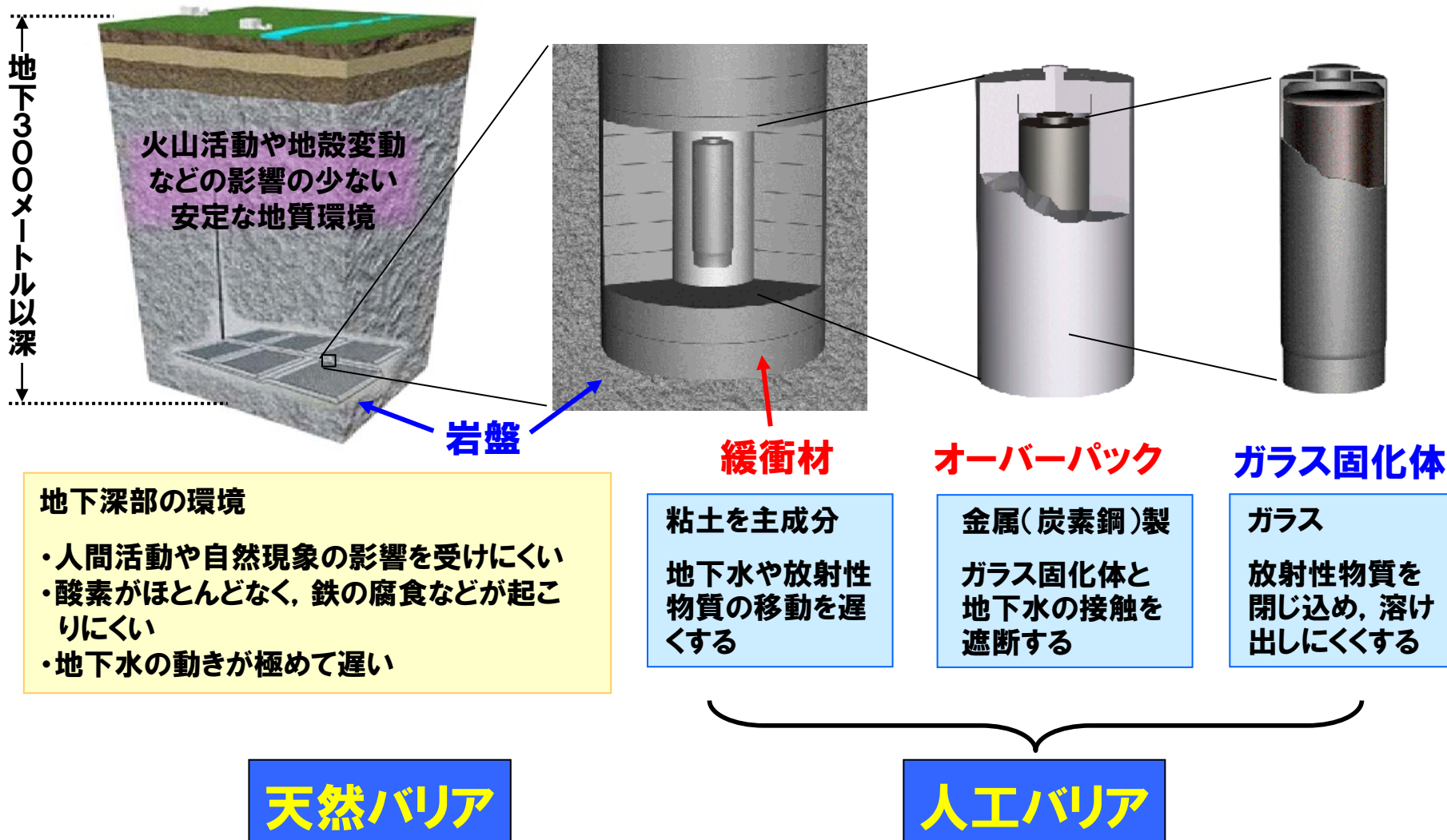


幌延URLにおける人工バリア性能確認試験

日本原子力研究開発機構
深地層研究部 堆積岩処分技術開発グループ

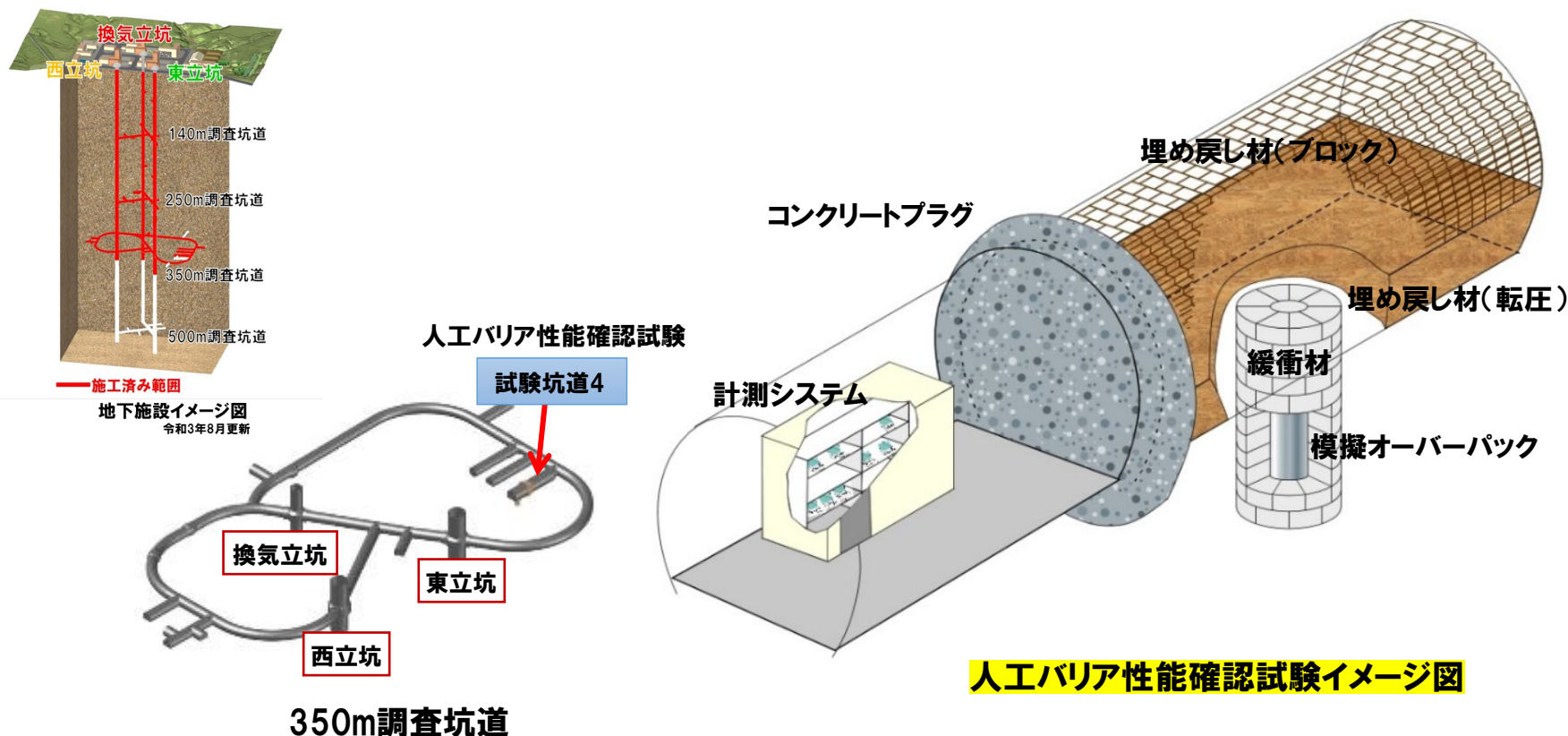
天然の岩盤と人工物を組み合わせた多重バリアシステム



人工バリア性能確認試験の概要

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実際の地下環境下に設置した上で、試験坑道の一部を埋め戻し、熱－水－応力－化学連成現象(THMC連成現象)に関する計測データを取得する試験**

※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-(1999)「日本でも地層処分が技術的に十分信頼性をもって行えること」、「今後、地層処分を進めていく際の技術的な拠り所が得られたこと」を示したレポート



