平成27年度~平成31年度

低レベル放射性廃棄物の処分に関する 技術開発事業

地下空洞型処分施設機能確認試験

5ヵ年とりまとめ報告書

令和2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3章

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~平成 31 年度低レベル放射性廃棄 物の処分に関する技術開発事業地下空洞型処分施設機 能確認試験の 5 ヵ年にわたる成果をとりまとめたもの です。

はじめに

地下 70m 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等から構成される地下空洞型処分施設は、低レベル放射性廃棄物に区分さ れる発電所廃棄物や TRU 廃棄物(地層処分相当の廃棄物を除く)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 の高い廃棄物を対象としていることや、地下 70m 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、地下空洞型処分施設は、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。このため、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、地下空洞型処分においては、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、こうした処分施設の長期管理の必要性 に鑑み、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により構成され る人工バリアについて、長期性能を確認するための考え方、モニタリング計画、性能確認の実現 性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 TRU 廃棄物の地層処分についても、 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。

本報告書は、平成27年度から平成31年度までの5ヵ年にわたる本事業の成果をとりまとめたものである。

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した。

報告書目次

第1章 全体概要1-
1.1 本事業の背景と目的
1.1.1 試験の背景1-
1.1.2 試験の目的1-
 1.2 地下空洞型処分施設機能確認試験の実施概要1-
第2章 地下空洞型処分施設機能確認試験の成果2-
2.1 国内外の既往研究成果等の調査
2.1.1 前提条件の整理
2.1.2 国内外の放射性廃棄物処分施設におけるモニタリングに関する既往研究成果の記
查2-
2.1.3 中深度処分における機能確認の目的と位置付け、モニタリングの制約条件の整理
2.1.4 中深度処分を対象とした既往検討成果の調査2-2
2.1 の参考文献
2.2 機能確認試験計画の策定2-7
2.2.1 具体的な機能確認試験計画の策定方法
2.2.2 モニタリングの前提条件の整理2-7
2.2.3 モニタリング対象施設の設定
2.2.4 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
2.2.5 機能確認試験計画の立案
2.2の参考文献
2.3 機能確認の実現性確認
2.3.1 モニタリング項目の抽出2-13
2.3.1の参考文献
2.3.2 施設挙動の定量化
2.3.2の参考文献
2.3.3 光ファイバセンサー技術の適用性検討2-44
2.3.3の参考文献
2.3.4 モニタリング計画の具体化に資する検討
2.3.4の参考文献
2.4 施設・岩盤挙動計測データの分析評価及び地震時挙動評価
2.4.1 施設・岩盤挙動計測データの分析評価 2-88
2.4.2 地震時挙動の分析評価

2.4の参考文献2-3	1051
3章 まとめと今後の課題	3-1
3.1 国内外の既往研究成果等の調査	. 3-1
3.2 機能確認試験計画の策定	. 3-1
3.3 機能確認の実現性確認	. 3-1
3.3.1 モニタリング項目の抽出	. 3-1
3.3.2 施設挙動の定量化	. 3-2
3.3.3 光ファイバセンサー技術の適用性検討	. 3-5
3.3.4 モニタリング計画の具体化に資する検討	. 3-8
3.4 施設・岩盤挙動計測データの分析評価及び地震時挙動評価	. 3-9

図目次

义	1.1 1	地下空洞型処分施設の概念図	1-2
义	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
义	2.1-2	中深度処分と浅地中処分、地層処分との違い	2-2
义	2.1-3	中深度処分施設の各部材の名称([5]に一部加筆)	2-5
义	2.1-4	フィンランドにおける地層処分施設のコンセプト([8]に加筆)	-15
义	2.1-5	スウェーデンにおける地層処分のコンセプト([9]に加筆)	-15
义	2.1-6	スイスにおける地層処分のコンセプト([10]に加筆)2	-16
汊	2.1-7	フランスにおける地層処分のコンセプト([11]に加筆)2	-17
汊	2.1-8	中深度処分施設と地層処分施設の構成部材の違い2	-20
汊	2.1-9	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	-26
汊	2.1-10	中深度施設の人工バリア構成の例[27]2	-29
汊	2.1 - 11	基本的要件と各埋設段階との対応関係の再整理[6]2	-31
汊	2.1 - 12	基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等(1/2)[6] 2	-32
汊	2.1-13	基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等(2/2)[6] 2	-33
义	2.1-14	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2	-40
义	2.1 - 15	セメント・ベントナイト相互作用の相関図2	-41
义	2.1 - 16	地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ2	-42
义	2.1 - 17	概念的な評価モデル2	-44
义	2.1-18	モデル評価体系の概念図2	-53
义	2.1 - 19	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 2	-53
义	2.1-20	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2	-54
义	2.1 - 21	飽和度の変化	-55
义	2.1 - 22	中深度処分における埋設施設の状態変化の例	-57
义	2.1 - 23	管理期間終了以後に係る安全評価シナリオの分類2	-58
义	2.1-24	地下水シナリオにおける核種移行評価モデル2	-63
义	2.1 - 25	人工バリアの主要パラメータに対する感度解析2	-65
义	2.1 - 26	処分場におけるガス発生の影響の範囲に関する概念図2	-67
义	2.1 - 27	ガス影響の解析結果2	-69
义	2.1 - 28	ガス異常放出評価モデルの概要2	-70
义	2.1 - 29	ガス異常シナリオの解析結果2	-70
义	2.1 - 30	処分施設の状態変遷2	-71
义	2.2-1	対象施設のイメージ2	-80
义	2.2-2	対象施設の適用が想定される事業段階のイメージ	-82
义	2.2-3	施工時性能、初期性能と長期性能の関係イメージ	-83
汊	2.2-4	埋設・保全段階の機能確認の役割2	-83

义	2.2 - 5	比抵抗計測装置(ウェンナー法)の概略図
义	2.2-6	飽和度と比抵抗の関係
义	2.2-7	Andra の中レベル廃棄物 (ILW) 処分坑道のセンサー設置イメージ (上下)
汊	2.2-8	モニタリング施設のスケールイメージ2-87
义	2.2-9	小規模モニタリング施設のイメージ
义	2.2-10	機能確認ポイントと計測値2-90
义	2.2-11	比抵抗値と飽和度・乾燥密度の関係2-91
义	2.2-12	シナリオの予察解析と試験計画への反映案2-92
义	2.2-13	検討手順のイメージ
义	2.2-14	埋設段階の解析例
义	2.2 - 15	光ファイバセンサーの耐久性試験イメージ
义	2.2-16	セメントペーストからの溶出に伴う pH の経時変化 2-94
义	2.2 - 17	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) 2-95
义	2.2-18	中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ(断面図)2-96
义	2.2-19	中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ(平面図)2-96
义	2.2-20	無線給電システムの概念と試験の例2-97
义	2.2-21	無線給電によるモニタリングの概念(HLW での例)2-97
义	2.2-22	吹付け工法による計器の設置検討例2-98
义	2.2-23	側部低透水層の水平掘削と埋戻し補修例
义	2.2-24	サンプリング方法が機能に及ぼす影響の検討イメージ
义	2.2-25	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
义	2.2-26	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
义	2.2-27	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)
义	2.2-28	局所浸潤による膨潤圧分布の例2-102
义	2.2-29	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) 2-103
义	2.2-30	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 2-103
义	2.2-31	流出現象を定量評価するための試験イメージ
汊	2.2-32	流出現象を定量評価例
汊	2.2-33	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)
汊	2.2-34	既存施設の現状のイメージ
义	2.2-35	既存施設の活用のイメージ
义	2.2-36	側部低拡散層(左側)の露出範囲(側面図) 2-108
义	2.2-37	上部低拡散層の露出範囲(平面図)2-108
义	2.2-38	手前コンクリートピットの露出範囲(正面図)2-109

义	2.2-39	光ファイバセンサーの計測結果からひび割れ発生状況を推定するイメージ
义	2.2-40	側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)2-110
义	2.2-41	上部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置案(平面図)2-110
义	2.2-42	KK シートの凹凸形状と手前コンクリートピット表面の状況2-112
义	2.2-43	手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置位置案(正面図).2-112
义	2.2-44	温度計測のための光ファイバセンサーの配置
义	2.2-45	光ファイバセンサーの配置イメージ2-113
义	2.2-46	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
义	2.2-47	既存施設に増築する際の周辺岩盤の性能評価イメージ
义	2.2-48	上部埋戻し材、上部・側部低透水層を撤去する試験計画のイメージ2-116
义	2.2-49	側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)2-117
义	2.2-50	側部低拡散層(右側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)2-117
义	2.2 - 51	上部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置案(平面図)2-117
义	2.2-52	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)2-118
义	2.2-53	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)2-118
义	2.2 - 54	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
		<i>7</i>)
义	2.2 - 55	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) 2-120
义	2.2-56	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
义	2.2-57	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(複合バリアシステ
		ムの長期浸漬試験)2-124
义	2.2-58	複合供試体の構成案2-124
义	2.2-59	試験土槽案 2-125
义	2.2-60	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2-127
义	2.2-61	地下模擬施設でのセンサーによる機能確認試験のイメージ2-128
义	2.2-62	地下模擬施設3次元モデルイメージ2-129
义	2.3-1	機能確認の実現性確認の検討フロー
义	2.3-2	操業イメージ(埋設施設の建設~坑道埋戻し)2-140
义	2.3-3	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低透水層、
		閉鎖措置段階前)2-147
义	2.3-4	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低透水層、
		閉鎖措置段階以降)2-148
义	2.3-5	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低拡散層、
		閉鎖措置段階前)2-149
义	2.3-6	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低拡散層、
		閉鎖措置段階以降)2-150
义	2.3-7	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(コンクリー

		トピット、閉鎖措置段階前)2-15
义	2.3-8	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(コンクリー
		トピット、閉鎖措置段階以降)2-155
义	2.3-9	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(区画内充て
		ん材、閉鎖措置段階前)2-153
义	2.3-10	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(区画内充で
		ん材、閉鎖措置段階以降)2-154
义	2.3-11	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(空洞内充て
		ん材、閉鎖措置段階以降)2-158
义	2.3-12	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(埋戻し材
		閉鎖措置段階以降)2-156
义	2.3-13	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(処分空洞
		閉鎖措置段階前)2-15'
义	2.3-14	機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(処分空洞
		閉鎖措置段階以降)2-158
义	2.3-15	中深度処分施設の廃止措置段階終了までに発生し得る挙動の整理(シナリオ
		整理表)
义	2.3-16	検討概要フロー2-166
义	2.3-17	人工バリアに着目した施設状態の設定イメージ2-16'
义	2.3-18	Bow-tie ダイヤグラムによる起因事象と影響の整理 2-168
义	2.3-19	挙動解析による処分モデルにおける各部材の飽和度経時変化[2] 2-169
义	2.3-20	活断層及び火山の影響に関する検討2-176
义	2.3-21	地震活動の影響に関する検討[5]2-171
义	2.3-22	人為事象の影響に関する検討2-175
义	2.3-23	偏膨潤に関する FTA 2-174
义	2.3-24	偏膨潤に関する ETA 2-174
义	2.3-25	解析ケース設定例2-175
义	2.3-26	熱、力学(応力変形)、二相流の相互影響
义	2.3-27	不飽和多孔質体の概念2-175
义	2.3-28	間隙比と平均有効応力の関係2-188
义	2.3-29	サクションと間隙比の関係 2-18′
义	2.3-30	(p、q) 面、(p、s) 面及び (p、q、s) 面での降伏曲面 2-189
义	2.3-31	有効応力及びサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面 2-189
义	2.3-32	試験空洞及び人工バリアの断面図[9]2-195
义	2.3-33	解析モデル
义	2.3-34	解析ステップ
义	2.3-35	境界条件の整理
义	2.3-36	低透水層の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)

义	2.3-37	コンクリートピットの二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)
义	2.3 - 38	低拡散層の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率) 2-199
义	2.3 - 39	廃棄体間及び上部充てん材の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)
义	2.3-40	上部埋戻し材(土質系)の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)
义	2.3-41	支保工及び側部埋戻し材(セメント系)の二相流曲線
义	2.3-42	クニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係[5] 2-204
义	2.3-43	小峯らの膨潤評価式に基づく飽和膨潤ひずみと有効拘束応力の関係[32]
义	2.3-44	構築時飽和度分布(-)(全体) 2-213
义	2.3-45	建設・埋設段階飽和度分布(-)(内部)(変形倍率:1倍)2-214
义	2.3-46	建設・埋設段階鉛直応力分布(MPa) 2-215
义	2.3-47	飽和度分布 (-) ① (変形:3倍)
义	2.3-48	飽和度分布 (-) ② (変形:3倍)
义	2.3-49	低透水層内における出力点2-218
义	2.3-50	低透水層の飽和度経時変化2-218
义	2.3-51	低透水層の平均有効応力(MPa)(変形:3倍) 2-220
义	2.3-52	低透水層の平均有効応力経時変化2-221
义	2.3 - 53	低透水層の乾燥密度分布(Mg/m3)(変形:3倍)2-223
义	2.3 - 54	クニゲル GX の透水係数と乾燥密度の関係[5] 2-224
义	2.3 - 55	低透水層の乾燥密度経時変化
义	2.3-56	低透水層の水平方向相対変位経時変化2-226
义	2.3-57	低透水層の鉛直方向相対変位経時変化2-226
义	2.3-58	セメント系部材の最大有効主応力(MPa) 2-227
义	2.3-59	セメント系部材の最小有効主応力(MPa) 2-228
义	2.3-60	セメント系部材の有効主応力方向①2-229
义	2.3-61	セメント系部材の有効主応力方向②(最大圧縮方向) 2-230
义	2.3-62	最大・最小有効主応力出力点(赤: RC ピット、黄: 低拡散層) 2-231
义	2.3-63	コンクリートピットの最大有効主応力の経時変化 2-232
义	2.3-64	コンクリートピットの最小有効主応力の経時変化 2-232
义	2.3-65	低拡散層の最大有効主応力の経時変化
义	2.3-66	低拡散層の最小有効主応力の経時変化
汊	2.3-67	セメント系部材の沈下量出力点2-234
义	2.3-68	セメント系部材の沈下量経時変化2-234
义	2.3-69	比較ケースにおける境界条件2-236
义	2.3-70	膨潤圧の設定

2.3-71	透水係数の設定2-2	237
2.3-72	比較ケースにおける状態表記による施工順序	238
2.3-73	飽和度分布(-)①(変形:3倍)	239
2.3-74	飽和度分布(-)②(変形:3倍) 2-2	240
2.3-75	出力点	241
2.3-76	低透水層の飽和度経時変化2-2	241
2.3-77	セメント系部材の最大有効主応力(MPa)	242
2.3-78	セメント系部材の最小有効主応力(MPa)	243
2.3-79	最大・最小有効主応力出力点(赤:RC ピット、黄:低拡散層) 2-2	244
2.3-80	コンクリートピットの最大有効主応力の経時変化	245
2.3-81	低拡散層の最大有効主応力の経時変化2-2	245
2.3-82	コンクリートピットの最小有効主応力の経時変化	246
2.3-83	低拡散層の最小有効主応力の経時変化	246
2.3-84	セメント系部材の沈下量出力点2-2	247
2.3-85	セメント系部材の沈下量経時変化2-2	247
2.3-86	セメント系部材の沈下量比較図	248
2.3-87	試験空洞及び人工バリア断面図2-2	254
2.3-88	解析モデル	255
2.3-89	熱伝導率の飽和度依存性(低透水層) 2-2	259
2.3-90	熱伝導率の飽和度依存性2-2	261
2.3-91	比熱の飽和度依存性	262
2.3-92	現状考えられている中深度処分の断面概念[45]	264
2.3-93	六ヶ所模擬施設の断面を基本とした廃棄体エリア内	264
2.3-94	廃棄体からの発熱量2-2	265
2.3-95	廃棄体エリア内における熱特性の飽和度依存性	266
2.3-96	解析施工ステップ2-2	268
2.3-97	解析コンター凡例	271
2.3-98	解析結果_ケース①(基本)2-2	272
2.3-99	解析結果_ケース②(浸潤抑制)2-2	273
2.3-100	0 解析結果_ケース③(浸潤促進)2-2	274
2.3-101	1 解析データ出力点2-2	275
2.3-102	2 主な各部材代表点における飽和度、温度の経時変化	276
2.3-103	3 廃棄体からの発熱条件比較2-2	277
2.3-104	4 低透水層周囲における温度と飽和度の関係	280
2.3-105	5 低拡散層外周における温度と飽和度の関係	281
2.3-106	3 解析結果抽出点	284
2.3-107	7 TOUGH2 解析による主な温度結果の経時変化	286
2.3-108	8 TOUGH2 解析結果の出力詳細	286
	2.3-71 2.3-72 2.3-73 2.3-74 2.3-75 2.3-76 2.3-76 2.3-77 2.3-78 2.3-79 2.3-80 2.3-81 2.3-81 2.3-82 2.3-83 2.3-84 2.3-85 2.3-86 2.3-87 2.3-88 2.3-87 2.3-88 2.3-89 2.3-90 2.3-90 2.3-91 2.3-92 2.3-93 2.3-94 2.3-95 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-98 2.3-97 2.3-98 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-98 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-96 2.3-97 2.3-90 2.3-100 2.3-100 2.3-100 2.3-100 2.3-100	2.3-71 透水係数の設定 2-2 2.3-72 比較ケースにおける状態表記による施工順序. 2-2 2.3-73 飽和度分布(-)①(変形:3倍) 2-2 2.3-74 飽和度分布(-)②(変形:3倍) 2-2 2.3-75 出力点 2-2 2.3-76 低透水層の飽和度経時変化 2-2 2.3-77 セメント系部材の最大有効主応力(MPa) 2-2 2.3-77 セメント系部材の最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-77 セメント系部材の最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-78 セメント系部材の最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-81 低拡散層の最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-82 コンクリートビットの最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-83 転北散層の最大有効主応力の経時変化 2-2 2.3-84 セメント系部材の沈下量出方点 2-2 2.3-85 セメント系部材の沈下量出た物図 2-2 2.3-86 セメント系部材の沈下量出比較図 2-2 2.3-87 試験空洞及び人工パリア断面図 2-2 2.3-88 解析モデル 2-2 2.3-89 熱伝導率の飽和度依存性 2-2 2.3-90 熱伝導率の飽和度依存性 2-2 2.3-91 比熱の飽和度依存性 2-2 2.3-92 現状考えられている中深度処分の断面を基本とした廃東体エリア内 2-2 2.3-93

义	2.3 - 109	全期間に関する温度推移	2-287
义	2.3-110	温度推移傾向(出力点⑩_低拡散層側要素)	2-287
义	2.3-111	クニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係	2-291
図	2.3 - 112	小峯らの膨潤評価式に基づく飽和膨潤ひずみと有効拘束応力の関係.	2-292
义	2.3-113	CODE_BRIGHT 解析ステップ	2-300
义	2.3-114	解析ステップ断面と出力点	2-301
义	2.3 - 115	解析結果_コンター図	2-304
义	2.3 - 116	主な部材出力点における解析結果	2-305
図	2.3 - 117	解析出力結果_RCPIT(中央)	2-306
义	2.3-118	解析出力結果_RCPIT(左端)	2-307
义	2.3-119	解析出力結果_RCPIT(左側上)	2-308
义	2.3-120	解析出力結果_低拡散層(左側上)	2-309
义	2.3-121	施設施工と施設挙動推移	2-310
义	2.3 - 122	解析出力点	.2-311
义	2.3-123	全応力(土圧)モニタリング傾向	2-314
义	2.3 - 124	締固められたベントナイトのモデル化検討フロー	2-315
义	2.3 - 125	正規圧密状態の飽和粘土における内部摩擦角と K0 の関係	2-316
义	2.3 - 126	K0 圧密除荷試験	2-317
义	2.3 - 127	過圧密比-土圧関係[58]	2-318
义	2.3 - 128	単要素解析モデル	2-319
义	2.3 - 129	締固められた粘性土の強度特性	2-322
义	2.3 - 130	解析モデル(一軸圧縮)	2-323
义	2.3-131	解析境界条件	2-323
义	2.3 - 132	一次元圧密試験結果[60]	2-324
义	2.3-133	一次元圧密試験結果の模式図[57]	2-324
义	2.3-134	解析ケースの e-Ln P'関係	2-326
义	2.3 - 135	全ケースの応力-ひずみ関係比較図	2-328
义	2.3-136	鉛直変位の比較	2-330
义	2.3-137	底部低透水層中央部における応力経路比較	2-332
义	2.3-138	出力点①における飽和度及び全応力の比較	2-332
义	2.3-139	低透水層の水分特性曲線	2-335
义	2.3-140	境界条件の整理	2-337
义	2.3-141	地盤バネ付き梁モデルの概念図	2-340
义	2.3-142	既往検討における処分空洞平面形状[62]	2-341
义	2.3-143	既往文献におけるコンクリートピットの施工状況概念図[63]	2-341
义	2.3-144	既存の実規模施設の断面図	2-342
义	2.3-145	低透水層の膨潤圧と乾燥密度の関係[72]	2-344
义	2.3-146	低透水層の変形係数と乾燥密度の関係[72]	2-344

义	2.3 - 147	低拡散層の圧縮強度と弾性係数の関係[71]
义	2.3 - 148	コンクリートピットの圧縮強度と弾性係数の関係[71] 2-345
义	2.3 - 149	廃棄体間充てん材の圧縮強度と弾性係数の関係[71]2-346
义	2.3 - 150	低拡散層の施工目地の目開き算定の概念図
义	$2.3 \cdot 151$	荷重図 (case-1~case-8)
义	$2.3 \cdot 152$	荷重図 (case-9~case-16)
义	$2.3 \cdot 153$	荷重図(case-17~case-24)2-352
义	$2.3 \cdot 154$	荷重図(case-25~case-32)2-353
义	$2.3 \cdot 155$	膨潤範囲と最大モーメントの関係(case-1~case-16:底部膨潤) 2-355
义	$2.3 \cdot 156$	膨潤範囲と最大モーメントの関係(case-17~case-32:側部膨潤) 2-356
义	$2.3 \cdot 157$	膨潤範囲と最大引張応力の関係(case-1~case-16:底部膨潤) 2-356
义	2.3 - 158	膨潤範囲と最大引張応力の関係(case-17~case-32:側部膨潤) 2-357
义	2.3 - 159	膨潤範囲と施工目地目開き量(上面)の関係(case-1~case-16: 底部膨潤)
义	2.3 - 160	膨潤範囲と施工目地目開き量(底面)の関係(case-1~case-16:底部膨潤)
义	2.3-161	膨潤範囲と施工目地目開き量(右面)の関係(case-17~case-32:側部膨潤)
义	2.3 - 162	膨潤範囲と施工目地目開き量(左面)の関係(case-17~case-32:側部膨潤)
义	2.3-163	人工バリアの機能確認においてモニタリングが必要と思われる項目.2-359
义	2.3-164	液固比と平衡水の Na+の関係 2-365
义	2.3 - 165	液固比と平衡水の K+の関係 2-365
义	2.3-166	液固比と平衡水の Ca2+の関係 2-365
义	2.3 - 167	液固比と固相 Ca 濃度の関係 2-366
义	2.3 - 168	固相 Ca 濃度比と Na+濃度の関係 2-367
义	2.3 - 169	固相 Ca 濃度比と K+濃度の関係 2-367
义	2.3 - 170	固相 Ca 濃度比と Ca2+濃度の関係 2-368
义	2.3 - 171	人工バリア構築前の処分空洞の状態
义	2.3 - 172	人工バリア構築前の処分空洞の状態
义	2.3-173	埋設完了後の処分空洞の状態
义	2.3 - 174	人工バリア構築前の解析領域
义	2.3 - 175	埋設完了後の解析領域
义	2.3 - 176	100 年後における pH 分布 (ケース 1) 2-382
义	2.3 - 177	200 年後における pH 分布 (ケース 1) 2-382
义	2.3 - 178	400 年後における pH 分布 (ケース 1) 2-382
义	2.3 - 179	100 年後における Na イオン濃度分布(ケース 1) 2-383
义	2.3 - 180	400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 1)

図 2.3-181	100 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 1) 2-384
図 2.3-182	2 400 年後における Ca イオン分布(ケース 1) 2-384
図 2.3-183	3 400 年後における pH 分布(ケース 1:i=0.07) 2-385
図 2.3-184	400 年後における pH 分布(ケース 2 : i=0) 2-385
図 2.3-185	5 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 1:i=0.07) 2-386
図 2.3-186	3 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 2:i=0) 2-386
図 2.3-187	7 400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 1:i=0.07) 2-387
図 2.3-188	3 400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 2:i=0) 2-387
図 2.3-189) ケース3におけるひび割れ、隙間の配置箇所2-388
⊠ 2.3-190) 400 年後における pH 分布(ケース 1:ひび割れ、隙間無し) 2-389
図 2.3-191	400 年後における pH 分布(ケース 3:ひび割れ、隙間有り) 2-389
図 2.3-192	2 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 1 : ひび割れ、隙間無し)
⊠ 2.3-193	3 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 3:ひび割れ、隙間有り)
図 2.3-194	- 400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 1 : ひび割れ、隙間無し)
図 2.3-195	5 400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 3:ひび割れ、隙間有り)
図 2.3-196	3 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布(ケース 1: ひび割れ、隙間
	無し)
図 2.3-197	400年後における施設内の Na イオン濃度分布(ケース 3: ひび割れ、隙間
	有り)2-392
図 2.3-198	3 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布(ケース 1: ひび割れ、隙間
	無し)
図 2.3-199) 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布(ケース 3:ひび割れ、隙間
	有り)2-393
図 2.3-200) 400 年後における pH 分布(ケース 3:降水系地下水) 2-395
図 2.3-201	400 年後における pH 分布(ケース 6:海水系地下水)
図 2.3-202	2 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 3:降水系地下水) 2-396
⊠ 2.3-203	3 400 年後における Na イオン濃度分布(ケース 6:海水系地下水) 2-396
図 2.3-204	400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 3:降水系地下水) 2-397
⊠ 2.3-205	5 400 年後における Ca イオン濃度分布(ケース 6:海水系地下水)… 2-397
⊠ 2.3-206	3 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布(ケース 3:降水系地下水)
図 2.3-207	7 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布(ケース 6:海水系地下水)
⊠ 2.3-208	3 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布(ケース 3:降水系地下水)

义	2.3 - 209	400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布(ケース 6:海水系地下水)
义	2.3 - 210	400 年後における pH 分布(ケース1:リファレンス) 2-400
义	2.3 - 211	400 年後における pH 分布(ケース 9:K、D100 倍) 2-400
义	2.3 - 212	400 年後における pH 分布(ケース1:施設周辺拡大) 2-401
义	2.3-213	400 年後における pH 分布(ケース 9:施設周辺拡大) 2-401
义	2.3 - 214	400 年後における Na イオン分布(ケース 1:施設周辺拡大) 2-402
义	2.3 - 215	400 年後における Na イオン分布(ケース 9:施設周辺拡大) 2-402
义	2.3 - 216	400 年後における Ca イオン分布(ケース 1:施設周辺拡大) 2-403
义	2.3-217	400 年後における Ca イオン分布(ケース 9:施設周辺拡大) 2-403
义	2.3-218	400 年後における pH 分布(ケース 1: リファレンス) 2-404
义	2.3-219	400 年後における pH 分布(ケース 10:周辺部材の物性変化) 2-404
义	2.3-220	400 年後における pH 分布(ケース 1:施設周辺拡大) 2-405
义	2.3-221	400 年後における pH 分布(ケース 10:施設周辺拡大) 2-405
义	2.3-222	400 年後における Na イオン分布(ケース 1:施設周辺拡大) 2-406
义	2.3-223	400 年後における Na イオン分布(ケース 10:施設周辺拡大) 2-406
义	2.3-224	400 年後における Ca イオン分布(ケース 1:施設周辺拡大) 2-407
义	2.3 - 225	400 年後における Ca イオン分布(ケース 10:施設周辺拡大) 2-407
义	2.3-226	400 年後における pH 分布(ケース1:リファレンス) 2-408
义	2.3 - 227	400 年後における pH 分布(ケース 14 : 吹付けコンクリートの変質のみ考
		慮しない)
义	2.3 - 228	中深度処分廃棄体の一例(溶接容器のイメージ)
义	2.3 - 229	廃棄体間充てん材のひび割れスケッチ図[87]2-415
义	2.3-230	上部充てん材のひび割れスケッチ図[87]
义	2.3 - 231	年間ガス発生速度の経時変化(廃棄体グループ 2(キャニスタ)、結晶質系岩
		盤)
义	2.3-232	処分施設の状態変遷
义	2.3-233	腐食量の算定モデルと算定式2-425
义	2.3-234	試験空洞内の結露状況(平成 29 年 6 月 27 日撮影) 2-426
义	2.3 - 235	高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア2-427
义	2.3-236	TRU等廃棄物処分場の人工バリア構成(深成岩類及び先新第三紀堆積岩類、
		グループ2の例)[104]2-428
义	2.3-237	空洞内充てん材の沈下計測位置[101] 2-429
义	2.3-238	空洞内充てん材の沈下量経時変化[109]2-430
义	2.3-239	空洞内充てん材の温度経時変化[109]2-430
义	2.3 - 240	空洞内充てん材の沈下量経時変化(施工期間のみ)[110]
义	2.3 - 241	解析対象とした施設の諸元(解析メッシュ) 2-434

义	2.3 - 242	壁面変位の経時変化(左)及び弾性係数の低減傾向(右)	2-435
义	2.3-243	EBS 部材の応力変化(EBS 設置後 1,000 年経過時)	2-435
义	2.3-244	散乱光のスペクトル	2-445
义	2.3 - 245	原位置試験でのレイリー計測結果例[3]	2-446
义	2.3-246	原位置試験でのブリルアン計測結果例[4]	2-447
义	2.3 - 247	原位置でのラマン計測結果例[4]	2-447
义	2.3 - 248	TW-COTDR 方式の構成	2-449
义	2.3-249	PPP-BOTDA 方式の構成	2-449
义	2.3 - 250	計測分解能と計測範囲の関係	2-452
义	2.3 - 251	散乱光のスペクトルと計測パラメーター	2-452
义	2.3 - 252	空間分解能と計測間隔	2-453
义	2.3 - 253	ひずみ計測用光ファイバセンサー	2-455
义	2.3 - 254	ひずみ計測用光ファイバセンサー	2-455
义	2.3 - 255	温度計測用光ファイバセンサーケーブル	2-456
义	2.3 - 256	温度計測用光ファイバセンサーケーブル	2-456
义	2.3 - 257	評価試験のフロー	2-457
义	2.3 - 258	各タイプの光ファイバ構成イメージ	2-458
义	2.3 - 259	光ファイバサンプル No.1	2-458
义	2.3-260	光ファイバサンプル No.2	2-458
义	2.3 - 261	光ファイバサンプル No.3	2-459
义	2.3-262	恒温槽内での塩水浸漬状況	2-461
义	2.3-263	線源からの距離と線量値	2-461
义	2.3-264	ガンマ線照射装置へのサンプル設置状況	2-462
义	2.3 - 265	試験状況と引張試験機	2-462
义	2.3-266	引張試験[21]	2-463
汊	2.3 - 267	引張試験結果のイメージ	2-464
义	2.3 - 268	引張試験結果(汎用タイプ;塩分)	2-464
义	2.3 - 269	引張試験結果(耐水タイプ;塩分)	2-465
义	2.3 - 270	引張試験結果(汎用タイプ;高pH)	2-466
义	2.3 - 271	引張試験結果(耐水タイプ;高pH)	2-466
义	2.3 - 272	高 pH で 10 日浸漬後の汎用タイプの劣化状況	2-466
义	2.3-273	引張試験結果(汎用タイプ;放射線)	2-467
义	2.3-274	引張試験結果(耐放射線タイプ;放射線)	2-467
汊	2.3 - 275	引張による動的疲労係数測定[21]	2-469
汊	2.3 - 276	動的疲労のデータ構成	2-469
汊	2.3 - 277	動疲労試験結果(汎用タイプ;塩分)	2-470
汊	2.3 - 278	動疲労試験結果(耐水タイプ;塩分)	2-470

図 2	.3-279	動疲労試験結果(汎用タイプ;高pH)	2-471
図 2	.3-280	動疲労試験結果(耐水タイプ;高 pH)	2-471
図 2	.3-281	動疲労試験結果(汎用タイプ;放射線)	2-472
図 2	.3-282	動疲労試験結果(耐放射線タイプ ; 放射線)	2-472
図 2	.3-283	光ファイバの損失定義	2-474
図 2	.3-284	OTDR の構成図 2.474	
図 2	.3-285	ダミー光ファイバを使用した均一な試料の OTDR 概略波形の例	2-475
図 2	.3-286	試験状況と OTDR 画面	2-475
図 2	.3-287	放射線照射時の実験状況	2-476
図 2	.3-288	放射線照射時間と損失の関係	2-477
図 2	.3-289	計測機能を喪失するモード	2-477
図 2	.3-290	累積破断確率のモデル化	2-478
図 2	.3-291	累積破断確率の予測	2-479
図 2	.3-292	累積破断確率のモデル化	2-479
図 2	.3-293	累積破断確率の予測	2-480
図 2	.3-294	累積破断確率試算結果(100年後)	2-481
図 2	.3-295	推定寿命の試算結果(汎用タイプ)	2-482
図 2	.3-296	推定寿命の試算結果(耐水タイプ)	2-482
図 2	.3-297	光ファイバセンサー(ポイント型)による膨潤圧計測	2-484
図 2	.3-298	光ファイバセンサー(ポイント型)による膨潤圧計測結果	2-484
図 2	.3-299	側圧検知の概念	2-485
図 2	.3-300	圧力計測検証実験の構成	2-485
図 2	.3-301	圧力計測検証実験の光ファイバセンサーの設置	2-485
図 2	.3-302	圧力計測検証実験の光ファイバセンサーの設置	2-486
図 2	.3-303	圧力計測検証実験のベントナイト敷き詰め状況	2-486
図 2	.3-304	圧力計測検証実験の加力状況	2-486
図 2	.3-305	圧力計測検証実験の状況	2-487
図 2	.3-306	圧力事前試験の実験結果1(ひずみ差と荷重)	2-487
図 2	.3-307	圧力事前試験の実験結果2(ひずみとクロスヘッド位置)	2-488
図 2	.3-308	側圧計測イメージ	2-489
図 2	.3-309	通水試験装置	2-490
図 2	.3-310	データロガー	2-490
図 2	.3-311	通水試験装置(通水経路とセンサー配置)	2-491
図 2	.3-312	ポイント型光ファイバ圧力センサー(冶具取付け後)	2-491
図 2	.3-313	データアナライザー(ポイント型光ファイバ圧力センサー)	2-492
図 2	.3-314	太径光ファイバ	2-492
図 2	.3-315	細径光ファイバ	2-493
図 2	.3-316	ポーラスストーン上への光ファイバセンサーの配置	2-493

図 2.3-3	17 光ファイバセンサーの取り出し部状況	
図 2.3-3	18 光ファイバセンサーの取り出し部	
図 2.3-3	19 ベントナイト敷き詰め	
図 2.3-32	20 ベントナイト締固め	
図 2.3-33	21 加圧後のベントナイト	
図 2.3-33	22 通水実験状況	
図 2.3-33	23 ロードセルの計測結果	
図 2.3-33	24 ポイント型光ファイバ圧力センサーの計測結果	
図 2.3-33	25 太径光ファイバのひずみ分布計測結果	
図 2.3-33	26 細径光ファイバのひずみ分布計測結果	
図 2.3-33	27 太径光ファイバによるひずみの経時変化	
図 2.3-33	28 細径光ファイバによるひずみの経時変化	
図 2.3-33	29 ロードセルと光ファイバ(二種類の差)の経時変化	
図 2.3-33	30 ロードセルと光ファイバ(二種類の差)の関係	2-499
図 2.3-33	31 側圧計測イメージ	2-500
図 2.3-33	32 太径光ファイバ	2-501
図 2.3-33	33 細径光ファイバ	2-501
図 2.3-33	34 軟質ゴム上への光ファイバセンサーの配置	2-501
図 2.3-33	35 通水試験装置	
図 2.3-33	36 データロガー(圧力試験)	
図 2.3-33	37 試験機器配置状況	2-503
図 2.3-33	38 面圧センサー設置状況	2-503
図 2.3-33	39 偏圧測定状況	2-503
図 2.3-3-	40 偏圧確認状況	2-504
図 2.3-3-	41 膨潤圧試験装置	2-505
図 2.3-3-	12 圧力とひずみの関係	
図 2.3-3-	43 施工性試験の試験体(ひずみセンサーケーブル)	
図 2.3-3-	44 施工性試験の試験体(光ファイバ芯線)	
図 2.3-3-	45 施工性試験の吹付施工	2-507
図 2.3-3-	46 吹付後の試験体	
図 2.3-3-	47 吹付前後の光透過損失の変化	
図 2.3-3-	48 固定法確認試験の構成	
図 2.3-3-	49 固定法確認試験の結果(間欠固定)	2-509
図 2.3-3	50 固定法確認試験の結果(全長固定)	
図 2.3-3	51 敷設試験イメージ	
図 2.3-3	52 OFS ケーブル断面図	
図 2.3-3	53 OFS ケーブル	2-511
図 2.3-3	54 エンボスケーブル断面図	2-511

図 2.3	-355	エンボスケーブル	2-511
図 2.3	-356	エンボスケーブル加工前後	2-512
図 2.3	-357	試験機の構成(摩擦試験機)	2-512
図 2.3	-358	摩擦試験機	2-513
図 2.3	-359	光ファイバ供試体設置部	2-513
図 2.3	-360	光ファイバ敷設状況	2-514
図 2.3	-361	垂直加圧用油圧ポンプ	2-514
図 2.3	-362	水平引張機構部	2-514
図 2.3	-363	光ファイバ計測機(NEUBRESCOP)	2-515
図 2.3	-364	光ファイバ計測機画面	2-515
図 2.3	-365	データロガー(敷設試験)	2-515
図 2.3	-366	クロロプレンゴム	2-516
図 2.3	-367	クロロプレンゴムの特性(準備試験結果)	2-516
図 2.3	-368	シリコン材	2-517
図 2.3	-369	シリコン材の特性(準備試験結果)	2-517
図 2.3	-370	シリコンスポンジ材	2-518
図 2.3	-371	シリコンスポンジ材の特性(準備試験結果)	2-518
図 2.3	-372	接着されていない光ファイバのひずみ変化	2-519
図 2.3	-373	隙間の増加に伴うひずみ変化	2-520
図 2.3	-374	被覆材の表面形状の影響	2-520
図 2.3	-375	隙間開閉の繰返しの影響	2-521
図 2.3	-376	計測システムの構成	2-523
図 2.3	-377	計測システム設置状況	2-524
図 2.3	-378	温度センサーケーブルと温度計の配置	2-525
図 2.3	-379	温度センサーケーブルの架設状況	2-525
図 2.3	-380	温度センサーケーブルの架設状況	2-525
図 2.3	-381	温度計の設置状況	2-526
図 2.3	-382	使用接着剤	2-526
図 2.3	-383	側部低拡散層(左側)側面図	2-527
図 2.3	-384	側部低拡散層への光ファイバ設置状況	2-527
図 2.3	-385	クリップゲージの設置状況	2-528
図 2.3	-386	データロガーの設置状況	2-528
図 2.3	-387	上部低拡散層平面図	2-529
図 2.3	-388	上部低拡散層への光ファイバ設置状況	2-529
図 2.3	-389	上部低拡散層への光ファイバ設置状況	2-529
図 2.3	-390	KK シートの凹凸形状と手前コンクリートピット表面の状況	2-530
図 2.3	-391	手前コンクリートピット正面図	2-530
図 2.3	-392	手前コンクリートピットへの光ファイバ設置状況	2-531

义	2.3 - 393	手前コンクリートピットへの光ファイバ設置状況	2-531
汊	2.3-394	温度センサーケーブル端子箱(坑口部)	2-532
汊	2.3 - 395	温度計のデータ回収作業	2-532
义	2.3-396	温度計による連続計測結果(坑口部)	2-533
义	2.3 - 397	温度計による連続計測結果(TD200)	2-533
义	2.3 - 398	温度計による連続計測結果(TD400)	2-533
汊	2.3 - 399	温度計による連続計測結果(TD600)	2-534
汊	2.3-400	温度計による連続計測結果(TD800)	2-534
义	2.3-401	温度計による連続計測結果(TD1000)	2-534
义	2.3 - 402	温度計による連続計測結果(コンクリートピット)	2-535
义	2.3 - 403	温度計測結果(アクセス坑道沿い;ブリルアン方式)	2-536
义	2.3 - 404	温度計測結果(アクセス坑道沿い;レイリー方式)	2-536
义	2.3 - 405	温度計などの設置状況(坑口)	2-537
义	2.3-406	温度計測結果(坑口;ブリルアン方式)	2-538
义	2.3 - 407	温度計測結果(坑口;レイリー方式)	2-538
义	2.3 - 408	温度計などの設置状況(TD200)	2-539
义	2.3 - 409	温度計測結果(TD200;ブリルアン方式)	2-539
义	2.3 - 410	温度計測結果(TD200;レイリー方式)	2-539
义	2.3-411	温度計などの設置状況(TD400)	2-540
义	2.3- 412	温度計測結果(TD400;ブリルアン方式)	2-540
义	2.3-413	温度計測結果(TD400;レイリー方式)	2-540
义	2.3-414	温度計などの設置状況(TD600)	2-541
义	2.3 - 415	温度計測結果(TD600;ブリルアン方式)	2-541
义	2.3 - 416	温度計測結果(TD600;レイリー方式)	2-541
义	2.3 - 417	温度計などの設置状況(TD800)	2-542
义	2.3-418	温度計測結果(TD800;ブリルアン方式)	2-542
义	2.3-419	温度計測結果(TD800;レイリー方式)	2-542
义	2.3-420	温度計などの設置状況(TD1000)	2-543
义	2.3-421	温度計測結果(TD1000;ブリルアン方式)	2-543
义	2.3-422	温度計測結果(TD1000;レイリー方式)	2-543
义	2.3-423	温度計などの設置状況(ピット部)	2-544
义	2.3-424	温度計測結果(ピット部;ブリルアン方式)	2-544
义	2.3 - 425	温度計測結果(ピット部;レイリー方式)	2-544
义	2.3-426	各箇所の温度計と光ファイバの標準偏差	2-545
义	2.3 - 427	側部低拡散層側面図	2-546
义	2.3 - 428	光ファイバセンサー設置状況(側部低拡散層;2018年6月)	2-547
义	2.3 - 429	クリップゲージのデータ回収作業	2-548
义	2.3 - 430	クリップゲージの状況(2018年6月)	2-548

义	2.3 - 431	クリップゲージの状況(2018年8月)	2-548
义	2.3-432	クリップゲージの計測結果(全期間)	2-549
义	2.3-433	クリップゲージの計測結果(一部)	2-549
义	2.3-434	クリップゲージの計測結果(一部)	2-550
义	2.3 - 435	ブリルアン周波数の計測結果(側部低拡散層;全体)	2-551
义	2.3-436	ブリルアン周波数の計測結果(側部低拡散層;一部)	2-551
义	2.3 - 437	ひずみ分布の計測結果(側部低拡散層;上側)	2-552
义	2.3-438	ひずみ分布の計測結果(側部低拡散層;下側)	2-552
义	2.3-439	ひび割れ無し部のひずみの経時変化1(側部低拡散層)	2-553
义	2.3-440	既設ひび割れ部2のひずみの経時変化1(側部低拡散層)	2-553
义	2.3-441	既設ひび割れ部3のひずみの経時変化1(側部低拡散層)	2-553
义	2.3-442	既設ひび割れ部4のひずみの経時変化1(側部低拡散層)	2-553
义	2.3-443	ひび割れ無し部のひずみの経時変化2(側部低拡散層)	2-554
义	2.3-444	既設ひび割れ部2のひずみの経時変化2(側部低拡散層)	2-554
义	2.3 - 445	既設ひび割れ部3のひずみの経時変化2(側部低拡散層)	2-554
义	2.3-446	既設ひび割れ部4のひずみの経時変化2(側部低拡散層)	2-555
义	2.3 - 447	ひび割れ無し部のひずみの経時変化3(側部低拡散層)	2-555
义	2.3-448	既設ひび割れ部2のひずみの経時変化3(側部低拡散層)	2-555
义	2.3-449	既設ひび割れ部3のひずみの経時変化3(側部低拡散層)	2-555
义	2.3 - 450	既設ひび割れ部4のひずみの経時変化3(側部低拡散層)	2-556
义	2.3 - 451	ひび割れ無し部のひずみの経時変化4(側部低拡散層)	2-556
义	2.3 - 452	既設ひび割れ部2のひずみの経時変化4(側部低拡散層)	2-556
义	2.3 - 453	既設ひび割れ部3のひずみの経時変化4(側部低拡散層)	2-556
义	2.3 - 454	既設ひび割れ部4のひずみの経時変化4(側部低拡散層)	2-557
义	2.3 - 455	上部低拡散層平面図	2-557
义	2.3 - 456	上部低拡散層の様子(2018 年 6 月)	2-558
义	2.3 - 457	上部低拡散層の様子(2018 年 8 月)	2-558
义	2.3 - 458	ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;全体)	2-559
义	2.3 - 459	ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;長辺方向)	2-560
义	2.3-460	ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;短辺方向)	2-560
义	2.3-461	ひずみ分布の計測結果(上部低拡散層;長辺方向1)	2-561
义	2.3-462	ひずみ分布の計測結果(上部低拡散層;長辺方向2)	2-561
义	2.3-463	既設ひび割れ部のひずみの経時変化1(上部低拡散層)	2-562
义	2.3-464	既設ひび割れ部のひずみの経時変化2(上部低拡散層)	2-562
义	2.3 - 465	既設ひび割れ部のひずみの経時変化3(上部低拡散層)	2-562
义	2.3-466	既設ひび割れ部のひずみの経時変化4(上部低拡散層)	2-562
义	2.3 - 467	既設ひび割れ部のひずみの経時変化5(上部低拡散層)	2-563
义	2.3 - 468	既設ひび割れ部のひずみの経時変化6(上部低拡散層)	2-563

図 2.3-469	既設ひび割れ部のひずみの経時変化7(上部低拡散層)	2-563
図 2.3-470	既設ひび割れ部のひずみの経時変化8(上部低拡散層)	2-563
図 2.3-471	手前コンクリートピット正面図	2-564
図 2.3-472	光ファイバセンサー設置状況(手前コンクリートピット)	2-565
図 2.3-473	ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;全体)	2-566
図 2.3-474	ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;水平	方向)
		2-566
図 2.3-475	ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;垂直	方向)
		2-566
図 2.3-476	ひずみ分布の計測結果(手前コンクリートピット;水平方向)	2-567
図 2.3-477	ひずみ分布の計測結果(手前コンクリートピット;垂直方向)	2-567
図 2.3-478	ひび割れ無し部のひずみの経時変化1(手前コンクリートピット)	2-568
図 2.3-479	ひび割れ無し部のひずみの経時変化 2(手前コンクリートピット)	2-568
図 2.3-480	ひび割れ無し部のひずみの経時変化3(手前コンクリートピット)	2-568
図 2.3-481	ひび割れ無し部のひずみの経時変化4(手前コンクリートピット)	2-568
図 2.3-482	ひび割れ無し部のひずみの経時変化5(手前コンクリートピット)	2-569
図 2.3-483	ひび割れ無し部のひずみの経時変化 6(手前コンクリートピット)	2-569
図 2.3-484	標準パッカーの施工状況(平成 29 年度要素実験)	2-571
図 2.3-485	事前試験用供試体	2-571
図 2.3-486	無筋コンクリートのひび割れ発生状況(要素試験)	2-572
図 2.3-487	鉄筋コンクリートのひび割れ発生状況(要素試験)	2-572
図 2.3-488	事前試験用供試体の寸法	2-573
図 2.3-489	鉄筋コンクリート供試体の配筋図(平面図)	2-574
図 2.3-490	鉄筋コンクリート試験体の配筋図(断面図と鉄筋詳細図)	2-575
図 2.3-491	標準パッカーで使用する機材[34]	2-576
図 2.3-492	標準パッカーの側面図	2-576
図 2.3-493	標準パッカーの破壊原理[34]	2-576
図 2.3-494	標準パッカーの断面	2-577
図 2.3-495	標準パッカーによるひび割れ誘発イメージ[34]	2-577
図 2.3-496	標準パッカー制御用リモコン	2-577
図 2.3-497	光ファイバセンサーの貼付け作業状況	2-578
図 2.3-498	光ファイバセンサーが貼られた試験体	2-579
図 2.3-499	鉄筋探查状況	2-579
図 2.3-500	削岩機による削孔状況	2-580
図 2.3-501	削孔完了状況	2-580
図 2.3-502	防音シートによる囲い	2-580
図 2.3-503	標準パッカーによるひび割れ誘発状況	2-581
図 2.3-504	上部低拡散層を模擬した試験体に発生させるひび割れ	2-581

义	2.3 - 505	試験体 No.1 直交方向のひび割れの拡大状況	2-582
义	2.3-506	貫通ひび割れ発生時の状況	2-582
义	2.3 - 507	試験体 No.1 斜め方向のひび割れの発生状況	2-583
义	2.3-508	斜め方向のひび割れ発生時の標準パッカー加圧状況	2-583
义	2.3 - 509	斜め方向のひび割れ発生の発生状況	2-584
义	2.3 - 510	手前コンクリートピットを模擬した試験体に発生させるひび割れ	2-585
义	2.3 - 511	試験体 No.2 直交方向のひび割れの幅(STEP1、STEP2)	2-585
义	2.3 - 512	試験体 No.2 直交方向のひび割れの幅 (STEP3)	2-586
义	2.3-513	試験体 No.2 直交方向の試験実施状況	2-586
义	2.3 - 514	試験体 No.2 直交方向のひび割れ発生状況	2-586
义	2.3 - 515	試験体 No.4 斜め方向のひび割れの幅	2-587
义	2.3 - 516	補間処理による解析方法	2-588
义	2.3 - 517	ひび割れ事前試験の計測結果1(無筋試験体 No.1)	2-589
义	2.3 - 518	ひび割れ事前試験の計測結果2(無筋試験体 No.1)	2-590
义	2.3 - 519	ひび割れ事前試験の計測結果3(無筋試験体 No.1)	2-591
义	2.3 - 520	ひび割れ事前試験の計測結果4(無筋試験体 No.1)	2-592
义	2.3 - 521	ひび割れ事前試験の計測結果5(無筋試験体 No.1)	2-593
义	2.3 - 522	ひび割れ事前試験の計測結果6(無筋試験体 No.1)	2-594
义	2.3 - 523	ひび割れ事前試験の計測結果7(無筋試験体 No.1)	2-595
义	2.3 - 524	ひび割れ事前試験の計測結果1(鉄筋試験体 No.2)	2-596
义	2.3 - 525	ひび割れ事前試験の計測結果2(鉄筋試験体 No.2)	2-597
义	2.3 - 526	ひび割れ事前試験の計測結果3(鉄筋試験体 No.2)	2-598
义	2.3 - 527	ひび割れ事前試験の計測結果4(鉄筋試験体 No.2)	2-599
义	2.3 - 528	ひび割れ事前試験の計測結果5(鉄筋試験体 No.2)	2-600
义	2.3 - 529	ひび割れ事前試験の計測結果 6(鉄筋試験体 No.2)	2-601
义	2.3 - 530	ひび割れ事前試験の計測結果7(鉄筋試験体 No.2)	2-602
义	2.3 - 531	ひび割れ事前試験の計測結果8(鉄筋試験体 No.2)	2-603
义	2.3 - 532	ひび割れ事前試験の計測結果 9(鉄筋試験体 No.2)	2-604
汊	2.3 - 533	ひび割れ事前試験の計測結果 10(鉄筋試験体 No.2)	2-605
汊	2.3 - 534	ひび割れ事前試験の計測結果 11(鉄筋試験体 No.2)	2-606
汊	2.3 - 535	ひび割れ事前試験の計測結果 12(鉄筋試験体 No.2)	2-607
汊	2.3 - 536	ひび割れ事前試験の計測結果1(鉄筋試験体 No.4)	2-608
汊	2.3 - 537	ひび割れ事前試験の計測結果2(鉄筋試験体 No.4)	2-609
义	2.3 - 538	手前コンクリートピット(正面図)	.2-611
义	2.3 - 539	手前コンクリートピット(2017年8月撮影)	.2-611
义	2.3 - 540	ひび割れ誘発位置(手前コンクリートピット)	2-612
义	2.3 - 541	上部低拡散層(平面図)	2-612
义	2.3 - 542	上部低拡散層(2017年8月撮影)	2-612

义	2.3 - 543	ひび割れ誘発位置(上部低拡散層)	2-613
义	2.3 - 544	削孔状況(手前コンクリートピット)	2-613
义	2.3 - 545	削孔状況(上部低拡散層)	2-614
义	2.3 - 546	削孔完了(手前コンクリートピット)	2-614
义	2.3 - 547	削孔完了(上部低拡散層)	2-614
义	2.3 - 548	パイ型ゲージとひずみゲージ取付位置	2-615
义	2.3 - 549	パイ型ゲージとひずみゲージの取り付け状況(手前コンクリートピ	ット)
			2-615
义	2.3 - 550	パイ型ゲージとひずみゲージの取り付け状況(上部低拡散層)	2-615
义	2.3 - 551	標準パッカーの設置状況	2-616
义	2.3 - 552	ひずみゲージ、パイ型ゲージによる計測と標準パッカーの制御状況.	2-616
义	2.3 - 553	油圧ポンプの指示計	2-616
义	2.3 - 554	光ファイバセンサーによる計測状況	2-617
义	2.3 - 555	クラックゲージによるひび割れ幅の計測	2-617
义	2.3 - 556	標準パッカー設置状況 手前コンクリートピット 直交方向	2-618
义	2.3 - 557	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP0~4)	2-618
义	2.3 - 558	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP5)	2-619
义	2.3 - 559	縦方向のひび割れの発生状況	2-619
义	2.3 - 560	KK シートの浮きの発生状況	2-619
义	2.3 - 561	標準パッカー設置状況 手前コンクリートピット 斜め方向	2-620
义	2.3 - 562	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP0~1)	2-620
义	2.3 - 563	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP2)	2-621
义	2.3 - 564	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP3)	2-621
义	2.3 - 565	標準パッカー設置状況 上部低拡散層 直交方向	2-622
义	2.3 - 566	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP0~2)	2-622
义	2.3 - 567	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP3)	2-623
义	2.3 - 568	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP4)	2-623
义	2.3 - 569	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP5)	2-624
义	2.3-570	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP6)	2-624
义	2.3 - 571	上部低拡散層に発生させたひび割れ	2-625
义	2.3 - 572	標準パッカーの設置位置 上部低拡散層 斜め方向	2-625
义	2.3 - 573	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP0~1)	2-626
义	2.3 - 574	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP2)	2-626
义	2.3 - 575	目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP3)	2-627
义	2.3-576	PPP-BOTDA 方式結果1(手前コンクリートピット STEP1)	2-629
义	2.3 - 577	TW-COTDR 方式結果1(手前コンクリートピット STEP1)	2-630
义	2.3-578	PPP-BOTDA 方式結果 2(手前コンクリートピット STEP2)	2-631
汊	2.3 - 579	TW-COTDR 方式結果 2(手前コンクリートピット STEP2)	2-632

図 2.3-580	PPP-BOTDA 方式結果 3(手前コンクリートピット STEP3) 2-633
図 2.3-581	TW-COTDR 方式結果 3(手前コンクリートピット STEP3) 2-634
図 2.3-582	PPP-BOTDA 方式結果 4(手前コンクリートピット STEP4) 2-635
図 2.3-583	TW-COTDR 方式結果 4(手前コンクリートピット STEP4) 2-636
図 2.3-584	PPP-BOTDA 方式結果 5(手前コンクリートピット STEP5) 2-637
図 2.3-585	TW-COTDR 方式結果 5(手前コンクリートピット STEP5) 2-638
図 2.3-586	PPP-BOTDA 方式結果 6(手前コンクリートピット、除荷) 2-639
図 2.3-587	TW-COTDR 方式結果 6(手前コンクリートピット、除荷) 2-640
図 2.3-588	PPP-BOTDA 方式結果 7(手前コンクリートピット、斜め STEP1) 2-641
図 2.3-589	TW-COTDR 方式結果 7(手前コンクリートピット、斜め STEP1). 2-642
図 2.3-590	PPP-BOTDA 方式結果 8(手前コンクリートピット、斜め STEP2) 2-643
図 2.3-591	TW-COTDR 方式結果 8(手前コンクリートピット、斜め STEP2). 2-644
図 2.3-592	PPP-BOTDA 方式結果 9(手前コンクリートピット、斜め STEP3) 2-645
図 2.3-593	TW-COTDR 方式結果 9(手前コンクリートピット、斜め STEP3). 2-646
図 2.3-594	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP1、手前コンクリートピット) 2-647
図 2.3-595	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP2、手前コンクリートピット) 2-647
図 2.3-596	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP3、手前コンクリートピット) 2-648
図 2.3-597	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP4、手前コンクリートピット) 2-648
図 2.3-598	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP5、手前コンクリートピット) 2-649
図 2.3-599	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP1、手前コンクリートピット)
図 2.3-600	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP2、手前コンクリートピット)
図 2.3-601	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP3、手前コンクリートピット)
図 2.3-602	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP4、手前コンクリートピット)
図 2.3-603	ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-U、手前コンクリートピット)
図 2.3-604	ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-M、L、手前コンクリートピッ
	ト)
図 2.3-605	PPP-BOTDA 方式結果 1(上部低拡散層 STEP1) 2-654
図 2.3-606	TW-COTDR 方式結果 1(上部低拡散層 STEP1) 2-655
図 2.3-607	PPP-BOTDA 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2) 2-656
図 2.3-608	TW-COTDR 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2) 2-657
図 2.3-609	PPP-BOTDA 方式結果 3(上部低拡散層 STEP3) 2-658
図 2.3-610	TW-COTDR 方式結果 3(上部低拡散層 STEP3)
図 2.3-611	PPP-BOTDA 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4)

义	2.3-612	TW-COTDR 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4) 2-661
义	2.3 - 613	PPP-BOTDA 方式結果 5(上部低拡散層 STEP5) 2-662
义	2.3-614	TW-COTDR 方式結果 5(上部低拡散層 STEP5) 2-663
义	2.3-615	PPP-BOTDA 方式結果 6(上部低拡散層 STEP6) 2-664
义	2.3-616	TW-COTDR 方式結果 6(上部低拡散層 STEP6) 2-665
汊	2.3-617	PPP-BOTDA 方式結果 7(上部低拡散層、斜め STEP1) 2-666
汊	2.3-618	TW-COTDR 方式結果 7(上部低拡散層、斜め STEP1) 2-667
汊	2.3-619	PPP-BOTDA 方式結果 8(上部低拡散層、斜め STEP2) 2-668
义	2.3-620	TW-COTDR 方式結果 8(上部低拡散層、斜め STEP2) 2-669
汊	2.3-621	PPP-BOTDA 方式結果 9(上部低拡散層、斜め STEP3) 2-670
汊	2.3-622	TW-COTDR 方式結果 9(上部低拡散層、斜め STEP3) 2-671
汊	2.3-623	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP1、上部低拡散層)2-672
汊	2.3-624	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP2、上部低拡散層) 2-673
汊	2.3-625	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP3、上部低拡散層)2-674
义	2.3-626	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP4、上部低拡散層)2-675
汊	2.3-627	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP5、上部低拡散層)2-676
汊	2.3-628	ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP6、上部低拡散層)2-677
汊	2.3-629	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP1、上部低拡散層) 2-678
义	2.3-630	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP2、上部低拡散層) 2-679
汊	2.3-631	ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP3、上部低拡散層) 2-680
义	2.3-632	ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-1、上部低拡散層) 2-681
义	2.3-633	ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-2、上部低拡散層) 2-681
义	2.3-634	ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-3、上部低拡散層) 2-681
义	2.3-635	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 1(上部低拡散層、
		STEP1、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-683
汊	2.3-636	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 2(上部低拡散層、
		STEP1、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-684
义	2.3-637	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 3(上部低拡散層、
		STEP1、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-685
义	2.3-638	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 4(上部低拡散層、
		STEP1、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-686
义	2.3-639	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 5(上部低拡散層、
		STEP2、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-687
义	2.3-640	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 6(上部低拡散層、
		STEP2、TW-COTDR 方式、長辺方向)
汊	2.3-641	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 7(上部低拡散層、
		STEP2、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-689
汊	2.3-642	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 8(上部低拡散層、

		STEP2、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-690
义	2.3-643	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 9(上部低拡散層、
		STEP3、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-691
义	2.3-644	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 10(上部低拡散層、
		STEP3、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-692
义	2.3-645	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 11(上部低拡散層、
		STEP3、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-693
义	2.3-646	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 12(上部低拡散層、
		STEP3、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-694
义	2.3-647	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 13(上部低拡散層、
		STEP4、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-695
义	2.3-648	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 14(上部低拡散層、
		STEP4、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-696
义	2.3-649	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 15(上部低拡散層、
		STEP4、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-697
义	2.3-650	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 16(上部低拡散層、
		STEP4、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-698
义	2.3-651	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 17(上部低拡散層、
		STEP5、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-699
义	2.3-652	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 18(上部低拡散層、
		STEP5、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-700
义	2.3-653	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 19(上部低拡散層、
		STEP5、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-701
义	2.3-654	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 20(上部低拡散層、
		STEP5、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-702
义	2.3-655	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 21(上部低拡散層、
		STEP6、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-703
义	2.3-656	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 22(上部低拡散層、
		STEP6、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-704
义	2.3-657	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 23(上部低拡散層、
		STEP6、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-705
义	2.3-658	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 24(上部低拡散層、
		STEP6、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-706
义	2.3-659	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例25(上部低拡散層、斜
		め STEP0、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-707
义	2.3-660	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例26(上部低拡散層、斜
		め STEP0、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-708
义	2.3-661	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例27(上部低拡散層、斜

		め STEP0、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-709
図	2.3-662	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 28(上部低拡散層、斜
		め STEP0、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-710
図	2.3-663	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 29(上部低拡散層、斜
		め STEP1、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)2-711
図	2.3-664	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 30(上部低拡散層、斜
		め STEP1、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-712
図	2.3-665	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 31(上部低拡散層、斜
		め STEP1、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-713
図	2.3-666	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 32(上部低拡散層、斜
		め STEP1、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-714
図	2.3-667	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 33(上部低拡散層、斜
		め STEP2、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-715
図 :	2.3-668	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 34(上部低拡散層、斜
		め STEP2、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-716
図 2	2.3-669	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 35(上部低拡散層、斜
		め STEP2、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-717
図 2	2.3-670	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 36(上部低拡散層、斜
		め STEP2、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-718
図 2	2.3-671	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 37(上部低拡散層、斜
		め STEP3、PPP-BOTDA 方式、長辺方向) 2-719
図:	2.3-672	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 38(上部低拡散層、斜
		め STEP3、TW-COTDR 方式、長辺方向) 2-720
図 :	2.3-673	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 39(上部低拡散層、斜
		め STEP3、PPP-BOTDA 方式、短辺方向) 2-721
図 9	2.3-674	光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 40(上部低拡散層、斜
		め STEP3、TW-COTDR 方式、短辺方向) 2-722
図 9	2.3-675	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例1(上部低拡散層、
		PPP-BOTDA 方式、ひずみ 100 µ 以上) 2-723
図 1	2.3-676	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例2(上部低拡散層、
		TW-COTDR 方式、ひずみ 100 µ 以上) 2-724
図 1	2.3-677	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例3(上部低拡散層、
_		PPP-BOTDA 方式、ひずみ 50 µ 以上)
凶 :	2.3-678	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例4(上部低拡散層、
1	0 0 0 = -	TW-COTDR 方式、ひすみ 50 µ 以上)
凶 1	2.3-679	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例5(上部低拡散層、
_		PPP-BOTDA 方式、ひずみ 20 µ 以上)
图 1	2.3-680	光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 6(上部低拡散層、

		TW-COTDR 方式、ひずみ 20 µ 以上) 2-728
义	2.3-681	光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較1(閾値100μ)
义	2.3-682	光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較 $2(閾値 50\mu)$
义	2.3-683	光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較 3(閾値 20μ)
义	2.3-684	上部低拡散層とひび割れ誘発位置2-731
义	2.3-685	上部低拡散層(2017年8月撮影) 2-731
义	2.3-686	削岩機
义	2.3-687	削孔状況(上部低拡散層)2-732
义	2.3-688	削孔完了(上部低拡散層)2-733
义	2.3-689	パイ型ゲージとひずみゲージ取付位置2-733
义	2.3-690	パイ型ゲージとひずみゲージの取付状況(上部低拡散層) 2-734
义	2.3-691	解析領域(上部低拡散層全体表示)2-735
义	2.3-692	解析領域(解析領域付近拡大)
义	2.3-693	解析メッシュと境界条件
义	2.3-694	分布荷重の概念図と標準パッカーの断面形状 2-737
义	2.3-695	ひずみコンター図(Case1、削岩力 1.0MN 時) 2-738
义	2.3-696	ひずみコンター図(Case1、削岩力 2.0MN 時) 2-739
义	2.3-697	ひずみコンター図(Case1、削岩力 3.0MN 時) 2-739
义	2.3-698	ひずみコンター図(Case1、削岩力 4.0MN 時) 2-740
汊	2.3-699	ひずみコンター図(Case1、削岩力 5.0MN 時) 2-740
义	2.3-700	ひずみコンター図(Case1、削岩力 6.0MN 時) 2-741
义	2.3-701	ひずみコンター図(Case2、削岩力 1.0MN 時) 2-741
义	2.3-702	ひずみコンター図(Case2、削岩力 2.0MN 時) 2-742
义	2.3-703	ひずみコンター図(Case2、削岩力 3.0MN 時) 2-742
义	2.3-704	ひずみコンター図(Case2、削岩力 4.0MN 時) 2-743
义	2.3 - 705	ひずみコンター図(Case2、削岩力 5.0MN 時) 2-743
义	2.3-706	ひずみコンター図(Case2、削岩力 6.0MN 時) 2-744
义	2.3-707	現状のひずみゲージ配置(案)2-745
义	2.3-708	ひずみ分布とひずみゲージ配置案の対比(Case-1、削岩力 3.0MN 時)
义	2.3-709	ひずみ分布とひずみゲージ配置案の対比(Case-2、削岩力 3.0MN 時)
义	2.3-710	光ファイバセンサーによる計測状況
义	2.3-711	ひび割れ形状及びひび割れ幅(直交方向ひび割れ)
义	2.3-712	直交ひび割れ 計器計測値(上 パイゲージ、中・下 ひずみゲージ) 2-748

図 2.3-713	ひび割れ形状及びひび割れ幅(斜め方向ひび割れ) 2-749
図 2.3-714	斜めひび割れ 計器計測値(上 パイゲージ、中・下 ひずみゲージ) 2-750
図 2.3-715	ひび割れ誘発位置(上部低拡散層)2-751
図 2.3-716	光ファイバ敷設状況(上部低拡散層)2-751
図 2.3-717	パイ型ゲージ(PI-5-100)とひずみゲージ
図 2.3-718	PPP-BOTDA 方式結果 1(上部低拡散層 STEP1) 2-753
図 2.3-719	TW-COTDR 方式結果1(上部低拡散層 STEP1) 2-754
図 2.3-720	PPP-BOTDA 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2) 2-755
図 2.3-721	TW-COTDR 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2) 2-756
図 2.3-722	PPP-BOTDA 方式結果 3(上部低拡散層 STEP3) 2-757
図 2.3-723	TW-COTDR 方式結果 3(上部低拡散層 STEP3) 2-758
図 2.3-724	PPP-BOTDA 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4) 2-759
図 2.3-725	TW-COTDR 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4) 2-760
図 2.3-726	PPP-BOTDA 方式結果 5(上部低拡散層 STEP5) 2-761
図 2.3-727	TW-COTDR 方式結果 5(上部低拡散層 STEP5) 2-762
図 2.3-728	PPP-BOTDA 方式結果 6(上部低拡散層 STEP6) 2-763
図 2.3-729	TW-COTDR 方式結果 6(上部低拡散層 STEP6) 2-764
図 2.3-730	PPP-BOTDA 方式結果 7(上部低拡散層 STEP7) 2-765
図 2.3-731	TW-COTDR 方式結果 7(上部低拡散層 STEP7) 2-766
図 2.3-732	ひずみ分布計測結果(STEP1、長軸 : P14) 2-766
図 2.3-733	ひずみ分布計測結果(STEP1、長軸:P15) 2-767
図 2.3-734	ひずみ分布計測結果(STEP2、長軸:P14) 2-767
図 2.3-735	ひずみ分布計測結果(STEP2、長軸:P15) 2-767
図 2.3-736	ひずみ分布計測結果(STEP3、長軸:P14) 2-768
図 2.3-737	ひずみ分布計測結果(STEP3、長軸:P15) 2-768
図 2.3-738	ひずみ分布計測結果(STEP4、長軸:P14) 2-768
図 2.3-739	ひずみ分布計測結果(STEP4、長軸:P15) 2-769
図 2.3-740	ひずみ分布計測結果(STEP5、長軸:P14) 2-769
図 2.3-741	ひずみ分布計測結果(STEP5、長軸 : P15) 2-769
図 2.3-742	ひずみ分布計測結果(STEP6、長軸 : P14) 2-770
図 2.3-743	ひずみ分布計測結果(STEP6、長軸 : P15) 2-770
図 2.3-744	ひずみ分布計測結果(STEP7、長軸:P14)
図 2.3-745	ひずみ分布計測結果(STEP7、長軸:P15)
⊠ 2.3-746	ひずみ分布計測結果(STEP1、短軸:P11)2-771
図 2.3-747	ひずみ分布計測結果(STEP1、短軸 : P12) 2-771
⊠ 2.3-748	ひずみ分布計測結果(STEP2、短軸:P11)2-772
図 2.3-749	ひずみ分布計測結果(STEP2、短軸 : P12) 2-772
図 2.3-750	ひずみ分布計測結果(STEP3、短軸:P11)2-772

図 2.3-751	ひずみ分布計測結果(STEP3、短軸:P12)	
図 2.3-752	ひずみ分布計測結果(STEP4、短軸 : P11)	
図 2.3-753	ひずみ分布計測結果(STEP4、短軸 : P12)	
図 2.3-754	ひずみ分布計測結果(STEP5、短軸 : P11)	
図 2.3-755	ひずみ分布計測結果(STEP5、短軸 : P12)	
図 2.3-756	ひずみ分布計測結果(STEP6、短軸 : P11)	
図 2.3-757	ひずみ分布計測結果(STEP6、短軸 : P12)	
図 2.3-758	ひずみ分布計測結果(STEP7、短軸 : P11)	
図 2.3-759	ひずみ分布計測結果(STEP7、短軸 : P12)	
図 2.3-760	ひずみゲージの測定結果 1(上部低拡散層 STEP1)	
図 2.3-761	ひずみゲージの測定結果 2(上部低拡散層 STEP2)	
図 2.3-762	ひずみゲージの測定結果 3(上部低拡散層 STEP3)	
図 2.3-763	ひずみゲージの測定結果 4(上部低拡散層 STEP4)	
図 2.3-764	ひずみゲージの測定結果 5(上部低拡散層 STEP5)	
図 2.3-765	ひずみゲージの測定結果 6(上部低拡散層 STEP6)	
図 2.3-766	ひずみゲージの測定結果 7(上部低拡散層 STEP7)	
図 2.3-767	デジタル画像相関法による変形前後のイメージ	
図 2.3-768	撮影実施状況	
図 2.3-769	撮影結果(STEP0)	
図 2.3-770	撮影結果(STEP4)	
図 2.3-771	撮影結果(STEP1)	
図 2.3-772	撮影結果(STEP5)	
図 2.3-773	撮影結果(STEP2)	
図 2.3-774	撮影結果(STEP6)	
図 2.3-775	撮影結果(STEP3)	
図 2.3-776	撮影結果(STEP7)	
図 2.3-777	方向成分值	
図 2.3-778	パッカーにて加圧した付近のひずみ変化(a)	
図 2.3-779	パッカーにて加圧した付近のひずみ変化(b)	
図 2.3-780	モニタリング対象施設のイメージ	
図 2.3-781	想定する処分空洞の断面図	
図 2.3-782	処分空洞内での操業状況(処分空洞縦断図)[1]	
図 2.3-783	想定する処分空洞縦断方向の廃棄体定置間隔[2]	
図 2.3-784	既往検討で検討対象とした施設形状(処分空洞部平面図、[3]	に一部加筆)
図 2.3-785	本検討で想定する処分空洞の縦断図	
図 2.3-786	フランスの処分場におけるモニタリングの例[7]	
図 2.3-787	ドイツの処分施設の概念図[8]	

义	2.3-788	スイスの処分施設の概念図[10]
义	2.3-789	処分施設における底部低透水層の位置
义	2.3-790	施設変形モニタリングによる安全機能への影響確認フロー 2-803
义	2.3-791	温度計測モニタリングによる安全機能への影響確認フロー 2-805
义	2.3-792	処分施設における低拡散層の位置2-807
义	2.3-793	低拡散層のひび割れモニタリングによる安全機能への影響確認フロー
义	2.3-794	計測のイメージ
义	2.3-795	処分施設の裏面排水分析(変化量対象)モニタリングによる安全機能、安
		全性への影響確認フロー
义	2.3-796	処分施設の裏面排水分析(検出確認)モニタリングによる安全機能、安全
		性への影響確認フロー
义	2.3-797	排水量の経年変化
义	2.3-798	Na イオン濃度の経年変化2-814
义	2.3-799	Kイオン濃度の経年変化2-814
义	2.3-800	Ca イオン濃度の経年変化
义	2.3-801	近傍ボーリング孔の地下水分析モニタリングによる安全機能への影響確認
		フロー
义	2.3-802	解析結果の出力位置
义	2.3-803	pH と施設からの距離の関係 (Case1)2-820
义	2.3-804	Na イオン濃度と施設からの距離の関係(Case1) 2-820
义	2.3-805	Kイオン濃度と施設からの距離の関係(Case1)
义	2.3-806	Caイオン濃度と施設からの距離の関係(Case1) 2-820
义	2.3-807	地震動計測による安全機能への影響確認フロー2-821
义	2.3-808	光ファイバセンサーの設置方法の概念図
义	2.3-809	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの設置位置(例) 2-826
义	2.3-810	計測精度と光ファイバの破断確率及びバリア機能への影響 2-827
义	2.3-811	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 1)
义	2.3-812	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 2)
义	2.3-813	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 3)
义	2.3-814	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 4)
义	2.3-815	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 5)
义	2.3-816	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 6)

図 2.3-817	温度履歴出力点(低拡散層のひび割れ計測)
図 2.3-818	代表点の温度履歴(TOUGH2;ケース①) 2-832
図 2.3-819	pH と塩化物イオン濃度の経時変化出力点
図 2.3-820	pH の経時変化(LIFE D.N.A.; ケース 3 及びケース 6) 2-834
図 2.3-821	塩化物イオン濃度の経時変化(LIFE D.N.A. ; ケース 3 及びケース 6)
図 2.3-822	側部-上部低拡散層の打ち継ぎ付近の光ファイバセンサー
図 2.3-823	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例1) 2-838
図 2.3-824	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例 2) 2-839
図 2.3-825	解析結果の出力点
図 2.3-826	上部低透水層の飽和度と全応力の経時変化
図 2.3-827	側部低透水層の飽和度と全応力の経時変化
図 2.3-828	底部低透水層の飽和度と全応力の経時変化2-842
図 2.3-829	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 1)
図 2.3-830	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 2)
図 2.3-831	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 3)
図 2.3-832	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 4)
図 2.3-833	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 5)
図 2.3-834	施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 6)
図 2.3-835	温度履歴出力点(施設内の圧力分布計測) 2-846
図 2.3-836	代表点の温度履歴(TOUGH2;ケース①) 2-846
図 2.3-837	pH と塩化物イオン濃度の経時変化出力点
図 2.3-838	pH の経時変化(LIFE D.N.A.; ケース 3 及びケース 6) 2-848
図 2.3-839	塩化物イオン濃度の経時変化(LIFE D.N.A. ; ケース 3 及びケース 6)
図 2.3-840	緩衝材の飽和度と比抵抗の関係[24] 2-850
図 2.3-841	ベントナイトの膨潤指数κをパラメータとした解析結果の比較 2-851
図 2.3-842	施設内の温度分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例) 2-852
図 2.3-843	炉内等廃棄物の放射能濃度と時間の関係2-855
図 2.3-844	トリチウム濃度計測器[42]
図 2.3-845	β線の分布計測イメージ

図 2.3-846	防射線照射前後の光ファイバの透過率の変化	2-862
図 2.3-847	/ 石英光ファイバの伝送損失特性	2-863
図 2.3-848	5 光ファイバのγ線照射後の誘起損失	2-864
図 2.3-849) 試料採取モニタリングのイメージ(廃棄物埋設中)	2-867
図 2.3-850) 試料採取モニタリングのイメージ(封止後)	2-867
図 2.3-851	放射線センサによるモニタリングイメージ(廃棄物埋設中)	2-869
図 2.3-852	お射線センサによるモニタリングイメージ(封止後)	2-869
図 2.3-853	5 放射性廃棄物の処分概念[61]	2-871
図 2.4-1	坑内気温・湿度の経時変化(百葉箱温湿度計 A-①)	2-888
図 2.4-2 見	底部低透水層の沈下量計測結果	2-890
図 2.4-3 見	底部低透水層の土圧計測結果	2-890
図 2.4-4	底部低拡散層の応力計測結果	2-891
図 2.4-5	底部コンクリートピットの応力計測結果	2-891
図 2.4-6 亻	則部コンクリートピットの応力計測結果	2-892
図 2.4-7 亻	則部低拡散層の応力計測結果	2-892
図 2.4-8	上部コンクリートピットの応力計測結果	2-893
図 2.4-9	上部低拡散層の応力計測結果	2-893
図 2.4-10	上部埋戻し材の沈下量計測結果	2-894
図 2.4-11	調查対象範囲	2-895
図 2.4-12	上部低拡散層と人為的に発生させたひび割れの関係	2-900
図 2.4-13	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	の1)
		2-901
図 2.4-14	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	D 2)
		2-902
図 2.4-15	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	ひ3)
		2-903
図 2.4-16	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	ひ 4)
		2-904
図 2.4-17	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	ひ 5)
		2-905
図 2.4-18	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	の6)
		2-906
図 2.4-19	上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その	の7)
		2-907
図 2.4-20	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その1)	2-909
図 2.4-21	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その 2)	2-910
図 2.4-22	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その3)	.2-911
図 2.4-23	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その4)	2-912

図 2.4-24	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その 5)	2-913
図 2.4-25	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その 6)	2-914
図 2.4-26	側部低拡散層のひび割れ履歴図(その 7)	2-915
図 2.4-27	側部低拡散層のひび割れ深さ	2-915
図 2.4-28	BTV 観察孔水平位置図	2-918
図 2.4-29	BTV 観察孔鉛直位置図	2-918
図 2.4-30	BTV 観察装置	2-919
図 2.4-31	BIP システムの標準構成図(現場システム)	2-921
図 2.4-32	ボーリングマシンによる斜孔の計測図	2-922
図 2.4-33	押し込み装置概略図	2-922
図 2.4-34	円周方向の分解能	2-923
図 2.4-35	画像取得のための円周ライン	2-924
図 2.4-36	走向傾斜計算ルーチン	2-925
図 2.4-37	ボーリング孔側壁観察レイアウト	2-926
図 2.4-38	ミニシースネイク装置	2-927
図 2.4-39	深度 5.772m付近の割れ目(平成 27 年度)	2-934
図 2.4-40	深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)	2-934
図 2.4-41	深度 8.646m付近の割れ目(平成 27 年度)	2-935
図 2.4-42	深度 8.646m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)	2-935
図 2.4-43	深度 11.295m付近の割れ目(平成 27 年度)	2-936
図 2.4-44	深度 11.295m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)	2-936
図 2.4-45	深度 5.772m付近の割れ目(平成 28 年)	2-937
図 2.4-46	深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 28 年度)	2-937
図 2.4-47	深度 8.646m付近の割れ目(平成 28 年度)	2-938
図 2.4-48	深度 8.646m付近の割れ目(トレース)(平成 28 年度)	2-938
図 2.4-49	深度 11.295m付近の割れ目(平成 28 年度)	2-939
図 2.4-50	深度 11.295m付近の割れ目(トレース)(平成 28 年度)	2-939
図 2.4-51	深度 5.772m付近の割れ目(平成 29 年度)	2-940
図 2.4-52	深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 29 年度)	2-940
図 2.4-53	深度 8.646m付近の割れ目(平成 29 年度)	2-941
図 2.4-54	深度 8.646m付近の割れ目(トレース)(平成 29 年度)	2-941
図 2.4-55	深度 11.295m付近の割れ目(平成 29 年度)	2-942
図 2.4-56	深度 11.295m付近の割れ目(トレース)(平成 29 年度)	2-942
図 2.4-57	深度 5.772m 付近のひび割れ(平成 30 年度)	2-943
図 2.4-58	深度 5.772m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度)	2-943
図 2.4-59	深度 8.646m 付近のひび割れ(平成 30 年度)	2-944
図 2.4-60	深度 8.646m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度)	2-944
図 2.4-61	深度 11.295m 付近のひび割れ(平成 30 年度)	2-945
図 2.4-62	深度 11.295m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度) 2-94	15
----------	------------------------------------------	--------------
図 2.4-63	深度 5.772m 付近のひび割れ(平成 31 年度) 2-94	6
図 2.4-64	深度 5.772m 付近のひび割れ(トレース)(平成 31 年度) 2-94	6
図 2.4-65	深度 8.646m 付近のひび割れ(平成 31 年度) 2-94	1 7
図 2.4-66	深度 8.646m 付近のひび割れ(トレース)(平成 31 年度) 2-94	1 7
図 2.4-67	深度 11.295m 付近のひび割れ(平成 31 年度) 2-94	8
図 2.4-68	深度 11.295m 付近のひび割れ(トレース)(平成 31 年度) 2-94	8
図 2.4-69	ひび割れの発生位置及び方向性と水溜まりの確認区間	19
図 2.4-70	BTV 観察結果(0.000m-2.000m)(平成 27 年度) 2-95	50
図 2.4-71	BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 27 年度) 2-95	51
図 2.4-72	BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 27 年度) 2-95	52
図 2.4-73	BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 27 年度) 2-95	53
図 2.4-74	BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 27 年度) 2-95	54
図 2.4-75	BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 27 年度) 2-95	55
図 2.4-76	BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 27 年度) 2-95	66
図 2.4-77	BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 27 年度) 2-95	57
図 2.4-78	BTV 観察結果(0.000m-2.000m)(平成 28 年度) 2-95	58
図 2.4-79	BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 28 年度) 2-95	59
図 2.4-80	BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 28 年度) 2-96	30
図 2.4-81	BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 28 年度) 2-96	31
図 2.4-82	BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 28 年度) 2-96	32
図 2.4-83	BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 28 年度) 2-96	33
図 2.4-84	BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 28 年度) 2-96	34
図 2.4-85	BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 28 年度) 2-96	35
図 2.4-86	BTV 観察結果(0.000m-2.000m)(平成 29 年度) 2-96	36
図 2.4-87	BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 29 年度) 2-96	37
図 2.4-88	BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 29 年度) 2-96	38
図 2.4-89	BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 29 年度) 2-96	39
図 2.4-90	BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 29 年度) 2-97	0
図 2.4-91	BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 29 年度) 2-97	1
図 2.4-92	BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 29 年度) 2-97	$^{\prime}2$
図 2.4-93	BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 29 年度) 2-97	'3
図 2.4-94	BTV 観察結果(0.000m-2.000m)(平成 30 年度) 2-97	'4
図 2.4-95	BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 30 年度) 2-97	$^{\prime}5$
図 2.4-96	BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 30 年度) 2-97	6
図 2.4-97	BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 30 年度) 2-97	7
図 2.4-98	BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 30 年度) 2-97	8
図 2.4-99	BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 30 年度) 2-97	/9

図 2.4-100	BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 30 年度) 2-980
図 2.4-101	BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 30 年度) 2-981
図 2.4-102	BTV 観察結果(0.000m-2.000m)(平成 31 年度)
図 2.4-103	BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 31 年度)
図 2.4-104	BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 31 年度) 2-984
図 2.4-105	BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 31 年度) 2-985
図 2.4-106	BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 31 年度) 2-986
図 2.4-107	BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 31 年度) 2-987
図 2.4-108	BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 31 年度) 2-988
図 2.4-109	BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 31 年度) 2-989
図 2.4-110	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(0.000m-1.000m)
<u> </u>	
图 2.4-111	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(1.000m-2.000m)
图 2.4-112	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比 (2.000m-3.000m)
<u> </u>	·····································
図 2.4-113	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観祭結果の対比 (3.000m-4.000m)
₩ 9.4-11 <i>4</i>	
⊠ 2.4-114	平成 27 平度~平成 31 平度の BIV 観察福米の対比 (4.000m-5.000m)
₩ 9 <i>4</i> -115	
凶 2.4 115	十成 27 中反 * 十成 51 中反 * 51 * 截奈柏未の対比 (5.000m 6.000m)
X 9 /-116	平成 97 年度~平成 31 年度の BTV 組密結果の対比 (6 000m-7 000m)
	2-996
叉 2.4-117	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(7.000m-8.000m)
	2-997
図 2.4-118	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(8.000m-9.000m)
	2-998
⊠ 2.4-119	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(9.000m-10.000m)
⊠ 2.4-120	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(10.000m-11.000m)
図 2.4-121	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(11.000m-12.000m)
図 2.4-122	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(12.000m-13.000m)
図 2.4-123	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(13.000m-14.000m)

図 2.4-124	平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(14.000m-15.	000m)
		2-1004
図 2.4-125	前方視カメラで撮影したボーリング孔先端	2-1005
図 2.4-126	前方視カメラで撮影したひび割れ(5.772 m 付近)	2-1005
図 2.4-127	空洞と計測坑 B の採水箇所	2-1007
🗵 2.4-128	採水方法	2-1008
⊠ 2.4-129	水質へキサダイヤグラム(2006 年度水質調査)	2-1015
図 2.4-130	水質ヘキサダイヤグラム(平成 29 年度)	2-1015
🗵 2.4-131	水質ヘキサダイヤグラム(平成 30 年度)	2-1016
🗵 2.4-132	水質ヘキサダイヤグラム(平成 31 年度)	2-1016
🗵 2.4-133	地中無線全体システム	2-1020
⊠ 2.4-134	送信装置	2-1020
図 2.4-135	無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 27	年度)
		2-1023
図 2.4-136	無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 28	年度)
		2-1023
図 2.4-137	無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 29	年度)
		2-1023
図 2.4-138	無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 30	年度)
		2-1024
図 2.4-139	無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 31	年度)
		2-1024
図 2.4-140	地中無線計器及び有線計器の設置位置	2-1025
図 2.4-141	地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成27年度)	2-1025
図 2.4-142	地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 27	年度)
		2-1026
図 2.4-143	地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成28年度)	2-1026
図 2.4-144	地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 28	年度)
		2-1026
図 2.4-145	地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成29年度)	2-1027
図 2.4-146	地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 29	年度)
		2-1027
図 2.4-147	地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 30 年度)	2-1027
図 2.4-148	地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 30	年度)
		2-1028
⊠ 2.4-149	地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 31 年度)	2-1028
図 2.4-150	地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 31	年度)
		2-1028

図 2.4-151	岩盤変位計測結果	. 2-1030
図 2.4-152	岩盤間隙水圧計測結果	. 2-1030
図 2.4-153	地震計設置位置	. 2-1031
図 2.4-154	地震計設置状況	. 2-1033
図 2.4-155	観測地震動の最大加速度と計測高さの関係(左から x、y、z 方向)	2-1036
図 2.4-156	解析モデル(全体)	. 2-1037
図 2.4-157	解析モデル(試験空洞周辺)	. 2-1037

表目次

表	2.1 - 1	本事業における前提条件、モニタリングの対象期間・対象範囲 2-3
表	2.1 - 2	本業務において用いる用語の定義(1/2)
表	2.1 - 3	本業務において用いる用語の定義(2/2)
表	2.1-4	中深度処分施設の各部材の呼称
表	2.1-5	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)(1/3)2-8
表	2.1-6	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)(2/3)2-9
表	2.1-7	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)(3/3)2-10
表	2.1-8	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)(1/4)2-11
表	2.1 - 9	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)(2/4)2-12
表	2.1 - 10	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) (3/4) 2-13
表	2.1 - 11	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) (4/4) 2-14
表	2.1 - 12	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2·19
表	2.1 - 13	地層処分のモニタリングの目的と分類[15]2-19
表	2.1-14	中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[16]2-21
表	2.1 - 15	地層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[17] 2-22
表	2.1 - 16	センサー技術の調査結果(計測項目と計測技術)
表	2.1 - 17	機能確認の目的と考え方の整理2-28
表	2.1 - 18	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)
表	2.1 - 19	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
表	2.1-20	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
表	2.1-21	閉じ込め、遮へいに係る技術的要件(埋戻しまで)
表	2.1 - 22	移行抑制に係る技術的要件(埋戻し後)
表	2.1-23	セメント系材料の安全機能に影響を及ぼす要因の整理
表	2.1-24	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
表	2.1 - 25	坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験
表	2.1-26	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
表	2.1-27	感度解析のための主要なパラメータの基準値
表	2.1-28	最大線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧
表	2.1-29	不確実性評価を対象としたパラメータの一覧 2-46
表	2.1-30	ベントナイト系材料の透水係数及び拡散係数の設定

表 2.1-31	セメント系材料の透水係数及び拡散係数の設定2-4	18
表 2.1-32	2 廃棄体からの溶出率及び施設浸透水量の設定	18
表 2.1-33	3 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…2-4	49
表 2.1-34	日 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)	IJ
	オ)	19
表 2.1-35	5 状態設定の時系列的な考え方2-8	50
表 2.1-36	3 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). 2-8	52
表 2.1-37	7 解析結果のまとめ	55
表 2.1-38	3 基本シナリオと変動シナリオの定義	59
表 2.1-39) 基本シナリオ設定のために評価すべき事項2-?	59
表 2.1-40)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2-6	30
表 2.1-41	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2-6	31
表 2.1-42	? 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	32
表 2.1-43	3 人工バリア特性の変遷2-6	33
表 2.1-44	↓ パラメータの経時変化 2·6	34
表 2.1-45	 ガス影響に関する解析設定	38
表 2.1-46	3 ガス移行シナリオの考え方2-7	72
表 2.2-1	モニタリング対象施設と具体的なモニタリング方法2-6	34
表 2.2-2	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	39
表 2.2-3	計測項目案(地上サンプリング施設の実施例1)	23
表 2.2-4	計測項目案(地上サンプリング施設の実施例 2)	26
表 2.2-5	計測項目案(地下模擬施設)2·13	30
表 2.3-1	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 2-13	36
表 2.3-2	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 2-13	37
表 2.3-3	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(低拡散層)…2-13	38
表 2.3-4	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)
		39
表 2.3-5	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)…2-13	39
表 2.3-6	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2-14	40
表 2.3-7	重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(低拡散層) 2-14	41
表 2.3-8	重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(コンクリートピット))
		41
表 2.3-9	重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(低透水層) 2-14	41
表 2.3-10	モニタリング対象及びモニタリング項目	42
表 2.3-11	中深度処分施設の基本安全機能と段階の関係	43
表 2.3-12	中深度処分施設の基本安全機能の内容2-14	43
表 2.3-13	中深度処分施設の各構成部位に要求される機能2-14	14
表 2.3-14	中深度処分施設の各構成部位の技術要件	15

表 2.3-15	抽出したモニタリング項目の候補	2-159
表 2.3-16	抽出したモニタリング項目	2-161
表 2.3-17	定量化方法(1/2)	2-164
表 2.3-18	定量化方法(2/2)	2-165
表 2.3-19	CODE_BRIGHT の主な適用プロジェクト	2-177
表 2.3-20	二相流パラメータ(その1)	2-197
表 2.3-21	二相流パラメータ(その2)	2-198
表 2.3-22	BB モデルで必要な物性パラメータとクニゲル GX 試験の現状	2-202
表 2.3-23	低透水層に用いる力学パラメータ	2-203
表 2.3 - 24	廃棄体間充てん材の諸元	2-206
表 2.3-25	廃棄体間充てん材に用いる力学パラメータ	2-206
表 2.3-26	上部充てん材に用いる力学パラメータ	2-206
表 2.3-27	コンクリートピットに用いる力学パラメータ	2-207
表 2.3-28	低拡散層に用いる力学パラメータ	2-207
表 2.3-29	埋戻し材(土質系材料)に用いる力学パラメータ	2-208
表 2.3-30	埋戻し材(セメント系材料)に用いる力学パラメータ	2-208
表 2.3-31	支保工の諸元及び力学パラメータ	2-209
表 2.3-32	均しコンクリートの力学パラメータ	2-209
表 2.3-33	力学パラメータ一覧(セメント系部材)	2-210
表 2.3-34	解析ケース一覧	2-211
表 2.3-35	低透水層の物性(変更値)	
表 2.3-36	施工状態と経過時間参照	
表 2.3-37	換算に用いた各係数値(理科年表_平成28年度)	2-258
表 2.3-38	主な部材に関する絶対浸透率設定値	
表 2.3-39	熱物性パラメーター覧	
表 2.3-40	飽和度に基づいた熱伝導率算出結果一覧	2-261
表 2.3-41	飽和度に基づいた比熱算出結果一覧	
表 2.3-42	廃棄体エリアからの発熱条件設定	2-264
表 2.3-43	各部位熱物性值[45]	2-266
表 2.3-44	廃棄体エリア内における熱特性の飽和度依存性算出結果	2-266
表 2.3-45	施工過程における境界条件整理(TOUGH2)	2-268
表 2.3-46	TOUGH2 解析ケース	2-269
表 2.3-47	TOUGH2 解析二相流パラメータ	2-270
表 2.3-48	各点における飽和度と温度データ_低透水層周囲	2-278
表 2.3-49	各点における飽和度と温度データ_低拡散層周囲	2-279
表 2.3-50	TOUGH2 解析結果傾向整理	2-285
表 2.3-51	ケース別温度結果整理_1/2(廃棄体定置(施工開始後 50 年)	以降対象)

表 2.3-52	ケース別温度結果整理2/2(廃棄体定置(施工開始後 50 年)以	人降対象)
		2-289
表 2.3-53	低透水層に用いる力学物性値	2-290
表 2.3-54	廃棄体間充てん材の諸元	2-294
表 2.3-55	廃棄体間充てん材に用いる力学パラメータ	2 - 294
表 2.3-56	上部充てん材に用いる力学パラメータ	2-295
表 2.3-57	コンクリートピットに用いる力学パラメータ	2-295
表 2.3-58	低拡散層に用いる力学パラメータ	2-296
表 2.3-59	埋戻し材(土質系材料)に用いる力学パラメータ	2-296
表 2.3-60	埋戻し材(セメント系材料)に用いる力学パラメータ	2-297
表 2.3-61	支保工の力学パラメータ	2-297
表 2.3-62	均しコンクリートの力学パラメータ	2-297
表 2.3-63	力学パラメーター覧(セメント系部材)(1/2)	2-298
表 2.3-64	力学パラメーター覧(セメント系部材)(2/2)	2-299
表 2.3-65	低透水層に着目した解析結果の整理	2-313
表 2.3-66	入力条件	2-320
表 2.3-67	検討解析ケース	2-320
表 2.3-68	解析結果	2-321
表 2.3-69	既往検討ケース	2-325
表 2.3-70	追加解析ケース	2-326
表 2.3-71	パラメータスタディ解析結果有効応力経路	2-327
表 2.3-72	パラメータスタディ解析結果応力-ひずみ関係	2-327
表 2.3-73	追加解析ケース	2-329
表 2.3-74	経年における鉛直変位量比較表(コンクリートピット中央)	2 - 331
表 2.3-75	検討結果の整理	2-333
表 2.3-76	初期条件一覧表	2-335
表 2.3-77	施工過程における境界条件整理(CODE_BRIGHT)	
表 2.3-78	解析用物性值一覧	
表 2.3-79	検討ケース一覧	2-349
表 2.3-80	検討結果一覧	2-354
表 2.3-81	試験空洞の吹付けコンクリートにおける使用材料	2-360
表 2.3-82	吹付けコンクリートの配合	2-360
表 2.3-83	試験に使用した材料	2-360
表 2.3-84	試験空洞の吹付けコンクリートにおける使用材料	2-360
表 2.3-85	初期試料の化学組成	2-361
表 2.3-86	浸漬水の分析(浸漬材齢 14 日、28 日、56 日)	2-361
表 2.3-87	鉱物組成の分析(浸漬材齢 14 日、28 日、56 日)	2-362
表 2.3-88	水和生成物の組成割合の経時変化	

表 2.3-89	浸漬水の分析(浸漬材齢 70 日)	. 2-364
表 2.3-90	液固比と固相 Ca 濃度比の関係	. 2-366
表 2.3-91	解析ケース	. 2-368
表 2.3-92	各部材における拡散係数と透水係数	. 2-369
表 2.3-93	固相 NaOH 濃度	. 2-371
表 2.3-94	固相 Ca(OH)2 濃度	. 2-372
表 2.3-95	空隙率	. 2-373
表 2.3-96	pH 分布	. 2-374
表 2.3-97	液相 Na+分布	. 2-375
表 2.3-98	液相 Ca2+分布	. 2-376
表 2.3-99	解析ケース(STEP1)	. 2-380
表 2.3-100	解析ケース(STEP2)	. 2-380
表 2.3-101	解析ケース(STEP3)	. 2-381
表 2.3-102	解析ケース	. 2-382
表 2.3-103	解析ケース	. 2-385
表 2.3-104	解析ケース	. 2-388
表 2.3-105	解析ケース	. 2-394
表 2.3-106	地下水組成[79]	. 2-394
表 2.3-107	セメント系材料の設定値(ケース 9)	. 2-400
表 2.3-108	セメント系材料の設定値(ケース 4)	. 2-404
表 2.3-109	人工バリア内鋼材の腐食シナリオ	2-411
表 2.3-110	腐食速度パラメーター覧	. 2-412
表 2.3-111	低拡散層の使用材料と配合[86]	. 2-413
表 2.3-112	廃棄体間充てん材の使用材料と配合[86]	. 2-414
表 2.3-113	廃棄体間充てん材のひずみ測定結果(20℃環境)[86]	. 2-414
表 2.3-114	コンクリートピットの使用材料と配合[86]	. 2-416
表 2.3-115	平成 21 年度に選定された上部充てん材の配合[86]	. 2-416
表 2.3-116	平成 22 年度に選定された上部充てん材の使用材料と配合[87]	. 2-417
表 2.3-117	上部充てん材のひずみ測定結果(20℃環境)[87]	. 2-418
表 2.3-118	各段階における代表的な腐食のメカニズムと腐食形態	. 2-424
表 2.3-119	空洞内充填材の配合条件	. 2-432
表 2.3-120	施工前実機試験で選定された配合(スランプ型、常温時)	. 2-432
表 2.3-121	施工前実機試験で選定された配合(スランプ型、低温時)	. 2-432
表 2.3-122	施工前実機試験で選定された配合(高流動型型)	. 2-432
表 2.3-123	各種散乱光による分布計測	. 2-448
表 2.3-124	主な温度分布の計測方法	. 2-450
表 2.3-125	主なひずみ分布の計測方法	. 2-451
表 2.3-126	計測器の仕様	. 2-454

表 2.3-127	光ケーブルの校正係数	2-456
表 2.3-128	光ファイバのサンプル	2-458
表 2.3-129	各タイプの光ファイバ仕様	2-459
表 2.3-130	劣化促進パラメーター	2-460
表 2.3-131	恒温槽仕様	2-461
表 2.3-132	ガンマ線照射装置仕様	2-462
表 2.3-133	塩水劣化促進後の破断強度(中央値)	2-465
表 2.3-134	高アルカリ劣化促進後の破断強度(中央値)	2-467
表 2.3-135	放射線照射後の破断強度(中央値)	2-468
表 2.3-136	直接破断に対する機械的評価	2-468
表 2.3-137	塩水劣化促進後の疲労係数	2-470
表 2.3-138	アルカリ劣化促進後の疲労係数	2-471
表 2.3-139	放射線照射後の疲労係数	2-473
表 2.3-140	疲労破断に対する機械的評価	2-473
表 2.3-141	損失計測結果(汎用タイプ)	2-476
表 2.3-142	損失計測結果(耐水性タイプ)	2-476
表 2.3-143	100 年経過後の単位長さあたりの累積破断個数の試算結果	2-480
表 2.3-144	直接破断モード時を考慮した場合のモニタリング計画例	2-481
表 2.3-145	疲労破断モードを考慮した場合のモニタリング計画例	2-483
表 2.3-146	損失増大モードを考慮した場合のモニタリング計画例	2-483
表 2.3-147	ポイント型光ファイバ圧力センサーの仕様	2-492
表 2.3-148	ベントナイト試験前密度	2-494
表 2.3-149	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(膨潤圧試験)	2-495
表 2.3-150	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(圧力試験)	2-504
表 2.3-151	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(圧力試験)	2-504
表 2.3-152	圧力計測を用いたモニタリング計画例	2-506
表 2.3-153	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(敷設試験)	2-518
表 2.3-154	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(敷設試験)	2-519
表 2.3-155	原位置試験	2-523
表 2.3-156	温度計の主な仕様	2-525
表 2.3-157	クリップゲージの主な仕様	2-527
表 2.3-158	データロガーの主な仕様	2-527
表 2.3-159	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(アクセス坑道)	2-535
表 2.3-160	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(アクセス坑道)	2-535
表 2.3-161	アクセス坑道と光ファイバ位置の関係	2-537
表 2.3-162	温度計測を用いたモニタリング計画例	2-546
表 2.3-163	クリップゲージの主な仕様	2-547
表 2.3-164	データロガーの主な仕様	2-547

表 2.3-165	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(側部低拡散層)	2-550
表 2.3-166	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(上部低拡散層)	2-559
表 2.3-167	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(手前コンクリートピット).	2-565
表 2.3-168	ひずみ計測を用いたモニタリング計画例	2-569
表 2.3-169	ひび割れ誘発手法の選定に向けた流れ	2-570
表 2.3-170	試験体の配合	2-573
表 2.3-171	打設したコンクリートの圧縮強度	2-573
表 2.3-172	使用機材一覧	2-578
表 2.3-173	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(事前試験)	2-588
表 2.3-174	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、手前コンクリー	トピッ
	Ь)	2-627
表 2.3-175	TW-COTDR 方式の計測パラメーター (現地試験、手前コンクリートヒ	ット)
		2-628
表 2.3-176	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層).	2-653
表 2.3-177	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)	2-653
表 2.3-178	ひび割れ検知を用いたモニタリング計画例	2-730
表 2.3-179	使用機材一覧	2-732
表 2.3-180	解析物性值	2-736
表 2.3-181	低拡散層の静弾性係数試験結果[38]	2-737
表 2.3-182	標準パッカーの仕様	2-738
表 2.3-183	計測ステップと加圧停止の目安値(上部低拡散層 直交方向)	2-747
表 2.3-184	計測ステップと加圧停止の目安値(上部低拡散層 斜め方向)	2-749
表 2.3-185	ゲージ長、基線長及びチャンネル数	2-751
表 2.3-186	PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層).	2-752
表 2.3-187	TW-COTDR 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)	2-752
表 2.3-188	本検討で想定する処分施設の建設・操業工程(1/3)	2-794
表 2.3-189	本検討で想定する処分施設の建設・操業工程(2/3)	2-795
表 2.3-190	本検討で想定する処分施設の建設・操業工程(3/3)	2-796
表 2.3-191	モニタリング計画の区分	2-797
表 2.3-192	モニタリング計画(例)検討におけるモニタリング項目	2-797
表 2.3-193	各段階で計測可能な内容	2-802
表 2.3-194	処分施設の変形のモニタリング計画例(1/2)	2-804
表 2.3-195	処分施設の変形のモニタリング計画例(2/2)	2-805
表 2.3-196	温度計測モニタリング計画例	2-806
表 2.3-197	低拡散層のひび割れモニタリング計画例	2-808
表 2.3-198	処分施設の裏面排水分析のモニタリング計画例	2-812
表 2.3-199	近傍ボーリング孔による地下水分析のモニタリング計画例(1/2)	2-816
表 2.3-200	近傍ボーリング孔による地下水分析のモニタリング計画例(2/2)	2-817

表 2.3-201	解析ケース	2-819
表 2.3-202	地震動計測によるモニタリング計画例	2-822
表 2.3-203	光ファイバセンサーによるモニタリング項目	2-823
表 2.3-204	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバの設置工程(例)	2-827
表 2.3-205	低拡散層のひび割れ計測用光ファイバの配置案概要	2-828
表 2.3-206	出力点⑩(低拡散層側)の平均温度	2-832
表 2.3-207	化学解析の解析ケース(平成 30 年度)([22]に一部加筆)	2-833
表 2.3-208	設定した環境条件(低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサー	-) 2-834
表 2.3-209	配置案毎の光ファイバセンサー延長(概算値)	2-835
表 2.3-210	低拡散層のひび割れ計測頻度(例)	2-836
表 2.3-211	施設内の圧力分布計測用光ファイバの設置工程(例 1)	2-839
表 2.3-212	施設内の圧力分布計測用光ファイバの設置工程(例 2)	2-840
表 2.3-213	施設内の圧力分布計測用光ファイバの配置案概要	2-842
表 2.3-214	出力点①(低透水層側)の平均温度	2-846
表 2.3-215	化学解析の解析ケース(平成 30 年度)([22]に一部加筆)	2-847
表 2.3-216	設定した環境条件(圧力分布計測用光ファイバセンサー)	2-848
表 2.3-217	配置案毎の光ファイバセンサー延長(概算値)	2-849
表 2.3-218	圧力分布の計測頻度(例)	2-849
表 2.3-219	施設内の温度分布計測用光ファイバの設置工程(例)	2-852
表 2.3-220	主要 12 核種からの放射線	2-855
表 2.3-221	天然放射性核種の例	2-856
表 2.3-222	主な放射線計測器の検出原理	2-857
表 2.3-223	中深度処分で要求される見込みのモニタリング[61]	2-876
表 2.4-1	調査方法の概要	2-896
表 2.4-2	対象部位における使用材料	2-897
表 2.4-3	上部低拡散層の配合	2-898
表 2.4-4	上部コンクリートピットの配合	2-898
表 2.4-5	側部低拡散層(左側)の配合	2-898
表 2.4-6	対象部位のひび割れ調査履歴	2-899
表 2.4-7	BTV 観察実施日	2-916
表 2.4-8	実施項目	2-917
表 2.4-9	ボアホール観察 BIP-V/BIP-6 システム(レアックス)概略仕様	2-919
表 2.4-10	平成 29 年度から平成 31 年度にかけての採水量	2-1008
表 2.4-11	水質分析項目と測定方法	2-1010
表 2.4-12	水質分析結果(平成 29 年度)	2-1012
表 2.4-13	水質分析結果(平成 30 年度)	2-1013
表 2.4-14	水質分析結果(平成 31 年度)	2-1014
表 2.4-15	浸出水の原因・侵入経路[2]	2-1017

表	2.4-16	セメント化学組成[3]
表	2.4-17	ベントナイト (Kunigel V1) の化学組成[4] 2-1018
表 2	2.4-18	センサーの仕様2-1020
表 2	2.4-19	地中無線内部の時計の遅延2-1021
表 2	2.4-20	回収したデータ2-1021
表 2	2.4-21	設置位置選定根拠
表 2	2.4-22	地震計の仕様
表 2	2.4-23	回収データの仕様2-1032
表:	2.4-24	観測地震動一覧(1/2) 2-1034
表:	2.4-25	観測地震動一覧(2/2) 2-1035
表	2.4-26	各年度の解析用入力地震動一覧2-1038
表 2	2.4-27	試験施設の応答加速度(平成 27 年度)
表	2.4-28	試験施設の応答加速度(平成 28 年度)2-1040
表:	2.4-29	試験施設の応答加速度(平成 29 年度)2-1040
表:	2.4-30	試験施設の応答加速度(平成 30 年度)2-1041
表 2	2.4-31	試験施設の応答加速度(平成 31 年度)
表:	2.4-32	試験施設の最大加速度分布の比較2-1042
表 2	2.4-33	フーリエスペクトルの比較(y 方向)2-1043
表 2	2.4-34	フーリエスペクトルの比較(z 方向) 2-1044
表 2	2.4-35	変形図2-1046
表 2	2.4-36	試験施設の地震時増分応力(y 方向)2-1048
表 2	2.4-37	試験施設の地震時増分応力(z 方向) 2-1049
表:	3.3-1	抽出したモニタリング項目

第1章 全体概要

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

原子力発電所等の運転及び解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物の中には、埋設時点の 放射能濃度がコンクリートピット処分対象廃棄物に比べ2オーダー程度高く、300年経過後のコ ンクリートピット処分対象廃棄物の放射能濃度レベルになるまでに十万年程度を要する廃棄物 が存在する。

このため、これら廃棄物については、廃棄物と公衆の離隔距離を確保し、かつ、長期にわたり 放射性物質の移行抑制を図るための処分方法として、地下 70m 以深の地下空洞内に圧縮ベント ナイト等の人工バリアを備えた処分施設(以下、「地下空洞型処分施設」という。)を設置し、そ こに埋設する方法が検討されてきている。

また、これら廃棄物については、その潜在的な影響が長期にわたり残存する可能性があるため、 廃棄物の埋設が完了し、地表に繋がる坑道を埋戻した後においても、処分施設の長期的な安定性 の見通しを確認するため、規制が終了するまでの期間(300~400 年程度)、モニタリング等の 能動的な管理を実施することが規制機関により求められる見込みである。

以上のように、地下空洞型処分施設の具体化には、少なくとも、状態変化を考慮しても長期に わたり放射性物質の移行抑制が期待できるだけの高い初期性能(施工時性能)を有する人工バリ ア等を地下の狭隘空間内で施工する技術、また、規制終了までの間、施工後の人工バリア等が設 計を逸脱することなく性能を発揮しつつあること等をモニタリングする技術について、現実に即 した環境条件下で確認することが必須となってきている。

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中深度処分は、地下 70m 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。

処分施設は、図 1.1-1 に示すように、低透水層(ベントナイト系材料)、低拡散層(セメント 系材料)、コンクリートピット等からなっており、これら人工バリアと周辺岩盤とを合わせた多 重バリアシステムにより、事業終了後の長期の安全性を確保する概念となっている。このため、 事業終了にあたっては、操業段階に人工バリアの長期挙動評価の妥当性をモニタリングによって 確認し、処分施設の長期的な安定性の見通しを得るためのモニタリング技術やその方法論の確立 が重要となっている。

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、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わたる機能確認方法の確立を目的として実施する。



図 1.1-1 地下空洞型処分施設の概念図

1.2 地下空洞型処分施設機能確認試験の実施概要

本事業は、地下空洞型処分施設の長期的な安定性の見通しを得るためのモニタリング技術やその方法論の確立に向けた試験を実施するものである。

本事業では、国内外の既往研究成果等の調査及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策定し、各種の試験を実施する。更に、青森県六ヶ 所村において日本原燃株式会社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 震時挙動評価及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。

第2章 地下空洞型処分施設機能確認試験の成果

第2章 地下空洞型処分施設機能確認試験の成果

2.1 国内外の既往研究成果等の調査

本節では、中深度処分を対象とした機能確認方法の検討を実施するに当たり、前提条件を明確 にするとともに、国内外の放射性廃棄物処分施設におけるモニタリングに関する規制基準類、既 往検討成果を調査・整理した。また、後述する検討を行う際に参考となる、中深度処分を対象と した安全機能や安全評価における状態設定、パラメータ設定等について既往検討成果を調査した。

2.1.1 前提条件の整理

高レベル放射性廃棄物の地層処分や TRU 等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。本事業において中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。

本項では、本事業の前提条件、対象範囲・期間の明確化及び用語の定義を明確化する。

(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ことを原則とする地層処分等の概念に対 し、地表から 70m 以深の地下に廃棄物埋設地を設置する中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。このように処分概念が異なるため、地層処分 等と中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、検討の 前提条件、対象範囲、対象期間等を明確化する。

まず、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[1]) 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。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、 中深度処分は、定置する深さ、定置する施設断面の大きさが、浅地中処分、高レベル放射性 廃棄物の地層処分などとは異なっている。3つの処分方法の違いを図 2.1-2 に示す。

IAEA:施設の様々な期間におけるモニタリング					
ベースライン モニタリング	ベースライン 施設完成時の 操業時の 閉鎖のための 閉鎖後の モニタリング モニタリング モニタリング モニタリング モニタリング				
操業前期間	操業期間			閉鎖後期間	

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



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、中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、中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。

本事業における前提条件、モニタリングの対象時期及び対象範囲をまとめて表 2.1-1 に示 す。

表 2.1-1 本事業における前提条件、モニタリングの対象期間・対象範囲

項目	内容
前提条件	本事業では、中深度処分施設のモニタリングを対象とする。 建設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	本事業の目的の一つは、「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わた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、本事業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 ニタリングは本事業の対象外とする。
対象 範囲	本事業での検討範囲は、中深度処分施設のモニタリングであり、他の放射性廃棄物 処分場との併設、近接による影響等は想定しない。 本事業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。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事業の対象外とする。

(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、用語の定義を明確化する。

ここでは、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した。本事業で用いる用語の定義を整理し、表 2.1-2、表 2.1-3 に示す。

-	
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、連続的又は定期的な観察及び測定
(初期)ベース ラインモニタリ ング	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。

表 2.1-2 本業務において用いる用語の定義 (1/2)

田新	
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 (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
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
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 放射性核種を収着すること 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 連続した地下水以降経路を形成しないこと
離隔機能 (埋戻し後)	離隔距離を確保すること 容易な侵入を防止すること

表 2.1-3 本業務において用いる用語の定義 (2/2)

中深度処分施設の各部材の名称は表 2.1-4 に示すように、土木学会[5]、原子力学会[6]、 TRU2 次レポート[7]等で様々な呼称が使われていたので、図 2.1-3 に示すように統一した呼称を用いるものとする。

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 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 コンクリー トピット	充填材 充填モルタル	廃棄体 廃棄体パッケー ジ
原子力学会	支保工	空洞内充てん材 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 (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 上部充てん材	廃棄体 模擬廃棄体

表 2.1-4	中深度処分施設の各部材の呼称



図 2.1-3 中深度処分施設の各部材の名称([5]に一部加筆)

2.1.2 国内外の放射性廃棄物処分施設におけるモニタリングに関する既往研究成果の調査

中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。本項では、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。

(1) 規制機関の考え方に関する調査

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 2.1-5、表 2.1-8 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)[1]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、又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、本事業では対象外とする。

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)[1]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していること から、実廃棄体を定置する実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 2.1-4[8])と、スウェーデンのエスポ岩盤研究所のよう に実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 2.1-5[9])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(図 2.1-6[10])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 2.1-7[11])。フランスの場合は直径 70cmの鋼製セルの中に廃棄体を複数、直列に配置する方法で、スウェーデン、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センサーを配置した温度計測、放射 能測定を主とした配置である。

中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。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、日本における中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。

	IAEA モニタリングとサーベイランス	アメリカ NRC 10CFR Part 61	スウェーデン SSM 性能確認プログラムのレ
	(SSG-31)、2014 年[1]	(NUREG-2175)、2015 年[12]	ビュー、2008年[13]
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。 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。 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。 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 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 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 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 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 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。 ・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 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。異常事態又は、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)

表 2.1-5 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)(1/3)

	IAEA モニタリングとサーベイランス	アメリカ NRC 10CFR Part 61	スウェーデン SSM 性能確認プログラムのレ
	(SSG-31)、2014 年[1]	(NUREG-2175)、2015 年[12]	ビュー、2008 年[13]
モニタリングの実施方法	 ・ 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。 	 (NUREG-2175)、2015 年[12] ・ 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。 	ビュー、2008年[13] (記載なし)
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。 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) ・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 		

表 2.1-6 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)(2/3)

	IAEA モニタリングとサーベイランス	アメリカ NRC 10CFR Part 61	スウェーデン SSM	性能確認プログラムのレ
	(SSG-31)、2014 年[1]	(NUREG-2175)、2015 年[12]	ビュー、2008 年[13]	
【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) ・環境パラメータ(たとえば、温度、湿度、再飽和圧力) ・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 エバリアのモ ニタリング	 ・機械的特性、応力、ひずみ ・地下開口部の従来型の観察(岩石応力、 岩盤支持物の変形及び荷重、壁及びライ 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及び水化学的擾 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 ・水力学的擾乱、透水性、水圧、飽和度 ・地球化学的擾乱、間隙水及び鉱物学、pH 酸化還元値、保持特性、生物学的変化 ・熱的擾乱、温度分布、温度分布から得ら れる熱伝導率 	_		

表 2.1-7 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)(3/3)

2 - 10

	スイス 原子力法令	フィンランド STUK	日本 原子力規制委員会
	(Nuclear Energy Ordinance)	(Nuclear Waste Repository)	第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備
	2009 年	2013 年[14]	の基準に関する規則の解釈、2013 年
モニタリングの目的 実施期間	 2009 年 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。 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。 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。 所有者(Nagra)が、モニタリング期間を提案する必要がある Nagra の技術報告書によれば、モ 	2013 年[14] ・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。 ・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。 ・埋め戻しと、定置空間及び他の空間の 閉鎖までを原則とする。 ・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。	 の基準に関する規則の解釈、2013年 ・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、中深度処分には、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。 第二種廃棄物埋設における現行の管理制度 ▶ 能動的な制度的管理 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
	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。		 管理を義務付け。 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。 定期的な見直し(PSR) 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。 管理制度の課題 中深度処分の場合、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。

表 2.1-8 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)(1/4)

	スイス 原子力法令	フィンランド STUK	日本 原子力規制委員会
	(Nuclear Energy Ordinance)	(Nuclear Waste Repository)、	第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備
	2009 年	2013 年[14]	の基準に関する規則の解釈、2013年
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 ・定置する周辺の岩盤の岩盤応力、 動き、変形のデータ ・定置する周辺の岩盤の水文地質学的 なデータ ・地下水化学のデータ ・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。 遮蔽機能(中深度処分) 周辺監視区域の直接 y 線及びスカイシャイン y 線に係る線量当量の測定 閉じ込め機能(中深度処分) 人工バリアから漏出する放射性物質の測定 移行抑制機能(中深度処分) 地下水中の放射性物質濃度の測定 離隔機能(中深度処分) 埋設深度等の状態の監視 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、中深度処分では、地下水位・水質等、必要な測定を要求している。

表 2.1-9 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) (2/4)

	スイス 原子力法令	フィンランド STUK	日本 原子力規制委員会
	(Nuclear Energy Ordinance)	(Nuclear Waste Repository)、	第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備
	2009 年	2013 年[14]	の基準に関する規則の解釈、2013年
閉鎖後の影響	・ 閉鎖後のモニタリングは規定して	処分施設の閉鎖のための前提条件とし	事業廃止後の制度的管理の考え方について、以
	いない。	て、以下の項目が必要であるとされてい	下のように記載されている。
	・ ただし、規制機関である ANSI は	る。	 長期にわたる安定的な管理としては、マー
	モニタリング期間を延長すること	・ 処分施設閉鎖の技術的な実施に関す	カーの設置、記録の保存等の受動的な制度
	ができる。	る説明	的管理とすることが適当である。これは
		 法令で定められた、研究・試験・モニ 	IAEA 基準でも明記されており、諸外国の
		タリング結果を踏まえて更新された	規制でも導入されている。(IAEA SSR-5
		セーフティケース	件 22 及び 5.7)
		 処分施設閉鎖後のモニタリング計画 	・ ただし、事業廃止後の受動的な制度的管理
		と、法令で定められた「計測を禁止す	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
「地屋加八」シュニ			ばない。 (IAEA SSR-5 5.6)
【地層処分】ヘースフ	_		
インモータリンク項		_	_
日			
「地層処力」廃果初八	_	_	_
タリング			
【地層処分】構造物及	・パイロット施設の廃棄物容量は少量		
び人工バリアのモニ	であるが、処分場の量を代表するも	—	—
タリング	のでなければならない。		
	・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			

表 2.1-10 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) (3/4)

2 - 13

	スイス 原子力法令	フィンランド STUK	日本 原子力規制委員会
	(Nuclear Energy Ordinance)	(Nuclear Waste Repository)、	第二種廃棄物埋設施設の位置、構造及び設備
	2009 年	2013 年[14]	の基準に関する規則の解釈、2013年
【地層処分】母岩のモ	・岩盤、及び岩盤水理の状態が、主要	天然バリアが安全機能を高めるため以下	
ニタリング項目	部分 (Main section)と比較されなけ	の項目を満足するものとする。	
	ればならない。	・岩盤の安定性	
	・パイロット部分は、空間的にも水理	・地下水流量が少ないこと	
	学的にも、主要部分と隔離されてい	・好ましい地下水化学	—
	なければならない。	・岩盤内への放射性物質の閉込め	
	・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。		

表 2.1-11 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) (4/4)


図 2.1-4 フィンランドにおける地層処分施設のコンセプト([8]に加筆)



スウェーデンの放射性廃棄物マネジメント

図 2.1-5 スウェーデンにおける地層処分のコンセプト([9]に加筆)



図 2.1-6 スイスにおける地層処分のコンセプト([10]に加筆)



図 2.1-7 フランスにおける地層処分のコンセプト([11]に加筆)

(2) 既往のモニタリングに関する検討成果の調査

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[1]) 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中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、中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) [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) [1]に示 されるように「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、能動的なモニタリングが確実に実施可能な状況は、 地表部での放射性核種のモニタリングが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。

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が示された。モニタリングに対す る欧州各国の代表的な考えを表 2.1-12に示す。特に、処分施設の段階的な状態が健全である ことを確認するに当たり、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[15]に示す表が、中深度処分についても当てはまると 考えられるので表 2.1-13に示す。

2-18

表 2.1-12 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。

	目的	分類
1.	処分場の安全性能と工学的対策の	処分システム構成要素の機能の確認
	妥当性の確認	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	意思決定に向けた情報提供
	資する情報提供	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	地質環境特性のベースライン把握
	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	国民・地域住民の地層処分に対する信頼
	供	性の向上
		将来世代のためのデータベース蓄積

表	2.1-13	地層処分のモニタリングの目的と分類[15]	1
4	4.1 10		

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、図 2.1-2 では、 地層処分と中深度処分では埋設深度と断面寸法が異なることを示したが、処分施設の構成部 材も異なる(図 2.1-8 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)、キャニスタという構成に対して、中深度処分は、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)、低拡散層(セメ ント系材料)、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、セメント系材料が多量に使用される点が特徴のひとつである。



中深度処分施設概念図([5]に一部加筆)



地層処分施設概念図

対象	中深度処分	地層処分
	廃棄体、区画内充てん材、コンクリート	キャニスタ、
人工バリア	ピット、低拡散層、低透水層、空洞内充	緩衝材、
	てん材	埋め戻し材
天然バリア	周辺岩盤	周辺岩盤

図 2.1-8 中深度処分施設と地層処分施設の構成部材の違い

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[16]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。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。中深度処分では、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られる。 表 2.1-14 に地層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。

		Stolettic Ref. e	
安全機能	技術要件	技術要件との関連を推定した	モニタリング
		再冠水過程で重要な FEP	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	全圧、間隙水圧
		耐熱性	温度
		耐放射線性	
		低透水層流出の抑制	飽和度
移流による移行の抑制	低透水性	低透水層の飽和	含水比
		低透水層中の地下水流動	間隙水圧
		移流	飽和度
コロイド移行の防止・抑	コロイドろ過能	低透水層中の地下水流動	間隙水圧
制		コロイドの形成	排水中のコロイド量
		移流	(サンプリング)
			飽和度
収着による放射性物質	収着性		
移行の遅延			
Ca の溶出によるベント	膨潤性、透水性	低透水層の膨潤	全圧、間隙水圧
ナイト系材料への影響	への影響		
廃棄体の保護	物理的緩衝性	低透水層の変形	変位
		低透水層の応力	全圧、間隙水圧

表 2.1-14 中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[16]

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[17]において調査した FEP が示されている(表2.1-15)。これらは3つの文献で扱う FEP を含んでおり、Posiva(2012)[8]において重要性が高いと評価された FEP、第2次取りまとめ[18]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。中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。

表 2.1-15	地層処分の人工バリアに影響するニアフィ	ィールドのパラメータ[17]
----------	---------------------	----------------

分野	FEP	詳細 FEP	パラメータ
		日日 日日 日日 日日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日 日	・母岩と隣接するプラグ/グラウト/支保/埋 め戻し材の温度
	熱の伝達	母岩の温度	・掘削影響領域の変化 ・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 ・地下水流動
岩盤力学	応力の再配分		 ・坑道掘削時の母岩の地圧の変化 ・岩盤クリープ
	既存の亀裂の再活性化 及び変位		 ・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 ・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) ・母岩の透水係数 ・掘削後の岩盤の変形(内空変位)
	地下水の流動		 ・岩盤の断層や割れ目幅の変化 ・地下水流速の変化 ・動水勾配 ・温度差
水理学	水頭の変遷		 ・岩盤の断層や割れ目幅の変化 ・地下水流速の変化 ・動水勾配 ・地下水の密度差 ・温度差
	塩水の変遷		 ・地下水中の溶存する塩水濃度 ・地下水流動 ・温度勾配(塩淡境界) ・地下水の密度差による密度流 ・温度差による熱対流
水理学+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、酸化還元電位等)の変化 ・反応後の母岩特性(力学、水理、化学的特性)
	地下水の酸化		 ・坑道周辺の不飽和領域の状態 ・処分坑道への地下水の流入量(湧水量) ・坑道壁面からの地下水の蒸発(水分量) ・地下水組成(pH、地下水組成、酸化還元電位等)の変化 ・地下水中の硝酸イオン濃度
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 ・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) 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 ・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 ・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)風花 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

(3) 長期計測に耐えうるセンサー技術に関する調査

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 性を有するセンサー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[11][19][20]とともに、長期計測の実例が多いダム計測分野[21][22][23]を調査対象に加 え、耐久性に関して記載のあるセンサー技術などについて、計測項目ごとに整理した(表 2.1-16)。

計測項目	センサー	計測項目	センサー
温度	熱電対	水圧	ピエゾ抵抗素子
	(Thermocouple)		(Piezoresistive)
	測温抵抗体		LVDT
	(Resistance		(Linear Variable
	Temperature		Differential
	Devices)		Transformer)
	サーミスタ		共振ワイヤセンサー
	(Thermistor)		(Vibrating Wire)
	コアセンサー		光ファイバ式
			ひずみゲージ
			(Strain Gauge)
機械的圧力	ひずみゲージ	変形	伸び計
	(Strain Gauge)		(Extensometer)
	圧電センサー		抵抗ゲージ
	(Piezoelectric Sensor)		(Resistive Gauges)
	静電容量センサー		光センサー
	(Capacitive Sensor)		(Optical Sensor)
	共振ワイヤセンサー		インバールワイヤ
	(Vibrating Wire)		(Invar wires)
	光センサー		共振ワイヤセンサー
	(Optical Sensor)		(Vibrating Wire)
含水量と湿度	張力計		
	(Tensiometer)		
	静電容量センサー		
	(Capacitive Sensor)		

表 2.1-16 センサー技術の調査結果(計測項目と計測技術)

長期計測の実現には、上記センサー技術以外にも考慮すべき点がある。なかでも、電力供 給やデータ伝送について、以下に示すような課題が認識されている。

- 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。
- 現状のセンサー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。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。

- 2.1.3 中深度処分における機能確認の目的と位置付け、モニタリングの制約条件の整理
- (1)機能確認の目的の整理

上述した文献調査の結果を踏まえ、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 2.1-17 に示す。また、調査対象の文献の多くは高レベル放射性廃棄物の地層処 分を対象としたもので、中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 確認された。

機能確認の目的に関して、各文献で類似(共通)する事項を整理し以下に示す。

- ・ 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。

機能確認の考え方に関して、各文献で類似(共通)する事項を整理し以下に示す。

- ・ 操業中及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。

以上より、中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。

(2) 機能確認の位置付けの整理

中深度処分の事業期間中には「施設確認」が実施され、建設段階における施設確認に関し ては、

- 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。
- とされている[24]。

この「施設確認」と「機能確認」及び本事業「機能確認試験」の関係と位置付けを整理し て図 2.1-9 に示す。「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 措置段階以降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 2.1-9 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

(3) モニタリングの制約条件の整理

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、中深度処分施 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、以下のようなモニタリング実施に よる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
- 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) 処分場内部又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、 あるいは自然又は誘発された現象(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

センサー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、中深度処分施設 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。

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(原安季)	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 ・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 ・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 ・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 ・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 (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 *性能確認プログラム: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 (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 ・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 ・新規技術の適用、原位置試験、長期試験を通じた不確実性の低減 ・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 ・廃止措置段階までの閉じ込め機能の確保 ・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 ・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 ・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 ・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 *安全レビュー: 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 及び閉鎖後の双方に おいて、重要で主要な 技術的パラメーを対 象として実施される べき ・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	 ・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 ・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 ・プログラムの永久閉鎖まで継続 ・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 ・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 ・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 ・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 ・施設性能のモニタリ ング ・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 ・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 ・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 ・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 ・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 ・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 ・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 ・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 ・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 			

表 2.1-17 機能確認の目的と考え方の整理

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。

2.1.4 中深度処分を対象とした既往検討成果の調査

(1) 安全確保の基本概念と安全機能

原子力安全委員会[25][26]は、中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、中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 [27]では、図 2.1-10 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)、低拡散層、低透水層等を設置する構成となっている。



図 2.1-10 中深度施設の人工バリア構成の例[27]

総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会報告書[28]では、上記の安全確保の基本 概念を踏まえ、中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」及び「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」及び「管理を必要とする期間終了後」の4に 区分し、表 2.1-18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。

₹ 2 .1 10 日		「「「「「「「「」」」		
基本的要件	①廃棄物埋設施	②定置から埋め	③埋め戻し完了	④管理を必要と
(安全機能等)	設受け入れから	戻しまで	後から管理を必	する期間終了後
	定置まで		要とする期間の	
			終了まで	
冷却	・建屋の換気設			
	備			
	・処分空洞の換			
	気設備			
閉じ込め	・処分容器	·処分容器		
		・人工バリア		
遮へい	・処分容器	·処分容器		
	・建屋構造体し	・定置時の仮設		
	ゃへい壁	しゃへい壁		
	・定置時の仮設	・処分空洞の設		
	しゃへい壁	備コンクリー		
	・処分空洞の設	ト ^(注)		
	備コンクリー			
	ト ^(注)			
移行抑制			・廃棄物	・廃棄物
			・処分容器	・処分容器
			・人工バリア	・人工バリア
			• 天然バリア	・天然バリア
隔離				 ・深度(距離)

表 2.1-18 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)

(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)と低拡散層に該当

一方、原子力学会[6]、土木学会[5]では、中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 2.1-11)、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 2.1-12、図 2.1-13)、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 2.1-19~表 2.1-22)である。

ここで、表 2.1-19、表 2.1-20 は、人工バリアの「閉じ込め機能」、「遮へい機能」及び「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 2.1-21、表 2.1-22)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 2.1-20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。

	廃棄物埋設施設						
基本安全機能	受入れる定置	定置~埋戻し施工	埋戻し施工完了後~	管理期間線了後以際~			
		(アクセス坑道・周辺坑道埋戻し)	管理期間終了				
冷却	 冷	」 却 					
閉じ込め	閉じ込め						
遮へい		\ U\					
移行抑制			移行	抑制			
離隔				離隔			

図 2.1-11 基本的要件と各埋設段階との対応関係の再整理[6]





図 2.1-12 基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等(1/2)[6]





図 2.1-13 基本安全機能を満足するために想定される施設・設備等(2/2)[6]

					部材		
基本安全	全機能	技術的要件	低透水層	低拡散層	コンクリ ートピッ ト	充てん材	上部埋戻 し材
埋戻しま		 ・定置作業期間の廃 棄体と地下水との 接触防止 	_	_	0	_	_
	閉じ	・力学的安定性		-	0	-	
埋戻しま		・透水特性	0	-	-	-	-
埋 戻 し ま で		・力学特性	0	-	-	-	_
	遮へい	・放射線の遮へい	Ι	0	0	0	-
		・力学的安定性	I	_	\bigcirc	_	1
		・力学特性	0	0		0	
		・拡散特性	\bigcirc	\bigcirc	-	-	-
		・核種収着特性	0	0	0	0	-
		・透水特性	0	-	-	-	0
埋戻し完 了後	移行	 化学的変質に対す る抵抗性 	0	0	0	0	0
	抑制	・力学特性	0	\bigcirc	_	_	0
		・ひび割れ性状	-	_	0	_	-
		・膨潤特性	0	_	_	_	-
		・有害空隙形成の抑 制	-	-	-	-	0

表 2.1-19 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

表 2.1-20 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

			部材					
基本安全株 埋戻し まで の	全機能	技術的要件	低透水層	低拡散層	コンク リート ピット	充てん材	上部埋 戻し材	処分 空洞
埋戻し まで	操業上 の機能	・力学特性	0	0	0	_	_	-
		・防水・排水性	_	_	_	_		\bigcirc
		・内空確保	_	_	Ι	-	_	0

甘木的西州	立四大大	技術的更优	检 本佰日
本平明女件		12111130円	快旦頃口
閉じ込め	ヨングリートビッ	刀字的安定性	コングリートの圧縮強度
	۲- ۲-		鉄筋の材質・配筋
			部材寸法
		定置作業期間の廃棄	定置前のコンクリートピット内に
		体と地下水との接触	地下水などがたまっていないこと
		防止	
	低透水層	透水特性	透水係数
			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	放射線の遮へい	乾燥密度
	Ъ		部材寸法
		力学的安定性	コンクリートの圧縮強度
			鉄筋の材質・配筋
			部材寸法
	充てん材	放射線の遮へい	乾燥密度
			部材寸法
		力学特性	圧縮強度
	低拡散層	放射線の遮へい	乾燥密度
			部材寸法
		力学特性	圧縮強度

表 2.1-21 閉じ込め、遮へいに係る技術的要件(埋戻しまで)

甘木的西伊		***	施工時点の	性能・状態	長期状態変化		
奉 平	的安件	部的	技術的要件	検査項目	技術的要件	検査項目	
					力学特性	強度・変形係数	
				チャなお	膨潤特性	膨潤圧	
	低	低透水層	透水特性	迎林士注	化学的変質	は田材料の 新新・	
	透				に対する抵	品質	
	水				抗性	叫具	
	11		力学特性	確度 · 変形係数	化学的変質	使用材料の種類・	
		上部埋戻し材	有害空隙形成の	充てんの状態	に対する抵	品質	
			抑制		抗性	配合	
	低拡散性	低拡散層	拡散特性	実効拡散係数 部材寸法	力学特性	圧縮強度	
			ひび割れ性状		化学的変質	使用材料の種類・	
				ひび割れの状態	に対する抵	品質	
移行					抗性	配合	
抑		低透水層	拡散特性	実効拡散係数 部材寸法	力学特性	強度·変形係数	
巾リ					膨潤特性	膨潤圧	
					化学的変質	は田村約の種類。	
					に対する抵	使用初种97厘溴·	
					抗性	叫貝	
		コンクリートピ		使用材料の種			
		-> / / / / L		類·品質	化学的変質	使用材料の種類・	
	核	充てん材	核種収着特性	配合	に対する抵	品質	
	俚 収	低拡散層		部材寸法、又は	抗性	配合	
	着			尤てん重	儿兴好本乐	日本学校の任何	
	恎	低活业屋	技话师羊桩桩	使用材料の種	化字的发貨	12日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日11日1	
		低透水層	核俚似有符性	類·品質	に刈りる抵	10頁 町 ム	
					がに生	HC'D'	

表 2.1-22 移行抑制に係る技術的要件(埋戻し後)

(2) 中深度処分における考慮事項

中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。

ここでは、既往の FEP リスト及び文献をもとに、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した。

土木学会[29]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及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 2.1-23 に、ベントナイト系材料について表 2.1-24 に示す。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 2.1-14 として整理した。

ここで、表 2.1-23、表 2.1-24 又は図 2.1-14 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 2.1-22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 2.1-15 のように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低透水層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[30]もあり、透水係数については、変化(増加又は低下)するとしている。

	影響要因	人工バリアへの影響機構	状態変化	安	安全機能への影響	
物理的	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	
影響	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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		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、低拡散層にひび割れが		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		割れが発生	_			
	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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		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、低拡散層にひび割れ		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		が発生	-			
	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	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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	収着性能
影響		させる可能性がある。				の低下
	周辺地下水の高硫酸イ	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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	収着性能
	オン濃度	ンガイトなどが生成されひび割れが発生				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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	収着性能
		どが生成されひび割れが発生				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		拡散係数の増加	施設内通過流量の増加	
		にひび割れが発生				
	ひび割れ部、空隙におけ	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	ひび割れ、	拡散係数の低下	施設内通過流量の低下	収着性能
	る二次鉱物の生成	れ、空隙を閉塞	空隙閉塞			の低下

表 2.1-23 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	廃棄体容器(金	廃棄体容器の腐食膨張、陥没により、低透水層が圧縮、膨	密度変化	透水係数の		
	属)腐食	張し、密度が変化する。		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	密度增大	透水係数の		
		縮され、密度が増加		低下		
	ベントナイトの	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	密度低下	透水係数の		
	沈下	т		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	透水係数の		
			化	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	密度変化	透水係数の		
		度が変化		変化		
	近接部材の隙間	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	密度低下	透水係数の		
	などへのベント	入による密度の低下		増加		
ナイトの浸入						
パイピングと侵		ベントナイトにかかる水圧勾配が高い時期、または、ガス	密度低下	透水係数の		
	食	発生により、緩衝材の一部が破過し、パイプ状の流路が形		増加		
		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。				
化学的影響	交換性陽イオン	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	膨潤圧の低	透水係数の		
	の変化	Ca 型化	下	増加		
	(Ca型化)					
	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		

