

原環センター トピックス

RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT FUNDING AND RESEARCH CENTER TOPICS

2021.6.NO.138

目次

センターの活動状況	①
原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について	④

センターの活動状況

I 運営状況

第 33 回理事会（決議の省略）

下記の事項について提案を行い、2021年4月22日付けをもって、提案どおり可決する旨の理事会の決議があったものとみなされました。

1. 公募による役員候補者の選考に関する規程の制定について
2. 役員候補者選考委員会運営規程の制定について

第 34 回理事会の開催

2021年6月7日、Web会議システム・対面の併用により開催の第34回理事会において、下記の事項について審議し、それぞれ原案のとおり可決されました。

1. 2020年度事業報告の承認について
2. 2020年度決算の承認について
3. 原子燃料サイクル推進基金管理業務の実施について
4. 2021年度原子燃料サイクル推進基金管理業務に関する事業計画及び収支予算の承認について
5. 2021年度事業計画書及び収支予算書の変更について
6. 会計監査人に対する報酬について
7. 第25回評議員会（定時）の招集について

第 25 回評議員会（定時）の開催

2021 年 6 月 22 日、Web 会議システム・対面の併用により開催の第 25 回評議員会（定時）において、下記の事項について審議し、それぞれ原案のとおり可決・了承されました。

1. 2020 年度事業報告について（報告）
2. 2020 年度決算について（報告）
3. 原子燃料サイクル推進基金管理業務の実施について
4. 定款の変更について
5. 2021 年度原子燃料サイクル推進基金管理業務に関する事業計画及び収支予算の承認について
6. 2021 年度事業計画書及び収支予算書の変更について
7. 評議員の選任について
8. 監事の選任について
9. 理事の選任について

今回の任期満了に伴う選任により、次の方が交代され、その他の方は再任されました。

（敬称略）

区 分	退 任 者	新 任 者	新任者所属・役職
評議員	倉田千代治	伊原 一郎	中部電力株式会社 専務執行役員 原子力本部長
評議員	高橋 明男	新井 史朗	一般社団法人日本原子力産業協会 理事長
評議員	—	佐藤 正知	北海道大学 名誉教授
監事（常勤）	長谷 毅	野元 毅	
理事（常勤）	田中 隆則	淵上 善弘	
理事（非常勤）	山本 徳洋	三浦 信之	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 理事

第 35 回理事会（決議の省略）

第 25 回評議員会（定時）終了後、同評議員会において選任された理事及び監事に対し、高橋彰理事を理事長に、淵上善弘理事を専務理事に、及び田中俊彦理事を常務理事に選定することについて提案を行い、2021 年 6 月 22 日付けをもって、提案どおり可決する旨の理事会の決議があったものとみなされました。

Ⅱ 成果等普及活動の実施状況

2020年度 第3回原環センター講演会の開催

2020年度第3回原環センター講演会をオンラインで開催しました。講演では、当センターがこれまで実施してきた中深度処分を対象として、人工バリアに係る施工性や品質確認に関する試験、モニタリングに係る機能確認試験などについて、これまでの取り組みについて、その概略を示すとともに、近年の取り組みを中心に、その技術成果について紹介しました。

開催日時：2021年3月31日（水）15:00～16:30

開催形式：オンライン開催

演 題：原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について

講演者：低レベル廃棄物処分研究開発部 藤原 啓司、広中 良和



2021年度 第1回原環センターセミナーの開催

放射性廃棄物処分の安全評価から処分の全体像を把握する第一歩として、安全評価の基礎知識を身につけた技術者・研究者を対象とした、第1回原環センターセミナー「放射性廃棄物処分の安全評価の基礎Ⅰ」を以下のとおり開催しました。講義後の総合討論では、講義への質疑応答を通じて、理解を深めていただきました。

開催日時：2021年6月3日（木）10:00～18:00

開催形式：オンライン開催

講師：公益財団法人原子力安全研究協会
技術顧問 朽山 修 氏

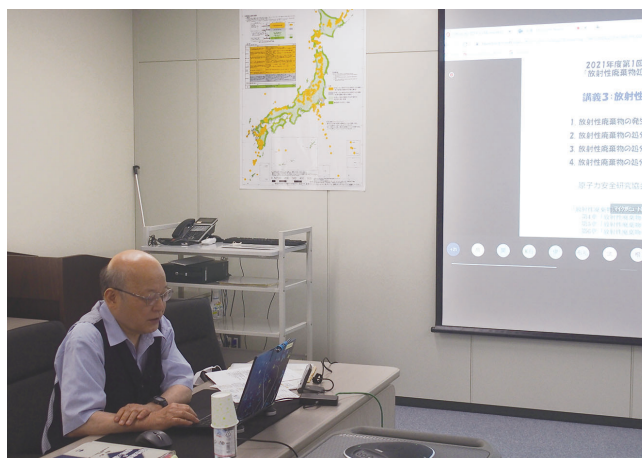
プログラム：

講義1：放射性廃棄物の発生と放射線の健康影響

講義2：放射線環境影響評価

講義3：放射性廃棄物処分の基本戦略

総合討論



原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について

低レベル廃棄物処分研究開発部
 広中 良和

はじめに

原環センターでは、我が国における中深度処分が安全で信頼性も高く社会に受け入れられるものとなるよう、さまざまな調査研究や技術開発を行ってきた。本報告では、これまでの取り組みについて、その概要を示すとともに、そこで得られた技術成果について紹介する。

1. 中深度処分とは

中深度処分の対象となる廃棄物は、原子力発電所等の運転及び廃止措置に伴って発生する低レベル放射性廃棄物のうち、放射能レベルの比較的高いもの（例えば、制御棒、チャンネルボックス（BWR）、バーナブルポイズン（PWR）、炉内構造物）であり、『L1廃棄物』とも呼ばれる。これらの廃棄物は、切断して外寸法が縦1.6m×横1.6m×高さ1.6mの鋼製の処分容器に収納される計画となっている¹⁾。

中深度処分は、対象廃棄物の総放射能量や長半減期核種の濃度等に鑑み、住居建設などの一般的な地下利用のほか、高層建築物の建設、地下鉄、上下水道、共同溝などの利用を想定しても十分に余裕のある深度（地表面から10万年後でも70m以深を確保）に処分する方法が考えられている。そのため、当初は『余裕深度処分』と呼ばれていたが、現在は、同様の処分概念として国際的には「Intermediate depth disposal」が使用されていることを踏まえて『中深度処分』の呼称が使用されている。

放射性物質の移行は、廃棄物・廃棄体、天然バリア及び人工バリアにより長期にわたり抑制することとなる。人工バリアは、区画内充填材（モルタル）、コンクリートピット（鉄筋コンクリート）、低拡散層（モルタル）、低透水層（圧縮ベントナイト）、空洞充てん材（底部・側部：鉄筋コンクリート、上部：ベントナイト混合土）から成る多重バリアとされ、岩盤中に掘削された空洞に廃棄体を人工バリアで包むように処分されることが考えられている¹⁾。中深度処分の概念を図-1に、操業イメージを図-2にそれぞれ示す。

