

深地層の研究施設計画に関する報告会2020

4. 幌延深地層研究計画

2) 研究成果トピックス (人工バリア性能確認試験に関する知見)

2020年12月1日

国立研究開発法人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
幌延深地層研究センター 深地層研究部

大野 宏和

報告の内容

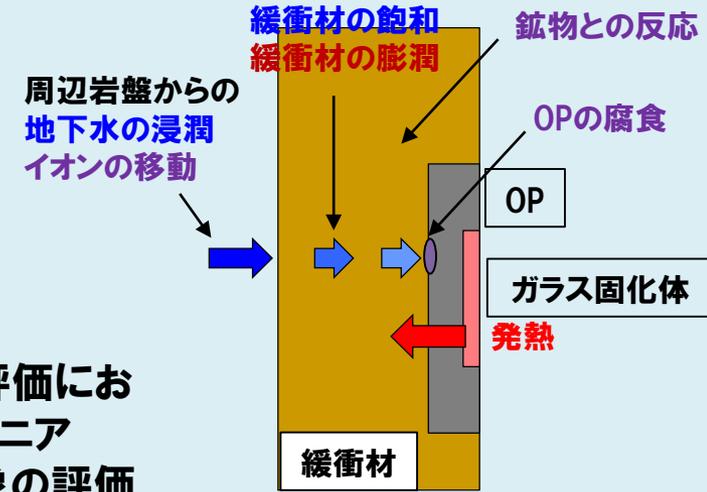
- **研究の背景・目標**
- **実施内容及び研究成果の概要**
 1. 実施内容(全体)
 2. 設計手法の適用性確認
 3. 製作・施工
 4. データ計測、連成解析
- **研究成果の活用と今後の課題**

研究の背景・目標

研究の背景・目標

背景

- 地層処分における人工バリア定置後に想定される主な現象
 - ・ガラス固化体からの発熱、周辺岩盤からの地下水の浸潤
 - ・地下水浸潤による緩衝材の飽和と膨潤応力の発生
 - ・地下水浸潤によるオーバーパック(OP)の腐食
 - ・緩衝材間隙水と鉍物の反応など
- これらの現象は相互に影響し合う複合的な連成現象となる
(THMC連成現象: **熱-水-力学-化学**連成現象)
- このようなニアフィールドの過渡期状態変遷の評価は、安全評価における初期状態設定やオーバーパックの寿命評価に必要となるニアフィールドの環境条件の設定上重要となり、それらの連成現象の評価手法の整備(解析ツールの整備)が必要



- これまでに人工バリア等の設計要件、設計上考慮すべき特性やパラメータ、考え方などは整理されているものの、深地層の研究施設で得られた地質環境データに基づく設計手法の適用性を確認することが課題

目標

- ⇒ 実規模、地下環境下で計測したデータを用いたTHMC連成現象の評価手法の整備
 - ⇒ 人工バリアや閉鎖技術の設計手法、製作・施工性の適用性確認
- 人工バリア性能確認試験で確認**

実施内容及び研究成果の概要

1. 実施内容(全体)

実施内容

実施内容

【設計】

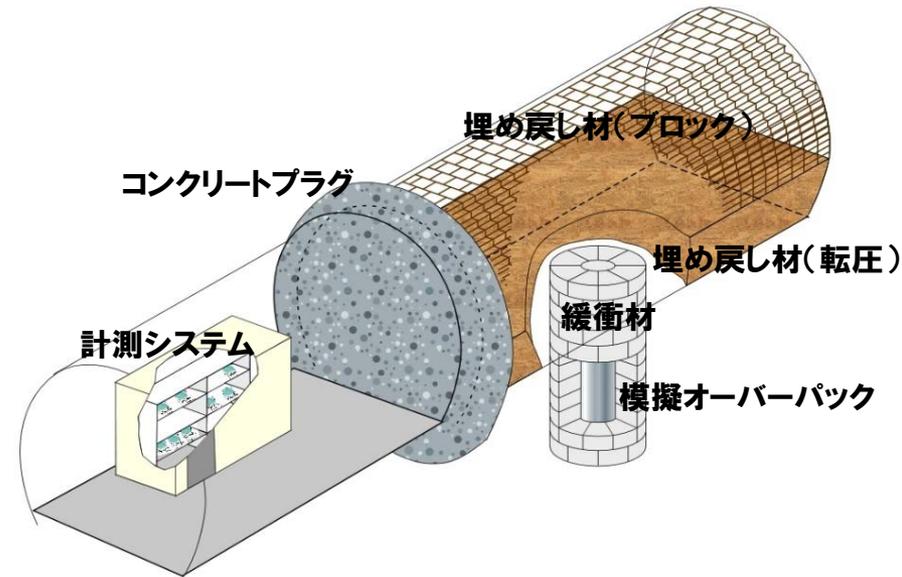
- 幌延を事例とした**設計手法の提示**
 - ✓人工バリア(緩衝材、オーバーパック)の設計手法の適用性の確認
 - ✓閉鎖技術(埋め戻し材、力学プラグ)に関する設計手法の適用性確認

【製作・施工】

- 「第2次取りまとめ」で示した処分概念が**実際の地下環境で構築できることの実証**
 - ✓処分孔(模擬)の掘削方法の例示
 - ✓緩衝材ブロックの定置方法の例示
 - ✓埋め戻し材施工方法の例示
 - ✓プラグ施工方法の例示、など