【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



これまで整理されてきた考え方で幌延の地質環境下(堆積岩、塩水地下水)で、人工バリアや埋め戻し材の仕様は決定できる？

【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



設計で決まった仕様のもをどのようにつくる？
どのように品質を確認する？
原位置でどのように施工する？

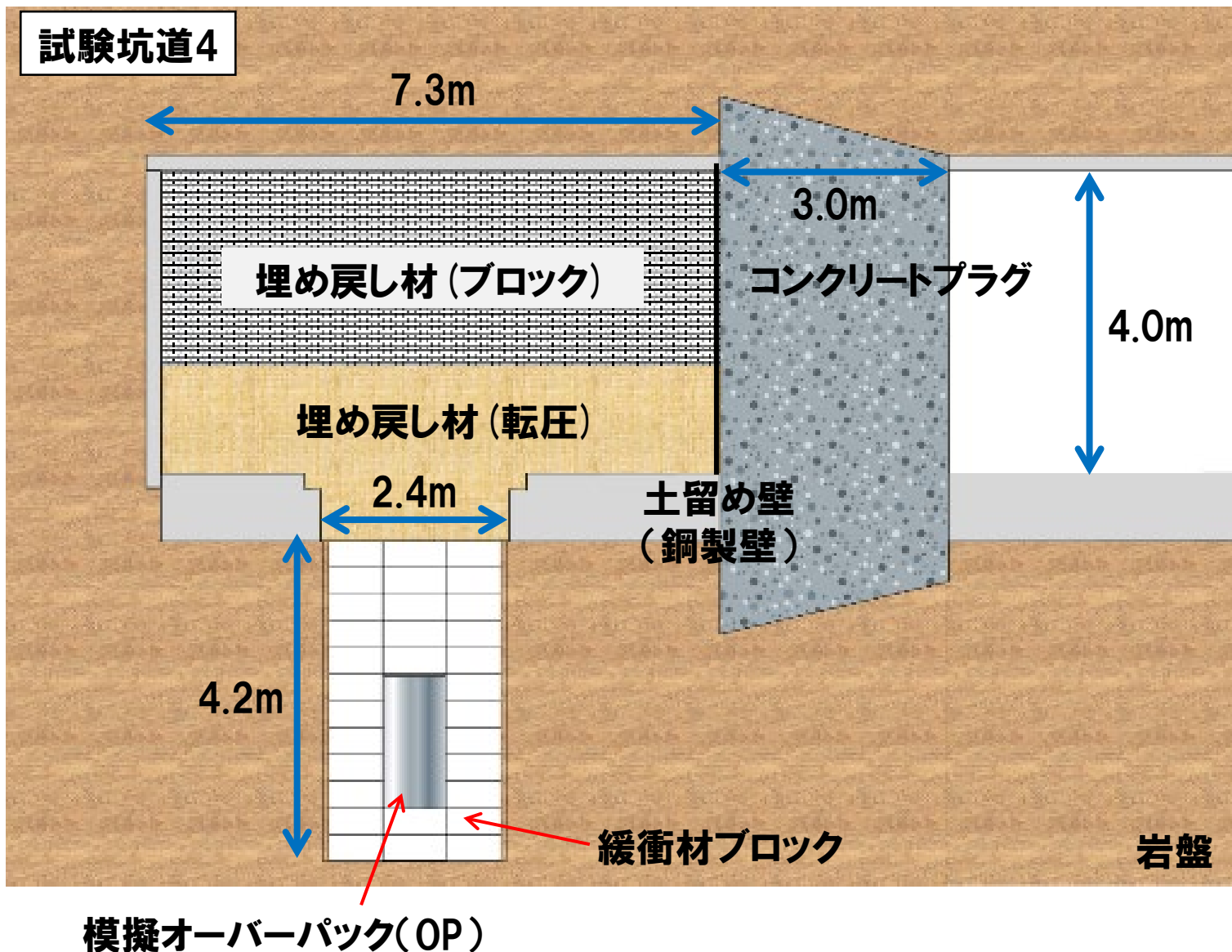
【データ計測と連成解析】

➤ 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



室内試験などの地上試験の結果と実規模原位置試験の結果は同じ？
これまでに作成してきた解析コードで原位置のデータは再現できる？



緩衝材

- 材料：クニゲルV1（70%）+ 珪砂（30%）
- 形状：円柱、扇型
- 乾燥密度：1.8 g/cm³
- 初期含水比：10.5%

模擬オーバーパック

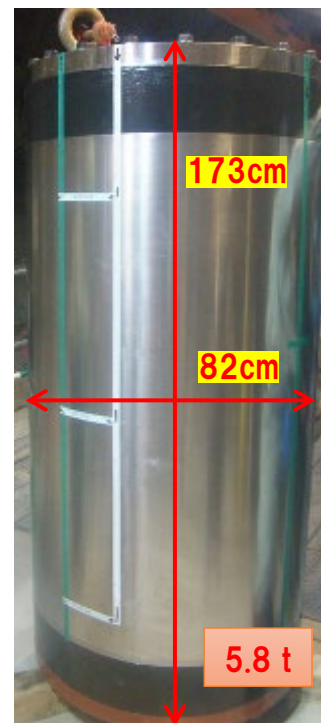
- 材料：炭素鋼
- 寸法：直径82cm、高さ173cm
- 重量：5.8 t

埋め戻し材

- 材料：クニゲルV1（40%）+ 掘削ズリ（60%）
- 乾燥密度： 転圧部 1.2g/cm³
ブロック部 1.4g/cm³

プラグ

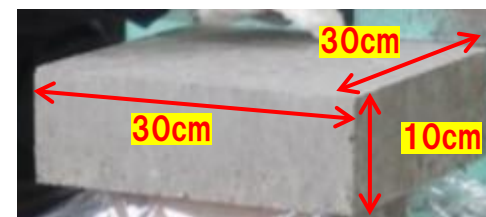
- 材料：低アルカリコンクリート



模擬オーバーパック



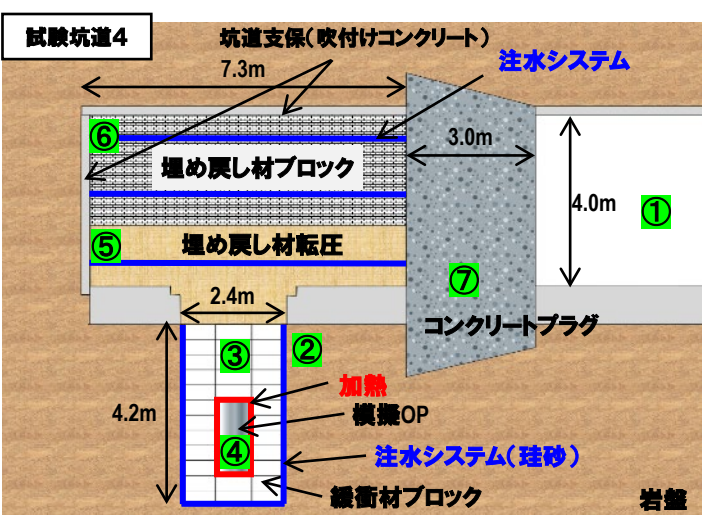
緩衝材

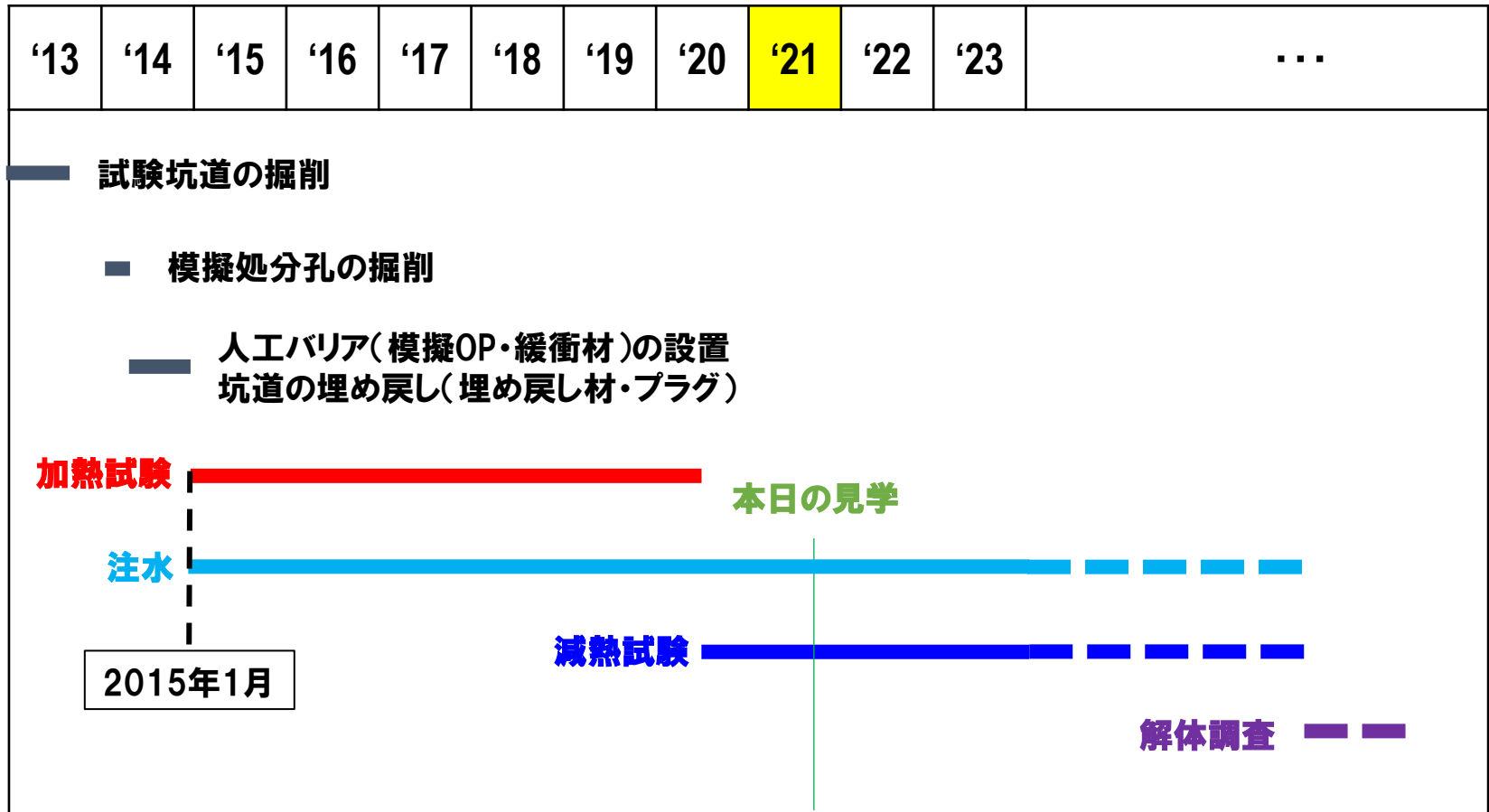


16.5kg

埋め戻し材(ブロック)

