

平成 30 年度 重点研究課題 (研究助成金)

新規制基準に対応した極低レベル放射性廃棄物処分
施設概念と設計の考え方に関する研究
(第 I 分冊)

— 諸外国における極低レベル放射性廃棄物処分場
に関する調査 —

報告書

平成 30 年 3 月

土木学会 エネルギー委員会

低レベル放射性廃棄物・汚染廃棄物対策に関する研究小委員会

分科会 3 (L 3 放射性廃棄物処分施設検討)

概 要

我が国においては、2011年3月の東日本大震災に伴って発生した未曾有の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、停止されていた原子力発電所の再稼働が徐々に増えて来ている一方、廃止措置を決定あるいは廃止措置中に至った原子力発電所が既に20基近くに達している。廃止措置後に発生することになる放射性廃棄物のうち、極低レベル放射性廃棄物に関しては、各発電所を保有する電気事業者が処分の実施責任を負うことになっており、各事業主が用意する処分サイトの環境条件等に応じて新規規制基準に対応した安全かつ合理的な処分施設を設置する方策の確立が今後の重要な課題となっている。

そこで、国内外での極低レベル放射性廃棄物処分への取組み状況、あるいは規制基準や学会標準整備状況についての調査結果を整理すると共に、今後の我が国における新規規制基準に対応した極低レベル放射性廃棄物処分施設の概念と設計の考え方について検討取りまとめを行うことにより、今後の極低レベル放射性廃棄物（L3廃棄物）の安全かつ合理的な処分の推進に向けての一つの技術的な拠り所に資する。

平成30年3月
研究代表者
大西有三・苅込敏

土木学会 低レベル放射性廃棄物・汚染廃棄物対策に関する研究小委員会

委員構成

(50音順、敬称略)

小委員会委員長	大西有三	京都大学
小委員会副委員長	勝見 武	京都大学大学院
幹事長	河西 基	電力中央研究所／(株)アサノ大成基礎エンジニアリング
幹事	山本武志	(一財)電力中央研究所
幹事	横山信吾	(一財)電力中央研究所
幹事	渡邊保貴	(一財)電力中央研究所
委員	遠藤和人	(国研) 国立環境研究所
委員	加藤和之	原子力損害賠償・廃炉等支援機構
委員	苅込 敏	日本原子力発電(株)
委員	窪田 茂	原子力発電環境整備機構
委員	佐々木泰	日本原燃(株)
委員	佐藤 努	北海道大学大学院
委員	森本英雄	前田建設工業(株)
委員	杉山大輔	(一財)電力中央研究所
委員	高橋利昌	四国電力(株)
委員	土 宏之	清水建設(株)
委員	中居邦浩	日揮(株)
委員	新堀雄一	東北大学大学院
委員	久田 真	東北大学大学院
委員	万福裕造	(国研) 農業・食品産業技術総合研究機構
委員	宮脇健太郎	明星大学
委員	油井三和	福島工業高等専門学校
専門委員	石田東生	茨城大学名誉教授／日本大学

土木学会 低レベル放射性廃棄物・汚染廃棄物対策に関する研究小委員会
分科会 3 (極低レベル放射性廃棄物 (L3) 処分施設検討)

分科会委員構成*)
(50 音順、敬称略)

主 査	苅込 敏	日本原電(株)
副主査	野口裕史	日本原電(株)
代表幹事	河西 基	電力中央研究所／(株)アサノ大成基礎エンジニアリング
幹 事	江口逸雄	三菱マテリアル(株)
幹 事	押部甚一	東電設計(株)
幹 事	坂井章浩	(国研)日本原子力研究開発機構
幹 事	杉橋直行	清水建設(株)
委 員	池田孝夫	日揮(株)
委 員	今井 久	(株)安藤・間
委 員	須山泰宏	鹿島建設(株)
委 員	高尾 肇	日揮(株)
委 員	福田和人	前田建設工業(株)
委 員	松田 武	(株)大林組
委 員	矢島一昭	(株)ダイヤコンサルタント

注*) 分科会委員のうち、分科会 3 (L3 処分施設検討) の担当者

目 次

1.	はじめに.....	1
(1)	背景・目的.....	1
(2)	成果の概要.....	1
2.	アメリカ.....	4
(1)	低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場.....	4
(2)	リッチランド.....	6
①	概要 ^[1]	6
②	操業開始 ^[1]	6
③	受入廃棄物 ^{[1][2][3]}	6
④	処分容量 ^{[1][4]}	7
⑤	処分施設の構造 ^{[1][3][5]}	7
⑥	地下水.....	9
⑦	廃棄物埋設状況 ^{[1][6]}	9
(3)	バーンウェル.....	11
①	概要.....	11
②	操業開始.....	12
③	受入廃棄物.....	12
④	処分容量.....	12
⑤	処分施設の構造.....	13
⑥	地下水.....	14
⑦	廃棄物埋設状況.....	14
(4)	クライブ.....	17
①	概要.....	17
②	操業開始.....	18
③	受入廃棄物.....	18
④	処分容量.....	19
⑤	処分施設の構造.....	19
⑥	地下水.....	20
⑦	廃棄物埋設状況.....	21
(5)	WCS テキサス.....	23
①	概要.....	23

②	操業開始	24
③	受入廃棄物	24
④	処分容量	24
⑤	立地条件	24
⑥	処分施設の構造	25
⑦	地下水	26
⑧	廃棄物埋設状況	27
3.	フランス	29
(1)	低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場 ^[1]	29
(2)	モルヴィリエ極低レベル放射性廃棄物処分場	30
①	概要 ^[1]	30
②	操業開始 ^[1]	30
③	受入廃棄物 ^[2]	30
④	処分容量 ^[1]	31
⑤	処分施設の構造 ^{[3][4][5][6]}	31
⑥	廃棄物埋設状況 ^{[2][4][5]}	34
⑦	モニタリング期間	35
4.	イギリス	37
(1)	低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場 ^[1]	37
(2)	ドリッグ処分場	38
①	概要	38
②	操業開始	38
③	受入廃棄物	38
④	処分容量	40
⑤	処分施設の構造	40
⑥	地下水	41
⑦	廃棄物埋設状況	42
5.	スウェーデン	44
(1)	低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場 ^[1]	44
(2)	スウェーデン国内における各処分場	45
①	概要 ^{[1][2]}	45
②	操業開始 ^{[1][3]}	47
③	受入廃棄物 ^[4]	47
④	処分容量及び放射エネルギー ^[4]	47
⑤	処分シナリオ ^[3]	47
⑥	VLLW 処分施設の設計 ^{[3][5]}	49

⑦	各処分場の構造	51
⑧	地下水.....	57
⑨	廃棄物埋設状況 ^[7]	57
6.	スペイン	60
(1)	低レベル放射性廃棄物の処分場	60
①	低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場	60
②	スペイン国内の放射性廃棄物処分場における廃棄物受入基準	60
(2)	エルカブリル処分場	62
①	概要 ^{[2][4][5][6][7][13]}	62
②	操業開始 ^{[2][4]}	64
③	受入廃棄物 ^{[4][5][8][9][10]}	64
④	処分容量 ^{[6][9]}	65
⑤	処分施設の構造 ^{[5][6][8][10][11][12]}	65
⑥	VLLW 処分場の安全評価.....	71
⑦	廃棄物埋設状況 (VLLW) ^[6]	72
7.	総括	74

1. はじめに

(1) 背景・目的

我が国においては、2011年3月の東日本大震災に伴って発生した未曾有の東京電力福島第一原子力発電所事故以降、停止されていた原子力発電所の再稼働が徐々に増えて来ている一方、廃止措置を決定あるいは廃止措置中に至った原子力発電所が既に20基近くに達している。廃止措置後に発生することになる放射性廃棄物のうち、極低レベル放射性廃棄物（L3廃棄物）に関しては、各発電所を保有する電気事業者が処分の実施責任を負うことになっており、各事業主が用意する処分サイトの環境条件等に応じて新規規制基準に対応した安全かつ合理的な処分施設を設置する方策の確立が今後の重要な課題となっている。

そこで、国内外での極低レベル放射性廃棄物処分への取組み状況、あるいは規制基準や学会標準整備状況についての調査結果を整理すると共に、今後の我が国における新規規制基準に対応した極低レベル放射性廃棄物処分施設の概念と設計の考え方について検討取りまとめを行うことにより、今後の極低レベル放射性廃棄物の安全かつ合理的な処分の推進に向けての技術的な拠り所に資することを目的とする。

(2) 成果の概要

本分冊Iにおいては、諸外国における極低レベル放射性廃棄物処分場の取扱う廃棄物の性状、施設構造、及び施設設計の考え方等に関する既存情報を次のような2つの観点より調査・整理した。

表 1.(2)-1 新規規制基準等への対応に関する既存情報の調査・整理

調査項目	検討のねらい
1) 諸外国におけるL3廃棄物処分の取組状況の調査・整理	・ 諸外国のL3埋設施設の構造等を把握し、分冊IIで検討する施設概念、新規規制基準対応に関する課題抽出・対応策検討に資する。
2) 規制・基準、学会標準の整備状況の調査・整理	・ 規制・基準の要求事項及び東海L3の審査指摘事項を整理し、②の課題抽出に資する。 ・ 埋設規制基準等の改正※の動向を踏まえた、原子力学会標準改正の状況を調査し、本分科会での検討結果の活用も提案する。

[注*] 原子力規制委員会の「廃棄物埋設の放射線防護基準に関する検討チーム」では、L1埋設に係る許可基準規則・解釈の制定及び第二種事業規則の改定に向けた検討をしており、それらを踏まえたL2/L3に係る規制基準等の改正案についても示している。

諸外国における L3 廃棄物等の処分の取り組み状況を調査・整理した概要は表 1.(2)-2 に示す通りである。

表 1.(2)-2 諸外国における L3 廃棄物処分の取組状況の調査・整理結果の概要

	エルカブリル (スペイン)	モルヴィリエ (フランス)	フォルスマルク (スウェーデン)	クライブ (アメリカ)
受入 廃棄物	金属、がれき等	金属、がれき、土 壤、プラスチック等	金属、樹脂、 <u>可燃</u> 物、プラスチック等	金属、がれき、土 壤、 <u>有害物質</u> 、 <u>可燃</u> 物、 <u>ウラン</u> 等
荷 姿	ドラム缶、コンテ ナ、フレコン	ドラム缶、コンテ ナ、フレコン、大型 機器一体	ドラム缶、コンテ ナ、コンクリート容 器、 <u>フィルム梱包</u>	<u>容器なし</u> 、コンクリ ート容器、大型機器 一体
処分場 型式	半地下式盛土型 (丘陵地斜面)	半地下式盛土型 (丘陵地斜面)	盛土型 (平地)	半地下式盛土型 (平地)
設計の 考え方	非放射性的有害廃棄物処分施設に係る規制 基準に基づき、 <u>放射性及び有害廃棄物の両</u> <u>方を埋設</u> することを可能としている		覆土の <u>透水性係数</u> (10^{-10} m/s 以下) 及び浸 透量 ($5\text{l/m}^2/\text{y}$) が法 令要求	<u>ラドン放出基準</u> ($0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$) を 遵守するためにラド ンバリア設置
施設構造 (詳細は 別冊参照)				

L3 廃棄物処分場の調査対象としたのはアメリカ (リッチランド、バーンウェル、クライブ、WCS テキサス)、フランス (モルヴィリエ)、イギリス (ドリッグ)、スウェーデン (フォルスマルク)、スペイン(エルカブリル)の 5 各国 8 処分場であり、諸外国では、平地もしくは丘陵知者面での半地下式盛土型 (一部では盛土型) が多かった。表 1.(2)-2 はその主な処分場の調査整理結果をまとめたものである。また、諸外国での設計の考え方として、非放射性的有害廃棄物処分施設に係る規制基準に基づき、放射性及び有害廃棄物の両方を埋設処分可能としているところも見受けられた。

表 1.(2)-3 諸外国における取組状況の調査・整理

受入廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ■ 日 本：金属・コンクリートに限定 ■ 諸外国：上記に加え、<u>可燃物、有害物質及びウラン廃棄物</u>も受け入れ可能
施設設計の考え方	<p>諸外国で遮水シート等による遮水層を設置している理由は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ <u>スペイン・フランス</u>：<u>放射性廃棄物及び有害廃棄物の両方を埋設可能</u>とするため、有害廃棄物処分場に係る基準に準拠している。 ■ <u>スウェーデン</u>：<u>覆土の浸透係数 (10^{-10}m/s 以下) 及び浸透量 ($5\text{l/m}^2/\text{y}$) の法令要求あり。</u> ■ <u>アメリカ (クライブ)</u>：<u>ラドン放出基準 ($0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$) を満足させるため、粘土層を設置。</u>

このように受入れ可能廃棄物対象が、日本では金属・コンクリート類の放射性廃棄物に限定されているのに対して、諸外国では、それらに加えて、可燃物、有害物質及びウラン廃棄物等も受入れ可能としているところが我が国とは異なるところであり、諸外国ではそれらを考慮して、施設設計などで遮水シート等による遮水層を設置している例や規制要求などがなされているようである。したがって、諸外国の例を参考にする際には、その対象廃棄物や設計の考え方の違いの有無をよく吟味しておく必要がある。

2. アメリカ

(1) 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場

表 2.(1)-1 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場（アメリカ）

処分場名	取扱廃棄物※1	処分実施主体	受入可能な州
リッチランド	Class A,B,C	US エコロジー社	ノースウェスト・コンパクト※2 (アラスカ州、ハワイ州、アイダホ州、モンタナ州、オレゴン州、ユタ州、ワシントン州、ワイオミング州) 及びロッキーマウンテン・コンパクト (コロラド州、ネバダ州、ニューメキシコ州)
バーンウェル	Class A,B,C	エナジーソリューションズ社	アトランティック・コンパクト (サウスカロライナ州、コネティカット州、ニュージャージー州)
クライブ	Class A	エナジーソリューションズ社	ノースウェスト・コンパクト以外の 42 州
WCS テキサス	Class A,B,C	ウエスト・コントロール・スペシャリスト社	テキサス・コンパクト (テキサス州、バーモント州)

※1：米国の放射能濃度上限値（参考値）[Bq/t] 注

- ・ Class A (Co-60 : 7.1×10^{12} 、Sr-90 : 4.0×10^8 、Cs-137 : 1.0×10^{10}) ⇒L3 相当
- ・ Class B (Sr-90 : 1.5×10^{12} 、Cs-137 : 4.4×10^{11}) ⇒L2 相当
- ・ Class C (C-14 : 8.1×10^{10} 、Tc-99 : 3.0×10^{10})
- ・ GTCC (Class C 以上の放射能) ⇒L1 相当

注) 米国の放射能濃度上限値の単位は Ci/m³ のため、現状電力事業者で想定している L2 廃棄体の金属廃棄物の充填率 11%、砂・モルタル充填率 89%より次のように単位を Bq/t に換算した。(11%×7.8+89%×2.3=3.67 t/m³、1Ci=3.7×10¹⁰ Bq)

日本の放射能濃度上限値 [Bq/t] (参考)

- ・ L3 (Co-60 : 1.0×10^{10} 、Sr-90 : 1.0×10^7 、Cs-137 : 1.0×10^8)
- ・ L2 (Sr-90 : 1.0×10^{13} 、Cs-137 : 1.0×10^{14})
- ・ L1 (C-14 : 1.0×10^{16} 、Tc-99 : 1.0×10^{14})

※2：州内で発生する低レベル放射性廃棄物は州が責任を持つこと、その際地域全体で解決を図るために構築した、州間の地域的協力体制を定めた州間協定のこと（図 2.(1)-2 参照）。

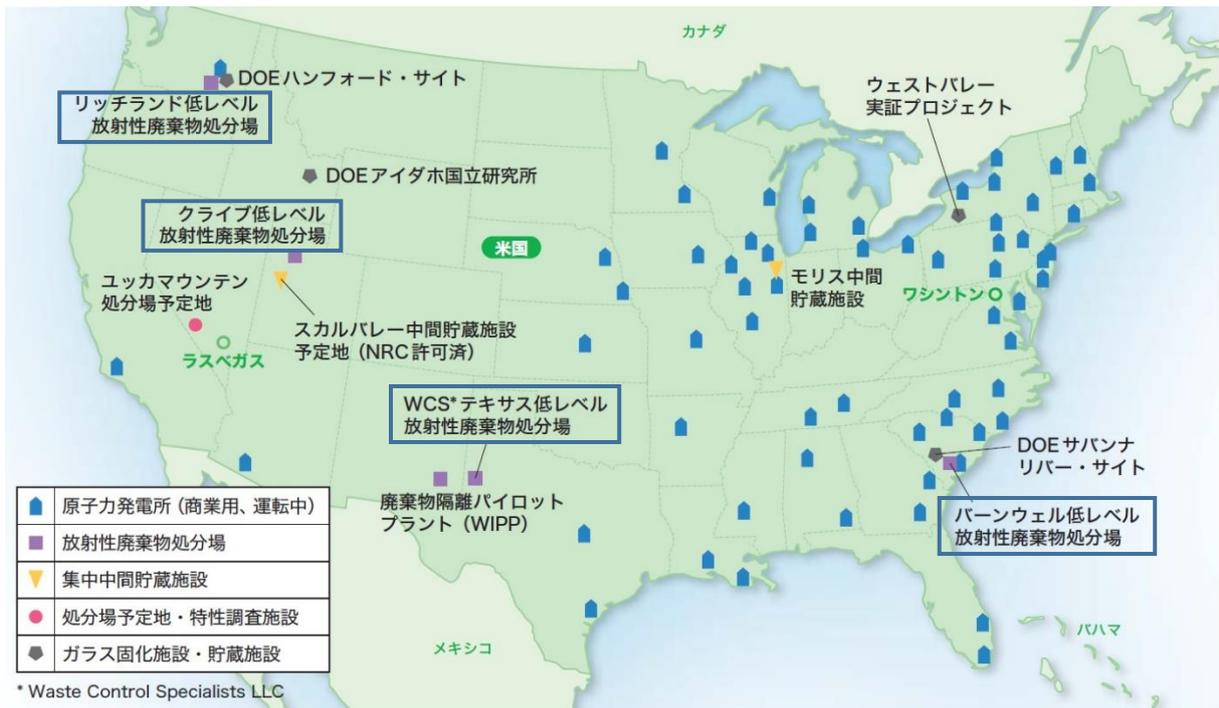


図 2.(1)-1 アメリカの原子力発電所及びその他の原子力関連施設の所在地

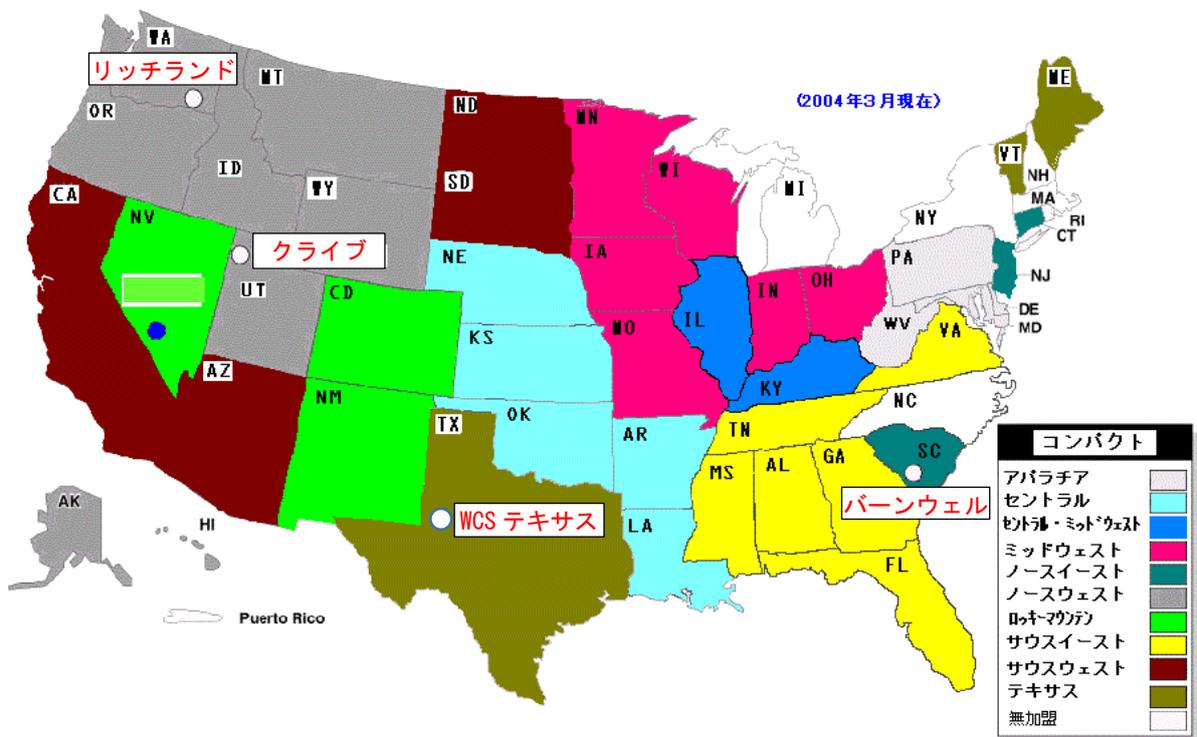


図 2.(1)-2 アメリカ LLW コンパクト (州間協定) 地域マップ

(2) リッチランド

① 概要^[1]

リッチランド処分場は、ワシントン州リッチランドの約 30km 北にあり、1965 年から民間処分場として低レベル放射性廃棄物の処分が行われている。

操業者は、US エコロジー社であり、処分場の土地は、ワシントン州が連邦政府から 100 年間借り受け、US エコロジー社に転貸されている。リッチランド処分場は、エネルギー省 (DOE) のハンフォード・サイトの中に位置している。

リッチランド処分場では、浅地中処分可能な全ての低レベル放射性廃棄物の受け入れ、処分が可能である。ただし、Class A, B, C の低レベル放射性廃棄物の受け入れは、ノースウェスト・コンパクト、またはロッキーマウンテン・コンパクトに加盟する州からの放射性廃棄物のみとなっている。

リッチランド処分場は、土地の賃貸契約が切れる 2063 年よりも 7 年早い、2056 年に閉鎖するとの予定が示されている。



図 2.(2)-1 リッチランド処分場の施設配置図

② 操業開始^[1]

1965 年

③ 受入廃棄物^{[1][2][3]}

リッチランド処分場は、表 2.(2)-1 に示す低レベル放射性廃棄物を受け入れている。

表 2.(2)-1 リッチランド処分場の受入対象廃棄物

対象廃棄物	<ul style="list-style-type: none">・ノースウェスト・コンパクト及びロッキーマウンテン・コンパクトからの Class A, B, C 低レベル放射性廃棄物✓ Class A (廃棄物割合 98%、放射エネルギー割合 2.6%) : 使用済保護服、医療廃棄物✓ Class B (廃棄物割合 0.83%、放射エネルギー割合 19%) : 長半減
-------	---

	<p>期廃棄物、原子力発電所から発生する金属／フィルタ／機器廃棄物、産業廃棄物</p> <p>✓ Class C（廃棄物割合 0.75%、放射エネルギー割合 78.3%）：原子力発電所、医療研究機関及び産業から発生する廃棄物</p> <ul style="list-style-type: none"> ・非有害レベルに処理された混合廃棄物 ・ラジウム／ベリリウム及びその他密封線源 ・高レベルラジウム廃棄物
--	---

④ 処分容量^{[1][4]}

リッチランド処分場の処分容量は約 170 万 m³ で、そのうち既に埋設済みの容量は約 40 万 m³ である（2016 年 12 月末時点）。

リッチランド処分場で受け入れ可能な総放射エネルギーは表 2.(2)-2 のとおり。

表 2.(2)-2 リッチランド処分場における総放射エネルギー

核種	総放射エネルギー (Bq)
H-3	3.2×10^{16}
C-14	1.9×10^{14}
Cl-36	1.2×10^{11}
Co-60	5.7×10^{16}
I-129	2.2×10^{11}
Cs-137	4.5×10^{15}
Pu-238	3.9×10^{14}
Pu-239	1.7×10^{14}
Ra-226	1.2×10^{13}
Tc-99	2.0×10^{12}
U-234	1.0×10^{13}
U-235	1.1×10^{12}
U-238	5.6×10^{13}
Am-241	1.7×10^{13}

⑤ 処分施設の構造^{[1][3][5]}

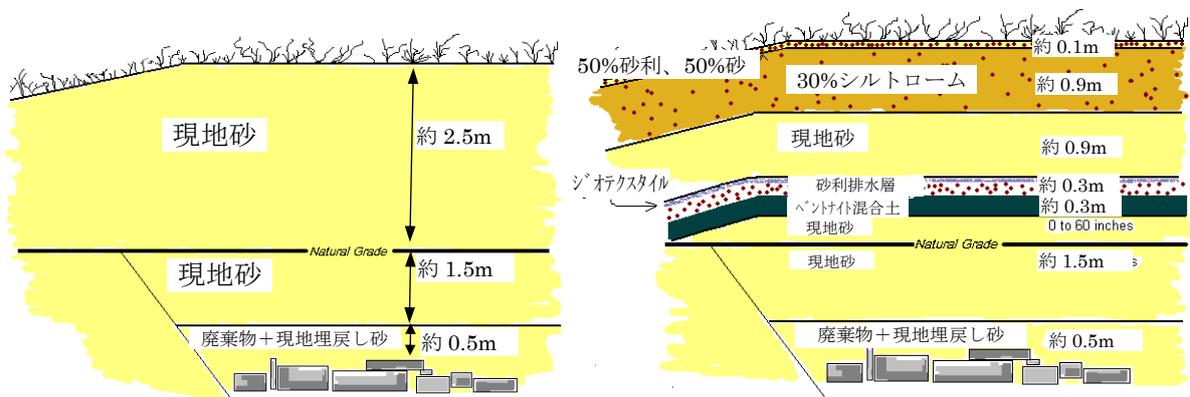
リッチランド処分場は、浅地中の素掘りトレンチで、典型的なトレンチは幅約 45m、深さ約 14m、長さ約 260m であり、廃棄物パッケージを処分する「掘下げ+盛土型」のトレンチ施設である。施設構造の公開情報がなく詳細は不明であるが、⑦廃棄物埋設状況の写真から判断すると、現状は特別な遮水構造は確認できず、砂による覆土のみと推測される。

