JAEA-Technology 2018-017 DOI:10.11484/jaea-technology-2018-017



瑞浪超深地層研究所における 坑道一部埋め戻し試験の計画策定

Planning for In-situ Backfilling Test to the Gallery in the Mizunami Underground Research Laboratory

戸栗 智仁 矢萩 良二 沖原 光信 竹内 伸光 黒崎 ひろみ 松井 裕哉

Satohito TOGURI, Ryoji YAHAGI, Mitsunobu OKIHARA, Nobumitsu TAKEUCHI Hiromi KUROSAKI and Hiroya MATSUI

> 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

Geoscientific Research Department Tono Geoscience Center Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development **March 2019**

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2019

JAEA-Technology 2018-017

瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の計画策定

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部

戸栗 智仁*、矢萩 良二*、沖原 光信*、竹内 伸光*、黒崎 ひろみ*、 松井 裕哉

(2018年12月25日 受理)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センターでは、「国立研究開発法人日本 原子力研究開発機構の中長期目標を達成するための計画」(平成 27 年 4 月 1 日~平成 34 年 3 月 31 日)に基づき、三つの必須の課題(地下坑道における工学的対策技術の開発、物質移動モデル 化技術の開発、坑道埋め戻し技術の開発)についての調査研究を進めている。

本報告書は、これらの必須の課題のうち、坑道埋め戻し技術の開発として計画していた瑞浪超 深地層研究所研究坑道を利用した坑道一部埋め戻し試験の全体計画等を策定した結果を述べたも のである。

本報告書は、清水建設株式会社が、日本原子力研究開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

東濃地科学センター:〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64 *:清水建設株式会社 JAEA-Technology 2018-017

Planning for In-situ Backfilling Test to the Gallery in the Mizunami Underground Research Laboratory

Satohito TOGURI*, Ryoji YAHAGI*, Mitsunobu OKIHARA*, Nobumitsu TAKEUCHI*, Hiromi KUROSAKI* and Hiroya MATSUI

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center, Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development, Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received December 25, 2018)

The Japan Atomic Energy Agency has been conducting research on three critical issues for development of: engineering techniques for underground construction, modelling techniques of mass transfer and tunnel backfilling methods at the Mizunami Underground Research Laboratory on the basis of Medium to Long-Term Plan of Japan Atomic Energy Agency.

This report describes the overall plan of in-situ test to backfill a part of Mizunami Underground Research Laboratory, which is planned for "development of tunnel backfilling method".

Keywords: Backfilling Method, Planning for In-situ Test, Crystalline Rock

This work was performed by Shimizu Corporation under contract with Japan Atomic Energy Agency.

^{*:} Shimizu Corporation

目 次

1. 概要
2. 坑道一部埋め戻し試験の概念の提示
2.1 諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験の調査とその結果の整理3
2.1.1 スウェーデン SKB 社「Prototype Repository 概要報告書」の調査結果3
2.1.2 フィンランド Posiva 社「BACEKO II 1/4 スケール試験トンネルにおける事前圧縮
埋め戻しブロック材の透過、前面開放および飽和試験」の調査結果
2.1.3 スイス NAGRA 社「Mont Terri URL におけるフルスケール定置試験(FE 試験)」の
調査結果
2.1.4 フランス Andra 社「処分坑道の埋め戻し実証試験場」の調査結果46
2.1.5 ベルギーEIG EURIDICE「PRACLAY 原位置試験の設計と設置」の調査結果51
2.2 我が国で実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念の提示
2.2.1 坑道埋め戻しへの要求性能の検討
2.2.2 我が国における埋め戻しに関する技術的成立性
2.2.3 瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の試験目的の設定82
2.2.4 坑道一部埋め戻し試験の概念
3 坊道
3.1 囲め戸し材の材料な上で施工に関する絵計
3.1 至6660000000000000000000000000000000000
3.2 工田の生の使的 3.9.1 十四め辟桧封条件の設定
3.2.1 工由の重換的本件の設定 113
3.5 生の戻し切の旭工区面員の検討 120 3.4 畑め豆し材のモニタリング後品質調査試験の検討 135
3.5 試驗室施工程
3.6 施丁数量
4. まとめ
4.1 坑道一部埋め戻し試験の概念提示に関するまとめ
4.2 坑道一部埋め戻し試験の概念に基づく試験計画策定に関するまとめ150
参考文献
付録

Content

1. Overview	1
2. Estabulishment of the concepts of the galley backfilling test in MIU, JAPAN	3
2.1 Bibliographic survey of tunnel/galleries backfilling tests conducted in other countries and their results	3
2.1.1 SKB, Sweden	3
2.1.2 Posiva, Finland	21
2.1.3 Nagra, Swiess	38
2.1.4 ANDRA, France	46
2.1.5 EIG EURIDICE, Belgium	51
2.2 Presentation of the concepts of the backfilling test to be carried out in JAPAN	62
2.2.1 Performance requirements of a backfilled material	62
2.2.2 Feasiblity of existing technology for backfilling of a future repository in Japan	67
2.2.3 Purpose of the backfilling test in MIU	82
2.2.4 Concept of the backfilling test in MIU	83
3. Planning of the gallery backfilling test in MIU	86
3.1 Specification of the backfilled material and the construction methods	90
3.2 Retaining wall	113
3.2.1 Requirements	113
3.2.2 Design	113
3.3 Quality control of the backfilled material during the construction	120
3.4 Quality survey of the backfilled material by the monitoring	135
3.5 Master schedule of the planned backfilling test in MIU	144
3.6 Construction quantity of the planned backfilling test in MIU	147
4. Summary	149
4.1 Summary on the concepts of the galley backfilling test in MIU, JAPAN	149
4.2 Summary on planning of the gallery backfilling test in MIU	150
References	152
Appendix	155

図目次

义	1.1	瑞浪超深地層研究所研究坑道レイアウトおよび検討対象候補地点2
义	2.1	Aspö ハードロック研究所(Aspö HRL)の Prototype Repository 位置4
义	2.2	Prototype Repository と処分孔のレイアウト4
义	2.3	Prototype Repository における埋め戻し材の締固め(トンネル頂部および斜面)…6
义	2.4	水圧計測結果の例 (Geokon)
义	2.5	埋め戻し材におけるセンサーの設置位置(坑道平行断面)
义	2.6	埋め戻し材におけるセンサーの設置位置(坑道垂直断面)10
义	2.7	埋め戻し材内における密度計測地点
义	2.8	RI 現場密度試験の概念
义	2.9	密度計測地点の例(48 番層)
义	2.10	ダイポール・ダイポール法の概念
义	2.11	電極の概要
义	2.12	電極の設置位置
义	2.13	電気抵抗解析結果の例
义	2.14	セクション2(緩衝材、埋め戻し材)に設置した動作しているセンサー数の推移
义	2.15	通信ケーブル用ボーリング孔(lead through holes)
义	2.16	通信ケーブル用ボーリング孔口
义	2.17	通信ケーブル用ボーリング孔の概要
义	2.18	通信ケーブルのプラグ貫通状況(赤枠は図 2.17 の通信用ボーリング孔)19
义	2.19	ドーム型コンクリートプラグとプレハブ擁壁(retaining wall)
义	2.20	1/4 スケール試験トンネル(埋め戻しブロックの組立)
义	2.21	組立ブロックとトンネル壁面間へのペレット吹き込み
义	2.22	埋め戻し表面を支持する鋼製格子
义	2.23	バーチ合板製のドア
义	2.24	埋め戻しブロック
义	2.25	ベントナイトペレット
义	2.26	基盤層の施工
义	2.27	埋め戻しブロックの組立状況
义	2.28	透過試験(Flow-Through Test)のブロック組立計画図
义	2.29	隙間へのベントナイトペレット吹き込み状況(左)と前面平滑処理後の埋め戻し
		材 (右)
义	2.30	土圧計 KDH-200KPA
义	2.31	キャリブレーションの様子
义	2.32	土圧計の設置位置
义	2.33	電気伝導度計の電極設置
义	2.34	含水比試料採取地点(図中の番号位置)

义	2.35	赤外線カメラ画像を用いた浸食経路の把握結果(左図)と含水比分布(右図) 34
义	2.36	超音波計による水位計測
义	2.37	浄化水槽
义	2.38	流入量および排水流量の計測結果(飽和試験 BCrSAT の例)36
义	2.39	埋め戻し材内のタキメーターの設置位置
义	2.40	FE 坑道の支保構成と計測器 ⁸⁾ ····································
义	2.41	高密度の「粒状ベントナイト混合物(granulated bentonite mixture : GBM) …39
义	2.42	プロトタイプ埋め戻し機械 (backfilling machine : BFM)40
义	2.43	3D 斜面走査の位置とバルクの乾燥密度計算結果40
义	2.44	FE 試験におけるセンサーの設置位置43
义	2.45	熱伝導計の計測結果44
义	2.46	酸素濃度の計測結果
义	2.47	坑道シーリングのブロック図46
义	2.48	Backfilling Demonstrator における埋め戻し材の締固め48
义	2.49	平板載荷試験(繰り返し法)の結果 12)
义	2.50	実証試験場の寸法(左図)および建設中の実証試験場の様子(右図)50
义	2.51	PRACLAY 原位置試験 3 つの試験構成
义	2.52	埋戻し材の施工
义	2.53	PRACLAY 横坑の飽和フィルタとベントフィルタ、空気排出のレイアウト53
义	2.54	水分(相対湿度)の計測結果
义	2.55	土圧の計測結果
义	2.56	水圧の計測結果(環状ベントナイト)57
义	2.57	水圧計の計測結果(Boom Clay)
义	2.58	変位計の計測結果(環状ベントナイト)58
义	2.59	水密シール設置場所の代替ライニング
义	2.60	環状ベントナイトリングのレイアウト60
义	2.61	感度解析結果に基づく空隙量、異なる初期乾燥密度と膨潤圧の関係61
义	2.62	人工バリア性能確認試験のイメージ
义	2.63	冠水坑道における再冠水試験の流れ
义	2.64	瑞浪超深地層研究所における深度 500m 冠水坑道ボーリングピットの埋め戻し
		試験
义	2.65	埋め戻し材の締固め試験結果
义	2.66	地下空洞型処分施設における上部埋め戻し材施工確認試験(吹付け工法)72
义	2.67	上部埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比
义	2.68	上部埋め戻し材の有効粘土密度と透水係数の関係
义	2.69	ピストン式油圧振動装置を装着したバケット
义	2.70	ボーリングピットの埋め戻し試験概念
义	2.71	水圧計測結果の例(ボーリングピットの埋め戻し試験)
义	2.72	土圧計測結果の例(ボーリングピットの埋め戻し試験)
义	2.73	水分計測結果の例(ボーリングピットの埋め戻し試験)

义	2.74	ボーリングピット埋め戻しにおける施工結果の計測例
义	2.75	緩衝材流出試験の概要(定流量注水時)
义	2.76	分光光度計 U-5100 および超音波分散機 UH-5080
义	2.77	吸光度分析によるベントナイト濃度計測の検量線の例81
义	2.78	吸光度分析によるベントナイト濃度計測の例81
义	2.79	ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係83
义	3.1	試験坑道坑口 0.00~1.60m 地点の地質記載シート
义	3.2	試験坑道坑口 1.60~3.20m 地点の地質記載シート
义	3.3	試験坑道坑口 3.20~4.90m 地点の地質記載シート88
义	3.4	試験坑道坑口 4.90~6.30m 地点の地質記載シート88
义	3.5	試験坑道坑口 6.30~8.10m 地点の地質記載シート
义	3.6	試験坑道坑口 8.10~10.10m 地点の地質記載シート
义	3.7	瑞浪超深地層研究所内換気立坑スカフォード 断面図
义	3.8	瑞浪超深地層研究所内 深度 500m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平
		面図
义	3.9	研究アクセス南坑道および設備横坑断面図
义	3.10	室内予備試験の埋め戻し材の構成材料
义	3.11	室内予備試験における締固め試験結果
义	3.12	幌延深地層研究センター人工バリア性能確認試験における室内試験結果94
义	3.13	ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係
义	3.14	埋め戻し材の吹き付けまでの流れ
义	3.15	吹付けノズル・アームの例
义	3.16	吹付機の例(1)
义	3.17	吹付機の例(2)
义	3.18	吹付機の例(3)
义	3.19	コンプレッサの例100
义	3.20	埋め戻し材の投入方法イメージ
义	3.21	施工機器配置例
义	3.22	施工ステップ
义	3.23	各ステップにおける作業内容
义	3.24	計測器設置時のケーブル配線方法
义	3.25	3D スキャナの例106
义	3.26	3D スキャナによる 3 次元計測手順の例106
义	3.27	3D スキャナによる 3 次元計測イメージ107
义	3.28	RI 計器の例
义	3.29	RI 密度試験(散乱型)による乾燥密度と砂置換法による乾燥密度109
义	3.30	散乱型 RI 計器の例(株式会社フィールドテック)110
义	3.31	RI 計器(散乱型)による密度計測手順の例110
义	3.32	各ステップにおける RI 密度試験実施位置
义	3.33	RI 密度試験の実施全位置

义	3.34	各ステップにおける試料採取の実施位置112
义	3.35	試料採取の実施全位置
义	3.36	候補地点の坑道形状113
义	3.37	荷重図
义	3.38	有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係
义	3.39	スルーフォーム
义	3.40	土留め壁計画図
义	3.41	吸出し防止材の配置図
义	3.42	試験坑道の排水流量、ベントナイト濃度計測の概要
义	3.43	水位計と採水装置および側溝の位置(埋め戻し材流出量計測)128
义	3.44	水圧計・土圧計・水分計の設置位置
义	3.45	埋め戻し材施工時におけるセンサー設置のイメージ133
义	3.46	オールコアボーリング位置および原位置透水試験の実施区間137
义	3.47	オールコアボーリングの実施概要
义	3.48	穴あきケーシングの概要
义	3.49	現場透水試験の試験区間の概要
义	3.50	原位置透水試験の実施手順
义	3.51	原位置透水試験の概要

表 目 次

表	2.1	坑道一部埋め戻し試験の実施機関、試験名および試験環境3
表	2.2	Prototype Repository Test で設置したセンサー一覧
表	2.3	本試験で使用したポリアミド製ケーブル
表	2.4	BACEKOIIにおける試験水準
表	2.5	埋め戻し材を定義する性能目標と設計要件
表	2.6	BACEKO II 試験で使用された材料の特性
表	2.7	埋め戻し材料の情報
表	2.8	埋め戻し材と処分坑道端部プラグの設計仕様
表	2.9	BACEKOIIで設置したセンサー一覧31
表	2.10	坑道プラグを定義する性能目標と設計要件
表	2.11	FE 試験で設置したセンサー一覧42
表	2.12	Backfilling Demonstrator で設置したセンサー一覧48
表	2.13	PRACLAY 原位置試験で設置したセンサー一覧
表	2.14	坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割62
表	2.15	埋め戻し材の設計
表	2.16	埋め戻し材・止水プラグの技術要件(基本的なバリア性能の確保)63
表	2.17	埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件63
表	2.18	埋め戻し材の施工方法
表	2.19	埋め戻し材の要求性能
表	2.20	ボーリングピット(材料 A)の埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比72
表	2.21	ボーリングピット(材料 B)の埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比72
表	2.22	瑞浪超深地層研究所ボーリングピットの埋め戻し試験で設置したセンサー一覧…78
表	2.23	分光光度計仕様
表	2.24	超音波分散器仕様
表	2.25	候補母岩の特徴および類型化
表	2.26	坑道一部埋め戻し試験の目的
表	2.27	国内外の坑道一部埋め戻し試験および参考となる試験の品質確認項目と計測法…84
表	2.28	坑道一部埋め戻し試験における品質確認項目および品質確認手法の概念85
表	3.1	室内予備試験に供した埋め戻し材の構成材料の一覧
表	3.2	室内予備試験の試験項目一覧
表	3.3	室内予備試験の基礎物性
表	3.4	締固め方法
表	3.5	波長分散型蛍光 X 線分析結果 ······95
表	3.6	埋め戻し材の必要数量
表	3.7	吹付機の仕様例
表	3.8	コンプレッサの仕様例
表	3.9	施工中の品質確認に係る計測

表 3.10	施工中の品質確認として実施する計測(計測機器、計測頻度、計測位置)105
表 3.11	散乱型・透過型 RI 計測器の比較
表 3.12	埋め戻し材の施工後品質確認項目、品質確認手法およびセンサー設置個数121
表 3.13	坑道一部埋め戻し試験で使用するセンサー
表 3.14	間隙水圧計・土圧計の計測法
表 3.15	間隙水圧計・土圧計の選定検討
表 3.16	水分計選定にあたっての候補
表 3.17	埋め戻し材のモニタリング後品質確認項目一覧
表 3.18	原位置透水試験の実施概要(1 区間あたり)
表 3.19	既往の埋め戻し材の吹付け施工試験の実績
表 3.20	吹付工1ステップにおけるサイクルタイムの推定
表 3.21	実施概略工程表(1年目)
表 3.22	実施概略工程表(2年目)
表 3.23	実施概略数量表(1年目)
表 3.24	実施概略数量表(2年目)

1. 概要

本検討は、日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構と称す)の超深地層研究所計画におけ る必須の課題のうち、瑞浪超深地層研究所の研究坑道を利用した坑道埋め戻し技術の開発に関わ る原位置試験の計画等の策定までの結果を記したものである。計画策定にあたっては、単に瑞浪 超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験のみならず、我が国で結晶質岩を対象とした埋め 戻しの技術基盤となるよう、以下の手順で実施した。

(1) 坑道一部埋め戻し試験の概念の提示

① 諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験の調査とその結果の整理

諸外国で実施されている既往の同種の研究事例を公開されている資料から調査し、その結果を 整理した。調査対象は、主に地層処分で考えられている竪置き方式による処分時に必要な、坑道 の埋め戻しを想定した試験に限定し、結果の整理では、以下の点を明示した。

- ・地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能
- ・坑道一部埋め戻し試験の目標、目的
- ・試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法

② 我が国で実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念の提示

我が国における結晶質岩を対象とした場合の、埋め戻しに関する技術的成立性の検討と課題の 抽出を目的として、坑道の一部埋め戻し試験の概念(目的達成のためのアプローチ方法、概略的 な試験内容)を提示した。

(2) (1)の結果に基づく試験計画の策定

(1)で提示した試験概念に基づき、図 1.1 に示す瑞浪超深地層研究所の深度 500m レベルの坑道 を活用した、施工および施工後の埋め戻し材の品質確認手法の構築も可能な具体的な試験計画(埋 め戻し材施工計画、計測計画)を策定した。計画は、以下の条件を満足することとした。

- ・現場作業を含む原位置試験の期間は、埋め戻し前から施工および施工後の調査試験とその解析 評価を含め、全体で2カ年とする。各年度の現場作業実施期間は、契約期間・試験結果の取り まとめ期間を考慮し、最長8カ月程度とする。
- ・図 1.1の試験候補地点における作業条件(坑内環境や地上から深度 500m までのアクセス、資 機材の搬入出など)を考慮して計画する。
- ・埋め戻し材としては、瑞浪において室内・原位置でのデータが取得されているベントナイトと 砂・砕石等を混合した材料とし、ベントナイト配合率は15%を基本とする。
- ・埋め戻し材の密度保持のために設置する土留め壁については、壁からの排水を前提とし深度相 当の水圧は設計荷重として考慮しないこととする。
- ・土留め壁からの排水の場所や方法については、埋め戻し箇所からのベントナイトの流出量の計 測が可能なように設定する。



図 1.1 瑞浪超深地層研究所研究坑道レイアウトおよび検討対象候補地点

2. 坑道一部埋め戻し試験の概念の提示

2.1 諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験の調査とその結果の整理

日本を含め、諸外国ではいくつかの研究開発機関により坑道の埋め戻しを対象とした試験が実施されている。主な実施機関と試験名、試験環境を表 2.1 に示す。

表 2.1 坑道一部埋め戻し試験の実施機関、試験名および試験環境

実施構	実施機関		試験名	<u>=+</u> #¢14	14.55	試験坑道		実施	時期	
国名	機関	略称	名称	武明地	地貝	坑道スケール	処分概念	坑道幅	開始	終了
スウェーデン	SKB	-	Prototype Repository Experiment	Äspö	結晶質岩	フルスケール	縦置き	4 m	2010	2011
フィンランド	Posiva	ΒΑСΕΚΟ ΙΙ	BACkfilling in EKOkem-project II	Äspö	模擬坑道	1/4スケール	縦置き	3 m	2010	2011
スイス	NAGRA	FE	Full-Scale Emplacement experiment	Mont Terri	堆積岩	フルスケール	横置き	3 m	2014	present
フランス	ANDRA	-	Backfilling Demonstrator	Bure	模擬坑道	小規模スケール	横置き	4 m	2004	-
ベルギー	SCK·CEN	-	PRACLAY experiment	HADES	粘土	小規模スケール	横置き	1.9 m	2008	present
日本		GREET	再冠水試験(ピット埋め戻し試験)	瑞浪	結晶質岩	冠水坑道床盤	縦置き	3×2×1m 4×3×1m	2012	present
	JAEA	-	緩衝材流出試験	幌延	堆積岩	バッファー	縦置き	-	2013	present

※ベルギーの埋め戻し試験実施機関は EIG EURIDICE (SCK・CENと ONDRAF/NIRAS との経済的利益グループ)である。

(1) 調查方針、調查目的

本調査では結晶質岩の竪置き処分概念の坑道を対象としているが、広く坑道を埋め戻す試験について調査を実施することとした。調査の目的は、以下の点を明示することである。

- ・地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能
- ・坑道一部埋め戻し試験の目標、目的
- ・試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

なお、調査した文献では、要求性能については、Performance targets、Design requirements、 requirement などの用語が用いられ、実施機関あるいは著者によってこれらの単語に対する意味、 使い分けが異なる。本調査では機能・性能に関する内容は「要求性能」、材料の種類や配合および 透水係数等に関する内容は「仕様」に分類して整理することとした。

(2) 調査対象

本調査では、国外で実施された行動を埋め戻す試験として、Prototype Repository 試験(SKB)、 BACEKOII 試験(Posiva)、FE 試験(NAGRA)、Backfilling Demonstrator 試験(Andra)、 PRACLAY 原位置試験(EIG EURIDICE)を対象とした。なお、本調査では、1.(2)で示したよう に、埋め戻し材の前面に設置する「土留め壁」は壁からの排水を前提としており、諸外国の処分 システムで設定されている「プラグ」や埋め戻し試験で設置された「壁」とは仕様が異なる。し かし、原位置埋め戻し試験における「プラグ」や埋め戻し材前面の「壁」を調査し、その目的や仕 様といった情報を得ることは、後述する「3. 坑道一部埋め戻し試験の概念に基づく試験計画の策 定」の有用な情報となる。

2.1.1 スウェーデン SKB 社「Prototype Repository 概要報告書」の調査結果¹⁾

スウェーデンの SKB 社は、Aspö ハードロック研究所 (Aspö HRL) の深度 450m の Prototype Repository (図 2.1、図 2.2) において、原位置埋め戻し試験を実施した。周辺岩盤の地質は結晶

質岩である。試験坑道は TBM 工法により掘削され、キャニスター、緩衝材、埋め戻し材、プラグ が設置された。約7年以上管理された後、2010年から土質材料のサンプリングやキャニスターの 回収を実施した。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)





(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.2 Prototype Repository と処分孔のレイアウト¹⁾

(1) 地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能

埋め戻し材の設計(design)として記載のある要求性能の内容を以下に列挙する。

・トンネルの安定性に貢献するトンネル充填を提供する

- ・キャニスター周りのベントナイトをその場所に保持する
- ・キャニスター周りの水の流れを防止する、あるいは制限する
- ・地下水品質の悪化の原因にならない
- ・長期間の化学的安定を存続する

(2) 坑道一部埋め戻し試験の目標、目的

Prototype Repository におけるプロジェクトの目的は、データと知識を取得することにより SKB 社と Posiva 社の KBS-3V 概念に対する安全な処分の論拠を支持すること、そして最終処分 のレファレンス設計の更新のための基礎資料を得ることであった。詳細を以下に示す。

- ・緩衝材と埋め戻し材の、設置時の密度および飽和度と、7年以上自然環境で濡らした材料のサンプルと分析により、緩衝材と埋め戻し材の最終的な密度と飽和のイメージを作ること
- ・回収の過程で、緩衝材と埋め戻し材、岩盤と緩衝材の境界面がどのようになっているか調査 すること
- ・緩衝材の地球化学、水-力学特性の変化を確認するために、緩衝材の材料特性をサンプルしテ ストすること
- ・水とガスのサンプルを取得し、生物学的、化学的活動を分析すること
- ・処分孔周りで起こる変化を観察するため、処分孔周りの岩盤を研究すること
- ・緩衝材と埋め戻し材の密度と水分含有量の測定結果でモデルとの比較をおこなうため、実験 における THM モデルを実行すること
- ・回収時のキャニスター位置の調査、緩衝材からの高い膨潤圧による変形の調査
- ・処分孔 No.5 に設置された銅電極の電位測定と、キャニスター表面に近接したベントナイトの サンプリングにより銅の腐食を測ること
- ・コンクリートと岩盤(コンタクトグラウチングが実施された)の境界面の状況を調べること
 はもちろんのこと、コンクリートドームに起こりうる損傷を研究すること
- ・コンクリート材料が、内部プラグ近傍の埋め戻し材中のベントナイトにどのように影響を及 ぼすか調査すること

埋め戻し材に対する調査では、処分孔やトンネル内の流量の測定、埋め戻し材サンプルの密度 と含水量の測定を実施したとの記述とともに、トンネル頂部に接した埋め戻し材の、パイピング と乾燥密度低下の関係について示されている。ただし、埋め戻し材設置時に直接密度が測定され なかったため、設置時に既に密度が低かった可能性がある点、解釈に注意が必要である。

(3) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

- ① 埋め戻し材の仕様
 - 文献 1)には、要件(requirement)という用語で、以下の埋め戻し材の仕様が示されている。
 - ・埋め戻し材料は、Milos soda 活性ベントナイト 30wt%と、破砕 TBM ズリ 70wt%の混合材
 - ・埋め戻し材の特性は、最大 10⁻⁹m/s の透水係数、最小 100kPa の膨潤圧、10MPa 以上の弾性 圧縮率
- ② 埋め戻し材の施工方法

Prototype Repository における図 2.2 の Section I, Section II 部分の埋め戻し試験 1)の施工方法 を以下に示す(図 2.3 参照)。

【処分孔の上部】

・水平層厚 10cm で、原位置転圧

・一般道路建設用振動機による締固め

【トンネル内】

・約35°の傾斜(材料の安息角より小さい傾斜)で、層厚20cmで転圧

・特殊に設計された振動締固め機械を使用

また、各測定機器は埋め戻し材のそれぞれの層に配置され、センサーおよびケーブルはベント ナイト粉末で覆った、としている。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.3 Prototype Repository における埋め戻し材の締固め(トンネル頂部および斜面)¹⁾

埋め戻し材の材料仕様と同様に、今日のスウェーデンにおける最終処分概念では埋め戻し材の 施工方法も変更されている。今日では、ブロック状にあらかじめ転圧された形状で定置される膨 潤粘土がレファレンスとなっている。これは、Prototype Repository における原位置締固め技術 では、最終処分概念の埋め戻し材のレファレンス仕様(乾燥密度 1.85 Mg/m³)を満足しなかった ことが一因と考えられている。

③ 埋め戻し材の計測項目・計測手法

Prototype Repository Test において実施された計測項目を下記に示す。

- ・水圧
- ・土圧
- ・水分(計測法は3種)
- ・温度
- ・密度

周辺の地質環境として、調査地の地下水は海水であり、また放射性廃棄物設置を想定して緩衝 材内のキャニスター付近にヒーターを設置したため高温となっていた。

坑道部分の埋め戻し材には 89 個のセンサーと、72 個の電極からなる 2 台の地中電位計が設置 された。Prototype Repository Test にて緩衝材と埋め戻し材に設置したセンサーの一覧を文献 1)-5)を参考に表 2.2 にまとめる。

表 2.2 Prototype Repository Test で設置したセンサー一覧¹⁾⁻⁵⁾

(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

1.0146	センサー名称		製品		仕	仕様		センサー個数		可要能推进		供去															
訂測対象	和名	英名	メーカー	製品名	センサー	温度計測	バッファー	バックフィル	計測の目的	的可则状况		偏考															
		Pore pressure sensor	Geokon	4500	Piezometer	0	12	14	泪測に伴る水口	Δ	故障が多 い	ケーブル : vbrating wire ロガー : Transducer															
水圧	水圧計		Kulite	-	Wheat stone bridge piezoresistive transducer	0	1	8	湿润に伴う水圧 の把握	◎油に伴う水圧 の把握	の把握	×	反応なし														
+ 5	누도란	Total pressure	Geokon	4800	Semiconductor	0	31	-	浸潤に伴う膨潤 圧の把握	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	浸潤に伴う膨潤	Δ	検量線が 異なる	多項式への変換により検 量線を補正できる。セン サーの3割は、5MPa以 下で生データに乱れ
工庄	上江訂	LAI Sensor		4850	(NATM向け)	0	-	8		Δ	検量線が 異なる																
			Kulite	-		0	3	31		×	反応なし																
	水分計(RH, Saturation humidity	水分計(RH, Relative humidi Saturation sensor humidity		Vaisala	-	Capaitance	0	39	-		-		ケーブル長10mまで														
水分			水分計(RH, Saturation 分 humidity	Relative humidity sensor	Rotronic	-	Capaitance	0	34	-	浸潤過程の把 振 埋め戻し材	-		ケーブル長に制約なし。 センサー、ケーブル外装 はチタンで溶接													
	suction)	Soil psychronic	Wescor	-	Borehole humidity	-	35	32	の材料管理	-																	
	水分計 (電気抵抗)	Geoelectronic monitoring grid	GRS	-	Dipole electroid	-	2列	2列		0	良好																
温度	温度計	Thermocouple	Pentronic	-	-	0	64	16	ヒーター設置に よる温度上昇程 度の把握	-																	
	試料採取	Sampling	-	-	Titanium cup	-	-	4	埋め戻し材の材	-																	
密度	RI密度測定	Nuclear gauge	InstroTek	MC-3	-	-	-	-	質管理	-																	

・: 不明もしくは情報なし

a) 水圧計および土圧計

水圧計および土圧計には、Geokon、Kulite の2社製品が採用された。図2.4に水圧計測結果の例を示す。センサー外装はチタン製で、センサー付近のケーブルはチタン製チューブで保護されており、かつセンサーとチューブはチタンで溶接されている。ケーブルの他の部分はポリアミド製チューブで保護されている²。



