

2019年7月17日

第54 回地盤工学研究発表会 特別セッション：「福島第一原子力発電所廃止措置への貢献を目的に創設された廃炉地盤工学の概要と活用方法の検討」

# 地盤施工学・地盤材料学・地盤環境学における空間放射線防護と放射性物質拡散防止技術の検討

廃炉地盤工学委員会 幹事長  
早稲田大学 後藤茂

## 廃炉地盤工学の使命

1. 事故原子力発電所廃止措置における原子力分野と地盤工学分野の相互理解と協働の促進。
2. (事故)原子力発電所の廃止過程において活用可能な地盤工学的技術を明確化（体系化）。

- 地盤工学的技術を廃炉技術の観点から再評価（何ができるか）。
- 作業空間改善のための空間放射線量の低減
- 周辺環境の防護のための放射能汚染物質の拡散防止
- 廃止処置に関連する他分野技術の活用容易化のための補助

# 廃炉地盤工学を構成する学問単元

## ・地盤力学

原子炉廃止措置での各段階で生じる構造物および地盤の形態変化について、**地震等に対する安定性**を検討するための技術群。

## ・地盤環境学

廃止措置過程において必要な地盤内（地下水、地下空洞等）の**放射線環境を予測・評価・改善**するための技術群。

## ・地盤材料学

廃止措置に有効な**地盤系材料（ボーリング補助液、止水材、グラウト材、覆土材料等）を開発・改良**する技術群。

## ・地盤施工学

廃止措置における環境的・構造的条件を考慮して、**最適な工法・材料を選択し、廃止措置過程を実体化**させるための技術群。

3

# 構成する学問単元と構造

## 廃炉地盤工学

### 地盤力学

1. 現状の力学的安定性評価
2. さらなる自然災害への対策設計
3. 仮設時の力学的安定性
4. . . .

### 地盤材料学

1. デブリ取出し補助材料
2. さらなる自然災害への対策設計
3. 仮設時の力学的安定性
4. . . .

### 地盤環境学

1. 作業環境の安全性確保・モニタリング
2. 地下部における汚染水の状況評価と将来予測
3. 対策工の実施
4. . . .

地盤施工学



Construction Management

# 廃炉のための地盤施工学の骨格

- 基本的骨格
  - 廃止措置の過程を考慮しつつ,
  - 一般的な地盤施工の類似性を考慮する.
- 上級の骨格
  - 廃炉過程の上位の概念から参画
  - 制約条件や要求性能を緩和
  - 上記を踏まえた工法/材料の選択肢を拡大!



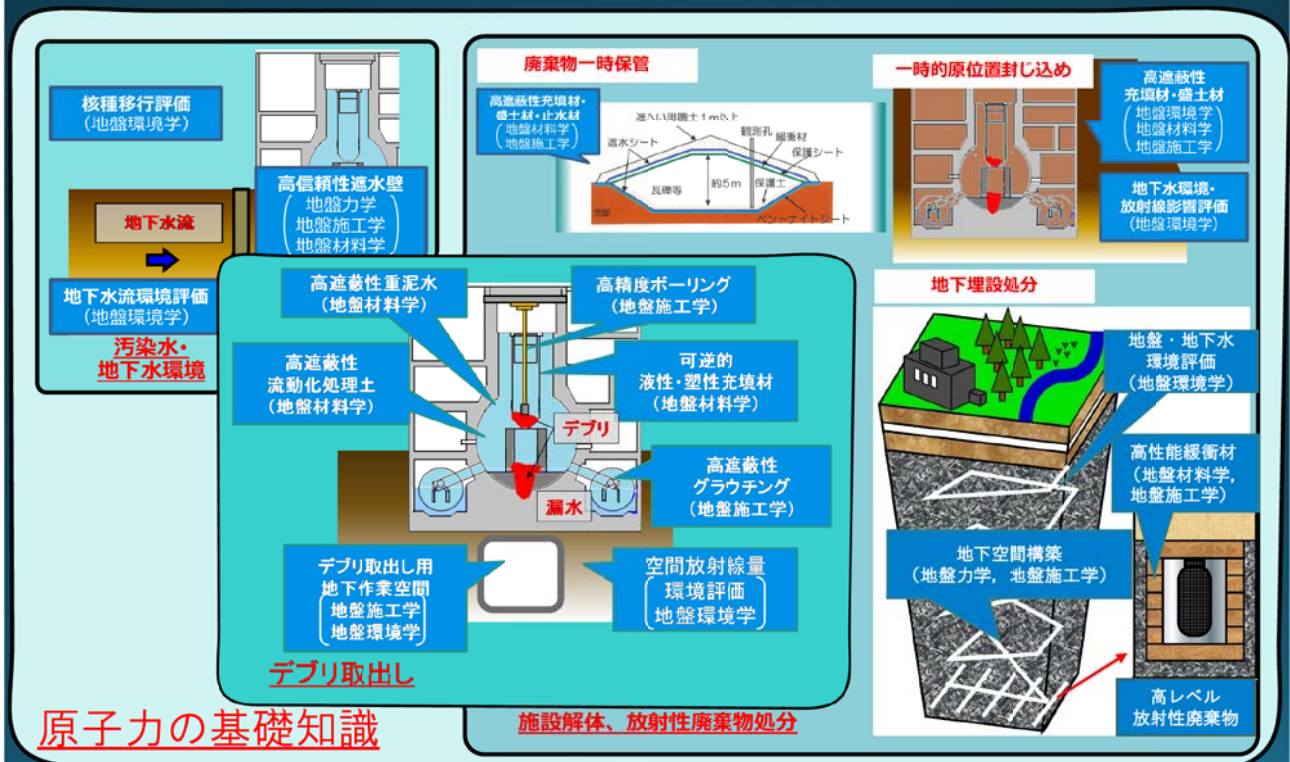
# 実施工のための地盤材料学

- 高放射線環境への対応
  - 放射線遮蔽に関する基礎学習
  - 放射線遮蔽可能な材料開発
  - 放射線遮蔽のキー性能
  - 超重泥水, バライト砕石覆土などのアイデア
- 廃棄物対策, 汚染エリア修復
  - 低透水遮水材の開発
  - その性能評価の精緻化
  - 実環境 (温度, 地下水質) での性能評価の精緻化

# 実施工のための地盤環境学

- ・ 汚染拡大の防止
  - ・ 汚染物質移動の**理解の高度化**
  - ・ **実流速**の追求
  - ・ **原子力工学**分野との地下水移動の**相互理解**
  - ・ 数値解析のみならず、**実測の現状理解**
- ・ 廃棄物対策，汚染エリア修復
  - ・ **既存の地盤改良技術**の適用と課題
  - ・ 実遮水材の性能を踏まえた**施設設計**
  - ・ **実環境（温度，地下水質）**を考慮した施設設計