表 2.1-24 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



図 2.1-14 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



図 2.1-15 セメント・ベントナイト相互作用の相関図

(3) 処分システムの状態に対する技術的検討

ここでは、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。

1) 土木学会における中深度処分の安全評価パラメータの検討

土木学会[29]では、中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 2.1-16 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及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 透水試験若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 2.1-25 に坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験を、表 2.1-26 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 2.1-16 地下水シナリオで用いる主な核種移行評価パラメータ

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	伝道国辺県般の添水州公本の畑堤
短区間透水試験	机但问应石盛00週小性刀和070厘
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 2.1-25 坑道周辺岩盤の透水性に関する調査・試験

地質の構成および構造	岩種、岩相 地層の分布・傾斜 地質境界の位置・傾斜
岩質	固結度 風化の状況・深度 変質の有無・状況・位置 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 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

表 2.1-26 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

2) 原子力学会における中深度処分の安全評価パラメータの検討

原子力学会[31]で検討された中深度処分施設の地下水シナリオの安全評価では、図 2.1-17 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。

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、反射 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 遅延及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 2.1-27 に感度解析のための主要なパラメータの基準値を、表 2.1-28 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 エ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。



図 2.1-17 概念的な評価モデル

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
	1/a	3.3E-05	溶出率を適用し難い廃棄物の
位山平 (今 広			存在を考慮し, 附属書 3 (参考)
(主産来初に一年に設定)			より1桁大きな値に設定
思般由我行距離	m	200	附属書3(参考)における遅い
石盈甲移打距離			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
			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	m³/kg	附属書 3	事例評価のための設定値
コンクリートピット Kd	m³/kg	表6 による	なお、廃棄体、ピット、モルタ
モルタル Kd	m³/kg		ルの分配係数はセメント系材
ベントナイト Kd	m³/kg		料として一律に設定
岩盤 Kd	m³/kg		
地表水希釈水量	m ³ /a	1E+08	附属書2(参考)による

表 2.1-27 感度解析のための主要なパラメータの基準値

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。

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	m³/kg	-0.66	-0.40	-0.68	-0.60	-0.77	-0.93
ベントナイト Kd	m³/kg	-0.02	-0.01	-0.08	0.00	0.01	0.00
岩盤 Kd	m³/kg	-0.35	-0.06	-0.56	-0.06	-0.01	-0.19
地表水希釈水量	m³/a	-0.56	-0.95	-0.53	-0.93	-0.94	-0.85

表 2.1-28 最大線量に対する各パラメータの偏順位相関係数一覧

: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) JNES による中深度処分の安全評価パラメータの検討

原子力安全基盤機構(JNES)[32]では、中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、中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。

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 2.1-29 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 2.1-30 に、セメント系材料の透 水係数及び拡散係数の設定を表 2.1-31 に示す。また、廃棄体からの溶出率及び施設浸透水量 の設定を表 2.1-32 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 を表 2.1-33 に示す。

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 ・劣化前 ・劣化後
		分配係数	以下に対して設定 ・コンクリート系部材 ・ベントナイト系部材
		廃棄体溶出率	以下に対して設定 ・放射化金属 ・CB ・BP ・樹脂等
	天然バリア	分配係数	母岩
		風化帯の分配係数	
<u></u>	風化帯	風化速度	
ソ <i>ム</i> 		降雨涵養量	

表 2.1-29 不確実性評価を対象としたパラメータの一覧

パラメータ	初期値	劣化過程	終局値
乾燥密度: ρ_d [Mg/m ³] (100%ベントナイ トなので=有効粘 土密度)	最小值:1.5 最大值:1.7 一様分布 粒子密度ρ:2.7	セメント溶脱深 さ <i>d(t)</i> の関数 ^(※)	1.0~1.1 溶脱深さ 1.3m とし て左式より算定
間隙率: ε[-]	$ \rho_d の関数 $ $ \varepsilon = 1 - \rho_d / \rho $	$ \rho_d $ の関数 $ \varepsilon = 1 - \rho_d / \rho $	ρ _d の関数 左式より算定する と、0.64
透水係数: k [m/s]	$ \rho_d$ の関数 $k = 5.4 \cdot 10^{-11.85 \rho_d + 5.78}$ ただし、 $\rho_d = 1 \text{Mg/m}^3$ 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/m ³ 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 陰イオン: De^A = 10^{-17.1\rho_d + 16.6} 中性: De^N = 10^{-16.2\rho_d + 16.0} 陽イオン: De^C = 10^{-16.1\rho_d + 16.0} ただし、D^* \times \varepsilonを最大とする。 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-9m ² /s と間隙 率 ε の終局値より、 1.3E-9 m ² /s として 設定
備考	分布を与えるのは ρ_d のみ。残りのパラメータは ρ_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)

表 2.1-30 ベントナイト系材料の透水係数及び拡散係数の設定

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

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

表 2.1-31 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	初期值	劣化後 (影響物質なし)	劣化後 (影響物質あり)
乾燥密度: ρ_d	εの関数	εの関数	εの関数
[Mg/m ³]	$\rho_d = \rho(1-\varepsilon)$		
(100%ベントナ	粒子密度 ρ :2.5		
イトであることか			
ら=有効粘土密			
度)			
間隙率:ε	最小值:0.1	0.46	0.46
[-]	最大值:0.3	10cm/1000 年をベースと	300 年後に溶脱が終了す
	一様分布	したルートt則(変更無	ると仮定し、時間線形か
		し)で施設外側から順次	つ一様に低下させる
		溶脱劣化	
透水係数 : <i>k</i>	最小值:5.4E-14	1E-5	1E-5
[m/s]	最大值:2.4E-08		
	対数一様分布	1000年で劣化して砂亚	300 年で劣化して砂亚み
		みになることを想定し、	になることを想定し、初
		初期値との線形補前	期値との緑形補前
美刘払散馀数:De	菆小恒:2.0E-14	菆小値:2.1E-10	菆小値:2.1E-10
[m²/s]	取八胆:0.8L-11	取八個:2.0E-9	取八個:2.0E-9
	刈穀一惊万巾 	東頻恒: 9.2E-10 二色八女	東頰他:9.2E-10 二舟八女
		二円万1 10 mm / 1000 年 な ベーフト	二円刀川 900 年後に涼脱が效了 す
		100m/1000 平をいこへと	るいの中後に俗別が於しり
		したルートし則(変更無	○こ仮足し、時間縁////・ ○一様に低下させる
		応防化	
備考	間隙率と実効拡散係	透水係数はひび割れ進展	影響物質によって 300 年
	数に相関無し。	に伴い全体が一様に増加	掛けて一様に劣化するこ
		することを想定し、実効	とを想定。劣化速度は一
		拡散係数は溶脱による外	次線形。
		側 (ベントナイト側) 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。	

表 2.1-32 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 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
	酸化	設定値(岩)			設定値(ノ	設定値(ベントナイト系材料)			設定値(セメント系材料)		
元素	還元	幾何平均	分布幅(m^3/kg)	幾何平均	分布幅((m^3/kg)	幾何平均	分布幅((m^3/kg)	
	状態	(m3/kg)	下限値	上限値	(m3/kg)	下限値	上限値	(m3/kg)	下限値	上限値	
С		1.0E-04	1.0E-06	1.0E-02	0.0E+00	-	-	3.2E-04	1.0E-06	1.0E-01	
CI		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	
Мо		1.0E-04	1.0E-06	1.0E-02	0.0E+00	-	-	3.2E-03	3.2E-04	3.2E-02	
То	-	1.0E+00	3.2E-02	3.2E+01	1.0E+01	3.2E-01	3.2E+02	1 05-03	1.05-06	1.05+00	
10	+	0.0E+00	-	-	0.0E+00	-	-	1.02 03	1.02 00	1.02.00	
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	
		3.2E+00	1.0E-01	1.0E+02	1.0E+01	3.2E-01	3.2E+02	1 0E±00	3 25-02	3 2E+01	
Ŭ	+	3.2E-03	1.0E-04	1.0E-01	1.0E-01	3.2E-03	3.2E+00	1.02.00	J.ZL UZ	3.2L 101	
Nin	-	1.0E+00	3.2E-02	3.2E+01	3.2E+00	3.2E-02	3.2E+02	1.05±00	2 25-02	2 25+01	
мр	+	1.0E-02	3.2E-04	3.2E-01	1.0E-02	1.0E-03	1.0E-01	1.0L+00	J.ZL-02	3.2L+01	
Du	-	3.2E+00	1.0E-01	1.0E+02	3 2E±00	3 25-02	2 2E±02	1.05±00	3 25-02	2 2E±01	
Pu	+	1.0E-01	3.2E-03	3.2E+00	J.ZE+00	9.ZE-0Z	5.ZE+0Z	1.02+00	J.ZE-0Z	5.20701	
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	

表 2.1-33 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

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 2.1-34 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	2.1-34	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 ・CBの溶出率 	・岩盤の Kd [C-14]	 ・放射化金属の 溶出率 ・CBの溶出率 	・岩盤の Kd [C-14] ・岩盤の Kd [I-129]

- (4) 処分システムの状態設定
 - 1) 中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[25][33]では、中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 2.1-35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。)

	埋め戻し前段階		埋め戻し	し後段階	
期間	建設・操業期間	過渡的な期間	多重パリア 発揮さ 多重パリア機能に	埋設施設が地表付近 - に近接することが想 定される期間	
	教十年 (操業期間)	~埋め戻し後数百年※	<u>期待する期間</u> ~約十万年※	期待する期間 約十万年 [~] 数十万年※	数十万年以隆※
	埋設施設の埋め戻し	埋設施設及びその周辺	長期的に安定な地質環	埋設施設の状態設定に	<u> 隆起・侵食、海水準</u>
	が完了するまでの期	の地質環境の状態変化	境のもと、埋設施設の	おいて、排除・低減が難	変動に伴い埋設施設
定	間	が安定的な状態に向か	状態変化が緩慢に変遷	しい内的・外的要因によ	が地表付近に近接す
義		う過渡的な期間	していく期間	る影響が顕在化する期	ることが想定される
				間	期間
	・現状の技術で合理	・不均一な過渡変化を	・科学技術的知見に基	・想定される劣化や、こ	・地質付近の地質環
	的に達成できる範	勘案しつつ、人エパリ	づく外挿を基本とし	れを評価する際の不確	境の状態設定に応
	囲で人エバリアの	アの損傷・劣化の影響	た手法の利用	かさを考慮してもなお	じた状態を設定す
	損傷・劣化を抑制す	が抑制・緩和されるよ	・これらのよりどころ	期待できる機能につい	ること
状	るよう設計されて	うに配慮すること	とする科学技術的知	ては考慮	・埋設施設のみなら
態	いること	・埋め戻し後短期間で	見の多くが評価期間	・バリア材に固有の物	ず、地表付近の地質
設定	・埋設施設の状態監視	飽和状態にいたる等	に比して非常に短期	性として期待できる特	環境の状態を精度
の	を行い、将来の状態	の、安全評価上の保守	間であることによっ	性や、天然バリアが本	よく設定すること
え	設定に必要な情報	性を優先したモデル	て生じると考えられ	来的に有する機能に基	は難しいことから、
方	の信頼性の向上を	等を使用する際は、そ	る不確かさを考慮し	つくとともに不確かさ	それらの不確かさ
	図るとともに、設	のモナルか確かに安	た状態設定を行うこ	に対する保守性を考慮	を勘楽しつつ、安全
	計・他工の品頁官埋 た 流切に 行る ニレ	王評価上の休ず性を 港界していることも	C	した状態を設定するこ	計価工の保守性を 満切に考慮した特
	そ週初に11フェと	満足していることを 確認すること		C	過めに考慮した1人 能設定
					ies as ac

表 2.1-35 状態設定の時系列的な考え方

※;おおよその時間尺度

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、中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。

a. 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と されている[34]。また、表 2.1-36 に示す解析例[35]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[36][37]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[38]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。

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	$\begin{array}{rrr} 40 & \rightarrow & 0@ \\ 3.2 & \mathrm{ka} \end{array}$	1)
Claystone	13.2	No	Yes	CSH minerals, sepiolite, Ca-zeolite, illite	0.6 @ 10 ka	$\begin{array}{rrrr} 15 & \rightarrow & 0@\\ 2.5 & \mathrm{ka} \end{array}$	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	$\begin{array}{rrr} 11 & \rightarrow & 0@ \\ 0.1 & \mathrm{ka} \end{array}$	4
Bure clay	13.2		Yes	Illite, analcime, Ca-zeolites	0.15 m @ 25 ka	$15 \rightarrow 2@25$ ka	5
Bentonite+ sand	11	Yes	Yes	Calcite, CSH minerals, Ca-zeolites	0.01 @ 10 ka	$\begin{array}{c} 40 \rightarrow 0 @ \ 10 \\ \text{ka} \end{array}$	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	$\begin{array}{c} 15 \rightarrow 0 @\\ 0.1 \ \mathrm{ka} \end{array}$	9
Generic clay	12.5	No	Yes	CSH minerals, calcite, gibbsite	0.001 @ 0.07 ka	$\begin{array}{rrr} 10 & \rightarrow & 0@ \\ 0.07 \\ \mathrm{ka} \end{array}$	10

表 2.1-36	地層処分におけ	るセメント・ベン		、の相互作用評価例(at 25 °C))
----------	---------	----------	--	---------------------	---

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.

b. 中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

中深度処分では、ベントナイト系材料(低透水層)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[31]では、図 2.1-18 に示す中深度処分 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 2.1-18 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 2.1-19 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 2.1-19 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

一方、技術的に可能性のある、又は、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 2.1-20 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 2.1-20 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

c. 再冠水挙動に関する検討例

原子力安全基盤機構(JNES)[39]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4.0×10·15m²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2.1·21に飽和度の変化を、表2.1·37に再冠水時間を示 す。



表 2.1-37 解析結果のまとめ

No.	低透水層絶対透	ガス	ガス発生の	低透水層透	廃棄体層定
	気性	発生	水分条件	過期間	吊到 達期間
1		無	—	90 年	1,000 年
2	$4.00E-15(m^2)$	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) 中深度処分における状態変遷

原子力学会[31]では、中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 2.1-22)に示している。なお、土木学会でも処分システムの 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。

いずれにしても、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 2.1-22 中深度処分における埋設施設の状態変化の例

2-57

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[25][40]では、管理期間終了以後に係る安全評価シナリオを、図 2.1-23 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 2.1-38 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、地下水シナリオ及びガス移行シナリオの評価は、「1)中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」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 2.1-39 及び表 2.1-40 に評価すべき事項を整理している。



図 2.1-23 管理期間終了以後に係る安全評価シナリオの分類

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
	· 「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 2.1-38 基本シナリオと変動シナリオの定義

表 2.1-39 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	(多重バリアが計画したどおりの状	基本地下水シナリオ	基本地下水シナリオ	基本地下水シナリオ
シナリオ	態に確実に至ることを示すための評	人工と天然バリアによる防護機能に	主に天然バリア防護機能によって、	周辺土壌との混合状態での風化・侵
	価)	よって、線量が可能な限り低く抑え	線量が可能な限り低く抑えられるよ	食の影響評価
		られるように配慮されていることを	うに配慮されていることを確認	
		確認		
基本ガス移	<u>基本ガス移行シナリオ</u>	基本放射性ガス移行シナリオ	<u>基本ガス移行シナリオ</u>	(ラドンに関する影響を別途評価)
行シナリオ	(廃棄体に閉じ込め性がない場合)	放射性ガス発生、移行の影響評価	人工バリアの物理的損傷や化学的環	
	放射性ガス発生、放射線分解ガス発		境の変化に伴うガスの発生量の変化	
	生と移行の影響評価(廃棄体が閉じ	<u>基本水素ガス移行シナリオ</u>	を考慮した影響評価	
	込め性を有する場合)なし	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		

	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	
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 (以下の機能等の変動の組み合わせを 想定) ・廃棄体の溶出率 ・人工バリアの防護機能 ・天然バリアの防護機能 ・生活圏の希釈水量等 人工バリアの機能一部喪失シナリオ*2 (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) 天然バリアの機能一部喪失シナリオ*2 (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 (以下の機能等の変動の組み合わせを 想定) ・残存する放射能インベントリ ・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) ・人工バリアの防護機能の喪失時期 ・天然バリアの防護機能 ・生活圏の希釈水量等 人工バリアの固有の特性を無視したシ ナリオ*2 (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) 天然バリアの一部機能喪失シナリオ*2 (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 (以下の機能等の変動の組合せを想定) ・残存する放射能インベントリ ・埋設施設の侵食速度 ・沢・河川の形成位置 ・風化帯到達時期 ・降雨涵養量 ・風化帯の遅延機能 ・生活圏の希釈流量等 (代替変動地下水シナリオ ・風化帯代替モデル*3 (変動地下水シナリオ(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 ・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 ・放射性ガス移行に関する変動の評価 変動水素ガス移行シナリオ ・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 ・水素ガス発生速度と量の変動の評価 ・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) ・風化帯におけるラジウム 226 濃度の変動の評価 ・ラドンによる被ばく評価に係る変動の評価

表 2.1-40 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

*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。

2-60

- 5) 基本地下水シナリオ及び変動地下水シナリオに関する設定と考え方
- a. 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[31]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 2.1-41 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 1 万年(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。

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-1 2
施設浸入水量 (m ³ /a/100m)	0.018-	▶ 0.06 -			▶ 0.18 - •			- 0.18
低拡散層 拡散係数 (m ² /s)	1E-12-	▶3E-12-			►2E-11-			··2E-11

表 2.1-41 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

一方、可能性のある変動状態では、表 2.1-42 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/100m 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-11m²/s になるとしている。

経過時間 [a] パラメータ	初期	1E+4	2.5E+4	4E+4	1E+5	2.5 E +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-						2 E -11

表 2.1-42 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

b. 原子力安全基盤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[32][39]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 エバリア特性の変遷の考え方を表 2.1-43 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 2.1-44 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 × 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 2.1-24 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 2.1-24 地下水シナリオにおける核種移行評価モデル

		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 変動地下水シナリナ	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。 閉鎖後 1000 年でひび割れが 生じるものとした。	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。 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。	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。 透水係数 健全部:1E-11m/s 劣化部:1E-5m/s 実効拡散係数 健全部:1E-12m ² /s 劣化部:7E-10m ² /s
低拡散層(モルタル層)	ス基本シナリオ	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。 透水係数
	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 (<i>t</i> 則) するものとした。	健全部:1E-11m/s 劣化部:1E-5m/s 実効拡散係数 健全部:1E-12m ² /s 劣化部:7E-10m ² /s
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
	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/cm ³ 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/cm ³ 程度相当の実効拡 散係数に増大するものとし た。	は 1.4g/cm ³ から、化学 的変質等も含めてこ れを終局状態とした。 透水係数 健全部:1E-12m/s 劣化部:1E-11m/s 実効拡散係数 健全部:1.4E-10m ² /s 劣化部:2.1E-10m ² /s

表 2.1-43 人工バリア特性の変遷



表 2.1-44 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 及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 2.1-25)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。

一方、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 2.1-25 人工バリアの主要パラメータに対する感度解析

c. 地下水シナリオのまとめ

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(及び収着部材の量)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。

6) 基本ガス移行シナリオ及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。

a. 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 とする中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[41]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 は表面又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¹⁴CH₄ (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、¹⁴CO₂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 2.1-26 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 2.1-26 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[42]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、膨潤圧及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。

b. TRU2 次レポートでのガスの検討

TRU2 次レポート[7]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 2.1-45 に示す。

影響を受ける	単位	レファレンス ケース	廃棄体グループ			
パラメータ			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	У	-	1000	100	30	10
排水期間	У	-	総排	林量/最大	排水速度と	する

表 2.1-45 ガス影響に関する解析設定

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 CH₄を対象としたガス発生量の評価と CH₄ 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 2.1-27)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 CH₄の移行による線量は、約 1×10⁻⁹Sv/y であり、地下水移行による 線量(約 2×10⁻⁶Sv/y)に比較して、十分に小さなことが判った。



図 2.1-27 ガス影響の解析結果

c. 原子力安全基盤機構におけるガス移行シナリオの検討

中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(JNES)[39]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 2.1-28 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 2.1-28 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 2.1-29 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 2.1-29 ガス異常シナリオの解析結果

d. 中深度処分施設のガス圧等の時間変遷の評価事例

中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[43]では、ガス影響評価解析において、図 2.1-30 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(~ 10³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 2.1-30 処分施設の状態変遷

施設からのガス発生量 5Nm³/y/Lot 及び 20Nm³/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。

e. 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[25][40]によるシナリオの考え方を整理すると、表 2.1-46 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。

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

表 2.1-46 ガス移行シナリオの考え方

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、低透水層及び低拡散層等の 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[5][29]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[7]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[41]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 CO₂及び CH₄ が示されている。CO₂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 CaCO₃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ている。

CH4 については、TRU ガス検討[44]では、気体状放射性物質として C-14 を含有する CH4 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¹⁴CH4 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(H2)とメタンガス(CH4)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られる。 **2.1**の参考文献

- [1] IAEA : Monitoring and surveillance of radioactive waste disposal facilities, Specific Safety Guide No.SSG-31, 2014
- [2] 日本原燃株式会社ウェブサイト: https://www.jnfl.co.jp/ja/business/about/llw/summary/
- [3] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度 管理型処分技術調査等
 事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 27 年 3 月
- [4] 一般社団法人 日本原子力文化財団:原子力・エネルギー図面集、第 8 章放射性廃棄物、 https://www.jaero.or.jp/data/03syuppan/energy_zumen/energy_zumen.html
- [5] 社団法人 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、 2009年7月
- [6] 一般社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会標準 余裕深度処分施設の施設検査方法:
 2010、AESJ-SC-F019:2010、2011年5月
- [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取りまとめ―、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005年9月
- [8] Posiva : Monitoring at Olkiluoto a Programme for the Period Before Repository Operation. Posiva Report 2012-01, August 2012
- [9] IAEA : Country Nuclear Power Profiles, Sweden (updated 2014), https://cnpp.iaea.org /countryprofiles/Sweden/Sweden.htm
- [10] 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
- [11] MoDeRn : Case Studies Final Report, 2013
- [12] U.S. NRC : Guidance for Conducting Technical Analyses for 10 CFR Part 61 (NUREG -2175), 2015
- [13] SSM : Technical Note 62 Review of performance confirmation programs and potential roles in SSM's Current review of SKB's License Application, 2014
- [14] STUK : Disposal of nuclear waste, 2013
- [15] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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―、原環センター技術報告書 RWMC-TRJ-04003、平成 16 年9月
- [16] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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、平 成 26 年 3 月
- [17] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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、平 成 27 年 3 月

- [18] 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次取りまとめー 分冊3 地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023、平成11年11月
- [19] MoDeRn : State of Art Report on Monitoring Technology, 2013
- [20] 財団法人 電力中央研究所: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-、N11033、平成24年4月
- [21] International Commission on Large Dams : Automated dam monitoring systems -Guidelines and case histories, 2000
- [22] ASCE : Guidelines for Instrumentation and Measurements for Monitoring Dam Performance, 2000
- [23] 村上浩次、手塚康成、平田洋一、大貫賢二、前島俊雄: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(貯槽工事 その 4)-、 土木学会第 68 回年次学術講演会、VI-203、平成 25 年 9 月
- [24] 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年
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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
- [29] 社団法人 土木学会: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、2008 年 6 月
- [30] POSIVA : Bentonite-Cement Interaction –Preliminary Results from Model Calculations, Working Report 2009-37, Dec. 2009
- [31] 社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会標準 余裕深度処分の安全評価手法:2008、 AESJ-SC-F012:2008、2009年5月
- [32] 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)報告書、09 廃輸報-0004、平成 21 年 11 月
- [33] 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
- [34] 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.

- [35] 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.
- [36] NAGRA : Geochemical Evolution of the L/ILW Near-field, Technical Report 14-11, 2014.10.
- [37] Watson, C., Benbow, S. & Savage, D. : Modelling the interaction of low pH cements andbentonite. Issues affecting the geochemical evolution of repositories for radioactive waste. SKI Report 2007:30, 2007.
- [38] OECD/NEA : Cementitious Materials in Safety Cases for Geological Repositories for Radioactive Waste: Role, Evolution and Interactions, 2012.
- [39] 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)報告書、平成19年9月
- [40] 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
- [41] Rodwell, W.R. and Nords, S.: "A Thematic Network on Gas Issues in Safety Assessment of Deep Repositories for Nuclear Waste (GASNET)", 2003
- [42] FORGE : Synthesis Report: Updated Treatment of Gas Generation and Migration in the Safety Case, Report D1.5R, 2013.9.
- [43] 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
- [44] OECD/NEA : Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, 2012.

2.2 機能確認試験計画の策定

2.2.1 具体的な機能確認試験計画の策定方法

人工バリアを主対象とし、2.1 の国内外の既往研究成果等の調査、2.3 で後述するモニタリン グ項目の検討成果も踏まえた具体的な機能確認試験の検討の実施手順を下記に示す。

- モニタリングの前提条件の整理:中深度処分の埋設段階以降においてモニタリングを実施 する場合の前提条件を整理する。
- ② モニタリング対象施設の設定:中深度処分の埋設段階以降において対象となるモニタリング施設を整理する。
- ③ 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の検討:モニタリングの前提条件 と施工手順を踏まえた実施可能なモニタリングを検討する。
- ④ 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:モニタリングの位置付けを把握 するために、初期性能と長期性能の関係、埋設・保全段階における機能確認の役割を確認 した上で、技術開発課題を整理する。
- ⑤ 機能確認試験計画の立案:中深度処分におけるモニタリングの技術開発課題を踏まえ、機 能確認試験計画を立案する。

2.2.2 モニタリングの前提条件の整理

地層処分におけるモニタリングは、処分場計画のさまざまな段階を問題なく完了するために欠 かせない情報をもたらし、そうすることによって放射性廃棄物処分の主要目的である閉鎖後長期 の安全性に対する信頼性の向上に資すると考えられている。

しかしながら、IAEA の安全要件[1]では、モニタリングプログラムは、閉鎖後の施設の総合的 な安全レベルを低下させることのないように設計され、実施されなければならないとされており、 また、IAEA の安全指針[2]では、モニタリングの実施は多重バリアシステム等の構成要素の挙動 に関するデータを取得できるメリットと、下記に示すような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、両者の間でのバランスを考慮しな ければならないとされている。

- 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) 処分場内部又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 いは自然又は誘発された現象(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

この中で、特に、3)モニタリング機器の設置による潜在的水みちの形成に対しては、IAEAの 安全指針[2]で、「モニタリングプログラムの設計では、その後の計装解体の必要性について考慮 すべきである。有害な影響(例えば、システムの構成要素との間で化学的な相互作用を起こす可 能性のある物質をシステムに持ち込むことでもたらされる)を引き起こす可能性のある装置やケ ーブルを除去することの実施可能性や、優先的な放出経路の形成を回避するためにモニタリング 用アクセス孔を適切に密封することの実施可能性に対しては、特に注意を払うべきである。残さ れた物理リンク(配線など)においてそのような制約が配慮されること、又はそのようなリンク の除去が可能であり、モニタリング終了後は影響を受けていないバリアが残ることについて、立 証すべきである。」としている。

IAEAの安全指針にあるような、モニタリング終了後のバリアの健全性を工学的に立証することは困難と考えられるため、実処分施設又はその周辺にセンサーを埋め込む必要があるモニタリングは避けるべきと考えられる。そのため、中深度処分を対象とした本事業では、「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。」ことを前提条件とし、実処分施設内のモニタリングでは、以下を基本とする。

- ① 潜在的な水みちの形成となるケーブルは敷設しない
- ② 人工バリアのサンプリング・削孔など、破壊的な行為を行わない

2.2.3 モニタリング対象施設の設定

対象施設の設定

前項で示したモニタリングに関する制約を守る方法が特定できない場合には、代替戦略を 用いる必要がある。IAEAの安全指針[2]では、地層処分施設を想定して、処分施設の範囲内 又は同じ母岩内の近い位置に広範な計装を備えた実証施設又はパイロット施設を建設すると いう選択肢も評価されるものと考えられるとしている。

その例としては、全米科学アカデミー(NAS)の報告書[3]や NAGRA[4]では、地層処分施設 の本格的な操業に先駆けて、又は、それと並行して、実廃棄物を埋設した実証施設又はパイ ロット施設でモニタリングすることが想定されている。なお、Andra[5][6]では、操業初期段 階に、高密度計装された少数の実処分坑道のモニタリング結果を踏まえて、それ以降の処分 坑道の計装の簡素化を図ることを計画している。

この他に、実際の埋設施設と同等の環境条件を模擬した地下又は地上の試験施設において、 操業期間を有効に活用し、人工バリア部材等の挙動を長期間モニタリングすることも考えら れる。

中深度処分は、対象とする廃棄物や処分深度は異なるが、複数のバリアにより処分システ ムに頑健性を持たせ、長期的な放射性核種の移行抑制機能を確保するという考え方は、高レ ベル廃棄物の地層処分場と同様である。したがって、中深度処分を対象とした場合において も、高レベル廃棄物の地層処分施設で考えられているモニタリング対象施設を参考に、以下 の3施設を検討対象とする。また、地下模擬処分施設は、先の実証施設又はパイロット施設 に相当するが、実廃棄物の使用は想定しない。なお、地下の試験施設の性格は、地下模擬処 分施設と類似するため、検討対象から除外した。

- · 実処分施設
- · 地下模擬処分施設
- · 地上施設

また、実処分施設と地下模擬処分施設を対象とした場合に、各施設から離れたところで実 施できるモニタリング施設として、以下の2施設を考えた。

- ・ 近傍ボーリング孔など採水施設
- ・ 地表/空中からの物理探査

以上で述べた施設のイメージを図 2.2-1 に示す。



図 2.2-1 対象施設のイメージ

(2) 対象施設毎の想定されるモニタリング対象期間

地層処分だけでなく、浅地中処分[7]においても、安全性を保証するために、閉鎖後のモニ タリングを要求したり、それに依存したりすべきではないとする原則がある。しかし、地層 処分であっても、社会が有益であると見なす限り、政府又は規制当局の要請により、公的保 証を提供するため、上述したモニタリングに関する制約を遵守した上で、閉鎖後モニタリン グが実施されるかもしれないとしている。

中深度処分施設では、廃棄体の定置が完了し、周辺坑道やアクセス坑道の埋戻しが完了す ると、所謂、制度的管理期間に相当する保全段階に入る。これまでの中深度処分に関する安 全規制の考え方[8][9]では、保全段階においても、人工バリアの性能等を把握するためのモニ タリングを行うことが要求されている。しかし、保全段階では、処分場のアクセス坑道が埋 め戻され、施設が密閉されているため、人工バリア等のモニタリングは、最終的には、地上 からの間接的な非破壊探査(地球物理学的方法や遠隔探査方法)か、又は、原位置センサー からの無線送信(ただし、現状技術レベルでは、埋戻し後、数年から十年程度が限度)に依 存しない限り、原位置でのモニタリングは実行不可能となる。ただし、2.3.3 で後述するよう に、本事業では、中深度処分施設のモニタリングに適用できる可能性がある計測技術として、 光ファイバセンサー技術に着目している。光ファイバセンサーは、分布計測が可能であるた め、従来の有線式センサーに比べてケーブル量を低減させることが可能であり、センサー部 に電気・電子部品を含まないことから電源が不要で、耐久性が高いという特徴を有する。こ のため、光ファイバセンサーの活用が許容される場合には、保全段階においても人工バリア 等のモニタリングを継続できる可能性がある。

以上より、本事業では、対象施設毎のモニタリング実施可能期間を以下のように設定した。

- ・ 実処分施設:埋戻し完了まで。ただし、光ファイバセンサーの使用が許容される場合 には保全段階中の可能。
- ・ 地下模擬処分施設:埋戻し完了まで。ただし、光ファイバセンサーの使用が許容される場合には保全段階中の可能。また、実処分施設に影響を与えず、アクセス坑道の開放が可能な場合は保全段階中も可能。
- · 地上施設:保全段階中も可能。
- ・ 近傍ボーリング孔など採水施設:保全段階中も可能。
- 地表/空中からの物理探査:保全段階中も可能。

ただし、保全段階では、モニタリング結果等を踏まえて、長期の安全性に影響を及ぼすような兆候がない限り、モニタリング項目やその頻度は漸次低減されるものと想定される。なお、IAEAの安全指針[2]では、適切に設計された処分施設では、閉鎖後モニタリングが継続されると合理的に予測できる期間内に、生物圏への多量の放射性物質の放出は予測されないことを認識すべきであること、長期の安全性に影響を及ぼさない限り、閉鎖後モニタリングの規模は縮小される可能性があるとしている。米国テキサス州の浅地中処分の環境モニタリング規則[10]でも、閉鎖後のサンプリングとラボ分析の頻度は、一般に操業中のそれより低減するという考え方が示されている。

以上に述べた施設の適用が想定される事業段階のイメージを図 2.2-2 に示す。なお、人工 バリアの施工は、廃棄体定置作業を挟んで、連続的かつ一体的に実施されるため、操業(埋 設段階)には、人工バリア施工中のモニタリングも含まれる。



図 2.2-2 対象施設の適用が想定される事業段階のイメージ

2.2.4 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

(1) 埋設段階、保全段階における機能確認の役割

中深度処分施設の人工バリアは、処分システムの将来の状態設定を踏まえて設計仕様が決 定され、施工及び検査がなされる。土木学会の報告書[11]では、中深度処分施設の人工バリ アの設計、施工及び検査にあたっては、以下の2つの観点で検討がなされている。

- ・ 各部位の施工完了時点で要求される性能及び状態が確保されていること(施工時性 能・状態確保)
- ・ 埋戻し後以降に、状態設定で想定した長期的な物理・化学特性変化を考慮しても、人 エバリア性能が、受動的に発揮できる状態であること(長期状態変化)

また、原子力安全委員会[12]では、中深度処分の廃棄物埋設地設計にあたり、移行抑制に 関して、「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」とし、埋設施設の将来の状態及びその変化を踏まえて、要求される機能 を満足する埋設施設を適切に品質が管理された設計・施工により確実に構築することが重要 としている。

このように、人工バリアの設計仕様は、将来の状態変化を考慮して設定され、その後、人 エバリアが設計仕様を満足するよう施工されていることが検査により確認される。ここで、 段階的に進められる人工バリアの施工時の性能を施工時性能とすると、廃棄体の定置が完了 し、周辺坑道やアクセス坑道の埋戻しが完了する時点の人工バリア性能は、所謂、処分シス テムの長期の安全評価の前提となる初期性能と位置付けることができる(図 2.2-3)。



図 2.2-3 施工時性能、初期性能と長期性能の関係イメージ

また、埋戻し完了までの段階(埋設段階)と埋戻し後から管理を必要とする期間が終了す るまでの段階(保全段階)に人工バリアの機能確認として実施すべきことは、「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」ことである[13]。その中で、モニ タリングは、IAEAの安全指針[2]にあるように、処分システムが予測通りの性能を示してい ること、言い換えれば、閉鎖後の処分施設の安全に影響を及ぼす可能性のある条件が存在し ないことを確認し、初期性能の設定やその後の長期性能の状態設定の妥当性や、それらの信 頼性向上につながる情報を蓄積し、安全評価の不確かさの低減を図るための1手段として利 用される。



図 2.2-4 埋設・保全段階の機能確認の役割

(2) 機能確認に係る各モニタリング方法の得失

各モニタリング対象施設における機能確認方法として、実施可能と考えられるモニタリン グ方法に分類すると、表 2.2-1 のようになる。なお、地表・空中からの物理探査については、 進展段階にある技術であることから、当面は非破壊検査技術の進展に関し、市場における技 術ウォッチングを継続していくこととし、ここでの検討対象からは除外した。

モニタリング対象施設	具体的なモニタリング方法	
実処分施設	• センサーによる計測	
地下模擬処分施設		
地上施設	 センサーによる計測 サンプリングにトス計測 	
近傍ボーリング孔などの採水設備	• リンノリンクによる計例	

表 2.2-1 モニタリング対象施設と具体的なモニタリング方法

ここでは、「1) センサーによるモニタリング」、「2) 模擬施設(サンプリング施設)による モニタリング」の得失を列挙する。

1) センサーによるモニタリング

一般的に、センサーによって直接計測できる物理量は、センサー内や電極間の電流値や抵抗などの電気的な変化であり、処分施設における拡散係数や透水係数などの施設の機能をセンサーによって直接計測することは不可能である。また、センサーによって計測される物理量から施設の機能が直接推定できる場合と、センサーによって計測される物理量と相関性の高い物理量から施設の機能を推定する場合もあり、センサーによる計測の信頼性は、センサーで計測できる物理量と施設の機能確認ポイントの相関性が重要となる。

例えば、低透水層の重要な機能である低透水性は、透水係数という物理量で規定されるが、 透水係数をセンサーで直接計測することは不可能である。通常は、透水係数と相関性の高い 乾燥密度を膨潤圧や比抵抗と飽和度などから推定することになる。

センサーによる機能の代替パラメータの計測の例として、図 2.2-5 にプラチナ電極を用い て耐久性を高めた比抵抗計測装置(ウェンナー法)の概略図を示している。本装置では、実 績として、蒸留水や NaCl 水溶液が供給されている乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30wt%含有 ベントナイトに対して約6年間に亘り比抵抗値を計測している[14]。



図 2.2-5 比抵抗計測装置(ウェンナー法)の概略図
この比抵抗計測では、図 2.2-6 に示すような飽和度との相関関係が乾燥密度と液種ごとに 得られており、膨潤や流出などにより乾燥密度が変化しない条件であれば、比抵抗値から飽 和度を推定することが可能である。また、逆に、明らかに飽和していると言える箇所であれ ば、比抵抗値から乾燥密度を推定することも可能である。



図 2.2-6 飽和度と比抵抗の関係

ただし、センサーによる計測は、センサー設置箇所の局所的な値であり、その計測値だけ で施設全体の機能を確認することが難しい場合もある。このような場合には、計測値を境界 条件とした解析を別途実施するなどの評価を実施しなければならないことも考えられる。

センサーによるモニタリングの最大の長所は、一度設置したセンサーが計画通り作動すれ ば、計測対象の経時変化を連続的に取得できる点であり、長期的に見れば安価な機能確認方 法と言える。しかし、その一方で、一般的なセンサーによるモニタリングの短所は、センサ ーの耐久性が不安定という点である。後述する既存施設の底部低透水層のセンサーの生存率 は水分計が 67%、間隙水圧計が 75%、沈下計が 80%、温度計と土圧計が 100%であり、計器 によってその生存率が異なる(いずれも平成 28 年 3 月時点の生存率)。同様の事象は、SKB がÄspö HRLで行った実規模処分試験(Prototype Repository Test)でも観察されている[6]。 既存施設に設置したセンサーの現段階での稼働時間は、最長で 7 年程度であり、計測開始 1 年程度で故障した物もある。このような耐久性の違いは、計測方式の違いだけでは説明がつ きにくいものも多く、耐久性に関する信頼性向上が大きな課題として挙げられる。センサー によるモニタリングの事例を図 2.2-7 に示す。ここでは、センサーとして、従来の電気セン サーに比べて耐久性が高いとされる光ファイバ式センサー(OFS)が利用されていることが特 徴的であり、Andra や Nagra で OFS 実用化に向けた検討が進められている。



図 2.2-7 Andra の中レベル廃棄物(ILW)処分坑道のセンサー設置イメージ(上下)

さらに、センサーの寿命は、腐食や断線などによる機能喪失の他にバッテリの容量にも依存する。一般的には、データの計測や転送頻度によってバッテリの消耗速度が変化するため、施設の機能が急激に変化する時期などを予め取得し、適切な時間間隔と頻度で計測することが重要である。モニタリングの前提条件でもある、モニタリングのためのセンサーの設置によって、施設の機能が低下することがないように、センサーの設置においては、極力無線を用いるなどの対策が必要である。また、バッテリに関する問題の解決策として、無線を利用した給電技術の開発なども有用である。

2) 模擬施設(サンプリング施設)によるモニタリング

施設の確認ポイントの評価は、施設から供試体をサンプリングして適切な試験方法で計測 することが最も信頼性が高い。この方法では、基本的にほとんどの機能確認ポイントを直接 計測できることが長所である。ただし、このようなサンプリングによる直接計測においても、 施工のばらつきによる試験結果のばらつきや、サンプリングに伴う機能の低下、さらには試 験自体のばらつきなども存在するため、試験結果の評価にはこれらを考慮する必要がある。 また、サンプリングを行うためには、対象となる施設に計測者が立ち入ることが前提となる ため、実処分施設や埋め戻された保全段階の地下模擬施設では実施が困難である。

また、計測したい機能に応じて施設のスケールをパラメータとすることも可能であり、ス ケールは実規模を最大として、数センチ程度の供試体スケールまでのモニタリングが考えら れる(図 2.2-8 参照)。



大規模モニタリング施設

図 2.2-8 モニタリング施設のスケールイメージ

大規模スケールの施設は、寸法形状、材料、施工方法や母岩環境をできる限り実処分場と 同等となるよう考慮することが可能で、特に、実処分施設と同等な水理、力学挙動を再現で きるという長所がある。SKBが Äspö HRL で行った実規模キャニスタ回収試験(Canister Retrieval Test)や先に述べた実規模処分試験(Prototype Repository Test)では、理論や実 験室ベースだけでは実規模でのベントナイト低透水層の再冠水挙動を十分に記述できないか もしれないことが示唆されており、小規模な実験室での試験と実処分施設間のギャップを埋 め、不確実性を低減するためには、十分に検討された実規模レベルの試験が望ましいと考え られる。

また、模擬施設は、一定期間の計装によるモニタリングを経て、施設の一部又は全体を解体し、人工バリア部材をサンプリングし、その状態を直接的に観察することで、モデル解析 やモニタリング結果との比較も可能である。ただし、大規模スケールの施設は、施設の設置、 維持や解体に非常にコストがかかる一方で、得られる情報は限定的なため、施設全体として の機能を評価するためには、別途、試験や解析が必要となる。

中規模スケールの施設は、比較的、実規模の形状に近く、地下水の浸潤状況などを実処分 施設と整合させ易いという長所を備えつつ、費用効率の高いアプローチと考えられる。地層 処分分野の既往試験では、施設規模を1/4~1/2スケールとする例が見られるが、適切なスケ ールがどの程度なのかについては、着目する機能や地下環境の違いなどによって異なると考 えられるため、別途検討が必要である。なお、センサーとサンプリングによるモニタリング を併行して実施する場合には、設置するセンサー自体の大きさを考慮して、施設スケールを 設定することも考えられる。

また、小規模スケール(供試体スケール)の施設は、地上施設での試験規模と同等である が、温度や湿度などのモニタリング環境の管理や地下水の供給などが不要となる可能性もあ る為、室内モニタリングと比較してコストが低減するものと考えられる。



図 2.2-9 小規模モニタリング施設のイメージ

3) 技術開発課題の整理

先に述べた本事業で対象とするモニタリング施設の特徴とモニタリング方法の特徴を踏ま え、機能確認に向けた技術課題と解決によって得られる効果を表 2.2-2 に示す。

これらの課題は、機能確認施設ごとに共通のものもあれば、機能確認施設の特徴に起因す るものもある。この表にまとめられた課題を本業務によって解決することは、機能確認方法 の選択肢を増やし、信頼性の向上に資するだけでなく、無駄なモニタリングの排除や適切な モニタリング計画(配置、時期、頻度)を決定するなどのコスト削減にも効果が期待できる。 なお、近傍ボーリング孔などの採水施設は、実績があり、技術課題なしとした。近傍ボーリ ング孔などの採水施設のデータは、施設全体の評価にあたっては、他施設でのモニタリング 結果や既存知見(や予測モデル)と合わせて総合的に活用されるものとの考えられる。

表 2.2-2	実処分場での適用を	踏まえたモニタ!	リンク	「の技術開発課題の整理
---------	-----------	----------	-----	-------------

	技術課題	施設				
確認		実	地下模 擬施設			毎辺されによって
方法		処分施設	アクセス供用	アクセス別	电上施設	得られる効果
セン	センサによって計測できる物 理量と機能の相関性	0	0	0	-	 ・設置すべきセンサーの種類の絞り込み ・センサーによる機能確認の信頼性向上
サ 	センサーによって計測できる 物理量を用いた全体的な機能 評価	0	0	0	-	・センサーの適切な配置計画の立案可能
	センサーの耐久性評価、及び高 性能・高耐久化検討	0	0	0	-	 ・センサーによる機能確認の信頼性向上 ・機能確認のコスト低減
	機能の経時変化の計測計画へ の反映(時間間隔、頻度)	0	0	0	-	 ・センサーによる機能確認の信頼性向上 ・機能確認のコスト低減
	センサーの無線伝送・給電技術 (距離、時間)	\bigtriangleup	\triangle	0	-	 ・センサーによる機能確認の信頼性向上 ・人工バリアの損傷低減
	センサーの設置方法	0	0	0	-	 ・センサーによる機能確認の信頼性向上 ・人工バリアの損傷低減
	センサーの交換方法(時間)	\bigtriangleup	\bigtriangleup	0	-	 ・センサーによる機能確認の信頼性向上 ・人工バリアの損傷低減
サンプリ	施工のばらつき、サンプリング に伴う機能の低下、試験自体の ばらつきなどの評価	-	0	0	0	・サンプリングによる機能確認の信頼性向上
リング	計測したい機能に応じたサン プリング施設や供試体の適切 な大きさ	-	0	0	0	 ・サンプリングによる機能確認の信頼性向上 ・サンプリング施設計画の立案可能
	実処分施設と異なるサンプリ ング施設における材料構成割 合の差異の評価	-	0	0	0	・サンプリング施設の小規模化
	実処分施設と異なる規模のサ ンプリング施設における地下 水浸潤状況の差異の評価	-	0	0	0	・サンプリング施設の小規模化
	サンプリング時に計測できる物理量を用いた施設全体の評価	-	0	0	0	 ・サンプリングによる機能確認の信頼性向上 ・サンプリング施設計画の立案可能
	保全段階の環境を人為的に模 擬する方法	-	-	0	0	 ・サンプリングによる機能確認の信頼性向上 ・保全段階の施設確認

2.2.5 機能確認試験計画の立案

本項では、埋設・保全段階の施設の機能確認方法の実現に資する情報を取得するための試験計画を立案する。試験計画の立案は、

- 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の立案

に区分して行った。予備検討は、前述の機能確認方法の課題を解決するための検討を行う室内試 験が中心であり、既存施設と新規施設は、室内試験よりも大きな試験や実際の機能確認施設と同 規模の機能確認試験を実施して機能確認の実現性を確認するものが中心である。

- (1) 予備検討の試験計画の立案
 - 1) センサーによる機能の代替パラメータの計測
 - a. センサーによって計測できる物理量と機能の相関性

施設の機能確認ポイントをパラメータとした室内試験を実施し、その試験中の様々な物 理量を計測する。施設の機能確認ポイントの変化と物理量の変化の相関性についてまとめ る。同じ機能を計測する場合でも、計測方法によっては感度の高い領域が異なることも考 えられる(図 2.2-10)。このような機能確認ポイントの変化と計測方法や計測値について 検討する。図 2.2-11 には、例として既往の研究[14]における比抵抗値と飽和度・乾燥密 度の関係を示す。図から、比抵抗値は低飽和度領域では感度が高く、高飽和度領域では感 度が低くなる傾向があることが分かる。このような、計測できる物理量との相関性や感度 の高い領域などを取りまとめる。



図 2.2-10 機能確認ポイントと計測値



図 2.2-11 比抵抗値と飽和度・乾燥密度の関係

- b. センサーによって計測できる物理量を用いた全体的な機能評価
 - センサーによって得られる値は、センサーの設置されている領域の局所的な機能確認ポ イントであり、その計測値を用いて施設全体の機能を確認するためには解析的な検討が不 可欠である。そこで、埋設・保全段階において施設の機能がどのように変化するのかを解 析によって評価し、最も機能変動が激しい箇所(保守側の評価を与える箇所)や変動がほ とんどない箇所を取得する。関連するパラメータの幅を考慮した解析を実施し、適切な設 置箇所などを決定する方法をまとめる。さらに、センサーによって得られた値を解析に反 映して、予測解析の修正を行い機能確認の精度を向上させる方法についても検討する。こ のような検討によって、機能確認の予測精度が高まれば、処分概念のロバスト性の向上に も貢献するものと考えられる。

(a) 埋設・保全段階の実施設で起こり得る事象の予察解析

埋設・保全段階において想定される現実的な時間枠において、見込まれる実施設の状態 変遷(人工バリア構成部材等の長期的な機能の変化)について予察的な解析を実施し、解 析結果の具体的な機能確認試験計画への反映を目指す。

埋設・保全段階の実施設の状態は、施設が不飽和から飽和に至る段階であり、この段階 を中心とした予察解析(例えば、T、H、M、Cの影響をそれぞれ考慮した解析等)を、 想定される極端な事象を含めて幅を持った形で実施し、当該期間の施設状態の変化の定量 的な評価を目指す。

解析に用いるデータセットは、既往の知見に基づき設定するものとし、解析結果を通じ て、どのような機能確認がどのレベルで実施可能か(対象とする計測の実現性)について 具体的に評価を行い、効率的なセンサー配置計画等、機能確認試験計画の最適化に貢献す る。予察解析において想定する事象としては、腐食膨張、セメント溶脱、低透水層の密度 (低下)、膨潤変形(膨潤圧)、セメントひび割れ、モンモリロナイト溶解、Ca型化、嫌 気性腐食のガス発生・移行等が考えられる。

解析に用いる実施設のモデルと解析結果、その試験計画への反映の概念を図 2.2-12(元 図出典[15]) に示す。



想定される実施設挙動の定量的評価に基づく機能確認試験計画

図 2.2-12 シナリオの予察解析と試験計画への反映案

(b) 埋設・保全段階の実施設で低拡散層に起こり得るシナリオの予察解析

中深度処分においては、例えば硫酸塩劣化等の塩影響が生じる可能性がある。塩影響が 生じた場合、セメント系人工バリアの劣化は早期に進行し、低拡散層やコンクリートピッ トの機能にも影響を及ぼすことが懸念される。しかしながら、中深度処分施設を対象とし た塩影響については既往の知見(具体的に起こり得る事象、変質の程度、変質速度、部位 毎の影響の程度など)が乏しい。

そこで、図 2.2-13の検討手順に従い、様々な条件を設定して室内試験及び解析検討を 行い、塩影響が生じた場合に埋設・保全段階の実施設で起こり得るシナリオを整理する。



(c) シナリオを考慮したセンサーの設置計画の立案、及び施設全体の機能確認

地下空洞型処分施設性能確証試験のために実施された予測解析事例[16]を図 2.2-14 に 示す。図から、埋設段階においては底部低透水層の両端(側部低透水層の底部)において せん断変形が大きくなることが予測される。このような場所にセンサーを設置するなどの 配置検討を行うと共に、さらに得られた結果で解析モデルの修正を加えるなどの検討を行 う。



図 2.2-14 埋設段階の解析例

c. センサーの耐久性評価、及び高性能・高耐久化検討

施設の機能確認ポイントの変化と相関性の高い物理量を計測可能なセンサーで耐久性 試験を実施し、耐久性の評価を行うと共に、センサーの弱部や劣化原因などを分析し、セ ンサーの高耐久化の可能性を検討する。さらに、センサーの計測精度を高める方策につい ても検討を行う。

長期計測に関する既往研究によれば、高圧力などによるセンサー容器の破損、センサー 容器に接続されているケーブルの入口部などの防水不良(密封問題)、センサー可動部の 機械的接触による摩耗、物理量変換のための力学的機構(ダイヤフラムやクランプなど) の性能低下、化学物質によるセンサーやケーブルの腐食など、センサー不具合の原因は多 岐にわたる。これらセンサーのほとんどが通常の土木工学プロジェクト用に設計されてお り、実際は放射性廃棄物処分用ではないこと、つまり設置条件や環境が異なることに注意 が必要である。

そこで、実施設の環境を考慮したうえでセンサーの劣化促進を模擬できる耐久性試験方法を検討する。なかでも、光ファイバセンサーを対象とした試験方法の検討から着手する。 同センサーによれば、処分場、特に人工バリアシステムにおける高温で腐食性の流体(塩水など)による電気式センサーやケーブルの劣化に関する課題を、克服できる可能性があるためである。具体的には、図 2.2-15 に示すような光ファイバセンサーの劣化促進(高アルカリ、高温、高湿度、放射線下など)試験を行い、一定の段階ごとに光ファイバの引 張試験により強度分布を実測のうえ、寿命予測を試みる。



図 2.2-15 光ファイバセンサーの耐久性試験イメージ

d. 機能の経時変化の計測計画への反映(時間間隔、頻度)

埋設・保全段階における施設の機能確認ポイントの経時変化を様々なシナリオを模擬し た室内試験で取得し、機能確認ポイントごとに変化の激しい時期を同定する。得られた経 時変化を基に現実的なセンサーによる機能確認計画を立案する。

図 2.2-16 は、セメントペーストからのアルカリ成分の溶出に伴う pH の経時変化を示 している[17]。この図から、セメントペーストからのアルカリ成分の溶出は、最初の5年 間程度(Region I)で急激に進むが、その後の200年(Region II)では大きな変化がな いことが分かる。一方、図 2.2-17 には、ケイ砂を 30wt%含むベントナイトブロックへの 水の浸潤速度を示している。図から、ベントナイトへの水の浸潤距離は浸潤時間の1/2 乗 に比例することが分かる。これは、浸潤距離が時間経過に伴って鈍化することを意味して いる。このような、人工バリアの性能と相関がある物理量の経時変化を取得することは、 センサーの配置やセンサーによる機能確認と後述するサンプリングによる機能確認の棲 み分けなどにも役立つ。



図 2.2-16 セメントペーストからの溶出に伴う pH の経時変化



図 2.2-17 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)

- e. センサーの無線伝送・給電技術
- (a) 無線伝送

地中無線技術は、バリアの安全性を損なわずにモニタリングが実施できる等のメリット があり、高レベル放射性廃棄物処分の工学技術として高度化に向けた技術開発が進められ ている。緩衝材や埋め戻し材の中に設置可能な小型・耐圧型の送信装置は開発されており、 現在、JAEA 幌延深地層研究センターの人工バリア試験と瑞浪超深珍地層研究所の再冠水 試験において、実証試験として地中無線によるデータ計測を行っている。

地中無線技術として残された課題としては、伝送距離の長距離化と共に通信ネットワークを多段化し伝送経路を冗長化することで、データの信頼性を向上させることが考えられる。この実現のため中継システムの開発を進めているが、開発した中継システムを坑道内で実証試験を行うことが必要である。試験坑道と計測坑で多段の中継ネットワークを構築し、実証試験を行う場合の試験イメージを図 2.2-18、図 2.2-19に示す。複数段の中継ネットワークを設けることにより、通信装置の一部で不具合が生じても計測ができることを確認する。



図 2.2-18 中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ(断面図)



図 2.2-19 中継装置の複数段・複数経路の実証試験イメージ(平面図)

(b) 無線給電

地中無線通信技術を適用した無線モニタリング機器は、有線モニタリング機器と比較し、 配線によるバリア機能への影響を回避することが可能である一方で、内蔵する電源の容量 に応じた稼働期間の限界などの課題があり、地中モニタリング技術の適用性の拡大のため には、無線モニタリング機器の電源の利用期間の長期化に関する検討が必要である。

原環センターでは、地中無線モニタリング装置の利用可能期間を長期化することを目的 とした電源に関する調査の一つとして、電磁波による電力供給方式に関しての検討が進め られている[18]。電磁波を用いた無線給電の概念とデモンストレーションの例を図 2.2-20に示す。 無線給電技術を、例えば無線伝送技術と併用することにより、無線伝送によるモニタリ ングの長所に加えて、より密な時間間隔で長期間の測定が実現可能になり、また、センサ ーの作動電力に対する制約が緩和されることにより、センサーの選択肢の拡大も期待でき ると考える。現時点では、給電効率の向上や原位置での評価の実施(現状では室内試験の 実績のみ)等の課題を有しているが、当該技術の開発状況によっては、機能確認試験にお けるモニタリング計画に組み込むことにより、長期間の試験実施可能性の実証、あるいは 将来的な実施設の建設時の機能確認に寄与することができると考える。

無線給電・無線伝送技術及び従来モニタリング技術をHLW処分のモニタリングに適用 した場合のイメージを比較したものを図 2.2-21 に示す。



図 2.2-20 無線給電システムの概念と試験の例



図 2.2-21 無線給電によるモニタリングの概念(HLW での例)

f. センサーの設置方法

センサーによる計測は、施設の性能や機能確認ポイントを代表するものでなければなら ないが、同じ性能の施設でも、その設置方法で得られる性能が異なることが予想される。 そこで、センサー毎に適切な設置方法を検討する。図 2.2-22 には、既往の研究で実施さ れた吹付けによる計器の設置検討例[19]を示す。低透水層の場合、センサー近傍の品質を 他の箇所と同等に保ちながらセンサーを設置するには、施工に伴う周辺への影響が小さく、 任意の形状に設置締固め土を構築できることが重要である。このような条件を満足する施 工法としては吹付け工法が最適である。



図 2.2-22 吹付け工法による計器の設置検討例

g. センサーの交換方法

アクセス坑道を実施設とは別に掘削する地下模擬施設や地上施設による機能確認では、 センサーに不具合が発生したり、モニタリング期間に技術革新があり、設置したセンサー よりも高耐久・高性能なセンサーが開発されたりした場合、センサーの交換を行った方が 良い場合も考えられる。このような場合に、施設の性能を極力損なわずにセンサーを取出 す方法や同じ場所に設置する方法について検討を行う。

図 2.2-23 には、側部低透水層を水平ボーリングでサンプリングした後に同径かつ同品 質のブロックを押し込んで埋戻し補修した例を示す[20]。この場合、センサーの取出しや 取り付けは実施していないが、センサーを含む周辺をサンプリングし、センサーを含むサ ンプリング時の低透水層と同品質のブロックを挿入するなどの可能性について検討を行 う。



図 2.2-23 側部低透水層の水平掘削と埋戻し補修例

- 2) サンプリングによる機能の直接計測
 - a. 施工のばらつき、サンプリングに伴う機能の低下、試験自体のばらつきなどの評価施工のばらつきを模擬した供試体を用いて室内試験を実施し、施設を解体して機能確認する際の施工のばらつきの影響を評価する。また、同じ人工バリアから様々なサンプリング方法によって試料を取得し、サンプリング方法が性能に及ぼす影響も室内試験によって調べる。さらに、機能確認のための試験自身の適切な試験手順の規格化やばらつきについても検討する。

図 2.2-24 には、サンプリング方法が機能に及ぼす影響の検討イメージを示す。図に示 すように、リファレンスの施工方法で構築した人工バリアを様々な方法でサンプリングし て、機能確認のための室内試験に供する。この際、比較のために室内成型した供試体につ いても同じ試験を実施する。室内成型した供試体の機能に対して、サンプリングによる乱 れなどの影響で、機能がどの程度の影響を受けるのかを定量評価する。



図 2.2-24 サンプリング方法が機能に及ぼす影響の検討イメージ

b. 計測したい機能に応じたサンプリング施設や供試体の適切な大きさ

実処分施設は施工に伴う性能のばらつきが存在する。また、性能によっては、ある領域 の平均値として定義されるものも存在する。このため、計測する機能に応じて適切な供試 体の大きさが存在する。この供試体の大きさが最適値よりも小さいと計測値はばらつき、 性能評価に無駄な時間が掛かることになる。そこで、施工手順を模擬した供試体を作製し、 様々な大きさで性能評価を行い、性能ごとに最適な供試体寸法を取得する。

図 2.2-25 には、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を示す。 低透水層の透水係数は、施工に伴う性能のばらつきなどにより、供試体の寸法によってば らつきの程度が異なる。このため、ばらつきが小さく、低透水層の機能を代表できる透水 係数を得るためには、最適な大きさが存在する。



図 2.2-25 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

c. 実処分施設と異なるサンプリング施設における材料構成割合の差異の評価

実処分施設の性能の変化の内、化学変化に起因するものは、その材料のモル比によって 検討条件が保守的でなかったり、過度に保守的であったりする。このため、実処分施設を 対象とした地化学解析を実施し、現実的な試験条件を決定する方法を取得する。

図 2.2-26 には小規模サンプリング施設による機能確認イメージを示す。覆エコンクリ ートから浸出する模擬地下水とベントナイトスラリーとの平衡水などを還元環境下で採 取し、浸漬試験を実施する。得られた試験結果は、実処分施設の地化学解析と比較し、試 験条件がどの程度保守側の設定になっているのかを定量評価する。小規模サンプリング試 験結果は地化学解析の高度化に資する情報としても利用する。



図 2.2-26 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

d. 実処分施設と異なる規模のサンプリング施設における地下水浸潤状況の差異の評価 実処分施設の性能の変化は、地下水浸潤に伴って発生するが、一般的には、再冠水過程 において地下水は均一に浸潤せず、局所的に浸潤するものと考えられる。一方、様々な施 設規模が考えられるサンプリング施設のうち、実施設よりも小さな規模の施設では、この ような局所的な浸潤を模擬することが難しい。この浸潤の状況が異なれば、力学・化学・ 水理的な事象が施設の性能に及ぼす影響も異なることが予想されるため、浸潤状況の違い による機能確認の差異を考慮することは重要である。

そこで、地下水浸潤によって発生する施設の性能変化のうち、飽和状態で検討すること が保守的である性能を室内試験で取得する。一方、局所的な浸潤を考慮すべき施設の性能 も抽出し、その評価に適切な試験規模や評価方法を検討する。

図 2.2-27 には飽和度変動による人工バリアの機能変化のイメージとして、低拡散層の Ca 溶出率(左図)と低透水層の剛性(右図)を示す。Ca 溶出率は、飽和度が高いほど 大きいと考えられるため、実処分施設に比べて飽和度の上昇が早い小規模の試験施設は保 守側の結果を与えるものと考えられる。低透水層の剛性についても、飽和度が高いほど小 さくなるため、小規模の試験施設は保守側の結果を与えると考えられる。

しかしながら、局所的に地下水が浸潤して剛性低下が起きた場合、コンクリートピット に生じる応力が大きくなり、亀裂の進展を助長する可能性もある(図 2.2-28) [21]。



図 2.2-27 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)



図 2.2-28 局所浸潤による膨潤圧分布の例

e. サンプリング時に計測できる物理量を用いた施設全体の評価

サンプリング施設で得られた値が実処分施設のどこの部位の値として取り扱うのが適 切かを評価して、得られた値を実処分施設を対象とした解析に反映し、施設全体の機能確 認の方法をまとめる。図 2.2-29 には、実処分施設を対象とした機能確認の例として、既 往の研究において実施された地震動による透水係数変化の結果を示す[22]。この場合のイ ンプットは、特定の地震動であるが、小規模サンプリング施設から得られた結果を実処分 施設を対象とした解析に反映して施設全体の評価に適用する方法を検討する。



図 2.2-29 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)

f. 保全段階の環境を人為的に模擬する方法

埋設段階から保全段階に至る過程で施設を取り巻く環境は酸化環境から還元環境へと 変化するものと考えられる。地下水の溶存ガスの分析に基づいて、様々な試験規模におい て還元環境を人為的に模擬する方法について検討を行う。また、施設の性能に対して、酸 化環境や還元環境の違いが及ぼす影響についても検討を行う(図 2.2-30)。



図 2.2-30 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

3) その他の計測

ここでは、低透水層に関連して発生するこれら事象のうち、再冠水段階で発生する可能 性のある事象として、エロージョンパイピングに着目し、室内試験等により、事象の兆 候をモニターするための具体的な指標について検討する。室内試験のイメージを図 2.2-31 に示す[14]。



図 2.2-31 流出現象を定量評価するための試験イメージ

実施内容としては、施設の性能に有意な影響を及ぼす埋設段階から保全段階で施設内に 発生する事象の発生条件や、発生した場合の副次的事象を調べる。これらの事象が発生し ていることを示す特異的な情報があれば、その取得方法を検討する。特異的な情報がなけ れば幾つかの情報による絞り込みで事象の発生の有無が判断できるフローの作成を検討 する。

また、影響事象の発生の有無だけでなく、発生の程度や性能への影響の大きさなどの推定の可能性についても検討する。図 2.2-32 には、流出現象が低透水層の機能に及ぼす影響の定量評価の例を示す[18]。この図は、湧水量から低透水層の流出量が推定できるというものであり、流出現象の影響を定量評価する方法として SKB などで実施されている。

さらに、図 2.2-33 には、流出現象の発生の有無を評価例として、排水中の固相のモン モリロナイト含有率を示す[14]。流出現象中は、モンモリロナイトが選択的に流出してい ることが分かっており、施設の排水中の固相のモンモリロナイト含有率を計測することで 流出現象の有無を判断することができる。



図 2.2-32 流出現象を定量評価例



図 2.2-33 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)

(2) 既存の実規模施設を活用した試験計画の立案

日本原燃敷地内の試験空洞にある既存試験施設は、施設の施工技術の実現性について確認 することを目的として構築されている。この際、施工エリアが湧水によって湿潤状態となり、 施工品質が損なわれることを排除するために、一次覆工の表面に防水シートを貼り付けて養 生を行い、施工エリア全体をドライな状態に維持している(図 2.2-34)。この状態で、側部 埋戻しや上部埋戻しを行っているため、既存施設の防水シートを除去して、積極的に湧水を 浸潤させるということは不可能な状況である。

そこで、ここでは、既存施設を活用した以下の試験計画について検討を行った。

- ・ 現状のままで活用する場合
- ・ 増築して活用する場合
- 水理制御機能を付与する場合



図 2.2-34 既存施設の現状のイメージ

1) 現状のままで活用する場合

前述のように、現状のままで既存施設を検討に活用する場合、水理場を制御することが困 難である。このため、現状の施設は、埋設段階の施設を模擬していると見なすこともできる。

地下水が浸潤しなければ、化学変質も発生しないと考えられるが、埋設段階の施設では化 学変質による機能の変化は緩慢であることを確認することも可能である。

また、水理・化学に起因した機能変化がほとんどないとすれば、力学を主とした機能確認 としての活用が考えられる。

この方法の長所は、

- ・ 気温や湿度が実処分施設に類似
- ・ 局所的な機能の変化を直接計測可能
- ・ スケール効果の考慮不要

などが挙げられる。一方、短所としては、

- ・ 水理場を制御できない
- ・ 化学変質を考慮できない

などが挙げられる。主な計測項目としては、

- ・土圧
- ・ 変形量
- 密度分布
- ・ ひび割れ間隔
- などである。
- a. センサーによる機能の代替パラメータの計測の課題解決に対する活用

既存施設には、様々なセンサーが埋め込まれている。このため、継続的に様々なデータ を取得して、埋設段階の施設における機能変化が小さいことを示すことが可能である。

さらに、継続的なセンサーによる計測を通じて、耐久性検討も可能である。一部の故障 した機器に関しては取り出して故障の原因を調べ、耐久性の向上に資する情報が入手でき る。さらに、センサーの設置方法や交換方法などの検討も可能である。 b. サンプリングによる機能の直接計測の課題解決に対する活用

既存施設は、現状の技術のうち適用性の高い施工技術で構築された実規模施設である。 このため、施工による機能のばらつきや、サンプリングに伴う機能の低下、試験自体のば らつきなどの評価に活用可能である。また、実規模施設であることから、計測したい機能 に応じたサンプリング施設や供試体の適切な大きさの検討を実施することも可能である。

c. 機能に影響を及ぼす事象の計測の課題解決に対する活用

既存施設は、水理的な事象を再現することが難しいため、力学的な事象の影響評価への 活用が考えられる。たとえば、クリープ変形が施設の機能に及ぼす影響の定量評価や不同 沈下によるコンクリートピットへのひび割れ状況の確認などが考えられる。また、浸潤し た際の局所的な膨潤を模擬した偏載荷や、水理的な事象として、流出が起きた後の低透水 層を模擬した局所掘削などがコンクリートピットのひび割れに及ぼす影響なども考慮可 能である(図 2.2-35)。

これらの検討の結果をセンサーや解体によって計測すれば、解析的な評価技術の確立に反映することも可能である。



図 2.2-35 既存施設の活用のイメージ

d. 光ファイバセンサーを活用したひび割れ計測に係る試験計画

既存の実規模施設は、手前コンクリートピット前面、側部低拡散層の一部、上部低拡散 層の一部が露出した状態となっている。ここでは、一般的な計測機器に比べて高耐久で、 ケーブル量を最小化した上で分布計測が可能という特徴を有する光ファイバセンサーに 着目し、セメント系材料のひび割れ計測を行う。2.3.2 (3) で後述するように、閉鎖措置 段階以降において、不均一に地下水が浸潤し、低透水層が局所的に膨潤した場合には、低 拡散層に引張強度を超える引張応力度が発生し、曲げひび割れが発生する可能性が示唆さ れている。また、既存の実規模施設の低拡散層には、打設後 1 ヶ月程度経過した段階で ひび割れが発生しており、実処分施設においても同様の事象が発生する可能性が十分にあ る。仮に低透水層の施工前にひび割れを充てんする等の補修が行われたとしても、埋設段 階から保全段階に移行した後にひび割れ幅が変動する可能性があるため、特に低拡散層の ひび割れ発生状況をモニタリングすることは有意であると考えた。

2.3.2 (3) で後述するような低透水層の偏膨潤による曲げひび割れに関しては、ひび割

れ発生方向がある程度予測可能である一方、無筋モルタル部材である低拡散層においては、 乾燥収縮等、他のひび割れ発生要因に起因するひび割れの発生方向を事前に予測すること が難しい。

そこで、本試験では、ひび割れの発生方向によらずひび割れ発生状況をモニタリングす る方法として、セメント系材料の表面に光ファイバセンサーを格子状に設置して、ひび割 れ発生状況をモニタリングするとともに、光ファイバセンサーの計測結果からひび割れ発 生状況を推定する手法を検討する。

既存の実規模施設において、コンクリートピット、低拡散層が面的に露出している範囲 を図 2.2-36~図 2.2-38 に赤枠で示した。なお、図 2.2-36、図 2.2-37 には既存のひび割 れ発生状況を青線で示した。本試験では、側部低拡散層の一部、上部低拡散層の一部及び 手前コンクリートピット前面に光ファイバセンサーを設置する。



図 2.2-36 側部低拡散層(左側)の露出範囲(側面図)



図 2.2-37 上部低拡散層の露出範囲(平面図)



図 2.2-38 手前コンクリートピットの露出範囲(正面図)

既存の実規模施設は、坑道軸方向の延長が 12m 程度であり、後述するような低透水層 の偏膨潤による曲げひび割れを発生させることは不可能である。光ファイバセンサーを設 置した低拡散層、コンクリートピットには、静的破砕剤等により人為的にひび割れを発生 させることとする。そして、光ファイバセンサーによる計測結果からひび割れ発生状況を 推定する手法を検討する。光ファイバセンサーの計測結果からひび割れ発生状況を推定す るイメージを図 2.2-39 に示す。



図 2.2-39 光ファイバセンサーの計測結果からひび割れ発生状況を推定するイメージ

側部低拡散層(左側)には、現状露出している範囲に4本のひび割れが存在しており、 このうち試験空洞最奥の1本を除く3本のひび割れを計測対象として、坑内温度・湿度 の変動に伴うひび割れ幅の変動を計測する。側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー 設置位置を図 2.2-40に示す。

側部低拡散層(左側)では、坑内温度・湿度の変動に伴うひび割れ幅の変動は極小さい と想定されるため、光ファイバセンサーを用いたひび割れ計測の計測精度を確認する。こ のため、既存のひび割れ幅計測技術(例:パイ型ゲージ)による計測を併用し、両者の計 測値を比較する。



図 2.2-40 側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)

上部低拡散層には、300mm 間隔の格子状に光ファイバセンサーを設置し、人為的にひ び割れを発生させることにより、ひび割れ計測試験を実施する。上部低拡散層の光ファイ バセンサー設置位置を図 2.2-41 に示す。



図 2.2-41 上部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置案(平面図)

人為的なひび割れ発生方法としては、例えば静的破砕剤の使用や機械的に荷重を加える 機器の使用が考えられる。静的破砕剤は、岩石や鉄筋コンクリート等の破砕に使用されて いる材料で、これまでに多数の適用実績を有するものである。光ファイバセンサーを設置 後に、上部低拡散層に直径 40mm 程度、深さ 50cm 程度のコアを削孔し、削孔した孔内 に静的破砕剤を充てんする。孔内で静的破砕剤が膨張することにより、引張応力を発生さ せ亀裂を発生させるものである。静的破砕剤の充てん孔を適切に配置することにより、あ る程度意図した位置にひび割れを発生させることが可能である。ただし、静的破砕剤は主 に解体を目的に使用されるものであるため、発生させるひび割れのひび割れ幅を制御する ことが難しい点に課題がある。機械的に荷重を加える方法は、種々の方法があり、例えば、 セメント系材料の表面にスリットを入れ、その中に袋状のジャッキを挿入してジャッキ内 部に油圧により圧力を作用させるものがある。また、静的破砕剤と同様にコア削孔し、坑 内に油圧により径が拡大するパッカーを挿入するものもある。

机上検討で上記のひび割れ発生方法の候補に優劣をつけることは困難であるため、事前 に地上部で側部及び上部低拡散層と部材厚が等しい試験体を作製し、静的破砕剤や機械的 に荷重を加える機器等の適用試験を実施して、実規模施設での試験に供するひび割れ発生 方法を選定する。

光ファイバセンサーによるひび割れ計測を行った後、図 2.2-39 に示したように、上部 低拡散層のひずみ分布図を作成し、そこからひび割れ分布を推定する。本試験においては、 実際のひび割れ発生状況を目視確認することが可能であるため、推定したひび割れ分布と ひび割れスケッチを比較することにより、より高い精度でひび割れ分布を推定する手法を 検討する。また、ひずみ分布図作成からひび割れ分布推定においては、光ファイバセンサ ーの設置密度が、ひび割れ分布推定精度に影響すると考えられる。そのため、300mm 間 隔で計測したデータを全て用いる場合、600mm 間隔の測定データのみを使用する場合、 900mm 間隔で計測したデータのみを使用する場合等、使用するデータの密度を変化させ ることにより、光ファイバセンサーの設置密度がひび割れ分布推定精度に与える影響を確 認する。

また、人為的なひび割れを発生させるひび割れ計測試験は、段階的にひび割れ幅を増大 させる。これにより、光ファイバセンサーにより計測可能なひび割れ幅の上限値を同定す ることが可能であると考えており、光ファイバセンサーの固定方法(全線接着、数 cm ピ ッチでの固定等)が計測可能なひび割れ幅の上限値に及ぼす影響を確認する。

手前コンクリートピットでは、上述の上部低拡散層と同様の試験を実施する。手前コン クリートは、上部低拡散層に比べて、広範囲に露出しているため、分岐を有するひび割れ など、より複雑な形状のひび割れを発生させることが可能であると考えらえる。

ただし、手前コンクリートピット前面は、KK シート工法[23]による打継ぎ処理がなさ れているため、表面には図 2.2-42 に示すような凹凸が形成されている。また、手前コン クリートは鉄筋コンクリートであり、鉛直・水平ともに 150mm 間隔で鉄筋が配筋されて いる。静的破砕剤を使用する際には、コア削孔する必要があり、コア削孔時には鉄筋と光 ファイバセンサーの両者を避ける必要があるため、光ファイバセンサーの設置間隔は 300mm とする。手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置位置を図 2.2-43 に 示す。



図 2.2-42 KK シートの凹凸形状[23]と手前コンクリートピット表面の状況



図 2.2-43 手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置位置案(正面図)

e. 光ファイバセンサーを活用した温度計測に係る試験計画

埋設段階から保全段階における処分空洞内の応力分布などが、シナリオ通りに推移して いるかどうかを確認する手段として、施設の温度変化を把握することは重要である。また、 懸念される不均質な地下水の浸潤などについても、網羅的な多点計測結果を用いれば、そ れらの温度変化を通じて浸潤位置や程度を検知できる可能性がある。ここでは、前項同様 に、ケーブル量を最小化した上で分布計測が可能という特徴を有する光ファイバセンサー に着目し、坑内温度の分布計測を行う。

試験実施場所として、既存の実規模施設付近だけでは季節変化などによる環境温度変化

が生じにくく、また強制的に温度変化を与えることも安全管理上などの理由で困難なため、 坑道全体を利用することとする。つまり、実規模施設から坑道を経由して坑口までの全長 にわたる温度分布を計測する。地下深度が深いほど年間を通した環境温度変化が小さく、 浅いほど環境温度変化が大きいことを利用すれば、位置的にも時間的にも温度差が生じる 状態下での試験が可能と考えらえる。

そこで、本試験では、光ファイバセンサーを坑道に沿って設置して、実規模施設から地 表までの全長における網羅的な温度状況をモニタリングする手法を検討する。

既存の実規模施設付近から、坑道を通じて坑口まで敷設する温度分布計測用光ファイバ センサーの設置イメージを図 2.2・44、図 2.2・45 に示す。定期的な温度分布計測に加えて、 安全管理上支障のない場所において、局所的な温度変化を与え、その前後における温度分 布計測結果をもとに熱源位置を特定することを試みる。



図 2.2-44 温度計測のための光ファイバセンサーの配置



図 2.2-45 光ファイバセンサーの配置イメージ

2) 増築して活用する場合

既存施設を用いた機能確認試験において、埋設から保全段階の実処分施設と同等の環境を 模擬する場合、水理場の制御が不可欠である。そこで、図 2.2-46 に示すように、既存施設に 連続する施設を増築し、その増築部分に水理場を制御する機能を付与することも可能である。 また、図 2.2-47 に示すように、増築する際に周辺岩盤にセンサーを設置して、周辺岩盤が緩 んだ状態から施設の建設〜埋設〜保全段階に至る過程で掘削前の状態に戻る状況もモニタリ ング可能である。天然バリアの機能が、保全段階で向上することが確認できれば、実際の処 分事業におけるモニタリングにおいても、天然バリアに関しては埋設段階までのモニタリン グで十分であることを示すことができる。

なお、地下水場を制御する方法としては、側部埋戻し材と底部のインバート部に比較的ポ ーラスなパネルを設置し、そのポーラスコンクリートパネルから低透水層に給水する方法が 考えられる。このような給水方法は、実処分施設への浸潤状況と比較すると促進試験に位置 付けられるため、実際の処分施設の評価に適用する場合には促進試験の影響を考慮する必要 がある。

この方法の長所は、

- ・ 地下水の供給が不要
- 局所的な機能の変化を直接計測可能
- ・ スケール効果の考慮不要
- ・ 短所実施設の構成と概ねモル比が合致
- 気温や湿度が実処分施設と類似

が挙げられる。一方で、短所としては、

・ 高コスト

が挙げられる。主な計測項目としては、

- 土圧
- · 変形量
- · 密度分布
- ・ ひび割れ間隔
- · 飽和度(新規機器)
- · 膨潤圧(新規機器)
- 沈下(新規機器)
- ・ ひび割れ幅・位置(新規機器)
- ・ Ca/Na イオン濃度(新規機器)
- pH(新規機器)

などである。さらに周辺岩盤の性能が保全段階から向上することを確認する目的で、

- ・ ロックボルトの張力(新規機器)
- · 湧水量(新規機器)

なども挙げられる。



図 2.2-46 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



図 2.2-47 既存施設に増築する際の周辺岩盤の性能評価イメージ

a. センサーによる機能の代替パラメータの計測の課題解決に対する活用

既存施設をそのまま活用する場合の検討内容に加え、増築する部分に無線伝送装置を埋め込むことで、計測値の無線伝送・無線給電の検討にも活用できる。さらに、給水期間中の施設性能の経時変化を取得し、水理や化学的な影響を考慮して、埋設段階から保全段階で機能変動が激しい時期を調べることも可能である。

b. サンプリングによる機能の直接計測の課題解決に対する活用

既存施設をそのまま活用する場合の検討内容に加え、小規模サンプリング施設の結果と 比較することで、実処分施設と異なる規模のサンプリング施設における地下水浸潤状況の 差異の評価や実処分施設と異なるサンプリング施設における材料構成割合の差異の評価 にも活用できる。 c. 機能に影響を及ぼす事象の計測の課題解決に対する活用

水理場を制御することで、埋設段階から保全段階に至る過程で実処分施設に発生する事 象を模擬することが可能である。この際に事象が発生していることを示す特異的な情報の 取得や、幾つかの情報による絞り込みで事象の発生の有無が判断できるフローの適用性の 確認を行うことができる。また、特異な情報として、施設の機能に影響を与えないトレー サーを増築部分に埋設し、そのトレーサーによって事象の発生の有無を確認することも可 能である。

さらに、影響事象の発生の有無だけでなく、発生の程度や性能への影響の大きさなどの 推定の検討についても活用できる。

d. 光ファイバセンサーを活用したひび割れ計測に係る試験計画

1) d. で策定した既存の実規模施設をそのまま活用した試験計画を拡張した試験として、 図 2.2・48 に示すように、上部埋戻し材、上部・側部低透水層を一旦撤去し、露出させた 側部・上部低拡散層表面に光ファイバセンサーを格子状に設置する。その後、側部低拡散 層(左側)と上部低拡散層において、1) d. と同様にひび割れ計測試験を実施する。ひび 割れ計測試験後は、側部低拡散層(左側)においては、ひび割れ幅の計測を継続すること を目的として、低拡散層が露出した状態を維持する。上部及び側部(右側)においては、 光ファイバセンサー設置後に低透水層の施工を行った場合に光ファイバセンサーに与え る影響を確認することを目的として、低透水層を再度施工する。その際、施工性能確証試 験と同様に、転圧工法、吹付工法の両方を実施する。



図 2.2-48 上部埋戻し材、上部・側部低透水層を撤去する試験計画のイメージ



図 2.2-49 側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)



図 2.2-50 側部低拡散層(右側)の光ファイバセンサー設置位置案(側面図)



図 2.2-51 上部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置案(平面図)

3) 水理制御機能を付与する場合

前述の増設案では、水理場制御機能を付与した新たな施設を増設することを計画している ため、様々な検討に活用できる一方で、コストが高いことが懸念される。そこで、既存の施 設に水理場制御機能のみを追加することも考えられる。

既存の施設に水理場制御機能のみを追加する方法としては、埋戻し材と低透水層の間にボ ーリング孔を設置し、パッカーを用いて加圧給水することが考えられる(図 2.2-52)。また、 既存施設の模擬廃棄体と充填材を撤去して、ピットの内側からボーリングを行い加圧給水す る方法も考えられる(図 2.2-53)。



図 2.2-52 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)



図 2.2-53 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)

この場合の長所としては、前述の水理場制御機能を付与した新たな施設を増設する場合と同様に、

地下水の供給が不要

- 局所的な機能の変化を直接計測可能
- ・ スケール効果の考慮不要
- ・ 短所実施設の構成と概ねモル比が合致
- 気温や湿度が実処分施設と類似

が挙げられる。さらに、コストも既存施設をそのまま利用した場合と同程度である。また、 ピットの内側からボーリングを行う場合は、

- 鉄筋腐食の促進試験
- ・ セメント浸出液を低透水層に作用させること

なども実施可能となる。

一方、短所としては、

- ・ 水理条件の制御が難しい
- ・ 既存計器で計測できる項目が限られているため、一部解体する必要がある
- ・ 周辺岩盤の機能を計測できない

などが挙げられる。主な計測項目としては、

- 土圧
- 変形量
- · 密度分布
- ・ ひび割れ間隔
- · 飽和度(新規機器)
- · 膨潤圧(新規機器)
- · 沈下(新規機器)
- ・ ひび割れ幅・位置(新規機器)
- ・ Ca/Na イオン濃度(新規機器)
- ・ pH (新規機器)

などである。

a. センサーによる機能の代替パラメータの計測の課題解決に対する活用

前述の水理場制御機能を付与した新たな施設を増設する場合と同様である。ただし、コ ンクリートピットの内側からボーリングを行う場合は、セメント系材料に関わるセンサー を用いた検討が容易である(図 2.2-54)。例えば、鉄筋に通電、若しくは Cl-を含むよう な水溶液を作用させて鉄筋腐食促進試験を実施した場合のセンサーで計測できる物理量 の経時変化の取得や、ひび割れ進展に関する計測値と目視観察との整合性、腐食によるセ メント浸出液の組成変化なども取得が可能となる。



図 2.2-54 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)

b. サンプリングによる機能、機能確認ポイントの直接計測の課題解決に対する活用 前述の水理場制御機能を付与した新たな施設を増設する場合と同様である。ただし、コ ンクリートピットの内側からボーリングを行う場合は、セメント系材料を容易に解体でき るため、セメント系材料の施工による性能のばらつきや鉄筋腐食にともなうひび割れによ る性能変化を直接計測できる(図 2.2-54)。

c. 機能に影響を及ぼす事象の計測の課題解決に対する活用

前述の水理場制御機能を付与した新たな施設を増設する場合と同様である。ただし、コ ンクリートピットの内側からボーリングを行う場合は、鉄筋に通電、若しくは Cl-を含む ような水溶液を作用させて鉄筋腐食促進に伴い発生する副次的な事象や特異的な情報を 収集できる。さらに、ひび割れの進展に伴って発生する貫通ひび割れが発生した場合にセ メント浸出液が低透水層に作用した場合に発生する事象なども取得できる。

既存施設の左右で低拡散層が露出している妻側に向かって左側の側部低透水層エリア を低拡散層とピットの検討に活用し、右側を低透水層の検討に活用する(図 2.2-55)ということも可能である。



図 2.2-55 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)
(3) 新規施設を活用した試験計画の立案

既存の実規模施設は実際の処分環境に近い地下の実規模施設であったため、センサーによ る機能の代替パラメータの計測施設としては適切であるが、サンプリング施設としては大き く、影響事象を計測するためには水理場制御ができないものであった。そのため、ここでは、 各機能確認方法の課題を解決しつつ、実際のモニタリング施設としても実施可能な様々な規 模のモニタリング施設の検討を行う。検討に当たっては、

- ・ 地上サンプリング施設
- ・ 地下サンプリング施設
- · 地下模擬施設

について検討を行う。なお、近傍ボーリング孔など採水施設については、地上施設、若しく は地下模擬施設での採水で検討可能であるため、本検討の新規機能確認試験施設としては検 討の対象から除外した。

1) 地上サンプリング施設

地上サンプリング施設は、管理された理想的な系でのモニタリングが可能な点である。た だし、埋設・保全期間に亘ってモニタリングすることを考えると、モニタリングできる機能 は、その経時変化が室内で再現可能な特定の地下環境のみに依存する場合に限られる。例え ば、原位置の地下水組成のみに依存する機能であれば、現地地下水を供給し続けることは比 較的容易であるが、原位置付近の地圧に依存する機能の場合、2~3MPa 程度の圧力を例えば 400 年間に亘って作用させ続けることは容易ではない。室内で再現する原位置環境によって モニタリングのコストが変動する。さらに、室内でのモニタリングの長所は、機能を直接計 測することが可能な点である。このため、機能を直接的に評価可能である。

ただし、室内でのモニタリングでは、実施設と材料構成割合を同等にすることが難しいな ど、得られた施設の機能が必ずしも原位置環境と同等であるとは限らないため、原位置環境 をどのように模擬するかだけでなく、原位置環境の違いを解釈し、得られた結果を補正する というやり方を示す必要がある。例えば、原位置環境よりも室内でのモニタリング環境が、 少なくとも保守側の設定であること示すということなどが考えられる。また、計測される機 能も供試体の平均的な機能であり、局所的な不均一さなどの評価には工夫が必要である。

a. 実施例1

図 2.2-56 に地上施設内での機能確認試験のイメージを示す。サンプリングする供試体 寸法は要素試験レベルである。予備検討や既存施設による機能確認試験との比較を行うこ とで、計測したい機能に応じたサンプリング施設や供試体の適切な大きさ、実処分施設と 異なるサンプリング施設における材料構成割合の差異の評価、実処分施設と異なる規模の サンプリング施設における地下水浸潤状況の差異の評価が可能となれば、供試体寸法は要 素試験レベルであっても機能確認可能であると考えた。

低拡散層やコンクリートと鉄筋で作られたコンクリートピットの供試体を配置し、周囲 をベントナイトで充填し、地下水が低拡散層からコンクリートピット側へ流れるようにし ている。供試体は前面から順番に採取できるようにすることで、1つの試験系で時間経過 をパラメータにできるように工夫している。供試体がベントナイトと接している比表面積 が実際の低拡散層よりも大きいため、溶出に対しては保守側の設定と言える。コンクリー トピットに対しては、拘束条件が実際と異なるが、鉄筋がベントナイトと直接接するよう に供試体を作製し、腐食によってコンクリートにひび割れが発生するように工夫している。 この際、地下水が大気と接しないように工夫するなど、還元環境とすることが重要と考え られる。

また、排水を採水し分析することで近傍ボーリング孔など採水施設による影響事象の有 無の推定に関する検討も実施可能である。



図 2.2-56 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

コンクリートピット、低拡散層の供試体は、いずれも φ10×20cm の円柱供試体とし、 コンクリートピットの供試体には、D6 鉄筋を供試体中心に配置する。セメント系材料の 供試体周辺に配置するベントナイトの厚さを 10cm とする。通水する地下水は、実処分施 設周辺の地下水を採取して使用すること、実処分施設周辺の地下水組成を調査した上で人 エバリア部材の機能変化を促進する組成に調整した模擬地下水を使用すること等が考え られる。

供試体は、時間経過に合わせて準備解体・採取して試験を実施するが、1回当たりのコンクリートピット及び低拡散層供試体の採取数を5体とすれば、図2.2-56に示した浸漬 槽の場合、24回の採取が可能であり、この場合、浸漬槽の寸法は、内側寸法で幅2.5m× 奥行1.1m×高さ1.3m程度となる。

本試験における計測項目案を表 2.2-3 に示す。計測項目は、人工バリア部材の化学的 変質を把握するためのものとし、それに伴う浸出水の水質変化を計測することが考えられ る。

	計測・分析対象	計測項目	備考
浸出試験	浸出水	間隙水の水質・組成	pH、イオン濃度等
解体調查	低透水層	飽和度(密度·間隙率)	
		強度	
		透水係数	
		Ca 化、二次鉱物生成	
	セメント系材料	強度、空隙率	
		ひび割れ状況	
		水和の程度	
		変質深さ	
		Ca 溶出、二次鉱物	
	鉄筋	腐食・劣化状況	

表 2.2-3 計測項目案(地上サンプリング施設の実施例 1)

本試験計画は、実処分施設内の地上施設や、実処分施設と別の場所に設けられる試験施 設内で実施することを想定しており、地下模擬処分施設を新規設置する試験や既存の実規 模施設を一部改造して水理場制御機能を付与する試験計画と比較すると試験費用は低く 抑えることが可能となる。ただし、地上での試験では、実処分施設の環境を全て再現する ことが困難である点に留意する必要がある。

b. 実施例 2

実施例 1 と同様に、比較的長期にわたる人工バリア(実施例1のバリア材単体系に対して、ここでは複合系とする)の機能変化を評価するためのモニタリング及び試験体のサンプリング調査を目的とした、地上(室内)の浸漬槽を用いた機能確認試験の実施例を図 2.2-56 に示す。

供試体として、人工バリアシステム(RC ピット、低透水層、低拡散層)を模擬した小型複合供試体を用いることにより、バリア構成要素の長期的な相互影響について評価を目指す。各供試体をブロック形状のユニット式で構築することで、順次サンプリング・分析が可能な試験構成とすることにより、経時的な状態変化を直接評価することができる。また、実施例1と同様に、地下水の注水に伴う施設からの浸出液についても採水・分析が可能であるが、地下水の取扱い環境等についての留意点についても実施例1と同様である。

試験設備や供試体の構成、地下水条件等は試験目的に応じて設定可能であり、例えば、 注水系統を複数配置することにより、地下水条件を系統ごとに変更することが可能になり、 試験の促進や、地下水組成を変化させる等、比較試験を実施することもできる。



(試験施設のイメージ)

図 2.2-57 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(複合バリアシステムの長期 浸漬試験)

人工バリア構成を模擬した複合供試体は要素レベルであり、実際の取り扱いを考慮して実施設の 1/20 程度のスケールを計画する。全体の物量の構成比は再現することは難しいが、低透水層 (ベントナイト)厚さを 5cm、中心に鉄筋棒を配置したセメント系材料 (円筒形)は、低拡散層の厚さと RC ピット部の被りを考慮して Φ 6cm (2 x 3cm \Rightarrow (60+5)/20)で計画する。 供試体は土槽の各区画の大きさに合わせて、低透水層の外側を、例えばセメント系材料等を 用いてブロック状に成型する。低透水層の外側の部材は供試体の飽和を妨げないような透過 性の材料を適用し、透過特性は、例えば岩盤相当に設定する等、実施設の環境を可能な限り 反映することとする。上記を踏まえた供試体の諸元を図 2.23に示す。

試験土槽は、模擬地下水の注水系統、試験工程、及び解体頻度によって柔軟に構成可能で あるが、注水系統を3系統、各回2供試体×5回の解体を想定して計30体の供試体を設置可 能な規模を設定する。土槽は上部に蓋を配置して密閉し、内部は解体対象の供試体毎に区画 で仕切も設けそれぞれ独立して注水可能な構造とする。



模擬地下水はタンク等に貯水した上で、注水管より供試体を横にした状態で下部より注水 する。この際、原位置の動水勾配を考慮したタンク位置の設定を基本とするが、必要な場合 には施設深度を考慮した水圧を作用させる装置とすることも可能である。模擬地下水を3種 類用い、1回の解体調査で2供試体を解体し、試験全体で5回の解体調査を計画した場合、 複合供試体の必要数は30体となる。このような条件に対する試験土槽の規模は、図2.2-59 に示すように、幅(W):2.2m×長さ:(L)3.0m×高さ:(H)0.6m程度となる。



試験の実施に際して、試験初期段階における浸出水の成分の想定や、供試体の飽和挙動の 確認等を目的として、予備確認試験を実施する。予備確認試験を通じて、試験開始初期の段 階で得られる初期のモニタリングデータ、供試体の飽和の進展等に対する予察を実施し、必 要に応じて解析等と比較することにより、時間経過に伴う試験供試体の状態変遷を評価する 上での基礎データを整備しておく。

予備確認試験で注水試験に用いる模擬地下水としては、例えば、原位置で採取した地下水、 原位置採取地下水の分析を踏まえて化学的劣化の促進を考慮した地下水、施設の機能に影響 を及ぼす因子を保守側に変動させた地下水、等を設定する。

試験土槽の個別の区画に供試体を設置し、原位置での動水勾配等を考慮した上で、模擬地 下水の注入を開始する。浸出液の定期的なモニタリングを実施しつつ模擬地下水の注入を継 続する。供試体が飽和に至った後、経過時間と対応する施設の状態変遷より判断して、計測・ 分析可能な人工バリアの状態変化が見込まれるタイミングで、供試体を土槽より取り出して 解体し、人工バリアの各構成要素の状態について評価を行う。この際、注入する地下水組成 の相違による変化の程度についても考察を行う。以降は、定期的に解体・調査を繰り返し、 人工バリア機能の経時的な変化について評価を実施する。

本試験における計測項目案を、重要な現象との対応を基に表 2.2-4 に示す。

安全機能	関連部位	安全レビュー 項目	影響を及ぼす重要現象	モニタリング対象項目	モニタン! 地上 長期 ポーリン 浸漬	Jング 地下 原位置 EBS
			飽和の進展	飽和度,水圧,温度		0
			変形,流出・膨出	変形量,水圧,ガス圧,全応力,飽和度,温度		0
任添水性	ベントナイト系	透水係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度),固相成分,温度	0	
回返水江	(緩衝材)		ガス移行・破過	ガス圧,水圧,全応力,飽和度,温度,変形量		0
			(その他共通)	透水係数,密度	0	0
		厚さ	変形,流出・膨出	変形量,水圧,ガス圧,全応力,飽和度,温度		0
		実行拡散係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度	0	
低扩散性	カメント系	ひび割れ	化学的劣化の進展	8化の進展 間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度		
1201/ARX III	回知設住 ビスクト来	開口面積	鉄筋等の腐食膨張等による変形	変形	0	
		厚さ				
	ベントナイト系	収着分配係数	化学的劣化の進展	 間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度	0	
収差社	(緩餌材)	体積			0	
收自江	セメント系	収着分配係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度	0	
	(吹付け文保工)	体積			0	
	支保工		腐食膨張	腐食速度,腐食膨張量	0	
	(鋼製支保工)		嫌気性腐食ガス発生	ガス発生速度	0	
			支保の劣化	変形・ひすみ、ひび割れ、間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分	0	0
二次的因子			空洞の変形	空洞内空変位		0
	EDZ,支保,空洞		再飽和の進展	地圧,水圧,飽和度,間隙率,透水係数,間隙水の水質・組成 (pH,Eh,イオン濃度)		0
			EDZの進展	地圧,水圧,飽和度,間隙率,透水係数,間隙水の水質・組成 (pH,Eh,イオン濃度)		0

表 2.2-4 計測項目案(地上サンプリング施設の実施例 2)

実際の試験実施に際しては、現状で以下の課題が見込まれ、事前検討(詳細設計や予備試 験)を通じて解決を図る必要があると考える。

- ブロック供試体外周部の透水性材料の選定(周辺岩盤相当の透水性が望ましい)
- ・ ベントナイト膨潤圧に対する外周部構成部材の力学的安定性の確保
- ・ 供試体解体時の作業の独立性の確保(他の供試体への影響を最低限に抑える方策)
- 長期試験時における試験設備の維持・補修方法(機器の更新等)

2) 地下サンプリング施設

地下サンプリング施設は、地上の施設に比べ制御できる試験条件が限られる代わりに、地 下水の供給や地圧など、実処分施設と類似の環境で機能確認試験が実施可能である。また、 地上と地下でのサンプリング施設を比較することで、機能確認環境の差異が及ぼす影響を定 量評価できれば、地上サンプリング施設による機能確認に成果を反映できる。

地下サンプリング施設は、実規模に近い大きな規模で実施することにより、実施設と材料 構成割合が同程度になり、化学的な変質に伴う機能変動の説明性が高くなるが、機能確認に 掛かるコストが非常に高くなるため、定期的にサンプリングするということが難しくなる。 このため、地下サンプリング施設も、地上サンプリング施設と同様に、供試体寸法を要素試 験レベルとした。この場合、実施設と材料構成割合を同等にすることが難しいなど、得られ た施設の機能が必ずしも原位置環境と同等であるとは限らないが、予備検討や地上サンプリ ング施設、さらに既存施設による機能確認試験との比較を行うことで、計測したい機能に応 じたサンプリング施設や供試体の適切な大きさ、実処分施設と異なるサンプリング施設にお ける材料構成割合の差異の評価、実処分施設と異なる規模のサンプリング施設における地下 水浸潤状況の差異の評価が可能となれば、供試体寸法は要素試験レベルであっても機能確認 可能であると考えた。

図 2.2-60 には地下サンプリング施設での機能確認試験のイメージを示す。施設は、地下に ボーリング孔程度の大きさの竪穴を設置し、その中に低拡散層やコンクリートと鉄筋で作ら れたコンクリートピットの供試体を配置し、周囲をベントナイトで充填してある。このボー リング孔の上流側には地下水の流向流速を制御するためにパッカーを設置した加圧給水用の ボーリング孔を設置してある。これにより、地下水が低拡散層からコンクリートピット側へ 流れるようにしている。また、最下流側に採水用のボーリング孔を設置しており、排水を採 水し分析することで近傍ボーリング孔など採水施設による影響事象の有無の推定に関する検 討も実施可能である。

供試体は前面から順番に採取できるようにすることで、1 つの試験系で時間経過をパラメ ータにできるように工夫している。供試体がベントナイトと接している比表面積が実際の低 拡散層よりも大きいため、溶出に対しては保守側の設定と言える。コンクリートピットに対 しては、拘束条件が実際と異なるが、鉄筋がベントナイトと直接接するように供試体を作製 し、腐食によってコンクリートにひび割れが発生するように工夫している。この際、地下水 が大気と接しないように工夫するなど、還元環境とすることが重要と考えられる。



図 2.2-60 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

3) 地下模擬施設

地下模擬施設は、地上の施設に比べ制御できる試験条件が限られる代わりに、地下水の供 給や地圧など、実処分施設と類似の環境で機能確認試験が実施可能である。また、地下模擬 施設は、地下サンプリング施設よりも試験規模を大きさとする代わりに、サンプリングでは なくセンサーで機能確認を行う試験施設として構築する。構築に当たっては、予備試験での 検討結果を反映したセンサーの配置を行い、無線伝送や無線給電が実施可能なものとする。 計測間隔や頻度についても、予備試験での検討結果を反映した計測計画とする。

図 2.2-61 には地下模擬施設での機能確認試験のイメージを示す。施設は、プラグによって 保全段階の還元環境を模擬し、材料構成割合をなるべく実施設と同等にする。プラグの下端 から脱気地下水を給水し、プラグの上端から排水するものとして、この排水を採水し分析す ることで近傍ボーリング孔など採水施設による影響事象の有無の推定に関する検討も実施可 能である。



図 2.2-61 地下模擬施設でのセンサーによる機能確認試験のイメージ

施設構成要素の形状寸法は、原則として、全ての要素を実施設に対して同じスケールで縮 小する。縮小の目安として以下に示す要件を考慮する。

- ・ 過去の実験実績から、必要に応じて比較検討が可能であること。
- ・ 施工性が現実的であること。

過去の実績では地上実験施設内模擬検討(1/5)や、スイスのグリムゼル岩盤試験場での原 位置試験ガス移行試験での施工(約 1/2)の検討実績がある。また、施工性の面において、 幌延深地層研究施設での試験坑道寸法(幅、高さとも約 4m)で実施している実績から、実 施設での坑道規模(幅、高さとも約 16m)の約 1/4 と想定された。以上より、今回の検討で は 1/4 を縮小の目安とし、各構成要素の寸法を以下の通り設定した。

なお、処分坑道の端部にある建設用及び操業用アクセス坑道は処分坑道より小径の坑道が 計画されているが、ここでは処分坑道と同じ坑道径でモデル化した。また、実際には建設用 及び操業用アクセス坑道への水理プラグ設置は不要と考えられるが、施設全体(例えば周辺 坑道)では設置の必要性もあることを考慮して、本研究施設に導入することとする。

模擬施設の3次元イメージモデルを図 2.32に示す。

- ① 低透水層:直方体、458.25cm×303.25cm×303.25cm、厚さ25cm
- ② 低拡散層:直方体、408.25cm×253.25cm×253.25cm、厚さ15cm
- ③ コンクリートピット:直方体 378.25cm×223.25cm×223.25cm、厚さ 17.5m(底版 20cm)
- ④ 廃棄体容器:立方体、40cm×40cm×40cm、140 個
- ⑤ 廃棄体:立方体、寸法未定
- ⑥ 上部遮蔽コンクリート:長方形、343.25cm×185.75cm×185.75cm、厚さ25cm



図 2.2-62 地下模擬施設3次元モデルイメージ

施工方法は実施設同様のものを採用するが、スケール的に困難な場合は別の方法を適用す る。また、覆エコンクリートにより地下水の流入が阻害されて試験に支障が生じることを考 慮し、プラグ下端から脱気地下水を給水し、プラグの上端から排水する。この排水を採水し、 分析することで近傍ボーリング孔など採水施設による影響事象の有無の推定に関する検討も 可能となる。

本試験における計測項目案を表 2.2-5 に示す。

各種計測に使用する多数のケーブルが、人工バリアシステムの止水性に与える影響を小さ くするために、計測ケーブル類は一部を除き専用のボーリング孔を使用して、アクセス坑道 まで引き出す。その他、地下水採水のためのボーリング孔を試験坑道と並行に、孔間トモグ ラフィ用として試験坑道を挟むように平行に2本施工する。

原位置計測方法として、以下の項目を計画する。

- ・ 飽和度(TDR 等)、間隙水圧(間隙水圧計)、温度(熱電対)、地圧膨潤圧(土圧計)、 コンクリートの歪(歪計)、コンクリートの応力(応力計)、ひび割れ(AE センサー) などを対象バリアに設置、ケーブルをアクセス抗道まで引き出す。
- ・ 長期的に安定した計測結果を得るためには、光ファイバを用いた計測も提案できる。
- ・ 人工バリア中に採水管を設置して、地下水到達の確認と、長期的な採水を行う。

					モニタン	ノング
安全機能	関連部位	安全レビュー	影響をひげす重要現象	モニタリング対象頂日	<u>地上</u> 1	地下
×±1886			彩音で次は今主女がみ		長期 ボーリン	原位置
					浸漬 ジョルロ	EBS
			飽和の進展	飽和度,水圧,温度		0
			変形,流出・膨出	変形量,水圧,ガス圧,全応力,飽和度,温度		0
任本水社	ベントナイト系	透水係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度),固相成分,温度	0	
西亞小庄	(緩衝材)		ガス移行・破過	ガス圧,水圧,全応力,飽和度,温度,変形量		0
			(その他共通)	透水係数,密度	0	0
		厚さ	変形,流出・膨出	変形量,水圧,ガス圧,全応力,飽和度,温度		0
		実行拡散係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度	0	
107 4-5 495 445	1. () I T	ひび割れ	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分, 温度		
低払設性 セメント糸	セメント糸	メノト糸 開口面積	鉄筋等の腐食膨張等による変形	変形	0	
		厚さ				
	ベントナイト系	収着分配係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度)、 固相成分、 温度	0	
네 그 수수 사수	(緩衝材)	体積			0	
収省性	セメント系	収着分配係数	化学的劣化の進展	間隙水の水質・組成(pH. Fb. イオン濃度)。 固相成分、温度	0	
	(吹付け支保工)	体積	105 055510-522		0	
	支保工		腐食膨張	腐食速度,腐食膨張量	0	
	(鋼製支保工)		嫌気性腐食ガス発生	ガス発生速度	0	
			支保の劣化	変形・ひずみ、ひび割れ、間隙水の水質・組成(pH, Eh, イオン濃度), 固相成分	0	0
二次的因子			空洞の変形	空洞内空変位		0
	EDZ,支保,空洞		再飽和の進展	地圧,水圧,飽和度,間隙率,透水係数,間隙水の水質・組成 (pH,Eh,イオン濃度)		0
			EDZの進展	地圧,水圧,飽和度,間隙率,透水係数,間隙水の水質・組成 (pH,Eh,イオン濃度)		0

表 2.2-5 計測項目案(地下模擬施設)

本試験を実施するにあたって以下の課題を事前、あるいは事後に確認しておく必要がある。

- ・ 層内部への計測センサー設置が困難なため、飽和の進展を空間的に把握しにくく、構 成要素の応力変化や変形との関連を評価するのに工夫を要する。
- ・計測センサー及び施工に関する予備試験を予め実施する必要がある。
- 打継目の取り扱いに関して予め検討しておく必要がある。
- 今回設定した縮小寸法は、過去の実績や施工性などから仮に設定したものであり、実際に適切な縮小目安は予め検討して設定する必要がある。

類似環境下での人工バリアシステムモニタリングは実規模で行うのが望ましいが、今回の 計画では相似形に縮小された人工バリアシステム試験施設によりモニタリングすることを想 定する。本施設でモニタリングする現象、項目は表 2.2-5 に示す主なモニタリング欄に対応 するものである。

なお、縮小模型では、材料は本物で間隙や粒のサイズは縮小されず部材としてのサイズだ けが縮小されているので、現象の相似性が保たれている。したがって、相似率で換算できる 部分と、実際とは異なっている現象とがあり、規模を縮小することで相似則が不整合となる 現象があることに注意が必要である。また、部材の応力やひずみは実規模と異なるため、そ の再現に関する必要性や再現方法などを事前に詰めておく必要がある。

また、今回設定した縮小寸法は、過去の試験実績や坑道や計測の施工性、飽和進展並びに 膨潤圧発生に伴う他の構成要素との相互作用のモニタリングの実施可能性などからモニタリ ング施設の規模は実規模の 1/4 スケール程度とするのが合理的と考えて、仮に設定したもの である。したがって、上記課題にも記した通り、実際の縮小目安は予め要素試験、解析等に よる間接的な手法の併用から検討して適切に設定する必要がある。 実施過程として、以下のような流れが案として考えられる。

- ① 要素試験により得られたパラメータにより、実規模大による検証解析を実施する。
- ② その結果、想定内の挙動評価が得られているか否かで各パラメータ、特に部材内の応 カーひずみ関係における相似則との関係を把握する。
- ③ この解析的検討結果を用いて実規模試験における管理値を試験設計に反映させる。
- (4) まとめ

本項では、様々な観点から機能確認試験計画を検討したが、全ての試験計画を本事業で実施することは不可能である。そこで、実施工程や実現性等を考慮して、以下に示す試験計画 を実施することとした。

- (1) 1) b. (a) 埋設・保全段階の実施設で起こり得る事象の予察解析
- (1) 1) b. (b) 埋設・保全段階の実施設で低拡散層に起こり得るシナリオの予察解析
- (1) 1) c. センサーの耐久性評価、及び高性能・高耐久化検討
- (2) 1) d. 光ファイバセンサーを活用したひび割れ計測に係る試験計画
- (2)1)e. 光ファイバセンサーを活用した温度計測に係る試験計画

2.2 の参考文献

- 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] National Research Council: One Step at a Time: The Staged Development of Geologic Repositories for High-Level Radioactive Waste, National Academies Press, 2003.
- [4] MoDeRn: National Monitoring Contexts Country Annexes, 2010.12.
- [5] Andra: Propositions de l'Andra relatives à la réversibilité du projet Cigéo décembre 2012
- [6] MoDeRn: Monitoring in Geological Disposal of Radioactive Waste: Objectives, Strategies, Technologies and Public Involvement Proceedings of an International Conference and Workshop, Luxembourg, 19 – 21 March 2013.
- [7] IAEA: Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste, No. SSG-29, 2014.
- [8] 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
- [9] 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
- [10] Texas Administrative Code: Title 30 Environmental Quality, Part 1 Texas Commission On Environmental Quality, Chapter 336 Radioactive Substance Rules Subchapter H Licensing Requirements for Near-Surface Land Disposal of Low-Level Radioactive Waste, Rule §336.731 Environmental Monitoring
- [11] 社団法人 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、 2009年7月
- [12] 原子力安全委員会:余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方、平 成22年4月1日
- [13] 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
- [14] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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2分冊)-人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材、平成 27 年3月
- [15] 原子力安全基盤機構:平成 19 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)報告書
- [16] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 17 年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査「地下空洞型処分施設性能確証試験」報告書、平成 18 年 3 月
- [17] 日本原子力研究開発機構: TRU 廃棄物処分技術検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取 りまとめ-、JNC TY1400 2005-013、FEPC TRU-TR2-2005-02、2005 年
- [18] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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、平成27 年3月

- [19] 奥津ほか:小型化地中無線モニタリング装置の開発と緩衝材ブロックへの設置方法の検討、 日本原子力学会秋の大会予稿集(CD-ROM)、C46、2010年9月
- [20] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 25 年度 管理型処分技術調査 等事業(地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験)施工確認試験(上部緩衝材隅角部)成果報 告書、平成 26 年 3 月
- [21] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成24年度地層処分技術調査等事業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平成19年度~平成24年度の取りまとめ報告書、平成25年3月
- [22] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度 管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成 19 年度~平成 26 年度の取りまとめ報告書、 平成 27 年 3 月
- [23] 協立エンジ株式会社: KK シート工法カタログ

2.3 機能確認の実現性確認

本節では、「2.1 国内外の既往研究成果等の調査」、「2.2 機能確認試験計画の策定」における調査・検討結果も参考に、図 2.3-1 に示す検討フローで機能確認の実現性について検討した。



図 2.3-1 機能確認の実現性確認の検討フロー

2.3.1 モニタリング項目の抽出

本項では、中深度処分施設の機能確認におけるモニタリング項目の候補を抽出した。モニタリ ング項目を抽出する際には、安全評価における感度に主眼を置いた「安全評価の側面からのアプ ローチ」と中深度処分施設の各構成部材に要求される安全機能を起点とした「安全機能の側面か らのアプローチ」を試行した。

(1) 安全評価の側面からのアプローチ

1) 重要パラメータの抽出

「2.1.4 中深度処分を対象とした既往検討成果の調査」で調査・整理した結果を基に、安 全評価上の感度が高い主要なパラメータ、基本シナリオに対し変動シナリオで考慮されてい るパラメータを整理した。整理結果を表 2.3-1、表 2.3-2 に示す。

表 2.3-1 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、低拡散性及び低透水性における実効拡散 係数及び透水係数、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及び強度及びベントナイトの膨潤圧が抽出された。

一方で、表 2.3-2 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、すなわち、熱、水理、力学及 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、前述のように、土木学会[1]、原子力学会[2]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

基本安全機能	安全評価上重要	関連パラメータ	影響要因	状態変数等
	度の高いパラメ			
	ータ			
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	地下水組成	pH、Eh、塩濃度
		造 (空隙率)	コンクリート配	材料、空気量、水セメ
			合	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	鉱物組成	
		積	圧縮強度	水セメント比、弾性係
				数
			廃棄体の発熱	温度
			(熱応力)	
			鉄筋の腐食膨張	腐食速度、体積膨張
			廃棄体の腐食膨	量、腐食生成物剛性
			張	
			ベントナイト膨	膨潤圧
			潤	
			地下水組成	pH、Eh、塩濃度
			廃棄体中の影響	硫酸塩濃度
			物質	
			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 2.3-1 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

其太安全機能	安全評価に上ろ	関連パラメータ	影響更因	状能亦数笔
本中女工版記	反上 町 画による 威座の直いパラ		心自文四	机态交换号
	× ×			and a start of start.
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
			廃棄体の腐食膨	量、腐食生成物剛性
			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	地下水組成、セメント
			化	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	

表 2.3・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

2) モニタリング期間中での値の変化の可能性

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、「1)重要パラメータの抽出」で抽出した、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 2.3·3~表 2.3·5 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 低拡散層で覆われていること、低拡散層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、低拡散層は、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。

				実処分施設におり	ける変化の可能性
基本安全機能	状態変化	影響要因	重要 パラメータ	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	分配係数		
	低拡散性	溶脱	実効拡散係数	低い	高い
	透水性	塩影響	透水係数		
		大気影響	開口面積		
			腐食速度	高い	高い
低拡散性 透水性			腐食膨張倍率		
	ひび割れ	地下水	鋼材弹性係数		低い
		谷 加 塩影響	弾性係数	任い	青山
			強度	ΠLX V '	[日] (、
			膨張圧		低い

表 2.3-3 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(低拡散層)

				実処分施設におけ	る変化の可能性
基本安全機能	状態変化	影響要因	重要 パラメータ	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	分配係数		
	低拡散性	溶脱	実効拡散係数	低い	高い
	透水性	塩影響	透水係数		
		大気影響	開口面積		
			腐食速度	高い	高い
低拡散性 透水性			腐食膨張倍率		
	ひび割れ	地下水	鋼材弾性係数		低い
		谷 加 塩影響	弹性係数	任い	青山
			強度		、
			膨張圧		低い

表 2.3・4 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)

表 2.3-5 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)

				実処分施設における変化の可能性		
基本安全機能	状態変化	影響要因	重要 パラメータ	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) 主要パラメータや影響因子の計測可能性

表 2.3-3~表 2.3-5 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[3]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 2.3-2 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、低拡散層及びコンクリート ピットが構築される。次いで、側部のコンクリートピット及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は困難となる。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 2.3-6 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。



表 2.3-6 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		住	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	底部及び側部埋戻し材の 施工	_	_			_	_	_	_	_
2	底部透水層の施工	\bigcirc	—			-			—	—
3	底部低拡散層の施工		_	_	\bigcirc	_	_	_	—	—
4	底部コンクリートピット の施工	•	_	_	•	_	_	0	_	_
5		•	_	_	●	_	_	0	0	
6	側部低拡散層の施工				\bullet	0		0	0	_
7	廃棄体定置・区画内充て ん	•	_		●	0	_	•	•	
8	上部コンクリートピット の施工	•	_		●	0	_	•	•	0
9	上部低拡散層の施工		_		\bullet	0	0	\bullet		
10	上部・側部低透水層の施 工	•	0	0	•	•		•	•	•
11	空洞充てん材の施工						\bullet	•		
12	坑道埋戻し			ullet	ullet	ullet	lacksquare			

○: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 2.3-7~表 2.3-9 に示す。なお、計測手法の検討は、「2.3.4 モニタリング計画の具体化 に資する検討」にて詳述する。

基本安全機能	状態変化	影響要因	重要 パラメータ	実処分施設における計測項目 ※括弧内は計測方法の例
核種収着性	収着性	地下水	分配係数	
	拡散係数	Caイオン溶脱	拡散係数	
	透水係数	塩影響	透水係数	
		大気影響	開口面積	・ Caイオン濃度(水質調査)
/rf +++++/, ,//.			腐食速度	 pH(水質調査)
低拡散性			腐食膨張倍率	・ ひび割れ幅・位置(目視調査、光フ
低透水性	ひび割れ	地下水	鋼材弾性係数	ァイバーによるひずみ計測)
			弾性係数	
		塩彰響	強度	
			膨張圧	

表 2.3-7 重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(低拡散層)

表 2.3-8 重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(コンクリートピット)

基本 安全機能	状態変化	影響要因	重要 パラメータ	実処分施設における計測項目 ※括弧内は計測方法の例
核種収着性	収着性	地下水	分配係数	
	低拡散性、	Caイオン溶脱	拡散係数	
	透水性	塩影響	透水係数	
		大気影響	開口面積	・ Caイオン濃度(水質調査)
			腐食速度	・ pH (水質調査)
低拡散性			腐食膨張倍率	・ ひび割れ幅・位置(目視調査、光フ
透水性	ひび割れ	地下水	鋼材弾性係数	ァイバーによるひずみ計測)
		Ca イ A ノ 谷 尻 佐 髟 郷	弾性係数	
		塩彩著	強度	
			膨張圧	

表 2.3-9 重要パラメータに関する計測項目及び計測方法の例(低透水層)

基本	状態変化	影響要因	重要	実処分施設における計測項目
安全機能			パラメータ	※括弧内は計測方法の例
低透水性	低透水性	地下水	透水係数	· 飽和度(水質調査)
		Caイオン溶脱		・ 層別沈下 (レベル測定)
		塩影響		 Ca/Na イオン濃度、pH(水質調査)

4) モニタリング項目の絞り込み

以上の検討を踏まえ、実処分施設における機能確認を対象として、モニタリング項目の絞 り込みを行った。結果を表 2.3-10 に示す。

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ー計測
		(表面への貼り付け)
	周辺環境	地中無線によるセンサー計測
		(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

表 2.3-10 モニタリング対象及びモニタリング項目

(2) 安全機能の側面からのアプローチ

ここでは、まず中深度処分施設に要求される基本安全機能を整理した。そして、それらを 細分化し、中深度処分施設を構成する各部位に要求される技術要件と要求される段階、さら には技術要件を満たすための部材仕様や管理項目の関係を明確化した。その上で、モニタリ ングの対象期間である、建設段階、廃棄物の埋設段階、閉鎖措置段階、保全段階に着目し、 中深度処分施設に発生し得る事象を各部位の仕様・管理項目と関連付け、モニタリング項目 の候補を抽出した。

1) 中深度処分施設に要求される機能

従来、余裕深度処分と呼ばれていた処分概念を含め、中深度処分施設に求められる機能や 鋼製部材の技術要件に関して種々の検討が行われてきた[1][2][4]。これら既往の検討成果と 検討中の規制基準[5][6][7]を踏まえ、中深度処分施設に要求される基本安全機能とそれらが 要求される段階を整理した。

中深度処分施設に要求される基本安全機能は、以下の4つである。

- ・ 閉じ込め
- ・ 遮へい
- · 移行抑制
- · 離隔

これらに加えて、主に廃棄物の埋設段階までの力学的な安定性等に関わる「操業上の機能」が要求されるが、操業上の機能は基本安全機能に含まれない。

本検討で整理した中深度処分施設の基本安全機能と段階の関係を表 2.3-11 に示す。

段階 基本 安全機能	建設段階	廃棄物の 埋設段階	閉鎖措置 段階	保全段階	廃止措置 段階	規制期間 終了後
閉じ込め						
遮へい						
移行抑制						
離隔						
操業上の機能						

表 2.3-11 中深度処分施設の基本安全機能と段階の関係

ここで、表 2.3-11 には、「閉じ込め」を閉鎖措置段階から保全段階にかけて破線で示した。こ れは、「審査ガイドの骨子案」[6]の内容を反映したものである。すなわち、埋設の終了までの間 においては、「放射性物質を廃棄物埋設地内の限定された区域に閉じ込める」こと、閉鎖措置段 階から保全段階においては、「廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量が無視できるほど少な い」ように放射性物質の移行を抑制することによって、放射性物質の異常な漏えいを防止する機 能を担保するものと読み取れることから、この後半部分の「閉じ込め」を破線で示したものであ る。なお、中深度処分の規制基準は、現在検討が進められている途中段階にあり、今後の整備状 況を注視しながら検討を進めていく必要がある。

表 2.3・11 に示した基本安全機能のうち、移行抑制と離隔は、それぞれ 4 項目、2 項目に細分 化される。これらを含めた基本安全機能の内容を既往の検討成果[1]も反映した上で整理し、表 2.3・12 に示す。

要求機能		要求機能	段階	機能の内容			
基本安全機能	閉じ込め		建設段階 ~保全段階	放射性物質の廃棄物埋設地外の環境への有意な漏出を防止 ること			
	遮へい		建設段階~ 廃棄物の埋設段階	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	核種収着性		放射性核種を収着すること			
		低拡散性	閉鎖措置段階 以降	放射性核種の拡散による移行を抑制すること			
		低透水性		低透水性により、処分施設を通過する地下水流量の低減を行う こと			
		卓越した移行経路 形成の防止		連続した地下水移行経路を形成しないこと			
	離隔	離隔距離の確保	坦制期間效了後	離隔距離を確保すること			
		容易な人間侵入 の抑制	况 前两间称] 该	容易な侵入を防止すること			
操業上の機能 廃棄物の埋設的		建設段階~	確実な建設、操業が行われる空間、力学的安定性が確保され ること				
		* オエリ1波化	廃棄物の埋設段階	坑道の形状を維持すること			

表 2.3-12 中深度処分施設の基本安全機能の内容

2) 中深度処分施設を構成する各部位に要求される機能と技術要件

中深度処分施設は、人工バリアや天然バリア等の多重バリアシステムにより構成されてお り、中深度処分施設を構成する部位ごとに要求機能が設定される。ここでは、中深度処分施 設を構成する各部位に要求される機能を既往の検討成果[1][2][4]をもとに整理して表 2.3-13 に示す。なお、本検討では、既往の中深度処分に関する検討成果より、中深度処分が複数の 人工バリアを組み合わせたバリアシステムを採用しており、処分施設の安全性の確保は人工 バリアの長期性能に多くを期待していることから、主な機能確認の対象を人工バリアとして 検討を行っている。しかし、一部の要求機能は、人工バリア以外にも期待されているため、 表 2.3-13 に示すように、人工バリア以外の構成部位を含めて整理を行った。

/ 要	~ 求機	部位	区画内 充てん材	コンクリート ピット	低拡散層	低透水層	空洞内 充てん材 ^{※1}	埋戻し材 ^{※2}	処分空洞
	閉じ込め			•		•			
		遮へい	•	•	•				
基		核種収着性	•	•	•				
本安	移行	低拡散性			•				
全 機	抑 制	低透水性				•	•		
能		卓越した移行経路 形成の防止						•	
	離	離隔距離の確保							•
	隔	容易な人間侵入 の抑制						•	
操業上の機能				•	•	•			•

表 2.3-13 中深度処分施設の各構成部位に要求される機能

●:各部位に要求される主要な機能

※1: 処分空洞上部を充てんする土質系材料

※2: 処分空洞端部および連絡坑道等を埋め戻す土質系材料

表 2.3-13 に示した各部位に要求される機能を基に各部位の技術要件を整理した。技術要件の整理についても、既往の検討成果[1][2][4]を参考にした。各部位の技術要件の整理結果を表 2.3-14 に示す。

部位	要求機能	各部位の技術要件
区画内 充てん材	遮へい	埋設段階の廃棄体定置後に、上部コンクリートピットの構築のために、区画内充てん材上に建設作業員等が入ることが想定される。このため、区面対して遮へい機能を有することが求められることから、技術要件として、放射線の遮へいが挙げられる。 また、区画内充てん材の上部には、上部コンクリートピット、上部低拡散層、空洞充てん材が設置されるため、これらを支持する十分な強度が求め げられる。
	移行抑制 (核種収着性)	閉鎖後、放射性核種を収着することが求められるため、技術要件として核種収着性が挙げられる。また、核種収着特性を維持するための化学抵変な
	閉じ込め	作用する荷重、地震力に対してコンクリートピットが健全であることで内部にある廃棄体の閉じ込め機能を確保することが要求されることから、
コンクリート	遮へい	埋設段階においては、廃棄体を線源とする放射線に対して遮へい機能を有することが要求されることから、技術要件として放射線の遮へいが挙げ また、コンクリートピットには、作用する荷重、地震力に対してコンクリートピットが健全であることで遮へい機能を維持することが要求されるこ
ピット	移行抑制 (核種収着性)	閉鎖後、放射性核種を収着することが求められるため、技術要件として核種収着性が挙げられる。また、核種収着特性を維持するための化学抵変な
	操業上の機能	コンクリートピットには、廃棄体定置クレーンの支持構造物としての耐力が要求されることから、技術要件として力学特性が挙げられる。
低拡散層	遮へい	埋設段階においては、廃棄体を線源とする放射線に対して遮へい機能を有することが要求されることから、技術要件として放射線の遮へいが挙げ また、側部低拡散層には、コンクリートピットに付着して遮へい体として自立するための力学特性が技術要件として挙げられる。
	移行抑制 (核種収着性)	閉鎖後、放射性核種の拡散による移行を抑制することが求められるため、技術要件として拡散特性が挙げられる。また、拡散特性に影響を与えるき 性状及び化学的変質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。
	移行抑制 (低拡散性)	閉鎖後、放射性核種を収着することが求められるため、技術要件として核種収着性が挙げられる。また、核種収着特性を維持するための化学抵変な
	操業上の機能	底部低拡散層の上部には、廃棄体を収納する区画であるコンクリートピットが設置されるため、埋設段階においては、廃棄体、コンクリートピッ 技術要件として力学特性が挙げられる。
	閉じ込め	放射性核種の移行媒体となる地下水が廃棄体に浸入することを抑制することで、埋設地外への核種移行を防止することが求められる。地下水の浸 技術要件として透水特性が挙げられる。また、透水特性に影響する部材寸法を維持するための力学特性が技術要件として挙げられる。
低透水層	移行抑制 (低拡散性)	閉鎖後、放射性核種の拡散による移行を抑制することが求められるため、技術要件として拡散特性が挙げられる。また、拡散特性に影響を与える音 質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。
	移行抑制 (低透水性)	閉鎖後には、移行抑制機能を確保するため、人工バリア内部を通過する地下水流量の低減を図ることが求められる。地下水通過流量は、低透水層のして透水特性が挙げられる。また、低透水性を維持するために、地下水浸潤による膨潤圧、部材厚を確保するための力学特性及び化学的変質に対
	操業上の機能	底部低透水層には、コンクリートピットや廃棄体等の支持部材として十分な強度が求められることから、力学特性が技術要件として挙げられる。
空洞内 充てん材	移行抑制 (低透水性)	閉鎖後長期にわたり低透水層の膨潤変形を十分小さい水準に抑制することが求められることから、技術要件として力学特性が挙げられる。また、 質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。さらに、地下水短絡経路となり得る有害な空げき形成を抑制することが技術要件として挙げられる
埋戻し材	移行抑制 (卓越した移行経路 形成の防止)	埋設段階の建設機材搬入や廃棄体搬送、地下施設内の換気・排水等を目的に設置された坑道が、閉鎖後、天然バリア内に生物圏への連続した核種和 道掘削前の状態に近づけることを目的に施工される。そのため、技術要件として透水特性が挙げられる。また、透水特性を維持するための化学的変
		埋設段階に用いられた坑道が廃棄物埋設地近傍への侵入経路になることを防止するため、人が容易に侵入できないように長期的に安定した材料に、る。このため、技術要件として坑道の閉そく性が挙げられる。また、長期にわたり坑道閉そく性を維持するための化学的変質に対する抵抗性が技行
加八方河	離隔 (離隔距離の確保)	閉鎖後、地表面からの離隔距離を確保する離隔機能が求められるため、埋設設備の上端から地表面までの距離が技術要件となる。
処分空洞	操業上の機能	埋設段階に考慮すべき荷重条件に対して力学的安定性を確保し、処分空洞の形状を維持するために、力学特性、内空確保が技術要件として挙げられ により膨潤するため、湧水などに対する防水・排水性が技術要件として挙げられる。

表 2.3-14 中深度処分施設の各構成部位の技術要件

画内充てん材には、廃棄体を線源とする放射線に められることから、技術要件として力学特性が挙

質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。

技術要件として力学特性が挙げられる。

られる。

ことから、技術要件として力学特性が挙げられる。 質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。

られる。

部材の寸法を維持するための力学特性、ひび割れ

質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。

トを支持する十分な強度が求められることから、

入は低透水層の透水特性に支配されることから、

部材の寸法を維持するための力学特性、化学的変

の透水特性によって支配されるため、技術要件と する抵抗性が技術要件として挙げられる。

長期にわたり力学特性を維持するために化学的変 る。

移行経路を形成しないように、地下水流動場を坑 変質に対する抵抗性が技術要件として挙げられる。

より坑道の内部空間を閉塞することが求められ 術要件として挙げられる。

れる。また、ベントナイト系材料は、わずかな水

3) 中深度処分施設を構成する各部位の仕様・管理項目とモニタリング項目の関係

上述の各部位に要求される機能、技術要件と各部位の仕様や管理項目との関係を整理する ため、部位毎にツリーを作成した。表 2.3-11 に示すように、中深度処分施設に要求される機 能は、閉鎖措置前と閉鎖措置以降で大きく異なるため、各部位の機能、技術要件と仕様・管 理項目との関係は、閉鎖措置前と閉鎖措置以降で個別に整理した。また、作成したツリーに はモニタリング項目を併記することにより、モニタリング項目が変動した場合に、施設のど の機能に影響するのかが明確になるように整理した。

図 2.3·3~図 2.3·14 に機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係を整 理したツリーを示す。なお、図 2.3·3~図 2.3·14 には、モニタリング項目としない仕様・管 理項目に対してその要因を併記した。また、「2.3.4 モニタリング計画の具体化に資する検 討」において、既存の計測技術を活用したモニタリング計画、光ファイバセンサー技術を活 用したモニタリング計画をそれぞれ検討することを念頭に、図 2.3·3~図 2.3·14 のモニタリ ング項目は、想定される計測技術を明示した。



図 2.3・3 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低透水層、閉鎖措置段階前)

2 - 147



図 2.3・4 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低透水層、閉鎖措置段階以降)

当該部位に要求されていない機能 既存計測技術で計測可能と考えられるモニタリング項目 光ファイバーセンサで計測可能と考えられるモニタリング項目



図 2.3-5 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(低拡散層、閉鎖措置段階前)

2 - 149





図 2.3-7 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(コンクリートピット、閉鎖措置段階前)

い理由	
理で対応 59、初期状 6性が低い)	
理で対応	
理で対応 5り、初期状 8性が低い)	
理で対応	
理で対応 り、初期状 き性が低い)	
理で対応	
理で対応 5り、初期状 3性が低い)	

当該部位に要求されていない機能 既存計測技術で計測可能と考えられるモニタリング項目 光ファイバーセンサで計測可能と考えられるモニタリング項目



図 2.3-8 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(コンクリートピット、閉鎖措置段階以降)



図 2.3-9 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(区画内充てん材、閉鎖措置段階前)


図 2.3-10 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(区画内充てん材、閉鎖措置段階以降)



図 2.3-11 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(空洞内充てん材、閉鎖措置段階以降)



図 2.3-12 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(埋戻し材、閉鎖措置段階以降)



図 2.3-13 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(処分空洞、閉鎖措置段階前)

2 - 157



図 2.3-14 機能、技術要件、仕様・管理項目及びモニタリング項目の関係(処分空洞、閉鎖措置段階以降)

2 - 158

4) モニタリング項目の抽出

以上で整理した内容を踏まえ、中深度処分施設の建設段階以降に生じ得る事象を整理し図 2.3-15 に示す。図 2.3-15 には、中深度処分事業の段階毎に経過年を示しているが、「2.3.2 施設挙動の定量化」で実施する解析的検討で使用するために設定した暫定値である。

以上の検討結果と図 2.3-15 を踏まえて、「適用性・実現性の観点から、現実的にモニタリ ング候補となりうる事象」という着眼点も踏まえてモニタリング項目を抽出した。抽出した モニタリング項目の候補を表 2.3-15 に示す。

想定する計測技術	段階	モニタリング項目の候補		
		処分施設の変形(処分空洞の内空変位、底部低透		
	閉鎖措置 段階前	水層の上載荷重による沈下)		
実処分施設で		低拡散層のひび割れ		
適用可能な既存		裏面排水の水質		
計測技術		周辺地下水の水質(近傍ボーリング孔)		
	閉鎖措置	周辺地下水の水質(近傍ボーリング孔)		
	段階以降			
	閉鎖措置	低拡散層のひび割れ		
	段階前			
光ノアイハ	胆丛井思	低透水層の膨潤圧		
センサー技術	闭頭措直 段階以降	低拡散層のひび割れ		
		地下水浸潤状況(地下水浸潤に伴う温度変化)		

表 2.3-15 抽出したモニタリング項目の候補

既存の計測技術を活用する場合、処分坑道内に進入可能な閉鎖措置段階前には、種々の計 測が可能であるが、閉鎖措置段階以降は、処分空洞周囲の連絡坑道や主要坑道、地上からの アクセス坑道が埋め戻されており、実施可能な計測は周辺地下水の分析のみとなる。

一方、光ファイバセンサー技術を活用する場合、長期耐久性が期待でき、分布計測が可能 で、ケーブル量を最小化することで人工バリアの機能を極力損なわない特徴を生かし、閉鎖 措置段階以降にも処分空洞内での計測を継続することができる可能性がある。さらに、光フ ァイバセンサーは建設段階、廃棄物の埋設段階で設置することになるため、閉鎖措置段階前 後でシームレスな計測が可能となる点も優位点である。

既存の計測技術、光ファイバセンサー技術の両者で計測可能な項目は、両者を併用するこ とにより相互確認を行い、取得データの信頼性を高めることができると考えられる。

			段	階						建設段階			廃棄物の埋設段階		間	鎖措置段階	保全段階	▶ 廃止措置段階	規制期間終了後
	経過的	年 (解析	i上の	設定的	₽数∽	ィメー	・ジ)		0	1	5 • • • • • • • • • • • • • • • • • • •		20	30	50	60		330	350
主な作業							① 底部及び側部の埋戻し 材の施工	② 底部の低透水層,低拡散 層,ピットの施工	③ 側部のピット,低拡散層 の施工	④ 廃棄体定置,区画内充 てん	⑤ 上部ピット,低拡散層の 施工	6 上部・側部低透水層,空 洞充てん材の施工	連絡	⑦ ・アクセス坑道 埋戻し	8	⑨ 地上施設の解体,敷地理 整備	ş 10		
			概	急図の状態	5aa												040 0400 00 55500		之 新地
					移行	抑制	離隔						閉じ込め						
	基本安全機能 および要求時期	閉 じ 込	遮へ	核種	低拡	低	卓 容 路越 離 易 形し 確問のな	操業上					遮へい						
		8	61	収 着 性	散性	水性	成に「正田抑入 防移」保離制間 止行 の 侵	、 徴 】 能									和 [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]	5行抑制	離隔
														<u>発熱</u> (発熱による膨張)				
	廃棄体																	腐食	膨張
													Ţ	ひび割れ(閉鎖措置前:温	一度、乾燥山	Q縮等、閉鎖措置」	ノスモニング ノスモニング ノスモニング ノステニング ノステニング ノスティング ノング ノング ノング ノング ノング ノング ノング ノング ノング ノ	± 膨張)	- I
	区画内 充てん材		0	0														Ca 溶	
																		<u>±</u>	-
	コンクリート	0	0	0				0			て入てが実出			^{梁收}	「偏膨润圧、			Ca 溶出	
	EYF									<				→				鉄筋の腐食臓	《張
	低世世国												ひび割れ(閉鎖措置)	前:温度、乾燥収縮等、閉	日鎖措置以降	备: 偏膨潤圧)			
	恆仏舣唐		0		0			0		<	ひび割	れ観測		→				ベントナイトとの相	互作用
											重(躯体・廃棄体荷重、	操業荷重)による底部の	透水層の沈下(不同沈	下含む)			地下	下水湿潤による膨潤(偏臓	潤含む)
	低透水層	0				0		0		(建設・操	業中の湧水接触による)	膨潤・流出 ※隣接音 (底部)	B材からの水分吸収によ	る膨潤を含む					۲. ۲.
起																	地下水浸	2日空11による膨潤工作 潤による膨潤(偏膨潤含む)	
しり	空洞内充てんた	オ				0								建設・操業中の湧水接触による膨潤・流出	Ē			流出 Ca型化	
うる																沈下	による天端部の隙間	<u>影発生</u>	
事	埋戻し材	沽															地下水浸》	間による膨潤(偏膨潤含t 流出	3)
豕	道	J-9/U																Ca型化	
	防水シート	-							_			裏面排水の水質分析					防水シー	- ト 防水機能劣化⇒喪失	Ę
	۵.														-				
	20 一支保 分 空洞内充てん	动材					0	0		1	1	ひび割れ(閉	- 	Ca浴出 與収縮等、閉鎖措置以降:	鉄筋の腐食	膨張)			
	迎(セメント系	<u>ج</u>)								<		ひび割れ観測			→			鉄筋の腐食膨張	
	内空								<		内空変位			*					
											I	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	セメント系材料からのの	Ca溶出による地下水の高	pH化				
	周辺岩盤	0			C)	0					E		協クリープ (近傍ボーリング31)					
	/								<							はモナセン			
	竹带設備									-+»						残直される	刺影部材の腐良膨張	辰 (残直される輌製部材力) 	のる場合ノ

・基本安全機能のマトリクス表では、要求されるものに〇印を記載 ・赤字:保全段階までに発生する確率が高いと考えられる事象 青字:既存計測技術により実処分施設で実施可能なモニタリング <u>下線</u>:光ファイバーセンサによる計測を想定するモニタリング項目