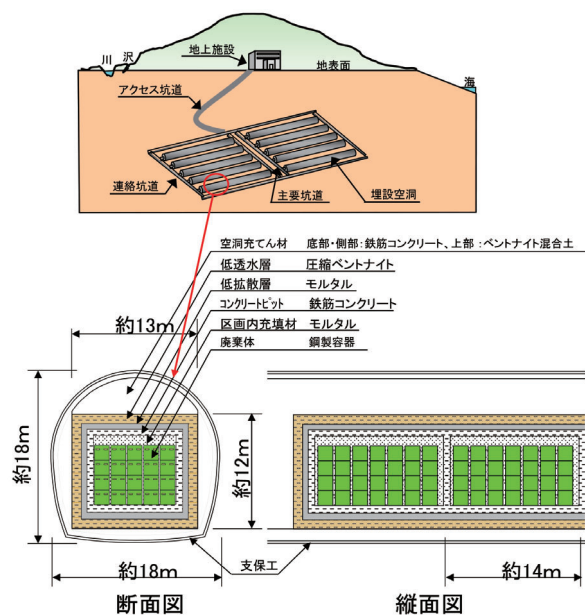


図-1 中深度処分の概念図¹⁾

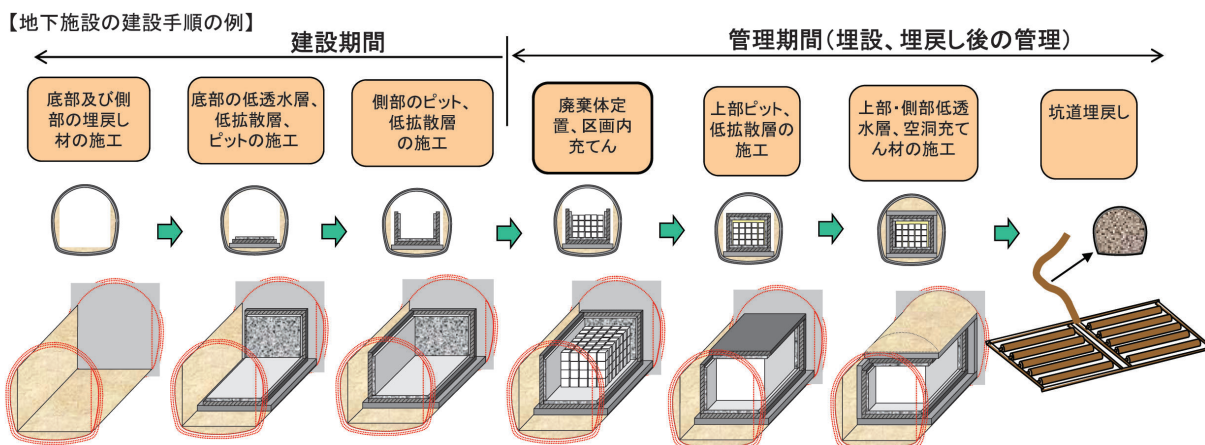


図-2 中深度処分の操業イメージ¹⁾

事業化に向けて、現在、国により規制基準の整備が進められているところである²⁾。

2. 原環センターにおける中深度処分関連の研究開発の経緯

将来の事業化の予見性を高めることを目的に、原環センターは、放射性廃棄物処分に対する国民・社会の理解促進、規制への適合性確保や事業の円滑実施に資する基盤的な技術開発を担ってきている。ここでは、将来を見据え、優位性のある要素技術やシステムの成熟度を高めること、中深度処分に係る有効な選択肢を増やすこと、また、分野横断的な課題も視野に入れることを重視している。

これまでに実施した中深度処分関連の研究開発とその内容は、以下に示すとおりである。

地下空洞型処分施設性能確証試験、閉鎖技術確証試験（平成19年度～平成26年度）

- ▶ 処分施設施工確認試験（施工技術、施工方法等の確認）
- ▶ 初期性能確認試験（要求品質の確認）
- ▶ 施設／岩盤挙動計測・地震影響試験（力学的安定性等の計測、地震影響検討）

地下空洞型処分施設機能確認試験（平成27年度～平成31年度）

- ▶ 処分事業の各段階における計測／分析方法の検討
- ▶ 解析等による施設挙動の把握・定量化等をもとに、計測／分析候補となり得る事象を抽出
- ▶ 閉鎖措置段階前：既存の物理量計測技術＋地下水モニタリング＋光ファイバセンサー技術
- ▶ 閉鎖措置段階～廃止措置段階：地下水モニタリング＋光ファイバセンサー技術

地下空洞型処分調査技術高度化開発（令和2年度～）

- ▶ 中深度処分相当の地下環境を評価する技術の高度化
- ▶ 中深度処分相当の地下環境を考慮した設計技術の高度化

3. 地下空洞型処分施設性能確証試験、閉鎖技術確証試験

(1) 目的

本試験は、実際の地下環境下において中深度処分に想定されている実規模の処分施設の模擬施設を構築し、施設の建設に係る施工技術、施設の核種閉じ込めや施設の構造体としての初期性能並びに施工後における施設性能に係る計測と評価等、実際に施工した試験施設の総合的な性能の確認を行うことを目的に実施したものである。

(2) 全体概要

本試験は、処分施設施工確認試験、初期性能確認試験及び施設／岩盤挙動計測・地震影響試験の3種類の試験から構成される（表-1）。

試験に供する地下空洞として、青森県六ヶ所村における日本原燃株式会社所有の試験空洞を利用した。

図-3に試験施設のイメージ図を、図-4に処分施設施工確認試験により構築された試験施設の写真を示す。

（本試験では、低透水層を緩衝材、低拡散層を低拡散材と称している。）

表-1 本試験の構成と各試験の内容

本試験の試験項目	各試験の内容
1. 処分施設施工確認試験	実際の地下空洞環境下において実規模の施設を施工することにより、施工技術、施工手順、施工方法等の実施への適用性を確認する。また、処分施設を構成する構成要素ごとに、複数の施工技術、施工方法を適用するとともに、施工の精度、効率を考慮して総合的な施設の施工性を確認する。
2. 初期性能確認試験	施工された施設について、力学的安定性、核種閉じ込め性等の安全評価において要求される初期性能に関わる品質について、その達成度やバラツキ等を確認する。
3. 施設／岩盤挙動計測・地震影響試験	施工された施設の力学的安定性や周辺岩盤に与える影響等を評価するために、施設や周辺岩盤の力学・水理挙動を計測する。また、地震動観測を行うとともに、観測データを用いた地震応答解析を行い、施設の地震時振動特性について検討する。

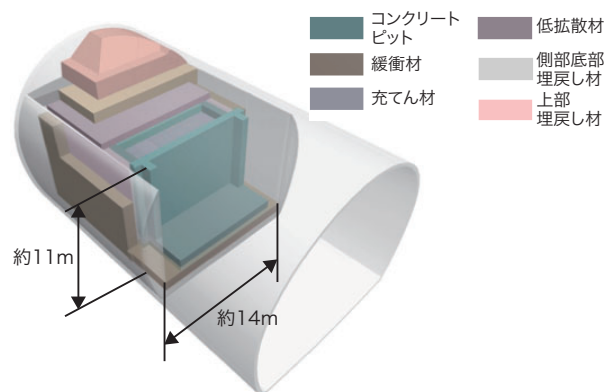


図-3 試験施設のイメージ



図-4 試験施設の状況（平成27年3月）

当該試験のうち、処分施設施工確認試験と初期性能確認試験の成果については、既報³⁾を参照されたい。以下に、施設／岩盤挙動計測・地震影響試験の内容を記載する。

(3) 施設／岩盤挙動計測・地震影響試験

1) 施設／岩盤挙動計測試験

試験施設の施工時及び施工後における、施設の力学挙動と周辺岩盤への影響を把握し、施設の健全性を評価するために、平成19年度～26年度にわたり、施設に温度計やひずみ計等の計測器(631台)を設置し、挙動計測を行った(図-5～図-7)。周辺岩盤には、間隙水圧計及び岩盤変位計(37台)を設置して、施設構築に伴う挙動を計測した(図-8)。

