



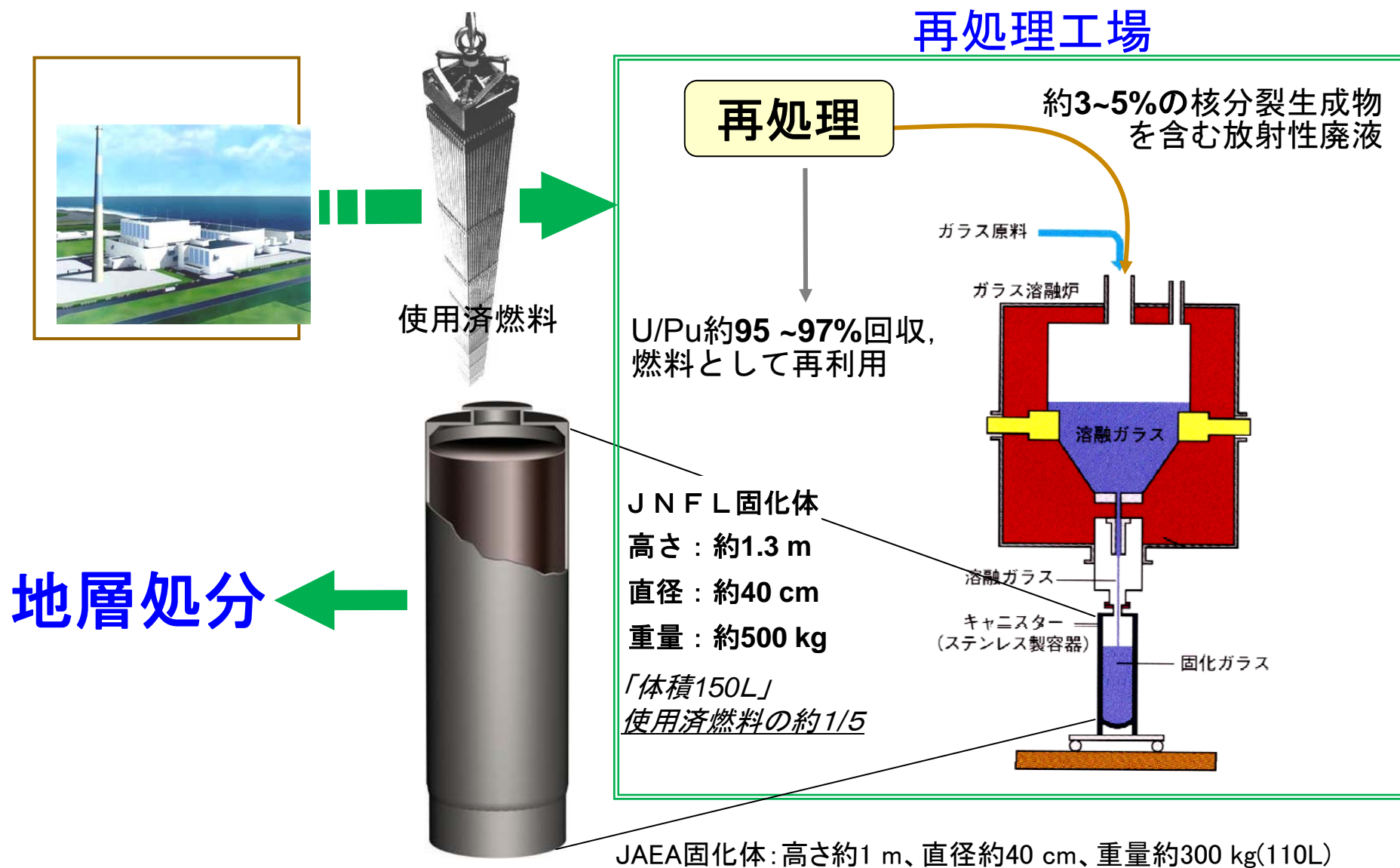
# 高レベル放射性廃棄物 地層処分研究開発の現状

独立行政法人日本原子力研究開発機構  
バックエンド研究開発部門  
地層処分研究開発推進部

# **1. 高レベル放射性廃棄物地層処分の概要**



# 高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)





# ガラス固化体の現状と発生量

## 現状

- ・保管中の使用済燃料(SF): 約17,000トﾝ
- ・JNFL返還固化体 1,574本 (2014年4月末)
- ・JNFL製造固化体 346本
- ・JAEA製造固化体 247本



## 中長期発生量

- ・既存SFは、固化体換算約24,000本相当
- ・中長期発生量は、今後の核燃料サイクル政策に依存
- ・従来計画では2021年頃累計約40,000本、この規模の地層処分場を想定

100万kWの原子力発電所を1年間運転すると約30本発生

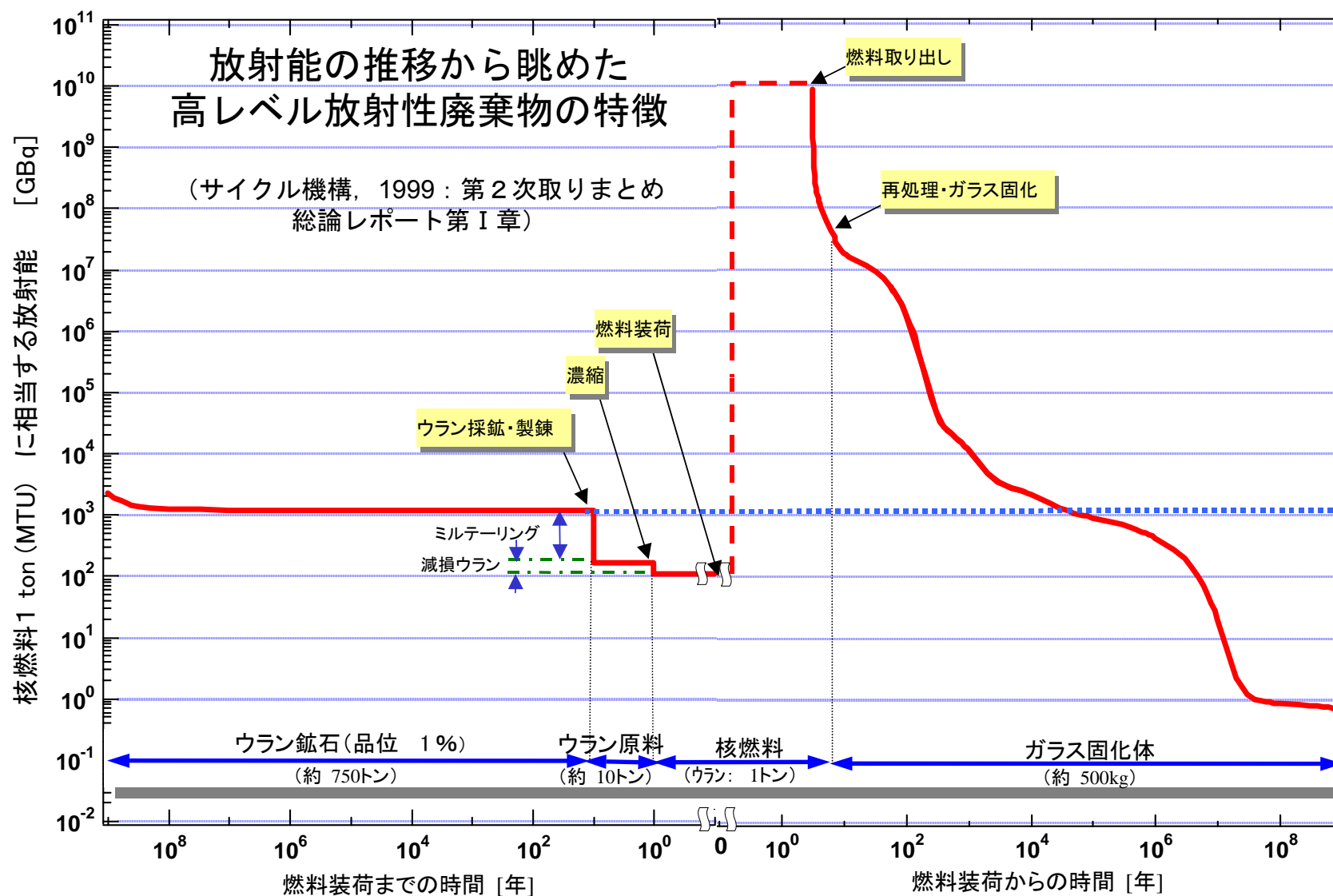


日本原燃(株) 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター  
(保管容量 2880本)