図 2.3-15 中深度処分施設の廃止措置段階終了までに発生し得る挙動の整理(シナリオ整理表)

(3) モニタリング項目抽出のまとめ

以上の結果を踏まえ、抽出したモニタリング項目を表 2.3-16 に示す。なお、「(2) 安全機 能の側面からのアプローチ」で抽出したモニタリング項目は「(1) 安全評価の側面からのア プローチ」で抽出した項目を概ね包含しており、本事業では、機能確認の主な対象を人工バ リアとしていることから、表 2.3-16 に人工バリアに関連するモニタリング項目を整理した。

なお、「2.1.3 中深度処分における機能確認の目的と位置付け、モニタリングの制約条件の整理」で設定したモニタリングの制約条件「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」を考慮して、従来型の有線式センサーの設置は避けることを前提とし て表 2.3-16を整理した。

想定する計測技術	段階	モニタリング項目		
		処分施設の変形(処分空洞の内空変位、底部低透		
		水層の上載荷重による沈下)		
中的八七十二	閉鎖措置	施設内の温度変化		
実処分施設で	段階前	低拡散層のひび割れ		
週用り配な成任		裏面排水の水質		
計例 找		周辺地下水の水質(近傍ボーリング孔)		
	閉鎖措置	国辺地でもあた所(に広ぶールンドフ)		
	段階以降	周辺地下水の水質(近傍ホーリンクれ)		
	閉鎖措置	低位世界のななど知ら		
	段階前	低払取増のいい割れ		
光ファイバ		低透水層の膨潤圧		
センサー技術	閉鎖措置	低拡散層のひび割れ		
	段階以降	地下水浸潤状況		
		(地下水浸潤に伴う温度変化や圧力分布)		

表 2.3-16 抽出したモニタリング項目

2.3.1 の参考文献

- [1] 社団法人 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計,品質管理および検査の考え方、 2009年7月
- [2] 一般社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会標準 余裕深度処分施設の施設検査方法: 2010、AESJ-SC-F019:2010、2011年5月
- [3] 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
- [4] 社団法人 土木学会: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、2008 年 6 月
- [5] 原子力規制庁:第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案、廃炉等に伴う放射性廃棄物の 規制に関する検討チーム第27回会合、資料27-1、平成29年11月2日
- [6] 原子力規制庁:中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨子案、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第27回会合、資料27-2、 平成29年11月2日
- [7] 原子力規制庁:炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(改定案)、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第27回会合、参考資料27-2-2、平成29年11月2日

2.3.2 施設挙動の定量化

(1) 施設挙動の定量化方法

2.3.1 では、モニタリング項目を抽出するために、中深度処分事業の各段階で処分施設に起 こりうる事象を網羅的に抽出した「シナリオ整理表」を作成した。ただし、シナリオ整理表 で抽出した起こりうる事象は、その発生可能性や発生した場合の変化の程度を定量的に評価 するに至っていない。そのため、モニタリングの計測手法や計測位置、計測頻度等のモニタ リング計画を具体的に検討するに当たり、モニタリング項目になりうる事象を定量的に評価 する必要があると考えた。

本項では、表 2.3-17、表 2.3-18 に示す手法により、シナリオ整理表で抽出した起こりう る事象を定量化することを試みた。以降で、熱・水・力学に着目した解析的検討、化学に着 目した解析的検討、文献調査等による施設挙動の定量化について詳述する。

部位	事象	定量化方法
	彩埶	熱・水に着目した解析的検討(解析コード:
		TOUGH2) により定量化する
盛垂体	容器の腐食膨張	既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、
		腐食開始時期、腐食量、膨張量を同定する
	ガスの発生	既往検討成果、原子力学会標準等を調査し、影響
		の程度を整理する
	ひび割れ発生	既往検討成果から収縮量を推定
区画内	化学的変質(Ca 溶出)	化学に看目した解析的検討(解析コード:LIFE D.N.A.)により定量化する
充てん材	ガスの発生	既往検討成果、原子力学会標準等を調査し、影響
		の程度を整理する
	ていてい生ました マダ 牛	水・刀字に看日した解析的傾討(解析コート: CODE DDICUED みびこ次二母組み解托により字
		CODE_BRIGHI)及い二次几有組み胜例により足 量化する
コンクリート		単にする 化学に差目した解析的検討(解析コード・LIFE
ピット	化学的変質(Ca 溶出)	D.N.A.)により定量化する
		既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、
	鉄筋の腐食膨張	腐食開始時期、腐食量、膨張量を同定する
	ひび割れ発生	二次元骨組み解析により定量化する
低拡散層	化学的亦啠(C。	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE
	11于时发貝(Ua 俗山寺)	D.N.A.) により定量化する
	「「「「「「「「」」」」。「「」」。「「」」。「「」」。「」」。「」」。「」」	水・力学に着目した解析的検討(解析コード:
		CODE_BRIGHT) により定量化する
	建設・埋設段階の水接触	実規模施設の実績から、建設・埋設段階における
	による変状	膨潤・流出の発生可能性を評価する
低透水層	地下水浸潤による膨潤	水・力学に着目した解析的検討(解析コード:
		CODE_BRIGHT) により定量化する
	流出	既在検討成果を調査・整理し、発生可能性や影響
		の程度を整理する
	Ca 型化	化字に看目した解析的検討(解析コード:LIFE
		D.N.A.) により定量化する

表 2.3-17 定量化方法 (1/2)

本 (合	車免	定量化专注		
目的位	すべ すべ アン・サイト			
	建設・理設段階の水接触	水・刀字に有日しに解析的検討(解析ユート:		
	による変状	CODE_BRIGHT) により定量化する		
空洞内	波下にトイエ地がの定時	閉鎖技術確証試験で施工した埋戻し材の挙動計測		
充てん材	化下による入姉部の空隙	データから空隙発生の可能性、発生する空隙の大		
(土質系)		きさを同定する		
	地下水浸潤にトス膨潤	水・力学に着目した解析的検討(解析コード:		
	地下小役個による膨個	CODE_BRIGHT)により定量化する		
防水シート	たまい しの機能声化	熱・水に着目した解析的検討(解析コード:		
裏面排水	防水シートの機能喪失	TOUGH2)により定量化する		
	ていていました マダム	既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、		
应河市	いい割れ先生	影響の程度を整理する		
空间内	(V) 学的亦所(C- 溶山)	化学に着目した解析的検討(解析コード:LIFE		
元 しん村 (セルトズ)	11子的发頁(Ca 俗山)	D.N.A.) により定量化する		
(1)/1示)	斜弦の府会転進	既往検討成果、過年度検討成果を調査・整理し、		
		腐食開始時期、腐食量、膨張量を同定する		
加八峦泊	出船カリ プレトス亦形	試験空洞掘削実績等の既往文献を調査し、変位発		
処方空间	「右盛クリーノによる変形	生時期、変位量を同定する		
	地下水の高 pH 化	小学に美日」た敏振的投計(敏振っ」ド・LIFE		
周辺岩盤	地下水中イオン濃度の変			
	化	D.N.A./ により正重化する		

表 2.3-18 定量化方法 (2/2)

- (2) 熱・水・力学に着目した解析的検討(空洞横断方向)
 - 1) 施設挙動解析による想定しうる事象の整理
 - a. 検討概要

機能確認試験の詳細計画や機能確認試験設備の設計に資するため、既設の実規模施設で の挙動計測では得られない人工バリアの安全機能の変遷について確認することを目的と して、施設の時間的な変遷を踏まえたうえで対象となる事象の選定を行い、当該事象の実 施設における挙動を把握するための予察的な解析を実施した。予察的な解析では、処分坑 道の埋め戻し完了から管理期間終了までの比較的現実的な時間枠の中で、施設の機能確認 として、人工バリア等において着目すべき事象が生じる可能性に着目して解析結果につい て評価を行った。

- b. 検討対象となる事象の選定
- (a) 目的及び検討概要

埋設・保全段階における現実的な時間枠で見込まれる実施設の状態変遷(人工バリア構 成部材等の機能の変化)について機能確認試験において押さえておくべき事項を抽出し、 予察的な解析を実施することにより、具体的な機能確認試験計画の策定に反映することを 全体計画として進めている。

本検討では、これら成果に基づき、最も注視すべき事象を引き起こす要因を選定し、想 定される範囲内における異状なケース(以降、比較ケースと称する)とそれに対してシン プルな均質ケース(以降、参照ケースと称する)を設定して、実施設挙動のシミュレーシ ョン解析を実施した。本節では、最も注視すべき検討事象の選定結果を示し、挙動解析シ ナリオの構築を行った。

本プロジェクトの主幹となる機能確認試験計画の策定までの流れを図 2.3-16のフロー 図に示す。1)節では、機能に影響を及ぼす、着目すべき要因について検討・抽出作業を 行った。



(b) 施設の状態設定

埋設施設の閉鎖の判断やその後の長期の安全性の見通しを得るためには、操業(埋設及 び保全)段階で想定外の施設浸入水量の増加に繋がる兆候がないことの確認が重要である。 そこで本節では、人工バリアに着目して予察解析による挙動検討を行った。施設の状態 と事象を引き起こす要因を図 2.3-17 に整理して示す。検討対象は、操業開始(0年)か ら保全段階終了(300年~400年)までの期間とした。

	操業	廃止措置段階以降••••		
評価期間	埋設段階	保全段階	多重バリアによる 安全確保	天然バリアによる 安全確保
	70年		300~400年	▼数万年
	廃棄体定置 埋戻し	再冠水、飽和	化学変質等によるバリ ア機能の劣化	
施設状態				
	 ・低透水層,低拡散層,RCピット:自重、 廃棄体荷重等による応力、変形の発達 (設計応力状態) 	・空洞内充填材の飽和→ベントナイトの飽和 (膨潤圧の発生)→廃棄体内の飽和 ・膨潤圧の発達による応力、変形の発達(偏 膨潤の可能性)	 ・金属材料の腐食膨張による低拡散バリア等のひび割れ発生 ・金属材料の腐食によるガス発生・移行、ガス圧の蓄積 	
	・空洞裏面排水による湧水の管理	・再冠水に伴う設計性能の発現	・バリア材の化学的変質・ 劣化,力学的劣化	
膨潤圧・膨潤変形		飽和進展に伴う低透水層の膨潤変形	膨潤圧による人工バリア~	の力学影響
金属腐食			低拡散バリア等のひ	び割れ発生
地震活動		想定外の地震による影響		
断層・火山活動		※立地における除外事項		
人為事象		偶発的な行	〕 為	

図 2.3-17 人工バリアに着目した施設状態の設定イメージ

(c) 起因事象と影響の整理

地下施設の構造的安定性の早期低下を引き起こす主な要因(状態の変化)として、「金 属材料の腐食」「膨潤圧・膨潤変形」「断層、火山活動」「地震活動」「人為事象」を考えた。 これらの要因を基本に、操業期間中の数百年に着目し、その発生が科学的に最も合理的と 考えられる事象(施設侵入水量の想定外の増加)を引き起こす要因について検討した。

検討手法として Bow-tie ダイヤグラム手法を用いて、科学的に合理的な想定外事象を 引き起こす要因(FTA:<u>Fault Tree Analysis</u>)とその結末(ETA:<u>Event Tree Analysis</u>) を策定し、その後、主検討要因に対する FTA より、解析シナリオを選定し、その結果を ETA から最終状況を参照しながら評価した。「施設侵入水量の想定外の増加」を発生事象 とした Bow-tie ダイヤグラムを図 2.3-18 に示す。

これらの各要因について、過去の文献や調査結果を参照し吟味した結果、操業段階の埋 設施設の主要な状態変化は、再冠水に伴う低透水層の膨潤であると考え、「膨潤圧・膨潤 変形」を選定した。

以下、過去の文献や調査結果を参照、活用して各要因の取捨選択について検討した結果 を後述の(d) a) ~d) において示す。



図 2.3-18 Bow-tie ダイヤグラムによる起因事象と影響の整理[1]

- (d)検討対象となる事象を引き起こす要因の選定
- a)低透水層の膨潤変形及び金属材料の腐食

類似施設を対象として既往の検討事例での挙動解析による坑道閉鎖直後からの処分モ デルにおける各部材の飽和度経時変化を図 2.3-19 に示す[2]。

解析結果より、低透水層は 50 年程度でほぼ飽和状態に達するのに対し、RC ピットに ついては、鉄筋かぶり分が飽和するまで概ね 500 年はかかるものと推定される。これよ り、低透水層の膨潤を検討対象のシナリオ(変動ケース)として抽出することは有意であ ると考えた。一方、鉄筋の腐食やガス発生は保全期間において起きる可能性は低いものと 考えた。



図 2.3-19 挙動解析による処分モデルにおける各部材の飽和度経時変化[2]

b)活断層、火山の影響

余裕深度処分の候補地を選定する過程においては、詳細な地質環境調査を事前に実施す ることにより、立地段階で既に除外されていることを前提条件として要求されているため、 火山活動や断層活動等による放射性影響を評価するための具体的なシナリオを設定する 必要はない、とされている[3]。したがって、本検討においても、活断層、火山の影響は 検討の対象外とした。

候補地に対する地質調査フロー例と地質環境が施設に与える影響例を図 2.3-20に示す。



図 2.3-20 活断層及び火山の影響に関する検討[4]

c) 地震活動の影響

過去の別案件の検討[5]では、巨大地震(900Gal)が建設〜操業(埋戻し直後)段階の 地下空洞処分施設に与える影響を把握するための地震応答解析を実施し検討している(図 2.3-21参照)。その結果として、以下のように評価されている。

コンクリートピット及び低拡散層は、大きな地震動に対しても部材の耐力は十分である ことがわかった。

低透水層(図中、緩衝材と表記)は、一部で塑性化する領域が発生するものの、体積ひ ずみ増分(最大 0.019%)から換算される透水係数の増分は小さく(最大 0.131%)、巨大 地震が低透水層に与える影響は小さいことがわかった。

以上から、地震活動によって懸念される影響が「バリア性能の早期低下」に繋がる重要 な要因となる可能性は低いと判断した。



図 2.3-21 地震活動の影響に関する検討[5]

d) 人為事象

人為事象シナリオにおいて、原子力規制委員会による報告[3]では、その設定として「埋 設施設のバリア機能に影響を与える行為」を対象としており、「埋設施設(廃棄体と人工 バリア)及び埋設施設近傍の天然バリアに擾乱を与える行為(人間侵入)」とその結果生 じる影響の評価とされている。

以上を踏まえると、図 2.3-22 に示す通り、人為事象については「意図的な行為」と「偶 発的な行為」に分類され、報告書内における各行為に対するコメントから、いずれも今回 の検討対象には当たらないと考えた。



(e) 偏膨潤に関する検討

a) 偏膨潤に関する FTA 及び ETA の検討

以上の各要因に対する過去の事例を中心に行った取捨選択検討により、「膨潤圧・膨潤 変形」を、施設侵入水量の増加という発生事象を引き起こす主検討要因として選択した。 以下に示すように、その発生がもっとも科学的に合理的と考えられる事象を、解析シナ リオとして選定し(FTA)、その解析結果について評価を行った(ETA)。

[FTA]

FTA では、偏湿潤(地下水流入)、偏膨潤のシナリオを広く検討して検討対象のシナリオ(変動ケース)を抽出した。抽出方針を以下に列挙する。

- 抽出した偏膨潤シナリオは、「それをおさえておけばあとは大丈夫=それが起こっていないことモニタリングすれば大丈夫」というストーリーを選定する。
- 上記のやり方で、解析する変動ケース決めの説明性の高いストーリーを作る。

考えられる大項目と詳細項目を以下に列挙する。これらを整理し、まとめてツリー状に 表したものを図 2.3-23 に示す。

- A. 低透水層への局所的な、あるいは、不均質な地下水の浸潤
 a_支保及び側部埋戻し材の局所的あるいは偏在的ひび割れ
 b_上部埋戻し材の相対的な高透水性
 c_支保、上部・側部埋戻し材の施工時不均質性(水理学的)
 d_周辺岩盤の水理学的不均質性(亀裂、水圧、透水性)
- B. 低透水層の施工時不均質性

a_施工時施設確認で許容される密度のバラツキの範囲内で特異的な分布 b_許容外の密度分布

c_モンモリロナイト含有量の不均質性

- C. ベントナイトの流出による低透水層の不均質性 a ベントナイトの上部埋戻し材への流出
 - b ベントナイトの側部埋戻し材や底部インバートのひび割れへの流出
- D. その他、低透水層及び周辺構成要素の変状に起因する低透水層の不均質性

a_地震に起因する変形・破壊

b_支保や上部・側部埋戻し材の早期劣化(力学的・化学的)

c_想定外の岩盤地圧の発達

これらより適切なストーリーを組み立てた一例として、「上部埋戻し材の流出、上部ベ ントナイトのエロージョンあるいはパイピングにより体積減少影響(密度低下)が起き、 周囲の低拡散層等やその機能を間接的に支持する部位に偏応力(応力集中など)が発生し て、ひび割れや大きな変形が発生して機能低下が起こる(初期性能喪失)。」などが考えら れる。



図 2.3-23 偏膨潤に関する FTA

[ETA]

FTA により組み立てたシナリオについて解析した結果(起きた事象による結末)を、"最終状況"を参照して ETA にて評価する。整理した ETA を図 2.3-24 に示す。



図 2.3-24 偏膨潤に関する ETA

b) ベントナイトの膨潤に着目した挙動解析

以上の結果として得られた膨潤(偏膨潤)を影響因子として、予察解析を実施するもの とする。解析方法として、図 2.3-25 に示すように周辺岩盤から均質に水が侵入するケー ス(以降、参照ケースと称する)の結果から偏った膨潤圧が発生するようなクリティカル な状態を設定し(以降、比較ケースと称する)、解析することによってベントナイト層の 密度と厚みの評価、低透水層の応力及びひび割れを評価し、機能確認試験計画の策定へ反 映する。



図 2.3-25 解析ケース設定例

- 2) 再冠水プロセスにおける施設変遷に着目した解析的検討
- a. 目的及び検討概要

処分坑道の一部埋戻し完了から管理期間終了に至る比較的現実的な時間枠において、人 エバリアの挙動として着目すべき事象が生じる可能性やその確認方法の検討に資するた めに、施設の飽和の進展に伴う力学的応答を評価可能な予察解析を実施した。

本検討で実施した力学連成二相流解析では、1)にて検討した参照ケース及び比較ケースを設定し、当該期間における状態変化の定量的な把握の可能性について考察を行った。

b. 解析コードの選定

本検討ではカタルーニャ工科大で開発された CODE_BRIGHT を用いるものとする。

CODE_BRIGHT はカタルーニャ工科大学(スペイン)で開発された地盤・岩盤など 多孔質体の熱・水・応力・ガス連成解析コード(FEM、2~3 次元)で、表 2.3-19 に示 すように海外では放射性廃棄物地層処分における人工バリア、天然バリアの挙動評価に広 く使われている。国内では、原子力安全基盤機構が余裕深度処分施設の再冠水やガス移行 などの閉鎖後の挙動評価のための解析に適用している[6]。また、原環センターが TRU 廃 棄物処分におけるガス移行評価研究に用いている[7]。

CODE_BRIGHT は他の同類のコードと比較して以下の2点に特徴があり、これが広く 地層処分分野に適用されている理由でもある。

- 膨潤性粘土を含む不飽和土の弾塑性構成モデルが導入されている
- 液相のみならず気相(ガス移行)を扱う二相流と力学及び熱の連成解析コードである

上記 2 項目により、再冠水時のベントナイトの吸水(不飽和から飽和)に伴う膨潤変 形挙動が表現可能であり、閉鎖系施設の再冠水時に生じる残留する気相の影響を考慮する ことや、ガス移行時の力学連成挙動が表現可能である。このとき、熱対流や湿潤・乾燥に よる熱特性の変化も考慮される。図 2.3-26 に熱、力学(応力・変形)、二相流の相互影 響関係を示す。

略称	実施場所/国	対象	概要
FEBEX (Full- scale Engineered Barriers Experiment)	Grimsel/ スペイン	スペインのHLW処分概念の 実物大EBSモデル(100%セ ラタ)	周辺岩盤を含むベントナイトの THM連成挙動の評価
GMT (Gas	Grimsel/	サイロ型処分施設概念(20%	人エバリア、周辺岩盤の力学連
Migration Test)	日本	クニゲルV1)	成ガス移行挙動評価
TBT (Temperature Buffer Test)	Äspo∕ スウェーデン	スウェーデンHLW処分概念 の実物大EBSモデル(100% MX80)	周辺岩盤を含むベントナイトの THM連成挙動の評価
Backfill & Plug	Äspo∕	処分坑道の埋戻し、プラグ	ベントナイト混合埋戻し材の周辺
Test	スウェーデン	(30% MX80)	岩盤を含むHM連成挙動の評価
PRACLAY	Mol∕	ベルギー処分概念の実物大	周辺岩盤を含むベントナイトの
	ベルギー	モデル(100% FoCa clay)	THM連成挙動の評価
EB (Engineered Barrier test)	Mt Terri∕	スイスHLW処分概念の実物	ベントナイト飽和過程の周辺岩盤
	EU	大EBSモデル(100%セラタ)	を含むHM連成挙動評価
DST (Drift	Yucca Mountain	処分坑道、岩盤	処分坑道と岩盤のTHM連成挙
Scale Test)	/米国		動評価

表 2.3-19 CODE_BRIGHT の主な適用プロジェクト



c. 解析コード概要

(a) 概要

CODE_BRIGHT で用いられている支配方程式は応力方程式、マスバランス方程式そして多孔質内部の内部エネルギー方程式からなる。

応力方程式は多孔質体の運動方程式に単純化され、液相、固相及び気相の質量平衡は以 下のようになる。

マスバランスの平衡方程式は合成近似によって定式化されており、水相中の溶存空気や 気相中の遊離物質等の質量は真密度と質量比の積によって定義され、以下の3つの項の 合計として定義される。

- 非移流流束(例えば、拡散、分散)
- 移流による流束(例えば、ダルシー流束)
- 固相の変形によって生じる流束

方程式の作成は次のように仮定され、任意の相(固相、液相、気相)中の各成分(溶解 ガス、蒸気など)の質量は多孔質体を総じて平衡をとる。この方法で各成分の一つの方程 式が得られる。方程式の仮定は、分配関数が各相でそれぞれの成分の割合を計算する必要 があることを意味する。

(b) 不飽和多孔質体への適用方法

多孔質体は、図 2.3-27 に示すように固体粒子、水、ガスで構成されたものとし、以下の3つの相と3つの物質が考慮される。

<相>

- 固相:鉱物
- 液相:水+溶解したガス(例えば溶解空気)
- 気相:乾燥ガス(例えば空気)+水蒸気

<物質>

固体:鉱物

水:液体、あるいは気相内に蒸発した水蒸気

ガス(空気):乾燥ガス、気体、あるいは液相に溶解した状態



図 2.3-27 不飽和多孔質体の概念

上記の多相、多物質で構成される多孔質体のモデル化において、以下が仮定されている。

- ・乾燥ガスは単一の物質であり、気相の主成分である。また、溶解ガスは Henry の平 衡則に従う。
- 多相間では熱平衡状態を仮定しており、3つの相は同一点において同じ温度である。
- 水蒸気の濃度はサイクロメトリック則に従って液相と平衡する。
- ・状態変数(未知数)は固体変位、水圧、ガス圧、温度である。
- ・微小ひずみ、微小ひずみ速度が仮定されている。
- ・溶解ガス及び液相の運動量のつりあいはそれぞれ、Fick 則と Darcy 則で考慮される。
- ・構成則で用いる多くの物理パラメータは圧力と温度の関数である(例えば、水蒸気の濃度、表面張力、気体の粘性は温度に強く依存する)。

CODE_BRIGHTの支配方程式は以下に示すとおりであり、適用された構成則と平衡則 を満たすように解かれる。

- ・固体の質量保存
- ・水の質量保存
- ・ガスの質量保存
- ・運動量保存
- ・内部エネルギー保存

なお、適用される構成則、平衡則は次のとおり。

- ・Darcy 則:水・ガスの移流
- ・Fick 則:水蒸気、ガスの拡散
- Fourier 則:熱伝導
- ・水分特性:飽和度~サクション
- ・線形弾性あるいは弾塑性構成モデル:応力~ひずみ
- ・Henry 則:ガス溶解度
- ・サイクロメトリック則:水蒸気量

- (c) 支配方程式
- a)基本式

それぞれの偏微分方程式は未知数に関連付けられている。これらの未知数は連成法を用いて解く、例えば、考慮できる全ての連成過程を実行することも可能であり、反対に、任意の非連成問題の一つの未知数を解くことも可能である。

CODE_BRIGHT におけるバランス方程式を以下に示す。

b) 運動量保存則:未知数は変位 $(\boldsymbol{u} = (u_x, u_y, u_z))$ $divergence \begin{pmatrix} tensor & of \\ total & stress \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} vector & of \\ body & forces \end{pmatrix} = vector \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ $\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{b} = \boldsymbol{0}$ (2.3-1)

c) 水の質量保存則:未知数は水圧P_l (MPa)

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} mass & of & water & in \\ liquid & and & gas & phase \end{pmatrix} + divergence \begin{pmatrix} total & fluxes \\ of & water \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external & sup p \, ly \\ of & water \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^w S_l \varphi + \theta_g^w S_g \varphi) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^w + \mathbf{j}_g^w) = f^w \qquad (2.3-2)$$

式(2.3-2)に物質微分を適用すると式(2.3-3)になる。

$$\varphi \frac{D_{s}(\theta_{l}^{w}S_{l} + \theta_{g}^{w}S_{g})}{Dt} + (\theta_{l}^{w}S_{l} + \theta_{g}^{w}S_{g})\frac{D_{s}\varphi}{Dt} + \left((\theta_{l}^{w}S_{l} + \theta_{g}^{w}S_{g})\varphi\right)\nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot \left(j \left(j \left(l + \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2}\right) \left(l + \frac{1}{2}\right)\right) = f^{w}$$

$$(2.3-3)$$

d) ガスの質量保存則:未知数はガス圧 P_g (MPa) $\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} mass & of & water & in \\ liquid & and & gas & phase \end{pmatrix} + divergence \begin{pmatrix} total & fluxes \\ of & air \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external & sup p ly \\ of & air \end{pmatrix}$ $\frac{\partial}{\partial t} (\theta_l^a S_l \varphi + \theta_g^a S_g \varphi) + \nabla \cdot (j_l^a + j_g^a) = f^a$ (2.3-4) 式(2.3-4)に物質微分を適用すると式(2.3-5)になる。

$$\varphi \frac{D_s \left(\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g\right)}{Dt} + \left(\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g\right) \frac{D_s \varphi}{Dt} + \left(\left(\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g\right)\varphi\right) \nabla \cdot \frac{d\boldsymbol{u}}{dt} + \nabla \cdot \left(\boldsymbol{j}'_l \stackrel{a}{} + \boldsymbol{j}'_g \right) = f^a$$
(2.3-5)

e) 熱エネルギー保存則:未知数は温度T (°C)

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} int\ e\ rnal\ energy\ in\ solid, \\ liquid\ and\ gas\ phase \end{pmatrix} + divergence \begin{pmatrix} total\ fluxes \\ of\ energy \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external\ sup\ p\ ly \\ of\ heat \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1-\varphi) + E_l \rho_l S_l \varphi + E_g \rho_g S_g \varphi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}) = f^Q \qquad (2.3-6)$$

f) 固相の質量保存則:未知数は間隙率
$$\phi$$
 (%)

$$\frac{\partial}{\partial t}(mass \ of \ solid) + divergence \begin{pmatrix} total \ fluxes \\ of \ salt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} external \ sup \ p \ ly \\ of \ salt \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_s(1-\varphi)) + \nabla \cdot (\mathbf{j}_s) = 0 \qquad (2.3-7)$$

ここで、

$$\mathbf{j}_s = \rho_s (1 - \varphi) \mathbf{\dot{u}} \tag{2.3-8}$$

間隙率の変化式は式(2.3-9)のようになる。

$$\frac{D_s\varphi}{Dt} = \frac{1}{\theta_s} \left[(1-\varphi) \frac{D_s\theta_s}{Dt} \right] + (1-\varphi)\nabla \cdot \frac{d\boldsymbol{u}}{dt}$$
(2.3-9)

固相に関する物質微分を適用すると式(2.3-10)になる。

$$\frac{D_s(\bullet)}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{d\boldsymbol{u}}{dt} \cdot \nabla(\bullet)$$
(2.3-10)

式中の記号の説明は以下のとおりである。

- **σ**; 全応力テンソル
- **b** ; 物体力
- θ;相の単位体積あたりの質量含有率
- S_l ;液相飽和度
- φ ; 間隙率
- S_g;気相飽和度
- **j**;全質量流束
- *ρ* ;密度
- E ; 内部エネルギー
- *i*_c ; 熱伝導流束
- **j**_E ; エネルギー流束
- f^a 、 ;外部から供給される単位体積当たりの空気及び水 f^w
- f^Q;外部から供給される単位体積当たりのエネルギー
- *u*;固相の速度ベクトル

上付きのwとaは水と空気をそれぞれ示し、下付きのs、l及びgは固相、液相及び気相を それぞれ示す。 (d) 構成則

a) 概要

構成則は独立の変数とそれらに依存するものとの間に規定される。THM 問題の支配方 程式はバランス方程式内の未知の項に構成則として置換される。THM 問題のための構成 則の概略表現を以下に示す。なお、式中の記号は以下のとおりである。

- λ ;多孔質媒体の熱伝導率
- ;ある相(水あるいは空気)のダルシー流速 \boldsymbol{q}_{α}
- k :絶対透過係数テンソル
- μα、kra ;動粘性係数、ある相(水あるいは空気)の相対浸透率
 - P_{α} ; ある相における圧力
 - : 重力加速度ベクトル g
 - D^{β}_{α} ;ある相における媒体の分散テンソル
 - ;水相あるいは空気相中の水成分あるいは空気成分の質量 D_m^β
 - 拡散に一致する分散係数
 - **D**'_a ;機械的分散テンソル
 - ;屈曲度 τ
 - ω_{α}^{β} :ある相中のある成分の質量分率
 - ;応力及びひずみベクトル σ、ε
 - ;水圧ベクトル S
 - Т ;温度ベクトル
 - :Dマトリクス D
 - ;力学場の変化に伴う水圧テンソル f
 - ;力学場の変化に伴う温度テンソル t
- b) フーリエ則

$$i_c = -\lambda \nabla T \tag{2.3-11}$$

式(2.3-11)は多孔質媒体中を通過する熱伝導流束を表す。熱伝導率λは通常、間隙率と飽 和度に依存する。このパラメータの一般的な表現は三相(固相、流体、気体)の熱伝導率 の相乗平均に基づく。この関係を式(2.3-12)に示す。

$$\lambda = \lambda_s^{(1-\varphi)} \lambda_l^{\varphi Sl} \lambda_g^{\varphi(1-Sl)} \tag{2.3-12}$$

c) 一般化ダルシー則

$$\boldsymbol{q}_{\alpha} = -\frac{\boldsymbol{k}k_{r\alpha}}{\mu_{\alpha}}(\nabla P_{\alpha} - \rho_{\alpha}g) \tag{2.3-13}$$

式(2.3-13)は間隙中のある相の移流流束を表す。間隙中を通る液相の移流流束は古典的 な表現によって式(2.3-14)で表される。

$$j_{\alpha}^{\beta} \tag{2.3-14}$$

液相の相対浸透率は飽和度に依存し、その依存性は van Genuchten の式(2.3-15)、あ るいはべき乗則(式(2.3-16))によって表される。

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^{\lambda} \right]^2$$
(2.3-15)

$$k_{rl} = A \cdot S_e^{\lambda} \tag{2.3-16}$$

ここで、Aと λ は形状を表すためのパラメータであり、 S_e は有効飽和度を示し、式(2.3-17)で表す。

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}}$$
(2.3-17)

ここで、 S_l :液相の飽和率

Srl:液相の残留飽和度

Sls:液相の最大飽和度

飽和度の定義は水分特性曲線(相対浸透率曲線、毛細管圧力曲線)から定義され、場の サクションを算出して、縦軸のサクションに応じた横軸の飽和度が水分特性曲線から規定 される。なお、サクションはガス圧P_aと水圧P_lとの差(P_g - P_l)から定義される。

一方、気相の移流流束についても同様であり、上付きのwがaに変わり、下付きのlがgに 変化する。

d) フィックの法則

$$\mathbf{i}_{\alpha}^{\beta} = -\mathbf{D}_{\alpha}^{\beta} \nabla \omega_{\alpha}^{\beta} = -\left(\varphi \rho_{\alpha} S_{\alpha} \tau D_{m}^{\beta} \mathbf{I} + \rho_{\alpha} \mathbf{D}_{\alpha}^{\prime}\right) \nabla \omega_{\alpha}^{\beta}$$
(2.3-18)

気相中の水成分の非移流流束は式(2.3-18)に示すフィックの法則で表現され、右辺の第 一項が水蒸気の拡散に関する式で、第二項が機械的拡散の項と一致する。分散係数は気相 中の質量拡散に一致して、式(2.3-18)の β はwに置き換わり ($\beta = w$)、式(2.3-19)で表され る。

$$D_m^w = D \, \frac{(273.15 + T)^n}{P_g} \tag{2.3-19}$$

ここで、D及びnは材料定数であり、 P_g はガス圧、Tは温度を示す。なお、解析では質量 拡散が支配的であり、蒸気の機械的拡散は無視すると仮定されている。

なお、液相及び気相の全質量流束は移流項と拡散項の和から求められる。

$$j_{\alpha}^{\beta} = \left(i_{\alpha}^{\beta}\right)_{advection} \tag{2.3-20}$$

e)力学法則

$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \mathbf{f}\dot{\mathbf{s}} + \mathbf{t}\dot{\mathbf{T}} \tag{2.3-21}$

式(2.3·21)は、式(2.3·18)の左辺第一項に加わる応力速度を表す式であり、変形や外力が 引き起こす、ひずみ場の変化のみならず、右辺第二項の間隙圧力変化(水圧、ガス圧)や 右辺第三項の温度変化が及ぼす力学応答の変化も含めて表現している。なお、温度変化や 間隙圧力の変化は、体積ひずみの項のみに考慮され、偏差成分には考慮されない。固相の カ学変化については、弾性体あるいは弾塑性体として各々の構成モデルによって表現される。ベントナイト系材料については修正 Cam – Clay モデルを不飽和も考慮できるように 拡張し、膨潤性粘土も扱えるようにした Barcelona Basic (BB) モデルを適用している[8]。

f)相変換

相変化が生じる際の平衡制約は局所平衡を使用する。これらの平衡則はガス相中の水蒸気の濃度(サイクロメトリック則)と液相中の溶解ガス濃度(ヘンリー則)に与えられる。 サイクロメトリック則はサクションとガス相中(θ_g^w)の水分含有量に関連する式(2.3-22) によって表される。

$$\theta_{g}^{w} = \left(\theta_{g}^{w}\right)_{0} exp\left[\frac{-(P_{g} - P_{l})M_{w}}{R(273.15 + T)\rho_{w}}\right]$$
(2.3-22)

ここに、 $(\theta_g^w)_0$ は飽和状態におけるガス相中の水蒸気濃度、 M_w は水のモル質量、そしてRは気体定数を示す。相対湿度(RH)はガス相中の水蒸気濃度に関連して式(2.3-23)に示される。

$$RH = \frac{\theta_g^w}{\left(\theta_g^w\right)_0} \cdot 100 \tag{2.3-23}$$

ヘンリー則はガス分圧から液相中の溶解ガスの濃度に関係付けられ、式(2.3-24)による。 $\theta_l^a = \omega_a^l \rho_w = \frac{P_a}{H} \frac{M_a}{M_w} \rho_w$ (2.3-24) ここに、 M_a はガス成分のモル質量、そして、Hはヘンリー定数を示す。

(e) Barcelona Basic Model

a)概要

CODE_BRIGHT に導入されている Barcelona Basic (BB) モデル[8]は、修正カム・ クレイモデルを不飽和粘土に拡張した弾塑性構成モデルであり、ベントナイトのような膨 潤性粘土に対しても適用できるよう拡張されている。なお、飽和時の挙動は修正カム・ク レイモデルと一致する。

BB モデルで考慮される不飽和粘土の一般的な力学特性を以下に示す。

- ・ サクションの増加(飽和度の低下)による圧密降伏応力の増加
- 不飽和粘土も飽和すると、飽和までのサクション・応力経路とは関係なく、圧密に
 関しては同じ挙動をする(同じ間隙比~有効応力関係となる、同じ圧密ラインに乗る)。
- 不飽和粘土は湿潤により、拘束応力が小さい場合は膨潤し、高い場合は圧縮する。
- 不飽和粘土の体積変化は応力経路依存性がある(サクションの変化が同時にあると 経路依存の体積変化挙動をする)。
- サクションの増加は有効粘着力を増大させるが、内部摩擦角に影響をほとんど与えない。

飽和時の挙動は修正カム・クレイモデルと同じことから、以下では特に、不飽和状態での挙動や飽和度(サクション)が変化した場合の挙動に焦点を当てて、BBモデルについて記述する。

b) 応力(外力)の変化による圧縮、膨潤挙動(圧密)

不飽和粘土においても飽和粘土と同様に、正規圧密状態の間隙比増分 de と平均有効応 力増分 dp は圧縮指数により式(2.3-25)で表される(図 2.3-28 参照)。

$$de = -\lambda(s)\frac{dp'}{p'} \tag{2.3-25}$$

ここに、

e:間隙比

p': 平均有効応力; 平均応力 p、間隙ガス圧 pg、間隙水圧 p1により次式で定義

$$p' = p - max(p_g, p_l)$$
 (2.3-26)

 λ (s): サクション s に依存する圧縮指数 ($s = p_g - p_l$ 、 p_g : 間隙ガス圧、 p_l : 間隙水 圧)

式(2.3-25)を間隙比増分の代わりに体積ひずみ増分 devで書き直せば次式となる。

$$d\varepsilon_v = \frac{\lambda(s)}{1+e_0} \frac{dp'}{p'} \tag{2.3-27}$$

ここに、

eo:初期間隙比

例えば、サクション*s*一定(飽和度一定)条件下では*λ*(s)一定なので式(2.3-25)より 次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \lambda(s) \ln \frac{p'}{p_0'}$$
(2.3-28)

ここに、poは初期平均有効応力



平均有効応力 ln (p') 図 2.3-28 間隙比と平均有効応力の関係

同様に、過圧密状態あるいは除荷時の弾性的な間隙比増分 de と平均有効応力増分 dp' は膨潤指数により式(2.3-29)で表される。

$$de = -\kappa(s)\frac{dp'}{p'} \tag{2.3-29}$$

ここに、

κ(s): サクション s に依存する膨潤指数

あるいは、このときの体積ひずみ増分ds,で書き直せば次式となる。

$$d\varepsilon_{\nu} = \frac{\kappa(s)}{1+e_0} \frac{dp'}{p'}$$
(2.3-30)

例えば、サクション s-定(飽和度一定)条件下では次式が成り立つ。

$$e = e_0 - \kappa(s) \ln \frac{p'}{p_0'},$$
(2.3-31)

なお、BB モデルでは圧縮指数、膨潤指数のサクション依存性は次式で定義される。

$$\lambda(s) = \lambda_0 [(1 - \gamma) \exp(\beta \cdot s) + \gamma]$$
(2.3-32)

$$\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s) \tag{2.3-33}$$

ここに、

λ₀: 飽和時の圧縮指数=λ(0)

ĸ₀: 飽和時の膨潤指数= **κ**(0)

 α , β , γ : \forall : \forall : \forall : \forall)

飽和、不飽和に係わらず間隙比と平均有効応力の関係は式(2.3-25)、(2.3-29)及び図 2.3-30 で示される関係に従うので、拘束圧(平均有効応力)が高くなれば間隙は小さく なって剛性は高くなる。例えば、過圧密状態での載荷時あるいは除荷時におけるヤング率 *E*と拘束圧(平均有効応力 *p*')との関係は式(2.3-29)より次式のようになる。

$$E = 3(1 - 2\nu)\frac{dp'}{d\varepsilon_{\nu}} = 3(1 - 2\nu) \cdot (1 + e_0) \cdot \frac{p'}{\kappa(s)}$$
(2.3-34)

ここに、vはポアソン比である。ヤング率 Eは平均有効応力 p'に比例し、膨潤指数 κ (s) に反比例することがわかる。

(f) 飽和度の変化による膨潤、圧縮挙動

ー般に不飽和粘土は飽和度の変化により体積ひずみが発生する。BB モデルではこれを 表現するために、前記の応力変化による圧縮、膨潤挙動(圧密)と類似した下記の関係を 導入している。圧密における圧密降伏応力の概念と同様に、過去に受けた最大のサクショ ン(以下、降伏サクションと呼ぶ)を超えてサクションが増加(乾燥)する場合には次式 で示される塑性的な体積減少が起こるとしている(図 2.3-29 参照)。

$$de = -\lambda_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{2.3-35}$$

2-186

ここに、

s: サクション

 $p_{atm}:$ 大気圧

λ_s: 乾燥による圧縮指数(定数)

サクションが減少(湿潤)する場合、あるいは降伏サクション以内でサクションが増加 (乾燥)する場合の体積変化は下記で定義される。

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{2.3-36}$$

ここに、

κ_s:湿潤による膨潤指数



図 2.3-29 サクションと間隙比の関係

一般の粘土に対してん、κ,は有効応力に依存しない定数と見なせるが、ベントナイトの ような膨潤性粘土に対しては、湿潤による膨潤指数 κ,は平均有効応力 *p*に依存する次式 が提案されている。

$$\kappa_s(p') = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right)$$
(2.3-37)

ここに、

κ_{s0}: **p**'_{ref}での湿潤膨潤指数

p'ref:参照平均有効応力

α_{sp}:湿潤膨潤指数の有効応力依存性の度合いを表すモデルパラメータ

式(2.3-37)を用いれば、湿潤膨潤(サクションの減少)による体積ひずみ増分 desは次式で表される。

$$d\varepsilon_s = \frac{\kappa_s(p')}{1+e_0} \frac{ds}{s+p_{atm}} = \frac{1}{1+e_0} \kappa_{s0} \left(1+\alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}}\right) \frac{ds}{s+p_{atm}}$$
(2.3-38)

したがって、平均有効応力 p'一定の場合の体積ひずみは、

$$\varepsilon_s = \frac{1}{1+e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \cdot \ln \frac{s+p_{atm}}{s_0 + p_{atm}}$$
(2.3-39)

ここで、式(2.3-39)で s=0 (飽和)とすれば、一定有効応力下で湿潤飽和させた時の 飽和時の膨潤ひずみ ε_{smax} が得られる(ε_{smax} は便宜上、膨張を正、他の体積ひずみ $\varepsilon_{v,cs}$ は 圧縮を正としていることに注意)。

$$\varepsilon \frac{1}{1+e_{0_{s0}}} \left(1+\alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}}\right) \ln \frac{p_{atm}}{s_{0}+p_{atm}}_{smax}$$
(2.3-40)

(g) 強度の飽和度依存性

不飽和の場合の圧密降伏応力 poは飽和の場合より増大し、次式で定義される(図 2.3-29 参照)。

$$p_0 = p^c \left(\frac{p_0^*}{p^c}\right)^{\frac{\lambda(0) - \kappa(0)}{\lambda(s) - \kappa(0)}}$$
(2.3-41)

ここに、

po*: サクション s=0 (飽和時)の圧密降伏応力

*p*_c:モデルパラメータ(参照応力)

式(2.3-41)で定義される降伏面はLC(Loading Collapse)降伏面と呼ばれている。 一方、過去に受けた最大のサクション(降伏サクション)で規定される降伏面は SI

(Suction Increase) 降伏面と呼ばれている。

内部摩擦角¢はサクションの影響受けず、したがって、限界状態応力比パラメータ M (M=6(sin¢)/(3-sin¢)) も一定値をとるが、粘着力はサクションに比例して増大する。し たがって、引張り強度 psも比例的に増加し、次式で定義されている(図 2.3-30 参照)。

$$p_s = \kappa \cdot s \tag{2.3-42}$$


図 2.3-30 (p、q) 面、(p、s) 面及び (p、q、s) 面での降伏曲面

有効応力及びサクションの変化による体積ひずみ挙動を規定する線 ($\lambda(s)$ 、 $\kappa(s)$ 、 λ_s 、 κ_s) と降伏曲面を (e、p'、s) 空間で示すと図 2.3-31 のようになる。



図 2.3-31 有効応力及びサクションの変化による体積ひずみ挙動と降伏曲面

(h) 透気・透水性の変形依存性

透気・透水性は変形(体積変化=空隙率の変化)の影響を受ける。CODE_BRIGHTでは、次式に示す Kozeny モデルにより、絶対浸透率の空隙率(n)依存性を考慮することで、透気・透水性の変形依存性が表現される。

$$k = k_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3}$$
(2.3-43)

ここに、

ko:空隙率が no(例えば、初期空隙率)のときの絶対浸透率

no:参照空隙率(通常、初期空隙率)

d. 解析条件

(a) 解析方針

人工バリアの構築ステップを考慮した解析を実施し、初期応力状態を作成する。続いて、 ベントナイトの飽和・不飽和膨潤挙動を考慮した解析を実施して、廃棄体を含めた低拡散 層やコンクリートピットなどセメント系部材の支持力評価を実施する。本検討では以下の 事象を考慮する。

- 1) 人工バリアの構築
- 2) ベントナイトの飽和・不飽和膨潤挙動

(b) 解析モデル

検討断面は、図 2.3-32 に示すように平成 27 年度地下空洞型処分施設機能確認試験報告書の地震時挙動評価[9]で用いられた検討断面と同様とした。

本解析に用いる解析モデルを図 2.3-33 に示す。低透水層の偏膨潤による変形を表現可 能にするため、坑道横断面をモデル化した。なお、本検討では低透水層の再冠水に伴う膨 潤変形挙動の模擬を目的とするため、コンクリートピット内の模擬廃棄体と充てん材は地 震時挙動評価[9]と同様に、両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、そ の物性は充てん材で代表させることとした。したがって、廃棄体部については簡略化した モデル化とした。要素数は 4350、節点数は 4401 である。



図 2.3-32 試験空洞及び人工バリアの断面図[9]



図 2.3-33 解析モデル

(c) 初期条件

人工バリア内部の構築を行い、施工順序の影響による応力状態を作成する。人工バリア の構築解析ステップの一例を図 2.3-34 に示す。なお、構築時についても、応力の釣合い のみならず、液相及び気相の釣合い計算も行っている。本検討の場合は、初期が不飽和で あることから、ネット応力下の釣合い計算を行っている。



図 2.3-34 解析ステップ





また、境界条件として以下に示す設定を行っている。

- 構築中における坑道内の構造物表面の流体に関する境界は不浸透境界
- 坑道内構造物の鉛直方向境界は大気圧 σv=0.1MPa の応力固定、水平方向境界は dx=0 の変位固定

(e) 材料物性值

廃棄体間充てん材、上部充てん材、コンクリートピット、低拡散層、低透水層(ベント ナイト)、上部埋戻し材(土質系)、側部埋戻し材(セメント系)、支保工、均しコンクリ ートの9部材に対して二相流パラメータ及び力学パラメータを設定する。

解析で用いる材料物性値は基本的に機能確認試験で得られた値を採用する。ただし、二 相流パラメータ等の機能確認試験で確認されていないものについては既往の検討で用い られた値を採用した。

a) 二相流パラメータ

既往の文献を基に構成する部材に対して設定する。採用する物性値は再冠水過程の検討 において用いられた物性と同値とする。なお、用いる解析コード CODE_BRIGHT で考 慮されていない物性曲線の定義については考慮可能な曲線にて近似して用いるものとし た。

ア)低透水層(ベントナイト)

林ら[2]が低透水層に適用した乾燥密度 pd=1.6Mg/m³のクニゲル GX (100%)を対象と した室内試験結果から設定したパラメータを用いる。気相の相対浸透率については、 CODE_BRIGHT では Corey モデルを考慮できないことから Power モデルにて近似して 用いた。相対浸透率の気相のフィッティングについては、解析範囲と考えられる飽和度 (80%~90%)付近の再現性を優先した。

イ) 低拡散層

Kumagai et. al.[10]における低拡散層のパラメータを用いる。ここで用いられているパ ラメータの内、二相流パラメータは山本ら[11]の研究における JIS モルタルのガス移行試 験から逆解析によって同定された二相流パラメータである。 空隙率については田中ら [12]の文献を基に設定している。なお、CODE_BRIGHT では相対浸透率の Corey モデル と毛管圧の Narasimhan モデルは用いることができないことから、相対浸透率は Power モデル、毛管圧は van Genuchten モデルで近似した。フィッティングについては、解析 対象と考えられる飽和度付近の再現性を優先した。

ウ) コンクリートピット、廃棄体間充てん材、上部充てん材、側部埋戻し材(セメン ト系)、支保工、均しコンクリート

Kumagai et. al.[10]におけるコンクリート材のパラメータを用いる。ここで用いられて いる二相流パラメータ(毛管圧力、相対浸透率)は Mayer, G et. al.[13]のパラメータで ある。空隙率については田中ら[12]の文献を基に設定している。なお、CODE_BRIGHT では相対浸透率の Corey モデルと毛管圧の Narasimhan モデルは用いることができない ことから、相対浸透率は Power モデル、毛管圧は van Genuchten モデルで近似した。フ ィッティングについては、解析対象と考えられる飽和度付近の再現性を優先した。 エ)上部埋戻し材(土質系材料)

Kumagai et. al.[10]における上部埋戻し材(土質系材料)のパラメータを用いる。ここで用いられている二相流パラメータは RWMC 報告書[14]の値を参照している。なお、 CODE_BRIGHTでは相対浸透率のCoreyモデル[15]と毛管圧のNarasimhanモデル[16] は用いることができないことから、相対浸透率は Power モデル[15]、毛管圧は van Genuchten モデル[17]で近似した。

以降に本検討で用いた相対浸透率曲線と毛管圧曲線の定義式を示す。また、表 2.3・20、 表 2.3・21 に用いたパラメータをまとめ、図 2.3・36~図 2.3・41 に各部材に用いる二相流 特性曲線を示す。

Corey モデル(相対浸透率) [15]

$$k_{rg} = (1 - S_e)^2 (1 - S_e^2) \tag{2.3-44}$$

$$k_{rl} = S_e^4 \tag{2.3-45}$$

$$S_e = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$$
(2.3-46)

ここで、krgがガスの相対浸透率、krl は液体の相対浸透率、Se は有効間隙水飽和度、Sl は間隙水飽和度、Shr は残留間隙水飽和度、Sgr は残留ガス飽和度を示す。

Power モデル(相対浸透率)[15]

$$k_{lr} = S_e^{\ m} \tag{2.3-47}$$

$$k_{rg} = A(1 - S_e)^n \tag{2.3-48}$$

$$S_e = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$$
(2.3-49)

ここで、klrが液体の相対透過係数、krgはガスの相対透過係数、Seは有効間隙水飽和度、 Slは間隙水飽和度、Slrは残留間隙水飽和度、Sgrは残留ガス飽和度、n及びmは間隙径分 布パラメータを示す。

③ Grant モデル(相対浸透率)[18]

$$K_{rg} = 1 - K_{lr} \tag{2.3-50}$$

④ van Genuchten モデル(相対浸透率)(水相のみ)[17]

$$K_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - \left(1 - S_e^{1/\lambda} \right)^{\lambda} \right)^2$$
(2.3-51)

$$S_e = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$$
(2.3-52)

ここで、λは空隙率分布パラメータを示す。

⑤ Narasimhan モデル(毛細管圧力)[16]

$$P_c = P_e - P_m [(1 - S_l)/(S_l - S_{lr})]^{1-n}$$
(2.3-53)

ここで、P_cは毛管圧、P_eは毛管排除圧(ガス侵入圧)、P_mは Narasimhan モデル係数 を示す。

⑥ van Genuchten モデル(毛細管圧力)[17]

$$P_{c} = P_{0} \left(S_{e}^{-1/\lambda} - 1 \right)^{1-\lambda}$$
(2.3-54)

$$S_e = (S_l - S_{lr}) / (1 - S_{lr} - S_{gr})$$
(2.3-55)

ここで、Pcは毛管圧、Poはガス侵入圧を示す。

			相対浸透率			毛細管圧力							
材料	相	絶対 浸透率	近似	残留的	泡和度	モデル 係数	近似	残留的	泡和度	モデノ	レ係数	空隙率	初期
		(m ²)	モデル	S_{wr}	S_{gr}	n	モデル	S_{wr}	S_{gr}	Po (MPa)	п		起仰皮
	水	$5.58 imes 10^{-20}$	Power	0	0	2.00	G			9.97	1 6	0.40	0.050
低透水層	ガス	$5.58 imes 10^{-20}$	Power	0	0	2.63	VG	0	0	3.21	1.7	0.40	0.850
コンクリート ピット	水	5.58×10^{-20}	Power	0.30	0.18	4.0		_	0	0.70			0.0
	ガス	4.65×10^{-18}	Power	0.30	0.18	2.5	VG	0	0	0.70	1.90	0.11	0.9
任扩散属	水	1.12×10^{-20}	Power	0.15	0.075	25	чС	0.15	0	1.90	1 4	0.15	0.0
低仏舣僧	ガス	8.14×10^{-18}	Power	0.15	0.075	2.8	10	0.10	Ŭ	1.20		0.10	0.9
廃棄体間	水	$5.58 imes10^{-20}$	Power	0.30	0.18	4.0	G	0	0	0.70	1.90	0.19	0.9
充てん材	ガス	$4.65 imes 10^{-18}$	Power	0.30	0.18	2.5	VG		0	0.70	1.90	0.19	0.9
ト郭本でした	水	$5.58 imes10^{-20}$	Power	0.30	0.18	4.0		0	0	0.70	1.00	0.10	0.0
上部允てん材	ガス	$4.65 imes 10^{-18}$	Power	0.30	0.18	2.5	VG	0	0	0.70	1.90	0.19	0.9
上部埋戻し材	水	5.58×10^{-18}	Power	0.30	0.01	4.0						0.20	
(土質系)	ガス	5.58×10^{-18}	Grant	_	_	_	VG	0.98	0.01	0.04	2.90	0.30	0.798

表 2.3-20 二相流パラメータ (その1)

ここで、Power は Power モデル、Grant は Grant モデル、vG は van Genuchten モデルを示す。

絶対浸透率は機能確認試験で得られた透水係数と、既往の文献での水とガスの絶対浸透率の比から設定した。

	相	絶対 浸透率 (m ²)	相対浸透率				毛細管圧力						
材料			近似	残留食	残留飽和度 モデル 係数		近似	残留飢	泡和度	モデノ	レ係数	空隙率	初期 的和度
			モデル	S_{wr}	S_{gr}	п	モデル	$S_{\scriptscriptstyle W\! r}$	S_{gr}	<i>P</i> ₀ (MPa)	п		AUTHIX
側部埋戻し材 (セメント系)	水	5.58×10^{-21}	Power	0.30	0.18	4.0		0	0	0.70	1.00	0.12	0.0
	ガス	4.65×10^{-19}	Power	0.30	0.18	2.5	VG	0	0	0.70	1.90	0.15	0.9
支保工 コンクリート	水	1.12×10^{-19}	Power	0.30	0.18	4.0		0	0	0.70	1.00	0.12	0.0
	ガス	9.29×10^{-18}	Power	0.30	0.18	2.5	VG	0	0	0.70	1.90	0.13	0.9

表 2.3-21 二相流パラメータ (その2)

ここで、Power は Power モデル、Grant は Grant モデル、vG は van Genuchten モデルを示す。

絶対浸透率は機能確認試験で得られた透水係数と、既往の文献での水とガスの絶対浸透率の比から設定した。

コンクリートピット、低拡散層、廃棄体層及び上部充てん材の空隙率に関しては確証試験[19]、[20]、[21]、[22]、[23]、[24]、[25]、[26]で取 得された値を参照して設定した。



図 2.3-36 低透水層の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)



図 2.3-37 コンクリートピットの二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)



図 2.3-38 低拡散層の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)



図 2.3-39 廃棄体間及び上部充てん材の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)



図 2.3-40 上部埋戻し材(土質系)の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)



図 2.3-41 支保工及び側部埋戻し材(セメント系)の二相流曲線(左:毛細管圧力、右:相対浸透率)

b) 力学パラメータ

カ学パラメータについても二相流パラメータと同様に既往の文献から設定する。適応する構成則は低透水層には修正 Cam – Clay モデルを不飽和まで拡張した弾塑性構成モデルである BB モデル(Barcelona Basic Model) [8]を適用し、その他は線形弾性とした。

ア) 低透水層

<必要な物性値と既往の実験データ>

CODE_BRIGHT に導入されているベントナイトの飽和・不飽和力学挙動を表す弾塑性 構成モデル (Barcelona Basic モデル、BB モデル) で必要な物性値は以下の通りである。

- 飽和圧密特性
- ・ 飽和度に依存する圧密特性(不飽和圧密特性)
- ・ 膨潤指数の飽和度(サクション)依存性を表すパラメータα
- 圧縮指数の飽和度(サクション)依存性を表すパラメータβ、γ
- · 膨潤特性
- ・ 拘束圧と飽和過程での膨潤量の関係を表すパラメータκ_{s0}、 α_{sp}
- 初期(施工時)のサクションを超えるサクションが作用したとき(初期飽和度より 飽和度が減少する時)の体積収縮量を規定するパラメータん。
- ・ 飽和せん断強度特性
- 内部摩擦角 体 粘着力 c
- ・ 飽和度に依存するせん断特性
- ・ 粘着力の飽和度(サクション)依存性を表すパラメータ

なお、BBモデルでは内部摩擦角は飽和度(サクション)に依存しないと仮定している。 また、本検討では、低透水層が初期飽和度以下となることは想定されないのでパラメータ んの設定は不要とした。

これらの物性値を設定するのに必要なクニゲル GX に対する試験の実施状況を表 2.3-22 に示す。不飽和圧密特性は未取得であるが、圧縮指数は保守的に飽和ベントナイ トの値を用い、膨潤指数は不飽和一軸圧縮試験に基づき推定する。また、不飽和せん断強 度特性も未取得であるが保守的な仮定として飽和と同等、すなわち、粘着力も引張強度も 0とした。

表 2.3-22 BB モデルで必要な物性パラメータとクニゲル GX 試験の現状

陆桥	パライータ	パラメータ設定のための	クニゲル GX に対する	設定古法		
1012	1.11.9	試験、理論	データ取得の現状	設定方法		
飽和圧密	λ ₀ , κ ₀	圧密試験	圧密試験結果あり a)	試験結果を使用		
不飽和圧密	α	サクション制御圧密試験	不飽和試料の1軸圧縮試	サクション制御圧密試験の実施が望まし		
		あるいは	験値ありり	いが、不飽和試料の1軸圧縮試験値から		
		不飽和試料の1軸圧縮試験		推定		
膨潤	κ_{s0}, α_{sp}	膨潤圧試験、膨潤量試験	膨潤圧試験、膨潤量試験の	試験結果に基づき設定		
		あるいは	結果あり c),d)			
		小峯らの膨潤評価式				
飽和せん断強度	ф, c	三軸圧縮試験	三軸圧縮試験結果あり ^{a)}	試験結果を使用		
不飽和せん断強度(粘	k	サクション制御三軸圧縮試験	試験データなし	一般に不飽和粘土は粘着力、引張強度を		
着力)と引張強度				有するが、飽和と同じく粘着力も引張強		
				度もゼロと仮定(保守的設定)		
<文献>		·	•			

a) 山田他(2009):ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その4)静的力学特性に関する検討、土木学会第64回年次学術講演会、 CS5-052, pp.237~238

b) 千々松他 (2008): ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その2) 不飽和支持力に関する検討、土木学会第63回年次学術講演会、 CS05-15, pp.197~198

c) 伊藤他(2008):ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その1)不飽和支持力に関する検討、土木学会第63回年次学術講演会、 CS05-14, pp.195~196

d) 伊藤他(2009):ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その3) 膨潤変形挙動に関する検討、土木学会第64回年次学術講演会、 CS5-051, pp.235~236

低透水層には修正 Cam – Clay モデルを不飽和粘性土に拡張した弾塑性構成モデルで、 ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるように拡張されている。表 2.3-23 に低透水層に用いる力学パラメータを示す。

項目	記号	単位	設定値	出典
初期乾燥密度	$ ho_d$	Mg/m ³	1.60	
真密度	$ ho_{s}$	Mg/m ³	2.65	
初期間隙比	е	_	0.656	
ポアソン比	ν		0.45	
膨潤指数(飽和時)	$\mathbf{K}0$	—	0.087	[27]
圧縮指数(飽和時)	λ_0	_	0.117	[27]
サクション依存膨潤指数パラメータ	α_{i}	_	-0.165	[28]
参照有効応力時の湿潤膨潤指数(飽和時) (パラメータ値設定時の膨潤圧 0.629MPa [29])	$\mathbf{K}_{\mathbf{S}}0$	_	0.2108	
有効応力依存湿潤膨潤指数パラメータ (パラメータ値設定時の膨潤圧 0.629MPa [29])	α_{sp}	_	-0.544	
限界応力比	Μ		0.580	[27]
非関連流れ則パラメータ	α	_	0.727	
引張強度	\overline{P}_{s0}	MPa	0.0	
压密先行応力(飽和時)	P_0^*	MPa	1.5	[30]

表 2.3-23 低透水層に用いる力学パラメータ

膨潤圧については8年取りまとめ報告書[5]を基に設定した。報告書[5]では施工直後の 原位置から採取した試料を用いて室内膨潤圧試験を実施し、膨潤圧試験の結果に基づいて、 膨潤圧と乾燥密度の関係を図 2.3・42 に示すように整理している。また、図に示す近似式 (2.3・56)は既往データより同定している。

 $\sigma_w = \exp(6.1893 \rho_d^2 - 14.0472 \rho_d + 6.1677)$ (2.3-56) ここで、 σ_w は膨潤圧、 ρ_d は乾燥密度を示す。よって、式(2.3-56)より膨潤圧は $\sigma_w = 0.629$ MPa となる。



図 2.3-42 クニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係[5]

膨潤特性に関するパラメータの設定については山本ら[31]の方法を基に設定する。BB モデルでは、湿潤に伴う膨潤や乾燥に伴う収縮量を規定する湿潤膨潤指数κ_sは式(2.3-57) で表わされる。

$$\kappa_{s}(p',s) = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss},s)$$
(2.3-57)

ここに、 κ_{s0} は p'_{ref} での湿潤による膨潤指数、 p'_{ref} は参照平均ネット応力、 a_{sp} は湿潤による膨潤指数の応力依存性の度合いを表すモデルパラメータ、p'は平均ネット応力(= $p - p_g$ 、pは平均応力、 p_g は間隙空気圧)、 a_{ss} はサクション依存の湿潤膨潤指数を表わすモデルパラメータ、sはサクションを示す。山本ら[31]はサクション依存の湿潤膨潤指数が a_{ss} =0 と仮定し、小峯らの膨潤評価式[32]に基づいて得られた拘束圧と飽和時の膨潤ひずみの関係を式(2.3-58)でフィッティングすることで BB モデルのパラメータ(κ_{s0} 、 a_{sp})を同定している。

$$d\varepsilon_s = \frac{\kappa_s(p')}{1 + e_0} \frac{ds}{s_0 + p_{atm}} = \frac{1}{1 + e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p_{ref}'} \right) \frac{ds}{s_0 + p_{atm}}$$
(2.3-58)

ここに、dɛsが湿潤膨潤による体積ひずみ増分、patmが大気圧を示す。

図 2.3-43 に小峯らの膨潤評価式に基づく飽和時の最大膨潤ひずみと有効拘束応力の関係とそれを BB モデルでフィッティングした結果を示す。BB モデルと膨潤評価式がよく 一致することがわかる。



図 2.3-43 小峯らの膨潤評価式に基づく飽和膨潤ひずみと有効拘束応力の関係[32]

Alonso, et. al [8]では、塑性ひずみ増分方向は非関連流れ則を考慮できるよう式 (2.3-59) に示す Ohmaki[33]の提案するパラメータαを導入している。

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2q+p_s-p_0)}$$
(2.3-59)

ここに、 $d\varepsilon_s^p$ サクション増分における塑性ひずみ増分、 $d\varepsilon_{vp}^p$ は塑性体積ひずみ増分、q はミーゼス応力、 p_s はサクション依存の引張強度、 p_0 は降伏圧密応力を示す。

非関連流れ則に関するパラメータαは横ひずみが0の条件から設定することができ、弾性せん断ひずみを無視し、横ひずみを0とすると式(2.3-60)となる。

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2}{3} \frac{1}{1 - \kappa/\lambda(0)}$$
(2.3-60)

また、静水圧状態 Koでは、式(2.3-61)が成り立つ。

$$p/q + p_s = 3(1 - K_0)/1 + 2K_0 \tag{2.3-61}$$

式(2.3-59)、式(2.3-60)、式(2.3-61)より、非関連流れ則に関するパラメータαは 式(2.3-62)として導かれる。

$$\alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \frac{1}{1 - \kappa/\lambda(0)}$$
(2.3-62)

式 (2.3-62) より、 a=0.727 となる。

イ)廃棄体間充てん材

廃棄体間充てん材の諸元を表 2.3-24 に、力学パラメータを表 2.3-25 に示す。前述し たようにコンクリートピット内の模擬廃棄体と充てん材は地震時挙動評価[9]と同様に、 両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、その物性は充てん材で代表させ ることとした。

_	• •	S = 1 · · · · · · · · · · ·		
項目	記号	単位	値	出典・備考
寸法	h×b×l	m	$1.6 \times 1.6 \times 1.6$	[34]
廃棄体全重量	W	t	28.0	[34]
単位体積重量	Y	kN/m ³	67.0	[34]

表 2.3-24 廃棄体間充てん材の諸元

$\overline{\alpha}$ 2.5 ⁻ 20 廃栗() 即元 しん M に 用 い る 力 子 M ノ Λ =	表 2.3-25	廃棄体間充てん材に用いる力学パラメー	ータ
--------------------------------------------------------------------------------------	----------	--------------------	----

物性	単位	物性值	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	30.0	標準値:目安の目標強度
静弹性係数	kN/mm²	18.4	6年取りまとめ報告書[35]p.2-201図 2.4-51の関係式より圧縮強度 30として算 出
単位体積重量	kN/m ³	23.0	H26報告書[26]p.7-61で使用している値
ポアソン比	_	0.2	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値
廃棄体込みの 単位体積重量	kN/m ³	52.4	

ウ) 上部充てん材

上部充てん材の力学パラメータを表 2.3-26 に示す。

	衣 2.3-26	上部允しん材	に用いる刀字ハフメータ
物性	単位	物性値	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	30.0	標準値:目安の目標強度
静弹性係数	kN/mm²	19.1	6 年取りまとめ報告書[35]p.2-207 図 2.4-56の関係式より圧縮強度 30 として算 出
単位体積重量	kN/m ³	24.5	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値
ポアソン比		0.2	H26 報告書[26]p.7-61 で使用している値

≢ 9 2-96 上部本でしたに用いる力学パラメータ

エ) コンクリートピット コンクリートピットの力学パラメータを表 2.3-27 に示す。

物性	単位	物性値	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	60.0	標準值:設計基準強度(o91)
静弹性係数	kN/mm²	36.9	6 年取りまとめ報告書[35]p.2-154 図 2.3-22の関係式より圧縮強度 60 として算 出
引張強度	N/mm ²	4.6	6 年取りまとめ報告書[35]p.2-154 図 2.3-23の関係式より圧縮強度 60 として算 出
単位体積重量	kN/m ³	24.5	H26 報告書[26]p.7-61 で使用している値
ポアソン比	_	0.2	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値

表 2.3-27 コンクリートピットに用いる力学パラメータ

才) 低拡散層

低拡散層の力学パラメータを表 2.3-28 に示す。

物性	単位	物性値	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	60	標準值:設計基準強度(o91)
静弹性係数	kN/mm²	28.4	6 年取りまとめ報告書[35]p.2-115 図 2.2-29の関係式より圧縮強度 60 として算 出
引張強度	N/mm ²	4.4	6 年取りまとめ報告書[35]p.2-115 図 2.2-30の関係式より圧縮強度 60 として算 出
単位体積重量	kN/m ³	23.0	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値
ポアソン比	—	0.2	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値

表 2.3-28 低拡散層に用いる力学パラメータ

カ) 埋戻し材(土質系材料)

埋戻し材(土質系材料)の力学パラメータを表 2.3-29 に示す。

物性	単位	物性値	出典・備考
乾燥密度	Mg/m^3	1.60	乾燥密度の管理目標値 1.6±0.1 の中心値
膨潤圧	MPa	0.033	H26報告書[26]p.3-85表 3.2-6より、現 場施工の平均値
変形係数	MN/m ²	4.9	H26報告書[26]p.3-76表 3.2-3より、現 場施工の平均値
ポアソン比	—	0.43	H26報告書[26]p.7-61で使用している値
単位体積重量	kN/m ³	19.10	H26報告書[26]p.7-61で使用している値

表 2.3-29 埋戻し材(土質系材料)に用いる力学パラメータ

キ) 埋戻し材(セメント系材料)

埋戻し材(セメント系材料)の力学パラメータを表 2.3-30に示す。

物性	単位	物性値	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	30.0	標準値:設計基準強度
静弹性係数	kN/mm²	27.6	H19報告書[19]p.2-179図2.2-7の関係式より、圧縮強度30として算出
単位体積重量	kN/m ³	24.5	H26報告書[26]p.7-61で使用している値
ポアソン比	_	0.2	H26報告書[26]p.7-61で使用している値

表 2.3-30 埋戻し材(セメント系材料)に用いる力学パラメータ

ク) 支保工

支保工の諸元と力学パラメータを表 2.3-31 に示す。支保工は、吹付けコンクリートと 鋼製支保工から構成される。

物性	単位	物性値	出典・備考
圧縮強度	N/mm ²	36.0	文献※より
静弹性係数	kN/mm²	27.9	H26報告書[26]p.7-61で使用している値 (支保工)
単位体積重量	kN/m ³	24.5	H26報告書[26]p.7-61で使用している値 (支保工)
ポアソン比	_	0.2	H26報告書[26]p.7-61 で使用している値 (支保工)

表 2.3-31 支保工の諸元及び力学パラメータ

※冨田ほか[36]:地下深部約 100m の堆積軟岩中に大規模試験空洞を掘削-余裕深度処分埋設施 設本格調査のうち試験空洞掘削工事-、2006 年 11 月.

ケ) 均しコンクリート

均しコンクリートの力学パラメータを表 2.3-32 に示す。均しコンクリートの物性値に 関しては埋戻し材(セメント系材料)と同等とした。

物性 単位 物性値 出典・備考 圧縮強度 N/mm² 30.0 標準值:設計基準強度 H19報告書[19]p.2-179図 2.2-7の関係式 静弹性係数 kN/mm² 27.6より、圧縮強度30として算出 単位体積重量 kN/m³ 24.5H26報告書[26]p.7-61で使用している値 _ ポアソン比 0.2H26報告書[26]p.7-61で使用している値

表 2.3-32 均しコンクリートの力学パラメータ

コ) セメント系部材

セメント系部材に対する力学パラメータの設定値の一覧を表 2.3-33 に示す。

部位	物性	単位	物性値	出典
	圧縮強度	N/mm ²	30.0	
	静弹性係数	kN/mm ²	18.4	[35]
廃棄体間充てん材	単位体積重量 (充てん材)	kN/m ³	23.0	[26]
	ポアソン比	_	0.2	[26]
	廃棄体込みの 単位体積重量	_	52.4	
	圧縮強度	N/mm ²	30.0	
ト如本イルオ	静弹性係数	kN/mm ²	19.1	[35]
上部元しん材	単位体積重量	kN/m ³	24.5	[26]
	ポアソン比	_	0.2	[26]
	圧縮強度	N/mm ²	60.0	[35]
	静弹性係数	kN/mm ²	36.9	[35]
コンクリートピット	引張強度	N/mm ²	4.6	[35]
	単位体積重量	kN/m ³	24.5	[26]
	ポアソン比	_	0.2	[26]
	圧縮強度	N/mm ²	60	[35]
	静弹性係数	kN/mm ²	28.4	[35]
低拡散層	引張強度	N/mm ²	4.4	[35]
	単位体積重量	kN/m ³	23.0	[26]
	ポアソン比	—	0.2	[26]
	圧縮強度	N/mm ²	30.0	
埋戻し材	静弹性係数	kN/mm ²	27.6	[19]
(セメント系)	単位体積重量	kN/m ³	24.5	[26]
	ポアソン比	—	0.2	[26]
	圧縮強度	N/mm ²	36.0	[36]
古伊エッンクリート	静弹性係数	kN/mm ²	27.9	[26]
文体エコンクリート	単位体積重量	kN/m ³	24.5	[26]
	ポアソン比	_	0.2	[26]
	圧縮強度	N/mm ²	30.0	
物レッシャル・レ	静弹性係数	kN/mm ²		[19]
均しコンクリート	単位体積重量	kN/m ³	24.5	[26]
	ポアソン比	_	0.2	[26]

表 2.3-33 力学パラメーター覧(セメント系部材)

(f) 解析ケース

解析ケースは、全体を一つの系として考えた場合、周辺岩盤から均質に水が侵入する参照ケース(図 2.3-25)、それに対して、偏った膨潤圧が発生するようなクリティカルな箇所から侵入する比較ケースの2ケースを考える(図 2.3-25)(表 2.3-34)。

参照ケースは、空洞内各部材間におけるサクションの差異を解消するために水の行き来 があり、かつGL-100m相当の水圧が空洞外周部に均質に掛かることにより、空洞内部へ 向かって水が移動する。セメント系部材において均質に飽和に向かう状況を確認する。

一方、比較ケースにおける侵入箇所は、上記、参照ケースの解析結果から偏膨潤の発生 が想定される箇所を考慮して決定する。

なお、これら両ケースの呼称は、あくまで本検討プロジェクト内のみに限定してこれら の状態を表現したものであり、公式な用語として定義されたものではない。

	• •		
ケース	施設施工	地下水の浸入位置	着目点
参照ケース	設計通り	周辺岩盤から均質に侵入	低透水層の膨潤による変 形及び発生応力
比較ケース	施工不良 (低透水層密度のバラツキ)	偏った膨潤圧の発生箇所	低透水層の偏膨潤による 変形及び発生応力

表 2.3-34 解析ケース一覧

(g) 評価方法

解析結果の評価については以下に着目する。

【着目点】

- 低透水層の応力状態
- 低透水層の塑性化の有無
- 低透水層の乾燥密度分布
- セメント系部材の沈下量
- セメント系部材の発生応力度

低透水層(ベントナイト)の飽和状態では引張強度が 0 となることから、応力の照査 については引張に達しているか否かに着目する。また、圧縮側については圧密降伏応力に 達しているか否かに着目する。また、せん断によっても塑性化することから、再冠水過程 における塑性化の有無についても照査を行う。

低透水層に要求される性能としては飽和後の低透水性であるため、飽和時の乾燥密度分布を算出することによって極端に乾燥密度が低下している箇所の有無を照査する。

セメント系部材はかなりの重量があり、飽和によって剛性が低下する低透水層上に設置 されることから、セメント系部材の沈下量が問題となる。そこで、セメント系部材の沈下 量を照査項目とする。また、低透水層の沈下や膨潤圧の発生によって、セメント系部材に 有害な応力が発生するか否かの照査も合わせて実施する。 e. 解析結果

本検討では、人工バリアの構築段階を考慮した解析を実施し、初期応力状態を作成後、 1) で検討したシナリオに基づき、再冠水過程における施設挙動解析を参照ケース、比較 ケースの計 2 ケース実施している。そのため、解析結果については人工バリアの建設・ 埋設段階(構築開始から構築終了まで 50 年)、参照ケース(50 年以降、周辺地盤から均 質に地下水の浸潤)、比較ケースに分けて整理する。

- (a) 建設・埋設段階
- a)建設·埋設段階___飽和 度分布

処分坑道全体の施設挙動解析において、施工順序の影響による飽和度分布を図 2.3-44 に示す。①~⑥は解析におけるステップも合わせて示しており、構築対象となる部材はス テップ終了時に100%の自重が載荷されるように(最終時刻でg=9.8m/s²となるように)、 重力加速度gを線形増加させて自重による応力を計算している(ov=pghのgを変化)。な お、施設は不飽和状態であるため、ネット応力下(平均応力から空気圧を差し引いた応力) における釣合い計算を行っている。ただし、各々の部材が不飽和状態であるためサクショ ンの差が生じており、水圧及びガス圧が定常状態に至るまでの計算は実施していない。よ って、構築時のステップでは圧密による体積変化と段階構築による応力変化を考慮するこ とを主目的としている。低透水層については、BBモデルを適用しており、圧密によるサ クション低下(飽和度の上昇)が生じるため、膨潤による体積ひずみが発生(体積拘束下 では膨潤圧の発現)する。この時、圧密による体積変化が生じるため、e-logp 関係に起因 する剛性変化は考慮される。



図 2.3-44 構築時飽和度分布 (-) (全体)

空洞内部に構築される部位(廃棄体、ベントナイト系及びセメント系部材)の建設・埋設段階①~⑥における飽和度分布を図 2.3-45 に示す。



b)建設·埋設段階__鉛直応力分布

処分坑道全体の構築解析において、施工順序の影響による鉛直応力の分布を図 2.3-46 に示す。



(b) 参照ケース(再冠水開始後(50年以降))

(a)の解析結果を初期状態とし、周辺岩盤から均質に地下水を浸潤させ、施設挙動解析 を実施した。

a) 飽和度

飽和度分布を図 2.3-47 と図 2.3-48 に示す。施設が概ね飽和するまでに数百年経過している。ただし、内部の空気の影響で 1000 年後でも施設は完全飽和に至らない。



図 2.3-47 飽和度分布 (-) ① (変形:3倍)



図 2.3-48 飽和度分布 (-) ② (変形:3倍)

低透水層の飽和度経時変化の出力点と結果を、それぞれ図 2.3・49 と図 2.3・50 に示す。 出力点は初期低透水層厚さの中心とした。ここで、上部低透水層及び下部中央は 20 年程 度で飽和に至る。下部隅角、側部中央の順に飽和に至る。数百年で低透水層全体が概ね飽 和する。





図 2.3-50 低透水層の飽和度経時変化

- b) 低透水層の応力状態
- ア) 平均有効応力分布

低透水層の平均有効応力を、図 2.3-51 に示す(圧縮:正)。圧密の効果によって、底 部から平均有効応力が発現する。また水が到達する順に膨潤圧が発生し、平均有効応力が 上昇する。



低透水層における平均有効応力の経時変化の出力点と解析結果を、それぞれ図 2.3-49 と図 2.3-52 に示す。底部については、圧密に伴い平均有効応力は増加するものの、膨潤 範囲の浸透に伴って、100 年後以降は反対に減少する。



図 2.3-52 低透水層の平均有効応力経時変化

- c) 低透水層の乾燥密度
- ア) 乾燥密度分布

低透水層の乾燥密度を、図 2.3-53 に示す(圧縮:正)。上部低透水層については上部 埋戻し材側へ膨張することから、初期よりも若干乾燥密度が低下する。ただし、上部低透 水層の層厚を貫く形での乾燥密度の低下は見られない。底部については圧密の効果により 乾燥密度は上昇する。



図 2.3-53 低透水層の乾燥密度分布 (Mg/m³) (変形:3倍)

イ)低透水性能の確認

8年取りまとめ報告書[5]で整理された、クニゲル GX の透水係数と乾燥密度の関係を図 2.3-54 に示す。

図 2.3-53 に示した低透水層の乾燥密度分布は、上部低透水層では乾燥密度が 1.387 Mg/m³ まで低下する要素が存在することを示している。一方、図 2.3-54 から乾燥密度 1.34 Mg/m³以上で施工時初期性能(透水係数 5×10⁻¹³ m/s)を満たすことがわかる。したがって、飽和後も層の低透水性能は保たれている。



図 2.3-54 クニゲル GX の透水係数と乾燥密度の関係[5]
低透水層における乾燥密度の経時変化の出力点と解析結果を、それぞれ図 2.3-49 と図 2.3-55 に示す。上部と側部(出力点 1~出力点 5)の乾燥密度が低いのは施工順序を追う 際に、設置時に若干膨張することによる。反対に底部は圧縮されることから、初期の乾燥 密度が高い。底部については圧密に伴い、層中間部分の出力点では、始めに圧縮されるも のの、膨潤範囲の浸透に伴って 100 年後以降は反対に膨張する。



図 2.3-55 低透水層の乾燥密度経時変化

d) 低透水層の相対変位

低透水層の相対変位の経時変化の出力点を図 2.3-49 に、また水平方向と鉛直方向の相 対変位の経時変化を、それぞれ図 2.3-56 と図 2.3-57 に示す。ただし、相対変位の基準 は施設建設・埋設終了時(初期状態)の座標とした。

水平方向の相対変位については、上部埋戻し材が比較的に柔らかい仕様となっていることから、上部埋戻し材側へ膨張することにより上部低透水層の相対変位(出力点1、出力点3)は底部低透水層の相対変位(出力点6、出力点8)よりも大きくなっている。

水平・鉛直方向とも左右対称な相対変位となっている。



図 2.3-56 低透水層の水平方向相対変位経時変化



図 2.3-57 低透水層の鉛直方向相対変位経時変化

- e)セメント系部材の応力状態
- ア)最大・最小有効主応力分布

セメント系部材の最大・最小有効主応力分布を、それぞれ図 2.3-58 と図 2.3-59 に示 す(圧縮:負)。低透水層の膨潤に伴い、セメント系部材は全圧縮状態となる。よって、 膨潤により引張応力になる部分はない。



図 2.3-58 セメント系部材の最大有効主応力 (MPa)

低透水層の膨潤に伴い、セメント系部材は全圧縮状態となる。最大圧縮応力は oc=2.12MPa程度であることから、圧縮強度に対して十分な裕度がある。



イ)主応力方向

セメント系部材の有効主応力の方向を、それぞれ図 2.3-60 と図 2.3-61 に示す。



図 2.3-60 セメント系部材の有効主応力方向①



図 2.3-61 セメント系部材の有効主応力方向②(最大圧縮方向)

セメント系部材の最大・最小有効主応力出力点を図 2.3-62 に示す。ただし、赤点はコ ンクリートピットの出力点、黄点は低拡散層の出力点をそれぞれ示す。



図 2.3-62 最大・最小有効主応力出力点(赤: RC ピット、黄: 低拡散層)

ウ) コンクリートピットの最大・最小有効主応力の経時変化

コンクリートピットの最大・最小有効主応力の経時変化を、それぞれ図 2.3-63 と図 2.3-64 に示す。セメント系部材の最大有効主応力は低透水層の膨潤圧の発現とともに圧 縮側の応力が増大する。50 年前後からコンクリート部材への水の侵入に伴い、間隙圧力 が上昇することにより、有効応力が低下する。



図 2.3-63 コンクリートピットの最大有効主応力の経時変化



図 2.3-64 コンクリートピットの最小有効主応力の経時変化

エ)低拡散層の最大・最小有効主応力の経時変化

低拡散層の最大・最小有効主応力の経時変化を、それぞれ図 2.3-65 と図 2.3-66 に示 す。



図 2.3-65 低拡散層の最大有効主応力の経時変化



図 2.3-66 低拡散層の最小有効主応力の経時変化

f) セメント系部材の沈下量

セメント系部材の沈下量経時変化の出力点と結果を、それぞれ図 2.3-67 と図 2.3-68 に示す。全出力点の沈下量は等しく、施設は傾きなく沈下している。



図 2.3-67 セメント系部材の沈下量出力点



図 2.3-68 セメント系部材の沈下量経時変化

(c) 参照ケースまとめ

施設建設・埋設後、数百年程度で低透水層は概ね飽和する。上部と底部の低透水層では 20年程度で飽和し、側部の低透水層では水の浸透距離が大きいため、上部や底部よりも 時間的差異が確認されたが、数百年程度以内には低透水層全体が概ね飽和に至った。

低透水層の底部の膨潤圧については、圧密に伴い平均有効応力は増加するものの、膨潤 範囲の浸透に伴って 100 年後以降は反対に減少する。

低透水層の乾燥密度分布について、上部低透水層は上部埋戻し材側へ膨張することから、 初期乾燥密度から若干乾燥密度が低下する。ただし、上部低透水層の層厚を貫く形での乾 燥密度の低下は見られない。底部低透水層は圧密の効果により乾燥密度の上昇がみられた。

セメント系部材については、低透水層の膨潤に伴って圧縮場になる。ただし、セメント 系部材への水の侵入とともに有効応力は若干低下する。また、セメント系部材は圧縮場に なるものの、圧縮強度に対しては十分な裕度を示した。

以上から、参照ケースについて、特にバリア性能が低下するような事象には至らないこ とが示唆された。

本解析結果を参考に、比較ケースを設定し解析を実施することにより、人工バリアへの 影響を確認する。 (d) 比較ケース

比較ケースは、参照ケース結果を参考に、低透水層の偏膨潤による施設への影響の検討 を行う。状態のシナリオとして、設計通りに施工できなかった地下施設の空洞の底部(排 水孔付近)のみに GL-100m相当の水圧が局所的に掛かることにより、当該箇所で部分的 に水が侵入するケースとした。

a) 解析条件

カ学に関する境界条件は、モデル境界を鉛直水平ともに拘束条件とする。また、水理に 関する境界条件は、施設の深度を GL-100.0m と仮定して、GL-100.0m 相当の水圧とし て PL=PG=1.0 (MPa) の水圧とガス圧を、施設底部(排水孔付近)に設定した地下水 侵入エリアに規定する。地下水侵入エリアは幅 0.7m で外周から低透水層までを貫く範囲 とする。また、その他の部分は不透水境界とする。境界条件を図 2.3-69 に示す。

低透水層の状態として pd=1.6±0.1Mg/m³の管理値の範囲内で、膨潤の観点から極端な 状態(上部の乾燥密度 1.5Mg/m³、側部 1.6Mg/m³、底部 1.7Mg/m³)を想定する。また、 乾燥密度ごとの低透水層の物性値を表 2.3-35 に、その根拠となるグラフを図 2.3-70 及 び図 2.3-71 に示す。乾燥密度に依存しないパラメータに関しては参照ケースと同じ値を 用いた。



項目	記号	単位	上部	側部	底部	備考
初期乾燥密度	$ ho_{d}$	Mg/m ³	1.5	1.6	1.7	管理値 pd =1.6±0.1
膨潤圧	$\sigma_{\rm w}$	MPa	0.38	0.63	1.19	文献[5]
透水係数	Κ	m/s	3.00E-13	2.00E-13	1.00E-13	文献[5]
参照有効応力時の 湿潤膨潤指数(飽和時)	Ks0	_	0.1534	0.2108	0.2839	
有効応力依存 湿潤膨潤指数パラメータ	$\alpha_{\rm sp}$	_	-0.747	-0.544	-0.404	

表 2.3-35 低透水層の物性(変更値)









比較ケースでは、偏膨潤による施設変状の影響を確認するため、あえて地下施設の空洞 の底部(排水孔付近)のみに GL-100m相当の水圧が局所的に掛かることを想定した。そ のため、空洞の全周囲に GL-100m相当の水圧が均等に掛かる参照ケースより流入量が極 めて少なくなり、施設全体の飽和進展に長期時間を要し、時間軸として比較をすることは できない。したがって、設定した検討期間の最終変状に焦点をおくこととした。ただし、 目安として に示す施設施工に関する各状態①~⑦について、比較ケースで設定した施 工経過年数を参照するよう に示す。

以降、解析結果において経過時間による整理結果を示す各グラフでは、横軸表記を状態 番号とする。



図 2.3-72 比較ケースにおける状態表記による施工順序

状態番号	施工状態	経過時間 (比較ケース)
1	支保工・均しコンクリート及び側部埋め戻 し(セメント系)設置	0 ~ 1
2	底部低透水層設置	1~5
3	セメント系人エバリア及び廃棄体層設置	5 ~ 30
4	側部透水層設置	30~40
5	上部低透水層設置	$40 \sim 45$
6	上部埋め戻し(土質系)設置	45~50
$\overline{\mathcal{O}}$	再冠水	50 ~

表 2.3-36 施工状	態と経過時間参照
--------------	----------

b)解析結果

ア) 飽和度

飽和度分布を図 2.3-73 と図 2.3-74 に示す。低透水層と埋戻し材のサクション差が大きいことや、入流する面積が異なることから注水による底部の飽和よりも、上部低透水層が早く飽和する。



図 2.3-73 飽和度分布 (-) ① (変形:3倍)



図 2.3-74 飽和度分布 (-) ② (変形:3倍)

低透水層における飽和度の経時変化の出力点と解析結果を、それぞれ図 2.3-75 と図 2.3-76 に示す。出力点は初期低透水層厚さの中心とした。



図 2.3-75 出力点



図 2.3-76 低透水層の飽和度経時変化

- イ)セメント系部材の応力状態
- 最大·最小有効主応力分布

セメント系部材の最大・最小有効主応力分布を、それぞれ図 2.3-77 と図 2.3-78 に示 す(圧縮:負)。偏膨潤に伴い、セメント系部材底部で最大有効応力の上昇が生じる。低 透水層全体が膨潤することにより、最大有効応力の上昇部分は消失し、セメント系部材は 全圧縮状態になる。



状態②③のセメント系部材底部に、偏膨潤による圧縮がみられる。偏膨潤による圧縮は 0.7MPa 程度であり、圧縮強度に比べて十分に小さい。



セメント系部材の最大・最小有効主応力出力点を図 2.3-79 に示す。ただし、赤点はコンクリートピットの出力点、黄点は低拡散層の出力点をそれぞれ示す。



図 2.3-79 最大・最小有効主応力出力点(赤: RC ピット、黄: 低拡散層)

コンクリートピットと低拡散層の最大有効主応力の経時変化を、それぞれ図 2.3-80 と 図 2.3-81 に示す。状態②③付近では、セメント系部材底部に偏膨潤による最大有効主応 力の上昇が現れる。ただし、セメント系部材が破壊に至るような応力変化は起こらない



図 2.3-80 コンクリートピットの最大有効主応力の経時変化



図 2.3-81 低拡散層の最大有効主応力の経時変化

コンクリートピットと低拡散層の最小有効主応力の経時変化を、それぞれ図 2.3-82 と 図 2.3-83 に示す。偏膨潤によって、セメント系部材底部の最小主応力は状態②③付近で ピークを持つ。ただし、最大主応力と同様に、セメント系部材が破壊に至るような応力変 化は起こらない



図 2.3-82 コンクリートピットの最小有効主応力の経時変化



図 2.3-83 低拡散層の最小有効主応力の経時変化

ウ) セメント系部材の沈下量

セメント系部材の沈下量経時変化の出力点と結果を、それぞれ図 2.3-84 と図 2.3-85 に示す。比較ケースでは下部低透水層の飽和によって、上方に 5cm 程度変位する。



図 2.3-84 セメント系部材の沈下量出力点



図 2.3-85 セメント系部材の沈下量経時変化

図 2.3-86 に参照ケースと比較ケースでのセメント系部材の沈下量の比較図を示す。参照ケースでは沈下傾向で定常状態になるが、比較ケースでは上方への挙動で定常状態となる。



図 2.3-86 セメント系部材の沈下量比較図

(e)比較ケースまとめ

比較ケースによる解析によって、以下の点について確認することが出来た。

- 低透水層と埋戻し材のサクション差が大きいため、注水による底部の飽和よりも、
 低透水層の上部が早く飽和した。
- セメント系部材底部に偏膨潤による有効主応力の変化が見られた。ただし、セメント系部材が破壊に至るような応力変化は起こらなかった。

以上より、処分坑道横断面に関しては、参照ケースと同様に比較ケースについても特に バリア性能が低下するような挙動は確認されなかった。

ただし、挙動モードとして上方へ施設全体が変位する挙動が示唆されており、参照ケースにおける沈下挙動モードとは異なる結果となった。よって、坑道縦断方向における挙動の均等性を確認し、バリア性能を評価する必要があると考えられる。

3) 施設内温度に着目した熱-水連成解析

1)節にて、施設挙動解析を実施する上で、検討すべき事象の整理を行った。その結果、施設建設・埋設段階時、及び再冠水過程における低透水層の偏膨潤が、低透水層自体への透水性低下への影響、また低拡散層へのひび割れ等の影響を与える可能性があることが分かった。 そこで、2)節にて、水-応力連成解析を実施し、施設内の低透水層の応力状態を把握し、低透水層の状態、また低拡散層へのひび割れの可能性検討を横断面において実施したところ、ひび割れについては特に問題がないという検討結果となった。

そこで、本節では、モニタリングの具体化検討に際して、施設の建設・埋設段階~再冠水 過程における廃棄体からの熱の影響を解析的に検討することとした。

本解析作業では、温度分布と施設内における水の浸潤の関係を検証し、水の浸潤(飽和、 湧水)によるセメント系部材やベントナイト系部材の温度変化を検討する。その結果を以っ て、遠隔計測などによる機能確認計測計画へ反映させる。

解析に用いたモデルを参考に、上部埋戻し材施工後からの期間(表 2.3-13 のシナリオ整理 表中、作業⑥から少なくとも保全段階を包含する)を対象とする。

再現する事象の流れを以下のとおり想定した。

- 上部空洞が埋め戻され、処分坑道の端部にプラグが設置された後、強制排水を停止する。
- 空洞周辺及び人工バリア部材の飽和が進む。定置段階から埋戻し材施工完了の期間中、 廃棄体からの発熱が起きるが、次第に収束する。

なお、単純に温度変化の分布と程度を確認するため、応力-ひずみ関係などの力学的な考 慮はしない。

a. 解析コードの選定

本解析作業では、熱-水連成解析コード TOUGH2 を採用した。

TOUGH2は、米国ローレンスバークレイ国立研究所(LBNL)のK. Pruess博士らが 開発したTOUGHシミュレータの改良版であり、公開されている解析コードである[37]。 これまで、この解析コード(TOUGH2)を用いて、様々な多孔質媒体における流動のモ デリングに国内外で適用されている[12][38]。TOUGH2は、二相流挙動の他、拡散によ る移行も同時に解く機能を有しており、状態モジュールを交換することで、気液二相状態 で、以下のような非常に多くの地下流動を取り扱うことが可能となる。

- ■水-空気
- ■水(700℃までの超臨界条件) 空気
- ■水ー炭酸ガス
- ■水ートレーサー
- ■水-ブラックオイル
- ■水-空気-揮発性溶媒
- ■水-無機化学成分(岩石・水反応)

フラクチャに関してもダブルポロシティモデル(フラクチャマトリックス+岩石マトリ ックス)として取り扱うことが可能である。また、共益勾配法により三次元での高速計算 が可能であり、1万グリッド以上のモデルを PC 上で計算することが可能となっている。 いくつかの状態方程式モジュールについて、ソースコード(FORTRAN)が米国エネル ギー省によって公開されており、非常に廉価に入手することが可能となっている。

本解析コードの適用としては、例えば飽和 JIS モルタルやセメントペーストの室内ガ ス移行試験に対する山本らの事例があり[39]、ガス注入にともなう排水量及びガス排出速 度が比較的良好に再現されている[12]。また、ベントナイト系材料への適用については、 グリムゼル試験場におけるガス移行試験の 20%ベントナイト混合土の他、山本らの 70% ベントナイト混合土のガス移行試験に対する適用事例などがある[39][40]。また、馬場ら は既存の貯留層シミュレーションが適用されている地区をモデル化し、その貯留層の温 度・圧力状態の精緻化を図った結果、温度に関して実測値と概ねマッチングさせることが できた[41]。

以上のように、TOUGH2については、国内外の豊富な利用実績を通じて数値解析コードとしての信頼性は確保されているものと考えられる。

- b. 解析コード概要
- (a) 支配方程式
- a)基本式

TOUGH2では、下記の式で表される質量-エネルギー保存則を解く[40]。

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{n}} M^{\kappa} dV_{n} = \int_{\Gamma_{n}} \boldsymbol{F}^{\kappa} \cdot \boldsymbol{n} d\Gamma + \int_{V_{n}} q^{\kappa} dV_{n}$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{n}} Q dV_{n} = \int_{\Gamma_{n}} \boldsymbol{F}^{h} \cdot \boldsymbol{n} d\Gamma + \int_{V_{n}} q^{h} dV_{n}$$
(2.3-63)

ここで、

- M : 単位体積あたりの質量 (kg/m³)
- Q:単位体積あたりの熱量 (J/m³)
- F:単位面積あたりの質量フラックス(kg/(m²・s))、
 若しくは熱量フラックス(J/(m²・s))
- Q : 湧き出し/吸い込み(質量の場合: kg/s、熱の場合: J/s)
- t :時間 (s)
- Vn :任意の体積要素(m³)
- Γ_{n} : V_{n} を囲む閉曲面 (m²)
- n:閉曲面「nに立てた法線ベクトル
- κ: 1 ≤ κ ≤ NK: 化学種成分を示すインデックス(水、空気、CO₂、H₂、...)
 κ = NK + 1 = h: 熱成分を表すインデックス

である。式(2.3-63)を積分型有限差分法により離散化し、残差が収束判定値以下となる までニュートン法により繰り返し計算を行う。

b)構成則

以下に式(2.3-63)中の各項を概説する。

• Accumulation 項

基礎方程式の左辺にある質量若しくは熱量Mは、以下の式で表される。<<質量>

$$M^{\kappa} = \phi \left(S_{\mathrm{g}} \rho_{\mathrm{g}} X_{\mathrm{g}}^{\kappa} + S_{\mathrm{l}} \rho_{\mathrm{l}} X_{\mathrm{l}}^{\kappa} \right) \tag{2.3-64}$$

- **φ** : 孔隙率 (-)
- S_β : β相の飽和度 (-)
- $\rho_{\beta} : \beta$ 相の密度(kg/m³)
- X^κ_β : 成分κの質量分率 (-)
- β : 液相、気相、NAPL 相

<熱>

$$Q = (1 - \phi)\rho_{\rm s}C_{\rm s}T + \phi \left(S_{\rm g}\rho_{\rm g}u_{\rm g} + S_{\rm l}\rho_{\rm l}u_{\rm l}\right)$$
(2.3-65)

ρ_s:固相の密度(kg/m³)
 C_s:固相の比熱(J/(kg·K))
 T:温度(K)
 u_β:β相の比内部エネルギー(J/kg)

・Flux 項

右辺第1項の質量フラックス**F**^kは、以下の式で表される。 <質量(移流)>

$$\boldsymbol{F}^{\kappa}|_{\mathrm{adv}} = \sum_{\beta} X^{\kappa}_{\beta} \boldsymbol{F}_{\beta} \tag{2.3-66}$$

ここで β 相のフラックス F_{β} は、Darcyの法則において以下のように表される。

$$\boldsymbol{F}_{\beta} = -\boldsymbol{k} \frac{k_{\mathrm{r}\beta}\rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \left(\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \boldsymbol{g} \right)$$
(2.3-67)

k:絶対浸透率(m²) $k_{r\beta}:\beta$ 相の相対浸透率(-) $\mu_{\beta}:\beta$ 相の粘性係数(Pa·s) $P_{\beta}:\beta$ 相の圧力(Pa) g:重力加速度(m/s²)

<質量(拡散)>

$$\boldsymbol{F}^{\kappa}|_{\mathrm{dif}} = -\phi \tau_{0} \tau_{\beta} \rho_{\beta} d_{\beta}^{\kappa} \nabla X_{\beta}^{\kappa}$$

$$(2.3-68)$$

 $\tau_0 \tau_\beta$: β 相の屈曲度(-)

 d_{β}^{κ} : β 相における κ 成分の分子拡散係数 (m²/s)

同様に、熱フラックス**F**^hは、以下の式で表される。<熱>

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm{h}} = -\lambda \nabla T + \sum_{\beta} h_{\beta} \boldsymbol{F}_{\beta}$$
(2.3-69)

ここで、

$$\lambda$$
 : 熱伝導率 (W/(m・K)) h_{β} : β 相の比エンタルピー (J/kg)である。

<相変換>

気体の水への溶解量は、ヘンリーの法則にしたがうものとしており、その場合、瞬時平 衡を仮定した。

$$p = K_H x \tag{2.3-70}$$

ここで、

p:気相内の溶質の分圧 (Pa)

 $K_{\rm H}$:比例定数

x:モル分率

である。

c. 解析条件

(a) 解析モデル

検討断面は、図 2.3-87 に示すように平成 27 年度地下空洞型処分施設機能確認試験報告書[9]の地震挙動評価で用いられた検討断面と同様にした。

本解析に用いる解析モデルを図 2.3-88 に示す。坑道施設内のモデル化について、本検 討では施設の再冠水に伴う温度変化を把握することを目的とするため、コンクリートピッ ト内の模擬廃棄体と充てん材は地震時挙動評価と同様に、両者が合成された均質な構造体 として取り扱うこととし、その物性は充てん材で代表させることとした。したがって、廃 棄体部については簡略化したモデル化となっている。また、モデル全体領域は、坑道周囲 から上下左右 50 m とし、模擬廃棄体からの発熱による温度変化が境界まで及ばない十分 広い範囲をモデル化し、境界格子に定温境界(初期状態から境界の温度は変化しない)を 与えることとした。なお、発熱事象は、廃棄体からの発生に限定した。総要素数は 11,816 である。



図 2.3-87 試験空洞及び人工バリア断面図



図 2.3-88 解析モデル

(b) 材料物性值

廃棄体(充てん材)、上部充てん材、コンクリートピット、低拡散層、低透水層(ベントナイト)、上部埋戻し材(土質系材料)、側部埋戻し材(セメント系材料)、支保工、均しコンクリートの9部材に対して二相流パラメータ及び熱物性値を設定する。

解析で用いる材料物性値は基本的に機能確認試験で得られた値を採用する[42][43]。ただし、二相流パラメータ等の機能確認試験で確認されていないものについては既往の検討で用いられた値を採用した[44][45][46]。

a) 二相流パラメータ

既往の文献を基に構成する部材に対して設定する。採用する物性値は再冠水過程の検討 において用いられた物性を基本とする。

TOUGH2 では流体による透水性の違いを十分には表現できないため、浸透率kを水と 空気で異なる値 k_{β} とすることで対処する。

$$\boldsymbol{F}_{\beta} = -\boldsymbol{k}_{\beta} \frac{k_{\mathrm{r}\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} \left(\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \boldsymbol{g} \right)$$
(2.3-71)

●低透水層(ベントナイト)

林ら[2]が低透水層に適用した乾燥密度 ρ_d =1.6 Mg/m³のクニゲル GX、100%を対象と した室内試験結果から設定したパラメータを用いる。気相の相対浸透率については、 Corey モデル[15]を近似して用いた。相対浸透率の気相のフィッティングについては、解 析範囲と考えられる飽和度(80%~90%)付近の再現性を優先した。毛管圧は van Genuchten モデル[17]で近似した。

●低拡散層(セメント系)

Kumagai et al.における低拡散層のパラメータを用いる[10]。ここで用いられているパ ラメータのうち、二相流パラメータは山本らの研究における JIS モルタルのガス移行試 験から逆解析によって同定された二相流パラメータである。空隙率については田中らの文 献を基に設定した。なお、相対浸透率は Corey モデル[15]、毛管圧は Narasimhan モデ ル[16]で近似した。フィッティングについては、解析対象と考えられる飽和度付近の再現 性を優先した。

●コンクリートピット、廃棄体、上部充てん材、側部埋戻し材(セメント系)、支保工、均 しコンクリート

Kumagai et al.におけるコンクリート材のパラメータを用いる[10]。ここで用いられて いる二相流パラメータ(毛管圧力、相対浸透率)は Mayer et al. [13]のパラメータである。 空隙率については田中らの文献を基に設定した。なお、相対浸透率は Corey モデル[15]、 毛管圧は Narasimhan モデル[16]10 で近似した。フィッティングについては、解析対象 と考えられる飽和度付近の再現性を優先した。

●上部埋戻し材(土質系)

Kumagai et al. における上部埋戻し材(土質系材料)のパラメータを用いる[10]。こ こで用いられている二相流パラメータは RWMC 報告書の値を参照している[42][43]。な お、相対浸透率は Corey モデル[15]、毛管圧は Narasimhan モデル[16]で近似した。

相対浸透率は Corey モデル[15]、毛管圧は Narasimhan モデル[16]で近似した。

以降に本検討で用いた相対浸透率曲線と毛管圧曲線のそれぞれに関するモデル定義式 を示す。

Corey モデル(相対浸透率)[15]

 $k_{\rm rg} = (1 - S_{\rm e})^{\rm n} (1 - S_{\rm e}^{\rm n}) \tag{2.3-72}$

[●]岩盤

$$k_{\rm rl} = S_{\rm e}^{\rm m} \tag{2.3-73}$$

$$S_{\rm e} = (S_{\rm l} - S_{\rm lr})/(1 - S_{\rm lr} - S_{\rm gr})$$
 (2.3-74)

ここで、 k_{rg} がガスの相対浸透率、 k_{rl} は液体の相対浸透率、 S_e は有効間隙飽和度、 S_l は間隙飽和度、 S_{lr} は残留間隙飽和度、 S_{gr} は残留ガス飽和率を示す。

② van Genuchten モデル(相対浸透率)(水相のみ)[17]

$$k_{\rm rl} = \sqrt{S_{\rm e}} \left(1 - \left(1 - S_{\rm e}^{\frac{1}{\lambda}} \right)^{\lambda} \right) \tag{2.3-75}$$

$$k_{\rm rg} = \sqrt{1 - S_{\rm e}} \left[1 - \left\{ 1 - (1 - S_{\rm e})^{\frac{1}{\lambda}} \right\}^{\lambda} \right]$$
(2.3-76)

$$S_e = (S_l - S_{lr})/(1 - S_{lr} - S_{rg})$$
 (2.3-77)

ここで、λはλ=1-1/nをみたす空隙率分布パラメータを示す。

③ Narasimhan モデル(毛管圧)[16]

$$P_{\rm c} = P_{\rm e} - P_{\rm m} [(1 - S_{\rm l})/(S_{\rm l} - S_{\rm lr})]^{1 - n}$$
(2.3-78)

ここで、 P_{c} は毛管圧、 P_{e} は毛管排除圧(ガス侵入圧)、 P_{m} は Narasimhan モデル係数を示す。

④ van Genuchten モデル(毛管圧)[17]

$$P_{\rm c} = P_0 \Big(S_{\rm e}^{-1/\lambda} - 1 \Big)^{1-\lambda} \tag{2.3-79}$$

$$S_{\rm e} = (S_{\rm l} - S_{\rm lr}) / (1 - S_{\rm lr} - S_{\rm gr})$$
 (2.3-80)

ここで、Pcは毛管圧、Poはガス侵入圧を示す。

b)絶対浸透率

TOUGH2 解析に使用する主な部材材料の透水性を示すパラメータとして、絶対浸透率 を設定する。絶対浸透率は透水係数データを基本に式(2.3-81)による換算を行うことに より設定値を求めた。

$$\boldsymbol{k} = \frac{\mu}{\rho \boldsymbol{g}} \boldsymbol{K} \tag{2.3-81}$$

ここで、

k:絶対浸透率(m²)
 K:透水係数(m/s)
 ρ:水の密度(kg/m³)
 μ:水の粘性係数(Pa·s = kg/(m·s))
 g:重力加速度(m/s²)

換算するため必要なそれぞれの係数値については、理科年表(平成 28 年版)より表 2.3-37の値を用いて計算した。各係数値は、TOUGH2 解析において設定した坑道内雰囲 気温度 15℃を条件に採用した。その結果、表 2.3-38 に基本となる各部材の透水係数と換 算した絶対浸透率の設定値を整理して示す。なお、各部材の透水係数の設定については、 後述「1.3 節 化学に着目した検討」内、「1.3.5 解析概要(1)入力条件」にて詳細を記述 している。

以上より、整理した各種解析パラメーター覧表を表に示す[47][48]。

1 2.5 51	医异に用いた甘味数値(生料牛衣_十成 20 牛皮)				
	条件	値	単位		
重力加速度		9.80665	m/s ²		
水の密度	$15^{\circ}\mathrm{C}$	999.10	kg/m ³		
粘性係数	15° C	0.0011378	Pa ∙ s		

表 2.3-37 換算に用いた各係数値(理科年表 平成 28 年度)

表 2.3-38	主な部材に関する絶対浸透率設定値

部 材	透水係数初期値 K _o (m/s)	絶対浸透率 K (m ²)	透水係数出典
コンクリートピット (セメント系)	$5.0 imes 10^{-13}$	5.81×10^{-20}	平成 19~24 年度取りまとめ報告書、 RWMC[35]
低拡散層(セメント 系)	1.0×10^{-13}	1.16×10^{-20}	平成 19~24 年度取りまとめ報告書、 RWMC[35]
低透水層(ベントナイ ト系)	$5.0 imes 10^{-13}$	5.81×10^{-20}	平成 19~24 年度取りまとめ報告書、 RWMC[35]
上部埋戻し材(土質 系)	5.0×10^{-11}	5.81×10^{-18}	平成 26 年度報告書、RWMC[26]
側部埋戻し材(セメン ト系)	$5.0 imes 10^{-13}$	5.81×10^{-20}	平成 19~24 年度取りまとめ報告書、 RWMC[35]
吹付けコンクリート	1.0×10^{-8}	$1.16 imes 10^{-15}$	平成 19~24 年度取りまとめ報告書、 RWMC[35]
岩盤	2.0×10 ⁻⁸	2.32×10^{-15}	石田ほか、原子カバックエンド研究、 Vol.13、No.1 (2006.10)[4]

c)熱物性パラメータ

各年度の地下空洞型処分施設性能確証試験・閉鎖技術確証試験報告書において各々検討 し、取得した値を優先して採用することとする[49][50][51]。一方、上記報告書に記述が ない部位、パラメータについては、既往の検討で用いられた値を採用した[9][14][41](表 2.3-39 参照)。

◆ 熱伝導率の飽和度依存性(低透水層_ベントナイト)

低透水層(ベントナイト)については、文献 JNC TN8400 99-052 の検討[52]より熱伝 導率の飽和度依存性は実験的にその関係が示されている。本年度実施する解析では、上記 文献の試験結果プロットを線形に近似した直線の飽和度 $S_w = 1.0$ における熱伝導率を参 考条件値とし、これを基本条件値と線形に結ぶことで、熱伝導率の飽和度依存条件を設定 した。設定グラフを図 2.3-89 に示す。グラフ中、解析対象となる飽和度範囲を実線で、 対象外となる範囲を点線で示す。



図 2.3-89 熱伝導率の飽和度依存性(低透水層)

廃棄体間充填材1.813 (相当水飽和度 0.90)1.420 (相当水飽和度 0.90)平成 21 年度報告書(2010)RWMC平成 21 年度報告書(2010)RWMC平成 平成 21 年度報告書(2010)RWMC平成 平成 21 年度報告書(2010)RWMC廃棄体容器41.5000.570増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会10.348廃棄体10.3480.954増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会1.956 (相当水飽和度 0.90)1,232 (相当水飽和度 0.90)ニンクリートピット (セメント系) とニンクリートピット (セメント系)	0.12 22 年度報告書(2011)RWMC 0.00 0.00	
廃棄体エリア廃棄体容器平成 21 年度報告書(2010)RWMC平成 21 年度報告書(2010)RWMC平成 平成 9廃棄体容器41.5000.570増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会廃棄体10.3480.954上部充填材1.956 (相当水飽和度 0.90)1,232 (相当水飽和度 0.90)コンクリートピット (セメント系) とコンクリートピット (セメント系)コンクリートピット (セメント系)	22 年度報告書(2011)RWMC 0.00 0.00	
廃棄体エリア廃棄体容器41.5000.570廃棄体増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会廃棄体10.3480.954増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会1.956 (相当水飽和度 0.90)1,232 (相当水飽和度 0.90)上部充填材コンクリートピット (セメント系) と	0.00	
廃業体エリア廃業体合益増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会廃棄体10.3480.954増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会1.956(相当水飽和度 0.90)1,232(相当水飽和度 0.90)ニンクリートピット(セメント系)とコンクリートピット(セメント系)	0.00	
廃棄体10.3480.954増田(2008)土木学会増田(2008)土木学会1.956(相当水飽和度 0.90)1,232(相当水飽和度 0.90)ニンクリートピット(セメント系)とニンクリートピット(セメント系)	0.00	
施業体 増田(2008)土木学会 増田(2008)土木学会 1.956(相当水飽和度 0.90) 1,232(相当水飽和度 0.90) 上部充填材 コンクリートピット(セメント系)と コンクリートピット(セメント系)		
上部充填材 コンクリートピット(ヤメント系)と コンクリートピット(ヤメント系)	0.15	
	99 年度報告書(9011)PWMC	
同値と仮定 と同値と仮定 *パペ	〒1%, 22 千茂和百音(2011)ftWIME	
コンクリートピット(セメント系) 1.956(相当水飽和度 0.90) 1,232(相当水飽和度 0.90)	0.13	
コンクラードとラード(ビアンドボ) 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成	24 年度報告書(2013)RWMC	
低拡散層 (セメント系) 1.831 (相当水飽和度 0.90) 1,332 (相当水飽和度 0.90)	0.15	
岡協設信 (ビバンドネパー 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 20 年度報告書(2009)RWMC 平成 20 年度報告書(2009)RWMC 20 年度報告報(2009)RWMC 20 年度報(2009)RWMC 20 年度報告書(2009)RWMC 20 年度報告書(2009)RWMC 20 年度報告報(2009)RWMC 20 年度報(2009)RWMC 20 8 RWMC 20 8 R	26 年度報告書(2015)RWMC	
1.400(相当水飽和度 0.85) 730(相当水飽和度 0.00)	0.41	
低透水層(ベントナイト系)平成 20 年度報告書(2009)RWMC : 1.409 平成 22 年度報告書(2009)RWMC : 1.396増田(2008)土木学会	Kumagai(2010)ICEM	
ト報理員した(土質系) 1.690(相当水飽和度 0.00) 770(相当水飽和度 0.00)	0.30	
1 11111111111111111111111111111111111	Kumagai(2010)ICEM	
- 御部畑戸しせ (セイント系) 1.990(相当水飽和度 0.90) 1,248(相当水飽和度 0.90)	0.17	
一 前 印 年 戻 し 材 (セ ノ ノ ト 茶) 平成 19 年 度 報告書(2008)RWMC 平成 19 年 度 報告書(2008)RWMC 平成	19 年度報告書(2008)RWMC	
1.990(相当水飽和度 0.90) 1,248(相当水飽和度 0.90)	0.17	
インバートコンクリート 側部埋戻し材(セメント系)と同値と 側部埋戻し材(セメント系)と同値 側部埋	!戻し材(セメント系)と同値	
仮定 と仮定	と仮定	
1.990(相当水飽和度 0.90) 1,248(相当水飽和度 0.90)	0.17	
支保コンクリート 側部埋戻し材(セメント系)と同値と 側部埋戻し材(セメント系)と同値 側部埋	戻し材(セメント系)と同値	
仮定 と仮定	と仮定	
0.878(相当水飽和度 0.00) 800(相当水飽和度 0.00)	0.40	
岩盤 増田(2008)土木学会 増田(2008)土木学会 第 2 次I 平成 28 ~0.45 鈴木(20 *☆石)	取りまとめ中央値:0.20 3 年度報告書(2017)RWMC:0.40 110)岩盤力学:0.56 対応回組合資料:0.37	

表 2.3-39 熱物性パラメータ一覧
◆ 熱伝導率の飽和度依存性(その他の部材)

低透水層以外の部材に関して、各部材材料に関するデータ取得時の飽和条件やセメント、 岩石などの一般値を参考に飽和度を設定し、熱伝導率の理論算定式により絶乾状態 $S_w = 0.0$ と飽和状態 $S_w = 1.0$ の熱伝導率 ($\lambda_{dry}, \lambda_{sat}$)を算出し、2点を線形で結び設定した(表 2.3-40、図 2.3-90参照)。グラフ中、解析対象となる飽和度範囲を実線で、対象外となる 範囲を点線で示す。

	側部 埋戻し材	低拡散層	コンクリート ピット	廃棄体間 充填材	上部充填材	上部埋戻し材	岩盤
φ	0.17	0.15	0.13	0.12	0.15	0.30	0.40
$S_{ m w}$	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.000	0.000
$ ilde{\lambda}$	1.99	1.831	1.956	1.813	1.956	1.690	0.878
λ _{dry}	1.893	1.746	1.882	1.745	1.871	1.690	0.878
$\lambda_{\rm sat}$	2.001	1.840	1.964	1.821	1.965	1.879	1.130

表 2.3-40 飽和度に基づいた熱伝導率算出結果一覧



図 2.3-90 熱伝導率の飽和度依存性

◆ 比熱の飽和度依存性

既往研究(前出 JNC 文献[52]ほか)から、一般的な比熱の飽和度依存性の関係が検討 されているが、本年度解析対象となる各部材材料に関する比熱のデータ取得方法が明確で ないこともあるため、ベントナイト(粘土)、セメント及び岩石などの材質における飽和 度と比熱に一般値を参考に、飽和度をそれぞれ設定し、理論式により絶乾状態 $S_w = 0.0$ と 飽和状態 $S_w = 1.0$ の熱伝導率(c_{dry}, c_{sat})を算出し、2点を線形で結び設定した(表 2.3-41、 図 2.3-91 参照)。グラフ中、解析対象となる飽和度範囲を実線で、対象外となる範囲を 点線で示す。

	側部 埋戻し材	低透水層	低拡散層	コンクリート ピット	廃棄体間 充填材	上部充填材	上部埋戻し材	岩盤
φ	0.17	0.41	0.15	0.13	0.12	0.15	0.30	0.40
$S_{ m w}$	0.900	0.000	0.900	0.900	0.900	0.900	0.000	0.000
ĩ	1248	730	1332	1232	1420	1232	770	800
<i>c</i> _{dry}	763	730	904	861	1077	804	770	800
$c_{\rm wet}$	1302	2030	1380	1273	1458	1280	1722	2069

表 2.3・41 飽和度に基づいた比熱算出結果一覧



図 2.3-91 比熱の飽和度依存性

◆ 廃棄体からの発熱量及び熱特性

中深度処分の熱解析に関する既往検討[44][45]では、コンクリートピット内の廃棄体定 置エリアを廃棄体容器、廃棄体間充てん材をソリッド要素でモデル化している(図 2.3-92 参照)。本解析では、廃棄体・容器・廃棄体間充てん材をそれぞれの形状でメッシュ割し ていないことから廃棄体エリア全域に熱条件を与えてしまうことになるため、上記基本概 念との繋がりも大切にするため、昨年度まで検討に用いた解析モデルにおいてメッシュは 変更しないながらも、廃棄体からの発熱量や物性値(密度、比熱、熱伝導率他)は容器(鉄)、 廃棄物(鉄)、充てん材の断面積のうち、発熱しない廃棄体間充てん材の面積分けを差し 引いて(85%)、等価物性として与える。以下にその検討内容を示す。

既往検討より、廃棄体の定置に関する基本概念は5列×4段であり、廃棄体列間に隙間 充てん材が施工されている。この考え方に検討対象である図 2.3-93 に示す模擬施設にお ける全廃棄体エリア(8.950 m×6.140 m=54.953 m²)において以下の施工寸法[53]を当 てはめて発熱発生エリアの設定を行う(表 2.3-42参照)。

【最上段廃棄体】

廃棄体容積 : 1.500 m×0.990 m=1.485 m² 鉄製容器容積: 1.600 m×1.090 m-1.485 m²=0.259 m²

【以外の廃棄体】

廃棄体容積 : 1.500 m×1.500 m=2.250 m²
鉄製容器容積: 1.600 m×1.600 m-2.250 m²=0.310 m²

以上より、

廃棄体容積 : 1.485 m²×5 体+2.250 m²×15 体=41.175 m² 鉄製容器容積: 0.259 m²×5 体+0.310 m²×15 体=5.945 m²



図 2.3-92 現状考えられている中深度処分の断面概念[45]



図 2.3-93 六ヶ所模擬施設の断面を基本とした廃棄体エリア内

部 材	面 積	į (m ²)	面積	i比	想定材質	発 熱
廃棄体エリア 全域	54.9	953	1.0)		
廃棄体	41.175	47 190	0.75	0.95	鉄類	0
容器	5.945	47.120	0.10	0.80	鉄類	0
廃棄体間充填材	7.8	33	0.1	5	モルタル	×

表 2.3-42 廃棄体エリアからの発熱条件設定

なお、廃棄体からの発生発熱量は以下の情報を基に図 2.3-94 に示す通り設定した。

- ・ 各原子力発電所における設定(安全貯蔵期間)を収集、整理した結果、原子炉停止後15年後に10 W/m³を初期値として発生させる。
- ・ Co-60 半減期算定式にしたがって、初期値 10 W/m³から指数関数的に減少するモデルとして設定した。



廃棄体エリアに与える熱特性(比熱、熱伝導率)は、既往検討[45]で各部位に設定された熱物性値(表 2.3・43 参照)を参考に設定した。廃棄体(表中、1_容器)、容器(表中、11_容器1)を用いて、廃棄体エリア内の各部位において前述にて算出した面積比率を考慮した上で、既設定した廃棄体間充てん材の熱物性(表 2.3・39 参照)を加えて、飽和度依存性を算出設定した。算出した飽和度依存性を考慮した廃棄体エリアの熱特性の結果を表 2.3・44 及び図 2.3・95 に示す。

		<u> </u>		熱伝導率	比熱	密度
				W∕mK	kJ/kgK	kg/m ³
廃棄体→	1	容器	أبياب أيقيق فيقب أبيا	10.348	<u>0.95</u> 4	3,282
	2	充てん材		1.507	1.050	2,140
	3	コンクリート充てん	充てん材上部	1.507	1.050	2,140
	4	コンクリートピット		1.915	1.050	2,500
	5	低拡散層		1.507	1.050	2,140
	6	低透水層		1.000	0.730	1,600
	7	埋戻し	埋戻し上部	1.690	0.770	1,600
	8	二次覆工		1.797	1.050	2,500
	9	一次覆工		0.878	0.800	2,200
	10	岩盤		0 <u>.878</u>	<u>0.8</u> 00	2,200
容器→	11	容器1		41.500	0.570	7,850
	12	容器2		10.348	0.954	3,282
	13	コンクリート	均しコンクリート	1.797	1.050	2,500
	14	コンクリート	埋戻し側部底部	1.797	1.050	2,500

表 2.3-43 各部位熱物性值[45]

表 2.3-44 廃棄体エリア内における熱特性の飽和度依存性算出結果

			盂珪	声珪レ	比	訙	熱伝	導率	問附该
部位	想定材料	発熱	山伯	凹惧儿	乾燥 飽和		乾燥	飽和	间原华
			(m^2)	()	(J/kg/K)		(/m	()	
廃棄体	鉄	0	41.175	0.75	954		10.	348	0.000
容器	鉄	0	5.945	0.10	57	0	41.	500	0.000
充てん材	モルタル	×	7.833	0.15	1,077 1,458		1.745	1.821	0.120
全体			54.950	1.00	930 984		12.492 12.503		0.002



図 2.3-95 廃棄体エリア内における熱特性の飽和度依存性

(c) その他設定条件地下水流動パラメータ

その他、解析を実施するにあたって必要となる設定事項を以下に整理して示す。

① 地下水流動パラメータ

坑道底盤で、GL-100 m 相当の静水圧がかかるよう設定するとともに、バックグランド としての地下水流動方向は左⇒右とし、後述の化学的変質に関する予測解析条件(動水勾 配 0.07 m/m)と同調することとした(図 2.3-88 参照)。

② 施工ステップ①の初期状態

ーモデル左端で地表面に水位があるとし、動水勾配 0.07 m/m として計算した際の地下 水位の静水圧とした。

ー岩盤内は水で完全に飽和した状態とし、坑道内部の部材については表 2.3-47 に示す 初期飽和度を与え、その他の部材(空洞部分)は乾燥状態とした。

-地表面温度を 12℃とし、地温勾配 0.03℃/m によって設定した。

③ 境界条件

ーモデル上面、側面、底面は圧力・温度固定境界とした。

ー施工ステップ①~⑥において、坑道内部で部材が無い空洞部については、圧力・温度 固定境界(圧力 0.1 MPa、温度 15℃)とした。

ー施工ステップ①~⑥までは、支保コンクリートに流入した地下水は完全に排水される として、圧力・温度固定境界(圧力:0.1 MPa、温度 15℃)とした。

④ 境界条件

上記、施工ステップを考慮した境界条件(まとめ)を表 2.3-45 に示す。また、TOUGH2 解析ケースを表 2.3-46 に示す。

			施_	ロステップ	0~45年	45~50年	50~1000年
条	件項	目			0 40-	43 00-	30 1000-
		ノイマン	流束(均	亢道内部)			
	Б			モデル境界	初期值*	初期值*	初期值*
	止 力	ディリクレ	気相 圧力	支保 コンクリート	初期值*	初期值*	
水				坑道内部	0.1 MPa(大気圧)		
空 気 介		ノイマン	j	充束			
気	飽			モデル境界	初期值*	初期值*	初期值*
	和 率	ディリクレ	気相 飽和率	支保 コンクリート	初期值*	初期值*	
				坑道内部	1.0		
		ノイマン	熱	流束			
穀				モデル境界	初期值*	初期值*	初期值*
	<u></u>	ディリクレ	温度	支保 コンクリート	初期值*	初期值*	
				坑道内部	15°C		

表 2.3-45 施工過程における境界条件整理 (TOUGH2)



図 2.3-96 解析施工ステップ

			支保工i	透水性
ケース	解析の状態	透水性条件	透水係数	絶対浸透率
			(m/sec)	(m ²)
1	各部材が想定通りに 機能すると考えた基 本ケース	ー般的な坑道支保に与える条件 (小割れ目が存在し、多少の湧 水侵入がある)	1.0×10^{-8}	$1.16 \times 10^{.15}$
2	施設内への地下水の 浸潤が大きく抑制さ れるケース	吹付けコンクリートが適切良好 に施工され、地下水の施設内の 浸水を完全に抑制している状況 を設定	$1.0 imes 10^{-12}$	$1.16 imes 10^{-19}$
3	施設内への地下水の 浸潤が促進されるケ ース	防水シートが機能せず、かつ吹 付けコンクリートも全周囲から 通水し、吹付けコンクリートの セメント部は劣化し、ほとんど 砂のみが残り、高透水性が生じ る可能性がある状況を設定	$1.0 imes 10^{\cdot 4}$	$1.16 imes 10^{-11}$

表 2.3-46 TOUGH2 解析ケース

表 2.3-47 TOUGH2 解析二相流パラメータ

項目									相対浸透率 <i>k</i> _{rl} (-)						毛細管圧力 <i>P</i> c (Pa)				初期
部材	絶対浸透率 <i>k</i> (m ²)	真密度 ρ (Mg/m ³)	空隙率 <i>Ф</i> (-)	ヤング係数 E (MPa)	ポアソン比 <i>v</i> (-)	固相圧縮率 β _P (1/Pa)	モデル	残留水飽和度 S _{lr} (-)	残留ガス 飽和度 S _{gr} (-)	形状係数 <i>m</i> (-)	形状係数 n (-)	モデル	残留水 飽和度 S lr (-)	残留ガス 飽和度 S _{gr} (-)	ガス侵入圧 P _e (MPa)	係数 P _m , P ₀ (MPa)	Na パラメータ り (-)	vG パラメータ n (-)	飽和率 (-)
廃棄体間 充てん材	1.16×10 ⁻²⁰	2.56	0.12	32,190	0.20	5.59×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
上部 充てん材	5.81×10 ⁻²⁰	2.53	0.15	40,200	0.20	4.48×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
コンクリートピット (セメント系)	5.81×10 ⁻²⁰	2.53	0.13	35,260	0.20	5.10×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
低拡散層 (セメント系)	1.16×10 ⁻²⁰	2.56	0.15	27,530	0.20	6.54×10 ⁻¹¹	Corey	0.15	0.075	25	2.3	Na	0.15	0	0.069	5.000	1.10		0.90
低透水層 (ベントナイト系)	5.81×10 ⁻²⁰	2.65	0.41	46.4	0.42	1.03×10 ⁻⁸	Corey	0	0	2	2.0	vG	0	0		3.270		1.70	0.85
上部埋戻し材 (土質系)	5.81×10 ⁻¹⁸	2.71	0.30	4.90	0.43	8.57×10 ⁻⁸	Corey	0.3	0.01	25	2.3	vG	0.58	0.01	0.040			2.50	0.75
側部埋戻し材 (セメント系)	5.81×10 ⁻²⁰	2.53	0.17	36,000	0.20	5.00×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
インバート コンクリート	5.81×10 ⁻²⁰	2.53	0.17	36,000	0.20	5.00×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
支保コンクリート	1.16×10 ⁻¹⁵	2.53	0.17	27,900	0.20	6.45×10 ⁻¹¹	Corey	0.3	0.18	4	2.0	Na	0	0	0.100	1.200	1.30		0.90
岩盤	2.32×10 ⁻¹⁵	2.70	0.40	2,000	0.47	9.00×10 ⁻¹¹	vG	0	0		水:10.0 空気:4.42	vG	0	0		0.015		1.56	1.00

d. 解析結果

a) 飽和度、温度の経時変化

図 2.3-96 に示す施工ステップに従い、解析コード TOUGH2 を用いた解析を実施した。 その結果、得られた解析モデル断面における飽和度、温度に関する経時変化について図 2.3-97 にコンター凡例図、図 2.3-98~図 2.3-100 に解析ケースごとに整理したコンター 図を示す。支保工の完全排水は施工ステップ⑥が終了するまでと設定しており、支保工部 分の飽和度は 50 年まで、設定した 90%程度のコンターを示しているものの、100 年後に は高い飽和状態を呈している。

坑道内の飽和度の変化は、

- 50 年未満は、水・空気の再配置
- 50年以降は、水・空気の再配置、圧力上昇による空気の圧縮、空気の水への溶解 と拡散

が主な要因となって生じていると考えられる。特に、坑道埋戻しに伴う圧力上昇による空 気の圧縮の影響が大きい。

一方、温度分布では廃棄体からの発熱を廃棄体設置施工が開始される 10 年からと設定 しており、コンター図では 20 年目に温度上昇が見られ、その後低下傾向を示した。隣接 する部材が設置されることで、既設の部材の温度は低下することが分かる。

次に、飽和度、温度の経時変化をそれぞれグラフ化した。図 2.3-101 には、解析デー タの出力点を、図 2.3-102 には出力点のうち、各部材を代表する 8 点を選んで飽和度、 温度の経時変化グラフ化したものを示す。各グラフ中には、施工ステップとなる各種イベ ントを併記している。これより、隣り合う部材が配置されることによって、飽和度は一時 的に低下するものの、一定期間が過ぎると全体として飽和度は上昇することが分かる。温 度は 15 年でピークを迎え、その後は初期の温度に低下する。また、ケース別の比較によ ると、ケース①を基本として、ケース②とケース③の双方において地下水浸潤の程度に差 異が生じている。これは、吹付けコンクリートの透水性が大きいケース③においては、地 下水浸潤が相対的に早くなっているためと考えられる。



図 2.3-97 解析コンター凡例



図 2.3-98 解析結果_ケース①(基本)



図 2.3-99 解析結果_ケース② (浸潤抑制)



図 2.3-100 解析結果_ケース③ (浸潤促進)



図 2.3-101 解析データ出力点



図 2.3-102 主な各部材代表点における飽和度、温度の経時変化

b)低透水層における飽和度と温度の関係

計測モニタリング策定において温度データの推移によって浸潤状況を把握し、地下水流 入などの異常箇所の確認に資するデータを提供するために、解析ケース①~③について、 各出力点における温度と飽和度の関係を整理した。低透水層及び低拡散層の周囲に着目し、 その周囲の各出力点における飽和度と温度のデータに関する代表年データを表 2.3-48、 表 2.3-49 にそれぞれ整理した。加えて、50 年以降の低透水層及び低拡散層周囲の各点に おける全データを用いてその関係をグラフ化したものを図 2.3-104、図 2.3-105 に示す。 なお、低透水層、低拡散層の底版内にそれぞれ設けた出力点 1、出力点 2 についての飽和 度と温度の関係のみ、建設段階当初からの全データを用いてグラフ化した。

廃棄体からの発熱量に関して、解析結果により算出された最高温度の変化量は昨年度に 同様のTOUGH2解析による結果と比較して小さいものとなった。これは、廃棄体からの 発熱条件を変更したことにより、発熱総量が約 1/3 に減少したことに起因すると考えら れた(図 2.3-103 参照)。

一方、各部材周囲に設けた出力点における 50 年以降の飽和度と温度の関係は、設けた 箇所により、その傾向に多少の差異が確認された。特に、低透水層の上部角及び上部では、 ケース②の浸潤抑制条件において、ケース①、ケース③とは異なる傾向を示した。しかし ながら、どのケースにおいても、その変化程度はあまり大きなものではなかった。



図 2.3-103 廃棄体からの発熱条件比較

		出力	」点1	出力	1点7	出力	点 11	出力	点 14	出力	点17	出力	点20
	Time	Sl	Т	Sl	Т	Sl	Т	Sl	Т	Sl	Т	Sl	Т
	[year]	[•]	[oC]	[-]	[oC]	[-]	[oC]	[•]	[oC]	[•]	[oC]	[-]	[oC]
	0												
	10	0.899	15.161									0.916	15.603
	20	0.929	20.015									0.942	23.383
	30	0.941	16.428							0.857	15.509	0.940	16.624
ケース(1) (其木)	50	0.953	15.438	0.960	15.008	0.993	14.942	0.993	14.948	0.942	15.212	0.891	15.225
	100	0.996	15.416	1.000	15.225	1.000	15.205	1.000	15.207	0.998	15.332	0.983	15.333
	200	1.000	15.355	1.000	15.183	1.000	15.166	1.000	15.167	1.000	15.280	1.000	15.281
	300	1.000	15.348	1.000	15.176	1.000	15.158	1.000	15.160	1.000	15.272	1.000	15.273
	400	1.000	15.347	1.000	15.175	1.000	15.158	1.000	15.159	1.000	15.272	1.000	15.273
	0												
	10	0.899	15.161									0.916	15.603
4- 70	20	0.929	20.015									0.942	23.383
	30	0.941	16.428							0.857	15.509	0.940	16.624
ケース(<u>2</u>) (温潤抑制)	50	0.953	15.110	0.958	15.076	0.962	14.990	0.962	14.991	0.942	15.069	0.891	15.107
	100	0.995	15.415	1.000	15.225	1.000	15.205	1.000	15.207	0.997	15.331	0.979	15.333
	200	1.000	15.355	1.000	15.183	1.000	15.166	1.000	15.167	1.000	15.279	1.000	15.281
	300	1.000	15.355	1.000	15.182	1.000	15.165	1.000	15.166	1.000	15.279	1.000	15.280
	400	1.000	15.355	1.000	15.182	1.000	15.165	1.000	15.166	1.000	15.279	1.000	15.280
	0												
	10	0.899	15.161									0.916	15.603
	20	0.929	20.015									0.942	23.383
	30	0.941	16.428							0.857	15.509	0.940	16.624
ケース(3) (浸潤促進)	50	0.953	15.281	0.959	15.051	0.981	14.961	0.981	14.965	0.942	15.128	0.891	15.141
	100	0.996	15.417	1.000	15.225	1.000	15.207	1.000	15.206	0.998	15.333	0.982	15.334
	200	1.000	15.355	1.000	15.183	1.000	15.166	1.000	15.166	1.000	15.280	1.000	15.281
	300	1.000	15.348	1.000	15.175	1.000	15.159	1.000	15.159	1.000	15.272	1.000	15.273
-	400	1.000	15.347	1.000	15.174	1.000	15.158	1.000	15.158	1.000	15.271	1.000	15.272

表 2.3-48 各点における飽和度と温度データ_低透水層周囲

		出た	」点2	出力	1点6	出力	点10	出力	点13	出力	点16	出力	点19
	Time	Sl	Т										
	[year]	[-]	[oC]	[-]	[oC]	[•]	[oC]	[-]	[oC]	[-]	[oC]	[-]	[oC]
	0												
	10	0.911	15.476							0.916	15.603	0.916	15.603
	20	0.914	22.246							0.942	23.382	0.942	23.383
	30	0.917	17.061	0.917	17.287	0.900	16.079	0.900	16.079	0.940	16.624	0.940	16.624
ケース(1) (基本)	50	0.921	15.366	0.875	15.084	0.835	15.021	0.835	15.025	0.891	15.223	0.891	15.225
	100	0.984	15.388	0.995	15.260	0.995	15.240	0.995	15.240	0.982	15.334	0.983	15.333
	200	1.000	15.330	0.999	15.215	0.997	15.196	0.998	15.197	1.000	15.281	1.000	15.281
	300	1.000	15.323	0.999	15.207	0.997	15.189	0.998	15.190	1.000	15.273	1.000	15.273
	400	1.000	15.322	0.999	15.207	0.997	15.189	0.998	15.190	1.000	15.273	1.000	15.273
	0												
ケース② (浸潤抑制)	10	0.911	15.476							0.916	15.603	0.916	15.603
	20	0.914	22.246							0.942	23.382	0.942	23.383
	30	0.917	17.061	0.917	17.287	0.900	16.079	0.900	16.079	0.940	16.624	0.940	16.624
	50	0.921	15.123	0.875	15.107	0.835	15.047	0.835	15.047	0.891	15.107	0.891	15.107
	100	0.983	15.388	0.993	15.260	0.993	15.239	0.994	15.240	0.978	15.333	0.979	15.333
	200	1.000	15.330	0.999	15.215	0.997	15.196	0.998	15.197	1.000	15.281	1.000	15.281
	300	1.000	15.329	0.999	15.214	0.997	15.196	0.998	15.196	1.000	15.280	1.000	15.280
	400	1.000	15.329	0.999	15.214	0.997	15.196	0.998	15.196	1.000	15.280	1.000	15.280
	0												
	10	0.911	15.476							0.916	15.603	0.916	15.603
ケース③ (浸潤促進)	20	0.914	22.246							0.942	23.382	0.942	23.383
	30	0.917	17.061	0.917	17.287	0.900	16.079	0.900	16.079	0.940	16.624	0.940	16.624
	50	0.921	15.229	0.875	15.096	0.835	15.029	0.835	15.031	0.891	15.140	0.891	15.141
	100	0.984	15.389	0.995	15.261	0.995	15.241	0.995	15.240	0.982	15.335	0.982	15.334
	200	1.000	15.330	0.999	15.215	0.998	15.197	0.998	15.196	1.000	15.281	1.000	15.281
F	300	1.000	15.323	0.999	15.207	0.998	15.189	0.998	15.189	1.000	15.274	1.000	15.273
	400	1.000	15.321	0.999	15.206	0.998	15.188	0.998	15.188	1.000	15.272	1.000	15.272

