

## 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

2021年3月



## まえがき

原環センターでは2020年度の自主調査研究の一環として、「設計・操業技術の最適化手法に関する研究」に取り組みました。本研究に係る調査や検討は、下記に示す民間企業有志、日本原子力研究開発機構ならびに原子力発電環境整備機構で構成する“設計・操業技術の最適化手法に関する研究会”の協力のもとで進めました。

本報告書は、これらの検討の成果を取りまとめたものです。報告書の取りまとめにあたっては、委員に加えて研究会の事務局として調査や検討に関与した原環センター職員も原稿執筆に携わりました。

### 設計・操業技術の最適化手法に関する研究会 委員（五十音順、敬称略）

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
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
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
アドバイザー	原子力発電環境整備機構	技術部

### 研究会事務局（委員以外の原稿執筆者）（五十音順）

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



# 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

## 目次

### まえがき

第1章	はじめに	1
第2章	検討の進め方	2
2.1	研究会の設置	2
2.2	検討手順	2
(1)	ステップ①：最適化アプローチの検討に先立つ諸外国の先行検討事例等の調査	2
(2)	ステップ②：わが国に適用可能な最適化アプローチに関する検討・整理	2
(3)	ステップ③：最適化の試行によるアプローチ案の適用性の確認	3
第3章	国際的な検討動向	4
3.1	動向調査の目的および調査対象	4
3.2	調査結果（国際的な検討動向等の概観）	5
(1)	国際機関における検討動向	5
(2)	主要国における技術検討動向	6
(3)	これまでに国内で実施された調査研究成果等の関連知見	8
第4章	わが国への適用を目指した最適化アプローチ（研究会検討結果）	10
4.1	最適化のアプローチに係る考え方	10
(1)	基本的な考え方	10
(2)	2段階の階層構造による最適化の適用対象の区分	11
(3)	最適化における評価項目間の重み付けと複数のオプションを対象とした最適化	12
4.2	最適化に係る評価項目	13
(1)	設計の最適化に係る評価項目	13
(2)	2段階による最適化：操業技術の最適化に係る評価項目	17
4.3	代替設計オプション案に基づく最適化アプローチの適用性の確認	20
(1)	本研究会における設計の最適化の試行手順	20
(2)	代替設計オプションの考案と最適化の試行	21
第5章	考察	34
5.1	研究会における検討結果のまとめ	34
5.2	最適化というツールの今後の活用方法に関する考察	35
(1)	実施主体の処分場設計における柔軟性の確保と段階的な詳細化	35
(2)	安全規制制度への対応	37
第6章	おわりに	39
	参考文献	40

## 別添資料集

- 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

# 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

## 第1章 はじめに

高レベル放射性廃棄物等の地層処分の段階的な開発プロセスにおける処分概念や設計の“最適化”について、近年、国際機関や事業が先行する主要国において、その考え方が具体化しつつある。一方、その方法論については、ALARA<sup>1</sup>やBAT<sup>2</sup>の考え方とも関係する放射線防護（安全性）と経済性の観点に加え、操業技術（建設・施工技術）としての実証性や遠隔操作性を含む技術的実現可能性、品質保証、規制要件への適合性ならびにメンテナンス性など、処分場の建設・操業に適用する技術を見据えた処分場設計の最適化を行う上での多様な評価項目が示唆されているものの、一般的に適用可能な方法論として確立されている状況ではない。

地層処分のサイト選定プロセスに進捗が得られつつあるわが国の状況を踏まえれば、国際的な考え方を踏まえつつ、わが国に適用可能な最適化の方法論を具体化し、今後のサイト選定プロセスの展開に応じて、適宜、その考え方を取り入れて処分場の設計を段階的に進め、最適化（複数の処分場設計オプションや操業技術オプションの比較評価）をとおした各節目における迅速かつ適切なオプション選択など、より合理的・効果的に処分場開発を進めることが望まれる。

このような背景のもと、わが国に適用可能な最適化の方法論の開発に向けて、処分場の設計および操業技術の最適化に係る国際的な動向を概観しつつ、最適化に係る方法論（最適化のアプローチ）の整備に向けた考え方を整理するとともに、わが国で一般的に想定される地質環境や国内外で検討されている多様な処分概念などを踏まえて、最適化において考慮すべき評価項目や評価指標について、主に工学的な観点から抽出・整理することを試みた。

本書は、上記の目的で取り組んだ検討の成果をとりまとめたものである。

---

<sup>1</sup> ALARA (As Low As Reasonably Achievable) : 国際放射線防護委員会 (ICRP) が 1977 年勧告で示した「すべての被ばくは社会的、経済的要因を考慮に入れながら合理的に達成可能な限り低く抑えるべきである」とした放射線防護の基本的概念。

<sup>2</sup> BAT (Best Available Technology) : 利用可能な最善の技術。

## 第2章 検討の進め方

前述した検討を進めるために、民間企業有志および関係機関の協力のもとで研究会を設置して検討を進めた。

### 2.1 研究会の設置

地層処分施設の設計・操業技術の最適化という本研究の対象課題に対して、特に工学技術な観点から検討を進めるために、トンネルや地下施設の設計・施工などの大型土木工事、或いは日本原子力研究開発機構が運営する深地層の研究施設等の設計・施工等に関して豊富な知見や経験を有する民間企業の有志の協力を得て、「設計・操業技術の最適化手法に関する研究会」（以下、「研究会」という。）を設置して検討を進めた。

研究会には、深地層の研究施設の設計・施工および運用の経験・実績を有する日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」と表記。）にも研究会メンバーとして協力を頂くとともに、地層処分事業の実施主体である原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」と表記。）にもアドバイザーとして検討に加わって頂いた。

研究会の委員構成および開催実績については別添「資料1」を参照されたい。

### 2.2 検討手順

わが国に適用可能な最適化に係る方法論（最適化アプローチ）の提示に向けて、以下のステップで検討を進めた。

ステップ①：最適化アプローチの検討に先立つ諸外国の先行検討事例等の調査

ステップ②：わが国に適用可能な最適化アプローチに関する検討・整理

ステップ③：最適化の試行によるアプローチ案の適用性の確認

#### (1) ステップ①：最適化アプローチの検討に先立つ諸外国の先行検討事例等の調査

既に国際機関などで最適化に関する検討が進められており、また、事業が先行する国においても、本研究会における検討の参考となり得る具体的な最適化の実践例が存在する可能性がある。

本ステップでは国際機関や諸外国の先行検討事例等を調査して、後続する検討ステップで参考となる情報を抽出する。

#### (2) ステップ②：わが国に適用可能な最適化アプローチに関する検討・整理

本ステップでは、諸外国の検討動向（ステップ①）を概観したうえで、わが国に適用可能な最適化アプローチのドラフト案について検討・整理する。

具体的には、『最適化に係る考え方・方法論（案）』の整理を行う。方法論については、最適化の実施において必要となる、多様な観点（価値観）から構成される『最適化に係る評価



項目・評価指標（案）』の整理を試みる。

### (3) ステップ③：最適化の試行によるアプローチ案の適用性の確認

ステップ②でドラフト化する最適化アプローチ案（考え方・方法論および評価項目・評価指標に関する素案）に基づき、代替設計オプション案を考案したうえで最適化を試行的に実践し、ドラフト案の適用性を確認し、必要な見直しを行う。

最適化が複数のオプション間での比較評価が基本となることから（後述の第3章を参照）、本検討では、比較評価元となるリファレンス方法（基本設計・仕様、施工・管理方法など）を処分孔縦置き方式（パネル型処分区画）として設定したうえで、代替設計オプション案との比較検討を試みる。

なお、本研究会で考案する代替設計オプション案は、最適化に係る方法論や評価項目・評価指標の妥当性を確認することを目的としたスケッチレベルのものである（代替設計オプションの概要をイラスト化したアイデアレベル）。地層処分施設の設計としての成立性を含めた最適化に係る個々の評価項目に関する詳細かつ定量的な評価ができるレベルのものではないが、今後の地層処分施設の設計の具体化において参照できる要素があり得ることを期待するものである。

### 第3章 国際的な検討動向

わが国に適用可能な最適化アプローチの具体化に先立ち国際的な検討動向等を概観した。

#### 3.1 動向調査の目的および調査対象

国際的な検討動向から窺える最適化の概念ならびに考え方や方法論の整理に加えて、最適化に係る多様な評価項目の抽出を目的として、国際機関や諸外国の検討動向等を調査した。

##### 調査の目的

- 『最適化に係る考え方・方法論』の整理に資する情報の収集
- 『最適化に係る評価項目・評価指標』の抽出に資する情報の収集
  - ・評価項目：多次元・多価値に及ぶ包括的な評価項目の抽出、評価項目の体系化／構造化
  - ・評価指標：各評価項目に対する指標設定の考え方

調査の対象を表 3.1-1 に示す。国際機関が発行する資料では、主に最適化に係る考え方や方法論の整理に資する情報を、また、主要国の関係組織が近年に公開したセーフティケース文書等の技術資料では、最適化を明示した記述に加えて評価項目（大・中項目）の抽出に資する情報の収集が期待できる。

また、その他として、これまでに国内で実施された調査研究成果なども調査対象とした。必ずしも最適化の観点ではないものの、上記目的に資する情報が得られることを期待して調査の対象に加えた。

表 3.1-1 国際的な検討動向に関する調査の対象

調査対象	1) 国際機関発行資料	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国際放射線防護委員会（以下、「ICRP」と表記。）</li> <li>● 国際原子力機関（以下、「IAEA」と表記。）</li> <li>● 経済協力開発機構／原子力機関（以下、「OECD/NEA」と表記。）</li> </ul>
	2) 主要国技術資料	<ul style="list-style-type: none"> <li>● フィンランド</li> <li>● スウェーデン</li> <li>● 米国</li> <li>● フランス</li> <li>● スイス（法規制文書のみ）</li> <li>● カナダ（法規制文書のみ）</li> </ul>
	3) その他	<p>（これまでに国内で実施された調査研究成果等の関連知見）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 資源エネルギー庁委託事業成果               <ul style="list-style-type: none"> <li>・可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発</li> <li>・地層処分施設閉鎖技術確証試験</li> </ul> </li> <li>● 費用・経済性に係る処分費用の積算情報</li> </ul>

なお、これらの調査では、次のような留意すべき事項があることを念頭に調査および取りまとめを行った。調査の結果について次節に整理する。

- 工学的観点（設計、製造・施工）では、ある時点（事業の節目）に取りまとめられるセーフ

ディケース文書は反復的検討の1断面（選択の結果）を取りまとめたものであり、オプションの比較評価や選択に係る記述が限定的である可能性（有益な情報に乏しい可能性）  
 ○抽出される評価項目は、各国の状況（地質環境、処分概念・設計、規制要件等）に固有のものである可能性

### 3.2 調査結果（国際的な検討動向等の概観）

前述した調査で得られた結果を次の調査対象毎に、2つの観点（①最適化に係る考え方・方法論、②最適化に係る評価項目・評価指標）から要約整理する。調査結果の詳細については別添「資料2」および「資料3」を参照されたい。

- (1) 国際機関における検討動向
- (2) 主要国における技術検討動向
- (3) これまでに国内で実施された調査研究成果等の関連知見

#### (1) 国際機関における検討動向

国際機関（ICRP、IAEA、OECD/NEA）の取りまとめから窺える最適化の考え方等として、表3.2-1のことが示唆される。最適化の議論は、当初は主に「放射線防護とコスト」の観点から始まり、近年では最適化における多様な側面（評価項目）を考慮する必要性が示唆されている。また、最適化プロセスは設計オプション間の相対比較であるとしたうえで（本質的には定性的であり定量的解析によって裏付ける）、最適化における多様な側面（価値観）を多様な評価項目として表現し、評価項目間の相対的重要度（重み付け）を考慮する必要性を挙げている。なお、処分場開発の様々な段階／レベルで実施される最適化を支援するものとして、利用可能な最善技術（BAT）の適用にも言及している。

上記のような考え方に加えて、国際機関の取りまとめから最適化に係る評価項目として、表3.2-2示す項目が挙げられている。

表 3.2-1 国際機関の取りまとめから窺える最適化の考え方など

<p>○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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 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 (ICRP, 2006)】</li> <li>● 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 (ICRP, 2006)】</li> <li>● 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 (IAEA, 2006)】</li> <li>● 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 (IAEA, 2011a)】</li> </ul> <p>○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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 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 (ICRP, 2013)】</li> </ul>
--

- 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（ICRP, 2013）】

○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, SSG-14（IAEA, 2011a; 2011b）】
- 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 SSG-14（IAEA, 2011b）】
- 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 SSG-23（IAEA, 2012）】

○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 SSG-31（IAEA, 2014）】

表 3.2-2 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

- 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
- メンテナンス性
- 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
- 環境保全

(2) 主要国における技術検討動向

表 3.2-3 に示すように、主要国（フィンランド、スウェーデン、米国、フランス、スイス、カナダ）の法規制文書および実施主体が取りまとめている技術資料などから、最適化に係る考え方や方法論は概ね国際機関の取りまとめと同様である。いずれの国も法規制文書レベルでは最適化に係る記述は“定性的”であり、最適化の主な視点は“放射線防護”である。一方で、フランスやスイスのように最適化の目的の1つに「実施すべき研究開発課題の明確化」を挙げている例も

あり、また、事業許可申請段階にあるスウェーデンでは最適化（比較評価）によって新たな設計オプションを導入する際の要件を定めている国もある。

また、最適化に係る実施主体の対応（技術資料）から窺える事項として、幾つかの国のセーフティケース文書から、更に詳細な最適化の評価指標に加え、最適化に係る設計要素（或いは設計因子への影響要素）を抽出することができる（表 3.2-4 参照）。例えば、ANDRA（フランス）は段階的なセーフティケース開発の差分（複数オプションからの選択の経緯）を説明しており、Posiva（フィンランド）や ANDRA は、地下構成要素毎に最適化に係る設計要素を丁寧に記載するといった特徴がある。

以上のように、各国の実施主体の技術的な対応動向から、より具体的な参考情報を得ることができるが、これらが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（わが国に適用できない可能性）があることに留意が必要である。

表 3.2-3 主要国の検討動向等から窺える最適化の考え方など

<ul style="list-style-type: none"><li>○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”であり、“放射線防護”が最適化の主な視点</li><li>○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）</li><li>○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）<ul style="list-style-type: none"><li>●最適化は利用可能な最善技術（BAT）と同時に論じられる</li><li>●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</li><li>●レ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</li><li>●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のみ、代替方法（設計・仕様、施工・管理方法）を採用できる</li></ul></li><li>○上記の一方で、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）</li></ul>
--

表 3.2-4 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

- 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（管理のし易さ）
- 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
- 区域内の線量率の抑制（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