原子力機構 TVF  
(保管容量 420本)

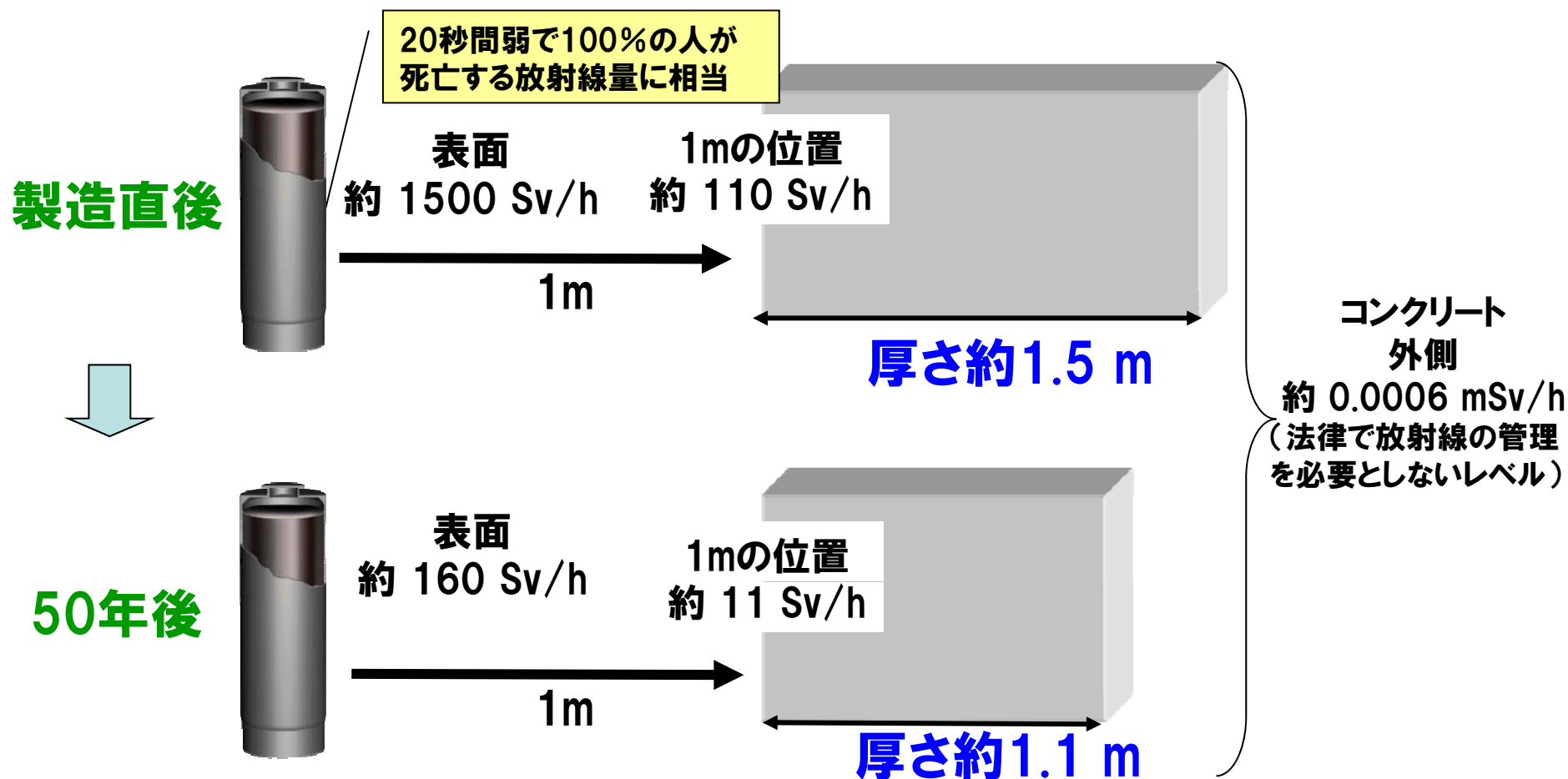
# 高レベル放射性廃棄物の特徴 (JNFLガラス固化体)



# 高レベル放射性廃棄物の管理

## 貯蔵における遮へい

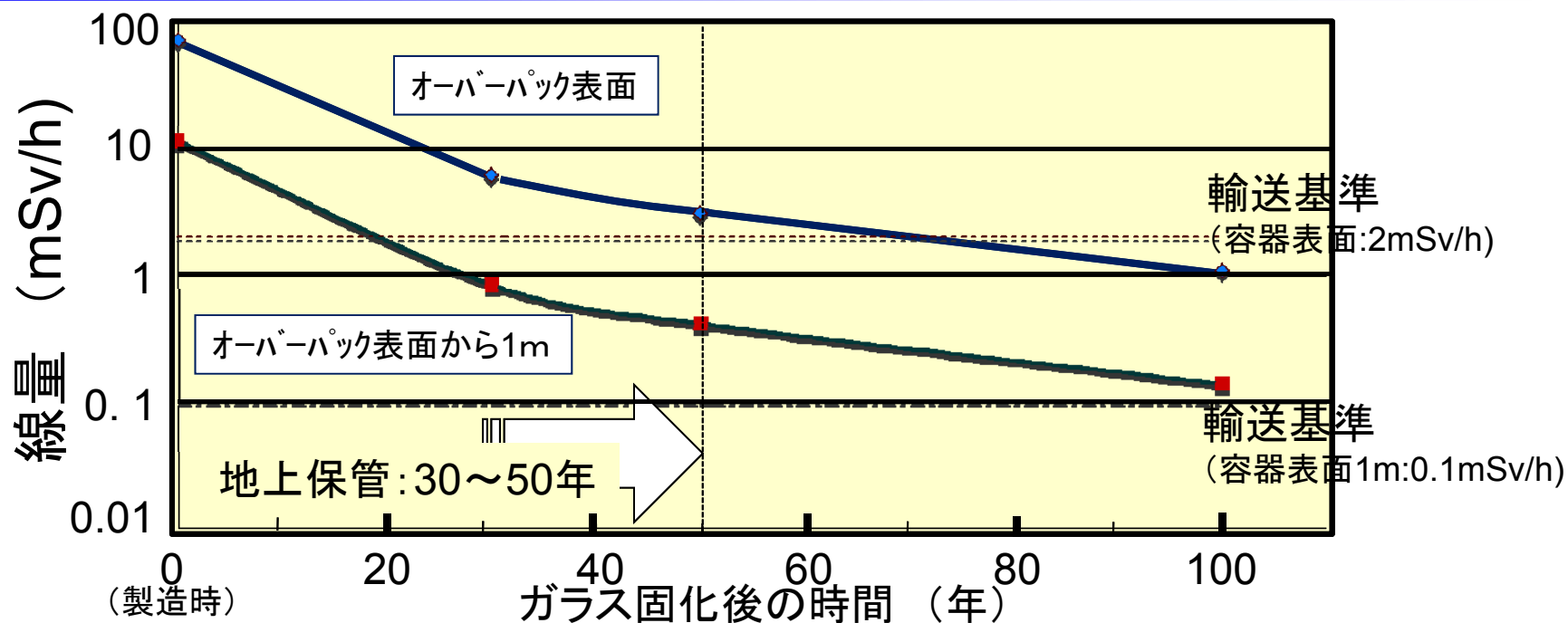
ガラス固化体から1m離れた所で、放射線管理を必要としない放射線レベルに隔離するために必要なコンクリート厚さ