ただし、将来処分施設を閉鎖する際は、ワシントン州の所轄官庁が作成した、Final

Environmental Impact Statement (FEIS) で定められている以下の性能基準を満たした閉鎖用覆土を施すことになっている。

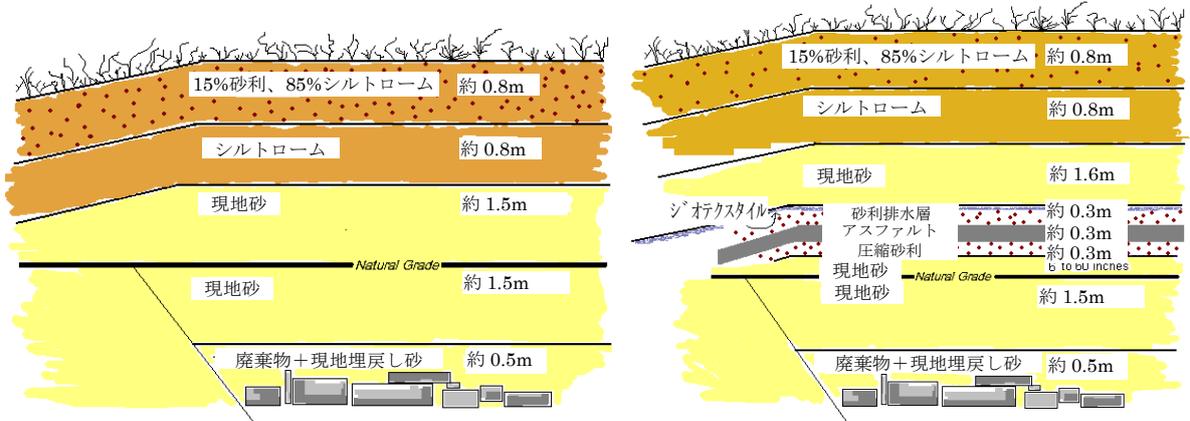
- ・ 雨水浸透率：0.5mm/年以下
- ・ 覆土厚さ：5m 以上
- ・ オフサイト線量：220 μ Sv/年以下
- ・ オンサイト線量：1,070 μ Sv/年以下

覆土の構造は高密度ポリエチレン (HDPE) ジオメンブレン及び上層の保護土層を含む中間覆土が提案されているなど、数種類のものが検討されているが、具体的には今後決定されるようである (図 2.(2)-2 参照)。



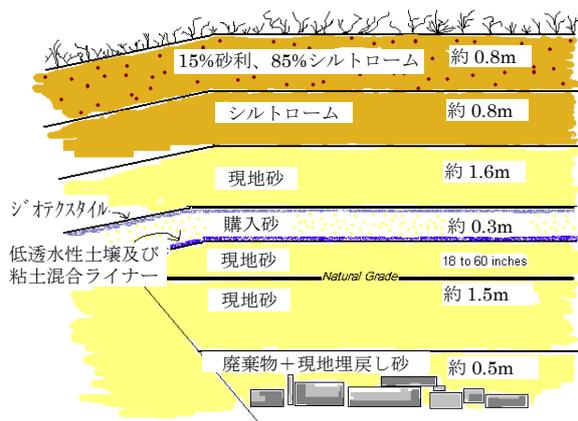
(1) Site Soils Cover

(2) US Ecology Cover

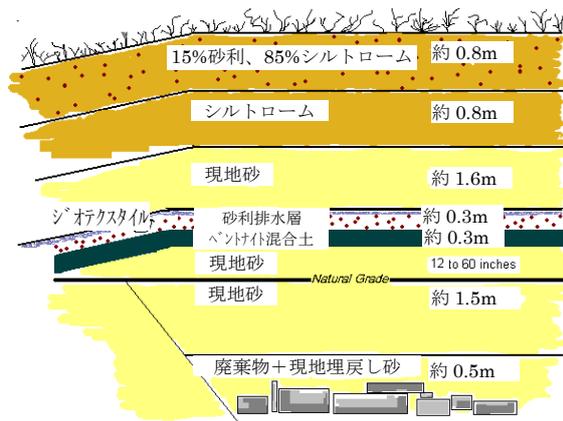


(3) Homogenous Cover

(4) Asphalt Cover



(5) GeoSynthetic Cover



(6) Bentonite Cover

図 2.(2)-2 リッチランド処分場の覆土構造の検討例

⑥ 地下水
不明

⑦ 廃棄物埋設状況^{[1][6]}

図 2.(2)-3 に Class A 及び Class B 廃棄物の埋設状況を示す。Class A 廃棄物については、コンテナに収納し、Class B 廃棄物については、廃棄物をコンクリート製の容器に収納するか、大型機器一体（蒸気発生器）で埋設している。なお、廃棄物定置作業は、テント等で覆うこともなく屋外で実施している。



(1) Class B 廃棄物の処分状況



(2) Class B 廃棄物の処分状況



PWR 蒸気発生器一体処分

Class A 廃棄物処分

(3) PWR 蒸気発生器一体処分／Class A 廃棄物の処分状況

図 2.(2)-3 リッチランド処分場における廃棄物処分状況 (Class A／Class B 廃棄物)

(3) バーンウェル

① 概要[1][7]

バーンウェル処分場は、サウスカロライナ州エイケンのエネルギー省（DOE）のサバンナリバー・サイトと Snelling 村の間に位置しており、1971 年から民間の処分場として低レベル放射性廃棄物の処分を行っている。現操業者は、エナジーソリューションズ社であり、同社はそれまでの運営会社であるケム・ニュークリアシステム社を 2006 年に買収している。なお、処分場の土地は、サウスカロライナ州の所有であり、操業者に貸し出されている。

バーンウェル処分場では、浅地中処分が可能な Class A, B, C の低レベル放射性廃棄物の受け入れ、処分を行っている。

バーンウェル処分場では、素掘りでのトレンチ処分が行われており、処分容量が一杯になりつつある。2008 年 7 月以降は、アトランティック・コンパクト（サウスカロライナ州、ニュージャージー州、コネティカット州）の低レベル放射性廃棄物のみを受け入れが制限されている。また、残りのスペースの多くは、近隣の原子力発電所の解体廃棄物の処分に予約されている。

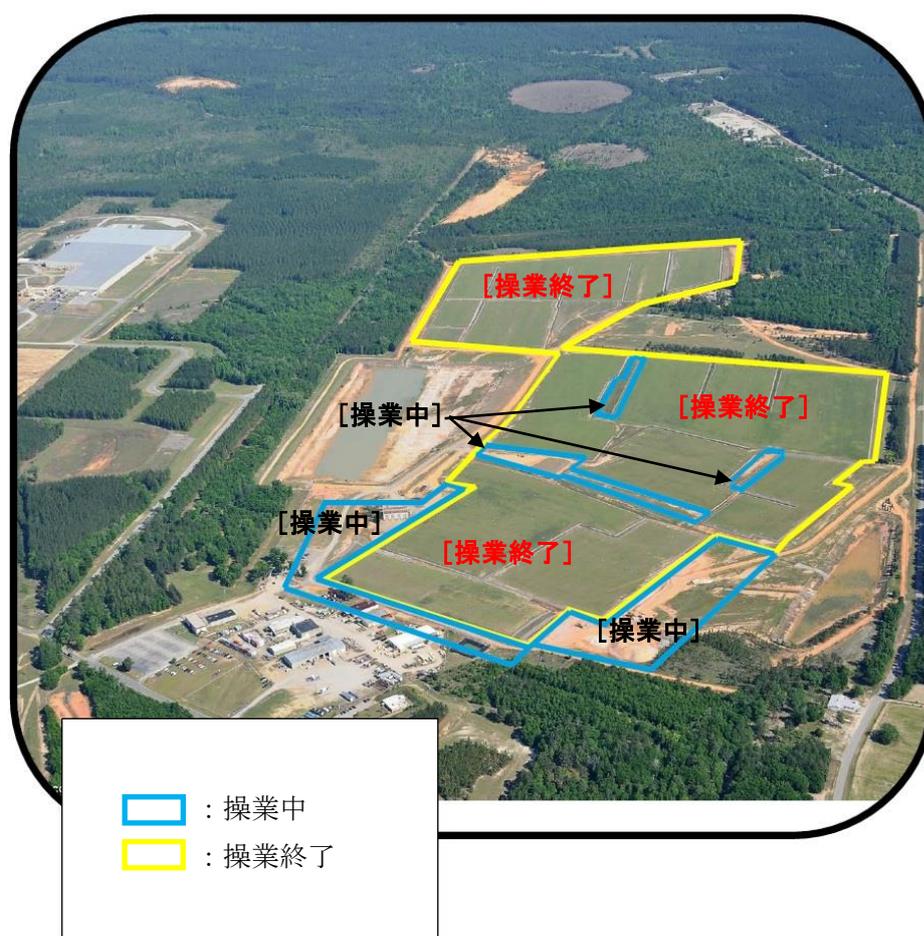


図 2.(3)-1 バーンウェル処分場の施設配置図

② 操業開始^[7]

1971 年

③ 受入廃棄物^{[7][8]}

バーンウェル処分場は、表 2.(3)-1 に示す低レベル放射性廃棄物を受け入れている。

表 2.(3)-1 バーンウェル処分場の受入対象廃棄物

対象廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・アトランティック・コンパクトからの Class A, B, C 低レベル放射性廃棄物（放射化機器、大型機器、蒸気発生器、樹脂、原子炉圧力容器等） <ul style="list-style-type: none"> ✓ Class A：ドラム缶、金属箱等に収納した放射能濃度の比較的低いもの ✓ Class B：300 年間耐用の高健全性容器（HIC）に入れる ✓ Class C：放射化された鋼、ステンレス鋼等全廃棄物の約 0.5% ・処分の対象となる廃棄物は、商用原子力発電所、病院及び各種研究施設から発生する低レベル放射性固体廃棄物である。
-------	---

④ 処分容量^{[1][9]}

バーンウェル処分場の処分容量は約 88 万 m³ で、そのうち既に埋設済みの容量は約 80 万 m³ である（2016 年 12 月末時点）。

バーンウェル処分場で受け入れ可能な最大放射能濃度は表 2.(3)-2 のとおり。

表 2.(3)-2 バーンウェル処分場における最大放射能濃度

核 種	Class A	Class B	Class C
① 長半減期核種	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)
C-14	≦3.0×10 ¹⁰		≦3.0×10 ¹¹
C-14（放射化金属）	≦3.0×10 ¹¹		≦3.0×10 ¹²
Ni-59（放射化金属）	≦8.1×10 ¹¹		≦8.1×10 ¹²
Nb-94（放射化金属）	≦8.1×10 ⁹		≦8.1×10 ¹⁰
Tc-99	≦1.1×10 ¹⁰		≦1.1×10 ¹¹
I-129	≦3.0×10 ⁸ 以下		≦3.0×10 ⁹
② α核種	(Bq/g)	(Bq/g)	(Bq/g)
半減期 5 年以上の α核種	≦3.7×10 ²		≦3.7×10 ³
Ra-226	≦3.7×10 ²		≦3.7×10 ³
Pu-241	≦1.3×10 ⁴		≦1.3×10 ⁵
Cm-242	≦7.4×10 ⁴		≦7.4×10 ⁵

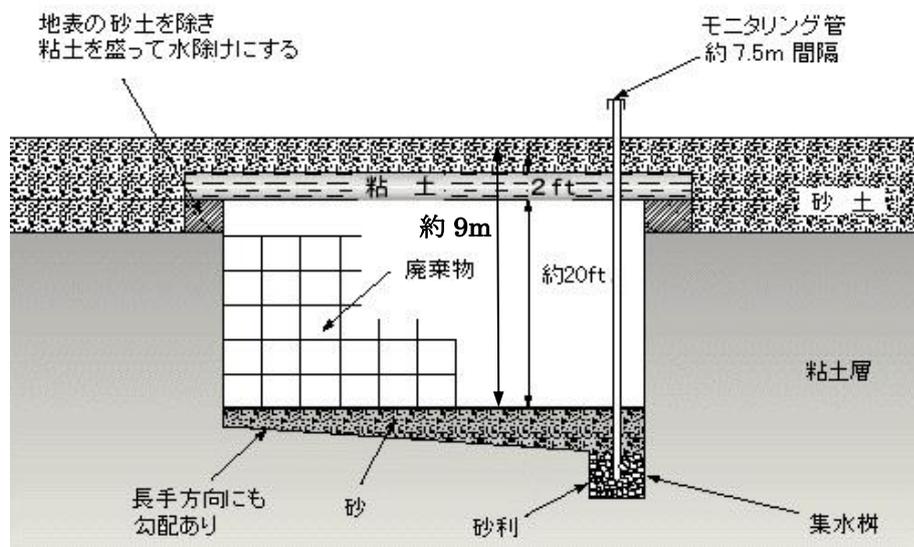
核種	Class A	Class B	Class C
③ 短半減期核種	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)	(Bq/m ³)
半減期 5 年以下の核種の合計	≦2.6×10 ¹³	≦2.6×10 ¹³	
H-3	≦1.5×10 ¹²	≦1.5×10 ¹²	
Co-60	≦2.6×10 ¹³	≦2.6×10 ¹³	
Ni-63	≦1.3×10 ¹¹	≦2.6×10 ¹²	≦2.6×10 ¹³
Ni-63 (放射化金属)	≦1.3×10 ¹²	≦2.6×10 ¹³	≦2.6×10 ¹⁴
Sr-90	≦1.5×10 ⁹	≦5.6×10 ¹²	≦2.6×10 ¹⁴
Cs-137	≦3.7×10 ¹⁰	≦1.6×10 ¹²	≦1.7×10 ¹⁴

⑤ 処分施設の構造^{[10][11]他}

Class A 廃棄物処分用のバーンウェル処分施設は、天然の粘土層を用いた浅地中処分施設で、地下約 9m 掘り下げた掘下式施設である。図 2.(3)-2 に示すとおり、トレンチ内に上部側部からの雨水浸入防止のため、地表の砂土を取り除き粘土を盛ってバリア壁を設けている。廃棄物層の底部は、浸透水の排水を促進するために砂層としており、底部の砂層は、浸透した水を集水桁に導くために傾斜を設け、収集した水はポンプアップして排水している。浸透水の監視のために、約 7.5m 間隔にモニタリング管を設けている。

最終段の廃棄物の埋設が完了後は、雨水の浸入を防止するために約 2 フィート (約 0.6m) の粘土で覆土する。将来処分施設を閉鎖する際は、図 2.(3)-3 に示すとおり、廃棄物層の上部には低透水性土壌、天然粘土ライナー、高密度ポリエチレン (HDPE)、砂層及び植生被覆土で構成されるバリアが設置される予定である。

なお、Class C 廃棄物は、廃棄物の上端が覆土上面から最低 5m 以下の深さとなるように埋設するか、又は最低 500 年間侵入者から保護する防護壁を設置することになっている。



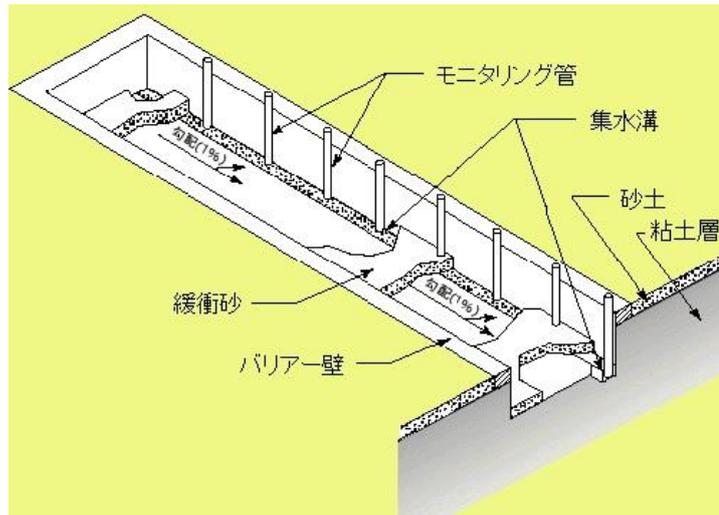


図 2.(3)-2 バーンウェル処分場の断面図 (Class A 廃棄物処分用トレンチ)



植生被覆土
表土
砂層
高密度ポリエチレン (HDPE)
天然粘土ライナー
低透水土壌
廃棄物層
砂層

図 2.(3)-3 バーンウェル処分場のバリア構成

⑥ 地下水^[12]

バーンウェル処分場のあるサウスカロライナ州エイケンには、降水量も地下水も我が国に似ており、地下水は廃棄物底面より下部を流れている。

⑦ 廃棄物埋設状況^{[10][12][13]}

バーンウェル処分場における廃棄物 Class 毎の処分量の割合は、Class A が約 80%弱、Class B 及び Class C が各々約 10%強である。



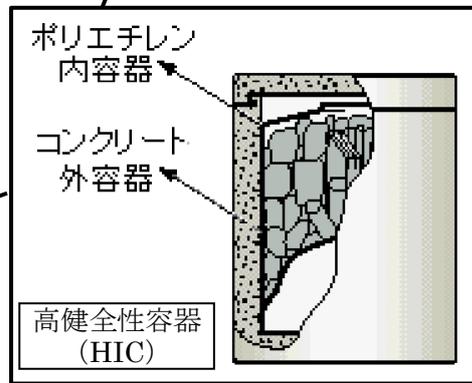
(1) Class B 廃棄物処分 (HIC)



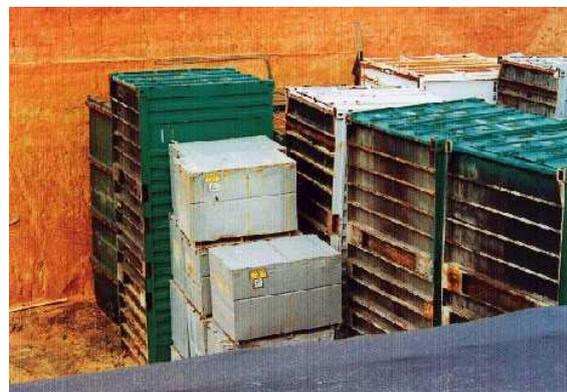
(2) Class B 廃棄物処分 (HIC)



(3) Class B 廃棄物処分 (HIC)



(4) Class B 廃棄物処分



(5) Class A 廃棄物処分
(20 フィートコンテナ／鉄箱)



(6) Class A 廃棄物処分

図 2.(3)-4 バーンウェル処分場における廃棄物埋設状況

(4) クライブ

① 概要[1][14][15][16]

クライブ処分場は、ユタ州の州都ソルトレイクシティから西へ約 75 マイル離れたユタ州西部の砂漠にあり、現操業者はエナジーソリューションズ社（以下、「ES 社」という）である。クライブ処分場では、1988 年から、ウランなどの自然起源放射性物質

(NORM) の処分が行われていたが、1998 年に Class A の低レベル放射性廃棄物の受入れ・処分許可がユタ州から発給され、低レベル放射性廃棄物の処分が行われるようになった。Class B,C の廃棄物についても取り扱いの申請が行われたが、その後断念している。なお、クライブ処分場では、ウラン鉱さいなどの「11e (.2) 副生成物廃棄物」の処分も行われている。また、クライブ処分場では、化学毒性を持った放射性廃棄物である混合廃棄物についても処分を行っている。

クライブ処分場の見取り図を図 2.(4)-1 に示す。現在は、Class A の LLRW の処分場である Class A west 施設、ウラン鉱さい処分施設（図中“Byproduct”）、Mixed waste の処分施設が操業中であり、廃棄物の処理、保管施設も操業中である。

ユタ州はノースウェスト・コンパクトに属しているが、クライブ処分場は全ての州からの Class A の低レベル放射性廃棄物を受け入れている。エネルギー省（DOE）からの放射性廃棄物も受け入れており、最近では、米国で処分される低レベル放射性廃棄物の多くが、このクライブ処分場で処分されている。





図 2.(4)-1 クライブ処分場の施設配置図

② 操業開始^[1]

1971 年（サイト選定）

③ 受入廃棄物^[14]

クライブ処分場はノースウェスト・コンパクト以外の 42 州からの Class A 廃棄物を受け入れており、これは全国の大半の Class A 廃棄物の受入を意味する。クライブ処分場の受入対象廃棄物を表 2.(4)-1 に示す。

表 2.(4)-1 クライブ処分場の受入対象廃棄物

<p>廃棄物発生場所 (対象廃棄物)</p>	<p>【Class A 低レベル放射性廃棄物】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子力発電所（使用済樹脂、乾燥放射性廃棄物 [DAW]、大型機器、鉛、フィルター等） ・原子力発電所の廃止措置により発生する廃棄物（コンクリート、木、金属、機器等） ・サイト修復（土壌、がれき、スラッジ、液体廃棄物等） ・医療／研究施設（試験装置、防護服、廃化学物質、水銀等） ・州／連邦政府機関等の廃棄物（重金属や有機物との混合廃棄物、マクロカプセル、廃液固化体、PCB 等） ・ウラン製錬施設、DOE 兵器施設等から発生した廃棄物（原料、ウラン及びトリウムの鉱さい、汚染機器、液体廃棄物、少量の劣化ウランで汚染された廃棄物等）
----------------------------	--

④ 処分量^{[1][15]}

クライブ処分場の全処分量は約 882 万 m³ で、そのうち既に埋設済みの容量は約 509 万 m³ である (2016 年 12 月末時点)。

現在クライブ処分場で操業中の処分施設は、Class A 低レベル放射性廃棄物の処分施設である Class A West 施設、ウラン鉱さい処分施設である”Byproduct”施設、及び重金属や有機物との混合廃棄物の処分施設である”Mixed Waste”施設である。なお、Class A West 施設では、少量の劣化ウランで汚染された廃棄物 (劣化ウランの重量が 5wt% を超えないもの) も処分する計画となっている。ウラン鉱さいの処分施設である”VITRO”施設、及び低放射能廃棄物 (Low-Activity Radioactive Wastes) の処分施設である”LARW”施設は既に埋設が完了し、操業を終了している。

ここでは、日本の L3 相当の廃棄物に近い廃棄物を取り扱う Class A West 施設に関する情報を整理する。Class A West 施設の敷地面積は約 54 万 m² (690m×780m)、体積は約 670 万 m³ で、埋設最大放射エネルギーは、約 7.4×10^{14} Bq である。

⑤ 処分施設の構造^{[15][17]}

現在操業中の Class A West 施設は、天然の土壌・粘土を用いた浅地中処分施設で、地下数メートルから高さ最大 23m に設計された地表部構造を持つ盛土式施設である。

a. 施設底部構造

各セルの基礎は既存の地上レベルより下に設置され、その位置は地下水面の約 15~20 フィート (約 4.6~6.1m) 上方である。基礎は標準的な管理で少なくとも 95% に締め固めた現地の粘土又は砂で構成されている。埋設施設底部には、ボトムライナーとして 2 フィート (約 0.6m) の厚さの低密度粘土層 (透水係数: 1.0×10^{-6} cm/s) が設置されている (図 2.(4)-2 下図参照)。

b. 覆土構造

廃棄物層の底部、側部、上部に粘土層、砂利等の排水層の浸透水の抑制バリア、覆土の侵食を抑制する等の多層のバリアを備えている。図 2.1.(4)-2 に施設のバリア構成を示す。

覆土の多層バリアのうち、覆土の最下層には厚さ 2 フィート (約 0.6m) の低密度粘土層 (透水係数: 5.0×10^{-8} cm/s 及び 1.0×10^{-6} cm/s) であるラドンバリア層を設けている (図 2.(4)-2 ⑤及び⑥参照)。これは、Environmental Protection Agency (米国環境保護庁、以下 EPA) のラドンの放出率の基準 ($20\text{pCi/m}^2/\text{s} = 0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$ を超えないこと) に従うために設置されたものである。

ラドンバリア層の上部には、砂及び砂利で構成された 2 層のフィルター層と、その間に設置する保護層が設置されている (図 2.(4)-2 ②~④参照)。

最終覆土の最上面には、覆土の侵食を防止するために直径 3.2cm 以上の小石を 1.5 フィート (約 46cm) 設置している (図 2.(4)-2 ①参照)。最終覆土の上面の勾配は 4%、側面

の法面勾配は約 5:1 に施工される (図 2.(4)-2 下図参照)。

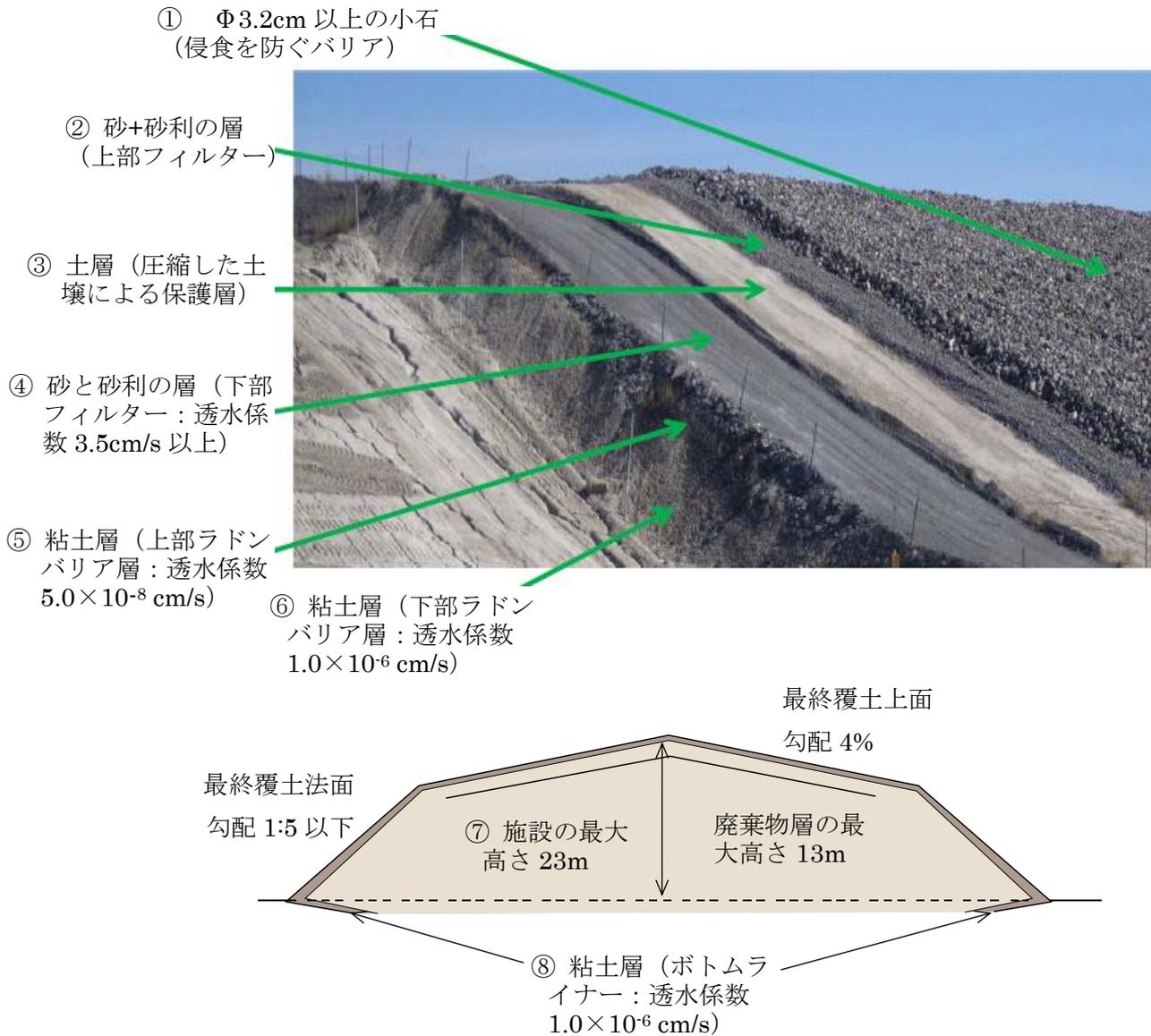


図 2.(4)-2 Class A West 施設のバリア構成

⑥ 地下水^{[17][18][22]}

埋設施設底面は既存の地上レベルより下に掘下げて設置され、その底面は地下水位から約 15~20 フィート (約 4.6~6.1m) 上方に位置している。

なお、クライブ付近の地下水は、塩分濃度が高いため品質が悪く、総溶解固形分 (TDS : Total Dissolved Solids) の含有量が高いため、人間への用途には適していない。クライブサイト下の地下水の TDS 含有量は $40,500 \text{ mg/l}$ (40.5%) と報告された例もあり、これは人間や家畜にとって有益ではなく、灌漑にも適さない水質である。

Conceptual diagram of physical processes for contaminant transport as modeled for the Clive Depleted Uranium Performance Assessment.