### (3) これまでに国内で実施された調査研究成果等の関連知見

必ずしも最適化の観点ではないものの、原環センターが取り組んできた他の調査研究等の成果から関連する参考情報を抽出した。例えば、資源エネルギー庁委託事業である可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発では、回収の容易性向上の観点から回収の容易性を高めるための工学的対策の検討過程において、表 3.2-5 に示すような回収の容易性を高めるための視点が整理されている（JAEA;RWMC, 2020a）。同様に、地層処分施設閉鎖技術確証試験では、坑道埋め戻し材の施工技術を対象としたものであるが、代替施工技術オプションの技術的実現性に関して7つの評価項目（表 3.2-6 参照）を設定してオプションの評価を試みている（JAEA;RWMC, 2020b）。前述した国際機関や諸外国の検討動向から窺える評価項目（表 3.2-2、表 3.2-4）には、回収可能性がキーワードとして含まれており、表 3.2-5 に示す回収の容易性を高めるための視点は、回収可能性という評価項目の細目として参考にできる。また、表 3.2-6 に示す坑道埋め戻し技術に関する評価項目は、設計の技術的実現可能性（構築の実現性）の参考例となり得る。

表 3.2-5 回収の容易性向上の視点（評価項目）およびポイント

回収の容易性向上の視点		容易性向上のポイント
廃棄体までのアクセス性向上	廃棄体までのアクセス経路を確保するための作業量等の少なさ	プラグ、埋め戻し材、充填材、緩衝材の撤去作業量を削減 坑道や処分孔の安定性を確保するための作業量を削減
	廃棄体のハンドリング性向上	一回の回収作業における回収物量の増加と作業数の低減
	物量	一回の回収作業における回収物量の増加と作業数の低減
	重量と形状	回収対象物の軽量化・形状の単純化
	健全性	回収対象物の健全性を確保
	動線	回収時の動作と動線の単純化
	環境	作業性を高めるための空間を確保

表 3.2-6 坑道埋め戻し材の代替施工技術オプションの技術的実現性に関して設定した評価項目

評価項目	評価指標
適用可能な埋め戻し材料および製造条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋め戻し施工技術の各埋め戻し材料への対応の柔軟性</li> <li>埋め戻し材料製造条件の汎用性</li> </ul>
施工の物理的制約条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道全断面への埋め戻し施工能力</li> <li>施工空間の裕度</li> </ul>
施工時の環境条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑道内環境から施工への影響</li> <li>施工による施工環境への影響</li> </ul>
施工品質および品質管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>高い埋め戻し密度の達成可能性および密度の制御性</li> <li>均質性確保の容易性</li> <li>設備および施工者のスキルの品質への影響</li> <li>プラント出荷および受け入れ時の品質管理の項目と容易性</li> <li>目視による埋め戻しの完全性確認の容易性</li> </ul>
施工速度	<ul style="list-style-type: none"> <li>埋め戻し工法ごとの概略の施工速度</li> <li>施工法の組合せの必要性</li> </ul>
施工技術の組合せによる有効性	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工法の組合せによる品質、施工速度などの改善性</li> </ul>
費用（増減要因）	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工速度のコストへの影響</li> <li>施工法の組合せによるコスト上昇の可能性</li> <li>施工法に対応した材料費の影響</li> </ul>

## 第4章 わが国への適用を目指した最適化アプローチ（研究会検討結果）

国際的な検討動向を踏まえ、わが国への適用に向けた最適化のアプローチに係る考え方を整理するとともに、現時点で想定し得る最適化に係る評価項目の抽出・整理を行った。

そのうえで、これらの考え方や評価項目の適切性を確認するために、複数の代替設計オプション案を考案して最適化を試行した。

### 4.1 最適化のアプローチに係る考え方

#### (1) 基本的な考え方

前章（3章）で整理したように、最適化のアプローチに係る考え方（方法論の整備に向けた考え方）は、国際機関や主要国の間で統合的に整理されている。本研究会では、わが国への適用を目指した最適化のアプローチも同様のものであることが望ましいと考え、国際的な検討動向に倣って表 4.1-1 のように整理した。

表 4.1-1 最適化の方法論に関する考え方

- |   |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>○最適化は、複数の設計オプション、或いは、複数の建設・操業技術オプションからの選択における比較評価である。</li><li>○最適化（比較評価）に係る評価項目は、放射線防護のみならず多岐にわたる項目となる（多様な側面・価値観を伴う）。</li><li>○最適化では、それらの多岐にわたる評価項目を構造化して体系的に扱い、評価項目間の相対的重要度（重み付け）を考慮する（重要度に関する別途の評価・判断が必要）。</li><li>○個々の評価項目に関する評価は本質的には定性的であるが、定量的な評価によって裏付けることが可能なものもある。</li><li>○最適化プロセスは処分場開発と歩調を合わせて進められ、各段階における利用可能な最善技術（BAT）を適用することで最適化を支援することができる。</li><li>○最適化によって、評価項目毎にオプション間の優劣の把握が可能となり、更に高める（劣る部分を改善する）ための課題の抽出・研究開発への展開が可能となる。</li><li>○最適化を目的とした選択枝の比較評価は、より現実的な想定に基づくものとする。</li></ul> |
|---|

上表に整理しているように、国際的な検討動向に倣って“最適化（比較評価）は本質的には定性的”と整理しているものの、事業に進展が見られる一部の国では、最適化の実施に際して次のような定量的な要件を定める例もあることに留意が必要である（表 3.2-3 からの抜粋）。

- リファレンス方法（比較評価元）のリスクと同じかそれより低いリスクにつながる場合のみ代替方法を採用できる（スウェーデン）。
- 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（スウェーデン）。他方、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限量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）。



以上のことから、最適化（オプション選択における比較評価）を支援する／裏付ける定量的な技術情報（知識ベース）の詳細度は事業段階によって異なるものの、特に事業の初期段階、或いは研究開発の着手段階における複数のオプションに対する定性的な比較検討は、課題の抽出や開発方針・計画を具体化するうえで有効なツール（手段）となる。他方、安全規制制度面での対応やステークホルダ等への説明性の観点から、最適化を支持する定量情報は、事業の進展とともにその重要性が高まっていくことが想定される。言い換えれば、選択した概念・設計や製造・施工技術の適切性に関するより定量的な説明が求められていく可能性が示唆される。

## (2) 2段階の階層構造による最適化の適用対象の区分

第3章で紹介した国際的な検討動向から、これまでの議論の主題は主に“防護の最適化”であり、その対象は処分施設の「設計」および「操業計画や操業手順」とされている。諸外国のセーフティケース等の技術資料などを参照しても、閉鎖後長期の安全評価のベースとなる建設・操業・閉鎖を経て構築される処分施設の「設計」に関する情報量に較べて、そのような処分場を構築するための操業計画ならびに操業技術や操業手順に関する情報量は必ずしも多いとは言えない（事業許可段階を経て操業段階に入る過程でより具体化されていくことが想定される）。

地層処分事業のサイト選定段階にあるわが国においても、核燃料サイクル機構（現 JAEA）が取りまとめた第2次とりまとめ（JNC, 1999）や NUMO が取りまとめた技術報告書（NUMO, 2011; 2021）など、これまでの技術報告の内容は主に前者に係る設計に力点が置かれ、後者の操業技術（製造・施工技術や手順）については現状の技術レベルを紹介する程度となっている。

このような状況ではあるが、諸外国の検討事例から「技術的実現性」に関連するものが最適化に係る評価項目として示唆されつつある（既出の表 3.2-2、表 3.2-4 を参照）。設計した処分場が構築できるか（設計要件を満たすように建設・操業・閉鎖できるか）という実現性の観点は重要であり、適用する操業技術の特性や制約等に応じて設計を見直す（フィードバックする）ことがあり得ることを踏まえれば、多様な地質環境や設計バリエーションへの柔軟な対応も念頭に置きつつ、早い段階から操業技術オプション（建設および製造・施工技術オプション）の最適化の検討を進めていくことが、これらの技術の開発計画の立案においても有益である。

以上のことから、本研究会では最適化の対象を次の2つに区分して2段階の階層構造で適用することが効果的であると考えられる。

### ①設計

### ②操業技術（設計した処分場を構築するための建設、製造・施工技術）

特に、②の操業技術の選択のために行われる最適化を地下構成要素の個々（例えば、坑道掘削、支保工、オーバーバック、緩衝材、埋め戻し材、プラグなど）に細分化して適用することで、個々の操業技術（この場合は建設および製造・施工技術）の特性に応じた詳細かつ適切な評価項目の設定が可能になる（適用の概念について 4.2 (2) 項に詳述）。

また、将来の処分場領域／空間に対して、どのようなスケールで設計や操業技術の最適化を行うべきかを考えておく必要がある。1つの処分場に1つの設計・1つの操業技術を適用しなければならない理由はない。与えられたサイトの地下環境特性が処分場領域内で異なるような場合には、（その程度にもよるが）パネル単位や処分坑道単位で異なる設計や操業技術を適用することで、

処分システム全体としての最適化が達成できる可能性がある。

### (3) 最適化における評価項目間の重み付けと複数のオプションを対象とした最適化

4.1 (1) 項で述べたように、最適化（比較評価）では、多岐にわたる評価項目を構造化して体系的に扱い、評価項目間の相対的重要度（重み付け）を考慮する必要がある。表 4.1-2 にこれらの概念を示す。評価項目間の相対的重要度の設定は、今後整備される安全規制制度の要求レベルや、ステークホルダの期待や要望などを踏まえた実施主体の開発戦略と言える（どの評価項目に重きを置いて設計や操業技術の選択や適用を行うか）。

表 4.1-2 評価項目の体系化・構造化と項目間の重み付けの概念

評価項目		重み付け (Weighting Factor)	評価指標（指標設定の考え方）
大項目	小項目		
項目1	小項目1-1		
	小項目1-2		
項目2	小項目2-1		
	小項目2-2		
	小項目2-3		
項目3	小項目3-1		
	・		
	・		
・	・		
項目n	小項目n-m		

このような重み付けの概念を含めた複数のオプションの比較評価を行う際のイメージを表 4.1-3 に示す。

表 4.1-3 評価項目間の重み付けを加味した複数のオプションに対する総合評価の概念

評価項目	相対評価結果（9段階評価）			重み付けを加味した評価結果			
	比較評価元 (オプション1)	比較対象1 (オプション2)	比較対象2 (オプション3)	重み付け (Factor)	比較評価元 (オプション1)	比較対象1 (オプション2)	比較対象2 (オプション3)
項目1	5	7	6	1.5	7.5	10.5	9.0
項目2	5	4	4	0.8	4.0	3.2	3.2
項目3	5	4	7	2.0	10.0	8.0	14.0
項目4	5	5	3	0.5	2.5	2.5	1.5
<b>総合点</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>-</b>	<b>24.0</b>	<b>24.2</b>	<b>27.7</b>

上表は3つのオプション間での最適化（比較評価）を例題とした概念であり、同表の左側では（青色背景部分）、評価項目毎に比較評価元（オプション1）と比較対象（オプション2および3）との比較評価を行い、優劣の差を9段階で評価している。このとき、比較評価元を基準点（9段階評価の中間点）として固定し、比較評価元であるオプション1とオプション2、オプション1

とオプション 3、と順次 2 つのオプション間での比較評価を行うことで、オプション 2 とオプション 3 の比較が可能となる。或いは、3 つのオプションを並べて 9 段階の物差しの枠内で相対順位を評価することもできる。同表の右側は（緑色背景部分）、左側の各オプションの評価項目毎の評価点に予め定めた重み付けの係数（Weighting Factor）を乗じたものである。これらを加算することで、全ての評価項目の重み付けを加味した総合評価が可能となる。

以上のような方法は一例であり、例えば、ある評価項目が規制要件、或いはステークホルダ間の遵守事項などとして要件化される場合には、その項目については“要件を満たすか／満たさないか”という評価となり、点数付けは意味をなさない可能性がある。また、将来の最適化（オプション選択の評価）の実践場面において、特定の評価項目のみを優先して判断を行うことも想定し得る。どの様な方法で最適化（オプション選択の評価）を進めるべきか、開発戦略ならびに今後の規制動向やステークホルダの期待や要請などの状況に応じて柔軟に対処して行くことが望まれる。

## 4.2 最適化に係る評価項目

### (1) 設計の最適化に係る評価項目

第 3 章に整理した国際的な検討動向や関連する研究成果などを踏まえ、本研究会において更なる項目や要素の追加ならびに個々の要素の分類や統合を行い、最適化に係る評価項目の体系化・構造化を図りつつ表 4.2-1 のように整理した。具体的には、次の 13 の評価項目を大項目として設定している。

- 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）
- ② 設計のロバスト性・柔軟性
- ③ 建設・操業性（建設・操業の作業性）
- ④ 品質保証・品質管理のし易さ
- 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
- 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
- ⑩ 環境保全
- ⑪ 回収可能性
- ⑫ 費用・経済性
- ⑬ その他

上記の大項目のうち、下線（青字表記）を施した項目は、前章（第 3 章）に整理した国際的な検討動向等から明示（或いは示唆）されている項目である。表 4.2-1 には、上記の 13 の評価項目毎に「評価指標の例」と「評価の考え方」を整理している。同表に示す評価項目および評価指標の整理では、NUMO の包括的技術報告書に示される設計因子（閉鎖前の安全性、閉鎖後の安全性、回収可能性、工学的成立性、経済的合理性）や要求事項（NUMO, 2021）との整合性に留意して

いる。

13の大項目のうち、①～③は工学的成立性の範疇に入るものであるが、ここでは現在のわが国の事業段階に留意して、「①詳細設計への具体化の見通し」と「③建設・操作性（適用する建設・操業技術）」を区分している。このように分けて考えることで、次項(2)に詳述するように、最適化に係る評価項目を設計、操業技術に分けて、それぞれに応じて詳細な評価や課題の具体化を図ることができる。更に②を明示することで、将来の候補サイトの多様な地質環境特性への適用性・柔軟性を意識できるようにしている。

また、主に工学的な観点から検討を進めている本研究会の整理では、設計および建設・操業の観点から、特に将来の安全規制対応において必要となる可能性に留意して、次の2つを大項目として設定している。

#### ④品質保証・品質管理のし易さ

#### ⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ

ここで“品質保証・品質管理”とは、操業段階における人工バリアを含む地下構成要素の製造・施工品質としている。原位置で一定の品質で施工された地下構成要素は、その直後から原位置の地下環境に晒され、段階的な坑道等の閉鎖、施設の最終閉鎖といった工学的なプロセスならびに再冠水に至る過渡期を経て、性能評価や安全評価が期待する長期の評価における初期状態（建設・操業に伴う地下環境の擾乱から初期ベースラインへの復旧に至る過渡期を経た状態）へと変遷する。“閉鎖認可に係る性能確認”とは、その過程である閉鎖段階において、そこまでに処分場の原位置で得られる情報または別の類似環境や室内での現象論的な試験データに基づく知見、或いは解析的な手法などを活用して、施工した地下構成要素の状態や機能の変遷を評価し、施設の最終閉鎖判断の支援に資する取組を意味する。例えば、米国のユッカマウンテン地層処分場に適用されるNRC規則（10 CFR Part 63）では、品質保証に係る活動とは別の取組として“性能確認プログラム”と称する取組が定義され施設の最終閉鎖段階までの実施が要求されている（NRC, 2009）。このような両者の関係を、概念的に図4.2-1のように表現する（JAEA;RWMC, 2020b）。