Prototype\Backfill \Section2 (20101120-20110405) Pore pressure – Geokon

b) 温度計

温度計には、Pentronic 社製品を使用した。市販品がキュプロニッケル製で耐圧性能があると 考えられたため、特別な対応はとられていない。

c) 水分計

水分(相対湿度)計には、Rotronic、Wescor、Vaisala の3 社製品が採用された。いずれも耐 圧5 MPa 性能をもつ。センサー=ロガー間のケーブル長については、Rotronic では自由に設定 できる一方、Vaisala では10m以内という制約があった。これら3 社製品への共通対応とし て、センサー付近のケーブルはチタン製チューブで保護し、さらにセンサー本体とチタン製チュ ーブはチタン製ケースに収めた。ケースとチューブはチタンで溶接され、センサーとチューブの 接続部分はOリングにより止水している。

セクション2の埋め戻し材においては、水圧計18地点、土圧計16地点、水分計32地点、温度計16地点に各センサーが設置された。図2.5と図2.6に水圧計・土圧計・水分計・温度計の 設置位置を示す⁴⁾。緩衝材上部の坑道軸に対して垂直となるE、F平面上の十字線上に各種セン サーが設置された。 JAEA-Technology 2018-017

- o pore water pressure + temp.
- \Box total pressure + temp.
- × temp.
- \triangle relative humidity (+ temp.)
- E, F measuring sections



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.5 埋め戻し材におけるセンサーの設置位置(坑道平行断面)³⁾



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.6 埋め戻し材におけるセンサーの設置位置(坑道垂直断面)⁴⁾

d) 密度計測

密度の計測として、ベントナイト混合物の2層毎に RI 現場密度試験と貫入試験の2種が実施 された。図 2.7 に埋め戻し材中における密度計測地点を示す。なお、図中のケーブルコリドー (Cable corridors)は、埋め戻し材中のケーブル配線箇所である。ケーブルコリドーは、密度計 測のための試料採取地点を避けるように配慮されている²⁰。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.7 埋め戻し材内における密度計測地点²⁾

RI 現場密度試験は、InstroTek 社製 MC-3 が採用された。RI 現場密度試験はγ線を土壌に照射 させ、土壌に吸収された放射量から密度を計測するもので、スライドハンマーと敷板を用いて鉛 直孔を掘削し、γ線光源棒を挿入して計測する。図 2.8 に RI 密度試験の概念を示す。計測時間は 1分とし、埋め戻し材内の平均密度は 1.75 Mg/m³の値が得られた。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.8 RI 現場密度試験の概念²⁾

貫入試験(試験詳細は不明)は、天端付近や壁面付近など RI 現場密度試験が困難な計測地点で 用いている。密度の他に水分も換算できるが(通常の貫入試験器ではなく、先端コーンに RI ユニ ットを付加した特殊な試験器の可能性あり)、あくまで簡易法であるため埋め戻し材の密度予測 に用いたとしている²⁾。

貫入試験では、貫入作業が十分におこなえなかったため検出限界以下の1.45 Mg/m³を示し、有 効な結果が得られなかったこと、埋め戻し坑道全体のマスボリュームと埋め戻し量から算出した 坑道内全体の埋め戻し材の湿潤密度は、1.63 Mg/m³であったと述べられている。

埋め戻し材を締固めた 48 番層の面上にて、密度のばらつきを検討するため X 字状に計測器を 設置して計測したが、特定方向での明瞭な傾向はみられなかったと記載されている。図 2.9 に一 例として、48 番層における密度計測地点を示す。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.9 密度計測地点の例(48 番層)²⁾

e) 水分(電気抵抗)

水分の計測のため、電気抵抗と試料採取による2種の計測が実施された。

電気抵抗は4本の電極を用いるダイポール・ダイポール法を使用した。給電極は定位置に固 定して受電極は移動しながらその間の電位差を計測し、オーム則により抵抗を算定する。図 2.10 にダイポール・ダイポール法の概念を示す ⁵⁾。



(Courtesy of GRS) 図 2.10 ダイポール・ダイポール法の概念⁵⁾

計測は1日間隔で実施し、解析は当初は四半期ごと、途中から1年ごとにおこなっていた。電極はGRS 社製品の一部改造品である。図 2.11 に電極の概要を示す。



電極はセクション2の締固め施工をおこなった35°斜面上において、2本の線上に0.5 mご とに配置された。図 2.12 に電極の設置位置を示す⁵。



図 2.12 電極の設置位置⁵⁾

図 2.13 に電気抵抗解析結果の例を示す 5。時間経過とともに埋め戻し材外縁部から中心部に かけて抵抗が除々に小さくなったことが確認された。坑道壁からの地下水の浸入に伴い、ベント ナイトが埋め戻し材外縁部から除々に浸潤したものと考えられている。



(Courtesy of GRS)

図 2.13 電気抵抗解析結果の例 5)

f) 水分計測(試料採取)

試料採取による直接的な水分計測は、密度を計測した全地点にてサンプリングをおこなっている。試料の湿潤密度を計測した後、105℃-24時間で乾燥させて蒸発水分量や乾燥密度が計測された。試料採取の結果、埋め戻し材内の平均含水率は13.7%の値が得られた。

g) 埋め戻し材開削後の性能確認試験

埋め戻し材の開削時には、緩衝材内に設置したものも含む 394 個のセンサー(岩盤内およびキ ャニスター内に設置した個体を除く)のうち、142 個が故障していた。とりわけ埋め戻し材内に 設置された湿度計(Vaisala、Rotronic)と乾湿計(Wescor)は海水が浸入したことで異常値を示 し、計測不能となった。

埋め戻し材の開削前にセンサー類をコア掘削により回収し、室内にてセンサーの性能確認試験 をおこなった³。性能確認試験の結果概要を下記に示す。正常の判断は、y=ax+bのうち傾き a=1の $\pm 2\%$ 、オフセット $b \le 0.2$ MPa、偏差 $\pm 2\%$ を示すものとした。

- ・Geokon(水圧計/土圧計):計測中は故障がみられたものの、回収後の性能確認試験では緩 衝材で使用されていた1台を除くすべてのセンサーで偏差±2%を示し、概ね良好な結果とな った。この1台は偏差 -4%を示し検量線に狂いが生じたが、値が取得できる限り検量線の補 正をおこなうことで計測自体は可能である、としている。
- ・Kumite(水圧計/土圧計):性能確認試験では反応が得られなかった。
- ・Vaisala、Rotronic、Wescor(水分計): 性能確認試験は実施されていない。
- ・電気抵抗(水分計):7年間の計測にわたり、2面の配列(Array)で構成される電極間の抵抗計測に欠測は生じず、正常な値を示した。ただし、ケーブル回収時に配列を引っ張ったため、それ以降はデータ取得不可となった。

回収直前までに計測できていたセンサーは、回収後にも概ね正常な値を示していたが、数台の センサーは損傷等により正常でなかった。埋め戻し材開削時は開削作業が最優先とされ、かつセ ンサー回収はコア掘削によりおこなったため、回収できたセンサー数は限られたものとなった。 また回収できても、センサー本体とケーブルの接続部分の破損や、センサー本体への浸水により、 一部のセンサーは性能確認試験が実施不可となった。図 2.14 に、セクション 2 に設置後動作し ているセンサー数の推移を示す 3。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.14 セクション 2 (緩衝材、埋め戻し材)に設置した動作しているセンサー数の推移³⁾

h) 通信ケーブル

【通信ケーブルの保護】

センサーとロガーを接続する通信ケーブルについては、緩衝材ではチタン製、埋め戻し材では ポリアミド製のチューブで保護された。さらに、いずれもケーブルのセンサー接続付近はチタン 製チューブで保護された。表 2.3 に、本試験(Prototype Repository)で使用したポリアミド製 ケーブルを示す²⁾。

计免制口	外径	内径
刈 承表而	(mm)	(mm)
Rotronic, Vaisala	10	6
Geokon, Kulite, Wescor	8	5
キャニスター温度計の光ケーブル	6	3

表 2.3 本試験で使用したポリアミド製ケーブル

チューブへのケーブル挿入の際には、挿入前にはチューブはコイル状に巻かず直線性を持たせること、細いケーブルは吸引ポンプを用いて挿入するなどの注意が払われた。

【通信ケーブル用ボーリング孔の設置】

本試験では、水圧・土圧・水分・温度等のデータを収録するデータロガーは埋め戻し坑道には 設置せず、試験坑道と平行に掘削された他坑道に設置された。データロガーを設置した坑道と埋 め戻し坑道の間にボーリング孔を掘削し、通信ケーブル(lead through)を通信ケーブル用ボー リング孔(lead through holes)に通すことで岩盤を貫通している。各通信ケーブルは耐水チュー ブにより保護される形態となっている。セクション1からは16本、セクション2からは11本の 通信ケーブル用ボーリング孔が掘削された。

図 2.15 に通信ケーブル用ボーリング孔のイメージを、図 2.16 に通信ケーブル用ボーリング孔 口の様子を示す。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.15 通信ケーブル用ボーリング孔 (lead through holes)²⁾



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.) 図 2.16 通信ケーブル用ボーリング孔口²⁾

本試験は、センサー・ケーブルに対して高塩水・高温度(90℃)条件下における 20 年間の耐水・耐圧性能が要求されるものであった。埋め戻し試験で用いられたケーブルやそれを保護する チューブは、センサーケース、鋼製パイプやフランジに接続できるよう接続部分に Swagelok 製 の継手やフェルールが用いられた。チューブやフランジ等の隙間には、止水のためセメント充填 によるプラギングや、ベントナイトによるシーリングがおこなわれた。通信ケーブルボーリング 孔内径は 200 mm、チューブ外径は 139.7 mm、チューブ厚さは 5 mm である。図 2.17 に通信ケ ーブル用ボーリング孔の概要を示す²⁾。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.17 通信ケーブル用ボーリング孔の概要²⁾

坑道内では、通信ケーブルは埋め戻し材の周縁部や底部を這うように設置された。図 2.18 に通信ケーブル (lead through)のプラグの貫通状況を示す。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.) 図 2.18 通信ケーブルのプラグ貫通状況(赤枠は図 2.17の通信用ボーリング孔)¹⁾

(4) プラグに関する記述

プラグは、止水性を期待したドーム型の現場打ち鉄筋コンクリートプラグが設置された。設計 では、ドーム型プラグが 4.5MPa の水圧を、埋め戻し材側に設置されたプレハブ擁壁(Retaining wall) が 0.1MPa の埋め戻し材の膨潤圧を受け持つよう設計された。また、力学応答のモニタリ ングのための計測器が設置されたほか、ガスと水のサンプリング用の導出管が 2本設置された(図 2.19)。コンクリートプラグは、収縮による支持岩盤との境界面の隙間を防ぐため、硬化後周辺温 度以下で冷却され、冷却後のコンクリート膨張により隙間を埋めた。また、支持岩盤には、微粒 子セメントとシリカゾルの配合材でポストグラウチングを実施している。



(Source: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.)

図 2.19 ドーム型コンクリートプラグとプレハブ擁壁(retaining wall)¹⁾

2.1.2 フィンランド Posiva 社「BACEKOII 1/4 スケール試験トンネルにおける事前圧縮埋め戻 しブロック材の透過、前面開放および飽和試験」の調査結果⁶⁾

フィンランドの Posiva 社は、2010 年より BACEKO II プロジェクト (BACEKO: Backfilling in EKOkem-project) を開始した。試験トンネルは 1/4 スケールで、トンネル内部には Posiva の 処分概念である埋め戻しブロックを設置し、ブロックが占めていない部分は乾燥ペレットを吹き 込んだ (図 2.20、図 2.21)。3 つの試験 (透過試験、前面開放試験、飽和試験)条件に応じて、 埋め戻し材前面には鋼製格子 (図 2.22) や、さらに前面にバーチ合板により作られた飽和ドア

(saturation door)(図 2.23)が設置された。また、埋め戻し材(ブロック)の材料や配合および密度、注入水の塩分濃度、ペレット材料の種類などがパラメータとして変更された(表 2.4)。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions) 図 2.20 1/4 スケール試験トンネル(埋め戻しブロックの組立)⁶⁾



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.21 組立ブロックとトンネル壁面間へのペレット吹き込み 6)



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.22 埋め戻し表面を支持する鋼製格子⁶⁾ (薄いプラスチックメッシュが取り付けられている。)



(Reproduced with permission of $\ensuremath{\operatorname{Posiva}}$ and $\ensuremath{\operatorname{Posiva}}$ Solusions)

図 2.23 バーチ合板製のドア⁶⁾ (飽和試験)

表 2.4 BACEKOIIにおける試験水準⁶⁾

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

Test	Abbreviation	Block	Pellet	Foundation layer
Friedland clay flow-through with 3.5 % salinity	FrFT 3.5	Friedland clay, 1880-1999 kg/m ³	Cebogel	-
Friedland clay flow-through with 7 % salinity	FrFT 7	Friedland clay, 1928-1999 kg/m ³	Cebogel	-
Friedland clay saturation	FrSAT	Friedland clay, 1880-1999 kg/m ³	Cebogel	40/60-mixture
Friedland clay open-front	FrOF1	Friedland clay, 1880-2040 kg/m ³	Cebogel	-
Friedland clay open-front	FrOF2	Friedland clay, 1928-1999 kg/m ³	Cebogel	-
40/60-mixture of bentonite and crushed rock flow- through	BCrFT	40/60-mixture	Cebogel	-
40/60-mixture of bentonite and crushed rock saturation	BCrSAT	40/60-mixture	Cebogel	40/60-mixture
40/60-mixture of bentonite and crushed rock open-front	BCrOF	40/60-mixture	Cebogel	-
Milos B clay flow-through	MiFT	IBECO-RWC-BF	IBECO- RWC-BF	-

なお、文献「BACEKOII 1/4 スケール試験トンネルにおける事前圧縮埋め戻しブロック材の 透過、前面開放および飽和試験」⁶⁾では、試験条件や試験結果の記載はあるものの、坑道埋め戻し への要求性能等に関する記載が見当たらない。そこで、文献「埋め戻し材生産指針 2012 処分坑 道の埋め戻し材とプラグの設計、生産と初期状態」⁷⁾を調査対象に加えた。

(1) 地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能

文献「埋め戻し材生産指針 2012」⁷⁾では、処分システムの技術的設計要件は、観察または測定 を通じた実装の段階で試験または検証することができる性能目標および目標特性の表現形式であ るとし、処分坑道の埋め戻し材の性能目標と設計要件を以下のように併記して示している(表 2.5)。

表 2.5 埋め戻し材を定義する性能目標と設計要件 7)

(Table 2-1. Performance targets and design requirements defined for the backfill.)

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solution	
性能目標	設計要件
(Performance targets)	(Design requirements)
定義(Definition)	
処分坑道の密封構造は、埋め戻し材およびプラグか	埋め戻し材の主成分は、天然の膨潤粘土からなる
らなる。 埋め戻し材は、処分坑道を埋め戻すために	ものとする。
使用される材料である。プラグは、処分坑道の入口	
に配置される。 埋め戻し材の目的は、緩衝材を適切	
な位置に保ち、緩衝材とキャニスターの良好かつ予	
測可能な条件を維持し、近接場における機械的、水	
理学的、地質学的条件を良好にし、キャニスターに	
漏れが発生した場合には放射性核種の移行を遅ら	
せることである。	
性能(Performance)	
特に明記されていない限り、埋め戻し材とプラグ	埋め戻し材は、様々な水理的もしくは機械的な攪
は、偶発的な偏差を除いて、予想される保管条件で、	乱後に初期設置および自己修復によって自己密封
数十万年にわたって以下に記載された性能目標を	するように設計されるべきである。
満たすことが望ましい。	
水理および輸送特性(Hydraulic and transport	properties)
埋め戻し材は、処分坑道に沿う大気の流れを制限す	埋め戻し材は、全ての埋め戻し坑道の全横断面に
ることが望ましい。	おける完全飽和後の透水係数が<1×10 ⁻¹⁰ m/s で設
	計されるべきである。
化学特性(Chemical properties)	
埋め戻し材とプラグの化学的組成は、緩衝材、キャ	埋め戻し材は、有害物質(有機物、酸化性化合
ニスターまたは基盤の性能を損なわないことが望	物、硫黄および窒素化合物)および微生物活性の
ましい。	含有量を制限するように選択されるべきである。
処分システム/力学特性のその他の要件	
(Support of other components of the disposal system / mechanical properties)	
埋め戻し材は緩衝材を所定の位置に保持すること	緩衝材を維持するための埋め戻し材の設計は、一
が望ましい。	方では、埋め戻し材の圧縮性および構造的剛性を
	考慮しなければならず、また一方で、緩衝材の膨
	潤圧および緩衝材と処分孔壁との摩擦を考慮しな
	ければならない。
埋め戻し材は、キャニスターが処分孔内で浮き上が	(同上)
るのを防止することが望ましい。	
埋め戻し材は、処分坑道の力学的安定性に寄与する	初期状態では、埋め戻し材は基盤の岩石との接触
ことが望ましい。	を持つべきである。

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

(2) 坑道一部埋め戻し試験の目標、目的

BACEKOII試験⁶⁾では9つの試験(表 2.4)が実施され、試験は大きく、透過試験(Flow-Through Test)、前面開放試験(Open-Front Test)、飽和試験(Saturation Test)の3つに分類されている。それぞれの試験で試験条件(材料仕様、埋め戻し材前面の壁の有無や種類、流入水の塩分濃度など)は異なるものの、試験目的に関する記述をまとめると、共通して以下が抽出できる。

- ・ベントナイトブロックの乾燥密度を視覚的に表現する。
- ・試験期間中、一定の間隔で圧力を測定する。
- ・エロージョンの様子を記録・確認する。
- ・埋め戻し材やペレットが崩れる様子を記録・確認する。
- ・水みちを記録・確認する。
・埋め戻し材の水理学的な基本特性(含水比、埋め戻し材内の水の貯留割合)を取得する。

・埋め戻し材内の飽和状況を記録する。

・埋め戻し材内の水の流出入量を記録・確認する。

(3) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

① 埋め戻し材の仕様

BACEKOII試験のでは9つの試験が実施され、それぞれの試験で埋め戻しブロックに使用した 材料が異なる。埋め戻しブロックに使用した材料の種類は以下の通りである。

・Friedland clay (Na 型ベントナイト)

・AC-200(Ca型ベントナイト)(砕石 60wt%混合ブロックに使用)

・Milos B clay (Ca 型ベントナイト・IBECO-RWC-BF)

また、埋め戻しブロックと坑道壁面との間に吹き込んだペレットの種類は以下のとおりである。

・Cebogel QSE (Na 型ベントナイト)

・Milos B clay (Ca 型ベントナイト・IBECO-RWC-BF)

各ベントナイトの材料特性を表 2.6 に、試験に用いた埋め戻し材料の情報と写真を、それぞれ 表 2.7、図 2.24、図 2.25 に示す。

表 2.6 BACEKO II 試験で使用された材料の特性⁶⁾

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

Material	Montmorillonite content [%]	CEC [meq/100g]	Liquid limit [%]	Free swelling capacity [ml/g]
Friedland clay	>75	50-60	132	8.7
AC-200	75-95	75.5		11.5
Milos B	58-70	69-74	208	9.1
Cebogel QSE	80	99.5	576	11.9

表 2.7 埋め戻し材料の情報⁶⁾

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

	Dry density [kg/m ³]	Compaction pressure [MPa]	Water content [%]	Reference
Friedland clay block	1980-2020	6-30	6.5-9.3	Koskinen 2011, Riikonen 2009
Mixture of 40 % bentonite and 60 % crushed rock	2050-2080	15-23	10.5-12.8	Koskinen 2011, Riikonen 2009
Milos B clay block	1595	47	18.5	Koskinen 2011
Cebogel pellets	2100	Extruded pellets	18.9	Dixon et al. 2008b
IBECO-RXC-BF pellets	1015	Extruded pellets	14.8	Johannesson et al. 2010
Foundation layer material	1750	In situ compacted	11	



Figure 3-3a. Friedland clay blocks.



Figure 3-3c. Milos B clay block.

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.24 埋め戻しブロック 6)

mixture of bentonite and crushed rock

block.







Cebogel QSE pellets.

Figure 3-1a. First consign- Figure 3-1b. The second con- Figure 3-1c. IBECOment of intact cylindrical signment of partially powder- RWC-BF pellets. ed Cebogel QSE pellets.

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.25 ベントナイトペレット⁶⁾

ここで、表 2.7 に、BACEKOII試験に用いた埋め戻しブロック(または基盤層)の製造試験 結果を示す。材料の仕様については、文献「埋め戻し材生産指針 2012」の記述を参照すると、 表 2.8 のとおりである(ただし、BACEKOII試験では表中のプラグは設置していない)。

表 2.8 埋め戻し材と処分坑道端部プラグの設計仕様 7)

(Table 2-3. Design specifications for backfill and deposition tunnel end plug.)

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

1. 性能
(PERFORMANCE)
1.1 埋め戻し材(BACKFILL)
モンモリロナイト含有量(Montmorillonite content):
フリードランド粘土ブロックのモンモリロナイト含有量は 30~38%とする
ブロック下の安定した基盤層(foundation layer)およびペレットはモンモリロナイト含有量が 75~
90%でなければならない。
乾燥密度(Dry density):
フリードランド粘土ブロックの乾燥密度は 1990~2070kg/m ³ の範囲内でなければならない。
ブロック下の安定した基盤層(foundation layer)の乾燥密度は 1,150~1,350kg/m ³ の範囲内でなけれ
ばならない。
ペレット充填物の乾燥密度は 900~1,100kg/m ³ の範囲内でなければならない。
形状(geometry):
埋め戻しブロックの寸法は 550×470×330mm とする。許容誤差は-1~+2mm でなければならない。
ブロック充填度(理論/公称断面から)は>80%でなければならない。
ブロックと理論坑道壁および天端の間の隙間は 100mm でなければならない。ペレット充填物は、ブロ
ックと岩石との間の残りの隙間を埋めるものとする。
ブロック下の安定した基盤(foundation layer)の厚さは、理論上の基盤岩の上、最大 150mm でなけれ
ばならない。掘削許容誤差+400mm を考慮すると、ブロック下の安定した基盤(foundation layer)の
最大厚さは 550mm である。
1.2 プラグ (PLUG)
プラグは、コンクリートドーム、ベントナイトシール、およびフィルタ層から構成されなければなら
ない。シーリング層およびフィルタ層の厚さは 750mm である。コンクリートドームの厚さは、ブラグ
の中心から測定して 1,500mm である。
コンクリートは設置後に水密でなければならない。コンクリート塊の透水係数は<1×10 ⁻¹¹ m/s でなけ
ればならない。
ベントナイトシールは、モンモリロナイト含有量 75-90%を有するベントナイトからなるものとする。
十分な密閉性を確保するために、乾燥密度は 1,400kg/m ⁹ 以上とする。密封層は、フラクの取り付け後 の h 席座はさ 1 に えい かた といわいしい から かい
の水俗性を催保するために、すめ胞和させなければならない。
ノイルタ層は、濾過のにのに取過な粒度分布を有する砂まには伴石からなるものでなけれはならない。
フラクは、少なくとも100年間、水理的な遮断能力を維持しなければならない。
2. 化子的性質(CHEMICAL PROPERTIES)
2.1 理例人 (BACKFILL)
理の戻し材中の有機物含有量は、1WL%木滴でなければならない。
理の戻し材中の総航東宮有量は、1Wt%木滴でなければならず、硫化物はせいせいこの半分である。
フラクに使用されるセメント質材料は、カルシワムオシリカの質量比か 1:6 未満でなけれはならない。
フラクの有機物含有量は1wt%未満でなければならない。
フラクの総硫寅宮有量は1Wt%末滴でなければならず、硫化物はせいせいこの半分である。
3. 処プンATA/ J字術性 のその他の要件 (SUDDODT OF OTHER COMPONENTS OF THE DISPOSAL SYSTEM/MECHANICAL
(SUPPORT OF OTHER COMPONENTS OF THE DISPOSAL SYSTEM/MECHANICAL
PROPERTIES) 21 プラガ
3.1 / / / プラガの力学的設定は、国田教业にた会ないなくしま フェいい。 のビカ共会に対応したはたいがかさか
ノフクの月子町独皮は、同囲靜小圧を音む少なくとも 1.5 MFG の圧力何里に対応しなけれはならな い
▼ 。 プラガの十亜材料は公け 乙苦砂またけ砂石でなければならない。
ノノノツ工女内が収力は、汨犬切よには牡汨しなりない。

② 埋め戻し材の施工方法

BACEKOII 試験における埋め戻し材の施工方法を、透過試験(Flow-Through Test)を例に以下に示す。

【基盤層(Foundation layer)施工:図 2.26】

原位置転圧(鋼製ローラーによる転圧、トンネルとの境界は鋼製ウェイトによる手動転圧)



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.26 基盤層の施工⁶⁾

【埋め戻しブロック組立:図2.27】

埋め戻しブロック(300mm×150mm×75mm)の人力組立(組立順序は図 2.28参照)



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.27 埋め戻しブロックの組立状況 6)



⁽Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.28 透過試験(Flow-Through Test)のブロック組立計画図⁶⁾ (BACEKOII試験⁶⁾に一部加筆)

【ベントナイトペレット吹き込み:図2.29】

- ・吹付けコンクリートに使われる吹付機(Meyco Piccola)を用いた、ベントナイトペレット(直径 6.5mm、長さ 5-20mm)の吹き込み
- ・前面の平滑処理(ブロック前面で余分なペレットを除去)



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.29 隙間へのベントナイトペレット吹き込み状況(左:図 2.21)と 前面平滑処理後の埋め戻し材(右)⁶⁾

③ 埋め戻し材の計測項目・計測手法

BACEKOII試験中は、下記の項目が計測された。

- ・土圧
- ・水分
- ・変位
- 流出水量(水位)
- ・埋め戻し材の流出率
- ・埋め戻し材の流出経路の把握(赤外線カメラ)

また、BACEKOII 試験前後では、下記の計測が計測された。

・含水比

表 2.9 に BACEKO II で設置したセンサーの一覧を示す⁶。実施した 3 種の試験(全 9 回実施) において、表 2.9 に示す全項目が計測された。土圧計と電気抵抗計は BACEKO II に先行して実 施した BACEKO 2008 試験で設置されたものを継続して使用し、設置位置の変更等など取り外し はおこなっていない。

表 2.9 BACEKOIIで設置したセンサーー覧⁶⁾

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

电上闭口 大王 在5	センサー名称		製品		仕様		センサー個数		計測の日的	TT #H 4LL 211		准去
aT 深门 X1 家	和名	英名	メーカー	製品名	センサー	温度計測	バッファー	バックフィル	計別の日的	нја	的认知	1冊-ち
土圧	土圧計	Total pressure sensor	al pressure sensor 東京測器	KDF-PA	Double diaphragm structure	-		6	湿潤に伴う膨潤 圧の把握	-		
		Soil pressure gauge		KDH-2000KPA	Bad-cell type	-		6		-		
水分	電気伝導度計	Electrical resistivity	ABEM	Terrameter SAS 4000	-	-		2列×32個	湿潤過程の把 握、埋め戻し材 の材質管理	0	良好	Weinner法で測 定
水位	水位計	Ultra sonic sensor	-	-	Ultra sonic	-		1	埋め戻し材から の排水量の把握	-		ベントナイト流 出量の計測
変位	タキメーター	Tachymeter	-	Trmble S6	-	-		5	膨潤に伴う埋め 戻し材の変位の 把握	0	良好	ブロックの膨潤 変位の計測
湿潤経路	赤外線カメラ	Infrared camera	-	-	-	-		1	埋め戻し材内に 形成された浸食 経路の把握	0	良好	浸食経路の把握
ベントナイト流 出量	試料採取	Sampling	-	-	-	-		0	埋め戻し材内か ら流出したペン トナイト量の把 握	-		タンク内沈殿物 の乾燥重量を計 測
含水比	試料採取	Water content sampling	-	-	-	-		0	埋め戻し材の材 質管理	-		

-: 不明もしくは情報なし

a) 土圧計

土圧の計測のため、東京測器社製の KDF-PA および KDH-200KPA の2 種の土圧計を使用し、 ともに模擬坑道の壁面に設置したままキャリブレーションがおこなわれた。KDF-PA (0~200 kPa) は 6 個設置された。データロガーは同社製 TDS-301 である。参考機器として Beamex 社製 Pressure Indicator により校正をおこない、また GE センシング&インスペクションテクノロジ ー社製 Druck DP1145 (デジタル式ブルドン管) により目視確認がおこなわれた。

KDH-200KPA(0~200 kPa)は6 個設置された。図 2.30、図 2.31 に KDH-200KPA とキャ リブレーションの様子を、図 2.32 に土圧計の設置位置を示す。土圧計は、坑道の片側壁面に設置 された。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)



図 2.30 土圧計 KDH-200KPA⁶⁾

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.31 キャリブレーションの様子 ⁶⁾



b) 水分計

埋め戻し材への浸潤過程の把握を目的として、4本の電極を用いて電位差を計測するウェンナ ー法により電気伝導度を計測し、埋め戻し材の水分量が算出された。電気伝導度の計測には、 ABEM Terrameter SAS 4000 が採用された。電気伝導度計はそれぞれ 32 個の電極をもつ 2 列 として坑道床盤を横断する方向に配置し、ケーブルと模擬坑道の内外へのケーブル貫通孔をシリ コン質止水材により止水された。図 2.33 に電気伝導度計の電極設置状況を示す。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.33 電気伝導度計の電極設置⁶⁾

c) 含水比

積上げたベントナイトブロックのブロック端部から試料採取をおこない、室内試験で含水比が 求められた。図 2.34 に試料採取地点を示す。



図 2.34 含水比試料採取地点(図中の番号位置)⁶⁾

d) 赤外線カメラを用いた浸食経路の把握

図 2.35 に赤外線カメラ画像を用いた浸食経路の把握結果と含水比分布の比較例を示す。赤外 線カメラ画像から残留水分あるいは浸食ベントナイト分の分布が把握でき、含水比の分布と相関 をもつ結果となった、としている。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.35 赤外線カメラ画像を用いた浸食経路の把握結果(左図)と含水比分布(右図)⁶⁾

e) 排水量と埋め戻し材流出量

模擬坑道から外部への、排水量と埋め戻し材の流出(エロージョン)量の計測がおこなわれた。 水トレイに超音波計(ultrasonic sensor)を設置し水面高さを経時計測するとともに、水トレイ 自体の重量を計測して流量を算出している。また、浄化水槽を用いて水と懸濁する埋め戻し材を 分離している。排水内の懸濁物は時間をかけて沈殿させてから上澄みを廃棄し、さらに残った上 澄みを蒸発させて沈殿物を取り出した。沈殿物の重量を計測することにより、ベントナイト系材 料からなるブロックの溶出量を算出している。

図 2.36 に超音波計による水位計測の様子を、図 2.37 に浄化水槽を示す。また、図 2.38 には

模擬坑道への流入量および排水量の結果を示す。飽和試験の場合、流入量は 0.1~0.2L/min で累計は約 2,200 L、排水量は 0~0.08 L/min で累計は約 1,000 L であった、としている。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.36 超音波計による水位計測 6)



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions) 図 2.37 净化水槽⁶⁾

JAEA-Technology 2018-017

BCrSAT flow-through



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.38 流入量および排水流量の計測結果(飽和試験 BCrSAT の例)⁶⁾

f) 変位計

埋め戻し材の膨潤による埋め戻しブロック内の特定地点の変位量計測のため、タキメーター(ト ータルステーション、Trimble S6)が用いられた。図 2.39 に埋め戻し材内のタキメーターの設置 位置を示す。



(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

図 2.39 埋め戻し材内のタキメーターの設置位置 6)

(4) プラグに関する記述

BACEKOII試験では、本節冒頭あるいは図 2.22 および図 2.23 に示したとおり、「プラグ」は 設置していない。試験ごとの埋め戻し材の前面の条件を以下に示す。 透過試験(Flow-Through Test)では、埋め戻し材の前面に薄いプラスチックメッシュを取り付けた鋼製格子(steel grid)が設置された。試験では、主に粘土の流出状況や流出量などが観察、 測定された。

前面開放試験(Open-Front Test)では、埋め戻し材の前面には何も設置されなかった。試験では、主に粘土の流出状況や流出量などが観察、測定された。

飽和試験(Saturation Test)では、埋め戻し材の前面に薄いプラスチックメッシュを取り付け た鋼製格子(steel grid)が設置され、さらに前面にはバーチ合板製の飽和ドア(saturation door) が設置された。また、飽和ドアとトンネル間の境界線は、シリコンシーラントで補強された。飽 和ドアの中心軸の上下には、2つの注水口が取り付けられ、模擬トンネル上部に位置する補助タ ンクに接続された。タンク内の水位は、飽和試験(Saturation Tests)の全期間で一定(200-300mm) となるように工夫された。試験では、主に粘土の乾燥密度や含水率(water content)などが観察、 測定された。

「埋め戻し材生産指針 2012」^つには、「プラグ」の性能目標や設計要件、設計仕様に関する記述 がある。設計仕様については表 2.8 に埋め戻し材の設計仕様とともに示したので、ここでは性能 目標と設計要件を表 2.10 に示す。

性能目標	設計要件
(Performance targets)	(Design requirements)
定義(Definition)	
処分坑道の閉鎖構造は、埋め戻し材およびプラグか	プラグは、水理学的な隔離能力が高く、長期間に
らなる。プラグは処分坑道の入口に配置される。	渡って大きな体積変化を起こさない材料で構成さ
	れなければならない。
性能(Performance)	
特に明記されていない限り、埋め戻し材とプラグ	—
は、偶発的な偏差を除いて、VAHA にリストされて	
いる要件で、数十万年にわたって以下に記載された	
性能目標を満たさなければならない。	
水理および輸送特性(Hydraulic and transport	properties)
プラグは操業中の処分坑道を水理学的に隔離しな	プラグは、少なくとも中央トンネルが開いている
ければならない。	限り水理的隔離能力を持つように設計しなければ
	ならない。
化学特性(Chemical properties)	
埋め戻し材とプラグの化学的組成は、緩衝材、キャ	プラグは、有害物質(有機物、酸化性化合物、硫
ニスターまたは基盤の性能を損なうものであって	黄および窒素化合物)および微生物活性の含有量
はならない。	を制限するように選択されなければならない。
処分システム/力学特性のその他の要件	
(Support of other components of the disposed	sal system / mechanical properties)
プラグは、操業中において、埋め戻し材を所定の位	プラグは、処分深度における埋め戻し材の膨潤圧
置に保持しなければならない。	と地下水の静水圧との合計に耐えるように設計さ
	れなければならない。
	プラグは、水理的隔離能力が失われた後において
	も、埋め戻し機能を維持するよう設計されなけれ
	ばならない。

(Performance targets and design requirements defined for the end plug.)

