

地層処分施設の  
設計・操業技術の最適化手法  
に関する研究

別 添

資 料 集



## 別添資料集の構成

資料 1	設計・操業技術の最適化手法に関する研究会の 委員構成と開催実績 .....	1
資料 2	最適化に係る考え方や評価項目等の整理に資する国際機関における検討事例 .....	5
資料 3	最適化に係る考え方や評価項目等の整理に資する主要国の技術検討事例 .....	17
資料 4	最適化アプローチの試行に用いた 本研究会で設定したレファレンス設計 .....	39
資料 5	最適化アプローチの試行に用いた 代替設計オプション案 .....	55



# 資料 1

## 設計・操業技術の最適化手法に関する研究会の 委員構成と開催実績

### 資料 1 の構成

1. 委員名簿
2. 研究会における検討の経緯

## 設計・操業技術の最適化手法に関する研究会

### 1. 委員名簿

(五十音順、敬称略)

委員	所属
井尻 裕二	大成建設株式会社 原子力本部
沖原 光信	清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部
志村 友行	株式会社大林組 原子力本部 原子力環境技術部
白瀬 光泰	大成建設株式会社 原子力本部 原子力環境技術部
神徳 敬	株式会社大林組 原子力本部 原子力環境技術部
須山 泰宏	鹿島建設株式会社 原子力部 企画室 処分プロジェクトマネジメントグループ
谷口 直樹	日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター 深地層研究部 堆積岩処分技術開発グループ
戸栗 智仁	清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部

(※所属は2020年8月段階)

#### アドバイザー

原子力発電環境整備機構 技術部

#### 事務局

原子力環境整備促進・資金管理センター 地層処分工学技術研究開発部 (五十音順)

江守 稔、川久保 政洋、小林 正人、玉井 宗孝、蓮井 昭則、深谷 正  
明、湊 康裕、山田 俊子

## 2. 研究会における検討の経緯

### ○予備会合（2020年7月30日）

- 研究会の設置について
- 本年度の検討作業手順について
- 諸外国の先行検討事例等の調査結果について
- 最適化に係る評価項目の体系化（案）とステップ②に向けた作業について
- その他（次回の開催予定など）

### ○第1回（2020年9月11日）

- 研究会（委員会）の構成について
- 本日の議論のポイントについて
- 最適化に係る評価項目（素案）のアップデート結果について
- 本研究会におけるリファレンス方法の設定について
- 次回委員会に向けた取組について
- その他（次回の開催予定など）

### ○第2回（2020年10月9日）

- 前回研究会の振り返りと示された意見への対応等について
- レファレンス方法に関する評価結果（事務局試行結果）について
- 代替設計オプション（横置き PEM 方式）に関する比較評価結果（事務局試行結果）について
- 次回研究会に向けた取組について
- その他（次回の開催予定など）

### ○第3回（2020年10月23日）

- 前回研究会の振り返りについて
- 最適化に係る評価項目一覧（案）のアップデートについて
- 各委員による評価の試行結果について（レファレンス方法の評価、代替設計オプションの比較評価）
- 次回研究会に向けた取組について
- その他（次回の開催予定など）

### ○第4回（2020年11月17日）

- 前回研究会の振り返りについて
- 事務局宿題について（最適化に係る評価項目一覧のアップデート、レファレンス方法に関する評価結果）
- 各委員への宿題につて（代替設計オプションの概要について各委員より報告）
- その他（次回の開催予定など）

○第5回（2020年12月23日）

- 前回研究会の振り返りについて
- 代替設計オプション案について（新たなオプション案の紹介を含めて各委員より報告）
- 研究会報告書の取りまとめ方針（構成・骨子）について
- その他（次回の開催予定など）

○第6回（2021年2月19日）

- 前回研究会の振り返りについて
- 代替設計オプション案の整理結果について（各委員より報告）
- 研究会報告書のドラフト版について
- その他（今後の予定など）



# 資料 2

## 最適化に係る考え方や評価項目等の整理に資する 国際機関における検討事例

### 資料 2 の構成

調査結果の要約 1 : 国際機関の取りまとめから窺える最適化の考え方など

調査結果の要約 2 : 国際機関の取りまとめから抽出した評価項目

詳細① : 国際放射線防護委員会(ICRP)

詳細② : 国際原子力機関(IAEA)

詳細③ : 経済協力開発機構／原子力機関(OECD/NEA)

放射性廃棄物管理委員会(RWMC)－セーフティケース統合グループ (IGSC)

備考 : 詳細①～③の原典資料の抜粋部分について、以下に留意されたい。

- ・ 赤アンダーライン部分 : 最適化の考え方などの重要なエッセンスと思われる箇所
- ・ 薄黄色ハッチング部分 : 最適化に係る評価項目

※本資料では、ICRP の出版物に関して、公益社団法人日本アイソトープ協会が下記 WEB サイトで公開している「ICRP 勧告 日本語版シリーズ」を参照させて頂いた。

<https://www.iriias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html>

## 調査結果の要約 1 : 国際機関の取りまとめから窺える最適化の考え方など

### ○主に『放射線防護』の観点から最適化の概念や方法論を解説

- 多様な価値観(評価項目)を体系化し、その相対的重要度(重み付け)を考慮【ICRP Pub.101b】
- 最適化プロセスは、定性的および定量的な判断が要求され、多様な側面が体系的に考慮される【ICRP Pub.101b】
- 最適化は様々な要因の相対的重要性についての判断が必要【IAEA SF-1】
- 最適化は構造化された方法で行われる 本質的には定性的であり、定量的解析によって裏付ける【IAEA SSR-5】

### ○最適化における『利用可能な最善技術(BAT)』や『ベスト・プラクティス(Best Practice)』の関係

- 処分場開発の様々な段階/レベルで利用可能な最善技術を適用することで最適化を支援【ICRP Pub.122】
- 最適化は、システムの防護能力を強化するとともに、その潜在的な影響（放射線影響およびその他の影響）を低減するための、利用可能な最善の技術を含めた防護対策オプションの反復的、系統的かつ透明性の高い評価として広義に理解されるべき【ICRP Pub.122】

### ○最適化における『安全評価』の役割

- 防護及び安全の最適化の一環として、安全評価を代替管理オプションに関する判断に役立てる【IAEA SSR-5,14】
- 安全評価による、代替的な廃棄物パッケージの設計および閉鎖手段のような種々の項目に関する比較評価によって、システムの最適化と施設設計を支援する【IAEA SSR-14】
- 最適化を目的として選択肢を比較する目的で実施される評価は、より現実的な想定に基づくべき【IAEA SSR-23】

### ○モニタリングプログラムの設計においても、費用と便益を考慮した最適化プロセスを適用すべき【IAEA SSR-31】

1

## 調査結果の要約 2 : 国際機関の取りまとめから抽出した評価項目等の分析・整理結果

### ○国際機関の取りまとめから抽出した最適化に係る評価項目

原典資料からの抜粋（分析・解釈・統合等を加味して表現の見直しや調整を施したもの）

- 費用
- 技術的実現可能性（構築の実現性）
- 放射性物質に伴う閉鎖前/閉鎖後長期の安全性（長期的な安全機能の維持を含む）
- 一般労働安全
- 不確実性（の管理）
- 規制要件への適合性
- 回収可能性（技術的実現性、回収の容易性）
- 掘削及び建設作業の廃棄物定置作業からの分離性
- 遠隔ハンドリング装置および遮へい設備の導入必要性の程度
- 放射線管理区域とそうでない区域の分離性（放射線管理区域における保守管理作業の最小化）
- 廃棄体を含む材料や設備の輸送・搬送効率
- 制度的管理に係る地下作業負荷（作業負荷、管理継続期間）
- 実証性（demonstrability）
- 操業の柔軟性（flexibility of operation）
- メンテナンス性（maintenance）
- 品質保証、モニタリング、状態把握/性能確認
- 予測性（predictability）
- 性能評価（performance assessments）
- 安全評価（safety assessments）
- 社会的受容性（public acceptance）
- 環境保全

2

## 詳細①：国際放射線防護委員会（ICRP）

### ICRP文書に関する分析・整理結果

- 原典資料① ICRP Pub.81 長寿命放射性固体廃棄物の処分に応用する放射線防護勧告
- 原典資料② ICRP Pub.82 長期放射線被ばく状況における公衆の防護 – 自然線源および長寿命放射性残渣による制御しうる放射線被ばくへの委員会の放射線防護体系の適用 –
- 原典資料③ ICRP Pub.101b 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価／放射線防護の最適化：プロセスの拡大
- 原典資料④ ICRP Pub.122 長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護

※本資料では、ICRPの出版物に関して、公益社団法人日本アイソトープ協会による「ICRP勧告 日本語版シリーズ」を参照させて頂いた。

<https://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html>

3

## ICRP文書に関する分析・整理結果

### (1) 最適化の考え方などに関する重要エッセンス

- 主に『放射線防護』の観点から最適化を解説
  - 多様な価値観(評価項目)を体系化し、その相対的重要度(重み付け)を考慮【Pub.101b】
  - 最適化プロセスは、定性的および定量的な判断が要求され、多様な側面が体系的に考慮される【Pub.101b】
- 最適化における『利用可能な最善技術(BAT)』や『ベスト・プラクティス(Best Practice)』の関係
  - 処分場開発の様々な段階/レベルで利用可能な最善技術を適用することで最適化を支援【Pub.122】
  - 最適化は、システムの防護能力を強化するとともに、その潜在的な影響（放射線影響およびその他の影響）を低減するための、利用可能な最善の技術を含めた防護対策オプションの反復的、系統的かつ透明性の高い評価として広義に理解されるべき【Pub.122】

### (2) 最適化に係る評価項目（被ばく評価に係る項目は安全評価の文脈で更に細分化できる）

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
Pub.101b本文より ●技術的実現可能性、●コスト、●社会的要因、 ●潜在的な悪いインパクト、●長期の有効性、 ●公衆又は作業者の懸念 Pub.101b代表的な属性に関する不完全なリストより ●管理能力（測定、健康監視等）、●持続性、 ●放射線以外の危険要因、●技術的実行可能性、 ●コスト、●不確実性、●規制上の拘束 Pub.122より ●回収可能性、●システムの建設・操業および閉鎖時における健全なマネジメント手法および工学的手法ならびに慣行	●技術的実現可能性 ●費用（コスト）【社会的要因の1つ】 ●放射性物質に伴う閉鎖前/閉鎖後長期の安全性（長期的な安全機能の維持を含む）【左記の「潜在的な悪いインパクト」、「長期の有効性」、「持続性」より】 ●品質保証、モニタリング/状態把握、性能確認【左記の「管理能力」、「システムの建設・操業および閉鎖時における健全なマネジメント手法および工学的手法ならびに慣行」より】 ●一般労働安全【左記の「放射線以外の危険要因」より】 ●不確実性（の管理） ●規制要件への適合性 ●回収可能性（技術的実現性、回収の容易性） 上記評価項目から示唆・想起される他の項目 ●環境保全

4

原典資料① ICRP Pub.81 長寿命放射性固体廃棄物の処分に適用する放射線防護勧告【下記抜粋の左側】

原典資料② ICRP Pub.82 長期放射線被ばく状況における公衆の防護 – 自然線源および長寿命放射性残渣による制御する放射線被ばくへの委員会の放射線防護体系の適用 – 【下記抜粋の右側】

3.2 防護の最適化

(32) 「防護の最適化は、線量を低減させるために合理的なすべてのことを行うことと広く解釈されている。(ICRP, 1997b, 17項)」「委員会の力点の多くは、防護の最適化を定性的に規定すること置かれてきた。(ICRP, 1997b, 37項)「…防護の最適化の概念の基本的な役割は、放射線被ばくの管理に責任のあるすべての人に、「自分はこれからの放射線量を減らすために合理的に実行できるすべてのことをしてきたらどうか」と絶えず自問するような思考状態を生じさせることである。(ICRP, 1989, 18項) このように、最適化に関する委員会の方策は判断によるところが多く、その本質はPublication60 (ICRP, 1991) の117項の中に要約されている: 「損害を減らす手段が、得られる損害の減少に比べ著しく過大な諸資材を使って初めて達せられるものならば、この手段を採用することは、社会のためにならない。 . . .」。

(33) 慣例的には、集団線量はくに微分費用便益分析による最適化決定への一つの入力であった。しかし委員会は、集団線量を将来の長い期間にわたって推定することの諸問題を認識している。

(34) 線量拘束値は、防護の最適化の重要な構成要素である。この用語は委員会によって、「決定グループの構成員への線量が拘束値を超える原因となるかもしれないような防護のいかなる選択肢をもそれ以上の検討から除くため、防護の最適化においてしばしば使用される線源関連の個人線量」(ICRP, 1997b, 41項) を意味するために使われている。このように拘束値は将来に対して前向きに使われ、それは線量限度と混同されるべきでない。拘束値の大きさは線源と状況に特有であり、全体の行為については同じであるべきである。

しかし委員会は、放射性廃棄物処分活動からの公衆構成員に対する線量拘束値について、1年につき約0.3mSvを超えない値を勧告する。

(35) Publication77 (ICRP, 1997b) は、「一般的状況のもとで利用できる最良の技術」という用語が最適化の関連でしばしば用いられると述べている。「利用できる最良の技術」あるいは「過大な費用を伴わない、利用できる最良の技術」というような呼び名で示される方策の採用を求めめる圧力が増してきている。「利用できる最良の」という用語は、通常、費用に関係なく、環境の観点から「最良」という意味合いがある。「過大な費用を伴わない」を追加することによって、この概念は、合理的に達成できる限り線量を低く保つという委員会の勧告にやや近くが、費用が関係するのはそれが過大になった時だけである。これらの方策は防護の最適化を達成するには不十分である (ICRP, 1997b, 7項)。しかし、「過大な費用を伴わない、利用できる最良の技術」の使用は、損害の定量的評価方法が現在利用できない自然環境に対する線量を減らすといった、特定の目的について有利になるであろう。

3.2.長期被ばく状況における防護対策の最適化

(61) 防護対策の最適化は、すでに正当化された介入の防護対策の形式、規模および継続期間に関して決定する過程である。その目的は、プラスの正味利益だけでなく、最大限の正味利益を得ることである。その手帳は、行為の範囲内にある線源の防護を最適化すること概念的に少しも異なることはなく34, 2.2節と3.1節で論議された意思決定支援のいろいろなタイプが防護対策の最適化に適用できる。長期被ばくを減らすための防護対策と他のタイプの被ばくに関係する防護対策の間に重大な相互作用がなければ、それらの技術は長期被ばくを引き起こしている状況の本質とは無関係である。もしそのような相互作用が重要であるならば、前に示したように、相互関係のあるサブシステムを持つ複雑なシステムの最適化のために勧告されたアプローチを適用すべきである (ICRP 1983, 114-116項参照)。

<sup>34</sup>放射線防護を最適化する技術はPublication22 (ICRP1973) で導入され、Publication37と55 (ICRP1983, 1989) の中で詳細に検討された。これら出版物は全て行為における防護の最適化を目的としているが、それらの根拠にある勧告は、介入における防護対策の最適化にも適用される。

(62) 通常、正味利益がプラスであるようないろいろな正当化された介入の選択肢があるであろう。他の選択肢は、正味利益がゼロかマイナスであるので正当化されないであろう。

これらの正当化されない選択肢は、最適化の過程において考慮すべきではない。正当化された選択肢の中で最適の防護選択肢は、そのような正味利益が最大にされている防護対策の形式、規模および継続期間の組合せであろう。最適の防護選択肢は、個人線量あるいは集団線量のいずれかにおいて必ずしも最低の残存年線量をもたらす選択肢であるというわけではない。選択肢のあるものはもと低い残存年線量をもたらすかもしれないが、最適の選択肢より小さい正味利益を与える可能性がありうる。

(63) いくつかの介入の選択肢は、線量を減らす手段として、人の居住地の使用制限を含むことがありうる。制限の実行を要求する制度上の管理が実行可能ならば、これらの選択肢は最適化過程の中で考慮されるかもしれない。それは、他の手段によって線量低減が成し遂げられるような選択肢と同等な基準と比較されるべきである。しかし、人の居住地の使用に対する制約を必要としない選択肢が、意思決定過程において、主に社会・政治的な考慮によって支持されるかもしれない。

(64) まとめとして、委員会は以下のように考える:

・防護対策の最適化は、行為との関連で委員会が勧告する防護の最適化への一般的なアプローチに従って実行することができる。最適な防護対策の形式、規模および継続期間は、介入の正当化された選択肢から選ばれるべきである。ある種の長期被ばく状況に対しては、人の居住地の使用を制限することは、最適化過程の結果でありうる。

原典資料③ ICRP Pub.101b 公衆の防護を目的とした代表的個人の線量評価/放射線防護の最適化: プロセスの拡大

(以下、「3. 最適化のプロセス」からの抜粋)

3.1.プロセスの構成

(24) 目的は、その事情の下で最良の防護選択肢を選択するために必要な、関連する属性を明確にして系統的に特定することである。この点に関して、被ばくの分布 (すなわち、個人線量、平均線量、被ばくする人の数) の特徴は、考慮すべき属性のほんの一部である。

(25) 関連する属性の特定するための最も簡単なアプローチは、「いつ、どこで、どのように、そして誰が被ばくしたか」と尋ねることである。これらの質問に答えることは、被ばく集団と彼らの被ばくの特徴、並びに、その状況に関連する技術的、経済的、社会的、環境の、そして論理上の考慮を表す属性のセットの結果としてもたらさるであろう。事故又はあらゆる潜在被ばく、グループ間の被ばくの移動、及び長い期間と遠距離にわたる集団の被ばく分布を回避することに注意を払うよう。委員会は勧告する。多くの状況について、立案のプロセスに利害関係者が参加することは、関連する属性の同定を支援する助けとなる。

(26) 最良の防護選択肢の選択を考慮すべき有用な属性の代表的なリストを表3.1に示す。このリストは完全なものではなく、被ばく状況の具体的な事情によっては、他の側面が含まれる必要があるかもしれない。一方、リストは完全ではないが、それは与えられた状況に関連する余りにも多くの属性を含むことがある。多くの状況では、限られた数の属性で十分であろう。それゆえ、重要な選択肢を適切に扱うためには、各々の状況に対して、関連する属性のケースごとの選択が求められる。被ばく状況と関係する、より広範囲の属性のスペクトルを考慮することは、その状況の包括的な評価のために重要である。

表3.1. 最良の防護選択肢を選ぶための代表的な属性 (不完全なリスト)

<ul style="list-style-type: none"> <li>被ばく集団の特徴             <ul style="list-style-type: none"> <li>性</li> <li>年齢</li> <li>健康状態</li> <li>感受性の高いグループ (例えば妊婦)</li> <li>習慣</li> </ul> </li> <li>被ばくの特徴             <ul style="list-style-type: none"> <li>被ばくの時間的空間的分布</li> <li>個人の数</li> <li>最小個人線量</li> <li>最大個人線量</li> <li>平均個人線量</li> <li>統計偏差</li> <li>個人線量の範囲に関連する集団線量</li> <li>潜在被ばくの可能性</li> <li>以前から存在する放射線の状態 (例えば、高い自然バックグラウンド、過去の活動又は事故により増加した被ばくレベル)</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>社会的考慮と価値             <ul style="list-style-type: none"> <li>公平性</li> <li>管理能力 (測定、健康監視等)</li> <li>持続性</li> <li>世代間の考慮</li> <li>個人の便益</li> <li>社会の便益</li> <li>被ばくした人の持つ情報/知識のレベル</li> <li>社会の信頼</li> </ul> </li> <li>環境の考慮             <ul style="list-style-type: none"> <li>動植物相へのインパクト</li> <li>気候へのインパクト</li> </ul> </li> <li>放射線以外の危険要因</li> <li>防護選択肢に対する技術的、経済的考慮             <ul style="list-style-type: none"> <li>実行可能性</li> <li>コスト</li> <li>不確実性</li> </ul> </li> <li>政治的側面</li> <li>規制上の拘束</li> </ul>
--	--

3.2.プロセスの特徴

(27) 防護の最適化は、被ばくが生じる前にそれを防ぐことを目的とした。前向きな反復プロセスである。それは、技術的及び社会経済的な発展の両方を考慮に入れた継続的なもので、また、定性的及び定量的な判断を要求する。このプロセスは、すべての関係のある側面が考慮されることを保証するために、体系的にまた慎重に構築されたものであるべきである。最適化とは、現在の事情において最善が尽くされてきたかどうかを常に問い続ける心構えである。それはまた、適切な手順と資材及びすべての関係組織のあらゆるレベルにおける関与も必要とする。(～中略～)

(32) どんな最適化プロセスについても、技術的な実施可能性、コスト、社会的要因、潜在的な悪影響、長期の有効性、及び公衆又は作業者の懸念のような多くの属性、並びにそれらの相対的な重要度を考慮に入れて、放射線防護に関する数多くの意思決定をする必要がある。このような意思決定は、行動が本当に必要であるかどうか、どの選択肢が最も有効かつ効率的であるか、また、どんな資材がその請け負った仕事を完了するのに合理的であるかを含んでいる。

(33) 最適化は心構えである。そのプロセスの効果的な履行は、関与するすべての利害関係者が放射線防護の基本的仮定を知り、かつそれに同意することが必要である。どんなレベルの被ばくもリスクを誘発できると認識することは、最適化プロセスに関与するすべての人々がその効果的な履行に責任があることを保証する動機であるべきである。更に、彼らは活動的な安全文化を固く守るべきであって、安全に重要な属性は、「個人的な献身、安全思考、及び本質的に疑問を投げかける態度……」である。良い慣行はそれ自体、安全文化の必須の要素であるが、機械的に適用するならば十分はない。用心深さ、正当な思考及び完全な知識、健全は判断と説明責任の正しい知識を備えて、安全に重要なすべての義務が正しく実行されるように、良い慣行の厳しい履行以上のことをする要件が存在する。」(IAEA, 1991)

(前スライドからの続き)

(34) 判断によるその性質上、最適化プロセスには透明性が強く求められる。プロセスの中に入るすべてのデータ、パラメータ、仮定及び数値は公開され、そして非常にはっきりと定義されなくてはならない。この透明性は、すべての関連情報が関係者に提供され、意思決定プロセスのトレーサビリティは、十分な説明を受けた上での決定を目指して、適切に文書化されることを前提としている。

(35) 環境への放射性物質排出管理のために、BATNEECの原則が使われることがある。最適化とBATNEECの原則はお互いに補完する。人の健康への結果を視野に入れ、残存する被ばくの管理は推定された放射線量の最適化によって推進されるであろう。廃水の放出管理に関しては人が直接影響を受けない又は主要な防護目標ではない状況においては、最適化は一般にBATNEECを適用するであろう。リオ会議（UN, 1992）以来、国際的な環境政策策定の中心的な組織化の原則である持続可能な開発は、非放射線領域でのBATNEEC技術に向けた健康主導の排出基準を超え、発生源において廃棄を減らすか、あるいは、実際のならば、排出をなくすことに焦点を当ててきている。このアプローチは、健康への影響／影響の確率の低減においてよりも、むしろ排出削減への防護目的に焦点を合わせて、施設と操業にますます適用されている。社会的要因と経済的要因を十分考慮したBATNEECの概念は、合理的に達成可能な限り低く線量を保つという委員会の勧告（ICRP, 1997, 1998）に近い。

(36) 最適化プロセスの履行に対する責任を明確化するために手順が必要である。操業レベルでは、結果としての組織構成が最適化だけに専念するか否かにかかわらず、コーディネータ、作業グループ、又は委員会を含む、ある操業に関わる専門領域間の会話を体系付けるために、組織構成を確立すべきである。

(37) 終わりに、最適化の効果的な履行は、当局から被ばくした個人までに及ぶすべての関係者の関与を必要とする。この関与を確認するために必要な要素には次のものを含む：

—最適化の規制への取り入れ、それを実行する意欲、及び、対話と管理の間に適切なバランスのある指針の提供【当局】：

—放射線に関する方針の明確化、一般的な目標の設定、手順の開発と実行、責任の委譲、手段と資料の割り当て、及び放射線防護専門職の操業から独立した維持【操業管理者】：

—情報の共有、慎重な態度の維持、教育と再教育、及び放射線防護の意識の高揚【個人】。

これらの規定の履行における個別の責任は、6章にもっと詳しく説明する（IAEA, 2002）。

3.3.利害関係者の関与（～以下、関連部分の抜粋～）

(39) 利害関係者の関与は、意思決定プロセスへの価値の組み込み、意思決定の実質的な質の改善、競合する利害関係の争いの解決、作業者と公衆双方の共通の理解の構築及び、諸機関における信頼の構築を達成する実績のある手段である。更に、すべての関係者を関与させることは、安全文化を強化し、もっと効果的で持続可能な意思決定を達成するために必要な放射線リスクの管理に必要な柔軟性を導入する。意思決定プロセスの枠内での防護選択肢の確認のみならず、被ばく状況の属性とそれらの相対的な重要性の確認に、利害関係者は特に役立つかもしれない。

3.4.最良選択肢の選択（～以下、関連部分の抜粋～）

(44) 最後に、最適化は最小化ではないということを強調すべきである。それは、被ばくから来る損害（経済、人間、社会、政治などの）と、個人の防護のために利用できる資材のバランスを慎重にとる評価の効果である。したがって、最良選択肢は必ずしも最低の線量を伴う選択肢ではない。

原典資料④ ICRP Pub.122 長寿命放射性固体廃棄物の地層処分における放射線防護

(以下、“要点”から最適化に係る部分を抜粋)

- 防護の最適化は、地層処分施設の段階的設計、建設および運転の中心的要素である。
- 最適化は、システムの防護能力を強化するとともに、その潜在的な影響（放射線影響およびその他の影響）を低減するための、利用可能な最善の技術を含めた防護対策オプションの反復的、系統的かつ透明性の高い評価として広義に理解されるべきである。
- 最適化原則の適用にあたって、ICRPが勧告する廃棄物処分施設の設計の放射線学的な判断基準は、住民にに対して年線量拘束値0.3mSv/年と、職業的に被ばくする作業員に対して年線量限度20mSv/年以下または5年間100mSv以下である。

注)用語解説において、“利用可能な最善の技術(BAT)”を“排出および環境全体への影響を防止し、防止が実行可能でない場合は、それらを低減することを意図した活動とその運用方法の開発における最も効果的で先進的な段階を意味する”と解説。

4.8 防護の最適化と利用可能な最善の技術

(69) 最適化の原則は、被ばくを引き起こす可能性（被ばくを受けることが確実でない場合）、被ばくする人の数および個人線量の大きさを、経済的および社会的要因を考慮して、合理的に達成できる限り低く保つための線源関連のプロセスとして、委員会（ICRP, 2006, 2007）によって定義されている。最適化プロセスの一般的勧告は、Publication 101（ICRP, 2006）で述べられている。

(70) ICRPの放射線防護の最適化原則は、地層処分システムの開発と履行に適用するときには、システムの防護能力を強化し、影響（放射線影響およびその他の影響）を低減するための各種オプションの反復的、系統的、そして透明性のある評価として、広い意味で理解されるべきである。

(71) 防護の最適化は、処分システムの主たる目的、すなわち、廃棄物中の放射性物質をできるかぎり閉じ込めることにより、そして、廃棄物を入、環境および生物圏から隔離することにより、現在そして将来にわたって人間と環境の防護することに取り組むべきである。防護の最適化は、操業期間中の作業員、公衆および環境の防護だけでなく、監視が無い可能性のある期間を含む将来の世代の防護も同様に取り扱わなければならない。長期にわたって、そして特に、無監視期間にも、安全性は受動的に機能する処分システムの遺産によって確保されなければならない。

(72) 地層処分システムの開発と履行に関する段階的な意思決定プロセスが、最適化プロセスの枠組みを構成する。中心的な構成要素としての最適化と利用可能な最善の技術の適用は、処分システムのすべての要素[すなわち、サイト（設置地質構造を含む）、施設設計、廃棄物パッケージ設計、廃棄物の特徴]、そして関連するすべての期間を統合アプローチで取り扱わなければならない。

(73) 防護の最適化は、開発者の責任であり、安全当局および環境保護当局、地元社会、並びにその他のステークホルダーと連携して、多角的な意思決定を行わなければならない。したがって、地層処分システムのための適正な最適化プロセスの筋道や最適化プロセスの最終結果の成功判断基準を演繹的に定義することは不可能である。

(74) 社会経済要因（政策意思決定や社会の受容性の問題を含む）は、例えば、利用できるオプション（例えば立地）を制限することによって、および／または、更なる条件（例えば回収可能性）を設定することによって、さまざまな程度で最適化プロセスを制限することがある。これらの考察が、関連するすべてのステークホルダーに対して透明性のある方法で定時され、それらの安全への意味合いが一般的に広く理解されることが重要である（OECD/NEA, 2011）。

(75) 最適化は継続的な取り組みであるが、その段階的プロセスにおいて、すべての関連するステークホルダーが最適化プロセスの結果を判断でき、そしてシステムのさまざまな要素を改善する方法を示すことができる節目を設定しなければならない。

(前スライドからの続き)

(76) 最適化のプロセスは、操業前、操業時および操業後の各段階で相当に異なる。操業段階では、大規模原子力施設に対する一般的勧告を適用する。操業段階で得られた経験を、当面の改善や近い将来の改善の考慮に入れることにより、 positioning 作業による作業者と公衆の双方の被ばくを低減させることができる。

(77) 操業後段階の最適化のほとんどすべての面が、設計段階の一部である施設を閉鎖するための計画とともに、廃棄物配置より前の、主に立地と設計段階で生じなければならない。操業段階では、操業後段階で提供されることになる防護の更なる最適化がまだ可能である。たとえば、新しい材料または技術が利用できるようになることも考えられる。施設の一部を閉鎖（例えば処分空間の密閉）する間に得られた経験が、施設全体の閉鎖の計画立案における改善につながる可能性がある。

(78) 操業後段階では、処分システムの能動的活動はない。廃棄物は配置され、人間と環境の防護は主に処分システムの受動的な隔離と閉じ込め能力に基づいている。したがって、操業後段階の最適化の決定は、閉鎖された処分システムの間接的監視の措置に関するものだけになると考えられる。

(79) 地層処分施設の立地、設計および履行により頑健な長期隔離と閉じ込めが可能になり、その結果、人間と環境への潜在的影響は非常に遠い将来にだけ生じるようになる。したがって、すでに説明したように、標準人の実効線量又はリスクの評価を通じた閉鎖後の放射線影響の評価は、時間の経過とともに不確実性が高まることや注意深く仮定を設定しなければならないことからすれば、将来の放射線影響の予測ではなく、むしろ処分システムの頑健性の指標または例示を提示するにすぎない。したがって、遠い将来を考える場合、線量とリスクの値は、本来の意味を失い、潜在的な放射線影響の相対的な比較器としての価値しか保持しない。

(80) 最適化プロセスを導き、あるいは、方向付ける要素は、建設時、操業時および閉鎖時における施設の構成要素の品質を直接または間接的に決定する要素であるべきである。ここで品質とは、頑健なやり方で閉じ込めと隔離の安全機能を達成する構成要素の能力を指す。システム構成要素の品質の評価と判断には、基本的に、サイト特性、良好事例の概念だけでなく、利用可能な最善の技術の要素、健全な工学技術、そして管理原則を含んでいる。これらの要素は、遠い将来の潜在的影響を扱わなければならない場合には、放射線学的な最適化を補完し、支援する。

(81) 開発または履行されたシステム設計の品質の判断は、良く構成された透明性のあるプロセスで、関連するすべてのステークホルダーが参加してなされるべきであるし、必要な場合は、それに対し批判的な視点から再検討されるべきである。このプロセスの核心は、他のすべてのステークホルダーにとって透明性がある。開発者と安全当局の間の相互作用である。

(82) より遠い将来における安全性を取り扱う場合、処分システムのさまざまなレベルに利用可能な最善の技術の概念を適用することによって、最適化を補完し、支援することができる。具体的には、

- 現在そして遠い将来における閉じ込めおよび隔離の能力を評価するため、サイトの特性評価の方法論的かつ科学的なプログラムを特定し、選択するための方法論
- 材料と技術の選択を含めたシステム設計の開発、そして、サイトの特性を考慮に入れて、閉じ込めと隔離という主要な目的にそれらが個別または統合して寄与する方法の開発
- 廃棄物、サイトおよび設計の特性の1つの処分システム内への統合、並びにシステム全体としての閉じ込めと隔離の能力の反復的評価
- 統合化されたマネジメントシステムの範囲内でのシステムの建設、操業および閉鎖時における健全なマネジメント手法および工学的手法並びに履行の使用

(83) 放射線学的な判断基準（実効線量とリスク）に基づく最適化は、処分システムに特有の期間そして特有の観点に関して、処分システムを設計、履行するプロセスの最適化の重要な部分である（例えば、設計開発段階や操業手順と活動の準備および履行段階で作業の安全性を評価する場合）。

(84) 処分システムの開発において、処分システムのさまざまな要素を総合的に最適化する方法には、いろいろなり方があ。第1に、段階的な最適化に関する意思決定は、主に時系列順に行わなければならない（例えば、母岩の選択に関する意思決定および1つまたは限られた数のサイトの選択に関する意思決定は、多くの場合、詳細は設計についての意思決定の前に行われる）。サイトの選択については、処分システムの安全性に関連して技術的判断基準（長期安定性、放射性核種移行に対するバリア、周辺の天然資源の存在の有無）と地域またはより広域での経済的、社会的要因とを両立させなければならない。第1段階では、望ましいサイトを、処分システムの天然バリアと自然環境の閉じ込め機能と隔離機能を考慮に入れて、幅広く定義された「必要とされる特性」に基づいて特定することができる。

(85) いくつかの適切なサイト候補を特定し、そして評価することができるならば、どの母岩またはサイトにするかの決定は、常に、定性的判断と定量的判断の両方に基づいた複数要因を考慮した決定となる。この多角的な決定において、放射線学的な判断基準（例えば、実効線量またはリスクの計算値）は、(1) 評価の時間的尺度が長くなればなるほど不確実性が高まること、(2) 設計基準となる放射線影響の計算値は、多くの場合、サイト選択における判定要因とはならないくらいに非常に低いという観察により、しばしば、限られた価値しか持っていない。

(86) 処分システムの頑健性の評価は、システムの最適化に貢献することができる。なぜなら、その評価は、処分システムとその構成要素の性能に対して、そして、システム全体へのさまざまな構成要素の相対的な寄与に対して、定量的または定性的な洞察を与えるからである。したがって、最適化プロセスのためのそのような評価の価値は、主として、閉じ込めと隔離というシステム全体の目的に対するさまざまな構成要素の相対的寄与と、これらの相対的寄与が擾乱事象とプロセスによってあるいは残余の不確実性によってどれくらい影響を受ける可能性があるかについて洞察することにある。非常に遠い将来に起こると推定される実効線量とリスクの計算値の不確実性は、最適化プロセスでのそれらの有用性を減じてしまう。

余白

## 詳細②：国際原子力機関（IAEA）

### IAEA文書に関する分析・整理結果

- 原典資料① IAEA基本安全原則 No.SF-1
- 原典資料② IAEA特定安全要件 No.SSR-5 「放射性廃棄物の処分」
- 原典資料③ IAEA特定安全指針 No.SSG-14 「放射性廃棄物の地層処分施設」
- 原典資料④ IAEA特定安全指針 No.SSG-23 「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」
- 原典資料⑤ IAEA特定安全指針 No.SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」