## 廃炉地盤工学の貢献できる「廃止措置」の事象の例



# 放射線対策と環境学・材料学

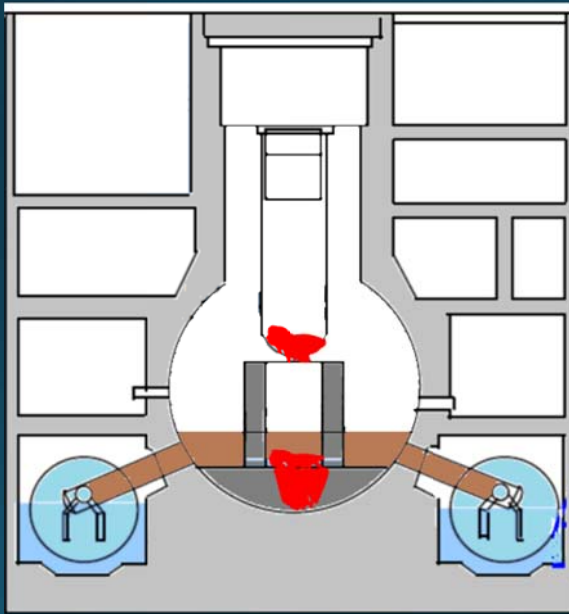
- **放射線発生源**：燃料デブリ，使用済み核燃料，（ガラス固化体），爆発飛散した放射性ホコリ・ガラ
- **拡散原因**：風，地下水流，格納容器からの漏水，漏気（空気に乗った飛散）
- **遮蔽対象**：デブリ自体，デブリ解体時の粉塵，放射性ガラ，除染土壌・廃棄物
- **防止策**：止水（地下水を入れない），封じ込め（外へ出さない），被覆（風に当てない），
- **必要な特性**：放射線遮蔽性，耐久性，施工性

# 放射線対策と環境学・材料学

- **放射線発生源**：燃料デブリ，使用済み核燃料，（ガラス固化体），爆発飛散した放射性ホコリ・ガラ
- **拡散原因**：風，地下水流，格納容器からの漏水，漏気（空気に乗った飛散）
- **遮蔽対象**：デブリ自体，デブリ解体時の粉塵，放射性ガラ，除染土壌・廃棄物
- **防止策**：止水（地下水を入れない），封じ込め（外へ出さない），被覆（風に当てない），
- **必要な特性**：放射線遮蔽性，耐久性，施工性

**要求機能・要求性能と真の特性  
代替特性を結びつけるのが  
環境学・材料学の役目！**

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用 特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



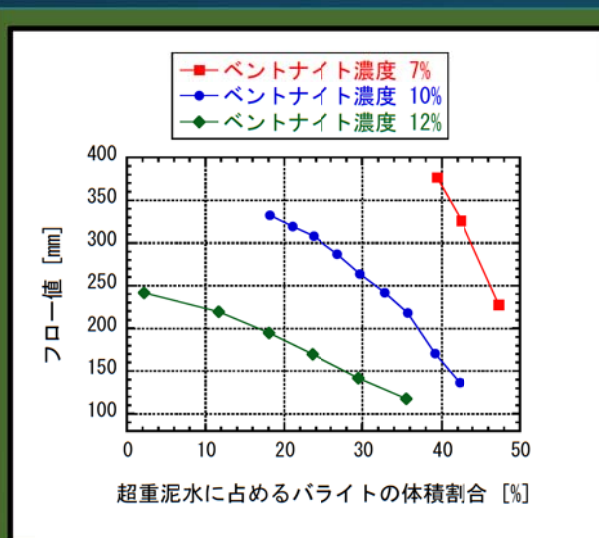
放射性物質に対する要求機能

- ① 漏水等による**拡散防止**
- ② 高放射線環境の**改善**
- ③ デブリ取出し時の**拡散防止**
- ④ デブリ取出し作業の**効率化**
- ⑤ 長期保存時の**デブリの安定性強化**？

要求性能

- ① 格納容器の**漏水を抑止**
- ② デブリからの**放射線遮蔽**
- ③ デブリ切削粉の**飛散抑止**
- ④ 切削粉等の**取り出し媒体**

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用 特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



超泥水の固体分量と流動性の関係

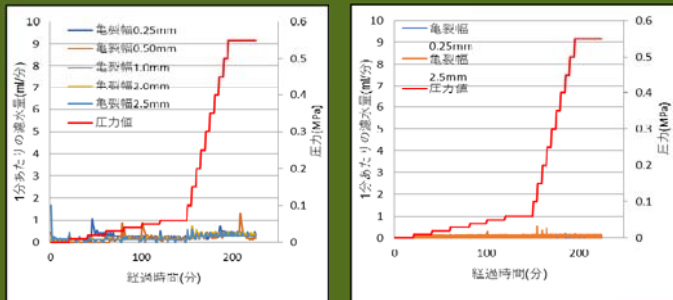
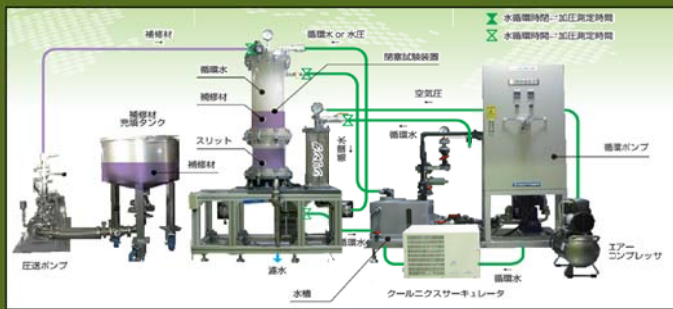
要求性能