(Reproduced with permission of Posiva and Posiva Solusions)

2.1.3 スイス NAGRA 社「Mont Terri URL におけるフルスケール定置試験(FE 試験)」の調査結果⁸⁾

スイスの NAGRA 社は、Mont Terri 地下研究所(URL)の直径約3m、長さ50mの試験坑道 において、FE 試験(フルスケール定置試験)を実施した。周辺岩盤のOpalinus Clay は、過圧密 のシルト質粘土でスイスの高レベル、低レベルおよび中レベルの放射性廃棄物の地層処分のため の岩石として評価されている。FE 坑道はチゼルを装備した空圧ハンマーにより遠隔操作で掘削 し、輪郭の整形にロータリードラムカッターを用いた。トンネル支保工と各計測器の配置は図 2.40 に示すとおりである。なお、吹付けコンクリートは人工バリアシステムの長期安定性に有効 な低 pH 吹付けコンクリートを用いている。

中間シーリングセクション (interjacent sealing section : ISS) にはベントナイトブロックが設 置された。試験セクション (test section) にはキャニスターを模擬したヒーター、ヒーターを置 くベントナイトブロック台座、これらを埋め戻すための高密度の「粒状ベントナイト混合物 (granulated bentonite mixture : GBM)」(図 2.41) が設置された。また、埋め戻し端部には厚 さ 20cm のコンクリートセグメントが 5 列積み重ねられた垂直擁壁が設置され、蒸気やガスの移 動を低減するため、樹脂層で擁壁を密閉した。プラグセクションでは、TM9.8 (図 2.40 参照) に 設置した梁と、TM14.8 の擁壁との空間に自己充填コンクリート (self-compacting concrete) を 圧送してプラグが構築された。



(Courtesy of Nagra)

図 2.40 FE 坑道の支保構成と計測器⁸⁾



(Courtesy of Nagra)

図 2.41 高密度の「粒状ベントナイト混合物 (granulated bentonite mixture : GBM)」⁸⁾

FE 試験は、堆積岩の横置き処分概念の試験であり、埋め戻し材(Backfilling)の記述は横置き 処分概念の緩衝材(buffer)に該当する。したがって、本調査の目的である、地層処分において求 められている坑道埋め戻しへの要求性能や坑道一部埋め戻し試験の目標、目的を、FE 試験から導 くことはできないが、使用した材料や施工方法、計測等については参考情報になり得るため、こ こでは

・試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

に着目した調査結果を示す。なお、FE 試験の場合、Backfilling はヒーター(模擬キャニスター) 周辺の材料を指すため、緩衝材に該当するが、文献の記載(Backfilling)にしたがい、以降、埋 め戻し材と称す。

(1) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

① 埋め戻し材の仕様

粒状ベントナイト混合物 (GBM) の目標乾燥密度は約 1.49Mg/m³ (ただし事前に実施した模型 埋め戻し試験の目標乾燥密度は 1.45Mg/m³)。

この値(1.45Mg/m³)は、膨潤圧、ガスおよび水の透過性、多孔度および微生物活性の抑制などの、長期性能を保証するための特性のうち、おそらくもっとも厳しい密度要件である微生物活性の抑制から設定した、としている。

② 埋め戻し材の施工方法

埋め戻し機械には、水平処分坑道に粒状ベントナイト混合物(GBM)を可能な限り緊密かつ均 質に埋め戻すことが求められた。埋め戻しの事前試験の結果、埋め戻し材斜面の雪崩による分離 効果に対する対策が必要となった。このため、埋め戻し機械は、5本の水平スクリューコンベアを 装備し、埋め戻し材の傾斜(約35°)に対して千鳥格子状に配置された(図 2.42)。



(Courtesy of Nagra)

図 2.42 プロトタイプ埋め戻し機械 (backfilling machine : BFM)⁸⁾

FE 試験における施工品質の管理では、3D レーザスキャナ使用された。粒状ベントナイト混合物(GBM)の斜面を 3D レーザスキャナで走査し埋め戻し量を決定、また埋め戻し材の供給に使用される大型土のう袋(bigbag)の重量測定と合わせて、バルクの乾燥密度が計算された(図 2.43)。



図 2.43 3D 斜面走査の位置とバルクの乾燥密度計算結果⁸⁾

埋め戻し材の計測項目・計測手法

FE 試験は、Phase 1、2、3a、3bの4段階に分けて実施された。Phase 1 では FE 坑道に近接 する岩盤のボーリング調査、Phase 2 では FE 坑道周辺岩盤中の EDZ に関する計測、Phase 3a では坑道壁における計測、Phase 3b ではバックフィル内のヒーターの有無に関する計測である。 本調査では Phase 3b の計測について調査した結果を示す。 FE 試験における計測項目は以下の通りである。

- ・水圧
- ・土圧
- ・水分
- ・温度
- ·熱伝導度
- ·物理探查
- ・ガス構成

- ·金属腐食
- ・物性
- ・変位
- ·引張強度

埋め戻し材内にヒーター3 台、水分計 15 個、土圧計 24 個、温度計 105 個、光ファイバー変位 計 430 m、RH 計 99 個、熱伝導計 12 個、ガス検知器(水素 14 個、酸素 5 個)、変位計測 7 個 が設置された ⁹。埋戻し材内を含む FE 試験で設置したセンサーの一覧を、文献 9),10),11)を参考 に表 2.11 にまとめる。

設置したセンサーのほとんどは 10 分ごとの計測とし、専用のデータロガーである DAS (Data Acquisition System: データ取得システム) に収録された。ヒーターの加熱による 130~150℃の 高温と塩水に浸される条件下で 10~15 年の継続的な長期モニタリングが求められた⁹。バッファ ー内においては、FE 坑道専用掘削マシンとセンサー類が接触しないよう、センサーの多くはセン サーホルダーに取り付けた状態で設置された¹¹。

表 2.11 FE 試験で設置したセンサーー覧⁸⁾

(Courtesy of Nagra)

电上闭 5+分	センサ	一名称	製	品	仕	様	センサ	一個数		可動狀況		備孝						
計測対象	和名	英名	メーカー	製品名	センサー	温度計測	バッファー	バックフィル	計測の日的	→ → - →	调考							
水圧	水圧計	Pore pressure sensor	=	=	-	0	27		浸潤に伴う水圧 の把握	-								
土圧	土圧計	Total pressure sensor	-	-	-	0	24		浸潤に伴う膨潤 圧の把握	-								
			-	PICO	Gamma- gamma probe	-	7			-								
			Delta-T devices	PR2	Dielectoric probe	-	22			-								
水分	水分計	Humidity sensor	Decagon devices	EC-5	Continuous dielectoric recording	-	16		浸潤過程の把握 埋戻し材の材質 管理	-								
			-		RH	-	99			-								
			Campbe II scientific	TDR	-	-	6		-									
			-	FDR	-	-	0			-								
		Termocouple	-	-	-	0	18			-								
温度	温度計	Platinum resistance sensor	-	-	PT1000	0	87		ヒータ設置によ る温度上昇程度 の把握	-								
		Optic fiber	-	-	Optic fiber	0	0			-								
熱伝導度	熱伝導度計	Thermal conductivity sensor	-	-	-	-	15		埋め戻し材の材 質管理	0								
		Geophysical monitoring	TGS	EBS	Seismic transmitter	-	7		埋め戻し材の材 質管理	-								
物理探查	物理探查		-	-	Acoustic borehole sensor	-	1 source, 8 receiver, 2 arrays			-								
										-	-	Acoustic sensor array(Seismic)	-	2		具日生	-	
ガス構成	ガス検知器	Gas compsition	-	-	-	-	14 hydrogen, 5 oxigen		浸潤・膨潤に伴 うガス量・組成	-								
		Gas sampling	-	-	-	-	0		変化の把握	-		ļ						
金属腐食	金属腐食評価	Corrosion	-	-	-	-	5		浸潤に伴う金属 腐食程度の把握	-								
物性	コーン貫入試験	Cone penetration test	-	-	-	-	19		埋め戻し材の材 質管理	-								
変位	変位計	Extensometer	-	-	-	-	23		膨潤に伴う埋め 戻し材の変位の 把握	-								
引張強度	光ファイバー	Strain sensing	-	-	Optic fiber	-	23		埋め戻し材の材 質管理	-								

-: 不明もしくは情報なし



FE 試験におけるセンサー設置位置を図 2.44 に示す。

(Courtesy of Nagra)

図 2.44 FE 試験におけるセンサーの設置位置⁸⁾

以降、計測器の設置状況の概要を示す11)。

a) 土圧計

土圧計が坑道壁面に24個、ヒーター外部に2個設置された。

b) 水分計

湿度および含水比の計測のため、99 個の RH 計がバッファー内に設置された。RH (Relative humidity) とは相対湿度を意味し、特定の温度における空気中の飽和水蒸気量と比較して、どの 程度の水蒸気を含むか示す値である。一般に湿度と呼ばれるもので、単位は % RH である。

また、ヒーター2 台の周辺およびその中間点に、特注改造した TDR (Time Domain Reflectometry) が6 個設置された。

c) 温度計

空間的な温度分布を把握するため合計 238 個の温度計が設置され、このうち 105 個は熱電対や PT1000 などの温度専用計で、残りの 133 個は土圧計および RH 計に内蔵されているものである。 また、ヒーターには熱電対が内部に 6 個、外部に 18 個設置された。

さらに、光ファイバー温度計がヒーター周囲と、ベントナイトブロックの全長にわたる 300 m 長で設置された。光ファイバー計測は熱・腐食の耐性に優れること、メートルレンジの空間的把 握が可能であることから、このような大規模で高温下の試験実施には有効である、としているの。

d) 熱伝導度計

ヒーター2台の周辺およびその中間点に、10 cm 長のセンサー針を持つ熱伝導計が 15 個設置された。図 2.45 に熱伝導計の計測結果を示す。ベントナイト混合物における乾燥状態の初期計測値は 0.29±0.05 W/mK であり、ヒーター加熱開始から 12 ヵ月は微増を示した。



(Courtesy of Nagra)

図 2.45 熱伝導計の計測結果⁸⁾

e) 物理探查

FE 坑道の吹付けコンクリート天端より数 cm 下方に、2本の気密管(gas-tight pipe)が 1.7 m 間隔で設置された。この気密管内は外部からのアクセスが可能であり、ベントナイト物性分布を 対象とした密度計測や地中レーダーが実施された。2本の気密管の間のトモグラフィックレーダ ーや音響計測をおこない、より鮮明な走査画像が取得された。

1 個の振動源と 8 個の受信機をもつボアホール音響計測が気密管内に据え付けられ、準連続的 なモニタリングを可能とした。さらに、音響計アレイを床盤付近および天端に設置し、アレイ単 独またはアレイ間における音響波形の微小な変化を捉えた。

f) ガス検知器

水素濃度計が14個、酸素濃度計が5個、それぞれ異なる地点に設置された。これに加え、内径 1.5 mm で PEEK 樹脂製のガス採取管を設置し、分光分析によるモニタリングおよびサンプリン グがおこなわれた。埋め戻し材内のサンプリング地点における管先端は PVDF 樹脂製、採取口は ステンレスフィルターあるいはシルバーコーティングされたナイロンメッシュが採用された。シ ルバーコーティングは、バイオフィルムの生成を防ぐための対応としておこなった。計測の結果、 酸素濃度は埋め戻し後 2~3 カ月でほとんど 0%まで低下した。図 2.46 に酸素濃度の計測結果を 示す。

g) 変位計

ヒーター本体やその周辺のベントナイトブロック、岩盤の変位を把握するため、変位計が 23 個 設置された。また、120 m 長の光ファイバー変位計をベントナイトブロック内に設置し、引張変 位が計測された。



(Courtesy of Nagra)

図 2.46 酸素濃度の計測結果⁸⁾

h) 金属腐食モニタリング

将来の FE 坑道の開削に伴う金属の腐食進行を観察するため、センサーホルダーは炭素鋼、伸 銅、電解銅、コールドスプレー銅の4種が作成された。各種5個の腐食観察ホルダーは、ヒータ ーおよびガス濃度計・ガス採取管の採取口付近に設置された。

2.1.4 フランス Andra 社「処分坑道の埋め戻し実証試験場」の調査結果¹²⁾

フランスの Andra 社の埋め戻し実証試験場(Backfilling Demonstrator)は、高レベル/長寿 命廃棄物(HL-LL waste)地層処分場の実現可能性調査の枠組みで開発された技術的な実証試験 場の1つである。実証試験場プログラムは2004年に始まり、試験坑道内に標準的な埋め戻し材 と、支持用の埋め戻し材が設置され、長期的な追跡がされている。本実証試験は、Andraの2005 年の設計で定義されている、標準的な埋め戻し材(standard backfill)と支持用埋め戻し材 (supporting backfill)が関係している。標準的な埋め戻し材は、坑道支保(drift lining)劣化後 の岩石の変形を制限するために、地下処分場のほぼすべての坑道を埋めるためのものである。支 持用埋め戻し材は、シーリング構造に含まれる膨潤粘土の膨潤圧に抵抗するために、埋め戻し体 積のほんの一部にのみ関係している。



(Courtesy of ANDRA)

図 2.47 坑道シーリングのブロック図 12)

「処分坑道の埋め戻し実証試験場」における、埋め戻し材(backfill)はスイスの FE 試験と同 じく堆積岩の横置き処分概念の試験であるが、図 2.47 に示すとおり、コンクリートプラグを隔て て膨潤性粘土とは別の役割を持たせており、要求性能や埋め戻し試験の目標、目的、使用した材 料や施工方法、計測等については参考情報となりうる。

(1) 地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能

文献「処分坑道の埋め戻し実証試験場」¹²⁾において、坑道の埋め戻し材の要求性能に関する明確な記述は見られない。埋め戻し実証試験の目的(OBJECTIVES OF THE BACKFILL DEMONSTRATOR)に、「埋め戻し材の主な機能は、貯蔵条件下(drift lining の劣化後の負荷)の周囲の岩石内のあらゆる変形に対抗すること」との記述がある。

(2) 坑道一部埋め戻し試験の目標、目的

埋め戻し実証試験の目的を、①初期の目的(Initial objectives)、②具体的な項目における目的 の移転(Transposition of objectives in concrete terms)、③研究中の新しい目的(New objectives during the study)に分類して説明している。

① 初期の目的 (Initial objectives)

実証試験(Demonstrator)の第一の目的は、Meuse / Haute-Marne 地下研究所の研究室で見つかった Callovo-Oxfordian argillites(粘土質岩)から、適切な埋め戻し材を開発することが可能であることを示すことであった、としている。

第二の目的は、小型の地下坑道内(underground drift)にその埋め戻し材を設定することが可 能であることを証明することであった、としている。

第三の目的は、設定された埋め戻し材が坑道壁面(標準的な埋め戻し材)上の、掘削緩み領域 (EDZ)に対して要求された仕様を満たし、膨潤粘土コア(埋め戻し材が支持するもの)の膨潤 力に対して十分に挙動することを実証することであった、としている。

② 具体的な項目における目的の移転(Transposition of objectives in concrete terms)

Andra は、上記の初期の目的を定量化された形式で仕様に反映した、としている。仕様については、後述する「(3) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測」にて詳述するが、埋め戻された坑道壁面近傍のダメージに対する研究から、不飽和埋め戻し材のヤング率として20MPa を定めている。

③ 研究中の新しい目的 (New objectives during the study)

20MPaのヤング率目標に基づいて、圧縮された埋め戻し材の乾燥密度を選定した、としている。 具体的には、勾配の安定性を保証する一定の圧密量を維持するために、砂の量(摩擦を増加させ るため)を最大にする配合を定義し、95%SPO(Standard Proctor Optimum の略。様々な含水 比の資料を用いた一連の標準プロクター試験中に達成された最大の圧縮性。SPO には、含水比

(wspo)と乾燥密度(ρdspo)の組み合わせがある。)に対応する乾燥密度を実験室で測定した。 次に、標準的な埋め戻し材の手順と同じプロセスに従って、支持用埋め戻し材を定位置にセット した。最後にプレートローディング試験によって、埋め戻し材の挙動特性を確認した、としてい る。また、長期的には飽和して充填された埋め戻し材は、2 つの逆の傾向(膨潤/沈降)に供さ れ、膨潤鉱物の密度とその量に比例して、膨潤が埋め戻し材の残留挙動を支配する、としこのよ うな長期目的は当初の目的にはなかったとしている。そこで、実証試験プログラムは、埋め戻し 材定置の膨潤特性を評価するために、飽和段階を組み込む必要があった、としている。

(3) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

① 埋め戻し材の仕様

標準的な埋め戻し材には、Meuse / Haute-Marne 研究所のサイトから産出される、Callovo-Oxfordian 粘土質岩を用いている。初期の目標を定量化された以下の形式で仕様に反映した、としている。

・20MPaの変形係数(飽和前の小さな負荷条件でのヤング率)

・アーチ形天端レベルでの空隙を 3cm に制限する。

さらに、仕様には、混合物の少なくとも80%に相当する粘土質含有量を必要とする、としている。

また、Andra とその関連事業者は、20MPa のヤング率の目標に基づいて、埋め戻し材の乾燥密度の最小値を 1.7~1.8t/m³に設定。乾燥密度 1.7~1.8t/m³は、95%SPO 程度の圧縮エネルギーに

相当する、としている。

② 埋め戻し材の施工方法

Backfilling Demonstrator では、埋め戻し材の締固めを目的として、パワーショベルに油圧ハンマーを装着、その先端に金属板が取り付けられた機械が使用された(図 2.48)。油圧ハンマーは、非常に高い衝撃レベルと比較的低い速度(毎分数百ストローク)で使用された。この圧縮モードは、打撃の方が粘土材料に適合する、としている。



(Courtesy of ANDRA)

図 2.48 Backfilling Demonstrator における埋め戻し材の締固め¹²⁾

また、埋め戻し材の供給には、試験坑道のアーチ下の材料を層状にするため、特殊バケットが 開発された。従来のバケットでは、アーチ下のバケットの傾動が不可能であるため、プッシュ式 油圧ジャッキシステムが設計・製造された。締固め前の層厚は 40cm としている。

③ 埋め戻し材の計測項目・計測手法

Backfilling Demonstrator における計測項目を下記に示す。

- ・密度
- ・含水比
- ・空隙
- ・圧密

表 2.12 に Backfilling Demonstrator で設置したセンサーの一覧を示す¹²⁾。

表 2.12 Backfilling Demonstrator で設置したセンサーー覧¹²⁾

(Courtesy of ANDRA)

5上3川赤+在5	センサ	一名称	製品		仕様		センサー個数		計測の目的	可希尔尔		備来			
而口用的路	和名	和名 英名 メーカー		製品名	センサー 温度計測		バッファー	バックフィル	FL 20 07 日 19	可到7人/几		调考			
密度	試料採取	Density	-	-	-	-		\backslash	\setminus	\setminus	250	埋め戻し材の材 質管理	0	-	施工前
含水比	土圧計	Water content samplig	-	-	-	-		200	埋め戻し材の材 質管理	0	良好	施工前			
空隙	内視鏡	Endoscopic measurement	-	-	-	-		1	埋め戻し材の沈 降現象の把握	0	-				
圧密	平板載荷試験	Plate-bading test	=	-	-	=		4	埋め戻し材の材 質管理	0	-	施工前			

・: 不明もしくは情報なし

a) 室内試験

乾燥密度・含水比については、標準的な埋め戻し材を対象に 40 地点、支持用埋め戻し材を対象 に 218 地点で試料採取され、室内試験がおこなわれた。

標準的な埋め戻し材では、無次元化した乾燥密度は95~103% (SPO = 95%)、含水比は9~12% (SPO = 11%)を示した。支持用埋め戻し材では、無次元化した乾燥密度は95~102% (SPO = 95%)、含水比は13~16% (SPO = 16%)を示した。

b) 内視鏡観察

埋め戻し材は水分飽和に伴い膨潤していく一方、一部で沈降現象を伴うことがある。これによ り、試験坑道の天端直下と埋め戻し材の間に空隙が発生する可能性があるが、本試験ではこの空 隙幅を3cm以内に制限するものとしていた。このため、試験坑道天端に試験孔(reentrants)を 設置し、内視鏡による空隙観察をおこなった。初回計測では空隙幅は平均0.6mm、最大2mmを 示し、その2週間後には平均で0.5mm増加した程度であったため、3cm以内に収まっていたこ とが確認された(2週間後以降の計測はなし)。

c) 平板載荷試験

試験坑道天端の試験孔(reentrants)4箇所を通して、直径60 cm 平板による平板載荷試験が おこなわれた。0.4 MPa オーダーの軽度な繰り返し法(最大沈下量45 mm)と、沈下量が20~ 50 cm に及ぶ強打法の2種を実施した。繰り返し法の結果を図2.49 に示す。



(Courtesy of ANDRA)

図 2.49 平板載荷試験(繰り返し法)の結果¹²⁾ (G:変形係数、E:弾性係数)

変形係数の初期値は 3~17 MPa が得られ、標準的な埋め戻し材よりも支持用埋め戻し材の方 がほぼ3倍高い値を示した。弾性係数の初期値は28~81 MPa が得られ、ここでも支持用埋め戻 し材が平均31 MPa を示し高い値を示した。いずれも繰り返しの過程で、変形係数は減少、弾性 係数は増加する傾向を示し、最大荷重は標準的な埋め戻し材よりも支持用埋め戻し材の方が高い 値を示した。 以上の結果から、試験当初求めていた飽和前における変形係数 20 MPa 以上を満たすことが確認された。

(4) プラグに関する記述

Backfilling Demonstrator では、図 2.50 に示す実証試験坑道を閉鎖するために、鉄筋コンクリート製の 2 つの扉が使用された。両端の扉の厚さは、それぞれ 20cm と 30cm である。また、シーリング用のリングを装備し、ボルトで固定する構造となっている。

坑道閉鎖後に、埋め戻し材の飽和のために水が供給されたが、両方のドアから漏水が確認され 水の供給は一時的に停止された。本文献が公表された時点(2008年)では、漏水箇所で下塗り作 業をおこなっている旨が記されている。





(Courtesy of ANDRA)

図 2.50 実証試験場の寸法(左図)および建設中の実証試験場の様子(右図)¹²⁾

2.1.5 ベルギーEIG EURIDICE[※]「PRACLAY 原位置試験の設計と設置」の調査結果¹³⁾ (※SCK・CEN と ONDRAF/NIRAS との経済的利益グループ)

PRACLAY 原位置試験は、ベルギーの放射性廃棄物処分の母岩 Boom Clay を対象に、1970年 代に始まった研究の継続試験である。地下の研究施設(HADES Underground Research Facility) は 1980年に Boom Clay の深度 225m 地点において建設が開始された。Boom Clay は粘土層で、 低い透水係数を示し、良好な密閉性により放射性核種を保持し、この性能によって生物圏への移 行を遅らせる高い能力の形成特性 (plastic character)を有することが示された。これらの成果を もとに、PRACLAY プロジェクトは 1995年に開始された(図 2.51)¹³⁾。



(Figure 2.51 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.51 PRACLAY 原位置試験 3 つの試験構成¹³⁾ (横坑と交差部の試験、シール試験、ヒーター試験)

(1) 地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能

文献「PRACLAY 原位置試験の設計と設置」¹³⁾では、飽和した埋め戻し材の要件として以下の 要件が示されている。

- ・加熱システムによって生成された熱を Boom Clay に効率的に伝達するために、坑道ライニン グおよび埋め戻し材(1.5~1.7W/mK)の熱伝導率より高い熱伝導率を有する。
- ・坑道内の水圧を迅速に均質化し、ヒーター近傍の水圧の長手方向の勾配を最小にするために、
 十分に高い透水係数を有すること。数値シミュレーションでは、埋め戻し材に関して、10⁻⁶m/s
 程度の透水係数が得られ、十分に高いことを示している。
- ・分離を考慮し裏込め砂の上面と底面との間の密度差を制限するために、可能な限り粒度分布の幅が少ない方が良い。
- (2) 坑道一部埋め戻し試験の目標、目的
- ① ヒーター試験 (Heater Test)

ヒーター試験は、大規模な熱負荷が Boom Clay に及ぼす影響を調査するために設計されている。高レベル放射性廃棄物は、数百年または数千年の間に相当量の熱を放出する。この熱負荷は、 放射性廃棄物の地層処分概念におけるホスト・ロックとしての性能に影響を及ぼす可能性がある。

ヒーター試験は、熱放出廃棄物処分のための一般的な坑道または横坑を模擬することを意図し ている。将来の処分場について、実際の処分の時間スケール、空間スケール、境界条件を完全に 再現することが不可能であるため、ヒーター試験は、最終処分場設計とは区別して、熱的、水理 学的、力学的な境界条件が十分に制御された合理的かつ限定した組み合わせの下でおこなうこと としている。具体的には、横坑の加熱された部分に完全に飽和された埋め戻し砂を設置し、横坑 の加熱された部分と加熱されていない部分との交差部分に水密シールを設けることによって疑似 的な非排水状態を実現している。

② シール試験 (Seal Test)

ヒーター試験とともにシールの試験も行っている。シールは、接続坑道に対して垂直に配置された PRACLAY 横坑に収容されている(図 2.51)。

③ 横坑および接続坑道試験(Gallery and Crossing Test)

PRACLAY 横坑の建設と接続坑道との交差部の建設は、地下処分施設の建設可能性のさらなる 実証を目的とした横坑および接続坑道試験(Gallery and Crossing Test)を構成し、また、開始 空洞(starting chamber)を使用せずに2つの横坑間の交差を構築する可能性を検討することに 利用できる。

(3) 試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

① 埋め戻し材の仕様

埋め戻し材には、Mol M34 砂が選択された。砂の乾燥密度は 1.45Mg/m³であり、坑道の 100m³ を埋め戻さなければならないため、145t の Mol M34 砂を要した。砂は SIBELCO から購入した、 としている。

計算された砂の飽和熱伝導率および透水係数は、それぞれ 2.5W/mK および 8.5×10⁻⁴m/s(乾燥密度は 1.45Mg/m³)である。これらの値は、前述で説明した埋め戻し砂の要件と一致している。

さらに、Mol M34 砂は粒度分布が狭く(63~180µmの間で88%)、分離による裏込め砂の上下の密度差を制限する。分離は、坑道の上部に断熱水層をもたらし、坑道周りの温度プロファイルが均一でなくなる可能性がある。Mol M34 砂については、飽和時にこの材料の偏在を調べるためにいくつかの小規模な室内試験を実施した。結果、試験中に砂中の分離は観察されなかった。なお、坑道の上部に100mmの水の層をモデル化した数値シミュレーションによる結果でも、この仮定した水の層は、坑道周りの温度プロファイルに限定され、非常に局所的な影響しか与えないことを示した、としている。