11

## IAEA文書に関する分析・整理結果

### (1) 最適化の考え方などに関する重要エッセンス

- 主に『放射線防護』の観点から最適化を解説
  - 最適化は様々な要因の相対的重要性についての判断が必要【SF-1】
  - 最適化は構造化された方法で行われる。本質的には定性的であり、定量的解析によって裏付ける【SSR-5】
  - モニタリングプログラムの設計においても、費用と便益を考慮した最適化プロセスを適用すべき【SSR-31】
- 最適化における『安全評価』の役割
  - 防護及び安全の最適化の一環として、安全評価を代替管理オプションに関する判断に役立てる【SSR-5,14】
  - 安全評価による、代替的な廃棄物パッケージの設計および閉鎖手段のような種々の項目に関する比較評価によって、システムの最適化と施設設計を支援する【SSR-14】
  - 最適化を目的として選択肢を比較する目的で実施される評価は、より現実的な想定に基づくべき【SSR-23】

### (2) 最適化に係る評価項目（被ばく評価に係る項目は安全評価の文脈で更に細分化できる）

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
SF-1、SSR-5、SSR-14より ●経済的要因、●社会的要因、●環境的要因、●費用、 SSR-5より ●掘削及び建設作業の廃棄物定置作業からの分離、 ●遠隔ハンドリング及び遮へい設備の廃棄物定置への使用、●潜在的な事故及びその影響の可能性を低減するための作業環境の管理、●監視区域及び管理区域における保守の必要性の最小化 SSR-14、SSR-23より ●放射線影響、●非放射線影響、●輸送ネットワーク、●継続的な制度的管理	●費用（コスト） ●掘削及び建設作業の廃棄物定置作業からの分離性 ●遠隔ハンドリング装置および遮へい設備の導入必要性の程度 ●放射性物質に伴う閉鎖前／閉鎖後長期の安全性 ●一般労働安全 ●放射線管理区域とそうでない区域の分離性（放射線管理区域における保守管理作業の最小化） ●廃棄体を含む材料や設備の輸送・搬送効率 ●制度的管理に係る地下作業負荷（作業負荷、管理継続期間）

12

原典資料① IAEA基本安全原則 No.SF-1 (下記の左側抜粋)

原典資料② IAEA特定安全要件 No.SSR-5 「放射性廃棄物の処分」(2011) (下記の右側抜粋)

原則5: 防護の最適化

合理的に達成可能な最高レベルの安全性を提供するように、防護は最適化されなければならない。

3.21. 放射線リスクのもととなる施設及び活動に適用される安全処置は、施設及び活動の存続期間を通して、その利用を過度に制限することなく、合理的に達成可能な最高レベルの安全を提供できるかどうか、最適化されなければならない。

3.22. 放射線リスクが合理的に達成可能な限り低いものであるかどうかを判定するには、通常の運転あるいは異常又は事故の状況から生じるかどうかにかかわらず、全てのリスクを先行的に(等級別扱いを利用して)評価し、施設及び活動の存続期間を通して、定期的に再評価しなければならない。関連した行為又は行為に関連したリスクの間に相互依存が存在する場合(たとえば、施設及び活動が存続する間の異なる段階に対して、放射性廃棄物管理における異なるグループ又は異なる段階に対するリスクに対して)には、これらについても考慮しなければならない。知識における不確実性も考慮する必要がある。

3.23. 防護の最適化は、**次を含むさまざまな要因の相対的重要性についての判断**を必要とする。

- 放射線に曝される可能性のある人数(作業員及び公衆)
- その他に受ける被ばくの可能性
- 受ける放射線量の程度及び分布
- 予知可能な事象による放射線リスク

- **経済的、社会的、環境的な要因**

また、防護の最適化は、放射線リスクを回避するために日々の活動で**実践可能な、良好な実践及び常識の使用**を意味する。

3.24. 許認可取得者による安全に投入する資源、規制の範囲及び厳重さとその適用は、放射線リスクの程度及び管理に対する法的責任に相応したものでなければならない。規制管理は、放射線リスクの重要性によって是認されないであれば、必要とされない。

原則6: 個人に対するリスクの限度

放射線リスクの管理に関する処置は、いかなる個人も損害の許容できないリスクを負わないことを確保しなければならない。

3.25. 防護の正当化及び最適化は、それ自身が、いかなる個人も損害の許容できないリスクを負わないことを保証するものではない。したがって、線量及び放射線リスクは、指定された限度内で管理されなければならない。

3.26. 反対に、線量限度及びリスク限度が許容される法的な上限を示しているならば、このような状況下では、それ自体で最適な達成可能な防護を確保することは不十分であり、防護の最適化により線量及びリスクの限度は補充されなければならない。したがって、求められるレベルの安全を達成するために、防護の最適化と個人への線量及びリスクの限度の両方が必要である。

2.人間及び環境の防護

操業期間における放射線防護

2.9. 処分施設の設計及び全ての操業の計画立案においては、防護の最適化(すなわち、被ばく並びに潜在被ばくの生起可能性及び規模を考慮して、経済的・社会的要因を考慮して、合理的に実現可能な限り低く)するための防護手段及び安全性を決定するプロセス)が検討される[3]。

2.10. 防護及び安全の手段の**最適化に関連する検討事項**としては、**閉鎖前及び建設作業の廃棄物定置作業からの分離、必要に応じて高レベルハンドリング及びびくき入設備の廃棄物定置への使用、潜在的な事故及びその影響の可能性を低減するための作業環境の管理、監視区域及び管理区域における保守の必要性の最小化**がある。汚染は管理(controlled)され、可能な限り避けることが求められている[3]。

閉鎖後の期間における放射線防護

2.15. 処分施設の閉鎖後における人間と環境の防護に関する安全目標と基準について次に提示する。

安全目標(Safety objective)

安全目標は、処分施設の閉鎖後における防護が最適化され、**社会的及び経済的要因が考慮される**ように、処分施設の立地、設計、建設、操業及び閉鎖を行うことである。また、公衆の長期にわたる線量またはリスクが、設計制約条件として使用された線量拘束値及びリスク拘束値を超えないという合理的な保証が得られるようにしなければならない。

(e) 1~20 mSvの範囲の年間線量(参考文献[7]、表8)が示される場合には、施設設計を最適化する手段によって、侵入の発生確率を低下させる、またはその影響を抑制するための合理的な努力は、当該施設の閉鎖段階では正当化される。

2.18. 廃棄物処分施設の安全性を確保するために採用される中心的アプローチは、「制約下における最適化」(optimization under constraints)である[ICRP Pub.81]。その意味で、防護の最適化は判断プロセスであると言及することができ、そこでは社会的、経済的要因が考慮される。**最適化は、構造化された方法で行われるが、本質的には定性的なものであり、定量的解析によって裏付けられるという方法で行われる。**

3.放射性廃棄物処分の計画立案に係わる安全要件

安全アプローチ(Safety Approach)

要件4: 処分施設の開発プロセスにおける安全の重要性

放射性廃棄物の処分施設の開発プロセスを通して、その施設に係わる利用可能なオプションが有する安全性への関連性(relevance)及び意味合い(implications)の理解が操業によって開発されなければならない。これは、操業時期(stage)及び閉鎖後において、最適化された安全水準(optimized level of safety)を提供するという目的のためである。

4.14. また、安全評価は、安全に係わる重要プロセスを特定し、処分施設の性能に関する理解向上の一助としなければならない。**安全評価は、防護及び安全の最適化の一環として、代替的な管理オプションに関する判断に役立てなければならない。**このような理解は、セーフティケースに提示された安全性に関する論拠のための根拠を与えるものでなければならない。操業者は、規制機関と協議すると共に規制機関の承認を受けて、安全評価の実施時期と詳細度を決定しなければならない。

原典資料③ IAEA特定安全指針 No.SSG-14 「放射性廃棄物の地層処分施設」(2011)

6.地層処分施設の段階的アプローチの要素

SSR-5の要件26([1]参照): 既設の処分施設

6.90. 操業中の施設における補修措置、あるいは操業計画や操業手順の変更に関する意思決定において、主要な放射線防護の原則は、最適化の原則である[4]。意思決定に際しては、閉鎖後の人々や環境に与える**放射線影響と非放射線影響**、その**社会的影響、財政面での費用**などに基づき、**さまざまな措置案や変更案を比較すること、入力情報を獲得**しなくてはならない。**フィードバック調査や実証プログラムが意思決定プロセスを支援**することもある。考慮すべき問題が広範囲にわたるため、既存施設の補修措置案や操業条件の変更を評価・比較する際、**規制機関(たとえば地域社会)以外の利害関係者を関与させると有利**である。

付録 I 地層処分施設の立地

概念的な計画段階

1.3. 立地の最初の段階は処分地選定に先立つ概念設計と計画に関係するため、立地は必然的に処分施設開発プロセスの初期に企画される。概念設計と計画の段階の目的は、サイト選択プロセスの全体的な計画を策定し、利用可能なデータを使って、地域調査段階の基礎として使用することが可能な岩種と地質構造を特定することである。立地プロセスの指針はこの計画段階の初期に操業によって確立されるべきである。必要な財政及び人的資源、資材、装置並びに時間が、実行可能な範囲で評価されるべきで、完全な立地調査に関する責任は特定されるべきである。サイトを選択する責任を託されている組織が、詳細にサイトを特性調査し、あるいは処分施設を建設し、操業する組織と同じであることは可能である。責任の割り当てに関するこのような決定は国家レベルにおいてなされる。しかしながら、立地プロセスは、周期的な更新を必要とする可能性が高い、規制機関と協議して開発されるべき特定の計画に従って進められるべきである。計画は以下を含むべきである:

- (a) 実行される作業の指定と記述 (b) 種々の作業の手順ダイヤグラム (c) サイト特性に採用するガイダンスあるいは基準 (d) このガイダンスあるいは基準の適用手順の概要
- (e) 包括的なスケジュール (f) コスト評価
- (g) **設計の最適化で考慮される長期安全性の期間**
- (h) 提案されたサイトが除外されるか、あるいは除外された理由

サイト調査及び特性調査のガイダンスと必要なデータ

水理地質学

1.29. 放射性核種放出の最もありそうなモードが地下水流動によるものであることから、流動の方向と速度の解析と同様に、地下水流動のメカニズムの評価は、どんなサイトの安全評価でも重要なインプットである。廃棄物の性質あるいは処分オプションにかかわらず、処分施設へ、処分施設を通して、そして処分施設からの流動を制限することが可能な地質環境が、受け入れ難い放射性核種放出を防ぐことに貢献するであろう。帯水層あるいは亀裂帯のような自然の特徴は、放射性核種の可能性がある放出経路である。地質/リア及び人工/リアの防護機能の互換性があるままでいるように、このような経路は処分施設母岩で限定されるべきである。水理地質学システムの希釈能力は同じく重要であるかもしれず、評価されるべきである。**立地は、処分施設から環境までの長い、緩慢な移動の地下水経路が好ましいような方法で最適化されるべきである。**

建設及び工学条件

1.41. サイトの地表及び地下の特性が、適用される安全規制に適合した最適化された地表施設の計画、地下での作業と全ての掘削の施工の申請を許容すべきである。

廃棄物の輸送

1.50. 場合によっては、新しいアクセスルートを建設したり、あるいは既存のルートを改修したりすることが必要となる。急な勾配や天然の障害物のような不適切な土地条件が存在している、アクセスルートの建設はより困難で、かつ費用がかかることになる。そのため、輸送距離が短くて追加の建設工事も限られており、さらに通りにくい地域を通過するアクセスルートが必要としないサイトが好まれる。しかしながら、新しい道路やその他の輸送用インフラストラクチャを全面的あるいは部分的に建設することにより、操業者として**輸送ネットワークを最適化し得ることがある**。たとえば、居住区域や慎重を期する地域をバイパスしたり、地域社会のために輸送リンクの創設を支援したりするなどである。

付録 II 閉鎖後の安全評価

安全評価に関する全般的考慮

安全評価の使用

11.5. 安全評価は、処分施設の開発の異なる段階において異なった目的にかなう。初期の段階で安全評価は、主要な処分概念の実現可能性を決定し、サイト調査を方向づけ、最初の意思決定を支援するために使われるべきである。それらの使用は初期の概念開発とサイト選定に続く段階でいっそう重要である。それから、**このような評価が、代替的な廃棄物パッケージの設計及び閉鎖手段のような種々の項目に関して比較評価を実行されることによって、システムの最適化と施設設計を支援するために開発されるべきである。**安全評価は処分施設の計画、建設、操業、そして閉鎖前を通して周期的に実行されるべきで、セーフティケースを開発し、漸次更新するために使われる。セーフティケースは、閉鎖後と施設の能動的管理に依存することができる期間を超えて、処分施設が安全であろうという主張を定量化し、実証する。根拠、解析及び議論の統合である(第5節と参考文献[11]参照)。



## 原典資料④ IAEA特定安全指針 No.SSG-23 「放射性廃棄物処分のセーフティケースと安全評価」(2012)

### 4. 放射性廃棄物処分に関するセーフティケース

#### セーフティケースの構成要素

##### 安全評価

非放射線学的環境影響

4.58. 処分施設から生じる非放射線学的影響の評価が要求され、それには環境保護法が適用される。これは、この安全指針の範囲を外れる。それにもかかわらず、この安全指針で説明される評価へのアプローチは、非放射性廃棄物による危険の評価と、全ての潜在的危険に対する安全と防護の最適化においても、有用であると考えられる。

#### 反復と設計の最適化

4.66. 処分施設の防護の最適化は、施設的设计開発において行われた決定に適用される判断プロセスである。適切な工学的及び技術的解決方法が採用されるべきであり、良好な管理原則が、処分施設の開発、建設、操業、及び閉鎖を通じて、全ての安全関連作業の品質を確保するために適用されるべきである。

4.67. 防護と安全の最適化に関するいくつかの決定に関しては、**専門家の判断と利用可能で立証済みの最善の技術の利用に基づく定性的アプローチで十分な場合がある**。問題が複雑であればあるほど、その問題における処分施設の他の側面との相互関連性がより大きくなり、最適化を立証する必要性も大きくなる。安全が最適化されたと思えることができるようにするには、以下の重要な議論が有効であると立証されるべきである。

- 処分施設の開発、建設、及び閉鎖の各段階での**各種設計オプションの長期安全に対する影響**には、細心の注意が払われてきた。
- 処分システムの予想される変遷に起因する線量/リスクは、不確実性が結果の重要な解釈を妨げるほど大きくならないような期間にわたって、拘束値を超えないことの合理的な保証がある。
- 処分施設の性能を阻害することがあり、より高い線量又はリスクを生じさせる事象の可能性は、立地又は設計により合理的に可能な限り低減されてきた。

### 5. 閉鎖後期間の放射線学的影響評価

#### 保守的な評価と現実的な評価

5.18. 施設的设计の最適化又は処分システム挙動の詳細な理解の立証のために、**評価は、モデルをパラメータ化するデータの入手可能性を前提として、可能な限り現実的であるべきである**。ただし、現実的な評価を実施することは、大量のパラメータが関係する複雑な計算を伴うことがあり、又、使用したデータとモデルが実際には処分システム性能の現実的表現には結びつかないことを立証するために、かなりの資源が必要になる場合がある。

5.19. 数値的な尺度又は性能基準に適合していることを立証するために、比較的単純なモデルに基づいて保守的解析を行うのが適切な場合がある。そのようなアプローチは、大きな安全裕度がある場合に実行可能である。ただし、使い方を誤ると、処分システムについて過度に保守的もしくは最悪ケースの表現からの結果は、実際の施設性能に類似するところがほとんどない評価結果に基づく十分な意思決定につながる可能性があるため、注意が必要である。さらに、過度に保守的なアプローチの利用は、後の評価で規制要件の履行を立証するためにより現実的な(すなわち、より保守性が低い)アプローチが採用される場合に、結果の操作を巡って利害関係者の懸念を招く可能性がある。そのような状況を回避するために、保守的アプローチが現実的アプローチか選択、及びアプローチの修正が行われた場合はその理由を明確に文書化し、伝達しなければならない。

### 6. 特定の問題点

#### 制度的管理

6.70. 天然起源の放射性核種を含む大量の廃棄物が関わる多くのケースでは、少なくとも特定の現在の技術的、経済的可能性、全ての既存の処分の代替に、少なくともある程度の制度的管理が必要である。そうしたケースにおいて要求される制度的管理の機能は、人間侵入の予防から監視と保守のプログラムによるバリア(例えば、カバー)が損傷しないことの確保、バリアの健全性に対する悪影響への対応までに及ぶ可能性がある。そうした影響は、例えば、根や穿孔動物によるカバーの浸食や劣化など、自然のプロセスによって発生している可能性がある。

6.71. このような場合、実施している制度的管理に関する必要性を受け入れることは、将来世代に過度の負担を負わせるため、参考資料[1]の原則Aに違反すると見なすことができる。ただし、この負担の評価にあたっては、自然期限の放射線各種を含む大量の廃棄物について、**現実的な制度的管理にかかわる処分オプションを受け入れるという決定は、技術的及び経済的な限界を認識した防護の一般的な最適化の結果**であろう。ただし、各ケースは、その利点と長期的防護レベルの最適化を確保する目的で実施された特定の最適化研究に基づいて検討すべきである。これには、変動的な安全を促進する措置の実施を考慮することを含めるべきである。そのような最適化研究は、施設のセーフティケース作成の一部として実施すべきである。

#### オプションの評価 - 既存施設への適用

6.87. 評価のコンテキストを確立する決定的部分は、評価原理(assessment philosophy)の定義から成るもので、線量の規制限度、制約条件及びその他の基準との比較の意図をもって実施された評価は、十分に保守的なレベルで実施しなければならない。しかし、**最適化を目的として選択肢を比較する目的で実施される評価は、より現実的な根拠に基づくべきである**。最適化の原則は既存の状況に適用することが重要であるため、これらの2種類の評価の区別が、既存施設には特に重要である。

### 7. セーフティケース及び安全評価の文書化と利用

#### 施設的设计と操業

7.21. 処分施設開発全体を通じて、セーフティケースは、施設的设计を支援するために使用するべきである。OECD/NEAの人工バリアシステムプロジェクト(参考資料[43]を参照)は、**工学設計及び最適化におけるセーフティケースのいくつかの使用例を示している**。

※参考資料43: BENNETT, D.G., HOOPER, A.J., VOINIS, S., UMEKI, H., The Role of the Engineered Barrier System in Safety Cases for Geological Radioactive Waste Repositories: An NEA Initiative in Co-operation with the EC (Proc. Int. Conf. Las Vegas, NV 2006), OECD, Paris (2006).

15

## 原典資料⑤ IAEA特定安全指針 No.SSG-31「放射性廃棄物処分施設のモニタリング及びサーベイランス」(2014)

### 4. モニタリングプログラムの設計

4.5. モニタリングプログラムは、**モニタリングの費用と便益を考慮する最適化プロセスを用いて設計すべきである**。モニタリングの範囲と持続期間はすべて、費用に直接寄与し(モニタリング機器・モニタリング活動のための費用、並びにその後の作業員にとってのリスクを緩和するための費用)、また間接的に寄与する(かかる活動が実施できるような施設を保守し、運営することに関係する費用)。モニタリングの費用を決定する際には、性能の不具合を引き起こす、あるいは廃棄物回収を不可能にする可能性のある重要情報の欠落に関連する財務リスクを評価すべきである。また、モニタリングの便益も、モニタリングから生じる可能性のある弊害に照らして考慮しなければならない。

16

## 詳細③：経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）

### 放射性廃棄物管理委員会（RWMC）－セーフティケース統合グループ（IGSC）

#### OECD/NEA文書に関する分析・整理結果

原典資料① The Role of the Engineered Barrier System in Safety Cases for Geological Radioactive Waste Repositories: An NEA Initiative in Co-operation with the EC (2006)

原典資料② Optimisation of Geological Disposal of Radioactive Waste (2010, NEA #6836) National and International Guidance and Questions for Further Discussion

17

## OECD/NEA文書に関する分析・整理結果

### (1) 最適化の考え方などに関する重要エッセンス

- 主に『放射線防護』の観点から最適化を解説
- 但し、他の国際機関（ICRPやIAEA）の考え方や取りまとめの紹介・引用が主体であり、新たなエッセンスなどは見受けられない。
- 資料②(2010年公開資料) に、最適化の方法論の1つとして、放射線防護以外の項目として最適化で考慮される『設計や概念の質に係るファクター』を例示している。

### (2) 最適化に係る評価項目（被ばく評価に係る項目は安全評価の文脈で更に細分化できる）

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
<p>2006年公開資料（参考①）より</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● feasibility</li> <li>● cost</li> <li>● performance assessments</li> <li>● safety assessments</li> <li>● costs of repository excavation remain reasonable</li> </ul> <p>2010年公開資料（参考②）より</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● predictability</li> <li>● demonstrability</li> <li>● feasibility of construction</li> <li>● flexibility of operation</li> <li>● maintenance</li> <li>● Retrievability</li> <li>● availability of transport routes</li> <li>● public acceptance</li> <li>● Cost</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実現可能性（feasibility）、構築の実現性（feasibility of construction）</li> <li>● 実証性（demonstrability）</li> <li>● 操業の柔軟性（flexibility of operation）</li> <li>● メンテナンス性（maintenance）</li> <li>● 回収可能性（retrievability）</li> <li>● 予測性（predictability）</li> <li>● 性能評価（performance assessments）</li> <li>● 安全評価（safety assessments）</li> <li>● 適度な掘削費用（costs of repository excavation remain reasonable）</li> <li>● 輸送経路の利用可能性（availability of transport routes）</li> <li>● 社会的受容性（public acceptance）</li> <li>● 費用（cost）</li> </ul>

18

## 原典資料① The Role of the Engineered Barrier System in Safety Cases for Geological Radioactive Waste Repositories: An NEA Initiative in Co-operation with the EC (2006)

### The Role of the Engineered Barrier System in Safety Cases for Geological Radioactive Waste Repositories: An NEA Initiative in Co-operation with the EC (2006)

#### V. EBS PROCESS ISSUES

##### V.B. Processes Issues and Repository Design

A number of requirements, constraints and processes will influence the design of a repository and the EBS. In repositories for spent fuel and high-level wastes, heat from the waste will be the primary factor determining the temperatures that will develop. Repository temperature is an important constraint on repository design. In order to build confidence in the suitability of a repository design, it is necessary to conduct an iterative series of assessments of repository performance and disposal system safety. These assessments need to take account of repository evolution and this can be achieved by considering a range of scenarios. It is also essential that such assessments are based on a sufficient level of process understanding and associated data.

Studies aimed at refining and optimising the design of a repository need to consider a wide range of different types of information, including, results from feasibility, cost, performance and safety assessments for alternative repository and EBS designs. Repository design might be optimised in respect of heat production by adjusting waste canister spacing so that the waste inventory can be disposed of within acceptable temperature and safety limits, and the costs of repository excavation remain reasonable.

#### VII. RECENT TRENDS IN EBS STUDIES

Optimisation should be approached on several levels, and programmes aimed at optimising the design of the disposal system and the EBS need to include SA, PA and process level modelling studies. SA and total system PA are best suited to informing choices over large-scale issues, such as the choice of repository layout and the waste inventory. Subsystem PA models and process level models may be useful when considering smaller scale issues, such as the choice between alternative engineered barrier materials.

#### 【分析】上記原典資料から示される最適化に係る評価項目

- feasibility : 実現可能性
- cost : 費用
- performance assessments : 性能評価
- safety assessments : 安全評価
- costs of repository excavation remain reasonable : 適度な掘削費用

19

## 原典資料② Optimisation of Geological Disposal of Radioactive Waste (2010, NEA #6836) National and International Guidance and Questions for Further Discussion

※本レポートでは、最適化に係る主要国の安全規制上の要件概要などの整理も含まれるが、基本的にICRPやIAEAの関連文書を参照しつつ、それらを概括的に整理したものとなっている。  
最適化の評価項目の観点で有益な情報は見受けられないが、唯一、結論の部分に以下のような記載がある。

#### 4. CONCLUSION

(前略)

- One way to reach system optimisation for geological disposal facilities might be to consider that the normal process of stepwise development of a repository from a conceptual basis to its implementation – whereby designs are subject to analysis, are discussed within the implementing organization and between the latter and its reviewers, be typically taken into account during a stepwise decision-making process. For instance, factors dealing with the quality of the design and its conception, such as predictability, demonstrability, feasibility of construction, flexibility of operation, maintenance and retrievability. Factors of more societal nature will include availability of transport routes, public acceptance and cost.

#### 【分析】上記原文から示される最適化に係る評価項目

- predictability : 予測性
- demonstrability : 実証性
- feasibility of construction : 構築の実現性
- flexibility of operation : 操業の柔軟性
- maintenance : メンテナンス
- retrievability : 回収可能性
- availability of transport routes : 輸送経路の利用可能性
- public acceptance : 社会的受容性
- cost : 費用

20



# 資料 3

## 最適化に係る考え方や評価項目等の整理に資する 主要国の技術検討事例

### 資料 3 の構成

最適化に係る主要国の検討動向等に関する調査方法

調査結果の要約 1 : 主要国の検討動向等から窺える最適化の考え方など

調査結果の要約 2 : 主要国の検討動向等から抽出した評価項目等の分析・整理結果

詳細① : フィンランド

詳細② : スウェーデン

詳細③ : 米国

詳細④ : フランス

詳細⑤ : スイス・カナダ (法規制文書のみ調査)

備考 : 詳細①～⑤の原典資料の抜粋部分について、以下に留意されたい。

- ・ 赤アンダーライン部分 : 最適化の考え方などの重要なエッセンスと思われる箇所
- ・ **薄黄色ハッチング部分** : 最適化に係る評価項目

## 『最適化』に係る主要国の検討動向等に関する調査方法

下記の調査手順により、最適化に係る評価項目等をキーワードとして抽出

### ①各国の法規制文書から最適化に係る要件・要求事項を抽出

### ②各国の事業者の対応を技術資料（支援技術資料を含むセーフティケースや研究開発関連技術文書）

- 本調査の目的に照らして、技術資料には下表のようなレベルがある。
- 本検討のステップ①では、**まずは下表の1)を対象に調査を実施**（余力があれば下記の2)以降に調査範囲を拡大）

- |  |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1) 一断面におけるセーフティケースで「最適化」と明示されている部分</li><li>2) 一断面におけるセーフティケースで設計や施工技術に関して複数のオプションを記載している部分<br/>（特定オプションの選択理由、各オプションの特性/優劣、各オプションの特徴をどのような観点で説明しているか、等から評価項目を抽出）</li><li>3) 時期の異なる二つの断面におけるセーフティケースの差分に対して上記の観点から評価項目を抽出</li><li>4) 研究開発（TRLレポートやR&amp;D計画）から窺える、設計・施工技術開発や代替オプション開発における開発の視点（開発の意図、開発したオプションの特性など）</li></ol> |
|--|

### ③調査における留意点

- 本調査で優先する目的 ⇒ 最適化における『評価項目』の抽出
- 上記の評価項目に関連して、次のような情報が~~あり得る~~ことに留意（意識して分類整理する）
  - ・最適化の対象となる要素 ⇒ 要件達成のための設計要素（材料選定、仕様設定など）
  - ・製造・施工技術の選定に係る事項
- 抽出される評価項目には、**地下環境を含む各国のリファレンス方法に固有となる評価項目**（わが国では参照できないもの）が含まれる可能性に留意

1

## 調査結果の要約 1：主要国の検討動向等から窺える最適化の考え方など

### 最適化の考え方や方法論など

- 法規制文書レベルでは、主要国のいずれも、最適化に係る記述は定性的、かつ放射線防護が最適化の主な観点。
- 個別の特徴的な事例として、スウェーデンのような例もある（以下）。
  - 最適化は利用可能な最善技術（BAT）と同時に論じられる。
  - 規制基準（線量/リスク基準）内であれば、BATの範囲内において放射線防護の最適化の努力が行われる。**  
※一方、最適化における長期安全性に関する評価では、一定の裕度をもって規制限度以下となるようにすべき（線量拘束値を設計目標として使用するが順守限度としては使用しない）とする国もある（カナダ）。
  - リファレンス方法と代替方法（代替設計オプション）の比較評価による最適化の方法論を明示的に説明。
  - リファレンス方法のリスクと同じかそれより低いリスクにつながる場合にのみ、代替方法（設計・仕様、施工・管理方法）を採用できる。**
- 最適化の目的の1つとして、**実施すべき「研究開発課題の明確化」**をあげている国もある（フランス、スイス）。

### 『最適化』に係る事業者の対応（技術資料）から窺える事項

- 幾つかの国のセーフティケース文書から、特に技術的観点から、更に詳細な最適化の**評価指標のみならず、最適化に係る設計要素（或いは設計因子への影響要素）の抽出が可能。**
  - 段階的なセーフティケース開発の差分（最適化）を説明 ⇒ フランスなど
  - 地下構成要素毎に、最適化に係る設計要素を丁寧に記載 ⇒ フィンランド、フランスなど
- 但し、調査における以下のような制約や課題もある。
  - 1断面のセーフティケースだけでは、オプション比較等の詳細が記載されていない場合がある  
⇒ 複数断面のセーフティケースから差分を読み解く必要がある（但し、有益な情報があるかは別問題）
  - 設計要素は、各国の地質環境に応じたスペシフィックな処分概念・設計に特化している可能性がある  
⇒ わが国に適用できない可能性に留意

2

## 調査結果の要約 2 : 主要国の検討動向等から抽出した評価項目等の分析・整理結果

### ○主要国の検討動向等から抽出した最適化に係る評価項目

原典資料からの抜粋（分析・解釈・統合等を加味して表現の見直しや調整を施したもの）

- 要件への適合性
- 品質保証
- 経済性・費用
- 社会的要素（社会的及び社会経済学的検討事項）
- 建設の容易性
- 操業（閉鎖）の容易性
- 操業時に扱いやすい重量（廃棄体）
- 操業期間中の構造物の安定性・制御性(管理し易さ)
- 物流
- 中間貯蔵
- 放射線管理区域とそうでない区域の分離性
- 立ち入り禁止区域の最小化
- 区画設定
- 区域内の線量率を抑制（制御性）
- 作業空間の区分性
- 遠隔操作性
- 既存技術の利用可能性
- 回収可能性
- 閉鎖前の安全性
- 一般労働安全
- 閉鎖後長期の安全性
- 将来の人間活動に関する不確実性（⇒人間侵入）
- 予測の信頼性
- 不確実性
- 事故発生時における全ての場所へのアクセス性

※抽出・整理において参照した国

【法規制文書】

フィンランド、スウェーデン、米国、フランス、  
スイス、カナダ

【実施主体技術資料】

フィンランド、スウェーデン、フランス、(米国)

3

余白

4

## 詳細①：フィンランド

### 資料構成

リファレンス設計（基本設計・仕様）

分析・整理結果：フィンランド（1/2）

分析・整理結果：フィンランド（2/2）

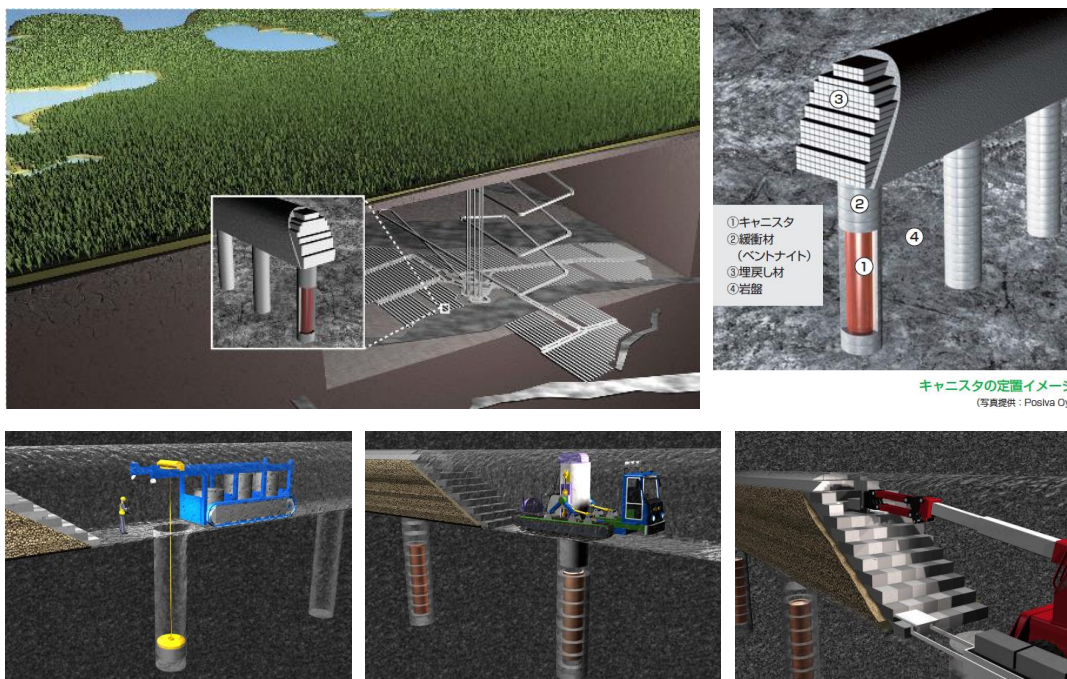
原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求

原典資料② 『最適化』に係る事業者の対応（Posiva）（POSIVA 2012-05）

原典資料③ 『最適化』に係る事業者の対応（Posiva）（POSIVA 2012-16～18）

5

### リファレンス設計（基本設計・仕様）



図出典) 右上図：資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2020年版）」  
右上図以外はPosiva社ホームページより（<https://www.posiva.fi/en/index/media/material.html>）

6



## 分析・整理結果：フィンランド（1/2）

### (1) 法規制文書における『最適化』に係る要求

★資料名称：

- 1) 原子力廃棄物の処分における安全性に関する政令（2008）
- 2) 放射線法（2015改）
- 3) STUK YVL D.5 STUK規制指針YVL D.5 原子力廃棄物の処分（2013）

- 規制要件の記述は定性的。
- 最適化は放射線防護の観点のみ。

### (2) 『最適化』に係る事業者（Posiva）の対応

★資料名称：

- 1) **TURVA-2012** Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012 (POSIVA 2012-12)
- 2) Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Description of the Disposal System 2012 (POSIVA 2012-05)
- 3) Production Line 2012; Canister (2012-16), Buffer (2012-17), Backfill (2012-18), Closure (2012-19)

- 上位文書である上記1)には、“最適化”を直接的に表現した記述はない。
- 上記2)および3)の支援文書に“最適化”に関連する記述が存在。

7

## 分析・整理結果：フィンランド（2/2）

### 原典資料から窺える最適化に係る評価項目

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
Posiva 2021-05より ●要件への適合性、●経済性  Posiva 2021-16～18より ●経済性、●品質保証	●要件への適合性 ●品質保証 ●経済性