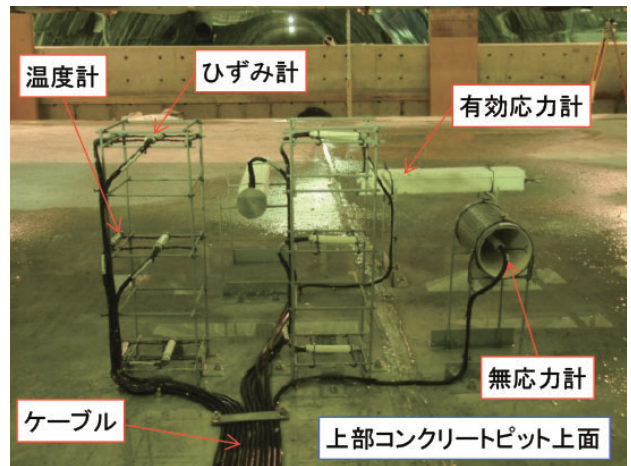


図-5 上部低拡散材の計測器

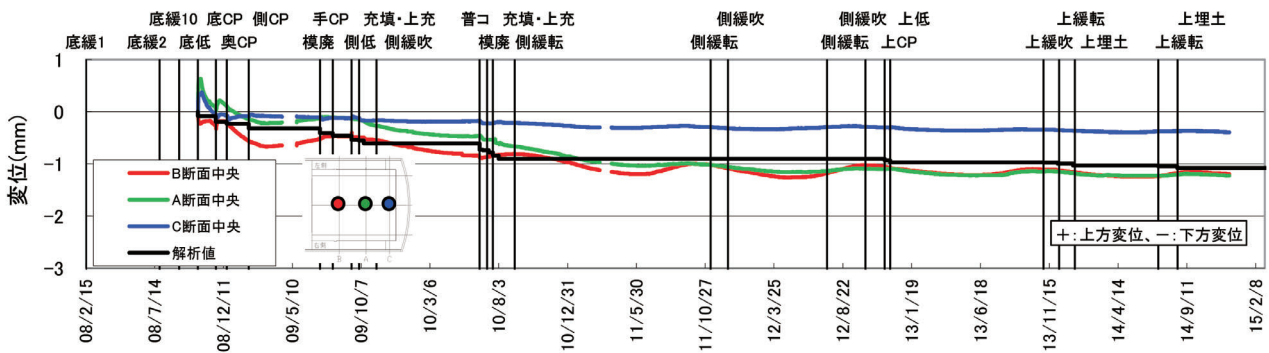


図-6 底部緩衝材の沈下量計測結果

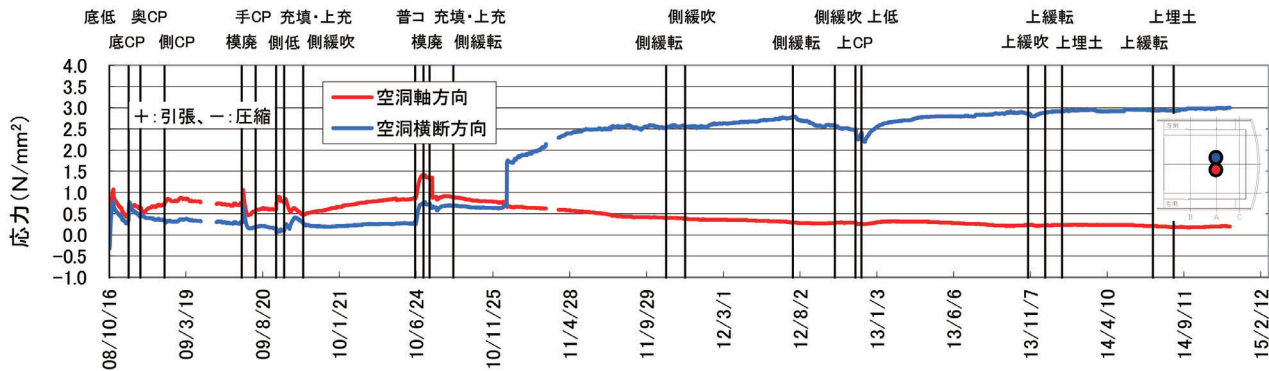


図-7 底部低拡散材の応力計測結果

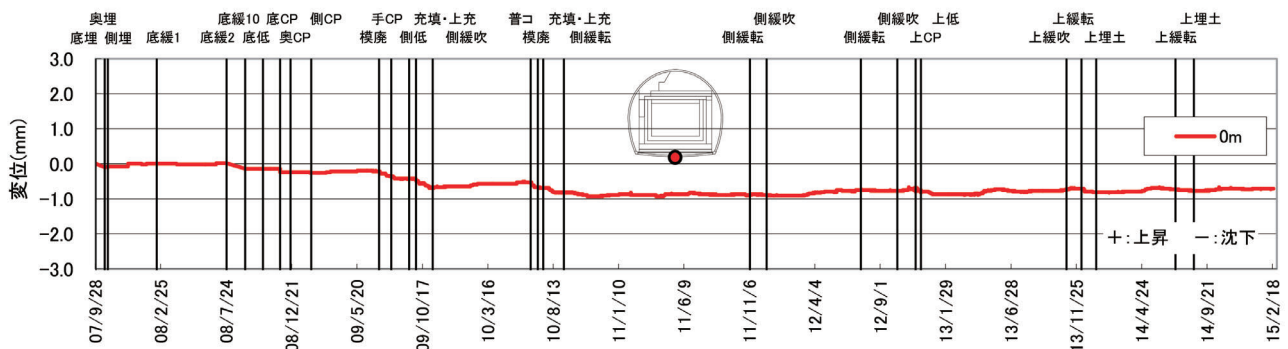


図-8 岩盤変位計測結果

また、コンクリートピットや低拡散材等のセメント系部材の初期性能（施設の建設完了時点の性能）を評価するために、打込み時に得られた計測結果を用いて、表-2 に示す各種データを取得した。

取得された挙動計測結果より、試験施設の構築が施設及び周辺岩盤に与える影響は、それらの健全性を損なうものではなく、計測時点で施設及び周辺岩盤の健全性は確保されていると評価された。

表-2 セメント系部材の初期性能に関する取得データ

取得データ	初期性能関連項目	計測項目
打込み時温度上昇量	温度特性	温度
弱材齢時のコンクリート剛性	コンクリートの剛性	応力、ひずみ
線膨張係数	線膨張係数	温度、ひずみ
自己収縮ひずみ・膨張ひずみ	自己収縮ひずみ、膨張ひずみ	温度、ひずみ
ひび割れ指数	ひび割れ特性	有効応力

2) 地震影響試験

大地震が建設・操業段階の地下空洞型処分施設に与える影響を把握するために、仮想的に設定した地震動（解放基盤面での水平方向最大加速度：250Gal、450Gal、900Gal）を用いて2次元有限要素法による地震応答解析を実施した（図-9）。

また、地下空洞型処分施設の地震時の振動特性を把握することを目的として、試験施設の3箇所地震計を設置して地震動観測を行い（図-10）、観測データを用いた2次元有限要素法による地震応答解析を実施した。

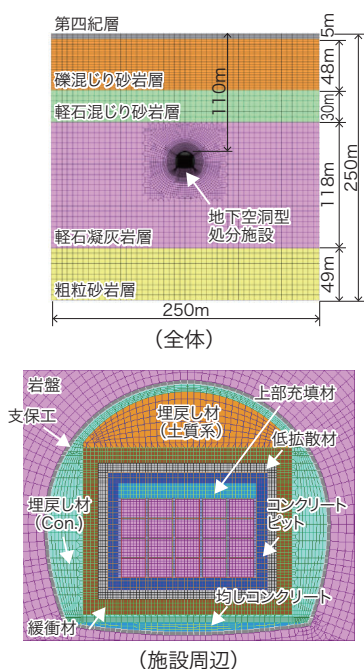


図-9 地震応答解析モデル

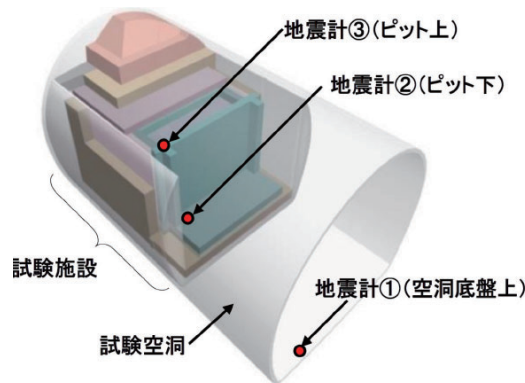


図-10 地震計の配置

上記解析により、コンクリートピット及び低拡散材は、大地震に相当する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。また、緩衝材は、一部で塑性化する領域が発生するものの（図-11）、体積ひずみ増分（図-12）から換算される透水係数の増分は小さく（最大0.131%）、大地震が緩衝材の透水性に与える影響は小さいことがわかった。

