平成27年度

# 管理型処分技術調査等事業
# 地下空洞型処分施設機能確認試験

# 報　告　書

平成28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

本報告書は、以下の構成でとりまとめています。

第 1 章～第 6 章

なお、以下の資料を合わせて添付します。

添付資料－1～ 添付資料－ 6

本報告書は、経済産業省からの委託研究として、公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した平成 27 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設機能確認試験の成果を取りまとめたものです。

# は じ め に

地下 50m 以深の大断面の地下空洞に構築されたコンクリートの処分ピットと、その周囲を覆うベントナイトの緩衝材から構成される地下空洞型処分施設は、発電所廃棄物や TRU 廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分のための処分施設として、各種の検討がなされている。地下空洞型処分施設は、低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い放射性廃棄物を対象としていることや、地下 50m 以深の地下空洞に建設する処分施設であるため、これまでに実績のある浅地中処分施設とは異なる計画・設計・施工技術が必要とされている。また、余裕深度処分のための施設は、地層処分の人工バリアの構成と比較して部材が多く、また、長期性能を満たす高い要求性能が建設時に求められる。今後の地下空洞型処分施設の計画・設計・建設に当たっては、より現実に即した試験条件下での検討や実証試験等の積み重ねが必要とされてきている。

平成 19 年度から平成 26 年度まで経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業として、地下空洞型処分施設を模擬した実規模施設において施工試験を実施し、その施工技術を実証的に整備してきた。一方、余裕深度処分においては、処分施設閉鎖後に長期の管理が求められており、長期の管理の考え方やそのためのモニタリングが必要となっている。

本事業である「地下空洞型処分施設機能確認試験」は、こうした検討や実証試験の必要性に鑑み、大断面の地下空洞に構築される地下空洞型処分施設を対象とし、ベントナイト系材料やセメント系材料等の人工バリアの長期性能を確認するため、機能確認の考え方、モニタリング計画の検討、機能の実現性の確認等の検討を実施するものである。

本事業の成果は、同様の処分施設形態が検討されている発電所廃棄物をはじめ、TRU 廃棄物の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に、共通の基盤技術として幅広く反映可能であり、また、将来の処分施設の機能確認に対して極めて重要な情報を提供するものである。

平成 27 年度は、上記の状況を十分踏まえた上で、本事業の基本となる全体計画を策定するものである。

なお、本事業は経済産業省資源エネルギー庁の委託により実施するものである。

平成 27 年度管理型処分技術調査等事業
地下空洞型処分施設機能確認試験　報告書目次

はじめに

第 1 章 全体概要 ..... 1-1
1.1 本事業の背景と目的 ..... 1-1
1.1.1 試験の背景 ..... 1-1
1.1.2 試験の目的 ..... 1-2
1.2 本事業の概要 ..... 1-2
1.2.1 試験の概要 ..... 1-2
1.3 平成 27 年度実施概要 ..... 1-2
1.3.1 検討委員会 ..... 1-2
1.3.2 平成 27 年度の成果の概要 ..... 1-3
1.4 本報告書の構成 ..... 1-4

第 2 章 国内外の既往研究成果等の調査 ..... 2-1
2.1 検討のための前提条件の確認 ..... 2-1
2.1.1 前提条件、対象範囲、対象期間の明確化 ..... 2-1
2.1.2 モニタリングに関する用語の定義の明確化 ..... 2-6
2.2 国内外の既往の研究成果の調査 ..... 2-12
2.2.1 規制機関によるモニタリングの考え方に関する調査 ..... 2-12
2.2.2 モニタリングの規制機関の考え方に関する調査結果のまとめ ..... 2-55
2.2.3 既往のモニタリングに関する調査 ..... 2-65
2.2.4 既往のモニタリングに関する調査結果のまとめ ..... 2-160
2.2.5 ベースラインモニタリングに関する調査 ..... 2-166
2.2.6 長期計測に耐えうるセンサ技術に関する調査 ..... 2-173
2.2.7 機能確認試験の目的と考え方およびモニタリングの制約条件の整理 ..... 2-182
2.3 余裕深度処分における機能確認の在り方、実現性の調査 ..... 2-184
2.3.1 既往事例調査における機能確認の目的と考え方 ..... 2-184
2.3.2 操業期間中における機能確認試験の在り方 ..... 2-185
2.3.3 機能確認の実現性 ..... 2-188
第 2 章　参考文献 ..... 2-191

第 3 章 人工バリアの性能確認項目の調査 ..... 3-1
3.1 本章の概要 ..... 3-1
3.2 安全確保の基本概念と安全機能 ..... 3-5
3.3 余裕深度処分における考慮事項の整理 ..... 3-13

3.3.1 人工バリア部材に関する FEP リストおよび FEP マトリクス .....3-13
3.3.2 人工バリアに関して考慮すべき物理的・化学的現象.....3-17
3.3.3 考慮事項の整理 .....3-26
3.4 処分システムの状態に対する技術的検討.....3-30
3.4.1 土木学会における余裕深度処分の安全評価パラメータの検討.....3-30
3.4.2 原子力学会における浅地中ピット処分の安全評価パラメータの検討.....3-32
3.4.3 原子力学会における余裕深度処分の安全評価パラメータの検討.....3-37
3.4.4 原安機構による余裕深度処分の安全評価パラメータの検討（その１）.....3-40
3.4.5 原安機構による余裕深度処分の安全評価パラメータの検討（その２）.....3-47
3.5 処分システムの状態設定 .....3-51
3.5.1 余裕深度処分における処分システムの状態設定のための時間枠 .....3-51
3.5.2 人工バリア状態設定に係る技術的検討事例.....3-52
3.5.3 余裕深度処分における状態変遷 .....3-57
3.5.4 状態設定と安全評価シナリオとの関係.....3-59
3.5.5 基本地下水シナリオおよび変動地下水シナリオに関する設定と考え方.....3-62
3.5.6 基本ガス移行シナリオおよび変動ガス移行シナリオに関する設定と考え方.3-68
3.6 人工バリアの安全機能に関する重要パラメータの抽出 .....3-77
3.7 モニタリング期間中での値の変化の可能性 .....3-80
3.8 主要パラメータや影響因子の計測可能性.....3-82
3.9 人工バリアの安全機能に影響を与える岩盤要因 .....3-85
3.10 モニタリング結果の活用方法 .....3-87
3.10.1 既往の安全規制のモニタリングに対する考え方.....3-87
3.10.2 モニタリング結果の活用の可能性 .....3-88
3.11 モニタリング対象および項目の絞り込み.....3-92
第 3 章　参考文献.....3-93

第 4 章 機能確認試験計画の策定 .....4-1
4.1 具体的な機能確認試験計画の策定方法 .....4-1
4.2 モニタリングの前提条件の整理.....4-2
4.3 モニタリング対象施設の設定 .....4-3
4.3.1 対象施設の設定 .....4-3
4.3.2 対象施設毎の想定されるモニタリング実施期間.....4-4
4.4 モニタリング対象施設における実施可能なモニタリング .....4-6
4.4.1 実処分施設 .....4-6
4.4.2 地下模擬処分施設.....4-8
4.4.3 地上施設.....4-8
4.4.4 近傍ボーリング孔などの採水施設 .....4-8
4.4.5 地表/空中からの物理探査 .....4-9

4.4.6 各モニタリング対象施設における対応方針 ..... 4-10
4.5 モニタリングの位置付けを踏まえた技術開発課題の整理 ..... 4-12
4.5.1 埋設・保全段階における機能確認の役割 ..... 4-12
4.5.2 機能確認に係る各モニタリング方法の得失 ..... 4-13
4.5.3 技術開発課題の整理 ..... 4-19
4.6 既存施設の計測機器類及びデータの整理・活用 ..... 4-21
4.6.1 既設計測機器の現状 ..... 4-21
4.6.2 既往の挙動計測結果 ..... 4-32
4.6.3 地中無線データ通信技術 ..... 4-68
4.6.4 既設計測機器の活用方法 ..... 4-74
4.6.5 本年度の既設施設の挙動計測 ..... 4-75
4.6.6 地震計の移設 ..... 4-123
4.7 機能確認試験計画の立案 ..... 4-128
4.7.1 予備検討の試験計画の立案 ..... 4-128
4.7.2 既存施設を活用した試験計画の立案 ..... 4-146
4.7.3 新規施設を活用した試験計画（案）の立案 ..... 4-154
4.7.4 既存施設と新規施設を活用した試験計画の位置付け（まとめ） ..... 4-160
4.7.5 本業務における試験の全体工程 ..... 4-162
第 4 章 参考文献 ..... 4-164

第 5 章 既設実規模施設における施設挙動、地震時挙動評価 及びコンクリートピット等のひび割れ評価 ..... 5-1
5.1 施設・岩盤挙動計測データの分析・評価 ..... 5-1
5.1.1 坑内環境計測結果の分析評価 ..... 5-1
5.1.2 上部埋戻し材の計測結果の分析評価 ..... 5-2
5.1.3 底部低透水層の観測結果の分析 ..... 5-6
5.1.4 セメント系材料の計測結果の分析評価 ..... 5-20
5.1.5 周辺岩盤挙動計測結果の分析評価 ..... 5-28
5.2 地震計の観測データの整理と挙動分析 ..... 5-34
5.2.1 地震応答解析の検討フロー ..... 5-34
5.2.2 観測データの分析評価 ..... 5-35
5.2.3 解析による地震時の挙動の評価 ..... 5-100
5.3 ひび割れ調査の分析評価 ..... 5-180
5.3.1 ひび割れ調査の目的 ..... 5-180
5.3.2 ひび割れ調査のまとめ ..... 5-180
5.3.3 ひび割れ調査結果 ..... 5-180
5.3.4 ひび割れ評価 ..... 5-184
第 5 章 参考文献 ..... 5-195

第 6 章 まとめ .....6-1
6.1 本事業のまとめ .....6-1

おわりに

図目次

【第 1 章】

図 1.1-1　地下空洞型処分施設の概念図 ..... 1-1

【第 2 章】

図 2.1-1　IAEA の規定する処分施設の様々な期間におけるモニタリング ..... 2-2
図 2.1-2　余裕深度処分と浅地中処分、地層処分との違い ..... 2-2
図 2.1-3　各段階における処分場の概念図 ..... 2-5
図 2.1-4　余裕深度処分施設の各部材の名称 ..... 2-11
図 2.2-1　フィンランドにおける地層処分施設のコンセプト ..... 2-62
図 2.2-2　スイスにおける地層処分施設のコンセプト ..... 2-63
図 2.2-3　スウェーデンにおける地層処分のコンセプト ..... 2-63
図 2.2-4　フランスにおける地層処分のコンセプト ..... 2-64
図 2.2-5　余裕深度処分施設と地層処分施設の構成部材の違い ..... 2-162
図 2.2-6　低中レベル廃棄物処分施設（VLJ 処分場） ..... 2-166
図 2.2-7　Posiva におけるモニタリングプログラムの流れ ..... 2-167
図 2.2-8　岩盤モデル構築のフローと安全性評価までの流れ ..... 2-168
図 2.2-9　水理地質に関するレポートと核種移行解析レポートの関係 ..... 2-168
図 2.2-10　OLKILUOTO でベースラインモニタリングが行われた掘削孔の配置図 ..... 2-170
図 2.3-1　事業期間中のモニタリングと機能確認・機能確認試験の位置づけ ..... 2-187

【第 3 章】

図 3.1-1　人工バリアの安全機能に関する重要パラメータおよびモニタリング項目の抽出フロー ..... 3-3
図 3.1-2　処分システムの状態設定の考え方 ..... 3-4
図 3.2-1　余裕深度施設の人工バリア構成の例 ..... 3-5
図 3.2-2　基本的要件と各埋設段階との対応関係の再整理 ..... 3-7
図 3.2-3　基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等 ..... 3-8
図 3.2-4　基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等　その 2 ..... 3-9
図 3.3-1　FEP マトリックスの例 ..... 3-16
図 3.3-2　埋戻し後における影響要因と想定される状態（例） ..... 3-19
図 3.3-3　埋戻し後における人工バリアの状態に影響を及ぼす要因（例） ..... 3-22
図 3.3-4　ベントナイトを用いた SFL の設計概念 ..... 3-24
図 3.3-5　Nagra の中低レベル廃棄物処分施設の設計概念（上：断面、下：側面） ..... 3-25
図 3.3-6　セメント-ベントナイト相互作用の相関図 ..... 3-26

図 3.3-7　埋戻し後の人工バリアの状態に影響を及ぼす要因の相関関係図 ..... 3-29
図 3.4-1　地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ ..... 3-31
図 3.4-2　処分システムの概略図（原図を一部修正） ..... 3-32
図 3.4-3　核種移行経路のモデル概念図（原図を一部修正） ..... 3-32
図 3.4-4　概念的な評価モデル ..... 3-37
図 3.4-5　感度解析におけるモデルとパラメータの関係 ..... 3-41
図 3.5-1　モデル評価体系の概念図 ..... 3-54
図 3.5-2　確からしい条件設定におけるベントナイト系材料の透水係数変化 ..... 3-54
図 3.5-3　長期評価に存在する不確実性を考慮した場合の透水係数変化 ..... 3-55
図 3.5-4　飽和度の変化 ..... 3-56
図 3.5-5　余裕深度処分における埋設施設の状態変化の例 ..... 3-58
図 3.5-6　管理期間終了以後に係る安全評価シナリオの分類 ..... 3-59
図 3.5-7　地下水シナリオにおける核種移行評価モデル ..... 3-64
図 3.5-8　人工バリアの主要パラメータに対する感度解析 ..... 3-67
図 3.5-9　処分場におけるガス発生の影響の範囲に関する概念図 ..... 3-69
図 3.5-10　ガス影響の解析結果 ..... 3-71
図 3.5-11　ガス異常放出評価モデルの概要 ..... 3-72
図 3.5-12　ガス異常シナリオの解析結果 ..... 3-72
図 3.5-13　処分施設の状態変遷 ..... 3-73
図 3.8-1　操業イメージ（埋設施設の建設～坑道埋戻し） ..... 3-82
図 3.10-1　第二種廃棄物埋設の事業の安全規制のフレーム ..... 3-88
図 3.10-2　人工バリアの長期状態設定の考え方 ..... 3-89
図 3.10-3　データ取得項目の選定の考え方 ..... 3-91

【第 4 章】

図 4.1-1　検討手順 ..... 4-1
図 4.3-1　対象施設のイメージ ..... 4-4
図 4.3-2　対象施設の適用が想定される事業段階のイメージ ..... 4-5
図 4.4-1　実処分施設の施工イメージ ..... 4-8
図 4.5-1　施工時性能、初期性能と長期性能の関係イメージ ..... 4-12
図 4.5-2　埋設・保全段階の機能確認の役割 ..... 4-13
図 4.5-3　比抵抗計測装置（ウェンナー法）の概略図 ..... 4-14
図 4.5-4　飽和度と比抵抗の関係 ..... 4-15
図 4.5-5　Andra の中レベル廃棄物（ILW）処分坑道のセンサ設置イメージ（上下） ..... 4-16
図 4.5-6　モニタリング施設のスケールイメージ ..... 4-17
図 4.5-7　小規模モニタリング施設のイメージ ..... 4-18
図 4.6-1　設置計器数量および計測器配置（その 1） ..... 4-24

図 4.6-2　設置計器数量および計測器配置（その 2）.....4-25
図 4.6-3　設置計器数量および計測器配置（その 3）.....4-26
図 4.6-4　岩盤変位計測結果.....4-32
図 4.6-5　間隙水圧計測結果.....4-33
図 4.6-6　大気圧計測結果（試験空洞）.....4-33
図 4.6-7　底部低透水層の沈下量計測結果.....4-34
図 4.6-8　底部低透水層の土圧計測結果.....4-35
図 4.6-9　底部低拡散層の応力計測結果.....4-36
図 4.6-10　底部コンクリートピットの応力計測結果.....4-37
図 4.6-11　側部コンクリートピットの応力計測結果.....4-38
図 4.6-12　側部低拡散層の応力計測結果.....4-39
図 4.6-13　上部コンクリートピットの応力計測結果.....4-39
図 4.6-14　上部低拡散層の応力計測結果.....4-40
図 4.6-15　上部埋戻し材の沈下量計測結果.....4-41
図 4.6-16　底部低透水層の土圧と温度の関係（平成 26 年 2 月 1 日～平成 27 年 2 月 20 日）.....4-42
図 4.6-17　底部低透水層の沈下量と温度の関係（平成 26 年 2 月 1 日～平成 27 年 2 月 20 日）.....4-42
図 4.6-18　上部埋戻し材の沈下量と温度の計測結果 （平成 26 年 9 月 10 日～平成 27 年 10 月 26 日）.....4-43
図 4.6-19　上部埋戻し材の沈下量と温度の関係 （平成 26 年 9 月 10 日～平成 27 年 10 月 26 日）.....4-43
図 4.6-20　ケーブルの止水処理（側部低拡散材の例）.....4-46
図 4.6-21　坑内環境の正常計器の割合.....4-62
図 4.6-22　周辺岩盤の正常計器の割合.....4-62
図 4.6-23　底部埋戻し材の正常計器の割合.....4-63
図 4.6-24　側部埋戻し材の正常計器の割合.....4-63
図 4.6-25　奥部埋戻し材の正常計器の割合.....4-63
図 4.6-26　上部埋戻し材の正常計器の割合.....4-63
図 4.6-27　底部低透水層の正常計器の割合.....4-64
図 4.6-28　側部低透水層の正常計器の割合.....4-64
図 4.6-29　上部低透水層の正常計器の割合.....4-64
図 4.6-30　底部低拡散層の正常計器の割合.....4-65
図 4.6-31　側部低拡散層の正常計器の割合.....4-65
図 4.6-32　上部低拡散層の正常計器の割合.....4-65
図 4.6-33　底部コンクリートピットの正常計器の割合.....4-66
図 4.6-34　側部コンクリートピットの正常計器の割合.....4-66
図 4.6-35　手前部コンクリートピットの正常計器の割合.....4-66

図 4.6-36　上部コンクリートピットの正常計器の割合 ..... 4-66
図 4.6-37　区画内充てん材および上部充てん材の正常計器の割合 ..... 4-67
図 4.6-38　地中無線全体システム ..... 4-68
図 4.6-39　送信装置 ..... 4-68
図 4.6-40　受信装置 ..... 4-68
図 4.6-41　有線温度計と無線温度計の計測結果 ..... 4-69
図 4.6-42　有線間隙水圧計と無線間隙水圧計の計測結果 ..... 4-69
図 4.6-43　低周波電磁波の送信方向 ..... 4-71
図 4.6-44　解析結果と試験結果の比較 ..... 4-71
図 4.6-45　小型地中無線送信装置 A ..... 4-72
図 4.6-46　小型地中無線送信装置 B ..... 4-72
図 4.6-47　坑道に設置スペースがある場合に使用可能な受信機（市販型） ..... 4-72
図 4.6-48　ボーリングコア対応受信機 ..... 4-73
図 4.6-49　小型地中無線送信装置 C ..... 4-73
図 4.6-50　中距離無線送信装置 ..... 4-73
図 4.6-51　中継システム用の長距離無線送信装置 ..... 4-73
図 4.6-52　B-①孔の配置（試験空洞沿い縦断面図） ..... 4-80
図 4.6-53　計測坑 B の間隙水圧計の概要図 ..... 4-80
図 4.6-54　手ばかり水位計による水位測定状況 ..... 4-81
図 4.6-55　計測作業方法の概要 ..... 4-81
図 4.6-56　間隙水圧経時変化（計測坑 C、2014/10/1～2015/11/11） ..... 4-83
図 4.6-57　間隙水圧経時変化（計測坑 B、2014/10/1～2015/11/10） ..... 4-83
図 4.6-58　間隙水圧経時変化（計測坑 C、2014/10/1～2015/11/11） ..... 4-84
図 4.6-59　間隙水圧経時変化（試験空洞 D、2014/10/1～2015/11/11） ..... 4-86
図 4.6-60　間隙水圧経時変化（試験空洞 E、2014/10/1～2015/11/11） ..... 4-86
図 4.6-61　無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧 ..... 4-88
図 4.6-62　地中無線データ回収状況 ..... 4-88
図 4.6-63　地中無線計器および有線計器の設置位置 ..... 4-89
図 4.6-64　地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果 ..... 4-89
図 4.6-65　地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果 ..... 4-89
図 4.6-66　百葉箱温湿度計測結果 ..... 4-91
図 4.6-67　上部埋戻し材の沈下計測結果 ..... 4-92
図 4.6-68　上部埋戻し材の温度計測結果 ..... 4-92
図 4.6-69　岩盤変位計測結果 ..... 4-93
図 4.6-70　岩盤内間隙水圧計測結果（1／2） ..... 4-94
図 4.6-71　岩盤内間隙水圧計測結果（2／2） ..... 4-95
図 4.6-72　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日） ..... 4-96
図 4.6-73　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日） ..... 4-97

図 4.6-74　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日）.....4-98
図 4.6-75　絶縁抵抗検査の概要図.....4-102
図 4.6-76　出力特性検査の概要図（計測坑 A、C および試験空洞 D、E の例）.....4-103
図 4.6-77　出力特性検査結果の評価.....4-104
図 4.6-78　間隙水圧計の基本特性（長期安定性の定義）.....4-105
図 4.6-79　補正定格出力の算出.....4-105
図 4.6-80　出力特性検査の結果（計測坑 A）.....4-108
図 4.6-81　出力特性検査の結果（計測坑 C）.....4-108
図 4.6-82　出力特性検査の結果（試験空洞（D-1 孔））.....4-109
図 4.6-83　出力特性検査の結果（試験空洞（E-1 孔））.....4-109
図 4.6-84　出力特性検査の結果（計測坑 B）.....4-110
図 4.6-85　基準値と誤差（実測出力-補正定格出力）〔計測坑 A〕.....4-111
図 4.6-86　基準値と誤差（実測出力-補正定格出力）〔計測坑 C〕.....4-112
図 4.6-87　基準値と誤差（実測出力-補正定格出力）〔試験空洞 D-1 孔〕.....4-112
図 4.6-88　基準値と誤差（実測出力-補正定格出力）〔試験空洞 E-1 孔〕.....4-113
図 4.6-89　基準値と誤差（実測出力-補正定格出力）〔計測坑 B〕.....4-113
図 4.6-90　計測坑 A における間隙水圧継時変化.....4-115
図 4.6-91　計測坑 B における間隙水圧継時変化.....4-115
図 4.6-92　計測坑 C における間隙水圧継時変化.....4-115
図 4.6-93　試験空洞（D-1 孔）における間隙水圧継時変化.....4-116
図 4.6-94　試験空洞（E-1 孔）における間隙水圧継時変化.....4-116
図 4.6-95　センサケーブルの絶縁検査の状況.....4-117
図 4.6-96　乳白色の細粒物質の付着状況.....4-117
図 4.6-97　スイッチボックスでの模擬入力状況.....4-122
図 4.6-98　地震計設置場所の停電時リスク.....4-123
図 4.6-99　地震計の移設場所（平面図）.....4-124
図 4.6-100　地震計の移設場所（断面図）.....4-124
図 4.6-101　地震計および架台の設置図.....4-126
図 4.6-102　架台および地震計の設置状況.....4-127
図 4.7-1　機能確認ポイントと計測値.....4-128
図 4.7-2　比抵抗値と飽和度・乾燥密度の関係.....4-129
図 4.7-3　シナリオの予察解析と試験計画への反映（案）.....4-130
図 4.7-4　検討手順のイメージ.....4-131
図 4.7-5　埋設段階の解析例.....4-132
図 4.7-6　光ファイバセンサの耐久性試験イメージ.....4-133
図 4.7-7　セメントペーストからの溶出に伴う pH の経時変化.....4-133
図 4.7-8　浸潤フロントの進展状況（初期飽和度からの増分が 1%で定義）.....4-134
図 4.7-9　中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ（断面図）.....4-135

図 4.7-10　中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ（平面図）.....4-135
図 4.7-11　無線給電システムの概念と試験の例.....4-136
図 4.7-12　無線給電によるモニタリングの概念（HLW での例）.....4-137
図 4.7-13　吹付け工法による計器の設置検討例.....4-138
図 4.7-14　側部緩衝材の水平掘削と埋戻し補修例.....4-139
図 4.7-15　サンプリング方法が機能に及ぼす影響の検討イメージ.....4-140
図 4.7-16　不均質材料における供試体サイズと透水係数の関係イメージ.....4-140
図 4.7-17　実処分施設の地化学解析の結果を考慮した小規模サンプリング施設による機能確認イメージ.....4-141
図 4.7-18　飽和度変動による人工バリアの機能変化のイメージ（左図：低拡散層の Ca 溶出率、右図：低透水層の剛性）.....4-142
図 4.7-19　局所浸潤による膨潤圧分布の例.....4-142
図 4.7-20　実処分施設を対象とした機能確認の例（地震動による透水係数変化）.....4-143
図 4.7-21　プラグの設置による還元環境を人為的に模擬する方法のイメージ.....4-143
図 4.7-22　流出現象を定量評価するための試験イメージ.....4-144
図 4.7-23　流出現象を定量評価例.....4-145
図 4.7-24　流出現象の発生の有無を評価例（排水中の固相のモンモリロナイト含有率）.....4-145
図 4.7-25　既存施設の現状のイメージ.....4-146
図 4.7-26　既存施設の活用のイメージ.....4-147
図 4.7-27　既存施設に水理場制御機能を増築して活用する場合のイメージ.....4-149
図 4.7-28　既存施設に増築する際の周辺岩盤の性能評価イメージ.....4-149
図 4.7-29　既存施設に水理場制御機能のみを増築場合のイメージ（1）.....4-150
図 4.7-30　既存施設に水理場制御機能のみを増築場合のイメージ（2）.....4-151
図 4.7-31　既存施設に水理場制御機能のみを増築場合のイメージ（セメント系人工バリア）.....4-152
図 4.7-32　既存施設に水理場制御機能のみを増築場合のイメージ（低透水層）.....4-153
図 4.7-33　新規地上サンプリング施設での機能確認試験のイメージ.....4-155
図 4.7-34　新規地上ｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ施設での機能確認試験のｲﾒｰｼﾞ（複合ﾊﾞﾘｱｼｽﾃﾑの長期浸漬試験）.....4-156
図 4.7-35　新規地下サンプリング施設による機能確認試験のイメージ.....4-158
図 4.7-36　地下模擬施設でのセンサによる機能確認試験のイメージ.....4-159

【第 5 章】

図 5.1-1　坑内気温・湿度の経時変化（百葉箱温湿度計 A-①）.....5-2
図 5.1-2　沈下計計測結果.....5-4
図 5.1-3　温度計計測結果.....5-4
図 5.1-4　沈下量と温度の関係.....5-4

図 5.1-5　底部低透水層の沈下計計測結果 ..... 5-5
図 5.1-6　土圧計・沈下計設置位置図（平面図） ..... 5-7
図 5.1-7　土圧計・沈下計設置位置図（横断面図、縦断面図） ..... 5-7
図 5.1-8　底部低透水層　土圧計計測結果（鉛直方向） ..... 5-10
図 5.1-9　底部低透水層　土圧計計測結果（水平方向） ..... 5-11
図 5.1-10　H25 年度と H26 年度の土圧計計測結果比較（A 断面） ..... 5-12
図 5.1-11　土圧計測値と温度計計測値の関係（H27 年 2 月 1 日～H28 年 2 月 10 日） .. 5-13
図 5.1-12　土圧計経年変化（A断面左右、H20 年 2 月 15 日～H28 年 2 月 10 日） ..... 5-13
図 5.1-13　底部低透水層　沈下計計測結果 ..... 5-15
図 5.1-14　底部低透水層の沈下量分布（空洞軸方向） ..... 5-16
図 5.1-15　沈下計計測値と温度計計測値の関係（H27 年 2 月 1 日～H28 年 2 月 10 日） 5-16
図 5.1-16　沈下計経年変化（A断面中央） ..... 5-17
図 5.1-17　底部低透水層沈下量の計測値と解析値の比較（A断面） ..... 5-17
図 5.1-18　温度計設置位置 ..... 5-18
図 5.1-19　底部低透水層の温度経年変化 ..... 5-18
図 5.1-20　底部低透水層の温度経時変化 ..... 5-19
図 5.1-21　底部低透水層の間隙水圧経時変化 ..... 5-19
図 5.1-22　底部低透水層の計測結果（部材中央） ..... 5-21
図 5.1-23　側部低透水層の計測結果（部材中央） ..... 5-22
図 5.1-24　上部低透水層の計測結果（部材中央） ..... 5-23
図 5.1-25　底部コンクリートピットの計測結果（部材中央） ..... 5-24
図 5.1-26　側部コンクリートピットの計測結果（部材中央） ..... 5-25
図 5.1-27　手前部コンクリートピットの計測結果（部材中央） ..... 5-26
図 5.1-28　上部コンクリートピットの計測結果（部材中央） ..... 5-27
図 5.1-29　D孔岩盤変位計位置図 ..... 5-28
図 5.1-30　間隙水圧計位置図 ..... 5-29
図 5.1-31　D孔岩盤変位計経時変化図 ..... 5-31
図 5.1-32　D 孔岩盤変位計経時分布 ..... 5-31
図 5.1-33　間隙水圧経時変化（A、B 孔） ..... 5-32
図 5.1-34　間隙水圧経時変化（C、D、E 孔） ..... 5-33
図 5.2-1　検討フロー ..... 5-34
図 5.2-2　地震計設置位置 ..... 5-36
図 5.2-3　地震計設置状況回収データの仕様 ..... 5-38
図 5.2-4　気象庁発表情報（2015 年 4 月 30 日） ..... 5-40
図 5.2-5　地震計①の加速度時刻歴（2015 年 4 月 30 日） ..... 5-41
図 5.2-6　地震計②の加速度時刻歴（2015 年 4 月 30 日） ..... 5-42
図 5.2-7　地震計③の加速度時刻歴（2015 年 4 月 30 日） ..... 5-43
図 5.2-8　気象庁発表情報（2015 年 11 月 1 日） ..... 5-44

図 5.2-9　地震計①の加速度時刻歴（2015 年 11 月 1 日）.....5-45
図 5.2-10　地震計②の加速度時刻歴（2015 年 11 月 1 日）.....5-46
図 5.2-11　地震計③の加速度時刻歴（2015 年 11 月 1 日）.....5-47
図 5.2-12　気象庁発表情報（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-48
図 5.2-13　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-49
図 5.2-14　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-50
図 5.2-15　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-51
図 5.2-16　気象庁発表情報（2016 年 1 月 11 日(2)）.....5-52
図 5.2-17　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(2)）.....5-53
図 5.2-18　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(2)）.....5-54
図 5.2-19　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 1 月 11 日(2)）.....5-55
図 5.2-20　気象庁発表情報（2016 年 1 月 12 日）.....5-56
図 5.2-21　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 1 月 12 日）.....5-57
図 5.2-22　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 1 月 12 日）.....5-58
図 5.2-23　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 1 月 12 日）.....5-59
図 5.2-24　気象庁発表情報（2016 年 1 月 14 日）.....5-60
図 5.2-25　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日）.....5-61
図 5.2-26　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日）.....5-62
図 5.2-27　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 1 月 14 日）.....5-63
図 5.2-28　気象庁発表情報（2016 年 2 月 2 日）.....5-64
図 5.2-29　地震計①の加速度時刻歴（2016 年 2 月 2 日）.....5-65
図 5.2-30　地震計②の加速度時刻歴（2016 年 2 月 2 日）.....5-66
図 5.2-31　地震計③の加速度時刻歴（2016 年 2 月 2 日）.....5-67
図 5.2-32　今年度観測された地震動の震源深さとプレート境界面推定等深線の関係（[8]に加筆）.....5-69
図 5.2-33　x 方向の最大加速度比較.....5-71
図 5.2-34　y 方向の最大加速度比較.....5-71
図 5.2-35　z 方向の最大加速度比較.....5-71
図 5.2-36　鉛直方向と水平方向の最大加速度の比率（地震計①）.....5-72
図 5.2-37　鉛直方向と水平方向の最大加速度の比率と震源距離の関係（地震計①）.....5-72
図 5.2-38　加速度のフーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比（2015 年 4 月 30 日）.....5-74
図 5.2-39　加速度のフーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比（2015 年 11 月 1 日）.....5-75
図 5.2-40　加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-76
図 5.2-41　加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2016 年 1 月 11 日(2)）.....5-77

図 5.2-42　加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2016 年 1 月 12 日）
.....5-78
図 5.2-43　加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2016 年 1 月 14 日）
.....5-79
図 5.2-44　加速度のフーリエスペクトルおよびフーリエスペクトル比（2016 年 2 月 2 日）
.....5-80
図 5.2-45　コンクリート重力ダムの固有周期と堤高の関係[4].....5-81
図 5.2-46　試験空洞と KiK-net 六ヶ所の位置関係.....5-82
図 5.2-47　KiK-net 六ヶ所のボーリング柱状図[7].....5-83
図 5.2-48　KiK-net 六ヶ所と試験空洞の方位.....5-84
図 5.2-49　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2015 年 4 月 30 日）.....5-85
図 5.2-50　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2015 年 11 月 1 日）.....5-86
図 5.2-51　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-87
図 5.2-52　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2016 年 1 月 12 日）.....5-88
図 5.2-53　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2016 年 1 月 14 日）.....5-89
図 5.2-54　KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測データ（2016 年 2 月 2 日）.....5-90
図 5.2-55　最大加速度比較（4 月 30 日）.....5-92
図 5.2-56　最大加速度比較（11 月 1 日）.....5-92
図 5.2-57　最大加速度比較（1 月 11 日(1)）.....5-92
図 5.2-58　最大加速度比較（1 月 12 日）.....5-92
図 5.2-59　最大加速度比較（1 月 14 日）.....5-92
図 5.2-60　最大加速度比較（2 月 2 日）.....5-92
図 5.2-61　加速度のフーリエスペクトル（2015 年 4 月 30 日）.....5-94
図 5.2-62　加速度のフーリエスペクトル（2015 年 11 月 1 日）.....5-95
図 5.2-63　加速度のフーリエスペクトル（2016 年 1 月 11 日(1)）.....5-96
図 5.2-64　加速度のフーリエスペクトル（2016 年 1 月 12 日）.....5-97
図 5.2-65　加速度のフーリエスペクトル（2016 年 1 月 14 日）.....5-98
図 5.2-66　加速度のフーリエスペクトル（2016 年 2 月 2 日）.....5-99
図 5.2-67　解析結果と観測データのフーリエスペクトル比較（y 方向、平成 26 年度検討結果）
.....5-101
図 5.2-68　地震計①の y 方向の卓越振動数および最大加速度.....5-103
図 5.2-69　地震諸元（上から震源距離、震源深さ、マグニチュード）.....5-104
図 5.2-70　地震計①の y 方向のフーリエスペクトル.....5-105
図 5.2-71　固有値解析モデル（平成 26 年度検討）.....5-105
図 5.2-72　今年度選定した地震動の加速度の増幅処理（地震計①、y 方向）.....5-108
図 5.2-73　今年度選定した地震動の加速度の増幅処理（地震計①、z 方向）.....5-109
図 5.2-74　試験空洞および人工バリアの断面図.....5-110
図 5.2-75　地震応答解析モデル（全体）.....5-112

図 5.2-76　地震応答解析モデル（試験施設）.....5-112
図 5.2-77　試験空洞近傍の地質構造（試験空洞縦断面）.....5-113
図 5.2-78　地層分割図.....5-117
図 5.2-79　埋戻し材（セメント系）の静弾性係数と材齢の関係.....5-119
図 5.2-80　$G/G_0 \sim \gamma$ と $h \sim \gamma$ の関係（埋戻し材（土質系））.....5-120
図 5.2-81　$G/G_0 \sim \gamma$ と $h \sim \gamma$ の関係（緩衝材）.....5-121
図 5.2-82　低透水層の静弾性係数と材齢の関係.....5-122
図 5.2-83　コンクリートピットの静弾性係数と材齢の関係.....5-123
図 5.2-84　充填材の静弾性係数と材齢の関係.....5-124
図 5.2-85　上部充填材の静弾性係数と材齢の関係.....5-125
図 5.2-86　引戻し解析モデル.....5-126
図 5.2-87　フィルタ処理（水平方向）.....5-128
図 5.2-88　フィルタ処理（鉛直方向）.....5-129
図 5.2-89　引戻し解析結果（水平方向）.....5-131
図 5.2-90　引戻し解析結果（水平方向）.....5-132
図 5.2-91　レーリー減衰の減衰定数と振動数の関係.....5-134
図 5.2-92　試験施設の応答加速度（水平方向）.....5-137
図 5.2-93　試験施設の応答加速度（鉛直方向）.....5-138
図 5.2-94　試験空洞の上下端位置の相対変位（水平方向）.....5-140
図 5.2-95　試験空洞の上下端位置の相対変位（鉛直方向）.....5-140
図 5.2-96　コンクリートピットの引張応力の地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-141
図 5.2-97　コンクリートピットの圧縮応力の地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-141
図 5.2-98　コンクリートピットの引張応力の地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-142
図 5.2-99　コンクリートピットの圧縮応力の地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-142
図 5.2-100　コンクリートピットのせん断応力地震時増分（履歴最大）.....5-143
図 5.2-101　コンクリートピットのせん断応力地震時増分（履歴最小）.....5-143
図 5.2-102　コンクリートピットの引張ひずみの地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-144
図 5.2-103　コンクリートピットの圧縮ひずみの地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-144
図 5.2-104　コンクリートピットの引張ひずみの地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-145
図 5.2-105　コンクリートピットの圧縮ひずみの地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-145

図 5.2-106　コンクリートピットのせん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-146
図 5.2-107　コンクリートピットのせん断ひずみの地震時増分（履歴最小）.....5-146
図 5.2-108　低透水層の引張応力の地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-147
図 5.2-109　低透水層の圧縮応力の地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-147
図 5.2-110　低透水層の引張応力の地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-148
図 5.2-111　低透水層の圧縮応力の地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-148
図 5.2-112　低透水層のせん断応力地震時増分（履歴最大）.....5-149
図 5.2-113　低透水層のせん断応力地震時増分（履歴最小）.....5-149
図 5.2-114　低透水層の引張ひずみの地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-150
図 5.2-115　低透水層の圧縮ひずみの地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-150
図 5.2-116　低透水層の引張ひずみの地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-151
図 5.2-117　低透水層の圧縮ひずみの地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-151
図 5.2-118　低透水層のせん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-152
図 5.2-119　低透水層のせん断ひずみの地震時増分（履歴最小）.....5-152
図 5.2-120　緩衝材の引張応力の地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-153
図 5.2-121　緩衝材の圧縮応力の地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-153
図 5.2-122　緩衝材の引張応力の地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-154
図 5.2-123　緩衝材の圧縮応力の地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-154
図 5.2-124　緩衝材のせん断応力地震時増分（履歴最大）.....5-155
図 5.2-125　緩衝材のせん断応力地震時増分（履歴最小）.....5-155
図 5.2-126　緩衝材の引張ひずみの地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-156
図 5.2-127　緩衝材の圧縮ひずみの地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-156
図 5.2-128　緩衝材の引張ひずみの地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-157
図 5.2-129　緩衝材の圧縮ひずみの地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-157
図 5.2-130　緩衝材のせん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-158
図 5.2-131　緩衝材のせん断ひずみの地震時増分（履歴最小）.....5-158
図 5.2-132　緩衝材の最大せん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-159
図 5.2-133　緩衝材の最大せん断ひずみレベル.....5-159
図 5.2-134　埋戻し材の引張応力の地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-160
図 5.2-135　埋戻し材の圧縮応力の地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-160
図 5.2-136　埋戻し材の引張応力の地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-161
図 5.2-137　埋戻し材の圧縮応力の地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-161
図 5.2-138　埋戻し材のせん断応力地震時増分（履歴最大）.....5-162
図 5.2-139　埋戻し材のせん断応力地震時増分（履歴最小）.....5-162
図 5.2-140　埋戻し材の引張ひずみの地震時増分（水平方向、引張正、履歴最大）.....5-163
図 5.2-141　埋戻し材の圧縮ひずみの地震時増分（水平方向、圧縮負、履歴最小）.....5-163
図 5.2-142　埋戻し材の引張ひずみの地震時増分（鉛直方向、引張正、履歴最大）.....5-164
図 5.2-143　埋戻し材の圧縮ひずみの地震時増分（鉛直方向、圧縮負、履歴最小）.....5-164

図 5.2-144　埋戻し材のせん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-165
図 5.2-145　埋戻し材のせん断ひずみの地震時増分（履歴最小）.....5-165
図 5.2-146　埋戻し材の最大せん断ひずみの地震時増分（履歴最大）.....5-166
図 5.2-147　埋戻し材の最大せん断ひずみレベル.....5-166
図 5.2-148　試験施設の最大加速度分布の比較.....5-168
図 5.2-149　フーリエスペクトル比較（水平方向）.....5-169
図 5.2-150　フーリエスペクトル比較（鉛直方向）.....5-170
図 5.2-151　試験空洞の上下端位置の相対変位（水平方向）【再掲】.....5-172
図 5.2-152　試験空洞の上下端位置の相対変位（鉛直方向）【再掲】.....5-172
図 5.2-153　水平方向の相対変位最大時刻の変形図（変形倍率 30000 倍）.....5-173
図 5.2-154　鉛直方向の相対変位最大時刻の変形図（変形倍率 30000 倍）.....5-174
図 5.2-155　入力地震動のフーリエスペクトル.....5-175
図 5.2-156　試験施設の引張応力の地震時増分（y 方向、引張正、履歴最大）.....5-177
図 5.2-157　試験施設の圧縮応力の地震時増分（y 方向、圧縮負、履歴最小）.....5-177
図 5.2-158　試験施設の引張応力の地震時増分（z 方向、引張正、履歴最大）.....5-178
図 5.2-159　試験施設の圧縮応力の地震時増分（z 方向、圧縮負、履歴最小）.....5-178
図 5.2-160　試験施設のせん断応力地震時増分（履歴最大）.....5-179
図 5.2-161　試験施設のせん断応力地震時増分（履歴最小）.....5-179
図 5.3-1　上部低拡散層及び上部コンクリートピットひび割れ調査結果（平面図、側面図）
.....5-181
図 5.3-2　左側側部低拡散層ひび割れ調査結果（正面図）.....5-182
図 5.3-3　底部低拡散層の BTV 観察結果（深度 5.772m 付近の割れ目）.....5-183
図 5.3-4　底部低拡散層の BTV 観察結果（深度 8.646m 付近の割れ目）.....5-183
図 5.3-5　底部低拡散層の BTV 観察結果（深度 11.295m 付近の割れ目）.....5-183
図 5.3-6　上部低拡散層の温度計測結果.....5-185
図 5.3-7　上部低拡散層のモルタル応力計測結果.....5-186
図 5.3-8　上部コンクリートピットの温度計測結果.....5-187
図 5.3-9　上部コンクリートピットの応力計測結果.....5-188
図 5.3-10　側部低拡散層の温度計測結果.....5-189
図 5.3-11　側部低拡散層の応力計測結果.....5-190
図 5.3-12　底部低拡散層の温度計測結果（1／2）.....5-191
図 5.3-13　底部低拡散層の温度計測結果（2／2）.....5-192
図 5.3-14　底部低拡散層の応力計測結果.....5-193
図 5.3-15　底部低拡散層のひずみ計測結果.....5-194

表目次

【第 1 章】

表 1.3-1　平成 27 年度検討委員会実施経緯 ..... 1-5

【第 2 章】

表 2.1-1　本業務における前提条件、モニタリングの対象期間・対象範囲 ..... 2-3
表 2.1-2　本業務におけるモニタリング対象時期と対象範囲 ..... 2-4
表 2.1-3　用語の定義において調査した既往の文献 ..... 2-6
表 2.1-4　既往の文献、各国・各機関で用いられている用語の整理(1) ..... 2-7
表 2.1-5　本業務において用いる用語の定義 ..... 2-10
表 2.1-6　余裕深度処分施設の各部材の呼称 ..... 2-11
表 2.2-1　調査した文献（モニタリングの規制機関のの基準に関する調査） ..... 2-12
表 2.2-2　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（1） ..... 2-14
表 2.2-3　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（2） ..... 2-17
表 2.2-4　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（3） ..... 2-19
表 2.2-5　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（4） ..... 2-20
表 2.2-6　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（5） ..... 2-22
表 2.2-7　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（6） ..... 2-24
表 2.2-8　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（7） ..... 2-25
表 2.2-9　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（8） ..... 2-26
表 2.2-10　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（9） ..... 2-27
表 2.2-11　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（10） ..... 2-28
表 2.2-12　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（11） ..... 2-29
表 2.2-13　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（12） ..... 2-30
表 2.2-14　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（13） ..... 2-31
表 2.2-15　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（14） ..... 2-32
表 2.2-16　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（15） ..... 2-33
表 2.2-17　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（16） ..... 2-37
表 2.2-18　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（17） ..... 2-38
表 2.2-19　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（18） ..... 2-39
表 2.2-20　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（19） ..... 2-40
表 2.2-21　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（20） ..... 2-42
表 2.2-22　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（21） ..... 2-44
表 2.2-23　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（22） ..... 2-45
表 2.2-24　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（23） ..... 2-46
表 2.2-25　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（24） ..... 2-48

表 2.2-26　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（25）.....2-49
表 2.2-27　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（26）.....2-50
表 2.2-28　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（27）.....2-52
表 2.2-29　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（28）.....2-54
表 2.2-30　モニタリングの各国の規制機関における考え方の比較（その 1）.....2-56
表 2.2-31　モニタリングの各国の規制機関における考え方の比較(その 2).....2-59
表 2.2-32　調査した文献（既往のモニタリングに関する調査）.....2-65
表 2.2-33　既往のモニタリングに関する調査結果（1）.....2-67
表 2.2-34　既往のモニタリングに関する調査結果（2）.....2-71
表 2.2-35　既往のモニタリングに関する調査結果（3）.....2-76
表 2.2-36　既往のモニタリングに関する調査結果（4）.....2-82
表 2.2-37　既往のモニタリングに関する調査結果（5）.....2-98
表 2.2-38　既往のモニタリングに関する調査結果（6）.....2-103
表 2.2-39　既往のモニタリングに関する調査結果（7）.....2-108
表 2.2-40　既往のモニタリングに関する調査結果（8）.....2-112
表 2.2-41　既往のモニタリングに関する調査結果（9）.....2-122
表 2.2-42　既往のモニタリングに関する調査結果（10）.....2-134
表 2.2-43　既往のモニタリングに関する調査結果（11）.....2-137
表 2.2-44　既往のモニタリングに関する調査結果（12）.....2-140
表 2.2-45　既往のモニタリングに関する調査結果（13）.....2-141
表 2.2-46　既往のモニタリングに関する調査結果（14）.....2-142
表 2.2-47　既往のモニタリングに関する調査結果（15）.....2-143
表 2.2-48　既往のモニタリングに関する調査結果（16）.....2-144
表 2.2-49　既往のモニタリングに関する調査結果（17）.....2-145
表 2.2-50　既往のモニタリングに関する調査結果（18）.....2-146
表 2.2-51　既往のモニタリングに関する調査結果（19）.....2-149
表 2.2-52　既往のモニタリングに関する調査結果（20）.....2-151
表 2.2-53　既往のモニタリングに関する調査結果（21）.....2-153
表 2.2-54　既往のモニタリングに関する調査結果（22）.....2-154
表 2.2-55　既往のモニタリングに関する調査結果（23）.....2-155
表 2.2-56　既往のモニタリングに関する調査結果（24）.....2-156
表 2.2-57　既往のモニタリングに関する調査結果（25）.....2-158
表 2.2-58　MoDeRn 最終報告会におけるモニタリングに関するステークホルダーの考え方
.....2-161
表 2.2-59　余裕深度処分のモニタリングの目的と分類.....2-161
表 2.2-60　余裕深度処分のベントナイト系材料に関するモニタリングパラメータ.....2-163
表 2.2-61　余裕深度処分の人工バリアに影響するニアフィールドのパラメータ.....2-163
表 2.2-62　サイト選定の各段階におけるベースラインモニタリングのための掘削孔....2-169

表 2.2-63　ベースラインモニタリングで重要なパラメータ ..... 2-170
表 2.2-64　水理地質学データに関する計測頻度 ..... 2-171
表 2.2-65　岩盤力学データに関する計測頻度 ..... 2-171
表 2.2-66　長期計測に耐えうるセンサ技術において調査した既往の文献 ..... 2-173
表 2.2-67　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(1) ..... 2-174
表 2.2-68　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(2) ..... 2-175
表 2.2-69　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(3) ..... 2-176
表 2.2-70　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(4) ..... 2-177
表 2.2-71　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(5) ..... 2-178
表 2.2-72　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(6) ..... 2-179
表 2.2-73　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(7) ..... 2-180
表 2.2-74　機能確認の目的と考え方の整理 ..... 2-183
表 2.3-1　モニタリングの目的と利害関係者の関与 ..... 2-188

【第 3 章】

表 3.2-1　各過程において想定される安全確保上考慮すべき基本的要件（安全機能） ..... 3-6
表 3.2-2　基本安全機能を踏まえた人工バリアの各構成部材に求められる技術的要件 .... 3-10
表 3.2-3　基本安全機能を踏まえた人工バリアの各構成部材に求められる技術的要件 .... 3-10
表 3.2-4　閉じ込め、遮へいに係る技術的要件（埋戻しまで） ..... 3-11
表 3.2-5　移行抑制に係る技術的要件（埋戻し後） ..... 3-12
表 3.3-1　人工バリア材料に関する基本 FEP リストの例 ..... 3-15
表 3.3-2　セメント系材料（コンクリートピット、低拡散層）の透水性および拡散性に影響を及ぼす要因の抽出例 ..... 3-20
表 3.3-3　ベントナイト系材料（低透水層）の透水性および拡散性に影響を及ぼす要因の抽出例 ..... 3-21
表 3.3-4　長期安全確保のための設計、品質管理および考慮すべき項目について ..... 3-23
表 3.3-5　セメント系材料の安全機能に影響を及ぼす要因の整理 ..... 3-27
表 3.3-6　ベントナイト系材料の安全機能に影響を及ぼす要因の整理 ..... 3-28
表 3.4-1　坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験 ..... 3-31
表 3.4-2　掘削影響領域における透水性予測評価のための調査データ ..... 3-31
表 3.4-3　最大被ばく線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧 ..... 3-34
表 3.4-4　地下水中の放射性物質が移行する尾鮫沼の沼産物摂取による内部被ばくの計算に用いるパラメータ及びその数値１ ..... 3-35
表 3.4-5　地下水中の放射性物質が移行する尾鮫沼の沼産物摂取による内部被ばくの計算に用いるパラメータ及びその数値２ ..... 3-35
表 3.4-6　線量当量の計算に用いる共通パラメータ及びその数値 ..... 3-36
表 3.4-7　感度解析のための主要なパラメータの基準値 ..... 3-39
表 3.4-8　最大線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧 ..... 3-39

表 3.4-9　case a のパラメータ設定範囲 ..... 3-42
表 3.4-10　case b のパラメータ値の範囲 ..... 3-43
表 3.4-11　統計的解析結果のとりまとめ方法 ..... 3-44
表 3.4-12　統計的な処理の手法毎の感度ランキング（C-14oa の沼産物摂取の例） ..... 3-46
表 3.4-13　不確実性評価を対象としたパラメータの一覧 ..... 3-47
表 3.4-14　ベントナイト系材料の透水係数及び拡散係数の設定 ..... 3-48
表 3.4-15　セメント系材料の透水係数及び拡散係数の設定 ..... 3-49
表 3.4-16　廃棄体からの溶出率及び施設浸透水量の設定 ..... 3-49
表 3.4-17　岩、ベントナイト系材料及びセメント系材料に対する分配係数の設定 ..... 3-50
表 3.4-18　埋設地区分及び被ばく経路ごとの重要核種と重要パラメータ（地下水シナリオ） ..... 3-50
表 3.5-1　状態設定の時系列的な考え方 ..... 3-51
表 3.5-2　地層処分におけるセメント - ベントナイトの相互作用評価例(at 25 °C) ..... 3-53
表 3.5-3　解析結果のまとめ ..... 3-56
表 3.5-4　基本シナリオと変動シナリオの定義 ..... 3-60
表 3.5-5　基本シナリオ設定のために評価すべき事項 ..... 3-60
表 3.5-6　変動シナリオ設定において評価すべき変動の要因とその組合せ ..... 3-61
表 3.5-7　可能性の高い状態における処分システムの設定パラメータ ..... 3-62
表 3.5-8　可能性のある変動状態における処分システムの設定パラメータ ..... 3-63
表 3.5-9　人工バリア特性の変遷 ..... 3-65
表 3.5-10　パラメータの経時変化 ..... 3-66
表 3.5-11　ガス影響に関する解析設定 ..... 3-70
表 3.5-12　ガス移行シナリオの考え方 ..... 3-74
表 3.6-1　セメント系材料の安全評価上重要度の高いパラメータと関連項目 ..... 3-78
表 3.6-2　ベントナイト系材料の安全評価上重要度の高いパラメータと関連項目 ..... 3-79
表 3.7-1　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（低拡散層） ..... 3-81
表 3.7-2　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（コンクリートピット） ..... 3-81
表 3.7-3　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（低透水層） ..... 3-81
表 3.8-1　埋設施設の施工ステップに伴う各部材の露出状態の推移 ..... 3-83
表 3.8-2　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（低拡散層） ..... 3-84
表 3.8-3　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（コンクリートピット） ..... 3-84
表 3.8-4　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（低透水層） ..... 3-84
表 3.9-1　周辺岩盤の人工バリア安全機能への影響要因 ..... 3-86
表 3.9-2　モニタリング期間中の岩盤の測定項目 ..... 3-86
表 3.10-1　余裕深度処分における管理措置及びその管理項目 ..... 3-90

表 3.11-1　モニタリング対象およびモニタリング.....3-92

【第 4 章】

表 4.4-1　実処分施設で実施可能なモニタリング対象 .....4-7
表 4.4-2　各モニタリング対象施設の特徴 .....4-10
表 4.4-3　各モニタリング対象施設における対応方針 .....4-11
表 4.5-1　モニタリング対象施設と具体的なモニタリング方法 .....4-13
表 4.5-2　実処分場での適用を踏まえたモニタリングの技術開発課題の整理 .....4-19
表 4.6-1　既設計測機器一覧（H19 年度～H26 年度） .....4-22
表 4.6-2　試験施設構成部材の計測項目と計測方法 .....4-23
表 4.6-3　坑内環境および周辺岩盤の計測機器仕様 .....4-27
表 4.6-4　埋戻し材の計測機器仕様 .....4-28
表 4.6-5　低透水層の計測機器仕様 .....4-29
表 4.6-6　低拡散層の計測機器仕様 .....4-30
表 4.6-7　コンクリートピットの計測機器仕様 .....4-31
表 4.6-8　充てん材の計測機器仕様 .....4-31
表 4.6-9　グラフ中のイベント名称 .....4-32
表 4.6-10　計測機器の現状の整理項目 .....4-44
表 4.6-11　各部材の計測機器の現状整理図表の対応 .....4-45
表 4.6-12　坑内環境の計測機器の現状一覧 .....4-47
表 4.6-13　周辺岩盤内の岩盤変位計の現状一覧 .....4-47
表 4.6-14　周辺岩盤内の間隙水圧計の現状一覧 .....4-48
表 4.6-15　底部埋戻し材の計測機器の現状一覧 .....4-49
表 4.6-16　側部埋戻し材の計測機器の現状一覧（1/2） .....4-50
表 4.6-17　側部埋戻し材の計測機器の現状一覧（2/2） .....4-51
表 4.6-18　奥部埋戻し材の計測機器の現状一覧 .....4-52
表 4.6-19　上部埋戻し材の計測機器の現状一覧 .....4-52
表 4.6-20　底部低透水層の計測機器の現状一覧 .....4-53
表 4.6-21　側部低透水層の計測機器の現状一覧 .....4-53
表 4.6-22　上部低透水層の計測機器の現状一覧 .....4-53
表 4.6-23　底部低拡散層の計測機器の現状一覧 .....4-54
表 4.6-24　側部低拡散層の計測機器の現状一覧 .....4-55
表 4.6-25　上部低拡散層の計測機器の現状一覧 .....4-56
表 4.6-26　底部コンクリートピットの計測機器の現状一覧 .....4-57
表 4.6-27　側部コンクリートピットの計測機器の現状一覧（1/2） .....4-58
表 4.6-28　側部コンクリートピットの計測機器の現状一覧（2/2） .....4-59
表 4.6-29　手前部コンクリートピットの計測機器の現状一覧 .....4-60
表 4.6-30　上部コンクリートピットの計測機器の現状一覧 .....4-60

表 4.6-31　充てん材の計測機器の現状一覧 ..... 4-61
表 4.6-32　センサの仕様 ..... 4-69
表 4.6-33　地中無線システムの種類 ..... 4-72
表 4.6-34　既設計測器機の活用方法 ..... 4-74
表 4.6-35　実施内容 ..... 4-75
表 4.6-36　既設計器一覧 ..... 4-76
表 4.6-37　回収データの仕様 ..... 4-78
表 4.6-38　使用機器一覧 ..... 4-83
表 4.6-39　計測坑 A（A-①）の計測作業結果 ..... 4-83
表 4.6-40　計測坑 B（B-②、B-④）の計測作業結果 ..... 4-84
表 4.6-41　計測坑 C（C-①～⑤）の計測作業結果 ..... 4-85
表 4.6-42　試験空洞（D-①、D-④、D-⑥、E-①、E-④、E-⑤）の計測作業結果 ..... 4-86
表 4.6-43　計測データ整理対象項目 ..... 4-91
表 4.6-45　静的計測計器点検判定基準一覧表 ..... 4-100
表 4.6-46　間隙水圧計の仕様（計測坑 A、C および試験空洞 D、E） ..... 4-103
表 4.6-47　間隙水圧計の仕様（計測坑 B） ..... 4-103
表 4.6-48　圧力校正器の仕様 ..... 4-104
表 4.6-49　現地点検作業の実施状況 ..... 4-106
表 4.6-50　間隙水圧計の点検結果まとめ ..... 4-120
表 4.6-51　平成 27 年度の換算係数 ..... 4-121
表 4.7-1　既存施設と新規施設を活用した試験計画の位置付け ..... 4-160
表 4.7-2　既存施設、新規施設と技術課題との関係 ..... 4-161
表 4.7-3　予備検討課題の優先度 ..... 4-162
表 4.7-4　全体工程 ..... 4-163

【第 5 章】

表 5.1-1　底部低透水層の上載荷重一覧 ..... 5-8
表 5.1-2　最大土圧一覧（H27 年 2 月 1 日～H28 年 2 月 10 日） ..... 5-13
表 5.1-3　最大沈下量一覧（H27 年 2 月 1 日～H28 年 2 月 10 日） ..... 5-16
表 5.1-4　間隙水圧計計測区間一覧 ..... 5-29
表 5.2-1　設置位置選定根拠 ..... 5-36
表 5.2-2　地震計の仕様 ..... 5-37
表 5.2-3　回収データの仕様 ..... 5-39
表 5.2-4　地震動一覧 ..... 5-39
表 5.2-5　観測地震動の最大加速度一覧 ..... 5-70
表 5.2-6　鉛直方向と水平方向の最大加速度の比率と震源距離の関係（地震計①） ..... 5-72
表 5.2-7　試験施設の 3 次元的構造の特徴 ..... 5-81
表 5.2-8　KiK-net 六ヶ所の詳細[7] ..... 5-82

表 5.2-9　地震計①と KiK-net 六ヶ所（標高-96.54m）の観測地震動の最大加速度一覧. 5-91
表 5.2-10　地震諸元および観測データ（地震計①の y 方向）の整理 ..... 5-102
表 5.2-11　固有値解析結果（平成 26 年度検討） ..... 5-106
表 5.2-12　部材ごとの材料モデル ..... 5-111
表 5.2-13　解析物性値一覧 ..... 5-114
表 5.2-14　引戻し解析に用いる地盤物性値 ..... 5-115
表 5.2-15　地盤物性値（修正 R-O モデルのパラメータ） ..... 5-116
表 5.2-16　地震応答解析に用いる地盤物性値 ..... 5-117
表 5.2-17　支保工の諸元および物性値 ..... 5-118
表 5.2-18　解析に用いる支保工の物性値 ..... 5-118
表 5.2-19　埋戻し材（セメント系）の物性値 ..... 5-119
表 5.2-20　埋戻し材（土質系）の物性値 ..... 5-120
表 5.2-21　緩衝材の物性値 ..... 5-121
表 5.2-22　低透水層の物性値 ..... 5-122
表 5.2-23　コンクリートピットの物性値 ..... 5-123
表 5.2-24　充填材の物性値 ..... 5-124
表 5.2-25　上部充填材の物性値 ..... 5-125
表 5.2-26　均しコンクリートの物性値 ..... 5-125
表 5.2-27　固有値解析モデル ..... 5-133
表 5.2-28　固有値解析結果 ..... 5-133
表 5.2-29　質量比例係数 α と剛性比例係数 β ..... 5-134
表 5.2-30　図化項目一覧 ..... 5-135
表 5.2-31　解析結果一覧 ..... 5-136
表 5.2-32　最大加速度一覧 ..... 5-168

添付資料 1　現地写真 ..... 1-3
添付資料 2　既設計測設備点 ..... 2-1
添付資料 3　計測器資 ..... 3-1
添付資料 4　施設・周辺岩盤挙動計測データ ..... 4-1
添付資料 5　地震動観測データ. ..... 5-1
添付資料 6　間隙水圧計点検記 ..... 6-1

# 第1章　全体概要

## 1.1　本事業の背景と目的

### 1.1.1　試験の背景

地下 50m以深の大断面の地下空洞に構築されたコンクリートの処分ピットと、その周囲を覆うベントナイトの緩衝材から構成される地下空洞型処分施設は、発電所廃棄物やＴＲＵ廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分のための処分施設として、各種の検討がなされている。

地下空洞型処分施設は、低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い放射性廃棄物を対象としていることや、地下 50m以深の地下空洞に建設する処分施設であるため、これまでの浅地中処分施設とは異なる計画・設計・施工技術が必要とされている。また、余裕深度処分のための処分施設は、地層処分の人工バリアの構成と比較して部材が多く、また、長期性能を満たす高い要求性能が建設時に求められる。今後の地下空洞型処分施設の計画・設計・施工に当たっては、より現実に即した試験条件下での検討や実証試験等の積み重ねが必要とされている。

このような状況を受け、国の事業として平成 19 年度から 24 年度までに「地下空洞型処分施設性能確証試験」および平成 25 年度、平成 26 年度に「地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験」を実施し、大断面の地下空洞において、埋戻し材としての要求品質の確保と、合理的な施工技術、施工方法の実規模施設への適用性の確証を目的に、具体的な処分施設を模擬した実規模施設において施工試験を行い、実用に供することができる施工技術を実証的に整備してきた。

一方、余裕深度処分では処分施設閉鎖後に数百年間の管理が見込まれるため、閉鎖技術に加え、閉鎖後の長期の管理の考え方やそのためのモニタリング技術が必要となっている。

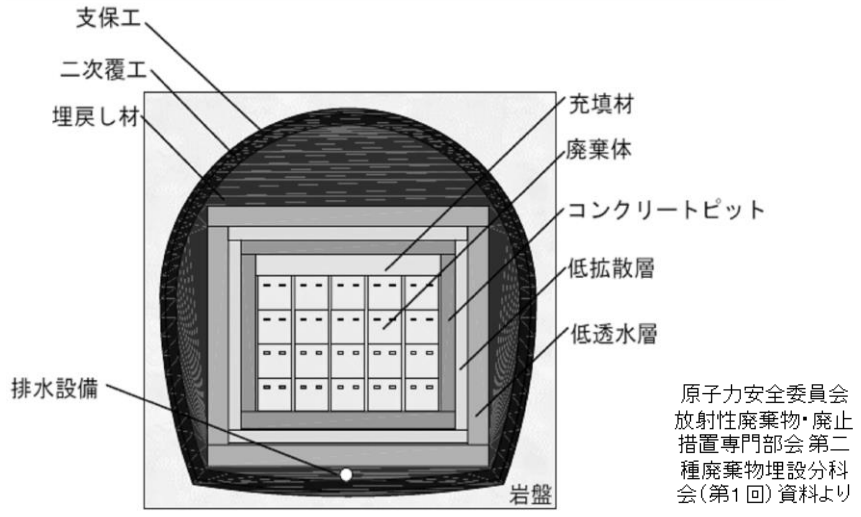



図 1.1-1 地下空洞型処分施設の概念図

### 1.1.2　試験の目的

我が国においては、これまでの原子力発電の利用に伴って既に放射性廃棄物が発生しており、その処理処分対策を着実に進める必要がある。発電所廃棄物やＴＲＵ廃棄物（地層処分相当の廃棄物を除く）等の低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分は、地下 50m以深の大断面の地下空洞型処分施設における処分を概念とした検討が行われてきている。

余裕深度処分施設は、低透水層（ベントナイト系材料、緩衝材等）、低拡散層（セメント系材料、低拡散材等）、コンクリートピット等からなり、処分施設の安全性の確保は、これら人工バリアの長期性能に多くを期待している。これに応えるためには、人工バリアの長期挙動評価の妥当性を操業段階におけるモニタリングによって確認する必要があり、モニタリング技術やその方法論の確立が重要となる。また、モニタリング技術の検討を行い、実施設への適用の確証および将来の長期の機能確認が行える見通しを得られることが重要でる。

本事業は、平成 27 年度から 5 年程度の期間で、平成 26 年度までに地下空洞内に構築した試験施設等も活用し、余裕深度処分施設の閉鎖後の長期的な管理に資するため、人工バリアや周辺岩盤の長期に亘る機能確認方法の確立を目的として実施する。

## 1.2　本事業の概要

### 1.2.1　試験の概要

本事業は、地下空洞型処分施設の長期性能を確認する検討・試験を行うものである。検討が進められている地下空洞型処分施設の概念は、図 1.1-1 示すように、地下空洞内において廃棄体周囲にセメント系材料（低拡散層、コンクリートピット、充てん材）や緩衝材（ベントナイト）で構成される人工バリア等を構築し、周辺岩盤と合わせた多重バリアシステムとして放射性核種を長期間に渡って閉じ込めるものである。

本機能確認試験では、国内外の既往研究成果等の調査および人工バリアの性能確認項目の調査の結果を反映して、低透水層等の部材の機能や周辺岩盤の状態変化を長期に亘って確認するための技術開発に関する全体計画を検討し策定する。また、全体計画に基づき、機能確認試験に係わる個別の技術開発課題について、具体的な研究開発計画を検討し、策定する。更に、青森県六ヶ所村において日本原燃（株）が掘削した試験空洞内に構築した既設の実規模施設における地震時挙動評価およびコンクリートピット等のひび割れ観察としては、既設の複数の地震計を用いた地震波を観測・挙動解析を行うとともに、実規模施設で既に計測されている低拡散層やコンクリートピットのひび割れの状況変化の継続調査を実施する。

## 1.3　平成 27 年度実施概要

### 1.3.1　検討委員会

本確認試験では、全体計画を策定し、あわせて具体的な機能確認試験計画を策定する。また、既設の実規模施設における地震時挙動評価およびコンクリートピット等のひび割れ観察を実施する。

試験の実施に当たっては、（公財）原子力環境整備促進・資金管理センター内に学識経験者等からなる「地下空洞型処分施設機能確認試験検討委員会」を設け、専門的立場からの助言を伺いつつ検討を進めた。同委員会における平成 27 年度の検討の経緯は表 1.3-1 に示すとおりである。

表 1.3-1　平成 27 年度検討委員会実施経緯

| 開　催　日 | 場　　所 | 審　議　内　容 |
|---|---|---|
| 第 1 回<br>平成 27 年 8 月 10 日 | （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター　第 1、2 会議室 | 平成 27 年度実施計画のレビュー<br>・全体計画の策定の実施計画<br>・具体的な機能確認試験計画の策定の実施計画<br>・既設の実規模施設における地震時挙動評価及びコンクリートピット等のひび割れ観察の実施計画　等 |
| 第 2 回<br>平成 27 年 11 月 5 日 | （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター　第 1、2 会議室 | 平成 27 年度試験結果の中間レビュー<br>・国内外の既往研究成果等調査の結果（中間報告）<br>・人工バリアの長期性能調査の結果（中間報告）<br>・具体的な機能確認試験計画の検討結果（中間報告） |
| 第 3 回<br>平成 28 年 2 月 25 日 | （公財）原子力環境整備促進・資金管理センター　第 1、2 会議室 | 平成 27 年度試験結果のレビュー<br>・国内外の既往研究成果等調査の結果<br>・人工バリアの長期性能調査の結果<br>・具体的な機能確認試験計画の策定の結果<br>・既設の実規模施設における地震時挙動評価及びコンクリートピット等のひび割れ観察の結果 |

### 1.3.2　平成 27 年度の成果の概要

平成 27 年度の成果の概要を以下に示す。

第 1 章の全体概要では、試験の背景と目的、試験の概要、試験の計画成果のレビューのために設置した検討委員会について記述した。

第 2 章の国内外の既往研究成果等の調査では、機能確認試験における検討の前提条件の確認として、前提条件・対象範囲・対象期間およびモニタリングに関する用語の定義を明確化した。また、国内外の既往の研究成果の調査として、規制機関によるモニタリングの考え方に関する調査、既往のモニタリングに関する調査、ベースラインモニタリングに関する調査、長期計測に耐えうるセンサ技術に関する調査、および機能確認試験の目的と考え方・モニタリングの制約条件の整理を実施した。

また、余裕深度処分における機能確認の在り方、実現性の調査として、既往事例調査における機能確認の目的と考え方、操業期間中における機能確認試験の在り方、機能確認の実現性について検討し、整理した。

第 3 章では、人工バリアの性能確認項目の調査として、安全確保の基本概念と安全機能、

余裕深度処分における考慮事項の整理、一般社団法人原子力学会、公益社団法人土木学会における処分システムの状態に対する技術的検討、処分システムの状態設定、人工バリアの安全機能に関する重要パラメータの抽出、モニタリング期間中での値の変化の可能性、主要パラメータや影響因子の計測可能性、人工バリアの安全機能に影響を与える岩盤要因、モニタリング結果の活用方法、およびモニタリング対象・項目の絞り込み等について調査し、検討・整理した。

第 4 章では、機能確認試験計画の策定として、具体的な機能確認試験計画の策定方法、モニタリングの前提条件の整理、モニタリング対象施設の設定、モニタリング対象施設における実施可能なモニタリング（実処分施設、地下模擬処分施設、地上施設、近傍ボーリング孔などの採水施設、地表/空中からの物理探査、各モニタリング対象施設における対応方針)、モニタリングの位置付けを踏まえた技術開発課題の整理、既存施設の計測機器類およびデータの活用、機能確認試験計画の立案（予備検討の試験計画の立案、既存施設を活用した試験計画の立案、新規施設を活用した試験計画（案）の立案、地下模擬施設、既存施設と新規施設を活用した試験計画の位置付け)、および本業務における試験の全体工程を検討し、取りまとめた。

第 5 章の既設実規模施設における施設挙動、地震時挙動評価及びコンクリートピット等のひび割れ評価では、施設・岩盤挙動計測データの分析・評価として、坑内環境計測結果の分析評価、上部埋戻し材の計測結果の分析評価、底部低透水層の観測結果の分析、セメント系材料の計測結果の分析評価、および周辺岩盤挙動計測結果の分析評価を実施した。また、地震計の観測データの整理と挙動分析として、地震応答解析のフローを検討、 観測データの分析評価（計器設置概要、地震動観測データ、観測データの分析評価)、解析による地震時の挙動の評価（解析条件、解析結果、分析評価）を実施した。また、ひび割れ調査の分析評価として、ひび割れ調査結果に基づき、昨年度までのひび割れと比較・検討し、ひび割れの状態を評価した。さらに、既設施設の挙動計測（既設計器の計測データ回収、地震計のメンテナンスおよび計測データの回収など)、計測データの整理、計測システムの保守・点検、地震計の移設等を実施した。

第 6 章のまとめでは、平成 27 年度の機能確認試験の検討成果を取りまとめた。

## 1.4　本報告書の構成

本報告書の構成は、以下のとおり。

第 1 章　全体概要
第 2 章　国内外の既往研究成果等の調査
第 3 章　人工バリアの性能確認項目の調査
第 4 章　機能確認試験計画の策定
第 5 章　既設実規模施設における施設挙動、地震時挙動評価及びコンクリートピット等のひび割れ評価
第 6 章　まとめ

添付資料

添付資料 1.　現地写真
添付資料 2.　既設計測設備点検
添付資料 3.　計測器資料
添付資料 4.　施設・周辺岩盤挙動計測データ
添付資料 5.　地震動観測データ
添付資料 6.　間隙水圧計点検記録
添付資料 7.　コンクリートピット昇降設備・上部安全設備の維持管理

# 第2章　国内外の既往研究成果等の調査

## 2.1　検討のための前提条件の確認

高レベル放射性廃棄物の地層処分やTRU廃棄物処分におけるモニタリングについては、国内外においてこれまでに多くの検討が行われているが、それぞれの国や機関が対象とする廃棄物種類や処分場概念、実施期間、管理方法等が異なることから、モニタリングの考え方に一部相違が見られる。本業務において余裕深度処分のモニタリングについて検討するにあたり、そのような国内外の事例等を参考とすることから、検討の前提条件、対象範囲・期間はもとより、使用する用語の意味についても明確にすることが必要であると考える。

本章では、本業務の前提条件、対象範囲・期間の明確化及び用語の定義を明確化する。

### 2.1.1　前提条件、対象範囲、対象期間の明確化

坑道埋戻し（閉鎖）後の維持管理を必要としない地層処分等の概念に対し、地表から深さ50m以上の地下に廃棄物埋設地を設置する余裕深度処分では坑道埋戻し後 300～400 年間に亘り管理期間が設けられている。このように処分場概念が異なるため、地層処分等と余裕深度処分ではモニタリングに求められる項目が異なると考えられることから、業務を実施するにあたり、検討の前提条件、対象範囲、対象期間等を明確化する。

先ず、IAEAでは放射性廃棄物処分施設のモニタリングに関する個別安全指針（SSG-31）において、処分施設の様々な期間に対応したモニタリングについて図 2.1-1 のように定めている[1]。すなわち、操業前期間はベースラインモニタリングを実施し、操業期間中は３つのモニタリング（施設完成時のモニタリング、操業時のモニタリング、閉鎖のためのモニタリング）を実施する。更に、閉鎖後期間は閉鎖後モニタリングを実施すると定義している。また、余裕深度処分は、定置する深さ、定置する施設断面の大きさが、浅地中処分、地層処分とは異なっている。3 つの処分方法の違いを図 2.1-2 に示す。

ここで、ベースラインモニタリングは、各処分施設において施設エリアが擾乱を受ける前に実施するものであり、それぞれの施設の深さ・構造が異なるものの、調査する項目としては、母岩の地下水流動場（物質の特性、地下水分布、動水勾配等）、地下水の地球科学的特性（酸化還元、塩度、主要元素の濃度、自然放射性核種の含有量等）、母岩の鉱物学、力学的特性、母岩の不連続面の特性調査、地下水、地表水、大気、土壌及び堆積物並びに動植物における自然放射能のレベル等を調査するもので、各処分施設においてほぼ共通していると考えられる。したがって、余裕深度処分施設に関する機能確認試験の検討においては、ベースラインモニタリングを対象外とし、余裕深度処分施設の操業期間、閉鎖後期間を対象とする。同様に、各処分施設においてほぼ共通している地表環境のモニタリングも対象外とする。

ただし、ベースラインモニタリングの実施内容は余裕深度処分施設の操業期間、閉鎖後期間のモニタリング内容を検討するうえでの参考情報になると考えられることから、その詳細について

は、2014 年に地層処分施設の建設許可を取得したフィンランドの実施主体である Posiva の事例を「2.2.2 既往のモニタリングに関する調査」において例示する。

また、施設建設地の岩盤のモニタリングについても、ファーフィールドの天然バリアを対象とするものと、ニアフィールドの EDZ（Engineered Damage Zone: 岩盤の掘削等により空洞の周辺に発生するゆるみ領域）を対象とするものがあるが、ファーフィールドの天然バリアで調査する項目は、母岩における機械的擾乱（応力場、変形、亀裂）、水力学的擾乱（透水性、水圧、飽和度等）、地球化学的擾乱（間隙水及び鉱物学、pH 値、酸化還元値、保持特性、生物学的変化等）、熱的擾乱（温度分布、温度分布から得られる熱伝導率等）であり、各処分施設においてほぼ共通であることからファーフィールドの天然バリアのモニタリングは対象外とし、余裕深度処分施設のニアフィールドの EDZ 領域を対象とする。

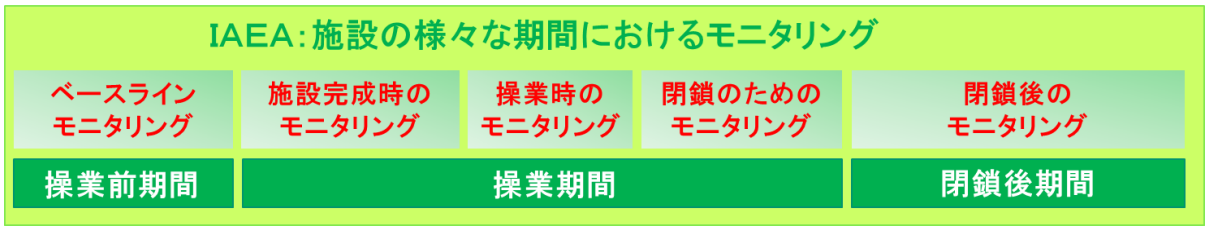
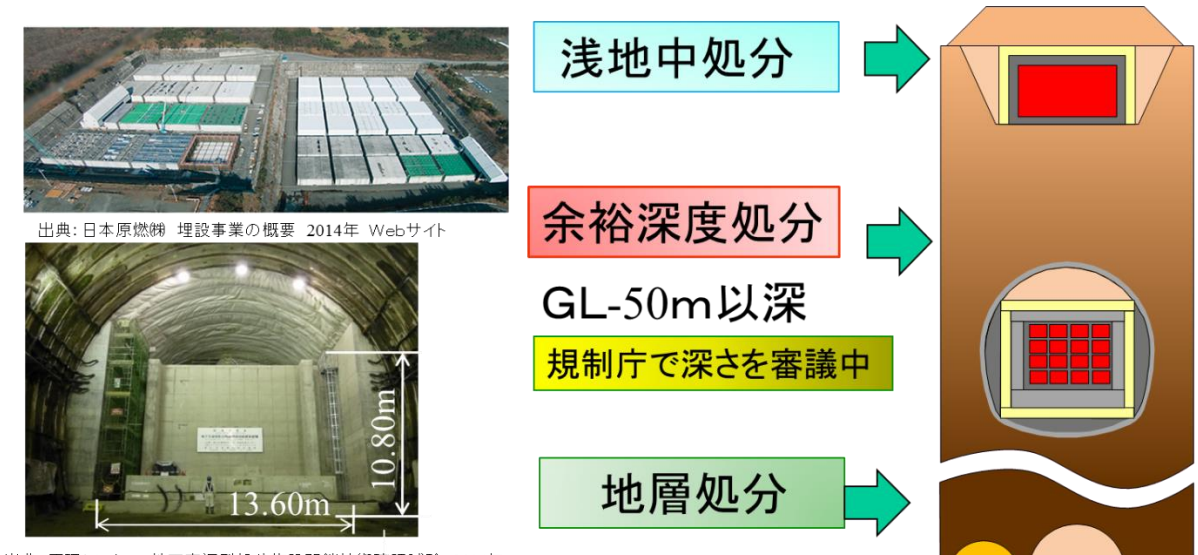



図 2.1-1　IAEA の規定する処分施設の様々な期間におけるモニタリング




| 対象 | 余裕深度 | 地層処分 |
|---|---|---|
| 深度 | 50m以深 | 300m以深 |
| 断面 | 大断面 | 小断面 |

図 2.1-2 余裕深度処分と浅地中処分、地層処分との違い

本業務における、前提条件、モニタリングの対象時期及び対象範囲を表 2.1-1、表 2.1-2 に示す。

なお、本表においては、上述した余裕深度処分施設の「操業期間」は「建設段階および埋設段階」、「閉鎖後期間」は「保全段階」に言い換えることとした。

表 2.1-1　本業務における前提条件、モニタリングの対象期間・対象範囲

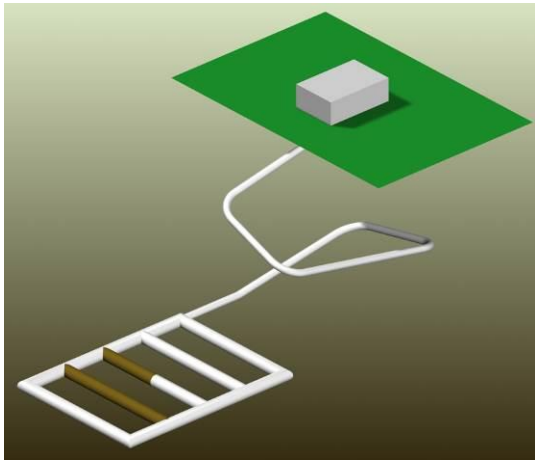
| 項目 | 内　　容 |
|---|---|
| 前提条件 | 本業務では、余裕深度処分施設のモニタリングを対象とする。<br>事業段階及び埋設段階は数十年に及び、埋設段階の最後に、坑道を埋戻し、その後、300～400 年に及ぶ保全段階を経て、廃止措置段階を迎える。ここでは、建設段階及び埋設段階に引き続き保全段階においても可能な範囲で処分場の安全機能の確認等を行う。、 |
| 対象期間 | 本業務の目的の一つは、「原位置での機能確認の限界を踏まえて、どのように多くのステークホルダーを対象に長期に亘る将来の安全性に係る情報を提供すべきか、その目的と実施事項を明確にすること」であることから、本業務で対象とするモニタリングの期間は、建設段階、埋設段階に加えて、埋戻し完了後の保全段階の一部期間を検討対象とする。なお、ベースライン取得のためのモニタリング、事業廃止後のモニタリングは本業務の対象外とする。 |
| 対象範囲 | 本業務での検討範囲は、余裕深度処分場のモニタリングであり、他の放射性廃棄物処分場（地層処分場、TRU 廃棄物処分場等）との併設、近接による影響等は想定しない。<br>本業務における主なモニタリング対象は人工バリアとし、人工バリアの評価における境界条件としてニアフィールドの天然バリアを対象とする。なお、ファーフィールドの天然バリア、地上環境のモニタリングは本業務の対象外とする。 |

表 2.1-2　本業務におけるモニタリング対象時期と対象範囲

| 段階 ＼ 計測場所・対象 | | | 調査段階 | 建設段階 | 埋設段階 | | | | | | | 保全段階 | 廃止措置段階 | 事業廃止段階 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 廃棄体定置、区画内充てん | 上部ピット、低拡散層施工 | 上部・側部低透水層、空洞内充てん材施工 | 処分坑道埋戻し中 | 処分坑道埋戻し完了 | 連絡坑道埋戻し | アクセス坑道埋戻し | | | |
| | | | | | 廃棄体受入れ開始 | | | | 処分坑道埋戻し完了 | | 埋戻し完了 | | 事業廃止 | |
| 地上環境（生物圏） | | | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| 処分施設 | 天然バリア | ファーフィールド | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | ニアフィールド | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | |
| | 地下施設 | アクセス坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 連絡坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 処分坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 支保工 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | プラグ | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | 人工バリア | 空洞内充てん材 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 低透水層 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 低拡散層 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | コンクリートピット | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 区画内充てん材 | － | － | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | 廃棄体 | | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| 地下模擬施設 | 地下施設 | アクセス坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 連絡坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 処分坑道 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | 支保工 | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | | プラグ | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| | 人工バリア | 空洞内充てん材 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 低透水層 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 低拡散層 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | コンクリートピット | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | | 区画内充てん材 | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | 模擬廃棄体 | | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| 実験室内 | 要素試験体 | | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |
| | 工学規模試験体 | | － | △ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | △ | △ | － |

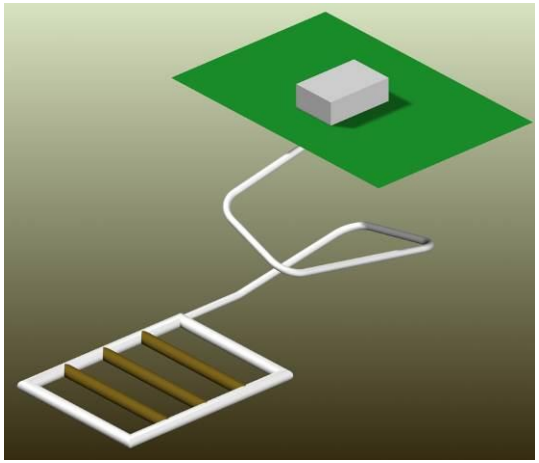
○：主な検討対象を示す　　△：○に付随する検討対象を示す　　－：検討対象外

処分坑道埋戻し中



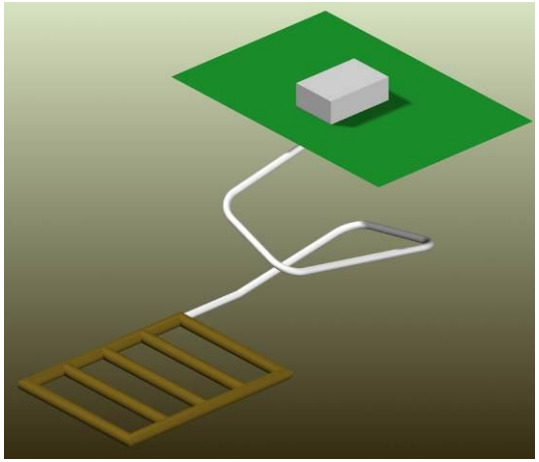
複数の処分坑道のうち、一部が埋戻し完了、一部が埋戻し中の状態

処分坑道埋戻し完了



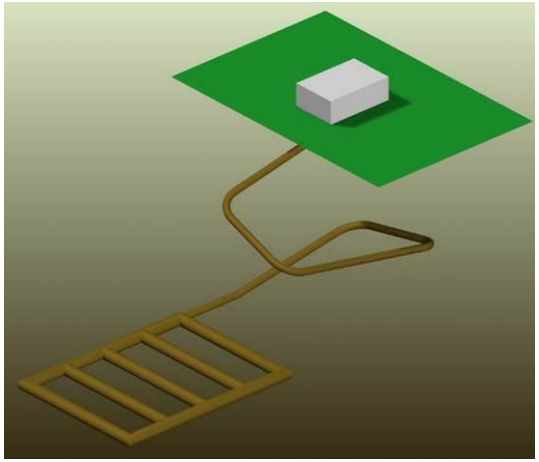
全ての処分坑道の埋戻しが完了し、連絡坑道の埋戻し前の状態

連絡坑道埋戻し



連絡坑道の埋戻しが完了し、アクセス坑道の埋戻し前の状態

アクセス坑道埋戻し



アクセス坑道の埋戻しが完了した状態

図 2.1-3　各段階における処分場の概念図

### 2.1.2　モニタリングに関する用語の定義の明確化

モニタリングに関する国内外の過去の検討事例等を比較すると、廃棄物分類の違いや放射性廃棄物処分場概念の違い等により、それぞれの国や機関によりモニタリングに要求される項目に相違がみられる。更に、モニタリングという用語の意味合いが異なると思われる事例もあることから、本業務を実施するにあたり、用語の定義を明確化する。

本項では、既往の文献等からそれぞれの国や機関で用いられている用語の意味・説明を整理し、本業務で用いる用語の定義を明確化する。

用語の定義に当たり、調査した既往の文献を表 2.1-3 に示す。表 2.1-3 に示す文献で用いられている用語の意味・説明を整理して表 2.1-4 に示す。

表 2.1-3　用語の定義において調査した既往の文献

| No. | 機関 | 文献名 | 発行年 |
|---|---|---|---|
| 1 | IAEA | Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities: Specific Safety Guide No.SSG-31 | 2014 |
| 2 | IAEA | Disposal of Radioactive Waste: Specific Safety Requirements No. SSR-5 | 2011 |
| 3 | NUMO | 高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性―「処分場の概要」の説明資料― NUMO-TR-04-01 | 2004 |
| 4 | NUMO | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 | 2010 |
| 5 | IAEA | IAEA SAFETY GLOSSARY TERMINOLOGY USED IN NUCLEAR SAFETY AND RADIATION PROTECTION 2007 EDITION | 2007 |
| 6 | JAEA | 高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行に係る安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース Data/Code2009-011 | 2009 |
| 7 | 原子力規制庁 | 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料 7-3 | 2015 |
| 8 | 原子力規制委員会 | 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の規準に関する規則の解釈 | 2013 |
| 9 | 土木学会 | 余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理及び検査の考え方 | 2009 |

表 2.1-4　既往の文献、各国・各機関で用いられている用語の整理(1)

| 用語 | 意味・説明 | 出典(文献No.) |
|---|---|---|
| 処分システム | 処分施設とそれが立地される環境。 | 2 |
| モニタリング | 廃棄物処分システムの構成要素の挙動や、廃棄物処分システムが公衆に及び環境に及ぼす影響の評価を助ける、連続的または定期的な観察及び測定。 | 1 |
| | 周辺環境や, 施設からの排気や排水中の放射能のレベルなどを測定することをいう。例えば，地下水位の測定，排気筒から放出される放射性物質濃度の測定などがある。 | 3 |
| | 地質環境、周辺環境、作業環境、放射線、処分システムの構成要素の継続的あるいは定期的な観測または計測。 | 4 |
| サーベイランス | 安全バリアの健全性を検証するために行う、廃棄物処分施設の物理的検査。 | 1 |
| 初期ベースライン | 最終処分施設建設地選定段階（精密検査の段階）における地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態推移。 | 4 |
| ベースラインモニタリング | サイト評価プロセス、及び安全評価の最初の繰り返しのための重要な特質、事象及びプロセスの特定を支援するためのモニタリング。 | 1 |
| 調査段階のモニタリング | 初期ベースラインを理解するためのモニタリング。 | 4 |
| 施設完成時のモニタリング | 操業活動の支援及び、その後の許認可段階のためのセーフティケースの開発を支援する、規制要件との適合の評価のためのモニタリング。 | 1 |
| 操業施設のモニタリング | 規制要件との適合の評価及び、その後の許認可段階のためのセーフティケースの開発支援のためのモニタリング。 | 1 |
| 建設・操業段階のモニタリング | 建設・操業段階のモニタリングは、主に安全レビュー及び閉鎖措置計画の認可における記録として、閉鎖後の長期安全性の確認に対して重要な役割を担う。調査段階に引き続き、適切な運用、情報・品質管理と情報公開が必要である。 | 4 |
| 閉鎖のためのモニタリング | 閉鎖活動とそれに続く閉鎖後モニタリングを支援する、規制要件との適合の評価のためのモニタリング。この段階においては、他の測定が中止されることになり追加の測定が導入されることがある。 | 1 |
| 閉鎖段階のモニタリング | 閉鎖段階のモニタリングは、主に閉鎖措置の確認における記録となる。原則として廃棄体の回収可能性は閉鎖措置の確認まで維持することとし、モニタリングはその意思決定を支援するものとなる。 | 4 |
| 処分施設の閉鎖後の性能のモニタリング | 規制要件との適合の評価及び、その後の決定（たとえば、モニタリング活動の規模縮小、規制管理からの解放）を支援するためのモニタリング。 | 1 |

| | | |
|---|---|---|
| 閉鎖後のモニタリング | 地層処分の閉鎖後の長期的な安全性はモニタリングを含む制度的管理に依存してはならないことが地層処分の考え方である。ただし、閉鎖後のモニタリングのあり方については、制度的管理の一環として行う可能性も含め、将来閉鎖の時点で、地質環境、社会的要請などを考慮して、改めて判断することが合理的である。 | 4 |
| FEP | 放射性固体廃棄物処分場の閉鎖後の安全に関係する要因を、特性（Features)、事象（Events)、プロセス（Processes）の視点から特定、分類すること。 | 6 |
| セーフティケース | 処分施設の安全性を証明するための意見と証拠を集めたもの。 | 2 |
| | ある施設又は活動の安全を裏付ける論拠及び証拠を収集したもの。放射性廃棄物処分場の場合、セーフティケースは所与の開発段階に関係している。このような場合のセーフティケースは、未解決のいかなる問題の所在も認めると共に、これらの問題を将来の開発段階において解決する作業のためのガイダンスを提供すべきである。 | 5 |
| | 地層処分システムの長期的な安全性能を保証する論拠, すなわち安全論拠 | 3 |
| ニアフィールド | 人工バリアと、その設置などにより影響を受けえると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを組み合わせた領域。 | 3 |
| ファーフィールド | ニアフィールドの外側から地表にかけての領域のすべてを指す。 | 2 |
| | 廃棄物パッケージに近いか接触している処分場の掘削区域で、充填材または密封材料及び、その特性が処分場または、その内容物によって変化したかあるいは変化しうる、地質媒体／母岩の部分を含む。 | 5 |
| 制度的管理 | ある加盟国の法律に基づいて指定された当局あるいは公的機関による放射性廃棄物サイトの管理。 | 5 |
| | （浅地中処分を対象に）事業者によって行われる操業中（埋設段階、保全段階）の管理 | 7 |
| 能動的（な）制度的管理 | モニタリング、サーベイランス（監視)、復旧作業などの制度的管理。 | 5 |
| 受動的（な）制度的管理 | 土地利用の管理などの制度的管理。 | 5 |
| 人工バリア | 埋設された放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止及び低減を行う人工構築物。 | 8 |
| | 地層処分において, ガラス固化体中の放射性物質を人間の生活環境から隔離するために設計される人工的な障壁をいう。ガラス固化体, オーバーパック及び緩衝材の総称であり, 処分場の構成要素の一つ。 | 3 |
| 天然バリア | 埋設された放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設された放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う岩盤又は地盤等。 | 8 |
| | 放射性物質を閉じ込める機能を期待し, 安定で地層処分に好ましい条件をもつ地下深部の岩盤をいう。処分場（多重バリアシステム）の構成要素の一つ。 | 3 |

| | | |
|---|---|---|
| 閉じ込め機能（建設・操業） | 放射性物質の埋設地外の環境への優位な漏出を防止すること | 9 |
| 遮へい機能（建設・操業） | 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること | 9 |
| 移行抑制機能（埋戻し後） | 放射性核種の拡散による移行を抑制すること<br>放射性核種を収着すること<br>低透水性により、処分施設を通過する地下水流を低減すること<br>連続した地下水以降経路を形成しないこと | 9 |
| 離隔機能（埋戻し後） | 離隔距離を確保すること<br>容易な侵入を防止すること | 9 |
| 閉じ込め機能（建設・操業） | 放射性物質の埋設地外の環境への優位な漏出を防止すること | 9 |

