

# 日本原子力研究開発機構(JAEA)における 高レベル放射性廃棄物の 地層処分技術に関する研究開発等について

平成28年 7月26日



国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価
2. 研究開発の枠組み
3. 研究開発の内容
  - ① 地質環境の長期安定性に関する研究
  - ② 深地層の研究施設計画
  - ③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等
4. 成果の発信と施設の公開

# 本日のご説明内容

---

## 1. 研究開発の目標・計画策定と評価

## 2. 研究開発の枠組み

## 3. 研究開発の内容

- ① 地質環境の長期安定性に関する研究
- ② 深地層の研究施設計画
- ③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等

## 4. 成果の発信と施設の公開

# 研究開発の目標・計画策定と評価

## 国による目標設定と評価

- 国による中期目標(中長期目標)の設定
- 中期目標(中長期目標)に基づく中期計画(中長期計画)の策定と国による認可
- 「独立行政法人評価委員会」(～H26年度)、「国立研究開発法人審議会」(H27年度～)及び主務大臣による評価

## 地層処分基盤研究開発調整会議における全体計画の策定と評価

- 研究開発全体の効果的かつ効率的な推進を図ることを目的に、関連研究機関が参画
- NUMOのニーズを取り込み、地層処分基盤研究開発に関する全体計画を策定
- 外部有識者委員会による評価の実施

## JAEAにおける外部評価

- 「国の研究開発評価に関する大綱的指針」に基づき「**地層処分研究開発・評価委員会**」を設置
  - ・ 定期的に、理事長からの諮問に基づき研究開発の課題評価を実施
  - ・ 平常的に、研究開発の計画や進捗状況等について討議、意見陳述

# 地層処分研究開発・評価委員会の外部評価

## 定期的な課題評価

### ○ 第1回中間評価（平成21年度実施）

研究開発は着実に進展しており、今後も機構が総合的な技術力を維持・強化しながら、中核となって基盤的な研究開発を着実に進めていくことが重要である。

### ○ 第2回中間評価（平成26年度実施）

研究開発は、国の基盤研究開発として、その科学的・技術的・社会的意義は極めて大きく、設定された目標を満足する成果が得られていることは評価に値する。この成果は国際的にも高い水準にあり、地層処分技術の信頼性の向上、人材養成やオールジャパンとしての技術力の向上に貢献している。



課題評価報告書\*

## 平常的な討議、アドバイス



評価委員会資料\*\*

\* 課題評価報告書

第1回中間評価: <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Evaluation-2010-001.pdf>

第2回中間評価: <http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Evaluation-2015-014.pdf>

\*\* 評価委員会資料:

[http://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/hyouka\\_iinkai\\_01.html](http://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/hyouka_iinkai_01.html)

# 課題評価における指摘事項への対応

- 地層処分研究開発・評価委員会における課題評価(第2回中間評価)での主要な指摘事項、指摘事項に対する措置内容、および措置内容に対する対応状況は以下のとおり。

【指摘事項】**深地層の研究施設**は、今後も**国の貴重な資産**として認識すべき。

【措置内容】**機構改革**を踏まえて選定した**必須の課題**に取り組みつつ、**国民との相互理解促進の場**としての提供内容の充実にも努める。

【対応状況】計画どおり**必須の課題に着手**、**深地層の研究施設**を積極的に活用した**見学会の開催**や**施設公開**、**研究成果報告会の開催**、**研究協力**や**学術的研究の場**として提供 など

【指摘事項】今後も**中核的な研究機関**として、**現有の技術力の維持・発展**を進めていくこと。

【措置事項】**処分事業の長期性**を考慮し、**技術・知識の効率的な継承**に努めるとともに、**事業の本格化**を見越した**オールジャパンの人材養成・育成計画**の検討を進める。

【対応状況】**各種データベース**や**CoolRep\***の**更新**、**NUMOとの共同研究**の強化・**協力研究員の受入れ**、**IAEA地下研究施設ネットワークのトレーニングコース開催** など

\* CoolRep: ウェブサイト上に展開し、読者の知りたい情報へのアクセスを容易にするレポートシステム

# (参考) 個別研究開発や成果取りまとめの評価

## 個別研究課題に関する外部委員会

### ○JAEA検討委員会

- ・深地層の研究施設計画検討委員会  
(H17年度～、20回開催)
- ・地層処分研究開発検討委員会  
(H17年度～、6回開催)
- ・地質環境の長期安定性研究検討委員会  
(H17年度～、14回開催)

### ○資源エネルギー庁受託事業の委員会

- ・処分システム評価確証技術開発委員会  
(H25年度～、年3回程度開催)
- ・直接処分等代替処分技術開発委員会  
(H25年度～、年3回程度開催)
- ・地質環境長期安定性評価確証技術開発委員会  
(H25年度～、年2回程度開催)

## 成果取りまとめに関するワークショップ

- 深地層の研究施設計画に係る第2期中期計画  
期間中の成果と今後の計画に関する国際レビュー  
ワークショップ(H26.6)
- 使用済燃料の直接処分第1次取りまとめ  
国際レビューワークショップ(H26.12)



深地層の研究施設計画に係る  
国際レビューワークショップ

# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価

2. 研究開発の枠組み

3. 研究開発の内容

① 地質環境の長期安定性に関する研究

② 深地層の研究施設計画

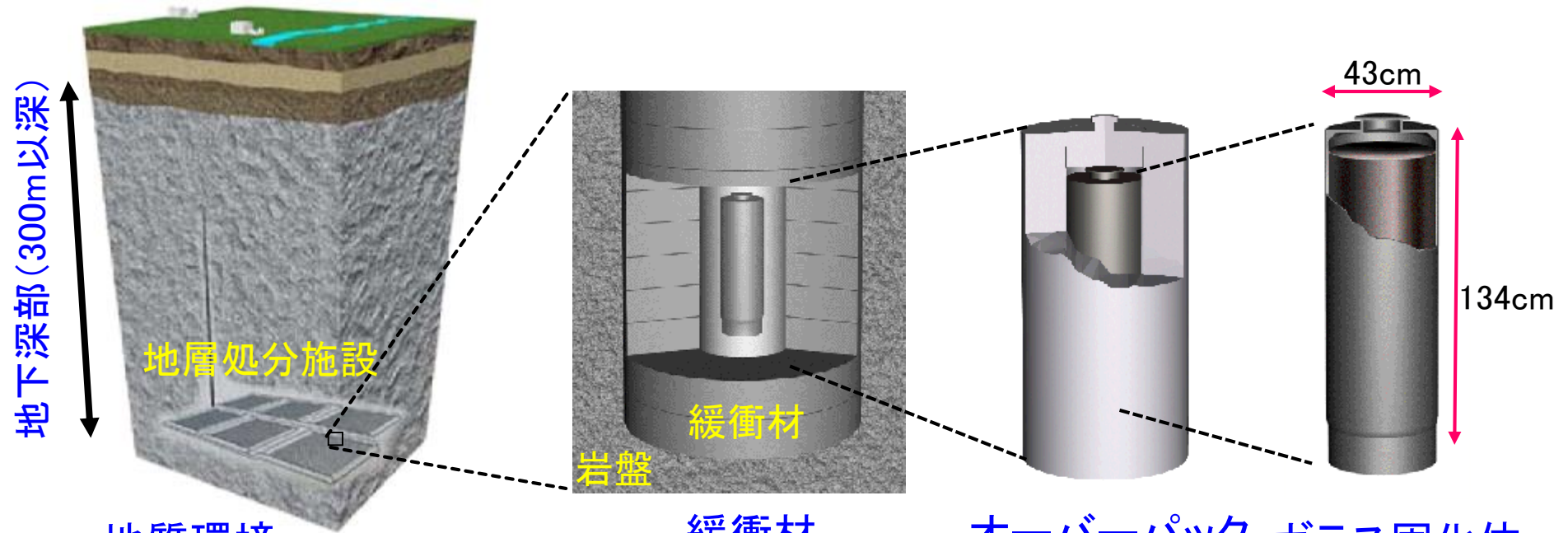
③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等

4. 成果の発信と施設の公開



# 地層処分概念

天然の地層と人工物との組み合わせによる**多重バリアシステム**



## 地質環境

- ・酸素がほとんどなく、金属が腐食しにくい
- ・地下水の動きがとても遅い
- ・放射性物質をくっつけて移動を抑える
- ・人間の生活圏から離れており、人間活動や自然現象の影響を受けにくい

## 天然バリア

## 緩衝材 (主成分は粘土)

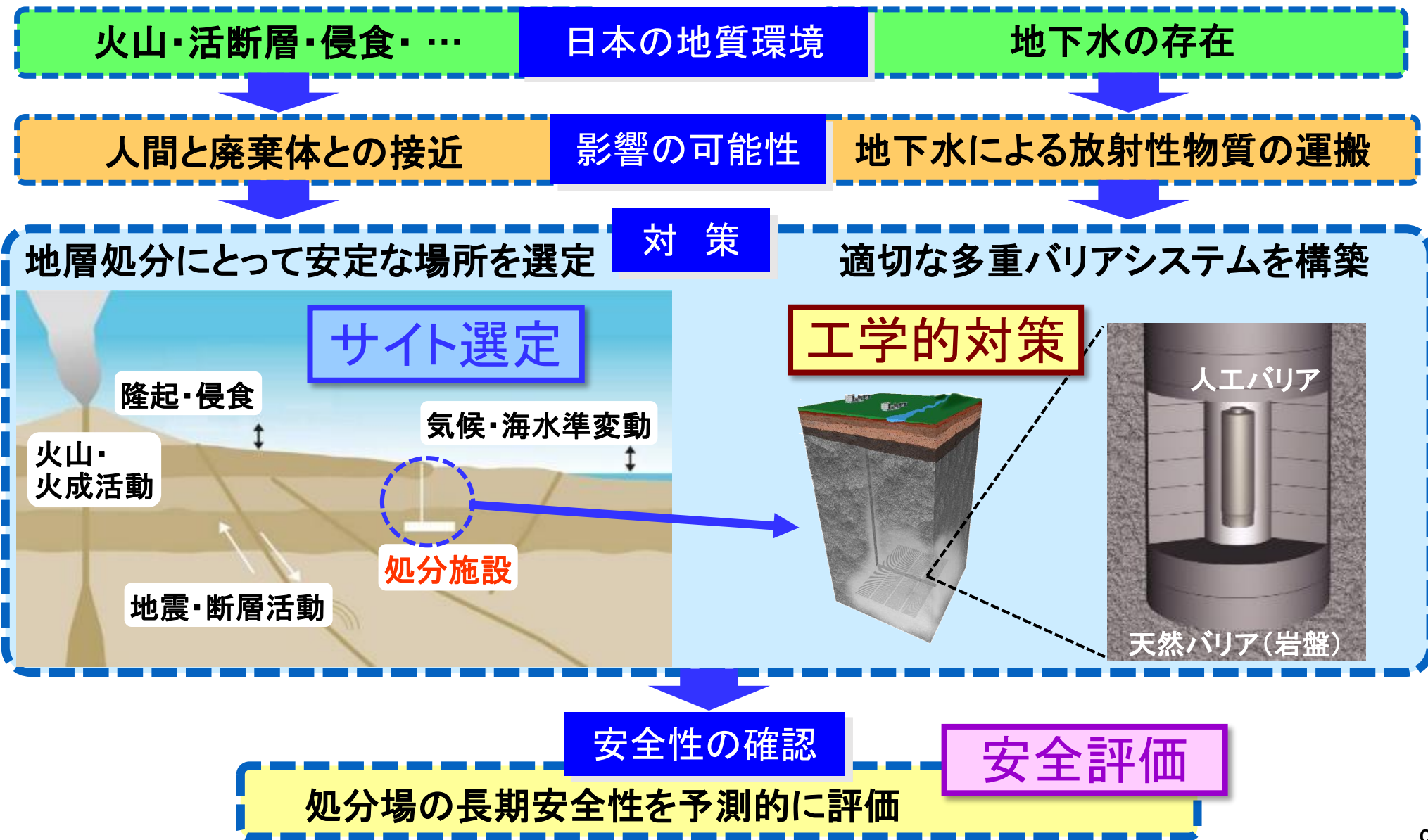
- ・地下水の浸み込みを抑える
- ・ガラス固化体から溶け出た放射性物質を吸着して移動を抑える

## オーバーパック ガラス固化体 (金属製)

- ・ガラス固化体が地下水と接触しないよう保護
- ・水にほとんど溶けず、放射性物質を閉じ込める

## 人工バリア

# 地層処分 of 安全確保の仕組み





# 「第2次取りまとめ」の概要

## 第2次取りまとめの結論

核燃料サイクル開発機構(1999)「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―」

### 地層処분을事業段階に進めるための信頼性のある技術的基盤が整備された。

- 地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発された。
- 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発された。
- 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発され、それを用いて安全性が確認された。
- 地上の研究施設(エントリー、クオリティ)の活用に加え、深地層の研究施設計画(瑞浪、幌延)を進めることにより、事業スケジュールと整合をとりつつ研究開発を展開することが可能な状況となっている。

## 国による評価

原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会(2000)  
「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」

- 第2次取りまとめには、我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が示されているとともに、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。
- 第2次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所になると評価する。

# 第2次取りまとめ以降の研究開発の位置づけ

## 原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画

(平成12年11月24日 原子力委員会)

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術のうち、最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発は、実施主体が担当するものとし、国及び関係機関は、最終処分の安全規制、安全評価のために必要な研究開発や深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を積極的に進めていくことが必要である。

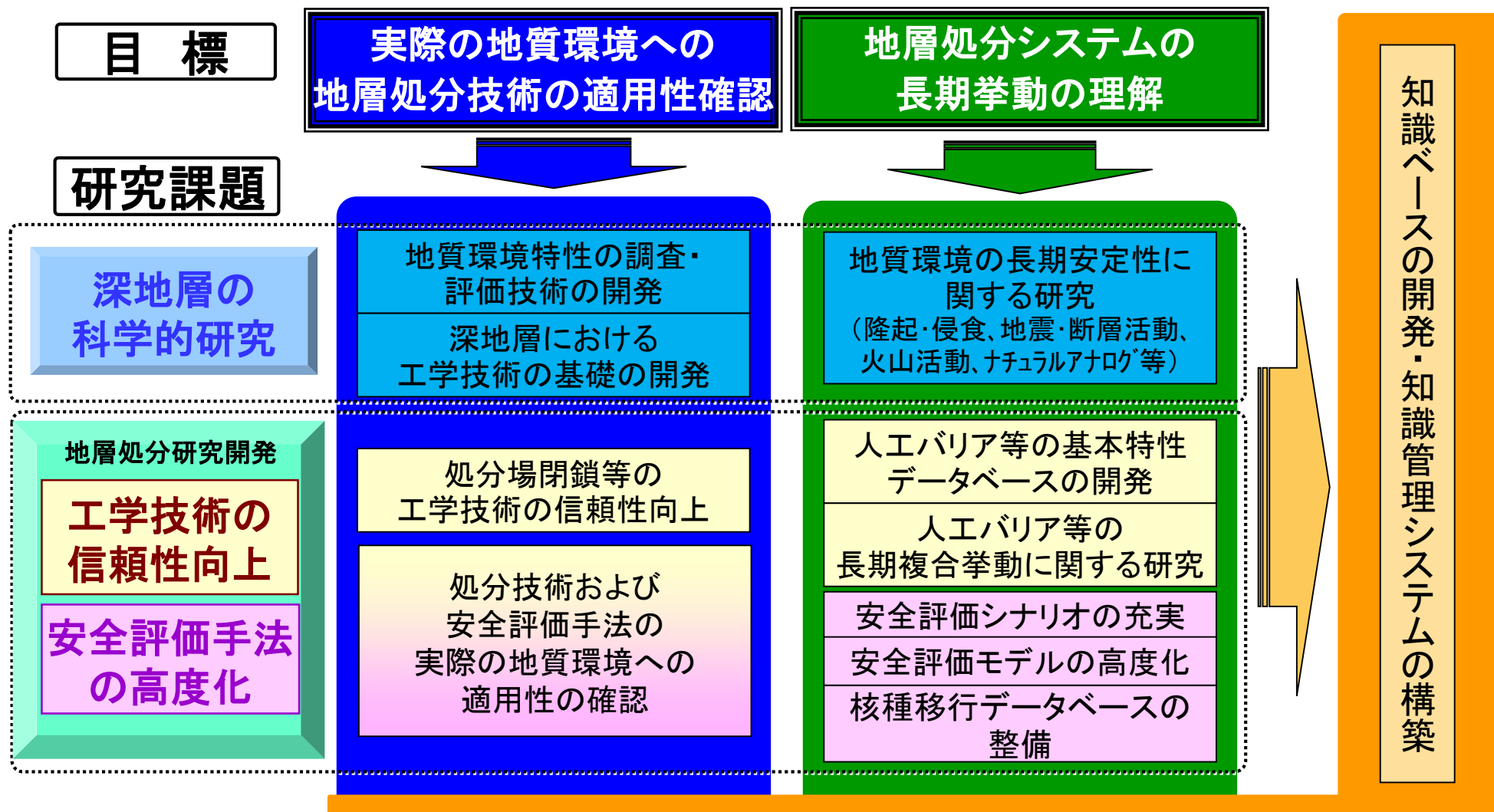
特に、核燃料サイクル開発機構等は、これまでの研究開発成果を踏まえ、今後とも深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設等を活用し、地層処分技術の信頼性の確認や安全評価手法の確立に向けて研究開発を着実に推進することが必要である。