経産省資源エネルギー庁「高レベル放射性廃棄物の処分について考えてみませんか」(2002)を基に作成

# 高レベル放射性廃棄物の管理

固化体の輸送、埋設過程における線量



「製造直後」



20秒間弱で100%の人が死亡する放射線量に相当

ガラス固化体表面  
約 1,500 Sv/h

「地層処分向けガラス固化体」



オーバーパック(鉄)の厚さ: 19cm  
(放射線遮へい15cm+腐食代4cm)

50年後 : 表面で約 3 mSv/h  
1m距離で約0.5mSv/h  
人がキャスク等で安全に  
取扱いができるレベル

## 技術的視点

安定な深地層の環境において、人工バリアと天然バリア(地層)を組合わせた「多重バリアシステム」による受動的安全体系(Passive Safety System)を構築することで、長期間にわたって放射性廃棄物を閉じ込める。

【安定な地下深部が有する特徴】

- 地表に比べ人間活動や自然現象の影響を受けにくい
- 還元性の環境にあり腐食や溶解が進みにくい
- 物質を長期間にわたり保持する

## 倫理的視点

- 段階的アプローチ  
→ 将来世代の選択の自由度を最大化,  
意思決定プロセスの公平性と公開性
- 受動的な安全系 → 将来世代の負担の最小化
- 適用可能な工学技術の存在 → 適切な資源配分



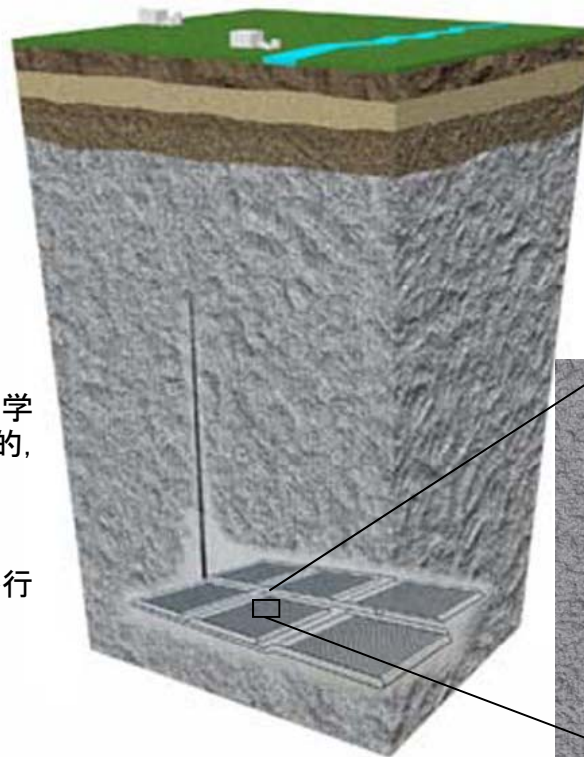
# 地層処分システムの構成要素と安全機能

(サイクル機構, 1999: 第2次取りまとめ総論レポート)

## 多重バリアシステム = 人工バリア + 天然バリア

### 地質環境

- ・ 長期的な安定性
- ・ 地層処分にとって好ましい地質環境特性 (地球化学的, 水理学的, 力学的, 物理的障壁など)
- ・ 天然バリアとしての機能 (核種移行遅延と希釈・分散)



### 人工バリア

#### ガラス固化体

(ステンレス製キャニスタに充填されたもの)

- ・ 低浸出率
- ・ 変質層での核種移行抑制

#### オーバーパック

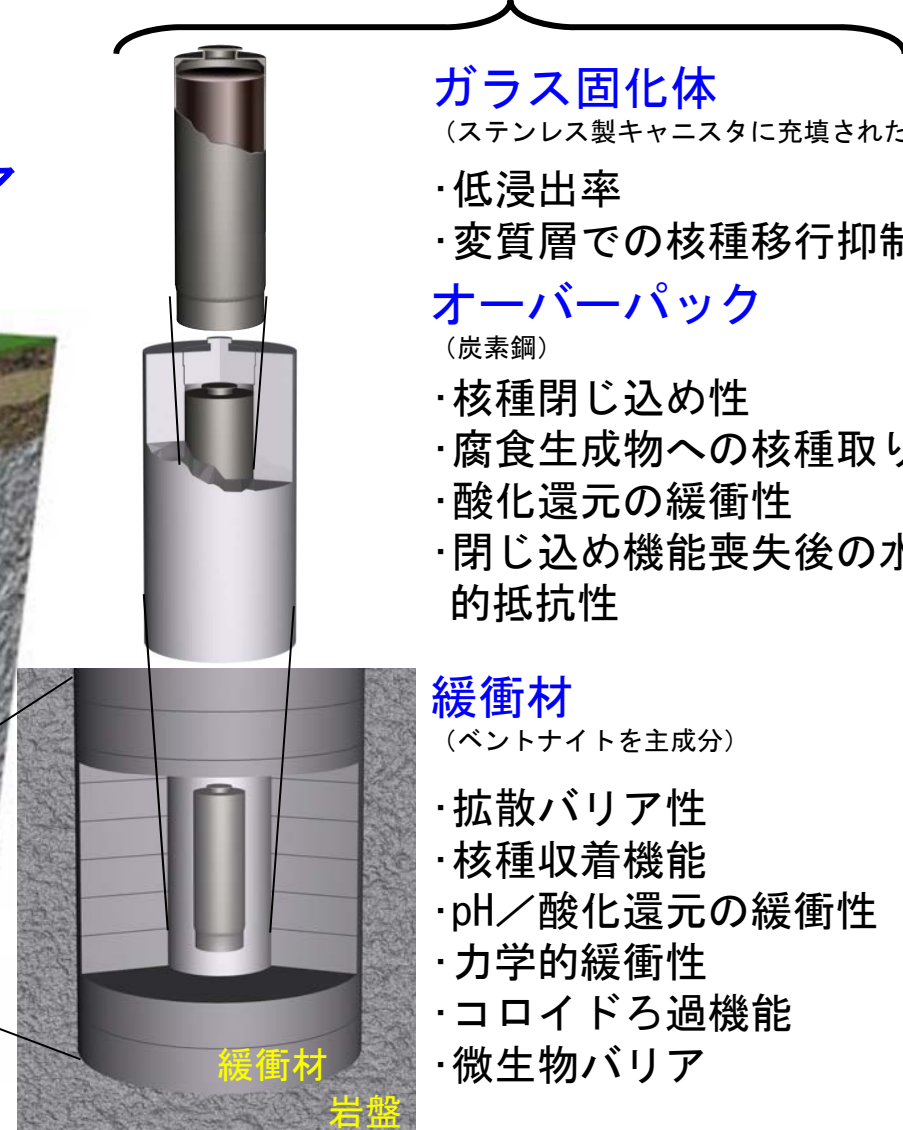
(炭素鋼)

- ・ 核種閉じ込め性
- ・ 腐食生成物への核種取り込み
- ・ 酸化還元の緩衝性
- ・ 閉じ込め機能喪失後の水理学的抵抗性

#### 緩衝材

(ベントナイトを主成分)