埋め戻し材の施工方法

埋め戻し砂の設置は、PRACLAY 坑道の上にあるホースを通して乾燥状態の砂を吹き付けるこ とによって実施された。砂の乾式注入は、サンドブラスト用にも使用できる吹付け機で実施した。 砂の前面が水密シールに向かって進むにつれて、注入ホースが引き戻される。埋め戻し材が完全 に取り付けられた後、この埋め戻し材は後の段階で飽和する。比較的複雑な操作であるため、砂 水混合物の注入よりも乾式設置が好ましい。この設置技術は、ESDRED モックアップで EURIDICE によって既に適切に適用されていた。

噴射技術は、2009 年 10 月 13 日に地上で試験された(図 2.52)。3m³/hr の砂の流入が達成された。ケーブル上に注入された砂の摩耗性を調べた。視覚的にケーブルの損傷を検出することはできなかった。



(a)注入ホースからの砂噴射

(Figure 2.52 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.52 埋戻し材の施工 13)

後の埋め戻し材飽和のために、6つの飽和フィルタが坑道の最下部に配置された。フィルタは、 100mm×50mmの厚さ3mmの焼結鋼板からなる。それらは坑道の床に固定され、単一の供給管 によって個別に供給される。また、坑道の上部に5つのベントフィルタが設置され、埋め戻し材 が飽和している間に坑道の空気を排出することができる。飽和フィルタとベントフィルタのレイ アウトを図 2.53 に示す。



⁽Figure 2.53 printed with permission of the EIG EURIDICE)

35 バールを超える水圧を防ぐ安全システムが実装されており、これは飽和フィルタ S2 と S6 に接続された2 つのリリーフバルブで制御している。バルブは35 バールの圧力で開く。水道水 は、埋め戻し砂を飽和させるために使用される。最初は Boom Clay の脱水と脱ガスが考慮され た。しかしながら、水の正確な化学組成は重要ではないと判明し、水の脱水は PRACLAY 坑道周 辺の熱-水-応力連成条件にわずかな影響しか及ぼさなかった。一方、脱ガスは坑道の鋼製部品の 腐食に悪影響を及ぼす可能性が懸念される、と記されている。

3 埋め戻し材の計測項目・計測手法

ここでは、主にシール試験で実施された計測について述べる。PRACLAY 原位置試験において、 水密シールの環状ベントナイト周辺で実施された計測項目を下記に示す。

- ・水圧
- ・土圧
- ・温度
- ・水分
- ・変位
- · 熱伝導度
- ・歪み

環状ベントナイトには、水圧計 21 個、土圧計 26 個、温度計 35 個、変位計 2 個が設置された ¹³⁾。表 2.13 には、PRACLAY 原位置試験で設置したセンサーの一覧を示す。

図 2.53 PRACLAY 横坑の飽和フィルタとベントフィルタ、空気排出のレイアウト¹³⁾

表 2.13 PRACLAY 原位置試験で設置したセンサーー覧¹³⁾

(Table 2.13 printed with permission of the EIG EURIDICE)

三上 301 54 65	センサー名称		と見て		仕様		センサー個数		計測の日約	न्त की	(井平		
61 AUX1 8K	和名	英名	メーカー	製品名	センサー	温度計測	バッファー	バックフィル	前別の日の	可動权の		VH -*5	
水圧	水圧計	Piezometer	-	-	-	-	21	\setminus	湿潤に伴う水圧 の把握	0	良好	止水腔のベント	
土圧	土圧計	Total pressure	-	-	Flatjack	-	16		湿潤に伴う膨潤 圧の把握	0	良好	ナイト環に設置	
		3611301	Kulite	-	-	-	10			0	良好		
温度	温度計	Thermocouple	-	-	-	0	35		ヒーター設置に よる温度上昇程 度の把握			(止水試験では 計測なし)	
水分	水分計	Moisture sensor	-	-	-	-	13		湿潤過程の把握 埋め戻し材の材 質管理	0	良好		
変位	変位計	Extensometer	-	-	-	-	3		膨潤に伴う埋め 戻し材の変位の 把握		1個不具合	止水壁のベント ナイト環に設置	
熱伝導度	熱伝導度計	Thermo conductivity probe	Hukse flux	-	-	-	3		埋め戻し材の材 質管理	-	-		
歪み	歪みゲージ	Strain gauge	-	-	-	-	3		埋め戻し材の材 質管理			(止水試験では 計測なし)	

-: 不明もしくは情報なし

シール試験において、水密シールはステンレス鋼(中央部)と環状ベントナイト(周縁部)で 形成され、埋め戻し材には砂が充填された(図 2.54(d))。最初の約2ヵ月間は坑道周囲の Boom clay 粘土層からの自然注水をおこない、その後は水密シールに設置されたシリンダー先端のフィ ルタから人工注水をおこなった。注水により埋め戻し材の砂と水密シールの環状ベントナイトを 浸潤させ、周囲の粘土層や水密シールの環状ベントナイトが示す挙動を捉えた、としている。

a) 水分計

図 2.54(d)のベントナイト環の3セクション箇所において、水分(相対湿度:Relative humidity) が計測された。図 2.54(a)、(b)、(c)に各セクションの水分(相対湿度)の計測結果を示す。

水分は、センサー設置直後では55~68%を示したのに対し、自然注水により全センサーで水分 上昇が観測され概ね 60~85%に達した。Boom Clay との境界に近い外周部分では水分上昇速度 が大きい傾向があり、2個のセンサーで96%、100%に達した。また、設置の約2ヵ月後から人工 注水を開始したところ、水分は鋭敏に上昇し、底部に設置されたセンサーから順に水分飽和して いく傾向が見られた。坑道内への水の供給量やベントナイトの初期状態および吸水特性から計算 すると、合計約35Lの水がベントナイト吸水に使われたこととなる。

坑道周辺の Boom Clay の透水性は非常に小さいため、周辺地盤から試験坑道内への水分供給量 は大変小さく、水収支は坑道内に限定的なものであったと考えられる。最初の2ヵ月間で計測さ れた膨潤圧(土圧)が十分大きくない結果から考えても、ベントナイトの吸水量は限定的なもの であったことが読み取れる。

また、構造物やベントナイトの空隙に設置されていた水分計では、計測対象としていたベント ナイトブロック内ではなく空隙の水分を計測していた可能性がある、と記されている。





b) 土圧計

土圧計は、ベントナイトと Boom Clay の境界面、ベントナイト環 2 本の隙間、ベントナイトの 環内部、ベントナイトと鋼製フランジの境界面、ベントナイトと鋼製シリンダーの境界面の計 5 箇所に設置された。図 2.55 に各所における土圧の計測結果を示す。

人工注水から数日内に2個の例外を除くセンサーで上昇が認められ、空隙が水分で充填された と考えられた。土圧は、坑道軸の垂直方向に対しては1.5~3.0 MPa、ベントナイト環内部におい ては1.0~3.0 MPa、坑道軸の平行方向に対しては2.6~4.1 MPaを示した。坑道中軸方向では空 隙が無かったため、他と比べ大きめの値となったと考えられる、としている。



(Figure 2.55 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.55 土圧の計測結果

c) 水圧計

水圧計はベントナイトと Boom Clay の境界面、環状ベントナイト2本の隙間、環状ベントナイトの内部、ベントナイトと鋼製シリンダーの境界面の計4箇所に設置された。図 2.56 に各所における水圧の計測結果を示す。なお、水圧計は絶対圧計を用いた。

ベントナイトと Boom Clay の境界面、およびベントナイトと鋼製シリンダーの境界面において、人工注水の開始とともに水圧が急上昇し、その後大気圧以下までの緩慢な低下を示した。これはベントナイトの吸水による負圧によるものと考えられる、としている。



図 2.56 水圧の計測結果 (環状ベントナイト)

環状ベントナイトから 0.5~0.9 m 離れた Boom Clay 中にも、水圧計が 3 個設置された。図 2.57 に Boom Clay 中の水圧の計測結果を示す。

止水壁の設置の際、Boom Clay 中の水圧は木枠取り外しの影響により急激に低下した。また人 工注水に伴い水圧は上昇し、開始から約 10 ヵ月後にはほぼ初期水圧まで回復した。水圧計設置地 点にて透水試験を実施したところ、透水係数は 10⁻¹² m/s 程度であった、としている。



(Figure 2.57 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.57 水圧計の計測結果 (Boom Clay)

d) 変位計

環状ベントナイト内に、2個の変位計が坑道中軸から放射状となる方向で設置された。図 2.58 に環状ベントナイトの変位計の計測結果、ならびに変位計の設置位置を示す。

底部に設置されたセンサーから変位が早く認められ、人工注水開始から1年後にはそれぞれベントナイトの膨潤方向に7.8mm、9.6mmの変位が観測された、としている。



(Figure 2.58 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.58 変位計の計測結果 (環状ベントナイト)

(4) プラグに関する記述

PRACLAY 原位置試験では、水密シールを設置している。水密シールは、接続坑道との交差点から 10m の距離にある PRACLAY 坑道に配置されている。坑道の公称内径は 1,900 mm である。 坑道建設中のコンクリートくさびブロックの配置に対する公差のために、内径は変化する。関連 する断面の最小直径(すなわち、最初の 10m)は約 1,870 mm である。

一方、水密シールの設置場所には、坑道には永久的なライニング部分である4つのスチールリングからなる別のライニングがあった(図 2.59(a))。これらはリングの座屈を避けるために、各々の間が鋼板で接続されていた。一時的な部品として、各スチールリングの両側に溶接された小さなスチールエッジの後ろに置かれた木材が構成されていた。別のライニングは、「ピンホール接続」によって互いに接続された9つのセグメントで構成されていた(図 2.59(b))。水密シールの設置前に、代替ライニングからの木材を除去して、ベントナイト環の設置を可能にするよう、Boom Clay の側壁を作製した。



(a) The lining consisted of a permanent part (4 steel rings) and a temporary part (wood placed between the steel rings):

(b) The segments of the alternative lining were connected by a pin-hole connection in the steel plates between the rings.

(Figure 2.59 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.59 水密シール設置場所の代替ライニング

ベントナイトの半径方向の膨潤圧は、水密シール周囲の Boom Clay への良好な密着を確実にす るために十分に高くなければならないが、一方で、Boom Clay 自体の破砕を避けるため制限され なければならない。設計では、水密シールの鋼構造は、ベントナイトに起因する半径方向の圧力 5MPa にさらされると評価されたが、この値は円形の空洞形状に均一な圧力分布が得られるとい う仮定に基づいている。楕円形の圧力分布の場合、半径方向の圧力は4~6MPa の間で変化する。 この設計ではさらに、水密シールの上流側で最大間隙水圧 3.5MPa および最高温度 90℃を想定し ている。下流側では、大気圧と気温 16℃が一般的な条件である。

また、水密シールであるベントナイト環(図 2.60)について、以下の要件を満たすよう示している。

- ・試験中に水密シールの周囲に負の有効応力が発生しないようにするため、最小膨潤圧は 2.5MPaである(ヒーター試験中の水密シール周囲のBoom Clay内の最大間隙水圧は2.5MPa と推定される)。
- Boom Clay の破損や水密シールのステンレス鋼構造の完全性を損なうことがないよう、最大 膨潤圧は6 MPa である。

・飽和状態での透水係数は、可能な限り低いものとする(少なくとも掘削等の影響を受けていない Boom Clay の透水係数(≈10⁻¹² m/s)よりも低く、可能であればこれより1桁低い位)。
 放射性廃棄物の地層処分では、FoCa 粘土、Febex S-2 および MX80 のような異なる種類のベントナイトが研究されている。ベントナイトの種類の選択については、厳密な基準は定められていない。なお、以下の議論に基づいて、MX80 ベントナイトを使用することが決定された、としている。

- ・正確な乾燥密度に圧縮された MX80 ベントナイトは、十分に高い膨潤および保水能力および 十分に低い透水係数を示す。
- ・MX80 ベントナイトはナトリウムを主成分とするベントナイトであるため、水の化学的性質 もナトリウム支配(14mM NaHCO₃)である Boom Clay と互換性がある。
- ・MX80 ベントナイトと Boom Clay との相互作用はまだ研究されておらず、このタイプのベン

トナイトに関する経験と情報は、地下の研究施設(Mont Terri、Bure、ASPO、AECL の URL) や、 実験室(CEA、CIEMAT、CERMES、および SKB による)における他の結果から得る ものとする。



(Figure 2.60 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.60 環状ベントナイトリングのレイアウト

ベントナイトについて決定されるべき最も重要なパラメータは、その初期乾燥密度である。この パラメータは、膨潤圧力および最終的な飽和透水係数を決定する。求めたい初期乾燥密度は、技 術的な空隙および Boom Clay との相互作用を考慮して、感度解析によって決定した。1.8t/m³の 初期乾燥密度を選択し、最終的な膨潤圧を 4MPa (図 2.61) とした。飽和状態での透水係数は 10-¹³m/s であり、これは Boom Clay の原位置透水係数より 1 桁小さい。


(Figure 2.61 printed with permission of the EIG EURIDICE)

図 2.61 感度解析結果に基づく空隙量、異なる初期乾燥密度と膨潤圧の関係

このほか、水密シールに用いられたベントナイトは、試験によりベントナイト-Boom Clay 境界 面の耐水圧性や、飽和中のベントナイトの崩壊の危険性などが確かめられた。また、飽和中のベ ントナイトの挙動を監視するために、計測器がベントナイトに配置された。

- ・16の全圧セル (flatjack)
- ・10の全圧セル (Kulite)
- ・35 の熱電対
- ・21 個のピエゾメーター(このうち 13 個に水分センサーが埋め込まれている。)
- ・3つの伸縮計
- ・3つの Hukseflux 熱伝導率プローブ

さらに、12個のひずみゲージが、水密シール上の代替ライニングのスチールリング上に配置される、としている。

2.2 我が国で実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念の提示

前節で実施した諸外国の埋め戻し試験に関する調査結果を踏まえ、本項では我が国で実施すべ き坑道一部埋め戻し試験の概念を検討する。

2.2.1 坑道埋め戻しへの要求性能の検討

要求性能については、諸外国、主にスウェーデン、フィンランドにおける坑道埋め戻しへの要求性能(または準ずる用語)をまとめると、以下の項目が挙げられる。

- ・移流抑制
- ・材料間の化学的安定性
- ・緩衝材位置の保持
- ・キャニスターの浮き上がり防止
- ・処分坑道の坑道安定性

また、要求性能を満たすことを確認するための指標をまとめると、以下の項目が挙げられる。

- ·透水係数
- ・膨潤圧

我が国の実施主体である NUMO は、「NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークシ ョップ」¹⁴において、坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割について表 2.14 のように 示している。また、坑道シーリングの構成要素のうち、埋め戻し材やプラグの設計における設計 要件、確認方法、指標、基準について表 2.14、表 2.15 のように示している。

表 2.14 坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割¹⁴⁾

構成要素	機能/役割
埋め戻し材	 放射性物質の移行経路となるような地下水の流れを抑制する。 再冠水後の緩衝材や止水プラグ(粘土プラグ)の坑道への膨出を抑制する。
カ学プラグ	 処分坑道において埋め戻しの完了していない空間側への埋め戻し材の膨出を 抑制する。
止水プラグ	 ・埋め戻し材との組み合わせで閉鎖後のアクセス坑道およびその周辺が放射性 物質の移行経路になることを防ぐ。

表 2.15 埋め戻し材の設計 14)

設計要件	確認方法	指標	基準
低透水性	坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないように, 埋め戻 し材の密度を設定する。	透水係数	1.0×10 ⁻⁸ m/s以下
施工の実現性	坑道内での埋め戻し施工が可能な密度であることを確認する。	乾燥密度	1.8 Mg/m ³ 以下
評価項目	確認方法	指標	基準
膨出抑制	再冠水後の緩衝材および止水プラグの膨出を抑制し, これらの 有効粘土密度が仕様成立範囲に収まることを, 埋め戻し材仕様 に対して確認する。	有効粘土密度 (緩衝材,止水 プラグ)	1.2 Mg/m ³ 以上

また、「処分場の安全機能と技術要件」¹⁵⁾では、埋め戻し材・止水プラグの技術要件(基本的な バリア性能の確保・長期健全性の維持に関する技術要件)として、表 2.16、表 2.17 を示している。

安全機能		技術要件	技術要件の説明	設計項目
放射性物 質の移行 抑制	アクセス坑道お よびその周辺が 卓越した移行経 路となることの 抑制	低透水性	地下水の流れを抑 制すること	埋め戻し材の設計 (材料設計) 止水プラグの設計 (材料設計,配置設 計)

表 2.16 埋め戻し材・止水プラグの技術要件(基本的なバリア性能の確保)¹⁵⁾

表 2.17 埋め戻し材、止水プラグの長期健全性の維持に関する技術要件¹⁵⁾

技術要件	技術要件の説明	設計項目
施工時の隙間の充てん (自己シール性)	施工時の隙間を充てんするよう, 膨潤 性を有すること	埋戻し材の設計 (材料設計,形状・厚さの設 計) 止水プラグの設計 (材料設計,配置設計)
残置物, 材料間の相互作 用の影響の低減	コンクリートなどの残置物や材料間の 相互作用により安全機能が著しく低下 しないこと	 埋戻し材の設計 (材料設計,形状・厚さの設計) 止水プラグ,力学プラグの設計 (材料設計,配置設計)

これらの坑道埋め戻しへの要求性能(あるいは埋め戻し材が保持すべき機能、要件)を 2.1 節 における調査結果と比較すると、各国ほぼ共通している。これは放射性物質の移行抑制など、処 分場に構築される人工的なバリアシステムが有すべき安全機能(特に閉鎖後長期の安全機能)が 各国共通しているためと考えられる。

「坑道安定性」については、スウェーデン、フィンランド等、いくつかの国において、要求性能(あるいは本調査において要求性能に準ずる用語に分類した、Performance targets、Design requirements、requirement 等)としての記載がある。そこで、フィンランド(Posiva 社)を対象に、「坑道安定性」を挙げている理由についてさらに文献調査を加えた(①~④)。その結果、坑道埋め戻しへの性能目標値として膨潤圧 0.2MPa を設定しているものの、その根拠は複合的であり、坑道の力学的安定性のほか、埋め戻し材と岩盤との密着によるパイピングの影響の防止、核種の移行抑制等を挙げている。

坑道は、建設期間や操業期間中には安定性が損なわれないように設計するため、支保部材と周 辺岩盤により数十年の安定性は確保されるものと考えられる。また、坑道が開放されていれば、 維持管理することも可能である。しかし、埋め戻し後については、支保部材の劣化という坑道安 定性に対する負の要素、埋め戻し材による支持(膨潤圧や力学的な支持能力)という正の要素、 ならびに周辺岩盤の強度等を考慮して、坑道安定性の必要性を議論する必要がある。

本検討においては、後述する坑道埋め戻し試験期間が短期であり、かつ結晶質岩盤を対象とす ることから埋め戻した後に支保部材や周辺岩盤の劣化等により坑道の安定性が損なわれる可能性 が小さいため、要求性能として坑道安定性は設定しないものとするが、品質管理の一環として、 埋め戻し材の膨潤圧(土圧)を計測し、同時に坑道安定性の検討に資する情報を取得することを 考える。以下は、調査した文献の該当箇所とその和訳である。

① Disposal of spent fuel in Olkiluoto bedrock; Programme for research, development and technical design for the pre-construction phase, Posiva 2000-14 (Posiva, 2000) ¹⁶⁾

[5.1.2 Functions and desired properties barriers] Backfill and sealings Some swelling pressure (~100kPa, corresponding to the weight of about four metres of loose rock) would be beneficial to support the tunnels against rock falls, to establish a tight backfill-rock contact and to counterbalance the effects of settlement and piping in the backfill.

- ・膨潤圧力(~100kPa、ゆるい岩の約4mの重量に相当)は、岩の落下に対するトンネルの 支持、埋め戻し材一母岩間の密な接触の確立、および埋め戻し材の(恒常的な)安定 (settlement)とパイピングの影響を相殺するために<u>有利であろう。</u>
- ② ASSESSMENT OF BACKFILL MATERIALS AND METHODS FOR DEPOSITION TUNNELS, INTERNATIONAL MEETING, SEPTEMBER 17...>...18, 2007, LILLE, FRANCE, CLAYS IN NATURAL & ENGINEERED BARRIERS FOR RADIOACTIVE WASTE CONFINEMENT (P.Keto et al., 2007) ¹⁷

[BREAKDOWN OF BACKFILLING REQUIREMENTS TO DRY DENSITY CRITERIA]

In order to restrict advective transport along the deposition tunnels, the hydraulic conductivity of the backfill material should be less than 10-10 m/s (Gunnarsson et al. 2006). This criterion is valid for the entire cross-section of the tunnel, including the contact zone between the backfill and the surrounding rock walls. Therefore, the backfill should have a swelling pressure of at least 0.1 MPa (Gunnarsson et al. 2006). Since it is very difficult to measure such a small swelling pressure in the laboratory, the criterion used in the laboratory studies was 0.2 MPa (Johannesson & Nilsson 2006).

・処分坑道に沿った(核種の)移行を制限するために、埋め戻し材料の透水係数は 10⁻¹⁰m/s 未満でなければならない(Gunnarsson et al., 2006)。<u>この基準は、埋め戻し材とその周囲</u>の岩壁との間の接触帯を含む、トンネルの断面全体に有効である。したがって、埋め戻し 材は、少なくとも 0.1MPa の膨潤圧を有するべきである(Gunnarsson et al., 2006)。なお 室内実験によりこのような小さな膨潤圧を測定することは非常に困難であるため、実験室 で使用された基準は 0.2MPa であった(Johannesson&Nilsson, 2006)。 ③ Deposition Tunnel Backfill Design for a KBS-3V Repository, Working Report 2009-129 (Posiva, 2010) ¹⁸⁾

【2.4 Re	quire	ments for	the bac	ckfill des	ign】 Table	2-3. P	erformanc	e tar	gets for the
backfill	with	possible	target	values,	applicable	time	windows	and	associated
rational	e as tl	ney have	been ex	pressed	in TKS-2009	9 (Tab	le 6-3).		

Performance target	Applicable time window	Rationale		
 ・・・(一部省略) 				
Backfill shall ensure a	After the target state	Backfill should contribute		
tight contact with the	has been reached, up to	to favourable conditions		
rock wall.	one hundred thousand	for the buffer and canister		
	years at least.	and <u>to the mechanical</u>		
Swelling pressure > 200		stability of the deposition		
kPa		<u>tunnels and near-field</u>		
		rock. It should also limit		
		and retard radionuclide		
		transport in case of		
		canister failure.		

性能目標	適用期間ウィンドウ	根拠
埋め戻し材は岩盤と密着	目標状態に達した後、少	<u>埋め戻し材は、</u> 緩衝材
しなければならない。	なくとも 10 万年後まで。	(buffer)およびキャニス
		ターの良好な条件、ならび
膨潤圧 > 200kPa		に <u>処分坑道およびニアフィ</u>
		<u>ールド岩盤の力学的安定性</u>
		<u>に寄与するはずである。</u> ま
		た、キャニスターが壊れた
		場合には、放射性核種の移
		行を制限および遅延させる
		はずである。

 ④ Backfill Production Line 2012; Design,Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug, POSIVA 2012-18 (Posiva, 2013b) ⁶⁾

[Abstract]

The performance targets for the backfill are to limit advective flow along the deposition tunnels, keep the buffer and canister in place and <u>contribute to the mechanical stability of the deposition tunnels.</u>

[・]埋め戻し材の性能目標は、処分坑道に沿った水流を制限し、緩衝材(Buffer)とキャニスターを所定の位置に保持し、処分坑道の力学的安定性に寄与する。

[2.1.1 Safety functions, performance targets and design requirements] According to Posiva (Design Basis report), the deposition tunnel backfill and the plug have the following safety functions:

- Contribute to favourable and predictable mechanical, geochemical and hydrogeological conditions for the buffer and canisters,

- Limit and retard radionuclide releases in the possible event of canister failure, and

- Contribute to the mechanical stability of the rock adjacent to the deposition tunnels.

- Posiva (design Basis report) によると、処分坑道の埋め戻し材とプラグには以下の安全機 能がある。
- 緩衝材(Buffer)とキャニスターにとって好都合で予測可能な力学的、地球化学的、水理 学的条件に貢献する。
- ・キャニスター破損の可能性がある場合に、放射性核種の放出を制限し遅らせる。
- ・ 処分坑道に隣接する母岩の力学的安定性に寄与する。

[6.5 Mechanical properties]

The backfill shall keep the buffer in place, contribute to keeping the canister in place and <u>shall contribute to the mechanical stability of the deposition tunnels (see Table 2-1).</u>

・埋め戻し材は、緩衝材 (Buffer) を所定の位置に保持し、キャニスターを適所に保持すべき であり、処分坑道の力学的安定性に寄与することが望ましい(Table 2-1 参照) *。

※ Table2-1 は、本報告書表 2.5 に記載

以上の調査および比較検討より、後述する坑道一部埋め戻し試験の概念の提示では、坑道埋め 戻しへの要求性能として、

・低透水性(坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと) を設定し、埋め戻し材単独の仕様設定をおこなうこととする。

「膨出抑制」については、処分孔に設置される緩衝材の膨潤特性やプラグの力学特性を含めて、 長期健全性の評価をおこなった上で埋め戻し材の仕様としての成立性が検討されるものと考えら れる。したがって、膨出抑制の評価に必要なデータ取得(埋め戻し材の膨潤圧など)を、後述す る坑道一部埋め戻し試験の目的に含めることを考える。

「自己シール性(施工時の隙間充填性)」については、岩盤との接触面の隙間を埋め戻し材が充 填可能であることを確認することにより達成できると考えられる。諸外国の埋め戻し試験結果や 我が国における埋め戻し施工実績から、岩盤との接触面の隙間に対する埋め戻し材の充填は可能 であると考えられるが、隙間充填性を後述する坑道一部埋め戻し試験の目的に含めて、計測管理 などにより確認することを考える。

2.2.2 我が国における埋め戻しに関する技術的成立性

(1) 埋め戻し材の施工実績

埋め戻し材の施工方法の分類として、旧核燃料サイクル開発機構(以下、JNCと称す)は「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-」¹⁹(以降、JNC第2次取りまとめと称す)において、①ブロック工法、②まきだし・締固 め工法、③吹付け工法、④横(斜め)締固め工法、⑤流動体工法を挙げている(表2.18)。この分 類に従い、我が国における埋め戻し材の施工実績をとりまとめる。ただし、⑤流動体工法につい てはセメント系材料を想定しており、本検討の仕様であるベントナイト系材料を用いた埋め戻し 材とは異なるため、本節では除外する。

asida zarok	16: "T 18:40				
彩態/工法		013-1-192794	上半	下半	その他
ブロック	ブロック運搬車	坑内のブロック選撥を行う。 既に波置された埋め戻し材を乱さないようタイヤ式走向機構 により走行する。			・吹付け装置と
200	ブロック設置車	プロックの連持後、波覧位置にプロックを移動後波置する。 プロックを把持する把持機時、設置位置に移動する昇降、積 移動機構、プロックを把持機構から設置位置に押し込むプッ シュ機構より得成される。	ग	. ज्यु	の組み合わせ が必要 ・ 7 [*] ロック浸遺7 [*] 7 ント(地上)が
	その他機械	プロック間、プロックと岩籠間の間際に骨材混合体を吹付け る吹付け機が必要。			278
まきだし・締固め	骨材混合体運搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を選続する。	不可	ъŢ	
-	まきだし機破	タイヤブルドーザにより骨材混合体をまきだす。	施工機械の 機高により 施工範囲が	ただし, <u></u> 街	 その他の施工 法との組み合 わせが不可欠
0.0	転圧機械	振動ローラによる毎年締固めを行う。	決定する。	<i>に</i> よる。	
吹付け	骨材混合体運搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を運搬する。			・単動で可能
- Bu	吹付け機	ポンプ部へのフィーダ機構、ポンプ機構を有する吹付け機を 下記吹付けロボットに搭載し、借材混合体を吹付ける。	ग	τſ	 必要な密度等 の品質が確保 できるかの確 初対除わしび
Geo	吹付けロボット	吹付け機から供給された骨材混合体を、吹付け機のロボッ トのアーム・ブーム起伏・旋回機構により位置決めし、ト ンネル全断面を埋め戻す。			いいいわよい 吹付け機械の 開発が必要

表 2	.18	埋め戻し材の施	エ方法 19)
-----	-----	---------	---------

		1404 T- 404		悔 考		
形態/工法		8色	上半	下半	その他	
機締固め	骨材混合体巡搬車	坑内用ダンプトラックにより骨材混合体を遥撤する。				
Color	骨材混合体供給後	遊艇車から骨材混合体を受け取り, 横樽間め機の投入ホッパ に供給する。	ា	Ţ	 単独で可能 - 位方向約因め 機械の開発が 必要 	
	横締固め機	ホッパから受け取った皆材混合体を積締装監部に供給するコ ンベア機構、積続機構、積積機構を移動する旋回・起伏機構 により,混合体を供給しながら振動により給囲める。				
流動体 (セメント系材料)	材料運搬車	セメント系材料を地上で練り混ぜ,坑道内はアジテータ車で 遮殺する。	ηj			
a to a to	打込みポンプ	辺線車から受け取ったセメント系材料は, 打込みポンプによ り打込みパイプ内を圧送する。	坑内に隔壁 状に型枠を 設置して充	न	 単独で可能 パッチャープラント (地上)が必要 	
	ディストリビュータ	ポンプにより打込まれたセメント系材料を、一定の屠厚にな るようパイプ吐出口を移動する。	填する。			

① ブロックエ法

幌延深地層研究センターは、堆積岩(新第三紀の主に泥岩)を主な対象として深地層の科学的 研究、地層処分技術の信頼性向上や安全性評価手法の高度化等に向けた基盤的な研究開発を実施 しており、深度 350m 調査坑道(試験坑道 4)では、人工バリア性能確認試験を実施している。人 エバリア性能確認試験は、幌延の地質環境をひとつの事例に、処分孔竪置き方式を対象として実 規模の人工バリアを設置し、実環境下において人工バリア定置後の再冠水までの過渡期の現象を 評価することを目的としている。

試験坑道 4 の一部を埋め戻す際に使用する埋め戻し材は、実際の処分場において材料の調達の し易さや経済性の観点から、坑道掘削で多量に発生する掘削土(ズリ)が用いられることを想定 し、掘削土(ズリ)とベントナイトを混合した材料が用いられている。また、試験坑道 4 の坑道 下半部は転圧締固め工法、坑道上半部は埋め戻し材をブロック状に加工した埋め戻し材ブロック の設置により埋め戻す計画としている²⁰⁾。人工バリア性能確認試験のイメージを図 2.62 に、埋 め戻し材に対する要求性能を表 2.19 に示す。