【データ計測と連成解析】

- THMC連成現象を評価するための**検証データの取得**
 - ✓人工バリア、埋め戻し材中に設置したセンサーによるデータ計測
 - ✓計測データを用いた連成解析手法の整備
 - ✓モニタリング手法の適用性確認



人工バリア性能確認試験イメージ図

人工バリア性能確認試験は、第2次取りまとめに示された軟岩系岩盤における処分孔竖置き方式を対象として、実物大の模擬人工バリアを設置した上で、試験坑道の一部を埋め戻し、THMC連成現象に関する計測データを取得する試験

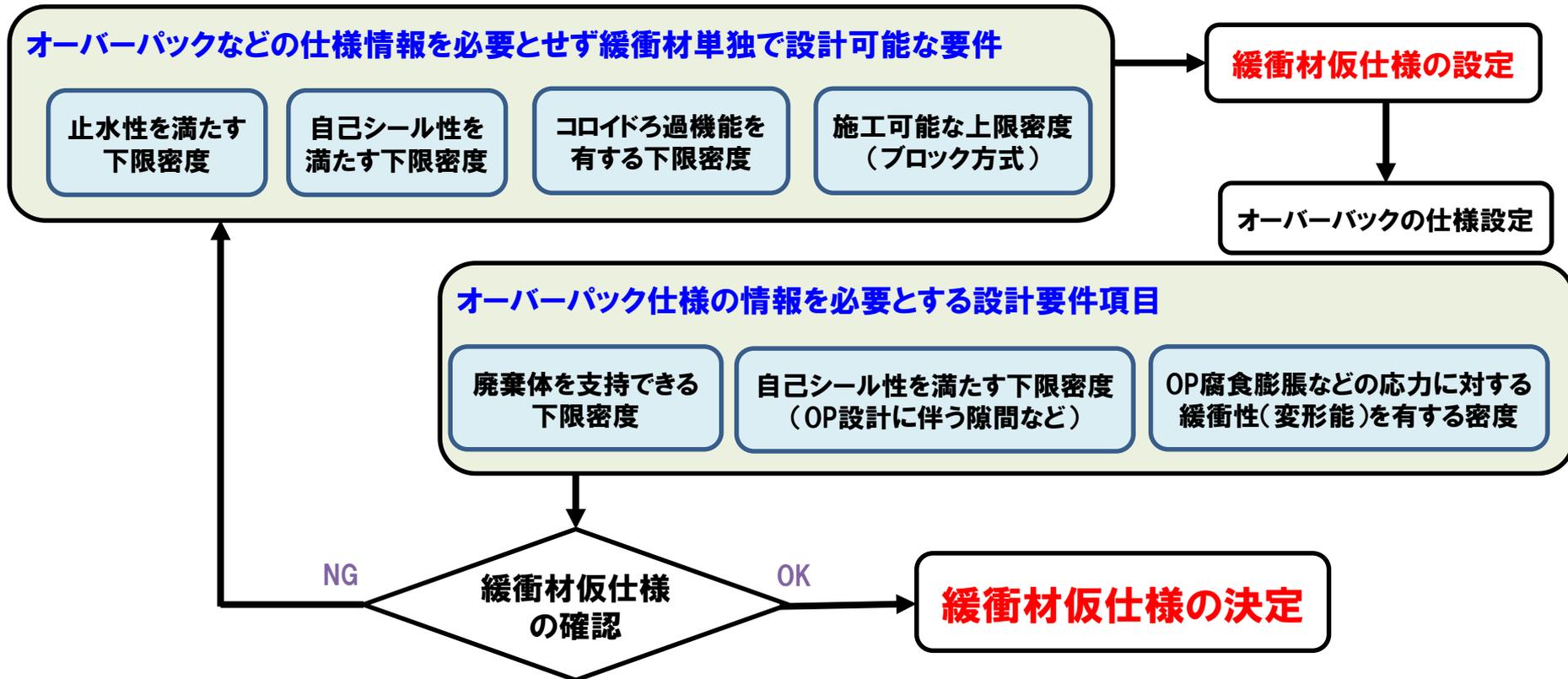
実施内容及び研究成果の概要

2. 設計手法の適用性確認

- 人工バリア(緩衝材、オーバーパック)
- 閉鎖技術(埋め戻し材、力学プラグ)

