

**実際の地質環境における人工バリアの適用性確認**

## **(1-2) 人工バリア性能確認試験**

**令和5年8月28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**

# 説明概要

## 課題

- 人工バリア定置後、緩衝材が飽和に至るまでに発生する人工バリア周辺での連成現象の評価と現象を予測するための解析モデルの検証。

## 目的・内容

- 幌延URLにおいて、実規模大の人工バリア性能確認試験を実施し、連成解析モデルを検証するためのデータを取得。
- 人工バリア性能確認試験での計測データを用いて、室内試験や海外事例をもとに開発、高度化してきた解析モデルを検証。

## 成果

- 幌延の地下水条件(海水系地下水)では、蒸留水条件と比較して緩衝材中の熱伝導特性に変化はないが、浸潤特性や膨潤特性は大きく異なる。
- 海水系地下水環境下においては、初期に存在する間隙水と地下水とが混合することで形成される間隙水組成に基づき設定される必要があり、水理解析と物質移行を含む地球化学解析とを連成させ、間隙水組成によって変化する水理特性の影響を考慮した解析手法を適用することで緩衝材の浸潤挙動を適切に評価することが可能。

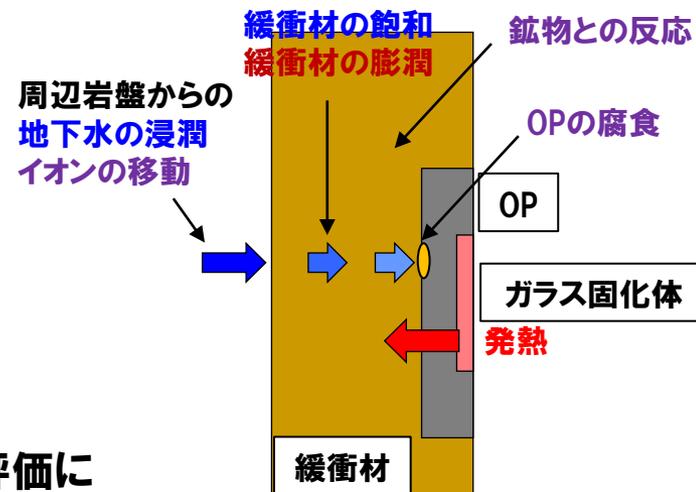
# 熱-水-力学-化学連成現象と背景

## ➤ 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

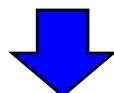
- ・ガラス固化体からの発熱、周辺岩盤からの地下水の浸潤
- ・地下水浸潤による緩衝材の飽和と膨潤応力の発生
- ・地下水浸潤によるオーバーパック(OP)の腐食
- ・緩衝材間隙水と鉍物との反応など

## ➤ 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



THMC連成現象の一例



## 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

# 人工バリア、埋め戻し材の設計・製作

## 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/cm<sup>3</sup>
- 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

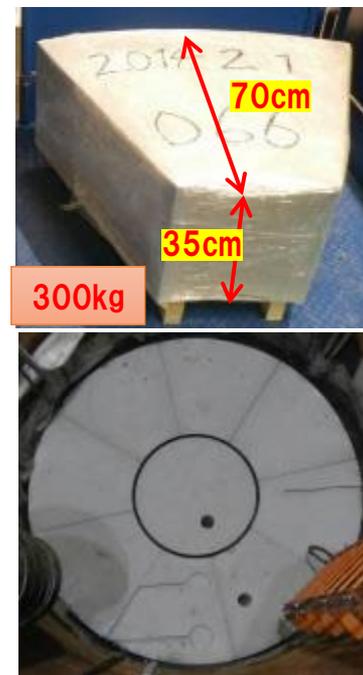
- 材料：クニゲルV1（40%）+ 掘削ズリ（60%）
- 乾燥密度： 転圧部 1.2g/cm<sup>3</sup>  
ブロック部 1.4g/cm<sup>3</sup>