- ① 格納容器の**漏水を抑止**
- ② デブリからの**放射線遮蔽**
- ③ デブリ切削粉の**飛散抑止**
- ④ 切削粉等の**取り出し媒体**



- 真の特性：遮水性, 空隙充填性
- 代用特性：流動性  
泥膜生成能力、  
泥膜の透水性や強度

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



超泥水の遮水性確認実験

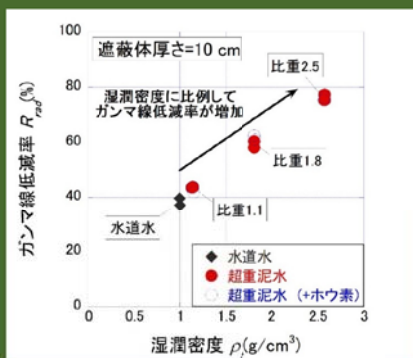
## 要求性能

- 格納容器の漏水を抑止
- デブリからの放射線遮蔽
- デブリ切削粉の飛散抑止
- 切削粉等の取り出し媒体

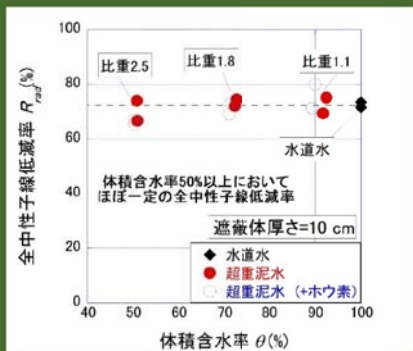


- 真の特性：遮水性
- 代用特性：流動性
- 空隙充填性
- 泥膜生成能力、泥膜の透水性や強度

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



超泥水の湿潤密度とガンマ線遮蔽性能



超泥水の体積含水率と中性子線遮蔽性能

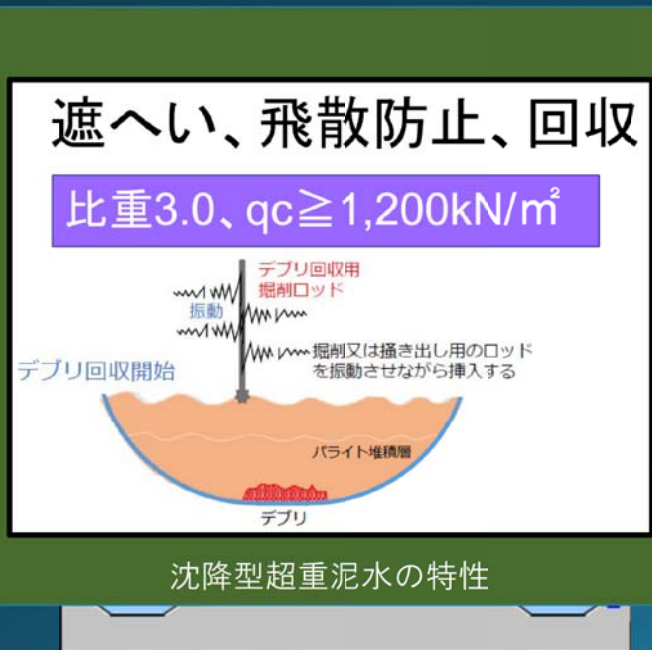
## 要求性能

- 格納容器の漏水を抑止
- デブリからの放射線遮蔽
- デブリ切削粉の飛散抑止
- 切削粉等の取り出し媒体



- 真の特性：放射線遮蔽特性
- 代用特性：密度、含水率（体積）

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



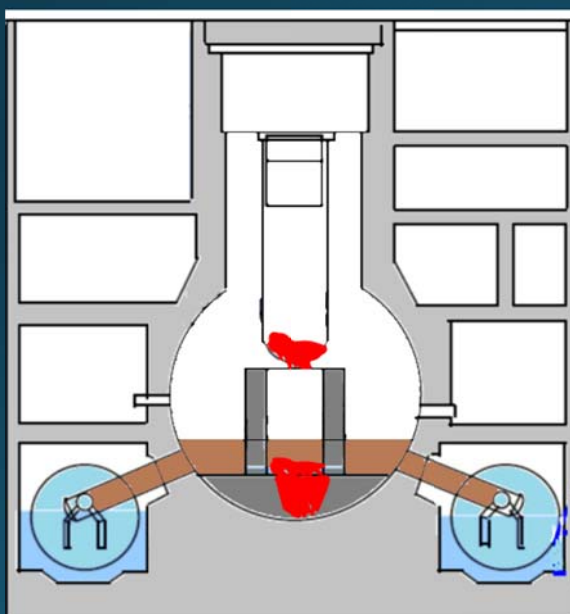
## 要求性能

- ① 格納容器の漏水を抑止
- ② デブリからの放射線遮蔽
- ③ デブリ切削粉の飛散抑止
- ④ 切削粉等の取り出し媒体



- 真の特性：粉塵抑止特性
- 代用特性：気相/液相（気泡）粘性？、比重

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み 冠水工法の水の代わりに超重泥水を用いる



## 要求性能

- ① 格納容器の漏水を抑止
- ② デブリからの放射線遮蔽
- ③ デブリ切削粉の飛散抑止
- ④ 切削粉等の取り出し媒体



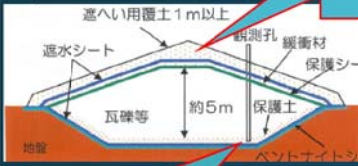
- 真の特性：切削粉等の保持能力
- 代用特性：粘性、比重、流速粉塵の分離性



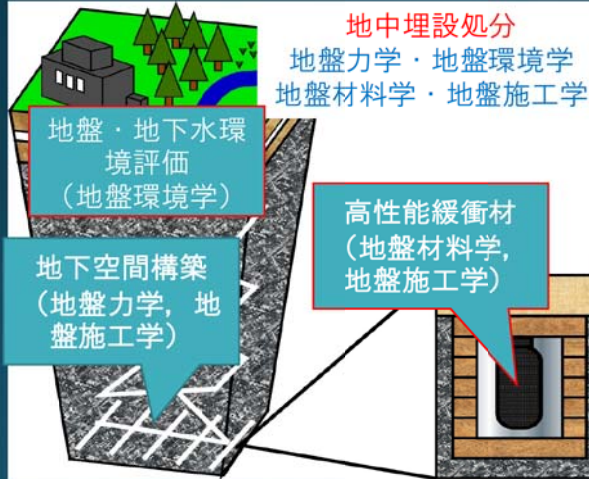
# ③施設解体・廃棄物処分 放射性廃棄物処分 における 地盤工学的技術

廃棄物一時保管  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性覆土  
(地盤材料学  
地盤施工学)



高性能止水材  
(地盤材料学)



地中埋設処分  
地盤力学・地盤環境学  
地盤材料学・地盤施工学

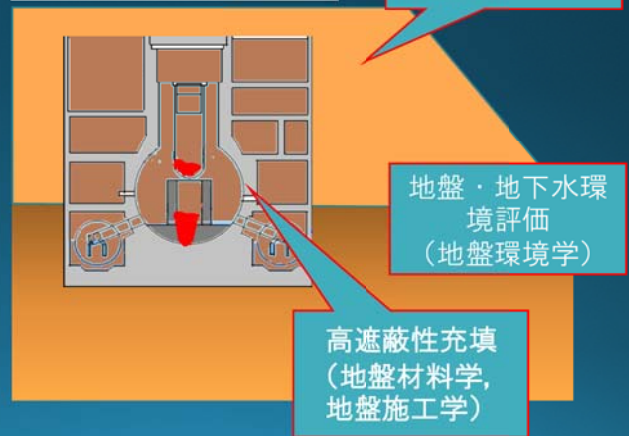
地盤・地下水環  
境評価  
(地盤環境学)

地下空間構築  
(地盤力学, 地  
盤施工学)

高性能緩衝材  
(地盤材料学,  
地盤施工学)

一時的原位置封じ込め  
地盤環境学  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性盛土  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



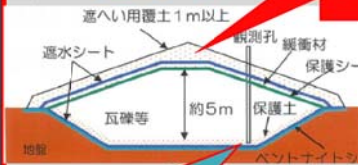
地盤・地下水環  
境評価  
(地盤環境学)

高遮蔽性充填  
(地盤材料学,  
地盤施工学)

廃棄物一時保管  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性覆土  
(地盤材料学  
地盤施工学)

# ③施設解体・廃棄物処分 放射性廃棄物処分 における 地盤工学的技術



高性能止水材  
(地盤材料学)

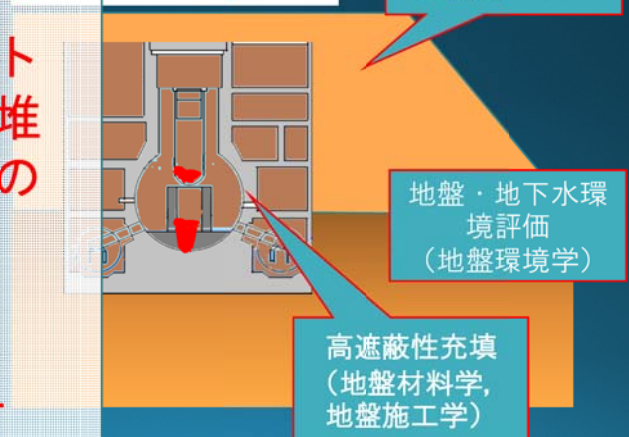
## 高性能な覆土材料の特性研究

● 土質系材料, ベントナイト  
混合土, 復興資材(津波堆  
積物)の覆土材料としての  
適応性の検討

- 放射線遮蔽性の検討
- 遮水特性の検討
- 締め固め施工性の検討

一時的原位置封じ込め  
地盤環境学  
地盤材料学  
地盤施工学

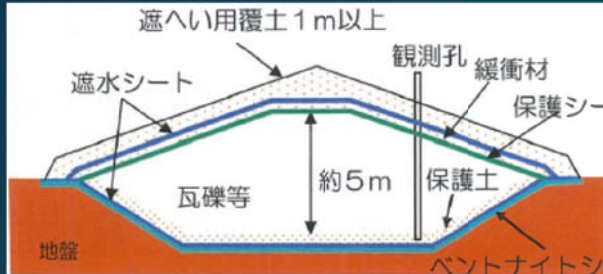
高遮蔽性盛土  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