また、深地層の研究施設は、学術的研究の場であるとともに、国民の地層処分に  
関する研究開発の理解を深める場としての意義を有し、その計画は、処分施設の計画  
と明確に区分して進めることが必要である。

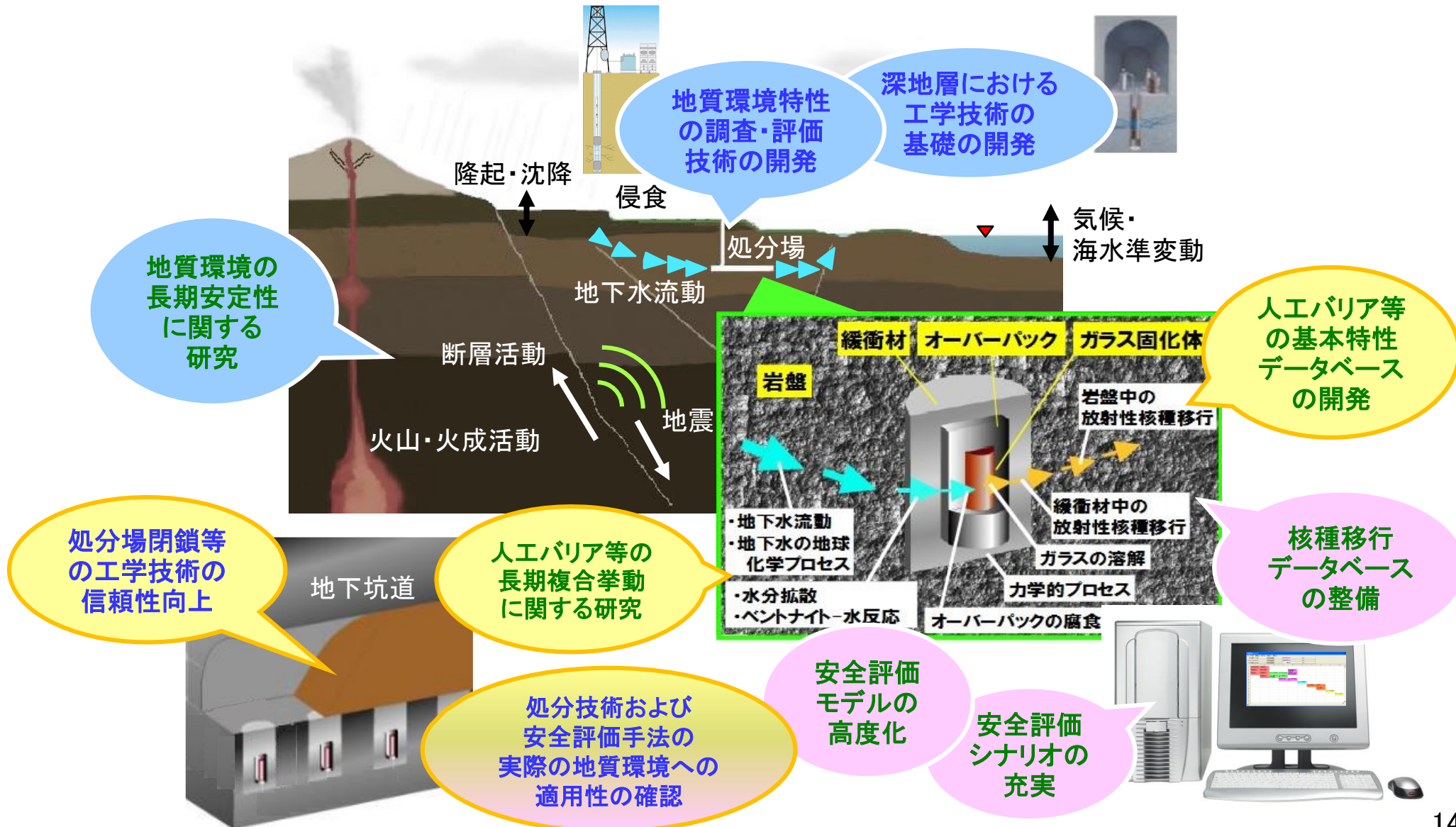


# JAEAにおける研究開発の目標と研究課題

- 地層処分の技術と信頼を支える基盤的な研究開発を推進
- 各研究課題は「地層処分基盤研究開発に関する全体計画」に基づく。



# (参考) 各研究開発項目のイメージ



# 地層処分技術に関する研究開発の拠点

(イメージ図)



瑞浪超深地層研究所  
(岐阜県瑞浪市)



土岐地球年代学研究所  
(岐阜県土岐市)

(イメージ図)



幌延深地層研究所  
(北海道幌延町)

## 東濃地科学センター

- 超深地層研究所計画  
(結晶質岩)

深地層の科学的研究

## 幌延深地層研究センター

- 幌延深地層研究計画(堆積岩)

深地層の科学的研究

工学技術の信頼性向上

安全評価手法の高度化

## 核燃料サイクル工学研究所(東海)



地層処分基盤研究施設 (茨城県東海村) [エントリー]

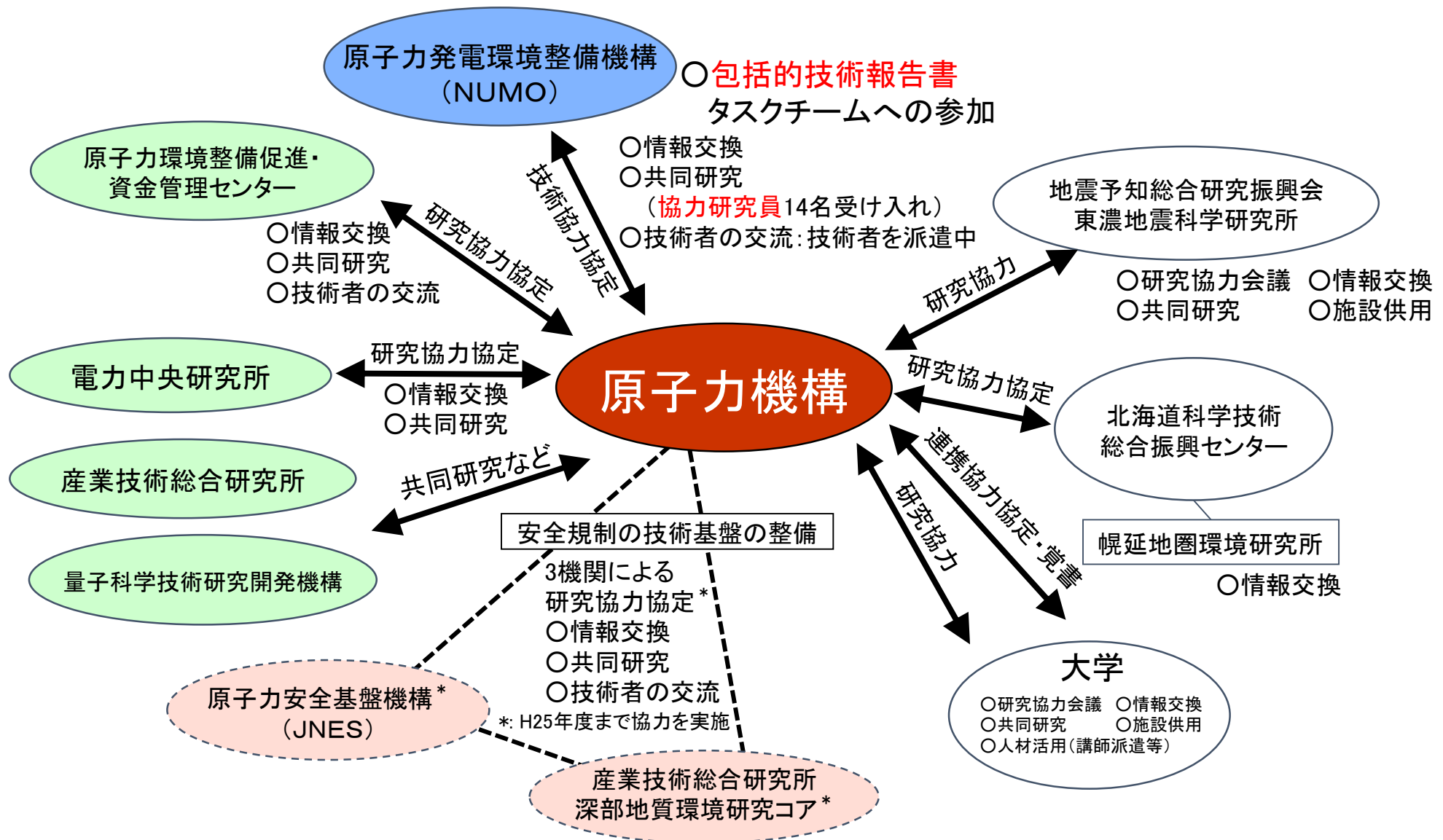


工学技術の信頼性向上

安全評価手法の高度化



# 地層処分技術に関する関係機関との協力



# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価

2. 研究開発の枠組み

3. 研究開発の内容

① 地質環境の長期安定性に関する研究

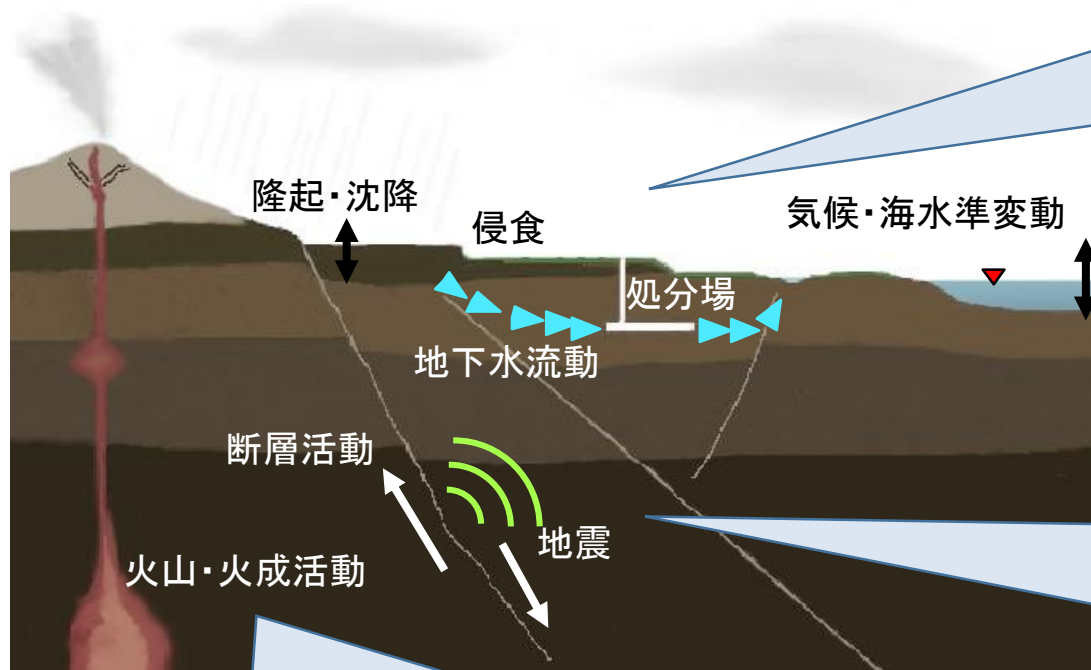
② 深地層の研究施設計画

③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等

4. 成果の発信と施設の公開

# 地質環境の長期安定性に関する研究

## 地層処分において考慮すべき自然現象



### 【隆起・侵食】

### 【気候・海水準変動】

- ・処分施設及び廃棄体の地表への接近
- ・地下水の流動特性や水質の変化による放射性物質の移行等

### 【地震・断層活動】

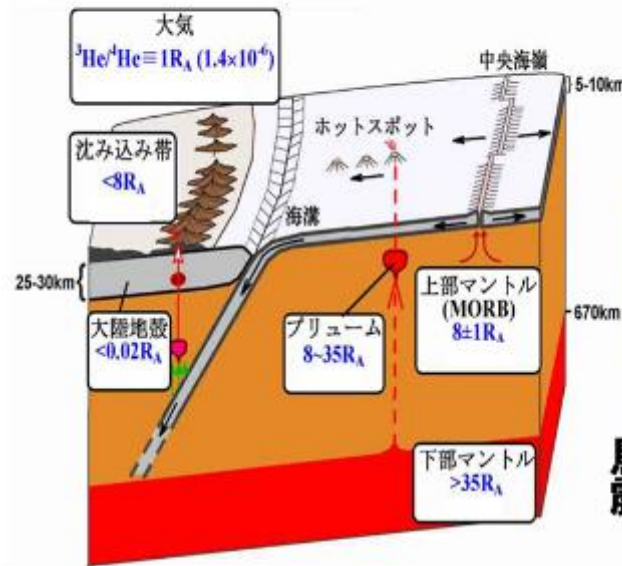
- ・岩盤の破断・破碎による処分施設及び廃棄体の破損
- ・岩盤の破断・破碎による地下水移行経路の形成, 岩盤歪に起因する地下水圧の変化等

### 【火山・火成活動】

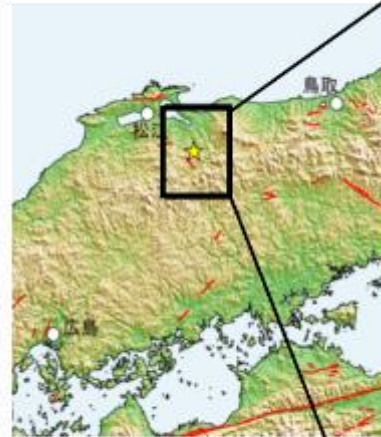
- ・マグマの貫入・噴出による廃棄体の破壊
- ・地温上昇・熱水対流の発生, 熱水・火山ガスの混入による地下水の水質変化等

# 地震・断層活動に関する調査技術開発

変動地形が明瞭でない活断層の調査技術  
(地下水中のヘリウム同位体比の測定)



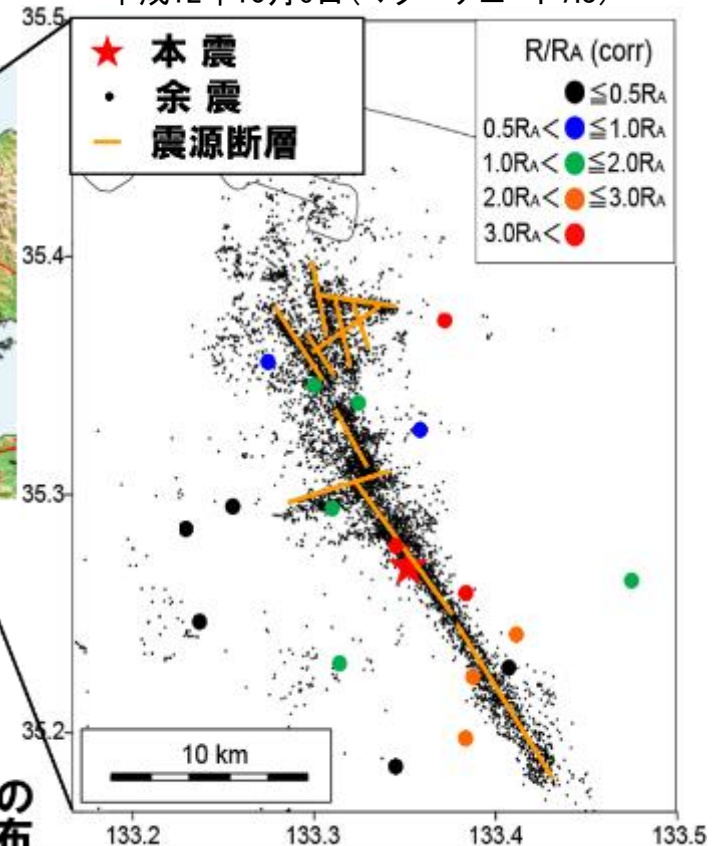
地球のHe同位体比( $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比)  
(角野ほか, 2005)



鳥取県西部地震  
震源と活断層分布

鳥取県西部地震余震域の  
He同位体比の分布

2000年鳥取県西部地震  
平成12年10月6日(マグニチュード7.3)