## プラグ

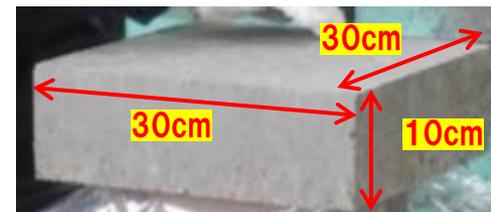
- 材料：低アルカリコンクリート



模擬オーバーパック

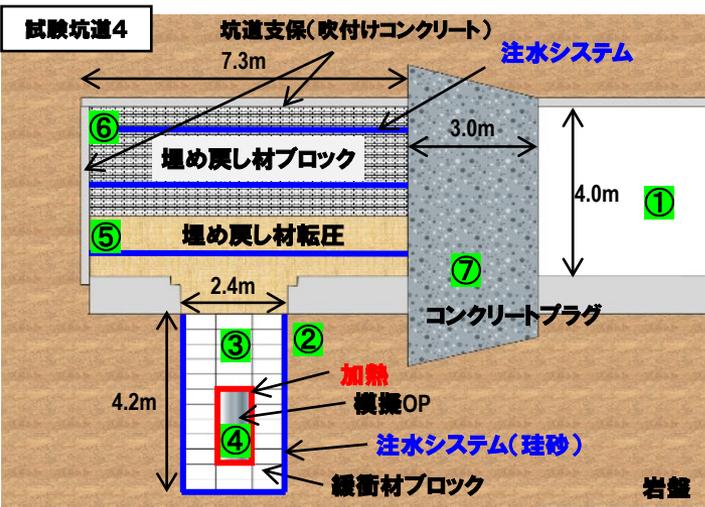


緩衝材

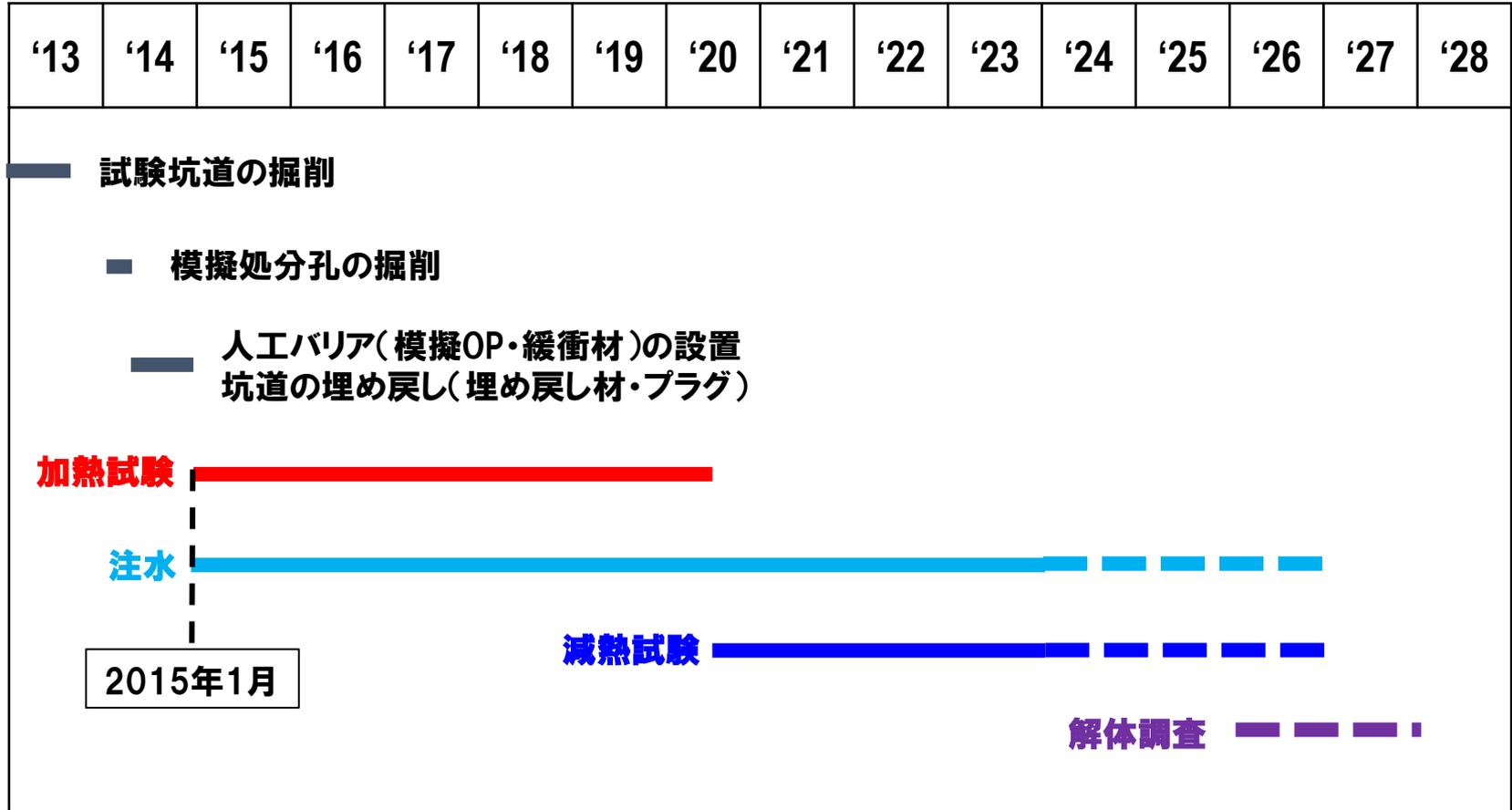


埋め戻し材(ブロック)

# 施工の様子

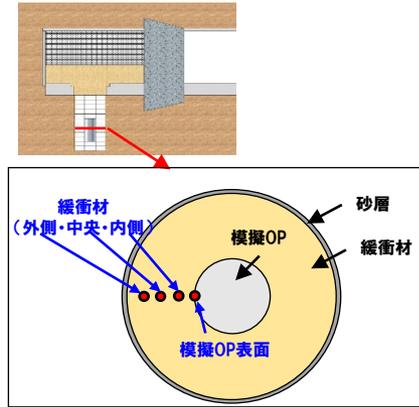


# 人工バリア性能確認試験の工程



# 計測データの一例(緩衝材5段目)

## 緩衝材5段目で計測されたデータの一例(温度、飽和度)



センサー設置位置

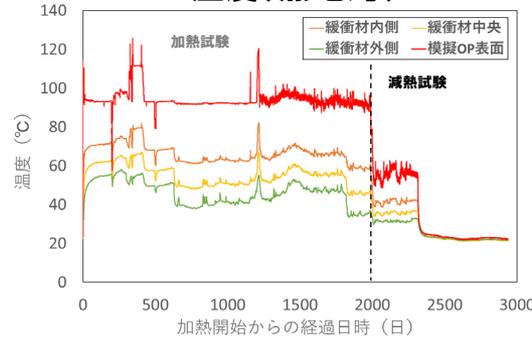
### 加熱試験

- 緩衝材外側は砂層からの地下水浸潤や温度勾配による内側からの水分移動により飽和度が増加
- 緩衝材内側の飽和度は減少
- その後、緩衝材中央部と内側の飽和度が非常に緩やかに増加

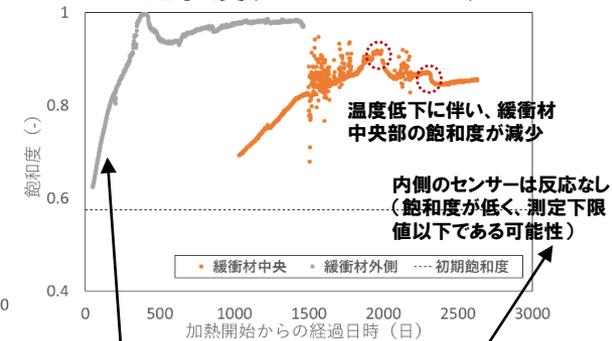
### 減熱試験

- 温度低下時に緩衝材中央部の飽和度が一時的に減少、緩衝材内側の飽和度は増加(加熱時よりも浸潤が速い)

温度(熱電対)

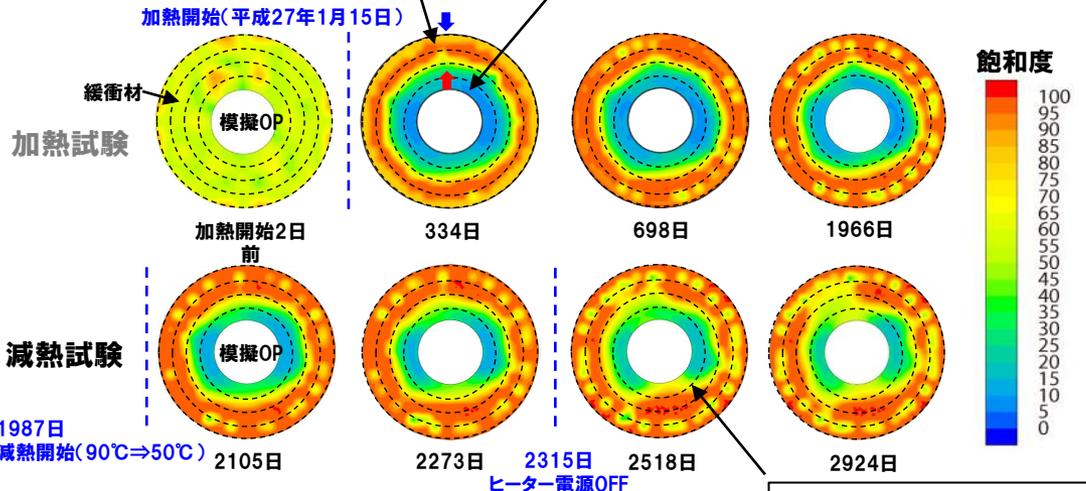


飽和度(サイクロメータ)