地震動観測では、取得した観測データを用いて地震応答解析を行い、解析結果と観測データの比較・分析により、試験施設の地震時の振動特性を把握した。

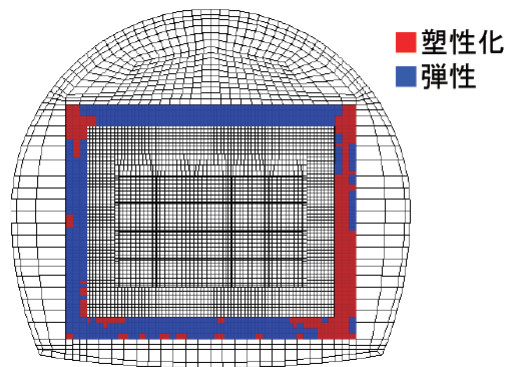


図-11 緩衝材の塑性化状況（解析終了時）

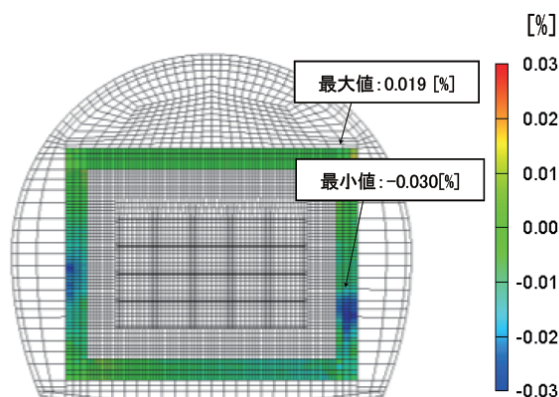


図-12 緩衝材の体積ひずみ増分（解析終了時）

4. 地下空洞型処分施設機能確認試験

(1) 目的

中深度処分においては、処分施設閉鎖後に長期の管理が求められ、その管理の考え方を整理することと、それを実現させるためのモニタリング技術が必要となっている。こうした処分施設の長期管理の必要性に鑑み、本研究は、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についての検討を実施したものである。

(2) 実施内容

本研究では、まず、国内外における規制機関の考え方、既往のモニタリングに関する検討成果、長期計測に耐えうるセンサー技術について調査を行った。次に、モニタリングの制約条件を整理するとともに、中深度処分における機能確認の目的と位置付けを明確にした。

その上で、以下に示す手順で諸検討を実施した。

- ①候補となるモニタリング項目の抽出
- ②施設挙動の定量化（数値解析、文献調査）
- ③計測技術に関する調査・評価
- ④モニタリング計画の具体化

候補となるモニタリング項目の抽出は、安全評価上重要となるパラメータに関連するものであることに加えて、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かどうかという視点から行った。

施設挙動の定量化は、モニタリング計画を具体化するためには、いつ・どこで・どのような現象・

挙動が想定されるのかを把握することが必須と考え実施したものである。熱、水、力学、物理、化学の観点で定量化を試みた。

モニタリング計画は、信頼性の観点から実績のある既存計測技術を適用することを基本とした。ただし、特に閉鎖措置段階以降にも適用できる既存計測技術は限定されること、近年、技術革新が目覚ましく、精度や耐久性の点から放射性廃棄物処分施設への適用性も高いと考えられることから、光ファイバセンサーによる計測に係る技術開発を実施し、その技術を用いた方法もモニタリング計画に反映した。

抽出したモニタリング項目の候補を表-3に、提案したモニタリング計画の一例を図-13に示す。

表-3 抽出したモニタリング項目の候補

想定する計測技術	段階	モニタリング項目の候補
実処分施設で適用可能な既存計測技術	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）
		低拡散層のひび割れ
		空洞裏面排水の水質
		周辺地下水の水質（近傍ボーリング孔） 温度
	閉鎖措置段階以降	周辺地下水の水質（近傍ボーリング孔）
	光ファイバセンサー技術	閉鎖措置段階前
閉鎖措置段階以降		低透水層の膨潤圧
		低拡散層のひび割れ
		地下水浸潤状況
		温度

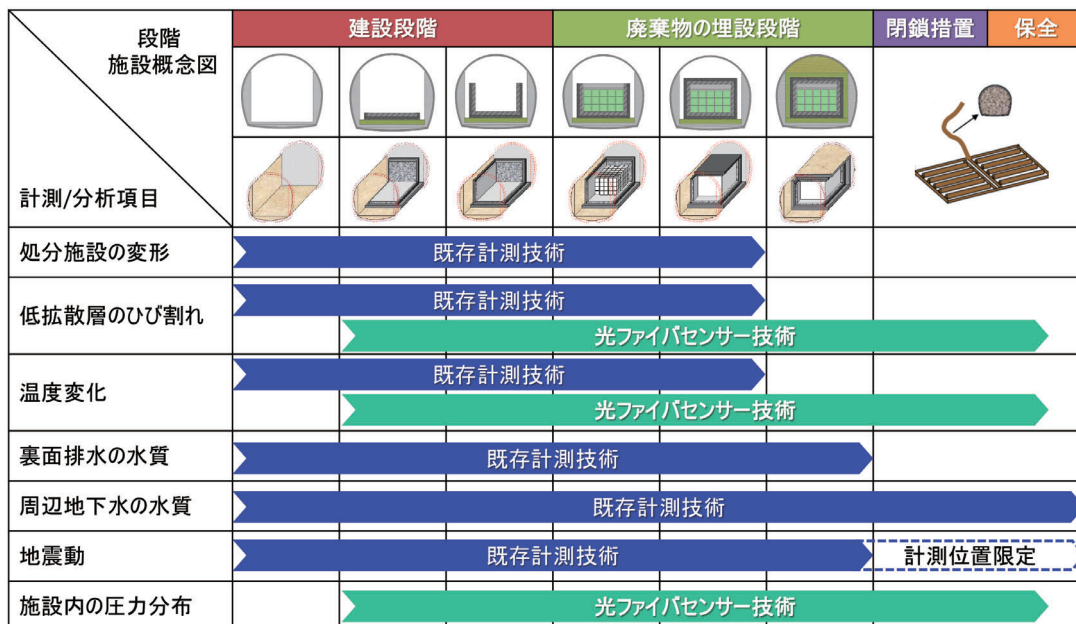


図-13 提案したモニタリング計画の一例

これまでに述べた内容のうち、施設挙動の定量化に係る検討及び光ファイバセンサーに係る技術開発について、以下詳細に記載する。

(3) 施設挙動の定量化に係る検討

1) 熱・水・力学に着目した検討

再冠水による地下水浸潤挙動を評価することを目的として、解析的検討を実施した。使用した解析コードは「TOUGH2」である。なお、本解析コードは、米国ローレンス・バークレー国立研究所の K. Pruessらが開発公開されている解析コード⁴⁾であり、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、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。

解析モデルを図-14に示す。各部位に与える解析用パラメータは、これまでに取得した試験結果や文献値に基づき設定した。廃棄体からの発熱は、初期発熱量を 10W/m^3 とし、Co-60の減衰に基づく経時変化として与えた。

解析結果の一例として、主要位置(図-15)における飽和度と温度の経時変化を図-16に示す。飽和度の経時変化は、位置によって大きく異なる結果となった。施設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要な要因と考えられる。

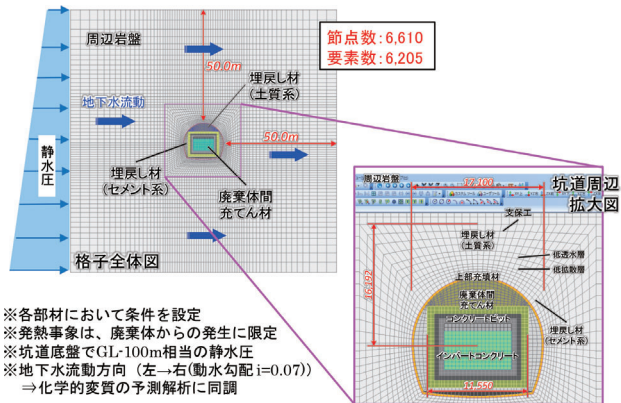


図-14 熱・水・力学に着目した検討の解析モデル

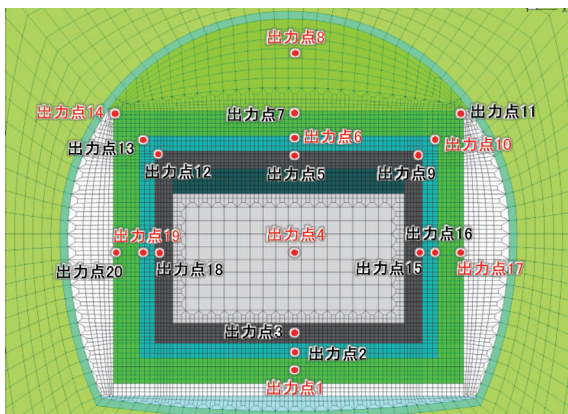


図-15 解析結果を出力する主要位置

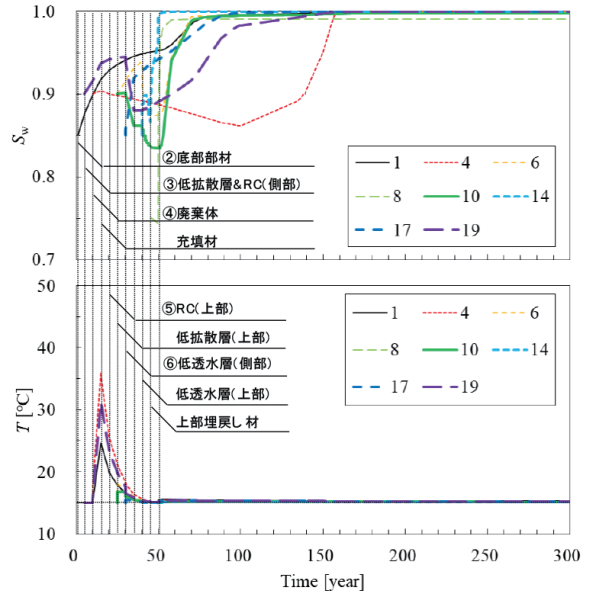


図-16 解析結果の一例(上段:飽和度、下段:温度)