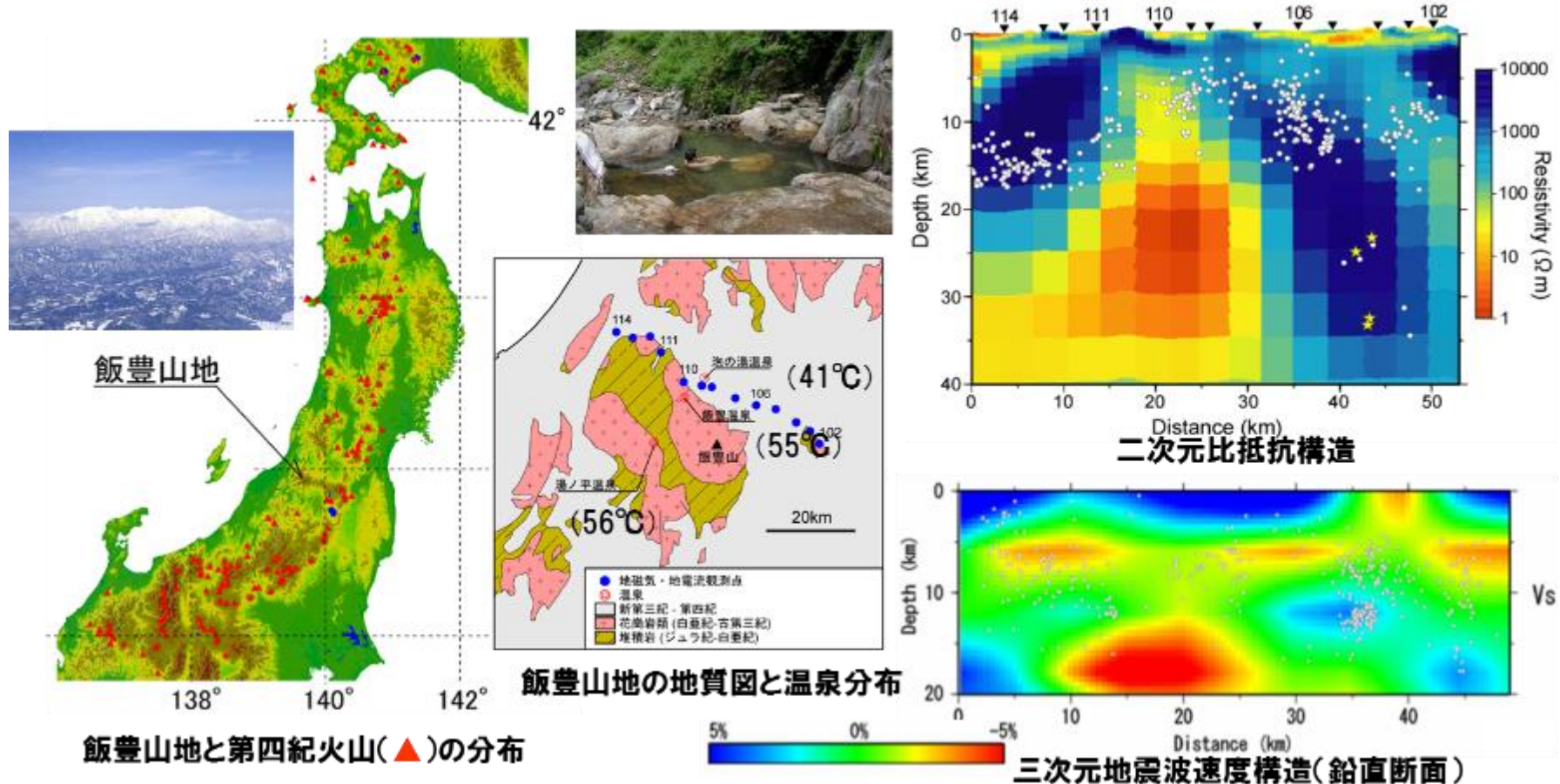


- 活断層に関する調査技術を開発・整備
  - 概要調査等の段階において、地上で確認されていない活断層を評価する際に有効



# 火山・火成活動に関する調査技術開発

電磁波や地震波を用いた物理探査によるマグマ・高温流体の推定



- 深部流体の分布に関する調査技術を開発・整備
  - 概要調査等の段階において、地上で確認されていない火成活動や熱水等の拡がりを評価する際に有効

# 年代測定技術の開発（1）

地質現象（火山、断層、隆起・侵食など）や地下水の年代を測定する技術を開発・整備

「炭素14, ベリリウム10, アルミニウム26」  
年代測定システム



断層活動, 噴火年代等の推定に利用  
(施設供用制度によって依頼測定も実施中)

「ウラニウム-ヘリウム」年代測定システム



低温の熱水活動や侵食速度の推定に利用  
(国内で唯一測定が可能)

「光ルミネッセンス」年代測定システム

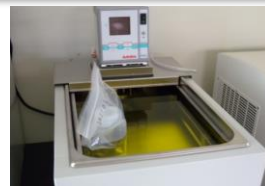


土砂の堆積年代等の推定に利用  
(平成27年度に実用化)

断層充填物質の「カリウム-アルゴン」年代測定(高速増殖原型炉「もんじゅ」の敷地内破碎帯の追加調査での実施例)



もんじゅ敷地内破碎帯



凍結・融解粉碎



→ 高速遠心分離



→ TEM解析



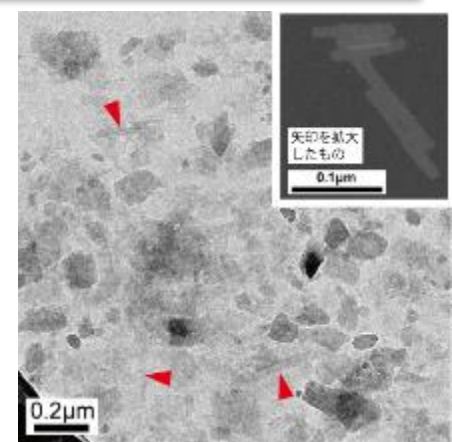
粒度分析



→ <sup>40</sup>Ar 定量



→ K 定量



今回測定した断層に含まれるイライト(鉱物)  
年代値は約5000万年前と推定

JAEAで開発した断層充填物質のカリウム-アルゴン年代測定の手順

# 年代測定技術の開発（２）

さまざまな目的や状況に対応できるように各種年代測定法を開発整備

分析施設	年代測定法	年代測定範囲(年)								主な反映先	対象物質	実用化へのスケジュール
		10 <sup>9</sup>	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>				
タンデム型加速器 質量分析計 (ペレトロン)	<sup>14</sup> C法									断層活動	地下水, 有機物	実用化済
	<sup>10</sup> Be法									隆起速度	石英	実用化済
	<sup>26</sup> Al法									隆起速度	石英	実用化済
	<sup>36</sup> Cl法									地下水年代	地下水	～H31
希ガス質量分析装置	K-Ar法									断層活動	自生雲母粘土鉱物	実用化済
四重極型質量分析装置	(U-Th)/He法									隆起速度	アパタイト, ジルコン	実用化済
光ルミネッセンス測定装置	OSL法									断層活動	石英, 長石	実用化済
電子スピン共鳴装置	ESR法									後背地解析	石英, 炭酸塩鉱物	～H29
高精度希ガス 質量分析装置	希ガス法									地下水年代	地下水	～H29
レーザーアブレーション 誘導結合プラズマ 質量分析装置	U-Pb法									断層活動	炭酸塩鉱物	～H29
	<sup>230</sup> Th- <sup>234</sup> U法									断層活動	炭酸塩鉱物	～H29
	FT法									隆起速度	ジルコン, アパタイト	～H29

技術開発の対象年代範囲

# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価

2. 研究開発の枠組み

3. 研究開発の内容

① 地質環境の長期安定性に関する研究

② 深地層の研究施設計画

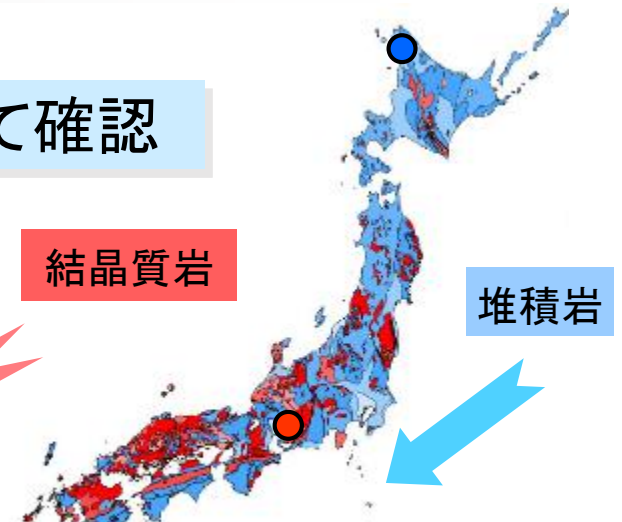
③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等

4. 成果の発信と施設の公開



# 深地層の研究施設計画

- ① 地層処分技術を実際の地質環境に適用して確認
- ② わが国固有の地質環境の理解
- ③ 深地層を体験・理解する場の整備



結晶質岩

堆積岩

瑞浪超深地層研究所  
(岐阜県瑞浪市)

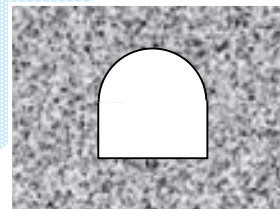
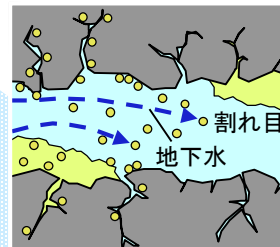
幌延深地層研究所  
(北海道幌延町)



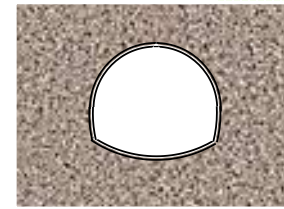
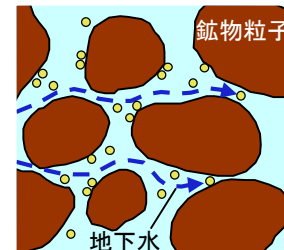
花崗岩  
(結晶質岩)

淡水系

硬 岩



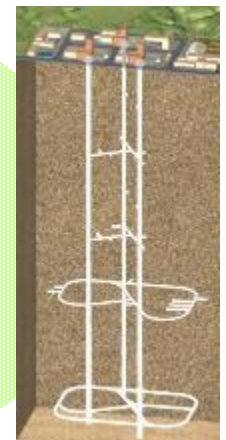
(イメージ図)



泥 岩  
(堆積岩)

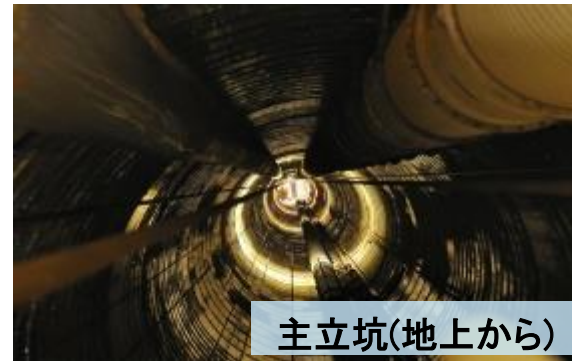
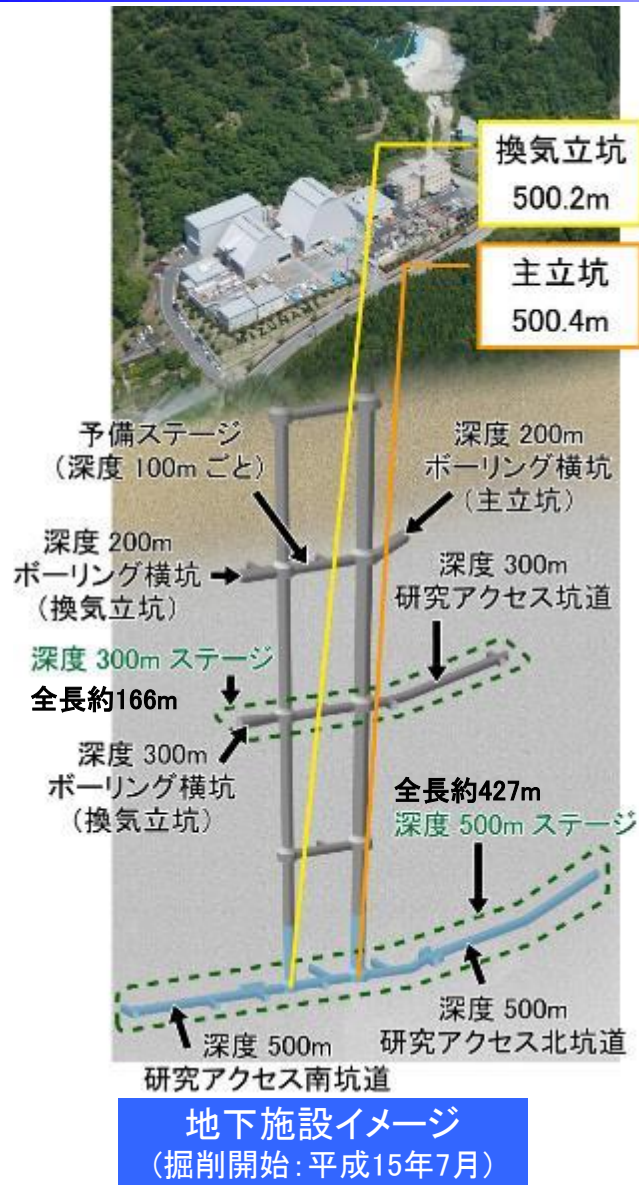
塩水系

軟 岩



(イメージ図)

# 瑞浪超深地層研究所（岐阜県 瑞浪市）



深度500m研究水平坑道 掘削完了(平成26年2月4日)





# 幌延深地層研究所（北海道 幌延町）



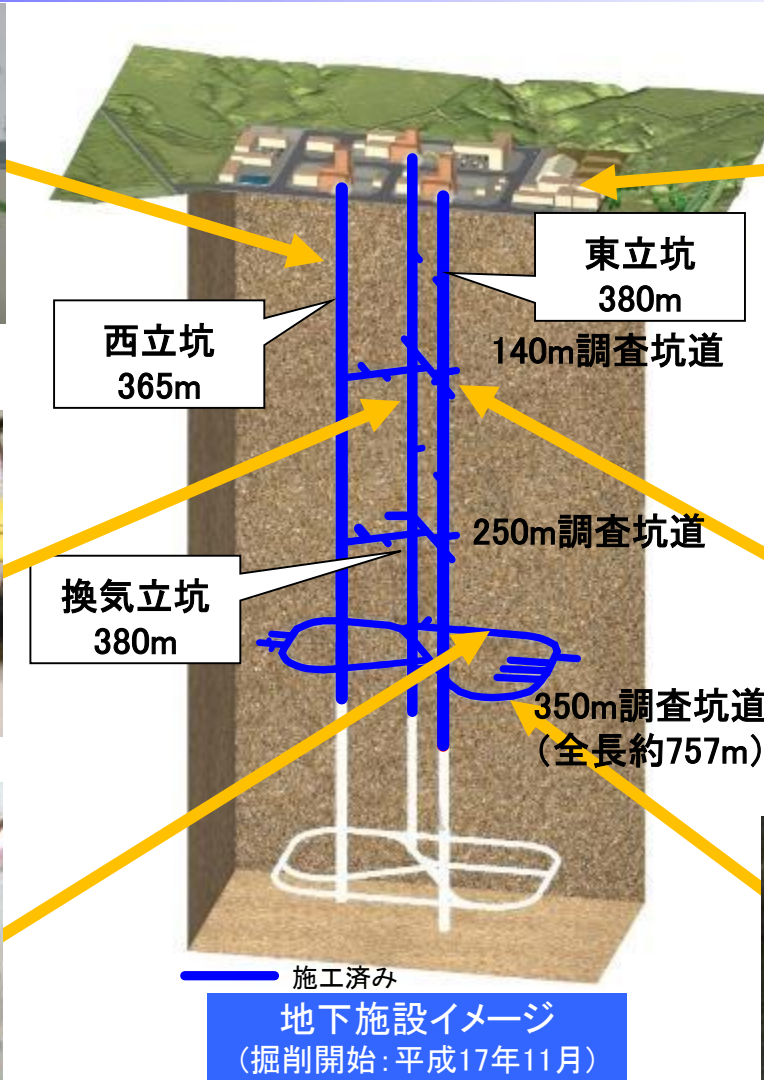
西立坑掘削工事(上部工)  
(平成23年2月25日)



換気立坑



350m調査坑道貫通  
(平成25年10月9日)



このイメージ図は、今後の調査研究の結果次第で変わることがあります。

深度350m調査坑道の水平坑道整備完了  
(平成26年6月)