【参考】POSIVA技術資料から窺える最適化に係る設計要素（地下構成要素に対応した整理）

対象地下構成要素	最適化に係る設計要素（或いは設計因子への影響要素） （※各国のリファレンス方法に固有の要素が含まれる可能性に留意）
使用済燃料	●熱伝達性・熱伝導性
キャニスタ	●サイズと形状（機械強度、放射線遮蔽、冷却効率） ●燃料収容数（最大化） ●キャニスタ重量（最小化）
緩衝材	●製造プロセス
埋め戻し材	●実効モニタロナイト乾燥密度 ●材料選定・製造仕様（加圧負荷、含水比、粒径分布）
その他（建設、製造・施工に関する『技術選択』の問題と整理）	●掘削技術（掘削形状の仕上げ誤差）

8

原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求

- 原子力廃棄物の処分における安全性に関する政令（2008）
- 放射線法（2015改）
- STUK YVL D.5 STUK規制指針YVL D.5 原子力廃棄物の処分（2013）

規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
原子力廃棄物の処分における安全性に関する政令（2008）	<p>第2章 放射線安全性</p> <p>第3条 原子力廃棄物施設の操業</p> <p>原子力廃棄物施設及びその操業は、次に挙げる要領によって設計されなければならない。</p> <p>(1) 施設での作業員被ばくが放射線令（1512/1991）に記載されている最大値を超えないように、あらゆる考え得る実践的な措置を講じることによって制限すること。</p> <p>(2) 原子力廃棄物施設が障害なく操業されているときに、放射性物質の環境への放出がきわめて低水準になること。</p> <p>(3) 想定運転事象の結果、施設作業員以外で最大の放射線被ばくを受ける人々が0.1 mSvを超える実効年間線量を受けないこと。</p> <p>(4) 仮想事故の結果、施設作業員以外で最大の放射線被ばくを受ける人々が次に示す値を超える年間線量を受けないこと。</p> <p>(a) 等級1の仮想事故の場合には1 mSv。</p> <p>(b) 等級2の仮想事故の場合には5 mSv。</p> <p>この条の適用において、処分施設の母岩中の自然放射性物質、及び地下水を通じて地下空洞内に放出される自然放射性物質に起因する線量は考慮しない。</p>
放射線法（2015改）	<p>第2条 一般原則</p> <p>放射線の使用および放射線被ばくが関係する行為が許容可能と見なされるためには、以下の要件を満たさなければならない。</p> <p>1) その行為から引き出される便益が、それによって引き起こされる害より大きいこと（正当化の原則）</p> <p>2) その行為の結果として生じる健康にとって危険な放射線被ばくを合理的に達成可能な限り低く維持できるようにその行為が手配されること（最適化の原則）</p> <p>3) いかなる者も、政令によって規定される最大値を超える放射線被ばくを受けないこと（個人防護の原則）</p> <p>放射線・原子力安全センター（STUK）は、個人が受ける放射線被ばくを計算するベースに関する詳細な規則を定めることができる。（22.5.2015/677）</p>
STUK YVL D.5 STUK規制指針 YVL D.5 原子力廃棄物の処分（2013）	<p>3 原子力安全及び放射線安全</p> <p>3.1 処分施設の操業</p> <p>302. 政令736/2008の第3条、および放射線法の第2条の最適化原則に準拠し、処分施設は、施設の通常の操業に起因して、最も被ばくを受ける母集団(population)の個人の平均年間線量が0.01 mSvの拘束値以下となるよう設計しなければならない。</p>

9

原典資料② 『最適化』に係る事業者の対応 (Posiva)

Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Description of the Disposal System 2012 (POSIVA 2012-05)

内容（原典資料からの抜粋）

4.3.2 Disturbances caused by excavation and operation Mechanical impacts and EDZ

… Mustonen et al. (2010, p. 165) list several recommendations regarding excavation and blasting to improve the quality of excavation, including the use of digital detonators, since the key to **minimising the EDZ is to optimise the excavation work.** …

5. INITIAL STATE OF THE SPENT NUCLEAR FUEL - 5.1 Spent nuclear fuel types - 5.1.1 Overview

… the power distribution inside the assembly is kept even and the **heat transfer is optimized.** …

6. INITIAL STATE OF THE CANISTER - 6.1 Reference design and alternatives - 6.2 Geometries and masses

**The size and shape** of the canisters have been derived based on the space needed for the actual spent nuclear fuel assemblies and on requirements for **mechanical strength, radiation shielding and cooling capability.** Economic optimisation has also been carried out, which **maximises the number of positions for assemblies in the canister and minimises the size (or weight) of the canister,** constrained by the performance requirements. **The current reference canister design is the result of several stages of optimisation.** …

7. INITIAL STATE OF THE BUFFER - 7.3 Material properties - 7.3.2 Buffer properties and saturation

The **manufacturing process will be optimised** by testing of methods and products (block properties such as strength, stiffness, dry density, etc.). …

8. INITIAL STATE OF THE DEPOSITION TUNNEL BACKFILL AND PLUG - 8.4 Material properties - 8.4.1 Deposition tunnel backfill

Variations in **average dry density** and EMDD

The average dry density is calculated from the total mass of backfill materials and the total volume of the tunnel. Assuming the initial range of component dry densities presented in Table 8-1 and excavation tolerances of 0–400 mm on the floor and 0–300 mm of the tunnel walls/roof, the dry density for the OL1–3 cases can vary between 1608 and 1924 kg/m<sup>3</sup> the average being 1758 kg/m<sup>3</sup> (see Figures 8-6 below and Appendix 5-1 in Backfill Production Line). The corresponding values for the LO1–2 tunnels are 1603–1928 kg/m<sup>3</sup> with an average of 1757 kg/m<sup>3</sup> (see Figures 8-7 below and Appendix 5-2 in Backfill Production Line). The large range is mostly due to large variations in the tunnel geometry. The effect of variance in the initial backfill dry densities is only ±60 kg/m<sup>3</sup>. Therefore, if a smaller range is desired, the **best option would be to optimise tunnel excavation techniques.** …

… If a smaller EMDD (effective montmorillonite dry density) range is desired, the **tunnel excavation techniques need to be optimized** to gain smaller tolerances.

【分析】原文から示される最適化の**評価項目**および**設計要素**

- 掘削作業（EDZの最小化）⇒ **技術選択の問題**
- 使用済燃料：熱伝達・伝導性⇒ **要件への適合性**
- キャニスタ：
  - ・ **サイズと形状**（機械強度、放射線遮蔽、冷却効率）
  - ⇒ これ自体は設計要素だが**要件への適合性、経済性**に関連
  - ・ **経済性**（燃料収容数の最大化、キャニスタ重量の最小化）
- 緩衝材：製造プロセス
- 埋め戻し材（実効モンモリロナイト乾燥密度）：掘削技術⇒ **技術選択の問題**

10

### 原典資料③『最適化』に係る事業者の対応 (Posiva)

- POSIVA 2012-16, Canister Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Canister
- POSIVA 2012-17, Buffer Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Buffer
- POSIVA 2012-18, Backfill Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug

内容 (原典資料からの抜粋)

#### POSIVA 2012-16, Canister Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Canister

##### 3 CANISTER REFERENCE DESIGN – 3.1 Insert – 3.1.3 Insert dimensions

… **Economic optimisation** has led to **maximising the number** of the positions for assemblies in the canister and to **minimizing the size** (or weight) of the canister. …

##### 5 MANUFACTURING OF CANISTERS – 5.1 Overview – 5.1.2 Strategy for inspections

… All NDT (nondestructive testing) inspections in every manufacturing phase are based on the **optimised detectability** and **sufficient sizing capability of the testing methods**. The detectability of defects is ensured by POD curves (Probability of detection curves) for defect types which are specific for manufacturing or welding.. …

#### POSIVA 2012-17, Buffer Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Buffer

##### 5 PRODUCTION OF THE BUFFER – 5.3 Manufacturing of blocks and pellets – 5.3.3 Machining of blocks

… To minimise the machining work of blocks, it is crucial that the dimensions of the isostatically compressed green blocks are as close as possible, but slightly larger, than the final required dimensions. This can be achieved by **optimising the mould filling and compression process**. …

#### POSIVA 2012-18, Backfill Production Line 2012 Design, Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug

##### 4 PRODUCTION OF THE BACKFILL – 4.2 Principles of quality assurance over the whole production chain – 4.2.3 **Quality assurance** of the production line

… Risk analysis can be used to **optimize** the **logistical** and **technical control points** and the needed **quality control measurements** in the different steps of the production line. …

##### 4 PRODUCTION OF THE BACKFILL – 4.7 Manufacturing of pellets – 4.7.3 Manufacturing method

… The pelletising rate and pellet properties can be **optimised for the material** by changing the **compressive load, humidity** and **grain size** of the raw material. …

##### 4 PRODUCTION OF THE BACKFILL – 4.7 Manufacturing of pellets – 4.7.5 Experiences from pellet production

… Experiences from this project will be used in **optimising** the properties of the pellet fill including **water content** and **grain size distribution**. …

(※POSIVA 2012-18には、その他に底盤層等の施工物等に対して同様の記述あり⇒本資料では割愛)

#### 【分析】

- 最適化の評価指標：経済性、品質保証
- 構成要素の要求性能達成の観点からの最適化の対象（加圧負荷、含水比、粒径分布など）  
⇒これは、要件達成のための設計要素（材料選定・仕様設定）と製造・施工技術選定の問題と分類

11

余白

12



## 分析・整理結果：スウェーデン（1/2）

### (1) 法規制文書における『最適化』に係る要求

★資料名称：SSMFS 2008:37 使用済燃料及び原子力廃棄物の最終管理における人間の健康と環境の保護に関する放射線安全機関の規則/一般勧告（2008）

- 規制要件の記述は定性的。
- 最適化は主に放射線防護（長期安全）の観点。利用可能な最善技術（BAT）が同時に論じられる。
- 規制基準（線量/リスク基準）内であれば、BATの範囲内において放射線防護の最適化の努力が行われる。

### (2) 『最適化』に係る事業者（SKB）の対応

★資料名称：SR-Site（2011）SR-Siteプロジェクト総括報告書（SKB TR-11-01）

○上記技術資料の下記セクションに、最適化（およびBAT）に係る記述（§2.7、§14.3、§15.3.5）

○方法論（§14.3より）：

- 比較評価の元となる**特定の設計（基本設計・仕様）および実現方法（施工・管理方法）をレファレンス方法**として定め、レファレンスからの変更を「リスク低減」や「リスクに影響を及ぼす不確実性の低減」の観点から**比較評価**。  
⇒SR-Siteでの最適化・BATの評価は、「選定したサイトにおける、銅/鉄製キャニスタ、緩衝材、及び埋め戻し材を用いた、垂直定置方式のKBS-3の手法」に特定。
- リスクまたは不確実性の低減が現実的に実現可能と認められないものは、レファレンス方法が既に最適化されており、BATを満たしていると主張できる。
- レファレンス方法のリスクと同じかそれより低いリスクにつながる場合に限り、**代替方法（設計・仕様、施工・管理方法）を採用できる**。
- 評価項目として、リスクに寄与するシナリオとそれらに関連する安全機能に焦点**。リスクに直接寄与しない他の主な設計（埋め戻し材、シーリングまたは処分場の深度など）についても、安全機能への影響の観点から評価。  
⇒最適化の主たる評価対象は放射線防護（評価項目の大項目は「閉鎖後長期の安全性」）

※参考：設計において『希釈』を安全機能の1つとして組み込むことが検討された（TR-11-01、§8.1.2）。

15

## 分析・整理結果：スウェーデン（2/2）

### 原典資料から窺える最適化に係る**評価項目**

○有益な情報を抽出できず・・・。

⇒ 今後時間余裕があれば、設計オプション開発(KBS-3H)の意図などから評価項目を探りたい

### 【参考】SKB技術資料から窺える最適化に係る設計要素（設計因子への影響要素）

○閉鎖後長期の安全性に関する、BATおよび最適化に係る規制要件への遵守を示すために、安全機能（閉じ込め、遅延能力）への影響の観点から、キャニスタの健全性に関連する3つの影響要素について、レファレンス方法（特定の設計・実現方法）の十分性を説明（TR-11-01 §14.3）。

安全機能への影響因子	影響因子に係る設計要素 (※各国のレファレンス方法に固有の要素が含まれる可能性に留意)
キャニスタ腐食破損の可能性	緩衝材中が移流環境となる可能性（腐食発生の要因）に関連する因子・要素 <ul style="list-style-type: none"> <li>●緩衝材の浸食回避の可能性</li> <li>●緩衝材の密度</li> <li>●埋め戻し材の密度</li> <li>●使用される緩衝材のタイプ</li> <li>●地下水化学（地下水イオン強度など）</li> <li>●流量増加につながる地圏条件</li> </ul> 腐食破損の可能性（緩衝材が浸食された場合）に影響を及ぼす設計要素 <ul style="list-style-type: none"> <li>●銅製シールの肉厚</li> <li>●定置孔の利用可否規準</li> </ul>
キャニスタ剪断破壊の可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●特性</li> <li>●定置孔除外の実施効果インサートの強度および欠陥発生</li> <li>●銅製外殻容器の力学特性</li> <li>●緩衝材の密度および材料</li> </ul>
リスクに寄与しない他の設計関連要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>●均衡荷重超過による破損</li> <li>●定置坑道埋め戻し材の寸法および材料特性</li> <li>●閉鎖材の寸法および材料特性</li> <li>●処分場深度</li> <li>●その他；化学的安定性（塩分濃度、酸化還元および硫化物）、水理学的な移動経路の長さ及び移行抵抗（処分場への、処分場から）、亀裂（頻度および透水量係数）、地下水圧、岩盤応力、初期温度、凍結、地表の浸食、偶発的な人間侵入</li> <li>●その他のレイアウトを行う上での問題（定置孔の正確な位置、除外定置孔の位置など）</li> </ul>

16

## 原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求

SSMFS 2008:37 使用済燃料及び原子力廃棄物の最終管理における人間の健康と環境の保護に関する放射線安全機関の規則/一般勧告 (2008)

規定内容 (原典参考和訳資料からの抜粋)

### 第4条

#### 最適化と利用可能な最善の技術

規則では、(訳補足：使用済燃料及び原子力廃棄物の最終管理においては、)最適化を行わなければならない、その際には、利用可能な最善の技術 (BAT) を考慮しなければならないことを要求している。この最適化と利用可能な最善の技術は、処分場の防護能力の改善を目的として併用すべきである。

処分場の最適化のための措置は、計算されたリスクに基づいて評価すべきである。

最終処分に係わる利用可能な最善の技術の適用とは、処分場及びそれに付属するシステム構成要素の立地、設計、建設、操業及び閉鎖が、合理的に可能な限りの範囲において、人工バリアと地層バリアの両方からの放出を防止し、制限し、遅延させるように実行すべきであることを意味している。様々な措置の間のバランスを取る際には、処分場の防護能力に対するそれぞれの影響に関する包括的な評価を実施すべきである。

計算されるリスクに著しい不確実性が伴うケース、例えば、閉鎖から長い期間が経過した後の処分場の解析や、処分場システムの開発作業の初期段階で実施される解析等では、利用可能な最善の技術をより重視すべきである。

最適化と利用可能な最善の技術の適用の間で矛盾が生じた場合、利用可能な最善の技術の方に優先順位を与えるべきである。

処分場に関して反復して行われるリスク解析及び継続的な開発作業を通じて蓄積される経験は、こうした最適化及び利用可能な最善の技術の適用において活用すべきである。

17

## 原典資料② 『最適化』に係る事業者の対応 (SKB)

SR-Site (2011) SR-Siteプロジェクト総括報告書 (SKB TR-11-01)

内容 (原典参考和訳資料からの抜粋)

### 2. 方法論 - 2.7 BATと最適化について

(RWMC注；評価指標の抽出の観点で有益な情報が無いので割愛)

### 14. 補足的な解析と裏づけとなる論拠 - 14.3 最適化及び利用可能な最善技術の利用の立証に必要な解析

#### 14.3.1 はじめに

(前略) SR-Site評価の枠内でBATに関する最終的な判断を下すことはできないが、この種の判断のための根拠を提供することはできよう。セクション 1.2の「はじめに」で述べたように、SR-Siteは処分場の人工部分の基本設計に基づいたものであり、この中には、基本設計の仕様 (specification) を実現するための管理方法を考慮した上で、ある特定の設計を実現するためのレファレンス方法が含まれる。この基本設計を変更することでリスクの低減やリスクに潜在的に影響を及ぼす不確実性の低減を実現できるかどうかについて、フィードバックできる可能性がある。設計の幾つかの側面のうち、安全機能の達成において、この種のリスクまたは不確実性の低減が現実的に実現可能だと認められないものについては、当該解決策が既に最適化されており、BATを満たしていると主張できる。ただしSR-Siteは、考え得る全ての技術的解決策を評価するものではない。SKB社は今後も、建設及び実施をより単純化するために、設計の幾つかの側面に関する技術開発を継続する予定であるが、こうした開発の成果を採用するのは、それがSR-Siteで明らかにされたリスクと同じかそれより低いリスクにつながる場合に限られる。(後略)

(RWMC注；以下、詳細は原典を参照されたい)

#### 14.3.2 腐食破損ポテンシャル

(緩衝材の浸食回避の可能性、緩衝材の密度、埋め戻し材の密度、使用される緩衝材のタイプ、地下水化学 (地下水イオン強度など)、流量増加につながる地圏条件、腐食破損の可能性 (緩衝材が浸食された場合) に影響を及ぼす設計要素、銅製シールの肉厚、定置孔の利用可否規準)

#### 14.3.3 剪断破損ポテンシャル

(特性、定置孔除外の実施効果インサートの強度および欠陥発生、銅製外殻容器の力学特性、緩衝材の密度および材料)

#### 14.3.4 リスクに寄与しない設計関連要素

(均衡荷重超過による破損、定置坑道埋め戻し材の寸法および材料特性、閉鎖材の寸法および材料特性、処分場深度、その他；化学的安定性 (塩分濃度、酸化還元および硫化物)、水理学的な移動経路の長さ及び移行抵抗 (処分場への、処分場から)、亀裂 (頻度および透水量係数)、地下水圧、岩盤応力、初期温度、凍結、地表の浸食、偶発的な人間侵入、その他のレイアウトを行う上での問題 (定置孔の正確な位置、除外定置孔の位置など) )

18

## 詳細③：米国

### 資料構成

リファレンス設計（基本設計・仕様）

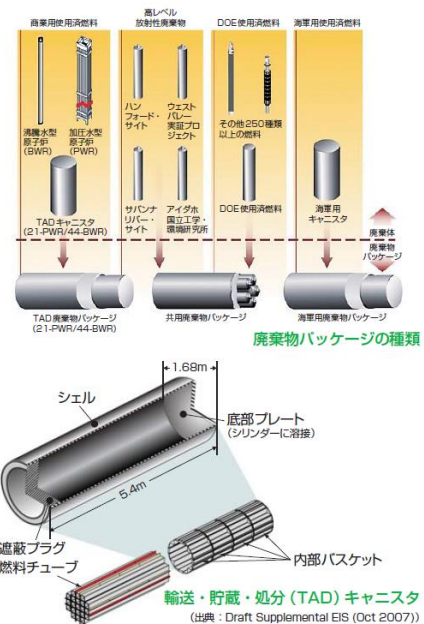
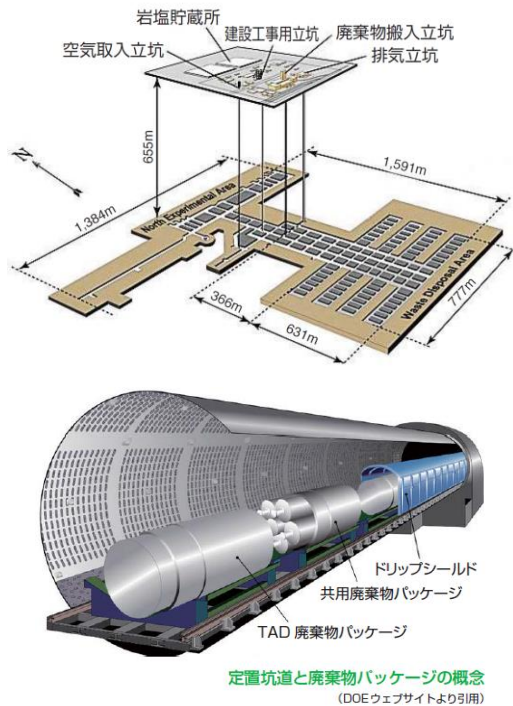
分析・整理結果：米国（1/2）

分析・整理結果：米国（2/2）

原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求（NRC規則 10 CFR Part 20, 61,63）

19

### リファレンス設計（基本設計・仕様）



図出典) 資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について (2020年版)」

20

## 分析・整理結果：米国（1/2）

### (1) 法規制文書における『最適化』に係る要求

★資料名称：

- 1) NRC規則 10 CFR Part 20「放射線に対する防護の基準」
- 2) NRC規則 10 CFR Part 61「放射性廃棄物の陸地処分のための許認可要件」
- 3) NRC規則 10 CFR Part 63「ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分」

○「最適化」という表現での規定はなく、「ALARA」の観点から放射線防護の最適化に関連する規定がある。

○放射線防護の最適化であるが、その評価項目として、「**経済性**」、「**(合理性)**」、「**社会的及び社会経済学的検討事項**」が挙げられている。

### (2) 『最適化』に係る事業者（DOE）の対応

★資料名称：

- 1) **TSPA-LA** Yucca Mountain Repository License Application SAFETY ANALYSIS REPORT (DOE/RW-0573)

○上記文書の§1.10および§1.12において、NRC規則等への対応（ALARAに関する要件への適合）の内容を以下の構成で記載しているが、最適化の評価指標の観点から得られる情報は限定的。

§1.10	1.10.1 線量をALARAに維持する管理義務 1.10.2 設計におけるALARAの原則 1.10.3 地上及び地下の遮へい設計 1.10.4 操業におけるALARAの原則
§1.12	1.12.1 永久閉鎖および廃止措置のための設計への考慮 1.12.2 永久閉鎖のための計画 1.12.3 地上施設の除染および廃止措置のための計画

○但し、上記セクションには「最適化（optimisation）」のキーワードでの記載は見つげられない（本資料での原典資料の抜粋は割愛）。

21

## 分析・整理結果：米国（2/2）

### 原典資料から窺える最適化に係る**評価項目**

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
10 CFR Part 20より ●経済性 ●社会的及び社会経済学的検討事項	●経済性 ●社会的及び社会経済学的検討事項

22



**原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求**

- NRC規則 10 CFR Part 20「放射線に対する防護の基準」
- NRC規則 10 CFR Part 61「放射性廃棄物の陸地処分のための許認可要件」
- NRC規則 10 CFR Part 63「ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分」

規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
10 CFR Part 20 「放射線に対する 防護の基準」	<p><b>§20.1003 定義</b></p> <p>「ALARA（「合理的に達成可能な限り低く（as low as is reasonably achievable）」）」は、技術の現状、技術の現状に関連した改善の<b>経済性</b>、公衆の健康と安全への便益に関連した改良の<b>経済性</b>、他の<b>社会的及び社会経済学的検討事項</b>を考慮し、及び公共の利益になる原子力及び認可物質の利用に関連して、認可された活動が着手される目的に実際には一致する本Partの線量限度をはるかに下回る放射線被ばくを維持するためにあらゆる合理的な方策を行うことを意味する。</p>
10 CFR Part 61 「放射性廃棄物の 陸地処分のための 許認可要件」	<p><b>§61.41 放射能放出からの一般国民の防護</b></p> <p>地下水、地表水、空気、土壌、植物あるいは動物といった一般環境受容体に放出される放射性物質の濃度は、公衆の年間線量として全身で25mrem、甲状腺で75mrem、及び他の器官で25mremを超えてはならない。流出物中の放射能の一般環境への放出は、<b>合理的に達成可能な限り低く保つように十分な努力</b>を払わなければならない。</p> <p><b>§61.43 操業中の個人の防護</b></p> <p>陸地処分施設における操業は、本章のPart 20（10 CFR Part 20）に規定されている放射線防護基準に従って行わなければならない。ただし、陸地処分施設からの流出物中への放射能放出に関しては本Partの§61.41によって規制されるので除く。<b>各々の合理的な努力は、放射線被ばくが合理的に達成可能な限り低く保つようになされなければならない。</b></p>
10 CFR Part 63 「ネバダ州ユッカマウンテン地層処分場での高レベル放射性廃棄物の処分」	<p><b>閉鎖前性能目標</b></p> <p><b>§63.111 永久閉鎖に至るまでの地層処分場操業エリアに関する性能目標</b></p> <p>(a) 放射線被ばく及び放射性物質の放出に対する防護</p> <p>(1) 地層処分場操業エリアは本章の<b>パート20の諸要件に適合しなければならない。</b></p> <p>(2) 通常の操業期間中、またカテゴリ-1の事象シーケンスにおいて、サイト境界線を越えた位置にいる公衆のいずれかの現実の構成員が受ける年間TEDE（これ以降は「線量」という言葉を使用する）が、§63.204で指定された閉鎖前基準を上回ることはできない。</p> <p><b>閉鎖後性能目標</b></p> <p><b>§63.113 永久閉鎖後の地層処分場の性能目標</b></p> <p>(a) 地層処分場には、多重バリアが含まなければならない。この多重バリアは、天然バリアと人工バリア・システムの両方で構成される。</p> <p>(b) 人工バリア・システムの設計は、天然バリアと共に働く形で、<b>合理的に最大の被ばくを受ける個人の放射線学的な被ばくが、本PartのサブパートLの§63.311において指定された限度内に収まるようにするものでなければならない。</b>また本パラグラフの順守は、本サブパートの§36.114、さらには本PartのサブパートLの§63.303、§63.305、§63.312及び§63.342において指定された諸要件に適合する性能評価を通じて立証されなければならない。</p>

23

余白

24

## 詳細④：フランス

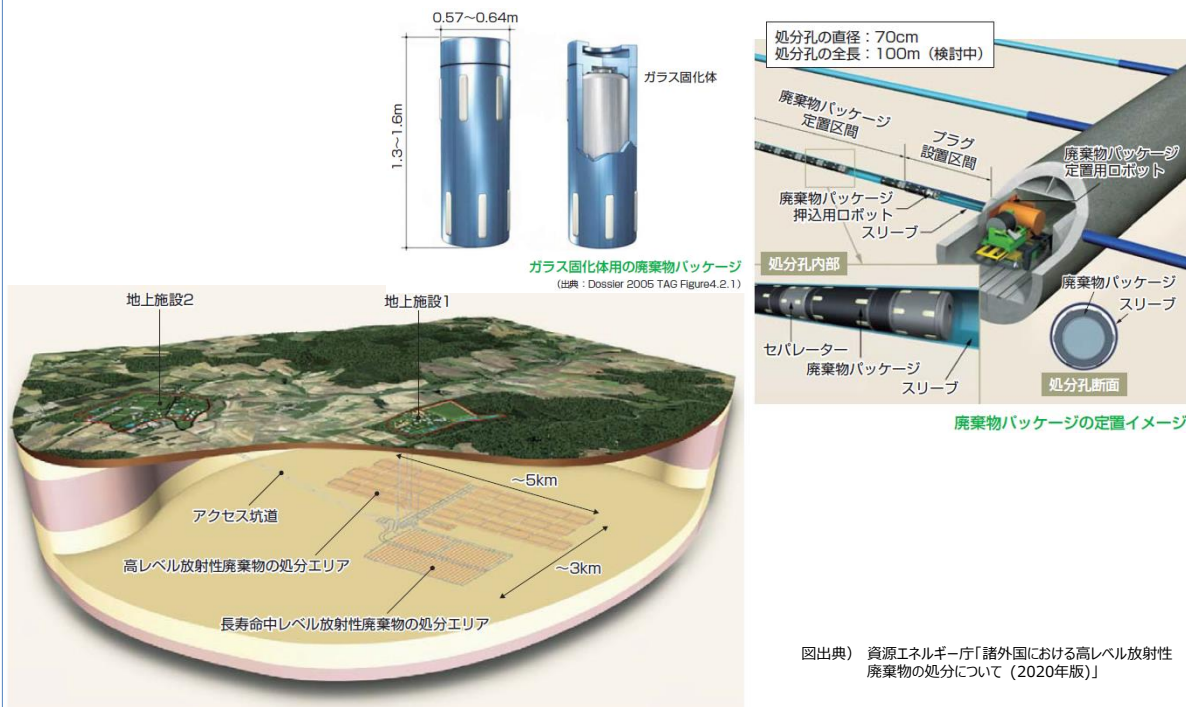
### 資料構成

リファレンス設計（基本設計・仕様）  
 分析・整理結果：フランス（1/3）  
 分析・整理結果：フランス（2/3）  
 分析・整理結果：フランス（3/3）

原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求  
 原典資料②-1 『最適化』に係る事業者の対応（ANDRA, Dossier2009）  
 原典資料②-2 『最適化』に係る事業者の対応（ANDRA, 2016安全オプション）  
 参考資料：『最適化』に係る事業者（ANDRA）からのヒアリング情報

25

### リファレンス設計（基本設計・仕様）



フランスにおける処分場の概念図

※地上施設1には作業員や物資等の輸送用立坑が、地上施設2には廃棄物輸送用の斜坑を配置することが検討されている。

図出典) 資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2020年版）」

26

## 分析・整理結果：フランス（1/3）

### (1) 法規制文書における『最適化』に係る要求

★資料名称：

- 1) 環境法典（適時の政令等を編算下もの）
- 2) ASN安全指針「深地層における放射性廃棄物の最終処分に関する安全指針」

○「最適化」という表現での規定はなく、「ALARA」の観点から放射線防護の最適化に関連する規定がある。

○ALARA（放射線防護の最適化）に係る評価項目として、「**経済性**」、「**(合理性)**」、「**社会的要素**」が挙げられている。

### (2) 『最適化』に係る事業者（ANDRA）の対応

★資料名称：

- 1) Dossier 2009, Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde（関係者限定配布版資料）
- 2) 2016 地層処分安全オプション書類 閉鎖後編（Safety Options Report -Post-Closure Part）
- 3) 参考：2016年度のヒアリング調査結果情報

○規則が要求する放射線防護の観点のみならず、Dossier2005以降の段階的な技術進展における改善点に係る情報が、限定的ではあるが明示的に記載されている。

⇒ 技術的な対応の観点を含めた最適化に係る事項（次ページの整理表）

○最適化の目的の1つとして、実施すべき研究開発課題の明確化がある。

27

## 分析・整理結果：フランス（2/3）

### 原典資料から窺える最適化に係る**評価項目**

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した <b>評価項目</b> の案（分析・解釈・統合等を加味）
<b>法規制文書より</b> ●経済性、●社会的要素  <b>ANDRA技術資料（2009年）より</b> ●経済的な要素（費用/便益）、●操業のしやすさ、●中間貯蔵、●ロジスティックス（物流）、●標準化、●特別な技術を開発する代わりに既存の手法を利用すること、●可逆性、●作業者の被ばくを制限するための放射線防護措置及び区画設定、●遠隔操作、●区域内の線量率を抑制  <b>ANDRA技術資料（2016年）より</b> ●安全性、●技術の遂行、●経済性/費用、●地下構造物構築(建設)の容易性、●操業期間中の構造物の安定性・制御性(管理し易さ)、●建設・操業・閉鎖び容易性  <b>ANDRAヒアリング調査より</b> ●操業時に扱いやすい重量、●遠隔操作、●被ばく線量に基づく作業空間の区分（⇒立ち入り禁止区域の設定）、●コンパクトな立ち入り禁止区域	●要件への適合性 ●社会的要素 ●建設の容易性 ●操業（閉鎖）の容易性 ●操業時に扱いやすい重量（廃棄体） ●操業期間中の構造物の安定性・制御性(管理し易さ) ●物流 ●中間貯蔵 ●放射線管理区域とそうでない区域の分離性 ●立ち入り禁止区域の最小化 ●区画設定 ●区域内の線量率を抑制（制御性） ●作業空間の区分性 ●遠隔操作性 ●既存技術の利用可能性 ●回収可能性 ●費用・経済性

28

## 分析・整理結果：フランス（3/3）

【参考】ANDRA技術資料から窺える最適化に係る設計要素（評価項目に対応した整理）

評価項目	最適化に係る設計要素（或いは設計因子への影響要素） （※各国のリファレンス方法に固有の要素が含まれる可能性に留意）
閉鎖前の安全性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 遮へい設計</li> <li>● 線源からの物理的距離</li> <li>● 作業環境（の安全性）</li> <li>● 過剰な安全設計の抑制</li> </ul>
建設の容易性	<ul style="list-style-type: none"> <li>● （プラグ等の）シール機構の性能・設置場所・数量</li> <li>● 処分坑道の長大化（処分坑道数の最小化、主要坑道等の最小化、種類の異なる廃棄体の混合定置）</li> </ul>
操業期間中の構造物の安定性・制御性(管理し易さ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 支保工（坑道掘削量の最小化、覆工等厚さの最小化）</li> </ul>

【参考】ANDRA技術資料から窺える最適化に係る設計要素（地下構成要素に対応した整理）

対象地下構成要素	最適化に係る設計要素（或いは設計因子への影響要素） （※各国のリファレンス方法に固有の要素が含まれる可能性に留意）
廃棄物パッケージ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 材料選択（長期的に劣化が遅い不活性な材料の選択）</li> <li>● 廃棄物パッケージの厚さ（厚さの選択における考慮事項） <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 落下時に破損しない</li> <li>・ 扱いやすい重量</li> <li>・ 温度、熱伝導性</li> <li>・ 腐食特性</li> <li>・ 地下水の化学的特性</li> <li>・ 線量</li> </ul> </li> </ul>
地下施設配置	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 上下に十分な厚さの粘土層の確保</li> <li>● 地上と連結する立坑および斜坑の地下1箇所での集約</li> <li>● 地上と連結する坑道の配置</li> </ul>