緩衝材外側は砂層からの地下水浸潤や温度勾配による内側からの水分移動により飽和度は増加

緩衝材内側は加熱により飽和度は減少

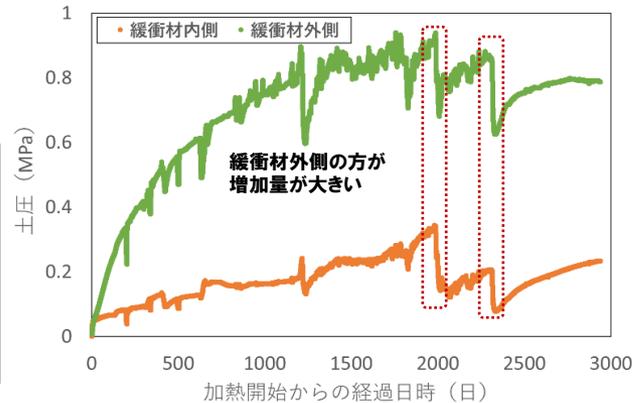
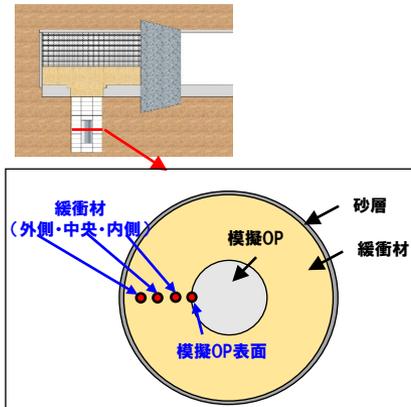


飽和度(比抵抗トモグラフィ)

緩衝材内側の飽和度が増加

# 計測データの一例(緩衝材5段目)

## 緩衝材5段目で計測されたデータの一例(応力)



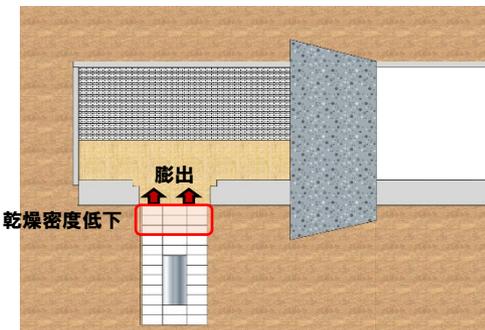
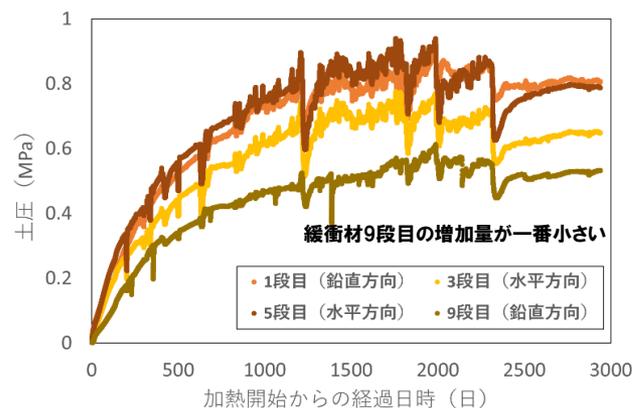
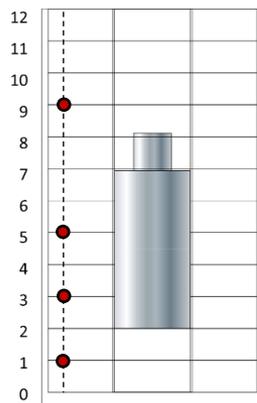
### 加熱試験

- 緩衝材外側では主に飽和度増加に伴う膨潤応力が発生
- 緩衝材内側では熱応力や間隙圧が変化

### 減熱試験

- 温度低下時に応力が急激に低下(温度低下による収縮の影響)