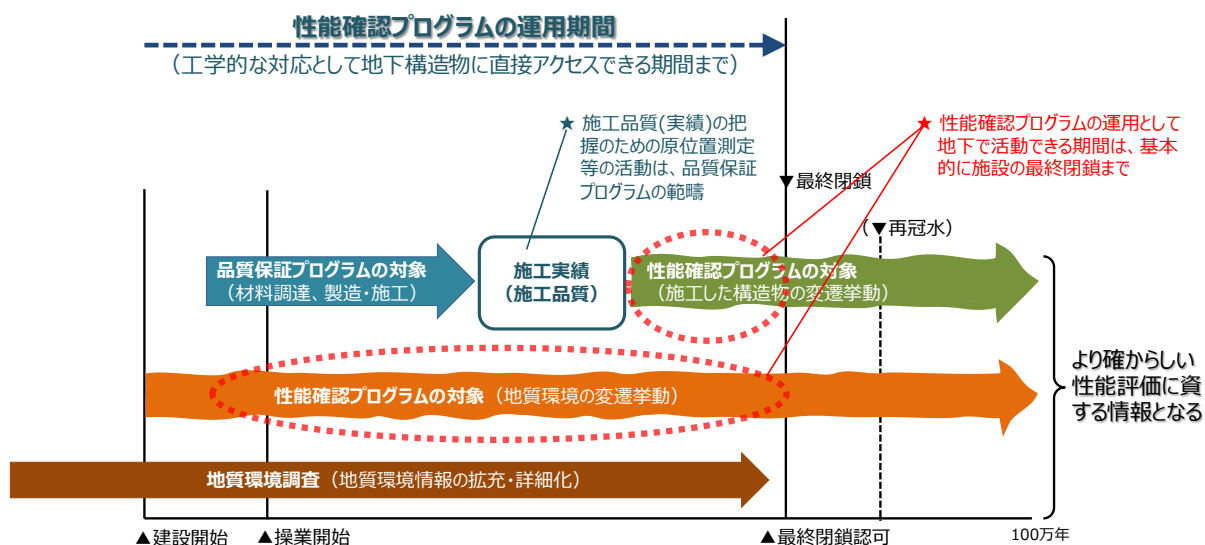


図 4.2-1 品質保証プログラムと性能確認プログラムの関係（概念）

上述した「④品質保証・品質管理のし易さ」と「⑤閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ」の意味合いを踏まえれば、これら2つの項目は、「⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ」および「⑧閉鎖後長期の安全性（放射線防護）」の確からしさを支持する重要な項目となる。これらに対してどのような厳格さやレベルで、製造・施工品質の保証や閉鎖認可までに行うべき活動（原位置での直接的な測定やモニタリング、或いは現象論的試験データに基づく知見や解析的手法といった間接的な手法の導入など）を計画するかは、今後の安全規制要求や実施主体の考え方に委ねられるものの、他の評価項目で高い評価を得た設計オプションであっても、これらに適切に対応できる設計オプションや操業技術オプションでなければ閉鎖認可が得られない可能性があり得ることから、オプション開発においては、これらにも留意して取り組んでいくことが肝要である。

なお、⑫費用・経済性は、費用積算の細目構造に沿って項目展開することが適切と想定されるが、本研究会では更なる細分化や評価指標の設定は行っていない。

以上のように、本研究会で整理した設計の最適化に係る評価項目は現時点における国際的な検討動向等を参照しつつ設定したものであるが、4.1 (3) 項で述べたように、今後の規制動向やステークホルダとの関係、更に事業進展や研究開発の進捗に伴う設計オプションの具体化に応じて、評価項目やその体系構造は変化し得るものである。また、本研究会では主に工学的な観点から検討を進めており、地質環境や安全評価の観点で更に追加すべき評価項目があり得る。このようなことから、表 4.2-1 に整理した設計の最適化に係る評価項目は“現段階における素案”であり、今後の最適化の実践に向けた更なる検討における「たたき台」として活用されることを期待する。

表 4.2-1 設計の最適化に係る評価項目（素案）

※下表内の青字は、第3章に整理した国際機関や主要国の検討動向等から抽出

評価項目	評価指標の例	評価の考え方（留意が必要な事項に関する補足）
①詳細設計への具体化の見直し／設計構築の実現性（建設・施工技術の適用性の見直し）	<ul style="list-style-type: none"> <li>●設計の詳細化（要件・仕様展開）において必要となる知見やデータの十分性（今後の見直し）</li> <li>●適用する建設・操業技術の信頼性、開発整備の見直し                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・適用技術・導入装置の複雑さ</li> <li>・施工品質レベル、速度・工期（並行作業ライン数等の設備レベルを含む）</li> <li>・適用技術の実証レベル、既存技術の利用可能性、など</li> </ul> </li> <li>●標準化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●建設・施工技術の実用性・適用性の有無・レベルを評価                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・個別技術の現状の技術実証レベルや今後の技術実証の見直しに留意</li> <li>・実績のある既存技術や類似技術が適用可能、或いは事前の技術実証の見直し高い場合に評価は高い</li> </ul> </li> </ul>
②設計のロバスト性・柔軟性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●母岩種類・地下環境や設計深度・場所（沿岸など）の多様性※に対する設計のロバスト性                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※NUMO 包括的技術報告書に示される母岩環境や深度のバリエーション（沿岸部含む）に留意</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●建設・操業に係る技術・装置や工程等に関する仕様・構造・形式等の単純化・統一化のし易さを評価</li> <li>●適用可能な岩種、深度、地温、地下水水質のバリエーションへの適用性（代替設計および包含する人バリエーション方式、地下坑道展開方式、アクセス坑道などの多様なバリエーションへの適用性／柔軟性を評価）</li> </ul>
③建設・操業性（建設・操業の作業性）	<ul style="list-style-type: none"> <li>●建設・操業・閉鎖作業の容易性                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・適用技術・導入装置の複雑さ</li> <li>・作業手順の合理性</li> <li>・廃棄体を含む材料や設備の輸送・搬送効率を踏まえた工期に対する裕度、など</li> </ul> </li> <li>●建設・操業期間中の地下構造物の安定性・制御性(管理のし易さ・メンテナンス性)</li> <li>●操業の柔軟性（作業環境、操業条件、工程・計画変更）</li> <li>●掘削・建設作業の廃棄物定置作業からの分離性</li> <li>●区画設定性（作業／工程区分性）                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線管理区域とそうでない区域の分離性</li> <li>・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、など</li> </ul> </li> <li>●遠隔操作性、●機械化・自動化（ロボティクス）の導入性</li> <li>●事故発生時における全ての場所へのアクセス性、事故・異常・故障時からの復旧・回復性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●以下にも留意                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・物流、空洞形状に応じた建設技術・装置等</li> <li>・廃棄体の形状・重量、定置レイアウト、構成要素と手順等</li> <li>・坑道形状（断面形状、連結部、傾斜など）が物流に与える影響</li> </ul> </li> <li>●地下作業環境（NF 母岩、湧水環境等）や工程・作業計画の変化／バリエーションへの柔軟性を評価</li> <li>●次の観点などから評価                             <ul style="list-style-type: none"> <li>・放射線管理区域における保守管理作業の最小化</li> <li>・立ち入り禁止区域の最小化、区域内の線量率の抑制性（制御性）</li> <li>・操業時の放射線作業環境の最小化の程度</li> </ul> </li> <li>●処分場形態や搬送形態等の特徴に留意のうえ、遠隔操作や機械化の導入の容易性等を評価</li> </ul>
④品質保証・品質管理のし易さ	<ul style="list-style-type: none"> <li>●施工品質の管理・確保・保証のし易さ                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※ここでの品質は製造・施工品質、その確認方法として製造・施工技術に応じた製造・施工プロセス管理を指向（原位置での確認作業を最小化）</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●原位置での施工品質把握（測定・モニタリング等）を最小化した製造・施工プロセス管理が適用できるレベルを評価（例えば、他の一般産業分野の知見を転用できる、類似のプロセス管理手法が構築できるか、など）</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>●性能確認技術の実現性・適用性（解析技術、原位置モニタリング／状態把握技術など）                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※施工～閉鎖段階における過渡期迄を見据えた状態変遷の把握・予測評価に関する原位置モニタリング技術や解析技術（或いは現象論データの外挿等）など</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●性能確認技術の実現性・適用性を見直しを評価</li> <li>●原位置状態把握作業（及び技術・装置）の導入を最小化できるレベルを評価</li> <li>※施工後（閉鎖後）の過渡期の状態変遷の予測評価に係る解析技術は次の性能評価技術の枠内で評価する</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>●予測性、信頼性</li> <li>●不確実性の管理のし易さ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●処分場（地下構成要素）の機能や状態変遷に影響する要因の有無や影響度に関する知見等のレベルにも留意</li> </ul>
⑦閉鎖前の安全性（放射線防護）	<ul style="list-style-type: none"> <li>●予測性、信頼性</li> <li>●不確実性の管理のし易さ</li> <li>●線量基準に対する安全裕度（平常時、事故時）</li> <li>●異常時／事故時の対応のし易さ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ここでの予測性は、操業時の事故／異常事象シナリオの包括性（イベント・フォルトツリーの包括性や信頼性）</li> <li>※規制要件（線量基準）の達成を前提とする</li> <li>●操業時の異常／事故シナリオの予見性、復旧作業の容易性や作業員の関与レベルを考慮</li> <li>●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関する知見等のレベルにも留意</li> </ul>
⑧閉鎖後長期の安全性（放射線防護）	<ul style="list-style-type: none"> <li>●予測性、信頼性</li> <li>●不確実性の管理のし易さ</li> <li>●安全規制要件（線量基準※）に対する裕度                             <ul style="list-style-type: none"> <li>※基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオ、人間侵入シナリオ</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>※規制要件（線量基準など）の達成が前提</li> </ul>
⑨一般労働安全	<ul style="list-style-type: none"> <li>●放射線安全・一般労働安全の確保レベル（裕度）</li> </ul>	
⑩環境保全	<ul style="list-style-type: none"> <li>●周辺環境への影響の予測性（大気、騒音・振動、河川・地下水、動植物など）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>※建設排土や排水処理の見直し、環境モニタリングの適用性に留意が必要</li> </ul>
⑪回収可能性	<ul style="list-style-type: none"> <li>●技術的実現性</li> <li>●回収の容易性（回収作業時間・工期）</li> <li>●回収可能性を維持できる期間（期間決定に資する影響評価技術の確からしさを含む）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>※上記の工学的成立性と同等の評価指標が展開される</li> <li>※別途、工務事業で評価指標を細分化（廃棄体までのアクセス性、廃棄体のハンドリング性など）</li> <li>※基本方針を踏まえれば、長いほど評価は高い</li> </ul>
⑫費用・経済性		
⑬その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>●線量基準以外の各種規制要件への適合性（制度的管理への非依存性など）</li> <li>●社会的要素への適合性（受容性、社会経済学的検討事項）</li> </ul>	

## (2) 2段階による最適化：操業技術の最適化に係る評価項目

既出の 4.1 (2) 項で述べたように、操業技術の選択において個々の操業技術の特性や制約等に応じた詳細かつ適切な評価項目を設定して最適化を行うために、本研究会では最適化の対象を次の 2 つに区分して 2 段階の階層構造で適用することを提案した。

### ①設計

#### ②操業技術（設計した処分場を構築するための建設、製造・施工技術）

上記①の設計の最適化に係る評価項目は前項(1)で述べたおりである。①の設計の最適化に係る評価項目と、別途展開する②の操業技術の最適化に係る評価項目との関係性を図 4.2-1 に示す。同図は操業技術の一例として、処分孔掘削技術、緩衝材施工技術ならびに埋め戻し材の材料と施工技術の選択における比較評価（最適化）への展開の概念を参考例示したものである（各操業技術の評価項目は例示である）。一部の評価項目は設計の最適化に係る評価項目と類似のものとなるが、対象となる操業技術を特定することによって更に詳細な評価項目に細分化することができ、また、特定した対象の特性に応じた固有の評価項目を考慮することができる。なお、設計および操業技術の選択においては、地質環境への適用性ならびに閉鎖後長期の性能評価や安全評価の要件や基準等を満たす必要があることから、これらの最適化を適切に進めるうえでは、工学的な視点に加え、これらの関連技術分野の支援が必要となる。

以上のような操業技術の最適化の一例として、表 4.2-2 に処分孔縦置きブロック方式における緩衝材ブロックと孔壁間の隙間の処理方法に関する最適化の例を示す（緩衝材施工技術の候補オプションとして、隙間未充填、ペレット充填、ケイ砂充填の 3 つのオプションを例題に比較評価を試行したもの）。同表の評価例は現時点における本研究会の一部のメンバーによる主観的／定性的な評価ではあるが、各オプションの特性を概観することができ、より適切な評価を行うために必要となる定量的な情報や課題、ウィークな部分とそれを改善するための課題などを抽出することができ、今後の研究計画の立案において有益な情報を得ることができる。

既述したように、最適化は本質的にはオプション間での定性的な比較評価であるものの、一部の先行国の事例のように、また、将来の技術選択の場面における適切な評価、ならびに規制対応やステークホルダへの説明性への観点から、事業の進展に応じて最適化に係る評価を支持する／裏付ける定量的な技術情報（技術ベース）が段階的に拡充・整備されていく必要がある。

# ① 設計の最適化

評価項目	設計オプションに関する比較評価（最適化）の結果		
	設計オプション 1	設計オプション 2	設計オプション 3
① 詳細設計への具体化の見通し/設計構築の実現性			
② 設計のロバスト性・柔軟性			
③ 建設・操作性（建設・操業の作業性）			
④ 品質保証・品質管理のし易さ			
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			
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			
⑩ 環境保全			
⑪ 回収可能性			
⑫ 費用（コスト）・経済性			
⑬ その他			

# ② 個々の操業技術への(※)展開

※材料、製造・施工技術オプション

## 例1 処分孔掘削技術オプションの選択評価(最適化)のイメージ

掘削技術オプションの選択・評価における評価項目			掘削技術オプション（技術選択肢）				
項目	小項目	細目	掘削技術OP-1	掘削技術OP-2	掘削技術OP-3	掘削技術OP-4	掘削技術OP-n
適用可能な環境条件	適用可能な岩種						
	湧水環境						
要件への適用性（既存技術の適用性）	適用可能な形状・サイズ						
	母岩への影響						
	品質保証・管理のし易さ	仕上げ形状誤差					
作業手戻との親和性	搬入出	装置・機材					
	スリ搬出効率						
費用見直し	1孔あたりの作業時間						
	オペレータ要員数						
将来の技術・装置の拡張性	装置・機材						
	準備工事・付帯設備						
	遠隔化						
	自動化						