設計：緩衝材の設計手法の適用性の確認

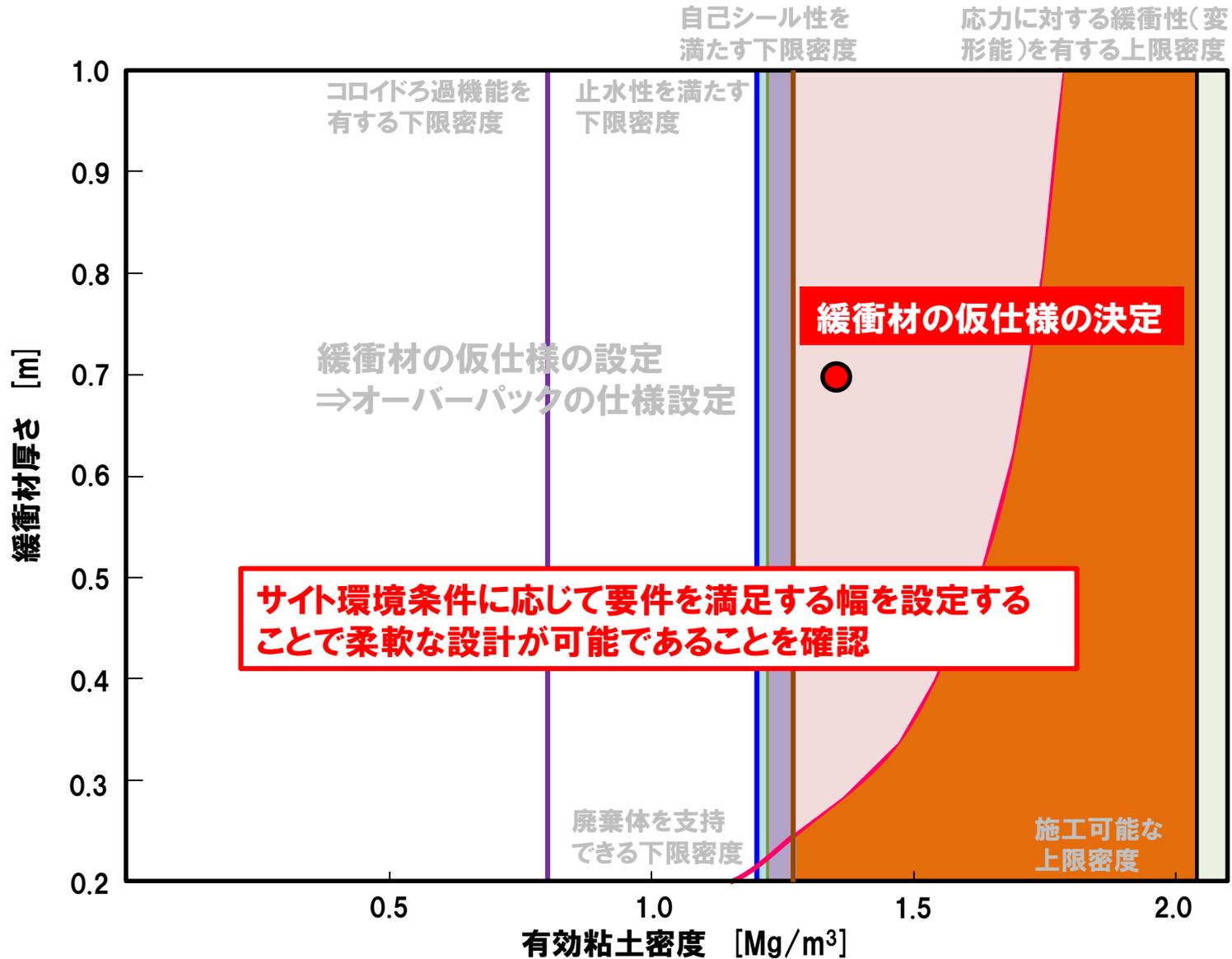
- これまでに構築された緩衝材の設計フローをもとに、人工バリア性能確認試験を実施する深度350mの地質環境条件に基づいて試設計を行い、設計事例の妥当性の再検証を実施