模擬オーバーパック

図 2.62 人エバリア性能確認試験のイメージ²⁰⁾

表 2.19 埋め戻し材の要求性能²⁰⁾

性能	要求事項
透水特性	坑道が主要な水みちとならない。
膨潤特性	埋め戻し材と坑道支保の隙間、埋め戻し材ブロックで設置した場合のブロック間の隙間に対する シール性。
強度特性	緩衝材の膨出に対する力学的抵抗性。埋め戻した坑道の地下水浸潤に伴う間隙水圧の上昇、有効 応力の減少等に対する長期安定性。
施工性	坑道を埋め戻す際の各施工方法(吹付け工法、転圧締固め工法、ブロック埋め戻し工法等)に対 する混合材料の施工性。

表 2.19 の要求性能に対し、埋め戻し材の基本仕様が設定されている。人工バリア性能確認試験 における埋め戻し材の主な仕様を以下に示す。

- ・透水係数 : 10⁻⁹m/s 以下(周辺岩盤の透水係数 10⁻⁸m/s 程度)
- ・膨潤圧 : 0.1MPa 以上
- ・埋め戻し材の配合:ベントナイト混合率 40wt%

これらの仕様のもと、転圧締固め工法の材料設定と埋め戻し材ブロックの材料設定について事

前の施工(製作)試験が実施され、品質の確認がおこなわれている。ここでは、埋め戻し材ブロ ック試作の結果について示すこととする。埋め戻し材ブロックの製作に使用した材料、機械等を 以下に示す。

- ・掘削土 : 350m 調査坑道稚内層(粒径 20mm 以下、ジョークラッシャーによる破砕 材料)
- ・ベントナイト : クニゲル V1
- ·混合水 :水道水
- ・使用機械 :プレス機仕様(加圧能力 800kN、機械寸法縦 1,420×横 900×高さ 3,490mm、 機械総質量 4,000kg、油圧モータ 22kW、油圧タンク 80L)
 - : 金型仕様(内寸法縦 300×横 300×高さ 300mm、金型肉厚 40mm、ピスト ン寸法縦 299×横 299mm)

埋め戻し材ブロックは、含水比を 30%、35%、40%に設定しブロックの試作をおこなっている。 製作性、操作性(積み重ね性・加工性)、品質経時変形の項目で評価を実施し、最終的な総合評価 として含水比 30%、乾燥密度を 1.4Mg/m³を人工バリア性能確認試験の埋め戻し仕様に設定して いる。なお、人工バリア性能確認試験に供する埋め戻し材は、現地発生土とベントナイトの混合 材料を使用することとしているが、事前にベントナイト以外の材料の違いによる透水係数への影 響を調べている。調査結果については、「3.1 埋め戻し材の材料および施工に関する検討(2)材料仕 様」に記述する。

また、以降「有効粘土密度」という用語を多く使用する。「緩衝材基本特性データベース」(JAEA, HP)²¹⁾の用語説明を用いて、以下に定義を示す。

「有効粘土密度」:単位体積あたりに含まれるベントナイト分の重量をそれ自身の体積で割ること により得られる純粋なベントナイト分の密度。ケイ砂の混合比率を変えたベントナイトの混合材 料の特性を把握するときの指標のひとつ。有効粘土密度は、次式で表すことができる。

 $\rho_e = M_b / (V_b + V_a) = \rho_d (100 - Rs) / (100 - \rho_d Rs / \rho_s)$

ここで、 ρ_e は有効粘土密度 (Mg/m³)、Mb はベントナイトの乾燥質量 (Mg)、Vb はベントナイトの容積 (m³)、Va は間隙の容積 (m³)、 ρ_d は乾燥密度 (Mg/m³)、Rs はケイ砂混合率 (wt%)、 ρ_s はケイ砂の土粒子密度 (Mg/m³) である。

② まきだし・締固め工法

瑞浪超深地層研究所の深度 500m 冠水坑道では、花崗岩(結晶質岩)を主な対象として深地層 の科学的研究(地層科学研究)を進めており、坑道埋め戻し技術の開発の一環として、現在再冠 水試験を実施している。再冠水試験は、観測データに基づき坑道閉鎖後の水圧回復プロセス、坑 道周辺の応力状態、化学状態について基礎データを取得し、坑道閉鎖時の環境回復に関わる具体 的な観測技術、解析技術(割れ目や断層の多い日本の結晶質岩を念頭においた調査・解析技術) を提案するものである。 再冠水試験の一環として、2014年9月から冠水坑道の床盤に掘削したボーリングピットを埋め 戻す埋め戻し試験を実施しており、将来坑道埋め戻しに使用される可能性のある埋め戻し材(ベ ントナイト、砂、礫)の物性変化や実用性(再冠水時の透水性や膨潤圧など)の評価に関わる基 礎データの取得、およびそのために必要な観測機器の耐久性や設置法の確認を主な目的としてい る²²⁾。図 2.63 に冠水坑道における再冠水試験の流れを示す。



図 2.63 冠水坑道における再冠水試験の流れ

ボーリングピットの埋め戻し試験では、「まきだし・締固め工法」により施工された、埋め戻し 材料の品質が確認された(図 2.64)。材料選定の参考として用いた透水係数、施工管理基準と埋め 戻し材の材料配合、使用機械を以下に示す。

・材料選定の参考 :	透水係数 10 ⁻¹¹ m/s オーター(周辺岩盤の透水係数 10 ⁻⁸ m/s オーター)
•施工管理基準 :	モンモリロナイト含有率 40%
	砂の土粒子密度 2.64Mg/m ³
	モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 2.81Mg/m³
	埋め戻し材上部に設置するコンクリートの密度:2.35Mg/m ³
	材料 A(ベントナイト混合土)乾燥密度**1.3~1.5g/m³
	材料 B(ベントナイト混合土)乾燥密度**1.3~1.5g/m³
	※:厚さ 20cm のコンクリート蓋の重量に釣り合う膨潤圧から設定
・埋め戻し材の配合:	材料 A ベントナイト(クニゲル GX): 砂*: 砕石**=15:35:50
	材料 B ベントナイト(クニゲル GX): 砂 [※] =15:85
	※:コンクリート用砂、 ※※:コンクリート用砕石 1505
・使用機械 :	振動コンパクタ(総重量 70kg、振動板寸法 510×350mm、
	振動数 5,600vpm、出力 3.2kW、燃料ガソリン)



図 2.64 瑞浪超深地層研究所における深度 500m 冠水坑道ボーリングピットの埋め戻し試験²²⁾ (まきだし・締固め工法)

埋め戻し材の締固め試験結果(室内試験)を図 2.65 に、埋め戻し材施工後に砂置換法(JISA 1214)により測定した乾燥密度および含水比の結果を表 2.20、表 2.21 に示す。ここで、材料 A と材料 B の乾燥密度と含水比に相違が生じている。この相違については、ピット壁面からの湧水の流入が影響したことを文献 22)では推察している。

本試験のように、コンクリート蓋の重量に対する膨潤圧の制約がある場合、低透水性に対する 評価は難しいうえ、文献にも施工後の低透水性に関する評価の記載はない。参考までに文献 22)に 記載のある基礎物性(砂の土粒子密度 2.666Mg/m³、砕石の土粒子密度 2.627Mg/m³)をもとに有 効粘土密度を計算すると、材料 A(平均乾燥密度 1.565~1.787Mg/m³)の有効粘土密度は 0.47~ 0.63 Mg/m³、材料 B(平均乾燥密度 1.725~1.835Mg/m³)の有効粘土密度は 0.58~0.66 Mg/m³ となる。これらの有効粘土密度を、後述する図 2.79 ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関 係に当てはめると、本試験は降水系地下水において概ね透水係数 10⁻¹¹m/s オーダーであることが 分かる。



(材料 a と材料 b は選定されなかった埋め戻し材)

表 2.20 ボーリングピット(材料 A)の埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比²²⁾

現場密度測定試験	4層目①	4層目②	8層目①	8層目②						
乾燥単位体積重量(g/cm ³)	1.513	1.622	1.712	1.530						
	1.509	1.769	1.884	1.722						
	1.672	1.676	1.765	1.660						
平均值	1.565	1.689	1.787	1.637						
含水比(%)	13.0	12.7	15.5	16.0						
	13.0	14.5	14.7	15.9						
	14.6	13.3	13.8	13.7						
平均值	13.5	13.5	14.7	15.2						

材料A:ベントナイト15%、砂35%、砕石50%

表 2.21 ボーリングピット(材料 B)の埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比²²⁾

現場密度測定試験	4層目①	4層目②	7層目①	7層目②
乾燥単位体積重量(g/cm ³)	1.835	1.870	1.590	1.789
	1.714	1.808	1.743	1.699
	1.739	1.827	1.843	1.814
平均値	1.763	1.835	1.725	1.767
含水比(%)	17.2	16.7	19.3	16.6
	16.9	18.2	19.5	18.4
	18.6	16.6	16.3	16.1
平均值	17.6	17.2	18.4	17.0

材料B:ベントナイト15%、砂85%

③ 吹付け工法

経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究として、原子力環境整備促進・資金管理センター (以下、RWMCと称す)が、余裕深度処分のための地下空洞型処分施設において、上部埋め戻し 材施工確認試験(図 2.66)を実施しており、「吹付け工法」による施工方法の適用性と、施工後の 埋め戻し材料の品質が確認された²³⁾。試験の目標と埋め戻し材の材料配合、使用機械を以下に示 す。

- ・暫定管理目標 : 透水係数 1.0×10⁻⁸m/s(周辺岩盤の透水係数の最低値 7.8×10⁻⁸m/s)
- ・埋め戻し材の配合:ベントナイト(クニゲル V1):砂=15:85
- ・使用機械 :湿式圧力釜式吹付機(コンクリート吹付け用)



図 2.66 地下空洞型処分施設における上部埋め戻し材施工確認試験(吹付け工法)²³⁾

埋め戻し材施工後、コア採取により測定した乾燥密度および含水比の結果を図 2.67 に、透水試験の結果を図 2.68 に示す。吹付け工法の平均乾燥密度は 1.694Mg/m³、有効粘土乾燥密度は 0.606Mg/m³である。本施工試験では、暫定的に設定した透水係数の管理目標を満足し、また透水 係数は有効粘土乾燥密度との相関が見られた、としている。

しかし、試験実施場所は空洞壁面が防水シートで覆われ、施工時の地下水の侵入がない状態で の結果であることから、後述する坑道一部埋め戻し試験や将来の処分場で想定される状況とは大 きく異なっていることに留意する必要がある。



図 2.67 上部埋め戻し材施工後の乾燥密度と含水比²³⁾



図 2.68 上部埋め戻し材の有効粘土密度と透水係数の関係²³⁾

④ 横(斜め)締固め工法

我が国で、ベントナイト系材料を用いた横(斜め)締固め工法による埋め戻し材の施工実績は 見当たらないが、法面整形に用いる締固め機械は存在する(図 2.69)。ベントナイト系材料に対 する適用性については調査が必要と考えられる。

スウェーデンの Prototype Repository 試験やフランスの Backfilling Demonstrator 試験では、 本工法による埋め戻し材の締固めを実施している(2.1.1、2.1.4 参照)。



図 2.69 ピストン式油圧振動装置を装着したバケット

(新技術情報提供システム:国土交通省, 2017) 24)

以上の埋め戻し材の施工方法を、ブロック工法、締固め工法、吹付け工法に分類し、JNC 第2 次取りまとめに示されているような小断面の坑道に対する施工実績という観点で整理すると、吹 付け工法の成立性に関する知見の拡充が必要であると考えられる。

(2) 我が国における埋め戻し材試験の計測実績

ここでは、近年我が国で実施された埋め戻し試験として、①瑞浪超深地層研究所の再冠水試験 におけるボーリングピットの埋め戻し試験²²⁾を、我が国の地下環境のように湧水量が多い場合に 懸念されるベントナイト系材料の流出現象に着目した試験として、②幌延深地層研究センターの 緩衝材流出試験²⁾を対象に調査を行った。その結果を以降に示す。

① 瑞浪超深地層研究所の再冠水試験におけるボーリングピットの埋め戻し試験

試験概要については、「2.2.2 我が国における埋め戻しに関する技術的成立性 (1)我が国における埋め戻し材の施工実績 ②まきだし・締固め工法」に記載のとおりである。観測機器に対する主な目的は、耐久性や設置法の確認としていることから、ここでは計測項目と、観測機器の耐久性や設置法について整理をおこなった。埋め戻し試験の概念図を図 2.70 に示す。



図 2.70 ボーリングピットの埋め戻し試験概念²²⁾

埋め戻し試験前には、下記項目について計測している。

- ・密度
- ・含水比

埋め戻し試験中は、下記項目について計測している。

- ・水圧(埋め戻しピット外部の冠水坑道内にも設置)
- ・土圧
- ・水分

下記に示す水圧計・土圧計・水分計の全センサーについて、試験前に5MPaの耐圧性能確認試験がおこなわれた。また、止水壁下部の5MPaの止水性能をもつフランジが設置され、ケーブルが止水壁内外に貫通された。ケーブルへの浸水を防ぐため、センサーからデータロガー接続部に至って接続部を持たない一本ものを用いている²²⁾。表 2.22 に埋め戻し試験において設置したセンサーを示す。

a) 水圧計

水圧計には、GE センシング社製 PTX1830 が採用された。ケーブルはポリウレタン製である。 最大 3.1 MPa における条件下でデータ取得が確認された。図 2.71 にボーリングピットの埋め戻 し試験における水圧計測結果を示す。



b) 土圧計

土圧計には、共和電業社製 BER-A-5MP110S が採用された。ケーブルはクロロプレン製である。 最大 3.1 MPa における条件下でデータ取得が確認された。図 2.72 にボーリングピットの埋め戻 し試験における土圧計測結果を示す。



図 2.72 土圧計測結果の例(ボーリングピットの埋め戻し試験)²²⁾

c) 水分計

水分計には、Decagon 社製 EC-5 と Dynamax 社製 PR2 が採用された。EC-5 のケーブルは PVC 製である。EC-5 は水圧変化の少ない定常時においても異常値を示すことが多数あり、その 原因はセンサー自身あるいはケーブルの破損部への浸水によるショートによるものと考えられる。 一方、PR2 は高圧下での計測はおこなわなかったが、プローブを埋め戻し材内で地下水に浸した 状態で約 5 ヵ月間計測できることが確認された。図 2.73 にボーリングピットの埋め戻し試験に おける水分計測結果を示す。埋め戻し後の 2 ヵ月間に水分が飽和し、その後飽和状態が継続して 計測された後、異常値を示した様子が表れている。



図 2.73 水分計測結果の例(ボーリングピットの埋め戻し試験)²²⁾

d) 密度と含水比

「2.2.2 我が国における埋め戻しに関する技術的成立性 (1)我が国における埋め戻し材の施工 実績 ②まきだし・締固め工法」に記載のとおり、砂置換法 (JIS A 1214) により密度を測定し ている。図 2.74 にボーリングピットの埋め戻し試験における乾燥単位体積重量と含水比の計測 結果を示す。材料 A (ベントナイト+砂+砕石の混合土)、材料 B (ベントナイト+砂の混合土)を 8 層に分けて締固めをおこなっている (図中①②は地点名称)。



図 2.74 ボーリングピット埋め戻しにおける施工結果の計測例²²⁾

表 2.22 瑞浪超深地層研究所ボーリングピットの埋め戻し試験で設置したセンサーー覧²²⁾

01.080/64.66	センサ	一名称	製		仕	様	センサ	一個数		-	an aik dub 2m	1# +4
aT 7月 X1 88	和名	英名	メーカー	製品名	センサー	温度計測	バッファー	バックフィル	計測の目的	•	可助化元	1冊~ち
水圧	水圧計	Piezometer	GEセンシング	PTX1830	-	-	Ν	12	湿潤に伴う水 圧の把握	0	-	冠水坑道内に も2個設置
土圧	土圧計	Total pressure sensor	共和電業	BER-A-5M P110S	Flatjack	-		12	湿潤に伴う土 圧の把握	0	-	
*	水分計	Humidity	Decagon	EC-5	誘電	-		22	浸潤過程の把 握	Δ	ケーブルが ショート、デー タロガーが浸水	
	7571	sensor	Dynamax	PR2	Dielectric probe	-		6	湿潤過程の把 握埋め戻し材 の材質管理	0	-	施工中は計測 なし
密度	変位計	Extensometer	-	-	-	-		4	埋め戻し材の 材質管理	0	-	施工前
含水比	熱伝導度計	Thermo conductivity probe	-	-	-	-		4	埋め戻し材の 材質管理	0	_	施工前

・:不明もしくはなし

② 幌延深地層研究センターの緩衝材流出試験

幌延深地層研究センターでは、オーバーパックの周囲に設置される緩衝材の施工技術および人 エバリアのモニタリング技術等の要素技術の整備を進めており、その一環として地下研究施設に おける緩衝材流出試験を実施している²⁵⁾。

実際の高レベル放射性廃棄物地層処分施設では、処分場への地下水の浸入により緩衝材内の水 みち形成や流出が発生した場合、ベントナイトの自己修復作用を妨げる可能性がある。本試験で は、緩衝材内部に水みちが形成され、地下水と共に緩衝材が外部へ流出する現象を岩盤中で確認 し、緩衝材の設計に際し考慮すべき重要な知見を得ることを目的とし、緩衝材の流出を採水試料 の分析や排水量との関連等により評価している。図 2.75 に示すような試験装置を坑道内に施工 し、水みち形成有無によって圧力制御と流量制御を選択できる加圧注水試験を実施している。



図 2.75 緩衝材流出試験の概要(定流量注水時)²⁵⁾

加圧注水試験において流出した地下水を定期的に採水し、吸光度分析によりベントナイトの定 量評価をおこなっている。吸光度分析は、特定の波長の光(単色光)を溶液試料に照射した際の 透過光量を測定し、試料が吸収した光(吸光度)を分析する方法であり、試料中に対象物質が多 いほど、多量の光が吸収される。吸光度は溶液の濃度に比例するため、あらかじめ標準試料の検 量線を作成することで溶液の濃度の算出が可能となる。

計測器には、日立ハイテクノロジー社製のレシオビーム分光光度計 U-5100、およびエスエム テー社製の超音波分散機 UH-50 を用いた。U-5100 は波長範囲が 190~1,100nm と広く、通常 の純水での測定と比較して不確定な物質が混入する可能性のある幌延の地下水の測定において有 効と考えられるため使用した。ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトの吸光度の変化 率が最も大きくなると考えられる 300nm についてもカバーしている。

分光光度計と超音波分散器の仕様をそれぞれ表 2.23、表 2.24 に、分光光度計 U-5100 および

超音波分散機 UH-50 を図 2.76 に示す。図 2.77 には、吸光度分析によるベントナイト濃度計測 の検量線の例を示す。また、図 2.78 には、吸光度分析によるベントナイト濃度計測の例を示す。 注水から約 1,400~2,100 時間後にベントナイト濃度の上昇がみられ、最大で 200 mg/L 程度が観 測されている。

製造	日立ハイテクノロジー
型名	型番U-5100
光学系	瀬谷−波岡マウントレシオビーム
スペクトルバンド幅	190~1,100 nm
光源	キセノン(Xe)フラッシュランプ

表 2.23 分光光度計仕様 25)

製造	エスエムテー
形式	UH-50
出力	50W
周波数	20kHz
発信機能	連続ハンドパルサー(手元スイッチ)
付属チップ	¢6マイクロチップステップ型(MS-6)

表 2.24 超音波分散器仕様 25)



図 2.76 分光光度計 U-5100 および超音波分散機 UH-50



図 2.77 吸光度分析によるベントナイト濃度計測の検量線の例²⁵⁾



諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験の主な計測項目(水圧、土圧、水分、密度、含水比、流出量)に対し、我が国においても十分な計測実績を有しているが、埋め戻し試験計画においては、坑道環境(例えば水圧)や計測期間を考慮した計測器の設定が必要である。

2.2.3 瑞浪超深地層研究所における坑道一部埋め戻し試験の試験目的の設定

原子力発電環境整備機構(以下、NUMOと称す)は「NUMOセーフティケースに関する外部 専門家ワークショップ」(NUMO, 2016)¹⁴⁾において、「候補母岩の特徴および類型化」の中で候 補母岩の透水係数を設定している(表 2.25)。

時代	新第三紀	先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	新第三紀・ 先新第三紀	
岩種	堆積岩類	堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
透水係数(m/s)	3×10^{-7}	$5 imes10^{-7}$	2×10^{-7}	$5 \! imes \! 10^{-8}$	9×10 ⁻⁷

表 2.25 候補母岩の特徴および類型化 (NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料¹⁴⁾をもとに作成)

本検討で対象とする坑道一部埋め戻し試験の実施場所に分布する土岐花崗岩は、表 2.25 と比較 すると深成岩類に区分できること、要求性能として設定した「低透水性(坑道内が卓越した地下 水の流動経路にならないこと)」を確認することから、類型化された母岩の透水係数(10°m/s オ ーダー)以下の透水性を満足する埋め戻し材の使用とその施工性等を確認することが適切と判断 した。施工方法には、小断面の坑道に対する吹付け工法の成立性に関する知見の拡充が挙げられ る。また、要求性能として挙げていないが、「膨出抑制」の評価に必要なデータ取得として、埋め 戻し材の膨潤圧変化を確認すること、が挙げられる。膨潤圧は埋め戻し材の浸潤過程に関連する ため、浸潤過程の取得も本試験の目的となる。加えて、本報告で検討する埋め戻し試験は、前提 条件である試験期間の関係から、埋め戻し材前面を排水構造とすること想定しており、排水条件 における埋め戻し材内の水圧の変化、および水圧と浸潤過程の関連性を取得することも重要であ る。さらに、埋め戻し前面を排水構造とした場合、坑道の湧水量にもよるが埋め戻し材の流出が 生じ、要求性能である「低透水性」が時間とともに満足できなくなることが考えられるため、排 水構造を条件とした場合の、湧水量と埋め戻し材の流出量の関連性および変化を確認することも 重要となる。以上を整理し設定した、坑道一部埋め戻し試験の目的を表 2.26 にまとめる。

対象	時期	試験目的	条件
埋め戻し	• 施丁前	・低透水性(周辺岩盤相当)を満足する材料の設	・深成岩を対象
材料設定		定および確認	とした条件
施工方法	・施工前・施工中	 ・低透水性を満足する密度の確認 ・吹付け工法の成立性に関する知見の拡充 	 ・小断面坑道を 対象とした条 件
埋め戻し	・施工後 (計測期間)	 ・浸潤過程の確認 ・膨潤圧、水圧変化の確認 ・湧水量と埋め戻し材の流出量の関係確認 	 ・埋め戻し材前 面を排水構造 とした条件
材の基本 特性	・モニタリ ング後	・密度、含水比、飽和度の確認 ・埋め戻し材流出状況(特に境界面)の確認	 ・埋め戻し材前 面の「土留め 壁」は設計荷重 を満たす条件

表 2.26 坑道一部埋め戻し試験の目的

2.2.4 坑道一部埋め戻し試験の概念

(1) 埋め戻し材の仕様

前述の通り透水係数 1.0×10⁻⁸m/s 以下の「低透水性」を満足することとする。図 2.79 は、ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係が示されたものである ¹⁴⁾。このグラフを参照し、処分場の地下水成分として海水系地下水を想定した場合にも、透水係数が 1.0×10⁻⁸m/s 以下となる ベントナイトの有効粘土密度を設定した場合、0.4Mg/m³以上となる。



図 2.79 ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係¹⁴⁾ (NUMO website より)

埋め戻し材(ベントナイト混合土)の配合は、JNC 第2次取りまとめ¹⁹⁾を参考にベントナイト 混合率 15wt%を設定する。これは、ベントナイトの混合率を変化させて実施した締固め試験の結 果、ベントナイト混合率 15wt%で最大の乾燥密度が得られたことによる。

(2) 埋め戻し材の施工方法

小断面坑道における、吹付け工法の成立性に関する知見の拡充を目的として、埋め戻し材の施 工方法は吹付け工法を設定する。後述する 3.1 節の埋め戻し材料の粒径に着目した室内予備試験 の結果から、室内締固め試験の最大乾燥密度の増加が確認できたため、求められる埋め戻し材の 透水性に応じ、室内予備試験で使用した材料と同等の材料を用いた場合の施工品質を設定する。

室内締固め試験結果(最大乾燥密度)と吹付け機械により施工した埋め戻し材の乾燥密度から、 吹付け機械の締固めエネルギーを推察、締固めエネルギーに応じた埋め戻し材の含水比設定と管 理をおこなうことで、吹付け工法の成立性に関する知見が拡充できる。特に、室内予備試験にお ける締固め試験結果から、締固めエネルギーが低下した場合に最適含水比が増加する傾向が得ら れているため、埋め戻し材の含水比設定においては注意が必要となる。

(3) 品質確認項目·品質確認手法

本検討における試験目的として、2.2.3 では低透水性の確認、膨潤圧の確認、埋め戻し材の流出 状況の確認等を挙げた。ここでは、国内外における事例を参考にしながら、坑道一部埋め戻し試 験の試験目的を達成するための品質確認項目、品質確認手法(計測法)を提案する。 2.1 で示した諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験、ならびに 2.2.2 (2)で示した我が 国における埋め戻し試験および参考となるその他試験の、品質確認項目と品質確認手法(計測法)、 計測の目的を表 2.27 にまとめる。

		スウェーデン	フィンランド	スイス	フランス	ベルギー	日本	日本		
		SKB	Posiva	NAGRA	ANDRA	EIG EURIDICE	JAEA 瑞浪)	JAEA 幌延)		
項目	計測法	Prototype Repository Experiment	ВАСЕКО ІІ	FE Experiment	Backfilling Demonstrator	PRACLAY Experiment	ボーリングピット 埋め戻し試験 (再冠水試験)	緩衝材流出試験	着目点	計測の目的
		竪置き	竪置き	横置き	横置き	竪置き	竪置き	竪置き		
水圧	水圧計	0	-	0	-	0	0	-		浸潤に伴う水圧の把握
*	水分計	0	-	0	-	0	0	-	浸潤	浸潤過程の把握
мл	電気抵抗	0	0	-	-	-	-	-		理め戻し材の品質管理
土圧	土圧計	0	0	0	-	0	0	-		浸潤に伴う膨潤圧の把握
変位	変位計	-	0	0	-	0	-	-	膨潤	膨潤に伴う埋め戻し材の 変位の把握
温度	温度計	0	-	0	-	0	-	-	温度	ヒーター設置による温度 上昇過程の把握
熱伝導度	熱伝導度計	-	-	0	-	0	-	-		埋め戻し材の品質管理
ಯಾ ಮಾ	試料採取	0	-	0	0	-	0	-		埋め戻し材の品質管理
齿皮	RI密度試験	0	-	-	-	-	-	-		
含水比	試料採取	-	0	-	0	-	0	-		埋め戻し材の品質管理
物理探査	レーダー・音響	-	-	0	-	-	-	-		埋め戻し材の品質管理
物性	コーン貫入試験	-	-	0	-	-	-	-	品質	埋め戻し材の品質管理
引張強度	光ファイバー	-	-	0	-	-	-	-		埋め戻し材の品質管理
歪み	歪みゲージ	-	-	-	-	0	-	-		埋め戻し材の品質管理
空隙	内視鏡	-	-	-	0	-	-	-		埋め戻し材の沈降現象の 把握
圧密	平板載荷試験	-	-	-	0	-	-	-		埋め戻し材の品質管理
排水量	水位計	-	0	-	-	-	-	-	湧水	埋め戻し材内からの排水 量の把握
浸食経路	赤外線カメラ	-	0	-	-	-	-	-	流出	埋め戻し材内に形成され た浸食経路の把握
ベントナイト 流出量	試料採取	-	0	-	-	-	-	0		埋め戻し材内から流出し たベントナイト量の把握
ガス構成	ガス検知器	-	-	0	-	-	-	-	4 m	浸潤・膨潤に伴うガス量・ 組成変化の把握
金属腐食	金属腐食評価	-	-	0	-	-	-	-	生成物	浸潤に伴う金属腐食程度 の把握

表 2.27 国内外の坑道一部埋め戻し試験および参考となる試験の品質確認項目と計測法

表 2.27 に挙げた品質確認項目の目的と実績を整理すると、水分や土圧、密度や含水比はほとん どの試験で確認されている。水圧は大深度下で行われた埋め戻し試験では計測されているが、地 上の模擬坑道で行われた試験では計測されていない。温度はキャニスターの発熱を模擬したヒー ターが設置された試験においては計測されている。その他の品質確認項目に関しては、試験目的 (例えば埋め戻し材の流出状況の確認)に応じた計測が実施されている。

本検討における坑道一部埋め戻し試験の目的(表 2.26)を達成するための品質確認項目を整理 すると、大深度の坑道におけるベントナイト混合土の膨潤圧の把握のためには、水圧・土圧の確 認が必要となる。また膨潤に至る準備段階となる浸潤過程の把握のためには水分の確認も必須の 項目となる。温度については、今回の試験計画ではキャニスターを模擬したヒーターは設置せず、 温度変化はほぼないと考えられるため品質確認項目としない。埋め戻し材の流出量については、 他試験では実績が少ないものの、今回の試験計画では土止め壁は排水構造としており、試験坑道 から外部への埋め戻し材の流出程度を確認するために品質確認項目として設定する。

これらの品質確認項目に対し、品質確認手法として計測法と計測時期を整理し、表 2.28 にまと める。表には品質確認項目ごとの計測の目的を併記する。なお、約2年間の計測期間後(モニタ リング後)の品質確認項目、品質認手法については、後述「埋め戻し材のモニタリング後品質調 査試験の検討」に示すこととする。

		計測	時期	
項目	計測法	施工中	施工後 (計測期間) 約2年間	計測の目的
水圧	水圧計	_	0	・浸潤に伴う水圧変化の把握
土圧	土圧計	_	0	・浸潤に伴う膨潤圧変化の把握
-*/\	水分計	—	0	・浸潤過程の把握
小刀	試料採取	0	_	・埋め戻し材の品質確認
密度・含水	RI 現場密度試験	0	_	・埋め戻し材の品質確認
μĹ	試料採取	0	_	・埋め戻し材の品質確認
埋め戻し材	流量	(\bigcirc)	0	・畑め戸しけの日産確認
流出量	吸光度	(())	0	・生の庆し竹の印貫唯認

表 2.28 坑道一部埋め戻し試験における品質確認項目および品質確認手法の概念

(〇) 湧水量や作業状況に応じて設定

3. 坑道一部埋め戻し試験の概念に基づく試験計画の策定

1章に示したように、坑道一部埋戻し試験の実施場所は、瑞浪超深地層研究所深度 500m 研究 アクセス南坑道から掘削した横坑を試験候補地点と考えている。このため、実現性のある試験計 画の策定にあたっては、試験候補地点の地質条件や作業条件を考慮する必要がある。計画策定に 際し、周辺岩盤や坑内環境、資機材に関して考慮する条件としては以下が挙げられる。