表 2.1-4 で整理した用語の意味・説明をもとに、本業務で用いる用語の定義を整理し、表 2.1-5 に示す。

表 2.1-5　本業務において用いる用語の定義

| 用語 | 定義 |
|---|---|
| 処分システム | 処分施設とそれが立地される環境 |
| モニタリング | 廃棄物処分システムの構成要素の挙動や、廃棄物処分システムが公衆に及び環境に及ぼす影響の評価を助ける、連続的または定期的な観察及び測定 |
| （初期）ベースライン | 最終処分施設建設地選定段階（精密検査の段階）における地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態推移 |
| ベースラインモニタリング | サイト評価プロセス、及び安全評価の最初の繰り返しのための重要な特質、事象及びプロセスの特定を支援するためのデータ収集のためのモニタリング |
| 施設完成時のモニタリング | 操業活動の支援及び、その後の許認可段階のためのセーフティケースの開発を支援する規制要件との適合の評価のためのモニタリング。この段階においては、追加の測定が導入されることもある。 |
| 操業施設のモニタリング | 規制要件との適合の評価及び、その後の許認可段階のためのセーフティケースの開発支援のためのモニタリング |
| ステークホルダー | 企業の活動によって直接的・間接的に影響を受ける人々や団体などの利害関係者 |
| FEP | 放射性廃棄物処分において、将来起こりうる特性・事象・プロセス |
| セーフティケース | 処分施設の安全性を証明するための意見と証拠を集めたもの |
| ニアフィールド | 人工バリアと、その設置などにより影響を受けえると考えられる人工バリア近傍の岩盤とを組み合わせた領域 |
| ファーフィールド | ニアフィールドの外側から地表にかけての領域のすべて |
| 制度的管理 | ある加盟国の法律に基づいて指定された当局あるいは公的機関による放射性廃棄物サイトの管理 |
| 能動的（な）制度的管理 | モニタリング、監視、復旧作業などの制度的管理 |
| 受動的（な）制度的管理 | 土地利用の管理などの制度的管理 |
| 人工バリア | 埋設された放射性廃棄物からの放射性物質の漏出の防止及び低減を行う人工構築物 |
| 天然バリア | 埋設された放射性廃棄物又は人工バリアの周囲に存在し、埋設された放射性廃棄物から漏出してきた放射性物質の生活環境への移行の抑制を行う岩盤又は地盤等 |
| 閉じ込め機能 | 放射性物質の埋設地外の環境への優位な漏出を防止すること |

| | |
|---|---|
| （建設・操業） | |
| 遮へい機能<br>（建設・操業） | 廃棄体を線源とする放射線に対して、遮へいを有すること |
| 移行抑制機能<br>（埋戻し後） | 放射性核種の拡散による移行を抑制すること<br>放射性核種を収着すること<br>低透水性により、処分施設を通過する地下水流を低減すること<br>連続した地下水以降経路を形成しないこと |
| 離隔機能<br>（埋戻し後） | 離隔距離を確保すること<br>容易な侵入を防止すること |
| 機能確認ポイント | 余裕深度処分施設の基本安全機能に関連するパラメータのうち、安全評価に対する感度が高いパラメータ（第 4 章で詳細を記述） |

ここで、IAEA の示すモニタリングとサーベイランスについては、本検討では同意義として扱い、モニタリングに計測・評価が含まれるものとして扱うものとする。

余裕深度処分施設の各部材の名称は表 2.1-6 に示すように、土木学会、原子力学会、TRU2 次レポート等で様々な呼称が使われていたので図 2.1-4 に示すように統一した呼称を用いるものとする。

表 2.1-6　余裕深度処分施設の各部材の呼称

| 各学会･取りまとめにおける名称 | 地下空洞の安定 | 空洞～人工バリアの隙間や坑道の埋戻し | ベントナイト材料の移行抑制 | セメント系材料の拡散低減 | 施設躯体 | 躯体内の充填 | 放射性廃棄物 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 土木学会 | 支保工 | 空洞内充てん材<br>埋戻し材 | 低透水層 | 低拡散層 | コンクリートピット | 区画内充てん材 | 廃棄体 |
| TRU2次レポート | 支保工 | 埋戻し材 | 緩衝材 | — | 構造躯体<br>コンクリートピット | 充填材<br>充填モルタル | 廃棄体<br>廃棄体パッケージ |
| 原子力学会 | 支保工 | 空洞内充てん材<br>坑道の埋戻し材 | 低透水層 | 低拡散層 | コンクリートピット | 区画内充てん材 | 廃棄体 |
| 確証試験<br>（弊センター） | 支保工 | 埋戻し材（セメント系）上部埋戻し材 | 緩衝材 | 低拡散材 | コンクリートピット | 区画内充てん材<br>上部充てん材 | 廃棄体<br>模擬廃棄体 |

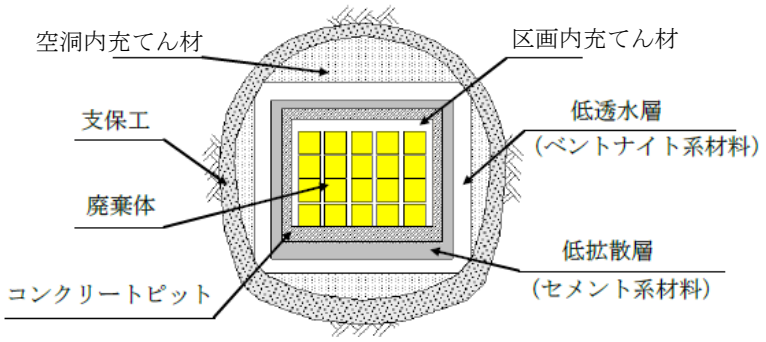



図 2.1-4　余裕深度処分施設の各部材の名称

## 2.2　国内外の既往の研究成果の調査

余裕深度処分の機能確認を検討するにあたり、同分野における国内外の現状を把握することを目的として、国内外における高レベル放射性廃棄物、低レベル放射性廃棄物（海外の中レベル放射性廃棄物を含む）、それぞれの処分施設の機能確認に関する文献、既往の研究成果、既存の基準等を調査した。そのうえで、余裕深度処分への反映を念頭に、その適用範囲、考え方等、機能確認の在り方、実現性を調査、検討した。前節の「表 2.1-5 本業務において用いる用語の定義」にて示しているように、本検討においてはモニタリングとサーベイランスの概念には区別はないものとして扱い、モニタリングという用語で統一する。本節では、モニタリングについて調査するにあたり、IAEA、各国の規制機関によるモニタリングの考え方と、それ以外の実施主体や研究主体による原位置試験や具体的な事例を分けて調査を行った。

### 2.2.1　規制機関によるモニタリングの考え方に関する調査

放射性廃棄物処分場の機能確認については、それぞれの国や機関で処分概念が異なり、モニタリングに要求される要件に相違がみられる。ここでは、規制機関によるモニタリングについての基準に関する調査を行い、それぞれの国や機関の処分場概念、それに基づく機能確認（安全性の確認）の考え方、安全性を保障する基準等について、調査・整理した。調査した文献を表 2.2-1 に、文献調査結果を表 2.2-2～表 2.2-15 に示す。

表 2.2-1　調査した文献（モニタリングの規制機関のの基準に関する調査）

| No. | 機関 | 文献名 | 発行年 |
|---|---|---|---|
| 1 | IAEA | Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities: Specific Safety Guide No.SSG-31 | 2014 |
| 2 | 原子力規制委員会 | 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 | 2013 |
| 3 | 原子力規制庁 | 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料　資料 3-4　廃棄物埋設に対する管理要求 | 2014 |
| 4 | 原子力規制庁 | 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料　資料 7-3　制度的管理について | 2014 |
| 5 | 原子力安全委員会 | 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方 | 2010 |
| 6 | 経済産業省 | 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，経済産業省令第 44 号 平成 26 年 12 月 10 日最終改正 | 2014 |
| 7 | 原子力安全委員会 | 環境放射線モニタリング指針 | 2008 |
| 8 | 総合資源エネルギー調査会 原子力安全・保安部会廃棄物 | 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について | 2007 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 安全小委員会 | | |
| 9 | カナダ原子力規制委員会 CNSC | 規制方針：Managing Radioactive Waste, P-290 | 2004 |
| 10 | カナダ原子力規制委員会 CNSC | 規制指針：Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management,G-320 | 2006 |
| 11 | 原子力安全委員会　放射性廃棄物・廃止措置専門部会 | 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する技術資料（案）<br>放廃第 31－2 号 | 2010 |
| 12 | イギリス環境省 | Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes<br>Guidance on Requirements for Authorisation | 2009 |
| 13 | 米国原子力規制委員会（NRC） | 10 CFR Part63（サブパート F「性能確認プログラム」）－NRC (1999)：<br>Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR Part63. | 1999 |
| 14 | 米国原子力規制委員会（NRC） | ユッカマウンテン審査書－NRC (2003): Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804. | 2003 |
| 15 | アメリカ原子力規制委員会 NRC | Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61 NUREG-2175<br>5.3.3　Monitoring of Engineered Barriers<br>10.0　PERFORMANCE CONFIRMATION | 2015 |
| 16 | フランス原子力安全局 ASN | Guide de surete relative au stockage definitif des dechets radioactifs en formation geologique profonde<br>5.6　Le programme de surveillance | 2008 |
| 17 | フィンランド放射線及び核安全局 STUK | Disposal of nuclear waste | 2013 |
| 18 | スウェーデン放射線安全機関 SSM | Technical Note 62<br>Review of performance confirmation programs and potential roles in SSM's Current review of SKB's License Application | 2014 |
| 19 | スウェーデン放射線安全機関 SSM | The Swedish Radiation Safety Authority’s regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste | 2008 |
| 20 | スイス連邦原子力安全検査局 ENSI | Sprcific design principles for deep geological epositories and requirements for the safety case　Guideline for Swiss nuclear installations | 2009 |

表 2.2-2　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（1）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 1-(1)　文献 1 のうち、モニタリングの概要、モニタリングプログラムの設計について |
| 2.文献名 | IAEA SSG-31 |
| 3.機関 | IAEA |
| 4.モニタリングの目的 | 放射性廃棄物処分施設のモニタリングとサーベイランスの一般目的として以下の 5 点が挙げられている。<br><br>・ 規制要件と許認可条件に対する順守を実証すること。<br>・ 処分システムが、セーフティケースに述べられているように、想定通りに機能していることを検証すること。これは、処分システムの構成要素が、安全評価の中で特定された機能を実施していることを意味する。<br>・ 安全を評価するためになされた重要な想定及び用いられたモデルが実施の状態と首尾一貫することを検証すること。<br>・ 処分施設、サイト及びその周辺に関する情報データベースを確立すること。このデータベースは、立地から建設、操業、閉鎖、閉鎖後の期間に進む際に将来の決定を支えるために利用される。さらに、データベースは、モニタリングの概念及び手順の更新にかんれんした決定を裏付けるものとしても利用される。<br>・ 公衆への情報を提供すること。 |
| 5.機能確認の考え方 | モニタリングとサーベイランスに関する事業者の責任として、以下のように記載されている。<br>・ 規制機関により規定された要件を満たすモニタリングとサーベイランスプログラムを設計すべきである。そのプログラムは、施設の操業前、操業及び閉鎖後期間を通して設計、改良されるべきであり、各段階に合わせて適切に特化されるべきである。<br>・ 規制機関との取り決めに従い、適切なモニタリングとサーベイランスを以下のように実施すべきである。<br>－建設段階の前とその期間中、及び操業前期間中のベースラインモニタリング。<br>－操業及び閉鎖後期間中における、システムの性能にかかわるあらゆる異常の検出。<br>・ 想定外の、または異常なシステム挙動に対処するための危機管理計画を策定すべきであり、また外部対応機関を含む原子力または放射線緊急事態の際に関与する所管当局と共に、計画の調整に当たるべきである。<br>・ モニタリング及びサーベイランスプログラムの状況を定期的に規制当局に報告すべきであり、廃棄物処分施設が適切にモニタリング及び管理されている証拠を規制機関に示すべきである。また、想定外または危険な事態が検出された場合には、所管の規制機関に対して、事態発生の場所及び時間を明記して迅速にその報告を行うべきである。<br>・ モニタリングとサーベイランスによって得られたデータの保持、保存、保全及び管理に当たるべきである。<br>・ 操業前期間中で概念の定義付けをしている間は、モニタリングとサーベイランスのための財政的な保証が整備されていることを確実にすべきである。<br>また、規制機関の責任として、以下のように記載されている。 |

| | |
|---|---|
| | ・ 緊急時のモニタリングに関する手配を含めた、モニタリングとサーベイランスのために施行されている規制、モニタリングとサーベイランスプログラムと報告に関する手配について、定期的にレビューすべきである。レビューが行われる時期は、関連分野における科学技術の進歩に起因する変更や、規制機関の要求による変更に対応できるだけの柔軟性を持つべきである。<br>・ 事業者によって提供されたモニタリングとサーベイランスのデータを、定められた要件に照らしてレビューすべきである。<br>・ 事業者によって廃棄物処分施設が適切にモニタリングされ管理されているということを検証すべきである。規制機関のモニタリングプログラムは、その独立性を損なうことなく、ある程度事業者のモニタリング戦略と調和して一致している必要がある。<br>・ 長期的なモニタリングをサーベイランスのための財政的な保証が、操業前段階に整っていることを確認すべきである。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | モニタリングによって達成可能なことに対して、モニタリング機器の電源の寿命など、物理的課題や制約によって、必然的に制限される。 |
| 8.計測技術 | ・ 非侵入型モニタリングの例として、無線信号通信技術が挙げられているが、「この技術は、まだ放射性廃棄物処分施設に適用するための開発段階にある」とされている。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 段階的な方法でモニタリングプログラムを設計する場合の重要な部分は、何について知る必要があり、その知見がどのように得られるかを明確にするための初期評価である、とされており、モニタリングプログラムの設計について、考慮すべき項目が挙げられている。<br>・ セーフティケースに重要な意味を持つ性質、プロセス、現象及び観測可能な量の選択<br>・ モニタリングプログラムの範囲と目的の設定<br>・ モニタリングプログラムの独立評価のためのプロセスの設定<br>・ 利用可能なモニタリング技術ならびにその特徴に基づいた、使用する方法の選択<br>・ モニタリング設備業者の資格と認証を検証するプロセスの設定<br>・ 計測のための場所の選択<br>・ どのモニタリングを縮小または終了してもよいかの基準を含む、モニタリングの継続期間と頻度の設定<br>・ 使用する計測機器の精度、測定範囲などに基づいた機器の選択<br>・ 対象とされる計測機関にわたるモニタリング技術の頑健性の評価<br>・ モニタリングの種類ごとに、結果をどのように利用し伝達するかの仕様<br>・ 既存の規制、セーフティケースに用いられている前提とモデルに基づいた対策レベルの設定<br>・ 対策レベルを超えた場合にどのような活動が追及されるべきかの決定<br>・ モニタリング結果の管理、報告のための仕様の設定<br>・ モニタリングのメリットと、コスト及びモニタリングによって生じ得るデメリットとのバランス<br>・ モニタリング結果の許容範囲の設定、及び許容範囲外の結果が得られた場合の明確な対策計画の設定<br>・ モニタリング用計測機器の解体手順の設定<br>・ モニタリングデータに関する適切な文書化と文書保管システムの |

| | |
|---|---|
| | 設定 |
| 10.その他 | ・ 「モニタリングプログラムは、閉鎖後の施設全体の安全性を低下させることがないように設計され、実施される必要がある」ことが明記されている。<br>・ 実処分施設でのモニタリングが困難な場合、似たような特徴を有する代替施設、実証施設、パイロット施設におけるモニタリングが有益な情報を提供する場合もあることを指摘している。<br><br>モニタリング活動による有害な影響として、以下の項目が挙げられており、情報を得るためのメリットと、モニタリングによって生じるデメリットの間でいかにバランスを取るかが重要な問題であるとしている。<br>・ 人工バリアの設置が遅れることによるバリアの劣化<br>・ 処分施設内への地下水流入の増大につながるバリアシステムを貫く経路の形成<br>・ 地下の作業空間を長く開けたままにしておくことによる地球化学的条件の変化<br>・ 人間侵入の可能性の増大。とりわけ、地下構造物が解放状態で放置され制度的管理が継続されない場合。 |
| 11．本業務への反映事項 | モニタリングの目的、機能確認の考え方 |

表 2.2-3　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（2）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 1-(2)　文献 1 のうち、処分施設の存続期間におけるさまざまな期間でのモニタリングについて |
| 2.文献名 | IAEA SSG-31 |
| 3.機関 | IAEA |
| 4.モニタリングの目的 | モニタリングは、サイト選定、施設の建設、操業、閉鎖、及び施設閉鎖後の各段階を通して様々な目的で実施されるとしており、<br>・ ベースラインを定めるため<br>・ 処分システムのバリアの挙動や変化をモニタリングするため<br>・ 生物圏への放射性核種の移動及び放出をモニタリングするため<br>・ 周辺環境についての情報データベースを構築するため<br>という目的が挙げられている。さらに、各段階でのモニタリングの目的が以下のように記載されている。<br>・ ベースラインモニタリング<br>・ サイト評価プロセス、及び安全評価の最初の重要な特質、事象及びプロセスの特定を支援するためのデータ収集<br>・ 施設完成時のモニタリング<br>・ 操業活動の支援、及びその後の許認可段階のためのセーフティケースの開発を支援するため<br>・ 操業施設のモニタリング<br>・ 規制要件との適合の評価、及びその後の許認可段階のためのセーフティケースの開発支援<br>・ 閉鎖のためのモニタリング<br>・ 閉鎖活動とそれに続く閉鎖後モニタリングを支援するため、及び規制要件との適合の評価のため<br>・ 処分施設の閉鎖後の性能のモニタリング（適宜）<br>・ 規制要件との適合の評価、及びその後の決定（例えばモニタリング活動の規模縮小、規制管理からの解放）を支援するため<br><br>さらに、操業前期間、操業期間中、閉鎖後期間について、モニタリングの目的が以下のように詳細に記載されている。<br>・ 操業期間前のモニタリング<br>・ サイト適合性の評価に寄与すること。<br>・ 施設設計用インプットデータを提供すること。<br>・ 操業時及び閉鎖後のセーフティケースに必要なインプットデータを提供すること。<br>・ 後のモニタリング結果との比較のためのベースライン状態を確立すること。<br>・ 操業期間のモニタリングプログラムの設計を支援すること。<br>・ 操業期間中のモニタリング<br>・ 材料と構造物の竣工時の性質に関するデータを提供すること、及び閉鎖後セーフティケースの見直し、改良もしくは信頼構築のために利用されることがある処分システムの要素の性能を確認するためのデータを提供すること。<br>・ 排出物の処理及び管理のためのシステムが正しく機能しているかどうかをチェックするために必要な情報を提供すること。<br>・ 許可された正常な操業状態からの逸脱について早期に警報を出すこと。<br>・ 環境中の放射線レベル及び放射能濃度、ならびに公衆被ばくを推定するための予測モデルを用いて、環境中への放射性核種の放出に関 |

| | |
|---|---|
| | するデータ（放出率、放射性核種の組成など）を提供すること。<br>➢ 操業期間中のモニタリング<br>・ 処分施設に帰することができると思われる環境中の放射性物質及び他の毒性のある物質を検出すること。<br><br>また、「緊急時対応のモニタリング」についても言及しており、その目的を<br>・ 人の健康及び環境に対する事故の影響を緩和するための情報提供<br>としている。 |
| 5.機能確認の考え方 | ・ 処分施設の性能を確認する目的のために、モニタリングは、処分システムの操業期間及び閉鎖後期間の双方において、重要で主要な技術的パラメータのために実施されるべきである。これは、セーフティケースの開発の段階的プロセスの一部分として見ることが可能であって、操業許可が交付された後も操業期間を通して、処分システムの操業中及び閉鎖後の性能の予見可能性を漸次高めていくために継続するものである。<br>・ 閉鎖後期間におけるモニタリングは、能動的な制度的管理の期間から受動的な制度的管理の期間へと移行する決定を、関係するステークホルダーに知らせることを含むべきである。<br>・ モニタリングとサーベイランスからの情報は、処分施設の安全における信頼を構築してリスクまたは不確実性を低減することを目的に収集され、また必要であると考えられる場合は、セーフティケースの更新の裏付けを目的に収集される。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・ 操業時セーフティケースに関連するモニタリングプログラムとは別に、処分施設における作業者の防護は、放射線安全に関する国の規則と国際的勧告に従って保証されなければならない。<br>・ モニタリング情報の利用に関連する課題には、空間的及び時間的変動を分解するのが難しいこと、特定の重要なパラメータを直接測定できないこと、処分施設の将来の挙動を予測できないこと、そして重要な一部のプロセスの根本的な理解が足りないこと、が挙げられる。 |
| 11．本業務への反映事項 | モニタリングの目的、機能確認の考え方 |

表 2.2-4　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（3）

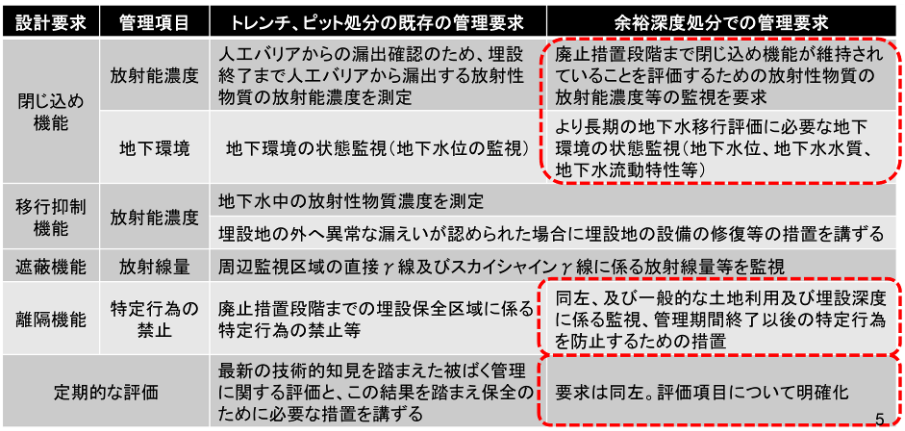
| | |
|---|---|
| 1.番号 | 2 |
| 2.文献名 | 第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 |
| 3.機関 | 原子力規制委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・ 放射線から放射線業務従事者を防護するため<br>・ 定期的な評価等に必要なデータを取得するため |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・ 事業所及びその境界付近における放射性物質の濃度及び線量<br>・ ピット処分を行う場合は、人工バリアから漏出する放射性物質の濃度等<br>・ 廃棄物埋設地の外に漏出し生活環境に移行する放射性物質の濃度等<br>・ 地下水の水位及びその他の廃棄物埋設地及びその周辺の状況<br>・ 人工バリア及び天然バリアの機能に関係する地下水の状況等 |
| 7.計測設備 | ・ 測定期間及び使用環境に適応して実用上必要な精度で監視及び測定ができる性能を有する監視設備及び測定設備を用いること |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・ ピット処分にあたっては埋設の終了後 300～400 年以内、トレンチ処分にあたっては埋設の終了後 50 年程度以内を目安として、廃棄物埋設地の保全に関する措置を必要としない状態に移行する見通しがあるものであること。 |
| 11．本業務への反映事項 | モニタリング項目 |

表 2.2-5　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（4）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 3 |
| 2.文献名 | 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料<br>資料 3-4　廃棄物埋設に係る管理要求 |
| 3.機関 | 原子力規制庁 |
| 4.モニタリングの目的 | 埋設段階及び保全段階の主な管理要求がその目的とともに記載されている。なお、既存の管理要求は、トレンチ処分又はピット処分を対象としており、余裕深度処分には、既存の管理要求に加えて離隔機能の状態を管理することとされている。<br>➢ 遮蔽機能（余裕深度処分、ピット処分、トレンチ処分）<br>【目的】周辺監視区域の線量限度を超えないようにすること<br>【管理要求】周辺監視区域の直接γ線及びスカイシャインγ線に係る線量当量の監視<br>➢ 閉じ込め機能（余裕深度処分、ピット処分）<br>【目的】人工バリアからの漏出がないこと<br>【管理要求】人工バリアから漏出する放射性物質の測定<br>➢ 移行抑制機能（余裕深度処分、ピット処分、トレンチ処分）<br>【目的】移行抑制機能が適切に機能していること<br>【管理要求】地下水中の放射性物質濃度の測定<br>➢ 離隔機能（余裕深度処分）<br>【目的】廃棄物埋設地と生活圏の離隔が適切に確保されていること<br>【管理要求】埋設深度等の状態の監視 |
| 5.機能確認の考え方 | 事業廃止後の制度的管理の考え方について、以下のように記載されている。<br>・ 余裕深度処分の対象廃棄物は、浅地中処分の対象廃棄物に比べ、当初の放射性インベントリが高く、また長半減期核種の濃度も高いため、放射能が長期に亘り残存する。<br>・ こうした放射性廃棄物は、ある程度深い地中に安定的に定置することにより、地上施設で管理する場合に比べ、将来の不測の事態等に起因するリスクを低減することが可能となる。<br>・ ある程度の深度に埋設することにより、偶発的な人間侵入が生じる可能性は小さくなるが、人間侵入によるリスクを更に低減するよう、合理的な措置を実行することが適当である。<br>・ 長期に亘る安定的な管理としては、マーカーの設置、記録の保存等の受動的な制度的管理とすることが適当である。これは IAEA 基準でも明記されており、諸外国の規制でも導入されている。（IAEA SSR-5　件 22 及び 5.7）<br>・ ただし、事業廃止後の受動的な制度的管理は、将来の不測の事態等により効力を失う可能性があることから、規制基準適合性の評価の前提として取り扱うことは適当ではない。（IAEA　SSR-5　5.6） |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 埋設段階及び保全段階の主な管理要求として、目的と管理要求が記載されており、管理要求の中に監視・測定すべき項目が挙げられている。<br>➢ 遮蔽機能（余裕深度処分、ピット処分、トレンチ処分）<br>・ 周辺監視区域の直接 γ 線及びスカイシャイン γ 線に係る線量当量の測定<br>➢ 閉じ込め機能（余裕深度処分、ピット処分）<br>・ 人工バリアから漏出する放射性物質の測定<br>➢ 移行抑制機能（余裕深度処分、ピット処分、トレンチ処分）<br>・ 地下水中の放射性物質濃度の測定<br>➢ 離隔機能（余裕深度処分） |

| | |
|---|---|
| | ・ 埋設深度等の状態の監視<br><br>また、事業廃止後の閉じ込め機能、移行抑制機能を評価することを目的として、余裕深度処分では、地下水位水質等、必要な測定を要求している。 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 第二種廃棄物埋設における現行の管理制度と課題について、以下のよう記載されている。<br><br>第二種廃棄物埋設における現行の管理制度<br>➢ 能動的な制度的管理<br>・ 事業廃止までの期間においては、遮蔽、閉じ込め、移行抑制の機能が確保されていることを確認するため、事業者に対し、モニタリング、施設の保全等の能動的な制度的管理を義務付け。<br>・ 事業廃止後は、「廃棄物埋設地の保全のために講ずべき措置を必要としない状況にあること」が原子力規制委員会により確認されなければ認可されない仕組み。<br>➢ 定期的な見直し（PSR）<br>・ 10 年ごとに実施される被ばく管理の評価において、最新の知見に基づき、将来の社会環境や技術などの変化を適切に取り込む。<br>管理制度の課題<br>・ 余裕深度処分の場合、一般的な土地利用が及ぶ可能性の小さい十分な深度があるとしても、浅地中処分に比べ放射能が長期に残留することから、事業廃止後の管理について検討する必要がある。<br><br>事業廃止後の管理要求として、以下のように記載されている。なお、現行の管理要求はトレンチ処分及びピット処分を対象としており、余裕深度処分には、受動的な制度的管理を要求することが検討されている。<br>・ 廃止措置計画の認可（トレンチ処分、ピット処分）<br>・ 廃止措置の終了確認（トレンチ処分、ピット処分）<br>・ 記録の保存（余裕深度処分に追加要求）<br>－事業廃止に伴い、規制の対象となる事業者がいなくなることから、指定機関への移管等を含めた記録の保存について検討が必要とされている。<br>・ 廃棄物埋設地を認知させるための標識・マーカーの設置（余裕深度処分に追加要求）<br>－永続的な標識・マーカーの設置<br>－廃止措置計画の認可基準要求 |
| 11．本業務への反映事項 | 埋設段階及び保全段階の主な管理要求とその目的、及び測定項目 |

表 2.2-6　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（5）

<table>
<tr><td>1.番号</td><td>4-(1)　文献 4 のうち、操業中の管理要求について</td></tr>
<tr><td>2.文献名</td><td>廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料<br>資料 7-3　制度的管理について</td></tr>
<tr><td>3.機関</td><td>原子力規制庁</td></tr>
<tr><td>4.モニタリングの目的</td><td>記載なし</td></tr>
<tr><td>5.機能確認の考え方</td><td>余裕深度処分施設に設計要求として課せられる閉じ込め機能に関する「廃止措置段階まで閉じ込め機能が確保されていることの評価」及び「より長期の地下水移行評価に必要な地下環境の状態監視」に必要な地下環境、放射能濃度、放射線量に係るモニタリングに対して必要と考えられる事項が、埋設段階毎に整理されて以下のように記載されている。なお、ピット処分に係る現行規制では、埋設終了後の一部のモニタリング期間として最大 300～400 年程度が想定されている。<br><br>➢　ベースラインモニタリング（建設前段階のモニタリング）<br>・　サイト評価プロセス及び基準適合性評価のための重要な特質、事象及びプロセスの特定・確認を支援するために有用なものであること<br>➢　操業期間中（埋設段階）モニタリング<br>・　人工バリアから漏出する放射性物質の濃度を監視及び測定できる設計であること<br>・　ベースラインモニタリングを補強するためのモニタリングができる設計であること<br>➢　埋設終了後（保全段階）から廃止措置段階までのモニタリング<br>・　人工バリアの閉じ込め機能が維持されていることを評価できるものであること<br>・　廃棄物埋設地の外への放射性物質の濃度を監視・測定できるものであること<br>・　埋設終了後や坑道の埋戻し後における環境の回復、機能維持に係る情報をモニタリングできるものであること<br>・　モニタリングが埋設施設の安全性に影響を与えないものであること</td></tr>
<tr><td>6.モニタリング項目及び確認方法</td><td>余裕深度処分の廃棄物埋設地は、浅地中処分に比べて深い深度に設置され、廃止措置段階までの閉じ込めに係る設計要求が課せられる。また、地下水移行などの自然過程に関して、より長期の線量評価が求められる。こうした余裕深度処分の特徴を踏まえ、設計で要求した機能を確認するために、事業規則における事業者に対する管要求として追加すべきと考えられる項目が挙げられている。<br>
<table>
<tr><th>設計要求</th><th>管理項目</th><th>トレンチ、ピット処分の既存の管理要求</th><th>余裕深度処分での管理要求</th></tr>
<tr><td rowspan="2">閉じ込め機能</td><td>放射能濃度</td><td>人工バリアからの漏出確認のため、埋設終了まで人工バリアから漏出する放射性物質の放射能濃度を測定</td><td rowspan="2">廃止措置段階まで閉じ込め機能が維持されていることを評価するための放射性物質の放射能濃度等の監視を要求<br>より長期の地下水移行評価に必要な地下環境の状態監視（地下水位、地下水水質、地下水流動特性等）</td></tr>
<tr><td>地下環境</td><td>地下環境の状態監視（地下水位の監視）</td></tr>
<tr><td rowspan="2">移行抑制機能</td><td rowspan="2">放射能濃度</td><td colspan="2">地下水中の放射性物質濃度を測定</td></tr>
<tr><td colspan="2">埋設地の外へ異常な漏えいが認められた場合に埋設地の設備の修復等の措置を講ずる</td></tr>
<tr><td>遮蔽機能</td><td>放射線量</td><td colspan="2">周辺監視区域の直接γ線及びスカイシャインγ線に係る放射線量等を監視</td></tr>
<tr><td>離隔機能</td><td>特定行為の禁止</td><td>廃止措置段階までの埋設保全区域に係る特定行為の禁止等</td><td>同左、及び一般的な土地利用及び埋設深度に係る監視、管理期間終了以後の特定行為を防止するための措置</td></tr>
<tr><td colspan="2">定期的な評価</td><td>最新の技術的知見を踏まえた被ばく管理に関する評価と、この結果を踏まえ保全のために必要な措置を講ずる</td><td>要求は同左。評価項目について明確化</td></tr>
</table>
5</td></tr>
<tr><td>7.計測設備</td><td>記載なし</td></tr>
</table>

| | |
|---|---|
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 機能確認の考え方、モニタリング項目 |

表 2.2-7　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（6）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 4-(2)　文献 4 のうち、事業廃止後の制度的管理について |
| 2.文献名 | 廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合 会議資料<br>資料 7-3　制度的管理について |
| 3.機関 | 原子力規制庁 |
| 4.モニタリングの目的 | 記載なし |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 事業廃止後は、事業者による能動的な制度的管理がなくなることから、人間侵入の発生可能性のさらなる低減を図るために、国際条約や国際基準に示されている記録の保存、土地利用の制限といった制度的管理の検討が必要であるとされており、具体的には、<br>・　廃棄物埋設地に係る記録を保存するための受動的な精度<br>・　標識、マーカー等、廃棄物埋設地を認知させるための可能な限り永続的な受動的設備<br>などを構築、設置することが挙げられている。<br>また、さらに強い事業廃止後の制度的管理として、以下のような仕組みを構築することが検討されている。<br>・　記録の保存に係る制度的な措置及び記録を保存すべき者（国又は国の機関など）<br>・　土地利用に関し、利用者が当該記録を調査するための仕組み<br>・　掘削などの特定行為の禁止措置のための国による土地利用制限や必要に応じた監視 |
| 11.本業務への反映事項 | 本業務への反映事項なし |

表 2.2-8　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（7）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 5-(1)　文献 5 のうち，放射線の監視について |
| 2.文献名 | 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方 |
| 3.機関 | 原子力安全委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・放射線の監視 |
| 5.機能確認の考え方 | ・事業期間内の安全の確保の確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・付属施設から放出する放射性物質の濃度等の監視<br>・周辺環境における放射線量、放射性物質の濃度等の監視<br>・廃棄物埋設地から地下水等に漏出し、生活環境に移行する放射性物質の濃度等の監視 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・廃棄体搬入開始より事業廃止までの期間が対象 |
| 11.本業務への反映事項 | 事業期間中の放射線監視に関する考え方 |

表 2.2-9　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（8）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 5-(2)　文献 5 のうち，安全評価の更新に資する技術的知見の収集について |
| 2.文献名 | 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方 |
| 3.機関 | 原子力安全委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・安全評価の更新に資する技術的知見の収集<br>・基本シナリオについては、その安全評価の結果が10μSv/年以下になる可能性が十分にあることに関する科学的蓋然性を示すこと。<br>・変動シナリオについては、その安全評価の結果が300μSv/年以下であることを示すこと。<br>・稀頻度事象シナリオについては、その安全評価の結果が10mSv/年を超えないこと、さらに保守的な条件設定を行った場合でも100mSv/年以下となることを示すこと。<br>・人為事象シナリオについては、人間の行為を様式化した上で、それに関連して生じる自然過程の事象についてできるだけ確からしい想定と不確かさを考慮した保守的な想定を行って評価し、前者の想定に基づく周辺住民への影響については1mSv/年以下、後者の想定に基づく周辺住民への影響については10mSv/年以下であることを示すこと。同様に、前者の想定に基づく特定の接近者個人への影響については10mSv以下、後者の想定に基づく特定の接近者個人への影響については100mSv 以下であることを示すこと。 |
| 5.機能確認の考え方 | ・管理期間終了まで繰り返し行う管理期間終了以後の安全評価の更新 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・管理期間終了までに蓄積される人工バリア、天然バリアの状態に関するデータの取得<br>・各種モニタリングにより得られる地質環境及び廃棄物埋設地の状態に関するデータの取得 |
| 7.計測設備 | ・モニタリングには、測定期間及び使用環境に適応した性能を有する設備・機器を用いるものとする。 |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・類似環境下での原位置試験、室内試験等の間接的な方法により取得された廃棄物埋設地の状態設定に関するデータの取得 |
| 10.その他 | ・安全評価の更新及びその評価に反映する新しい科学技術的知見の収集について、その作業方法によって、管理期間終了以後の安全性を低下させないように留意したうえで、計画の策定・更新に関する方針を示すこと<br>・各種モニタリングに当たっては、更新した安全評価の結果等を参考に測定項目を選定し、これに基づいて計画を見直す必要がある<br>・モニタリングには、測定期間及び使用環境に適応した性能を有する設備・機器を用いるものとする |
| 11.本業務への反映事項 | 安全評価の更新に係るモニタリングデータの考え方 |

表 2.2-10　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（9）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 6 |
| 2.文献名 | 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 |
| 3.機関 | 経済産業省 |
| 4.モニタリングの目的 | （目的に関する記載はないが、事業期間内の安全確保を目的としたモニタリング） |
| 5.機能確認の考え方 | ・廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏えいを監視し、漏えいがあったと認められる場合には速やかに廃棄物埋設地の設備の修復その他の放射性物質の漏えいを防止するために必要な措置を講ずる。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・放射性廃棄物の排気口又は排気監視設備及び排水口又は排水監視設備における放射性物質の濃度<br>・管理区域における外部放射線に係る一週間の線量当量、空気中の放射性物質の一週間についての平均濃度及び放射性物質によって汚染された物の表面の放射性物質の密度<br>・周辺監視区域における外部放射線に係る一月間（すべての廃棄物埋設地を土砂等で覆うまでの間においては一週間）の線量当量及び地下水中の放射性物質の濃度<br>・廃棄物埋設地の外への放射性物質の漏えい<br>・降雨量（一月間についての積算降雨量）<br>・地下水の水位 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | ・　事業期間内の安全確保を目的とした放射性物質の漏洩監視のためのモニタリング項目 |

表 2.2-11　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（10）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 7 |
| 2.文献名 | 環境放射線モニタリング指針、平成 20 年 3 月 |
| 3.機関 | 原子力安全委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・周辺住民等の線量が、1 年間の線量限度を十分に下回っていることを確認<br>・予期しない放射性物質又は放射線の放出があった場合に適切に対応することが可能となること |
| 5.機能確認の考え方 | ・周辺住民等への結果の提供<br>・予期しない放射性物質又は放射線の放出があった場合での対応<br>・異常事態、緊急事態発生時の速やかな対応 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・空間放射線の測定<br>・環境試料中の放射能の測定 |
| 7.計測設備 | ・異常事態発生の際に中性子線が放出される可能性がある施設については、中性子線用サーベイメータ、中性子線測定器等の準備<br>・モニタリングステーション（連続モニタに加えてダストサンプラ、気象要素の測定機器等を備えた野外測定設備）<br>・モニタリングポスト（連続モニタを備えた野外測定設備）<br>・モニタリングポイント（積算線量計を備えた野外測定設備） |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・空間放射線量率の測定、大気中の放射性物質濃度の測定、環境試料の採<br>取及び放射能の測定等の緊急時モニタリング作業を実施する |
| 10.その他 | ・適用範囲に廃棄物埋設施設が含まれているが、放出源モニタリングに関する記述も含まれる。 |
| 11.本業務への反映事項 | 環境放射線とそのモニタリングに関する考え方 |

表 2.2-12　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（11）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 8-(1)　文献 8 のうち，放射線管理等について |
| 2.文献名 | 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について |
| 3.機関 | 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・放射線モニタリングは、閉じ込め、遮へい機能等の安全機能が設計どおりに機能し、操業中における周辺公衆や作業従事者への放射線影響が適切に防止または低減されていることを観測によって確認する |
| 5.機能確認の考え方 | ・操業中における周辺公衆や作業従事者への放射線影響が適切に防止または低減されていることの確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・周辺監視区域における直接放射線の測定<br>・周辺監視区域の地下水に含まれる放射性物質の測定等 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・地上施設及び埋め戻しまでの地下施設に対する放射線モニタリングについては、基本的に、現行の埋設規則等と同様の規定が適用できると考えられる<br>・経済産業大臣の認可を受ける保安規定において、事業の各段階の特徴に応じて事業者による安全性を判断するためのモニタリング内容を規定することが必要であり、必要な技術開発の項目も含め、地下水等のモニタリング項目（地下水位、放射性物質濃度等）、頻度等の具体的な内容についてWGで検討を行う。 |
| 11.本業務への反映事項 | 余裕深度処分に係る放射線管理の考え方 |

表 2.2-13　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（12）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 8-(2)　文献 8 のうち，事業者の安全レビュー |
| 2.文献名 | 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について |
| 3.機関 | 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・事業者が安全レビューの一環として行う<br>・安全レビューは、廃棄物埋設施設の長期的な安全性が最新知見に照らしてもなお担保される見通しであることの確認 |
| 5.機能確認の考え方 | ・安全レビューでは、許可時の安全審査で確認した安全評価の個々の項目の数値的厳密性というよりも、処分システムの全体の総合的な安全性を確認することが重要である。<br>・事業者は安全レビューの結果を踏まえて保安措置の一環として、必要に応じて適切な措置を講じる。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・その時点までに定置した廃棄体の量や今後定置する予定の廃棄体の量及び建設段階で得られる新たなデータ類、環境、地下水、地質モニタリング等の各種モニタリング<br>・建設時の掘削等によって得られる地質環境に関するデータ<br>・IAEA の安全レポートシリーズ No.35「放射性廃棄物のための浅地中処分施設のサーベイランスとモニタリング」（2004 年）では、サーベイランス及びモニタリングに関する一般規準が示されており、モニタリングの際に考慮すべき項目として、①放射性汚染物質、②放射性汚染物質の移行に影響を及ぼす化学的特性、③処分施設周辺の放射線レベル、④地下水における放射性汚染物質の移行、⑤大気中への放射性汚染物質の移行、⑥処分施設における地表水中の放射性汚染物質の輸送及び⑦魚や植物等の一般環境が挙げられている。 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・モニタリング設備には、長期的な使用や使用環境に適応した性能が求められる<br>・事業者は、モニタリング設備の設置等にあたって、廃棄物埋設施設の有する安全性能に及ぼす影響についても配慮しなければならない<br>・国は、これら事業者の活動（安全レビュー、データや知見の収集、蓄積及び更新、保安措置）が適切になされているかどうか確認していくことが重要である<br>・フィンランドの安全規制制度においては、事業者に処分場の閉鎖後のサーベイランス計画の策定が義務づけられており、スウェーデンでは、操業中に限定されているものの、閉鎖後における最終処分場の安全性を判断するための状況について事業者が継続的に把握する責任があるとされている。 |
| 11.本業務への反映事項 | 安全レビューに係るモニタリングへの要求事項 |

表 2.2-14　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（13）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 9 |
| 2.文献名 | 規制方針：Managing Radioactive Waste, P-290 |
| 3.機関 | カナダ原子力規制委員会 CNSC |
| 4.モニタリングの目的 | 記載なし |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | なし |

表 2.2-15　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（14）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10 |
| 2.文献名 | 規制指針：Assessing the Long Term Safety of Radioactive Waste Management,G-320 |
| 3.機関 | カナダ原子力規制委員会 CNSC |
| 4.モニタリングの目的 | 記載なし |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 制度的管理に関する記載があり、以下のように能動的な制度的管理としてモニタリングが挙げられている。<br>・　制度的管理には、土地利用の制限、マーカー設置などの受動的な制度的管理と、水処理、モニタリング、メンテナンスなどの能動的な制度的管理がある。 |
| 11.本業務への反映事項 | なし |

表 2.2-16　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（15）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 11 |
| 2.文献名 | 余裕深度処分の管理機関終了以後における安全評価に関する技術資料（案） |
| 3.機関 | 原子力安全委員会　放射性廃棄物・廃止措置専門部会 |
| 4.モニタリングの目的 | 《※注釈》<br>本文献には、モニタリング（機能確認）を対象とした目的についての明確な記述が示されていないため、ここでは、モニタリング（機能確認）は安全評価に資するために実施するものであるとの観点から、各シナリオにおける安全評価の目的をモニタリング（機能確認）の目的と同義として考えた。<br>また本件では、検討の対象を管理期間終了までの人工バリアのモニタリング（機能確認）としていることから、土地利用シナリオ（基本・変動）及び、主に天然バリア機能に期待する期間についての記述は、対象外とした。<br><br>【基本地下水シナリオ】<br>・過渡的な期間においては、多重バリア機能に期待する期間及び、主に天然バリア機能に期待する期間のそれぞれの初期状態として計画（想定）した通りのバリア機能及び特性を発揮できる状態に確実に至ることを確認する（5.2.2 より）。<br>・多重バリア機能に期待する期間においては、多重バリアによる防護機能（人工バリアによる防護機能[低透水性、低拡散性、収着性、低溶出性等]と天然バリアによる防護機能[地表までの距離、物理的隔離機能、化学的遅延機能]）による線量の低減状況を確認する（5.2.3 より）。<br><br>【基本ガスシナリオ】<br>・過渡的な期間においては、廃棄体に閉じ込め性がない場合、水の放射線分解による水素ガスの発生を抑制する対策が取られていることを確認するとともに、廃棄体からの水素ガスの放出に伴うガス状の放射性物質や揮発性の放射性物質の放出の影響を確認する（5.3.2 より）。<br>・多重バリア機能に期待する期間においては、長期にわたり残存または生成されると想定される放射性ガスの影響あるいは金属腐食に伴って発生する非放射性ガスである水素ガス等が人工バリアの特性変化または地下水移行に及ぼす影響について評価し、被ばく線量に及ぼす影響を確認する（5.3.3 より）。<br><br>【変動地下水シナリオ】<br>・過渡的な期間においては、建設・操業等の埋め戻し前の期間に想定される様々な不確かさを想定しても、多重バリア機能に期待する期間の変動地下水シナリオで想定する初期条件が確実に達成されることを確認する（6.2.2 より）。<br>・多重バリア機能に期待する期間においては、発生の可能性は低いが安全評価上重要な変動要因を考慮しても、処分システムの多重バリア機能が本来の機能を発揮し、処分システムが頑健性を有していることを確認する（6.2.3 より）。<br><br>【変動ガスシナリオ】<br>・過渡的な期間においては、廃棄体に対する閉じ込め性に係る不確かを考慮しても、ガス状の放射性物質や揮発性の放射性物質の放出の影響 |

| | |
|---|---|
| | が小さいことを確認するとともに、水の放射線分解による水素ガスの発生の変動要因を勘案しても、これを抑制する対策が取られていることを確認する（6.3.2 より）。<br>・ 多重バリア機能に期待する期間においては、長期にわたり残存または生成されると想定される放射性ガスあるいは非放射性ガスの発生量等の変動要因及び人工バリアの劣化やガスの透気性に係る変動要因を考慮しても、安全が確保されるとともに、人工バリアが構造的に破壊することはなく健全性が確保されることを確認する（6.3.3 より）。 |
| 5.機能確認の考え方 | 《※注釈》<br>本文献には、モニタリング（機能確認）を対象とした考え方についての明確な記述が示されていないため、ここでは本文献中の、余裕深度処分を対象とした管理期間中の管理・監視に対する留意事項等についての記述を、モニタリング（機能確認）の考え方の参考とした。<br><br>・ 放射性廃棄物の埋設後、一定期間行われる、埋設施設からの放射性物質の漏出の監視は、設計上の想定を超える放射性物質の漏出がないこと、及び埋設施設が設計において想定した状態を維持・推移していることを確認・評価することで、基本シナリオ、変動シナリオ、稀頻度事象シナリオの想定の妥当性を確認し将来の安全性を保証するためにおこなわれるものである。<br>・ 余裕深度処分の対象となる放射性廃棄物は初期段階では短寿命の放射性物質等に起因して、高い放射能を有していることから、放射能の影響について十分に評価が行われると共に、必要に応じ、この影響の程度を一定期間監視することについて検討する必要がある。<br>・ 埋設設備内が地下水の浸入によって飽和状態に向かう際の過渡的な変化が、設計上の想定に対し安全側で推移していることを監視する必要がある。<br>・ 過渡的な段階での監視は、埋設される人工バリア近傍で行うことが望ましく、埋設施設を完全に閉鎖するまでの間に行われる必要がある。<br>・ 人工バリア近傍で行う監視については、監視のために用いられる機器の設置によって放射性物質の移行経路が生じる等、処分システムの安全性を損なうものであってはならない。<br>・ 監視のために坑道等の埋め戻しが長期間にわたり行われないことは、移行抑制の観点からは好ましくないことから、このような点に配慮した適切な監視を行う必要がある。<br>・ 埋設施設を完全に埋め戻した後は、人工バリアと天然バリアにより放射性物質の生活圏への移行を抑制する段階であり、主に埋設施設近傍の地下水や敷地境界における地下水中の放射性物質濃度の監視により、放射性物質の人工バリアからの漏出及び生活圏への移行に係る監視が行われる。また、必要に応じ、地下水の水質や流動特性の計測を通じ、処分システムに影響を与える因子（例えば設計上 pH、Eh の影響が考慮されていれば、その数値）について監視が行われることが想定される。<br>（以上、9.2.1 より） |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 【モニタリング項目】<br>・ 管理期間中を対象とした埋設施設からの放射性物質の漏出量<br>・ 過渡的な期間を対象とした人工バリアの変化（飽和度、膨潤圧等）<br>・ 埋設施設埋戻し後の地下水中の放射性物質の濃度<br>・ 処分システムの設計上で考慮される地下水の水質<br>（以上、9.2.1 より）<br>【確認方法】 |

| | |
|---|---|
| | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 【変動シナリオにおける留意事項】<br>・地下水についての変動シナリオを考慮する場合は、基本地下水シナリオで想定されている放射能インベントリの不確かさ、放射性廃棄物からの放射性物質の溶出率等を含めた人工バリアの防護機能に関する不確かさ（セメント系人工バリアの初期ひび割れ、低透水層の密度のばらつき等）、天然バリアの防護機能に関連する不確かさ（地圏の透水係数、間隙率、亀裂頻度、地質構造の不均質性等）、生活圏を構成する自然事象の状態設定に関する不確かさを考慮しても、変動シナリオの「めやす（300μSv/年以下）」を超えないことの確認が必要となる（6.2.1）。<br>・ガスについての変動シナリオを考慮する場合は、基本ガス移行シナリオで想定されている放射性ガス等と水素ガス等について、ガスの発生量及び発生速度の不確かさ、人工バリアのガス透気性に関する不確かさ、及び天然バリアのガスの移行挙動に関連する不確かさ等を考慮しても、変動シナリオの「めやす（同上）」を超えないことの確認が必要となる（6.3.1）。<br><br>【変動地下水シナリオにおける不確実性（人工バリア防護機能）】<br>・低透水性に関するパラメータ<br>各人工バリアの部位の透水係数及び間隙率、埋設施設周辺の動水勾配、EDZ の影響範囲及びその透水係数等<br>・低拡散性に関するパラメータ<br>各人工バリアの部位の実行拡散係数及び間隙率、埋設施設からの拡散による移行の濃度境界となる EDZ 等<br>・収着性に関するパラメータ<br>各人工バリアの部位の収着体積、間隙率及び分配係数<br>・低溶出性に関するパラメータ<br>埋設施設内の酸化・還元環境等<br>（以上、6.2.3 より）<br>【変動ガスシナリオにおける不確実性（ガス移行シナリオ）】<br>・放射性ガス移行シナリオ<br>放射性ガス等の放射性物質を含むガス移行評価では、特に炭素 14 を含むガス発生量及び発生速度の変動及び人工バリアからのガス移行に関する状態設定の変動を考慮する。<br>・水素ガス移行シナリオ<br>水素ガス等の移行に関する評価では、ガス発生量及び発生速度の変動、水素ガス等が人工バリアへ及ぼす影響要因とその程度の変動、及び地下水シナリオとの関連において考慮すべき状態設定の変動を考慮する。<br><br>【管理期間終了の判断について】<br>・現行の安全審査指針による管理期間終了の考え方<br>被ばく管理の観点から行う廃棄物埋設地の管理は、「有意な期間」内に終了し得るとともに、管理期間終了以後において、埋設した廃棄 |

| | |
|---|---|
| | 物に起因して発生すると想定される一般公衆に及ぼす線量は、被ばく管理の観点からは管理することを必要としない低い線量（「めやす」としては、規制除外線量である 10μSv/年を超えないこと）であること。<br>　ここで、浅地中処分のうち人工構築物を設置した廃棄物埋設施設に埋設する場合の「有意な期間」としては、300 年～400 年を「めやす」として用いることとする。<br>　また、浅地中処分のうち人工構築物を設置しない廃棄物埋設施設に埋設する場合については、もともと放射能レベルの低い非固型化コンクリート等廃棄物を埋設対象としているため、「有意な期間」としては、埋設段階及びその後の 50 年程度の保全段階を「めやす」として用いることとする。<br>（以上、9.1 より）<br><br>・余裕深度処分における管理期間終了の考え方<br>　管理期間の終了を判断する根拠としては管理期間終了後の安全評価の結果、施設の状態が過渡的な変化を経て緩慢に変遷していくことを確認し、基本シナリオにおいて 10μSv/年を超えないことについて科学的に合理的な蓋然性があるとともに、変動シナリオにおいてその変動幅を考慮しても 300μSv/年を超えないこと、さらに稀頻度事象シナリオについても敢えて安全評価を行い、その影響が基本的に 10mSv/年を超えず、最大でも 100 mSv/年を超えることがないことが確認された段階。<br>（以上、9.3 より） |
| 11.本業務への反映事項 | ・過渡的な期間及び多重バリア機能に期待する期間における、安全評価に資する機能確認に関する事項 |

表 2.2-17　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（16）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 12 |
| 2.文献名 | Geological Disposal Facilities on Land for Solid Radioactive Wastes －Guidance on Requirements for Authorisation－ |
| 3.機関 | イギリス環境規制機関（EA）他 |
| 4.モニタリングの目的 | ・処分施設の建設、操業、閉鎖から生じる変化のモニタリングの実行 |
| 5.機能確認の考え方 | ・保証する許認可の期間、施設の設定されたパラメータ以内に納まる<br>・モニタリングは施設の環境セーフティケースを阻害してはならない |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・調査段階と建設前段階の間でモニタリングする必要がある<br>・放射能の測定<br>・地質学的、物理学的、化学的なパラメータを含む建設、廃棄物の定置により変化する値（例えば、地下水の水圧、流れ、化学組成）<br>・建設段階と許認可の期間に、施設の建設、操業、閉鎖が施設の特性に及ぼす影響を理解するため、パラメータをモニタリングする必要がある |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・具体的な廃棄物のレベルを明確に提示する必要がある<br>・誤った観測による不適切なアクションプランを避けるために、判断できる手法を用意する必要がある<br>・許認可の期間が終了した時点で、モニタリングやサーベイランスは終了とする |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリングの考え方 |

表 2.2-18　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（17）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 13 |
| 2.文献名 | Disposal of High-Level Radioactive Wastes in Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR Part63 |
| 3.機関 | NRC |
| 4.モニタリングの目的 | ・放射性の排出物が管理基準値以下であることを確認する<br>・建設及び操業期間を通じて地下の環境の状態及びその変化が許認可取得時に想定した範囲内にあることを確認する<br>・閉鎖後のバリアとして設計・想定した天然及び工学的なシステム並びに構成要素が期待通りに機能していることを確認する<br>（以上を性能確認プログラムとして要求） |
| 5.機能確認の考え方 | ・設計上の仮定と比較評価、設計や建設方法の変更の必要性の決定<br>・処分場の永久閉鎖の前に求められているライセンスの修正申請の中で、性能確認プログラムで得られたデータを用いて更新された閉鎖後の性能評価の提出が義務付けられている。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・規制上の基準値への適合性<br>・地質工学・設計パラメータの確認（特に地下施設の熱力学応答を原位置で永久閉鎖まで）<br>・設計試験<br>－ボアホールや立坑のシール、埋戻し材、ドリップシールド<br>－廃棄体パッケージ、埋戻し材、ドリップシールド、岩盤、不飽和帯及び飽和帯の地下水の熱的相互影響<br>・処分場操業エリアにおける廃棄物パッケージのモニタリングと試験<br>－パッケージ内部の状態を観察する実験室での実験も含め、可能な範囲で地下施設で廃棄物が遭遇する環境を再現する |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・性能確認のためのデータを提供することを目的とする性能確認プログラムを可能な場合に実施するように求めている。<br>・サイト特性調査から開始、永久閉鎖まで継続し、原位置のモニタリング、実験室やフィールドでの試験、原位置での実験を含む。 |
| 11.本業務への反映事項 | 性能評価のためのモニタリングの考え方 |

表 2.2-19　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（18）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 14-(1)　文献 14 のうち，性能確認プログラムへの一般要求について |
| 2.文献名 | Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804. |
| 3.機関 | 米国原子力規制委員会（NRC） |
| 4.モニタリングの目的 | 性能確認プログラムへの一般要求 |
| 5.機能確認の考え方 | ・性能確認計画書にプログラムの目的が記述されていることの確認と、目的が要求事項を満足するのに十分であることの確認。これには、十分な技術情報が含まれ、計画が特定されているかの確認を含む。<br>・計画書にスケジュールが記載されていること、それが要求事項を満足するのに十分であることの確認<br>・性能確認プログラムの実施に向けたアプローチの評価。これには、必要に応じてプログラムの実施の要否を決定し、詳細技術レビューを受けるのに必要な情報が計画書に含まれるかの確認を含む。<br>・記録、報告、不適合報告、検査などの管理手続きの妥当性確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・実際の地下環境条件や建設・操業中における変化が許認可レビューで想定した制限内に収まっているかどうか<br>・天然バリアシステム、人工バリアシステムが想定したとおりに機能しているかどうか<br>・プログラムのスケジュールの一般要求事項への一致<br>・プログラムが永久閉鎖まで継続すること<br>・天然・人工バリアシステムへの悪影響の考慮<br>・ベースライン情報と、その情報が調査、建設、操業により変化する可能性の評価の提示<br>・健康や安全性に影響しうるパラメータや自然プロセスのベースラインからの変動をモニタリングし、評価する内容となっていること<br>・人工バリアシステムと要素が想定したとおりに機能しているかどうかをモニタリングする内容となっていること<br>・性能確認計画書の定期的な評価と更新の記述 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認のための試験及びモニタリング項目 |

表 2.2-20　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（19）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 14-(2)　文献 14 のうち，地質工学パラメータと設計パラメータについて |
| 2.文献名 | Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804. |
| 3.機関 | 米国原子力規制委員会（NRC） |
| 4.モニタリングの目的 | 地質工学パラメータと設計パラメータの確認 |
| 5.機能確認の考え方 | ・性能確認計画書に建設・操業段階での地質工学パラメータと設計パラメータ（閉鎖後にバリアとして機能すると想定する自然プロセスを含む）の計測、試験、マッピングに関する容認可能なプログラムが提供されていることの確認<br>・プログラムに閉鎖までの地下施設の熱力学応答を原位置でモニタリングする計画が含まれることの確認とその計画の適切性の評価<br>・性能確認計画に、設計での仮定に対する地下環境条件をモニタリングし評価するための適切なサーベイランスプログラムが提供されていることの確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・モニタリング及び評価の対象としたパラメータが健康や安全性に影響するパラメータに焦点を当てた性能に基づく(performance-based)方法で選ばれていること<br>・選ばれたパラメータが合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・選ばれたパラメータのベースラインが、適切な解析的または統計的方法で決定されたこと<br>・選ばれたパラメータのベースラインが提出時期に入手可能な全データを考慮したものであること<br>・建設、操業による影響と天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用が考慮されていること<br>・原位置の熱力学応答パラメータが健康や安全性に影響するパラメータに焦点を当てた性能に基づく方法で選ばれていること。また修正オプションの維持の必要性を考慮していること。<br>・選ばれた原位置の熱力学応答パラメータが合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・選ばれた原位置の熱力学応答パラメータのベースラインが、適切な解析的または統計的方法で決定されたこと<br>・建設、操業による影響と天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用が考慮されていること<br>・モニタリング、試験、実験の方法が個々のパラメータの性質に適していること。機器の信頼性や交換の必要性を考慮していること。<br>・計画が、設計の根拠、仮定と計測・観察結果を比較する対策を含むこと。比較が定期的かつ変化の観点から適切な時期となっていること<br>・比較により深刻な違いが見つかった際には、設計や建設方法の修正の必要性を決定する方法を含むこと。許容しうる変化が提示されていること。<br>・深刻な違いやその重大性、変更について NRC に報告する方法を含むこと |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実 | 記載なし |

| | |
|---|---|
| 施方法 | |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認のための試験及びモニタリング項目 |

表 2.2-21　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（20）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 14-(3)　文献 14 のうち，設計試験への要求について |
| 2.文献名 | Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804. |
| 3.機関 | 米国原子力規制委員会（NRC） |
| 4.モニタリングの目的 | 設計試験への要求 |
| 5.機能確認の考え方 | ・性能確認計画書に、人工バリアシステムと要素の試験に関する適切なプログラムが含まれることの確認<br>・廃棄物パッケージ、岩盤、不飽和帯及び飽和帯の地下水、人工バリアシステム・要素間における熱的相互影響を設計試験プログラムに含むことの確認<br>・計画書で示されたスケジュールが要求事項を満足するのに十分であることの確認<br>・性能確認計画書に、設計上の要求事項に対して、埋戻しの設置・締固め手順の有効性を評価する適切な試験プログラムを含むことの確認<br>・性能確認計画書に、前もってボアホール、立坑、斜坑のシールを評価する適切な試験プログラムを含むことの確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・試験対象とする人工バリアシステムと要素が、廃棄物隔離に重要なシステムと要素に焦点を当てた性能に基づく方法で選ばれていること。<br>・選ばれた人工バリアシステムと要素が合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・試験方法が個々の人工バリアシステムと要素の性質に適していること。試験の場所が環境との親和性を考慮して決められていること。機器の信頼性や交換の必要性を考慮していること。<br>・廃棄物の定置による影響や天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用が設計根拠に考慮されていること<br>・試験対象とする熱的相互影響が健康や安全性に影響するパラメータに焦点を当てた性能に基づく方法で選ばれていること<br>・選ばれた熱的相互影響が合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・試験方法が個々の熱的相互影響の性質に適していること。試験方法が設計に必要なデータを考慮して選ばれていること。試験の場所が環境との親和性を考慮して決められていること。機器の信頼性や交換の必要性を考慮していること。<br>・廃棄物の定置による影響や天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用が、性能限界（すなわち設計上の想定）を評価する際に考慮されていること<br>・試験対象とする埋戻し材の定置・締固め手順が、廃棄物隔離に重要なシステムと要素に焦点を当てた性能に基づく方法で選ばれていること<br>・選ばれた埋戻し材の定置・締固め手順が合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・試験方法が埋戻し材の定置・締固め手順の性質に適していること。試験方法が手順の設計に必要なデータを考慮して選ばれていること。試験の場所が環境との親和性を考慮して決められていること。機器の信頼性や交換の必要性を考慮していること。<br>・廃棄物の定置による影響や天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用が設計根拠に考慮されていること<br>・ボアホール、立坑、斜坑のシールの有効性を評価する試験プログラムが、廃棄物隔離に重要なシステムと要素に焦点を当てた性能に基づく |

| | |
|---|---|
| | 方法で選ばれていること<br>・選ばれた試験プログラムが合理的かつ完全であることの性能評価による確認<br>・試験方法がボアホール、立坑、斜坑のシールの有効性の評価に適していること。試験方法が手順の設計に必要なデータを考慮して選ばれていること。試験の場所が環境との親和性を考慮して決められていること。機器の信頼性や交換の必要性を考慮していること。<br>・廃棄物の定置、試験プログラムによる天然バリアシステム・人工バリアシステムの相互作用への影響が設計根拠に考慮されていること |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認のための試験及びモニタリング項目 |

表 2.2-22　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（21）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 14-(4)　文献 14 のうち，廃棄物パッケージのモニタリング・試験への要求 |
| 2.文献名 | Yucca Mountain Review Plan, NUREG-1804. |
| 3.機関 | 米国原子力規制委員会（NRC） |
| 4.モニタリングの目的 | 廃棄物パッケージのモニタリング・試験への要求 |
| 5.機能確認の考え方 | ・性能確認計画書に、処分場の操業エリアにおける廃棄物パッケージの状態のモニタリングに関する適切なプログラムが含まれることの確認。特に以下の評価に関する確認。<br>・性能確認計画書に、廃棄物パッケージ内部の状態に焦点をあてた実験室での実験に関する適切なプログラムを含むことの確認<br>・廃棄物パッケージのモニタリング及び試験プログラムのスケジュールが要求事項を満足するのに十分であることの確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・モニタリング及び試験の対象とする廃棄物パッケージは、材料、設計、構造、製造、検査の方法の観点において代表性があること<br>・モニタリング及び試験の対象とする廃棄物パッケージの環境は、定置環境として代表性があり、安全な操業に一致すること<br>・モニタリング及び評価の対象とする環境条件は、少なくとも地下水化学特性を含むこと<br>・モニタリング及び試験には、溶接、製造上の欠陥、製造後の損傷、特にハンドリング時の損傷の評価を含むこと<br>・プログラムが技術的に実施可能であること。方法が適切で実施可能であり、センサや機器が環境条件を維持できるものであること。また交換可能なこと。<br>・実験は廃棄物パッケージの設計や性能評価のモデル及び前提の確認に必要なデータを提供すること<br>・腐食モニタリング及び試験は、少なくとも腐食の試験片を含むこと<br>・プログラムのスケジュールは可能な限り早期に開始すること。またモニタリング及び試験を永久閉鎖まで可能な限り長く継続すること。 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・モニタリング及び試験の対象とする廃棄物パッケージは、材料、設計、構造、製造、検査の方法の観点において代表性があること<br>・モニタリング及び試験の対象とする廃棄物パッケージの環境は、定置環境として代表性があり、安全な操業に一致すること |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認のための試験及びモニタリング項目 |

表 2.2-23　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（22）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 15-(1)　文献 15 のうち，人工バリアモニタリングについて（5.3.3） |
| 2.文献名 | Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61(NUREG-2175) |
| 3.機関 | U.S.NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) |
| 4.モニタリングの目的 | 性能の確認と（あるいは）予測モデルの支援 |
| 5.機能確認の考え方 | 人工バリアのモニタリングは困難である。劣化プロセスの影響を観察することが長期性能の理解にとって重要である。人工的な地表の覆い（engineered surface covers）の性能モニタリングにより、性能評価、人間侵入評価、サイト安定性評価で予測していた通りに覆いが機能していれば信頼を与えることになる。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 覆いのモニタリングには、直接的に行われる非破壊の性能モニタリングと直接的／間接的に行われる解釈用モニタリングがある。<br>・性能モニタリングは、直接かつ継続的に、原位置で装置を用いて主要な性能の変数（例えば覆いを通過するフラックス）をモニタリングする<br>・解釈用モニタリングは、主要な性能の変数に関連する補助的な変数（例えば含水量）をモニタリングし、主要な性能モニタリングのデータの理解や解釈に使われる。 |
| 7.計測設備 | 記述なし |
| 8.計測技術 | ・解釈用モニタリングは埋込センサで直接的に測定するものや、地中探知レーダーや航空機搭載レーダーのようなリモートセンシングで間接的に測定するものがある。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 以下が例として示されている。<br>・リモートセンシングにより覆いを効果的にモニタリングできる例として、植生の変化がある。植生の変化は水の流動特性に依存し、線形に植生が生じた場合は、クラックやバリアの何らかの劣化を示している可能性がある。 |
| 10.その他 | ・将来的には長期間のモニタリングにリモートセンシングが重要になる。<br>・解釈用モニタリングは、環境への放射性核種の放出に繋がりかねない性能上の問題を発見できる可能性があるため、強く推奨している。 |
| 11.本業務への反映事項 | 補完的な解釈用モニタリングの設定、リモートセンシングの活用方法 |

表 2.2-24　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（23）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 15-(2)　文献 15 のうち，性能確認について（10.0） |
| 2.文献名 | Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61(NUREG-2175) |
| 3.機関 | U.S.NRC (United States Nuclear Regulatory Commission) |
| 4.モニタリングの目的 | 性能確認の支援 |
| 5.機能確認の考え方 | 性能確認とは、サイト閉鎖前に性能目標が満足していることを証明するために使った情報の正確性を評価・妥当性確認するための試験、実験、解析のプログラムである。性能確認プログラムの主要な要素は以下の通り。<br>・ 建設中に遭遇したサイト条件が許認可申請段階に想定した範囲内にあることの確認<br>・ 人工バリアと多重防護が設計通りに構築され、許認可申請段階に想定した範囲の性能を有することの確認<br>・ 性能目標を満たすとして許認可の時点で期待した天然バリアの性能の確認<br>・ 施設の性能のモニタリング<br>・ セーフティケースの確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 性能確認を支援する規制要求として以下のモニタリングが挙げられている。<br>・ 閉鎖後モニタリングと維持（10 CFR 61.7(c)(3)）：閉鎖段階の後、5 年間、サイトの安定性と制度的管理の準備を保証するための観察と維持管理を行う。<br>・ 閉鎖申請書の内容（10 CFR 61.28）：放射性廃棄物の長期閉じ込めに関連する、操業期間中に得られた追加的な地質、水理、その他サイトデータ<br>・ 建設・操業中の環境モニタリング（10 CFR 61.53(c)）：建設・操業中のモニタリングシステムは、長期影響の評価に使用でき、緩和対策の必要性を評価できるデータであること。環境モニタリングシステムは、サイトから放出された放射性核種がサイト境界を超える前に、放出を早期に警告できるものとすること。<br>・ 閉鎖後サーベイランスのための環境モニタリング（10 CFR 61.53(d)）：環境モニタリングシステムは、サイトから放出された放射性核種がサイト境界を超える前に、放出を早期に警告できるものとすること。 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・ 環境モニタリングシステムは、サイトから放出された放射性核種がサイト境界を超える前に、放出を早期に警告できるものとする。<br>・ 環境モニタリングは、施設から多少離れた施設周辺の緩衝帯及び境界部の地下水、大気等のサンプリングが主体となる。<br>・ 性能指標（performance indicator）を決定し、使用することでモニタリングに役立つ可能性がある。性能指標は、処分システムの全体性能を直接計測して得るものではないが、システム性能の変化の前兆を見つけ、早期段階に警告する役割をもつ。 |
| 10.その他 | ・ 許認可申請を支援する解析の更新を定期的に行うことを推奨して |

| | |
|---|---|
| | おり、その際にモニタリングのデータも使用される。<br>・ 制度的管理段階においても処分施設の性能のモニタリングと小規模な管理は必要であると考えられている。<br>・ モニタリングデータで想定外の値が得られたとしても、異常値として扱うのではなく、想定していない現象が生じたのではないか、という注意を持ってデータを扱うべきである。 |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認におけるモニタリングの役割に関する考え方 |

表 2.2-25　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（24）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 16 |
| 2.文献名 | Guide de surete relative au stockage definitif des dechets radioactifs en formation geologique profonde<br>5.6　Le programme de surveillance |
| 3.機関 | フランス原子力安全局 |
| 4.モニタリングの目的 | サーベイランスプログラムの目的として、処分施設の各段階において、段階の進行に伴う主要な事象とともに、処分施設の構成要素や岩盤の状態を反映したパラメータの変遷をたどることである、としている。 |
| 5.機能確認の考え方 | サーベイランスプログラムは、処分施設建設から閉鎖までの間実施される必要があり、場合によっては施設閉鎖後も継続する必要があるとされており、サーベイランスの制約条件として、処分施設の安全性のレベルを低下させてはならないことが挙げられている。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 本業務への反映事項なし |

表 2.2-26　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（25）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 17 |
| 2.文献名 | Disposal of nuclear waste |
| 3.機関 | フィンランド放射線及び核安全局 STUK |
| 4.モニタリングの目的 | 記載なし |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | モニタリング項目として具体的な記述はないものの、施設の安全性に関連する母岩の特性やバリアの挙動に関する十分なデータを収集する必要があると指摘しており、以下のようなモニタリングを実施すべきであるとしている。<br><br>・　掘削される岩盤の体積に関する特性<br>・　廃棄体を定置する周辺の岩盤の応力、変形のモニタリング<br>・　廃棄体を定置する周辺の岩盤の水文地質学的なモニタリング<br>・　地下水化学のモニタリング<br>・　人工バリアの挙動に関するモニタリング |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 処分施設の閉鎖のための前提条件として、以下の項目が必要であるとされている。<br><br>・　処分施設閉鎖の技術的な実施に関する説明<br>・　法令で定められた、研究・試験・モニタリング結果を踏まえて更新されたセーフティケース<br>・　処分施設閉鎖後のモニタリング計画と、法令で定められた「計測を禁止する区域」の提案 |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリング項目 |

表 2.2-27　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（26）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 18 |
| 2.文献名 | SSM: Technical note 2014:40, Review of performance confirmation programs and potential roles in SSM's current review of SKB's license application. –Main Review Phase- |
| 3.機関 | SSM(Swedish Radiation Safety Authority) |
| 4.モニタリングの目的 | 文献中では，モニタリングに関して直接言及はしていないが，モニタリングに関連する「性能確認（performance confirmation）」を，認閉鎖前の建設及び操業期間において，試験の実施と情報の議論，初期の建設許認可（CLA）の解析と結果のために実施すべきプログラムと定義し，その目的として，以下を示している。<br>・ 建設・操業期間中に遭遇する現実的な地表面下の状況，及びそれらの状況の変化が CLA の評価において限定的な仮定の範囲内であることの立証<br>・ 天然バリア及び人工バリアシステム及びバリアの構成要素が，以降の廃棄体定置に対して所定の特性と安全機能を有することを示す試験や計測<br>・ 新規技術の適用性評価に加えて，原位置試験，大規模試験，あるいは長期試験を通じたモデルにおける不確実性の低減や代替案の排除<br>・ 公衆衛生の確保や安全性の充足を目的として設計された性能目標や安全機能を確認するための持続的で追跡可能な試験プログラムを通じた一般公衆の信頼性向上 |
| 5.機能確認の考え方 | 性能確認プログラムが許認可へ貢献するための留意事項として，以下の項目が述べられている。<br>・ 閉鎖前の性能確認プログラムにおいても，初期の建設許認可の基本となる，先行するサイト特性調査及び材料試験の継続を含んでいる。<br>・ 限られた人材，工程，及び予算管理においては，システム性能やバリアの安全機能に重要なプロセスやパラメータの取得に集中することが要求されるが，それらは比較的大きな不確実性を有している。したがって，プロセスやパラメータの選定は，信頼性のある代替シナリオに対するリスク情報及び性能規定に基づくべきである。<br>・ リスク的に重要で解決が困難な主要な事項を確認した後に，3 つの大まかな選定基準がそれぞれ適用可能である。<br>・バリア能力（安全機能）及びシステム性能に対してパラメータがどの程度重要か？<br>・パラメータに対する現在の知見は，どの程度の信頼性のレベルか？<br>・特定の試験より得られた情報は，どの程度正確か？<br>・ 性能確認プログラムは，施設の性能と安全性確認におけるプログラムの向上と同様に，新しい技術を導入し，修正し，そして受け入れるために繰返しの更新が必要である。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 具体的なモニタリング項目は示されていないが，性能確認の目的として，機能確認試験に関連する以下の項目が含まれている。<br>・ 天然バリア及び人工バリアシステム及びバリアの構成要素が，以降の廃棄体定置に対して所定の特性と安全機能を有することを示す試験や計測の実施<br>・ 新規技術の適用性評価に加え，原位置試験，大規模試験，あるいは長期試験を通じたモデルにおける不確実性の低減や代替案の排除 |
| 7.計測設備 | 記載なし |

| | |
|---|---|
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | |
| 11.本業務への反映事項 | 操業期間中に実施する「性能確認」の目的と考え方 |

表 2.2-28　モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（27）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 19 |
| 2.文献名 | The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste, SSMFS 2008:21 |
| 3.機関 | SSM(Swedish Radiation Safety Authority) |
| 4.モニタリングの目的 | 安全性のために実施した解析結果による対策を確認する（'measures'） |
| 5.機能確認の考え方 | ○直接、機能確認に関する記述はないが、機能を確認するための前提となる安全性解析について以下の記述がある。<br>・安全性の解析におけるシナリオは、外部条件と内部条件の与えられた組合せによって処分施設に与える影響が検討される。それぞれの条件は以下の通り。<br>【外部条件】特性、処分施設バリアの外部で生じる事象とプロセスにおける条件⇒これらは気候変動や処分施設環境の間接的効果を含んでいる、人間の活動と同様に、凍土、氷河、地盤沈下、地盤隆起。<br>【内部条件】特性、処分施設バリアの内部で生じる事象とプロセスにおける条件⇒これらの条件における事例は、地層周辺と関連するプロセスと同様に、不具合、核物質、核廃棄物、及び人工バリアと関連するプロセスを含む特性。<br>○閉鎖後の処分施設の安全性は、放射性物質の分散可能性を主に想定することによって、そして、時系列として、どのように事象の順序立て（シナリオ）が分布されているかを、量的に解析している。<br>○安全性の解析を行う目的は、とりわけ、これらのシナリオからの危険を示すことにある。この危険とは、SSM によって課せられている人的健康や環境の保護における要求に関連している。<br>○安全性の解析には、また次の目的もある。異なる期間中における処分施設の挙動に関する基本的な認識に備えるため。挙動に関する要求や異なる処分施設の構成要素を確認するため。<br>○安全性の解析を行うためのシナリオについて以下の記述がある。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ○直接、モニタリングに関する記述はないが、安全性を確認する解析によって設定される対策について以下の記述がある。<br>・処分施設の操業調査と保守となる規制の前提は、SSM の規制(SSMFS 2008 : 1)の原子力施設の安全性の条項にしたがって、処分施設が閉鎖されるまで実施される。<br>・閉鎖は、施設に関する報告にしたがって（9 節、11 節）、トンネルや立坑を地表までの埋め戻しを伴う。たとえば、処分施設操業期間に実施される定置空洞の埋戻しは、この点において閉鎖とみなさない。<br>・資格所有者は閉鎖前の安全性に関して、その対策が適切であることを保証しなければならない。本対策は、SSM の規制(SSMFS 2008 : 1)にしたがった管理システムの要求、安全性のレビュー、プログラム、定期的な安全レビューに応じて実施される。<br><br>○また、バリア機能について、以下の記述がある。<br>・人工バリアの機能の例としては、他のバリアの化学的保護性能を含み、漏れを防止する容器内における放射性物質の格納を完全にする。他バリアの維持や放射性物質の分散防止を手助けする化学特性と同様の水漏れ抵抗や数種の物質分散への抵抗と同様である。<br>・処分施設箇所における地層自体で天然バリアとなり得る、岩のような地層は、複数のバリア機能を有する。例えば、地表環境からの隔離、人 |

| | |
|---|---|
| | 工バリアにおける空気や水などによる損傷影響の制限化、処分施設への地下水流動の制限化、そして処分施設の内部や近傍における有益な化学環境への貢献（地下水内における放射性物質の移行を弱める）。<br>・バリアあるいはバリア機能は、処分施設の処分施設のバリアや計画やロケーションにおける安全能力に影響するような放射性（あるいは多種の）物質が寄与する処分施設において必要とされる。<br>・これらのニーズやバリアシステムによってどのように満足されているかは、処分施設に関する安全性解析報告に明確に示されるものとする。 |
| 7.計測設備 | ○特に記載はないが、計測技術に関する記述として下欄を参照 |
| 8.計測技術 | ○特に記載はないが、技術面としての導入に関する考え方として以下の記述がある。<br>・技術的、経済的観点から見たテクノロジーを意味するような使用可能な技術は、その地域内における適用に工業的に実現可能であるものとする。これは、技術が可能でなければならず、また単に試験段階に存在するものでもない。しかしながら、その技術はスウェーデンの中で可能である必要はない。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | ○モニタリングの実施方法についての記述は特にない。 |
| 10.その他 | ・処分施設箇所や処分深度は、地層が適切な安定性と有利な条件を供給し、処分施設バリアが十分な期間以上に動作することを保証する条件に基づいて選択されるものとする、<br>・上記条件としては、温度関連、水理的、力学的（例えば岩盤力学や地震学）及び化学的（地質化学、水理化学を含む）。さらに、処分施設箇所が、現在利用されているか、将来利用する予定がある天然資源から十分な距離が確保されている位置とする。<br>・地層処分施設のバリア機能において、閉鎖後の安全性の低下に繋がるような欠損（不具合）が発生、あるいはその疑いがあると見込まれた場合は、遅滞なく、SSM に報告されるものとする。<br>・バリアシステムは最善の技術を考慮して設計、建設されるものとし、複数のバリアを包含する。それゆえ、安全性は単独の欠損があろうとも維持されなければならない。 |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリング項目を検討する上での、処分施設の建設、操業中における安全性の検討解析に関する考え方、ノウハウの収集 |

表 2.2-29 モニタリングの規制機関の基準に関する調査結果（28）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 20 |
| 2.文献名 | Specific design principles for deep geological repositories and requirements for the safety case. Guideline for Swiss nuclear installations |
| 3.機関 | ENSI (Swiss Federal Nuclear Safety Instructiorate) |
| 4.モニタリングの目的 | ・パイロット施設において、実廃棄体を使い、モニタリング段階（原則 50 年）の間、廃棄体、埋め戻し材、及び母岩の挙動に関するデータを収集する。モニタリング段階の間は、閉鎖の判断を見据えて、長期の安全性を確認するものとする。<br>・モニタリングと地層処分の維持及び回収可能性は、互いに共存し、受動的な安全バリアを乱してはならない。 |
| 5.機能確認の考え方 | ・得られた知見は、主用部位でのデータプロセシングに伝送されなければならない。すなわち、進行中のプロセスに移行可能（transferable）でなければならない。これらのデータは処分場の閉鎖の決定のための基礎となるものである。<br>・地質、水理学的地質条件は、本体部のデータと比較しなければならない。<br>・パイロット部はメインセクションからは、空間的に水理的に分離されていなければならない。<br>・パイロット部の施工は、メインセクションに対応して、廃棄物の定置プロセスや、埋め戻し材料は、メインセクションのものに対応している必要がある。<br>・パイロット部は、廃棄物の量は少なくても、実際の廃棄物の代表成分を含んでいなければならない。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・パイロット施設は、本施設における廃棄体の定置に先立って、廃棄体を定置し、埋戻しを行なわなければならない。<br>・本施設のバリアシステムがパイロット施設において、十分に正確に再現されなければならない。<br>・パイロット施設の廃棄体は、本施設の廃棄体を十分に代表するものでなければならない。<br>・パイロット施設のモニタリングプログラムは、パイロット施設と岩盤環境の変遷を測定し、それに関する以下の情報を与えるものとする。<br>a. パイロット施設の安全性に関係した状態およびプロセスと岩盤環境について。<br>b. 予期しない事象を早期発見する。<br>c. バリアの有効性を確認する。<br>d. 安全評価の確証を支援する。 |
| 7.計測設備 | ・特に記載はない。 |
| 8.計測技術 | ・データは、主要施設とその岩盤環境の状況に、移行可能でなければならない。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・パイロット施設において、実廃棄体を使い、モニタリング段階（原則 50 年）の間、廃棄体、埋め戻し材、及び母岩の挙動に関するデータを収集する。 |
| 10.その他 | ・パイロット施設に適用されるモニタリングプログラムは、定期的にチェックされなければならない。モニタリングプログラムとその結果は、ENSI（連邦原子力安全検査局）がレビューを行うために提出されなければならない。 |
| 11.本業務への反映事項 | パイロット施設において、実廃棄体を用いてモニタリングを行い、その期間を 50 年と定めたことがスイスの特徴である。 |

### 2.2.2　モニタリングの規制機関の考え方に関する調査結果のまとめ

モニタリングの規制機関の考え方に関する調査結果を表 2.2-30～表 2.2-31 に示す。IAEA の放射性廃棄物処分施設のモニタリングに関する個別安全指針（SSG-31）では、モニタリングの目的を、処分システムの構成要素が、安全評価の中で特定された機能を実施していること、安全評価をするために用いられたモデルが実施の状態と首尾一貫していることを検証すること、処分施設、サイト及びその周辺に関する情報データベースを確立することと定義している。

また、この情報データベースは、立地から建設、操業、閉鎖、閉鎖後の期間に進む際に、将来の計測データの比較対象として、処分システムが安全に機能しているという判断を支えるために利用されること、計測されたデータがすでに確立されたデータベースに対して想定外、または異常値を検出した場合には、所管の規制機関に迅速に報告し指示を仰ぐこと、公衆（ステークホルダー）への情報を提供すること等が主要な目的であることが示されている。

なお、異常値を検出した場合に対する判断や、具体的な対策は、実施主体が規制機関と共に検討することであるため、本検討では対象外とする。

モニタリングを実施する場所について、IAEA の規定（SSG-31 2.3）では閉鎖後の施設全体の安全性を低下させることがないように設計され実施される必要があるとのことから、実廃棄体を定置する実施施設ではモニタリングを行わないことが、スウェーデン、フィンランド、スイスで共通である。模擬廃棄体を使った試験施設でモニタリングを行うケースとして、フィンランドの Olukiluoto における ONKALO 地下特性調査施設のように実施施設のエリアの中央に設置する場合（図 2.1-1）と、スウェーデンのエスポ岩盤研究所のように実施施設とは全く別の場所で岩盤環境に関する試験を行う場合（図 2.2-3）の２ケースがある。

一方、試験施設で実廃棄体を使ってモニタリングするケースは、スイスのようにパイロット施設を実施施設とは隔離して構築し、実施施設の操業に先立って実廃棄体を用いて、廃棄物の定置、埋め戻しや岩盤の挙動を監視するケースと、実施施設でモニタリングを行うケースとして、フランスのように約 100 年間は「可逆性を維持した地層処分場」とし、実廃棄体の取出しや、処分施設の設計変更等、将来世代への選択肢を残すために実廃棄体の近傍でモニタリングを行うケースがある（図 2.2-4）。フランスの場合は直径 70 ㎝の鋼製セルの中に廃棄体を複数、直列に配置する方法で、スェーデン、フィンランド、スイス、日本とは異なり鋼製セルの外側表面に光ファイバーセンサを配置した温度計測、放射能測定を主とした配置であるため、本章では対象外とする。

余裕深度処分施設のモニタリングは、処分施設の挙動を正確に計測できること、また、地下環境によって検査システムがどうのように変化するのか取出して調査が可能であることが重要であり、廃棄体として実廃棄体を使うと放射能に対する防護措置等を考慮しなければならないことから、模擬廃棄体を使って、実施処分施設以外の場所で検討することが好ましいと考える。

また、日本と北欧との大きな違いは、岩盤環境が複雑で、地下水の流出量も多いことが予想されることから、日本における余裕深度処分施設のモニタリングを考える場合には、処分施設を構成する各部材の挙動を把握するとともに、こうした地下環境の影響や対策を考慮したモニタリング計画が重要だと考える。

表 2.2-30　モニタリングの各国の規制機関における考え方の比較（その 1）

| | IAEA　モニタリングとサーベイランス（SSG-31）、2014 年 | アメリカ NRC 10CFR Part 61（NUREG-2175）、2015 年 | スウェーデン　SSM　性能確認プログラムのレビュー、2008 年 |
|---|---|---|---|
| モニタリングの目的 | ・ 規制要件と許認可条件に対する順守の実証。<br>・ 処分システムの構成要素が、安全評価の中で特定された機能を実施していること。<br>・ 安全を評価するためになされた想定及び用いられたモデルが実施の状態と首尾一貫することを検証することを検証する。<br>・ 処分施設、サイト及びその周辺に関する情報データベースを確立する。立地から建設、操業、閉鎖、閉鎖後の期間に進む際に将来の決定を支えるために利用される。モニタリングの概念及び手順の更新に関連した決定を裏付けるものとしても利用される。<br>・ 公衆への情報を提供すること。 | ・ 性能の確認と（あるいは）予測モデルの支援<br>・ 性能確認の支援 | ・ モニタリングに関連する「性能確認」を，建設及び操業期間において，試験の実施と情報の議論，初期の建設許認可(CLA)の解析と結果のために実施すべきプログラムと定義<br>・ 建設・操業期間中に遭遇する地表面下の状況，それらの状況の変化が CLA 評価の限定的な仮定の範囲内であることの立証<br>・ 天然バリア、人工バリアシステム、バリアの構成要素が，廃棄体定置に対して所定の特性と安全機能を有することを示す<br>・ 新規技術の適用性評価，原位置試験，大規模試験，長期試験を通じたモデルにおける不確実性の低減や代替案の排除<br>・ 公衆衛生の確保や安全性の充足を目的として設計された性能目標や安全機能を確認するための持続的で追跡可能な試験プログラムを通じた一般公衆の信頼性向上 |
| 実施期間 | ・ 建設段階前とその期間中、及び操業前期間中。<br>・ 操業及び閉鎖後期間中における、システムの性能にかかわるあらゆる異常の検出。 | ・ 閉鎖後モニタリングと維持（10 CFR 61.7(c)(3)）：閉鎖段階の後、5 年間<br>・ 建設・操業中の環境モニタリング（10 CFR 61.53(c)） | ・建設・操業期間中 |
| 規制当局への報告 | ・ 定期的に報告すべきである。異常事態または、想定外の事象が発生した場合には、所管の規制機関に対して、迅速に場所、時間等について報告する。 | （表に記載はないが、規制要求に対する報告があると思われる） | （記載なし） |
| 計測設備 | ・ モニタリング機器の電源の寿命など、物理的課題や制約によって、必然的に制限される。 | （記載なし） | （記載なし） |
| モニタリング | ・ モニタリングプログラムを設計する場合の重要な部分は、何について知る必要 | ・ 性能指標（performance indicator）を決定し、使用する | （記載なし） |

| | | | |
|---|---|---|---|
| の実施方法 | があり、その知見がどのように得られるかを明確にするための初期評価である。 | ことでモニタリングに役立つ可能性がある。性能指標は、処分システムの全体性能を直接計測して得るものではないが、システム性能の変化の前兆を見つけ、早期段階に警告する役割をもつ。 | |
| 閉鎖後の影響 | ・ 閉鎖後の施設全体の安全性を低下させることがないように設計され、実施される必要がある。<br>・ 実処分施設でのモニタリングが困難な場合、似たような特徴を有する代替施設、実証施設、パイロット施設におけるモニタリングが有益な情報を提供する場合もある。 | ・ 制度的管理段階においても処分施設の性能のモニタリングと小規模な管理は必要であると考えられている。 | （記載なし） |
| 【地層処分】ベースラインモニタリング項目 | ・母岩の地下水流動場（物質の特性、地下水分布、動水勾配等）<br>・地下水の地球科学的特性（酸化還元、塩度、主要元素の濃度、自然放射性核種の含有量等）<br>・母岩の鉱物学、力学的特性<br>・母岩の不連続面の特性調査<br>・地下水、地表水、大気、土壌及び堆積物並びに動植物における自然放射能のレベル | ― | ― |
| 【地層処分】廃棄物パッケージの状態モニタリング | ・直接測定することが可能なパラメータ（腐食電流、ひずみ、粘土緩衝材の膨潤圧）<br>・環境パラメータ（たとえば、温度、湿度、再飽和圧力）<br>・廃棄物パッケージにできるだけ近いところの廃棄物由来ガスの解析 | ― | ― |
| 【地層処分】構造物及び人工バリアのモニタリング | ・機械的特性、応力、ひずみ<br>・地下開口部の従来型の観察（岩石応力、岩盤支持物の変形および荷重、壁およびラ | ― | ― |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | イニングの変形、亀裂 | | |
| 【地層処分】処分施設によって引起される擾乱 | ・開削活動の結果としての機械的擾乱、排水に起因する水理学的および水化学的擾乱、発熱性廃棄物の定置によって引き起こされる熱機械的影響、空気の侵等による地球科学的擾乱 | ― | ― |
| 【地層処分】母岩のモニタリング項目 | ・母岩における機械的擾乱、応力場、変形、亀裂<br>・水力学的擾乱、透水性、水圧、飽和度<br>・地球化学的擾乱、間隙水及び鉱物学、pH値<br>酸化還元値、保持特性、生物学的変化<br>・熱的擾乱、温度分布、温度分布から得られる熱伝導率 | ― | ― |

表 2.2-31　モニタリングの各国の規制機関における考え方の比較(その 2)

| | スイス　原子力法令<br>（Nuclear Energy Ordinance）、<br>2009 年 | フィンランド　STUK<br>(Nuclear Waste Repository)、2013 年 | 日本　原子力規制委員会<br>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、2013 年 |
|---|---|---|---|
| モニタリングの目的 | 深地層処分場は放射性廃棄物、パイロット施設とテスト施設から構成される（<br>図 2.2-2 参照）。<br>・ モニタリングはパイロット施設において、実廃棄物を使って定置し、廃棄物、埋め戻し材や岩盤の挙動の監視を行う。 | ・掘削されるサイトと岩盤が処分施設に相応しいものであることを示すために実施される。<br>・安全性に関する母岩の特性やバリアの挙動に関する十分なデータが収集できるものとする。 | ・既存の管理要求は、トレンチ処分又はピット処分を対象としており、余裕深度処分には、既存の管理要求に加えて離隔機能の状態を管理することと規定。 |
| 実施期間 | ・ パイロット施設におけるモニタリング実施期間は、監視期間が満了する時までとする。<br>・ 所有者（Nagra）が、モニタリング期間を提案する必要がある<br>・ Nagra の技術報告書によれば、モニタリング期間は、定置後から閉鎖の適用まで原則的に 50 年間と規定されている。 | ・埋め戻しと、定置空間および他の空間の閉鎖までを原則とする。<br>・要求された場合は、処分施設の閉鎖後モニタリングを実施する。 | 第二種廃棄物埋設における現行の管理制度<br>➢ 能動的な制度的管理<br>事業廃止までの期間においては、遮蔽、閉じ込め、移行抑制の機能が確保されていることを確認するため、事業者に対し、モニタリング、施設の保全等の能動的な制度的管理を義務付け。<br>・ 事業廃止後は、「廃棄物埋設地の保全のために講ずべき措置を必要としない状況にあること」が原子力規制委員会により確認されなければ認可されない仕組み。<br>➢ 定期的な見直し（PSR）<br>・ 10 年ごとに実施される被ばく管理の評価において、最新の知見に基づき、将来の社会環境や技術などの変化を適切に取り込む。<br>管理制度の課題<br>余裕深度処分の場合、一般的な土地利用が及ぶ可能性の小さい十分な深度があるとしても、浅地中処分に比べ放射能が長期に残留することから、事業廃止後の管理について検討する必要がある。 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 規制当局への報告 | ・ 原子力法 73 条に従って、処分施設に関するいかなる情報も、自発的に規制担当者に対して報告するものとする。 | ― | （記載なし） |
| 計測設備 | ・ モニタリング機器の電源の寿命など、物理的課題や制約によって、必然的に制限される。 | ― | （記載なし） |
| モニタリングの実施方法 | ・ モニタリングはパイロット施設において、実廃棄体を用いて実施する。 | ・掘削される岩巻の体積に関する特性<br>・定置する周辺の岩盤の岩盤応力、動き、変形のデータ<br>・定置する周辺の岩盤の水文地質学的なデータ<br>・地下水化学のデータ<br>・エンジニアリングバリアの挙動に関するデータ | 埋設段階及び保全段階の主な管理要求として、目的と管理要求が記載されており、管理要求の中に監視・測定すべき項目が挙げられている。<br>➢ 遮蔽機能（余裕深度処分）<br>・ 周辺監視区域の直接 γ 線及びスカイシャイン γ 線に係る線量当量の測定<br>➢ 閉じ込め機能（余裕深度処分）<br>・ 人工バリアから漏出する放射性物質の測定<br>➢ 移行抑制機能（余裕深度処分）<br>・ 地下水中の放射性物質濃度の測定<br>➢ 離隔機能（余裕深度処分）<br>・ 埋設深度等の状態の監視<br><br>また、事業廃止後の閉じ込め機能、移行抑制機能を評価することを目的として、余裕深度処分では、地下水位・水質等、必要な測定を要求している。 |
| 閉鎖後の影響 | ・ 閉鎖後のモニタリングは規定していない。<br>・ ただし、規制機関である ANSI はモニタリング期間を延長することができる。 | 処分施設の閉鎖のための前提条件として、以下の項目が必要であるとされている。<br>・ 処分施設閉鎖の技術的な実施に関する説明<br>・ 法令で定められた、研究・試験・モニタリング結果を踏まえて更新されたセーフティケース<br>・ 処分施設閉鎖後のモニタリング計画と、法令で定められた「計測を禁止す | 事業廃止後の制度的管理の考え方について、以下のように記載されている。<br>・ 長期に亘る安定的な管理としては、マーカーの設置、記録の保存等の受動的な制度的管理とすることが適当である。これは IAEA 基準でも明記されており、諸外国の規制でも導入されている。（IAEA SSR-5 件 22 及び 5.7）<br>・ ただし、事業廃止後の受動的な制度的管理は、将来の不測の事態等により効力を失う |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | る区域」の提案 | 可能性があることから、規制基準適合性の評価の前提として取り扱うことは適当ではない。（IAEA　SSR-5　5.6） |
| 【地層処分】ベースラインモニタリング項目 | － | － | － |
| 【地層処分】廃棄物パッケージの状態モニタリング | － | － | － |
| 【地層処分】構造物及び人工バリアのモニタリング | ・パイロット施設の廃棄物容量は少量であるが、処分場の量を代表するものでなければならない。<br>・パイロット施設では、主要施設（Main facility)において廃棄物の定置が始まる前に、廃棄物を定置し、埋め戻しを完了しなければならない | － | － |
| 【地層処分】処分施設によって引起される擾乱 | － | － | － |
| 【地層処分】母岩のモニタリング項目 | ・岩盤、および岩盤水理の状態が、主要部分（Main section)と比較されなければならない。<br>・パイロット部分は、空間的にも水理学的にも、主要部分と隔離されていなければならない。<br>・パイロット部分の建設と廃棄物の定置プロセスは、主要部分における定置プロセスと対応していなければならない。 | 天然バリアが安全機能を高めるため以下の項目を満足するものとする。<br>・岩盤の安定性<br>・地下水流量が少ないこと<br>・好ましい地下水化学<br>・岩盤内への放射性物質の閉込め | － |