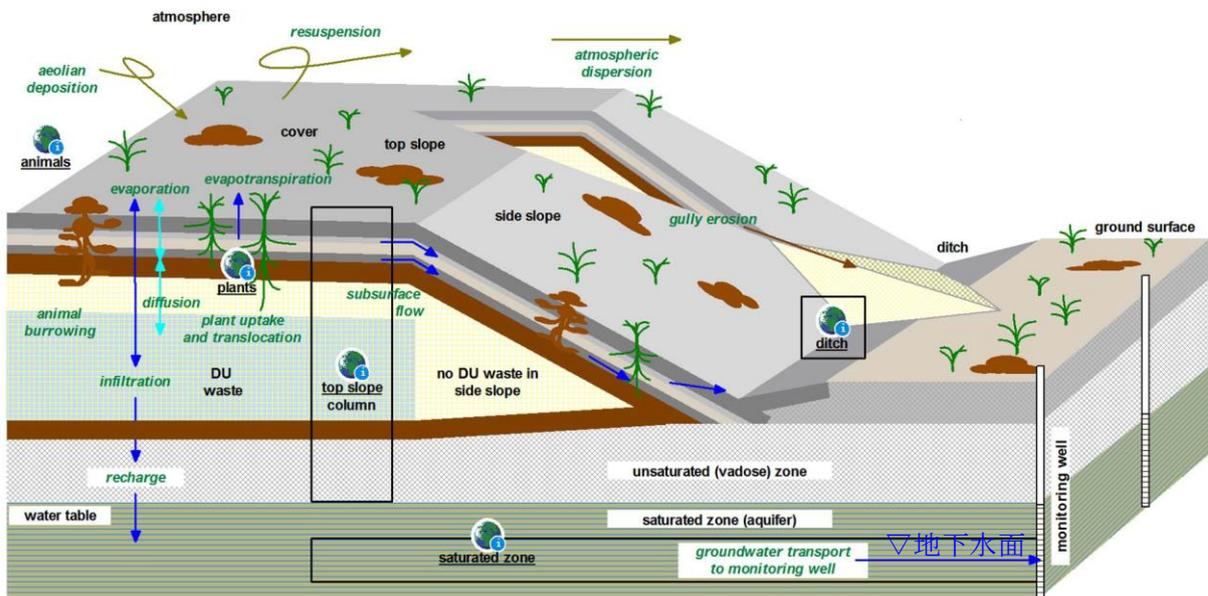


図 2.(4)-3 Class A West 施設の断面図

⑦ 廃棄物埋設状況^[14]

比較的低い放射能レベルの廃棄物（量が多い）はそのまま処分できるバルク状で受け取り、少し高い放射能レベルの廃棄物（量は少ない）は容器に封入して扱われ、覆土は粘土、砂利と岩石によって行われる。



(1) 廃棄物受入れ



(2) コンクリート容器収納廃棄物埋設



(3) コンクリート容器収納廃棄物埋設



(4) 廃棄物埋設状況 (上空写真)



(5) 大型機器一体埋設



(6) 大型機器一体埋設



(7) 受入済廃棄物



(8) 受入済廃棄物

図 2.(4)-4 廃棄物の埋設状況

(5) WCS テキサス

① 概要[1][15]

WCS テキサス処分場は、テキサス州アンドリュース郡にあり、民間廃棄物の処分場（CWF）及び連邦政府機関廃棄物の処分場（FWF）として低レベル放射性廃棄物の処分が計画され、2009年にテキサス州の許可を受け、2011年11月10日に操業を開始し、2012年4月27日にCWFで最初の低レベル放射性廃棄物の受入れを行った。FWFは、2013年6月6日に操業を開始した。

操業者は、ウェスト・コントロール・スペシャリスト（WCS）社であり、1985年低レベル放射性廃棄物政策修正法で州または州が共同で処分を実施するとされた以降、初めて建設された低レベル放射性廃棄物処分場である。

図 2.(5)-1 に WCS テキサス処分場の施設配置図を示す。低レベル放射性廃棄物処分施設は、テキサス・コンパクト（テキサス州、バーモント州）の Class A, B, C の放射性廃棄物を処分する CWF 施設（Compact Waste Facility）と、エネルギー省（DOE）などの連邦政府機関の Class A, B, C 低レベル放射性廃棄物及び混合低レベル廃棄物を処分する FWF 施設（Federal Waste Facility）がある。FWF 施設は、コンテナを用いない廃棄物を埋設する施設（FWF-NCDU: Non-Canister Disposal Unit）とコンテナに入れた廃棄物を埋設する施設（FWF-CDU: Canister Disposal Unit）に分かれて設置する計画である。なお、CWF 施設はテキサス・コンパクトの低レベル放射性廃棄物を受け入れているが、コンパクトの委員会の承認を受けることにより、その他の州も処分を行うことも可能である。ただし、CWF に配置された非コンパクトの廃棄物の総量を、認可された能力の 30% に制限している。



図 2.(5)-1 WCS テキサス処分場の施設配置図

② 操業開始^[1]

2011年11月10日

(廃棄物の受入は2012年4月27日開始)

③ 受入廃棄物^[19]

WCS テキサス処分場は、表 2.(5)-1 に示す種類の低レベル放射性廃棄物を受け入れている。受け入れ時は、円筒形又は長方形の鉄筋コンクリート製のモジュラーコンクリートキャニスター (MCC) に廃棄物及びグラウトを充填する方法、及び標準的な MCC に収まらない大きな機器等についてはラージコンポーネント (LC) とする方法で受け入れている。

表 2.(5)-1 WCS テキサス処分場の受入対象廃棄物

対象廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> ・テキサス・コンパクトからの Class A, B, C 低レベル放射性廃棄物 ・エネルギー省 (DOE) などの連邦政府からの Class A, B, C 低レベル放射性廃棄物 (ウランで汚染された廃棄物等を含む) 及び混合低レベル廃棄物
-------	---

④ 処分容量^[15]

CWF 及び処分 FWF 施設の処分容量、埋設最大放射エネルギーを表 2.(5)-2 に示す。

表 2.(5)-2 WCS テキサス処分場の処分容量/埋設最大放射エネルギー

施設名	対象廃棄物	放射能レベル	処分容量 ^{※1}	最大放射エネルギー
CWF 処分施設	テキサス・コンパクト廃棄物	Class A, B, C	約 65 万 m ³	1.4 × 10 ¹⁷ Bq
FWF 処分施設	DOE 廃棄物	Class A, B, C	約 74 万 m ³	2.1 × 10 ¹⁷ Bq
FWF-CDU (コンテナ)			約 23 万 m ³	2.0 × 10 ¹⁷ Bq
FWF-NCDU (コンテナなし)		Class A	※2	※2

※1 許可書に記載されている量

※2 許可証に記載なし

⑤ 立地条件^[15]

処分場周辺の地質及び水理状態を図 2.(5)-2 に示す。処分施設を設置する深さの地層は、Red bed と呼ばれる低透水性の粘土層 (透水係数は、1 × 10⁻⁹ cm/s) で、不飽和層となっている。図 2.(5)-2 の 180 foot sandstone (地下約 55m) の層は途中で途切れているため、225 foot sandstone (地下約 69m) の層が、地下水を含む層で、安全評価における施設近

傍の井戸水利用シナリオの条件として用いられ、また、地下水のモニタリングに利用されている。ただし、225 foot の層についても、透水係数が $1.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ と低いため、地下水流速は $1.26 \times 10^{-3} \text{ (m/y)}$ (安全評価の条件) と小さく、実際に地域の生活に利用できるほどの地下水量ではない。

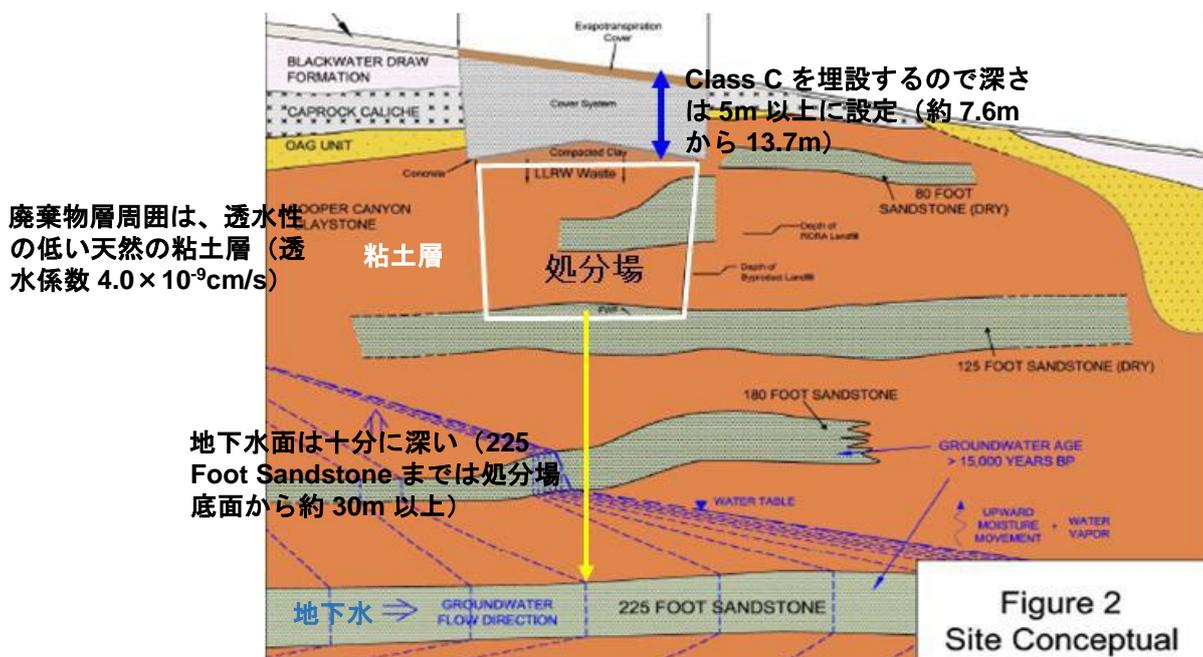


図 2.(5)-2 処分場周辺の地質及び水理状態

⑥ 処分施設の構造^{[15][23]}

WCS テキサス処分場は、テキサス州の規則 (Texas Administrative Code RULE § 336.729 : 低レベル放射性廃棄物の浅地中処分に係る許可要件) 及び米国連邦規則 10CFR part 61 の廃棄物の処分施設の要件に基づき、Class C 廃棄物を埋設するため 5m より深く設置するとともに、粘土層の中に処分施設全体を設置することとし、場所に応じて 25 フィート (約 7.6m) から 45 フィート (約 13.7m) の深さとすることとしている。なお、テキサス州の規則においては、「覆土は水の浸入を最小限に抑え、埋設した廃棄物からの浸出水又は表面水を低減させるために設置し、地質学的変化及び生物的活動による劣化に抵抗できる設計としなければならない。」とされている。廃棄物層及び底部のライナー層の深度方向の厚さは、約 60 フィート (約 18.3m) であるため、処分施設底面から地下水層 (225 foot sandstone) までの深さは、30m 以上となっている。

CWF 施設の概念図を図 2.(5)-3 に示す。処分施設は最終的に廃棄物層の上部に 3 層からなるカバーシステムを設置している。カバーシステムの機能は廃棄物層から近い順に以下の通り。

- Performance Cover System : 雨水等による浸透水の浸入を抑制するカバー。圧縮し

た粘土混合土層（図の緑色の層）、砂や砂利の層による排水層（図の青い層）、鉄筋吹付けコンクリート層（図の灰色の層）で構成される。FWF 施設では、粘土層と排水層の間に高密度ポリエチレン（HDPE）の遮水ライナー層が設置される。

- **Biobarrier Cover System**：図の緑と灰色の縞模様の層は、丸石等から構成され、草の根や生物の侵入の防止、及び人の掘削時の発見に役立つカバーである。茶色い層は、周囲の粘土（red bed）を用いた層である。
- **Evapotranspiration Cover System**：風雨による侵食を抑え、長期の安定性を保つためのカバー。
- **CWF 及び FWF 施設**ともに、廃棄物層の底部及び側部にも圧縮した粘土層、厚さ 1 フィート（約 0.3m）の鉄筋吹付けコンクリート層と RCRA 準拠の土壤合成層を含む厚さ 7 フィート（約 2.1m）のライナーシステムが設置されている。

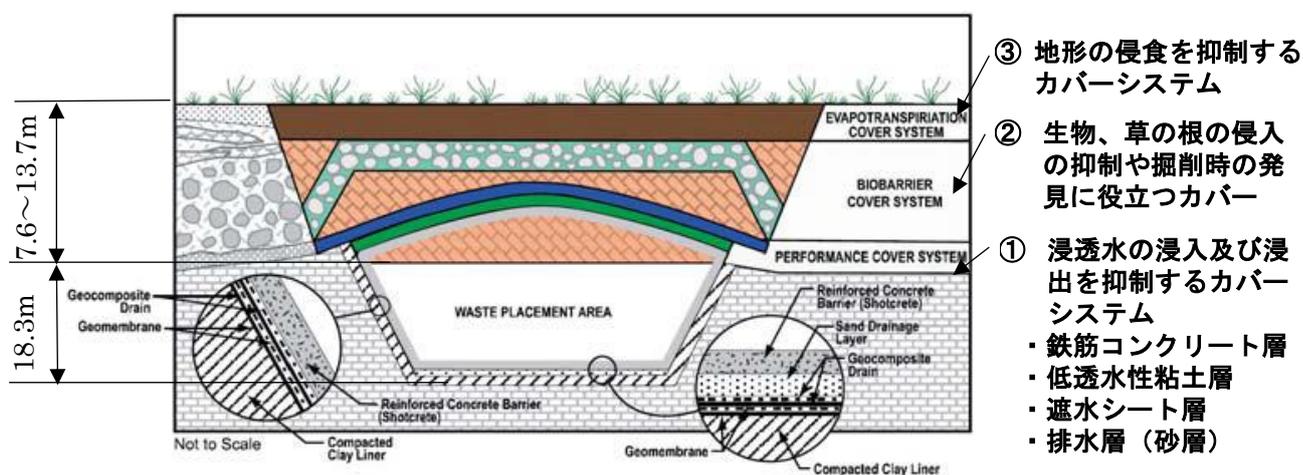


図 2.(5)-3 CWF 処分施設の概念図

⑦ 地下水[20]

処分場は、厚さ約 800~1000 フィート（約 244~305m）のほぼ不浸透性の Red bed（赤色粘土層）上に立地し、この層は地表から約 20 フィート（約 6.1m）以内に近接する。唯一の帯水層は粘土層の下位にあり、飲用に適さない。同施設周辺に地表水は存在しない。気候は乾燥しており、蒸発散量は浸透量を大幅に上回る。

CWF 処分施設の底面から地下水が流れている 225 Foot Sandstone までは、約 30m 以上あり、十分な離隔距離がある。

⑧ 廃棄物埋設状況[21]



(1) CWF 処分施設
(テキサス・コンパクト廃棄物)



(2) FWF 処分施設
(DOE 廃棄物)



(3) 副産物処分施設



(4) 有害物処分施設

図 2.(5)-4 廃棄物の埋設状況

参考文献（アメリカ）

1. 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて（2018年版） 経済産業省資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
2. US エコロジー社ホームページ
3. FINAL ENVIRONMENTAL IMPACT STATEMENT (DOH Publication 320-031 VOLUME 1 May 28, 2004)
4. Technical Evaluation Report (For US Ecology Low-Level Waste Disposal Facility, Richland Washington)
5. Commercial Low-Level Radioactive Waste Disposal Site Richland, Washington (Application for approval of the final design of the Phase I interim closure cover April 2010)
6. 原環センターライブラリー 米国における低レベル放射性大型金属廃棄体（PWRの蒸気発生器）の例
7. エナジーソリューションズ社資料（Barnwell LLRW Disposal Facility）
8. 放射性廃棄物ハンドブック（平成29年度版）原子力環境整備促進・資金管理センター
9. SOUTH CAROLINA DEPARTMENT OF HEALTH AND ENVIRONMENTAL CONTROL RADIOACTIVE MATERIAL LICENSE（Amendment No. 49 amends）
10. BARNWELL LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL FACILITY ; CONCEPTUAL DESIGN FOR LOW-VOLUME OPERATIONS（URS Corporation）
11. 原環センターライブラリー 米国のバーンウェル低レベル放射性廃棄物処分場
12. L3 廃棄物施設に関する予備的検討（平成22年度）日本原子力発電(株)
13. 原環センターライブラリー 米国における低レベル放射性廃棄物トレンチ処分の例
14. エナジーソリューションズ社ホームページ（Clive Disposal Facility）
15. 北米地域のウラン廃棄物処分に関する調査 日本原子力研究開発機構
16. LLRW Clive Facility 2016 Disposal Update（エナジーソリューションズ社）
17. Licensing and Operations of the Clive, Utah Lowlevel Containerized Radioactive Waste Disposal Facility - A Continuation of Excellence
18. Advancing Performance Assessment for Disposal of Depleted Uranium at Clive Utah（Energy Solutions）
19. Federal Waste Disposal Facility (FWF) Generator Handbook
20. 低レベル廃棄物の最前線に救援があるか WCS社の場合
21. WCS社ホームページ（Federal Waste Facility）
22. Conceptual Site Model for Disposal of Depleted Uranium at the Clive Facility（Clive DU PA Model v1.4 : 5 November 2015）
23. Texas Administrative Code RULE § 336.729（LICENSING REQUIREMENTS FOR NEAR-SURFACE LAND DISPOSAL OF LOW-LEVEL RADIOACTIVE WASTE）

3. フランス

(1) 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場^[1]

表 3.(1)-1 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場（フランス）

処分場名	取扱廃棄物	処分実施主体
モルヴィリエ	極低レベル放射性廃棄物	放射性廃棄物管理機関（ANDRA）

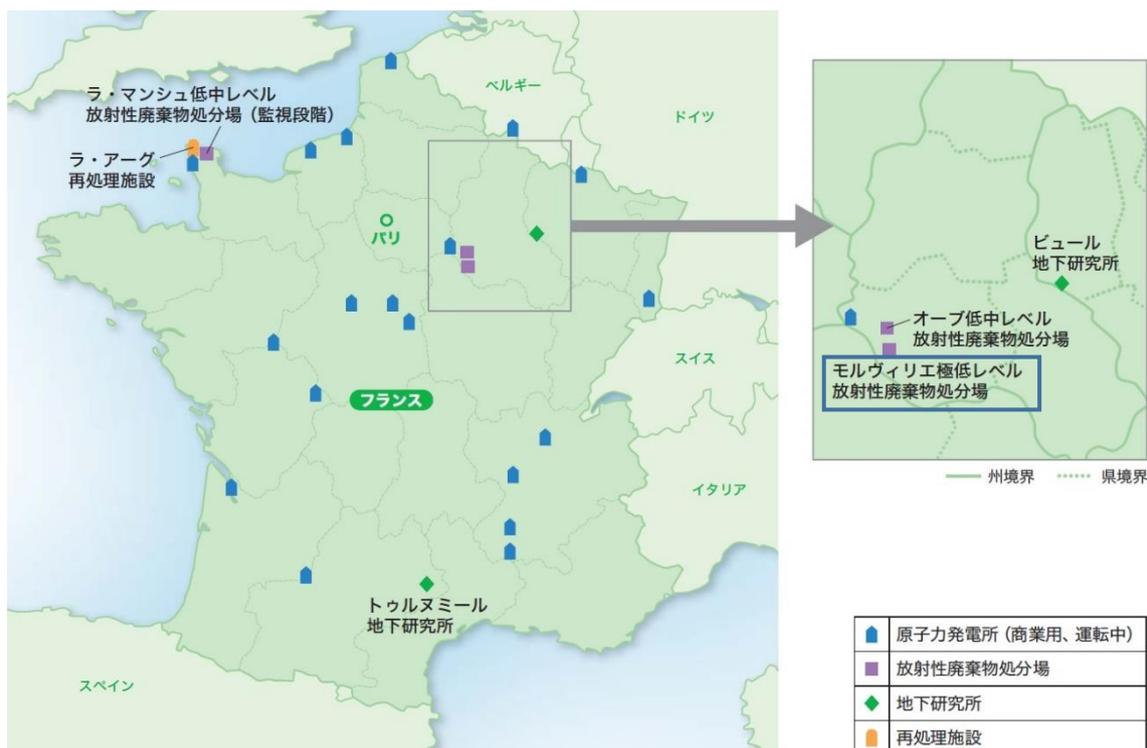


図 3.(1)-1 フランスの原子力発電所及びその他の原子力関連施設の所在地

(2) モルヴィリエ極低レベル放射性廃棄物処分場

① 概要^[1]

モルヴィリエ処分場では、主に原子力施設の解体や、低レベルの放射性物質を扱う非原子力産業サイト、放射性物質によって汚染されたサイトの除染から発生した極低レベル放射性廃棄物が処分されている。モルヴィリエ処分場は、フランス西部に位置し、オーブ処分場に隣接している。処分場の構成は、粘土層を素掘りしたトレンチで、横 25m、縦 80m、深さ 6.5m の処分セルからなっている。また、操業期間は約 30 年間とされている。

なお、モルヴィリエ処分場はラ・マンシュ処分場やオーブ処分場のような原子力基本施設（INB）ではなく、環境保護指定施設（ICPE）としての許可を受けて操業されている。



図 3.(2)-1 モルヴィリエ処分場の施設配置図

② 操業開始^[1]

2003 年

③ 受入廃棄物^[2]

モルヴィリエ処分場で受け入れている VLLW は、原子力施設の廃止措置や運転中に発生する放射性廃棄物、もしくは放射性核種を使用する公共施設（研究所、病院など）や工業施設等から発生する放射性廃棄物であり、内容は土壌、がれき、スクラップ金属等であり、角型容器、ドラム缶、フレコンなどに入れて処分する他、大型の廃棄物を直接処分している。処分場には圧縮処理施設が設置されており、受け入れたプラスチックや圧縮可能な金属廃棄物の処理を行った後、埋設することも行

われている。いずれの場合も空隙は不等沈下防止のために砂などを充填する。放射能レベルは 10Bq/g 程度である。

フランスではクリアランスが制度化されておらず、汚染もしくは放射化による廃棄物が存在する領域（nuclear waste zone）と汚染や放射化の可能性がない領域（conventional waste zone）に区分されることになっている。前者に区分されると極めて微量な汚染もしくは放射化でも放射性廃棄物として処分する必要がある。