掘削技術オプションの例（以下、NUMO調べ）			
SBM	Down Reaming	全旋回ケーシング工法	ダウンリーミング（リブレス工法）
エスエム研究所/S&D	インテグ/Pusha	有限地下研究所/JACA	有限工業機械工業株式会社
SKB TR-02-26	Posiva WR 2016-27	JAEA 平成25年度研究開発事業報告	
結晶質岩	結晶質岩	堆積岩	結晶質岩/堆積岩
Φ1,750mm×H8,000mm	Φ1,750mm×H8,200mm	Φ2,400mm×H4,200mm	Φ2,320mm×H4,150mm
【掘削】ネーリング（掘土）バネーム	【掘削】バレルリブレス（掘土）炭素鋼パイプ	【掘削】オーブ（掘土）オーブ（掘土）	【掘削】バレルリブレス（掘土）スクリュー
実績：1,422.1h/14孔 約7日/孔	実績：19.5月（6孔の平均） 約10日/孔	実績：1孔人工リブレス用 約5日/孔（1ヶ月）	標準準備をベースに海外実績より 掘削～約4日/孔

## 例3 埋め戻し材の材料と工法オプションの選択評価(最適化)のイメージ

【埋め戻し材の材料オプションに応じた材料特性に係る知識ベースのイメージ】

材料パラメータ		材料特性等									
種類		ベントナイト		確認のエネルギー	最大乾燥密度	最適含水比	透水係数	膨潤率（膨潤量）	材料調達性	材料製造・管理方法	コスト
種類		混合率（%）									
ケイ砂	3号, 6号	火成岩類	流紋岩	最大粒径	5						
			火山岩類	安山岩	最大粒径	15	1Ec				
			玄武岩	最大粒径	≤ 20 mm	30	2Ec				
	砕石 砕砂	堆積岩類	深成岩類	花崗岩	最大粒径	≤ 10 mm	40	4.5Ec			
			砂岩	最大粒径	≤ 5 mm	50					
			凝灰岩	最大粒径	≤ 2.5 mm						

【埋め戻し材の施工技術オプションに係る知識ベースのイメージ】

施工技術オプション	施工可能材料範囲	達成可能な品質レベル	材料ロス率	施工速度	施工管理の容易性	環境条件	過剰操作性	原位置モニタリングの容易性	コスト		
									材料調達・製造	施工管理	モニタリング
搬き出し・転圧								(現時点では、必要性及び測定項目は未確定)			
吹付け											
スクリューフィーダ											
ブロック											
パレット											
上記の組合せ											

## 例2 緩衝材施工技術オプションの選択評価(最適化)のイメージ

緩衝材施工技術オプションの選択・評価における評価項目			緩衝材施工技術オプション（技術選択肢）								
項目	小項目	細目	処分孔掘削				処分坑掘削				
			未充填	ケイ砂	パレット	転圧	吹付け	密閉PEM	隙間ありPEM		
適用可能な環境条件	施工対象形状										
要件への適用性	施工環境	湧水、湿度									
	施工密度	達成密度、密度分布									
	品質保証・管理のし易さ	施工プロセス管理									
作業安全性	品質保証・管理のし易さ	技術実証性									
	技術実証性	現状レベル									
作業手戻との親和性	放射線安全	地上/地下、掘削環境									
	一般作業安全	地上/地下									
作業手戻との親和性	搬入出	装置・機材、材料									
	付随作業	孔壁間処理									
	後続作業の負荷	処分坑掘削処理									
性能評価(施工後の状態変化)の確からしさ	その他	流出抑制、膨出抑制									
	流出抑制、膨出抑制										
閉鎖時の性能確認のし易さ	1体(1孔)あたりの作業時間	境界/界面の制御性									
	境界/界面の制御性	モニタリング依存度									
費用見直し	オペレータ要員数										
	装置・機材										
将来の技術・装置の拡張性	その他	準備工事・付帯設備、材料ロス									
	遠隔化										
	自動化										

図 4.2-1 2段階の階層構造で適用する最適化のイメージ（比較評価に向けて整備を進めるべき工学技術の知識ベースのイメージ）



表 4.2-2 縦置きブロック方式における緩衝材施工技術オプションの最適化の例（オプション選択における比較評価の例）

※1：本表の評価は、現時点における本研究会の一部のメンバーによる主観的なものであることに留意（適切な評価のためには更なる研究が必要）

※2：表内の丸数字（①～③）は、各評価項目における3つのオプションの優位性を順位付けしたもの（優：①>②>③：劣）

評価項目	隙間未充填（ケーシング/遮水シート設置オプション）	ペレット充填	ケイ砂充填
緩衝材流出量に基づく適用可能な施工環境（処分孔内湧水環境）【今後の研究課題】	③ 【今後の研究で見極め】	② 【今後の研究で見極め】	① 【今後の研究で見極め】
膨出特性【今後の研究課題】	③ ・鉛直方向膨出抑制効果（孔壁摩擦力）の程度など 【今後の研究で見極め】	② ・同左 【今後の研究で見極め】	① ・同左 【今後の研究で見極め】
緩衝材流出量の確からしい定量評価の実現性【今後の研究課題】	③ ・諸外国でも過大評価モデルを整理した程度	②（③に近いレベル） ・判断指標設定の考え方次第だが、界面の状況/挙動は未充填オプションに近い	① ・界面の湧水挙動を単純化できる可能性
施工性	① ・隙間充填作業が無い	③ ・狭陰部のめれた孔壁では要求精度の施工性に課題	②（①に近い） ・隙間 4cm のめれた孔壁でも施工性に大きな課題なし
経済性	① ・充填材料・装置及び作業が不要	③ ・ペレット製造費+要求精度達成のための装置導入など	②（①に近い） ・汎用装置で十分
過渡期の力学的安定性（自立・直立性、ポジション維持性）	③ ・支持材なし（自己シールまで隙間が存在）	② ・不均一な湧水場所に伴うペレットの偏膨潤	① ・懸念なし
施工品質の要求レベル（軽いほど良い）	② ・緩衝材/OP の自立/直立性維持のため、高度な施工品質を要する（底盤水平加工、処分孔真円掘削/定置） ・隙間への異物混入が許されない	③ ・充填ペレットの密度・粒径管理、充填仕上げ密度などの高度な施工品質管理を要する	① ・ケイ砂充填のみなら、施工品質管理の負荷小
閉鎖認可に係る性能確認（過渡期の確からしい性能評価）のし易さ	③ ・隙間への異物混入が許されない（孔壁落盤や緩衝材欠落など） ・緩衝材外周からの一様な湧水供給を保證できない（緩衝材の偏膨潤を誘発する可能性）	②（③に近い） ・緩衝材外周からの一様な湧水供給を保證できない（ペレットの偏膨潤⇒緩衝材の偏膨潤を誘発する可能性）	① ・緩衝材は体積拘束される ・緩衝材外周は一様な湧水供給環境
長期の性能評価・安全評価の初期条件（緩衝材の再冠水時の状態）の予測評価の確からしさ	③ ・緩衝材周りの湧水供給環境の違いや偏膨潤の発生などにより、過渡期の性能評価に不確かさが存在	② ・左記と同様に性能評価の確からしさに課題 ・但し、安全評価の面では、流出量を差し引いてもペレット充填分のベントナイト増量が期待できる	①（安全評価技術の知見による支援が必要） ・施工品質の要求レベルが低く、過渡期の緩衝材周りの湧水環境が一様なので、確からしい予測評価が可能 ・長期的にも有意な懸念は想定されない（既に緩衝材に30%のケイ砂、安全評価上はEDZの一部と扱える）
原位置測定・モニタリングの必要性（簡略化できるほど良い）	③ ・上記の施工品質や性能確認の懸念から、原位置での現物測定/確認やモニタリングが要求される可能性	②（③に近い） ・（左記同様）	① ・施工品質の要求レベルが低く、緩衝材周りの湧水環境が一様なので、原位置測定等が簡略化できる可能性

### 4.3 代替設計オプション案に基づく最適化アプローチの適用性の確認

前述した“設計の最適化に係る評価項目”の適切性を確認し、必要な見直しを行うことを目的として、研究会において複数の代替設計オプション案を考案して最適化を試行した。4.2(1)項に整理した設計の最適化に係る評価項目（素案）は、以下に整理する最適化の試行をとおして必要な見直しを加えたものである。

#### (1) 本研究会における設計の最適化の試行手順

本研究会では、以下の手順で設計の最適化の試行に取り組んだ。

手順①：比較評価元となるリファレンス方法（基本設計・仕様、施工・管理方法など）の設定

手順②：研究会メンバーの意識合わせを目的とした最適化の試行練習の実施

手順③：各メンバーによる代替設計オプションの考案と最適化の試行

最適化が複数のオプション間での比較評価が基本となることを踏まえ、本研究会では、比較評価元となるリファレンス方法（基本設計・仕様、施工・管理方法など）を「処分孔縦置き方式（パネル型処分区画）」として、代替設計オプションの比較検討を試みることにした。

比較対象となる各研究会メンバーが考案する代替設計オプションは、設計概要をイラスト化したスケッチレベルであることが想定されたが、最適化（比較評価）を試行するうえで、比較評価元となるリファレンス方法は可能な限り詳細であることが望ましいことから、最初に手順①として、NUMOの包括的技術報告書に示される設計情報（NUMO, 2021）を参考にしつつ（NUMO 包括的技術報告書の示される設計概要とは異なる部分がある）、本研究会におけるリファレンス方法を図 4.3-1 のように設定した。リファレンス方法の詳細については、別添「資料4」に整理しているので参照されたい。

また、本研究会の各メンバーが、メンバー間で整合的かつ適切なレベルで手順③を実施するには、どの程度の詳細さで代替設計オプションを考案すべきか、また、設計の最適化に係る各評価項目に対してどの様な観点でどの様なレベルで定性評価を実施すべきか、といったことがメンバー間で共有されている必要がある。手順②では、そのような意識合わせを目的として、代替設計オプションに“横置き・PEM方式”を設定してリファレンスとの比較評価を各メンバーで試行練習して意識合わせを行った（手順②の内容については割愛する）。

手順③の実施結果について、次項(2)に整理する。



力については変更できることを前提に検討を進めることとした（例えば“40年で40,000本”など）。

表 4.3-1 現行の法規制制度から要求される事項

最終処分法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 廃棄物の種類（使用済燃料の再処理後に生ずる特定放射性廃棄物）</li> <li>● 処分深度（300m 以深）</li> <li>● サイト選定プロセス（3 段階の調査）</li> </ul>
原子炉等規制法	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 処分方式で区分（地層処分＝隔離型処分）</li> </ul>
最終処分基本方針 （平成 27 年閣議決定）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 貯蔵期間：30 年～50 年間程度</li> <li>● 人工バリア<sup>1</sup>と天然バリア<sup>2</sup>を組み合わせた多重バリアシステムによって最終処分             <ul style="list-style-type: none"> <li>1 人工バリア：廃棄物のまわりに人工的に設けられる複数の障壁</li> <li>2 天然バリア：廃棄物に含まれる物質を長期にわたって固定する天然の働きを備えた地層</li> </ul> </li> <li>● 回収可能性の確保（処分施設の最終閉鎖まで）</li> </ul>
最終処分計画 （平成 20 年閣議決定）	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 処分場の規模（廃棄物の量）：40,000 本以上</li> <li>● 能力（年間処分量）：年間約 1,000 本</li> <li>● 概略スケジュール：－（詳細は割愛）</li> </ul>

表 4.3-2 代替設計オプションの考案における他の留意事項

<p>1) 同様な設計（概念）であっても、建設・操業の手順（それに伴うタイムライン）が変わるものは、それぞれを代替設計オプションの 1 つとする。</p> <p>2) 細かなレベルで多数の設計オプションや操業技術オプションが想定されるが、提案者が考える最適なオプションを選んで代替設計オプションを構築する。例えば、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 廃棄体搬送方法：レール方式／ホイール方式</li> <li>● 処分孔竖置き方式における原位置施工方法：ブロック、ペレット、吹付け・・・</li> </ul> <p>3) アクセス坑道や連絡坑道は多くの代替設計オプションで共通コンポーネントとなることが想定されるため、代替設計オプションの検討・考案では以下を分けて考えることとして、本研究会では、②に重きを置く。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>①アクセス坑道や連絡・主要坑道</li> <li>②廃棄体定置エリア（レファレンス設計では力学プラグ以遠）</li> </ul> <p>但し、②の代替設計の導入により、アクセス・連絡・主要坑道の設計に有意な影響（メリット）が見込まれる場合は、代替設計オプション概要に加味し、比較評価の際に考慮する。</p> <p>4) NUMO 包括的技術報告書に示される閉鎖後長期の安全機能に留意する。地下構成要素や人工バリアの構成、材料や組合せを変更することは可能であるが、新たな材料等を導入する際は、事業許可申請段階までに現在の材料と同等レベルの知見の整備が必要となることに留意する。</p>
---

以上のような前提条件の下で、各メンバーが考案した代替設計オプション案の概要（イメージ図）を図 4.3-2～4.3-9 に示す。処分システム全体を見据えた最適化の観点で概念レベルから大局的に代替設計を考える、或いは人工バリア周りの局所的な要素を捉えてその構成や適用する操業技術ならびに物流等への展開を考えるなど、得られた代替設計オプションは個々の委員会メンバーの思考性に応じて多種多様となっている。また、図 4.3-8 および図 4.3-9 に示す ID.13～ID.16 のように、予め処分概念（処分システムの全体構成）を構成する個別要素の組み合わせに関する体系的な整理を試み（図 4.3-10 に示すようなバリエーション分類・階層化）、個々の要素の特性の違いを評価したうえで代替設計オプション案として表現するような考え方もある。

これらの図は代替設計オプション案の概要（イメージ図）の部分抜粋紹介したものであるが、別添「資料5」には、オプション案毎に以下に示す情報を整理しているので参照されたい（その一例として、資料5から抜粋したものを図4.3-11に参考例示する）。