人工バリア性能確認試験 施工の様子





人工バリア性能確認試験における 設計

これまで整理されてきた考え方で幌延の地質環境下(堆積岩、塩水地下水)で、人工バリアや埋め戻し材の仕様は決定できる？

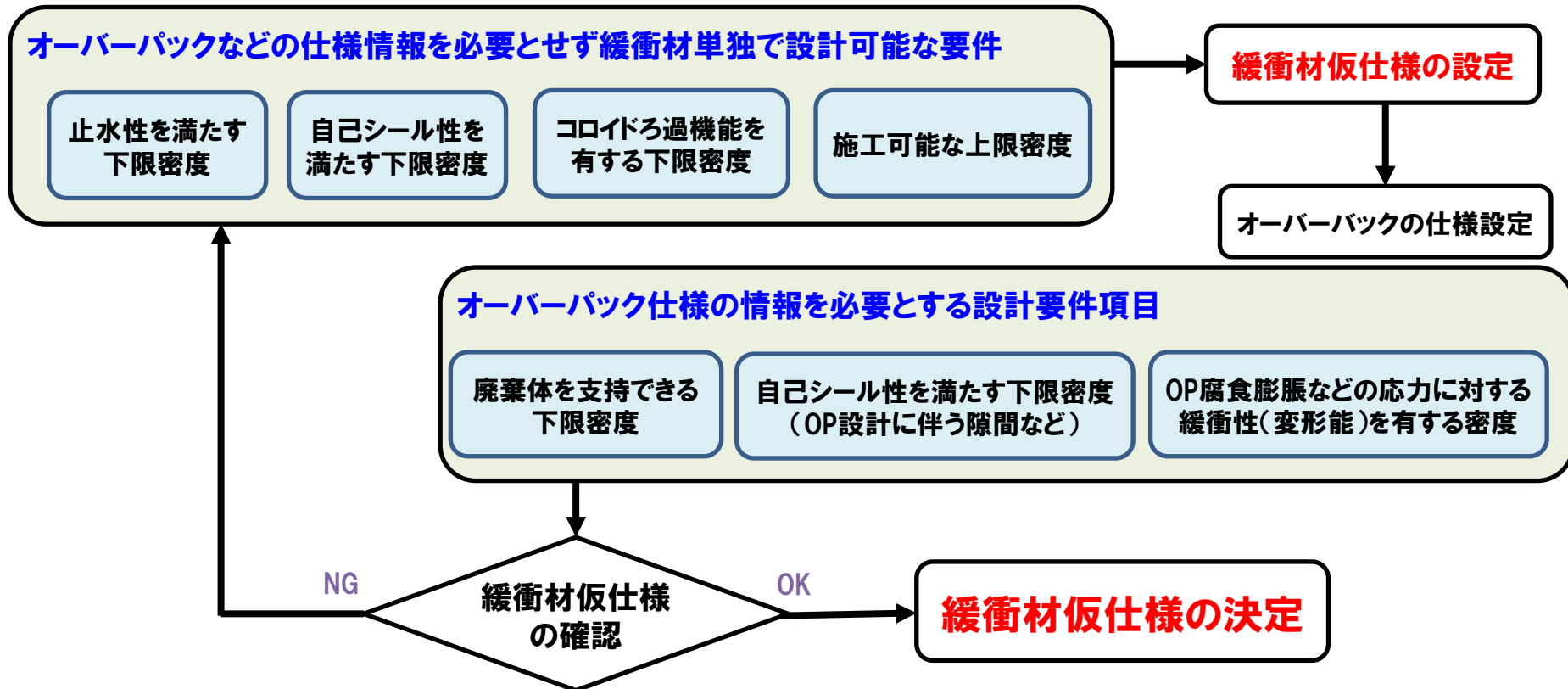


【設計】

- **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

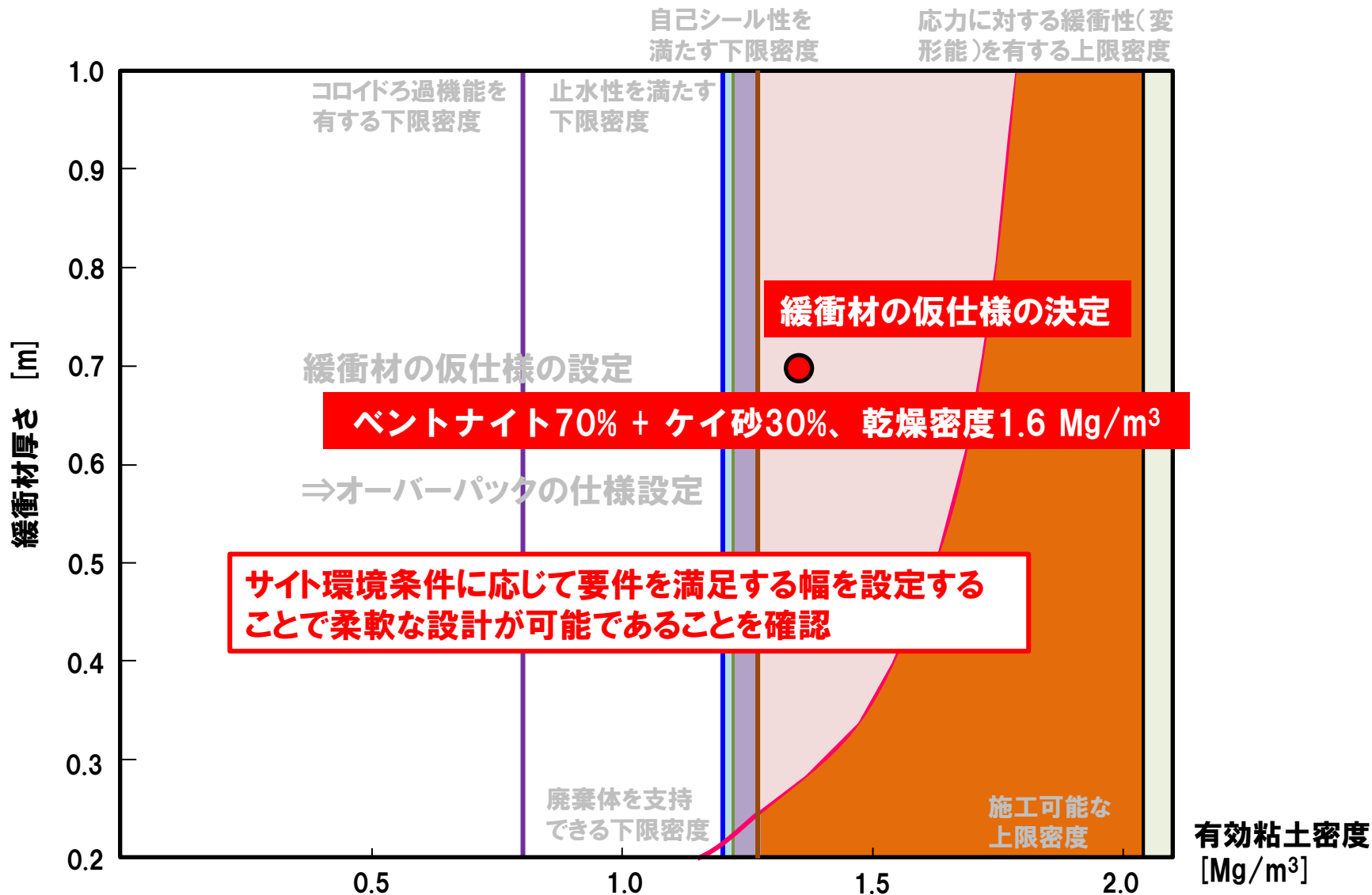
設計：緩衝材の設計手法の適用性の確認

- 平成17年取りまとめで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

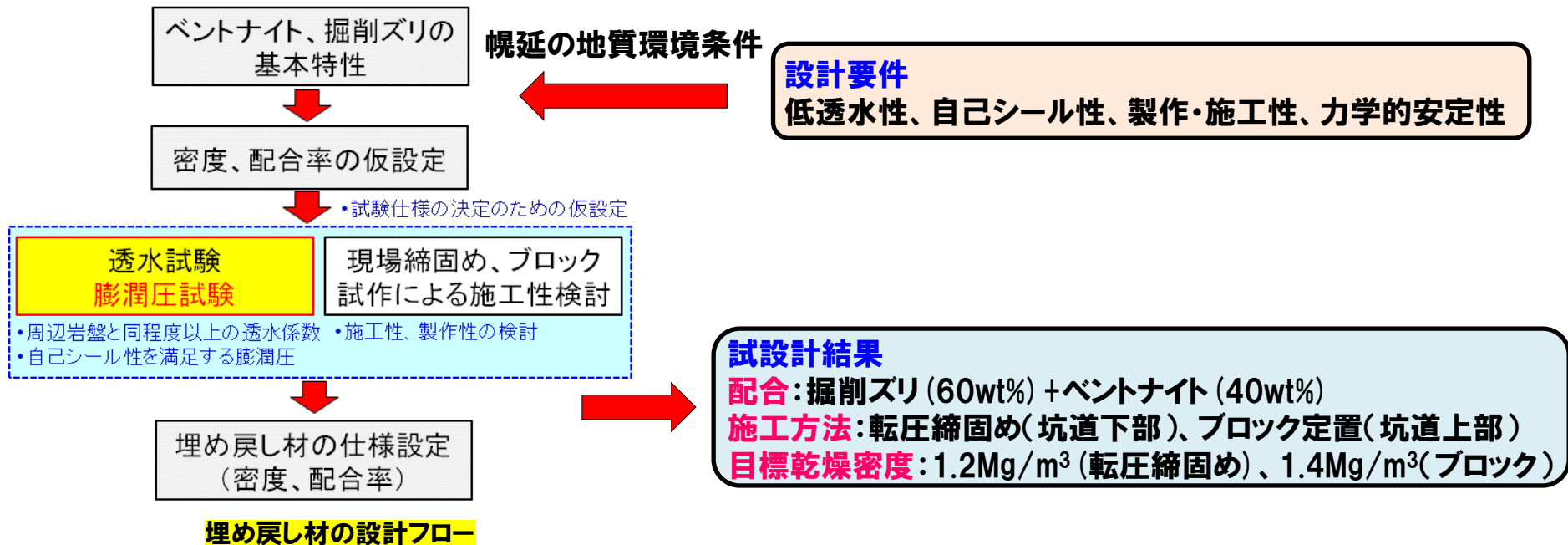
深度350mの地質環境条件に基づく緩衝材(ブロック方式)の試設計結果



設計：埋め戻し材の設計手法の適用性の確認

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利用することが有効的
- 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験設計を実施