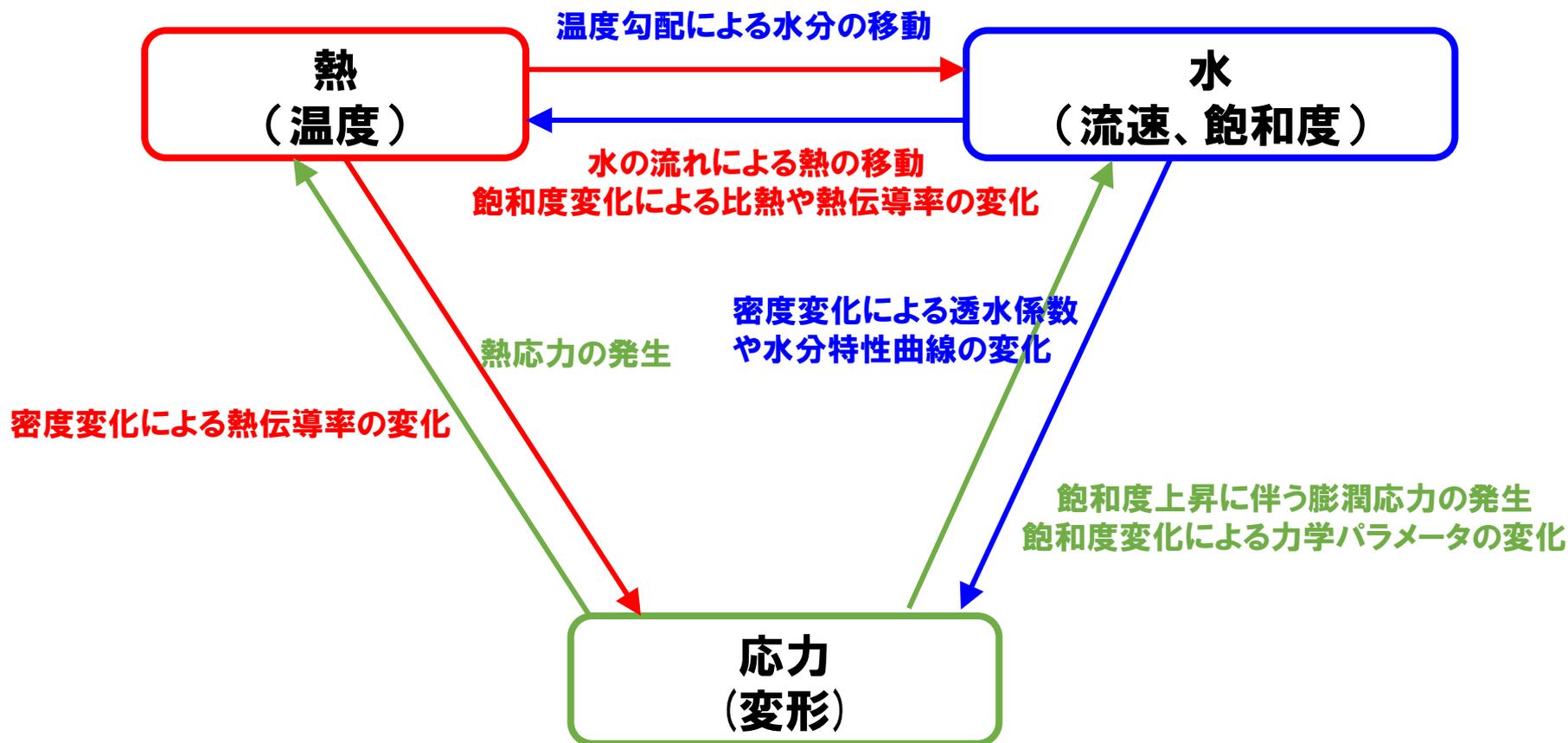
## 鉛直方向の応力の比較



- 緩衝材上部では、埋め戻し材側へ膨出し、乾燥密度が低下している可能性がある
- 乾燥密度分布の把握が課題(解体調査)

# THM連成解析検討

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

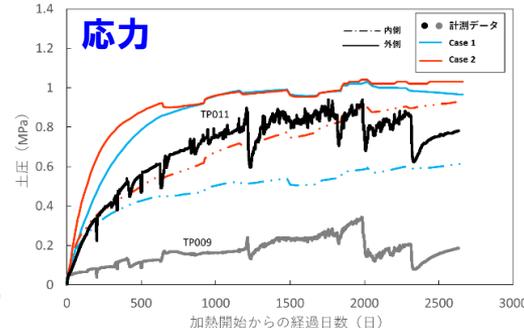
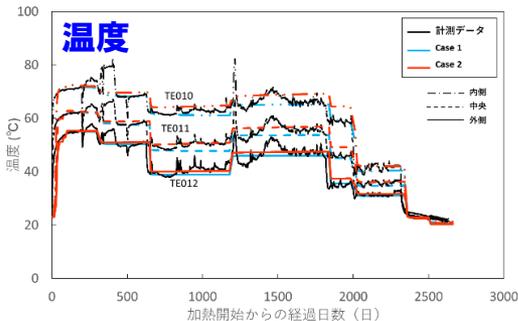
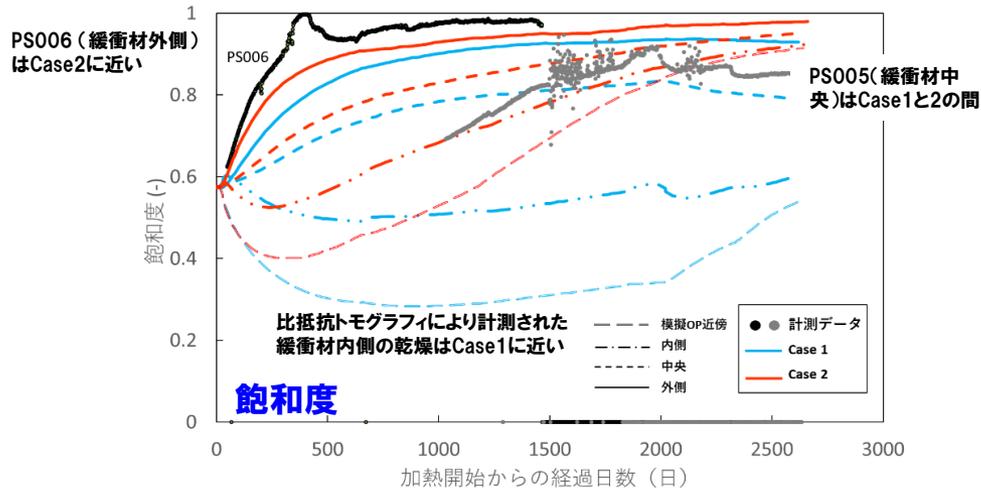
# THM連成解析検討

## THM連成解析の一例:

- 蒸留水条件(Case1)と幌延地下水条件(Case2)で取得されたそれぞれのパラメータを使用し、THM連成解析を実施(緩衝材5段目の計測値と比較)