地盤・地下水環  
境評価  
(地盤環境学)

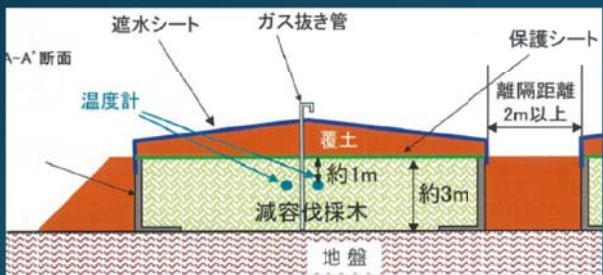
高遮蔽性充填  
(地盤材料学,  
地盤施工学)

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み ベントナイト混合土を覆土に用いる



放射性廃棄物に対する要求機能

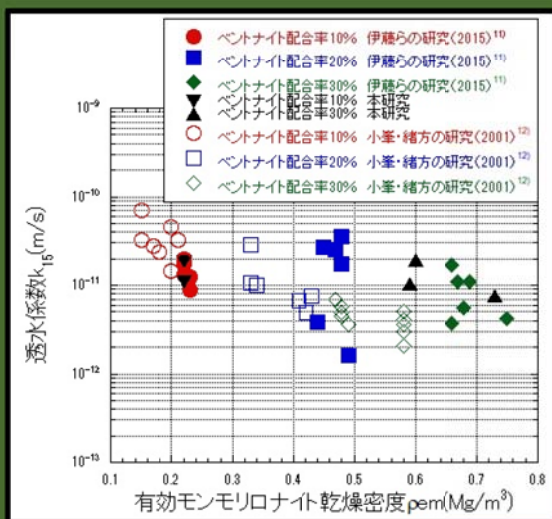
- ① 地下水等による**拡散防止**
- ② 風などによる**飛散防止**
- ③ 遮蔽による外部**放射線環境保全**



要求性能

- ① 雨水や**地下水**の**浸入抑止**
- ② 廃棄物からの**放射線遮蔽**
- ③ 天候による覆土厚**劣化抑止**
- ④ 凍結融解による**劣化抑止**

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み ベントナイト混合土を覆土に用いる



ベントナイト混合土の遮水性

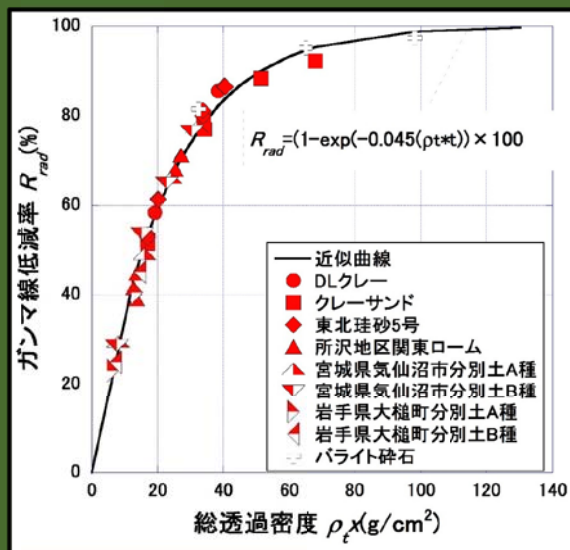
要求性能

- ① 雨水や**地下水**の**浸入抑止**
- ② 廃棄物からの**放射線遮蔽**
- ③ 天候による**経年の劣化抑止**
- ④ 凍結融解による**劣化抑止**



- 真の特性：遮水性（透水性）
- 代用特性：密度、厚さ、  
ベントナイト量

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用 特性への廃炉の特殊性の組み込み ベントナイト混合土を覆土に用いる



土質系材料のガンマ線遮蔽性能

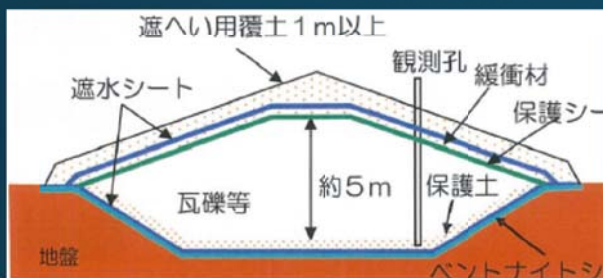
## 要求性能

- ① 雨水や地下水の浸入抑止
- ② 廃棄物からの放射線遮蔽
- ③ 天候による経年の劣化抑止
- ④ 凍結融解による劣化抑止



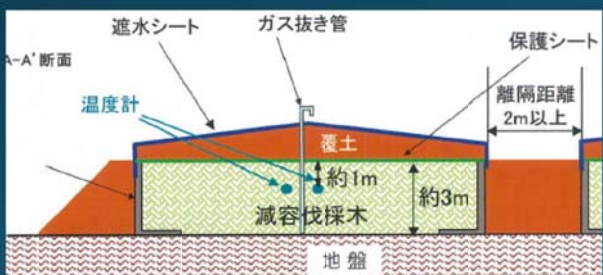
- 真の特性：放射線遮蔽性
- 代用特性：密度、厚さ、含水状態、土の種類

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用 特性への廃炉の特殊性の組み込み ベントナイト混合土を覆土に用いる



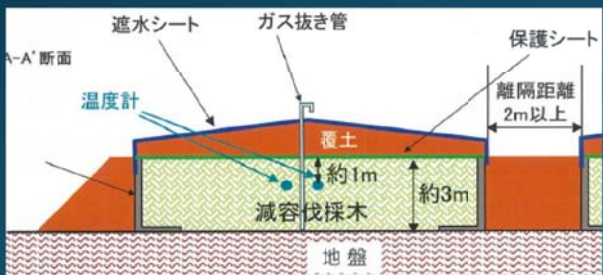
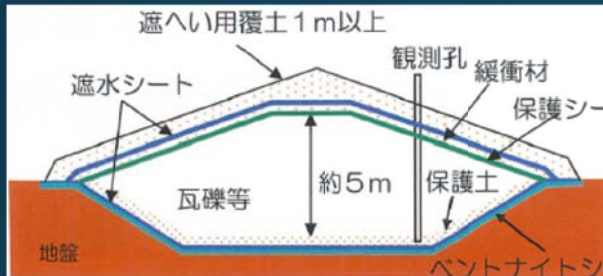
## 要求性能

- ① 雨水や地下水の浸入抑止
- ② 廃棄物からの放射線遮蔽
- ③ 天候による経年の劣化抑止
- ④ 凍結融解による劣化抑止



- 真の特性：耐浸食性
- 代用特性：密度、厚さ、鉱物組成、スレーキング特性

# 要求機能・要求性能・真の特性・代用特性への廃炉の特殊性の組み込み ベントナイト混合土を覆土に用いる



## 要求性能

- ① 雨水や地下水の浸入抑止
- ② 廃棄物からの放射線遮蔽
- ③ 天候による経年の劣化抑止
- ④ 凍結融解による劣化抑止

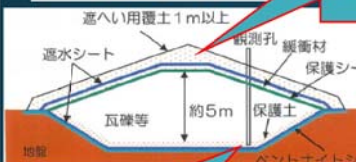


- 真の特性：耐凍上害能力
- 代用特性：凍結膨張性（細粒分組成、拘束状態）  
水密性（耐ひび割れ）？  
固結性（材料的強度等）

廃棄物一時保管  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性覆土  
(地盤材料学  
地盤施工学)