ゆめ地創館

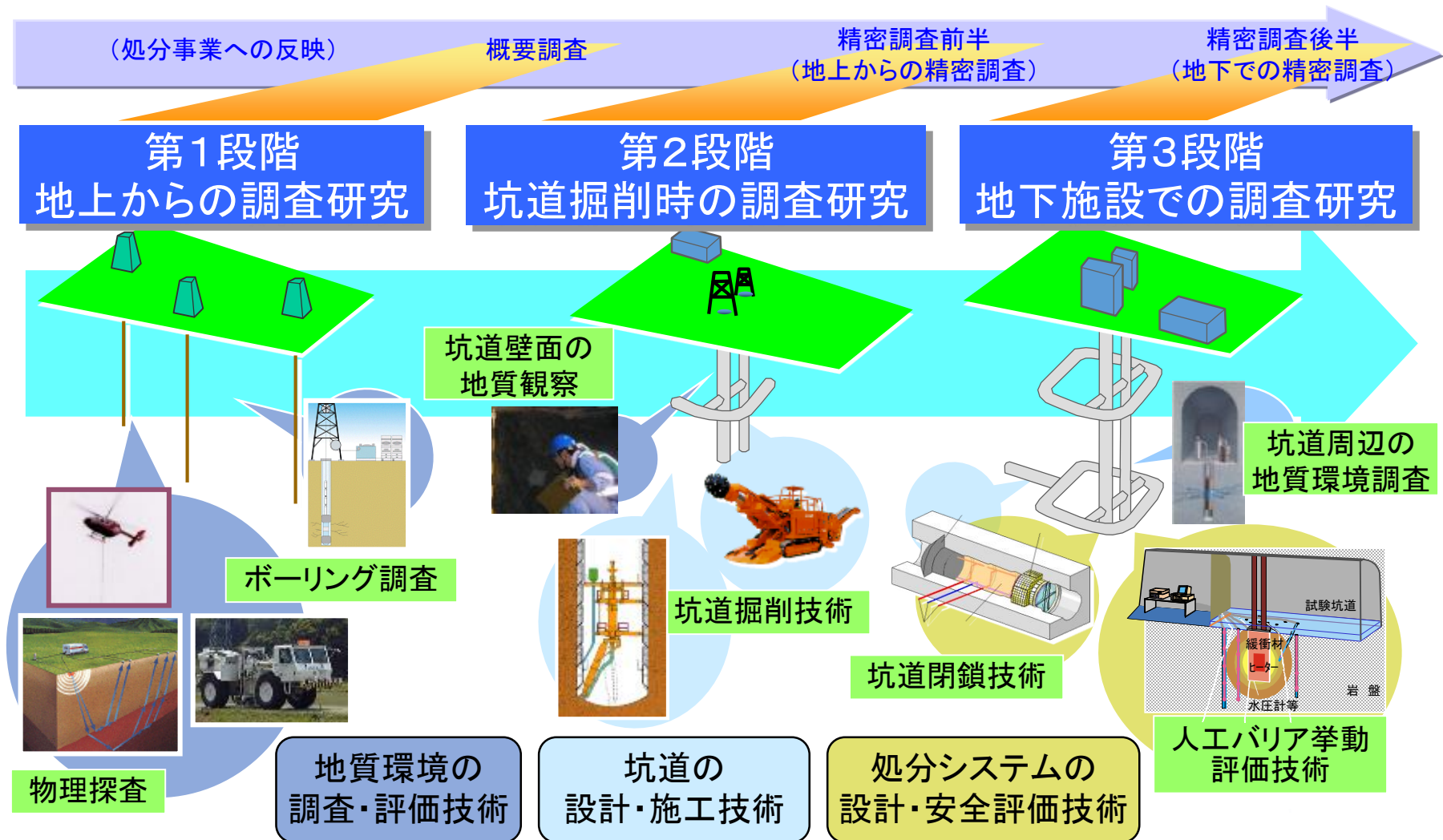


ボーリング調査



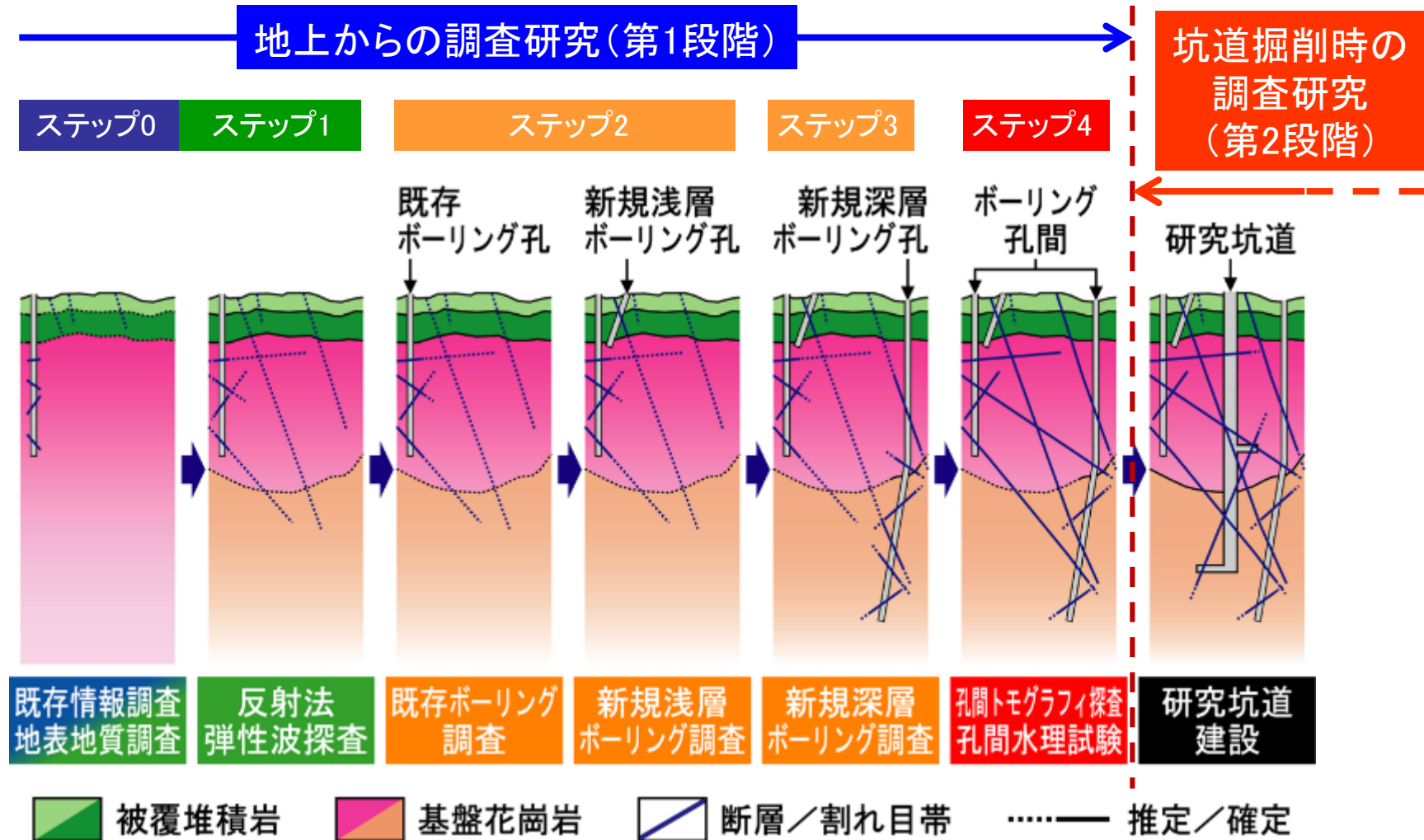
350m調査坑道

# 深地層の研究施設計画の進め方



図はイメージ。幌延深地層研究計画では、堆積岩における地層処分研究開発も実施。

# 地質環境の調査・評価技術の体系化（瑞浪）



- 不確実性を低減するために有効な地上からの調査技術やその組み合わせを、第2段階で取得される実際の地質環境データに基づき確認しつつ技術を体系化



# 地質環境モデルの構築（幌延：地質構造モデル）

## 地上からの調査研究（第1段階）

地表地質調査



地上物理探査



ボーリング調査

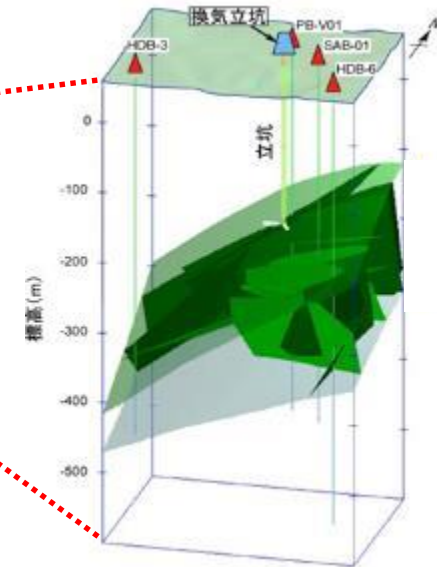
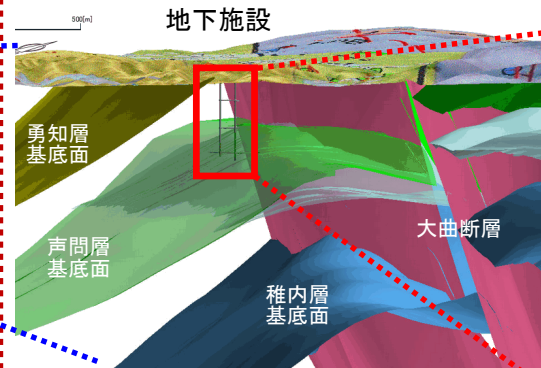
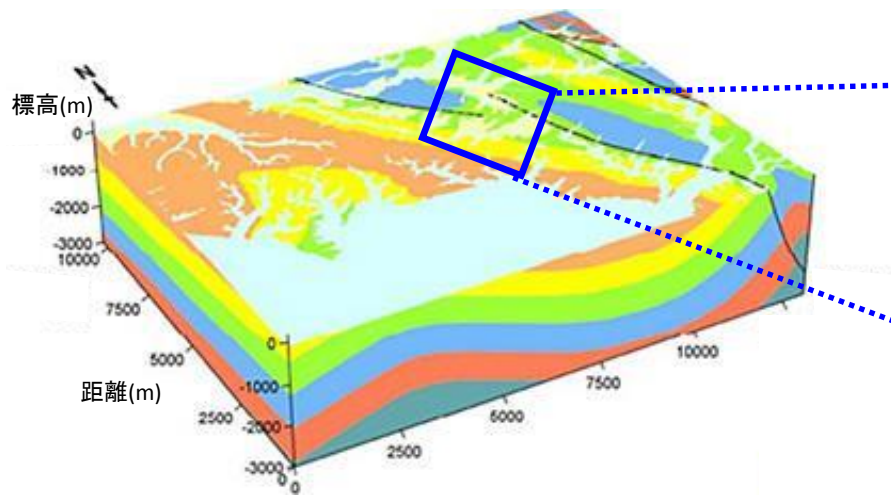


## 坑道掘削時の調査研究（第2段階）

壁面地質観察



坑道内ボーリング調査



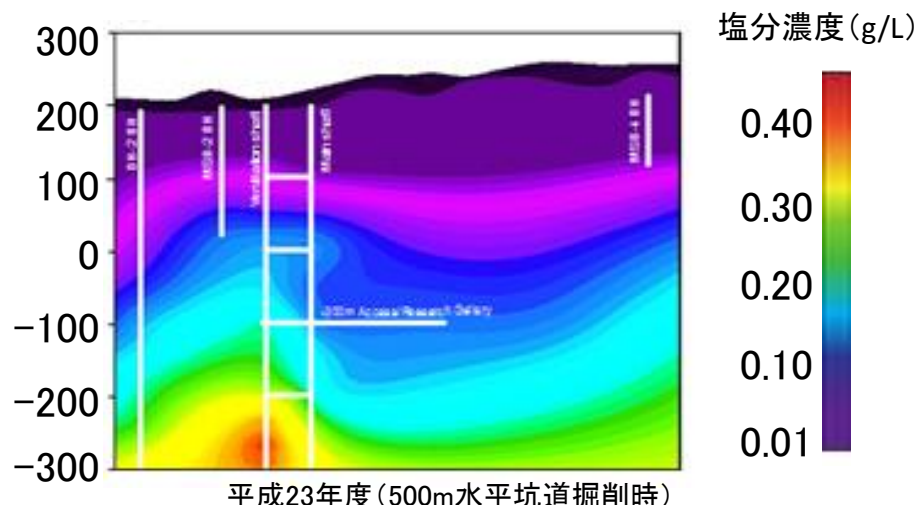
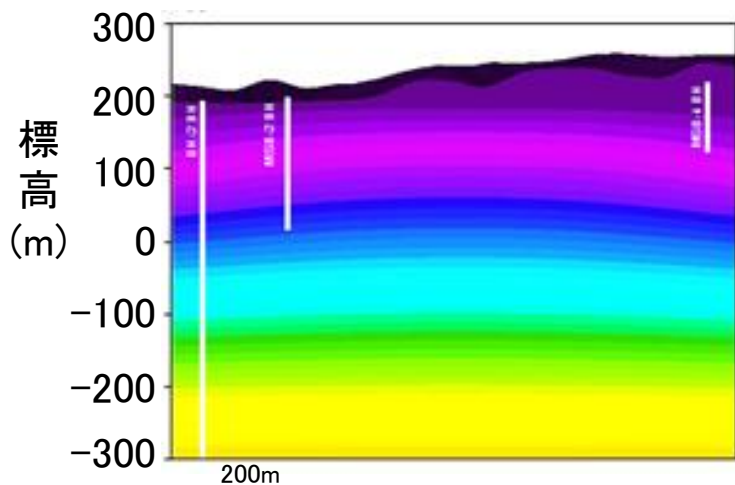
- 地上および地下での調査により、地下の地質構造の分布を効果的に推定する手法を整備
- 坑道内の地質観察等に基づき、地上から地下を推定する際の精度や限界を確認

# 地質環境の変化（瑞浪・幌延：地球化学モデル）

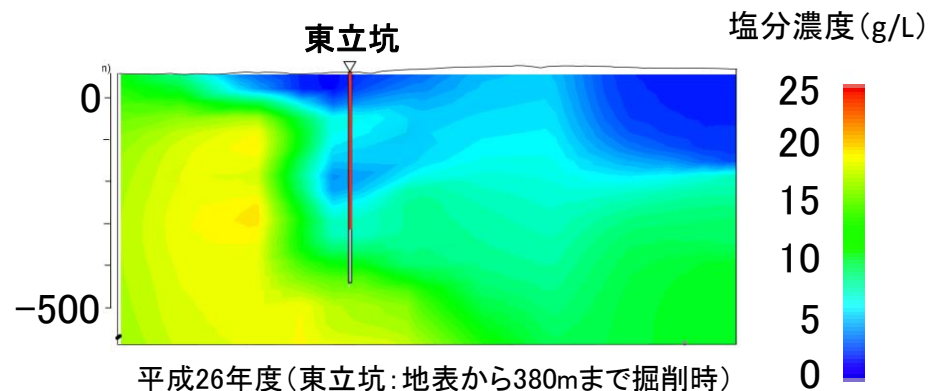
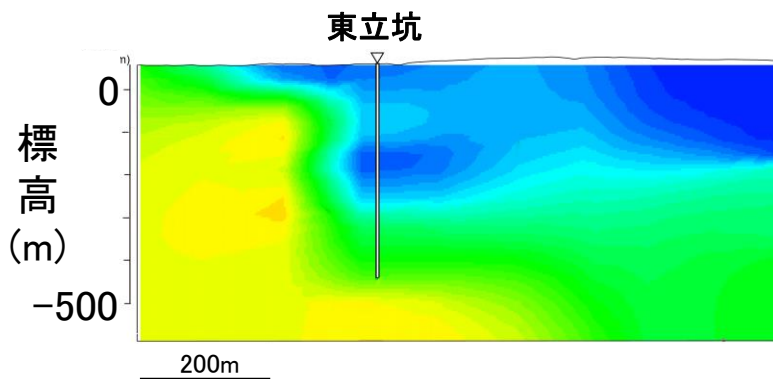
第1段階（坑道掘削前）