### 既存の室内試験結果

⇒透過液に幌延地下水(塩水系地下水)を使用した場合、蒸留水条件と比較して緩衝材の**固有透過度は増加、平衡膨潤応力は低下**(熱特性は変化しない)。



緩衝材5段目の計測値と解析結果

### 解析結果(幌延地下水条件と蒸留水条件)

#### 温度分布

- 両者の差は、熱パラメータ(熱伝導率、比熱)が含水比の関数であることが要因(飽和度分布の差)。

#### 飽和度分布

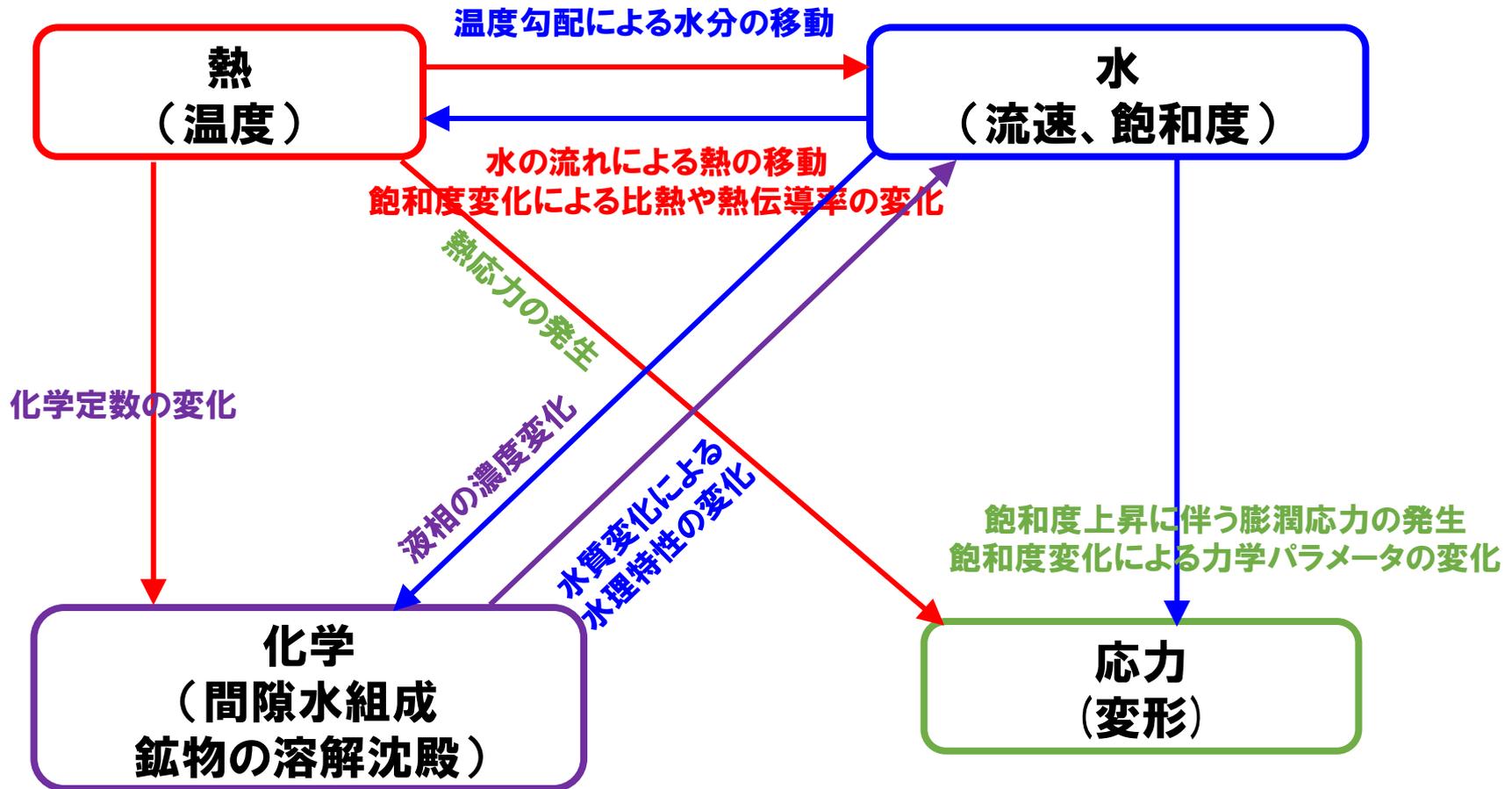
- 外側では幌延地下水条件の方が再現性が高く、内側では蒸留水条件の方が再現性が高い。
- 中央部ではおおよそ両者の間。
- 外側では砂層から幌延地下水が浸潤、内側では緩衝材製作時の水が温度勾配によって移動。
- 間隙水の水質変化の把握が重要(解体調査)。

#### 応力分布

- 解析結果は全体的に計測値よりも高く評価される。
- 幌延地下水条件では、特に内側で飽和度を高く評価しているため、応力分布も高く評価される。
- 応力分布に与える影響が大きい乾燥密度分布も把握することが重要(解体調査)。

# THMC連成解析検討

**COUPLYS**: THM連成解析コード (THAMES)、物質移行解析コード Dtransu および地球化学解析コード PHREEQC の独立した三つの解析コードを組み合わせた解析システム

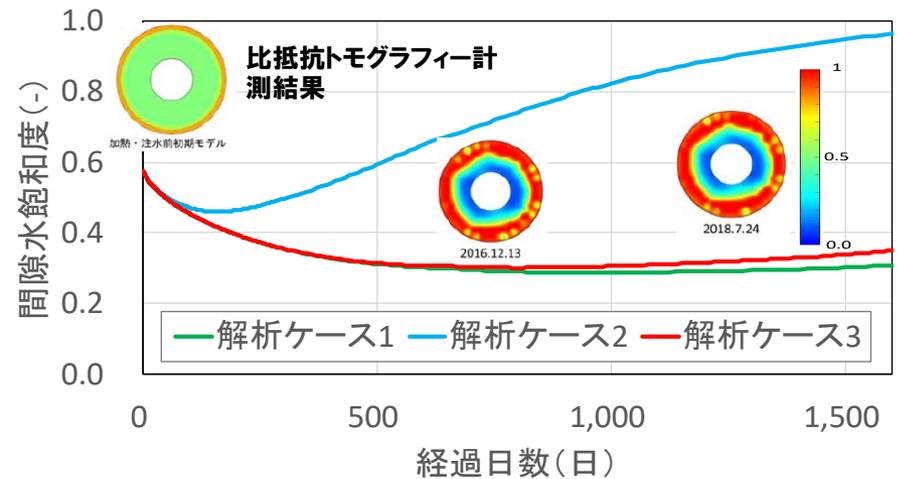
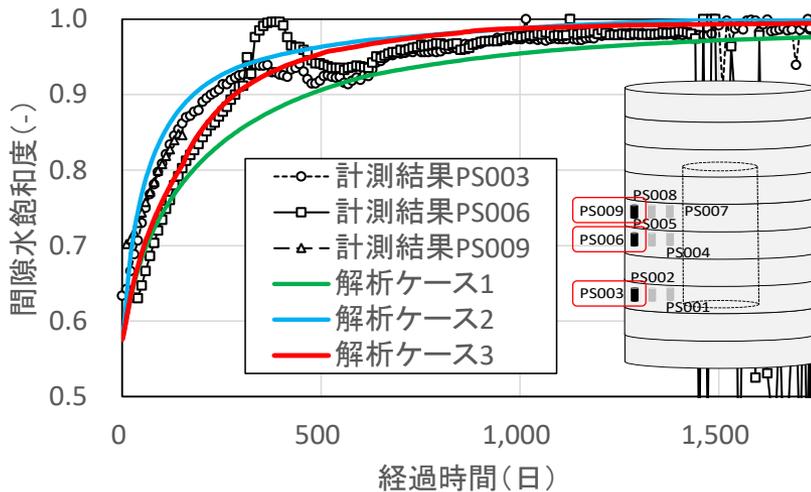