## ③施設解体・廃棄物処分 放射性廃棄物処分 における 地盤工学的技術



高性能止水材  
(地盤材料学)

地中埋設処分  
地盤力学・地盤環境学  
地盤材料学・地盤施工学

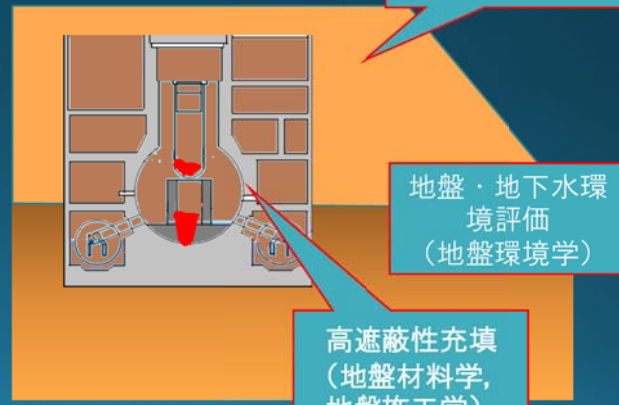
地盤・地下水環境評価  
(地盤環境学)

地下空間構築  
(地盤力学, 地盤施工学)

高性能緩衝材  
(地盤材料学,  
地盤施工学)

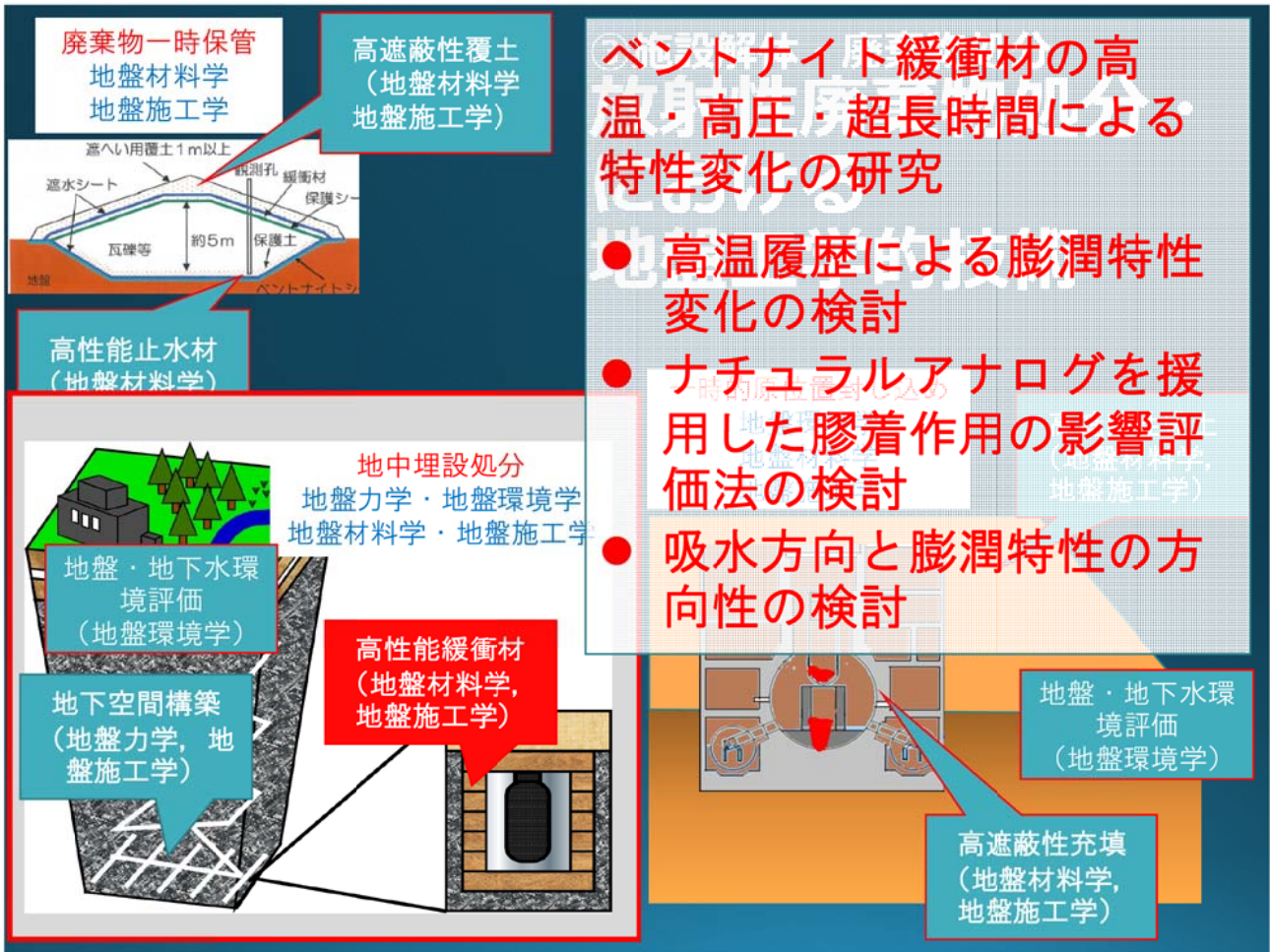
一時的原位置封じ込め  
地盤環境学  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性盛土  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



地盤・地下水環境評価  
(地盤環境学)

高遮蔽性充填  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



## 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の緩衝材に用いる

地層処分のイメージ

高レベル放射性廃棄物

緩衝材としての要求機能

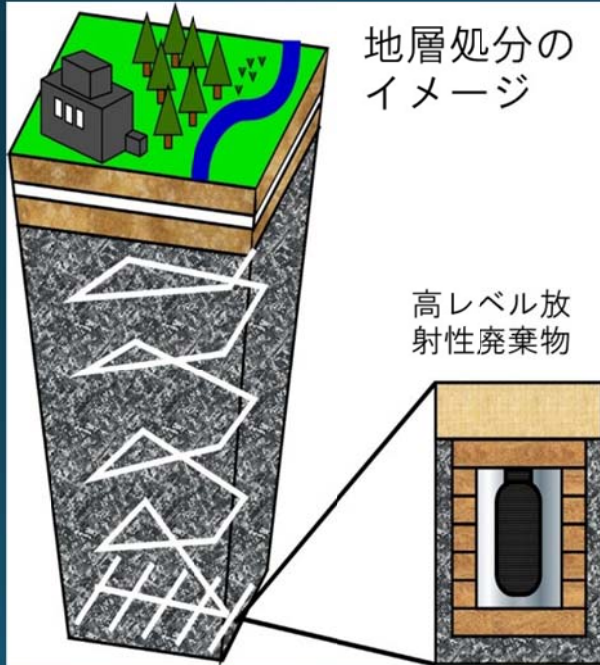
- ① 廃棄体の安定的保持
- ② 廃棄体に対する地下水の流出入の抑止
- ③ 吸着による核種流出の抑止
- ④ 作業時の放射線環境の改善