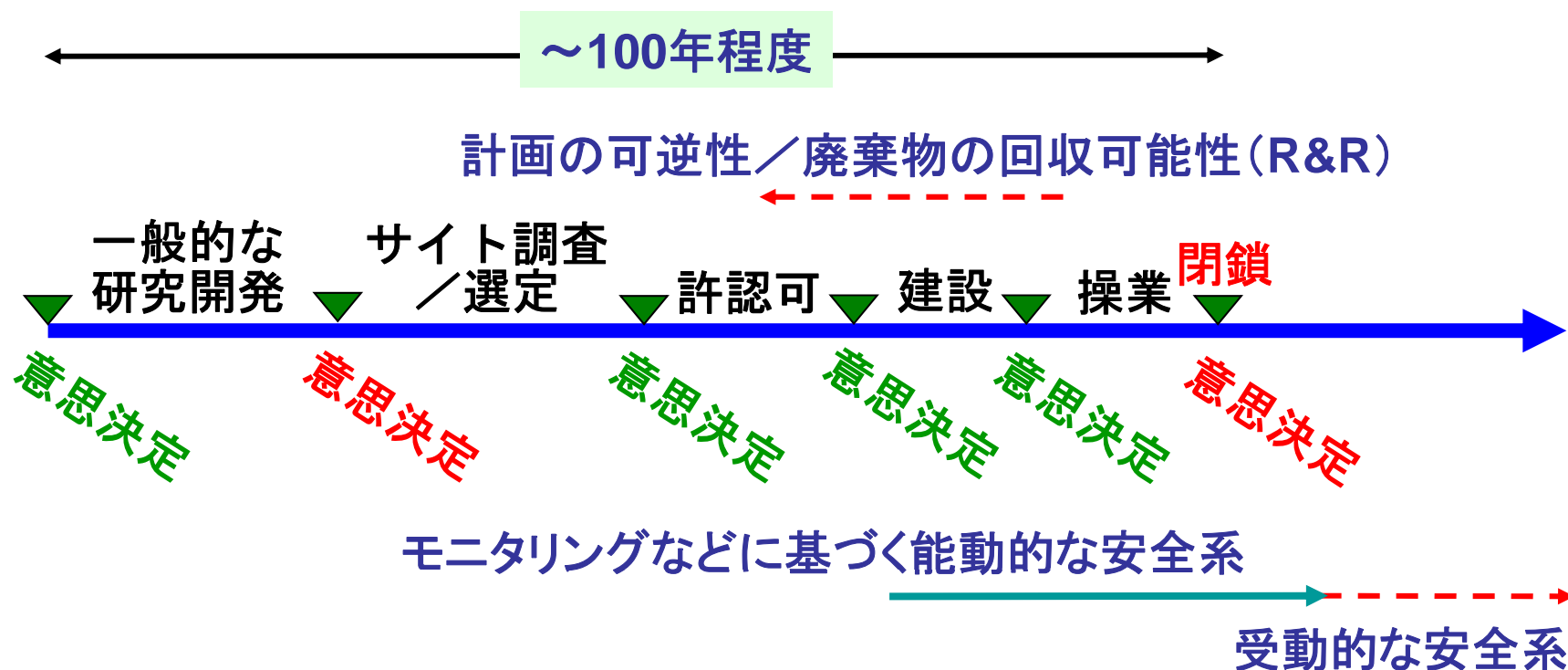
- ・ 拡散バリア性
- ・ 核種収着機能
- ・ pH/酸化還元の緩衝性
- ・ 力学的緩衝性
- ・ コロイドろ過機能
- ・ 微生物バリア





# 地層処分の進め方

- ・ 段階的な意思決定
  - － 世代を超えた様々なステークホルダーの参加
  - － 各意思決定点において地層処分の実現可能性, 安全性を確認(セーフティケース)

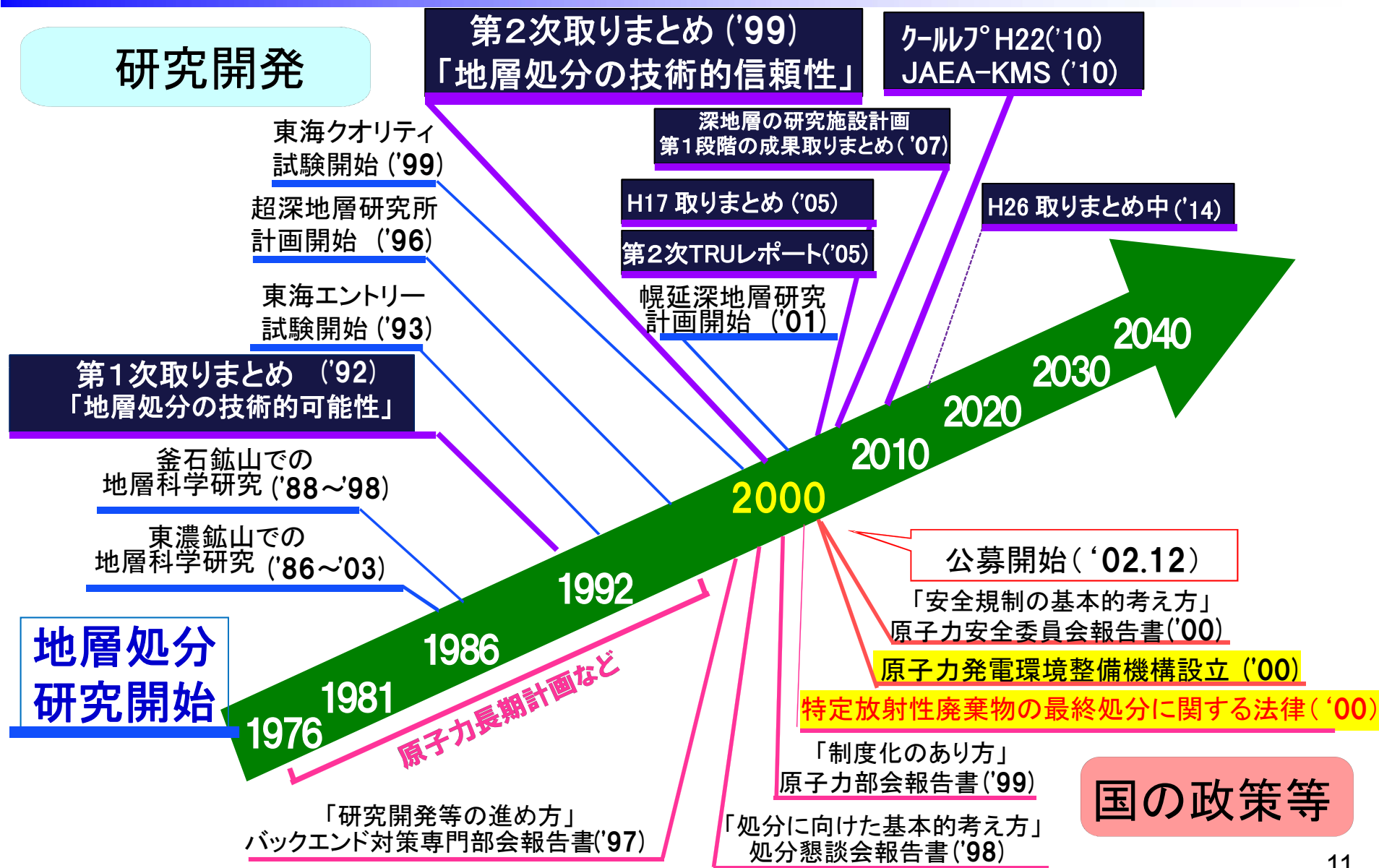


## **2.原子力機構における研究**



# 日本の地層処分研究開発

## 地層処分の成立性に関する研究から事業化段階の研究へ





# なぜ、日本で地下研究施設が、必要か

●わが国の地質環境は、海外と条件が異なり、海外の技術や知見だけでは不十分

⇒ 海外の地下研での知見・経験を活用して、わが国の代表的な地質を対象とした深地層の研究が必要

## 日本の地層は若い

代	紀	年(百万年前)
新生代	第四紀	0
	第三紀	新第三紀 1.7
		古第三紀 24
中生代	白亜紀	64
	ジュラ紀	140
	三疊紀	208
古生代		242
先カンブリア紀		564