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験設計を行うことにより、設計フローの適用性を確認

人工バリア性能確認試験における 製作・施工・品質管理

設計で決まった仕様のをどのように
につくる？
どのように品質を確認する？
原位置でどのように施工する？



【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

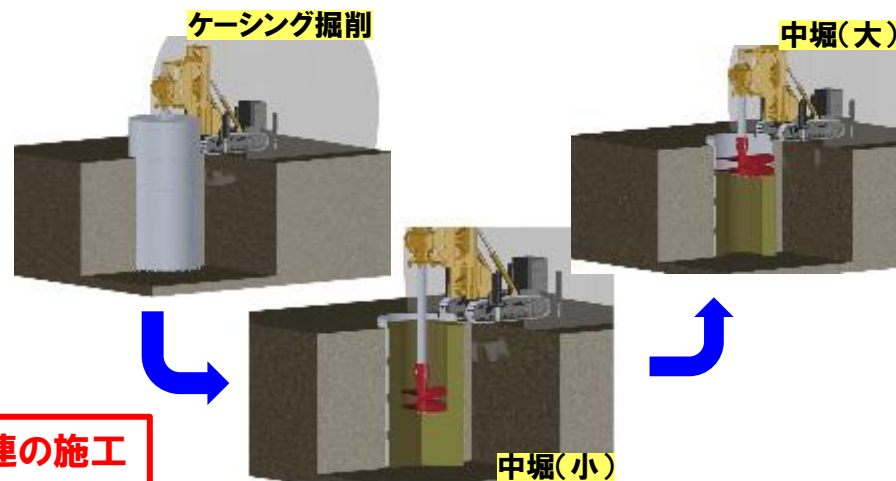
施工：処分孔(模擬)の掘削方法の例示

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

試験孔掘削概念図



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

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いて管理項目の測定を実施

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

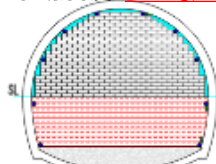
成型品ごとのばらつきが少なく、設計仕様を満たす緩衝材ブロックが製作可能なことを確認

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の測定を実施
- 転圧締固め部は転圧時に巻き出し厚さと仕上がり厚さの測定を行い、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

人工バリア定置後に人工バリア周辺 (ニアフィールド)で想定される主な現象

処分場閉鎖後のストーリーボードの例

処分場閉鎖後に期待される処分場のシステムとしてのふるまい

→時間スケール

→空間スケール

空間スケール	現在の地質環境が継続すると考えられる期間 ($T_1 \sim T_2$)			地質環境の特性に関する不確実性が増大する期間 (T_3)	
	建設・操業	処分場閉鎖から再冠水完了までの期間 (T_1)	再冠水完了から放射性核種の移行が生ずるまでの期間 (T_2)		
広域スケール	<p>建設・操業</p>	<p>処分場閉鎖</p>	<p>再冠水完了</p>	<p>放射性核種の移行の生起</p>	<ul style="list-style-type: none"> 隆起、侵食や、地球規模での周期的な気候変動およびそれに伴う海水準の変動が継続する。 処分場近傍に火山・火成活動、新層活動による影響が生ずる可能性が増大。
処分場スケール	<ul style="list-style-type: none"> 坑道への湧水は排水され、坑道周辺の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。 坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的不飽和状態となる。 坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道への湧水は排水され、坑道周辺の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。 坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的不飽和状態となる。 坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道への湧水は排水され、坑道周辺の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。 坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的不飽和状態となる。 坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑道への湧水は排水され、坑道周辺の母岩中の水位は下がって坑道へ向かう水の流れが生じる。 坑道から空気が供給され母岩は部分的に水理学的不飽和状態となる。 坑道周辺の地下水は酸化性環境となる。 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性核種は地下水の流れに沿って断層を支配的な経路として地質環境中を移行し生活圏に至る。
パネルスケール	<p>地下水流動方法</p>	<p>地下水流動方法</p>	<p>地下水流動方法</p>	<p>地下水流動方法</p>	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境の条件は安定的に継続する。 地質環境によって水理や地下水の挙動が地質的に変化する可能性がある。 母岩を移行する放射性核種は地下水の流れに沿って移流・分散メカニズムにより移行する。
ニアフィールドスケール	<p>人工バリア性能確認試験で対象とする範囲 ※ 罫置き・ブロック方式</p>	<ul style="list-style-type: none"> 埋め戻された坑道は周辺の母岩から徐々に地下水が冠水し、母岩と一体になって飽和状態に回復する。 建設・操業中に導入された空気中の酸素は周辺母岩中の鉱物との反応等により消費されて地下水は本表の還元性になる。 腐食に伴って発生した水素が緩衝材中や処分坑道、連絡坑道、母岩などを介して処分場から分散・移動する。 坑道内のセメント系材料と地下水が反応することにより坑道周辺母岩の地下水のpHは局所的に高いものとなる。これにより埋め戻し材や周辺母岩の変質がわずかに生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食に伴う水素ガスが気相あるいは地下水中の溶質として緩衝材や埋め戻し材、母岩などを介して処分場から分散・移動する。 母岩中の地下水は放射付コンクリートやグラウトと反応して化学的特性が変化しつつ、止水プラグ、埋め戻し材と反応する。これにより止水プラグ、埋め戻し材の変質がわずかに生じる。 	<ul style="list-style-type: none"> 母岩中には割れ目のネットワークが形成されており、地下水中にはネットワーク中の連結した多数の割れ目の中を流動する。 放射性核種は地下水の流れに沿って移流・分散メカニズムにより移動する。 核種の一部は母岩地下水中のコロイドとともに移行する可能性がある。 止水プラグや埋め戻し材は地下水との反応によって少しずつ変質する。 セメント系材料の溶出によって地下水水質や母岩の構成組成に変化が生じる。 処分場に存在する有機物が核種移行挙動に影響する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 温度場、水理場、応力場、化学場の変化を生ずる可能性がある。

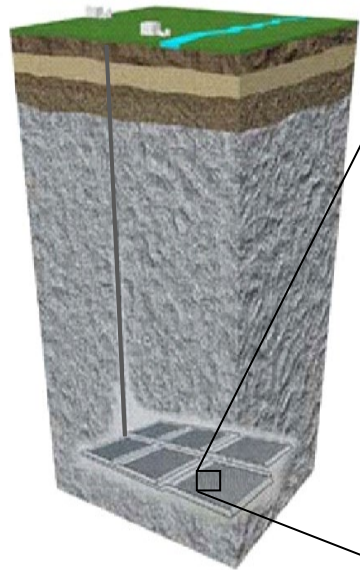
処分場システムの状態の変遷とそれに応じた核種の移行は、空間スケールと時間スケールによって異なる

図 6.3-1 ストーリーボードの例：高レベル放射性廃棄物処分場（罫置き・PEM方式）のふるまい

出典：NUMO (2021) 包括的技術報告書

各種坑道の掘削

湧水、排水、地下水位の低下
不飽和領域の拡大、酸化性環境



掘削影響領域の発生

- ・ 止水プラグによる掘削影響領域の分断

坑道の埋め戻し

- ・ 母岩の再冠水とともに飽和

緩衝材の設置

- ・ 地下水の浸潤による緩衝材の飽和、膨潤
- ・ 低透水場の形成

母岩

- ・ 坑道周囲の母岩は不飽和、酸化性環境
- ・ 坑道の埋め戻し後、時間経過とともに飽和、還元環境へ回帰

OP(ガラス固化体)の設置

- ・ ガラス固化からの発熱による周辺の温度が上昇
- ・ 時間経過とともにガラス固化体の発熱量は低下
- ・ OPの腐食

地下水反応

- ・ 地下水と鉱物の反応
- ・ セメント系材料と地下水の反応、周辺母岩や緩衝材の変質

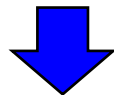
熱-水-力学-化学連成現象

➤ 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との反応など

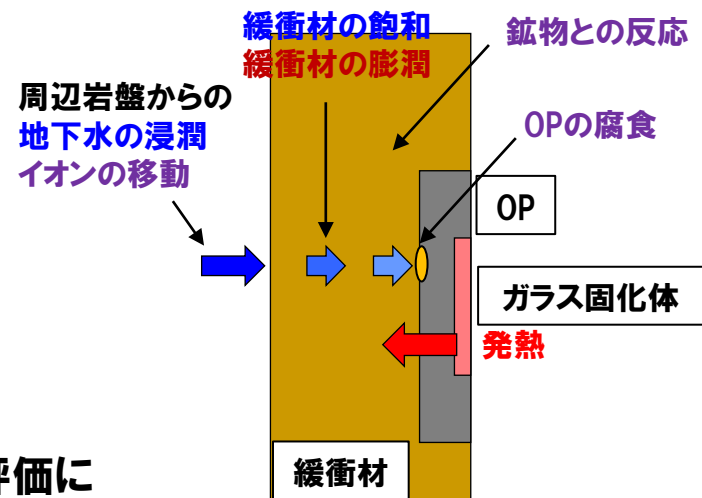
➤ これらの現象は相互に影響し合う複合的な連成現象となる (THMC連成現象: 熱-水-力学-化学連成現象)

➤ 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



幌延URLにおいて人工バリア性能確認試験の実施

- ◆ 緩衝材中の熱伝導挙動の把握
- ◆ 緩衝材・埋め戻し材中の不飽和から飽和への過渡期現象の把握
- ◆ 緩衝材・埋め戻し材中の力学挙動の把握
- ◆ オーバーパックの腐食挙動の把握
- ◆ 間隙水の化学特性の把握