[1] TVO 社　Web サイト

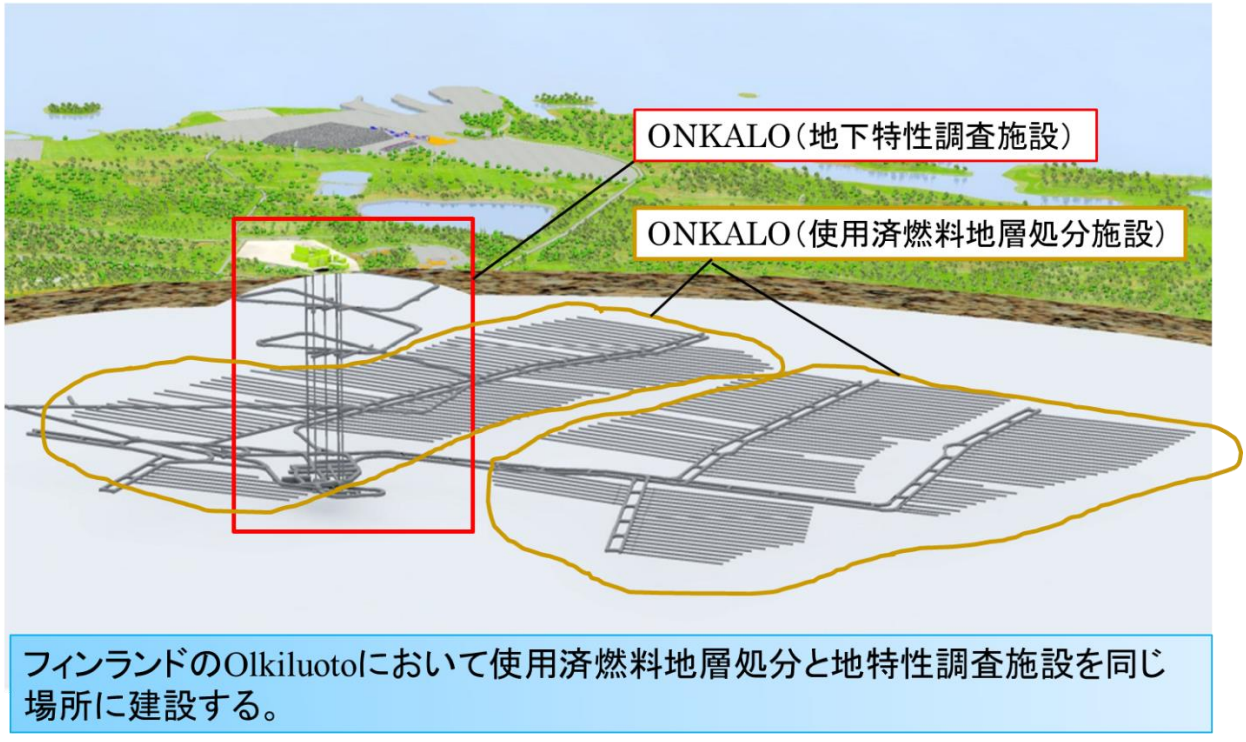



図 2.2-1　フィンランドにおける地層処分施設のコンセプト[2]

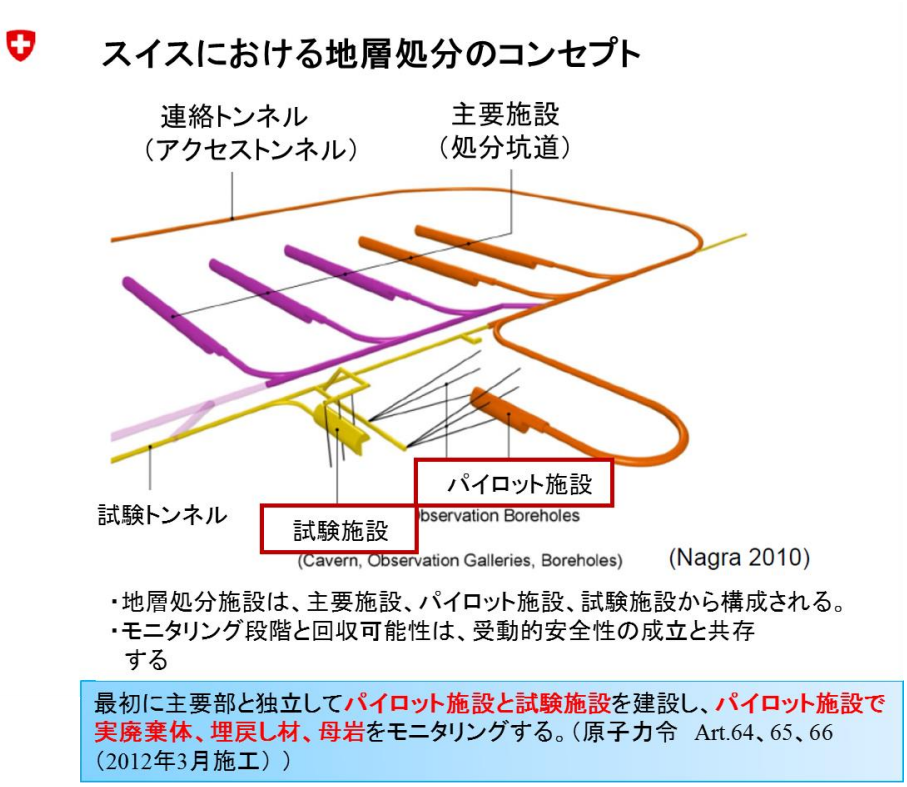



図 2.2-2 スイスにおける地層処分施設のコンセプト[3]

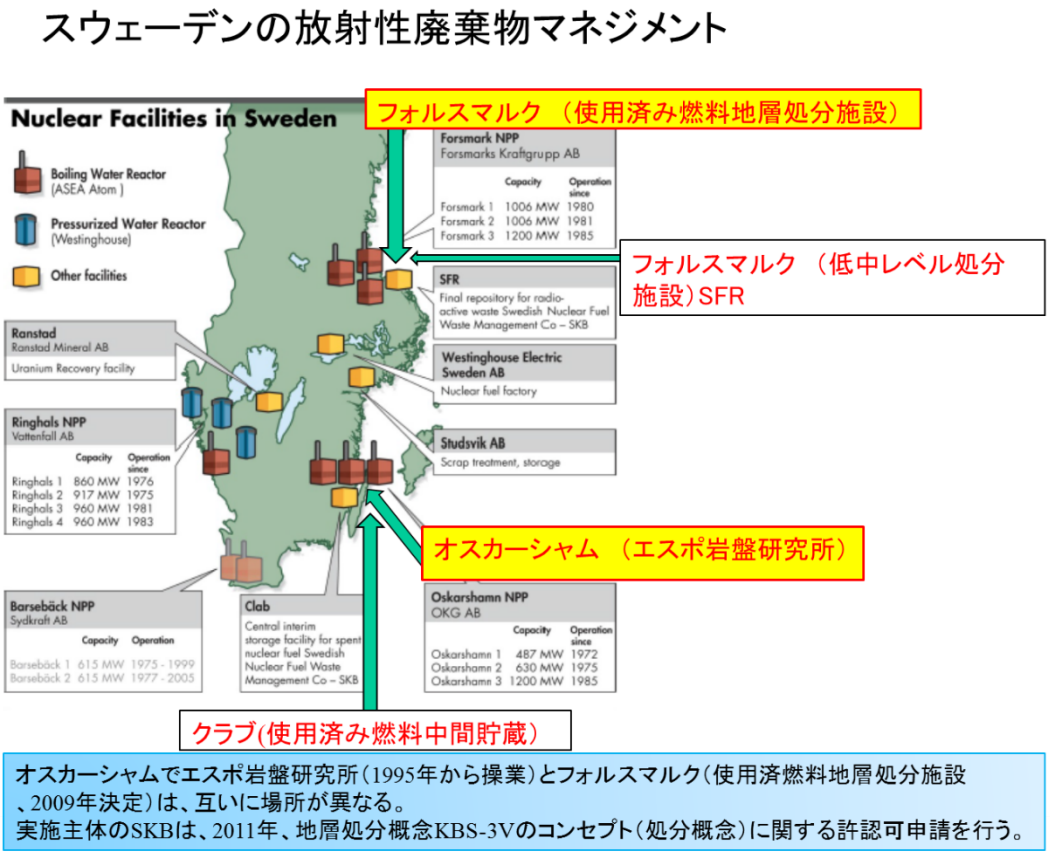
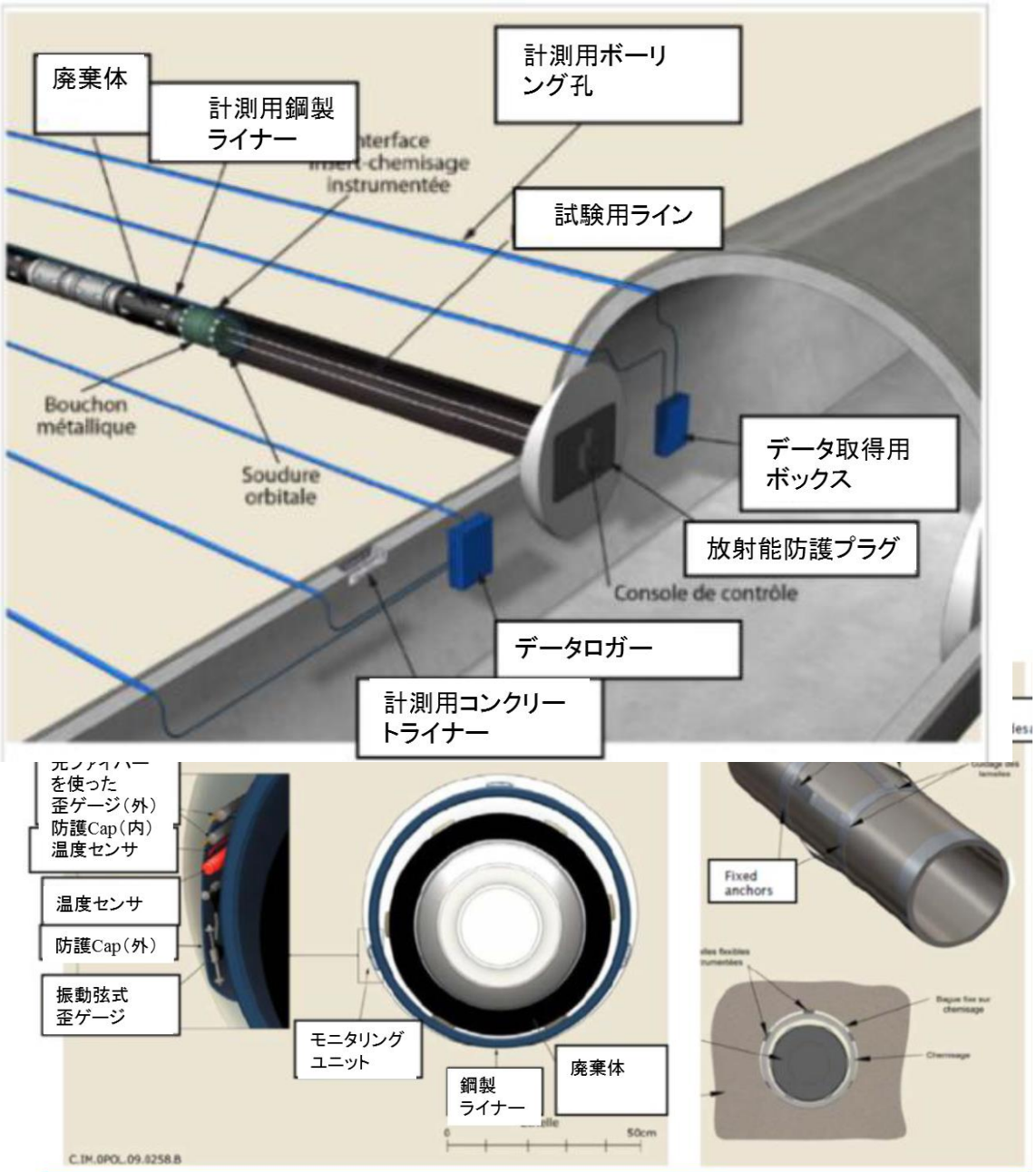



図 2.2-3 スウェーデンにおける地層処分のコンセプト[4]




フランスの場合は、「可逆性を維持した処分場」として、100年間は回収可能性を保持する必要があり、直径70cmの鋼製ライナーの中に実廃棄体を直列に配置し、鋼製ライナーの外側に温度センサ、放射能測定のためのセンサを配置する。

図 2.2-4 フランスにおける地層処分のコンセプト[5]

### 2.2.3 既往のモニタリングに関する調査

上記で整理した基準に対し、国内外でこれまでに実施されたモニタリングに関する検討、現地実規模試験等の結果を収集し、モニタリングの概念、位置付け、計測項目、計測期間、計測方法等を整理する。調査した文献を表 2.2-32 に、文献調査結果を表 2.2-33～表 2.2-57 に示す。

表 2.2-32 調査した文献（既往のモニタリングに関する調査）

| No. | 機関 | 文献名 | 発行年 |
|---|---|---|---|
| 1 | RWMC | 地層処分にかかわるモニタリングの研究―位置付け及び技術的可能性― | 2004 |
| 2 | RWMC | 平成19年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2008 |
| 3 | RWMC | 平成20年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2009 |
| 4 | RWMC | 平成21年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2010 |
| 5 | RWMC | 平成22年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2011 |
| 6 | RWMC | 平成23年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2012 |
| 7 | RWMC | 平成24年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発― | 2013 |
| 8 | RWMC | 平成25年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第3分冊）モニタリング関連技術の整備 | 2014 |
| 9 | RWMC | 平成26年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発 報告書（第3分冊）モニタリング関連技術の整備 | 2015 |
| 10 | NUMO | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 | 2010 |
| 11 | 日本原子力学会 | 低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法 AESJ-SC-F016:2010 | 2010 |
| 12 | Posiva | Monitoring at Olkiluoto, a Program for the period before repository operation | 2012 |
| 13 | Andra | Dossier 2005 | 2005 |
| 14 | MoDeRn | Case studies, Final report | 2013 |
| 15 | スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB） | Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep geological repository of spent fuel, SKB R-04-13. | 2004 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 16 | 欧州共同体（EC） | 放射性廃棄物の地層処分の段階的アプローチにおけるモニタリングの役割に関するテーマ別ネットワーク<br>Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste , EUR21025EN. | 2004 |
| 17 | スイスにおける放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA） | 放射性廃棄物の処分概念－<br>Disposal Concepts for Radioactive Waste Final Report. | 2000 |
| 18 | 全米科学アカデミー（NAS） | 高レベル放射性廃棄物処分の段階的開発<br>One step at a time- the staged development of geologic repositories for high-level radioactive waste. | 2003 |
| 19 | NWMO(カナダ) | Choosing a Way Forward_final study | 2005 |

表 2.2-33　既往のモニタリングに関する調査結果（1）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 1 |
| 2.文献名 | 地層処分にかかわるモニタリングの研究―位置付け及び技術的可能性― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | IAEA において検討された地層処分モニタリングの目的に加え、国内外の地層処分に関わる機関等に対する聞き取り調査をもとに地層処分モニタリングについて整理し、地層処分モニタリングの目的は、目的 1～5 に大別されるとしている。さらに、目的 1～5 に対して細分し、モニタリングの目的と分類として表に整理している。 |

表 2-1　地層処分モニタリングの目的とその分類

| 目　的 | 分　類 |
|---|---|
| 1.　処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認 | 処分システム構成要素の機能の確認 |
| | 設計・施工上の仮定の確認 |
| | 安全評価モデルの検証 |
| | 処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断 |
| 2.　法令要件に対する適合性の確認 | 処分場閉鎖後の法令要件 |
| | 建設・操業時法令要件（作業員及び周辺住民に対する安全） |
| | 環境影響に関わる法令要件 |
| 3.　政策及び事業実施上の意思決定に資する情報提供 | 意思決定に向けた情報提供 |
| | 埋設廃棄体の回収可能性への対処 |
| 4.　概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握 | 地質環境特性のベースライン把握 |
| 5.　社会的な意思決定に向けた情報提供 | 国民・地域住民の地層処分に対する信頼性の向上 |
| | 将来世代のためのデータベース蓄積 |

また、地層処分モニタリングの目的を踏まえ、地層処分に関わるステークホルダーの中から、処分事業実施者、安全規制機関、社会が、地層処分モニタリングお目的に関してどのように関与すると考えられるかを表に整理している。

表 2-2　モニタリングの目的と利害関係者の関与

| (横:利害関係者)<br>(縦:モニタリングの目的) | 処分事業実施者 | 安全規制機関 | 社会<br>(一般公衆及び技術者) |
|---|---|---|---|
| 1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認 | セーフティー・ケースの補強 | | 技術者によるレビュー |
| 2. 法令要件に対する適合性の確認 | 規制当局への報告 | 左記に対する判定 | 技術者によるレビュー |
| 3. 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供 | 段階的実施のプロセス及び裏づけの明示、社会との対話 | | 技術者によるレビュー<br>経営、政策担当者の関与 |
| 4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握 | プロジェクトの改善、合理化、不具合の場合の対応 | | 技術者によるレビュー |
| 5. 社会的な意思決定に向けた情報提供 | 段階的実施の確認 | | 社会的意思決定 |

さらに、地層処分モニタリングの目的を処分事業の段階ごとに対応させ、各事業段階におけるモニタリングの役割を表に整理している。

表 2-3　事業の各段階におけるモニタリングの役割

| モニタリングの目的＼事業段階 | 処分地選定 | 建設・操業 | 閉鎖の決定／閉鎖 | 閉鎖後 |
|---|---|---|---|---|
| 2．法令要件に対する適合性の確認 | 許認可にかかわる規制要件 | 建設・操業にかかわる規制要件 | 閉鎖にかかわる規制要件 | 該当しない |
| 1．処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認 | 該当しない | 該当する<br>・（規制要件） | 該当する<br>・（規制要件） | 該当しない |
| 3．政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供 | 該当する<br>・立地決定に関する事業判断 | 該当する<br>・段階的な事業展開 | 該当する<br>・閉鎖の判断 | 該当しない |
| 4．概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握 | 該当する<br>・事前のベースラインデータ | 該当する<br>・事業実施に伴う擾乱の有無 | 該当する | 該当する<br>・閉鎖後の回復、安定化 |
| 5．社会的な意思決定に向けた情報提供 | 立地にかかわる社会的意思決定 | 処分事業に対する信頼 | 閉鎖に関する社会的意思決定 | 社会が望む限りモニタリングを継続 |

| | |
|---|---|
| 5.機能確認の考え方 | モニタリングを行う対象との関係として以下のように記載されている。<br>・ 地層処分モニタリングの対象としては、前節までに整理したモニタリング目的との関係から考えると、人工バリアと処分場を構成する工学的要素や、その周辺環境の状況、さらに天然バリアの構成要素としてのファーフィールドにいたる広い領域を考えておく必要がある。<br>・ 廃棄体、緩衝材の挙動、及びそれらに影響を与える周辺岩盤の環境を直接的に計測するためには、結果的にバリア性能に影響を及ぼす可能性のある多くの機器の設置が必要となる。<br><br>また、パイロット施設との関係について、以下のように記載されている。<br>・ 廃棄体に直接アクセスしてモニタリングを行うことは工学的バリアの長期性能に対して潜在的マイナス影響を及ぼす可能性がある。この問題に対応するための提案のひとつとして、実処分エリアとは別の位置に実証のための施設を設け、モニタリングを実施するという考えがある。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | モニタリング結果の利用に関して、以下のように記載されている。<br>・ 原環センターが主催したモニタリングに関する国際ワークショップでは、モニタリングで得られたデータが当初期待した範囲を外れた場合どうするか、という問題が提起された。<br>・ モニタリングで得られたデータを評価するためには、モニタリングの実測値と、それらのデータを理解するための評価ツールが関連していることが重要である。<br><br>これに対して、米国 WIPP で採用されているトリガー値等を考察し、モニタリングに関わる計測と評価システムを構築するための課題として、以下の移行に関する標準化を挙げている。<br>・ データの取得方法<br>・ データの評価方法 |

・　判断（エキスパート・ジャッチメント）の方法・基準

モニタリング項目として、以下が挙げられている。
・　地下施設周辺の水地や地下水化学特性、廃棄体周辺の熱、水理、応力、地下水化学特性
・　処分場の操業時における作業員や公衆への放射線影響
・　掘削あるいは建設作業による水源への水の供給や水質変化など
・　トンネル工事によるダスト、ガスあるいは騒音など
・　水理特性、地下水化学特性、などの地質環境特性

**7.計測設備**

地層処分モニタリングは、地表付近における計測などを除いて、多くの場合、下表に示す計測環境を念頭に置くことが必須条件であるとしている。

表 3-1　地層処分モニタリングにおいて考慮すべき計測環境条件

| 項目 | 廃棄体近傍 | 廃棄体遠方 |
|---|---|---|
| 温度 | 最大 100℃ | 45℃（深度 1000m）* |
| 圧力 | 11MPa**（深度 1000m） | 10MPa（深度 1000m） |
| 水質 | 塩水／淡水 | 塩水／淡水 |
| 放射線*** | $3X10^{-0}$mGy/h（ガンマ線） | 考慮する必要なし |
| | $3X10^{-2}$mGy/h（中性子線） | |

*（核燃料サイクル開発機構、1999）
**深度 1000m での静水圧(10MPa)＋緩衝材の膨潤圧力(1MPa)を想定
***オーバーパック厚さ 190mm の場合のオーバーパック表面での値（核燃料サイクル開発機構、1999）

**8.計測技術**

モニタリング技術の開発に際して、以下のように記載されている。
・　最終処分地選定段階から建設・操業期間中には、ボーリング孔や調査坑道が開放した状態で計測機器へのアクセスも比較的容易であり、既存の測定技術、手法をもとに実施できる部分が多いと考えられるが、処分場及びモニタリング機器へのアクセスが極めて限定される処分場閉鎖後を想定した技術の適用性の見通しがより重要となる。

地層処分のモニタリングで想定される計測対象について、技術動向調査結果が次頁の表のように整理されている。

表 3-2 計測対象とセンサ技術動向調査のまとめ

| 計測対象分類 | 計測項目 | 計測方法 | 地層処分モニタリング技術の観点での課題 |
|---|---|---|---|
| 熱 | 温度 | 熱電式計測 | 導電性金属使用のため、環境での変化、劣化をきたす |
| 地下水 | 水位、間隙水圧<br>含水率 | 水位、水圧、水分計 | 化学法、電気法(導電計測)ともに長期の信頼性が課題 |
| 応力 | 岩盤圧、亀裂<br>変位、ひずみ | 音響（AE）<br>ひずみ／変位計 | 音響等発信・受信計測のエネルギー供給 |
| 化学 | 水質化学<br>溶存成分 | Eh/pH 計測<br>腐食電位 | 原理的に化学反応センサのため変化、劣化への対処 |
| その他複合計測 | 光学ファイバ複合センサ<br>（反射型、透過型等）<br>応力－光透過特性変化<br>化学－光波長<br>感熱－光波長、屈折率変化 | | センサとファイバ材料の、化学的構造的耐久性が未知である<br><br>光通信ケーブル等の知見の反映 |

＊）計測項目、方法については、（IAEA,2001、POSIVA 2003、SKB, 2001）等を参照

光ファイバ複合センサについては（Jobmann, 2000）等を参照

また、地中無線技術は、地下深部で計測されたデータを地表に伝える手段として多くのモニタリング技術に共通な技術であり、センサからデータを送信するためのケーブルを用いない技術として、処分場の閉じ込め性能に影響を及ぼさない有望な技術であることから、技術の整備を行うことが重要であるとしている。

| | |
|---|---|
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11．本業務への反映事項 | モニタリングの目的、及び各事業段階におけるモニタリングの役割<br>パイロット施設におけるモニタリング<br>計測設備の計測環境<br>計測技術 |

表 2.2-34　既往のモニタリングに関する調査結果（2）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 2 |
| 2.文献名 | 平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | 文献 1 を含む原環センターにおけるモニタリングの研究で検討された、モニタリングの目的を見直し、モニタリングの目的と分類として、p2-72 に示す表のように整理している。 |
| 5.機能確認の考え方 | モニタリングの目的と対応させて、処分事業の各段階におけるモニタリングの考え方が p2-73 に示す表のように整理されている。なお、処分事業の段階は、立地調査から最終閉鎖後までを対象としており、操業段階の一部として「部分的な閉鎖」段階を考慮している。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | モニタリング項目は、候補計測パラメータとして、モニタリングの目的とともに p2-74 に示す表のように整理されている。 |
| | |

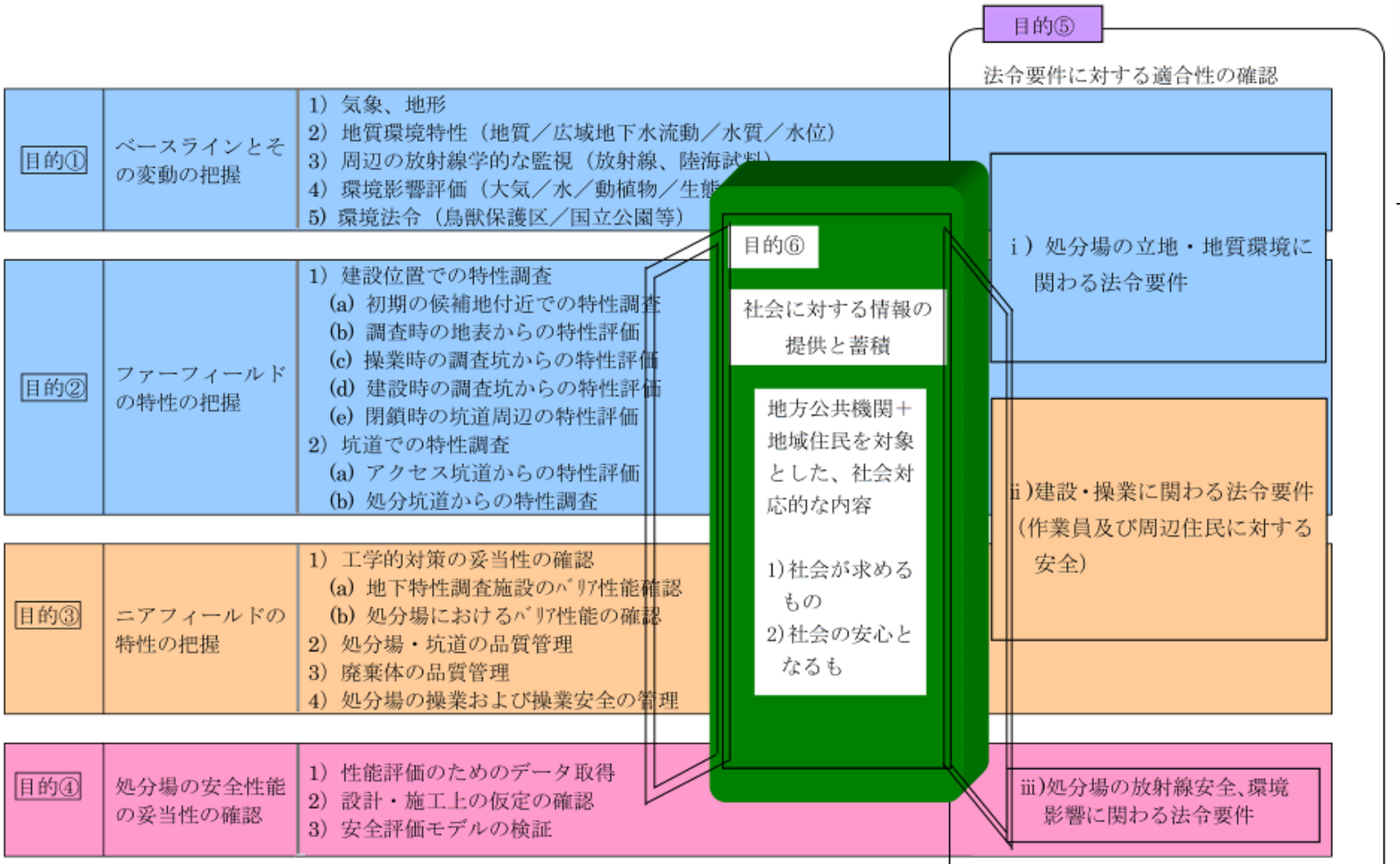



図 2.6.4-1　モニタリングの目的

表 2.6.4-1　モニタリングの考え方のまとめ（改訂版）

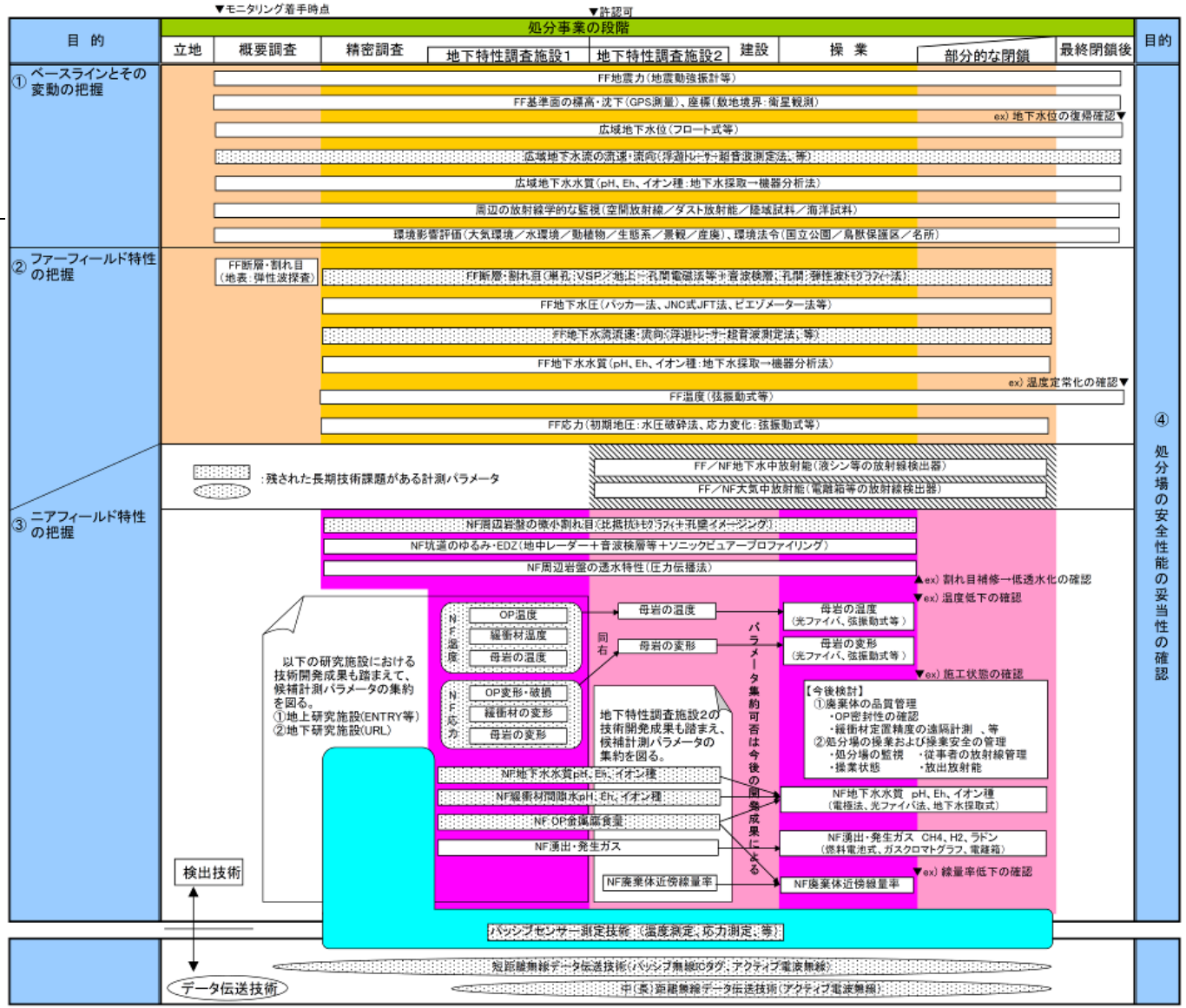


表 2.5.5-1　モニタリング目的カテゴリーの見直し（平成 19 年度）

| モニタリングの目的 | 小項目 | 候補計測パラメータ |
|---|---|---|
| ① ベースラインおよびその変動の把握 | a) 気象、地形 | 気象／気候／地形 |
| | b) 地質環境特性 | 地質／広域地下水流動／地下水水質／地下水水位 |
| | c) 周辺の放射線学的な監視 | 空間放射線／ダスト放射能／陸域試料／海洋試料 |
| | d) 環境影響評価 | 大気環境／水環境／動植物／生態系／景観／産廃 |
| | e) 環境法令 | 国立公園／鳥獣保護区／名所等 |
| ② ファーフィールドの特性の把握 | a) 建設位置での特性調査 | 地質の特性（旧 3.）<br>地下水流動の変化（動水勾配／透水係数）（旧 4.）<br>地下水水質の変化（旧 5.）<br>場の温度（旧 6.）<br>場の応力（旧 7.）<br>連続した割れ目幅（ex. 半径 100m圏内） |
| | (a)初期の候補地付近での特性調査 | |
| | (b)調査時の地表からの特性評価 | |
| | (c)建設時の調査坑からの特性評価 | |
| | (d)操業時の坑道周辺の特性評価 | |
| | (e)閉鎖時の坑道周辺の特性評価 | |
| | b) 坑道での特性調査 | |
| | (a)アクセス坑道からの特性評価 | |
| | (b)処分坑道からの特性調査 | |
| ③ ニアフィールドの特性の把握 | a) 工学的対策の妥当性の確認 | 温度（旧 4.）<br>応力（旧 5.）<br>坑道周辺の応力・変位（旧 6.）<br>緩衝材の再冠水：水分移動（旧 9.）<br>オーバーパック金属腐食（旧 10.）<br>緩衝材の間隙水化学（旧 11.）<br>周辺の地下水化学（旧 12.）<br>分配係数（Ｋｄ） |
| | 1) 地下特性調査施設でのﾊﾞﾘｱ性能の確認 | |
| | 2) 処分場におけるﾊﾞﾘｱ性能の確認（処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断） | |
| | b) 処分場・坑道の品質管理 | 周辺岩盤の微小割れ目（旧 1.）<br>坑道のゆるみ・EDZ（旧 2.）<br>周辺岩盤の透水特性（旧 3.）<br>坑道(処分孔)寸法／傾斜／不陸／連続した割れ目幅／割れ目幅／割れ目深さ |
| | 1) アクセス坑道・主要坑道 | |
| | 2) 処分坑道 | |
| | 3) 処分孔 | |
| | c) 廃棄体の品質管理 | |
| | 1) ガラス固化体 | 識別番号（核種インベントリ含む）／ガラス固化体密度・体積・表面積／ガラス溶解速度／ |
| | 2) オーバーパック | 材料／外観／寸法／重量／密封（閉）性／腐食代厚さ／（耐圧代厚さ／、遮へい代厚さ） |
| | 3) 緩衝材 | 材料（組成、モンモリロナイト含有率等）／外観／寸法／重量／含水率／ |
| | d) 処分場の操業および操業安全の管理 | 放射線（旧 7.）、湧出・発生ガス（旧 8.） |
| | 1) 処分場の監視 | 火災／ガス／冠水／浸透水／湧水／換気温度・量・質／地下空洞の安定性／ﾃﾛ対策 |
| | 2) 操業状態 | 受入本数／埋設本数／通気風量／坑内温度／坑内湿度／坑内大気圧／坑内風景 |
| | 3) 従事者の放射線管理 | 管理区域の空間線量率／表面汚染密度／出入り管理記録／体外被ばく／体内被ばく |
| | 4) 放出放射能 | 排水中の放射能（旧 13.）／排気中の放射能（旧 14.） |

| | | |
|---|---|---|
| ④ 処分場の安全性能の妥当性の確認 | 1) 性能評価のためのデータ取得<br>2) 設計・施工上の仮定の確認<br>3) 安全評価モデルの検証 | ①～③の必要部分 |
| ⑤ 法令要件に対する適合性の確認 | ⅰ)処分場の立地・地質環境に関わる法令要件<br>ⅱ)建設・操業に関わる法令要件（作業員及び周辺住民に対する安全）<br>ⅲ)処分場の放射線安全、環境影響に関わる法令要件 | ①～④の一部 |

| | | |
|---|---|---|
| ⑥ 社会に対する情報の提供と蓄積 | 1) 社会が求めるもの<br>2) 社会の安心となるもの | ①～⑤の一部 |

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | データ伝送にケーブルを要しない無線技術、及びガラス製の光ファイバないに検知部を施した光ファイバセンサ技術を高レベル放射性廃棄物処分モニタリングにおける中核的技術と位置付けて、下記の技術に対するきそてきな調査・試験を行い、その信頼性や適用範囲等を評価している。<br><br>① 地中無線通信技術<br>・ ケーブルが不要なためバリアの安全性を損なわずにモニタリングで、地層処分の研究開発において有用なセンサ技術である。<br>・ 一般産業では、ダム等で既に実用化されており、10 年程度の長寿命が期待できる。<br>・ 地層処分システムに適用するには支保・鉄筋等の低周波無線通信への影響を評価する必要がある。<br>② 光ファイバセンサ技術<br>・ 光ファイバセンサに関する技術開発は、URL や実処分場の地下特性評価施設におけるニアフィールドの連成現象の理解を進めるためのデータ取得を行うために、センサ寿命や測定精度の向上、センサ寿命の向上及び施工要領の評価のために必要である。<br>・ FBG 式光ファイバセンサの耐久性評価、FBG 式土圧センサのデータ確証試験等の調査研究を行い、約 310 日間の連続計測によりセンサ自体の耐久性を確認し、常温域における試験セルによるベントナイト膨潤圧の測定が適切に行えることを確認すると共に今後のセンサ改良点を見出した。<br>③ パッシブ無線センサ技術<br>・ RFID を活用したパッシブ無線センサは、バッテリー等の動力源とケーブルが不要なためバリアの安全性を損なわずに長期間モニタリングできる可能性があり、実現性が確認できれば地層処分の研究開発において極めて有用なセンサ技術となり得る。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 本文献では、地層処分における各段階での意義・考え方や要件を勘案しつつ、モニタリングに係る体系的な技術的選択肢を提示するとともに、知識マネージメントツールとしての機能を有する「地層処分モニタリング技術メニュー」の整備を行っており、「地層処分モニタリング技術メニュー」の Web ベースシステムの高度化・改良に係る検討が実施されている。<br>また、閉鎖後の記録保存技術について、国内の動向調査、海外の記録保存事例の調査が行われている。 |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリングの目的と分類、及びそれに対応したモニタリング項目<br>モニタリング技術（無線通信技術、光ファイバセンサ技術） |

表 2.2-35　既往のモニタリングに関する調査結果（3）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 3 |
| 2.文献名 | 平成 20 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | P2-77 に示す表は、文献 2 で検討されたモニタリングの目的と分類をさらに見直し、目的④が「処分場の安全性能の妥当性の確認」から「処分場の安全評価の妥当性の確認」に変更されるとともに、目的④の小項目が変更されている。 |
| 5.機能確認の考え方 | 地層処分モニタリングの考え方は、文献 2（平成 19 年度報告書）と同様に p2-73 に示す表に整理されている。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | モニタリング項目は、候補計測パラメータとして、見直されたモニタリングの目的と分類とともに以下のように整理されている。 |

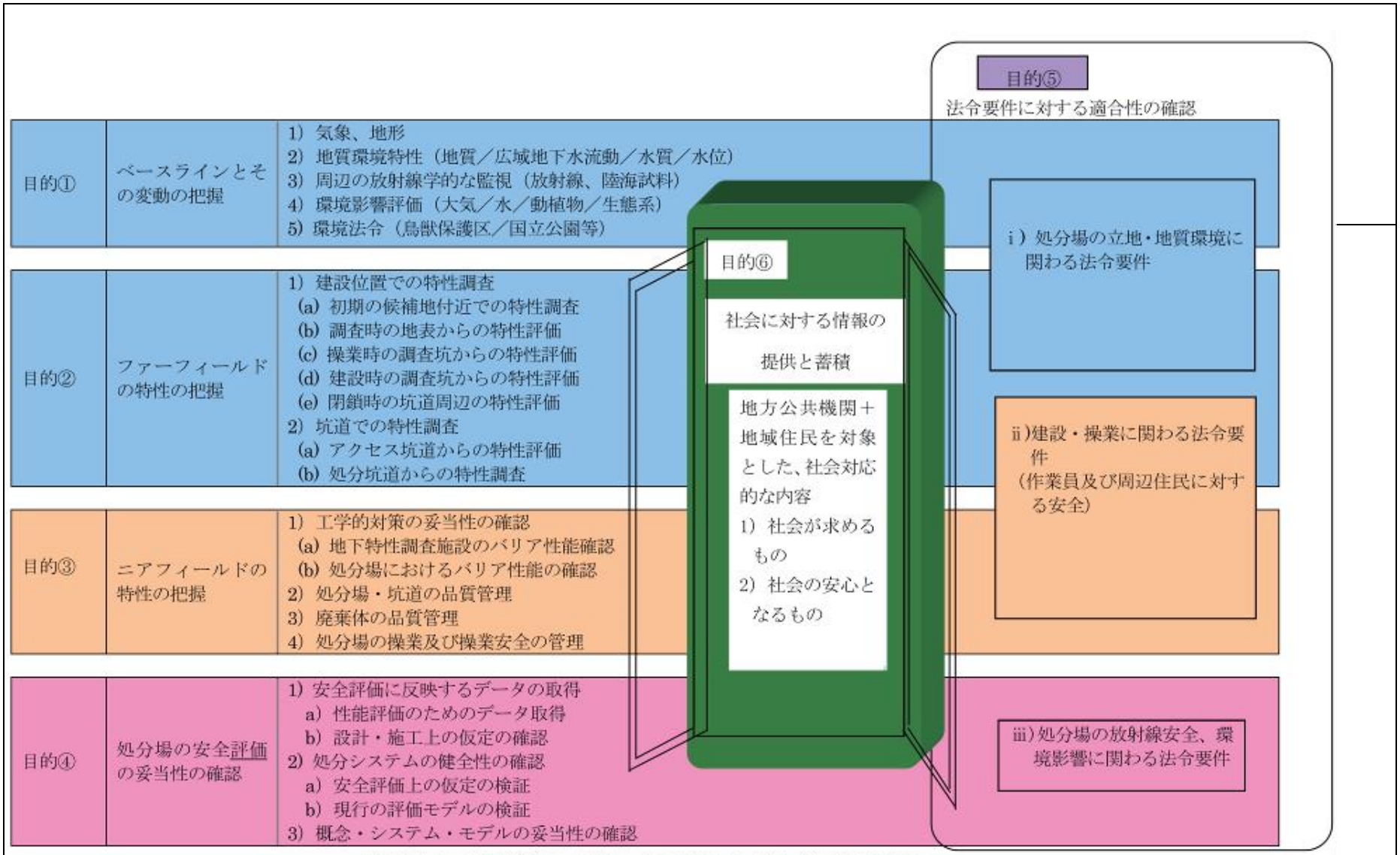



図 8.1.4-1　地層処分モニタリングの目的カテゴリ（平成 20 年度）

表 8.1.4-1　モニタリング目的カテゴリと候補計測パラメータ(平成 20 年度：1／3)

| モニタリングの目的 | | 候補計測パラメータ | | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 大項目 | 小項目 | | | |
| ① ベースラインおよびその変動の把握 | a) 天然現象の把握 | | | |
| | (a)火山・火成活動 | 地温 等 | | － |
| | (b)地震・断層活動 | 断層位置/断層幅/地震動加速度 等 | | － |
| | (c)隆起・侵食 | 標高/隆起量/侵食量 等 | | － |
| | (d)気候・海水準変動 | 年平均降水量/最多雨月降水量/最小雨月降水量/年平均気温/最暖月平均気温/最寒月平均気温/海水準 等 | | － |
| | b) 環境特性の把握 | | | |
| | (a)大気環境 | 1)気象 | 風向/風速/日射量/放射収支量/気温/湿度/気圧/降水量/積雪量/感雨雪/感雷 | － |
| | | 2)大気質 | SOx/NOx/ダイオキシン類 等 | |
| | | 3)悪臭 | 各種悪臭物質濃度/強さ/質 等 | |
| | | 4)騒音・振動 | 騒音レベル/振動レベル | |
| | (b)水環境 | 1)水理・水文 | 河川・海域・湖沼データ群 | － |
| | | 2)水質 | 水温/pH/Eh/COD/BOD/各種有害化学物質濃度 等 | |
| | | 3)底質 | 粒度分布 等 | |
| | (c)地質環境 | 1)地形 | 陸域地形/水域地形 | － |
| | | 2)地質 | 岩種/温度/分布/層序/土壌中各種有害化学物質濃度 | － |
| | | 3)岩盤特性 | 強度/応力/連続した割れ目 | － |
| | | 4)地下水流動 | 地下水面/動水勾配/透水係数/流量/流向・流速 | － |
| | | 5)地下水水質 | Eh／pH/溶存成分/微生物活動/各種有害化学物質濃度 | － |
| | (d)社会環境 | 景観／産廃／国立公園／鳥獣保護区／名所 等 | | － |
| | (e)生態系 | 1)植生 | 種類/数/人間による摂取量/有害化学物質濃度 | － |
| | | 2)陸生動物 | | |
| | | 3)水生植物 | | |
| | | 4)水生動物 | | |
| | c) 放射線学的監視 | 1)大気中放射能 | 空間放射線量/ダスト放射能 | － |
| | | 2)水中放射能 | 水中放射能 | |
| | | 3)地質中放射能 | 土壌中放射能/地下水中放射能 | |
| | | 4)生体中放射能 | 陸域試料中放射能/淡水試料中放射能/海洋試料中放射能 | |
| ② ファーフィールドの特性の把握 | a) 建設位置での特性調査<br>(a) 初期の候補地付近での特性調査<br>(b) 調査時の地表からの特性評価<br>(c) 操業時の調査坑からの特性評価<br>(d) 建設時の調査坑からの特性評価<br>(e) 閉鎖時の処分場の特性評価<br>b) 坑道での特性調査<br>(a) アクセス坑道からの特性評価<br>(b) 処分坑道からの特性調査<br>(c) 閉鎖過程での坑道周辺の特性評価 | 1)地質の特性（岩種等、旧 3.） | | － |
| | | 2)岩盤の特性（強度等） | | － |
| | | 3)FF 地下水流動の変化(旧 4.) | ・動水勾配 | － |
| | | | ・透水係数 | |
| | | | ・地下水流量 | |
| | | | ・地下水流向流速 | |
| | | 4) FF 地下水水質の変化（旧 5.） | ・Eh | － |
| | | | ・pH | |
| | | | ・溶存成分 | |
| | | | ・微生物活動 | |
| | | 5)場の温度（旧 6.） | | － |
| | | 6)場の応力（旧 7.） | | － |
| | | 7)連続した割れ目（ex. 半径 100m圏内） | | － |
| | | 8)母岩領域の分配係数（Kd） | | － |
| | | 9)下流側断層領域の分配係数（Kd） | | － |

注)「目的②：ファーフィールドの特性の把握」の小項目は議論途中のもの

表 8.1.4-2　モニタリング目的カテゴリと候補計測パラメータ(平成 20 年度：2／3)

| モニタリングの目的 | | 候補計測パラメータ | | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 大項目 | 小項目 | | | |
| ③ ニアフィールドの特性の把握 | a) ニアフィールドの特性調査 | 1)周辺の地下水化学（旧 12.） | ・Eh | — |
| | | | ・pH | |
| | | | ・溶存成分 | |
| | | | ・微生物活動 | |
| | | 2)周辺岩盤の分配係数（Kd） | | — |
| | | 3)NF 地下水流動の変化 | ・透水係数 | — |
| | | | ・地下水流量 | |
| | | | ・地下水流向流速 | |
| | | 4)坑道周辺の応力・変位（旧 6.） | | — |
| | b) 工学的対策の妥当性の確認 | | | |
| | (a)地下特性調査施設でのﾊﾞﾘｱ性能の確認 | 1)温度（旧 4.　温度場） | ・オーバーパック | — |
| | | | ・緩衝材 | — |
| | | | ・周辺岩盤 | — |
| | | 2)応力（旧 5.　応力場） | ・オーバーパック | — |
| | | | ・緩衝材 | — |
| | | | ・周辺岩盤 | — |
| | | 3)緩衝材の再冠水：水分移動（旧 9.） | | — |
| | | 4)オーバーパック金属腐食（旧 10.） | | — |
| | | 5)緩衝材の間隙水化学（旧 11.） | ・Eh | — |
| | | | ・pH | |
| | | | ・溶存成分 | |
| | | | ・微生物活動 | |
| | (b)処分場におけるﾊﾞﾘｱ性能の確認(処分場の操業・施工に係る改善や補修の判断) | 1)周辺岩盤の微小割れ目（旧 1.） | | — |
| | | 2)周辺岩盤の透水特性（旧 3.） | | — |
| | | 3)放射線量率 | ・オーバーパック表面 | — |
| | | | ・地下水中 | — |
| | | 4)地下水の侵入量 | | — |
| | c) 処分場・坑道の品質<br>(a)アクセス坑道・主要坑道<br>(b)処分坑道<br>(c)処分孔<br>(d)支保 | 1)坑道のゆるみ・EDZ の幅（旧 2.） | | — |
| | | 2)EDZ の透水係数 | | — |
| | | 3)坑道(処分孔)寸法/傾斜/不陸/連続した割れ目幅/割れ目幅/割れ目深さ | | — |
| | | 4)処分場の温度・湿度 | | — |
| | | 5)支保の状態 | | — |
| | d) 廃棄体の品質 | | | |
| | (a)ガラス固化体 | 識別番号（核種インベントリ含む）/ガラス固化体密度・体積・表面積/ガラス溶解速度/ | | — |
| | (b)オーバーパック | 材料/外観/寸法/重量/密封（閉）性/腐食代厚さ/（耐圧代厚さ/、遮へい代厚さ） | | — |
| | (c)緩衝材 | 材料（組成、モンモリロナイト含有率等）/乾燥密度/外観/寸法/重量/含水率/ | | — |
| | (d)シール・プラグ | 材料（組成、モンモリロナイト含有率等）/乾燥密度/外観/寸法/重量/含水率/ | | — |
| | e) 処分場の操業および操業安全 | 放射線（旧 7.）、湧出・発生ガス（旧 8.） | | |
| | (a)処分場の監視 | 火災/ガス/冠水/浸透水/湧水/換気温度・量・質/地下空洞の安定性/ﾃﾛ対策 | | — |
| | (b)操業状態 | 受入本数/埋設本数/通気風量/坑内温度/坑内湿度/坑内大気圧/坑内風景 | | — |
| | (c)従事者の放射線管理 | 管理区域の空間線量率/表面汚染密度/出入り管理記録/体外被ばく/体内被ばく | | — |
| | (d)操業時の放出放射能 | 排水中の放射能（旧 13.） | | — |
| | | 排気中の放射能（旧 14.） | | — |

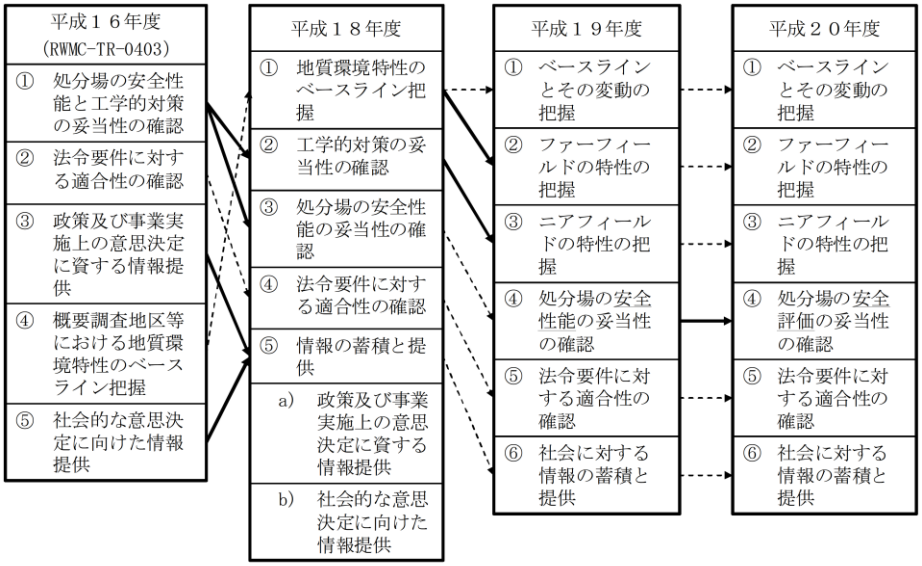
表 8.1.4-1　モニタリング目的カテゴリと候補計測パラメータ(平成 20 年度：1／3)

| モニタリングの目的 | | 候補計測パラメータ | | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 大項目 | 小項目 | | | |
| ① ベースラインおよびその変動の把握 | a) 天然現象の把握 | | | |
| | (a) 火山・火成活動 | 地温 等 | | － |
| | (b) 地震・断層活動 | 断層位置/断層幅/地震動加速度 等 | | － |
| | (c) 隆起・侵食 | 標高/隆起量/侵食量 等 | | － |
| | (d) 気候・海水準変動 | 年平均降水量/最多雨月降水量/最小雨月降水量/年平均気温/最暖月平均気温/最寒月平均気温/海水準 等 | | － |
| | b) 環境特性の把握 | | | |
| | (a) 大気環境 | 1) 気象 | 風向/風速/日射量/放射収支量/気温/湿度/気圧/降水量/積雪量/感雨雪/感雷 | － |
| | | 2) 大気質 | SOx/NOx/ダイオキシン類 等 | |
| | | 3) 悪臭 | 各種悪臭物質濃度/強さ/質 等 | |
| | | 4) 騒音・振動 | 騒音レベル/振動レベル | |
| | (b) 水環境 | 1) 水理・水文 | 河川・海域・湖沼データ群 | － |
| | | 2) 水質 | 水温/pH/Eh/COD/BOD/各種有害化学物質濃度 等 | |
| | | 3) 底質 | 粒度分布 等 | |
| | (c) 地質環境 | 1) 地形 | 陸域地形/水域地形 | － |
| | | 2) 地質 | 岩種/温度/分布/層序/土壌中各種有害化学物質濃度 | － |
| | | 3) 岩盤特性 | 強度/応力/連続した割れ目 | － |
| | | 4) 地下水流動 | 地下水面/動水勾配/透水係数/流量/流向・流速 | － |
| | | 5) 地下水水質 | Eh／pH/溶存成分/微生物活動/各種有害化学物質濃度 | － |
| | (d) 社会環境 | 景観／産廃／国立公園／鳥獣保護区／名所 等 | | － |
| | (e) 生態系 | 1) 植生 | 種類/数/人間による摂取量/有害化学物質濃度 | － |
| | | 2) 陸生動物 | | |
| | | 3) 水生植物 | | |
| | | 4) 水生動物 | | |
| | c) 放射線学的監視 | 1) 大気中放射能 | 空間放射線量/ダスト放射能 | － |
| | | 2) 水中放射能 | 水中放射能 | |
| | | 3) 地質中放射能 | 土壌中放射能/地下水中放射能 | |
| | | 4) 生体中放射能 | 陸域試料中放射能/淡水試料中放射能/海洋試料中放射能 | |
| ② ファーフィールドの特性の把握 | a) 建設位置での特性調査<br>(a) 初期の候補地付近での特性調査<br>(b) 調査時の地表からの特性評価<br>(c) 操業時の調査坑からの特性評価<br>(d) 建設時の調査坑からの特性評価<br>(e) 閉鎖時の処分場の特性評価<br>b) 坑道での特性調査<br>(a) アクセス坑道からの特性評価<br>(b) 処分坑道からの特性調査<br>(c) 閉鎖過程での坑道周辺の特性評価 | 1) 地質の特性（岩種等、旧 3.） | | － |
| | | 2) 岩盤の特性（強度等） | | － |
| | | 3) FF 地下水流動の変化(旧 4.) | ・動水勾配 | － |
| | | | ・透水係数 | |
| | | | ・地下水流量 | |
| | | | ・地下水流向流速 | |
| | | 4) FF 地下水水質の変化（旧 5.） | ・Eh | － |
| | | | ・pH | |
| | | | ・溶存成分 | |
| | | | ・微生物活動 | |
| | | 5) 場の温度（旧 6.） | | － |
| | | 6) 場の応力（旧 7.） | | － |
| | | 7) 連続した割れ目（ex. 半径 100m圏内） | | － |
| | | 8) 母岩領域の分配係数（Kd） | | － |
| | | 9) 下流側断層領域の分配係数（Kd） | | － |

注)「目的②：ファーフィールドの特性の把握」の小項目は議論途中のもの

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | 文献 2 で調査・試験が行われた、①～③のモニタリング技術に対して、詳細な試験が行われ、各技術に対する課題等を以下のように抽出している。<br><br>① 地中無線通信技術<br>・ 低周波は長距離の地中伝送には良いが、短距離の伝送なら高周波の方が効率が良く、多くのデータを伝送出来る。また、短距離であれば電力消費量を抑制することができ、混信の問題も少ない。<br>・ 地層処分モニタリングのデータ通信方法で要求される距離（10m～500m）や送受信する情報の数や量を整理し、何をターゲットにするかを明確にする必要がある。これにより、ケーブルによる有線通信や地中無線・パッシブ無線センサ等の無線通信を総合的にみて、通信方法、通信周波数、伝送モード、電源方式等を選択する必要がある。<br>② 光ファイバセンサ技術<br>・ 例えば、土圧計と温度計を別のファイバとするような FBG 式光ファイバセンサの構成・構造を検討し、測定対象に見合った感度となる仕様の選択を検討する必要がある。<br>・ 光ファイバの特徴を最大限に生かした、センサ開発ができるような原理・方法・装置の検討を試行する。<br>③ パッシブ無線センサ技術<br>・ 地層処分モニタリングのデータ通信方法で要求される距離（10m～500m）や送受信する情報の数や量を整理し、何をターゲットにするかを明確にする必要がある。これにより、ケーブルによる有線通信や地中無線・パッシブ無線センサ等の無線通信を総合的にみて、通信方法、通信周波数、伝送モード、電源方式等を選択する必要がある。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリングの目的と分類、及びそれに対応したモニタリング項目<br>モニタリング技術（無線通信技術、光ファイバセンサ技術） |

表 2.2-36　既往のモニタリングに関する調査結果（4）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 4 |
| 2.文献名 | 平成 21 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | 地層処分モニタリングの目的は、文献 1、2、3 等で検討されており、平成 20 年度（文献 3）までの原環センターによるモニタリングの目的の変遷が以下のように示されている。<br><br><br>注記：実線は検討により変更・追加・分割等がなされた目的／点線は変更なし<br>図 2.3.1-1　原環センターによるモニタリング目的の変遷（平成 16 年度～20 年度） |
| 5.機能確認の考え方 | 文献 4 では、高レベル放射性廃棄物処分事業において最も重要と考えられる閉鎖時の観点から、地層処分の基本的考え方と現状のモニタリング技術を踏まえ、「地層処分のモニタリングのあり方」について検討されており、以下の 3 点について詳細に記述されている。<br>➢ 閉鎖時の観点から、地層処分のモニタリングはどうあるべきか？（①閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングの制約条件）<br>➢ 閉鎖時の意思決定におけるモニタリングの役割は？（②閉鎖時の意思決定のための基本的理論構造及びもモニタリングの役割）<br>➢ 閉鎖時の意思決定のためのモニタリング計画立案時の留意事項は？（③モニタリング計画検討方法）<br><br>① 閉鎖時の意思決定におけるモニタリングの制約条件<br>モニタリングの実施は処分システムの構成要素の挙動にかんするデータを取得できるメリットに加え、モニタリングプロセスから発生するデメリットもあるため、実際のモニタリング計画においては、両者の間で整合を図ることが求められる、としており、モニタリングプロセスによって発生するデメリットとして、以下が挙げられている。<br><br>・ モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく<br>・ モニタリングの実施に伴う工学的バリアシステム設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化（工学的バリアシステムが所定の機能を発揮できない可能性がある） |

| | |
|---|---|
| | ・ 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成<br>・ モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存したした場合の人間侵入、あるいは自然または誘発された現象（例えば、大湧水）による悪影響が生じる可能性の増大<br>・ その他処分場操業への干渉<br><br>この中で、「潜在的水みちの形成」に関しては、工学的対策が困難であり、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるために他の対策によるトレードオフを行うことが困難であるため、避けることが望ましい、としている。そして、基本的なモニタリングの要件として「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない」ことを掲げている。<br><br>上記の制約を踏まえた上での、閉鎖時の意思決定における地層処分モニタリングの制約条件を以下のように定義している。<br>・ 処分場の処分坑道、人工バリアシステムでのモニタリングは実施しない（閉鎖時の判断に活用できない）。閉鎖前段階においてアクセス可能な主要坑道のみは、モニタリングが可能である。処分場の閉鎖後は主要坑道のモニタリングを中止する（閉鎖時においては水みちになる可能性がある主要坑道のケーブルは撤去）。<br>・ 人工バリアシステムのモニタリング情報がどうしても必要であれば、処分場とは異なる場所に地下特性照査施設Ⅰ（ヒーター等を有する模擬廃棄体を埋設）を建設し、人工バリアシステム、模擬処分坑道でのモニタリングを行う。地下施設の閉鎖後は中止する（水みちになる可能性がある主要坑道のケーブルは撤去）。<br>・ 処分坑道のモニタリング情報がどうしても必要であれば、処分場とは異なる場所に実廃棄体の定置に係わる試験施設的な役割も含め、地下照査施設Ⅱ（実廃棄体を埋設）を建設し、処分坑道でのモニタリングを行う。この場合においても処分場と同様に、人工バリアシステムのモニタリングは行わない。併催に先立ち、処分坑道内のセンサやケーブルは撤去し、行動を再度埋め戻す（閉鎖後、地下調査施設Ⅱは、許認可手続きでの対応が可能であれば、処分施設の一部とする）。<br>・ 地上からのボーリング孔等を追用いたファーフィールドのモニタリングに関しては、バリア機能や性能の低下を防ぐために概要調査及び精密調査において掘削・使用されたボーリング孔を基本的には継続して使用する。地上からの物理探査等、非破壊によるモニタリングは、基本的には随時可能である。<br>・ 地下施設を活用して実施するファーフィールドのモニタリングは、上記の人工バリア（地下施設を含む）に準拠する。<br><br>② 閉鎖時の意思決定のための基本的理論構造及びモニタリングの役割<br>閉鎖時の意思決定のため「現状の状況において閉鎖することが妥当である」ことを示す論理的構造を構築するに当たり、<br>・長期的安全確保対策<br>・安全評価等による安全確認<br>の視点が重要であるとしている。さらに、上記 2 点が真であることを示すためには、各々2 つのサブ命題が真である必要があるとし、下図のような基本理論構造を提案している。 |

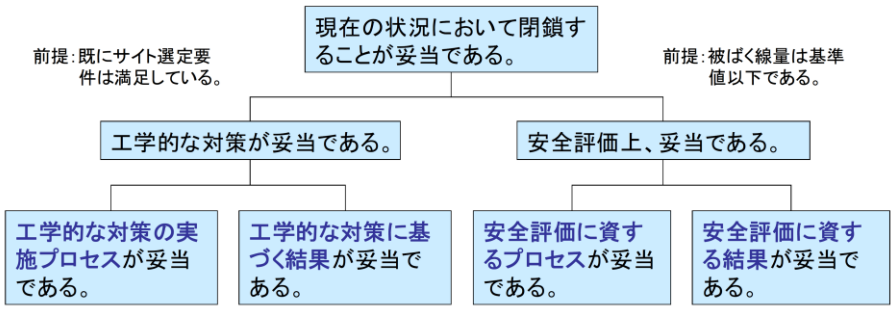



図 2.3.5-1 「現在の状況において閉鎖することが妥当である。」ことが真であるための基本論理構造

その上で、一般的にモニタリングの結果は、地質環境特性、つまり“場の理解”に活用されるケースと、予測した結果の妥当性の確認、つまり“場の確認”に活用されるケースがあると考えられ、具体的に“場の理解”に活用されるケースのモニタリング結果は、主にプロセスの確認をサポートするエビデンスとなり、“場の確認”に活用されるケースは、主に結果の妥当性をサポートするエビデンスとなる、としており、モニタリング結果の適用先を、下図のように整理している。

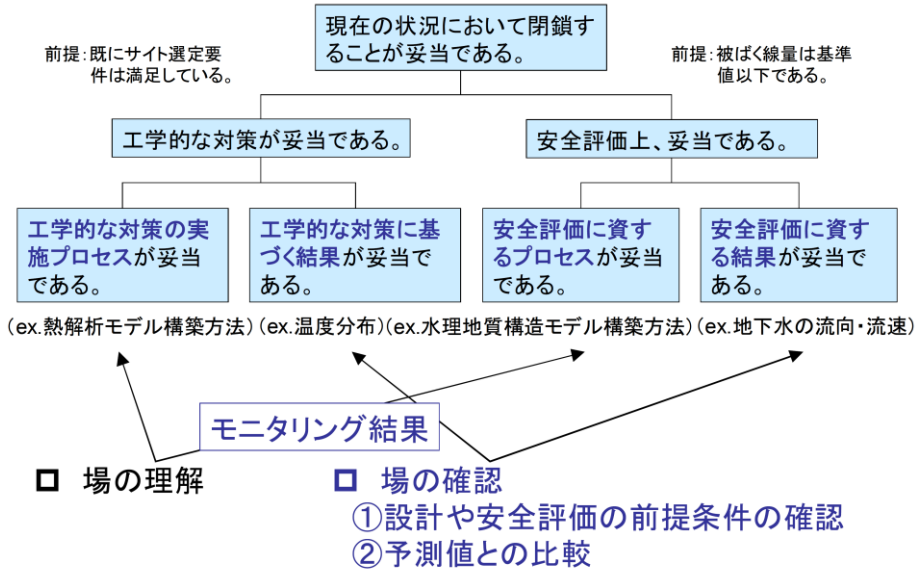



図 2.3.5-2 閉鎖に資する論理構造におけるモニタリング結果の適用先

③ 閉鎖時の意思決定におけるモニタリング計画検討方法

モニタリング計画検討に向けたモニタリング項目の選定方法及びモニタリング結果の判断基準の考え方が示されている。なお、モニタリング結果の判断基準に関して、“場の理解”については閉鎖後の意思決定の前段階において、基本的に整合が取れるまで場の理解を進めることにより対応するため、結果の妥当性をサポートするエビデンスになる“場の確認”に着もした検討が実施されている。

モニタリング項目の選定方法として、下図のようなフローが提案されている。

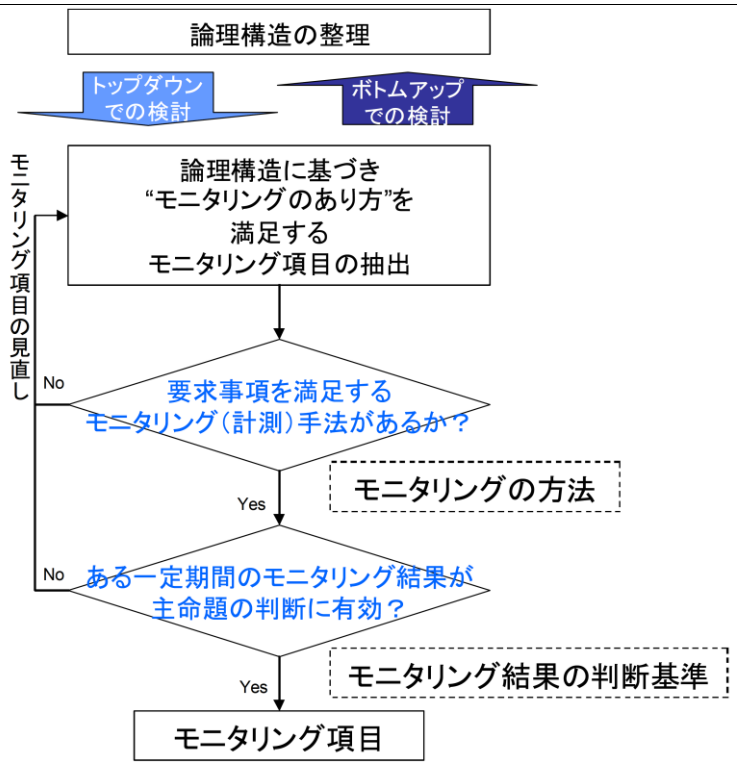



図 2.3.6-1　モニタリング項目の選定方法

上記、モニタリング項目の選定方法におけるモニタリング結果の判断基準は、数値解析による予測値との比較に加え、設計や安全評価の前提条件の確認があり、モニタリング結果の判断基準の考え方が下図のように示されている。

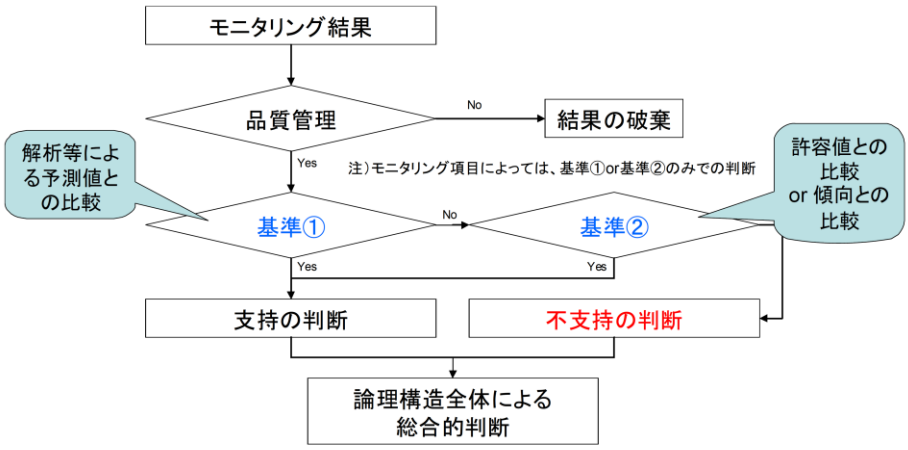



図 2.3.6-3　モニタリング結果の判断基準

| | |
|---|---|
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 閉鎖措置に資するモニタリング項目の抽出を試行した結果が以下のように示されている。 |

表 2.4.2-9　モニタリング項目抽出試行検討結果（安全評価シナリオ、モデル及びデータの仮定）

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| オーバーパックが、ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間での地下水とガラス固化体の接触を阻止 | ■ 地下水とガラス固化体の接触を少なくとも 1000 年間は完全に妨げるように設計され、腐食による強度の減少により機械的に破損する。評価上は、すべてのオーバーパックが処分後 1000 年で同時に破損し、ガラス固化体が地下水と接触することを保守的に仮定<br>■ オーバーパックの破損までに、ガラス固化体の発熱は無視できる程度になり、処分場内の温度は周辺岩盤とほぼ同じになる | 鉄の腐食速度が時間的に減少することが報告されており、これを考慮すれば設計よりも長期にわたって核種を完全に封じ込めることを想定することができる。 | ■ 人工バリアシステムが、地下水とガラス固化体の接触が少なくとも 1000 年間は完全に妨げるように設計されているか？ | ○ 解析評価（地下水状況の計測結果に基づく） | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 想定外の早期の地下水浸入がないことを確認 | ■ 水分量 | － | － | ● | ● | ● | ●<br>（ないこと） | － | |
| | | | ■ 定置後 1000 年間でオーバーパックは腐食により強度の減少により機械的に破損するか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ○ 初期状態の確認 | ■ THMC連成解析パラメータ | － | － | － | － | ●<br>（－） | ●<br>（－） | ●<br>（－） | |
| | | | | ◆ 何らかの影響で早期に腐食が開始するかを確認 | ■ 表面電位<br>■ 分極抵抗 | － | － | － | － | － | ●<br>（E<－500mV） | － | ASTM 規格 |
| | | | ■ 定置後 1000 年間でガラス固化体の発熱は無視できる程度になるか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 定置後 1000 年間で処分場の温度は周辺岩盤とほぼ同じになるか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ○ 初期状態の確認 | ■ 温度 | － | ●<br>（<地温+数 10℃） | ●<br>（<地温+数 10℃） | ●<br>（<地温+数 10℃） | － | － | － | |
| ガラス固化体は、放射性核種を均一かつ安定に固定化し、地下水への放射性核種の溶出を抑制 | ■ オーバーパック破損後、ガラスマトリクスがゆっくりと溶解し、それと調和的にガラス固化体中の核種が溶出する。ガラス表面積の時間的減少は保守的に考えて無視する | 長期的なガラス溶解速度の不確実性を考慮。溶解速度の不確実性は、ガラス表面に生成した変質層の保護効果により溶解反応が抑制される可能性、あるいは、炭素鋼オーバーパックの鉄腐食生成物との共存や地下水との反応によるケイ酸塩鉱物の生成で溶性ケイ酸が消費され溶解反応が促進される可能性により生ずる。 | ■ オーバーパック破損後、ガラスマトリクスがゆっくりと溶解し、それと調和的にガラス固化体中の核種が溶出するか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| 低透水性、膨潤性 | ■ 緩衝材は完全に飽和し、均質な低透水性のバリアとなる。緩衝材中の核種移行は、移流に比べて拡散が卓越する。 | | ■ 再冠水後、緩衝材は完全に飽和し低透水性バリアとして機能するか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 膨潤後の緩衝材中の核種移行は拡散支配であるか？ | ○ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| コロイド、微生物及び有機物のろ過 | ■ 飽和・膨潤した緩衝材は微細な間隙構造を有し、コロイド、微生物及び高分子の有機物をろ過 | ■ 実験により金コロイド（15nm）が圧縮ベントナイトによりろ過されることが確認されていることから、人工バリア中で生成するコロイドは、緩衝材でろ過されると考えられる。<br>■ 有機物は分子サイズが大きい場合圧縮ベントナイトによりろ過されることが実験により確認されている。<br>■ 微生物は、分子サイズが大きいため圧縮ベントナイトでろ過されることが実験で確認されている。 | ■ コロイド・微生物及び高分子有機化合物は飽和・膨潤した緩衝材のフィルタリングにより濾過されるか？ | ◆ サイト環境での試験 | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| | | | | ◆ サイト環境条件の把握 | ■ コロイド<br>■ 有機物<br>■ 微生物（個数及び種類） | — | — | — | ●<br>(–) | ●<br>(–) | — | — | |
| 化学的緩衝性 | ■ 地下水はもともと還元性であるが、地下水と緩衝材及びオーバーパック腐食生成物などとの反応は還元性の環境をより確かにする。降水系地下水と緩衝材及びオーバーパック腐食生成物との平衡反応を考慮 | — | ■ 地下水は還元性か？<br>■ 地下水と緩衝材及びオーバーパック腐食生成物などとの反応は還元性環境を促進するか？ | ◆ サイト環境条件の把握 | ■ Eh | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | — | — | — | 坑道解放時の地下水は酸化状態？ |
| 間隙水中での低い溶解度（溶解度制限） | ■ ガラス固化体周辺及び緩衝材中での放射性元素の濃度は還元環境で低い溶解度により制限される。放射性元素の溶解度は、当該元素の同位体間で分配される。沈澱は、瞬時／可逆を仮定する。<br>■ 地下水や緩衝材を | — | ■ 緩衝材が地下水と接触する際の環境は還元性か？ | ◆ サイト環境条件の把握 | ■ Eh | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | ●<br>(Eh<0) | — | — | — | 坑道解放時の地下水は酸化状態？ |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | | |
| | 起源とする同位体の影響は保守的に考えて無視する。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。 | | | | | | | | | | | | | |
| 小さな物質移行速度（拡散） | ■ 核種は、同位体間で分配された溶解度により制限される濃度を上限とした濃度勾配に従って緩衝材中を溶質として拡散移行する。緩衝材中での核種濃度は、軸方向及び周方向での勾配はなく、半径方向にのみ勾配を持つと仮定。<br>■ 緩衝材と岩盤の境界に達した核種が緩衝材外側での地下水（掘削影響領域を通過する地下水流量を考慮）と瞬時混合するとして緩衝材外側の核種濃度を設定。瞬時混合した核種はすべて掘削影響領域を通過する地下水流れにより透水性亀裂に流入すると仮定。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。<br>地下水流れの上流側に位置するガラス固化体から溶出してきた核種が下流側に至り、緩衝材中の濃度勾配がさらに緩やかになる濃度干渉の効果は保守的に考えて無視する。 | 掘削影響領域通過流量の不確実性を考慮。掘削影響領域通過流量の不確実性は、岩盤あるいは掘削影響領域の透水性、掘削影響領域の大きさのばらつきにより生ずる。 | ■ 緩衝材中の核種移行は拡散支配か？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 緩衝材中での核種濃度は、軸方向及び周方向での勾配はなく、半径方向にのみ勾配を持つか？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 緩衝材と岩盤の境界に達した核種が緩衝材外側での地下水（掘削影響領域を通過する地下水流量を考慮）と瞬時混合するか？ | ◆ サイト環境条件を把握しモデルを改良する？ | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 瞬時混合した核種はすべて掘削影響領域を通過する地下水流れにより透水性亀裂に流入するか？ | ◆ サイト環境条件を把握し⇒モデル改良⇒再評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| 放射性核種の移行遅延（収 | ■ 拡散による移行の過程で、核種は緩衝 | | ■ 核種は緩衝材の構成鉱物への収着により遅延され | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| 着） | 材の構成鉱物への収着により遅延される。収着は、線形／瞬時／可逆を仮定する。<br>■ ガラス固化体の内部亀裂やガラスの変質生成物及びオーバーパック腐食生成物や掘削影響領域の核種移行遅延機能は保守的に考えて無視する。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。 | | るか？ | | | | | | | | | | |
| | | | ■ 緩衝材中の核種収着は、線形／瞬時／可逆で十分か？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| 微生物活動、有機物 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 微生物の存在は、地下水中の酸化還元反応速度に影響を与えるが、平衡を仮定した地下水水質形成モデルの中で、その影響を考慮していると考えることができる。<br>■ 核種と有機物の錯体形成は、炭酸などのほかの配位子との競合を考慮するとその影響は大きくないとの報告がある。<br>■ しかしながら有機物や微生物による影響の詳細な検討は、今後の具体的な地質環境条件での研究に依存するものと考える。 | ■ 微生物あるいは有機物の種類や量によっても本当に処分システムに影響しないか？ | ◆ サイト環境条件の把握 | ■ 有機物<br>■ 微生物（個数及び種類） | － | － | － | ●<br>(－) | ●<br>(－) | － | － | |
| コロイド生成／移行 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 実験により金コロイド（15nm）が圧縮ベントナイトによりろ過されることが確認されていることから、人工バリ | ■ 如何なるコロイドの種類や量によっても本当に処分システムに影響しないか？ | ◆ サイト環境条件の把握 | ■ コロイド | － | － | － | ●<br>(－) | ●<br>(－) | － | － | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| | | ア中で生成するコロイドは、緩衝材でろ過されると考えられる。 | | | | | | | | | | | |
| ガス発生／移行 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ ガスの発生については、オーバーパック腐食による水素ガスの発生が卓越している。<br>■ 腐食速度が時間的に減少することや溶存水素ガスの拡散により、透気が起こるほどの水素ガスの蓄積はないと考えられる。<br>■ 仮に透気が起こったとしても、緩衝材の自己シール性により透気経路は閉塞されることを示す実験結果も得られている。<br>■ 崩壊により生成される放射性のガス成分や微生物によるメタンガスの生成が考えられるが、それらの量は水素ガスに比べ有意ではない。 | ■ 処分場環境下においても緩衝材の自己シール機能により透気経路は閉塞するか？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 安全評価の前提に影響を及ぼす有意な量の放射性ガスは発生しないか？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 初期の段階で有意なガスが発生していないか確認 | ■ ガス組成・濃度 | － | － | － | ● (－) | ● (－) | － | － | |
| | | | ■ 安全評価の前提に影響を及ぼす有意な量の微生物によるメタンガスは発生しないか？ | ◆ 初期の段階で有意なガスが発生していないか確認 | ■ ガス組成・濃度<br>■ 微生物（個数及び種類） | ● (－) | ● (－) | ● (－) | ● (－) | ● (－) | － | － | |
| 放射線分解 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 放射線分解で発生し得る酸化剤（$H_2O_2$ など）の量に比べて、人工バリア中に十分な量の還元物質（オーバーパックやその腐食生成物、緩衝材中の黄鉄鉱、地下水中の還元物質）が存在することにより酸化性雰囲気は緩衝されると考えられる。 | ■ 放射線分解による酸化剤よりも人工バリア中の還元物質の方が卓越し、酸化環境は緩衝されるか？ | ◆ 初期状態の確認 | ■ Eh | ● (Eh<0) | ● (Eh<0) | ● (Eh<0) | ● (Eh<0) | － | － | － | 坑道解放時の地下水は酸化状態？ |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| 放射線損傷 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 放射線損傷については、ガラス固化体へのα線の影響やスメクタイトへのγ線の影響は小さいものと考えられる。 | ■ 緩衝材への放射線影響は無視できるほど小さいか？ | ◆ サイト条件を把握し解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| オーバーパックの腐食膨張 | ■ 腐食膨張は設計において考慮されており、人工バリアに期待される安全機能を損なうことはない。 | － | ■ 腐食膨張に関する設計の考慮は妥当か？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 初期の段階で想定外の腐食膨張が発生していないことの確認 | ■ THMC連成解析パラメータ | － | － | － | － | ●（–） | ●（–） | ●（–） | |
| オーバーパックの沈下 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 保守的な仮定に基づいたとしても沈下量は小さく、オーバーパックの腐食膨張による比重低下や緩衝材の圧縮は沈下をさらに起こりにくくする。 | ■ オーバーパックの沈下量は無視しうるほど小さいか？ | ◆ サイト環境での試験 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 初期状態の確認 | ■ 変位 | － | － | － | － | ●（<～3mm/10年） | ●（<～3mm/10年） | － | |
| | | | ■ 腐食膨張以前の沈下量も無視しうるほど小さいか？ | ◆ 初期の段階で想定外の腐食膨張が発生していないことの確認 | ■ THMC連成解析パラメータ | － | － | － | － | ●（–） | ●（–） | ●（–） | |
| 周辺母岩中の亀裂への緩衝材の侵入 | ■ 亀裂への緩衝材の侵入は設計において考慮されており、人工バリアに期待される安全機能を損なうことはない | ■ プラグ／グラウト、支保工、埋め戻し材については、環境条件を勘案し、変形や流出のような変化があっても、それが人工バリアや天然バリアの機能を損なわないように配慮すると考えられる。 | ■ 亀裂への緩衝材の侵入にすいて設計への考慮は妥当か？<br>■ プラグ／グラウト、支保工、埋め戻し材は想定しうる如何なる条件下においても人工バリアや天然バリアの機能を損なわないように配慮されているか？ | ◆ サイト環境での把握 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 初期の段階で想定外の想定外の事象が発生していないことの確認 | ■ 鉱物組成<br>■ 透水(量)係数<br>■ 強度 | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| 緩衝材の変質 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | ■ 緩衝材の温度が100℃未満となるよう処分場が設計されるため、緩衝材性能を損なうようなスメクタイトのイライト化やセメンテーションは起こらない。<br>■ セメント材料を用いる際でも、その材料を適切に選定すれば、スメクタイトの顕著な変質は避けられると考えられる。 | ■ 緩衝材の温度が 100℃未満となるように処分場が設計されているか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度 | － | － | － | － | ●（<100℃） | － | － | |
| | | | ■ いかなる時期においても緩衝材の温度は 100℃未満か？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度 | － | － | － | － | ●（<100℃） | － | － | |
| | | | | ◆ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ いかなる時期においてもスメクタイトの変質は生じないか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 鉱物組成 | － | － | － | － | ●（–） | － | － | |
| | | | | ◆ 場の状況の確認 | ■ pH | － | － | － | ●（<11） | ●（<11） | － | － | |
| 処分施設の構成要素の物理的／化学的変遷 | ■ 処分施設の構成要素は適切に設計、施工され、適切な地質環境において長期間にわたって人工バリアや天然バリアの機能を損なわない。 | ■ 緩衝材の温度が100℃未満となるよう処分場が設計されるため、緩衝材、ガラス固化体、オーバーパック、処分施設及び母岩の機能に影響を与えるような熱膨張が発生することは考えにくい。 | ■ 緩衝材の温度が 100℃未満となるように処分場が設計されているか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度 | － | － | － | － | ●（<100℃） | － | － | |
| | | | ■ いかなる時期においても緩衝材の熱膨張はないか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度<br>■ 変位 | － | － | － | － | ●（–） | － | － | |
| | | | | ◆ 解析評価 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| 好ましい地下水化学（還元性など）[a] | ■ 多くの地形パターンや岩種において想定可能で実測値によって存在の支持も得られている降水系地下水を想定する。<br>■ 地下水組成は、一般的に存在すると考えられる主要な鉱物との平衡反応を仮定して設定する。 | － | ■ サイト環境の地下水は還元性を維持しているか？ | ○ 解析評価（地下水状況の計測結果に基づく） | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| | | | | ◆ 初期の段階での確認 | ■ Eh | ●（Eh<0） | ●（Eh<0） | ●（Eh<0） | ●（Eh<0） | － | － | － | 坑道解放時の地下水は酸化状態？ |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| 小さな地下水流束[a] | ■ 地下水は、亀裂が連結した不均質な亀裂構造の中を流れる。<br>■ 熱による対流や塩淡境界に沿った密度流の影響は考慮しない。 | ■ 透水量係数分布の不確実性を考慮。 | ■ 岩盤亀裂について仮定したモデルは妥当か？ | ○ サイト環境条件の把握⇒モデル改良 | ■ 割れ目幅 | ●（–） | ●（–） | – | – | – | – | – | |
| | | | ■ 熱による対流や塩淡境界に沿った密度流の影響はないか？ | ◆ 初期の段階での確認 | ■ 温度 | ●（–） | ●（–） | – | – | – | – | – | |
| | | | | | ■ 地下水流向・流速 | ●（–） | ●（–） | – | – | – | – | – | |
| 深部地質環境の長期的な安定性[a] | ■ 深部地質環境の力学的、水理学的、化学的な特性及び物質移行に関する特性の時間的変化は考慮しない | – | ■ 深部地質環境の力学的、水理学的、化学的な特性及び物質移行に関する特性の時間的変化はないか？ | ○ サイト環境条件の把握 | ■ サイト環境条件 | ●（–） | ●（–） | – | – | – | – | – | |
| 人間環境からの物理的障壁の存在[a] | ■ 処分場は主要な断層から少なくとも100m 以上離して配置される。 | – | ■ 処分場は主要な断層から少なくとも 100m 以上離して配置されているか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | – | – | – | – | – | – | – | – | |
| 放射性核種の移行抑制（ゆっくりとした地下水の動きによるによる核種の移流・分散あるいは拡散） | ■ 核種は岩盤の亀裂中及び断層中を溶質として移流・分散で移行する。<br>■ 縦方向分散の影響のみ考慮し、横方向分散の影響は考慮しない。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。 | ■ 亀裂開口幅の不確実性を考慮。<br>■ 分散長の不確実性を考慮。<br>■ 断層内動水勾配の不確実性を考慮。 | ■ 核種は岩盤の亀裂中及び断層中を溶質として移流・分散で移行するか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | – | – | – | – | – | – | – | – | |
| | | | ■ 横方向分散の影響はないか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | – | – | – | – | – | – | – | – | |
| 放射性核種の移行抑制（亀裂性岩盤における岩石基質部への核種の拡散） | ■ 亀裂中の核種は、拡散により岩石基質部へ移行する。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。<br>■ 亀裂充填鉱物や流れのない亀裂間隙中への核種の拡散による移行遅延は保守的に考えて無視する。 | ■ マトリクス拡散寄与面積率の不確実性を考慮。<br>■ マトリクス拡散深さの不確実性を考慮。<br>■ 間隙率／乾燥密度／実効拡散係数の不確実性を考慮。 | ■ 亀裂中の核種は、拡散により岩石基質部へ移行するか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | – | – | – | – | – | – | – | – | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| 放射性核種の移行遅延（収着） | ■ 岩石基質部中及び断層中で、核種は岩石鉱物表面に収着し移行が遅延される。収着は線形／瞬時／可逆を仮定する。<br>■ 亀裂表面への収着による移行遅延は保守的に考えて無視する。<br>■ 核種の崩壊／生成を考慮する。 | ■ 分配係数の不確実性を考慮。 | ■ 岩石基質部中及び断層中で、核種は岩石鉱物表面に収着し移行が遅延されるか？<br>■ 岩石基質部中及び断層中での核種収着は線形／瞬時／可逆か？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | － | － | － | － | － | － | － | － | |
| 微生物活動、有機物 | ■ 岩盤中の微生物や有機物が核種移行に有意な影響は与えない。 | ■ 有機物の影響を分配係数の不確実性として考慮。<br>■ 微生物の存在は、地下水中の酸化還元反応速度に影響を与えるが、平衡を仮定した地下水水質形成モデルの中で、その影響を考慮していると考えることができる。<br>■ しかしながら有機物や微生物による影響の詳細な検討は、今後の具体的な地質環境条件での研究に依存するものと考える。 | ■ 核種移行に有意な影響を与える岩盤中の微生物や有機物が存在していないか？ | ○ サイト環境条件の把握 | ■ 有機物 | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |
| | | | | | ■ 微生物（個数及び種類） | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |
| コロイド生成／移行 | ■ コロイドは生成しにくく、また存在したとしても核種移行に影響は与えない。 | － | ■ 核種移行に有意な影響を与える岩盤中のコロイドが存在していないか？ | ○ サイト環境条件の把握 | ■ ｺﾛｲﾄﾞ | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |
| ガス発生／移行 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | － | ■ 有意な影響を与えるガスが存在していないか？ | ○ サイト環境条件の把握 | ■ ガス組成・濃度 | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |
| 放射線分解 | ■ 地層処分システムへの影響が小さい | － | ■ 放射線による岩盤への有意な影響はないか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | ■ 放射線量 | ●（–） | ●（–） | － | － | － | － | － | |

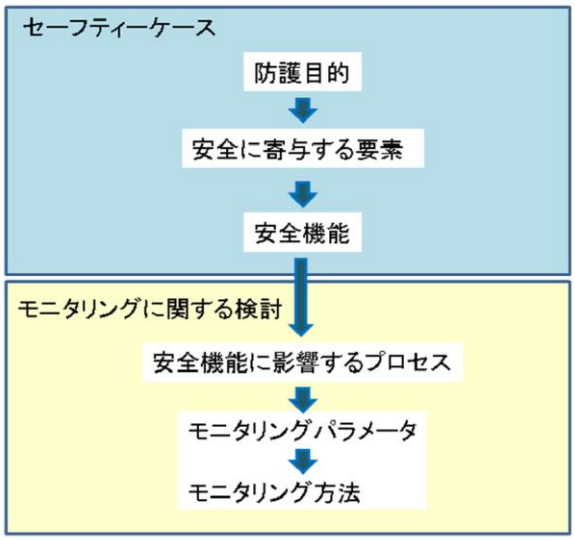
| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ﾌｧｰﾌｨｰﾙﾄﾞ | ﾆｱﾌｨｰﾙﾄﾞ | 坑道（ｱｸｾｽ） | 坑道（処分） | 緩衝材 | ｵｰﾊﾞｰﾊﾟｯｸ | ｶﾞﾗｽ固化体 | |
| | と考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | | | | | | | | | | | | |
| 放射線損傷 | ■ 地層処分システムへの影響が小さいと考えられるため、安全評価の解析では考慮しない。 | － | ■ 放射線による岩盤への有意な影響はないか？ | ○ サイト環境条件の把握⇒解析 | ■ 放射線量 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| 岩盤の物理的／化学的変遷 | ■ 岩盤の力学的、水理学的、化学的な特性及び物質移行に関する特性の時間的変化は考慮しない。 | ■ 緩衝材の温度を最大でも 100℃未満となるように処分場のレイアウトが設計され、母岩の温度は、埋め戻し後の初期に地温より数十℃高い時期があるにすぎず、地下水と鉱物との化学的相互作用に大きな影響を及ぼすとは考え難い。<br>■ 長期において、母岩が変質を受けたとしても、充填鉱物の生成や亀裂を移行する物質の岩石基質部への拡散が起こりやすくなるといった好ましい効果が期待できる。<br>■ 支保工の影響についても、低アルカリ性コンクリートの使用により、母岩の著しい劣化を避けることができる。 | ■ 緩衝材の最大温度は 100℃未満となるように設計されているか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度 | － | － | － | － | ●（＜100℃） | － | － | |
| | | | ■ 母岩の温度は埋め戻し後の初期に地温より数十℃高い程度か？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 温度 | ●（＜地温より数十℃） | ●（＜地温より数十℃） | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 地下水と岩盤鉱物との化学的相互作用は生じていないか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 鉱物組成 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 充填鉱物の生成や亀裂を移行する物質の岩石基質部への拡散が起こりやすくなるといった好ましい効果が期待できる環境が維持されているか？ | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 鉱物組成 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| | | | ■ 支保工による母岩劣化への影響はないか？ | ◆ 環境条件の確認 | ■ pH | ●（<11） | ●（<11） | ●（<11） | ●（<11） | | | | |
| | | | | ◆ 初期の状態を確認 | ■ 鉱物組成 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| | | | | | ■ 強度 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| | | | | | ■ 透水(量)係数 | ●（-） | ●（-） | － | － | － | － | － | |
| 生物圏での移行 | ■ 評価指標として放射線量を基本として将来においても現在と同様の生活様式が継続すると仮定。<br>■ GBI として河川を想定し地表環境での | － | ■ 将来においても現在と同様の生活様式が継続しているか？<br>■ 核種の流入域は河川で妥当か？<br>■ 帯水層での核種の分散や収着はあるか？ | 本検討範囲外（生物圏） | － | － | － | － | － | － | － | － | |

| 安全機能を含む処分システムの変遷 | 概念モデル | 概念モデル排除理由あるいはデータの不確実性 | 安全評価の信頼性向上に資するため想定される確認項目 | 想定される確認方法 | 想定されるモニタリング項目 | 計測場所・部位 | | | | | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | 地下環境 | | 処分施設 | | | | | |
| | | | | | | ファーフィールド | ニアフィールド | 坑道（アクセス） | 坑道（処分） | 緩衝材 | オーバーパック | ガラス固化体 | |
| | 核種の移行・分散と、種々の経路による被ばくを考慮。<br>■ 帯水層での核種の分散や収着は考慮しない。 | | | | | | | | | | | | |

**注記1**　想定される確認方法の見出しは「○：設定したモデル通りであることの確認方法」「◆：想定外であることの確認方法」を意味している
**注記2**　想定される確認方法の「解析評価」でパラメータを取得する可能性はあるが、この行為はモニタリングとはしないこととしている。
**注記3**　計測場所・部位の記載について、“(　)”内は計測を行うと仮定した場合、既往の安全評価や工学的な検討に基づき確認すべき基準となる数値を表わしている。
**注a**　人工バリアの設置環境に係わる項目