緩衝材の設計フロー図

設計:緩衝材の設計手法の適用性の確認

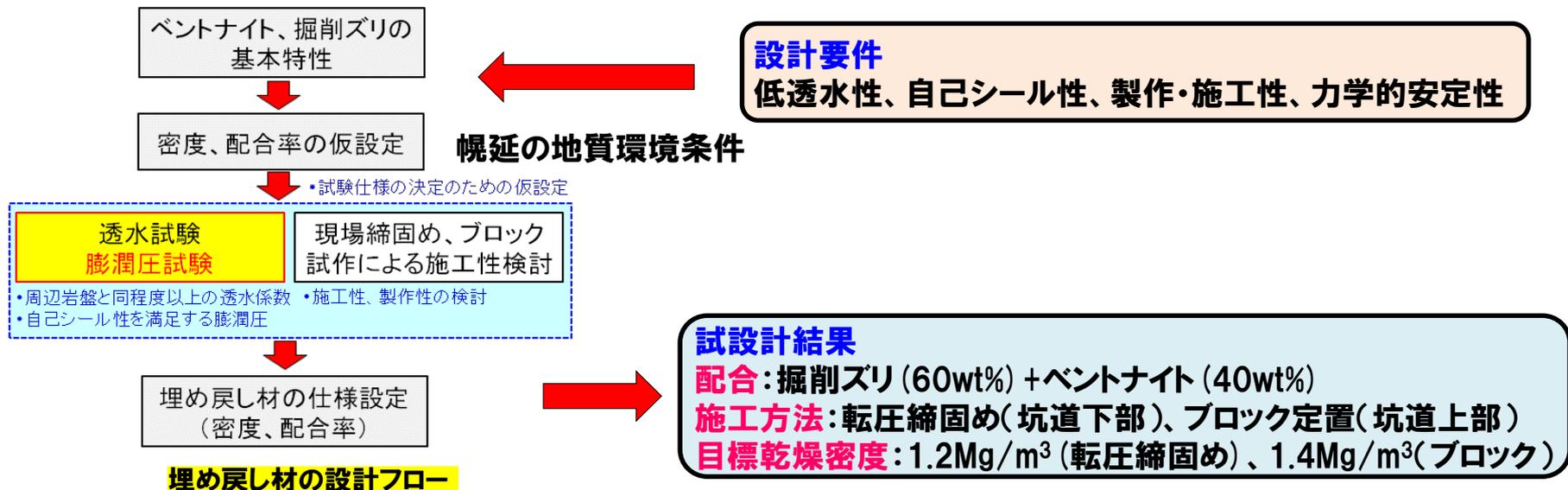
深度350mの地質環境条件に基づく緩衝材(ブロック方式)の試設計結果



設計：埋め戻し材の設計手法の適用性確認

埋め戻し材仕様の検討

- 地下施設の処分概念に影響を与えないように坑道を処置しておくことが必要
- 掘削ズリは材料調達のしやすさや経済性の観点から埋め戻し材として理由することが有効的
- 掘削ズリにベントナイトを混合した材料について、設計要件を満たすように埋め戻し材の試設計を実施
- 幌延の掘削ズリにベントナイトを混合した材料について、設計要件を満たすように埋め戻し材の試設計を実施



埋め戻し材の具体的な設計フローを構築し、幌延の地質環境条件を一例とした試設計を行うことにより、設計フローの適用性を確認

実施内容及び研究成果の概要

3. 製作・施工

- 処分孔(模擬)の掘削方法の例示
- 緩衝材ブロックの定置方法の例示
- 埋め戻し材施工方法の例示
- プラグ施工方法の例示

施工：処分孔(模擬)の掘削方法の例示

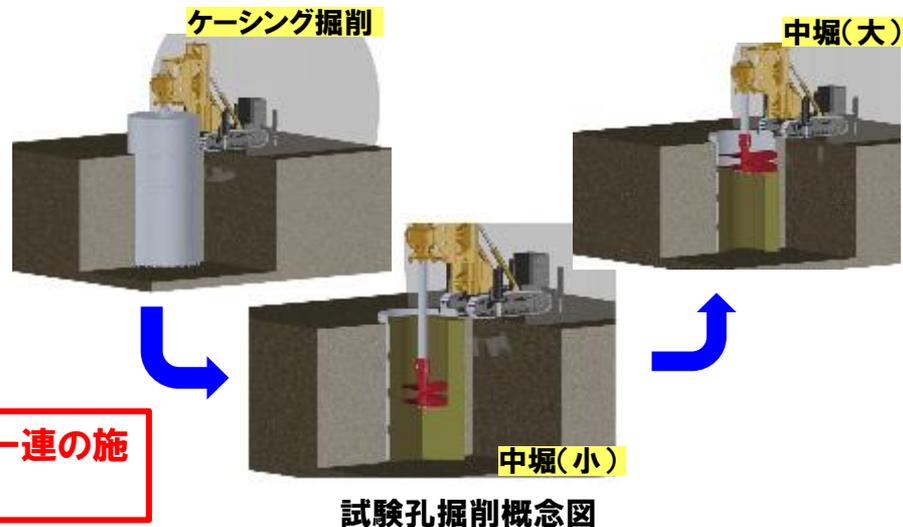
処分孔(模擬)の掘削方法の例示

- 縦置き方式を想定した直径2.4m、深さ4.2mの大口徑の処分孔を掘削するために、外掘りケーシング工法と中掘りオーガー工法を同一のマシンで施工可能な専用の掘削機械(大口徑掘削機)を開発

開発のコンセプト

- ✓ 狭隘な地下空間において一貫施工が可能な機械設備
- ✓ 多数の処分孔掘削の連続施工が可能な高い掘削能率と機動性
- ✓ より安全でシンプルな施工が可能

処分孔の掘削からオーバーパック設置前の段階まで、一連の施工を当該機械のみで適用できることを確認



大口徑掘削機



外掘りケーシング掘削状況



中掘りオーガー掘削状況

試験孔掘削の様子（動画）



製作・施工：緩衝材ブロックの製作と定置方法の例示

緩衝材ブロックの製作

- 製作は施工時の隙間を考慮し、試設計結果(膨潤時乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$)を満たすように乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ のブロックを製作
- 緩衝材ブロックは混合土を金型に投入し圧縮成型機械により静的に圧縮成型



① 材料投入



② 圧縮成型

緩衝材の定置

- 原子力環境整備促進・資金管理センター(原環センター)により開発された緩衝材定置技術である真空把持装置について地下での適用性を確認

緩衝材の定置
(真空把持)



原位置においても真空把持装置が適用可能であることを確認

品質管理

- ブロックごとのばらつきを少なくし、設計仕様を満足するか確認するために成型前、成型時、成型後の各々の段階における管理項目に対して管理基準を設定

設定した
管理項目

成型前
含水比、メチレンブルー吸着量

成型時
材料投入量、成型圧力、圧縮保持時間

成型後
寸法、質量、外観

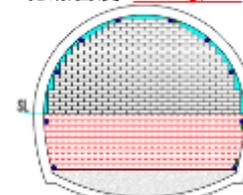
成型品ごとのばらつきが少なく、設計仕様を満たす緩衝材ブロックが製作可能なことを確認