④ 処分容量^[1]

モルヴィリエ処分場の処分容量は約 65 万 m³ で、そのうち既に埋設済みの容量は約 33 万 m³ である（2016 年末時点）。

モルヴィリエ処分場で受け入れ可能な総放射エネルギーは表 3.(2)-2 のとおり。

表 3.(2)-1 総放射エネルギー

核種	総放射エネルギー (Bq)
C-14	1.9×10^{12}
Cl-36	6.4×10^{10}
Se-79	7.4×10^{11}
Sr-90	3.7×10^{12}
Tc-99	1.3×10^{11}
Ag-108m	3.8×10^9
Sn-126	1.0×10^{11}
I-129	3.1×10^{10}
Cs-135	1.8×10^{12}
Ra-226	1.4×10^{12}
Th-232	1.1×10^{10}
Pu-239	1.2×10^{11}

⑤ 処分施設の構造^{[3][4][5][6]}

トレンチ設計の基本原則は、非放射性の有害廃棄物処分施設に関する管理規則を遵守することになっている。この原則を適用することにより、放射性廃棄物と有害廃棄物の両方を埋設することを可能としている。

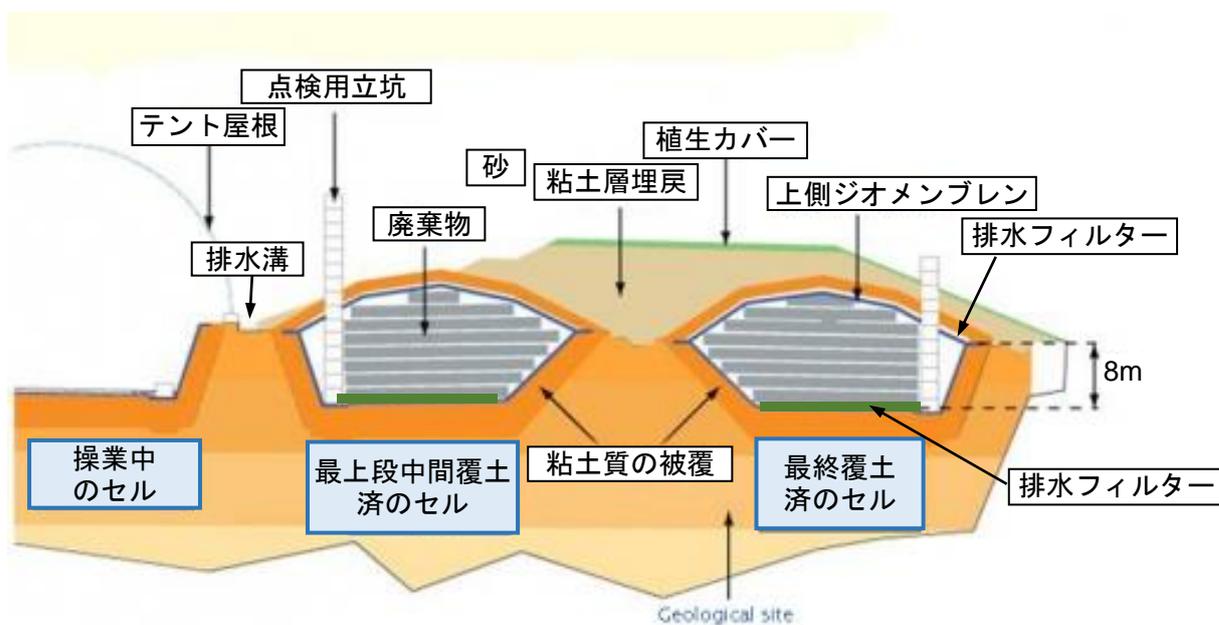
図 3.(2)-2 に処分場の概念図を示す。処分場は、厚さ 15m～25m の低透水性の粘土層の地盤に設置され、粘土層を深さ約 8m 掘削する。廃棄物を定置する前に、厚さ 2mm の高密度ポリエチレン（HDPE）を処分セル底部（下部ジオメンブレン）及び側部に取り付ける。廃棄物を平均約 10 層定置した後、廃棄物の周囲の空隙を砂で充填し、廃棄物上部に同様の HDPE（上部ジオメンブレン）を取り付け、下部ジ

オメンブレンに熱溶接し防水バリアを形成する。ジオメンブレンは完全防水性で、数 10 年間放射能の拡散及び外部水（雨、湿潤）の浸水を防ぐよう設計されている。

ジオメンブレン外周の”粘土質の被覆”は、浸透率 10^{-9} m/s 以下の非常に低い浸透性のものである。また、その上部の”粘土層埋戻材”は、処分セル掘削に伴い除去した粘土層で、最初の浸透率を回復させるために、厚さ 1~5m の層を機械的に成形して圧縮した層である。この”粘土層埋戻材”が、”ジオメンブレン”及び”粘土質の被覆”等で構成された閉じ込め機能を、風化（霜、風）、動物及び侵食から守る役割を果たしている。最後に、厚さ約 30cm の植生された表層土で覆う。

下部ジオメンブレンの上（廃棄物側）に敷砂利及び排水管による集水機能を設けている。

廃棄物の定置中のトレンチには、膜構造のテントを設置して雨水の浸入を防止する。



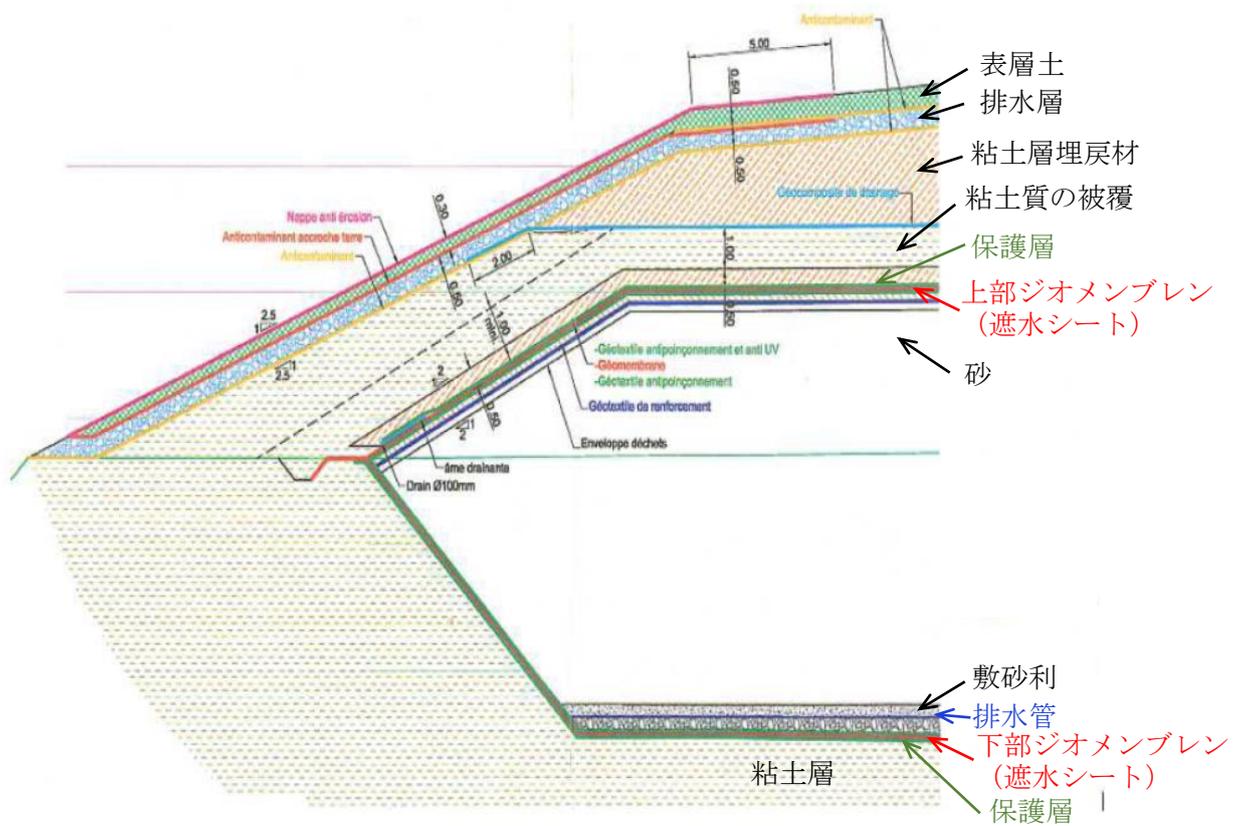


図 3.(2)-2 モルヴィリエ処分場の概念図

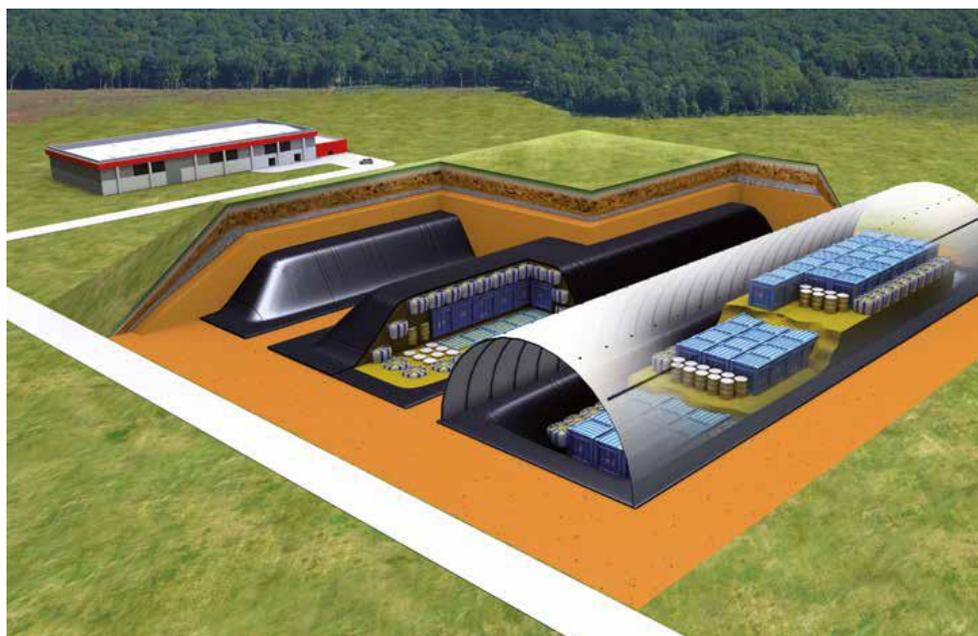


図 3.(2)-3 モルヴィリエ処分場のイメージ図

⑥ 廃棄物埋設状況^{[2][4][5]}

極低レベル放射性廃棄物の性質を考慮すると、廃棄物収納容器等（ドラム、シートなど）は放射能を閉じ込める役割は有しておらず、運搬時の保護及び埋設作業を容易にする役割を果たしている。モルヴィリエ処分場で受け入れる廃棄物の約30%は、埋設前に処理を受けている。低密度の廃棄物（プラスチック、断熱材など）は、ベーリングプレスで圧縮された後、結束されて透明なプラスチックシートで梱包される。また、別のプレス機にてスクラップ金属を減容している。埋設地現場で発生した汚水や事業者から受け入れた汚泥などの廃棄物は、固化・安定化ユニットで処理される。

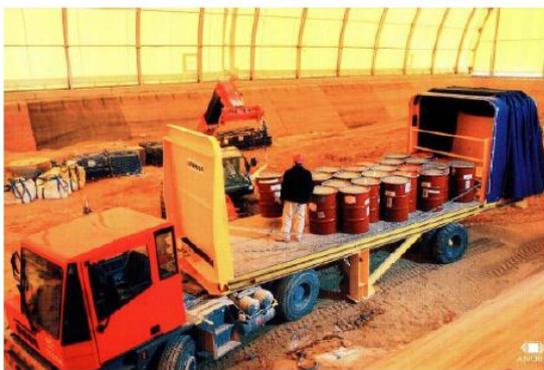
また、輸送用キャスクやコンクリートブロック及び蒸気発生器などの大型機器を、解体することなく埋設処分を行っている。これまで4基の蒸気発生器を埋設しているが、除染後の蒸気発生器は十分に放射能が低いため、通常のセルで埋設可能である。



(1) トレンチの掘削



(2) 定置前のトレンチ



(3) ドラム缶廃棄物の定置作業



(4) ドラム缶廃棄物の定置作業



(5) ドラム缶廃棄物の定置



(6) 大型廃棄物の定置



(7) 蒸気発生器輸送



(8) 蒸気発生器定置



(9) 雨水浸入防止テント設置状況



(10) 覆土後のテント移設作業

図 3.(2)-4 廃棄物の埋設状況

⑦ モニタリング期間

覆土後の処分場の管理期間（モニタリング期間）は、30年とされている。

参考文献（フランス）

1. 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて（2018年版） 経済産業省資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
2. RANDEC ニュース 2016 No.102
3. DISPOSAL OF VERY LOW LEVEL WASTE AND SAFETY ASSESSMENT
4. ANDRA “The surface disposal concept for VLL waste”
5. 欧州地域のウラン廃棄物処分に関する調査 日本原子力研究開発機構
6. L3 廃棄物施設に関する予備的検討（平成 22 年度） 日本原子力発電(株)

4. イギリス

(1) 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場^[1]

表 4.(1)-1 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場（イギリス）

処分場名	取扱廃棄物	処分実施主体
ドリッグ	低レベル放射性廃棄物	LLWR 社



図 4.(1)-1 イギリスの原子力発電所及びその他の原子力関連施設の所在地

(2) ドリッグ処分場

① 概要^{[1][2]}

イングランドのカンブリア州西部のドリッグ村近郊に位置するドリッグ処分場は、過去には、英国原子力公社（UKAEA）、英国核燃料会社（BNFL）により操業されていたが、現在は、原子力廃止措置機関（NDA）から委託を受けた LLW Repository Ltd（LLWR 社）により 2007 年から運営されている。ドリッグ処分場では、2 種類の処分方法で廃棄物を処分している。1959 年に操業を開始し、粘土でライニングされたトレンチ処分施設に固型化・処理されていない低レベル放射性廃棄物を処分していたが。その後、1986 年に英国議会の勧告を受けて、1988 年のポールト 8 の操業開始からトレンチ処分は徐々に減少し、1995 年のセラフィールド LLW 圧縮施設の完成によりトレンチ処分は終了し、コンクリートポールト施設に大型の ISO コンテナ容器に収納された廃棄物を処分する方法に変わっていった。

現在、ドリッグ処分場ではポールト 8（処分容量 20 万 m³）の処分容量が満たされ、廃棄物はポールト 9 に定置している。今後、ドリッグ処分場では 2130 年までに発生が見込まれる 440 万 m³ の低レベル放射性廃棄物を処分するため、ポールト 20 まで施設を増設する予定である。



図 4.(2)-1 ドリッグ処分場の施設配置図

② 操業開始^[1]

1959 年

③ 受入廃棄物^{[3][4][5][6][7]}

ドリッグ処分場は低レベル廃棄物の処分場であり、放射性物質の濃度上限値は α 核種で 4,000 Bq/g、 β γ 核種で 12,000 Bq/g である。そのうち極低レベル放射性廃棄

物の濃度上限値は 4 Bq/g である (図 4.(2)-2 参照)。受け入れ条件は表 4.(2)-1 のとおり。

ドリッグ処分場で受け入れる前に、大半の廃棄物は圧縮した上で ISO コンテナに収納し、圧縮できない廃棄物は、ISO コンテナに直接収納する (図 4.(2)-3 参照)。なお、廃棄物を ISO コンテナに収納した後、ドリッグの固形化施設にて ISO コンテナにグラウトを充填し固形化する。

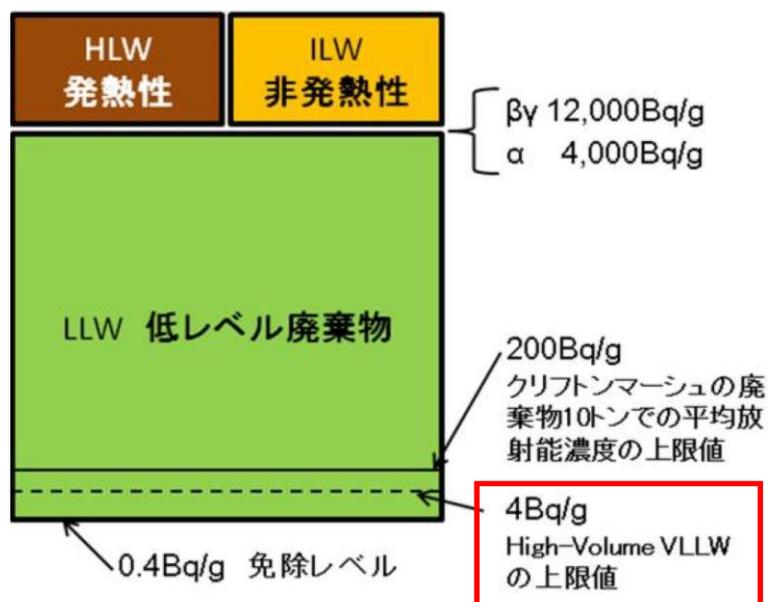
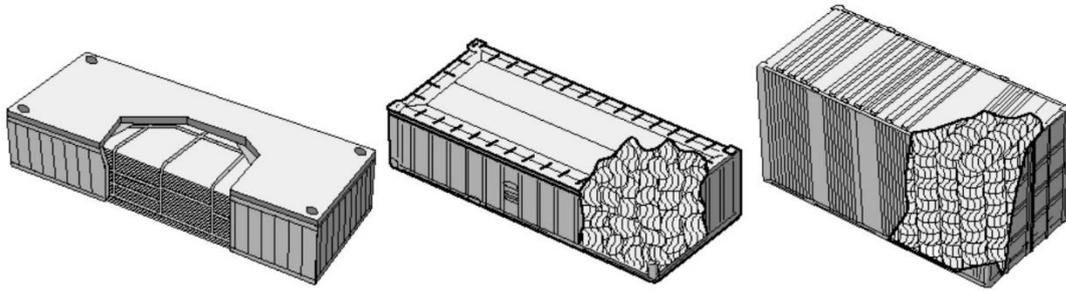


図 4.(2)-2 イギリスの低レベル放射能区分

表 4.(2)-1 ドリッグ処分場の受入条件

項目	内容
受入対象物	原子力産業、防衛省、非原子力産業、教育、医学及び研究施設などから発生する、紙、厚紙、プラスチック、防護服、土壌、瓦礫、金属を ISO コンテナ容器に収納したもの
有害物	水、火災・爆発性物質※1、ガスを発生する物質、腐敗性物質 (5%以下)、生物学的毒性
表面密度限度	α 核種 : 0.4 Bq/cm ² 以下、 $\beta \gamma$ 核種 : 4 Bq/cm ² 以下
マクロ空隙率	10%以下
圧縮強度	400 kN/m ² 以上
重量	グラウト充填前 : 35 t 以下 グラウト充填後 : 42 t 以下もしくは 30 kN/m ² 以下の厳しい方

※1 : ①可燃性金属 (微粉の Li, Mg, Zr, Zn, Na, K, Ca)、②22°C以下の引火点を有する固定化されている液体、③りん、④ホウ素の水素化物、⑤水素化物、窒素化物、炭化物等で水と反応により熱・可燃性を発生する物質、⑥強酸試薬、⑦圧縮気体、エアゾル



- (1) ハーフハイトコンテナ (圧縮物収納) (2) ハーフハイトコンテナ (非圧縮物収納) (3) フルハイトコンテナ (充填ドラム缶収納)

図 4.(2)-3 廃棄物の収納形態の例

④ 処分容量^[1]

ドリッグ処分場の処分容量は、既に埋設が完了しているトレンチ 1~7 が約 80 万 m³ で、操業中のボルト 8~14 が約 130 万 m³ である (2011 年 5 月)。

⑤ 処分施設の構造^[8]

ドリッグ処分場の主要媒体は、不均一で不連続な粘土層であり、その周囲に砂層が分布している。

覆土の構造は図 4.(2)-4 に示すとおり、表土層は表面流出及び蒸発散を期待されているもので、その下層に構成されているのは厚さ 0.5m の玉石層で、根の侵入防止の役割を担っている。更にもその下層には、上下にメンブレン (人工材料) を配置した厚さ 0.6m の粘性土層 (ベントナイト混合土) による遮水層の上下に、排水層を設けている。上部排水層及び下部排水層は、各々厚さ 0.3m の礫層及び砂層で構成され、下部排水層については、キャピラリーバリアとして設計されており、埋戻し層 (廃棄物埋設地点) への浸出水の浸入の抑制を図っている。下部排水層の下層には、形状調整のために廃棄物と排水層との間の隙間を埋める埋戻し層がある。さらに埋戻し層の下部にも厚さ 1.0m の碎石砂利層がある。浸出水ドレンの下部層への浸透は下部粘土層により排除される構造である。

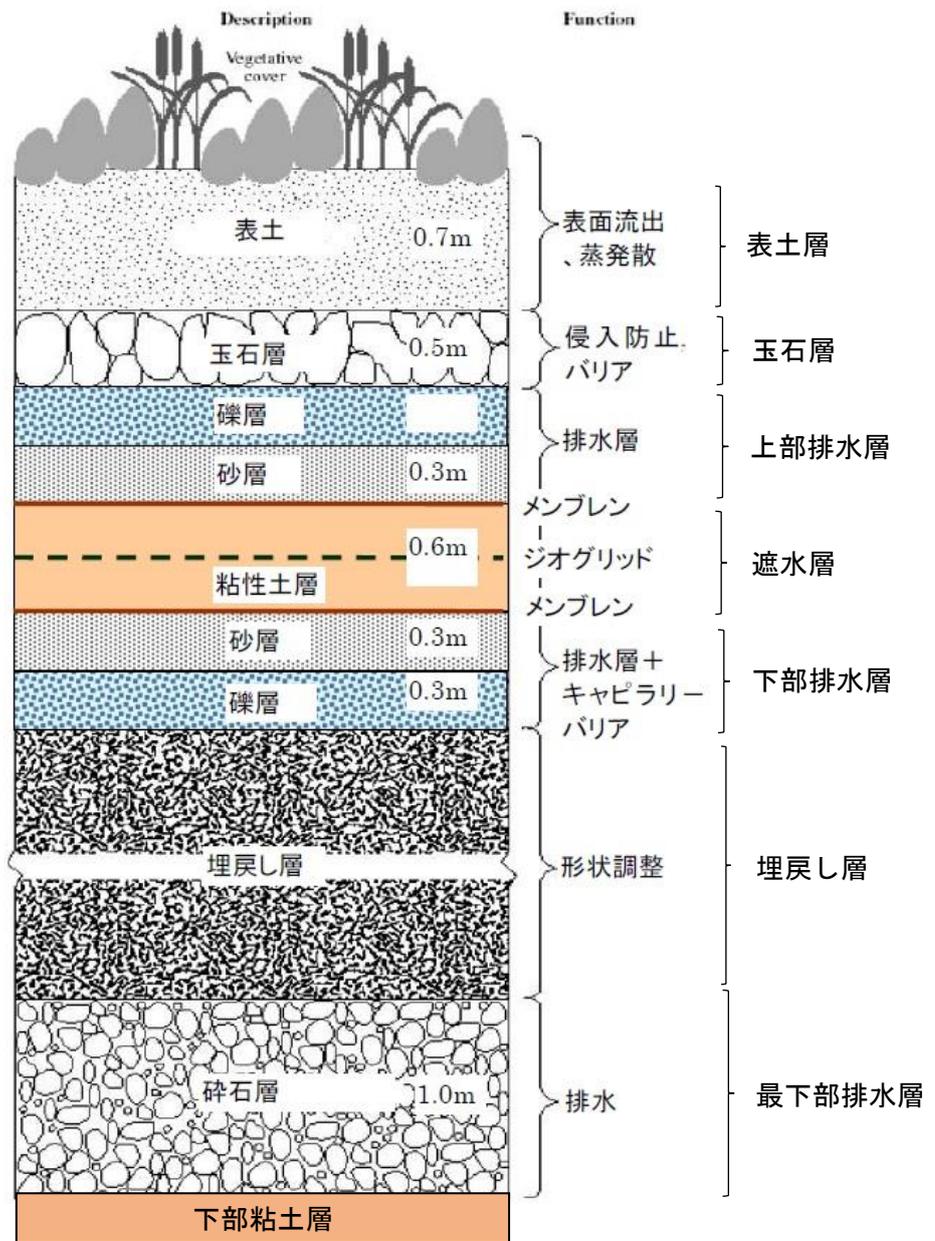


図 4.(2)-4 覆土の構造

⑥ 地下水^[9]

地下水位は、廃棄物定置位置より上である。

⑦ 廃棄物埋設状況[6]



(1) フレコン定置 (トレンチ)



(2) 廃棄物鉄道輸送 (ISO コンテナ)



(3) ISO コンテナ受入れ (ボールト)



(4) ISO コンテナ定置 (ボールト)



(5) ISO コンテナ収納廃棄物

図 4.(2)-5 廃棄物の埋設状況

参考文献（イギリス）

1. 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて（2018年版） 経済産業省資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
2. 海外情報ニュースフラッシュ（原子力環境整備促進・資金管理センター 2015.6.18 発行）
3. Directions to the Nuclear Decommissioning Authority (the NDA) in respect of the Drigg Nuclear Site
4. 欧州地域のウラン廃棄物処分に関する調査 日本原子力研究開発機構
5. 放射性廃棄物データブック（財）原子力環境整備センター 1998年11月
6. LLW Repository Ltd ホームページ
7. 原環センターライブラリー 英国における低レベル放射性廃棄物廃棄体形態の例
8. 極低レベル放射性廃棄物施設の合理的な構造形式に関する研究（原電自社研）
9. L3 廃棄物施設に関する予備的検討（平成22年度） 日本原子力発電(株)