↑

要求機能に対する阻害要因

- a. 崩壊熱による高温環境
- b. 大深度による高圧環境
- c. 海水浸入の可能性
- d. 長期間（数万年）の継続（化学的変質の可能性）

# 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の 緩衝材に用いる



緩衝材としての要求機能

- ① 廃棄体の安定的保持
- ② 廃棄体に対する地下水の流
- ③ 浸透の抑制
- ④ 作業時の放射線環境の改善

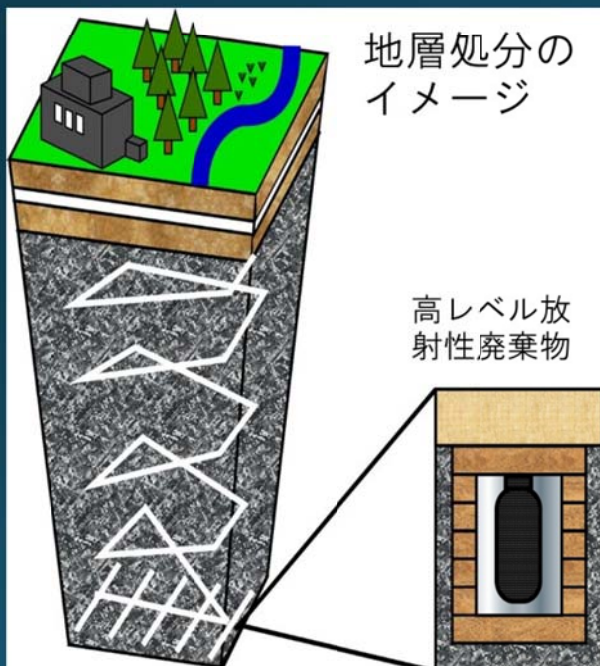
要求性能として  
**膨潤特性に注目**



要求機能に対する阻害要因

- a. 崩壊熱による高温環境
- b. 大深度による高圧環境
- c. 海水浸入の可能性
- d. 長期間（数万年）の継続（化学的変質の可能性）

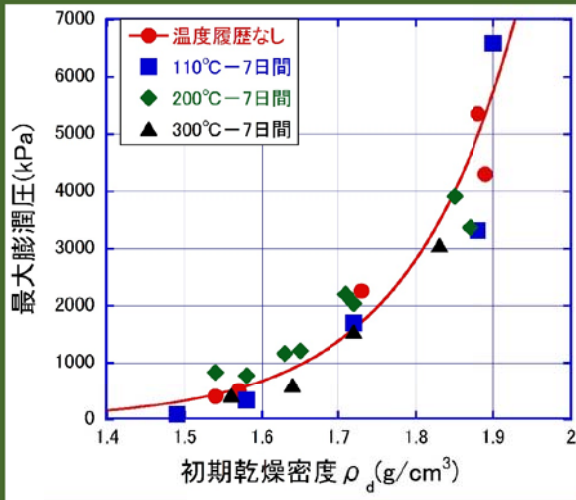
# 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の 緩衝材に用いる



ベントナイト緩衝材の高温・高圧・超長時間による特性変化の研究

- 高温履歴による膨潤特性変化の検討
- ナチュラルアナログを援用した膠着作用の影響評価法の検討
- 吸水方向と膨潤特性の方向性の検討

# 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の 緩衝材に用いる

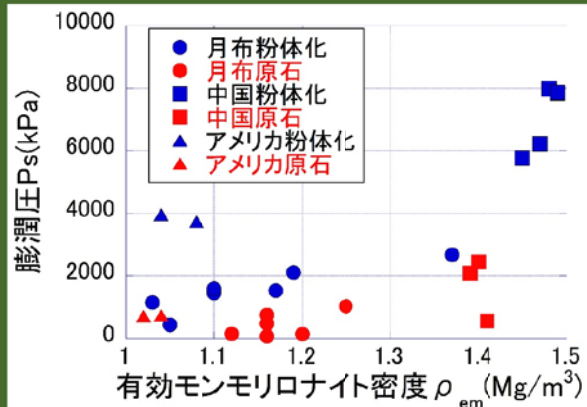
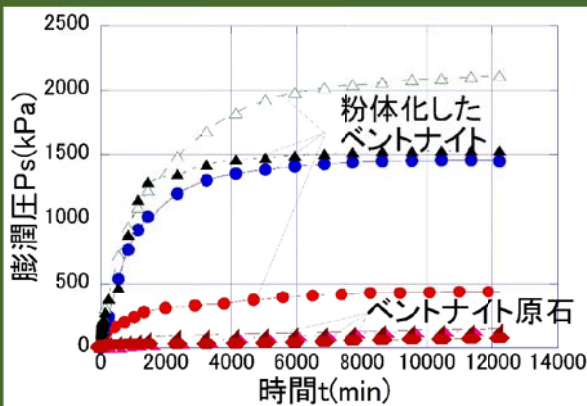


高温履歴による膨潤圧の変化



ベントナイト緩衝材の高温・高圧・超長時間による特性変化の研究

- 高温履歴による膨潤特性変化の検討
- ② 欠損に対する修復性
- ③ ナチュラルアナログを援用した膠着作用の影響評価法の検討
- 吸水方向と膨潤特性の方向性の検討



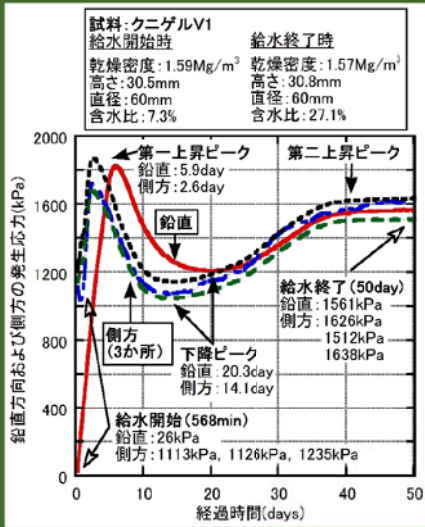
粉体化ベントナイトと原石の膨潤圧

# 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の

ベントナイト緩衝材の高温・高圧・超長時間による特性変化の研究

- 高温履歴による膨潤特性変化の検討
- ② 欠損に対する修復性
- ③ ナチュラルアナログを援用した膠着作用の影響評価法の検討
- 吸水方向と膨潤特性の方向性の検討

# 要求機能・要求性能・真の特性 ベントナイトを高レベル廃棄物（体）の 緩衝材に用いる



吸水方向と発生膨潤圧の関係



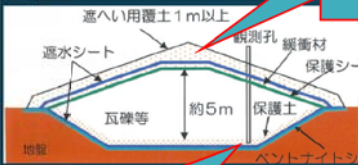
## ベントナイト緩衝材の高温・高圧・超長時間による特性変化の研究

- 高遮蔽性覆土に対する膨潤特性変化の検討
- 劣化に対する修復倍率を援用した膠着作用の影響評価法の検討
- 吸水方向と膨潤特性の方向性の検討

廃棄物一時保管  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性覆土  
(地盤材料学  
地盤施工学)

## ③施設解体・廃棄物処分 放射性廃棄物処分 における 地盤工学的技術



高性能止水材  
(地盤材料学)



地中埋設処分  
地盤力学・地盤環境学  
地盤材料学・地盤施工学

地盤・地下水環境評価  
(地盤環境学)

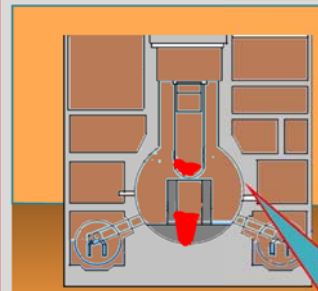
地下空間構築  
(地盤力学, 地盤施工学)