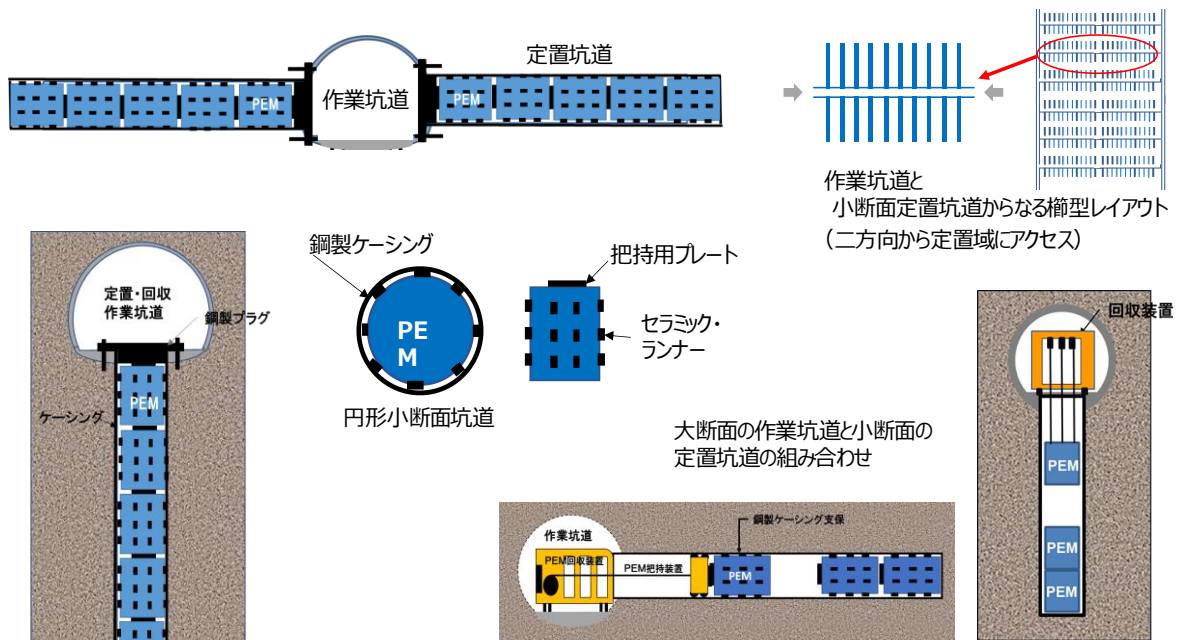
- 1) 代替設計オプション案の概要（イメージ図）
- 2) 代替設計オプション案の主な特徴（解説）
- 3) レファレンス方法との比較評価結果
- 4) 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

図4.3-2～4.3-9に示す代替設計オプション案の概要（イメージ図）から窺えるように、考案されたオプション案は、処分システムの全体構成を置き換えるようなものから、既存の設計の一部を置き換えるもの、或いは特定の操業技術の適用を念頭に置いたものなど多種多様であり、1つの代替設計オプション案に多数の個別設計要素を組み込んでいる例もある。これらの代替設計がレファレンス方法に対してどのようなメリットを有し、そのトレードオフとしてどのようなデメリットを有するかは、別添「資料5」に整理した当該代替設計オプションの特徴（解説）やレファレンス方法との比較評価結果から窺うことができる。

このような本検討会における試行的な取組や得られた情報が、今後の最適化の実践に向けた更なる検討のみならず、以下のような観点から今後の設計の具体化や開発計画の立案に資することを期待する。

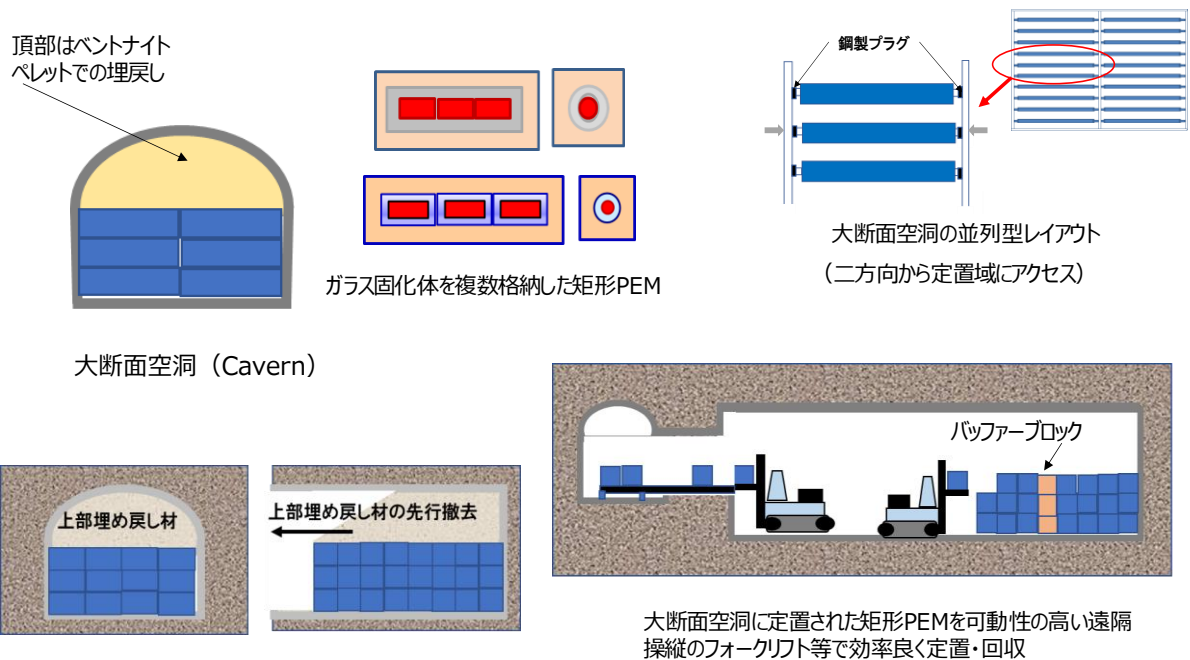
- 今回の検討をとおして得られた代替設計オプション案は多種多様なレベルのものであるが、今後の処分場設計の具体化において、大小様々なレベルで参考となる部分があることを期待する。
- 最適化（レファレンス方法との比較評価）の試行結果は、研究会メンバーの主観的な内容ではあるものの、各メンバーが有する専門性や業務経験に基づくものであり、各評価項目に対してどのような視点でどのように評価したかを把握することができる。今後、同様の評価を行う際に参照可能な評価事例として活用されることを期待する。

## ID.01 : 円形小断面坑道PEM複数定置



※ 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)

## ID.02 : 大断面・空洞矩形PEM集中定置



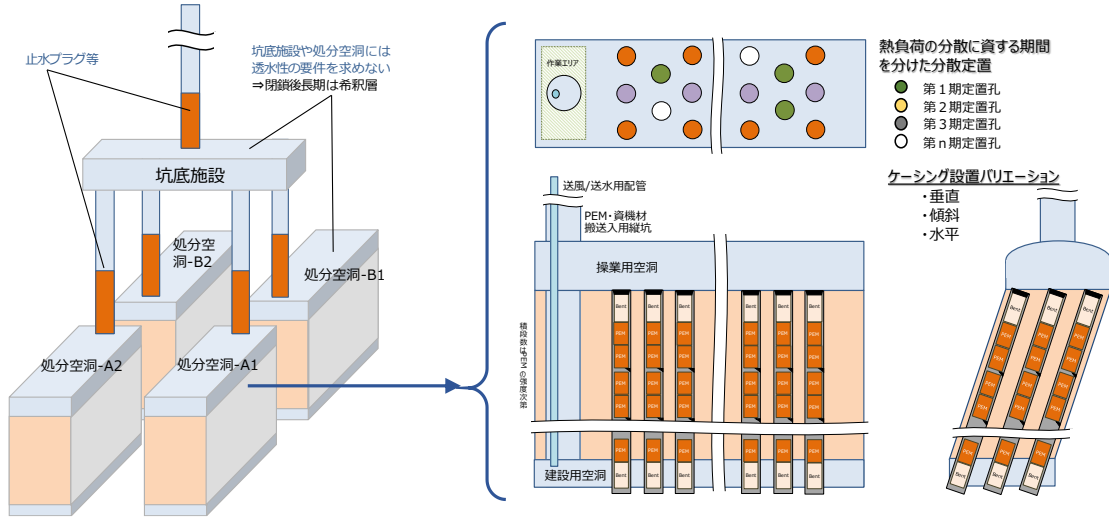
※ 回収可能性の観点では、維持期間において隣接する矩形PEMどうしの独立性が維持されることが望まれる。

図 4.3-2 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要 (イメージ図) 【1/8】



## ID.05 : 集積処分孔への水密PEM接続定置

- 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処分孔(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孔の数量を決定
  - 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処分孔施工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)



## ID.06 : 大空洞 (サイロ) へのオーバーパック集積定置

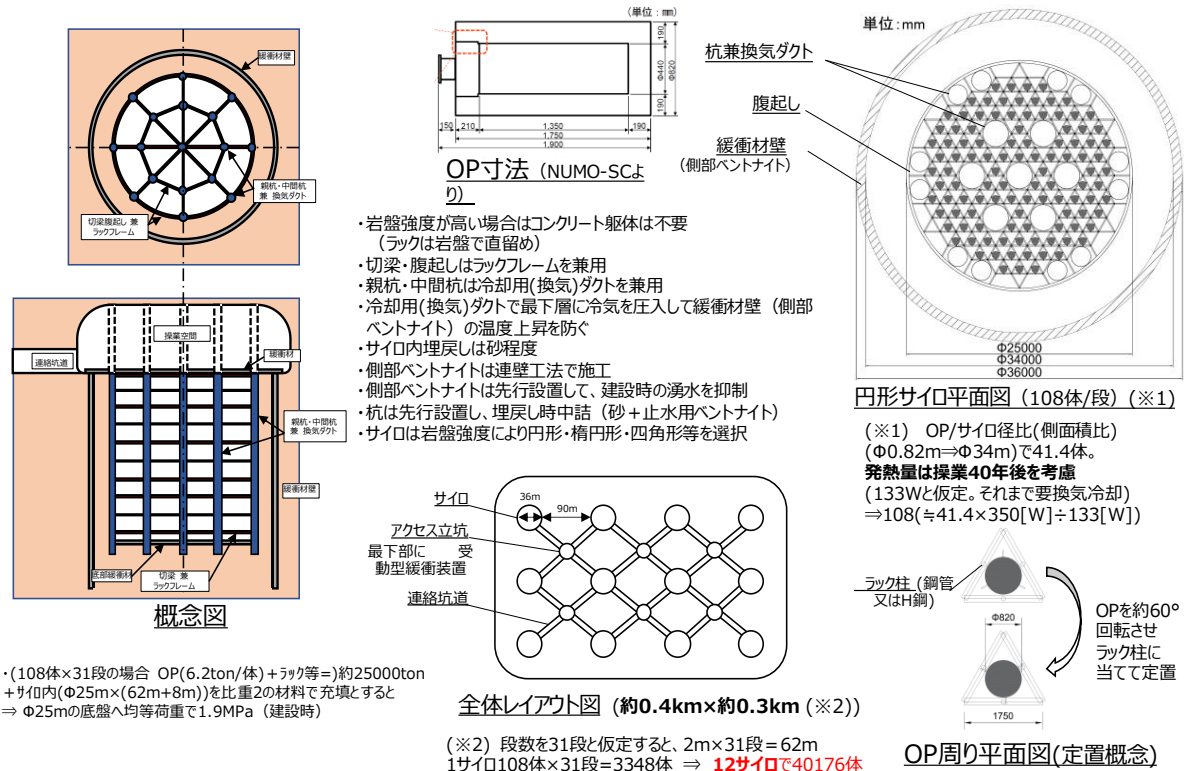
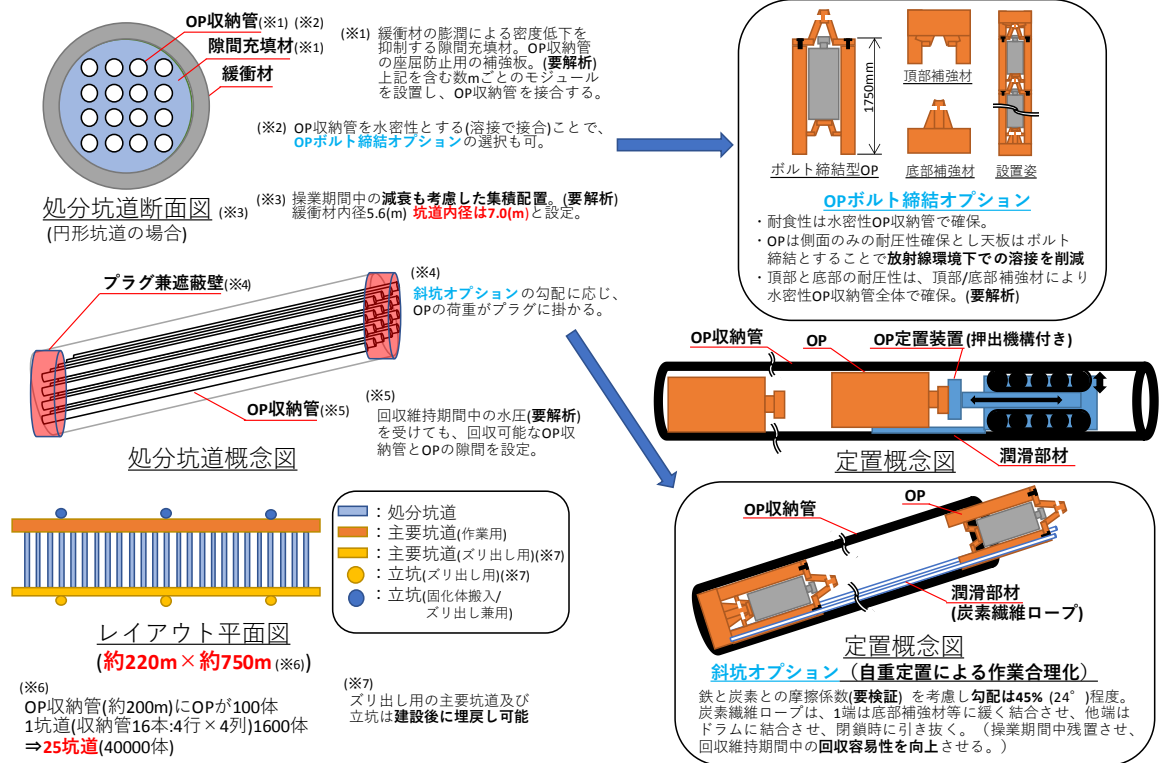