第2段階（坑道掘削中）

瑞浪



幌延

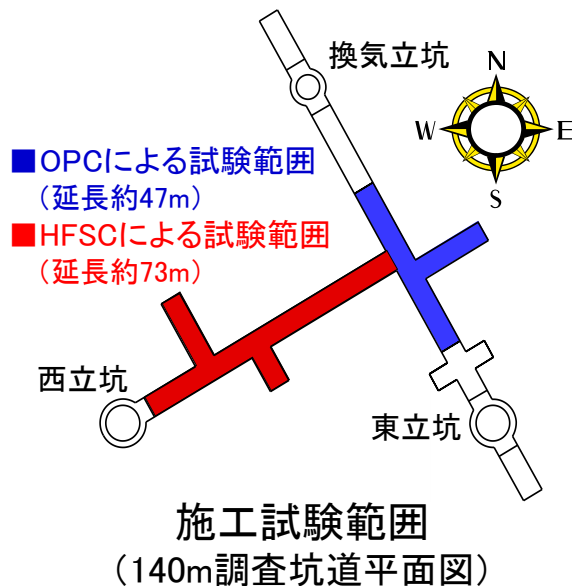


- 坑道掘削に伴う水質変化のプロセスを定量的に評価するとともに、将来変化を予測するための調査解析技術を整備

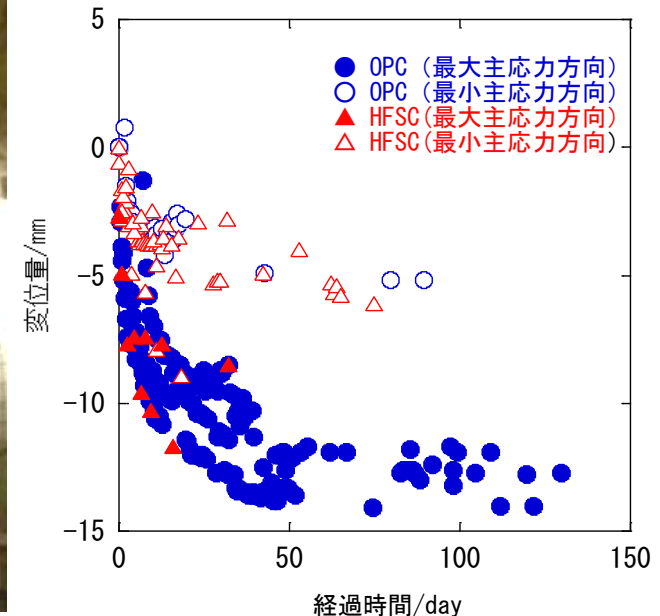
# 低アルカリ性セメントの開発（幌延）

## 低アルカリ性セメントを用いた吹付けコンクリートの原位置施工試験

- 地下坑道を維持するために用いられるセメント(普通ポルトランドセメント OPC: Ordinary Portland Cement)により、地下水が高アルカリ性(pH13程度)となり、人工バリアや周辺岩盤が変質・劣化する可能性
- ⇒ 影響を低減するため、低アルカリ化(pH11以下)を指向した低アルカリ性セメント(HFSC: Highly Fly-ash contained Silica-fume Cement)を開発



吹付け施工試験の様子



内空変位の経時変化

- 世界で初めて低アルカリ性セメントの坑道規模における吹付け施工に成功
- 普通ポルトランドセメントと同等の施工性であることを確認



# 深地層の研究施設計画 成果のまとめ

- 地上から地下深部の地質環境を把握するための調査解析技術を構築し、その有効性を確認
- 坑道掘削に伴う地質環境の変化を把握するための調査解析技術を整備
- 坑道の掘削・施工対策技術、維持管理技術の適用事例を提示し、有効性を確認



概要調査～精密調査前半に必要な基盤技術を整備

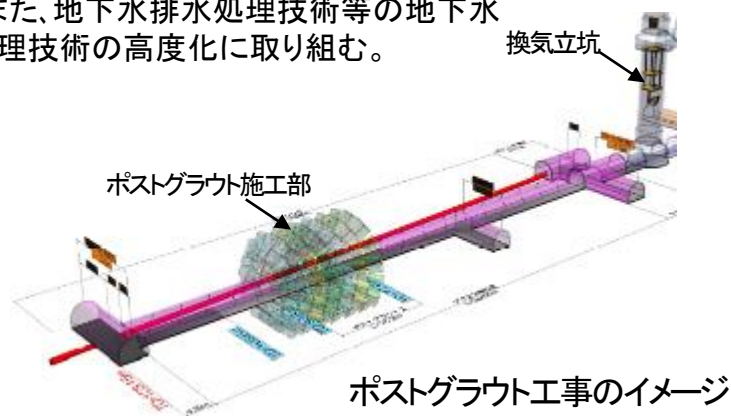
# 今後の研究開発計画 瑞浪超深地層研究所（必須の課題）

## ① 地下坑道における工学的対策技術の開発

- ◆大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
- ◆地下水管理技術

[概要] 深度500mの研究坑道において、坑道への湧水量をプレグラウトとポストグラウトの組合せによって制御可能とするウォータータイトグラウト施工技術を実証する。

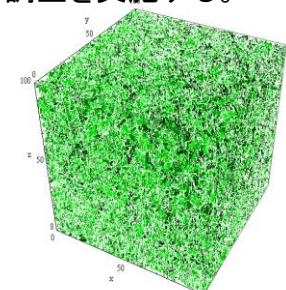
また、地下水排水処理技術等の地下水管理技術の高度化に取り組む。



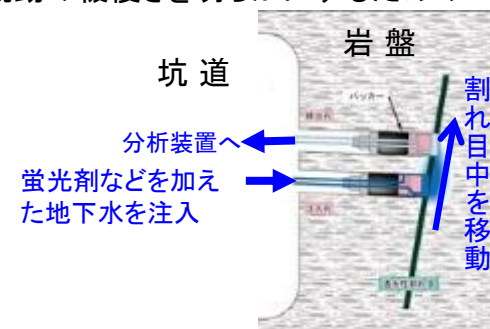
## ② 物質移動モデル化技術の開発

- ◆長期的な変遷を含めた地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動に関する試験及びモデル化技術

[概要] 深度500mの研究坑道において、結晶質岩(花崗岩)中の割れ目での物質の移動現象を理解し、モデル化するための調査解析を実施する。また、割れ目の透水性及び地下水流動・水質の長期的変化や地下水流動の緩慢さを明らかにするための調査を実施する。



割れ目分布モデル

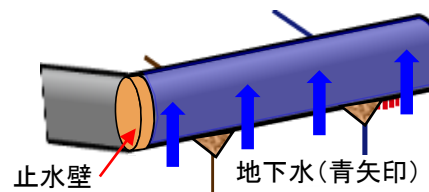


研究坑道内での物質移動試験の例

## ③ 坑道埋め戻し技術の開発

- ◆坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術
- ◆長期モニタリング技術など

[概要] 深度500mの研究坑道において、坑道の一部を埋め戻し、地下水を自然に冠水させることによる地下水の水圧・水質及び坑道周辺岩盤の化学的・力学的変化を観察し、地質環境の回復能力等を評価するとともに、地質環境に応じた埋め戻し技術の構築を目指す。また、長期の観測に必要なモニタリング技術の開発を実施する。



再冠水試験のイメージ

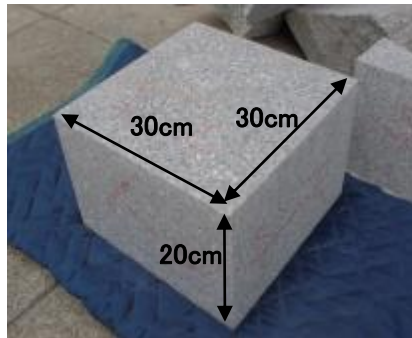


モニタリング装置

# (参考) 必須の課題に係る研究成果の一例 (瑞浪)

## 室内拡散試験による物質移動特性調査

岩石試料の整形



試験孔の掘削

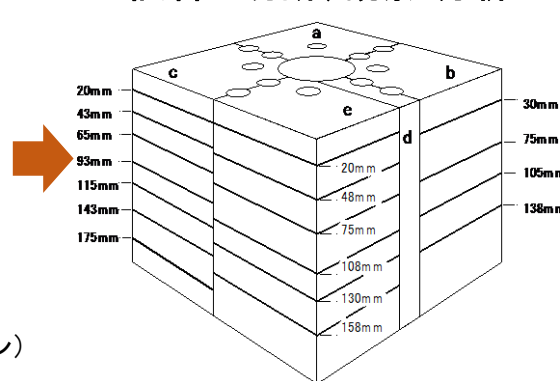


浸水・試験開始

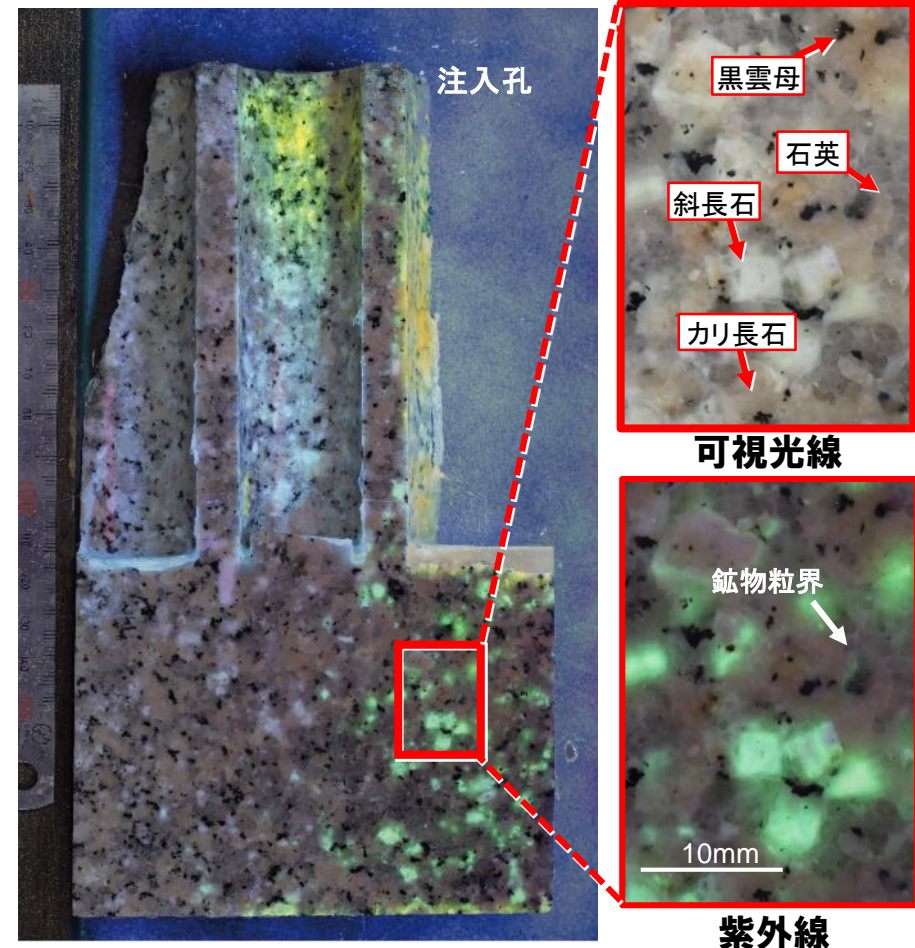


使用トレーサー: 蛍光染料(ウラニン)  
試験日数: 403日

試料の切断、観察・分析



試料の観察結果(鉛直断面)



- 花こう岩を構成する鉱物のひとつである斜長石の微小空隙にトレーサーを確認
  - 割れ目がない花こう岩においても、核種移行の遅延効果が期待できる可能性を示唆

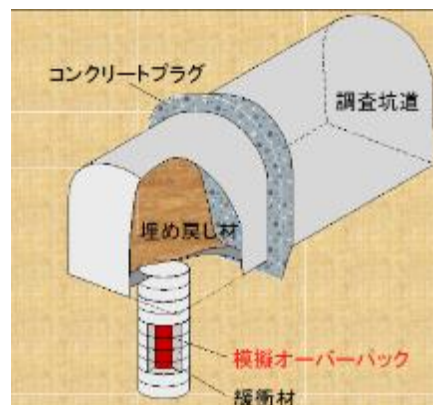


# 今後の研究開発課題 幌延深地層研究所（必須の課題）

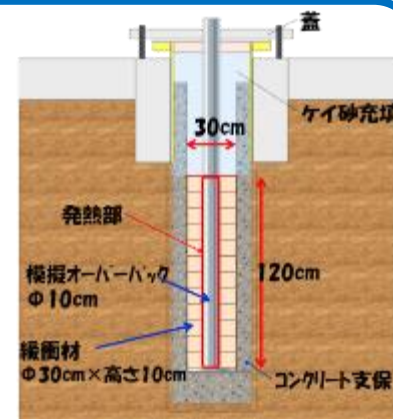
## ① 実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

平成26年度から深度350m調査坑道で実施している人工バリア性能確認試験、オーバーパック腐食試験、物質移行試験を通して、実際の地質環境において、人工バリアや周辺岩盤中での熱-水-応力-化学連成挙動や物質移行現象などを計測・評価する技術の適用性を確認し、「精密調査後半」に必要となる実証試験の技術基盤を確立する。

- 人工バリア性能確認試験
- オーバーパック腐食試験
- 物質移行試験



人工バリア性能確認試験

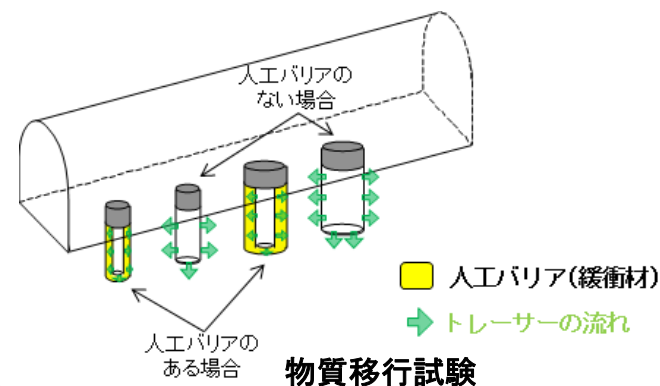


オーバーパック腐食試験

## ② 処分概念オプションの実証

人工バリア設置環境の深度依存性を考慮し、種々の処分概念オプションの工学的実現性を実証し、多様な地質環境条件に対して柔軟な処分場設計を行うことを支援する技術オプションを提供する。

- 処分孔等の湧水対策・支保技術等の実証試験
- 人工バリアの定置・品質確認等の方法論に関する実証試験
- 高温(100℃以上)等の限界的条件下での人工バリア性能確認試験



物質移行試験

## ③ 地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

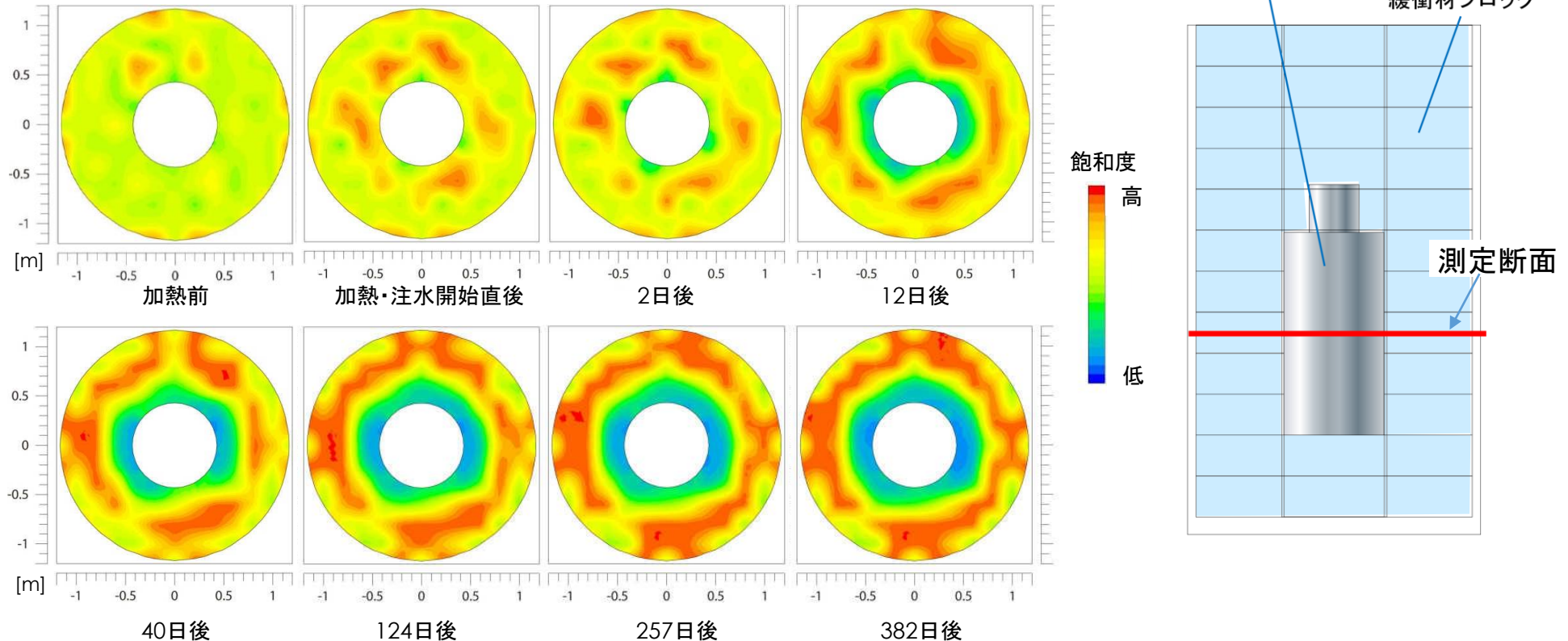
地震・断層活動等の地殻変動に対する力学的・水理学的な緩衝能力を定量的に検証し、堆積岩地域における立地選定や処分場の設計を、より科学的・合理的に行える技術と知見を整備する。