高性能緩衝材  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



一時的原位置封じ込め  
地盤環境学  
地盤材料学  
地盤施工学

高遮蔽性盛土  
(地盤材料学,  
地盤施工学)

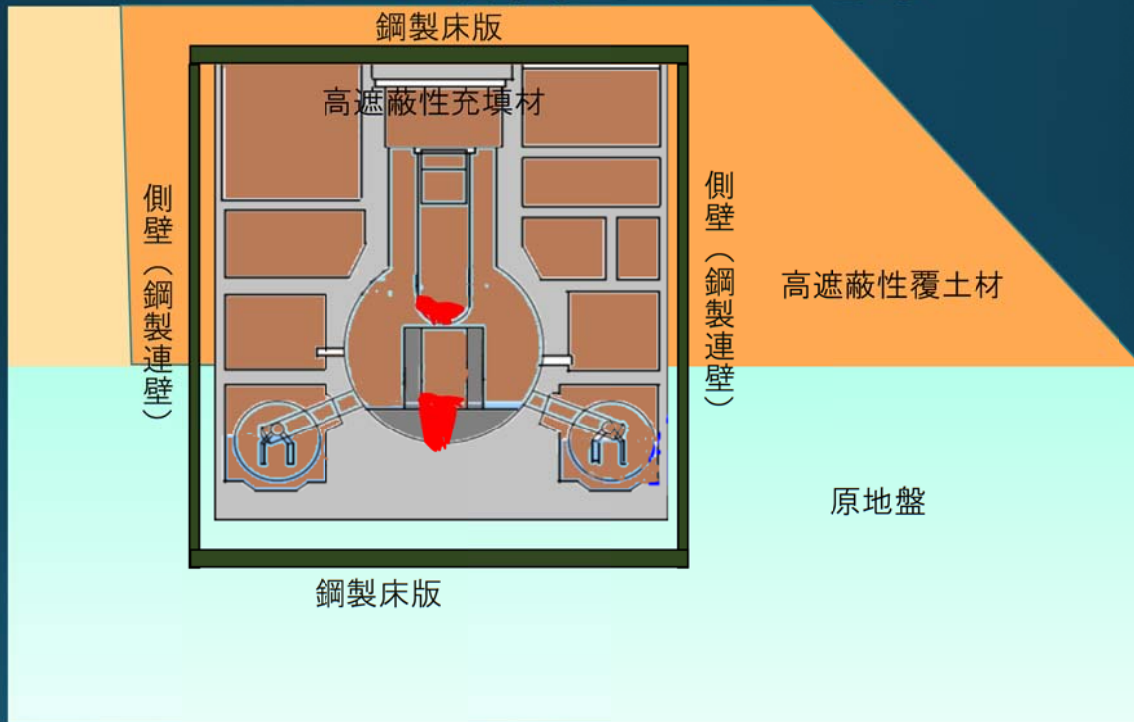


地盤・地下水環境評価  
(地盤環境学)

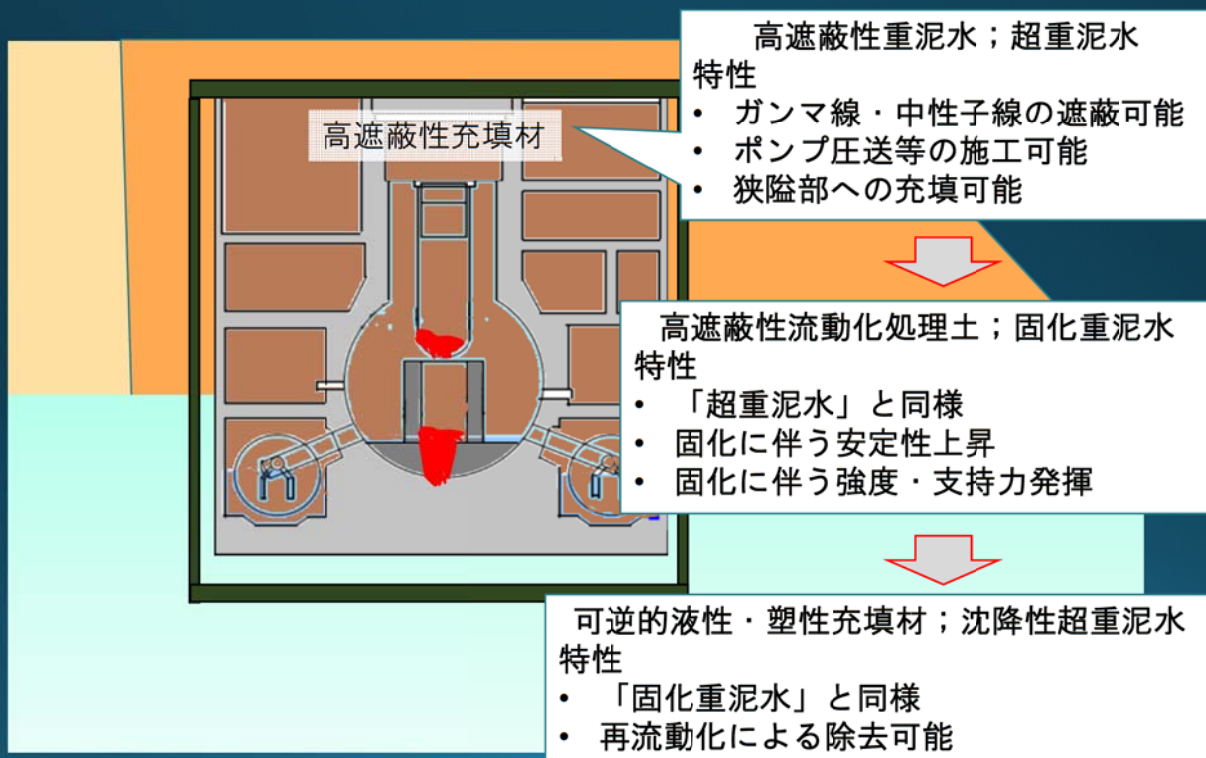
高遮蔽性充填  
(地盤材料学,  
地盤施工学)