図 4.3-4 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要 (イメージ図) 【3/8】



## ID.07 : 集積処分孔へのオーバーバック接続定置



## 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

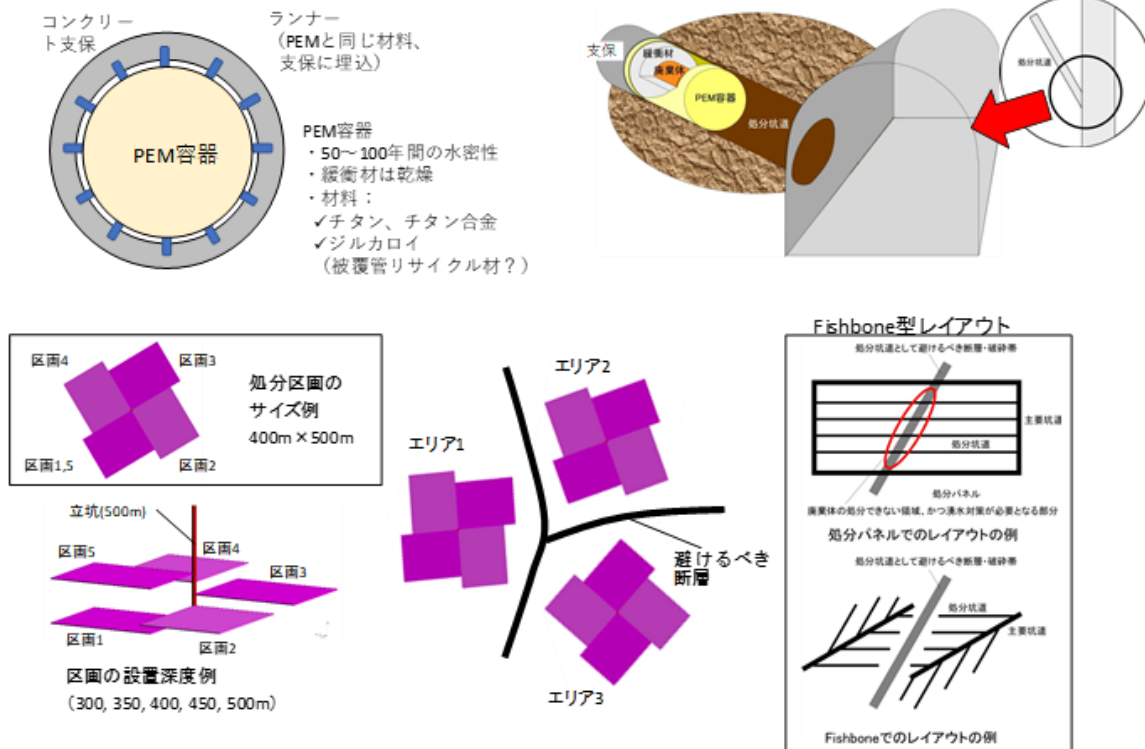
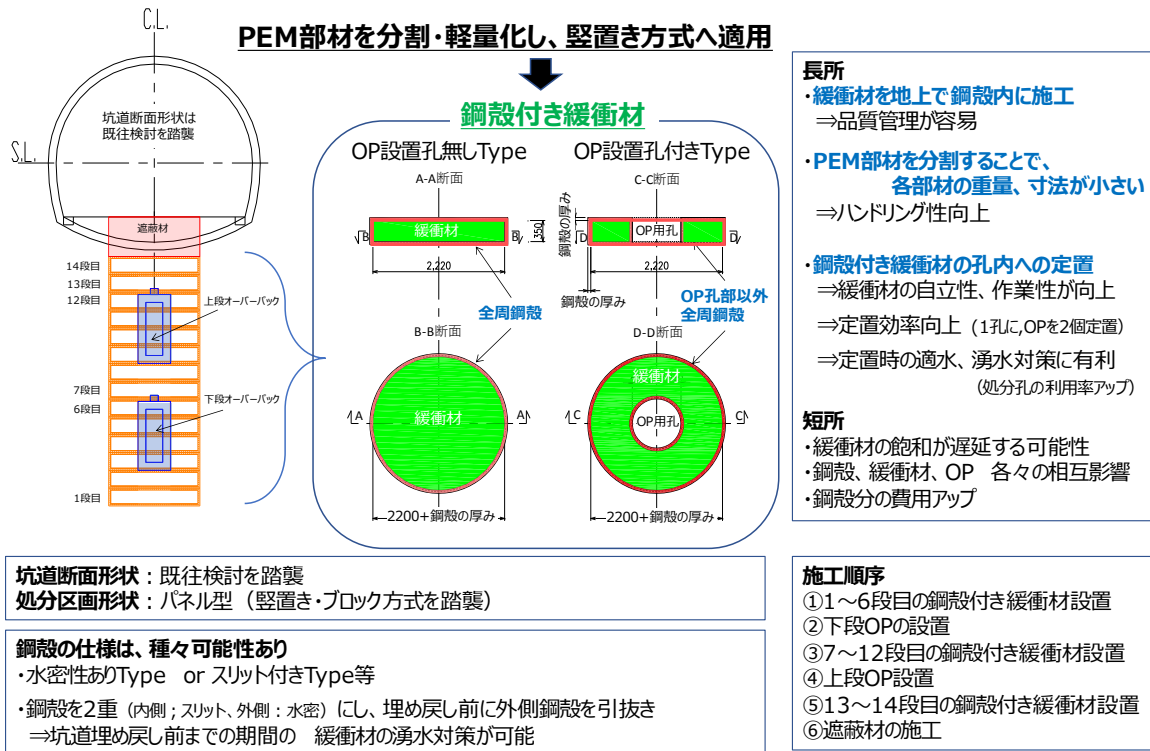


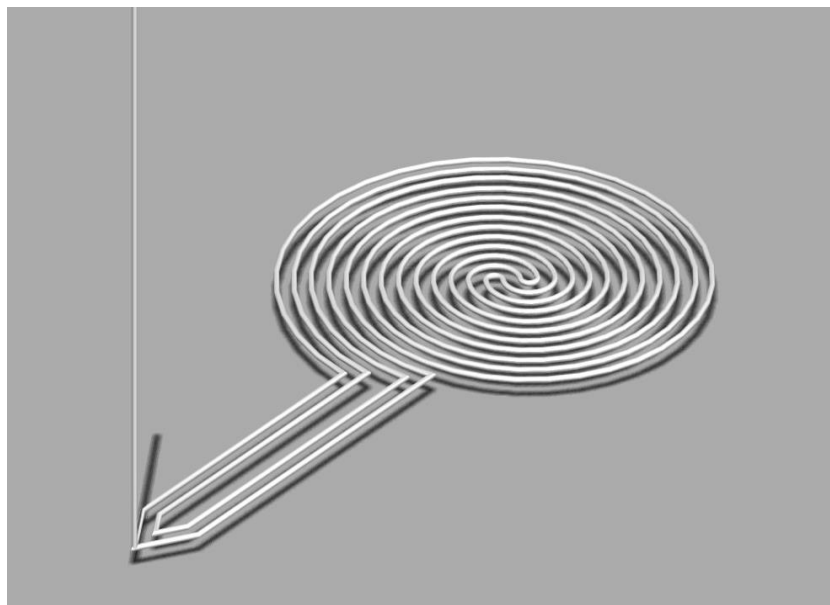
図 4.3-5 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要 (イメージ図) 【4/8】

## ID.09 : 竖置き・鋼殻付き緩衝材+OP設置方式



## ID.10 : 渦巻き型レイアウト

### 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

図 4.3-6 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要（イメージ図）【5/8】

# ID.11 : 可変型処分坑道レイアウト

## 可変型処分坑道レイアウト

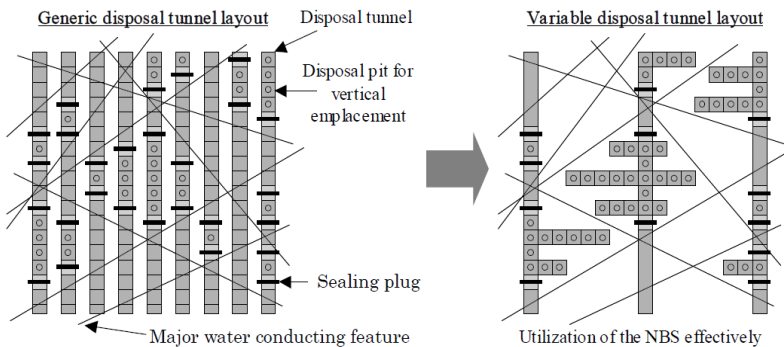
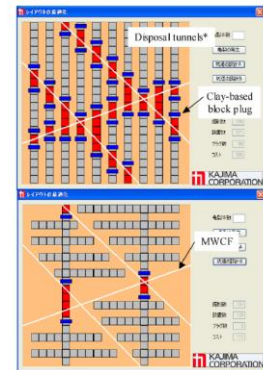


Fig.12 Image of the variable disposal tunnel layout taking into consideration the distribution of major water conducting features



\*Disposal pit for vertical emplacement  
Fig. 7. Optimization tool 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)

# 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概念

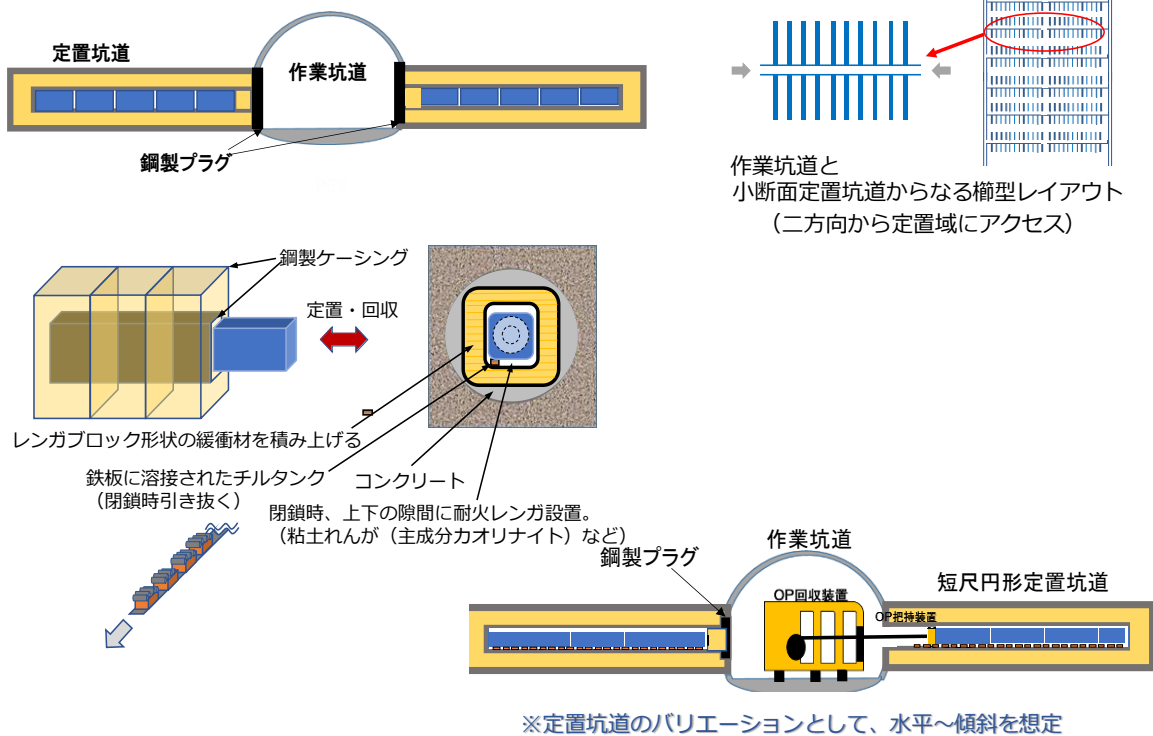


図 4.3-7 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要 (イメージ図) 【6/8】

## ID.13 : ネットワーク型施設方式

### ○概念図



### 代替設計の主な特徴

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

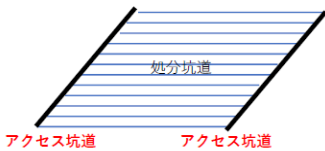


### ○地下施設の構成（選択肢）

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	集中配置型	分散配置型		
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		
パネル型	複線型	ネットエンド型	空間型	水槽型	処分孔型	処分坑道型	縦置き型	横置き型	斜め置き型
定置位置の展開		人工組立方法の選択		緩衝材製作方法の選択		<input type="radio"/> 作業時の工夫 <input type="radio"/> PEM <input type="radio"/> 放射線環境			
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				

## ID.14 : 複アクセス型施設方式

### ○概念図



### 代替設計の主な特徴

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する。

・物流の分散が可能  
・処分坑道内での2方向避難を確保

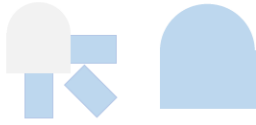
### ○地下施設の構成（選択肢）

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	集中配置型	分散配置型		
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		
パネル型	複線型	ネットエンド型	空間型	水槽型	処分孔型	処分坑道型	縦置き型	横置き型	斜め置き型
定置位置の展開		人工組立方法の選択		緩衝材製作方法の選択		<input type="radio"/> 作業時の工夫 <input type="radio"/> PEM <input type="radio"/> 放射線環境			
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				

図 4.3-8 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要（イメージ図）【7/8】

## ID.15 : 水槽型処分方式

### ○概念図



### 代替設計の主な特徴

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理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。

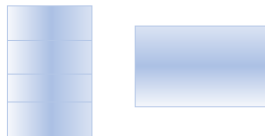
- ・均質な水理場が確保
- ・浸潤（偏膨潤）の不確実性が低減
- ・腐食環境が穏やか[PEM]容器腐食速度

### ○地下施設の構成（選択肢）

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	集中配置型	分散配置型		
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		
パネル型	複線型	デットエンド型	空間型	水槽型	処分孔型	処分坑道型	縦置き型	横置き型	斜め置き型
定置位置の展開		人工組立方法の選択		緩衝材製作方法の選択		<input type="radio"/> 作業時の工夫 <input type="radio"/> PEM <input checked="" type="radio"/> 放射線環境 水で遮蔽性向上？			
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				

## ID.16 : 地上浸潤型処分方式

### ○概念図



### 代替設計の主な特徴

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

### ○地下施設の構成（選択肢）

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	集中配置型	分散配置型		
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		
パネル型	複線型	デットエンド型	空間型	水槽型	処分孔型	処分坑道型	縦置き型	横置き型	斜め置き型
定置位置の展開		人工組立方法の選択		緩衝材製作方法の選択		<input type="radio"/> 作業時の工夫 <input checked="" type="radio"/> PEM 力学的な一体性を要求 <input type="radio"/> 放射線環境			
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				