各国の地下研究施設と対象岩種と年代

↑ 日本(幌延:泥岩)  
アメリカ(ユッカマウンテン:凝灰岩)  
ベルギー(モル:粘土層)

↑ 日本(瑞浪:花崗岩)  
↑ スイス(モンテリ:粘土層)  
↓ フランス(ビュール:粘土層)  
↓ ドイツ(ゴアレーベン:岩塩層)

↑ カナダ(ホワイトシェル:花崗岩)  
↑ スウェーデン(エスポ:花崗岩)  
↑ フィンランド(オルキルト:花崗岩)

## 日本は、変動帯に位置し、地下水が豊富

### ●検討課題の例

- ・ 地震の影響
- ・ 断層・破碎帯の影響
- ・ 地下水(湧水)抑制対策
- ・ 花崗岩・堆積岩の透水性調査
- ・ 堆積岩における工学技術の実証等

## 深地層の研究施設の主な役割

- ・ 地質環境の調査や処分場の建設・操業に関する課題解決(破碎帯、湧水対策等)
- ・ 地上からの調査～地下施設での調査・埋設技術の実証
- ・ 安全規制を制度化していく上での具体的事例の提供
- ・ 国民が深地層の環境を体験・学習する場の提供

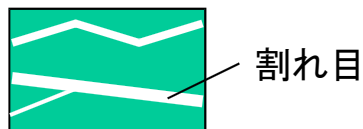
# 日本の地質と原子力機構の研究施設

- ・日本の地質は、結晶質岩（花崗岩など）と、堆積岩（泥岩など）に分けられる。
- ・結晶質岩と堆積岩では、地層処分にとって重要な岩盤や地下水の性質が異なる。
- ・地下研の地元協定：放射性廃棄物の持ち込み・使用はしない、将来処分場にしない、処分実施主体への譲渡、貸借は行わない、地域振興に協力。