5. スウェーデン

(1) 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場^[1]

スウェーデンでは、原子力発電所を所有・操業する許可所有者である電力会社が、その事業から発生する放射性廃棄物を安全に処分する責任がある。極低レベル放射性廃棄物 (VLLW) については、発生者が自らのサイト内で地表埋立てにより処分する方法がとられており、これまでに原子力発電所ではフォルスマルク (Forsmark)、オスカーシャム (Oskarshamn)、リングハルス (Ringhals) で実績がある。

それ以外の低中レベル放射性廃棄物は、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社 (SKB 社) が実施主体となる複数の処分場において放射性廃棄物を処分する計画であり、原子力発電所の運転から生じた低中レベル放射性廃棄物は 1988 年から操業開始した SKB 社の SFR という処分場で処分されている。SKB 社は原子炉の運転期間の延長のほか、今後本格化する原子力発電所の廃止措置への対応するため、2014 年 12 月に SFR の拡張に関する許可申請を行っている。

表 5.(1)-1 極低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場 (スウェーデン)

処分場名	取扱廃棄物	処分実施主体
フォルスマルク	極低レベル放射性廃棄物	フォルスマルク発電会社 (FKA)
オスカーシャム	極低レベル放射性廃棄物	E.ON/フォータム
リングハルス	極低レベル放射性廃棄物	バッテンフォール/E.ON



図 5.(1)-1 スウェーデンの原子力発電所及びその他の原子力関連施設の所在地

(2) スウェーデン国内における各処分場

① 概要^{[1][2]}

i. フォルスマルク原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）

フォルスマルク原子力発電所では、放射線管理区域内で使用される作業着、手袋、紙類のほか、煙感知器などのプラスチック、金属端材などの極低レベル放射性廃棄物を発電所敷地内において地表埋立によって処分している。

極低レベル廃棄物の年間発生量は約 200m³と少ないため、埋立処分を通年で行っておらず、約 5 年間隔のキャンペーン方式で実施している。

金属や硬質プラスチックはドラム缶などの容器に収納して処分するが、廃棄物の大部分は高圧圧縮した廃棄物をストレッチフィルムで梱包した約 1m³のパッケージである。これらを地表地盤に構築した約 1m の下部シーリング層の上に定置し、雨水が廃棄物と接触しないように約 3m の厚さの上部シーリング層を施工する。

埋立処分場全体の総放射能は常に 200GBq 以下に制限されており、処分した廃棄物に含まれる放射能は 100 年以内にクリアランスレベル以下に減衰するものだけが埋立処分することが認められている。

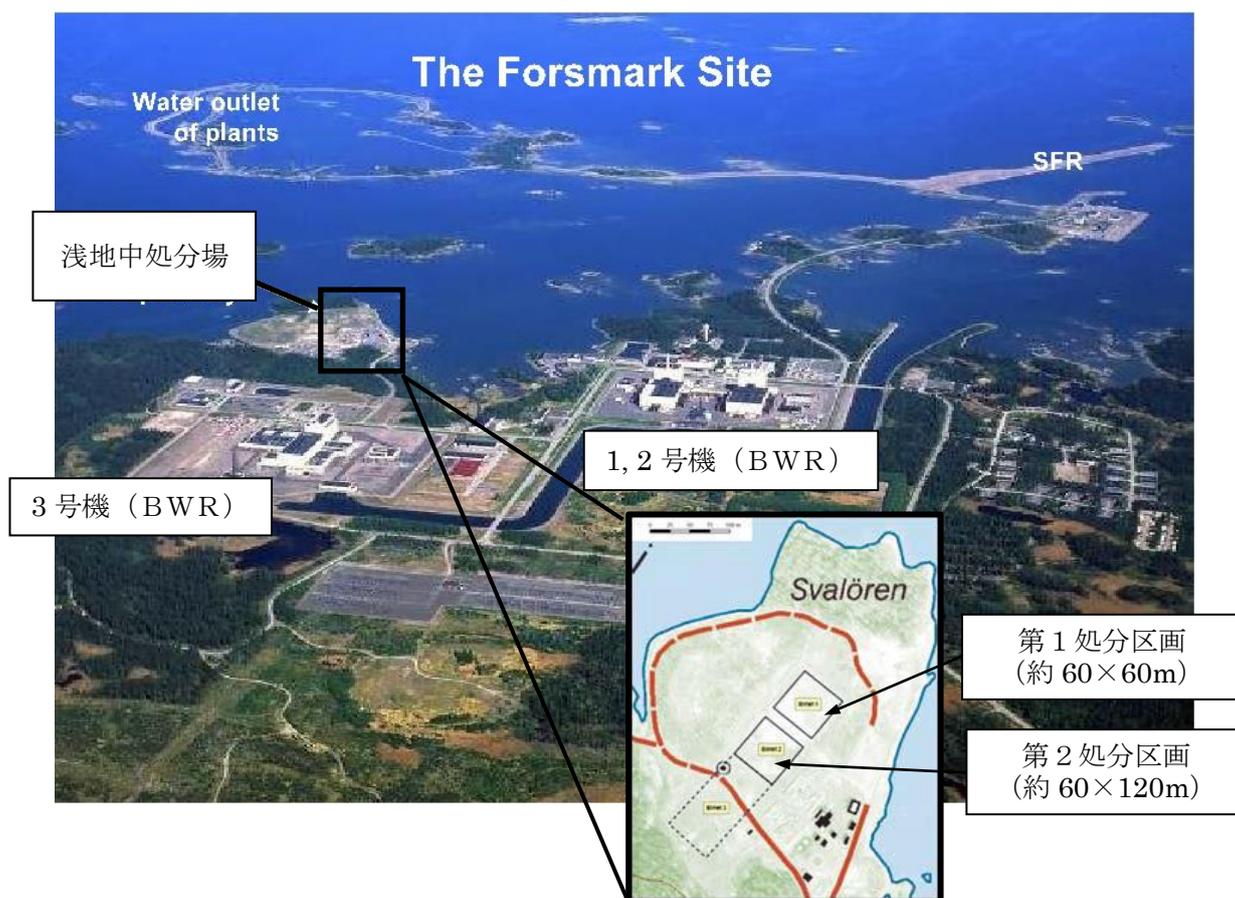


図 5.(2)-1 フォルスマルク原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）の施設配置図

ii. オスカーシャム原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）^[2]

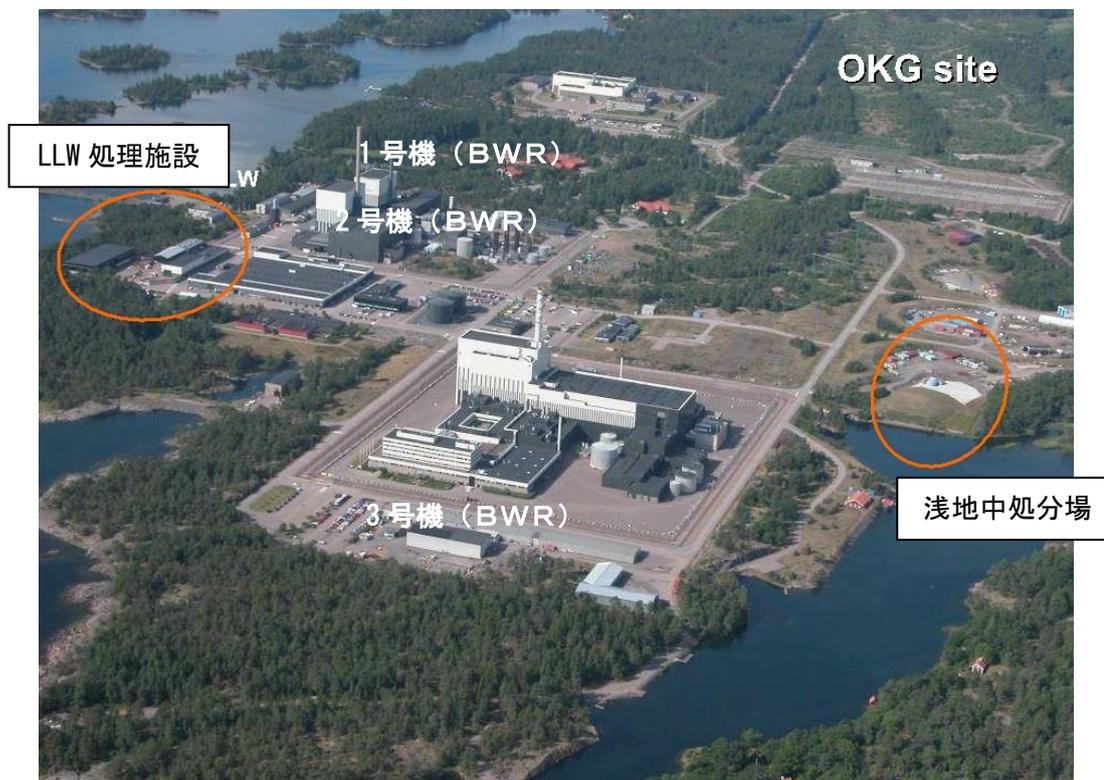


図 5.(2)-2 オスカーシャム原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）の施設配置図

iii. リングハルス原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）^[2]

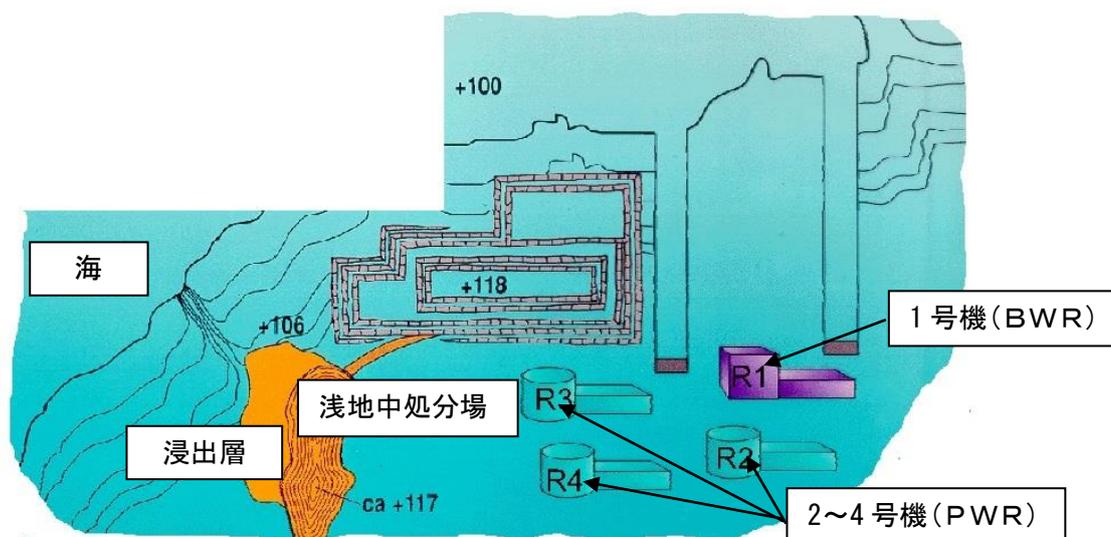


図 5.(2)-3 リングハルス原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）の施設配置図

② 操業開始^{[1][3]}

表 5.(2)-1 各処分場の操業時期及びライセンス期間

	フォルスマルク	オスカーシャム	リングハルス
操業開始	1989 年	1986 年	1993 年
ライセンス期間	2070 年	2075 年	2060 年

③ 受入廃棄物^[4]

表 5.(2)-2 各処分場の受入廃棄物及び荷姿

廃棄物種類	フォルスマルク	オスカーシャム	リングハルス
イオン交換樹脂	鉄製ドラム缶にア スファルト固化	鉄製ドラム缶にコ ンクリート固化	コンクリート製と 鋼製モールドにコ ンクリート固化
金属スクラップ 及び使用済部品	■ 鉄製モールドに 収納 ■ ISO コンテナに 収納	■ コンクリート製 モールドに収納 しコンクリート で固化	■ コンクリート製 モールドに収納 しコンクリート で固化 ■ ISO コンテナに 収納
スラッジ	—	—	■ コンクリート製 モールドに収納 し、コンクリート で固化

④ 処分容量及び放射エネルギー^[4]

表 5.(2)-3 各処分場の処分容量及び放射エネルギー

	フォルスマルク	オスカーシャム	リングハルス
ライセンス 条件	約 1.7 万 m ³ 〔最大：200GBq〕 〔α 核種最大：0.2GBq〕	約 1.0 m ³ 〔最大：200GBq〕 〔α 核種最大：0.2GBq〕	約 1.0 m ³ 〔最大：1,100GBq〕 〔α 核種最大：0.1GBq〕
実績 (2016.12. 31 現在)	約 0.7 万 m ³ (約 4,400 トン) 〔34.3GBq〕	約 1.0 万 m ³ (約 5,400 トン) 〔37GBq〕	約 0.9 万 m ³ (約 5,400 トン) 〔265GBq〕

注：〔 〕内は放射エネルギー

⑤ 処分シナリオ^[3]

スウェーデンにおける処分場からの放射性物質の放出としては、火災による大気放出及び水による漏出の 2 つが主に考慮されており、これ以外には人間侵入に対するシナリオが検討されている。スウェーデンにおける L3 廃棄物埋設施設の申請において考慮されたシナリオをまとめると下表のようになる。

表 5.(2)-4 スウェーデンで検討された主なシナリオ

シナリオ	考え方
埋設地中の廃棄物を通る地下水による放射能の放出	・ 慎重な仮定とパラメータ値を用いた評価がなされた。
	・ 最悪の事態を想定し埋設地からの放射能の早い浸出プロセスが検討された。処分場が最高放射能を保持している時期に、廃棄物のまわりの内部バリアがすべて劣化すると仮定された。
	・ 放射能の早い放出を引き起こす極端な降水を考慮した条件での計算も実施される。これが扱ったシナリオの中で最も高い被曝計算値となった。
火災	・ 火災による大気放出で拡散した場合について計算がなされた。
閉鎖の後の掘削、埋設地の上での農業	・ 埋設地が小さな丘の形状であるため、その上での農業活動や井戸を掘るために使用されるという可能性は高いとはみなされず、そうしたシナリオは考慮されていない。

多層集排水方式の覆土や底部を有する L3 廃棄物埋設施設における安全評価シナリオとしては、主に地下水シナリオが考えられる。地下水シナリオの中でも、極端な降水を考慮したシナリオでは次のことを考慮する必要がある。

- ・ 覆土内の排水層により降水が排水しきれない場合
- ・ 表面保護層の侵食

これらの 2 点については、表面保護層（植生層）が破壊されていない限り、極端な水量が排水層に浸透することは考えにくく、目視点検等による管理がなされていれば問題ないと考えられる。また、植生がある程度安定した段階では、表面保護層の侵食などの劣化は考えにくい。

廃棄物周辺のバリアが早期に劣化することを想定したシナリオでは、以下 2 点が考えられる。

- ・ 遮水層の透水性増加
- ・ 排水層や廃棄体間の充填材の目詰まり

SKB International Report にも記述されているようにベントナイト混合土は自然由来の材料であり長期的に安定しており、処分場の放射能が減衰していない時期（数十年）における劣化は考えにくい。目詰まりについても、スウェーデンではそのリスクはほとんど考慮されていないようである。これは、表面保護層等を通過してくる地下水の流量が少なく（HDPE シートなどを使う場合は実質的にゼロに近い）、また細粒分等が濾過

されていることなどで数十年の時間スケールでは問題はないとの判断と思われる。

降水量の想定については、表 5.(2)-4 にある「放射能の早い放出を引き起こす極端な降水を考慮した条件」についても検討がなされている。具体的には 27,000mm/year というフォルスマルクの平均降水量 700mm/year の 40 倍近い値であり、大幅に過大な降水が考慮されている。これは、極端な条件での被曝量を把握しておくために使用された条件となっている。

⑥ VLLW 処分施設の設計^{[3][5]}

放射性廃棄物の管理及び処分については、主に原子力活動法（SFS 1984 : 3）及び令（SFS 1984 : 14）、並びに放射線防護法（SFS 1988 : 220）及び令（SFS 1988 : 293）の規定によって規制されている。

i. 盛土の構造安定性

フォルスマルク、オスカーシャム及びリングハルス処分場の構造概念図を図 5.(2)-4 ～図 5.(2)-10 に示す。スウェーデンの規制当局は、追加で補足的な要件を求めていることがある。例えば、処分場の傾斜について図 5.(2)-7 の写真（9）に示すように、オスカーシャム処分場の盛土の法面について法勾配 1:3 が求められている。ただし、この規制はさらに厳しくなり、現在は 1:4 以下であることが求められている。

ii. 施設のバリア機能

スウェーデンの規制では、主として機能要件に基づいており、粒度や透水係数等の個別の特性については規制の中で示されていない。ただし、処分キャンペーンの実施申請では、事業者が詳細な計画を示すことが求められる。事業者は、使用される材料及びプロセスの詳細な技術事項をすべて含んでいる計画を提出し、規制当局は申請書のレビューにおいて、使用材料の詳細や、どのように施工を行うかの詳細について、変更を要求することができる。

a. 覆土層

覆土に関しては、降雨浸透量が十分に低い値となるように設計される。すなわち法令要求としては、覆土の透水係数が 10^{-10}m/s 以下、あるいは浸透量が $5 \text{ (}\ell/\text{m}^2/\text{year)}$ が示されている。スウェーデンにおける安全評価では、結果が過小評価とならないように用いられるほとんどの値は保守側にバイアスがかけられており、覆土浸透水量の評価においても、動水勾配を 1.0 として検討がされている。覆土内部の動水勾配を仮に 1.0 とすると、浸透量が $5 \text{ (}\ell/\text{m}^2/\text{year)}$ であることは $1.6 \times 10^{-10}\text{m/s}$ に相当する。これはかなり低い透水係数であり、ベントナイト混合土を用いる場合にはベントナイトの配合率をある程度高くする必要がある。あるいは、高密度ポリエチレンシート（HDPE）などで完全に覆うことが必要と考えられる。

スウェーデンの埋設施設の覆土層には、こうした人工材料でできたシートが用いられている。その有効期間については、実験室での試験により 150～250 年と見積もられているが、メーカーの保証は与えられていない。メーカーでは、ジオメンブレンやジオテキスタイルは 150 年機能が持続するとしているが、これは所定の期間に機能の重大な悪化が生じないこと（100%の性能が維持されるとは限らない）を意味するものとして理解されている。一方、現在のライセンス条件では、規制当局は VLLW 処分場の放射エネルギーを放射線の監視が約 65 年の後に終了可能となるようなレベルに制限している。事業者は、この同じ期間に対してジオメンブレン及びジオテキスタイルの耐久性は十分として計画を提出しており、規制当局は当初、材料の特定の有効期間を認めていなかったが、放射線の監視がなされている間は十分に良いとして受け入れた。

また、遮水層にベントナイトカーペット（GCL）を用いる場合、十分な機能を得るためには荷重（覆土重量）がかかった状態にして、水和するようにする必要があるとしている。ベントナイト水和過程では、必要な拘束力を得るために最低 1.0m の覆土が必要であり、表面保護層をベントナイトカーペットとともに適切に設置する必要がある。

b. 底部バリア

底部バリア層の役割は、廃棄物層を通過してきた浸透水を速やかに外部に出すことで、処分場の内部に地下水位が形成されないようにすることである。このことを確実にするために、処分場の底部バリア層は比較的高い透水性($k=10^{-8}\text{m/s}$)を持つように設計されている。

c. 浸透床（Infiltration bed）

リングハルス及びオスカーシャムの VLLW 処分施設では浸透床が設置されている。浸透床に浸透した水は、オスカーシャムの場合近くの Hamnefjärden 湾（バルト海）で、リングハルスの場合近くの大西洋に排出されることになる。核種が浸透床を通過するシナリオでは、それらは沿岸の水に分散されることが想定されている。

オスカーシャム盛土処分場において、規制当局は砂の混合物、泥炭と破碎された貝殻から成る浸透床（収着床）を要求している。廃棄物からの放射能が水とともに移動する場合は、放射能のほとんどは浸透床の中で収着され海に到達しないとしている。このような収着が放射能を濃集させ、二次的放射線源を形成することもありうるが、スウェーデンの規制当局は放射能を海に到達させるよりはその方が良いと考えている。浸透床での放射性核種の収着を評価する際、 K_d 値として Co60 については 10ml/g、Cs137 については 20 ml/g が用いられており、これらは非常に保守的な値となっている。

⑦ 各処分場の構造

i. フォルスマルク原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）^{[3][6][7]}

[覆土構造]

ベントナイトライナーを粘土層、モレーン層、碎石及びストーンパウダーで覆う構造を持った覆土を有する盛土型の埋設施設である。

覆土構造の概念を図 5.(2)-4 に、詳細を図 5.(2)-5 に示す。覆土の構造として、排水層は径 8~16mm の碎石層であり、遮水層はベントナイトテキスタイルとベントナイト混合層の 2 種類が組み合わされている。最上部の砂質モレーン層は、機械的な影響による損傷を防ぎ、木の根の侵入から遮水層を保護する働きを有する。また、浸食の観点から、粘土分が 10%未満であるという利点を有する。覆土の構成要素を表 5.(2)-5 に示す。

[底部構造]

底部構造の概念を図 5.(2)-4 に、詳細を図 5.(2)-5 に示す。底部の排水層は礫層で、遮水層はベントナイト混合層であり、覆土に比べるとやや簡略化した構造となっている。

碎石層の透水係数は 10^{-2}m/s で、その上の 0~32mm 粒径の碎石とストーンパウダーの混合層の透水係数は 10^{-5}m/s である。

遮水層などの透水性は締固め度で管理される。締固め度はアイソトープメーター (Troxler など) を用いて管理制御される。底部の構成要素を表 5.(2)-6 に示す。

表 5.(2)-5 フォルスマルク処分場の覆土構成要素

覆土層	機能	配合等	厚み
モレーン層	表面保護、浸食防止		1.2m
ジオテキスタイル	層の分離		
碎石層	排水層	粒径 8-16mm	0.3m
ストーンパウダー	ベントナイトテキスタイルの保護	粒径 0-2mm	0.1m
ベントナイトテキスタイル	遮水層		
ベントナイトとストーンパウダーの混合層(BES5)	遮水層		0.4m
碎石とストーンパウダーの混合層	応力分散	粒径 0-32mm	0.5m
ストーンパウダー	均し層	粒径 0-2mm	0.5m

表 5.(2)-6 フォルスマルク処分場の底部構成要素

底部層	機能	配合等	厚み
礫（碎石）とストーンパウダーの混合層	排水層の保護	粒径 0-32mm	0.15m
礫層（碎石層）	排水層	粒径 8-16mm	0.3m
ベントナイトとストーンパウダーの混合層（BES1）	遮水層		0.4m
天然のモレーン層	構造物の基盤		2m

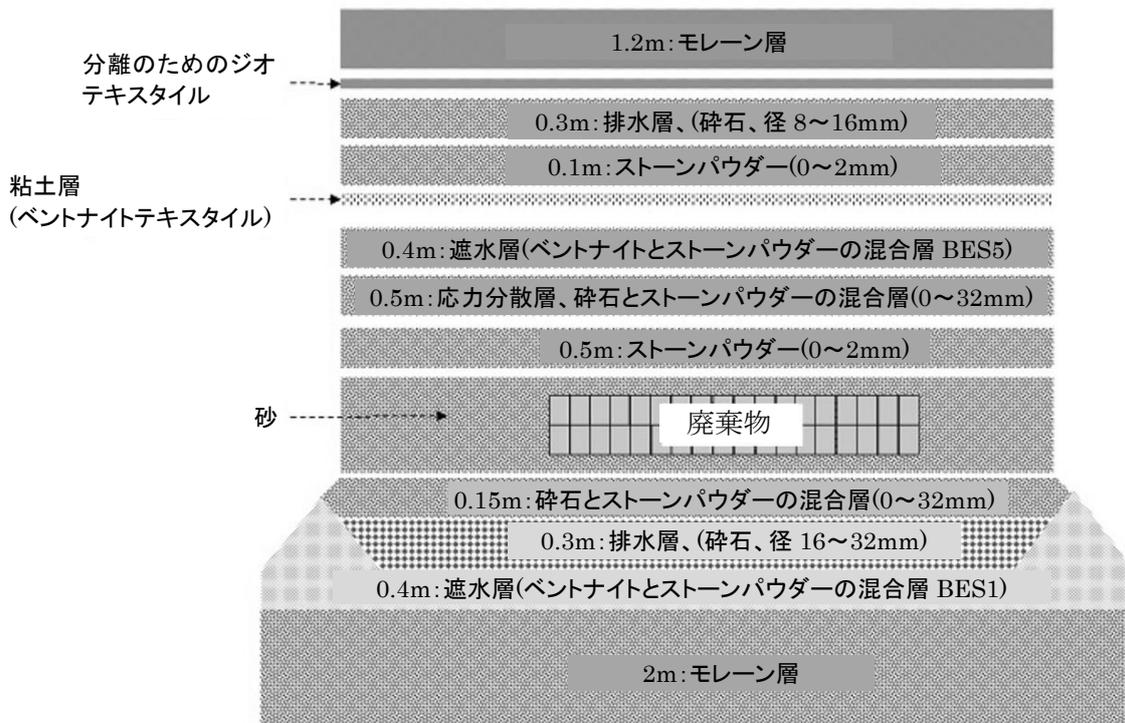
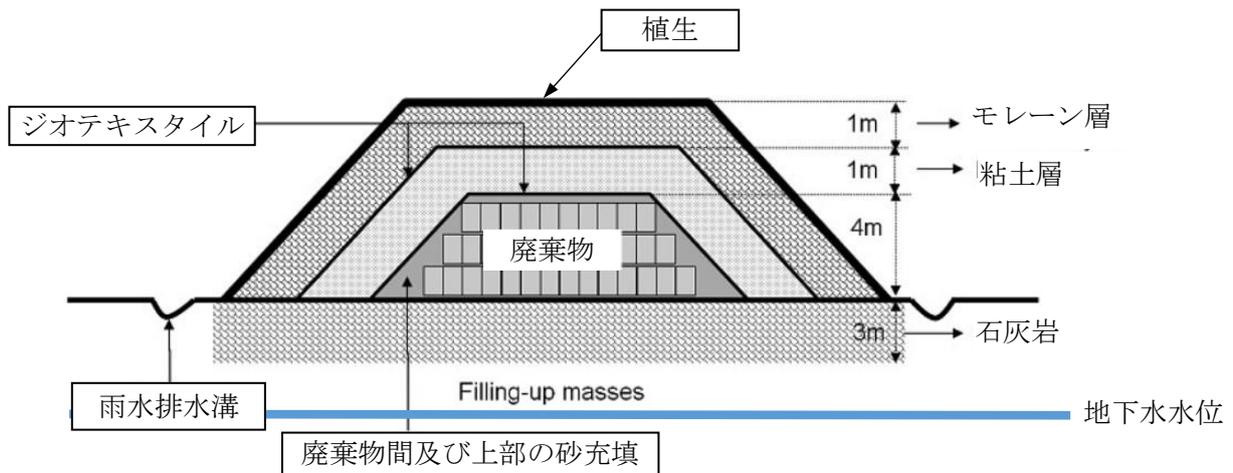