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | 文献 2、3 で調査・試験が行われた、①、②のモニタリング技術に対して、さらに調査検討が行われ、各技術に対する課題等を以下のように抽出している。<br><br>① 地中無線通信技術<br>・ 施設閉鎖後は、坑道内のモニタリング機器はケーブルを含めて撤去されることを基本とした検討を行ったが、必要であれば地中無線装置によるモニタリングを継続することができる。ただし、通信距離、データ伝送能力、及び共用機案に限りがあるため、現在の技術では、地中無線技術を適用したとしても、閉鎖後 10 年程度のモニタリングが現実的なところである。<br>② 光ファイバセンサ技術<br>・ 光ファイバセンサの耐久性評価<br>－計測値の振動の低減<br>－高温環境下での長期耐久性に関する検討<br>－多連式圧力計の構造検討<br>・ 敷設方法を考慮した研究計画の立案<br>・ pH 計及び水分計の技術評価<br>・ センサの耐放射線性に関する調査<br>（基本的に今後の調査は必要ないとされている） |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリングの目的<br>モニタリングの役割、モニタリング項目の選定方法及びモニタリング結果の判断基準<br>モニタリング項目の抽出方法の考え方とモニタリング項目<br>モニタリング技術（無線通信技術、光ファイバセンサ技術） |

表 2.2-37　既往のモニタリングに関する調査結果（5）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 5 |
| 2.文献名 | 平成 22 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | 文献 4 と同様の記載がある。 |
| 5.機能確認の考え方 | 性能確認に資するモニタリングに関して、モニタリングの候補となるパラメータに対する要求事項が挙げられている。なお、文献 4 では、核種移行抑制に大きく関連する「天然バリア」の「水理」に着目して検討を実施している。<br><br>・ 閉鎖後セーフティケースに関連が深い<br>・ 閉鎖までの数十年から 100 年程度のデータに基づき、何らかの結論（判断）を導くことができる<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果の整合に関して議論が可能である<br>・ 測定点が処分場のひろがり、ばらつきを考慮しても代表性がある<br>・ 処分場の閉鎖後安全性に影響を及ぼさない（このため、廃棄体近傍や人工バリアシステムは極力避け、必要であれば地下特性調査施設等において模擬廃棄体等を用いてモニタリングすることを考える）<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果が食い違う場合の対応を事前に検討できる（対応計画（モデルの更新など）、是正処置（修復）など）<br><br>モニタリングの目的の一つとして「処分システムの性能確認」が挙げられ、これらはモニタリングにより直接的に性能が確認されるもの、モデルによる予測値との比較により性能が確認されるものとに区分して考えることができ、前者については、下図のような流れで、セーフティケースに示された安全機能を出発点としてモニタリングパラメータの抽出が行われ、これをモニタリングすることにより性能確認が行われることが示されている。<br><br><br>図 2.3.3-1　安全機能に影響するプロセスのモニタリング |

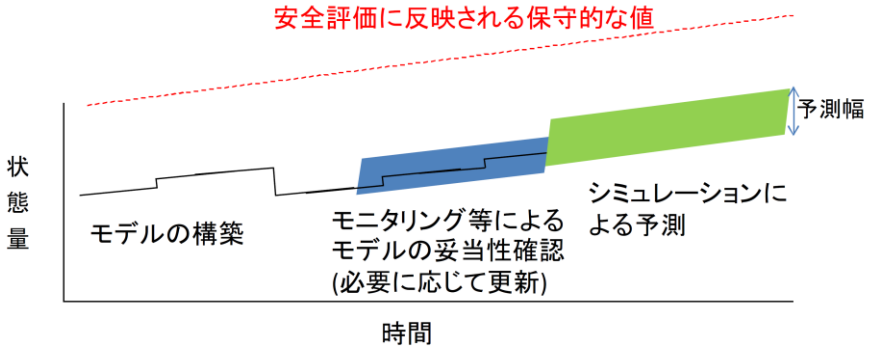
| | |
|---|---|
| | 一方、モデルによる予測値との比較により性能が確認されるものについては、モデルの確認方法やモデルと性能確認の関係等について検討が必要であり、処分場閉鎖時等の、ある段階でモニタリングを中止するためには、性能確認の一環として閉鎖後の長期挙動の予測のためにモデルの確認を行うことが重要であるとされている。そして、下図に示されるようなモデルの確認が行われれば、引続きシミュレーションによる予測が可能となり、処分システムの安全の観点でのモニタリングを中止することが可能であるとしている。<br><br><br>図 2.3.3-2　モニタリングとモデルの更新・確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 地層処分モニタリングのパラメータとして、計測場所・部位、計測時期のマトリックスが p2-100 に示す図のように示されている。ただし、具体的測定項目には言及されていない。 |




図 2.3.4-26　モニタリングの時期と場所による計測パラメータの選択[86]

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | 文献 2、3、4 で調査・試験が行われた、①、②のモニタリング技術に対して、さらに調査・試験が行われ、各技術に対する調査・試験結果と課題等が以下のように記載されている。<br><br>① 地中無線通信技術<br>・ 中距離伝送試験では、ビュール地下研究所内における伝送試験を実施し、伝送距離 50m 程度の坑道間伝送が検証できた。伝送試験を通じて以下の知見を得た。<br>－送信アンテナ近傍に換気ファン等の鋼製部材は、磁界強度を大きく減衰させる。<br>－鋼製支保工と鋼管は磁界強度に以下の影響を与える。<br>鋼製支保工と鋼管が送信方向と同じ方向に配置されているとき、磁界強度に与える影響は小さい。<br>鋼製支保工に対して磁束が鉛直に入射するとき、坑道内の磁界強度は低下する。<br>長い鋼管が磁束の向きに直角に配置されているとき、磁束は鋼管に引き寄せられるように挙動する。<br>－受信アンテナが鉄板等で囲まれている場合、磁束は大きく減衰する。<br>・ ビュール地下研究所内における伝送試験により、小型化送信装置で伝送距離 24m の坑道間伝送が可能であることを検証できた。また、中距離伝送試験で得られた磁界電波挙動と同様の挙動が確認できた。<br>・ ビュール地下研究所内で実施した伝送試験結果の解釈あたり、数値解析による評価も行った結果、数値解析で試験結果を十分に再現することができた。<br>・ 今後の課題として、先ず、ボアホール対応受信機においては、受信アンテナ収納スペースの影響についての検討と、受信可能な磁束との関係に関する検討があげられる。これらを踏まえてボアホール対応型の受信装置を設計し、実際の坑道内において実証実験を行い、性能を確認することである。次に、処分場においては地下水、緩衝材及び埋め戻し材の影響についての検討があげられる。通信システムには、水圧、土圧、温度が作用することを踏まえ、先ず、耐水性、耐圧性のある通信システムを開発し、実規模実験に適用できる通信システムの構造を確立し実証することである。また、高温によって電池の寿命や、装置内の結露によってシステムの耐久性が損なわれることから、これらを解決するシステムを検討していくことが重要である。<br><br>② 光ファイバセンサ技術<br>・ ベントナイト膨潤圧の長期耐久性試験を行った結果、スペースクリエイション社製センサに関しては、温度の評価値は熱電対測定結果と良い一致を示したが、共和電業社製センについては、温度に関しては経時に従い最大 10℃の誤差が現れ、圧力に関しては妥当な値が得られた。<br>・ 課題として以下が挙げられており、文献 4 と重複する事項が挙げられている。<br>－計測値の振動の低減<br>－圧力計の構造検討 |

| | |
|---|---|
| | －長期耐久性に関する検討<br>－使用材質の検討<br>－適切な敷設方法に関する検討 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3、4 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本業務への反映事項 | 性能確認に資するモニタリングパラメータに対する要求事項及び性能確認の考え方<br>モニタリングパラメータと計測場所・部位、計測時期のマトリックス<br>モニタリング技術（無線通信技術、光ファイバセンサ技術） |

表 2.2-38　既往のモニタリングに関する調査結果（6）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 6 |
| 2.文献名 | 平成 23 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | 文献 4、5 と同様の記載がある。<br><br>さらに、スウェーデンの SKB の事例を調査しており、SKB R-04-13 に記載されているモニタリングの目的について、以下のようにまとめている。<br><br>段階的に実施される処分事業におけるモニタリングは主に以下のような理由で実施される<br>・ 処分サイトの一次ベースライン条件を記述するため<br>・ 処分サイト及び人工バリア挙動にかんする理解を進展され実証するため<br>・ 意思決定プロセスへの支援のため<br>・ 国際的及び国内ガイドラインや規制を順守していることを示すため |
| 5.機能確認の考え方 | 文献 4 に引き続き、核種移行抑制に大きく関連する「天然バリア」の「水理」に着目した検討が実施されており、スウェーデンの SKB の事例を調査している。また、「人工バリア」のうち「緩衝材」に関して、同様にスウェーデンの SKB の事例を調査している。<br>そのうち、SR-Site における、ベースライン記述のためのモニタリング、処分場建設の影響のモニタリング、処分場建設・操業のコントロールプログラム、廃棄体定置後のモニタリングについての記述を整理して p2-104 に示す表のようにまとめている。 |

表 2.3.4-2　SR-Site におけるモニタリングの記述概要

| 項目 | 記述の概要 |
|---|---|
| ベースライン記述のためのモニタリング | ・地表からのサイト調査期間におけるベースラインコンディション確立の目的は、処分場周辺の環境の処分場開発による変化を認識し、自然による変化と人為的な変化を区別する為の、基準を定義することである。<br>・ベースラインコンディションを記述することは、本質的に、サイト記述モデルに等しく、サイトの特性調査によって得られたデータに基づく。<br>・サイト特性の一部は時間により変化するため、地球科学的、あるいは環境的なパラメータのモニタリングはサイト調査段階に開始され、いくつかの例外を除き、地表からの調査の完了後、地下の掘削作業開始後も継続されている。 |
| 処分場建設の影響のモニタリング | ・処分場建設・操業が環境対し、どのように影響を与えるかを調査することを目的とする。<br>・水理地質学的あるいは水理地球化学的モデルの作成と妥当性の確認に用いられる。<br>・モニタリング計画は必要の都度見直され、特に長期の測定が処分場建設・操業による影響を捉え続けているかに着目する。<br>・モニタリング計画は環境制御計画や処分場建設計画の要求事項に適合しなければならない。 |
| 処分場建設・操業のコントロールプログラム | ・コントロールプログラムは処分場の掘削に先立って作成されるが、処分場建設等の経験がフィードバックされる。<br>・処分場の建設・操業が、設計の前提条件や他の要求への適合することを保障することを目的とする。<br>・材料供給、職人の技量、施工が完了し操業している施設が設計と操業活動の事項に対応するかのコントロール、が考慮される。 |
| 廃棄体定置後のモニタリング | ・これまでに述べた（ベースライン、処分場建設・操業の影響）モニタリング計画は、廃棄体が定置され、処分場の閉鎖が開始されるまで継続する。<br>・処分場の閉鎖時には、モニタリングシステムは徐々に解体されるが、閉鎖のプロセスをどこまでモニタリングするかが課題となる。<br>・最終的に処分された廃棄体の人工バリア（キャニスター、緩衝材、埋め戻し材）のモニタリングは、人工バリアの安全機能を損なう為、意図していない。<br>・閉鎖後のモニタリングに対する法的要求はないが、核物質防護のためのモニタリングは開発されるだろう。<br>・閉鎖後のモニタリングについては、閉鎖時の政策決定者により決定される。<br>・SR-Site では閉鎖後のモニタリング計画について考慮しないが、長期安全性に影響を与えないものとなるだろう。 |

| | |
|---|---|
| | また、SKB R-04-13 に記載されているモニタリングの具体的な役割、モニタリングプログラムに必要な事項を以下のようにまとめている。<br><br>モニタリングの具体的な役割<br>・ 地層処分の各段階における滑動の影響を特定し評価するために、擾乱を受けない場合の自然条件とその季節変化（ベースライン）に関する知見を取得すること<br>・ 安全性の説明をサポートし、モデルや仮定を試験するために、地層処分システムの機能に関してさらに理解すること<br>・ 理想処分場の環境影響を監視すること<br>・ 作業環境が放射線学的に、及び非放射線学的に安全であることの証拠を提供すること<br>・ 放射性廃棄物の検査（保障措置）が満たされる要件を示すこと<br><br>モニタリングプログラムに必要な事項<br>・ モニタリングプログラムの目的<br>・ モニタリングの適用範囲（モニタリング対象の選定基準、モニタリングする特性、プロセス、現象及びモニタリング可能な数量の特定）<br>・ モニタリング手法の特定<br>・ モニタリングシステムの運用（モニタリング終了時期に関する基準などといった、モニタリング期間と頻度の特定、モニタリング結果の品質管理と報告書作成、坑道のトリガーレベルの決定、トリガーレベルを超過した場合に実施すべき行動の決定）<br><br>さらに、SKB R-04-13 には、長期安全性の評価に関するモニタリングについて述べられており、以下のようにまとめている。<br><br>・ 長期安全評価のためにモニタリングする特性、プロセス及び現象の特定は安全評価の内容に本質的に関連する。<br>・ モニタリングすべき基本的性質は「長期安全性」であると考えられるが、これは不可能であるため、一つもしくは複数のプロセスのパラメータを複合して「キーとなる指標」とし、プロセスや特徴の本質的要素を取得するという手法をとる。例えば、個々の元素の挙動を特定し追跡することができないような場合には、温度のモニタリングが放射性崩壊のよりよい「キーとなる指標」となる。<br>・ 「キーとなる指標」を追跡することにより、システム全体がどのように進展していくかについての初期情報を得ることができるため、モニタリングプログラムの中で「キーとなる指標」を設定することは賢明である。また、「キーとなる指標」は、操業時や長期の安全性についての安全評価の中でも示される可能性がある。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | SKB R-04-13 では、「5.機能確認の考え方」に示した内容を勘案し、モニタリングの対象とする特性やプロセス、現象を特定するべき、とされており、モニタリング項目が示されおり、それらを p2-106 に示す表のようにまとめている。 |

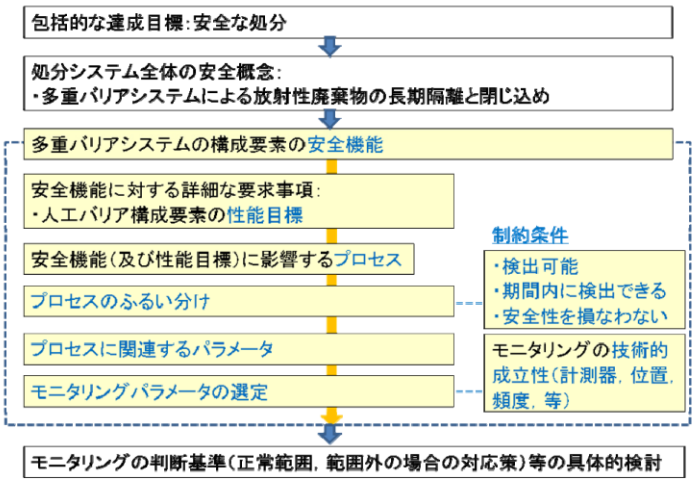
表 2.3.4-3　SKB R-04-13 におけるモニタリング項目

| | サイト調査段階 | 建設および詳細特性調査段階 | 初期操業、通常操業、閉鎖段階 | 閉鎖後段階で制度的管理をする期間 |
|---|---|---|---|---|
| 環境モニタリングプログラム | - 地表調査の擾乱 | - 補足地表調査の擾乱<br>- 処分場建設の影響(土壌、地下水、ガス、騒音) | - 補足地表調査の擾乱<br>- 処分場建設の影響(土壌、地下水、ガス、騒音) | - 地下水面上昇の影響<br>- 文書の保存 |
| 気候 | - 気温、気圧、降水量、蒸発量、流水量、海水準変動 | - 気温、気圧、降水量、蒸発量、流水量、海水準変動 | - 気温、気圧、降水量、蒸発量、流水量、海水準変動 | - 気温、気圧、降水量、蒸発量、流水量、海水準変動 |
| 生物圏 | - 動植物、土壌、土地利用など | - 動植物、土壌、土地利用など | - 動植物、土壌、土地利用など | - 動植物、土壌、土地利用など<br>- 文書の保存 |
| 地表からの試錐孔 | - 地下水化学、地下水圧、地下水温 | - 地下水化学、地下水圧、地下水温 | - 地下水化学、地下水圧、地下水温 | - 文書の保存 |
| 地下からの試錐孔 | | - 地下水化学、地下水圧、地下水温<br>- 岩盤の変形 | - 地下水化学、地下水圧、地下水温<br>- 岩盤の変形 | - 文書の保存 |
| 地震事象 | - 時刻、位置、局部地震の種類 | - 時刻、位置、局部地震の種類<br>- 微小地震事象 | - 時刻、位置、局部地震の種類<br>- 微小地震事象 | - 時刻、位置、局部地震の種類<br>- 微小地震事象<br>- 文書の保存 |
| 処分場の監視 | | - 火災<br>- 冠水、浸透水、噴出水（量、質）<br>- 換気（温度、量、質）<br>- 騒音<br>- 予防メンテナンスのための条件<br>- 地下空洞の安定性 | - 火災<br>- 冠水、浸透水、噴出水（量、質）<br>- 換気（温度、量、質）<br>- 騒音<br>- 予防メンテナンスのための条件<br>- 地下空洞の安定性<br>- 放射線<br>- 保障措置 | - 保障措置<br>- 文書の保存 |

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載されている。 |

| | |
|---|---|
| 8.計測技術 | 文献 2、3、4、5 で調査・試験が行われた、①、②のモニタリング技術に対して、さらに調査・試験が行われ、各技術に対する調査・試験結果と課題等が以下のように記載されている。<br><br>地中無線通信技術<br>・ 配線による処分システムの安全性への影響を低減することが可能な地中無線通信技術の適用範囲拡大を目指し、小型化した地中無線受信装置（受信アンテナ）を開発するとともに、本装置を用いた実証試験をフランスの地下研究施設において実施した。その結果、地下の坑道から掘削されたボーリング孔間において地中無線通信が可能であることを確認した。<br>・ 今後の課題として、小型無線システムに最適なセンサの選定とアダプタの開発が必要である。また、受診したデータをさらに遠隔に伝送するためには中継システムの構築が必要である。<br><br>光ファイバセンサ技術<br>・ FBG 圧力センサでは計測値に振動が見られたため、センサ構造（大きさ）と合わせ、適切なグレーティング長について検討する必要がある。<br>・ 多点測点を目指して開発した FBG 圧力センサは、センサ全体を試験対象領域に敷設した場合、異なる温度の計測が行えず、構造・材質・強度の見直しを含めた検討が必要である。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3、4、5 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本業務への反映事項 | スウェーデン SKB におけるモニタリングの目的、機能確認の考え方、及びモニタリング項目<br>モニタリング技術（無線通信技術、光ファイバセンサ技術） |

表 2.2-39　既往のモニタリングに関する調査結果（7）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 7 |
| 2.文献名 | 平成 24 年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第 3 分冊）―モニタリング技術の開発― |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | モニタリングの目的に関する記載はなく、文献 6 までに示されたもう k 的が踏襲されている。 |
| 5.機能確認の考え方 | 文献 5、6 に引き続き、性能確認のためのモニタリングについて検討が実施されており、文献 7 では、「人工バリア」に着目して検討されている。<br>性能確認のためのモニタリングの候補となるパラメータに課せられる要求事項として、以下の項目を挙げている。なお、これらは、文献 5 で示した「天然バリア」の性能確認のためのモニタリングパラメータに課せられる要求事項と同一である。<br><br>・ 閉鎖後セーフティケースに関連が深い<br>・ 閉鎖までの数十年から 100 年程度のデータに基づき、何らかの結論（判断）を導くことができる<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果の整合に関して議論が可能である<br>・ 測定点が処分場のひろがり、ばらつきを考慮しても代表性がある<br>・ 処分場の閉鎖後安全性に影響を及ぼさない（このため、廃棄体近傍や人工バリアシステムは極力避け、必要であれば地下特性調査施設等において模擬廃棄体等を用いてモニタリングすることを考える）<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果が食い違う場合の対応を事前に検討できる（対応計画（モデルの更新など）、是正処置（修復）など）<br><br>そして、モニタリングの対象となるプロセスとパラメータの選定の考え方として、下図に示すフローを示している。<br><br><br>図 2.4.2-1　人工バリアの安全機能に影響するプロセスのモニタリングパラメータ選定方法案<br><br>また、モニタリングに実施における制約条件として、モニタリングの実施により得られる長期安全性への信頼性向上というメリットとモニタリ |

| | |
|---|---|
| | ングに伴うデメリットが存在することから、下記に示すデメリットとの間で整合を図ることが求められるとしている。なお、下記に示すモニタリングの実施に伴うデメリットは、文献 4 で示したものと概ね同様である。<br><br>・ モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく<br>・ モニタリングの実施に伴う工学的バリアシステム設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化（工学的バリアシステムが所定の機能を発揮できない可能性がある）<br>・ 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成<br>・ モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存した場合の人間侵入、あるいは自然または誘発された現象（洪水など）による悪影響が生じる可能性の増大<br>・ 処分場建設、操業、閉鎖等への干渉<br><br>この中で、「潜在的水みちの形成」に関しては、工学的対策が困難であり、地層処分の長期安全性の信頼性を高めるために他の対策によるトレードオフを行うことが困難であるため、十分な考慮が必要である、としている。そして、基本的なモニタリングの要件として「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない」ことを掲げている。<br>その上で、操業・閉鎖段階における地層処分モニタリングの制約条件として、下記を定義しており、この制約条件を満たすものが原位置で実施可能なモニタリングであるとしている。なお、地下施設を活用して実施するニアフィールドのモニタリングについても、下記制約条件に準拠するとしている。<br><br>・ 処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない。アクセス可能な坑道のみ、モニタリングが可能である。処分場の閉鎖後は全ての坑道のモニタリングを中止する（閉鎖後に置いては水みちになる可能性がある坑道のケーブルは撤去）。<br>・ 再冠水過程の浸潤状況の把握、人工バリアのモニタリング情報が必要であれば、処分場とは異なる場所に地下調査施設（ヒーター等を有する模擬廃棄体を埋設）を建設し、人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う。処分場の閉鎖後は中止する（閉鎖時においては水みちになる可能性がある連絡坑道のケーブルは撤去）。<br><br>上記のモニタリングの制約条件から、実廃棄体近傍でのモニタリングに関して、フランス Andra、スイス Nagra の事例を調査し、以下のように整理されている。<br><br>フランス Andra<br>・ 1 世紀以上の期間の可逆性の維持が規定されており、これにより、地層処分のコンセプトは廃棄体の回収可能性を重視したものとなっている。<br>・ 回収可能性を維持した管理プロセスに情報を与えるため、処分場での実廃棄体近傍のモニタリングが計画されている。<br>・ 処分場の中で、一部の廃棄体近傍にてモニタリングを実施し、ここでのモニタリング結果が、処分場全体を通しての性能の指示的指針として、広範囲に適用される。<br>・ 廃棄体を設置する鋼製スリーブの外側でモニタリングを実施 |

| | |
|---|---|
| | ・ モニタリングには有線のセンサの他、地中無線通信技術の利用を検討<br>・ 無線モニタリングの実施時には、遮蔽用鋼製プラグの外側までは有線でデータを送り、その外側の低透水性のベントナイトシールとコンクリートプラグの部分は、無線でデータを送信<br><br>スイス Nagra<br>・ 主施設のバリアシステムとインベントリを代表する廃棄物を設置したパイロット施設を設置の建設が規定されており、ここでのモニタリングにより安全評価の裏付けとなる情報を取得することが求められている。<br>・ パイロット施設におけるモニタリングにより、廃棄体近傍のバリア機能が損なわれた場合には､廃棄物をパイロット施設から取り出し、主施設に定置することが規定されている。<br>・ パイロット施設に隣接する観察用坑道からのボーリングによる廃棄体近傍の母岩のモニタリングが検討されている。<br>・ パイロット施設におけるモニタリングでは、無線モニタリング技術や非侵入型モニタリング技術の利用が検討されている。<br><br>上記、フランス、スイスの事例調査の結果から、実廃棄体近傍でのモニタリングが行われる場合の条件を考察し、以下のようにまとめている。<br><br>・ 実廃棄体近傍のモニタリングを選択する背景には、法規制による要件を満たす必要性が存在している。<br>・ モニタリングは処分場を代表する少数の廃棄体に対して実施され、ここでの情報が処分場全体の安全評価の裏付けとして利用される。<br>・ 実廃棄体に対するモニタリングは、実廃棄体を設置した地下調査施設または処分場の一部で実施される。<br>・ 廃棄体近傍のバリア機能の擾乱に配慮し、無線モニタリング技術や非侵入型モニタリング技術の利用が検討される。<br>・ バリア機能の擾乱が認められた場合、またはモニタリング期間が終了した場合、廃棄体を回収し処分場の安全な場所に移設する。<br><br>その上で、わが国においては、実廃棄体近傍のモニタリングを必要とする法規制は現在のところ存在していないため、このような選択がなされる可能性は高くないとしている。しかし、実廃棄体近傍のモニタリングにおいて、バリア機能の擾乱を可能な限り抑えるため、地中無線通信技術や非侵入型のモニタリング技術を適用する場合の課題として以下を挙げている。<br><br>地中無線通信技術を用いる場合<br>・ 廃棄体近傍の高温環境において、無線送信装置（特にバッテリー）が必要とされる期間、機能を維持できるか。<br>・ 廃棄体近傍の放射線に対して、無線送信装置が必要とされる期間、機能を維持できるか。<br>非侵入型のモニタリング技術を用いる場合<br>・ 必要なパラメータが測定可能か<br>・ 十分な解像度が得られるか<br>・ 緩衝材と廃棄体の物性の違いが、緩衝材のモニタリングに影響しないか |

| | |
|---|---|
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | 文献 2、3、4、5、6 で調査・試験が行われた、地中無線通信技術に対して、さらに調査・試験が行われ、各技術に対する調査・試験結果と課題等が以下のように記載されている。<br><br>・ 地中無線による通信距離拡大のため、地中無線中継システムを開発した。中継装置による送信距離は平成 22 年度（文献 5）で開発した中距離地中無線送信装置の 10 倍の能力を持つ送信アンテナを開発し、地上での試験により所定の能力を持つことを確認した。<br>・ 小型地中送信装置を用いた圧力モニタリング及びひずみモニタリングのため、平成 23 年度（文献 6）で開発した静水圧環境で適用可能な小型地中無線送信装置に圧力センサ及びひずみセンサを接続するためのアダプタを開発し、測定・通信試験、温度試験、振動試験により所定の能力を持つことを確認した。<br>・ 地下坑道から地表への長距離送信の実現可能性の検討を行うため、3 次元電磁波伝搬解析を実施し、中継システムの 3 倍の送信強度を持つ送信機を新規開発でき、坑道端部に鋼製支保工等の電磁波減衰を引き起こす部材のない部分を形成できれば実現可能性がある。<br>・ 調査段階や建設・操業段階における長期間のモニタリングの際に生じるバッテリーの寿命に関する問題や、これを克服するための電源供給技術の検討が課題として残された。 |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3、4、5、6 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本事業への反映事項 | 人工バリアの性能確認のためのモニタリング要求事項、モニタリングパラメータ選定の考え方、モニタリングの制約条件<br>実廃棄体近傍のモニタリングに関する考え方、海外の事例<br>地中無線通信技術の適用 |

表 2.2-40　既往のモニタリングに関する調査結果（8）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 8 |
| 2.文献名 | 平成 25 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 3 分冊）モニタリング関連技術の整備 |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | 地層処分モニタリングを目的に基づき分類し、以下のように整理されている。<br><br>a） 処分システムの期待／予測された挙動の検証／確認（閉鎖後安全、性能確認）<br>・長期セーフティケースの根拠のサポート<br>・閉鎖前の処分プロセスのマネージメントのサポート<br>b） 操業安全性<br>・一般労働安全<br>・放射性安全<br>c） 環境影響<br>d） 核保証措置（直接処分）<br>e） ベースラインの取得<br>a)及び c)のためのモニタリング結果と比較されるサイトの初期状態の取得<br>f） 法令要件の遵守<br>a)～d)までに関し定められた法令要件（制度的管理に関する法令要件を含む）の遵守 |
| 5.機能確認の考え方 | 文献 8 では、文献 7 と同様に、人工バリアの性能確認に資するモニタリングについて検討が行われており、性能評価のためのモニタリングの候補となるパラメータに対する要求事項、モニタリングパラメータの選定方法が示されている。なお、要求事項、パラメータ選定方法ともに文献 7 と同様である。<br><br>性能評価モニタリングの候補となるパラメータに対する要求事項<br>・ 閉鎖後セーフティケースに関連が深い<br>・ 閉鎖までの数十年から 100 年程度のデータに基づき、何らかの結論（判断）を導くことができる<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果の整合に関して議論が可能である<br>・ 測定点が処分場のひろがり、ばらつきを考慮しても代表性がある<br>・ 処分場の閉鎖後安全性に影響を及ぼさない（このため、廃棄体近傍や人工バリアシステムは極力避け、必要であれば地下特性調査施設等において模擬廃棄体等を用いてモニタリングすることを考える）<br>・ モデル（予測）等とモニタリング結果が食い違う場合の対応を事前に検討できる（対応計画（モデルの更新など）、是正処置（修復）など） |

パラメータ選定方法

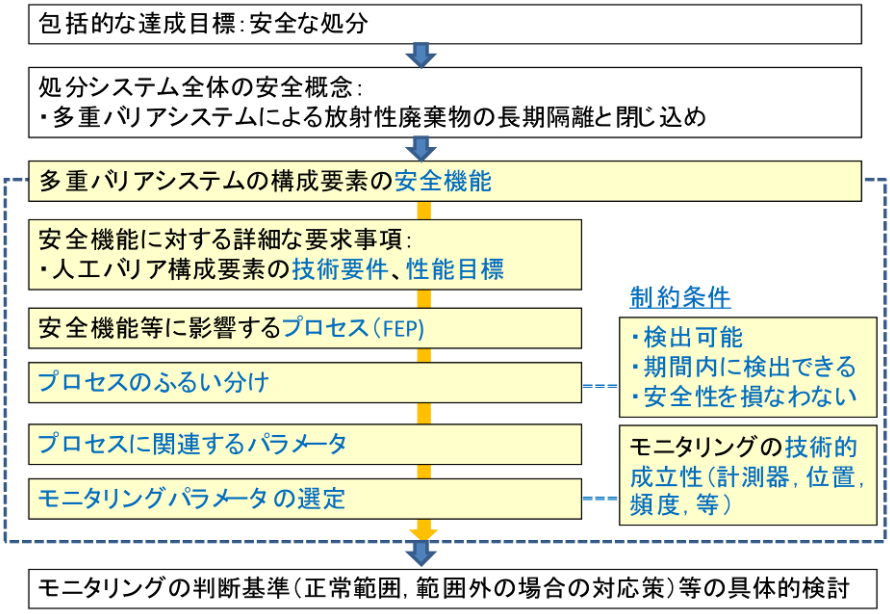



図 3.4.2-1　人工バリアの安全機能に影響するプロセスの
モニタリングパラメータ選定方法案[36]

モニタリングの実施における制約条件の検討として、モニタリングの実施に伴うデメリットが示されている。なお、下記デメリットは文献 7 と同様の記載である。

- モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく
- モニタリングの実施に伴う工学的バリアシステム設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化（工学的バリアシステムが所定の機能を発揮できない可能性がある）
- 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成
- モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存したした場合の人間侵入、あるいは自然または誘発された現象（洪水など）による悪影響が生じる可能性の増大
- 処分場建設、操業、閉鎖等への干渉

これらデメリットから、モニタリングの実施における制約条件の基本事項を「モニタリング行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない」こととしている。
この制約条件の基本事項を踏まえて、操業・閉鎖段階における地層処分モニタリング実施の制約条件を以下のように定義しており、この制約条件を満たすものが原位置で実施可能なモニタリングであるとしている。

- 処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない。アクセス可能な坑道のみ、モニタリングが可能である。処分場の閉鎖後は全ての坑道のモニタリングを中止する（閉鎖後に置いては水みちになる可能性がある坑道のケーブルは撤去）。
- 再冠水過程の浸潤状況の把握、人工バリアのモニタリング情報が必要であれば、処分場とは異なる場所に地下調査施設（ヒーター等を有する模擬廃棄体を埋設）を建設し、人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う。処分場の閉鎖後は中止する（閉鎖時においては水

| | |
|---|---|
| | みちになる可能性がある連絡坑道のケーブルは撤去)。<br><br>一方、地中無線送信技術を用いた場合、現在の技術的な制約条件である、伝送距離が限定されている事、伝送速度が遅い事、機器の寿命に加えてバッテリーの寿命も考慮する必要がある事等の課題を克服すれば、地層処分モニタリングの制約条件を変えることが可能でるとして、地中無線送信技術を用いた場合の制約条件を以下のように示している。<br><br>・ 処分場の処分坑道、人工バリアでのモニタリングは実施しない。主要坑道や連絡坑道においては、埋め戻しが行なわれプラグが設置された場合にも、無線送信装置によりデータを送信することでモニタリングが可能である。坑道の埋め戻しが進行し、無線送信装置の伝送距離の限界を越える場合には、データの中継を行ない、さらにモニタリングを継続することが可能である。処分場の閉鎖後のモニタリングはバッテリーの寿命等に依存するが、一定期間のモニタリングが技術的に可能である。<br>・ 再冠水過程の浸潤状況の把握等、人工バリアのモニタリング情報が必要であれば、処分場とは異なる場所に地下調査施設を建設し、模擬廃棄体周辺の人工バリア、模擬処分坑道でのモニタリングを行う。処分場の閉鎖後のモニタリングはバッテリーの寿命等に依存するが、一定期間のモニタリングが技術的に可能である。<br><br>さらに、処分場の処分坑道でのモニタリングを行わないとする制約条件に対して、処分坑道、処分孔におけるモニタリングの可能性を検討している。廃棄体近傍でのモニタリングを検討している事例として、フランス ANDRA の事例を調査し、処分場の廃棄体近傍でモニタリングを実施する理由を以下のように挙げている。<br><br>a) 処分場の可逆的管理の助けとなる<br>b) 運用面の安全管理に貢献する<br>c) 長期的に地質調査に関する追加情報を提供する<br>このうち、a)のモニタリングにより得られた情報は、<br>・ 次の段階に移ることの妥当性の評価、<br>・ パッケージの回収能力の評価、<br>・ 建設すべき次期構造物に関する特に土質工学面からの設計変更の準備<br>に貢献する。<br><br>また、人工バリアの性能確認モニタリングのオプションについて検討されており、以下のようなオプションを列挙するとともに、その長短を比較して p2-115 に示す表に取りまとめている。<br><br>・ 模擬廃棄体の仕様（実廃棄体と同じ材料的性質、質量、寸法、発熱量を持つヒーター等）<br>・ 地下特性調査施設で実施<br>・ 処分パネルで実施<br>・ 実廃棄体を用いたパイロット施設での実施<br>・ 処分場にて、地質学的・水理学的不均一性を考慮してモニタリングを実施<br>・ 実廃棄体近傍の人工バリアをモニタリング、終了後モニタリング機 |

器を回収して人工バリアを再構築
・ 模擬廃棄体を設置した人工バリアをモニタリング
・ 地中無線、非侵入型のモニタリングの利用
－廃棄体を無線モニタリング装置に置き換えてのモニタリング

表 3.4.3-1 人工バリアの性能確認モニタリングのオプション比較

| モニタリング実施場所 | 模擬廃棄体近傍の人工バリア | 実廃棄体近傍の人工バリア |
|---|---|---|
| 地下特性調査施設 | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。<br>×：地質学的・水理学的不均一性への対処が困難、放射線の影響はモニタリング出来ない。 | |
| パイロット施設 | | ○：放射線の影響もモニタリング可<br>×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要、地質学的・水理学的不均一性への対処が困難。 |
| 処分パネル | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。地質学的・水理学的不均一性への対処が可能<br>×：放射線の影響はモニタリング出来ない。 | ○：放射線の影響もモニタリング可、地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。<br>×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要。 |

| | |
|---|---|
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 緩衝材の再冠水過程を対象として、緩衝材の安全機能、技術要件、FEP の関係を整理した上で、モニタリングパラメータの候補を下表に提示している。 |

表 3.4.2-11　安全機能、技術要件、FEP から推定した再冠水時のモニタリングパラメータ候補

| 安全機能 | 技術要件 | 技術要件との関連を推定した再冠水過程で重要な FEP | | FEP と直接関係を推定したパラメータ | モニタリングパラメータ候補 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | FEP 番号 | FEP 名 | | |
| 放射性物質の溶解度制限 | （還元環境の保持） | — | — | — | — |
| 移流による移行抑制 | 低透水性 | B-2.2 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | B-2.3 | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| | | B-6.3.1 | 移流/分散 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| コロイド移行の防止・抑制 | コロイドろ過能 | B-2.3 | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| | | B-4.7 | コロイドの形成 | 排水中のコロイド量 | 排水中のコロイド量（サンプリング） |
| | | B-6.3.1 | 移流/分散 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| 収着による放射性物質移行の遅延 | 収着性 | — | — | — | — |
| 放射性物質の溶解度制限、移流による移行抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質移行の遅延 | 自己修復性 | B-3.3 | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 耐熱性 | B-1.2 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | 耐放射線性 | | | | |
| | 緩衝材流出の抑制 | B-2.2 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | B-2.3 | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| | | B-3.5 | 緩衝材の流出 | 排出水中の緩衝材量、流量、流速、密度、膨潤圧 | 排出水中の緩衝材量（サンプリング）、全圧、間隙水圧 |
| | 廃棄物との相互作用の影響の低減 | — | — | — | — |
| | バリア材料間の相互作用の影響の低減 | — | — | — | — |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | B-3.3 | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| （他のバリアの保護） | ガラス固化体の過熱の防止 | B-1.2 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | B-3.2 | 緩衝材の応力 | 膨潤圧、全圧、間隙水圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | | B-3.4 | 緩衝材の変形 | 変位、全圧 | 変位、全圧 |
| | オーバーパックの沈下の防止 | B-3.2 | 緩衝材の応力 | 膨潤圧、全圧、間隙水圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | | B-3.4 | 緩衝材の変形 | 変位、全圧 | 変位、全圧 |

また、性能確認のためのモニタリングはあくまで性能確認プログラムの一部であり、モニタリングによって全ての性能確認を行うものではいことに注意が必要であると提言しており、性能確認モニタリングの位置付けを下図のように整理している。

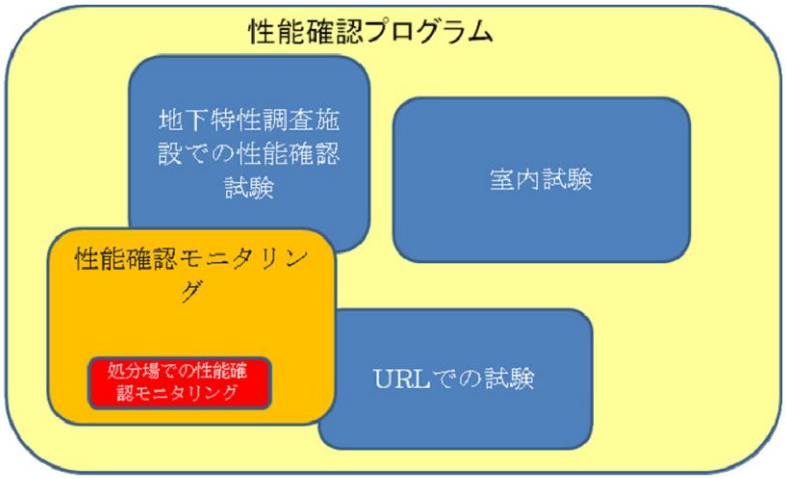



図 3.4.2-2　性能確認モニタリングの位置付け

性能確認のためのモニタリング結果の反映に関して、以下のような検討が行われている。
図①において、このパラメータのモニタリング結果は、事前に予測された値の幅に収まっている。この時、モニタリング結果は、このパラメータに関係する品質や性能が確保されており、性能を維持すべき期間中は、ある許容値を上回る値の幅で推移するという予測に対して追加的な根拠をもたらす。また、モニタリング結果はパラメータの予測モデルの精度向上（不確実性の低減）に寄与し得るものと考えられる（図①中の赤線）。この場合、モニタリングは予定された期間の終了まで継続され、モニタリング結果は新たな予測モデル（赤線）と比較される。

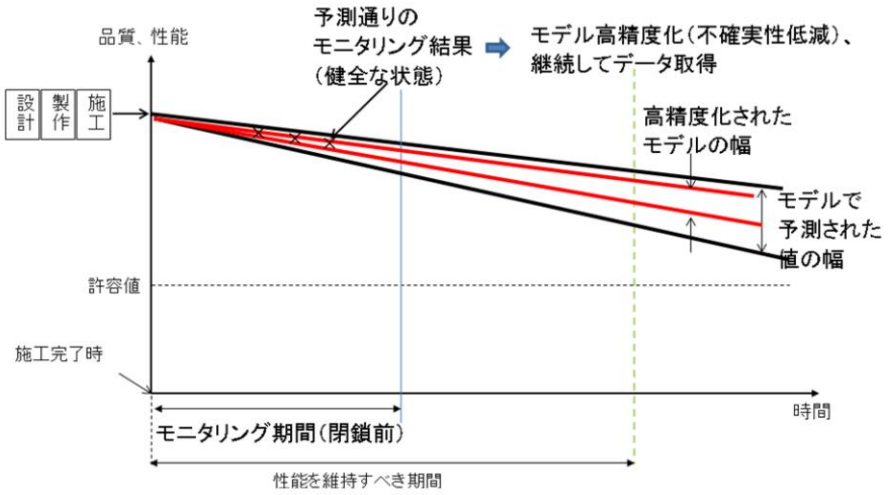



図 3.4.4-1　モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（1/4）

図①

図②において、モニタリング結果が事前に予測されたパラメータの幅を下回り、かつ許容値は上回っている。このモニタリング結果は、現時点ではこのパラメータが示す人工バリア構成要素の品質・性能は許容できる状態であるが、性能を維持すべき期間のある時点で許容値を下回る可能性があることを示唆する。このため、モニタリング結果を踏まえたモデルの見直しが行われ、その結果、性能を維持すべき期間内に許容値を下回ることはなく、また処分の安全性に影響しない（リスクに関係しない）と予測された場合、修正されたモデルを確認するため、追加的なモニタリングが実施されるものと考えられる。

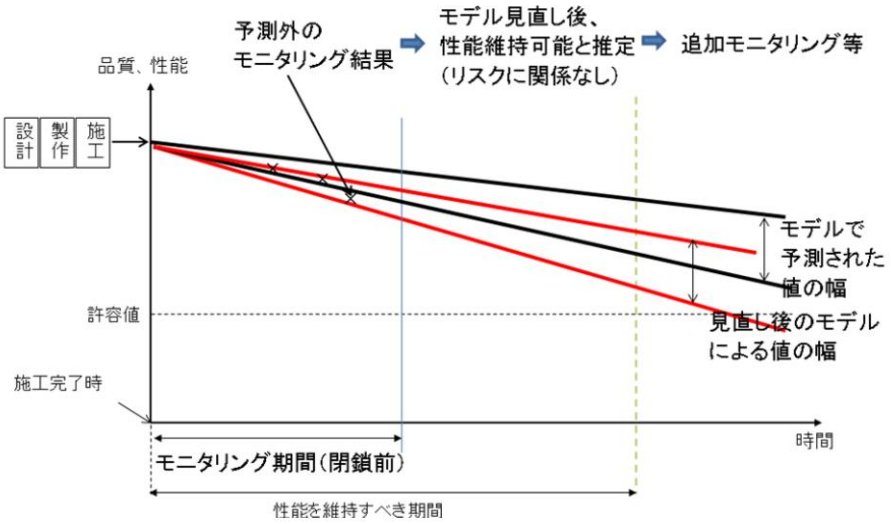



図 3.4.4-2 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（2/4）

図②

図③において、モニタリング結果が事前に予測されたパラメータの幅を下回り、かつ許容値は上回っている。このモニタリング結果は、現時点ではこのパラメータが示す人工バリア構成要素の品質・性能は許容できる状態であるが、性能を維持すべき期間のある時点で許容値を下回る可能性があることを示唆する。このため、モニタリング結果を踏まえたモデルの見直しが行われ、その結果、性能を維持すべき期間内に許容値を下回る可能性があり、かつ処分の安全性に影響し得る（リスクに関係する）と予測された場合、リスク管理として工学的対策や廃棄体の回収などのリスク管理オプションが選択されることになる。

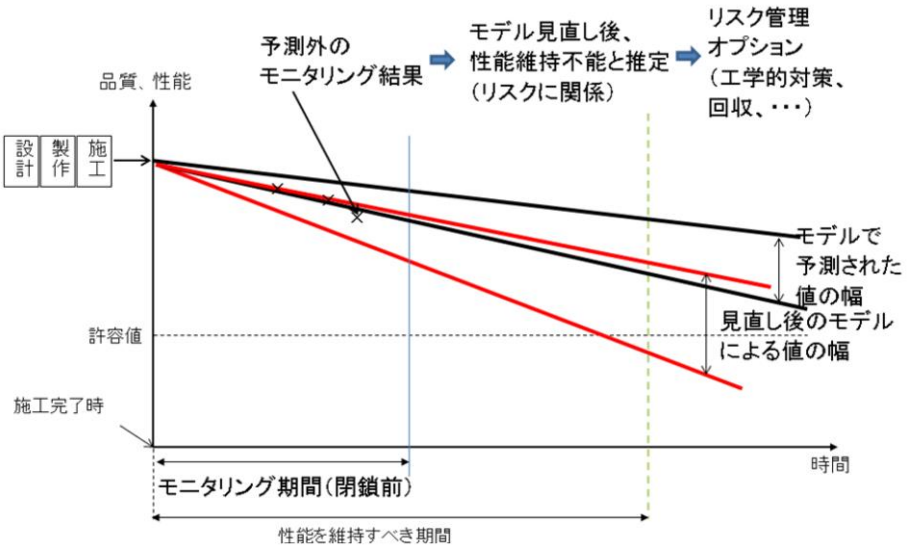



図 3.4.4-3 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（3/4）

図③

一方、図④のように、モニタリング可能な期間と人工バリアの構成要素が性能を維持すべき期間との時間の長さに大きな差があることが指摘されている。このため、モニタリング結果は、モデルが予測する人工バリア構成要素の挙動のうち、ごく初期の段階と比較されることになる。このことから、モニタリングにより確認すべき対象としては、ある人工バリア構成要素の性能のうち、初期の段階での挙動が、その後の性能に大きく影響するものを選択することが効果的である、としている。逆に、初期の挙動がバリア性能に大きな影響を与えないようなパラメータをモニタリングした場合には、挙動を予測するモデルに対して、これを確認し信頼性を（ある程度）強化する結果になる、としている。

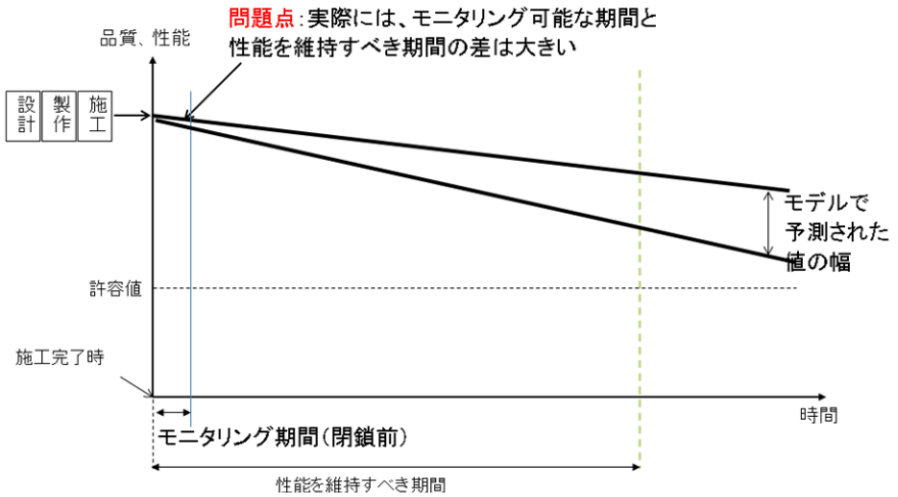



図 3.4.4-4 モデルによる予測範囲とモニタリング結果の比較（4/4）

図④

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |

| | |
|---|---|
| 8.計測技術 | 核種地層処分モニタリング技術の到達状況が以下のようにまとめられている。<br><br>有線センサの技術の現状と改善の可能性について、以下のようにまとめられている。<br>・ センサのハウジングの材料は圧力と腐食に耐えるよう改善されるべきである。SS316L 又はチタンが推薦される。<br>・ ケーブルも同様に PUR またはフッ素重合体（PTFE,FEP 等）による被覆が期待され、環境により、SS316L 又はチタンによる外部被覆も防護性を向上させる。<br>・ 特にケーブル接続部において水とガスからの遮断が保障されるべきである。耐性試験は 5MPa まで実施することが推薦される。<br>・ 放射線による影響は殆どのケースで検討されるべきである。<br>・ 機械的圧力について直径 100mm 以下の信頼できるセンサの供給が 1 社（KULITE USA）に限られており、供給に 30 週を要する。他の供給元が必要である。(原環センターからの依頼の結果、Geokon 及び坂田電機にて納期約 3 カ月で供給可能となった。)<br>・ 飽和に近い状態での緩衝材や埋め戻し材の正確な湿度測定について適切な解がない。また、不飽和状態での間隙水圧測定について信頼できるセンサが必要である。<br>・ 放射性廃棄物のモニタリングに適した放射線センサが存在しない。<br>・ 処分場の厳しい環境で使用可能な、非接触型の変位センサが求められる。<br>・ フィールド環境、処分環境で適用できる、信頼性と安定性のある pH センサの開発が必要である。<br>・ コロイドセンサは存在しない。<br><br>光ファイバセンサの技術の現状と改善の可能性については、今後数年間で多くの改善が期待されるとしているが、現状では少なくとも以下の改善が必要であるとしている。<br>・ 干渉法以外の技術により信頼性が外挿されるべきである。<br>・ 水圧やガス圧、放射線からの空間的防護が確立されることが期待される。<br>・ 化学、湿度、放射線に関する光ファイバセンサを開発すべきである。<br>・ 一般的に、処分場での使用に関する更なる適性の証明が必要である。<br><br>処分場での適用を目指した地中無線通信技術には、高周波を用いるものと低周波を用いるものがあり、その長所・短所が p2-121 に示す表のようにまとめられている。 |

表 5.3.3-1　地中無線通信技術の分類と長所・短所（[2]に追記、作表）

| | 高周波無線システム(UHF) | 低周波無線システム(ULF, SLF, ELF) |
|---|---|---|
| 長所 | ・高いデータ速度<br>・短い通信時間<br>・低いエネルギー消費<br>・小型アンテナ（短い波長）<br>・モニタリングに応用できる多くの機器が・市場で入手可能 | ・固体中での非常に小さな減衰<br>（⇒原環センター：鋼製支保をもつ地下研の岩盤中で 50m（実績））<br>・高い侵入性（地中無線システム）<br>・水や湿度に対する高い許容性 |
| 短所 | ・低い侵入性（岩盤中で数m）<br>・水や湿度に対する非常に低い許容性（特に 2.4 GHz). | ・非常に長い波長（閉じた空間内での使用に不適）<br>・大きなエネルギー要求量<br>（⇒原環センター：小型送信機で 10 年）<br>・無線ネットワークへの低い適性<br>（⇒原環センター：中継技術を開発） |
| 開発事例 | ・スペイン・EITAMIN による機器開発と地下研での実証 | ・原環センターによる各種機器と地下研での検証<br>・オランダ・NRG による基礎的検討 |

| | |
|---|---|
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3、4、5、6、7 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本事業への反映事項 | モニタリングの目的<br>モニタリングパラメータ選定の考え方・方法<br>廃棄体近傍でのモニタリングの考え方<br>モニタリング結果の反映方法<br>モニタリング技術の技術動向 |

表 2.2-41　既往のモニタリングに関する調査結果（9）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 9 |
| 2.文献名 | 平成 26 年度 地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発報告書（第 3 分冊）モニタリング関連技術の整備 |
| 3.機関 | 原子力環境整備促進・資金管理センター |
| 4.モニタリングの目的 | モニタリングの目的として、以下に示す文献 8 と同様の目的が挙げられており、各目的の関係が図 2.2.1-1 にまとめられている。さらに地層処分の段階と場所による目的の分類が表 2.2.1-1 なされている。<br><br>a） 処分システムの期待／予測された挙動の検証／確認（閉鎖後安全、性能確認）<br>・長期セーフティケースの根拠のサポート<br>・閉鎖前の処分プロセスのマネージメントのサポート<br>b） 操業安全性<br>・一般労働安全<br>・放射性安全<br>c） 環境影響<br>d） 核保証措置（直接処分）<br>e） ベースラインの取得<br>a)及び c)のためのモニタリング結果と比較されるサイトの初期状態の取得<br>f） 法令要件の遵守<br>a)～d)までに関し定められた法令要件（制度的管理に関する法令要件を含む）の遵守 |

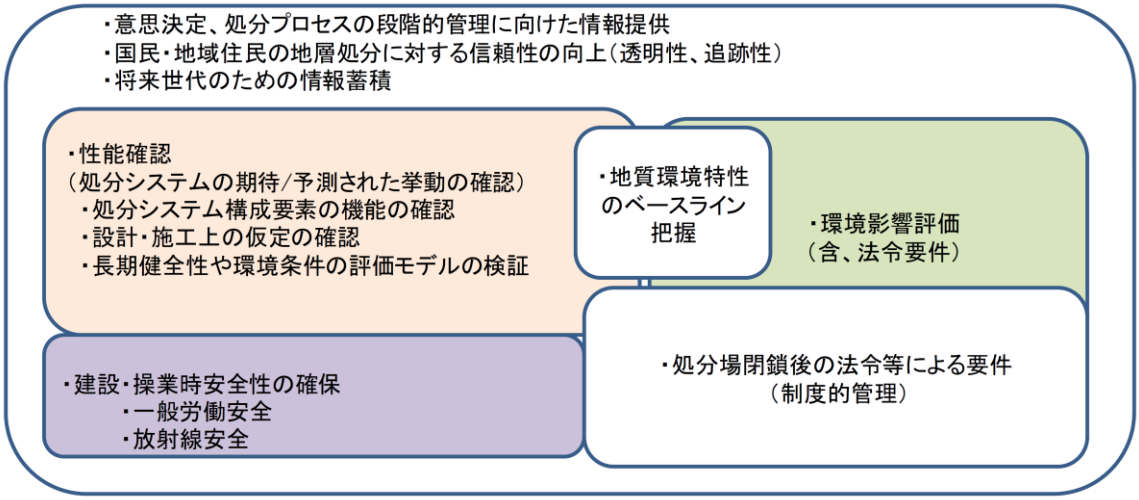



図 2.2.1-1　地層処分におけるモニタリングの目的

表 2.2.1-1 地層処分の段階と場所によるモニタリング目的

| | 概要調査段階 | 精密調査段階前半 | 精密調査段階後半 | 建設段階 | 操業段階 | 閉鎖段階 | 閉鎖後管理 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 遠隔（衛星、航空） | 調査・ベースライン | | 環境影響評価 | | | | |
| 地表・ボーリング | 調査・ベースライン | | 環境影響評価 | | | | |
| | 調査・ベースライン | | 性能確認（ファーフィールド） | | | | |
| 地下特性調査施設 | | | 環境影響評価 | | | | |
| | | | 性能確認 | | | | |
| | | | 操業安全 | | | | |
| 処分場 | | | | 環境影響評価 | | | |
| | | | | 性能確認 | | | |
| | | | | 操業安全 | | | |

| | |
|---|---|
| 5.機能確認の考え方 | モニタリングの実施に伴うデメリット、モニタリングの制約条件及び地中無線通信技術を用いた場合の制約条件、人工バリアのモニタリングパラメータの選定方法、モニタリング候補となるパラメータへの要求事項については、文献 8 と同様の記載がある。<br>人工バリアの性能確認モニタリングのオプションについては、文献 8 で示された比較表が改変され、p2-124 に示す表のように示されている。 |

表 2.4.2-1　人工バリアの性能確認モニタリングのオプション比較

| モニタリング実施場所 | 模擬廃棄体近傍の人工バリア | 実廃棄体近傍の人工バリア |
|---|---|---|
| 地下特性調査施設 | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。<br>Δ：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認については検討必要。<br>×：地質学的・水理学的不均一性への対処が困難。<br>×：放射線の影響はモニタリング出来ない。 | |
| 処分パネル | ○：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響は、安全面からは考慮しなくて良い。<br>○：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認が可能。<br>○：地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。<br>×：放射線の影響はモニタリング出来ない。 | ○：放射線の影響もモニタリング可能<br>○：処分坑道埋め戻し前の状態変化の確認が可能。<br>○：地質学的・水理学的不均一性への対処が可能。<br>×：モニタリング機器設置によるバリア性能への影響の対処が必要。 |

| | |
|---|---|
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 緩衝材、埋戻し材に関して、安全機能、技術要件及び FEP から推定したモニタリングパラメータの候補が p2-125 と p2-126 に示す表に示されている。 |

表 2.4.3-2　安全機能、技術要件、FEP から推定した緩衝材のモニタリングパラメータ候補

| 安全機能（NUMO-TR-10-11） | 技術要件（NUMO-TR-10-11） | 再冠水過程の事象（第 2 次取りまとめ、SKB TR-10-45 参照） | 直接関連するパラメータ | モニタリングパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 放射性物質の溶解度制限 | （還元環境の保持） | - | | |
| 移流による移行抑制 | 低透水性 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | 移流/分散 | 流量、流速 | - |
| コロイド移行の防止・抑制 | コロイドろ過能 | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | コロイドの形成 | 排水中のコロイド量 | 排水中のコロイド量（サンプリング） |
| | | 移流/分散 | 流量、流速、間隙水圧 | 間隙水圧 |
| 収着による放射性物質移行の遅延 | 収着性 | - | - | - |
| 放射性物質の溶解度制限、移流による移行抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質移行の遅延 | 自己修復性 | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 耐熱性 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | 耐放射線性 | - | | |
| | 緩衝材流出の抑制 | 緩衝材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 緩衝材中での地下水流動 | 流量、流速 | |
| | | 緩衝材の流出 | 排出水中の緩衝材量、流量、流速、密度、膨潤圧 | 全圧、間隙水圧、排出水中の緩衝材量（サンプリング） |
| | | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 残置物との相互作用の影響の低減 | - | - | - |
| | バリア材料間の相互作用の影響の低減 | - | - | - |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 緩衝材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| （他のバリアの保護） | ガラス固化体の過熱の防止 | 緩衝材の温度 | 温度 | 温度 |
| | オーバーパックの保護（物理的緩衝性） | 緩衝材の応力 | 全圧 | 全圧 |
| | | 緩衝材の変形 | 変位 | 変位 |
| | オーバーパックの沈下の防止 | 緩衝材の応力 | 全圧 | 全圧 |
| | | 緩衝材の変形 | 変位 | 変位 |

表 2.4.3-5　安全機能、技術要件、FEP から推定した坑道埋め戻し材のモニタリングパラメータ候補

| 安全機能<br>(NUMO-TR-10-11) | 技術要件<br>(NUMO-TR-10-11) | 再冠水過程の事象<br>(第2次取りまとめ、SKB TR-10-47 参照) | 直接関連するパラメータ | モニタリングパラメータ |
|---|---|---|---|---|
| アクセス坑道及びその周辺が卓越した移行経路となることの抑制 | 低透水性 | 埋め戻し材の飽和 | 含水比 | 含水比 |
| | | 埋め戻し材中での地下水流動 | 流量、流速 | - |
| | | 移流/分散 | 流量、流速 | - |
| | 施工時の隙間の充填（自己シール性） | 埋め戻し材の膨潤 | 膨潤圧 | 全圧、間隙水圧 |
| | 残地物、材料間の相互作用の影響の低減 | 埋め戻し材の化学変質 | 鉱物組成、化学組成 | - |

また、人工バリア性能に影響を与えると考えられる、ニアフィールドの岩盤力学的パラメータ、水理学的パラメータ、地球化学的パラメータ等について、国内外の地下研究所での計測、モニタリングの実績等を参照して抽出している。抽出されたモニタリングパラメータは下表と p2-128 に示す表のとおりである。

表 2.4.4-2　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）(1/2)

| FEP 記号 | 分野 | FEP | 詳細 FEP | パラメータ |
|---|---|---|---|---|
| M-01 | 岩盤力学 | 熱の伝達 | 母岩の熱物性<br>母岩の温度<br>母岩の熱膨張 | ・母岩と隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材の温度<br>・母岩自身の温度<br>・掘削影響領域の変化や岩盤クリープ量<br>・周辺岩盤の地下水及びセメント系材料などからの溶出成分量<br>・母岩の構成鉱物の変化（坑壁の変化）<br>・熱応力の変化<br>・地下水流動 |
| M-02 | 岩盤力学 | 応力再配分 | — | ・坑道掘削時の母岩の地圧の変化<br>・岩盤クリープ<br>・岩盤の亀裂状態及び発達程度を考慮するための弾性波速度 |
| M-03 | 岩盤力学 | 既存の亀裂の再活性化及び変位 | — | ・母岩としての亀裂の発達程度を考慮するための弾性波速度<br>・坑道掘削時の母岩の変形状態 |
| M-04 | 岩盤力学 | 岩盤の剥離 | — | ・処分孔施工から廃棄体定置後の初期の温度上昇の影響 |
| M-05 | 岩盤力学 | クリープ | — | ・岩盤特性の変化（岩盤強度など）<br>・母岩の透水係数<br>・掘削後の岩盤の変形（内空変位） |
| H-01 | 水理学 | 地下水の流動 | — | ・母岩の断層や割れ目幅の変化<br>・地下水流速の変化<br>・動水勾配<br>・地下水の密度差<br>・温度差 |
| H-02 | 水理学 | 水頭の変遷 | — | ・母岩の断層や割れ目幅の変化<br>・地下水流速の変化<br>・動水勾配<br>・地下水の密度差<br>・温度差 |

表 2.4.4-3　FEP より抽出された人工バリアに影響するニアフィールド因子（パラメータ）
(2/2)

| FEP 記号 | 分野 | FEP | 詳細 FEP | パラメータ |
|---|---|---|---|---|
| H+C-01 | 水理学＋地球化学 | 塩水の変遷 | — | ・ 地下水中に溶存する塩水濃度<br>・ 地下水流動<br>・ 濃度勾配（塩淡境界）<br>・ 地下水の密度差による密度流<br>・ 温度差による熱対流 |
| C-01 | 地球化学 | 岩石及び地下水の相互作用 | — | ・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化<br>・ 反応後の母岩特性（力学、水理、化学的特性） |
| C-02 | 地球化学 | 地下水の酸化 | — | ・ 坑道周辺の不飽和領域の状態<br>・ 処分坑道への地下水の流入量（湧水量）<br>・ 坑道壁面からの地下水の蒸発（水分量）<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化<br>・ 地下水中の硝酸イオン濃度 |
| C-03 | 地球化学 | 地下水の炭酸化 | — | ・ 炭酸化の可能性がある地下水中の有機物量<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位など）の変化 |
| C-04 | 地球化学 | セメントの影響 | — | ・ 母岩の特性（力学、水理、化学、鉱物）<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、Eh、Ca2+イオン濃度）の変化 |
| C-05 | 地球化学 | 微生物の活動 | — | ・ 地下水中の微生物量や種類<br>・ 微生物による有機物の代謝・分解により生成する錯化剤、有機酸、ガス<br>・ 地下水組成（pH、地下水組成、Eh）の変化 |
| C-06 | 地球化学 | コロイド移行 | — | ・ 地下水中のコロイド量や種類（①岩石の風化に起因する粘土系鉱物、②鉄／マンガン酸化物、③有機物及び④微生物）<br>・ 母岩の断層や透水割れ目 |
| C-07 | 地球化学 | ガス発生 | — | ・ 水素ガス |

| | |
|---|---|
| 7.計測設備 | モニタリング技術として、「8.計測技術」の内容が記載れている。 |
| 8.計測技術 | 地層処分の性能確認モニタリングにおけるモニタリング技術に対する技術的課題として、以下の項目が挙げられている。<br><br>・ 複数のバリアへの損傷または擾乱を避ける。<br>・ 過酷な環境（温度、湿度、放射線、誘発ストレス）で効果的かつ精度良く機能すること。<br>・ 安全性の根拠が長いタイムスケールにわたった非常に小さな変化に関わっている。そのなかで要求される精度を達成する。<br>・ 選択された場所からのモニタリング情報が明らかに代表的な情報であること。<br>・ 想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性。<br>・ バリアの擾乱なしで現場のセンサにアクセスするのが不可能である。<br>・ センサ故障を識別するための基準・方法を定義する必要がある。<br><br>また、各センサの技術的課題として以下の事項を指摘している。<br><br>電気式センサ（各パラメータ共通）<br>・ センサのハウジングの材料は圧力と腐食に耐えるよう改善されるべきである。SS316L 又はチタンが推薦される。<br>・ ケーブルも同様に PUR またはフッ素重合体（PTFE、FEP 等）による被覆が期待され、環境により、SUS316L 又はチタンによる外部被覆も防護性を向上させる。<br>・ 特にケーブル接続部において水とガスからの遮断が保障されるべきである。耐性試験は 5MPa まで実施することが推薦される。<br>・ 放射線による影響は殆どのケースで検討されるべきである。<br><br>電気式センサ（パラメータごと）<br>・ 機械的圧力について直径 100mm 以下の信頼できるセンサの供給が 1 社（KULITE USA）に限られており、供給に 30 週を要する。他の供給元が必要である。(原環センターからの依頼の結果、Geokon 及び坂田電機にて納期約 3 カ月で供給可能となった。)<br>・ 飽和に近い状態での緩衝材や埋め戻し材の正確な湿度測定について適切な解がない。また、不飽和状態での間隙水圧測定について信頼できるセンサが必要である。<br>・ 放射性廃棄物のモニタリングに適した放射線センサが存在しない。<br>・ 処分場の厳しい環境で使用可能な、非接触型の変位センサが求められる。<br>・ フィールド環境、処分環境で適用できる、信頼性と安定性のある pH センサの開発が必要である。<br>・ コロイドセンサは存在しない。<br><br>光ファイバセンサ<br>・ 干渉法以外の技術により信頼性が外挿されるべきである。<br>・ 水圧やガス圧、放射線からの空間的防護が確立されることが期待される。<br>・ 化学、湿度、放射線に関する光ファイバセンサを開発すべきである。<br>・ 一般的に、処分場での使用に関する更なる適性の証明が必要であ |

る。
操業時の安全性のモニタリングに関して、各パラメータの測定機器、方式について、下表と、p2-131 に示す表のように整理されている。

表 3.2.2-1　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(1/2)

| モニタリングパラメータ | 測定機器 | 測定方式 |
|---|---|---|
| 放射能（空間線量） | GM 管（ガイガーミュラー計数管） | GM 管の円筒形の内部にヘリウム、アルゴン等の不活性ガスが詰められており、中心電極と壁材の間に 700～1000Ｖの直流電圧が加えられている。γ（X）線は、壁材と反応して内部に電子を放出させ、電子は内部のガスに電離を引き起こす．電離によって生じたイオンがきっかけとなって管内に放電が起き、放電によるパルスを計測することにより測定が行われる。 |
| | Na(Tl)シンチレーター | γ 線と反応して微弱な光を発するヨウ化ナトリウムを検出することにより、当該物質の γ 線を測定する |
| | LaBr3(Ce)シンチレーター | 方式は Na(Tl)と同様。エネルギー分解能が NaI(Tl)の約 2 倍。 |
| | CsI(Tl)シンチレーター | 方式は Na(Tl)と同様。NaI より感度が少し高く、エネルギー分解能も多少改善。 |
| | CdTe(CdZnTe)半導体検出器 | 放射線が半導体検出器を通過するとそれらによって電離した電子が電子-正孔対を作り出し、これを逆バイアス電場によって電極に集める。こうして集められた電荷をチャージセンシティブアンプ(電荷総量に比例した信号を出力する増幅器)を介して増幅・測定することにより、空孔内部で失われたエネルギーを測定する。物質的には NaI や Ge より高感度だが、大きな CdTe 素子を利用する技術が成熟していないため、 大きな結晶を利用しやすい NaI などに比べると感度を高くしにくい。 |
| | Ge 半導体検出器 | |
| | Si(Li)半導体検出器 | |
| 放射能（空間線量） | 放射線管理システム | 作業環境や排気・排水設備に設置される様々な種類の「放射線モニタ」と管理室に設置する「中央監視装置」より構成されるシステム。 |
| 放射能（空間線量）(※個人線量は主にフィルムバッジにより計測) | モニタリングポスト（※蛍光ガラス線量計） | 蛍光ガラス線量計は、銀を入れた特殊なガラスに放射線を照射後、紫外線を当てると蛍光を出す性質を利用して線量を測定。 |
| | 電離箱式線量計 | 放射線照射によって電離箱の空洞内で発生する電離電流(電荷)を計測．放射線による気体の電離作用を利用した放射線測定器。 |
| | 熱ルミネッサンス線量計 | 熱ルミネセンス線量計は、放射線を照射後加熱すると光を発する物質の性質を利用して線量を測定。 |
| | フィルムバッジ | γ（X）線、β 線及び熱中性子線等の放射線がフィルムバッジに入射する場合に、材質の異なるフィルタを通してできるフィルムの黒化度の差を利用して被ばく線量を評価し、かつ放射線の種類及び入射エネルギーを推定する。 |
| 放射能（土壌線量） | ヨウ化ナトリウムスペクトロメーター検出器 | ヨウ化ナトリウム(NaI)の結晶を検出器として使用し、放射性物質から出るガンマ線を測定。 |
| 放射能（水中・底質線量） | シンチレーション式水質・底質線量用サーベイメータ | 水中・底泥中に設置し、放射線量を測定。 |
| | 曳航式放射線計測システム | 海底土の放射能の連続・精密測定を行うシステムであり、海底を約 3mピッチで連続計測することが可能。 |
| 放射能（放射性物質量） | HEPA フィルタ | 排気塔に設置し、施設内の放射性物質を採集する。 |
| 放射能（体内被ばく量） | ホールボディカウンター | 体内に存在する放射性物質を体外から測定する機械。立った状態、座った状態で体内の放射性物質を計測できるもので、1 人あたり 3 分～5 分で計測が終了する。体内の放射性物質から放出される γ 線を体外で計測することで、内部被ばく量を測定する。 |

表 3.2.2-2　操業時の安全に関わるモニタリング機器に関する整理(2/2)

| モニタリングパラメータ等 | 測定機器 | 測定方式 |
|---|---|---|
| 変形<br>（変位・ひずみ量） | ゲージ | ゲージは、変形を計測したい物等に貼り付けて使用。<br>セオドライト及び傾斜計は測量機器。 |
| | セオドライト | |
| | 傾斜計 | |
| 有毒ガス<br>（一酸化炭素、二酸化炭素） | ガスクロマトグラフィ | 移動相を気体とし、試料を移動相とともにカラムの中に流し、固定相の相互作用（吸着・分配）によって分離。ガスを測定する。 |
| 有毒ガス<br>（水素） | SE-H2 水素センサ | コンベクション管等を用い、計測対象の水素濃度（体積）を測定する（In-Situ）水素センサ。 |
| 有毒ガス<br>（メタン） | メタン濃度計測器 | 炭化水素の計測器として、検出原理から、水素炎イオン化検出法（FID）によるもの、赤外線吸収（NDIR、オープンパス方式）によるもの、接触燃焼法によるもの、化学発光によるもの、半導体センサによるものがある。化学発光法は、開発途上にあり、NDIR 法、接触燃焼法は測定対象が比較的高濃度の場合に、オープンパス法は、測定対象が比較的低濃度の場合に適用される。 |
| 有毒ガス<br>（二酸化炭素） | 二酸化炭素濃度計測器 | 赤外光源と光センサ素子を両端に固定した筒（セル）の中に測定したい気体を流す方法。低濃度では入射光の減衰が少なく、高濃度では減衰が大きいという原理を活用。 |
| 酸素濃度 | 酸素濃度計 | 隔膜を拡散してセンサー内部に到達する酸素の電解電流を酸素濃度として表示。 |
| 振動<br>（地震） | 地表用加速度計 | 地表の振動を計測。計測したデータはデータ収録･処理装置に送る。 |
| | 可搬式データ収録・処理装置 | |
| 地下水<br>（地下水） | 地下水位計 | 地下水位計は、ボーリング孔内や井戸内に設置して、地下水位を測定。地下水検層器は、ボーリング孔内の水の比抵抗値を測定することにより流水層を検出する装置。 |
| | 地下水検層器 | |
| 変形<br>（変位・ひずみ量） | GPS 測量 | GPS の L1 波を利用した原位置計測機である。地すべりの検知や橋梁の動揺など高精度の測量が必要とされる分野で mm 単位の計測が可能。 |
| （データ管理システム） | ガス検知警報機用指示警報ユニット、モニタリングシステム全般 | データの自動保存・監視。 |

また、地中無線通信技術について、

- ケーブルを使用しないため、バリアの安全性を損なわずに実施できる。
- ケーブル敷設により計測場の擾乱を避けるため、取得データの信頼性を向上させることができる
- 作業が容易のため、作業性、経済性が向上する
- 作業員の作業時間短縮にもつながるため、作業員の被ばく線量低減にも寄与する

ものであり、地中無線通信技術の様々な課題を克服し、地層処分モニタリング実施時に生じる制約条件（長距離での実施が困難、高温環境下での耐熱性が高くない等）を変えていくことが必要であるとしている。その上で、地中無線通信技術の適用課題と開発すべき項目、各開発項目に対する対策が下表と p2-135 に示す表のようにまとめられている。

表 3.3.2-1　処分の実施段階ごとの地中無線モニタリング技術の適用課題と開発項目

| 適用イメージ | | | 課題 | 開発項目 |
|---|---|---|---|---|
| 立地・調査段階 | 地下研究施設 | ①地下深部から地上へのデータ伝送 | ・500m 程度の長距離を中継無しでの送信（地中無線の可能性を示すことが目的のため、電源は外部電源の利用が可能） | ・長距離送信能力（外部電源可） |
| | 地下調査施設（模擬廃棄体） | ②人工バリアや処分坑道のモニタリング（中継によるデータ送信） | ・1 回 50m 程度の中継によるデータ送信<br>・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・模擬廃棄体に対する耐熱 | ・中継装置（中継システム（50m 程度の 1 段/多段中継）、埋蔵型（耐圧性）、内部電源の 10～20 年程度の長寿命化）<br>・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性 |
| | | ③人工バリアや処分坑道のモニタリング（近傍のボーリング孔での受信） | ・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・確実な挙動モニタリングを行うためのセンサと送信機の小型化<br>・模擬廃棄体に対する耐熱 | ・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性<br>・センサと送信機の一体化によるモニタリング装置全体としての小型化 |
| 操業・閉鎖段階 | 実処分場 | ④主要坑道や連絡坑道でのモニタリング（プラグを挟んだ送信など） | ・追加が可能な中継装置<br>・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年） | ・中継装置（中継システム（追加可能な多段中継）、埋蔵型（耐圧性）、内部電源の 10～20 年程度の長寿命化） |
| | | ⑤人工バリアや処分工坑道のモニタリング（近傍ボーリング孔での受信） | ・機器に使用する材料の長期間の挙動評価が求められるため、センサと同程度の寿命（10～20 年）<br>・確実な挙動モニタリングを行うためのセンサと送信機の小型化<br>・実廃棄体に対する耐熱、耐放射線 | ・小型送信機の 10～20 年程度の長寿命、耐熱性、耐放射線性<br>・センサと送信機の一体化によるモニタリング装置全体としての小型化 |

表 3.3.2-2　各開発項目と対策

| 開発項目 | | | 対策 |
|---|---|---|---|
| a.長距離送信能力（外部電源可） | | | 「ANDRA との共同研究」<br>・送信強度の向上（アンテナの大型化、耐電圧の向上等）<br>・磁束の減衰量の低減（鋼製部材の少ない坑道の利用、ボーリング孔を活用した鋼製部材外からの送信等）<br>・S/N 比の向上（ボーリング孔を利用した受信等） |
| b.中継装置 | 中継システム | 1 回 50m 程度の 1 段/多段中継 | ・中継システムの開発 |
| | | 追加可能な多段中継 | ・中継システムの高度化 |
| | 埋蔵型（耐圧性） | | ・中継装置の設計<br>・耐圧性の向上 |
| | 内部電源の 10～20 年程度の長寿命化（高頻度での測定・送信設定のケース） | | ・一次電池の長寿命化<br>・非接触電力供給の高度化<br>・ベータボルタイック発電方式の高度化<br>・放射性同位体熱電気変換器の高度化 |
| c.小型送信機 | 内部電源の 10～20 年程度の長寿命化（高頻度での測定・送信設定のケース） | | （同上） |
| | センサと送信機の一体化 | | ・センサと一体化した送信機の開発 |
| | 耐熱性 | | ・耐熱性の向上 |
| | 耐放射線性 | | ・耐放射線性の向上 |

| | |
|---|---|
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 文献 2、3、4、5、6、7、8 と同様に、「地層処分モニタリング技術メニュー」のプログラム改良・整備、及び記録保存技術の調査・分析が実施されている。 |
| 11.本事業への反映事項 | モニタリングの目的と各段階と場所におけるモニタリングの目的の分類<br>モニタリングパラメータ選定の考え方・方法<br>モニタリング技術の技術的課題と開発項目、開発項目に対する対策 |

表 2.2-42　既往のモニタリングに関する調査結果（10）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10-(1)　文献 10 のうち，モニタリングの分類と閉鎖後長期の安全確保について |
| 2.文献名 | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 |
| 3.機関 | NUMO |
| 4.モニタリングの目的 | ・ 意思決定支援及び信頼性向上・安心の提供<br>・ 閉鎖後長期の安全確保<br>－ 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング<br>・ 事業期間中の安全確保<br>－ 放射線安全の確保（放射線安全の確保に関するモニタリング）<br>－ 一般労働安全の確保（一般労働安全の確保に関するモニタリング）<br>－ 周辺環境の保全（周辺環境の保全に関するモニタリング） |
| 5.機能確認の考え方 | ・ p1-122 に「閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング」,「放射線安全の確保に関するモニタリング」,「一般労働安全の確保に関するモニタリング」,「周辺環境の保全に関するモニタリング」に分類された各モニタリングは，事業の段階に応じて変化し，意思決定支援及び信頼性向上・安心の提供に反映される。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・ 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング<br>－ 代表的なモニタリング項目：地下水の水圧（水位）<br>・ 放射線安全の確保に関するモニタリング<br>－ 空気中の放射線量，環境資料の適宜採取による放射能測定（海水・土壌・農産物・海生生物など）<br>・ 一般労働安全の確保に関するモニタリング<br>－ 坑道内の作業安全や良好な作業環境を確保するために，温度，湿度，酸素量，ガス，粉塵など（継続的測定）<br>・ 周辺環境の保全に関するモニタリング<br>－ 大気質（粉塵），気象，騒音・振動，河川・地下水の水圧（水位）・水質，動植物など（継続的測定）<br>・ 各モニタリングとも確認方法の記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| | |




図-2　モニタリングの段階的な役割

| | |
|---|---|
| 9.モニタリングの実施方法 | ・ 閉鎖後長期の安全確保に関するモニタリング<br>– 安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデルの妥当性を確認など，間接的な確認を実施<br>・ 放射線安全の確保に関するモニタリング<br>– 管理区域・周辺監視区域を定め，保安のための一環としての放射線安全の確保のための放射線モニタリングを実施<br>– 現行の原子力施設周辺において実施されている放射線モニタリングを参考にし，管理区域の移動を考慮した計画に基づき実施<br>・ 一般労働安全の確保に関するモニタリング<br>– 土木，鉱山，原子力などの分野における現行の法規制あるいは基準類などに準拠して実施<br>– モニタリングは，地下調査施設の建設開始時点から実施し，閉鎖の終了時点まで継続<br>・ 周辺環境の保全に関するモニタリング<br>– 各項目の継続的測定により保全措置の効果を適宜評価し，必要があれば保全措置の改善もしくは追加措置を検討 |
| 10.その他 | 安全レビューにおける安全確認とモニタリングの役割<br>・ モニタリングは，事業許可申請時の安全評価で仮定されるシナリオ自体の確からしさを直接的に確認するために行うものではない。<br>・ 別の指標をモニタリングすることにより，安全評価シナリオで仮定される状況に近づいていることを確認する，あるいは安全評価シナリオの基礎となっている地質環境モデルなどの妥当性を確認する |
| 11.本業務への反映事項 | 安全評価シナリオとモニタリングの考え方 |

表 2.2-43　既往のモニタリングに関する調査結果（11）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10-(2)　文献 10 のうち，調査段階のモニタリングについて |
| 2.文献名 | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 |
| 3.機関 | NUMO |
| 4.モニタリングの目的 | ・　施設建設前：地質環境，周辺環境，放射線初期ベースラインの理解<br>・　建設開始後：地下調査施設の建設による影響把握と地質環境の一層の理解 |
| 5.機能確認の考え方 | ・　施設建設前：初期ベースラインの把握し，事業による擾乱の発生以降の影響評価における基準を予測する（下図） |

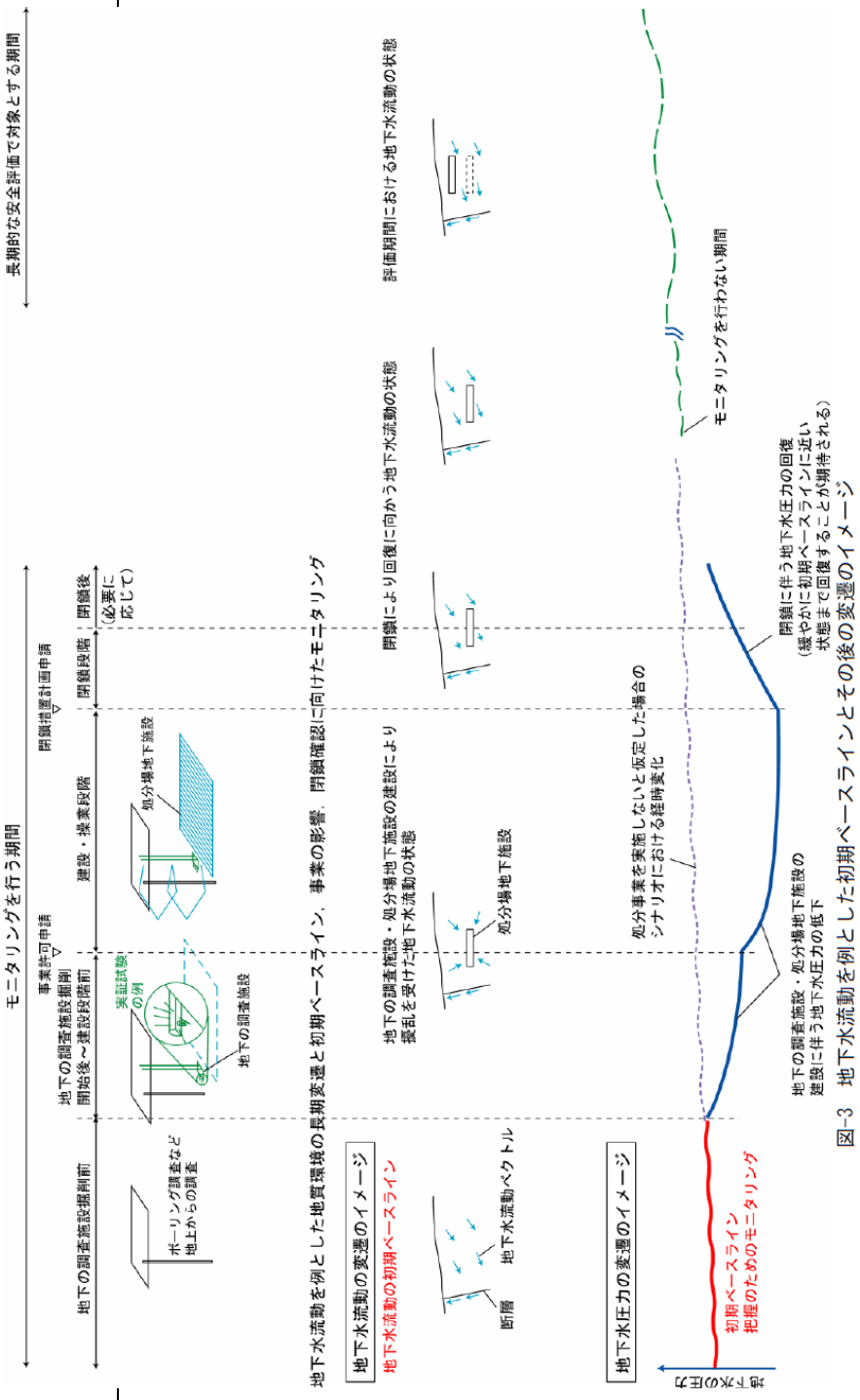
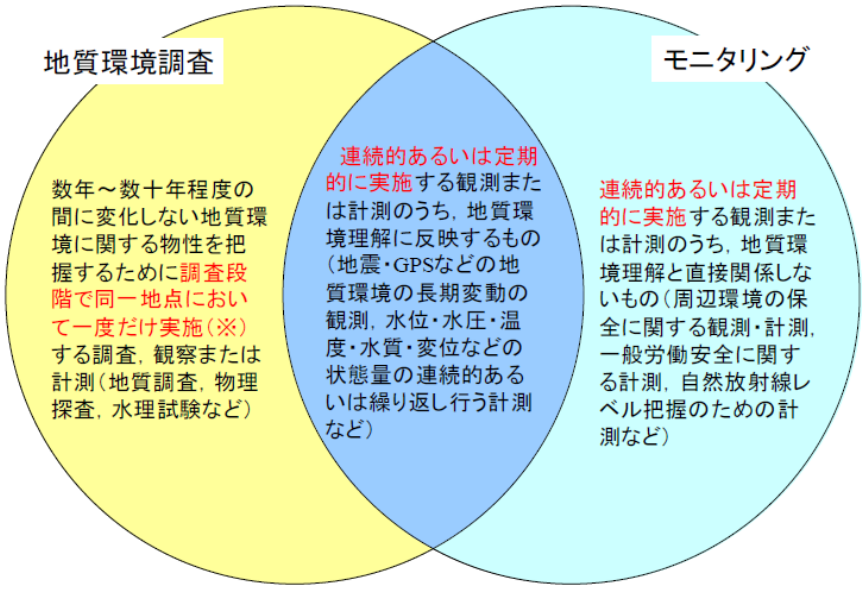


図-3　地下水流動を例とした初期ベースラインとその後の変遷のイメージ

| | |
|---|---|
| | ・ 建設開始後：モニタリングにより地下水位の低下など地質環境に対する影響や，生態系など周辺環境への影響が許容する値を超えないことを確認し，必要に応じて対策を講じる |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・ 施設建設前：初期ベースライン把握のためのモニタリング（IAEA）：母岩及びその周辺の地下水流動場（水圧分布，動水勾配，涵養，流出域），地下水の地球化学特性（レドックス，塩水系地下水，主要成分，自然核種），地下水・地表水・大気・土壌・堆積物・動植物の自然放射線レベル，気象，水文，生態系など<br>・ 建設開始後：地質環境調査により掘削されたボーリング孔を利用した地下水圧，水質等（下図）<br><br><br>図-4　調査段階における地質環境調査とモニタリングの関係 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・ 地下調査施設などの建設以前から地下水の圧力などのモニタリングを開始し，建設に伴う地下水流動場の変化を把握し，閉鎖措置の確認の際に初期状態を参照する<br>・ 地質環境調査との連携により，地質環境調査と統合的に計画，実行，評価する |
| 10.その他 | 初期ベースラインの把握は以下の事項に貢献する<br>・ 事業許可申請時及びそれ以降の安全レビュー，閉鎖措置計画の申請，閉鎖措置の確認などにおける閉鎖後長期安全性に関する評価基準（将来の意思決定を支援する情報）の設定<br>・ 周辺環境への影響評価や環境放射線モニタリング指針などに関する |

| | |
|---|---|
| | 影響評価のための基準の設定<br>・ 地質環境の理解の強化<br>・ 社会受容と信頼性向上 |
| 11.本業務への反映事項 | 初期ベースラインの考え方 |

表 2.2-44　既往のモニタリングに関する調査結果（12）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10-(3)　文献 10 のうち，建設・操業段階のモニタリングについて |
| 2.文献名 | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 |
| 3.機関 | NUMO |
| 4.モニタリングの目的 | ・　閉鎖後長期安全性の確認に対する安全レビュー及び閉鎖措置計画の認可における記録<br>・　事業許可申請の際に提示した地質環境や安全評価の信頼性向上 |
| 5.機能確認の考え方 | ・　安全レビュー及び閉鎖措置計画の認可において，事業許可申請時に提示した地質環境や安全評価について，それ以降蓄積されるデータによって確認し，必要に応じた更新により信頼性を提示する |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・　適切な運用，情報・品質管理と情報公開を行いながら，調査段階から継続して実施し，必要に応じて追加する<br>・　操業段階では放射性廃棄物を取り扱うことになるため，管理区域・周辺監視区域を定め，保安のための一環として放射線安全の確保に関するモニタリングを開始する。<br>・　環境放射線モニタリング指針に基づき環境放射線モニタリングを開始する（初期ベースラインとなる自然放射線のモニタリングについては調査段階から開始）。<br>・　モニタリングにより異常時・緊急時の判断，廃棄体回収を含めた対策などの意思決定の支援を行う。 |
| 10.その他 | ・　廃棄体近傍でモニタリングを行う場合は，人工バリアあるいは近傍の岩盤の長期的なバリア機能を脅かす可能性があるため，本格的な操業の前に，代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対してモニタリングを行うなどの対応を検討する |
| 11.本業務への反映事項 | 建設・操業時のモニタリングの考え方 |

表 2.2-45　既往のモニタリングに関する調査結果（13）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10-(4)　文献 10 のうち，閉鎖段階のモニタリングについて |
| 2.文献名 | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 |
| 3.機関 | NUMO |
| 4.モニタリングの目的 | ・　閉鎖措置の確認における記録<br>・　事業許可申請の際に提示した地質環境や安全評価の信頼性向上 |
| 5.機能確認の考え方 | ・　閉鎖後には地質環境は緩やかに初期ベースラインに近い状態まで回復することが期待されることから，不確実性や自然の不可逆性を考慮し，想定される幅に入っていることを確認する |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・　適切な運用，情報・品質管理と情報公開を行いながら，操業・建設段階から継続して実施し，必要に応じて追加する |
| 10.その他 | ・　原則として廃棄体の回収可能性は閉鎖措置の確認まで維持することとし（廃棄物安全小委員会，2006，2008），モニタリングはその意思決定を支援する。<br>・　閉鎖措置の確認は，実質的に制度的管理に依存しない受動的なシステムへの移行を意味することから，非常に重要な意思決定のマイルストーンとなる |
| 11.本業務への反映事項 | 閉鎖段階におけるモニタリングの考え方 |

表 2.2-46　既往のモニタリングに関する調査結果（14）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 10-(5)　文献 10 のうち，閉鎖後のモニタリングについて |
| 2.文献名 | 放射性廃棄物の地層処分におけるモニタリングと初期ベースラインに関する検討 NUMO-TR-10-01 |
| 3.機関 | NUMO |
| 4.モニタリングの目的 | ・　廃止措置終了までの周辺環境への影響の把握，放射線防護の確認，一般の作業者安全の確認，設計の確認という観点からのモニタリングの継続（閉鎖措置以降においても，廃止措置として，廃棄物管理施設の解体，核燃料物質による汚染の除去，核燃料物質などの廃棄及び法令で示された記録の指定機関への引渡しを行う必要がある） |
| 5.機能確認の考え方 | ・　長期的な安全性の評価は閉鎖確認において終了するものであり，閉鎖後のモニタリングは安全性の確認の意味で行われるべきではない（ただし，制度的管理の一環として行う可能性も含め，将来閉鎖の時点で，地質環境，社会的要請などを考慮して，改めて判断）。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・　周辺環境への影響の把握，放射線防護の確認，一般の作業者安全の確認，設計の確認という観点からのモニタリングの継続 |
| 10.その他 | ・　事業廃止後にもモニタリングを継続する場合，その責任についても，閉鎖後のモニタリングのあり方とともに，将来改めて判断することが必要 |
| 11.本業務への反映事項 | 閉鎖後段階におけるモニタリングの考え方 |

表 2.2-47　既往のモニタリングに関する調査結果（15）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 11-(1)　文献 11 のうち，廃棄物埋設地からの漏出と生活環境への移行の監視について |
| 2.文献名 | 低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法、2011 年 2 月 10 日、AESJ-SC-F016 |
| 3.機関 | 日本原子力学会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・余裕深度処分の埋設後段階においては、施設設計及び地質条件によって監視場所、監視頻度、監視期間などを個別に設定し、一定期間、移行制御の監視、すなわち廃棄物埋設地からの漏出の監視と、生活環境への移行の監視を実施する |
| 5.機能確認の考え方 | ・閉じ込めの監視と移行抑制の監視 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・湧水、近傍地下水などにおける放射性物質濃度の測定［建設段階・埋設段階］<br>・近傍地下水中の放射性物質濃度の測定［埋戻後段階］<br>・周辺監視区域内の地下水中の放射性物質濃度の測定［埋戻後段階］ |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 生活環境への移行監視を目的としたモニタリングの概念 |

表 2.2-48　既往のモニタリングに関する調査結果（16）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 11-(2)　文献 11 のうち，外部線量及び放射性物質濃度の確認について |
| 2.文献名 | 低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法、2011 年 2 月 10 日、AESJ-SC-F016 |
| 3.機関 | 日本原子力学会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・余裕深度処分の建設・埋設段階及び埋設後段階の周辺監視区域設定期間においては周辺監視区域に係る監視を行い、外部線量及び放射性物質濃度が法令に定める線量限度、濃度限度を超えていないことを確認する |
| 5.機能確認の考え方 | ・周辺監視区域において、外部線量及び放射性物質濃度が法令に定める線量限度、濃度限度を超えていないことを確認 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・周辺地下水中の放射性物質濃度<br>・外部放射線に係る線量当量 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 外部線量及び放射性物質濃度モニタリングの考え方 |

表 2.2-49　既往のモニタリングに関する調査結果（17）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 11-(3)　文献 11 のうち，新知見による安全性の確認について |
| 2.文献名 | 低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法、2011 年 2 月 10 日、AESJ-SC-F016 |
| 3.機関 | 日本原子力学会 |
| 4.モニタリングの目的 | ・廃棄物埋設施設の長期的な安全性が技術的に適用可能な最新の知見に照らしてもなお確保される見通しであることを確認する<br>・あらかじめ安全レビューの計画を立てたうえで、その計画に従って安全レビューのためにデータの取得を含めた最新知見の収集を行う |
| 5.機能確認の考え方 | ・安全レビューによる廃棄物埋設施設の長期的な安全性の見通しの確認への反映 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・移行制御の観点からは岩盤、地下水、人工バリアなどに係る最新知見、離隔の観点からは廃棄物埋設施設の深度などに係る最新知見に着目 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・建設・埋設段階では、検査、品質管理、記録、監視に係るデータの取得、埋設後段階では、処分システムの長期性能を損なわずに行えるデータの取得を計画することが望ましい<br>・なお、安全レビューのために改めてデータの取得を行う場合には、必要に応じて、データの取得項目ごとの取得方法・取得場所・取得頻度を定める |
| 11.本業務への反映事項 | 安全レビューを睨んだモニタリングの考え方 |