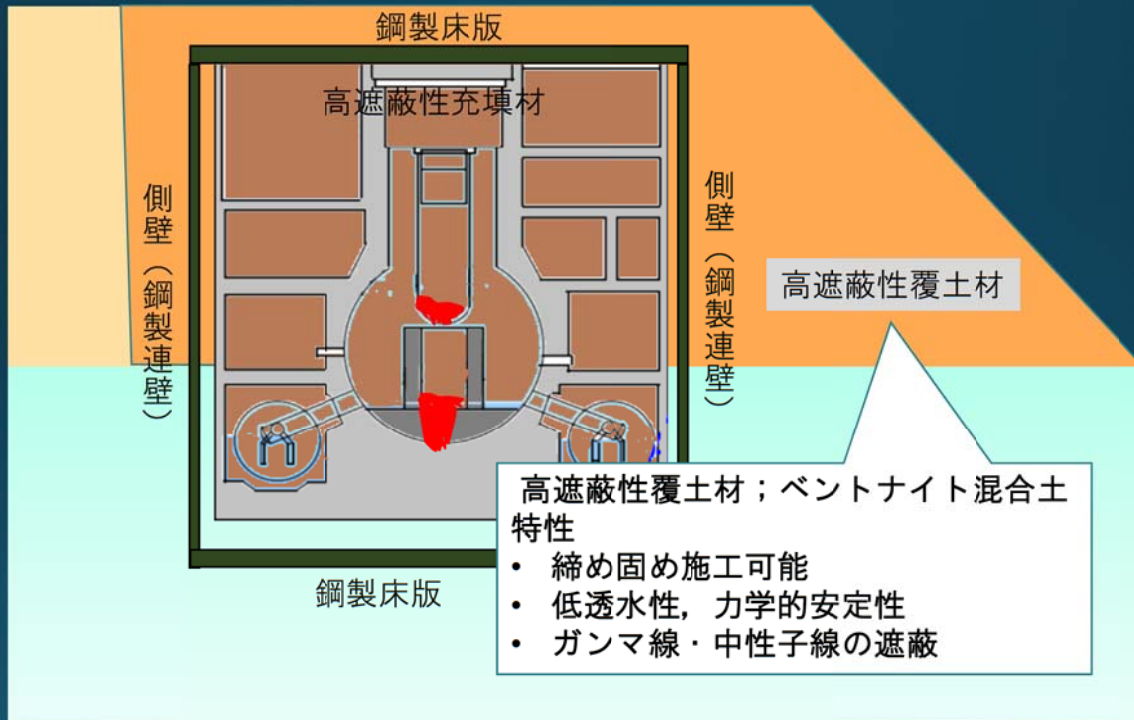
# 研究成果の他への活用 高濃度汚染物の排出が困難な時は 一時的原位置封じ込め



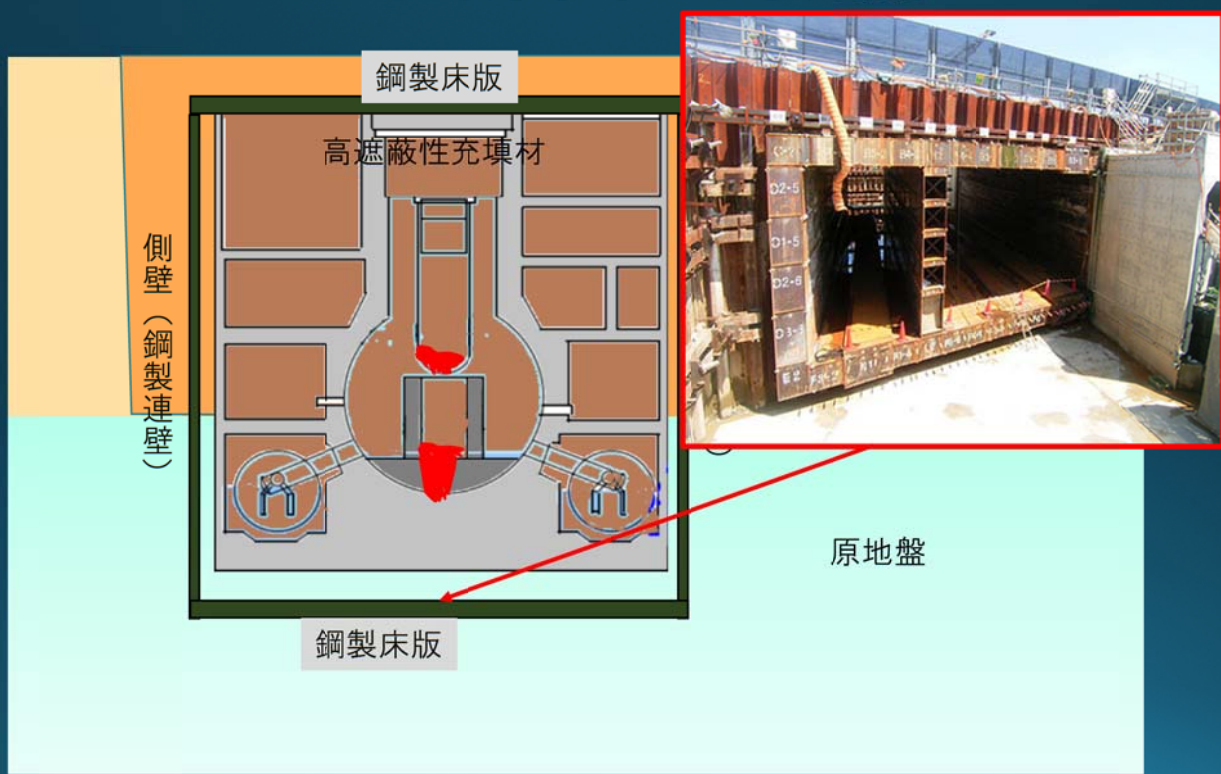
# 研究成果の他への活用 一時的原位置封じ込め



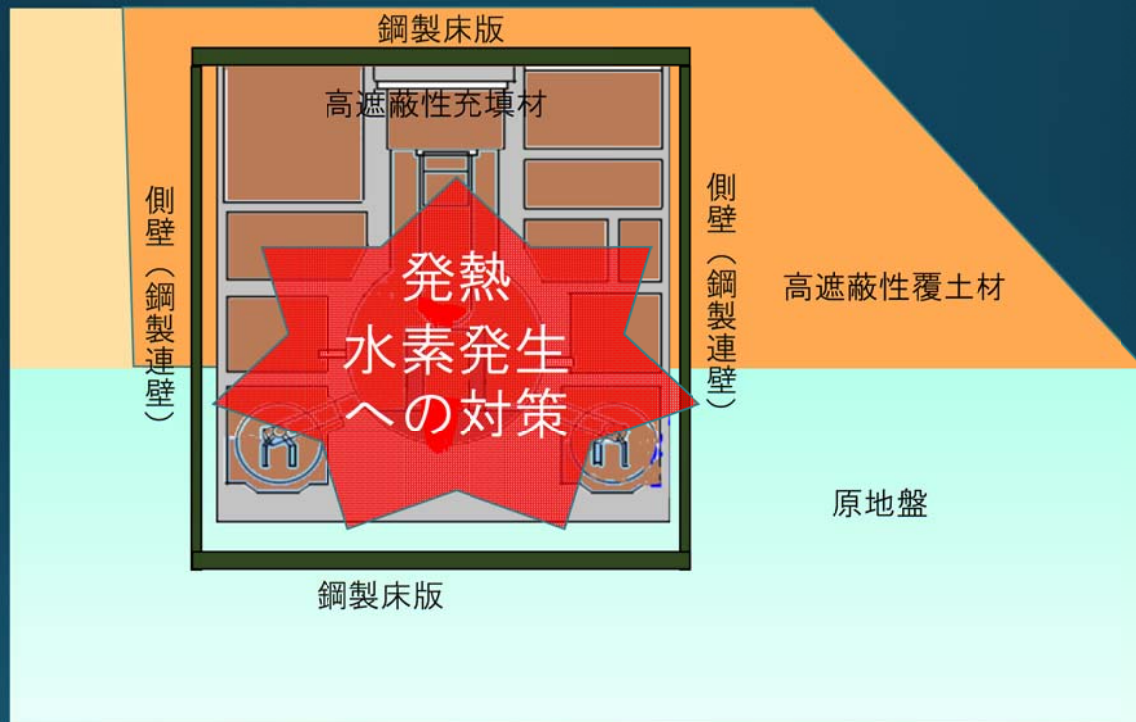
# 研究成果の他への活用 一時的原位置封じ込め



# 研究成果の他への活用 一時的原位置封じ込め



# 一時的原位置封じ込め 解決しなければならない課題



ご清聴ありがとうございました。