COUPLYSで考慮するTHMC連成現象

# THC連成解析検討

## THC連成解析の一例:

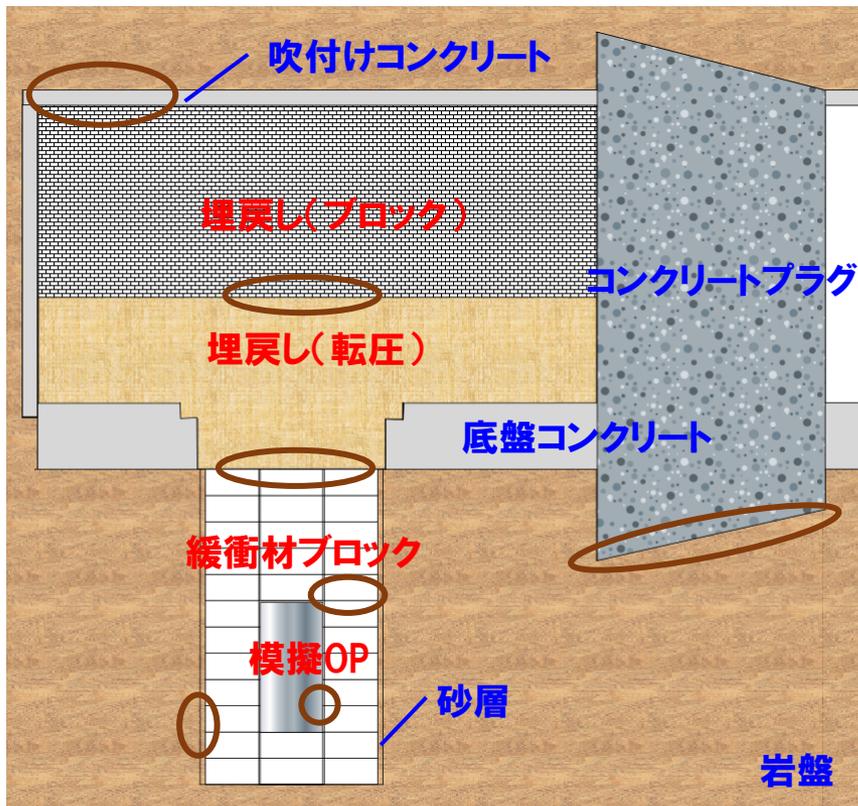
- 幌延人工バリア性能確認試験を対象としたTHC連成解析(ケース3)、比較として、蒸留水条件での固有透過度を用いた場合のTH連成解析(ケース1)、幌延地下水条件での固有透過度を用いた場合のTH連成解析(ケース2)を実施
- THC連成解析(ケース3)は、緩衝材外周部の浸潤挙動を概ね良好に再現し、緩衝材内側の飽和度が低下する挙動も比抵抗トモグラフィー計測結果と整合的な結果が得られた。



# 今後の計画：解体調査

## 解体調査によるデータ取得

- センサーにより得られるデータは限定的であるため、より詳細なデータを取得するためには解体調査によるデータ取得が必要



### 調査計画案

#### 各材料

- 緩衝材、埋戻し材: 水分量、乾燥密度、間隙水組成、鉱物組成、微生物相互作用、ブロック間の継目
- 模擬OP: 腐食（腐食深さ、腐食生成物）

#### 材料界面/継目

- 模擬OP/緩衝材: 鉄/ベントナイト界面現象、隙間充填具合
- 緩衝材/埋戻し材: 緩衝材の膨出
- 緩衝材/砂層/岩盤: 緩衝材の流出
- コンクリート/埋め戻し材: 低アルカリセメント/ベントナイト界面現象、
- コンクリート/岩盤: 低アルカリセメント/岩盤界面現象

#### その他

- センサー、ケーブル、注水管、ヒーター

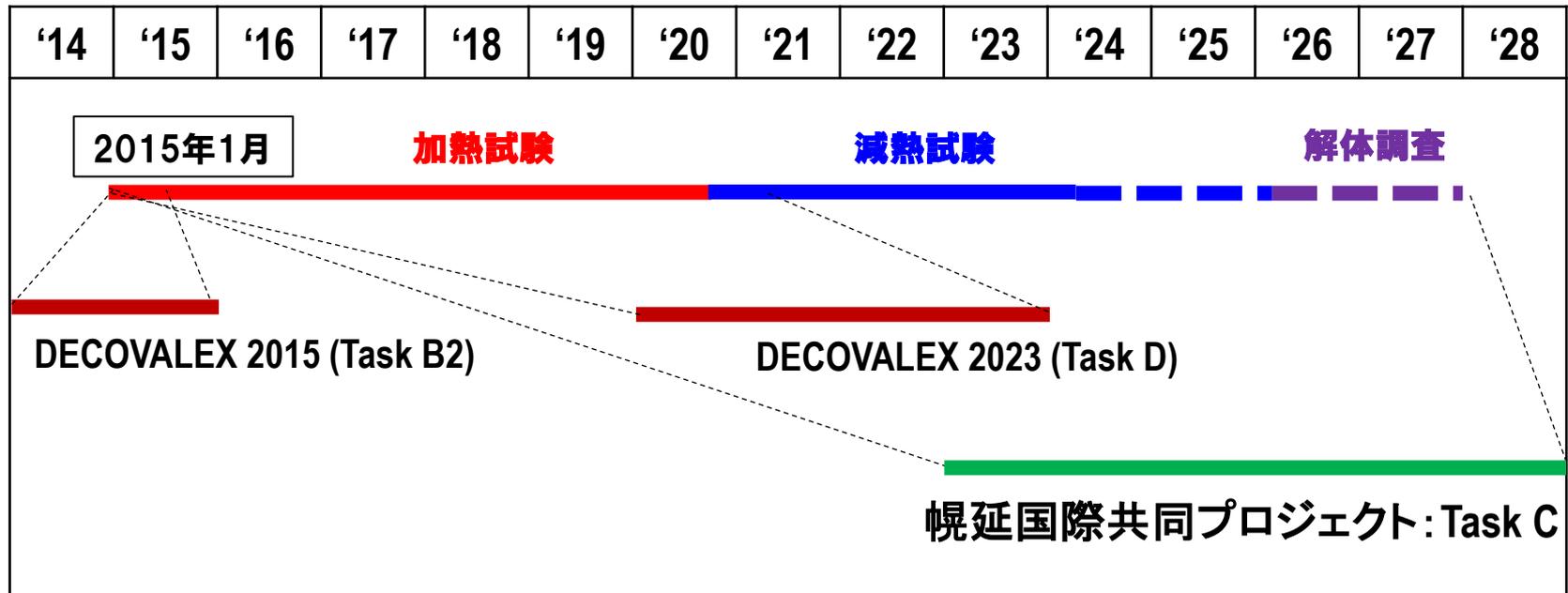
⇒人工バリア性能確認試験の解体試験(幌延国際共同プロジェクト)