表 2.2-50　既往のモニタリングに関する調査結果（18）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 12 |
| 2.文献名 | Monitoring at Olkiluoto, a Program for the period before repository operation |
| 3.機関 | Posiva |
| 4.モニタリングの目的 | モニタリングの目的として、以下の 6 項目が挙げられている。<br><br>・ 処分施設の周辺環境が、処分施設の長期安全性に対して悪影響がないことを証明すること<br>・ 処分施設のモデル化にフィードバックすること<br>・ 環境影響を監視すること<br>・ 周辺岩盤と地表面環境への影響に関するフォードバックと建設・設計にデータを提供すること<br>・ 人工バリアシステムの期待／予測された挙動の根拠を確認すること<br>・ 環境中の放射線を測定すること（義務） |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | モニタリング項目として、天然バリア、地表面環境、人工バリアそれぞれに対して以下の項目が挙げられている。<br><br>母岩（力学）<br>・ 応力の再配分に対し、変位と応力（方向と強度）、微小地震、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・ 既存の割れ目、破砕帯の再活性化、新規の割れ目の生成に対し、微小地震、割れ目、破砕帯の変位、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・ 岩盤のクリープに対し、岩盤の変位、ロックボルトへの荷重、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・ 剥落に対し、微小地震、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・ 岩盤の温度変化に対し、現場での温度測定（熱流量のロギングと地球物理的手法）、温度モニタリングを行なう。<br>・ 地殻平衡による隆起、母岩の安定性に対し、局所的な隆起速度、相対的な隆起のモニタリングを行なう。<br>・ 地殻運動による母岩の移動に対し、水平方向の変位のモニタリングを行なう。<br>・ 地震に対し、マグニチュード、位置、地震動における断層のずれと震源の半径のモニタリングを行なう。<br>母岩（水理学）<br>・ 水位の変化に対し、坑井及び地下水観察チューブでの水位のモニタリングを行なう。<br>・ 地下水流動の変化に対し、単一の坑井及び複数の坑井間での流入と流出のモニタリングを行なう。<br>・ 母岩及び上位の地層の水理学的特性の変化に対し、坑井中の割れ目に於ける地下水流動と透水量係数、地下水観察チューブでの透水係数、フィールドでの活動に対する水圧の応答と坑道への流入のモニタリングを行なう。<br>・ 水頭の変化に対し、解放された坑井及びパッカーで区切られた坑井での水頭のモニタリングを行なう（淡水の水頭）。<br>・ 坑道への流入に対し、処分場全体への流入、量水堰への流入、個々 |

| | |
|---|---|
| | の漏水箇所、竪坑での漏水、空気の流れと湿度、作業に用いた水量のモニタリングを行なう。<br>・ 地下水の塩分濃度の変化に対し、坑井内の地下水の EC、割れ目での地下水の EC、サンプ<br>・ リングした地下水の塩分濃度のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の建設・操業に用いる水の水源の影響に対し、水源の水位、ダムの浸透チューブでの水位と透水係数のモニタリングを行なう。<br>・ 地表水の水理の擾乱に対し、水位、流出水、浸透、海水位、地表の霜、降水のモニタリングを行なう。<br>母岩（地化学）<br>・ 地下水特性の変化に対し、地下水化学、地下水の塩濃度分布、地下水中の微生物とガス、地下水中のコロイドのモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の建設・操業に用いる水の水源の影響に対し、浅部及び深部地下水の同位体組成のモニタリングを行なう。<br>・ 外来物質の影響に対し、外来物質、外来物質による浅部及び深部地下水への影響のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の坑道への流入に対し、地下水観測施設、量水堰、浸出性の割れ目における地下水化学のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場で使用する水に対し、使用水の化学特性のモニタリングを行なう（貯水箇所及び溝)。<br>・ ズリからの浸出に対し、採石貯蔵箇所近辺の地表水の化学特性、採石貯蔵箇所近辺の地下水の化学特性のモニタリングを行なう。<br>地表面環境<br>・ 母岩に流入する地下水の流量及び水質<br>・ 地表面の隆起<br>キャニスター<br>・ 銅製オーバーパックの腐食に対し、腐食電位のモニタリングを行なう。<br>・ 放射線による熱生成に対し、表面温度のモニタリングを行なう。<br>・ 銅製オーバーパックの変形に対し、半径方向及び軸方向のひずみのモニタリングを行なう。<br>・ キャニスター表面への沈殿に対し、実証設備の解体後の表面のサンプリングを行なう。<br>緩衝材・埋戻し材<br>・ 伝熱に対し、温度のモニタリングを行なう。<br>・ 水の流入に対し、緩衝材中の湿度のモニタリングを行なう。<br>・ 膨潤に対し、膨潤圧、間隙水圧のモニタリングを行なう。<br>・ 質量の再配分に対し、緩衝材の変位及び隆起、キャニスターの変位のモニタリングを行なう。<br>・ 材料の化学特性の変化に対し、実証設備の解体後のサンプリングを行なう。<br>プラグ・シール<br>・ プラグ、シールの劣化に対し、プラグの健全性、温度、湿度、圧力、鋼材の腐食（実証設備の解体後のサンプリング）のモニタリングを行なう。 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実 | 記載なし |

| | |
|---|---|
| 施方法 | |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリング項目 |

表 2.2-51　既往のモニタリングに関する調査結果（19）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 13 |
| 2.文献名 | Dossier 2005 |
| 3.機関 | Andra |
| 4.モニタリングの目的 | 処分場のモニタリングとサーベイランスの主要な目的として以下の 3 項目（①～③）が挙げられている。さらに、各目的に対して、従属的な目的が挙げられている。<br><br>① 処分場の可逆的な管理を支援する<br>・1 つの段階から次の段階への移行の妥当性を評価する<br>・パッケージの回収可能性を評価する<br>・特に地質工学的設計基準に関して、建設すべき次の構造物の設計変更に資する<br>② 操業安全と長期的安全に資する<br>・操業又は長期的な安全機能に影響する可能性がある変状を検出する<br>・従業員と環境を防護するために危険な状況の発生を予知する<br>・構造物及び隣接する粘土質岩の短期的・中期的変化がモデルで予測されたような長期的変遷と整合性のある領域に留まっていることの確認<br>③ 地質調査による追加情報を提供する |
| 5.機能確認の考え方 | 目的②に対して、<br>・安全機能に影響する可能性のある変状検知<br>・危険な状況の発生予知<br>・予測された長期的変遷との整合性確認<br>といった従属的な目的に対して、処分場の安全評価をモニタリング・サーベイランスに依存させるものではない、としている。<br><br>処分場のモニタリングに固有の制約条件として、大きく以下の 2 点が挙げられている。<br>・ モニタリング機器に要求される寿命<br>・ モニタリング機器の「控え目さ」（モニタリングが処分場に安全機能に干渉することがないこと）<br><br>このうち、モニタリング機器の「控え目さ」が処分場のモニタリング・サーベイランスプログラムの開発において考慮すべき重要な制約であるとしており、モニタリング機器の使用に際して<br>・ 構造物の操業条件に対する大きな影響がないこと<br>・ 構造物の力学的耐性に対する大きな影響がないこと<br>・ 構造物に要求される安全機能と地層環境に有利な特性への大きな影響がないこと（特にシーリングと岩盤の水理学的特性）<br>が制約条件として挙げられている。<br>また、現段階では、突起のあるケーブルやセンサの存在に関連する障害を防止するために、廃棄体に計測器を設置することは計画されていない、と記載されている。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 操業期間中にモニタリングすべきパラメータとして、以下のように各部位に対して挙げられている。 |

| | |
|---|---|
| | B 廃棄物のセル<br>・ 覆工の応力レベル<br>・ セル内に密閉される期待（特に水素）の分析<br>・ セル構成要素の温度変化<br><br>C 廃棄物及び使用済燃料のセル<br>・ 廃棄体パッケージを収容する金属製ライニングの力学的安定性と腐食状態<br>・ セルとその周辺環境の的変化<br>・ 母岩によってライニングに導入される応力の変化・変形<br>・ セルの大気組成（特に酸素含有量）及び湿度の変化<br>・ セル付近の環境の飽和度の変化<br><br>立坑と坑道<br>・ 覆工の力学的安定性 |
| 7.計測設備 | 上記の処分場モニタリングの制約として挙げられている、モニタリング機器に要求される寿命について、以下のような記載がある。<br><br>・ 構造物のモニタリング・サーベイランスに使用される設備は、長期に渡って（1 世紀のスケールで）信頼性を持って作動できるものでなければならない。<br>・ 設置される計測機器の分布と数量は、センサの故障率を考慮し、可能な限り長期間構造物の変化を追跡するために十分なデータを入手できるようにしなければならない。<br>・ セルの大部分が放射線と温度によりモニタリング機器の正常な動作に対して攻撃的環境条件を呈する。そのため、センサは、C 廃棄物セルで 100℃程度、発熱量が小さい B 廃棄物セルを定置するセルの覆工では 60℃程度の温度まで正常に動作するものでなければならない。<br>・ 設置される計測機器は、可能な限り放射線影響に脆弱でなく、放射線の影響を最小化できるようにセル内に設置されるセンサが選択される。 |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリングの目的<br>モニタリングの制約条件<br>計測機器に要求される条件 |

表 2.2-52　既往のモニタリングに関する調査結果（20）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 14 |
| 2.文献名 | Case studies, Final report |
| 3.機関 | MoDeRn |
| 4.モニタリングの目的 | ・　人工バリアの性能確認 |
| 5.機能確認の考え方 | ・　室内試験等により確認されるべきプロセス、進行が顕著に遅いプロセスをモニタリング対象から除外する<br>・　EDZ に関して、瞬時に進行し、その後安定するプロセスをモニタリング対象から除外する<br>・　処分場の性能とサイトの理解の両面で重要度の低いプロセスはモニタリング対象から除外する |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | キャニスター<br>・　銅製オーバーパックの腐食に対し、腐食電位のモニタリングを行なう。<br>・　放射線による熱生成に対し、表面温度のモニタリングを行なう。<br>・　銅製オーバーパックの変形に対し、半径方向及び軸方向のひずみのモニタリングを行なう。<br>・　キャニスター表面への沈殿に対し、実証設備の解体後の表面のサンプリングを行なう。<br>緩衝材・埋戻し材<br>・　伝熱に対し、温度のモニタリングを行なう。<br>・　水の流入に対し、緩衝材中の湿度のモニタリングを行なう。<br>・　膨潤に対し、膨潤圧、間隙水圧のモニタリングを行なう。<br>・　質量の再配分に対し、緩衝材の変位及び隆起、キャニスターの変位のモニタリングを行なう。<br>・　材料の化学特性の変化に対し、実証設備の解体後のサンプリングを行なう。<br>プラグ・シール<br>・　プラグ、シールの劣化に対し、プラグの健全性、温度、湿度、圧力、鋼材の腐食（実証設備の解体後のサンプリング）のモニタリングを行なう。<br>母岩（力学）<br>・　応力の再配分に対し、変位と応力（方向と強度)、微小地震、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・　既存の割れ目、破砕帯の再活性化、新規の割れ目の生成に対し、微小地震、割れ目、破砕帯の変位、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・　岩盤のクリープに対し、岩盤の変位、ロックボルトへの荷重、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・　剥落に対し、微小地震、目視観察によるモニタリングを行なう。<br>・　岩盤の温度変化に対し、現場での温度測定（熱流量のロギングと地球物理的手法)、温度モニタリングを行なう。<br>・　地殻平衡による隆起、母岩の安定性に対し、局所的な隆起速度、相対的な隆起のモニタリングを行なう。<br>・　地殻運動による母岩の移動に対し、水平方向の変位のモニタリングを行なう。<br>・　地震に対し、マグニチュード、位置、地震動における断層のずれと震源の半径のモニタリングを行なう。<br>母岩（水理学） |

| | |
|---|---|
| | ・ 水位の変化に対し、坑井及び地下水観察チューブでの水位のモニタリングを行なう。<br>・ 地下水流動の変化に対し、単一の坑井及び複数の坑井間での流入と流出のモニタリングを行なう。<br>・ 母岩及び上位の地層の水理学的特性の変化に対し、坑井中の割れ目に於ける地下水流動と透水量係数、地下水観察チューブでの透水係数、フィールドでの活動に対する水圧の応答と坑道への流入のモニタリングを行なう。<br>・ 水頭の変化に対し、解放された坑井及びパッカーで区切られた坑井での水頭のモニタリングを行なう（淡水の水頭)。<br>・ 坑道への流入に対し、処分場全体への流入、量水堰への流入、個々の漏水箇所、竪坑での漏水、空気の流れと湿度、作業に用いた水量のモニタリングを行なう。<br>・ 地下水の塩分濃度の変化に対し、坑井内の地下水の EC、割れ目での地下水の EC、サンプ<br>・ リングした地下水の塩分濃度のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の建設・操業に用いる水の水源の影響に対し、水源の水位、ダムの浸透チューブでの水位と透水係数のモニタリングを行なう。<br>・ 地表水の水理の擾乱に対し、水位、流出水、浸透、海水位、地表の霜、降水のモニタリングを行なう。<br>母岩（地化学)<br>・ 地下水特性の変化に対し、地下水化学、地下水の塩濃度分布、地下水中の微生物とガス、地下水中のコロイドのモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の建設・操業に用いる水の水源の影響に対し、浅部及び深部地下水の同位体組成のモニタリングを行なう。<br>・ 外来物質の影響に対し、外来物質、外来物質による浅部及び深部地下水への影響のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場の坑道への流入に対し、地下水観測施設、量水堰、浸出性の割れ目における地下水化学のモニタリングを行なう。<br>・ 処分場で使用する水に対し、使用水の化学特性のモニタリングを行なう（貯水箇所及び溝)。<br>・ ズリからの浸出に対し、採石貯蔵箇所近辺の地表水の化学特性、採石貯蔵箇所近辺の地下水の化学特性のモニタリングを行なう。 |
| 7.計測設備 | 「8.計測技術」として地中無線通信技術に関する記載がある |
| 8.計測技術 | 地中無線通信技術 |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・ 処分場での実廃棄体近傍でのモニタリングは実施せず、実証施設において模擬廃棄体により人工バリアの性能確認のためのモニタリングを実施 |
| 10.その他 | |
| 11.本業務への反映事項 | モニタリング項目<br>モニタリングの実施方法 |

表 2.2-53　既往のモニタリングに関する調査結果（21）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 15 |
| 2.文献名 | Monitoring during the stepwise implementation of the Swedish deep geological repository of spent fuel (SKB R-04-13) |
| 3.機関 | SKB |
| 4.モニタリングの目的 | ・処分サイトの初期ベースライン状態の提示<br>・国際的及び国内のガイドラインや法令を遵守していることの提示<br>・処分サイトと人工バリア挙動の理解の構築と実証 |
| 5.機能確認の考え方 | ・サイトやバリアの機能の理解の増進、操業上及び環境上の要求事項への適合性の提示、次の段階へ進む意思決定への情報提供に使われる。<br>・操業中のモニタリングは、長期の安全評価に用いた初期状態の妥当性の検証と、処分エリアが想定した処分システムの過渡的な挙動に合うように変化していることを示すために行われる。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・次段階以降の処分場に関わる活動による影響を理解し評価するための、自然状態での季節変動（baseline）の下での乱されていない状態<br>・長期安全性は直接モニタリングできないため処分場システムの性能の変化に対して本質的ないくつかのパラメータを鍵指標として設定してモニタリング<br>・モニタリングの対象について、整理されている。<br>－人為的な影響（交通、汚染源、道路、井戸、産業の展開、人口等）<br>－地表の生態系（森林地、農地、気候の変化等）<br>－母岩の状態（地温、地下水、力学等）<br>－放射性廃棄物を扱っていない地下施設<br>－処分場の構成要素（キャニスタ、緩衝材、埋戻し材、遮へい扉） |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・閉鎖後のモニタリングプログラムは、その時の世代が意思決定する。<br>・エスポ岩盤研究所のプロトタイプ処分場において、人工バリアを模擬した試験体を使ってその性能を直接モニタリングしている。 |
| 11.本業務への反映事項 | 長期安全性モニタリングの考え方 |

表 2.2-54　既往のモニタリングに関する調査結果（22）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 16 |
| 2.文献名 | Thematic Network on the Role of Monitoring in a Phased Approach to Geological Disposal of Radioactive Waste, EYR21025EN, 2004 |
| 3.機関 | 欧州共同体（EC） |
| 4.モニタリングの目的 | ・処分場建設前の初期条件と、処分場開発において新しい段階を開始する前の初期条件（ベースライン）<br>・施設操業の許可に関するモニタリング（適合性確認）<br>・処分概念の主要な仮定の確認（処分場性能に関する評価や仮定が適切であることの確認）<br>・次の段階にいつ移行するかの決定をサポートする |
| 5.機能確認の考え方 | ・設定されたベースライン状態は、サイトにおけるプロセスの理解を確実とし、工学的対策が適切かの判断を支援<br>・操業中の公衆、生態系の防護として、処分場からの定常的な放出物に関する規制で定められた放出限度や被ばく限度への適合性を示す。<br>・ニアフィールドの物理化学的変化が予測どおりに進んでいることの確認のような、間接的な使い方<br>・性能評価の代表的なステップへの寄与（FEP、シナリオ、モデル等） |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・処分システムの性能や安全評価に使用されるパラメータに加え、サイトをより深く理解するためのパラメータ<br>・適用される規則、サイト許認可で定められた基準や指針への適合性<br>・工学的バリアの物理化学的状態とその変化<br>・ファーフィールドの地質水理、地球化学及び地質力学的状態 |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 記載なし |
| 10.その他 | ・適合性モニタリングはモニタリングが行われた時点での規制限度や自主基準、品質保証上の要求に適合していることを示すもの<br>・性能評価を支援するモニタリングは、適合性が将来にわたって達成できることを示すもの |
| 11.本業務への反映事項 | 各段階におけるモニタリングの考え方 |

表 2.2-55　既往のモニタリングに関する調査結果（23）

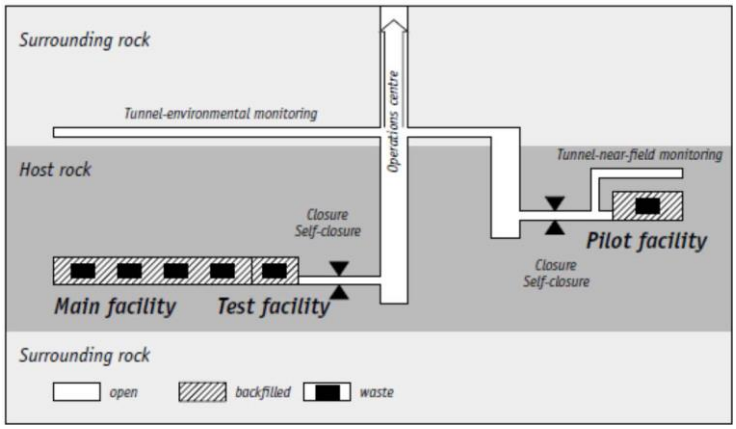
| | |
|---|---|
| 1.番号 | 17 |
| 2.文献名 | Disposal Concepts for Radioactive Waste Final Report. |
| 3.機関 | スイスにおける放射性廃棄物処分概念専門家グループ（EKRA） |
| 4.モニタリングの目的 | ・類似環境下のパイロット施設における、人工バリアやニアフィールドの長期の変化のモニタリング<br>・類似環境下の試験施設における、安全性に関連したプロセスの理解 |
| 5.機能確認の考え方 | ・長期安全性の実証に用いた予測モデルの妥当性確認<br>・結果の詳細な評価が主施設の閉鎖の許認可の前提<br>・試験施設の結果と主施設の建設・操業からの結果、パイロット施設の結果が、長期安全性を確かめる際の重要なインプットとなる。結果の詳細な評価が主施設の閉鎖の許認可の前提。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・少量の代表的な廃棄体をモニタリング<br>・坑道のニアフィールドの状態<br>・廃棄体の発熱を再現する熱源を用いた熱応答、放射性トレーサーを用いた移行プロセスの調査、空の廃棄体容器を用いた処分環境で起こる化学的プロセス |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・パイロット施設：モニタリング段階の終わりまで、少量の代表的な廃棄体をこの施設においてモニタリングし、施設の最終埋め戻しまでの間検査が行われる。<br><br><br>図　監視付き長期地層処分場の概要<br>・パイロット施設では以下のいくつかの機能が考えられる。<br>－人工バリアやニアフィールドの長期の変化のモニタリング<br>－長期安全性の実証を用いた予測モデルの妥当性確認<br>－主施設の閉鎖を超えた長期の管理を可能にする実証施設の役割 |
| 10.その他 | 記載なし |
| 11.本業務への反映事項 | 類似環境下施設とモニタリングの考え方 |

表 2.2-56　既往のモニタリングに関する調査結果（24）

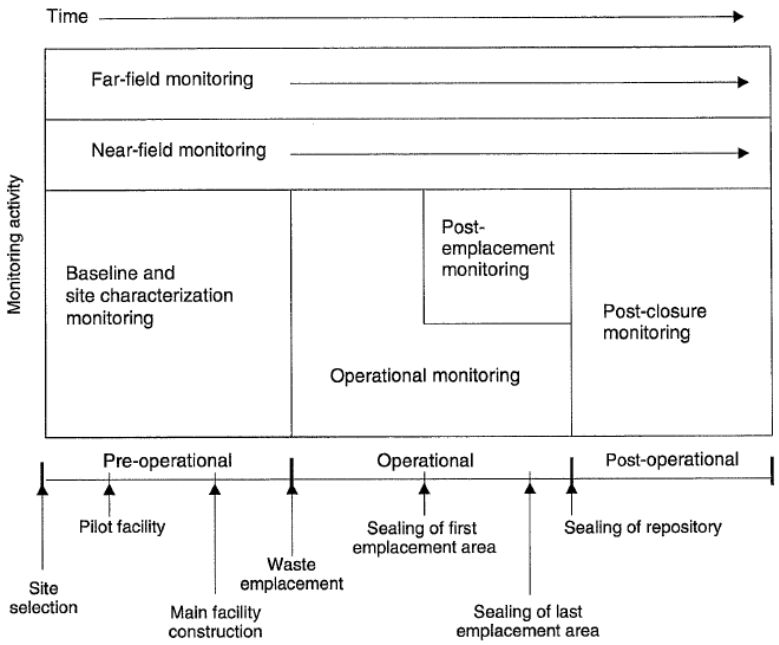
| | |
|---|---|
| 1.番号 | 18 |
| 2.文献名 | One step at a time – the staged development of geologic repositories for high-level radioactive waste |
| 3.機関 | 全米科学アカデミー |
| 4.モニタリングの目的 | ・環境や人体に影響のある、システム挙動や異常の検知（コンプライアンス）<br>・実際のシステム（及び要素）の性能評価や、予測との比較のためのデータの提供 |
| 5.機能確認の考え方 | ・プログラムを前進するかどうか、あるいは操業上の戦略を修正するかどうかの意思決定におけるモニタリングデータの利用<br>・直接または間接的にバリアを観察するモニタリングは性能確認のひとつめの基礎となり、モニタリングデータをもとに予測した挙動と観察された挙動の比較を行う科学的評価は、性能確認の２つめの基礎となる。 |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | ・放射性核種含有量（空気、水、岩）<br>・処分場システムによって乱されない温度、化学、機械、地質や生物学的状態のベースライン<br>・処分場の環境（天然バリア、人工バリアを含む） |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | ・サイトモニタリングは実行不可能　→　間接的な地球物理学やリモートセンサ方法へ<br><br><br>図　処分プログラムの様々なフェーズにおけるモニタリング活動の種類 |

表　高レベル放射性廃棄物の地層処分で求められている
モニタリングの概要

| 環境 | 処分場構成要素の例 | パラメータとプロセスの例 | 方法の例 |
|---|---|---|---|
| 処分場 | ・坑道(壁、床、天井へのｺｱﾘﾝｸﾞを含む)<br>・周囲環境<br>・廃棄体/オーバーパック<br>・緩衝材<br>・埋戻し材<br>・シール材<br>・他の人工バリア<br>・ﾓﾆﾀﾘﾝｸﾞ構成材料（ｾﾝｻｰ、ﾜｲﾔｰ等） | ・3次元的な変化<br>・圧力/引張力<br>・腐食<br>・酸化/還元<br>・温度<br>・鉱物構成<br>・空気とガスの構成<br>・流体の内容物と構成<br>・構造上の連続性<br>・蒸気飽和/湿気<br>・有機物の活動（微生物） | ・坑内orコアによる直接的なｻﾝﾌﾟﾘﾝｸﾞ（連続的or不連続的）<br>・物体や直接的な物理や化学的要素の非破壊計測。<br>・ﾊｰﾄﾞﾃﾞｰﾀ転送(電気ｹｰﾌﾞﾙ、ﾜｲﾔｰ、光ｹｰﾌﾞﾙ、ﾜｲﾔｰﾚｽ転送)<br>・遠方からの探知や地表での地球物理学（連続した低速度撮影も含む）<br>・傾斜計<br>・ﾄﾓｸﾞﾗﾌｨｰ計測方法（γスキャン方法も含む）<br>・音波計測方法 |
| 自然<br>（ニアフィールド、ファーフィールド） | ・環境<br>・地表面<br>・表面水(小川、湖、湿地)<br>・地下水位より上部にある層（不飽和領域）<br>・飽和層<br>・母岩（近郊、遠方）<br>・深部の母岩<br>・微生物環境 | ・降雨量（その他選択された気象や気候の要素）<br>・温度（空気、水、岩）<br>・化学構成（空気、水、岩）<br>・放射性核種含有量（空気、水、岩）<br>・地下水位<br>・水流(表面水、不飽和帯、飽和帯)<br>・侵食や堆積物の移動<br>・応力状態<br>・地震<br>・陸上の表面変形、侵食、生物学上の活動 | ・浅い&深い試すい孔（水理学のための直接測定選択、合成パラメータ、サンプル収集）<br>・気象観測所（計器の多様性）<br>・空気のモニタリング<br>・微粒子収集<br>・電気プローブ<br>・地表水モニタリング観測所（流れ、水位、水質）<br>・事前のGPS観察<br>・ひずみ計<br>・地震計<br>・ボーリング孔の地球物理学（トモグラフィーも含む）<br>・地表からの地球物理学（も含む）<br>・傾斜計<br>・遠方からの探知（航空や衛星からの調査） |

| | |
|---|---|
| 10.その他 | ・モニタリングは段階的な意思決定において不可欠なものである。 |
| 11.本業務への反映事項 | 機能確認の考え方，モニタリング項目 |

表 2.2-57　既往のモニタリングに関する調査結果（25）

| | |
|---|---|
| 1.番号 | 19 |
| 2.文献名 | Choosing a Way Forward_final study |
| 3.機関 | NWMO（核燃料廃棄物管理機関、カナダ） |
| 4.モニタリングの目的 | モニタリングの目的として、以下が挙げられている。<br>・ 処分システムの長期安全性と性能を確認するため<br>・ 処分施設の閉鎖の判断（閉鎖前モニタリング） |
| 5.機能確認の考え方 | 記載なし |
| 6.モニタリング項目及び確認方法 | 記載なし |
| 7.計測設備 | 記載なし |
| 8.計測技術 | 記載なし |
| 9.モニタリングの実施方法 | 地層処分施設の閉鎖後のモニタリングは、地表面から実施される。 |
| 10.その他 | 核燃料廃棄物の長期管理アプローチとして「適応性のある段階的管理」が提唱されており、以下のように 3 フェーズに区分した管理となっており、各フェーズにおいてモニタリングを実施する管理が行われる。<br>本文献は、地層処分実施に至るまでの期間を含めた長期管理アプローチとしての「適応性のある段階的管理」を提唱したもので、モニタリングに関する詳細な記述は見られない。<br><br>第 1 フェーズ；集中管理の準備（最初の約 30 年）<br>・ 原子炉サイトにおける使用済燃料の貯蔵とモニタリングを継続<br>・ 関与プログラム、サイト選定プロセスの策定・実施<br>・ 集中施設（地下特性調査施設、地層処分施設、浅部岩盤空洞）の選定作業<br>・ 集中施設のサイト特性調査、安全解析及び環境評価（使用済燃料の輸送についても同様）<br>・ 技術開発<br>・ 環境評価法に基づく環境評価プロセス（許認可手続き）<br>・ 関与プログラムを通じて、浅部岩盤空洞での集中貯蔵を実施するかの決定と実施する場合には許認可手続き<br>・ 地下特性調査施設の許認可手続き<br><br>第 2 フェーズ；集中管理と技術確証（約 30 年）<br>・ 原子炉サイトでの貯蔵継続<br>・ 地下特性調査<br>・ 地層処分施設としての適合性確認<br>・ 関与プログラムを通じて最終設計を準備、地層処分施設と付属施設の建設時期を決定<br>・ 地層処分施設の建設許認可<br>・ 浅部岩盤空洞での集中貯蔵を実施する場合には、使用済燃料の輸送と浅部岩盤空洞施設での集中貯蔵 |

| | |
|---|---|
| | 第 3 フェーズ；長期閉じ込め、隔離、モニタリング<br>・ 地層処分施設への使用済み燃料輸送<br>・ モニタリング・性能評価のため、必要に応じて回収可能とするためのアクセスを維持<br>・ 閉鎖前モニタリング（最大 300 年間：原子炉サイト等での貯蔵 60 年＋地層処分施設 240 年）<br>・ 地層処分施設を閉鎖するかの決定と閉鎖する場合の閉鎖・廃止措置<br>・ 浅部岩盤空洞での集中貯蔵を実施した場合には、浅部岩盤空洞施設の廃止措置 |
| 11.本業務への反映事項 | 本業務への反映事項なし |

### 2.2.4 既往のモニタリングに関する調査結果のまとめ

2014 年に個別安全指針として発行された IAEA の処分施設に関するモニタリングとサーベイランス （SSG-31 1.4）では、比較的短寿命の放射性核種を含んだ廃棄物のための浅地中処分については、安全目標が満たされているかどうかを決定するために直接管理の適用が可能であるとしている。これに対して長寿命の放射性廃棄物を含んだ廃棄物を処分する地層処分の場合は、閉鎖後の直接管理は実行不可能であるとしている。一方、浅地中処分と地層処分の間に位置する余裕深度処分については直接管理とするか、否かについては規定されていない。したがって、余裕深度処分に関する機能確認試験の内容について調査する必要がある。

また、(SSG-31 8.1)には「放射性廃棄物処分施設の目的は、長期的な受動的安全性を提供することであり、処分施設は、安全のための長期的な能動的管理が要求されないように設計される」としている。ここで、能動的な制度的管理の例とは、(SSG-31 6.12) に示すように「環境における放射性核種のモニタリングや、バリアの性能及び健全性のモニタリングである」としていることから、確実に能動的なモニタリングが可能な状況は、地表部での放射性核種のモニタリングは、常に可能であることからこれを除くと、地中に構築する処分施設を対象とし、処分施設の建設段階、操業段階であり、埋戻しが完了するまでの段階であるといえる。

線量については、各国によって異なるため、それぞれの国の法令を遵守する必要があり、(SSG-31 8.6) においては「線量限度のような性能を基にした規制基準の順守についての検証は、特質、事象およびプロセスやシステム性能に関する洞察をもたらすモニタリングが必要となり、セーフティケースと安全評価を支援するための情報を提供する。この種の規制要件を満たすためのアプローチは厳格な規則に従うものではないため、規制機関、事業者およびその他の利害関係者の間で十分かつ早期のコミュニケーションが行われるべきである。」としている。我が国においては、現在、規制庁において検討が進められているため、それを受けて検討する必要があるため、本検討では対象外とする。

地層処分に関するモニタリング期間については、2013 年に欧州原子力共同体（Euratom）の 7th Frame work の活動の一つである MoDeRn（安全な処分場の操業と段階的閉鎖のためのモニタリング）に関する最終報告会で、規制機関、実施期間、一般から様々なステークホルダーが参加し、埋戻してから閉鎖まで 100 年程度は地層処分施設の将来を判断するためにはモニタリングによるデータの取得が必要であるとの見解であった。モニタリングに対する欧州各国の代表的な考えを

表 2.2-58 に示す。特に、処分施設の段階的な状態が健全であることを確認するにあたり、モニタリングにのみすべてを期待してはならないという見解は重要であるといえる。すなわち、モニタリングを実施する場所は、室内試験や実施処分施設以外で行う試験等もあり、それらの結果も踏まえてそれぞれの処分施設の段階における状態を総合的に判断しなければならないということである。

ここで、処分施設におけるモニタリングのの目的とその分類について、2004 年に原環センターがまとめた地層処分に関する報告書（文献 No.1）に示す表、が、余裕深度処分についても当てはまると考えられるので表 2.2-59 に示す。先ず、1.処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認をするために、１）処分システム構成要素の機能を確認すること、次に、２）設計・施工上の仮定を確認する

表 2.2-58 MoDeRn 最終報告会におけるモニタリングに関するステークホルダーの考え方

**MoDeRn（Monitoring Developments for Safe Repository Operation and Staged Closure）：安全な処分場の操業と段階的閉鎖のためのモニタリングの開発）が主催する国際会議**
**2013年3月19—21日**

MoDeRnプロジェクトはEuratom（the European Atomic Energy Community、欧州原子力共同体）の7th Framework Programmeの一つとして実施された。

MoDeRnでは、モニタリングの地層処分の段階的な実施への適用について、技術的、社会的側面から検討してきた。**モニタリングは、地層処分の長期安全性に関する現象について有益な情報をもたらすが、システム全体の性能を長期にわたってモニタリングするには限界もあり、モニタリング機器については、挑戦的な技術も開発段階にある。**モニタリングは、技術と社会を結びつける重要な要素ではあるが、**長期安全性に関わる地層処分の挙動の確認行為については、過度な期待をしてはならない。**

**スウェーデンのモニタリングコンセプト**：重要な点は、**ベースラインを構築することであり、処分場建設に伴って変化する環境や、処分環境において手を加えない状況と手が加わった状況の違いを明確に認識するため、リファレンスを定義することである。**スウェーデンには閉鎖後のモニタリングについて法的な規則はなく、操業が継続する限りモニタリングを継続する計画である。また、閉鎖する以前に、**モニタリング機器は完全に撤去する方針であるが、**閉鎖プロセスについてどの程度モニタリングを実施するかについては、考えておかなければならない。

**ドイツのモニタリングコンセプト**：ドイツの岩塩における地層処分の**モニタリングは、実処分場の東側施設の一部を対象として、鉛直処分孔内では、模擬キャニスターの表面に全圧計、間隙水圧計、湿度計、温度計を配置して、地中無線を使ってモニタリングする**計画である。地盤工学的なバリア内には、**センサは極力配置せず、**これを通過するケーブルも避け、アクセス坑道においてもケーブルの配置を認めず、地上から処分場へ繋ぐケーブルも排除すること。

**フランスのモニタリングコンセプト**：**100年間は可逆性を有することが義務付けられているため、モニタリングシステムは、施設の操業と廃棄物の可逆性を保証するために必要な情報を取得**しなければならない。システム設計では、機器の測定誤差を確認するため、原位置測定と擾乱をしない測定方法を比較し、測定方法に関する信頼性を向上させている。システムの堅牢性、擾乱を与えない特性、長期に亘る機能の信頼性を確保するために、研究開発を行っている。

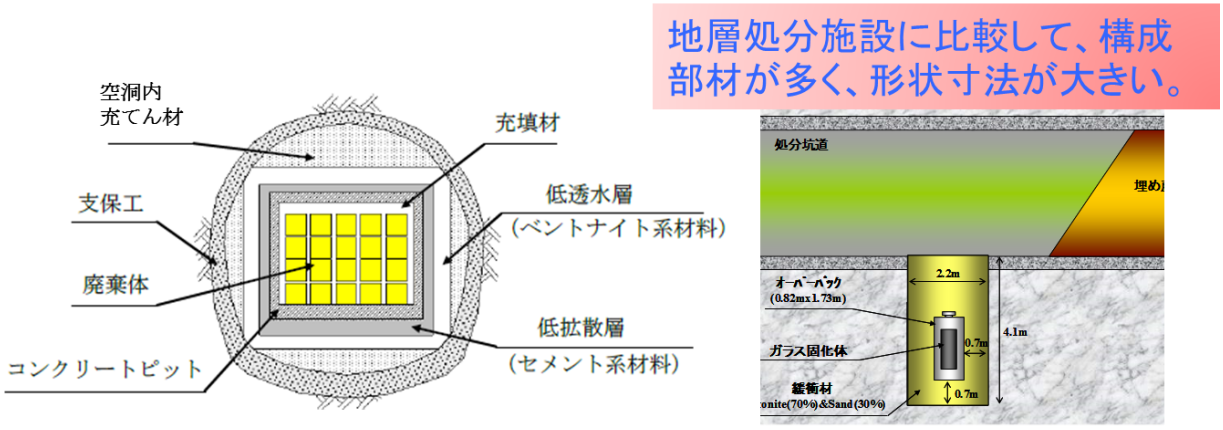
表 2.2-59 余裕深度処分のモニタリングの目的と分類

| 目的 | 分類 |
|---|---|
| 1. 処分場の安全性と工学的対策の妥当性の確認 | 1）処分システム構成要素の機能の確認 |
| | 2）設計・施工上の仮定の確認 |
| | 3）安全評価モデルの検証 |
| | 4）処分場の建設・操業に係る改善や補修の判断 |
| 2. 法令要件に対する適合性の確認 | 1）処分場閉鎖後の法令要件 |
| | 2）建設・操業時法令要件（作業員及び周辺住民に対する安全 |
| | 3）環境影響に関わる法令要件 |
| 3. 政策・及び事業実施上の意志決定に資する情報提供 | 1）意志決定に向けた情報提供 |
| | 2）埋設廃棄体の回収可能性への対処 |
| 4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握 | 3）地質環境特性のベースライン把握 |
| 5. 社会的な意思決定に向けた情報提供 | 1）国民・地域住民の地層処分に対する信頼性の向上 |
| | 2）将来世代のためのデータベース蓄積 |

ことは必須である。ここで、余裕深度処分施設と地層処分施設の大きな違いは、ベントナイト系材料の他に、構成部材としてコンクリートピットや、坑道が大断面であることから吹付コンクリートを代

表とする支保工等のセメント系材料が使われることである。セメント系材料については、原環センターが平成 19 年から平成 25 年にかけて実施した地下空洞型処分施設に関するモニタリング結果を第 5 章に示す。3）安全評価モデルの検証をすることについては、第 3 章で扱うものとする。4）処分場の建設・操業に係る改善や補修の判断は、モニタリングの結果についてのアクションであるため、規制機関、実施者およびその他の利害関係者の間で十分なかつ早期のコミュニケーションが行われるべきであると判断される。

既往のモニタリングに関する調査では、地層処分に関する文献が多数あり、余裕深度処分との違いは、図 2.1-2 では深さと断面の大きさが異なることを示したが、余裕深度処分では処分施設の構成部材も異なる（図 2.2-5 参照）。地層処分が、天然バリア（周辺岩盤）、埋め戻し材、緩衝材（ベントナイト系材料）、キャニスターという構成に対して、余裕深度処分は、天然バリア（周辺岩盤、空洞内充てん材（ベントナイト系材料）、低透水層（ベントナイト系材料）、コンクリートピット（セメント系材料）、区画内充てん材（セメント系材料）であり、この調査ではセメント系材料に関する資料が少ない。ここでセメント系材料に関するパラメータについては、第 5 章で詳細に扱うものとする。




| 対象 | 余裕深度 | 地層処分 |
|---|---|---|
| 人工バリアの構成部材 | 廃棄体、区画内充てん材、コンクリートピット、低透水層、低拡散層、空洞内充てん材 | キャニスター、緩衝材、埋め戻し材 |
| 天然バリア | 周辺岩盤 | 周辺岩盤 |

図 2.2-5 余裕深度処分施設と地層処分施設の構成部材の違い

特にベントナイト系材料については、原環センターの平成 25 年度　地層処分技術調査等事業　処分工学確証技術開発報告書　（第 3 分冊）モニタリング技術開発整備において、緩衝材の再冠水過程を対象として、緩衝材の安全機能、技術要件、FEP の関係を整理した上で、モニタリングパラメータを与えている（文献資料　8）。ここで緩衝材に期待する安全機能として、放射性物質の溶解度制限、移流による移行の抑制、コロイド移行の防止・抑制、収着による放射性物質移行の遅延が挙げられてい

る。余裕深度処分では、セメント系材料が使用されることから Ca の溶出によるベントナイト系材料への影響、廃棄体の保護等が追加されるものと考える。表 2.2-60 に余裕深度処分のベントナイト系材料に関するモニタリングパラメータを示す。

表 2.2-60 余裕深度処分のベントナイト系材料に関するモニタリングパラメータ

| 安全機能 | 技術要件 | 技術要件との関連を推定した再冠水過程で重要な FEP | モニタリングパラメータ |
|---|---|---|---|
| 放射性物質溶解度制限 | 還元環境の保持 | 自己修復性<br>耐熱性<br>耐放射線性<br>緩衝材流出の抑制 | 全圧、間隙水圧<br>温度<br><br>飽和度 |
| 移流による移行の抑制 | 低透水性 | 緩衝材の飽和<br>緩衝材中の地下水流動<br>移流 | 含水比<br>間隙水圧<br>飽和度 |
| コロイド移行の防止・抑制 | コロイドろ過能 | 緩衝材中の地下水流動<br>コロイドの形成<br>移流 | 間隙水圧<br>排水中のコロイド量（サンプリング）<br>飽和度 |
| 収着による放射性物質移行の遅延 | 収着性 | ― | ― |
| Ca の溶出によるベントナイト系材料への影響 | 膨潤性、透水性への影響 | 緩衝材の膨潤 | 全圧、間隙水圧 |
| 廃棄体の保護 | 物理的緩衝性 | 緩衝材の変形<br>緩衝材の応力 | 変位<br>全圧、間隙水圧 |

次に、地層処分を対象としてニアフィールドにおける事象が人工バリアに与える影響について、原環センターの平成 26 年度　地層処分技術調査等事業　処分工学確証技術開発報告書　（第 3 分冊）モニタリング技術開発整備（文献資料 9）において調査した FEP が示されている。これらは 3 つの文献で扱う FEP を含んでおり、Posiva(2012)に於いて重要性が高いと評価された FEP、第 2 次取りまとめ[6]の FEP に加え、セメントと岩盤やベントナイトとの反応を考慮している TRU2 次レポート[7]の FEP である。余裕深度処分のニアフィールドにおける FEP とモニタリングパラメータにおいても、特に、日本の場合は地下の湧水量が多いという点を考慮しており、参考としてよいと考えられる。その結果を（表 2.2-61）に示す。

表 2.2-61 余裕深度処分の人工バリアに影響するニアフィールドのパラメータ

| 分野 | FEP | 詳細 FEP | パラメータ |
|---|---|---|---|
| 岩盤力学 | 熱の伝達 | 母岩の熱物性 | ・母岩と隣接するプラグ／グラウト／支保／埋め戻し材の温度 |
| | | 母岩の温度 | ・掘削影響領域の変化<br>・岩盤のクリープ量 |
| | | 母岩の熱膨張 | ・周辺岩盤、セメント系材料等からの溶出成分量<br>・地下水流動 |
| | 応力の再配分 | | ・坑道掘削時の母岩の地圧の変化<br>・岩盤クリープ |
| | 既存の亀裂の再活性化 | | ・岩盤の亀裂状態及び発達程度を |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | 及び変位 | | 考慮するための弾性波速度<br>・坑道掘削時の母岩の変形状態 |
| | 岩盤の剥離 | | ・廃棄体定置後の初期温度上昇 |
| | クリープ | | ・岩盤特性の変化（岩盤強度など）<br>・母岩の透水係数<br>・掘削後の岩盤の変形（内空変位） |
| 水理学 | 地下水の流動 | | ・岩盤の断層や割れ目幅の変化<br>・地下水流速の変化<br>・動水勾配<br>・温度差 |
| | 水頭の変遷 | | ・岩盤の断層や割れ目幅の変化<br>・地下水流速の変化<br>・動水勾配<br>・地下水の密度差<br>・温度差 |
| 水理学＋地球化学 | 塩水の変遷 | | ・地下水中の溶存する塩水濃度<br>・地下水流動<br>・温度勾配（塩淡境界）<br>・地下水の密度差による密度流<br>・温度差による熱対流 |
| | 岩石及び地下水の相互作用 | | ・地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位等）の変化<br>・反応後の母岩特性（力学、水理、化学的特性） |
| 地球化学 | 地下水の酸化 | | ・坑道周辺の不飽和領域の状態<br>・処分坑道への地下水の流入量（湧水量）<br>・坑道壁面からの地下水の蒸発（水分量）<br>・地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位等）の変化<br>・地下水中の硝酸イオン濃度 |
| | 地下水の炭酸化 | | ・炭酸化の可能性がある地下水中の有機物量<br>・地下水組成（pH、地下水組成、酸化還元電位等）の変化 |
| | セメントの影響 | | ・母岩の特性（力学、水理、化学、鉱物）<br>地下水組成（pH、地下水組成、Eh、Ca2+イオン濃度）の変化 |
| | 微生物の活動 | | ・地下水中の微生物量や種類<br>・微生物による有機物の代謝・分解により生成する錯化剤、有機酸、ガス<br>・地下水組成（pH、地下水組成、Eh）の変化 |
| | コロイド移行 | | ・地下水中のコロイド量や種類（①岩石の）風化に起因する粘土系鉱物、②鉄/マンガン酸化物、③有機物及び④微生物 |
| | ガス発生 | | ・水素ガス |

余裕深度処分の計測技術については、地層処分モニタリング技術に対する技術的課題とほぼ等しいと考え、以下の項目が挙げられている。

複数のバリアへの損傷または擾乱を避ける。
過酷な環境（温度、湿度、放射線、誘発ストレス）で効果的かつ精度良く機能すること。
安全性の根拠が長いタイムスケールにわたった非常に小さな変化に関わっている。そのなかで要求される精度を達成する。
選択された場所からのモニタリング情報が明らかに代表的な情報であること。
想定される特に長いタイムスケールにわたるモニタリングシステムの信頼性と耐久性。
バリアの擾乱なしで現場のセンサにアクセスするのが不可能である。
センサ故障を識別するための基準・方法を定義する必要がある。

また、各センサの技術的課題として以下の事項を指摘している。
電気式センサ（各パラメータ共通）
・センサのハウジングの材料は圧力と腐食に耐えるよう改善されるべきである。SS316L 又はチタンが推薦される。
・ケーブルも同様に PUR またはフッ素重合体（PTFE、FEP 等）による被覆が期待され、環境により、SUS316L 又はチタンによる外部被覆も防護性を向上させる。
・特にケーブル接続部において水とガスからの遮断が保障されるべきである。耐性試験は 5MPa まで実施することが推薦される。
・放射線による影響は殆どのケースで検討されるべきである。

電気式センサ（パラメータごと）
・機械的圧力について直径 100mm 以下の信頼できるセンサの供給が 1 社（KULITE USA）に限られており、供給に 30 週を要する。他の供給元が必要である。
・飽和に近い状態での緩衝材や埋め戻し材の正確な湿度測定について適切な解がない。また、不飽和状態での間隙水圧測定について信頼できるセンサが必要である。
・放射性廃棄物のモニタリングに適した放射線センサが存在しない。
処分場の厳しい環境で使用可能な、非接触型の変位センサが求められる。
・フィールド環境、処分環境で適用できる、信頼性と安定性のある pH センサの開発が必要である。
・コロイドセンサは存在しない。

光ファイバセンサ
・干渉法以外の技術により信頼性が外挿されるべきである。
・水圧やガス圧、放射線からの空間的防護が確立されることが期待される。
・化学、湿度、放射線に関する光ファイバセンサを開発すべきである。
一般的に、処分場での使用に関する更なる適性の証明が必要である。

### 2.2.5　ベースラインモニタリングに関する調査

ベースランイモニタリングの実施例として、2015 年に世界で初めて地層処分施設の建設許可を取得したフィンランドの放射性廃棄物処分事業の実施主体である Posiva の事例を示す。ベースラインモニタリングは、オルキルオト（OLKILUOTO）における地下施設構築のためのトンネル掘削が始まる前の岩盤、水理、地表環境を含むデータ計測であり、トンネル掘削等によって擾乱を受けた場合の計測値に対して、サイトを評価し、処分施設の健全性を評価する場合に基準となるデータを取得するものである。

オルキルオトには、２つの原子力発電所と低中レベルの放射性廃棄物を処分する VLJ 処分場が稼働しており（図 2.2-1 参照）、1980 年～2002 年までの 20 年間で掘削されたボーリング孔を使ってベースラインモニタリングが行われている。VLJ 処分場は、オルキルオト原子力発電所 1、2 号機を運転するテオリスーデン・ヴォイマ社（TVO 社）が民間で運転・管理しているため詳細な情報は少ないが、図 2.2-6 に示すように原子力発電所北側の地下 60～100m の岩盤内に掘削された２つのサイロから構成され、TVO 社は自社の原子炉の運転に伴って発生した放射性廃棄物を低レベル、中レベルに分別して専用のサイロで埋設処分している。

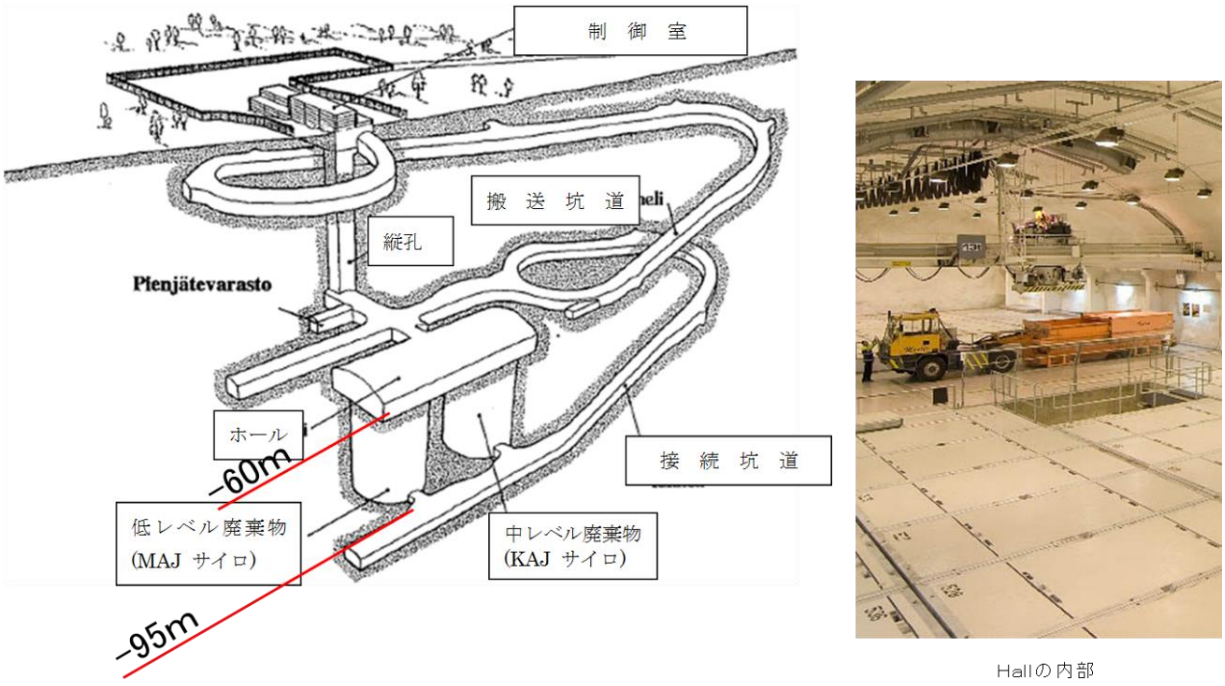



図 2.2-6　低中レベル廃棄物処分施設（VLJ 処分場）[8]

Posiva におけるモニタリングに関する報告は、処分場周辺の自然、環境、母岩、水理に関するデータをまとめたサイトレポート（Site Report、Site description）、処分場建設前の擾乱を受けないモニタリングデータに関するベースラインコンディション（Baseline Condition）、これを受けて計画された、地下特性調査施設におけるモニタリング計画（Monitorinng Programme）、これらの結果を環境、岩盤力学、水理学の分野別にまとめたモニタリング結果（Results of

Monitoring）に分類される[9]。

サイトレポートは 1999 年 6 月に公開され、サイト選定の経緯を含めて報告されており、2005 年、2007 年、2009 年、2011 年にはサイトディスクリプション（Site Description）として公開されている。2004 年にオルキルオトにおいて地下特性研究施設オンカロ（ONKALO）の建設が開始されるのに先立ち、サイトの初期状態をまとめたベースラインコンディションは、2003 年 9 月にオルキルオトにおける気象、地形、地質、地表、環境を理解するためのデータベースとして公開され、2004 年以降は、ONKALO のモニタリングプログラムに従い、岩盤力学、水理学、環境の 3 分野に分けてモニタリング結果が報告されている。図 2.2-7 に Posiva におけるモニタリングプログラムの流れを示す。

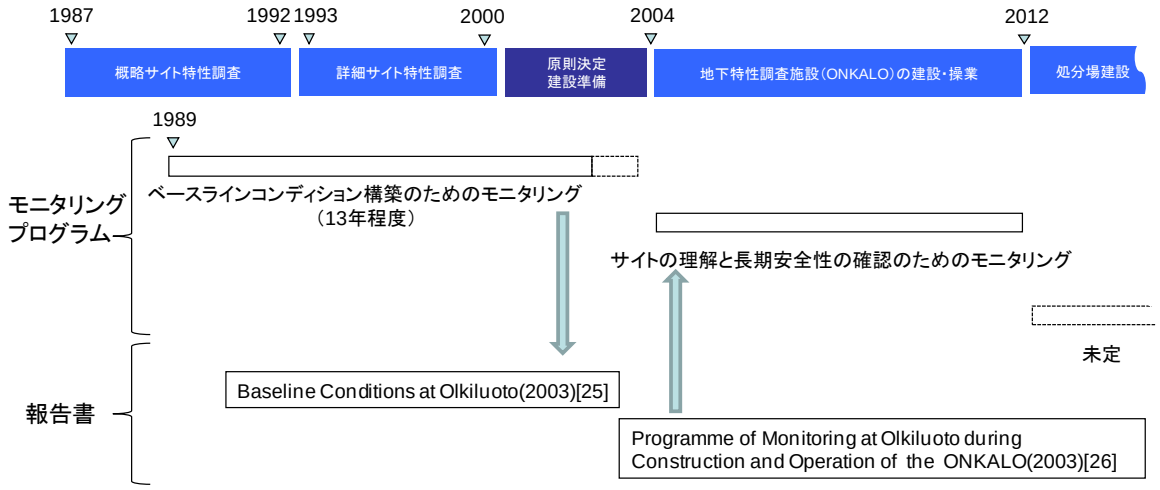



図 2.2-7　Posiva におけるモニタリングプログラムの流れ[9]

モニタリング結果は、処分場サイトの全体を俯瞰するために 3 次元モデルの構築に使われ、これらのモデルは最終処分場の性能評価や、岩盤の長期安全性に関わる影響評価に用いられる。特に重要なモデルは、地質学、地質化学、水理地質学、岩盤力学に関するモデルであり、最終的にこれらを統合して最終処分場の岩盤モデルが構築される。図 2.2-8 に岩盤モデル構築のフローと安全性評価および処分場計画への適用までのフローを示す。

水理学のデータは地下水流動モデルの構築や、地下水流動の長期予測解析や岩盤の熱特性とともに核種移行解析のためのインプットデータを提供する。環境に関するデータは、生物圏モデルの作成に使われ、核種移行解析結果と比較して生物圏の安全性評価のベースとなる。図 2.2-9 に水理地質モデルに関連したレポートを時系列で示す。

ベースラインコンディションは、2004 年の地下特性研究施設であるオンカロの建設前の気象、地形、地質、地表、環境に関するサイトの初期状態のデータベースとして集積され、その後の段階において取得されるデータと比較される指標となるもので 2003 年 9 月に報告された。ベースラインコンディションの定義は、以下の 3 点である。

・処分場の長期安全性、環境影響評価に深く関わり、施設の建設によって変化が予測される特性に対して、現場のサイトの地表、地下の状態を示すもの。

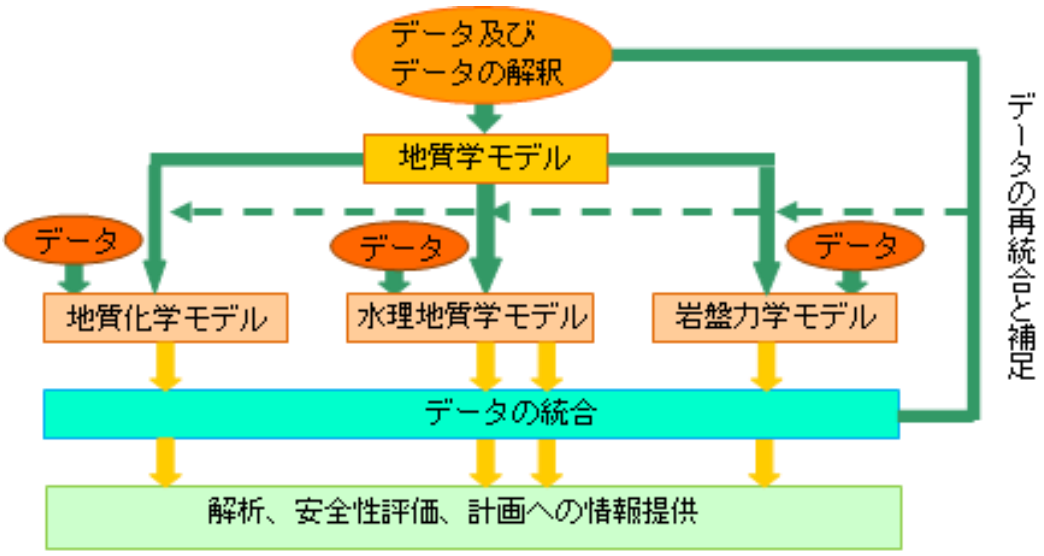



図 2.2-8　岩盤モデル構築のフローと安全性評価までの流れ[9]

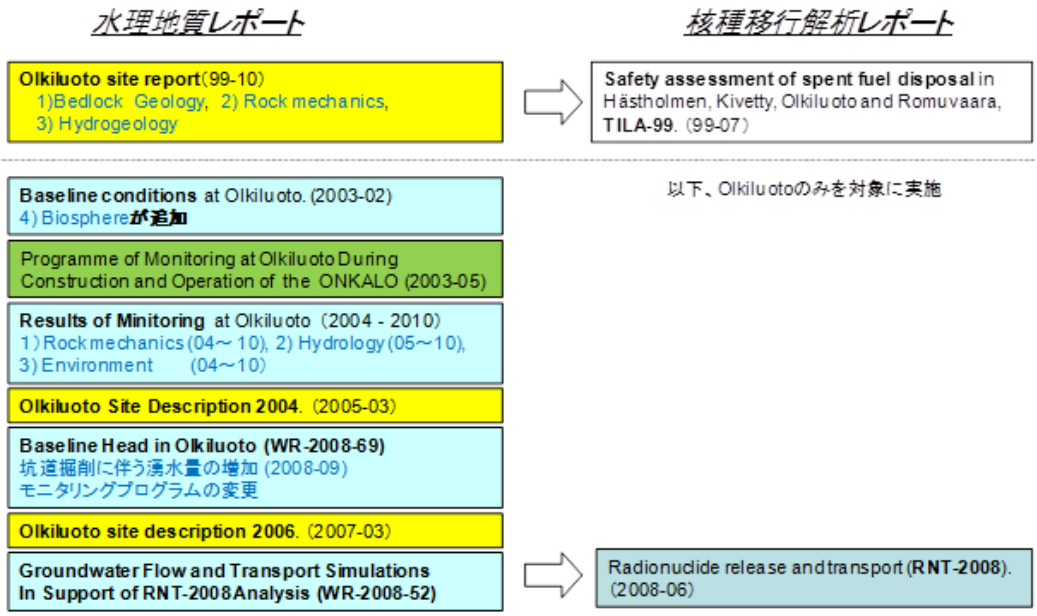



図 2.2-9　水理地質に関するレポートと核種移行解析レポートの関係[9]

・地下研究施設であるオンカロの施設によって影響を受ける可能性のある項目に対し、出来る限り自然の変動を記録し、以後の計測データが自然変動によるものか、処分場の建設によるものかを決定できる指標とする。
・モデルを構築するパラメータに関するデータ、試験に関わるデータ、場の理解を助けるモデルの使用に関するデータを提供する。

このベースラインコンディションは自然の変動幅を考慮し、今後、処分場の建設に伴って新たに収集されるモニタリングデータは、このベースラインのデータと比較され、もしこのデータ領域を超える場合には、データの分析が行われ、すでに構築したモデルや設計が更新されることも

意図している。ベースラインコンディションでは、処分場の長期安定性に関係する岩盤特性調査に主眼が置かれ、さらに水理地質学、水分地球化学、岩盤力学、地殻および地震特性に関するものを含んでいる。ベースラインコンディションに含まれる調査結果は以下の６項目に分類される。

① 生物環境
② 海底における沈殿物
③ 母岩の地質学
④ 岩盤力学
⑤ 水理地質学
⑥ 水文地球化学

これらの調査結果は、処分場サイトの全体を俯瞰するために３次元モデルの構築に使われる。

ここで、ベースラインモニタリングについて、岩盤、水理に関する計測項目に着目し、事前調査段階、詳細調査段階 Phase 1、Phase 2、サイト選定段階毎に計測したものを表 2.2-62 に示す。KR-1～KR-23 は深さ 1000mに至る試験孔で、透水性を測定するために水理試験ユニット(HTU: Hydraulic testing unit)を備えたダブルパッカーと、流量差フローメータを使った流量差ロギング(Differt flow loggings)が採用されている。PP-1～PP-36 は深さ 100m以浅の試験孔を示し、スラグ（錘錐）を用いた透水試験（以下スラグ試験と称す）がマルチレベルピエゾメータを使って実施された。調査孔のうち深掘削孔を赤丸で浅掘削を青丸で図 2.2-10 に示す。

表 2.2-62 サイト選定の各段階におけるベースラインモニタリングのための掘削孔[10]

| 段階 | 年度 | 掘削孔 | 名称 | パラメータ |
|---|---|---|---|---|
| 事前調査 | 1987-1992 | 深掘削孔 | KR1-KR6 | マッピング・透水係数 |
| | | 深掘削孔 | KR1 | 岩盤強度試験 |
| | | 深掘削孔 | KR1-KR5 | マルチパッカー、地下水採取 |
| | | 浅掘削孔 | PP1-PP36 | マッピング |
| 詳細調査段階 Phase 1 | 1993-1996 | 深掘削孔 | KR7-KR10 | マッピング・透水係数 |
| | | 深掘削孔 | KR2、4、10 | 岩盤強度試験 |
| | | トレンチ | TK1、TK2 | マッピング |
| | | | GPS1-9 | GPS測定開始 |
| 詳細調査段階 Phase 2 | 1997-2000 | 深掘削孔 | KR11、KR12 | 掘削 |
| | | 深掘削孔 | KR6、KR7 | 追加ボーリング |
| | | | | 掘削孔間流れ、ポンプ試験 |
| サイト選定段階 | 2001- | 深掘削孔 | KR13-KR23 | 掘削、KR15追加ボーリング |
| | | トレンチ | TK3 | 掘削孔間流れ、ポンプ試験 |
| | | | | マイクロ地震波、地下水 |




図 2.2-10　OLKILUOTO でベースラインモニタリングが行われた掘削孔の配置図[10]

ベースラインモニタリングの範囲は、地層処分場の建設範囲　縦×横=1.3km×2.3km に対して縦×横=2.5km×4.0km である。これらのデータのうちベースラインモニタリングで特に重要なパラメータとして以下の 12 個が挙げられている（表 2.2-63 参照）。

表 2.2-63　ベースラインモニタリングで重要なパラメータ[10]

| プロセス No | プロセスの名称 | プロセス No | プロセスの名称 |
|---|---|---|---|
| 物理的プロセス | | 水理地質学的プロセス | |
| P1 | 掘削影響範囲（ＥＤＺ）の変化 | H1 | 水理学的ネットワークの変化 |
| P2.1 | 母岩の破砕帯の再活性化 | H2 | 水理学的水頭の変化 |
| P2.2 | 母岩の新しい破砕帯の発生 | H3 | 破砕帯の特性の変化 |
| P3 | 母岩への酸素の供給 | H6 | 密度差流（Density driven flow） |
| P4 | 外来液体（Foreign fluid）の侵入 | H10 | 塩水との境界の変化 |
| P5 | 外来物（Foreign Solid material）の侵入 | | |
| P7 | 掘削孔の収縮 | | |

水理地質学データと岩盤力学データに関する計測頻度について、表 2.2-64 と表 2.2-65 に示す。

表 2.2-64　水理地質学データに関する計測頻度[9]

| モニタリングパラメータ | 1989-2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 地下水位 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 潮位 | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× |
| 水頭圧 | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× |
| ボーリング孔の流況 | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ボーリング孔間の流況 | | | | | | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| 透水係数 | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 地下水の塩分含有量 | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| トンネル内の湧水量 | | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| トンネル内の水量バランス | | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 表面流出量＊ | | | × | × | × | × | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× |
| 降水量 | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× | ×× |
| 積雪と含水量 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 浸透 | | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |
| 凍土 | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × |

| 測定回数の凡例 | |
|---|---|
| (0) | 試験計測 |
| 0 | 1-2回/年 |
| × | 1-4回/年 |
| ×× | 4-24回/年 |

＊表面流出量は環境モニタリングで報告される。

表 2.2-65 岩盤力学データに関する計測頻度[9]

| 岩盤力学のパラメータ | 1989-2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 岩の力学的特性試験 | | | | | | | | | | | |
| 微小地震動モニタリング | | | | | | 常 | 常 | 常 | 常 | 常 | 常 |
| GPS測定 | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 地点間距離観測(EDM) | | | | | | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| コントロールマーカー測定 | | | | | | 1 | | | 1 | | |
| 詳細レベリング　小ループ | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 詳細レベリング　0.8km直線間 | | | | | | 1 | | | | 1 | |
| エクステンソメータ測定 | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | |
| コンバージェンス測定＊ | | | | | | 1 | 1 | | 1 | | |

数値は、年当たりの測定回数を示す。
＊：坑道内の内空変位を測定する。

岩盤力学、水理地質学的なデータに加え、地震の影響と岩盤の挙動に関する計測が行われている。一つは微小地震動モニタリングであり、もう一つは岩盤の変位を測定することを目的としたGPS測定である。

・微小地震動モニタリング

岩盤の安定性を計測するため、微小地震動モニタリングシステムが2002年春に設置された。ネットワークは６つのステーションで構成され、加速度計が配置されている。このステーションを最適に配置するための検討が行われ、コンセプトモデルが構築された[11]。これらのデータはPosivaのオフィスに自動的に送られる。また、必要に応じてこのシステムはアップグレードされる予定である。

・GPS測定

GPSモニタリングシステムは1994年に設置され、岩盤の挙動が毎日測定されている[12]。システムは中央ステーションと９つのローカルステーションで構成され、中央ステーションには、衛生からの受信アンテナが設置されて、フィンランド全体をカバーするGPSネットワークにリンクされている。中央ステーションとローカルステーション間の距離が測定されるが、このエリア内に重要な破砕帯が含まれている。ローカルステーションのネットワークは年に２回測定される。GPS測定結果を検証するために、電気的に距離を測定する測線が2002年に構築された。この距離の測定は２回、GPS測定時に併せて測定している。水平距離の誤差は1mmのオーダーで、鉛直方向の誤差は2-3mmである。

### 2.2.6　長期計測に耐えうるセンサ技術に関する調査

数百年間の長期的な管理に対しては、既往研究成果を踏まえた上で、これまでにない耐久性を有するセンサ技術などを考慮する必要がある。そこで、放射性廃棄物処分場における文献とともに、長期計測の実例が多いダム計測分野を調査対象に加え、耐久性に関して記載のあるセンサ技術などについて、計測項目ごとに整理する。調査した文献を表 2.2-66 に、文献調査結果を表 2.2-67～表 2.2-73 に示す。

表 2.2-66　長期計測に耐えうるセンサ技術において調査した既往の文献

| No. | 機関 | 文献名 | 発行年 |
|---|---|---|---|
| 1 | MoDeRn | Case studies, Final report | 2013 |
| 2 | MoDeRn | State of Art Report on Monitoring Technology | 2013 |
| 3 | ICoLD※ | Automated dam monitoring systems - Guidelines and case histories. | 2000 |
| 4 | ASCE | Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance | 2000 |
| 5 | 土木学会第 68 回年次講演会 | 水封式 LPG 岩盤備蓄基地における光ファイバ式間隙水圧計の適用について−倉敷国家石油ガス備蓄基地（長走行時その 4）− | 2013 |
| 6 | 電力中央研究所報告 | 堆積軟岩における原位置加熱実験（その 4）−不飽和条件を想定した岩盤の挙動把握と数値解析およびひずみ計測手法の適用性評価— | 2012 |

※International Commission on Large Dams

表 2.2-67　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(1)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 温度 | 熱電対<br>(Thermocouple) | • 熱電対はかなりの高温でも信頼性を発揮し RTD よりも安価であることから、工業用途に広く普及している。<br>• 熱電対を厳密にキャリブレーションすれば、RTD と同等の精度を実現できる。<br>• 適用温度や対象に応じて、様々な材料による熱電対が取り揃えられている。その他センサよりも頑丈で、様々な化学環境下に向いている。 |
| | 測温抵抗体<br>(Resistance Temperature Devices) | • プラチナ製 RTD は精度や長期的安定性が改善されていることから、工業用途で一般的に選ばれている。長期的安定性については廃棄物最終処分場での用途を考慮する際は主要な論点となると思われる。<br>• 長期安定性は RTD の方が熱電対よりも良いが，時として劣る。<br>• メタルの純度の高さが長期安定性に影響する。安定した長期計測には、プラチナ製 RTD が最適である。 |
| | サーミスタ<br>(Thermistor) | • サーミスタは RTD ほどの精度や安定性はないが結線についてはより扱い易い。コスト面でも多少安価である。<br>• サーミスタの変温時のドリフトは RTD よりも大きく､その適用は 100℃を越えないものの温度表示などに限定される。こうした単純なケースでは、サーミスタが安価で単純な構成の面からも好んで用いられる。 |
| | コアセンサー | • X方向、Y方向、Z 方向のひずみゲージで測定が可能である。乾燥密度 2.0Mg/m3、一軸圧縮強さ 5.4MPa の環境においても最高 90℃の温度測定が可能であったため、今後の使用性能について成果が期待される。 |

• 温度センサは、緩衝材や埋め戻し材などの高い圧力や歪みを含む厳しい環境下でも適用可能であることがこれまでの実績により示されている。しかし、孔隙水による化学物質の浸食にたいする感受性は早期故障の原因になることもあるため、過酷な化学環境で使用するためには特殊金属あるいは金属被膜等を考慮しなければならない。

温度計測センサの比較

| Criteria | Thermocouple | RTD | Thermistor |
|---|---|---|---|
| Temp Range | -270°C to 2300°C | -240°C to 650°C | -100°C to 500°C |
| Accuracy | Good | Best | Good |
| Linearity | Better | Best | Good |
| Sensitivity | Good | Better | Best |
| Cost | Best | Good | Better |
| Long-term stability | Good | Best | Poor |

表 2.2-68　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(2)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 機械的圧力 | ひずみゲージ<br>(Strain Gauge) | • ひずみゲージは可動部がないため安定した装置である。<br>• ハーフブリッジ構成は、感度低下や熱誤差が生じるために短期計測や動的計測に向いている。ハーフブリッジやクォーターブリッジよりも、フルブリッジ構成の方が長期計測には向いている。 |
| | 圧電センサ<br>(Piezoelectric Sensor)<br>静電容量センサ<br>(Capacitive Sensor) | • 静電容量センサ及び圧電センサは可動部がないために安定度は高く、内部に摩擦も起こらない。<br>• 静電容量センサは、同試験の短期実験において高い不具合率が記録された。とりわけ感知素子を入れた容器に接続されているケーブルの入口部に関しては、防水不良が起こるとそれが原因で大規模な計器類の不具合事故につながることもあるため特に注意を払う必要がある。実際このような事故は Mont Terri での HE-B 実験で起きている。 |
| | 共振ワイヤセンサ<br>(Vibrating Wire) | • 振動ワイヤセンサは衝撃あるいは振動に対しては影響を受けやすいが、かなりの強度を有しており長期的にも安定している。そのため、Grimsel 研究所で実施された ESDRED 及び FEBEX の実験では好まれて使用されており、後者の実験では長期的に信頼性が高い選択肢であることが実証されている。<br>• ワイヤセンサの最大の長所は長期安定性である。電気部品では単にワイヤを振動させ、その周波数を計測するだけである。しかし、機械部品ではワイヤのクリープがないこと、グリップが滑らないこと、ワイヤが腐食しないことなどを確保した製作が必要である。そのため、定期的に再キャリブレーションして監視するのが良い。 |
| | 光センサ<br>(Optical Sensor) | • 光圧力センサは可動部を持つことから壊れやすい。 |

表 2.2-69　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(3)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 含水量と湿度 | 張力計<br>(Tensiometer) | • 張力計内の水圧による張力は飽和状態にある限り内部に留めることができる。張力計に使われている貯蔵容器内に空気が溜まると張力は即時に-1 大気圧まで下がるため、張力計内部の水を再度加圧しなければならない。しかし、加圧法を用いて張力計から水を取り除くためには地上から水を取り除く必要がある。近年Cui et al. (2008)及びMendes et al. (2008)が行った開発では張力計は特定の環境下で長期に亘る測定のために原位置に放置しておくことが可能であることが示された。 |
| | 静電容量センサ<br>(Capacitive Sensor) | • 静電容量式センサは、低温度係数、高温での機能性（200℃まで）、結露から完全な回復、化学気相に対する適度な抵抗力などにより特徴付けられる。長期的性能の良さも認められている。一般に、相対湿度 0～100%の範囲での測定に特定されているが、静電容量式センサが飽和するとその精度は失われる。 |

表 2.2-70　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(4)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 水圧 | ピエゾ抵抗素子<br>(Piezoresistive) | • |
| | 共振ワイヤセンサ<br>(Vibrating Wire) | • 長いケーブルを使用でき、ケーブルの劣化を免れる頑健な（周波数ベースの）信号（時には、「デジタル」信号とも呼ばれる）といった利点を提供するが、近代的な読み取り技術（周波数解析ベース）では雑音環境でもセンサが機能する。<br>• 弱点は、長期間、張力をかけたワイヤの性能である。特に、ワイヤの両端におけるクランプが重要となる<br>• 1.5km の長距離伝送の場合、ケーブルが周囲の電気的ノイズを拾ってくると、水圧が変動する状況がある。 |
| | ひずみゲージ<br>(Strain Gauge) | • |
| | LVDT<br>(Linear Variable Differential Transformer) | • |
| | 光ファイバ式 | • 温度範囲 20℃から 60℃の範囲では、FPI 方式の方が FGB 方式よりも安定した結果が得られている。<br>• 1.5km の長距離でもノイズ等による変動は全く見られなかった。 |

- 接近できない長期モニタリングでは、センサの交換という別の制約が加わる。水圧センサに関しては、水圧と全圧を区別するフィルタの目詰まりが、交換の必要性を高めることが考えられる。
- 高温で腐食性の流体(塩水など)が、処分場、特に人工バリアシステム（EBS）のモニタリングに制約を生じさせる可能性がある。センサやケーブル接続の構成部品の材料を注意深く選ぶか、ファイバオプティックセンサを適用することにより、この制約を克服する可能性が高い。

表 2.2-71　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(5)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 変形 | 伸び計<br>(Extensometer) | • |
| | 抵抗ゲージ<br>(Resistive Gauges) | • |
| | 光センサ<br>(Optical Sensor) | • |
| | Invar wires<br>(インバールワイヤ) | • |
| | 共振ワイヤセンサ<br>(Vibrating Wire) | • VWS は、耐用年数が長いことで知られる頑健な材料でできている。測定原理は、鋼線の振動に基づいている。測定の単純さから、ドリフト補正と定期保守の必要がない故障予防システムとなっている。<br>• 歴史的には、1931 年に André Coyne が特許を出している。故に、最初の実験が 1932～1934 年に開始された。ダム(Le Mont Larron など)に設置したいくつかの振動ワイヤセンサ（VWS）が、1950 年以来現在も動き続けている。 |

表 2.2-72　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(6)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| pH | 電気化学 pH センサ (Electrochemical pH sensors) (ガラス電極:Glass Electrode) | • 長期測定中は、電極信号が経時変化するので、pH の小さな変化を観察することは難しい。 |
| | 光学化学 pH センサ (Optical chemical pH sensors) | • |
| • 現場で遭遇する大きな課題は、センサやアナライザの表面の（生物）汚損である。たとえば、感応面における微生物の成長が原因としてあげられる。処分場条件では、生物現象が重大である（たとえば、硫酸塩還元細菌が腐食を促進する）と考えられるので、このことは操業段階から閉鎖後の一定期間における問題となる可能性がある。 | | |

表 2.2-73　長期計測に耐えうるセンサ技術文献調査結果(7)

| 計測項目 | センサ | コメント |
|---|---|---|
| 変位 | 電位差型変換器 (Potentiometric Transducers) | • 変位電位差変換器は、温度による変動が小さく、一般的にかなり頑健である。寿命は、摩擦による滑り接触と抵抗素子の摩耗に依存する。摩擦は、変位速度と滑り接触が及ぶ全距離に依存する。このことは通常、これらの変換器の主な欠点であるが、処分場で予測される変位は非常に遅く、普通は一方向に限られる。故に、実際には、そういった接触での摩耗は予測されない。電位差計は、粘土隔壁の変位を測定するトンネルシーリング試験で使用された。 |
| | 誘導型変換器 (Inductive Transducers) (LVDT: Linear Variable Differential Transformer) | • LVDT は、コイルとコアの間に、反復性と長寿命をもたらす機械的結合を持たず、0.002 % fs 未満という非常に低いヒステリシスを示す。LVDT は、トンネルシーリング試験などの異なる実験で変位を測定するのに広く用いられており、一般的に良い性能を示している。他の例では、バッファに埋め込まれたものが振動ワイヤセンサよりも信頼性の低い結果となっている。たとえば、FEBEX の場合、比較すると、かなり早期に故障している。FEBEX や ESDRED のような他のプロジェクトでは、これらのセンサが、考えうるコンクリートシールの変位を測定するために設置されていて、バッファに埋め込まれず、供用区域に設置されているときは良い結果である。<br>• LVDT は出力電圧が大きく、信号線への耐ノイズ性に優れていることに加え、コアとコイルのあいだに機械的接触がない点が挙げられる。そのため、期待されるセンサ寿命は長い。 |
| | 共振ワイヤ型センサ (Vibrating Wire Transducer) | • 振動ワイヤ変換器は非常に頑健であり、FEBEX のようなプロジェクトで良い性能を示している。FEBEX では、これらの変換器がヒータの変位やベントナイトブロックの寸法変化を測定するのに利用された。この実験で設置されたセンサの一部は期待寿命のずっと前に故障したが、これはベントナイト内の環境条件が好む厳しい腐食を受けたからである。これは測定原理とは関係なく、機能している間は正確に作動した。 |
| | コアセンサー | • X方向、Y方向、Z方向のひずみゲージで測定が可能である。乾燥密度 2.0Mg/m3、一軸圧縮強さ 5.4MPa の環境においても最高 90℃の温度測定が可能であったため、今後の使用性能について成果が期待される。 |

長期計測の実現には、上記センサ技術以外にも考慮すべき点がある。なかでも、電力供給やデータ伝送が大きな課題と認識されている。

- 高信頼性・大容量のバッテリ、太陽電池、風力発電などが遠隔地での計測には期待されるが、最も重要なのは低消費電力技術の開発である。
- 現状のセンサ技術で関連する物理量の殆どを観測することができると言える。最大の挑戦は、100 年を越える電源供給や地表への無線伝送技術である。
- 廃棄体近傍で適用可能な技術（repository-based　あるいは borehole-based に分類される）が必要なのは間違いない。いつでも誰でもできるのだから。Repository-based 技術が寿命となった場合の代替手段として borehole-based 技術の更なる開発が必要である。
- ケーブルを避ける手段として、高信頼で適切なデータ伝送のできるワイヤレス技術の開発を進めるべきである。同様に、ケーブル本数低減のために光ファイバ多重化技術が望まれる。

### 2.2.7　機能確認試験の目的と考え方およびモニタリングの制約条件の整理

文献調査の結果から、主に各国の基準類に着目し、機能確認の目的と考え方を整理して表 2.2-74 に示す。これより、余裕深度処分施設の機能確認では、

- 長期的な安全が最新の知見に照らして合理的に担保されること
- 安全評価の更新するためのデータを取得すること

が重要であると考えられる。

また、高レベル放射性廃棄物処分施設に対する基準類、研究成果を参考にすると、余裕深度処分施設において考えられるモニタリング施設は以下の 3 施設である。

- 実処分施設
- 地下模擬処分施設
- 地上施設

さらに、実処分施設と地下模擬処分施設を対象とした場合には、これら施設での直接的な計測に加え、各施設から離れた位置でモニタリングを実施する以下の 2 施設がモニタリング施設として考えられる。

- 近傍ボーリング孔などの採水施設
- 地上からの非破壊探査施設

一方、実処分施設でモニタリングを実施する場合には、以下のようなデメリットが存在し、モニタリングによりデータや知見を取得することができるメリットとの整合を図る必要がある。

1) モニタリングを行う作業員が受ける放射線被ばく
2) モニタリングの実施に伴う人工バリア設置の遅延により生じえる処分場材料の劣化（人工バリアが所定の機能を発揮できない可能性がある）
3) 処分場内部または周辺でのモニタリング機器の設置に伴う放射性物質の移動に係わる潜在的水みちの形成
4) モニタリングを実施するために処分場へのアクセス坑道を残存した場合の人間侵入、あるいは自然または誘発された現象（例えば、大湧水）による悪影響が生じる可能性の増大
5) 処分場建設、操業、閉鎖等への干渉

センサ等の計測機器を埋め込んだ場合には、3)の「潜在的水みちの形成」に対する対策が困難であり、高レベル放射性廃棄物処分施設を対象とした場合と同様に、余裕深度処分施設のモニタリングにおいても、「モニタリングの行為がバリアの機能や性能を損なってはいけない」ことを制約条件としたモニタリング計画の立案が必要であると考えられる。

表 2.2-74　機能確認の目的と考え方の整理

| 国(機関) | IAEA | 米国（NRC） | | | 英国（環境省） | スウェーデン(SSM) | スイス(ENSI) | 日本(原子力規制庁) | 日本(原安委) | 日本(総合エネ調査会) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 文献 | IAEA SSG-31 | 10 CFR Part 63 | NUREG-1804 | NUREG-2175 | Guidance on Requirements for Authorization | Technical Note No.62 | Guideline for Swiss nuclear installations G03/e | 廃炉規制検討チーム会合会議資料 7-3 | 第二種埋設施設安全審査の基本的考え方 | 低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制 |
| 目的 | ・閉鎖後セーフティケースの見直し、改良、信頼構築のための処分システム要素の性能確認に資するデータの提供<br>・許可された正常な操業状態からの逸脱についての早期警報の実施<br>・環境中の放射線レベル、放射能濃度、公衆被ばくの推定のための予測モデルによる放射性核種の環境中への放出に関するデータの提供 | ・放射性排出物が管理基準値以下であることの確認<br>・建設・操業期間を通じて地下環境の変化が許認可取得時の想定範囲内であることの確認<br>・閉鎖後の天然バリア・人工バリアのシステム及び構成要素が期待通り機能していることの確認<br>(性能確認プログラムとしての要求) | ・性能確認プログラムの評価の一部として実施<br>*性能確認プログラム：<br>最終処分場が国民の健康と安全性の保護に重要な所期の性能を保持することを確認するために実施するモニタリング・試験・実験・調査・計測等に関するプログラムであり，サイト特性評価の開始から永久閉鎖の終了まで継続される | ・性能確認の支援<br>(性能確認：サイト閉鎖前に性能目標が満足していることを証明するために使った情報の正確性を評価・妥当性確認するための試験、実験、解析のプログラム) | ・処分施設の建設、操業、閉鎖に起因する変化のモニタリングによる環境セーフティケースの支持 | ・建設・操業期間中の現実的な地下環境とその変化が評価において限定的な仮定の範囲内であることの立証<br>・天然バリア・人工バリア及びその構成要素が所定の特性と安全機能を有することを示す試験や計測の実施<br>・新規技術の適用、原位置試験、大規模試験、長期試験を通じた不確実性の低減<br>・性能目標や安全機能の確認試験を通じた一般公衆の信頼性向上 | ・エビデンスの保存を目的とした信頼できるデータの収集(モニタリングプログラムの妥当性は評価のため定期的に ENSI に提出) | ・閉じ込め機能に関する以下の確認<br>-廃止措置段階までの閉じ込め機能の確保<br>-長期の地下水移行評価に必要な地下環境の状態監視 | ・安全評価の更新に資する技術的知見の収集<br>・管理期間終了まで繰り返し行う管理期間終了以後の安全評価の更新<br>・管理期間終了までに蓄積される人工バリア、天然バリアの状態に関するデータの取得<br>・各種モニタリングにより得られる地質環境及び廃棄物埋設地の状態に関するデータの取得 | ・事業者により実施する安全レビューの一環<br>*安全レビュー：<br>廃棄物埋設施設の長期的な安全性が最新知見に照らしてもなお担保される見通しであることの確認 |
| 考え方 | ・処分施設の性能確認を目的として、操業中および閉鎖後の双方において、重要で主要な技術的パラメーターを対象として実施されるべき<br>・セーフティケース開発の段階的プロセスの一部分として、操業期間を通じて処分システムの操業中および閉鎖後の性能の予見可能性を漸次高めていくために継続する | ・モニタリングデータに対して設計上の仮定と比較評価を通じて、設計・建設方法の変更の必要性の決定に資する<br>・モニタリングデータにより閉鎖前の修正許認可申請における閉鎖後性能評価の更新を支援する | ・実際の地下環境条件や建設・操業中における変化が許認可レビューで想定した制限内であることを確認<br>・プログラムの永久閉鎖まで継続<br>・健康や安全性に影響しうるパラメータや自然プロセスのベースラインからの変動に関するモニタリングによる評価<br>・性能確認計画書の定期的な評価と更新の記述 | ・建設中に遭遇したサイト条件が許認可申請段階に想定した範囲内にあることの確認<br>・人工バリアと多重防護が設計通りに構築され、許認可申請段階に想定した範囲の性能を有することの確認<br>・性能目標を満たすとして許認可の時点で期待した天然バリアの性能の確認<br>・施設性能のモニタリング<br>・セーフティケースの確認 | ・許認可で保証する期間、環境セーフティケースにおいて施設に対して設定されたパラメータの範囲以内であることを示すデータの提供<br>・モニタリングは施設の環境セーフティケースを阻害してはならない<br>・許認可の期間が終了した時点で環境セーフティケースの保証はモニタリングに依存してはならない | ・閉鎖前の性能確認プログラムでは，先行するサイト特性調査及び材料試験の継続を含む<br>・安全機能に重要なプロセスやパラメータの選定は、代替シナリオに対するリスク情報及び性能規定に基づく<br>・施設性能及び安全性確認はプログラムの向上と併せて、新規技術の導入・修正，繰返しの更新が必要 | ・地下施設周辺の地質モニタリングは施設閉鎖まで実施<br><br>・モニタリングは水理的条件、水質構成、空洞形状の安全性に関連する岩石特性を含む（地質学的、水理学的データベースを処分施設の長期的進展の評価のために補完） | ・人工バリアから漏出する放射性物質の濃度を監視及び測定できる設計とする<br>・ベースラインモニタリングを補強するためのモニタリングができる設計とする | ・管理期間終了以後の安全性低下のないように留意して計画の策定・更新に関する方針を示す<br>・各種モニタリングは、更新した安全評価の結果等を参考に測定項目を選定し、これに基づいて計画を見直す | ・許可時の安全審査で確認した安全評価に関して、処分システムの全体の総合的な安全性を確認することが重要<br>・施設周辺の地下水等の地質環境に関する事項をはじめとして、安全レビューを実施する上で必要なモニタリングを自主的かつ積極的に行い、データを蓄積すべき |
| その他 | | | | ・許認可申請を支援する解析の更新の定期的実施を推奨、その際モニタリングデータを使用 | | | ・パイロット施設は、主施設での廃棄体定置前に廃棄体や埋戻し材の定置を実施 | | | |

① 赤字は機能確認の目的において各文献で類似の項目、青字は機能確認の考え方において各文献で類似の項目、緑字は具体的なモニタリング・試験・取得データに関わる項目を示す。

## 2.3　余裕深度処分における機能確認の在り方、実現性の調査

### 2.3.1　既往事例調査における機能確認の目的と考え方

調査対象の文献の大部分は高レベル放射性廃棄物（HLW）を対象としたもので、余裕深度処分とは概念や事業展開の考え方に相違がある点に留意する必要があるものの、操業段階の機能確認（モニタリング）においては参考となる部分が多いと考え、目的や考え方、機能確認の実施内容や取得データに関して、関連する事項について抽出、整理した。その結果、各文献で提示された内容は、概して類似、共通していることが判明した。

(1) 機能確認の目的

機能確認の目的に関して、各文献で類似（共通）する事項を箇条書きに整理した結果を以下に示す。

- 正常な操業状態からの逸脱についての早期警報（IAEA）
- 地下環境の変化が想定範囲内であることの確認（米、スウェーデン）
- 天然バリア・人工バリ及び構成要素が期待通り機能していることの確認（米）
- 国民の健康と安全性の保護に重要な性能を保持することの確認（米）
- サイト閉鎖前に性能目標が満足していることの証明（米）
- 建設、操業、閉鎖に起因する変化のモニタリング（英）
- 長期的な安全性が最新知見に照らして担保されることの確認（日本）

これらの事項を操業・保全段階の機能確認の目的として考えた場合、総じて、「長期的な安全が最新の知見に照らして合理的に担保されること」と捉えることができ、このためのモニタリングは（健全性確認のための）事象のモニタリングであると考えることができる。

(2) 機能確認の考え方

機能確認の考え方に関して、各文献で類似（共通）する事項を箇条書きに整理した結果を以下に示す。

- 操業中および閉鎖後の性能の予見可能性の向上（IAEA）
- 設計・建設方法の変更の判断、修正許認可申請における閉鎖後性能評価の更新（米）
- 性能確認計画書の定期的な評価と更新（米）
- 許認可申請を支援する解析の更新の定期的実施（米）
- 新規技術の導入・修正，繰返しの更新（スウェーデン）
- 安全レビューを実施する上で必要なモニタリングを実施（日）

これらの事項を操業・保全段階の機能確認の考え方とした場合、総じて、「安全評価の更新に資すること」と捉えることができ、このためのモニタリングとしては（定期安全レビューへの貢献のための）機能のモニタリングであると考えることができる。

(3) 機能確認の実施内容、取得データ

機能確認の具体的な実施内容、取得データに関して、具体的に記述した文献はほとんどないが、本検討において機能確認試験を計画するうえで、参考となる記述について、実施するモニタリング・試験、および取得データの観点から抽出した結果について、以下に箇条書きで示す。

1) 実施するモニタリング・試験に関する記述

- モニタリングによってバリアの性能を低下させるべきではない（IAEA）
- 新規技術の適用、原位置試験、大規模試験、長期試験を通じた不確実性の低減（スウェーデン）
- モニタリングは施設の環境セーフティケースを阻害してはならない（英、環境省）
- 安全レビューを実施する上で必要なモニタリング（日）

2) 取得データに関する記述

- 処分システム要素の性能確認に資するデータ、環境中への放出に関するデータ取得（IAEA）
- モニタリングデータに対し、設計上の仮定との比較評価による設計・建設方法の変更の判断（米）
- モニタリングデータによる閉じ込め機能の確保の確認（日）
- 地下水移行評価に必要な地下環境の状態監視に資するデータ（日）
- 人工バリア、天然バリアの状態に関するデータ（日）

スウェーデンでは、原位置試験、大規模試験、長期試験等により不確実性を低減する旨の記述があるが具体的な実施内容までは掘り下げていない。また、IAEA や英国環境省は、モニタリングにより施設の機能やセーフティケースに影響を与えてはいけない旨を記している。

取得データについては、各文献とも総じて、施設（人工バリア、周辺環境）の状態変化を評価するためのデータを求めており、データの反映先としては、(2)での整理結果に示されるように、定期的な安全評価の更新を睨んでいると考えられる。

### 2.3.2 操業期間中における機能確認試験の在り方

(1) 本検討の対象とする機能確認の位置づけ

既往の基準に関する文献調査結果より、各国、各機関とも機能確認に関しては、①長期的な安全が最新の知見に照らして合理的に担保されることの確認、および②安全評価の更新への貢献、が機能確認の目的、考え方において共通した認識であると判断することができる。これらの文献では機能確認の実施内容や取得データについて具体的な記述がなされているものはほとんどないが、前述の①、②を支援するための試験とデータ取得を求めていると考え

られる。

調査文献のほとんどは HLW を対象としたものであり、本検討の対象との事業進展の考え方の相違に留意する必要があるが、操業期間中における機能確認に関しては、既往の検討と同様の考え方を適用できると考える。

これらの結果を参照し、本検討における機能確認の位置づけを、「健全性確認のための事象モニタリング、定期安全レビューに資する機能モニタリングの双方の視点に立って、モニタリング、試験、データ取得を実施する」ことと設定する。

(2) 建設完了時における施設確認と機能確認

「低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について」（2.2.1、文献 8）では、建設段階における「施設確認」に関して、

- 事業者は、掘削等によって得られる地質環境に関するデータを踏まえても、廃棄物埋設施設が、基本設計ないし基本的設計方針どおりであることを評価・確認しつつ建設を実施し、国の施設確認を受検すべきである。
- 国の施設確認においては、例えば、坑道の亀裂等を判定規準とするのではなく、得られた地質環境データ等を踏まえて、総合的な安全性、つまり、廃棄物埋設施設の安全性が許可された範囲内に収まっているかを確認することが妥当である。

としている。このうち、2 項目目に記されている「総合的な安全性、つまり、廃棄物埋設施設の安全性が許可された範囲内に収まっているかを確認する」考え方は、機能確認の目的である「設計で見込んでいない事象が発生していないことの確認」と共通した位置づけであると考えられる。

(3) 機能確認の在り方

図 2.3-1 は、事業期間中における「施設確認」と「機能確認」の関係と位置づけについて整理して示したものである。前述のとおり、「施設確認」と「機能確認」の目的には共通した事項を含んでおり、評価項目やモニタリング項目は、建設段階から操業段階に至る事業の進展を鑑みた場合、互いに整合している必要があると考える。また、機能確認は定期安全レビューに貢献しつつ、廃止措置段階における長期的な安全性に対する信頼性を向上するものでなければならないと考える。

したがって、本検討の対象とする機能確認試験は、「原位置での機能確認の制約条件や限界，対象とするモニタリングの概念や要求事項の相違等を踏まえたうえで，機能確認方法の構築に資するデータやエビデンスの取得に向けた試験計画や技術開発計画を立案・実施する」ものであるべきと考える。

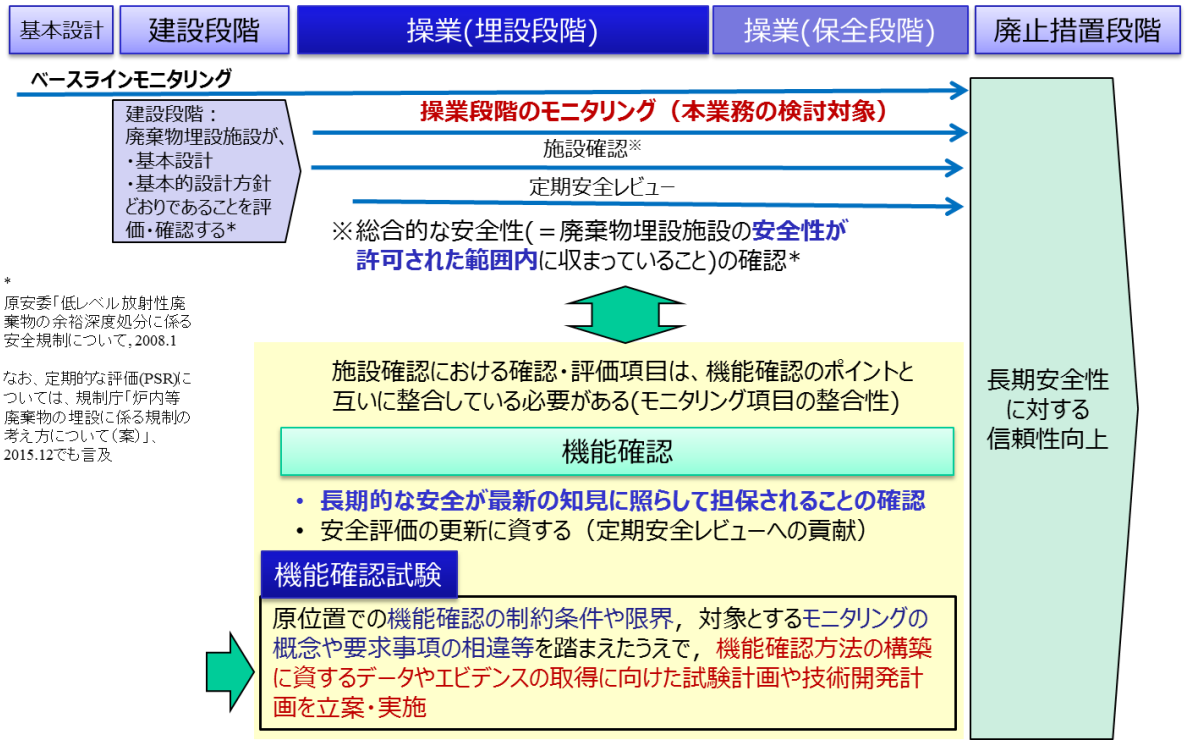



図 2.3-1　事業期間中のモニタリングと機能確認・機能確認試験の位置づけ

(4) 機能確認とステークホルダー

OECD/NEA のステークホルダーの信頼に関するフォーラム報告書[13]の序文では、ステークホルダーとしては、廃棄物発生者、廃棄物管理機関、安全規制機関、地元自治体、選挙で選ばれた代表者、および一般公衆と意思決定者間の技術的仲介者などが含まれるとしている。また、原環センター報告書（2.2.2、文献 8）では、地層処分のモニタリングの目的を踏まえて、地層処分に関わるステークホルダーの中から、処分実施事業者、安全規制機関、および社会（一般公衆および仲介する技術者）を対象として、その関与について整理している（表 2.3-1）。

処分の実施事業者は，それぞれのモニタリングの目的に対応した関連するステークホルダーへの関与として、意思決定や処分プロセスの裏付け係る的確な情報を提供するとともに、処分事業の適切化を図ることがあげられる。安全規制機関は、技術上の法令基準に適合していることの確認を事業者に要求することにより、他のステークホルダーに対して処分事業が適切に推進されていることを示す。また，社会は，処分場が将来世代にわたって安全であることに対しすべての目的の観点から関心を寄せるため、モニタリング結果に対する技術者による適切なレビューが重要となる。

余裕深度処分の操業期間（埋設段階）におけるモニタリングは、HLW の操業期間におけるモニタリングと基本的な考え方は類似する部分が多いと考えられ、モニタリングに関するステークホルダーの関与に関しても、ステークホルダー相互において地層処分と大きく変わるものではないと考える。したがって、余裕深度処分の機能確認においては、規制側よりの要求事項を満たすことは当然として、特に、社会（一般公衆）の関心に対して理解が得られる

よう，説明性や透明性を確保したものでなければならないと考える。

表 2.3-1　モニタリングの目的と利害関係者の関与

| (横:利害関係者)<br>(縦:モニタリングの目的) | 処分事業実施者 | 安全規制機関 | 社会<br>(一般公衆及び技術者) |
|---|---|---|---|
| 1. 処分場の安全性能と工学的対策の妥当性の確認 | セーフティー・ケースの補強 | | 技術者によるレビュー |
| 2. 法令要件に対する適合性の確認 | 規制当局への報告 | 左記に対する判定 | 技術者によるレビュー |
| 3. 政策および事業実施上の意思決定に資する情報提供 | 段階的実施のプロセス及び裏づけの明示、社会との対話 | | 技術者によるレビュー<br>経営、政策担当者の関与 |
| 4. 概要調査地区等における地質環境特性のベースライン把握 | プロジェクトの改善、合理化、不具合の場合の対応 | | 技術者によるレビュー |
| 5. 社会的な意思決定に向けた情報提供 | 段階的実施の確認 | | 社会的意思決定 |

### 2.3.3　機能確認の実現性

既往の研究成果や基準等の調査結果のうち、既往のモニタリングに関する調査結果を参照し、機能確認試験として、

- 実処分施設を利用した試験
- 地下模擬処分施設による試験
- 地上施設による試験（工学規模試験、室内試験等）
- 地表面からのモニタリング

の 4 つの観点から、各国の検討における機能確認試験の考え方を取りまとめるとともに、本検討での試験計画における留意点について補足した。

(1) 実処分施設を利用した試験

実処分施設を利用した試験に関連して、英国環境省（2.2.1，文献 12）は、モニタリングは施設の環境セーフティケースを阻害してはならないとしており、そのために、処分施設内に設置したモニタリング設備は、坑道埋戻しに先立ち解体・撤去することや、モニタリングが操業期間中及びその後の施設への要求機能に影響を及ぼさないことを評価することを示している。また、MoDeRn 報告書では、実処分施設に模擬廃棄体を設置した人工バリアの性能確認モニタリングの実施が提案されている。

本検討における機能確認において実処分施設を利用した試験を考えた場合、英国の考え方と同様、建設・操業段階に実処分施設内にモニタリング設備を設置した場合は、坑道の埋戻しに先立ち設備の解体・撤去が必要となり、仮に、埋戻し後の保全段階にもモニタリングを継続する場合には、設備が処分施設の機能に影響を及ぼさないことの評価や保全段階終了後の設備の解体・撤去が必要となると考える。しかしながら、これらの評価や設備の撤去に関しては、撤去に伴う再掘削時の放射線の影響や規制上の制約の不確実性の観点からは、現実

的ではないと考える。したがって，実処分施設における機能確認の可能性は限定的であり、原位置で実施する機能確認の限界を考慮した計画の立案が重要となり、また、処分実施設へのセンサ設置，サンプリングは避けるべきであると考える。

(2) 地下模擬処分施設による試験

地下模擬処分施設による機能確認試験に関連して、スイスでは実廃棄体を使ったパイロット施設で人工バリアやニアフィールドの長期変化のモニタリングが計画されており、その中では、実処分施設での廃棄体定置が始まる前に、廃棄物を定置し、埋め戻しを完了させるとしている。スウェーデンやフィンランドでは、模擬廃棄体を使った岩盤や人工バリアの性能確認モニタリングが計画されている。

原子力発電環境整備機構（NUMO）は、地層処分のモニタリング検討の中で、操業期間中のモニタリングに関して「廃棄体近傍でのモニタリングの行う場合には、人工バリア、周辺岩盤の長期的なバリア機能への影響に配慮して、本格的操業の前に代表的な廃棄体あるいは模擬廃棄体に対するモニタリングを行う等の対応が考えられる」としているものの、現時点では初期ベースライン把握のためのモニタリング技術の実証試験を計画し、廃棄体近傍モニタリングは事業の進展とともに具体化するとしている。また、原安委は、安全審査の基本的考え方として、安全審査の段階では管理期間終了まで繰り返し行う管理期間終了以後に係る安全評価に反映する新しい科学技術的知見の収集について、計画の策定・更新に関する方針が示される必要があるとしており、具体的な計画策定時には管理期間終了以後に係る安全評価の更新に反映する新しい科学技術的知見（データ）の一つとして、「実際の埋設施設と同等の条件を模擬した類似環境下での原位置試験あるいはそれを補完する室内試験等の間接的な方法により取得された廃棄物埋設地の状態設定に関するデータ」をあげて、管理期間終了以後に係る安全評価の更新における前提条件及び入力情報の妥当性の確認等に用いるとしている。

地下模擬処分施設における試験やモニタリングでは、実施設では直接確認できない操業期間中や閉鎖後の再冠水過程における人工バリアの挙動を類似環境下において把握し、人工バリアが安定状態に至った時点で所定のバリア性能を持つこと、性能発揮の前提となる構造健全性を維持していることを確認することが可能であると考える。

(3) 地上施設による試験（工学規模試験、室内試験等）

地上施設による試験に関連した事項は、既往文献調査の範囲において具体的に明記した事例はなかったが、地上での工学規模試験や室内試験は、地下の原位置環境の再現には制約があるものの、理想的な試験系を構築することが可能であり、

- 機能確認方法の構築に資するデータやエビデンスの取得
- 機能確認試験に先立ち実施することによる実処分事象を対象とした機能確認試験へのデータ提供

の観点からは有効な試験方法であると考える。

(4) 地表面からのモニタリング

地表面からのモニタリングに関連する事項として、欧州共同体（EC）は、地質水理、地球化学および地質力学状態のモニタリングを項目としてあげられており、NUMO による検討では、湧水・近傍地下水等のモニタリングによる地質環境への影響確認があげられている。これらより取得されるデータは、ベースラインモニタリングと比較評価することにより、操業に伴う処分施設および周辺環境の状態変化との関連付けが可能となると考える。

# 第 2 章　参考文献


[1] TVO 社 HP：　http://www.tvo.fi/Power%20plants

[2] Vira Juhani：　Planned spent repository at Olkiluoto, 2012

[3] A. -K.Leuz, B. Graupner, E.Frank, M. Hugi, M. Rahn：　Monitoring requirements in the Swiss regulatory framework,Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste, An International Conference and Workshop, 19-21 March, 2013, Luxemburg

[4] IAEA: Country Nuclear Power Profiles Sweden, 2015

[5] MoDeRn partners: Case　Studies Final Report, 2013

[6] 核燃料サイクル開発機構：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－ 分冊 3,　JNC TN1400 99-023（1999）

[7] 電気事業連合会／核燃料サイクル開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書 －第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).