表 2.3-49 各点における飽和度と温度データ_低拡散層周囲





図 2.3-104 低透水層周囲における温度と飽和度の関係





図 2.3-105 低拡散層外周における温度と飽和度の関係

c)結果の整理

以上の検討より、解析コード TOUGH2 により、再冠水後の浸潤挙動と温度との関係を 調べた。その結果、温度と飽和度の明確な相関関係は認められなかった。仮に、温度と飽 和度に相関が認められるとすれば、廃棄体定置後の温度の急激な上昇に起因する間隙水の 状態変化といった現象が想定されるものの、本検討の範囲では、そのような現象の影響は 非常に小さい。

坑道内の飽和度の変化は、水・空気の再配置と、圧力上昇に伴う空気の圧縮が主な要因 として説明される。また、各部材の温度は、隣接する部材の設置に伴って大きく変化する ことが分かった。飽和度の変化による熱物性の変化が温度変化に及ぼす影響は相対的に小 さい。予察解析をするにあたっては、各部材や岩盤の浸透率、相対浸透率、毛細管圧力と いった流動に関わるパラメータの把握が非常に重要であるといえる。これは、例えば出力 点7、11 及び14 のように異なる二相流パラメータ条件値を与えた施設部材に囲まれた箇 所であれば、ケース~③における水飽和度と温度の関係にも有意な差が確認されたような 箇所があることからも、これらをモニタリング策定の検討対象とすることも可能ではある と言える。

なお、解析結果より当初 300 年~400 年と想定していた再冠水による施設内部の完全 飽和は 200 年ほどであった。当初想定と今回の検討における設定条件に相違があること を考慮した上で、今後施設内部の飽和が早期になった場合に、各部材の機能へ与える影響 を検証する必要がある。

以上の結果を以って、モニタリング計画の策定に反映することとする。

解析結果の出力点はひび割れモニタリング計測を想定した低透水層の周囲を想定し、図 2.3-106 に示す出力点とした。温度、飽和度に関する解析結果を以下に示すと共に、出力デ ータの推移傾向を表 2.3-50 に、全出力データの整理結果を表 2.3-51~表 2.3-52 に示す。表 中赤字は各期間におけるピーク温度を表している。また、得られた主要温度の推移傾向に関 して確認した結果を図 2.3-107~図 2.3-110 に示す。なお、各出力点においては計測計器の 配置状況を想定し、図 2.3-108 のとおり部材面の内側と外側の両方から抽出した。

【施設内全般】

ピーク温度は廃棄体中央部となる出力点0であり、最高温度は約43℃であった。

【底部低透水層下面】

温度の高い順で出力点①→④→⑤となった。これは、廃棄体との距離や坑道周囲との距離 に起因するものと考えられた。

【上部低透水層下面】

上部低透水層下面において、出力点®~@の3点において大きな相違はなかった。これより、当該面においては概ね同等の温度分布であることが推定された。

【側部低透水層外面】

側部_埋戻し材側(外側)において、出力点⑥~⑧の3点において大きな相違はなかった。 これより、当該面においては概ね同等の温度分であることが推定された。

【側部低透水層内面】

側部低透水層外面に比べて、廃棄体に近い分全体的に約 0.5℃高い傾向を示しているが、 出力点⑨~⑪の 3 点においては大きな相違はなかった。これより、当該面においても概ね 同等の温度分布であることが推定された。

解析結果より、図 2.3-109 に示すように各施設が施工された瞬間に温度挙動が瞬時に 下がってまた持ち直すような動きが見られた。本解析では、平成 29 年度に検討したシナ リオ整理表に基づき、解析ステップを施工順序に合わせており、ステップ毎に新たな部材 が施工される設定としている。各部材が設置された段階では、各部材の温度は 15℃(初 期値)であり、既設部材と新設された部材間で温度差が生じるため、既設部材の温度は大 きく低下する。その後、時間が進むにしたがって、部材間の温度差が小さくなるため変化 も小さくなる。新設部材の温度が既設部材と等しくなると、への熱の拡散が主な理由で、 全体の温度が低下の傾向を示すものと考えられる。



ひび割れモニタリング計測想定箇所:赤線位置 (低透水層側部・上部,低拡散層底部施工直前に設置)

解析結果の出力箇所

図 2.3-106 解析結果抽出点



表 2.3-50 TOUGH2 解析結果傾向整理



図 2.3-107 TOUGH2 解析による主な温度結果の経時変化



図 2.3-108 TOUGH2 解析結果の出力詳細



図 2.3-109 全期間に関する温度推移



				Case(1)	(基本)			Case2 (浸水抑制)			Case3 (浸水促進)	
	対象期間		全期	期間	閉鎖後(5	0年以降)	全邦	期間	閉鎖後(5	0年以降)	全期	期間	閉鎖後(5	0年以降)
番号	箇.	Я	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)
0	廃棄体中	中央	43.11	11.63	15.51	58.49	43.11	11.63	15.52	56.98	43.11	11.63	15.51	58.28
1	底部低透水層下	低透水層側	23.46	11.73	15.68	52.91	23.46	11.73	15.69	54.32	23.46	11.73	15.67	58.28
	端面中央	埋戻し材側	22.21	11.73	15.69	52.91	22.21	11.73	15.70	54.32	22.21	11.73	15.68	58.28
2	底部低透水層外	低透水層側	16.55	11.76	15.62	58.49	16.55	11.76	15.63	54.32	16.55	11.76	15.62	58.28
2	端面左	埋戻し材側	16.26	11.76	15.62	58.49	16.26	11.76	15.63	54.32	16.26	11.76	15.62	58.28
2	底部低透水層下	低透水層側	18.64	11.76	15.64	52.91	18.64	11.76	15.65	54.32	18.64	11.76	15.64	58.28
3	端面左	埋戻し材側	18.03	11.76	15.65	52.91	18.03	11.76	15.66	54.32	18.03	11.76	15.65	58.28
1	底部低透水層下	低透水層側	18.64	11.73	15.64	52.91	18.64	11.73	15.65	54.32	18.64	11.73	15.64	58.28
4	端面右	埋戻し材側	18.03	11.76	15.65	52.91	18.03	11.76	15.66	54.32	18.03	11.76	15.65	58.28
Б	底部低透水層外	低透水層側	16.55	11.76	15.62	58.49	16.55	11.76	15.64	54.32	16.55	11.76	15.63	58.28
5	端面右	埋戻し材側	16.26	11.76	15.62	58.49	16.26	11.76	15.63	54.32	16.26	11.76	15.63	58.28
6	側部低透水層右	低透水層側	15.51	30.20	15.30	58.49	15.51	30.20	15.31	62.29	15.51	30.20	15.30	58.28
0	外端面上	埋戻し材側	15.43	30.20	15.29	58.49	15.43	30.20	15.30	62.29	15.43	30.20	15.29	58.28
7	側部低透水層右	低透水層側	15.90	30.33	15.46	58.49	15.90	30.33	15.46	56.98	15.90	30.33	15.46	58.28
(外端面中	埋戻し材側	15.80	30.33	15.46	58.49	15.80	30.33	15.46	56.98	15.80	30.33	15.46	58.28
0	側部低透水層右	低透水層側	15.60	58.49	15.60	58.49	15.60	56.98	15.60	56.98	15.60	58.28	15.60	58.28
0	外端面下	埋戻し材側	15.60	58.49	15.60	58.49	15.60	56.98	15.60	56.98	15.60	58.28	15.60	58.28
0	側部低透水層右	低透水層側	16.04	30.13	15.32	58.49	16.04	30.13	15.33	62.29	16.04	30.13	15.32	58.28
9	内端面上	低拡散層側	18.03	25.53	15.32	58.49	18.03	25.53	15.33	62.29	18.03	25.53	15.33	58.28
10	側部低透水層右	低透水層側	16.55	30.20	15.48	58.49	16.55	30.20	15.48	56.98	16.55	30.20	15.48	58.28
10	内端面中	低拡散層側	36.57	11.67	15.48	58.49	36.57	11.67	15.48	56.98	36.57	11.70	15.48	58.28
11	側部低透水層右	低透水層側	15.82	30.20	15.59	58.49	15.82	30.20	15.60	56.98	15.82	30.20	15.60	58.28
	内端面下	低拡散層側	26.33	11.70	15.59	58.49	26.33	11.70	15.60	56.98	26.33	11.70	15.60	58.28
10	側部低透水層左	低透水層側	16.04	30.13	15.32	58.49	16.04	30.13	15.33	62.29	16.04	30.13	15.32	58.28
	内端上	低拡散層側	17.87	25.53	15.31	58.49	17.87	25.53	15.32	62.29	17.87	25.53	15.31	58.28
10	側部低透水層左	低透水層側	16.55	30.20	15.48	58.49	16.55	30.20	15.48	56.98	16.55	30.20	15.48	58.28
	内端中	低拡散層側	36.58	11.67	15.48	58.49	36.58	11.67	15.48	56.98	36.58	11.67	15.48	58.28

表 2.3-51 ケース別温度結果整理_1/2 (廃棄体定置(施工開始後 50年)以降対象)

(赤字:ピーク温度)

	出力点			Case(1)	(基本)			Case2 (浸水抑制)			Case3 (浸水促進)	
	対象期間		全期	期間	閉鎖後(5	0年以降)	全期	明問	閉鎖後(5	0年以降)	全期	明問	閉鎖後(5	0年以降)
番号	箇列	б	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)	ピーク温度 (゜)	経過年(年)
15	側部低透水層左	低透水層側	15.51	30.20	15.30	58.49	15.51	30.20	15.31	62.29	15.51	30.20	15.30	58.28
15	外端面上	低拡散層側	15.43	30.20	15.30	58.49	15.43	30.20	15.31	62.29	15.43	30.20	15.30	58.28
16	側部低透水層左	低透水層側	15.90	30.33	15.46	58.49	15.90	30.33	15.46	56.98	15.90	30.33	15.46	58.28
10	外端面中	低拡散層側	15.80	30.33	15.46	58.49	15.80	30.33	15.46	56.98	15.80	30.33	15.46	58.28
17	側部低透水層左	低透水層側	15.59	58.49	15.59	58.49	15.60	56.98	15.60	56.98	15.60	58.28	15.60	58.28
17	外端面下	低拡散層側	15.59	58.49	15.59	58.49	15.60	56.98	15.60	56.98	15.60	58.28	15.60	58.28
18	上部低透水層下	低透水層側	15.38	40.80	15.34	58.49	15.38	40.80	15.34	59.64	15.38	40.80	15.34	58.28
10	端面中央	低拡散層側	18.86	25.27	15.35	58.49	18.86	25.27	15.35	59.64	18.86	25.27	15.35	58.28
10	上部低透水層下	低透水層側	15.29	58.49	15.29	58.49	15.30	62.29	15.30	62.29	15.29	58.28	15.29	58.28
19	端面左	低拡散層側	17.86	25.53	15.30	58.49	17.86	25.53	15.31	62.29	17.86	25.53	15.30	58.28
20	上部低透水層下	低透水層側	15.29	58.49	15.29	58.49	15.30	62.29	15.30	62.29	15.29	58.28	15.29	58.28
20	端面右	低拡散層側	17.86	25.53	15.30	58.49	17.86	25.53	15.31	62.29	17.86	25.53	15.30	58.28
	低拡散層底部上	低拡散層側	35.15	11.67	15.58	58.49	35.15	11.67	15.59	56.98	35.15	11.67	15.58	58.28
21	端面中央	RC ピット 側	36.31	11.67	15.57	58.49	36.31	11.67	15.58	56.98	36.31	11.67	15.57	58.28
	低拡散層底部上	低拡散層側	31.83	11.70	15.58	58.49	31.83	11.70	15.59	56.98	31.83	11.70	15.58	58.28
22	端面左	RC ピット 側	33.01	11.70	15.57	58.49	33.01	11.70	15.58	56.98	33.01	11.70	15.57	58.28
	低拡散層底部上	低拡散層側	31.83	11.70	15.58	58.49	31.83	11.70	15.59	56.98	31.83	11.70	15.58	58.28
23	端面右	RC ピット 側	33.01	11.70	15.57	58.49	33.01	11.70	15.58	56.98	33.01	11.70	15.58	58.28

表 2.3-52 ケース別温度結果整理__2/2 (廃棄体定置(施工開始後 50年)以降対象)

(赤字:ピーク温度)

- 4) 施設挙動に関する水-力学連成解析
 - a. 施設変位に着目した解析的検討

これまでの検討から、より検討対象を現実に即したものとするため、検討対象に近い既 往の取得データを入力パラメータとした水-力学連成解析を実施し、施設挙動に関するモ ニタリング策定に資する建設段階までの変位を確認した。

(a) 力学パラメータ

カ学パラメータについても二相流パラメータと同様に既往の文献から設定する。適応す る構成則は低透水層には修正 Cam – Clay モデルを不飽和まで拡張した弾塑性構成モデ ルである BB モデル(Barcelona Basic Model)[8]を適用し、その他は線形弾性とした。

a) 低透水層

低透水層には修正 Cam – Clay モデルを不飽和粘性土に拡張した弾塑性構成モデルで、 ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるように拡張されている。表 2.3-23 に低透水層に用いる力学パラメータを示す。

項目	記 号	単 位	設定値	出 典
初期乾燥密度	$ ho_d$	Mg/m ³	1.60	平成 26 年度 8 年とりまとめ、P.2-7、表 2.1-4
真密度	$ ho_d$	Mg/m ³	2.65	平成 26 年度報告書、P.2-57、図 2.2-15
初期間隙比	Е		0.656	初期乾燥密度と真密度より算定
ポアソン比	ν		0.42	平成 20 年度報告書、P.7-11、表 7.1-2
膨潤指数(飽和時)	κ_0		0.087	山田、足立ら、土木学会第 64 回
圧縮指数(飽和時)	λ_0		0.117	同上
サクション依存膨潤 指数パラメータ	α_i		0.165	山本、熊谷ら、土木学会第65回
参照有効応力時の湿 潤膨潤指数パラメー タ	κ_{s0}		$\begin{array}{c} 0.210\\ 8\end{array}$	(山本、小峯ら、土木学会第 63 回)を 基に Fitting
有効応力依存湿潤膨 張指数(飽和時)	α_i		0.544	(山本、小峯ら、土木学会第 63 回)を 基に Fitting
限界応力比	Μ		0.548	山田、足立ら、土木学会第 64 回
压密先行応力(飽和 時)	P ₀	MPa	1.50	第2次取りまとめ、分冊2、IV-97

表 2.3-53 低透水層に用いる力学物性値

膨潤圧については「平成 26 年度 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成 19 年度 ~平成 26 年度の取りまとめ報告書」[5]を基に設定した。報告書では施工直後の原位置か ら採取した試料を用いて室内膨潤圧試験を実施し、膨潤圧試験の結果に基づいて、膨潤圧 と乾燥密度の関係を図 2.3-42 に示すように整理している。また、図に示す近似式は既往 データより同定している。

 $\sigma_w = \exp(6.1893\rho_d^2 - 14.0472\rho_d + 6.1677)$ (2.3-82) ここで、 σ_w は膨潤圧、 ρ_d は乾燥密度を示す。よって、式(2.3-82)より膨潤圧は $\sigma_w =$





図 2.3-111 クニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係

膨潤特性に関するパラメータの設定については山本ら[54]の方法を基に設定する。BB モデルでは、湿潤に伴う膨潤や乾燥に伴う収縮量を規定する湿潤膨潤指数κ_sは式(2.3-83) で表わされる。

$$\kappa_{s}(p',s) = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss},s)$$
(2.3-83)

ここに、 κ_{s0} は p'_{ref} での湿潤による膨潤指数、 p'_{ref} は参照平均ネット応力、 α_{sp} は湿潤による膨潤指数の応力依存性の度合いを表すモデルパラメータ、p'は平均ネット応力 (= $p - p_g$ 、pは平均応力、 p_g は間隙空気圧)、 α_{ss} はサクション依存の湿潤膨潤指数を表わすモデルパラメータ、s はサクションを示す。山本らはサクション依存の湿潤膨潤指数が $\alpha_{ss} = 0$
と仮定し、小峯らの膨潤評価式に基づいて得られた拘束圧と飽和時の膨潤ひずみの関係を 式(2.3-84)でフィッティングすることで BB モデルのパラメータ(κ_{s0} 、 α_{sp})を同定し ている。

$$d\varepsilon_{s} = \frac{\kappa_{s}(p')}{1+e_{0}} \frac{ds}{s_{0}+p_{atm}} = \frac{1}{1+e_{0}} \kappa_{s0} \left(1+\alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p_{ref}'}\right) \frac{ds}{s_{0}+p_{atm}}$$
(2.3-84)

ここに、 $d\varepsilon_s$ が湿潤膨潤による体積ひずみ増分、 p_{atm} が大気圧を示す。

図 2.3-112 に小峯らの膨潤評価式に基づく飽和時の最大膨潤ひずみと有効拘束応力の 関係とそれを BB モデルでフィッティングした結果を示す。BB モデルと膨潤評価式がよ く一致することがわかる。



図 2.3-112 小峯らの膨潤評価式に基づく飽和膨潤ひずみと有効拘束応力の関係

Alonso, et. al [8]では、塑性ひずみ増分方向は非関連流れ則を考慮できるよう式 (2.3-85) に示す Ohmaki の提案するパラメータαを導入している。

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2q\alpha}{M^2(2q+p_s-p_0)}$$
(2.3-85)

ここに、 $d\varepsilon_s^p$ サクション増分における塑性ひずみ増分、 $d\varepsilon_{vp}^p$ は塑性体積ひずみ増分、q はミーゼス応力、 P_s はサクション依存の引張強度、 p_0 は降伏圧密応力を示す。

非関連流れ則に関するパラメータαは横ひずみが0の条件から設定することができ、弾性せん断ひずみを無視し、横ひずみを0とすると式(2.3-86)となる。

$$\frac{d\varepsilon_s^p}{d\varepsilon_{vp}^p} = \frac{2}{3} \frac{1}{1 - \kappa/\lambda(0)}$$
(2.3-86)

また、静水圧状態 K₀では、式(2.3-87)が成り立つ。

$$p/q + p_s = 3(1 - K_0)/1 + 2K_0 \tag{2.3-87}$$

式 (2.3-85)、式 (2.3-86)、及び式 (2.3-87) より、非関連流れ則に関するパラメータαが 式 (2.3-88) により導かれる。

$$\alpha = \frac{M(M-9)(M-3)}{9(6-M)} \frac{1}{1 - \kappa/\lambda(0)}$$
(2.3-88)

式 (2.3-88) より、a=0.727 となる。

b)廃棄体間充てん材

廃棄体間充てん材の諸元を表 2.3-54 に、力学パラメータを表 2.3-55 に示す。前述したようにコンクリートピット内の廃棄体と充てん材は地震時挙動評価と同様に、両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、その物性は充てん材で代表させることとした。

		3 = 1 · · · · · · · · · ·		
項目	記号	単位	値	備考・出典
寸法	h×b×l	m	1.6×1.6×1.6	
廃棄体全重量	W	t	28.0	
単位体積重量	Г	kN/m ³	67.0	

表 2.3-54 廃棄体間充てん材の諸元

表 2.3-55 廃棄体間充てん材に	用いる力学パラメータ
--------------------	------------

物性	単 位	物性値	出典
圧縮強度	N/mm ²	85.25	平成 25 年度報告書、P.7-45、表 7.4-12、
			材令 91 日平均值
	l-NI/mana?	22 100	平成 25 年度報告書、P.7-52、表 7.4-16、
[F]][平][王](示玄)	KIN/IIIII ²	52,190	材令 91 日平均值
単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成 27 年度報告書、P.5-124、表 5.2-24
ポアソン比		0.20	平成 25 年度報告書、P.7-45、表 7.4-12
廃棄体込みの単位体積重量		52.4	

c)上部充てん材

上部充てん材のパラメータを表 2.3-56 に示す。

物性	単 位	物性値	出典
圧縮強度	N/mm ²	71.56	平成 25 年度報告書、P.7-46、表 7.4-13、材 令 91 日平均値
静弹性係数	kN/mm ²	40,200	平成 25 年度報告書、P.7-53、表 7.4-17、材 令 91 日平均値
単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成 27 年度報告書、P.5-125、表 5.2-25
ポアソン比		0.20	平成 27 年度報告書、P.5-125、表 5.2-25

表 2.3-56 上部充てん材に用いる力学パラメータ

d) コンクリートピット

コンクリートピットの力学パラメータを表 2.3-57 に示す。

物性	単 位	物性值	出典
圧縮強度	N/mm ²	56.87	平成 26 年度報告書、P.5-41、表 5.4-10、材 令 91 日平均值
静弹性係数	kN/mm ²	35,260	平成 26 年度報告書、P.5-46、表 5.4-12、材 令 91 日平均值
引張強度	N/mm ²	4.72	平成 22 年度報告書、P.5-17、表 8.4-1
単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成 27 年度報告書、P.5-123、表 5.2-23
ポアソン比		0.20	平成 27 年度報告書、P.5-123、表 5.2-23

表 2.3-57 コンクリートピットに用いる力学パラメータ

e)低拡散層

低拡散層の力学パラメータを表 2.3-58 に示す。

物性	単 位	物性値	出典
圧縮強度	N/mm ²	59.16	平成 26 年度報告書、P.5-41、表 5.4-11、材 令 91 日平均值
静弾性係数	kN/mm ²	27,530	平成 26 年度報告書、P.5-46、表 5.4-13、材 令 91 日平均値
引張強度	N/mm ²	4.40	平成 19~24 年度取りまとめ、P.2-115、図 2.2-30の関係より算定
単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成 27 年度報告書、P.5-122、表 5.2-22
ポアソン比		0.20	平成 27 年度報告書、P.5-122、表 5.2-22

表 23-58	低拡散層に用いる力学パラメータ
1 4.0 00	

f) 埋戻し材(土質系材料)

埋戻し材(土質系材料)の力学パラメータを表 2.3-59に示す。

項目	単 位	設定値	出 典
初期乾燥密度	Mg/m ³	1.645	平成 26 年度報告書、P.3-76、表 3.2-3
膨潤圧	MPa	0.033	平成 26 年度報告書、P.3-160、表 3.4-5
変形係数	MN/m ²	4.90	平成 26 年度報告書、P.3-76、表 3.2-3
間隙率		0.30	Kumagai Ġ
真密度	Mg/m^3	2.71	平成 26 年度報告書、P.3-134、図 3.4-19 中表記
単位体積重量	kN/m ³	19.1	平成 27 年度報告書、P.5-120、表 5.2-20
ポアソン比		0.43	平成 27 年度報告書、P.5-120、表 5.2-20

表 2.3-59 埋戻し材(土質系材料)に用いる力学パラメータ

g) 埋戻し材(セメント系材料)

埋戻し材(セメント系材料)の力学パラメータを表 2.3-60 に示す。

物性	単 位	物性值	出典
圧縮強度	N/mm ²	60.31	平成 19 年度報告書、P.2-175、表 2.2-7、材 令 91 日平均値
静弹性係数	kN/mm ²	36,000	平成 19 年度報告書、P.2-178、表 2.2-8、材 令 91 日平均值
単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成 27 年度報告書、P.5-119、表 5.2-19

0.20

表 2.3-60 埋戻し材(セメント系材料)に用いる力学パラメータ

h) 支保工

ポアソン比

支保工の力学パラメータを表 2.3-61 に示す。支保工は、吹付けコンクリートと鋼製支 保工から構成される。

平成 27 年度報告書、P.5-119、表 5.2-19

物性	単 位	物性値	出典
圧縮強度	N/mm ²	31.4	平成 19~24 年度取りまとめ、P.2-115、図 2.2-30の関係より算定
静弹性係数	kN/mm ²	27,900	平成 27 年度報告書、P.5-118、表 5.2-18
単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成 27 年度報告書、P.5-119、表 5.2-18
ポアソン比		0.20	平成 27 年度報告書、P.5-119、表 5.2-18

表 2.3-61 支保工の力学パラメータ

i) 均しコンクリート

均しコンクリートの力学パラメータを表 2.3-62 に示す。均しコンクリートの物性値に 関しては埋戻し材(セメント系材料)と同等とした。

物性	単 位	物性值	出典
圧縮強度	N/mm ²	18.1	平成 19~24 年度取りまとめ、P.2-154、図 2 2-22 の関係上り算定
静弹性係数	kN/mm ²	22,000	2.5-22の関係より募定 平成 27 年度報告書、P.5-125、表 5.2-26
単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成 27 年度報告書、P.5-125、表 5.2-26
ポアソン比		0.20	平成 27 年度報告書、P.5-125、表 5.2-26

表 2.3-62 均しコンクリートの力学パラメータ

j) セメント系部材

セメント系部材に関する力学パラメータの設定値の一覧を表 2.3-63~表 2.3-64 に示 す。

部材	物性	単 位	物性値	出典
廃棄体間充てん材	圧縮強度	N/mm ²	85.25	平成 25 年度報告書、P.7-45、 表 7.4-12、材令 91 日平均值
	静弹性係数	kN/mm ²	32,190	平成 25 年度報告書、P.7-52、 表 7.4-16、材令 91 日平均值
	単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成27年度報告書、P.5-124、 表 5.2-24
	ポアソン比		0.20	平成 25 年度報告書、P.7-45、 表 7.4-12
	廃棄体込みの単位 体積重量		52.4	
上部充てん材	圧縮強度	N/mm ²	71.56	平成 25 年度報告書、P.7-46、 表 7.4-13、材令 91 日平均值
	静弹性係数	kN/mm ²	40,200	平成 25 年度報告書、P.7-53、 表 7.4-17、材令 91 日平均值
	単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成27年度報告書、P.5-125、 表 5.2-25
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-125、 表 5.2-25
コンクリートピッ ト	圧縮強度	N/mm ²	56.87	平成 26 年度報告書、P.5-41、 表 5.4-10、材令 91 日平均值
	静弹性係数	kN/mm ²	35,260	平成 26 年度報告書、P.5-46、 表 5.4-12、材令 91 日平均值
	引張強度	N/mm ²	4.72	平成 22 年度報告書、P.5-17、 表 8.4-1
	単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成27年度報告書、P.5-123、 表 5.2-23
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-123、 表 5.2-23
低拡散層	圧縮強度	N/mm ²	59.16	平成 26 年度報告書、P.5-41、 表 5.4-11、材令 91 日平均值
	静弹性係数	kN/mm ²	27,530	平成 26 年度報告書、P.5-46、 表 5.4-13、材令 91 日平均值
	引張強度	N/mm ²	4.40	平成 19~24 年度取りまと め、P.2-115、図 2.2-30の関 係より算定
	単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成27年度報告書、P.5-122、 表 5.2-22
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-122、 表 5.2-22

表 2.3-63 力学パラメーター覧 (セメント系部材) (1/2)

部材	物性	単 位	物性値	出典
埋戻し材 (セメン ト系)	圧縮強度	N/mm ²	60.31	平成19年度報告書、P.2-175、 表 2.2-7、材令 91 日平均値
	静弹性係数	kN/mm ²	36,000	平成19年度報告書、P.2-178、 表 2.2-8、材令 91 日平均値
	単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成27年度報告書、P.5-119、 表 5.2-19
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-119、 表 5.2-19
支保コンクリート	圧縮強度	N/mm ²	31.4	平成 19~24 年度取りまと め、P.2-115、図 2.2-30の関 係より算定
	静弹性係数	kN/mm ²	27,900	平成27年度報告書、P.5-118、 表 5.2-18
	単位体積重量	kN/m ³	24.5	平成27年度報告書、P.5-119、 表 5.2-18
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-119、 表 5.2-18
均しコンクリート	圧縮強度	N/mm ²	18.1	平成 19~24 年度取りまと め、P.2-154、図 2.3-22の関 係より算定
	静弹性係数	kN/mm ²	22,000	平成27年度報告書、P.5-125、 表 5.2-26
	単位体積重量	kN/m ³	23.0	平成27年度報告書、P.5-125、 表 5.2-26
	ポアソン比		0.20	平成27年度報告書、P.5-125、 表 5.2-26

表 2.3-64 力学パラメーター覧 (セメント系部材) (2/2)

(b) 建設段階までの施設挙動解析条件

予想される施工手順とそれぞれのバリアの施工時期を反映してステップ解析を行った。 そのうち、建設操業段階終了までの 50 年間における施設挙動について、計測モニタリン グ策定において、適切な計測箇所とその測定変位量の推定を行った。図 2.3-113 に解析 施工ステップを部材ごとに時系列化して示す。また、各段階の施工におけるモデル断面と 計測箇所候補となる 4 点の解析出力点を示したモデル図を図 2.3-114 に示す。



図 2.3-113 CODE_BRIGHT 解析ステップ

ステップ解析時の境界は大気圧と同じ圧力を解放している面に載荷している。自重はコ ンストラクションステップとしているため、t=0における有効応力はoe=0となっている。 ステップの最終インクリメントで 100%の自重が載荷されるように(最終時刻で g=9.8m/s²となるように)、重力加速度gを線形増加させて自重による応力を計算してい る (ov=pghのgを変化)。なお、施工完了は吹付け完了時点とする。このような計算を行 っていることから、鉛直方向応力は自重相当、水平方向応力はポアソン比に応じた分布に なる。

CODE_BRIGHTの解析では、水圧と空気圧(ガス圧)が生じており、不飽和状態では、 水圧は負の値、ガス圧は正の値を有している。一方、解析上の有効応力の定義は o_e=omax (Pl、 Pg)となっており、水圧と空気圧の大きい方を全応力から差し引き算出して いる。モデル境界上では、有効応力ではなく、全応力が生じており、なにも拘束をしなけ れば間隙圧力によって膨張する。そのため、各部材の初期の有効応力は 0 と設定してい ることから、水圧と空気圧の大きい方でモデル境界を拘束する必要があることから、初期 の段階では空気圧で応力固定する。



図 2.3-114 解析ステップ断面と出力点

(c) 解析結果

解析結果として、建設・埋設段階における飽和度、平均有効応力の経時変化を図 2.3-115 に示す。ここで、平均有効応力については、ベントナイト系部材の膨潤挙動に着目するこ とから、低透水層だけを拡大して表示している。また、主な部材代表点(低透水層底版中 央、廃棄体中央、上部埋戻し材中央、及び低拡散層側部面)における飽和度、平均有効応 力及び施設変位の経時変化を図 2.3-116 に示す。各出力点における結果を図 2.3-117~図 2.3-120 に示す。また、施工開始から 50 年までの期間における施設施工ステップとその 変位挙動の関係を図 2.3-121 に示す。

コンクリートピット底版中央点における変形を基に施設内の挙動について概説する。

底部低透水層及びコンクリートピットが施工されると、底部低透水層はコンクリートピット部の重さに応じた沈下と、それに伴い、底部低透水層の側部では大気圧解放されているためこの部分は膨張が生じる。また、インバートコンクリート及びコンクリートピット 底部のサクションは底部低透水層のサクションよりも小さいため、底部低透水層は周辺の コンクリートから水分を吸収することにより、飽和度が上昇しそれに伴い膨潤する。よっ て、5年~10年におけるコンクリートピット底部中央点における変形は上向き傾向を示 す。その後、廃棄体がセットされると、10年から20年までは廃棄体の重量が徐々に載荷 され、20年から30年はコンクリートピット上部等が施工されることから、その間、コン クリートピット底部は沈下する。

側部低透水層が施工されることにより、周辺とのサクションバランスによって、側部低 透水層が水分を吸収することから、コンクリートピット底部中央点は若干上昇する。しか し、上部低透水層と上部埋戻し材(土質系)が40年~50年の間に施工されると、上部低 透水層のサクションが強く、上部埋戻し材のサクションは小さく透過性も高いことから、 上部低透水層が上部埋戻しの水分を吸収して膨潤する。上部低透水層の膨潤によってコン クリートピット底部中央点は沈下する。

50年以降になると、吹付けコンクリート周辺から水が浸透してくる。解析では飽和条件の境界条件を与えていることから、水圧 Pl=ガス圧 Pg=1.0MPa の境界条件を与えている。そのため、水とガスが施設に侵入してくることになる。ここで、外側境界から最も移行距離の短い底部低透水層にガスと水が浸透してくる。それにより、底部低透水層の飽和度はこの時点で飽和に近い状態にあることから、トラップされたガスは動けず圧縮され、さらに、水に溶解したガスが拡散によって侵入してくるため、底部低透水層のガス圧が上昇する。間隙圧力の増加に伴い、体積膨張をおこすことから 60 年から 70 年ぐらいまではコンクリートピット底部中央点は沈下から膨張に転ずる。70 年以降は、ガスがさらに施設内部に拡散によって移行することから、底部低透水層のガス圧が低下してコンクリートピット底部中央点が沈下していく。

底部低透水層(出力点1)の平均有効応力の変化も上記の挙動を示している。すなわち、 10年~50年までは、膨潤圧の発現及び廃棄体等の施設の構築に伴い平均有効応力は増加 する。しかし、60年~70年付近ではガス圧による間隙圧力の上昇に伴い、平均有効応力 も低下する。その後は、ガス圧の消散とともに、施設の飽和、上部低透水層の間隙圧力の 増加等により、底部低透水層(出力点1)の平均有効応力は1000年まで増加する。なお、 飽和しても設定した膨潤圧 o_{sw}=0.63MPa に平均有効応力が達しないのは、ガス圧による 間隙圧力が高いためである。

コンクリートピット部の有効応力の変化については、40年くらいから平均有効応力が 増大する。これは、周辺に設置してある低透水層の膨潤によって平均有効応力が増大する。 その後、底部低透水層の有効応力の低下が増加に転ずると、コンクリートピット側のガス 圧による間隙圧力が増大し始めるため、平均有効応力が低下し始めることになる。ただし、 コンクリートピットよりも内側はそのままガスがトラップされる状態となるため、間隙圧 力が高いままとなり、有効応力は下げ止まりする。

設定した出力点において、変位データを出力し、その経過推移を調べた主な結果を以下 に示す。

- ・ 廃棄体の設置終了時(20年目)は RCPIT 中央、低拡散層左上にて-10mm の鉛直変 位が発生する結果となった。
- ・ 上部埋戻し材施工終了時(50年目)は RCPIT 中央、低拡散層左上にて-17mm の鉛 直変位が発生する結果となった。
- ・ 底部部材(RCPIT、低拡散層)と側部上(RCPIT、低拡散層)の間において、側部 施工時(5年目)以降、常に概ね5~7mmの差異で推移する結果となった。これは、 底部部材施工後、側部部材が施工されるまでの間の施設挙動により出力基準点が動 いたことによる差異であると推察された。したがって、上記の各出力点の変位デー タがモニタリングを考えた場合の計測値と考える。



図 2.3-115 解析結果_コンター図







図 2.3-117 解析出力結果_RCPIT (中央)



図 2.3-118 解析出力結果_RCPIT (左端)



図 2.3-119 解析出力結果_RCPIT (左側上)



図 2.3-120 解析出力結果_低拡散層(左側上)





図 2.3-121 施設施工と施設挙動推移

b. 施設にかかる応力に関する水-力学解析

CODE_BRIGHT を用いて実施した解析検討により、閉鎖措置段階(50年)以降の移設内 における応力と飽和度の分布データを分析し、再冠水における施設内の水の浸潤状況の推定 に資する情報の整理を行った。

施設各部材のうち、低拡散層及び低透水層に対して検討している応力モニタリング計測想 定箇所(図 2.3-122 参照)として各辺 3 点を出力点と設定し、飽和度と全応力を抽出した。 それぞれの経時変化とその相関を表 2.3-65 に示す。それぞれの抽出点において想定される全 応力値の規模と推移傾向を把握するとともに、飽和度と全応力の相関性を確認した。



図 2.3-122 解析出力点

【底部低透水層下面】

- 部分について、上部部材との水分のやり取り、また廃棄体重量による圧密も受けることから体積圧縮による飽和度の上昇が生じる。その結果、他の抽出点と比較し、全応力、飽和度ともに大きくなっている。
- ・ 全応力(計器計測を考慮し大気圧分を排除)の最大値は概ね 1.4~1.5MPa に収束する 傾向が得られた。

【上部低透水層下面】

- 上部低透水層は、飽和度の上昇とともに全応力も増加し、ほぼ飽和に達した段階で膨 潤圧の増加は落ち着き、緩やかな増加傾向を示す。
- ・ 全応力(計器計測を考慮し大気圧分を排除)の最大値は概ね 1.2~1.3MPa に収束する 傾向が得られた。

【側部低透水層外面】

- ・ 側部低透水層施工開始から、埋戻し完了までの期間では、上部側の抽出点の値がより 小さい値を示している。これは前述した期間において、⑥部材と接触する部材が少な く、⑦⑧と比較して水分移動が小さくなっていることが考えられる。
- 50年以降については、外部から水と間隙空気の流入があるため、支保に距離が近けれ ば近いほど、飽和度は大きくなる。
- ・ 全応力(計器計測を考慮し大気圧分を排除)の最大値は概ね 1.3MPa に収束する傾向 が得られた。

【側部低透水層内面】

- ⑥~⑧(側部_埋戻し材側)とほぼ同じ挙動を示している。
- ・ 全応力(計器計測を考慮し大気圧分を排除)の最大値は概ね 1.3MPa に収束する傾向 が得られた。いずれの出力点位置においても、全応力と飽和度の関係において、飽和 度が 95%を超えると全応力は最大 0.2 MPa~1.5 MPa の間で急激に上昇する傾向が 示された。
- また、図 2.3-123 には底部低透水層下面及び側部低透水層外面に設定した各 3 点の出 力点における全応力データと飽和データそれぞれの経時変化、全応力と飽和度の関係 のグラフを示す。全応力と飽和度の関係は概ね同様の傾向を示すものの、全応力と飽 和度の各経時変化に関しては、測定する箇所(出力点)により、その推移に相違が確 認された。

これらの結果から閉鎖措置段階以降のベントナイト部材を主とした施設内における水 の浸潤状況について、全応力の経時変化や飽和度との相関を総合的に見ることにより把握 し、モニタリング計画に反映した。

表 2.3-65 に示す飽和度 – 経過時間のグラフにおいて、いずれの出力点においても、飽 和度が完全飽和に達しない、約 99%にて安定している。これは施設内において間隙空気 がトラップしているためであり、圧密状態下において空気と共に力学的にも平衡状態にな っていることに起因していると考えられた。

図 2.3-123 に底部低透水層下面及び側部低透水層外面に設定した各 3 点の出力点にお ける全応力データと飽和データそれぞれの経時変化、全応力と飽和度の関係のグラフを示 す。全応力と飽和度の関係は、いずれの出力点位置においても、飽和度が 95%を超える と全応力は最大 0.2 MPa~1.5 MPa の間で急激に上昇する。これは、解析モデルに依存 する形で概ね同様の傾向を示すものと考えられるが、全応力と飽和度の各経時変化に関し ては、多種の部材により複雑に構築された施設内にて測定する箇所(出力点)により、そ の推移に相違が確認された。

これらの結果から閉鎖措置段階以降のベントナイト部材を主とした施設内における水 の浸潤状況について、全応力の経時変化や飽和度との相関を各測定点において総合的に見 ることにより把握するものとし、モニタリング計画に反映した。





図 2.3-123 全応力(土圧)モニタリング傾向

5) 解析的検討手法に対する整理

a. 締固められたベントナイトの特性及び施工後の施設内部における応力状態の違いに よる影響評価

4) b. 節に示したとおり、施設モデルを用いた施設挙動解析結果を整理したが、実際に中 深度処分施設の低透水層は締固めにより施工されることから、その締固めの影響を解析にど のように考慮するか、その影響が解析結果にどの程度影響するかを確認することとした。

図 2.3-124 に検討フローを示し、検討フローに基づいて以下の検討を実施することとした。

【初期応力状態の設定】

 ✓ 締固められた粘土は OCR が増加し、初期異方性を有する。そのため、初期異方性を 与えた初期応力状態を設定する。

【剛性と OCR をパラメータにした検討】

- ✓ 締固め効果によって、密度と OCR のみならず、強度と剛性の増加も見込まれる。しかし、その効果は定量的に把握できていないことから、締固め効果として強度と剛性に着目して検討を実施する。
- ✓ 単位要素を用いて三軸状態からの一軸圧縮解析を実施する。この時、OCRと膨潤指数
 κをパラメータとして 10 ケースの解析ケースを設定し、各ケースの有効応力経路と応力--ひずみ関係を算出する。

【異なる解析条件による影響比較検討】

✓ 以上の検討結果をもとに追加解析ケースを選択し(上記、10ケース中3ケースを選択)、
 施設全体モデルを用いた解析により、締固め程度が解析結果に与える影響について検討を行う。



図 2.3-124 締固められたベントナイトのモデル化検討フロー

(a) 解析コード CODE_BRIGHT における締固めを考慮した異方性の初期応力の設定

a)本事業でこれまでに実施した検討ケース(基本ケース)

基本ケースにおけるベントナイトのモデル化については、既往の文献から材料パラメー タを設定して、初期応力については、密度から計算される自重を与えている。

初期応力の設定のうち、自重については、ov=pghより算出され解析コード内部で密度 と重力加速度から計算される。この時、ポアソン比の設定が重要となるが、以下のように 設定した。

本解析における設置時の自重による応力は $\sigma_v=\sigma_{yy}=\rho gh$ で計算され、 σ_h (σ_{xx} 、 σ_{zz})はポアソン比なりの応力状態となる。ここで、ポアソン比の設定については、Jakyの概算式を利用して設定している。具体的には、静止土圧係数 K_0 と有効応力に関する内部摩擦角 ϕ' より、

$$K_0 = 1 - \sin \phi'$$
 (2.3-89)

静止土圧係数とポアソン比の関係は以下のとおりである。

$$K_0 = \frac{\upsilon}{1-\upsilon}, \quad \upsilon = \frac{1-\sin\phi}{2-\sin\phi} \tag{2.3-90}$$

よって、内部摩擦角 ϕ' = 14.5°より、ポアソン比はv = 0.428となる。なお、この内部摩擦角は、低透水層に対する入力条件とした限界応力比 M=0.548 [55]を用いて、限界応力 比 M と内部摩擦角 ϕ との以下の関係式から算出した。

$$M = \frac{6\sin\phi'}{3-\sin\phi'}$$
(2.3-91)

Ladd らの文献[56] (図 2.3-125) では正規圧密状態の飽和粘土に対して以下の関係が あると示している。



図 2.3-125 正規圧密状態の飽和粘土における内部摩擦角と Koの関係

よって、「b.締固めを考慮した異方性の初期応力の設定検討」に後述するが、これまでの研究をもとに初期応力のうち水平方向の応力はポアソン比を介して考慮している。

b)締固めを考慮した異方性の初期応力の設定検討

締固めを考慮した異方性の初期応力の設定に関する検討を、以下に示す締固めによる Ko と OCR の影響に基づいて実施した。

笹倉ら[57]は飽和ベントナイトの側方土圧計測可能な一次元圧密試験装置を用いて一次元圧密・除荷時の鉛直・側方圧力の測定を行っており、図 2.3-126 のような結果を得ている。





ここで、鉛直有効応力(σ'_{v})と土圧係数(K_{0})の関係を見ると、土圧係数は除荷に伴い増加している。

さらに、過圧密比と土圧係数に関する経験式は以下式による。

$$K_{0-OC} = K_{0-NC}OCR^m$$

(2.3-92)

ここで、 K_{0-oc} は除荷時の土圧係数、 K_{0-NC} は正規圧密時の土圧係数、OCR は過圧密比、 m は材料パラメータである。

一方、高山[58]は上式を用いて、図 2.3-127 を作成し、過圧密比が 10 以下であれば、 m=0.6 が実験結果とよく合い、過圧密比がそれ以上であると、m=0.5 あるいは 0.4 が良 く一致するとしている。



図 2.3-127 過圧密比-土圧関係[58]

ベントナイトの正規圧密時の土圧係数は概ね $K_{0-NC} = 1.0$ といわれていることから、 OCR を 2 あるいは 10 と仮定すれば、 $K_{0-OC} = 1.5$ あるいは $K_{0-OC} = 4.0$ と仮定できる。

低透水層の厚さは 1m であることから、鉛直応力 $\sigma_v = mgh = 0.016$ MPaと計算でき、この際の水平応力は $K_{0-oc} = 1.5$ の時、 $\sigma_h = 0.024$ MPa、 $K_{0-oc} = 4.0$ の時、 $\sigma_h = 0.064$ MPa となる。よって、異方性を考慮した初期応力を以下に示す 2 ケース設定できる(単位: MPa)。

Case1 $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = (0.024, 0.016, 0.024)$ Case2 $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}) = (0.064, 0.016, 0.064)$

まず、図 2.3-124 のフローに示す 2 項目に当たる検討を行う。上記、これらの 2 ケースについて、CODE_BRIGHT 解析における始めのステップ計算で、その初期応力でつり

合い計算を行い、応力状態に対して変形して応力も変化していないことを確認する必要が ある。

c)検討解析

締固めによる異方性の初期応力の設定を検討するため、図 2.3-128 に示す簡易モデル を作成し、表 2.3-66 に示す入力条件により初期応力を発生させ、自重を考慮した解析を 実施した。その際、実施した解析ケースは、表 2.3-67 に示すように締固め影響による OCR を OCR=2 と OCR=10 と仮定して、初期異方性を設定した。

初期応力に関する入力算定式を以下に示す[56][58]。

- $\sigma_{v} = \rho g h = 0.016 \text{ (MPa)}$ (2.3-93)
 - $K_{0-NC} = 1.0 \tag{2.3-94}$
- $K_{0-OC} = K_{0-NC} (OCR)^m (2.3-95)$
 - $\sigma h = \sigma v \times K_{0-OC} \tag{2.3-96}$



乾燥密度	$ ho_{d}$	kg/m ³	1,600
土粒子密度	$ ho_{s}$	kg/m ³	2,650
弹性係数	Ε	MPa	10
ポアソン比	ν		0.3
間隙比	е		0.656
間隙率	n		0.396

表 2.3-66 入力条件

表 2.3-67 検討解析ケース

	上載圧(MPa)	$\text{OCR}\;(K_{0-OC})$	Initial stress (MPa) $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz})$
Case1	0.016	2(1.5)	(0.024, 0.016, 0.024)
Case2	0.016	10 (4.0)	(0.064、0.016、0.064)

解析検討の結果、表 2.3-68 に初めのステップ計算後の鉛直変位と x、y、z 方向の平均 有効応力の分布を示す。

鉛直変位コンターに示されるように、始めのステップにて上載荷重がかかることにより 圧密変位が発生していることが確認されるが、平均有効応力においては二次元面内におい て変形したことによる応力変化は確認されていない。そして、分布した平均有効応力値は 初期値として各ケースで設定した3方向の応力値で分布していた。

したがって、初期応力状態が設定されていることが示唆された。

Case (上載正	公 古杰()	平均有効応力(MPa)			
MPa) (OCR)	站但炎仏(m)	σχχ	σуу		
Case1 (0.016) (2)	Y-Displacements 5.3032e-20 -1.7778e-13 -3.5556e-13 -5.3333e-13 -7.1111e-13 -8.8889e-13 -1.0667e-12 -1.2444e-12 -1.4222e-12 -1.6e-12	Sxx-Stresses eff -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024 -0.024	Syy-Stresses eff -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016		
Case2 (0.016) (10)	Y-Displacements 1.3645e-19 -4.0421e-13 -8.0842e-13 -1.2126e-12 -1.6168e-12 -2.0211e-12 -2.4253e-12 -2.8295e-12 -3.2337e-12 -3.6379e-12	Sxx-Stresses eff -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064 -0.064	Syy-Stresses eff -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016 -0.016		

表 2.3-68 解析結果



(b) パラメータスタディによる締固められたベントナイトのモデル化に関する検討

a) 剛性と OCR の関係

太田ら[59]によれば、図 2.3-129 に示すように締固められた粘性土は、密度が高くなれ ば、先行圧密の効果が増し、強度も増加することを示している。よって、締固められたベ ントナイトも同様の傾向を示すものと考えられる。ただし、締固め程度による OCR や強 度との関係は明らかにされていない。

そこで、本検討では OCR と弾性剛性に関係する膨潤指数 κ をパラメータとして、それ らがせん断挙動にどのような影響を与えるのかを検討した。具体的には、単位要素を用い て三軸状態からの一軸圧縮解析を実施した。この時、OCR と膨潤指数 κ をパラメータと して 10 ケースの解析ケースを設定し、各ケースの有効応力経路と応力ひずみ関係を算出 した。ここで、締固めによって部材が固くなり、それに伴い強度も増加するということを 確認することが重要となる。



図 2.3-129 締固められた粘性土の強度特性

b)解析モデルと検討ケース

本検討で用いる解析モデルを図 2.3-130 に示す。本検討では、地盤の三軸状態を模擬 した単位要素に鉛直ひずみを 15%まで強制変位で与え、応力--ひずみ関係及び有効応力 経路を算出した(図 2.3-130、図 2.3-131 参照)。その結果を基に、本解析に用いる締固 め影響による OCR と剛性の検討ケースを設定する。





図 2.3-131 解析境界条件

材料剛性については、除荷時に Ko が変化し膨潤線は同一にならないこと、かつ、ベントナイトの膨潤線は非線形な応答を示すことを考慮して、次のように考えた。

核燃料サイクル開発機構における平成 17 年取りまとめ[60]によれば、一次元圧密試験の除荷時の挙動としては、図 2.3-132 のような関係を示している。また、同じく笹倉ら[57] も図 2.3-133 に示すように除荷過程では非線形な挙動を示すことを模式図にしている。


図 2.3-133 一次元圧密試験結果の模式図[57]

膨潤指数をパラメータとした追加解析では以下のとおり、解析ケースを考えた。太田ら [59]の検討を基に、OCR が大きいケースに対して剛性を硬くし、OCR が小さいケースに 対して剛性を柔らかくした。初期応力と OCR の関係は表 2.3-70 中に示す入力値算定式 に従い設定した[58]。なお、現状、用いている膨潤指数は対象材料で得られた κ=0.087 である。一方、膨潤指数の最低値と最大値の設定については以下の情報を参考にした。 【最低値(固い設定)】

H17 年レポート[60]の最低値は κ_{min}=0.01 (P.100 参照)、奥津らの検討[61]における P.84 のまとめ表から κ_{min}=0.0086 となっている。なお、これらはすべて飽和ベントナイ トである。

ー方、山本らの検討[54]における、サクション900kPa時(不飽和)の膨潤指数は κ =0.007 となっている。山本らの検討を見ると、サクション増加(飽和度低下) すると κ は小さ くなる傾向があり、本検討における初期状態は 2.134MPa であることから、山本らの検 討よりも小さい値となると考えられる。そこで、 κ の最低値は κ =0.001 とした。

【最大値(軟らかい設定)】

笹倉らの検討[57]では、膨潤指数は圧縮指数へ漸近すると指摘している。そこで、基本 ケースで設定した圧縮指数が λ=0.117 であることから、κ=0.1 を設定した。

以上から、単要素による追加解析ケースを表 2.3-70 のように設定する。また、主なケ ースの e-Ln P'関係を図 2.3-134 に示す。

既存検訴	サケース
ポアソン比	v=0.42
膨潤指数	к=0.087
先行圧密	Pc=1.50 MPa

表 2.3-69 既往検討ケース

パラメータ スタディ 解析ケース	膨潤指数 <i>ĸ</i>	圧密降伏応力 Pc (MPa)	初期平均有効 応力 P' (MPa)	OCR	m	о _ћ (MPa)	o _v (MPa)	
ケース1	0.001	0.478	0.0478	10.0		0.0637		
ケース 2	0.003	0.277	0.0396	7.0		0.0514		
ケース 3	0.005	0.167	0.0333	5.0		0.0420		
ケース 4	0.007	0.119	0.0298	4.0		0.0368		
ケース 5	0.009	0.078	0.0260	3.0	0.0	0.0309	0.016	
ケース 6	0.010	0.043	0.0215	2.0	0.6	0.0243		
ケース 7	0.020	0.037	0.0205	1.8		0.0228		
ケース 8	0.050	0.028	0.0189	1.5		0.0204		
ケース 9	0.080	0.021	0.0172	1.2		0.0178		
ケース 10	0.100	0.018	0.0166	1.1		0.0169		

表 2.3-70 追加解析ケース

圧縮指数 λ	0.117
限界状態応力比 M	0.548
間隙比 e	0.611
ポアソン比 <i>ν</i>	0.42

【入力値算出式】

 $\sigma_{v} = 0.016 \quad (MPa)$ $K_{0-NC} = 1.0$ $- K_{0-NC} (OCR)^{m}$

$$K_{0-OC} = K_{0-NC}(OCR)$$

$$\sigma_h = \sigma_v \times K_{0-OC}$$

$$P' = (\sigma_v + 2\sigma_h)/3$$

$$Pc = P' \times OCR$$



c) 検討解析

10 ケースによるパラメータスタディ解析によって得られた有効応力経路の比較を表 2.3-71 に、応力-ひずみ関係の比較を表 2.3-72 に示す。また、すべてのケースにおける 応力-ひずみの関係を同一グラフに併記し、比較したものを図 2.3-135 に示す。

これらの結果整理より、今回のパラメータスタディ解析により得られた知見を以下に示す。

・OCR が高ければ高いほど、強度及び剛性が高いことが分かる。

・強度及び剛性が高くなるにしたがい、ひずみ軟化現象が顕著に確認された。



表 2.3-71 パラメータスタディ解析結果__有効応力経路

表 2.3-72 パラメータスタディ解析結果__応力--ひずみ関係

ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5
OCR=10	OCR=7	OCR=5	OCR=4	OCR=3
к=0.001	к=0.003	к=0.005	к=0.007	к=0.009
		100 100 100 100 100 100 100 100		605 605 605 605 605 605 605 605
ケース6	ケース7	ケース8	ケース9	ケース10
ケース6 OCR=2	ケース7 OCR=1.8	ケース8 OCR=1.5	ケース9 OCR=1.2	ケース10 OCR=1.1
ケース6 OCR=2 ĸ=0.01	ケース7 OCR=1.8 ĸ=0.02	ケース8 OCR=1.5 ĸ=0.05	ケース9 OCR=1.2 ĸ=0.08	ケース10 OCR=1.1 _K =0.1



図 2.3-135 全ケースの応力-ひずみ関係比較図

以上から、施設全体モデルを用いた OCR と剛性に関する追加解析を検討ケースとして 採用する。 (c) 施設全体モデルによる追加解析

以上の単要素によるパラメータスタディ検討結果をもとに追加解析ケースを選択し (10 ケース中、3 ケースを選択)、施設モデルを用いた締固めによる影響の検討解析を行った。

選択した κ のケースがどの程度の締固め状態を表しているのかは不確定であり、その 状態の把握が今後の課題になる。

a)解析モデルと条件

解析モデル及び検討するべき入力条件以外については、前述 1.2.2(2)において示した入 力条件を用いている。今回、検討する解析ケースでは、締固め度合いの異なる膨潤指数 κ (OCR)を前節パラメータスタディ解析ケースから表 2.3-73に示す 3 ケースを選択し、 施設全体モデルの入力条件として与え、追加施設挙動解析を実施した。

- 締固め程度が密な場合:OCR=10、к=0.001
- 締固め程度が少し緩い場合:OCR=1.5、к=0.05
- 締固め程度が緩い場合:OCR=1.1、к=0.1

なお、追加解析における圧密降伏応力は、飽和時に膨潤圧が発生することから、設定 した膨潤圧をもとに各ケースにおける OCR から設定する。

すなわち、P_{sw}=0.629MPa であることから、OCR=10 のケースは Pc=6.29MPa、 OCR=1.5 のケースが Pc=0.944MPa となる。なお、既往のケース(基本ケース)は Pc=1.5MPa、 OCR=2.4 となる。

Case (締固め程度)	OCR	圧密降伏応力 Pc	膨潤指数 <i>K</i>
基本	2.4	1.500	0.087
追加1(緩)	1.1	0.692	0.100
追加2(微緩)	1.5	0.944	0.050
追加3(密)	10.0	6.290	0.001

表 2.3-73 追加解析ケース

b) 鉛直変位の比較

解析結果より得られた、各ケースにおける鉛直変位の経時変化を図 2.3-136 に示す。 図中グラフは、施設内の変位測定箇所別に追加解析したケースとこれまでの本事業にお いて検討実施してきた基本ケースの 4 ケースについて併せてプロットし比較したもので ある。このうち、主な経年におけるコンクリートピット(中央)における鉛直変位量を整 理比較したものを表 2.3-74 に示す。



図 2.3-136 鉛直変位の比較

経過時間	鉛直変位(cm)										
(Year)	基本	追加 1(緩)	追加2(微緩)	追加 3(密)							
10	0.740	0.935	0.957	0.140							
50	-0.970	-1.442	-0.910	0.100							
100	-2.110	-3.648	-2.730	0.214							
1000	-4.480	-6.097	-3.140	0.233							

表 2.3-74 経年における鉛直変位量比較表 (コンクリートピット中央)

これらの結果整理より、追加ケース 3(密)以外の 3 ケースにおいては、変位モニタ リングの着目期間である 50 年までの変位挙動は 0.910cm~1.442cm の沈下結果となり、 総じて大きな違いは見られなかったものの、地下水の浸潤が進む 100 年以降は有意な差 が認められ、解析 1000 年の結果として 3.14cm~6.097cm の幅を持つ結果となった。

一方、追加ケース 3(密)では、他ケースとは顕著に異なる挙動を示し、ほとんど沈下せず解析 1000 年の結果 0.233cm の上方変位を示した。

c)底部低透水層中央部における応力経路比較

図 2.3-137 に各ケースの底部低透水層中央部における応力経路を示す。それぞれの経時変化、全応力と飽和度との関係をそれぞれ整理して示す。

これより得られた知見を以下に示す。

- ・ 初期応力の異方性の影響については、膨潤圧の発現に伴い、軸差応力及び平均有効 応力は増加するが、降伏には至らない結果となった。
- ・ OCR によって、降伏後の挙動に影響を及ぼすが、本検討ではすべて弾性域のため、 その影響はなかった。
- なお、異方性を考慮した弾塑性モデルによる検討は行っていないため、その検討については、今後の課題である。



図 2.3-137 底部低透水層中央部における応力経路比較

d) 出力点①における飽和度及び全応力の比較

図 2.3-138 に出力点①(底部低透水層下面中央)における飽和度と全応力、それぞれの経時変化、全応力と飽和度との関係をそれぞれ整理して示す。

これより得られた知見を以下に示す。

- ・ 飽和度-経過時間関係、全応力-経過時間関係、飽和度-全応力関係の結果は、大局的にはほぼ重なる結果となったが、経過時間の中での挙動は締固めの程度により微妙に異なる。
- ・ 飽和度及び全応力は、いずれのケースでも施設建設開始後 80 年程度で最大に近い値 に達している。



図 2.3-138 出力点①における飽和度及び全応力の比較

(d) 検討まとめ

原位置締固めは、所定の密度で管理されるものの、ある程度の施工誤差が生じるものと考 えられ、この影響として OCR、強度及び剛性に着目し、図 2.3-124 に示すフローにしたが い 10 ケースによるパラメータスタディ解析を実施し、強度と剛性の関係を調べた上で、施 設全体モデルによる追加解析を実施した。ただし、その影響が及ぼすパラメータの影響につ いては、不明なため、仮定値を与え検討を実施した。

フローに示した検討項目順に、得られた知見と残された課題点を整理して表 2.3-75 に示す。

検討フロー項目	得られた知見	課題等
初期応力状態の 設定検討	✓ 締固めを考慮した異方性の初期応力の 設定を行い、使用する解析コードで任 意の初期応力状態の設定が可能である ことを確認した。	
3 種類の異なる κ (OCR)を考 慮した施設全体 モデルによる追 加解析	 ✓ 異なる OCR と剛性を与えた 10 ケース のパラスタを実施した。締め固めの程 度(OCR)が高いほど、強度及び剛性 が高いことを確認した。 ✓ 施設全体モデルによる追加解析では、 OCR と剛性のみならず、OCR によっ て設定される締固め影響による初期異 方性についても考慮した。膨潤圧が解 析結果に与える影響が大きく、それに 比べて初期異方性の影響は小さかっ た。また、OCR については、解析結果 は弾性範囲内であるため、塑性ひずみ は生じないことから影響がなかった。 	 ✓ 初期の応力状態から飽和膨潤時 の応力の変遷については今後の 課題である。 ✓ 施設内飽和進展過程における塑 性化の発生の有無につては不明 なため妥当性については今後の 課題である。
解析条件の違い による影響評価	 ✓ 変位については、追加ケース3は他と 顕著に異なる挙動を示した。その他の ケースを比較すると、変位モニタリン グの着目期間である50年までの変位 挙動(最大でも沈下量は1cm程度)に 大きな違いは見られないものの、地下 水の浸潤が進む100年以降は有意な差 が認められた。 ✓ 飽和度一時間関係、全応カー時間関係、 飽和度一全応力関係の解析結果は、大 局的にはほぼ重なる結果となったが、時間経過の中での挙動は微妙に異な る。 ✓ 飽和度及び全応力は、いずれのケース でも80年程度で最大に近い値に達し ている。 	 ✓ 基本ケースは既往の検討から信 頼性が高いと判断した値を用い たが、実施工された人工バリアが 有するばらつきやその幅につい ては今後の課題である。 ✓ 基本ケースを含め、検討した4 ケースにおいて、変位挙動に差異 があることが明らかになったが、 実現場に即した強度と剛性の特 定については、未確認となってい る(例えば к=0.001)。

表 2.3-75 検討結果の整理

b. 施工過程を含め初期条件と境界条件に関する検討

(a) 初期条件

CODE_BRIGHT における段階載荷解析は弾塑性自重解析によるステップ解析を実施 している。CODE_BRIGHT では初期状態として、全応力、間隙水圧及び間隙空気圧を設 定する。そして、有効応力は例えば式(2.3-99)で、飽和度は式(2.3-97)で記述される サクションから水分特性曲線を介して定義される。

自重解析で重力加速度を負荷する前の初期応力については、全応力をベースとして大気 圧下にあると仮定し、全応力=大気圧、すなわち、 $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=0.1$ MPa としている。た だし、Barcelona Basic Model は修正 Cam-Clay Model をベースとしていることから、若 干の拘束圧が無いと剛性が求まらないため、本モデルを適用している低透水層には、無視 できる程度の若干の有効応力(0.004MPa)を与えている。具体的には $\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=$ 0.104MPa とした。

初期の間隙空気圧については、大気圧を仮定して $P_g=0.1$ MPa とした。CODE_BRIGHT における飽和度は、水分特性曲線より水圧 P_l と間隙空気圧 P_g の差、式(2.3-97)に規定さ れるサクション S_u より規定される。そのため、初期飽和度が規定されている場合は、水分 特性曲線から初期サクションが規定されることになるため、式(2.3-98)に基づいて初期 間隙水圧を規定する。すなわち、初期間隙水圧は、水分特性曲線における初期飽和度に対 するサクションを用いて式(2.3-98)より規定する。

$$S_u = P_l - P_g$$
 (2.3-97)
 $P_l = S_u + P_g$ (2.3-98)

この時、不飽和であることから、水圧は負圧になる。具体的に本解析で用いた水分特性 を用いて、初期飽和度 85%を設定すると以下のようになる。

図 2.3-139 より、サクションは Su=-2.134MPa となる。よって、初期に設定すべき水 圧は Pl=Su+Pg=-2.034MPa となる。

力学挙動を規定する有効応力は CODE_BRIGHT の場合、式(2.3-99)のネット応力から規定される。

$$\boldsymbol{\sigma_{net}} = \boldsymbol{\sigma} + P_g \boldsymbol{I} \tag{2.3-99}$$

式 (2.3-99) より、初期の有効応力は低透水層以外については $\sigma_{net} = 0.000$ MPa となり、 弾塑性構成モデルの Barcelona Basic model を適用する低透水層については、 $\sigma_{net} = 0.004$ MPa を与えていることになる。

なお、Barcelona Basic Model における平均有効応力p'の定義は式(2.3-100)となり、 不飽和時は間隙空気圧 P_a の方が大きいことからネット応力と等価になる。



図 2.3-139 低透水層の水分特性曲線

上記が初期の入力条件の設定である。これについては、初期状態における状態設定を行 うパラメータとして整理する。

☆ // ナナ	如期亡力	初期	初期	初期間隙	初期間隙
区小山豆	们对那匹刀	間隙率	飽和度	水圧	空気圧
廃棄体	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 MPa$	0.116	0.90	-0.2368MPa	0.1MPa
RCピット	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 \text{ MPa}$	0.126	0.90	-0.2368MPa	0.1MPa
低拡散層	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 \text{ MPa}$	0.147	0.90	-0.6826MPa	0.1MPa
低透水層	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.104 \text{ MPa}$	0.410	0.85	-2.0340MPa	0.1MPa
側部埋戻し材	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 \text{ MPa}$	0.167	0.90	-0.2368MPa	0.1MPa
上部埋戻し材	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 \text{ MPa}$	0.300	0.75	0.03778MPa	0.1MPa
支保工	$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 0.1 \text{ MPa}$	0.167	0.90	-0.2368MPa	0.1MPa

表 2.3-76 初期条件一覧表

(b) 境界条件

カ学・水・空気連成問題は、本質的には、二階の偏微分方程式を解く問題となっている。 その微分方程式を解くためには、ノイマン条件とディリクレ条件の2種類の境界条件が 必要になる。対象となる領域境界は、必ずどちらかの条件が課されている必要があり、か つ2つの条件が同時に課されている境界は存在できない。

カ学・水・空気連成問題の場合は、3 相のそれぞれに、この2 種類の境界条件が課され る必要があり、境界条件を明示するという作業は、それらすべての境界条件を示すことに なる。具体的には、土の変形場においては、応力境界(ノイマン条件)と変位境界(ディ リクレ条件)、間隙水の浸透場では、流束(フラックス)条件(ノイマン条件)と水頭条 件(ディリクレ条件)、間隙空気圧の浸透場では、流束(フラックス)条件(ノイマン条 件)と空気圧ポテンシャル水頭(ディリクレ条件)となる。施工過程を考慮した解析を行 う場合には、施工過程に伴って、境界が変化するため、その境界条件も変化することにな る。

本解析で図 2.3-140 に示す施工ステップにおいて、以下に示す境界設定事項をノイマン条件とディリクレ条件として整理し、表 2.3-77 に示す。

また、境界条件として以下に示す設定を行っている。

- ・ 構築中における坑道内の構造物表面の流体に関する境界は不浸透境界
- ・ 坑道内構造物の鉛直方向境界は大気圧 ov=0.1MPa の応力固定
- ・ 水平方向境界は dx=0 の変位固定

周囲境界条件として、Narashimhan モデルのようなエアーエントリーバリューを有す るモデルでは、境界条件が飽和条件の場合、水圧については、例えば水圧=1.0MPa にし て、ガス圧=水圧+エアーエントリーバリューとしている。すなわち、水圧が従属変数で あるため、エアーエントリーバリューを有する Narashimhan モデル等では、水圧が不定 となり、上記設定となる。これに対して、今回適用した CODE_BRIGHT で用いている van Genuchten モデルでは、水圧とガス圧が主変数で飽和度は従属変数となるため、飽 和の定義が水圧-ガス圧=0 となり、飽和境界条件は水圧=ガス圧との設定となる。



図 2.3-140 境界条件の整理



表 2.3-77 施工過程における境界条件整理 (CODE_BRIGHT)

6) モニタリング計画に資する解析結果の整理

モニタリング計画において、施設内への水の浸潤を把握する計測項目として、ベントナイ ト膨潤に伴う『応力変化』がその候補にならないかという視点で平成 30 年度に実施した解 析結果を精査した。また、解析モデルや解析条件の検証を行うための追加解析を実施した。 また、『温度変化』については、平成 30 年度に実施した解析結果から施設内におけるピーク 温度、推移傾向を把握する観点から解析条件(解析ステップ)を見直し、熱-水連成解析を 実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

- 閉鎖措置段階以降のベントナイト部材を主とした施設内における水の浸潤状況について、全応力の経時変化や飽和度との相関を各測定点において総合的に見ることが重要である。
- 追加解析より、低透水層(ベントナイト)の締固めの程度によって、閉鎖段階以降において低透水層(ベントナイト)の性能が変化し、水の浸潤の進行にしたがって沈下量に有意な差を確認した。
- 建設~閉鎖段階以降の期間において、今回の施設内温度解析の検討では、施設内に発生するピーク温度は、廃棄体定置直後に中央部で約43℃発生することが分かった。また、解析ステップを細かくすることにより温度の増減傾向を詳細に把握することもできた。

これに対し、本業務における検討から得られた課題を以下に示す。施設内の浸潤による飽 和膨潤挙動を推定するため解析的な検討を実施する上で包括的に考えられる課題を以下に示 す。

a. 解析に用いた物性値

本検討では、対象材料の仕様に沿った材料における、既往の要素試験結果をもとに解析 用物性値を設定して解析を実施した。しかし、対象材料の仕様と同等の材料で実施されて いる要素試験等の数は少ないため、対象材料における要素試験による材料物性値(例えば、 以下のような物性値)の取得が必要であると考える。

- 飽和・不飽和圧密特性(ベントナイト系材料)
- 飽和・不飽和せん断特性(ベントナイト系材料)
- 水分特性曲線(セメント系部材及びベントナイト系材料)
- 相対浸透率あるいは不飽和透気透水特性(セメント系部材及びベントナイト系材料)
 施工による材料物性値のばらつきを考慮した検討

実際に施工された人工バリアの材料物性値はばらつきを持つことが予想される。そのた め、このばらつきをどのように評価するかは今後の検討課題と考える。

c. 建設〜埋設段階における挙動の推定

建設段階においては、締固めの影響による OCR や Ko 値の影響が生じ、初期応力状態 や材料剛性が変化するといわれている。そのため、建設〜埋設段階において、より詳細な 解析を実施するためには、締固め時の初期応力状態(例えば、Ko=1.0以上の設定が可能 な状態)等を考慮する必要がある。低透水層(ベントナイト)の膨潤過程に締固め時の初 期応力や材料剛性がどのような影響を及ぼすのかを解析検討のみならず、要素試験等も含 めながら検討する必要があると考える。さらに、要素試験結果を分析し、試験結果の再現 解析等を実施して建設〜埋設段階時におけるモデル化や使用する解析コードの選定も含 めて検討する必要がある。

7) まとめ

下記に、本項で得られた成果をまとめる。

- モニタリングの計測手法や計測位置、計測頻度等のモニタリング計画を具体的に検討 するため、モニタリング項目になりうる事象を調査・整理し、定量的に評価した。
- シナリオ整理表で抽出した起こりうる事象による施設挙動を、坑道周囲に均等に水圧 が掛かる参照ケースと、坑道底部中央部に局所的に水圧がかかる比較ケースにて解析 的に検討した。処分坑道横断面に関しては、参照ケースと同様に比較ケースについて も特にバリア性能が低下するようなほどの挙動は確認されなかった。ただし、挙動モ ードとして上方へ施設全体が変位する挙動が示唆されており、参照ケースにおける沈 下挙動モードとは異なった。よって、坑道縦断方向における挙動を確認し、バリア性 能を評価する必要があると考えられた。
- モニタリングの具体化検討に際して、施設の建設・埋設段階〜再冠水過程における廃 棄体からの熱の影響を解析的に検討した。その結果、温度と飽和度の明確な相関関係 は認められなかった。ただし、モニタリング施設内におけるピーク温度(廃棄体中央 部で約43℃)や解析ステップを細かくすることにより温度の増減傾向を詳細に把握す ることもでき、施設内における基礎情報となる温度環境の傾向をモニタリングするう えで、重要な情報を得ることができた。
- モニタリング計画において、施設内への水の浸潤を把握する計測項目として、ベント ナイト膨潤に伴う『応力変化』がその候補にならないかという視点で解析結果を精査 した。また、解析モデルや解析条件の検証を行うための追加解析を実施した。その結 果、以下の項目を確認することができた。
 - ✓ 閉鎖措置段階以降のベントナイト部材を主とした施設内における水の浸潤状況について、全応力の経時変化や飽和度との相関を各測定点において総合的に見ることが重要であることを確認した。
 - ✓ 追加解析より、低透水層(ベントナイト)の締固めの程度によって、閉鎖段
 階以降において低透水層(ベントナイト)の性能が変化し、水の浸潤の進行
 にしたがって沈下量に有意な差を確認した。

(3) 力学に着目した解析的検討(空洞縦断方向)

(2) では、処分坑道の横断面方向の挙動を二次元 FEM 解析により検討した。ここでは、処 分空洞縦断方向の挙動を予測するため、セメント系人工バリア部材(低拡散層、コンクリー トピット、上部充てん材、廃棄体間充てん材)を梁モデルで、低透水層を地盤バネでモデル 化した二次元骨組み解析を実施した。二次元骨組み解析により、低透水層が局所的に膨潤し た場合に低拡散層に発生する断面力、変形を算定し、ひび割れ及び施工目地の目開きの発生 可能性を評価する。なお、本検討で算定する各部材の応力度や変形量は、処分坑道埋戻し時 点からの増分であり、建設段階及び操業段階で生じた各部材の応力度、変形量は考慮しない ものとする。

- 1) 検討方法
 - a. 部材のモデル化
 - (a) モデル化の基本方針

検討モデルは、セメント系人工バリア部材(低拡散層、コンクリートピット、上部充て ん材、廃棄体間充てん材(以降、コンクリートピットの内側の領域を廃棄体層と称する)) を梁モデルでモデル化し、低透水層を地盤バネでモデル化する。

< ── 処分空洞縦断方向 _____、

・ ・ ・ ・ ・ ご 2.3·141 い盤バネ付き梁モデルの概念図

(b) 梁モデル

既往の検討結果[62]に示された図 2.3-142 より、コンクリートピットは8 区画で構成されており、セメント系バリア部材の総延長は120m 程度である。

また、既往の文献[63]に示された施工ステップによると、図 2.3-143 に示すように、側 部コンクリートピットの施工は 1 区画おきにコンクリート打設が行われることを想定し ており、施工目地が設けられる。しかし、コンクリートピットの処分坑道縦断方向の鉄筋 が連続していない場合、施工目地部で相対変位が生じ、核種の漏えいにつながることが懸 念されるため、本検討では、コンクリートピットの処分空洞縦断方向鉄筋は連続している と考える。



図 2.3-142 既往検討における処分空洞平面形状[62]

Step.3 底部・側部コンクリートピット施工



図 2.3-143 既往文献におけるコンクリートピットの施工状況概念図[63]

低拡散層は、コンクリートピットと同様に1区画毎(15m毎)に分割して打設し、施 工目地を設けるものとする。ただし、コンクリートピット、低拡散層の施工目地は地盤バ ネ付き梁モデルではモデル化しないこととする。

廃棄体層は、廃棄体と廃棄体間充てん材及び上部充てん材の複合体であるが、保守的に 弾性係数が最も小さい廃棄体間充てん材のモルタルで代表させてモデル化する。また、コ ンクリートピット内部の仕切り壁は、梁モデルの剛性に対する寄与が小さく、処分空洞縦 断方向の挙動に対する影響が小さいと考えられるためモデル化しないこととする。

以上をまとめてセメント系人工バリア部材のモデル化方法を以下に示す。

- ・ セメント系人工バリア部材の延長を 120m とする
- ・ コンクリートピット、低拡散層は 15m 間隔で施工目地が設置される
- ・ 梁モデルでは施工目地をモデル化しない
- ・ 廃棄体層は廃棄体間充てん材としてモデル化する
- ・ コンクリートピットの仕切り壁はモデル化しない

(c) 断面剛性

処分坑道断面方向の形状は、図 3.1 79 に示す既存の実規模施設の断面形状を用いる。 梁モデルの等価弾性係数は次式により算定する。

$$E = (E_1 I_1 + E_2 I_2 + E_3 I_3) / (I_1 + I_2 + I_3)$$

$$(2.3-101)$$

2-341

- *E*3 : 廃棄体層の弾性係数(kN/m²)
- *I*₁ : 低拡散層の断面二次モーメント (m⁴)
- *I*₂ : コンクリートピットの断面二次モーメント (m⁴)
- *I*₃ : 廃棄体層の断面二次モーメント (m⁴)



図 2.3-144 既存の実規模施設の断面図

(d) 地盤ばね

低透水層の地盤反力係数は、道路橋示方書[64]に準拠して次式により算出する。

$$k_V = k_{V0} \left(\frac{B_V}{0.3}\right)^{-3/4} \qquad k_{V0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \tag{2.3-102}$$

ここに、

k_V	:	鉛直方向地盤反力係数(kN/m³)
k_{V0}	:	直径 0.3m の剛体円板による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向 地盤反力係数 (kN/m ³)
R.,		セムント系人工バリア部材の幅 (m)
D_V	•	
E_0	:	低透水層の変形係数(kN/m ²)
α	:	地盤反力係数の換算係数で、変形係数を供試体の一軸圧縮試験又は三 軸圧縮試験から求めた場合は α=4

b. 解析用物性值

本検討で使用する、低拡散層、コンクリートピット、廃棄体間充てん材、低透水層の物 性値は、地下空洞型処分施設性能確証試験の各年度報告書[65][66][67][68][69][70]及び平 成19年度~平成24年度の取りまとめ報告書[71]、地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成19年度~平成26年度の取りまとめ報告書[72]に記載の数値を使用する。なお、低透水層の物性値は、施工上のばらつき等を考慮して変動させることとする。

本検討で使用する解析用物性値を表 2.3-78 に示し、設定根拠を次頁以降に示す。

☆ 7 774 5	立 物灶 単位 設定値		官値	山曲、伊孝	
前小五	物性	中心	標準値	変動値	山典・浦ろ
	乾燥密度	Mg/m ³	1.60	1.70	管理値 1.6±0.1Mg/m ³ の中央 値と上限値
低透水層	膨潤圧	MPa	0.63	1.19	平成 19 年度~平成 26 年度の 取りまとめ報告書[72]より
	変形係数	MN/m ²	60	30	平成 19 年度~平成 26 年度の 取りまとめ報告書[72]より
	圧縮強度	N/mm ²	60	_	設計基準強度
低拡散層	静弹性係数	kN/mm ²	28.4	_	平成 19 年度~平成 24 年度の 取りまとめ報告書[71]より
	引張強度	N/mm ²	4.44	_	平成 19 年度~平成 24 年度の 取りまとめ報告書[71]より
コンク	圧縮強度	N/mm ²	60	_	平成 19 年度~平成 24 年度の 取りまとめ報告書[71]より
ピット	静弹性係数	kN/mm ²	36.9	_	平成 19 年度~平成 24 年度の 取りまとめ報告書[71]より
廃棄体間	圧縮強度	N/mm ²	30	_	配合設計における目標強度の 目安
充てん材	静弹性係数	kN/mm ²	18.4	_	平成 19 年度~平成 24 年度の 取りまとめ報告書[71]より

表 2.3-78 解析用物性值一覧

(a) 低透水層の膨潤圧

低透水層の膨潤圧は、乾燥密度との関係式が平成 19 年度から平成 26 年度の取りまと め報告書[72]に記載されている。この算定式を用いて、乾燥密度が 1.6Mg/m³ 及び 1.7Mg/m3 に対応する膨潤圧を算定すると以下のようになる。

乾燥密度 ρ d=1.6Mg/m³:σ w=0.63 MPa

乾燥密度 $\rho_d = 1.7 Mg/m^3$: $\sigma_w = 1.19 MPa$

なお、低透水層の偏膨潤によりセメント系人工バリア部材に変形が生じた場合は、膨潤 圧が低下することが想定されるが、本検討では、セメント系人工バリア部材の変形に伴う 膨潤圧の低下は考慮しないこととした。



(b) 低透水層の変形係数

低透水層の変形係数は、乾燥密度との関係が平成 19 年度から平成 26 年度の取りまと め報告書[72]に記載されているが、乾燥密度から変形係数を算出する関係式は示されてい ない。膨潤圧に比べ、乾燥密度との相関が小さく、30 MN/m²~90 MN/m²程度の範囲で ばらついている。本検討では、低透水層の地盤反力係数を算定する際に変形係数を使用す るが、標準値としては、30 MN/m²~90 MN/m²程度のばらつきの中での平均的な値とし て 60 MN/m²を、地盤反力係数が小さく算定される保守的な値として 30 MN/m²を使用 することとした。



図 2.3-146 低透水層の変形係数と乾燥密度の関係[72]

(c) セメント系材料の弾性係数

低拡散層の弾性係数は、圧縮強度との関係式が平成 19 年度から平成 24 年度の取りま とめ報告書[71]に記載されている。この算定式を用いて、圧縮強度が設計基準強度である 60 N/mm²に対応する弾性係数を算定すると以下のようになる。

 $E = 28.4 \text{ kN/m}^2$



図 2.3-147 低拡散層の圧縮強度と弾性係数の関係[71]

コンクリートピットの弾性係数は、圧縮強度との関係式が平成 19 年度から平成 24 年 度の取りまとめ報告書[71]に記載されている。この算定式を用いて、圧縮強度が設計基準 強度である 60 N/mm²に対応する弾性係数を算定すると以下のようになる。

 $E = 36.9 \text{ kN/m}^2$



図 2.3-148 コンクリートピットの圧縮強度と弾性係数の関係[71]

廃棄体間充てん材の弾性係数は、圧縮強度との関係式が平成 19 年度から平成 24 年度 の取りまとめ報告書[71]に記載されている。この算定式を用いて、圧縮強度が配合設計時 の目標強度の目安である 30 N/mm²に対応する弾性係数を算定すると以下のようになる。

 $E = 18.4 \text{ kN/m}^2$



図 2.3-149 廃棄体間充てん材の圧縮強度と弾性係数の関係[71]

(d) 低拡散層の引張強度

ひび割れ発生の可能性評価に用いる低拡散層の引張強度は、圧縮強度との関係式が平成 19年度から平成24年度の取りまとめ報告書[71]に記載されている。この算定式を用いて、 圧縮強度が設計基準強度である 60 N/mm²に対応する引張強度を算定すると以下のよう になる。

 $f_{tk}~=~4.44~\text{N/mm}^2$

- c. セメント系人工バリア部材の断面力と変形の算定方法 本検討では、平面骨組計算システム「FREMING」(FUJITSU 建設ソリューション製) を用いて梁モデルに発生する断面力と変形を算出する。
- d. 低拡散層のひび割れ発生可能性の評価方法

二次元骨組み解析により算定した曲げモーメント Mから、低拡散層最外縁での引張応力度 σ_t を次式により算定し、引張強度 σ_{ta} と比較することによりひび割れ発生の可能性を評価する。なお、この場合は、施工目地の目開きは発生しないとしてひび割れ発生の可能性を評価する。

 $\sigma_t = M/Z \tag{2.3-103}$

ここに、

M : 発生曲げモーメント $(kN \cdot m)$

Z : セメント系人工バリア部材の断面係数 (m³)

e. 低拡散層の施工目地の目開きの算定方法

膨潤圧により部材に曲げモーメントが発生し、引張側の低拡散層施工目地が目開きする ことが想定される。二次元骨組み解析では、梁モデル上の任意の位置における回転角 φ が 算定可能であるため、回転角 φ を用いて変形後の低拡散層最外縁寸法 L を算定する。L と変形前の寸法 Loの差を施工目地の目開きとして評価する。なお、この場合は、ひび割 れは発生しないとして施工目地の目開きを評価する。



図 2.3-150 低拡散層の施工目地の目開き算定の概念図

低拡散層の施工目地の目開き量算定方法の概念図を図 2.3-150 に示す。

各節点 iにおける回転角 ϕ_i (ϕ_i は反時計回りが正)が二次元骨組み解析から算出される。変形後の梁モデル(弧 AB)がなす扇形の頂点を O とすると、次式が成立する。

$$\theta = \angle AOB = \phi_i - \phi_{i+1} \tag{2.3-104}$$

変形前後で梁モデルの長さ Loに変化が無いと仮定すると、扇形 OAB の半径 r と Loの 関係は次式のようになる。

$$2\pi r \times \theta / 2\pi = L_0 \Leftrightarrow r = L_0 / \theta \qquad (2.3-105)$$

図 2.3-150 に赤線で示した変形後における低拡散層の最外縁(弧 CD)がなす扇形 OCD の半径 *R*と部材高さ *H*の関係は次式のようになる。

$$R = r + H/2 = L_0/\theta + H/2$$
(2.3-106)

したがって、変形後における低拡散層の最外縁部材長 L は次式により算定される。

$$L = 2 \pi R \times \theta / 2 \pi$$

= $R \times \theta$
= $(L_0 / \theta + H / 2) \times (\phi_i - \phi_{i+1})$ (2.3-107)

以上より、低拡散層の施工目地の目開き量 ΔL は、次式により算定される。

$$\Delta L = L - L_0 \tag{2.3-108}$$

2) 検討ケース

検討ケースを表 2.3-79に示す。本検討におけるパラメータは以下の5項目である。

- ・ 偏膨潤する部位(処分坑道の横断面内における膨潤部位)
- ・ 偏膨潤する位置(処分坑道の軸方向における位置)
- ・ 膨潤範囲(処分坑道の軸方向における範囲)
- · 膨潤圧
- 低透水層の変形係数

偏膨潤する部位は、底部低透水層及び側部低透水層とした。

偏膨潤する位置は、梁部材の変形、梁部材に発生する断面力を網羅的に検討するため、処 分空洞中心部と処分坑道端部とした。

膨潤範囲は、セメント系人工バリア部材の幅と同等程度の10mを最小として、セメント系 人工バリア部材総延長120mの1/4、1/2、3/4に相当する30m、60m、90mを設定した。

膨潤圧を算出するパラメータとなる低透水層の乾燥密度は、施工管理値の中心値である 1.6Mg/m³ と上限値である 1.7Mg/m³ とし、乾燥密度から算出される膨潤圧はそれぞれ 0.63MPa 及び 1.19MPa である。

偏膨潤圧に抵抗する地盤バネの地盤反力係数を算定するパラメータとなる低透水層の変形 係数は、平均的な 60MN/m²と地盤反力係数が小さく算定される保守的な値として 30MN/m² を設定した。

		膨潤圧							
case	時の明立の伝	膨調片里	膨潤範囲	乾燥密度	膨潤圧	変形係数			
	膨相可迎	膨伸吐直	(m)	(Mg/m^3)	(MPa)	(kN/m^2)			
1			10						
2			30	1.00	0.02	<u>co 000</u>			
3			60	1.00	0.05	00,000			
4		処分坑道	90						
5		中心	10						
6			30	1 70	1 10	20,000			
7			60	1.70	1.19	30,000			
8	底部		90						
9	低透水層		10						
10			30	1.00	0.00	<u>co 000</u>			
11			60	1.60	0.63	60,000			
12		処分坑道	90						
13		端部	10		1 10				
14			30	1 70		20,000			
15			60	1.70	1.19	50,000			
16			90						
17			10						
18			30	1.00	0.00	<u>co 000</u>			
19			60	1.60	0.63	60,000			
20		処分坑道	90						
21		中心	10						
22			30	1 70	1 10	20,000			
23	/p./ +p		60	1.70	1.19	30,000			
24	制 (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)		90						
25	払透小唐 (左側)		10						
26			30	1.00	0.00	00.000			
27			60	1.60	0.63	60,000			
28		処分坑道	90						
29		端部	10						
30			30	1 50	1 10	20.000			
31			60	1.70	1.19	30,000			
32			90						

表 2.3-79 検討ケース一覧

各検討ケースの荷重図を図 2.3-151~図 2.3-154 に示す。なお、図 2.3-151~図 2.3-154 に示した荷重図は、底部低透水層の偏膨潤を模擬した case-1~case-16 においては処分坑道 縦断図、側部低透水層の偏膨潤を模擬した case-17~case-32 においては処分坑道平面図に相 当するものである。



図 2.3-151 荷重図 (case-1~case-8)

case-9

case-13

case-14

W	M	Ň	M	łw	łw	łW	W	W	M	M	M	Ň	Ň	M	M	M	Ň	M	Ň	M
	4	腹 0.	影潤 63	I圧 MPa	l															
	Om	4								1	10m	1								-



case-10





case-11

W	М	W	M	М	łW	łW	M	M	M	M	М	M	M	M	M	M	M	M	М	M
						•				(膨潤圧 0.63MPa									
	6 0m							60m 🛌							•					





case-12

case-16





図 2.3-152 荷重図 (case-9~case-16)

case-17

case-21



図 2.3-153 荷重図 (case-17~case-24)

case-25

case-29



図 2.3-154 荷重図 (case-25~case-32)

3) 検討結果

各ケースの最大モーメント、低拡散層最外縁で発生する最大引張応力度、施工目地の目開 き量をまとめて表 2.3-80 に示す。なお、施工目地の目開き量は、低透水層が偏膨潤した面(底 面/左面)が引張側となる場合、逆に偏膨潤した面と逆の面(上面/右面)が引張側となる場合 が存在するため、上面/右面、底面/左面それぞれの合計目開き量、及び 15m 間隔で設置され る各施工目地の最大値を示している。

	最大	最大引張	目地の目開	き (合計)	目地の目開き(最大)			
case	モーメント	応力度	上面・右面	底面・左面	上面・右面	底面・左面		
	$(kN \cdot m)$	(N/mm^2)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
1	258,686	1.72	0.95	0.70	0.47	0.15		
2	412,564	2.74	2.26	1.39	1.13	0.42		
3	256,138	1.70	3.09	0.68	0.89	0.21		
4	253,149	1.68	3.69	0.00	0.79	0.00		
5	613,858	4.08	2.55	1.03	1.27	0.31		
6	1,102,657	7.33	6.58	1.87	3.15	0.74		
7	877,787	5.84	10.31	0.51	3.01	0.20		
8	674,753	4.49	11.85	0.00	2.08	0.00		
9	243,406	1.62	0.06	1.76	0.03	0.81		
10	218,250	1.45	0.34	1.55	0.20	0.62		
11	206,597	1.37	1.43	1.43	0.61	0.61		
12	218,250	1.45	1.55	0.34	0.62	0.20		
13	607,044	4.04	0.09	5.21	0.05	2.03		
14	618,919	4.11	0.32	5.22	0.20	1.92		
15	527,389	3.51	3.91	3.91	1.68	1.68		
16	618,919	4.11	5.22	0.32	1.92	0.20		
17	238,554	1.21	0.76	0.36	0.38	0.10		
18	420,248	2.14	1.89	0.61	0.94	0.24		
19	320,932	1.63	2.98	0.22	0.87	0.07		
20	256,749	1.31	3.45	0.00	0.62	0.00		
21	572,827	2.91	2.20	0.36	1.03	0.14		
22	1,121,568	5.71	6.26	0.78	2.60	0.29		
23	1,059,546	5.39	10.29	0.14	2.83	0.07		
24	707,037	3.60	10.82	0.00	1.66	0.00		
25	234,359	1.19	0.04	1.54	0.02	0.62		
26	233,249	1.19	0.12	1.50	0.07	0.56		
27	203,441	1.04	1.18	1.18	0.51	0.51		
28	233,249	1.19	1.50	0.12	0.56	0.07		
29	575,253	2.93	0.01	4.51	0.00	1.49		
30	663,782	3.38	0.09	5.16	0.09	1.70		
31	489,474	2.49	2.94	2.94	1.26	1.26		
32	663,782	3.38	5.16	0.09	1.70	0.09		

表 2.3-80 検討結果一覧

最大モーメント及び最大引張応力と膨潤範囲の関係を図 2.3-155~図 2.3-158 に示す。な お、図 2.3-157、図 2.3-158 には、表 2.3-78 に示した低拡散層の引張強度に加え、2012 年 制定 コンクリート標準示方書 [設計編] [73]に示された 80N/mm²程度までの圧縮強度を有 する普通コンクリートに適用可能な引張強度算定式(以降、コン示式と称する)を用いて算 出した引張強度を併記した。

底部低透水層の偏膨潤を模擬した case-1~case-16 と側部低透水層の偏膨潤を模擬した case-17~case-32 を比較すると、低拡散層に発生する最大モーメントは、同等程度から 20% 程度 case-17~case-32 の方が大きい。一方で、低拡散層最外縁に発生する最大引張応力度は、 5~30% 程度 case-1~case-16 の方が大きい。これは、セメント系人工バリア部材の断面形 状が長方形であり、梁モデルの曲げ剛性は case-17~case-32 の方が大きく、曲げモーメント から引張応力度を算出する際に用いる断面係数は case-1~case-16 の方が小さいためである。

図 2.3-157、図 2.3-158 に示したように、偏膨潤する低透水層の乾燥密度が管理値の中央 値である 1.6Mg/m³、偏膨潤圧に抵抗する側の低透水層の地盤反力係数を算定する変形係数 が試験値の平均的な値である 60MN/m² の場合は、低拡散層に発生する最大引張応力が 2.7N/mm² 程度以下であり、ひび割れ発生の可能性は低いと考えられる。一方、偏膨潤する 低透水層の乾燥密度が管理値の上限値である 1.7Mg/m³、偏膨潤に抵抗する側の低透水層の 地盤反力係数を算定する変形係数が試験値の最小値である 30MN/m²、偏膨潤位置が処分坑 道中心の場合には、偏膨潤する範囲が 10m であってもコン示式で算出した引張強度を上回る 場合があり、30m、60m の場合には、いずれも低拡散層の引張強度(4.44N/mm²)を超える 引張応力度が発生することが確認された。



図 2.3-155 膨潤範囲と最大モーメントの関係 (case-1~case-16:底部膨潤)



図 2.3-156 膨潤範囲と最大モーメントの関係 (case-17~case-32:側部膨潤)



図 2.3-157 膨潤範囲と最大引張応力の関係 (case-1~case-16: 底部膨潤)



図 2.3-158 膨潤範囲と最大引張応力の関係 (case-17~case-32:側部膨潤)

次に、低拡散層の施工目地目開き量と膨潤範囲の関係を図 2.3-159~図 2.3-162 に示す。 図 2.3-159~図 2.3-162 には、15m 間隔で設置されると設定した施工目地の目開き量の合計 (各図左)、及び最も目開き量が大きくなる目地の目開き量(各図右)を示している。偏膨潤 する低透水層の乾燥密度が管理値の上限値である 1.7Mg/m³、偏膨潤圧に抵抗する側の低透 水層の地盤反力係数を算定する変形係数が試験値の最小値である 30MN/m²、偏膨潤位置が 処分坑道中心の場合には、上面の目開き量が大きい傾向が見られ、膨潤範囲が 90m の場合に は、目開き量が合計で 12mm 程度まで増大することが確認された。また、最も目開き量が大 きくなる目地の目開き量は 3mm 程度であると推定される。



図 2.3-159 膨潤範囲と施工目地目開き量(上面)の関係(case-1~case-16:底部膨潤)



図 2.3-160 膨潤範囲と施工目地目開き量(底面)の関係(case-1~case-16:底部膨潤)



図 2.3-161 膨潤範囲と施工目地目開き量(右面)の関係(case-17~case-32:側部膨潤)





4) 処分空洞縦断面方向の解析的検討のまとめ

二次元骨組み解析を用いて、低透水層が局所的に膨潤した場合に低拡散層に生じる引張応 カ、施工目地の目開き量を概略評価した。その結果、保守的な条件設計においては、低透水 層の膨潤圧により低拡散層には引張強度を超える引張応力が生じ、ひび割れが発生する可能 性があること、施工目地の目開きが合計で12mm 程度、目地一箇所当たりでは最大3mm 程 度生じる可能性があることが確認された。

- (4) 化学に着目した解析的検討
 - 1) 目的と概要

本業務では、人工バリアの機能確認の方法として、人工バリアの化学的変質に着目して、 埋設段階までは裏面排水のモニタリングを、閉鎖措置以降は近傍ボーリング孔における地下 水組成モニタリングを提案している(図 2.3・163)。その水質モニタリングが、安全評価の更 新に資する情報となり得るためには、人工バリアの化学的変質が周辺環境に及ぼす影響につ いて解析を実施し、影響の範囲や挙動を把握することが必要である。また、水質モニタリン グを行う上では、周辺地下水と最初に接し、分析結果に最も影響を与えると考えられる吹付 けコンクリートについて、着目すべき分析項目を抽出する必要がある。さらには、長期的な 解析を行う上で、吹付けコンクリートにおけるセメント系材料の劣化による化学的変質や溶 解特性を把握することが重要である。本項では、解析精度向上のために①セメント系材料の 化学的変質についてのデータを取得すること、②裏面排水モニタリングを想定した解析及び 近傍ボーリング孔における地下水組成モニタリングを想定した解析を実施し、想定される各 条件において、人工バリアの化学的変質が周辺環境に与える pH やイオン濃度等の影響につ いて把握することを目的とした。



図 2.3-163 人工バリアの機能確認においてモニタリングが必要と思われる項目

- 2) セメント系材料の化学的変質及び溶解特性
 - a. 試験概要

吹付けコンクリートの化学的変質や、溶解特性に関するデータを取得するために、溶解 試験を行った[74]。試験空洞で施工された吹付けコンクリートの配合を模擬した供試体を 製作し、40℃の環境で 56 日間封緘養生した養生終了後、供試体を所定の粒径に粉砕し、 溶解試験を行った。

- b. 試験条件
- (a) 試験空洞に施工された吹付けコンクリートの使用材料と配合

表 2.3-81 に試験空洞の吹付けコンクリートにおける使用材料を、表 2.3-82 に吹付コ ンクリートの配合をそれぞれ示す。
使用材料	記号	摘要
セメント	С	 普通ポルトランドセメント(宇部三菱セメント) 密度: 3.16g/cm³
細骨材	S	陸砂 密度:2.59g/cm ³ 、F.M.:2.70
粗骨材	G	砂利 粗骨材最大寸法 10mm、密度: 2.57g/cm ³
	SP	高性能減水剤 FTN-30(グレースケミカルズ)
混和剤	AC	急結剤 デンカナトミック TYPE10 カルシウムサルフォアルミネート系
繊維	SF	鋼繊維 シンコーファイバ φ0.6mm×30mm 神鋼建材株式会社

表 2.3-81 試験空洞の吹付けコンクリートにおける使用材料

表 2.3-82 吹付けコンクリートの配合

W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							
(%)		W	С	S	G	SP	AC		
45	60	202	450	979	648	3.60	45		

(b) 溶解試験の材料と配合

試験に使用した材料を表 2.3・83 に、配合を表 2.3・84 に示す。今回の試験では、試験 空洞に施工された吹付けコンクリート配合のセメントペースト部分を用いた。急結剤は、 カルシウムサルフォアルミネートを主成分とするデンカナトミック TYPE10 を使用した。 水はイオン交換水を使用した。供試体作製に用いた材料について化学組成を分析した。表 2.3・85 に初期試料の化学組成分析結果を示す。デンカナトミック TYPE10 はカルシウム サルフォアルミネートを主成分としており、普通ポルトランドセメントでは含有割合が少 ない SO3 や Al₂O₃ を多く含有していることが分かる。

表 2.3-83 試験に使用した材料

使用材料	記号	摘要
水	W	イオン交換水
セメント	С	普通ポルトランドセメント(宇部三菱セメント)密度:3.16g/cm ³
	SP	高性能減水剤 FTN-30(グレースケミカルズ)
混和剤	AC	急結剤 デンカナトミック TYPE10(デンカ) カルシウムサルフォアルミネート系

表 2.3-84 試験空洞の吹付けコンクリートにおける使用材料

W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
(%)		W	С	SP (W 内割)	AC (C 外割 10%)		
45	60	540	1202	13.2	120		

			試料名		
		セメント	急結剤		
		(蛍光X線分析)	(蛍光X線分析・化学分析)		
	CaO	63.6	42.1		
	MgO	2.4	-		
	${ m SO}_3$	2.0	27.9		
成	Na ₂ O	0.2	2.2		
ゴ 分	K_2O	0.3	0.1		
析	P_2O_5	0.2	0.04		
結	MnO	0.1	-		
果	${ m SiO}_2$	20.7	1.7		
$\widehat{0/2}$	Al_2O_3	5.2	22.9		
<u>/0</u>	Fe_2O_3	2.9	0.2		
	${ m TiO_2}$	0.3	0.6		
	Ig.loss	2.1	1.7		
	insol.	-	0.5		

表 2.3-85 初期試料の化学組成

c. 試験結果

(a) 浸漬水のイオン組成

液固比 10、100 のケースについて、浸漬材齢 14 日、28 日、56 日後のイオン組成分析 した結果を表 2.3-86 に示す。Na+、K+、Ca²⁺、Al³⁺、全 Si は定量下限値以上の量のイオ ンが検出された。Al³⁺は定量下限値を超える量のイオンが検知されているものの、その濃 度は低かった。吹付けコンクリートのイオンモニタリングにおける着目すべき項目として は、比較的多く検出され、変化が大きい Na+、K+、Ca²⁺が挙げられる。また、材齢 56 日 間でほぼ平衡状態に達していた。

項目	単位		液固比 10			液固比 100	
		材齢	材齢	材齢	材齢	材齢	材齢
		14 日	28 日	56 日	14 日	28 日	56 日
pH		12.7	12.8	12.9	12.3	12.5	12.7
Cl-		1 未満					
$SO_{4^{2}}$		5	5	4 未満	4 未満	4	4 未満
Na+		191	196	187	19.2	19.4	18.9
K+		165	174	171	16.7	17.8	17.5
Ca^{2+}		664	649	722	340	356	503
Mg^{2+}	mg //	0.1 未満					
Fe	κ	0.01 未満					
Al ³⁺		0.06	0.04	0.03	0.14	0.10	0.11
全S		100 未満					
イオン状 Si		1 未満	1 未満	1未満	3	1	1 未満
全 Si		8	3	1	10	3	4

表 2.3-86 浸漬水の分析(浸漬材齢14日、28日、56日)

(b) 浸漬後残渣の鉱物組成

液固比 10、100 の浸漬材齢 14 日、28 日、56 日で固液分離を実施した試料について、 浸漬後残渣の鉱物組成を分析した。鉱物組成分析の結果を表 2.3・87 に示す。また、液固 比 10、液固比 100 における鉱物組成割合の経時変化を表 2.3・87 に示す。液固比 10、液 固比 100 のどちらのケースも、ポルトランダイトとモノサルフェートの組成割合が減少 し、エトリンガイトが増加している。ポルトランダイトやモノサルフェートから溶出した Ca²⁺、モノサルフェートより溶出する Al³⁺、溶液中の SO4²の反応等により、エトリンガ イトが生成したものと考えられる。エトリンガイトはポルトランダイトに比べて溶出しに くいため、吹付けコンクリートの化学的変質は一般的なコンクリートに比べて遅くなるも のと考えられる。

			鉱物組成(mass%)									
液固比	浸頂材齢(日)	エーラ	ヒ゛ーラ	アルミ	フェラ	エトリン	モノサル	ポルトラ	非見好	九八十八		
		사	イト	ネート	仆	ガイト	フェート	ンダイト	≁⊞員 C-S-H			
		C_3S	C_2S	C ₃ A	C ₄ AF	Ett	Afm	$Ca(OH)_2$	0.511	CaCO3		
浸漬前0)試料	5.86	2.70	0.22	4.26	7.97	1.80	13.43	63.75	-		
	14	4.50	3.19	0.00	2.44	13.29	1.79	13.17	61.62	-		
10	28	3.31	2.45	0.04	2.20	15.18	0.38	10.88	65.56	-		
	56	3.62	2.30	0.00	2.26	16.34	0.48	10.97	64.03	-		
	14	4.42	3.65	0.05	2.73	10.86	1.23	7.07	69.99	-		
100	$\overline{28}$	3.89	3.14	0.07	2.46	15.92	0.55	4.87	69.12	-		
	56	3.62	2.84	0.00	2.41	17.10	0.29	3.13	70.62	-		

表 2.3-87 鉱物組成の分析(浸漬材齢14日、28日、56日)



表 2.3-88 水和生成物の組成割合の経時変化

(c) 液固比と浸漬水のイオン濃度の関係

浸漬材齢 70 日目に全液固比について固液分離を実施し、浸漬水の分析を行った。浸漬 水の分析結果を表 2.3-89 に示す。

百日	単					液固比				
項日	位	1	5	7	10	20	100	1000	2000	3000
浸漬材 齢	田	70			56	70	56	70		
pН		13.1	12.9	12.8	12.9	12.8	12.7	11.7	11.4	11.1
Cl-		5	1	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満	1 未満
$\mathrm{SO}_{4^{2^{-}}}$		19	4	4 未満	4 未満	4 未満	4 未満	4 未満	4 未満	4 未満
Na+		1670	378	266	187	93.8	18.9	2.0	1.1	0.7
K+		1460	337	239	171	83.6	17.5	1.9	1.2	0.8
Ca ²⁺		166	708	737	722	789	503	82.2	45.0	26.5
Ma ²⁺		1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Mg2*		I /下间	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満
Fo		0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
ге	mg	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満
Al	/ℓ	0.1 未満	0.02	0.02	0.03	0.02	0.11	0.11	0.09	0.39
会C		1000	100	100	100	100	100	100	100	10
土口		未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満	未満
イオン 状 Si		1 未満	32	38	21					
全 Si		2	4	2	1	2	4	33	40	22
CO ₃ ²⁻		114	5.0 未満	5.0 未満	5.0 未満	5.0 未満	5.0 未満	16.2	9.8	9.5
浸漬材 齢	日		70		56	70	56		70	

表 2.3-89 浸漬水の分析(浸漬材齢 70 日)

液固比と平衡水の関係を図 2.3-164 から図 2.3-166 に示す。液固比が小さい領域では、 Na+や K+の濃度が高く、Ca²⁺は比較的濃度が低いこと、液固比が 10 以上の領域では Ca²⁺ の濃度が高くなっている。これは液固比が小さいときは、イオン化しやすい Na+や K+の 溶出が先行して進行し、ポルトランダイト (Ca(OH)₂) や非晶質の溶脱が進まなかったた めである。



図 2.3-166 液固比と平衡水の Ca²⁺の関係

(d) 溶解平衡関係の取得

Na +、K+、Ca²⁺の溶解平衡関係について、浸漬開始前の供試体に対する浸漬後の固相 に残存する Ca 濃度(固相 Ca 濃度比とする)と液相中の Ca²⁺濃度の関係性に着目して整 理する。固相 Ca の量は供試体に含まれる Ca 量と液相に溶出したイオン量の差から求め られる。液固比と固相 Ca 濃度比の関係を表 2.3-90、図 2.3-167 に示す。OPC+急結剤は、 OPC に比較して、液固比が大きくなった場合でも、Ca イオンの溶出が少ないことが分か る。

		液固比									
	1	5	7	10	20	100	1000	2000	3000		
OPC+急結剤	1.00	0.99	0.98	0.98	0.95	0.84	0.74	0.71	0.75		
OPC[75]	1.00	0.99	0.98	0.98	0.95	0.78	0.56	0.50	0.40		

表 2.3-90 液固比と固相 Ca 濃度比の関係



図 2.3-167 液固比と固相 Ca 濃度の関係 (OPC は[75]より引用)

各液固比の固相 Ca 濃度比と液相の Na +、K+、Ca²⁺の濃度の関係をプロットしたもの を図 2.3-168~図 2.3-170 に示す。固相 Ca 濃度比が 0.9 を超える領域においては、OPC に比較して、同一固相 Ca 濃度比のときの Na +、K+の濃度が高いことが分かる。

一方で Ca²⁺の濃度は、固相 Ca 濃度比が 0.9 を超える領域において、OPC+急結剤は OPC よりも溶出している Ca²⁺の濃度が高い傾向にあるが、それより小さい領域では、 OPC に比較して Ca²⁺の濃度が低いことが分かる。これらのことは吹付けコンクリートが 普通コンクリートに比べて溶けにくいことを示唆している。



(OPC は[75]より引用)



(OPC は[75]より引用)

- 3) 裏面排水モニタリング計画に資するための解析的検討
 - a. 解析概要

建設段階から施工される吹付けコンクリートは、施工当初から地下水と接しているため、 埋設段階であっても化学的変質(溶脱)が生じる可能性がある。したがって、表 2.3-91 に示す埋設段階及び保全段階(建設~100年程度まで)における裏面排水のモニタリング を対象として化学的変質について解析を行った[76][77]。

表 2.3-91 解析ケース

ケース	目的	解析概要	解析期間
1	建設・操業中における防水シート 裏面の排水モニタリングにて着 目すべき分析項目を抽出	人工バリア構築前の処分空洞を 模擬	100 年まで

b. 解析条件

(a) 解析モデル

解析モデルを図 2.3-171 に示す。人工バリアから 25m の範囲までモデル化し、解析コード LIFE D.N.A.用いて化学的変質や浸出する水量などの検討を行った。なお、いずれの解析においても動水勾配は図面の左側から右側へ 0.07m/m の勾配で作用するものとした。



図 2.3-171 人工バリア構築前の処分空洞の状態

(b)入力物性

各種の拡散係数と透水係数の一覧を表 2.3-92 に示す。

項目	単位	岩盤	吹付けコ ンクリー ト	セメント 系埋戻し 材	埋戻し材 土質系	低透水材	低拡散材	コンクリ ートピッ ト
拡散 係数	m2/s	$2.0 imes$ 10^{-9}	$5.0 imes$ $10^{\cdot 12}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot13}$	$1.7 imes$ 10^{-9}	$1.0 imes 10^{-10}$	$1.0 imes$ $10^{\cdot13}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot13}$
透水 係数	m/s	$3.0 imes$ 10^{-8}	$1.0 imes 10^{-12}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot13}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot 11}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot13}$	$1.0 imes 10^{-13}$	$5.0 imes$ $10^{\cdot13}$

表 2.3-92 各部材における拡散係数と透水係数

c. 解析結果

(a) セメント系材料の化学的変質の変遷と物質移行特性の変化

固相 NaOH、Ca(OH)2 濃度の経時変化を表 2.3-93 及び表 2.3-94 に示す。NaOH や KOH は解析開始から 20 年程度で吹付けコンクリート全面にて消失し、その後 Ca(OH)2 の溶脱が始まる。Ca(OH)2の溶脱は主として岩盤に向けて進行するが、解析期間 100 年 においても吹付けコンクリートの全域で Ca(OH)2 は多く残存する結果となった。次に、 吹付けコンクリートにおける空隙率の経時変化を表 2.3-95 に示す。上述した溶脱によっ て吹付けコンクリートの空隙率はやや粗大化するものの、その影響範囲はごくわずかであ る。すなわち、本検討における解析期間 100 年のあいだで、吹付けコンクリート内面に 浸出する水量の変化はわずかであると考えられる。

(b) 吹付けコンクリートにおけるイオン組成の変化

処分空洞近傍における pH 分布の経時変化を表 2.3・96 に示す。NaOH や KOH の溶脱 によって OH・が岩盤に拡散し、pH は大きく上昇する。次に、Na+と Ca²⁺濃度の経時変化 を表 2.3・97 及び表 2.3・98 に示す。Na+や K+は吹付けコンクリートに含まれる量が少な いうえに、NaOH、KOH は早期に消失するため、100 年後には下流側の一部にイオンが 残存するのみでほぼ移流によって流失する結果となった。一方、Na+や K+が消失したあ とも Ca(OH)₂ が継続的に溶脱を続けるため、周辺岩盤並びに吹付けコンクリート内面に 浸出する水の pH が高い状態で維持し続け、Ca²⁺濃度も特に下流側で徐々に高まる結果と なった。







2-373







- 4) 近傍ボーリング孔による地下水組成に関する解析的検討
 - a. 解析概要

解析に用いる物性には様々な不確実性が含まれている。実際には、施設の建設から操業、 埋設、閉鎖措置段階への変遷に応じて施設の状態や周辺地下水の流れも変化することから、 実施時には詳細な検討が必要になると考えられるものの、想定される計測値がどの程度の 幅を有するかを事前に把握しておくことは重要である。

本項では、①地下水の動水勾配や施設に生じるひび割れ、掘削影響領域(EDZ)、地下 水組成等の不確実性を考慮したうえで、モニタリング値に大きく影響を与える条件・パラ メータを明らかにするとともに、計測結果の想定範囲(幅)を示すこと②人工バリアを構 成する各部材の物性が、施設周辺での各種イオン濃度やpHの分布並びに経時変化に及ぼ す影響を明らかにするとともに、計測結果の想定範囲(幅)を提示すること、上記 2 つ を目的として検討を行った。

- b. 解析条件
- (a) 解析モデル

検討対象は、埋設段階及び保全段階(建設~1,000 年程度まで)とした。埋設段階は図 2.3-172 に示す埋戻し前(再冠水前)の期間である[78]ため、人工バリアの化学的変質は 限定的であると考えられる。一方で、空洞周辺に施工されている吹付けコンクリートは、 施工当初から地下水と接しているため、埋設段階であっても化学的変質(溶脱)が生じる 可能性がある。また、吹付けコンクリートは急結剤として硫酸塩を含有しているため、化 学的変質が早い可能性があり、その影響を考慮した解析が必要となる。

本検討では、処分空洞内に人工バリアが構築される前(図 2.3-172)と、閉鎖措置段階から再冠水後、数 100 年(図 2.3-173)という 2 つのフェーズで解析を実施することとした。なお、いずれの解析においても、動水勾配は図面の左側から右側へ 0.07m/m の勾配で作用することを基本とした。



図 2.3-172 人工バリア構築前の処分空洞の状態



図 2.3-173 埋設完了後の処分空洞の状態

解析領域について、岩盤は下流側を施設中心から 500m とし、上流側やその他の面は 100m とした。解析領域のイメージを図 2.3-174 及び図 2.3-175 に示す。



図 2.3-174 人工バリア構築前の解析領域



図 2.3-175 埋設完了後の解析領域

(b)入力物性

各部材の拡散係数及び透水係数について表 2.3-92 と同様の数値を基本とし、各ケース において、それぞれ設定した。

(c) 解析ケース

本項では STEP1 から STEP3 までの解析を実施した。STEP1 では周辺環境がモニタリ ングに及ぼす影響を確認するため表 2.3・99 に示すケースで解析を行った。主に地下水流 動に係る条件(動水勾配、ひび割れ・隙間、EDZ、吹付けコンクリートの初期変質)と 化学環境に係る条件(岩盤グラウト、地下水組成)を考慮し、下表のとおり解析ケースを 設定した。

ケース	動水 勾配	ひび割 れ・隙間	EDZ	岩盤グ ラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質	検証の対象
1	7%	-	-	-	降水系	-	標準
2	0%	-	-	-	降水系	-	動水勾配
3	7%	0	—	—	降水系	—	ひび割れ
4	7%	\bigcirc	\bigcirc	-	降水系	-	EDZ
5	7%	0	-	\bigcirc	降水系	-	グラウト
6	7%	\bigcirc	—	-	海水系	-	地下水組成
7	7%	0	-	—	降水系	0	吹付初期変質

表 2.3-99 解析ケース (STEP1)

(-:考慮しない、○:考慮する)

STEP2 では STEP1 で用いた代表的な各部材の入力物性を用い、ケース1をリファレ ンスとして、人工バリア部材である低透水槽、低拡散層、コンクリートピットの拡散係数 及び透水係数を、いずれも 10 倍 (ケース 8)、100 倍 (ケース 9) とした解析を実施し、 これらの物性値が地下水モニタリング値に及ぼす影響を評価した。また、ケース 10 では 空洞内充填材 (セメント系)に用いられるコンクリートの物性を経済的な観点から普通ポ ルトランドセメント (OPC) にし、かつ吹付けコンクリートの透水係数を現実的な範囲 で安全側の設定としたケースを評価した。

表 2.3-100 解析ケース (STEP2)

ケース	概要
8	低透水層、低拡散層、コンクリートピットの拡散係数、透水係数を 10 倍に
9	低透水層、低拡散層、コンクリートピットの拡散係数、透水係数を 100 倍に
10	『空洞内充填材(セメント系)』の透水係数、拡散係数を LPCFA→OPC 相当に し、吹付けコンクリートの透水係数を大きく

STEP3では地下水に溶出するイオンの由来を明らかにするため表 2.3-101に示すケースでパラメータスタディを行った。表 2.3-101 において『〇』を付けた部材においては含有するイオンの量、及びそのイオンの行動とそれに伴う化学的変質を考慮し『-』を付けた部材においては、岩盤のように拡散係数、透水係数が変化せず、イオンを含有しないという設定にて解析を実施した。結果については、これらの中で代表的なケースについて記載する。

ケース	低透水層 低拡散層 コンクリートピット	埋戻し材 (土質系、セメント系)	吹付け コンクリート	備考
1	0	0	0	STEP1 の ケース 1 と同一
11	0	_	—	
12	0	—	0	
13	—	—	0	
14	0	0	—	

表 2.3-101 解析ケース (STEP3)

(-:化学的変質を考慮しない、○:化学的変質を考慮する)

c. 解析結果

(a) ケース1(リファレンス)

ケース1における100年後及び400年後のpH分布を図 2.3-176~図 2.3-178に示す。 動水勾配の影響によって下流側に高 pH 領域が拡大しているものの、400年後において地 下水中の pH の影響を及ぼす範囲は100m 程度という結果になった。

ケース	動水 勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質
1	7%	-	-	-	降水系	—

表 2.3-102 解析ケース



図 2.3-176 100 年後における pH 分布 (ケース 1)



図 2.3-177 200 年後における pH 分布 (ケース 1)



図 2.3-178 400 年後における pH 分布 (ケース 1)

ケース1における100年後及び400年後のNaイオン分布を図2.3-179、図2.3-180に示す。動水勾配の影響によって下流側にNaイオンが多く溶出しているものの、400年後において地下水中のNaイオン濃度に影響を及ぼす範囲は100m程度という結果になった。



図 2.3-179 100 年後における Na イオン濃度分布 (ケース 1)



図 2.3-180 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース 1)

ケース1における100年後及び400年後のCaイオン分布を図2.3-181、図2.3-182 に示す。動水勾配の影響によって下流側にCaイオンが多く溶出しているものの、400年 後において地下水中のCaイオン濃度に影響を及ぼす範囲は100m程度という結果になっ た。すなわち、リファレンスとして設定したケースにおいては、400年間で周辺岩盤の地 下水組成に影響を及ぼす範囲は、施設周辺100m程度にとどまるという結果となった。



図 2.3-181 100 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース 1)



図 2.3-182 400 年後における Ca イオン分布 (ケース 1)

(b) ケース2(動水勾配の影響)

ケース1及びケース2における、400年後のpH分布を図 2.3-183及び図 2.3-184に 示す。動水勾配をゼロにすることによって、下流側の高pH領域が半分程度(約50m) になる結果となった。また、上流側は高pH領域が2倍程度に拡大する結果となった。す なわち、動水勾配の考慮の仕方は解析結果に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる。

ケース	動水 勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質
1	7%	-	—	-	降水系	-
2	0%	—	_	_	降水系	_

表 2.3-103 解析ケース



図 2.3-183 400 年後における pH 分布 (ケース1: i=0.07)



図 2.3-184 400 年後における pH 分布 (ケース 2: i=0)

ケース1及びケース2における、400年後のNaイオン分布を図 2.3-185及び図 2.3-186 に示す。pH分布と同様に、動水勾配をゼロにすることによって、下流側のNaイオン溶 出領域が半減する結果となった。また、上流側はNaイオン溶出領域が2倍程度に拡大す る結果となった。



図 2.3-185 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース1:i=0.07)



図 2.3-186 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース 2: i=0)

ケース1及びケース2における、400年後のCaイオン分布を図 2.3-187及び図 2.3-188 に示す。pH分布と同様に、動水勾配をゼロにすることによって、下流側のCaイオン溶 出領域が半減する結果となった。また、上流側はCaイオン溶出領域が2倍程度に拡大す る結果となった。



図 2.3-187 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース1: i=0.07)



図 2.3-188 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース 2: i=0)

(c) ケース3(ひび割れ・隙間の影響)

ケース1及びケース3における、400年後のpH分布を図 2.3-190及び図 2.3-191に 示す。本検討では、図 2.3-189に示すように、施設を縦横に切る形で2mmのひび割れを 考慮し、さらに、赤い線で示した領域では充填材とRCピットとのあいだに2mmの隙間 が生じることをモデル化して解析を行った。これらのひび割れや隙間は、pH分布に大き な影響を及ぼさない結果となった。施設が構築されたあと、全体としての流れが緩やかに なるため、今回考慮したひび割れ程度であれば、周辺地下水の水質に大きな影響は生じな いものと考える。

ケース	動水 勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質
1	7%	-	—	-	降水系	—
3	7%	0	—	-	降水系	—

表 2.3-104 解	杤ケース	•
-------------	------	---



図 2.3-189 ケース3におけるひび割れ、隙間の配置箇所



図 2.3-190 400 年後における pH 分布 (ケース1:ひび割れ、隙間無し)



図 2.3-191 400 年後における pH 分布 (ケース3: ひび割れ、隙間有り)

ケース1及びケース3における、400年後のNaイオン分布を図 2.3-192及び図 2.3-193 に示す。本検討で考慮したひび割れや隙間は、Naイオン濃度分布に大きな影響を及ぼさ ない結果となった。



図 2.3-192 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース1:ひび割れ、隙間無し)



図 2.3-193 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース 3: ひび割れ、隙間有り)

ケース1及びケース3における、400年後のCaイオン分布を図 2.3-194及び図 2.3-195 に示す。本検討で考慮したひび割れや隙間は、Caイオン濃度分布に大きな影響を及ぼさ ない結果となった。



図 2.3-194 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース1: ひび割れ、隙間無し)



図 2.3-195 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース3: ひび割れ、隙間有り)

ケース1及びケース3における、400年後の施設内におけるNaイオン分布を図 2.3-196 及び図 2.3-197 に示す。ひび割れ及び隙間の影響によって、上部埋め戻し材に含まれる Naイオンの流出が助長されていることが確認された。



図 2.3-196 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布 (ケース1: ひび割れ、隙間無し)



図 2.3-197 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布 (ケース3: ひび割れ、隙間有り)

ケース1及びケース3における、400年後の施設内におけるCaイオン分布を図 2.3-198 及び図 2.3-199 に示す。上流側から溶出した Caイオンがひび割れや隙間を通って下流側 に流され、下流側の Caイオンの濃度上昇が助長されていることを確認した。



図 2.3-198 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布 (ケース1:ひび割れ、隙間無し)



図 2.3-199 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布 (ケース3: ひび割れ、隙間有り)

(d) ケース6(地下水組成の影響)

ケース 3 及びケース 6 における、400 年後の pH 分布を図 2.3-200 及び図 2.3-201 に 示す。本検討では、海水系地下水組成として既往の研究[79]にて示された表 2.3-106 に示 す値を用いた。

本検討の範囲では、地下水組成が周辺岩盤の pH に及ぼす影響は小さい結果となった。

ケース	動水勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質
3	7%	0	-	-	降水系	-
6	7%	\bigcirc	—	_	海水系	_

表 2.3-105 解析ケース

表	2.3 - 106	地门	「水組成	[79]	
~	- .0 ±00				

種類	pН	Na+	K+	Ca ²⁺	SO4 ²⁻	Mg ²⁺	Cl-	CO32-
降水系地下水	8.5	0.77	0.03	0.125	0.14	0.155	0.44	0.62
海水系地下水	8.0	620	11	0.33	0.032	0.25	590	0.13



図 2.3-200 400 年後における pH 分布 (ケース3:降水系地下水)



図 2.3-201 400 年後における pH 分布 (ケース 6:海水系地下水)
ケース 3 及びケース 6 における、400 年後の Na イオン濃度分布を図 2.3-202 及び図 2.3-203 に示す。海水系地下水には大量の Na イオンが存在することから、セメント系材 料からの Na イオン溶出による影響は確認されなかった。



図 2.3-202 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース3:降水系地下水)



図 2.3-203 400 年後における Na イオン濃度分布 (ケース 6:海水系地下水)

ケース 3 及びケース 6 における、400 年後の Ca イオン濃度分布を図 2.3-204 及び図 2.3-205 に示す。地下水組成が周辺岩盤の Ca イオンに及ぼす影響は小さい結果となった。



図 2.3-204 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース3:降水系地下水)



図 2.3-205 400 年後における Ca イオン濃度分布 (ケース 6:海水系地下水)

ケース3及びケース6における、400年後の施設内におけるNaイオン分布を図 2.3-206 及び図 2.3-207に示す。岩盤に存在するNaイオンが濃度拡散で施設内部に浸透している 状況が確認された。また、ひび割れに沿ってNaイオンが施設内に浸透している状況も確 認された。



図 2.3-206 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布 (ケース3:降水系地下水)



図 2.3-207 400 年後における施設内の Na イオン濃度分布 (ケース 6:海水系地下水)

ケース3及びケース6における、400年後の施設内におけるCaイオン分布を図 2.3-208 及び図 2.3-209 に示す。海水中のNaイオンが施設内に浸透した影響で、吹付けコンクリ ートやひび割れ近傍においてCaの溶脱が若干抑制される結果となった。



図 2.3-208 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布 (ケース3:降水系地下水)



図 2.3-209 400 年後における施設内の Ca イオン濃度分布 (ケース 6:海水系地下水)

(e) ケース9(人工バリア部材の透水係数、拡散係数の影響)

ケース1及びケース9における、400年後のpH分布を図 2.3-183及び図 2.3-184に 示す。低透水層、低拡散層、コンクリートピットの透水係数や拡散係数をリファレンスの 100倍にしても、施設周辺のpH分布にはほぼ変化がない結果となった。

部材名	吹付け コンクリート	空洞内充てん材 (セメント系)	低拡散層	コンクリート ピット
初期拡散係数 (m²/s)	5×10^{-12}	5×10^{-13}	1×10 ⁻¹¹	5×10^{-11}
初期透水係数 (m/s)	1×10 ⁻⁸	5×10^{-13}	1×10 ⁻¹¹	5×10 ⁻¹¹

表 2.3-107 セメント系材料の設定値 (ケース 9)



図 2.3-210 400 年後における pH 分布 (ケース1:リファレンス)



図 2.3-211 400 年後における pH 分布 (ケース 9:K、D100 倍)

ケース 1、ケース 9 における施設周辺の 400 年後における pH 分布を図 2.3-212 及び 図 2.3-213 に示す。施設内の pH 分布には違いがみられ、人工バリア部材の透水係数、 拡散係数が大きくなるほど、施設内の pH 上昇が早くなるという結果が得られた。しかし ながら、これらの図からも、施設外の岩盤における pH 分布にはほぼ差が無くなっており、 施設外の岩盤における pH 分布は岩盤の物性によって律速されている可能性がある。



図 2.3-212 400 年後における pH 分布 (ケース1:施設周辺拡大)



図 2.3-213 400 年後における pH 分布 (ケース 9:施設周辺拡大)

ケース 1 及びケース 9 における施設周辺の 400 年後における Na イオン分布を図 2.3・214 及び図 2.3・215 に示す。人工バリア部材の透水係数や拡散係数が大きいケース 9 では、空洞内充てん材(土質系)や低透水層の Na イオン濃度が見られなくなり、ケース 9 については、ベントナイトと接するコンクリートピットの Na イオン濃度が低下してい る領域が存在する。これは、コンクリートピットからの Na 溶脱がほぼ終了し、Ca イオ ンの溶脱に移行した状態であると考えられる。このように、pH 分布と同様に、Na イオ ン分布も施設内での差は明確に見られるものの、施設外の岩盤における Na イオン分布に は大きな差が無くなっている。



ケース 1 及びケース 3 における施設周辺の 400 年後における Ca イオン分布を図 2.3-216 及び図 2.3-217 に示す。人工バリア部材の透水係数や拡散係数がケース 3 では、 ベントナイトと接するコンクリートピットのCaイオン濃度が上昇している領域が存在す る。これは、コンクリートピットからの Na 溶脱がほぼ終了し、Ca イオンの溶脱に移行 した状態であることを示している。しかしながら、pH 分布や Na イオン分布と同様に、 Ca イオン分布も施設内での差は明確に見られるものの、施設外の岩盤における Ca イオ ン分布には大きな差が無くなっている。

以上の結果を踏まえて、人工バリア部材の透水係数や拡散係数が 100 倍になったとし ても、周辺岩盤におけるイオン組成の分布の変化は限定的であることが分かった。



図 2.3-216 400 年後における Ca イオン分布 (ケース1:施設周辺拡大)



図 2.3-217 400 年後における Ca イオン分布 (ケース 9:施設周辺拡大)

(f) ケース 10 (空洞内充てん材と吹付けコンクリートの物性の影響)

セメント系材料においてケース 10 の設定値を表 2.3-108 に示す。空洞内充てん材(セ メント系)については、一般的な水セメント比 50%の普通ポルトランドセメントを用い たコンクリートを想定した。ケース1及びケース 10 における、400 年後の pH 分布を図 2.3-218 及び図 2.3-219 に示す。空洞内充てん材(セメント系)のセメント種類を OPC に変更して、水セメント比を 5%高めることで拡散係数や透水係数を大きく設定したもの の、ケース1とケース 10 で施設周辺の pH 分布に大きな差は生じなかった。

	• •			
部材名	吹付け <i>コンク</i> リート	空洞内充てん材 (セメント系)	低拡散層	コンクリート ピット
水セメント比	0.45	0.50	0.45	0.45
初期拡散係数 (m²/s)	5×10^{-12}	5×10 ⁻¹¹	1×10 ⁻¹³	5×10 ⁻¹³
初期透水係数 (m/s)	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻¹¹	1×10^{-13}	5×10 ⁻¹³

表 2.3-108 セメント系材料の設定値 (ケース 4)



図 2.3・218 400 年後における pH 分布 (ケース1:リファレンス)



図 2.3-219 400 年後における pH 分布 (ケース 10:周辺部材の物性変化)

ケース1及びケース10における施設周辺の400年後におけるpH分布を図 2.3-220及 び図 2.3-221 に示す。施設内の pH 分布には違いがみられた。空洞内充てん材(セメン ト系)の拡散係数並びに透水係数が大きくなり、セメント種類が比較的溶けやすい OPC となったことで、ベントナイト系材料の pH が早期に上昇している。また、施設周辺の pH 分布については、ケース 10 の方が pH は全体的に低めとなった。これは、吹付けコ ンクリートの透水係数が大きくなったことで、岩盤との境界付近におけるイオンが下流側 に流れやすくなったためと考えられる。



図 2.3-220 400 年後における pH 分布 (ケース1:施設周辺拡大)



図 2.3-221 400 年後における pH 分布 (ケース 10:施設周辺拡大)

ケース 1 及びケース 10 における施設周辺の 400 年後における Na イオン分布を図 2.3-222 及び図 2.3-223 に示す。施設内の Na イオン分布には違いがみられた。空洞内充 てん材 (セメント系)の拡散係数並びに透水係数が大きくなり、セメント種類が比較的溶 けやすい OPC となったことで、ベントナイトより外側の Na イオンは早期に施設外に溶 出する結果となった。その結果、ケース 10 の方がケース 1 に比べて広範囲の岩盤に Na イオンが溶出したものと考えられる。しかしながら、同図のコンターに示した青の範囲は 1mmol/1 程度であり、モニタリングにて計測する上では大きな差ではないと考えられる。



ケース 1 及びケース 10 における施設周辺の 400 年後における Na イオン分布を図 2.3・224 及び図 2.3・225 に示す。施設内の Ca イオン分布には違いがみられた。空洞内充 てん材 (セメント系)の拡散係数並びに透水係数が大きくなり、セメント種類が比較的溶 けやすい OPC となったことで、ベントナイトより外側の Na イオンは早期に施設外に溶 出した結果、Na イオンに続いて溶出する Ca イオン濃度が、ケース 10 の空洞内充てん材 (セメント系)においてが大きく上昇する結果となった。一方で、Na イオンが先行して 岩盤に存在する影響で、Ca イオンの広がりが限定的となっている。これらの相互作用に よって、結果として pH 分布に大きな差が生じなかったものと考えられる。



図 2.3-224 400 年後における Ca イオン分布 (ケース1:施設周辺拡大)



図 2.3-225 400 年後における Ca イオン分布 (ケース 10:施設周辺拡大)

(g) ケース14(地下水組成に最も影響する部材の把握)

ケース1及びケース14における、400年後のpH分布を図 2.3-226及び図 2.3-227に 示す。吹付けコンクリートの変質のみ考慮せず、空洞内充てん材や人工バリア部材の変質 を考慮すると、pH分布はケース1とは異なる結果となった。

ケース I ~ケース V の結果を総合的に評価すると、周辺岩盤における地下水組成モニタ リング値に影響を及ぼすのは吹付けコンクリートが主であり、人工バリア部材の変質は同 モニタリング値に影響をしないと考えられた。



図 2.3-226 400 年後における pH 分布 (ケース1:リファレンス)



図 2.3-227 400 年後における pH 分布 (ケース 14: 吹付けコンクリートの変質のみ考慮しない)

5) まとめ

下記に、本項で得られた成果をまとめる。

- ・ 地下水モニタリングにおける着目すべき項目としては、比較的多く検出され、変化が 大きい Na⁺、K⁺、Ca²⁺が挙げられる。
- ・ 吹付けコンクリートにおける溶解特性は、急結剤によってエトリンガイトが多く生成 するために、普通コンクリートに比べて溶解しにくい。
- ・ 地下水モニタリング値について、人工バリアのひび割れや隙間、EDZ 等が及ぼす影響 は小さく、動水勾配の影響は大きい。
- ・ 地下水モニタリング値について、バリアを構成する部材の透水係数や拡散係数が、地 下水モニタリング値に及ぼす影響は小さい。
- 低拡散層、コンクリートピット、低透水層がある程度の品質誤差を持って構築された としても、400年間において、同部材の化学的変質によって施設外にイオンが溶出す る可能性は極めて低く、地下水組成モニタリング値に影響を及ぼすのは主に吹付けコ ンクリート由来のイオンである。

(5) 文献調査等による定量化

本項では、前述の解析的検討で取り扱っていない事象について、起こりうる事象の計測実現性を確認することを目的として、既往の検討成果等を参照して定量化することを試みた。

- 1) 廃棄体容器の腐食膨張
- a. 廃棄体容器の概要

既往文献に基づく中深度処分を対象とした廃棄体の概念を図 2.3-228 に示す。廃棄体 容器は厚さ t=50mm の炭素鋼(溶接構造用圧延鋼材; SM490)で製作され、重量は約 28t (廃棄物を含む)が見込まれている[80]。



図 2.3-228 中深度処分廃棄体の一例(溶接容器のイメージ)

b. 腐食速度の検討事例

中深度処分施設における廃棄体容器の腐食膨張について検討した公表文献は極めて少 ない。腐食に関連する検討事例としては、土木学会による検討報告書[81]において、人工 バリアのセメント系材料中の鉄筋の腐食について、「鉄筋コンクリート中の鉄筋が腐食膨 張し、セメント系材料にひび割れが発生するなど、核種移行抑制機能に影響を及ぼす可能 性がある」としたうえで、以下のように知見がまとめられている。

・建設・操業段階~再冠水:

腐食メカニズムは酸素消費型である。コンクリートピットの鉄筋はアルカリ環境下 (pH=13 程度)にあるため不動態被膜に覆われて不動態化しており、腐食速度は極小 である。腐食速度の検討事例[82]では、pH=12.5~13.5 程度の環境において平均腐食 速度 0.1~0.05 µ m/y (323K) が報告されている。

·再冠水後以降:

腐食メカニズムは水素発生型となる。再冠水後の極初期は溶存酸素を消費する酸素 消費型の腐食が進行し、鉄筋近傍の溶存酸素がある濃度以下になった後に水素発生型 での腐食に移行する。この場合も腐食速度は極小である。その後、溶脱が鉄筋位置ま で進行し、pH が 10 程度まで低下した以降は、鉄筋の腐食速度は大きくなる。既往の 検討事例[83]では、低炭素及びアルカリ環境下における炭素鋼の腐食速度を腐食に伴 う水素ガスの発生量より求めた結果として、pH=10 の環境下で 0.1 µ m/y のオーダー、 pH=12.5 及び 13.5 において 0.01 µ m/y のオーダーが示されている。

一方、土木学会年次学術講演会における、中深度処分施設におけるセメント系人工バリ ア内の鋼材腐食についての検討事例(杉橋ほか[84]、及び松枝ほか[85])では、廃棄体容 器を含めた鋼材腐食に関する検討結果として、鋼材腐食に影響を及ぼす環境条件として、

- ・環境温度:
 - ・温度範囲:10~60℃
 - ・地下水組成:
 - ・酸化還元電位: -200~0 mV
 - pH : 8.3~9.5
 - ・塩化物イオン濃度:約11~18 mg/L
- ・セメント系人工バリア内環境:
 - ・建設・操業段階~再冠水~鋼材位置までセメント水和物溶脱時:pH=11.5~13 程度
 - ・セメント水和物が鋼材位置まで溶脱後:pH=10~11.5程度以下

を設定したうえで、腐食環境をステージ I ~Ⅲの 3 つに区分し(表 2.3-109)、各ステ ージにおける腐食速度について、既往の文献調査結果に基づき「最も確からしいパラメー タ」と「安全裕度を考慮したパラメータ」として設定するとともに、これ以上保守的に扱 うことが科学的に否定できる値として棄却できる範囲を示している(表 2.3-110)。

腐食環境 ステージ	対象 鋼材	環境 温度	腐食 メカニズム	pН	腐食生成物 腐食形態	腐食速度
ステージ I 建設・操業段階~ 再冠水			酸素 消費型	11 5~13		腐食速度 I
ステージⅡ 再冠水後~ 鉄筋位置まで溶脱	炭素鋼	10∼60℃	水素	程度	Fe ₃ O ₄ 全面腐食	腐食速度 Ⅱ
ステージⅢ 鉄筋位置まで溶脱後			発生型	10~11.5 程度以下		腐食速度 Ⅲ