図 5.(2)-4 フォルスマルク処分場の構造概念図

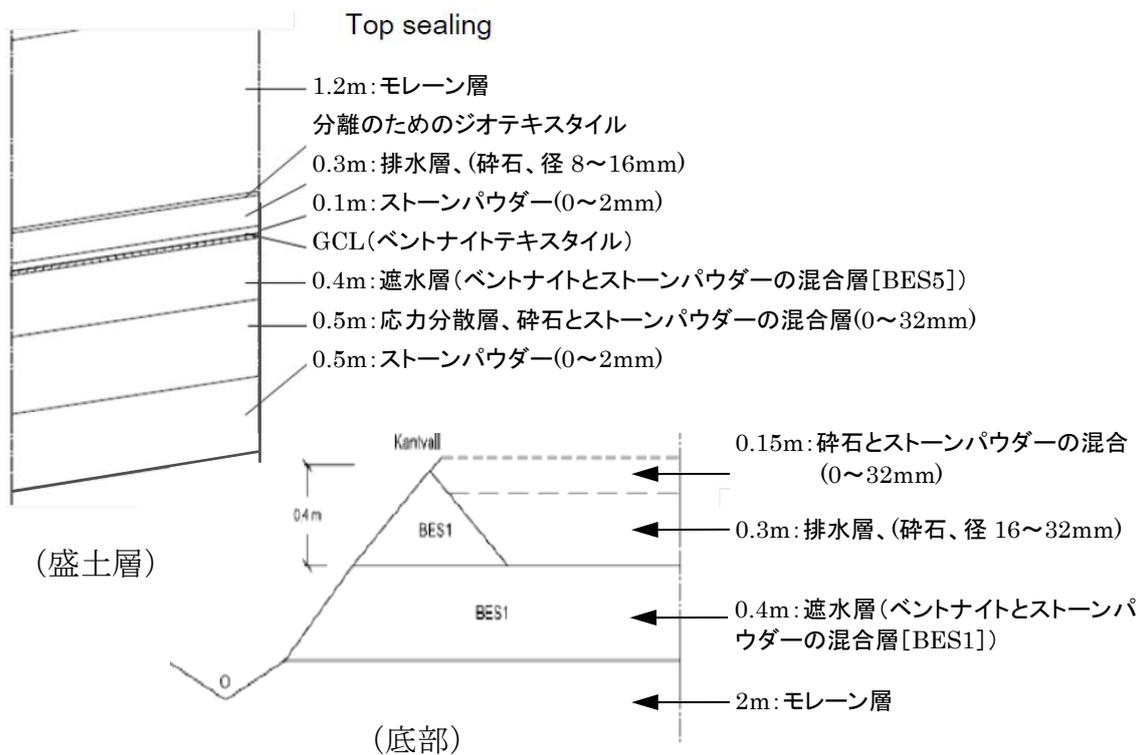


図 5.(2)-5 フォルスマルク処分場の盛土層及び底部の構造

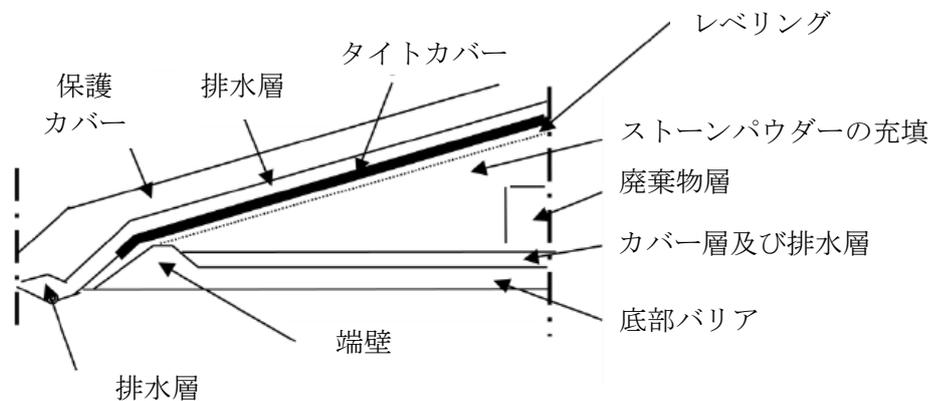


図 5.(2)-6 フォルスマルク処分場の端部及び底部の構造 (詳細)

- ii. オスカーシャム原子力発電所 (極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場) [3][6][7]
 ベントナイト及びプラスチックライナー、排水層、保護層 (モレーン層と土) で覆う構造を持った覆土を有する盛土型の埋設施設である。
 覆土及び底部構造の概念を図 5.(2)-8、構造を示す写真を図 5.(2)-7 に示す。底部には不透水のコンクリート板 (plate)、浸出水は直接浸透ベッド (infiltration bed) に誘導

に向かい、そこで放流される前にモニタリングされる。

覆土はベントナイトと排水層、保護層（モレーンと土）の混合層である。バリアは、砂、礫と有機物の混合物の外部浸透領域で構成している。



(1) 鉄筋コンクリート底盤



(2) 定置後廃棄物上の覆土



(3) 遮水層 1 (ベントナイト)



(4) 遮水層 2 (HDPE)



(5) HDPE の溶着



(6) 盛土型覆土



(7) 盛土型覆土



(8) 最終覆土・被覆層



(9) 法面

図 5.(2)-7 オスカーシャム処分場の構造

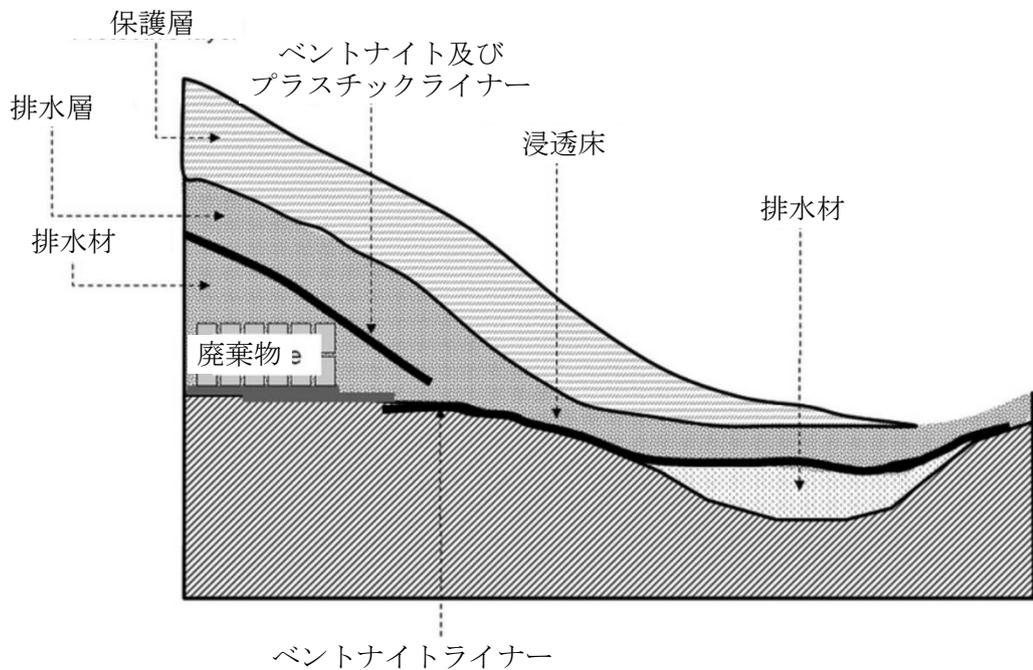


図 5.(2)-8 オスカーシャム処分場の構造断面図

iii. リングハルス原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場） [3][7]

ベントナイトライナー、排水層、保護層（モレーン層と土）で覆う構造を持った覆土を有する盛土型の埋設施設である。

覆土及び底部構造の概念を図 5.(2)-9、構造を示す写真を図 5.(2)-10 に示す。地盤は不透水の岩盤で、浸出水を誘導する浸透床（infiltration bed）で構成されている。

覆土はベントナイトライナーを遮水層と保護層（モレーンと土）で覆った構造である。

覆土以外でジオテキスタイル等の人工バリアはない。覆土ではほぼ完全に降水を遮断することで、廃棄物を通過する量を極小まで減らすという考え方である。

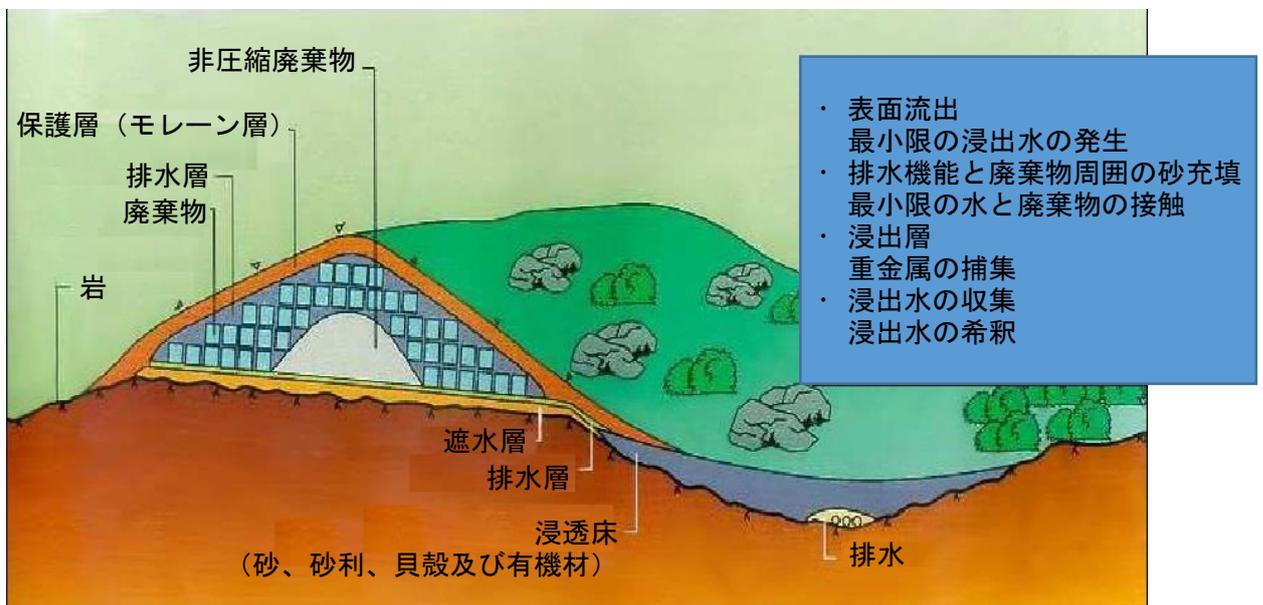


図 5.(2)-9 構造断面図



(1) 処分場底部・施工前（岩盤）



(2) 処分場底部・施工中
（表面掘削及びコンクリート打設）



(3) 遮水ライナー設置

(4) 遮水ライナー

図 5.(2)-10 リングハルス処分場の構造

⑧ 地下水

表 5.(2)-7 各処分場の地下水面の位置

フォルスマルク	オスカーシャム	リングハルス
地下水面は、廃棄物底面より下部に存在している。	情報なし	情報なし

⑨ 廃棄物埋設状況^[7]

i. フォルスマルク原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）



(1) 廃棄物定置状況

(2) 処分場外景

図 5.(2)-11 フォルスマルク処分場の廃棄物定置状況

ii. オスカーシャム原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）



(1) 砂による容器内の空隙充填

(2) 埋設地外周への圧縮廃棄物の定置



(3) 底部バリア



(4) 廃棄物定置状況

図 5.(2)-12 オスカーシャム処分場の廃棄物定置状況

iii. リングハルス原子力発電所（極低レベル放射性廃棄物の地表埋立処分場）



(1) 廃棄物定置状況

(2) 廃棄物定置状況

図 5.(2)-13 リングハルス処分場の廃棄物定置状況

参考文献（スウェーデン）

1. 諸外国における放射性廃棄物関連の施設・サイトについて（2018年版）経済産業省資源エネルギー庁 電力・ガス事業部 放射性廃棄物対策課
2. ” Shallow land repositories for very low level waste (VATENFALL)”（IAEA ホームページ）
3. 極低レベル放射性廃棄物施設の合理的な構造形式に関する研究（原電自社研）
4. Sweden´s sixth national report under the Joint Convention on the safety of spent fuel management and on the safety of radioactive waste management(2017)
5. Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries（Regulatory and Institutional Framework for Nuclear Activities）
6. Analysis on the International Trends in Safe Management of Very Low Level Waste Based upon Graded Approach and Their Implications
7. Shallow land repositories for very low level waste (VATENFALL)”（IAEA ホームページ）

6. スペイン

(1) 低レベル放射性廃棄物の処分場

① 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場^{[1][2][3]}

放射性廃棄物処分については、放射性廃棄物管理公社（ENRESA）が実施主体になっている。ENRESA は、1984 年に放射性廃棄物の管理を行う非営利団体として設立され、スペイン国内で発生した高レベル放射性廃棄物から低・中レベル放射性廃棄物に係わる研究開発、中間貯蔵、輸送、処分、及び原子力施設の廃止措置に至るまで広範囲な活動を行っている。

低中レベル放射性廃棄物（LILW）の処分施設としては、1992 年に操業を開始したスペイン唯一のエルカブリラ放射性廃棄物処分場がある。また、同処分場の南東エリアに原子力施設の廃止措置により発生する極低レベル放射性廃棄物（VLLW）の処分施設を建設し、2008 年より操業している。

表 6.(1)-1 低レベル放射性廃棄物の処分実施主体及び処分場（スペイン）

処分場名	取扱廃棄物	処分実施主体
エルカブリラ	低中レベル放射性廃棄物 極低レベル放射性廃棄物	放射性廃棄物管理公社（ENRESA）



図 6.(1)-1 エルカブリラ処分場の設置位置

② スペイン国内の放射性廃棄物処分場における廃棄物受入基準^[13]

スペイン国内では、放射性廃棄物処分施設を規制する特定の法律は定められていな

いため、原子力安全審議会（Nuclear Safety Council）の定めた長期放射線許容基準（リスク： 10^{-6} /年、線量：0.1mSv/年）に基づいて、低レベル放射性廃棄物の受入れ濃度基準が下表のように設けられている。

表 6.(1)-2 スペインにおける低レベル放射性廃棄物受入れ濃度基準

	核種	濃度上限 (Bq/g)
レベル 1 (LLW) ○ 均質固化体（樹脂、スラッジ、エバポレータ濃縮物） ・ 機械的限界（浸漬前後の圧縮・引張強度） ○ 固体廃棄物（カートリッジフィルター、乾燥スラッジ、灰） ・ モルタル/コンクリートの厚さ ・ スリーブの機械的限界（圧縮強度） ○ 不均質廃棄物 ・ 圧縮可能な廃棄物：分離プロセス ・ 非圧縮性廃棄物：間隙充填	H-3	7.40×10^3
	C-14	3.70×10^3
	Co-60	3.70×10^3
	Ni-59	3.70×10^3
	Ni-63	3.70×10^3
	Sr-90	3.70×10^3
	Nb-94	1.20×10^2
	Tc-99	1.00×10^3
	I-129	4.60×10^1
	Cs-137	3.70×10^3
	全 β ・ γ 核種	3.70×10^4
	全 α 核種	1.85×10^2
レベル 2 (ILW) ○ 均質固化体（樹脂、スラッジ、エバポレータ濃縮物） ・ 機械的限界（浸漬、熱サイクル前後の圧縮・引張強度） ・ 浸出限界 ○ 固体廃棄物（カートリッジフィルター、乾燥スラッジ、灰） ・ モルタル/コンクリートブロック遮蔽の厚さ ・ 遮蔽の機械的限界（圧縮強度）及び熱サイクル ・ 拡散限界 ○ 不均質廃棄物 ・ 圧縮可能な廃棄物：製作を回避 ・ 非圧縮性廃棄物：製作を回避	H-3	1.00×10^6
	C-14	2.00×10^5
	Co-60	5.00×10^7
	Ni-59	6.30×10^4
	Ni-63	1.20×10^7
	Sr-90	9.10×10^4
	Nb-94	1.20×10^2
	Tc-99	1.00×10^3
	I-129	4.60×10^1
	Cs-137	3.30×10^5
全 α 核種	3.70×10^3	
・ 施設全体の α 核種の平均濃度は 370 Bq/g 以下でなければならない ・ セルの上層部にはレベル 1 廃棄物を設置しなければならない		

(2) エルカブルル処分場

① 概要^{[2][4][5][6][7][13]}

エルカブルル処分場は、スペイン南部アンダルシア地方コルドバの西北約 60km にあるシェラアルバナ丘陵地帯の麓にある。スペイン最初の低中レベル放射性廃棄物 (LILW) 処分場として 1992 年 10 月に操業を開始した。敷地総面積約 1,100 万 m² で、このうち約 20 万 m² を処分場としている。

その後、同処分場の南東エリアに、LILW 処分場とは別に、極低レベル放射性廃棄物 (VLLW) 専用の処分場の必要性が認められ、2003 年 1 月の自治体の計画認可、2005 年 12 月の環境評価の承認、2006 年 2 月の建設認可され、13 万 m³ の容量をもつ VLLW 処分施設を建設し、2008 年 10 月に操業開始した。



(1) VLLW 処分エリア



(2) LILW 処分エリア



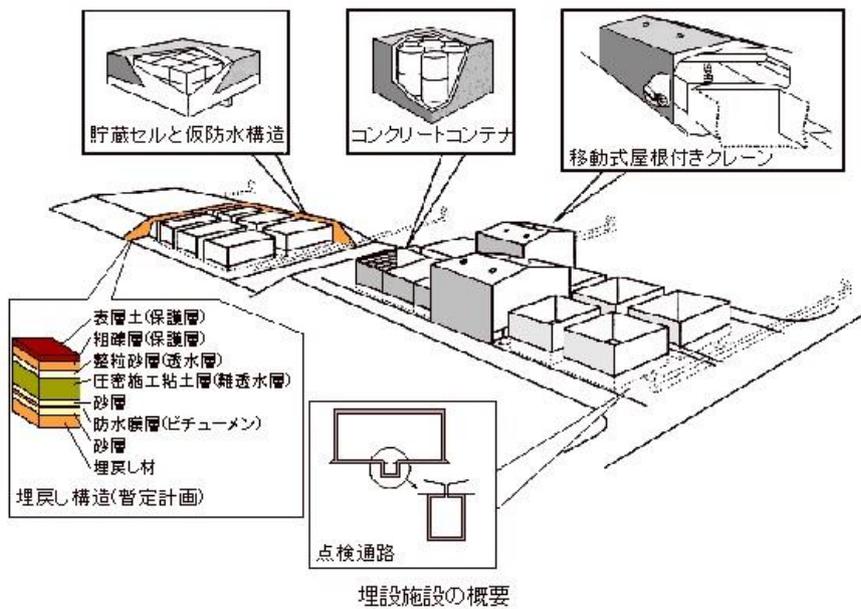
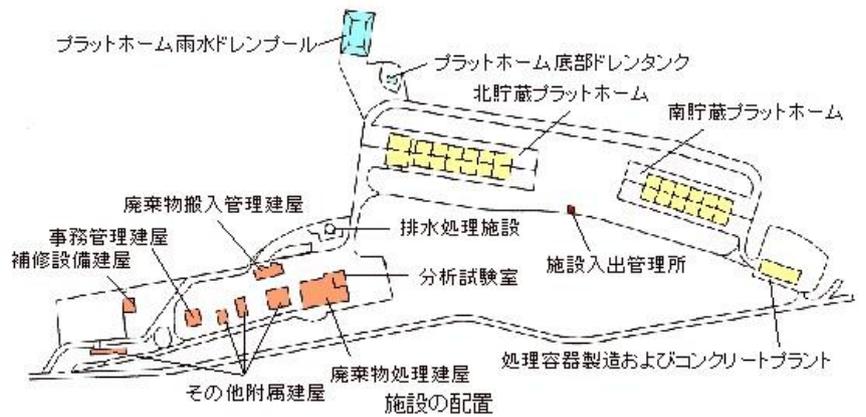
(3) LILW 処分エリア



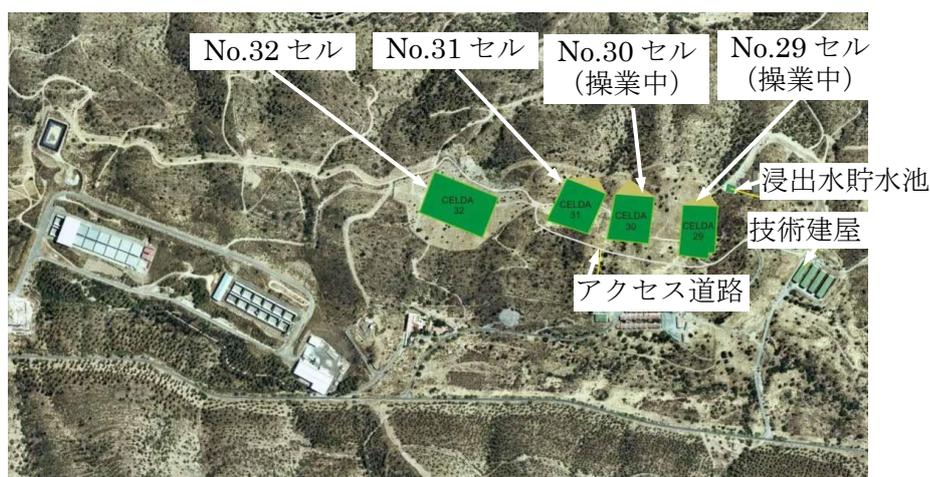
(4) 建屋エリア



(1) エルカブリル処分場全景



(5) エルカブリル処分場 (LILW) の施設配置図



(6) エルカブリル処分場 (VLLW) の施設配置図

図 6.(2)-1 エルカブリル処分場写真及び施設配置図

② 操業開始^{[2][4]}

1992 年 10 月 (LILW 処分場)

2008 年 10 月 (VLLW 処分場操業)

③ 受入廃棄物^{[4][5][8][9][10]}

スペイン国内 10 原子力発電所、原子燃料施設、CIEMAT (エネルギー・環境技術研究センター)、研究機関及び医療機関等から発生する低中レベル放射性廃棄物

(LILW) 及び極低レベル放射性廃棄物 (VLLW) を受け入れている。VLLW は、放射性のスクラップ及びがれきなどの固体廃棄物であり、そのほとんどは、原子力発電所の解体に伴い発生するものであり、200ℓドラム缶、大型バッグ及び 1.3m³金属容器に収納されたものを受け入れる。VLLW の放射能含有量は低く、管理のための要求は厳格ではない。

なお、低中レベル放射性廃棄物 (LILW) は、発生者が処理した上で本処分場に処分される。ただし、原子力発電所、CIEMAT 等大規模施設における圧縮性廃棄物については、エルカブリルの高圧圧縮処理施設で処理される。

エルカブリル処分場の受入総放射エネルギーは表 6.(2)-1 のとおりであり、そのうち VLLW 処分場の受入総放射エネルギーは、エルカブリル処分場全体の受入総放射エネルギーの 1% 以下に制限される。

表 6.(2)-1 エルカブリル処分場の受入総放射エネルギー

核種	総放射エネルギー (Bq)
H-3	2.00 × 10 ¹⁴
C-14	2.00 × 10 ¹³
Ni-59	2.00 × 10 ¹⁴

Ni-63	2.00×10^{15}
Co-60	2.00×10^{16}
Sr-90	2.00×10^{15}
Nb-94	1.00×10^{13}
Tc-99	3.20×10^{12}
I-129	1.50×10^{11}
Cs-137	3.70×10^{15}
Pu-241	1.15×10^{14}
全 α 核種	2.70×10^{11}

④ 処分容量^{[6][9]}

エルカブリル処分場の処分容量は約 4.5 万 m³ であり、このうち 53% が 2006 年夏までに使用されている。その後、2008 年 10 月から、12 万 m³ の容量をもつ極低レベル放射性廃棄物 (VLLW) 処分施設が操業した。

⑤ 処分施設の構造^{[5][6][8][10][11][12]}

[LILW 処分エリア]

LILW 処分エリアの処分概念は、コンクリート型の構造セルからなる多重バリア浅地中処分埋設施設で、フランス方式を参考として廃棄物の再取り出しを可能なものとしている。環境と廃棄物の間には、以下の 3 つのバリアがある。