- ・ 結晶質岩(花崗岩)が分布する。
- ・ 日本は変動帯に位置し、瑞浪超深地層研究所の深度 500 m においてもヨーロッパ北部の結晶 質岩等と比較すると岩盤内の亀裂の発達が著しい。巨視的スケールで見た場合の岩盤内の透 水係数は高く、透水試験の結果を平均すると概ね 10⁻⁸ m/s オーダーである。
- ・ 今回の試験の実施予定の試験坑道(横坑)の天端および側壁は吹付けコンクリート、床盤は コンクリートが施工されている。
- 試験坑道の周辺は長距離にわたる坑道が施工されており、かつプレグラウトおよびポストグ ラウトを数度にわたり施工したため、試験坑道の周辺岩盤は初期的な水理条件とは異なるこ とが予想される。
- ・ 周辺岩盤内の水圧は 3.0~4.0 MPa である。ただし、今回の試験で施工する土留め壁は排水 を前提としているため、埋め戻し材内部の水圧はこれほど高くはならないと想定している。
- ・ 試験坑道の湧水は、掘削時の壁面観察結果によれば滲出程度、または滴水(0.1L/min)程度 である(図 3.1~3.6)。
- ・ 地上から地下への資機材の搬入には、換気立坑を用いる。換気立坑における資機材の運搬は、 吊荷重 11.68t の巻き上げ機を用いるため、この吊荷重を超える資機材の運搬はできない。
- ・ 換気立坑の最深部にはスカフォードが常設されており、資機材の運搬はこのベルマウス部を 通過する。そのため、ベルマウス部の直径(1.90m)を超える資機材の運搬はできない(図 3.7)。







図 3.2 試験坑道坑口 1.60~3.20m 地点の地質記載シート







図 3.4 試験坑道坑口 4.90~6.30m 地点の地質記載シート







図 3.6 試験坑道坑口 8.10~10.10m 地点の地質記載シート



図 3.7 瑞浪超深地層研究所内換気立坑スカフォード 断面図

3.1 埋め戻し材の材料および施工に関する検討

(1) 坑道仕様

坑道一部埋め戻し試験に用いる坑道の候補は、瑞浪超深地層研究所内の深度 500m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑である。以降は、この設備横坑の断面や延長、経路をもとに試験計画を 策定する。図 3.8 に設備横坑付近の平面図を、図 3.9 に設備横坑の断面図を示す。



図 3.8 瑞浪超深地層研究所内 深度 500m 研究アクセス南坑道のうち設備横坑付近平面図



図 3.9 研究アクセス南坑道および設備横坑断面図

(2) 材料仕様

「2.2.4 坑道一部埋め戻し試験の概念 (1)埋め戻し材の仕様」より、透水係数が 1.0×10⁻⁸m/s 以下となるベントナイト混合土(参考値:有効粘土密度 0.4Mg/m³以上、ベントナイト混合率 15wt%)とする。ベントナイト以外の材料(砂、砕石等)の混合率や材質(成分)については、 以下に示した室内予備試験結果や、既往の知見を参考に設定するものとする。

① ベントナイト以外の材料(砂、砕石等)の混合率設定のための室内予備試験

前述、地下空洞型処分施設の上部埋め戻し材施工確認試験における「吹付け工法」の施工実績 では、室内締固め試験の最大乾燥密度約 1.81Mg/m³に対して、現場施工時の締固め度平均値が 94%程度(範囲は約 89~100%)であることが確認されている ²³⁾。締固め度は現場施工時の締固 めエネルギーに関係がある一方、施工時の含水比によっても変動する。吹付け工法による埋め戻 し材施工の成立性を示すうえで、現場施工時の乾燥密度の変動要因(締固めエネルギー、含水比 など)を厳密に管理することは重要であるが、室内締固め試験により最大乾燥密度が増加するこ とを確認できれば、変動要因の管理を緩和することも可能であると考えられる。

本検討では、埋め戻し材の最大乾燥密度の増加に向けて、埋め戻し材料に着目した予察的な試験を実施した。ただし、埋め戻し材のベントナイト配合率は、他の埋め戻し試験材料と同様に 15wt%を基本とした。

一般に、土質材料の締固め特性は粒径幅の広い材料で最大乾燥密度が高くなる傾向がある。事 例として挙げた埋め戻し材料を見ると、ベントナイト混合土のベントナイト以外の材料は、砂ま たは砂と砕石の混合材料となっている。砂と砕石の混合材料を用いた、瑞浪超深地層研究所のボ ーリングピット埋め戻し試験における砕石は、コンクリート用砕石 1505 を用いており、ベント ナイトを含めた重量配合比率(乾燥重量比)は、ベントナイト(クニゲル V1):砂:砕石=15:35: 50 である。この材料条件において、コンクリート用砕石の最大粒径に着目し、コンクリート用砕 石 2005 を用いた場合の室内締固め試験を実施した。用いた材料を表 3.1、図 3.10 に、試験項目 を表 3.2 にそれぞれ示す。

名称	構成材料	配合*[%]	仕様	備考		
	ベントナイト	15	クニゲル V1	クニミネ工業社製		
ベントナイト	砂***	35	コンクリート用砂	花崗岩を原料		
混合土	砕石***	50	コンクリート用砕石 (2005)	花崗岩を原料		

表 3.1 室内予備試験に供した埋め戻し材の構成材料の一覧

※本試験では湿潤重量とした。 ※※奈良県吉野郡産



a) 砂

b) 砕石

図 3.10 室内予備試験の埋め戻し材の構成材料

名称	構成材料	配合[wt%]	試験項目(規格)
ベントナイト	ベントナイト	15	・含水比測定 (JIS A 1203)、密度測定 (JIS A 1202)、
	砂	35	粒度試験(JISA1204)、締固め試験(JISA1210A-
此百上	砕石	50	c法) *

表 3.2 室内予備試験の試験項目一覧

※砕石の粒度試験結果より購入時 19mm 以上の砕石が 1.3%含まれたが、JISA 1210 A-c 法に準拠させるため 19mm 以上の砕石を排除した。

a) 含水比測定、密度測定、粒度測定

各材料の購入時(混合土は混合後)の基礎物性を表 3.3 に示す。なお、含水比と土粒子密度は 3供試体の平均値を示している。

	含	上始了.					粒度			
插桁	水	上松丁	礫分	砂分	シルト	粘土分	最大	10%	60%	均等
1里天只	比	佰皮 [Ma/m3]	[%]	[%]	分[%]	[%]	粒径	粒径	粒径	係数
	[%]	[wig/m°]					[mm]	[mm]	[mm]	
クニゲル V1	6.5	2.767	0.0	0.0	23.1	76.9	0.075	-	0.00167	-
砂	4.1	2.681	8.4	86.5	3.0	2.1	4.75	0.123	0.859	6.98
砕石	0.4	2.686	100.0	0.0	0.0	0.0	26.5	5.90	11.9	2.02
混合土	2.5	2.690	55.3	29.9	6.2	6.2	26.5	0.00740	7.72	1040

表 3.3 室内予備試験の基礎物性

b) 締固め試験

締固め試験は A-c 法で実施した。また、締固めエネルギーの違いによる最適含水比と最大乾燥 密度の傾向を取得するため、突固め回数を変化させて 1Ec、0.6Ec、0.4Ec の締固め曲線を取得し た。1Ec、0.6Ec、0.4Ecの最適含水比と最大乾燥密度を以下に、締固め方法を表 3.4 に、締固め 試験結果を図 3.11 に示す。

- ・1Ec : 最適含水比 11.6%、最大乾燥密度 1.933 Mg/m³(締固め曲線からの推定)
- ・0.6Ec: 最適含水比 12.5%、最大乾燥密度 1.855 Mg/m³(締固め曲線からの推定)

・0.4Ec:最適含水比14.8%、最大乾燥密度1.799 Mg/m³(締固め曲線からの推定)

モールド寸法	内径 10.00cm、高さ 12.73cm
ランマー重量	2.5kg
落下高さ	30cm
突固め層数	3層
突固め回数	1Ec=25 回/層、0.6Ec=15 回/層、0.4Ec=10 回/層

表 3.4 締固め方法



含水比 w (%)

図 3.11 室内予備試験における締固め試験結果

含水比測定結果をもとに、ベントナイト混合土の乾燥重量比を計算すると、ベントナイト(ク ニゲル V1):砂:砕石=14.4:34.5:51.1である。また、有効粘土密度を下式により算出した結果 を以下に示す。

·有効粘土密度算出式

$$\rho_e = \frac{\rho_d (100 - R_s)}{(100 - \frac{\rho_d R_s}{\rho_s})}$$

ここで、 ρ_e は有効粘土密度(Mg/m³)、 ρ_d は乾燥密度(Mg/m³)、Rs は砂の乾燥質量での 混合率、 ρ_s は砂の土粒子密度で、Rs $\geq \rho_s$ は砂と砕石の乾燥重量平均により求めた。

・1Ec : 有効粘土密度 0.727 Mg/m³(最適含水比、最大乾燥密度から算出)

・0.6Ec : 有効粘土密度 0.656 Mg/m³(最適含水比、最大乾燥密度から算出)

・0.4Ec : 有効粘土密度 0.609 Mg/m³(最適含水比、最大乾燥密度から算出)

図 3.11 に示す室内予備試験結果から、砕石のような粒径幅の広い材料を用いることで、埋め戻 し材の最大乾燥密度の増加が見込める結果が得られ、現場施工における締固めエネルギーが0.4Ec 相当になった場合にも、埋め戻された材料の乾燥密度は1.78~1.80 Mg/m³、有効粘土密度は0.6 Mg/m³程度を見込めることが示唆された。なお、材料仕様は施工方法によっては施工性に大きく 影響するため、施工方法への適用性を確認する必要がある。 ② ベントナイト以外の材料(砂、砕石等)が透水係数に与える影響に関する考察

幌延深地層研究センターの人工バリア性能確認試験では、ベントナイト混合土の室内試験を実施して、現地発生土の堆積岩(維内層:換気立坑のGL-250m~300m近傍の掘削土)を用いた場合とケイ砂を用いた場合の、埋め戻し材の透水係数を取得している。これらの透水係数を同文献に記載されている有効粘土密度で整理すると、図 3.12のようになる。



図 3.12 幌延深地層研究センター人工バリア性能確認試験における室内試験結果 (文献 20)をもとに作成)

ベントナイト混合土は、降水系地下水と海水系地下水によって透水性が異なることが知られて いる(例えば、図 2.79)。図 3.12の透水試験で用いられた幌延地下水(HDB・6 孔 GL・366~409m から採水)の塩化物イオン濃度は、海水の塩化物イオン濃度の約 1/4 である。つまり、現地発生 土を用いたベントナイト混合土と、ケイ砂を用いたベントナイト混合土の透水性を比較するため には、水質がベントナイト混合土の透水性に与える影響を排除する必要がある。そこで、図 3.12 から「蒸留水」のデータのみを抽出し、抽出したデータを図 2.79 に重ね、有効粘土密度と透水係 数の関係で整理した(図 3.13)。

整理、比較の結果、ベントナイト混合土として幌延現地発生土を使用した場合、ケイ砂の場合 に比して透水係数が1オーダー程度高くなる傾向が見られた。以上より、ベントナイト混合土の 透水係数は有効粘土密度と相関があるものの、ベントナイト以外の混合材料によって透水特性が 変化する可能性があり、特にケイ砂以外の材料を用いる場合には透水特性を確認する必要がある ことが示唆された。なお、幌延現地発生土を使用した場合に、ベントナイト混合土の透水係数が 1オーダー程度高くなる傾向については、現地発生土には塩化物が含有しており、ベントナイト との混合時、あるいは透水試験時に塩化物イオンが溶出したことが考えられる。現地発生土の蛍 光X線分析による分析結果を表 3.5 に示す。



図 3.13 ベントナイトの有効粘土密度と透水係数の関係 (図 2.79¹⁴⁾ に、図 3.12²⁰⁾の結果を加筆)

分析項目	単位	ベントナイト	掘削土(ズリ)	ケイ砂
CO_2	%	7.45	17.1	8.60
Na ₂ O	%	2.63	1.06	2.42
MgO	%	2.58	1.01	1.62
Al ₂ O ₃	%	15.9	9.52	11.3
SiO_2	%	66.1	63.9	68.8
P_2O_5	%	N.D.	0.0521	0.129
SO_3	%	0.649	1.68	0.0510
Cl	%	N.D.	0.101	N.D.
K_2O	%	0.313	1.65	2.05
CaO	%	2.25	0.488	1.18
TiO ₂	%	N.D.	0.438	0.392
MnO	%	0.0744	0.0363	0.0886
Fe ₂ O ₃	%	2.04	2.92	3.37
NiO	%	N.D.	0.0111	N.D.
Rb ₂ O	%	N.D.	0.0069	N.D.
SrO	%	0.0212	0.0095	0.0232
Y_2O_3	%	0.0084	N.D.	N.D.
ZrO_2	%	0.0192	0.0115	0.0129

表 3.5 波長分散型蛍光 X 線分析結果²⁰⁾

N.D.:検出限界以下

ここまでの知見を整理し、本埋め戻し試験における埋め戻し材の材料仕様の参考値を以下にまとめる。

・埋め戻し材の有効粘土密度:0.4Mg/m³以上(海水系地下水を想定した場合にも、透水係数が 1.0×10⁻⁸m/s以下となる有効粘土密度)。ただし、事前に透水特 性を確認する。

・ベントナイト混合率 : 15wt%

・ベントナイト以外の材料 : コンクリート用砂(花崗岩) 35wt%
 コンクリート用砕石(2005 砕石、花崗岩) 50wt%

試験計画における埋め戻し材は、上記を参照しつつ、室内予備試験の結果も踏まえ、乾燥密度 1.8Mg/m³(有効粘土密度 0.6Mg/m³)、含水比 13.7%(0.4Ec と 0.6Ec における最適含水比の平均 値を採用)で計画することとする。

以上から、本施工において必要となる埋め戻し材の必要重量を計算すると表 3.6 のとおりとなる。

項目	数量	備考
坑道断面積	11.5 m^2	
坑道長(施工区間)	6.0 m	
設計体積	68.9 m ³	
設計重量 (乾燥重量)	124.0 t	乾燥密度 1.8 Mg/m ³ として
設計重量 (湿潤重量)	141.0 t	含水比 13.7%として
必要重量	$176.3 \mathrm{t}$	リバウンド率 25%として

表 3.6 埋め戻し材の必要数量

(3) 施工方法

前述のとおり、埋め戻し材の施工方法は吹付け工法とする。吹付け工法には、乾燥した吹付け 材料に対してノズル先端付近で加水して吹付ける乾式吹付けと、あらかじめ加水調整した材料を 吹き付ける湿式吹付けがあるが、今回の坑道一部埋め戻し試験では埋め戻し材の含水比が品質確 認上の重要な要因となるため、あらかじめ材料を混錬し含水比調整した材料を吹付け機に投入す る湿式吹付けを採用する。施工時の埋め戻し材の流れを図 3.14 に示す。

使用する施工機械は、吹付けノズル、吹付けアーム、吹付け機、コンプレッサおよび材料運搬 機器の構成とする。




各施工機械の詳細を次項に述べる。

(4) 施工機械・使用設備

施工に用いる機械を以降に示す。

① 吹付ノズル・アーム

吹付けには、遠隔操作式の吹付けロボットを使用する(図 3.15 は参考例)。遠隔操作型のノズ ルをアームに取り付け、坑道外より操作し吹付けを実施する。



図 3.15 吹付けノズル・アームの例 (SIKA 社製 Aliva-101、Aliva-302.1)

② 吹付け機

吹付け機は、その吐出能力が吹付け施工時の締固めエネルギーに影響するため、より吐出能力 の高い機械が望まれる。しかし、換気立坑ベルマウス部の直径 1.9m を超えるサイズのものは搬 入できない。また、吹付け機ホッパーの投入口が地上から 2m を超えて高いものは、埋め戻し材 の投入が困難である。以上を踏まえ、吹付け機を選定する。

図 3.16~3.18 および 表 3.7 に、地下坑道での施工あるいは余裕深度処分の関係で実施された 地下空洞型処分施設施工試験における実績で示されている、吹付け機の例とその仕様を示す。な お、上述の通り換気立坑ベルマウス部の空間的制約(直径 1.9m)から、表 3.7 の 3 機種の例のう ち S4C-1T は搬入が困難であると判断できる。 JAEA-Technology 2018-017



図 3.16 吹付機の例(1) (AGC プライブリコ社製ニードガン 2000)



図 3.17 吹付機の例(2) (SIKA 社製 Aliva-267)



図 3.18 吹付機の例(3) (三和産業社製 S4C-1T 改)

表 3.7 吹付機の仕様例

	ニードガン 2000	Aliva-267	S4C-1T	
メーカー	AGC プライブリコ	Sika	三和産業	
必要電力	220V 7.5kW	380-480V 10kW	原動機、11kW	
ノズル径 (mm)	63.5	65	詳細不明	
最大骨材粒径 (mm)	15	20	詳細不明	
所要空気圧(MPa)	0.74	0.7	0.88	
吐出量 (m ³ /h)	20	16.0	最小で 10	
寸法 W×D×H(mm)	990×1,845×1,175	935×2,110×1,330	$1,500 \times 3,400 \times 2,850$	
重量 (kg)	1,200	1,500	2,400	
備考	余裕深度処分、上部緩	一般の水平坑道にお	余裕深度処分、上部埋	
	衝材隅角部の吹付け	ける吹付けに多数の	め戻し材の吹付け施	
	施工で使用実績 ²⁶⁾	使用実績	工で改良機の使用実	
	ただし用いた材料の		績 23)	
	配合、粒径は異なる。			

③ コンプレッサ

コンプレッサは、吹付機の所要空気圧、所要空気量から仕様を決定する(例を図 3.19、表 3.8 に示す)。



図 3.19 コンプレッサの例 (北越工業社製 PDS265S)

	PDS265S
メーカー	北越工業
使用燃料	軽油
吐出圧力(MPa)	0.69
空気量(m ³ /h)	7.5
寸法 W×D×H(mm)	1,200×2,050×1,250
重量 (kg)	1,150
備考	吹付け機の性能、サイズと
	重量の制限をもとに選定
	する。
	空気量不足の際は2台で対
	応することも可能

表 3.8 コンプレッサの仕様例

材料運搬・投入

埋め戻し材は、地上で混錬および含水比調整をおこなった後に大型土嚢に詰め、立坑から地下 500m まで降ろし設備横坑へと運搬される。立坑の坑底から設備横坑までは約60m であり、この 間はフォークリフトによって運搬する。

埋め戻し材の吹付け機への投入は以降のとおりとする。(i)吹付け機のホッパー高さまで足場を 作成する。(ii)フォークリフトで大型土嚢を足場まで持ち上げる。(iii)スコップを用いて埋め戻し 材を大型土嚢から吹付け機のホッパーへ投入する。図 3.20 に、埋め戻し材の投入イメージを示 す。





図 3.21 に、施工機器の坑道内配置イメージを示す。



(5) 施工手順

施工は図 3.22 に述べるステップに分けて実施する。各ステップでは施工後の品質確認を目的 とした計測機器を設置するほか、施工中の品質確認方法の確立を目的とした計測をおこなう。ま た、ステップ 9 では土留め壁を設け、埋め戻し材の流出を押しとどめる。各ステップにおける作 業内容を図 3.23 に示す。





図 3.23 各ステップにおける作業内容

計測機器を設置した後に、次ステップの吹付け時に計測機器本体やケーブルが損傷せぬよう養 生をおこなう。

次ステップの吹付け時に埋まる場所へ設置した計測機器およびケーブルは、埋め戻し材を人力 で締め固めて直接吹付けが当たらないようにする。その他のケーブルは、束ねて吹付けの当たら ない場所へ避けておく。ステップごとのケーブル配線方法のイメージを図 3.24 に示す。



図 3.24 計測器設置時のケーブル配線方法

(6) 施工した埋め戻し材の品質確認手法

① 品質確認項目

瑞浪超深地層研究所の深度 500m 冠水坑道でおこなわれたボーリングピット埋め戻し試験 ²²に おいては、砂置換法による現場密度測定試験によって施工中の品質確認をおこなっている。余裕 深度処分のための地下空洞型処分施設施工試験における上部埋め戻し材施工確認試験 ²³において は、シンウォールサンプラーを用いたサンプリングによる含水比測定、湿潤密度測定に加えて、 吹付前後に 3D スキャナ測定あるいは写真測量によって三次元データを取得し、差分による吹き 付け厚の測定をおこなっている。また、SKB による Prototype Repository Test¹⁾では、密度計測 の項目として試料採取と RI 計器を用いた密度試験を挙げている。

今回の坑道一部埋め戻し試験においては、施工中の品質確認手法の確立を目的として、表 3.9

に挙げる3点を実施項目とする。盛土等における密度管理として一般的に実施される砂置換法は、 吹付けによる施工という点から水平面を確保することが難しいため、今回の試験における実施項 目の候補から除外した。

計測方法	測定内容
3D スキャナによる	・出来形測定
3 次元計測	・乾燥密度の計算
DI应由封险	・密度測定
nl 否及迅殃	・水分量測定
学生这日	・含水比測定
时(个个17术 月)X	・密度測定(パラフィン法)

表 3.9 施工中の品質確認に係る計測

② 計測方法

前述より、施工中の品質確認手法確立を目的として実施する計測は 3D スキャナによる 3 次元 計測、RI 密度試験、試料採取による含水比測定・密度測定、の 3 つである。各計測に用いる計測 機器と計測頻度、計測位置を表 3.10 にまとめる。

計測方法	使用機器	計測頻度	計測位置
3D スキャナによる	9D フキャナ	試験開始前および	土留め壁設置位置付近に
3次元計測	3D ~ + +)	ステップごと	スキャナ設置
RI密度試験	RI 計器	ステップごと	図 3.32 参照
試料採取	サンプラー	ステップごと	図 3.34 参照

表 3.10 施工中の品質確認として実施する計測(計測機器、計測頻度、計測位置)

a) 3D スキャナによる三次元計測

3D スキャナを用いて、吹付前、ステップごとに坑道内を形状計測し、吹付面の傾斜や吹き付け 厚等の出来形を測定する(図 3.25~3.27)。さらに、得られた3次元データをもとに吹付け体積を 計算、事前に計測しておいた吹付け材料の重量と含水比から乾燥密度を計算する。なお、リバウ ンド材が密度計算に計上されないよう、各ステップ吹付け後はリバウンド材を除去した後に形状 計測をおこなう。また、除去したリバウンド材は重量と含水比を計測、吹付け材料の重量から差 し引くものとする。



図 3.25 3D スキャナの例 (FARO 社製 FOCUS S70)



図 3.26 3D スキャナによる 3 次元計測手順の例



図 3.27 3D スキャナによる3次元計測イメージ

b) RI 計器を用いた密度試験

RI 密度試験は、線源から発生したガンマ線・中性子線が計測対象を透過あるいは散乱し、検出 器まで到達する現象から湿潤密度・水分量を測定する方法であり、高速道路やダム等の盛土の締 固め管理において規格化され、使用されている(図 3.28)。また地盤工学会により測定方法が標準 化されている(JGS1614)。透過型と散乱型の計測方法があり、どちらも砂置換法と同等の測定結 果を得ることができる。表 3.11、図 3.29 に透過型と散乱型の計測方法と比較例を示す。



①散乱型



② 透 過 型

図 3.28 RI計器の例

(RI計器を用いた盛土の締固め管理要領(案),建設省(1996)²⁷⁾)

項	E	散乱型	透過型	
線 酒	ガンマ線	コバルトー60	コバルトー60	
195 195	中性子線	カリフォルニウム-252	カリフォルニウム-252	
梌出哭	ガンマ線	SCカウンタ×1	GM管×5	
假山田	中性子線	He-3カウンタ×2	H e - 3 管×2	
測定方法	密度	ガンマ線工法散乱方式	ガンマ線透過型	
例だ力な	水分	熱中性子散乱方式	速中性子透過型	
本体	寸 法	310 imes 365 imes 215mm	310 imes 365 imes 160mm	
本体	重量	25 k g	11 k g	
測定範囲	(深さ)	$160\sim\!200$ mm	200mm	
測定時間	標準体	5分	10分	
	現場	1分	1分	
測定項日		湿潤密度、水分密度、乾燥密	答度、含水比、空隙率	
		締固め度、飽和度(平均値、	最大・最小値、標準偏差)	
雷	洍	DC6V内蔵バッテリ	DC6V内蔵バッテリ	
FE3	1//1	連続8時間	連続12時間	
		・孔あけ作業が不要	・計量で扱いやすい	
長	所	・路盤などにも適用可能	・表面の凹凸に左右されに くい	
		・感度が高く計測分解能力 が高い	・使用実績が多い	
		・測定表面の凹凸の影響を 受けやすい	・孔あけ作業が必要	
短	所	・礫の適用に注意を要する	・礫に適用できない場合が ある(削孔不可能な地盤)	
		・重い	・線源棒が露出している	

表 3.11 散乱型・透過型 RI 計測器の比較²⁷⁾



図 3.29 RI 密度試験(散乱型)による乾燥密度と砂置換法による乾燥密度²⁷⁾

透過型の試験機は、その性質から試験対象を 20cm ほど掘削し、そこに線棒を差し込む必要が ある。今回の坑道一部埋め戻し試験においては、わずかな損傷であっても水みちとなり得る可能 性を除去するため、掘削の必要がない散乱型の RI 計器を用いた密度試験を採用する。散乱型の RI 計器の例を図 3.30 に、密度計測手順を図 3.31 に、計測点を図 3.32、図 3.33 に示す。

計器は一日に一度、標準体を用いて校正をおこなう。その後、現場バックグラウンド(BG)測 定をおこない、順次計測点にて測定をおこなう。また計測対象面は RI 計器に対して密着している 必要があり、そのため計測前には吹付け面が平面となるよう整形を施す必要がある。



図 3.30 散乱型 RI 計器の例(株式会社フィールドテック)



図 3.31 RI計器(散乱型)による密度計測手順の例



図 3.32 各ステップにおける RI 密度試験実施位置





c) 試料採取による含水比測定・密度測定

ステップ毎に試料採取をおこない、採取した試料から含水比測定、密度測定をおこなう。採取 地点は水分計を設置した位置に近接する定点とし、土の含水比試験(JISA1203)、土の湿潤密度 試験(JISA1224)を実施する。計測点を図 3.34、図 3.35に示す。



図 3.34 各ステップにおける試料採取の実施位置



図 3.35 試料採取の実施全位置

3.2 土留め壁の検討

3.2.1 土留め壁検討条件の設定

(1) 土留め壁の設置目的と前提条件

本検討における土留め壁は、埋め戻し材の密度保持を目的に設置する。また、土留め壁は壁か らの排水を前提とする。埋め戻し箇所、土留め壁設置箇所となる坑道壁面には、吹付けコンクリ ートが施工されている。吹付けコンクリートは、肌落ち防止や応力分布の平滑化等の効果を発揮 して、周辺地山の安定化を図っている。作業の安全性を確保するため、埋め戻し試験においては 吹付けコンクリートの撤去はおこなわないこととする。

(2) 荷重条件

土留め壁を検討する際の荷重条件を設定する。土留め壁が受ける荷重として以下を想定する。

- ・埋め戻し材(ベントナイト)の膨潤圧
- ・埋め戻し材の静止土圧
- ・坑道高さ相当の水圧

(3) 土留め壁に用いる材料・構造

(1)に示す目的「埋め戻し材の密度保持」を達成するため、(2)に示す荷重条件に耐え得る材料、 構造を選定する。その他、埋め戻し後の調査として、埋め戻し材の浸潤過程の把握をおこなう。 浸潤過程は水分計を用いて計測する計画であるが、浸潤過程が目視で確認できる土留め壁の材料・ 構造について検討する。

3.2.2 土留め壁の設計

(1) 坑道の形状と設計荷重

土留め壁の設計にあたり、候補地点の坑道形状を図 3.36 に示す。また、荷重図を図 3.37 に、 設計荷重の算定結果を①~③に示す。



図 3.36 候補地点の坑道形状



図 3.37 荷重図

- ・埋め戻し材の平衡膨潤応力:pb1=100(kN/m)
- ・埋め戻し材の静止土圧 : pb2=18.3(kN/m)
- ・坑道高さ分の静水圧 : pw=32.3(kN/m)

① 埋め戻し材の平衡膨潤応力(p_{b1})

埋め戻し材の平衡膨潤は、図 3.38 に示される有効粘土密度と平衡膨潤応力の実験式 ²⁸⁾より算 出する。埋め戻し材の有効粘土密度は、「3.1 (2)材料仕様」で 0.4 Mg/m³以上を、目標値として 0.6 Mg/m³を設定した。ここでは、密度のバラツキも考慮し、有効粘土密度 0.7 Mg/m³の場合の平衡 膨潤応力を求めることとする。また、瑞浪超深地層研究所の地下水は降水系地下水であるので、 降水系地下水の実験式を用いることとする。



図 3.38 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係

・降水系地下水の実験式:

 $\sigma = \exp(3.94\rho_e^3 - 13.71\rho_e^2 + 18.06\rho_e - 9.60)$

ここで、 σ は平衡膨潤応力(MPa)、 ρ eは有効粘土密度(Mg/m³)である。 ρ e=0.7Mg/m³のとき、

 $\sigma = \exp(3.94\rho_e^3 - 13.71\rho_e^2 + 18.06\rho_e - 9.60)$

=0.098≒0.1MPa pb1=100(kN/m)

埋め戻し材の静止土圧(pb2)

埋め戻し材の静止土圧を p_{b2} (kN/m)、静止土圧係数を K_0 、埋め戻し材の水中単位体積重量を γ_b ' (kN/m^3)、坑道高さを h (m) とした時、埋め戻し材の静止土圧(有効応力)は下式によっ て算出した。

$$p_{b2} = K_0 \times \gamma_b' \times h$$

pb2: 埋め戻し材の静止土圧(kN/m)

Ko:静止土圧係数(=0.5)

γb': 埋め戻し材の水中単位体積重量(kN/m³)

h:坑道高さ(m)(=3.3m)

ここで、埋め戻し材の基礎物性は「3.1(2)材料仕様」の室内予備試験を参考に設定する。埋め戻し材の飽和単位体積重量 ρ_{sat} (Mg/m³) は、次式によって算出する。

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + \rho_w e}{1 + e}$$

 ρ_{sat} : 埋め戻し材の飽和単位体積重量(Mg/m³) ρ_{s} : 埋め戻し材の土粒子の密度(Mg/m³) (=2.690Mg/m³) 室内予備試験(表 3.3)より ρ_{w} : 水の密度(Mg/m³)(=1Mg/m³) e: 間隙比