# 今後の計画：幌延国際共同プロジェクト(HIP)

## 【幌延国際共同プロジェクト:Task C 人工バリアシステム解体試験】

センサーで取得したデータに加えて、解体調査で取得するデータ(粘土材料中のより詳細な飽和度、乾燥密度、塩濃度分布や材料界面の情報)を用いたベンチマークテストを実施(DECOVALEXではセンサーで取得したデータのみ)

- ①解体調査計画の決定と実施
- ②解体調査時に予測される飽和度、乾燥密度、塩濃度分布などの予測解析
- ③予測解析と解体調査データの比較による解析モデルの更新



# 今後の課題

## 今後の課題

### 連成解析手法の高度化

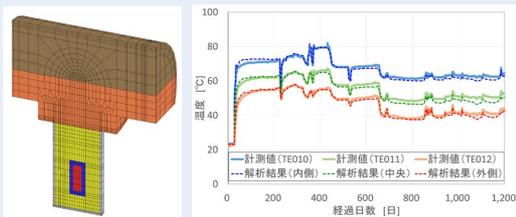
- 原位置データ計測や解体調査による検証データの拡充、解析コードの検証・高度化

### 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

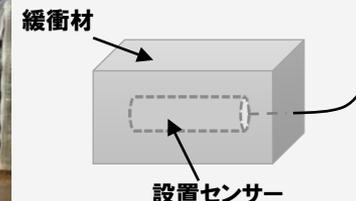
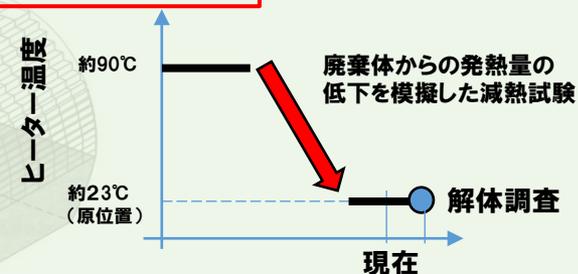
#### 連成解析手法の高度化