2) 化学に着目した検討

地下水の移流・分散に伴う場の化学的物質移行挙動を評価することを目的として、解析的検討を実施した。使用した解析コードは「LIFE D.N.A.」である。なお、本解析コードは、セメント系材料中のイオンの拡散、移流の影響、電気的中性条件、セメント系材料からの成分溶脱に伴う特性の変化⁵⁾を考慮できる物質移行解析プログラムである。ベントナイトの化学的変質については、イオン交換反応とそれに伴う透水係数の変化を考慮している。

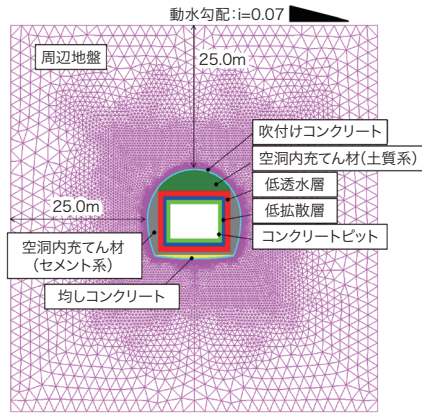
解析モデルを図-17に示す。解析は、以下に示す因子を考慮して、感度解析を実施した(表-4)。

- 地下水の動水勾配 (7% / 0%)
- 施設内に生じるひび割れ (無 / 有)
- 周辺岩盤の掘削影響領域 (考慮しない / する)
- グラウトのアルカリ影響 (考慮しない / する)
- 地下水組成 (降水系 / 海水系)
- 吹付けコンクリートの水和初期における変質 (考慮しない / する)

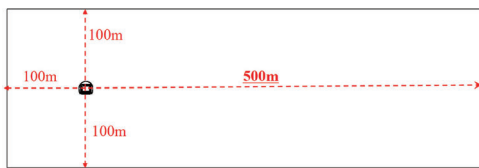
各部位に与える解析用パラメータは、これまでに取得した試験結果や文献値に基づき設定した。

解析結果は、特にナトリウムイオン、カルシウムイオン、pHの分布や経時変化に着目して整理した。解析結果の一例として、ケース①におけるpHのコンター図を図-18に示す。また、施設内に生じるひび割れの無有による影響を図-19に示す。

いずれの解析ケースにおいても、処分施設から溶出したイオン等が400年間で周辺地下水に影響を及ぼす範囲は100m程度であった。また、ひび割れの無有を始めとして、考慮した因子が解析結果に及ぼす影響はいずれも限定的であった。



(処分施設周辺のメッシュ分割)



(解析モデルの範囲)

図-17 化学に着目した検討の解析モデル

表-4 化学に着目した検討の解析ケース

ケース	動水勾配	ひび割れ	岩盤掘削影響領域	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%	○	—	—	降水系	—
④	7%	○	○	—	降水系	—
⑤	7%	○	—	○	降水系	—
⑥	7%	○	—	—	海水系	—
⑦	7%	○	—	—	降水系	○

注記) ○：考慮する、—：考慮しない

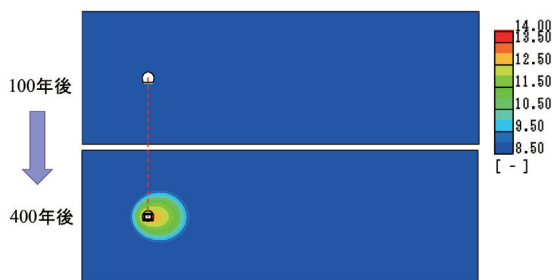


図-18 解析結果の一例 (ケース①、pH分布)

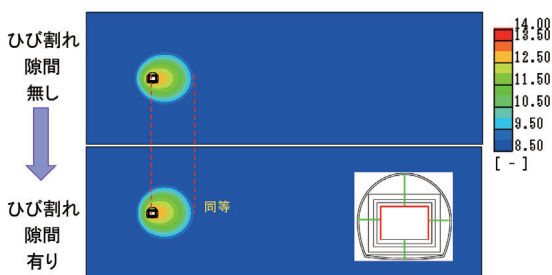


図-19 解析結果の一例 (ケース①と③の比較、pH分布)

(4) 光ファイバセンサー技術に係る技術開発

1) 分布型光ファイバセンサー

分布型光ファイバセンサーは、次の特長を有することから、放射性廃棄物処分施設のモニタリングに対して有望な計測技術になるものと期待されている。

- 電気式センサーのようなポイント計測ではなく、一本の光ファイバで多点の計測が可能な分布計測のため、ケーブル量を最小化でき、バリエーション低下への影響が最低限に抑えられる
- センサー部分に電気部品を含まず電源が不要であるため、耐ノイズ性や安全性が高い
- 電気式センサーよりも耐久性に優れ、長期適用に向いている

光ファイバセンサーのなかでも、光ファイバ内で生じる散乱光を利用したセンサーは分布型光ファイバセンサーと呼ばれる。図-20に示すように散乱光には、レイリー、ブリルアン、ラマン散乱の三種類がある。ラマン散乱はその強度が散乱光発生箇所の温度のみに依存することから、これまでも分布型温度センサーとして広く適用されてきた。ブリルアン散乱に基づく光ファイバセンサーは、ひずみや温度に依存して散乱光の周波数が変化することを利用し、光ファイバの全長に沿ったひずみ分布や温度分布を取得できる。ブリルアン散乱光を利用した光ファイバセンサーにはいくつか方法があるが、本研究では、PPP-BOTDA (Pre Pulsed Pump-Brillouin Optical Time Domain Analysis) 方式を用いた。レイリー散乱に基づく光ファイバセンサーは、散乱光の強度を用いて、光ファイバに生じた曲げなどによって変化する光の透過損失量を計測するために主に使われてきた。近年、レイリー散乱を用いた計測技術の開発が盛んで、光ファイバが有する屈折率の僅かなばらつきをもとにしたひずみや温度の計測が取り組まれている。これらは、光ファイバのもつ固有の屈折率パターンが、ひずみや温度によって変化することを利用したもので、昨今の光学素子の高解像度化や演算処理の高速化によって具現化されてき

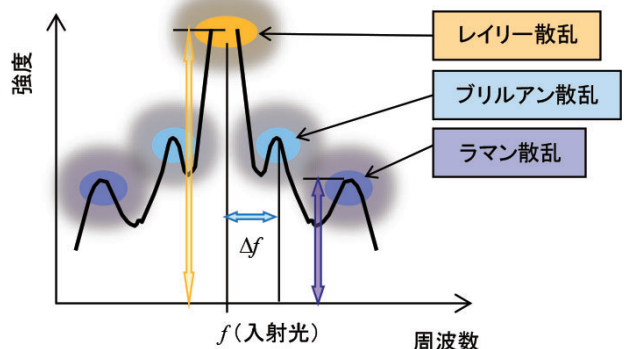


図-20 光ファイバ内の散乱光

た。他の散乱光と比べて圧倒的に強度が強いため、高空間分解能とともに高い精度を実現できる。本研究では、先に示した誘導ブリルアン散乱光とともに、レイリー散乱光を利用した光ファイバセンサーとして、TW-COTDR (Tunable Wavelength-Coherent Optical Time Domain Reflectometry) 方式を用いた。本研究で用いた分布型光ファイバセンサーの方式を表-5に示す。