29

### 原典資料① 法規制文書における『最適化』に係る要求

- 環境法典（適時の政令等を編算下もの）
- ASN安全指針「深地層における放射性廃棄物の最終処分に関する安全指針」

規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
環境法典（適時の政令等を編算下もの）	<p><b>第三章：原子力基本施設 – 第4節：原子力基本施設の設置</b></p> <p><b>第R593-18条</b> 2019年3月14日付デクレ第2019-190号の第2条による新条項 （前略）Ⅲ.- 暫定版（第R. 593-16条に定める安全報告書の暫定版）は、当該事業計画が、技術的知見の現状、慣行、及び当該施設の環境の脆弱性を踏まえたうえで、<b>経済的に許容可能な条件において合理的に可能な限り低いリスクのレベルを達成することができることを証明する。</b>（後略）</p> <p><b>第R593-19条</b> 2019年3月14日付デクレ第2019-190号の第2条による新条項 （前略）リスクマネジメント研究報告書は、当該事業計画が、当該施設の知見、慣行、及び環境脆弱性の現状を踏まえたうえで、<b>経済的に受け入れられる条件において合理的な可能な限り低いリスクのレベルを達成することができることを証明する。</b></p>
ASN安全指針「深地層における放射性廃棄物の最終処分に関する安全指針」	<p><b>4. 基本目標</b></p> <p><b>4.1 目標</b> （前略） 処分施設の閉鎖後は、人の健康と環境の保護は、一定の限られた期間以降も確実な方法で維持することが出来ない監視や制度的管理に依存するものであってはならない。 したがって、介入を行う必要なしに放射性廃棄物に含まれる放射性物質や化学毒性に対して人及び環境を保護するために、閉鎖後の安全性を自動的に確保できるように地質環境を選択し処分施設を設計する。 この点について、<b>処分に関して採用される概念は、得られる科学知識、最新技術、並びに様々な経済及び社会的要素を考慮して、合理的に実現可能な最低レベルに放射線影響を保つことを可能としなければならない。</b> ※上記の英文：In this respect, the design retained for the repository will have to allow the radiological impact to be kept as low as reasonably possible on the basis of the acquired scientific knowledge … 選定されるサイトの特性、処分施設のレイアウト、人工構造物（パッケージ、人工構築物）の設計及びこれらの実施面での品質が、処分の安全性の基礎となる。したがって、これらの要素が基本目標に合致していることを確認する必要がある。この一環として、放射線影響及び化学的影響の評価を行って、目標が確実に達成されていることを確認する。放射線影響については、放射線防護基準を以下に示す。化学毒性については、これらが及ぼす可能性のある影響の許容性について、法的基準、或いは、こうした基準が存在しない場合には、利用可能な勧告に基づいて評価されなければならない。</p> <p><b>4.2 放射線防護基準 – 4.2.2 変動状態</b> （前略） 個人実効線量の計算値と定められた値との比較を除くと、リファレンス状態についても変動状態についても、処分の放射線影響の許容性の評価は、<b>経済及び社会的要素を考慮して合理的に実現可能なレベルと同程度に低いレベルに個人被ばくを抑えるために処分施設の設計者が行う作業の解析結果として得られるものである。</b></p>

30

原典資料②-1『最適化』に係る事業者の対応 (ANDRA)

Dossier 2009, Options de sûreté du stockage en formation géologique profonde

※以下、関係者限定配布版資料（フランス語原典資料の部分翻訳）からの抜粋

内容（原典参考部分和訳資料からの抜粋）

1. 安全アプローチと入力情報 - 1.4 安全に係る一般原則  
(前略)

ALARA：人間及び環境が受ける影響は、**経済的な要素**（たとえば**費用/便益**など）を考慮に入れ、またその時点での科学及び技術面での知識を検討し、**合理的に達成可能な限り低いレベルに低減**されなければならない。この原則は、1世紀という期間を見た場合、可逆性原則とその変遷から分離されるものではない。

(中略)

人間及び環境が受ける影響に関する評価は、その機能と通常の変遷の面から、さらには代替変遷シナリオとの関連において実施され、レファレンス値との比較が行われる。しかしその逆に処分場の設計規準を、「最大許容」線量として設定されるレファレンス値からの逆算によって設定することはできない。このことは、上述したALARA原則に基づき、短期的にも長期的にも当てはまる。したがって「安全裕度」の概念は場合により、**安全性以外の検討事項（すなわち、操業のしやすさ、中間貯蔵、ロジスティクス（物流）、標準化、特別な技術を開発する代わりに既存の手法を利用すること、可逆性など）を動機とする「設計規準の保守的な設定」と結び付くことも考えられる。**これは、必要となった場合には、上述した安全確保の考え方を損なうことなく縮小することができる。  
(後略)

注）本資料での記載は割愛するが、Dossier 2005からの設計変更（最適化）として、放射性物質から生じる電離放射線からの作業員／公衆の保護の観点から、最適化に係る幾つかの設計要素が窺える（以下）。

安全機能に関する機能	示唆される最適化に係る設計要素
放射性物質から生じる電離放射線からの作業員の保護	ALARA原則に基づいて <b>作業員の被ばくを制限するための放射線防護措置及び区画設定</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 放射線防護<b>遮へいに関する設計</b>規準を設定する。</li> <li>● 従業者を放射線源から遠ざける（<b>遠隔操作</b>機器の利用など）。</li> <li>● 作業員が最も線量の多い場所にとどまる時間を限定する。</li> <li>● 規則に従ってリスクが存在する区域を表示する標識を設置する。</li> <li>● あらゆる遮へいの喪失が起こるリスクと、ヒューマン・ファクター及び組織要因に関するリスクの管理を行う。</li> </ul>
放射性物質から生じる電離放射線からの公衆の保護	ALARA原則に基づいて公衆の被ばくを制限するための放射線防護措置 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 囲いが設定された<b>区域内の線量率を抑制</b>する。また特に建屋の設計規準を設定する（又は場合によって土壁などの補完物を設置する）ことにより、<b>スクリーン効果</b>を限定する。</li> <li>● 従業者を<b>放射線源から遠ざける</b>（囲いが設定された区域から距離を置く）。</li> <li>● INBの存在を知らせる標識を設置する。</li> <li>● 外部事象に関わるリスクと建屋の老化に関わるリスクの管理を行う。</li> </ul>

31

原典資料②-2『最適化』に係る事業者の対応 (ANDRA)

2016 地層処分安全オプション書類 閉鎖後編 (Safety Options Report -Post-Closure Part)

内容（原典参考和訳資料からの抜粋）

第IV巻 得られた成果 - 重要な構成要素 - 設計フェーズから実施されている活動

1 基本工学設計段階において得られた成果と今後の安全面での反復作業

1.4 設計変更と最適化の方法をCigeoプロジェクトに漸進的に統合する

(前略)

プロジェクト開発の各段階において、これらの多様な最適化研究の進展と、これらの研究が相互に及ぼす**安全性、技術の遂行**、さらには**費用面**での課題に関する影響の分析により、**これらのバリエーションのうちのいずれを提案されている処分システム構成に組み込むことができるのか、またいずれの研究を並行して継続してなければならぬのか、さらに期限がいつに設定されるべきなのかの定義が可能となる。**

(前略) このアプローチには、**継続的な安全性の改善と技術的及び経済的な最適化のプロセス**の、時の経過とともに利用可能な最良の手法を導入してゆく**必要性**が含まれる。(後略)

注）上記セクションで「基本工学設計段階で特定された閉鎖後安全性に影響を及ぼす可能性のある主要な最適化の機会と技術的なバリエーション」として一覧表整理されている内容（原典資料の上記セクションの表1.4-1より関連部分を抜粋）

【分析】最適化の評価指標ならびに最適化の対象（設計要素）が窺える。  
⇒ 最適化の評価項目：地下構築物構築(建設)の容易性、操業期間中の構築物の安定性・制御性(管理し易さ)、建設・操業・閉鎖の容易性

Optimisation opportunities and technical variants	Technical or technical and economic benefit
Closure structures in the ILW-LL section (backfill)	Optimise the <b>number of seals</b> (performance, position, number) Note: May <b>make construction of the seals</b> in the ILW-LL section <b>easier</b>
ILW-LL drift and cell <b>roof support</b> : use of compressible segments	Correlated <b>reductions of the excavated cross-section and thickness of the concrete</b> <b>Mechanised placement technique</b> that may improve <b>worksite safety</b> Note: <b>increase in control of the stability of the structures throughout Cigeo's operating period</b>
<b>Less conservative design</b> of all the supports-liners based on <b>specified constitutive equation</b>	Correlated <b>reduction of the excavated cross-section and thickness of the concrete</b>
<b>Longer HLW1/HLW2 cell</b> (150 m)	<b>Reduction in the number of HLW1/HLW2 disposal cells and in the drifts lengths in the HLW1/HLW2 sections</b> Note: <b>increase in the ease of construction, operation, and closure</b> of the HLW1/HLW2 sections
<b>Placement of the vitrified ILW-LL waste packages</b> in between the HLW1/HLW2 waste packages	<b>Reduction in the number of ILW-LL disposal cells and thus in the drift lengths in the ILW-LL section</b>

32

参考資料：『最適化』に係る事業者（ANDRA）からのヒアリング情報  
（2016年度のヒアリング調査結果より）

ヒアリング調査から窺える最適化の評価項目（および影響を及ぼす設計要素）

- 閉鎖後長期の防護の最適化（以下によって閉鎖後長期の被ばく線量の低減）
  - 地質環境の選択（透水性の低い粘土層、地震がないこと、断層がないこと、浸食影響を考慮した処分施設の十分な深度の確保）
  - 廃棄物パッケージ（⇒次項目参照）
- 廃棄物パッケージの最適化
  - 長期的に劣化が遅い不活性な材料の選択
  - 廃棄物パッケージの厚さ（以下、厚さの選択における考慮事項）
    - ・落下時に破損しないこと
    - ・操業時に扱いやすい重量であること
    - ・廃棄体の温度
    - ・廃棄物から岩盤への熱伝導
    - ・腐食特性
    - ・地下水の化学的特性
    - ・線量
- 地下施設配置の最適化
  - 地下施設の位置が上下に十分な厚さの粘土層の確保
  - 地上と連結する立坑および斜坑の地下1箇所での集約（対流の抑制、移流による核種移行の起点の集約）
  - 地上と連結する坑道の配置（地下水流の上流側に配置し、核種に汚染された地下水の地上への移行経路となることを防ぐ）
- 操業期間中の防護の最適化
  - 遠隔操作（リモートコントロール）の導入 ⇒ 作業員の被ばく低減（廃棄体の搬送・定置等）
  - 予測される被ばく線量に基づく作業空間の区分 ⇒ 立ち入り禁止区域の設定
  - コンパクトな立ち入り禁止区域（可能な限り小さくする）

33

余白

34

## 詳細⑤：スイス・カナダ（法規制文書のみ調査）

### 資料構成

リファレンス設計（基本設計・仕様）

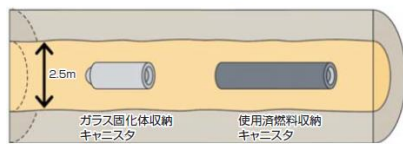
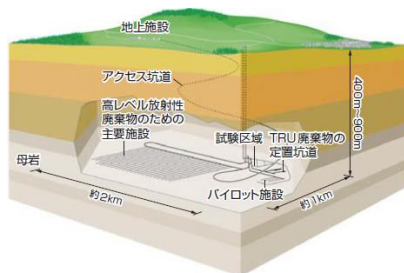
分析・整理結果：スイス・カナダ（法規制）

原典資料①-1 法規制文書における『最適化』に係る要求（スイス）（ENSI-G03）

原典資料①-2 法規制文書における『最適化』に係る要求（カナダ）（G-320）

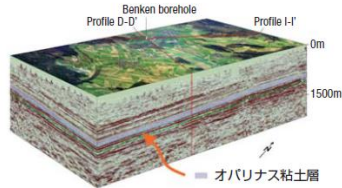
35

### リファレンス設計（基本設計・仕様） 左図：スイス、右図：カナダ

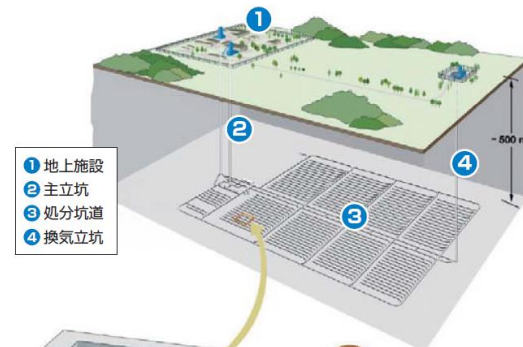


オバリナス粘土層内での高レベル放射性廃棄物の処分場とキャニスタの定置イメージ

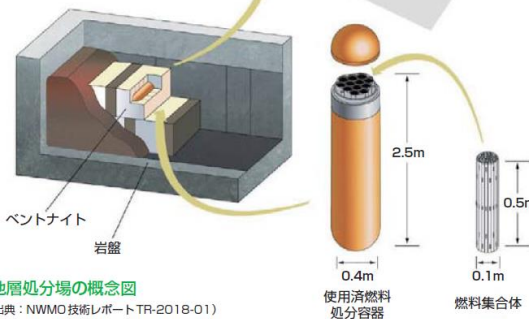
（出典：NAGRA「処分の実現可能性実証プロジェクト」報告書（2002）、NAGRA 放射性廃棄物管理プログラム（2016）



オバリナス粘土層の分布（例）



- ① 地上施設
- ② 主立坑
- ③ 処分坑道
- ④ 換気立坑



地層処分場の概念図

（出典：NWMO 技術レポート TR-2018-01）

図出典）資源エネルギー庁「諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について（2020年版）」 36

## 分析・整理結果：スイス・カナダ（法規制）

### (1) 法規制文書における『最適化』に係る要求

★資料名称：

- 1) スイス ENSI-G03 地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件（2009）及び解説書
- 2) カナダ CNSC 放射性廃棄物管理の長期安全性の評価 規制指針G-320（現REGDOC-2.11.1）

- 放射線防護の観点から最適化を位置付け。
- 最適化とは段階的なプロセス（スイス）。
- 最適化の方法論として代替案の比較検討を行うことを提示（スイス）。
- 最適化における長期安全性に関する評価では、一定の裕度をもって規制限度以下となるようにすべき。  
⇒線量拘束値を設計目標として使用するが順守限度としては使用しない（カナダ）。
- 最適化の目的の1つとして、実施すべき研究開発課題の明確化がある（スイス）。

### 原典資料から窺える最適化に係る評価項目

原典資料からの抜粋	左記を踏まえて表現を見直した評価項目の案（分析・解釈・統合等を加味）
<p>スイス ENSI-G03より</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 操業面での安全性、● 長期的な安全性、● 事故が発生した場合に地下構造物の全ての場所に迅速にアクセスできるよう配慮、● 不確実性が長期安全性に及ぼす影響、● 長期安全性の予測の信頼度</li> </ul> <p>カナダG-320（現REGDOC-2.11.1）より</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 適用要件を満足、● 長期における安全性、● 長期予測の不確実性、● 将来の人間活動に関する不確実性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 閉鎖後長期の安全性（操業面での安全性⇒）</li> <li>● 閉鎖前の安全性</li> <li>● 一般労働安全</li> <li>● 事故発生時における全ての場所へのアクセシビリティ</li> <li>● 不確実性</li> <li>● 将来の人間活動に関する不確実性</li> <li>● 予測の信頼性</li> <li>● 要件への適合性</li> </ul>

37

### 原典資料①-1 法規制文書における『最適化』に係る要求（スイス）

- ENSI-G03 地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件（2009）
- ENSI-G03 地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件 指針の解説書

規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
ENSI-G03 地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件（2009）	<p><b>4 防護目標及び防護基準</b></p> <p><b>4.2 防護目標を実現するための原則</b></p> <p>放射性廃棄物の地層処分場では、以下に挙げる原則を考慮に入れる必要がある。万全を期すため、既に原子力令第11条第2項で規定されている原則もここで言及される。</p> <p>k) <b>最適化：地層処分場の設計、建設及び操業（閉鎖を含む）の枠組みにおいて決定を下す際には、操業面での安全性及び長期的な安全性の最適化を目指した代替案の比較検討を実施しなければならない。</b></p> <p><b>6.最適化、品質マネジメント及び文書作成</b></p> <p><b>6.1地層処分場の操業段階及び長期安全性の最適化</b></p> <p>地層処分場とそれに付随する地上施設の<b>操業段階における放射線防護</b>は、放射線防護令の第6条に従って最適化されなければならない。その際に、<b>長期安全性に及ぼす影響</b>があれば、それも考慮しなければならない。地層処分場及びその地上施設による放射線学的影響は、科学技術の水準に基づいて<b>可能な限り合理的な程度</b>において低減しなければならない。</p> <p>地層処分場を具体化していく各段階において、安全性に関係するそれぞれの決定に関して、様々な選択肢ならばにそれが長期安全性にとって持ち得る意味を定量的に検討し、全体として安全性を高める方向に働く決定を下さなければならない。またこの最適化方法は、文書化しなければならない。</p> <p><b>長期安全性の最適化の意味において、高レベル放射性廃棄物の処分容器は、定置されてから1,000年にわたり、放射性核種を完全に閉じ込めるよう設計しなければならない。また処分義務者は、処分容器がこの期間にわたって放射性核種を閉じ込める能力があることを立証しなければならない。</b></p> <p><b>付属書1 概念に関する規定</b></p> <p>最適化：地層処分場の場合、<b>最適化とは段階的なプロセスと考えられており、それぞれの段階で安全性に関する決定を下す際に、様々な選択肢と、それが処分場の操業安全性と長期安全性において持つ意味について定量的な方法で検討し、全体的に見て安全性が高まるような決定を下すプロセスをいう。</b></p>

38



規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
ENSI-G03 地層処分場の設計原則とセーフティケースに関する要件 指針の解説書	<p><b>5 設計、操業及び閉鎖－5.1地層処分場及びそれに付帯する地上施設の設計－5.1.3地下構造物に関する要件</b>  <b>地下施設に関する計画策定と建設時の最適化においては、操業段階の安全性と閉鎖後段階の安全性を整理しなくてはならない。</b>処分場の個々の部分の操業は、必要であれば保守作業のために中断することができる。設計時には、<b>事故が発生した場合に地下構造物の全ての場所に迅速にアクセスできるように配慮しておくことが重要である</b>（救助車両の通行のため）。また、避難路は十分な寸法を備えていなければならない。  廃棄物の定置作業が終了した後のモニタリング期間の長さについて、国際的に統一された見解は存在していない。ドイツの規制では、モニタリング期間が全く想定されおらず、地層処分場への廃棄物定置後に処分場を閉鎖することが定められている[9]。フランスの規定では、少なくとも100年間のモニタリング期間が想定されており、その期間中は、回収可能性が維持されることになっている[10]。スイスの場合、モニタリング期間の長さは、廃棄物の定置が終了した後の段階で、その時点で最新の資料に基づき、UVEKが決定することになっている（原子力令、第68条）。現時点では、原子力施設の廃止措置基金及び廃棄物管理基金に関する政令（SEFV）（SR 732.17）では、処分費用の計算を行う目的で、モニタリング期間の長さが50年と想定されている。建設、定置作業、モニタリング並びに閉鎖にとって必要な期間の長さを考慮に入れると、地下構造物は100年を上回る期間にわたって安定性を維持することが必要になる可能性がある。モニタリング期間のためのプロジェクトは、10年毎に点検及び再検討されることになっている（原子力令 第42条）。</p> <p><b>6 最適化、品質マネジメント及び文書化－6.1地層処分場の操業段階及び長期安全性の最適化</b>  指針には、防護基準が遵守されるようにするために、多重バリア・システムの全体としての機能に関する具体的な要件が定められている。防護基準で定められた限度が守られていたとしても、それだけに留まることなく、地層処分場の計画、建設及び操業にあたり、<b>科学技術面での最新の水準によって可能となる範囲</b>で、また<b>合理的な範囲</b>で、適切な措置によって地層処分場から発生する<b>放射線学的な影響</b>を削減しなければならない。  安全性を向上させる措置という意味では、処分容器の設計によって、高レベル放射性廃棄物を少なくとも千年間にわたり完全に閉じ込められることが要求される。この閉じ込め期間の長さは、最初の千年の期間における高レベル放射性廃棄物の放射線学的な毒性と発熱量の減少から導出されたものである。この完全に閉じ込め期間に、埋め戻し物質の飽和状況や定置廃棄物に近接した場所での圧力及び温度が推移し、平衡条件に近いものとなるであろう。これによって、廃棄物の定置によって地質学的な環境に生じた影響が低減され、後の段階の安全技術面での検討の土台となる想定条件の信頼度が高まることになる。  処分義務者は、最新の科学及び技術水準に基づき、<b>地層処分場条件の下で処分容器が廃棄物を閉じ込めることのできる期間の長さ</b>を示し、<b>容器の欠陥発生率やその時間との関係</b>について調査する必要がある。</p> <p><b>7 地層処分場の安全性の立証－7.2閉鎖後段階のためのセーフティケース－7.2.2安全評価－不確実性の取り扱い</b>  不確実性の取り扱いは、セーフティケースと安全評価の中心的な要素の一つである。それゆえバリア・システムの機能がロバストなものであることを示すためには、発生確率の低い変遷や単なる仮説にすぎない変遷についても、考慮に入れる必要がある。地層処分場の将来の変遷に関する包括的パリエーションの放射線学的影響を計算する際には、最善の知見に依拠して、実際の変遷が、変遷のパリエーションの中で示される放出より大きな放出をもたらすことがないようにするということが出発点として置かれる。また、これらの計算には、できるだけモデルの出発点とモデル・パラメータの選択に関する保守的な仮定も含めなければならない。<b>不確実性が長期安全性に及ぼす影響</b>について体系的に調査することにより、<b>長期安全性の予測の信頼度</b>を高め、<b>今後どのような研究活動が必要となるのかを明確にし、地層処分場の設計を最適化することができる。</b></p>

39

**原典資料①-2 法規制文書における『最適化』に係る要求（カナダ）**

● CNSC 放射性廃棄物管理の長期安全性の評価 規制指針G-320

(⇒CNSC REGDOC-2.11.1, Volume III放射性廃棄物管理 第3巻：放射性廃棄物管理の長期安全性の評価)

規制文書名	規定内容（原典参考和訳資料からの抜粋）
放射性廃棄物管理の長期安全性の評価 規制指針G-320  ※現在はG-320は廃止され、REGDOC-2.11.1vol3となっている。G-320の4.3.2項の記述はREGDOC-2.11.1vol3の「4.3.2 設計の最適化」で継承されている。	<p><b>4.0 背景情報－4.3 長期管理のための許認可審査－4.3.2 設計の最適化</b>  原子力施設の設計は、<b>すべての適用要件を満足するように最適化すべき</b>である。特に放射性廃棄物管理施設については、規制限度を満たすだけでなく、<b>長期における安全性が確保されることを保証する一定の裕度をもって規制限度以下となるようにすべき</b>である。こうした期待が必要な理由は、<b>長期予測の不確実性、将来の人間活動に関する不確実性</b>、さらにその廃棄物管理システムはレセプターが被ばくを受ける<b>汚染物質の唯一の発生源であるとは限らない可能性がある</b>ためである。</p> <p><b>6.0 許容基準の定義－6.2 人間と環境の防護基準－6.2.1 人間の電離放射線防護</b>  施設または汚染サイトの長期安全性の評価は、公衆の被ばくに対する規制線量限度（現行 1 mSv/年）を超えないという合理的保証を与えるべきである。しかし、多数の発生源に被ばくがあり得ることを説明するために、かつ評価されている施設に起因する線量が合理的に達成可能な限り低い（ALARA）ことを確実にするのに役立つために、規制限度未満である許容基準を使用すべきである。  例えば、<b>設計最適化のために</b>、国際放射線防護委員会（ICRP）は約0.3mSv/年を超えない「線量拘束値」と呼ばれる設計目標を勧告している。<b>最適化プロセスでは線量拘束値を設計目標として使用するが、順守限度としては使用しない</b>。従って、評価モデルを使った予測の不確実性を説明する際には線量拘束値を使用すべきでない。</p> <p><b>7.0 長期評価の実施－7.3 システム記述（前略）</b>  システム記述は、許認可ライフ・サイクルの初期においては完全性及び厳密性に欠くものであり、したがって、<b>設計最適化の目的のために</b>、あるいは環境影響評価または許認可申請書を裏付けるために安全性の長期評価に必要な情報の一部は、標準データまたは汎用データを使用することが認識されている。施設のライフ・サイクルを通じて、許認可が進行するにつれて、施工完了時の情報及び操業データが取得され、サイト特性の理解がより深まることになる。許認可ライフ・サイクルの後期になされる長期安全性の評価は、最新かつ改良されたモデルとデータに基づくことになり、標準情報、汎用情報または仮定による情報に依存しないことにより、モデルの信頼性がより高まることが期待される。</p> <p><b>7.5.3 制度的管理（前略）</b>  長期管理の選択肢は、安全機能（safety feature）としての長期の制度的管理の手段に、それが絶対的に必要ではない限り依存すべきではない。しかし、サイト固有の特定の状況で、ある種の廃棄物に対しては、（第4.3.2項「設計の最適化」で議論したように）、<b>施設設計を最適化した後であっても、安全機能としての長期制度的管理の代わりとなる現実的な如何なる管理も存在しない場合がある。</b></p>

40



# 資料 4

## 最適化アプローチの試行に用いた 本研究会で設定したレファレンス設計

### 資料 4 の構成

1. 設定の前提・基本情報
2. 人工バリアの設計ならびに施工技術・工程
  - (1) オーバーパック
  - (2) 緩衝材
3. 地下施設の設計ならびに建設・施工技術および工程
  - (1) 共通：坑道全般
  - (2) 処分坑道
  - (3) 主要坑道、(TRU 取付坑道)、連絡坑道、アクセス坑道
  - (4) 埋め戻し材
  - (5) 力学プラグ
  - (6) 止水プラグ
4. 建設・操業・閉鎖工程を踏まえたタイムライン
  - (1) 建設・操業・閉鎖の概要工程
  - (2) 包括的技術報告書におけるタイムライン設定に資する情報
  - (3) 建設・操業・閉鎖工程を踏まえたタイムライン

### 備考：

本研究会では、NUMO の包括的技術報告書\*を参照しつつ、本研究におけるレファレンス設計を設定した。設定した本研究におけるレファレンス設計は、NUMO の設計とは異なる部分があることに留意されたい。

※原子力発電環境整備機構（NUMO）（2021）：NUMO-TR-20-03、“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ケースの構築－”

# 1. 設定の前提・基本情報

- 対象概念 : 処分孔竖置き・ブロック方式
- 対象母岩 : 新第三紀堆積岩類
- 地下施設設置深度 : 500 m
- 設計で用いる地質環境特性 : 下表参照

表 4.2-6 設計で用いる地質環境特性の設定値 (物理的特性、力学的特性、熱的特性)

岩種	深成岩類	先新第三紀堆積岩類	新第三紀堆積岩類	
物理的特性	飽和密度 $\rho$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.69	2.64	2.28
	真密度 $\rho_s$ [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.7	2.7	2.7
	有効空隙率 $n_v$ [%]	0.8	3.5	25
力学的特性	一軸圧縮強さ $q_b$ [MPa]	115		15
	弾性係数 $E$ [MPa]	37,000		3,500
	ポアソン比 $\nu$ [-]	0.25		0.3
	粘着力 $c$ [MPa]	15		3
	内部摩擦角 $\phi$ [°]	45		28
	引張強度 $\alpha_t$ [MPa]	8		2.1
	側圧係数 $K_0$ [-]	164h+0.74 (h: 深さ[m])		
	初期鉛直応力 $\sigma_v$ [MPa]	$\rho g h \cdot 1.000$ ( $\rho$ : 飽和密度[Mg/m <sup>3</sup> ], $g$ : 重力加速度[9.8 m/s <sup>2</sup> ], $h$ : 深さ[m])		
初期水平応力 $\sigma_h$ [MPa]	$K_0 \sigma_v$			
熱的特性	弾性波 (P波) 速度 $V_p$ [km/s]	2.1+2.9(1-exp(-0.00792 ph))		1.8+1.4(1-exp(-0.00057 ph))
	熱伝導率 $\lambda$ [W/m K]	2.9	2.8	2.3
	比熱 $c$ [J/kg K]	1.0	1.0	1.4
	地温変位 $dt/dz$ [°C/100m]	3		
地表面の温度 $t$ [°C]	15			

表 4.2-7 設計で用いる地質環境特性の設定値 (処分場スケールにおける水理学的特性)

岩種	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
透水係数 [m/s]	2.7×10 <sup>-8</sup>	上部泥岩層: 2.0×10 <sup>-9</sup> 下部泥岩層: 4.4×10 <sup>-8</sup> 砂岩層: 5.3×10 <sup>-7</sup>	砂岩優勢基質: 2.0×10 <sup>-8</sup> 泥岩優勢基質: 2.0×10 <sup>-9</sup> チャート岩塊: 1.0×10 <sup>-8</sup>

表 4.2-8 設計で用いる地質環境特性の設定値 (モデル水質)

岩種	深成岩類		新第三紀堆積岩類		先新第三紀堆積岩類	
	低 CI 濃度	高 CI 濃度	低 CI 濃度	高 CI 濃度	低 CI 濃度	高 CI 濃度
地下水タイプ	低 CI 濃度	高 CI 濃度	低 CI 濃度	高 CI 濃度	低 CI 濃度	高 CI 濃度
水温 [°C]	45	45	30	30	45	45
pH	8.16	7.56	8.38	6.54	8.15	6.33
Eh <sup>0</sup> [mV]	-301	-259	-282	-168	-289	-171
塩化物イオン濃度 [mol/L]						
Cl <sup>-</sup>	2.34×10 <sup>-3</sup>	4.90×10 <sup>-2</sup>	1.11×10 <sup>-3</sup>	2.08×10 <sup>-1</sup>	1.11×10 <sup>-3</sup>	2.08×10 <sup>-1</sup>
炭酸化学種濃度 [mol/L]						
total C	9.48×10 <sup>-4</sup>	2.16×10 <sup>-4</sup>	1.66×10 <sup>-3</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	1.70×10 <sup>-3</sup>	4.66×10 <sup>-2</sup>
硫酸化学種濃度 [mol/L]						
H <sub>2</sub> S	4.79×10 <sup>10</sup>	2.75×10 <sup>9</sup>	9.53×10 <sup>11</sup>	1.41×10 <sup>9</sup>	3.32×10 <sup>10</sup>	4.69×10 <sup>9</sup>
HS <sup>-</sup>	1.30×10 <sup>8</sup>	2.16×10 <sup>8</sup>	2.93×10 <sup>9</sup>	8.45×10 <sup>10</sup>	8.65×10 <sup>9</sup>	2.49×10 <sup>9</sup>
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	6.89×10 <sup>6</sup>	1.36×10 <sup>5</sup>	1.20×10 <sup>4</sup>	2.57×10 <sup>6</sup>	1.19×10 <sup>4</sup>	2.52×10 <sup>6</sup>
CaSO <sub>4</sub>	2.30×10 <sup>-7</sup>	5.80×10 <sup>-6</sup>	2.02×10 <sup>-6</sup>	8.13×10 <sup>-8</sup>	2.29×10 <sup>-6</sup>	8.54×10 <sup>-8</sup>
NaSO <sub>4</sub>	1.30×10 <sup>-7</sup>	7.65×10 <sup>-7</sup>	2.09×10 <sup>-6</sup>	1.12×10 <sup>-6</sup>	2.09×10 <sup>-6</sup>	1.06×10 <sup>-6</sup>
MgSO <sub>4</sub>	1.29×10 <sup>-8</sup>	6.68×10 <sup>-8</sup>	2.88×10 <sup>-7</sup>	3.02×10 <sup>-7</sup>	4.08×10 <sup>-7</sup>	4.01×10 <sup>-7</sup>

※水素標準電極電位に対する値

1

## 設計因子・要求事項

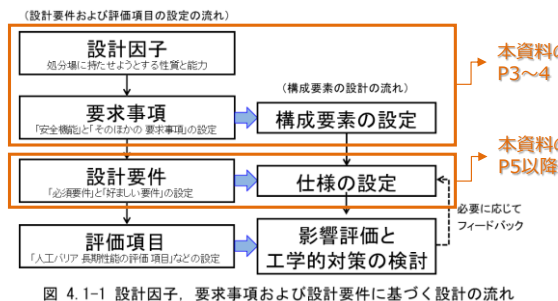


表 4.2-2 作業工程と安全機能を担う構成要素の関係 (高レベル放射性廃棄物処分場の場合) \*

作業工程	安全機能と対応する構成要素	作業時間じり込み									
		輸送容器	ガラス固化体	オーバーバック	封入施設	廃棄体の受入・検査	輸送容器	封入施設 (確認検査)	廃棄体の受入・検査	搬送車両	定置装置
地上施設	1. 地上施設への輸送	✓	✓				✓				
	2. ガラス固化体の受入・検査-時置置き		✓		✓			✓			
	3. ガラス固化体のオーバーバックへの封入		✓		✓			✓			
	4. 搬送車両への積み込み		✓	✓	✓			✓	✓		
地下施設	5. アクセス坑道での搬送	✓	✓	✓	✓					✓	
	6. 処分坑道での搬送と定置	✓	✓	✓	✓					✓	
	7. 処分坑道の埋め戻し	✓	✓	✓							

✓: 安全機能を確保する構成要素

※ ガラス固化体を廃棄体、オーバーバックを廃棄体パッケージと置き換えることで、TRU等廃棄物処分場の場合の作業工程と構成要素の関係になる。

表 4.2-4 高レベル放射性廃棄物処分場の安全機能と構成要素の関係

基本概念	安全機能	構成要素	
隔離	自然現象の著しい影響からの防護	地質環境	
	人の接近の抑制		
閉じ込め	放射性物質の溶出の抑制	ガラス固化体	
		廃棄体と地下水の接触の防止	オーバーバック
		放射性物質の溶解の抑制	地質環境
		遅い地下水流速による放射性物質の移行の抑制	地質環境
		放射性物質の移行による移行の抑制	緩衝材
		コロイド移行の抑制	緩衝材
		放射性物質の収着	緩衝材
		放射性物質の分散	地質環境
	坑道およびその周辺が卓越した放射性物質の移行経路となることの抑制	止水プラグ、埋め戻し材	

2

表 4.2-3 閉鎖前の安全性に関する安全機能と構成要素の関係 (一般労働安全)

安全確保の基本概念	安全機能	構成要素
作業環境の維持	換気能力	坑道の換気経路、換気設備 (冷房設備を含む)
	排水能力	坑道の排水経路、排水設備
	照明能力	坑道の照明設備
労働災害の発生・拡大の防止	防火対策	防火設備、消火設備
	坑道の力学的安定性	支保工
	そのほかの労働災害防止対策	落下・転倒防止装置、非常用貯水槽
緊急時の避難経路の確保	避難経路の確保	アクセス坑道 (入気用立坑を避難経路とする)、連絡坑道、緊急待避所、風門、通信・連絡設備

## 処分概念・構成要素 (§ 4.2.3)

### 人工バリア

ガラス固化体
オーバーバック
緩衝材

### 地下施設

坑道	アクセス坑道
	連絡坑道
	主要坑道
	処分坑道
	処分孔
埋め戻し材	
プラグ	坑口プラグ
	止水プラグ
	カ学プラグ
坑底施設 (OP等積替など)	

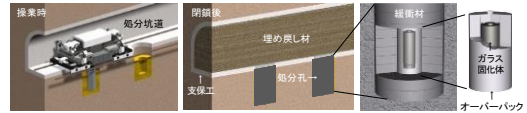


図 4.2-2 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア

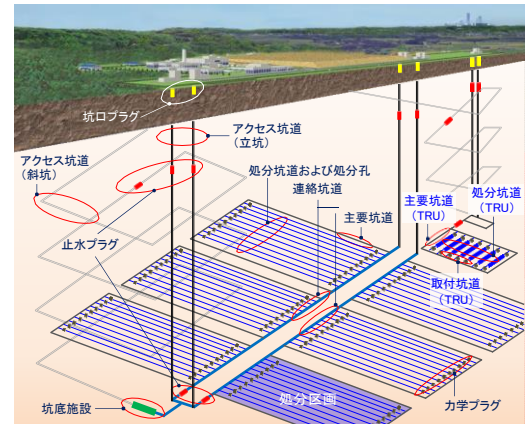


図4.2-4 地下施設のイメージ

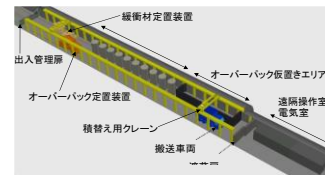


図 4.5-25 坑底施設の構造 (縦置き・ブロック方式)