図 4.3-9 本研究会メンバーが考案した代替設計オプション案の概要（イメージ図）【8/8】

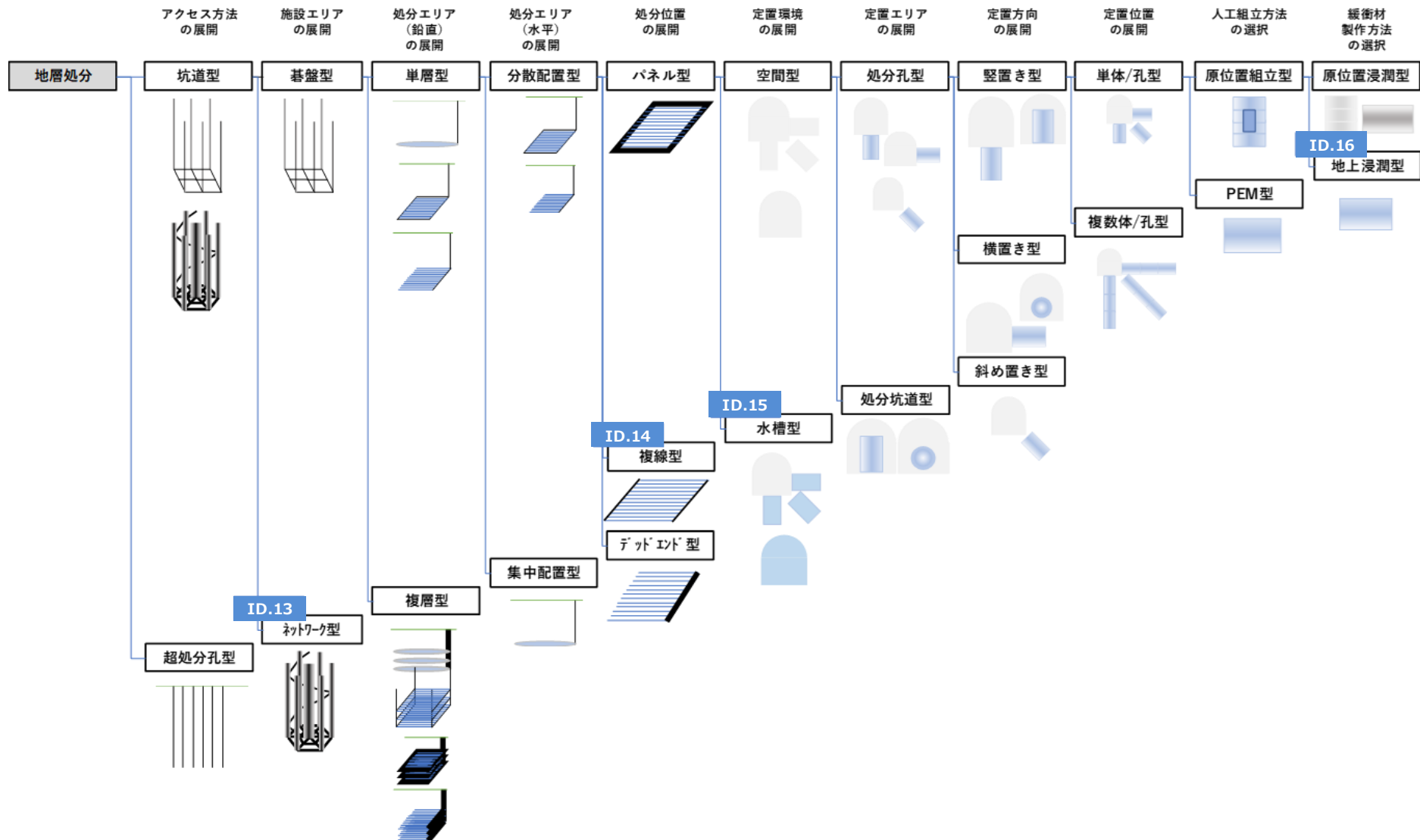
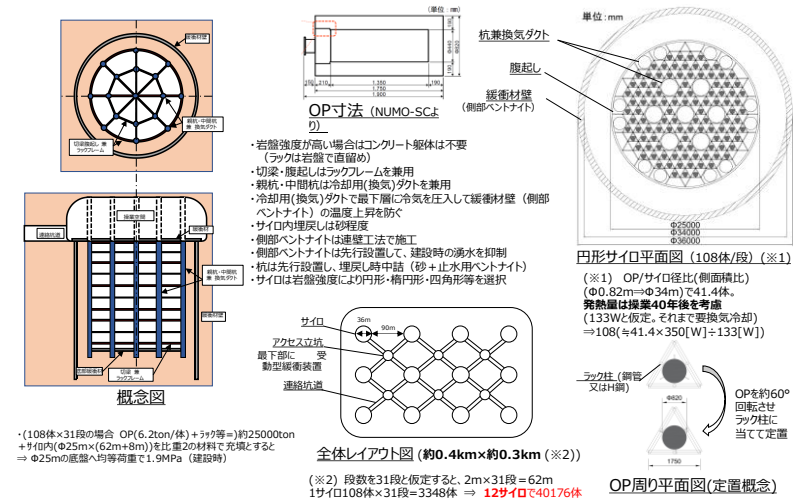


図 4.3-10 処分概念を構成する個別要素の組み合わせに関する体系的整理（前出の ID13～16 の代替設計オプション案を考案する際のベース）

# 代替設計オプション ID.06 オーバーパック・サイロ（大空洞）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徴的な違い)

#### ○地下施設の構成

- OP・集積配置型：
  - ・約0.4km×約0.3kmの面積に12式のサイロ
  - ・1サイロ：Φ36m×(高さ62m+8m)程度でOPは3348体(=108体/段の×31段) ⇒ 12式で40176体
  - ・地上からのアクセスは立坑6本 (ref.5本⇒6本)
  - ・集積定置のため、緩衝材量及び掘削量が低減
    - ⇒ 掘削量の比較(※)として、アクセス坑道以外の掘削量は、ref.(PEM) 286×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>⇒55×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(=4.54×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>×12式)で1/5程度、処分深度が浅。ref.(PEM) 15700m(=1000m×5本+10700m(斜坑))⇒7500m(=1000m×6本+1500m)
    - 緩衝材量の比較は、ref.(PEM) 49×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>⇒11×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(=0.9m<sup>3</sup>×12式)で1/4.5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。
  - ・低透水性を要求する埋戻し材はアクセス立坑のみ。⇒水密プラグは立坑本数分(6個)のみ必要。
- 力学プラグの役割として、緩衝材壁(側部ベントナイト)及び底部緩衝材の膨出抑制対策を検討。

#### ○建設時の工夫

- 側部ベントナイトは先行設置して、建設時の湧水を抑制 (水没ワ'ショでは底部ベントナイト(必要に応じ)は操業後設置)
- ラックフレームは掘削切梁兼用 (ラック総重量はOP総重量の1/5程度)
  - ⇒ 鋼材物量の比較として、(OP+PEM鋼管-固化体)と(OP+ラック重量-固化体)を比較すると、ref.(PEM)12.7ton/体 ⇒ 7.0ton/体で1/2程度
- 操業空間に支柱が必要な場合は、OP定置装置に干渉しないよう要検討

#### ○操業時の工夫

- OPの発熱量は操業期間(40年)中も冷却期間として考慮 (操業期間中は強制冷却) (水没ワ'ショでは水の自然循環で除熱)
- OPの搬送：立坑により搬送(遮へい体付き)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。
- OPの定置：OP定置装置(遮へい体付き)で吊り下げ、OPを回転させることでラック柱に当てて定置可能。
- OP落下対策：要検討 (水没ワ'ショでは水の流体抵抗で緩衝)
- 装置の異常時対応：操業空間の床を遮へい体 (水没ワ'ショでは水) とすることで、人手で保守可能。(要冷房設備)
- 遠隔操作：上記の対応により、保守以外の定置作業は遠隔操作で実施可能。
- 操業安全(放射線防護)：建設区画と操業区画はサイロごとに区分することで分離可。

#### ○回収容易性の工夫

- 隙間充填材：隙間充填材(砂等)は、閉鎖直前に一括投入することができるため除去不要。
- 回収作業日数：各立坑(6坑)の平行作業より、420日(≒40000体÷(16体/日・立坑×6立坑))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	④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)	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
②設計のロバスト性・柔軟性	④側部ベントナイト部を先行施工することでサイロ建設時の湧水影響を緩和 ⑥必要な用地面積が小さく、良好な岩盤にサイロの設置場所を選択し易い	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
③建設・操作性 (建設・操業の作業性)	④サイロの建設・OPの定置に関する作業性が良い ⑥最終閉鎖まで埋め戻さない概念のため、大空洞等での維持・補修作業が容易 ⑥搬送・定置作業を規格化し易く、遠隔操作の導入性が高い ⑥サイロの数・段数等を変更可 ⑥サイロごとに区画分けが可能 ⑥サイロ内は高放射線環境 ⑥側部ベントナイトの施工性技術に不確実性	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
④品質保証・品質管理の容易性	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑤閉鎖時に係る性能確認の確からしさ	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑥閉鎖後長期の性能評価の確からしさ	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑦閉鎖前の安全性 (放射線防護)	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑧閉鎖後長期の安全性 (放射線防護)	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑨一般労働安全	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑩環境保全	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑪回収可能性	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑫費用 (コスト) ・経済性	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿
⑬その他	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿	④⑤⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟㊱㊲㊳㊴㊵㊶㊷㊸㊹㊺㊻㊼㊽㊾㊿

### 代替設計オプションの実現に向けた技術課題

- 緩衝材壁(サイロ外周部の緩衝材)の機能割当・要件設定に資する知見拡充 (核種吸着性・膨潤による密度低下・自己シール性・クリープ変形・・・)
- ラックフレームおよびOPの形状検討 (サイロ内落下時対策 / 把持部はラック定置用と兼用等) (水没時 / 空気時)
- 安全性への影響評価 (緩衝材未配置部の性能評価・安全評価手法の開発)
- 緩衝材壁の施工方法の確立 (連壁工法の適用、膨潤対応・・・)
- 緩衝材底部・頂部の施工方法の確立 (OP定置後場合は遠隔施工、膨潤対応等・・・)
- 要求時間スケールにサイロ内構造物の健全性 (回収維持期間におけるラックの健全性等)
- 残置物の影響評価 (ラックフレーム、ダクト・・・)

図 4.3-11 代替設計オプション案の最適化試行結果 (別添「資料5」からの抜粋参考例示)

## 第5章 考察

### 5.1 研究会における検討結果のまとめ

前章までに整理したように、わが国への適用を目指した最適化アプローチについて、研究会では以下のように整理した（第4章の要約）。

#### 最適化のアプローチに係る基本的な考え方（4.1 節）

- 最適化のアプローチに係る考え方については、国際機関や主要国である程度の整理がなされており（以下表 4.1-1 の要約）、わが国でもこれらと整合性を持って進めることができる。
  - ・最適化は複数のオプションからの選択における比較評価である
  - ・最適化（比較評価）に係る評価項目は、多岐にわたる項目となり（多様な側面・価値観を伴う）、それらを構造化して体系的に扱い、評価項目間の相対的重要度を考慮する
  - ・個々の評価項目に関する評価は本質的には定性的である（定量的な評価によって裏付けることが可能なものもある）
  - ・最適化プロセスは処分場開発と歩調を合わせて進められ、各段階における利用可能な最善技術（BAT）を適用することで最適化を支援することができる
  - ・最適化によって、評価項目毎にオプション間の優劣の把握が可能となり、更に高める（劣る部分を改善する）ための課題の抽出・研究開発への展開が可能となる
- 最適化における個々の評価項目に関する評価は本質的には定性的であるが、最適化を支持する定量情報は、事業の進展とともにその重要性が高まる可能性に留意が必要である。
- 最適化の対象を「設計」および「操業技術（建設、製造・施工技術）」に区分して、2段階の階層構造で適用することが効果的である。後者の操業技術について、地下構成要素の個々に細分化して適用することで、個々の操業技術の特性に応じた詳細かつ適切な評価項目の設定が可能となる。
- 将来の処分場領域／空間に対して、どのようなスケールで設計や操業技術の最適化を行うべきかを考えておく必要がある。例えば、パネル単位や処分坑道単位で異なる設計や操業技術を適用することで、処分システム全体としての最適化が達成できる可能性も想定し得る。
- 評価項目毎の相対比較や順位付けによって複数のオプションの比較評価が可能である。また、評価項目間の相対的重要度（重み付け）を加味することで、全ての評価項目を考慮した総合評価が可能となる。相対的重要度の設定を含めて、どのような方法で最適化（比較評価によるオプション選択）を進めるべきか、開発戦略ならびに今後の規制動向やステークホルダの期待や要請などの状況に応じて柔軟に対処して行くことが望まれる。

#### 最適化に係る評価項目（4.2 節）

- 国際的な検討動向から、設計の最適化に係る評価項目として、防護の最適化のみならず多様な評価項目を窺うことができる。
- 国際的な検討動向を踏まえ、本研究会では主に工学的な観点から 13 の大項目からなる「設計の最適化に係る評価項目（素案）」を取りまとめた。その特徴的なこととして以下が挙げられる。



- ・工学的成立性という項目で一括りにできる可能性があるものの、現在のわが国の事業段階、ならびに更なる詳細な評価や課題の具体化に資することなどに留意して、「詳細設計への具体化の見通し」と「建設・操業性（適用する建設・操業技術）」を区分している。
- ・将来の安全規制対応で必要となる可能性に留意して、「品質保証・品質管理のし易さ」および「閉鎖認可に係る性能確認の確からしさ」を大項目として設定している。

○研究会では、「設計の最適化に係る評価項目」だけでなく、「操業技術の最適化に係る評価項目」への展開の概念も整理した。

○以上のような評価項目（素案）が、今後の最適化の実践に向けた更なる検討における「たたき台」として活用されることを期待する。

#### 代替設計オプション案に基づく最適化アプローチの適用性の確認（4.3 節）

○本研究会で整理した「最適化に係る評価項目」の適切性を確認することを目的として、様々なレベルの代替設計オプション案を考案して最適化を試行した。

○これらの試行をとおして、代替設計オプション案毎に以下の整理を行った。これらの情報が、今後の最適化の実践に向けた更なる検討のみならず、今後の設計の具体化や開発計画の立案における参考情報となることを期待する。

- 1) 代替設計オプション案の概要
- 2) 代替設計オプション案の主な特徴
- 3) レファレンス方法との比較評価結果
- 4) 代替設計オプションの実現に向けた技術課題を取りまとめた。

## 5.2 最適化というツールの今後の活用方法に関する考察

### (1) 実施主体の処分場設計における柔軟性の確保と段階的な詳細化

事業の進め方に関して実施主体（NUMO）は、“処分場は、文献調査、概要調査、精密調査の各段階で取得される地質環境情報や、その時点の最新の科学的知見や技術開発成果、また後述する安全評価の結果などに基づき、安全性や工学的な実現性などさまざまな因子を考慮して設計する。・・・（中略）・・・段階的な調査に応じて、処分場の仕様の例示から、概念設計、基本設計へと処分場の設計を詳細化していくなかで、これらの諸条件の変化に適応し、最適なものとなるようにしていく”としたうえで、その具体的な考え方として以下を挙げている（以下は、包括的技術報告書第2章より）（NUMO, 2021）。

- 段階的にサイト選定を進めていく過程において、安全確保や工学的な実現性などの面から首尾一貫した設計の考え方を適用できるようにするため、処分場に求められる多面的な要求事項を設計因子として取りまとめ、それらを総合的に考慮して最適化を行う。
- 多様な地質環境や、長い事業期間中における科学技術の進歩などに対応して、処分場の設計を進められるようにさまざまな設計のオプションを準備する。
- 段階的な調査対象範囲の絞り込みと空間スケールに対応して得られる情報・データに適合した詳細度で、段階的に処分場の設計を実施する。