表-5 本研究で用いた分布型光ファイバセンサーの方式

	PPP-BOTDA	TW-COTDR
散乱光	ブリルアン	レイリー
ファイバ構成	両端接続	片端接続
空間分解能	約50 mm ~	約50 mm ~
計測精度	± 数10 μひずみ	±1 μひずみ
	± 約1-2°C	± 約0.1-0.2°C

2) 室内実験

室内実験として、光ファイバセンサーの長期耐久性の確認と、圧力計測の実現可能性に係る基礎的な検討を実施した。

(a) 長期耐久性に係る検討

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)こととともに、光学的特性が確保されている(光が通る)必要がある。耐久性試験として、光ファイバのサンプルに劣化促進を与え、その前後で機械的・光学的な評価を行った。機械的な評価としては、引張試験で光ファイバサンプルの破断強度を調べた。また、光学的な評価としては、光ファイバサンプルに光を入射して透過損失量を調べた。光ファイバの劣化因子として、塩水・高pH・放射線を選択し、劣化水準を段階的に変化させて評価試験を行った。劣化因子はそれぞれ単独で与えた。塩水と高pHでの劣化促進は、60°C環境で溶液内にサンプルを浸漬することで行った。

選択した劣化因子を考慮し、光ファイバを構成するコア部やクラッド部が異なる三種類のサンプル(すべてシングルモード光ファイバ素線)で実験を行った(図-21)。また、使用する光ファイバのサンプルはすべて一次被覆(外径250μmの紫外線硬化型樹脂被覆)のみが施されたもの(素線と呼ばれる)であり、施工性や耐久性向上などを目的とした二次被覆は含まず、安全側での評価を試みた。

No.1: 汎用の光ファイバ

No.2: クラッド部の外側にカーボン被覆が施された耐水型

No.3: コア部とクラッド部の材料を最適化(コア部にフッ素をドーピング)した耐放射線型



図-21 光ファイバサンプル

劣化促進後の破断強度の結果を表-6～表-8にそれぞれ示す。汎用型では、塩水(海水の2倍の濃度)、高アルカリ溶液(pH13)浸漬の前後で破断強度の低下がみられたが、耐水型では認められないことを確認した。また、放射線照射(200Gy/h)の前後において、汎用型、耐放射線型ともに破断強度に有意な変化は認められなかった。

表-6 塩水浸漬後の破断強度(中央値)

単位 GPa	劣化水準					
	0	1	2	3	4	5
	初期値	10日	50日	100日	200日	400日
汎用型	4.664	4.522	4.036	4.267	3.938	3.751
耐水型	3.386	3.403	3.376	3.413	3.389	3.376

表-7 高アルカリ溶液浸漬後の破断強度(中央値)

単位 GPa	劣化水準					
	0	1	2	3	4	5
	初期値	1日	3日	5日	10日	50日
汎用型	4.903	4.268	4.153	破断	—	—
耐水型	3.389	3.407	—	—	3.399	データ無

表-8 放射線照射後の破断強度(中央値)

単位 GPa	劣化水準		
	0	1	2
	初期値	5h	100h
汎用型	4.903	4.934	4.986
耐放射線型	3.817	3.866	3.939

(b) 圧力計測に係る検討

圧力計測の実現性確認のための実験は、ベントナイトの通水試験装置(図-22)を用いて、ポーラスストーン上面に、ベントナイト供試体下部に接するように、以下に示す被覆の異なる二種類(どちらもシングルモードファイバ)の光ファイバ心線を並べて設置したうえで、通水によりベントナイトに膨潤圧を発生させて実施した。

- 太径: PVC被覆心線、外径900μm
- 細径: UV被覆心線、外径500μm

圧力検知の原理は次のとおりである。光ファイバの被覆面で受けた圧力は、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、二種類の光ファイバの計測結果の差は、光ファイバ長軸方向のひずみや温度ではなく、圧力によるものと言える。温度や変形などによるひずみは二種類の光ファイバに同等に加わるため、両者の差分をとることで圧力のみを選択的に計測できることになる（図-23）。

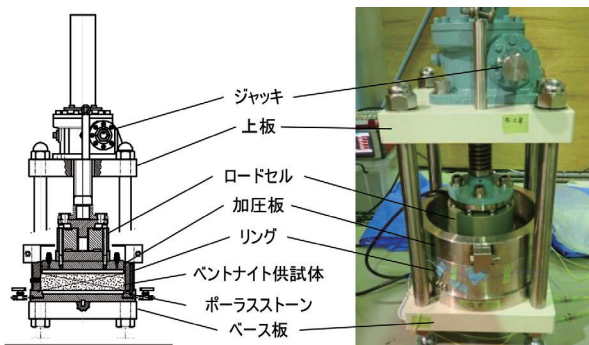


図-22 圧力計測試験装置

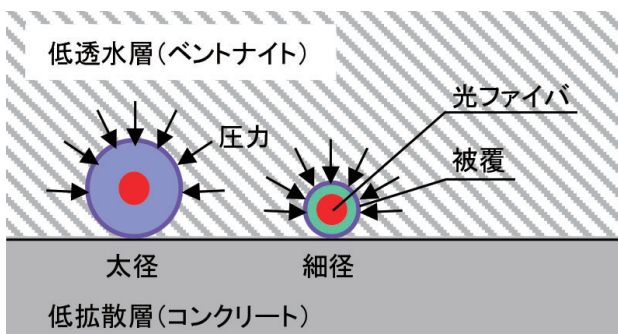


図-23 圧力計測のイメージ

実験の結果、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が確認されたことで、低透水層の膨潤圧発生に伴う圧力変化モニタリングの実現可能性が期待される結果となった。

安定した圧力計測のためには、光ファイバ被覆（材料や厚さなど）や設置方法などの改良が必要である。また、周囲からの圧力によるポアソン効果で長軸方向のひずみが発生することが圧力計測のメカニズムとして推察されるが、設置方法などの最適化のためにもその解明が必要である。ベントナイト膨潤圧への適用を想定したさらなる実験的考察が望まれる。

3) 原位置実験

原位置実験は、前述の地下空洞型処分施設性能確認試験、閉鎖技術確認試験で構築された実規模施設等を利用して、長期的な温度計測及びひずみ計測の検証実験と、人為的に発生させたひび割れを対象にした計測実験を実施した。

(a) 温度計測実験

分布型光ファイバセンサーの処分施設モニタリングにおける適用性を検証するために、約 1,100 m の坑道全長に沿って光ケーブルを敷設し、季節変化に伴う温度の変化を約二年間にわたって計測した。

温度用光ファイバケーブルは、外被と光ファイバ素線が一体化していない被覆を有する 4 本のシングルモードファイバ心線が、ケーブル被覆内に収納されているものである（図-24）。ケーブル外側の温度は内部光ファイバに伝わる一方で、ケーブル被覆に加わった変形が内部の光ファイバにひずみとして伝わらない構成となっている。

坑道沿いの温度用光ケーブルの配置を図-25 に示す。光ケーブルは、計測器を設置した計測小屋から坑道側壁のラックに架設し、実規模施設で折り返して坑口まで敷設した。坑口端部でケーブル内のうちの光ファイバ二本を繋げることで往復路を構成し、全長で約 2,750m の範囲で温度分布計測を行った。また、参照用データを得るための温度計を計 7 箇所に併設した。

実験の結果、ブリルアン方式で計測された温度が、季節変化に応じた雰囲気温度の変化を捉えていることが確認された。これまで光ファイバによる温度計測の検証は数百メートルまでの範囲に留まっており、今回、キロメートルを超える実規模レベルで、さらに、合計 13,000 点以上（全長 2,750m の光ケーブル全長に沿って 200mm 間隔で計測）で温度を長期計測した意義は大きい。

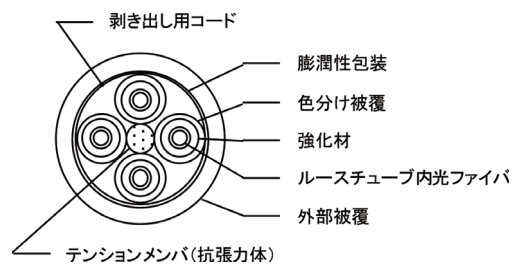


図-24 温度計測用光ファイバケーブルの断面図

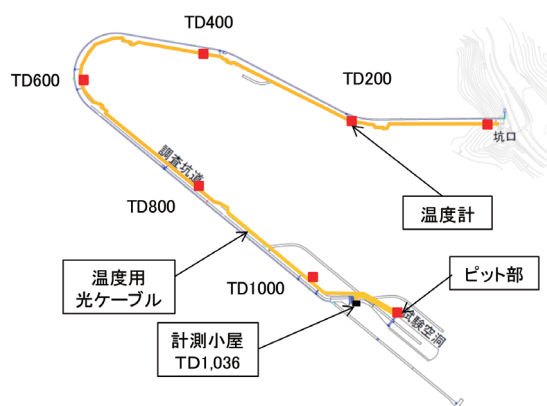


図-25 温度計測用光ファイバケーブルの配置

(b) ひび割れ計測実験

実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、実規模施設の上部低拡散層に人為的にひび割れを発生させ、それを光ファイバセンサーにより計測する実験を実施した。