※本研究会では地上施設は検討対象外

3

## 処分区画 (§ 4.5.4)

### ○処分区画形状

- パネル型、6区画 (§ 4.5.4 (2))

### ○パネル形状

- 12m×(51-1 処分坑道)+30m×2 =660m
- 6.66m×(131-1 処分孔)+30m×2 =925.8m

※新第三紀堆積岩類の場合の処分坑道1本あたりの処分孔数は131 (付属書4-55)

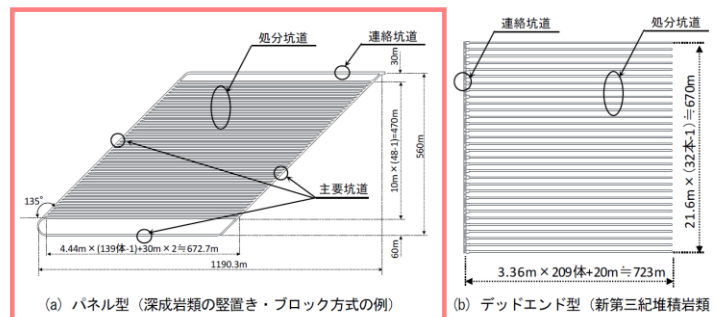


図 4.5-17 高レベル放射性廃棄物処分場の処分区画の形状

表 4.5-16 検討対象母岩と処分概念に対する処分区画の形状と区画数の関係

処分概念	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
縦置き・ブロック方式	パネル型：6区画	パネル型：6区画	デッドエンド型：8区画
横置き・PEM方式	デッドエンド型：6区画	デッドエンド型：6区画	デッドエンド型：8区画

(下表は付属書4-55より)

岩種	ガラス固化体を封入したオーバーバック定置数 (1区画当り)	処分坑道本数 (1区画当り)	ガラス固化体を封入したオーバーバック定置数 (処分坑道1本当り)	処分坑道延長 (1区画当り)
深成岩類	6,672 体	48 本	139 本	672.7 m
新第三紀堆積岩類	6,681 体	51 本	131 本	925.8 m
先新第三紀堆積岩類 (坑道長最長のケース)	5,000 体	20 本	250 本	1,110 m

4

## 2. 人工バリアの設計ならびに施工技術・工程

### 人工バリアの設計対象 (§ 4.4.1(1))

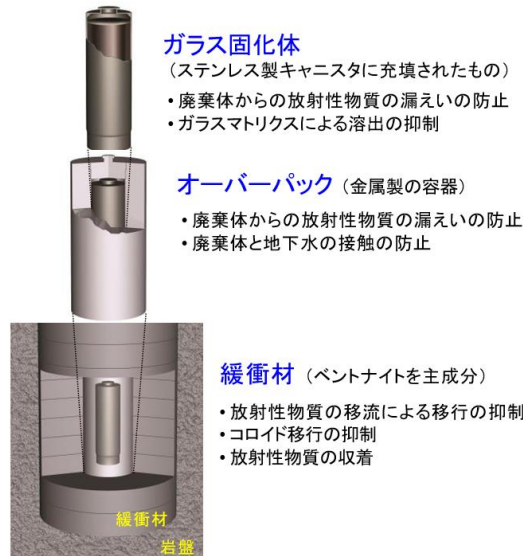


図 4.4-1 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリアの構成と安全機能  
(NUMO, 2004[2]を編集)

5

### (1) オーバーパック (§ 4.4.1(2))

#### 設計要件・仕様

表 4.4-1 オーバーパックの設計要件

設計要件	内容	設計項目
耐食性	埋設後の所定の期間、腐食によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能が損なわれないこと	材料、厚さ、蓋接合部
構造健全性	操作中および埋設後の所定の期間に作用する荷重によって廃棄体と地下水の接触を防止する安全機能が損なわれないこと	材料、厚さ、形状、蓋接合部、把持部
耐食性に対する放射線影響の抑制	水の放射線分解によって生成される酸化性化学種により腐食が著しく促進されないこと	材料、厚さ
製作性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により製作可能な構造および材料であること	材料、形状
遠隔封入性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、ガラス固化体を遠隔封入可能な構造および材料であること	材料、内空寸法、蓋接合部の形状
遠隔定置性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術により、オーバーパックを遠隔定置可能な構造であること	形状、把持部

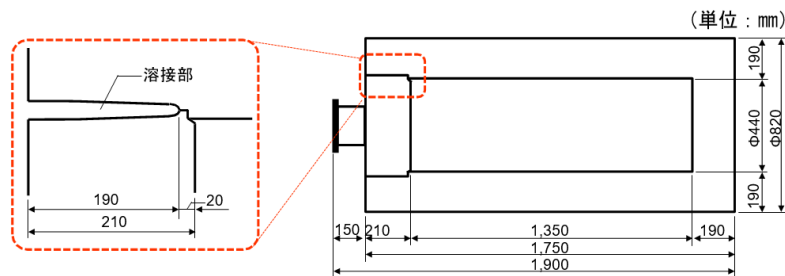


図 4.4-6 オーバーパックの仕様

※OPの製造技術および施工工程（地上施設での封入工程）は本研究の検討対象外（⇒整理は割愛）

6

## (2) 緩衝材 (§ 4.4.1(3))

### 設計要件・仕様

表 4.4-6 高レベル放射性廃棄物に対する緩衝材の設計要件

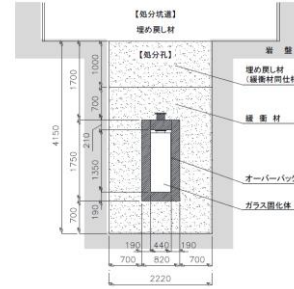
設計要件	内容	設計項目
低透水性	緩衝材中の地下水の流れを抑制し、放射性物質の移行を遅延すること	材料, 有効粘土密度
コロイドろ過能	放射性物質がコロイドとして移行することを防止すること	材料, 有効粘土密度
自己シール性	オーバーバックや岩盤との隙間など、施工時にできる隙間を充填可能な膨潤性を有すること	材料, 有効粘土密度, 厚さ
自己修復性	ガス発生による亀裂が緩衝材に生じたとしても閉塞できること	材料, 有効粘土密度
製作施工性	既存の技術もしくは近い将来実現可能と考えられる技術に基づき製作施工が可能であること	材料, 有効粘土密度, 材料の混合率
微生物影響の防止	オーバーバックの腐食に影響を与える緩衝材中の微生物活動を抑制すること	材料, 有効粘土密度
物理的緩衝性	オーバーバックの腐食膨張による力学的な影響を緩和して、オーバーバックを保護するように物理的な緩衝性を有すること	材料, 有効粘土密度, 厚さ

表 4.4-8 高レベル放射性廃棄物に対する緩衝材の仕様 (配合および密度)

方式	配合 (乾燥重量比)	密度	
		飽和膨潤により隙間充填した状態 (設定仕様)	製作時の状態※ <sup>3</sup> (参考)
ブロック	ベントナイト70% ケイ砂 30%	乾燥密度※ <sup>1</sup> = 1.6 Mg/m <sup>3</sup> として、 有効粘土密度※ <sup>2</sup> = 1.4 Mg/m <sup>3</sup>	乾燥密度 ≈ 1.8 Mg/m <sup>3</sup> として、 有効粘土密度 ≈ 1.6 Mg/m <sup>3</sup>
PEM			乾燥密度 ≈ 1.7 Mg/m <sup>3</sup> として、 有効粘土密度 ≈ 1.5 Mg/m <sup>3</sup>

※1 乾燥密度：ベントナイトとケイ砂を混合した状態の乾燥密度  
 ※2 有効粘土密度：ケイ砂を除いたベントナイトの乾燥密度  
 ※3 製作時の状態：緩衝材が地下水の浸潤により膨潤する前の状態

(以下、付属書4-15より)



(a) 縦置き・ブロック方式

図 18 高レベル放射性廃棄物処分場的人工バリアの仕様

※ ブロック方式における隙間形状 (付属書4-15)

$$d_B = 40 \text{ mm}$$

$$d_{OP} = 20 \text{ mm}$$

※隙間の充填処理なし

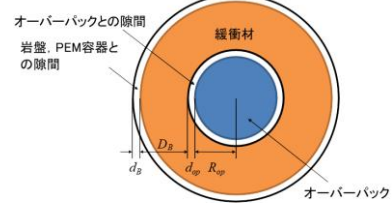


図 5 緩衝材周りの隙間の設定

7

## 施工技術、工程

### ○製造・施工技術 (付属書4-29)

#### ①緩衝材ブロックの製作 (地上施設)



図 1 緩衝材ブロックの製作例 (原理センター, 2014 を編集)

#### ②地上・地下施設での積み卸し・積み替え

真空吸引技術

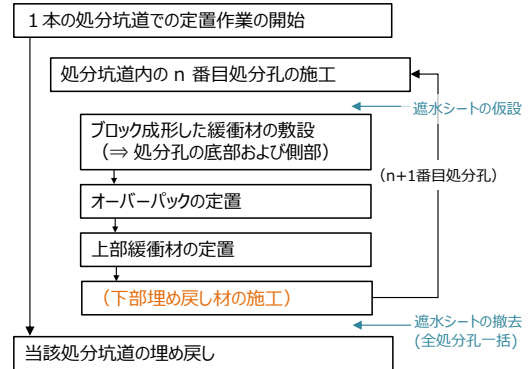
#### ③処分孔での施工 (緩衝材の定置)

テレスコピック/真空吸引技術



図 3 実規模緩衝材ブロック真空把持実証試験装置の製作例 (原理センターより提供)

### ○地下原位置での施工工程 (§ 4.4.3(1))



※湧水対策1：処分孔への遮水シートの仮設

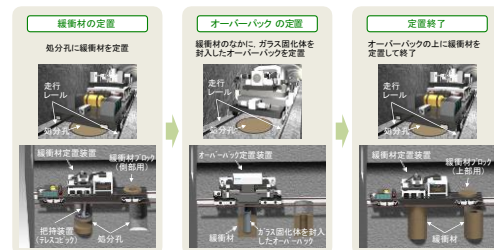


図4.4-26 緩衝材および廃棄体定置手順 (縦置き・ブロック方式の場合)

8

### 3. 地下施設の設計ならびに建設・施工技術および工程

#### 地下施設の設計の考え方 (§ 4.5.1)

- 年当たり約 1,000 本ずつ処分 (最終処分計画)  
⇒ 建設と操業を並行展開、処分区画を複数に分割した設計
- ガラス固化体の貯蔵期間は30~50年  
⇒ 貯蔵期間50年に対して地下施設を設計 (貯蔵期間30年は設計結果のみ記載)  
(制限温度は100℃; 緩衝材)

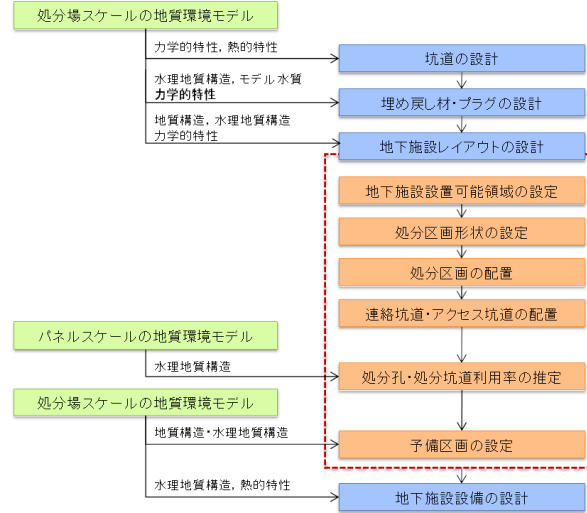


図 4.5-1 地下施設の設計フロー

### (1) 共通：坑道全般

#### 設計要件・坑道断面設定の考え方 (§ 4.5.2)

表 4.5-2 処分場の坑道の役割

役割	アクセス坑道 (斜坑)	アクセス坑道 (立坑)	連絡坑道 主要坑道 取付坑道	処分坑道
廃棄体および操業関連機械などの搬送通路	○	—	○	○
作業従事者の移動通路	—	○	○	—
建設機械の移動通路	—	○	○	—
掘削土の搬出路	—	○	○	—
換気経路	○	○	○	—
排水経路・給水経路	—	○	○	—
給電・通信路	—	○	○	—
緊急時の避難経路	○	○	○	—

※ 立坑は複数配置し、各立坑の役割は配置に応じて割り当てる。

表 4.5-3 坑道の設計要件

設計要件	内容	設計項目
取容性	人工バリアの設置、建設・操業に必要な設備・機器、換気・排水設備などのユーティリティ設備に必要な空間を確保すること	内空断面の形状と寸法
安全通路の確保	作業従事者が立ち入る区画については、安全通路が確保されること	内空断面の形状と寸法
空洞安定性	建設・操業が安全かつ円滑に行われるよう坑道の力学的安定性が確保できること	内空断面の形状と寸法、支保工、廃棄体位置間隔、処分坑道中心間距離
廃棄体の発熱影響の低減	廃棄体の発熱により人工バリアの性能が著しく低下しないこと	処分坑道中心間距離、廃棄体位置間隔
坑壁剥落防止	坑壁が剥落しないように、坑道の力学的安定性を確保すること	支保工、覆工

表 4.5-4 坑道の評価項目

評価項目	内容
耐震安定性	地震動に対しても、坑道の力学的安定性が確保されていること

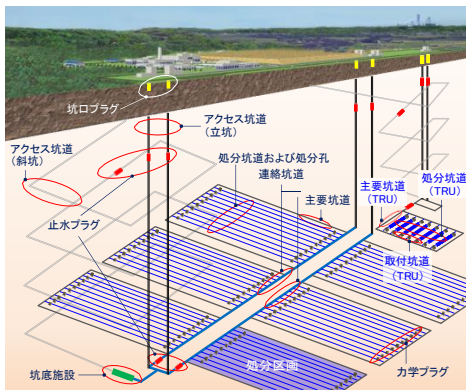


図4.2-4 地下施設のイメージ

#### 坑道断面設定の考え方 (§ 4.5.2)

- アクセス坑道、連絡坑道、処分坑道

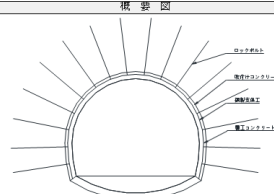
⇒ 建設機器や搬送や定置のための装置が走行するため、床面は平らであることが望ましく、この点から**蛸型形状**がよい (交差部は別途考慮、底盤が平らでない場合はインバート施工)



## 支保工・覆工の構成要素と設計の考え方 (付属書4-32)

表 5 支保工の初期設定例 (高レベル放射性廃棄物処分場)

地山等級	支保工	処分坑道	主要坑道	連絡坑道	アクセス(斜)	アクセス(立)	
深成岩	断面規模		小	小	中	中	
	ロックボルト	長さ(m)	2	2	3	3	—
		周方向間隔(m)	1.2	1.2	1.5	1.5	—
		延長方向間隔(m)	1.5	1.5	1.5	1.5	—
	C I	鋼製支保工(サイズ, 建込間隔(m))	—	—	—	—	—
		吹付けコンクリート(cm)	5	5	10	10	—
二次覆工コンクリート(cm)		—	20	30	30	40	
新第三紀 堆積岩	断面規模		小	小	中	中	
	ロックボルト	長さ(m)	3	3	4	4	—
		周方向間隔(m)	1.0	1.0	1.2	1.2	—
		延長方向間隔(m)	1.0	1.0	1.0	1.0	—
	D II	鋼製支保工(サイズ, 建込間隔(m))	H100, 1m	H100, 1m	H150, 1m	H150, 1m	—
		吹付けコンクリート(cm)	12	12	20	20	—
二次覆工コンクリート(cm)		—	20	30	30	40	



分類	構成要素	設計の考え方
支保工	吹付け コンクリート	吹付けコンクリートは、トンネル掘削完了後、ただちに地山にコンクリートを面的に密着させて設置する支保材である。吹付けコンクリートの性能は、掘削に伴って生じる地山の变形や外力による圧縮せ人断等に抵抗することにあると考えられ、これらの性能が様々な組み合わせによって支保効果を発揮し、地山を安定化させる。
	ロックボルト	ロックボルトは、トンネル壁面から地山内部に穿孔された孔に設置される支保部材である。部材構成は、鋼棒等の芯材、巻部で芯材と吹付けコンクリートとを一体化するためのベアリングプレートおよびナットからなる。ロックボルトは穿孔された孔のほぼ中心に設置される芯材が孔の周囲の地山と一体化することにより、地山の内部から支保効果を発揮する。
	鋼製支保工	鋼製支保工は、トンネル壁面に沿って形鋼等をアーチ状に設置する支保材であり、建込みと同時に一定の効果を発揮できるため、吹付けコンクリートの強度が発現するまでの早期において初期の安定化を図ることができる。また、鋼製支保工は吹付けコンクリート等と一体となって地山に密着し、トンネルの安定化を図ることができる。
覆工	覆工 コンクリート	山岳トンネルで施工されるトンネルでは、多くの場合、支保工で地山を安定させ、地山の变形が収束してから覆工コンクリートを施工する。そのため、覆工コンクリートには外力が作用しないと考えられ、通常、覆工コンクリートに力学的性能を付加させないことが多い。このような場合、覆工に必要な性能は耐用性が主となり、無筋コンクリートで設計・施工される。耐用性は一般に定量的に個別設計する項目ではないため、標準設計として事前に標準設計巻厚を決めて適用している。

図 1 支保工・覆工の構成要素と設計の考え方 (土木学会, 2016を参考に作成)

11

## (2) 処分坑道 (§ 4.5.2(2) (i))

### 仕様 (断面形状)

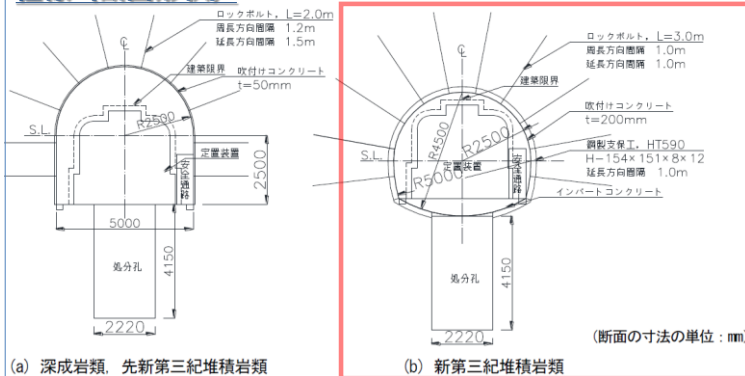


図 4.5-2 処分坑道の建築限界と断面形状 (縦置き・ブロック方式)

## 処分孔施工オプション (力学的安定性確保対策)

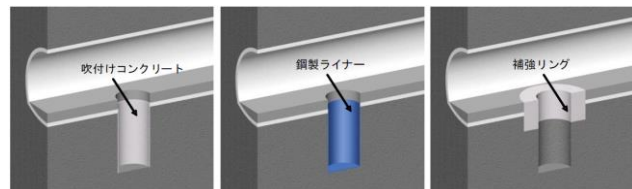


図 4.5-3 処分孔の力学的安定性確保対策 (出典: NUMO, 2011[1])

12

**処分坑道および処分孔の中心間距離の設定 (§ 4.5.2(3))**

- 処分坑道間距離 ⇒ 2.4 D = 12.0 m (新第三紀堆積岩類)
- 処分孔間距離 ⇒ 3.0 d = 6.66 m (新第三紀堆積岩類)

表 4.5-7 処分坑道中心間距離の設定結果 (高レベル放射性廃棄物処分場)

条件		縦置き・ブロック方式			横置き・PEM方式		
		パネル型の処分区画		デッドエンド型の処分区画			
		深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類	深成岩類	新第三紀堆積岩類	先新第三紀堆積岩類
空洞安定性	処分坑道のみ	10.0 m	12.0 m	10.0 m	9.6 m	12.0 m	9.6 m
	取付部考慮	—	—	16.0 m	16.0 m	21.6 m	16.0 m
廃棄体熱影響	貯蔵期間 30年	18.0 m	12.0 m	18.0 m	22.0 m	21.6 m	22.0 m
	貯蔵期間 50年	10.0 m	12.0 m	10.0 m	11.0 m	12.0 m	11.0 m
設定値 (最大値) ※		10.0 m	12.0 m	16.0 m	16.0 m	21.6 m	16.0 m

※ 本報告書の地下施設の設計は貯蔵期間50年のガラス固化体のインベントリを対象とするので(4.5.1項(1)参照), 処分坑道中心間距離の設定値は, 空洞安定性と貯蔵期間50年のガラス固化体の発熱による影響を考慮した結果を参照して決定した。

**掘削・施工技術、工程**

※NUMO包括的技術報告書では掘削方式やズリ出し方式などの施工方法には言及していないため、国土交通省やNEXCOの積算基準を参考に提案する。

**(3) 主要坑道、(TRU取付坑道)、連絡坑道、アクセス坑道 (§ 4.5.2(2))**

**仕様 (設定条件・断面仕様例)**

以下、§4.4.3(1)より

- アクセス坑道 (斜坑) から坑底施設までの廃棄体の移送は、タイヤ方式の搬送車両による搬送が有効。
- ※その先は (OP/緩衝材の定置まで)、レール方式が示唆されている。

⇒主要坑道から先は、レールの敷設作業も必要となる。

表 4.5-6 主要坑道、取付坑道、連絡坑道およびアクセス坑道の断面の設定条件

坑道の種類	設定条件	仕様例 (深成岩類)
主要坑道 (HLW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>高レベル放射性廃棄物処分場の縦置き・ブロック方式において、1日当たりの廃棄体の定置数が5体であり、5本の処分坑道で同時並行で作業を行うことを想定する。</li> <li>一日に取り扱う物流量は多くはなく、定置装置の対面通行の必要がないため、1車線とする。</li> </ul>	<p>(単位: mm)</p>
連絡坑道 (HLW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>オーバーバック・緩衝材定置装置が対面通行できるように、2車線を確保する。</li> <li>2車線の定置装置の建築限界と、その外側に配置すべきユーティリティ設備を考慮する。</li> </ul>	<p>(単位: mm)</p>

取付坑道 (TRU)	廃棄体パッケージ搬入に伴う物流量は多くはないため、1車線とする。	主要坑道 (HLW) と
主要坑道 (TRU)	重要な動線で物流量が多いことから、搬送車両の対面通行を考慮して2車線を確保する。	連絡坑道 (HLW) と
アクセス坑道 (立坑) (HLW・TRU)	掘削土の搬出、コンクリートの供給などの建設時に大量に運搬すべき物の重要な動線となる。また、換気や排水などのユーティリティ設備の重要な動線ともなる。加えて、立坑自体の掘削のための効率的な作業足場が確保できる空間も必要になる。	<p>(単位: mm)</p>
アクセス坑道 (斜坑) (HLW・TRU)	長距離を安全性に配慮して低速で搬送するため、搬送車両の対面通行を考慮して2車線を確保する。	連絡坑道と同じ断面

※ HLW: 高レベル放射性廃棄物処分場, TRU: TRU等廃棄物処分場

## アクセス坑道の役割・連絡坑道の配置概念 (4.5.4 (2)~(4))

表 4.5-19 アクセス坑道の役割 (パネル型処分区画)

No.	名称	作業の役割	換気の役割
斜坑	操業用斜坑	ガラス固化体を封入したオーバーバック・緩衝材搬送	入気
立坑 No.1	掘削土搬出専用立坑1	掘削土の搬出・排水	排気
立坑 No.2	掘削土搬出専用立坑2	掘削土の搬出・排水	排気
立坑 No.3	換気立坑	排水	排気
立坑 No.4	資機材搬入立坑1	埋め戻し材・人員・資機材搬入	入気
立坑 No.5	資機材搬入立坑2	埋め戻し材・人員・資機材搬入	入気
立坑 No.6	資機材搬入立坑3	埋め戻し材・人員・資機材搬入	入気

### アクセス斜坑の設置形状 (4.5.4 (4))

- 勾配10%
- スパイラル構造 (一辺1,000m、各コーナーは曲率半径30 mで90°に屈曲)
- 

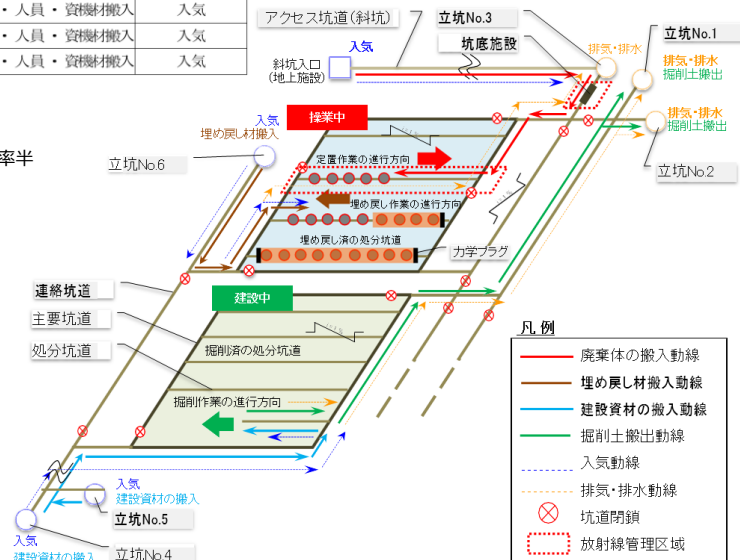


図 4.5-21 連絡坑道の配置概念図 (パネル型処分区画)

15

## 掘削・施工技術、工程

### ○掘削・支保施工技術

#### ● NATM工法を基本

(以下は示された工法技術オプション例、付属書4-67)

坑道種類	掘削工法オプション例
アクセス立坑	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ショートステップ工法</li> <li>● レイズローラー工法</li> </ul>
アクセス斜坑	
水平坑道 ➢ 連絡坑道 ➢ 主要坑道 ➢ 処分坑道	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NATM工法                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 制御突破</li> <li>➢ 自由断面掘削機による機械掘削 (ロードヘッダーなど)</li> </ul> </li> <li>● トンネルボーリングマシン工法 (TBM)</li> </ul>
処分孔	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大口径掘削機 (幌延適用実績、6日/孔)</li> <li>● 全断面掘削機 (SKB実証実績、平均掘削速度0.4 m/h)</li> <li>● ダウンリーミング工法 (Posiva実証実績)</li> </ul>



開発した大口径掘削機



オーガー工法による中掘

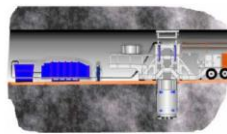


図 8 スウェーデン、エス岩盤研究所で実施された処分孔掘削 (出典: Andersson and Johansson, 2002)

図 7 深地層の研究施設における模擬処分孔の掘削状況 (出典: 花室, 2014)

### ○掘削・支保施工工程

(付属書4-67を参照)

#### 注釈

● 坑道に関して、NUMO包括的技術報告書では掘削方式やズリ出し方式などの施工方法には言及していないため、国土交通省やNEXCOの積算基準を参考に推察する。

● 上記と同様に、処分孔1孔の掘削に要するサイクルタイムの設定や詳細な工法には言及しておらず、NUMOでは1日5孔を掘削することを前提として機械数・パーティ数を増やすことで対応可能と想定している。具体的な工法等については、北欧などの諸外国の試験施工の事例から推察する。

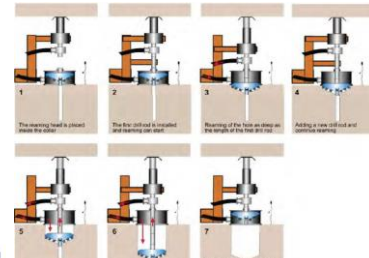


図 10 ダウンリーミング工法の施工手順 (出典: Crilén et al., 2009)

16

## (4)埋め戻し材 (§ 4.5.3(1))

### 設計要件・仕様

表 4.5-8 埋め戻し材の設計要件

設計要件	内容	設計項目
低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと	材料, 有効粘土密度
製作施工性	既存の技術または実現性のある見通しのある技術で製作施工が可能であること	乾燥密度, 有効粘土密度, 材料の混合率

表 4.5-9 埋め戻し材の評価項目

評価項目	内容
緩衝材および止水プラグの膨出抑制	処分坑道や連絡坑道において, 再冠水後の緩衝材および止水プラグ (ベントナイト製の場合) の膨出を抑制すること

表 4.5-10 埋め戻し材の仕様

施工方法	配合	乾燥密度	有効粘土密度	対象となる坑道
締固め工法	ベントナイト 15% 掘削土 85%	1.8 Mg/m <sup>3</sup>	0.6 Mg/m <sup>3</sup>	処分坑道 (高レベル放射性廃棄物処分場の縦置き・ブロック方式, TRU等廃棄物処分場), 連絡坑道, 取付坑道 (TRU等廃棄物処分場), 主要坑道, アクセス坑道
吹付工法	ベントナイト 50% 掘削土 50%	1.6 Mg/m <sup>3</sup>	1.2 Mg/m <sup>3</sup>	処分坑道 (高レベル放射性廃棄物処分場の横置き・PEM方式)

※ 上記の仕様は掘削土の物性をケイ砂の物性で代用した場合の例であり, 掘削土の特性によって配合などの仕様は変わるようになる。

17

### 埋め戻し材の施工技術、工程

#### ○施工技術 (§4.5.7(2))

処分坑道、主要坑道、連絡坑道、アクセス斜坑

#### ●有力な施工技術オプション (下記の組み合わせ)

- 坑道下部：現場締固め工法
- 坑道上部：吹付工法

#### ●上記以外に適用可能性のある工法の例

- ブロック工法
- 締固め工法
- 吹付工法
- ペレット充填工法
- 流動化処理土充填工法など

#### アクセス立坑

#### ●有力な施工技術オプション

- 現場締固め工法

#### ○施工工程

#### ●処分坑道の埋め戻しは処分坑道単位 (§4.5.7(2))

#### 注釈

- 付属書4-55 (5.埋め戻し作業日数の設定) を参照のこと。以下、補足。

・処分坑道の埋戻しは、1本の処分坑道すべての廃棄体の定置が完了した後に行う (例えば、深成岩ケースにおける縦置き・ブロック方式の場合は、139体の定置後に処分坑道を埋め戻す)。

・本付属書では、パイピング現象の評価のため、ある処分坑道に1体目の廃棄体を定置してから、1体目の処分坑道上部の処分坑道を埋め戻すまでの時間を計算しているので注意のこと。

18

(5) カ学プラグ (§ 4.5.3 (2))

設計要件・仕様

表 4.5-11 カ学プラグの設計要件

設計要件	内容	設計項目
構造健全性	カ学プラグに作用する坑道埋戻し材の膨潤圧などに対する構造健全性を有すること	プラグ厚さ, 切り欠き形状, 配筋
製作施工性	既存の技術または実現性の見通しのある技術で施工可能であること	コンクリートの配合・強度

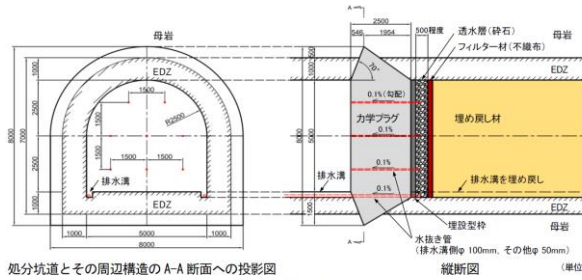


図 4.5-13 設計したカ学プラグの構造

カ学プラグの設置位置 (付属書4-50)

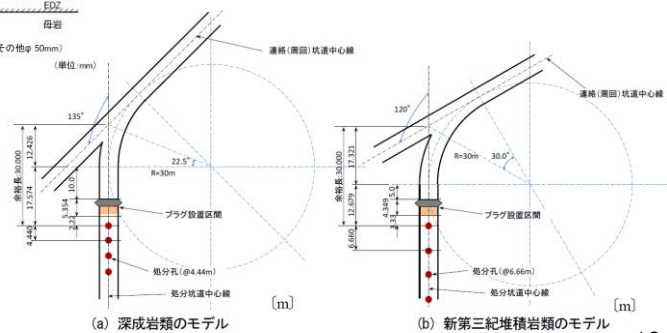


図 4 カ学プラグの位置を考慮した処分坑道の取付部 (レール方式)

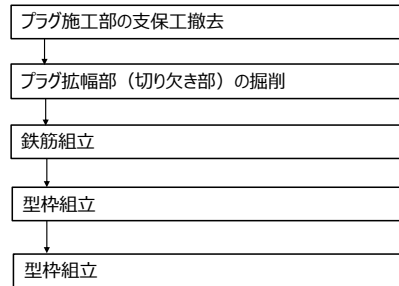
カ学プラグの施工技術、工程

○施工技術

注釈

- NUMO 包括的技術報告書には、プラグの施工工程等の詳細には言及していない。
- 施工技術等は明示的ではないが、右記の個々の施工工程に応じた汎用技術の適用が可能と推察。  
⇒ 必要に応じて、下記の先行研究事例から、詳細な「適用技術」、「詳細工程」や「タイムライン」に係る情報を参照。
  - ・ 北欧実証試験 (Domplu など)
  - ・ 幌延 (人工バリア性能確認試験におけるプラグ設置)
  - ・ 瑞浪 (冠水坑道におけるプラグ設置)

○施工工程 (§ 4.5.7(2) P4-133)



## (6) 止水プラグ (§ 4.5.3(3))

### 設計要件・仕様

表 4.5-12 止水プラグの設計要件

設計要件	内容	設計項目
低透水性	坑道埋め戻し材との組み合わせで、坑道およびその周辺に沿った地下水の流動を抑制すること	材料、有効粘土密度、プラグの構造
製作施工性	既存の技術または実現性のある技術で施工可能であること	乾燥密度、材料の混合率

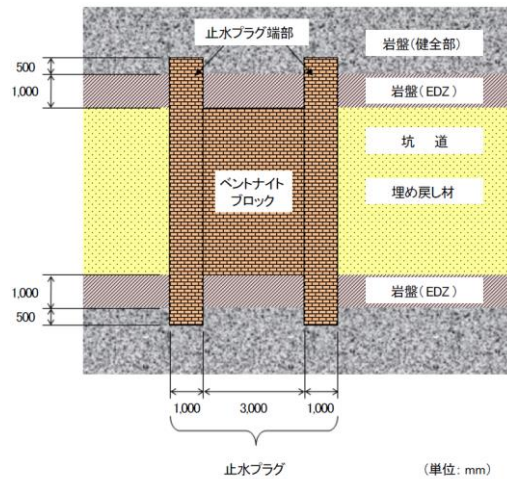


図 4.5-14 設計した止水プラグの構造

21

### カ学プラグの施工技術、工程

#### ○施工技術 (§4.5.7(2) P4-130)

- 有力な施工技術オプション（下記の組み合わせ）
  - 高密度に締め固めたベントナイトブロックを積み上げる方法
  - 岩盤との境界面はベントナイト吹付けを行い隙間を充填
- 付随作業
  - 岩盤への切り欠きの設置（例えば、ラインドリリングと Rock splitting を組み合わせた掘削方法などの適用）