- i. 廃棄物を充填した 200 リットルドラム缶を、立方形のコンクリート製コンテナ (2.25m×2.25m×2.20m) に 3 行 3 列 2 段 (ドラム缶 18 本) に収納し、ドラム缶の空隙にモルタルを注入し固化する (図 6.(2)-2 参照)。これが 1 次バリアとなる。
- ii. 2 次バリアは、i. で製作したコンクリート製コンテナに収納した廃棄物を定置するための貯蔵セルである。貯蔵セル内にはこのコンテナ 320 個が定置される。
- iii. 3 次バリアは、貯蔵セルが ii. で定置したコンテナ廃棄物で満たされた後、コンテナ廃棄物の隙間を充填する砂利、及びその後貯蔵セル上部に設置するスラブ、並びに塗布する非透水性のペイント、その後覆う非透水性及び透水性の土である。また、エルカブリル処分場が位置する地域の地質も 3 次バリアの一つであり、この地域はエルカブリル層として知られ、主に片麻岩と雲母層から構成される丘陵地である。

LILW 処分エリアは南北 2 つのプラットフォーム上に設置された計 28 基の強化コンクリート製貯蔵セル (各 24×19×10m) で構成されている。セルは南プラットフォームに 12 基、北プラットフォームに 16 基で、各プラットフォームは浸水対策が施され、底部

の水を雨水プールに集めるネットワークが設備されている。

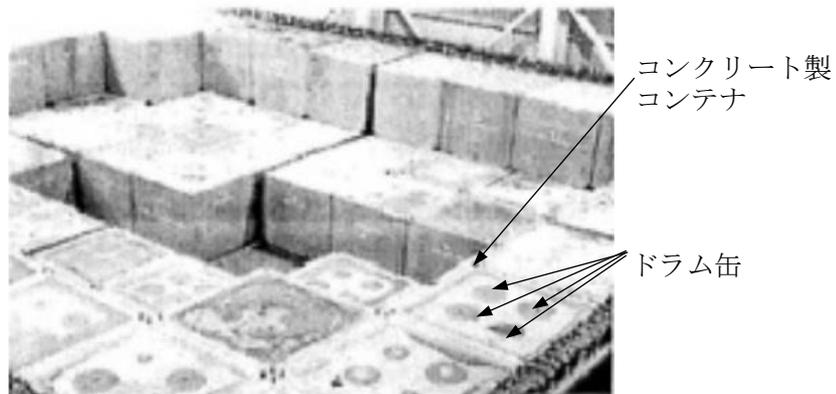


図 6.(2)-2 LILW コンクリート製コンテナ

[VLLW 処分エリア]

i. 設計方針と基準

設計では、以下の基本的な目的が考慮されている。

- ・ 操業中及び閉鎖後に亘り、公衆、作業員及び環境に対する放射線への防護を保障する。
- ・ 廃棄物、施設、作業員及び環境に関して、徹底的な追跡可能な書類を通してサイトの管理と監視を保障する。

上記の目的を達成するために適用された設計及び技術仕様は以下のとおり。

- ・ 放射性核種の移動を妨げるための分離バリアの使用
- ・ 廃棄物パッケージ及びセルの放射能制限を設けること
- ・ 最大 60 年の監視期間
- ・ 廃棄物に接触する可能性のある水を管理する浸出水管理ネットワークシステムの設置
- ・ 潜在的に汚染された浸出水の量を最小にするために、処分セルを利用する場合には、簡易シェルターの下で廃棄物の定置が行われること
- ・ 廃棄物の積み上げには処分状態が安定で、最終カバーを支持するのに十分な負荷特性を示す

VLLW 処分場は既設の LILW 処分場と同じ基本的に安全基準を満たすが、設計は、放射能レベルと関連付けたリスクに調和した非放射性の有害廃棄物の処分場を規制している規則に基づいている。処分施設の具体的な設計は、原子力安全評議会 (CSN) によって評価された「有害廃棄物の排除に関する欧州指令 (European Directive for elimination of dangerous waste)」、及びスペインの法律に基づき作成された「極低レベル放射性廃棄物貯蔵のための施設の基準」に基づいている。

ii. 処分場の特徴

VLLW 処分のために、処分セル及び処理建屋の 2 施設が新設された。

- a) VLLW 処分は 4 つのセル（セル No.29～32）に分けられ、2008 年 10 月より操業され、現在までに、2 つのセルが建設された。残りのセルは放射性廃棄物管理に必要なおよそ 30 年の期間を通じて建設される。

VLLW 処分場の建設状況を図 6.(2)-3、断面図を図 6.(2)-4、及びバリア構成の断面を図 6.(2)-5 に示す。図 6.(2)-3 及び図 6.(2)-4 に示すとおり、本処分場は山間部の一部を平坦に造成した後掘下げる、掘下げ型のトレンチである。

掘削後、天然土壌層の上部に底部バリアを設置する。底部バリアは、地下排水のための砕石層（図 6.(2)-3 写真(3)）、不透水層として厚さ 1m の粘土層、厚さ 3cm のナトリウムベントナイトで埋め戻されたポリエチレン製ジオメンブレン層、厚さ 4mm の高密度ポリエチレン層（HDPE）、浸出水排水管が張り巡らされた砕石層で構成される（図 6.(2)-5 参照）。

底部バリアの上部には、中間バリアとしても一つの予備の砕石層が置かれ（内部は浸出水排水管を設けている）、システム性能のモニタリングを容易にする役割を担っている（図 6.(2)-5 参照）。

廃棄物を定置した後、廃棄物は土壌層で覆われ、その上部に HDPE 層と砕石排水層及び現地土壌から成り立つキャップ部のバリアが設けられ、最上部は表面土壌層で覆われる（図 6.(2)-5 参照）。

シェルター内の処分セルの状況を図 6.(2)-7 に示す。図 6.(2)-7 に示すとおり、廃棄物は金属製の容器又はフレキシブルコンテナに収納したものを受け入れ、雨水浸入防止用テント内で定置作業を実施している。また、雨水浸入防止用テントは、膜構造のもので室内は天井に照明器具を設けている。

- b) 処分セルの建設と併せて処理建屋（長さ 50.4m、幅 12.4m、高さ 8.5m）が作られた。この建屋の機能は、廃棄物の受入と積み降ろし、確認と管理、廃棄物の一時的な貯蔵、廃棄物の処理または最終処分の分類、モルタル添加による廃棄物の安定化等である。



(1) 掘削



(2) 準備作業／サブドレン設置



(3) 砕石層、浸出水排水管設置



(4) 粘土層及びベントナイトバリア



(5) HDPE フィルム、
ジオテキスタイル及び砕石層



(6) 砕石排水層、底部及び法面

図 6.(2)-3 VLLW 処分場の建設状況写真

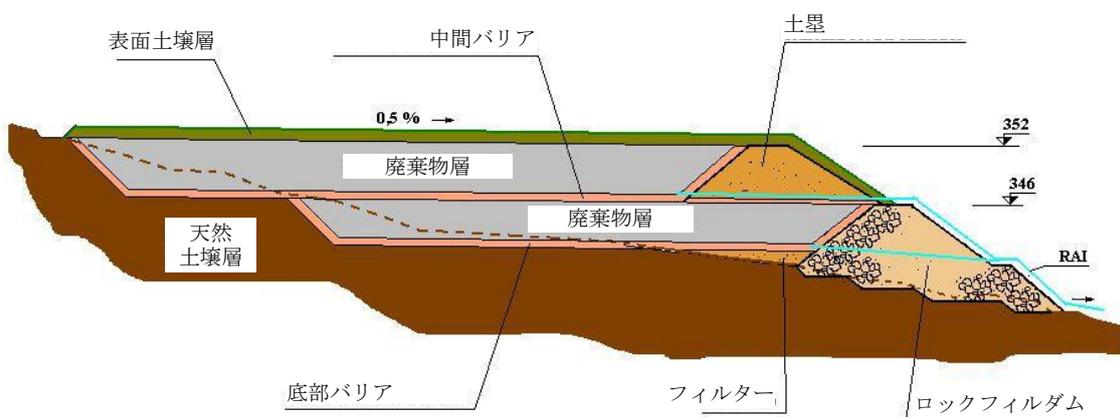


図 6.(2)-4 VLLW 処分場の断面図

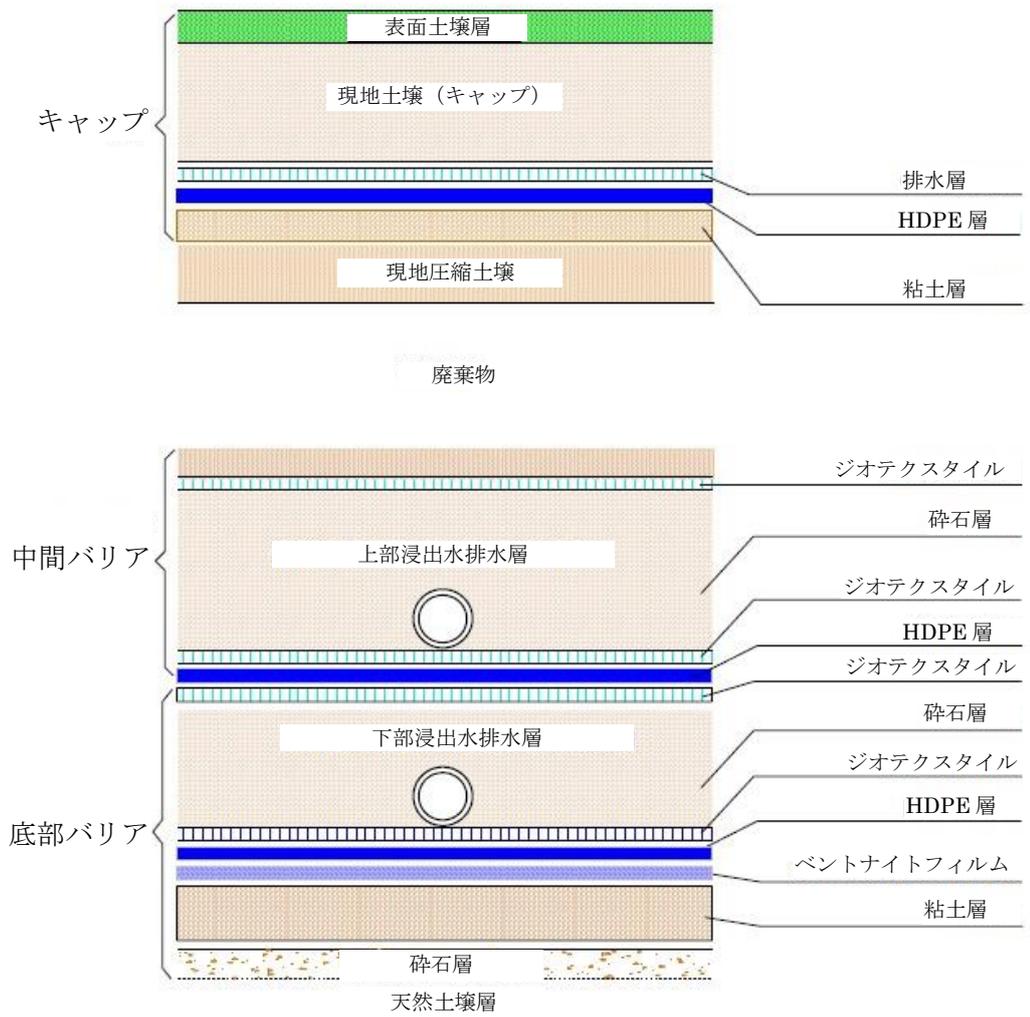


図 6.(2)-5 VLLW 処分場のバリア構成

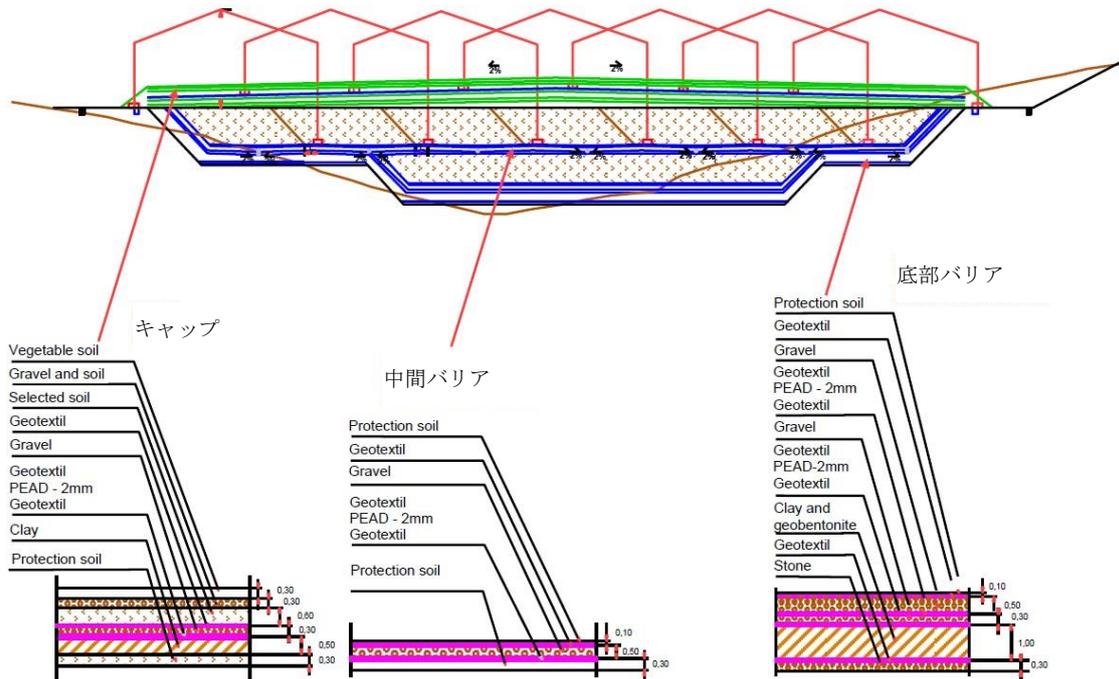


図 6.(2)-6 VLLW 処分場の浸透水対策



(1) VLLW 処分場全景



(2) VLLW 処分場シェルター内



(3) VLLW 処分場シェルター内



(4) VLLW 処分場シェルター内



(5) VLLW 処分場シェルター内

図 6.(2)-7 VLLW 処分場の内部写真

⑥ VLLW 処分場の安全評価

安全評価の方法は、LILW のための既存の処分施設に採用された安全アプローチと整合性が取られている。評価では、放射線上の基準、全放射能インベントリ、監視期間、サイト環境あるいは決定グループの定義に対して、両者の処分施設に共通のデータを利用している。

採用された安全要求事項は、国の規定する要求事項ともに、国際原子力機関 (IAEA) と国際放射線防護委員会 (ICRP) のような国際組織の最新のガイドと勧告に従っている。また、スペインの CSN によって規定された被ばく最大線量は 5mSv/y 、公衆のための線量条件は、標準シナリオで 0.1mSv/y である。

安全解析では、標準シナリオのほか、発生確率の非常に低い処分施設の侵入シナリオについても考慮されている。水移動シナリオでは、自然及び人工バリアの挙動に関して非常に控えめな仮定に従って、標準シナリオと変動シナリオの両ケースで解析で解析された。また、被ばく評価の対象グループは施設近くで生活すると仮定された。また、空気移動シナリオは、施設の操業段階、事故火災と処分ユニット落下シナリオのほか、長期間の不注意な人間侵入シナリオを含んでいる。

実施された安全評価によって、処分のための廃棄物放射能の受入れ基準を決めるほか、人間の健康と環境の防護の受け入れられるレベルが現在も将来ともに達成されることが実証される。

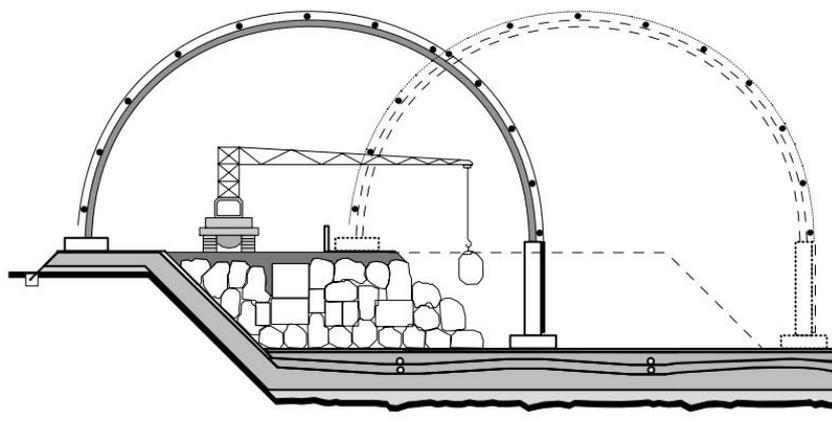
処分施設の長期間の安全性能は、処分セルの中の全放射能が LILW 処分のために設けられたインベントリの 1%以下と想定して、受入れ基準及び標準シナリオの解析と侵入事象を考慮に入れて評価されている。

⑦ 廃棄物埋設状況 (VLLW) [6]



(1) 廃棄物定置状況

(2) 覆土状況



(3) 廃棄物定置方法

図 6.(2)-6

VLLW 処分場廃棄物の定置状況

参考文献（スペイン）

1. ENRESA ホームページ Creation of ENRESA
2. RANDEC ニュース 2010 No.83
3. COMMUNICATION WITH PUBLIC AT A REPOSITORY SITE (ENRESA September 2009)
4. 原環センタ トピックス 1993.12.No.28
5. ENRESA ホームページ El Cabril Disposal Facility
6. Very Low Activity Waste Disposal Facility Recently Commissioned as an Extension of El Cabril LILW Disposal Facility in Spain - 9014
7. 原環センタ：1998年版放射性廃棄物データブック
8. 研究施設等廃棄物埋設事業計画策定のための受入要件等に関する調査 日本原子力研究開発機構
9. 原環センターライブラリー 各国における低中レベル放射性廃棄物対策の状況
10. Safety Assessment of the New Very Low-Level Waste Disposal Installation at El Cabril, Spain-9042
11. OPERATIONAL EXPERIENCES OF EL CABRIL (ENRESA October 2011)
12. LILW ACCEPTANCE PROCEDURES IN SPAIN: DISTRIBUTION OF RESPONSIBILITIES
13. DISPOSAL CENTRE OF EL CABRIL (enresa October, 2017)

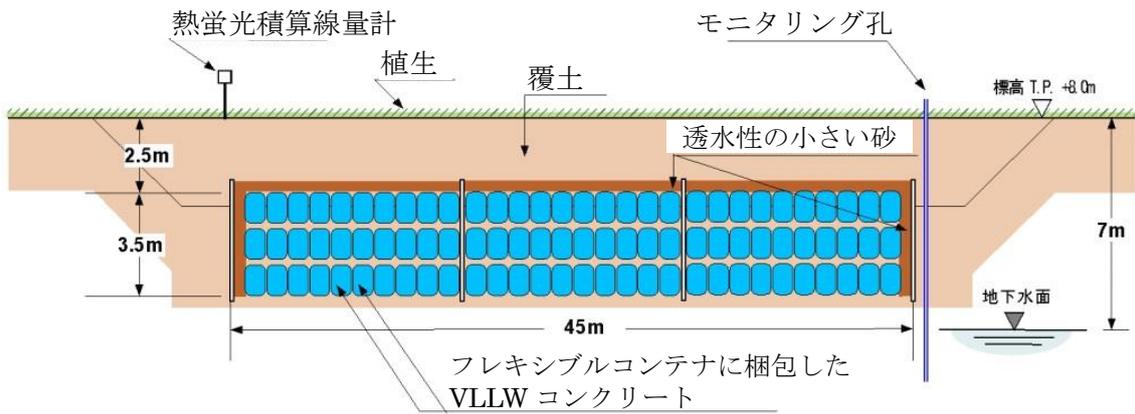
7. 総括

2019年4月現在、国内の原子力発電所のうち廃止措置中の発電所は11箇所^{※1}である。また、四国電力は2018年10月10日に伊方原子力発電所2号機、関西電力は2018年11月22日に大飯原子力発電所1,2号機の廃止措置計画認可申請書を原子力規制委員会に提出した。さらに、東北電力は2018年10月25日に女川原子力発電所1号機の廃止を表明しており、今後も廃止措置を計画する発電所が増加する見込みである。

発電所の廃止措置においては、低レベル放射性廃棄物が大量に発生するため、放射能レベルの区分に応じた埋設施設を建設する必要がある。国内の低レベル放射性廃棄物は、放射能レベルの高い方から、「放射能レベルの比較的高いもの（L1）」、「放射能レベルの比較的低いもの（L2）」及び「放射能レベルの極めて低いもの（L3 [VLLW]）」に分類されている。

原子力発電所の廃止措置を円滑に進めるためには、早期に低レベル放射性廃棄物処分施設を建設する必要があり、特に最も物量が多く、かつ廃止措置の初期段階で発生するVLLW相当の処分施設の早期建設が必須である。国内においては、日本原子力発電が東海発電所で発生したVLLWの処分施設をサイト内に建設するために事業許可の申請（2015年7月16日）を行っており、現在「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（第二種埋設許可基準規則）」の適合性について、原子力規制庁の審査を受けている段階である。審査の過程において原子力規制庁より、第二種埋設許可基準規則の第六条に基づき、外部事象（自然事象及び人為事象）による衝撃から埋設施設の「移行抑制機能」及び「遮蔽機能」の損傷防止対策を要求されている。このため、日本原子力研究開発機構が実施中の「VLLWの簡易埋設処分に係る安全性実証試験」において1995年に建設し、1997年に保全段階に移行した、VLLWトレンチ施設と同様の構造を持つ従来型の素掘りトレンチ（図7-1参照）では、第二種埋設許可基準規則に適合できない可能性がある。このため、今後国内に建設が想定されるあらゆる構造の埋設施設の検討に資するために、先行する諸外国におけるVLLW処分施設の構造を調査した。諸外国の調査結果を以下のとおりまとめた。

※1：東海、敦賀1号（日本原子力発電）、玄海1号（九州電力）、浜岡1,2号（中部電力）、美浜1,2号（関西電力）、島根1号（中国電力）、伊方1号（四国電力）、ふげん、もんじゅ（日本原子力研究開発機構）



(1) VLLW 埋設施設構造 (断面図)



(2) 埋設施設全景

(3) 中間覆土施工 (埋設段階)

図 7-1 「VLLW の簡易埋設処分に係る安全性実証試験」における VLLW 埋設施設

(1) 受入廃棄物

諸外国の VLLW 処分場で受入れている廃棄物について調査した結果を表 7.(1)-1 に示す。

- ・ アメリカの処分場で受け入れている廃棄物の発生箇所については、原子力発電所のみならず医療施設、研究施設、軍事施設なども含まれている。受入対象廃棄物は金属、コンクリートに加えて防護服・フィルター等の可燃物、廃樹脂、鉛・PCB 等の有害物、医療廃棄物やウラン廃棄物も対象とされており、廃棄物の収納方法も放射能レベル・廃棄物の性状に応じてドラム缶、コンクリート製円筒容器、コンテナ、機器一体、容器に収納しないなどとしている。なお、クライブ処分場以外では VLLW のみではなく、日本の L2 に相当する廃棄物も受け入れ混合埋設を行っている。
- ・ フランス及びスペインの処分場で受入れている廃棄物の発生箇所については、燃料製造施設を含む原子力施設、医療施設、研究施設である。受入対象廃棄物は、主に金属、がれき等で、フランスではそれに加えてプラスチックであり、廃棄物の荷姿は、ドラム缶、コンテナ、フレコン、大型機器一体とされている。
- ・ スウェーデンは、原子力発電所内に VLLW 処分場を建設し、当該原子力発電所で発生した廃棄物のみ取り扱っており、日本原子力発電の東海 VLLW 処分施設と同様の方式である。受入対象廃棄物は、金属、樹脂、及び防護服、紙、プラスチック等の可燃物であり、廃棄物の荷姿は、ドラム缶、コンテナ、コンクリート容器の他に、圧縮廃棄物についてはストレッチフィルム梱包である。
- ・ イギリスの処分場は、VLLW の他に日本の L2 相当の廃棄物を受入れ、混合埋設を行っている。受入れている廃棄物の発生箇所については、原子力施設、医療施設、研究施設、軍事施設、非原子力産業である。受入対象廃棄物は、放射性機器、土壌、がれき、及び紙、プラスチック、防護服等の可燃物であり、廃棄物の荷姿はコンテナである。
- ・ 日本の VLLW 処分場で受け入れ可能な廃棄物は、「核燃料物質又は核燃料物質によつて汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則（第二種埋設事業規則）」第一条の二第 2 項七により、コンクリート、金属及びそれに類するものとされおり、諸外国の VLLW 処分場と比べて取り扱える廃棄物が限定されているのが特徴である。