表 2.3-109 人工バリア内鋼材の腐食シナリオ

	最も確からしい パラメータ (um/y) 安全裕度を考 パラメー (um/y)		既往の私	开究	棄却できる範囲
	(µm/y)	(μm/y)	μ m/y	論文数	
			1以下	3	
腐食速度 I	1以下	1	0.01 \sim 1	1	$10 \ \mu m/v < 10$
NA KENZ I	12/1	1	0.1以下	1	10 µ m y <
			0. $4 \sim 1$	1	
			0.01	3	
	0.01		0.002	2	
腐食速度Ⅱ		0.02	0.004~0.01	1	$1 \times 10^{4} \mu \text{ m/y}$
			0.02以下	1	10μ m/y <
			0.02	1	
			0.3	2	
			0.3~0.39	1	
			0.35	1	
腐食速度Ⅲ	0.5	2.0	0.37~2.4	1	$1 \times 10^{-4} \mu$ m/y>
			0.49	1	
			1.1	1	
			2.0	1	

表 2.3-110 腐食速度パラメーター覧

c. 腐食膨張の程度

鋼材の腐食に伴う体積膨張率に関しては、地層処分研究開発第 2 次取りまとめ(H12 レポート)では、オーバーパックの腐食膨張に関する検討において体積膨張率を 3 倍と 設定している。この値と保守的な腐食速度として、表 2.3-110 の安全裕度を考慮した腐 食速度を考えた場合、例えば廃棄体容器の腐食膨張は保全段階終了まで(約 330 年)の 期間においては、廃棄体部では再冠水が完了していない(ステージ I、腐食速度 1 µ m/y) と想定され、腐食厚さは約 0.3mm、腐食による体積膨張(腐食膨張)は約 1mm が見込 まれる。

2) 区画内充てん材のひび割れ発生

区画内充てん材(廃棄体間充てん材、上部充てん材)は、地下空洞型処分施設性能確証試 験[86][87]において、室内配合選定試験及び現場施工性試験が行われた。ここでは、確証試験 における試験結果を参照し、廃棄体間充てん材及び上部充てん材のひび割れ発生状況を定量 化する。

a. 廃棄体間充てん材

廃棄体間充てん材の配合は、表 2.3-111 に示す低拡散層のうち LP45 配合を基本配合として、

- ・高い流動性を有すること
- ・材料分離抵抗性を有すること
- ・高温環境下での施工においても上記性能を有すること(廃棄体の発熱に対する対応)

を要求性能として配合選定試験が行われた。

配合選定試験から得られた使用材料と配合を表 2.3-112 に示す。区画内充てん材の配 合は、遠隔操作によって狭隘な廃棄体間のすき間を充填可能とするため、スランプフロー を 82.5±7.5cm (75cm~90cm) に増大させている。一方、流動性を増大させたことによ り材料分離抵抗性が低下しないよう粉体量を増大させている。また、発熱した廃棄体に接 することを想定した高温環境下での試験により、高温環境下でも所定の性能が得られる混 和材を選定している。膨張材の有無については、区画内充てん材の要求機能が遮へいと核 種収着性であることから[88]、膨張材は不要と判断されている。

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント (太平洋セメント社) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,430cm ² /g
細骨材	S	石灰砕砂(八戸松館産): 密度=2.66g/cm³、FM=2.75
石灰石微粉末	LS2	石灰石微粉末(宮城石灰工業株式会社製) 密度=2.72g/cm ³ 、比表面積=5,420cm ² /g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力㈱ 能代火力発電所) 密度=2.25g/cm ³ 、比表面積=3,740cm ² /g
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン (太平洋マテリアル)、密度=3.05 g/cm ³
退和刻	SP	高性能 AE 減水剤(花王)、マイティ 3000H:カルボキシル基含有ポリ エーテル系化合物
化七个口거リ	As	空気量調整剤(エムエムビー) マイクロエア 404:ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.3-111 低拡散層の使用材料と配合[86]

		W/P	LS/B		空				単位	五量 (k	(g/m ³)			
配合	W/B			7777	気				粉体 P					CD
名	(%)	(%)	(%)	(cm)	量	W	W 結合材 B IS1 I				TGO	S	G	SP Py%
				(0111)	(%)		LPC	FA	LEX	LOI	LOZ			1 ~ /0
LP45	45.0	31.0	45	65	2.5	230	338	153	20	—	230	1,279	_	0.68
LP60	45.0	28.1	60	65	2.5	230	338	153	20	_	307	1,204	_	0.68

材料	記号	概要
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント社) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,430cm ² /g
細骨材	S	石灰砕砂(八戸松館産): 密度=2.66g/cm³、FM=2.75
石灰石微粉末	LS2	石灰石微粉末(宮城石灰工業株式会社製) 密度=2.72g/cm³、比表面積=5,420cm²/g
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、II種(東北電力㈱ 能代火力発電所) 密度=2.25g/cm ³ 、比表面積=3,800cm ² /g
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン (太平洋マテリアル)、密度=3.05 g/cm ³
	SP3	高性能 AE 減水剤(BASF ポゾリス)、SP8LS:ポリカルボン酸エー テル系化合物と配合ポリマーの複合体
混和剤	Ad	減水剤 遅延型(I種)(BASF ポゾリス)、ポゾリス No.89:変性リ グニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸化合物の複合体
	As	空気量調整剤(エムエムビー) マイクロエア 404 : ポリアルキレングリコール誘導体

表 2.3-112 廃棄体間充てん材の使用材料と配合[86]

				空	単位量 (kg/m ³)								
W/B W/P		LS/B	7777	気			粉	本 P			gDo	A 1	
(%)	(%)	(%)	(cm)	量 (%)	W	結	吉合材 B L Go			\mathbf{S}	Dro Px%	Ad Px%	
						LPC	FA	LEX	LDZ		1 ~ / 0	1.170	
45	28.1	60	82.5 ± 7.5	2.5	230	358	153	0	307	1,205	0.85%	0.30%	

区画内充てん材に対して実施された初期性能確認試験のうち、ひび割れに関する試験は、

- 自己収縮試験
- ·拘束膨張試験
- ・長さ変化試験
- 断熱温度上昇試験
- ・ひび割れ調査(現場打設後の目視調査)

である[86]。ここでは、自己収縮試験、拘束膨張試験、長さ変化試験の結果から収縮量 を推定するとともに、実際に発生したひび割れとの比較を行う。

自己収縮試験、拘束膨張試験、長さ変化試験から得られたひずみを表 2.3-113 に示す。

試験名	ひずみ (μ)	材齢
自己収縮試験	250(収縮)	56 日
拘束膨張試験	330(収縮)	35 日
長さ変化試験	620(収縮)	6ヶ月

表 2.3-113 廃棄体間充てん材のひずみ測定結果(20℃環境) [86]

拘束膨張試験は、材齢7日以降は相対湿度60±5%の環境下で試験を実施しており、乾燥による収縮が含まれるため、総収縮ひずみは、自己収縮試験と長さ変化試験の結果から、

 $250\!+\!620\!=\!870\,\mu$

程度と推定される。

平成 21 年度の施工確認試験において現場で打設された廃棄体間充てん材には、上部充 てん材が直上に打設された材齢 10 日後までにひび割れは確認されていない[86]。平成 22 年度は、図 2.3-229 に示すように、模擬廃棄体隅角部を起点とするひび割れ発生、模擬 廃棄体との界面における間隙及びひび割れ発生、コンクリートピットとの界面付近におけ るひび割れ発生が確認された[87]。平成 22 年度には、模擬廃棄体としてコンクリート製 のブロックを使用したため、模擬廃棄体との界面における間隙の発生は、吸水によるもの と推定されている[87]。ひび割れについては、上述の室内試験結果から、ひび割れ幅を推 定すると、

模擬廃棄体廃棄体間隔:260mm×870×10⁻⁶=0.23mm

打設範囲短手方向: 5,400mm×870×10⁻⁶=4.7mm

となる。模擬廃棄体の隅角部を起点とするひび割れの多くが、ひび割れ幅 0.2~0.4mm であり、収縮ひずみからの推定値と概ね整合する。また、打設範囲長手方向のひび割れ幅 (短手方向の収縮量)を合計すると、図 2.3-229に示す中心線では 3.0mm となり、概ね 整合していると言える。

以上より、廃棄体間充てん材には、打設後比較的短期間で幅 1mm 程度のひび割れが複 数発生することが想定され、主なひび割れ発生位置は、廃棄体との界面、廃棄体の隅角部、 コンクリートピットとの界面と想定される。



図 2.3-229 廃棄体間充てん材のひび割れスケッチ図[87]

b. 上部充てん材

上部充てん材の配合は、表 2.3-114 に示すコンクリートピットの配合を基本配合として、

- ・高い流動性を有すること
- ・材料分離抵抗性を有すること

を要求性能として配合選定試験が行われた。

配合選定試験から得られた配合を表 2.3-115 に示す。使用材料は表 2.3-114 に示した コンクリートピットと同様である。上部充てん材の配合は、遠隔操作によって広い範囲に 打設され、必要な遮へい厚さを確保するためのセルフレベリング性を確保するため、スラ ンプフローを 70±5cm (65cm~75cm) に増大させている。石灰石微粉末量を 215kg/m³ 以上に増大させてもスランプスローを大きくできなかったため、過度に高粘性とならない ように材料分離抵抗性と流動性のバランスを考慮した配合選定が行われている。膨張材の 有無については、廃棄体間充てん材と同様に、区画内充てん材の要求機能が遮へいと核種 収着性であることから[88]、膨張材は不要と判断された。

表 2.3-114 コンクリートピットの使用材料と配合[86]

材料	記号	概要					
セメント	LPC	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント社) 密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,640cm ² /g					
細骨材	S	石灰砕砂(八戸松館産): 密度=2.66g/cm³、FM=2.79					
粗骨材	G	石灰砕石(八戸松館産):最大骨材寸法=20mm、 岩種:石灰岩、密度=2.69g/cm ³ 、FM=6.63					
工匠工商松丰	LS1	石灰石微粉末(太平洋セメント社、熊谷工場) 密度=2.70 g/cm ³ 、比表面積=5,390cm ² /g					
	LS2	石灰石微粉末(宮城石灰工業株式会社製) 密度=2.71g/cm³、比表面積=5,510cm²/g					
フライアッシュ	FA	フライアッシュ、II種(東北電力㈱ 能代火力発電所) 密度=2.18g/cm ³ 、比表面積=3,810cm ² /g					
膨張材	LEX	改良型ハイパーエクスパン (太平洋マテリアル)、密度=3.05 g/cm ³					
<u> 現</u> 和刘	SP	高性能 AE 減水剤(花王)、マイティ 3000H:カルボキシル基含有ポリ エーテル系化合物					
化比不口用归	As	空気量調整剤(エムエムビー) マイクロエア 404 : ポリアルキレングリコール誘導体					

				スラン	空		使用材料および単位量 (kg/m ³)								
W/B	W/P	LS/B	s/a	プフロ	気	え お お体 P		* 粉体 P					сD		
(%)	(%)	(%)	(%)	-	量	W	水 W 結合材 B LC			TGO	S	G	DY%		
				(cm)	(%)	vv	LPC	FA	LEX	LSZ			1 ^ /0		
45	30.0	50	53.4	65 ± 5	2.5	160	229	107	20	249	815	780	0.8%		

表 2.3-115 平成 21 年度に選定された上部充てん材の配合[86]

				スラン	空	空 使用材料および単位量						m³)	
W/B	W/P	LS/B	s/a	プフロ	気	-14		粉	本 P				CD
(%)	(%)	(%)	(%)		量		水 w 結合材 B Lo		TGO	s	G	SP Dy%	
				(cm)	(%)	vv	LPC	FA	LEX	LSZ			1 ^ /0
45	28.0	50	52.4	70 ± 5	2.5	160	249	107	0	215	849	780	0.80%

しかし、平成 21 年度の施工確認試験において、現場で打設された上部充てん材とコン クリートピット内面との界面に 2~3mm 程度の間隙が発生した。このことから、平成 22 年度には、膨張材を添加する配合修正を行うとともに、廃棄体間充てん材と同様に、廃棄 体の発熱影響を考慮した配合選定試験が行われた[87]。平成22年度の配合選定試験から 得られた使用材料と配合を表2.3-116に示す。平成21年度の配合からの修正点は、膨張 材を20k/m³添加すること、熱影響を考慮して混和材を変更することの2点である。

材料	記号	概要				
セメント	LP	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント)				
	С	密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,540cm ² /g				
細骨材	\mathbf{S}	石灰砕砂(八戸松館産): 密度=2.67g/cm ³ 、FM=2.71				
粗骨材	G	石灰砕石(八戸松館産):最大骨材寸法=20mm、				
		密度=2.70g/cm ³ 、FM=6.76				
石灰石微粉末	LS	石灰石微粉末(宮城石灰工業)				
		密度=2.67g/cm ³ 、比表面積=5,120cm ² /g				
フライアッシ	Ē٨	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力㈱ 能代火力発電所)				
ユ	ΓА	密度=2.22g/cm ³ 、比表面積=4,020cm ² /g				
膨張材	LE	改良型ハイパーエクスパン(太平洋マテリアル)				
	Х	密度=3.05 g/cm ³				
	SP1	高性能 AE 減水剤(花王)、マイティ 3000H:カルボ				
		キシル基含有ポリエーテル系化合物				
	SP2	高性能 AE 減水剤 (BASF ポゾリス)、SP8RV 改良品 :				
混和剤		ポリカルボン酸エーテル系化合物				
	SP3	高性能AE減水剤(BASFポゾリス)、SP8LS:ポリカ				
		ルボン酸エーテル系化合物と配合ポリマーの複合体				
	Ad	減水剤 遅延型(I 種)(BASF ポゾリス)				
		ポゾリス No.89 : 変性リグニンスルホン酸化合物とオ				
		キシカルボン酸化合物の複合体				
	As	空気量調整剤(エムエムビー)				
		マイクロエア 404 : ポリアルキレングリコール誘導体				

表 2.3-116 平成 22 年度に選定された上部充てん材の使用材料と配合[87]

	75170					使用材料および単位量 (kg/m				kg/m ³)				
Gmax	71-	空気量	W/B	W/P	s/a	粉体 P					SP	Ad	As		
(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	W 結合材 B ₁		тя	\mathbf{S}	G	P×%	P×%	P×%		
	(CIII)						LPC	FA	LEX	цр					
20	70 ± 5	2.5 ± 1.5	45	28.0	52.5	160	229	107	20	215	851	780	1.10	0.20	0.02

上部充てん材に対して実施された初期性能確認試験のうち、ひび割れに関する試験は、

- · 自己収縮試験
- ·拘束膨張試験
- ・長さ変化試験
- ·断熱温度上昇試験
- ・ひび割れ調査(現場打設後の目視調査)

である[87]。ここでは、自己収縮試験、拘束膨張試験、長さ変化試験の結果から収縮量 を推定するとともに、実際に発生したひび割れとの比較を行う。

自己収縮試験、拘束膨張試験、長さ変化試験から得られたひずみを表 2.3-117 に示す。

試験名	ひずみ(μ)	材齢
自己収縮試験	23(膨張)	56 日
拘束膨張試験	139(膨張)	35 日
長さ変化試験	217(収縮)	182 日

表 2.3-117 上部充てん材のひずみ測定結果(20℃環境)[87]

拘束膨張試験は、材齢7日以降は相対湿度60±5%の環境下で試験を実施しており、乾燥による収縮が含まれるたが、廃棄体間充てん材と異なり、膨張材を添加していることから得られたひずみは膨張側である。したがって、総収縮ひずみは、3試験の結果から、

 $-23-139+217=55\mu$ (+:収縮)

程度と推定される。

平成22年度の施工確認試験において現場で打設された上部充てん材は、図2.3-230に 示すように、打設翌日にひび割れ及びコンクリートピット内面との界面における間隙の発 生が確認されている。施工確認試験では、打設後の養生の有無をパラメータとして試験を 実施しているため、養生の有無でひび割れ及び間隙の発生状況が大きく異なる結果が得ら れている。ただし、ひび割れ発生箇所を鉛直方向にコア削孔し、ひび割れの深度を測定し た結果、ひび割れ幅が最も大きい箇所においても、ひび割れの深度は140mm 程度であり、 ごく表層部分にのみひび割れが発生していることが確認された。

上述の室内試験結果から、ひび割れ幅を推定すると、

打設範囲長手方向:10,700mm×55×10⁻⁶=0.59mm

打設範囲短手方向: 7,050mm×55×10⁻⁶=0.39mm

となる。養生なし範囲においては、推定値よりも大きなひび割れが発生しているものの、 養生あり範囲においては、概ね整合すると言える。

コンクリートピット内面との界面における間隙については、養生なし範囲で顕著に見られた。深さ方向に貫通していることが確認されている。一方、養生あり範囲では、間隙発 生範囲が局所的であり、深さ方向に貫通していないことが確認されている[87]。

以上より、上部充てん材には、表面の乾燥を防止する養生ができない場合、打設直早期 に最大で幅 1mm 程度のひび割れが複数発生するとともに、コンクリートピットとの界面 に間隙が生じることが想定される。適切な湿潤養生が実施可能な場合には、微細なひび割 れが発生する可能性がある。いずれの場合も、ひび割れ発生位置、方向を予め特定するこ とは困難と考えられる。



図 2.3-230 上部充てん材のひび割れスケッチ図[87]

3) ガスの発生

処分施設におけるガスの発生起源は、①金属腐食、②有機物の微生物分解、及び③水の放 射線分解、に大別される。

Rodwell らによる GASNET 報告書[89]では、処分場におけるガスによる潜在的な影響は一般的に以下の 4 点に集約されるとされており、旧サイクル機構(現 JAEA)の TRU 処分におけるガス影響評価[90]においても、これらの項目を参照して検討を実施している。

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

本項では、関連する既往検討におけるガス発生影響評価の事例を参照し、放射線分解ガス の発生の関連からの知見について整理する。

a. TRU 処分施設における放射線分解ガスの発生評価

第2次TRUレポート[114]では、以下のような事象によるガス発生を想定してガス影響の評価を実施しており、TRUの廃棄体グループ2(キャニスタ)に対してガス発生速度の経時変化について図2.3・231のように見積もっている。結果として、比較的初期(~600年程度)における最大ガス発生速度は廃棄体内間隙水の放射線分解によって決定され、以降はハスの腐食によるガス発生の寄与が大きくなり、全体として廃棄体外のセメント系充填材間隙水の放射線分解や有機物の微生物分解のガス発生への寄与は小さいことが示されている。

·金属腐食

処分施設内に存在する主な金属として、ドラム缶などの構成材料である炭素鋼やステン レス鋼、燃料集合体に用いられているジルカロイやインコネルなどがあり、これらの金属 の還元性雰囲気下の腐食にともなう水素ガスの発生を想定する。

・有機物の微生物分解

処分施設内に存在する代表的な有機物にはアスファルト及びセルロースなどがあり、こ れらの有機物の微生物分解によるガス発生を想定する。処分環境において微生物活動によ って発生する主要なガスは CO2(主な微生物)、N2(脱窒菌)及び CH4(メタン生成菌) である。検討では、セルロースは全量がガスまで分解されるものとし、アスファルトにつ いては微生物分解対象となる成分をアスファルテン、レジン等を除いた脂肪族炭化水素及 び芳香族炭化水素とし、アスファルトに占める脂肪族炭化水素及び芳香族炭化水素の含有 率は、ブローンアスファルトで得られた値である 56%を用いて算定する。

· 放射線分解

廃棄物中に含まれる放射性核種からの放射線の作用により、廃棄物あるいは充填材中の 間隙水が分解され、水素などのガスが発生する。



図 2.3-231 年間ガス発生速度の経時変化(廃棄体グループ 2(キャニスタ)、結晶質系岩盤)

b. 中深度処分を対象とした既往検討におけるガス影響評価事例

中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[91]では、ガス影響評価解析において、図 2.3-232 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(~ 103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 2.3-232 処分施設の状態変遷

施設からのガス発生量は、対象とする廃棄物とコンテナに対して、大きさ、数量、形状、 及び腐食速度を設定し、嫌気性金属腐食及び水の放射線分解を考慮した評価の結果として、 5Nm3/y/Lot 及び 20 Nm3/y/Lot の 2 ケースが設定されている。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。

c. 規制関係文書における放射線分解ガスへの対応の考え方

原子力安全委員会による「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 考え方」[92]では、基本ガス移行シナリオの設定におけるシナリオ設定の考え方のなかで、 水の放射線分解及び金属の腐食による水素ガスの発生等に関して、『ガスの発生量及び発 生速度等を評価し、埋設施設の設計、人工バリアの構成部位の透気特性(例えば、ベント ナイトの透気特性)等を勘案した上で、ガスが人工バリアの劣化又は地下水の移行に及ぼ す影響を評価する必要がある』としたうえで、『これらのガスが地下水に溶存して地下水 とともに挙動する場合には、ガス移行シナリオを設定する必要はなく、地下水シナリオの 評価において放射性ガス溶解の影響を考慮することが適当である』としている。

ガスの発生挙動については、多重バリアの状態設定に応じて変化することから、基本ガ

ス移行シナリオの評価は、基本地下水シナリオと同様に、時間的経過段階における状態設定の考え方に基づき、①過渡的な期間、②多重バリア機能に期待する期間、③主に天然バリア機能に期待する期間、及び④埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間、の4つの時期に分けて実施することとしており、それぞれの期間の目的として以下が示されている。

・過渡的な期間

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 の放出の影響が小さいことを確認する。

・多重バリア機能に期待する期間

対象廃棄物の性状を勘案し、長期にわたり残存又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 の特性変化又は地下水移行に及ぼす影響について評価し、その影響が小さいことを確認す る。

・主に天然バリア機能に期待する期間

人工バリアの劣化が進展し、ガス移行を抑制するような機能が喪失した段階において、 発生するガスによる地下水の移行特性に及ぼす影響について評価し、その影響が小さいこ とを確認する。

・埋設施設が地表付近に近接することが想定される期間

埋設施設が地表付近に近接することが想定される場合には、廃棄物に含まれるウラン系 列の放射性物質のラドンの影響について評価し、有意な影響を及ぼさないことを確認する。

水の放射線分解については、過渡的な期間、及び多重バリア機能に期待する期間におい て基本シナリオにおいて評価すべき事項とされ、特に過渡的な期間においては、『水の存 在と放射線の強度に左右される。特に水の放射線分解に寄与する放射性物質は主にコバル ト 60 であり、これは比較的短期間に減衰する。したがって、このような水素ガスについ ては、地下水が浸透する前の廃棄体内部に残存する水分を抑制する等の対策を取ることに より、その発生量を抑制することができることから、廃棄体内部の圧力上昇による損傷や 人工バリアに対する影響を軽減するための十分な配慮がなされていることを確認する必 要がある』としている。

現在、原子力規制委員会では、「廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム」 により、中深度処分に係る規制基準等の改正に向けた検討が進められているが、制定に向 けて事業者との意見交換が進められている「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方につ いて(改訂案)[93]」の中で、放射線分解によって水素ガスが発生する廃棄物に対して、 『浅地中処分の対象廃棄物に比べて高い放射能濃度の廃棄物を取り扱うことから、放射線 分解によって水素ガスが発生する廃棄物については、ガス発生を考慮した対策を講じるこ とを要求する。また、坑道の埋戻しが終了するまでの間は、湧水等によって廃棄物埋設地 や坑道に蓄積する水を放射線障害防止の観点から適切に排除する措置を講ずることを要 求する』としている。

- 4) コンクリートピットの鉄筋の腐食膨張
- a. 腐食のメカニズムと腐食形態、腐食速度の検討事例

コンクリートピットの鉄筋腐食の考え方については、前章で示した土木学会の報告書 [81]が参考になる。報告書では、コンクリートピット中の鉄筋の腐食挙動を、

- ①建設・操業段階~再冠水 (酸素消費型・不動態での腐食)
- ②再冠水後 (水素発生型・不動態での腐食)
- ③鉄筋位置まで溶脱後 (水素発生型・全面腐食)

の3段階に区分し、それぞれの段階の代表的な腐食メカニズムと腐食形態を表 2.3-118 のように整理している。建設・操業段階においては、コンクリートピットの鉄筋はアルカ リ環境下にあるため不動態皮膜に覆われ不動態化しており、不動態皮膜を破壊する事象と しては中性化や塩害が考えられる。中性化についてはコンクリートが大気中に暴露される 時間に影響を受けるが、この時間を 50 年としても中性化深さは 20mm 程度であり、中性 化を考慮した適切な被りの設定により影響が排除可能であるとされている。

表 2.3-118 各段階における代表的な腐食のメカニズムと腐食形態

	酸素	腐食メカ ニズム	pН	不動態皮膜	腐食形態	腐食速度	
 ①建設・操業 段階 ~再冠水 	あり	酸素 消費型	13 程度 あり		不動態で の腐食	極小	
			10 程度	中性化で破壊	全面腐食	大きい	
			13 程度	塩害で局部破壊	局部腐食	極大	
②再冠水後	なし	水素 発生型	12.5 程度	あり	不動態で の腐食	極小	
 ③鉄筋位置ま で溶脱後 	なし	水素 発生型	10 程度	なし	全面腐食	やや 大きい	

※ハッチング部は、中性化や塩害の影響がある場合

腐食速度については既往検討の結果として、①の段階で 0.1~0.05 µ m/y、②の段階 (pH=12.5、13.5) で 0.01 µ m/y オーダー、③の段階 (pH=10) では 0.1 µ m/y オーダー、 が示されており、鉄筋周辺のひび割れ発生時の腐食量については、コンクリート標準示方 書 [維持管理編] [94]による 10mg/cm²が一つの目安となるが、ひび割れの進展について は実験値や力学的モデルを用いて設定するのがよいとしている。

b. 腐食膨張の程度とひび割れの可能性

コンクリートピットは低透水層及び低拡散層に覆われた構造となっており、保全期間の 終了(約 330 年)までに再冠水は完了していないことが見込まれる。この期間の鉄筋の 腐食速度を既往検討に基づき 0.1μ m/y ($0.1 \sim 0.05 \mu$ m/y の最大値)とし、体積膨張率を 3 倍(高レベルのオーバーパック腐食検討での設定値)とした場合、腐食厚さは約 0.03 mm、 腐食による体積膨張(腐食膨張)は約0.1 mm が見込まれる。

腐食膨張に伴う腐食量は図 2.3-233 に示す概念により算出した場合、前述の条件を考慮した場合の腐食量はひび割れ発生時の目安腐食量である 10 mg/cm² に比較して約 1/3 の 3 mg/cm2 となり、鉄筋周辺にはひび割れが発生しないことが予想される。



(4) 腐食量の算定式 鉄筋が腐食すると、腐食生成物は鉄に比べて体積が増加する.腐食生成物と鉄の関係を図-2に示す.この図に示すように鉄筋の単位長さあたりの腐食を考えた場合, 鉄筋腐食量の算定式は式(2.5)で表される¹⁾.

$$W_c = \frac{\gamma}{(\rho - 1)} u_2 \tag{2.5}$$

ここに、W_c:鉄筋腐食量(mg/mm²)
 u₁:鉄筋の半径方向の減少した厚さ(mm)
 u₂:鉄筋の半径方向の増大した厚さ(mm)
 y:鉄の密度(7.85mg/mm³)
 o:腐食生成物の体積膨張率

図 2.3-233 腐食量の算定モデルと算定式[95]

5) 建設段階・廃棄物の埋設段階における低透水層の変状

地下空洞型処分施設性能確証試験[86][87][96][97][98][99]及び閉鎖技術確証試験 [100][101]では、平成19年度に試験空洞の実規模施設構築範囲に防水シートを施工している。 その後、平成19年度及び平成20年度底部低透水層を施工し、平成21年度から平成24年度 にかけて側部低透水層、平成25年度から平成26年度にかけて上部低透水層及び上部埋戻し 材の施工試験を実施している。

防水シートの施工から現時点で11年が経過しており、その間に低透水層の流出に至るよう な地下水の浸入は確認されていない。また、試験空洞内は、夏期に非常に高湿度の状態とな り、図 2.3-234に示すように、セメント系材料の表面が結露する。この現象は、毎年繰り返 されているが、この結露水により低透水層が膨潤する等の変状は確認されていない。

したがって、建設・操業中に低透水層の変状が生じる可能性は極めて低いと考えるのが妥 当である。





手前コンクリートピット



上部低拡散層 図 2.3-234 試験空洞内の結露状況(平成 29 年 6 月 27 日撮影)

6) 閉鎖措置段階以降における低透水層の流出

ベントナイト系材料の流出現象は、高レベル放射性廃棄物の地層処分分野で検討が実施さ れている。

NUMO は、高レベル放射性廃棄物処分場の竪置き処分方式において、パイピング現象に よる緩衝材の流出に関する検討を実施している[102][103]。高レベル放射性廃棄物処分場の 竪置き処分方式は、図 2.3-235(a)に示すように、処分孔の岩盤面と緩衝材が接するため、緩 衝材の設置後初期段階でベントナイトが十分に膨潤して止水機能を発揮する前に、岩盤から 処分孔へ局所的に高い圧力で緩衝材内部への浸潤速度を超えて地下水が流入する場合に、局 所的な緩衝材の膨潤により生成させるゲル状の緩衝材が地下水によって持ち去られ、緩衝材 内にパイプ状の水みちが形成される。これをパイピング現象と呼んでいる[103]。パイピング 現象に伴い、緩衝材の流出(エロージョン)が継続・進行すると、緩衝材の密度が低下し、 安全機能が損なわれることが懸念されている。

これに対して NUMO は、緩衝材の安全機能が損なわれない流出量の限界値(許容流出量) に対応する湧水量(許容湧水量)を基準値として定め、処分孔内の湧水量が許容湧水量を上 回る処分孔への廃棄体定置を回避することを考えている[103]。



(a) 竪置き・ブロック方式



(b) 横置き・PEM 方式 図 2.3-235 高レベル放射性廃棄物処分場の人工バリア[104]

中深度処分施設の低透水層は、底部・側部については内外面がセメント系材料に接してお り、上部については内面がセメント系材料、外面がベントナイト系材料である上部埋戻し材 に接している。また、低透水層と隣接部材との境界面が地下水の水みちとなる可能性は低い と考えられる。したがって、高レベル放射性廃棄物処分場の竪置き方式における緩衝材とは、 設置される環境が異なり、局所的に高い圧力で地下水が流入する可能性は低く、低透水層表 面でパイピング現象が生じるような地下水流は発生し難いと考えられる。

NUMO[104]では、高レベル放射性廃棄物処分場の横置き PEM 方式(図 2.3-235(b))、図 2.3-236 に示す中深度処分と処分概念が類似する TRU 等廃棄物処分場の緩衝材に対する流出

現象の検討を実施していない。

このことからも、中深度処分施設の低透水層においては、流出現象が発生する可能性は低いと考えられる。



(a) 緩衝材を設置する場合(グループ2)

図 2.3-236 TRU 等廃棄物処分場の人工バリア構成(深成岩類及び先新第三紀堆積岩類、グルー プ2の例)[104]

本事業では、低透水層の流出現象を主なモニタリング対象としないこととするが、高レベル放射性廃棄物処分場の竪置き方式を対象とした緩衝材のパイピング現象に関する既往検討 [105][106]では、わずかな湧水量でも圧力勾配の状況によっては地下水流速が増大する等により、パイピング現象及び流出の発生が確認されている。また、低透水層は、施設内を通過する流量を低減し、拡散場を維持するための重要な低透水バリア部材であるため、その機能低下は中深度処分施設の長期安全性に大きく影響する可能性があるため、ベントナイト系材料の流出現象に対する検討状況等の動向を注視していく必要があると考えられる。 7) 空洞内充てん材(土質系)の沈下による天端部の空隙発生

地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験[100][101]では、転圧工法と吹付工法による空洞内 充てん材の施工試験を実施している。使用材料は、ベントナイト(クニゲル V1(クニミネ工 業(株)製品))と砂(コンクリート用砕石)を乾燥質量比 15:85 で混合したベントナイト混 合土である。空洞内充てん材は、施工後の沈下により空洞上部に間隙が発生する可能性があ るため、沈下量の計測が行われている。計測位置を図 2.3-237 に示す。



図 2.3-237 空洞内充てん材の沈下計測位置[101]

本計測は、地下空洞型処分施設機能確認試験[107][108][109]でも継続されており、施工時 点からの沈下量及び温度の経時変化は図 2.3・238~図 2.3・240 に示すとおりである。図 2.3・240 に示すように、施工荷重が作用するたびに自重増加に伴う沈下が発生し、その後は 作用荷重が増加していないにも関わらず沈下が漸増している。長期的には、図 2.3・238、図 2.3・239 に示すように、温度の季節変動に伴う周期的な変動のみが見られるようになり、沈 下は収束していると評価されている[110]。沈下量の最大値は、平成 29 年 4 月の 5.8mm で ある。

施工手順を考慮した三次元弾性解析では、図 2.3・240 に示すように、施工ステップの進行 にともなう沈下量増加が再現されているものの、弾性解析では施工完了後の粘性的な沈下挙 動を再現することはできず、長期的には沈下量が小さく評価されている。ただし、最終沈下 量の解析値は 4.4mm 程度であり、実測された最大値と大きな乖離はないと言える。



図 2.3・240 空洞内充てん材の沈下量経時変化(施工期間のみ) [110]

以上より、空洞内充てん材は、施工後数ヶ月間にわたって自重による沈下が生じる可能性 があり、沈下量は数 mm オーダーと想定される。

ただし、沈下量計測が実施されている平成 26 年度に施工された空洞内充てん材の天端部 は、吹付工法で施工されており、当該部位の一部では、締固め度の管理規定値(締固め度: 90%)を下回るものがあったことが確認されている[101]。規定の締固め度以上で施工された 場合には、沈下量が抑制されると想定される。

また、仮に上部埋戻し材天端部に沈下による空隙が発生した場合でも、閉鎖措置段階以降 には、地下水浸潤に伴いベントナイト系材料が膨潤するため、空隙が閉塞する可能性も考え られる。したがって、上部埋戻し材天端部の空隙が長期安全性に及ぼす影響は、ベントナイ ト系材料の膨潤挙動を考慮した評価を実施していくことが望まれる。

8) 閉鎖措置段階以降における空洞内充てん材(土質系)の流出

「6) 閉鎖措置段階以降における低透水層の流出」で前述したように、中深度処分施設のベ ントナイト系材料は、高レベル放射性廃棄物処分場の緩衝材と異なり、岩盤に接しておらず、 空洞内充てん材(土質系)も上面は二次覆エコンクリートに、下面は上部低透水層に接して いる。また、隣接部材との境界面が地下水の水みちとなる可能性は低いと考えられる。その ため、高レベル放射性廃棄処分場の堅置き方式で懸念されるような流出現象が発生する可能 性は低いと考えられる。

ただし、空洞内充てん材(土質系)に流出現象が発生した場合、施設の変形挙動に影響するほか、低透水層(特に上部低透水層)の体積拘束が弱まり、低透水層の密度低下を招く可 能性があるため、ベントナイト系材料の流出現象に対する検討状況等の動向を注視していく 必要があると考えられる。

9) 空洞内充てん材(セメント系)のひび割れ発生

土木学会の報告書[2]では、人工バリアの設計・施工の項で、設計において構成部材単独と して考慮する機能として、支保工については「操業空間の確保、自重・外力に対する安全性 確保」、及び「空洞安定性の確保」が、空洞内充填材(報告書では埋戻し材としての扱い)に ついては、「操業空間の確保、自重・外力に対する安全性確保」、及び「埋戻し後の地下水移 動の抑制」が示されている。支保工については、要求される機能を満たすようにトンネル標 準示方書[111]にしたがった設計が、また空洞内充填材は、セメント系材料の場合は適切な低 透水性が確保されるようひび割れ抑制に配慮したうえで、隣接する低透水層への影響を勘案 して配合設計が求められている。

支保工及び空洞内充填材は、埋戻し後を考えた場合、処分施設の空洞安定性の維持に寄与 すると考えられる。ただし、これらの構成部材は低透水層の外側に位置するため、比較的早 期に溶脱し透水性能が低下するため、その場合は水みちとなる可能性が考えられる。

空洞内充填材(セメント系)については、平成 19 年度の地下空洞型処分施設性能確証試 験報告書[112](以下、H19報告書)において室内試験及び現場施工試験が行われており、こ こでは、確証試験における試験結果を参照し、ひび割れの発生について整理する。

H19報告書によると、空洞内充てん材(セメント系)には、スランプ型コンクリートと高流動型コンクリートの2種類の配合が用いられており、それぞれの施工部分と配合条件を表 2.3-119に、配合条件に基づき実機試験で選定された具体的な配合を、表 2.3-120~表 2.3-122に示す。
部材・部位	使用するコンクリート
底部 側部 1~3リフト 奥部 1~3リフト	LPC+FA、W/B=45%、スランプ型
側部4リフト	LPC+FA、W/B=45%、高流動型

表 2.3-119 空洞内充填材の配合条件

表 2.3-120 施工前実機試験で選定された配合(スランプ型、常温時)

					使用材料および単位量(kg/m ³)						
スランフ [*] (cm)	空気量 (%)	W/B (%)	W/P (%)	s/a (%)	W	<u>ل</u> يند ا	粉体 P		S1	G1	Ad
						LPC	FA	LS			P×(%)
18 ± 2.5	2.5 ± 1.5	45	32	50	175	272	117	150	812	819	0.75%

表 2.3-121 施工前実機試験で選定された配合(スランプ型、低温時)

					使用材料および単位量(kg/m ³)						
スランプ	空気量 (%)	W/B	W/P	s/a	w		粉体 P			01	Ad
(СШ)	(70)	(70)	(70)	(70)	w	結合 LPC	·材 B	LS	51	61	$P \times (\%)$
						LIU	In				
18 ± 2.5	2.5 ± 1.5	45	32	50	175	272	117	150	812	819	0.95%

751/7*						1	使用材	料およ	、び単位	立量(1	kg/m³)	
70-	空気量	W/B	W/P	s/a			粉	本P				CD2
(cm)	(%)	(%)	(%)	(%)	w	糸	詰合材	В	1.51	S1	G1	P × (%)
(Cm)						LPC	FA	LEX	LOI			
65	2.5	45.0	26.4	51.6	160	229	107	20	249	824	780	0.80

表 2.3-122 施工前実機試験で選定された配合(高流動型型)

上記材料による充填材の施工の結果、打設後に発見された沈降ひび割れと、21本の出来形 面でのひび割れ(20本は乾燥ひび割れ、1本は再振動時のバイブレータの掛け方に起因と推 定)が確認されており、それぞれの成因について考察がなされている。

平成 19 年度報告書では、空洞内充填材(セメント系)の止水性能は建設・操業期間中の 安全確保を見込んだ結果として期待される性能であり、実処分施設においては地山程度の透 水性が求められ、止水性能が重要な評価対象となり得るとしている。また、止水性能を評価 する上ではひび割れの予測・評価が重要であるとして、透水性評価のための透水試験に加え て、ひび割れ特性に関連する室内試験として、自己収縮試験、長さ変化試験、断熱温度上昇 試験が実施されている。

さらに、これらの室内試験結果、ひび割れ調査結果、及び計測結果より得られる物性や環 境条件に基づき、ひび割れの解析的評価が実施されており、それらの総合評価として以下の 知見を得ている。

空洞内充填材は、力学特性に優れ、断熱温度上昇量や線膨張係数が小さく、また自己収縮量 も少ないため、水和熱の発生やその後の温度低下、自己収縮に伴うひび割れが極めて発生し にくい材料である。

- 一方で、ひび割れ予測解析におけるコンクリート応力は実測値を超過し、安全側ではあるが ひび割れが実際よりも生じやすい評価結果となっている。
- 今後の課題として、充填材の線膨張係数や若材令時の力学パラメータの取得による設定パラ メータの信頼性向上が必要である。

以上の知見より判断すると空洞内充填材に関しては、適切な配合設計と施工計画の策定、 及び施工の実施を通じて、ひび割れの発生を最小限に留めることが可能であると考えられる。

10) 空洞内充てん材(セメント系)の鉄筋の腐食膨張

支保工・空洞内充填材には鉄筋等の鋼製材料が使用されており、部材内部への水の浸潤に よる腐食膨張の発生が見込まれる。鉄筋等の鋼材の腐食については埋戻しが完了し、当該部 材が再冠水に至るまでは酸素消費型の腐食形態を示す。支保工部は処分施設の最も外側に位 置するため、比較的短時間で再冠水に至り水素発生型の腐食に移行する。また、空洞内充填 材は体積が大きく部材全体の再冠水には時間を要するため、比較的長期に渡り酸素消費型の 腐食形態が継続すると考えられる。

2018年11月に公開された原子力発電環境整備機構(NUMO)の包括的技術報告書(レビ ュー版、TR18-03)[113]では、ニアフィールドスケールの基本シナリオの記述において、支 保工等の鉄筋の腐食に関して、再冠水が完了するまでの酸化雰囲気のもとでは「残存する酸 素は、鉄を成分として含む地下施設の構成要素の腐食によって消費され、緩衝材間隙水がよ り速やかに還元性となることに寄与する。」と記されている。

NUMOの報告書は、高レベル放射性廃棄物やTRU廃棄物を対象としたシナリオであるが、 中深度処分施設についても概ね同様の事象が想定できると考えられる。従って、前述の記述 に加え、支保工・空洞内充填材が低透水層の外側に構成される部材であり鉄筋の腐食膨張の 影響は施設の外側に波及するであろうと考えられることより、低透水層より内側の人工バリ ア構成に及ぼす影響は僅かであると考える。

11) 処分空洞の岩盤クリープによる変形

前出の土木学会の報告書[81]では、岩盤クリープの評価における現状の理解と今後の展開 として、一般的な地下構造物について岩盤クリープを評価する際には、計測データなどを用 いて力学モデルのパラメータを同定したうえでの予測解析、あるいは計測データを外挿する 形で予測が行われることが多く、計測データなどに基づいて予測手法(力学モデル)の妥当 性を検証することによって一般的な地下構造物の供用年数程度の予測評価が可能であるとし たうえで、埋設施設における長期的な岩盤クリープに対しては、岩盤特性に応じて適切に選 定した力学モデルを用いた数値解析的な外挿により予測する方法が考えられるとしている。 また、長期的な岩盤クリープ予測においては、外挿による誤差、並びに岩盤と空洞内部の人 エバリアの境界条件(空洞内部に存在する人工バリアの剛性低下等)を考慮した評価を求め ている。報告書では、第2次TRUレポート[114]での検討事例を参照したうえで、岩盤クリ ープの発生傾向は処分空洞内部に設置される人工バリアの剛性に強く依存しており、人工バ リアとしてモルタルの 1/100 程度の剛性が空洞内部に期待できる場合、100 万年間の岩盤ク リープは、処分空洞内に人工バリアがない場合の 1/10 程度にとどまる、すなわち処分空洞内 部に一定の剛性を有する人工バリアが存在することにより、長期的な岩盤クリープは抑制さ れるとしている。したがって、岩盤クリープの長期的な状態評価の実施においては、地点の 岩盤特性に応じた適切な力学モデルの選定に加えて、岩盤クリープの抑制効果の観点から人 工バリアの時間経過に対する剛性低下の適切な考慮が重要であると述べている。

具体的に中深度処分を対象として、長期に渡る岩盤クリープの影響について評価した数少 ない既往の事例として、鈴木ら[115]の検討では、中深度処分埋設施設本格調査における試験 空洞の超長期岩盤クリープ挙動の予測を、線形粘弾性挙動及び強度破壊点以降の挙動が表現 可能なモデルとして大久保モデルを適用した解析を実施している(図 2.3・241)。検討では、 試験空洞の掘削完了時及び完了後 6 カ月の変位(変位増分)について解析値と実測値との比 較により設定パラメータの妥当性を評価した上で、10 万年後までの超長期に及ぶ壁面変位を 解析的に予測している。人工バリア材料の劣化を考慮して 1,000 年後のセメント系バリアの 剛性を 1/10 に低下させた解析の結果、空洞天端における 10 万件間の変位増分量は 11.9mm 程度であり(図 2.3・242)、変位増分は 1,000 年後の支保の劣化に伴う物性変化の影響が大き いことが得られている。また、主要部材の応力増分も・0.1MPa(圧縮)程度と僅かであり、 岩盤クリープが人工バリアに与える影響は比較的小さいと結論付けている(図 2.3・243)。



図 2.3-241 解析対象とした施設の諸元(解析メッシュ)



図 2.3-242 壁面変位の経時変化(左)及び弾性係数の低減傾向(右)



図 2.3-243 EBS 部材の応力変化(EBS 設置後 1,000 年経過時)

また、岩盤クリープによる空洞変形自体を評価した検討ではないが、山本ら[116]は、人工 バリアの長期性能に影響を与える要因として、岩盤のクリープ及び自重、廃棄体容器の腐食 膨張、ベントナイトの膨潤変形、セメント系材料の劣化、といった複合的な事象を考慮した 非線形の連続体解析を実施し、3万年にわたる人工バリアの状態変化について考察を実施し ている。解析には汎用有限要素法プログラム(ABAQUS)を用い、岩盤の変形・破壊・クリ ープは大久保モデルと Janach の破過条件によりモデル化し、廃棄体容器の腐食膨張を熱膨 張として取り扱うとともに、コンクリート系材料の変質についても溶脱速度に応じて剛性と 強度を 1/10に逐次低減させることにより考慮している。解析の結果として、3万年間に安全 評価上問題となるような人工バリアシステムへの影響(低拡散層の性能低下、低透水層への 塑性ひずみの発生等)は生じないことが示されている。 2.3.2 の参考文献

- [1] S. David Sevougian: Deep Borehole Emplacement Mode Hazard Analysis (DBEMHA), Sandia National Laboratories, July (2015).
- [2] 林秀郎、武内邦文、山本修一、伊藤裕紀、谷智之:余裕深度処分施設におけるベントナイト 層の飽和期間に関する検討、土木学会第62回年次学術講演会、平成19年9月 (2007).
- [3] 原子力規制委員会: 炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(案)(2016).
- [4] 石田裕樹、守友常雄、佐々木泰:余裕深度処分の成立確認に向けた地質環境調査について、 原子力バックエンド研究、Vol.13、 No.1 (2006).
- [5] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成26年度 管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成19年度~平成26年度の取りまとめ報告書 (2015).
- [6]原子力安全基盤機構:平成 19 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)報告書 (2008).
- [7] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 19 年度 地層処分技術調査等委託費
 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発 報告書(第2分冊)一ガス移行挙動
 の評価— (2007).
- [8] E. E. ALONSO, A. GENS AND A. JOSA : A CONSTITUTIVE MODEL FOR PARTIALLY SATURATED SOILS, GÉOTECHNIQUE, 40, No.3 (1990).
- [9] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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 (2016).
- [10] Mamoru Kumagai et.al.: Study on mechanical influence of gas generation and migration on engineered barrier system in radioactive waste disposal facility, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2010, October (2010).
- [11] 山本幹彦、三原守弘、大井貴夫:地層処分におけるガス移行影響評価-人工バリア内のガス 移行解析手法とデータ取得-、原子力バックエンド研究、Vol10 No.1-2、2004.3 (2004).
- [12] 田中幸久、廣永道彦、森敦史:放射性廃棄物処分施設へのガス移行解析コードの適用性に関する研究 -気液2相流解析コードの選定と適用-、電力中央研究所報告、研究報告:N09003 (2009).
- [12] 藤山哲雄、田中幸久、康永道彦、森敦史:ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に 関する文献調査、財団法人 電力中央研究所報告、研究報告 N07021 (2018).
- [13] Mayer, G., Jacobs, F., and Wittmann, F. H.: Experimental determination and numerical simulation of the permeability of cementitious materials, Nuclear Engineering and Design, 138 (2), pp.171-177 (1992).
- [14] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 17 年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価 報告書. 平成 18 年 3 月 (2006).

- [15] COREY,A. T., THE INTERRELATION BETWEEN GAS AND OIL RELATIVE PERMEABILITIES, PRODUCERS MONTHLY, 19(1), PP.38-41 (1954).
- [16] NARASIMHAN,T. N., & WITHERSPOON, P. A., NUMERICAL MODEL FOR SATURATED - UNSATURATED FLOW IN DEFORMABLE POROUS MEDIA: 3. APPLICATIONS. WATER RESOURCES RESEARCH, 14(6), 1017-1034 (1978).
- [17] VAN GENUCHTEN,M.TH., A CLOSED-FORM EQUATION FOR PREDICTING THE HYDRAULIC CONDUCTIVITY OF UNSATURATED SOILS,SOIL SCI. SOC. AM. J., 44,PP.892-898 (1980).
- [18] GRANT, M.A., PERMEABILITY REDUCTION FACTORS AT WAIRAKEI, PAPER 77-HT-52, PRESENTED AT AICHE-ASEM HEAT TRANSFER CONFERENCE, SALT LAKE CITY, UTA (1977).
- [19] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 19 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2008).
- [20] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2009).
- [21] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度 管理型処分技術調査
 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2010).
- [22] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2011).
- [23] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 23 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2012).
- [24] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2013).
- [25] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 25 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書 (2014).
- [26] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書 (2015).
- [27] 山田敦夫、足立有史、千々松正和、雨宮清、金子岳夫、伊藤裕紀、庭瀬一仁:ベントナイト クニゲル GX の基本特性試験(その4)静的力学特性に関する検討、土木学会第64回年次学 術講演会 (2009).
- [28] 山本修一、武内邦文、熊谷守、大石英希:力学連成二相流解析におけるクニゲルGX ベント ナイトの力学特性検討、土木学会第65回年次学術講演会 (2010).
- [29] 伊藤裕紀、庭瀬一仁、金子岳夫、千々松正和:ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その3) 膨潤変形挙動に関する検討、土木学会第64回年次学術講演会 (2009).
- [30] 石川博久、石黒勝彦、並河努、菅野毅: 低透水層の圧密特性、動力炉・核燃料開発事業団 東 海事業所 公開資料、PNC TN8410 97-051 (1997).
- [31] 山本修一、小峯秀雄: THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関す

る一考察、土木学会第63回年次学術講演会 (2008).

- [32] 小峯秀雄、緒方信英:高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の膨潤評価 式の提案-砂とベントナイトの配合割合及びベントナイト中の陽イオンの種類・組成の 影響-、電力中央研究所報告、U99013 (1999).
- [33] Ohmaki, S. : Stress- strain behavior of anisotropically, normally consolidated cohesive soil. In: Dungar, R., R., Pande, G.N., Studer, J.A. (Eds), Proc. 1st Int. Symp. On Num. Models in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, pp.250-269 (1982).
- [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(第17回)配布資料 放廃第17-4 号、H19.10.18 (2007).
- [35] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 平成 19 年度~平成 24 年度の取りまとめ報告書 (2013).
- [36] 富田敦紀、蛯名孝仁、福田勝美、戸井田克:地下深部約 100m 堆積軟岩中に大規模試験空洞 を掘削、トンネルと地下、Vol. 37、 No. 11、 pp. 855-863 (2006).
- [37] PRUESS, K., OLDENBURG, C. M., & MORIDIS, G. J. : TOUGH2 USER'S GUIDE VERSION 2 (1999).
- [38] 藤山哲雄、田中幸久、廣永道彦、森敦史:ベントナイト・セメント系材料のガス移行評価に関する文献調査、財団法人 電力中央研究所報告、研究報告 N07021 (2008).
- [39] 山本幹彦、三原守弘、大井貴夫:地層処分におけるガス移行影響評価 -人工バリア内 のガス移行解析手法とデータ取得-、原子力学会バックエンド研究 研究論文、VOL.10 NO.1-2 (2004).
- [40] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 17 年度 地層処分技術調査等 TRU 廃棄物関連処分技術調査 人工バリア・天然バリアガス移行挙動評価 報告書 (2006).
- [41] 馬場浩太、久保大樹、小池克明: TOUGH2 を用いた安比地区地熱貯留層の温度・圧力状態のシミュレーション、情報地質 第27巻 第2号 (2016).
- [42] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 28 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 (2017).
- [43] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度 管理型処分技術 調査等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成 19 年~平成 26 年度の取りまと め報告書、(2015).
- [44] 鈴木康正、新井慶将、小山俊博、窪田茂、石橋勝彦、寺田賢二、小林裕、武地真一、根本政広、杉橋直行:地下空洞型処分施設性能確証試験における底部・側部埋戻し材施工確認試験に関する検討(その4) -コンクリートのひび割れ予測評価に関する考察-、 土木学会第63回年次学術講演会(2008).
- [45] 増田良一、佐々木規行、高村尚、奥津一夫:トンネル型処分施設の施設内温度上昇に対 する影響因子、土木学会第63回年次学術講演会(2008).
- [46] 新保弘、戸梶慎一、武地真一、木ノ村幸士、根本政広、杉橋直行、秋山吉弘 : 発熱廃棄

体の表面温度に関する検討-地下空洞型処分施設性能確証試験-、土木学会第65回年次 学術講演会(2010).

- [47] 加藤和之、脇寿一、斎藤典之、小野文彦、大間知行、尾崎充弘:余裕深度処分の技術的な信 頼性構築に向けた検討状況について、原子力バックエンド研究、Vol.13 No.1 (2006).
- [48] 鈴木健一郎、山本修一、熊谷守、川本健:軽石凝灰岩の飽和・不飽和領域のガス流動特性に 関する実験的研究、第 39回岩盤力学に関するシンポジウム、講演番号 12 (2010.1).
- [49] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 19 年度 管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2008).
- [50] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2008).
- [51] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2013).
- [52] 谷口航、鈴木英明、杉野弘幸、松本一浩、千々松正和、柴田雅博:熱的特性の緩衝材仕様に 対する影響(研究報告)、JNC TN8400 99-052 (1999).
- [53] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度 管理型処分技術調査 等委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書 (2010).
- [54] 山本修一、小峯秀雄: THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関す る一考察、土木学会第 63 回年次講演会 (2008.9).
- [55] 山田淳夫、足立有史、千々松正和、雨宮清、金子岳夫、伊藤裕紀、庭瀬一仁:ベントナイト クニゲル GX の基本特性試験(その4)静的力学特性に関する検討、土木学会第64回年次学 術講演会 (2009).
- [56] LADD, C.C., FOOTT. R., ISHIHARA. K., SCHLOSSER. F. & POULOS. H. G.: STRESS-DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS. 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, JAPAN (1977).
- [57] 笹倉剛、畔柳幹雄、小林一三、岡本道考:ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ 取得II、核燃料サイクル開発機構契約業務報告(2003).
- [58] 高山裕介:ベントナイトの力学モデルと放射性廃棄物地層処分における緩衝材としての品質 評価、学位論文_甲第 6083 号、神戸大学、(2014).
- [59] 太田秀樹、伊藤雅夫、石黒健、米谷敏: 締め固められた粘性土の先行圧縮応力と強度の推定、 土木学会論文集 NO.436/Ⅲ-16、PP27-36(1991)
- [60] 核燃料サイクル開発機構:高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築-平成 17 取りまとめ- 一分冊 2 工学技術の開発-、JNC TN1400 2005-015 (2005).
- [61] 奥津一夫、森川誠司、広中良和、前田宗宏、新保弘、畔柳幹雄、田部井和人、佐原史浩、村 上武志、青山裕司:ニアフィールド水理場の長期的変遷評価システム構築に関する研究Ⅳ、 JNC TJ8410 2005-012 (2005).
- [62] 独立行政法人 原子力安全基盤機構:平成 21 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)報告書、平成 22 年 9 月

- [63] 社団法人 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計,品質管理および検査の考え方、 2009年7月
- [64] 公益社団法人 日本道路協会:道路橋示方書·同解説 IV 下部構造編、平成 24 年 3 月
- [65] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 19 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 20 年 3 月
- [66] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度 管理型処分技術調査等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 21 年 3 月
- [67] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 22 年 3 月
- [68] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 23 年 3 月
- [69] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 23 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 24 年 3 月
- [70] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 25 年 3 月
- [71] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度 管理型処分技術調査 等事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 平成 19 年度~平成 24 年度の取りまとめ報告書、 平成 25 年 3 月
- [72] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度 管理型処分技術調査
 等事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 平成 19 年度~平成 26 年度の取りまとめ報告
 書、平成 27 年 3 月
- [73] 公益社団法人 土木学会:2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]、平成 25 年 3 月
- [74] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 年度管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、2017
- [75] 横関康祐:コンクリートからの成分溶出を対象とした千年レベルの長期耐久性設計に関する 研究、東京工業大学学位論文、2004 年
- [76] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 30 年度管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、2018
- [77] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 31 年度管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、2019
- [78] 土木学会 エネルギー委員会: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、p.25、2009年
- [79] 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分 冊 3 地層処分システムの安全評価、JNC TN1400 99-023、1999
- [80] 原子燃料サイクル専門部会LLW廃棄体等製作・管理分科会:余裕深度処分対象廃棄体の 製作要件及び検査方法に関する標準―標準の概要について―、日本原子力学会 2015 年秋の大会、2015.9

- [81] 土木学会エネルギー委員会: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、2008.6.
- [82] 本田ほか:アルカリ性条件における炭素鋼の腐食に伴う硝酸イオンの化学的変遷挙動、材料 と環境、 vol.55、 2006.
- [83] 三原ほか:低酸素かつアルカリ条件下における炭素鋼,ステンレス鋼及びジルカロイからの ガス発生率及び腐食速度の評価、サイクル機構技法、 No.15、 2002.6.
- [84] 杉橋ほか:余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食に関する一考察、 土木学会第 63 回年次学術講演会、 CS05-43、 2008.9.
- [85] 松枝ほか: 余裕深度処分施設におけるセメント系人工バリア内の鋼材腐食速度について、土 木学会第 64 回年次学術講演会、 CS05-31、 2009.9.
- [86] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書(第 I 分冊)、平成 22 年 3 月
- [87] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 22 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 23 年 3 月
- [88] 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計、品質管理および検査の考え方、2009年
- [89] Rodwell, W.R. and Nords, S.: "A Thematic Network on Gas Issues in Safety Assessment of Deep Repositories for Nuclear Waste (GASNET)", EUR 20620 EN, 2003.
- [90] 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.
- [91] Kumagai, M., et.al: Study on mechanical influence of gas generation and migration on engineered barrier system in radioactive waste disposal facility., ICEM2010-40109, 2010.
- [92] 原子力安全委員会:余裕深度処分の管理期間終了以降における安全評価に関する考え方、 2010.4.1.
- [93] 原子力規制委員会: 炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(改訂案)、第27回廃 炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム、参考資料27-2-2、2017.11.
- [94] 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編]、 2007.
- [95] 元路寛ほか:鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究、 土木学会論文集、 No.669/V-50、 2001.2.
- [96] 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 19 年度管理型処分技術調査等委託
 費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 20 年 3 月
- [97] 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度管理型処分技術調査等委託 費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 21 年 3 月
- [98] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 23 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 24 年 3 月
- [99] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 24 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 25 年 3 月
- [100] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 25 年度管理型処分技術調査等

委託費 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 26 年 3 月

- [101] 公益財団法人原子力環境整備促進·資金管理センター:平成 26 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 27 年 3 月
- [102] 原子力発電環境整備機構(NUMO):包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の 実現一適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築一 レビュー版、NUMO -TR-18-03、付属書 4-55 パイピング現象の評価期間の設定、平成 30 年 11 月
- [103] 原子力発電環境整備機構(NUMO):包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の 実現一適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築一レビュー版、NUMO -TR-18-03、付属書 4-56 パイピング現象による緩衝材の流出現象の評価、平成 30 年 11 月
- [104] 原子力発電環境整備機構(NUMO):包括的技術報告書:わが国における安全な地層処分の 実現一適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築一レビュー版、NUMO -TR-18-03、2018年11月
- [105] K. Suzuki, H. Asano, R. Yahagi, I. Kobayashi, P. Sellin, C. Svemar and M. Holmqvist : Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository, Clay Materials, 2013
- [106] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成27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2分冊)一人工バリア品質/健全性評価手 法の構築— 緩衝材、平成28年3月
- [107] 公益財団法人原子力環境整備促進·資金管理センター:平成 27 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 28 年 3 月
- [108] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 28 年度管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 29 年 3 月
- [109] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 年度低レベル放射性廃棄物 の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 30 年 3 月
- [110] 伊藤喜広、鈴木康正、田坂嘉章、押部甚一、千々松正和、山田淳夫、寺田賢二:ベントナ イト混合土の沈下挙動に関する検討、土木学会第72回年次学術講演会、VII-034、平成29年 9月
- [111] 土木学会: 2016 年制定 トンネル標準示方書 【共通編】・同解説/【山岳工法編】・同解説, 2016.
- [112] 財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 19 年度管理型処分技術調査等委託費 地下空洞型処分施設性能確認試験報告書 平成 20 年 3 月、 2008.3.
- [113] 原子力発電環境整備機構:包括的技術報告:わが国における安全な地層処分の実現-適切な サイトの選定に向けたセーフティケースの構築-(レビュー版)、 NUMO-TR-18-03、 2018.11.
- [114] 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 棄物処分研究開発取りまとめ-、FEPC TRU-TRU2-2005-02、 JNC TY1400 2005-013、 2005.

- [115] 鈴木ほか:余裕深度処分における岩盤クリープ影響に関する検討、土木学会第62回年次学 術講演会、 CS5-047、 2007.9.
- [116] 山本ほか:トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析、 土木学会第 63 回年次学術講演会、 CS5-059、 2008.9.

2.3.3 光ファイバセンサー技術の適用性検討

光ファイバセンサーには数多くの技術があり、その分類方法もいくつかある。例えば、計測に 利用する光の物理量をもとにした分類(光の強度、周波数、位相、偏波など)、あるいは計測す る物理量をもとにした分類(温度センサー、加速度センサー、電流センサー)などである。分類 方法のひとつとして、計測箇所をもとにした分類がある。この分類方法によれば、FBG(Fiber Bragg Grating)方式に代表されるような任意箇所でのみ計測が可能な"ポイント型"と、"分布 型"に二分される。放射性廃棄物処分施設のモニタリングに適用すべく検討が進められている光 ファイバセンサーの多くは"分布型センサー"である。分布型センサーでは、光ファイバ内に特 殊な加工などをすることなく、汎用の光ファイバそのものがセンサーとして機能するため、全長 にわたる情報を得ることができる。一本の光ファイバで多点計測が可能であり、ひずみゲージ式 などの電気センサー(これも"ポイント型センサー")よりもケーブル断面を最小限にできる可 能性があるため、遮蔽機能への影響を低減することが期待されているためである。

ANDRA などによる既往研究によれば、分布型センサーのなかでも、技術成熟度(TRL)が高 いものとして、ラマン方式(後述)の温度分布計測(DTS: Distributed Temperature Sensing、 TRL6)と、ブリルアン方式(後述)のひずみ分布計測(DSS: Distributed Strain Sensing、TRL5) が挙げられている[1]。本検討では、十分なTRL を有するラマン方式については、試験内容から は除いている。

本項では、分布型光ファイバセンサー技術の概説とともに、その適用性を様々な観点から検討 するために実施したラボ試験と、主に坑内温度把握と低拡散層におけるひび割れ検知のための原 位置試験について、それぞれ記載する。 (1) 概説

本項では、分布型光ファイバセンサーの概要とともに、同センサーのパラメーターの意味 合い、また様々な分布型光ファイバセンサーの実現方法について記載する。

1) 光ファイバ内の散乱光

分布型センサーでは、光ファイバ内で生じる散乱光を利用している。光の散乱は、物質に 光があたったときに、物質を構成する分子や粒子に光が衝突し、あちこちに反射される現象 である。光ファイバ内に光が入射すると、わずかではあるがすべての箇所で散乱光が生じる。 様々な方向に散乱するもののうち、われわれが主に観測するのは入射光に対して戻ってくる 方向に進む後方散乱光である。この散乱光は、通信分野においては入射光の信号強度が減る 原因となるため不要なものである。しかし、この散乱光のスペクトル波形には散乱発生箇所 の様々な情報が含まれている。光ファイバ内の散乱光としては以下の3つが知られている[2]。



図 2.3-244 散乱光のスペクトル

- レイリー散乱光:光の損失量や屈折率の揺らぎの情報を含む
- ブリルアン散乱光:ひずみと温度の情報を含む
- ラマン散乱光:温度の情報を含む
- a. レイリー散乱光

レイリー散乱とは、光の波長よりも小さいサイズの粒子によって発生するもので、散乱 された光は入射した光と同じ周波数をもつ。光ファイバにおいては、光ファイバを構成す る分子のミクロな密度や組成の揺らぎによるものである。光ファイバ内で発生する散乱 光の中で最も強い散乱光であり、従来から光ファイバの光損失測定や破断点の検出に利 用されている。レイリー散乱を利用した分布型計測技術としては、屈折や曲げの程度や位 置を計測する OTDR (Optical Time Domain Reflecmetry) が最もシンプルなものであ る。最近は、スペクトルの分析技術と演算処理技術の進歩から、わずかな屈折率の揺らぎ を積極的に利用してひずみ分布や温度分布を計測する OFDR (Optical Frequency Domain Reflecmetry)、Phased OTDR、TW-COTDR(Tunable Wavelength Cohetent Optical Time Domain Reflecmetry)などが実用化されてきている。光ファイバの種類と しては、シングルモードファイバー(SMF)、マルチモードファイバー(MMF)ともに利 用できるが、実用上、ひずみ分布や温度分布を計測する際には SMF が用いられることが 多い(計測器に依存する)。

ANDRA による最近の原位置試験での取り組みでは、図 2.3-245 に示すように廃棄体 ケーシングの変形モニタリングのために、レイリー方式によるひずみ分布計測が適用さ れている[3]。



図 2.3-245 原位置試験でのレイリー計測結果例[3]

b. ブリルアン散乱光

ブリルアン散乱とは、光ファイバ中の分子(SiO2)の振動に起因しているが、媒質中を 伝搬する音響波(粗密波)による散乱である。粗密波では、光ファイバ中に屈折率の濃淡 が形成されるために回折格子として機能し、この周期と光の半波長が一致する(ブラッグ 波長条件を満たす)と、光は進行方向の逆方向に反射される。このとき、音響波そのもの も移動しているので、その移動速度に応じて、反射光(後方散乱光と呼ばれる)はドップ ラー効果によって周波数が低くなる。この粗密波の移動速度は、光ファイバのひずみや温 度に依存することから、入射光とブリルアン後方散乱光の周波数差からひずみ分布や温 度分布を計測することができる。ブリルアン散乱を利用した分布計測技術としては、ひず み分布や温度分布を計測する BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflecmetry)、 BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analysis)、BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis)がある。光ファイバの種類としては、SMF、MMFとも に利用できるが、実用上、SMFが用いられる(計測器に依存する)。

NAGRA による最近の原位置試験での取り組みでは、図 2.3-246 に示すように坑道の 変形計測用にブリルアン方式によるひずみ分布計測が適用されている[4]。



図 2.3-246 原位置試験でのブリルアン計測結果例[4]

c. ラマン散乱光

ラマン散乱とは、ブリルアン散乱同様に光ファイバ中の分子(SiO2)の振動などに起 因して散乱される光であるが、入射する光子と物質との間のエネルギーの授受によって 起こる。振動にエネルギーを与えた光は入射光より波長が長く(周波数が低く)なり(ス トークス光)、振動からエネルギーを得た光は入射光より波長が短く(周波数が高く)な る(アンチストークス光)。特にアンチストークス光の強度は光ファイバの温度により大 きく変化することが知られている。そのため、ラマン散乱の強度を知ることで、温度を計 測することができる。ひずみの影響を受けないことが、温度計測にとって大きな利点であ る。ラマン散乱を利用した分布計測技術としては、温度分布を計測する ROTDR (Raman Optical Time Domain Reflecmetry)がある。光ファイバの種類としては、SMF、MMF ともに利用できるが、実用上、MMF 向けの計測器が多い。これは、もともと強度が弱い ラマン散乱光に対しては、入射光量を多く取れる MMF が SMF よりも向いているためで ある。

NAGRA による最近の原位置試験での取り組みでは、図 2.3-247 に示すように坑道の 温度計測用にラマン方式によるひずみ分布計測が適用されている[4]。



図 2.3-247 原位置でのラマン計測結果例[4]

2) 分布型光ファイバセンサー

3 つの散乱光によって実現される分布型センサーを表 2.3-123 に示す。ラマン方式は、 最も実績が豊富であること・主に SMF で用いられることなどから本研究の取り組みから 除くこととし、レイリー方式とブリルアン方式を対象とした、具体的には、TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflecmetry) [5]と PPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Anaysis) [6]を用いて試験を行った。

散乱光	周波数	散乱要因	計測	使用ファイバ
レイリー	入射光と 同じvo	媒質内の密 度揺らぎ	 強度が損失などに依存 (最近 DSS*・DTS*で用いられ はじめた) 	主に SMF
ブリルアン	v o±10 数 GHz	音波 (音響フォ ノン)	周波数がひずみ・温度に依存 (主にひずみ分布 DSS で用い られる手法)	主に SMF
ラマン	v o±10 数 THz	分子振動 (光学フォ ノン)	温度分布 DTS 強度が温度に依存 (主に温度分布 DTS で用いら れる手法)	主に MMF (SMF も可)

表 2.3-123 各種散乱光による分布計測

*DTS : Distributed Temperature Sensing

*DSS : Distributed Strain Sensing

TW-COTDR 方式の基本的な光ファイバの構成を図 2.3-248 に示す。光ファイバ内に 片端からパルス光を入射して、レイリー散乱光を観測する。この散乱光スペクトルは、光 ファイバの僅かな密度の違いなどによって異なり、光ファイバの種類や位置によってそ れぞれが固有のパターンを有する。レイリー散乱光のピーク波長の変化(レイリー周波数 シフト)はわずかなもので、そのピークを抽出することは容易ではないが、比較するふた つのスペクトルのパターンの相互相関をもとにすることで、わずかなレイリー周波数シ フトを精度よく計測することができる。計測位置の情報は、パルス光の帰還時間と光速か ら算出する。本方式において、分布計測としての位置分解能は、入射するパルス光の幅に 依存する。レイリー周波数シフトΔv_Rは、ひずみ係数 C₂₁と温度係数 C₂₂を用いて下式の ようにあらわされる。ここで、ΔεとΔTはそれぞれひずみ変化と温度変化である。

$$\Delta v_R = C_{21} \Delta \varepsilon + C_{22} \Delta T \qquad 2.3-1$$



図 2.3-248 TW-COTDR 方式の構成

PPP-BOTDA 方式の基本的な光ファイバの構成を図 2.3-249 に示す。光ファイバ内に ふたつの光を対向させることによって、ブリルアン散乱光が誘導される。ふたつの光の周 波数差がブリルアン周波数シフトに一致する場合に、誘導ブリルアン散乱によって両者 の光のあいだでエネルギーの授受が最大化される。そのため、ふたつの光の周波数差を掃 引しながら連続光を観測すれば、光量が最大となったときの周波数差からブリルアン周 波数シフトを計測することができる。計測位置の情報は、パルス光の帰還時間と光速から 算出する。本方式において、分布計測としての位置分解能は、入射するパルス光の幅に依 存する。ブリルアン周波数シフトΔvBは、ひずみ係数 C11 と温度係数 C12 を用いて下式の ようにあらわされる。ここで、ΔεとΔTはそれぞれひずみ変化と温度変化である。

$$\Delta v_B = C_{11} \Delta \varepsilon + C_{12} \Delta T \qquad 2.3-2$$



図 2.3-249 PPP-BOTDA 方式の構成

シングルモード光ファイバによってループが構成されていれば(両端から光を入射可 能であれば)、上記の両方式(PPP-BOTDA 並びに TW-COTDR)を用いて、ブリルアン 周波数シフト Δv_B とレイリー周波数シフト Δv_R をともに観測可能である。この二観測値と あらかじめ既知の係数 D₁₁~D₂₂によって、ひずみ変化 $\Delta \epsilon$ と温度変化 ΔT のふたつの未知数 を算出することができる。前述の C₁₁~C₂₂をはじめ、これら係数を出すためにはキャリ ブレーションが必要となる。

$$\begin{pmatrix} \Delta \varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{21} \\ D_{12} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v_B \\ \Delta v_R \end{pmatrix}$$
 2.3-3

a. 温度分布

3 つの散乱光を用いた温度分布の計測方法には表 2.3-124 に示すいくつかの方法がある。

レイリー散乱光のみ、あるいはブリルアン散乱光のみを使用した場合、それぞれの散乱 光はひずみの影響も受けるため、温度用ケーブルを使用する必要がある。温度用ケーブル 内部の光ファイバはひずみから縁切りされているため、式2.3-1や式2.3-2内のひずみ変化 Δεがゼロになる結果、温度変化ΔTを計測することができる。精度としては一般的に、レ イリーのみの方が、ブリルアンのみよりも高い。また、ブリルアンのみの場合でも、両端 接続による方法の方が、分解能を高くできることなどの利点がある。

レイリー散乱光とブリルアン散乱光を両方計測して、既知の感度係数(D₁₁~D₂₂)と式 2.3-3から温度変化ΔTをひずみ変化Δεとともに算出することもできる。この場合、温度用 ケーブルを使用する必要はない。

表 2.3-124 内の No.1~5 の方法で得られるのは、温度変化であることに注意が必要である。各位置における絶対温度を得るためには、何らかのキャリブレーションが必要となる。

ラマン散乱光による温度計測では、温度用ケーブルを使用する必要はない。絶対温度を 把握するために、すべての位置でキャリブレーションをする必要はないが、計測結果が光 の損失によって影響を受けやすいため、状況に応じて適切なキャリブレーションを考慮 する必要がある。こうした課題解決のために、両端接続による温度計測方法[7]が提唱さ れている。

No.	散乱光	光ファイバ	光ファイバ 構成	計測方法例	特長
1	レイリー	SMF	片端接続	TW-COTDR	高精度
		(温度用)			温度用ケーブル必要
2	ブリルアン	SMF	片端接続	BOTDR	構成シンプル
		(温度用)			温度用ケーブル必要
3		SMF	両端接続	BOTDA	2より高空間分解能
		(温度用)			温度用ケーブル必要
4	レイリー+	SMF	片端接続	TW-COTDR	構成シンプル
	ブリルアン			+ BOTDR	温度用ケーブル不要
5		SMF	両端接続	TW-COTDR	4より高空間分解能
				+ BOTDA	温度用ケーブル不要
6	ラマン	MMF	片端接続	ROTDR	最もシンプル
					温度用ケーブル不要
7		MMF	両端接続	ダブルエン	6より高精度
				ド ROTDR	温度用ケーブル不要

表 2.3-124 主な温度分布の計測方法

b. ひずみ分布

3 つの散乱光を用いたひずみ分布の計測方法には表 2.3-125 に示すいくつかの方法がある。

レイリー散乱光のみ、あるいはブリルアン散乱光のみを使用した場合、それぞれの散乱 光は温度の影響も受けるため、温度補正をする必要がある。温度補正方法にもよるが、精 度としては一般的に、レイリーのみの方が、ブリルアンのみよりも高い。また、ブリルア ンのみの場合でも、両端接続による方法の方が、分解能を高くできることなどの利点があ る。

レイリー散乱光とブリルアン散乱光を両方計測して、既知の感度係数(D₁₁~D₂₂)と式 2.3-3からひずみ変化Δεを温度変化ΔTとともに算出することもできる。この場合、温度補 正する必要はない。

No.	散乱光	光ファイバ	光ファイバ 構成	計測方法例	特長
1	レイリー	SMF	片端接続	TW-COTDR	高精度
					温度補正必要
2	ブリルアン	SMF	片端接続	BOTDR	構成シンプル
					温度補正必要
3		SMF	両端接続	BOTDA	2より高空間分解能
					温度補正必要
4	レイリー+	SMF	片端接続	TW-COTDR	構成シンプル
	ブリルアン			+ BOTDR	温度補正不要
5		SMF	両端接続	TW-COTDR	4より高空間分解能
				+BOTDA	温度補正不要

表 2.3-125 主なひずみ分布の計測方法

3) 計測パラメーター

分布型光ファイバセンサーは、既存の電気式センサーと異なることから、これまでとは異 なる計測パラメーターの取り扱いが重要である[8]。分布型光ファイバセンサーで重要なパラ メーターを以下に5つ示す。

a. 計測分解能

ひずみや温度などが計測された結果に対して、どのくらい小さな変化量について捉え られる能力があるかどうかを示す(Measured resolution)(図 2.3-250)。考え方はこれ までの電気式と同様であるが、分布型光ファイバセンサーの場合、信号が距離によって減 衰するため、計測分解能が距離に影響を受ける点に注意が必要である。

計測装置上のパラメーターとしては、散乱光のスペクトルを得るために設定するステ ップ周波数に大よそ相当する。図 2.3-251 にそのイメージを示す。このステップ周波数 が小さいほど、わずかな周波数変化を捉えやすくなるため、結果として計測分解能を細か くすることができる。しかし、ステップ周波数が小さい場合には長い計測時間が必要とな る。計測装置によっては、内挿などの処理によってステップ周波数の間隔以下で高い計測 分解能を実現している場合がある。

b. 計測範囲

計測できるひずみや温度の変化量の最大〜最小値の範囲を示す(Measured range)(図 2.3-250)。

計測装置上のパラメーターとしては、散乱光のスペクトルを得るために設定する掃引 周波数幅に相当する。図 2.3-251 にそのイメージを示す。この周波数幅が大きいほど、 計測範囲を大きくすることができる。しかし、周波数幅が大きい場合には長い計測時間が 必要となる。逆に、周波数幅が小さい場合、計測範囲は狭いが短い計測時間で済む。



図 2.3-250 計測分解能と計測範囲の関係



図 2.3-251 散乱光のスペクトルと計測パラメーター

c. 計測距離

どれだけ遠い光ファイバまで計測できるかの能力を示す(Measured length)(図 2.3-250)。パルス光を用いた計測方式の場合、最遠端からの反射光を待つ必要があるため、 最短の計測周期は計測距離にも依存する。

計測装置上のパラメーターとしては、計測距離に応じて入射光の光量を調整する必要 がある。計測距離については、光の損失も影響を与えるため、コネクタや融着接続の個数 などによっても変化する。また、計測距離が長い場合には計測時間が必要となる。

d. 空間分解能

分布型センサー特有のもので、その性能を規定する代表的なパラメーターである。どれ

だけ局所的な変化の位置を捉えられるかの能力を示す(Spatial resolution)。

空間分解能のイメージを図 2.3-252 に示す。実際の温度変化又はひずみ変化をΔT又は Δεとして実線で示した場合、分布型光ファイバセンサーで得られる結果は、急激な変化を 示す箇所を遷移しながら破線のようになる。文献[8]によれば、実際の変化量の 10~90% を示す遷移区間を空間分解能とされている。一方、温度分布計測の標準[9]によれば、0~ 90%を示す遷移区間を空間分解能とされている。

計測装置上のパラメーターとしては、空間分解能は、入射するパルス光のパルス幅として決められることが多い。例えば、10n秒のパルス幅を入射した場合、1mの空間分解能に相当する。

e. 計測間隔

どのぐらい空間的に細かい結果を得られるかの能力を示す(Sampling resolution, Samling spacing)(図 2.3-252)。分布型光ファイバセンサーの計測結果は、ファイバ上 における距離とその点の物理量(温度やひずみ)である。その点の間隔は、光の速度と信 号変換の時間による。

計測装置上のパラメーターとしては、計測間隔は細かいほど多くのデータが得られる ことになるが、計測処理の都合上、計測時間が長くなる。理想的には、計測間隔は空間分 解能よりも充分小さくあるべきだが、実用上は空間分解能の1/2程度以下であれば充分と 考えられる。



図 2.3-252 空間分解能と計測間隔

f. 計測時間

どの程度の時間で計測が完了できるかどうかの能力を示す(Measurement time)。分 布型光ファイバセンサーの場合、僅かな信号を検知する必要があるため、計測を繰り返す ことで信号対雑音比の向上をしている。その繰り返し回数(平均化回数)も計測時間に大 きな影響を与える。

計測装置上のパラメーターとしては、前述した a.~e.のパラメーターによる条件と、計

測に許容される時間を鑑み、その中で最良な信号が得られるように可能な限り平均化回数を上げることが一般的である。

- 4) 本試験での使用機器
 - a. 計測装置

本試験では、ブリルアン散乱を用いた PPP-BOTDA 方式、レイリー散乱を用いた TW-COTDR 方式をともに具備する Neubrex 社製 NBX-7020 を用いた。その仕様を表 2.3-126 に示す。

機能	BOT	BOTDR PPP-BOTDA TW-COTDR																
発光波長				1550±	±2 nm						1530~1	560 nm						
計測対象							ひずみ	、温度										
→ +、++ 445					1本0)光ファイ	バでひる	ずみと温	度を分離	何能								
主は特徴					PPP-BC	DTDA / E	BOTDR	/ TW-C	OTDR /	COTDR	2							
距離レンジ				50m,	, 100m ,	250m, 5	i00m, 11	km, 2.5k	m, 5km,	10km, 2	25km							
計測周波数範囲				9~13	3 GHz					192	2300~1	96000 (äHz					
れずな計測符画		-30,000~+40,000 $\mu \epsilon$ -15,000~+20,000 $\mu \epsilon$										$-30,000 \sim +40,000 \ \mu \ \varepsilon$						
いすが計測範囲				(-3%-	~ +4%)						(-1.5%~	~ +2.0%)						
計測周波数			1.0	5 10	20 50 1	411-				100	200 21	50 500						
掃引ステップ			1, 2	., 5, 10,	20, 30 M					100	, 200, 23	50, 500						
サンプリング周期						5 cm	(標準)	, 1cm(:	最小)									
サンプリング点数					6	00,000 (標準),	3,000,	000(最大	5)								
加算回数				2	$2^5 \sim 2^{23}$	3回(ハ-	ードウェフ	ア加算2 ⁵	~ 2 ¹⁶	回を含む)							
機能	BOT	ſDR			PPP-E	BOTDA					тw-с	OTDR						
パルス幅	5 ns	10 ns	0.2 ns	0.5 ns	1 ns	2 ns	5 ns	10 ns	0.2 ns	0.5 ns	1 ns	2 ns	5 ns	10 ns				
距離分解能	50 cm	100 cm	2 cm	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100 cm	2 cm	5 cm	10 cm	20 cm	50 cm	100cm				
ダイナミックレンジ*1	1 dB	2 dB	0.5 dB	1 dB	2 dB	3 dB	4 dB	6 dB	0.5 dB	1 dB	3 dB	6 dB	8 dB	10 dB				
予想最長計測距離 ^{*2}	3 km	6 km	0.5 km	1 km	2 km	5 km	10 km	18 km	0.5 dB	1 km	10 km	20 km	22 km	25 km				
光計測系許容損失 ^{*1*8}	3 dB	6 dB	1 dB	2 dB	5 dB	7 dB	10 dB	12 dB	1 dB	2 dB	5 dB	7 dB	10 dB	13 dB				
計測精度 ^{*3*4}	30με	/ 1.5K	15 με	/ 0.75K	7.5με	/ 0.35K	5με.	/ 0.25K			0.5 με	/ 0.05K						
再現性 ^{*3*4*5}	20 με	/ 1.0K	10 με	/ 0.5K	2.4 με	/ 0.1K	2με	/ 0.1K			0.2 με	/ 0.01K						
計測所要時間 ^{*6*7}			-	5秒()	最短)						60秒(最短)						
計測精度		_						10 // 5	/ 0.5K									
(ハイブリッドモード)								10 μ ε	/ 0.51									
再現性		_						5 11 6	/ 0.25K									
(ハイブリッドモード)								σμε	0.231									
入出力ファイバー						シンク	ルモー	ド光ファ・	ィバー									
ファイバコネクタ							FC-	APC										
適合ファイバー						シンク	ルモー	ド光ファ・	ィバー									
電源					A	C 100~	•240V, 8	50/60Hz	:, 250 V/	4								
レーザ規格						Class	I (IEC60	825-1 :	2001)									
寸法 / 重量					Appro	x. 456 (V	V) x 485	(D) x 2	86 (H) /	30 kg								
運転時温度制限					10	~40°C,	湿度85%	。以下(結	露なきこ	(と)								
保管時温度制限							0~9	50°C										
製造国							日	本										

表 2.3-126 計測器の仕様

^{*1:}加算回数 2¹⁶にて *2:シングルモードファイバ (UV 被覆)の平均損失 0.3 dB/km にて *3:束取り UV 被覆ファイバの場所にて *4:束 取り UV 被覆ファイバの場所にて、恒温状態にて *5:標準偏差は連続する 100 箇所における連続 5 回の計測にて *6:50 m レンジ,加算回 数 2¹³回,周波数掃引ステップ 41 回にて、かつ Pulse Adjustment の時間を含まず *7:50 m レンジ,加算回数 2¹³回,周波数掃引ステップ 401 回にて、かつ Pulse Adjustment の時間を含まず *8:光出力の調整による許容範囲であり、光出力による非線形現象が発生する場合を除外す

る *1-*5 は PPP-BOTDR の掃引周波数ステップ値 5MHz にて (Pulse Adjustment と Auto Frequency Adjustment が On の状態にて) *1-*5 は TW-COTDR の掃引周波数ステップ値 250MHz にて (Pulse Adjustment が On の状態にて)

b. 光ケーブル

ひずみ計測用光ファイバセンサー(OFS 社製 C80920、1.8×3.5mm)を図 2.3-253 に 示す。貼り付け時にコンクリート表面との付着面積を確保できるように断面形状は偏平 としている。また、太径の抗張力体を、ケーブル中央の光ファイバの左右に配置すること で、施工時の引っ張りや衝撃などに対して光ファイバが損傷しにくいような構成として いる。左右の抗張力体を裂いて、内部の光ファイバを取り出した様子を図 2.3-254 に示 す。



図 2.3-253 ひずみ計測用光ファイバセンサー



図 2.3-254 ひずみ計測用光ファイバセンサー

温度計測用光ファイバセンサーケーブル(OFS 社製 CX80766、外径 8.5mm)を図 2.3-255 に示す。内部の光ファイバと被覆部は縁切りされており、ケーブルに引張が加わ ったとしても、内部の光ファイバには引張が加わらないような構成となっている。内部の 光ファイバを取り出した様子を図 2.3-256 に示す。



図 2.3-255 温度計測用光ファイバセンサーケーブル



図 2.3-256 温度計測用光ファイバセンサーケーブル

上記ケーブルを用いて、定温環境下での引張試験や、無ひずみ環境下での温度サイクル 試験の結果、得られた係数を表 2.3-127 に示す。計測装置で得られた結果と本係数を式 2.3-1や式2.3-2に代入することによって、ひずみ分布と温度分布を算出する。

種別	ブリルフ	アン感度	レイリー感度			
記号	C ₁₁	C ₁₂	C ₂₁	C ₂₂		
単位	ひずみ[MHz/με]	温度[MHz/℃]	ひずみ[GHz/με]	温度[GHz/℃]		
ひずみセンサケーブル	0. 0468	3. 42	-0. 147	-8.50		
温度センサケーブル	_	2.12	_	-4.45		

表 2.3-127 光ケーブルの校正係数

(2) ラボ試験

分布型光ファイバセンサー技術の適用性を、様々な観点から検討するためにラボ試験を実施した。光ファイバセンサーが長期的に適用可能かどうかを検討するための"耐久性試験"、 温度やひずみ以外の物理量として圧力が計測可能かどうかを検討するための"圧力試験"、光 ファイバセンサーと対象の接着力が失われた場合でもひずみが計測可能かどうかを検討する ための"敷設試験"をそれぞれ行ったので、本項で記載する。

- 1) 耐久性試験
 - a. 耐久性試験の概要

光ファイバがセンサーとして長期的にその性能を保持するためには、機械的強度に大きな低下がない(断線しない)とともに、光学的特性が確保されている(光が通る)必要がある。本検討では、光ファイバサンプルに劣化促進を与え、その前後で機械的、光学的評価試験を行う。評価試験のフローを図 2.3-257 に示す。



図 2.3-257 評価試験のフロー

光ファイバの劣化因子としては、既往研究の多い温度・湿度(水分)・応力以外に、放 射性廃棄物処分場における特有のものとして塩分・高 pH・放射線が挙げられる。本検討 では、これらを劣化因子として選択し、劣化水準を段階的に変化させて評価試験を行う。 劣化因子はそれぞれ単独で与え、複合的な影響は本研究では対象としない。

通常、光ファイバはケーブル(二次被覆、シース含む)加工されるが、シース材料など によって耐環境特性は大きく異なる。センサー用途を目的とした本検討では、センサー感 度に大きな影響を与える二次被覆やシースの詳細な仕様(材質や被覆厚など)は現時点で 決定していないこと、また安全側での評価となることから、一次被覆のみを有する光ファ イバ線(外径 250 μ m)で耐久性を評価することとした。

b. 光ファイバのサンプル

耐久性試験に供する光ファイバは、与える劣化因子(塩水・高 pH・放射線)に対して 試験結果に差が生じると予想される光ファイバを市販品のなかから選択した(表 2.3-128 参照)。No.1の光ファイバは汎用タイプとして、通信用光ファイバで世界シェアトップの Corning 社の製品とした。No.2の光ファイバは耐水タイプとして、クラッド表面にカー ボン被覆[10、11] がなされた OFS 社の製品とした。No.3 は耐放射線タイプとして、コ アとクラッドの屈折率が最適化[12、13] されたフジクラ社の製品とした。ブリルアン散 乱光によるセンサー方式の適用を考慮し、これら光ファイバはすべてシングルモード光ファイバで通信用途に製造されているものである。劣化促進から評価試験まで二次被覆のない状態、つまり光ファイバ素線(外径 250 µ m)で行う。各タイプの光ファイバの構成イメージを図 2.3-258 に、サンプルの外観を図 2.3-259~図 2.3-261 にそれぞれ示す。

No.	タイプ	メーカ	型番
1	汎用	Corning (米国)	SMF-28 Ultra Bare Fiber
2	耐水	OFS (米国)	F78814
3	耐放射線	フジクラ (日本)	SMF-RRSMFB

表 2.3-128 光ファイバのサンプル



図 2.3-258 各タイプの光ファイバ構成イメージ



図 2.3-259 光ファイバサンプル No.1



図 2.3-260 光ファイバサンプル No.2



図 2.3-261 光ファイバサンプル No.3

各タイプの光ファイバの仕様を表 2.3-129 に示す。

項目	No.1 汎用	No.2 耐水	No.3 耐放射線
ファイバ タイプ	シングルモード光フ ァイバ	カーボンコートシン グルモード光ファイ バ	フッ素ドープ石英コ アシングルモード光 ファイバ
使用波長	1310nm / 1550nm	1310nm / 1550nm	1310nm
モード フィールド径	9.2 \pm 0.4 μ m @1310nm 10.4 \pm 0.5 μ m @1550nm	$8.9 \pm 0.5 \mu$ m @1310nm $10.0 \pm 0.5 \mu$ m @1550nm	8.6±0.7μm @1310nm
コア	ゲルマニウムドープ	ゲルマニウムドープ	フッ素ドープ石英
材質	石英	石英	
クラッド 材質	純粋石英	純粋石英	フッ素ドープ石英
ファイバ径	$125\pm0.7\mu$ m	$125\pm1\mu$ m	$125\pm2\mu$ m
伝送損失	≦0.32dB/km @1310nm ≦0.18dB/km @1550nm	≦0.5dB/km @1310nm ≦0.3dB/km @1550nm	≦0.6dB/km @1310nm ≦0.5dB/km @1550nm
カットオフ波長	≤ 1260 nm	≦1310nm	≤ 1260 nm
一次被覆材質	アクリレート樹脂	カーボンコート+ アクリレート樹脂	アクリレート樹脂
被覆径	$242\pm5\mu$ m	$250\pm10\mu$ m	$245\pm10\mu$ m
スクリーニング レベル	>1% (0.69GPa)	>1% (0.69GPa)	>1% (0.69GPa)
使用温度範囲	-60∼85℃	-40∼85℃	0~60℃

表 2.3-129 各タイプの光ファイバ仕様

c. 劣化促進

劣化促進パラメーターを表 2.3-130 に示す。光ファイバ全長に対して均一に劣化促進 するためには、用意した光ファイバサンプル(素線、約250m長)をボビンから外して束 どりした状態が望ましい。しかし、運搬時の破損などを避けるために、それぞれの劣化促 進は光ファイバがプラスチック製のボビンに巻き取られた状態で行う。安定した光学的 評価試験結果を得るためにも、ボビンに巻いた状態は適していると言える。また、機械的、 光学的ともに評価試験はサンプル全長に対して行うため、ボビンの内周〜外周における 劣化度合いの差が評価結果へ与える影響は、一定程度低減されると考えられる。

なお、各劣化環境は光ファイバセンサー設置位置などをもとに定量的に決定したもの ではない。既往研究での実験条件を参考に、使用する実験設備の制限の下で出来る限り劣 化促進されるよう意図したものである。

劣化	比較				劣化水準		
因子	ファイバ	劣化境境	1	2	3	4	5
塩水	汎用 vs. 耐水	高濃度(海水 の2倍)塩水 に浸漬(60℃)	10 日	50 日	100 日	200 日	400 日
高 pH	汎用 vs. 耐水	高アルカリ溶 液 (pH13) に 浸漬 (60℃)	1日	3日 (汎用のみ)	10日 (耐水のみ)	50 日* (耐水のみ)	
放射線	汎用 vs. 耐放射線	200Gy/h を照 射	5h	100h			

表 2.3-130 劣化促進パラメーター

*ボビンから光ファイバをうまくほどけなかったため促進後の試験できず

シングルモード光ファイバを構成する石英ガラスは、水やアルカリなどの化学的浸食 を受けることが知られている[14]。そこで、塩分・高pHに対する劣化促進は、光ファイ バサンプルを溶液に浸漬することによって行う。浸漬は恒温槽内で行い、既往研究におけ る加速劣化試験条件[15]などを参考に、60℃、大気圧環境下で実施する。さらなる高温で は劣化進行が激しく機械的評価試験で安定した結果が得られないと懸念されること、通 信用架空線が日射によって経験する最高温度とも一致するため参照可能な研究結果が多 いこと、セメント系材料の性能低下が 60℃まではみられないこと[16]などから本条件と する。恒温槽内での浸漬状況と恒温槽の仕様を、図 2.3-262 と

表 2.3-131 にそれぞれ示す。

塩分については、室温で海水に浸漬したカーボン被覆の効果確認の事例[17]を参考に、 濃度を2倍(6%)、温度を60℃とすることで劣化促進を図る。高濃度の塩水は、塩化ナ トリウムと蒸留水から作製する。

高 pH については、既往研究[¹⁸]を参考にセメント溶解水を想定した下記組成の高アル カリ水に浸漬する。このときのイオン強度は約 0.5、pH は 13.4 である。

0.3M KOH + 0.2M NaOH + 0.0005M(0.5mM) Ca(OH)2 2.3-4



図 2.3-262 恒温槽内での塩水浸漬状況

表	2.3 - 131	恒温槽什様
1	1 .0 TOT	

項目	仕様
加温ヒータ容量	4.5kW
温度設定範囲	-40~150°C
湿度設定範囲	$20{\sim}98\%$ rh
内寸法(W)×(D)×(H)	1000×800×1000 mm

シングルモード光ファイバを構成する石英ガラスは、放射線を照射すると透過率が低下することが知られている[14]。そこで、放射線に対する劣化促進は、光ファイバサンプルに放射線を直接照射することによって行う。既往の研究[12]、[13]、[19]と図 2.3-263に示すガンマ線照射装置の性能(装置所有機関による測定結果)を鑑み、200Gy/hで照射する。L1 処分容器表面線量率は最大 500mSv/h であるが、実施設のコンクリートピット

(0.7m 厚)によれば放射線の減衰が 2×10⁻³程度期待される[20](点線源、セシウム 137 の場合)。そのため、200Gy/h の照射 1 時間は、コンクリートピット外壁部における曝露 約 20 年に相当する。そのため、本評価における最長の劣化水準 2(照射 100 時間)は、 約 2000 年に相当すると考えらえる。



使用するガンマ線照射装置の外観と仕様を図 2.3-264 と表 2.3-132 にそれぞれ示す。



図 2.3-264 ガンマ線照射装置へのサンプル設置状況

項目	仕様
線源	セシウム 137
線源容量	244.2TBq
照射室	ϕ 338 $ imes$ 600mm
照射台	φ 300mm
照射線量率範囲	4.8~1500Gy/h

表 2.3-132 ガンマ線照射装置仕様

d. 機械的評価

光ファイバの機械的評価(破断しないかどうか)として、2つのモードを考える。ひと つめは、付与された応力が破断応力を越えた場合に破断するモード(ここでは、直接破断 モードと呼ぶ)で、ふたつめは、付与された応力は小さいが石英ガラス表面の微小な傷(マ イクロクラック)が拡大することで破断するモード(ここでは、疲労破断モードと呼ぶ) である。つまり、破断応力以下の応力でも、長期間継続して負荷させると傷が成長し破断 に至ることがある。これはガラスの疲労特性として知られる。ここでは、引張試験を通じ て、2つの破断モードに対する評価を行ったので紹介する。

JIS[21] によれば、静疲労試験や動疲労試験によって、破断強度そのものとともに、疲労破断モードの評価に必要な疲労係数(n_d)を求めることができる。実際の本検討における試験状況と引張試験機を図 2.3-265 に示す。



図 2.3-265 試験状況と引張試験機

ここで、疲労破壊モードを生じさせるマイクロクラック成長に関する説明をする。光フ アイバに付加される応力 σ_1 、 σ_2 下において、マイクロクラックが成長し破断に至る時間を それぞれ T_1 、 T_2 とすると、応力と破断時間の関係は近似的に下式であらわされる[22]。 応力の比に疲労係数を乗じた値が、破断に至る時間の逆比に等しいことを示している。つ まり、1%伸びの応力(σ_1)下で $T_1=1$ 秒で破断に至る大きさの傷は、疲労係数n=20の 場合、0.5%伸びの応力(σ_2)下で $T_2=1.05\times10^6$ 秒($\Rightarrow12$ 日間)には破断に至ると言う 考え方である。疲労係数nは疲労試験方法(静的、動的)により異なり、測定時間と適用 応力レベルにより、その結果に影響を与えることが知られているため、その取扱いには注 意を要する[21]。

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^n = \frac{T_2}{T_1} \tag{2.3-5}$$

一般的には、光ファイバの強度を全長にわたって保証するため、製造された光ファイバ の全長にわたり所定の張力(スクリーニングひずみ)を加えて傷などの低強度部を取り除 くスクリーニング試験が行われている[23][24]。本評価で得られる疲労係数とスクリーニ ング試験条件(スクリーニングひずみ、スクリーニング時間など)、さらに放射性廃棄物 処分場内での光ファイバセンサー設置位置における環境条件(光ファイバに加わるひず み、ひずみが加わる期間など)をもって、光ファイバセンサーの推定寿命を求めることと なる。

(a) 直接破断

直接破断モードに対しては、引張試験を実施する。引張試験では、数 m 程度の長さの 光ファイバに一定なひずみ(ここでは 2.5%/min.)を加え、破断強度(応力)を測定する (図 2.3-266 参照)。この測定を数多くのサンプルで実施して、それぞれの破断強度結果 を累積分布として表現することで、光ファイバの現有の機械的性能を評価できる。図 2.3-267 のように、引張試験結果はワイブル分布形状を示すことが知られている。評価指 標としては、破断強度が高いこととともに、破断強度にばらつきが少ない(グラフの傾き が急である)ことが安定した性能の観点からも重要であると言える。



図 2.3-266 引張試験[21]



図 2.3-267 引張試験結果のイメージ

塩分による劣化促進後の引張試験結果(2.5%/min.、n=21~28)を図 2.3-268~図 2.3-269 に示す。

汎用タイプ光ファイバ(図 2.3-268)は、塩水浸漬期間の増加によって、平均破断強度 が低下する傾向があること、また破断強度のばらつきがわずかに増える(グラフの傾きが 緩くなる)ことがわかった。塩水 200日の結果が他と傾向が異なる点、50日と100日の 結果が逆転している点などがみられるが、これらは浸漬時の環境が原因と考えられる。浸 漬時にボビンを横置き(図 2.3-262)にせざるを得ないため、浸漬中に光ファイバが徐々 にボビンの下側にずれ落ちていき、引張試験時に光ファイバを損傷なく取り出せなかっ たことが原因と考えられる。

耐水タイプ光ファイバ(図 2.3-269)は、塩水浸漬期間の増加にも関わらず、破断強度の平均、ばらつきともに、ほとんど変化しないことがわかった。サンプル数は 1 であるが、400日の結果に低強度部がみられた。



図 2.3-268 引張試験結果(汎用タイプ;塩分)



図 2.3-269 引張試験結果(耐水タイプ;塩分)

塩水劣化で比較したふたつの光ファイバの、引張試験で得られた破断強度(中央値)を まとめて表 2.3-133 に示す。耐水タイプの塩水に対する効果を確認することができた。

	劣化水準					
光ファイバ	0	1	2	3	4	5
	初期	10 日	50 日	100 日	200 日	400 日
汎用タイプ	4.664GPa	4.522	4.036	4.267	3.938	3.751
耐水タイプ	3.386GPa	3.403	3.376	3.413	3.389	3.376

表 2.3-133 塩水劣化促進後の破断強度(中央値)

高アルカリによる劣化促進後の引張試験結果(2.5%/min.、n=21~28)を図 2.3-270~ 図 2.3-271 に示す。

汎用タイプ光ファイバ(図 2.3-270)は、高アルカリ浸漬期間の増加によって、平均破 断強度が低下する傾向があること、また破断強度のばらつきが増える(グラフの傾きが緩 くなる)ことがわかった。10日間浸漬も行ったが、図 2.3-272 に示すように光ファイバ の劣化が激しく、治具で把持出来ず、引張試験を行うことが出来なかった。

耐水タイプ光ファイバ(図 2.3-271)は、高アルカリ浸漬期間の増加にも関わらず、破 断強度、ばらつきともに、ほとんど変化しないことがわかった。







図 2.3-271 引張試験結果(耐水タイプ;高pH)



図 2.3-272 高 pH で 10 日浸漬後の汎用タイプの劣化状況

高アルカリ劣化で比較したふたつの光ファイバの、引張試験で得られた破断強度(中央値)をまとめて表 2.3-134 に示す。耐水タイプの塩水に対する効果を確認することができた。

	劣化水準				
光ファイバ	0	1	2	3	
	初期	1日	3 日	10 日	
汎用タイプ	4.903GPa	4.268	4.153	-	
耐水タイプ	3.389GPa	3.407	-	3.399	

表 2.3-134 高アルカリ劣化促進後の破断強度(中央値)

放射線による劣化促進後の引張試験結果(2.5%/min.、n=21~28)を図 2.3-273~図 2.3-274 に示す。

汎用タイプ光ファイバ(図 2.3-273)、耐放射線光ファイバ(図 2.3-274)ともに傾向は 同様であった。つまり、わずかではあるが、放射線照射によって破断強度が上がっている ようである。その原因は定かではない。破断強度のばらつきはほとんど変化がなかった。







図 2.3-274 引張試験結果(耐放射線タイプ;放射線)
放射線照射で比較したふたつの光ファイバの、引張試験で得られた破断強度(中央値) をまとめて表 2.3-135 に示す。どちらの光ファイバともに、放射線照射によってわずか ではあるが破断強度の向上がみられた。

		劣化水準	
光ファイバ	0	1	2
	初期	$5\mathrm{h}$	100h
汎用タイプ	4.903GPa	4.934	4.986
耐放射線タイプ	3.817GPa	3.866	3.939

表 2.3-135 放射線照射後の破断強度(中央値)

劣化促進された光ファイバサンプルの引張試験をもとに、直接破断モードに対する機 械的評価を表 2.3-136 にまとめる。塩水やアルカリに対しては、耐水タイプ光ファイバ の効果が確認できた。

ルファイバ				
九ノアイバ	塩水	高アルカリ	放射線	
汎用タイプ	× 破断強度低下	× 破断強度低下	0	
耐水タイプ	0	0		
耐放射線タイプ			0	

表 2.3-136 直接破断に対する機械的評価

(b)疲労破断

疲労破断モードに対しては、動疲労試験を実施する。動疲労試験では、光ファイバに加 えるひずみ速度を変え(ここでは 0.025~25%/min.)、破断強度を測定することで疲労係 数(*n*_d)を求める(図 2.3-275~図 2.3-276 参照)。疲労係数をもとにすれば、応力付与 状態における将来的な破断寿命を計算することができる。



塩水による劣化促進後の動疲労試験結果(0.025~25%/min.、n=計 52~74)を図 2.3-277 ~図 2.3-278 に示す。

劣化水準に関わらず、汎用タイプ光ファイバ(図 2.3・277)は、ひずみ速度に応じて破 断強度が変化しているのに対して、耐水タイプ光ファイバ(図 2.3・278)は、ひずみ速度 によらず破断強度はほぼ一定である。このことは、汎用タイプでは低応力下においてもマ イクロクラックが成長していること、湛水タイプではマイクロクラックがほとんど変化 しないこと、を示している。なお、汎用タイプ光ファイバの 200 日浸漬サンプルについ て、ひずみ速度 0.025%.min での試験が正常に出来なかったため、データが欠損してい る。







図 2.3-278 動疲労試験結果(耐水タイプ;塩分)

塩水劣化で比較したふたつの光ファイバの、動疲労試験で得られた疲労係数(n_d)をま とめて表 2.3-137 に示す。汎用タイプと耐水タイプの疲労係数の明確な違いが明らかに なったが、疲労係数そのものについては劣化に伴う変化はみられなかった。

表 2.3-137 塩水劣化促進後の疲労係数

	劣化水準					
光ファイバ	0	1	2	3	4	5
	初期	10 日	50 日	100 日	200 日	400 日
汎用タイプ	21.83	20.41	22.47	23.45	9.83	21.22
耐水タイプ	242.90	221.22	242.90	262.16	269.27	332.33

高アルカリによる劣化促進後の動疲労試験結果(0.025~25%/min.、n=計 52~74)を図 2.3-279~図 2.3-280 に示す。

汎用タイプ光ファイバ (図 2.3-279)、耐水タイプ光ファイバ (図 2.3-280) ともに、傾

向は塩水のときと同様であった。なお、汎用タイプ光ファイバの3日浸漬サンプルについて、ひずみ速度 0.025%.min での試験が正常に出来なかったため、データが欠損している。



図 2.3-280 動疲労試験結果(耐水タイプ;高pH)

アルカリ劣化で比較したふたつの光ファイバの、動疲労試験で得られた疲労係数(n_d) をまとめて表 2.3-138 に示す。ここでも、汎用タイプと耐水タイプの疲労係数の明確な 違いが明らかになったが、疲労係数そのものについては劣化に伴う変化はみられなかっ た。

		劣化	水準	
光ファイバ	0	1	2	3
	初期	1日	3 日	10 日
汎用タイプ	21.83	18.92	21.73	—
耐水タイプ	242.90	199.00	—	269.27

表 2.3-138 アルカリ劣化促進後の疲労係数

放射線照射による劣化促進後の動疲労試験結果(0.025~25%/min.、n=計 52~74)を図 2.3-281~図 2.3-282 に示す。

汎用タイプ光ファイバ(図 2.3-281)、耐水タイプ光ファイバ(図 2.3-282)ともに、放 射線照射に伴う明確な変化はみられなかった。





図 2.3-281 動疲労試験結果(汎用タイプ;放射線)

図 2.3-282 動疲労試験結果(耐放射線タイプ;放射線)

放射線照射で比較したふたつの光ファイバの、動疲労試験で得られた疲労係数(nd)を まとめて表 2.3-139 に示す。表 2.3-135 でみられた放射線照射によるわずかな破断強度 の向上と同様に、疲労係数についてもわずかながら増加しているようである。

	劣化水準			
光ファイバ	0	1	2	
	初期	$5\mathrm{h}$	100h	
汎用タイプ	21.83	22.20	24.38	
耐放射線タイプ	18.53	18.46	19.49	

表 2.3-139 放射線照射後の疲労係数

劣化促進された光ファイバサンプルの動疲労試験をもとに、疲労破断モードに対する 機械的評価を表 2.3-140 にまとめる。注意すべきは、汎用・耐水タイプともにもともと有 する特長(汎用タイプ:疲労係数 20 前後、耐水タイプ:疲労係数 200 前後)は、塩水や 高アルカリへの劣化促進によっても変化していないことである。

ルフーイバ	劣化因子				
	塩水	高アルカリ	放射線		
汎用タイプ (疲労係数小)	×	×	\bigtriangleup		
耐水タイプ (疲労係数大)	0	0	_		
耐放射線タイプ			\bigtriangleup		

表 2.3-140 疲労破断に対する機械的評価

e. 光学的評価

光学的特性が確保されている(光が通る)ことは、分布型光ファイバセンサーを実現す るうえで最重要項目のひとつである。機械的な性能が確保されていたとしても、光学的な 機能が失われてしまう可能性がある(ここでは損失増大モードと呼ぶ)。光ファイバ内で の光パワーの減少の尺度として損失がある。JIS[25]にあるように、光ファイバの距離の 離れた二つの断面1と2の間の波長λでの損失 A(λ)は下式によって求められる。ここで、 P₁(λ)は光ファイバ入射側断面1を通過する光パワー、P₂(λ)は光ファイバ出射側断面2を 通過する光パワーである(図 2.3-283 参照)。

$$A(\lambda) = 10 \log_{10} \left| \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \right|$$
 2.3-6



図 2.3-283 光ファイバの損失定義

光ファイバの単位長さ当たりの損失係数 $\alpha(\lambda)$ は下式によって求められる。ここで、 $A(\lambda)$ は波長 λ での損失、Lは長さである。

$$\alpha(\lambda) = \frac{A(\lambda)}{L}$$
 2.3-7

損失試験のうち光パルス試験機(OTDR:Optical Time Domain Reflectometry)を用 いる OTDR 法は単一方向の測定であり、光ファイバの異なる箇所から光ファイバの先端 までの後方散乱光パワーを測定する方法である。この測定は光ファイバ内の伝搬速度及 び光ファイバの両端からの後方散乱光を測定し、この二つの OTDR 波形を平均化するこ とによって、光ファイバの損失試験に用いることができる。OTDR による損失試験方法 を図 2.3・284 に、ダミー光ファイバを使用した均一な試料の OTDR 概略波形の例を図 2.3・285 にそれぞれ示す。実際の本検討における試験状況と OTDR 画面を図 2.3・286 に 示す。被測定光ファイバ部分の単方向の後方散乱損失係数は、下式であらわされる。ここ で、αは単方向の後方散乱係数、Z1 はダミー光ファイバ以遠のデッドゾーン(接続部の測 定不可領域)を越えたところの距離、Z2 は試料の端部の距離(終端反射影響のないとこ ろ)である。

$$\alpha(\lambda) = \frac{P_1(\lambda) - P_2(\lambda)}{Z_1 - Z_2}$$
 2.3-8



図 2.3-284 OTDR の構成図



図 2.3-285 ダミー光ファイバを使用した均一な試料の OTDR 概略波形の例



図 2.3-286 試験状況と OTDR 画面

一般的に、シングルモード光ファイバでの損失試験時には、1310nm 又は 1550nm の 波長を使うことが多い。波長 1310nm で約 0.4 dB/km、波長 1550nm で約 0.2 dB/km が 一般的な損失と言われている。本検討として重視すべきは、計画している光ファイバセン サーで使用される波長 1550nm であるが、計測できる条件下では参考値として波長 1310nm でも計測を行った。

汎用光ファイバの損失計測結果を表 2.3-141 に示す。各サンプルにつき約 150m 長の 損失(dB)を計測したものである。塩分に関して、浸漬期間の増加に伴う明確な損失変 化は確認されなかった。一方、高アルカリに関して、浸漬期間の増加に伴って、わずかで はあるが損失が増大した。

少少田子 油目		劣化水準					
为化凶于	议民	0	1	2	3	4	5
		初期値	10 日	50 日	100 日	200 日	400 日
塩分	1310nm	$0.35~\mathrm{dB}$	0.34	0.38	0.36	0.34	0.37
	1550nm	0.24	0.32	0.32	0.28	0.20	0.22
		初期値	1日	3日	10 日	50 日	
高 pH	1310nm	$0.35~\mathrm{dB}$	0.36	0.58	NG	-	
	1550nm	0.24	0.25	0.36	NG	-	

表 2.3-141 損失計測結果(汎用タイプ)

耐水光ファイバの損失計測結果を表 2.3-142 に示す。各サンプルにつき約 150m 長の 損失(dB)を計測したものである。塩水、高アルカリともに、浸漬期間の増加に伴う変化 は確認されなかった。

火ル国ユ	油毛		劣化水準				
为化凶丁	议民	0	1	2	3	4	5
		初期値	10 日*	50 日	100 日	200 日	400 日
塩分	1310nm	$0.35~\mathrm{dB}$	0.37	0.41	0.38	0.32	0.35
	1550nm	0.25	0.29	0.32	0.28	0.20	0.21
		初期値	1日	3日	10 日	50 日	
高 pH	1310nm	0.35 dB	0.38	-	0.31	0.36	
	1550nm	0.25	0.26	-	0.26	0.24	

表 2.3-142 損失計測結果(耐水性タイプ)

劣化因子のうち放射線については、照射を停止すると損失変化が徐々に復帰していく ことが知られている。そこで、損失試験については放射線を照射した状態で実施すること とする。実験時の状況を図 2.3-287 に示す。損失の測定波長は 1550nm として、照射開 始から 100 時間のあいだ 20 分間隔で定期的に測定した。



図 2.3-287 放射線照射時の実験状況

放射線照射時間と損失の計測結果を図 2.3-288 に示す。それぞれの長さ(L)は、汎用 光ファイバ 183m 長、耐放射線光ファイバ 137m 長で測定を行い、1km あたりの損失を 算出した(式2.3-7)。累積放射線量で約 20,000Gy の場合、汎用タイプで約 23dB/km の 損失増加が生じたのに対して、耐放射線タイプでは約 1dB/km の損失増加に抑えられた。 既往文献[26]でも見られるように、コアにフッ素をドープすることにより、著しく耐放射 線性を高められることを確認できた。ちなみに、照射終了 8 日後に汎用タイプを再測した ところ、損失が約 15dB/km まで復帰していた。



図 2.3-288 放射線照射時間と損失の関係

f. まとめとモニタリング計画へのフィードバック

耐久性試験を通じて、劣化促進前後における光ファイバサンプルの機械的評価(引張試 験、動疲労試験)と光学的評価を行い、典型的な光ファイバ種類の長短とともに耐久性評 価に資するバックデータを得た。ここでは、試験で得られたバックデータをもとに具体的 な耐久性評価を、直接破断モードと疲労破断モード、また光学的な機能を失う損失増大モ ードのそれぞれについて検討し、具体的なモニタリング計画へのフィードバックを試み る。各モードの発生イメージを図 2.3-289 に示す。ここで敷設する光ファイバは、低拡散 層のひび割れ計測用途(敷設延長:0.5~5.0km)と施設内の圧力分布計測用途(敷設延 長:0.3~0.7km)を想定する。



図 2.3-289 計測機能を喪失するモード

はじめに、直接破断モードについて検討する。このモードでは、破断応力以上の応力が 生じることによって光ファイバが破断に至るモードである。これは、低拡散層にひび割れ が生じた場合に、ひび割れ直交部に位置する光ファイバが破断することを想定している。

直接破断モードによる累積破断確率 F は、下式にもとづき計算する[27]。ここで L は 光ファイバ長、 $N(\sigma_F)$ は破断強度が σ_F 以下となる欠陥の単位長さあたりの累積個数を示す。

 $F = 1 - e^{-L \cdot N(\sigma_F)}$ 2.3-9 or はひび割れ (0.3mm 幅程度と想定)が生じた際に光ファイバに加わる応力で、原位 置試験結果などをもとに 70MPa とした。つまり、例えば平成 30 年度の上部低拡散層に おける計測結果の STEP3 時点によれば、ひび割れ幅 0.2~0.3mm 程度のときに光ファイ バによるひずみが約 1000 μ 程度であった(図 2.3-575、図 2.3-625)。光ファイバのヤン グ係数を 70GPa とすれば、このときの応力は 70MPa となる。N(or)を算出するにあたっ ては、耐水タイプ光ファイバに関して耐久性試験のうち塩水浸漬後の引張試験で得られ た結果をもとに将来の破断確率の予測を試みた。なぜならば、高アルカリ環境下における 耐水タイプ光ファイバの引張試験結果によれば、破断強度が向上する結果が得られたた めである。これは、劣化よりも計測誤差が大きかったためと考えられる。

累積破断確率のモデル化イメージを図 2.3-290 に示す。L₀ を劣化促進前における引張 試験の結果(実測データ有り)、L₁を劣化促進後における引張試験の結果(60℃環境下で の実測データ有り)とする。これら実測データをもとに、t℃環境下での劣化促進後にお ける引張試験の結果 L_(t)を推測することを試みる。



図 2.3-290 累積破断確率のモデル化

温度による反応の速度定数 k は、以下のアレニウス式に従うとする。ここで、Ea は活 性化エネルギー(ガラスの場合 34.4k [J/mol])、R は気体定数(8.31 [J/K・mol])、T は 絶対温度([K])である。

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right)$$
 2.3-10

よって、t℃と 60℃のときの反応速度定数の比は下式であらわされる。

$$\frac{k_t}{k_{60}} = \frac{\exp\left(-\frac{Ea}{RT_t}\right)}{\exp\left(-\frac{Ea}{RT_{60}}\right)} = \exp\left(-\frac{Ea}{RT_t} + \frac{Ea}{RT_{60}}\right) = \exp\left(\frac{Ea}{R}\left(\frac{T_t - T_{60}}{T_{60}T_t}\right)\right)$$
 2.3-11

60℃環境下での実測データ(劣化促進前から劣化促進後の劣化量)に上記の反応速度定

数の比を乗じることによって、仮想的に t℃環境下での劣化促進後における引張試験の結 果を算出する。

$$L(t) = L0 + \frac{k_t}{k_{60}}(L1 - L0)$$
2.3-12

こうして得られた 35℃環境下における結果を、もとのデータ(60℃)とともに図 2.3-291に示す。実測に比較して、35℃の推測されたデータは劣化度合いが少ない様子が わかる。



図 2.3-291 累積破断確率の予測

上記によって、t℃環境下での劣化促進後における引張試験の結果 Lttを推測するが、も ととなる実測データは 60℃環境下における塩水浸漬後の引張試験である。このときの劣 化促進期間は最長 400 日までであり、それ以降の劣化については結果を外挿する必要で ある。その外挿のイメージを図 2.3-292 に示す。



図 2.3-292 累積破断確率のモデル化

ここで、引張試験結果をもとにした累積破断確率分布は、両対数表示(塩水浸漬:図 2.3-269や高アルカリ浸漬:図 2.3-271)上で直線であると仮定する。このときの線形近似でモデル化された直線は、傾きが $k_1 \sim k_3$ 、累積破断確率が 50%となる破断強度が $\sigma_1 \sim \sigma_3$ で、それぞれあらわされるものとする。

累積破断確率の予測方法のイメージを図 2.3-293 に示す。ここで、モデル化された直 線の傾き(k₁~k₃)と累積破断確率が 50%となる破断強度(σ₁~σ₃)ともに、劣化水準(浸 漬日数)に対して指数関数とする。そうした条件を与えることで、将来想定する劣化水準 時(L_T)における傾き(k_T)並びに破断強度(50%値)(σ_T)が推定できる(図内(a)(b))。 その結果、Lr時における累積破断確率のモデルを決定する(図内(c))。その結果、任意年数後における累積破断モデルが推定される。最後に、与えられたor とモデルの交点によって、N(or)が決定できる。



こうした手順によって、60℃環境下における累積破断確率の実測データから任意温度 環境下におけるデータを推定し、任意期間における累積破断モデルを外挿した結果から のN(GF)を試算した結果を下表に示す。本試算によれば、25℃以下ではゼロを示している。 累積破断確率のモデルを単純化(両対数表示において直線)したことなどによるものと考 えられる。

温度環境	N(GF):単位長さあたりの累積破断個数
35° C	$4.489 imes 10^{-4}$
34°C	$7.865 imes 10^{-5}$
33°C	$1.047 imes 10^{-5}$
$32^{\circ}C$	$1.037 imes 10^{-6}$
31°C	$7.514 imes 10^{-8}$
30°C	$3.923 imes 10^{-9}$
29°C	$1.457 imes 10^{\cdot 10}$
28°C	$3.819 imes 10^{\cdot 12}$
27°C	$7.017 imes 10^{\cdot 14}$
26°C	$8.882 imes 10^{\cdot 16}$

表 2.3-143 100 年経過後の単位長さあたりの累積破断個数の試算結果

得られた N(GF)と式2.3-9を用いて、累積破断確率を試算した結果を図 2.3-294 に示す。 29℃以下の環境であれば 100 年時点・5km 長でも破断確率を通信分野で一般的な 10⁻⁶以 下に抑えられそうである。15℃環境(原位置試験におけるコンクリートピット部の年間平 均気温程度、図 2.3-399 参照)では十分に小さい値と考えられる。



図 2.3-294 累積破断確率試算結果(100年後)

上記試算をもとにしたモニタリング計画の一例を、その前提となる設定条件とともに 表 2.3-144 に示す。カーボンコートされた耐水ファイバを利用して、光ファイバ長さを 5000m 以下とすれば、設定条件を満足することができる。

本試算は、限られた実測データのなかから限られた条件をもとに行ったものであるこ とに注意が必要である。ひび割れが出た場合とは言え、光ファイバそのものの有する破断 強度よりは極めて小さい応力が加わった際の破断確率を算出する必要がある。そうした 非常に低強度における破断確率の精度を上げるためには、破断確率のモデルを高度化(今 回は両対数表示で直線)するとともに、引張試験のn数(今回は n=21~28)を増やして、 低強度部のサンプルを得る必要があると考えられる。また、温度をパラメータとした浸漬 によるデータ蓄積、温度が一定でない環境を想定した場合の破断確率試算方法も課題と して挙げられる。

設定条件	モニタリング計画例		
100年、29℃環境下	耐水光ファイバを使用		
破断確率<10-6	光ファイバ長さ 5000m 以下		
ひび割れ幅 0.3mm			
試算時の条件:			
 引張試験結果をもとにした累積破断確 	率分布は、両対数表示上で直線である		
 上記直線モデルの傾きや中央値は、劣化水準に対して指数関数を示す 			
• 劣化促進効果はアレニウス近似			

表 2.3-144 直接破断モード時を考慮した場合のモニタリング計画例

次に、疲労破断モードについて検討する。このモードでは、わずかな応力が長期間かか ることによってマイクロクラックが徐々に成長していき、光ファイバが破断に至るモー ドである。これは、ひび割れや圧力などの計測用途に関わらず、光ファイバセンサーを設 置した際に、低拡散層のひび割れ以外の箇所で発生することをイメージしたものである。 光ファイバ製造時のスクリーニングひずみをε1、スクリーニング時間を T1 とすれば、 ひずみε2の環境下における寿命 T2は、動疲労係数 (nd)を用いて以下のように表せる。

$$T_2 = T_1 \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)^{n_d}$$
 2.3-13

一般的な通信用光ファイバのスクリーニング条件では、661は1%ひずみ、スクリーニ ング時間 T1 は 1 秒である。高信頼性が求められる海底ケーブル用光ファイバなどの場 合、661 として 2%ひずみが用いられる。ここでは安全側で前者と想定し、動疲労試験で 得られた結果をもとに寿命算出を試みた。動疲労係数 (n_d) については、動疲労試験で得 られた結果(塩水浸漬:表 2.3·137や高アルカリ浸漬:表 2.3·138)を用いた。耐水タイ プのこれらの結果は、劣化水準によって明確な変化がみられなかったため、平均値を動疲 労係数 (n_d=261.8) として採用した。現地環境下における負荷ひずみ61 を変えながら寿命 を算出した結果を図 2.3·296~図 2.3·297 に示す。汎用タイプの光ファイバを使用した 場合でも、原位置試験で導入された程度の初期ひずみ (0.1% (1000 µ ひずみ) 程度以下、 図 2.3·458 参照) であれば推定寿命は充分に長く、本モードにおける光ファイバの破断 は無視できると考えられる。



図 2.3-295 推定寿命の試算結果(汎用タイプ)



図 2.3-296 推定寿命の試算結果(耐水タイプ)

上記試算をもとにしたモニタリング計画の一例を、その前提となる設定条件とともに 表 2.3-145 に示す。ここでは、必ずしもカーボンコートを施した耐水ファイバは不可欠 ではない。汎用ファイバを用いたとしても、設置時に導入するひずみをスクリーニングひ ずみの 1/10 程度以下とすれば、設定条件を満足することができる。4 芯の光ケーブル(自 重 50kg/km)を例にとれば、自重 800m によって 0.3%のひずみが負荷される。敷設時に は、こうした自重による設置時ひずみも考慮する必要がある。

表 2.3-145 疲労破断モードを考慮した場合のモニタリング計画例

	設定条件	モニタリング計画例
	100年~	光ファイバ種類は汎用・耐水ともに可
		設置時ひずみはスクリーニングひずみの 1/10 程度
試算時の条	件:	
• スクリ	ーニング条件は1%、1	秒。必要に応じて、高信頼性用(海底ケーブルな
ど) 向	けのスクリーニング条	件(2%、1秒)変更可能

最後に、損失増大モードについて検討する。2.3.3 (2) 1) c. でも記載したように、 200Gy/h の照射 5 時間は、現地環境下 (コンクリートピット外壁部) における曝露約 100 年に相当する。このとき (累積線量 1000Gy) の耐放射線タイプ光ファイバの損失増大量 は 0.36dB/km (1550nm のとき) であった。もともとのシングルモード光ファイバが有 する損失 (約 0.2dB/km) と足し合わせても 0.56dB/km である。光ファイバセンサーに よるモニタリングで許容される損失量を 3dB (信号強度がおよそ半分になる) と仮定し、 接続部 (コネクタ接続や融着接続) による損失量を 0.5dB 程度確保しておくとすれば、 残り 2.5dB (3-0.5) までの損失量の増大は許容される。そのため、光ファイバセンサーの 長さを一本あたり 5km (2.5÷0.56) 抑えられれば、計測機能を維持することができるこ とになる。

上記試算をもとにしたモニタリング計画の一例を、その前提となる設定条件とともに 表 2.3-146 に示す。耐放射線ファイバを利用して、光ファイバ長さを 5000m 以下とすれ ば、設定条件を満足することができる。

設定条件	モニタリング計画例
100 年	耐放射線タイプ
(コンクリートピット外壁部)	光ファイバ長さ 5000m 以下

表 2.3-146 損失増大モードを考慮した場合のモニタリング計画例

2) 圧力試験

分布型光ファイバセンサーを用いて、主に、坑道内の温度分布計測や、低拡散層のひず み分布計測への適用に向けた検討を進めてきた。もし、圧力分布計測が実現できれば、低 透水層の偏膨潤などを把握し、低拡散層の変状が発生する前の予兆を確認するなど、多面 的なモニタリングが期待できる。そこで、事前試験、膨潤圧試験、圧力試験を通じて、圧 力分布計測の可能性を探った。

a. 事前試験

(a) 従来技術

光ファイバによるポイント型の圧力測定センサーのひとつとして、ファブリーペロー 方式を利用したものがある。本センサーを用いてベントナイト膨潤圧測定を試みたところ(図 2.3-297)、妥当な結果が得られた(図 2.3-298)。



図 2.3-297 光ファイバセンサー (ポイント型)による膨潤圧計測



図 2.3-298 光ファイバセンサー (ポイント型) による膨潤圧計測結果

ファブリーペロー方式はポイント型のセンサーであり、光ファイバ1本につき端部の 一点のみを計測する方式である。多点の圧力を計測するためには、その数だけ光ファイバ を用意する必要があり、光ファイバのもつ利点を損なってしまう。一本の光ファイバで多 点の圧力を計測する方法はこれまでのところまだない。

(b) 圧力計測検証実験

圧力分布計測のイメージを図 2.3-299 に示す。並列する二本の光ファイバの拘束条件 を変えることで、側圧によって異なる長軸方向の挙動が生じると考えられる。長軸方向の 挙動の違いは、これまでひずみ分布計測で用いられている技術 (ブリルアン方式又はレイ リー方式)による計測で実現可能であるため、側圧が両者のひずみ差と相関がみられれば、 側圧分布の実現性が確認できる。



図 2.3-299 側圧検知の概念

上記圧力分布測定の実現性を検証するために、加力装置を用いてベントナイト下の光 ファイバセンサーに側圧を与える実験を実施した。図 2.3-300 に実験構成を示す。鋼板 に拘束条件の異なる光ファイバセンサーを設置したうえで、ベントナイトを敷き詰めた。 加力装置で段階的に荷重を上げながら、光ファイバセンサーに沿ったひずみ分布を計測 した (TW-COTDR 方式)。試験状況を図 2.3-301~図 2.3-305 に示す。



図 2.3-300 圧力計測検証実験の構成



図 2.3-301 圧力計測検証実験の光ファイバセンサーの設置



図 2.3-302 圧力計測検証実験の光ファイバセンサーの設置



図 2.3-303 圧力計測検証実験のベントナイト敷き詰め状況



図 2.3-304 圧力計測検証実験の加力状況



図 2.3-305 圧力計測検証実験の状況

(c) 実験結果

拘束条件の異なる箇所のひずみ差と、荷重並びに加力装置クロスヘッド変位の関係を、 それぞれ図 2.3-306 と図 2.3-307 に示す。荷重の増加に伴って、ひずみが上昇している 様子がわかる。一方、荷重を除荷してもひずみが低下せずに残留する結果であった。クロ スヘッドの結果と含めて鑑みれば、ベントナイトが締固められる過程で側圧が上昇した ものの、その後側圧が充分低下しなかったためと思われる。可逆性などを確認するうえで は試験方法を改良する必要があるが、圧力分布計測の可能性を示唆する結果が得られた。 モールドの径は内径 500mm のため、荷重 200kN 時には約 1MPa の圧力が生じている。



図 2.3-306 圧力事前試験の実験結果1 (ひずみ差と荷重)



図 2.3-307 圧力事前試験の実験結果2(ひずみとクロスヘッド位置)

(d) まとめ

従来技術であるポイント型の光ファイバセンサーに代わる手段として、分布型センサーによる圧力計測の可能性を検討した。低拡散層(コンクリート)表面へのセンサー固定を想定し、その固定条件(拘束条件)が異なるふたつの光ファイバセンサーのひずみ差が、 光ファイバに直交するように加わる圧力と相関があることが確認できた。

実際の低拡散層表面では、圧力変化以外に、ひずみや温度変化が想定される。今回確認 した圧力計測方法では、対象表面の変形などによるひずみ影響を受けるため、拘束条件の 与え方には工夫が必要である。

- b. 膨潤圧試験
- (a) 概要

前述の事前試験結果を受けて、圧力に対する光ファイバの拘束条件を変化させること とした。そのイメージを図 2.3-308 に示す。低透水層(ベントナイト)と低拡散層(コン クリート)に挟まれるように、被覆(材料や厚さなど)が異なる二種類の光ファイバセン サーを平行に配置することを仮定する。被覆面で受けた側圧は、被覆を経て内部の光ファ イバに伝達される。その伝達具合は被覆によって異なるため、両者の光ファイバセンサー の計測結果の差は、ひずみや温度ではなく、側圧によるものと言える。被覆状態の異なる 二種類の光ファイバセンサーによって、側圧を検知しようとするものである。本方法によ れば、対象表面の変形などによるひずみ影響は二種類の光ファイバにほぼ同等に加わる と考えられ、圧力のみを選択的に計測することができると考えられる。



図 2.3-308 側圧計測イメージ

本試験では、被覆の異なる二種類の光ファイバセンサーを、ポーラスストーン(通水用) とベントナイト供試体のあいだに配置し、通水によるベントナイト膨潤が二種類の光フ ァイバセンサーに与える側圧の差をもとに、その領域の圧力状態をとらえようと試みる ものである。ちなみに本試験環境下では、ひずみと温度は一定と言える環境下である。

(b) 試験装置

分布型光ファイバセンサーの計測によれば、空間分解能を任意に変更することが可能 である。2cm あるいは5cm などの高い空間分解能を実現することもできるため、供試体 そのもののサイズを小さくすることも可能である。しかし、供試体端部の影響(温度、ひ ずみや曲げの状況など)を極力排除するためには、供試体をなるべく大きくして、実際に 観測したい領域を十分に確保する必要がある。今回は、試験装置の組み立てやベントナイ ト供試体の作成に伴う作業性などを考慮し、直径 300mm の供試体用の試験装置とした。

通水試験装置を図 2.3-309 に示す。ベントナイト供試体部(φ300mm、高さ 60mm) の下部に位置するポーラスストーンを経由してベントナイト下面全体から通水される仕 組みとなっている。試験装置は供試体製作のモールドも兼ねていて、供試体側面のリング にカラーを重ねた状態でベントナイトを敷き詰め、加圧板を手回しのスクリュージャッ キで締め固めることができる。



図 2.3-309 通水試験装置

ベントナイト供試体部の上部の加圧板と、反力をとる上板のあいだにはロードセル (200kN)を設置して、データロガー(図 2.3-310)にて荷重を計測できるようになって いる。



図 2.3-310 データロガー

供試体部の下部に位置する通水バルブと通水パイプの配置を図 2.3-311 に示す。側面 のリングには、供試体を横切るように配置する光ファイバセンサーが通る孔があいてい る。また、A~D に示す 4 箇所の位置には、90 度間隔で供試体深さ方向に異なる(下面 から 15~45mm)位置に参照用のファブリーペロー方式のポイント型光ファイバ圧力セ ンサー(図 2.3-312)を設置、アナライザー(図 2.3-313)につないで圧力を計測する。 本センサーでは、ベントナイト膨潤圧を計測できることを事前に確認している(図 2.3-298参照)。



図 2.3-311 通水試験装置(通水経路とセンサー配置)



図 2.3-312 ポイント型光ファイバ圧力センサー(冶具取付け後)



図 2.3-313 データアナライザー (ポイント型光ファイバ圧力センサー)

参照用のファブリーペロー方式のポイント型光ファイバ圧力センサーの仕様を表 2.3-147 に示す。

メーカ・型番	FISO • FOP-M-BA
計測レンジ	0~6.8MPa(0~1000psi)
分解能	フルスケールの 0.2%
精度	フルスケールの1%以下
動作温度範囲	-20∼+150°C
温度特性ゼロシフト	フルスケールの 0.01%/℃

表 2.3-147 ポイント型光ファイバ圧力センサーの仕様

(c) 光ファイバ

被覆種類の異なる光ファイバセンサーとして、以下に示す二種類の光ファイバ(どちら も汎用のシングルモードファイバー)を用意した。

太径: PVC 被覆、外径 900 ミクロン (図 2.3-314)

細径:UV 被覆、外径 500 ミクロン(図 2.3-315)

下部ポーラスストーンに設置した様子を図 2.3-316 に示す。



図 2.3-314 太径光ファイバ



図 2.3-315 細径光ファイバ



図 2.3-316 ポーラスストーン上への光ファイバセンサーの配置

供試体下面に設置した光ファイバセンサーは、供試体側面の試料容器(リング)とOリングのあいだを経て、外部に取り出し、計測器につなげる。取り出し部の光ファイバセンサーの様子を図 2.3-317~図 2.3-318 に示す。



図 2.3-317 光ファイバセンサーの取り出し部状況



図 2.3-318 光ファイバセンサーの取り出し部

(d) ベントナイト供試体

光ファイバセンサー設置後の下部ポーラスストーン上に、三層に分けて、ベントナイト 敷き均し、締固めを繰り返し、最終的に 60mm 厚の供試体を製作した。ベントナイト Gv の乾燥密度 1.6g/cm3 となるよう締め固めた。試験前のベントナイト密度を表 2.3-148 に、 供試体製作の様子を図 2.3-319~図 2.3-321 に示す。

総重量	高さ	体積	含水比	湿潤密度	乾燥密度
(g)	(cm)	(cm3)	(%)	(g/cm3)	(g/cm3)
8250	5.92	4183.8	21.6	1.972	1.622

表 2.3-148 ベントナイト試験前密度



図 2.3-319 ベントナイト敷き詰め



図 2.3-320 ベントナイト締固め



図 2.3-321 加圧後のベントナイト

ベントナイト供試体へ通水をしながら、光ファイバセンサーでひずみ分布を計測した。 計測は TW-COTDR 方式で行った。その計測パラメーターを表 2.3-149 に示す。

距離レンジ	50 m	
位置分解能	2 cm	
サンプリング間隔	1 cm	
加算回数	2^{12}	
周波数掃引範囲	$300 \mathrm{~MHz}$	(194~194.3 GHz)
掃引周波数ステップ	$0.25~\mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	1201	
計測時間 (単発)	約 210 秒	

表 2.3-149 TW-COTDR 方式の計測パラメーター (膨潤圧試験)

(e) 試験結果

バルブから通水(2018年12月28日9:00頃に開始)しながら、ロードセル、ポイン ト型光ファイバ圧力センサー、分布型光ファイバセンサーで定期的な連続計測を行った。 実験時の様子を図 2.3-322に示す。



図 2.3-322 通水実験状況

a) ロードセル

試験装置に設置したロードセルによる膨潤圧の計測結果を図 2.3-323 に示す。通水開始 2~3 日間のあいだで膨潤圧が大きく上昇し、その後も徐々に上昇している様子がわかる。



図 2.3-323 ロードセルの計測結果

b) ポイント型光ファイバ圧力センサー

ベントナイト供試体側面のリングに設置したポイント型光ファイバ圧力センサーの計 測結果を図 2.3-324 に示す。センサーA、B、C、Dは、それぞれ供試体(60mm 厚)下 部からの位置(高さ)が、15、25、35、45mm である。通水直後からそれぞれの挙動が 位置(高さ)に対して相関がみられない。試験装置のリング内壁に沿って上昇した水など による影響と思われ、浸潤深度を把握するには至らなかった。



図 2.3-324 ポイント型光ファイバ圧力センサーの計測結果

c)分布型光ファイバセンサー

ポーラスストーンに固定した太径と細径の光ファイバセンサーを用いてひずみ分布を 計測した結果を図 2.3-325~図 2.3-326 にそれぞれ示す。ばらつきが多いものの、太径に ついては 8.9m 付近で、細径については 12.6m 付近で、通水直後からひずみが変化して いる傾向を示している。



図 2.3-325 太径光ファイバのひずみ分布計測結果



図 2.3-326 細径光ファイバのひずみ分布計測結果

得られたひずみ分布から、ベントナイト供試体中央部 200mm 範囲の平均ひずみを算

出、その経時変化を図 2.3-327~図 2.3-328 に示す。通水直後の挙動が異なるものの、そ れ以降の挙動について両者ともに同様の傾向を示している。特に、細径の結果については、 ロードセルによる膨潤圧の経時変化と似た結果であった。