#### ○施工工程

##### 注釈

- P20と同様。
- 施工工程は明示的ではないが、概ね左記の施工技術から推察が可能。

22

## 4. 建設・操業・閉鎖工程を踏まえたタイムライン

### (1) 建設・操業・閉鎖の概要工程

#### ○建設工程

アクセス坑道・連絡坑道の掘削・支保施工	
位 パ で ネ 展 ル 開 単	主要坑道の掘削・支保施工
	処分坑道の掘削・支保施工
	処分孔の掘削

#### ○操業工程：人工バリア搬送・定置・処分坑道埋め戻し（§ 4.2.4）

開 処 分 坑 道 単 位 で 展	OP/緩衝材ブロック等搬送 (アクセス坑道内)
	OP/緩衝材ブロック等積替 (定置装置への積替)
	OP/緩衝材ブロック等の搬送・定置 (処分坑道内搬送・処分孔への定置)
	処分坑道の埋め戻し【処分坑道単位】 (カ学プラグ設置⇒埋め戻し⇒カ学プラグ設置)
主要坑道の埋め戻し (カ学プラグ、水理プラグの設置を含む)	

#### ○閉鎖工程：主要・連絡・アクセス坑道の埋め戻し

#### ※留意点

- 回収可能性に留意して、施設の最終閉鎖段階までは、埋め戻し状態Bとする（§4.7.1）

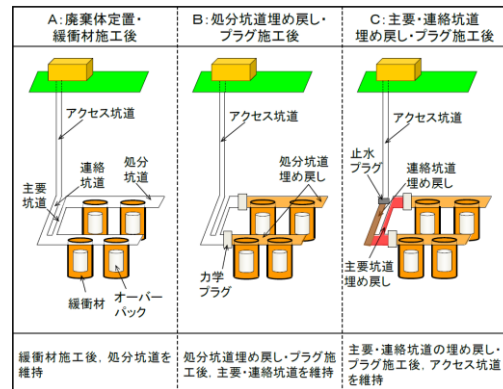


図 4.7-1 回収時の地下施設の状態（高レベル放射性廃棄物処分場の設置き・ブロック方式）

### (2) 包括的技術報告書におけるタイムライン設定に資する情報

#### 前提条件に関する情報

- 放射線防護（管理区域設定）の観点から、処分区画は建設区画と操業区画を独立させて、建設と操業は並行実施（§4.5.1(1)）  
⇒建設期間(10年)において、第1処分区画の建設までを完了（主要・処分坑道、処分孔の建設・支保工）
- 処分坑道での作業は、5本の処分坑道で同時並行で実施（§4.5.2(2)）（付属書4-55）
- 1日あたり1体の廃棄体を定置（緩衝材定置 + OP定置 + 上部緩衝材定置 + 下部埋め戻し材の施工 + 当該処分孔の範囲の処分坑道の埋め戻し）（付属書4-55）

#### マイルストーン（全体工程概要）

（以下、NUMO TR-11-01より）

- 建設段階：10年間程度
  - ・処分施設の建設
- 操業段階：50年間程度
  - ・操業の実施
  - ・閉鎖措置計画の認可  
(申請準備・審査期間含む)
- 閉鎖段階：10年間程度

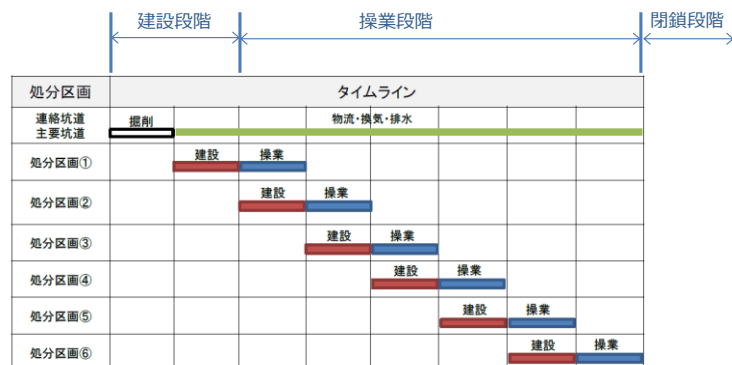


図 4.5-22 処分区画の建設・操業の順序と連絡坑道の役割（パネル型処分区画）

**パネル型処分坑道 1 本当たりの作業時間に関する情報** (本文4.4.3(1)、付属書4-55)

- 人工バリア定置に係る作業手順 (処分坑道の埋め戻しまで)
  - 作業ステップ 1 : 全ての処分孔 (131孔) へのガラス固化体を封入したオーバーバックの定置
  - 作業ステップ 2 : 処分坑道の片側への力学プラグの施工
  - 作業ステップ 3 : 処分坑道の埋め戻し
  - 作業ステップ 4 : 残った片側への力学プラグの施工
- 作業ステップ 1 に要する日数 : 130日 (1日に1体のオーバーバックを定置 : **緩衝材の定置を含む**)
- 作業ステップ 2 に要する日数 : 38日
  - 作業手順 : 施工個所の掘削、鉄筋および型枠の設置、コンクリートの打設、コンクリート養生、脱型・片打
  - 日数内訳 : コンクリート養生28日 + その他の作業10日
- 作業ステップ 3 に要する日数 : 4日

⇒付属書4-55に基づけば、上記の作業ステップ1～3の並行作業も考慮して処分坑道 1 本あたりのシーケンシャルな実作業日数は**172日** (右表、1年あたりの作業に平準化されていることに注意)。これに作業ステップ4の4日 (コンクリート養生は除外) を追加すると**176日**。

**表 1 パイピング現象の評価期間**  
新第三紀堆積岩類のケース : パネル型

工程	作業日数	暦日日数
ガラス固化体を封入したオーバーバックの定置	130日	130×(365/200)=237日
プラグ施工	10日	計 14日
埋戻し	4日	14×(365/276)=19日
コンクリート養生	28日	28日
合計		284日 (約9.5ヶ月)

※1 : ガラス固化体を封入したオーバーバックを年間 1,000 体、1日 5 体定置することから年間の作業日数を 200 日と設定。  
 ※2 : ガラス固化体を封入したオーバーバックの定置以外の作業については、一ヶ月当りの作業日数を 23 日とし、年間の作業日数を 276 日と設定。

**注釈**

定置と処分坑道の埋め戻しのタイムラインは付属書4-55 (5.埋め戻し作業日数の設定) を参照のこと。以下、補足。

・処分坑道の埋戻しは、1本の処分坑道すべての廃棄体の定置が完了した後に行う (例えば、深成岩ケースにおける縦置き・ブロック方式の場合は、139体の定置後に処分坑道を埋め戻す)。

・年間1,000体の定置は処分計画の要件 (法定要件相当)

**(3) 建設・操業・閉鎖工程を踏まえたタイムライン**

**建設段階 (10年)**

- 一般土木分野の現状技術・経験に基づくタイムラインを試算 (詳細は「参考資料③」を参照)
  - 右下図は深成岩類1,000mの試算結果
  - 律速はアクセス斜坑 : 3,567日
- 新第三紀堆積岩類500mの場合への換算
  - 1,000mの試算結果に $[1/0.7]$ を乗じ、更にアクセス坑道 (立坑・斜坑) には $[1/2(500/1,000)]$ を乗じる。
  - アクセス斜坑 :  $3,567/0.7/2 = 2,548$ 日
  - 立坑～処分孔 :  $(2,227-(500/2))/0.7 = 2,824$ 日

⇒ 律速となる2,824日は、

- 年間365日フル稼働換算 : **7.7年**
- 年間260日稼働換算 : **10.9年**

→新第三紀堆積岩類500mなら、10年の建設段階を満足できそう

**注釈**

- 試算方法や試算条件の精査が必要、特に、支保工施工時間を加味した「建設速度」や「速度係数」など
- 非現実的であれば工程・タイムラインの見直しが必要
- 更なる高度化研究によって実現できそうであれば、最適化 (比較評価) においてそのような条件付きのリファレンスと見做す

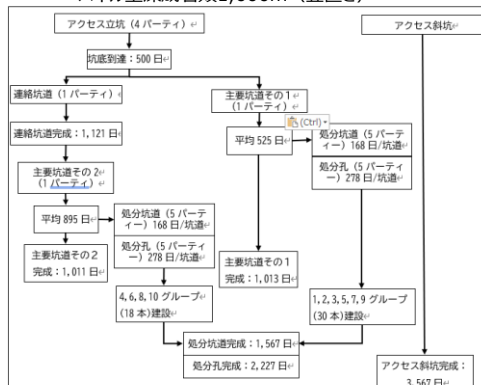
**試算条件**

- ①同時並行建設ライン数 (パーティ数)
  - ・アクセス立坑 : 4ライン
  - ・処分坑道 (処分孔) : 5ライン

②建設速度	③速度係数 (岩種の違いを考慮)
・処分坑道 : 4m/日 ・処分孔 : 0.5孔/日 (2.07m/日) ・主要坑道 : 2.5m/日 ・連絡坑道 : 1.5m/日 ・アクセス立坑 : 2m/日 ・アクセス斜坑 : 3m/日	・深成岩類 : 1.0 (処分深度1,000m) ・新第三紀堆積岩類 : 0.7 (処分深度500m) ・先新第三紀堆積岩類 : 1.2 (処分深度1,000m)

**試算結果 (作業フロー、タイムライン)**

パネル型深成岩類1,000m (縦置き)





### 操業段階 (50年間程度)

- P24のマイルストーンを踏まえ、操業期間中に「5パネルの建設」と「6パネルの操業」を収める。
- パネル展開で律速となる「6パネルの操業」について、**7年/1パネル展開を仮定**する。  
⇒**操業期間は7年×6パネル=42年と仮定**（閉鎖認可申請前まで）
- 1パネルの展開における「建設」と「操業」それぞれのタイムライン（以下）

#### 建設工程のタイムライン

- P26のラフな試算にもとづき、新第三紀堆積岩類の場合1パネルの建設に要する時間は、
  - $2,227 - 500 = 1,727$  日（深成岩類）
  - $1,727 / 0.7 = 2,467$  日（新第三紀堆積岩類への換算）  
= **6.76年**（年間365日フル稼働換算）

→年間365日フル稼働なら、7年で1パネルの建設を満足できそう

#### 操業工程のタイムライン

- P25より、1処分坑道あたりの操業時間（定置～埋め戻し迄・プラグ設置まで）は**176日**
- 51本の処分坑道に対する5ライン（5作業パーティ）での並行作業
  - $176日 \times (51/5) = 176 \times 11 = 1,936$  日

⇒以上の建設工程の展開より、操業工程には時間的な余裕がある



# 資料 5

## 最適化アプローチの試行に用いた 代替設計オプション案

### 資料 5 の構成

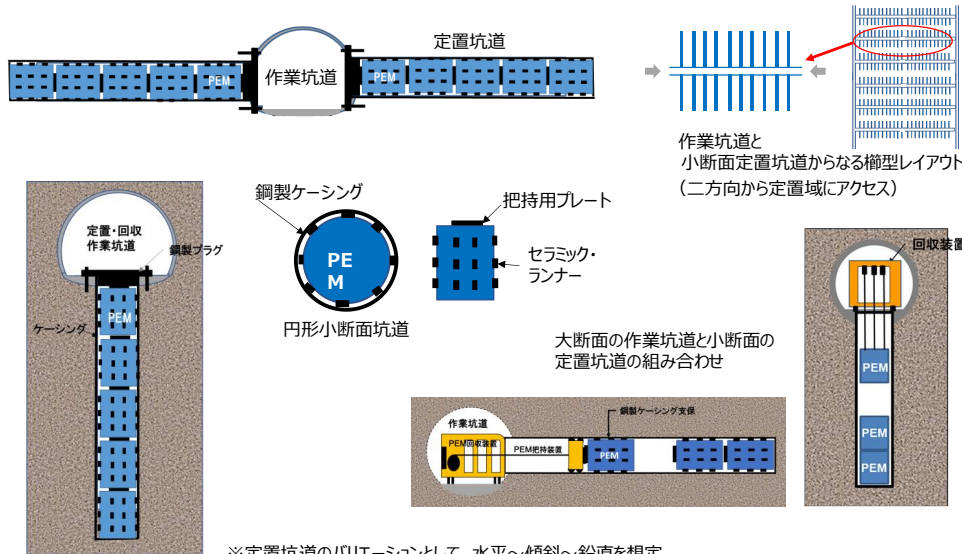
- ID.01 : 円形小断面坑道 PEM 複数定置
- ID.02 : 大断面・空洞矩形 PEM 集中定置
- ID.03 : 2重ライナー管・オーバーパック接続定置
- ID.04 : 多段・小断面・PEM 接続定置
- ID.05 : 集積処分孔への水密 PEM 接続定置
- ID.06 : 大空洞（サイロ）へのオーバーパック集積定置
- ID.07 : 集積処分孔へのオーバーパック接続定置
- ID.08 : 処分坑道横置き・Ti 製 PEM 方式・小断面 Fishbone 坑道・分散型らせん状処分区画
- ID.09 : 縦置き・鋼殻付き緩衝材+OP 定置方式
- ID.10 : 渦巻き型レイアウト
- ID.11 : 可変型処分坑道レイアウト
- ID.12 : 矩形小断面坑道コンテナ形オーバーパック複数定置方式
- (ID.13-16 : 考え方のベースとなる代替設計オプションの展開)
- ID.13 : ネットワーク型施設方式
- ID.14 : 複アクセス型施設方式
- ID.15 : 水槽型処分方式
- ID.16 : 地上浸潤処分方式

### 備考 :

ここに整理した代替設計オプション案は、本研究のメンバーが各自で考案したものであり、特にレファレンスに対する比較評価結果などは、研究会として精査されたものではないことに留意を頂きたい。

## 代替設計オプション ID.01 : 円形小断面坑道 PEM 複数設置

### 代替設計オプションの概要



※定置坑道のバリエーションとして、水平～傾斜～鉛直を想定  
 ※回収可能性の観点では、維持期間においてケーシングとPEM間の縁切りの機能が維持されていることが望まれる (水密性ケーシングの導入など)

### 代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- 隙間充填材を必要としない円形小断面坑道に、緩衝材とオーバーバックを一体撤去できるPEMを複数体定置 (PEM内には複数のオーバーバックあるいはガラス固化体を複数格納したオーバーバックも可) する。
- 定置坑道長を短尺化することで回収廃棄体へのアクセス性や動線・物流も向上できる。
- 円形小断面には回収可能性維持期間の坑道安定性を確保することとPEMの定置回収時の装置のハンドリング性を向上させるために耐腐食性の高耐久性ケーシング材を設置する。
- オーバーバックやPEMを軽量化 (厚さを薄くする等) し、耐腐食性材料を用いることにより、で回収作業の負荷を削減でき容易性は向上する。
- 小断面内での定置・回収には動作が単純な回収装置を用い、動力部は広い作業坑道に設置することで一度回収装置を据え付ければ複数のPEMを回収することができ、回収の作業数が低減する。
- 小断面坑口には撤去可能な鋼製プラグを設置してアクセス性を向上させる。

※本オプションは2019年度の資源エネルギー庁委託事業における「回収の容易性を高めた代替設計概要」として示されたもの。2020年度の委託事業では前年度の成果をベースに、引き続き『回収の容易性向上』の観点から下記のバリエーション展開、設計仕様の具体化ならびに実現性の確認が進められている。

- 円形小断面坑道を水平方向だけでなく、鉛直方向、斜め方向への設置、およびそれらの組合せ
- 作業坑道の断面を拡大して、円形小断面坑道を一断面に複数本設置

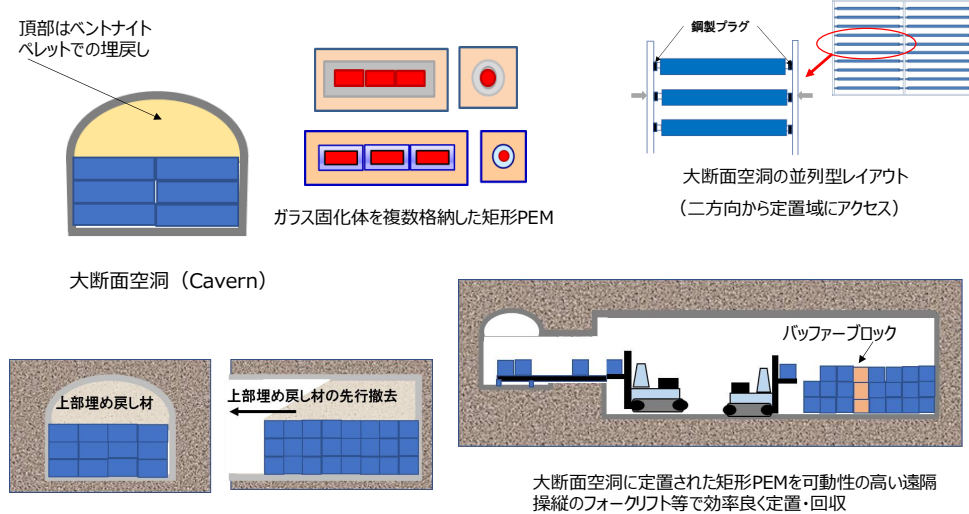
### レファレンスに対する比較評価

評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し / 設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	④横置きに関して設計詳細化や建設・操業技術の信頼性に関する参考事例が存在 (以下一例) ・ フランス ANDRA の処分概念や使用済燃料廃棄体のキャスクの DIRECT 方式 ・ 米国の原子力発電所で利用されている使用済燃料の貯蔵用サイロへの定置技術	⑤設計詳細化における、水密性を期待する構造物 (ケーシング、PEM 容器、プラグ)、内空 (PEM-ケーシング間) やライナー等に対する要件設定の不確実性 (機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性)
② 設計のロバスト性・柔軟性	④定置坑道の長尺化により、地質環境変化に関する不確実性が大きい (3次元不均質性)	
③ 建設・操業性 (建設・操業の作業性)	④デッドエンド形式に伴う定置坑道内への PEM 定置数量の柔軟性 (増減が簡単) ④建設と廃棄体定置を伴う操業の作業分離性が高い (後者の搬送・定置作業は短時間) ④重量物である PEM の地上からの原位置への搬送・定置 ④長尺ケーシングの原位置施工技術 (水密施工) の実現性 ④小断面・長尺の定置坑道における施工技術の信頼性 (PEM 押し込み技術、耐久性のあるランナーやケーシング) ④回収維持期間中における回収関連部品の健全性 (ランナーやケーシング、腐食への耐性)	
④ 品質保証・品質管理の容易性	④高度な品質管理を要求される原位置施工部材が少ない	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④PEM、且つ、埋め戻しが無いことから性能確認項目が少ない ④閉鎖時に規制要求があれば、PEM を引き出して現物の状態確認も可能 ④基本的に埋戻しや隙間充填のない概念であり、原位置の多様な直接 / 間接測定が可能	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④堅積みにおける PEM の耐荷重性能への懸念 ④堅積みにおける PEM 消失後 (破損時) の OP 自重沈下の懸念 ④ケーシングや PEM の水密性の要求保持期間に関する信頼性 (水密性 PEM 内の残留気相 / 発生水素を含む) 【水密性を要求する場合】	
⑦ 閉鎖前の安全性 (放射線防護)	④異常時における特定の廃棄体へのアクセス性が高い	
⑧ 閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)		
⑨ 一般労働安全		
⑩ 環境保全		
⑪ 回収可能性	④定置・回収対象モジュールが PEM であり、アクセス性やハンドリング性が高い ④定置後の一定期間は冠水等による影響を受けにくく、回収が容易 (定置済みの PEM は拘束されていない)、且つ、特定の PEM へのアクセス性が高い ④回収維持期間中における PEM やケーシングの健全性 (腐食の影響)	
⑫ 費用 (コスト) ・経済性	④作業坑道や処分坑道の掘削ボリュームの合理化	
⑬ その他		

### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 重量物を支えるケーシングやランナーの材質、形状、製造・施工精度など
- PEM の挿入方法 (ANDRA プッシングマシンの高度化など)
- 定置坑道 (小断面・水平坑道) の掘削、支保・ケーシング施工技術 (水密性を確保したケーシングの原位置継ぎ足し等)
- 要求時間スケールにおける水密性 (ケーシング、PEM) の健全性 (水密性を要求する場合)
- 残置物の長期的影響の評価 (ケーシングの内側・外側、ランナー)

代替設計オプションの概要



※回収可能性の観点では、維持期間において隣接する矩形PEMどうしの独立性が維持されることが望まれる。

代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- 上部のみを埋め戻すことで撤去量が少なくなる大断面坑道に、緩衝材とオーバーバックを一体で回収できるPEM (PEM内には複数のオーバーバックあるいはガラス固化体を複数格納したオーバーバックも可) を集中定置することで回収時の作業効率の向上を図る。
- 容器の形状を矩形PEMとすることで隙間充填材を省略でき、フォークリフトなど単純な回収装置を用いることで定置・回収が容易となる。
- オーバーバックやPEMを軽量化 (厚さを薄くする等) し、耐腐食性材料を用いることにより、で回収作業の負荷を削減でき容易性は向上する。
- 大断面空洞は短尺化することで回収する廃棄体の移送距離を短くすることができる。
- 支保材に高耐久性部材を使用することで坑道安定性確保の作業量を減らす。
- 動線と物流を考慮して定置坑道レイアウトを単純化し、大断面空洞とアクセス用の小断面坑道を組み合わせることで動線・物流の効率化を図る。
- 小断面の坑口には撤去が容易な鋼製プラグを設置する。

※本オプションは2019年度の資源エネルギー庁委託事業における「回収の容易性を高めた代替設計概要」として示されたもの。2020年度の委託事業では前年度の成果をベースに、引き続き『回収の容易性向上』の観点から下記のバリエーション展開、設計仕様具体化ならびに実現性の確認が進められている。

- PEMの定置方向 (置き方) は、横置きだけでなく、縦置きもあり
- 「円形小断面坑道PEM複数定置概念」と「大断面坑道矩形PEM集中定置概念」との組み合わせの可否

レファレンスに対する比較評価

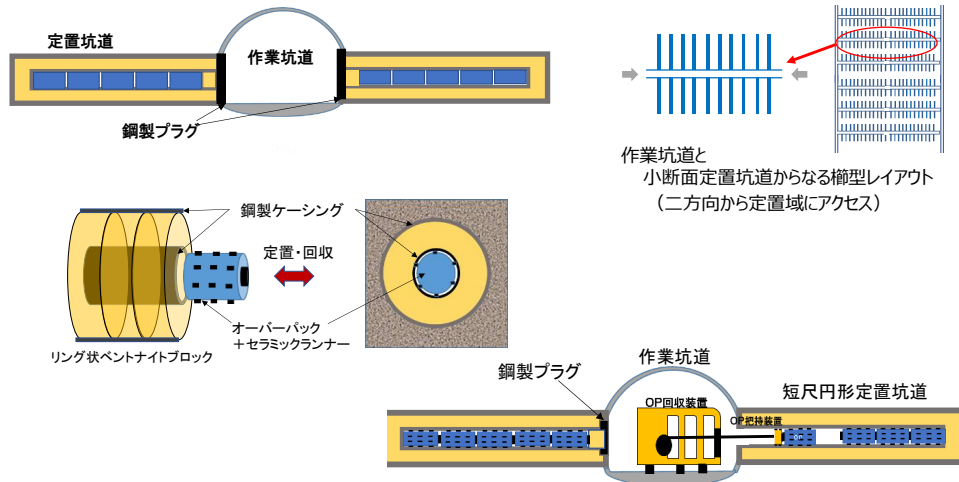
評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し / 設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	④大断面空洞 (cavern) の設計詳細化や建設・操業技術の信頼性に関する参考事例が存在 (地下発電所建設事例など)	⑤矩形横置き PEM の集中定置に関する設計詳細化における、構造躯体ならびに PEM 容器や埋戻し材等に関する要件設定に不確実性 (機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性)
② 設計のロバスト性・柔軟性	④岩盤強度などの地質環境や深度に制約の可能性	
③ 建設・操業性 (建設・操業の作業性)	④作業空間が大きいため建設・操業・閉鎖の作業性 (維持・補修作業を含む) は良い ④大断面空洞建設後は、空洞内での作業工程や計画変更 (PEM 定置数量の変更などを含む) への柔軟性は高い	⑤重量物である PEM の地上からの原位置への搬送・定置 ⑤大断面空洞の構造健全性の確保・維持に伴う設計・施工や湧水対策は相対的に大掛かりになる可能性
④ 品質保証・品質管理の容易性	④高度な品質管理を要求される原位置施工部材が少ない (巨つ大断面空洞での作業であることから品質管理は容易)	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④PEM であること、大断面での作業であることから性能確認項目が少ない	⑤構造物が大きいことから閉鎖までの過渡期の変遷挙動の把握に難しさ
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④閉鎖後長期の変遷挙動の予測に難しさ (埋戻し材の浸潤過程など)	⑤多段積みにおける PEM の耐荷重性能への懸念 ⑤多段積みにおける PEM 消失後 (破損時) の OP 自重沈下の懸念 ⑤ケーシングや PEM の水密性の要求保持期間に関する信頼性 (水密性 PEM 内の残留気相 / 発生水素を含む) 【水密性を要求する場合】
⑦ 閉鎖前の安全性 (放射線防護)	④異常時における特定の廃棄体へのアクセス性に課題 (他の廃棄体の移動・撤去等を要する)	
⑧ 閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)		
⑨ 一般労働安全		
⑩ 環境保全		
⑪ 回収可能性	④定置・回収対象モジュールが PEM であり、アクセス性やハンドリング性が高い ④定置後の一定期間は冠水等による影響を受けにくい ⑤回収維持期間中における PEM の健全性 (腐食の影響)	
⑫ 費用 (コスト) ・経済性	④大断面空洞集積定置のため、主要・連絡・処分等の坑道掘削ボリュームの合理化	
⑬ その他		

代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 矩形 PEM 容器の材質、厚さ、形状 (多段積への対応)
- ハンドリング及び定置方法の検討
- 要求時間スケールにおける水密性 (矩形 PEM) の健全性 (水密性を要求する場合)

## 代替設計オプション ID.03 : 2重ライナー管・オーバーバック接続定置

### 代替設計オプションの概要



※定置坑道のバリエーションとして、水平～傾斜～鉛直を想定  
 ※回収可能性の観点では、維持期間において内側ケーシングとPEM間の縁切りの機能が維持されていることが望まれる（水密性の内側ケーシングの導入など）

### 代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）

- 2重ライナー管に複数のオーバーバックを定置
  - 隙間充填材を必要としない円形小断面坑道に外側鋼製ケーシング（高耐久性の支保材）を設置。
  - その内側にリング状の緩衝材ブロックを定置し、オーバーバックとの縁切りのための耐腐食性のある内側ケーシングを設置。
  - 内部には複数のオーバーバックを定置（ガラス固化体を複数格納したオーバーバックでも可）。
- 回収時には内部ケーシング内に定置されているオーバーバックのみを回収し、緩衝材は残置する。
- オーバーバックを軽量化し、耐腐食性材料を用いることにより、で回収作業の負荷を削減でき容易性は向上する。
- 小断面の内側ケーシング内のオーバーバック回収のために、回収装置は単純化し、動力部は断面の広い作業坑道に設置する。
- 小断面の坑口には撤去容易な鋼製プラグを設置する。
- 回収距離を短くするために定置坑道は短尺化する。

※本オプションは2019年度の資源エネルギー庁委託事業における「回収の容易性を高めた代替設計概要」として示されたもの。2020年度の委託事業では前年度の成果をベースに、引き続き『回収の容易性向上』の観点から下記のバリエーション展開、設計仕様の具体化ならびに実現性の確認が進められている。

- 円形小断面坑道を水平方向だけでなく、鉛直方向、斜め方向への設置、およびそれらの組合せ
- 大断面坑道への定置

### レファレンスに対する比較評価

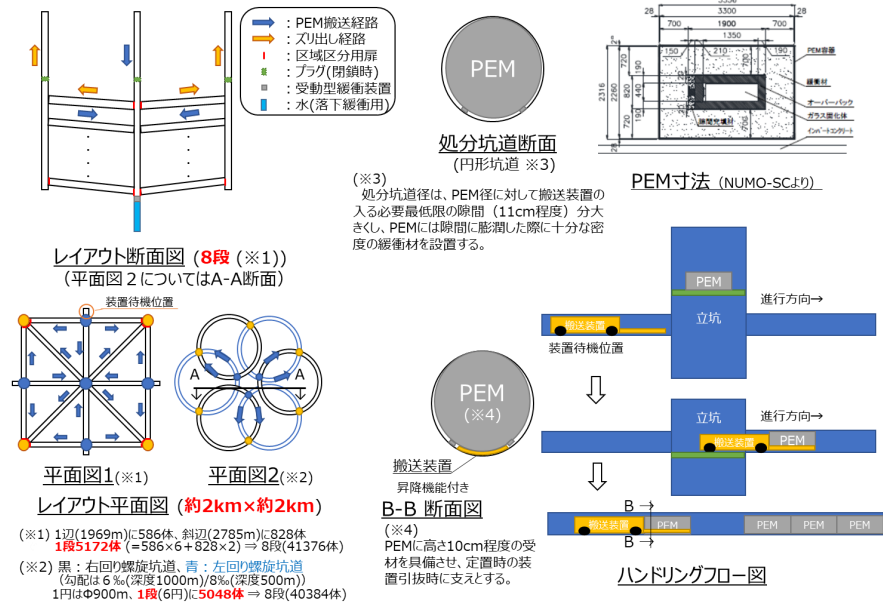
評価項目	⊕主なプラス評価の理由	⊖主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見通し）	⊕類似設計や施工技術に関する先行研究事例あり（ANDRA 直接処分概念） ⊕2重ライナー管に対する要件設定の不確実性（機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性）	
② 設計のロバスト性・柔軟性	⊖定置坑道の長尺化により、地質環境変化に関する不確実性が大きい（3次元不均質性）	
③ 建設・操業性（建設・操業の作業性）	⊕リング状ベントナイトブロックやOP搬送・定置・回収の施工技術は先行研究事例あり（ANDRA）。 ⊕デッドエンド形式に伴う定置坑道内へのPEM定置数量の柔軟性（増減が簡単） ⊕建設と廃棄体定置を伴う操業の作業分離性が高い（後者の搬送・定置作業は短時間） ⊕長尺ケーシングの原位置施工技術の実現性（特に水密施工方法など） ⊖小断面・長尺の定置坑道における施工技術の信頼性（PEM押し込み技術、耐久性のあるランナーやケーシング） ⊖回収維持期間中における回収関連部品の健全性（ランナーやケーシング、腐食への耐性）	
④ 品質保証・品質管理の容易性	⊕地上施設でのPEM製作 ⊖2重ライナー管内の緩衝材の施工の難しさに伴う品質確保の難しさ	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	⊕閉鎖時に規制要求があれば、OPを引き出して現物の状態確認も可能 ⊕基本的に埋戻しや隙間充填のない概念であり、原位置の多様な直接/間接測定が可能 ⊖外側ケーシングの存在により長期化する緩衝材への浸潤プロセスの挙動把握の不確実性	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	⊖ケーシングの水密性の要求保持期間に関する信頼性（水密性を要求する場合）	
⑦ 閉鎖前の安全性（放射線防護）	⊕異常時における特定の廃棄体へのアクセス性が高い	
⑧ 閉鎖後長期の安全性（放射線防護）		
⑨ 一般労働安全		
⑩ 環境保全		
⑪ 回収可能性	⊕定置・回収対象モジュールがオーバーバックであり、アクセス性やハンドリング性が高い ⊕定置後の一定期間は冠水等による影響を受けにくく、回収が容易（定置済みのOPは拘束されていない）、且つ、特定のOPへのアクセス性が高い ⊖回収維持期間中におけるOPや内側ケーシングの健全性（腐食の影響）	
⑫ 費用（コスト）・経済性	⊕作業坑道等の掘削ボリュームの合理化	
⑬ その他		

### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 定置坑道（小断面・水平坑道）の掘削、外側ケーシング施工技術（原位置継ぎ足し等）
- 内側ケーシング（原位置継ぎ足し、水密施工等）の施工技術
- 緩衝材の施工技術（ブロック、その他の方法）
- 要求時間スケールにおける水密性（内側ケーシング）の健全性（水密性を要求する場合）
- 残置物の長期的影響の評価（内側ケーシングとOPの間隙、ランナー）

代替設計オプション ID.04 : 多段・小断面・PEM 連接位置

代替設計オプションの概要



代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- 地下施設の構成
  - 多段型:
    - ・約2km×約2kmの面積 (定置距離: 1辺1969m(586体)×6辺、斜辺2785m(828体)×2辺) に8段の処分坑道
    - ・1段毎の間隔は(NUMO-SC表4.5-7より)、深度1000mの場合16m(最深段1112m)、深度500mの場合21.6m(最深段651.2m)
    - ・地上からのアクセスは立坑9本 (5本はPEM搬送用(斜坑は無し)、4本はスリ出し用) (ref.5本→9本)
    - ・処分坑道が112本 (14本/段×8段)。アクセス斜坑・主要坑道・連絡坑道は無い。(⇒掘削量、埋め戻し材の低減)
      - ⇒ 掘削量の比較(※)として、処分坑道断面は、(ref.(PEM) 16.5m<sup>2</sup>⇒4.7m<sup>2</sup>)で1/3以下となり、処分坑道以外の坑道距離は、処分深度以深: ref.(PEM) 4900m(連絡坑道)⇒1008m(=16m×7段×9本)、処分深度以浅: ref.(PEM) 15700m(=1000m×5本(立坑)+10700m(斜坑))⇒9000m(=1000m×9本)
      - (※): 縦置き・ブロック方式との比較では優となるのは自明のため、横置き・PEM方式との比較とした。
    - 処分坑道を小断面とし、PEMとの隙間を必要最低限にして、PEMには隙間に膨潤した際に十分な密度の緩衝材を充填する。
    - カサ/水密プラグは、緩衝材が流出しないため、大幅に低減可。(ref.(PEM) 192箇所(=32本×6パネル) → 9箇所)
  - 建設時の工夫
    - 土質調査: TBM等で掘りながら壁面観察し、AETモグラフィー等により全体を把握する。
  - 操業時の工夫
    - PEMの製作: 地下水の影響を受けない地上施設での組立て。工場払出しの管理、検査も色々実施可能。
    - PEMの搬送: 立坑により搬送するため、斜坑での運搬車が不要となり、安全に機械搬送が可能。
    - 隙間充填: 不要。
    - 装置の異常時対応: 処分坑道が立坑に直接接続され、装置の救援が容易。
    - 遠隔操作: 上記の3項目により、全ての定置作業を遠隔操作で実施可能。
    - PEM定置: 模擬PEMを使用した試運転により安心して遠隔操作によるPEM定置を実施可能。
    - 操業安全 (湧水対策): 停電時等に水没しても、緩衝材が露出しておらず流出しないため、ハリア機能に影響なし。
    - 操業安全 (放射線防護): 建設区画と操業区画は段ごとに区分することで分離可。
  - 回収容易性の工夫
    - PEM: 水密構造 (完全な止水) とすることで、緩衝材の膨張を防ぎ、定置時の状態でハンドリング可。  
 (鋼殻内の水素滞留には要対応。例えば鋼殻に貫通タップ穴を開け、水素透過性の金属をコーティングしたボルトを挿入。)
    - 回収作業日数: 各立坑(5本)の平行作業により、552日 (828体×2斜坑×8段/斜辺÷24体/日) 程度で全量回収可。