[8] Hakemus_VLJ-luolan_kayttolupaehtojen_muuttamiseksi: TVO 社が VLJ 処分について政府から認可を受けたプロセス、2011 年 9 月 20 日

[9] 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成22年度 地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書（第3分冊）―モニタリング技術の開発―

[10] Posiva: Establishing baseline conditions and monitoring during construction of the Olkiluoto URCF access ramp, Hydrology. Posiva 2002-07

[11] Saari, J.：Seismic network at the Olkiluoto site. Posiva Oy. Working report 2003

[12] Chen, R. & Kakkuri, J.：Feasibility study and technical proposal for long-term observations of bedrock stability with GPS. Report YJT-94-02. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki

[13] OECD/NEA: STAKEHOLDER CONFIDENCE AND RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL, 2000.8.

# 第3章　人工バリアの性能確認項目の調査

## 3.1　本章の概要

第 2 章で述べたように、IAEA 安全要件[1]では、処分施設のモニタリング計画の目的を、「(中略) 施設の操業期間における作業者と公衆の構成員の安全および環境の防護に必要な条件を確認するため、(中略) 施設の閉鎖後の安全に影響する可能性がある条件がないことを確認するため」としている。また、IAEA 安全指針[2]ではガイドでは、上記後者の目的に関連して、「操業許可発行後の操業段階においても、処分システムの閉鎖後性能の予測可能性を漸進的に高めるため、重要な技術的パラメータについてのモニタリングを実施し、安全評価に用いられるデータを裏付ける追加的なデータを提供すべきである。」としている。

このような考え方は既に一部の国では具体化されており、米国 NRC では、地層処分施設[10]、浅地中処分施設[11]ともに、性能確認プログラム（Performance Confirmation Program）と称して、操業段階の処分施設の性能を確認するためのモニタリングを含む活動を規定している。この他、欧州原子力共同体（Euratom）では、地層処分施設を中心に、操業中の性能確認のためのモニタリング戦略や技術適用性の検討[7]を進めている。

我が国でも、総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会[32]が、余裕深度処分施設の操業段階のモニタリングを、放射線から公衆及び放射線業務従事者を防護するためのもの（以下「放射線モニタリング」という。）と、廃棄物埋設施設の長期的な安全性が最新知見に照らしてもなお担保される見通しであることの確認（以下「安全レビュー」という。）の一環として行うモニタリングに大別[32]している。また、原子力安全委員会[23]も、「人工バリアの機能に応じて、管理期間終了までは、新しい科学技術的知見を反映した管理期間終了以後に係る安全評価を更新することで、評価結果に基づく判断（「めやす」を満足するか否か）の変更不要性、すなわち判断の根拠に係る不変性を確認する必要がある。」としている。このような安全レビューや安全評価の更新の一環として行うモニタリングは、基本的に、IAEA や米国の性能確認プログラムの考え方と同様である。

余裕深度処分施設の長期的な安全性に係る安全レビューや安全評価の更新には、施設を構成する天然バリアと人工バリア、さらには生物圏のモニタリング情報や関連する最新の科学的知見が必要となる。これらのうち、天然バリアや生物圏については、処分事業主体により、サイト固有の立地条件を考慮して、サイト調査段階から、主要パラメータのモニタリングが開始され、重点・優先項目や頻度の見直しはあったとしても、建設・操業段階を通して、事業廃止まで情報収集が継続されるものと想定される。

いっぽう、人工バリアについては、安全審査やその後の施設確認に向け、その設計・施工や長期の安全性評価に資する種々の研究、試験により、計画的に情報収集が実施されるもの

と想定される。いっぽう、操業段階以降の安全レビュー等の具体的な進め方は安全審査の結果等を踏まえて将来的に計画されること等から、これまで、安全レビュー等に向けた、操業段階以降の具体的な人工バリア機能確認の方法の検討は進んでいない。このため、余裕深度処分の円滑な実現に向け、操業段階以降の人工バリア機能確認の方法について、幅広い規制要求や社会的要請に対応可能な技術オプションを検討、整備する必要がある。

本章では、余裕深度処分の安全評価に関する文献調査等を踏まえ、人工バリアを構成する各部材、周辺岩盤に要求される長期性能を確認するためのパラメータ選定に関する検討を実施した。本章における検討フローを図 3.1-1 に示す。人工バリアの長期性能を検討する上では、各部材における長期状態を整理し、シナリオごとに安全評価上重要度の高いパラメータを設定することが重要である。そこで、「日本原子力学会標準　余裕深度処分の安全評価手法：2008」[41]に示される処分システムの状態設定の考え方(図 3.1-2)を参考とし、人工バリアの安全機能に関する重要パラメータを設定した。その上で、設定したパラメータについて、対象期間中（建設～埋設段階）における変化の可能性、計測方法および計測可能性の可否、モニタリング結果の活用方法等を勘案した上で、モニタリング対象項目を設定することとした。

なお、余裕深度処分の安全評価に関する文献等の調査では、図 3.1-1 に示した「余裕深度処分における考慮事象の整理」、「処分システムの状態に対する技術的な検討」および「処分システムの状態設定」に関する情報を整理した。

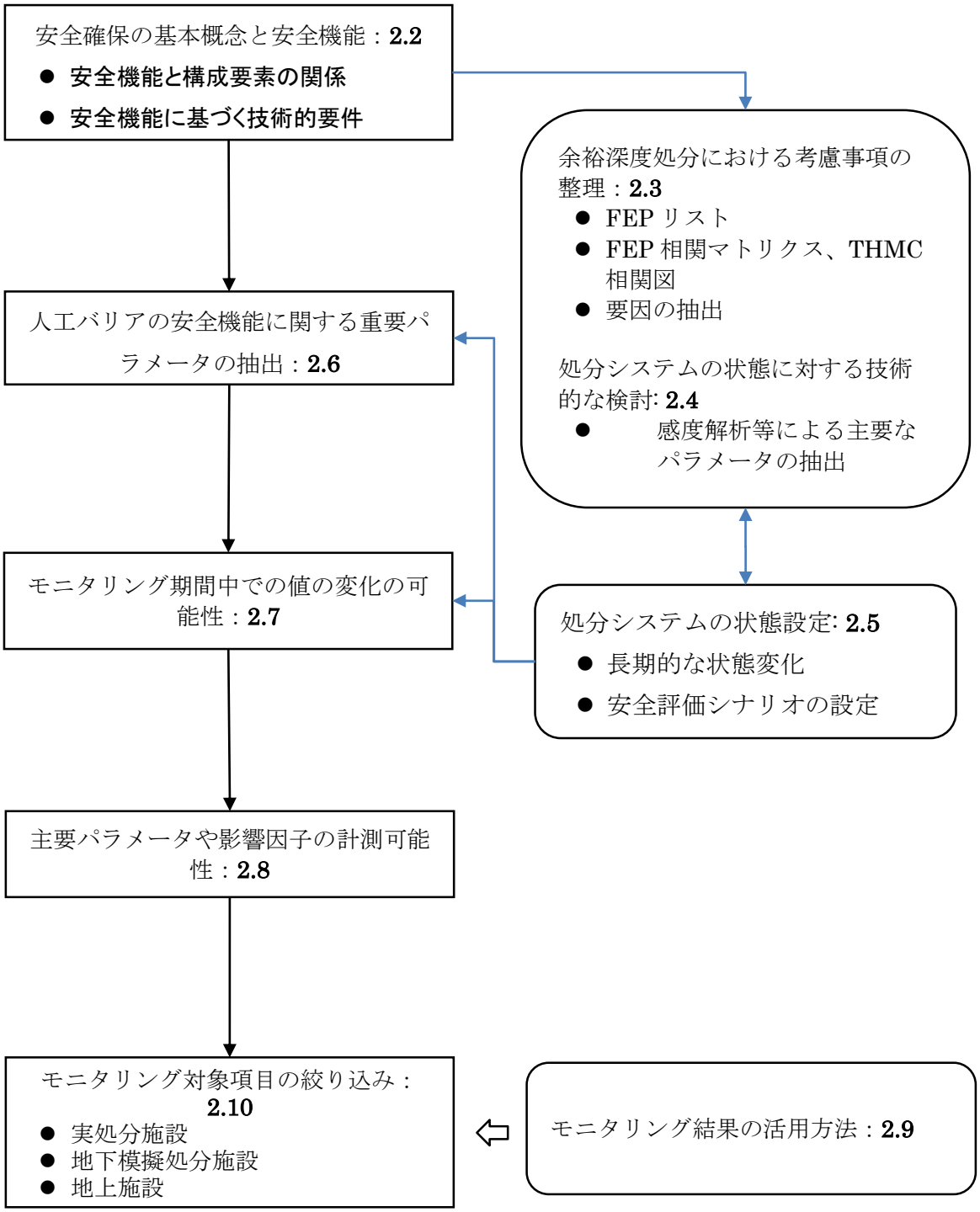



図 3.1-1　人工バリアの安全機能に関する重要パラメータおよびモニタリング項目の抽出フロー

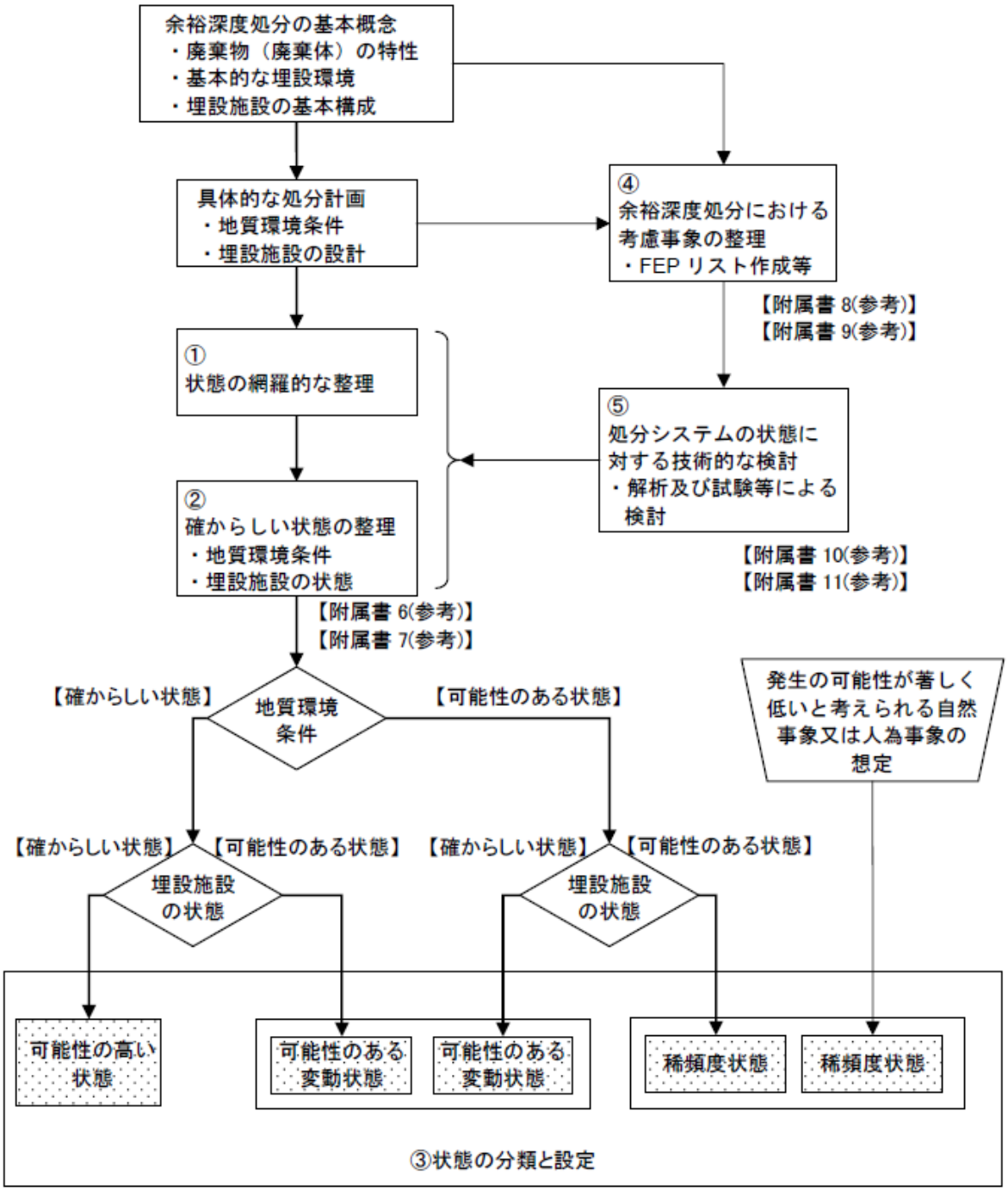



図 3.1-2　処分システムの状態設定の考え方

## 3.2　安全確保の基本概念と安全機能

原子力安全委員会[25][23]は、余裕深度処分施設の対象となる廃棄物の特性を踏まえ、安全確保の基本概念として、長期の安全性が、バリアの一つの機能に過度に依存していないよう、複数のバリアにより処分システムに頑健性を持たせ、安全上の裕度を確保する、具体的には、工学的に施設される人工バリアと地層等の天然バリアを組合せるという、IAEA の多重安全機能の考え方と同様の考え方を示している。

上記の安全確保の基本概念を踏まえ、余裕深度処分施設の人工バリアは、立地点の地質環境や廃棄体に含まれる放射性物質の種類及び放射能濃度等を勘案して設計されるが、既往検討[34]では、図 3.2-1 に示すように、地下に掘削された空洞内に、コンクリートピット（充てん材を含む）、低拡散材、緩衝材等を設置する構成となっている。

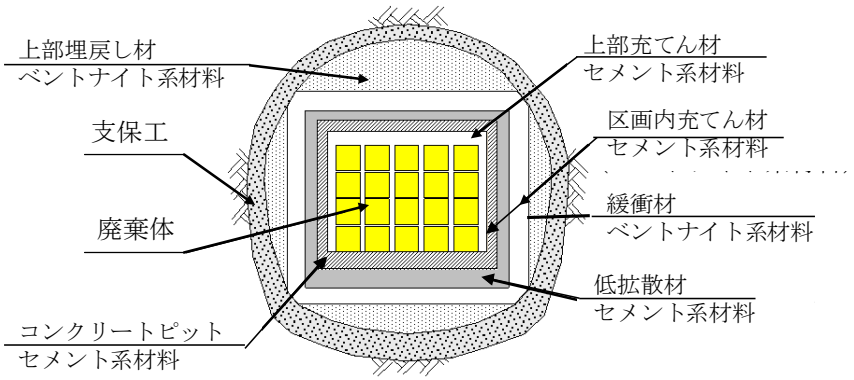



図 3.2-1 余裕深度施設の人工バリア構成の例

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会報告書[32]では、上記の安全確保の基本概念を踏まえ、余裕深度処分施設の安全確保上考慮すべき基本的要件（安全機能等）として、「冷却」、「閉じ込め」、「遮へい」、「移行抑制」および「隔離」を抽出している。また、事業許可後の段階を、「廃棄物の施設への受入から定置まで」、「定置から埋め戻しまで」、「埋め戻し完了後から管理を必要とする期間の終了まで」および「管理を必要とする期間終了後」の４に区分し、表 3.2-1 に示すように、時系列によって想定される安全確保上考慮すべき基本的要件が変化していくことを示している。これによれば、人工バリアの基本的要件は、埋戻し前までは、「閉じ込め機能」と「遮へい機能」が、また、埋戻し後は、「移行抑制機能」が重要であることを再確認することができる。

表 3.2-1 各過程において想定される安全確保上考慮すべき基本的要件（安全機能）

| 基本的要件（安全機能等） | ①廃棄物埋設施設受け入れから定置まで | ②定置から埋め戻しまで | ③埋め戻し完了後から管理を必要とする期間の終了まで | ④管理を必要とする期間終了後 |
|---|---|---|---|---|
| 冷却 | ・建屋の換気設備<br>・処分空洞の換気設備 | | | |
| 閉じ込め | ・処分容器 | ・処分容器<br>・人工バリア | | |
| 遮へい | ・処分容器<br>・建屋構造体しゃへい壁<br>・定置時の仮設しゃへい壁<br>・処分空洞の設備コンクリート（注） | ・処分容器<br>・定置時の仮設しゃへい壁<br>・処分空洞の設備コンクリート（注） | | |
| 移行抑制 | | | ・廃棄物<br>・処分容器<br>・人工バリア<br>・天然バリア | ・廃棄物<br>・処分容器<br>・人工バリア<br>・天然バリア |
| 隔離 | | | | ・深度（距離） |

（注）人工バリア構成部材の一部であるコンクリートピット（充てん材を含む）と低拡散材に該当

いっぽう、原子力学会[42]、土木学会[38]では、余裕深度処分の対象廃棄物や処分施設の立地点の具体化に依らず、一般的に上記の基本的要件を設計に反映するための検討を実施している。ここで、原子力学会等では、廃棄物埋設施設の放射線障害防止上の安全を確保するために必要な機

能を基本安全機能と定義し、基本的要件（安全機能等）に替え、基本安全機能という用語を使用している。

原子力学会等の検討内容は、まず、基本安全機能と各埋設段階との対応関係の再整理（図 3.2-2）、基本安全機能とそれを確保するための人工バリア構成部材等との対応関係の検討（図 3.2-3、図 3.2-4）、人工バリア性能の確保（長期健全性を含む）と工学的実現性の確保の観点から、人工バリアの各構成部材に求められる技術的要件及び建設時点の検査項目の検討（表 3.2-2～表 3.2-5）である。

ここで、表 3.2-2 および表 3.2-3 は、人工バリアの「閉じ込め機能」、「遮へい機能」および「移行抑制機能」に着目して技術的要件を整理したものである。これら基本安全機能のうち、移行抑

制機能を有する人工バリアの技術的要件については、建設時点の性能・状態及び長期状態変化の二つの観点から影響度の高い因子を抽出し，長期性能を保証するために必要な建設時点の要件が設定されている。したがって、移行抑制機能を有する人工バリアの技術的要件は、後述する長期の安全評価において考慮すべき物理的・化学的現象の抽出・整理を踏まえたものと考えることができる。また、ここで示された技術的要件を満たしていることを確認するための検査項目（表 3.2-4 および表 3.2-5）は、処分システムの機能確認を行う上で、着目すべき指標・パラメータ候補となりうるものである。なお、土木学会では、表 3.2-3 に示すように、確実な建設・操業を行うための空間・力学的安定性確保、坑道の形状維持等のために要求される機能として、「操業上の機能」についても言及している。

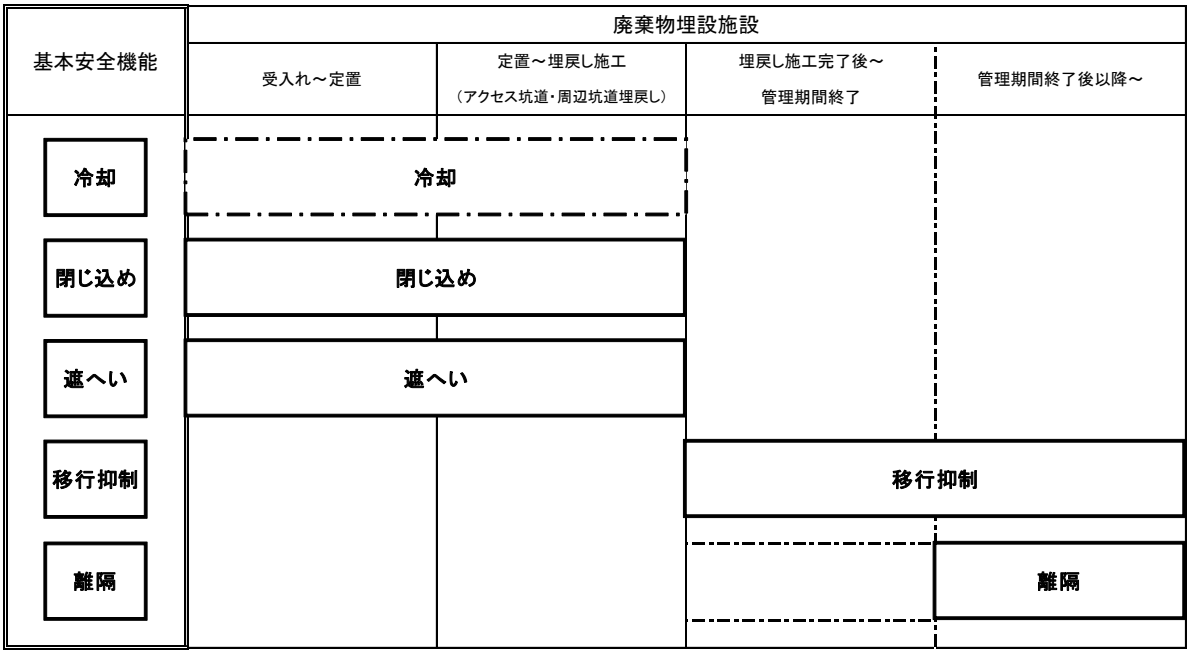



図 3.2-2 基本的要件と各埋設段階との対応関係の再整理

(注1) 「冷却」については，放射性物質の崩壊熱によって発熱が想定される場合に，必要に応じて考慮することが求められると考えられることから，廃棄体及び廃棄物埋設施設固有に係る事項となるため，検討対象外としている。

(注2) 「隔離」については、離隔距離の確保と容易な人間侵入の抑制（坑道の閉そく性など）を想定している。

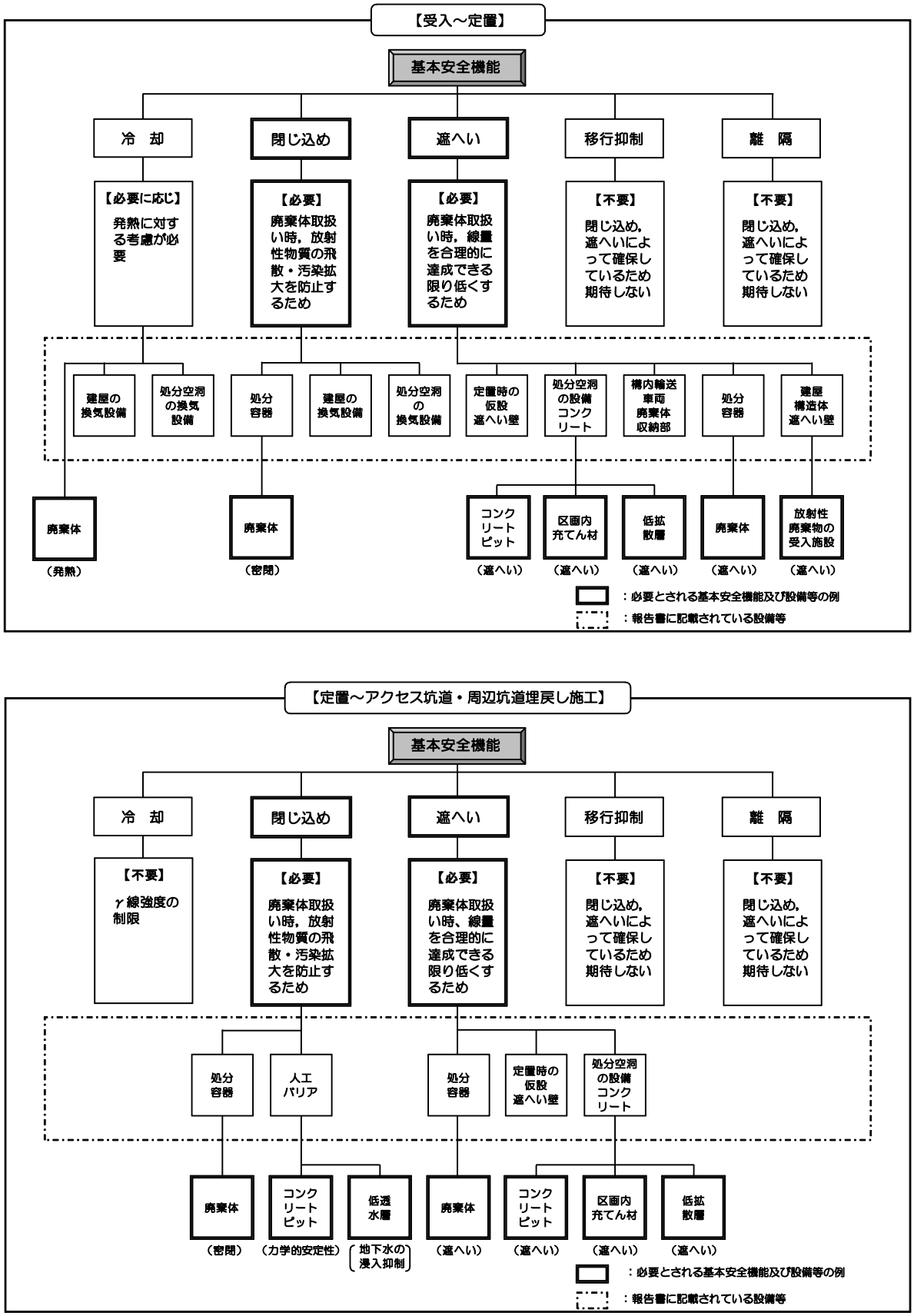
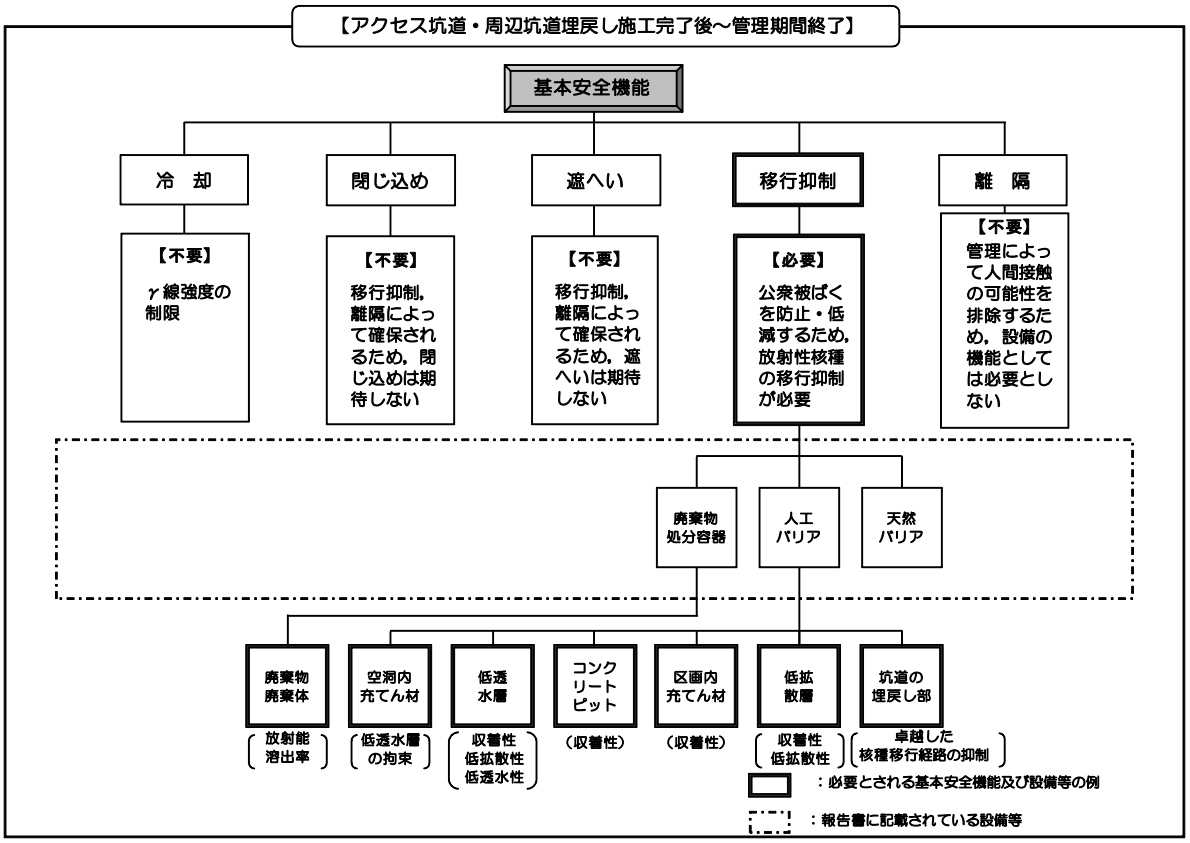






図 3.2-3　基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等



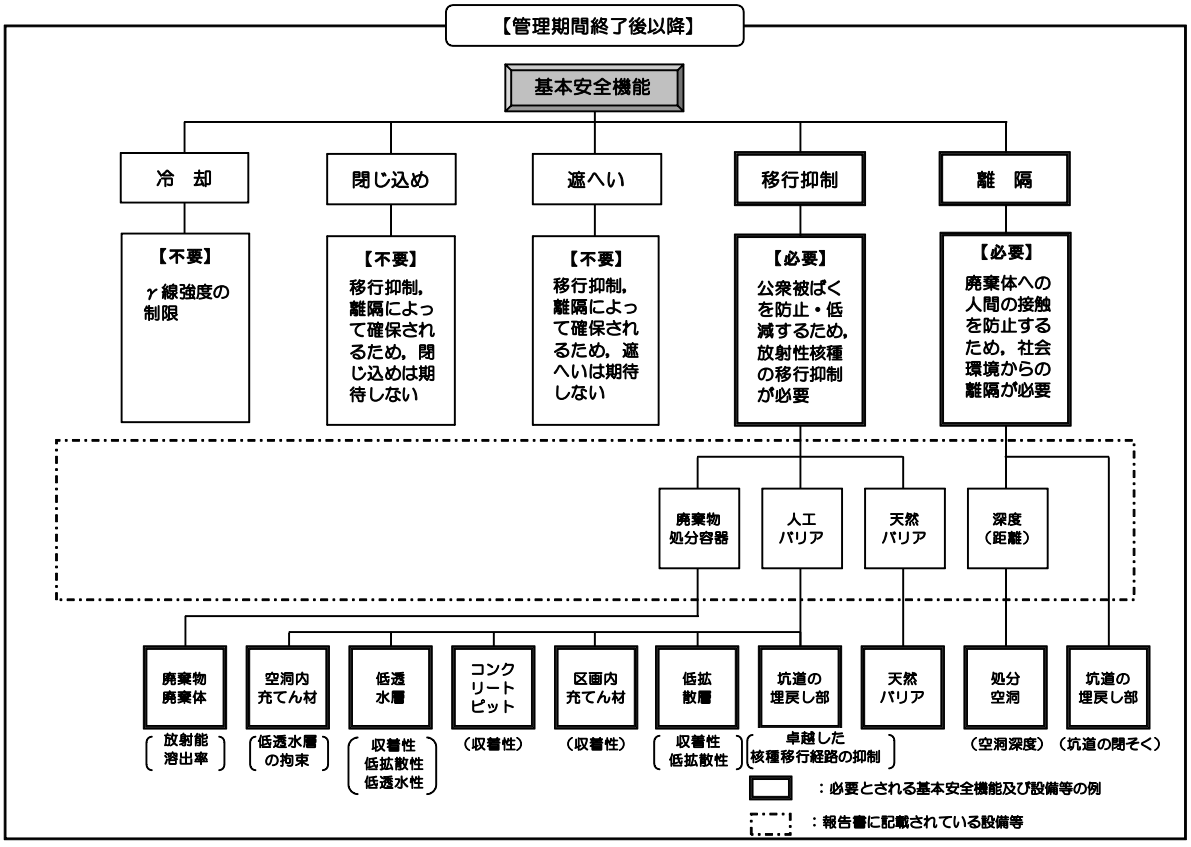




図 3.2-4　基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等　その 2

表 3.2-2 基本安全機能を踏まえた人工バリアの各構成部材に求められる技術的要件

| 基本安全機能 | | 技術的要件 | 部材 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 緩衝材 | 低拡散材 | コンクリートピット | 充てん材 | 上部埋戻し材 |
| 埋戻しまで | 閉じ込め | ・定置作業期間の廃棄体と地下水との接触防止 | - | - | ○ | - | - |
| | | ・力学的安定性 | | - | ○ | - | |
| | | ・透水特性 | ○ | - | - | - | - |
| | | ・力学特性 | ○ | - | - | - | - |
| | 遮へい | ・放射線の遮へい | - | ○ | ○ | ○ | - |
| | | ・力学的安定性 | - | - | ○ | - | - |
| | | ・力学特性 | ○ | ○ | | ○ | |
| 埋戻し完了後 | 移行抑制 | ・拡散特性 | ○ | ○ | - | - | - |
| | | ・核種収着特性 | ○ | ○ | ○ | ○ | - |
| | | ・透水特性 | ○ | - | - | - | ○ |
| | | ・化学的変質に対する抵抗性 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| | | ・力学特性 | ○ | ○ | - | - | ○ |
| | | ・ひび割れ性状 | - | - | ○ | - | - |
| | | ・膨潤特性 | ○ | - | - | - | - |
| | | ・有害空隙形成の抑制 | - | - | - | - | ○ |

(注) 学会標準で用いている低拡散層は低拡散材、低透水層は緩衝材、区画内充てん材は充てん材、空洞内充てん材は上部埋め戻し材に対応している

表 3.2-3 基本安全機能を踏まえた人工バリアの各構成部材に求められる技術的要件

| 基本安全機能 | | 技術的要件 | 部材 | | | | | 処分空洞 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 緩衝材 | 低拡散材 | コンクリートピット | 充てん材 | 上部埋戻し材 | |
| 埋戻しまで | 操業上の機能 | ・力学特性 | ○ | ○ | ○ | - | - | - |
| | | ・防水・排水性 | - | - | - | - | | ○ |
| | | ・内空確保 | - | - | - | - | - | ○ |

表 3.2-4　閉じ込め、遮へいに係る技術的要件（埋戻しまで）

| 基本的要件 | 部材 | 技術的要件 | 検査項目 |
|---|---|---|---|
| 閉じ込め | コンクリートピット | 力学的安定性 | コンクリートの圧縮強度<br>鉄筋の材質・配筋<br>部材寸法 |
| | | 定置作業期間の廃棄体と地下水との接触防止 | 定置前のコンクリートピット内に地下水などがたまっていないこと |
| | 緩衝材 | 透水特性 | 透水係数<br>部材寸法 |
| | | 力学特性 | 強度・変形係数 |
| 遮へい | コンクリートピット | 放射線の遮へい | 乾燥密度<br>部材寸法 |
| | | 力学的安定性 | コンクリートの圧縮強度<br>鉄筋の材質・配筋<br>部材寸法 |
| | 充てん材 | 放射線の遮へい | 乾燥密度<br>部材寸法 |
| | | 力学特性 | 圧縮強度 |
| | 低拡散材 | 放射線の遮へい | 乾燥密度<br>部材寸法 |
| | | 力学特性 | 圧縮強度 |

表 3.2-5　移行抑制に係る技術的要件（埋戻し後）

| 基本的要件 | | 部材 | 施工時点の性能・状態 | | 長期状態変化 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 技術的要件 | 検査項目 | 技術的要件 | 検査項目 |
| 移行抑制 | 低透水性 | 緩衝材 | 透水特性 | 透水係数<br>部材寸法 | 力学特性 | 強度・変形係数 |
| | | | | | 膨潤特性 | 膨潤圧 |
| | | | | | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質 |
| | | 上部埋戻し材 | 力学特性<br>有害空隙形成の抑制 | 強度･変形係数<br>充てんの状態 | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質<br>配合 |
| | 低拡散性 | 低拡散材 | 拡散特性 | 実効拡散係数<br>部材寸法 | 力学特性 | 圧縮強度 |
| | | | ひび割れ性状 | ひび割れの状態 | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質<br>配合 |
| | | 緩衝材 | 拡散特性 | 実効拡散係数<br>部材寸法 | 力学特性 | 強度・変形係数 |
| | | | | | 膨潤特性 | 膨潤圧 |
| | | | | | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質 |
| | 核種収着性 | コンクリートピット<br>充てん材<br>低拡散材 | 核種収着特性 | 使用材料の種類・品質<br>配合<br>部材寸法、又は充てん量 | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質<br>配合 |
| | | 緩衝材 | 核種収着特性 | 使用材料の種類・品質 | 化学的変質に対する抵抗性 | 使用材料の種類・品質<br>配合 |

## 3.3　余裕深度処分における考慮事項の整理

余裕深度処分施設の人工バリアの長期的な状態変化を設定するに当たって考慮すべき物理的・化学的現象は、FEP の分析等とともに、熱－水理－力学－化学（THMC）にわたる複合的プロセスの評価・解析等により、できるだけ網羅的、かつ、体系的に抽出・整理が行われ、人工バリアの構成部材別に、相互の関連性を踏まえて適切に評価することが必要となる。

本節では、既往の FEP リストおよび文献をもとに、人工バリアの安全機能に関して考慮すべき物理的・化学的現象について整理する。

### 3.3.1　人工バリア部材に関する FEP リストおよび FEP マトリクス

処分システムの長期的な安全性を評価するには、将来的に想定される放射性核種の移行に関連する様々な物理的・化学的な現象を時系列的に、かつ、網羅的に抽出し、評価のためのシナリオを作成する必要がある。このための手法として、国際的に FEP 分析によるシナリオ作成手法が提唱されており、OECD/NEA では地層処分の閉鎖後の安全性に限定した国際 FEP リストを整備している。

現状、余裕深度処分施設を対象とした FEP リストの検討例は少なが、その中で、原子力学会[41]では、国際 FEP リストなどを参考に、余裕深度処分の人工バリア構成などの基本概念を踏まえて、表 3.3-1 に示す、余裕深度処分施設を対象とした FEP リストを参考として作成している。

また、同学会では、図 3.3-1 に示すように、緩衝材を例にについて、各 FEP 間の相互関係を示す FEP マトリクスについても参考として作成している。ここで、縦軸と横軸の各 FEP によって網目状に区切られるマトリクスに赤●印又は○印があるものは、マトリクスで交差する FEP 間に相関が想定されるものである。また、マトリクスを結ぶ矢印は、始点が影響の起点あるいは要因となる FEP もしくは FEP 間の相関を表しており、終点が影響の帰結となる FEP もしくは FEP 間の相関による事象（同図では で記入している）を表している。このように FEP 相関マトリクスを用いることで、緩衝材における種々の変化は、地下水の浸入を起点として、膨潤などの事象に対応する力学的な影響と地下水成分との化学反応による影響を生じることが、図式的に整理できる。この他に、埋設施設近傍の環境条件は、人工バリアの状態を評価する際の境界条件となるため、FEP と THMC との相互関係を整理することも有効だが、余裕深度処分を対象とした検討例は見当たらない。

ここで、シナリオ開発の手法には、大きく２つの手法があり[3]、その一つが、上記の FEP による手法である。この手法は、FEP を収集する、FEP をスクリーニングする、FEP を組み合わせてシナリオを作成する、そして、シナリオをグルーピングし代表的なシナリオを特定するとい

う一連の手順を踏むことで、個々の現象（または FEP）を出発点として、それらを統合してシナリオ開発を行う手法であり、ボトムアップアプローチと呼ばれている。ボトムアップアプローチは、一見、論理的にシナリオ開発が行えるように見えるが、シナリオ開発の手順は反復的で、これまで、ボトムアップアプローチだけでうまくシナリオ開発が行えたかどうかは疑問視されている[12]。もう一つの手法は、重要な安全機能を最初に特定し、その上で、条件のどのような組み合わせが 1 つまたは複数の安全機能を損なうおそれがあるのかに焦点を置くもので、トップダウンアプローチと呼ばれている。多くの場合、トップダウンアプローチをシナリオの特定のための主要な方法として用い、ボトムアップアプローチがそれを確認する、または、その根拠を与えるツールの役割を果たすというように、2 つを組み合わせて用いることが多いとされている。

原子力学会[41]、土木学会[38][39]や原子力安全委員会[23][22]においても、FEP 分析の重要性を指摘してはいるが、FEP マトリックス等を用いた影響要因の抽出ではなく、人工バリアの代表的な安全機能を出発点として、FEP リスト等を拠り所として、それに影響を及ぼす要因を抽出するという、トップダウンアプローチとボトムアップアプローチを組み合わせた手法が用いられている。したがって、次項以降では、人工バリアの代表的な安全機能を出発点とした影響要因の整理を行うこととする。

表 3.3-1　人工バリア材料に関する基本 FEP リストの例

| 特性 | 構成材料 | | |
|---|---|---|---|
| | 廃棄体 | セメント系材料 | ベントナイト系材料 |
| 温度 | W1.1 熱特性<br>W1.2 温度<br>W1.3 崩壊熱 | CM1.1 熱特性<br>CM1.2 温度<br>CM1.3 水和熱 | B1.1 熱特性<br>B1.2 温度 |
| 水理 | W2.1 水理特性<br>W2.2 地下水流動<br>W2.3 飽和 | CM2.1 水理特性<br>CM2.2 地下水流動<br>CM2.3 飽和 | B2.1 水理特性<br>B2.2 地下水流動<br>B2.3 飽和 |
| 力学 | W3.1 力学特性<br>W3.2 応力<br>W3.3 破壊とひび割れ<br>W3.4 変形 | CM3.1 力学特性<br>CM3.2 応力<br>CM3.3 破壊とひび割れ<br>CM3.4 変形 | B3.1 力学特性<br>B3.2 応力<br>B3.3 膨潤<br>B3.4 変形<br>B3.5 流出 |
| 化学 | W4.1 化学特性<br>W4.2 地下水化学<br>W4.3 地下水との反応<br>W4.4 化学的変質<br>W4.5 微生物の影響<br>W4.6 有機物の影響<br>W4.7 ｺﾛｲﾄﾞの形成<br>W4.8 ｶﾞｽの発生／影響<br>W4.9 塩の蓄積<br>W4.10 腐食生成物の生成 | CM4.1 化学特性<br>CM4.2 地下水化学<br>CM4.3 地下水との反応<br>CM4.4 化学的変質<br>CM4.5 微生物の影響<br>CM4.6 有機物の影響<br>CM4.7 ｺﾛｲﾄﾞの形成<br>CM4.8 ｶﾞｽの発生／影響<br>CM4.9 塩の蓄積<br>CM4.10 腐食生成物の生成 | B4.1 化学特性<br>B4.2 地下水化学<br>B4.3 地下水との反応<br>B4.4 化学的変質<br>B4.5 微生物の影響<br>B4.6 有機物の影響<br>B4.7 ｺﾛｲﾄﾞの形成<br>B4.8 ｶﾞｽの発生／影響<br>B4.9 塩の蓄積 |
| 放射線 | W5.1 核種の放射性崩壊<br>W5.2 地下水の放射線分解 | CM5.1 核種の放射性崩壊<br>CM5.2 地下水の放射線分解 | B5.1 核種の放射性崩壊<br>B5.2 地下水の放射線分解 |
| 核種移行 | W6.1 核種ｲﾝﾍﾞﾝﾄﾘ<br>W6.2 物質移動特性<br>W6.3 幾何形状・間隙構造<br>W6.4 核種移行<br>W6.5 化学成分の移行 | CM6.1 物質移動特性<br>CM6.2 幾何形状・間隙構造<br>CM6.3 核種移行<br>CM6.4 化学成分の移行 | B6.1 物質移動特性<br>B6.2 幾何形状・間隙構造<br>B6.3 核種移行<br>B6.4 化学成分の移行 |

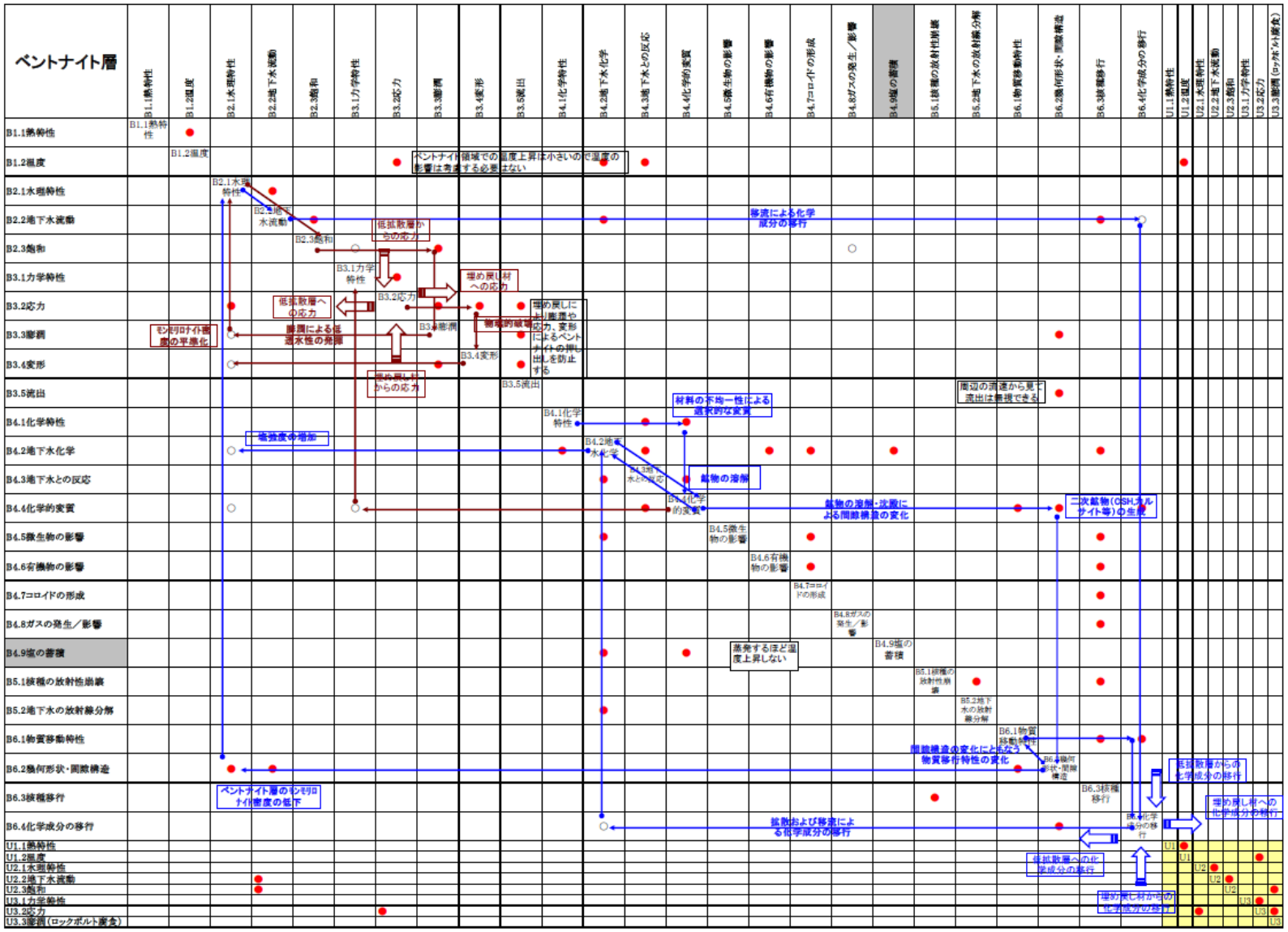



図 3.3-1　FEP マトリックスの例

### 3.3.2　人工バリアに関して考慮すべき物理的・化学的現象

#### (1) 状態変化をもたらす可能性のある物理的・化学的現象

廃棄体中の放射性物質が生活圏に移行する経路としてもっとも留意すべきは、地下水を介した移行の経路であり、人工バリアに期待される主たる安全機能は、その経路による放射性物質の移行をできるだけ長期にわたって抑制し、生活圏への移行時期を遅らせることにより、放射性壊変による放射能の減衰を図り、一般公衆の被ばく線量を低減することである。

放射性物質の地下水移行を抑制するために人工バリアに求められる代表的な特性は、既に 2.2 で述べたように、人工バリア内部への地下水の浸透と移流による放射性物質の移行を抑える特性（低透水性）、放射性物質が地下水を介して拡散することを抑える特性（低拡散性）、放射性物質を人工バリア内での収着によって人工バリア外への移行を抑える特性（核種収着性）である。これらに加え、廃棄体からの放射性物質の溶出を抑える特性（低溶出性）があり、安全評価においては、これらの特性を適切に評価することが求められる。また、これら人工バリアの特性を評価するに当たっては、埋設施設を構成する部位の力学特性の評価およびその特性を踏まえた埋設施設全体に関する物理的挙動の評価により、埋設施設の全体的形状の維持について適切に検討することが求められる。

土木学会[39]では、上記を踏まえ、図 3.2-1 の余裕深度施設の人工バリア構成の例を参考に、各段階における影響要因と想定される人工バリアの状態を図 3.3-2 のように整理している。これによれば、再冠水に伴い、セメント系材料であるコンクリートピットおよび低拡散層は、鉄筋の腐食や外力条件の変化などによるひび割れの発生・進展と、セメント水和物の溶脱などによる空隙構造の変化により、透水性および拡散性が変化すると考えられている。また、ベントナイト系材料である低透水層は、水との接触に伴う膨潤圧発生、交換性陽イオンの変化（Ca 型化）などによる透水性の変化や、モンモリロナイトの溶解による有効粘土密度の変化による透水性および拡散性の変化が考えられている。

また、土木学会[39]では、このような特性の変化を考慮し、セメント系材料およびベントナイト系材料の透水性および拡散性に影響を及ぼす要因の抽出例を表 3.3-2 および表 3.3-3 に、これらの影響要因の相互作用関係を図 3.3-6 のように整理している。例えば、セメント水和物の溶脱は、セメント系材料の透水性や拡散性を変化させるだけでなく、高アルカリ性の溶脱水によって、ベントナイト系材料のモンモリロナイトの溶解や、セメンテーションなどによって、ベントナイト系材料の透水性および拡散性が変化する可能性がある。また、図 3.3-6 には示されていないが、セメント系材料からの高アルカリ性の溶脱水は、亀裂の充填やセメンテーションなどを起こすことによって、周囲の岩盤などにも影響を与える可能性もあるとしている。そして、その結果として、安全評価パラメータであるセメント系材料及びベントナイト系材料の透水係数と実効拡散係

数、施設通過水量が変化するとしている。

原子力安全委員会[22]でも、表 3.3-4 に示す土木学会の検討例[38]や長期的な人工バリアの状態設定が求められる国内外の地層処分関係のレポートの検討例を参考に影響要因の例として以下を抽出し、これらについて現状の知見の整理を行っている。

○　ベントナイト系の部位
- モンモリロナイト層間の陽イオン組成の変化
- モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、及び二次鉱物の生成
- 間隙水の水質の影響（塩水、可溶性塩）
- 熱変質
- ベントナイトの膨潤
- 応力場の変化に伴う変形・損傷
- 周辺空隙への侵入及び流出

○　セメント系の部位
- セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成
- 間隙水の水質の影響（塩水、可溶性塩）
- 熱変質
- 応力場の変化や変質によるひび割れの生成、進展

○　金属
- 金属腐食
- 金属腐食に伴う膨張性腐食生成物、水素ガスの発生
- 応力場の変化による廃棄体の変形・座屈

○　共通
- 微生物の影響

ただし、これらは、埋設対象とする放射性廃棄物の特性、埋設地の地質環境条件や人工バリアの構成等の条件に依存するため、実際の安全評価では、埋設地固有の条件等を勘案し、影響要因のスクリーニングを行うことが重要となる。

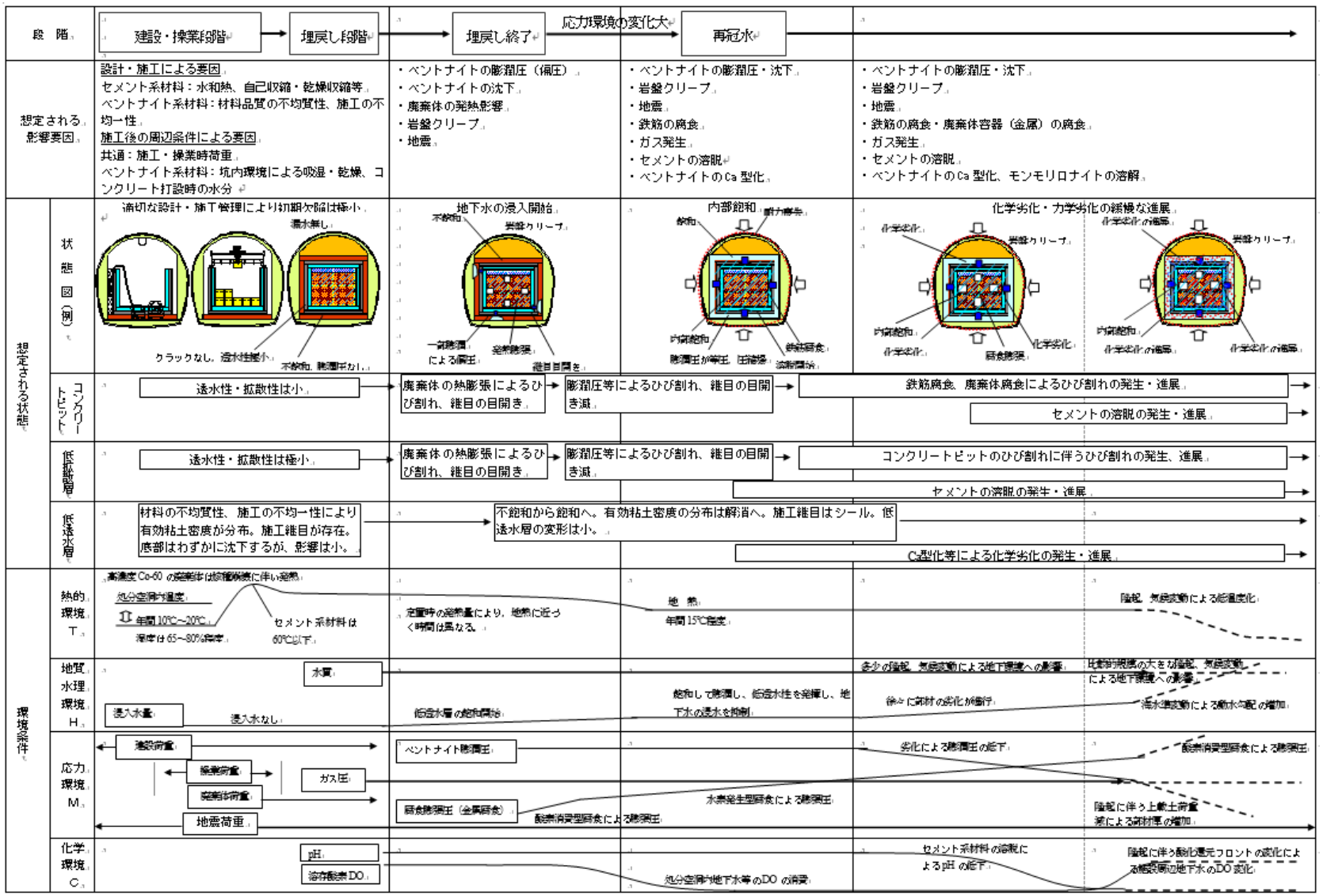



図 3.3-2 埋戻し後における影響要因と想定される状態（例）

表 3.3-2 セメント系材料（コンクリートピット、低拡散層）の透水性および拡散性に影響を及ぼす要因の抽出例

| 影響要因 | | | | 人工バリアの状態への影響機構 |
|---|---|---|---|---|
| 初期ひび割れの進展、新たなひび割れの発生 | 物理的影響 | ベントナイトの膨潤圧 | | 膨潤圧（膨潤過程の偏圧も含む）によりコンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | ベントナイトの沈下 | | 底部低透水層の不同沈下によるセメント系材料の相対変位により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | 鉄筋の腐食 | | 腐食膨張により、コンクリートピットにひび割れが発生。 |
| | | 廃棄体の発熱影響 | | 廃棄体発熱による熱応力により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。また、弾性係数や強度が低下。 |
| | | 廃棄体容器（金属）の腐食 | | 廃棄体容器内の空隙が小さい場合、廃棄体容器（金属）の腐食膨張により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | | | 廃棄体容器内の空隙が大きい場合、廃棄体容器（金属）の腐食陥没により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | ガス発生 | | 鉄筋、廃棄体容器（金属）の腐食ガスの蓄圧により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | 岩盤クリープ | | 岩盤クリープによりコンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | 地震影響 | | 地震力により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | 化学的影響 | 廃棄体の発熱影響 | | 熱によりセメント系材料が化学的に変質し、バリア性能を低下させる可能性がある。 |
| | | 膨張性鉱物の生成によるマトリックスの破壊 | 周辺地下水の高硫酸イオン濃度 | 地下水に高濃度の硫酸イオンが含まれる場合、膨張性のエトリンガイト等が生成されひび割れが発生。 |
| | | | 廃棄体中の可溶性塩 | 一部の廃棄体は硫酸塩を含むため、膨張性のエトリンガイト等が生成されひび割れが発生。 |
| | | アルカリ骨材反応 | | アルカリ骨材反応によってコンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。 |
| | | ひび割れ部における二次鉱物の生成 | | 地下水とセメント溶脱成分との反応による二次鉱物がひび割れを閉塞。 |
| 空隙構造の変化（空隙率の変化） | 化学的影響 | セメント水和物の溶脱、二次鉱物の生成 | | 地下水によりセメント水和鉱物の溶解や、地下水成分との反応による二次鉱物の生成により空隙構造が変化。 |

影響要因の相互作用：鉄筋の腐食および化学変質（空隙率の増大等）によるコンクリートピット等の剛性および強度の低下と、膨潤圧、岩盤クリープ等の荷重の継続により、コンクリートピットおよび低拡散層のひび割れが進展。

表 3.3-3 ベントナイト系材料（低透水層）の透水性および拡散性に影響を及ぼす要因の抽出例

| 影響要因 | | | | 人工バリアの状態への影響機構 |
|---|---|---|---|---|
| ベントナイト特性の変化 | 化学的影響 | 交換性陽イオンの変化（Ca 型化） | | セメント系材料からのカルシウム溶脱水による Ca 型化。 |
| | | 高イオン強度による凝集等 | 周辺地下水の塩水化 | 塩の蓄積により、空隙特性（空隙率、空隙構造）が変化するとともに、膨潤性能が低下。 |
| | | | 廃棄体中の硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩 | 塩の蓄積により、空隙特性（空隙率、空隙構造）が変化するとともに、膨潤性能が低下。 |
| 有効粘土密度の変化 | 物理的影響 | 廃棄体容器（金属）の腐食 | | 廃棄体容器内の空隙が小さい場合、廃棄体容器（金属）の腐食膨張により、低透水層が圧縮され、密度が増加。 |
| | | | | 廃棄体容器内の空隙が大きい場合、廃棄体容器（金属）の腐食陥没により、低透水層が膨張し密度が低下。 |
| | | ガス発生 | | 廃棄体容器（金属）の腐食ガスの蓄圧により低透水層が圧縮され、密度が増加。 |
| | | ベントナイトの沈下 | | 底部低透水層の圧縮変形により、上部低透水層の密度が低下。 |
| | | 岩盤クリープ | | 岩盤クリープにより低透水層が薄くなり密度が増加。 |
| | | 地震影響 | | 地震動により低透水層の沈下等が発生し、低透水層の密度が変化。 |
| | | 近接部材の隙間等へのベントナイトの浸入 | | コンクリート打ち継目やひび割れ部へのベントナイトの浸入による密度の低下。 |
| | 化学的影響 | モンモリロナイトの溶解、随伴鉱物の溶解、二次鉱物の生成 | | セメント系材料からの高アルカリ性の溶脱水によるベントナイト構成材料の溶解による密度低下。溶解成分と地下水成分等が反応して二次鉱物が沈殿。 |
| 短絡経路の形成 | 物理的影響 | ガス発生 | | 廃棄体の腐食等により発生したガスによる低透水層の破過が生じ、低密度部を形成。再飽和により透水性が回復。 |
| | | ブロックの間隙等の残留 | | ブロックの隙間等が高透水部を形成。ただし、ベントナイト層全体の透水性増大へ及ぼす影響は小さい。 |

影響要因の相互作用：鉄筋の腐食および化学変質（空隙率の増大等）によるコンクリートピット等の剛性および強度の低下と、膨潤圧、岩盤クリープ等の荷重の継続により、変形が生じ低透水層の密度が変化。

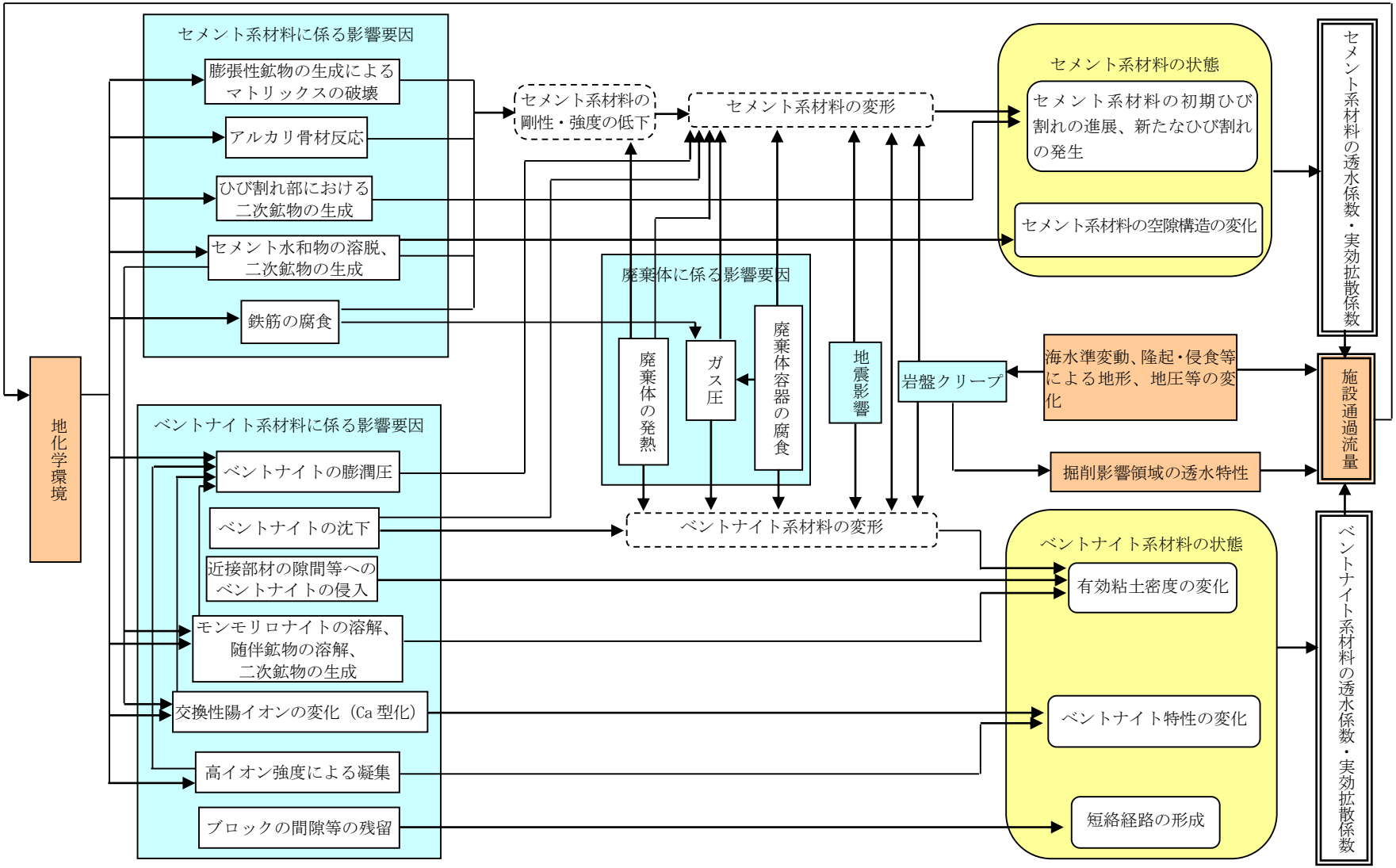



図 3.3-1 埋戻し後における人工バリアの状態に影響を及ぼす要因（例）

表 3.3-4 長期安全確保のための設計、品質管理および考慮すべき項目について（例）

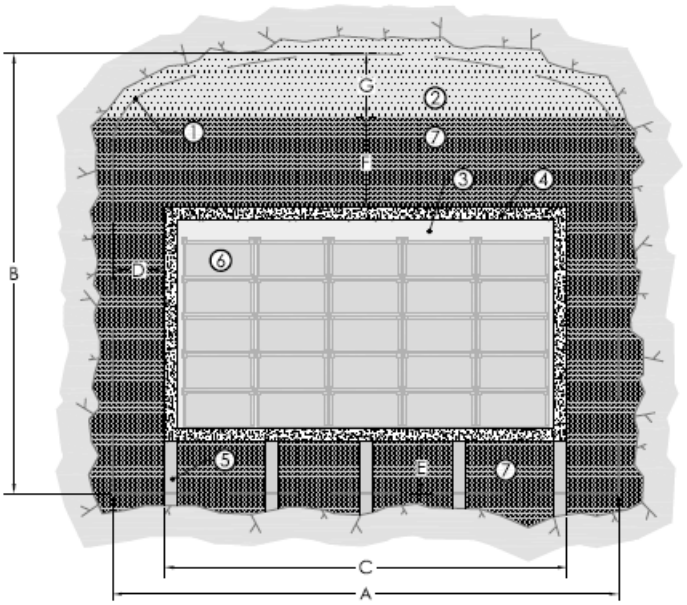
| 人工ﾊﾞﾘｱ機能 | 主な対応部位 | 重要度の高いパラメータ（施工時性能･状態） | 性能を支配する主要な物理・化学特性 | 長期状態評価において考慮すべき主要な現象・反応 | 左記現象・反応に影響する当該部位の主要な特性（長期状態設定） | 考慮すべき特性<br>○施工時性能に係る特性<br>＊長期性能に係る特性 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 低透水性 | 低透水層 | ○透水係数 | ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ層間ｲｵﾝ組成 | ・交換性陽イオンの変化 | ＊鉱物組成（層間ｲｵﾝ組成）<br>＊密度（かさ密度） | ○透水係数<br>○厚さ<br>＊鉱物組成<br>＊密度（かさ密度）<br>＊強度・変形係数<br>＊膨潤圧 |
| | | | ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率 | ・ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄの溶解 | ＊鉱物組成（ﾓﾝﾓﾘﾛﾅｲﾄ含有率） | |
| | | | 乾燥密度 | ・力学的変形に伴う密度・形状の変化<br>・近接部材隙間等へのﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ流出 | ＊強度・変形係数<br>＊膨潤圧 | |
| | | | 間隙水の水質 | ・塩水の影響<br>・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 | ― | |
| | | ○厚さ | 厚さ | ・力学的変形に伴う密度・形状の変化<br>・近接部材隙間等へのﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ流出 | ＊強度・変形係数<br>＊膨潤圧 | |
| | | | 短絡経路の有無 | ・力学的影響による物理的損傷<br>・膨潤による自己シール | ＊膨潤圧 | |
| | 空洞内充てん材 | ○強度･変形係数（低透水層の拘束） | 密度 | ・鉱物変質 | ＊鉱物組成 | ○強度・変形係数<br>＊鉱物組成 |
| 低拡散性 | 低拡散層 | ○実行拡散係数 | 基質部の空隙構造 | ・ｾﾒﾝﾄ水和物の溶脱、二次鉱物の生成<br>・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 | ＊鉱物組成<br>＊実効拡散係数 | ○＊実効拡散係数<br>○ひび割れ開口面積<br>○厚さ<br>＊鉱物組成<br>＊圧縮強度 |
| | | ○ひび割れ開口面積 | ひび割れ幅<br>長さ<br>本数 | ・二次鉱物の生成によるひび割れ形成<br>・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響<br>・微生物活動<br>・力学的変形に伴うひび割れの生成、進展<br>・低透水層の不等沈下に伴う応力発生によるひび割れ形成 | ＊鉱物組成<br>＊圧縮強度 | |
| | | ○厚さ | 厚さ（健全部） | ・ｾﾒﾝﾄ水和物の溶脱、二次鉱物の生成<br>・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 | ＊鉱物組成 | |
| 核種収着性 | 区画内充てん材、ｺﾝｸﾘｰﾄﾋﾟｯﾄ、低拡散層 | ○収着分配係数 | 鉱物組成 | ・ｾﾒﾝﾄ水和物の溶脱、二次鉱物の生成<br>・熱変質による鉱物変質 | ＊鉱物組成 | ○収着分配係数<br>○収着体積<br>＊鉱物組成 |
| | | | 間隙水の水質 | ・ｾﾒﾝﾄ水和物の溶脱、二次鉱物の生成<br>・硝酸塩、硫酸塩などの可溶性塩の影響 | ― | |
| | | ○収着体積 | 当該部位の体積 | ・ｾﾒﾝﾄ水和物の溶脱、二次鉱物の生成 | ＊鉱物組成 | |

(2) 類似施設の事例

ここでは、参考のため、人工バリアの安全機能に影響を与える可能性のある物理的・化学的現象に着目して、ベントナイトなどの粘土系材料とセメント材料が共存するスウェーデンとスイスの中低レベル放射性廃棄物の安全設計概念を概略整理した。

(a) SFL の安全設計概念

SFL は、スウェーデンの原子炉の運転・廃炉廃棄物、黎明期の原子力研究や医療・産業・研究に伴って発生する中低レベル廃棄物を地層処分するための施設であり、現在、SKB で複数の設計概念を検討中[17][18]である。ここでは、複数の設計概念のうち、図 3.3-4 に示す、セメントとベントナイトが共存する設計概念で取り上げられている物理的・化学的現象の概要を紹介する。




*Cross-sectional view of the Clay repository concept. Legend: 1) Theoretical tunnel contour. 2) Bentonite pellets. 3) Grout. 4) Concrete structure for the operating period (0.5 metre). 5) Granite pillars. 6) Waste containers. 7) Bentonite blocks. Approximate dimensions: A = 20 m, B = 17 m, C = 16 m, D = 2 m, E = 2 m, F = 3–4 m, G = 2–3 m.*

図 3.3-4　ベントナイトを用いた SFL の設計概念

この設計概念では、ベントナイトの安全機能として、低透水性に加え、収着性、低拡散性、コロイドろ過性を期待している。そして、それら安全機能に関連して、不飽和条件での水の吸水率と移行挙動、飽和条件での水の移行挙動、パイピングと侵食、膨潤と質量再分配、液状化、凍結、水の移行/二相流/混合、溶解/沈殿、化学種と収着（イオン交換を含む）、拡散/核種の拡散移行、コロイド放出/ベントナイト侵食、コロイド生成と移行について、プロセスの理解が必要としている。

また、これらプロセスのうち、設計概念の特徴を踏まえて、今後、さらなる研究が必要と考えられるものとして、以下の 3 項目を挙げている。なお、これらについては、前項 3.3-2(1)で取り上げている物理的・化学的現象に包含されているものと考えられる。

・多量のベントナイトを使用するため、長期的なベントナイトの透水性を評価するために、飽和期間中の膨潤特性、例えば、不均質な水の飽和の影響を理解すること

・構造躯体、充填材と廃棄体中のセメントとベントナイトの相互作用
・ベントナイトを通過するコロイド移行

(b) Nagra の安全設計概念

Nagra の中低レベル廃棄物処分施設の設計概念[8]を図 3.3-5 に示す、大空洞に廃棄体を定置後、空間をモルタル充填するものである。ただし、母岩がカオリナイトを主要鉱物とするオパリナス粘土であるため、セメントとベントナイトが共存する設計概念と見なすこともできる。この設計概念の主要な安全機能は、母岩の低透水性とセメント系材料の物理化学特性（核種収着、腐食・溶解度制限）である。

処分システムの長期変遷に影響するプロセス等として、アルカリシリカ反応（アルカリ骨材反応）によるセメントの劣化、廃棄体に含有されている有機物の分解等に起因する $CO_2$ とセメントとの反応（中性化反応）、母岩とセメントとの相互作用による界面の空隙率変化、セメントおよび粘土を起源とするコロイドなどが挙がられている。

なお、これらについても、前項 3.3-2(1)で取り上げている物理的・化学的現象に包含されているものと考えられる。

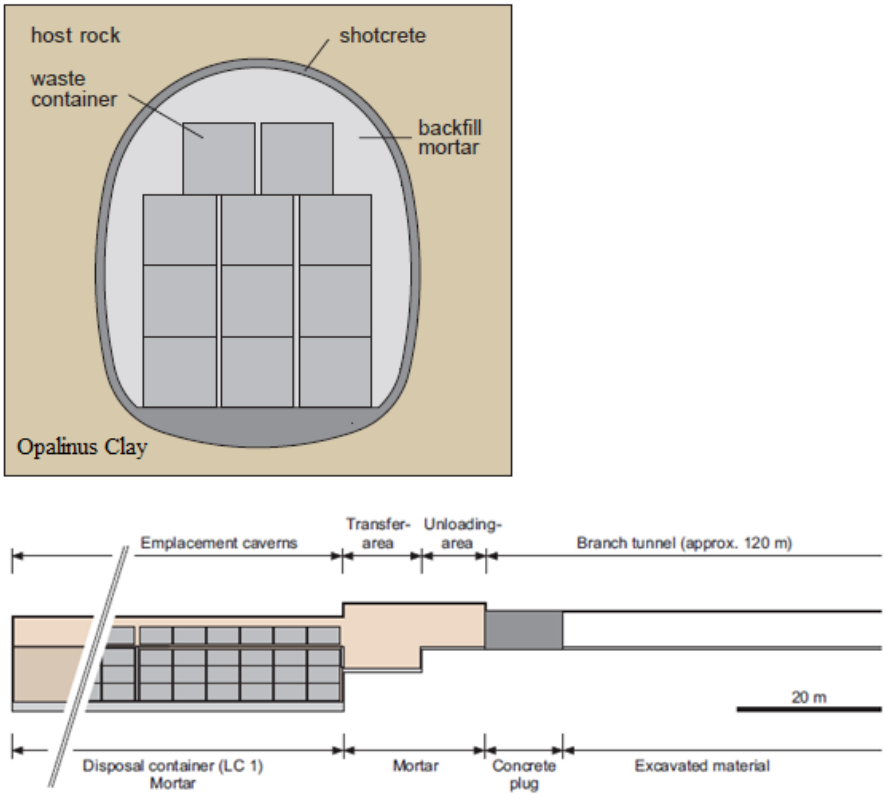



図 3.3-5 Nagra の中低レベル廃棄物処分施設の設計概念（上：断面、下：側面）

### 3.3.3　考慮事項の整理

土木学会[39]等の検討を踏まえ、人工バリアの代表的な安全機能に影響を及ぼす、長期状態変化の影響要因および影響機構を整理した。整理結果をセメント系材料について表 3.3-5 に、ベントナイト系材料について表 3.3-6 示す。また、これらをもとに、各影響要因と人工バリアとの相互関係を図 3.3-7 として整理した。

ここで、表 3.3-5、表 3.3-6 または図 3.3-7 より、人工バリアの安全機能に影響を与える可能性のある関連パラメータを、影響機構や状態変化の記述から抽出することも可能である。例えば、ベントナイト系材料の低透水性については、透水係数、膨潤圧と密度（厚さ、間隙率、材料組成、強度・変形係数）が抽出できる。また、コンクリート系材料の低拡散性（・低透水性）については、実効拡散係数と透水係数（空隙構造、ひび割れ）、ひび割れ（鋼材腐食速度、腐食膨張率、ベントナイト膨潤圧、ガス圧）、圧縮強度、材料組成が抽出できる。これらは、表 3.2-5 の移行抑制に係る技術的要件で整理した検査項目を包含している。

ここで、ベントナイトの低透水性（や低拡散性）は、膨潤性に依存し、また、膨潤性は、ベントナイトの乾燥密度（モンモリロナイトの単位体積あたりの含有量）、層間陽イオンの水和特性や周辺地下水のイオン強度（塩分濃度）に強く関係している。したがって、密度や膨潤圧の低下は、直接的にベントナイトの透水係数の増加につながることになる。

また、セメントの高アルカリ間隙水によるモンモリロナイトと随伴鉱物の溶解反応については、溶解反応により完全に変質した部分の膨潤圧はゼロと仮定される。しかし、例えば、図 3.3-6 のよう複合的に進行するケイ酸カルシウム水和物などの二次鉱物の生成・沈殿により、反応界面からある深さで緩衝材の空隙率はゼロとなり、反応の進行が抑制されるとの議論[14]もあり、透水係数については、変化（増加または低下）するとしている。

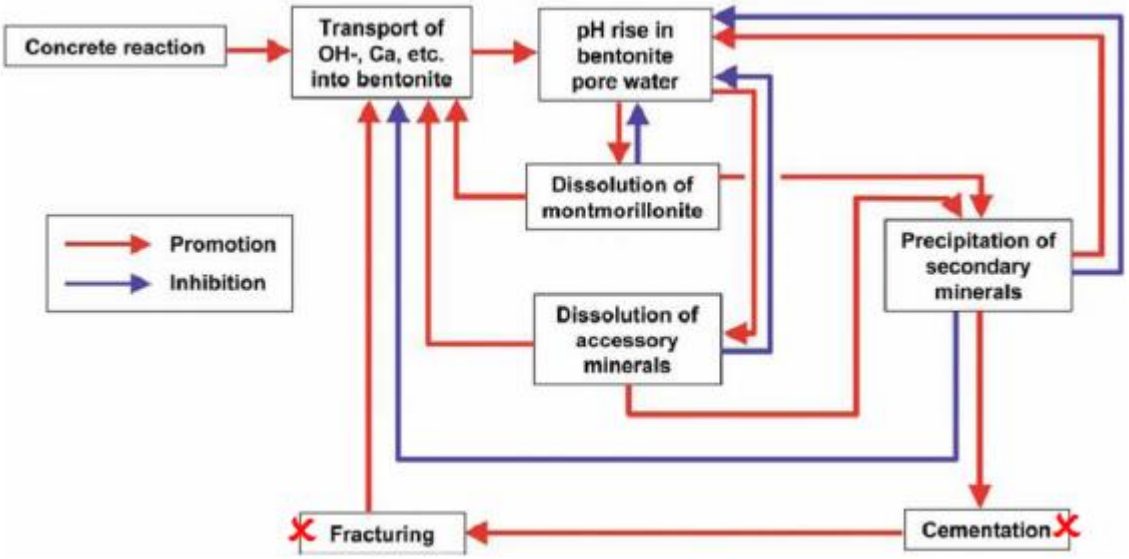



図 3.3-6 セメント-ベントナイト相互作用の相関図

表 3.3-5　セメント系材料の安全機能に影響を及ぼす要因の整理

| 影響要因 | | 人工バリアへの影響機構 | 状態変化 | 安全機能への影響 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 物理的影響 | ベントナイトの膨潤圧 | 膨潤圧によりコンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | ひび割れ | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | ベントナイトの沈下 | 底部低透水層の不同沈下により、コンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | 鉄筋の腐食 | 腐食膨張により、コンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | 廃棄体の発熱影響 | 廃棄体発熱による熱応力により、コンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生。また、弾性係数や強度が低下 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | 廃棄体容器の腐食 | 腐食膨張、陥没により、コンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | ガス発生 | 鋼材の腐食ガスの蓄積により、コンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | 岩盤クリープ | 岩盤クリープによりコンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | 地震影響 | 地震力によりコンクリートピット、低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| 化学的影響 | 廃棄体の発熱影響 | 熱によりセメント系材料が化学的に変質し、バリア性能を低下させる可能性がある。 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | 収着性能の低下 |
| | 周辺地下水の高硫酸イオン濃度 | 地下水に高濃度の硫酸イオンが含まれる場合、膨張性のエトリンガイトなどが生成されひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | 収着性能の低下 |
| | 廃棄体中の可溶性塩 | 一部の廃棄体は硫酸塩を含むため、膨張性のエトリンガイトなどが生成されひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | 収着性能の低下 |
| | アルカリ骨材反応 | アルカリ骨材反応によってコンクリートピットおよび低拡散層にひび割れが発生 | | 拡散係数の増加 | 施設内通過流量の増加 | |
| | ひび割れ部、空隙における二次鉱物の生成 | 地下水とセメント溶脱成分との反応による二次鉱物がひび割れ、空隙を閉塞 | ひび割れ、空隙閉塞 | 拡散係数の低下 | 施設内通過流量の低下 | 収着性能の低下 |

表 3.3-6　ベントナイト系材料の安全機能に影響を及ぼす要因の整理

| 影響要因 | | 人工バリアへの影響機構 | 状態変化 | 安全機能への影響 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 物理的影響 | 廃棄体容器（金属）腐食 | 廃棄体容器の腐食膨張、陥没により、低透水層が圧縮、膨張し、密度が変化する。 | 密度変化 | 透水係数の変化 | | |
| | ガス発生 | 廃棄体容器（金属）の腐食ガスの蓄圧により低透水層が圧縮され、密度が増加 | 密度増大 | 透水係数の低下 | | |
| | ベントナイトの沈下 | 底部低透水層の圧縮変形により、上部低透水層の密度が低下 | 密度低下 | 透水係数の増加 | | |
| | 岩盤クリープ | 岩盤クリープにより低層水層が薄くなり密度が増加 | 密度、厚さ変化 | 透水係数の変化 | | |
| | 地震影響 | 地震力により低透水層の沈下などが発生し、低透水層の密度が変化 | 密度変化 | 透水係数の変化 | | |
| | 近接部材の隙間などへのベントナイトの浸入 | コンクリート打継目やひび割れ部へのベントナイトの浸入による密度の低下 | 密度低下 | 透水係数の増加 | | |
| | パイピングと侵食 | ベントナイトにかかる水圧勾配が高い時期、または、ガス発生により、緩衝材の一部が破過し、パイプ状の流路が形成され、その流路に沿ってベントナイトの侵食が発生する可能性。地下水の流れの速い、特定の亀裂や層理面に集中して地下水が流れる場所で侵食が発生する可能性。これらにより、ベントナイト密度が低下。 | 密度低下 | 透水係数の増加 | | |
| 化学的影響 | 交換性陽イオンの変化（Ca型化） | セメント系材料からの高カルシウム濃度の間隙水によるCa型化 | 膨潤圧の低下 | 透水係数の増加 | | |
| | 高イオン強度に | 周辺地下水や廃棄体中の可溶性塩の蓄積により空隙特性 | 膨潤圧の低 | 透水係数の | | |

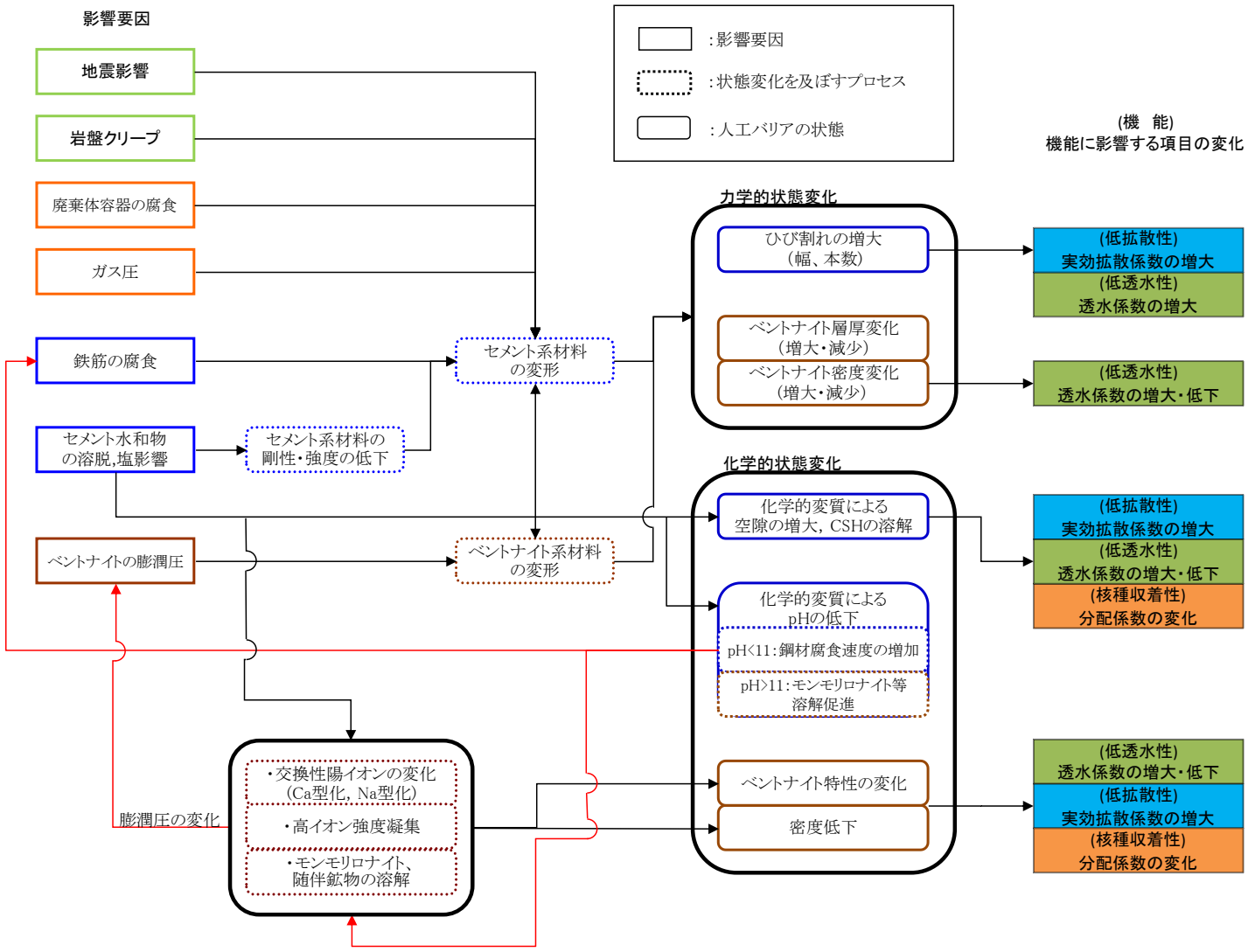



図 3.3-7　埋戻し後の人工バリアの状態に影響を及ぼす要因の相関関係図

## 3.4　処分システムの状態に対する技術的検討

本節では、安全評価に影響するパラメータを対象として、既往文献の調査を行い、感度解析等の実施事例に基づき主要なパラメータを抽出した。

### 3.4.1　土木学会における余裕深度処分の安全評価パラメータの検討

土木学会[38]では、余裕深度処分の地下水シナリオの安全評価手順を考慮し、安全評価結果の精度、信頼性に大きく影響を及ぼすと考えられるもので、土木工学的な見地から検討可能なものとして、図 3.4-1 に示す、以下の核種移行評価パラメータを検討の対象として抽出している。