図 2.3-327 太径光ファイバによるひずみの経時変化



図 2.3-328 細径光ファイバによるひずみの経時変化

被覆厚の異なる二種類の光ファイバの差を、ロードセルの結果とともに経時変化として図 2.3-329 に示す。傾向は異なるものの、両者ともに上昇傾向を示している。



図 2.3-329 ロードセルと光ファイバ (二種類の差)の経時変化

ロードセルと光ファイバ(二種類の差)の関係を図 2.3-330 に示す。特に膨潤圧が小さい場合(通水初期)に変動がみられるものの、光ファイバによって一定の膨潤圧の上昇傾向を把握できることを確認した。



図 2.3-330 ロードセルと光ファイバ (二種類の差)の関係

(f) まとめ

光ファイバ周囲の圧力の影響を、被覆状態(被覆厚、被覆材料)の異なる光ファイバを 用いて実験的に確認した。被覆状態の異なる二種類の光ファイバ上にベントナイトを敷 き詰めて通水試験を行った結果、二種類のひずみ計測結果の差から、膨潤圧の上昇傾向を 確認することができた。二種類の光ファイバはともに同等のひずみや温度変化を受ける ため、仮にひずみや温度変化などが加わる環境下においても、選択的に圧力分布計測がで きる可能性を示唆する結果であった。

ベントナイト通水による本試験では、光ファイバへの均一な圧力付与が困難であるこ とから、ひずみ計測結果はばらつきが目立った。圧力を付与する機構を再考のうえ、再現 性のある実験方法で、また二種類以上の異なる被覆状態の光ファイバでのさらなる検討 が望まれる。その結果、圧力検知のメカニズム解明にもつながっていくものと考える。

c. 圧力試験

光ファイバセンサーによって、ひずみ・温度分布だけでなく圧力分布を計測できれば、 低透水層の膨潤圧などのモニタリングに資することができる。既往研究によれば、加力装 置を用いたベントナイト下の光ファイバセンサーに側圧を与える試験によって、段階的 な荷重にともなうひずみ変化が得られ、圧力分布計測の可能性を示唆する結果が示され ている[28]。

そこで、実際の適用を想定し、ベントナイトの通水試験を通じて生じる膨潤圧を用いて 光ファイバセンサーに側圧を与える試験を行い、圧力分布計測の可能性をさらに探るこ ととした。 (a) 試験方法

a)概要

光ファイバセンサーによる側圧計測方法のイメージを図 2.3-331 に示す。低透水層(ベ ントナイト)とセメント系材料バリア(コンクリート)に挟まれるように、被覆(材料や 厚さなど)が異なる二種類の光ファイバセンサーを平行に配置することを仮定する。被覆 面で受けた側圧は、被覆を経て内部の光ファイバに伝達される。その伝達具合は被覆によ って異なるため、両者の光ファイバセンサーの計測結果の差は、ひずみや温度ではなく、 側圧によるものと言える。被覆状態の異なる二種類の光ファイバセンサーによって、側圧 を検知しようとするものである。



本試験は、被覆の異なる二種類の光ファイバセンサーを、ポーラスストーン(通水用) とベントナイトを模擬した軟質ゴム材料との間に配置し、ジャッキによる加圧が光ファ イバセンサーに与える側圧の差をもとに、その領域の圧力状態を捉えようと試みるもの である。ちなみに本試験環境下では、ひずみと温度は一定と言える環境下である。

b) 光ファイバセンサー

被覆種類の異なる光ファイバセンサーとして、以下に示す二種類の光ファイバ(どちら も汎用のシングルモードファイバー)を用意した。太径ファイバは、PVC 被覆、外径 900 ミクロン(図 2.3-332)、細径ファイバは、UV 被覆、外径 500 ミクロン(図 2.3-333)と した。

ベントナイトを模擬したゴム材に設置した様子を図 2.3-334 に示す。



図 2.3-332 太径光ファイバ



図 2.3-333 細径光ファイバ



図 2.3-334 軟質ゴム上への光ファイバセンサーの配置

c)試験方法

分布型光ファイバセンサーの計測によれば、空間分解能を任意に変更することが可能 である。2cm あるいは5cm などの高い空間分解能を実現することもできるため、供試体 そのもののサイズを小さくすることも可能である。しかし、供試体端部の影響(温度、ひ ずみや曲げの状況など)を極力排除するためには、供試体をなるべく大きくして、実際に 観測したい領域を十分に確保する必要があるため、直径 300mm の供試体用の試験装置と した。

通水試験装置を図 2.3-335 に示す。加圧板を手回しのスクリュージャッキで締め固める

ことができる。



図 2.3-335 通水試験装置

ベントナイト供試体部の上部の加圧板と、反力をとる上板のあいだにはロードセル (200kN)を設置して、データロガー(図 2.3-336)にて荷重を計測できるようになって いる。試験機器の配置状況を図 2.3-337 に示す。



図 2.3-336 データロガー (圧力試験)



図 2.3-337 試験機器配置状況

準備試験として、面圧センサーでの参照データの取得、試験装置の偏圧の確認を実施した。このセンサーは動的な面圧分布の変化を測定することが可能であり、10kN~最大130kNまでの条件にて、測定し、偏圧の確認を行った(図2.3-338~図2.3-340)。ジャッキ外周部の圧力のかからない範囲など、本試験へのフィードバックを行うこととした。



図 2.3-338 面圧センサー設置状況



図 2.3-339 偏圧測定状況


図 2.3-340 偏圧確認状況

ベントナイト供試体へ通水をしながら、光ファイバセンサーでひずみ分布を計測した。 計測は PPP-BOTDA 方式及び TW-COTDR 方式で行った。その計測パラメーターを表 2.3-150~表 2.3-151 に示す。

距離レンジ	50 m
位置分解能	2 cm
サンプリング間隔	1 cm
加算回数	2^{10}
周波数掃引範囲	7MHz (10.5~10.92 GHz)
掃引周波数ステップ	$0.25 \mathrm{~MHz}$
周波数掃引回数	61
計測時間 (単発)	約 120 秒

表 2.3-150 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(圧力試験)

表 2.3-151 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(圧力試験)

距離レンジ	50 m
位置分解能	2 cm
サンプリング間隔	1 cm
加算回数	2^{10}
周波数掃引範囲	1000 MHz (194~195.2 GHz)
掃引周波数ステップ	$0.25 \mathrm{~MHz}$
周波数掃引回数	1201
計測時間 (単発)	約 240 秒

(b) 試験結果

図 2.3-341 のような膨潤圧試験装置を用いて、500 µ m と 900 µ m の光ファイバを並列 に並べて測定を行った。 それぞれ得られた計測値の差から、ひずみ量を算出しグラフ化した結果を図 2.3-342 に 示す。

偏圧のないジャッキ中央部のデータを用いてひずみと圧力の関係を示している。微小 ではあるが、圧力増加に伴うひずみの増加を検知している結果となった。



図 2.3-341 膨潤圧試験装置



図 2.3-342 圧力とひずみの関係

(c) まとめ

光ファイバセンサーによって、温度分布やひずみ分布計測を実施、検証を進めてきた。 合わせて圧力分布を実現できれば、低透水層の偏膨潤を把握し、低拡散層の変状が発生す る前の予兆について確認するなど、多面的なモニタリングが期待できる。

そこで、光ファイバ周囲の圧力の影響を、被覆状態(被覆厚、被覆材料)の異なる光フ ァイバを用いて実験的に確認した。ベントナイトを模擬した軟質ゴム材料上に被覆状態 の異なる二種類の光ファイバを敷設しジャッキによる加圧試験を行った結果、二種類の ひずみ計測結果の差から、圧力の定性的な上昇傾向を確認することができた。しかしなが ら、そのひずみの数値は 20 µ 程度であり、極めて微小な範囲での変動となり、圧力の定 量化とともに更なる課題と考える。 d. まとめとモニタリング計画へのフィードバック

温度分布やひずみ分布の計測だけでなく、圧力分布計測の可能性について実験的に検 証した。周囲の圧力に対する光ファイバの拘束条件が異なる二種類のケーブルを併設し、 その計測結果の差が、周囲の圧力変化と相関があることを実験的に確認した。

現状では、その可能性が確認されたのみであり、さらに数 100kPa 以上の圧力差での検 証に留まり、さらなる研究開発を通じてそのメカニズムの解明が望まれる。また、実際に 原位置に適用するためには光ファイバセンサーケーブルの開発も不可欠であり、そのう えで適用範囲を明確にする必要がある。

設定条件	モニタリング計画例
圧力(変化)分布の計測	(被覆などが異なる)2条の光ファイバが 併設されたケーブルを利用する

表 2.3-152 圧力計測を用いたモニタリング計画例

3) 敷設試験

光ファイバセンサーによって、ひずみ分布を計測するためには、対象構造物との一体性 を確保して、対象構造物に生じた変形やひび割れなどに伴う変化を光ファイバセンサー に伝達する必要がある。これまで、セメント系材料バリア(コンクリート)表面のひび割 れを検知することを主な目的に、光ファイバセンサーを低拡散層表面に接着剤を用いて 固定することを想定してきた。しかし、接着剤による低拡散層〜光ファイバセンサーの付 着が、長期的に維持されることは考えにくい。そこで、接着剤による低拡散層への付着に 期待しない光ファイバセンサーの敷設方法を検討するための敷設試験を実施した。

あわせて、光ファイバセンサー設置にあたっての基礎的なバックデータの蓄積を目的 として、施工性試験と固定方法確認試験を実施した。

a. 施工性試験

光ファイバセンサーの設置位置として、低拡散層表面が想定されている。施工手順を考 慮すれば、既に低拡散層表面に光ファイバが配置された状態で、低透水層の吹付施工をす る必要がある。吹付施工に対する耐久性を確認することは、光ファイバによる機能確認モ ニタリング実現性を確認するうえで重要な点である。そこで、光ファイバ上にベントナイ ト吹付施工を行い、その前後で光ファイバに断線などがみられないかどうか、実験的に確 認した。

試験体は、コンクリート二次製品に接着剤を用いて光ファイバセンサーを固定したものである(図 2.3-343~図 2.3-344)。試験体に吹付施工をしながら、OTDR 装置によって試験体の光ファイバセンサーの光の透過損失量(図 2.3-283 参照)を確認し、変化がないかどうかを確認した(図 2.3-345~図 2.3-346)。その結果、ひずみセンサーケーブル(図 2.3-253 図 2.3-254~図 2.3-254 参照)はおろか、外径 0.9mmの光ファイバ芯線に

ついても、センサーは破断することなく、透過損失量の有意な変化もみられなかった(図 2.3-347)。



図 2.3-343 施工性試験の試験体(ひずみセンサーケーブル)



図 2.3-344 施工性試験の試験体 (光ファイバ芯線)



図 2.3-345 施工性試験の吹付施工



図 2.3-346 吹付後の試験体



図 2.3-347 吹付前後の光透過損失の変化

b. 固定法確認試験

光ファイバセンサーを低拡散層に固定する方法として、光ファイバを間欠的に固定す るか、あるいは全長にわたって固定するか、に大別される。前者は手間がかからずに施工 が容易であるとともに、ひび割れなどが生じた場合にも光ファイバにかかるひずみが鈍 化されるために切断されにくい利点がある。一方、後者は施工手間がかかり、ひび割れが 生じた場合に切断の恐れが若干大きくなることが懸念されるが、微小なひび割れ発生も 鈍化することなく感度良く検知できる利点がある。そこで、両者の差を確認するために、 図 2.3-348 に示す実験構成で比較を行った。



図 2.3-348 固定法確認試験の構成

二枚の鋼板上に光ファイバを間欠(300mm 間隔)並びに全長固定をしたうえで、鋼板 の下間隔を広げながら、ブリルアン散乱光によるひずみ分布計測を行った結果を図 2.3-349 並びに図 2.3-350 に示す。間欠固定では固定間隔のあいだでほぼ一定のひずみを 示しているのに対し、全長固定ではピーク状のひずみ分布を示していることがわかる。感 度の高さを考慮し、全長固定による方法で実規模模擬施設におけるひずみセンサーケー ブルを固定することとした。なお、同実験構成でひび割れ幅を 4mm まで広げた場合にお いても、全長固定で光ファイバが切れることはなかった。



図 2.3-349 固定法確認試験の結果(間欠固定)



図 2.3-350 固定法確認試験の結果(全長固定)

c. 敷設試験

光ファイバセンサーによって、ひずみ分布を計測するためには、対象構造物との一体性 を確保して、対象構造物に生じた変形やひび割れなどに伴う変化を光ファイバセンサーに 伝達する必要がある。これまで、セメント系材料バリア(コンクリート)表面のひび割れ を検知することを目的に、光ファイバセンサーを低拡散層表面に接着剤を用いて固定する ことを想定してきた。しかし、接着剤による低拡散層~光ファイバセンサーの付着が、長 期的に維持されることは考えにくい。そこで、接着剤による低拡散層への付着に期待しな い光ファイバセンサーの敷設方法を検討するための試験を実施した。

(a) 試験方法

a)概要

敷設試験のイメージを図 2.3-351 に示す。低透水層(ベントナイト)とセメント系材料 バリア(コンクリート)に挟まれるように、光ファイバセンサーを配置することを仮定す る。低透水層の締固め時に応じた圧力、またその後の膨潤圧によって、光ファイバセンサ ーが低拡散層に押し付けられる。その圧力によって、光ファイバセンサー~低拡散層のあ いだに摩擦力が発生するため、低拡散層の挙動を捉えられると考えられる。また、その圧 力の大きさによって、摩擦力が異なり、ひずみ計測の感度に影響を及ぼすことが想像され る。



本試験では、上図を模擬した実験を行い、接着剤による付着がない場合にひび割れ検知が可能かどうかを実験的に確認する。

b) 光ファイバセンサー

本試験では、二次被覆と光ファイバが一体化した一芯のセンサーケーブル、OFS ケーブル (図 2.3-352~図 2.3-353; OFS ケーブル C80920、1.8×3.5mm)、エンボスケーブル (図 2.3-354~図 2.3-355、1.7×4.3mm) 2 種類を用いて実験を行う。



図 2.3-352 OFS ケーブル断面図



図 2.3-353 OFS ケーブル



鋼線 (テンションメンバー) 図 2.3-354 エンボスケーブル断面図



図 2.3-355 エンボスケーブル

エンボスケーブルについては、被覆材の表面形状の違いによる摩擦力の影響ついて検 討するため、図 2.3-356 のようにケーブル表面の凹凸形状をやすりを用いて加工し、物性 値は同一、表面形状のみが異なるケーブルとした。



図 2.3-356 エンボスケーブル加工前後

c)試験方法

本試験では、図 2.3-357~図 2.3-358 に示すような摩擦試験機を用いて試験を行う。 試験装置で付与する圧力を変えながら試験を行い、摩擦力向上策(凹凸被覆)の効果、 隙間開閉の繰返しによる影響などを確認する。



図 2.3-357 試験機の構成 (摩擦試験機)



図 2.3-358 摩擦試験機

図 2.3-359~図 2.3-360 に示すように試験機の中央部に光ファイバを敷設する。 図 2.3-361 のような垂直加圧用油圧ポンプを用いて加圧し、試験機右側、図 2.3-362 に 示す水平引張機構を駆動させることで供試体部分の隙間開閉を発生させる。



図 2.3-359 光ファイバ供試体設置部



図 2.3-360 光ファイバ敷設状況



図 2.3-361 垂直加圧用油圧ポンプ



図 2.3-362 水平引張機構部

ひずみ分布計測は光ファイバ計測機(図 2.3-363~図 2.3-364; NEUBRESCOP)を用いて、PPP-BOTDA 方式及び、TW-COTDR 方式で行った。

また、参照データとして、データロガー(図 2.3·365)により、垂直荷重(kN)、垂直 変位(mm)、水平荷重(kN)、水平変位(mm)を計測した。



図 2.3-363 光ファイバ計測機 (NEUBRESCOP)



図 2.3-364 光ファイバ計測機画面



図 2.3-365 データロガー (敷設試験)

試験は効率や再現性を考慮し、ベントナイト・コンクリートをそれぞれ模擬した材料に て実施した。

ベントナイトを模擬した材料としては、硬さの異なる3種類のゴム材料を使用した。

クロロプレンゴムが最も硬く、順にシリコン材、シリコンスポンジ材と軟らかい材質で ある。また、今回の試験荷重を付与した後、除荷により全て元の形状に戻ることを事前に 確認した(図 2.3-366~図 2.3-371)。



図 2.3-366 クロロプレンゴム



図 2.3-367 クロロプレンゴムの特性(準備試験結果)



図 2.3-368 シリコン材



図 2.3-369 シリコン材の特性(準備試験結果)



図 2.3-370 シリコンスポンジ材



図 2.3-371 シリコンスポンジ材の特性(準備試験結果)

ひずみ分布計測は、PPP-BOTDA 方式及び TW-COTDR 方式で行った。このときの計測 パラメーターを表 2.3-153~表 2.3-154 に示す。

距離レンジ	50 m	
位置分解能	2 cm	
サンプリング間隔	1 cm	
加算回数	2^{10}	
周波数掃引範囲	$7 \mathrm{MHz}$	(10.5~10.92 GHz)
掃引周波数ステップ	$0.25~\mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	61	
計測時間 (単発)	約 120 秒	

表 2.3-153 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(敷設試験)

距離レンジ	50 m
位置分解能	2 cm
サンプリング間隔	1 cm
加算回数	2^{10}
周波数掃引範囲	1000 MHz (194~195.2 GHz)
掃引周波数ステップ	$0.25 \mathrm{~MHz}$
周波数掃引回数	1201
計測時間(単発)	約 240 秒

表 2.3-154 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(敷設試験)

(b) 試験結果

a) 接着剤の使用の有無について

図 2.3-372 のグラフは、摩擦試験機にて負荷する圧力を増加させながら光ファイバにて ひずみを測定した結果である。

使用した光ファイバは凹凸形状のエンボスケーブル、隙間中央位置でのひずみ変化を 表している。得られたデータからは、接着剤を使用しない場合でも、圧力の増加に伴うひ ずみの増加が確認できた。



図 2.3-372 接着されていない光ファイバのひずみ変化

図 2.3-373 のグラフは、隙間を徐々に広げた際の隙間中央のひずみを表している。 隙間の増加に伴うひずみの増加傾向が確認できる。



図 2.3-373 隙間の増加に伴うひずみ変化

b) 摩擦力の影響について

図 2.3-374 のグラフは、光ファイバの被覆材の表面形状の違いによる摩擦力の影響について、試験を行った結果である。

光ファイバセンサーにより隙間発生の検知は可能であるものの、今回試験に使用した被 覆の凹凸程度では両者の感度に有意な差は認められない結果となった。



図 2.3-374 被覆材の表面形状の影響

c) 隙間開閉の繰返しの影響について

図 2.3-375 のグラフは、隙間開閉の繰返しの影響についての結果である。 隙間の増加に伴い、ひずみは単調増加し、隙間をゼロに戻すことでひずみもほぼゼロにな ることが確認できた。



図 2.3-375 隙間開閉の繰返しの影響

(c) まとめ

セメント系材料バリアのひび割れを検知するために、これまでは光ファイバセンサーを 表面に接着剤を用いた試験を行ってきた。その結果、光ファイバセンサーによるひずみ分 布計測結果から、目視レベル以下のひび割れ幅についても検知できることを確認している。 一方、センサー固定のための接着剤による付着力が、長期的に維持されることは考えにく い。

そこで、センサー固定のための接着剤がない場合に、ひび割れ検知が可能かどうかを実 験的に確認した。その結果、光ファイバセンサーが計測対象に対して押し付けられるよう な圧力を受けることによって、接着剤を使わずともひび割れ検知ができる可能性を確認し た。また、その感度は圧力によって異なるものの、ベントナイト膨潤圧想定値、最大 1.5MPa よりも小さな圧力範囲で検知が可能であった。低透水層の締固め圧や膨潤圧が、センサー と低拡散層の付着力に寄与することが示された。

接着剤が無い場合のひび割れ検知性能は、光ファイバセンサーと計測対象の摩擦に大き く依存すると考えられるため、光ファイバセンサーの表面形状(摩擦力向上のための凹凸 形状など)や圧力の大きさなどの影響について検討を進めた。

得られた結果を以下に示す。

- ✓ 摩擦試験機にて負荷する圧力を増加させながら模擬ひび割れを与えて、光ファイバに てひずみを測定した結果、接着剤を使用しない場合でも、圧力の増加に伴うひずみの 増加が確認できた。しかしながら、TW-COTDR 方式に特有の相関不良による異常値 については、異なる計測方式を比較参照し、その妥当性を判断する必要がある。 ま た、模擬ひび割れの影響範囲は圧力に関わらずほぼ一定であり、試験装置のサイズが 影響を与えている可能性もあり、さらなる検証が望まれる。
- ✓ 光ファイバの被覆材の表面形状の違いによる摩擦力の影響について、試験を行った結果、光ファイバセンサーにより隙間発生の検知は可能であるものの、今回試験に使用

した被覆の凹凸程度では両者の感度に有意な差は認められない結果となり、今後の課 題となった。

 ✓ 隙間開閉の繰返しの影響について試験を行った結果、隙間の増加に伴い、ひずみは単 調増加し、隙間をゼロに戻すことでひずみもほぼゼロになることが確認できた。

なお、現実的には、光ファイバセンサーの敷設時には、一定の固定をする必要性はあ る。その固定方法(全長固定、間欠固定)については、ひび割れなどの発生時における 切断リスクも考慮のうえで検討すべきであり、こうした検討は課題として残る。

(3) 原位置試験

分布型光ファイバセンサー技術のうち、温度計測とひずみ計測について、実環境下におけ る検証を目的に模擬施設を利用した原位置試験を行った。具体的には、表 2.3-155 に示す 4 箇所に光ファイバセンサーを設置(2017年10月)し、その後、断続的にひずみや温度の連 続計測を実施した[29]。また、強制的にひび割れを発生させるひび割れ試験を実施(2018年 10月に上部低拡散層と手前コンクリートピット、2019年10月に上部低拡散層)した。

位置	計測項目	計測用光ファイバ	計測方式	対象エリア	実施時期
アクセス坑道沿い	温度	温度計測用光	No.1、3	約 1200m 長	2018.1~2019.10
壁面		ファイバセン	(表		
		サーケーブル	2.3-124)		
側部低拡散層(左	ひずみ	ひずみ計測用	No.1、3	約 2.6×	2018.1~2019.10
側)表面		光ファイバセ	(表	$8.0m^2$	
		ンサー	2.3 - 125)		
上部低拡散層表面	ひずみ	ひずみ計測用	No.1、3	約 10.2×	2018.1~2019.10
		光ファイバセ	(表	$2.1 \mathrm{m}^2$	
	ひび割れ	ンサー	2.3 - 125)		2018.10
					2019.10
手前コンクリート	ひずみ	ひずみ計測用	No.1、3	約 7.5×	$2018.1 \sim 2019.10$
ピット表面	ひび割れ	光ファイバセ	(表	$5.1 \mathrm{m}^2$	2018.10
		ンサー	2.3-125)		2019.10

表 2.3-155 原位置試験

- 1) 原位置試験の概要
 - a. 計測システム

光ファイバセンサー、光計測器 (Neubrex 社製 NBX-7020)、データ処理装置より構成 される計測システムの構成を図 2.3-376 に、実際の原位置試験における計測システムの 設置状況を図 2.3-377 にそれぞれ示す。





図 2.3-377 計測システム設置状況

本計測システムでは、表 2.3-126 にあるようにブリルアン散乱光とともにレイリー散 乱光を用いた計測方式も適用可能である。本研究においては、ブリルアン散乱光による計 測方式のうち PPP-BOTDA (Pulse Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Anaysis) [30]と、レイリー散乱光による計測方式のうち TW-COTDR (Tunable Wavelength Coherent Optical Time Domain Reflecmetry) [31]でひずみ等を計測する。それぞれの方 式については 2.3.3 (1) 2) 参照のこと。

原位置試験で使用した温度計測用光ファイバセンサーケーブル (OFS 社製 CX80766、 外径 8.5mm) については、2.3.3 (1) 4) b. 参照のこと。同センサーケーブルは、2017 年 10 月にアクセス坑道沿い壁面に敷設した。

ひずみ計測用光ファイバセンサー (OFS 社製 C80920、1.8×3.5mm) については、2.3.3 (1) 4) b. 参照のこと。同センサーは、2017 年 10 月に側部低拡散層、上部低拡散層、手 前コンクリートピットに設置した。

b. 光ファイバセンサーなどの設置

実規模模擬施設には、表 2.3-155 に示すように温度計測用光ファイバセンサーケーブ ルを一箇所、ひずみ計測用光ファイバセンサーを三箇所、それぞれ設置した。各箇所にお いては、光ファイバセンサーでループを構成し、その両端を計測器に接続した(PPP-BOTDA 方式を実現するため、図 2.3-376 参照)。

温度分布計測用光ファイバセンサーケーブル(図 2.3・255~図 2.3・256; OFS 社製 CX80766)は、計測小屋からコンクリートピット部で折り返して坑口まで、壁面に既設の 吊りワイヤーを利用して架設した。センサーケーブルのうちの二芯を用いて、坑口部のケ ーブル端部で当該二芯を接続することで、全長約 2500m の光ファイバでループを構成し た(PPP-BOTDA 方式を実現するため、図 2.3・376 参照)。ケーブルの配置を図 2.3・378 に、架設状況を図 2.3・379~図 2.3・380 にそれぞれ示す。また、温度分布計測用の参照計 器として、坑道沿いに約 200m 間隔で温度計を設置した。温度計の測温部は、温度センサ ーケーブル部に固定した。温度計の仕様を表 2.3・156 に、また設置状況を図 2.3・381 に それぞれ示す。



図 2.3-378 温度センサーケーブルと温度計の配置



図 2.3-379 温度センサーケーブルの架設状況



図 2.3-380 温度センサーケーブルの架設状況

メーカ・型番	T&D・おんどとり TR-71wf	単三×2本
測定対象	温度 2ch	
測定範囲	-40~+110°C	
精度	± 0.3 °C	

表 2.3-156 温度計の主な仕様



図 2.3-381 温度計の設置状況

ひずみ分布計測用光ファイバセンサーケーブル (図 2.3-253~図 2.3-254; OFS 社製 C80920) は、エポキシ系接着剤 (スリーエム製 DP-420; 図 2.3-382) を用いて、対象表 面に全長固定した。



図 2.3-382 使用接着剂

側部低拡散層(左側)には、現状露出している範囲に4本のひび割れが存在しており、 このうち試験空洞最奥の1本を除く3本のひび割れを計測対象として、坑内温度・湿度 の変動に伴うひび割れ幅の変動を計測した。

側部低拡散層(左側)の光ファイバセンサー設置位置を図 2.3-383 に、設置状況を図 2.3-384 にそれぞれ示す。既設ひび割れに直交するように、水平方向に 8m 長の直線部 4 本から成る光ファイバセンサーの構成とした。また、既設ひび割れの開口変位計測にクリ ップゲージを追加で設置した(2018年1月)。開口変位計測のためのクリップゲージとデ ータレコーダの仕様を表 2.3-157~表 2.3-158 に、また設置状況を図 2.3-385~図 2.3-386 にそれぞれ示す。



図 2.3-383 側部低拡散層(左側)側面図



図 2.3-384 側部低拡散層への光ファイバ設置状況

表 2.3-157 クリップゲージの主な仕様

メーカ・型番	共和電業・DTC-A-2
定格容量	2mm
非直線性	±1%RO 以内
定格出力	2.5mV/V+20%~-10%

表	2.3 - 158	データロガーの主な仕様
---	-----------	-------------

メーカ・型番	共和電業・RMH-310A	専用 9V バッテリ駆動
チャンネル数	10	
ひずみ測定範囲	±20000×10 ⁻⁶ ひずみ	
ひずみ分解能	1×10-6ひずみ	
ひずみ測定精度	$\pm 0.1\%$ FS	



図 2.3-385 クリップゲージの設置状況



図 2.3-386 データロガーの設置状況

上部低拡散層には、300mm 間隔の格子状に光ファイバセンサーを設置した。坑内温度・ 湿度の変動に伴うひずみ分布の変動を計測するとともに、ひび割れ試験時には強制的な ひび割れの発生検知のための計測を行った。

上部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置を図 2.3-387 に、設置状況を図 2.3-388 図 2.3-386~図 2.3-389 にそれぞれ示す。対象表面には格子状に光ファイバセンサーが 交差するため、既設ひび割れと直交する長辺方向の光ファイバセンサーを先に設置した 後、短辺方向のセンサーを設置した。



図 2.3-387 上部低拡散層平面図



図 2.3-388 上部低拡散層への光ファイバ設置状況



図 2.3-389 上部低拡散層への光ファイバ設置状況

手前コンクリートピット前面には、KKシート(900×900mm/シート)工法による打継

ぎ処理がなされており、表面には図 2.3-390 に示すような凹凸が形成されている。また、 鉄筋コンクリートで、鉛直・水平ともに 150mm 間隔で鉄筋が配筋されている。人為的な ひび割れ発生のために静的破砕剤を使用する際には、コア削孔する必要がある。コア削孔 時には鉄筋と光ファイバセンサーの両者を避ける必要があるため、光ファイバセンサー の設置間隔は 300mm とした。



図 2.3-390 KK シートの凹凸形状と手前コンクリートピット表面の状況

手前コンクリートピットには、上述の上部低拡散層と同様に 300mm 間隔の格子状に光 ファイバセンサーを設置した。坑内温度・湿度の変動に伴うひずみ分布の変動を計測する とともに、ひび割れ試験時には強制的なひび割れの発生検知のための計測を行った。

手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置位置を図 2.3-391 に、設置状況を 図 2.3-392~図 2.3-393 にそれぞれ示す。対象表面には格子状に光ファイバセンサーが 交差するため、作業性の観点から水平方向の光ファイバセンサーを先に設置した後、垂直 方向のセンサーを設置した。



図 2.3-391 手前コンクリートピット正面図



図 2.3-392 手前コンクリートピットへの光ファイバ設置状況



図 2.3-393 手前コンクリートピットへの光ファイバ設置状況

2) 温度計測

アクセス坑道沿いの約 1200m 長にわたって架設された温度計測用光ファイバセンサーケ ーブルを用いて連続的な計測を行った。

a. 計測概要

図 2.3-378 に示したように、温度計測用光ファイバセンサーケーブルは、計測小屋か らコンクリートピット部で折り返して坑口まで、壁面に既設の吊りワイヤーを利用して 架設した。センサーケーブルのうちの二芯を用いて、坑口部のケーブル端部で当該二芯を 接続(図 2.3-394) することで、光ファイバでループを構成している(全長約 2750m)。 2017 年 10 月に温度センサーケーブル架設して以降、計測システムを坑内に持ち込むご とにケーブルを繋ぎこみ、断続的に連続計測を実施した。

また、温度計は常設し、適宜データの吸い上げを行った。その様子を図 2.3-395 に示 す。



図 2.3-394 温度センサーケーブル端子箱(坑口部)



図 2.3-395 温度計のデータ回収作業

b. 参照用機器の結果

温度計(坑口部、TD200、TD400、TD600、TD800、TD1000、コンクリートピット部 の計7カ所)を用いて連続計測した結果を図 2.3-396~図 2.3-402 に示す。それぞれの 温度計はふたつの計測点を有するため、各図内にはどちらもプロットしている。ふたつの 計測点の計測位置に違いはないため、両者に有意な差はみられない。温度計は一時間間隔 で連続計測を行ったが、機器設定を誤った(計測頻度の設定が短すぎたために内部の記録 容量が足りずに上書きしてしまった)ために 2018 年3月~6月のあいだのデータが欠損 してしまった。こうしたデータ欠損期間があるものの、季節による温度変化をとらえるこ とができた。

坑口部は、外気温の影響を最も受けるため、温度変化が一番大きく、その温度変化は-5 ~+20℃にまでわたる。坑口から坑内に向かって徐々に温度変化は小さくなり、TD800 で は+11~+16℃程度である。それに対して、コンクリートピット部では+9~+18℃と温度 変化は大きくなるが、これは坑口部から送風機と風管を用いてコンクリートピット部に 外気が送られているためと考えられる。















c. 光ファイバセンサーの結果

分布型光ファイバセンサー (ブリルアン (PPP-BOTDA) 方式、レイリー (TW-COTDR) 方式) により全長約 2750m にわたって連続計測した。このときの計測パラメーターを表 2.3-159~表 2.3-160 に示す。

	温度	
	(Ch.7、8)	
距離レンジ	3,000 m	
位置分解能	50 cm	
サンプリング間隔	20 cm	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	400 MHz	(10.60~11.00GHz)
掃引周波数ステップ	$5 \mathrm{~MHz}$	
周波数掃引回数	81	
計測時間 (単発)	約170秒	
計測間隔	180分	常設時
計測開始日時	2018/1/23 9:56	

表 2.3-159 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター (アクセス坑道)

表 2.3-160 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(アクセス坑道)

	温度	
	(Ch.7、8)	
距離レンジ	3,000 m	
位置分解能	50 cm	
サンプリング間隔	20 cm	
加算回数	2^{14}	
周波数掃引範囲	$300~{ m GHz}$	(194.0~194.3THz)
掃引周波数ステップ	$200 \mathrm{~MHz}$	
周波数掃引回数	1,501	
計測時間(単発)	約 20 分	
計測間隔	180分	常設時
計測開始日時	2018/1/23 9:59	

2018年1月23日の結果を初期値としたときの、2019年10月までの任意時点における温度分布計測結果を図2.3・403~図2.3・407に示す。ブリルアン方式における結果によれば、計測期間を通じて安定して温度変化を得ることができている。一方、レイリー方式における結果によれば、2018年3月時点からばらつきが大きく、2018年11月以降については有意な結果を示すようなものではなかった。レイリー方式では初期の計測結果をもとに、散乱光スペクトルパターンのマッチングを行っているが、初期値からの変化量が大きいためにマッチングがとれなかったためである。微小な変化の計測には効果を発揮するが、大きな変化量が生じた場合に課題があるレイリー方式の特徴が顕在化した。





温度分布計測結果のグラフは計測システムを原点とした光ファイバ上の座標系であり、 実際には光ファイバはアクセス坑道に沿って坑口で折り返しているため、グラフの位置 は原点から計測室~コンクリートピット~坑口~コンクリートピット~計測室を直線状 に示している。現地アクセス坑道内の位置と、光ファイバ上の座標系とのおおよその位置 関係を表 2.3-161 に示す。本結果は、光ケーブル架設後に、それぞれの位置を冷却前後

アクセス坑道内位置	光ファイバ位置	
	往路	復路
坑口部	1,368.573 [m]	1,373.912 [m]
TD200	1,156.254	1,586.436
TD400	944.141	1,798.755
TD600	740.241	2,002.655
TD800	530.797	2,212.304
TD1000	339.628	2,405.321
コンクリートピット部	149.075	2,594.231

表 2.3-161 アクセス坑道と光ファイバ位置の関係

以下に、往復路を構成する光ファイバで得られた各位置における温度計測結果を示す。

坑口部における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3-405に示す。 ここは、光ファイバセンサーケーブル端部で当該二芯を融着接続しているために、保護用 の中継箱を設けている。

往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3-406~図 2.3-407 に示す。温度計の計測結果は絶対温度であ るが、光ファイバの計測結果は 2018 年 1 月 23 日時点を初期値とした相対的な温度変化 である。坑口部のために、風雨の影響を受けやすく短期的な温度変化が激しいが、ブリル アン方式の光ファイバは概ね温度計と同様の傾向を示した。しかし、レイリー方式の光フ ァイバではばらつきが大きかった。



図 2.3-405 温度計などの設置状況(坑口)





TD200 における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3-408 に示す。 往路と復路の光ファイバの計測結果 (ブリルアン方式・レイリー方式) を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3-409~図 2.3-410 に示す。坑口部よりも温度変化は緩やかに なっており、ブリルアン方式による光ファイバは概ね温度計による傾向と同様であった。 しかし、坑口部同様にレイリー方式の光ファイバではばらつきが大きかった。



図 2.3-408 温度計などの設置状況 (TD200)



図 2.3-409 温度計測結果 (TD200; ブリルアン方式)


TD400における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3・411 に示す。 往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3・412~図 2.3・413 に示す。坑口部や TD200 と同じように、ブ リルアン方式による光ファイバは概ね温度計による傾向と同様であった。レイリー方式 による光ファイバではばらつきが大きいが、坑口部や TD200 よりも温度計との相関がみ られた。



図 2.3-411 温度計などの設置状況 (TD400)



図 2.3-412 温度計測結果 (TD400; ブリルアン方式)



TD600における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3・414に示す。 往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3・415~図 2.3・416に示す。他の箇所と同じように、ブリルアン 方式による光ファイバは概ね温度計による傾向と同様であった。レイリー方式による光 ファイバは一時的にばらつきがあるものの、他の箇所よりも温度計と高い相関がみられ た。



図 2.3-414 温度計などの設置状況 (TD600)



図 2.3-415 温度計測結果 (TD600; ブリルアン方式)



TD800における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3・417に示す。 往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3・418~図 2.3・419に示す。他の箇所と同じように、ブリルアン 方式による光ファイバは概ね温度計による傾向と同様であった。レイリー方式による光 ファイバでは TD600よりもばらつきが大きいが、坑口部や TD200よりも温度計との高 い相関がみられた。



図 2.3-417 温度計などの設置状況 (TD800)



図 2.3-418 温度計測結果 (TD800; ブリルアン方式)



TD1000 における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3-420 に示す。

往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3・421~図 2.3・422 に示す。ブリルアン方式による光ファイバ は概ね温度計による傾向と同様であった。レイリー方式による光ファイバではばらつき が大きいが、坑口部や TD200 よりも温度計との相関がみられた。



図 2.3-420 温度計などの設置状況 (TD1000)



図 2.3-421 温度計測結果 (TD1000; ブリルアン方式)



ピット部における温度計や光ファイバセンサーケーブルの設置状況を図 2.3-423 に示 す。

往路と復路の光ファイバの計測結果(ブリルアン方式・レイリー方式)を、同じ位置の 温度計結果とともに図 2.3・424~図 2.3・425 に示す。他の箇所と同じように、ブリルアン 方式による光ファイバは概ね温度計による傾向と同様であった。しかし、坑口部同様にレ イリー方式の光ファイバではばらつきが大きかった。



図 2.3-423 温度計などの設置状況 (ピット部)



図 2.3-424 温度計測結果 (ピット部;ブリルアン方式)



d. まとめとモニタリング計画へのフィードバック

アクセス坑道沿いに光ファイバセンサーケーブルを敷設して、全長約 2750m における 温度変化の計測を断続的ながらも長期的にブリルアン方式とレイリー方式で行った。ブ リルアン方式光ファイバによる温度計測では、温度計と高い相関があることを確認でき た。一方、レイリー方式による温度計測では、ばらつきが大きかった。

光ファイバセンサーそれぞれの方式による温度計測結果と、温度計との差の標準偏差 を算出し、光ファイバ上の位置ごとに示した結果を図 2.3・426 に示す。ブリルアン方式 による標準偏差は TD800 で最小の約 1.2℃を示し、坑口部やピット部で大きかった。温 度変化そのもの変化が大きいこととともに、風などの影響で生じるひずみ変化をセンサ ーケーブルで完全に縁切りできなかったためと考えられる。光ファイバセンサーケーブ ルの構造などだけでなく敷設方法に改善の余地がある。一方、レイリー方式によるばらつ きが大きく、温度計との差の標準偏差も大きかった。一部を除き、総じて光ファイバ上の 距離が離れるほど増加するようであった。前述したように初期値から比べて変化量が大 きいことによってマッチングが取れなかっただけでなく、距離による影響がある可能性 が考えられる。



図 2.3-426 各箇所の温度計と光ファイバの標準偏差

現地環境下においても、適切な光ファイバセンサーケーブルを適切に敷設し、ブリルア ン方式を用いることによって標準偏差 1℃程度で温度変化を計測できることを確認でき た。特に、ラマン方式と異なりブリルアン方式では、光ファイバにひずみが付与されない ようなケーブル構造と敷設方法が重要である。また、他方式同様に、温度と位置のキャリ ブレーションは実用上不可欠である。つまり、計測物理量は温度変化なので、絶対温度を 計測するためには、初期などにおいて別途温度計と比較する必要がある。また、敷設後に は現地座標系と光ファイバ座標系を揃えるために、局所的に加温や冷却をして計測する 作業が必要である。

設定条件	モニタリング計画例
絶対温度の計測	光ファイバセンサー設置後、 ・温度のキャリブレーションを行う ・位置のキャリブレーションを行う

表 2.3-162 温度計測を用いたモニタリング計画例

3) ひずみ計測

模擬施設のうち、側部低拡散層、上部低拡散層、手前コンクリートピットのそれぞれの 表面に全長固定したひずみ計測用光ファイバセンサーを用いて連続的な計測を行った。

a. 側部低拡散層

側部低拡散層の左側の約 2.6×8.0m²の範囲内において、ひずみ計測用光ファイバセン サーを全長固定して、連続的な計測を行った。同範囲の中央部付近には3本の0.1~0.3mm 幅程度の既設ひび割れが存在する。

(a) 計測概要

側部低拡散層には、既設ひび割れに直交するように水平方向に 8m 長の直線部 4 本か ら成る光ファイバセンサーを設置した。直線部は全長固定して、折り返しなどの曲線部は ぐらつきを抑えるために間欠固定した。側部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置を 図 2.3-427 に示す。また、既設ひび割れの開口変位量を計測するために、最上部の光ファ イバセンサー付近にクリップゲージを計 3 個設置した。クリップゲージとデータレコー ダの仕様を表 2.3-163~表 2.3-164 にそれぞれ示す。



図 2.3-427 側部低拡散層側面図

	秋 2.5 105 / / / / / / / ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
メーカ・型番	共和電業・DTC-A-2
定格容量	2mm
非直線性	±1%RO 以内
定格出力	2.5mV/V+20%~-10%

表 2.3-163 クリップゲージの主な仕様

表 2.3-164 データロガーの主な仕様

メーカ・型番	共和電業・RMH-310A	専用 9V バッテリ駆動
チャンネル数	10	
ひずみ測定範囲	±20000×10-6ひずみ	
ひずみ分解能	1×10-6ひずみ	
ひずみ測定精度	$\pm 0.1\%$ FS	

(b) 試験結果

側部低拡散層の光ファイバセンサー設置状況を図 2.3-428 に示す。設置から 1.5 年程 度経過したときの様子であるが、特に湿気を帯びた部分でセンサー設置用接着剤の色味 が変化(半透明から黄色)している箇所がみられた。しかし、設置したセンサーが剥がれ ているような様子はみられなかった。



図 2.3-428 光ファイバセンサー設置状況(側部低拡散層; 2018年6月)

側部低拡散層に設置した3つのクリップゲージのデータ回収状況を図 2.3-429に示す。 クリップゲージのケーブルは上部低拡散層に設置したデータロガーまで延伸され、定期 的に USB メモリでデータ回収した。



図 2.3-429 クリップゲージのデータ回収作業

クリップゲージの設置状況を図 2.3-430~図 2.3-431 に示す。クリップゲージのコマ をエポキシ接着剤で固定した後に、クリップゲージを設置したが、夏季になり低拡散層表 面が湿気を帯びるとともにコマが外れた(2018年5月)。湿気を帯びた表面を乾かしてコ マを再設置するなどの復旧を試みたが、何度か落下を繰り返した(2018年6月など)。夏 季における連続的な開口変位量の計測方法は再考が必要である。



図 2.3-430 クリップゲージの状況(2018年6月)



図 2.3-431 クリップゲージの状況 (2018年8月)

全期間におけるクリップゲージの計測結果を図 2.3-432 に、開始直後の一部を拡大し て図 2.3-433 にそれぞれ示す。光ファイバと直交する 3 本の既設ひび割れ(図 2.3-427 の Crack 2~4)の開口変位を示している。2018年1月の設置以来、連続してひび割れ開 口変位を計測していたが、2018年5~6月にかけて前述のようにクリップゲージの落下 が生じ、その後再設置、落下が何度か繰り返された。再設置前後でコマの固定間隔が異な るため、再設置以降の計測結果については定量的な値に連続性はない。図 2.3-433には、 コンクリートピット部の温度計の結果を併記する。既設ひび割れの開口変位が、温度変化 と逆の相関があることがわかる。





図 2.3-433 クリップゲージの計測結果 (一部)

また、2018年10月以降、再設置後のデータを初期値とした結果を、コンクリートピット部の温度計とともに図 2.3-434 に示す。ここでもひび割れ開閉は温度と逆の相関(温度上昇時にひび割れが閉じる)があり、おおよそ-20μm/℃の関係性があった。



側部低拡散層では、分布型光ファイバセンサーにより全長約 380m にわたって連続計 測した。このときの計測パラメーターを表 2.3-165 に示す。

	ひずみ	
	(Ch.1、2)	
距離レンジ	500 m	
位置分解能	10 cm	
サンプリング間隔	5 cm	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	420 MHz	(10.60~11.02GHz)
掃引周波数ステップ	3 MHz	
周波数掃引回数	141	
計測時間 (単発)	約160秒	
計測間隔	180分	常設時
計測開始日時	2018/1/23 11:27	

表 2.3-165 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター (側部低拡散層)

光ファイバ全長におけるブリルアン周波数の計測結果を図 2.3・435 に、側部低拡散層 部分における結果を図 2.3・436 に拡大して示す。設置時にセンサーに導入された張力を 含む結果であり、170~215m 付近が水平方向に 8m 長で設置したセンサー4本分を示して いる。10MHz の周波数変化は 200 μ ひずみ変化に相当するため、設置時にセンサーに導 入された引張ひずみはおよそ 800 μ ひずみ(40MHz)であった。



図 2.3-435 ブリルアン周波数の計測結果(側部低拡散層;全体)



図 2.3-436 ブリルアン周波数の計測結果(側部低拡散層;一部)

2018 年 1 月 23 日昼頃の結果を初期値としたときの発生ひずみを図 2.3-437 と図 2.3-438 に示す。側部低拡散層に設置した水平方向のセンサーのうちの上側 2 本分を図 2.3-437 に、下側 2 本分を図 2.3-438 に示す。それぞれには既設ひび割れ箇所(図 2.3-427 の Crack 2~4) で、局所的なひずみ変化がみられる。当該箇所では、気温上昇とともに負方向に局所的に変化している。逆に、設置箇所部分以外は温度変化と正の相関を有し、気 温上昇とともに正方向に変化している。



図 2.3-438 ひずみ分布の計測結果(側部低拡散層;下側)

既設ひび割れ部の挙動を確認するために、ひび割れの無い箇所のひずみの経時変化と3 箇所の既設ひび割れ箇所(Crack2~4)のひずみの経時変化を図 2.3-439~図 2.3-442に 示す。これらは、側部低拡散層に設置した水平方向のセンサーのうちの1 番上の結果 (175~182m)である。それぞれの図には、光ファイバの計測結果とともにコンクリート ピット部の温度計の計測結果も併記する。ひび割れ無し部では、温度上昇時とともにひず みが上昇している。一方、既設ひび割れ箇所では、温度上昇時にはひずみが低下している。 クラックゲージでみられたように、温度上昇時のひび割れ開口変位の減少をとらえられ ていることがわかる。



図 2.3-439 ひび割れ無し部のひずみの経時変化1(側部低拡散層)



図 2.3-440 既設ひび割れ部2のひずみの経時変化1(側部低拡散層)



図 2.3-441 既設ひび割れ部3のひずみの経時変化1(側部低拡散層)



図 2.3・442 既設ひび割れ部4のひずみの経時変化1(側部低拡散層)

同様に、側部低拡散層に設置した水平方向のセンサーのうちの上から 2 番目の結果 (184~191m)を図 2.3-443~図 2.3-446 に、3 番目の結果(193~200m)を図 2.3-447 ~図 2.3-450 に、4 番目の結果(201~208m)を図 2.3-451~図 2.3-454 に、それぞれ示 す。概して、ひび割れ無し部のひずみが温度と正の相関があり、既設ひび割れ箇所のひず みが負の相関がある傾向を示した。場所によって、温度変化に対する変化量に多少違いが みられた。ひび割れ幅や深さ、温度の差、設置状況による違いなどがその原因として考え られるが、はっきりした理由は不明である。



図 2.3-443 ひび割れ無し部のひずみの経時変化2(側部低拡散層)



図 2.3-444 既設ひび割れ部2のひずみの経時変化2(側部低拡散層)



図 2.3-445 既設ひび割れ部3のひずみの経時変化2(側部低拡散層)



図 2.3-446 既設ひび割れ部4のひずみの経時変化2(側部低拡散層)



図 2.3-447 ひび割れ無し部のひずみの経時変化3(側部低拡散層)



図 2.3-448 既設ひび割れ部2のひずみの経時変化3(側部低拡散層)



図 2.3-449 既設ひび割れ部3のひずみの経時変化3(側部低拡散層)



図 2.3-450 既設ひび割れ部4のひずみの経時変化3(側部低拡散層)



図 2.3-451 ひび割れ無し部のひずみの経時変化4(側部低拡散層)



図 2.3-452 既設ひび割れ部2のひずみの経時変化4(側部低拡散層)



図 2.3-453 既設ひび割れ部3のひずみの経時変化4(側部低拡散層)



図 2.3-454 既設ひび割れ部4のひずみの経時変化4(側部低拡散層)

b. 上部低拡散層

上部低拡散層の約 10.2×2.1m² の範囲内において、ひずみ計測用光ファイバセンサー を全長固定して、連続的な計測を行った。同範囲の中央部には1本の約 0.2mm 幅程度の 既設ひび割れが存在する。

(a) 計測概要

上部低拡散層には、300mm 間隔の格子状に光ファイバセンサーが設置されている。直 線部は全長固定して、折り返しなどの曲線部はぐらつきを抑えるために間欠固定した。上 部低拡散層の光ファイバセンサー設置位置を図 2.3-387 に示す。対象表面には格子状に 光ファイバセンサーが交差するため、既設ひび割れと直交する長辺方向の光ファイバセ ンサーを先に設置した後に、短辺方向のセンサーが設置した。



図 2.3-455 上部低拡散層平面図

(b) 試験結果

上部低拡散層の光ファイバセンサー設置状況を図 2.3-456~図 2.3-457 に示す。夏季は、 湿気を含んだ外気が周辺まで送り込まれているため、表面は結露していた。一部は水たま りのような状態であったが、一見したところ設置したセンサーが剥がれているような様 子はみられなかった。



図 2.3-456 上部低拡散層の様子(2018年6月)



図 2.3-457 上部低拡散層の様子(2018年8月)

上部低拡散層では、分布型光ファイバセンサーにより全長約 540m にわたって連続計 測した。このときの計測パラメーターを表 2.3-166 に示す。

	ひずみ	
	(Ch.3、4)	
距離レンジ	600 m	
位置分解能	10 cm	
サンプリング間隔	5 cm	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	$420 \mathrm{~MHz}$	(10.60~11.02GHz)
掃引周波数ステップ	$3 \mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	141	
計測時間(単発)	約170秒	
計測間隔	180分	常設時
計測開始日時	2018/1/23 11:22	

表 2.3-166 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(上部低拡散層)

光ファイバ全長におけるブリルアン周波数の計測結果を図 2.3-458 に、上部低拡散層 部分における結果を図 2.3-459 と図 2.3-460 に拡大して示す。設置時にセンサーに導入 された張力を含む結果であり、図 2.3-459 が長辺方向に 10.2m 長で設置したセンサー8 本分を、図 2.3-460 が短辺方向に 2.1m 長で設置したセンサー35 本分を示している。 10MHz の周波数変化は 200 μ ひずみ変化に相当するため、設置時にセンサーに導入され た引張ひずみはおよそ 600~800 μ ひずみ (30~40MHz) であった。



図 2.3-458 ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;全体)



図 2.3-459 ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;長辺方向)



図 2.3-460 ブリルアン周波数の計測結果(上部低拡散層;短辺方向)

2018 年 1 月 23 日昼頃の結果を初期値としたときの発生ひずみを図 2.3-461 と図 2.3-462 に示す。上部低拡散層に設置した長辺方向のセンサーのうちの奥側 4 本分を図 2.3-461 に、坑口側 4 本分を図 2.3-462 に示す。それぞれには既設ひび割れ 1 箇所で、局所的なひずみ変化がみられる。当該箇所では、気温上昇とともに負方向に局所的に変化している。逆に、設置箇所部分以外は温度変化と正の相関を有し、気温上昇とともに正方向に変化している。



図 2.3-461 ひずみ分布の計測結果(上部低拡散層;長辺方向1)



図 2.3-462 ひずみ分布の計測結果(上部低拡散層;長辺方向2)

短辺方向については、約2.5mの設置箇所ごとのひずみ変化が周期的にみられた。しかし、既設ひび割れに直交していないため、長辺方向でみられた局所的なひずみ変化はみられなかった。

既設ひび割れ部の挙動を確認するために、既設ひび割れ箇所のひずみの経時変化を図 2.3-463~図 2.3-470 に示す。これらは、上部低拡散層に設置した長辺方向のセンサー8 本分の既設ひび割れと直交する箇所の結果である。それぞれの図には、光ファイバの計測 結果とともにコンクリートピット部の温度計の計測結果も併記する。ひずみの経時変化 をもとにすれば、側部低拡散層でみられたように、温度変化と逆の相関を有するひび割れ 開口変位の挙動をとらえられていることがわかる。場所によって、温度変化に対する変化 量に多少違いがみられた。ひび割れ幅や深さ、温度の差、設置状況による違いなどがその 原因として考えられるが、はっきりした理由は不明である。



図 2.3-463 既設ひび割れ部のひずみの経時変化1(上部低拡散層)



図 2.3-464 既設ひび割れ部のひずみの経時変化2(上部低拡散層)



図 2.3-465 既設ひび割れ部のひずみの経時変化3(上部低拡散層)



図 2.3-466 既設ひび割れ部のひずみの経時変化4(上部低拡散層)



図 2.3-467 既設ひび割れ部のひずみの経時変化5(上部低拡散層)



図 2.3-468 既設ひび割れ部のひずみの経時変化 6 (上部低拡散層)



図 2.3-469 既設ひび割れ部のひずみの経時変化7(上部低拡散層)



図 2.3-470 既設ひび割れ部のひずみの経時変化8(上部低拡散層)

c. 手前コンクリートピット

手前コンクリートピットは約7.5×5.1m²の範囲内において、ひずみ計測用光ファイバ センサーを全長固定して、連続的な計測を行った。表面にはKKシート(900×900mm/ シート)工法による打継ぎ処理がなされているため凹凸が形成されているが、既設ひび割 れは確認されていない。

(a) 計測概要

手前コンクリートピットには、上述の上部低拡散層と同様に 300mm 間隔の格子状に光 ファイバセンサーを設置されている。直線部は全長固定して、折り返しなどの曲線部はぐ らつきを抑えるために間欠固定した。

手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置位置を図 2.3-391 に示す。対象表面には格子状に光ファイバセンサーが交差するため、水平方向の光ファイバセンサーを 先に設置した後に、垂直方向のセンサーが設置した。



図 2.3-471 手前コンクリートピット正面図

(b) 試験結果

手前コンクリートピットの光ファイバセンサー設置状況を図 2.3-472 に示す。一見した ところ設置したセンサーが剥がれているような様子はみられなかった。



図 2.3・472 光ファイバセンサー設置状況(手前コンクリートピット)

手前コンクリートピットでは、分布型光ファイバセンサーにより総延長約 700m にわたって3時間の間隔で連続計測した。このときの計測パラメーターを表 2.3-149 に示す。

	ひずみ	
	(Ch.5、6)	
距離レンジ	700 m	
位置分解能	20 cm	
サンプリング間隔	10 cm	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	$450 \mathrm{~MHz}$	(10.60~11.05GHz)
掃引周波数ステップ	$5~\mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	91	
計測時間 (単発)	約70秒	
計測間隔	180分	常設時
計測開始日時	2018/1/23 11:22	

表 2.3-167 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(手前コンクリートピット)

光ファイバ全長におけるブリルアン周波数の計測結果を図 2.3-473 に、手前コンクリートピット部分における結果を図 2.3-474 と図 2.3-475 に拡大して示す。設置時にセンサーに導入された張力を含む結果であり、図 2.3-474 が水平方向に 7.5m 長で設置したセンサー18本分を、図 2.3-475 が垂直方向に 5.1m 長で設置したセンサー26本分を示している。10MHz の周波数変化は 200 μ ひずみ変化に相当するため、設置時にセンサーに導入された引張ひずみはおよそ 600~800 μ ひずみ (30~40MHz) であった。



図 2.3-473 ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;全体)



図 2.3-474 ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;水平方向)



図 2.3-475 ブリルアン周波数の計測結果(手前コンクリートピット;垂直方向)

2018 年 1 月 23 日昼頃の結果を初期値としたときの発生ひずみを図 2.3-476 と図 2.3-477 に示す。水平方向については、約 7.5m の設置箇所ごとの、垂直方向については、

約 5.1m の設置箇所ごとのひずみ変化が周期的にみられた。温度変化に対して、正の相関 で変化していることがわかった。



図 2.3-476 ひずみ分布の計測結果(手前コンクリートピット;水平方向)



図 2.3-477 ひずみ分布の計測結果(手前コンクリートピット;垂直方向)

水平方向の温度変化は設置長にわたってほぼ一定であるが、位置が遠いものほど(グラ フ上で右側ほど)変化幅が小さいようであった。また、垂直方向の温度変化は設置長にわ たって一定ではない。垂直方向の位置が低いものほど温度による変化が大きく、位置が高 いものほど温度による変化が大きいようである。恐らく、コンクリートピット上の高さに よって温度に違いがあるためと考えられる。



図 2.3-478 ひび割れ無し部のひずみの経時変化1(手前コンクリートピット)



図 2.3-479 ひび割れ無し部のひずみの経時変化2(手前コンクリートピット)







図 2.3-481 ひび割れ無し部のひずみの経時変化4(手前コンクリートピット)



図 2.3-482 ひび割れ無し部のひずみの経時変化5(手前コンクリートピット)



図 2.3-483 ひび割れ無し部のひずみの経時変化6(手前コンクリートピット)

d. まとめとモニタリング計画へのフィードバック

実規模模擬施設のうち側部低拡散層、上部低拡散層、手前コンクリートピットに光ファ イバセンサーケーブルを敷設して、ひずみ変化の計測を長期的にブリルアン方式で行っ た。ブリルアン方式光ファイバによるひずみ計測によって、季節変化で開閉する既設ひび 割れの開口変位量(数10μm程度)を確認することができた。こうした既設ひび割れは、 ひずみ分布の局所的な変化から確認することが可能であるが、その開口変位量の定量的 な把握のためには、温度補正が重要となる。

設定条件	モニタリング計画例
ひび割れ箇所の検知	温度変化などに伴うひずみ分布計測の局 所変化から評価

表 2.3-168 ひずみ計測を用いたモニタリング計画例

4) ひび割れ計測試験(平成30年度)

実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験では、光ファイバセンサーが 30cm 間隔の 格子状に設置された手前コンクリートピットと上部低拡散層を対象として、施設にひび 割れを発生させて、そのときに生じるひずみを光ファイバセンサーで計測した。ここでは、 そのために実施した事前試験と実規模模擬施設を利用したひび割れ計測試験(平成 30 年 10 月、令和元年 10 月)について記載する。

- a. 試験体を用いた事前試験
- (a) はじめに
- a) 人為的なひび割れ誘発手法検討の流れ

実規模模擬施設を活用した試験では、セメント系材料の表面に人為的なひび割れを発 生させて、そのときに生じるひずみを光ファイバセンサーで計測する。このとき、人為的 にひび割れを発生させる手法が必要であるが、試験対象とする上部低拡散層と手前コン クリートピットのうち、手前コンクリートピットは部材寸法が大きい上、内部や隣接の部 材から拘束されている鉄筋コンクリート構造物であるため、適切な大きさのひび割れを 誘発できない可能性があり、一方で、上部低拡散層はモルタル層であるため、むしろ過大 なひび割れを発生させてしまう恐れがある。

このように、試験を実施するにあたり、実規模模擬施設に過大な損傷を与えず、かつ、 確実にひび割れを誘発させる手法を検討する必要がある。表 2.3・169 にひび割れ誘発手 法の選定の流れを示す。平成 29 年度の地下空洞型処分施設機能確認試験[32]では、1.2m ×1.2m×60 cmの供試体ブロックを用いた要素試験を実施し、人為的なひび割れ誘発手法 の候補として、標準パッカー工法を選定した。標準パッカー工法の作業状況を図 2.3・484 に示す。また、上部低拡散層や手前コンクリートピットを模擬した 2.0m×3.0m× 60(70cm)のブロック供試体を、事前試験に供する試験体として、図 2.3・485 のとおり製 作した。

項目	要素試験	事前試験	実規模模擬施設を活用した ひび割れ計測試験
時期	平成 29 年度	平成 30 年度 8 月	平成 30 年度 10 月
目的	実規模模擬施設にひび 割れを誘発する手法に ついて、候補を選定す る。	候補選定したひび割れ誘発 手法が、実規模模擬施設を 用いたひび割れ計測試験に 適用可能であることを確認 する。	*ル31+皮11月 光ファイバセンサーを利用 して、実規模模擬施設に発生 させるひび割れの形状や大 きさを検知できることを確 認する。
対象	供試体ブロック 50cm×50cm×50cm 1.2m×1.2m×60cm 程 度	実規模模擬施設を想定した 試験体 2m×3m×60cm (70cm)	実規模模擬施設 上部低拡散層と手前コンク リートピット (平成 31 年度は上部低拡散 層のみ)

表 2.3-169 ひび割れ誘発手法の選定に向けた流れ



図 2.3-484 標準パッカーの施工状況(平成 29 年度要素実験)



図 2.3-485 事前試験用供試体

b) 事前試験の目的

事前試験は、標準パッカー工法の実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験への適 用性を確認するために実施した。平成 29 年度に実施した要素試験では、無筋コンクリー トの試験体は、0.1mm 程度のひび割れが発生したあと、さらに加圧を続けると、瞬時に ひび割れ幅が拡大して、幅が 2mm 以上の貫通ひび割れが生じた。事前試験に用いる試験 体の部材寸法は要素試験よりも大きく、また、均しコンクリート上に製作されているため、 要素試験に比較するとひび割れ幅は拡大しにくいと考えられるが、どの程度、ひび割れ幅 を制御しながら拡大することが可能であるか、確認する必要がある。

一方、鉄筋コンクリートの試験体は要素試験において、30cm ピッチで標準パッカーを 配置したときに、標準パッカーの間で 0.35mm 程度のひび割れを誘発させられることを 確認している。より部材寸法が大きくなる事前試験においても、同様にひび割れを誘発す ることが可能であるか確認する必要がある。

以上のように、上部低拡散層を模擬した無筋コンクリート試験体では標準パッカーの ひび割れ制御性の確認を、手前コンクリートピットを模擬した鉄筋コンクリート試験体 では寸法が大きな部材に対してもひび割れを発生させられることを確認することが、本 試験の目的である。

なお、本試験では試験体に光ファイバセンサーを 30cm 間隔の格子状に貼りつけてお り、実規模施設を用いたひび割れ計測試験の施工条件を模擬している。この光ファイバセ ンサーを用いて、人為的に誘発させるひび割れを対象としたひずみの計測も実施するこ



図 2.3-486 無筋コンクリートのひび割れ発生状況 (要素試験)



図 2.3-487 鉄筋コンクリートのひび割れ発生状況(要素試験)

- (b) 試験方法
- a) 対象部材
- ア)供試体の寸法

平成 29 年度の地下空洞型処分施設機能確認試験[32]で製作した 4 体の試験体を対象とした。図 2.3・488 に示すように、4 つの試験体は部材厚さ 10cm の均しコンクリート上に製作されており、上部低拡散層を模擬した試験体 No.1 と No.3 は 2.0m×3.0m×60cm の 無筋コンクリート、手前コンクリートピットを模擬した試験体 No.2 と No.4 は 2.0m× $3.0m \times 70cm$ の鉄筋コンクリートである。



図 2.3-488 事前試験用供試体の寸法

イ)供試体の強度

平成 26 年度の地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書[33]によると、実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験でひび割れを誘発させる上部低拡散層及び手前コンク リートピットは、それぞれ 113.5N/mm²(現場水中養生、材齢 365 日)、91.4N/mm²(現 場水中養生、1200 日)であり、強度レベルが大きい部材であることが分かる。

実規模模擬施設が示すコンクリートやモルタルの強度をできる限り再現できるように、 事前試験に用いる試験体には予備強度 61N/mm²の高強度コンクリートを打ち込んでい る。

試験体の配合を表 2.3-170 に、打設したコンクリートの現場封緘養生の供試体の圧縮 強度試験結果を表 2.3-171 に示す。実規模模擬施設には及ばないものの、試験時点で 86.7N/mm²の強度を有している。

セイント	呼び強度	水灶合材		単位重量	(kg/m^3)	
種別	(N/ mm ²)	水而百初 比(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材
普通	61	32.1	170	530	780	913

表 2.3-170 試験体の配合

租埠封缄姜生	压縮強度(N/mm ²)				
死物时候食工	1	2	3	平均	
7日	63.2	61.5	61.6	62.1	
28 日	76.7	75.5	76.8	76.3	
91 日	85.8	84.6	85.1	85.1	
171 日	oc 1	80.0	070	907	
(試験時)	00.4	80.0	01.8	00.7	

表 2.3-171 打設したコンクリートの圧縮強度

ウ)手前コンクリートピットを模擬した試験体の配筋

図 2.3-489、図 2.3-490 に、鉄筋コンクリート用試験体の配筋図を示す。実規模模擬施設の配筋を模擬して、底面と上面は長軸方向に D29、短軸方向に D25 を配置し、せん断

補強筋には D16 のヘッドバーを使用している。







CC'断面











図 2.3-490 鉄筋コンクリート試験体の配筋図(断面図と鉄筋詳細図)
- b)ひび割れ誘発手法
- ア)標準パッカー工法の概要

標準パッカー工法は、くさびの原理を用いてコンクリートを割る手法である。図 2.3-491 に示すように、ポンプユニットにより発生させる油圧力を利用して力を加える。

図 2.3・492 にパッカーの側面図を、図 2.3・493 に破壊原理を示す。油圧力を加えると、 パッカー内部より、徐々に「矢」が伸びてくる。このとき矢の進展に合わせて、「羽根」 が拡がり、岩やコンクリートを割ることができる。削岩力は 650t (85MPa) 程度である。



図 2.3-491 標準パッカーで使用する機材[34]



図 2.3-492 標準パッカーの側面図[34]



図 2.3-493 標準パッカーの破壊原理[34]

標準パッカーの羽根の断面形状は図 2.3-494 に示すようなかまぼこ状の形状をしてい て、羽根の拡張する力は矢印の方向に発生する。標準パッカーを設置する向きによって、 ひび割れを発生させる方向を制御できる点が特徴的である。



図 2.3-494 標準パッカーの断面

標準パッカーは長さ1m、重量30~35kg程度であり、人が手に持って扱うことが可能 である。打撃を加えずに、油圧でくさびを動かすので、破片が飛び散る危険性は極めて低 く、目視でひび割れを確認しながら作業を行うことも可能である。また、矢の上下動を図 2.3-496 に示す制御用リモコンにより操作することができる。下ボタンを押している間、 矢の伸展が進み、岩やコンクリートを割裂する力が加わるが、下ボタンを押すのをやめる と、矢の伸展はとまり、ひび割れが拡がるのを抑制することができる。



図 2.3-495 標準パッカーによるひび割れ誘発イメージ[34]



図 2.3-496 標準パッカー制御用リモコン

イ)事前試験に使用した機械

試験に使用した標準パッカー工法の機材の一覧を表 2.3-172 に示す。

作業内容	機械名称	型式
削岩機による削孔	削岩機(東洋空気製作所)	TJ-15
	コンプレッサー(北越工業)	PDS-100
	集塵機(LIFELEX)	JFX-50-095
標準パッカーによる ひび割れ誘発	標準パッカー	K25W40A400
	油圧ポンプ	HM-103、HM-
		103 HY

表 2.3-172 使用機材一覧

- c) 試験の手順
- ア) 光ファイバセンサーの貼付け

実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験では、光ファイバセンサーが 30cm 間隔で 格子状に貼りつけられた部材にひび割れを発生させる必要がある。足の踏み場が限られ ており、削岩機による削孔作業によって、光ファイバセンサーを破損することも懸念され る。

そこで本試験では、光ファイバセンサーを 30cm 間隔で格子状に張り付けた状態で、ひ び割れを誘発させることとした。また、併せて、誘発させたひび割れを光ファイバセンサ ーで検知できることを確認するための計測を行うこととした。



図 2.3-497 光ファイバセンサーの貼付け作業状況



図 2.3-498 光ファイバセンサーが貼られた試験体

イ)鉄筋の探査

手前コンクリートピット部を模擬した鉄筋コンクリートの試験体では、削岩機で削孔 する穴が鉄筋と干渉して、削岩できない可能性がある。光ファイバセンサーの貼付け作業 と並行して、電磁波レーダー式の鉄筋探査機を用いて鉄筋探査を行った。図 2.3-499 に 鉄筋探査状況を示す。



図 2.3-499 鉄筋探査状況

ウ) 削岩機による削孔

光ファイバセンサーが貼りつけられた試験体の上で、削岩機による削孔作業を行い、直径 42mm、深さ 60cm の穴を削孔した。削岩機による削孔状況を図 2.3-500 に、削孔後の穴の状況を図 2.3-501 に示す。計画通りに穴を削孔することができており、光ファイバセンサーを傷つけることなく削孔できること、事前に鉄筋探査を行うことで、鉄筋に干渉せずに、穴を削孔できることが確認された。



図 2.3-500 削岩機による削孔状況



図 2.3-501 削孔完了状況

なお、削岩機による削孔作業は大きな音が発生するため、作業場所を図 2.3-502 に示 すように防音シートで覆った状態で作業を実施した。



図 2.3-502 防音シートによる囲い

エ)標準パッカー工法によるひび割れ誘発

削孔した穴に図 2.3-503 に示すように標準パッカーを設置し、油圧ポンプにより加圧 してひび割れを誘発させた。ひび割れが発生したら加圧を停止して、光ファイバセンサー によるひずみ計測、クラックゲージを用いたひび割れ幅の測定を行うこととした。また、 光ファイバセンサーによる計測の終了後、再度加圧を行って、ひび割れ幅の拡大が目視で 確認された段階で、加圧を停止し、再度、光ファイバセンサーによるひずみ計測、クラッ クゲージを用いたひび割れ幅の計測を行った。

標準パッカーでは最大 85MPa まで加圧することが可能であるが、本来この機械は鉄筋 コンクリートに対して使用することは想定されていない。最大圧力まで加圧すると、予期 せぬトラブルが生じる可能性も考えられたことから、本試験では 70MPa を最大の加圧力 とした。



図 2.3-503 標準パッカーによるひび割れ誘発状況

(c) 試験結果(ひび割れ発生状況)

a)上部低拡散層を模擬した試験体

ア)標準パッカーの設置位置

試験体 No.1 を用いて、図 2.3-504 に示すように、まず光ファイバセンサーに直交する 方向に、次に斜めに交わる方向にひび割れを発生させた。

光ファイバセンサーに直行する方向のひび割れでは、60cm 間隔、斜めに交わる方向に ひび割れを発生させる際は、85cm 間隔で標準パッカーを設置した。



図 2.3-504 上部低拡散層を模擬した試験体に発生させるひび割れ

イ)ひび割れの誘発(直交方向のひび割れ)

光ファイバセンサーの直交方向に発生させたひび割れの拡大状況を図 2.3-505に示す。 無筋コンクリートである試験体 No.1 では、標準パッカーが約 40MPa を示したとき、予 め想定していた方向に、0.1mm を下回るひび割れが発生した。一度標準パッカーの加圧 を停止して、光ファイバセンサーによる計測を実施した後、再度標準パッカーによる加圧 を行った。その結果、40MPa を超えたときに、瞬時に 0.35~0.45mm の貫通ひび割れが 生じた。なお、図 2.3-505 右側の図には、ひび割れと光ファイバセンサーの交点で測定し たひび割れ幅を記載している。

要素試験と同様に、無筋コンクリートでは、0.1mm 以上のひび割れ幅を制御すること ができなかった。



図 2.3-505 試験体 No.1 直交方向のひび割れの拡大状況



図 2.3-506 貫通ひび割れ発生時の状況

ウ)ひび割れの誘発(斜め方向のひび割れ)

次に、光ファイバセンサーに斜めに交わる方向にひび割れを発生させた。まず、図 2.3-507に示す位置に標準パッカーを設置して加圧したところ、ひび割れ①の幅だけが拡 大し、ひび割れ②にはほとんどひび割れを生じなかった。本試験では、一台の油圧ポンプ から、二つの標準パッカーに対して加圧しているため、既にひび割れ生じていて、矢が進 展しやすい方の標準パッカーに、選択的に力がかかっていた可能性が高い。

そこで新規にひび割れを発生させる削孔穴にだけ標準パッカーを設置して加圧したと ころ、図 2.3-509 に示すように、斜め方向のひび割れを発生させることができた。しか し、このときもひび割れ幅は瞬時に拡大して貫通ひび割れを生じており、幅を制御するこ とはできなかった。



図 2.3-507 試験体 No.1 斜め方向のひび割れの発生状況



図 2.3-508 斜め方向のひび割れ発生時の標準パッカー加圧状況



図 2.3-509 斜め方向のひび割れ発生の発生状況

エ) まとめ

要素試験に比較して大きな部材寸法の試験体を用いて試験を実施したものの、0.1mm 以上のひび割れを制御することはできず、0.35~0.45mmの貫通ひび割れを瞬時に生じさ せてしまう結果となった。実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験でひび割れを発 生させる上部低拡散層は、低透水層に覆われている箇所も含めて11.5m×8.0mと、事前 試験の試験体と比べるとはるかに大きな部材であるため、必ずしも幅の大きな貫通ひび 割れが瞬時に生じるとは限らないが、目視によって段階的にひび割れ幅を拡大させるこ とが困難なことが明らかになった。

一方で、本試験では、標準パッカーを用いることによって意図した方向にひび割れを誘 発できることが確認できている。ひび割れが入ると想定される位置に、予め、ひずみゲー ジやパイ型ゲージを設置し、加圧中に、リアルタイムでひずみやひび割れ幅を計測するこ とで、ひずみやひび割れ幅を制御しながら試験を実施できると考えられる。

また、無筋コンクリートに斜め方向にひび割れを発生させる際、既にひび割れを発生さ せるために使用した削孔穴を用いてひび割れを発生させようとすると、斜め方向に新た なひび割れは発生せずに、既に生じさせたひび割れ幅が拡大することが分かった。事前試 験で実施したのと同様に、新規にひび割れを発生させる位置に削孔した穴のみを使用し て、ひび割れを発生させることとする。

- b)手前コンクリートピットを模擬した試験体
- ア)標準パッカーの設置位置

図 2.3-510 に示すように、試験体 No.2 を用いて光ファイバセンサーに直交方向のひび 割れを、試験体 No.4 を用いて斜め方向に交わるひび割れを発生させた。

手前コンクリートピットを模擬した鉄筋コンクリート試験体では、標準パッカーで誘 発できる最大のひび割れ幅を把握することを主たる目的とした。直交方向にひび割れを 発生させるときは、30cm 間隔で、斜め方向にひび割れを発生させるときは約45cm 間隔 で標準パッカーを設置している。

なお、直交方向のひび割れを発生させるときは、図 2.3-510 に示すように、光ファイバ センサーを用いた計測によって、ひび割れの進展挙動を追従できることを確認するため に、南側から徐々に標準パッカーの設置位置を北側に移動させて、ひび割れを進展させた。



図 2.3-510 手前コンクリートピットを模擬した試験体に発生させるひび割れ

イ)ひび割れの誘発(直交方向のひび割れ)

直交方向にひび割れを発生させたときのひび割れ幅を図 2.3-511と図 2.3-512に示す。 標準パッカーで 70MPa 加圧したときに、最大 0.35mm のひび割れを発生させることが 可能であることが分かった。また、このとき貫通ひび割れは生じておらず、加圧位置に近 い箇所ではひび割れ幅が大きく、加圧位置から離れるほど、ひび割れ幅は小さくなってい る。



図 2.3-511 試験体 No.2 直交方向のひび割れの幅 (STEP1、STEP2)



図 2.3-512 試験体 No.2 直交方向のひび割れの幅 (STEP3)



図 2.3-513 試験体 No.2 直交方向の試験実施状況



図 2.3-514 試験体 No.2 直交方向のひび割れ発生状況

ウ) ひび割れの誘発(斜め方向のひび割れ) 斜め方向にひび割れを誘発させたときのひび割れ幅を図 2.3-515 に示す。標準パッカ ーの設置間隔が 45cm ほどになる斜め方向であっても、0.20mm 程度のひび割れを誘発させられることが分かった。なお、このときも貫通ひび割れは生じていない。



図 2.3-515 試験体 No.4 斜め方向のひび割れの幅

エ) まとめ

手前コンクリートピットを模擬した試験体を用いてひび割れを誘発させた結果、光フ ァイバセンサーに直交する方向(標準パッカー設置間隔 30cm)では最大 0.35mm、斜め に交わる方向(標準パッカー設置間隔 45cm)では最大 0.20mmのひび割れを誘発できる ことが分かった。今回発生したひび割れは、部材を貫通したものでなく、標準パッカーの 周りでのみ生じたものであったことを考えると、事前試験の試験体で寸法であっても、十 分にひび割れの発生を抑制する効果があったものと考えられる。実規模模擬施設はより 部材寸法、周囲の拘束が大きい条件であるが、少なくとも 2 つの標準パッカーの間では、 ひび割れを誘発することが可能であると考えられる。

- (d) 試験結果(光ファイバセンサーによる計測)
- a) 光ファイバセンサーによる計測方法

目視によるひび割れ発生状況と比較することで、光ファイバセンサーによるひび割れ 検知の適用性を検証した。

光ファイバセンサーの計測パラメーターを表 2.3-173 に示す。計測にはブリルアン散乱 を利用した PPP-BOTDA 方式を用いた。段階的な加圧ステップごとに、光ファイバセン サーによる計測を繰り返した。

距離レンジ	100 m
位置分解能	5 cm
サンプリング間隔	2.5 cm
加算回数	2^{13}
周波数掃引範囲	300 MHz (10.70~11.00GHz)
掃引周波数ステップ	5 MHz
周波数掃引回数	61
計測時間 (単発)	約 160 秒

表 2.3-173 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(事前試験)

b)データの評価方法

光ファイバで得られた結果は、位置ごとに得られるブリルアン周波数シフトの変化で あり、それに光ファイバセンサーごとの定数を乗じることでひずみ分布(位置 vs.ひずみ) を算出することができる。その結果を、試験体全体で評価しようとすると、光ファイバセ ンサーを設置した場所以外を何らかの方法で補間する必要がある。ここでは、試験体全体 を 10cm 間隔でデータをもたせるために、図 2.3-516 に示すようにバイキュービック補 間法を用いた。これは、離散的な標高データからコンター図などを作成する場合などに汎 用の方法である。



図 2.3-516 補間処理による解析方法

c) 光ファイバセンサーによる計測結果

試験結果は、上部低拡散層を模擬した試験体(無筋試験体 No.1)、手前コンクリートピットを模擬した試験体(鉄筋試験体 No.2、No.4)ごとに示す。

ア)上部低拡散層を模擬した試験体 No.1

標準パッカーが約 40MPa を示したときに試験体表面に 0.1mm を下回るひび割れが発生した。そのときの計測結果を図 2.3-517 に示す。長辺方向でひび割れを検知している。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-517 ひび割れ事前試験の計測結果1(無筋試験体 No.1)

加圧を一旦停止後、さらにパッカーによる加圧を進めた結果、再度 40MPa を超えたあ たりで、0.35~0.45mm 幅で部材を貫通するひび割れが生じた。そのときの計測結果を図 2.3-518~図 2.3-520 に示す。長辺方向で検知された局所ひずみ変化が、試験体中央部で 最大を示していたもの(図 2.3-518)が、試験体端部に移動(図 2.3-519)し、長辺方向 の計7本の光ファイバで大よそ一定となった(図 2.3-520)。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-518 ひび割れ事前試験の計測結果 2 (無筋試験体 No.1) RCblock#1K 1153trim.csv

RCblock#1K 1153trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-519 ひび割れ事前試験の計測結果 3 (無筋試験体 No.1)

RCblock#1K 1250trim.csv

RCblock#1K 1250trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-520 ひび割れ事前試験の計測結果 4 (無筋試験体 No.1)

次に、光ファイバセンサーを斜めに交わる方向にひび割れを発生させた。徐々に斜めひ び割れのための加圧を上げながら計測した結果を図 2.3-521~図 2.3-523 に示す。短辺 方向で徐々に変化する斜めひび割れの様子をとらえることができた。長辺方向では、既に 発生済みの直交方向のひび割れによる影響が大きいものの、斜めひび割れの影響がわず かに見える。特に短辺方向で顕著な試験体端部の引張ひずみは、格子状の光ファイバの折 り返し部(全長固定していない部分)の影響が生じていると考えられる。



補間処理(短辺方向の光ファイバ)





RCblock#1K 1354trim.csv

ひずみ分布 (長辺方向の光ファイバ)



補間処理(長辺方向の光ファイバ)



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-521 ひび割れ事前試験の計測結果 5 (無筋試験体 No.1)



RCblock#1K 1409trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-522 ひび割れ事前試験の計測結果 6 (無筋試験体 No.1)

RCblock#1K 1432trim.csv

RCblock#1K 1432trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-523 ひび割れ事前試験の計測結果 7 (無筋試験体 No.1)

イ)手前コンクリートピットを模擬した試験体 No.2

まず試験体短辺方向にひび割れを発生させながら、計測を行った。その結果を図 2.3-524~図 2.3-527 に示す。図 2.3-524 では 0.04mm 幅のひび割れが、図 2.3-525 では 0.1mm 幅程度のひび割れが、図 2.3-526 では最大 0.15mm 幅のひび割れが、図 2.3-527 では最大 0.25mm 幅のひび割れがそれぞれ目視で確認できている。長辺方向でひび割れ による局所的なひずみ変化を検知できているが、短辺方向にも影響があるようである。



ひずみ分布 (短辺方向の光ファイバ)



補間処理(短辺方向の光ファイバ)



RCblock2 1517trim.csv

ひずみ分布(長辺方向の光ファイバ)



補間処理(長辺方向の光ファイバ)



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-524 ひび割れ事前試験の計測結果1(鉄筋試験体 No.2)



RCblock2 1540trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-525 ひび割れ事前試験の計測結果 2 (鉄筋試験体 No.2)



2-598

ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-526 ひび割れ事前試験の計測結果 3 (鉄筋試験体 No.2)

-1.5 L -1

-0.5

0.5

0 x [m]

-1.5 L -1

-0.5

0.5

0 x [m] RCblock2 1637trim.csv

RCblock2 1637trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-527 ひび割れ事前試験の計測結果 4 (鉄筋試験体 No.2)

次に試験体長辺方向にひび割れを発生させながら、計測を行った。その結果を図 2.3-528~図 2.3-533 に示す。図 2.3-528 では最大 0.2mm 幅のひび割れが発生し、図 2.3-529 ではその長さが延び(最大 0.2mm 幅)、図 2.3-530 ではさらに延びた(パッカー 圧 70MPa 時に最大 0.35mm 幅)。長辺方向は既に発生させたひび割れ影響がそのまま残 っているが、短辺方向によって今回発生させたひび割れを検知できている。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-528 ひび割れ事前試験の計測結果 5 (鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1058trim.csv

RCblock22 1058trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-529 ひび割れ事前試験の計測結果 6 (鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1127trim.csv

RCblock22 1127trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-530 ひび割れ事前試験の計測結果 7 (鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1141trim.csv

RCblock22 1141trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-531 ひび割れ事前試験の計測結果 8(鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1241trim.csv

RCblock22 1241trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-532 ひび割れ事前試験の計測結果 9 (鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1456trim.csv

RCblock22 1456trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-533 ひび割れ事前試験の計測結果 10(鉄筋試験体 No.2)

最後に試験体斜め方向にひび割れを発生させながら、計測を行った。その結果を図 2.3-534~図 2.3-535 に示す。斜め方向のひび割れは短辺方向、長辺方向ともに横切るこ ととなり、どちらの結果でもその局所的なひずみ変化をとらえることができた。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-534 ひび割れ事前試験の計測結果 11(鉄筋試験体 No.2)

RCblock22 1614trim.csv

RCblock22 1614trim.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-535 ひび割れ事前試験の計測結果 12(鉄筋試験体 No.2)

ウ)手前コンクリートピットを模擬した試験体 No.4

試験体斜め方向にひび割れを発生させながら、計測を行った。その結果を図 2.3-536~ 図 2.3-537 に示す。斜め方向のひび割れは最大で 0.2mm 幅程度で、短辺方向、長辺方向 ともに横切ることとなり、どちらの結果でもその局所的なひずみ変化をとらえることが できた。STEP3 時点での計測結果を光ファイバでもその様子をうまくとらえられている (図 2.3-537)。



ひずみ分布 (短辺方向の光ファイバ)



補間処理(短辺方向の光ファイバ)



RCblock4 1441trim.csv

ひずみ分布(長辺方向の光ファイバ)



補間処理(長辺方向の光ファイバ)



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-536 ひび割れ事前試験の計測結果1(鉄筋試験体 No.4)







ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ) 図 2.3-537 ひび割れ事前試験の計測結果 2 (鉄筋試験体 No.4)

(e) まとめ

実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験に対する、標準パッカー工法の適用性を 確認することを目的として、事前試験を実施した。

上部低拡散層を模擬した試験体では、ひび割れ幅を目視で確認しながら、段階的にひび 割れ幅を拡大することを試みたが、要素試験と同様に、瞬時に貫通ひび割れを生じてしま い、ひび割れ幅を制御することはできなかった。一方、手前コンクリートピットを模擬し た試験体では、手前コンクリートピットを模擬した試験体では、光ファイバセンサーに直 交する方向で最大 0.35mm、斜めに交わる方向で最大 0.20mm のひび割れを誘発するこ とができた。実規模模擬施設を用いた試験においても、少なくとも 2 つの標準パッカーの 間ではひび割れを誘発できると考えられる。また、いずれの試験体を用いた試験において も、意図した方向にひび割れを発生させることができた。

実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験では、標準パッカー工法によって段階的 にひずみやひび割れ幅を増大させていき、加圧ステップ毎に光ファイバセンサーによっ てひずみを計測する。上述のとおり、目視確認によってひび割れ幅を制御することは困難 だったこと、一方で意図した方向にひび割れを発生させることはできたことから、ひび割 れが発生すると想定される位置に、予め、ひずみゲージやパイ型ゲージを設置し、リアル タイムで計測される値を参照することで、標準パッカーに作用させる油圧力を制御する ことが好ましいと考えられた。また、ひずみゲージやパイ型ゲージを設置することで、光 ファイバセンサーで計測されるひずみと、ひずみゲージやパイ型ゲージで計測される値 を定量的に比較することも可能となる。

以上のとおり、実規模模擬施設を活用したひび割れ計測試験では標準パッカー工法を 用いてひび割れを誘発させること、その制御は、ひび割れが発生すると想定される位置に ひずみゲージやパイ型ゲージを設置して、その計測値をリアルタイムで確認することで、 実施することとした。

光ファイバセンサーによれば、ひずみの局所的な変化としてひび割れをとらえられた。 その処理を工夫することによって、目視によるひび割れマップ相当の結果を得ることが 出来た。

b. 原位置試験

現地環境下における光ファイバセンサーのひび割れ検知性能を確認するために、ひび 割れ計測試験を実施した。その性能を定量的に確認するため、段階的にひび割れを誘発し ながら、光ファイバセンサーでひずみ計測するとともに、併設した参照計器(パイ型ゲー ジ、ひずみゲージ)による計測、目視によるひび割れ観察を実施した。 (a) 試験方法

- a) 対象部材
- ア)手前コンクリートピット

手前コンクリートピットは、幅 8.95m、高さ 7.44m、部材厚さ 70cm の鉄筋コンクリ ートの壁部材である。水平方向に D29、鉛直方向に D25 の鉄筋が、それぞれ 150mm ピ ッチで設置されている。せん断補強筋には、D16 のヘッドバーが使用されている。平成 26 年度の地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験報告書[33]によると、材齢 1200 日時点に おける圧縮強度は 91.4N/mm²であることが確認されている。手前コンクリートピット前 面は、KK シート工法[35][36] による打継ぎ処理がされているため、表面には図 2.3・390 に示すような凹凸が形成されている。内面を充填材に、底面を底部低拡散層に拘束された 構造となっている。



図 2.3-538 手前コンクリートピット(正面図)



図 2.3-539 手前コンクリートピット (2017年8月撮影)

本試験では手前コンクリートピットのうち、図 2.3-540 に示す位置に標準パッカーを 設置して、直交方向と斜め方向の2方向にひび割れを誘発させる計画とした。


図 2.3-540 ひび割れ誘発位置(手前コンクリートピット)

イ) 上部低拡散層

上部低拡散層は、幅 11.55m、奥行き 8.0m、部材厚さ 60cm の無筋モルタル層である。 大部分は上部低透水層により埋没しており、手前から 2.75m の範囲が露出している。平 成 26 年度管理型処分技術調査等事業地下空洞型処分施設性能確証試験の長期材齢物性試 験[33]において、材齢 365 日時点における圧縮強度は 113.5N/mm² であることが確認さ れている。上部低拡散層は、底面を上部コンクリートピットに拘束されている。



図 2.3-541 上部低拡散層 (平面図)



図 2.3-542 上部低拡散層 (2017年8月撮影)

本試験では手前コンクリートピットのうち図 2.3-543 に示す位置に標準パッカーを設置して、直交方向と斜め方向の2方向にひび割れを誘発させる計画とした。



図 2.3-543 ひび割れ誘発位置(上部低拡散層)

b)ひび割れ誘発手法

事前試験の結果より標準パッカー工法の適用性が確認できたことから、事前試験と同 一の機材を用いてひび割れ誘発作業を実施した。機材の一覧は表 2.3-172 参照のこと。

- c) 試験の手順
- ア) 削岩機による削孔

図 2.3-540 と図 2.3-543 に示す位置を、削岩機を用いて削孔した。削孔状況を図 2.3-544 と図 2.3-545 に、削孔完了後の状況を図 2.3-546 と図 2.3-547 に示す。



図 2.3-544 削孔状況 (手前コンクリートピット)



図 2.3-545 削孔状況 (上部低拡散層)



図 2.3-546 削孔完了(手前コンクリートピット)



図 2.3-547 削孔完了(上部低拡散層)

イ)ひずみゲージ、パイゲージの取り付け

本試験では、光ファイバセンサーの計測性能を定量的に確認するため、光ファイバセン サーでひずみを計測するとともに、ひび割れ発生前に生じる微小なひずみをひずみゲー ジで、ひび割れ発生後のひび割れ幅をパイ型ゲージで計測することとした。パイ型ゲージ やひずみゲージは、ひび割れが発生すると予想される位置を中心に取り付けている。一部 のひずみゲージ(ε7、ε8、ε9)は、ひび割れに平行する方向に取り付けていて、ひび 割れ発生位置の周縁で生じるひずみの変化を計測した。





図 2.3-549 パイ型ゲージとひずみゲージの取り付け状況(手前コンクリートピット)



図 2.3-550 パイ型ゲージとひずみゲージの取り付け状況(上部低拡散層)

ウ) ひび割れの誘発

図 2.3-551 に示すように、ひび割れを発生させたい位置に合せて標準パッカーを設置 し、油圧ポンプを用いて標準パッカーに加圧した。段階的にひずみやひび割れ幅を増大さ せられるように、ひずみゲージやパイ型ゲージの計測値をリアルタイムで確認して、油圧 ポンプで作用させる圧力を制御した。ひずみゲージ、パイ型ゲージによる計測及び油圧ポ ンプを用いた標準パッカーの制御状況を図 2.3-552 に示す。なお、斜め方向にひび割れ を発生させる際は、図 2.3-553 に示すように油圧ポンプの圧力指示計の値を参考にしている。



図 2.3-551 標準パッカーの設置状況



図 2.3-552 ひずみゲージ、パイ型ゲージによる計測と標準パッカーの制御状況



図 2.3-553 油圧ポンプの指示計

エ) 光ファイバセンサーによるひずみ計測

標準パッカーによる加圧を停止したあと、光ファイバセンサーによる計測を実施した。 光ファイバセンサーの計測状況を図 2.3-554 に示す。計測方法の詳細については、試験 結果の説明に併せて示すこととする。



図 2.3-554 光ファイバセンサーによる計測状況

オ)クラックゲージを用いたひび割れ幅の目視計測

光ファイバセンサーによる計測を実施している間に、クラックゲージを用いてひび割 れ幅の計測を行った。計測状況を図 2.3-555 に示す。

クラックゲージを用いたひび割れ幅の目視計測、光ファイバセンサーを用いたひずみ 計測を終了後、再度、標準パッカーに加圧してひび割れ幅を拡大させて、同様にひずみや ひび割れ幅の計測を実施した。



図 2.3-555 クラックゲージによるひび割れ幅の計測

(b) 試験結果

- a) 手前コンクリートピット
- ア)直交方向ひび割れ

光ファイバセンサーと直交方向に発生させるケースでは、図 2.3-556 に示すような 2 ヶ所に標準パッカーを設置して、段階的に加圧した。計測ステップ毎の目視観察によるひ び割れ幅と、ひずみゲージやパイ型ゲージによる計測値を図 2.3-557 と図 2.3-558 に示 す。

STEP0から4にかけては、ひずみゲージやパイ型ゲージでは段階的に計測値が上昇するものの、目視観察では、ひび割れを確認できなかった。STEP5においてはじめてひび割れが目視確認できた。その幅は 0.10mm に満たなかった。ひび割れの発生状況を図2.3-559に示す。なお、STEP2以降、図2.3-560に示すように、標準パッカー近傍のKK

シートの凹凸が箇所の浮きが確認されており、このような浮きによって生じるひずみが、 各種計測機器で計測されている可能性がある。



図 2.3-556 標準パッカー設置状況 手前コンクリートピット 直交方向



図 2.3-557 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP0~4)



図 2.3-558 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP5)



図 2.3-559 縦方向のひび割れの発生状況



図 2.3-560 KK シートの浮きの発生状況

イ)斜め方向ひび割れ

斜め方向のひび割れを発生させる際は、図 2.3-561 に示すように標準パッカーを設置 した。計測ステップ毎の目視観察によるひび割れ幅と、ひずみゲージやパイ型ゲージによ る計測値を図 2.3-562 から図 2.3-564 に示す。斜め方向においても、0.10mm に満たな いひび割れしか発生しなかった。手前コンクリートピットは部材寸法が大きい上、鉄筋コ ンクリート部材のため、ひび割れ幅が拡大しにくかったことが理由であると考えられる。



図 2.3-561 標準パッカー設置状況 手前コンクリートピット 斜め方向



図 2.3-562 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP0~1)



図 2.3-563 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP2)



図 2.3-564 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP3)

- b)上部低拡散層
- ア) 直交方向ひび割れ

標準パッカーの設置状況を図 2.3-565 に示す。計測ステップ毎の目視観察によるひび 割れ幅と、ひずみゲージやパイ型ゲージによる計測値を図 2.3-566 から図 2.3-570 に示 す。STEP1 から 2 ではひずみが段階的に上昇していく一方で、目視観察によるひび割れ は確認できなかった。STEP3 でひび割れが発生して以降、段階的にひび割れは伸展、拡 大しており、STEP6 でひび割れは側面まで貫通しており、その幅は最大で 0.45mm に達 している。上部低拡散層のひび割れ発生状況を図 2.3-571 に示す。ひび割れはひずみゲ ージやパイ型ゲージを通過しているため、これらの計測機器で計測されるひずみや変位 は、発生させたひび割れによって生まれているものと考えられる。なお、ひずみゲージを ひび割れが通過すると、ひずみゲージが切れるために、ひずみの計測が不能となる。この ケースでは、STEP3 で ε2、ε3、ε6 が、STEP4 において ε1、ε4、ε5 が切断されて、計測 不能となっている。



図 2.3-565 標準パッカー設置状況 上部低拡散層 直交方向



図 2.3-566 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP0~2)



図 2.3-567 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP3)



図 2.3-568 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP4)



図 2.3-569 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP5)



図 2.3-570 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP6)



図 2.3-571 上部低拡散層に発生させたひび割れ

イ)斜め方向ひび割れ

事前試験より、直交方向にひび割れを誘発する際に用いた削孔穴に標準パッカーを設置して加圧すると、既存の直交方向のひび割れが拡大することが想定されたことから、図 2.3-565 に示すように、1ヶ所にのみ、標準パッカーを設置した。

計測ステップ毎の目視観察によるひび割れ幅と、ひずみゲージやパイ型ゲージによる 計測値を図 2.3-573 から図 2.3-575 に示す。斜め方向にひび割れが発生、伸展、拡大に 伴って、ひずみゲージやパイ型ゲージで計測される値に変化が生じていることが分かる。



図 2.3-572 標準パッカーの設置位置 上部低拡散層 斜め方向



図 2.3-574 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値(STEP2)



図 2.3-575 目視観察によるひび割れ幅と計器計測値 (STEP3)

(c) 光ファイバセンサーによるひずみ計測(手前コンクリートピット)

a)ひずみ計測方法

光ファイバセンサーの計測パラメーターを表 2.3-174 に示す。計測にはブリルアン散 乱を利用した PPP-BOTDA 方式と、レイリー散乱を利用した TW-COTDR 方式を用いた。 段階的な加圧ステップごとに、光ファイバセンサーによる計測を繰り返した。

表 2.3-174 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、手前コンクリートピット)

	ひずみ	
	(Ch.5、6)	
距離レンジ	700 m	
位置分解能	5 cm	
サンプリング間隔	$2.5~{ m cm}$	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	$350 \mathrm{~MHz}$	(10.60~10.95GHz)
掃引周波数ステップ	$5~\mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	71	
計測時間 (単発)	約180秒	

	ひずみ	
	(Ch.5、6)	
距離レンジ	700 m	
位置分解能	5 cm	
サンプリング間隔	2.5 cm	
加算回数	213	
周波数掃引範囲	200 MHz (194.0~194.2GH	Iz)
掃引周波数ステップ	0.2 MHz	
周波数掃引回数	1001	
計測時間 (単発)	約 300 秒	

表 2.3-175 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(現地試験、手前コンクリートピット)

- b) ひずみ計測結果
- ア) ひずみ分布

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 の計測 結果を図 2.3-576~図 2.3-577 に示す。PPP-BOTDA 方式では変化がみられないが、TW-COTDR 方式ではひずみの局所的な変化がみられた。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-576 PPP-BOTDA 方式結果 1 (手前コンクリートピット STEP1)

Front-Rayleigh strain 25-5 1023.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1023.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-577 TW-COTDR 方式結果 1 (手前コンクリートピット STEP1)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3-578~図 2.3-579 に示す。TW-COTDR 方式よりは顕著でないものの、PPP-BOTDA 方式でも僅かながらひずみの局所的な変化がみられた。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-578 PPP-BOTDA 方式結果 2 (手前コンクリートピット STEP2)

Front-Rayleigh strain 25-5 1046.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1046.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-579 TW-COTDR 方式結果 2 (手前コンクリートピット STEP2)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 の計測 結果を図 2.3-580~図 2.3-581 に示す。PPP-BOTDA 方式、TW-COTDR 方式ともに明 確なひずみの局所的な変化がみられた。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-580 PPP-BOTDA 方式結果 3 (手前コンクリートピット STEP3)

Front-Rayleigh strain 25-5 1108.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1108.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-581 TW-COTDR 方式結果 3 (手前コンクリートピット STEP3)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP4 の計測 結果を図 2.3-580~図 2.3-581 に示す。PPP-BOTDA 方式、TW-COTDR 方式ともに明 確なひずみの局所的な変化がみられた。STEP0 から 4 にかけては、ひずみゲージやパイ 型ゲージでは段階的に計測値が上昇するものの、目視観察では、ひび割れを確認できなか った。目視レベル以下のひび割れを光ファイバセンサーで確認することができた。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-582 PPP-BOTDA 方式結果 4 (手前コンクリートピット STEP4)

Front-Rayleigh strain 25-5 1131.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1131.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-583 TW-COTDR 方式結果 4 (手前コンクリートピット STEP4)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP5 の計測 結果を図 2.3-584~図 2.3-585 に示す。この時点ではじめてひび割れが目視確認できた ものの、幅は 0.1mm に満たないものであった。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-584 PPP-BOTDA 方式結果 5 (手前コンクリートピット STEP5)

Front-Rayleigh strain 25-5 1153.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1153.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-585 TW-COTDR 方式結果 5 (手前コンクリートピット STEP5)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP5 の後の 除荷後の計測結果を図 2.3-586~図 2.3-587 に示す。STEP5 と比較して最大ひずみ値は 小さくなるものの、ひずみが残留している。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-586 PPP-BOTDA 方式結果 6(手前コンクリートピット、除荷)

Front-Rayleigh strain 25-5 1227.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1227.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-587 TW-COTDR 方式結果 6(手前コンクリートピット、除荷)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 の計測 結果を図 2.3-588~図 2.3-589 に示す。既に発生させた直交ひび割れによる影響が大き いが、TW-COTDR 方式によれば僅かな変化が生じているようにみえる。このときに、目 視で斜めひび割れは確認されていない。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-588 PPP-BOTDA 方式結果 7 (手前コンクリートピット、斜め STEP1)



Front-Rayleigh strain 25-5 1353.csv





ひずみ分布(鉛直方向の光ファイバ)



補間処理(水平方向の光ファイバ)

y [m]

ся (m)

2

-400



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-589 TW-COTDR 方式結果 7 (手前コンクリートピット、斜め STEP1)

補間処理(鉛直方向の光ファイバ)



光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3-590~図 2.3-591 に示す。ここでは、明瞭に斜めひび割れによる変化を確認 することができた。この時点で、0.1mm 幅以下の斜めひび割れが目視で確認された。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-590 PPP-BOTDA 方式結果 8(手前コンクリートピット、斜め STEP2)

Front-Rayleigh strain 25-5 1418.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1418.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ)

ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-591 TW-COTDR 方式結果 8 (手前コンクリートピット、斜め STEP2)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 の計測 結果を図 2.3-592~図 2.3-593 に示す。ここでも、明瞭に斜めひび割れによる変化を確認 することができた。この時点で、二箇所の加圧箇所を貫通するように 0.1mm 幅以下の斜 めひび割れが進展することを目視で確認した。



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ) ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-592 PPP-BOTDA 方式結果 9(手前コンクリートピット、斜め STEP3)

Front-Rayleigh strain 25-5 1441.csv

Front-Rayleigh strain 25-5 1441.csv



ひずみコンター(水平方向の光ファイバ)

ひずみコンター(鉛直方向の光ファイバ) 図 2.3-593 TW-COTDR 方式結果 9 (手前コンクリートピット、斜め STEP3)

イ)参照データとの比較

光ファイバセンサーによる計測結果と、近傍のひずみゲージの計測結果を併記して、パッカーの加圧ステップごとに図 2.3-594~図 2.3-602 に示す。



図 2.3-594 ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP1、手前コンクリートピット)



2-647


8.5

7.9 8.2

図 2.3-596 ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP3、手前コンクリートピット)



図 2.3-597 ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP4、手前コンクリートピット)





図 2.3-598 ひび割れ試験時のひずみ比較(STEP5、手前コンクリートピット)



図 2.3-599 ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP1、手前コンクリートピット)





図 2.3-600 ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP2、手前コンクリートピット)





図 2.3-602 ひび割れ試験時のひずみ比較(斜め STEP4、手前コンクリートピット)

光ファイバセンサーによるひずみ分布計測結果から、ひび割れ位置の近傍 20cm 分を積 分して、各ステップでひび割れ幅を算出した。こうして得られたひび割れ幅結果を、近傍 のパイゲージの計測結果を併記して、時系列で図 2.3-603~図 2.3-604 に示す。



図 2.3-603 ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果 (PI-U、手前コンクリートピット)



図 2.3-604 ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-M、L、手前コンクリートピット)

c) まとめ

現地環境下における光ファイバセンサーのひび割れ検知性能を確認するために、手前 コンクリートピット(鉄筋有り)に標準パッカーでひび割れを発生させてひび割れ計測試 験を実施した。段階的にひび割れを誘発しながら、光ファイバセンサーでひずみ計測する とともに、併設した参照計器(パイ型ゲージ、ひずみゲージ)による計測、目視によるひ び割れ観察と比較した。

ブリルアン計測(PPP-BOTDA 方式)、レイリー計測(TW-COTDR 方式)ともに、目 視でひび割れが確認されるより前に、ひずみの局所的な変化をとらえることができた。特 に、レイリー計測は微小なひずみ変化をとらえるのに優れており、ひび割れの予兆をとら えられる可能性がある。

空間分解能の違い(ゲージ長 90mm、光ファイバ 50mm)や設置位置が異なることな どもあり、ひずみゲージと光ファイバに差があるところがあるものの、ひずみゲージと光 ファイバは比較的良く一致していた。また、ひずみゲージが断線して以降も、光ファイバ で計測することができた。光ファイバセンサーでは、標準パッカー工法によって圧縮〜引 張ひずみともにみられた。網羅的な評価のためには、ひずみゲージを多数設置するなど稠 密な参照データの必要がある。

光ファイバセンサーによるひずみ分布計測をもとに積分値からひび割れ幅を求め、パ イゲージと比較した。光ファイバセンサーのなかでも、ブリルアン計測の結果はパイゲー ジの結果と良く一致していた。

- (d) 光ファイバセンサーによるひずみ計測(上部低拡散層)
- a) ひずみ計測方法

光ファイバセンサーの計測パラメーターを表 2.3-176 に示す。計測にはブリルアン散 乱を利用した PPP-BOTDA 方式を用いた。段階的な加圧ステップごとに、光ファイバセ ンサーによる計測を繰り返した。

	ひずみ	
	(Ch.3、4)	
距離レンジ	600 m	
位置分解能	5 cm	
サンプリング間隔	2.5 cm	
加算回数	2^{15}	
周波数掃引範囲	300 MHz	(10.60~10.90GHz)
掃引周波数ステップ	$5 \mathrm{MHz}$	
周波数掃引回数	61	
計測時間(単発)	約150秒	

表 2.3-176 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)

表 2.3-177 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)

	ひずみ	
	(Ch.3、4)	
距離レンジ	600 m	
位置分解能	5 cm	
サンプリング間隔	$2.5~{ m cm}$	
加算回数	2^{13}	
周波数掃引範囲	$200 \mathrm{~MHz}$	(194.0~194.2GHz)
掃引周波数ステップ	$0.2 \mathrm{~MHz}$	
周波数掃引回数	1001	
計測時間 (単発)	約 270 秒	

- b) ひずみ計測結果
- ア) ひずみ分布

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 の計測 結果を図 2.3-605~図 2.3-606 に示す。PPP-BOTDA 方式では変化がみられないが、TW-COTDR 方式ではひずみの局所的な変化がみられた。



ひずみ分布 (短辺方向の光ファイバ)



補間処理(短辺方向の光ファイバ)



ひずみ分布 (長辺方向の光ファイバ)



補間処理(長辺方向の光ファイバ)



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-605 PPP-BOTDA 方式結果 1 (上部低拡散層 STEP1)

Top-Rayleigh strain 25-5 0918.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 0918.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-606 TW-COTDR 方式結果 1 (上部低拡散層 STEP1)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3-607~図 2.3-608 に示す。PPP-BOTDA 方式(長辺方向)、TW-COTDR 方 式ともに明確なひずみの局所的な変化がみられた。このときまで、ひび割れ発生は目視で は確認されなかった。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-607PPP-BOTDA 方式結果 2 (上部低拡散層 STEP2)

Top-Rayleigh strain 25-5 0938.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 0938.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-608 TW-COTDR 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 の計測 結果を図 2.3-609~図 2.3-610 に示す。PPP-BOTDA 方式(長辺方向)、TW-COTDR 方 式ともに明確なひずみの局所的な変化がみられた。このときはじめて、目視で最大 0.1mm 幅のひび割れを確認した。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-609PPP-BOTDA 方式結果 3 (上部低拡散層 STEP3)

Top-Rayleigh strain 25-5 0958.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 0958.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-610 TW-COTDR 方式結果 3 (上部低拡散層 STEP3)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP4 の計測 結果を図 2.3-611~図 2.3-612 に示す。目視によればひび割れは進展、拡大し、最大ひび 割れ幅は 0.2mm であった。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-611 PPP-BOTDA 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4)

Top-Rayleigh strain 25-5 1022.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1022.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)
 ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)
 図 2.3-612 TW-COTDR 方式結果 4 (上部低拡散層 STEP4)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP5 の計測 結果を図 2.3-613~図 2.3-614 に示す。目視によればひび割れはさらに進展、拡大し、最 大ひび割れ幅は 0.25mm であった。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-613 PPP-BOTDA 方式結果 5(上部低拡散層 STEP5)

Top-Rayleigh strain 25-5 1049.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1049.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-614 TW-COTDR 方式結果 5 (上部低拡散層 STEP5)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP6 の計測 結果を図 2.3-615~図 2.3-616 に示す。目視によればひび割れはさらに側面まで進展、拡 大し、最大ひび割れ幅は 0.45mm であった。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-615 PPP-BOTDA 方式結果 6(上部低拡散層 STEP6)

Top-Rayleigh strain 25-5 1108.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1108.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)
 ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)
 図 2.3-616 TW-COTDR 方式結果 6 (上部低拡散層 STEP6)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 の計測 結果を図 2.3-617~図 2.3-618 に示す。既に発生した直交ひび割れによる影響が大きく、 斜めひび割れ用加圧の影響は顕在化していない。このとき、目視でひび割れは確認されて いない。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-617 PPP-BOTDA 方式結果 7 (上部低拡散層、斜め STEP1)

Top-Rayleigh strain 25-5 1417.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1417.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-618 TW-COTDR 方式結果 7 (上部低拡散層、斜め STEP1)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3・619~図 2.3・620 に示す。これまで大きな変化がみられなかった PPP-BOTDA 方式(短辺方向)でひずみの局所変化がみられた。このとき、目視で 0.1mm 幅 以下のひび割れが確認された。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-619 PPP-BOTDA 方式結果 8(上部低拡散層、斜め STEP2)

Top-Rayleigh strain 25-5 1446.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1446.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-620 TW-COTDR 方式結果 8(上部低拡散層、斜め STEP2)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3-621~図 2.3-622 に示す。このとき、斜め方向のひび割れは進展、拡大し、 目視で最大 0.2mm 幅のひび割れが確認された。



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ) ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)図 2.3-621 PPP-BOTDA 方式結果 9(上部低拡散層、斜め STEP3)

Top-Rayleigh strain 25-5 1521.csv

Top-Rayleigh strain 25-5 1521.csv



ひずみコンター(短辺方向の光ファイバ)
 ひずみコンター(長辺方向の光ファイバ)
 図 2.3-622 TW-COTDR 方式結果 9(上部低拡散層、斜め STEP3)

イ)参照データとの比較

光ファイバセンサーによる計測結果と、近傍のひずみゲージの計測結果を併記して、パッカーの加圧ステップごとに図 2.3-594~図 2.3-602 に示す。



















光ファイバセンサーによるひずみ分布計測結果から、ひび割れ位置の近傍 20cm 分を積 分して、各ステップでひび割れ幅を算出した。こうして得られたひび割れ幅結果を、近傍 のパイゲージの計測結果を併記して、時系列で図 2.3-632~図 2.3-634 に示す。



図 2.3-632 ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-1、上部低拡散層)



図 2.3-633 ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-2、上部低拡散層)



図 2.3-634 ひび割れ試験時のひび割れ幅算出結果(PI-3、上部低拡散層)

c) まとめ

現地環境下における光ファイバセンサーのひび割れ検知性能を確認するために、上部 低拡散層(鉄筋無し)に標準パッカーでひび割れを発生させてひび割れ計測試験を実施し た。段階的にひび割れを誘発しながら、光ファイバセンサーでひずみ計測するとともに、 併設した参照計器(パイ型ゲージ、ひずみゲージ)による計測、目視によるひび割れ観察 と比較した。結果は、手前コンクリートピットでの試験同様であった。

ブリルアン計測(PPP-BOTDA 方式)、レイリー計測(TW-COTDR 方式)ともに、目

視でひび割れが確認されるより前に、ひずみの局所的な変化をとらえることができた。特に、レイリー計測は微小なひずみ変化をとらえるのに優れており、ひび割れの予兆をとら えられる可能性がある。

空間分解能の違い(ゲージ長 90mm、光ファイバ 50mm)や設置位置が異なることな どもあり、ひずみゲージと光ファイバに差があるところがあるものの、ひずみゲージと光 ファイバは比較的良く一致していた。また、ひずみゲージが断線して以降も、光ファイバ で計測することができた。光ファイバセンサーでは、標準パッカー工法によって圧縮〜引 張ひずみともにみられた。網羅的な評価のためには、ひずみゲージを多数設置するなど稠 密な参照データの必要がある。

光ファイバセンサーによるひずみ分布計測をもとに積分値からひび割れ幅を求め、パ イゲージと比較した。両者には差がみられたが、光ファイバセンサーのなかではブリルア ン計測の結果がパイゲージの結果に近かった。

(e) 光ファイバセンサー設置間隔の検討

実験では 30cm 間隔で格子状に光ファイバを設置して、得られたひずみ分布計測結果を もとに、図 2.3-516 に示す補間処理を行ってひずみ分布を算出した。このとき、処理に使 用するデータのうち、格子を 2 個分毎に使用すれば 60cm 間隔で、3 個分毎に使用すれば 90cm 間隔で光ファイバを設置して得られた結果と考えられることができる。ここでは、 原位置試験で得られたデータのうち上部低拡散層のものを用いて、光ファイバ設置間隔 の検討を行った。 光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 (図 2.3-566)の検討結果を図 2.3-635~図 2.3-638 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



設置間隔 30cm のときのひずみ分布 (生データ)

in strain 25-5 0915.csv



設置間隔 60cm のときのひずみ分布 Top-Brillouin strain 25-5 0915.csv



設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
 設置間隔 90cm のときの補間処理
 図 2.3-635 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 1 (上部低拡散層、 STEP1、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)


 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-636 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 2(上部低拡散層、 STEP1、TW-COTDR 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-637 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 3 (上部低拡散層、 STEP1、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-638 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 4(上部低拡散層、 STEP1、TW-COTDR 方式、短辺方向) 光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 (図 2.3-566)の検討結果を図 2.3-639~図 2.3-642 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式)による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式)による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



設置間隔 30cm のときのひずみ分布 (生データ)

Brillouin strain 25-5 0936.csv



設置間隔 60cm のときのひずみ分布 Top-Brillouin strain 25-5 0936.csv



equation of the second second

Top-Brillouin strain 25-5 0936.csv

設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-639 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 5 (上部低拡散層、 STEP2、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-640 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 6(上部低拡散層、 STEP2、TW-COTDR 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひすみ分布 2.3-641 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 7(上部低拡散層、 STEP2、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-642 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 8(上部低拡散層、 STEP2、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 (図 2.3-567)の検討結果を図 2.3-643~図 2.3-646 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式)による長辺方向、レイリー方式(TW-COTDR 方式)による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 **60、90cm**の結果を示す。



1200

1000

800

200

0

-200 3.5

y [m]



設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理





設置間隔 60cm のときのひずみ分布

x [m]

設置間隔 90cm のときのひずみ分布 設置間隔 90cm のときの補間処理 図 2.3-643 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 9 (上部低拡散層、 STEP3、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-644 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 10(上部低拡散層、 STEP3、TW-COTDR 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-645 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 11(上部低拡散層、 STEP3、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-646 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 12(上部低拡散層、 STEP3、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP4 (図 2.3-568)の検討結果を図 2.3-647~図 2.3-650 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-647 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 13(上部低拡散層、 STEP4、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-648 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 14(上部低拡散層、 STEP4、TW-COTDR 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-649 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 15(上部低拡散層、 STEP4、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-650 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 16(上部低拡散層、 STEP4、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP5 (図 2.3-569)の検討結果を図 2.3-651~図 2.3-654 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



設置間隔 30cm のときのひずみ分布 (生データ)



設置間隔 60cm のときのひずみ分布

Top-Brillouin strain 25-5 1047.csv



Top-Brilloun strain 25-5 1047.es

設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-651 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 17(上部低拡散層、 STEP5、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-652 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 18(上部低拡散層、 STEP5、TW-COTDR 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-653 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 19(上部低拡散層、 STEP5、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-654 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 20(上部低拡散層、 STEP5、TW-COTDR 方式、短辺方向) 光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP6 (図 2.3-570)の検討結果を図 2.3-655~図 2.3-658 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-655 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 21(上部低拡散層、 STEP6、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-656 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 22(上部低拡散層、 STEP6、TW-COTDR 方式、長辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-657 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 23(上部低拡散層、 STEP6、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



 設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-658 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 24(上部低拡散層、 STEP6、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP0 (図 2.3-573)の検討結果を図 2.3-659~図 2.3-662 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式)による長辺方向、レイリー方式(TW-COTDR 方式)による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 **60、90cm**の結果を示す。

× [m]

× [m]

x [m]



y [m]

~ 0

x [m]

設置間隔 90cm のときの補間処理 設置間隔 90cm のときのひずみ分布 図 2.3-659 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 25(上部低拡散層、斜 め STEP0、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)

y [m]



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-660 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 26(上部低拡散層、斜め STEP0、TW-COTDR 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のとぎのひずみ分布 図 2.3-661 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 27(上部低拡散層、斜 め STEP0、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



設置間隔 90cm のときのひすみ分布 図 2.3-662 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 28(上部低拡散層、斜 め STEP0、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 (図 2.3・573)の検討結果を図 2.3・663~図 2.3・666 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



設置間隔 30cm のときのひずみ分布 (生データ)

p-Brillouin strain 25-5 1412.csv



設置間隔 60cm のときのひずみ分布

Top-Brillouin strain 25-5 1412.csv



設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-663 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 29(上部低拡散層、斜め STEP1、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-664 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 30(上部低拡散層、斜め STEP1、TW-COTDR 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-665 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 31(上部低拡散層、斜め STEP1、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-666 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 32(上部低拡散層、斜め STEP1、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 (図 2.3-574)の検討結果を図 2.3-667~図 2.3-670 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。







設置間隔 60cm のときのひずみ分布







設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-667 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 33(上部低拡散層、斜め STEP2、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-668 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 34(上部低拡散層、斜め STEP2、TW-COTDR 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-669 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 35(上部低拡散層、斜め STEP2、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-670 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 36(上部低拡散層、斜め STEP2、TW-COTDR 方式、短辺方向)

光ファイバセンサー斜め方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 (図 2.3・575)の検討結果を図 2.3・671~図 2.3・674 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式) による長辺方向、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) による長辺方向、ブ リルアン方式による短辺方向、レイリー方式による短辺方向、について、設置間隔 30、 60、90cm の結果を示す。



設置間隔 30cm のときのひずみ分布 (生データ)

p-Brillouin strain 25-5 1516.csv



設置間隔 60cm のときのひずみ分布

Top-Brillouin strain 25-5 1516.csv





設置間隔 30cm のときの補間処理 (生データ)



設置間隔 60cm のときの補間処理



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
設置間隔 90cm のときの補間処理
図 2.3-671 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 37(上部低拡散層、斜め STEP3、PPP-BOTDA 方式、長辺方向)


設置間隔 90cm のときのひずみ分布
 設置間隔 90cm のときの補間処理
 図 2.3-672 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 38(上部低拡散層、斜め STEP3、TW-COTDR 方式、長辺方向)



設置間隔 90cm のときのひずみ分布
 設置間隔 90cm のときの補間処理
 図 2.3-673 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 39(上部低拡散層、斜め STEP3、PPP-BOTDA 方式、短辺方向)



図 2.3-674 光ファイバ設置間隔の違いによる計測結果の比較例 40(上部低拡散層、斜め STEP3、TW-COTDR 方式、短辺方向)

次に、補間処理された短辺方向と長辺方向の結果をすべての平面位置で加算する。その 結果をある閾値(20、50、100 µ ひずみ)によって二値化する。ひずみがある閾値より大 きい位置は、ひび割れが入っていると考えられるため、その結果はひび割れマップととら えることができる。 閾値を 100 μ ひずみとしたときの光ファイバによるひび割れマップを図 2.3-675~図 2.3-676 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式)、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) について、設置間隔 30、60、90cm の結果を示す。



図 2.3-675 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 1(上部低拡散層、PPP-BOTDA 方式、ひずみ 100 µ 以上)



図 2.3-676 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 2(上部低拡散層、TW-COTDR 方式、ひずみ 100 µ 以上)

閾値を 50 μ ひずみとしたときの光ファイバによるひび割れマップを図 2.3-677~図 2.3-678 に示す。それぞれ、ブリルアン方式 (PPP-BOTDA 方式)、レイリー方式 (TW-COTDR 方式) について、設置間隔 30、60、90cm の結果を示す。



図 2.3-677 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 3(上部低拡散層、PPP-BOTDA 方式、ひずみ 50 μ 以上)



斜め STEP3

図 2.3-678 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 4(上部低拡散層、TW-COTDR 方式、ひずみ 50 μ 以上)

閾値を 20μひずみとしたときの光ファイバによるひび割れマップを図 2.3-679~図 2.3-680 に示す。それぞれ、ブリルアン方式(PPP-BOTDA 方式)、レイリー方式(TW-COTDR 方式)について、設置間隔 30、60、90cm の結果を示す。



図 2.3-679 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 5(上部低拡散層、PPP-BOTDA 方式、ひずみ 20 μ 以上)



図 2.3-680 光ファイバ設置間隔の違いによるひび割れマップの比較例 6(上部低拡散層、TW-COTDR 方式、ひずみ 20 μ 以上)

このように光ファイバセンサーで得られたひび割れマップ上で閾値を越えたメッシュ の総数は、ひび割れ発生に応じて増えると考えられる。そこで、その総数と、目視で得ら れたひび割れ開口面積(図 2.3-566~図 2.3-570 と図 2.3-573~図 2.3-575 参照。幅×長 さの和)を比較した。その結果をステップに応じて図 2.3-681~図 2.3-683 に示す。目視 によれば、STEP3 からひび割れが確認され、その後ひび割れ開口面積は単調増加してい る。斜め STEP0 (図内で STEP10)で一度減少し、その後徐々に増加した。光ファイバ センサーの結果によれば、総じて、特にひび割れが発生する段階(~STEP2)に高い感度 をもち、ひび割れ幅が増える段階(STEP4~6)は目視結果と比較すればやや感度が低下 するようである。なかでも、TW-COTDR 方式で閾値を 100 μ とした場合が、最も目視に 近い結果であった。閾値が小さいほど、計測誤差の影響か目視との乖離が大きかった。し かし、閾値や計測方式に関わらず、光ファイバの設置間隔(30,60,90cm)による差は 概して大きくなかった。また、特に閾値を 20 μ とした場合に顕著であるが、ひび割れ発 生後(STEP3~)に光ファイバセンサーによる結果が減少している。これは、ひび割れ発 生にともない周辺の応力が開放することによって、ひずみが影響する範囲が減少するた めと考えられる。



図 2.3-681 光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較1(閾値 100 µ)



図 2.3-682 光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較2(閾値 50µ)



図 2.3-683 光ファイバセンサーと目視によるひび割れ開口面積の比較3(閾値 20µ)

c. まとめとモニタリング計画へのフィードバック

実規模模擬施設のうち上部低拡散層と手前コンクリートピットに敷設した光ファイバ センサーケーブルを利用して、強制的なひび割れ発生時におけるひずみ変化の計測をブ リルアン方式とレイリー方式で行った。ブリルアン方式、レイリー方式の特長を生かして、 ひび割れ発生前の応力集中から、ひび割れ発生、またその進展をとらえることができた。 また、机上検討を通じて、光ファイバセンサーの設置間隔によるひび割れ検知性能の違い を確認した。

表 2.3-178 ひび割れ検知を用いたモニタリング計画例

設定条件	モニタリング計画例
ひび割れ検知	90cm 間隔で光ファイバを設置

- 5) ひび割れ試験(平成31年度;上部低拡散層)
 - a. はじめに

実規模施設を活用したひび割れ計測試験では、光ファイバセンサーが 30cm 間隔の格子 状に設置された手前コンクリートピット(鉄筋コンクリート)と上部低拡散層(無筋モル タル)を対象に、施設にひび割れを発生させて、そのときに生じるひずみを光ファイバセ ンサーで計測する。平成 30 年度の試験[37]では、光ファイバでひび割れを誘発させたと きにひび割れ部分のみならず、周縁の圧縮〜引張ひずみを共に捉えることができた。本試 験では、前試験からひずみゲージ及びパイゲージの設置数を増やして引張〜圧縮ひずみを 多数計測し、連続的な計測が可能な光ファイバセンサーによる計測値と比較することで、 その計測性能を定量評価した。

- b. 試験方法
- (a) 対象部材
- a)上部低拡散層

本試験は上部低拡散層を対象とする(図 2.3-684、図 2.3-685)。上部拡散層は幅 11.55m、 奥行き 8.0m、部材厚さ 60cm の無筋モルタル層である。大部分は上部低透水層により埋 没しており、手前から 2.75m の範囲が露出している。上部低拡散層の底面については、上 部コンクリートピットに拘束されている。ひび割れを発生させる上部拡散層には平成 30 年度のひび割れ試験実施時の光ファイバセンサーが格子状に残置されており、同光ファイ バを使用する。本試験では上部低拡散層のうち図 3.2-1 に示す位置に標準パッカーを設置 して、直交方向と斜め方向の 2 方向にひび割れを誘発させる計画とした。



図 2.3-684 上部低拡散層とひび割れ誘発位置



図 2.3-685 上部低拡散層(2017 年 8 月撮影)

(b) ひび割れ誘発手法

事前試験の結果より標準パッカー工法の適用性が確認できたことから、事前試験と同一の機材を用いてひび割れ誘発作業を実施した。機材の一覧を表 2.3-179 に、写真を図 2.3-686 に示す。

作業内容	機械名称	型式
	削岩機(東洋空気製作所)	TJ-15
削岩機による削孔	コンプレッサー(北越工業)	PDS-100
	集塵機(LIFELEX)	JFX-50-095
「 趰淮パッカーによる	標準パッカー	K25W40A400
ほ 単パック による ひび割れ誘発	油圧ポンプ	HM-103、HM-
	佃庄ハンノ	103HY

表 2.3-179 使用機材一覧



図 2.3-686 削岩機

(c) 試験の手順

a) 削岩機による削孔

図 2.3-684 に示す位置を、削岩機を用いて削孔した。削孔状況を図 2.3-687 に、削孔完 了後の状況を図 2.3-688 に示す。



図 2.3-687 削孔状況(上部低拡散層)



図 2.3-688 削孔完了(上部低拡散層)

b) ひずみゲージ、パイ型ゲージの取付

本試験ではひび割れ周縁の圧縮〜引張ひずみについて光ファイバセンサーの計測性能 を定量的に確認するため、前回より多くのひずみゲージを設置した(図 2.3-689、図 2.3-690)。ひび割れ発生前に生じる微小なひずみをひずみゲージで、ひび割れ発生後のひ び割れ幅をパイ型ゲージで計測することとした。パイ型ゲージはひび割れが発生すると 予想される位置に取付け、ひずみゲージはXY方向に設置し、ひび割れ発生位置の周縁で 生じるひずみの変化を計測した。

なお、ひずみゲージの設置範囲は、二次元 FEM 解析の結果も参考にして設定した。解 析的検討について次頁以降に示す。



図 2.3-689 パイ型ゲージとひずみゲージ取付位置



図 2.3-690 パイ型ゲージとひずみゲージの取付状況(上部低拡散層)

ア)上部低拡散層のひび割れ計測試験を模擬した解析

本年度は、光ファイバセンサーによるひび割れ計測を実証することを目的として、上部 低拡散層に人為的に強制的にひび割れを発生させて光ファイバセンサーによるひずみ計 測を実施する。ひび割れを発生させる手法として、標準パッカーにより載荷孔内に荷重を 作用させ、強制的にひび割れを発生させるため、実際の中深度処分施設のセメント系人工 バリア部材にひび割れが発生する際とは異なる応力状態が生じると想定される。光ファ イバセンサーで二次元的なひずみ分布を計測するとともに、ひずみゲージを昨年度より も広範囲に設置して参照データを取得するため、ひずみゲージ設置範囲の設定に資する ことを目的として、上部低拡散層のひずみ分布を解析的に検討した。解析は二次元 FEM 解析を用いた。

·解析領域

解析領域を図 2.3-691、図 2.3-692 に示す。標準パッカーの載荷孔中心とひび割れが発生すると考えられる載荷孔延長線を対象面と考え、標準パッカーによる荷重影響領域の 1/4 を解析領域とした。ただし、図 2.3-691、図 2.3-692 に示す下側の領域は、上部低拡散層の部材端部に近いため、左上の領域を解析領域と設定した。



図 2.3-691 解析領域(上部低拡散層全体表示)



図 2.3-692 解析領域 (解析領域付近拡大)

・解析コード

解析には、二次元有限要素法解析プログラム GEOTECS を用いた。本プログラムは、 トンネル、地下発電所、地下エネルギー施設などの岩盤構造物を対象としたプログラムで あるが、セメント系材料の解析にも適用可能である。本プログラムは、有限要素法による 二次元平面ひずみ解析を実施するもので、モデル化は、ソリッド要素、ジョイント要素、 ビーム要素、トラス要素、バネ要素などを用いることができるが、本解析ではソリッド要 素のみを用いている。

・解析ケースと解析モデル

二次元有限要素法による解析で、セメント系材料のひび割れ発生を表現することは困難 であるため、本検討では、ひび割れ発生前とひび割れ発生後を模擬して2ケースの解析を 実施した。具体的には、図2.3-693に示すように、ひび割れ発生面である解析モデル右端 境界の境界条件を変えることで、ひび割れ発生前後の状態をモデル化した。

ひび割れ発生前は、ひび割れ発生面である解析モデル右端境界の水平方向変位が拘束されるように、鉛直フリー、水平固定の境界条件とした。一方、ひび割れ発生後は、ひび割

れ発生面である解析モデル右端境界の水平方向変位が拘束されない状態となるため、鉛 直・水平ともにフリーの境界条件とした。解析モデル右端境界以外は、図 2.3-693 に示す ようローラー支承とした。



·解析条件

物性値

上部低拡散層は弾性体としてモデル化した。解析に用いる物性値は表 2.3-180 に示すとおりである。

部位	物性	設定値	出典
上部低拡散層	弹性係数	35.8 (kN/mm²)	初期性能確認試験結果[38] (表 2.3-181 参照)
	ポアソン比	0.2(-)	コンクリート標準示方書[39]

表 2.3-180 解析物性值

	1				+++			
部材	部位	, 姜士冬姓	材齡		静理性係数(kN/mm²)			
6141	1 未工委 1 山山		(日)	1	2	3	平均	
		現場水中養生	7	-	-	-	-	
	底如		28	22.0	22.5	22.9	22.5	
	(U20年度)		91	27.6	27.1	27.0	27.2	
	(120年度)		1500	36.0	36.3	36.2	36.2	
	加工		1850	35.4	35.8	36.0	35.7	
			2200	36.2	36.6	35.9	36.2	
		現場水中(左)	7	-	-	-	-	
低垃劫村	但山立四		28	23.5	23.3	23.6	23.5	
15.12 12.19	(山21年年)		91	27.8	28.4	28.4	28.2	
	(日21年度)		365	32.1	32.3	32.9	32.4	
			1150	34.3	34.0	34.7	34.3	
			7	-	-	-	-	
	上部		9	14.4	14.7	15.0	14.7	
	(H24年度)	現場水中養生	28	21.8	22.0	21.9	21.9	
	施工		91	27.1	26.9	27.5	27.2	
		365	35.4	35.8	36.2	35.8		

表 2.3-181 低拡散層の静弾性係数試験結果[38]

荷重

荷重は、標準パッカーの断面形状と荷重載荷機構を考慮して、図 2.3-694 に示すように、 等分布荷重を載荷孔内の 30mm の範囲に水平方向に作用させた。



図 2.3-694 分布荷重の概念図と標準パッカーの断面形状

本事業で用いた標準パッカーは、表 2.3-182 に示すように、最大で 6.5MN の削岩力を 載荷可能である。本解析では、削岩力 0.1MN に相当する等分布荷重を 65 ステップに分割 して順次作用させた。

		ウエッジ	*						
型 式	直径 (mm)	有効長 (mm)	割岩幅 (mm)	全長 (mm)	重量 (kg)	使用ビット 径(mm)	せん孔長 (mm)	割岩力 (MN)	用途
C15W28A200	28	200	7.5	940	30	30	360	F 2	原云切山) 起去 细支田功工具
C15W42A450	42	450	7.5	1190	31	44	610	5.5	原石切山し、虹石、埋立用矸石场
C15W30B200	30	200	9	940	30	32	360	11	岩般田 転石田 埋立田砂石堤
C15W42B400	42	400	9	1140	31	44	560	4.4	石盈用、粒石用、埋立用矸石场
C15W32D200	32	200	12	940	30	34	360		
C15W40D300	40	300	12	1040	30	42	460	3.3	コンクリート用、転石用
C15W42D300	42	300	12	1040	30	44	460		
C15W38F200	38	200	15	940	30	40	360	2.6	
C15W47F300	47	300	15	1040	30	50	460	2.0	
K25W40A400	40	400	12.5	1343	35	42	660	6.5	
K25W42A440	42	440	12.5	1395	36	44	700	6.5	岩盤用、転石用、
K25W62A500	62	500	12.5	1455	37	64	760	6.5	コンクリート用、ヘンノート杭用
K25W58D370	58	370	20	1325	36	60	630	4.1	

表 2.3-182 標準パッカーの仕様[40]

・解析結果(ひずみ分布)

ひずみコンター図を図 2.3-695~図 2.3-706 に示す。





図 2.3-697 ひずみコンター図 (Case1、削岩力 3.0MN 時)



図 2.3-699 ひずみコンター図 (Case1、削岩力 5.0MN 時)









図 2.3-706 ひずみコンター図 (Case2、削岩力 6.0MN 時)

・ひずみゲージ設置範囲の提案

平成 30 年度に実施した上部低拡散層を対象としたひび割れ計測試験では、主にひずみ ゲージによって計測されたひずみを載荷ステップの指標としていたため、ひび割れ発生時 点の載荷荷重が記録されていないが、油圧ゲージの最大値(80MPa 程度で削岩力 6.5MN に対応)に対して 1/2 程度の油圧で目視可能なひび割れが発生している。また、上部低拡 散層は無筋部材であることから、手前コンクリートピットを対象とした試験と異なり、ひ び割れ発生後には大きな油圧の上昇がみられなかった。

ここでは、削岩力 3MN 程度でひび割れが発生するものと想定し、削岩力 3.0MN の解 析結果を参照してひずみゲージの設置範囲について検討する。上述した解析結果のうち、 Case-1、Case-2 の削岩力 3.0MN におけるひずみ分布図に、ひずみゲージ配置(案)(図 2.3-707)を重ねて図 2.3-708、図 2.3-709 に示す。



図 2.3-707 現状のひずみゲージ配置(案)



図 2.3-708 ひずみ分布とひずみゲージ配置案の対比(Case-1、削岩力 3.0MN時)



 X方向
 Y方向

 図 2.3-709
 ひずみ分布とひずみゲージ配置案の対比(Case-2、削岩力 3.0MN時)

ひずみ分布の広がりが最も大きい図 2.3-709(左)を参照すると、現状のひずみゲージ 配置(案)は、100μ程度圧縮ひずみが生じると考えらえる範囲を包含している。また、 大きなひずみが生じないと考えられる範囲にもひずみゲージを設置する計画となってい る。したがって、原位置試験における平面的なひずみ分布を概ね計測可能であると考えら れる。

ただし、本解析では、上部低拡散層底面の拘束をモデル化できていないため、標準パッ カーによる荷重の影響範囲は、本解析結果よりも小さいと想定される。

c) ひび割れの誘発

ひび割れを発生させたい位置に合せて標準パッカーを設置し、油圧ポンプを用いて標 準パッカーに加圧した。段階的にひずみやひび割れ幅を増大させられるように、ひずみゲ ージやパイ型ゲージの計測値をリアルタイムで確認して、油圧ポンプで作用させる圧力 を制御した。

d) 光ファイバセンサーによるひずみ計測

標準パッカーによる加圧を停止したあと、光ファイバセンサーによる計測を実施した。 光ファイバセンサーの計測状況を図 2.3-554 に示す。計測方法の詳細については、試験 結果の説明に併せて示すこととする。



図 2.3-710 光ファイバセンサーによる計測状況

e) クラックゲージを用いたひび割れ幅の目視計測

ひび割れを目視で確認できた時点から、クラックゲージを用いてひび割れ幅の計測を 行った。クラックゲージを用いたひび割れ幅の目視計測、光ファイバセンサーを用いたひ ずみ計測を終了後、再度、標準パッカーに加圧してひび割れ幅を拡大させて、同様にひず みやひび割れ幅の計測を繰り返し実施した。

- c. 試験結果
- (a) 目視観察や計測器による参照データの取得
- a) 上部低拡散層
- ア)直交方向ひび割れ

各計測ステップにおけるパッカーの加圧停止の目安をひずみゲージ及びパイ型ゲージ の値をもとに管理する。各ステップにおけるパッカーの加圧値を表 2.3-183 に示す。 STEP5 時点で初めて 0.05mm 以下の微細なひび割れが目視確認できた。その後 STEP6 でひび割れ幅が増幅し最大 0.20mm、STEP7 では最大 0.35mm であった。STEP7 時点 のひび割れの形状をスケッチし、CAD 図に置き換えたものを図 2.3-711 に示す。ここで は、ひび割れ部分に近い代表的なひずみゲージとパイゲージの結果を図 2.3-712 に示す。 Y4-5 についてはひずみの値がかなり大きいため、右側縦軸を参照することとする。

STEP	各ステップにおける 加圧停止の目安	各ステップの 標準パッカーの加圧値
0	初期値	0 MPa
1	ひずみゲージの最大値が 10μ	8 MPa
2	ひずみゲージの最大値が 20μ	12 MPa
3	ひずみゲージの最大値が 50μ	18 MPa
4	ひずみゲージの最大値が 100 μ	20 MPa
5	パイゲージの最大値が 0.05mm	26 MPa
6	パイゲージの最大値が 0.10mm	56 MPa
7	パッカーの加圧最大値 70MPa	70 MPa