製作・施工：埋め戻し材の製作と施工方法の例示

埋め戻し材混合土とブロックの製作

- 混合土(粒径20mm以下の掘削スリ:ベントナイト=60:40wt%)を製作
- 転圧締固め部は事前確認試験結果より目標乾燥密度を $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ に設定
- 埋め戻し材ブロックは混合土を金型に投入し圧縮成型機械により静的に圧縮成型
- 埋め戻し材ブロックは施工時の隙間や剛性を考慮し乾燥密度は $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$ で製作

乾燥密度： $1.4\text{Mg}/\text{m}^3$



乾燥密度： $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$

埋め戻しイメージ図

埋め戻し材の施工

- 埋め戻し材下部はハンドガイドローラーにより、設定した目標乾燥密度をクリアするように転圧締固め施工
- 埋め戻し材上部は目標乾燥密度をクリアするように製作したブロックを設置



埋め戻し材の施工例

品質管理

- 埋め戻し材ブロックは緩衝材ブロックと同様、成型前、成型時、成型後の各々の段階における管理項目に対して管理基準を設定
- 転圧締固め部は転圧時に巻き出し厚さと仕上がり圧の測定を行い、転圧後に原位置密度測定(砂置換法、RI法、熱伝導率法、レベル測量)を実施



いずれの方法においても、乾燥密度測定を実施した層において、転圧締固めの目標乾燥密度 $1.2\text{Mg}/\text{m}^3$ 以上を満たしていることを確認、RI法が比較的簡便かつ適用性の高い方法であることを確認