THMC連成現象の一例

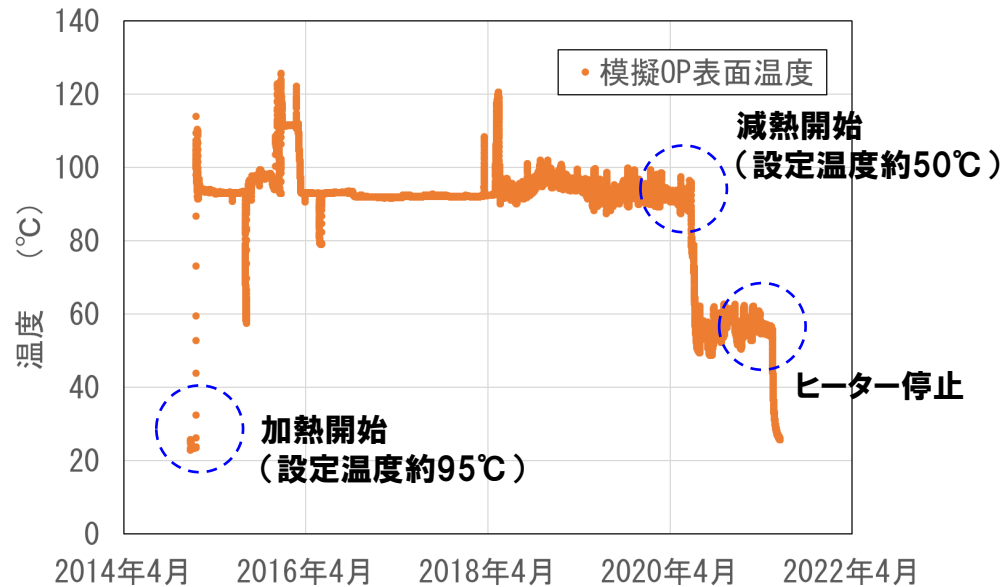
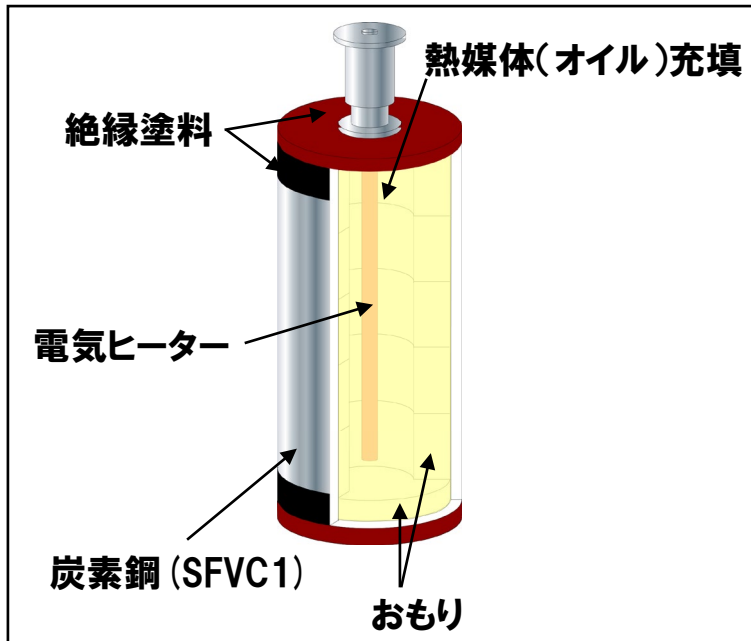
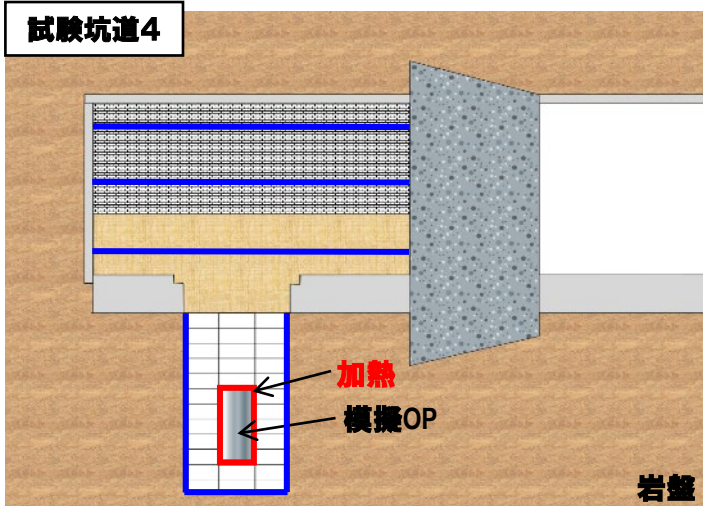
人工バリア性能確認試験における データ計測と連成解析

室内試験などの地上試験の結果と実規模
原位置試験の結果は同じ？
これまでに作成してきた解析コードで原位置
のデータは再現できる？

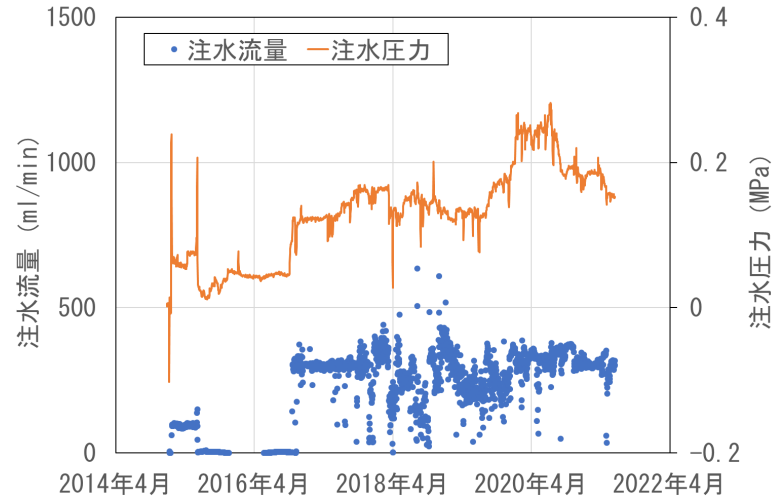
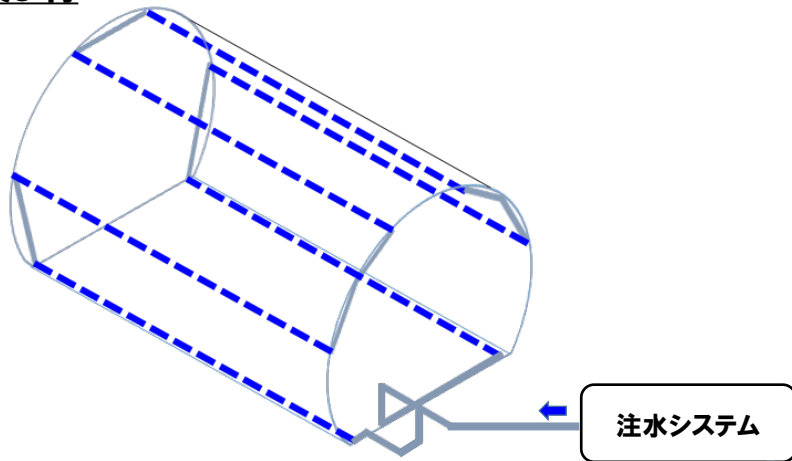


【データ計測と連成解析】

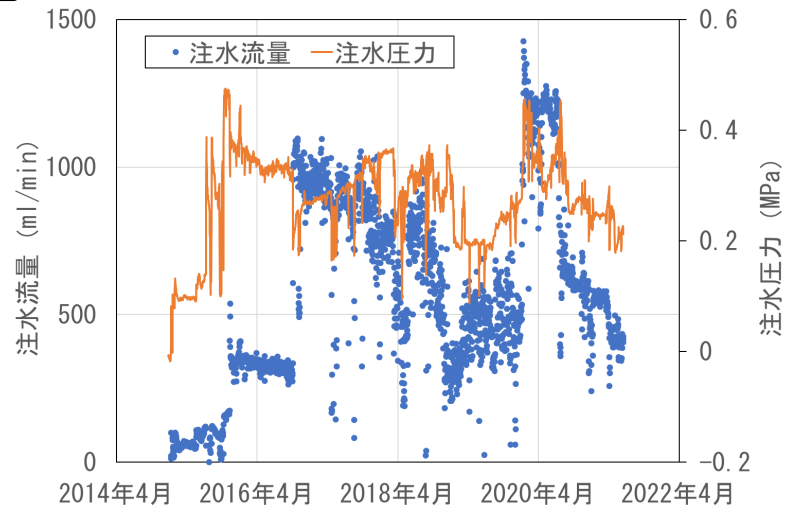
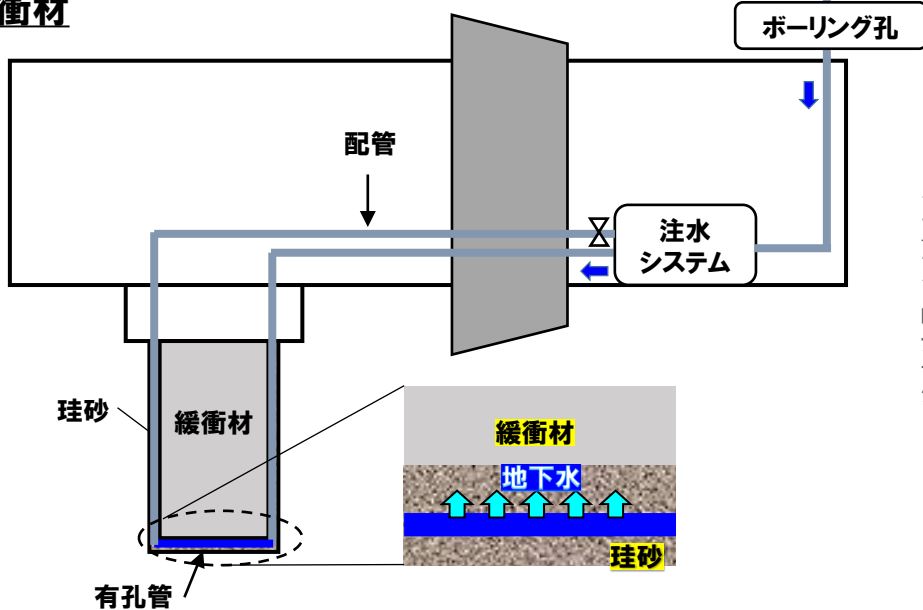
- THMC連成現象を評価するための検証データの取得
 - ✓人工バリア、埋め戻し材中に設置したセンサーによるデータ計測
 - ✓計測データを用いた連成解析手法の整備
 - ✓モニタリング手法の適用性確認