- 水圧擾乱試験等による緩衝能力の検証・定量化
- 地殻変動による人工バリアへの影響・回復挙動試験

# (参考) 必須の課題に係る研究成果の一例(幌延)

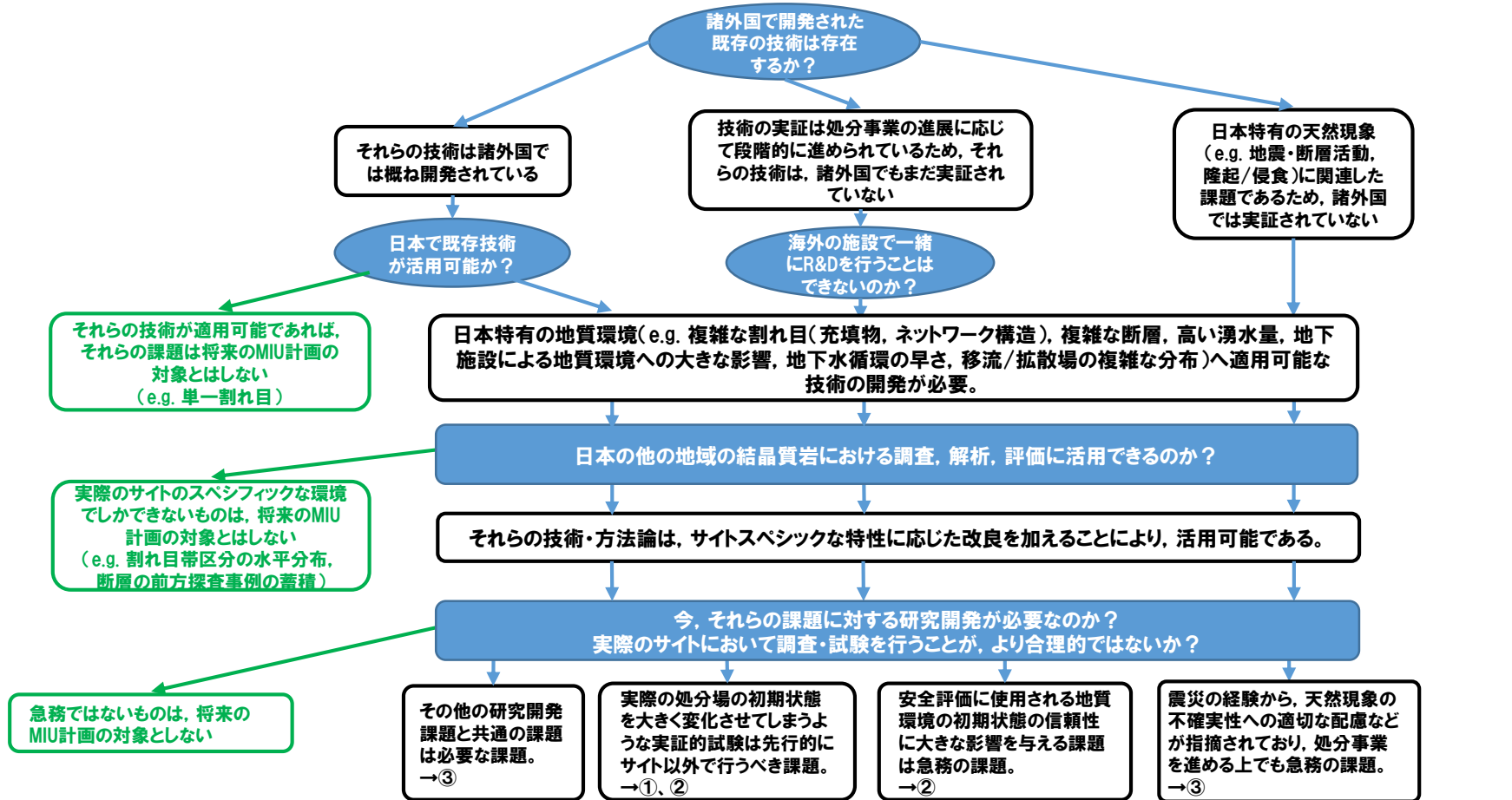
人工バリア性能確認試験における熱－水理－力学－化学に関するデータの取得

比抵抗トモグラフィーを用いて測定した緩衝材の水分飽和度



- 新たに適用した比抵抗トモグラフィー技術により、人工バリア内部の様子を2次元的に可視化
  - 人工バリアが性能を発揮するための要件・メカニズム等をより詳細に評価可能

# (参考) 必須の課題の重要性の確認(1)



## 必須の課題

- ①地下坑道における工学的対策技術の開発
- ・大規模湧水に対するウォータータイトグラウト技術
  - ・地下水管理技術

- ②坑道埋め戻し技術の開発\*
- ・坑道閉鎖に伴う環境回復試験技術
  - ・長期モニタリング技術の開発など

- ③物資移動モデル化技術の開発
- ・長期的な変遷を含めた地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動試験及びモデル化\*\*

\*:これまで海外でも試みられてきている試験(e.g.坑道規模水理試験、酸化還元緩衝試験、岩盤力学-水理-地球化学複合現象調査)は、「坑道埋め戻し技術の開発」として統合・合理化

\*\*:地下深部におけるわが国固有の亀裂ネットワーク中の地下水流動・物質移動及びモデル化手法の開発、地質環境の長期変遷解析技術の開発(深部地下水の起源・滞留時間の理解を含む)

# (参考) 必須の課題の重要性の確認(2)

## 「地層処分事業の技術開発計画」(NUMO, 2013)の課題と必須の課題との対比

NUMOがJAEA等に期待する技術開発<sup>1)</sup>(抜粋)

技術開発の意義

JAEAの必須の課題

### 地質環境特性の把握

- 深地層研究による地質環境特性の総合的な調査・評価技術の構築
- 地質環境特性の調査・評価技術の高度化

### 人工バリアの設計・施工

- 人工バリアに対する複合現象を考慮した長期性能変化に関する評価手法の高度化
- 深地層の研究施設坑道を活用した緩衝材、埋め戻し材およびプラグの設計、施工と性能確認
- 回収が必要となる状態の設置および処分方式に応じた回収技術の整備

### 地下施設の設計

- 調査の進展に応じた施設設計の更新方法の具体化
- 亀裂評価と廃棄体位置基準の基本方針の提示
- 深地層の研究施設の坑道を活用したグラウト設計技術の実証および性能確認

### 安全評価

- 地下調査施設での実証手法および手順の明確化
- (現象のモデル化とシステム性能評価モデルの更新などにかかる実データの取得)

### 安全設計(深地層研究施設の知見提供)

- 地下坑道建設・維持管理などにおける安全対策の知見
- 深部地下地震観測による地震動特性の把握と知見提示

### モニタリング

- 地下坑道でのモニタリング意義検討、パラメータ・計測通信装置検討
- 坑道掘削に並行した地上からのモニタリング技術
- 人工バリアシステム機能と閉鎖後長期安定性に関するモニタリング技術
- 制度的管理・回収可能性にかかわるモニタリング技術

- 安全機能指標基準、設計基準策定などに用いるデータ取得、利用可能な最善技術の実証
- 同上

- 安全機能指標基準、設計基準策定、シナリオ解析
- 利用可能な最善技術の実証、シナリオ解析、安全機能・設計基準策定
- シナリオ解析、利用可能な最善技術の実証、安全機能指標基準

- 利用可能な最善技術の実証
- 安全機能指標・設計基準策定
- 利用可能な最善技術の実証、シナリオ解析、安全機能指標・設計基準

- 利用可能な最善技術の実証、安全機能指標基準、シナリオ解析(シナリオ解析、安全機能指標・設計基準)

- 安全機能指標・設計基準策定、利用可能な最善技術の実証
- 安全機能指標・設計基準策定、シナリオ解析

- 安全機能指標・設計基準策定、利用可能な最善技術の実証、シナリオ解析
- 同上
- 同上
- 安全機能指標・設計基準策定

### 【瑞浪】

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

### 【幌延】

実際の地質環境における人工バリアの適用性確認

処分概念オプションの実証

地殻変動に対する堆積岩の緩衝能力の検証

- 【凡例】
- : 瑞浪
  - : 幌延
  - - - : 地質環境調査の観点での実施

1) NUMO (2013): 地層処分事業の技術開発計画, NUMO-TR-13-02.

# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価

2. 研究開発の枠組み

3. 研究開発の内容

① 地質環境の長期安定性に関する研究

② 深地層の研究施設計画

③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等

4. 成果の発信と施設の公開



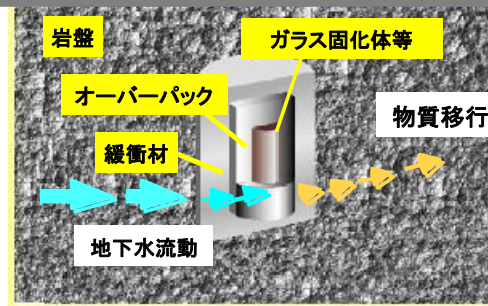
# 地層処分システムの工学・安全評価技術開発

- ・ 人工バリア等の基本特性データの拡充とデータベースの信頼性向上
- ・ 人工バリア等の長期挙動に関する研究
- ・ 安全性評価手法に関する技術整備
- ・ 核種移行に係るモデルとデータベースの拡充・整備
- ・ 実際の地質環境への適用性確認（幌延深地層研究センターとの連携）

地層処分基盤研究施設（エントリー）



地層処分における核種移行モデルの高度化



地層処分放射化学研究施設（クオリティ）



人工バリアシステムの健全性評価試験

- 熱力学・収着・拡散データベース
- 緩衝材基本的性データベース
- グラウトデータベース
- ガラスの溶解に関するデータベース
- オーバーパックデータベース

各種データベースの構築（HPで公開中）

人工バリアの長期性能評価に関する室内試験やデータベースの構築



放射性物質の濃度分析



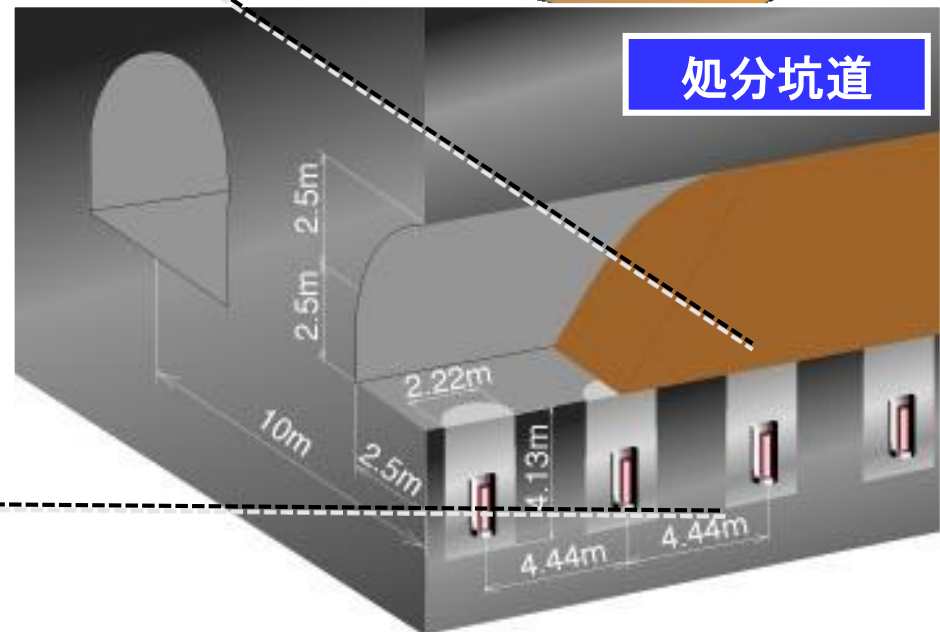
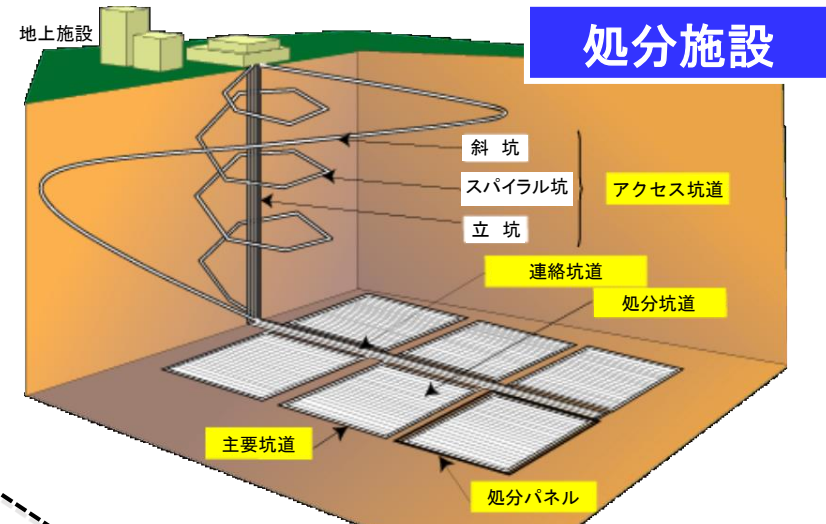
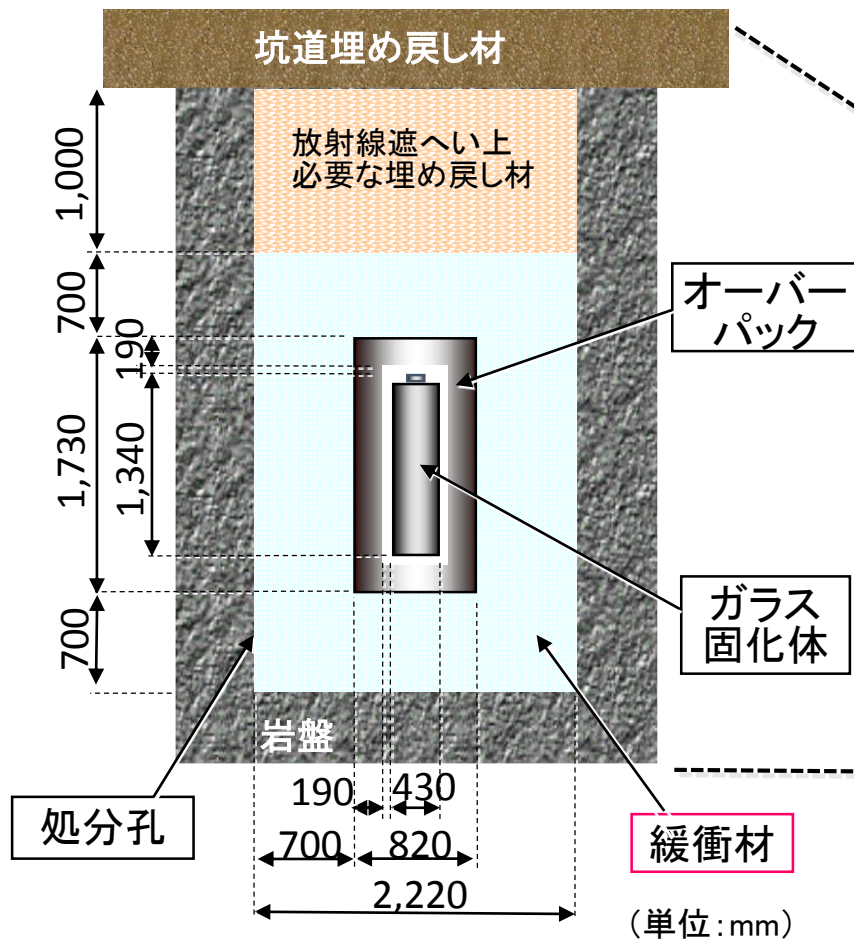
還元環境を模擬したグローブボックス内における放射性物質移行データの取得