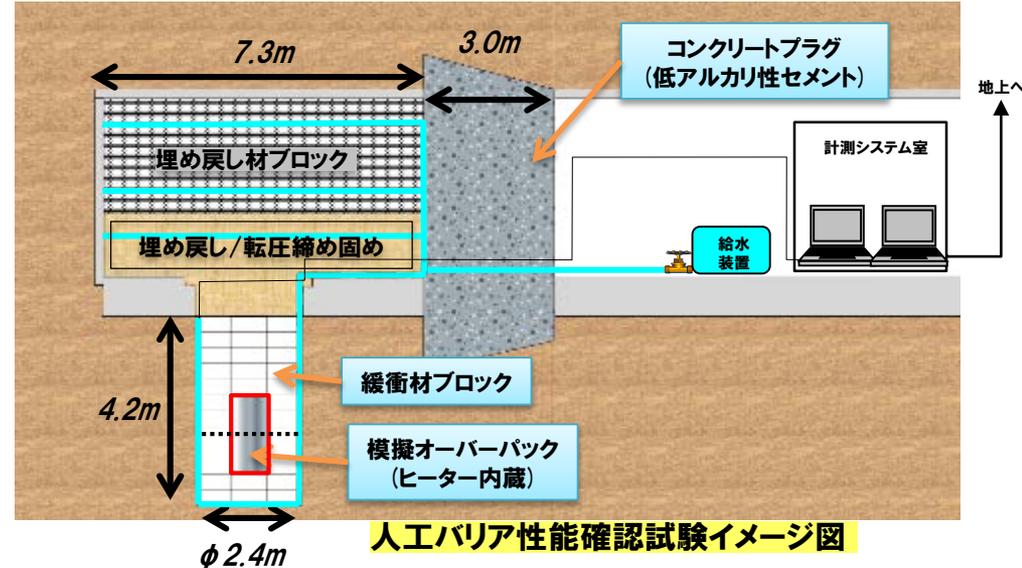
実施内容及び研究成果の概要

4. データ計測、連成解析

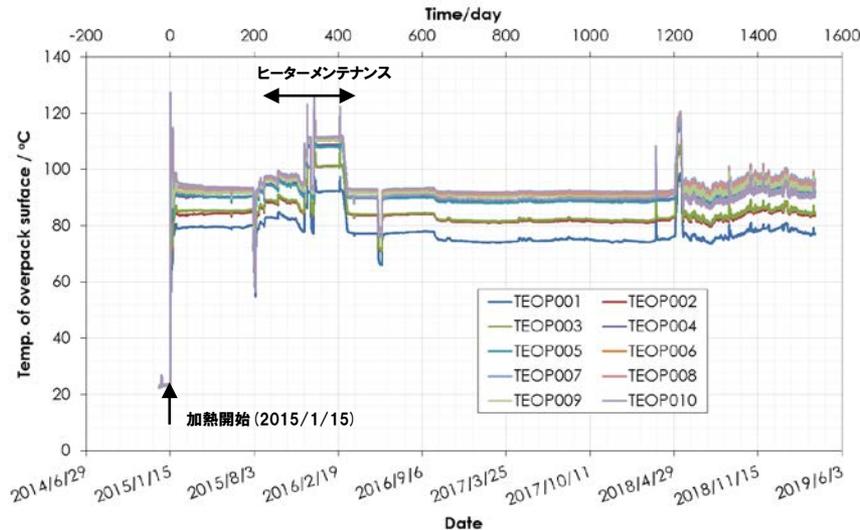
データ計測：試験条件と計測項目

試験条件

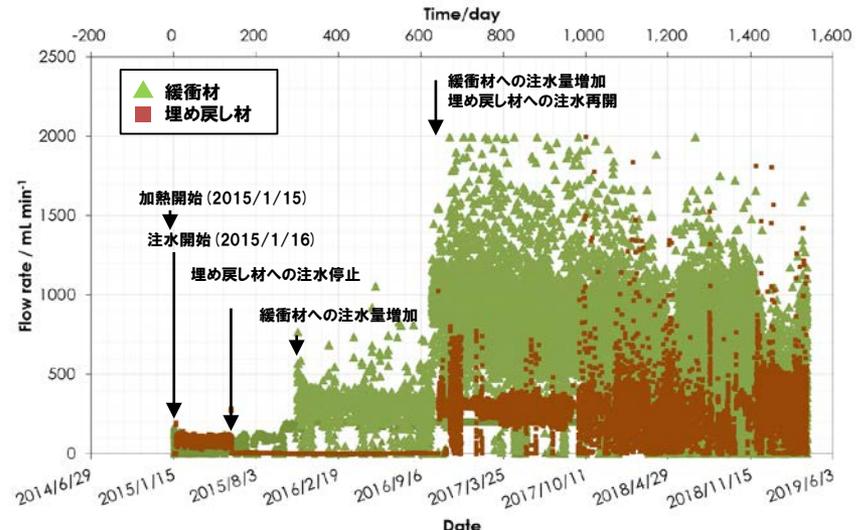
- 廃棄体からの発熱を模擬するために模擬OP内部に設置したヒータにより**加熱**(基本表面温度:約90℃)
- 再冠水後の地下水の浸潤を模擬するために緩衝材と埋め戻し材外周部から**人工注水**
- 境界条件となる**加熱温度**と**注水流量**を変化させ、各種連成データを取得



人工バリア性能確認試験イメージ図



オーバーパック表面温度

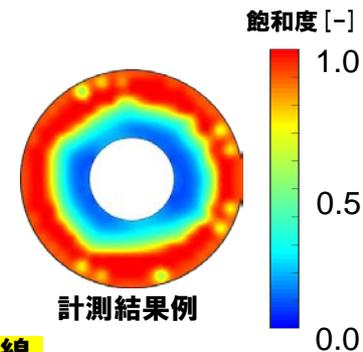
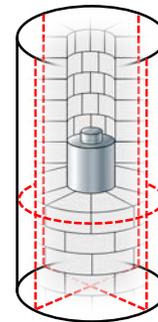


注水流量

データ計測：モニタリング手法の適用性確認

人工バリア性能確認試験

- センサーの選定に際しては国内外の事例を参考に基本的に5年以上の使用実績があるものを選定、一部のセンサーは原位置における適用性を確認するために新規にセンサーを開発
- 原位置における無線伝送技術の適用性を確認するために、緩衝材および埋め戻し材中に無線センサーを設置(原環センターとの共同研究)
- 計測データを分析し、不良と判断される計測データを抽出
 - ①故障やケーブルの断線等の物理的要因で不良と判断されるデータ
 - ②センサーの仕様や特徴を考慮したうえで不良と判断されるデータ
 - ③加熱、注水などの外的要因に対する応答を勘案して、同種のセンサー間の比較等により不良と判断されるデータ

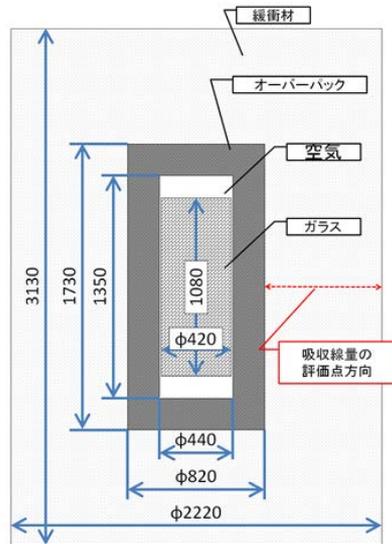


計測データ分析の結果、既存センサーについては約8割のセンサーが稼働していることを確認
新規に開発した光学式pH計や温度補償型のFDR-V(水分計)については、センサーの材質や設置方法に改良が必要であることを確認
比抵抗トモグラフィによる水分量測定については、原位置においても概ね緩衝材中の水分量計測が可能であることを確認
計測データの品質向上や測定不可となった要因やその対策については、解体調査時にセンサーの詳細確認や校正作業を実施することが必要

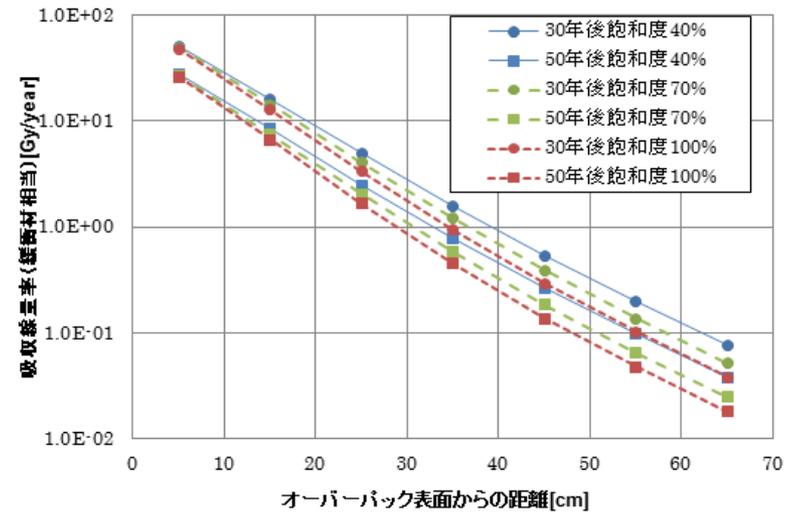
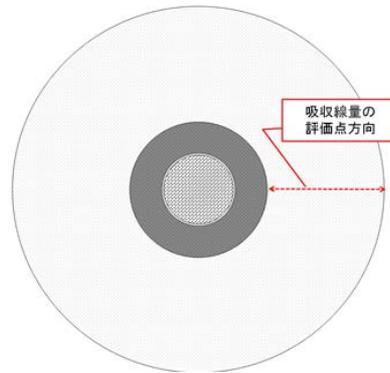
データ計測：モニタリング手法の適用性確認