- 連成パラメータの取得、原位置試験によるデータ計測
- 国際プロジェクトによる他解析コードとの比較検討



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

---

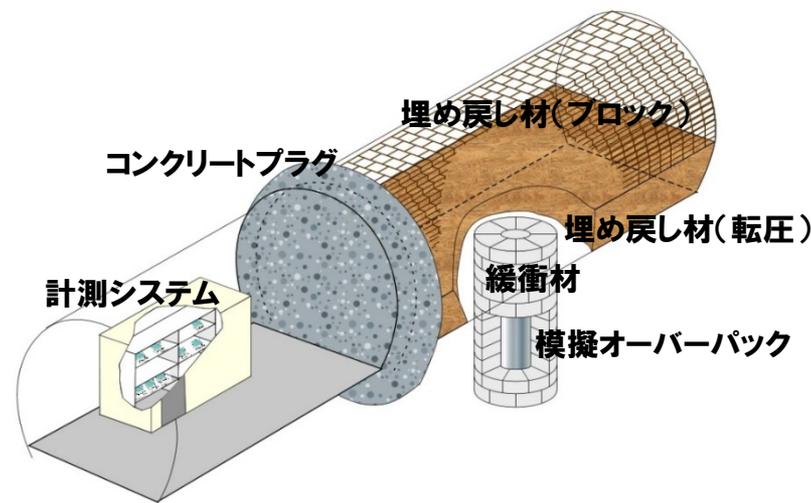
# 參考資料



# 人工バリア性能確認試験の実施内容

## 【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

### 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縦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

## 【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

# 設置センサー一覧

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		

# 室内試験

- 緩衝材中の熱特性、水理特性、力学特性

- ✓ 室内試験によって個々の特性を把握し、連成解析へ反映

## 熱特性

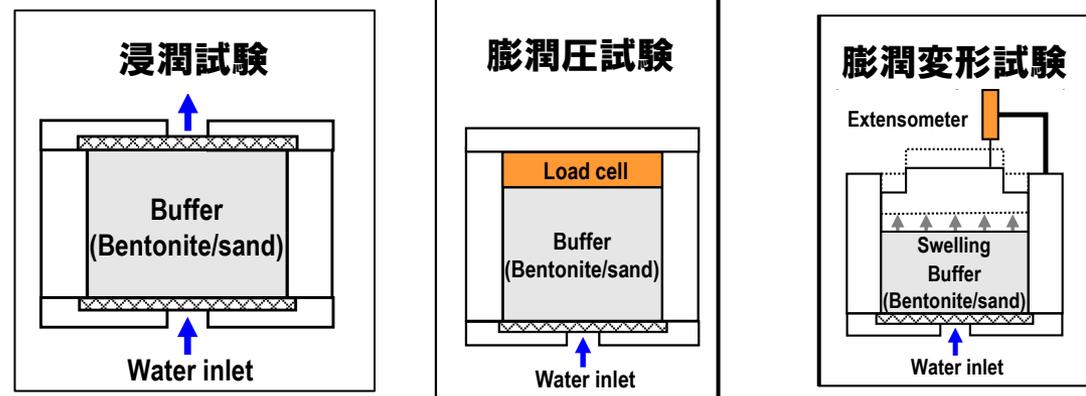
- 熱伝導率
- 比熱

## 水理特性

- 透水性
- 水分特性曲線

## 力学特性

- 膨潤特性
- ヤング率



室内試験のイメージ図

# 緩衝材の熱特性

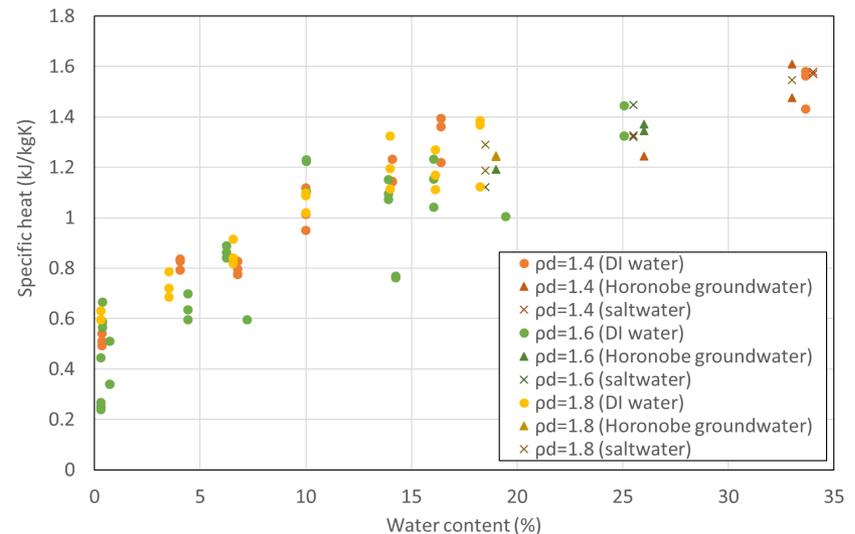
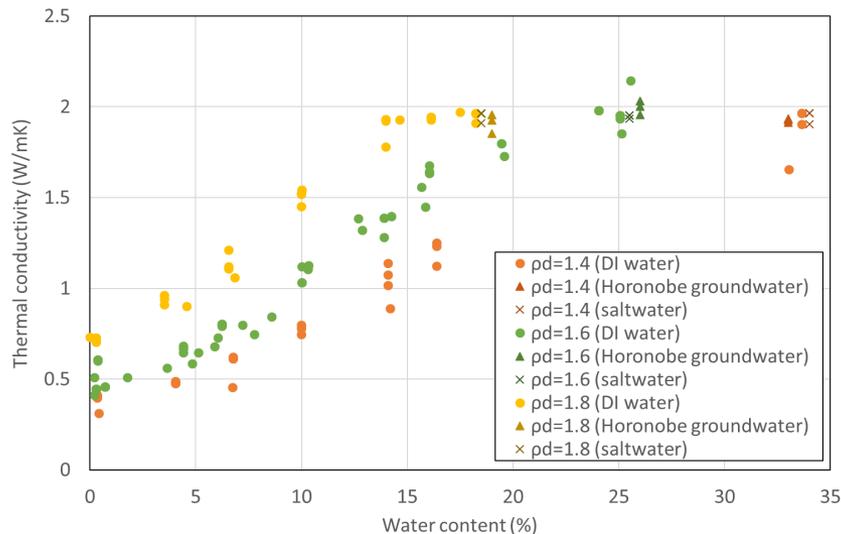
## 熱特性

- 熱伝導率：緩衝材の含水比や乾燥密度によって変化

$$\lambda = A + Bw + Cw^2 + D\rho_d \quad A, B, C, D: \text{パラメータ}, \rho_d: \text{乾燥密度}, w: \text{含水比}$$

- 比熱：緩衝材の含水比によって変化

$$c = \frac{A + Bw}{100 + w} \quad A, B: \text{パラメータ}, w: \text{含水比}$$



イオン強度: DI water = 0 (mol/dm<sup>3</sup>), Horonobe groundwater = 0.21 (mol/dm<sup>3</sup>), Saltwater = 0.64 (mol/dm<sup>3</sup>)

# 緩衝材の水理特性

## 水理特性

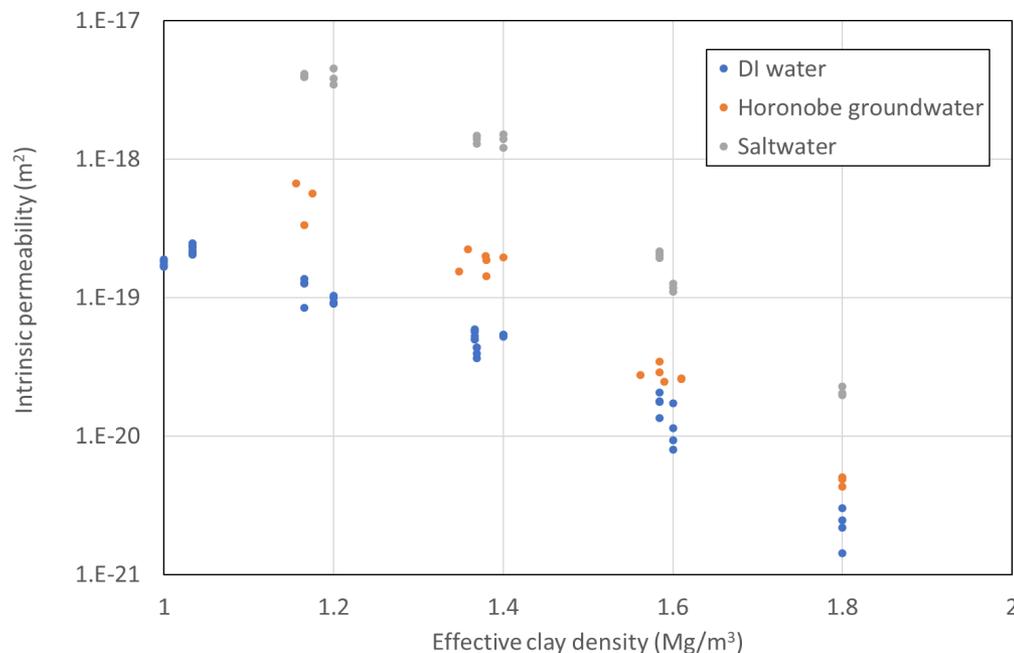
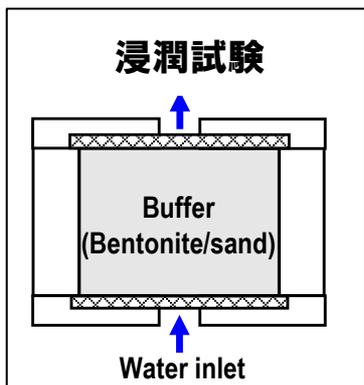
- 固有透過度: 緩衝材の有効粘土密度(乾燥密度)や水質によって変化

$$\kappa = \exp(A + B\rho_e + C\rho_e^2) \quad A, B, C: \text{parameter}, \rho_e: \text{有効粘土密度}$$

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

$\rho_e$ : 有効粘土密度,  $\rho_d$ : 乾燥密度  
 $R_s$ : 砂の含有率,  $\rho_s$ : 砂の土粒子密度

	A	B	C
DI water	-42.1	1.1447	-2.1232
Horonobe groundwater	-41.466	4.316	-4.069
Salt water	-47.155	15.138	-7.878



# 緩衝材の膨潤特性

## 力学特性

- 平衡膨潤圧: 緩衝材の有効粘土密度(乾燥密度)や水質によって変化

$$\sigma_{swmax} = \exp(A\rho_e^3 - B\rho_e^2 + C\rho_e - D) \quad A, B, C, D: \text{パラメータ}, \rho_e: \text{有効粘土密度}$$

	A	B	C	D
DI water	3.94	13.71	18.06	9.60
Horonobe groundwater	4.24	20.04	37.63	26.07
Salt water	4.24	20.04	37.63	26.07