放射性物質の溶解・移行挙動等の試験研究

# 地層処分システムの工学技術

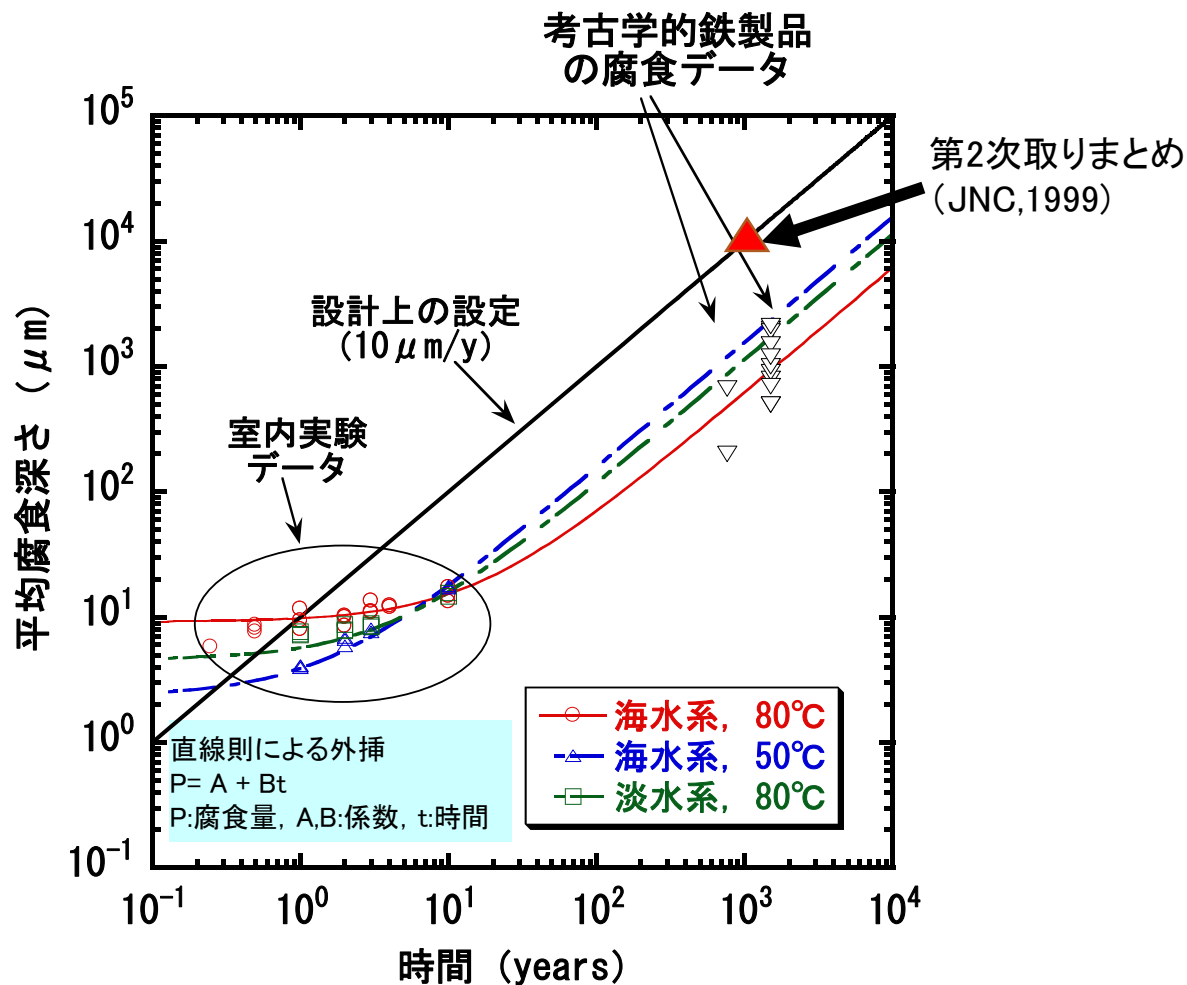
## 人工バリア等の設計例

### 人工バリアシステム



(「第2次取りまとめ」より)

# オーバパックの長期腐食モデルとその確証

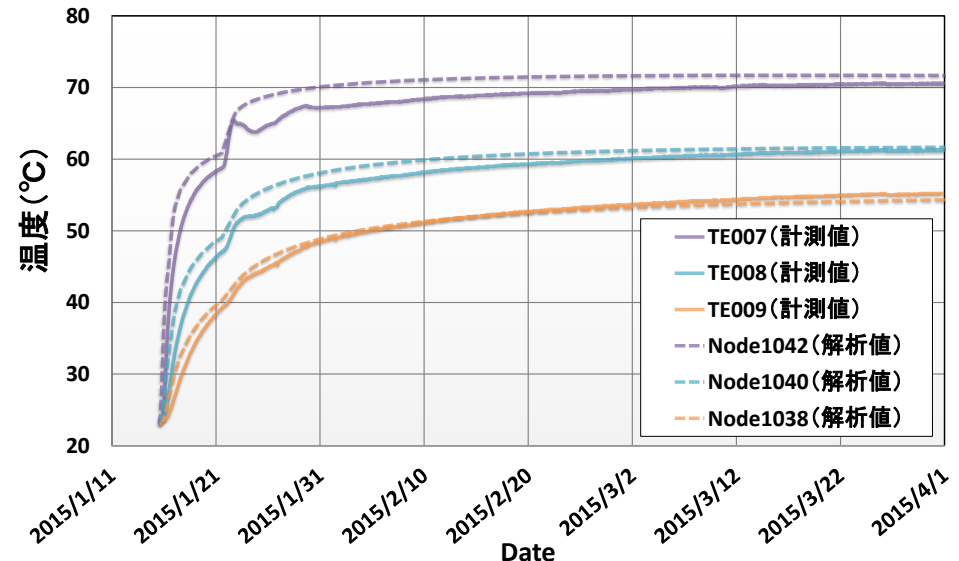
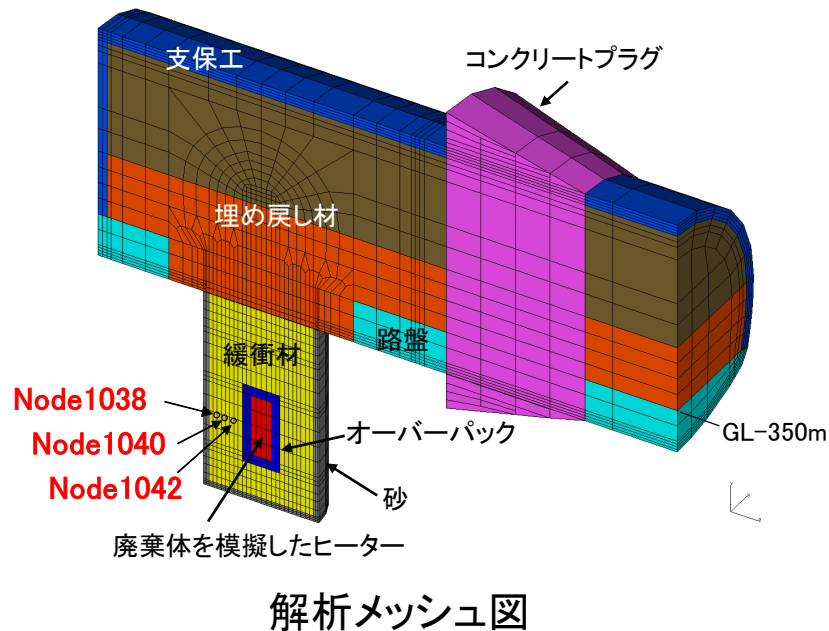


約750年間粘土に埋没していた考古学遺物 (鉄器)

- 室内試験に基づく金属腐食に関する評価モデルについて、数百年～千年程度経過した試料の調査により、長期に対する適用性を確認

# 人工バリア等の長期挙動に関する研究

## 熱-水-応力-化学連成(4連成)挙動の解析評価



人工バリア性能確認試験の計測値と解析結果の比較  
(緩衝材中の温度の経時変化)

- 処分坑道・人工バリアの過渡期(坑道の掘削・閉鎖・地下水の飽和)における4連成挙動評価のための解析コードを開発
- 人工バリアの過渡期の連成挙動評価を実施し、地下水化学を含むニアフィールド環境の変遷を評価⇒幌延URLの人工バリア性能確認試験の計測データとの比較を通じて、解析コードの正確性を確認
- オーバーパックの腐食評価や核種移行解析のための初期条件を提示



# 地層処分システムの安全評価の手順

- 将来予想される変化や状況をシナリオとして描き、これを表現する数学モデルとデータを用いたシミュレーションにより評価
- 将来の状態を言い当てるのではなく、安全性を判断するための材料を提供

シナリオ

「もし、こんなことが起こったら・・・？」  
○ 地下水シナリオ(基本シナリオ, 変動シナリオ)  
○ 接近シナリオ



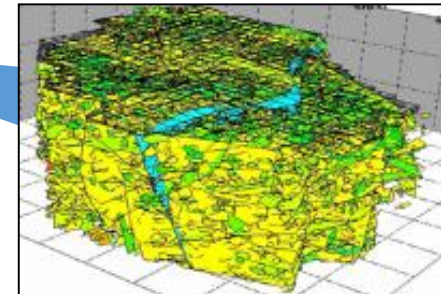
モデル&データ

シナリオを表現する数学モデル  
(例) 
$$Rd_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2} - \lambda_i Rd_i C_i + \lambda_{i-1} Rd_{i-1} C_{i-1}$$
  
 $Rd$ : 遅延係数    $\lambda$ : 崩壊定数    $D$ : 拡散係数



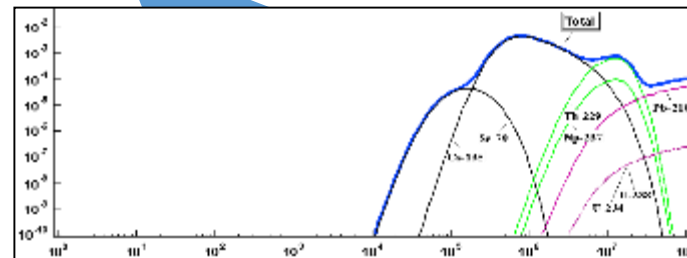
シミュレーション

数学モデルとデータを用いた評価解析



安全基準

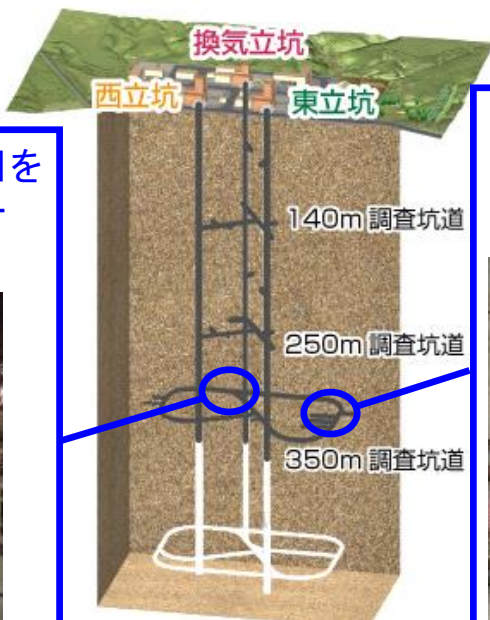
安全性の判断



# 放射性核種の移行に係わる現象理解とモデル開発

## 幌延の地下坑道(深度350m)でのトレーサー試験

岩盤中の単一割れ目を対象としたトレーサー試験

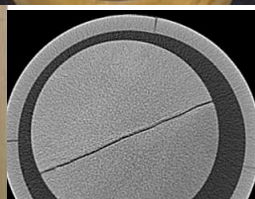


岩盤のマトリクス部と緩衝材を対象とした拡散試験



## 幌延の岩石試料を用いた室内トレーサー試験

単一割れ目コア

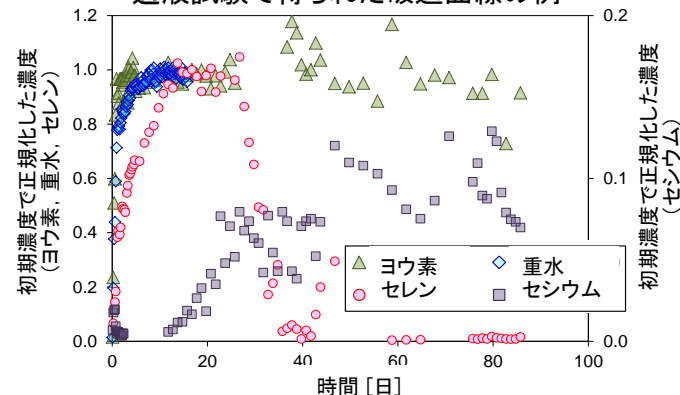


X線CT像



通液試験状況

通液試験で得られた破過曲線の例



- 室内試験と原位置試験を組み合わせることにより、岩石中の物質移行現象の理解を深めながら、安全評価モデルの信頼性を向上

# 地層処分システムの設計・安全評価に必要な 各種データベースの整備

## ○ 人工バリア等の基本特性に関するデータの取得とデータベースの整備

- ・ オーバーパックデータベース: 1,711件
- ・ 緩衝材基本特性データベース: 2,168件
- ・ グラウトデータベース: 材料203件、施工215件

⇒ 幌延URLでの人工バリア性能確認試験等における仕様の設定、  
原位置での挙動予測等に反映



## ○ 核種移行に関するデータの取得とデータベースの整備

- ・ 熱力学データベース(平衡定数): 1,772件
- ・ 収着分配係数データベース: 約 58,000件, 文献数約 750編
- ・ 拡散係数データベース: 約 5,000件, 文献数約 300編
- ・ ガラス溶解データベース: 数値データ 23,288件, 文献数237編

⇒ NUMOの包括的技術報告書での最新の安全評価パラメータ設定  
への反映のほか、使用済燃料の直接処分の調査研究、福島第一  
原子力発電所の事故廃棄物の処理・処分に関する研究開発、  
および諸外国の安全評価でも活用



各種データベースは原子力機構ホームページで公開

<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html>



# 使用済燃料の直接処分研究開発

## 背景・経緯

既に発生している研究炉の使用済燃料や福島第一原子力発電所の使用済燃料対策などを考えると、使用済燃料を直接処分することを可能にしておくことの必要性は明らかであり、技術開発等を進めるべき

「核燃料サイクル政策の選択肢について」平成24年6月21日 原子力委員会決定

⇒ 平成25年度より、使用済燃料の直接処分に関する調査研究を開始

目的：代替処分オプションとして、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分に関する調査研究を推進し、技術的基盤を整備。

国及び関係研究機関は、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。  
「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」平成27年5月22日 閣議決定

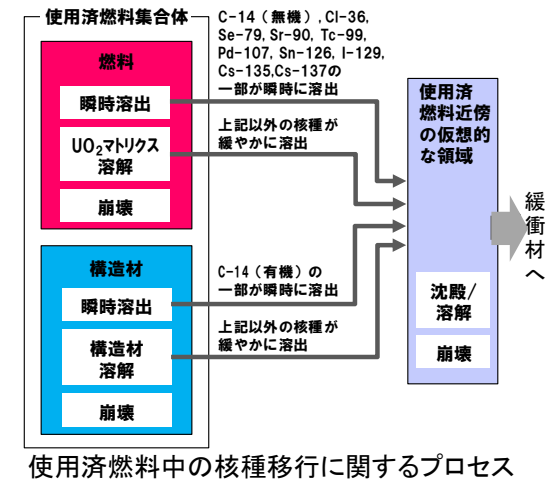
調査研究では、ガラス固化体との以下の違いに着目。

## ○ 工学技術

- ・ 使用済燃料が多様（炉型、燃焼度等）で、寸法や重量が大きく、核分裂性物質（U、Pu）が相当量含まれること→処分容器の設計等
- ・ 崩壊熱が高い→処分容器の燃料集合体数、坑道離間距離や廃棄体ピッチ等

## ○ 安全評価

- ・ 燃料及び構造材（燃料被覆管等）の両方からの核種溶出。
- ・ 一部の核種の一定割合は瞬時に放出。残りは、燃料（ $\text{UO}_2$ ）及び構造材の溶解とともに溶出。



「わが国における使用済燃料の地層処分システムに関する概括的評価  
—直接処分第1次取りまとめ—」公開 (JAEA-Research 2015-016)

<http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Research-2015-016.pdf>



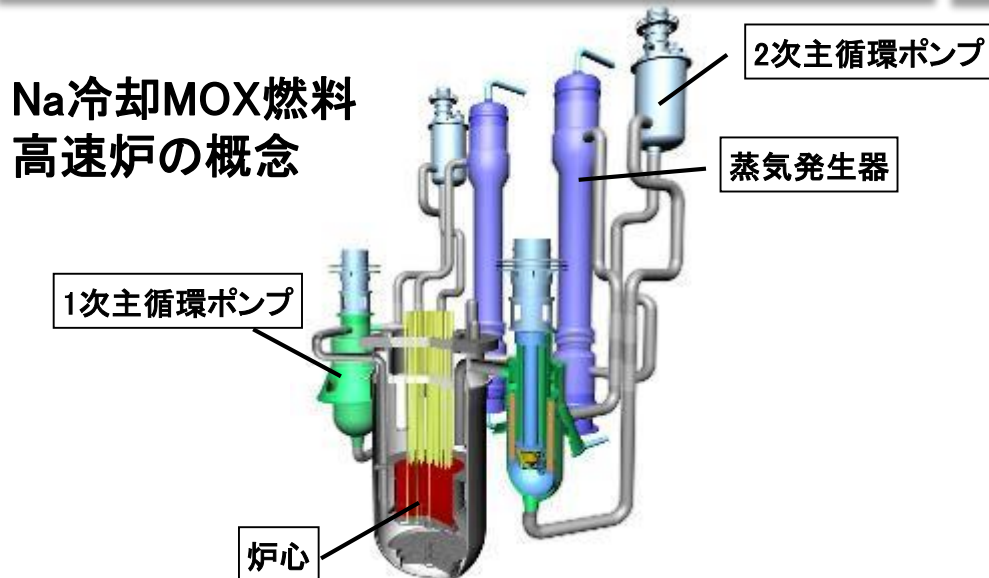
# 分離・変換技術に関する研究開発（１）

国及び関係研究機関は、幅広い選択肢を確保する観点から、使用済燃料の直接処分その他の処分方法に関する調査研究を推進するものとする。また、最終処分の負担軽減等を図るため、長寿命核種の分離変換技術の研究開発について着実に推進する。