埋め戻し材

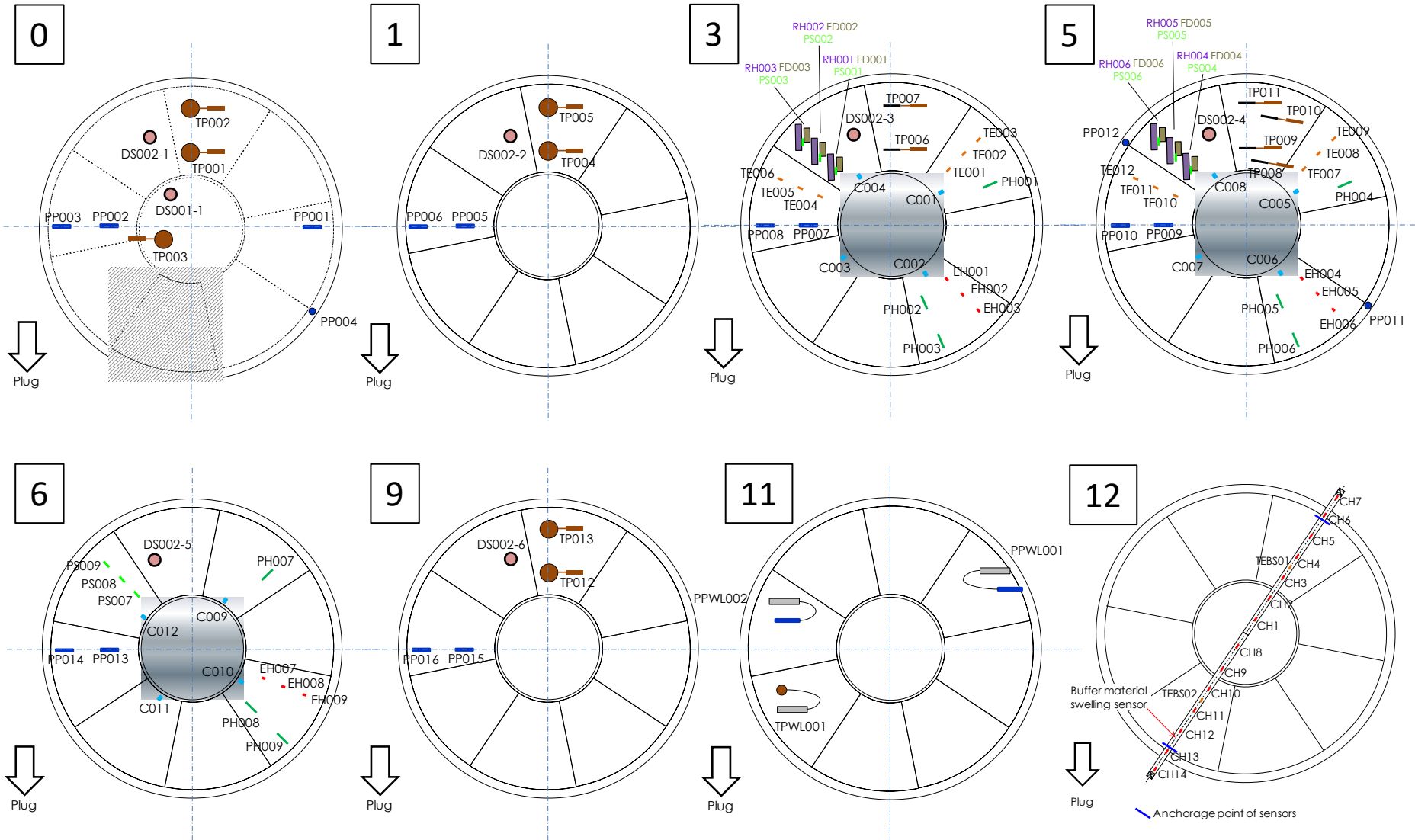


緩衝材

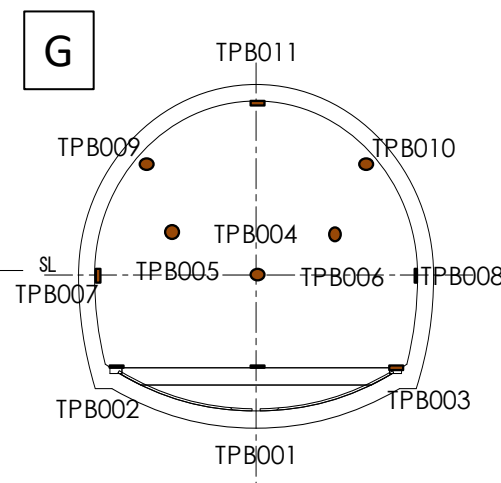
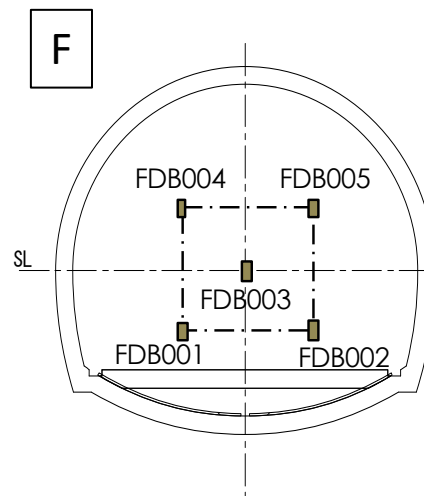
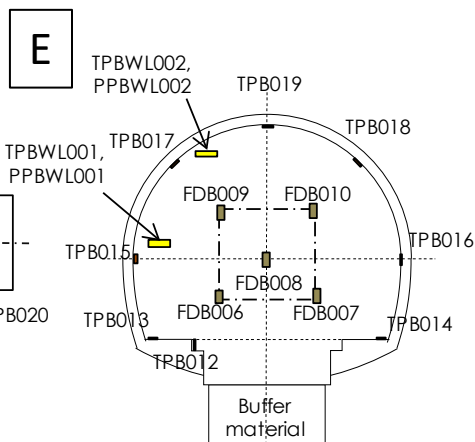
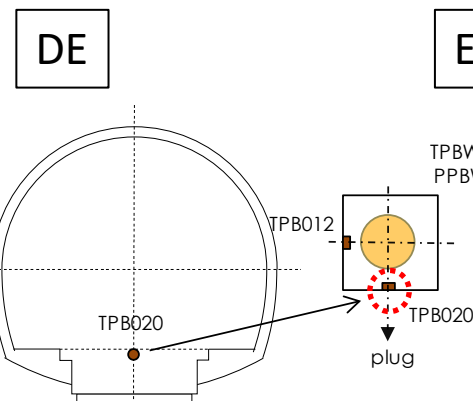
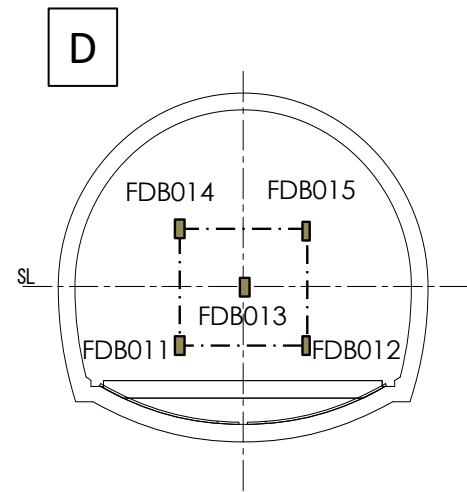
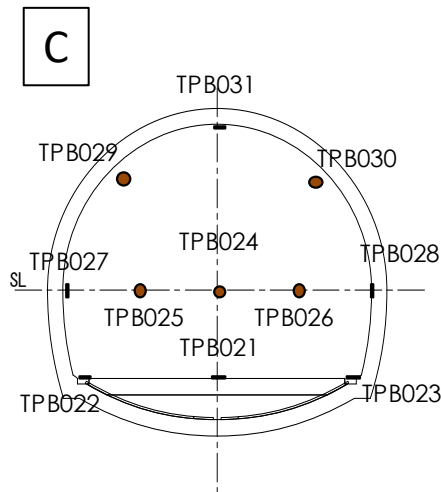
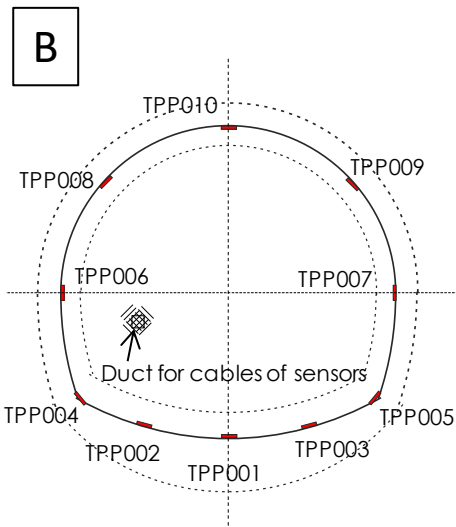
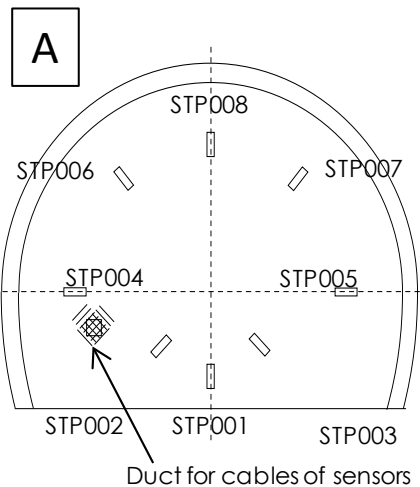