※以下はレファレンスと同一条件  
 ・対象母岩、設置深度、地質環境特性、人工ハリア仕様、地下坑道の設計・仕様等の考え方、安全評価の考え方

レファレンスに対する比較評価

評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	④狭隘空間での PEM 搬送技術は、既往研究実績あり ⑤設計詳細化における、水密性を期待する構造物 (PEM 容器) や内空 (PEM-坑壁) 等に対する要件設定の不確実性 (機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性) ⑥期待される処分坑道の掘削・仕上げ精度が厳しい	
② 設計のロバスト性・柔軟性	④多段配置・展開のため、岩盤強度などの地質環境や深度に制約の可能性	
③ 建設・操業性 (建設・操業の作業性)	0)段ごとに区画分けが可能 (但し、操業中は立坑で連結) 0)処分坑道がアクセス坑道に連結しており装置の救援性が良い (但し、最低 1km の処分坑道内の特定の廃棄体へのアクセス性は高くない) 0)立坑での搬入、PEM の定置、異常時対応も遠隔操作で実施可能 (但し、PEM-坑壁間のクリアランスが小さいため、遠隔装置のトラブルリスクは相対的に高い) ⑥小口径・長い坑道、かつ、掘削・仕上げ精度を満足させる適用技術の実現性に不確実性 ⑥小口径・長い坑道のため、維持・管理 (補修) が容易ではない ⑥PEM 搬入用のアクセス立坑が多いため、操業の柔軟性は期待できるが、3次元で水平・垂直坑道が交差するため、レイアウト面での柔軟性に課題	
④ 品質保証・品質管理の容易性	④高度な品質管理を要求される対象部材が少ない (PEM、止水プラグ程度)	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④閉鎖時に規制要求があれば、PEM を取り出して現物の状態確認も可能 0)水密 PEM 容器の腐食挙動 (その後の PEM 内緩衝材浸潤挙動は解析技術に委ねる)	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	⑥PEM-坑道間の隙間を充填しないため、不確実性が増加 ⑥水密性 PEM 内の残留気相 (発生水素を含む) の挙動に不確実性 ⑥ケーシングや PEM の水密性の要求保持期間に関する信頼性 (水密性 PEM 内の残留気相/発生水素を含む) 【水密性を要求する場合】	
⑦ 閉鎖前の安全性 (放射線防護)		
⑧ 閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)		
⑨ 一般労働安全	④掘削物量の低減により、環境安全性が向上	
⑩ 環境保全	④掘削物量の低減により、環境安全性が向上	
⑪ 回収可能性	④定置・回収対象モジュールが PEM であり、アクセス性やハンドリング性が高い ④回収維持期間中の PEM-坑壁 (裸孔) 間のクリアランス保持の信頼性	
⑫ 費用 (コスト) ・経済性	④掘削物量は合理化	
⑬ その他		

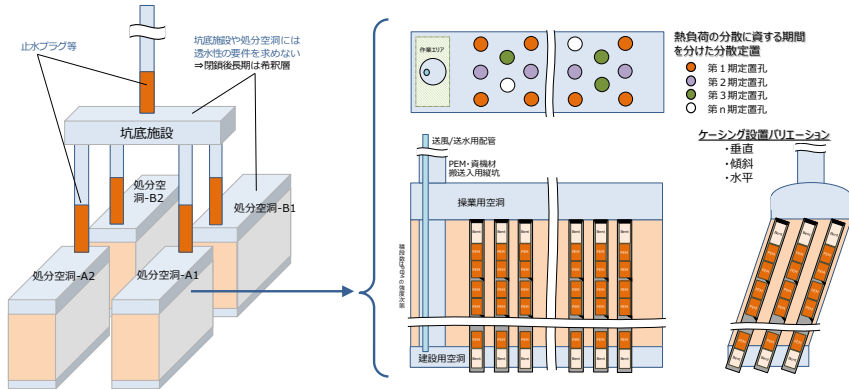
代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 要求される掘削・仕上げの達成が可能な掘削技術の実現性 (狭隘処分坑道内の壁面観察方法・技術を含む)
- 掘削精度 (凹凸) に対する上敷き材 (薄い鉄板等) の材料・厚さ、残置物影響の評価
- 狭隘空間・1km 超の処分坑道 (裸孔 + 上敷き材) における搬送・定置装置の適用性・信頼性
- 要求時間スケールにおける水密性 (ケーシング、PEM) の健全性 (水密性を要求する場合)

代替設計オプション ID.05 : 集積処分孔への水密 PEM 接続位置

代替設計オプションの概要

- 1つの処分空洞モジュールは操業用(上部)と建設用(下部)および上下を貫通する鋼製ケーシングで構成
  - ケーシングは、『掘削孔+ケーシング』、『掘削大空洞+ケーシング+隙間充填』等によって施工
  - 鋼製ケーシング内にPEMを段積(熱負荷やPEM外殻容器の耐荷重に応じて段積数調整)
  - 岩盤強度・PEM段積数・ケーシング設置密度に応じて処分空洞の数量を決定
- 操業中(回収維持期間中)は埋め戻さず、空ケーシングを利用して冷却:空冷式/水冷式(水没循環)
- アクセス坑道は『縦』を基本として閉鎖時に止水領域を設置、処分空洞内は透水性の要件は設けない
- ※ケーシング密度が高く施工性に懸念がある場合は他の代替設計オプションを指向(⇒OP・サイロ方式など)



資料-60

代替設計オプションの主な特徴

- 物流(資機材やPEMの搬送)は基本的に『縦のライン』(横坑や斜坑はない)
  - 核種移行評価(短絡経路)における不確実性を低減
  - 力学プラグ不要、止水プラグは限定的
- 処分領域(操業空洞+建設空洞+間の領域)内に低透水性の要件は設定しない
  - 品質管理の負荷低減
  - 安全評価上はEDZと同様の希釈領域
- 処分空洞内のケーシング間隔は可能な限り集積
  - ケーシングは垂直(理想)⇒PEMへの過重負荷を考慮して傾斜度・くさび等の導入を調整
  - 第1期/第2期...と時期を分けて分散配置することにより熱負荷を制御
  - 空ケーシング孔は冷却装置として利用
    - 硬岩系・破砕帯(湧水量が減りにくい場) ⇒未使用期間は坑底施設深度レベルで処分空洞を水没 坑底施設から建設用空洞に湧水を強制注水(循環水冷)
    - 堆積岩系・多孔質(初期の湧水が徐々に減るような場) ⇒未使用期間は水没させずに循環空冷
  - PEMとケーシング間のギャップは空洞
    - 操業期間中は水が入らないように仮蓋(ケーシング上部)は水密性を確保
    - ケーシング最上部(及び最下部)には、高密度ベントナイト充填PEMを設置(長期的にケーシング内を充填) ※非水密PEMの場合は、操業期間中もギャップ内を湧水で満たしてPEM内浸潤を加速
- 設計バリエーション展開例
  - ケーシング角度(垂直〜傾斜〜水平)
  - ケーシング孔掘削方式
    - ⇒処分領域全体を包含する大空洞掘削方式(ケーシング設置後に土質系材料で隙間充填)
  - ※移送モジュールの最小化を目指したい(PEMのスリム化、OP方式、など)

レファレンスに対する比較評価

評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
①詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性(建設・施工技術の適用性の見通し)	④処分空洞の上下大空洞の施工は大空洞(Cavern)やサイロ型で実績あり	⑤PEM段積数やケーシング集積度の仕様具体化、空ケーシングを利用した冷却効果の定量化などは未検討(定量化の見通しはある)
②設計のロバスト性・柔軟性	④母岩種類や湧水環境(冷却システムの切り替えなど)に柔軟	⑤PEMの機能割り当ての考え方(水密/非水密)の変更にも柔軟
③建設・操業性(建設・操業の作業性)	④ケーシング孔掘削技術の高度化が必要となる可能性があるが、建設後の操業性は高い(坑底施設・操業/建設用空洞などを分けることで作業性が良い)	⑤坑底施設や操業用空洞で作業が規格化でき、遠隔・自動化技術の導入の見通しが高い
④品質保証・品質管理の容易性	④最終閉鎖まで埋め戻さない概念のため、空洞等の維持・補修作業が容易	⑤重量物であるPEMの地上からの原位置への搬送・定置
⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④処分空洞モジュール単位で建設/操業の大まかな区画分離が可能だが、同一処分空洞における分散定置など、放射線管理区域上の分離が難しい	⑤高度な品質管理を要求される原位置施工部材が少ない
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④閉鎖時に規制要求があれば、PEMを引き出して現物の状態確認も可能	⑤基本的には埋戻しや隙間充填のない概念であり、原位置の多様な直接/間接測定が可能
⑦閉鎖前の安全性(放射線防護)	④異常時における特定の廃棄体へのアクセス性が高い	⑤ケーシングやPEMの水密性の要求保持期間に関する信頼性(水密性PEM内の残留気相/発生水素を含む)【水密性を要求する場合】
⑧閉鎖後長期の安全性(放射線防護)	④希釈領域が大きいため評価はより安全側になる可能性	⑤一般労働安全
⑨一般労働安全	④希釈領域が大きいため評価はより安全側になる可能性	⑩環境保全
⑩環境保全	④冷却水(湧水)の地上放出時に慎重さを要する(放射線影響など)	⑪回収可能性
⑪回収可能性	④回収可能性(アクセス性・ハンドリング性)は高い	⑫費用(コスト)・経済性
⑫費用(コスト)・経済性	④ケーシング単位であるが、特定の廃棄体へのアクセス性も高い	⑬その他
⑬その他	④空洞等の維持・補修作業が容易のため、回収維持期間を長く設計できる可能性(逆にケーシングやPEMの健全性には留意が必要)	
	④回収維持期間中におけるPEMやケーシングの健全性(腐食の影響)	
	④集積型のため掘削量は合理化(坑底施設、操業/建設用空洞分は増加)	
	④湧水利用(冷却水)、処分空洞の水没管理により、湧水処理量抑制の可能性	

代替設計オプションの実現に向けた技術課題

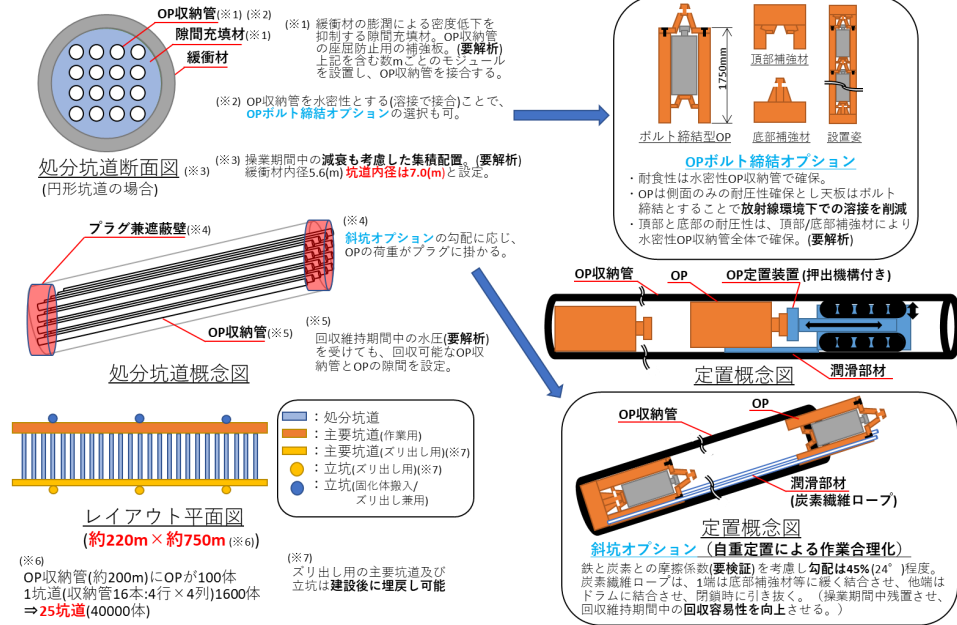
- 力学安定性の観点からの「上部」操業用空洞と「下部」建設用空洞との『設けるべき最小離間距離』と『段積み可能なPEM数量』の設計(PEM外殻容器の耐荷重設計)
- 高密度となる処分孔(垂直〜傾斜)の掘削技術・掘削精度
- ケーシングの自立性確保のための孔壁間の仕上げ方法(粘性泥水、セメンチング、...)
- ケーシングの水密性を確保できる原位置継ぎ足し施工技術等の実現性
- 要求時間スケールにおける水密性(ケーシング、PEM)の健全性(水密性を要求する場合)、PEM定置済みのケーシングの水密性の確保が可能な閉鎖可能な蓋の実現性
- 傾斜ありの場合における、段積PEMの間に設ける『くさび』等の導入の技術的実現性、PEM-ケーシング間の空間維持装置(ANDRAのセラミック突起物のようなもの)の実現性
- 鋼製ケーシング、くさび、突起物等の回収維持期間における機能健全性(空冷/水冷期間)





# 代替設計オプション ID.07：集積処分孔へのオーバーパック接続定置

## 代替設計オプションの概要



## 代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- **地下施設の構成**
    - 集積配置：
      - ・約220m×約750mの面積に25本の処分坑道で、1坑道にOP収納管を16本設置。OP収納管に100体のOP収納。
      - ・地上からのアクセスは立坑6本 (3本はOP搬送用(斜坑は無し)、3本はスリ出し用) (ref.5本→6本)
      - ・操業期間(40年)中の崩壊熱低減も考慮した集積定置のため、掘削量、緩衝材量を大幅に低減。
      - ・アクセス斜坑・連絡坑道は無い。(⇒埋め戻し材も低減)
      - ⇒ 掘削量の比較(※)：処分坑道掘削量は、(ref.(PEM) 255[×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>]⇒19[×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>])で1/13程度と大幅に削減され、処分坑道以外の坑道距離は、処分深度以深：ref.(PEM) 4900m(連絡坑道)⇒1500m(=750m×2本)、処分深度以浅：ref.(PEM) 15700m(=1000m×5本(立坑)+10700m(斜坑))⇒6000m(=1000m×6本)
      - ⇒ 緩衝材量の比較は、(ref.(PEM) 49×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>⇒6.4×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>)で1/7程度
      - (※)：縦置き・ブロック方式との比較では優となるのは自明のため、横置き・PEM方式との比較とした。
    - 力学/水密プラグ兼遮蔽壁の数量は低減。(ref.(PEM) 192箇所(=32本×6パネル) ⇒ 50箇所)
  - **建設時の工夫**
    - 掘削方法：斜坑オプションの場合、45%(24°)程度と比較的勾配が大きいため、斜坑TBM等の採用も検討。
    - OP収納管設置方法：隙間充填材及び座屈防止用補強板を含む数mごとのモジュールによる設置を検討。
  - **操業時の工夫**
    - OPの製作：OPボルト締結オプションの場合、放射線環境下の溶接が不要となり製作性向上。
    - OPの搬送：立坑により搬送するため、斜坑での運搬車が不要となり、安全に機械搬送が可能。
    - 隙間充填：緩衝材を設置後、OP収納管を設置しつつ、隙間充填を通常(放射線無し)環境で施工可能。
    - 装置の異常時対応：OPを退避させることで、OP定置装置へのアクセスが可能。(⇒OPの退避方法を要検討)
    - OP定置：潤滑部材を使用することで、定置装置の必要駆動力を低減。または斜坑オプションの場合、自重定置可。(要検証)
    - 操業安全(湧水対策)：要検討。
    - 操業安全(放射線防護)：建設区画と操業区画は処分坑道ごとに区分することで分離可。
  - **回収容易性の工夫**
    - 回収方法：OP収納管内のOPを取り出せば良いので、作業性が良い。取り出し装置は別途要製作。
    - 回収作業日数：各立坑(3本)の平行作業により、834日(40000体÷3坑÷16体/日・坑)程度で全量回収可。
- ※以下はレファレンスと同一条件  
 ・対象母岩、設置深度、地質環境特性、人工バリア仕様、地下坑道の設計・仕様等の考え方、安全評価の考え方

## レファレンスに対する比較評価

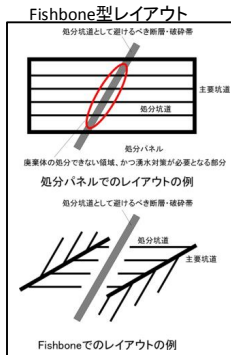
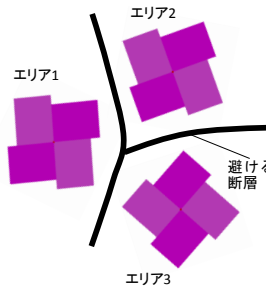
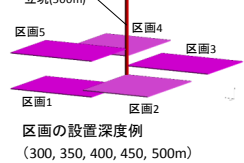
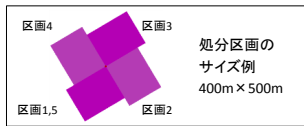
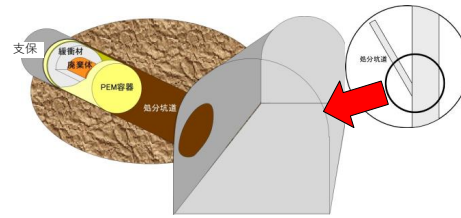
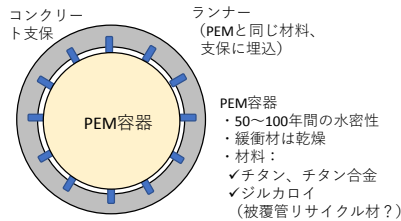
評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
①詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性(建設・施工技術の適用性の見通し)	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	0)斜坑オプションでも斜坑TBMは設定勾配よりも急勾配での施工実績あり 0)OPボルト締結オプションにおけるOP収納管全体での耐圧性は未検討(定量化の見通しあり) ⑤選定する潤滑部材とOP収納管(炭素鋼)との摩擦係数を検証する必要あり ⑤設計詳細化における、水密性を期待する構造物(OP収納管)や内空(収納管-OP)等に対する要件設定の不確実性(機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性) ⑤水密性を確保したOP収納管の原位置継ぎ足し施工技術の実現性 ⑤大断面坑道壁面への緩衝材の施工方法に不確実性(膨出抑制対応等を含む) ⑤緩衝材の熱影響評価は未検討(定量化の見通しあり) ⑤プラグ兼遮蔽壁とOP収納管(管端部)との取合いについて要検討
②設計のロバスト性・柔軟性	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	④斜坑オプションでは、OP定置の作業性が良い ④閉鎖時の埋戻し作業の物量小(OP収納管の管端部溶接、主要坑道の埋戻し) ④処分坑道の埋戻しの無い概念(処分坑道の構造物の維持・補修作業が不要) ④処分坑道単位で取捨可能であり、処分坑道の本数・長さ、収納管の本数・径等を変更可 ④立坑での搬入、主要坑道の搬送、定置を遠隔操作で実施可能
③建設・操業性(建設・操業の作業性)	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	0)処分坑道ごとに区分けが可能 0)特定廃棄体へのアクセスは処分坑道単位(主要坑道内でOPの退避が必要)
④品質保証・品質管理の容易性	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	④大断面坑道壁面への緩衝材の施工品質に不確実性 ④長尺の処分坑道掘削精度やOP収納管の施工精度が要求される
⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	④閉鎖時に規制要求があれば、OPを取り出して現物の状態確認も可能 ④操業中埋め戻さない概念のため、原位置での直接/間接測定が可能 0)水密OP収納管の腐食挙動
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	④回収可能性(アクセス性・ハンドリング性)は高い ④OP収納管単位であるが、特定の廃棄体へのアクセス性も高い ④回収維持期間中におけるOP収納管等の健全性(腐食の影響)
⑦閉鎖前の安全性(放射線防護)	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	0)立坑及び主要坑道でのOP搬送に対する遮へいが必要 ④OP直接ハンドリングのため異常時の対応は高放射線環境下(遮へいが必要)
⑧閉鎖後長期の安全性(放射線防護)	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	
⑨一般労働安全	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	
⑩環境保全	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	
⑪回収可能性	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	
⑫費用(コスト)・経済性	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	④掘削物量の低減による掘削費用・埋戻し費用の合理化 ④OPボルト締結オプションの導入(溶接と較べて時間短縮)による操業費用の合理化
⑬その他	④OPボルト締結オプションは、OP溶接作業より地上施設での作業が合理化(操業工程の柔軟性が向上)	

## 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 斜坑の掘削技術・掘削精度
- 高密度となるOP収納管の自立性確保(座屈防止用補強板含む)のための隙間充填材の仕上げ方法
- OP収納管の水密性を確保できる原位置継ぎ足し施工技術等の実現性(斜坑時の管端部の耐荷重含む)、隙間充填工法の実現性
- 要求時間スケールにおける水密性OP収納管の健全性
- 斜坑オプションの場合、潤滑部材の選定検討(炭素繊維ロープの信頼性・摩擦係数の検証など)
- 大断面坑道壁面への緩衝材の施工方法の確立(膨潤対応等を含む)
- OPボルト締結オプションの実現性検討(OPの設計検討)

代替設計オプション ID.08 : 処分坑道横置き・Ti 製 PEM 方式・小断面 Fishbone 坑道・分散型らせん状処分区画

代替設計オプションの概要



レファレンスに対する比較評価

評価項目	ⓐ主なプラス評価の理由	ⓑ主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>ⓐPEM 容器の設計詳細化が必要 (材料選定、必要厚さ、封入方法、廃棄体収容数、寸法等)</li> <li>ⓐPEM 容器内緩衝材の施工方法、乾燥等の処理方法、品質管理方法の詳細化が必要。</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>ⓐ小断面坑道と PEM 容器の隙間の大きさ、定置方法の詳細化が必要。</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> <li>ⓐ複数の区画を異なる深度、エリアに展開するため仕様が多様化</li> </ul>	
② 設計のロバスト性・柔軟性	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>ⓐ制限温度の緩和。</li> <li>ⓐ複数の廃棄体収容の可能性。</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>ⓐ坑道長さは任意に設定可能。</li> <li>ⓐ捨て坑道は比較的長くなる。</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> <li>ⓐ湧水対策を低減化した配置が可能。</li> <li>ⓐ工程ごとにエリアの分離が可能。</li> </ul>	
③ 建設・操業性 (建設・操業の作業性)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>ⓐ人工バリアの現場施工に比較して大型かつ重量物を扱う(鋼製 PEM 概念に比較すれば軽量)。</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>ⓐ主要坑道からの方向転換が軽減</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> <li>ⓐ複数の区画を異なる深度、エリアに展開するため仕様が多様化</li> </ul>	
④ 品質保証・品質管理の容易性	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>ⓐ地上で人工バリアの品質管理が可能。PEM 容器はほとんど腐食しないため、腐食に対する管理は軽微</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> <li>ⓐ複数の区画を異なる深度、エリアに展開するため仕様が多様化</li> </ul>	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> </ul>	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	<ul style="list-style-type: none"> <li>■チタン製 PEM 容器</li> <li>ⓐ高温期の水を介した緩衝材変質、OP の腐食、水蒸気による内圧上昇を防止</li> <li>ⓐ鋼製 PEM 容器に比較して PEM 容器腐食に伴う水素ガス発生を抑制 (炭素鋼 OP から発生した緩衝材中溶存水素の吸収は期待できない)</li> <li>ⓐ鋼製 PEM 容器に比較して Fe による緩衝材の変質は抑制</li> <li>ⓐPEM 容器の封入前に緩衝材を乾燥、残留空気の除去や不活性ガスの置換によって酸素による炭素鋼 OP の腐食も低減。</li> <li>■小断面 Fishbone 坑道</li> <li>ⓐセメントによる人工バリア、岩盤への影響の考慮が必要</li> <li>ⓐPEM 容器と坑道壁面間の隙間の核種移行評価上の扱いについて検討が必要 (核種の選択的な移行経路にならないか等)</li> <li>■分散型らせん状処分区画</li> <li>ⓐ超長期的な隆起浸食による生活圏への到達の影響を緩和</li> </ul>	

代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

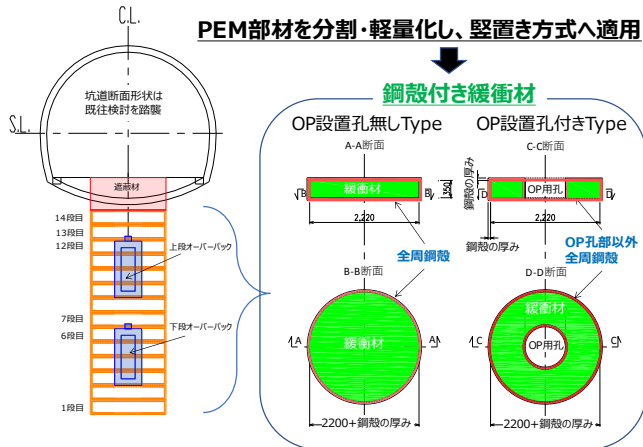
- PEM容器
  - ✓水密構造とし、高温期の50~100年程度の期間地下水浸入を防止。
  - ✓緩衝材は乾燥させた状態とし、高温期の水を介した緩衝材変質、OPの腐食、水蒸気による内圧上昇を防止→制限温度の緩和。放射線による腐食への影響を考慮した遮蔽厚さも不要or低減
  - ✓PEM材料はチタン合金、ジルカロイ等の水素を吸収する材料。PEM容器腐食に伴う水素ガス発生を抑制 (チタンは発生した水素の90%以上を吸収すると推定)。すきま腐食が起こらない合金種を選定。
  - ✓PEM材料、製作コストは増加するが、制限温度は緩和され、廃棄体ピッチ、離間距離は小さくなるため掘削土量は低減。
  - ✓OPは炭素鋼製。PEM容器の封入前に緩衝材を乾燥、残留空気の除去や不活性ガスの置換によって酸素による炭素鋼の腐食も低減。
  - ✓PEM容器内のOP、緩衝材により放射線を遮蔽し、放射線に対する措置や遠隔操作の導入に伴う負荷を軽減。
- 処分坑道は回収可能性維持期間の坑道安定性を確保するためのコンクリート支保を設置。支保に埋め込まれたランナーにより定置・回収を容易にするとともに、PEM容器と支保のすきまは最小化。ランナーはPEM容器と同一金属材料を使用し、異種金属接触腐食等の影響を排除。すきま腐食も適切な合金種の選定で防止。
- 処分坑道はFishbone型として断層等に対するレイアウトの柔軟性を確保するとともに、搬送時の方向転換等の容易性を向上
- 区画は設置深度を変えたらせん型とし、処分場の面積を低減化。超長期的な隆起浸食の影響の低減も図る。

	<p>○核種移行評価、安全評価における核種移行経路等の設定について再検討が必要</p> <p>⊕区画が重ならないよう配置することで上方への熱拡散による上部区画への影響を低減可</p>
⑦ 閉鎖前の安全性 (放射線防護)	<p>■チタン製 PEM 容器</p> <p>⊕人工バリアの現場施工に比較すれば線量率は低い</p> <p>○人工バリアのコンパクト化 (OP や緩衝材の厚さ低減) や乾燥した緩衝材により他の PEM 概念よりも高線量率</p> <p>■小断面 Fishbone 坑道</p> <p>■分散型らせん状処分区画</p>
⑧ 閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)	<p>■チタン製 PEM 容器</p> <p>⊕PEM 容器が貫通しない限り OP 腐食、核種溶出も生じないため、核種移行開始時期の遅延化が期待できる (数 1000 年程度)</p> <p>■小断面 Fishbone 坑道</p> <p>○PEM 容器と坑道壁面間の隙間の核種移行評価上の扱いについて検討が必要 (核種の選択的な移行経路にならないか等)</p> <p>■分散型らせん状処分区画</p>
⑨ 一般労働安全	
⑩ 環境保全	
⑪ 回収可能性	<p>■チタン製 PEM 容器</p> <p>⊕定置後～回収までの期間 PEM 容器はほとんど腐食しないため、定置時の状態が維持される。</p> <p>■小断面 Fishbone 坑道</p> <p>■分散型らせん状処分区画</p>
⑫ 費用 (コスト) ・ 経済性	<p>■チタン製 PEM 容器</p> <p>○PEM 容器の材料、設計製作、検査等のコストアップ</p> <p>⊕制限温度緩和で廃棄体ピッチ、離間距離が小さくなると掘削土量は低減</p> <p>⊕放射線による腐食への影響を考慮した OP 遮蔽厚さ低減</p> <p>■小断面 Fishbone 坑道</p> <p>○捨て坑道分の掘削量が多い。</p> <p>⊕PEM 容器と坑道間のすきま充填が不要</p> <p>■分散型らせん状処分区画</p> <p>○複数の区画を異なる深度、エリアに展開するため仕様が多様化</p>
⑬ その他	

### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- PEM 容器の設計要件、仕様、製作施工方法等の具体化、閉じ込め機能 (寿命)、遮蔽性、PEM 材の水素吸収特性等の評価
- PEM 容器内の人工バリアの仕様、施工方法の検討
- 定置・回収時のランナーの適用性、健全性の確認、仕様や施工方法の具体化
- 小断面坑道の仕様、施工方法の具体化
- 断層に対する合理的な坑道や処分区画の展開方法の整理
- 複数の深度の処分区画に対する人工バリアや地下施設の設計、熱や水理的特性・挙動の解析
- 安全評価上のモデル、シナリオの見直し、安全評価上の優位性の有無や程度の確認

代替設計オプションの概要



**坑道断面形状**：既往検討を踏襲  
**処分区画形状**：パネル型（竖置き・ブロック方式を踏襲）

**鋼殻の仕様は、種々可能性あり**  
 ・水密性ありType or スリット付きType等  
 ・鋼殻を2重（内側；スリット、外側；水密）にし、埋め戻し前に外側鋼殻を引抜き  
 ⇒坑道埋め戻し前までの期間の 緩衝材の湧水対策が可能

**長所**  
 ・緩衝材を地上で鋼殻内に施工  
 ⇒品質管理が容易  
 ・PEM部材を分割することで、各部材の重量、寸法が小さい  
 ⇒ハンドリング性向上  
 ・鋼殻付き緩衝材の孔内への定置  
 ⇒緩衝材の自立性、作業性が向上  
 ⇒定置効率向上（1孔に、OPを2個定置）  
 ⇒定置時の適水、湧水対策に有利（処分孔の利用効率アップ）

**短所**  
 ・緩衝材の飽和が遅延する可能性  
 ・鋼殻、緩衝材、OP 各々の相互影響  
 ・鋼殻分の費用アップ

**施工順序**  
 ①1～6段目の鋼殻付き緩衝材設置  
 ②下段OPの設置  
 ③7～12段目の鋼殻付き緩衝材設置  
 ④上段OP設置  
 ⑤13～14段目の鋼殻付き緩衝材設置  
 ⑥遮蔽材の施工

代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）

既往の処分概念の、**長所の採用 短所の改善**を基本方針とした。

○横置き・PEM方式

- （長所）**地上組立**のため、**品質管理が容易**  
 ・鋼殻を有するため、**適水等による定置時における緩衝材の膨潤等の問題が生じにくい**
- （短所）PEMがオーバーバックに比べ、**重量大、寸法大（37.2 t、φ2316mm×L3356mm）**であることから**装置の大型化の必要、ハンドリング（作業）性が低下 ⇒PEM部材を分割することで軽量化**

○竖置き・ブロック方式

- （長所）廃棄体を**個別に回収可能**
- （短所）処分孔へのブロック定置後、**緩衝材の膨潤等の問題が生じる可能性 ⇒鋼殻付き緩衝材で湧水対策**  
 ・**定置効率が横置き方式に比べ悪い**（坑道掘削面積に対する廃棄体定置の割合が低い）  
 ⇒**処分孔複数定置（1孔に2個のOP定置）**による改善

上記の長所、短所の検討から、以下の代替設計（案）を設定

- ◆PEM部材を分割し軽量化（6～7 t 程度の部材に分割）：ハンドリング性の向上  
 鋼殻付き緩衝材（緩衝材を地上で鋼殻内に施工）：品質管理の容易さ、鋼殻が健全であれば、OPの回収が容易
- ◆竖置き方式：個別回収の容易性
- ◆処分孔複数定置方式（オーバーバック2個/孔）：定置効率の向上

**竖置き・鋼殻付き緩衝材+オーバーバック方式 定置**の代替設計（案）

（副次的長所：緩衝材ブロックの角欠け、施工時の膨潤、定置後の流出等の問題が少ない⇒処分孔の利用効率UP）

レファレンスに対する比較評価

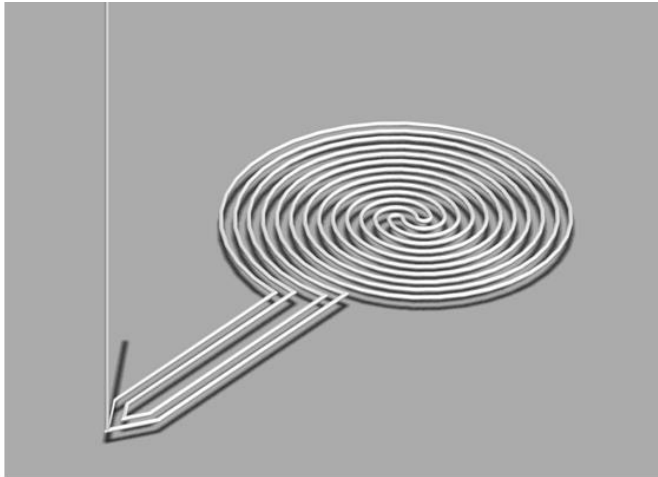
評価項目	④主なプラス評価の理由	⑤主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見通し）	④処分概念は、レファレンス（処分孔竖置き・原位置ブロック施工）を踏襲するため、既往検討（JNC2000、NUMO-5C）の成果を基に、詳細設計への具体化の見通しは高い ④鋼殻付き緩衝材については、現在検討が進められている PEM 方式の構造を緩衝材のリング毎に分割するという思想のため、詳細設計への具体化の見通しは高い ⑤設計詳細化における、①鋼殻同士、鋼殻と OP との相互作用の検討、②鋼殻強度の検討、③処分孔への廃棄体の設置本数（処分孔の深さ）の検討などについては、今後知見を拡充する必要があり	
② 設計のロバスト性・柔軟性	④鋼殻の仕様に柔軟性があることから、設計のロバスト性・柔軟性は高いと判断できる。例えば、緩衝材ブロックの角欠け対策が可能となる点や、緩衝材の処分孔への定置の際の湧水による緩衝材の膨潤、定置直後の緩衝材の流出への対策も可能と考えられる ④緩衝材を地上で鋼殻内に施工することから、例えば事前に緩衝材の含水比（飽和度）を調整することも可能となり、この点での設計のロバスト性・柔軟性が高いと見込まれる	
③ 建設・操業性（建設・操業の作業性）	④PEM を分割することで、各部材の軽量化を図ることが可能となる。すなわち、運搬・定置装置の小型化、ハンドリング性の向上が見込まれ、建設・操業性は高まると考える ④処分孔の掘削量はレファレンスに比べ2倍となるものの、1処分孔に2体の廃棄体（オーバーバック）を設置することが可能となり、定置効率はレファレンスに対し、約2倍となることから、建設・操業性はレファレンスに対し、高まると考える ④レファレンス（処分孔内での生身の緩衝材ブロックの定置）に比べ、鋼殻付きのブロックは、緩衝材の自立性向上、定置時の適水・湧水対策も加味されていることから、作業効率の向上が見込まれる ⑤回収維持期間中における鋼殻の健全性（腐食への耐性など）については、今後知見を拡充する必要があり	
④ 品質保証・品質管理の容易性	④緩衝材を地上で鋼殻内に施工することから、緩衝材の品質管理については、地上での確実な管理が可能となる ④運搬・定置時の緩衝材の角欠け・処分孔内への定置時の適水・湧水による緩衝材の膨潤など、緩衝材の品質に影響を与える可能性がある要因に対して、鋼殻が対策となり得る	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	④レファレンスと同様に施工対象物（緩衝材、埋め戻し材、支保等の構成要素）の施工後の変遷が場の成り行き任せ ④緩衝材の定置後の鋼殻と孔壁との隙間閉塞については、別途充填材必要となる ④緩衝材定置直後の流出・膨出挙動に関しては、レファレンスより対策が可能となる ④レファレンスと同様に、施工後に（閉鎖迄の）モニタリング等の原位置測定が要求される可能性があり	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④OP の長期性能の評価では、鋼殻と OP との相互作用などに関する知見の拡充が今後必要となる ④竖置きにおける鋼殻消失後（破損時）の OP 自重沈下の懸念 ④鋼殻内の水密性の要求保持期間に関する信頼性【水密性を要求する場合】	
⑦ 閉鎖前の安全性（放射線防護）	レファレンスとほぼ同等程度	
⑧ 閉鎖後長期の安全性（放射線防護）	④核種移行評価・線量評価に影響する要因の有無や影響度について、鋼殻を起因とする種々の相互影響を検討する必要があり（鋼殻付き緩衝材の長期性能評価は今後の検討課題）	
⑨ 一般労働安全	レファレンスとほぼ同等程度	
⑩ 環境保全	レファレンスとほぼ同等程度	
⑪ 回収可能性	④レファレンスと同様に特定の廃棄体の回収（処分孔毎の廃棄体の回収）が可能	
⑫ 費用（コスト）・経済性	④レファレンスに対し2倍（処分孔1孔につき2体のOPの定置）の廃棄体定置効率となる ④鋼殻分の費用が増加	
⑬ その他		