モニタリング機器の放射線影響

- ガラス固化体の貯蔵期間および緩衝材の飽和度の変化を考慮した解析により緩衝材中の吸収線量を算出
- モニタリング機器で使用されている材料の耐放射線性に関する文献調査の結果をもとに、解析により求めた吸収線量との比較からその影響を定性的に検討



解析モデル



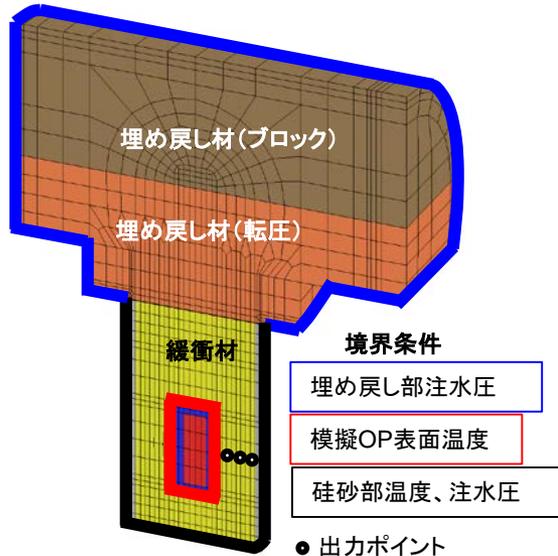
解析により求めた吸収線量

吸収線量解析と耐放射線性調査の結果から、一般的なモニタリング機器の使用寿命に影響を及ぼす線量ではないことを確認

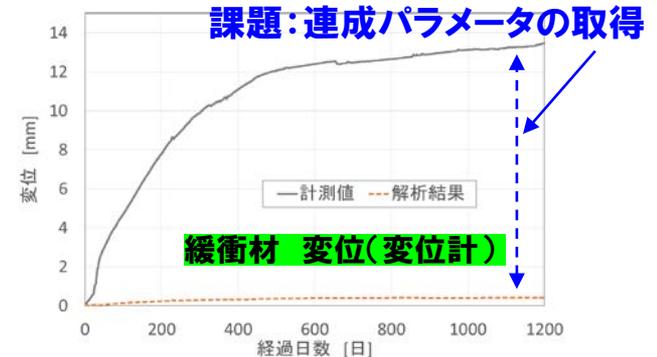
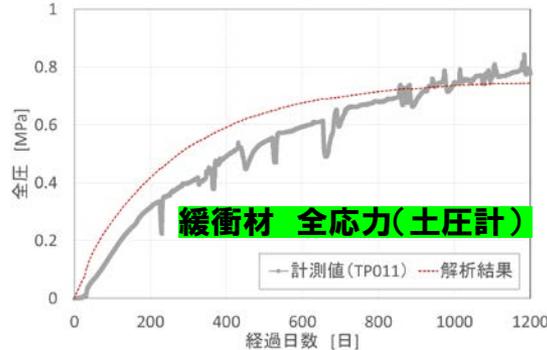
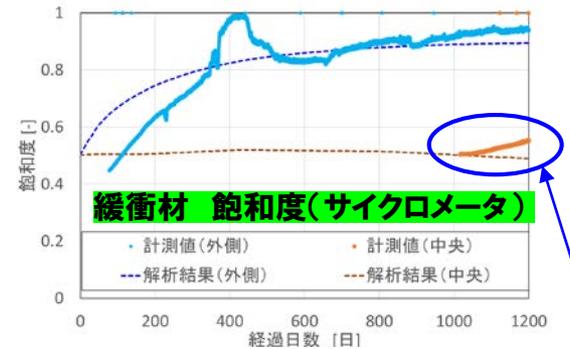
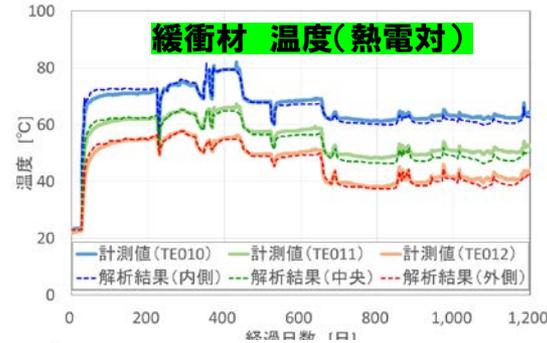
電子部品を内蔵する機器については、信頼できるデータ取得の可否について検証するため、照射条件下での作動試験を行い、計測データの妥当性について評価することが必要