表 2.3-183 計測ステップと加圧停止の目安値(上部低拡散層 直交方向)



図 2.3-711 ひび割れ形状及びひび割れ幅(直交方向ひび割れ)



図 2.3-712 直交ひび割れ 計器計測値(上 パイゲージ、中・下 ひずみゲージ)

イ)斜め方向ひび割れ

直交ひび割れと同様に、削孔した孔にパッカーを設置し加圧した。各ステップについて、 ひび割れの目安となるひずみゲージやパイゲージをひび割れ方向には設置していないた め、パッカーの加圧値を目安に停止した(表 2.3-184)。図 2.3-713に標準パッカーを設置 した図面と、STEP4 で最終的に入ったひび割れの結果を示す。STEP3 で初めて、目視で ひび割れが確認され、最大 0.08mm であった。その後、ひび割れ幅は進展し STEP4 では 最大 0.30mm であった。

ひずみゲージやパイゲージの結果を図 2.3-714 に示す。ここでは、ひび割れ周縁の代表 的な点のみ結果を記載した。初期値からひずみがあるのは、直交ひび割れ試験完了後、0 セットせずに測定を実施したためである。Y6-4 が STEP4 で急激に低下しているのはひ び割れの進展に伴うゲージの破断だと考えられる。斜め方向のひび割れの発生、伸展、拡 大に伴って、周縁で引張~圧縮ひずみが生じていることが分かる。

表 2.3-184 計測ステップと加圧停止の目安値(上部低拡散層 斜め方向)

STEP	各ステップの 標準パッカーの加圧値
0	0 MPa
1	10 MPa
2	$20 \mathrm{MPa}$
3	40 MPa
4	70 MPa



図 2.3-713 ひび割れ形状及びひび割れ幅(斜め方向ひび割れ)



図 2.3-714 斜めひび割れ 計器計測値(上 パイゲージ、中・下 ひずみゲージ)

(b) 光ファイバセンサーを用いたひずみの計測

- a)上部低拡散層
- ア) 試験方法

上部低拡散層に、格子状に設置してある光ファイバに対して、直交するひび割れ、斜め で交差するひび割れを誘発するように標準パッカー工法を適用した。パッカー設置位置 を図 2.3-715 に示す。前年度は上部低拡散層向かって右側、今年度は上部低拡散層向かっ て左側にて試験を実施した。光ファイバ敷設状況を図 2.3-716 に示す。



図 2.3-715 ひび割れ誘発位置(上部低拡散層)



図 2.3-716 光ファイバ敷設状況(上部低拡散層)

使用したゲージは図 2.3-715 に示すパイ型ゲージ (PI-5-100) 及び、ひずみゲージ (PL-60) の 2 種類である。また、ゲージ長、基線長及び設置数を表 2.3-185 に示す。



図 2.3-717 パイ型ゲージ (PI-5-100) とひずみゲージ

表 2 3-185	ゲージ長	基線長及びチ-	ャンネル数
X 4.0 100			

	ゲージ長・基線長	CH数
パイ型ゲージ	100mm	8
ひずみゲージ	60mm	125

光ファイバセンサーの計測パラメーターを表 2.3-186~表 2.3-187 に示す。段階的な加 圧ステップごとに、光ファイバセンサーによる計測を繰返した。

表 2.3-186 PPP-BOTDA 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)

距離レンジ	600 m
位置分解能	5 cm
サンプリング間隔	2.5 cm
加算回数	2^{15}
周波数掃引範囲	300 MHz (10.60~10.90GHz)
掃引周波数ステップ	5 MHz
周波数掃引回数	61
計測時間 (単発)	約150秒

表 2.3-187 TW-COTDR 方式の計測パラメーター(現地試験、上部低拡散層)

距離レンジ	600 m	
位置分解能	5 cm	
サンプリング間隔	$2.5~{ m cm}$	
加算回数	2^{13}	
周波数掃引範囲	$200 \mathrm{~MHz}$	(194.0~194.2GHz)
掃引周波数ステップ	0.2MHz	
周波数掃引回数	1001	
計測時間 (単発)	約 270 秒	

イ)試験結果

・ひずみ分布

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1 の計測 結果を図 2.3-718~図 2.3-719 に示す。PPP-BOTDA 方式では変化が見られないが、TW-COTDR 方式ではひずみの局所的な変化が見られた。







R-STEP1-1000.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-719 TW-COTDR 方式結果 1 (上部低拡散層 STEP1)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP2 の計測 結果を図 2.3-720~図 2.3-721 に示す。目視によるひび割れ発生は確認されなかったが、 PPP-BOTDA 方式、TW-COTDR 方式ともに明確なひずみの局所的な変化が見られた。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-720 PPP-BOTDA 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2)


R-STEP2-1028.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-721TW-COTDR 方式結果 2(上部低拡散層 STEP2)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP3 の計測 結果を図 2.3-722~図 2.3-723 に示す。目視によるひび割れ発生は確認されなかったが、 前ステップと同様に、PPP-BOTDA 方式、TW-COTDR 方式ともに明確なひずみの局所 的な変化が見られた。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-722 PPP-BOTDA 方式結果 3 (上部低拡散層 STEP3)

R-STEP3-1059.csv

R-STEP3-1059.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-723 TW-COTDR 方式結果 3 (上部低拡散層 STEP3)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP4 の計測 結果を図 2.3-724~図 2.3-725 に示す。目視によるひび割れ発生は確認されなかったが、 前ステップ同様、PPP-BOTDA 方式、TW-COTDR 方式ともに明確なひずみの局所的な 変化が見られた。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-724PPP-BOTDA 方式結果 4 (上部低拡散層 STEP4)



R-STEP4-1126.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)剤間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-725 TW-COTDR 方式結果 4(上部低拡散層 STEP4)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP5 の計測 結果を図 2.3-726~図 2.3-727 に示す。STEP5 時点で初めて 0.05mm 以下の微細なひび 割れが目視確認できた。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-726 PPP-BOTDA 方式結果 5 (上部低拡散層 STEP5)



R-STEP5-1159.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-727TW-COTDR 方式結果 5 (上部低拡散層 STEP5)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP6 の計測 結果を図 2.3-728~図 2.3-729 に示す。目視によるひび割れは拡大し、最大ひび割れ幅は 0.20mm であった。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-728 PPP-BOTDA 方式結果 6 (上部低拡散層 STEP6)

R-STEP6-1246.csv

R-STEP6-1246.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-729TW-COTDR 方式結果 6 (上部低拡散層 STEP6)

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP7 の計測 結果を図 2.3-730~図 2.3-731 に示す。目視によるひび割れは更に側面まで進展、拡大し、 最大ひび割れ幅は 0.35mm であった。



補間処理(長軸方向の光ファイバ)補間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-730 PPP-BOTDA 方式結果 7 (上部低拡散層 STEP7)

R-STEP7-1310.csv

R-STEP7-1310.csv



補間処理(長軸方向の光ファイバ)剤間処理(短軸方向の光ファイバ)図 2.3-731 TW-COTDR 方式結果 7(上部低拡散層 STEP7)

・参照データとの比較

ひずみゲージ

光ファイバセンサーによる計測結果と、近傍のひずみゲージの計測結果を併記して、パ ッカーの加圧ステップごとに図 2.3-732~図 2.3-759 に示す。なお、図中の P11、P12、 P14、P15 は光ファイバセンサーの通りを示す(図 2.3-689)。



図 2.3-732 ひずみ分布計測結果 (STEP1、長軸: P14)







図 2.3-734 ひずみ分布計測結果 (STEP2、長軸: P14)



図 2.3-735 ひずみ分布計測結果 (STEP2、長軸: P15)



図 2.3-736 ひずみ分布計測結果 (STEP3、長軸: P14)



図 2.3-737 ひずみ分布計測結果 (STEP3、長軸: P15)



図 2.3-738 ひずみ分布計測結果 (STEP4、長軸: P14)



図 2.3-739 ひずみ分布計測結果 (STEP4、長軸: P15)



図 2.3-740 ひずみ分布計測結果 (STEP5、長軸: P14)



図 2.3-741 ひずみ分布計測結果 (STEP5、長軸: P15)



図 2.3-742 ひずみ分布計測結果 (STEP6、長軸: P14)



図 2.3-743 ひずみ分布計測結果 (STEP6、長軸: P15)



図 2.3-744 ひずみ分布計測結果 (STEP7、長軸: P14)



図 2.3-745 ひずみ分布計測結果 (STEP7、長軸: P15)



図 2.3-746 ひずみ分布計測結果 (STEP1、短軸: P11)



図 2.3-747 ひずみ分布計測結果 (STEP1、短軸: P12)



図 2.3-748 ひずみ分布計測結果 (STEP2、短軸: P11)



図 2.3-749 ひずみ分布計測結果 (STEP2、短軸: P12)



図 2.3-750 ひずみ分布計測結果 (STEP3、短軸: P11)



図 2.3-751 ひずみ分布計測結果 (STEP3、短軸: P12)



図 2.3-752 ひずみ分布計測結果 (STEP4、短軸: P11)



図 2.3-753 ひずみ分布計測結果 (STEP4、短軸: P12)



図 2.3-754 ひずみ分布計測結果 (STEP5、短軸: P11)



図 2.3-755 ひずみ分布計測結果 (STEP5、短軸: P12)



図 2.3-756 ひずみ分布計測結果 (STEP6、短軸: P11)



図 2.3-757 ひずみ分布計測結果 (STEP6、短軸: P12)







図 2.3-759 ひずみ分布計測結果 (STEP7、短軸: P12)

ひずみゲージの分布的計測

光ファイバセンサー直交方向にひび割れを発生させるケースにおける STEP1~ STEP7 のひずみゲージの分布的計測結果を図 2.3-760~図 2.3-766 に示す。



補間処理(長軸方向のひずみゲージ) 補間処理(短軸方向のひずみゲージ) 図 2.3-760 ひずみゲージの測定結果 1 (上部低拡散層 STEP1)



oct201910RKS-GaugeX Time1020



補間処理(長軸方向のひずみゲージ) 補間処理(短軸方向のひずみゲージ) 図 2.3-761 ひずみゲージの測定結果 2(上部低拡散層 STEP2)



補間処理(長軸方向のひずみゲージ) 補間処理(短軸方向のひずみゲージ) 図 2.3-762 ひずみゲージの測定結果 3 (上部低拡散層 STEP3)



oct201910RKS-GaugeX Time1117



補間処理(長軸方向のひずみゲージ)補間処理(短軸方向のひずみゲージ)図 2.3-763 ひずみゲージの測定結果 4 (上部低拡散層 STEP4)



oct201910RKS-GaugeX Time1152



補間処理(長軸方向のひずみゲージ)補間処理(短軸方向のひずみゲージ)図 2.3-764 ひずみゲージの測定結果 5 (上部低拡散層 STEP5)

oct201910RKS-GaugeY Time1226

oct201910RKS-GaugeX Time1226



補間処理(長軸方向のひずみゲージ)補間処理(短軸方向のひずみゲージ)図 2.3-765 ひずみゲージの測定結果 6(上部低拡散層 STEP6)

oct201910RKS-GaugeY Time1300

oct201910RKS-GaugeX Time1300





デジタル画像相関法

応力場を面的に把握するため、デジタル画像相関法(DIC)を併せて実施した。

デジタル画像相関法は、表面のランダムパターンを基に、二画像間において相関が高い 位置を探索し、画素間を補間して、サブピクセル以下で位置を探索する原理である。変形 前後のイメージを図 2.3-767 に示す。この手法の推定分解能は、800×1200 画素で 2×3m 範囲を撮影した場合、1 画素あたり 2.5mm、画素間補間によって 1/10 画素程度までは読 取り可能とすると、250 ミクロン以下である。

本試験では、視野内の面内変位分布の取得を試みる。三脚上にカメラを設置して、ひび割れ試験の試験箇所を上から加圧ステップごとに撮影した(図 2.3-768)。結果を図 2.3-769 ~図 2.3-776に示す。また、必要に応じて照明を追加し、適宜照度の調整を行った。



図 2.3-767 デジタル画像相関法による変形前後のイメージ



図 2.3-768 撮影実施状況



図 2.3-770 撮影結果 (STEP4)



図 2.3-772 撮影結果 (STEP5)



図 2.3-774 撮影結果(STEP6)



図 2.3-769 撮影結果 (STEP0)



図 2.3-771 撮影結果 (STEP1)



図 2.3-773 撮影結果 (STEP2)



図 2.3-775 撮影結果 (STEP3)



図 2.3-776 撮影結果 (STEP7)



図 2.3-777 方向成分值

パッカーにて加圧した付近の Y 方向のひずみ変化を図 2.3-778~図 2.3-779 に示す。画像の補間処理により、ひずみの変化は見えるが、ステップに伴う単調な増加は確認できない結果となった。



図 2.3-778 パッカーにて加圧した付近のひずみ変化 (a)



図 2.3-779 パッカーにて加圧した付近のひずみ変化(b)

d. まとめ

実規模施設を活用し、光ファイバセンサーが 30cm 間隔の格子状に設置された手前コン クリートピット(鉄筋コンクリート)と上部低拡散層(無筋モルタル)を対象に、標準パ ッカーで施設にひび割れを発生させて、そのときに生じるひずみを光ファイバセンサー で計測した。光ファイバセンサーによる計測は、ひずみやひび割れを拡大させるごとに実 施し、そのときのひずみゲージの計測値やデジタル画像相関法の結果、目視観察結果と比 較して、その計測性能を定量評価した。

得られた結果を以下に示す。

- ✓ ブリルアン計測(PPP-BOTDA 方式)、レイリー計測(TW-COTDR 方式)ともに、 目視でひび割れが確認されるより前に、ひずみの局所的な変化をとらえることができた。特に、レイリー計測は微小なひずみ変化をとらえるのに優れており、ひび割れの 予兆をとらえられる可能性がある。
- ✓ 昨年度の試験結果から、ひずみゲージと光ファイバは比較的良く一致していたものの、 空間分解能の違い(ゲージ長 90mm、光ファイバ 50mm)や設置位置が異なることな どもあり、ひずみゲージと光ファイバに差が見られていた。今年度は網羅的な評価の ために、ひずみゲージを多数設置し、稠密な参照データを取得し、改めて、ひずみゲ ージと光ファイバの計測値が良く一致することを確認した。
- ✓ デジタル画像相関法での検討では、画像の補間処理により、ひずみの変化は見えるが、
 ステップに伴う単調な増加は確認できない結果となり、今後の課題となった。

2.3.3 の参考文献

- [1] Delepine-Lesoille, S., Girard, S., Landolt, M., Bertrand, J., Planes, I., Boukenter, A., and Ouerdane, Y. (2017). France's state of the art distributed optical fibre sensors qualified for the monitoring of the French underground repository for high level and intermediate level long lived radioactive wastes. Sensors, 17(6), 1377.
- [2] 保立和夫、村山英晶、光ファイバセンサ入門、光防災センシング振興協会
- [3] Farhoud R., Bertrand J., Guzik A., Bumbieler F., Helmlinger B. and Kishida K. (2019). Qualification of diameter change monitoring system of inaccessible steel tube. MODERN2020 Paris.
- [4] Vogt T., Fisch H., Garitte B., Lüthi B. F., Müller H. R., Reinicke A, Sakaki T., Frieg B., Yeatman R. and König W. (2019). What we can learn from a fullscale demonstration experiment after 4 years of DTS monitoring – the FE Experiment. MODERN2020 Paris.
- [5] Delepine-Lesoille, S. et al. : Validation of TW-COTDR method for 25km distributed optical fiber sensing. In Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, Vol. 8794, p. 879438 (2013).
- [6] 李哲賢ほか: PPP-BOTDA 測定技術を用いた 2cm 分解能ブリルアン分布計測の実現、電子情報通信学会技術研究報告、光ファイバ応用技術、108(32)、pp.55-60、2008 年
- [7] Fernandez, A.F.; Rodeghiero, P.; Brichard, B.; Berghmans, F.; Hartog, A.H.; Hughes, P.; Williams, K. andLeach, A.P. Radiation-tolerant Raman distributed temperature monitoring system for large nuclear infrastructures. IEEE Trans. Nucl. Sci. 2005, 52, 2689-2694.
- [8] Hartog, A. H. (2017). An introduction to distributed optical fibre sensors. CRC press.
- [9] International Journal: Fiber optic sensors Part2-2: Temperature measurement– Distributed sensing, IEC 61757-2-2, International Electrotechnical Commission
- [10] 吉澤信幸:カーボンコーティングによる光ファイバの高信頼化、材料と環境 41(1)、46-53、 1992 年
- [11] Lindholm, E. A., Li, J., Hokansson, A. S., Abramczyk, J., Arthur, S. E., and Tallant, D. R.: Low speed carbon deposition process for hermetic optical fibers. In Proc. 48th Int. Wire Cable Symposium, 672-679 (1999).
- [12] 愛川和彦、井添克昭、社本尚樹、工藤学、妻沼孝司:耐放射線シングルモード光ファイバ、 フジクラ技報、113, 10-14、2008 年
- [13] Wijnands, Thijs, et al.: Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field. IEEE Transactions on Nuclear Science 55.4, 2216-2222 (2008).
- [14] 藤原成利: ガラスの劣化、マテリアルライフ、3(2)、77-81、1991年
- [15] 中原恒雄、鈴木修三:光ファイバの特性、テレビジョン学会誌 32(4)、286-291、1978年
- [16] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成 21 年度管理型処分技術調査等委託費地下

空洞処分施設性能確証試験報告書(第I分冊)、2010年

- [17] Lindholm, E. A., Li, J., Hokansson, A., Slyman, B., Burgess, D.: Aging behavior of optical fibers in aqueous environments. In Photonics Europe, International Society for Optics and Photonics, 25-32, 2004.
- [18] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成24年度地層処分技術調査等事業TRU廃 棄物処分技術人工バリア長期性能評価技術開発報告書(第1分冊)一人工バリアの長期挙動 の評価一、4-68、2013年
- [19] 草野譲一:高放射線環境で使用される機器・材料類の耐放射線特性データ集、JAEA-Review 2008-012、日本原子力研究開発機構、2008 年
- [20] 日本アイソトープ協会: アイソトープ手帳、148、2001年
- [21] 日本工業標準調査会: 光ファイバ機械特性試験方法 JIS C 6821 (1999)
- [22] 常石克之: 光ファイバの被覆材料と構造. SEI テクニカルレビュー 182、56-64 (2013).
- [23] 満永豊、勝山豊、小林敬和、石田之則:スクリーニング試験による光ファイバ強度保証法.
 電子情報通信学会論文誌 B 66(7)、829-836 (1983).
- [24] 山田裕介、中島和秀、倉嶋利雄:通信用光ファイバの強度保証と破断特性評価技術. NEW GLASS 27 (106)、3-6 (2012).
- [25] 日本工業標準調査会: 光ファイバ損失試験方法 JIS C 6823 (2010).
- [26] Kakuta, T., Shikama, T., Narui, M., & Sagawa, T. (1998). Behavior of optical fibers under heavy irradiation. Fusion Engineering and Design, 41(1-4), 201-205.
- [27] 中原基博、坂口茂樹、光ファイバの強度と破壊、応用物理、48(9)、859-866 (1979).
- [28] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 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 30 年 3 月
- [29] (財) 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 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 30 年 3 月
- [30] 李哲賢ほか: PPP-BOTDA 測定技術を用いた 2cm 分解能ブリルアン分布計測の実現、電子 情報通信学会技術研究報告、光ファイバ応用技術、108(32)、pp.55-60、2008 年
- [31] Delepine-Lesoille, S. et al. : Validation of TW-COTDR method for 25km distributed optical fiber sensing. In Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, Vol. 8794, p. 879438 (2013).
- [32] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:低レベル放射性廃棄物の処分に関す る技術開発事業地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 30 年 3 月
- [33] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:管理型処分技術調査等事業地下空洞 型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成27年3月
- [34] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:低レベル放射性廃棄物の処分に関す る技術開発事業地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 30 年 3 月
- [35] 新技術情報共有システム NETIS 新技術概要説明情報

- [36] 協立エンジ株式会社: KK シート工法カタログ
- [37] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター、2019
- [38] 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 26 年度管理型処分技術調査等 事業 地下空洞型処分施設閉鎖技術確証試験 報告書、平成 27 年 3 月
- [39] 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]、平成 29 年
- [40] 平戸金属工業株式会社:標準パッカー (C15W、K25W シリーズ) カタログ、 http://www.hirado.co.jp/wp-content/uploads/2016/11/K25-C15.pdf 、2019 年 8 月現在

2.3.4 モニタリング計画の具体化に資する検討

前提条件の整理

ここでは、モニタリング計画を具体的に検討するに当たり、モニタリングの対象施設、対 象施設の形状、処分場の建設・操業工程などの前提条件を改めて整理する。

1) モニタリング対象施設

国内外の放射性廃棄物処分施設のモニタリングに関する既往検討成果を参照すると、中深 度処分を対象としたモニタリング対象施設として、以下の3施設が考えられる。

- · 実処分施設
- · 地下模擬処分施設
- · 地上施設

また、実処分施設と地下模擬処分施設を対象とした場合には、各施設から離れた場所で実施できるモニタリング施設として、以下の2施設が考えられる。

- ・ 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

以上のモニタリング対象施設のイメージを図 2.3-780 に示す。



図 2.3-780 モニタリング対象施設のイメージ

本検討では、上記のモニタリング対象施設のうち、これまでに十分な検討がなされていな い地下施設(実処分施設、地下模擬処分施設)を対象として、人工バリアの機能確認に焦点 を当ててモニタリング計画を具体的に検討する。さらに、閉鎖措置段階以降にも比較的容易 にモニタリングを継続することが可能な近傍ボーリング孔などの採水施設も検討対象とする。

2) 施設形状

実処分施設の施設形状は、既往検討成果を参考にして想定する。

処分空洞と人工バリア部材の断面形状は、既設の実規模施設の形状とする(図 2.3-781)。 なお、図 2.3-781の断面は、施設挙動の定量化検討で用いている断面と同様である。



図 2.3-781 想定する処分空洞の断面図

縦断方向には、図 2.3-782[1]に示すように、廃棄体が処分坑道縦断方向に 7 列定置される 区画に分割されるものと考える。



図 2.3-782 処分空洞内での操業状況(処分空洞縦断図)[1]

処分空洞縦断方向の廃棄体定置間隔は、既設の実規模施設における定置間隔[2]を参考とする。図 2.3-783 に示すように、廃棄体間の離隔を 260mm、中仕切り壁との離隔を 310mm 及び 660mm とし、処分空洞縦断方向に 7 列の廃棄体を定置すると、1 区画の内空寸法は以 下のようになる。

 $1,\!600 \text{mm} \times 7 \!+\! 260 \text{mm} \times 6 \!+\! 310 \text{mm} \!+\! 660 \text{mm} \!=\! 13,\!730 \text{mm}$



図 2.3-783 想定する処分空洞縦断方向の廃棄体定置間隔[2]

また、既往検討[3]で対象とした施設形状(図 2.3-784)を参考に、処分空洞 1 本当たり、 コンクリートピットは8区画に分割されるものと考える。また、図 2.3-784より、処分空洞 両端部には 20m 程度の廃棄体が定置されないスペースがあるものとする。



図 2.3-784 既往検討で検討対象とした施設形状(処分空洞部平面図、[3]に一部加筆)

以上より、本検討で想定する処分空洞の縦断図を図 2.3-785 に示す。なお、処分空洞の配 置間隔は、図 2.3-784 より 45m と想定する。


図 2.3-785 本検討で想定する処分空洞の縦断図

3) 施設配置

中深度処分施設は、現在整備が進められている規制基準で、10万年後においても70m以上の深度を確保することが求められている。中深度処分は、処分場サイトが未定であり、本 事業において10万年間の隆起・侵食量を算定することが困難であるため、ここでは、10万 年間の隆起・侵食の影響を50mと仮定し、処分空洞の設置深度を地表面下120mと想定する。 なお、処分空洞の多段配置は考慮せず、複数の処分空洞が同一深度に設置されるものと考え る。

地上から地下施設へのアクセスは、斜坑によるものとし、斜坑の勾配を10%程度と仮定する。この場合、アクセス坑道の延長は1,200mとなる。

4) 建設・操業工程

地下施設(実処分施設、地下模擬処分施設)におけるモニタリングを具体的に検討する際、 センサーの設置位置や設置時期、計測可能な時期は、建設・操業工程に依存する。ここでは、 既往検討[1][4]を参考に、表 2.3·188~表 2.3·190 に示す建設・操業工程を想定する。なお、 表 2.3·188~表 2.3·190 に示した概念図は、文献[1]より抜粋したものである。

また、n本目の処分空洞で廃棄体定置(Step7)が完了し、n+1本目の処分空洞で Step6 までの施工が完了している場合、n+1本目の処分空洞での廃棄体定置作業(Step7)を開始 するものと想定する。

Step	概念図	備考
Step1 アクセス坑道、連絡坑 道、処分空洞掘削	_	
Step2 処分空洞内のインバー ト、側部埋戻しコンクリ ート施工	_	
Step3 底部低透水層施工		 8 区画分の底部低透水層を施 工すると想定
Step4 底部低拡散層施工		 8 区画分の底部低拡散層を施 工すると想定
Step5 底部・側部コンクリート ピット施工		 Step5 で妻部コンクリートピット及び中仕切り壁も施工すると想定 概念図に示されるように、1 区画毎にコンクリートを打設すると想定 処分空洞縦断方向の鉄筋は連続していると想定

表 2.3-188 本検討で想定する処分施設の建設・操業工程(1/3)

2-794



表 2.3-189 本検討で想定する処分施設の建設・操業工程(2/3)

2-795



表 2.3-190 本検討で想定する処分施設の建設・操業工程 (3/3)

2-796

(2) モニタリング計画の検討

上述した前提条件に基づき、本節では、モニタリング計画(例)を具体的に検討する。

ただし、中深度処分は、規制基準が検討中の段階であり、実施主体による具体的な安全確 保方策が示されていない状況である。そこで、本事業では、今後、実施主体によって提示さ れる安全確保方策におけるモニタリングの目的や役割に応じて、実施主体が任意に選択可能 なモニタリング計画を提示する。

モニタリング計画は、本事業で設定したモニタリングの制約条件への適合性に応じて、表 2.3-191 に示すように複数のレベルに区分した。

	A 2.3-191 モークリンク計画の区方				
区分	制約条件への適合	モニタリングの例			
А	バリア機能を低下させないこ とを基本とする	 ・ 立地段階に設置された調査用ボーリング孔を活用した地下水分析 ・ 廃棄物の埋設段階までにおけるセメント系材料のひび割れ観測(可視領域に限定) 			
В	僅かなバリア機能の低下を許 容するが、修復が可能	 ・モニタリング用に設置するボーリング孔を用いた地 下水分析 			
С	僅かなバリア機能の低下を許 容する	 ・光ファイバセンサー技術を用いたセメント系材料の ひび割れ観測 			

表 2.3-191 モニタリング計画の区分

モニタリング項目は、過年度に抽出した確認対象項目(表 2.3-192)とする。

• •				
計測技術	段階	確認対象項目		
既存の計測技術 (オプション A、B)	閉鎖措置段階前	 ・ 処分施設の変形計測 (空洞内空変位、底部低透水層の沈下等) ・ 温度変化 ・ セメント系材料のひび割れ観測 ・ 裏面排水の水質分析 ・ 周辺地下水の水質分析(ボーリング孔) ・ 地震動計測 		
	閉鎖措置段階以降	・周辺地下水の水質分析(ボーリング孔)・地震動計測(地上のみ)		
光ファイバ	閉鎖措置段階前	・セメント系材料のひび割れ観測		
センサー技術	及び	・温度変化		
(オプション C)	閉鎖措置段階以降	・(膨潤圧を含む)施設内の応力分布※		

表 2.3-192 モニタリング計画(例)検討におけるモニタリング項目

※ 光ファイバセンサーによる圧力分布計測技術が実用レベルに達した場合を想定

1) モニタリング領域の設定

中深度処分対象の廃棄物は、加藤ほか[5]の試算によると、廃棄体換算で約6万m³とされている。本検討で想定した地下施設の形状・寸法の場合、原子力学会標準[6]に示される廃棄体仕様を想定すると、20本以上の処分空洞が必要となる。

これら全ての処分空洞をモニタリング対象とすることは現実的ではないと考えられるため、 高レベル放射性廃棄物処分場を含む国内外の事例を参考にして、モニタリング対象領域の設 定について検討する。

a. フランスの事例

フランスでは、廃棄体及び廃棄体近傍でのモニタリング実施が法的要件として求められ ている。フランスの放射性廃棄物処分の事業者である ANDRA は、モニタリング実施箇 所として図 2.3-786 に示すように、実処分場の中でいくつかの処分セルやモジュール(図 2.3-786 中の Control C module)を対象としたモニタリング計画を策定している[7]。そ して、処分場の一部で実施したモニタリング結果が処分場全体に対して代表性を持つもの としている。



図 2.3-786 フランスの処分場におけるモニタリングの例[7]

b. ドイツの事例

ドイツの放射性廃棄物処分施設におけるモニタリングの事例は、放射性廃棄物処分施設のモニタリングに関する国際共同研究 MoDeRn[8]で岩塩サイトの事例として取り上げられている。

ドイツでは、図 2.3-787 に示すように、East2 と East3 領域には高レベル廃棄物(HLW) が、West1 と West2 及び West3 領域には中レベル廃棄物(ILW) と低レベル廃棄物(LLW) が埋設される計画となっている。このうち、East1 領域は、最初に廃棄体が定置される領 域であり、高レベル廃棄物、中レベル廃棄物及び低レベル廃棄物が定置される。この East1 領域をモニタリング領域として使用することが想定されており、他の領域で操業が続けら れている間にモニタリング領域からデータを収集することが可能となる。したがって、処 分場の操業段階において閉鎖後の領域全体の変遷についてモニタリングを実施すること が可能であるとしている。モニタリング位置は、廃棄体の発熱によりできる限り高い発熱 に曝される位置、又は、熱・力学的な変遷がより不均一なることが想定される位置が選定 されている。



図 2.3-787 ドイツの処分施設の概念図[8]

c. スイスの事例

スイスでは、実廃棄体を埋設するパイロット施設でのモニタリング実施が法的要件とし て義務付けられている。スイス連邦原子力安全検査局 ENSI の地層処分場の設計原則と セーフティケースに関する要件[9]では、以下のような要件が示されている。

- パイロット施設には廃棄物を設置し、主施設における廃棄物の定置が開始される前に
 埋め戻さなければならない。
- ・ パイロット施設は次のように運用しなければならない。
 - a) 主施設のバリアシステムを十分再現できる
 - b) 廃棄体の選定は主施設のインベントリを代表している
- ・ パイロット施設のモニタリングプログラムでは次のような情報が得られるよう施設

と地質環境の経時的変化を測定しなければならない。

- a) パイロット施設と地質環境の安全関連条件とプロセス
- b) 想定外の変化の早期認識
- c) バリアシステムの有効性
- d) 安全評価の裏付け
- ・ 情報は主施設とその地質環境の条件にも置き換えられるものでなければならない。
- パイロット施設のモニタリングプログラムの妥当性は定期的に確認しなければならない。また、モニタリングプログラムとその結果は定期的に ENSI に提出し、審査を受けなければならない。
- ・モニタリングフェーズ終了時にパイロット施設の安全バリアの条件が予想外のプロ セスや計画的干渉のため既に安全要件を満たさず、適切な保守や補修措置が実施でき ない場合、廃棄物をパイロット施設から取り出し主施設に定置しなければならない。 これに対して、図 2.3・788 に示すような施設レイアウトが検討されており、図 2.3・788
 中の Pilot Facility でモニタリングを実施することが想定されている[10]。パイロット坑 道は、隣接する観察用坑道(Observation Tunnel)からモニタリング用ボーリング孔を 用いてパイロット坑道周辺の母岩にアクセスすることとしている。



図 2.3-788 スイスの処分施設の概念図[10]

以上で示した 3 ヵ国においては、名称や位置付けは若干異なるものの、実処分場の一 部でモニタリングを実施することが検討されている。ドイツ、スイスにおいては、先行し て廃棄体を定置する領域やモニタリング用施設に実廃棄体を定置し、処分坑道を埋め戻し た後に、他の領域で操業が進められている期間にモニタリングデータを取得する計画とな っている。

わが国の中深度処分において地下施設でのモニタリング実施が必要となる場合には、最 初に廃棄体が定置される処分空洞や、スイスのパイロット施設のような将来的に実処分施 設の一部となる先行施設においてモニタリングを実施し、処分施設全体の挙動を代表させ ることがモニタリング領域設定の考え方のひとつとして有効であると考えられる。

ただし、処分施設の一部でモニタリングを実施する場合には、ドイツにおけるモニタリ ング位置選定やスイスの規制要件に示されるように、処分施設全体に対する代表性を担保 することが重要となる。

処分施設の一部でモニタリングを実施する場合に、モニタリング領域が処分施設全体に 対する代表性を担保するためには、廃棄体のインベントリや発熱量はより高いものを選定 する(保守的にする)一方、人工バリアの性能は処分場全体に対して平均的な状態が望ま しいと考えられる。

以降のモニタリング計画の検討では、地下施設における計測については、最初に廃棄体 が定置される処分空洞1本を対象としてモニタリング計画を具体化することとする。

なお、モニタリング領域の設定は、規制要求や事業者のモニタリング戦略に依存するも のである。例えば、モニタリング領域を狭い範囲に限定しても処分場の代表性を担保でき る場合には、モニタリング領域を限定する方が合理的となる可能性がある。ここで設定し たモニタリング領域は、本検討における前提条件として設定したものであり、実事業にお いて、最初に廃棄体が定置される処分空洞 1 本をモニタリング領域とすることを推奨す るものではない点に留意されたい。 2) 既存計測技術を活用したモニタリング

前項で設定した前提条件のもと、5ヶ年で検討してきた既存計測技術を活用したモニタリング方法について述べる。

過年度で検討してきた各段階(建設段階、廃棄物の埋設段階、閉鎖措置段階、保全段階) で計測可能な内容を表 2.3-193 に示す。以下に示す5つのモニタリング内容について、モニ タリング計画(例)を示す。

- a. 処分施設の変形
- b. 低拡散層のひび割れ観察
- c. 処分施設の裏面排水分析
- d. 近傍ボーリング孔による地下水分析
- e. 地震動計測

段階	建設段階		廃棄物の埋設段階			閉鎖措置 段階	保全 段階	
主な作業	底部及び側部の埋 戻し材の施工	底部の低透水層、低 拡散層、ピットの施工	側部のピット、低 拡散層の施工	廃棄体定置、区 画内充てん	上部ピット、低 拡散層の施工	上部・側部低透水層、 空洞充てん材の施工	アクセス坑道 等の埋戻し	保安 活動等
un کر رہی		Recent					0	
概念図 施設の状態	D			Ø				
実処分施設で 実施可能なモ ニタリング内容 (平成27年度の 成果)	 a. 各種計測(処分施設の変形) b. 各種計測(低拡散層のひび割れ観測) c. 排水分析(処分施設) d. 近傍ボーリング孔による地下水分析 e. 各種計測(地震動計測) 					▼対象部材の理戻しまで計) 「同上	 則可能 休水停止まで計決 保全段階以降 快表面の地震 保全段階以降も 	町可能 も計測可能 計測は 計測可能

表 2.3-193 各段階で計測可能な内容

a. 処分施設の変形

底部低透水層の変形係数は約 80.0N/mm²であり[11]、周囲のセメント系材料と比較し て小さいこと、また底部低透水層の上部には、低拡散層やコンクリートピット等の人工バ リアの構築及び廃棄体の定置に伴い、それらの自重が底部低透水層に荷重として作用する ことにより、底部低透水層が圧縮沈下し、処分施設全体が変形する可能性がある(図 2.3-789)。

処分施設の変形をモニタリングすることにより、安全機能へ影響する低透水層の密度変化(低透水性)、低拡散層及びピットのひび割れ(低拡散性、透水性)の状態変化を確認する。施設変形モニタリングによる安全機能への影響確認フローを図 2.3-790、モニタリング計画例を表 2.3-194~表 2.3-195 に示す。



図 2.3-789 処分施設における底部低透水層の位置



図 2.3-790 施設変形モニタリングによる安全機能への影響確認フロー



表 2.3-194 処分施設の変形のモニタリング計画例 (1/2)





b. 温度計測

温度計測は、処分施設内の環境の基本情報として実施すべき項目である。

低拡散層などのセメント系材料においては、打設時の水和発熱に伴う温度上昇・下降は、 ひび割れ発生にも関わる要素であると考えられる。また、硬化後においても、廃棄体の発熱 履歴の影響を受けること、特に部材表面では空洞内の温度変化の影響を受けることにより、 温度ひずみの増減に伴うひび割れ発生の可能性が考えられる。

また、空洞内の温度計測は、作業環境の管理の観点でも必須の項目である。

温度計測モニタリングによる安全機能への影響確認フローを図 2.3-791、モニタリング計 画例を表 2.3-196 に示す。



図 2.3-791 温度計測モニタリングによる安全機能への影響確認フロー



表 2.3-196 温度計測モニタリング計画例

c. 低拡散層のひび割れ観察

処分施設における低拡散層は、図 2.3-792 に示す位置にあり、放射性核種の拡散によ る移行を抑制すること(低拡散性)を主たる安全機能とし、核種移行の遅延を図る部材で ある。低拡散層にひび割れが発生すると、低拡散層の拡散係数の増加や施設内通過流量の 増加により、安全機能に影響を及ぼすことが考えられる。

低拡散層のひび割れモニタリングによる安全機能への影響確認フローを図 2.3-793、モニタリング計画例を表 2.3-197 に示す。



図 2.3-792 処分施設における低拡散層の位置



図 2.3-793 低拡散層のひび割れモニタリングによる安全機能への影響確認フロー



表 2.3-197 低拡散層のひび割れモニタリング計画例

d. 処分施設の裏面排水分析

処分施設の裏面排水を対象として、流量及び各分析試験を行い、施設の状態予測の一助 とする。対象とするモニタリングは、流量、pH等に代表される「計測値の変化量」を対 象とするものと、モンモリロナイト等に代表される通常検出されないと想定される物質の 「検出確認」に区分した(図 2.3-794)。

処分施設の裏面排水分析モニタリングによる安全機能及び安全性への影響確認フロー を、「変化量」を対象とした場合を図 2.3-795、「検出」を対象とした場合を図 2.3-796 に示す。また、モニタリング計画例を表 2.3-198 に示す。なお、「変化量」及び「検出」 を対象とした場合、両者とも共通の試料(処分施設の裏面排水)を用いることになるため、 表 2.3-198 のモニタリング計画例は共通とした。





図 2.3-795 処分施設の裏面排水分析(変化量対象)モニタリングによる安全機能、安全性への影響確認フロー



図 2.3-796 処分施設の裏面排水分析(検出確認)モニタリングによる安全機能、安全性への影響確認フロー



表 2.3-198 処分施設の裏面排水分析のモニタリング計画例

本検討において、裏面排水量及び裏面排水に含まれる各種イオン濃度(Na⁺、K⁺、Ca²⁺) を解析的に算出している。排水量の経年変化を図 2.3-797、各種イオン濃度(Na⁺、K⁺、 Ca²⁺)の経年変化を図 2.3-798~図 2.3-800に示す。

図 2.3-797 に示すように、排水量は時間と共にやや増加する。これは、吹付けコンク リートから徐々に成分が溶脱することが原因と考えられる。実際の排水モニタリング時に は、同図を参考にして集水された水量の推移をチェックする方法が考えられる。モニタリ ング中に水量の大幅な変化が生じた場合には、施設若しくは周辺岩盤における異常有無の 判断材料になると考えられる。

また、図 2.3-798~図 2.3-800 に示すように、吹付けコンクリート構築当初は、Na+ や K+の変化が顕著となるものの、その影響は 50 年程度で落ち着き、その後の変化は小 さくなる。Ca²⁺も、50 年程度までイオン濃度が大きくなるが、その後の変化は小さくな る。図 2.3-798~図 2.3-800 には、各イオンのイオンクロマトグラフ法での定量下限を 示しており、いずれのイオンにおいても全期間において定量が可能であると考えられる。

実施設におけるモニタリングにおいても、事前解析により、裏面排水に含まれる各対象 物の経年変化について予測しておくものと考えられる。予測値とモニタリング計測結果を 比較分析することにより、予測モデルの検証・更新・高度化を行い、施設の状態を適切に 評価していくことが望まれる。



図 2.3-797 排水量の経年変化



図 2.3-798 Na イオン濃度の経年変化



図 2.3-799 Kイオン濃度の経年変化



図 2.3-800 Caイオン濃度の経年変化

e. 近傍ボーリング孔による地下水分析

処分施設の近傍ボーリング孔による地下水を対象として、各種分析試験及び現地計測を 行い施設の状態予測の一助とする。対象とするモニタリングは、前述の「処分施設の裏面 排水分析」と同様に現地ボーリング孔で採取した試料を用いて分析するもの(試料計測) と、現地ボーリング孔での水理計測により分析するもの(現地計測)に区分した(図 2.3-801)。また、モニタリング計画例を表 2.3-199~表 2.3-200 に示す。



図 2.3-801 近傍ボーリング孔の地下水分析モニタリングによる安全機能への影響確認フロー

表 2.3-199 近傍ボーリング孔による地下水分析のモニタリング計画例(1/2)

項目	内容
いつ (計測時期)	・建設前後の地質環境への影響を把握するために、建設前の処分場のサイト調査・選定時から、建 設後の保全段階までの期間中は継続して実施する必要がある。 ・また閉鎖措置段階の確認の際に初期状態を参照するために、初期ベースライン(処分施設の建設 以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態推移のこと[15])を把握する ことが必要である。
	 ・処分場のサイト調査・選定時に削孔されるボーリング孔を利用することが一つの合理的な案になると考えられるが、その際には当然のことながら、地形・地質特性及び水理特性を考慮した上で配置すべきである。また、それらの情報については、三次元の地理空間情報に落とし込んでいくことで、維持管理等において有用であると考えられる。 ・ボーリング孔の設置等にあたり考慮すべき事項を以下に記載する。
	 □ ボーリング孔が施設の地下水流れにできるだけ影響を及ぼさない位置を選定すること。 □ その影響を最小限にするための対処方法(例えば、パッカーの設置)も検討すること。 □ 処分施設の通過流量の推定及び流入水と流出水の成分を把握するために、施設の上流・下流へのボーリング孔設置を検討すること(地下水流動解析の境界条件にも利用することを 想定)。 □ 放射性物質や他の有害物質が敷地外に流出していないことを確認するために敷地境界付近 へのボーリング孔設置を検討すること。
どこで (計測場所)	・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・
何を (計測項目)	 ・試料計測(液相部組成(イオン濃度)、pH、酸化還元電位(Eh)、固相部組成、線量など) ・現地計測(地下水位、間隙水圧)

項目	内容			
	 ・試料計測については、前述の裏面排水と同様である。 ・現地計測の計測方法の例を以下に示す。 			
	現地計測の計測方法の例分析項目計測方法地下水位・水位計間隙水圧・ピエゾメータ			
	 ・採水装置及び現地計測(地下水位、間隙水圧)の概要を以下に示す。 ※以下の方法は一例であり、これらのボーリング孔を用いた各種計測技術は今後も開発が進むと考えられるため、事業者がモニタリングを計画する際に、その時点での適切な計測方法を選定することが望まれる。 			
どのように計測 (計測方法、頻度)	ウインド 地上水裂センサ 野常空間 ロレージー サージー ロレージー サージー ロレージー サージー ロレージー サージー ロレージー ロレージー ロレージ			
	採水装置の概要 地下水圧測定の概要 地下水位観測孔の概要			
	採水装置及び現地計測(地下水位、間隙水圧)の概要[14]			
	 ・計測頻度としては、処分施設の仕様や周辺岩盤の水理特性、事前予測解析結果等を考慮して設定 すべきであると考えられる。参考として、一般廃棄物の最終処分場における計測頻度[16]である「一 年に一回以上」が目安になると考えられる。 			
	・水位計測の場合の計測結果の利用方法を以下に示す。			
計測結果の 利用方法	水位の計測 解析評価(現状の想定) 小 別時電量,物管量の変化 「解析事量((現状の想定) ・解析事進((現状の想定) ・解析事進((現状の想定) ・ 「解析事量(の変化(半う地下水の流入- 流出 (海水位の変化 (海水位の変化 (海水位の変化 (ションボール) (ションボール) (ションボール)			
	◆ 要対策 ※THMC は、T:Thermal (熱)、H:hydro (水理学)、M:Mechanical (力学)、C:Chemical (化学)の略			

表 2.3・200 近傍ボーリング孔による地下水分析のモニタリング計画例 (2/2)

平成 30 年度の検討において、2 次元モデルの物質移行解析を用いて、周辺岩盤中に含まれる各種イオン濃度(Na⁺、K⁺、Ca²⁺)の経年変化を解析的に算出している。解析ケースとしては、表 2.3-201 に示すように、動水勾配、施設のひび割れ有無、EDZ の考慮などをパラメータとして 7 つの解析ケースを実施した。また、出力位置は、図 2.3-802 に示すように、空洞側壁から下流側の水平方向に 5m、10m、20m、50m、100m、200m、400m の位置とした。

解析結果の代表例として、Case1 における、pH と施設からの距離の関係を図 2.3-803 に、各種イオン濃度 (Na⁺、K⁺、Ca²⁺) と施設からの距離の関係を図 2.3-804~図 2.3-806 に示す。図 2.3-804~図 2.3-806 に示すように、規制期間相当である 400 年の間では、 pH や各種イオン濃度の変化が生じる範囲は、施設から約 100m の範囲であることがわか る。なお、図 2.3-804~図 2.3-806 には、各イオンのイオンクロマトグラフ法での定量 下限を示しており、イオン濃度の変化が生じる施設から約 100m の範囲では定量が可能 であると考えられる。

平成 31 年度の検討において、上記の施設周辺に溶出する各種イオンは、吹付けコンク リート由来のものが主であることがわかった。よって、低拡散層及び低透水層のような人 エバリア由来の各種イオンが施設周辺に溶出する可能性は低く、地下水モニタリングを実 施しても人工バリアの状態変化を把握することは難しいことがわかった。したがって、人 エバリアの状態変化の把握については、地下水モニタリングにより、人工バリア由来の溶 出物が検出されないことを確認することにより、施設の移行抑制が機能されていることを 確認できると考えられる。

実施設におけるモニタリングにおいても、事前解析により、周辺岩盤中の各対象物の経 年的な移行について予測しておくものと考えられる。予測値とモニタリング計測結果を比 較分析することにより、予測モデルの検証・更新・高度化を行い、施設の状態を適切に評 価していくことが望まれる。

Case	動水 勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 劣化
1	7 %	—	—	—	降水系	—
2	0 %	—	—	—	降水系	—
3	7 %	0	—	—	降水系	—
4	7 %	0	0	—	降水系	_
5	7 %	0	—	0	降水系	—
6	7 %	0	—	—	海水系	—
7	7 %	0	—	—	降水系	0

表 2.3-201 解析ケース

(-:考慮しない、○:考慮する)



図 2.3-802 解析結果の出力位置



図 2.3-804 Na イオン濃度と施設からの距離の関係 (Case1)



図 2.3-805 Kイオン濃度と施設からの距離の関係 (Case1)



図 2.3-806 Caイオン濃度と施設からの距離の関係 (Case1)

f. 地震動計測

地震動による実処分施設への影響を評価するために、実処分施設及び周辺岩盤において 地震動を計測することが望まれる。地震動計測により取得される計測データは、再現解析 のための入力地震動に利用でき、再現解析により地震動による施設への影響を評価できる と考えられる。また、複数点の計測データを取得することにより、周辺岩盤の深部から地 表面までの増幅特性を分析できる。

地震動計測による安全機能への影響確認フローを図 2.3-807、モニタリング計画例を表 2.3-202 に示す。



図 2.3-807 地震動計測による安全機能への影響確認フロー

項目	内容
	 ・処分場開発の各段階(建設段階、廃棄物の埋設段階、閉鎖措置段階、保全段階)においては、 常時実施されることが望まれる。 ・ただし、上記の処分場開発の各段階においては、処分施設の形状や、処分空洞及びアクセス坑 道の埋戻しの状態が変化するため、地震動を計測するための地震計の設置期間や設置位置も制限 を受けることになる(下図を参照)。処分空洞の埋戻しにより「①処分空洞内」の計測は不可とな り、アクセス坑道の埋戻しにより「②アクセス坑道内」の計測は不可となる。「③周辺岩盤内」及 び「④地表面」の計測は、計測時期の制約はなく保全段階以降も計測可能である。
いつ (計測時期) どこで (計測場所)	 地上施設 ④地表面の計測 (計測時期の制約はない) アクセス坑道 ①処分空洞内の計測 (処分空洞の埋戻し時期まで計測可能) ①処分空洞の埋戻し時期まで計測可能) ③周辺岩盤内の計測(ボーリング孔を利用) (計測時期の制約はない)
何を (計測項目)	・加速度
	・加速度検出器は、地上用と地中用の2つに分けられる。地上用検出器は、地表面や対象物に直接据え置いて設置するタイプであり、①処分空洞内、②アクセス坑道内、④地表面の計測に適すると考えられる。一方、地中用検出器は、ボーリング孔を利用して、地中に設置するタイプであり、③周辺岩盤内の計測に適していると考えられる。 ・計測頻度として、地震計は常時稼働することになる。そのため、全期間のデータを取得すると、データ量が膨大となる。処分施設への影響を評価する上で取得すべき地震動データは、比較的大きな地震の計測データであるため、取得するデータと廃棄するデータを取捨する必要がある。トリガー条件として設定したトリガー値(例えば1Galの加速度)を超過した場合のみ、計測データを取得する等の方法が一般的に使われている。
どのように計測 (計測方法、頻度)	With L 用) Mix 医検出器の例[17] With L 用 Mix 医検出器の例[17]
計測結果の 利用方法	 ・前述の処分施設の変形モニタリングと同様に、施設状態を評価するための力学解析(再現解析)の入力条件等への利用。

表 2.3-202 地震動計測によるモニタリング計画例

- 3) 光ファイバセンサー技術を活用したモニタリング計画(例)の検討
 - a. 概説

光ファイバセンサー技術は、従来から使用されている有線式ポイント型計測機器に比べ、 下記の点において中深度処分施設のモニタリングへの適用性が高いと考えられる。適用を 想定する光ファイバセンサーは、耐久性評価の結果を反映して耐水性光ファイバを基本と する。

・分布計測が可能

・ケーブル量を最小化可能

・電源が不要

・耐久性が高い

本項では、表 2.3-203 に示すモニタリング項目を対象に、光ファイバセンサー技術を 活用したモニタリング計画を具体的に検討する。

モニタリング項目	段階	備考			
セメント系材料のひび割れ	建設段階~保全段階	本項では、低拡散層のひび割れをモ ニタリング対象として検討			
施設内の圧力分布※	建設段階~保全段階	本項では、低透水層の膨潤圧発生を 圧力変化として計測することで、地 下水浸潤状況を把握することを目 的として検討			
施設内の温度	建設段階~保全段階	施設挙動の基本情報として計測			

表 2.3-203 光ファイバセンサーによるモニタリング項目

※ 光ファイバセンサーによる圧力分布計測技術が実用レベルに達した場合を想定

なお、光ファイバセンサー技術を活用して人工バリア部材の挙動を計測する場合、光フ ァイバケーブルが人工バリア部材を貫通することになるため、僅かであってもバリア機能 の低下を許容することになる。そのため、本項で検討する光ファイバセンサー技術を活用 したモニタリング計画は、表 2.3-191 に示す区分 C に相当する。

b. 光ファイバセンサーの設置方法

光ファイバセンサーの設置方法としては、これまでセメント系材料の表面に接着剤で設 置方法を検討対象としてきた。ここでは、具体的なモニタリング計画の検討を実施するに 当たり、改めて光ファイバセンサーの設置方法について整理する。

セメント系材料を計測対象とした場合を例に、考えられる光ファイバセンサーの設置方 法の概念図を図 2.3-808 に示す。



図 2.3-808 光ファイバセンサーの設置方法の概念図

セメント材料埋め込み型は、人工バリア部材の内部に異物を埋め込むことになる。低拡 散層に埋め込む場合には、ケーブルとモルタルの界面が核種の移行経路になる可能性があ る。鉄筋コンクリート部材に埋め込む場合には、鉄筋に光ファイバセンサーを結束するこ とができるため有効な手法となるが、無筋部材に埋め込む場合には、光ファイバセンサー を固定するための治具が必要となり、人工バリア部材中に埋め込む異物が増加することと なる。また、ベントナイト系材料の内部に埋め込む場合も、ケーブルとベントナイトの界 面が水みちとなるほか、無筋部材と同様に光ファイバセンサーを固定するための治具が必 要となる可能性があり、これらの影響によりベントナイト系材料に求められる低透水性を 低下させる可能性がある。

セメント系材料切欠きへの接着型には、複数の設置方法が考えられる。ひとつは、構築 したセメント系部材の表面を切削して光ファイバセンサーを接着剤で固定する方法であ る。この場合、一旦構築したセメント系部材の表面を切削する工程が必要であり、光ファ イバセンサーの敷設延長が長い場合には、切削作業に要する時間が非常に長くなる。また、 切削箇所がひび割れ発生の起点になる可能性があるため、バリア機能への影響が懸念され る。

その他の方法としては、セメント材料を打設する前に型枠内面に光ファイバセンサーを 設置しておく方法、型枠内面の光ファイバセンサーを設置する位置に予め凸部を設けてお く方法が挙げられる。

前者は、構築後の部材を切削することなく、セメント系材料切欠きへの接着型と類似の 設置を可能とする方法である。ただし、型枠内面への設置を確実に行わないと、セメント 系材料の打設時に光ファイバセンサーが型枠から剥離する可能性がある。この場合、人工 バリア部材の内部に異物を埋め込むことになる。また、意図した位置に光ファイバセンサ ーが設置されないことになるため、モニタリング計画そのものを見直す必要が生じる可能 性がある。セメント系材料の打設中に光ファイバセンサーが剥離した場合、元の位置に再 設置することは困難である。一般に、脱型時に硬化したセメント系材料から容易に型枠材 が剥がせるように、型枠内面に剥離剤を塗布する。剥離剤を塗布した面に接着剤を用いて 再設置することは非常に困難と想定される。一方、剥離剤塗布前に、十分な接着力を有す る接着剤で光ファイバセンサーを設置した場合、型枠脱型時にセメント系材料から型枠と ともに光ファイバセンサーが剥離してしまう可能性も否定できない。

後者は、型枠に凸部を設置する事前加工が必要な方法であり、鋼製型枠のように転用回 数が多い場合には有効な方法となり得る。一方、合板型枠のように転用回数が少ない場合 には、非効率となる可能性がある。また、光ファイバセンサーの配置に合わせた加工・組 立作業が必要となり、型枠材の継ぎ目等における凸部の連続性等に配慮した施工が必要と なる。

セメント系材料表面接着型は、上記の方法における課題を解決することが可能である。 ただし、光ファイバセンサーの敷設延長が長い場合には、設置作業に要する時間が非常に 長くなるほか、十分な強度と少なくとも隣接部材を構築するまでの期間は接着力を保持す る耐久性を有する接着剤を用いて確実に設置することが必要となる。また、この手法の場 合は、隣接部材の構築時に光ファイバセンサーが剥離したり、損傷したりする可能性があ る。これに対しては、セメント系材料表面に光ファイバセンサーを設置した後に、吹付工 法によりベントナイト系材料を施工する場合を想定した試験を実施しており、光ファイバ センサーが剥離・破断することなく、ベントナイト吹付前後で光損失量に変化がないこと が確認されている[18]。

以上より、各方法が有する課題や現状技術による実現性に鑑み、本検討では、セメント 系材料表面接着型の設置方法を基本としてモニタリング計画を具体的に検討することと する。

- c. セメント系材料(低拡散層)のひび割れ計測
- (a) 計測位置と光ファイバセンサー設置時期

低拡散層に発生するひび割れは、既設の実規模施設におけるひび割れ発生状況や施設挙 動の定量化検討の結果を踏まえると、低拡散層に発生するひび割れの位置や方向を予め特 定することは困難と考えられる[19]。また、低拡散層は、底部・側部・上部の各部位で構 築時期が異なることから部位間には打ち継ぎ部が生じる。さらに、図 2.3・785 に示した ように、人工バリアの延長は 120m 程度となることが想定されるため、底部・側部・上 部低拡散層それぞれにおいて、分割打設する可能性がある。低拡散層に要求される安全機 能である低拡散性を評価する上では、ひび割れや打ち継ぎ目のような繋がりを持った空隙 の量(空隙の幅や本数)が重要なパラメータとなる[20]ため、打ち継ぎ部の目開きをひび 割れの発生・進展と同様に取り扱う必要があると考えられる。そのため、モニタリング対 象とする処分空洞1本の低拡散層全域を計測することを基本として検討を実施する。

底部低拡散層は、「(1) 4) 建設・操業工程」で示した工程のうち、Step4 において底部 低透水層の直上に構築される。光ファイバセンサーを底部低透水層上に設置することが困 難であるため、底部低拡散層の打設が完了し、底部低拡散層上での設置作業が可能となっ た段階で、底部低拡散層上面に光ファイバセンサーを設置する。 側部低拡散層は Step6 で構築され、その後廃棄体定置工程に移行する。既設の実規模 施設の構築においては、側部コンクリートピットと側部低拡散層の打ち継ぎ部の一体性を 確保する目的で、側部コンクリートピット外面に凹凸を形成している[21]。実処分施設で も同様の施工方法が採用されると想定すると、凹凸がある側部コンクリートピット外面よ りも、平滑面である側部低拡散層外面に光ファイバセンサーを設置する方が作業性に優れ ると考えられるため、側部低拡散層外面に光ファイバセンサーを設置する。なお、側部低 拡散層構築後には、Step7 で廃棄体が定置され、Step8 で区画内充てん材が施工されるま での期間、処分空洞内は放射線の影響を受ける。光ファイバセンサーへの放射線影響を低 減するため、側部低拡散層への光ファイバセンサー設置作業は、Step8 の区画内充てん材 施工が完了した直後とする。

上部低拡散層は、上部コンクリートピット構築後の Step11 で構築される。既設の実規 模施設の構築においては、上部コンクリートピットと上部低拡散層の打ち継ぎ部の一体性 を確保する目的で、上部コンクリートピット上面に打ち継ぎ処理が行われている。ただし、 側部コンクリートピットとは異なり、打設天端面に凹凸を形成するシートを設置すること が困難であることから、打設後に遅延剤を散布してレイタンス処理を行うことで打ち継ぎ 部の一体性を確保している。実処分施設でも同様の施工方法が採用されると想定すると、 上部コンクリートピット上面、上部低拡散層上面のいずれにも光ファイバセンサーを設置 することが可能である。本検討では、低拡散層のひび割れ状況をより正確に計測する観点 から、ひび割れ計測用の光ファイバセンサーは上部低拡散層上面に設置することとする。

以上より、光ファイバセンサーを設置する位置を図 2.3-809 に、設置時期を表 2.3-204 示す。



図 2.3-809 低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーの設置位置(例)

表 2.3-204 低拡散層のひび割れ計測用光ファイバの設置工程(例)

設置面	設置 Step	概念図[1]		
底部低拡散層 上面	底部低拡散層施工 (Step4)の直後			
側部低拡散層 外面	区画内充てん材施 工 (Step8)の直 後 [※]			
上部低拡散層 上面	上部低拡散層施工 (Step11)の直後			

※ 放射線影響を軽減するため、廃棄体定置後に遮蔽が確保された状態で側部低拡散層外面に敷設

(b) 光ファイバセンサーの配置

上述のとおり、低拡散層に発生するひび割れの位置や方向を予め特定することは困難で あり、打ち継ぎ部の目開きもひび割れと同様に計測できる敷設方法を検討する必要がある。 これに対して、光ファイバセンサーを格子状に設置することが有効であると考えられる。 光ファイバセンサーによるひび割れ計測では、ひずみを計測し、その結果からひび割れ の発生状況(ひび割れ延長、ひび割れ幅)やひび割れ開口面積を推定することになる。そ の推定精度は、光ファイバセンサーの設置間隔に依存する。ただし、設置間隔を小さくす る場合、光ファイバセンサーの敷設延長が増大するため、累積破断確率が増大する。これ に対しては、光ファイバセンサーを複数系統にすることで累積破断確率を増加させずに設 置間隔を小さくすることが可能となる。しかし、光ファイバセンサーを複数系統にするこ とにより、ケーブル本数が増大し、バリア機能への影響が大きくなるため、光ファイバセ ンサーの系統数は少ないことが望ましい。このように、計測精度と光ファイバの破断確率 及びバリア機能への影響はトレードオフの関係にある。これらの関係の概念図を図 2.3-810に示す。



図 2.3-810 計測精度と光ファイバの破断確率及びバリア機能への影響
また、前述したとおり、現段階では実施主体による具体的な安全確保方策が提示されて おらず、安全評価におけるひび割れに係るパラメータ設定の保守性や裕度は不明である。 すなわち、低拡散層のひび割れ計測に求められる計測精度が明確になっていない。以上の ことから、本検討では、光ファイバセンサーの配置案を複数提示することとする(表 2.3-205)。表 2.3-205 に示した配置案の光ファイバセンサー配置イメージを図 2.3-811 ~図 2.3-816 に示す。

	格子間隔	光ファイバセンサー系統数	
	(mm)	空洞横断方向	空洞縦断方向
配置案1	300	1	1
配置案 2	600	1	1
配置案 3	900	1	1
配置案 4	300	2	2
配置案5	600	2	2
配置案 6	900	2	2

表 2.3-205 低拡散層のひび割れ計測用光ファイバの配置案概要













ここで、図 2.3-811~図 2.3-816 に示した配置案における光ファイバセンサーの耐久性 を評価する指標のひとつである累積破断確率の算定に必要な条件について検討する。光フ ァイバセンサーの耐久性を評価するために実施した室内試験では、促進劣化試験を実施し ているため、光ファイバセンサーを浸漬した環境は、実際に光ファイバセンサーが曝され る環境条件とは異なる。そこで、施設挙動の定量化の解析結果等を参照して、実施に光フ ァイバセンサーが曝される環境条件(温度、pH、塩化物イオン濃度)を設定する。

温度は、上述した施設挙動の定量化検討のうち、TOUGH2を用いた熱・水連成解析の 結果を参照して設定する。なお、施設挙動の定量化検討における TOUGH2 を用いた解析 では、支保工の透水性をパラメータとして 3 ケースの解析を実施したが、明確な差異が 見られなかったため、ここでは基本ケースとなるケース①の結果を参照する。解析結果の うち、図 2.3・809 に示した低拡散層のひび割れ計測のための光ファイバセンサー設置位 置のうち、図 2.3・817 に示す代表点の温度履歴を図 2.3・818 に示す。なお、光ファイバ センサーは部材境界に設置することを想定しているため、図 2.3・818 には部材境界にお ける両側の温度履歴を示している。図 2.3・818 によると、廃棄体を定置した 10 年時点か ら温度が上昇し、37℃程度まで温度が上昇している。その後、温度低下に転じ、20~30 年の間に 20℃を下回り、40 年経過時点では、周辺岩盤の温度である 15℃に漸近する。 光ファイバセンサーの耐久性評価試験から導出された耐久性評価式は、環境温度を考慮す ることは可能であるが、温度履歴を考慮することができない。そのため、ここでは、光フ ァイバセンサーの耐久性に及ぼす温度の影響を確認できるように、複数の温度条件を設定 することとし、最高温度付近の 35℃と、最終的に漸近する 15℃及びその間の中間的な温 度として 25℃と 20℃の合計 4 水準の温度条件を設定する。なお、図 2.3-818 に示した温 度履歴のうち、最も最高温度が高い出力点⑩(低拡散層側)に着目すると、平均温度は表 2.3-206 に示すとおりである。



図 2.3-817 温度履歴出力点(低拡散層のひび割れ計測)



図 2.3-818 代表点の温度履歴 (TOUGH2;ケース①)

我 2.5 200 田乃杰姆(國伍欣福國) 97千场吨度				
期間	50 年まで	100 年まで	200 年まで	300 年まで
平均温度	19.5°C	17.3°C	16.3°C	15.9°C

表 2.3-206 出力点⑩(低拡散層側)の平均温度

pHと塩化物イオン濃度は、施設挙動の定量化検討のうち、LIFE D.N.A.を用いた化学 解析の結果を参照して設定する。LIFE D.N.A.を用いた化学解析は種々のパラメータを変 動させたパラメトリックな検討を実施しているが、ここでは、平成 30 年度に実施された 解析ケース[22]のうち、セメント材料のひび割れや部材間の隙間を考慮したケース 3 と地 下水組成を海水系としたケース 6 に着目する(表 2.3・207 参照)。解析結果のうち、解析 結果のうち、図 2.3・809 に示した低拡散層のひび割れ計測のための光ファイバセンサー 設置位置のうち、図 2.3・819 に示す代表点の pH と塩化物イオン濃度の経時変化を図 2.3・820、図 2.3・821 に示す。図 2.3・820 によると、pH は概ね 12~13.5 の範囲にある。 また、図 2.3・821 によると、塩化物イオン濃度はケース 3 とケース 6 で大きく異なり、 ケース 3 では 0~0.5mmol/l の範囲、ケース 6 では 0~600mmol/l の範囲に分布する。



表 2.3-207 化学解析の解析ケース(平成 30 年度)([22]に一部加筆)

(-:考慮しない、○:考慮する)



図 2.3-819 pH と塩化物イオン濃度の経時変化出力点



図 2.3-820 pHの経時変化(LIFE D.N.A.; ケース3及びケース6)



図 2.3-821 塩化物イオン濃度の経時変化(LIFE D.N.A.; ケース3及びケース6)

以上で設定した環境条件をまとめて表 2.3-208 に示す。

表 2.3-208	設定した環境条件	(低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセン	/サー)
-----------	----------	----------------------	------

項目	設定値
温度	15、20、25、35°C
pH	12, 12.5, 3, 13.5
塩化物イオン濃度	0.01、0.5、100、500mmol/l

図 2.3-811~図 2.3-816 に示した配置案における光ファイバセンサーの延長(概算値) を表 2.3-209 に示す。

		光ファイバセン	ンサーの延長*
	青り上	空洞横断方向	空洞縦断方向
	上部・底部	3.7 km	4.1 km
記旦采 I	側部	3.1 km	2.7 km
- 配罟安 9	上部・底部	1.9 km	2.1 km
配直采 4	側部	1.6 km	1.4 km
 町 罟 安 9	上部・底部	1.3 km	1.4 km
配直采 3	側部	1.1 km	1.0 km
町 男 安 4	上部・底部	1.9 km	2.1 km
配直采 4	側部	1.6 km	1.4 km
町異安┎	上部・底部	1.0 km	1.1 km
配直采 0	側部	0.8 km	0.7 km
町墨安 6	上部・底部	0.7 km	0.7 km
癿但余 0	側部	0.6 km	0.5 km

表 2.3-209 配置案毎の光ファイバセンサー延長(概算値)

※ 光ファイバセンサー1系統当たりの延長で、計測部分のみの延長を示す

(c) 計測頻度

光ファイバセンサーを使用した計測を行う場合、人がアクセス可能な場所に光アナライ ザを設置する。計測頻度は、光アナライザで設定することができるため、任意に変更・調 整することが可能である。

建設段階、廃棄物の埋設段階においては、順次部材が構築され、廃棄体の定置が行われ るため、各部材に作用する荷重が増加し、応力状態が変化する。また、セメント系材料は 打設後の比較的早い段階で温度応力や収縮に伴うひび割れが発生する可能性がある。その ため、建設段階、廃棄物の埋設段階では、ひび割れ計測の頻度を高く設定することが望ま しいと考えられる。一例として、1回/日程度に設定し、部材構築や廃棄体定置が行われ る前後に追加計測を実施することが考えられる。なお、建設段階、廃棄物の埋設段階にお いては、目視又はカメラ撮影によるひび割れ観測が実施されることが想定される。当該部 位が不可視状態となった後は、光ファイバセンサーによる計測のみが実施されるため、不 可視状態となる直前に、目視・カメラ撮影によるひび割れ観測と光ファイバセンサーによ る計測を実施し、両者の結果が整合していることを確認した上で、光ファイバセンサーに よる計測に移行する必要がある。

一方、閉鎖措置段階、保全段階においては、施設挙動の変動が緩慢になることが想定されるため、計測頻度を低減することが可能と考えられる。ただし、閉鎖措置段階以降に生じる大きな変化のひとつに再冠水によるベントナイト系材料の膨潤挙動が挙げられる。この際、低拡散層の応力状態に変動が生じ、新たなひび割れの発生や既存ひび割れの進展が生じる可能性がある。そのため、後述する施設内の圧力分布計測を実施し、ベントナイト系材料の膨潤挙動が確認された場合には、ひび割れ計測の頻度を上げることが望ましいと考えられる。一例として、計測頻度を1回/週程度に設定し、ベントナイト系材料の膨潤

挙動が確認された場合には1回/日程度に計測頻度を上げることが考えられる。 以上で説明したひび割れ計測頻度の設定例を表 2.3-210に示す。

表	2.3 - 210	低拡散層のひび割れ計測頻度	(例)

段階	計測頻度	備考
建設段階 及び 廃棄物の埋設段階	1回/日を基本とし、施工イベン トの前後で計測を実施	既存計測技術(目視、カメラ 撮影)によるひび割れ観察結 果を引き継ぐ
閉鎖措置段階 及び 保全段階	1回/週を基本とし、ベントナイ ト系の膨潤挙動が確認された 場合等には1回/日程度まで頻 度を上げて計測を実施	

(d) 留意点、課題

提案した光ファイバセンサーを活用した低拡散層のひび割れ計測における留意点や課 題を抽出し、以下に列挙する。

- a) 施工性の観点
 - ・ 提案した光ファイバセンサーの配置案は、いずれも光ファイバ総延長が長いため、設置 作業に要する期間が長く、建設・操業工程に影響する可能性がある。
 - ・ 底部低拡散層上面に光ファイバセンサーを設置した後に、底部コンクリートピットの鉄 筋を組み立てる必要があるため、光ファイバセンサーを損傷させないような施工方法を 採用する必要がある。
 - ・ 側部低拡散層の上部は、上部低拡散層と同時に打設される部位である。そのため、側部
 ー上部低拡散層の打ち継ぎ部を計測するための光ファイバセンサー(図 2.3-822 の〇部)
 を上部低拡散層打設完了まで設置することができない。この期間に光ファイバセンサー
 を損傷させないような養生が必要となる。



図 2.3-822 側部-上部低拡散層の打ち継ぎ付近の光ファイバセンサー

- ・ 側部低拡散層への光ファイバセンサー設置後に隣接する側部低透水層を施工するため、 光ファイバセンサーを損傷させない施工方法(吹付工法など)を採用する必要がある。
- b) 計測技術の観点
 - 本事業では、格子状に設置した光ファイバセンサーにより計測したひずみデータから、 ひび割れ幅、ひび割れ形状を推定する技術を検討したが、十分な推定精度が得られてい ないため、今後の技術開発による推定精度向上が望まれる。また、光ファイバセンサー の設置間隔とひび割れ発生状況推定精度の関係も定量的に評価するには至っていない ため、その評価についても課題が残る。
 - セメント系材料の表面に光ファイバセンサーを設置する場合、接着剤による全線固定を 想定している。しかし、長期にわたり接着剤の接着効果に期待することはできないため、 接着剤の接着効果が喪失した後の計測精度について別途検討した。別途行った検討では、 セメント系材料とベントナイト系材料の境界面に光ファイバセンサーを設置した状態 を想定したものであるが、底部低拡散層についてはセメント系部材間(コンクリートピ ットと低拡散層の境界面)に設置する案を提示しているため、今後、更なる検討が必要 である。
 - ・ 光ファイバセンサーの破断を抑制する対策として、全線固定ではなく部分固定とする方法や、光ファイバセンサーにゆとりを持たせ、かつ複数本設置する方法も考えられるため、計測精度と耐久性を両立する方法を検討することが望まれる。
- d. 施設内の圧力分布計測
- (a) 計測位置と光ファイバセンサー設置時期

施設内の圧力分布は、閉鎖措置段階以降に再冠水によりベントナイト系材料が膨潤挙動 を示したことを把握することを主目的として計測する。そのため、低透水層に隣接する位 置に光ファイバセンサーを設置することとする。閉鎖措置段階以降の再冠水過程において は、地下水浸潤が不均一となり、低透水層が一様に膨潤しない可能性があるため、モニタ リング対象とする処分空洞 1 本の低透水層全域を計測することを基本として検討を実施 する。

底部低透水層は、処分空洞内のインバートコンクリート、側部埋戻しコンクリートの施 工が完了した後の Step3 で構築される。ベントナイト系材料の表面に光ファイバセンサ ーを設置することが困難であることから、インバートコンクリートの打設が完了し、イン バート上での設置作業が可能となった段階で、インバートコンクリート上面に光ファイバ センサーを設置する。

側部低透水層は、廃棄体定置、区画内充てん材の施工が完了し、遮蔽が確保された後、 Step9 で構築される。側部低透水層は、内側に側部低拡散層、外側に側部埋戻しコンクリ ートが配置される。いずれもセメント系材料であるため、光ファイバセンサーの設置が可 能である。圧力分布計測用光ファイバセンサーの設置位置としては、以下の2通りの考 え方がある。

- ・ 側部低拡散層外側にはひび割れ計測用光ファイバセンサーが設置されるため、その一部
 を圧力分布計測用光ファイバセンサーに置き換えて、同じ位置でひび割れ計測と圧力分
 布計測を行う。
- ・ 圧力分布計測に用いる光ファイバセンサーは、ひび割れ計測用と構造が異なるため、別
 系統にせざるを得ないため、できる限り低透水層を貫通するケーブル数を減らす観点から、側部埋戻しコンクリート内面に光ファイバセンサーを設置する。

前者は低拡散層のひび割れ計測を実施する前提に立っているが、低拡散層のひび割れ計 測を実施するか否かの判断は実施主体に委ねられるため、本検討では、上記 2 通りの考 え方をセンサー配置の検討に反映することとする。

側部埋戻しコンクリート内面に光ファイバセンサーを設置する場合、Step2 完了以降に 光ファイバセンサーを設置することが可能となる。側部低拡散層外面に光ファイバセンサ ーを設置する場合には、Step6 完了以降に設置が可能となる。しかし、Step7 で廃棄体が 定置され、Step8 で区画内充てん材が施工されるまでの期間、処分空洞内は放射線の影響 を受ける。光ファイバセンサーへの放射線影響を低減するため、光ファイバセンサー設置 作業は、Step8 の区画内充てん材施工が完了した直後とする。

上部低透水層は、上部低拡散層の施工後の Step12 で構築される。上部低透水層上面に は光ファイバセンサーを設置することが困難であるため、上部低拡散層上面に光ファイバ センサーを設置する。上部低拡散層上面には、ひび割れ計測用の光ファイバセンサーを設 置する計画を策定しているため、ひび割れ計測用の一部を圧力分布計測用に置き換えるこ ととする。

以上より、光ファイバセンサーを設置する位置を図 2.3-823 に、設置時期を表 2.3-211 に示す。



図 2.3-823 施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例1)

設置面	設置 Step	概念図[1]		
	処分空洞内のイン			
インバート	バートコンクリー			
コンクリート	ト、側部埋戻しコ		_	
上面	ンクリート施工			
	(Step2)の直後			
側部低拡散層 外面	区画内充てん材施 工(Step 8)の直 後 [※]			
上部低拡散層 上面	上部低拡散層施工 (Step11)の直後			

表 2.3-211 施設内の圧力分布計測用光ファイバの設置工程(例1)

[※] 放射線影響を軽減するため、廃棄体定置後に遮蔽が確保された状態で側部低拡散層外面に敷設



図 2.3-824 施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例2)

表 2.3-212 施設内の圧力分布計測用光ファイバの設置工程(例 2)

設置面	設置 Step	概念図[1]		
	処分空洞内のイン			
インバート	バートコンクリー			
コンクリート	ト、側部埋戻しコ	—		
上面	ンクリート施工			
	(Step2)の直後			
側部埋戻し コンクリート 内面	区画内充てん材施 工(Step 8)の直 後 [※]			
上部低拡散層 上面	上部低拡散層施工 (Step11)の直後			

※ 放射線影響を軽減するため、廃棄体定置後に遮蔽が確保された状態で側部低拡散層外面に敷設

(b) 光ファイバセンサーの配置

施設内の圧力分布計測は低透水層の面直方向の圧力を計測するため、低拡散層のひび割 れ計測と異なり、格子状に光ファイバセンサーを設置する必要が無い。本検討では、処分 空洞縦断方向に光ファイバセンサーを設置することとする。

光ファイバセンサーによる圧力分布計測は技術開発段階にあり、高精度で計測できる技 術水準には達していないが、将来的な技術革新の可能性を考慮して配置案を検討する。施 設内の圧力分布は、水・力学連成解析(CODE_BRIGHT)の基本ケースの結果を参考に する。

図 2.3-825 に示す解析結果出力点のうち、上部、側部、底部低透水層における飽和度 と全応力の経時変化を図 2.3-826~図 2.3-828 に示す。図 2.3-826 に示した上部低透水 層は、場所による飽和度、全応力の違いは認められず、中央部と両端部はほぼ同じ挙動を 示している。一方、図 2.3-827、図 2.3-828 に示す側部・底部低透水層では、場所によ って飽和度、全応力の経時変化に差異が見られる。なお、ここで参照した解析結果は、現 時点で最も確からしいと考えられる状態をモデル化した解析ケースであるが、今後は、状 態変化の変動幅を考慮した解析を実施することや、解析精度向上に資するデータ取得も重 要である。

上述したように、光ファイバセンサーによる圧力分布計測技術は技術開発段階にあり、 高精度で圧力分布を計測できる技術水準にないため、現段階では、図 2.3-827、図 2.3-828 に示す全応力の違いを検知することはできない可能性が高い。しかし、今後の技術革新に より、高精度な計測が可能となった場合、詳細に地下水浸潤状況を把握するためには、各 面に 4~5 側線程度設けることが望ましいと考えられる。なお、図 2.3-826~図 2.3-828 に示した解析結果は、不均一な地下水浸潤を考慮していないものであるため、実際の処分 施設では、飽和度、全応力の経時変化に、より大きな差異が生じる可能性があることに留 意する必要がある。 本検討では、圧力分布計測ための光ファイバセンサー配置として、光ファイバセンサー の設置位置と設置間隔及び系統数をパラメータとして複数の配置案を提示する(表 2.3-213)。表 2.3-213 に示した配置案の光ファイバセンサー配置イメージを図 2.3-829 ~図 2.3-834 に示す。



図 2.3-825 解析結果の出力点



図 2.3-826 上部低透水層の飽和度と全応力の経時変化





図 2.3-828 底部低透水層の飽和度と全応力の経時変化

表	2.3-213	施設内の圧力分布計測用光ファイバの配置案概要

	設置位置※	間隔 (mm)	光ファイバセンサー系統数 (処分空洞縦断方向)
配置案1	側部	2000	1
配置案2	低拡散層	4000	1
配置案3	外面	2000	2
配置案4	側部埋戻し	2000	1
配置案5	コンクリート	4000	1
配置案6	内面	2000	2

※:側部の光ファイバセンサー設置位置を示す(底部、上部は共通)





図 2.3-830 施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 2)









図 2.3-834 施設内の圧力分布計測用光ファイバセンサーの配置イメージ(配置案 6)

ここで、図 2.3-829~図 2.3-834 に示した配置案における光ファイバセンサーの耐久 性を評価する指標のひとつである累積破断確率の算定に必要な条件について検討する。光 ファイバセンサーの耐久性を評価するために実施した室内試験では、促進劣化試験を実施 しているため、光ファイバセンサーを浸漬した環境は、実際に光ファイバセンサーが曝さ れる環境条件とは異なる。そこで、施設挙動の定量化の解析結果等を参照して、実施に光 ファイバセンサーが曝される環境条件(温度、pH、塩化物イオン濃度)を設定する。

温度は、上述した施設挙動の定量化検討のうち、TOUGH2を用いた熱・水連成解析の 結果を参照して設定する。なお、施設挙動の定量化検討における TOUGH2 を用いた解析 では、支保工の透水性をパラメータとして 3 ケースの解析を実施したが、明確な差異が 見られなかったため、ここでは基本ケースとなるケース①の結果を参照する。解析結果の うち、図 2.3・824 に示した圧力分布計測のための光ファイバセンサー設置位置のうち、 図 2.3・835 に示す代表点の温度履歴を図 2.3・836 に示す。なお、光ファイバセンサーは 部材境界に設置することを想定しているため、図 2.3・836 には部材境界における両側の 温度履歴を示している。図 2.3・836 によると、廃棄体を定置する 10 年時点では底部にの み光ファイバセンサーが設置された状態であり、出力点 1 の温度が 23℃程度まで温度が 上昇している。その後、温度低下に転じ、40 年経過時点では、周辺岩盤の温度である 15℃ に漸近する。側部及び上部では廃棄体発熱の影響は小さく、出力点 18 が 20℃程度まで上 昇する程度である。光ファイバセンサーの耐久性評価試験から導出された耐久性評価式は、 環境温度を考慮することは可能であるが、温度履歴を考慮することができない。そのため、 ここでは、光ファイバセンサーの耐久性に及ぼす温度の影響を確認できるように、複数の 温度条件を設定することとし、最高温度付近の25℃と、最終的に漸近する15℃及びその 間の中間的な温度として20℃の合計3水準の温度条件を設定する。なお、図2.3-836に 示した温度履歴のうち、最も最高温度が高い出力点①(低透水層側)に着目すると、平均 温度は表2.3-214に示すとおりである。



図 2.3-835 温度履歴出力点(施設内の圧力分布計測)



図 2.3-836 代表点の温度履歴 (TOUGH2; ケース①)

表 2.3-214 出力点①(低透水層側)の平均温度

期間	50 年まで	100 年まで	200 年まで	300 年まで
平均温度	16.6°C	16.1°C	15.7°C	$15.6^{\circ}\mathrm{C}$

pHと塩化物イオン濃度は、施設挙動の定量化検討のうち、LIFE D.N.A.を用いた化学 解析の結果を参照して設定する。LIFE D.N.A.を用いた化学解析は種々のパラメータを変 動させたパラメトリックな検討を実施しているが、ここでは、平成 30 年度に実施された 解析ケース[22]のうち、セメント材料のひび割れや部材間の隙間を考慮したケース 3 と地 下水組成を海水系としたケース 6 に着目する(表 2.3・215 参照)。解析結果のうち、解析 結果のうち、図 2.3・824 に示した圧力分布計測のための光ファイバセンサー設置位置の うち、図 2.3・837 に示す代表点の pH と塩化物イオン濃度の経時変化を図 2.3・838、図 2.3・839 に示す。図 2.3・838 によると、pH は概ね 12~13.5 の範囲にある。また、図 2.3・839 によると、塩化物イオン濃度はケース 3 とケース 6 で大きく異なり、ケース 3 では 0~ 0.5mmol/l の範囲、ケース 6 では 0~600mmol/l の範囲に分布する。

ケース	動水 勾配	ひび割れ・ 隙間	EDZ	岩盤 グラウト	地下水 組成	吹付け 初期変質
1	7%	-	-	-	降水系	-
2	0%	—	-	—	降水系	-
3	7%	0	-	-	降水系	—
4	7%	0	0	-	降水系	-
5	7%	0	-	0	降水系	-
6	7%	0	-	_	海水系	_
7	7%	0	-	_	降水系	0

表 2.3-215 化学解析の解析ケース(平成 30 年度)([22]に一部加筆)

(-:考慮しない、○:考慮する)



図 2.3-837 pH と塩化物イオン濃度の経時変化出力点



図 2.3-838 pH の経時変化(LIFE D.N.A.; ケース 3 及びケース 6)



図 2.3-839 塩化物イオン濃度の経時変化(LIFE D.N.A.; ケース3及びケース6)

以上で設定した環境条件をまとめて表 2.3-208 に示す。

表 2.3-216	設定した環境条件(圧力分布	i計測用光ファイバセンサー)
項目	設定値	備考

項目	設定値	備考
温度	15、20、25°C	
pH	12, 12.5, 3, 13.5	耐久性評価式で考慮できないため累
塩化物イオン濃度	0.01、0.5、100、500mmol/l	積破断確率の試算には使用しない

また、図 2.3-829~図 2.3-834 に示した配置案における光ファイバセンサーの延長(概 算値)を表 2.3-217 に示す。

	立777年	光ファイバセンサーの延長*
	自り立	空洞縦断方向
町 罟 安 1 4	底部・上部	0.7 km
配但采 1、4	側部	0.6 km
□ 毘安 9 5	底部・上部	0.4 km
阳 <u></u> 但 采 2、 0	側部	0.4 km
町墨安り 0	底部・上部	0.4 km
111 単単余 う、り	側部	0.4 km

表 2.3-217 配置案毎の光ファイバセンサー延長(概算値)

※ 光ファイバセンサー1系統当たりの延長で、計測部分のみの延長を示す

(c) 計測頻度

施設内の圧力分布計測においても、計測頻度を任意に変更・調整することが可能である。 施設内の圧力分布計測は、再冠水過程における低透水層の膨潤挙動を把握することが主 目的であるが、この場合、閉鎖措置段階直前の応力状態を把握しておくことが重要である。 建設段階、廃棄物の埋設段階においては、順次部材が構築され、廃棄体の定置が行われる ため、各部材に作用する荷重が増加し、応力状態が変化する。また、低透水層に着目する と、底部・側部・上部の各部位で応力状態が異なることが想定される。そのため、建設段 階、廃棄物の埋設段階における圧力分布を可能な範囲で正確に把握するために、計測頻度 を1回/日程度に設定し、部材構築や廃棄体定置が行われる前後に追加計測を実施するこ とが一例として考えられる。

一方、閉鎖措置段階、保全段階においては、施設挙動の変動は緩慢になることが想定され、再冠水挙動も数十年オーダーの時間スケールで進行すると想定される。そのため、建設段階、廃棄物の埋設段階よりも計測頻度を低減することが可能と考えられる。一例として、計測頻度を1回/週程度に設定し、ベントナイト系材料の膨潤挙動が確認された場合には、1回/日程度に計測頻度を上げることが考えられる。

以上で説明した施設内の圧力分布計測頻度の設定例を表 2.3-218 に示す。

段階	計測頻度	備考
建設段階 及び 廃棄物の埋設段階	1回/日を基本とし、施工イベン トの前後で計測を実施	
閉鎖措置段階 及び 保全段階	 1回/週を基本とし、低透水層の 膨潤挙動が確認された場合には1回/日程度まで頻度を上げ て計測を実施 	

表 2.3-218 圧力分布の計測頻度(例)

(d) 留意点、課題

提案した光ファイバセンサーを活用した施設内の圧力分布計測における留意点や課題 を抽出し、以下に列挙する。

a) 施工性の観点

- ・ 提案した光ファイバセンサーの配置案は、いずれも光ファイバ総延長が長いため、設置 作業に要する期間が長く、建設・操業工程に影響する可能性がある。
- ・本検討で提示した光ファイバセンサーの配置案では、インバートコンクリート、上部低 拡散層の上面に光ファイバセンサーを設置する。設置した光ファイバセンサーの直上に 構築する底部・上部低透水層は、転圧工法での施工が想定されるが、光ファイバセンサ ーを損傷させない施工上の工夫、施工方法の選定が必要となる。
- b) 計測技術の観点
 - ・ 光ファイバセンサーによる圧力分計測は技術開発段階にあり、高精度で圧力分布を計測 できる技術水準には達していないため、今後の技術開発による技術革新が望まれる。な お、低透水層の含水量や飽和度を計測して地下水浸潤状況を把握するための光ファイバ センサー技術を用いない計測方法として、比抵抗トモグラフィが挙げられる。既往検討 [23]では様々な計測方式が検討されているが、その計測精度については詳述されていな い。また、我が国の高レベル放射性廃棄物処分場の緩衝材を対象とした試験では、図 2.3-840 に示すように、飽和度が高い領域では比抵抗の変化が小さい結果が得られてい る[24]。中深度処分施設における低透水層の初期飽和度が 80%以上であることを考慮す ると、比抵抗を用いた飽和度や地下水浸潤状況の推定には、高精度な計測技術が必要に なると想定される。



「2.3.2(2) 熱・水・力学に着目した解析的検討」では、ベントナイトの締固め状態 の違いが施設挙動に与える影響を確認するために、膨潤指数κをパラメータとした 検討を実施している。その結果、図 2.3-841 に示すように、閉鎖措置段階以降に おいても、底部低透水層の力学挙動に違いが見られたことから、施設挙動の監視は、 この期間をカバーするように検討することが重要と考えられる。



図 2.3-841 ベントナイトの膨潤指数κをパラメータとした解析結果の比較

- e. 施設内の温度分布
- (a) 計測位置と光ファイバセンサーの設置時期

光ファイバセンサーは、ひずみと温度を同時に計測できる点に大きな特徴がある。その ため、上述した低拡散層のひび割れ計測、施設内の圧力分布計測のために設置する光ファ イバセンサーを温度分布計測と併用することが合理的であると考えられる。中深度処分施 設における主要な熱的要因は廃棄体の発熱であるため、低拡散層のひび割れ計測、施設内 の圧力分布計測のために設置する光ファイバセンサーのうち、廃棄体に近い位置に設置す る低拡散層のひび割れ計測用光ファイバセンサーで施設内の温度分布を計測することを 提案する。



図 2.3-842 施設内の温度分布計測用光ファイバセンサーの設置位置(例)

設置面	設置 Step	概念図[1]
底部低拡散層 上面	底部低拡散層施工 (Step4)の直後	
側部低拡散層 外面	区画内充てん材施 工(Step8)の直 後 [※]	
上部低拡散層 上面	上部低拡散層施工 (Step11)の直後	

表 2.3-219 施設内の温度分布計測用光ファイバの設置工程(例)

※ 放射線影響を軽減するため、廃棄体定置後に遮蔽が確保された状態で側部低拡散層外面に敷設

(b) 光ファイバセンサーの配置

低拡散層のひび割れ計測に用いる光ファイバセンサーを温度分布計測にも使用するため、光ファイバセンサーの配置は、低拡散層のひび割れ計測と同様である。

(c) 計測頻度

低拡散層のひび割れ計測に用いる光ファイバセンサーを温度分布計測にも使用するため、計測頻度は、低拡散層のひび割れ計測と同様である。

(d) 留意点、課題

提案した光ファイバセンサーを活用した施設内の温度分布計測における留意点や課題 を抽出し、以下に列挙する。

- a) 施工性の観点
 - ・ 提案した光ファイバセンサーの配置案は、いずれも光ファイバ総延長が長いため、設置 作業に要する期間が長く、建設・操業工程に影響する可能性がある。
 - ・ 底部低拡散層上面に光ファイバセンサーを設置した後に、底部コンクリートピットの鉄 筋を組み立てる必要があるため、光ファイバセンサーを損傷させないような施工方法を 採用する必要がある。
 - ・ 側部低拡散層の上部は、上部低拡散層と同時に打設される部位である。そのため、側部
 ー上部低拡散層の打ち継ぎ部を計測するための光ファイバセンサーを上部低拡散層打
 設完了まで設置することができない。この期間に光ファイバセンサーを損傷させないような養生が必要となる。
 - ・ 側部低拡散層への光ファイバセンサー設置後に隣接する側部低透水層を施工するため、 光ファイバセンサーを損傷させない施工方法(吹付工法など)を採用する必要がある。
- b) 計測技術の観点
 - ・同一の光ファイバセンサーを用いてひずみ計測と温度計測を実施する場合、適切な計測 方式(ラマン計測/ブリルアン計測/レイリー計測)を選択する必要がある。

4) 核種漏えい検知のためのモニタリング

ここでは、施設から核種が漏えいしていないことを確認するために、放射性核種分析装置 や放射線検出器を活用したモニタリング計画を検討する。

はじめに、モニタリング対象の放射性核種と放射線種に関する条件を整理する。次に、既 存の放射線検出技術と最近の技術動向を整理し、核種分析装置を用いたモニタリング計画の 検討、放射線検出器を用いたモニタリング計画の検討を行う。施設の状況(時期・場所)に よりモニタリング条件が異なることに留意して検討した。また、各計画の実現に向けて解決 すべき課題を整理した。

地下埋設施設には人口バリアの設計上の問題や施工の不具合等による異常漏洩の監視・測 定(放射線モニタリング)を行うための設備設置が要求されている[25]。本章ではモニタリ ング計画の具体化に資するため、従来からの放射線計測技術の動向を調査し適用性を検討す る。

a. 放射線計測に関する技術調査の条件

放射線計測に関する技術の調査範囲を明確にするため、中深度地下埋設施設でモニタリ ング対象となる放射性核種、放射線種、放射線量率の範囲を整理した。

(a) 計測対象となる放射性核種と放射線種

中深度埋設施設へ格納される炉内等廃棄物(L1)は、 α 核種をほとんど含まず、半減 期が数百年を超える長半減期の β ・ γ 核種を多く含む(図 2.3-843、図 2.3-843 及び表 2.3-220)。施設のモニタリングは主に β ・ γ 線の計測と、水や土壌に含まれる β ・ γ 核種 の濃度の計測となる。表 2.3-220 に記載した核種から放射される放射線のエネルギー範 囲は β 線が H-3 の 0.01860MeV~Cs-137 の 1.176MeV、 γ 線が Ni-59 の 0.0069MeV~ Co-60 の 1.333MeV である。この他、低線量・低濃度の計測では地下水や土壌中に含ま れる天然放射性核種(表 2.3-221)を計測し影響を除去することがある。



図 2.3-843 炉内等廃棄物の放射能濃度と時間の関係[26]

核種	半減期(年)	主なβ線のエネルギー (MeV)と放出割合	主な光子線エネルギー (MeV)と放出割合
H-3	12.33	eta $^-$ 0.01860 $-$ 100%	
C-14	$5.730 imes 10^{3}$	eta $^-$ 0.156 $-$ 100%	
Cl-36	$3.01 imes10^5$	$eta^- 0.709 - 98.1\% \ { m EC} \ 1.9\%$	
Ni-59	$7.6 imes 10^4$	EC 100% β + 0.0505一弱	$\begin{array}{c} 0.0069 {-} 29.8\% \ {\rm Co}{-}{\rm K}\alpha \\ 0.0077 {-} 4.0\% {\rm Co}{-}{\rm K}\beta \end{array}$
Co-60	5.271	$egin{array}{c} eta = 0.318 - 99.9\% \ 1.491^{-} { m ss} \end{array}$	$\begin{array}{c} 1.173 - 100\% \\ 1.333 - 100\% \end{array}$
Ni-63	100.1	β $^-0.0669 - 100\%$	
Nb-94	$2.03\! imes\!10^4$	eta $^-0.472 - 98.1\%$	$\begin{array}{c} 0.703 {-} 97.9\% \\ 0.871 {-} 99.9\% \end{array}$
Tc-99	2.111×10^{5}	eta $^-0.294\!-\!100\%$	
Ag-108m	$4.18 imes10^2$	eta $^-0.1094$	
I-129	$1.57\! imes\!10^7$	eta $^-0.154\!-\!100\%$	0.0396 - 7.5% $0.0298 - 57.0\%$ Xe-K α $0.0336 - 13.2\%$ Xe-K β
Cs-137	30.04	$eta^{-0.514-94.4\%}_{1.176-5.6\%}$	$\begin{array}{c} 0.662\!-\!85.1\% \; \mathrm{Ba}\text{-}137\mathrm{m} \\ 0.0332\!-\!5.6\% \; \mathrm{Ba}\text{-}\mathrm{K}\alpha \\ 0.0364\!-\!1.3\% \; \mathrm{Ba}\text{-}\mathrm{K}\beta \end{array}$
Hf-182	8.90×10^{6} y	β ⁻ 0.373	

表 2.3-220 主要 12 核種からの放射線[27]

核種	半減期	主なβ線のエネルギー (MeV)と放出割合	主な光子線エネルギー (MeV)と放出割合
K-40	1.277×10^{9}	eta^{-} 1.312-89.3% EC 10.7%	1.461- 10.7%
Ra-226	1600 年	lpha 4.602 - 5.6% lpha 4.784 - 94.4%	0.186- 3.6% 他
Rn-222	3.824d	α 5.490-99.9% 他	0.510- 0.076%
Rn-220	55.6s	lpha 5.748 - 0.11% lpha 6.288 - 99.9%	0.550- 0.11%
Rb-87	$4.75 imes 10^{10}$	$\alpha 0.283 - 100\%$	

表 2.3-221 天然放射性核種の例[28]

(b) 放射線量率の範囲

放射線計測の範囲によって計測手法が異なる場合があるため、中深度施設へ埋設される 廃棄体の表面線量率と、施設の線量拘束値(L1については検討中の値)を参考にした。 値は下記の通りである。なお、日本人が 1 年間に被ばくする大地からの放射線量は 0.33mSv と見積もられている[29]。この値は 1 年間を 8,766 時間として均等割りすると 約 0.04μSv/h に相当する。

(c) 廃棄体容器の最大表面線量率[30]

500mSv/h 以下

- (d) 施設の線量拘束値 [31][32]
- a) 現行の第二種廃棄物の規則(L2 と L3) 基本シナリオ 10µSv/年 変動シナリオ 300µSv/年
- b)検討中の第二種廃棄物の規則(L1)
 通常の保守的な状態
 100µSv/年
 厳しい状態
 300µSv/年

上記より放射線計測の範囲を線量率 0.001µSv/h~1Sv/h、積算線量 1Sv/年~10,000Sv/ 年の桁と見積もり調査する。 b. 従来検出技術の概観

放射線の検出原理は電離現象、発光現象、化学変化、その他に大別される(表 2.3・222)。 ここでは、地下埋設施設への適用技術を絞り込む際の参考にするため、既存の主要な放射 線検出原理を整理した。

検出原理 (信号)		検出器
電離現象	一時電離	電離箱(気体)、半導体検出器(固体)
(電荷→電流、電圧)	電子なだれ	比例計数管(気体)、GM 計数管(気体)
	蛍光放出	シンチレーション検出器
	チェレンコフ放射	チェレンコフ検出器(液シン)
発光現象 (光子→電荷→電圧)	蓄積誘導放射	イメージングプレート 熱ルミネッセンス線量計(TLD) 光刺激ルミネッセンス線量計(OSLD) 蛍光ガラス線量計
	写真作用	写真乳剤、X線フィルム
小 学本 小	酸化・還元反応	鉄線量計、セリウム線量計
16子发16	ラジカル形成	アラニン線量計
	着色	高分子線量計、カラーインジケータ
電荷収集	電荷蓄積	ファラディカップ
発熱現象	熱発生	カロリーメータ
原子核反応	核反応、放射化	BF3 カウンタ、3He カウンタ、箔検出器
	放射線損傷	固体飛跡検出器
飛跡現象	液滴形成	霧箱
	気泡形成	泡箱

表 2.3-222 主な放射線計測器の検出原理(文献[33]を参考にして作成した)

(a) 電離現象による検出

放射線がガスや固体中を通過するとエネルギーを与えて物質を電離させる。高電場を印 加し電離で生じた電子とイオン(固体中では電子と正孔)を再結合させずに電極へ移動さ せ、放射線の入射を電気信号に換えて検出する。

地下空間で長期使用する場合には、ガスの封入(漏洩・可燃性)、高電場の印加(放電・ 劣化)、が課題になると考えられる。

- (b) 発光現象による検出
- a)蛍光放出

放射線(主にβ・γ線)の通過により生じた励起状態がエネルギーを失う際に放射する シンチレーション光(蛍光や燐光)を検出する。光電子増倍管やフォトダイオードなどに よって光信号を電気信号に変換・増幅し、放射線の入射数を計数(カウント)するほか、 発光の輝度から放射線エネルギーの情報も得られる。

シンチレーション光を放射する透明な材料であるシンチレータは材質によって無機シ ンチレータと有機シンチレータに分類される。一般的に、無機シンチレータは、発光効率 が高い、光出力との直線性が良い、割れ易く潮解性がある(潮解性のない材料もある)、 等の特徴があり、有機シンチレータは、発光減衰時間が短い、プラスチックや有機液体中 にシンチレータを溶解させて複雑形状や大型化に対応可能である、発光効率が無機シンチ レータより低い、等の特徴がある。

地下空間で使用する場合、シンチレータの潮解性等の耐候性、光検出器への通電(ケー ブルの耐候性や防爆性)が課題になると考えられる。密閉空間からシンチレーション光を 減衰させずに外部へ伝送できれば、原位置への通電が不要なシステムとなるため原理的に 注目される。ボアホールサイズのシンチレーション検出器が市販されており、地下埋設施 設周辺の観測孔内の放射線環境を必要に応じて確認する手段として実用可能な技術であ る。

b) チェレンコフ放射

電荷を持った粒子が物質中を通過する速度 v が、屈折率 n の物質中の光の速度 c/n を上回ると粒子の飛跡に沿ってチェレンコフ光が発生する。液体試料中に含まれる 90Sr などの核種(最大エネルギーが 263keV を超える β 線放出核種)を定量するために、液体シン チレーション検出器で、液体シンチレータを試料に混合せず、チェレンコフ光を検出する 場合がある。

観測孔から試料を採取して実験室で定量するための技術の一つとして注目する。

c) 蓄積誘導放射

放射線の照射により軌道捕獲された電子が、熱や光の照射により捕獲された量に比例し た光を放射する特性を利用して放射線の積算線量を計測する。TLD(熱ルミネッセンス 線量計)、OSLD(光刺激ルミネッセンス線量計)、蛍光ガラス線量計などの個人線量計の 原理がこれに該当する。

低線量の計測で利用されているが、データを読み出すために線量計を回収・分析する必要があり、密閉空間内への適用技術としての注目度は低いと考えられる。地下埋設施設周辺の観測孔内の放射線の積算線量を確認する手段として実用可能な技術である。

(c) 化学変化による検出

a)写真作用

放射線照射により写真乳剤中のハロゲン化銀が電離し、銀イオンを還元させて潜像を生 じるので、現像・定着させて写真を得、フィルムの黒化度合いから積算線量を計測する。 個人線量計として最も古くから利用されてきたが、他の原理の個人線量計が登場し利用は 減っている。

フィルムを回収して現像するプロセスが必要なため、密閉空間への適用技術としての注

目度は低いと考えられる。観測孔内の放射線環境を一定期間ごとに確認する手段として実 用可能な技術である。

b)酸化 · 還元反応

放射線照射による水溶液中の物質の酸化・還元等の化学反応を利用した検出器。鉄線量 計、セリウム線量計などがこれに該当する。線量は通常10Gv以上を対象とする。

データを読み出すために線量計を回収・分析する必要があるため密閉空間内への適用技 術としての注目度は低いと考えられる。

c) ラジカル形成

放射線照射により結晶中に生じる安定なラジカル量を測定して放射線量を定量する。ア ラニン線量計の検出原理がこれに該当する。アラニン線量計は計測範囲が広く(1~ 105Gy)、高い精度と安定性を持つ(<±1%)が[34]、データを読み出すために線量計を 回収・分析する必要があるため密閉空間内への適用技術としての注目度は低いと考えられ る。

- (d) その他の原理による検出
- a) 電荷収集

金属(ファラディカップ)に電荷をもった放射線を照射すると電荷が蓄積される。金属 に電流計を接続しておくと入射した放射線数に応じた電流を検出できる。電子やイオンビ ームのフルエンス(単位面積当たりに入射する粒子の個数)を計測するために用いられて いる。

計測対象の荷電粒子が空間中を飛行して検出器に到達することが前提となるため、地下 埋設施設への適用技術として注目度は低いと考えられる。

b) 発熱作用

放射線照射により生じた熱量を計測して放射線量を求める原理の検出器。電荷を持たな い放射線の計測にも有効である。放射線源の放射能の絶対値を求めるため、恒温状態にし た検出器を2系統用意し、1系統にだけ放射線を照射して、両者の温度差を精密計測する マイクロカロリメーターなどがこれに該当する。

α線源やβ線源に対し10MBq程度の放射能を計測できる。地下埋設施設の線量拘束値 レベルの線量照射で生じる熱量は極めて低く、精密な温度計測や検出器自身の温度制御が 課題になると考えられる。

c)原子核反応

電荷を持たない中性子の検出では、中性子と反応を起こし易い元素に照射し、電荷を持った粒子を放射させて検出する。BF3 カウンタ、3He カウンタ、箔検出器、等がこれに該当する。

地下埋設施設では主な検出対象は $\beta \cdot \gamma$ 線核種であるため注目度は低い技術と考えられる。

d)飛跡現象

プラスチックなどを陽子以上の重荷電粒子が通過すると通路に沿って放射線損傷が生 じるためその損傷を化学処理して保存し光学顕微鏡で観察する固体飛跡検出器や、電荷を 持った粒子の飛跡に沿って泡や液滴を生じさせ写真に記録する泡箱や霧箱が該当する。 地下埋設施設では主な検出対象はβ・γ線であるため注目度は低い技術と考えられる。

c. 従来技術の動向

放射線計測対象の条件整理と、従来技術の検出原理を踏まえて、β線計測技術、γ線計 測技術、βγ核種の同定と放射能濃度推定技術について、次の文献を中心に技術動向を調 査した。

- ANDRA, Dossier 2005[35]
- Sensor[36]
- IEEE Transaction on Nuclear Science[37]
- Nuclear Instruments and Method[38]
- IPAC 2018 (第9回国際粒子加速器会議)要項集[39]
- ・ 原子力安全技術センター「平成 26 年度放射線対策委託費(放射能測定法シリーズ改 訂)事業報告書」放射線計測[40]
- ・ 放射線防護用設備・機器ガイド 2016/2017 版(日本アイソトープ協会)[41]
- Review in Physics[58]
- Geotechnical Engineering Journal of SEAGS & AGSSEA[44]
- (a) β線計測技術の動向

β線はβ壊変によって放射される放射線で実体は高速の電子又は陽電子である。エネル ギーの低いβ線は検出器に到達するまでにエネルギーを失ってしまうため(例えばトリチ ウム H-3 から放射されるエネルギー18keV のβ線は空気中での飛程が約 0.5cm)、窓の厚 さを薄くしたガス検出器や、計測対象を液体シンチレータに浸漬させてシンチレーション 光を放射させる液体シンチレータ法で計測する。

液体中のトリチウムの濃度分布を計測することを目的として、トリチウムから放射され るベータ線を固体シンチレータと光ファイバを組み合わせて計測するセンサの研究開発 が報告されている(図 2.3-844 [42])。センサの有感部は無機シンチレータの粉末を混合 した直径 10mm×厚さ 0.1mmのエポキシ樹脂で、β線が通過するとシンチレーション光 が放射される。樹脂には光ファイバの束が接合されており、シンチレーション光を光電子 増倍管へ導いて電気信号に変換・増幅し記録・表示する。トリチウム濃度の 2 次元分布 を高い位置分解能で得ることを最終目標として開発を進めており、1本1本の光ファイバ からの信号を2次元配置した光電子増倍管やCCDカメラで撮像することが検討されている。埋設施設のモニタリングでは、例えば観測孔から採取した地下水にトリチウムが検出された場合に、濃度の高い位置を特定する手段として使用できる可能性がある。装置の構成は、光ファイバ中でシンチレーション光(紫外領域)が減衰するため、有感部に近い位置に前置光増幅器を置く方式や、有感部に近い位置で信号を数値化して通信する方式になると考えられる(図 2.3-845)。





図 2.3-844 トリチウム濃度計測器[42]

図 2.3-845 β線の分布計測イメージ

(b) γ線計測技術の動向

γ線(光子線・エネルギーの高い電磁波)が物質と相互作用してエネルギーを失う過程 はレイリー散乱、光電効果、コンプトン散乱、電子対生成に分けられる。線量率の計測で は、電離箱、ガイガーミューラー管、シンチレーション検出器、半導体検出器などが使用 され、積算線量の計測では、熱ルミネッセンス計、光ルミネッセンス計、化学線量計など が使用されることが多い。これらの検出器のうち電離で生じた電子を電極に集めるタイプ は数 kV の高電圧を印加するため、地下水位以下の湿度が高い環境、あるいは防爆仕様を 求められる埋設施設で使用する場合は密閉性の確保が必須となる。一方、励起で生じた光 を検出するシンチレーション検出器等は計測位置から光ファイバ等でシンチレーション 光を導くことができれば計測位置に電極や電線を配置する必要が無い。また、光ファイバ は、電線における信号の減衰や、外部からの電磁ノイズの影響を受けないため、原理的に 埋設施設のモニタリングに最も適した方法と考えられる。

近年、大型加速器施設では加速器を設置したトンネルの放射線環境を光ファイバ式の線

量計でモニタリングする実験が進められている[43][44]。全長に FBG が施された光ファ イバへ光を通過させ、後方散乱成分が放射線照射部分で影響を受けることを利用して線量 を推定する方式で、長さ 250m の FBG 光ファイバの全長に沿って 1m 間隔で 250 箇所(位 置分解能 1m)を 250 日間記録し続け(最大値約 100Gy/250 日、検出下限約 3Gy/250 日)、 従来型の積算線量計の値とよく一致したことが報告されている。埋設施設のモニタリング では、廃棄体容器の表面線量率(最大 500mSv/h)を 1 週間以上の間隔(積算値が検出下 限以上となる間隔)で記録し続け、異常漏洩の有無を確認する使用法などが考えられる。 地下埋設施設境界からの漏洩検知は漏洩限度が極めて低いため(光ファイバ式の線量計の 検出下限 3Gy に対して 1~5 桁低い)、適用は難しいが放射線照射が FBG 光ファイバへ 及ぼす影響のメカニズムが解明され、現在よりも放射線感度が高い FBG 光ファイバが製 造されるようになる可能性を考慮し技術動向には注意すべきと考える。



図 2.3-846 放射線照射前後の光ファイバの透過率の変化[45]

(c) 核種同定・濃度推定技術の動向

土壌や水に含まれる放射性核種(γ核種)を同定する装置として NaI(TI)シンチレーションスペクトロメータやゲルマニウム半導体スペクトル分析器などが使用されている。試料を採取して定型容器に詰め、環境放射線を遮蔽した空間中で試料から放射される放射線のエネルギースペクトルを計測して核種を特定し、濃度も推定する装置が一般的である。 原位置で廃棄物等を対象に核種同定や濃度推定を行えるハンディタイプのスペクトロメータも実用化されている。更に原位置で濃度を推定するための校正ソフトウェア[46]の精度向上も進んでいる。

化学処理が必要で濃度分析に時間がかかっていたストロンチウム(Sr-90)などのβ核 種のリアルタイム計測を実現した装置[47][48]は従来の市販品にない新しい計測器とし て注目される。検出対象核種から放射されるエネルギーが既知のβ線が通過するとチェレ ンコフ光が放射されるように屈折率を調整したエアロゲル材料を用いた装置で、特定のβ 核種の有無を原位置で確認する要望があれば適用可能な原理の技術である。 排水に含まれる放射性セシウム濃度(基準:134Cs(Bq/L)/60+137Cs(Bq/L)/90 \leq 1) を、試料自身で環境放射線を遮蔽する装置構成とすることにより、高速で全量(大容量) を判定するセシモニウォーター[49]も現存被ばく状況下での低線量を計測する新しい考 え方の装置といえる。

- d. 注目すべき技術
- (a) 光ファイバ放射線計測技術

γ線計測技術のうち特に光ファイバを利用した技術に関する文献調査を行った。光ファ イバを用いたγ線計測方法として、①γ線がシンチレータに照射されて生成されたシンチ レーション光を光ファイバで伝送し輝度を計測してγ線量を求める方式、②通信用に使用 され低損失なシングルモード光ファイバの波長 1550nm の光に対する損失量を計測して γ線照射量を求める方式、の2通りが考えられる。



図 2.3-847 石英光ファイバの伝送損失特性[50]


図 2.3-848 光ファイバの y 線照射後の誘起損失[51]

- a) 点計測型光ファイバセンサー(シンチレータ+光ファイバ)
 - この方式で地下埋設施設のモニタリングを実現するためには、低線量で高輝度のシンチ レーション光が放射されるシンチレータと、シンチレーション光を長距離伝送できる光フ ァイバが必要である。低損失の通信用光ファイバは石英コアのシングルモードタイプで、 波長 1550nm の近赤外線に対する損失が最も小さくなる特性を持つ。よって、放射線の 照射に応答して近赤外光発光するシンチレータ等の材料があれば「シンチレータ+光ファ イバの方式」で遠距離から計測する手法の可能性が拓ける。同様に、従来からのシンチレ ータが放射する紫外領域のシンチレーション光を数百 m 以上伝送できる光ファイバ等の 材料があっても同じ可能性が拓ける。そこでシンチレータと紫外線透過光ファイバの動向 について調査した。
- b) シンチレータの動向(近赤外発光物質の動向)

近赤外線を放射するシンチレータの研究開発の報告が、東北大学[52]、奈良先端科学技 術大[53]、九工大[54]、横浜国大[55]などから行われている。放射線がん治療におけるリ アルタイム体内線量計測を目的とし、人体に無害かつ透過し易い近赤外線に感度のあるシ ンチレータの開発(発光波長 650~1100nm)や、キセノンが赤外(~1.3µm)で発光す ることに着目したシンチレータとして活用する研究開発が行われていたが、通信用光ファ イバの発光中心である波長 1550nm で発光するシンチレータをターゲットとした材料開 発は確認されなかった。2016年に京都大学がバイオイメージング用に波長 1.5~1.65µm で発光する蛍光材料の開発に成功したと発表しており[56]動向が注目される。

c)紫外線透過光ファイバの動向

光ファイバ中に回折格子を構成する加工には波長 300nm 以下の紫外線レーザーが使用 されており、光ファイバ材料中に格子欠陥を生じさせ透過率を低下させる特性が知られて いる。紫外光による加工装置は通信以外に医療や半導体などの分野でも利用され、加工強 度を上げる等の要望に応える耐紫外線用光ファイバが開発されているが通信用光ファイ バの損失率並みの性能は得られていない。例えば波長 215nm に対する相対透過率は 88% (ファイバーラボ社) であり、数百 m の距離を微弱なシンチレーション光を伝送する方 法に好適とはいえない。※一般的にプラスチック光ファイバは紫外線を通さないため調査 対象は石英ファイバに限定した。

2014年にマックスプランク光科学研究所(MPL)、QUEST研究所、PTBの研究グル ープが分光分析用途で使う紫外線を通すために新しいタイプの微細構造をもった光ファ イバを製作し波長 280nmの紫外光 10mW を 100時間照射する試験を行った報告を行い 注目されたが、計測で得られた損失は~1dB/m で、通信用のシングルモードファイバー の波長 1550nm に対する損失と比べて 3 桁高い内容であった[57]。 d) 分布計測型光ファイバセンサー(FBG・LPG 技術)

石英コアのシングルモード光ファイバの中でレーザー光はレイリー散乱(光の波長より 小さい粒子による散乱)、ラマン散乱(入射波長と異なる波長の散乱)、ブリュリアン散乱 (物質中の音波との相互作用で振動数がずれて散乱される)等を起こす。

FBG (Fiber Bragg Grating) はコアに屈折率が異なる領域を周期的に書き込んだ光フ ァイバで、コアを伝搬する光の前進と後退のモード結合(回折)により、ブラッグ反射の 条件を満たす波長の光が損失する特徴をもった光ファイバである。格子間距離のわずかな 変化が損失波長のずれなどの応答として検出できるため、電磁ノイズや耐熱性の高い温 度・歪みセンサとして利用されている。回折格子の書き込みを可能とするために FBG の 光ファイバ (石英) にはゲルマニウム (Ge) やリン (P)、ホウ素 (B)、セリウム (Ce) などが添加される。これらの添加物は光ファイバを放射線環境下で使用した場合、損失波 長や損失率に影響することが知られており、光ファイバセンサーに対する放射線影響の研 究が各種行われ、同時に、光ファイバを放射線センサとして積極的に利用する研究開発も 行われるようになった[45]。

LPG (Long Period Grating) は回折格子の間隔(周期)が長い FBG で(FBG の格子 間隔が 0.5µm などであるのに対し LPG は数 10~数百µm である)、光の伝搬に関与する 光ファイバ領域がコアとクラッドの両部に渡るため、より高い感度のセンサ技術として期 待されている。

石英ベースの光ファイバに関して、放射線影響の要素をモデル化し、シミュレーション により実測データを再現する試みが始まっている[58]。RIA や RIE などの放射線影響に関 する現象の理解が進めば、光ファイバの耐久性、光ファイバ放射線センサの高感度化・高 精度化が進む契機となるため今後の動向が注目される。

- e. 放射線計測に関する技術調査のまとめ
 - ・地下埋設施設の放射線モニタリング条件、従来からの技術を整理し、β線計測技術の動向、γ線計測技術の動向、β・γ核種同定・濃度推定技術の動向を中心に新しい技術の動向を調査した。
 - 調査の中で、原理的に地下閉鎖空間内への通電を不要にできる光ファイバ放射線(γ 線)計測技術の可能性に注目したが、地下埋設施設のモニタリング条件の実現には、 放射線で近赤外線発光するシンチレータ材料や、紫外領域の光の損失が通信用並み に低い光ファイバ材料など、革新的な光学材料が必要なフェーズ(技術成熟度レベ ル(TRL) 1~2)であった。
 - 施設周辺に観測孔を開け、観測孔内に放射線計測器を都度設置回収できる状況に対しては、基本的に従来技術で対応できると考えられる。
 - 従来技術を閉鎖空間内へ適用する場合は、計測器への電力供給やデータ回収法(長期供給可能な電池や、無線電力伝送技術、防爆性、耐候性等)が課題となる。

f. 試料採取&分析による核種漏洩検知のためのモニタリング

ここでは地下水や土壌を採取・分析しモニタリング対象核種が含まれていないことを確 認するためのモニタリング計画を検討する。

(a) 方法

採水ポンプ・採水容器・コア採取装置等の採取技術を用いて地下水・土壌・ガスなどの 試料を採取し、地上の実験室に設置下ゲルマニウム半導体分析器などの分析装置によって 放射性核種の濃度を確認する。

- (b) 関連技術
- a)採取装置

採水ポンプ、採水容器、コア採取装置、エアーサンプラー

b)分析装置

ゲルマニウム半導体検出器、NaI(Tl)シンチレーション検出器、液体シンチレーション 分析装置

- (c) モニタリング計画例
- a) 廃棄物埋設中(~50年)
- ア) 埋設坑道外

敷地内の既存の試掘ボーリング孔(観測孔)から土壌・地下水・ガスを採取して分析す る。定期安全レビュー(10年を越えない期間ごとに、施設の安全性・信頼性を評価し、 施設が環境に影響を及ぼしていないことを示す)への対応も考慮して、建設の早い段階か らモニタリングポイント選定を行い、放射線管理区域設定前から計測を行う。

イ)埋設坑道内

坑内で浸出水・ガスを採取して分析する。浸出水は排水路や排水処理設備で採取し、ガ スは検知対象の特性(比重など)を考慮した位置で採取する。



図 2.3-849 試料採取モニタリングのイメージ (廃棄物埋設中)

- b) 封止後(50~300年
- ア) 埋設坑道外

敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)の土壌・地下水・ガスを採取して分析する。地下 水の量や向き等の状況によりモニタリング計画を見直す。



図 2.3-850 試料採取モニタリングのイメージ(封止後)

イ) 埋設坑道内

(埋設坑道は埋め戻されて試料を採取できないためモニタリングなし)

- c) 解除後(300年~)
- ア) 埋設坑道外

敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)の土壌・地下水・ガスを採取して分析する。地下 水の量や向き等の状況によりモニタリング計画を見直す。

イ)埋設坑道内

(埋設坑道は埋め戻されて試料を採取できないためモニタリングなし)

(d) 課題

試料採取場所や数、採取頻度の設定に係る情報が不足している。

- g. 原位置計測による核種漏洩検知のためのモニタリング ここでは放射線計測プローブを設置してモニタリング対象核種が漏洩していないこと を確認するためのモニタリング計画を検討する。
- (a) 方法

放射線センサプローブを用いて原位置計測を行う。

(b) 関連技術

放射線センサ:GM 計数管、シンチレーション検出器、半導体検出器、TLD、OSL、 フィルムバッジ、などの $\beta\gamma$ 線検出用センサ

- (c) モニタリング計画例
- a) 廃棄物埋設中 (~50年)
- ア) 埋設坑道外 敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)内で放射線計測を行う。
- イ)埋設坑道内

坑内に放射線センサを設置して行う。



図 2.3-851 放射線センサによるモニタリングイメージ(廃棄物埋設中)

- b) 封止後(50~300年)
- ア) 埋設坑道外

敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)内で放射線計測を行う。

イ) 埋設坑道内

電力供給手段(電力ケーブル、電池、無線電力伝送)とデータ通信手段(ケーブル、無 線通信)、計測器の防水対策を施して封止前に使用していた放射線センサで計測を続ける 方法や、プローブへの電力供給が不要な光ファイバ放射線センサ(将来技術)を適用して 行う方法が考えられる。

封止後は計測器のメンテナンスができない環境となるため、同一箇所に異なる原理の計 測器を複数設置して傾向を比較するなど工夫して計測する。



図 2.3-852 放射線センサによるモニタリングイメージ(封止後)

- c) 解除後(300年~)
- ア) 埋設坑外 敷地内の試掘ボーリング孔(観測孔)内で放射線計測を行う。
- イ)埋設坑内

(計測器を設置できないためモニタリングなし)

(d) 課題

核種漏洩検知後の漏洩箇所探査や、漏洩を止める技術の調査検討も必要である。

5) 整備が進められている規制要求との対比

ここでは、現在整備が進められている中深度処分を含む低レベル放射性廃棄物処分に対す る規制基準類[59][60][61]におけるモニタリングに係る要求事項を調査・整理するとともに、 本事業で検討したモニタリング計画(例)と対比する。なお、規制基準類を調査する上では、 モニタリングに関する記述が最も詳細な「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について (改定案)」[61](以下、「規制の考え方(改定案)」と称する。)を主に調査対象とした。な お、*斜体*で記載した部分は、規制基準類から原文のまま抜粋したことを示す。

- a. 規制要求の整理
- (a) 規制要求の前提
- a) 処分概念

従来、余裕深度処分と呼ばれていた処分概念が、今般の規制基準の整備に伴い、中深度 処分と呼ばれるようになった。「規制の考え方(改定案)」[61]では、以下のように中深度 処分の処分概念を定義している。

炉内等廃棄物の処分を行うに当たっては、数万年を超える長期間にわたって炉内等廃棄 物を起因とする放射線による影響から公衆と、公衆を防護する上で必要な環境(汚染され ると間接的に公衆への放射線影響を生じ得るような環境のこと。以下「生活環境」という。) を防護する必要がある。

数万年を超える長期間にわたって公衆と生活環境を防護するための根幹的な対策とし て、廃棄物と公衆の離隔に有効と考えられる深度へ廃棄物を埋設し、自然現象に起因する 事象(以下「自然事象」という。)及び人間活動に起因する事象(以下「人為事象」とい う。)*5による廃棄物への擾乱等を防ぐとともに、その周辺の岩盤又は地盤等(以下「天 然バリア」という。)が有する物理的及び化学的な特性や、天然バリアへの放射性核種の 漏出の防止及び低減の機能を有する人工構築物(以下「人工バリア」という。)を活用す ることにより、<u>埋設された廃棄物からの放射性核種の漏出や生活圏への移行を抑制(以下</u> 「閉じ込め^{*6}」という。)する^{*7}。炉内等廃棄物に必要となる離隔のための深度や閉じ込 めの程度は、総放射能量や長半減期核種の濃度等に見合ったものとし、深度は浅地中処分 よりも深いものとする^{**8}。

以上のような処分概念を「中深度処分」と呼ぶこととする。

(原文には<u>下線</u>なし。)

ここで、上記の下線部において、埋設された廃棄物からの放射性核種の漏出や生活圏へ の移行を抑制することを「閉じ込め」と呼んでいるが、この「閉じ込め」に対して、以下 の注釈が付いており、ここでの「閉じ込め」は、実質的には「移行抑制」に相当すると読 み取ることができる。

※6ここでの「閉じ込め」は、許可基準規則における「限定した区域への閉じ込め」で はなく、放射性核種の漏出や生活圏への移行の抑制のことを意味する。

O放射性廃棄物に含まれる放射性物質を起因とするリスクから公衆と生活環境を防護するため、廃棄物の種類や放射能濃度等に応じた埋設の方法により最終的な処分を行う。



図 2.3-853 放射性廃棄物の処分概念[61]

b)規制終了までの期間

規制期間は、以下に示すように、事業者による事業の継続性を考慮して 300~400 年程 度とされている。

埋設された炉内等廃棄物は、数万年を超える長期にわたり人への潜在的な影響が残る可 能性があるが、こうした長期間にわたり事業者※9を規制して管理させることにより安全 を確保することは現実的でない。

このため、事業者が離隔や閉じ込めの措置を完了し、原子力規制委員会が、当該措置に 問題がないこと、原子力規制委員会による事業者に対する規制が行われる期間(以下「規 制期間」という。)の終了後において防護上の問題を生じ得るような状態に至ることは合 理的に想定し得ないこと等を確認した上で、規制は有限の期間で終了するものとする。規 制終了までの期間としては、事業者による離隔や閉じ込めの措置に係る確認を一定の期間 求める観点に加えて、事業者による事業の継続性の観点から既往のピット処分の事業を参 考に、300~400 年程度を念頭に置く。

なお、原子炉等規制法の規定に基づき、規制期間中及び規制期間終了後において、廃棄 物埋設地を含む一定の区域に対する掘削や地下利用等の特定の行為は制度的に制限され る。

(b) 中深度処分事業の各段階

平成 29 年 11 月 2 日に公開された「規制の考え方(改定案)」[61]には、原子炉等規制 法[62]の改正が反映され、中深度処分においても「閉鎖措置」の概念が導入され、中深度 処分事業の段階が以下のように定義されている。

中深度処分事業は、以下の段階に分けられる。現行の法令に基づき事業者が受ける規制 は、このうち審査段階から廃止措置段階までである。なお、廃棄物埋設施設の一部の建設 が終了した段階で廃棄物の受入れが行われることも想定されるため、建設段階と埋設段階 とが並行する場合もある。

- ・ 立地段階(立地場所の調査~事業申請前)
- · 審查段階(事業申請~事業許可前)
- 建設段階(事業許可~廃棄物の受入れ開始前)
- 廃棄物の埋設段階(廃棄物の受入れ開始~廃棄物埋設地の埋戻し終了)
- ・ 閉鎖措置段階^{※14} (廃棄物埋設地の埋戻し終了後~閉鎖措置の終了)
- 保全段階(閉鎖措置の終了後~廃止措置の開始前)
- · 廃止措置段階(廃止措置の開始~廃止措置の終了)
- · 規制期間終了後

「規制の考え方(改定案)」[61]では、事業者が受ける規制を「審査段階」から「廃止 措置段階」までとしており、上述の「(a) b)規制終了までの期間」での記載を参考にす ると、「審査段階」から「廃止措置段階」までが 300~400 年程度と読み取れる。一方、 「中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガイドの骨 子案」[60](以下、「審査ガイドの骨子案」と称する。)には、「埋設の終了から廃止措置 の開始までの期間は、300~400 年を目安とする」との記載があり、「規制の考え方(改 定案)」[61]と「審査ガイドの骨子案」[60]には、規制期間の考え方に若干の齟齬がある 点に留意する必要がある。

(c) 規制要求の考え方

「規制の考え方(改定案)」[61]における規制要求は、設計要求と管理要求に大別される。ここでは、規制要求のうち、モニタリングに関する設計要求、管理要求を整理した。

a)設計要求

設計要求の中では、モニタリング設備に係る要求が明記されており、「放射線モニタリ

ング」と「地下水等モニタリング」の 2 種類のモニタリングを実施するための設備を設置することが要求されている。

人工バリアによって少なくとも廃止措置の開始までの期間は廃棄物埋設地からの放射 性核種の漏出が抑制されていることを確認するため、人工バリアの設計上の問題、施工の 不具合等による異常な漏えいの監視・測定(以下「放射線モニタリング」という。)を行 うための設備を設置することを要求する。ここで、異常な漏えいとは、廃棄物埋設地から 漏出する放射性核種の濃度が一定の水準を超える場合をいう。また、地下水の状態に加え て、廃棄物埋設地の埋戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱すること なく性能を発揮しつつあることを事業者が確認し、後述する定期的な評価等に必要なデー タを取得するため、廃止措置の開始までの間において、廃棄物埋設地及びその周辺の地質 環境に係る物理的・化学的特性、人工バリアの性能や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態等の確認のためのデータ取得(以下「地下水等モニタリング」とい う。)を行うための設備を設置することを要求する。

放射線モニタリング及び地下水等モニタリング設備の設計に当たっては、廃棄物の埋設 段階、坑道の埋戻し段階及び保全段階における廃棄物埋設地周辺の環境や測定期間に適応 して実用上必要な精度で監視・測定ができる性能を有する設備を用いることを要求する。 この際、モニタリング設備の設置により、漏出抑制機能を担保する人工バリアの劣化や酸 化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促進をもたらすことがないよう、最適な設 計を講じることを要求する。このため、地下水等モニタリングの対象のうち人工バリアの 性能については、実際の環境と同等の条件を模擬した環境下での原位置試験又はそれを補 完する室内試験等の間接的な方法により確認することが可能であれば、このような設備の 設置によって代替することを妨げるものではない。

b)管理要求

管理要求の中では、規制期間終了後の安全性確認に関して、モニタリングに関連する要 求が挙げられている。

ア)放射性核種の閉じ込め機能の確認に係る要求

設計要求に示されたモニタリングを実施するための設備を用いて、放射性核種の異常な 漏えいの徴候がないことを確認する「放射線モニタリング」、及び地下水の状態と、人工 バリアと天然バリアが設計を逸脱することなく性能を発揮しつつあることを確認するた めの「地下水等モニタリング」を実施することが要求されている。

廃止措置の開始までの間において放射線モニタリングを行い、人工バリアの設計上の問題、施工の不具合等による放射性核種の異常な漏えいの徴候がないことを確認することを 要求する。

また、廃止措置の開始までの間において、地下水等モニタリングを行い、地下水の状態

に加えて、廃棄物埋設地の埋戻し終了後における人工バリアや天然バリアが設計を逸脱す ることなく漏出抑制や移行抑制に係る性能を発揮しつつあることの確認に必要なデータ を取得することを要求する。

イ)定期的な評価等に係る要求

廃止措置の開始までの期間において、10年を超えない期間ごと及び廃棄物の埋設段階 や保全段階などの次の段階に移行する前に、最新の技術的知見を踏まえた定期的な評価を 行うことが求められている。この定期的な評価では、廃棄物埋設地が70m以上の深度に とどまることによる離隔機能に関する確認の他、モニタリングで取得されたデータを反映 し、閉じ込めに関する確認を実施することが要求されている。

中深度処分においては、最新の技術的知見を踏まえてもなお離隔に係る設計が基準に適 合しているかどうかを事業者が確認するため、少なくとも10万年間は火山活動及び断層 活動、侵食作用が著しい影響を及ぼすおそれのない場所が廃棄物埋設地として選定されて いることや、侵食作用を考慮しても廃棄物埋設地が地表から70メートル以上の深度にと どまることの見通しに影響を及ぼす要素や徴候がないことを確認することを要求する。

また、閉じ込めに係る設計についても同様に事業者が確認を行うため、地下水等モニタ リング結果も反映し、人工バリアの漏出抑制機能の健全性を確認することに加え、人工バ リアからの放射性核種の漏出及び天然バリア中の移行挙動を評価し、自然事象に係るシナ リオの基準に適合していることを確認することを要求する。

ウ) 閉鎖措置に係る要求

閉鎖措置段階以降に、モニタリング設備を残置してモニタリングを継続する必要がある 場合には、人間侵入の防止のみならず、モニタリング設備を埋め戻した領域が放射性核種 の移行経路にならないことが重要となる。そのため、規制要求にも上記内容が明記されて いる。また、閉鎖措置後にはモニタリングの実施に関する技術的難易度が大幅に増大する と想定されるため、モニタリング方法を適切に見直すことが要求されている。

閉鎖措置に当たっては、人が容易に立ち入れないようにすることを要求するとともに、 埋戻した領域が放射性核種の卓越した移行経路とならないようにすることを要求する。

また、閉鎖措置後は、放射線モニタリングの精度や異常時の補修等の容易性が大幅に低 下することが考えられる。このため、事業者が閉鎖措置段階に移行しようとする場合は、 放射線モニタリングの方法、異常時の補修等の方法を適切に見直すことを要求する。

エ) 異常時の措置に係る要求

規制要求には、モニタリングを行った結果、異常が確認された場合の措置についても記 載されている。放射性核種の異常な漏えいの徴候が確認された場合には、漏出箇所の確認 や補修等の対策を採ることが要求されており、有効な措置が採れない場合には、廃棄物の 回収を要求する場合があることが明記されている。

事業者が放射線モニタリングを行った結果、万一異常な漏えいが確認された場合、既往 の事業規則では、放射性物質の異常な漏えいを防止するために必要な措置を講ずることが 要求されている。具体的には、漏出箇所の確認や補修等の必要な対策を採ることを要求す る。

中深度処分においては、廃止措置の開始までの期間モニタリングを行い、廃棄物埋設地 からの放射性核種の異常な漏えいの徴候が確認された場合、漏出箇所の確認や補修等の必 要な対策を採ることを要求する。

また、補修等の有効な措置が採れない場合は、廃棄物の一部又は全部の回収を要求する こともあり得る。廃棄物の回収を行うこととなった場合は、回収時の安全を確保するため の措置を講じることに加え、回収に先がけ、回収が想定される廃棄物を安全に保管するた めの十分な容量を有する廃棄物の保管施設を設けるとともに、適切な方法により当該廃棄 物を保管することを要求する。

オ)規制期間終了の要件

規制期間終了後は、事業者の存続が保証されていないため、原子力規制委員会が、能動 的な管理を必要とせず、長期安全性に問題を生じるような状態に至ることが合理的に想定 し得ないことを確認することとしている。

規制期間終了後は、事業者の存続が保証されないため、事業者によるモニタリングや万 ーの際の補修等の能動的管理が行われることは期待できない。したがって、事業者に対す る規制終了時点においては、坑道の埋戻し後の放射線モニタリングによって放射性核種の 異常な漏えいが発生していないこと、安全確保に必要な離隔や閉じ込めの措置が完了し、 その後の定期的な評価等によってそれらの措置に問題がないことが、それぞれ事業者によ り確認され、もはや能動的管理を要することなく長期にわたってリスクが低く保たれ、防 護上の問題を生じるような状態に至ることは合理的に想定し得ないことについて、事業者 に必要なデータを提出させ原子力規制委員会が最終的な確認を行う必要がある。このため、 以下を要求する。

- ・ 廃止措置の開始までの間の放射線モニタリングによって、廃棄物埋設地からの放射 性核種の異常な漏えい等の徴候が確認されていないこと。
- 廃止措置の開始までの間に実施した最新の定期的な評価によって、廃棄物埋設地の 離隔に係る措置に問題がないこと、閉じ込めに影響を及ぼす要素や徴候が確認され ていないこと及び自然事象に係るシナリオの評価結果が線量基準に適合している ことが確認されていること。
- 廃止措置の終了確認までの間にモニタリング用に設置した観測孔が、水みちが生じないように適切に埋戻されていること。
- この他、廃止措置の終了確認までに、規制期間終了後の特定行為の制限に必要な保存す

べき記録が整備されていること、廃棄物埋設地の存在を認知しやすくする標識等が設置さ れていることを要求する。

「規制の考え方(改定案)」[61]で要求しているモニタリングの目的と内容をまとめる と表 2.3-223 のように整理される。

表 2.3-223 中深度処分で要求される見込みのモニタリング[61]

名称	目的	内容
放射線 モニタリング	人工バリアによって少なくと も廃止措置の開始までの期間 は廃棄物埋設地からの放射性 核種の漏出が抑制されている ことを確認する	人工バリアの設計上の問題や施工 の不具合等による異常な漏えいの 監視・測定
地下水等 モニタリング	地下水の状態に加えて、廃棄物 埋設地の埋戻し終了後におけ る人工バリアや天然バリアが 設計を逸脱することなく性能 を発揮しつつあることを事業 者が確認し、定期的な評価等に 必要なデータを取得する	廃止措置の開始までの間におい て、廃棄物埋設地及びその周辺の 地質環境に係る物理的・化学的特 性、人工バリアの性能や人工バリ ア及び天然バリアの機能に関係す る地下水の状態等の確認

(d) 廃止措置の開始までの期間中の異常な漏えいを防止する機能

以上では、検討中の規制基準のうち、モニタリングに関する要求事項を中心に整理した。 ここでは、新たな規制要求として、廃止措置の開始までの期間中の異常な漏えいを防止す る機能について整理する。

「審査ガイドの骨子案」[60]には、中深度処分における廃止措置の開始までの期間中の 異常な漏えいを防止する機能の妥当性を確認するために検討されるべき項目、その際の視 点及び判断基準が示されている。

【許可基準規則】

- 2 中深度処分を行う場合の廃棄物埋設地は、次に掲げるところにより、放射性物 質を閉じ込める機能を有するものでなければならない。

 - 二 埋設の終了から廃止措置の開始までの期間、放射性物質を廃棄物埋設地内 に閉じ込めることができるものであること。

【基準解釈】

- 3 第2項第1号に規定する「廃棄物埋設地内の限定された区域に閉じ込めること ができる」とは、次のことをいう。
 - 廃棄物埋設地内の限定された区域の構造が、想定される自重、土圧、地震
 力及びその他想定される自然事象に対して十分な耐力を有すること。
 - 二 廃棄物埋設地内の限定された区域を構成する構造が、放射性物質の移行を 遮断する性能を有していること。上記2の人工バリア又はその一部がこの 構造を兼ねても良い。
- 4 第2項第2号に規定する「埋設の終了から廃止措置の開始までの期間、放射性物質を廃棄物埋設地内に閉じ込めることができる」とは、次のことをいう。
 - ー 埋設の終了から廃止措置の開始までの期間は、300~400年を目安と する。
 - 二 発生が合理的に想定できる範囲内の自然現象が人工バリアの機能に及ぼ す影響を考慮した最も厳しい状態設定の下で、廃棄物埋設地内における放 射性物質の移行を評価した結果、埋設の終了から廃止措置の開始までの期 間は、廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量が無視できるほど少ない こと。

【判断基準】

- ① 廃棄体容器が腐食により貫通する時期が廃止措置の開始以降となる、廃棄体の 下端が地下水により浸漬する時期が廃止措置の開始以降となる等の理由により、放射性物質の漏えい事象が生起しないこと。
- ② 廃止措置の開始までの期間において、廃棄物埋設地から漏出する主要な放射性物質についての放射能の年間当たりの漏出量又は廃棄物埋設地に隣接する岩盤中の地下水濃度が極めて低いこと。 例えば、年間当たりの漏出量を初期放射能量で除した値が極めて小さいこと、 岩盤中の地下水中濃度が検出限界、水中の濃度限度50等に照らして十分に低いこと等。

「審査ガイドの骨子案」[60]における許可基準規則に示されるように、放射性廃棄物の 受入れの開始から埋設の終了まで、すなわち廃棄物の埋設段階においては、廃棄物埋設地 内の限定された区域に閉じ込める必要があり、基準解釈に「*放射性物質の移行を遮断する 性能を有している*」とされているとおり、この「閉じ込め」は、従来、閉鎖措置段階を含 めるか含めないかの相違はあるが、原子力学会[63]、土木学会[1]等で検討されてきた受け 入れ開始から周辺坑道埋め戻し施工完了(閉鎖措置完了)までの「閉じ込め」(廃棄体取 り扱い時、放射性物質の飛散・汚染拡大を防止する)に相当すると考えられる。

一方、埋設の終了から廃止措置の開始までの期間、すなわち閉鎖措置段階から保全段階

においては、廃棄物埋設地内に閉じ込める必要がある。ただし、ここでの「閉じ込め」は、 基準解釈に「*廃棄物埋設地から漏出する放射性物質の量が無視できるほど少ない*」とされ ており、判断基準においても、放射性物質の漏出が全く無いことの他に、極めて少ない又 は十分低いという表現が用いられていることから、「移行抑制」に相当する機能と読み取 ることができる。これは、「(a) a) 処分概念」で示した処分概念の考え方と整合するもの であり、閉鎖措置段階を含めるか含めないかの違いはあるが、既往の原子力学会[63]等の 検討における「移行抑制」に相当するものと考えられる。

なお、「廃棄物埋設地」は、「放射性廃棄物を埋設する場所(人工バリアを含む)のこと」 と定義されており[59]、中深度処分においては、「処分空洞」と読み替えることができる と推察される。

b. モニタリング計画(例)と規制要求の対比

ここでは、本事業で具体的に検討したモニタリング計画(例)と整備が進められている 規制基準におけるモニタリングに係る要求事項とを対比し、その関係性について考察する。

(a) 処分施設の変形計測

処分施設の変形計測は、主に底部低透水層の沈下挙動に着目し、低透水層の厚さの変化 や不均一な沈下挙動によるセメント系人工バリアのひび割れ発生等の影響を確認するモ ニタリング計画(例)として検討した。計測期間は、処分坑道の埋戻し前を対象としてい る。

本モニタリング計画(例)は、人工バリア部材の長期挙動における初期値を確認するた めのモニタリングと位置付けることも可能である。建設段階における品質管理において、 構築した部材が仕様を満たしていることを確認することは当然であるが、底部低透水層を 例に挙げると、乾燥密度や厚さが、構築直後と他部材や廃棄体の上載荷重が作用した後で 異なる可能性がある。そのため、人工バリアの構築直後の状態ではなく、可能な範囲で処 分空洞埋戻し時点に近い状態を初期性能として評価することで、人工バリアの長期挙動評 価の信頼性を高めることができると考えられる。つまり、定期的な評価に反映するための データを取得することが可能である。

したがって、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されているモニタリング(表 2.3-223) のうち、人工バリアの機能に関連する「地下水等モニタリング」の一部に相当すると考え られる。また、本モニタリング計画(例)は、バリア機能に影響を及ぼさない範囲で実施 可能な手法である。そのため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されている「漏出抑 制機能を担保する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促 進をもたらすことがない」範囲でモニタリングを実施することが可能である。

(b) 低拡散層のひび割れ観察・ひび割れ計測

既存計測技術を活用した低拡散層のひび割れ観測は、目視やデジタルカメラにより撮影 した低拡散層表面の画像を解析してひび割れ発生状況を確認するものである。観測期間は、 処分坑道の埋戻し前を対象としている。低拡散層が露出している期間内に光ファイバセン サーを設置して、直接的な観察が不可能になる前に光ファイバセンサーによるひび割れ計 測に引き継ぐ。そして、閉鎖措置段階以降は、光ファイバセンサーでひずみを計測してひ び割れ発生状況を推定するモニタリングを継続する。

本モニタリング計画(例)は、低拡散層に要求される機能のうち、低拡散性に影響を及 ぼすひび割れ発生状況を観測するものであり、定期的な評価に反映するデータを取得可能 であるため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されているモニタリング(表 2.3・223) のうち、人工バリアの機能に関連する「地下水等モニタリング」に相当する。特に、閉鎖 措置段階も継続してひび割れ計測が実施可能な光ファイバセンサーを活用したモニタリ ング計画(例)は、実処分施設で取得したデータを定期的な評価にフィードバックするこ とが可能であるため、より現実的で信頼性の高い評価が可能となると考えられる。

目視やデジタルカメラ画像によるひび割れ観察は、バリア機能に影響を及ぼさない範囲 で実施可能な手法である。そのため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されている「漏 出抑制機能を担保する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行 の促進をもたらすことがない」範囲でモニタリングを実施することが可能である。一方、 光ファイバセンサーを活用したひび割れ計測は、人工バリア内に光ケーブルを敷設するた め、既存の有線式センサーに比べ、ケーブル量が格段に少ないものの、潜在的な水みち形 成等のリスクを否定できない。したがって、モニタリングによりデータを取得することが 非常に重要で、モニタリングによって生じるデメリットよりも情報を取得するメリットを 優先する場合に適用可能な選択肢となる。

(c) 処分施設の裏面排水分析

処分空洞の裏面排水分析は、pH や各種イオン濃度の変化を確認することや、通常は検 出されないと想定される物質(例えば、処分空洞埋戻し後の比較的早い段階では処分空洞 害に漏出・流出しないと想定される放射性核種やモンモリロナイト)の検出による異常検 知を目的としている。計測期間は、裏面排水が閉塞されるまでの期間を対象としている。 裏面排水が閉塞される時期は未確定であり、最早で処分空洞の埋戻しが完了した時点と考 えられる。ただし、処分空洞が埋め戻された後も取付坑道や連絡坑道まで排水管を延伸す ることで、裏面排水の採取を可能とすることもできる。

本モニタリング計画(例)は、地下水の状態から処分施設の状態を推定する観点では「地 下水等モニタリング」に相当し、放射性核種の漏出検知の観点では「放射線モニタリング」 に相当する。すなわち、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されているモニタリング(表 2.3-223)の両者の性質を持ち合わせている。

また、本モニタリング計画(例)は、バリア機能に影響を及ぼさない範囲で実施可能な 手法である。そのため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されている「漏出抑制機能 を担保する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促進をも たらすことがない」範囲でモニタリングを実施することが可能である。ただし、裏面排水 の採取に当たっては、インバート下部に導水管を設置するのが一般的であるが、閉鎖措置 段階において、これを埋め戻す必要があることに留意すべきである。いずれも裏面排水の 導水管を想定した規制要求ではないと考えられるが、「規制の考え方(改定案)」[61]では、 閉鎖措置に際して、「埋戻した領域が放射性核種の卓越した移行経路とならないようにす ること」を、規制期間終了の要件として、「廃止措置の終了確認までの間にモニタリング 用に設置した観測孔が、水みちが生じないように適切に埋戻されていること」を要求して いる。

(d) 近傍ボーリング孔による地下水分析

近傍ボーリング孔による地下水分析は、施設状態推定の一助とするために、上記の裏面 排水分析と同様の分析に加えて、処分施設周辺の地下環境の推定に資するために地下水位 等の計測を実施するものである。計測期間は、裏面排水分析と大きく異なり、廃止措置の 開始まで継続可能である。また、裏面排水が処分空洞掘削後からのみ採取可能であるのに 対して、ボーリング孔からの地下水採取はサイト調査段階から可能である。

施設挙動の定量化解析の結果によると、周辺地下水の組成等を分析しても、人工バリア の状態をはじめとする施設状態を精度良く推定することは難しいと考えられる。しかし、 地下施設建設前から地下施設の建設、閉鎖措置段階を経る中で、地下の状態は大きく変化 する可能性があり、地下水位、地下水流向等を計測することで、安全評価の前提となる地 下水流況を把握することは極めて重要であると考えられる。仮に、直接的に人工バリアの 状態把握に資するデータが得られない場合でも、地下水の状態を計測することは、定期的 な評価にデータを反映することが可能であるため、本モニタリング計画(例)は「地下水 等モニタリング」に相当する。また、地下水の分析により放射性核種を検出することも可 能であるため、「放射線モニタリング」も兼ねたモニタリングに位置付けられる。

本モニタリング計画(例)は、バリア機能に影響を及ぼさない範囲で実施可能な手法と して検討したが、廃棄物埋設地のごく近傍にボーリング孔を追加設置する場合等において は、天然バリアの機能に影響を及ぼすことを否定できない。そのため、廃棄物埋設地とボ ーリング孔の位置関係を適切に設定する必要があると考えられ、データを取得できるメリ ットとバリア機能に影響を与えるリスクを比較・検討した上で判断することが肝要である。

また、「規制の考え方(改定案)」[61]では、規制期間終了の要件として、「廃止措置の 終了確認までの間にモニタリング用に設置した観測孔が、水みちが生じないように適切に 埋戻されていること」を要求している。そのため、深度が 100m 級と想定される大深度 ボーリング孔を適切に埋め戻す手法を検討し、実証しておく必要がある。

(e) 地震動計測

地震動計測は、大規模な地震が発生した場合に処分施設への影響を解析的に評価するために、処分施設近傍で地震波を取得するためのものである。計測期間は、地下坑道内に地 震計を設置する場合は閉鎖措置段階までに限定されるものの、地表面や近傍ボーリング孔 内に地震計を設置する場合には、廃止措置の開始まで計測を継続することが可能である。 本モニタリング計画(例)は、地震発生時に処分施設への影響を確認することが目的と なるため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されている「放射線モニタリング」、「地 下水等モニタリング」とは直接リンクするものではないが、地震発生後の施設の状態を推 定することができれば、定期的な評価においてその影響を反映することができる。また、 地震大国を呼ばれる我が国においては、放射性廃棄物処分や地震動に関わる技術者のみな らず、一般市民も地震時における処分施設の健全性に関心を持っていると考えられるため、 定期的な評価にデータを反映するだけではなく、広く一般市民に対して情報公開する観点 からも重要なモニタリングになると考えられる。

本モニタリング計画(例)は、バリア機能に影響を及ぼさない範囲で実施可能な手法で ある。そのため、「規制の考え方(改定案)」[61]で要求されている「漏出抑制機能を担保 する人工バリアの劣化や酸化還元雰囲気の擾乱など、放射性核種の移行の促進をもたらす ことがない」範囲でモニタリングを実施することが可能と考えられる。

(f) 施設内の圧力分布計測

光ファイバセンサーを活用した施設内の圧力分布計測は、閉鎖措置段階以降の再冠水過 程において、地下水浸潤に伴い低透水層が膨潤することによる圧力変化を計測して、地下 水浸潤状況を把握することを目的としている。計測期間は、光ファイバセンサー敷設以降、 閉鎖措置段階以降である。

再冠水に伴う低透水層の膨潤挙動は、閉鎖措置段階以降の規制期間における施設の状態 変化が非常に緩慢に進行することが想定されている中で、最も大きな状態変化のひとつで あると言え、この状態変化を把握する意義は大きいと考えられる。また、所定の膨潤圧が 発生したことを確認することができれば、間接的に低透水層の乾燥密度が適切な範囲にあ ることを確認することも可能と考えられる。このような観点では、定期的な評価に反映す るパラメータを直接計測するモニタリングではないが、「規制の考え方(改定案)」[61] で要求されているモニタリング(表 2.3-223)のうち、人工バリアの機能に関連する「地 下水等モニタリング」の一部に相当すると考えられる。

本モニタリング計画(例)は、人工バリア内に光ケーブルを敷設するため、既存の有線 式センサーに比べ、ケーブル量が格段に少ないものの、潜在的な水みち形成等のリスクを 否定できない。したがって、モニタリングによりデータを取得することが非常に重要で、 モニタリングによって生じるデメリットよりも情報を取得するメリットを優先する場合 に適用可能な選択肢となる。

(g) 施設内の温度分布計測

施設内の温度分布計測は、低拡散層のひび割れ計測に用いる光ファイバセンサーを活用 して、施設状態の基本情報である温度を計測するものである。計測期間は、光ファイバセ ンサー敷設以降、閉鎖措置段階以降である。

施設内の温度分布に最も影響を及ぼす因子は、廃棄体の発熱である。本事業の解析的検 討では、人工バリアがその機能に影響を及ぼすような高温に曝される可能性は低い結果が 得られているが、廃棄体条件によっては、廃棄体の発熱影響が人工バリアの機能に影響を 及ぼす可能性も否定できない。そのため、人工バリアの機能低下を招くような温度環境に なっていないことを確認することが重要である。このような観点から、「規制の考え方(改 定案)」[61]で要求されているモニタリング(表 2.3-223)のうち、人工バリアの機能に 関連する「地下水等モニタリング」の一部に相当すると考えられる。

本モニタリング計画(例)は、人工バリア内に光ケーブルを敷設するため、既存の有線 式センサーに比べ、ケーブル量が格段に少ないものの、潜在的な水みち形成等のリスクを 否定できない。したがって、モニタリングによりデータを取得することが非常に重要で、 モニタリングによって生じるデメリットよりも情報を取得するメリットを優先する場合 に適用可能な選択肢となる。 2.3.4 の参考文献

- [1] 社団法人 土木学会:余裕深度処分における地下施設の設計,品質管理および検査の考え方、 2009年7月
- [2] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度 管理型処分技術調査等 委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 22 年 3 月
- [3] 独立行政法人 原子力安全基盤機構:平成 21 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)報告書、平成 22 年 9 月
- [4] 社団法人 土木学会: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、2008 年 6 月
- [5] 加藤和之、脇寿一、齋藤典之、小野文彦、大間知行、尾崎充弘:余裕深度処分の技術的な信 頼性構築に向けた検討状況について、原子力バックエンド研究、講演再録、Vol.13、No.1、 2006 年 10 月
- [6] 一般社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会標準 余裕深度処分対象廃棄体の製作要件及 び検査方法:2015、AESJ-SC-F014:2015、2015 年 9 月
- [7] ANDRA : Dossier 2005 Argile, Tome Architecture and management of a geological repository, Dec 2005
- [8] MoDeRn : Case Studies Final Report, 31 Oct 2013
- [9] ENSI : Specific design principles for deep geological epositories and requirements for the safety case, Guideline for Swiss nuclear installations, April 2009
- [10] MoDeRn : National Monitoring Contexts Country Annexes, 01 May 2009
- [11] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度 管理型処分技術調査等委
 託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 21 年 3 月
- [12] FARO ホームページ: http://www.faro.com/ja-jp/
- [13] 国土交通省北海道開発局ホームページ:

http://www.hkd.mlit.go.jp/ky/jg/gijyutu/ud49g70000004bv9-att/k_23.pdf

- [14] 原子力安全委員会:原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会(第29回)、配付資料 放廃第29-2号、平成22年4月5日
- [15] 原子力発電環境整備機構: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、2010年5月
- [16] 総理府・厚生省令第一号:一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術 上の基準を定める省令、昭和 52 年
- [17] 株式会社 ミツトヨホームページ: https://www.mitutoyo.co.jp/
- [18] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 29 年度 低レベル放射性廃棄 物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 30 年 3 月
- [19] 佐々木敏幸ほか:光ファイバセンサー技術を活用した中深度処分施設における機能確認方法の検討一地下空洞型処分施設機能確認試験(その20)一、令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会、Ⅶ-130、2019年9月

- [20] 庭瀬一仁、杉橋直行、辻幸和:低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層に用いる高流動モルタルの室内配合選定、コンクリート工学論文集、第21巻第3号、2010年9月
- [21] 財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 20 年度 管理型処分技術調査等委
 託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 21 年 3 月
- [22] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 30 年度 低レベル放射性廃棄 物の処分に関する技術開発事業 地下空洞型処分施設機能確認試験 報告書、平成 31 年 3 月
- [23] MoDeRn : State of Art Report on Monitoring Technology, 16 May 2013
- [24] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター: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2分冊)一人工バリア品質/健全性評価手 法の構築― 緩衝材、平成 27 年 3 月
- [25] 原子力規制庁:「炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(案)」、2016年8月.
- [26] 原子力規制庁資料、2016年8月24日.
- [27] アイソトープ手帳第10版第6刷、平成18年.
- [28] 国立研究開発法人 放射線医学総合研究所 HP 自然期限放射性物質データベース ほか.
- [29] 環境省:「放射線による健康影響などに関する統一的な基礎資料(平成 29 年度版)」.
- [30] 電気事業連合会:「余裕深度諸部における付属施設について」、2016 年 12 月 12 日、 http://www.nsr.go.jp/data/000173197.pdf.
- [31] 平成25年11月27日原管廃発第1311277号 原子力規制委員会決定:「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」
- [32] 原子力規制庁:「中深度処分等に係る規制基準等の策定について-ALARA の適用における線 量評価の位置付け-」、第 11 回原子力規制委員会 資料 4 修正版(平成 30 年 5 月 30 日) https://www.nsr.go.jp/data/000239231.pdf.
- [33] T.Iimoto, et al., Fundamentals of Radiation Measurement, Journal of Plasma and Fusion Research, Vol.89, No.9 (2013).
- [34] 小嶋拓治、津田政行、アラニン線量計の放射線治療線量レベル(1-100Gy)への応用、 RaDIOISOTOPES,44,603-607(1996).
- [35] ANDRA, DOSSIER 2005 ARGILE ARCHITECTURE AND MANAGEMENT OF A GEOLOGICAL DISPOSAL SYSTEM -.
- [36] www.mdpl.com/journal/sensors.
- [37] IEEE Transaction on Nuclear Science.
- [38] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.
- [39] Proceedings, 9th International Particle Accelerator Conference (IPAC'18).
- [40] https://www.jcac.or.jp/site/library/series.html.
- [41] https://www.jrias.or.jp/report/cat1/205.html.
- [42] K.W.Jang, et al., Fiber-optic radiation sensor for detection of tritium, Nucl. Instru. Method A 652 (2011).
- [43] G.Li Vecchi, et al., Distributed Optical Fiber Radiation Sensing at CERN, Preeedings,

9th International Particle Accelerator Conference, p.WEPAF083 (2018).