計測対象となる上部低拡散層は無筋モルタル層で、その底面は上部コンクリートピットで拘束されている。ひずみ用光ケーブル（図-26）をエポキシ系接着剤で図-27のように300mm間隔で格子状に全長固定（直線部のみ）した。上部低拡散層へのひび割れ導入は、低拡散層表面から削孔した孔に油圧パッカーを挿入してそれを加圧することにより行った。また、参照用データを得るために、近傍にひずみゲージやパイ型ゲージを設置した。実験は表-9に示すように、ステップ1からステップ6まで段階的に加圧を上げながら、ひずみ分布計測（ブリルアン方式、レイリー方式とも）並びに目視観察を行った。

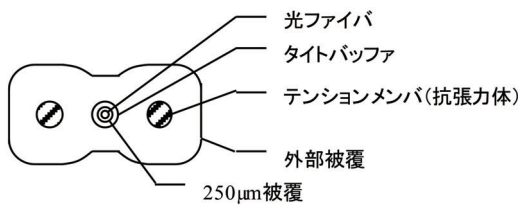


図-26 ひずみ計測用光ファイバケーブルの断面図

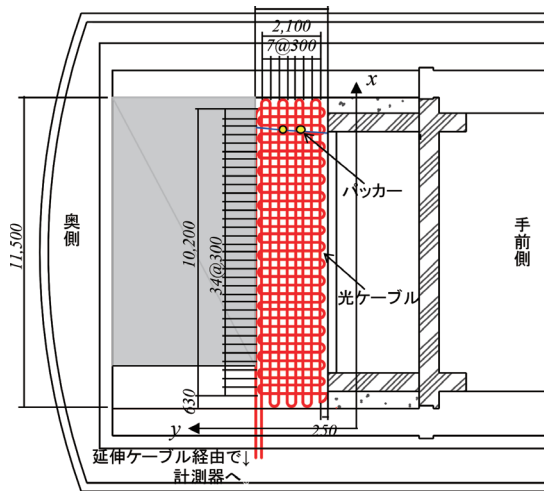


図-27 上部低拡散層への光ファイバケーブル設置状況

表-9 ひび割れ計測実験の载荷ステップ

ステップ	ひび割れ状況などの確認状況
1	目視ひび割れ無し、ひずみゲージ100μ以下
2	目視ひび割れ無し、ひずみゲージ最大500μ
3	0.10mm ひび割れ確認、ひずみゲージ最大1500μ
4	0.20mm ひび割れ確認、ひび割れが短軸方向全体に進展、ひずみゲージ断線
5	0.30mm ひび割れ確認
6	0.45mm ひび割れ確認

目視とクラックスケールによるひび割れマップをステップごとに図-28に示す。ステップ1、2では、目視確認可能なひび割れは見られず、ステップ3からひずみゲージの断線が散見され、ステップ4ですべてのひずみゲージが断線した。

結果の一例として、図-29に示す位置における光ファイバセンサーにより計測されたひずみを、近傍のひずみゲージの結果とともに図-30に示す。ブリルアン方式は±数10μひずみのばらつきがあるが、レイリー方式はばらつきが小さく、ひび割れ位置近傍に圧縮ひずみが生じている様子さえ確認できる（ステップ1）。空間分解能の違い（ひずみゲージのゲージ長90mm、光ファイバ50mm）や設置位置が若干異なることなどもあり、ひずみゲージと光ファイバの計測結果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の計測結果は総じて良く一致していた。また、ひび割れが発生し、ひずみゲージが破断して計測が不能になった後も、光ファイバは最終ステップまでひずみを計測することが可能であった。