連成解析：解析モデルと計測データとの比較

- THM連成解析コードTHAMESを用いて人工バリア性能確認試験の再現解析を実施
- THMC連成解析コードCouplysを用いて、化学的な環境の変化を定量的に示す事例解析を実施
- 緩衝材中の空気の動きに着目し、気液二相流THM連成解析を実施 (Code-Bright)
- 検討結果から課題の抽出を行い、連成パラメータの取得や解析コードの改良を実施



解析モデルと境界条件



計測データと連成解析結果 (THAMES) の比較

THAMESの力学モデルの改良や連成パラメータの取得により再現性の向上を確認
 気液二相流THM連成解析により緩衝材中の気相が水分移動だけではなく力学現象(応力や変位)にも影響を及ぼす可能性があることを確認
 連成評価手法のさらなる高度化のためには、減熱時のデータ取得、計測データとの比較検証により抽出された課題(連成パラメータや気相の影響)の継続検討、他解析コードとの比較検証が必要

研究成果の活用と今後の課題

研究成果の活用(設計・製作・施工)

研究成果の概要



人工バリア、閉鎖技術の
設計・製作・品質管理



閉鎖技術の施工

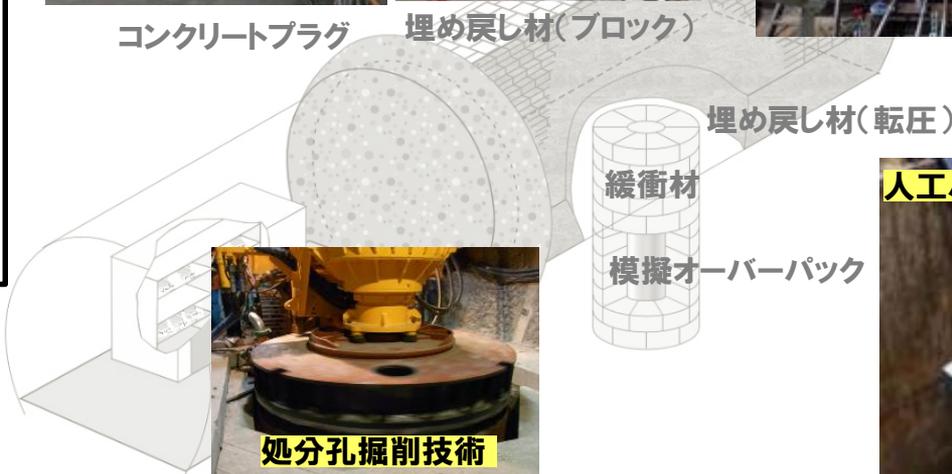
コンクリートプラグ



埋め戻し材(ブロック)



閉鎖技術の施工と品質管理



人工バリアの定置技術



研究成果の活用

設計手法の適用性確認

- これまでに構築した人工バリアの設計フローに加え、新たに埋め戻し材に関する個別設計フローを構築し、その適用性を確認、人工バリア等の合理化設計技術に寄与

製作・施工及び品質管理手法の適用性確認

- 新たに処分孔掘削技術の開発を含め、製作・施工技術や品質管理方法の適用性を例示、精密調査後半段階における安全性・合理性などを考慮した手順や工法の選定に寄与

今後の課題(データ計測・連成解析)

今後の課題

連成解析手法の高度化

- ガラス固化体からの発熱を模擬した原位置試験や解体調査による検証データの拡充、抽出された課題(連成パラメータの取得、気相の影響など)の継続検討、国際プロジェクトを通じた他解析コードとの比較検討を行うことで連成解析コードのさらなる高度化を目指す

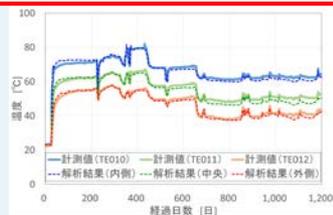
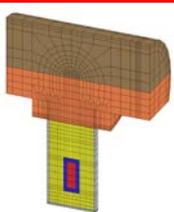
モニタリング手法の適用性確認

- 計測データの妥当性やセンサー長期耐用性等については、解体調査時に詳細を検証することで計測データの品質向上やモニタリング手法の高度化に資する情報の整理を目指す

今後の予定

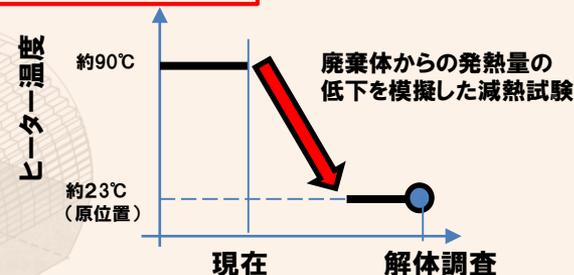
連成解析手法の高度化

- 連成パラメータの取得、気相の影響を確認するための室内、原位置試験
- 国際プロジェクトによる他解析コードとの比較検討
DECOVALEX2023 (2020~2023) Task D
「Full-scale Engineered Barrier System Experiment at Horonobe URL」



計測システム

減熱試験の実施



緩衝材

設置センサー

解体調査(サンプリング)

- 計測データの校正、センサーの詳細確認
- 人工バリア、埋め戻し材、岩盤、コンクリートやそれらの界面の詳細確認



ご清聴ありがとうございました。