併せて、上記のような考え方に関連する設計オプションの準備（整備）について、次のように整理している（NUMO, 2021）。

- 設計オプションとは、処分場概念、地下施設レイアウト、処分区画の配置、廃棄体の定置形態（縦置き、横置きなど）、オーバーパックや緩衝材などの人工バリア構成要素の材料などに関する設計上の多様な選択肢を指す。
- 設計オプションのなかには、今後、工学的成立性の確認といった観点で技術開発を継続していく必要があるものも含まれている。このような設計オプションの整備の考え方は、多様な条件に適合した処分場の設計の可能性を高め、BATによる地層処分の安全性に対する信頼性向上の考え方とも合致する。
- 地質環境モデルは、広域スケール、処分場スケール、パネルスケールに対して作成する。それぞれのスケールにおいて記述される地質環境情報の内容や詳細度に対応して、例えば広域スケールの地質環境モデルでは処分場の位置や地下施設の深度、処分場スケールの地質環境モデルでは地下施設のレイアウト、パネルスケールの地質環境モデルでは坑道や人工バリアなど、スケールに応じた適切な設計項目を設定することで、地質環境の調査・評価に付随する不確実性の存在に配慮して設計を進めることが可能となる。

以上のような実施主体の考え方は、本書で整理した国際的な検討動向とも整合したものであり、本研究会で取りまとめた考え方とも一致する。実施主体の考え方として述べられているように、設計オプションには大小様々なレベルのものが含まれ、また、適用する操業技術の特性や制約等を設計にフィードバックさせる場面もあり得ることを踏まえ、本研究会では、最適化の目的の1つに“課題の抽出や開発方針・計画の具体化”を挙げ、そのための手段として、「設計」と「操業技術」の最適化を分けて考えることを提案した。更に、以下に示すようなことを踏まえれば、より早い段階から最適化の考え方を導入して実践していくことで、特に操業技術の最適化をより早期かつ具体的に検討することができ、必要な開発課題を明確にすることができる。と考える。

- 地層処分という特有の環境条件に適用される工学技術（設計、製造・施工技術）の実用化（技術実証）に至るまでの段階的な開発ステップ（図 5.2-1）、ならびに開発に要する時間や研究リソースの制約等を踏まえれば、より早い段階から最適化（有望な技術オプションの絞り込みと課題の抽出）を行い、合理的な開発計画を立案したうえで着実に開発を進めていく必要がある。
- 実施主体である NUMO は、精密調査段階の後半に、地下調査施設などでの実証試験を踏まえて建設・操業・閉鎖に関する技術の実用性を確認する計画である（NUMO, 2021）。精密調査施設でそのような最終確認を行うためには、予め最終確認の対象となる技術を絞り込み、確認方法（実証試験方法や試験実施に必要な設備）を具体化して、精密調査施設の設計を含めた精密調査計画を必要な時期に策定しなければならない。そのためには、適切な開発計画に基づき、図 5.2-1 に示すような地上での研究や地下研究施設などを効果的に組み合わせた段階的な開発を着実に進めておく必要がある。

## 工学技術に関する段階的な研究開発・技術開発のステップ（想定）

（※わが国の研究推進体制と利用可能な研究施設インフラを考慮）

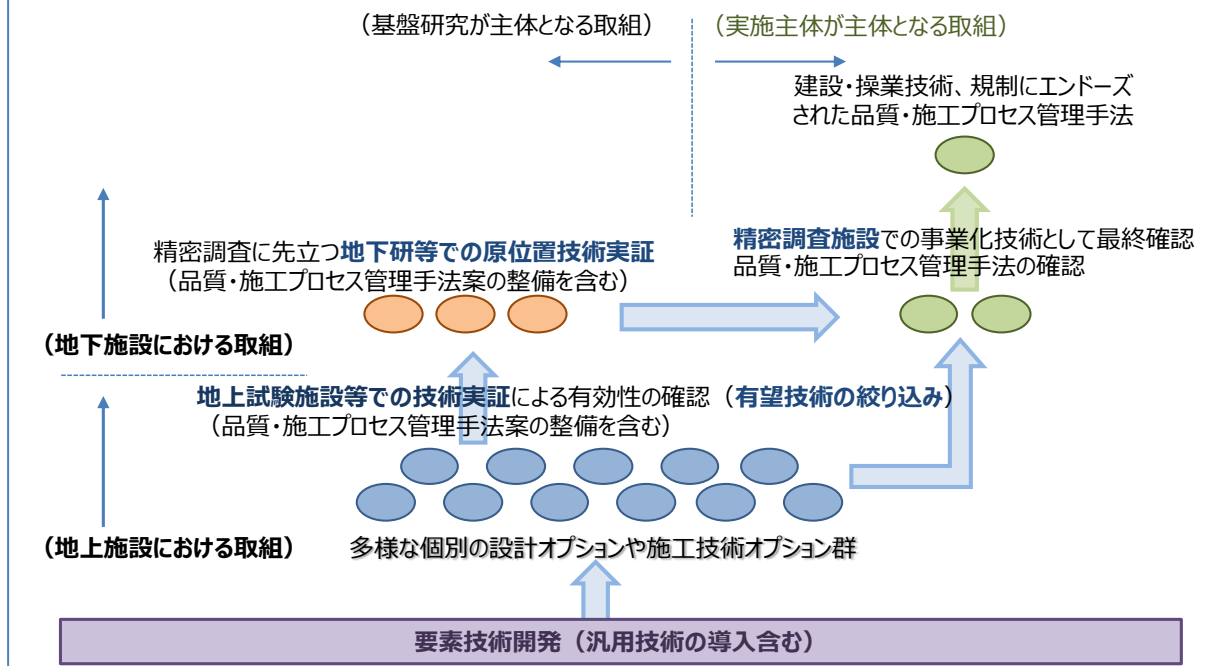


図 5.2-1 わが国の研究体制や研究資源を踏まえた工学技術の段階的な開発ステップの例

## (2) 安全規制制度への対応

原子力規制委員会「廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム」（以下、「規制検討チーム」という。）における「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について」（NRA, 2016）の取りまとめにおける検討過程において、“炉内等廃棄物は地層処分と浅地中処分の対象廃棄物の両方の特徴を併せ持っており、長期にわたる隔離を必要とする点では地層処分の対象と類似である。このため、安全確保の考え方や規制基準等についても、地層処分との共通点が多くなるものと考えられる。”との考え方が示されている（NRA, 2015）。このような安全規制制度の整備に向けた検討の考え方を踏まえれば、今後検討が進められる地層処分の安全規制制度を推し量るうえで、第二種廃棄物埋設（中深度処分）に係る規制基準等に関する検討動向を把握しておくことが有益である。

規制検討チームから示された「中深度処分についての第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則及びその解釈の骨子（案）」（NRA, 2017）では、事業許可段階における設計上の対策に関するものとして、規制要求への ALARA の概念の取り入れに関して次のような考え方を示している。

- できるだけ安定で廃棄物埋設に適した立地場所の選定や廃棄物埋設地の配置・形状の設定、放射性物質を閉じ込める人工バリアについて合理的に利用可能な優れた技術の選択を求めるなど、工学的な対策に意を尽くすことにも力点を置くことが防護の実効性をより向上させることにつながると考えられる。

○設計プロセスの中では、最低限満足すべき一定の水準（立地場所の安定性や人工バリアの閉じ込め性能）を規定した上で、設計オプション間での性能比較を行い優れた技術を選択することを求めることが考えられる。

○合理的な範囲を超えた要求とならないよう、技術選択に当たっては、敷地の範囲や、国内外における既存又は類似の技術等を考慮することが必要である。また、設計プロセスに関しては、客観的な審査が可能となるよう、事業者による設計の妥当性の説明が適切になされるとともに、前述の指標や線量拘束値を含む設計の妥当性に係る科学的な根拠の明示等について、審査基準やガイド類においてより詳細な解説を行う必要がある。

また、「人工バリアを設置する方法」について、“人工バリアは、設置される環境において技術的に施工可能なものであって、建設・施工技術及びそれを使用した設計について比較考慮を行った上で合理的に利用可能な優れた技術等によるものであること”と解説している。

以上のような骨子（案）に関する更なる検討を経て、第二種廃棄物埋設に係る許可基準規則<sup>3</sup>とその解釈<sup>4</sup>および事業規則<sup>5</sup>の改正案ならびに審査ガイド案の策定に向けて、これらに含まれるべき要求事項（中深度処分に係る規制基準等における要求事項）に対する科学的・技術的意見の募集が2020年7月に行われたところである。同要求事項には、埋設した放射性廃棄物に起因する将来の周辺の公衆全体の被ばくの可能性及び線量を合理的な範囲でできる限り低減するための最新の知見・技術による措置の検討及びそれを実現するための設計上の対策とともに当該設計に関する詳細な説明を埋設事業者に求め、そのプロセスの妥当性の確認<sup>6</sup>に重点を置くことが示されている（NRA, 2020）。

このような埋設事業に関する安全規制制度の考え方は、従来の仕様規定（規制側が規則及び告示等で仕様を規定）から性能規定化への変遷ともいえる。要求された性能を満足するならば、その方法は事業者の裁量を認めるとする性能規定の考え方は、事業者のオプション選択の柔軟性を高めるとともに、責任の明確化（規制機関と事業者）や更なる安全性の向上（埋設施設の安全性を向上させるための最新技術の取り入れなどに係る事業者の選択の柔軟性）が期待される。そのような性能規定の導入では、これまで以上に民間規格等の更なる活用等も期待される（青木他, 2020）。

以上のように、最適化は、①実施主体の事業推進における柔軟性の確保、②今後整備される安全規制への対応、更に、③効果的な開発計画の立案といった観点から重要かつ有益なツールと言える。特に、①および③の観点から、より早い段階から最適化に向けた検討や実践に取り組むことが望まれる。

<sup>3</sup> 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則

<sup>4</sup> 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈

<sup>5</sup> 核燃料物質又は核燃料物質によって汚染された物の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則

<sup>6</sup> 埋設事業者は、(1)人工バリアの設計等に係る選択肢の設定、(2)廃棄物埋設地の設置場所に係る選択肢の設定および(3)設計オプションからの最終的な設計の選定に係るプロセスを示し、原子力規制委員会はこれら設計プロセスの妥当性を確認する。

## 第6章 おわりに

本研究会における検討をとおして、最適化に係る国際的な検討動向を概観し、今後わが国で設計および操業技術（建設・施工技術）の選択に資する最適化を行ううえでの考え方や最適化に係る評価項目（素案）を整理することができた。最適化の対象を「設計」および「操業技術（建設、製造・施工技術）」に区分し、後者を地下構成要素の詳細設計や施工手順にも留意して細分化して適用することで、個々の操業技術の特性に応じた詳細かつ適切な評価項目の設定が可能となる。評価項目および項目間の重要度は、今後の技術進展、規制要件やステークホルダの関心等によって変化し得るものであるが、それらを考慮した今後の最適化の検討における「たたき台」として活用されることを期待する。

本研究会で考案した代替設計オプション案は、最適化に係る評価項目の適切性を確認する目的で考案したものではあるが、個々の研究会メンバーの尽力のもとで大小様々なレベルで代替設計オプション案を提示することができた。より現実的な設計オプションとするには、更なる検討や設計の具体化が必要となるが、本検討をとおして整理した代替設計オプション案に関する情報には、個々の要素単位で参照可能なアイデアや実現に向けた技術課題、更に最適化（比較評価）における評価項目毎のレビューの視点などが含まれている。今後のサイト選定の進展に応じた最適化の実施戦略の具体化において、次のような点についても更なる検討が必要となるが、研究会で考案したアイデアなどが今後の検討ならびに設計および建設・操業技術の具体化や高度化の一助となることを期待する。

- ・将来の処分場領域／空間に対して、どの様なスケールで設計や操業技術の最適化を行うべきか（1つの処分場に1つの設計・1つの操業技術を適用しなければならない理由はない）
- ・評価項目間の相対的重要度（重み付け）の設定を含めて、どの様な方法で最適化（比較評価によるオプション選択）を進めるべきか（特定の評価項目のみで判断を行うこともあり得る）

第5章に述べたように、複数の設計オプションや建設・操業技術オプションからの選択を支援する最適化は、次の観点から重要かつ有益なツールとなり得る。

- ・実施主体の事業推進における柔軟性の確保
- ・今後整備される安全規制への対応
- ・効果的な開発計画の立案

本研究会では主に工学技術分野の観点から検討を進めたが、今後の最適化の実践に向けた更なる検討においては、地質環境調査技術分野や安全評価技術分野の観点からの更なる検討や支援・連携、ならびにそれらとの統合が必要である。そのような点に留意しつつ、今後、関連する取組が進められることを期待する。

最後に、本研究に係る検討および取りまとめに際して、別添「資料1」に示す民間企業有志、日本原子力研究開発機構ならびに原子力発電環境整備機構の皆様より多大なご協力を賜りましたこと、改めて感謝いたします。

## 参考文献

- IAEA(2006) : IAEA Safety Standards, Safety Fundamentals No. SF-1 “Fundamental Safety Principles”
- IAEA(2011a) : IAEA Safety Standards, Specific Safety Requirements No. SSR-5, “Disposal of Radioactive Waste”
- IAEA(2011b) : IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-14, “Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste”
- IAEA(2012) : IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-23, “The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste”
- IAEA(2014) : IAEA Safety Standards, Specific Safety Guide No. SSG-31, “Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities”
- ICRP (2006) : ICRP Publication 101b, “The Optimisation of Radiological Protection - Broadening the Process”
- ICRP (2013) : ICRP Publication 122, “Radiological Protection in Geological Disposal of Long-lived Solid Radioactive Waste”
- U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2009) : 10 CFR Part 63, “DISPOSAL OF HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTES IN A GEOLOGIC REPOSITORY AT YUCCA MOUNTAIN, NEVADA”
- 青木広臣、井上亮、川崎智 (2020) : 原子力バックエンド研究 Vol.27 No.2、「総論 放射性廃棄物に関する技術基準の性能規定化及び受入れ基準導入に係る一考察」
- 核燃料サイクル機構 (現日本原子力研究開発機構 ; JAEA) (1999) : JNC TN1400 99-020~024、“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-”
- 原子力規制委員会 (NRA) (2015) : 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第 9 回会合、資料 9-1 「廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討の基本方針」
- 原子力規制委員会 (NRA) (2016) : 炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について、平成 28 年 8 月
- 原子力規制委員会 (NRA) (2017) : 第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案 ( I . 中深度処分についての第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則及びその解釈の骨子 (案))、平成 29 年 5 月
- 原子力規制委員会 (NRA) (2020) : 中深度処分に係る規制基準等における要求事項に対する科学的・技術的意見の募集について、令和 2 年 7 月
- 原子力発電環境整備機構 (NUMO) (2011) : NUMO-TR-11-01、“地層処分事業の安全確保 (2010 年度版) - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために - ”
- 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 - ”
- 日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター (JAEA;RWMC) (2020a) : 資源エネルギー庁委託事業「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 可逆性・回収可能性調査・技術高度化開発 報告書」

日本原子力研究開発機構、原子力環境整備促進・資金管理センター（JAEA;RWMC）（2020b）：  
資源エネルギー庁委託事業「平成 31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開  
発事業 地層処分施設閉鎖技術確証試験 報告書」