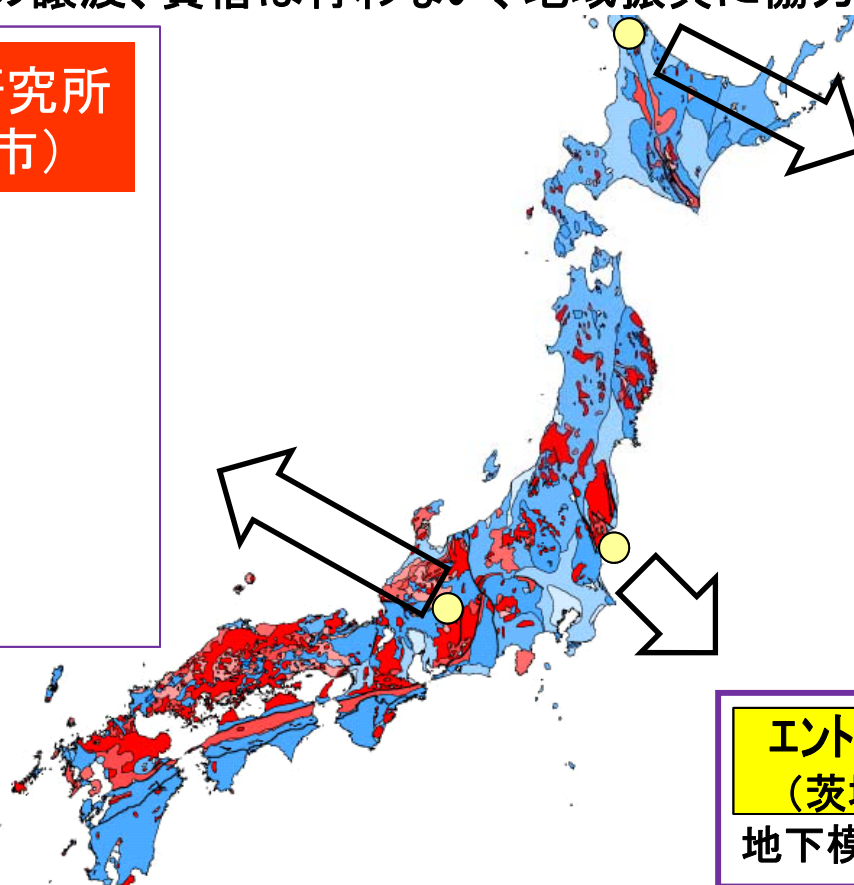
瑞浪超深地層研究所  
（岐阜県瑞浪市）

## 結晶質岩

- ・岩石は塊状で硬い
- ・地下水は岩盤中の割れ目を通る



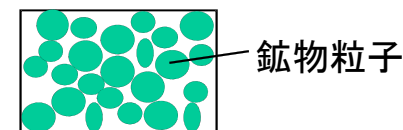
わが国の地質の分布  
（海拔：マイナス500m）



幌延深地層研究所  
（北海道幌延町）

## 堆積岩

- ・岩石は層状で軟らかい
- ・地下水は鉱物粒子の隙間に浸み込む



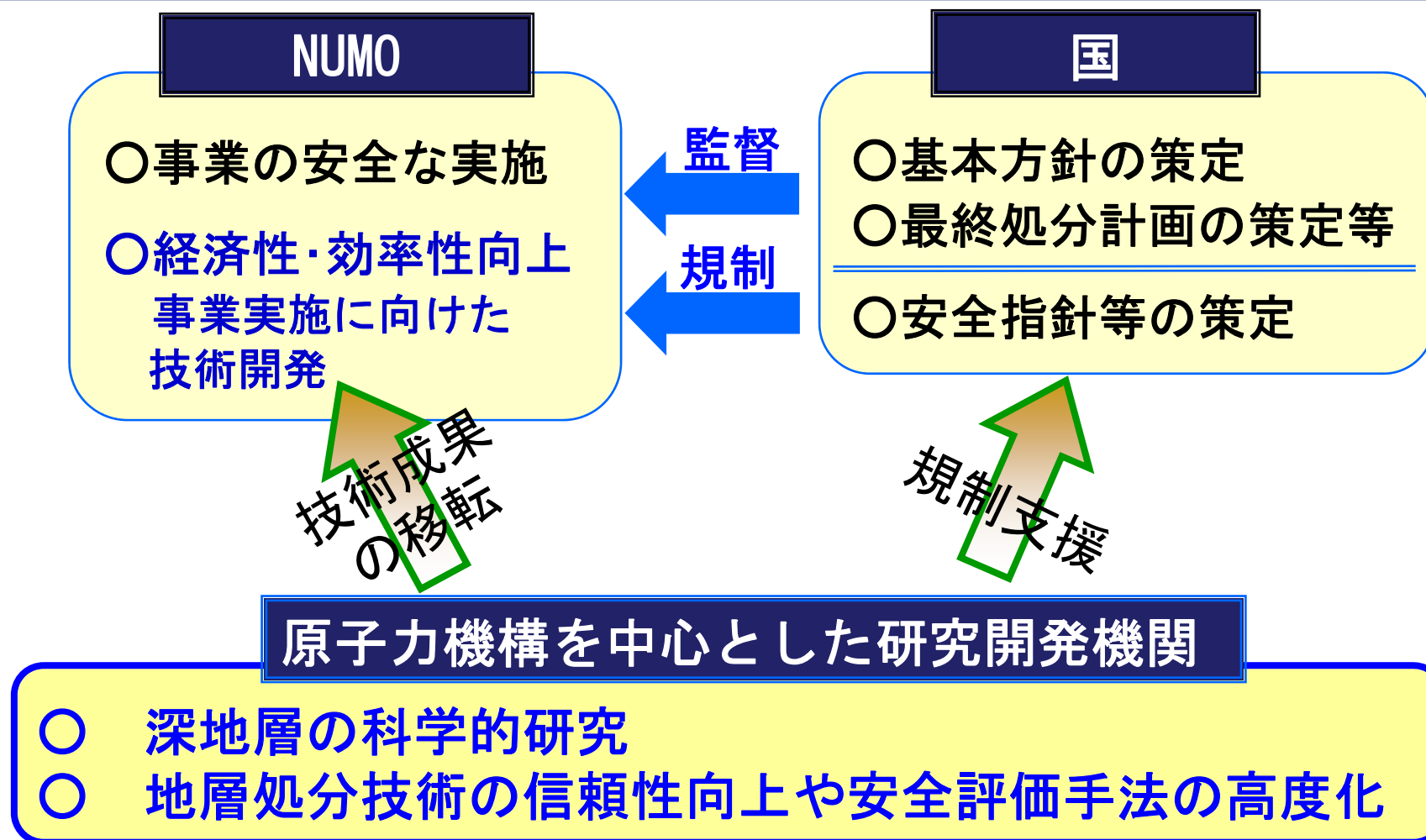
エントリー、クオリティ  
（茨城県東海村）  
地下模擬の試験施設

- ・ NUMOによる処分地選定の調査に先行して、必要な技術基盤を強化
- ・ NUMOは、結晶質岩と堆積岩の双方を対象に候補地を公募中



# 地層処分事業段階における研究開発の体制

- 研究開発の役割分担は、経済産業省・原子力機構等からなる「地層処分基盤研究開発調整会議」(H17.7設置)で全体計画を策定し、成果をレビュー。







# 高レベル放射性廃棄物を安全に 地層処分するための技術確認

## ■ 我が国における地層処分の技術的成立性の確認

- 1976年から実施されてきた幅広い地質条件を対象とした研究開発の結果、
  - 日本においても適切なサイトを選定すれば、海外と同等の安全性を有する高レベル放射性廃棄物の地層処分が実現できるということを提示  
「地層処分研究開発第2次取りまとめ(1999)」
  - 長半減期低発熱放射性(TRU)廃棄物に対して提示 「第2次TRUレポート(2005)」
- 上記を技術基盤として「最終処分法」が成立 (2000年、2008年改正)

## ■ 事業段階におけるこれまでの研究開発

- サイトが特定された際に適用可能とするための研究開発を継続強化
  - 現実的な地質環境条件への適用性実証
  - 処分場閉鎖後の長期安全性だけでなく建設・操業等の安全性の検討、関心のあるステークホルダーへの積極的な情報提供と合意形成
  - 科学技術の進歩や社会条件の変化に対応可能な技術的柔軟性の確保
  - 多様な情報の指数関数的な増加(情報爆発)に対応可能な知識マネジメント

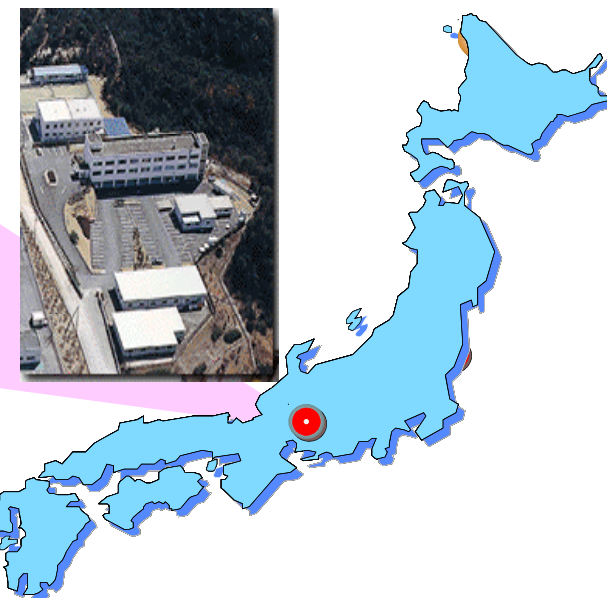
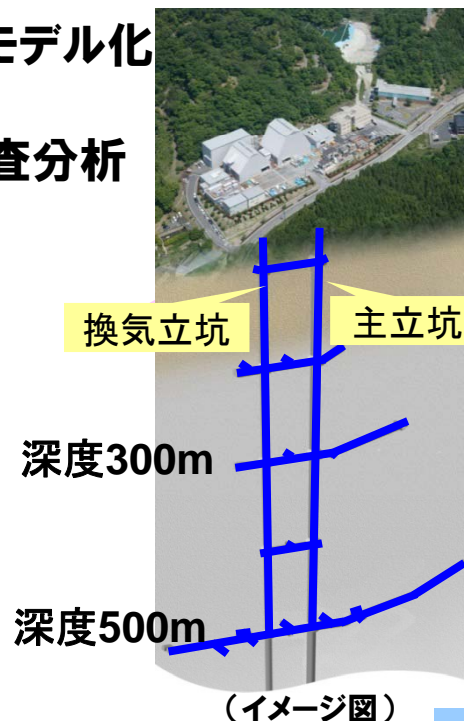




# 東濃地科学センター (瑞浪超深地層研究所)の成果

- ・ 深部地質環境(結晶質岩)の調査・モデル化技術開発実証
- ・ 地質環境の長期変動性に関する調査分析技術の開発

深度500m研究アクセス北坑道



地質環境調査技術の開発

亀裂性状把握と湧水量観測  
による亀裂ネットワークモデル実証



地下水流動や地球化学の研究

坑道掘削に伴う深部地下水  
特性評価モデルの検証



数百年～数千万年にわたる  
体系的年代測定技術の構築



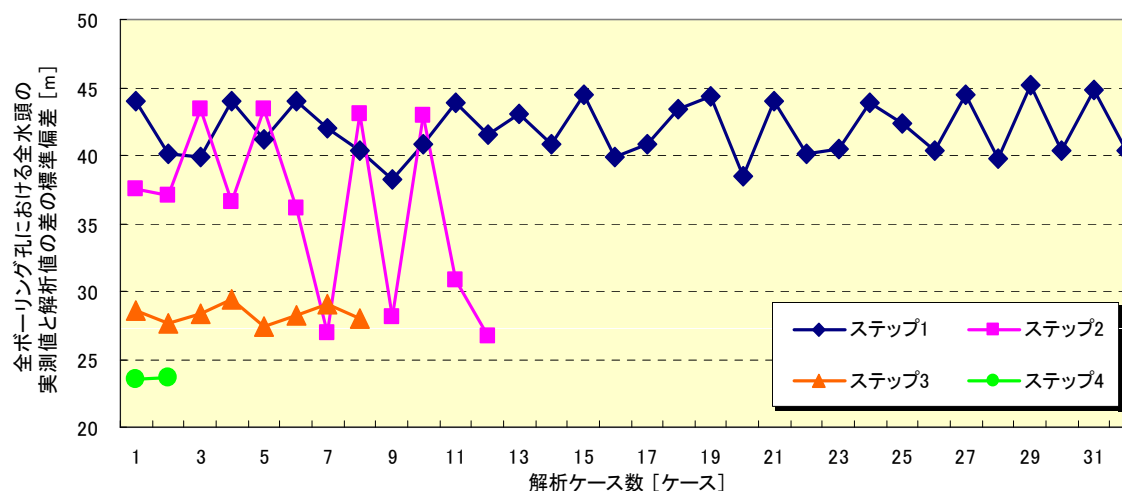
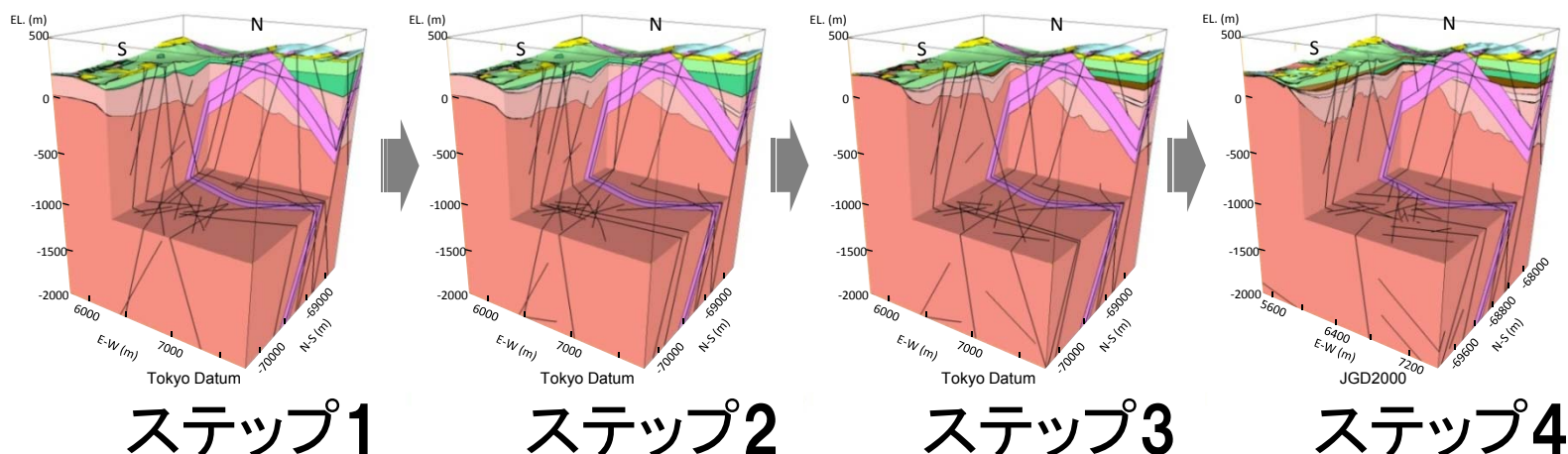
希ガス質量分析計 (K分析)