［天然バリアに係る核種移行評価パラメータ］
- 施設通過流量
- 実流速
- 移行経路長
- 分散特性
- 流出点の位置
- 流出点での希釈水量

［人工バリアに係る核種移行評価パラメータ］
- 透水係数
- 実効拡散係数

なお、岩盤の成因、既存割れ目の有無や不均質性の程度などの違いにより、坑道周辺において掘削により透水性が変化する領域およびその変化量は地点により異なる可能性がある。このため、坑道などの原位置において、坑道周辺岩盤の透水性に関する調査を行い、透水性の観点から掘削影響領域を評価するとしている。なお、坑道掘削に伴う透水性の変化を評価する際には、坑道掘削前に実施した地表からのボーリング孔内や坑道から十分離れた位置での透水試験もしくは室内透水試験などにより、初期状態における透水性を得ておく必要があるとしている。

表 3.4-1 に坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験を、表 3.4-2 に掘削影響領域における透水性予測評価のための調査データを示す。

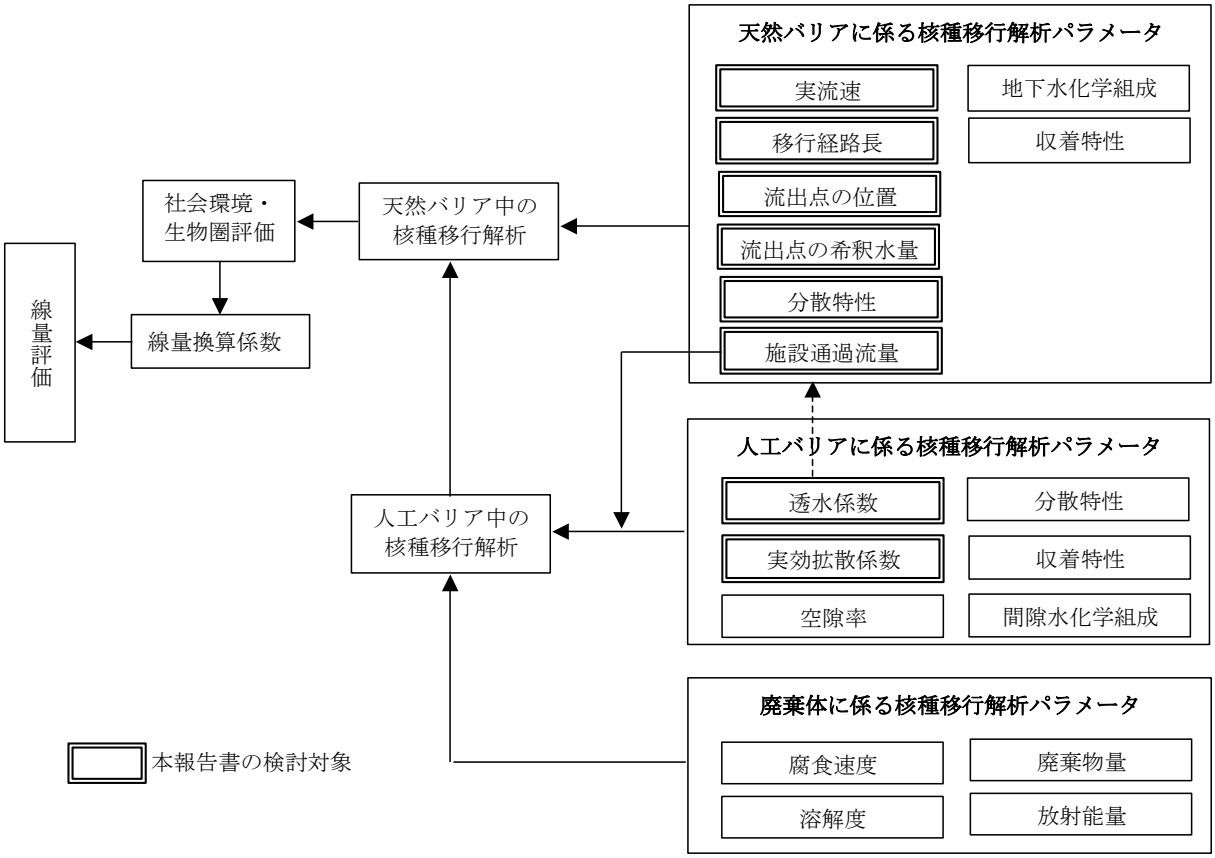



図 3.4-1　地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ

表 3.4-1　坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験

| 調査方法 | 目　　的 |
|---|---|
| 地質観察 | 地質の不均質性、坑道スケールでの割目状況の把握 |
| ボアホールカメラ | 割目の観察 |
| | 透水試験実施位置の選定 |
| ジョイント変位計 | 亀裂開口幅の変化の測定 |
| 透水試験<br>短区間透水試験 | 坑道周辺岩盤の透水性分布の把握 |
| 孔間透水試験 | 坑道周辺岩盤の透水性分布の把握 |
| 間隙水圧測定 | 坑道周辺岩盤の間隙水圧分布の把握 |
| 流体検層 | 湧水による温度変化、電気伝導度変化の測定 |
| 孔内蒸発量ロギング試験 | 孔壁からの蒸発散量の測定 |

表 3.4-2　掘削影響領域における透水性予測評価のための調査データ

| | |
|---|---|
| 地質の構成および構造 | 岩種、岩相<br>地層の分布・傾斜<br>地質境界の位置・傾斜 |
| 岩質 | 固結度<br>風化の状況・深度<br>変質の有無・状況・位置<br>緩みの有無・状況・深度 |
| 不連続面 | 断層・シームの位置・走向・傾斜・性状<br>割目の開口量、位置、走向・傾斜、性状 |
| 透水性 | 測定区間ごとの透水係数 |

### 3.4.2　原子力学会における浅地中ピット処分の安全評価パラメータの検討

原子力学会[43]が想定したコンクリートピット処分施設の核種移行経路の概略図を図 3.4-2 に示す。また、地下水シナリオの安全評価では、図 3.4-3 に示す埋設施設（廃棄体およびコンクリートピット)、その外側に設置される透水性の低いベントナイト混合土、さらにその外側の天然バリア（土壌、岩盤）の 3 つのパートに分けて評価モデルが構築されている。

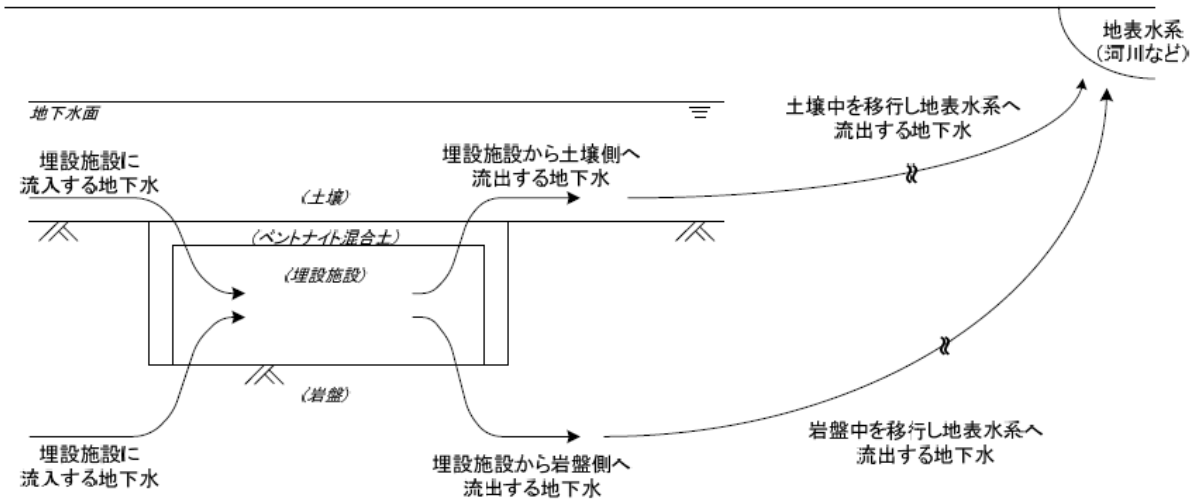



図 3.4-2　処分システムの概略図（原図を一部修正）

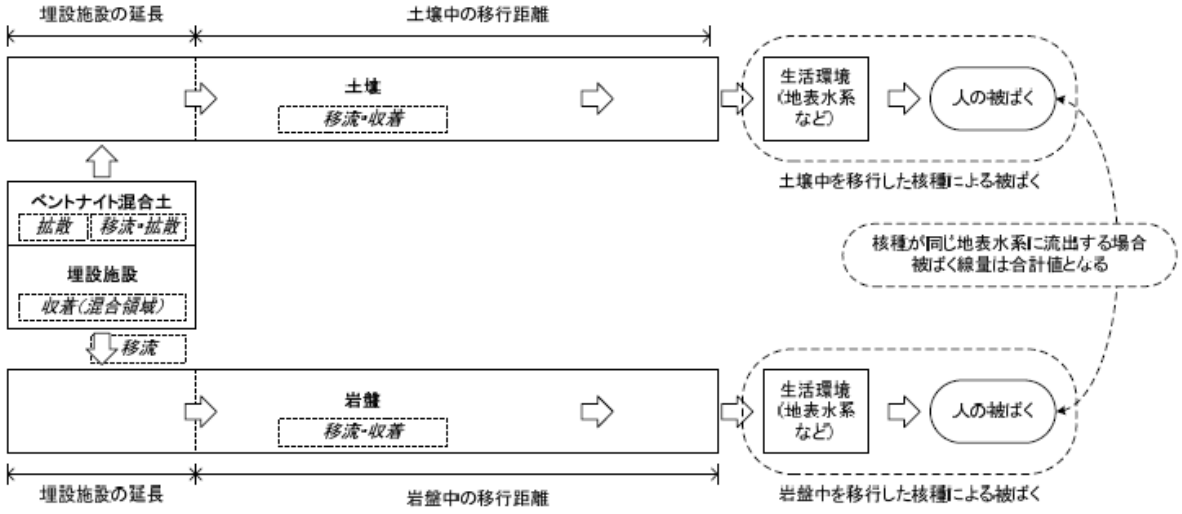



図 3.4-3　核種移行経路のモデル概念図（原図を一部修正）

ここで、埋設施設内は間隙水中の核種濃度が一様である領域として扱われ、核種ごとに設定した収着分配係数にしたがって核種が固相と液相に分配される。また、ベントナイト混合土は、埋

設施設から流出する地下水が通過する領域の大きさに応じて移流と拡散を考慮する領域（地下水が通過する領域）と拡散のみを考慮する領域（地下水が通過しない領域）に区分される。なお、ベントナイト混合土が設置されていない領域（コンクリートピット底部）からの放出は移流のみを考慮する。さらに、核種移行経路にあたる天然バリアの地質媒体は、1 次元の多孔質として近似し、移流-分散、平衡吸着による遅延および崩壊連鎖を考慮した 1 次元移流分散方程式により天然バリアから生物圏への核種移行フラックスを計算する。

本調査では、上記の評価モデルのうち、余裕深度処分の安全評価とも関連する、埋設施設（廃棄体特性は除く）とベントナイト混合土について、評価に使用するパラメータを抽出した。

[埋設施設における核種移行に関するパラメータ]
- 埋設施設の体積($m^3$)
- 埋設施設内の媒体 j の体積分率(-)
- 埋設施設内の媒体 j の間隙率(-)
- 埋設施設内の媒体 j の密度($kg/m^3$)
- 放射性核種 i に対する埋設施設内の媒体 j の分配係数($m^3/kg$)

[ベントナイト混合土からの核種放出に関するパラメータ]
- ベントナイト混合土の実効拡散係数($m^2/s$)
- ベントナイト混合土の地下水流速(m/s)
- ベントナイト混合土の間隙率(-)
- ベントナイト混合土の密度($kg/m^3$)
- 放射性核種 i に対するベントナイト混合土の分配係数($m^3/kg$)
- 埋設施設を通過する地下水流量($m^3/a$)
- ベントナイト混合土の拡散寄与面積($m^2$)
- ベントナイト混合土厚さ(m)
- ベントナイト混合土から土壌へ流出する地下水流量($m^3/a$)

また、原子力学会では、地下水シナリオにおける主要パラメータの変動に伴う被ばく線量への寄与について、感度解析を行い、最大被ばく線量に対する各パラメータの偏順位相関係数（表 3.4-3）を求め、それらの相対的重要度を整理している。その結果は、おおよそ以下の通りである。

- 埋設施設の分配係数および地下水流入量などの埋設施設からの放射性核種放出に係るパラメータは、ほとんどの核種で重要度が高い。
- H-3 は短半減期の核種であり、移行時間に関連するパラメータ（地下水流速，移行距離）が特に重要となる。

・ ベントナイト混合土の実効拡散係数及び分配係数の感度は相対的に大きくない。

表 3.4-3 最大被ばく線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧

| 核種<br>（半減期 [a]） | H-3<br>(1.23E+1) | C-14<br>(5.70E+3) | Ni-59<br>(1.01E+5) | Nb-94<br>(2.03E+4) | Tc-99<br>(2.11E+5) | I-129<br>(1.57E+7) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 埋設施設 $K_d$ | -0.05 | -0.95 | -0.85 | -0.78 | -0.68 | -0.82 |
| 地下水流入量 | 0.73 | 0.88 | 0.72 | 0.66 | 0.87 | 0.91 |
| 地下水流出割合（土） | 0.25 | 0.04 | 0.19 | 0.26 | 0.04 | -0.06 |
| ベントナイト $D_e$ | 0.12 | 0.36 | 0.23 | 0.21 | 0.37 | 0.30 |
| ベントナイト $K_d$ | -0.05 | -0.11 | -0.13 | -0.22 | -0.03 | -0.04 |
| 地下水流出幅（土） | -0.34 | -0.05 | -0.08 | -0.17 | -0.03 | -0.05 |
| 地下水流速（土） | 0.36 | 0.06 | 0.26 | 0.28 | 0.06 | 0.12 |
| 土壌 $K_d$ | -0.03 | -0.12 | -0.27 | -0.30 | -0.04 | -0.16 |
| 地下水流出幅（岩） | -0.31 | -0.14 | -0.19 | -0.18 | -0.25 | -0.17 |
| 地下水流速（岩） | 0.48 | 0.29 | 0.35 | 0.32 | 0.41 | 0.31 |
| 岩盤 $K_d$ | -0.03 | -0.27 | -0.43 | -0.40 | -0.29 | -0.09 |
| 移行距離 | -0.74 | -0.30 | -0.46 | -0.50 | -0.34 | -0.28 |

埋設施設 $K_d$ ：埋設施設内の分配係数
地下水流入量 ：埋設施設へ流入する地下水流量
地下水流出割合（土） ：土壌へ流出する地下水流量の割合
ベントナイト $D_e$ ：ベントナイト混合土の実効拡散係数
ベントナイト $K_d$ ：ベントナイト混合土の分配係数
地下水流出幅（土） ：土壌へ流出する地下水流量の流出幅
地下水流速（土） ：土壌中の地下水流速
土壌 $K_d$ ：土壌の分配係数
地下水流出幅（岩） ：岩盤へ流出する地下水流量の流出幅
地下水流速（岩） ：岩盤中の地下水流速
岩盤 $K_d$ ：岩盤の分配係数
移行距離 ：土壌中及び岩盤中の核種の移行距離

表中の凡例

| |
|---|
| 偏順位相関係数の絶対値が 0.5 以下 |
| 偏順位相関係数の絶対値が 0.1 以下 |

なお、参考に、六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター廃棄物埋設事業許可申請書[44]で使用されている地下水中の放射性物質が移行する尾鮫沼の沼産物摂取による内部被ばくの計算に用いるパラメータおよびその数値を表 表 3.4-4 および表 3.4-5 に、線量当量の計算に用いる共通パラメータ及びその数値を表 3.4-6 に示す。

表 3.4-4 地下水中の放射性物質が移行する尾鮫沼の沼産物摂取による内部被ばくの計算に用いるパラメータ及びその数値１

| 記号 | パラメータ | 数値 | 備　考 |
|---|---|---|---|
| $L_c$ | 核種が流入する覆土の地下水流向方向の長さ　(m) | 30 | |
| $\varepsilon_c$ | 覆土の間隙率　(—) | 0.46 | 段丘堆積層の値 |
| $\rho_c$ | 覆土の粒子密度　(kg/m$^3$) | 2700 | 段丘堆積層の値 |
| $K_{dc}(i)$ | 覆土の核種 i の分配係数 (ml/g) | | |
| $U_c$ | 覆土の地下水流束　(m/y) | 10 | |
| $Q_{i0}$ | 埋設設備全体への浸入水量 (m$^3$/y) | 660 | |
| $Q_{C0}$ | 埋設設備から覆土への流出水量　(m$^3$/y) | 60 | |
| $Q_{g0}$ | 埋設設備から鷹架層中部層への流出水量　(m$^3$/y) | 600 | |
| $Q_C$ | 覆土内地下水流量　(m$^3$/y) | 2,700 | |
| $Q_g$ | 鷹架層中部層内地下水流量 (m$^3$/y) | 600 | |
| P(j) | 埋設設備内の媒体 j の体積分率　(—) | ｾﾒﾝﾄ系充てん材(廃棄体)　:　0.141<br>ｾﾒﾝﾄ系充てん材(埋設設備)　:　0.342<br>コンクリート　:　0.321 | |
| ε(j) | 埋設設備内の媒体 j の間隙率 (—) | ｾﾒﾝﾄ系充てん材(廃棄体)　:　0.35<br>ｾﾒﾝﾄ系充てん材(埋設設備)　:　0.35<br>コンクリート　:　0.35 | |
| ρ(j) | 埋設設備内の媒体 j の粒子密度　(—) | ｾﾒﾝﾄ系充てん材(廃棄体)　:　2,500<br>ｾﾒﾝﾄ系充てん材(埋設設備)　:　2,500<br>コンクリート　:　2,600 | |

表 3.4-5 地下水中の放射性物質が移行する尾鮫沼の沼産物摂取による内部被ばくの計算に用いるパラメータ及びその数値２

| 記号 | パラメータ | 数値 | 備　考 |
|---|---|---|---|
| $L_b$ | ベントナイトを混合した覆土の厚さ　(m) | 2.0 | |
| $\varepsilon_b$ | ベントナイトを混合した覆土の間隙率　(—) | 0.40 | |
| $\rho_b$ | ベントナイトを混合した覆土の粒子密度　(kg/m$^3$) | 2,700 | |
| $K_{db}(i)$ | ベントナイトを混合した覆土の核種 i の分配係数　(m$^3$/kg) | 別表参照 | |
| $U_b$ | ベントナイトを混合した覆土の地下水流束　(m/y) | 0.01 | |

表 3.4-6 線量当量の計算に用いる共通パラメータ及びその数値

| 記号 | パラメータ | 数値 | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| Kd(i,j) | 埋設設備内の媒体 j の核種 i の分配係数 ($m^3/kg$) | | セメント系充てん材 | | コンクリート | 実測データから設定 |
| | | | 廃棄体 | 埋設設備 | |
| | | H-3 : | 0 | 0 | 0 | |
| | | C-14 : | $5\times10^{-2}$ | $5\times10^{-2}$ | $5\times10^{-2}$ | |
| | | Co-60 : | $7\times10^{-1}$ | $7\times10^{-1}$ | $1\times10^{-1}$ | |
| | | Ni-59 : | $4\times10^{1}$ | $4\times10^{1}$ | $8\times10^{-2}$ | |
| | | Ni-63 : | $4\times10^{-1}$ | $4\times10^{-1}$ | $8\times10^{-2}$ | |
| | | Sr-90 : | $1\times10^{-2}$ | $1\times10^{-2}$ | $1\times10^{-2}$ | |
| | | Nb-94 : | $4\times10^{1}$ | $4\times10^{-1}$ | $8\times10^{-2}$ | |
| | | Tc-99 : | $3\times10^{-4}$ | $3\times10^{-4}$ | 0 | |
| | | I-129 : | 0 | 0 | 0 | |
| | | Cs-137: | $3\times10^{-2}$ | $3\times10^{-2}$ | $3\times10^{-2}$ | |
| | | Am-241: | $1\times10^{1}$ | $1\times10^{1}$ | $1\times10^{1}$ | |
| | | その他のα※ | $1\times10^{1}$ | $1\times10^{1}$ | $1\times10^{1}$ | ※Pu で代表 |
| Kdc(i) | 覆土の媒体 i の分配係数 ($m^3/kg$) | | 覆土 | | | 実測データから、土壌の値と等しいとして設定 |
| | | H-3 : | $1\times10^{3}$ | | | |
| | | C-14 : | $3\times10^{1}$ | | | |
| | | Co-60 : | $2\times10^{-1}$ | | | |
| | | Ni-59 : | $2\times10^{-1}$ | | | |
| | | Ni-63 : | $2\times10^{-1}$ | | | |
| | | Sr-90 : | $7\times10^{-2}$ | | | |
| | | Nb-94 : | $2\times10^{-1}$ | | | |
| | | Tc-99 : | $8\times10^{-4}$ | | | |
| | | I-129 : | $3\times10^{-4}$ | | | |
| | | Cs-137: | $1\times10^{0}$ | | | |
| | | Am-241: | $2\times10^{0}$ | | | |
| | | その他のα※ | $2\times10^{0}$ | | | ※Pu で代表 |
| Kdb(i) | ベントナイトを混合した覆土の核種 i の分配係数 $m^3/kg$ | | ベントナイトを混合した覆土 | | | 実測データから設定 |
| | | H-3 : | 0 | | | |
| | | C-14 : | $1\times10^{-3}$ | | | |
| | | Co-60 : | $5\times10^{-2}$ | | | |
| | | Ni-59 : | $5\times10^{2}$ | | | |
| | | Ni-63 : | $5\times10^{-2}$ | | | |
| | | Sr-90 : | $1\times10^{-1}$ | | | |
| | | Nb-94 : | $5\times10^{-2}$ | | | |
| | | Tc-99 : | 0 | | | |
| | | I-129 : | 0 | | | |
| | | Cs-137: | $1\times10^{1}$ | | | |
| | | Am-241: | $1\times10^{1}$ | | | ※Pu で代表 |
| | | その他のα※ | $1\times10^{0}$ | | | |

### 3.4.3　原子力学会における余裕深度処分の安全評価パラメータの検討

原子力学会[41]で検討された余裕深度処分施設の地下水シナリオの安全評価では、図 3.4-4 に示すように、大きく、廃棄体層（廃棄体とその周囲に充てんされたセメント系充てん材）、その外側に設置されるセメント系材料層（コンクリートピット、低拡散層）、さらにその外側のベントナイト系材料層、そして、その外側の天然バリア（岩盤）の 4 つのパートに分けて評価モデルが構築されている。

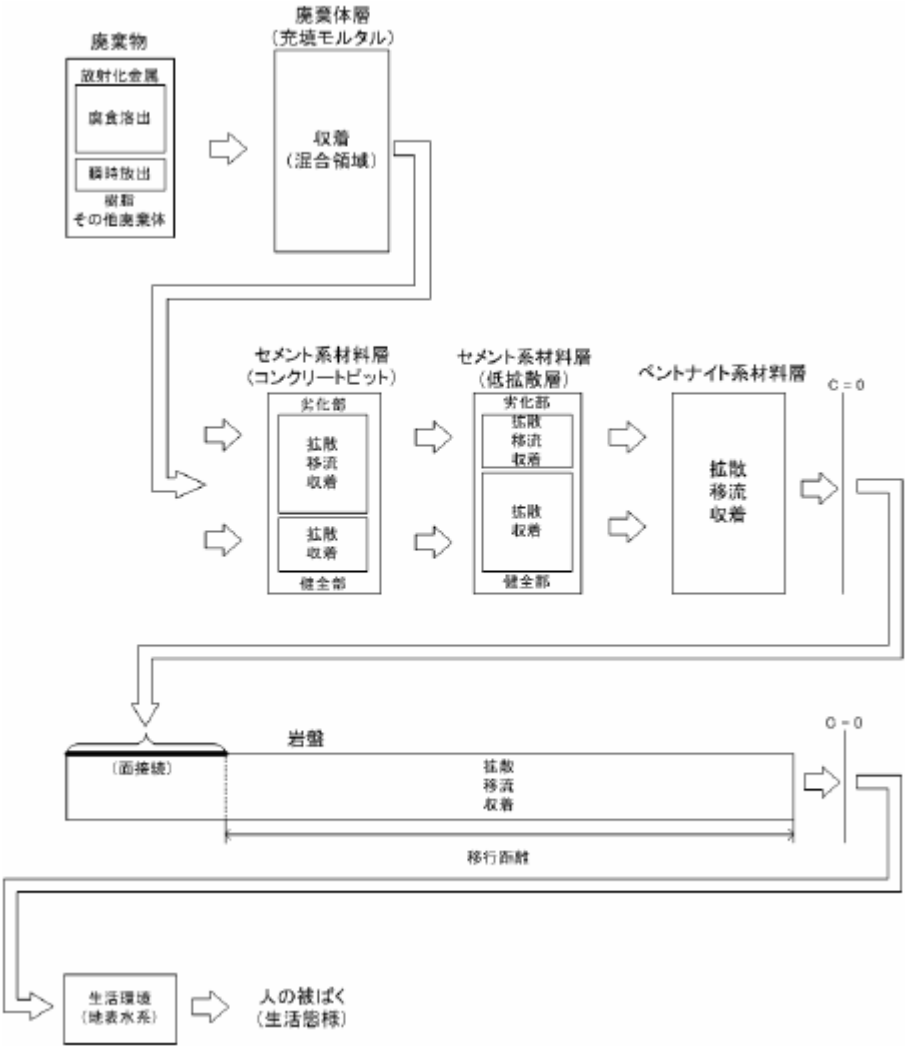



図 3.4-4 概念的な評価モデル

ここで、廃棄体層内は間隙水中の核種濃度が一様である領域として扱われ、核種ごとに設定したセメント系材料に対する収着分配係数にしたがって核種が固相と液相に分配される。また、廃棄体のうち放射化金属については溶出率を考慮する。また、セメント系材料層については、長期的な劣化を考慮し、健全な部分（放射性核種は拡散により移行）と局所的に劣化した部分（放射性核種は移流分散により移行）の二つが存在するとしている。ベントナイト系材料層については、

あらかじめ想定される変質を考慮して設計・施工できるため、長期的にもベントナイト系材料層の透水係数は岩盤に比べて小さいことが期待できるため、放射性核種は拡散移流により移行するとしている。なお、核種移行経路にあたる天然バリアの地質媒体は、岩盤に割れ目が少ない場合には多孔質として近似し、移流-分散、平衡吸着による遅延および崩壊連鎖を考慮した1次元移流分散方程式により天然バリアから生物圏への核種移行フラックスを計算するとしている。

このような評価モデルをもとに、地下水シナリオにおける被ばく線量評価を行う際に用いる主要パラメータについて、モンテカルロシミュレーションに基づく確率論的解析手法を用いた線量評価を行い、それぞれが線量に与える寄与を検討している。主要なパラメータの設定値としては、線量評価結果の全体像が含まれるように、感度解析の基準値を設定し、その振れ幅は一律に基準値の 10 分の 1 から 10 倍としている。（分布形状は対数一様分布）

表 3.4-7 に感度解析のための主要なパラメータの基準値を、表 3.4-8 に最大線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧を示す。

偏順位相関係数の絶対値は、最大線量に対する各パラメータの感度の程度、すなわち寄与の強さを表し、正負の記号は評価結果との相関性、すなわち正相関であるか逆相関であるかを表している。この感度解析の結果より、以下の傾向が見られるとしている。

- モルタル拡散係数又はセメント系材料 Kd といった人工バリアからの放出抑制効果はいずれの核種においても感度が大きい。
- 数千年から数万年の半減期を有する C-14 及び Ni-59 はともに、人工バリアによる放出抑制、天然バリアにおける移行遅延ともに感度が大きい。
- 半減期が長く収着性の乏しい Cl-36、I-129 などは溶出率、モルタル拡散係数などの人工バリア放出抑制効果の感度は大きいが、天然バリアにおける移行遅延の感度は小さい。
- ベントナイト系材料の透水係数に依存して設定される施設浸入水量は、半減期が長く収着性の乏しい核種も含めて感度を有する。
- 地表水希釈水量は核種によらず線量に比例するため、総じて感度が大きい。
- ベントナイト Kd については、すべての核種で感度が小さい。

表 3.4-7　感度解析のための主要なパラメータの基準値

| パラメータ* | | 感度解析のための基準値 | 備考 |
|---|---|---|---|
| 施設浸入水量 | $m^3/a$ | 0.06 | **附属書 3（参考）**による |
| 溶出率<br>（全廃棄物に一律に設定） | 1/a | 3.3E-05 | 溶出率を適用し難い廃棄物の存在を考慮し，**附属書 3（参考）**より 1 桁大きな値に設定 |
| 岩盤中移行距離 | m | 200 | **附属書 3（参考）**における遅い流速の移行距離に設定 |
| モルタル拡散係数 | $m^2/s$ | 1E-12 | **附属書 3（参考）**による<br>劣化部割合は拡散係数に含まれるものとして設定 |
| 地下水実流速 | m/a | 0.1 | **附属書 3（参考）**による |
| 廃棄体 Kd | $m^3/kg$ | **附属書 3 表 6** による | 事例評価のための設定値<br>なお，廃棄体，ピット，モルタルの分配係数はセメント系材料として一律に設定 |
| コンクリートピット Kd | $m^3/kg$ | | |
| モルタル Kd | $m^3/kg$ | | |
| ベントナイト Kd | $m^3/kg$ | | |
| 岩盤 Kd | $m^3/kg$ | | |
| 地表水希釈水量 | $m^3/a$ | 1E+08 | **附属書 2（参考）**による |

注*　上記の主要なパラメータ以外の設定は**附属書 3（参考）**による一定の値とした。なお，分配係数については，**附属書 3 表 6** での設定値が 0 の場合には，0.0001 を仮定した。

表 3.4-8　最大線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧

| パラメータ | | 偏順位相関係数 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C-14 | Cl-36 | Ni-59 | Tc-99 | I-129 | Np-237 |
| 施設浸入水量 | $m^3/a$ | 0.20 | 0.39 | 0.18 | 0.39 | 0.41 | 0.42 |
| 溶出率 | 1/a | 0.48 | 0.85 | 0.22 | 0.80 | 0.68 | 0.08 |
| 岩盤中移行距離 | m | -0.62 | -0.20 | -0.61 | -0.19 | -0.06 | -0.18 |
| モルタル拡散係数 | $m^2/s$ | 0.65 | 0.66 | 0.58 | 0.69 | 0.74 | 0.88 |
| 地下水実流速 | m/a | 0.61 | 0.21 | 0.58 | 0.19 | 0.04 | 0.15 |
| セメント系材料 Kd | $m^3/kg$ | -0.66 | -0.40 | -0.68 | -0.60 | -0.77 | -0.93 |
| ベントナイト Kd | $m^3/kg$ | -0.02 | -0.01 | -0.08 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 岩盤 Kd | $m^3/kg$ | -0.35 | -0.06 | -0.56 | -0.06 | -0.01 | -0.19 |
| 地表水希釈水量 | $m^3/a$ | -0.56 | -0.95 | -0.53 | -0.93 | -0.94 | -0.85 |

：偏順位相関係数の絶対値が 0.5 以下

：偏順位相関係数の絶対値が 0.1 以下

### 3.4.4　原安機構による余裕深度処分の安全評価パラメータの検討（その１）

原子力安全基盤機構（原安機構）[26]では、人工バリアの初期性能及び長期変質に関わる不確実性と、天然バリアに関わるバリア性能の不均質性・不確実性とが、安全性能に与える影響度を評価する目的で検討を行っている。具体的には，各パラメータを単位量（例えば±一桁）だけ変化させ，安全評価結果に与える影響の大きさ（感度）を把握するとともに，その感度の大小関係に基づいてパラメータの重要度ランクを示している。

（1）モデル、パラメータ等の設定

感度解析は、暫定的なレファレンスケースにおける設定値の周辺で各パラメータの入力値を統計的に変動させた感度解析（以下、「case a」とする。）と、文献調査から得られた知見を基に、より幅広い不確実性を入力値の変動範囲とした不確実性解析（以下、「case b」とする。）の２ケースを実施している。例えば、被ばく線量に支配的となる C-14oa（放射化金属起源の有機形態炭素）のセメント系材料に対する分配係数の範囲は、case a では 1.0E-01～1.0E+01、case b では 1.0E-04～2.5E+06 としている。また、対象核種は、C-14o(一般の有機炭素)、 C-14og（黒鉛起源の有機炭素） C-14oa（放射化金属起源の有機炭素)、 C-14i（無機炭素)、Cl-36、 Tc-99 、I-129 、Np-237 および Pu-239 である。

感度解析に用いた地下水シナリオの性能評価モデルとモデルパラメータの関係を図 3.4-5 に、また、case a および case b のパラメータ設定範囲をそれぞれ表 3.4-9 および表 3.4-10 に示す。なお、人工バリアにおけるモデルは，拡散経路および移流経路を考慮した 2 経路モデルとし、それぞれの経路の大きさは移流面積比率により制御するとしている。あわせて、case a を想定して、セメント系材料及びベントナイト系材料の劣化に伴う部材の間隙率の変化と透水係数及び実効拡散係数との関係をモデル化し，劣化に伴う施設浸入水量の変動を考慮した感度解析も実施している。

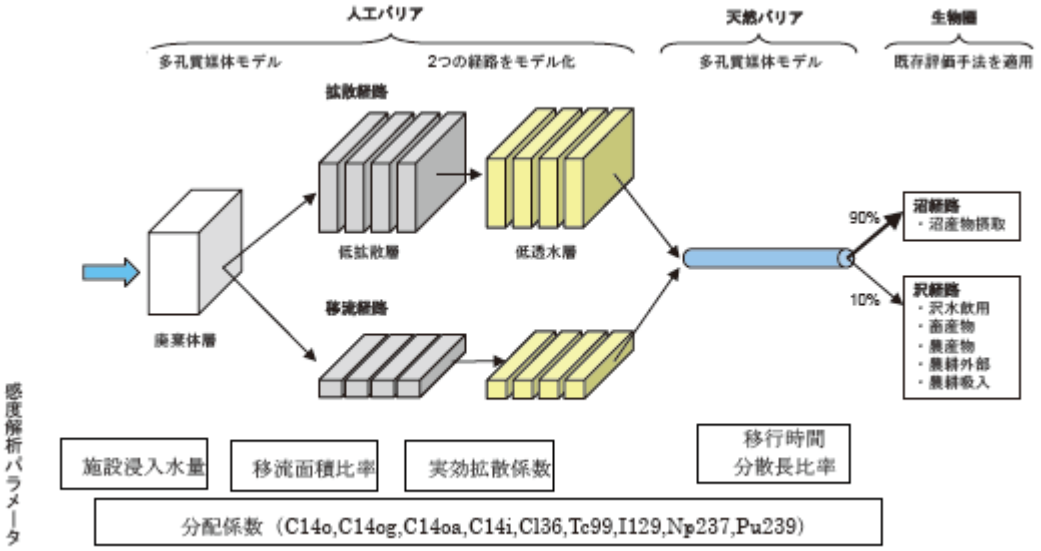



図 3.4-5 感度解析におけるモデルとパラメータの関係

表 3.4-9　case a のパラメータ設定範囲

| 領域 | パラメータ | | 単位 | パラメータ設定範囲 | | 分布形 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 最小値 | 最大値 | |
| 廃棄体充填材 | 溶出率 A | | 1/yr | 1.0E-06 | 1.0E-04 | 対数一様 |
| | 溶出率 B | | 1/yr | 3.0E-06 | 3.0E-04 | 対数一様 |
| | 溶出率 C | | 1/yr | 1.0E-05 | 1.0E-03 | 対数一様 |
| | 溶出率 D | | 1/yr | 3.0E-05 | 3.0E-03 | 対数一様 |
| | 溶出率 E | | 1/yr | 瞬時溶出 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E+00 | 1.0E+02 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 3.0E+00 | 3.0E+02 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E+01 | 1.0E+03 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Tc99 | ml/g | 3.0E-02 | 3.0E+00 | 対数一様 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+03 | 1.0E+05 | 対数一様 |
| | 廃棄体中の充填材体積割合 | | - | 0.5 | | 固定 |
| | 廃棄体充填材間隙率 | | - | 0.35 | | 固定 |
| 人工バリア | 施設通過流量 | | m³/yr/m | 3.0E-03 | 6.0E-01 | 対数一様 |
| | 移流面積比率 | | - | 0.01 | 0.25 | 対数一様 |
| 低拡散層 | 実効拡散係数（健全部） | | m²/s | 1.0E-13 | 1.0E-11 | 対数一様 |
| | 実効拡散係数（亀裂部） | | m²/s | 2.0E-12 | 2.0E-10 | 対数一様 |
| | 間隙率（健全部） | | - | 0.2 | | 固定 |
| | 間隙率（亀裂部） | | - | 0.35 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E+01 | 1.0E+03 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Tc99 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+03 | 1.0E+05 | 対数一様 |
| 低透水層 | 実効拡散係数 | | m²/s | 2.0E-11 | 2.0E-09 | 対数一様 |
| | 間隙率 | | - | 0.4 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Tc99 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 5.0E-01 | 5.0E+01 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| 天然バリア | 天然バリア移行時間 | | yr | 1,000 | 20,000 | 対数一様 |
| | 天然バリア分散長比率 | | - | 1.0E-02 | 1.0E+00 | 対数一様 |
| | 天然バリア間隙率 | | - | 0.47 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 7.0E-03 | 7.0E-01 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Tc99 | ml/g | 2.0E-02 | 2.0E+00 | 対数一様 |
| | | I129 | ml/g | 6.0E-03 | 6.0E-01 | 対数一様 |
| | | Np237 | ml/g | 2.0E+02 | 2.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 2.0E+02 | 2.0E+04 | 対数一様 |

（注）網掛けは固定したパラメータ

表 3.4-10　case b のパラメータ値の範囲

| 領域 | パラメータ | | 単位 | パラメータ設定範囲 | | 分布形 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 最小値 | 最大値 | |
| 廃棄体充填材 | 溶出率 A | | 1/yr | 1.0E-06 | 1.0E-04 | 対数一様 |
| | 溶出率 B | | 1/yr | 3.0E-06 | 3.0E-04 | 対数一様 |
| | 溶出率 C | | 1/yr | 1.0E-05 | 1.0E-03 | 対数一様 |
| | 溶出率 D | | 1/yr | 3.0E-05 | 3.0E-03 | 対数一様 |
| | 溶出率 E | | 1/yr | 瞬時溶出 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E+00 | 1.0E+02 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 3.0E+00 | 3.0E+02 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E+01 | 1.0E+03 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Tc99 | ml/g | 3.0E-02 | 3.0E+00 | 対数一様 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+03 | 1.0E+05 | 対数一様 |
| | 廃棄体中の充填材体積割合 | | - | 0.5 | | 固定 |
| | 廃棄体充填材間隙率 | | - | 0.35 | | 固定 |
| 人工バリア | 施設通過流量 | | $m^3/yr/m$ | 3.0E-03 | 6.0E-01 | 対数一様 |
| | 移流面積比率 | | - | 0.01 | 0.25 | 対数一様 |
| 低拡散層 | 実効拡散係数（健全部） | | $m^2/s$ | 1.0E-13 | 1.0E-11 | 対数一様 |
| | 実効拡散係数（亀裂部） | | $m^2/s$ | 2.0E-12 | 2.0E-10 | 対数一様 |
| | 間隙率（健全部） | | - | 0.2 | | 固定 |
| | 間隙率（亀裂部） | | - | 0.35 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E+01 | 1.0E+03 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Tc99 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+03 | 1.0E+05 | 対数一様 |
| 低透水層 | 実効拡散係数 | | $m^2/s$ | 2.0E-11 | 2.0E-09 | 対数一様 |
| | 間隙率 | | - | 0.4 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Tc99 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | I129 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Np237 | ml/g | 5.0E-01 | 5.0E+01 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 1.0E+02 | 1.0E+04 | 対数一様 |
| 天然バリア | 天然バリア移行時間 | | yr | 1,000 | 20,000 | 対数一様 |
| | 天然バリア分散長比率 | | - | 1.0E-02 | 1.0E+00 | 対数一様 |
| | 天然バリア間隙率 | | - | 0.47 | | 固定 |
| | 分配係数 | C14o | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14og | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14oa | ml/g | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 対数一様 |
| | | C14i | ml/g | 7.0E-03 | 7.0E-01 | 対数一様 |
| | | Cl36 | ml/g | 1.0E-08 | | 固定 |
| | | Tc99 | ml/g | 2.0E-02 | 2.0E+00 | 対数一様 |
| | | I129 | ml/g | 6.0E-03 | 6.0E-01 | 対数一様 |
| | | Np237 | ml/g | 2.0E+02 | 2.0E+04 | 対数一様 |
| | | Pu239 | ml/g | 2.0E+02 | 2.0E+04 | 対数一様 |

（注）網掛けは固定したパラメータ

また、感度解析の結果は，天然バリアからの核種の放出率及び想定される被ばく経路での線量解析結果について，表 3.4-11 に示す方法で整理を行っている。

表 3.4-11 統計的解析結果のとりまとめ方法

| | 対象とする量 | 算定方法 | 目的 |
|---|---|---|---|
| 1 | 各バリアからの核種放出率の時間変化 | 廃棄体，人工バリア及び天然バリアからのフラックスの中央値の時間変化を算定 | 10,000 ケース，または，2500 ケースの解析結果の時間ステップ毎に中央値を抽出し，平均的な核種放出挙動を，核種毎に確認する。 |
| 2 | 最大線量 | 最大線量の分布範囲を算定 | 核種毎及び経路毎に線量換算して最大線量を算定し，最大線量の分布範囲を把握する。また，10μSv/yr 及び 300μSv/yr との比較を行い，主たる支配核種及び被ばく経路を確認する。 |
| 3 | 天然バリアでの核種ごとの最大放出率 | ムービングバンド法，相関係数，順位相関係数を用い各パラメータの感度の統計分析による評価を行う | ムービングバンド法では，各パラメータ値の設定範囲内で天然バリアからの核種放出率がとり得る最大値と最小値の比から各パラメータの感度の大きさを把握する。また，相関係数を用い，感度の大きなパラメータの抽出を行う。 |
| 4 | 被ばく線量 | 目標線量に対する SI 法による統計分析を実施する。 | 2 で最も大きな線量を示した「C-14oa－沼産物摂取」に対して SI 法により感度の大きなパラメータを抽出し，最大線量が 10μSv/yr を下回る割合を把握する。また，各被ばく経路，核種の合計の線量解析結果との比較を行う。 |

(2) 感度解析結果

感度解析結果のうち、被ばく線量の最大値に最も寄与する C-14oa（放射化金属起源の有機形態炭素）のパラメータ感度のランキングを表 3.4-12 に示す。以下に、感度解析結果のまとめを抜粋するが、概略、C-14oa 、Tc-99 および Cl-36 が被ばく線量に強く影響を及ぼす核種であること、これら核種の移行に寄与する安全評価上のパラメータで重要度の高いものは、天然バリア中の分配係数と移行時間、廃棄物の腐食速度で規定される溶出率、人工バリアの施設浸入水量であることが示されている。なお、ここで、case b では、分配係数の不確実性の幅を大きく設定したことで、低拡散層及び充填材領域での分配係数の感度が大きくなっている。

・ 天然バリアの性能（地下水の移行時間、分配係数、分散長）は、被ばく線量の最大値に最も寄与する C14(半減期 5、730 年）による線量に大きな影響を及ぼし、また、それ以外の核種の天然バリアからの核種放出率にも影響を及ぼすという解析結果が得られた。天然バリアの性能は、不均質である地質条件や地下水水理・化学環境に依存するため、具体的な検討を実施する際には、天然バリアに関わる不確実性の取り扱いや、パラメータの設定などを吟味して、対象となる処分場に見合う条件設定が必要であると考えられる。

・ 安全評価上重要なパラメータの一つとして挙げられた母岩の分配係数については、本検討においては幅広く不確実性を含んでいると想定して変動幅を大きく設定した。ただし、サイト

が決定され、サイト固有の安全評価を行う場合には、得られる情報により地下水移行経路に関するパラメータの不確実性の幅が低減できる可能性もあり、その場合は桁単位で変動する分配係数の不確実性（試験取得方法や取得データの解析への適用方法）の取り扱いが感度解析上、非常に感度の高いものとなる可能性がある。

・ 被ばく線量に支配的となる放射化金属に含まれる C14 の溶出率は、金属廃棄物の腐食速度と表面積の大きさによって定義される。腐食速度は周辺の環境に影響されるため、これを現実的に設定するには、溶出率の算定根拠や廃棄体が設置される地層での地下水化学環境の不確実性について検討しておくことが有効であると考える。また、溶出率は、安全評価の支配方程式からも明らかなように、人工バリアの性能と関連することから、人工バリア内の核種移行に対して影響の大きいパラメータであると考えられる。

・ 廃棄体充填材や低拡散層における C14 に対する分配係数は、幅広い不確実性を有しており、C14 の移行挙動（有機、無機、ガス）によって大きく異なるものと考えられることから、安全評価において、C14 の人工バリア内部での移行形態の取り扱いは C14 のバリア内での遅延に関して大きな影響があると考える。

・ 本検討の感度解析結果においては、人工バリアに関わるパラメータの感度は、天然バリアに係るパラメータや溶出率の感度に比較して小さい。しかしながら、人工バリアの性能に応じて算出される施設浸入水量は天然バリアからの核種放出率及び被ばく線量に対して明らかに影響を及ぼしており、施設浸入水量に対する人工バリア部材の長期的安定性における不確実性の検討が重要となる。更に、不確実性を取り扱う観点からは、人為的なコントロールが可能であるパラメータとして、この不確実性の検討が処分施設の安全性を明示する上で有効であると考えられる。

・ Tc99 及び Cl36 は、線量評価上、C14 に次いで被ばく線量に強く影響を及ぼす核種であるという結果が得られた。分配係数が小さく、半減期が移行時間に比べて長いこれらの核種では人工バリアや天然バリアにおける核種移行の遅延効果が小さく、人工バリアの核種放出率と天然バリアからの核種放出率がほぼ同等となる解析結果となった。そのため、これら核種の被ばく線量評価では、天然バリアによる核種移行抑制性能にあまり期待出来ないため、その核種が含まれる廃棄体の溶出率や、人工バリアの核種移行抑制機能を支配するパラメータである実効拡散係数等が重要度の高いパラメータとなる。

表 3.4-12 統計的な処理の手法毎の感度ランキング（C-14oa の沼産物摂取の例）

| | | case a | | case b | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 領域 | パラメータ | MB 法順位 | SI 法順位 | MB 法順位 | SI 法順位 | 相関係数順位 | 順位相関係数順位 | 順位相関係数 |
| 廃棄体充填材 | 溶出率 A | **3** | 5 | | 8 | **3** | 7 | 0.06 |
| | 溶出率 B | | | | | | | |
| | 溶出率 C | 8 | 7 | | 10 | 7 | 9 | 0.05 |
| | 溶出率 D | 7 | 6 | | 9 | 8 | 11 | 0.03 |
| | 溶出率 E | | | | | | | |
| | 分配係数 | 6 | 4 | **3** | **1** | 5 | **1** | 0.57 |
| | 廃棄体中の充填材体積割合 | | | | | | | |
| | 廃棄体充填材間隙率 | | | | | | | |
| 人工バリア | 施設浸入流量 | 4 | **3** | 4 | 4 | **1** | **3** | 0.22 |
| | 移流面積比率 | | | 8 | | | 8 | 0.06 |
| 低拡散層 | 実効拡散係数（健全部） | | | 5 | 7 | 10 | 14 | 0.02 |
| | 実効拡散係数（亀裂部） | | 9 | 7 | | | 23 | 0.01 |
| | 分配係数（健全部） | | 8 | **2** | 5 | 9 | 4 | 0.19 |
| | 分配係数(移流部) | | | **1** | **2** | 6 | **2** | 0.48 |
| | 間隙率（健全部） | | | 10 | | | 16 | 0.01 |
| | 間隙率（亀裂部） | | | | | | | |
| 低透水層 | 実効拡散係数（健全部） | | | | | | 10 | 0.04 |
| | 実効拡散係数（亀裂部） | | | | | | | |
| | 分配係数（健全部） | | | | | | | |
| | 分配係数(移流部) | | | | | | | |
| | 間隙率（健全部） | | | | | | | |
| | 間隙率（亀裂部） | | | | | | | |
| 天然バリア | 天然バリア移行時間 | **2** | **2** | 9 | 6 | **2** | 6 | 0.10 |
| | 天然バリア分散長比率 | 5 | 10 | | | | | |
| | 分配係数 | **1** | **1** | 6 | **3** | 4 | 5 | 0.13 |
| | 天然バリア間隙率 | | | | | | | |

### 3.4.5　原安機構による余裕深度処分の安全評価パラメータの検討（その２）

原子力安全基盤機構（原安機構）[27]では、余裕深度処分の安全評価における不確実性のうち、パラメータの不確実性に着目した検討を行っている。具体的には、安全評価の重要度パラメータについて不確実性の定量評価を試みるとともに、その結果を用いて被ばく評価を行いパラメータの重要性等を検討し、余裕深度処分の安全評価におけるパラメータの不確実性に対する確率論的手法の適用性を検討している。この検討では、地表面近接前の地下水シナリオと地表面近接後の近接シナリオを対象としているが、ここでは、人工バリアに関係する地下水シナリオについて記載することとした。

(1) パラメータの設定

不確実性及びその影響評価の観点から確率論的に設定するパラメータの一覧を表 3.4-13 に、ベントナイト系材料の透水係数及び拡散係数の設定を表 3.4-14 に、セメント系材料の透水係数及び拡散係数の設定を表 3.4-15 に示す。また、表 3.4-16 に廃棄体からの溶出率及び施設浸透水量の設定を、表 3.4-17 に岩、ベントナイト系材料及びセメント系材料に対する分配係数の設定を示す。

表 3.4-13　不確実性評価を対象としたパラメータの一覧

| シナリオ | 部位 | パラメータ | 備考 |
|---|---|---|---|
| 地下水シナリオ | 人工バリア | 低透水層の透水係数 | 透水係数との関係に留意しつつ施設浸透水量として設定 |
| | | 低拡散層の拡散係数 | 以下に対して設定<br>・劣化前<br>・劣化後 |
| | | 分配係数 | 以下に対して設定<br>・コンクリート系部材<br>・ベントナイト系部材 |
| | | 廃棄体溶出率 | 以下に対して設定<br>・放射化金属<br>・CB<br>・BP<br>・樹脂等 |
| | 天然バリア | 分配係数 | 母岩 |
| 近接シナリオ | 風化帯 | 風化帯の分配係数 | |
| | | 風化速度 | |
| | | 降雨涵養量 | |

表 3.4-14　ベントナイト系材料の透水係数及び拡散係数の設定

| パラメータ | 初期値 | 劣化過程 | 終局値 |
|---|---|---|---|
| 乾燥密度：$\rho_d$ [Mg/m³]（100%ベントナイトなので＝有効粘土密度） | 最小値：1.5<br>最大値：1.7<br>一様分布<br>粒子密度$\rho$：2.7 | セメント溶脱深さ$d(t)$の関数 (※) | 1.0～1.1<br>溶脱深さ 1.3m として左式より算定 |
| 間隙率：$\varepsilon$ [－] | $\rho_d$の関数<br>$\varepsilon = 1 - \rho_d / \rho$ | $\rho_d$の関数<br>$\varepsilon = 1 - \rho_d / \rho$ | $\rho_d$の関数<br>左式より算定すると、0.64 |
| 透水係数：$k$ [m/s] | $\rho_d$の関数<br>$k = 5.4 \cdot 10^{-11.85\rho_d + 5.78}$<br>ただし、$\rho_d$=1Mg/m³の状態の1E-9m/sを最大とする | 初期値と終局値を一次線形補間 | 乾燥密度 1Mg/m³の状態の 1E-9m/s を終局値として設定 |
| 実効拡散係数：De[m²/s] | $\rho_d$の関数<br>陰イオン：$De^A = 10^{-17.1\rho_d + 16.6}$<br>中性：　$De^N = 10^{-16.2\rho_d + 16.0}$<br>陽イオン：$De^C = 10^{-16.1\rho_d + 16.0}$<br>ただし、$D^* \times \varepsilon$を最大とする。<br>$D^*$：自由水中の拡散係数（2E-9m²/s） | 初期値と終局値を一次線形補間 | 自由水中の拡散係数 2E-9m²/s と間隙率εの終局値より、1.3E-9 m²/s として設定 |
| 備考 | 分布を与えるのは$\rho_d$のみ。残りのパラメータは$\rho_d$の関数として設定。 | 劣化速度はセメントの溶脱速度に依存 | 終局状態に至る時間は、セメントの溶脱速度に依存するため、85000 年（影響物質なし）及び 300 年（影響物質あり） |

※　乾燥密度を溶脱深さにより定める関数：$\rho_d(t) = \rho_{d0} \times \dfrac{V_0}{V_0 + V_d(t)}$

$$= \rho_{d0} \times \frac{47.6}{47.6 + 20.056 \times d(t) - 1.84 \times d(t)^2}$$

表 3.4-15　セメント系材料の透水係数及び拡散係数の設定

| パラメータ | 初期値 | 劣化後<br>(影響物質なし) | 劣化後<br>(影響物質あり) |
|---|---|---|---|
| 乾燥密度：$\rho_d$<br>[Mg/m³]<br>（100%ベントナイトであることから＝有効粘土密度） | $\varepsilon$の関数<br>$\rho_d = \rho(1-\varepsilon)$<br>粒子密度$\rho$：2.5 | $\varepsilon$の関数 | $\varepsilon$の関数 |
| 間隙率：$\varepsilon$<br>[−] | 最小値：0.1<br>最大値：0.3<br>一様分布 | 0.46<br>10cm/1000年をベースとしたルートt則（変更無し）で施設外側から順次溶脱劣化 | 0.46<br>300年後に溶脱が終了すると仮定し、時間線形かつ一様に低下させる |
| 透水係数：$k$<br>[m/s] | 最小値：5.4E-14<br>最大値：2.4E-08<br>対数一様分布 | 1E-5<br>固定<br>1000年で劣化して砂並みになることを想定し、初期値との線形補間 | 1E-5<br>固定<br>300年で劣化して砂並みになることを想定し、初期値との線形補間 |
| 実効拡散係数：De<br>[m²/s] | 最小値：2.0E-14<br>最大値：5.8E-11<br>対数一様分布 | 最小値：2.1E-10<br>最大値：2.0E-9<br>最頻値：9.2E-10<br>三角分布<br>10cm/1000年をベースとしたルートt則（変更無し）で施設外側から順次溶脱劣化 | 最小値：2.1E-10<br>最大値：2.0E-9<br>最頻値：9.2E-10<br>三角分布<br>300年後に溶脱が終了すると仮定し、時間線形かつ一様に低下させる |
| 備考 | 間隙率と実効拡散係数に相関無し。 | 透水係数はひび割れ進展に伴い全体が一様に増加することを想定し、実効拡散係数は溶脱による外側（ﾍﾞﾝﾄﾅｲﾄ側）からの劣化を想定しているため、劣化速度、劣化位置が異なることに留意が必要。 | 影響物質によって300年掛けて一様に劣化することを想定。劣化速度は一次線形。 |

表 3.4-16　廃棄体からの溶出率及び施設浸透水量の設定

| パラメータ | 分布型 | 最小 | 最大 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 廃棄体溶出率 [1/y] | | | | |
| 放射化金属 | 対数一様 | 1.0E-07 | 1.0E-03 | |
| CB | 対数一様 | 1.0E-07 | 1.0E-03 | |
| BP | 対数一様 | 6.0E-06 | 2.0E-02 | |
| 樹脂等 | 固定 | 1 | 1 | |
| 施設浸透水量 [m³/y] | 透水係数から簡易式により導出 | 4.6E-06 | 1.7E-02 | 算術平均：1.3E-04<br>標準偏差：9.9E-04 |

CB：チャンネルボックス、BP：バーナブルポイズン

表 3.4-17 岩、ベントナイト系材料及びセメント系材料に対する分配係数の設定

| 元素 | 酸化還元状態 | 設定値（岩） | | | 設定値（ベントナイト系材料） | | | 設定値（セメント系材料） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 幾何平均 (m3/kg) | 分布幅（m^3/kg） | | 幾何平均 (m3/kg) | 分布幅（m^3/kg） | | 幾何平均 (m3/kg) | 分布幅（m^3/kg） | |
| | | | 下限値 | 上限値 | | 下限値 | 上限値 | | 下限値 | 上限値 |
| C | | 1.0E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-02 | 0.0E+00 | - | - | 3.2E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-01 |
| Cl | | 3.2E-05 | 1.0E-06 | 1.0E-03 | 0.0E+00 | - | - | 1.0E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-02 |
| Ca | | 1.0E-03 | 1.0E-06 | 1.0E+00 | 3.2E-04 | 3.2E-06 | 3.2E-02 | 1.0E-03 | 1.0E-06 | 1.0E+00 |
| Ni | | 1.0E-01 | 1.0E-03 | 1.0E+01 | 1.0E-01 | 3.2E-03 | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 3.2E-03 | 3.2E+00 |
| Zr | | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 | 1.0E+00 | 1.0E-02 | 1.0E+02 | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 |
| Nb | | 3.2E-01 | 3.2E-02 | 3.2E+00 | 1.0E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 1.0E-03 | 1.0E-06 | 1.0E+00 |
| Mo | | 1.0E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-02 | 0.0E+00 | - | - | 3.2E-03 | 3.2E-04 | 3.2E-02 |
| Tc | - | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 | 1.0E+01 | 3.2E-01 | 3.2E+02 | 1.0E-03 | 1.0E-06 | 1.0E+00 |
| | + | 0.0E+00 | - | - | 0.0E+00 | - | - | | | |
| Sn | | 1.0E+00 | 1.0E-03 | 1.0E+03 | 3.2E+00 | 1.0E-02 | 1.0E+03 | 1.0E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+01 |
| I | | 1.0E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-02 | 0.0E+00 | - | - | 1.0E-04 | 1.0E-06 | 1.0E-02 |
| Hf | | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 | 1.0E+00 | 1.0E-02 | 1.0E+02 | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 |
| Th | | 1.0E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+01 | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 |
| U | - | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 | 1.0E+01 | 3.2E-01 | 3.2E+02 | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 |
| | + | 3.2E-03 | 1.0E-04 | 1.0E-01 | 1.0E-01 | 3.2E-03 | 3.2E+00 | | | |
| Np | - | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 | 3.2E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+02 | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 |
| | + | 1.0E-02 | 3.2E-04 | 3.2E-01 | 1.0E-02 | 1.0E-03 | 1.0E-01 | | | |
| Pu | - | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 | 3.2E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+02 | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 |
| | + | 1.0E-01 | 3.2E-03 | 3.2E+00 | | | | | | |
| Am | | 3.2E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+02 | 3.2E+00 | 1.0E-01 | 1.0E+02 | 1.0E+00 | 3.2E-02 | 3.2E+01 |

(2) 解析結果による重要パラメータの抽出

全ての埋設地区分に対する加算産物摂取と沢・河川水利用による被ばくに関し、被ばくの上位核種と重要パラメータを表 3.4-18 に示す。これらの結果は、これまでに検討された決定論的評価や感度解析の結果と整合するものであり、相関係数を用いた重要パラメータに関して、その適応性が示唆されたとされている。

表 3.4-18 埋設地区分及び被ばく経路ごとの重要核種と重要パラメータ（地下水シナリオ）

| 埋設地区分（対象廃棄物） | No.1（金属等廃棄物） | No.2（樹脂等廃棄物） | No.3（金属等廃棄物） | No.4（樹脂等廃棄物） |
|---|---|---|---|---|
| 河川産物摂取 | C-14、Cl-36 | C-14、(Cl-36) | C-14、Cl-36 | C-14、I-129 |
| 沢・河川水利用 | Cl-36、(C-14) | C-14、Cl-36 | C-14、Cl-36 | I-129、(Cl-36) |
| 重要パラメータ（相関係数 0.4 以上） | ・セメントの実効拡散係数<br>・CB の溶出率 | ・岩盤の Kd [C-14] | ・放射化金属の溶出率<br>・CB の溶出率 | ・岩盤の Kd [C-14]<br>・岩盤の Kd [I-129] |

## 3.5　処分システムの状態設定

### 3.5.1　余裕深度処分における処分システムの状態設定のための時間枠

原子力安全委員会[23][24]では、余裕深度処分システムの状態は、通常、数十年程度と考えられる埋め戻し前段階と、埋設施設の埋め戻しが完了した埋め戻し後段階の大きく 2 つの段階に分けられ、さらに長期的な安全評価の観点からは、埋め戻し後段階について、以下の 4 期間に分けることが合理的であるとしている。また、時間スケールに応じた不確かさの程度の変化を考慮して、状態設定の時系列的な考え方を表 3.5-1 のように示している。

- 埋設施設及びその周辺の地質環境の状態変化が安定的な状態に向かう過渡的な期間（以下、「過渡的な期間」という。）
- 長期的に安定な地質環境のもと、人工バリアの状態が緩慢に変遷し、天然バリア、人工バリア共に機能が期待できる期間（以下、「多重バリア機能に期待する期間」という。）
- 埋設施設の状態設定における排除・低減が難しい内的・外的要因による不確かさの影響の顕在化により、主に天然バリアの機能のみに期待することとなる期間（以下、「主に天然バリア機能に期待する期間」という。）
- 隆起・侵食、海水準変動に伴い埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間（以下、「埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間」という。）

表 3.5-1 状態設定の時系列的な考え方

| | 埋め戻し前段階 | 埋め戻し後段階 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 期間 | 建設・操業期間 | 過渡的な期間 | 多重バリアの防護機能が発揮される期間 | | 埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間 |
| | | | 多重バリア機能に期待する期間 | 主に天然バリア機能に期待する期間 | |
| | 数十年（操業期間） | ～埋め戻し後数百年※ | ～約十万年※ | 約十万年~数十万年※ | 数十万年以降※ |
| 定義 | 埋設施設の埋め戻しが完了するまでの期間 | 埋設施設及びその周辺の地質環境の状態変化が安定的な状態に向かう過渡的な期間 | 長期的に安定な地質環境のもと、埋設施設の状態変化が緩慢に変遷していく期間 | 埋設施設の状態設定において、排除・低減が難しい内的・外的要因による影響が顕在化する期間 | 隆起・侵食、海水準変動に伴い埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間 |
| 状態設定の考え方 | ・現状の技術で合理的に達成できる範囲で人工バリアの損傷・劣化を抑制するよう設計されていること<br>・埋設施設の状態監視を行い、将来の状態設定に必要な情報の信頼性の向上を図るとともに、設計・施工の品質管理を適切に行うこと | ・不均一な過渡変化を勘案しつつ、人工バリアの損傷・劣化の影響が抑制・緩和されるように配慮すること<br>・埋め戻し後短期間で飽和状態にいたる等の、安全評価上の保守性を優先したモデル等を使用する際は、そのモデルが確かに安全評価上の保守性を満足していることを確認すること | ・科学技術的知見に基づく外挿を基本とした手法の利用<br>・これらのよりどころとする科学技術的知見の多くが評価期間に比して非常に短期間であることによって生じると考えられる不確かさを考慮した状態設定を行うこと | ・想定される劣化や、これを評価する際の不確かさを考慮してもなお期待できる機能については考慮<br>・バリア材に固有の物性として期待できる特性や、天然バリアが本来的に有する機能に基づくとともに不確かさに対する保守性を考慮した状態を設定すること | ・地質付近の地質環境の状態設定に応じた状態を設定すること<br>・埋設施設のみならず、地表付近の地質環境の状態を精度よく設定することは難しいことから、それらの不確かさを勘案しつつ、安全評価上の保守性を適切に考慮した状態設定 |

※；おおよその時間尺度

### 3.5.2　人工バリア状態設定に係る技術的検討事例

埋設施設の状態設定は、主要なバリア機能の長期的な変化を技術的に検討し、その結果を参考に行うことになる。以下に、余裕深度処分の人工バリア変遷のうち、特徴的と考えられるベントナイト変質と再冠水挙動に関するモデル評価例を示す。

（1）地層処分におけるセメント - ベントナイト相互作用の検討例

セメント - ベントナイト相互作用については、地層処分分野を中心に多くの知見が蓄積されてきている。ベントナイトは、セメントの高アルカリ間隙水により、ベントナイトを構成するモリロナイト層間陽イオン（主に Na）のイオン交換、モンモリロナイトと随伴鉱物である石英(quartz)、長石(feldspars)、黄鉄鉱（Pyrite）、石膏(Gypsum)などの溶解反応、ケイ酸カルシウム水和物などの二次鉱物の生成・沈殿が複合的に進行する[16]とされている。また、表 3.5-2 に示す 解析例[9]によれば、これらの過程で生成する二次鉱物の沈殿により、反応界面からある深さで緩衝材の空隙率はゼロとなり、ベントナイトの変質深さは、多くの場合、0.10-0.2m 程度であるとされている。これら解析では、透水係数や膨潤圧に関するモデル評価は行っていないが、拡散条件下でのセメント間隙水と緩衝材との反応により、緩衝材の空隙率が減少することで、HTO の実効拡散係数が減少したという報告[6][19]もあり、安全評価上の透水係数を、楽観的な設定では減少するとし、悲観的な設定では不変とする設定を行っている例もある。なお、ベントナイトの膨潤圧は、モンモリロナイトが完全に変質した部分のみをゼロと仮定している。

セメント系材料を使用する場合、多かれ少なかれ、セメント - ベントナイト相互作用の評価は必須である。OECD/NEA[13]では、セメント影響を考慮した設計の着眼点として、セメントの使用による欠点だけでなく、利点（強い核種収着性等）にも着目し、適切な材料を選定し、処分システム性能を最適化するよう化学バリアと緩衝材を設計することや、低 pH セメントを使用すること、接触界面が最小になるよう設計すること、相互作用の影響がごく一部のみとなるよう十分な量の緩衝材を設置するなどの対策例を示している。

表 3.5-2 地層処分におけるセメント - ベントナイトの相互作用評価例(at 25 °C)

| Solid | Initial pH | Kinetics | Porosity Feedback | Products | Alteration depth [m] | Porosity[%] | Ref. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Bentonite+ sand | 11.3 | Yes | Yes | CSH minerals, Ca-zeolite, celadonite, calcite | 0.1 @ 3.2 ka | 40 → 0@ 3.2 ka | ① |
| Claystone | 13.2 | No | Yes | CSH minerals, sepiolite, Ca-zeolite, illite | 0.6 @ 10 ka | 15 → 0@ 2.5 ka | ② |
| MX-80(1800kg m-3) | 12.5 | No | No | Illite, zeolites, CSH minerals, saponite, chlorite | 0.2 @ 100 ka | | ③ |
| Opalinus Clay | 13.5 | Yes | No | Illite, calcite, CSH minerals, zeolites, sepiolite | 0.1 @ 50 ka | 11 → 0@ 0.1 ka | ④ |
| Bure clay | 13.2 | | Yes | Illite, analcime, Ca-zeolites | 0.15 m @ 25 ka | 15 → 2@ 25 ka | ⑤ |
| Bentonite+ sand | 11 | Yes | Yes | Calcite, CSH minerals, Ca-zeolites | 0.01 @ 10 ka | 40 → 0@ 10 ka | ⑥ |
| Bentonite+ sand | 10, 10.5, 11, 11.5 | Yes | Yes | Calcite, celadonite, Ca-zeolites, CSH minerals | 0.015 @ 1 ka (pH 11) | 40 → 0@ 1 ka(pH 11) | ⑦ |
| Claystone | 12.5 | Yes | Yes | Calcite, muscovite, Ca-zeolite | < 0.02 @ 0.015 ka | Porosity decrease | ⑧ |
| Bure clay | 12.5 | Yes | Yes | CSH minerals, calcite, Ca-zeolites, illite, saponite, hydrotalcite | 0.01 @ 0.1 ka | 15 → 0 @ 0.1 ka | ⑨ |
| Generic clay | 12.5 | No | Yes | CSH minerals, calcite, gibbsite | 0.001 @ 0.07 ka | 10 → 0@ 0.07 ka | ⑩ |

①Savage et al.: Modelling the interaction of bentonite with hyperalkaline fluids. Applied Geochemistry 17: 207-223, 2002./②De Windt et al. (2004): Coupled modeling of cement/claystone interactions and radionuclide migration. Journal of Contaminant Hydrology 68, pp.165-182./③Gaucher et al.: Modeling diffusion of an alkaline plume in a clay barrier. Applied Geochemistry 19, pp.1505-1515, 2004./④Michau, N. : ECOCLAY II: Effects of cement on clay barrier performance. Andra Report C.RP.ASCM.04.0009, 2005./⑤Trotignon et al.: Predicting the long-term durability of concete engineered barriers in a geological repository for radioactive waste. Physics and Chemistry of the Earth 32, pp.259-274, 2007./⑥Ueda et al.: Evaluation of the kinetics of cement-bentonite interaction in a HLW repository using the reactive solute transport simulator. In: 15th International Conference on Nuclear Engineering, Nagoya, Japan, pp. ICONE15-10566, 2007./⑦Watson et al.: Modelling the interaction of low pH cements and bentonite. Issues affecting the geochemical evolution of repositories for radioactive waste. SKI Report 2007:30, 2007./⑧De Windt et al.: Reactive transport modeling of geochemical interactions at a concrete/argillite interface, Tournemire site (France), Physics and Chemistry of the Earth 33, S295-S305, 2009./⑨Marty et al.: Influence of reaction kinetics and mesh refinement on the numerical modelling of concrete/clay interactions. Journal of Hydrology 364, pp.58-72, 2009/⑩Kosakowski et al.: Evolution of a generic clay/cement interface: first reactive transport calculations utilizing a Gibbs energy minimization based approach for geochemical calculations. Journal of Environmental Science for Sustainable Society 3, pp.41-49, 2009.

(2) 余裕深度処分におけるセメント - ベントナイト相互作用の検討例

余裕深度処分では、ベントナイト（低透水層）系材料は、多量のセメント系材料で挟まれた状態で設置されるため、その長期特性を評価するためには、セメント系材料との相互作用について理解を深める必要がある。原子力学会[41]では、図 3.5-1 に示す余裕深度処分施設の人工バリア構成を考え、既存の試験などで得られた知見及び埋設施設の設計などを踏まえてパラメータ等の条件を設定し、ベントナイト系材料の透水係数についてモデル評価を実施している。

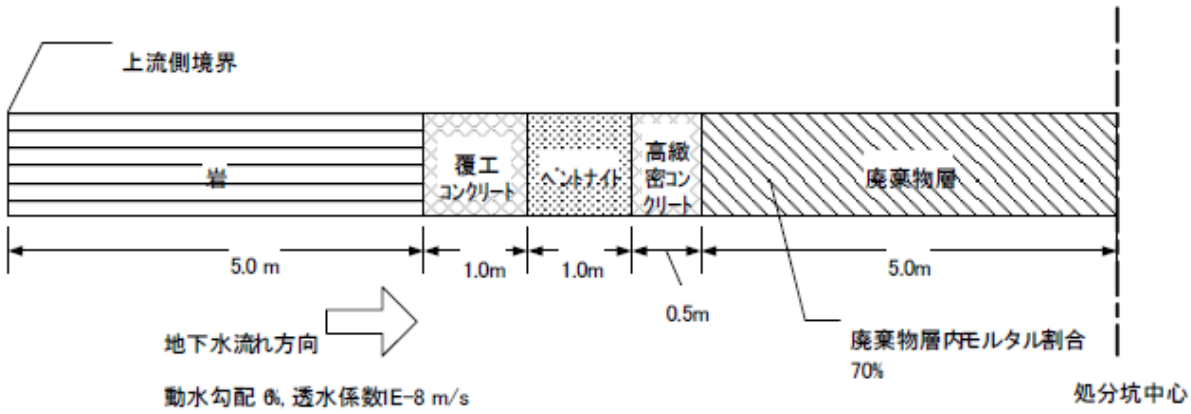



図 3.5-1 モデル評価体系の概念図

その結果、確からしいと考えられる条件設定を行った場合は、図 3.5-2 に示すようにベントナイト系材料のうちセメント系材料と接している部分については、モンモリロナイトなどの溶解に伴い透水係数が増加するが、ベントナイト系材料全体としての等価透水係数は、10 万年経過後でも 2E-12m/s 程度までの増加に留まっている。

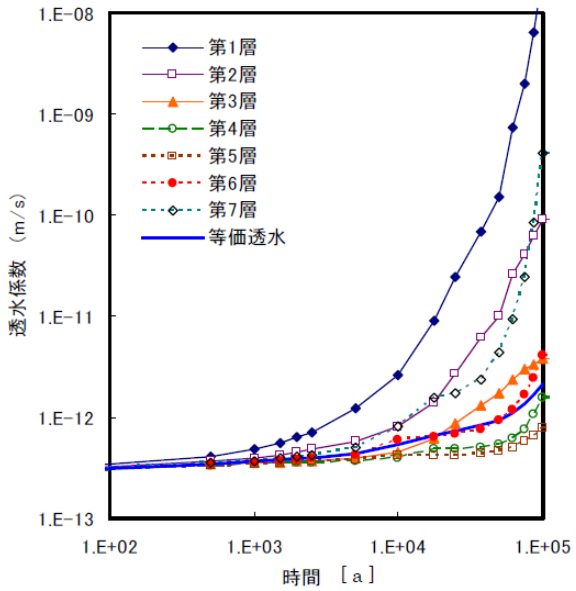



図 3.5-2 確からしい条件設定におけるベントナイト系材料の透水係数変化

いっぽう、技術的に可能性のある、または、科学的に合理的と考えられる範囲で幅を持たせた条件設定を行った場合、図 3.5-3 に示すように、ベントナイト系材料に接するセメント系部材の成分の溶脱による間隙の増加や強度の低下、廃棄体の腐食等による廃棄体層の間隙の解放により、10 万年経過後の透水係数が 1 桁以上増加する可能性が示唆されている。

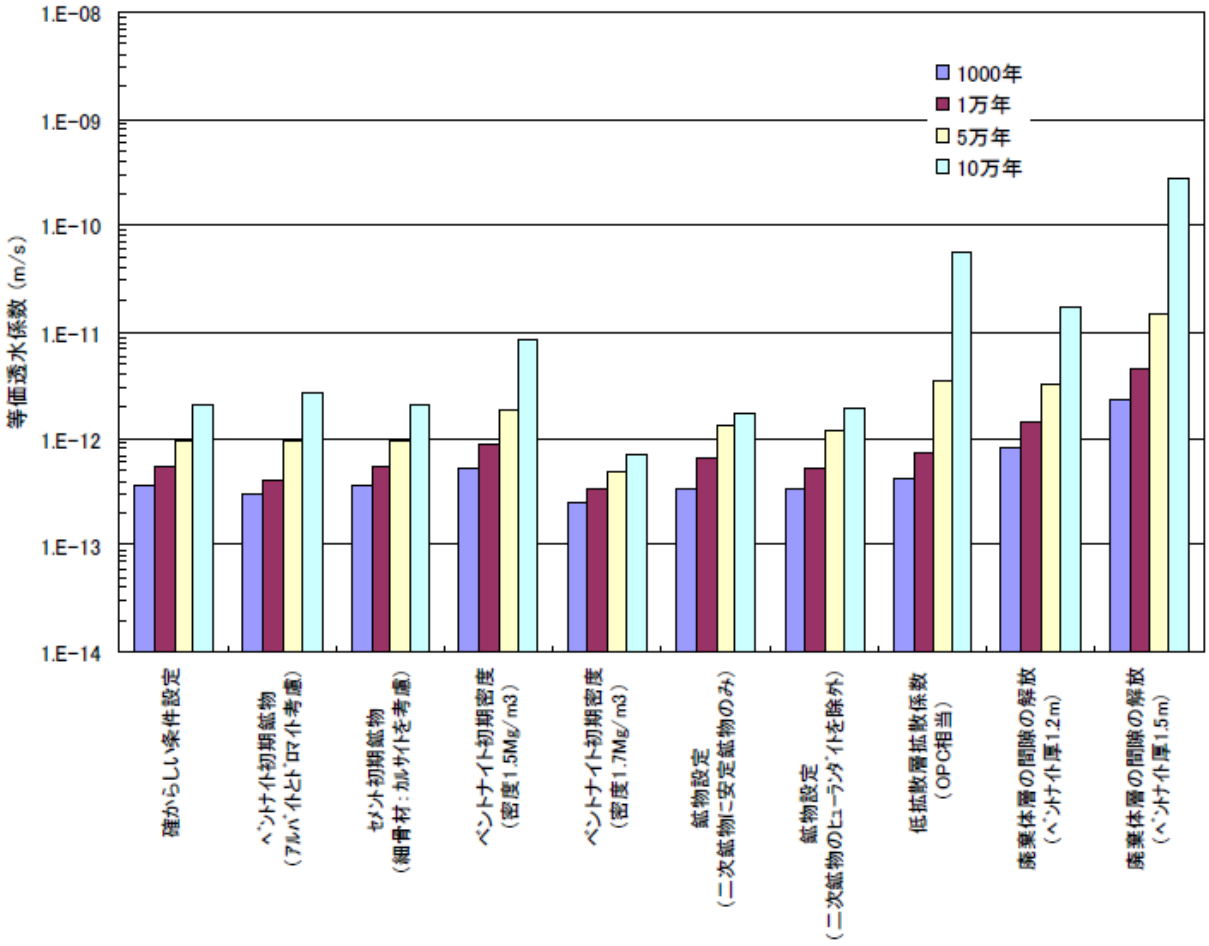
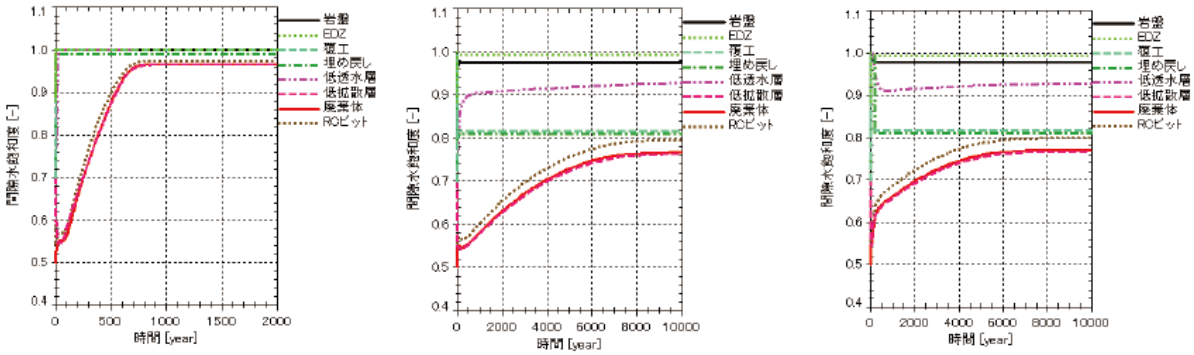



図 3.5-3 長期評価に存在する不確実性を考慮した場合の透水係数変化

（3）再冠水挙動に関する検討例

原子力安全基盤機構（原安機構）[26]は、処分坑道閉鎖後の人工バリアの再冠水挙動について、再冠水と並行して発生すると考えられるガス発生を考慮し、気液 2 相流解析により、再冠水に至る時間を算定している。解析では、「低拡散層とコンクリートピットを貫通するひび割れを想定するケース」や「ガスの排出を目的として低透水層と低拡散層の中央上部に高透過性領域を設けるケース」なども実施しているが、ここでは、ガスの絶対透過係数を $4.0\times10^{-15}m^2$ とし、①ガスが発生しないケース、②廃棄体層中に水分あり、初期からガスが発生するケース、③廃棄体層中に水分がなく、初期にはガスが発生しないケース、の 3 ケースについて、図 3.5-4 に飽和度の変化を、表 3.5-3 に再冠水時間を示す。




① ガス発生なし　② 初期水分あり＋ガス発生　③ 初期水分なし＋ガス発生

図 3.5-4 飽和度の変化

表 3.5-3 解析結果のまとめ

| No. | 低透水層絶対透気性 | ガス発生 | ガス発生の水分条件 | 低透水層透過期間 | 廃棄体層定常到達期間 |
|---|---|---|---|---|---|
| ① | 4.00E-15($m^2$) | 無 | — | 90 年 | 1,000 年 |
| ② | | 有 | 水あり | 300 年 | >10,000 年 |
| ③ | | 有 | 水なし | 90 年 | 10,000 年 |

ケース①は、低透水層は水位回復直後（約 20 年後）に定常状態に至るが、地下水が低透水層を通過し内側の低拡散層の飽和度が上昇開始するのは約 90 年後となる。ケース②は、ガス発生により、低透水層の飽和度上昇が緩慢となるため、低拡散層の飽和度が上昇開始するのは約 300 年後となり、その後も 10,000 年に至るまで緩慢ながら飽和度の上昇が認められる。また、ケース③は、①と②の中間的な挙動となる。

何れにしても、坑道内部の廃棄体層が定常状態となるには約 1,000 年以上を要することになる。また、ガス発生と再冠水が並行しても、全体的に飽和に向かうが、透気特性によっては脱飽和の傾向が長期間継続するとしている。

### 3.5.3　余裕深度処分における状態変遷

原子力学会[41]では、余裕深度処分の基本概念、考慮すべき物理的・化学的現象や処分システムの状態に対する技術的検討などに基づいて、安全評価シナリオで想定するバリア材について、化学的な変質と力学的な変形を想定して経時的な状態変化を、その要因となる THMC の変化とあわせて、図式的（図 3.5-5）に示している。なお、土木学会でも、図 3.3-2 に示したように、処分システムの状態変遷について、原子力学会と同様な整理がなされている。

人工バリアは、地下水の浸入に伴い、セメント-ベントナイト界面での化学的変質と岩盤クリープや鋼材（金属廃棄物、鉄筋など）の腐食膨張などによる力学的変形により、長期的には、ベントナイト系材料層の透水性能の低下と低拡散層の拡散性能の低下が想定されている。

ここで、ベントナイト系材料層の透水性能については、セメント間隙水等の影響による Na 型モンモリロナイトの Ca 型化とモンモリロナイトや随伴鉱物の溶解による変質が想定されている。また、廃棄体に残っている間隙の解放などにより埋設施設の力学的安定性の再配分が起こり、ベントナイト系材料層が膨潤し、廃棄体の間隙などを埋めることで、その密度が低下することについても想定されている。これらの変化により、ベントナイト系材料層の透水係数は増加し、それに伴って施設浸入水量が増加すると想定されている。

また、セメント系材料である低拡散層については、長期的には、鉄筋と廃棄体容器などの鋼材の腐食膨張によって低拡散層のひび割れが進展することが想定されている。ただし、ベントナイト系材料層の変質は遅く、急激な浸入水量の増加はなく、地下水が還元性かつアルカリ環境であるため、鋼材の腐食は、非常に緩やかにしか進展しないと想定している。これらの変化により、低拡散層の実効拡散係数が増加すると想定されている。なお、長期的には、隆起侵食により、埋設施設が地表に接近する以前に、風化帯に入り、地下水流速の増加や酸化性の地下水により、鋼材腐食が促進される可能性も想定されている。

いづれにしても、上記の処分システムの状態変遷は一例であり、安全評価のためのシナリオの設定においては、過去及び現在の状況から、処分システム及び被ばく経路の特性並びにそれらにおいて将来起こることが確からしいと予見される一連の変化とこれらに関わる発生の可能性は低いが安全評価上重要な変動要因を考慮する必要がある。

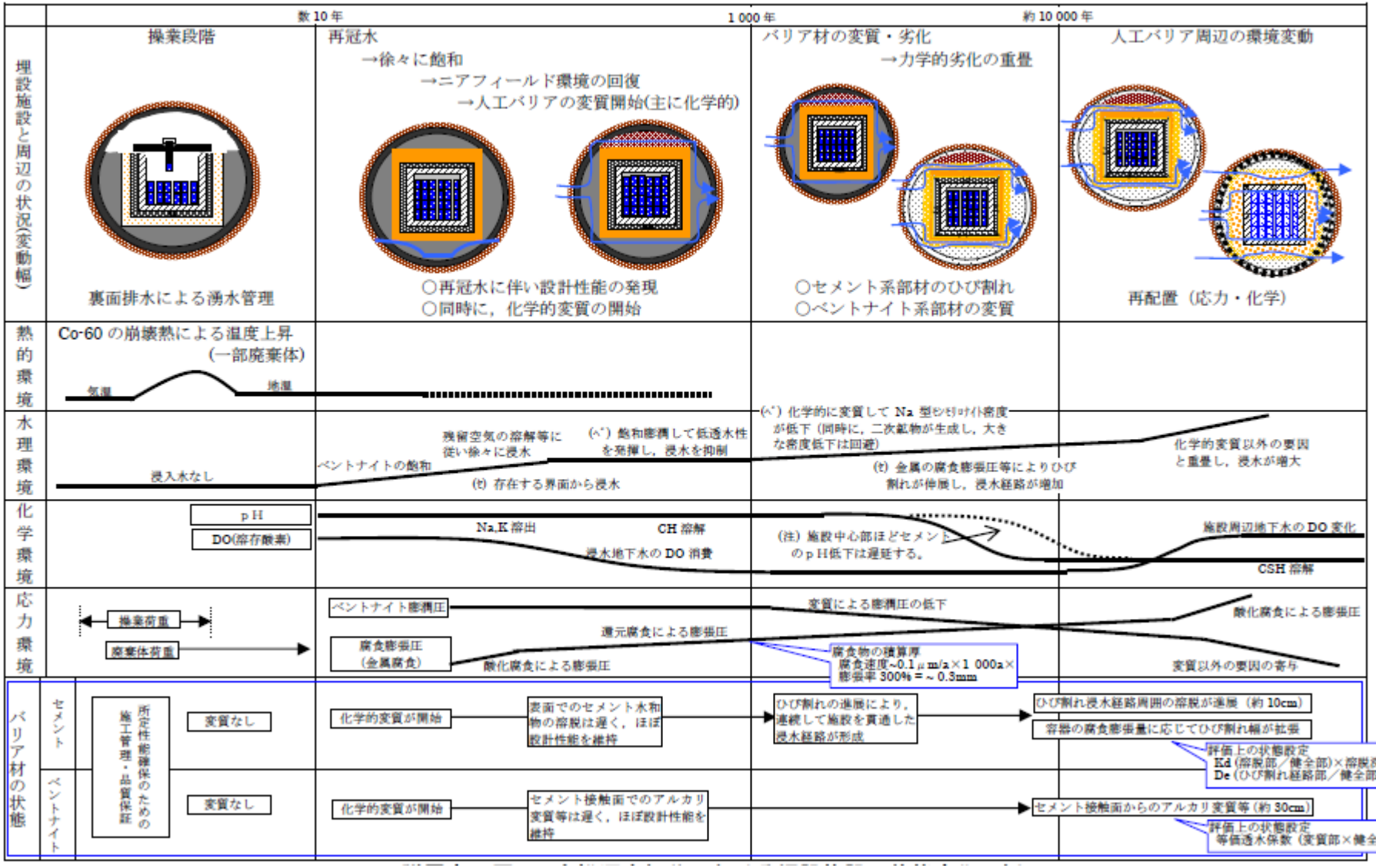



図 3.5-5 余裕深度処分における埋設施設の状態変化の例

### 3.5.4　状態設定と安全評価シナリオとの関係

原子力安全委員会[22][23]では、管理期間終了以後に係る安全評価シナリオを、図 3.5-6 のように分類している。これらシナリオのうち、主に人工バリアの安全機能に係るものは、地下水シナリオとガス移行シナリオであり、表 3.5-4 に示す基本シナリオと変動シナリオの定義を踏まえて、人工バリア構成部位の安全機能である、低透水性、低拡散性、収着性、低溶出性、その他の特性に着目した状態設定を行う必要があるとしている。

また、地下水シナリオおよびガス移行シナリオの評価は、3.5.1 項に示した、時間の経過に応じて、「過渡的な期間」、「多重バリアの機能に期待する期間」、「主に天然バリアの機能に期待する期間」、「廃棄物埋設地が地表付近に近接することが想定される期間」の 4 つの時間段階に分けて行うことを基本とするとして、それぞれ、表 3.5-5 および表 3.5-6 に評価すべき事項を整理している。

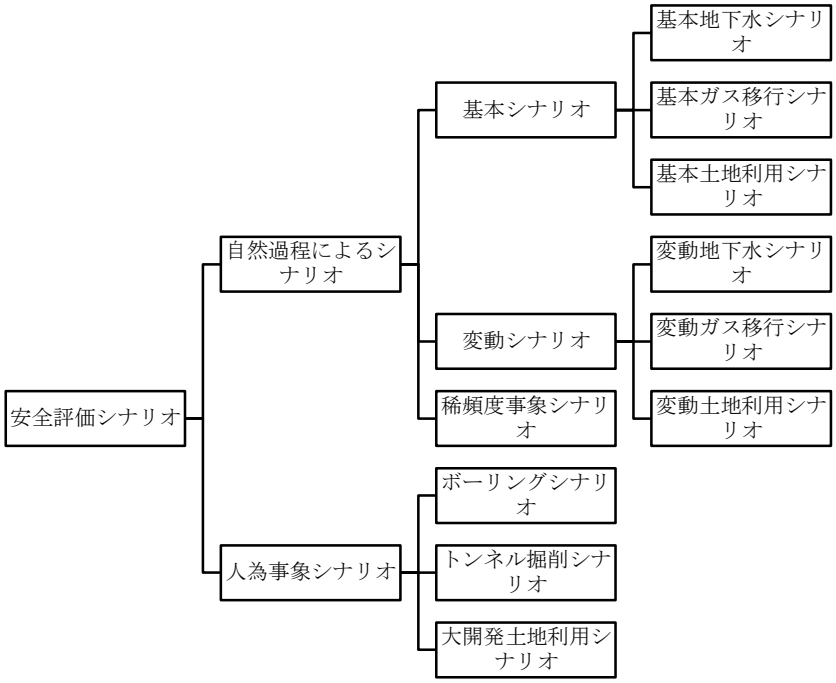



図 3.5-6 管理期間終了以後に係る安全評価シナリオの分類

表 3.5-4 基本シナリオと変動シナリオの定義

| | |
|---|---|
| 基本シナリオ | ・ 発生の可能性が高く、通常起きるものと考えざるをえないようなシナリオ<br>・ 「発生の可能性が高い」とは、単に「最も可能性が高い」というよりも、科学的合理性に基づき現実的に想定される範囲で適切に保守性が確保されていることも含まれた概念 |
| 変動シナリオ | ・ 基本シナリオに対する不確かさに係る評価を行うシナリオであり、発生の可能性は低いが、安全評価上重要な変動要因を考慮したシナリオ |

表 3.5-5 基本シナリオ設定のために評価すべき事項

| | **過渡的な期間** | **多重バリア機能に期待する期間** | **主に天然バリア機能に期待する期間** | **埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間** |
|---|---|---|---|---|
| **基本地下水シナリオ** | （多重バリアが計画したどおりの状態に確実に至ることを示すための評価） | **基本地下水シナリオ**<br>人工と天然バリアによる防護機能によって、線量が可能な限り低く抑えられるように配慮されていることを確認 | **基本地下水シナリオ**<br>主に天然バリア防護機能によって、線量が可能な限り低く抑えられるように配慮されていることを確認 | **基本地下水シナリオ**<br>周辺土壌との混合状態での風化・侵食の影響評価 |
| **基本ガス移行シナリオ** | **基本ガス移行シナリオ**<br>（廃棄体に閉じ込め性がない場合）放射性ガス発生、放射線分解ガス発生と移行の影響評価（廃棄体が閉じ込め性を有する場合）なし | **基本放射性ガス移行シナリオ**<br>放射性ガス発生、移行の影響評価<br><br>**基本水素ガス移行シナリオ**<br>放射線分解ガス発生、金属腐食ガス発生と移行の影響評価 | **基本ガス移行シナリオ**<br>人工バリアの物理的損傷や化学的環境の変化に伴うガスの発生量の変化を考慮した影響評価 | （ラドンに関する影響を別途評価） |

表 3.5-6 変動シナリオ設定において評価すべき変動の要因とその組合せ

| | 過渡的な期間 | 多重バリア機能に期待する期間 | 主に天然バリア機能に期待する期間 | 埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間 |
|---|---|---|---|---|
| **変動地下水シナリオ** | （初期施工状態の変動要因の評価） | 代表的な変動地下水シナリオ*1<br>（以下の機能等の変動の組み合わせを想定）<br>・廃棄体の溶出率<br>・人工バリアの防護機能<br>・天然バリアの防護機能<br>・生活圏の希釈水量等<br><br>人工バリアの機能一部喪失シナリオ*2<br>（低透水性、低拡散性、収着性について、それぞれ個別に機能喪失を想定）<br><br>天然バリアの機能一部喪失シナリオ*2<br>（物理的離隔機能、化学的遅延機能についてそれぞれ個別に機能喪失を想定） | 代表的な変動地下水シナリオ*1<br>（以下の機能等の変動の組み合わせを想定）<br>・残存する放射能インベントリ<br>・人工バリア構成部材の固有の特性（遅延機能及び透水特性）<br>・人工バリアの防護機能の喪失時期<br>・天然バリアの防護機能<br>・生活圏の希釈水量等<br><br>人工バリアの固有の特性を無視したシナリオ*2<br>（遅延機能、透水特性についてそれぞれ個別に機能喪失を想定）<br><br>天然バリアの一部機能喪失シナリオ*2<br>（物理的離隔機能、化学的遅延機能についてそれぞれ個別に機能喪失を想定） | 代表的な変動地下水シナリオ*1<br>（以下の機能等の変動の組合せを想定）<br>・残存する放射能インベントリ<br>・埋設施設の侵食速度<br>・沢・河川の形成位置<br>・風化帯到達時期<br>・降雨涵養量<br>・風化帯の遅延機能<br>・生活圏の希釈流量等<br><br>代替変動地下水シナリオ<br>・風化帯代替モデル*3<br><br>不確かさに関する安全裕度評価シナリオ*4<br>（変動地下水シナリオに大きな影響を与えるパラメータ（風化帯の厚さ、海退の速度等）については、条件設定の妥当性を確認するとともに、想定されるパラメータの変動幅を考慮してもなお安全裕度があることを示すこと） |
| **変動ガス移行シナリオ** | 代表的な変動ガス移行シナリオ<br>・廃棄体からの放射性ガスの発生量、放射線分解ガス発生量やガス移行割合等の不確かさの評価 | 変動放射性ガス移行シナリオ<br>・放射性ガス移行に関する変動の評価<br><br>変動水素ガス移行シナリオ<br>・水素ガス移行に関する変動の評価 | 代表的な変動ガス移行シナリオ<br>・水素ガス発生速度と量の変動の評価<br>・ガス移行に伴う地下水への影響の程度の変動の評価 | （ラドンに関する影響を別途評価）<br>・風化帯におけるラジウム 226 濃度の変動の評価<br>・ラドンによる被ばく評価に係る変動の評価 |

*1 科学的に合理的と考えられるパラメータの変動の範囲については、着目する特性について、十分な統計的データが存在する場合には、これらを用いてその範囲を設定することも可能である。その際、97.5%片側信頼区間の値を用いることが考えられる。しかし、長期的な安全評価における不確かさについては、多くの場合十分な統計的データは整備されていない。このような場合には、多くの専門家の意見を参酌して適切な保守性を持たせて設定することが重要である。また、気候変動等の状態設定において複数の変動シナリオが想定される場合（例えば、温暖期、寒冷期等）には、それぞれの状態設定における評価を独立に行うこととする。