設置センサー		計測項目	数量		
			試験孔部	埋め戻し部	プラグ部
振動弦	土圧	緩衝材中の土圧、埋め戻し材外周部の土圧、プラグ外周部の土圧	13	31	10
	間隙水圧	緩衝材中および珪砂中の間隙圧	16		
	変位	緩衝材中の変位	6		
	ひずみ	プラグ表面のひずみ			8
温度(熱電対)		緩衝材中の温度	22		
湿度計		緩衝材中の湿度(水分量)	6		
サイクロメータ		緩衝材中のサクション(水分量)	9		
水分量 (FDR-V)	標準計測	埋め戻し材中の比誘電率(水分量)		15	
	温度補償計測	緩衝材中の比誘電率(水分量)	12		
	温度	緩衝材中の温度	6		
光学式pH計		緩衝材中のpH	9		
自然電位(白金電極)		緩衝材中の自然電位	9		
炭素鋼腐食センサー		模擬オーバーパックの液抵抗、分極抵抗(腐食速度)	12		
比抵抗トモグラフィ		緩衝材中の比抵抗(水分量)	262		
緩衝材膨出センサー		埋め戻し材側への緩衝材の膨出量		2	
流量計		緩衝材及び埋め戻し材中への注水量	緩衝材、埋め戻し材それぞれに異なるレンジの流量計を設置(3種類)		
温度計		模擬オーバーパックの表面温度	模擬オーバーパック表面に10か所		

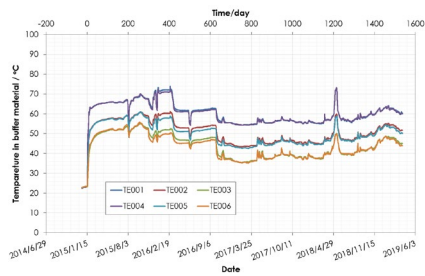
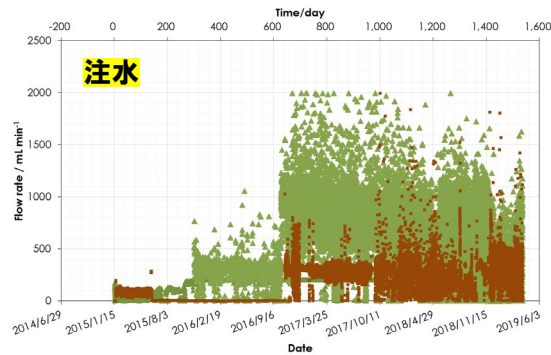
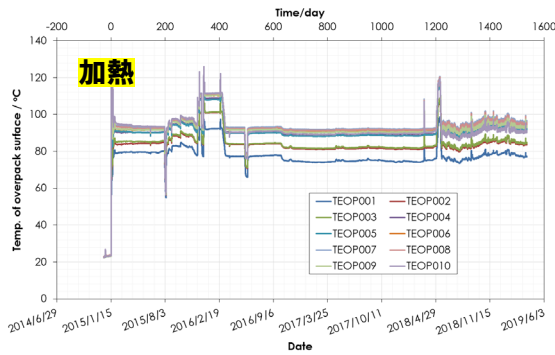
緩衝材中のセンサー配置



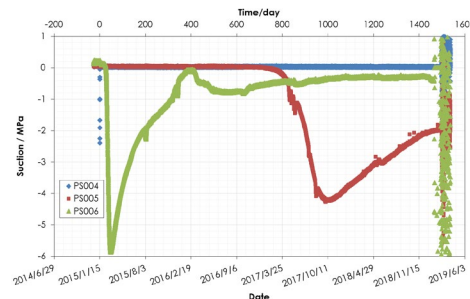
埋め戻し材中のセンサー配置



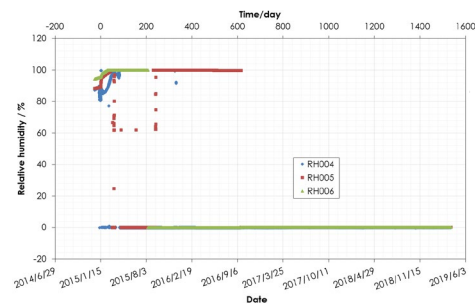
計測データの一例(緩衝材)



温度(熱電対)

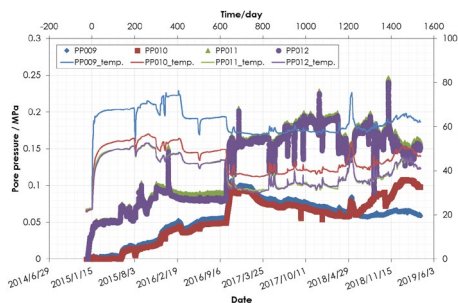
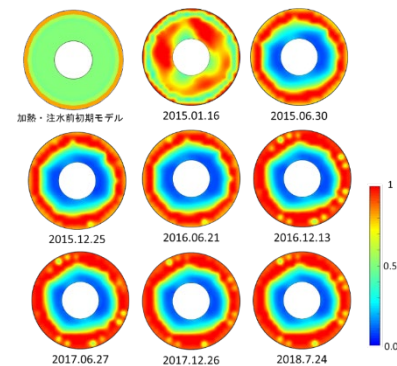


サクション(サイクロメータ)



相対湿度(湿度計)

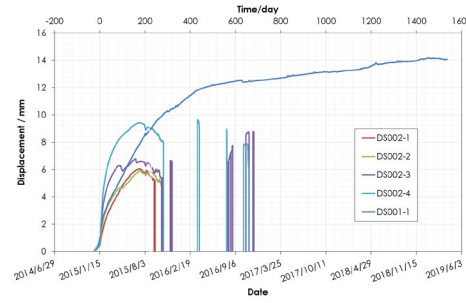
飽和度(比抵抗トモグラフィ)



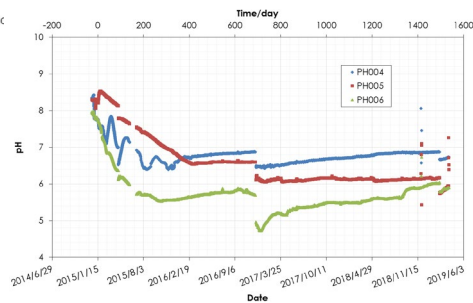
間隙圧(間隙水圧計)



全応力(土圧計)



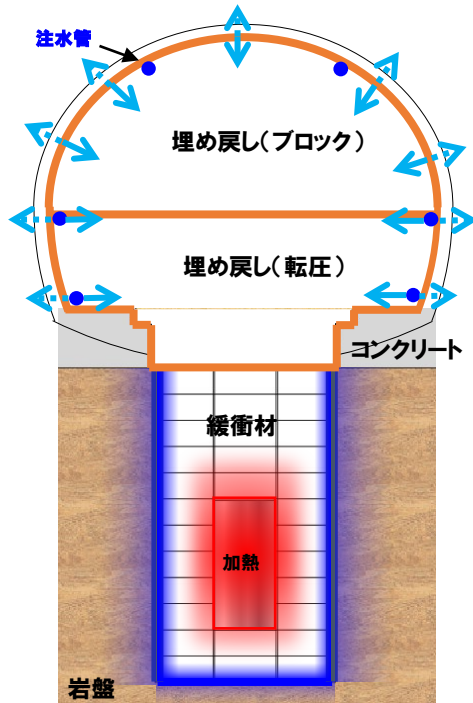
変位量(変位計)



pH計(光学式pH計)

データ取得

- 緩衝材底部及び埋め戻し材周りの注水量とOPの温度をコントロールすることで、人工バリア及び埋め戻し材中の連成データを取得



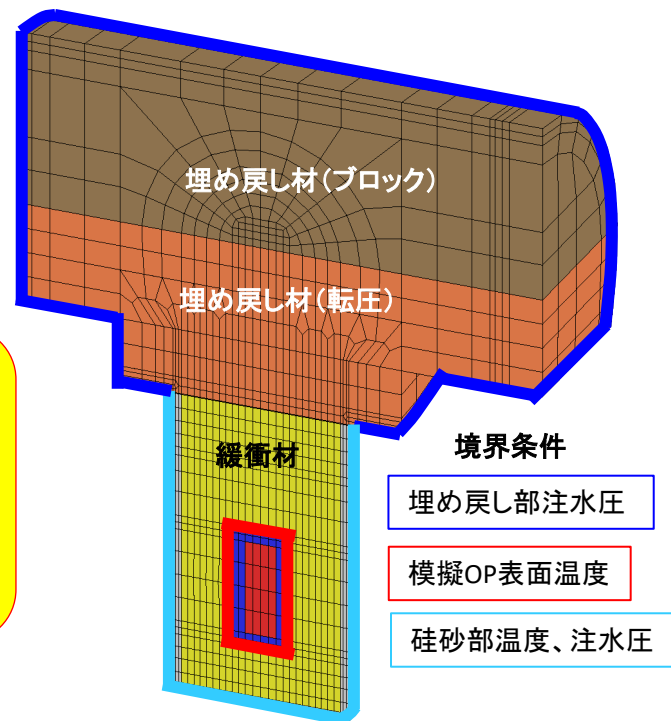
複数の温度条件、注水条件における実測値と解析値の比較を通じて解析モデルの妥当性・センサーの精度・プロセスの相互作用・影響因子等について検討

捉えたい人工バリア中の主な現象

- ・注水による水の移動(飽和度分布)
 - ・加熱による熱の移動(温度分布)
 - ・水による膨潤応力の発生(応力分布)
 - ・オーバーパックの腐食
- これらの現象は相互に影響し合う (THMC連成現象)