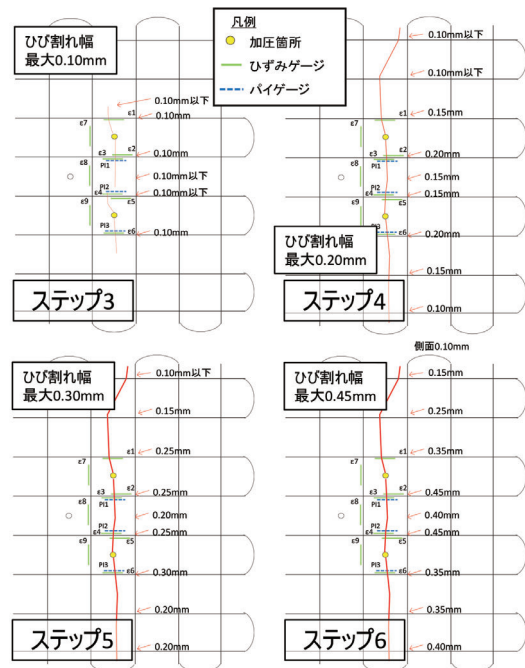


図-28 ひび割れの進展状況

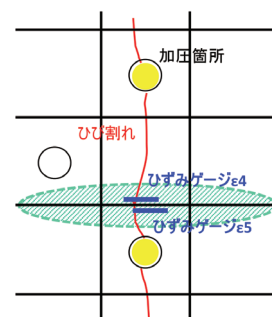


図-29 ひずみ計測位置図

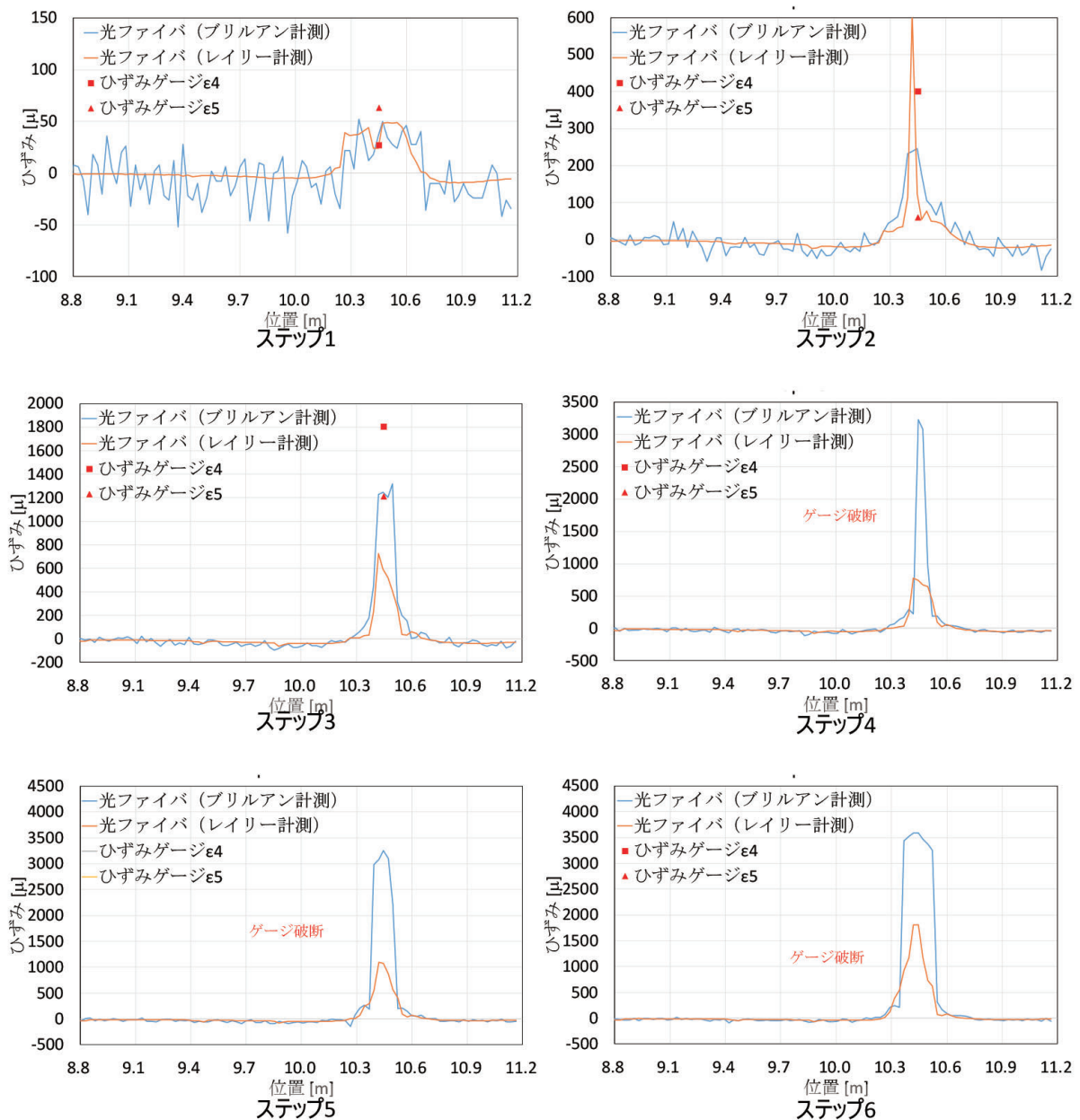


図-30 ひずみ分布計測結果

本技術開発を通じて、我が国における中深度処分施設のモニタリング項目候補と考えられる処分施設内の圧力分布、処分施設内の温度分布、低拡散層のひずみ、低拡散層のひび割れ発生状況のそれぞれへの光ファイバセンサーの適用性を、実験的に検証することができた。

5. 地下空洞型処分調査技術高度化開発

現在、中深度処分の規制基準は整備途上であるが、大断面の地下空洞の掘削可能性を評価するため、初期の設置深度として地表から200m程度までを想定し、岩盤の初期地圧を極力、場を乱すことなく効率的に測定できる基盤技術や、施設設置深度の地下水

流動等も考慮し、複数の技術オプションの中から最適な組合せを選択して施設設計する手法が求められる方向にある。

本研究は、大規模な坑道や地下空洞型処分施設などを建設する上で必要となる岩盤にかかる初期地圧の三次元的な分布を測定する技術の開発等、地下環境を評価する技術の高度化を行うと共に、最適な施設設計を支援するための技術の開発等、地下環境を考慮した設計技術の高度化を行うものである。検討フローを図-31に示す。

令和2年度から5ヵ年の予定で当該研究を開始したところであり、この研究成果については、成果が取りまとめ次第報告する予定である。

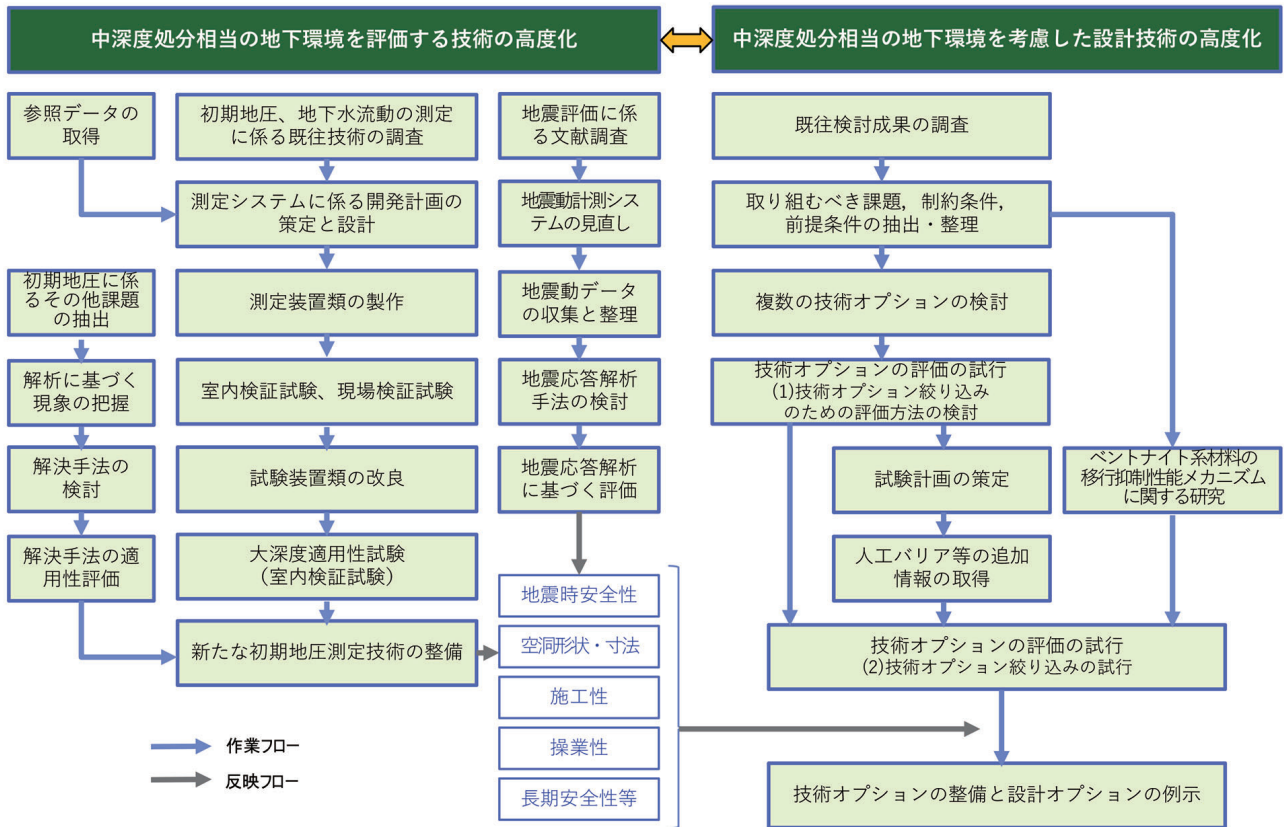


図-31 地下空洞型処分調査技術高度化開発の検討フロー

おわりに

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。こうした状況に鑑み、原環センターでは、ここに紹介したさまざまな研究開発を実施してきた。

地下空洞型処分施設性能確認試験、閉鎖技術確認試験では、地下環境において実規模レベルの地下空洞型処分施設の試験施設の試験施工を行った結果、採用した施工技術・施工方法が現実の施設の施工においても使用できること、また、構築された人工バリアは設定した初期性能を満足しており、地下環境で高い品質の人工バリアの構築が可能であることを示した。

地下空洞型処分施設機能確認試験では、数値解析による施設挙動の定量化、計測技術に関する調査と技術開発、モニタリング計画の具体化検討を実施した。その結果、光ファイバセンサーによる計測技術が中深度処分のモニタリングに非常に有効であるこ

とを示し、その技術と既存計測技術を組み合わせることで中深度処分のモニタリング計画の一例を提示した。

これらの成果が、中深度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、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する。

なお、本報告内容は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託による「平成19年度～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認試験）」、「平成25年度～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認試験）」、「平成27年度～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）」、「平成29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）」、「令和2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（地下空洞型処分調査技術高度化開発）」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 第2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会合(平成27年2月12日)資料2-1「原子力発電所等の廃止措置及び運転に伴い発生する放射性廃棄物の処分について」、電気事業連合会
- 2) 平成30年第22回原子力規制委員会(平成30年8月1日)資料3「中深度処分等に係る規制基準等の策定について－第二種廃棄物埋設に係る事業許可基準規則等の骨子案の事業者との意見交換の実施－」、原子力規制庁
- 3) 秋山吉弘：余裕深度処分施設の施工技術の確証－地下環境下、実規模大の地下空洞型処分施設の構築を例に－、原環センタートピックス NO.117、2016年3月
- 4) K.Pruess, C.Oldenburger, G.Moridis : TOUGH2 USER'S GUIDE, VERSION 2, 2012
- 5) 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

(本稿は、2021年3月31日に開催した「2020年度第3回原環センター講演会」の講演「原環センターにおける中深度処分に関する研究開発について」に基づき作成しました。)

編集発行

公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター
〒104-0044 東京都中央区明石町6番4号(ニチレイ明石町ビル12階)
TEL 03-6264-2111(代表) FAX 03-5550-9116
ホームページ <https://www.rwmc.or.jp/>