ここで、間隙比 e は次式によって算出する。また、埋め戻し材の乾燥密度 ρ_d (Mg/m³) は 1.80Mg/m³ とする。

$$e = (\rho_s / \rho_d) - 1$$

 $\rho_{s}: ± 粒子の密度(Mg/m³)(=2.690Mg/m³) 室内予備試験(表 3.3) より$ $<math>\rho_{d}: 乾燥密度(Mg/m³)(=1.80Mg/m³)$

- 115 -

$$e = (\rho_s / \rho_d) - 1$$

=(2.690/1.80)-1
 ≈ 0.494

以上より、埋め戻し材の飽和単位体積重量 ρ sat は、

$$\rho_{sat} = \frac{\rho_s + \rho_w e}{1 + e}$$

=(2.690+1.0×0.494)/(1+0.494)
=2.131(Mg/m³)
 $\gamma_{sat} = \rho_{sat} \cdot g$
=2.131×9.8
 \approx 20.9(kN/m³)

埋め戻し材が飽和状態、すなわち地下水位が坑道天端にあるとした場合について、有効応力を 求める。有効応力は、全応力から間隙水圧を差し引いた分となる。したがって有効応力を求める ための埋め戻し材の密度を水中単位体積重量γ_bとすると、

$$\gamma_b' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$
$$= 20.9 \cdot 9.8$$
$$\Leftrightarrow 11.1 (\text{kN/m}^3)$$

γ b': 埋め戻し材の水中単位体積重量(kN/m³)
 γ sat: 埋め戻し材の飽和単位体積重量(kN/m³)
 γ w: 水の単位体積重量(kN/m³)(=9.8kN/m³)

以上より、埋め戻し材の静止土圧は、

 $p_{b2} = K_0 \times \gamma_b' \times h$

 $= 0.5 \times 11.1 \times 3.3$ = 18.3 (kN/m)

pb2: 埋め戻し材の静止土圧(kN/m)

Ko:静止土圧係数(=0.5)

γb': 埋め戻し材の水中単位体積重量(kN/m³)(=11.1N/m³)

h:坑道高さ(m)(=3.3m)

③ 坑道高さ分の静水圧

坑道高さ分の静水圧を pw (kN/m)、水の単位体積重量を γ w (kN/m³)、坑道高さを h (m) としたとき、坑道高さ分の静水圧は下式によって算出する。

 $p_w = \gamma_w \times h$

=9.8×3.3

 \approx 32.3(kN/m)

pw:坑道高さ分の静水圧(kN/m) γw:水の単位体積重量(kN/m³)(=9.8kN/m³)

h:坑道高さ(m)(=3.3m)

(2) 土留め壁の材料選定

諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験では、埋め戻し材の前面には主にコンクリート 製の「プラグ」が設置されている。これは、坑道埋め戻し試験の「プラグ」に止水性を期待してい るためである。本検討で検討している埋め戻し試験では、土留め壁は排水構造として、埋め戻し 材の浸潤過程を把握する。浸潤過程は水分計を用いて計測する計画であるが、浸潤過程が目視で 確認できる土留め壁の材料を選定することが望ましい。このように、埋め戻し材を目視で確認で きる壁を採用した事例としては、Posiva 社の BACEKO II プロジェクトがある(図 2.22)。

荷重条件に耐え視認性の良い土留め壁の材料として、コンクリート型枠で打設状況を目視確認 するために開発された「スルーフォーム」がある。スルーフォームは、通常のコンクリート型枠 においてベニア材を用いる箇所に樹脂板を用いており、型枠内部の状況が目視で確認できる製品 である。図 3.39 にコンクリート打設状況を目視確認している状況を示す²⁹⁾。本製品による、土 留め壁の製作について、検討をおこなうこととする。



図 3.39 スルーフォーム

(3) 土留め壁の設計

スルーフォームを用いた土留め壁の計画図を図 3.40 に、計算書を付録に示す。なお、土留め壁 には、計測用ケーブルを導出するための貫通孔を3つ設ける計画とした。 後述、(4)土留め壁からの排水方法にも記したが、土留め壁と坑道吹付け面との隙間が大きいと、 埋め戻し材が膨出する可能性がある。土留め壁の製作にあたっては、実際の坑道形状を事前に取 得し、できるだけ隙間が小さくなるように加工することが大切である。



図 3.40 土留め壁計画図

(4) 土留め壁からの排水方法

埋め戻し材施工後、ベントナイトの流出量を適切に管理するための、土留め壁からの排水方法 について検討をおこなう。埋め戻し材施工側の坑道壁面からの湧水は、埋め戻し材が飽和すると 湧水の流れやすい場所を選択的に流れる。本検討では、坑道内の吹付けコンクリートの撤去をお こなわないため、吹付けコンクリートと埋め戻し材との境界面、あるいは地山と吹付けコンクリ ートとの境界面を湧水は流れるものと考えられる。埋め戻し材中のベントナイトの流出量を計測 するためには、特に吹付けコンクリートと埋め戻し材との境界面を湧水が流れる場合について考 慮する必要がある。

図 3.40 に示したように、土留め壁と坑道吹付け面との境界については、止水処理などをおこな わないため、この境界部から湧水が排水されることが考えられるが、埋め戻し材の膨潤応力が大 きい場合、この境界部から埋め戻し材が「膨出」する可能性がある。取得すべき情報はベントナ イトの「流出」であるため、この埋め戻し材の「膨出」を抑え、「流出」量を取得できるような工 夫を土留め壁に施す必要がある。

土木用資機材には、のり面工事等において「吸出し防止材」が利用されている。ここでは、「吸 出し防止材」を図 3.41 に示すように配置し、埋め戻し材の「膨出」を抑制するよう計画する。



図 3.41 吸出し防止材の配置図

ここで、A-A 断面に「水抜き孔」を計画しているが、B-B 断面と同様にA-A 断面にも「吸出し 防止材」を設置してもよい。いずれの場合においても、埋め戻される側の湧水は吸出し防止材を 通過し、土留め壁外面に排水されることにより、湧水内のベントナイト成分(ベントナイト流出 量)を取得できる構造とする。

3.3 埋め戻し材の施工後品質の検討

3 章の冒頭で述べた地質条件や原位置における計測環境、計測期間等を考慮すると、埋め戻し 材の施工後品質を確認するための計測機器には、以下の項目が要求される。

- ・ センサーおよびケーブルが水圧+膨潤圧相当の耐圧性能をもつこと。
- ・ センサーおよびケーブルに計測期間2年間の耐用性があること。
- ・ 埋め戻し材の吹き付け施工過程で、センサーおよびケーブルの設置が迅速かつ確実におこなえること。
- ・ 埋め戻し材の土留め壁外部への流出量の計測が可能であること。
- データロガーは土留め壁外に設置するため、ケーブルがフランジ等を介して土留め壁を 貫通できるものであること。
- ・ 坑道天端からの滴水に対しデータロガーが保護されていること。
- データロガーの電源は無停電電源装置より給電され、瞬間停電への対策が講じられかつ 自動的に復電されること。
- ・ 立坑内は資機材用キブル(直径 1.4m、積載荷重 400kg)、坑道内は台車による運搬が可能 であること。
- (1) 品質確認項目

「2.2.4 坑道一部埋め戻し試験の概念 (3)品質確認項目・品質確認手法」で設定した、坑道一 部埋め戻し試験における品質確認項目(計測項目)および品質確認手法(計測法)に、センサー 設置個数を追記したものを表 3.12 に示す。

試験坑道内部への地下水流入に伴う埋め戻し材の間隙水圧の把握のため、水圧計を設置する。 浸潤に伴う埋め戻し材の膨潤圧の把握のため、土圧計を設置する。埋め戻し材の浸潤過程の把握 および埋め戻し材の材質管理のため、水分計の設置、現場密度測定試験の実施、試料採取および 室内試験をおこなう。また、試験坑道内への地下水の浸入により、埋め戻し材の一部が浸食およ び運搬され、試験坑道内に留まらず土留め壁外へ流出する可能性がある。このため、埋め戻し材 からの地下水流量の把握と吸光分析による湧水中のベントナイト含有量の計測をおこなう。セン サーの設置個数は、後述の図 3.44 の水圧計・土圧計・水分計の設置位置に示す配置から判断した。

		計測	時期			
項目	計測法	施工中	施工後 (計測期間) 約2年間	センサー 設置個数	計測の目的	
水圧	水圧計	_	0	15	 ・浸潤に伴う 水圧変化の把握 	
土圧	土圧計	_	0	14	 ・浸潤に伴う 膨潤圧変化の把握 	
	水分計	_	0	25	・浸潤過程の把握	
水分	試料採取	0	_	25	 ・埋め戻し材の 品質確認 	
密度	RI 現場密度試 験	0	_	62	・埋め戻し材の 品質確認	
	試料採取	0	_	25	・埋め戻し材の 品質確認	
埋め戻し材	流量	(\bigcirc)	0	1	・埋め戻し材の	
流出量	吸光度	()	0	1	品質確認	

表 3.12 埋め戻し材の施工後品質確認項目、品質確認手法およびセンサー設置個数

(〇) 湧水量や作業状況に応じて設定

(2) 品質確認方法(計測機器、計測箇所、頻度等)

① 計測機器の選定

センサーについては、試験坑道の周辺岩盤内における地下水圧を考慮し、十分な耐圧性能を持った機器を選定することを前提とする。表 3.13 に坑道一部埋め戻し試験で使用するセンサーを示す。

計測対象	センサー名称	設置個数	計測間隔	備考
水圧	土圧計	15	5 min 以上	試験坑道の天盤、側壁、床盤および中心部
土圧	水圧計	14	5 min 以上	試験坑道の天盤、側壁および床盤
水分	水分計	25	5 min 以上	試験坑道内の上下2箇所以上
流量	流量計	1	水槽内に一定水 位が溜まるごと	
ベントナイト 流出量	分光光度計	き計 ₁		土留め壁外部の側溝
	超音波分散器	L	□迴囘以工	

表 3.13 坑道一部埋め戻し試験で使用するセンサー

水圧計の計測対象は、試験坑道内の飽和に伴い発生する水圧であり、計測結果がベントナイト の膨潤圧と混同してはならない。このため、センサー受感部への埋め戻し材の接触を避ける必要 があり、先端に多孔質フィルタを備え受感部への固体の接触を防ぐ間隙水圧計を用いる必要があ る。

計測される土圧と水圧の差が 10⁻² MPa オーダーの僅差となる可能性があるため、本試験では 間隙水圧計・土圧計ともに高い計測精度をもつ製品を選定する必要がある。表 3.14 に間隙水圧 計・土圧計の計測法を示す。

型 式 ひずみゲージ型		スライド抵抗型 (ポテンショメータ) (摺動抵抗型)	カールソン型	差動トランス型	振動弦型 (バイブレーション ワイヤ型)
変換対象	変位→電気抵抗	変位→電気抵抗	変位→電気抵抗 変位→誘起電圧		変位→共振周波
代表回路			hundry and		//// ■」周波数スイー ■ブジェネレータ
	ブリッジ直編法 他に零位法あり	直編法 他に零位法あり	ホイートストーンブリッジ 他に直編法あり	零位法 他に直編法あり	共振周波数カウンタ
最小読取り値	約5µm	約 0.3 mm	約5µm	約 0.001 mm (200 mm のゲージ長で5 µm)	約 5 µm
最大測定值	約 10000 µm	約 200 mm	約 10000 µm	約 50 mm	約 1000 µm
機械的強度 (耐震・耐衝撃性)	最も大きい	小さい	小さい	普通	小さい
経 年 変 化	大きいときあり (接着剤変質,変形 絶縁低下のため)	大きいときあり (接点の磨耗,腐食 絶縁低下のため)	大きいときあり (絶縁低下のため)	ほとんどなし	ほとんどなし
耐 湿 性	弱い	強い	弱い	強い	強い
絶縁低下に 対する影響度	100 MΩ 以上必要	100 KΩ 以上で可	100 MΩ 以上必要	50 KΩ 以上で可	5 KΩ 以上で可 (信号で周波数であって 電圧・抵抗・電流に関係 ないことによる)
自動化システム の構成の難易	容易にできる	容易にできる	容易にできる	容易にできる	容易にできる

表 3.14 間隙水圧計・土圧計の計測法 30)

間隙水圧計・土圧計としては、主にひずみゲージ型、差動トランス型、振動弦型の3種が一般 に市販されており、それぞれの特徴を比較した。表 3.15 に間隙水圧計・土圧計の選定検討を示す。 非直線性の小ささ、経済性の観点からは差動トランス型、計測精度を見ると振動弦型の選定が望 ましいと考えられる。

計測法	測定の原理	変位の 変換法	計測精度 (非直線性)	経済性	経年変化	普及状況	長所	短所
歪みゲージ型	歪みによる伸び縮み で発生する電気抵抗 変化を捉える。	電気抵抗	Δ	Δ	Δ	国内のコンク リート構造物	振動や衝撃に強い。	湿度に弱い。
差動トランス型	1次コイルと2次コイ ル間における鉄心の 移動による出力電圧 の変化を捉える。直 接差動トランス型と2 次ダイアグラム型の2 種類がある。	誘起電圧	0	0	0	国内の土構造物	出力が大きく比較的 大きな変形に適する。 電圧変化・温度変化 に強い。	ケーブルの絶縁 不良に影響され る。
振動弦型	鋼製弦の張力変化を 固有振動数の変化と して捉える。	共振周波数	Ø	Δ	0	欧米、東南アジ ア等諸外国	ケーブルの絶縁不良 が少ない。 ノイズが少ない。 長期安定性あり。	温度変化に弱 い。

表 3.15 間隙水圧計・土圧計の選定検討

水分計については、市販されているほとんどのセンサーは耐圧性能を保証していない。再冠水 試験のボーリングピット埋め戻し試験において使用された EC-5 センサー(旧 Decagon 社製) は、事前の耐圧試験により 4 MPa 圧力下での作動を確認していたが、現場での実証実験では、飽 和以降は満足な測定結果が得られていない。その原因として、製品の組み立て精度や、設置時に 無理な荷重がかかったことによる破損、および破損による長期間における耐圧性能の欠如等が考 えられる。

水分計は、センサーの構成材質・内部構造・ケーブル接続部分の構造などの堅牢性に着目し、 選定する必要がある。また、選定した水分センサーを実際に試験坑道に設置する前に、可能な限 り吹付け強度相当への耐衝撃性能、ならびに4 MPa 程度の耐圧性能を確認することが望ましい。 水分計の耐衝撃性能や耐圧性能が十分でないと判断された場合、土中に触れる受感部以外を保護 し、耐圧性や水密性を高める改良を施す必要がある。改良の仕様は、センサーの選定、保護材の 材質、充填材料等を検討した上で決定する。参考に、表 3.16 に水分計選定にあたっての候補を示 す。実施時には、材質、堅牢性や改良の確実性を念頭にセンサーを選定する。 This is a blank page.

表 3.16	水分計選定にあたっての候補

	製造メーカ、販売代 理 店等	METER社(旧Decagon Devices)		株式会社A・R・P		クリマテック株式会社		
	製品名	EC-5 土壌水分センサー	GS1 土壌水分センサー	WD-3-W-5Y	CACC-SEN-SDI	CDT-ML3	CIM-TRIME-PICO	
基本	写真	CERSICOL CHINA - LINA - CHINA CHINA - LINA - CHINA CHINA - LINA - CHINA CHINA - CHINA - CHINA CHINA - CHINA -				Pillion of the second sec		
IFI +IX	測定項目	体積含水率	体積含水率	体積含水率	体積含水率	体積含水率	体積含水率	
		静電容量法	静電容量法	TDT法	TDT法、導電率	ADR法,導電率	TDR法、導電率	
	デジタル/アナログ	アナログ	アナログ	アナログ (デジタルも可能)	デジタル (SDI)	アナログ (0-1V) (常時電源印可は不可)	アナログ (0-1V)	
	対象	砂質土	砂質土	仕様に記載なし	仕様に記載なし	仕様に記載なし	仕様に記載なし	
	測定範囲	風乾~飽和	風乾~飽和	空気中(0%) ~ 水中(100%)	0~100%	0~100%	0~100%	
	精度	±3%VWC(8dS/m以下の砂質土壌)	±3%VWC(8dS/m以下の砂質土壌)	±5% F.S	±2%	± 0.01 m3/m3	±1%	
	センサー形状	板状	ロッド	板状	U字棒状	ロッド	ロッド	
	材質	受感部は樹脂製	SUS、塩化ビニル製	ポリエステル系高接着樹脂	304ステンレス、エポキシ、ポリエチレン	304ステンレス、プラスチック	304ステンレス、(本体不詳)	
	大きさ	89×18×7mm (プローブ長さ55mm)	51×24×74 (プローブ長さ55mm)	120 [※] ×36×12nm ※ケーブル口20nm含まず (プローブ長さ50nm)	203×54×14mm (プローブ長さ160mm)	φ40×171mm (プロープ長さ60mm)	φ32×115mm (プローブ長さ110mm, φ3.5mm)	
耐性	耐衝撃性	センサー用途から衝撃に関する実 証実験は行っていないために、耐 衝撃を要する現場での使用を保証 することは出来ない。再冠水試験で は、設置時に振動コンパクタの振動 や荷重がかかり、一部が破損した 可能性がある。	センサー用途から衝撃に関する実証実験	は行っていないために、耐衝撃を要するヨ	見場での使用を保証することは出来ない。			
	耐圧性	再冠水試験では設置前に室内にて 耐圧性能が確認されていた。	センサー用途から耐圧に関する実証実験は行っていないために、耐圧を要する現場での使用を保証することは出来ない。基本的に飽和度が100%になることを想定しているので、水没 に絶えられるような構造となっているが、センサー廻りの密着性や不要な圧力により測定が不能になることがある。					
	防塵性	仕様に記載なし	仕様に記載なし	あり	仕様に記載なし	仕様に記載なし	仕様に記載なし	
	防水性	仕様に記載なし	仕様に記載なし	IP68相当	IP68相当	IP68相当	IP68相当	
その他	特徴	安価で簡便に使用できることから、 数多くの現場で使用されている。そ の数多くの使用実績を鑑み、当該 再冠水試験 でも使用された。	EC-5 等他のセンサーに比べて耐久 性が考慮されている。	国内生産のセンサーで、マイコン内 蔵により製品の個体差がない。受 感部は、土との密着性を高めること から、板状となっている。出力はデ ジタル I/Fに対応している。本体内 部は基板上の部品が樹脂により封 止されている。	センサー自体が大きく堅牢に作られ ている。標準での水密性も高く、3~ 5m くらいの飽和土中での測定実績 をもつ。出力信号もデジタル変換さ れているのでケーブル等の影響を 受けにくい。本体内部は樹脂により 封止されている。	ADR 法での測定から、塩分や有機 物が多い土に適用が可能である。 センサー内部は空洞であるので、 水密性は高いが耐圧性に難があ る。	センサー内部に測定周波数を電流 値に変換する回路を持つ。ロッドは 長いが比較的太く、土中の応力に よるロッドの変形がない。さらに φ 6 × 160mm の製品もある。高額なう え、納期に時間が掛かる。	
	耐衝撃・耐圧改良の難易性	改 良治 具を製作する場合、工夫が 必要である。	センサー本体が土中での使用に適 した構造となっていないため、改良 治具を製作する場合はかなりの工 夫が必要である。	外的要因で受感部が歪んだ場合、 センサー根元などから水が浸入す る可能性があり、改良治具に工夫 が必要である。	本体が大型かつBOX 状であるため に、改良治具の製作に工夫が必要 である。	センサーとケーブルが分離している ため、改良治具となる保護管の設 計が比較的容易である。	本体が円筒形であり改良治具の設 計が容易である。	
	zンサー価格(標準ケーブル長)	15,000	20,000	19, 500	34,000	130,000	175,000	
	メリット	耐圧試験済 安価	比較的堅牢 安価	センサー本体が堅牢 安価	受感部が堅牢 デジタル計測	耐圧性はない 耐圧治具の製作は比較的容易	耐圧治具の製作は容易	
	デメリット	受感部が曲げに対して脆弱	センサー本体の形状が特殊 耐圧治具の製作が困難	受感部が曲げに対して脆弱	大型 耐圧治具の製作が困難	高価	高価	
評価	性能面	0	0	Ô	0	0	0	
	耐衝撃性・耐圧性(改良なし)	0	0	0	©		0	
	町 衝撃・耐圧 改長の 容易さ 怒 溶性 (センサー 年セ)			 		 	 ∧	
	絵合評価		©	<u> </u>	<u> </u>	0	∧	
				♥			Δ	

※赤字は、評価の上で特に着目した特徴

2 室内試験

坑道一部埋め戻し試験の実施前後の埋め戻し材の品質確認として、埋め戻し材の試料採取による土質試験を実施する。埋め戻し材の試料は、埋め戻し材施工中(吹き付け施工中)にサンプラーにより採取する、埋め戻し材施工後はコアボーリングにより採取するものとする。採取地点は水分計を設置した位置に近接する定点とする。

なお、埋め戻し材施工中の品質確認手法については、「3.1 埋め戻し材の材料および施工に関す る検討 (6)施工した埋め戻し材の品質確認手法」に示したとおりである。また、埋め戻し材施工 後の品質確認は、一定期間のモニタリングを経た後に実施する。具体的には、後述する「3.4 埋め 戻し材のモニタリング後品質調査試験の検討」に示す。

埋め戻し材流出量の計測

埋め戻し材の流出量の把握のため、試験坑道(埋め戻し領域)からの排水流量と排水中のベン トナイト濃度を計測する。土留め壁外側の側溝に水位計を設置し、土留め壁内部(試験坑道)か ら流出して側溝へ流下した地下水の流量を経時的に把握する。

試験坑道(埋め戻し領域)からの流出とアクセス南坑道の湧水が混合しないよう、アクセス南 坑道の側溝を一部新設かつ一部埋め戻し、アクセス南坑道奥側の湧水と試験坑道内部(埋め戻し 領域)からの排水を独立させる。試験坑道(埋め戻し領域)からの排水が所定の方向となるよう、 新たに施工する側溝には傾斜を持たせ、かつ側溝上部には蓋を設置し、水分の蒸発や外部からの 粉塵の侵入を防ぐことが望ましい。

埋め戻し材の流出量については、「2.2.2 我が国における埋め戻しに関する技術的成立性 (2) 我が国における埋め戻し材試験の計測実績」に示した吸光分析法によるベントナイトの流出量の 計測法を用いる。土留め壁前の側溝を流下する水を週1回程度に捕集ビンで採取し、室内で分光 光度計を用いてベントナイト濃度を求め、埋め戻し材の流出量を把握する。図 3.42 に排水流 量・ベントナイト濃度計測の概要を、図 3.43 に水位計と採水装置および側溝の位置を示す。



図 3.42 試験坑道の排水流量、ベントナイト濃度計測の概要



図 3.43 水位計と採水装置および側溝の位置(埋め戻し材流出量計測)

- ④ 計測機器の設置
- a) センサー設置位置

埋め戻し材内におけるセンサーの設置位置を提案するにあたり、地下水の浸入過程と埋め戻し 材の膨潤過程、および埋め戻し材の試験坑道外への流出に留意する必要がある。

・試験坑道内へは、地下水は主に坑道の天端、側壁および切羽面から浸入すると考えられる。

- ・このため、埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって、地下水による埋め戻し材の浸潤が進行する。浸潤した箇所から埋め戻し材の膨潤が開始し、膨潤も埋め戻し材の周縁部から中心部に向かって進行するものと考えられる。
- 一方、試験坑道内へ流入する地下水は、壁面の吹付けコンクリートと埋め戻し材の境界ある いは埋め戻し材内を通過し、重力により試験坑道の床盤に集まる傾向も持つと考えられる。
 この場合、試験坑道内の上部では不飽和かつ下部では飽和の傾向となり、鉛直方向の水分分 布の差異が発生する可能性がある。

これらの現象の進行過程を経時的に把握するため、センサーの配置は下記の考え方に基づくこととする。

・浸潤過程を観測するため、水分計は埋め戻し材内の平面上に設置する。鉛直方向で水分分布 差異が発生する可能性を考え、設置平面は試験坑道内の上下2面とする。

- ・埋め戻し材の膨潤過程と膨潤圧を観測するため、土圧計を天端、側壁、床盤に設置する。
- ・浸潤に伴う水圧の上昇と、土圧の結果と合わせて埋め戻し材の膨潤圧を算出するため、水圧 計を土圧計に近接するよう設置する。また、埋め戻し材内の中心部にも設置する。
- ・土留め壁外側の坑道脇の側溝に流量計および採水装置を設置し、湧水量の計測および埋め戻 し材の流出量計測をおこなう。

図 3.44 に土圧計・水圧計・水分計の設置位置を示す。

This is a blank page.

JAEA-Technology 2018-017



図 3.44 水圧計・土圧計・水分計の設置位置

b) センサーおよびケーブルの設置方法

今回の坑道一部埋め戻し試験では、埋め戻し材は吹付け作業を繰り返して斜面を形成しながら 施工する計画である。「2.1.1 スウェーデン SKB 社「Prototype Repository 概要報告書」の調査 結果」で述べた SKB の Prototype Repository Test では、埋め戻し材をホイールローダーでまき 出し、転圧機で締め固め、斜面を形成しながら埋め戻し施工しており、斜面を形成する点で今回 の試験と施工法が類似する。

SKBでは締固めた後、センサー設置地点には深さ3cmの溝を掘り、センサーを埋設している。 センサーと溝との隙間を埋めるために埋め戻し材を充填し、再度締固めており、今回の試験にお いてもこのような手法によりセンサーを埋設する。また、強力な締固め荷重による破損を防ぐた め、センサーやケーブル上部は埋め戻し材を盛土し、手で締め固める計画とする。図 3.45 に埋め 戻し施工時におけるセンサー設置のイメージを示す。



図 3.45 埋め戻し材施工時におけるセンサー設置のイメージ

データロガーは土留め壁の外側に設置するため、ケーブルは土留め壁を貫通する必要がある。 再冠水試験における埋め戻し試験では、フランジを用いて貫通させており、今回の試験において も同様の施工法を取る計画とする。

SKBの Prototype Repository Test では、試料採取のためのボーリングコア掘削の際に、計測器のケーブルと接触しないよう埋め戻し材内にケーブルコリドーを設けてケーブルを集めている。 今回の試験においても、試験後のオーバーコアリング実施の際に計測センサーやケーブルを意図 せず破損しないようケーブル配線部分を定めておく。

⑤ データ管理

坑道一部埋め戻し試験の実施にあたり、取得するデータから下記事項について比較し、変化過 程の情報を整理する。

・膨潤過程の把握

土圧・水圧から土圧計の設置地点ごとの膨潤圧を算出し、膨潤過程を把握する。

・浸潤過程の把握

水分の飽和状況と水圧上昇程度の分布を整理する。飽和後に水圧が上昇する状況を把握す る。

・水圧回復過程の把握

深度 500m の試験坑道およびアクセス南坑道の掘削以前の初期水圧に対して、今回の試験 により埋め戻し材内の水圧の回復程度を把握する。試験坑道付近の、先進ボーリングとして 掘削された 12MI32 号孔における初期水圧と比較して検討する。

以上の項目について、試験坑道内の周辺-中心、切羽側-土留め壁側、鉛直上部-下部の位置関係 から変化傾向を把握する。
3.4 埋め戻し材のモニタリング後品質調査試験の検討

本節では、センサー等を用いた埋め戻し材の施工後品質のモニタリング完了後、オールコアボ ーリングにより採取した埋め戻し材の物性値の取得や、オールコアボーリング孔を用いた原位置 透水試験に関する検討について示す。

(1) 品質確認項目

本試験における埋め戻し材への要求性能は、「2.2.1 坑道埋め戻しへの要求性能の検討」に示し た通り「低透水性(坑道内が卓越した地下水の流動経路とならないこと)」であり、埋め戻し材の 仕様として、透水係数 1.0×10⁻⁸m/s 以下の「低透水性」材料を設定した。

埋め戻し材の施工直後の品質(低透水性)は、施工前の材料試験や施工中の品質確認試験によ って確認することができる。一方、本試験における埋め戻し材の前面は、排水構造を前提条件と した「土留め壁」を設置することから、試験坑道内の湧水量にもよるが埋め戻し材の流出(密度 低下)が発生する可能性がある。また、試験坑道の支保工にはセメント系材料(吹付けコンクリ ート)が使用されていることから、埋め戻し材中のベントナイトの特性が変化することも考えら れる。これらを要因として、施工直後の埋め戻し材の品質は、時間経過とともに変化することが 考えられるため、時間経過した埋め戻し材の特性を把握し、評価する必要がある。なお、評価に あたっては、施工前の材料試験の結果や施工中の品質確認試験結果、モニタリング結果を分析す ることで、埋め戻し材の特性変化に至る過程を推定することが可能と考える。表 3.17 にモニタリ ング後の埋め戻し材の品質確認項目および品質確認手法(試験方法)を示す。

項目	試験方法	試料採取位置/ 試験位置	試験の目的
 試料採取による 品質確認 ・飽和度 ・乾燥密度 ・透水係数 	 ・含水比試験(JISA 1203) ・土の湿潤密度試験(JISA 1225) ・土粒子の密度試験(JISA 1202) ・透水試験(JISA 1218) 	 水分計設置位置付近 (図 3.46参照) (図 3.35参照) 	 ・飽和度、乾燥密 度、透水係数の 変化 (施工直後との 比較)
原位置試験による品質確認・透水係数	・単孔を利用した透水試験 (JGS 1314)に準拠	 ・水分計設置位 置付近 (図 3.46参照) 	・原位置試験の適 用性評価

表 3.17 埋め戻し材のモニタリング後品質確認項目一覧

(2) 品質確認方法

① 試料採取による品質確認

埋め戻し材の施工直後の品質(低透水性)とモニタリング後の品質の変化を確認することを目 的に、モニタリング完了後オールコアボーリングにより試料採取をおこなう。試料の採取方法に ついては、後述の図 3.47 による。試験方法は JIS 規格に準じ、試料採取位置は施工直後の品質 確認位置(水分計設置位置)付近とする(図 3.46参照、図 3.35参考)。なお、採取した試料の透 水試験は、飽和に至る時間等を考慮して試験数を設定する必要がある。

原位置試験による品質確認

オールコアボーリングによる試料採取区間を対象に、ボーリング孔内において透水試験を実施 する。ベントナイト混合土のように低透水性材料の場合、モニタリング完了後(約2年後)にお いても十分に埋め戻し材が飽和しない可能性がある。このような不飽和材料に対して、原位置透水試験の手順、解析法が適用可能であるかも含めて、評価することを目的とする。

図 3.46 にオールコアボーリング位置および原位置透水試験の実施区間を示す。合計 5 孔掘削 し、いずれの孔も図中の断面 B~C 及び断面 E~F の 2 区間をオーバーコアリングサンプリング 試料の採取区間かつ原位置透水試験の実施区間とする。 JAEA-Technology 2018-017