各種センサーにより計測

解析モデル



□ 水理条件

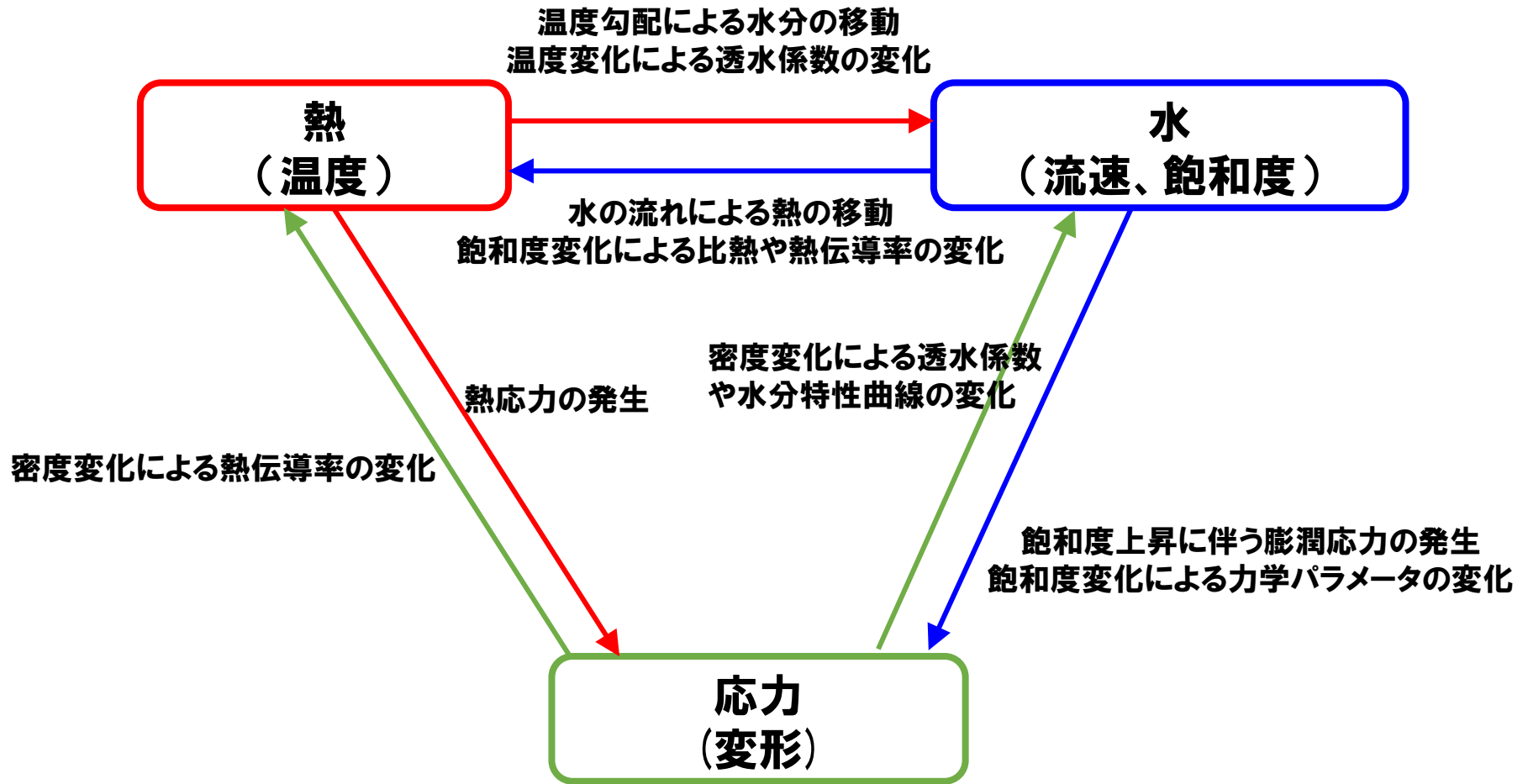
- 初期条件 緩衝材設置時の初期飽和度(50%)
- 硅砂中の間隙水圧(実測値)を外側境界条件
- 埋め戻し外側の間隙水圧(実測値)を外側境界条件
- 硅砂中は常に飽和

□ 温度条件

- 初期条件 初期の緩衝材中の温度(実測値)
- 模擬オーバーパック表面の温度(実測値)を内側境界条件
- 硅砂中の温度(実測値)を外側境界条件

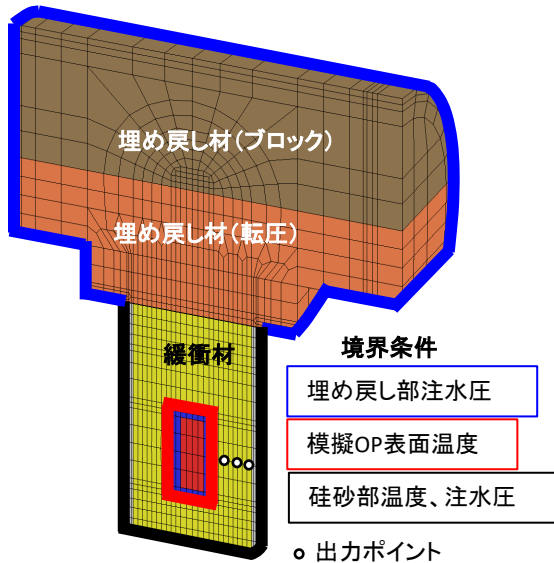
THM連成解析の一例

THAMES: THM連成現象が解析できる三次元有限要素 (FEM) 解析コード

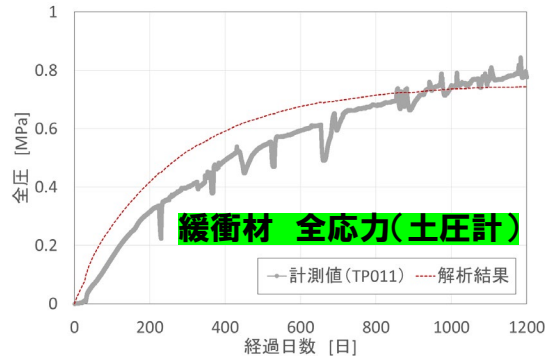
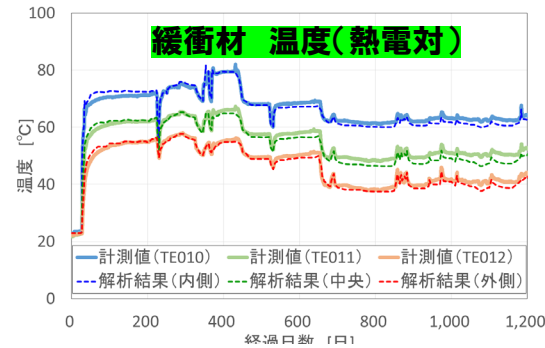


THAMESで考慮するTHM連成現象

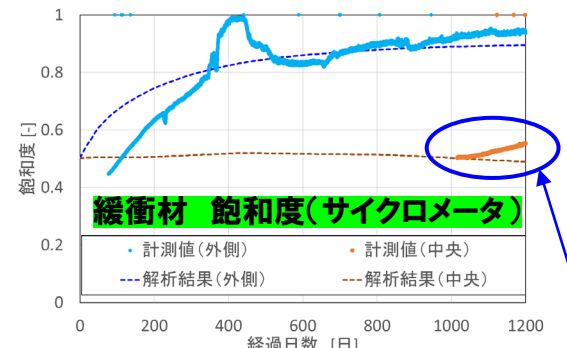
- THM連成解析コードTHAMESを用いて人工バリア性能確認試験の再現解析を実施
- 検討結果から課題の抽出を行い、連成パラメータの取得や解析コードの改良を実施



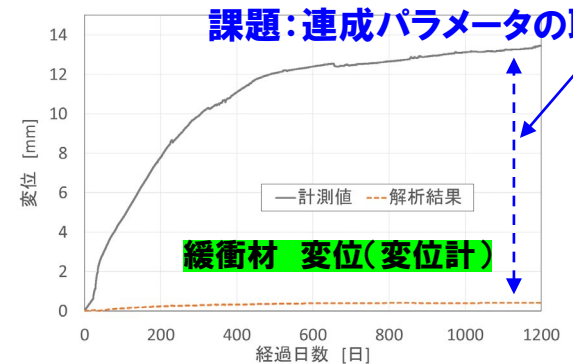
解析モデルと境界条件



計測データと連成解析結果 (THAMES) の比較



課題: 連成パラメータの取得



- 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)

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

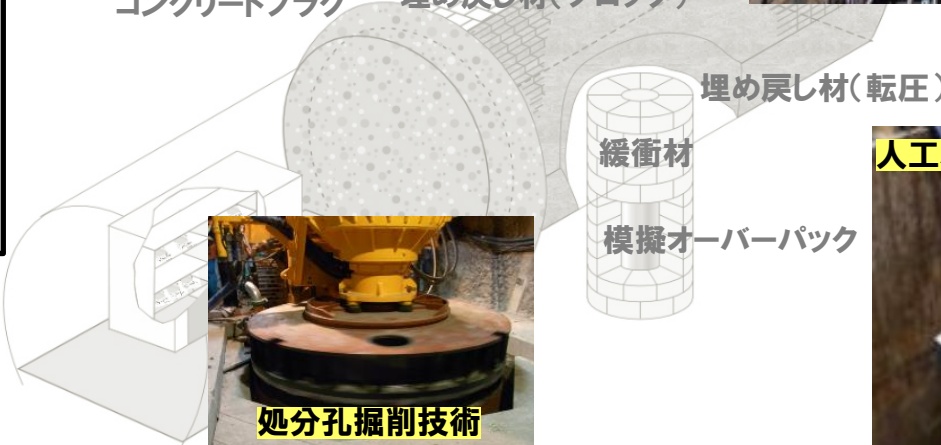
コンクリートプラグ



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、精密調査の段階(地下調査施設での調査)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量の低下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

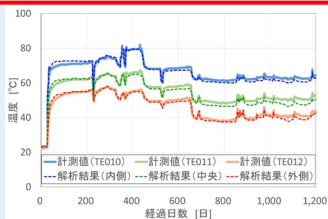
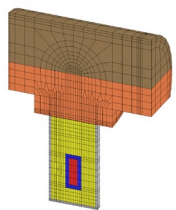
モニタリング手法の適用性確認

- 計測データの妥当性やセンサー長期耐用性等について、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

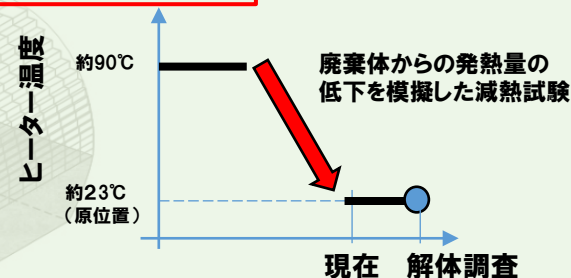
連成解析手法の高度化

- 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



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

緩衝材