*2 喪失する機能については、それぞれの具体の埋設施設に係る FEP の分析を行い、それらの蓋然性の確認を行った上で、安全上重要な核種及びそれに対する防護機能について評価するものとする。ただし、十分な信頼性を持って予測可能なことが立証できる特性については、その予測範囲の下限値で代替できる。

*3 地表付近に近接した状態における埋設施設の態様については、風化帯で劣化し、付近の土壌と混合するモデル以外にも様々な状況が想定される。基本地下水シナリオで示す風化帯のモデル以外の代替モデルを用いて変動シナリオとして評価し、安全性を確認することも重要である。

*4 複数のパラメータが結果に重要な影響を及ぼす場合には、これらのパラメータの不確かさを確率論的に評価し、条件設定の妥当性を確認する方法も一つの有効な方法である。この場合には、これまでの最新の知見に基づき統計分布を設定するとともに、データが不足しているものについては、保守性を勘案して設定することが重要である。

### 3.5.5　基本地下水シナリオおよび変動地下水シナリオに関する設定と考え方

（1）原子力学会における地下水シナリオに関するパラメータ設定

原子力学会[41]では、地下水シナリオに関する処分システムの状態変化について，施設浸入水量と拡散移行抑制性能に着目し、可能性の高い状態（基本シナリオ）と可能性のある変動状態（変動シナリオ）に対して、それぞれパラメータの検討例を示している。

まず、可能性の高い状態では、表 3.5-7 に示すように、ベントナイト系材料層の初期透水係数 3E-13m/s が変質によって 1 万年（1E+4 年）で 1E-12m/s に、10 万年（1E+5 年）で 3E-12m/s になるとし、それに伴い、施設浸入水量は、初期の 0.018m3/a から 1 万年（1E+4 年）で 0.06m3/a に、10 万年（1E+5 年）で 0.18m3/a になるとしている。また、低拡散層については、処分開始時の初期拡散係数を 1E-12m2/s とし、ひび割れの進展が 1E+4 年で面積割合 0.1%、10 万年（1E+5 年）で 1%になると仮定している。ひび割れ部を含む拡散係数は、ひび割れ部の拡散係数を自由水中の水の拡散係数である約 2E-9m2/s として、初期拡散係数との面積割合を考慮して加重平均を求め，それぞれ 3E-12m2/s，2E-11m2/s としている。

表 3.5-7 可能性の高い状態における処分システムの設定パラメータ

| 経過時間 [a] ／ パラメータ | 初期 | 1E+4 | 2.5E+4 | 4E+4 | 1E+5 | 2.5E+5 | 4E+5 | 1E+6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 施設近傍以外の岩盤 移行距離（m） | 300 | → | → | → | → | 150 | 30 | 30 |
| 施設近傍岩盤 透水係数（m/s） | 1E-08 | → | → | → | → | → | 1E-07 | 1E-07 |
| 地下水実流速 （m/a） | 0.1 | → | → | → | → | → | 1.0 | 1.0 |
| ベントナイト系材料層 透水係数（m/s） | 3E-13 | 1E-12 | → | → | 3E-12 | - | - | 3E-12 |
| 施設浸入水量 （m³/a/100m） | 0.018 | 0.06 | → | → | 0.18 | - | - | 0.18 |
| 低拡散層 拡散係数（m²/s） | 1E-12 | 3E-12 | → | → | 2E-11 | - | - | 2E-11 |

いっぽう、可能性のある変動状態 では、表 3.5-8 に示すように、比較的早い段階においてベントナイト系材料層が著しく変質すると想定し、1 万年（1E+4 年）で透水係数が 3E-11m/s になるとし、それに伴い施設浸入水量も 1.8m3/a になるとしている。また、低拡散層については、比較的早い段階からひび割れが進展すると仮定し，1 万年（1E+4 年）で面積割合が 1%になると仮定し、拡散係数は 2E-11 m2/s になるとしている。

表 3.5-8 可能性のある変動状態における処分システムの設定パラメータ

| 経過時間 [a] / パラメータ | 初期 | 1E+4 | 2.5E+4 | 4E+4 | 1E+5 | 2.5E+5 | 4E+5 | 1E+6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 施設近傍以外の岩盤移行距離（m） | 300 | → | 150 | → 30 | - | - | - | 30 |
| 施設近傍岩盤透水係数（m/s） | 1E-08 | → | → | 1E-07 | - | - | - | 1E-07 |
| 地下水実流速（m/a） | 0.1 | → | → | 1.0 | - | - | - | 1.0 |
| ベントナイト系材料層透水係数（m/s） | 3E-13 | → 3E-11 | - | - | - | - | - | 3E-11 |
| 施設浸入水量（$m^3$/a/100m） | 0.018 | → 1.8 | - | - | - | - | - | 1.8 |
| 低拡散層拡散係数（$m^2$/s） | 1E-12 | → 2E-11 | - | - | - | - | - | 2E-11 |

（2）原安機構における地下水シナリオに関するパラメータ設定

原子力安全基盤機構（原安機構）[26][28]は、基本地下水シナリオと変動地下水シナリオの主要な人工バリア特性の変遷の考え方を表 3.5-9 にように整理している。また、人工バリアに関するパラメータの経時変化を表 3.5-10 のように設定している。

ここで、セメント系材料である低拡散層の拡散係数は、バリア外縁側から徐々に劣化が進展するとして、その劣化速度を表現するモデルとして、以下に示す$\sqrt{t}$ 則（ t：経過年数）及び t 則を採用している。なお、$d_1$ [m]は拡散係数が増大する各部材の外縁部からの距離であり、a 及び b は 1,000 年間で外縁部から 10cm 劣化する値としている。

- 基本地下水シナリオ $\sqrt{t}$ 則：$d_1 = a \times \sqrt{t}$ $(a = 3.16 \times 10^{-3} m/yr^{0.5})$
- 変動地下水シナリオ t 則：$d_1 = b \times t$ $(b = 1 \times 10^{-4} m/yr)$

ベントナイトの透水性の経時的変化については、1 万年～10 万年程度の間に透水係数は 10 倍程度になるものとしている。

また、それぞれのシナリオにおけるバリアの初期性能については以下を想定している。

- 基本地下水シナリオ：健全な材料の値を使用
- 変動地下水シナリオ：影響物無の場合は上記と同様、影響物有の場合は初期から劣化状態の値を使用

なお、地下水シナリオにおける核種移行評価モデルは、図 3.5-7 に示すように、1 次元モデルで、移流・分散及び拡散に寄与する面積をバリア外側へ向けて変化させ、均一混合層はベントナイトの外側の埋め戻し、支保・覆工、EDZ を一括して取扱う領域とし、収着特性は岩盤と同じで

あると仮定している。

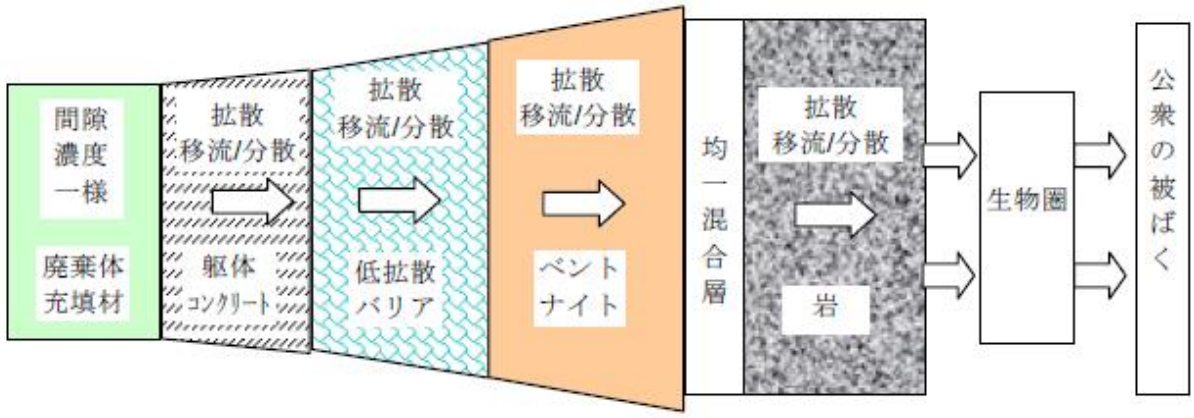
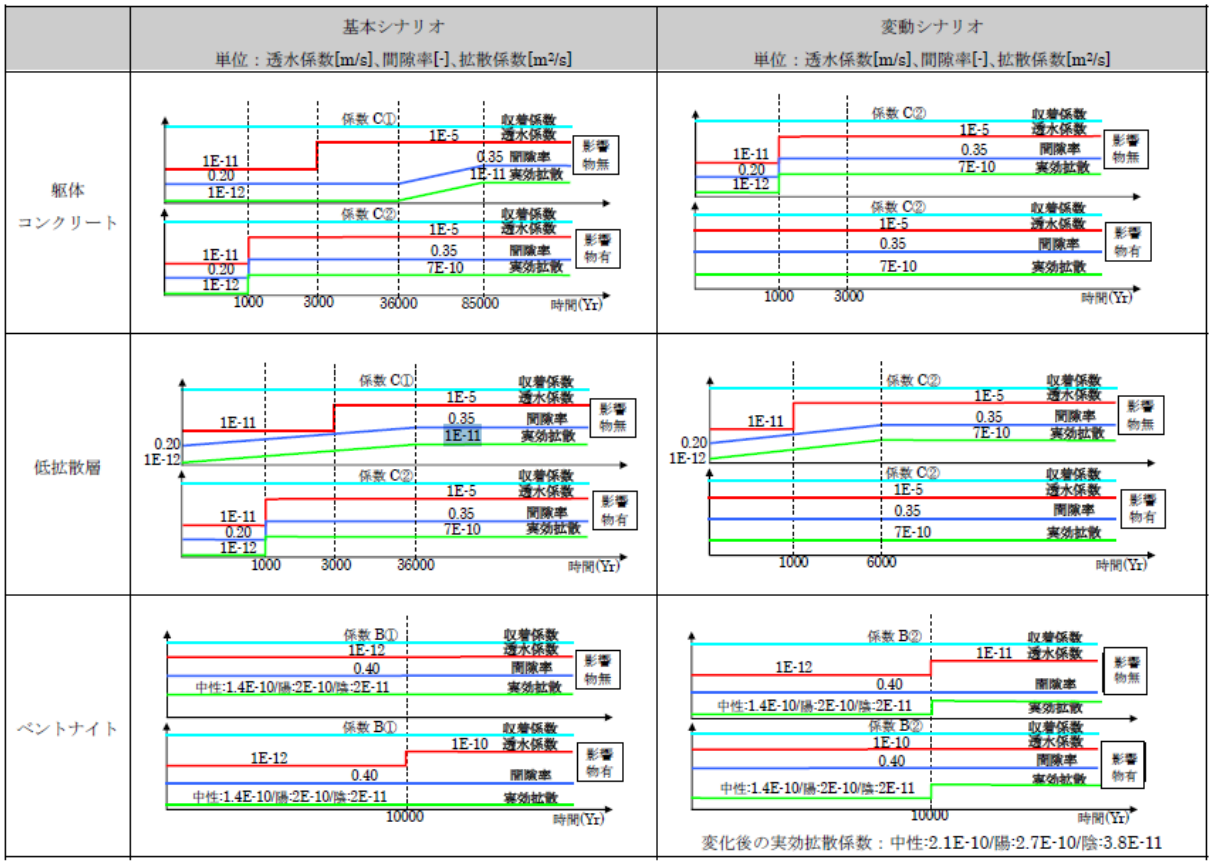



図 3.5-7 地下水シナリオにおける核種移行評価モデル

表 3.5-9 人工バリア特性の変遷

| | | 透水係数 | 実効拡散係数 | 備考 |
|---|---|---|---|---|
| 躯体コンクリート | 基本シナリオ | 鉄筋の腐食膨張によりひび割れが発生し、透水係数が増大する。閉鎖後 3000 年にひび割れ発生。 | 躯体コンクリートは、低拡散の内側にあるため、低拡散層の全域が溶脱するまで溶脱せず拡散係数は変化しない。 | ひび割れ発生による透水係数の終局状態は砂と同等とした。<br><br>透水係数<br>健全部：1E-11m/s<br>劣化部：1E-5m/s<br>実効拡散係数<br>健全部：1E-12m²/s<br>劣化部：7E-10m²/s |
| | 変動地下水シナリオ | 閉鎖後 1000 年でひび割れが生じるものとした。 | 鉄筋コンクリートのため、微細なひび割れが拡散係数増大の要因となる可能性があり、ひび割れ発生時に拡散係数が増大するものとした。 | |
| 低拡散層（モルタル層） | 基本シナリオ | 内側の躯体コンクリート層のひび割れ発生に伴い、同時（3000 年後）にひび割れが発生し、透水係数が増大するものとした。 | ひび割れよりも、溶脱等による空隙構造変化が、実効拡散係数増の支配要因となる。フィンランド(TVO-1/98)で示されている劣化速度 10cm/ka の基準点を基に $\sqrt{t}$ 則に従うものとした。 | 低拡散層では少数の大きなひび割れが発生すると想定した。この為、低拡散層の拡散係数のひび割れによる影響は小さいものとした。<br>透水係数<br>健全部：1E-11m/s<br>劣化部：1E-5m/s<br>実効拡散係数<br>健全部：1E-12m²/s<br>劣化部：7E-10m²/s |
| | 変動地下水シナリオ | 同上。1000 年後に透水係数が増大する。 | 同上、劣化速度 10cm/ka（フィンランドと同じ）にて線形変化（$t$ 則）するものとした。 | |
| 低透水層（ベントナイト層） | 基本シナリオ | 密度低下は発生しないと想定し、全評価期間において初期値を用いた。 | 空隙率は変化しないと想定し、全評価期間において初期値を用いた。 | 周辺岩盤の土圧に相当する膨潤圧を有する密度をベントナイトの終局状態と想定する。土圧は約 1MPa であり、膨潤圧 1MPa のベントナイト密度は 1.4g/cm³から、化学的変質等も含めてこれを終局状態とした。<br>透水係数<br>健全部：1E-12m/s<br>劣化部：1E-11m/s<br>実効拡散係数<br>健全部：1.4E-10m²/s<br>劣化部：2.1E-10m²/s |
| | 変動地下水シナリオ | 1 万年後(4)、底部埋戻層の沈下等、外力の影響により、密度 1.4g/cm³ 程度相当まで低下すると想定し、透水係数が増大するものとした。 | 密度低下に伴う空隙率変化を想定し、1 万年後に密度 1.4g/cm³ 程度相当の実効拡散係数に増大するものとした。 | |

表 3.5-10 パラメータの経時変化




また、施設浸入水量、セメント系材料の実効拡散係数、セメント系材料の収着分配係数および放射性廃棄物の溶出速度が被ばく線量結果に及ぼす影響について感度解析を実施している。その結果（図 3.5-8）によれば、多重バリアが十分に機能すれば、施設浸入水量が 2 桁増加しても被ばく線量は 4 倍程度の増加に留まること、セメント系材料の実効拡散係数が 2 桁増加しても被ばく線量は 3 倍程度の増加に留まること、また、セメント系材料の分配係数が 1 桁減少しても，線量結果は 2 倍程度の増加に留まることが示されている。

いっぽう、放射性廃棄物の溶出速度は、人工バリアや天然バリアにおける核種移行の遅延効果が小さい C-14 等の核種が支配的な場合には，溶出速度が 1 桁増加すると被ばく線量も約 1 桁増加することが示されている。

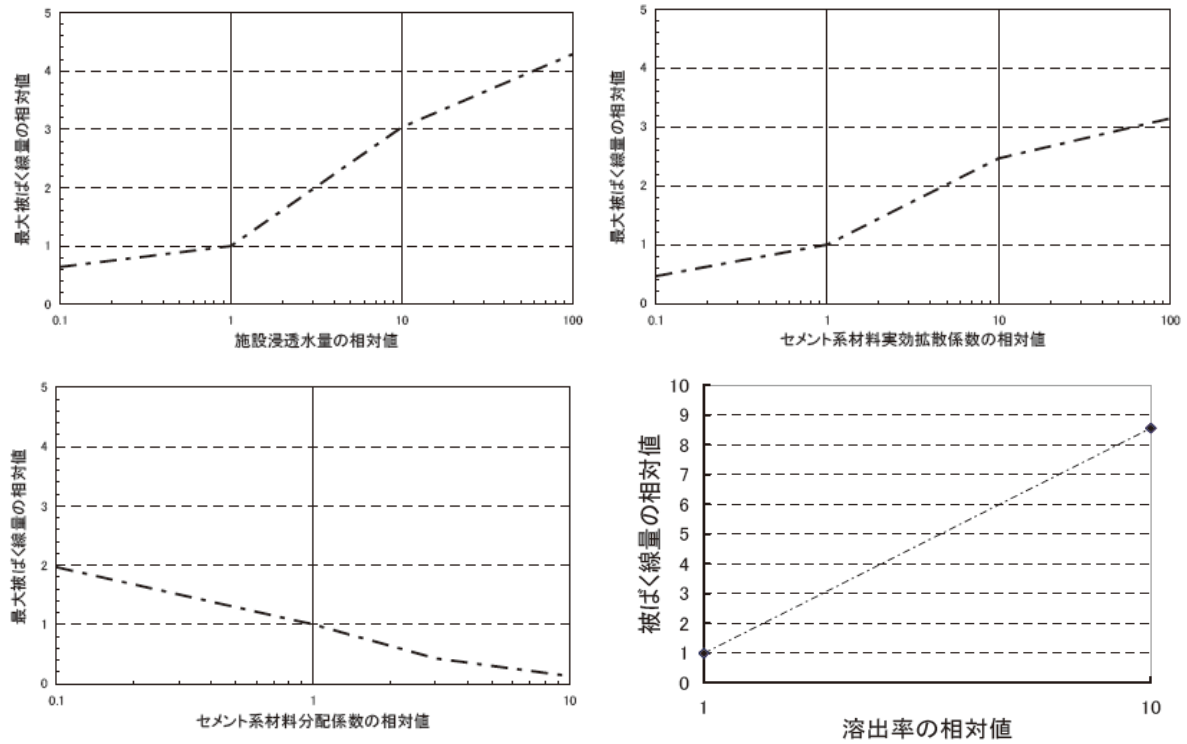



図 3.5-8 人工バリアの主要パラメータに対する感度解析

(3) 地下水シナリオ設定のまとめ

地下水シナリオでは、以下のパラメータに着目して人工バリアの状態設定が行われている。

- 低透水性：ベントナイト系材料の透水係数の変化に影響を与える物理的・化学的現象（例えば、モンモリロナイト含有率、モンモリロナイト層間のイオン組成、間隙水の水質、密度低下等）に着目した状態設定を行っている。なお、施設浸入水量は、ベントナイト系材料の透水係数に依存している。
- 低拡散性：セメント系材料の実効拡散係数の変化に影響を与える物理的・化学的現象（空隙構造、ひび割れ等の発達）に着目した状態設定を行っている。
- 核種収着性：セメント系材料の放射性物質の収着分配係数（および収着部材の量）について、対象となる放射性物質に応じて、バリア材の劣化やバリア材周辺の化学環境を考慮して設定を行っている。
- なお、放射性廃棄物の溶出速度は、その材質と比表面積、埋設施設内の酸化・還元環境、pHや硝酸塩や硫酸塩等の影響物質に依存するが、変動シナリオでは溶出速度を高く設定している。

### 3.5.6　基本ガス移行シナリオおよび変動ガス移行シナリオに関する設定と考え方

処分システム内で発生するガスには、非放射性ガスの代表てきなものとして、廃棄体等に含まれる金属の還元腐食による水素がある。また、放射性ガスとしては、廃棄体に微量に含まれるウランや超ウラン核種の子孫核種として生成されるラドン等が挙げられる。なお、廃棄体中に炭素や有機物が含まれている場合には、二酸化炭素やメタンの生成の可能性も考えられる。この他、廃棄体の放射線強度が高い場合には、水の放射線分解によるガス発生の可能性も考えられる。

処分システム内のガス発生は、ガス発生速度が、仮に、人工バリア、天然バリア空隙中のガス分子の拡散速度やガスの溶解度限界を超えるような場合には、ガス相の形成と蓄圧が起こり、バリアや放射性核種の移行に影響を与えるとされている。このため、2.5.3 で述べた原子力安全委員会の安全評価シナリオにおいても、発生したガスが微量であり、例えば地下水への溶解度限界を超えないことが明らかな場合には、地下水シナリオの一部として評価することとするが、ガスとして固有の挙動あるいはガスの蓄積に伴うガス圧力が地下水の流動挙動に影響を及ぼすと見なされる場合にはガス移行シナリオとして評価する必要があるとしている。

本項では、以下に既存のガス移行シナリオの検討事例を調査する。

(1) ユーラトム（Euratom）のガス影響に係る安全評価の取り組み

海外においては、放射性廃棄物処分施設に対するガス影響は 1970 年代以降、継続的に検討されている。検討の大部分は高レベル廃棄物を対象としたものであり、本検討の対象とする余裕深度処分とは対象廃棄物も処分概念も異なるが、ガス影響の考え方としては参考とすることができる。例えば、ユーラトムの GASNET プロジェクト(1998 年～2002 年)の報告書[15]には、ガスの発生・移行、処分システムへの影響、シナリオ解析等に関する知見が整理されている。

例えば、ガス発生については、生成量の観点からは、放射性ガスは、非放射性ガスほど重要性はないが、放射線被ばくの観点からは、C-14 を含むガスの評価が重要であるとしている。また、放射化金属の場合、C-14 は表面またはその近傍に濃縮されているため、還元性腐食により生成される $^{14}CH_4$ （メタン）の放出量は、初期がより大きくなるとしている。いっぽうで、有機物の分解により生成する C-14 を含むガスのうち、$^{14}CO_2$ は、固型化材や充填材に使用されているセメントとの反応によりカス相から除去されることが期待されるとしている。

また、処分場におけるガスによる潜在的な影響については、図 3.5-9 に示すように、一般的に以下の 4 点に集約されるとされている。

① バリアの力学的健全性に対する影響
→気体の生成の後で発生する可能性のある圧力の上昇が原因となって、処分場と岩盤構造に発生する力学的な影響

② 汚染水の押し出しの影響
→処分場周囲の地下水の流動と輸送に影響を与える気体の直接的な効果（汚染された水が処分場から強制的に放出されることを含む）
③ 放射性ガス放出、可燃性ガス放出の影響
→様々な気体の生物圏への放出
④ 形成された気体が処分場の化学的な環境に及ぼす影響
→上記①～③に比較して一般的には重要性は低いと考えられる

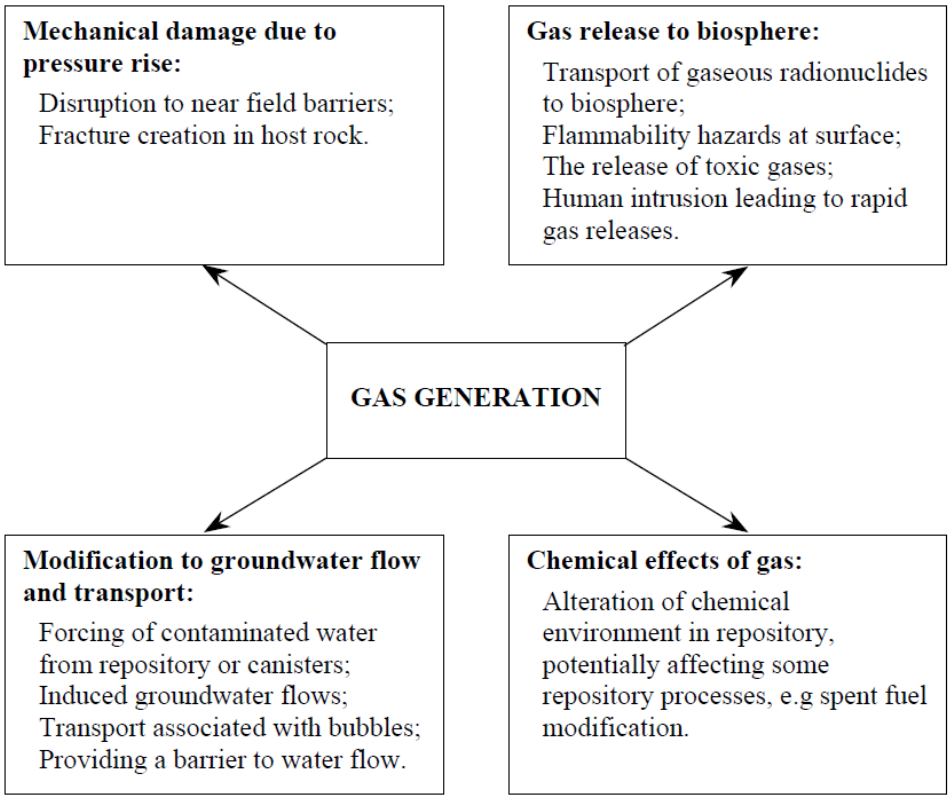



図 3.5-9 処分場におけるガス発生の影響の範囲に関する概念図

なお、ユーラトムは、GASNET プロジェクト終了後も、FORGE プロジェクト(2007 年～2013 年）を実施し、ガスの発生・移行に係る不確実性の低減に取り組んでいる。FORGE プロジェクトの科学的な成果[4]として、飽和ベントナイト中のガス移行は、これまでの粘性-毛細管流動（visco-capillary flow）では説明できず、ガス圧上昇に伴い形成される拡張流路（dilatant pathway）が主要な経路であるとしていることである。また、拡張流路の形成と全応力、膨潤圧および間隙圧は強く関連があり、拡張流路の形成時、局所的に全応力等の値が変化し、その部分から局所的にガスが流出するが、ガスはベントナイト間隙部分を通過しないためベントナイトの飽和度は低下せず、汚染水の押し出しもないことも示唆されている。この他、2013 年から CAST プロジェクトを立ち上げ、放射化金属、放射化グラファイト等からの C-14 の放出メカニズムの検討も進めている。

(2) 日本原子力研究開発機構－電気事業連合会による TRU 廃棄物処分技術検討書（第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ）でのガスの検討

同技術検討書[33]では、処分施設内間隙圧力の上昇によるバリアへの力学的影響と変化と放射性核種によって汚染された間隙水の早期排出を対象に被ばく線量の評価を行っている。ガス影響に関する解析設定を表 3.5-11 に示す。

表 3.5-11 ガス影響に関する解析設定

| 影響を受けるパラメータ | 単位 | レファレンスケース | 廃棄体グループ | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | グループ1 | グループ2 | グループ3 | グループ4 |
| 総排水量 | $m^3/m$ | - | 2.6 | 1.0 | 1.9 | 1.9 |
| 最大排水速度 | $m^3/m/y$ | - | 0.26 | 0.17 | 0.007 | 0.024 |
| 排水開始時刻 | y | - | 1000 | 100 | 30 | 10 |
| 排水期間 | y | - | 総排水量/最大排水速度とする | | | |

また、GASNET などの知見に基づき、一部の放射性核種についてはガス状にて移行する可能性があることを考慮して、ガス状の放射性 $CH_4$ を対象としたガス発生量の評価と $CH_4$ ガスが生物圏に到達し、帯水層において地下水に溶解し、その地下水が利用されることによる被ばく線量の評価（図 3.5-10）を行っている。結果の概要は以下の通りである。

- 内圧が掘削時の応力解放に抵抗力として作用し、岩盤の力学的安定性を向上させる傾向があり、間隙圧力による力学的安定性に及ぼす影響（緩衝材の破壊及び掘削影響領域の力学的な破壊の可能性）は小さいと考えられる。
- ガス発生による天然バリア中の核種移行経路の地下水の動きに対する影響も小さいものと判断される。
- ガス発生に伴う人工バリア内部の地下水の押し出しに伴う核種移行率の上昇は、今回の設定（表 2.5-8 参照）では、排水の継続期間が短いことから、最大線量に影響を与えなかったものと考えられる。
- ガス状放射性 $CH_4$ の移行による線量は、約 $1\times10^{-9}$Sv/y であり、地下水移行による線量（約 $2\times10^{-6}$Sv/y）に比較して，十分に小さなことが判った。

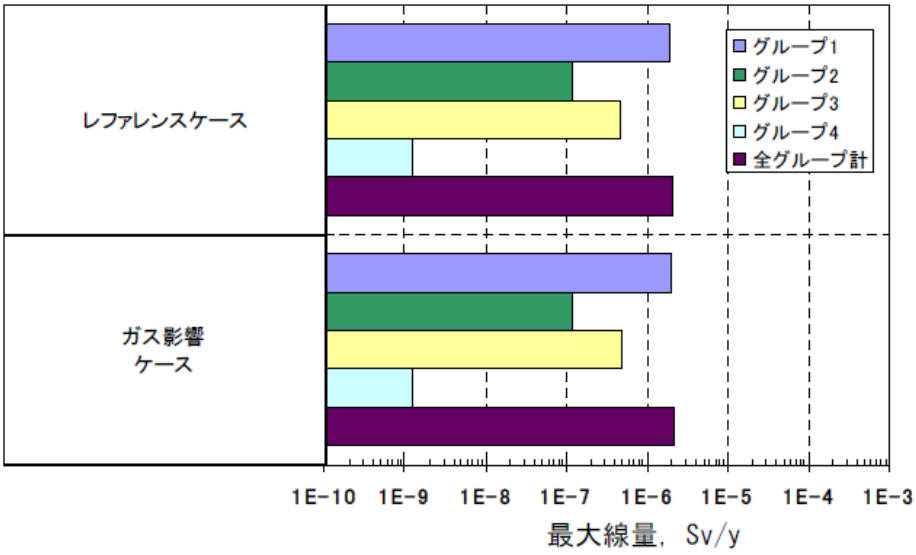



図 3.5-10 ガス影響の解析結果

(3) 原安機構におけるガス移行シナリオの検討

余裕深度処分においては、放射化金属や解体廃棄物の他に、廃棄体容器も厚肉の金属容器で製作される可能性があり、多量の金属を内蔵する。これらの金属の腐食等に伴い水素ガス等のガスが発生するが、低透水層はガスに対しても通気性が低いため、内圧が上昇したある時点で流路が形成され、低透水層内に蓄圧されたガスによって短期間の間に内包する地下水が押し出される可能性がある。

原子力安全基盤機構（原安機構）[26]では、このような事象を、ガス異常放出シナリオとして、発電所起源の放射化金属及び解体廃棄物を定置した処分坑道の一部においてガスが異常放出され、それに伴い、低透水層より内側の溶存核種が低透水層の外側に短時間で放出され、そのまま通気経路が開放されている状態を想定した検討が行われている。

ガス異常放出評価モデルの概要を図 3.5-11 に示す。評価にあたっては、内圧上昇により低透水層にガス移行パスが形成される時期を 10,000 年後とし、この時に放射性物質を内蔵する低透水層より内側（廃棄体層から低拡散層まで）の全ての地下水が保守的に 1 年以内に EDZ に押し出されると仮定している。また、EDZ を介して天然バリア中に放出された地下水の挙動は基本地下水シナリオと同じとし、ガス放出後減圧されると低透水層は再冠水により元の透水性能に戻るとして評価されている。

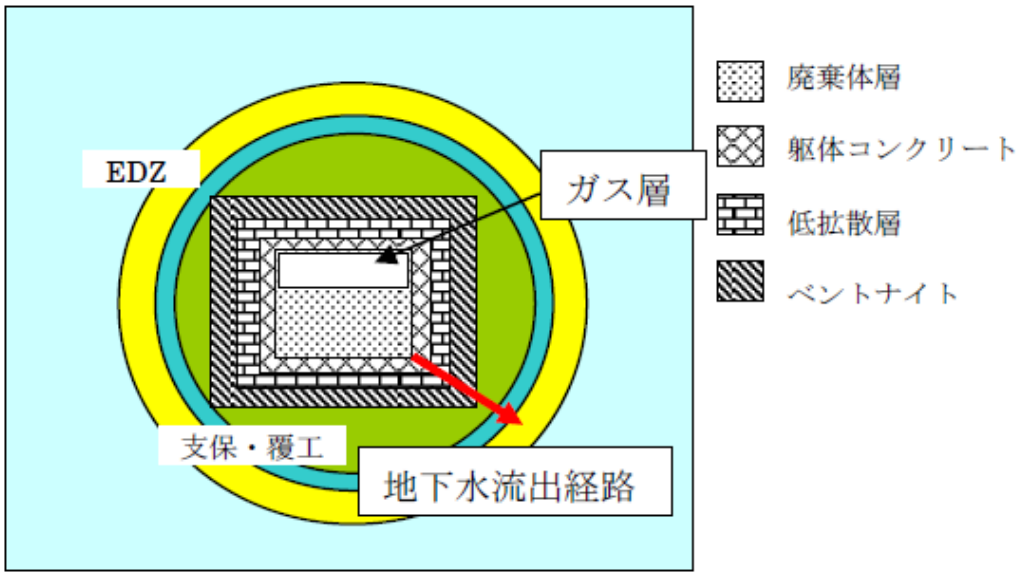



図 3.5-11 ガス異常放出評価モデルの概要

ガス異常放出シナリオの被ばく線量の評価結果を図 3.5-12 に示す。ガスの異常放出を想定した 10,000 年後の人工バリアから天然バリアへの核種移行フラックスは、基本地下水シナリオに比べ約 24 倍と急増しているが、被ばく線量の評価結果は、基本地下水シナリオの約 0.73μSv/y に対して、約 8.1μSv/年程度と、1 桁程度の増加に留まっている。これにより、人工バリアからの短期的な放出は、天然バリアにおける拡散あるいは分散効果により減衰し、生物圏に移行する段階では大きな影響は及ぼさないことが確認できたとしている。

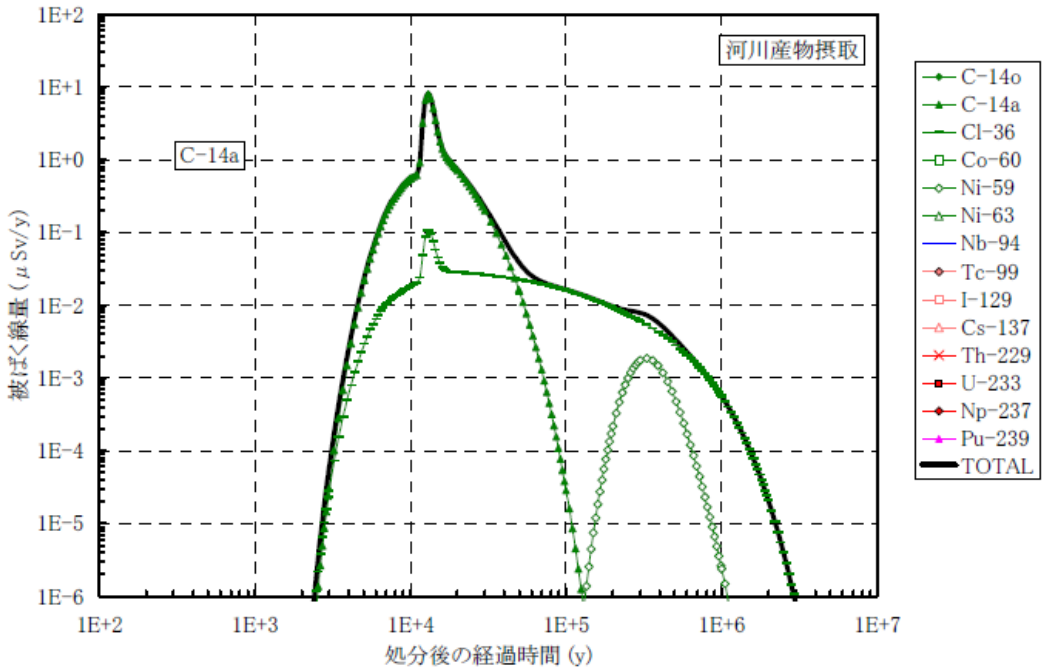



図 3.5-12 ガス異常シナリオの解析結果

（4）余裕深度処分施設のガス圧等の時間変遷の評価事例

余裕深度処分施設のガス移行影響を対象とした検討事例は非常に限定的であるが、例えば、熊谷らの論文[5]では、ガス影響評価解析において、図 3.5-13 に示すようなガス発生に伴う施設の処分システムの状態変化が設定されており、長期的な状態設定において着目されているパラメータとしては、K（絶対浸透率）、 Sw（水飽和度）、 Krw（水相相対浸透率）、 Krg（ガス相相対浸透率）である。図によると、操業期間中に相当する期間（～$10^3$ 年）の状態変化としては、低拡散層、低透水層ともに劣化はほとんどなく、絶対浸透率に関しても、バリアの劣化はなく低透水性を維持しているものとされている。また、当該期間に施設の再冠水は進行し、低透水層は高飽和度を維持、低拡散層は緩やかに飽和度が上昇する状態となり、飽和の進展にしたがって、相対浸透率は水相が上昇し、ガス相は減少するとされている。

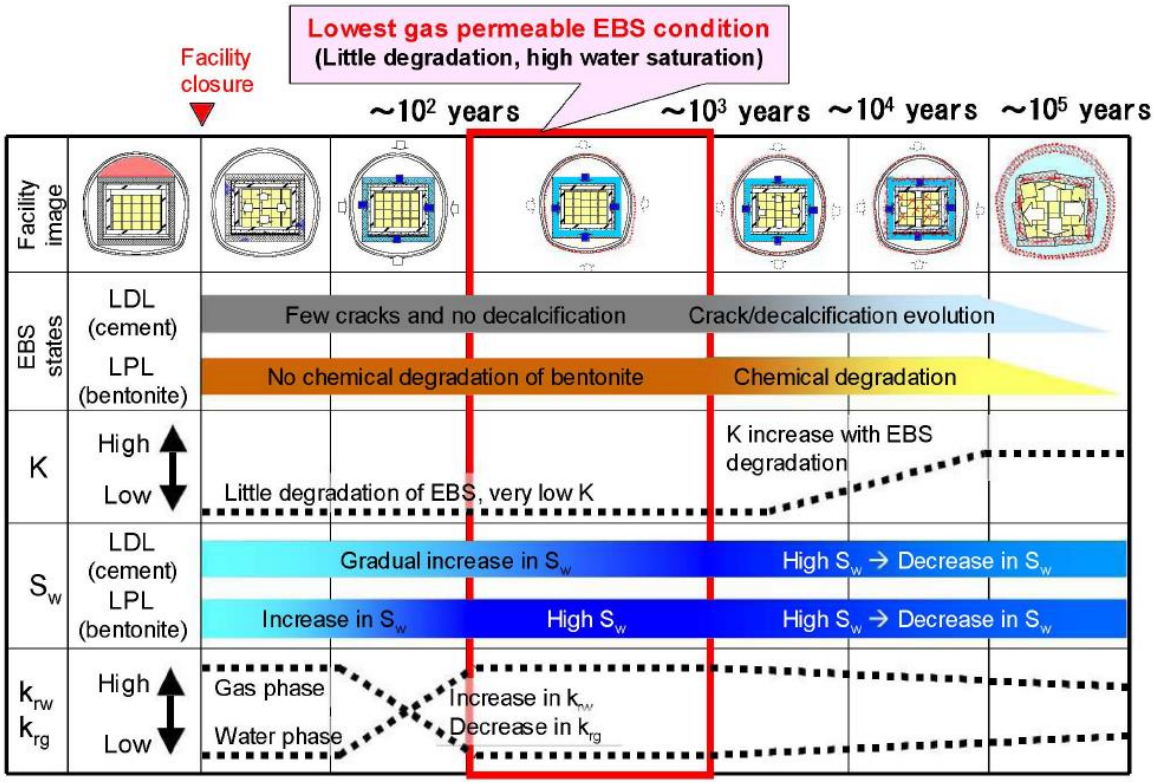



図 3.5-13　処分施設の状態変遷

施設からのガス発生量 5Nm³/y/Lot および 20 Nm³/y/Lot を設定して、施設の再冠水後 1,000 年間のガス移行挙動に伴う施設の健全性を解析的に評価した結果、発生量 5Nm³/y/Lot のケースでは、発生したガスは主要なバリアに損傷を与えないと予想されること、その一方で、発生量 20Nm³/y/Lot のケースでは、個々のバリア材にガス圧の明確なピークが見られ、低拡散層（セメント系バリア材）においては局所的に発生応力が引張応力を超える、すなわち、クラックが発生する可能性があることが示されている。論文では、結論として、ガス発生量があるレベル以下であれば、発生ガス圧は、バリア材に力学的な損傷を与えるものではないとされている。

(5) ガス移行シナリオのまとめ

先に記した原子力安全委員会[22][23]によるシナリオの考え方を整理すると、表 3.5-12 のようになる。表は評価すべきシナリオの概念的な考え方を示しており、基本シナリオで考慮する個別シナリオにおいて想定する具体的なガスの挙動は示されていない。また、変動シナリオでは、基本シナリオで想定した諸量の不確かさ（変動）を考慮した確認が示されている。

表 3.5-12　ガス移行シナリオの考え方

<table>
<tr><th colspan="2">基本ガス移行シナリオ</th><th>変動ガス移行シナリオ</th></tr>
<tr><td>水素ガス等のガス移行シナリオ</td><td>基本地下水シナリオにおいて想定する人工バリアの状態や地下水の移行に対するガス移行の影響を評価</td><td rowspan="2">基本ガス移行シナリオで想定されている放射性ガス等と水素ガス等について、ガスの発生量及び発生速度の不確かさ、人工バリアのガス透気特性に関する不確かさ、及び天然バリア中のガス移行挙動に関連する不確かさ等を考慮しても「めやす」を超えないことに十分な合理性があることの確認</td></tr>
<tr><td>放射性ガス等の放射性物質を含むガス移行シナリオ</td><td>ガスそのものの移行を考慮したガス移行シナリオとして評価</td></tr>
</table>

具体的なガスの挙動として、埋戻し～閉鎖を経て廃棄体の閉じ込め性能が維持されている期間における一般的な挙動としては以下のように想定される。

- 飽和の進展に伴う地下水の EBS 内への侵入により、放射性分解及び金属の腐食等によりガスが発生する。
- 廃棄体が閉じ込め性能を維持している期間において放射性核種は物理的に閉じ込められている。
- 非放射性ガスは人工バリアの各構成部材の境界面に蓄積するか、あるいは部材中を移流、拡散、あるいは二相流で移行した後、周辺岩盤に放出される。

このようなガスの発生・移行挙動が放射性廃棄物処分に及ぼす潜在的な影響としては、国内外の検討でも示されているとおり、以下のように示すことができる。

- バリアの力学的健全性への影響
- 汚染水の押出しへの影響
- 放射性ガス放出、可燃性ガス放出の影響

バリア（人工バリア）の力学的健全性について、前述のガス影響評価例では、嫌気性金属腐食と水の放射性分解等を考慮してガス発生量を算出し、発生ガス圧に対するバリア材の力学的健全性を解析的に評価している。ガスの発生により、低透水層および低拡散層等のバリア材に作用するガス圧が時間とともに上昇し、バリア材に変形を及ぼし、許容応力を超えた場合には損傷に至り、バリア材の健全性が損なわれる結果となる。

このようなバリアの健全性に影響を与える事象としては、①人工バリアシステムの再冠水の進展、②バリア中の金属腐食等によるガス発生、③ガスの発生に伴う間隙圧力の上昇、③き裂の発生によるバリア機能の低下、等があげられる。これらの事象は、低透水層や低拡散層の機能と連関づけられ、機能の評価において重要度の高いパラメータとしては、土木学会の考え方における重要度の高いパラメータの分類[38][39]で示すと、低透水層では透水特性、強度・変形特性や厚さ、低拡散層では強度・変形特性、拡散特性、ひび割れ開口面積や厚さ、等があげられる。

汚染水の押出しへの影響に関しては、TRU でのガス影響評価[33]では、ガス発生に起因する施設よりの累積押出し水量を解析的に評価し、これを「ガス発生によるセメント間隙水の押出し」として、核種移行解析における地下水移行シナリオに考慮することにより評価を実施している。汚染水の押出しはバリア材の透水係数に因る部分が多く、影響を与える事象としては、①人工バリアシステムの再冠水の進展、②バリア中の金属腐食によるガス発生、③ガス移行やガス圧の上昇による間隙水の排出、等があげられる。これらの事象は、バリアの健全性と同様に透水層や低拡散層の機能と連関づけられ、低透水層では透水特性や厚さ、低拡散層では透水特性や厚さ、等があげられる。

また、放射性ガスの影響に関して GASNET[15]の見解では、ガスの構成分子となる放射性核種のうち、気体となり得る化学形態を形成する可能性等からは実質的に C-14 のみが放射線学的影響を及ぼし得るとされており、C-14 を含有する可能性のあるガスとして $CO_2$ 及び $CH_4$ が示されている。$CO_2$ については水への溶解度が高く、特にセメント環境下では地下水中に高濃度で存在する Ca と反応して $CaCO_3$ として沈殿を生じ、気体状で地表に到達することはほとんどないと考えられでいる。

$CH_4$ については、TRU ガス検討[12]では、気体状放射性物質として C-14 を含有する $CH_4$ を考慮した解析を各廃棄体グループに対して実施し、ある廃棄体グループでは 10,000 年程度でガス状の $^{14}CH_4$ が僅かながら地表に到達する結果となっている。可燃性ガスに関しては、水素ガス（$H_2$）とメタンガス（$CH_4$）の放出が一般的には考えられる。放射性ガス、可燃性ガスの生物圏への放出に関しては、人工バリアに関連する影響事象としては、①人工バリアシステムの再冠水の進展、②バリア中の金属腐食によるガス発生、③気相あるいは溶存ガスとしての気体状放射性核種の移行、等があげられ、健全性や汚染水の押出しへの影響と同様のパラメータが抽出されるが、全体としては、気体状ガスの主要な移行経路となる天然バリアの状態の影響が大きいと考えられる。

以上に述べたガス移行シナリオ基づく安全評価は、基本的に、施設の閉鎖が完了した後を対象として評価であり、操業期間中は、安全評価の基本的な前提条件を満たしていることを確認することが主となる。

シナリオに影響を与える主要パラメータは、バリアの力学的健全性への影響、汚染水の押出しへの影響の観点からは、低透水層の強度・変形特性や厚さ、飽和度、透水特性、低拡散層の強度・変形特性、拡散特性、ひび割れ開口面積や厚さが、抽出された。また、放射性ガス、可燃性ガスの放出については、天然バリアの状態の影響が大ではあるが、他の影響と同様のパラメータが抽出された。これらのパラメータは、既往文献調査結果に基づく各部位ごとの安全評価上重要度の高いパラメータと共通しており、埋設・保全段階を含む操業期間中に実施可能なモニタリングについては、これらに包含できると考える。したがって、モニタリング方法についても、他と共通した方法が適用できると考える。

## 3.6 人工バリアの安全機能に関する重要パラメータの抽出

前述の検討結果に基づき、パラメータの抽出の検討方法を整理すると以下のようになる。

- 基本安全機能による各部材の主要な要求機能から、考慮すべき事象、状態変化や相互関係を整理し、パラメータを抽出した。
- 安全評価上の感度が高い主要なパラメータを抽出した。
- 基本シナリオに対し変動シナリオで考慮されているパラメータについて確認した。

この整理結果を表 3.6-1 および表 3.6-2 に示す。表 3.6-1 より、セメント系材料における状態変化として、特に安全評価による感度の高いパラメータは、核種収着性における収着分配係数、低拡散性および低透水性における実効拡散係数および透水係数、ひび割れにおける鋼材腐食速度、鋼材腐食膨張率、鋼材弾性係数、セメント系材料の弾性係数および強度およびベントナイトの膨潤圧が抽出された。

一方で、表 3.6-2 より、ベントナイト系材料における状態変化として、特に安全評価による感度の高いパラメータは、低透水性における透水係数が抽出された。

その他として、これら人工バリアの安全機能の前提となる、埋設施設全体の形状維持に係る力学的挙動の評価、安全評価による感度の高いパラメータである廃棄体の溶出速度が挙げられる。

これらのパラメータは、埋設施設近傍の代表的な環境条件、すなはち、熱、水理、力学および化学条件に依存する。したがって、これら環境条件の経時変化を捉えることも重要である。

- 熱　：廃棄体の発熱、地温等
- 水理：地下水の流速・流向等
- 力学：埋設施設に作用する地圧、地震動等
- 化学：人工バリアの健全性に影響を与える物質（例えば、硫酸塩や硝酸塩）や地下水の水質（例えば、pH、酸化還元電位やイオン強度）

また、3.2 節に示したように、土木学会等[38][42]で、安全評価上の重要性を踏まえて、埋設施設施工時の検査項目が設定されているが、上記の整理により、あらためて、検査項目の妥当性が確認できたことになる。ただし、安全評価上重要度の高いパラメータは、例えば、透水係数を、直接、施設施工時や、その後、継続的にモニターすることは困難である。したがって、例えば、施工時のパラメータ値は、事前に取得したパラメータの試験条件と実施工時の条件が同等であることを確認したうえで、事前に取得したパラメータ値を用いることが適当と考えられる。その後のパラメータ値のモニターは、対象とするパラメータに関連し、かつ、計装やサンプリングで測定可能なパラメータや代表的な物理量（状態変数等）で行うことが考えられる。

表 3.6-1　セメント系材料の安全評価上重要度の高いパラメータと関連項目

| 基本安全機能 | 安全評価上重要度の高いパラメータ | 関連パラメータ | 影響要因 | 状態変数等 |
|---|---|---|---|---|
| 核種収着性 | 収着分配係数 | 鉱物組成 | | |
| | | 収着体積 | | |
| | | 間隙水の水質 | 廃棄体中の影響物質 | |
| | | | 溶脱成分 | |
| | | | 地下水組成 | pH、Eh、塩濃度 |
| | | 温度 | 廃棄体の発熱 | 温度 |
| | | | 充填材の水和熱 | |
| 低拡散性 | 実効拡散係数 | 基質部の空隙構造（空隙率） | 地下水組成 | pH、Eh、塩濃度 |
| | | | コンクリート配合 | 材料、空気量、水セメント比 |
| | | | 溶脱 | |
| | | 健全部の厚さ | | |
| | | 温度 | 廃棄体の発熱 | 温度 |
| | | | 充填材の水和熱 | |
| 低透水性 | 透水係数 | ひび割れ開口面積 | 鉱物組成 | |
| | | | 圧縮強度 | 水セメント比、弾性係数 |
| | | | 廃棄体の発熱（熱応力） | 温度 |
| | | | 鉄筋の腐食膨張 | 腐食速度、体積膨張量、腐食生成物剛性 |
| | | | 廃棄体の腐食膨張 | |
| | | | ベントナイト膨潤 | 膨潤圧 |
| | | | 地下水組成 | pH、Eh、塩濃度 |
| | | | 廃棄体中の影響物質 | 硫酸塩濃度 |
| | | | ガス発生 | 圧力 |
| | | | 岩盤クリープ | クリープ変位量 |
| | | | 地震影響 | 加速度 |

表 3.6-2　ベントナイト系材料の安全評価上重要度の高いパラメータと関連項目

| 基本安全機能 | 安全評価による感度の高いパラメータ | 関連パラメータ | 影響要因 | 状態変数等 |
|---|---|---|---|---|
| 低透水性 | 透水係数 | 厚さ | 侵食等 | 地下水流速、塩濃度（イオン強度）、セメント間隙水組成 |
| | | | 変形 | 強度・変形係数、膨潤圧 |
| | | | 短絡経路の形成 | ガス圧力、膨潤圧 |
| | | 密度 | 鉱物組成 | モンモリロナイト密度 |
| | | | 鉄筋の腐食膨張 | 腐食速度、体積膨張量、腐食生成物剛性 |
| | | | 廃棄体の腐食膨張 | |
| | | | 沈下 | 強度・変形係数 |
| | | | ガス発生 | 圧力 |
| | | | 岩盤クリープ | クリープ変位量 |
| | | | 地震 | 加速度 |
| | | | 侵食等 | 地下水流速、塩濃度（イオン強度）、セメント間隙水組成 |
| | | | 変質 | 地下水組成、温度 |
| | | 膨潤圧 | 密度 | モンモリロナイト密度 |
| | | | 層間イオンの変化 | 地下水組成、セメント間隙水組成 |
| | | | 地下水組成 | 塩濃度（イオン強度） |
| | | 温度 | 廃棄体の発熱 | 温度 |
| | | | 充填材の水和熱 | |

## 3.7　モニタリング期間中での値の変化の可能性

モニタリング期間（埋設段階）では、建設、操業、埋戻しまでの過程が含まれる。人工バリアの劣化挙動は、周辺環境の影響を大きく受ける。周辺環境は、地下水作用の有無、すなわち冠水前後で大きく異なる。また、冠水の有無は、埋戻しの有無によって異なる。

ここでは、モニタリング期間を、建設から埋戻し終了までの期間と、埋戻し終了から保全段階終了までの期間に分け、前項 3.6 で整理した、安全評価上重要度の高いパラメータと関連項目を参照し、表 3.7-1、表 3.7-2 および表 3.7-3 に、モニタリング期間において実処分施設でのパラメータの変化の可能性について検討した。

埋戻しまでの期間について、例えば、セメント系材料（低拡散層）は大気環境中に存在するため、大気中に存在する一般的な土木構造物と同様の変状の発生が推定される。ここで、大気中で生じる変状としては、一般に、中性化、乾燥収縮が考えられる。

一例として、中性化によって生じる影響としては、コンクリートピット中の鋼材腐食に起因するひび割れ発生が挙げられる。しかしながら、建設時において、コンクリートピットは低拡散材で覆われていること、低拡散材は無筋の高強度モルタルで構成されることが想定されることを踏まえると、コンクリートピットが中性化の影響を受ける可能性は低いものと考えられる。なお、低拡散材は、無筋部材が想定されていることから、中性化によるひび割れは発生しないと考えられる。

一方で、乾燥収縮による影響としては、乾燥収縮ひび割れの発生が想定される。乾燥収縮ひび割れが発生すると、ひび割れ開口面積の増加が懸念される。乾燥収縮ひび割れを生じる可能性のある部材としては、低拡散層が挙げられる。

また、保全段階においては、例えば塩影響等により、分配係数や実効拡散係数、透水係数において変化が生じる可能性がある。

表 3.7-1　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（低拡散層）

| 基本安全機能 | 状態変化 | 影響要因 | 機能確認ポイント | 実処分施設における変化の可能性 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 建設～埋戻し終了 | 埋戻し終了～保全段階終了 |
| 核種収着性 | 収着性 | 地下水溶脱塩影響 | 分配係数 | 低い | 高い |
| 低拡散性透水性 | 低拡散性、透水性 | | 実効拡散係数 | | |
| | | | 透水係数 | | |
| | ひび割れ | 大気影響 | 開口面積 | 高い | 高い |
| | | 地下水溶脱塩影響 | 腐食速度 | | |
| | | | 腐食膨張倍率 | | |
| | | | 鋼材弾性係数 | 低い | 低い |
| | | | 弾性係数 | | 高い |
| | | | 強度 | | |
| | | | 膨張圧 | | 低い |

表 3.7-2　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（コンクリートピット）

| 基本安全機能 | 状態変化 | 影響要因 | 機能確認ポイント | 実処分施設における変化の可能性 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 建設～埋戻し終了 | 埋戻し終了～保全段階終了 |
| 核種収着性 | 収着性 | 地下水溶脱塩影響 | 分配係数 | 低い | 高い |
| 低拡散性透水性 | 低拡散性、透水性 | | 実効拡散係数 | | |
| | | | 透水係数 | | |
| | ひび割れ | 大気影響 | 開口面積 | 高い | 高い |
| | | 地下水溶脱塩影響 | 腐食速度 | | |
| | | | 腐食膨張倍率 | | |
| | | | 鋼材弾性係数 | 低い | 低い |
| | | | 弾性係数 | | 高い |
| | | | 強度 | | |
| | | | 膨張圧 | | 低い |

表 3.7-3　モニタリング期間中に推定される変化の有無とその程度（低透水層）

| 基本安全機能 | 状態変化 | 影響要因 | 機能確認ポイント | 実処分施設における変化の可能性 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 建設～埋戻し終了 | 埋戻し終了～保全段階終了 |
| 低透水性 | 低透水性 | 地下水溶脱塩影響 | 透水係数 | 低い | 低い |

## 3.8　主要パラメータや影響因子の計測可能性

表 3.7-1、表 3.7-2 および表 3.7-3 にて抽出した重要パラメータに影響を及ぼす因子を計測する場合、埋設施設の時系列変化における現場条件を勘案することが重要である。

文献[37]に示される、埋設施設の建設～坑道埋戻しまでの操業イメージを図 3.8-1 に示す。図より、埋設施設の建設にあたっては、まず、底部の低透水層、低拡散材およびコンクリートピットが構築される。次いで、側部のコンクリートピットおよび低拡散層が構築される。この間には、人間が埋設施設近傍まで直接接近することも可能であると想定される。一方、その後に廃棄体が定置されると、上部コンクリートピットが施工されるまでは、線量の高い環境となるため、直接接近することは困難となる。上部コンクリートピットの施工後は、再び人間が直接埋設施設に接近することが可能となる。低拡散層の施工後、坑道が埋戻されると、埋設施設に接近することは困難となる。埋設施設の施工ステップに伴う各部材の露出状態の推移を表 3.8-1 に示す。表より、例えば、実処分施設を対象として、人工バリアの各部材について外観観察（目視あるいは画像処理による観察）を実施する場合には、「施工されており、大部分が露出している」箇所に限られることとなる。

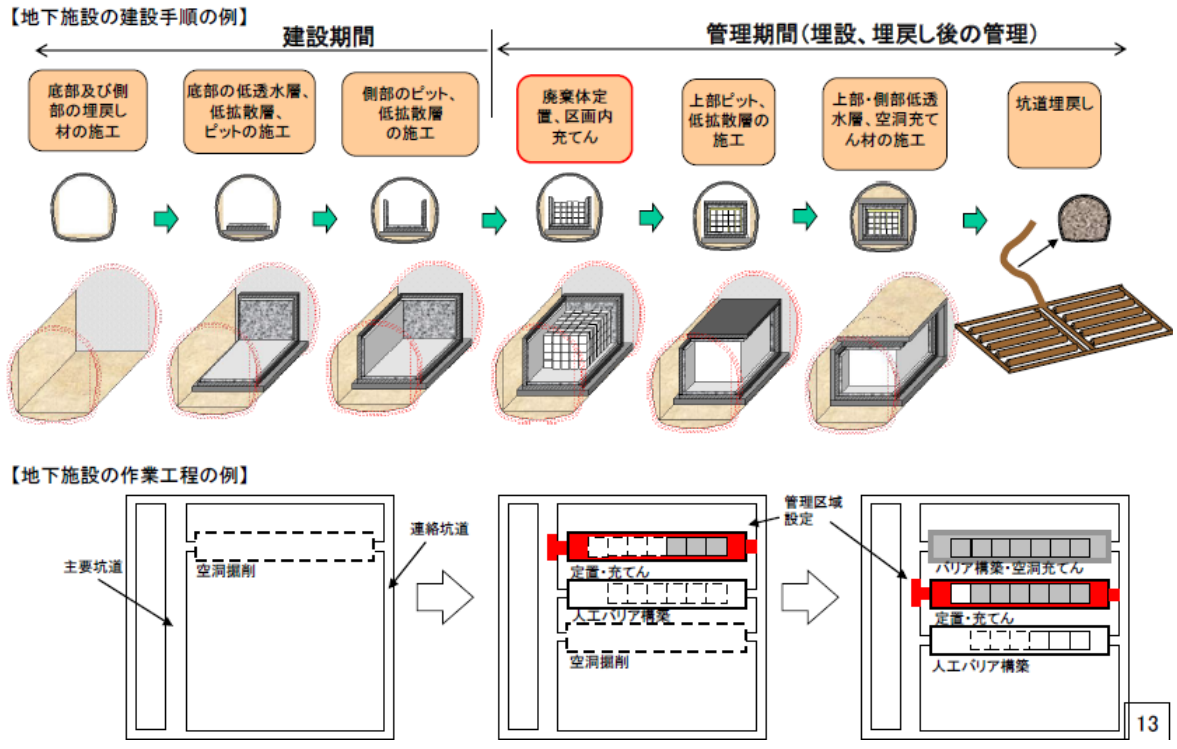



図 3.8-1　操業イメージ（埋設施設の建設～坑道埋戻し）

表 3.8-1　埋設施設の施工ステップに伴う各部材の露出状態の推移

| 施工ステップ | | 各部位における露出状態 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 低透水層 | | | 低拡散層 | | | コンクリートピット | | |
| | | 底部 | 側部 | 上部 | 底部 | 側部 | 上部 | 底部 | 側部 | 上部 |
| 1 | 底部および側部埋戻し材の施工 | － | － | － | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 底部透水層の施工 | ○ | － | － | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 底部低拡散層の施工 | ● | － | － | ○ | － | － | － | － | － |
| 4 | 底部コンクリートピットの施工 | ● | － | － | ● | － | － | ○ | － | － |
| 5 | 側部コンクリートピットの施工 | ● | － | － | ● | － | － | ○ | ○ | － |
| 6 | 側部低拡散層の施工 | ● | － | － | ● | ○ | － | ○ | ○ | － |
| 7 | 廃棄体定置・区画内充てん | ● | － | － | ● | ○ | － | ● | ● | － |
| 8 | 上部コンクリートピットの施工 | ● | － | － | ● | ○ | － | ● | ● | ○ |
| 9 | 上部低拡散層の施工 | ● | － | － | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● |
| 10 | 上部・側部低透水層の施工 | ● | ○ | ○ | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 11 | 空洞充てん材の施工 | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |
| 12 | 坑道埋戻し | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● | ● |

○：施工されており、大部分が露出している
●：施工されているが、大部分が露出していない
－：施工前

また、関連パラメータを測定する場合、測定対象によって候補となる計測手法が異なることが想定される。ここでは、実処分施設を対象として計測手法の候補を検討した。検討結果を表 3.8-2 から表 3.8-4 に示す。なお、実処分施設以外としては、地下模擬処分施設や地上/地下施設を対象として、センサ埋め込みによる計測、近傍ボーリング孔での水質調査、サンプリングによるデータ取得等でも測定できる可能性がある。これについては、第 4 章にて詳述する。

表 3.8-2　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（低拡散層）

<table>
<tr><th>基本安全機能</th><th>状態変化</th><th>影響要因</th><th>機能確認<br>ポイント</th><th>実処分施設における計測項目<br>※括弧内は計測方法の例</th></tr>
<tr><td>核種収着性</td><td>収着性</td><td rowspan="3">地下水<br>Ca イオン溶脱<br>塩影響</td><td>分配係数</td><td rowspan="9">● Ca イオン濃度（水質調査）<br>● pH（水質調査）<br>● ひび割れ幅・位置（目視調査，光ファイバーによるひずみ計測）</td></tr>
<tr><td rowspan="8">低拡散性<br>低透水性</td><td>拡散係数</td><td>拡散係数</td></tr>
<tr><td>透水係数</td><td>透水係数</td></tr>
<tr><td rowspan="7">ひび割れ</td><td>大気影響</td><td>開口面積</td></tr>
<tr><td rowspan="6">地下水<br>Ca イオン溶脱<br>塩影響</td><td>腐食速度</td></tr>
<tr><td>腐食膨張倍率</td></tr>
<tr><td>鋼材弾性係数</td></tr>
<tr><td>弾性係数</td></tr>
<tr><td>強度</td></tr>
<tr><td>膨張圧</td></tr>
</table>

表 3.8-3　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（コンクリートピット）

<table>
<tr><th>基本安全機能</th><th>状態変化</th><th>影響要因</th><th>機能確認<br>ポイント</th><th>実処分施設における計測項目<br>※括弧内は計測方法の例</th></tr>
<tr><td>核種収着性</td><td>収着性</td><td rowspan="3">地下水<br>Ca イオン溶脱<br>塩影響</td><td>分配係数</td><td rowspan="9">● Ca イオン濃度（水質調査）<br>● pH（水質調査）<br>● ひび割れ幅・位置（目視調査，光ファイバーによるひずみ計測）</td></tr>
<tr><td rowspan="8">低拡散性<br>透水性</td><td>低拡散性、<br>透水性</td><td>拡散係数</td></tr>
<tr><td>透水係数</td><td>透水係数</td></tr>
<tr><td rowspan="7">ひび割れ</td><td>大気影響</td><td>開口面積</td></tr>
<tr><td rowspan="6">地下水<br>Ca イオン溶脱<br>塩影響</td><td>腐食速度</td></tr>
<tr><td>腐食膨張倍率</td></tr>
<tr><td>鋼材弾性係数</td></tr>
<tr><td>弾性係数</td></tr>
<tr><td>強度</td></tr>
<tr><td>膨張圧</td></tr>
</table>

表 3.8-4　機能確認ポイントに関する計測項目および計測方法の例（低透水層）

| 基本安全機能 | 状態変化 | 影響要因 | 機能確認<br>ポイント | 実処分施設における計測項目<br>※括弧内は計測方法の例 |
|---|---|---|---|---|
| 低透水性 | 低透水性 | 地下水<br>Ca イオン溶脱<br>塩影響 | 透水係数 | ● 飽和度（水質調査）<br>● 層別沈下（レベル測定）<br>● Ca/Na イオン濃度、pH（水質調査） |

## 3.9　人工バリアの安全機能に影響を与える岩盤要因

表 3.6-1 および表 3.6-2 にて抽出した重要パラメータに影響を及ぼす因子として、周辺岩盤の影響が考えられる。そのため、各部材の状態変化に影響を与える周辺岩盤の状態をモニタリングすることが重要になる。周辺岩盤が人工バリアの安全機能に影響を与える要因について整理した結果を表 3.9-1 に示す。岩盤が人工バリアに影響を与えるのは埋戻し後になる。

核種吸着性に関しては、周辺地下水の再冠水によりコンクリートピットや低拡散層に水が浸潤した後、その地下水によりセメント水和物の溶脱や二次鉱物の生成により、分配係数や空隙率に影響が生じることが考えられる。

セメント系材料の低拡散性、低透水性に関しては、核種吸着性と同様、周辺地下水の再冠水によりコンクリートピットや低拡散層に水が浸潤した後、セメント水和物の溶脱や二次鉱物の生成が、拡散係数や透水性に影響を及ぼすと考えられる。その他にひび割れの形成が低拡散性に影響を与える。周辺岩盤からのひび割れ形成要因としては、岩盤クリープによる力学的な変形や地下水中の高硫酸イオンによる膨潤性エトリンガイト等の生成によるものが想定される。また、地下水の再冠水により周辺のベントナイトが膨潤する際、地下水の浸潤が不均一な場合は膨潤箇所が偏在し、不等変形による応力の発生によるひび割れの発生が想定できる。一方、鋼材腐食は廃棄体内からの硫酸塩によるものと想定できるため、周辺岩盤による影響からは外している。

ベントナイト系材料の低透水性に関しては、再冠水時後に周辺岩盤が塩水化し、塩の蓄積により空隙特性が変化すると共に、膨潤性能の低下が考えられる。モンモリロナイト等の溶解はセメント系材料からの高アルカリ性間隙水の浸入が考えられ、これは周辺地下水による影響とは異なるため検討から外している。

以上の整理結果に基づき、岩盤のモニタリング項目の検討を行った。周辺岩盤の状態については、埋戻し前においては人工バリアへ影響を与えないので、埋戻し後、再冠水による変化を確認することになる。ただし、初期値として埋戻し前から計測を行っておく必要がある。表 3.9-2 に計測項目を示す。

表 3.9-1　周辺岩盤の人工バリア安全機能への影響要因

| 基本安全機能 | 状態変化 | | | 関連パラメータ | 周辺岩盤による影響要因 |
|---|---|---|---|---|---|
| セメント系材料<br>核種収着性 | 収着性 | | | 分配係数 | ・地下水によるCSHの溶脱、<br>二次鉱物の生成 |
| | 空隙増大 | 化学的状態変化 | | 空隙率 | |
| | | | | 密度 | |
| | CSH等の溶解 | | | 組成（成分） | |
| セメント系材料<br>低拡散性<br>低透水性 | 低拡散性、低透水性 | | | 実効拡散係数 | ・地下水によるCSHの溶脱、<br>二次鉱物の生成 |
| | | | | 透水係数 | |
| | ひび割れ | 力学的状態変化<br>セメント系変形 | 鋼材腐食 | 腐食速度 | -(廃棄体内部からの影響) |
| | | | | 腐食膨張倍率 | |
| | | | | 鋼材弾性係数 | |
| | | | 剛性・強度低下 | 弾性係数 | ・岩盤クリープ<br>・地下水中の高硫酸イオンによる膨潤性エトリンガイト等の生成 |
| | | | | 強度 | |
| | | | ベントナイト変形 | 膨張圧 | ・地下水のベントナイトへの浸潤過程の偏在 |
| | 空隙増大 | 化学的状態変化 | | 空隙率 | ・地下水によるCSHの溶脱、<br>二次鉱物の生成 |
| | CSH等の溶解 | | | 組成（成分） | |
| ベントナイト系材料<br>低透水性 | 低透水性 | | | 透水係数 | ・周辺地下水の塩水化による塩の蓄積 |
| | 層厚・密度変化 | 物理的状態変化<br>化学的状態変化 | ベントナイト変形 | 膨潤圧 | |
| | 特性変化 | 化学的状態変化 | Ca型化 | 周辺環境 | |
| | 密度変化 | | モンモリロナイト、随伴鉱物の溶解、高イオン凝集 | 密度 | -(セメント系材料からの影響) |
| | | | | 間隙率 | |
| | | | | 組成（成分） | |

表 3.9-2　モニタリング期間中の岩盤の測定項目

| 基本安全機能 | 状態変化 | 影響要因 | 機能確認ポイント | 周辺岩盤状態が与える影響 | 実処分施設における計測項目<br>※括弧内は計測方法の例 |
|---|---|---|---|---|---|
| 核種収着性 | 収着分配係数 | 地下水溶脱塩影響 | 分配係数 | ・地下水によるCSHの溶脱、<br>二次鉱物の生成 | 空洞周辺地下水圧（間隙水圧測定）<br>地下水組成、pH、Eh（水質調査） |
| | | | 空隙率 | | |
| | | | 密度 | | |
| | | | 組成（成分） | | |
| 低拡散性<br>低透水性 | 拡散係数<br>透水係数 | | 実効拡散係数 | ・地下水によるCSHの溶脱、<br>二次鉱物の生成 | 空洞周辺地下水圧（間隙水圧測定）<br>地下水組成、pH、Eh（水質調査） |
| | | | 透水係数 | | |
| | ひび割れ | 大気影響 | 開口面積 | -(廃棄体内部からの影響) | - |
| | | 地下水溶脱塩影響 | 腐食速度 | | |
| | | | 腐食膨張倍率 | | |
| | | | 鋼材弾性係数 | | |
| | | | 弾性係数 | ・岩盤クリープ<br>・地下水中の高硫酸イオンによる膨潤性エトリンガイト等の生成 | 空洞内空変位（岩盤変位計測）<br>空洞周辺ゆるみ範囲（弾性波速度計測、BTVによる割れ目開口調査）<br>地下水組成、pH、Eh（水質調査） |
| | | | 強度 | | |
| | | | 膨張圧 | ・地下水のベントナイトへの浸潤過程の偏在 | 空洞周辺岩盤飽和度分布（TDR） |
| 低透水性 | 透水係数 | 地下水溶脱塩影響 | 透水係数 | ・周辺地下水の塩水化による塩の蓄積 | 空洞周辺地下水圧（間隙水圧測定）<br>地下水組成、pH、Eh（水質調査） |
| | 層厚 | | 膨潤圧 | | |
| | 特性変化 | | 周辺環境 | | |
| | 密度変化 | | 密度 | -(セメント系材料からの影響) | - |
| | | | 間隙率 | | |
| | | | 組成（成分） | | |

## 3.10　モニタリング結果の活用方法

### 3.10.1　既往の安全規制のモニタリングに対する考え方

原子力安全・保安部会[32]では、余裕深度処分事業に求められる定期的な安全レビューについて、その時点までに定置した廃棄体の量や今後定置する予定の廃棄体の量及び建設段階で得られる新たなデータ類、環境、地下水、地質モニタリング等の各種モニタリング等に加えて、国内外の研究や類似した原子力施設以外のトンネルや地下構造物等も含めて得られる最新知見に基づき行う必要があるとしている。また、事業者が自主的に、廃棄物埋設施設の安全性能を低下させない範囲で、操業中に一部埋め戻した部分について放射線モニタリング等を行い、環境中への放射性物質の漏えいの有無、埋め戻し後の長期的な閉じ込め性能等を確認する上で有効と考えられるデータを取得することは、安全レビューを行う際の重要な最新知見ともなりうるとしている。

また、原子力安全委員会[23]では、管理期間終了以後に係る安全評価の更新について、人工バリアの機能に応じて、管理期間終了までは、以下に示すような新しい科学技術的知見を反映した管理期間終了以後に係る安全評価を更新することで、評価結果に基づく判断（「めやす」を満足するか否か）の変更不要性、すなわち判断の根拠に係る不変性を確認する必要があるとしている。ただし、これは、個々の項目の数値的な厳密性というより、判断の根拠に係る「めやす」を満足していることをいうとしている。

- 廃棄体に関するデータ
- 管理期間終了までに蓄積される人工バリア、天然バリアの状態に関するデータ
- 各種モニタリングにより得られる地下水の流動や水質等を含む地質環境及び廃棄物埋設地の状態に関するデータ
- 実際の埋設施設と同等の条件を模擬した類似環境下での原位置試験あるいはそれを補完する室内試験等の間接的な方法により取得された廃棄物埋設地の状態設定に関するデータ

安全レビューに関しては、現行の第二種廃棄物埋設の事業に関する規則第 19 条の 2 第 1 項第 1 号に「最新の技術的知見を踏まえて、核燃料物質等による放射線の被ばく管理に関する評価を行うこと」と規定されている。また、原子力規制委員会は、「第二種廃棄物埋設施設の定期的な評価等に関する運用ガイド」（平成 25 年 12 月施行）で、「最新の技術的知見」の解釈として、評価の実施までに第二種廃棄物埋設施設に係る監視および測定の結果、国内外の研究開発・技術開発等によって得られた最新の知見であって、申請書の添付 3～7 の記載事項を更新するために必要なものとしている。なお、現在、原子力規制委員会は、余裕深度処分の安全規制について審議を継続しているが、安全レビューやモニタリングに関する考え方は、概ね、原子力安全・保安部会や原子力安全委員会の考え方と同等である。

以上を踏まえると、現行の安全規制のフレームを図 3.10-1 に示すが、モニタリング結果は、定

期的な安全レビューと、放射能の減衰に応じた埋設施設の保安のために講ずべき措置を変更する際（埋設段階から保全段階への移行、保全段階から廃止措置段階への移行などの事業の節目）の意思決定に活用されることになる。

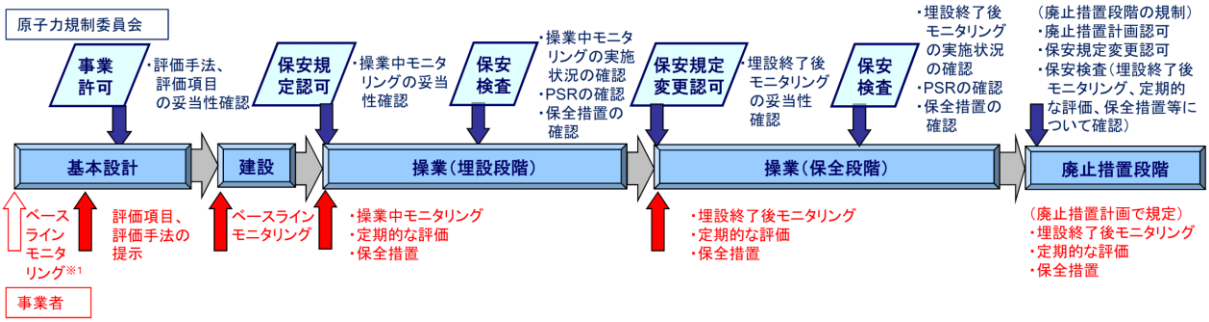



図 3.10-1 第二種廃棄物埋設の事業の安全規制のフレーム

### 3.10.2　モニタリング結果の活用の可能性

人工バリアの長期状態設定について、土木学会[38]は、図 3.10-2 に示す考え方が示されている。余裕深度処分における基本安全機能は、地下施設が設計・建設されて、「閉じ込め」、「遮へい」を確保した後に埋戻しがなされ、「移行抑制」、「離隔」へと推移していくこととなる[2]。埋戻しが完了した後は、離隔された状態であることを踏まえると、人工バリアに対して維持管理を実施することは困難であり、長期性能は徐々に低下していくことが想定される。したがって、人工バリアの長期的な性能・状態は、建設・操業段階の過程において、概ね決まるとされている[2]

図では、地下水シナリオの開始点として、施設の埋戻しが完了した時点が示されている。一方で、施設の性能は、施工時状態の時点が示されている。施工直後から埋戻し完了までは、およそ 100 年程度が推定されることから、施工時性能は、この期間中における機能低下を抑制するよう、設計対応がなされる。このことから、安全評価上の初期性能を満足するためには、建設・操業期間中における人工バリアの機能変化（機能低下）を考慮した上で、施工時性能を満足する必要がある。

モニタリング結果の活用方法として、建設・操業期間中（100 年程度）に人工バリアの挙動・状態をモニタリングすることで、安全評価上の初期性能に対する、人工バリアの性能を定期的に評価できる可能性がある。また、埋戻し完了後においても、モニタリングによってデータを取得することで、人工バリアの性能を定期的に評価できる可能性がある。

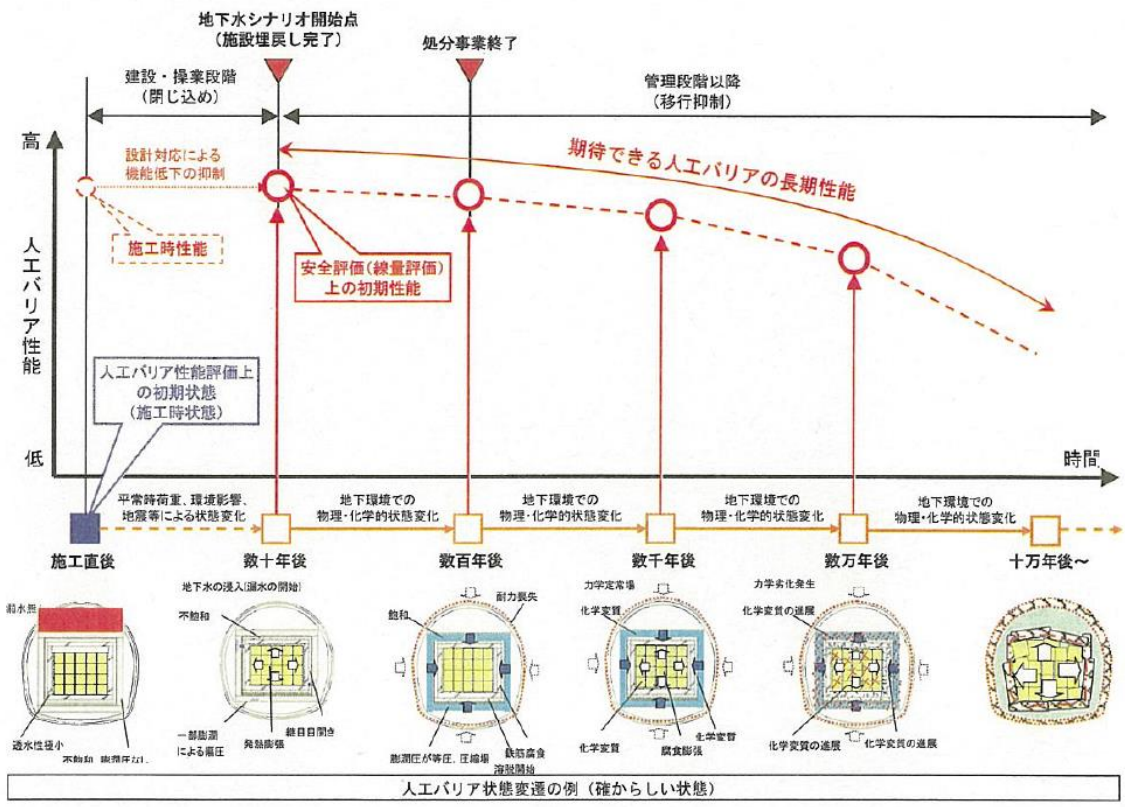



図 3.10-2　人工バリアの長期状態設定の考え方

モニタリング結果の活用方法については、原子力学会の文献[40]にも記載されている。余裕深度処分の基本安全機能を満たすための管理措置及びその管理項目について、表 3.10-1 に示す。埋設後段階における基本安全機能は移行抑制であり、そのための管理措置の一つとして安全レビューが設けられている。安全レビューの目的は「廃棄物埋設施設の長期的な安全性が岩盤、地下水、人工バリアなどに係る技術的に適用可能な最新の知見に照らしてもなお確保される見通しであることと」とされており、管理項目としては「処分システムの長期性能を損なわずに行えるデータの取得、整理」とされている。また、「余裕深度処分の埋設後段階においては、施設設計及び地質条件によって監視場所、監視頻度、監視期間などを個別に設定し、一定期間、移行抑制の監視、すなわち廃棄物埋設地からの漏出の監視と、生活環境への移行の監視を実施する」とされている。さらには「移行抑制の監視結果又は安全レビューの実施結果を考慮し、監視場所、監視頻度、監視期間などを見直すことができる」ともされており、本業務におけるモニタリング結果は、こうした知見にも反映できる可能性がある。

表 3.10-1　余裕深度処分における管理措置及びその管理項目

| 段階 | 基本安全機能 | 管理措置 | | 管理項目 |
|---|---|---|---|---|
| | | 区分 | 目的 | |
| 建設・埋設段階 | 遮へい | 監視 | ・周辺監視区域の線量限度を超えないようにすること。 | ・周辺監視区域の直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線に係る線量当量の測定 |
| | 閉じ込め | 廃棄物埋設地に係る保全 | ・廃棄物埋設地の閉じ込めを維持すること。 | ・周辺監視区域への立ち入り制限<br>・埋設設備の巡視・点検、監視設備の維持管理<br>・埋設保全区域の設定、埋設保全区域の巡視・点検 |
| | | 監視 | ・閉じ込めが設計どおりに機能していること（有意な漏出のないこと。） | ・湧水、近傍地下水などにおける放射性物質濃度の測定 |
| | | | ・周辺監視区域の濃度限度を超えないようにすること c)。 | ・周辺地下水中の放射性物質濃度の測定 |
| | 移行抑制 a) | 坑道の埋戻し部の施工 b) | ・放射性物質の卓越した移行経路を形成しないこと。 | ・埋戻し材の選定方法<br>・坑道の埋戻し部の施工方法 |
| | | 安全レビュー | ・廃棄物埋設施設の長期的な安全性が岩盤、地下水、人工バリアなどに係る技術的に適用可能な最新の知見に照らしてもなお確保される見通しであること。 | ・国内外の最新知見の収集、整理<br>・検査、品質管理、記録に係るデータの取得、整理 |
| | 隔離 a) | 坑道の埋戻し部の施工 b) | ・廃棄体近傍への人間の容易な侵入を防止すること | ・埋戻し材の選定方法<br>・坑道の埋戻し部の施工方法 |
| | | 安全レビュー | ・廃棄物埋設施設の長期的な安全性が当該施設の深度などに係る技術的な適用可能な最新の知見に照らしてもなお確保される見通しであること。 | ・国内外の最新知見の収集、整理<br>・検査、品質管理、記録に係るデータの取得、整理 |
| 埋戻後段階 | 移行抑制 | 廃棄物埋設地に係る保全 | ・廃棄物埋設地の移行抑制を維持すること。<br>・掘削などの特定行為を禁止又は制約すること。 | ・埋設保全区域の設定、埋設保全区域の巡視・点検<br>・特定行為に係る立札などの設置と維持管理 |
| | | 監視 e) | ・移行抑制が適切に機能していること f)。（漏出状況、生活環境への移行） | ・近傍地下水中の放射性物質濃度の測定<br>・周辺監視区域 d)内の地下水中の放射性物質濃度の測定 |
| | | | ・周辺監視区域 d)の濃度限度を超えないようにすること。 | ・周辺地下水中の放射性物質濃度の測定 |
| | | 安全レビュー | ・廃棄物埋設施設の長期的な安全性が岩盤、地下水、人工バリアなどに係る技術的に適用可能な最新の知見に照らしてもなお確保される見通しであること。 | ・処分システムの長期性能を損なわずに行えるデータ取得、整理 |

注　a) 機能が確保されるべき時期の以前に管理措置が取られることもある。
b) この管理項目の中に設計、施工管理、施工時の品質管理を含む。
c) 法令要求事項。
d) 埋戻後段階における周辺監視区域の設定は、周辺公衆の放射線防護のために管理を行う期間設定される(6.2.2 参照)
e) 施設設計及び地質条件によって監視場所、監視頻度、監視期間などを個別に設定し、一定期間移行抑制の監視、すなわち廃棄物埋設地からの漏出の監視と、生活環境への移行の監視とを実施する。ただし、移行抑制の監視結果又は安全レビューの実施結果などを考慮し、監視場所、監視頻度、監視期間などを見直すことができる。
f) “移行抑制が適切に機能していること”とは、設計・安全評価の時点で見込んだ移行状況を有意に逸脱する事象が生じていないことを意味する。具体的には、放射性物質の移行状況が安全評価において想定した程度あるいはそれ以下に収まっていることを言う。

また、文献[40]には、安全レビューのために改めてデータの取得を行う場合には、データの取得条件、すなわちデータの取得項目、取得方法、取得場所、取得頻度を定めておく必要があるとされている。文献[40]に示されるデータ取得項目の選定の考え方を図 3.10-3　データ取得項目の選定の考え方に示す。図中における「現在の技術水準で当該事業に則したデータ取得」とは、“安全レビューの計画（計画の見直しを含む）を行う時点において、技術的に可能な方法で、安全評価の対象としている処分システムに関係しているデータを取得する”ということを示しており、これを容易かつ安全に行うことができるか、という観点でデータ取得項目を選定する。ここで、“容易かつ安全に行うことはできるか否か”の判断因子は、「データ取得の有用性」および「処分システムの長期性能を損なわないか否か」とされている。

現在の技術水準で当該事業に則したデータとしては、処分空洞、坑道および既存ボーリング孔より取得できる地下水データ又は実施設より取得できるデータが考えられる。地下水データは、地下水位などの物理データと地下水組成などの化学データがある。

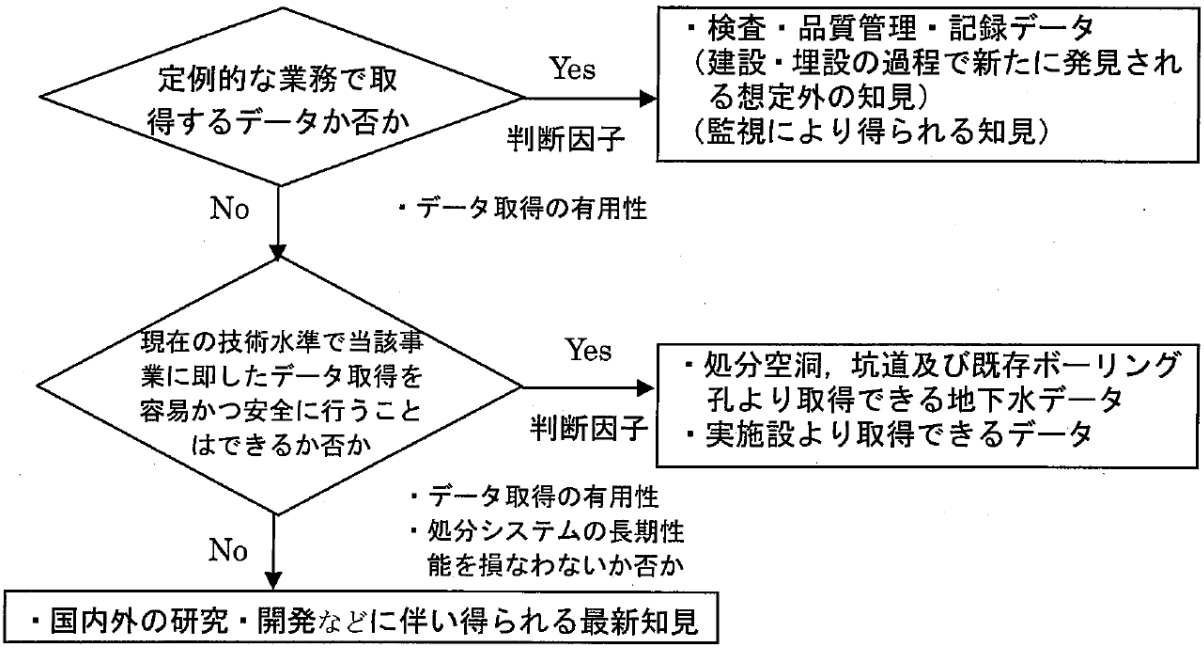



図 3.10-3　データ取得項目の選定の考え方

## 3.11　モニタリング対象および項目の絞り込み

以上の検討を踏まえ、モニタリング対象およびモニタリング項目の絞り込みを行った。結果を表 3.11-1 に示す。

表 3.11-1　モニタリング対象およびモニタリング項目

| モニタリング対象 | 部位 | モニタリング項目 |
|---|---|---|
| 実処分施設 | 低透水層 | 沈下などレベル測定 |
| | 低拡散層 | ひび割れなど表面観察 |
| | | 部材表面でのセンサ計測<br>（表面への貼り付け） |
| | 周辺環境 | 地中無線によるセンサ計測<br>（部材への埋め込み） |
| | | 近傍ボーリング孔での水質調査 |
| | | 地上・近傍からの非破壊探査 |
| 地下模擬処分施設 | | センサ埋め込みによる計測 |
| | | 近傍ボーリング孔での水質調査 |
| | | サンプリングによるデータ取得 |
| 地上/地下施設 | | サンプリングによるデータ取得 |

# 3 章　参考文献


[1] IAEA: Disposal of Radioactive Waste, Specific Safety Requirements, IAEA Safety Standards Series No. SSR-5, 2011.

[2] IAEA: Monitoring and Surveillance of Radioactive Waste Disposal Facilities, Specific Safety Guide No. SSG-31, 2014.

[3] IAEA: The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. SSG-23, 2012.

[4] FORGE：Synthesis Report: Updated Treatment of Gas Generation and Migration in the Safety Case, Report D1.5R, 2013.9.

[5] Kumagai, M., Yamamoto, S., Takeuchi, K., Tanaka, Y. and Hirognaga, M.: Study on mechanical influence of gas generation and migration on engineered barrier system in radioactive waste disposal facility. (2010)

[6] Michau, N.: ECOCLAY II: Effects of cement on clay barrier performance, Andra Report, C.RP.ASCM.04.0009, 2005.

[7] MoDeRn: Monitoring During the Staged Implementation of Geological Disposal, Modern Deliverable D-6.1, 2014

[8] NAGRA: Geochemical Evolution of the L/ILW Near-field, TechnicalReport 14-11,2014.10.

[9] NAGRA: An Assessment of the Impact of the Long Term Evolution of Engineered Structures on the Safety-Relevant Functions of the Bentonite Buffer in a HLW Repository, Technical Report 13-02, 2014.

[10] NRC: Disposal of High- Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada, 10 CFR Part 63, 2001.

[11] NRC: Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61, NUREG-2175, 2015.

[12] OECD/NEA: Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, 2012.

[13] OECD/NEA: Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions, 2012.

[14] POSIVA: Bentonite-Cement Interaction –Preliminary Results from Model Calculations, Working Report 2009-37.

[15] Rodwell, W.R. and Nords, S.: “A Thematic Network on Gas Issues in Safety Assessment of Deep Repositories for Nuclear Waste (GASNET)”, 2003

[16] Savage, D., Walker, C., Arthur, R., Rochelle, C., Oda, C., Takase, H.: Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids: A review of the role of secondary minerals, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 32, Issues 1–7, pp.287-297, 2007.

[17] SKB: Progress report on evaluation of long term safety of proposed SFL concepts, R-13-41,

2013.12.
[18] SKB: SFL concept study Main report, TR-13-14, 2013.12.
[19] Watson, C., Benbow, S. & Savage, D.: Modelling the interaction of low pH cements and bentonite. Issues affecting the geochemical evolution of repositories for radioactive waste. SKI Report 2007:30, 2007.
[20] 核燃料サイクル機構東海事業所 : TRU 廃棄物処分におけるガス発生・移行解析（研究報告）, JNC TN8400 2005-026, 2005.9.
[21] 京谷修:放射性廃棄物処分施設の設計検討状況, 第 60 回土木学会年次学術講演会研究討論会, 資料　研-08, 2005 年 9 月.
[22] 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 : 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する技術資料（案）, 放廃第 31-2 号, 平成 22 年 8 月 5 日.
[23] 原子力安全委員会：原子力安全委員会決定, 第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方, 平成 22 年 8 月 9 日.
[24] 原子力安全委員会：人工バリアに関する長期的安全確保の考え方の整理(案), 第 18 回第二種廃棄物埋設分科会　資料　二分第 18-4 号, 平成 21 年 6 月 9 日.
[25] 原子力安全委員会：放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について, 平成 16 年 6 月 10 日.
[26] 原子力安全基盤機構 : 平成 18 年度　放射性廃棄物処分に関する調査（余裕深度処分に関する調査）　平成 19 年 9 月
[27] 原子力安全基盤機構 : 平成 20 年度　放射性廃棄物処分に関する調査（余裕深度処分に関する調査）　平成 21 年 11 月
[28] 原子力安全基盤機構：低レベル放射性廃棄物処分施設の代表的な安全評価シナリオの解析例, 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 低レベル放射性廃棄物埋設分科会, 埋分第 6-1 号, 平成 18 年 9 月 19 日
[29] 原子力規制委員会：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（平成二十五年十二月六日原子力規制委員会規則第三十号）
[30] 原子力規制委員会：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（平成 25 年 11 月 27 日 原管廃発第 1311277 号）
[31] 原子力規制庁：廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム会合資料（第 1 回～第 7 回）
[32] 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会廃棄物安全小委員会：低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に係る安全規制について, 平成 20 年 1 月 18 日.
[33] 電気事業連合会, 核燃料サイクル開発機構 : TRU 廃棄物処分技術検討書 －第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発とりまとめ－, 2005.
[34] 電気事業連合会：余裕深度処分に関する検討状況について, 原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会 放廃第 17-4 号, 平成 19 年 10 月 18 日.
[35] 電気事業連合会 : 余裕深度処分に関する検討状況について, 原子力安全委員会放射性廃棄物・

廃止措置専門部会, 平成 19 年 10 月 18 日.
[36] 電気事業連合会 : 余裕深度処分に関する検討状況について, 原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会, 平成 19 年 10 月 18 日.
[37] 電気事業連合会：余裕深度埋設の概要　第 6 回 埋設処分技術ワーキンググループ、平成 23 年 1 月 19 日
[38] 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方, 土木学会, 2009 年 7 月.
[39] 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会, 2008 年 6 月.
[40] 日本原子力学会標準委員会：低レベル放射性廃棄物の埋設地に係る埋戻し方法及び施設の管理方法：2010, AESJ-SC-F016:2010, 2011.2.
[41] 日本原子力学会標準委員会：余裕深度処分の安全評価手法: 2008, AESJ-SC-F012:2008, 2009.5.
[42] 日本原子力学会標準委員会 : 余裕深度処分施設の施設検査方法 : 2010, AESJ-SC-F019:2010, 2011.5.
[43] 日本原子力学会標準委員会 : 浅地中ピット処分の安全評価手法 : 2012, AESJ-SC-F023 : 2012, 2013.7.
[44] 日本原燃(株)：六ヶ所低レベル放射性廃棄物埋設センター　廃棄物埋設事業許可申請書　昭和 63 年 4 月（一部補正　平成 9 年 9 月）