蛍光光度計 (Ar分析)

# 深地層の科学的研究(瑞浪URL)

## 地質環境の調査技術や評価手法の開発

- 調査研究の進展に応じて得られるデータ(地質学的不均質性や物質移行経路)に基づく、三次元地質構造分布の評価精度向上







# 地質環境の長期安定性に関する 年代測定技術の開発(東濃)

- 加速器質量分析装置を用いた宇宙線生成核種年代測定法

$^{14}\text{C}$ や $^{10}\text{Be}$ による 年代測定法を実用化

- 四重極型質量分析計などを用いた (U-Th) /He年代測定法

U, Th及びHeを定量する技術を整備し, (U-Th) /He年代測定法を実用化

- 希ガス質量分析計などを用いたK-Ar年代測定法

極細粒な自生雲母粘土鉱物を効率的に分離する技術を整備

- 高分解能のテフラ(火山砕屑物)同定手法

メルトインクルージョン(ガラス包有物)の化学組成によってテフラを同定する手法を開発



加速器質量分析装置

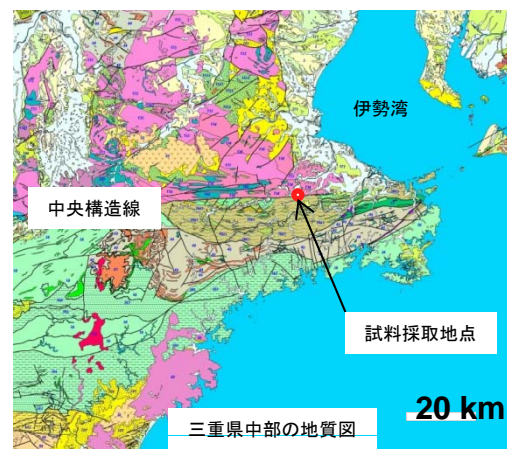


K-Ar年代測定装置

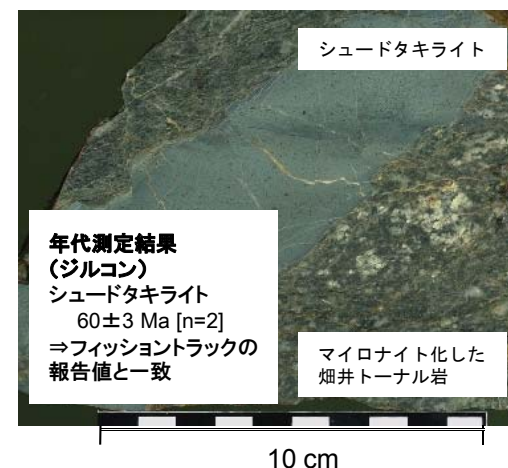


(U-Th) /He年代測定装置

研究事例: 三重県多気地域領家花崗岩中のシュードタキライトの(U-Th)/He年代



産業技術総合研究所地質調査総合センター (編)  
(2007) 20万分の1日本シームレス地質図データ  
ベース 2007年5月12日版. 産業技術総合研究所研  
究情報公開データベースDB084, 産業技術総合研  
究所地質調査総合センター.

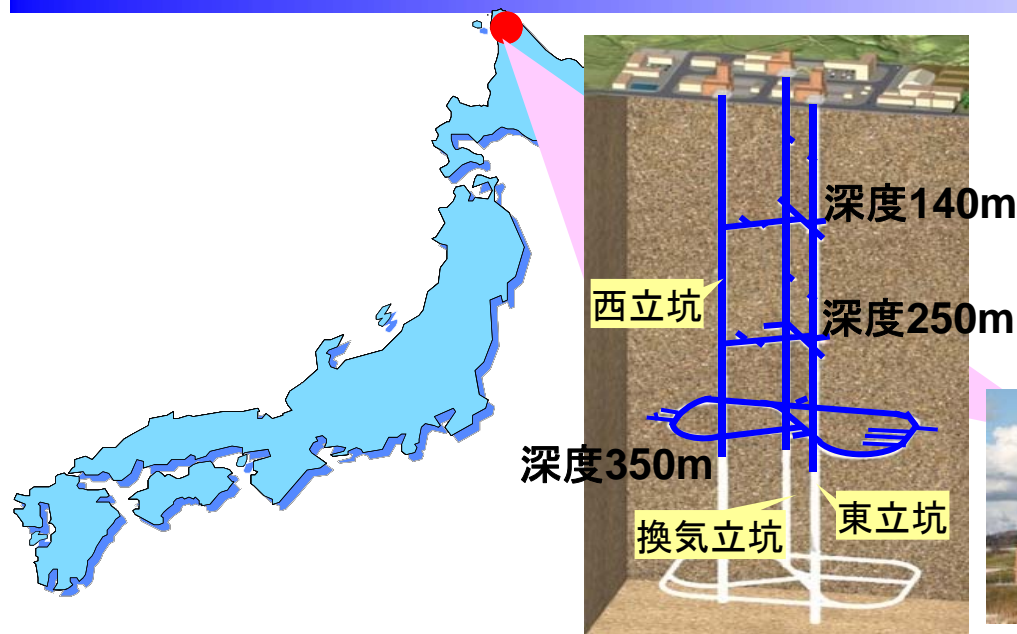


年代測定結果  
(ジルコン)  
シュードタキライト  
 $60 \pm 3 \text{ Ma}$  [n=2]  
⇒フィッシュトラックの  
報告値と一致

マイロナイト化した  
畑井トーナル岩

Yamada et al., 2012

# 幌延深地層研究所の成果

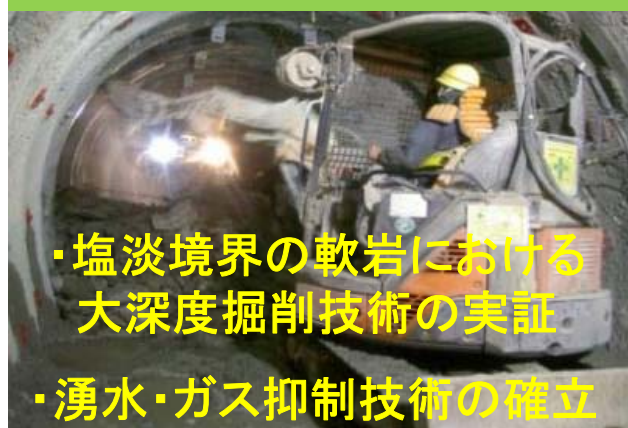


(イメージ図)