A1



図 3.46 オールコアボーリング位置および原位置透水試験の実施区間













図 3.47 にオールコアボーリングの実施概要を示す。掘削、コアチューブの引き抜き、ケーシン グ押し込みの手順を繰り返し、コア取りは HQ (ビット外径 97.5mm)を使用する。ケーシングは 図 3.48 に示す通り、穴あきケーシングを用いる。





図 3.48 穴あきケーシングの概要

図 3.49 には現場透水試験の試験区間の概要を示す。試験区間は、孔内に挿入したケーシング内 にて設置深度を移動できるダブルパッカーシステムを用いて区画する計画とする。



図 3.49 現場透水試験の試験区間の概要

表 3.18 に原位置透水試験の実施概要、図 3.50 に原位置透水試験の実施手順を示す。なお、前述の通り試験区間周辺の埋め戻し材に含まれる水分が不飽和の場合、区間によっては十分な試験結果が得られない可能性がある。また、ここで述べる透水試験の手順や解析法は一般におこなわれているものであり、実際に試験をおこなう際の埋め戻し材の状態によっては十分に適応できない可能性があるため、詳細は別途検討する必要がある。

試験名	数量(回)
パルス試験	2
定流量試験(注入法)	1
定流量試験(回復法)	1

表 3.18 原位置透水試験の実施概要(1区間あたり)



図 3.50 原位置透水試験の実施手順

透水試験は、穴あきケーシングの設置区間を対象に、下記の一連の手順で実施する。図 3.51 に 原位置透水試験の概要を示す。

- ① 観測装置の準備: 孔内にダブルパッカーシステムを挿入する。
- ② パッカー拡張 (INF): パッカー2本を拡張させ、試験区間を形成する。
- ③ 間隙水圧の計測(PSR):試験区間に注水する。注水量は埋め戻し材内の飽和状況によるため、あらかじめ注水用地下水を準備しておく必要がある。また、平衡間隙水圧が取得できない場合は、パルス試験・定流量試験では、間隙水圧の変動量による影響を極力低減できる大きな水頭差を確保することとする。
- ④ パルス試験(PI、1回目)
- ⑤ 定流量注入試験(RI)
- ⑥ 定流量回復試験(RIS)
- ⑦ パルス試験(PI、2回目)
- ⑧ パッカー収縮 (DEF): パッカーを収縮させ、引き抜く



図 3.51 原位置透水試験の概要

a) パルス試験

パルス試験では注入試験(PI)をおこなう。手順を以下に示す。

- ① 注水用の圧力容器を準備し、容器内に間隙水圧+αの圧力を掛ける。
- ② 試験区間へ通ずるバルブを瞬間的に開放し、試験区間に注水加圧する。
- ③ 注水後の水圧収束過程を測定する。時間当たりの水圧変化量から後述の理論式にて水理定数 を算出する。
- ④ 注水前後の圧力容器の重量の差から、注水量を測定する。この水量から区間の圧縮率
 (Compressibility)を求める。

b) 定流量試験

定流量試験では定流量注入試験と回復試験(RI/RIS)をおこなう。手順を以下に示す。

- パルス試験の結果により、目標とする圧力変動量・流量を設定する。仮に区間の湧水量が把 握できた場合は、これも流量設定の指標とする。目標とする圧力変動量は間隙水圧の変動を キャンセルするために十分なものとする。設定流量が1L/min以下の場合はプランジャーポ ンプ(HPLC)を、それ以上の場合は最大5L/minまで設定可能なモーノポンプを選定する。
- ② 試験区間に設定した流量にて水を注入する。
- ③ 解析に十分なデータ(後述)が取得できたことを確認し、注入を終了して回復試験に移行す る。

(※5 L/min の注水量で解析できるデータが得られない場合は、試験法の再検討などを行う。)

試験中は、【水位低下量-Log (t/r²)】プロットや【圧力変化の時間微分(デリバティブ)】プロットを PC 上で表示し、圧力変動を観測する。解析に必要なデータが取得できたことをプロット 形状から判断して試験を終了する。

パルス試験の解析法は、「地盤調査の方法と解説 第7編 地下水調査 第3章 単孔を利用した透水試験」に記される直線勾配法の Hvorslev の解析式³¹⁾と、曲線一致法の Cooper 他の解析式³²⁾を用いる。定流量試験の解析法は、注入試験では Cooper-Jacob 法³³⁾、回復試験では Agarwal 法の解析式³⁴⁾を用いる。

3.5 試験実施工程

1年目の試験実施に要する日数を、下記の仮定を元に設定する。

- ・坑道内での一日の作業時間は、地下 500m までの移動や準備を考慮し、6 時間とする。
- ・余裕深度処分における地下空洞を利用した吹付施工試験実績²³⁾では、毎時約2.0t(平成25年は毎時1.909t、平成26年度は毎時2.280t、表3.19参照)であったことから、吹付速度は毎時1.5tを仮定する。
- ・ステップ毎の吹付エサイクルタイムは、品質管理計測も考慮し、表 3.20のように仮定する。
- ・型枠設置には2日を仮定する。
- ・計測工における計測機器の設置および養生は、1日につき2.5個を仮定する。

項目		平成26年度	平成25年度
吹付け量	(kg)	48, 572	57, 135
吹付け速度	(kg/h)	2, 280	1, 909
施工速度	(kg/h)	1, 214	995
10m ³ 当たり吹付け時間	(hour,min)	8:24	10:18
10m ³ 当たり施工時間	(hour,min)	15:47	19:46
リバウンド率	(%)	12.7	14.8

表 3.19 既往の埋め戻し材の吹付け施工試験の実績 23)

ここで、吹付け速度は吹付け作業のみの速度であり、施工速度は材料を供給機に投入してから 吹き終わるまでの時間(ホースが閉塞した際の処理時間等を含む)をもとにした速度を示す。

表 3.20 吹付エ1ステップにおけるサイクルタイムの推定

	項目	単位当たりの作 業時間(min)	数量	単位	作業時間 (min)	備考
吹付けエ	(1ステップ)					
	埋め戻し材投入	10. 0	26	捴	260. 0	フレコンバック1袋につき0.5t
	吹付け	40. 0	12. 8	t	512. 7	数量は施工量の全体 (t) /11 (ステップ) 吹付け速度は1.5t/hourとして計算
	リバウンド除去	20. 0	1	個	20.0	
	RI密度試験	5.0	9	点	45.0	ステップごとの実施数の最大値
	試料採取	10.0	6	点	60.0	ステップごとの実施数の最大値
	3Dスキャナー計測	20. 0	1	回	20.0	
				計(min)	917. 7	
				計(hour)	15.3	
				計(day)	3.0	実作業時間を6時間とする。

以上をもとに設定した1年目の実施概略工程を表 3.21に、2年目の実施概略工程の検討結果を 表 3.22に示す。2年目の概略工程の検討では、1孔(6m)あたりのボーリング掘削日数を3日、 原位置透水試験を2日×2深度と仮定した。

表 3.21 実施概略工程表(1年目)

5	実働日数	 5	1	0	<u> </u>	i	15		20			25			30			35			40			45			50		55		60		65		7	0		75	 	80
	埋め戻し材準備・運搬																																							
進供工	埋め戻し材搬入																																							
华1佣工	機材搬入																			П	П																			
	機材配置																																							
	材料投入・吹付け			<mark>א ד</mark>	テップ1		スラ	テップ2	<mark>ג ד</mark>	テップ	3	7	テッフ	1 ⁶ 4		ステッ	<mark>プ5</mark>		ステッ	<mark>プ6</mark>		ステッ	プ 7		ステッ	<mark>プ8</mark>		ステ	ップ10	ステ	ップ11	ステ	・ップ12							
映画のエ	型枠設置																											ステ	ップ9											
	計測機器設置																																							
計測工	計測システム構築																																							
	計測開始																																							

表 3.22 実施概略工程表(2年目)

		実働日数			5	10	D	1	15	2	20		25		30		35		40		4	5		50		55	60
計測工	データ取	2得	計測7ヵ月																								
	準備工	(資機材搬出入、段取り替え)																									
	No.1孔	オーバコアリング(ケーシング含む)																									
		原位置透水試験工																									
	No.2孔	オーバコアリング(ケーシング含む)																									
		原位置透水試験工																									
品質確認工	No.3孔	オーバコアリング(ケーシング含む)																									
		原位置透水試験工																									
	No.4孔	オーバコアリング(ケーシング含む)																									
		原位置透水試験工																									
	No.5孔	オーバコアリング(ケーシング含む)																									
		原位置透水試験工																									
		評価・取りまとめ																									

3.6 施工数量

前節までに検討した計画に基づき、施工に必要となる施工機器、実施する計測の点数の概略数 量を検討した結果を表 3.23 (1年目)、および表 3.24 (2年目)に示す。

分類	項目	単位	数量	備考
埋め戻し材料	ベントナイト混合土	t	193.9	必要重量*× 1.1 (ロス**を考慮)
	吹付けノズル	日	65	搬入から吹付け工終了まで
	吹付けアーム	日	65	搬入から吹付け工終了まで
施工機器	吹付け機	日	65	搬入から吹付け工終了まで
	コンプレッサ	日	65	搬入から吹付け工終了まで
	フォークリフト	日	65	搬入から吹付け工終了まで
土図み廃	スルーフォーム	式	1	
上田の堂	支保部材	式	1	
	3Dスキャナ	□	12	施工開始前+ステップごと
施上中 試験・計測	R嘧度試験	点	62	
	試料採取	点	25	
	計測機器設置	日	22	
	計測システム構築	日	5	
	データ回収	旦	23	4.5週(週1回計測)×5ヵ月
	水圧計センサー	個	15	
	土圧計センサー	個	14	
	水分計センサー	個	25	
	流量センサー	台	1	
	センサー改良	個	25	水分計センサーの耐圧改良
	水圧計ケーブル	m/ 個	30	
施 上 後 試験・計測	土圧計ケーブル	m/ 個	30	
	水分計ケーブル	m/ 個	30	
	水圧計データロガー	台	1	
	土圧計データロガー	台	1	
	水分計データロガー	台	5	
	流量計データロガー	台	1	
	データ回収パソコン	台	1	
	自動水位ポンプ	台	2	
	流出試料採取器	台	1	
	流出量計測器	台	1	

表 3.23 実施概略数量表(1年目)

* 必要重量=設計重量×(1+リバウンド率)

** 材料のロスとは、例えば吹付け機内部に残存した埋め戻し材料などを指す

分類	項目	単位	数量	備考
施工後 試験・計測	データ回収	回	32	4.5週(週1回計測)×7ヵ月
モニタリング後 試験・計測	オールコアボーリング(HQ)	m	30	5箇所× 6m
H VOC HTDG	試料採取	点	25	
	原位置透水試験	□	10	5箇所× 2深度
	パッカー	本	2	
	ロッド	m	10	中継 用
	孔口止水装置	個	5	
	貯水 用 水タンク	台	1	
	パルス試験用水タンク	台	1	
	電子天秤	台	1	秤量21kg程度
【原位置試験】	定流量ポンプ	台	1	500~5,000mL/min
	流量計	台	1	\sim 7,500mL/min
	圧力計	個	1	5MPa
	コンプレッサ	台	1	AC100V
	流路切替装置	台	1	
	データ収集PC	台	1	プログラム追加
	解析用PC	台	1	解析ソフト追加
	データロガー	台	1	

表 3.24 実施概略数量表(2年目)

4. まとめ

超深地層研究所計画における、坑道埋め戻し技術の開発に関わる原位置試験の試験計画策定を 目的として、諸外国で実施されている坑道一部埋め戻し試験の調査と結果の整理、ならびに我が 国で実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念を提示した。また、試験概念に基づき、瑞浪超深地 層研究所の深度 500m レベルの坑道を活用した場合の坑道一部埋め戻し試験計画を策定した。

4.1 坑道一部埋め戻し試験の概念提示に関するまとめ

(1) 坑道埋め戻しへの要求性能

本検討では結晶質岩の竪置き処分概念の坑道を対象としているが、広く坑道を埋め戻す試験に ついて調査を実施することとした。調査では、以下の点を明示することに留意した。

- ・地層処分において求められている坑道埋め戻しへの要求性能
- ・坑道一部埋め戻し試験の目標、目的
- ・試験に使用された埋め戻し材の仕様と施工方法、計測

調査対象には、Prototype Repository 試験(SKB)、BACEKO II 試験(Posiva)、FE 試験(NAGRA)、 Backfilling Demonstrator 試験(Andra)、PRACLAY 原位置試験(EIG EURIDICE)を選定し た。諸外国の坑道埋め戻しへの要求性能(または準ずる用語)を調査した結果、主にスウェーデ ン、フィンランドの調査結果から、以下の項目が抽出された。

- ·移流抑制
- ・材料間の化学的安定性
- ・緩衝材位置の保持
- ・キャニスターの浮き上がり防止
- ・処分坑道の坑道安定性
- また、要求性能を満たすことを確認するための指標をまとめると、以下の項目が抽出された。
- ·透水係数
- ・膨潤圧

我が国で実施すべき坑道一部埋め戻し試験の概念の提示にあたっては、諸外国の調査結果に加 えて、我が国の実施主体である NUMO の坑道シーリングの構成要素に期待する機能と役割につ いて調査をおこない、諸外国共通する要求性能を検討する坑道一部埋め戻し試験の要求性能とし て設定した。

ここで、膨出抑制(緩衝材位置の保持、キャニスターの浮き上がり防止など)については、竪 置き処分概念の処分孔に設置される緩衝材の膨潤特性やプラグの力学特性を含めて、長期健全性 の評価をおこなった上で埋め戻し材の仕様としての成立性が検討されるものと考え、本検討では 要求性能として設定せずに、膨出抑制の評価に必要なデータ取得(埋め戻し材の膨潤圧など)を 試験目的と位置づけた。なお、材料間の化学的安定性については、埋め戻し材だけでなく坑道の 支保部材やプラグ材料とともに考慮されるものであり、埋め戻し試験のみを対象とした本検討の 要求性能に化学的安定性は設定しなかった。

さらに、処分坑道の坑道安定性については、坑道埋め戻し試験期間が短期(約2年)であるこ とから、埋め戻した後に支保部材や周辺岩盤の劣化等により坑道の安定性が損なわれることは考 えにくいことから、要求性能として坑道安定性は設定しないものとした。 以上の調査および比較検討より、本検討における坑道一部埋め戻し試験の概念の提示では、坑 道埋め戻しへの要求性能として、

・低透水性(坑道内が卓越した地下水の流動経路にならないこと) を設定した。

(2) 埋め戻しに関する技術的成立性

埋め戻しに関する技術的成立性を検討するため、諸外国に加えて我が国における埋め戻し材の 施工実績、計測実績を調査した。

埋め戻し材の施工方法については、我が国ではブロック工法、締固め工法、吹付け工法の実績 があるが、原子力機構の第2次取りまとめに示されているような小断面の坑道に対する施工実績 という観点で整理すると、吹付け工法の成立性に関する知見の拡充が課題として挙げられた。

埋め戻し材の計測方法については、諸外国と同様の計測項目(水圧、土圧、水分、密度、含水 比、流出量)の計測実績を我が国においても有しているが、坑道環境(例えば水圧)や計測期間 を考慮した計測器の設定が課題として挙げられた。

(3) 坑道一部埋め戻し試験の試験目的

坑道一部埋め戻し試験の目的は、要求性能として設定した「低透水性(坑道内が卓越した地下 水の流動経路にならないこと)」を確認すること、を挙げた。ここで、低透水性の参考値として、

「NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ」の「候補母岩の特徴および類型 化」の中から、深成岩類の透水係数を参考に 1.0×10⁻⁸m/s 以下を設定した。すなわち埋め戻し試 験では、透水係数 1.0×10⁻⁸m/s 以下を満足できる材料および施工方法を設定し確認する。

また、埋め戻し試験における材料設定や施工方法、埋め戻し材の基本特性を対象に、それぞれ の試験目的を明確にし、表 2.26 にまとめた。

(4) 坑道一部埋め戻し試験の概念

坑道埋め戻しへの要求性能や技術的成立性、試験の目的を踏まえて、埋め戻し材仕様の設定方 法や施工方法(吹付け工法)の成立性に資する知見の拡充方法、品質確認項目や品質確認手法を 提示した。また、品質確認項目ごとに計測の目的を明確にし、表 2.28 にまとめた。

4.2 坑道一部埋め戻し試験の概念に基づく試験計画策定に関するまとめ

埋め戻し試験計画の策定にあたっては、試験候補地点の地質条件や作業条件を挙げ、条件に配 慮した試験計画を策定した。

(1) 埋め戻し材料および施工に関する計画

坑道一部埋め戻し試験の概念で示した、要求性能や試験の目的に基づき、透水係数が 1.0×10⁻⁸ m/s 以下となるベントナイト混合土(参考値:有効粘土密度 0.4 Mg/m³ 以上、ベントナイト混合率 15wt%)を材料仕様として設定した。

一方、試験計画における埋め戻し材は、室内予備試験の結果をもとに、乾燥密度 1.8Mg/m³(有 効粘土密度 0.6Mg/m³)、含水比 13.7%(0.4Ec と 0.6Ec における最適含水比の平均値を採用)で 計画した。

埋め戻し材の施工方法は、知見の拡充を目的に試験の概念において吹付け工法を提示したが、 試験計画では吹付け方式(乾式と湿式があるが、湿式を選定)や候補となる施工機械(吹付けノ ズル、吹付けアーム、吹付け機、コンプレッサおよび材料運搬機器)を、試験候補地点における 作業条件を考慮して抽出した。 施工手順は、施工後の品質確認を目的とした計測機器の設置やケーブル配線、施工中の品質確認方法の確立を目的とした計測を考慮して、図 3.22 に示す施工ステップ、あるいは図 3.24 に示すケーブル配線方法を定めた。

施工中の埋め戻し材の品質確認手法として、品質確認(密度、含水比測定)のほか出来形確認 も考慮して、3Dスキャナによる3次元計測、RI密度測定、試料採取の3点を設定した。また、 それぞれの手法について計測手順や計測方法を示したほか、計測位置を定めた。

(2) 土留め壁の計画

本検討における土留め壁は、埋め戻し材の密度保持を目的とし、壁からの排水を前提とした。したがって、土留め壁が受ける荷重は以下を想定した。

- ・埋め戻し材(ベントナイト)の膨潤圧
- ・埋め戻し材の静止土圧
- ・坑道高さ分の水圧

諸外国の埋め戻し試験では、土留め壁に用いる材料にはコンクリートが使用されることが多い が、本検討では Posiva 社の BACEKOII プロジェクトと同様に、埋め戻し材の浸潤過程を目視で 確認できるよう配慮することとした。コンクリート型枠「スルーフォーム」は、上記の荷重条件 に耐え視認性の良い材料を用いていることから、本検討の土留め壁として選定、設計をおこなっ た。土留め壁からの排水方法については、埋め戻し材の「流出」を許容しながら、膨潤による膨 出を抑制する必要があることから、土留め壁に吸出し防止材を配置する計画とした。

(3) 埋め戻し材の施工後品質確認の計画

坑道一部埋め戻し試験の概念において提示した、品質確認項目や品質確認手法、品質確認項目 ごとの計測の目的を達成するため、ここではセンサーの配置や設置個数、計測間隔などを設定し た。また、各センサー(水圧計、土圧計、水分計、流量計)の特徴を示し、埋め戻し試験でのセン サー選定にあたっての課題を示した。

具体的には、埋め戻し材は浸潤とともに膨潤圧が発生するため、土圧と水圧が区別できる計測 精度のセンサー選定が必要であること、水分計は国内外で長期間の計測が困難であったとの報告 を踏まえ、耐圧性や水密性、耐衝撃性についての事前検討が必要であることを示した。

ベントナイトの流出量の計測については、既往の計測実績の調査から吸光分析法を設定した。 ただし、坑内環境調査として地質記載シートを調査した結果、試験候補地点の湧水量は微量であ ることから、流量計ではなく水位計を用いた流量測定を提案した。

(4) 埋め戻し材のモニタリング後品質の調査試験計画

埋め戻し材のモニタリング完了後の、品質確認項目、品質確認方法について検討し、計測の目 的とともに表 3.17にまとめた。計画では、埋め戻し材の要求性能として設定した「低透水性(坑 道内が卓越した地下水の流動経路とならないこと)」、埋め戻し材の仕様として設定した透水係数 1.0×10⁻⁸m/s 以下の「低透水性」が、時間経過とともにどのように変化したかを実材料や原位置 試験で確認できる項目、方法を選定した。なお、埋め戻し材の特性変化を施工前、施工中、モニ タリング後でできるだけ同条件で評価できるよう、試験方法や材料採取位置に配慮した。

(5) 試験工程

試験工程は、1年目(埋め戻し試験、計測工)と2年目(計測工、モニタリング後品質調査試験)に分けて立案した(表 3.21、表 3.22)。各年度の現場作業実施期間は、契約期間・試験結果の取りまとめ期間を考慮し、最長8ヵ月程度となるよう考慮した。

参考文献

- 1) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Prototype Repository, Opening and retrieval of outer section of Prototype Repository at Äspö Hard Rock Laboratory, Summary report, TR-13-22, 2016, 236p.
- 2) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II, SKB IPR-04-13, 2004, 104p.
- 3) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Prototype Repository, Validation of retrieved sensors from the Prototype experiment at Äspö Hard Rock laboratory, SKB P-13-31, 2014a, 37p.
- 4) Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) : Prototype Repository Sensor data report (period 010917-130101), Report No 25, SKB P-13-39, 2014b, 256p.
- 5) Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH : Geoelectric monitoring of bentonite barrier resaturation in the Äspö Prototype Repository, Final report, GRS-352, 2014, 85p.
- 6) Posiva Oy : BACEKO II Flow-Through, Open-Front and Saturation Tests of Pre-Compacted Backfill Blocks in a Quarter-Scale Test Tunnel, Working Report 2012-41, 2013b, 378p.
- 7) Posiva Oy : Backfill Production Line 2012; Design,Production and Initial State of the Deposition Tunnel Backfill and Plug, POSIVA 2012-18, 2013a, 164p.
- 8) Nagra : Implementation of the full-scale emplacement (FE) experiment at the Mont Terri rock laboratory, Swiss J Geosci, 2017.
- 9) R. Müller H, Vogt T, Garitte B, Sakaki T, Spillmann T, Hertrich M, Giroud N : Instrumenting, monitoring and heating the Full-Scale Emplacement (FE) Experiment at the Mont Terri URL, LUCOEX Conference andWorkshop, S2-1, 2015.
- 10) Köhler S, Weber H, Garitte B, R. Müller H : Backfilling at Horizontal Emplacement Tunnel with Granular Bentonite-Machine Development Pre- & Mock-up Tests and Application at the Mont Terri URL, LUCOEX Conference and Workshop, S2-2, 2015.
- 11) R. Müller H, Garitte B, Vogt T, Köhler S, Sakaki T, Weber H, Spillmann T, Hertrich M, K. Becker J, Giroud N, Cloet V, Diomidis N : Implementation of full-scale emplacement (FE) Experiment at the Mont Terri rock laboratory, Swiss Journal of Geosciences, 110, pp.287-306, 2017.
- 12) Andra: Repository Drift Backfilling Demonstrator, WM2008 Conference, 24-28 February 2008, Phoenix, AZ, 2008.
- 13) ESV EURIDICE EIG : The design and installation of the PRACLAY In-Situ Experiment, EURIDICE REPORT 13-129, 2013.
- 14) 原子力環境整備機構: NUMO セーフティケースに関する外部専門家ワークショップ資料, https://www.numo.or.jp/topics/safetycase_setsumei4.pdf (参照: 2018年2月1日).
- 15) 原子力環境整備機構: 処分場の安全機能と技術要件 (2010 年度), NUMO-TR-10-11, pp.26-27, 2011.
- 16) Posiva Oy : Disposal of spent fuel in Olkiluoto bedrock; Programme for research, development and technical design for the pre-construction phase, POSIVA 2000-14, 2000, 152p.
- 17) P. Keto, D. Gunnarsson, L-E. Johannesson, J. Hansen : ASSESSMENT OF BACKFILL MATERIALS AND METHODS FOR DEPOSITION TUNNELS, INTERNATIONAL MEETING, SEPTEMBER 17...>...18, 2007, LILLE, FRANCE, CLAYS IN NATURAL & ENGINEERED BARRIERS FOR RADIOACTIVE WASTE CONFINEMENT, 2007.

- 18) Posiva Oy : Deposition Tunnel Backfill Design for a KBS-3V Repository, Working Report 2009-129, 2010, 108p.
- 19) 核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第2次取りまとめ-分冊2地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, pp.V_64-V_65, 1999.
- 20) 中山雅, 大野宏和, 棚井憲治, 杉田裕, 藤田朝雄: 幌延深地層研究計画における人工バリア 性能確認試験-坑道の埋め戻し材に関する検討-, JAEA-Research 2016-002, 2016, 89p.
- 21) 日本原子力研究開発機構:緩衝材基本特性データベース, https://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/ (参照: 2018年2月1日).
- 22) 高安健太郎,大貫賢二,川本康司,高山祐介,見掛信一郎,佐藤稔紀,尾上博則,竹内竜史: 再冠水試験におけるボーリングピットの埋め戻し試験,JAEA-Technology 2017-011, 2017, 61p.
- 23) 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, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2013/25-15-1.pdf(参照: 2018年2月1日).
- 24) 国土交通省:新技術情報提供システム, http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=QS-160025&TabType=2&nt=nt(参照:2018年2月1日).
- 25) 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)-人工バリア品質/健全性評価手法の構築-緩衝材,2016, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy _koougakukakusyou_2kansyouzai-1.pdf(参照:2018年2月1日).
- 26) 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, http://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2013/25-15-1.pdf (参照: 2018 年 2 月 1 日).
- 27) 建設省: RI 計器を用いた盛土の締固め管理要領(案), 1996,http://www.qsr.mlit.go.jp/s_top/doboku/hikkei-kanri12.pdf#search=%27RI 計器を 用いた盛土の締固め管理要領(案)(参照:2018年2月1日).
- 28) JNC: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年取りまと め--分冊2工学技術の開発-,JNC TN1400 2005-015, pp.2-34, 2005.
- 29) 大同機材工業株式会社:型枠商品のご紹介, http://www.daido-kizai.co.jp/?post_type=products(参照:2018年2月1日).
- 30) 川崎秀明,長原寛,山下武宣,安仁屋勉:間隙水圧計長期性能試験による振動弦型計器の現 地適用性検討,ダム工学 14(1), pp.39-48, 2004.
- 31) Hvorslev, M.J. : Time lag and soil permeability in groung water observations, Corps of Engineers, U. S. Army, Waterways Experiment Station, Bulletin No. 36, Vicksberg, Mississippi, 1951, 48p.
- 32) Cooper, H.H.Jr., J.D.Bredhoeft, I.S.Papadoplulos : Response of Finite-diameter well to an instantaneous change of water, Water Resources Research Res., 3, pp.263-269, 1967.
- 33) Jacob, C.J. : Notes on determining permeability by pumping tests under watertable conditions, USGS, Open file report, 1944, 25p.
- 34) Agarwal, R.G. : A new method to account for producing time effects when drawdown type curves are used to analyze pressure buildup and other test data, paper SPE 9289 presented at the 55th SPE annual technical conference and exhibition, Dallas, Texus, 1980, 20p.

This is a blank page.

付録

土留め壁設計計算書







4 縦リブ計算 (H=68) (材質 SS400) 側圧 151^{KN/m²} W ^{KN/n} 幅 600 mm当たり $W = 151 \times 0.60 = 90.6^{KN/m}$ 450 $M = 1/8 \times 90.6 \times 0.450^2 = 2.29^{KN/m}$ $S = 1/2 \times 90.6 \times 0.450 = 20.4^{KN/m}$ 断面緒元 型枠1枚当たり $\begin{array}{cccc} A \ \text{(mm}^2) & A \ \text{(mm}^2) & Z \ \text{(mm}^3) & I \ \text{(mm}^4) & E \ \text{(N/mm}^2) \\ 15. \ 47 \times 10^2 & 10. \ 99 \times 10^2 & 19. \ 67 \times 10^3 & 85. \ 89 \times 10^4 & 2. \ 0 \times 10^5 \end{array}$ 曲げ応力度 $\sigma = \frac{2.29 \times 10^{6}}{19.7 \times 10^{3}} = 116 \ \ \angle \ 157^{N/m^{2}}$ セン断応力度 $\tau = \frac{20.4 \times 10^{3}}{10.9 \times 10^{2}} = 19 \ \angle 89^{N/mm^{2}}$ 撓み量 $\delta = \frac{5 \times 90.6 \times 450^4}{384 \times 2.0 \times 10^5 \times 85.89 \times 10^4} = 0.3 \overset{\text{mm}}{\sim} 3^{\text{mm}}$





This is a blank page.

表1.	SI 基本単位	Ĭ.
甘大昌	SI 基本ì	单位
盔半里	名称	記号
長さ	メートル	m
質 量	キログラム	kg
時 間	秒	s
電 流	アンペア	А
熱力学温度	ケルビン	Κ
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立	単位の例
an de La SI 組立単位	<u>f</u>
名称	記号
面 積 平方メートル	m ²
体 積 立方メートル	m ³
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s
加 速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2
波 数 毎メートル	m ⁻¹
密度,質量密度キログラム毎立方メート/	
面積密度キログラム毎平方メート/	ν kg/m ²
比体積 立方メートル毎キログラ」	m ³ /kg
電 流 密 度 アンペア毎平方メート/	ν A/m ²
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m
量 濃 度 ^(a) , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度 キログラム毎立方メート/	
輝 度 カンデラ毎平方メート/	ν cd/m ²
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	1
(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野-	では物質濃度

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI租工申位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 (в)	m/m
立 体 催	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 (b)	m^2/m^2
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ^{·1}
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
压力,応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	$m^2 kg s^{-3}$
電荷,電気量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^{-2}$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(カタール) kat [s¹ mol
 (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや ュヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。やレシウス度とケルビンの
 (d)ペルジは高頻現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)センジス度はケルビンの特別な名称で、1、通道を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (f)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	I 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{-2} K^{-1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表 面 電 荷	「クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘 電 卒	コァラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放 射 輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語						
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10-3	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10 ⁻⁹	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^{3}	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^1	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У	

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	٥	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³		
トン	t	$1 t = 10^3 kg$		

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの				
名称記号			記号	SI 単位で表される数値
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダル	ŀ	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子	「質量単	单位	u	1 u=1 Da
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	М	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{\cdot 12} \text{ cm})^2=10^{\cdot 28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	の単位しの教徒的な問題は
ベル	В	31単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値	
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J	
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N	
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s	
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$	
スチルブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$	
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx	
ガル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²	
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$	
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$	
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹	
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」			

は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称		記号	SI 単位で表される数値			
キ	ユ		IJ	-	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	Ξ		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	-	cal	1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	ц	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$