代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 鋼殻の材質、形状、製造・施工精度など
- 鋼殻付き緩衝材の定置方法・定置精度など
- 残置物（鋼殻）の長期的影響の評価
- 鋼殻を起因とする種々の相互影響、鋼殻付き緩衝材の長期性能評価

代替設計オプションの概要

渦巻き型レイアウト  
(一筆書き)



既往検討資料の活用

(羽根ほか：地下施設レイアウトの処分場長期性能への影響に関する考察，日本原子力学会「2006 年春の年会」(2006)など)

代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- 地層処分の坑道掘削においては、作業の安全性や将来における作業員の確保の困難さ（職人不足）等の観点から自動化・遠隔化が求められている。また、安全評価の観点から、掘削時のゆるみ域の発生を極力低減することが要求されている。そのため、坑道掘削方法として、NATM 工法より自動化・遠隔化が容易で、ゆるみ域が発生しづらく、かつ硬質な地山で高速掘進が可能な TBM のニーズは高い。
- しかしながら、TBM には下記の短所がある。
  - ✓ パネルのような短距離の掘削の場合、TBM の戻りや組立・解体など多くの手間が生じる。
  - ✓ 断層破砕帯など不良地山に遭遇した場合、対処に手間がかかる。
- そこで、本概念では TBM 掘削効率を最大限に高めるため、「一筆書き」を軸とした長距離掘進を基本とする施設レイアウトを採用している。一筆書きなどを採用すれば、TBM の戻りや組立・解体など多くの手間を減らすことができ、TBM 掘削効率を高めることにより、工期短縮・コスト削減に寄与できる。また、一筆書きにおいてスパイラル的な施設レイアウト形状の活用も可能で、鉛直空間も有効活用可能となる。
- ただし、前述したように「断層破砕帯など不良地山に遭遇した場合、対処に手間がかかる」という欠点があるため、事前調査において「断層破砕帯など不良地山」を避けたレイアウトが行えることが望ましい。（参考までに、軟弱な不良地山対応として TBM と NATM 工法の優れた機能を兼ね備えた掘削機も既に開発されている。）

レファレンスに対する比較評価 (前提：「断層破砕帯など不良地山」を避けたレイアウトの場合)

評価項目	⊕主なプラス評価の理由 ⊖主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	⊕主要坑道として直径方向にズリ出し坑道 (下段)・機械搬入坑道 (上段) を設置することや、エリアの大きさを踏まえ渦巻きの数を調整することなど、基本的考え方は整理済みである。
②設計のロバスト性・柔軟性	⊕一筆書きにおいてスパイラル的な施設レイアウト形状の活用も可能で、鉛直空間も有効活用可能となる。
③建設・操業性 (建設・操業の作業性)	⊕処分坑道の TBM 掘削効率を高めることにより、工期短縮・コスト削減に寄与できる。 ⊕主要坑道を短くできることにより、工期短縮・コスト削減に寄与できる。
④品質保証・品質管理の容易性	
⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	⊕TBM 活用により、ゆるみ域発生低減が可能である。
⑦閉鎖前の安全性 (放射線防護)	
⑧閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)	⊕TBM 活用により、ゆるみ域発生低減が可能である。
⑨一般労働安全	
⑩環境保全	
⑪回収可能性	
⑫費用 (コスト) ・経済性	⊕ 処分坑道の TBM 掘削効率を高めること、主要坑道を短くできることにより、工期短縮・コスト削減に寄与できる。
⑬その他	⊕軟弱な不良地山対応として TBM と NATM 工法の優れた機能を兼ね備えた掘削機も既に開発されている。 ⊕処分坑道横置き・PEM 方式でも対応可能である。

代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 事前調査とリンクさせた「断層破砕帯など不良地山」を避けたレイアウトの実施
- 基本設計的な検討の実施

## 代替設計オプション ID.11 : 可変型処分坑道レイアウト

### 代替設計オプションの概要

#### 可変型処分坑道レイアウト

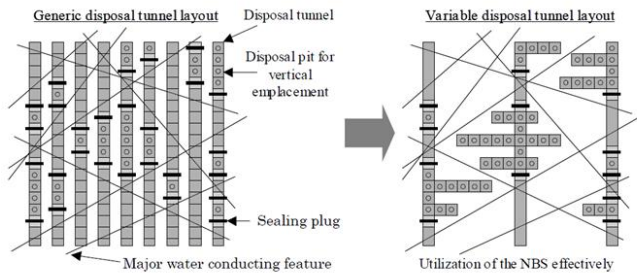


Fig.12 Image of the variable disposal tunnel layout taking into consideration the distribution of major water conducting features

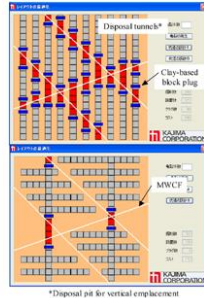


Fig. 7. Optimization test using a variable disposal tunnel layout (top: before optimization, bottom: after optimization)

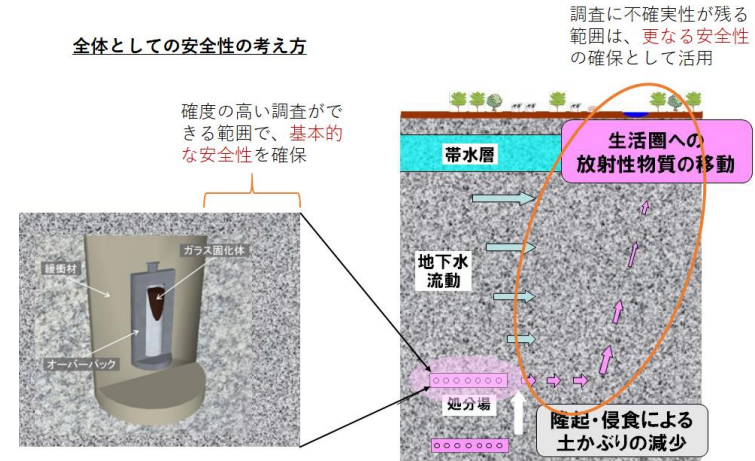
#### 既往検討資料の活用

(須山ほか：不均質な地質環境における地層処分場の止水プラグ設計方法に関する基礎的検討，原子力バックエンド研究，Vol.14 No.1(2007)及び Y.Suyama, et al.: Study of an optimization approach for a disposal tunnel layout, taking into account the geological environment with spatially heterogeneous characteristics, Nuclear Engineering and Design 239 (2009))

#### 代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)

- 山岳トンネルの設計では、トンネル掘削時の観察や計測の結果に基づき当初設計からの修正が可能な方法を採用している。この理由は、計測技術には測定限界などがあり、不均質な岩盤を対象とした場合、主に地上からの事前調査結果に基づく水理地質構造モデルには不確実性が残存するためである。(要は掘ってみないと分からない。)
- 本概念は、**不均質性が顕著な岩盤**を対象とした場合、本来天然バリアが有する機能を有効活用するという視点に立つと、従来のように先に処分坑道レイアウトを決定し建設を進めるという設計手法(事前調査で地下の状態が分かるという前提)が不均質な地質環境において必ずしも安全上好ましいと言えない。そのため、不均質な地質環境においては、より安全性を向上させる設計手法として高透水路を極力避け、**好ましい場所を探して廃棄体を定置する**という観点が好ましく、本概念では地下での調査結果に基づき情報化施工として、日々得られる施工情報を基に処分坑道レイアウトを地質環境に対して最適化する手法(事前調査で地下の状態が分からないことが前提)を適用したものである。(NUMO-TR-04-03 に記載のある「TAILORING」への対応。)
- 地層処分での坑道掘削は通常の山岳トンネルのように坑口 2 点間を繋ぐことが目的ではなく、好ましい地質環境に廃棄体を定置することが本来の目的となる。そのため、本概念はあくまでも一つの考え方であるが、不均質な地質環境における地層処分を念頭に置いた場合、本来有する天然バリア機能を有効に活用できるため処分場の安全性向上に寄与するものと考えられる。(説明性を考えた場合、最初に悲観的なモデルからスタートし、現実的なモデルに変わる方が受け入れやすい。多くの場合は楽観的なモデルからスタートしているため、その後想定外などもある現実的なモデルとなり苦労するケースが多い。)

#### 全体としての安全性の考え方



(NUMO 作成資料に加筆・修正)

#### レファレンスに対する比較評価 (前提: 不均質性が顕著な岩盤の場合)

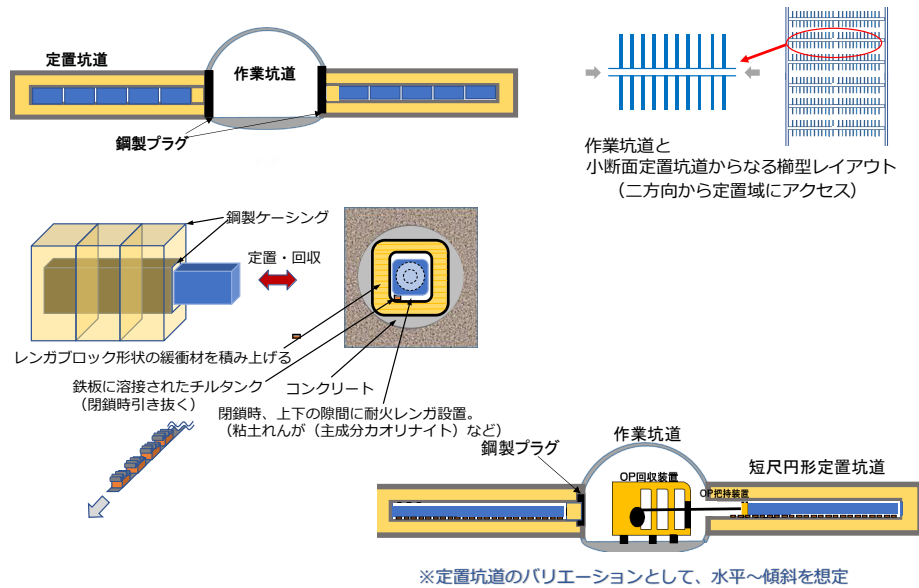
評価項目	⊕主なプラス評価の理由	⊖主なマイナス評価の理由
①詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性 (建設・施工技術の適用性の見通し)	・本概念適用による基本的考え方は整理済みである。	
②設計のロバスト性・柔軟性	⊕不均質性に応じて設計が可能である。	
③建設・操業性 (建設・操業の作業性)	⊕高透水路を極力避けることが可能である。	
④品質保証・品質管理の容易性		
⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ		
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	⊕確度の高い調査ができる処分坑道周辺の岩盤で安全性を確保するため、確からしさが向上する。	
⑦閉鎖前の安全性 (放射線防護)		
⑧閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)	⊕好ましいエリアを探して廃棄体を停止するため、説明性が向上する。	
⑨一般労働安全		
⑩環境保全		
⑪回収可能性		
⑫費用 (コスト) ・経済性	⊕トータルの掘削量を減らせる。	
⑬その他	⊕処分坑道設置・原位置ブロック施工でも、処分坑道横置き・PEM 方式でも対応可能である。	

#### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 基本設計的な検討の実施
- 日々得られる施工情報を基に処分坑道レイアウトを最適化するためのシステムの開発
- 処分坑道レイアウトの変更に対応可能な建設・操業・閉鎖技術の開発

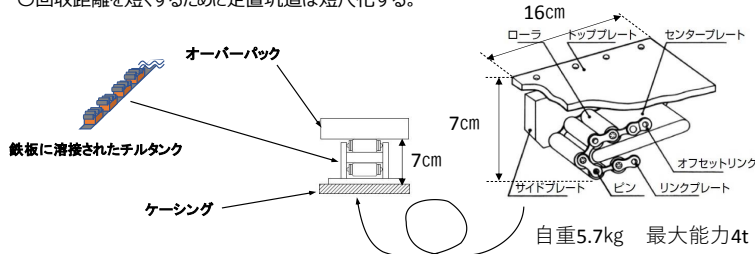
## 代替設計オプション ID.12：矩形小断面坑道コンテナ形オーバーバック複数設置方式

### 代替設計オプションの概要



### 代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特長的な違い）

- 円形小断面坑道に、矩形の高耐久性の支保材である鋼製ケーシングを設置し、坑道と支保材の間はコンクリート充填する。ケーシング内にレンガブロック状の緩衝材を定置するとともにオーバーバックの縁を切るためにペントナイトブロックの内側に耐腐食性のある矩形のケーシングを設置し、チルトタンクを設置する。ケーシング内部のチルトタンク上にガラス固化体を内包したコンテナ形状のオーバーバックを順々に定置する。
- 回収時には内部ケーシングに沿ってチルトタンク上のオーバーバックのみを回収し、緩衝材は残置する。
- オーバーバックに垂鉛メッキすることで、数十年～百年程度の防食効果が期待でき、鉄錆が回避できるため、回収後、漏洩検査等が求められた場合、健全性確認準備は表面のコケ・水垢を高圧洗浄等で取り除くだけで済むため、炭素鋼が腐食している場合と比較し、作業負荷は小さい。
- 小断面の鋼製ケーシング内のオーバーバックを回収するために、回収装置は単純化し、動力部は断面の広い作業坑道に設置する。回収したオーバーバックは、コンテナ形状のため、一時保管場で横向きのまま積み上げることが可能で、転がらないため、安全である。ただし、コンテナ形状への変更は、オーバーバックの重量増加が伴う。
- 小断面の坑口には撤去容易な鋼製プラグを設置する。
- 回収距離を短くするために定置坑道は短尺化する。



### レファレンスに対する比較評価

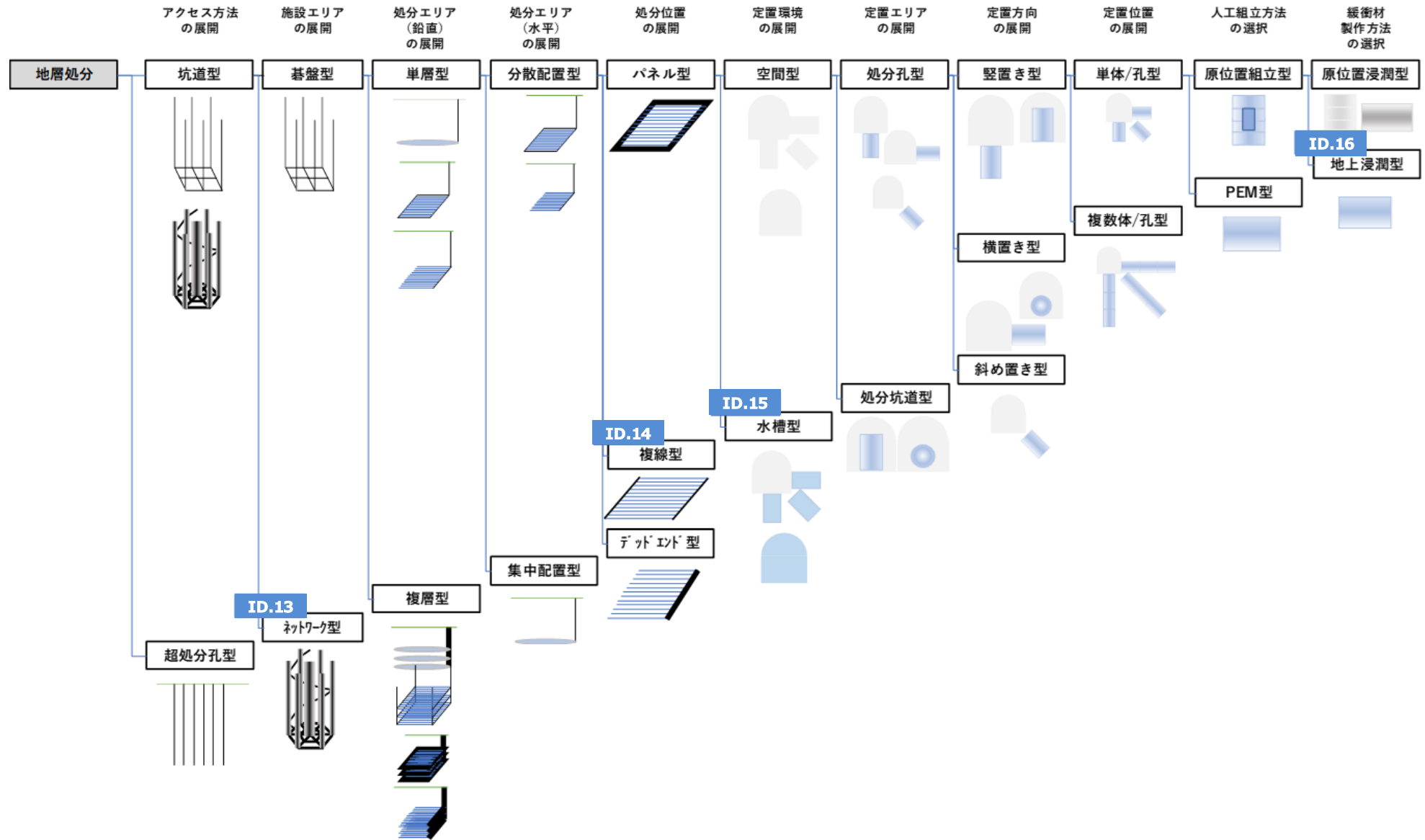
評価項目	⓪主なプラス評価の理由	⓫主なマイナス評価の理由
① 詳細設計への具体化の見通し／設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見通し）	⓪類似設計や施工技術に関する先行研究事例あり（SCK-CENの処分概念） ⓫2重ライナー管と充填コンクリートに対する要件設定の不確実性（機能割当や時間スケールの設定に必要な知見等の十分性）	
② 設計のロバスト性・柔軟性	⓫定置坑道の長尺化により、地質環境変化に関する不確実性が大きい（3次元不均質性）	
③ 建設・操業性（建設・操業の作業性）	⓪外側のケーシングと内側ケーシングの隙間に設置されるレンガブロック状緩衝材の施工は、国内外での原位置試験での実績があるため実現性は高い。（JAEA） ⓪デッドエンド形式に伴う定置坑道内へのオーバーバック定置数量の柔軟性（増減が簡単） ⓪建設と廃棄体定置を伴う操業の作業分離性が高い（後者の搬送・定置作業は短時間） ⓪長尺ケーシングの原位置施工技術の実現性（特に水密施工方法など） ⓪小断面・長尺の定置坑道における施工技術の信頼性（チルトタンク上の重量物押し込み技術は一般的） ⓪⓫回収維持期間中における回収関連部品の健全性（内側ケーシングの水密施工が可能ならばケーシング内の温度管理も行えるので⓪、水密施工が難しい場合チルトタンクの腐食の耐性検討要⓫）	
④ 品質保証・品質管理の容易性	⓫2重ライナー管内の緩衝材の施工の難しさに伴う品質確保の難しさ ⓫オーバーバックと内側ライナーとの隙間閉塞に用いる耐火レンガの設置方法・設置時期含む手順の確認が必要	
⑤ 閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ	⓪閉鎖時に規制要求があれば、OPを引き出して現物の状態確認も可能 ⓪基本的に埋戻しや粉体の隙間充填のない概念であり、原位置の多様な直接／間接測定が可能 ⓫オーバーバックと内側ライナーとの隙間閉塞については、耐火レンガを用いる ⓫外側ケーシングの存在により長期化する緩衝材への浸潤プロセスの挙動把握の不確実性 ⓫施工後閉鎖迄の期間、モニタリング等の原位置測定が要求される可能性がある	
⑥ 閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	⓫レファレンスと比較し、鋼製材料が緩衝材の周囲に多用されているため、鉄型化による緩衝材の膨潤性能の低下や長期経過後の変質の可能性に留意する必要がある ⓫ケーシングの水密性の要求保持期間に関する信頼性（水密性を要求する場合）	
⑦ 閉鎖前の安全性（放射線防護）	⓪異常時における特定の廃棄体へのアクセス性が高い	
⑧ 閉鎖後長期の安全性（放射線防護）	レファレンスとほぼ同等程度	
⑨ 一般労働安全	レファレンスとほぼ同等程度	
⑩ 環境保全	レファレンスとほぼ同等程度	
⑪ 回収可能性	⓪定置・回収対象がオーバーバックであり、アクセス性やハンドリング性が高い ⓪定置後の一定期間は冠水等による影響を受けにくく、回収が容易（定置済みのOPは拘束されていない）、且つ、特定のOPへのアクセス性が高い ⓪⓫回収維持期間中におけるOPや内側ケーシングの健全性（鋼製プラグを閉めることで水密性が担保されれば、ケーシング内の温度管理も行えるので⓪、水密施工が難しい場合チルトタンクの腐食の耐性検討要⓫）	
⑫ 費用（コスト）・経済性	⓪作業坑道等の掘削ボリュームの合理化 ⓫ケーシング、チルトタンク設置費用、チルトタンク撤去費用が増加	
⑬ その他		

### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 定置坑道（小断面・水平～傾斜坑道）の掘削、外側ケーシング施工技術（原位置継ぎ足し、水密施工等）
- 内側ケーシング（原位置継ぎ足し、水密施工等）の施工技術
- 要求時間スケールにおける水密性（内側ケーシング）の健全性（水密性を要求する場合）
- 残置物（鋼製ケーシング）による緩衝材の長期性能評価



処分システムを構成する個別要素の組み合わせに関する体系的整理案



体系的整理案に基づく個々の要素の特性評価：代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）【1/3】

評価項目	アクセス方法の展開		施設エリアの展開		処分エリア（鉛直）の展開		処分エリア（水平）の展開	
	超処分孔型	坑道型	ネットワーク型	基盤型	単層型	複層型	集中配置	分散配置
設計、建設・施工の実現性（設計技術、建設・施工技術の適用性）		⊕処分分野での設計例がある	⊕都市計画での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある ⊕都市計画での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある
設計技術								
建設技術	⊕類似施工例あり[原油井]※直径が小さい	⊕類似施工例あり[地下貯蔵，地下発電所，カミオカンデ等]					⊕類似施工例あり[地下貯蔵，地下発電所，カミオカンデ等]	⊕類似施工例あり[炭鉱]
探業技術								
設計のロバスト性・柔軟性					⊕片面的な広がりが優越する岩盤に有利	⊕鉛直的な広がりが卓越する岩盤に有利		⊕地盤に応じた配置の柔軟性
建設・探業性（建設・探業の作業性）		⊕建設と探業との並行が可能						
探業の作業性		⊕建設と探業との並行が可能	⊕物流の集約が可能	⊕物流の分散が可能				⊕処分エリアの確保が早い
品質保証・品質管理の容易性		⊕湧水制御が可能						
閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ								⊕エリア単位での確認が可能
閉鎖前の安全性（放射線防護）								⊕熱伝達性が良い
閉鎖後長期の性能評価の確からしさ							⊕残置物量が少ない ※坑道延長に依存	⊕残置物が分散する
一般労働安全								
建設時								
探業時	⊕地下作業が無くリスク量が少ない							
環境保全		⊕地上と連通する坑道が少なく環境擾乱が少ない						
回収可能性								⊕処分エリア単位での回収作業に対応
費用（コスト）・経済性								
その他							⊕坑道総延長が短い ※アクセス系坑道の延長が短い	

体系的整理案に基づく個々の要素の特性評価：代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）【2/3】

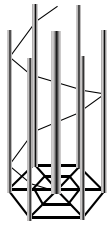
評価項目	処分位置の展開			定置環境の展開		定置エリアの展開	
	パネル型	複線型	デッドエンド型	空間型	水槽型	処分孔型	処分坑道型
設計、建設・施工の実現性 (設計技術、建設・施工技術の適用性)	設計技術	⊕処分分野での設計例がある		⊕処分分野での設計例がある		⊕処分分野での設計例がある	⊕【横置き】処分分野での設計例がある
	建設技術		⊕類似施工例あり[炭鉱, 地下貯蔵, 地下発電所, カミオカンデ等]	類似施工例あり	類似施工例あり		
	操業技術						
設計のロバスト性・柔軟性		⊕処分坑道エリア内の岩盤条件の事前把握により処分位置の柔軟性が高い	⊕定置エリア決定の柔軟性が高い		[処分孔型]定置前より水槽状態の構築が可能	⊕実規模試験実施例あり	⊕実規模試験実施例あり
建設・操業性 (建設・操業の作業性)	建設の作業性		⊕物流の分散が可能	⊕定置エリアの確保が早い			
	操業の作業性		⊕物流の分散が可能			⊕処分坑道が動線として活用できる ⊕アクセス系坑道の埋戻し作業性が良い	⊕定置位置の確保が早い
品質保証・品質管理の容易性							⊕湧水処理量が少ない ※処分坑道解放期間に依存
閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ					⊕均質な水理場が確保 浸潤(偏膨潤)の不確実性が低減		
閉鎖前の安全性(放射線防護)					⊕水による遮蔽性が高い		
閉鎖後長期の安全性(放射線防護)							⊕力学プラグ数量が少ない ※処分孔キャップ分
閉鎖後長期の性能評価の確からしさ			⊕残置物量が少ない ※坑道延長に依存				
一般労働安全	建設時	⊕処分坑道内での2方向避難が確保できる	処分坑道内での2方向避難が確保できる	⊕作業量が少なくリスク量少ない ※坑道延長に依存			
	操業時						
環境保全			⊕環境擾乱が少ない ※坑道延長に依存				
回収可能性					⊕腐食環境が穏やか [PEM]容器腐食速度	⊕定置エリア単位での回収作業に対応	
費用(コスト)・経済性							
その他			⊕坑道総延長が短い ※アクセス系坑道の延長が短いため				⊕坑道総延長が短い ※処分孔が不要となるため

体系的整理案に基づく個々の要素の特性評価：代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）【3/3】

評価項目		設置方向の展開			設置位置の展開		人工バリア組立方法の選択		緩衝材製作方法の選択	
		縦置き型	横置き型	斜め置き型	複数体/孔型	1体/孔型	原位置組立型	PEM型	原位置浸潤	地上浸潤
設計、建設・施工の実現性 (設計技術、建設・施工技術の適用性)	設計技術	⊕【処分孔型】処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある		⊕【横置き】処分分野での設計例がある ⊕【縦置き】処分分野での設計例がある(SF処分)	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	⊕処分分野での設計例がある	
	建設技術 操業技術	⊕実規模試験実施例あり ※バレット・PEM除く	実規模試験実施例あり ※バレット・PEM対象		⊕【横置き】処分分野での設計例がある ⊕【縦置き】処分分野での設計例がある(SF処分)	⊕実規模試験実施例あり	⊕実規模試験実施例あり ※PEM除く	⊕実規模試験実施例あり ※PEM対象		
設計のロバスト性・柔軟性										
建設・操業性 (建設・操業の作業性)	建設の作業性									
	操業の作業性					⊕設置場所の確保が早い		⊕地下での操業作業量および遠隔作業量が少ない		
品質保証・品質管理の容易性								⊕地上製作により製作品質(精度)が高い		⊕【PEM】地上での浸潤により製作品質(精度)が高い
閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ						⊕廃棄体単位での確認が可能		⊕PEM容器により湧水による影響が緩和		⊕【PEM】浸潤(膨潤)の不確実性が低減
閉鎖前の安全性(放射線防護)						⊕熱伝達性が良い		⊕緩衝材とPEM容器により遮蔽性が高い		
閉鎖後長期の安全性(放射線防護)										
閉鎖後長期の性能評価の確からしさ										
一般労働安全	建設時									
	操業時							⊕地下での操業作業量が少なくリスク量が少ない		
環境保全										
回収可能性						⊕廃棄体単位での回収作業が可能		⊕PEM単位での回収が可能		
費用(コスト)・経済性										
その他					⊕坑道総延長が短い ※処分坑道およびアクセス系坑道の延長が短くなるため					

代替設計 ID.13 : ネットワーク型施設方式

代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)



- 中心に大断面立坑, 周辺部に通常立坑を配し, それらをネットワーク状 (環状+放射) にアクセス坑道で結ぶ
- 処分エリアは, アクセス坑道周辺とする
- 物流の集約が可能 (選択可能な組み合わせ)

レファレンスに対する比較評価 ⇒各代替設計の主な特徴による

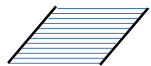
代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 物流量 (資機材, 排土, 換気, 排水など) の精査
- 地上アクセス方法

アクセス方法の展開	施設エリアの展開	処分エリア (鉛直) の展開	処分エリア (水平) の展開	処分位置の展開	定置環境の展開	定置エリアの展開	定置方向の展開	定置位置の展開	人工バリア組立方法の展開	緩衝材製作方法の展開
超処分孔型	ネットワーク型	単層型	集中型	パネル型	空間型	処分孔型	縦置き型	複数体/孔型	原位置組立型	原位置浸漬型
坑道型	基盤型	複層型	分散型	複線型	水槽型	処分坑道型	横置き型	1体/孔型	PEM型	地上型
				デッドエンド型			斜め置き型			

代替設計 ID.14 : 複アクセス型施設方式

代替設計の主な特徴 (レファレンスに対する本設計の特徴的な違い)



- アクセス坑道を複線型とし, アクセス坑道間を連通する処分坑道を展開
- 物流の分散が可能
- 処分坑道内での2方向避難を確保 (選択可能な組み合わせ)

レファレンスに対する比較評価 ⇒各代替設計の主な特徴による

代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 物流量 (資機材, 排土, 換気, 排水など) 検討

アクセス方法の展開	施設エリアの展開	処分エリア (鉛直) の展開	処分エリア (水平) の展開	処分位置の展開	定置環境の展開	定置エリアの展開	定置方向の展開	定置位置の展開	人工バリア組立方法の展開	緩衝材製作方法の展開
超処分孔型	ネットワーク型	単層型	集中型	パネル型	空間型	処分孔型	縦置き型	複数体/孔型	原位置組立型	原位置浸漬型
坑道型	基盤型	複層型	分散型	複線型	水槽型	処分坑道型	横置き型	1体/孔型	PEM型	地上型
				デッドエンド型			斜め置き型			

## 代替設計 ID.15 : 水槽型処分方式

### 代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）

- 定置直後より、廃棄体周囲を水で満たし、廃棄体直近周囲の水利場を人工的に構成し、緩衝材の浸潤を積極的かつ確実にする。閉鎖時には必要に応じて埋め戻す。
  - ※集中配置型、処分孔型の場合、処分孔を水で満たし、その中に廃棄体を定置する。
  - ※処分坑道型の場合、廃棄体を定置した後に、処分坑道を水で満たす。
  - ※PEM 容器に水密性を要求しない。
- （選択可能な組み合わせ）

### レファレンスに対する比較評価 ⇒各代替設計の主な特徴による

#### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- プラグの構造、施工方法、解体方法



アクセス方法の展開	施設エリアの展開	処分エリア（鉛直）の展開	処分エリア（水平）の展開	処分位置の展開	定置環境の展開	定置エリアの展開	定置方向の展開	定置位置の展開	人工バリア組立方法の展開	緩衝材製作方法の展開
超処分孔型	ネットワーク型	単層型	集中型	パネル型	空間型	処分孔型	縦置き型	複数体/孔型	原位置組立型	原位置浸漬型
坑道型	基礎型	複層型	分散型	複線型	水槽型	処分坑道型	横置き型	1体/孔型	PEM型	地上型
				デッドエンド型			斜め置き型			

## 代替設計 ID.16 : 地上浸潤処分方式

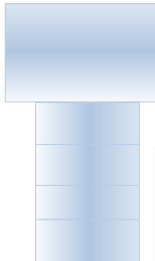
### 代替設計の主な特徴（レファレンスに対する本設計の特徴的な違い）

- 地上施設（緩衝材製作後もしくは廃棄体組立後）において、緩衝材を飽和させた後、地下施設へ搬送して定置する
  - [PEM]地上での浸潤により製作品質（精度）が高い
  - [PEM]浸潤（偏膨潤）の不確実性が低減
- （選択可能な組み合わせ）

### レファレンスに対する比較評価 ⇒各代替設計の主な特徴による

#### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 地上での浸漬方法と浸漬時間
- 浸漬後の緩衝材挙動の把握



アクセス方法の展開	施設エリアの展開	処分エリア（鉛直）の展開	処分エリア（水平）の展開	処分位置の展開	定置環境の展開	定置エリアの展開	定置方向の展開	定置位置の展開	人工バリア組立方法の展開	緩衝材製作方法の展開
超処分孔型	ネットワーク型	単層型	集中型	パネル型	空間型	処分孔型	縦置き型	複数体/孔型	原位置組立型	原位置浸漬型
坑道型	基礎型	複層型	分散型	複線型	水槽型	処分坑道型	横置き型	1体/孔型	PEM型	地上浸漬型
				デッドエンド型			斜め置き型			

2021年3月

公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター（原環センター）  
Radioactive Waste Management Funding and Research Center

〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号 ニチレイ明石町ビル12階

TEL : 03-6264-2111（代表） FAX : 03-5550-9116 <https://www.rwmc.or.jp/>

本書の複写・転載などの問い合わせは、企画部 [kikaku@rwmc.or.jp](mailto:kikaku@rwmc.or.jp) までお願いします。