- [44] V. Di Muro, L. Pelecanos, K. Soga, C. Kechavarzi, R.F. Morton, L. Scibile: Long-term deformation monitoring of CERN concrete-lined tunnels using distributed fiber-optic sensing, In Geotechnical Engineering Journal of SEAGS & AGSSEA, Vol.50, No.2, 2019.
- [45] A.Gusarov and S.K.Hoeffgen, Radiation effects on fiber gratings, IEEE Trans. Nucl. Sci. vol60, No.3, (2013).
- [46] ISOCSTM (In-Situ Object Calibration Softoware), Mirion Technologies (Canberra) KK.
- [47] 伊藤博士、A study and development of real-time strontium-90 counters based on Cherenkov radiation detection、千大院理博甲第理 119 号、2017 年 9 月.
- [48] 特開 2016-080557 号(放射性物質測定器及び放射性物質測定方法).
- [49] 平野ほか、排水全量の放射能モニタリング装置の実用化、鹿島建設技術研究所年報、第65 号 2017 年 12 月 1 日.
- [50] D.J.Griscom, Optical Properties and Structure of Defects in Sillica Glass, J. Ceram. Coc. Jpn, 99, 923 (1991).
- [51] RIST ATOMICA, http://www.rist.or.jp/atomica/.
- [52] 東北大、赤外発光シンチレーターYb:Gd3Al2Ga3O12 結晶の作製と特性評価、第 74 回応用 物理学会秋季学術講演会公演予稿集 18p-A12-17 (2013).
- [53] 奈良先端科学技術大、Nd-Ce 共添加した Lu3Al5O12 シンチレータの特性評価、第76回応 用物理学会秋季学術講演会予稿集 13p-PA7-11(2015).
- [54] 九工大、透明セラミックスレーザー材料による近赤外シンチレーション、第 61 回応用物理 学会春季学術講演会公演予稿集 19a-PA1-11 (2014).
- [55] 横浜国大、液体キセノンの赤外発光の測定-4、日本物理学会 2016 年秋季大会概要集 24aSG-4 (2016).
- [56] J.Xu, et al., Near-infrared long persistent luminescence of Er3+ in garnet for the third bio-imaging window, J. Mater. Chem. C. 2016.4. 11096-11103.
- [57] F.Gebert, M.H.Frosz, T.Weiss, Y.Wan, A.Ermolv, N.Y.Joly, P.O.Schmidt, and P.S.J.Russell, Damage-free single-mode transmission of deep-UV light in hollow-core PCF, Optics Express vol.22, Issue 13, pp.15388-15396 (2014).
- [58] Sylvain Girard, Antonio Alessi, Nicolas Richard, Layla Martin-Samos, Vincenzo De Michele, Luigi Giacomazzi, Simonpietro Agnello, Diego Di Francesica, Adriana Morana, Blaz Winkler, Imene Reghioua, Philippe Paillet, Marco Cannas, Thierry Robin, Aziz Boukenter, Youcef Ouerdane: Overview of radiation induced point defects in silica-based optical fibers, In Review in Physics, vol.4, (2019). 100032.
- [59] 原子力規制庁:第二種廃棄物埋設に係る規制基準等の骨子案、廃炉等に伴う放射性廃棄物の 規制に関する検討チーム第27回会合、資料27-1、平成29年11月2日
- [60] 原子力規制庁:中深度処分における廃棄物埋設地の設計プロセス及び線量評価に係る審査ガ イドの骨子案、廃炉等に伴う放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第27回会合、資料27-2、

平成 29 年 11 月 2 日

- [61] 原子力規制庁: 炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について(改定案)、廃炉等に伴う 放射性廃棄物の規制に関する検討チーム第27回会合、参考資料27-2-2、平成29年11月2 日
- [62] 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律、昭和 32 年法律第 166 号、令和元 年六月十四日公布(令和元年法律第三十七号)改正
- [63] 一般社団法人 日本原子力学会:日本原子力学会標準 余裕深度処分施設の施設検査方 法:2020、AESJ-SC-F0149:2010、2011年5月

2.4 施設・岩盤挙動計測データの分析評価及び地震時挙動評価

試験施設に設置してある温度計やひずみ計等、また周辺岩盤内に設置してある間隙水圧計等の 計測器によって取得された計測結果を整理し、施設の状態を分析した。併せて、現地でのセメン ト系材料のひび割れ調査結果についても分析した。

さらに、試験施設で取得された地震動観測データの分析及び観測データを用いた地震応答解析 による施設の地震時影響評価についても述べる。

分析評価の対象期間は、平成27年度~平成31年度とした。

2.4.1 施設・岩盤挙動計測データの分析評価

(1) 坑内環境計測結果の分析評価

【目的】

試験空洞内の坑内気温及び湿度の経時変化の傾向に着目し分析評価を行う。

【まとめ】

 2015年4月以降では、施工試験が実施されていないため、施工に伴う坑内気温及び湿度の 変動は見られず、季節変化に伴う変動が見られる。

【計測結果の分析評価】

本試験における環境計測は、空洞手前において百葉箱温湿度計1基(A-①)より計測を行っている。以下、2015年4月から2019年10月までの環境計測結果の分析結果について示す。

百葉箱温湿度計 A-①で計測された坑内気温と坑内湿度について、日平均、日最高、日最低、 日較差を図 2.4-1 に示す。坑内気温については、日平均気温、日最高気温、日最低気温とも に季節の気温変化に伴う変動が見られる。坑内平均気温は、夏季期間では17℃程度まで上が り、冬季期間では10℃程度まで下がる。当該期間では施工試験が実施されていないため、施 工に伴う坑内気温の変動は特に見られなかった。坑内湿度についても季節の湿度変化に伴う 変動が見られ、夏季期間では日最高湿度と日最低湿度の差がほぼゼロに近くなるが、その他 の時期においては湿度の差が 0~20%となっている。





百葉箱気温

図 2.4-1 坑内気温・湿度の経時変化(百葉箱温湿度計 A-①)

(2) 人工バリアの計測結果の分析評価

【目的】

当該期間における試験施設の健全性を評価するために、試験施設のセメント系材料及び土 質系材料に設置した計測器によって得られた計測結果を用いて分析評価した。

【まとめ】

- 2015年4月以降では、施工試験が実施されていないため、施工に伴う変動は見られず、季節変化に伴う変動が主に見られる。
- ・ 底部及び側部低拡散層ではひび割れ発生の可能性がある挙動が認められるが、いずれも近傍の計器では顕著な変化は見られないことから、局所的なものであり、施設の健全性を損なうものではなく、現時点で試験施設の健全性は確保されていると評価される。

【計測結果の分析評価】

施設の状態を把握する上で代表的な計測結果及び分析結果を図 2.4-2~図 2.4-10 に示す。



図 2.4-2 底部低透水層の沈下量計測結果



図 2.4-3 底部低透水層の土圧計測結果





図 2.4-5 底部コンクリートピットの応力計測結果



図 2.4-6 側部コンクリートピットの応力計測結果



図 2.4-7 側部低拡散層の応力計測結果



図 2.4-8 上部コンクリートピットの応力計測結果



図 2.4-9 上部低拡散層の応力計測結果



図 2.4-10 上部埋戻し材の沈下量計測結果

- (3) セメント系材料のひび割れ調査の分析評価
 - 1) 目視によるひび割れ調査
 - a. 目的

既存の実規模施設のうち、セメント系材料により施工した試験施設における上部コンク リートピット、上部低拡散層上部及び側部低拡散層左側のひび割れ状況を把握することを 目的に実施した。

b. 対象範囲

平成27年度から平成31年度までのひび割れ調査における対象範囲を図 2.4-11に示す。 調査対象部位は上部コンクリートピット及び上部低拡散層の上部と側部低拡散層の左側 である。

- ・側部低拡散層表面(左側)(約 22m²)・・・・・①
- ・上部低拡散層の上面(約 40m²)・・・②
- ・上部コンクリートピット上面(約3m²)・・・③



図 2.4-11 調査対象範囲

c. 対象範囲

今回実施したひび割れ調査の方法を表 2.4-1 に示す。測定に使用するクラックスケール は 0.05mm 単位で計測できるものを使用した。ひび割れの深さの測定については超音波 測定器 (ESI-10)を使用した。ひび割れ幅の測定状況を写真 2.4-1 に、ひび割れ深さの 測定状況を写真 2.4-2 に示す。ひび割れ幅の測定箇所は、過去の調査時に測定した箇所と した。今回の対象部位における使用材料を表 2.4-2 に、上部コンクリートピット、上部低 拡散層、側部低拡散層の基本配合をそれぞれ表 2.4-3、表 2.4-4、表 2.4-5 に示す。

項目		概要					
	・ひび割れ幅						
評価項目	・ひび割れの位置						
	・ひび割れ深さ						
	・ひび割れ幅	 ・1ヵ所でひび割れ幅が異なる場合は適当な数ヵ所で測定 ・ひび割れに母差がある場合は母差の寸法も記録 					
		- ・ 米日ぬコンベックフで測定					
評価方法	・ひび割れの位置	・段差が認められた場合もその位置を記録					
	・ひび割れ深さ	・超音波測定器 ランプ法					
		(ESI-10 株式会社東横エルメス製)					
測定機器	・クラックスケー	レ 品番 58697(シンワ社製)					
	・0.10 未満は 0.10 未満と表記						
測定幅	・0.10~1.00 まで	は 0.05mm 単位でひび割れ幅を測定					
	・1.00mm を超える	る場合は 0.10mm 単位でひび割れ幅を測定					

表 2.4-1 調査方法の概要



写真 2.4-1 ひび割れ幅の測定状況



写真 2.4-2 ひび割れ深さの測定状況

衣 4.4-2 対象部性にわける使用材	表	2.4-2	対象部位における使用材料
---------------------	---	-------	--------------

材料	記号	概要		
	I DC1	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株))		
セイント	LPUI	密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,490 cm ² /g		
	I DCo	低熱ポルトランドセメント(太平洋セメント(株))		
	LPUZ	密度=3.22 g/cm ³ 、比表面積=3,430 cm ² /g		
	፹ላ 1	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所)		
フライアッパー	FA1	密度=2.24g/cm ³ 、比表面積=3,800cm ² /g		
/////////	FA 9	フライアッシュ、Ⅱ種(東北電力(株)能代火力発電所)		
	TA2	密度=2.25g/cm ³ 、比表面積=3,740 cm ² /g		
	IFY1	石灰系膨張材、改良型ハイパーエクスパン(太平洋マテリアル(株))		
膨進材	LEAI	密度=3.04 g/cm ³		
加致加大中国	LEX2	石灰系膨張材、改良型ハイパーエクスパン(太平洋マテリアル(株))		
		密度=3.05 g/cm ³		
	LP1	石灰石微粉末(太平洋セメント(株)熊谷工場)		
石灰石微粉末		密度=2.70 g/cm ³ 、比表面積=5,140 cm ² /g		
~H //C~H //KA/J /N	LP2	石灰石微粉末(宮城石灰工業株式会社)		
		密度=2.72 g/cm ³ 、比表面積=5,420 cm ² /g		
细·母·**	S1	石灰砕砂(八戸松館産):密度=2.66 g/cm ³ 、FM=2.70		
州 月 19	S2	石灰砕砂(八戸松館産): 密度=2.66 g/cm ³ 、FM=2.75		
भा 19 **	G	石灰砕石(八戸松館産):最大粗骨材寸法=20mm、		
相同的	G	岩種:石灰岩、密度=2.70 g/cm ³		
	SD	高性能 AE 減水剤、マイティ 3000H(花王(株))		
<u> </u> 思和	51	: カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物		
印色在中国	Δα	フライアッシュ用空気量調整剤 マイクロエア 404 (エムエムビー)		
	As	:ポリアルキレングリコール誘導体		

表 2.4-3 上部低拡散層の配合

			フランプ			使用材料及び単位量 (kg/m ³)							
W/B	W/P	LP1/B	777	空気量				粉体 P				CD	
(%)	(%)	(%)	(am)	(%)	水	水 W 結合材 B L D1			S1	G	SP Px%		
			(CIII)		vv	LPC1	FA1	LEX1				1 ^ 70	
45.0	31.0	45.0	65	2.5	230	338	153	20	230	1279		0.57	

表 2.4-4 上部コンクリートピットの配合

7						使用材料及び単位量 (kg/m ³)							
W/B	W/P	LP1/B	s/a	~/~/	空気量	-te		粉	本 P				CD
(%)	(%)	(%)	(%)	(am)	(%)	小		結合材 B		I D1	S1	G	SP Dy04
				(CIII)		vv	LPC1	FA1	LEX1	LFI			1 ^ 70
45.0	30.0	50.0	53.4	65	2.5	160	229	107	20	178	884	780	0.75

2-898

表 2.4-5 側部低拡散層(左側)の配合

スラ		スランプ		使用材料及び単位量 (kg/m ³)								
W/B	W/P	LP2/B	フロー	空気量	-	粉体 P				CD.		
(%)	(%)	(%)	(cm)	(%)	小 W	結合材 B LDO		S2	G	SP Dy04		
					vv	LPC2	FA2	LEX2	LF2			1 ^ 70
45.0	31.0	45.0	65	2.5	230	338	153	20	230	1279	_	0.50

d. 各部位の調査履歴

本業務で対象とする側部低拡散層、上部コンクリートピット及び上部低拡散層の調査履 歴を表 2.4-6 に示す。2019 年度 2 回目の調査時点で上部低拡散層は材齢 2501 日、上部 コンクリートピットは材齢 2513 日、側部低拡散層は材齢 3675 日であった。

				材齢 (日)					
	調査日			上部低拡散層	上部コンクリート ピット	側部低拡散層			
						2009/9/16 打設			
H21	2009.	10.	23			37			
	2009.	12.	14			89			
H22	2010.	10.	23	—	—	402			
H23	2011.	1.	5			476			
1120	2011.	12.	7			812			
H24	2012.	3.	13	2012/12/3 打設	2012/11/21 打設	909			
H25	2013.	10.	16	317	329	1491			
	2014.	2.	14	438	450	1612			
H26	2014.	6.	22	566	578	1740			
	2014.	12.	2	729	741	1903			
U 97	2015.	9.	4	1005	1017	2179			
1127	2015.	12.	2	1094	1106	2268			
பல	2016.	8.	4	1340	1352	2514			
1120	2016.	12.	14	1472	1484	2646			
1190	2017.	8.	7	1708	1720	2882			
п29	2017.	12.	6	1829	1841	3003			
U 90	2018.	8	23	2089	2101	3263			
1150	2018.	12	3	2191	2203	3365			
D1	2019.	7	4	2404	2416	3578			
R1	2019.	10	9	2501	2513	3675			

表 2.4-6 対象部位のひび割れ調査履歴
e. 調査結果

(a) 上部コンクリートピット及び上部低拡散層

上部コンクリートピット及び上部低拡散層はそれぞれ 2012 年 11 月、2012 年 12 月に 施工され、その後も年 2 回程度の継続的に調査が行われている。ひび割れ履歴図を図 2.4-13 から図 2.4-19 に示す。なお、それぞれの図において、灰色でハッチングされてい る部分は平成 25 年度に実施した上部埋戻し材の施工確認試験によって埋没した箇所を示 している。

平成 30 年度の調査結果では、上部低拡散層上面で、これまで 0.20~0.30mm で推移し ていたひび割れが、0.15mm に閉じていた。これは、平成 30 年 10 月 9 日から 12 日にか けて実施した光ファイバセンサーを用いたひび割れ計測試験において、上部低拡散層に人 為的なひび割れを発生させた影響であると考えられる。図 2.4-12 に示すように、人為的 なひび割れを発生させる際に、上部低拡散層のひび割れを閉じる方向に加力している。

なお、人為的に発生させたひび割れについては、本調査の対象外としている。



図 2.4-12 上部低拡散層と人為的に発生させたひび割れの関係



図 2.4-13 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図(その1)



図 2.4-14 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図 (その2)



図 2.4-15 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図 (その3)



図 2.4-16 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図 (その 4)



図 2.4-17 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図 (その5)

上部低拡散層 上部コンクリートピット 測定日:H30年 8月23日(材齢2089日) 測定日:H30年 8月 23日(材齢2101日) 8,000 e// Ø Ø 0.10未満 0.00 0.10 0.20 11,550 8.10 上部低拡散層 側面 ... 0.<mark>10未満</mark> 凡例 - 凡例 - 0.00~0.10mm未満 - 0.10~0.20mm未満 - 0.20~0.30mm未満 - 0.30~0.40mm未満 - 0.40~0.50mm未満 - 0.50~0.60mm未満 0.80 *図内数字はひび割れ幅(mm) 上部低拡散層 側面 上部低拡散層 測定日:H30年 12月 3日(材齢2191日) 上部コンクリートピット 測定日:H30年 12月 3日(材齢2203日) 8,000 V /// 0.10未満 0.10未満 0.15 0.15 1,550 6.10 上部低拡散層 側面 0.10未満 ARTITIS / 凡例 - 人例
 0.00~0.10mm未満
 0.10~0.20mm未満
 0.20~0.30mm未満
 0.30~0.40mm未満
 0.40~0.50mm未満
 0.50~0.60mm未満 0.00 ■図内数字はひび割れ幅 (mm) 上部低拡散層 側面





図 2.4-19 上部コンクリートピット及び上部低拡散層のひび割れ履歴図 (その7)

(b) 側部低拡散層左側

側部低拡散層は 2009 年 9 月に施工され、その後も年 2 回程度の継続的な調査が行われ ている。2019 年 12 月までのひび割れの履歴を図 2.4-20 から図 2.4-26 に示す。2019 年 7 月 4 日に超音波測定器(ESI/P-10)でひび割れ深さを測定した(図 2.4-26)。ひび割れ 深さは 400mm から 450mm であり、ひび割れは側部低拡散層(厚さ 600mm)を貫通し ていなかった。なお、平成 21 年度側部低拡散剤施工確認試験[1]では、側部低拡散層施工 直後に確認されたひび割れについて、コアを抜いて深さが 600mm であり、低拡散層を貫 通するひび割れであったことが確認されている(図 2.4-27)。以上のことを踏まえると、 温度応力に伴って発生したひび割れは貫通するものの、その後の長期にわたる乾燥収縮に よって生じるひび割れは部材を貫通するほどにならないと考えられる。 H21年10月23日(材齢37日)



図 2.4-20 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その1)



図 2.4-21 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その2)



図 2.4-22 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その3)





-0.45 -0.35 -埋没 -埋没 -埋没 0.30 0.15 0.30 0.30 0.25 0.25 0.25 0.20 0.30 0.30 0.20 0.30

図 2.4-23 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その 4)





測定日:H29年 8月 7日(材齢 2882日)



図 2.4-24 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その5)



図 2.4-25 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その 6)



図 2.4-26 側部低拡散層のひび割れ履歴図 (その7)



図 2.4-27 側部低拡散層のひび割れ深さ

f. まとめ

(a) 上部低拡散層及び上部コンクリートピット

2012年3月13日の計測から、2019年10月9日までの計測においてひび割れ幅の増 大や進展、新たなひび割れの発生は確認されなかった。したがって、ひび割れの発展と進 展は収束したといえる。

(b) 側部低拡散層

上部低拡散層及び上部コンクリートピット上面と同様に、2012年3月13日の計測から、 2019年10月9日までの計測においてひび割れ幅の増大や進展、新たなひび割れの発生は 確認されなかった。このため、ひび割れの発展と進展は収束したといえる。また、平成 21年度確証試験[1]で確認された温度応力が主と思われるひび割れについては、深さが 600mmでひび割れが貫通していることが報告されたが、2012年頃に確認された乾燥収縮 によるものと思われるひび割れについては、深さが400mmから450mmであり、側部低 拡散層(厚さ600mm)は貫通していないと判断できる。

- 2) 底部低拡散層の BTV 観察
- a. 目的

現在、余裕深度処分試験空洞内で実施されている地下空洞型処分施設性能確証試験において、施設の施工性の検証とともに、施設建設中及び建設後の施設挙動計測試験が実施されている。本業務では、この一環として、底部低拡散層ひび割れ観測を行った。

底部低拡散層ひび割れ観測は、平成 20 年度に施工された底部低拡散層の施設挙動計測 を目的としたものである。同部材は高い拡散抑制機能を保持することが要求される。この ため、本確証試験において同部材の施工後、外部拘束や乾燥収縮等による初期ひび割れ及 び重量物の積載等によるひび割れの発生状況を把握する必要がある。そこで、平成 20 年 度に底部低拡散層に水平ボーリングを削孔し、毎年1~2回の割合で、ボーリング孔内部 のひび割れ観察を行ってきた。平成 20~21 年度の調査ではひび割れは確認されなかった が、平成 22 年度の調査で初めてひび割れ発生(深度 5.772m及び深度 11.295m)が報告 され、平成 23 年度の調査でも新たなひび割れ(深度 8.642m)が確認された。平成 24 年 度は深度 11.295mのひび割れに滲み出しが確認されたものの、平成 25 年度、平成 26 年 度は同ひび割れの滲み出しは確認されなかった。

平成 27 年度から平成 31 年度にかけて、これらのひび割れの追跡調査及び新規ひび割れの有無の確認を行った。

b. 試験実施日

平成 27 年度から平成 31 年度にかけて表 2.4-7 に示す日程で BTV 観察を実施した。

表 2.4-7 BTV 観察実施日

年度	実施日	
平成 27 年度	12月2日(水)	
平成 28 年度	12月14日(水)	
平成 29 年度	12月6日(水)	
平成 30 年度	12月3日(月)	
平成 31 年度	10月9日(水)	

c. BTV 観察

平成 20 年度に底部低拡散層で掘進したボーリング孔を用いて、BTV によりひび割れ観 測を行った。観測の結果、ひび割れが認められた箇所について、そのひび割れデータを取 得するとともに、ひび割れの状況を図化した。平成 30 年度以降は平成 29 年度まで実施 していた BTV 側壁観察装置に加え、前方視カメラを用いたボーリング孔観察を新たに実 施した(表 2.4-8 参照)。

年度	実施項目	
平成 27 年度~平成 29 年度	側壁観察のみ	
	(L=15.03m)	
平成 30 年度~平成 31 年度	側壁観察+前方観察	
	(L=15.03m) $(L=0.17m)$	

表 2.4-8 実施項目

(a) ひび割れ観察孔位置

ボーリング孔の位置を図 2.4-28、図 2.4-29 に示す。水平位置は底部低拡散層中心から 左へ 1,875mm である。鉛直位置は、厚さ 600mm の底部低拡散層上端より 250mm 下、 下端より 350mm 上である。BTV 側壁観察装置では、カメラ設置位置より前方プローブ 長分 (0.17m)を除く、15.03m の観察を実施した。前方視カメラではボーリング孔先端 の 0.17m を観察した。



図 2.4-28 BTV 観察孔水平位置図



図 2.4-29 BTV 観察孔鉛直位置図

- (b) BTV を用いたボーリング孔側壁観察
- a) 観察装置

BTV 観察に先立って、平成 20 年度に孔口保護用に設置した鋼板を取り外した。ボーリ ング孔壁のひび割れ観察は下記仕様に基づいて行った(表 2.4-9、図 2.4-30 参照)。BTV 装置による観察後、孔壁展開画像の表示及び亀裂の幾何学性状のデータ整理も行うシステ ムを用いた。平成 29 年度までは BIP-V システム(分解能 0.25mm)、平成 30 年度以降は より細かなボーリング孔のひび割れを確認するため、より高解像度である BIP-6 システム (分解能 0.1mm)を使用した。

表 2.4-9 ボアホール観察 BIP-V/BIP-6 システム(レアックス)概略仕様

項目	BIP-V	BIP-6
プローブ径	$\phi~50$ mm	
画像観察記録	孔壁全周を連続的に定方位観察可能	
孔方向	全方向可能(鉛直孔、水平孔、傾斜孔)	
観察速度	27m/時間	21m/時間
	(0.45m/分)	(0.35m/分)
測定可能な最小ひび割れ幅 (=1 ピクセルの空間分解能)	0.25mm	0.1mm



図 2.4-30 BTV 観察装置

BIP システムは、孔内画像観察記録及び解析システムを統合したもので、選択したツー ルに応じて孔内を可視化する装置である。ツールにはデジタル可視イメージ、ライブビデ オイメージ、超音波イメージの3種類があり、本調査ではデジタル可視イメージツールを 選択した。デジタル可視イメージツールは ODS プローブ(Optical Digital Scanner、以 下 ODS という)と呼ばれ、孔壁 360°の定方位連続展開画像をフルカラー・デジタル記 録が可能なツールである。 BIP システムの構成図を図 2.4-31 に示す。本システムは、管内を自重降下によって挿 入されるプローブ (ゾンデ)部分、深度カウンター、ケブラーケーブルによる昇降装置 (ウ ィンチ)、ロッド押し込み装置、プローブ制御装置、カメラ映像の計測・処理を行う耐衝 撃・防水性ノート型パソコンなどで構成される。

以下に ODS の機能と特徴をまとめる。

 ・ 簡便な画像取り込みシステムによって高速の観察記録が可能。BIP-V、BIP-6ともに複数の分解能設定を有しており、速度はこれによって決まる。より高い分解能を設定すると、観察記録速度は遅くなる。

```
BIP-V: (0.00 \sim54.00m/h)
```

BIP-6: (0.00 ~112.2m/h)

- ・ 吊り下げ方式により鉛直孔~下向き斜孔、ロッド方式により水平孔、上向き斜孔~ 上向き鉛直孔にも適用可能。
- ・ 観察可能な孔の孔径 56~180mm(条件により異なる)
- ・ 孔壁の全周生画像とリアルタイムの360°展開画像が観察可能。亀裂からの湧水・ ガスの噴出状況はゾンデを停止させ長時間の連続観察が可能。
- ・ 孔壁の展開画像は、PCハードディスクにデジタル記録し、孔壁全周画像及び展開 画像は、VTRに録画することが可能。
- ・ 必要箇所では、180° 孔壁展開機能により、360° 展開時の倍の精度で孔壁の半周 連続観察可能。
- 孔壁展開画像は、光磁気ディスクからコンピューターのディスプレー上に再現可能。
 また、再現された展開画像はディスプレー上で亀裂などの不連続面の走向傾斜・幅
 を計測することが可能。測定された走向傾斜などのデータはPCハードディスクに
 記録され統計処理やステレオネット表示が可能。展開画像は、カラープリンター(カ ラーコピー機)に接続することにより出力可能。
- 高速コンピューターグラフィックスにより、孔壁画像を任意の方向から三次元観察が可能。

b)鉛直孔

鉛直下向孔の標準構成図を図 2.4-31 に示す。



図 2.4-31 BIP システムの標準構成図(現場システム)

c) 斜坑及び水平孔の測定方法

ボーリング孔が水平から下向き 30°よりも緩やかな斜孔若しくは水平から上向きの場合などで、自重による降下が見込めない場合は、図 2.4-32の様な機材配置でボーリングマシンによる押込で計測を実施する。また、ボーリングマシンが無い場合は、図 2.4-33の様な押し込み装置を用いる。



図 2.4-32 ボーリングマシンによる斜孔の計測図



図 2.4-33 押し込み装置概略図

d) 孔壁画像の分解能

<円周方向>

計算方法については以下に示す。

66 π (mm) ÷720 (ピクセル) =0.25mm/pixel

一方、BIP-6 では、孔内画像は、円周方向に 2880 ピクセルで作成される (図 2.4-34 参照)。

φ66孔の場合、1ピクセルはおよそ 0.1mm となる。

計算方法については以下に示す。



 66π (mm) ÷2880 (ピクセル) ≒0.1mm/pixel

図 2.4-34 円周方向の分解能

<深度方向>

BIP-V では、深度方向については、エンコーダにより 400 パルス/rpm と設定している。 つまり 10cm 進むのに 400 回の信号を返すことになる。したがって

10 (cm) ÷400 (パルス) = 0.25 mm/パルス

となり、1パルス毎に1ラインの画像を計測していくため、孔壁画像の1ラインは理論 上 0.25mm の幅を持つことになる(図 2.4-35 参照)。

また、エンコーダからの信号により 0.25mm 毎に画像取り込みの命令がなされるが、 カメラの画像取得速度は1秒間に 30 回が限界となる。

したがって、孔壁画像の最高計測速度は、

0.25mm×30 コマ/秒=7.5mm/秒

となる。したがって、7.5mm/秒を超えない速度で押込み装置の押込み速度を調整する。

一方 BIP-6 では、深度方向については、エンコーダによりプーリー1 周(72cm) につき 7200 パルスの設定となっている。したがって

72 (cm) ÷7200 (パルス) ≒0.1mm/パルス

となり、孔壁画像の1ラインは理論上0.1mmの幅を持つことになる(図 2.4-35 参照)。 したがって、孔壁画像の最高計測速度は、

0.1mm×60 コマ/秒=6.0mm/秒

となる。したがって、6.0mm/秒を超えない速度で押込み装置の押込み速度を調整する。



図 2.4-35 画像取得のための円周ライン

e)画像解析

ひび割れ箇所は孔壁に光を当てた際に影となり、BTV 画像上で暗いピクセルのつなが りとして現れる。また、孔壁との切合線として示されるひび割れ面は、BTV 画像上でサ インカーブを成す(図 2.4-36 参照)。BTV 画像の解析ではこの特徴を利用して、周囲よ りも暗いサインカーブ状の模様を探すことによってひび割れを検出する。

ひび割れの走向・傾斜は、これらの情報と一対一の関係にあるサインカーブの形状(位 相差・振幅)から同定される。本計測システムでは、現場で観察記録した画像データを読 み出して画面上に表示し、ひび割れ箇所をマウスカーソルでポインティングすることによ ってこの作業を簡便に行うことができる。また、ひび割れの幅は、ひび割れの走向に対し て、直交する方向で評価する。

なお、幅が1ピクセルの空間分解能(0.25/0.1mm)より小さいひび割れであっても、 色調(3色×256 階調)の異なるつながりの分布から、ひび割れの存在を検知できる場合 がある。ただし、基本的に空間分解能以下のひび割れ幅を定量的に測定することはできな いので、この場合は、検出されたひび割れの幅を「0.25/0.1mm 未満」と判定する。



図 2.4-36 走向傾斜計算ルーチン

f) 側壁観察状況

底部低拡散層手前の砕石スロープ平場上に BTV の電動押し込みパーツを設置した。レ イアウトを図 2.4-37 に、BTV 観察状況を写真 2.4-3 に示す。



図 2.4-37 ボーリング孔側壁観察レイアウト



写真 2.4-3 BTV 観察状況

(c) 前方視カメラを用いたボーリング孔先端の観察

ボーリング孔は 15.20m であるが、BTV の構造上、孔先端から 0.17m が死角となる。 この死角部分及び観察孔先端を観察するために、前方視カメラを用いてひび割れ観察孔の 先端を観察した(図 2.4-38、写真 2.4-4 参照)。

[前方視カメラ 「ミニシースネイク」(レアックス)概略仕様]

プローブ径: φ30mm

画像観察記録:動画として記録し、動画画面を撮影することで画像を入手



図 2.4-38 ミニシースネイク装置

前方視カメラは自動水平機能がついているため、カメラが回転せず、ボーリング孔のど の位置にひび割れがあるかを観察することが可能である。ただし、孔の先端方向をカメラ 撮影するので、カメラと観察対象物の距離が一定ではないため、ひび割れ幅を観察するこ とはできない。ひび割れ幅を計測できないため、前方視カメラの押し込み速度は観察物の 対象に応じて変更が可能である。



写真 2.4-4 ボーリング孔先端観測状況

(d) BTV 観察結果

平成20年度(第1回目)から数えて8~12回目の計測を実施した結果を以下に示す。

<平成 27 年度>

- 深度 0.00m~15.03mまでの画像データを取得した。機械的な深度誤差が発生したため、ロッド長及びカメラ長によりボーリング孔長が、掘削長である 15.20mであることを確認し、カメラの構造上の死角である先端 0.17mを差し引くとともに、初期値のデータに深度を合わせ込み BTV による観察長を 15.03m(補正後)とした。
- ・ 記録画像精度(分解能)を深度方向 0.25mm、円周方向 0.25mmとし BTV 装置で 得られる最高解像度(分解能) 720 ピクセルで画像記録を行った。
- 前回までの計測時と同様に、削孔時に形成されたと考えられるボーリングを横断する同心円状の筋(展開画像では水平又はスパイラル状の筋)及び、孔壁画像の両端部であるボーリング孔の下側で汚れが波状に見える状況であった。しかし、割れ目の認識に影響を与えるものではなかった。
- ・ 割れ目とは別に、骨材の剥離又は気泡跡と思われる円形状の空隙を見ることができ た。これも第1回目と比較し変化は見られなかった。
- 前年度までの観測で確認されている 3 本の既存ひび割れ(図 2.4-39~図 2.4-44 参照)以外に、<u>新規の割れ目は確認されなかった。</u>
- ・ 割れ目の開口幅は、どちらの割れ目も計測限界である 0.25mm未満であり、第 5 回目調査と比較し開口幅の差異は認められなかった。
- ・ 図 2.4-69 に示すように割れ目の深度と方向は以下の様である。

- 深度 5.772m (N86W89N):ボーリング孔に対して走向はほぼ直交し、ほぼ垂直 に切断する。
- ② 深度 8.642m (N52E79NW):ボーリング孔に対して走向は N52E で斜交し、ほぼ 垂直に近い 79 度でボーリング孔を切断する
- ③ 深度 11.295m (N66W85N):ボーリング孔に対して走向は N66W で斜交し、ほぼ 垂直である 85 度でボーリング孔を切断する。
- ・ 平成24年度、水の滲み出しによるとおもわれる"しみ"が確認されたが、今年度 は、昨年度と同様に同位置で"しみ"確認されていない。

<平成 28 年度>

- 深度 0.00m~15.03mまでの画像データを取得した。機械的な深度誤差が発生したため、ロッド長及びカメラ長によりボーリング孔長が、掘削長である 15.20mであることを確認し、カメラの構造上の死角である先端 0.17mを差し引くとともに、初期値のデータに深度を合わせ込み BTV による観察長を 15.03m(補正後)とした。
- ・ 記録画像精度(分解能)を深度方向 0.25mm、円周方向 0.25mmとし BTV 装置で 得られる最高解像度(分解能) 720 ピクセルで画像記録を行った。
- 前回までの計測時と同様に、削孔時に形成されたと考えられるボーリングを横断する同心円状の筋(展開画像では水平又はスパイラル状の筋)及び、孔壁画像の両端部であるボーリング孔の下側で汚れが波状に見える状況であった。しかし、割れ目の認識に影響を与えるものではなかった。
- ・ 割れ目とは別に、骨材の剥離又は気泡跡と思われる円形状の空隙を見ることができた。これも第1回目と比較し変化は見られなかった。
- 前年度までの観測で確認されている 3 本の既存ひび割れ(図 2.4-45~図 2.4-50 参照)以外に、<u>新規の割れ目は確認されなかった。</u>
- ・ 割れ目の開口幅は、どちらの割れ目も計測限界である 0.25mm未満であり、第 5 回目調査と比較し<u>開口幅の差異は認められなかった。</u>
- ・ 図 2.4-69 に示すように割れ目の方向は以下の様である。
- 深度 5.772m (N86W89N):ボーリング孔に対して走向はほぼ直交し、ほぼ垂直 に切断する。
- ② 深度 8.642m (N52E79NW):ボーリング孔に対して走向は N52E で斜交し、ほぼ 垂直に近い 79 度でボーリング孔を切断する
- 深度 11.295m (N66W85N): ボーリング孔に対して走向は N66W で斜交し、ほぼ 垂直である 85 度でボーリング孔を切断する。
- ・ 平成 24 年度、水の滲み出しによるとおもわれる"しみ"が確認されたが、平成 25 年度以降、平成 27 年度まで同位置で"しみ"確認されていない。
- ・ <u>今回の計測(平成 28 年度)で、深度 11.1m 以深で水の滲み出しによると思われる</u> <u>"しみ"と深度 13.74m 以深で"水の溜まり"が確認された(図 2.4-69 参照)。</u>

・ _ "水の溜まり"区間では薄い膜状の浮遊物も確認されている。

<平成 29 年度>

- 深度 0.00m~15.03mまでの画像データを取得した。機械的な深度誤差が発生したため、ロッド長及びカメラ長によりボーリング孔長が、掘削長である 15.20mであることを確認し、カメラの構造上の死角である先端 0.17mを差し引くとともに、初期値のデータに深度を合わせ込み BTV による観察長を 15.03m(補正後)とした。
- ・ 記録画像精度(分解能)を深度方向 0.25mm、円周方向 0.25mmとし BTV 装置で 得られる最高解像度(分解能) 720 ピクセルで画像記録を行った。
- 前回までの計測時と同様に、削孔時に形成されたと考えられるボーリングを横断する同心円状の筋(展開画像では水平又はスパイラル状の筋)及び、孔壁画像の両端部であるボーリング孔の下側で汚れが波状に見える状況であった。しかし、割れ目の認識に影響を与えるものではなかった。
- ・ 割れ目とは別に、骨材の剥離又は気泡跡と思われる円形状の空隙を見ることができ た。これも第1回目と比較し変化は見られなかった。
- 前年度までの観測で確認されている 3 本の既存ひび割れ(図 2.4-51~図 2.4-56 参照)以外に、新規の割れ目は確認されなかった。
- ・ 割れ目の開口幅は、どちらの割れ目も計測限界である 0.25mm未満であり、第 5 回目調査と比較し開口幅の差異は認められなかった。
- · 図 2.4-69 に示すように割れ目の方向は以下の様である。
- 深度 5.772m (N86W89N):ボーリング孔に対して走向はほぼ直交し、ほぼ垂直 に切断する。
- ② 深度 8.642m (N52E79N):ボーリング孔に対して走向は N52E で斜交し、ほぼ垂直に近い 79 度でボーリング孔を切断する
- 深度 11.295m (N66W85N):ボーリング孔に対して走向は N66W で斜交し、ほぼ 垂直である 85 度でボーリング孔を切断する。
- ・ 平成 24 年度、水の滲み出しによるとおもわれる"しみ"が確認されたが、平成 25 年度以降、平成 27 年度まで同位置で"しみ"は確認されていない。
- 平成 28 年度に、深度 11.1m 以深で水の滲み出しと深度 13.74m 以深で溜り水が確認された。
 平成 31 年度の調査では、深度 6.26m 以深で水の滲み出し、深度 9.49m
 以深で溜り水が確認され、深度 13.30m 以深はたまり水によって冠水した。平成
 28 年度と比べて、浅い深度から水の滲み出し及び溜り水が確認された。(図 2.4-69 参照)

<平成 30 年度>

・ 深度 0.00m~15.03m までの画像データを取得した。機械的な深度誤差が発生した ため、ロッド長及びカメラ長によりボーリング孔長が、掘削長である 15.20m であ ることを確認し、カメラの構造上の死角である先端 0.17m を差し引くとともに、 初期値のデータに深度を合わせ込み BTV による観察長を 15.03m (補正後) とした。

- ・ 記録画像精度(分解能)を深度方向 0.1mm、円周方向 0.1mm とし BTV 装置で得られる最高解像度(分解能) 2880 ピクセルで画像記録を行った。
- 前回までの計測時と同様に、削孔時に形成されたと考えられるボーリングを横断する同心円状の筋(展開画像では水平又はスパイラル状の筋)及び、孔壁画像の両端部であるボーリング孔の下側で汚れが波状に見える状況であった。しかし、ひび割れの認識に影響を与えるものではなかった。
- ・ ひび割れとは別に、骨材の剥離又は気泡跡と思われる円形状の空隙を見ることがで きた。これも第1回目と比較し変化は見られなかった。
- ・ 前年度までの観測で確認されている 3 本の既存ひび割れ(図 2.4-57~図 2.4-62 参照)以外に、新規の側壁でのひび割れは確認されなかった。
- ひび割れの開口幅は、どのひび割れも計測限界である 0.1mm 未満であった。昨年 度のカメラの解像度である 0.25mm 未満であり、開口幅の拡大は確認できなかった。
- ・ 図 2.4-69 に示すようにひび割れの方向は以下の様である。
- 深度 5.772m (N86W89N): ボーリング孔に対して走向はほぼ直交し、ほぼ垂直に 切断する。
- ② 深度 8.646m (N52E79N):ボーリング孔に対して走向は N52E で斜交し、ほぼ垂直に近い 79 度でボーリング孔を切断する
- 深度 11.295m (N66W85N): ボーリング孔に対して走向は N66W で斜交し、ほぼ 垂直である 85 度でボーリング孔を切断する。
- ・ 平成 24 年度、水の滲み出しによるとおもわれる"しみ"が確認されたが、平成 25 年度以降、平成 27 年度まで同位置で"しみ"は確認されていない。
- 平成 30 年度の調査では、ボーリング孔側壁の色が全体的に濃い色で撮影されており、明確な水の滲みだしの開始地点がわからなかった。これは、ボーリング孔側壁を観察する際の微妙なカメラの光量調整が色調に影響したものと考えられる。一方で、深度 7.63m 以深で溜り水があり、深度 11.87m 以深でボーリング孔が冠水した。平成 29 年度と比べて、浅い深度での溜まり水が確認された。(図 2.4-69 参照)
- 前方視カメラでボーリング孔先端を観察する際、溜まり水の懸濁によって観察する ことができなかった。このためボーリング孔から排水を実施した。排水した水は水 質分析を実施した。
- 前方視カメラの観察の結果、ボーリング孔先端に明確なひび割れは確認できなかったが、先端に付着物を確認した(図 2.4-125 参照)。水中で付着物に前方視カメラを当てると、付着物の一部が剥離した。また図矢印下側では、付着物が線状に分布しているように観察でき、ひび割れに沿って付着物が析出している可能性も考えられる。

・ ボーリング孔から排水後に、前方視カメラで側壁にある 3 つのひび割れを観察したところ、ひび割れから水が滲みだす様子は観察されなかった。(図 2.4-126参照)

<平成 31 年度>

- 深度 0.00m~15.03m までの画像データを取得した。機械的な深度誤差が発生したため、ロッド長及びカメラ長によりボーリング孔長が、掘削長である 15.20m であることを確認し、カメラの構造上の死角である先端 0.17m を差し引くとともに、初期値のデータに深度を合わせ込み BTV による観察長を 15.03m (補正後)とした。
- ・ 記録画像精度(分解能)を深度方向 0.1mm、円周方向 0.1mm とし BTV 装置で得られる最高解像度(分解能) 2880 ピクセルで画像記録を行った。
- 前回までの計測時と同様に、削孔時に形成されたと考えられるボーリングを横断する同心円状の筋(展開画像では水平又はスパイラル状の筋)及び、孔壁画像の両端部であるボーリング孔の下側で汚れが波状に見える状況であった。しかし、ひび割れの認識に影響を与えるものではなかった。
- ・ ひび割れとは別に、骨材の剥離又は気泡跡と思われる円形状の空隙を見ることがで きた。これも第1回目と比較し変化は見られなかった。
- ・ 前年度までの観測で確認されている 3 本の既存ひび割れ(図 2.4-63~図 2.4-68 参照)以外に、新規の側壁でのひび割れは確認されなかった。
- ・ ひび割れの開口幅は、どのひび割れも計測限界である 0.1mm 未満であり、昨年度の調査と開口幅の拡大は確認できなかった。
- ・ 図 2.4-69 に示すようにひび割れの方向は以下の様である。
- 深度 5.772m (N86W89N): ボーリング孔に対して走向はほぼ直交し、ほぼ垂直に 切断する。
- 深度 8.646m (N52E79N):ボーリング孔に対して走向は N52E で斜交し、ほぼ垂直に近い 79 度でボーリング孔を切断する
- 深度 11.295m (N66W85N): ボーリング孔に対して走向は N66W で斜交し、ほぼ 垂直である 85 度でボーリング孔を切断する。
- ・ 平成 24 年度、水の滲み出しによるとおもわれる"しみ"が確認されたが、平成 25 年度以降、平成 27 年度まで同位置で"しみ"は確認されていない。
- 平成 30 年度の調査では、ボーリング孔側壁の色が全体的に濃い色で撮影されており、明確な水の滲みだしの開始地点がわからなかった。これは、ボーリング孔側壁を観察する際の微妙なカメラの光量調整が色調に影響したものと考えられる。一方で、深度 7.66m 以深で溜り水があり、深度 11.89m 以深でボーリング孔が冠水した。平成 30 年度と比べて、ほぼ同じ深度での溜まり水が確認された。(図 2.4-69 参照)
- 平成30年度は、溜まり水による懸濁によって前方視カメラでボーリング孔先端を 観察することができなかった。このためボーリング孔から排水を実施した。この経

験を踏まえ、今年度は、前方視カメラを挿入する前に排水を行った。採取した水に 対して水質分析を実施した。

- 前方視カメラの観察の結果、ボーリング孔先端に明確なひび割れは確認できなかったが、先端に付着物を確認した(図 2.4-125 参照)。また図矢印下側では、付着物が線状に分布しているように観察でき、ひび割れに沿って付着物が析出している可能性も考えられる。
- ・ ボーリング孔から排水後に、前方視カメラで側壁にある 3 つのひび割れを観察したところ、ひび割れから水が滲みだす様子は観察されなかった。(図 2.4-126参照)



図 2.4-39 深度 5.772m付近の割れ目(平成 27 年度)



開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N86W89Nを示す。ボーリング孔に直交しほぼ垂直に切断している。 図 2.4-40 深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)



図 2.4-41 深度 8.646m付近の割れ目(平成 27 年度)



開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N52E79Nを示す。 図 2.4-42 深度 8.646m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)








図 2.4-44 深度 11.295m付近の割れ目(トレース)(平成 27 年度)







開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。

割れ目の走向傾斜は、N86W89Nを示す。ボーリング孔に直交しほぼ垂直に切断している。
図 2.4-46 深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 28 年度)





開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N52E79Nを示す。









開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N66W85Nを示す。









開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。

割れ目の走向傾斜は、N86W89Nを示す。ボーリング孔に直交しほぼ垂直に切断している。
図 2.4-52 深度 5.772m付近の割れ目(トレース)(平成 29 年度)





開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N52E79Nを示す。









開口幅は、計測限界の0.25mm未満である。 割れ目の走向傾斜は、N66W85Nを示す。

図 2.4-56 深度 11.295m付近の割れ目(トレース)(平成 29 年度)



図 2.4-57 深度 5.772m 付近のひび割れ(平成 30 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。 ひび割れの走向傾斜は、N86W89Nを示す。ボーリング孔に直交しほぼ垂直に切断している。 図 2.4-58 深度 5.772m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度)



図 2.4-59 深度 8.646m 付近のひび割れ(平成 30 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。 ひび割れの走向傾斜は、N52E79Nを示す。

図 2.4-60 深度 8.646m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度)



図 2.4-61 深度 11.295m 付近のひび割れ(平成 30 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。

ひび割れの走向傾斜は、N66W85Nを示す。

図 2.4-62 深度 11.295m 付近のひび割れ(トレース)(平成 30 年度)



図 2.4-63 深度 5.772m 付近のひび割れ(平成 31 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。 ひび割れの走向傾斜は、N86W89Nを示す。ボーリング孔に直交しほぼ垂直に切断している。 図 2.4-64 深度 5.772m 付近のひび割れ(トレース)(平成 31 年度)



図 2.4-65 深度 8.646m 付近のひび割れ(平成 31 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。 ひび割れの走向傾斜は、N52E79Nを示す。





図 2.4-67 深度 11.295m 付近のひび割れ(平成 31 年度)



開口幅は、計測限界の0.1mm未満である。

ひび割れの走向傾斜は、N66W85Nを示す。





断面図



図 2.4-69 ひび割れの発生位置及び方向性と水溜まりの確認区間

[0.000 m - 2.000 m]



図 2.4-70 BTV 観察結果(0.000m-2.000m) (平成 27 年度)

[2.000m-4.000m]











[10.000m-12.000m]



図 2.4-75 BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 27 年度)

[12.000m-14.000m]



図 2.4-76 BTV 観察結果(12.000m-14.000m) (平成 27 年度)

[14.000m-15.030m]



2-957

[0.000m-2.000m]



[2.000m-4.000m]



[4.000m-6.000m]



図 2.4-80 BTV 観察結果(4.000m-6.000m) (平成 28 年度)

[6.000m-8.000m]



[8.000m-10.000m]



図 2.4-82 BTV 観察結果(8.000m-10.000m) (平成 28 年度)

[10.000m-12.000m]



2-963



図 2.4-84 BTV 観察結果(12.000m-14.000m) (平成 28 年度)

[14.000m-15.030m]



図 2.4-85 BTV 観察結果(14.000m-15.030m) (平成 28 年度)

[0.000m-2.000m]



図 2.4-86 BTV 観察結果(0.000m-2.000m) (平成 29 年度)

[2.000m-4.000m]



[4.000m-6.000m]



[6.000m-8.000m]



図 2.4-89 BTV 観察結果(6.000m-8.000m) (平成 29 年度)

[8.000m-10.000m]



[10.000m-12.000m]



図 2.4-91 BTV 観察結果(10.000m-12.000m) (平成 29 年度)
[12.000m-14.000m]



図 2.4-92 BTV 観察結果(12.000m-14.000m) (平成 29 年度)



[0.000m-2.000m]



図 2.4-94 BTV 観察結果(0.000m-2.000m) (平成 30 年度)



図 2.4-95 BTV 観察結果(2.000m-4.000m) (平成 30 年度)



図 2.4-96 BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 30 年度)

[6.000m-8.000m]



図 2.4-97 BTV 観察結果(6.000m-8.000m) (平成 30 年度)

[8.000m-10.000m]



図 2.4-98 BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 30 年度)

[10.000m-12.000m]



図 2.4-99 BTV 観察結果(10.000m-12.000m)(平成 30 年度)

[12.000m-14.000m]



図 2.4-100 BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 30 年度)



[0.000m-2.000m]



[2.000m-4.000m]



図 2.4-103 BTV 観察結果(2.000m-4.000m)(平成 31 年度)

2-983





図 2.4-104 BTV 観察結果(4.000m-6.000m)(平成 31 年度)

[6.000m-8.000m]



図 2.4-105 BTV 観察結果(6.000m-8.000m)(平成 31 年度)

[8.000m-10.000m]



図 2.4-106 BTV 観察結果(8.000m-10.000m)(平成 31 年度)



[12.000m-14.000m]



図 2.4-108 BTV 観察結果(12.000m-14.000m)(平成 31 年度)

[14.000m-15.030m]



図 2.4-109 BTV 観察結果(14.000m-15.030m)(平成 31 年度)



図 2.4-110 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(0.000m-1.000m)



図 2.4-111 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(1.000m-2.000m)



図 2.4-112 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(2.000m-3.000m)



図 2.4-113 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(3.000m-4.000m)



図 2.4-114 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(4.000m-5.000m)



図 2.4-115 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(5.000m-6.000m)



図 2.4-116 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(6.000m-7.000m)



図 2.4-117 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(7.000m-8.000m)



図 2.4-118 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(8.000m-9.000m)



図 2.4-119 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(9.000m-10.000m)



図 2.4-120 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(10.000m-11.000m)



図 2.4-121 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(11.000m-12.000m)





図 2.4-123 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(13.000m-14.000m)



図 2.4-124 平成 27 年度~平成 31 年度の BTV 観察結果の対比(14.000m-15.000m)



図 2.4-125 前方視カメラで撮影したボーリング孔先端 (左:平成 30 年度、右:平成 31 年度)





図 2.4-126 前方視カメラで撮影したひび割れ(5.772 m 付近) (左:平成 30 年度、右:平成 31 年度)

(e) 計測後の処理

後、継続的にひび割れ観察を行うことが出来るよう孔の保護処理を行った。具体的には、 一辺 200mm 等の鋼板(防錆処理済)を4点アンカー留め等の処置をした。観察孔養生後 を写真 2.4-5、写真 2.4-6に示す。



写真 2.4-5 観察孔鉄板養生後



写真 2.4-6 観察孔鉄板養生後(拡大)

d. ボーリング孔内の水質分析

(a) 採水位置

平成 28 年度に確認された底部低拡散材ボーリング孔内の浸出水の起源及び侵入経路同 定の調査として、平成 29 年度以降ボーリング孔内の浸出水の水質分析を行った。

水質分析では、前方視カメラで撮影時に排水したボーリング孔の水と水質分析結果の比較のため図 2.4-127 に示す試験空洞と計測坑 B の湧水も採水した。試験空洞の湧水は、地下水が吹付コンクリートやロックボルトの隙間等から坑道内へ滲み出し、写真 2.4-7 に示す側溝の集水桝へ溜まったものである。計測坑 B の湧水は、試験空洞直上付近の坑道内において滲み出した地下水を配水管で導水し、配水管から直接採水したものである(写真 2.4-8 参照)。なお計測坑 B は、在来工法(支保工+鉄矢板)で施工されており、矢板等の隙間から地下水が滲み出している。



図 2.4-127 空洞と計測坑 Bの採水箇所



写真 2.4-7 採水箇所①:試驗空洞側溝集水桝


写真 2.4-8 採水箇所③:計測坑 B 配水管

(b) 採水方法

ボーリング孔の浸出水の採水方法を図 2.4-128 に示す。バキュームにレジューサーを介 して塩ビ管を接続し、ひび割れ観測孔の先端付近まで塩ビ管を挿入し採水した。平成 31 年度の採水状況を写真 2.4-9、写真 2.4-10 に示す。採水した水は、すぐに容器へと移し た。その際、容器内に空気が残らないように留意した。平成 29 年度から平成 31 年度に かけて採水した量を表 2.4-10 に示す。孔内に残留水があると考えられるため、ボーリン グ孔内の浸出水は採水量より少し多いと考えられる。

表 2.4-10 平成 29 年度から平成 31 年度にかけての採水量

年度	採水量
平成 29 年度	10.1 ^{リッ}
平成 30 年度	13.9 ^{リッ}
平成 31 年度	15.2 ^{リッ}



図 2.4-128 採水方法



写真 2.4-9 採水状況





写真 2.4-10 採水した水 (左:採水後全景、右:水深計測)

(c)水質分析方法

水質分析項目と測定方法を表 2.4-11 に示す。分析項目については平成 18 年に実施され た「低レベル放射性廃棄物の次期埋設に関する本格調査結果について[1]」(以下、平成 18 年水質調査)の分析項目に、採水箇所がコンクリート近傍であることを考慮して、鉄、 アルミニウム、シリカを追加した。

表 2.4-11	水質分析項目	と測定方法

項目	測定の方法	単位
рН	JIS K 0102 12.1 に定めるガラス電極法	-
電気伝導率(EC)	JIS K 0102 13 に定める電気伝導度計による方法 (25℃換算値)	mS/m
ナトリウムイオン(Na⁺)	JIS K 0102 48.2 に定める原子吸光法	mg/L
カリウムイオン(K⁺)	JIS K 0102 49.2 に定める原子吸光法	mg/L
カルシウムイオン(Ca ²⁺)	JIS K 0102 50.2 に定める原子吸光法	mg/L
マグネシウムイオン(Mg ²⁺)	JIS K 0102 51.2 に定める原子吸光法	mg/L
塩化物イオン(CI⁻)	JIS K 0102 35.3 に定めるイオンクロマトグラフ法	mg/L
硝酸イオン(N0₃ ⁻)	JIS K 0102 43.2.5 に定めるイオンクロマトグラフ法	mg/L
硫酸イオン(SO4 ²⁻)	JIS K 0102 41.3 に定めるイオンクロマトグラフ法	mg/L
炭酸水素イオン(HCO₃ ⁻)	JIS K 0101 13.1 に定める滴定法 (計算により(HCO3)として表示)	mg/L
炭酸イオン(CO ₃ ²⁻)	JIS K 0101 13.2 に定める滴定法 (計算により(CO ₃ ²⁻)として表示)	mg/L
全シリカ (T-Si)	JIS K 0101 44.3.1 に定める融解及び吸光光度法	mg/L
全鉄(T-Fe)	JIS K 0102 57.2 に定める原子吸光法	mg/L
2価鉄イオン(Fe ²⁺)	JIS K 0102 57.1 に定める吸光光度法	mg/L
アルミニウム(AI)	JIS K 0102 58.2 に定める原子吸光法	mg/L

(d)水質分析結果

水質分析結果を表 2.4·12~表 2.4·14 に示す。各表中には平成 18 年水質調査及び平成 29 年度~平成 31 年度ボーリング孔内の浸出水の水質分析結果も併せて示しており、これ らの結果は、調査坑周辺のボーリング孔(試験空洞施工深度付近)から採水した地下水の 分析結果である。また一般的な地下水の主要イオンについて、図 2.4·129~図 2.4·132 に 平成 29 年度~平成 31 年度の水質へキサダイヤグラムをそれぞれ示す。

<平成 29 年度~平成 31 年度で共通していた点>

ボーリング孔、試験空洞、計測坑 Bの結果からは、以下のことが明らかとなった。

・ 試験空洞や計測坑 B の湧水と比べ、ボーリング孔内の浸出水は、pH が高く高アル カリ性であった。

- ボーリング孔内への浸出水の電気伝導率、ナトリウムイオン、カリウムイオン、硫酸イオン、炭酸イオンは試験空洞・計測坑 Bの湧水に比べて 10 倍以上の高い値を示した。
- ・ ボーリング孔内への浸出水のカルシウムイオン、マグネシウムイオン、塩化物イオン、炭酸水素イオンは、試験空洞・計測坑 Bの湧水と比べ、やや低い値を示した。
- ・ 試験空洞と計測坑 B の湧水を比較すると、ほぼ同じような組成であったが、試験 空洞のほうが、カルシウムイオン、炭酸水素イオンなどがわずかに高い値を示した。

また平成18年水質調査結果も考慮すると、以下のことが分かった。

- ・ 平成18年水質調査結果の軽石混じり砂岩層と軽石凝灰岩層では、ほぼ同じ組成で あった。
- これらの分析結果に対して、試験空洞の湧水は、カルシウムイオンがやや高い値を 示した。
- ・ 計測坑 Bの湧水は、平成 18 年水質調査結果とほぼ同じ組成を示した。

<平成 29 年度~平成 31 年度で変動のあった点>

・ 平成 30 年度水質調査と比較すると、平成 31 年度では観察孔内の浸出水のナトリ ウムイオンが 10 倍ほど増加したが、平成 29 年度と同水準(607mg/L)に戻ってい た。それ以外の調査項目で大きな変化はなかった。

		①ひび割れ観測孔内の浸出水※2	②試験空洞側溝	③計測抗 B	2006 年水質調査	2006 年水質調査
項目(単位)		(2017/12/6 採水)	(2018/1/11 採水)	(2018/1/11 採水)	軽石混じり砂岩層※3	軽石凝灰岩層※ 3
pH ※ 1		12.6	8.6	8.0	$8.9 \sim 9.5$	8.3~8.7
EC 💥1	mS/m	709	21.2	17.8	-	_
Eh	mV	—	_	_	-224~-24	$-106 \sim -79$
Na ⁺	mg/L	607	23.3	17.6	$28 \sim 31$	17~19
K^+	mg/L	396	1.89	2.92	$1.4 \sim 1.6$	0.8~1.1
Ca ²⁺	mg/L	4.1	15.8	8.4	$0.1 \sim 0.5$	4.6~11
Mg^{2+}	mg/L	0.01	2.44	4.91	0.1~0.2	$1.5 \sim 4.8$
Fe^{2^+}	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	-	-
Cl ⁻	mg/L	4.8	17.1	22.2	13~16	11~18
HCO3 ⁻	mg/L	0.0	59.3	47.6	$30 \sim 37$	$37 \sim 40$
SO4 ²⁻	mg/L	395	19.5	2.1	7.8~13	$12 \sim 16$
NO ₃ -	mg/L	18.0	0.06	11.2	-	-
CO3 ²⁻	mg/L	194	4.6	0	3.6~11	0~1.2
T–Si	mg/L	30.5	23.8	17.2	-	-
T-Fe	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	-	-
Al	mg/L	5.1	<0.1	<0.1	-	-

表 2.4-12 水質分析結果 (平成 29 年度)

※1 pH、電気伝導率は分析室での測定値である。

※2 ひび割れ観測孔内の浸出水について、試験空洞・計測抗Bと比べ、高い値を赤字に、低い値を青字で示した。 ※3 水質分析結果は、試験空洞施工深度付近のデータ

2 - 1012

平成30年度 観察孔内z		平成30年度 観察孔内水※2	試験空洞 側溝	計測孔B	平成29年度 観察孔内水	平成18年水質調査	平成18年水質調査
項目((単位)	(2018/12/3採取)	(2018/12/3採取)	(2018/12/3採取)	(2017/12/6採水)	軽石混じり砂岩層※3	軽石凝灰岩層※3
pН		12.49	8.33	7.84	12.6	8.9~9.5	8.3~8.7
EC	mS/m	679	21.7	18.11	709	-	_
Eh	mV	_	-	-	_	-224~-24	$-106 \sim -79$
Na ⁺	mg/L	58.6	21.6	16.7	607	28~31	17~19
K ⁺	mg/L	338.7	1.8	2.89	396	1.4~1.6	0.8~1.1
Ca ²⁺	mg/L	2.93	16.05	8.52	4.1	0.1~0.5	4.6~11
Mg^{2+}	mg/L	0.01	2.34	4.79	0.01	0.1~0.2	$1.5 \sim 4.8$
Fe ²⁺	mg/L	<0.05	< 0.05	<0.05	<0.05	-	-
Cl	mg/L	4.88	17.2	22.04	4.8	$13 \sim 16$	11~18
HCO ₃	mg/L	0	67.3	49.5	0	$30 \sim 37$	$37 \sim 40$
SO_4^{2-}	mg/L	403.4	20.71	2.17	395	7.8~13	12~16
NO ₃	mg/L	34.08	0.08	10.66	18	-	-
CO3 ²⁻	mg/L	142	0.5	0	194	3.6~11	0~1.2
T-Si	mg/L	34.3	24.7	17.2	30.5	-	-
T-Fe	mg/L	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	-	-
Al	mg/L	<0.1	<0.1	<0.1	5.1	-	-

表 2.4-13 水質分析結果 (平成 30 年度)

※1 pH、電気伝導率は分析室での測定値である。

※2 ひび割れ観測孔内の浸出水について、試験空洞・計測坑 B と比べ、高い値を赤字に、低い値を青字で示した。

※3 水質分析結果は、試験空洞施工深度付近のデータ

		① 本年度観察孔内水※2₊	②試験空洞側溝。	③計測抗 B≠	平成 30 年度観察孔内水	2006 年水質調査-	2006 年水質調査-
項目(単位)	5	(2019/10/9 採取)₽	(2019/10/9 採取)↔	(2019/10/9 採取) 🗧	(2018/12/3 探取)。	軽石混じり砂岩層※3₽	軽石凝灰岩層※3₽
pH 涨1₽	ę.	12.4*	8.3 0	7.8 0	12.50	8.9∼9.5₽	8.3~8.7.
EC ※1.0	mS/m₊	638 <i>e</i>	21.9 🕫	15.9 +	679.0+	- çı	- ₄ .
Eh₊	mV₽	€ + −	⊂,-	- ₽	C _P	-224~-24+	-106~-79+
Na+₽	mg/L₽	461 <i>ə</i>	21.8 +	24.3 🕫	58.6*	28~31.0	17~19.0
K⁺₽	mg/L₽	284 👳	2.05 0	1.29 🕫	339 0	1.4~1.60	0.8~1.1.0
Ca²+₀	mg/L₽	3.8 ø	16.5 0	4.4≁	2.90	0.1~0.5+	4.6~11+
Mg ²⁺ √	mg/L₽	0.010	2.22 +	3.91 🕫	0.01*	0.1~0.2*	1.5~4.8+
Fe²+₊≀	mg/L₽	<0.05+	<0.05+2	<0.05#	<0.05+3	G.−	. چ
Cl⁻ø	mg/L₽	4.89₽	17.3 0	17.8 🗸	4.88*	13~16.0	11~18.0
HCO3 ⁻ ₽	mg/L₽	0 ø	67.1 0	47.1 🕫	0.04	30~37+	37∼40.⊷
SO₄ ^{2−} ₽	mg/L₽	44 0 <i>•</i>	22.5 +	17.7 🕫	403 🕫	7.8~13+	12~16.0
NO3-⊷	mg/L₽	39.5+	0.21 🕫	1.74 🕫	34.1+	<i>ت</i> ه-	- ₄ -
CO32-6	mg/L₽	112.0	ته 0	ته 0	142 🕫	3.6~11+	0~1.20
T−Si₽	mg/L₽	25.6.	24.4	25.5 +	34.3~	- <i>-</i> 2	-ب
T-Fe₊	mg/L₽	<0.05+2	<0.05#	<0.05#	<0.05+2	<i>-</i> ۵	
Ale	mg/L₽	<0.1.0	<0.1 \$	<0.1 @	<0.1.0	- ,	C+−
L			1				

表 2.4-14 水質分析結果 (平成 31 年度)

※1 pH、電気伝導率は分析室での測定値である。

※2 ひび割れ観測孔内の浸出水について、試験空洞・計測坑 B と比べ、高い値を赤字に、低い値を青字で示した。

※3 水質分析結果は、試験空洞施工深度付近のデータ



図 2.4-129 水質ヘキサダイヤグラム (2006 年度水質調査)

(図中の 2006 年水質調査は、表 2.4-12~表 2.4-14の軽石混じり砂岩層と軽石凝灰岩層の平均値)



図 2.4-130 水質ヘキサダイヤグラム (平成 29 年度)



図 2.4-131 水質ヘキサダイヤグラム (平成 30 年度)



図 2.4-132 水質ヘキサダイヤグラム(平成 31 年度)

(e) 水質分析結果の考察

表 2.4-15 に示すように、ボーリング孔の浸出水の原因として考えられるのは、空洞周辺の地下水か、結露水である[2]。本調査結果から、ボーリング孔の浸出水は、空洞周辺の地下水の組成と異なることが明らかとなった。また結露水は一般に純水に近い組成であるため、これもボーリング孔の浸出水の組成と異なる可能性が高い(結露水は夏場にしか出現しないため、冬場に行った本調査では採水できなかった)。したがって、地下水や結露水がボーリング孔へ侵入する過程、あるいはボーリング孔内で溜まっている間に周辺の材料の影響を受け、水質が変化したと考えられる。実際にボーリング孔周辺のコンクリートに使われている低熱ポルトランドセメントやベントナイトには、表 2.4-16[3]や表 2.4-17[4]、表 2.4-17 に示すように、一般的にはナトリウムやカリウムを含んでいる。

原因	発生場所	経 路	可能性	備考
地下水	空洞周辺	防水シート〜埋戻し 材コンクリート〜底 部低透水層〜底部低 拡散層	小	 ・防水シートは空洞全周に敷設されている。 ・埋戻し材コンクリートにひび割れは確認されていない。 ・低透水層中の間隙水圧上昇は確認されていない。 ・低透水性のベントナイトを通過するのに長時間がかかる。
施工で使 用した水	試験施設 上部	各人エバリアの界 面、ひび割れ等	無し	・平成26年度以降、施工水の使用は無い。
停電時の 水没によ る浸水	試験空洞	BTV 観察孔(孔口) 底部低透水層	小	 ・観察孔口はコーキング剤による養生を実施 (密封状態) ・浸水時間は短く、水圧はほとんど作用していない。 ベントナイトは低透水性で通過に長時間がかかる。
結露	試験施設 上部	各人工バリアの界 面、ひび割れ等	小	【木が通過する可能性がある経路】 (a)充填材~側部コンクリートピットの界面 (b)側部コンクリートピット~側部低拡散層の界面 底部コンクリートピットにひび割れがあれば侵入経 路となる可能性がある。

表 2.4-15 浸出水の原因・侵入経路[2]

表 2.4-16 セメント化学組成[3]

項目	区分	強熱減量 ig.loss %	酸化マグネシウム MgO %	三酸化硫黄 SO3 %	塩化物イオン CI %	全アルカリ Na2Oeq %	けい酸 三カルシウム C3S %	けい酸 ニカルシウム C2S %	アルミン酸 三カルシウム C3A %	鉄アルミン酸 四カルシウム C4AF %
低熱ポルトランド	JIS規格值	≦3.0	≦5.0	≦3.5	≦0.02	≦0.75	-	≧40	≦6	-
セメント	当社品質例	0.64	0.67	2.49	0.004	0.40	27	55	2	9
普通ポルトランドセメント	当社品質例	2.26	1.41	2.10	0.015	0.50	56	18	9	9
中庸熱ポルトランドセメント	当社品質例	0.50	0.95	2.36	0.005	0.50	43	36	3	13
高炉セメントB種	当社品質例	1.64	3.31	2.05	0.010	-	-	-	-	-

成分	全岩	水ひ試料
SiO ₂	69.9	61.3
TiO ₂	0.18	0.16
Al ₂ O ₃	14.4	22.0
Fe ₂ O ₃	1.91	1.78
FeO	0.47	0.22
MnO	0.06	0.02
MgO	1.86	3.58
CaO	1.87	0.68
Na ₂ O	2.70	3.60
K₂O	0.30	0.10
P₂O₅	0.05	0.02
強熱減量"	5.04	6.30
合計	98.74	99.76
その他		
Cr	0.03	
全S	0.55	
SO4	0.21	
c	0.61	
CO ³ 5	1.7	
乾燥減量2)	8.50	8.71
1)1000°C		

表 2.4-17 ベントナイト (Kunigel V1) の化学組成[4]

2) 室温放置試料の 105℃恒量までの減量

そのほか、計測坑 B の湧水については、平成 18 年水質調査結果とほぼ同じ組成であっ たため、地山の地下水と考えられるが、試験空洞の湧水については、わずかではあるがカ ルシウムイオンや硫酸イオン等が高く、吹付コンクリートの影響を受けている可能性があ る。

平成 30 年度に大幅に減少したナトリウムイオンは、平成 31 年度に平成 29 年度水準 (607mg/L) に戻った。この場合、ベントナイトの膨潤性能が落ちたとは考えにくいこと から、ナトリウムイオンの変動は別の要因に依るものと考えられる。今後もベントナイト やセメントから各種イオンが溶出するスピードが変化する可能性があるため、経過観察が 必要である。

- (4) 地中無線データの分析評価
 - a. 目的

本業務は、地中無線の実証試験の一環として、周囲に鋼製部材がある環境下で無線通信の可否について確認することが目的である。

b. 地中無線データ回収

平成 20 年に底部低透水層を施工した際に温度計、間隙水圧計を内蔵した地中無線送信 装置が設置されており、センサーの計測頻度は1回/日、データ取得頻度は1回/年とし て運用している。

地中無線全体システムを図 2.4·133、送信装置を図 2.4·134、センサーの仕様を表 2.4·18、データ回収状況を写真 2.4·11 に示す。通信システムは受信地点に受信機と命令 送信機をセットし、埋設されている無線通信装置と常時双方向通信できるようになってい るが、現在は、受信機を定期的にセットし、データを回収する形式で運用中である。デー タ取得時は、試験施設手前に受信装置を配置して、データ送信命令の信号を送ってデータ を送信・受信している。現在、無線通信装置は、内蔵している電池の消耗を極力防ぐため、 月・水・金曜日の午前 10 時 25 分から午後 3 時 25 分まで 30 分間隔で、受信器から送ら れてくる指令を受信待機するモードになっている。

平成 27 年度においては、問題なく 10 か月分のデータ(2015 年 2 月 1 日~2015 年 12 月 3 日)が回収できた。

平成 28 年度のデータ回収において、2015 年 12 月 3 日~2016 年 2 月 18 日のデータが 回収できなかった。その原因として、計測器(送信側)のバッテリ消耗とデータ受信中に 送受信機間で通信不具合が生じたことが挙げられる。メーカ(坂田電機)のバッテリ保障 期間は5年であり、計器を稼働してから平成28年度で8年目となるため、バッテリの消 耗が考えられる。

平成 29 年度は、データ通信時のバッテリの負担を減らすために、1回の通信で送信す るデータ量を従来の1年分から1か月分に分割し、データを回収した。この結果、計器の 稼働時間内に計4ヶ月分(平成29年8月9日~平成29年12月6日)のデータを回収で きた。

平成 30 年度は、底部低透水層の経年変化を計測するために、データ未回収期間の2か 月ごとに、連続した 10 日間の計測結果を回収した。

平成 31 年度は、データ未回収の 1 か月ごとに、連続した 10 日間の計測経過を回収した。

温度は、坑道内の外気による換気の影響により外気温の年変化の影響を受けていること が分かる。間隙水圧については低透水層中に水が浸入していないため間隙水圧計のフィル ター内の気圧を測定している状態であり、設置時の1気圧のまま変化していない。

無線通信装置のデータを回収する際に、毎年地中無線内部の時計に遅延が見られるため、 データ回収後に内部の時計を修正した。表 2.4-19 に遅延時間の一覧を示す。平成 27 年 度から平成 31 年度にかけて回収したデータを表 2.4-20 に示す。





・送信装置容器: φ215mm、L=310mm
・内部に通信制御回路、データロガー、電源関 連装置等を収納

図 2.4-133 地中無線全体システム

図 2.4-134 送信装置

名称	仕 様	センサー写真		
温度計	測 定 範 囲:+70℃ 精 度:1℃以内	バッテリ		
間隙水圧計	測 定 範 囲:600kPa 精 度:±1kPa	間隙水圧計受圧部		

表 2.4-18 センサーの仕様

年度	地中無線内部の時計の遅延
平成 27 年度	1分30秒
平成 28 年度	3分30秒
平成 29 年度	2分30秒
平成 30 年度	30 秒
平成 31 年度	5分

表 2.4-19 地中無線内部の時計の遅延

年度	No.	回収個数	回収データ			
平成 27 年度	1	356	2014/12/12	\sim	2015/12/2	
平成 28 年度	1	371	2016/2/19	\sim	2016/12/6	
平成 29 年度	1	32	2017/8/9	\sim	2017/9/9	
	2	30	2017/9/10	\sim	2017/10/9	
	3	31	2017/10/10	\sim	2017/11/9	
	4	27	2017/11/10	\sim	2017/12/6	
	1	10	2018/11/24	\sim	2018/12/3	
	2	10	2018/9/24	\sim	2018/10/3	
	3	10	2018/7/25	\sim	2018/8/3	
	4	10	2018/5/25	\sim	2018/6/3	
	5	10	2018/3/25	\sim	2018/4/3	
平成 30 年度	6	10	2018/1/25	\sim	2018/2/3	
	7	10	2017/5/25	\sim	2017/6/3	
	8	10	2017/3/25	\sim	2017/4/3	
	9	10	2017/1/25	\sim	2017/2/3	
	10	20	2016/1/26	\sim	2016/2/14	
	11	20	2017/6/24	\sim	2017/7/13	
	1	10	2019/9/30	\sim	2019/10/9	
	2	10	2019/8/31	\sim	2019/9/9	
	3	10	2019/7/31	\sim	2019/8/9	
	4	10	2019/6/30	\sim	2019/7/9	
亚武 91 年度	5	10	2019/5/30	\sim	2019/6/8	
平成 31 平茂	6	10	2019/4/29	\sim	2019/5/8	
	7	10	2019/3/29	\sim	2019/4/7	
	8	10	2019/2/26	\sim	2019/3/7	
	9	10	2019/1/26	\sim	2019/2/4	
	10	10	2018/12/26	\sim	2019/1/4	

表 2.4-20 回収したデータ



写真 2.4-11 地中無線データ回収状況



図 2.4-137 無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 29 年度)



図 2.4-138 無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 30 年度)



図 2.4-139 無線通信装置で測定中の低透水層中の温度と間隙水圧(平成 31 年度)

また、地中無線計器近傍に有線計器を設置しており、有線計器で計測した値と無線通信 で回収したデータを比較した(図 2.4-140)。平成 27 年度から平成 31 年度にかけての双 方の温度計データと間隙水圧計データを図 2.4-141~図 2.4-150 に示す。地中無線計器の 計測値は近傍の有線計器の計測値と同等であった。また表 2.4-20 に示すような断続的な データ回収方法であっても、温度の季節変動の傾向は概ね捉えられていた。



図 2.4-140 地中無線計器及び有線計器の設置位置



図 2.4-141 地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 27 年度)



図 2.4-142 地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 27 年度)



図 2.4-143 地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 28 年度)



図 2.4-144 地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 28 年度)



図 2.4-145 地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 29 年度)



図 2.4-146 地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 29 年度)



図 2.4-147 地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 30 年度)





図 2.4-148 地中無線計器と有線計器の間隙水圧データ回収結果(平成 30 年度) 底部低透水層の温度



図 2.4-149 地中無線計器と有線計器の温度データ回収結果(平成 31 年度) ^{底部低透水層の間隙水圧}



(5) 周辺岩盤挙動計測結果の分析評価

【目的】

周辺岩盤に設置した岩盤変位計及び間隙水圧計によって得られた計測結果を用いて、計測期間における周辺岩盤の状態を分析評価した。

【まとめ】

・ 2015年4月以降では、周辺岩盤に設置した岩盤変位計及び間隙水圧計の計測値の変動はほ とんど認められず、現時点で周辺岩盤の健全性は確保されていると評価される。

【計測結果の分析評価】

周辺岩盤に設置した岩盤変位計及び間隙水圧計の計測結果及び分析結果を図 2.4-151~図 2.4-152 に示す。



図 2.4-151 岩盤変位計測結果





2.4.2 地震時挙動の分析評価

(1) 検討概要

現地で計測している地震計の観測データを用いて、地震時の本試験施設の応答挙動(加速 度等)を分析した。このときの本試験施設の応力状態などの挙動を定性的に評価するため、 観測データから作成した入力地震動を用いて地震応答解析を実施した。

- (2) 地震動計測
 - 1) 地震計設置

地震計は計3台(地震計①~③と称す)とし、図 2.4-153に示すように地震計①は試験施 設から比較的離れた底盤上、地震計②は底部コンクリートピット上、地震計③は手前部コン クリートピット上にそれぞれ設置した。平成27年度の観測中に、空洞の停電等により排水ポ ンプが停止し、空洞底盤部が浸水した際、空洞底盤上にある地震計①が水没し故障する事故 が発生した。このことから、今後の運用を考慮して、2015年10月に、図 2.4-153の平面図 に示すように地震計①の設置場所を現位置から坑口側に約26m移動した。

設置位置選定根拠を表 2.4-21 に示す。各地震計の計測方向は、空洞軸方向を x 方向、空洞 横断方向を y 方向、鉛直方向を z 方向とした。

地震計の仕様を表 2.4-22、回収データの仕様を表 2.4-23 に示す。トリガ条件は、表 2.4-23 に示すように、マスタとするセンサ(地震計①)で、x、y、z 方向のいずれかが 1Gal 以上とした。

地震計の設置状況を図 2.4-154 に示す。



地震計	設置位置	選定根拠
地震計①	試験施設から離れた底盤上 (インバートコンクリート 上)	地震応答解析の入力地震動作成用のデータ とするため、地震時の試験施設の影響が小さ い位置に設置する必要がある。そのため、試 験施設から比較的離れた底盤上を選定した。
地震計②	底部コンクリートピット上	底部低透水層の地震時影響を分析評価する ために底部コンクリートピット上を選定し た。
地震計③	手前部コンクリートピット 上	試験施設全体の地震時影響を分析評価する ために、試験施設の中で高位置となる手前部 コンクリートピット上を選定した。

表 2.4-21 設置位置選定根拠

表 2.4-22 地震計の仕様

名称	仕様	機 種
	計 測 範 囲:±1.5G	富士電機(株)製
加速度センサ	周 波 数 応 答 : 0.1~50Hz	MEMS 応用感振センサ
	分 解 能:X、Y 軸:0.02Gal	CPUKSNSP-00(防水・防塵型)
	m Z 軸: $0.07 m Gal$	
	サンプリング周波数 : 200Hz	
	送 信 周 波 数:0.5sec	
	使 用 条 件:周囲温度:-30℃~60℃	
	周囲湿度:95%RH 以下	
	外 形 寸 法:113×90×60mm	

表 2.4-23 回収データの仕様

項目	仕様
トリガ条件	マスタとするセンサ(地震計①)で、xyz のいずれかが 1Gal 以上
トリガ引き伸ばし時間	地震検知時間幅 10秒
プレトリガ時間	トリガ検知前の収集時間 10秒
ポストトリガ時間	地震収束判断時間 60 秒
サンプリング周波数	200Hz(1 秒間に 200 データを取得)
出力形式	データ変換後、CSV ファイル形式 1 列目に取得時刻、2~4 列目に XYZ の加速度データ(Gal)



(5) 養生ケース内

図 2.4-154 地震計設置状況

2) 観測地震動

2015年以降に観測された地震動一覧を、気象庁発表の六ヶ所村尾駮観測点における情報[5] とともに表 2.4-24~表 2.4-25 に示す。また、各観測地震動の最大加速度と計測高さ(地震 計①を基準)の関係を図 2.4-155 に示す。

図 2.4-155 に示すように、2019 年 8 月 15 日に観測された地震動で加速度が最も大きく、 地震計③の x 方向で最大加速度は 30.7Gal であった。また、地震計①から地震計③の上方に 向かうにつれて最大加速度が増幅する傾向も一部の地震で認められる。

举生日	電源地	マグニ	震源	震源距離	震度
л <u>т</u> н		チュード	深さ	(六ヶ所村尾駮)	(六ヶ所村尾駮)
2015/4/30	岩手県沖	M5.4	24km	164km	2
2015/11/1	青森県 東方沖	M5.2	65km	110km	2
2016/1/11(1)	青森県 三八上北地方	M4.6	10km	66km	1
2016/1/11(2)	岩手県沖	M4.4	38km	123km	1
2016/1/12	北海道 北西沖	M6.2	265km	468km	2
2016/1/14	浦河沖	M6.7	$52 \mathrm{km}$	171km	3
2016/2/2	岩手県沖	M5.6	22km	194km	1
2016/5/3	北海道東方沖	M5.9	44km	586km	1
2016/5/24	岩手県沖	M4.4	48km	128km	1
2016/5/25	青森県東方沖	M4.8	34km	94km	1
2016/7/16	秋田県内陸北部	M4.6	8km	86km	1
2016/7/19	青森県東方沖	M4.5	66km	105km	2
2016/7/24	十勝地方中部	M4.9	96km	276km	1
2016/8/17	青森県三八 上北地方	M3.8	90km	107km	- (1 未満)
2016/9/26	浦河沖	M5.4	29km	158km	2
2016/10/3	浦河沖	M4.5	67km	153km	1
2016/11/12	宮城県沖	M5.9	58km	285km	1
2016/11/22	福島県沖	M7.4	25km	404km	1
2016/11/23	青森県東方沖	M3.9	118km	123km	1
2017/9/10	浦河沖	M5.6	43km	160km	2
2017/9/27	岩手県沖	M6.1	35km	125km	2
2017/11/5	青森県三八上北 地方	M4.3	112km	139km	1

表 2.4-24 観測地震動一覧 (1/2)

※地震観測のトリガ条件:マスタとするセンサ(地震計①)で、xyz 方向のいずれかが 1Gal 以上

発生日	震源地	マグニ チュード	震源 深さ	震源距離 (六ヶ所村尾駮)	震度 (六ヶ所村尾駮)
2017/12/2	浦河沖	M4.9	67km	166km	1
2017/12/16	岩手県沖	M5.5	52km	164km	1
2017/12/20	青森県東方沖	M4.1	57km	79km	1
2018/1/24	青森県東方沖	M6.3	34km	97km	3
2018/1/28	岩手県沖	M4.9	35km	134km	1
2018/1/29	青森県東方沖	M4.4	37km	95km	- (1 未満)
2018/5/7	岩手県内陸北部	M5.1	98km	182km	1
2018/5/14	岩手県沖	M5.1	29km	152km	1
2018/7/2(1)	青森県東方沖	M4.9	64km	105km	2
2018/7/2(2)	青森県東方沖	M5.0	39km	121km	1
2018/7/10	青森県東方沖	M4.9	68km	110km	2
2018/8/05	青森県東方沖	M4.2	62km	101km	2
2018/8/24	青森県東方沖	M5.1	32km	111km	1
2018/9/6(1)	胆振地方中東部	M6.7	37km	201km	3
2018/9/6(2)	胆振地方中東部	M5.4	38km	200km	1
2018/9/11	青森県東方沖	M5.0	47km	102km	1
2018/11/28	青森県東方沖	M5.7	11km	160km	1
2018/12/3	青森県東方沖	M4.6	87km	88km	1
2019/4/11	三陸沖	M6.2	5km	222km	2
2019/4/28	十勝地方南部	M5.6	102km	241km	2
2019/5/8	青森県東方沖	M4.2	21km	118km	1
2019/7/1	青森県東方沖	M5.2	51km	94km	1
2019/8/15	青森県三八上北 地方	M5.5	93km	95km	3
2019/8/15	青森県三八上北 地方	M4.5	91km	93km	2
2019/8/25	青森県東方沖	M4.1	63km	102km	2
2019/8/29	青森県東方沖	M6.1	21km	141km	2
2019/9/7	青森県東方沖	M5.0	64km	109km	2
2019/9/16	青森県東方沖	M4.5	58km	85km	1
2019/12/19	青森県東方沖	M5.5	50 km	98 km	3
2020/1/28	青森県東方沖	M4.2	57 km	78 km	1

表 2.4-25 観測地震動一覧 (2/2)

※地震観測のトリガ条件:マスタとするセンサ(地震計①)で、xyz 方向のいずれかが 1Gal 以上



※計測高さは、地震計①の高さを基準とした。

図 2.4-155 観測地震動の最大加速度と計測高さの関係(左からx、y、z方向)

(3) 地震応答解析

1) 解析条件

解析モデルを図 2.4-156~図 2.4-157 に示す。地下空洞周辺の地質構造は、確証試験の実施箇所(試験空洞)近傍の地質構造[6]を参考に水平成層としてモデル化した。側方・底面の境界は、半無限地盤への波動の逸散を考慮するため、ダッシュポットを用いた粘性境界とした。地下空洞施設の部材構成や寸法形状は、試験施設に準拠した。解析に用いた物性値は、確証試験時の試験結果及び参考文献[7]に基づき設定した。

岩盤及び低透水層の動的物性のひずみ依存性には修正 R-O モデルを適用し、それ以外の構造物は弾性モデルとした。低透水層と周辺部材の界面は剛結条件とした。コンクリートピット内の模擬廃棄体と区画内充てん材は、両者が合成された均質な構造体として取り扱うこととし、その物性は区画内充てん材で代表させることとした。



入力地震動の一覧を表 2.4-26 に示す。入力地震動は、地震計①での観測データを一次元重 複反射理論に基づく解析 (SHAKE) を用いて、地震計①の設置位置から図 2.4-156 の解析 モデル下端(深度 250m)まで引戻して作成した。なお、引戻す際には、平成 27~30 年度の地 震動については、観測データの地震動レベル (加速度) を、リファレンスケースの平成 26 年度の解析で使用した地震動 (2014 年 8 月 10 日) と同等に調整することにより、地震動の 周波数が施設の応答に与える影響を比較・分析した。平成 31 年度の地震動については、リフ ァレンスケースの地震動とスペクトル特性が類似していることから、「最大加速度は異なるが フーリエスペクトルが類似している地震動」として、地震動レベルの調整は行わず、観測デ ータをそのまま使用した。また、高振動数成分を含む地震動を引戻した場合、高振動数成分 が卓越した非現実的な加速度波形になる可能性があるため、地震動観測データに対して 20Hz 以上の高振動成分のフィルタ処理を行い、引戻し解析を実施した。表 2.4-26 に示すように、 入力地震動は 20Gal 程度と小さいため、低透水層と周辺部材との剥離・すべり及び低透水層 の弾塑性挙動は考慮していない。





表 2.4-26 各年度の解析用入力地震動一覧

- 2) 解析結果の分析評価
 - a. 試験施設の振動特性

地震計設置位置の応答加速度の時刻歴を表 2.4-27~表 2.4-31 に示す。

試験施設の振動特性を検討するために、地震計設置位置における最大加速度分布を表 2.4-32、フーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比を表 2.4-33~表 2.4-34 に示す。 表 2.4-32 に示すように、水平方向(y方向)、鉛直方向(z方向)ともに、施設内での最 大加速度の大きな増幅は見られない。水平方向については、表 2.4-33 のフーリエスペク トル比に示すように、本解析モデルでは、9、12、14、17、19Hz 付近の振動数を多く含 む波が入射されると加速度は増幅される。鉛直方向については、表 2.4-34 のフーリエス ペクトル比に示すように、本解析モデルでは、どの振動数帯においても大きな増幅は発生 しないものと考えられる。



y 方向 z方向 15 10 5 0 地震計①_z方向 最大:7.6Gal (16.495 15 10 地震計①_y方向 最大:7.5Gal (18.085s 地震計① 加速度[Gal] 加速度[Gal] 5 0 --5 -10 -5 -10 -15 -15 40 時間[s] 時間ſs 15 10 地震計(2)_y方向 最大:7.4Gal(18.32s) 地震計②_z方向 最大:8.2Gal (16.495s) 15 10 5 0 -5 地 加速度[Gal] 5 0 加速度[Gal] 電計2 -10 -10 -15 -15 20 時間[s] 時間[s] 15 地震計③_y方向 最大:7.8Gal (18.455s) 地震計③_z方向 最大:8.3Gal (16.495s) 10 5 10 5 地 n速度[Gal] 加速度[Gal] 震計③ 0 0 -5 -10 -10 -15 -15 時間[s] 時間[s]

表 2.4-27 試験施設の応答加速度(平成 27 年度)





表 2.4-28 試験施設の応答加速度(平成 28 年度)









表 2.4-30 試験施設の応答加速度(平成 30 年度)



表 2.4-31 試験施設の応答加速度(平成 31 年度)

表 2.4-32 試験施設の最大加速度分布の比較



※平成31年度の解析のみ、地震動レベルの調整は行っていない。


表 2.4-34 フーリエスペクトルの比較 (z 方向)



b. 試験施設の変形特性

試験施設の変形特性を検討するために、試験空洞の上下端位置の水平方向(y方向)相 対変位が最大となる時刻の変形図を表 2.4-35 に示す(変形を明確にするため、変形倍率 を 10000 倍で描画している)。

表 2.4-35 に示すように、年度によって変形の大小が見られ、変位量が最大となるのは 平成 28 年度の 0.24mm であり、最小となるのは平成 27 年度の 0.04mm であった。この 要因としては、以下のことが考えられる。

- ・ 既往検討により、本解析モデルにおける地盤の固有振動数(1~6 次)は 0.880~
 3.919Hz であることがわかっており、表 2.4-33~表 2.4-34 に示すように、平成
 28 年度の入力地震動が固有振動数帯の波を多く含むため、地盤の変形が大きくなった。
- ・ 表 2.4-35 に示すように、試験施設の変形は周辺地盤の変形に追随し、地盤の変形 量が大きい平成 28 年度のケースが、試験空洞の相対変形も大きくなった。

以上より、地盤の固有振動数の波を多く含む平成 28 年度の入力地震動が、試験施設の 変形特性に与える影響が大きいことがわかった。



	全体図	空洞拡大図	空洞上下端の 水平方向相対変位
平成27年度			0.04mm
平成28年度			0.24mm
平成 29 年度			0.15mm
平成30年度			0.12mm
平成31年度			0.15mm

※変形を明確にするため、変形倍率を 10000 倍で描画

c. 試験施設の発生応力

試験施設の地震時に発生する増分応力の引張方向及び圧縮方向の最大値分布を表 2.4-36~表 2.4-37 に示す。なお、図化の対象は以下とした。

- ・ コンクリートピット(底部、側部、上部)
- · 低拡散層(底部、側部、上部)
- · 低透水層(底部、側部、上部)
- ・ 埋戻し材(上部)

応力成分毎に着目すると、表 2.4-36~表 2.4-37 に示すように、引張・圧縮応力は水平 方向、鉛直方向ともに左右・上下部の隅角部で応力が集中する傾向が見られる。

また、表 2.4-36~表 2.4-37 に示すように、いずれの応力成分においても平成 28 年度 が大きくなる傾向が見られる。これは、前項で述べたように、施設の変形量が平成 28 年 度のケースで最大となることと整合する。

以上より、平成28年度の入力地震動が、試験施設の発生応力に与える影響が大きいこ とがわかった。



表 2.4-36 試験施設の地震時増分応力 (y 方向)



表 2.4-37 試験施設の地震時増分応力 (z 方向)

(4) まとめ

各年度で観測された地震動データを整理し、試験施設に与える影響を分析した。また地震 応答解析では、試験施設の変形特性及び発生応力に与える影響に着目して地震動を選定し、 試験施設に与える影響を分析した。その結果、いずれ地震動においても試験施設の振動特性 に与える影響は小さいが、その中でも、地盤の固有振動数の波を多く含む平成28年度の地震 動は、試験施設の変形特性及び発生応力に与える影響が大きいことがわかった。

今後の課題としては、本検討では、試験空洞底盤に設置した地震計の観測データを用いて いるため、観測データには試験空洞及び試験施設の影響が含まれ、1 次元モデルを用いた引 戻し解析では、精度が高い解析用入力地震動を作成できない可能性がある。解析用入力地震 動の精度を高めるためには、試験空洞及び試験施設の影響を受けない当該サイトの岩盤中及 び地表面に地震計を設置し、そこで観測された地震動データを用いた分析の実施が望まれる。 また、岩盤中での地震波の減衰について、周波数依存を考慮した減衰を適用させる等の解析 手法の高度化も望まれる。

本検討では、既往文献を参考として解析用地盤を水平成層構造として設定しており、また、 当該サイト付近の地盤物性値を引用して解析用物性値を設定している。これらは、解析結果 と観測データの乖離発生の原因の一つと考えられる。よって当該サイトにおける詳細な地質 構造及び地盤物性値を設定することにより、実挙動と整合がとれる解析の実施が望まれる。 2.4 の参考文献

- [1] 公益財団法人 原子力環境整備促進・資金管理センター:平成 21 年度 管理型処分技術調査
 等委託費 地下空洞型処分施設性能確証試験 報告書、平成 22 年 3 月
- [2] 鹿島建設株式会社:平成 29 年度ひび割れ観測孔内の水質分析結果、平成 30 年 3 月
- [3] 太平洋セメント株式会社:低熱ポルトランドセメント 紹介ホームページ

 $http://www.taiheiyo\text{-}cement.co.jp/service_product/cement/pdf/lcement_v3.pdf$

- [4] 核燃料サイクル開発機構:緩衝材の膨潤特性(研究報告)、平成11年12月
- [5] 気象庁:気象統計情報 震度データベース検索

(http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/shindo_db/shindo_index.html)

- [6] 冨田敦紀他:余裕深度処分埋設施設本格調査のうち試験空洞の支保設計および挙動、電力土 木、No.325、2006.9
- [7] 日本原燃株式会社:再処理施設及び特定廃棄物管理施設「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」等の改訂に係る耐震安全性評価報告 コメント回答(基礎地盤の安定性)、2010.5

第3章 まとめと今後の課題

第3章 まとめと今後の課題

3.1 国内外の既往研究成果等の調査

中深度処分を対象とした機能確認方法の検討を実施するに当たり、前提条件を明確にするとと もに、国内外の放射性廃棄物処分施設におけるモニタリングに関する規制基準類、既往検討成果 を調査・整理した。

本事業における前提条件や検討対象とする期間・範囲を設定するとともに、使用する用語を定 義するとともに、各国の規制基準類や既往検討成果を参考に、中深度処分における機能確認の目 的と位置付け、モニタリングの制約条件を整理した。

3.2 機能確認試験計画の策定

本事業で実施する機能確認試験の計画を策定するため、技術開発課題を整理し、主に室内試験 の実施を想定した予備検討の試験計画、既存の実規模施設を増改築せずに活用した試験計画、既 存の実規模施設を増築して活用する試験計画、既存の実規模施設に水理制御機能を付与する試験 計画及び新規施設を構築する試験計画をそれぞれ検討した。検討した試験計画案から実施工程や 実現性等を考慮して、以下に示す試験計画を実施することとした。

- (1) 埋設・保全段階の実施設で起こり得る事象の予察解析
- (2) 埋設・保全段階の実施設で低拡散層に起こり得るシナリオの予察解析
- (3) センサーの耐久性評価、及び高性能・高耐久化検討
- (4) 光ファイバセンサーを活用したひび割れ計測に係る試験計画
- (5) 光ファイバセンサーを活用した温度計測に係る試験計画

3.3 機能確認の実現性確認

3.3.1 モニタリング項目の抽出

モニタリング計画の具体化検討で対象とするモニタリング項目を抽出するために、安全評価に おける感度に主眼を置いた「安全評価の側面からのアプローチ」と中深度処分施設の各構成部材 に要求される安全機能を起点とした「安全機能の側面からのアプローチ」を試行した。

抽出したモニタリング項目を以下に示す。なお、本事業で設定したモニタリングの制約条件「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」を考慮して、従来型の有線式センサーの設置は避けることを前提としてモニタリング項目を整理した。

想定する計測技術	段階	モニタリング項目	
	閉鎖措置 段階前	処分施設の変形(処分空洞の内空変位、底部低透	
		水層の上載荷重による沈下)	
中加八齿驰云		施設内の温度変化	
夫処づ他設し		低拡散層のひび割れ	
週用り記な死任		裏面排水の水質	
司 (則1又1小)		周辺地下水の水質(近傍ボーリング孔)	
	閉鎖措置		
	段階以降	周辺地下水の水質(虹傍ホーリンクれ)	
	閉鎖措置	低拡散層のひび割れ	
	段階前		
光ファイバ		低透水層の膨潤圧	
センサー技術	術 閉鎖措置段階以降	低拡散層のひび割れ	
		地下水浸潤状況	
		(地下水浸潤に伴う温度変化や圧力分布)	

表 3.3-1 抽出したモニタリング項目

3.3.2 施設挙動の定量化

(1)熱・水・力学に着目した解析的検討

本項では、中深度処分事業の各段階におけるモニタリング項目を抽出するために、「シナリ オ整理表」を作成し、起こりうる事象を抽出、定量化することを試みた。以降で、熱・水・ 力学に着目した解析的検討による施設挙動の定量化について検討した。

- 1)施設挙動解析による想定しうる事象の整理
 - モニタリングの計測手法や計測位置、計測頻度等のモニタリング計画を具体的に検討 するため「シナリオ整理表」を作成し、モニタリング項目になりうる事象を調査・整 理し、定量的に評価した。
 - 検討手法として Bow-tie ダイヤグラム手法を用いて、科学的に合理的な想定外事象を 引き起こす要因 (FTA: Fault Tree Analysis) とその結末 (ETA: Event Tree Analysis) を策定し、その後、主検討要因に対する FTA より、解析シナリオを選定し、その結果 を ETA から最終状況を参照しながら評価した。
 - ・ 以上の各要因に対する過去の事例を中心に行った取捨選択検討により、「膨潤圧・膨潤 変形」を、施設侵入水量の増加という発生事象を引き起こす主検討要因として選択した。
- 2) 再冠水プロセスにおける施設変遷に着目した解析的検討
 - 「シナリオ整理表」で抽出した起こりうる事象による施設挙動を、坑道周囲に均等に 深度相当の水圧が掛かる参照ケースと、坑道底部中央部のみに局所的に水圧がかかる 比較ケースにて解析的に比較検討した。

- ・ 本解析検討では CODE_BRIGHT を用いた水・力学連成解析とした。
- 処分坑道横断面に関しては、参照ケースと同様に比較ケースについても特にバリア性 能が低下するようなほどの挙動は確認されなかった。ただし、挙動モードとして上方 へ施設全体が変位する挙動が示唆されており、参照ケースにおける沈下挙動モードと は異なった。よって、坑道縦断方向における挙動を確認し、バリア性能を評価する必 要があると考えられた。
- 3) 施設内温度に着目した熱-水連成解析
 - モニタリングの具体化検討に際して、施設の建設・埋設段階〜再冠水過程における廃 棄体からの熱の影響を解析し、温度分布と施設内における水の浸潤の関係を検証し、 水の浸潤(飽和、湧水)によるセメント系部材やベントナイト系部材の温度変化を検 討した。
 - ・ 本解析検討では TOUGH2 を用いた熱・水連成解析とした。
 - その結果、温度と水飽和率の明確な相関関係は認められなかった。ただし、モニタリング施設内におけるピーク温度(廃棄体中央部で約43℃)や解析ステップを細かくすることにより温度の増減傾向を詳細に把握することができ、施設内における基礎情報となる温度環境の傾向をモニタリングするうえで、重要な情報を得ることができた。
- 4) 施設挙動に関する水-力学連成解析
 - モニタリング計画に即して施設内に設定した出力点において、変位データを出力し、
 その経過推移を調べた。その結果、得られた主な知見を以下に示す。
 - ✓ 廃棄体の設置終了時(20年目)は RCPIT 中央、低拡散層左上にて-10mm の鉛 直変位が発生する結果となった。
 - ✓ 上部埋戻し材施工終了時(50 年目)は RCPIT 中央、低拡散層左上にて-17mm の鉛直変位が発生する結果となった。
 - ✓ 底部部材(RCPIT、低拡散層)と側部上(RCPIT、低拡散層)の間において、 側部施工時(5年目)以降、常に概ね5~7mmの差異で推移する結果となった。 これは、底部部材施工後、側部部材が施工されるまでの間の施設挙動により出力 基準点が動いたことによる差異であると推察された。したがって、上記の各出力 点の変位データがモニタリングを考えた場合の計測値と考える。
 - 閉鎖措置段階(50年)以降の移設内における応力と飽和度の分布データを分析し、再 冠水における施設内の水の浸潤状況の推定に資する情報の整理を行った。その結果、 得られた主な知見を以下に示す。
 - ✓ それぞれの抽出点において想定される全応力値の規模と推移傾向を把握するとともに、飽和度と全応力の相関性を確認した。
 - ✓ これらの結果から閉鎖措置段階以降のベントナイト部材を主とした施設内における水の浸潤状況について、全応力の経時変化や飽和度との相関を総合的に見ることにより把握することを確認した。
- 5) 解析的検討手法に対する整理
 - ・ モニタリング計画において、解析モデルや解析条件の確認を行うための追加解析を実

- 施した。その結果、以下の項目を確認することができた。
 - ✓ 締固めを考慮した異方性の初期応力の設定をおこない解析コードで初期応力 状態を確認した。
 - ✓ 施設モデルでは、OCR と剛性のみならず、OCR によって設定される締固め 影響による初期異方性についても考慮した。検討の結果、初期異方性は膨潤 圧よりも十分に小さく、その影響は生じなかった。また、OCR については、 解析結果は弾性範囲内であるため、塑性ひずみは生じないことから影響がな かった。
 - ✓ 追加解析より、低透水層(ベントナイト)の締固めの程度によって、閉鎖段 階以降において低透水層(ベントナイト)の性能が変化し、水の浸潤の進行 にしたがって沈下量に有意な差を確認した。
- ・以上の結果より、信頼性の高い挙動予測を可能にするために、圧密試験や三軸試験等による更なるデータ取得が必要であると考えた。更に、そのデータに基づく適正なパラメータを用いて、モデルの検討を行い今回と同様の解析による再評価が望まれると考えた。
- (2) 化学に着目した解析的検討

人工バリアの機能確認方法として、人工バリアの化学的変質に着目した解析的検討を行っ た。施設近傍のモニタリング値として大きく変化するものは Ca²⁺、Na⁺、K⁺、H⁺(pH) で あり、それらは主として吹付けコンクリートに由来するものであることを示した。本検討に 用いた解析コードにおいて、対象とした 400 年の期間では、施設周辺のモニタリング値が変 化する範囲は全体として 100m 程度であり、その分布は岩盤地下水の動水勾配による影響が 大きいことを示した。対して、人工バリアのひび割れや隙間、EDZ、バリアを構成する部材 の透水係数や拡散係数による影響は小さいことを示した。

今後の課題として、岩盤の物性がイオンモニタリングに主として影響することから、天然 バリアの物性を考慮した解析的検討が必要である。また、本検討で用いた解析コードとは異 なる、地球科学コードを用いて解析的検討を行い、本検討で得られた結果と比較して解析精 度を向上していくことが必要である。

(3) 文献調査等による定量化

定量化が求められる「起こりうる事象」のうち、解析的検討によらない事象について、既 往の検討成果などを参考に定量化を試みた。

金属の腐食による体積膨張については、廃棄体容器、コンクリートピット及び空洞内充填 材の鉄筋についての文献調査を行った。その結果、再冠水に至るまでは酸素消費型、それ以 降は水素発生型の腐食が予想され、廃棄体容器では体積膨張量は約1mm、コンクリートピッ トの鉄筋の腐食では、保全段階終了時期において約0.1mm が見込まれるとする研究成果が あった。なお、空洞内充填材・支保工の金属腐食は、その影響が施設の外側に波及する性質 のものであり、人工バリアに及ぼす影響は小さいと考えられる。

区画内充填材におけるガス発生については、ガス発生源は金属腐食、有機物の微生物分解 及び水の放射線分解に分類され、余裕深度処分施設に関する検討例では、ガス発生速度を 2 通り設定して 1000 年間の解析を実施、遅い速度では主要なバリアへの損傷は無いが、速い 速度では低拡散層において応力が引張強度を超える可能性が示された。

セメント系充填材でのひび割れ発生については、区画内充填材及び空洞内充填材について の調査検討を行った。区画内充填に関する検討事例では、室内試験と確証試験結果を比較し、 室内試験におけるひずみと確証試験での実測ひび割れ幅は概ね整合している結果となった。 空洞内充填に関する本研究の過去の検討事例では、空洞内充填はひび割れが発生しにくい材 料が選定されているが、ひび割れ予測解析ではひび割れが生じやすい評価結果となっている。 本分野の課題として、パラメータの信頼性向上が必要であること、ひび割れ発生位置・方向 の推定が困難であることがあげられているが、適切な設計施工が行われればひび割れの発生 を最小限に留めることが可能とされている。

土質系材料の変状については、低透水層の水接触による変状・流出及び空洞内充填材の沈 下による天端空隙の発生についての調査検討を行い、過去の防水シート、低透水層及び埋め 戻し材の施工事例では、地下水の進入は確認されておらず、中深度処分ではその施設の特徴 から、局所的に低透水層のパイピングを発生させるような地下水流は発生しにくいことから、 透水層の水接触による変状・流出が生じる可能性は低いと判断される。原位置試験施設にお ける空洞内充填材の沈下量計測では、収束値で 5.8mm であり、解析値の 4.4mm と近似する 値であった。

処分坑道の岩盤クリープ変形による影響についての調査検討では、空洞内の人工バリアな どの構造物の剛性により、クリープ変形は抑制され、それによる主要部材の応力増分も僅か であり、岩盤クリープによる人工バリアへの影響は小さいとされている。

3.3.3 光ファイバセンサー技術の適用性検討

光ファイバセンサーのなかでも、光ファイバそのものがセンサーとして機能し、一本で多点計 測を可能にする分布型光ファイバセンサーについて、放射性廃棄物処分施設へのその適用性を実 験的に検討した。計測方式としては、レイリー散乱光に基づく TW-COTDR 方式とブリルアン散 乱光に基づく BOTDA 方式を用いた。

ラボ試験として実施した項目を以下に示し、それぞれの成果と課題を挙げる。

施設特有の環境下における光ファイバの耐久性を検討するために、高アルカリ・塩水・放 射線のそれぞれの劣化促進前後における光ファイバサンプルを用いて、光学的評価と機械 的評価を行った。その結果、カーボン被覆が施された耐水型光ファイバでは、高アルカリ や塩水における劣化が大きく抑えられることがわかった。また、放射線照射に対しては、 光ファイバ材料が特殊な耐放射線型光ファイバが有効であることがわかった。具体的な寿 命や破断確率の評価に対しては、試験方法をさらに改善する必要がある。例えば、現地環 境は経年で温度変化が考えられることなどから、環境温度を変えた劣化促進を含む試験が 望まれる。また、現地環境で付与される低応力状態での光ファイバ評価のためには、充分 なサンプル数を確保した機械的評価試験(引張試験)が望まれる。

- ひずみや温度だけでなく、圧力分布計測の実現可能性を実験的に検討した。圧力に対する 感度が異なる二本(太径被覆、細径被覆)の光ファイバケーブルに、ベントナイト通水に よる膨潤圧を付与したところ、膨潤圧の上昇に従って、レイリー方式による二本の計測結 果の差も増加した。次に、圧力を付与する方法を、ベントナイトによる膨潤圧から、ゴム を介在した加力方法に変更したところ、同様の傾向を確認することができた。こうした結 果から、光ファイバセンサーによる圧力分布の可能性を確認できた。しかし、まだ定性的 な圧力増加の傾向を捉えたに過ぎない。実用化に向けては、圧力検知メカニズムの解明、 圧力の定量評価に向けた取組み、光ファイバ二本を一体化させた光ケーブルの開発、など 課題は多い。
- 光ファイバをひずみ分布計測に適用するためには、対象構造物との一体性確保が重要であ る。現在のところ、光ファイバの設置位置は低拡散層表面が想定されている。そのため、 光ファイバが低拡散層表面に配置された状態で、低透水層の吹付施工をする必要がある。 そこで、光ケーブルに対して実際にベントナイト吹付を行い、光ファイバが断線しないこ とを確認した。また、原位置試験などでは光ケーブルを接着剤によって固定しているが、 長期的に接着剤による一体性が維持されていることは考えにくい。そこで、接着剤による 付着力に期待せず、低透水層からの膨潤圧によって低拡散層のひび割れ検知ができるかど うか、模擬実験で確認した。接着剤を用いない場合でも、モニタリング対象面に対して 200kPa 程度の圧力が付与されれば、ひび割れ検知が可能であることを確認した。対象構 造物との一体性は、光ケーブルの形状による摩擦力にも大きく依存すると考えられるが、 その点については充分な精査ができず、課題として残る。

原位置試験として実施した項目を以下に示し、それぞれの成果と課題を挙げる。

- 模擬施設を利用した原位置試験として、アクセス坑道沿いの温度分布(全長約2750m分)、 側部低拡散層表面のひずみ分布(全長約380m分)、上部低拡散層表面のひずみ分布(全 長約540m分)、手前コンクリートピットのひずみ分布(全長約700m分)を計測した。 それぞれの光ケーブルは、2017年10月に設置を終え、2018年1月の最初の計測から途 中の中断も挟みながら2019年10月まで計測を行った。
- アクセス坑道沿いの温度分布計測では、温度用ケーブル(ケーブルに生じるひずみが光フ ァイバに加わらない機構)を用いて、季節変動による温度変化をとらえることができた。 ブリルアン方式では、のべ21カ月を通じてばらつきなどなく安定した計測結果が得られ、 参照となる温度計との差は約1.2℃であった。しかし、レイリー方式では、特に坑口やピ ット部など温度変化が比較的大きい場所で計測結果のばらつきが大きかった。これは、レ イリー方式の計測原理によるものであるが、温度用ケーブルにひずみ成分が付与されたこ とも影響していると考えられ、そのケーブル機構の改善が望まれる。
- 側部低拡散層表面のひずみ分布計測では、ひずみケーブル(ケーブルに生じるひずみが光 ファイバに加わる機構)を用いて、季節変動による3箇所の既設ひび割れ(ひび割れ幅約

0.1~0.3mm)の開口変位を捉えることができた。参照となるクリップゲージによれば、 ひび割れ開閉は温度と逆の相関で約-20μm/℃であったが、ブリルアン方式においても同 様にその挙動を確認することができた。その開口変位の挙動から、ひび割れの幅や深さな どまで確認できれば非常に有益と考えられ、今後の更なる検討が望まれる。

- 上部低拡散層表面のひずみ分布計測では、ひずみケーブルを用いて、季節変動による1箇 所の既設ひび割れ(ひび割れ幅約 0.2mm)の開口変位を捉えることができた。また、手 前コンクリートピットのひずみ分布計測では、ひずみケーブルを用いて、季節変動による 局所的なひずみ分布の変化がみられないため、既設ひび割れがないことが確認できた。長 期的な検証にあたっては、夏期の湿気によって部分的な接着剤の変質が懸念されることか ら、接着剤の劣化過程における計測性能への影響が懸念される。
 - 30cm 間隔で格子状にひずみケーブルを設置した上部低拡散層並びに手前コンクリートピットについては、強制的なひび割れを発生させる試験を行った。ひび割れ発生方法は、模擬試験体を用いて事前に確認し、削孔穴にくさびを入れて油圧によって強制的にひび割れ を発生させる標準パッカー工法を選定した。原位置試験では、油圧を段階的に上昇させな がら、ひずみ分布計測(ブリルアン・レイリー方式とも)と目視観察を繰り返した。目視 でひび割れが確認できないような段階では、レイリー方式によってひずみが変化している 様子を捉えられ、その結果はひずみゲージと良く一致した。また、ひび割れ幅が増大する ような段階では、レイリー方式ではばらつきが大きくなるが、ブリルアン方式によってひ ずみが変化している様子を安定して捉えられ、その結果はクリップゲージと良く一致した。 このとき、ひび割れを横切るひずみゲージは断線して計測不可であった。レイリー方式と ブリルアン方式を組み合わせることで、ひび割れ発生前のわずかなひずみ変化から、ひび 割れ発生後の大きなひずみまで計測できることを原位置試験で確認できた。
 - 強制的なひび割れ試験を通じ、光ファイバセンサーの計測結果に基づく全体評価方法について検討した。光ファイバセンサーの計測結果は 30cm 間隔の離散的なデータであるが、 そこから目視によるひび割れマップ同等のものを導出する必要があるためである。そこで、 まず対象表面を 10cm メッシュに分割し、光ファイバセンサーのデータから内挿すること で対象全体のひずみコンターを作成した。次に、ある閾値以上のひずみを示すメッシュを ひび割れ発生箇所とした。そのメッシュの合計個数と、目視によるひび割れ開口面積を、 ひび割れ試験の段階ごとに比較した。その結果、新たなひび割れが発生し、進展する段階 においては両者に良い相関がみられたが、既存ひび割れが広がる段階においては光ファイ バの感度が劣った。現状の 10cm メッシュをさらに細かくする、各メッシュにおけるひず み値を考慮する、など評価方法の改善が必要である。
 - 前項の検討とともに、光ケーブルの設置間隔について検討した。現状の 30cm 間隔のデー タを用いた評価、そのうちの一部のデータを用いた評価を比較した。その結果、90cm 間 隔で光ケーブルを設置しても、30cm 間隔同様の評価ができることを確認した。設置間隔 の上限は、実際にひび割れが生じた場合のひずみの影響範囲によるため、対象材料や構造、 境界条件による。そのため、原位置試験における検討には限界がある。

3.3.4 モニタリング計画の具体化に資する検討

モニタリングの行為がバリア機能を低下させないことを制約条件として、具体的なモニタリン グ計画(例)を検討した。計測技術としては、制約条件の下で実施可能な既存の計測技術とでき るだけバリア機能を低下させない計測技術として光ファイバセンサー技術を検討対象としてモ ニタリング計画(例)を検討した。

閉鎖措置段階前における処分施設の変形挙動、温度変化、低拡散層のひび割れ発生状況、裏面 排水の水質及び閉鎖措置段階以降も含めた周辺地下水の水質について、制約条件の下で実施可能 な既存の計測技術を組み合わせたモニタリング計画(例)を検討した。

既存の計測技術を組み合わせたモニタリングにおいては、以下の課題が抽出された。

- 施設の変形計測用の3Dレーザースキャナーや低拡散層のひび割れ評価用の画像解析の活 用ついては、測定精度や現地環境(温度、湿度等)での適用性等について課題が残るため、 今後の技術開発動向を注視していくことが望まれる。
- 裏面排水や地下水の採水による各種分析においては、どの程度の分析結果が必要なのかな ど、施設の安全機能及び安全性への影響を評価するための分析結果の代表性に関する検討 が今後の課題として挙げられる。

制約条件下では閉鎖措置段階以降に実施可能なモニタリングが限定的であることから、分布計 測が可能であるためケーブル量を最小化可能で既存計測器よりも高耐久な光ファイバセンサー に着目し、低拡散層のひび割れ発生状況、施設内の圧力分布及び温度分布と対象とした光ファイ バセンサー技術を活用したモニタリング計画(例)を提示した。

光ファイバセンサー技術を活用したモニタリングにおいては、以下のような課題が抽出された。

- ・ 光ファイバセンサーの設置作業に要する期間が長く、建設・操業工程に影響を与える可能
 性がある。
- ・ 光ファイバセンサー設置後に隣接部材を施工する際、光ファイバセンサーを損傷させない 施工方法を採用する必要がある。
- ・ 光ファイバセンサーにより計測した低拡散層のひずみ分布からひび割れ発生状況を推定 する手法を検討したが、十分な精度が得られていないため、今後の技術開発による推定精 度向上が望まれる。
- ・ 光ファイバセンサーによる圧力分計測は技術開発段階にあり、高精度で圧力分布を計測で
 きる技術水準には達していないため、今後の技術開発による技術革新が望まれる。
- ベントナイトの締固め状態の違いにより、閉鎖措置段階以降の力学挙動に変化が生じる可 能性が示唆されており、閉鎖措置段階以降、数百年間を対象としたモニタリングが必要と なる可能性がある。

上述したような解決すべき課題は残るものの、既存計測技術と光ファイバセンサー技術を組み 合わせることにより、建設段階~保全段階においてシームレスに実施するモニタリング計画の一 例を提示した。 3.4 施設・岩盤挙動計測データの分析評価及び地震時挙動評価

施設及び岩盤挙動計測の分析の結果、平成27年度以降では、施設及び周辺岩盤には季節変化 に伴う挙動が主に見られ、施設の健全性への影響はないと推察された。また、目視によるセメン ト系材料のひび割れ調査、底部低拡散層のBTV 観察の結果、平成27年度以降のひび割れの進 展、新たなひび割れの発生は見られなかった。

また、試験施設に与える地震影響を評価するために、試験空洞内で観測された地震動データの 中から、試験施設の変形特性及び発生応力に与える影響に着目して地震動を選定し、地震応答解 析を実施した。その結果、いずれ地震動においても試験施設の振動特性に与える影響は小さいが、 その中でも、地盤の固有振動数の波を多く含む平成28年度の地震動は、試験施設の変形特性及 び発生応力に与える影響が大きいことがわかった。

今後の課題として以下が挙げられる。

入力地震動作成に使用する観測地震動には、空洞や施設の影響が含まれるため、精度が高い
 入力地震動を作成できていない可能性がある。今後は、解析精度向上に向けて、観測地震動
 データの充実、解析手法の高度化が望まれる。

おわりに

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中深 度処分施設の計画、設計や円滑な建設及び操業には、より現実的な条件下で、各種の検討や実証 試験等の積み重ねが必要となる。本試験は、こうした状況に鑑み、地下空洞型処分施設の機能確 認を主目的とする実証的な試験を行ったものである。

本試験は大断面の地下空洞における処分施設の主に人工バリアの機能の確認方法の検討及び実 証的な試験が主となる。このため、試験の計画にあたっては、低レベル放射性廃棄物等の処分施 設の計画・設計・施工・安全評価に関わりのある専門家からなる委員会を設け、幅広く関連する 知見や意見等を取り入れて検討を進めた。

本報告書は、平成27年度から平成31年度にかけて、資源エネルギー庁から原子力環境整備促進・資金管理センターが受託を受けて、地下空洞型処分施設を対象とし、ベントナイト系材料や セメント系材料により構成される人工バリアについて、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した技術開発 の成果を取りまとめたものである。地下空洞型処分が安全で信頼に足るものとして社会に受け入 れられるものとするために本事業の成果が活用され、地下空洞型処分システムが、ステークホル ダーにとってより納得のいくものとなることを期待している。