表 7.(1)-1 諸外国の処分場における受入廃棄物及び荷姿

国	処分場	受入廃棄物	荷姿
アメリカ	リッチランド (ClassA～C [VLLW～LLW])	原子力発電所、医療施設、研究施設 (放射性機器、大型機器、防護服、医療廃棄物、ラジウム・ベリリウム及びその他密封線源、混合廃棄物等)	コンテナ、大型機器一体、コンクリート容器
	バーンウェル (ClassA～C [VLLW～LLW])	原子力発電所、医療施設、研究施設 (放射性機器、大型機器、樹脂等)	コンテナ、コンクリート容器
	クライブ (ClassA [VLLW] 専用)	原子力発電所、医療施設、研究施設、州・連邦政府機関、ウラン製錬施設、DOE 施設 (放射性機器、大型機器、鉛、フィルター、樹脂、コンクリート、土壌、がれき、スラッジ、防護服、液体廃棄物、水銀、混合廃棄物、PCB、ウラン鉱さい、ウラン廃棄物等)	容器なし、コンクリート容器、大型機器一体
	WCS テキサス (ClassA～C [VLLW～LLW])	原子力発電所、医療施設、研究施設、DOE 施設 (LLW、混合廃棄物、ウラン廃棄物)	大型機器一体、コンクリート容器
フランス	モルヴィリエ (VLLW 専用)	原子力施設、医療施設、研究施設 (金属、土壌、がれき、プラスチック等)	ドラム缶、コンテナ、フレコン、大型機器一体
イギリス	ドリッグ (VLLW～LLW)	原子力施設、医療施設、研究施設、軍事施設、非原子力産業 (放射性機器、土壌、がれき、紙、プラスチック、防護服等)	コンテナ
スウェーデン	フォルスマルク (VLLW 専用)	フォルスマルク原子力発電所 (金属、樹脂、防護服、紙、プラスチック等)	ドラム缶、コンテナ、コンクリート容器、ストレッチフィルム梱包 (圧縮廃棄物)
	オスカーシャム (VLLW 専用)	オスカーシャム原子力発電所 (金属、樹脂、防護服、紙、プラスチック等)	
	リングハルス (VLLW 専用)	リングハルス原子力発電所 (金属、樹脂、防護服、紙、プラスチック、スラッジ等)	

スペイン	エルカブリル (VLLW 専用)	原子力施設、医療施設、研究施設 (金属、がれき等)	ドラム缶、コンテナ、フレコン
日本 (参考)	VLLW 埋設安全性 実証試験施設	動力試験炉 JPDR (コンクリート)	フレコン、プラスチックシート
	東海 (申請中) (VLLW 専用)	東海発電所 (金属、コンクリート)	鉄箱、フレコン、プラスチックシート

(凡例) ■ : VLLW 専用処分場

(2) 総放射エネルギー (VLLW 専用施設抜粋)

諸外国における VLLW 専用処分場の総放射エネルギーについて調査を行った結果を、表 7.(2)-1 に示す。各処分場の受入れ総放射エネルギーは、集中処分形態を採るアメリカ、フランス、スペインでは $10^{13} \sim 10^{14} \text{Bq}$ であるのに対して、サイト処分形態を採るスウェーデンでは $10^{11} \sim 10^{12} \text{Bq}$ である。日本原子力発電が申請中の東海 VLLW 埋設施設の総放射エネルギーは、同じサイト処分形態を採るスウェーデンと同程度である。

なお、エルカブリル処分場は、低中レベル放射性廃棄物 (LILW) 及び極低レベル放射性廃棄物 (VLLW) を処分する施設を有しており、受け入れられる総放射エネルギーは施設全体で約 $2.8 \times 10^{16} \text{Bq}$ で、そのうち VLLW はその 1% 以下に制限されるため約 $2.8 \times 10^{14} \text{Bq}$ とした。

表 7.(2)-1 諸外国における VLLW 専用処分場の総放射エネルギー

国	処分場	処分形態	総放射エネルギー (Bq)
アメリカ	クライブ (Class A West 施設)	集中処分	約 7.4×10^{14}
フランス	モルヴィリエ	集中処分	約 1.0×10^{13}
スペイン	エルカブリル	集中処分	約 2.8×10^{14}
スウェーデン	フォルスマルク	サイト処分	約 2.0×10^{11}
	オスカーシャム	サイト処分	約 2.0×10^{11}
	リングハルス	サイト処分	約 1.1×10^{12}
日本 (参考)	東海 (申請中)	サイト処分	約 1.7×10^{12}

(3) 埋設施設の構造 (VLLW 専用施設抜粋)

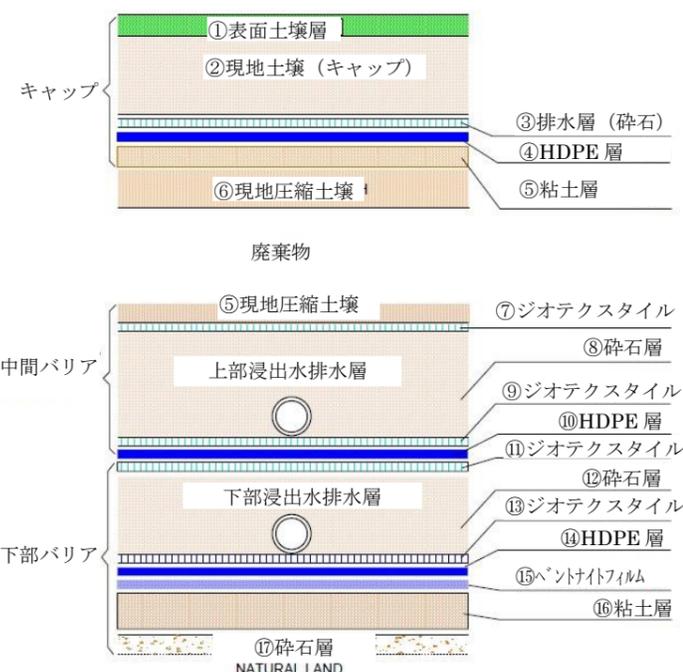
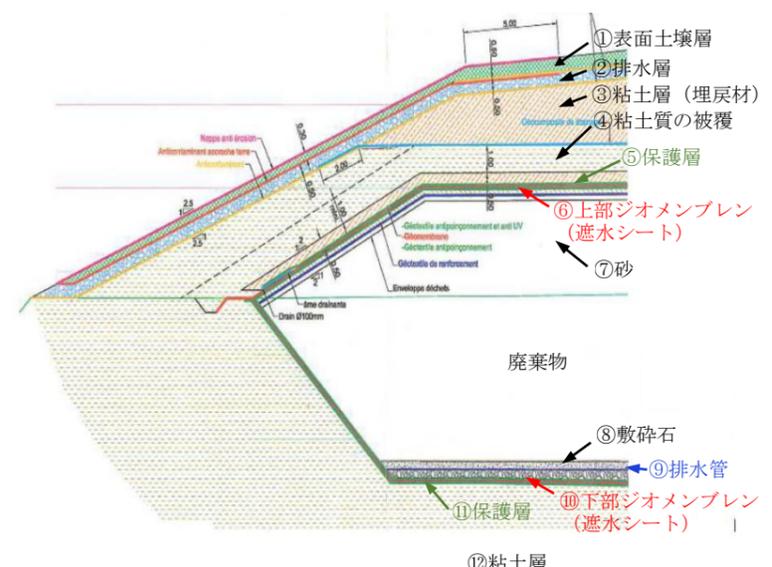
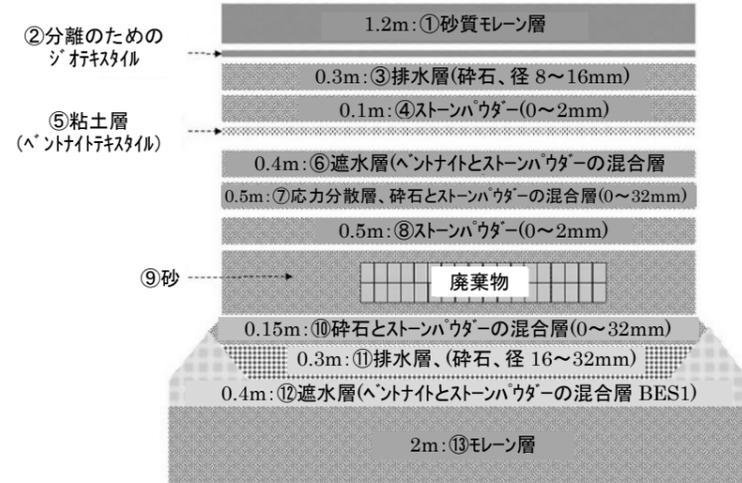
諸外国における VLLW 専用処分場の構造について調査した結果を、表 7.(3)-1 に受入対象廃棄物、総放射エネルギー及び地下水位置等の情報とともにまとめた。

- ・ スペインのエルカブリル処分場は、フランスのモルヴィリエ処分場を基に設計されたもので、放射能レベルと関連付けたリスクに調和した非放射性的有害廃棄物の処分場を規制している規則に基づいて設計されており、放射性廃棄物と

有害廃棄物の両方を埋設することを可能としている。このため、埋設施設の覆土は、粘土層及び高密度ポリエチレンによる不透水層（HDPE層）で構成され、浸透水の浸入を防いでいる。モルヴィリエ処分場の場合、粘土層及びHDPE層で構成された閉じ込め機能を、風化（霜、風）、動物及び侵食から保護するために、粘土層及びHDPE層の上部に厚さ約1～5mの粘土層で覆う設計としている。最上部は、厚さ約30cmの植生された表面土壌層で覆う。また、底部については、廃棄物からの発生水及び万が一浸入した場合の浸透水を、粘土層、HDPE層及び排水管で構成した排水層により、埋設施設の下層への浸透を防ぐ設計としている。

- スウェーデンのVLLW処分場は、他国のような掘削型のトレンチではなく、地表面直下に排水層を設置し、その上に廃棄物を定置し盛土を施す盛土型の処分施設である。なお、オスカーシャム処分場は岩盤が浅いため、トレンチ底部にコンクリート底盤を設置する盛土型処分施設である。埋設施設の覆土に対する法令要求は 10^{-10}m/s 以下とされているため、遮水層としてベントナイトテキスタイル及びベントナイトとストーンパウダーの混合層の2種類を組み合わせる設計としている。物理的な影響による損傷を防ぎ、木の根の侵入から遮水層を保護するために、最上部には砂質モレーン層を設ける。また、底部については、廃棄物からの発生水及び万が一浸入した場合の浸透水を、ベントナイトとストーンパウダーで構成された遮水層及び碎石で構成された排水層により、埋設施設の下層への浸透を防ぐ設計としている。
- アメリカのクライブ処分場は、ウラン及びトリウム鉱さい、ウラン廃棄物を取り扱っていることもあり、覆土の最下層には厚さ約0.6mの低密度粘土層であるラドンバリア層を設けている。これは、Environmental Protection Agency（米国環境保護庁）のラドンの放出率の基準（ $0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$ を超えないこと）に従うために設置されたものである。最終覆土の最上面には、覆土の侵食を防止するために直径3.2cm以上の小石を1.5フィート（約46cm）設置している。最終覆土の上面の勾配は4%、側面の法面勾配は約5:1に施工される。また、底部にはボトムライナーとして2フィート（約0.6m）の厚さの低密度粘土層（透水係数： $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ ）が設置されている。

表 7.(3)-1 諸外国における VLLW 処分場の比較 (1 / 2)

	エルカブリル (スペイン)	モルヴィリエ (フランス)	フォルスマルク (スウェーデン)
実施主体	放射性廃棄物管理公社 (ENRESA) [国営]	放射性廃棄物管理機関 (ANDRA) [国営]	フォルスマルク発電会社 (FKA)
操業開始	2008年10月 [VLLW 専用施設]	2003年	1989年
受入対象廃棄物			
放射能レベル	<ul style="list-style-type: none"> ・VLLW (金属、がれき等) ・放射能濃度: 1~10 Bq/g ・総放射能: 2.8×10^{12} Bq 	<ul style="list-style-type: none"> ・VLLW (金属、がれき、土壌、プラスチック等) ・放射能濃度: 10 Bq/g 以下 ・総放射能: 1.0×10^{13} Bq 	<ul style="list-style-type: none"> ・VLLW (金属、樹脂、防護服、紙、プラスチック等) ・放射能濃度: 数 10 Bq/g 以下 ・総放射能: 2.0×10^{11} Bq
発生元	国内原子力発電所、原子燃料施設、研究機関及び医療機関等	国内原子力発電所、研究機関、医療機関及び工業施設等	フォルスマルク原子力発電所
荷姿	200ℓドラム缶、フレコン、1.3m ³ 金属容器	ドラム缶、コンテナ、フレコン、大型機器一体	ドラム缶 (イオン交換樹脂)、コンクリート容器/ISO コンテナ (金属/使用済部品)、ストレッチフィルム梱包 (圧縮廃棄物)
処分施設構造			
処分場型式	掘下げ+盛土型	掘下げ+盛土型	盛土型
覆土・底部	<p>・覆土: 廃棄物を定置した後、廃棄物は土壌層 (⑥) 及び粘土層 (⑤) で覆われ、その上部に HDPE 層 (④) と碎石の排水層 (③) 及び現地圧縮土壌 (②) から成り立つキャップ部のバリアが設けられ、最上部は表面土壌層 (①) で覆われる。</p> <p>キャップ</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 表面土壌層 ② 現地土壌 ③ 碎石層 (碎石による排水層) ④ HDPE 層 (高密度ポリエチレンによる不透水層) ⑤ 粘土層 (不透水層) ⑥ 現地圧縮土壌  <p>中間バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ⑦ ジオテクスタイル ⑧ 碎石層 ⑨ ジオテクスタイル ⑩ HDPE 層 ⑪ ジオテクスタイル ⑫ 碎石層 ⑬ ジオテクスタイル ⑭ HDPE 層 ⑮ ベントナイトフィルム ⑯ 粘土層 <p>下部バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ⑰ 碎石層 ⑱ 排水層 (碎石、径 16~32mm) ⑲ 粘土層 <p>NATURAL LAND</p>	<p>・覆土: 廃棄物を平均約 10 層定置した後、廃棄物の周囲の空隙を砂 (⑦) で充填し、廃棄物上部に同様の厚さ 2mm の HDPE (⑥ 上部ジオメンブレン) を取り付け、下部ジオメンブレン (⑩) に熱溶接し防水バリアを形成する。ジオメンブレンは完全防水性で、数 10 年間放射能の拡散及び外部水 (雨、湿潤) の浸水を防ぐよう設計されている。ジオメンブレン外周の”粘土質の被覆 (④)” は、浸透率 10^{-9} m/s 以下の非常に低い浸透性のものである。また、その上部の”粘土層埋戻材 (③)” は、処分セル掘削に伴い除去した粘土層で、最初の浸透率を回復させるために、厚さ 1~5m の層を機械的に成形して圧縮した層である。この”粘土層埋戻材”が、”ジオメンブレン”及び”粘土質の被覆”等で構成された閉じ込め機能を、風化 (霜、風)、動物及び侵食から守る役割を果たしている。最後に、厚さ約 30cm の植生された表層土 (①) で覆う。</p> 	<p>・覆土: 法令要求としては、覆土の透水係数が 10^{-10} m/s 以下、あるいは浸透量が 5 (ℓ/m²/year) が示されている。これはかなり低い透水係数であり、高密度ポリエチレンシート (HDPE) などで完全に覆うことが必要とされている。覆土構造は以下のとおり。</p> <p>廃棄物を砂 (⑨) で埋めた後、その上部にならし層として厚さ 0.5m のストーンパウダー (⑧ 粒径 0-2mm)、応力分散のために厚さ 0.5m の碎石とストーンパウダーの混合層 (⑦ 粒径 0-32mm) を設けている。排水層 (③) は粒径 8~16mm の碎石層であり、遮水層はベントナイトテキスタイル (⑤) 及びベントナイトとストーンパウダーの混合層 (⑥) の 2 種類が組み合わされている。最上部の砂質モレーン層 (①) は、機械的な影響による損傷を防ぎ、木の根の侵入から遮水層を保護する働きを有する。また、浸食の観点から、粘土分が 10%未満であるという利点を有する。</p> 

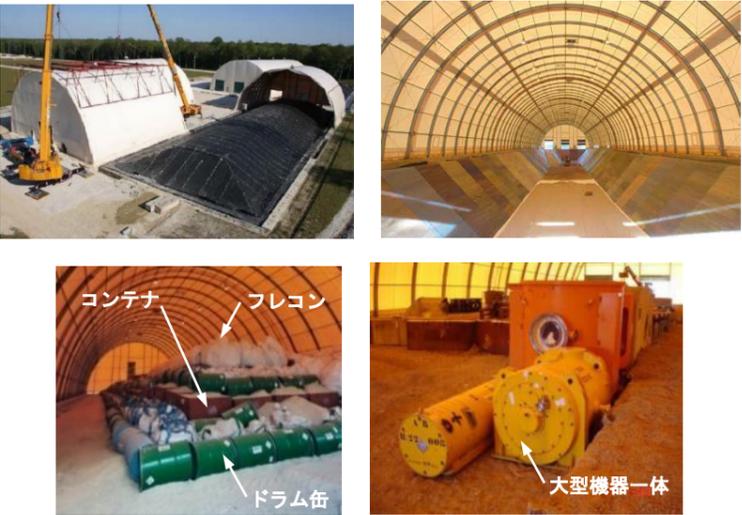
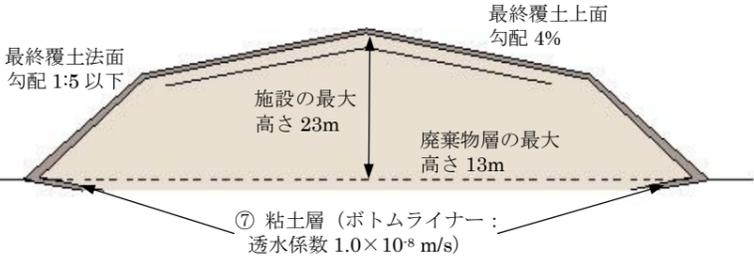
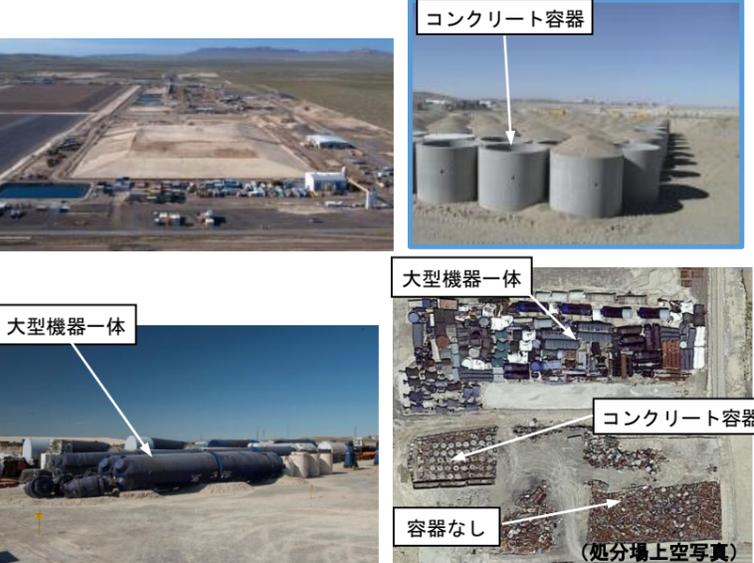
	<p>・底部：処分セル底部のバリアは、地下排水のための砕石層 (⑰)、不透水層として1m厚さの粘土層 (⑯)、ナトリウムベントナイトで埋め戻されたポリエチレン製ジオメンブレン層 (⑮)、高密度ポリエチレン層 (⑭HDPE)、浸出水回収パイプが張り巡らされた砕石層 (⑫) から構成される。また、さらにその上部に予備の中間バリアで構成されている。各層の詳細は以下のとおり。</p> <p>中間バリア</p> <ul style="list-style-type: none"> ⑦ ジオテクスタイル (濾過層) ⑧ 砕石層 (浸出水排水配管含む排水層) ⑨ ジオテクスタイル (濾過層) ⑩ HDPE層 (高密度ポリエチレンによる不透水層) ⑪ ジオテクスタイル (濾過層) ⑫ 砕石層 (浸出水排水配管含む排水層) ⑬ ジオテクスタイル (濾過層) ⑭ HDPE層 (高密度ポリエチレンによる不透水層) ⑮ ベントナイトフィルム (ナトリウムベントナイトによる不透水層) ⑯ 粘土層 (厚さ1mの粘土による不透水層) ⑰ 砕石層 (排水層) <p>下部バリア</p>	<p>・底部：厚さ15m~25mの低透水性の粘土層 (⑫) の地盤に設置され、粘土層を深さ約8m掘削する。粘土層の透水係数は非常に低く、10^{-9}m/s以下である。廃棄物を定置する前に、厚さ2mmの高密度ポリエチレン (HDPE) を処分セル底部 (⑩下部ジオメンブレン) 及び側部に取り付ける。下部ジオメンブレンの上 (廃棄物側) に敷砕石 (⑧) 及び排水管 (⑨) による集水機能を設けている。</p>	<p>・底部：底部の排水層は厚さ0.3mの砕石層 (⑪粒径8~16mm) で、その上部には排水層の保護のため厚さ0.15mの砕石とストーンパウダーの混合層 (⑩粒径0~32mm) を設けている。なお、砕石層の透水係数は10^{-2}m/s、砕石とストーンパウダーの混合層の透水係数は10^{-5}m/sである。</p> <p>遮水層は厚さ0.4mのベントナイトとストーンパウダーの混合層 (⑫) であり、覆土に比べるとやや簡略化した構造となっている。なお、遮水層などの透水性は、アイソトープメーター (Troxlner など) を用いて締固め度で管理される。</p>
写真			 <p>オスカーシャムの例 (オスカーシャムは岩盤が浅いため、トレンチ底部にコンクリート底盤を設置する構造である。)</p>
設計の考え方	<p>VLLW 処分場は既設の LILW 処分場と同じ基本的に安全基準を満たすが、設計は、放射能レベルと関連付けたリスクに調和した非放射性の有害廃棄物の処分場を規制している規則に基づいている。処分施設の具体的な設計は、「有害廃棄物の排除に関する欧州指令 (European Directive for elimination of dangerous waste)」とスペインの法律に基づき作成された「極低レベル放射性廃棄物貯蔵のための施設の基準」に基づいている。</p>	<p>トレンチ設計の基本原則は、非放射性の有害廃棄物処分施設に関する管理規則を遵守することになっている。この原則を適用することにより、放射性廃棄物と有害廃棄物の両方を埋設することを可能としている。</p>	<p>放射性廃棄物の管理及び処分については、主に原子力活動法 (SFS 1984 : 3) 及び令 (SFS 1984 : 14)、並びに放射線防護法 (SFS 1988 : 220) 及び令 (SFS 1988 : 293) の規定によって規制されている。</p>
地下水位	廃棄物底面より下部	廃棄物底面より下部	廃棄物底面より下部
雨水浸入防止	膜構造テント	膜構造テント	なし

表 7.(3)-1 諸外国における VLLW 処分場の比較 (2 / 2)

	クライブ (アメリカ)		
実施主体	エナジーソリューションズ		
操業開始	1998 年 (VLLW 受入許可取得)		
受入対象廃棄物			
放射能レベル	<ul style="list-style-type: none"> ・VLLW (放射性機器、大型機器、鉛、フィルター、樹脂、コンクリート、土壌、がれき、スラッジ、防護服、液体廃棄物、水銀、混合廃棄物、PCB、ウラン鉱さい、ウラン廃棄物等) ・総放射能量 : 7.4×10^{14} Bq 		
発生元	国内原子力発電所、原子燃料施設、研究機関及び医療機関、軍事施設等		
荷姿	容器なし、大型機器一体、コンクリート容器		
処分施設構造			
処分場型式	掘下げ+盛土型		
覆土・底部	<p>・覆土 : 覆土の最下層には厚さ 2 フィート (約 0.6m) の低密度粘土層 (透水係数 : 5.0×10^{-10} m/s 及び 1.0×10^{-8} m/s) であるラドンバリア層を設けている (⑤, ⑥)。これは、Environmental Protection Agency (米国環境保護庁) のラドンの放出率の基準 ($0.74 \text{Bq/m}^2/\text{s}$ 以下) に従うために設置されたものである。ラドンバリア層の上部には、砂及び砂利で構成された 2 層のフィルター層と、その間に設置する保護層が設置されている (②~④)。最終覆土の最上面には、覆土の侵食を防止するために直径 3.2cm 以上の小石を 1.5 フィート (約 46cm) 設置している (①)。最終覆土の上面の勾配は 4%、側面の法面勾配は約 5:1 に施工される。</p>  <p>① Φ3.2cm 以上の小石 (侵食を防ぐバリア)</p> <p>② 砂+砂利の層 (上部フィルター)</p> <p>③ 土層 (圧縮した土壌による保護)</p> <p>④ 砂と砂利の層 (下部フィルター : 透水係数 3.5cm/s 以上)</p> <p>⑤ 粘土層 (上部ラドンバリア層 : 透水係数 5.0×10^{-10} m/s)</p> <p>⑥ 粘土層 (下部ラドンバリア層 : 透水係数 1.0×10^{-8} m/s)</p>		

	<p>・底部：各セルの基礎は既存の地上レベルより下に設置され、その位置は地下水面の約 15～20 フィート（約 4.6～6.1m）上方である。基礎は標準的な管理で少なくとも 95%に締め固めた現地の粘土又は砂で構成されている。埋施設底部には、ボトムライナーとして 2 フィート（約 0.6m）の厚さの低密度粘土層（⑦ 透水係数：1.0×10^{-8} m/s）が設置されている。</p> 		
写真			
設計の考え方	<p>クライブ処分場ではウラン及びトリウム鉱さい、ウラン廃棄物を取り扱っていることもあり、覆土の最下層には厚さ約 0.6m の低密度粘土層であるラドンバリア層を設けている。これは、Environmental Protection Agency（米国環境保護庁）のラドンの放出率の基準（$0.74\text{Bq/m}^2/\text{s}$ を超えないこと）に従うために設置されたものである。</p>		
地下水位	廃棄物底面より下部（約 4.6～6.1m 下方）		
雨水浸入防止	なし		

(4) まとめ

諸外国の VLLW 処分場では、日本と異なり金属及びコンクリート廃棄物以外に、可燃物、有害物質やウラン廃棄物等も取り扱えるようにするために、法令上埋設施設の覆土及び底部には遮水層（粘土層や HDPE 層など）を設ける設計としているものと考えられる。

風化（霜、風）、動物及び侵食から埋設施設の移行抑制機能を保護するための対策として、覆土に粘土層を用いている。また、法面を含む覆土最上段には砕石や植生を施すなどの外部事象による影響対策を採用している。