「特定放射性廃棄物の最終処分に関する基本方針」平成27年5月22日 閣議決定

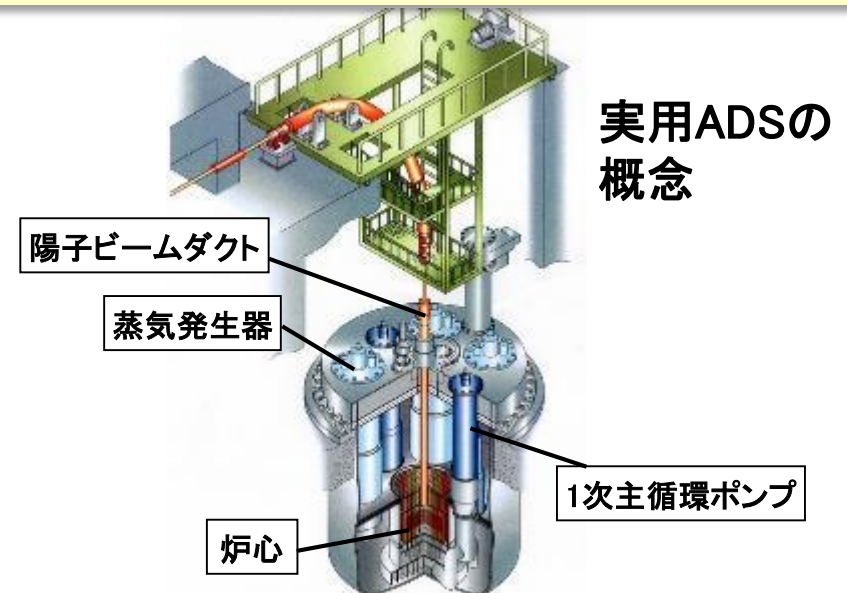
## 高速炉サイクル利用型

- 発電炉を用いた分離変換技術
- PuとともにMAをリサイクル
- 発電炉（**高速炉**）内でMAを核変換
- 燃料のMA含有量は3～5%まで
- Na冷却MOX燃料高速炉が有力候補



## 核変換専用サイクル型(階層型)

- 発電用サイクルに核変換サイクルを付設
- コンパクトなサイクルにMAを閉じ込める
- 核変換専用システム（**加速器駆動システム(ADS)** 等）
- 燃料のMA含有量は50%以上（ウランを含まない燃料）
- 鉛合金冷却窒化物燃料ADSが有力候補



# 分離・変換技術に関する研究開発（２）

## 高速炉を用いた 核変換技術の研究分野

- 「もんじゅ」の性能試験等で得られるデータを用いた炉心設計手法の検証
- 炉心設計研究
- 均質MAサイクルMOX燃料の照射挙動データの取得
- 長寿命炉心材料開発
- 「常陽」再稼働後、MA含有MOX燃料の照射性能を把握するため、米国及び仏国との共同照射試験を実施

## 加速器駆動システム(ADS)を用いた 核変換技術の研究分野

### MAの分離変換のための 共通基盤技術の研究

- MA分離回収に関する技術的成立性を評価
- MA燃料製造に関する技術的成立性を評価
- 小規模なMAサイクルの実証試験に着手

- J-PARC核変換実験施設の建設に向けた取組み
- ADS概念設計
- ターゲット窓材評価
- MA燃料乾式処理技術開発
- ADS開発に関する国際協力（海外施設を用いた実験等）

# 本日のご説明内容

---

1. 研究開発の目標・計画策定と評価
2. 研究開発の枠組み
3. 研究開発の内容
  - ① 地質環境の長期安定性に関する研究
  - ② 深地層の研究施設計画
  - ③ 地層処分システムの工学・安全評価技術開発等
4. 成果の発信と施設の公開

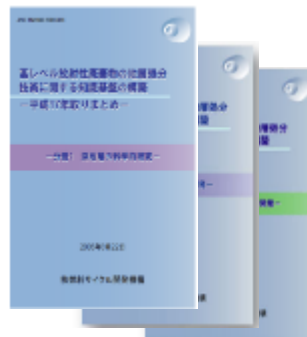
# 研究成果の取りまとめ

多様かつ増大・進化する知識の統合、継承への対応

知識マネジメントシステムを開発: **CoolRep** + **JAEA KMS**

**CoolRep**: ウェブサイト上に展開し、読者の知りたい情報へのアクセスを容易にするレポートシステム  
(<http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>)

**JAEA KMS**: 原子力機構が地層処分研究開発の一環として開発を進めている知識マネジメントシステム  
([http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms\\_login.html](http://kms1.jaea.go.jp/kmsif/kms_login.html))



研究開発成果の取りまとめの経緯

第1次取りまとめ  
(1992)

第2次取りまとめ  
(1999)

H17年度成果取りまとめ  
(2005)

H22年度成果取りまとめ  
CoolRepH22 (2010)

H26年度成果取りまとめ  
CoolRepH26 (2015)



# 地域説明会、情報・意見交換会の開催（幌延、東濃）

- ・ 幌延深地層研究計画 調査研究成果報告
- ・ 幌延フォーラム

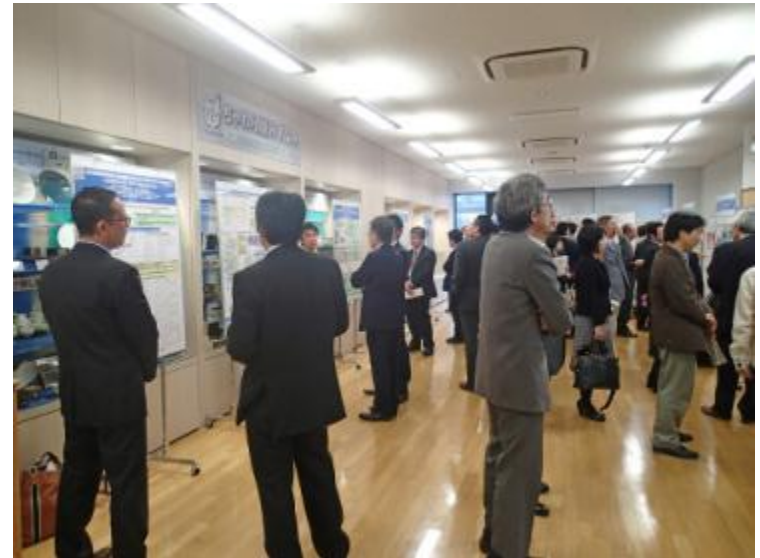
幌延深地層研究センターの事業内容や  
幌延深地層研究計画の現状について  
地域の皆さま等に報告



幌延深地層研究計画 平成26年度調査研究成果報告会  
(平成27年8月6日) [調査研究成果報告の様子]

- ・ 東濃地科学センター 地層科学研究  
情報・意見交換会

東濃地科学センターの研究内容を、大学、  
研究機関、企業の研究者・技術者等に広く  
紹介し、情報・意見交換



東濃地科学センター 地層科学研究 情報・意見交換会  
(平成27年10月29日～30日) [ポスターセッションの様子]

- ・ 地元地域での事業説明会 東濃21回、幌延15回(平成27年度実績)

# 研究開発報告会等の開催

## 地層処分に関する研究開発報告会

—第2次取りまとめ以降の研究開発の進展と今後の展開—  
(平成27年7月14日,コクヨホール)

地層処分に対する社会や国民の理解を得るため、海外研究機関の実績との比較や不測の事態(稀頻度事象)への方策を示すことが有効という意見等をいただいた。

## 地層処分に関するイベント

「地下深くの不思議を学ぼう—地層処分と「かがく」—」  
(平成27年7月25日,日本科学未来館)

子供を含めた一般の方々に広く地層処分に関する興味・関心を持っていただくことを目的としたシンポジウムと科学イベント(工作・実験)を開催



研究開発報告会  
会場の様子



広島大学長沼毅先生による  
シンポジウム



科学イベントコーナー  
(地下水の水質分析)

# 施設の公開、講師派遣

## ○ 科学技術への理解増進活動・理数科教育支援

- 大学、スーパーサイエンスハイスクール等 校外教育受入れ
  - ✓ 平成27年度:東濃14校、幌延11校
- 講師派遣
  - ✓ 大学等集中講義、スーパーサイエンスハイスクールへの講師派遣



スーパーサイエンスハイスクール(東海)

## ○ 見学会の開催

- 定期施設見学会の開催
  - ✓ 平成27年度:東濃12回、幌延7回
- 各研究施設の見学者数  
(平成27年度実績)
  - ✓ 東濃:約 2,700名  
(うち地下施設見学 約2,100名)
  - ✓ 幌延:約 7,800名  
(うち地下施設見学 約1,000名)
  - ✓ 東海:約 800名



校外教育受入れ(東濃)



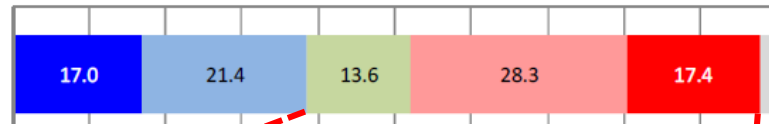
施設見学(幌延)

※ 東海は、地層処分研究開発関連施設への見学者

# (参考) 一般見学者へのアンケート結果例 (幌延・ゆめ地創館)

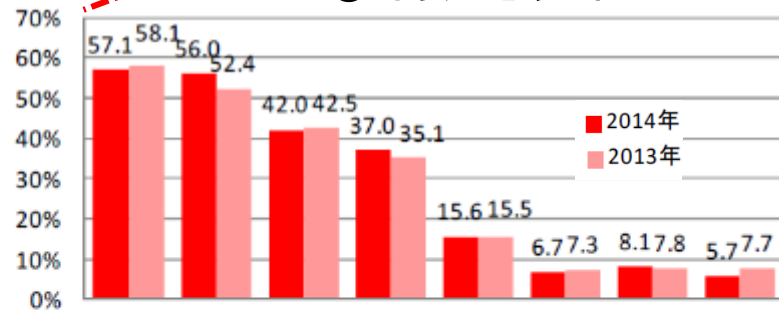
■ 安全 ■ 多少、安全 ■ わからない ■ 多少、不安 ■ 不安 ■ 無回答  
0% 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%

2014年(N=2457)



地層処分の安全性について  
どう感じましたか？

## ① 不安に思う理由は？



幌延深地層研究センター  
ゆめ地創館

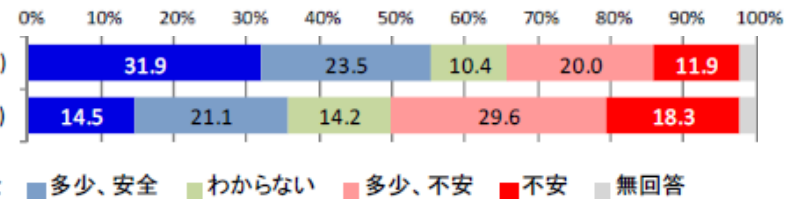


## ② 地下施設の見学の有無による意識の違い

地下施設の見学

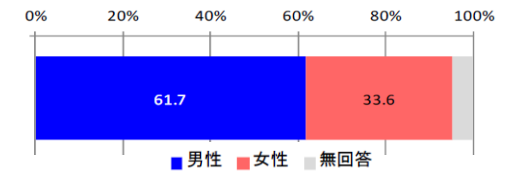
見学有り(N=345)

見学無し(N=2112)

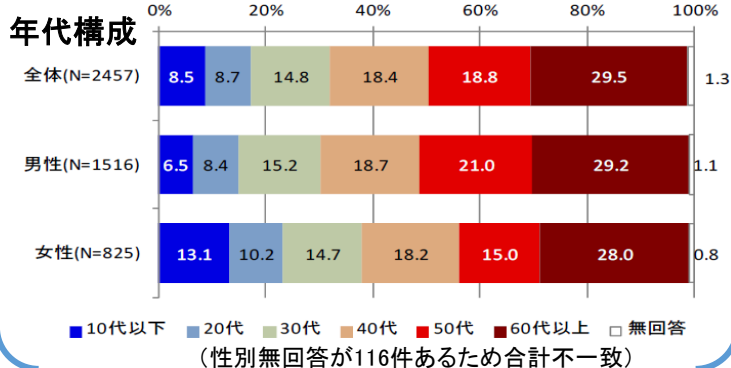


## ◆ 回答者の属性

男女比



年代構成





# インターネットサイトを通じた情報発信

- 研究成果情報の提供 (CoolRep)
- 研究施設の状況等に興味を持ってもらえるようなコンテンツ、タイムリーな情報の発信

## 【瑞浪】

- ・ 瑞浪超深地層研究所バーチャル体験
- ・ 瑞浪超深地層研究所ライブ映像、地下坑道パノラマ写真

## 【幌延】

- ・ 研究内容紹介、トピックス紹介
- ・ 調査試験の進捗状況の写真・動画の掲載

- 評価委員会等の資料・議事概要の公開
- 「地層処分ポータル」との相互リンク 等



CoolRep トップページ

<http://kms1.jaea.go.jp/CoolRep/index.html>



地層処分技術に関する研究開発ホームページ  
<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/toppage/top.html>



幌延深地層研究センター調査研究の状況(例)

<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/cyousakenkyu260.9.html#0926>



瑞浪超深地層研究所バーチャル体験ポータル画面

<http://www.jaea.go.jp/04/tono/taiken/web3d200803.htm>

# まとめ

- JAEAにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の計画及び成果については、①国立研究開発法人に対する国の評価システム、②地層処分基盤研究開発調整会議、③ JAEAが設置した外部評価委員会による評価を受け、計画の策定に反映している。
- JAEAは、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び地層処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等を、関係機関との適切な役割分担と協力の下に着実に進めてきている。
- NUMOとは、協力協定に基づく技術者の交流、共同研究等を進めるとともに、包括的技術報告書について、タスクフォースへの参加および試験データ等の成果の反映を行っている。
- 成果の発信と施設の公開などを通じて、国民理解の醸成に貢献している。
- 引き続き、地層処分技術の信頼性の向上を目指して、関係機関とのより一層の連携・協力を図りながら、第3期中長期計画で示した課題に取り組む。

# (資料) JAEAの第三期中長期計画の概要

## ○ 高レベル放射性廃棄物の処分技術等に関する研究開発

- ・ 深地層の研究施設計画における研究開発の進捗状況等については、平成31年度末を目途に、外部専門家による評価等により確認する。
- ・ 超深地層研究所計画については、  
地下坑道における工学的対策技術の開発等、必須の課題について平成31年度末までの5年間で成果を出すことを前提に重点的に取り組む。  
平成31年度末までに、跡利用を検討するための委員会での議論も踏まえ、土地賃貸借期間の終了(平成34年1月)までに埋め戻しができるようにという前提で考え、坑道埋め戻しなどのその後の進め方について決定する。
- ・ 幌延深地層研究計画については、  
実際の地質環境における人工バリアの適用性確認等、必須の課題について重点的に取り組む。  
平成31年度末までに研究終了までの工程やその後の埋め戻しについて決定する。
- ・ 自然現象に伴う地質環境の変化を予測・評価する技術を整備する。
- ・ 高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る処分システム構築・評価解析技術の先端化・体系化を図る。
- ・ 海外の直接処分にに関する最新の技術動向を調査するとともに、代替処分オプションとしての使用済燃料直接処分の調査研究に取り組み、成果を取りまとめる。

## ○ 放射性廃棄物の減容化・有害度低減の研究開発

- ・ 研究開発の実施に当たっては、外部委員会による評価を受け、進捗等の妥当性を確認しつつ研究開発を行う。
- ・ 高レベル放射性廃液を用いた試験による分離回収データ等を取得し、MA分離回収に関する技術的成立性を評価する。
- ・ 幅広い組成のMA燃料の基礎データの取得等を進め、MA燃料製造に関する技術的成立性を評価する。
- ・ 既存施設を用いた小規模なMAサイクルの実証試験に着手する。
- ・ 均質MAサイクルMOX燃料の照射挙動データの取得等を行う。
- ・ 「常陽」再稼働後、米国及び仏国との共同照射試験を実施する。
- ・ J-PARC核変換実験施設の建設に向けて必要な要素技術開発等に取り組む。
- ・ ターゲット窓材評価等を行うとともに、国際協力によりADS開発を加速させる。