- 処分場の工学技術と実証研究
- 深部地質環境(堆積岩)の調査・モデル化技術の開発実証
- 沿岸域における地質環境の長期変動性に係る調査・解析技術の開発



## 深度350m調査坑道の掘削



## 支保技術の開発と施工



## 掘削に伴う応力変化の測定



セメントによる高pHプルームの長期安全性への影響緩和を目指す

### • 吹付けコンクリート

- 地上での模擬空洞による吹付け試験 (H18年度)
- 原位置試験用配合と試験計画設定 (H19年度)
- 幌延URL 140m坑道での原位置試験\* (H21年度)
- 幌延URL 250m坑道での原位置試験\* (H22～H23年度)
- 幌延URL 350m坑道での原位置試験\* (H24～H25年度)

( \* 周辺岩盤及び地下水の分析を継続中 )

### • 覆工コンクリート

- 室内特性試験及び原位置試験用配合選定 (H20年度)
- 幌延URL立坑底部で原位置試験\*\* (H26年度)

( \*\* 周辺岩盤及び地下水の分析をH26年度から実施予定 )

### • グラウト材料

- 原位置試験用配合／試験計画設定 (H20年度)
- 幌延URL 250m坑道での原位置試験 (H21年度)
- 幌延URL 250m坑道から350m坑道への実施工\*\*\* (H24年度)

( \*\*\* 坑道周辺の透水試験を継続的に実施予定 (H25年度～) )



140m調査坑道を用いた  
吹付け試験の様子



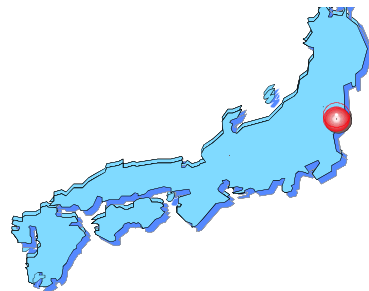


# エントリー・クオリティ(室内試験)

- ・ 地下模擬の実験設備の整備と核種移行試験
- ・ 処分場の設計技術開発
- ・ 処分システムの長期安全性に関する予測技術の開発
- ・ 技術レポート・データベースの定期公開、WEB化



エントリー



クオリティ



粘土材とヒータ



模擬岩石



entry	Solid Phase Group	Solid Phase	water type	K <sub>d</sub>	Ref.
Bentonite (Clay mineral)	bas benton	granodiorite	1.00E+01 ~ 1.50E+01	Altard and Beal019	
Bentonite (Clay mineral)	bas benton	granodiorite	1.00E+01 ~ 1.20E+01	Altard and Beal019	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag1105	1.50E+00	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag230	2.00E+01	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag230	2.51E+01	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag1105	3.90E+00	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag230	5.01E+01	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite/quartz010 900	Ag1105	7.94E+00	Altard et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite	de-ionized water #4	1.00E+02	Barton et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite	de-ionized water #4	1.10E+02	Barton et al 019190	
Bentonite (Clay mineral)	bentonite	de-ionized water #4	1.20E+01	Barton et al 019190	

[http:// migrationdb.jaea.go.jp](http://migrationdb.jaea.go.jp)

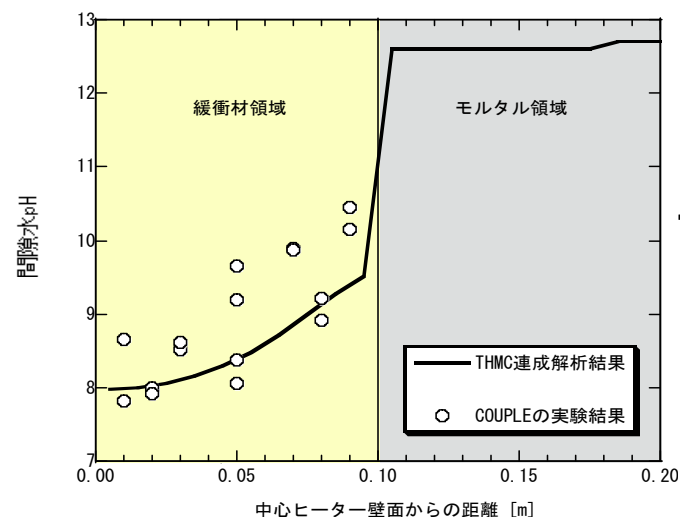
人工バリアにおける熱-水-応力-化学連成モデルの開発、人工バリア(オーバーパック、緩衝材)基本特性データベース開発

放射性核種を用いた深部地下条件における核種移行に関するデータ取得(溶解度/鉱物への収着係数など)とデータベース開発

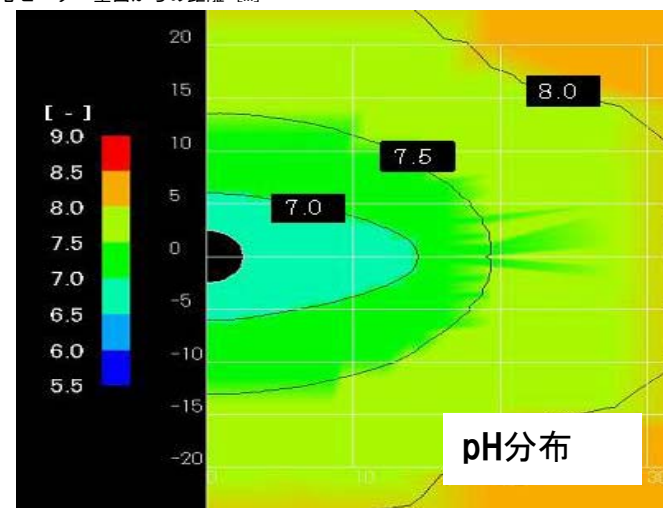
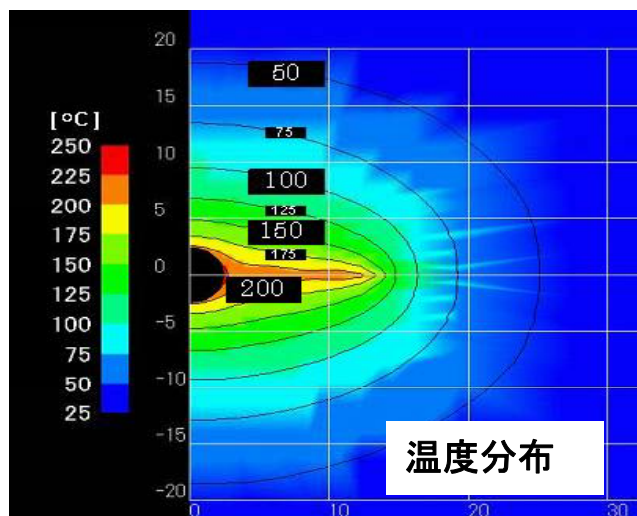


# 処分場ニアフィールド長期変遷過程の可視化や人工バリア性能把握のための数値解析技術の開発

- オーバーパックの腐食や核種移行の場となる、人工バリアやその周辺環境の熱-水-応力-化学の時空間変化を数値実験により表現する手法を開発



180日後のpH分布  
と解析結果





# 地層処分研究開発における情報爆発への対応

- 過去20年以上にわたる研究開発成果の統合は、その間に経験を積んだ、限られた専門家チームによって実施してきたが、  
...情報の爆発的增加によって作業が困難  
...経験を積んだ専門家が引退する時期
- そこで、次世代型知識マネジメントを開発—CoolRep + JAEA KMS



## 地層処分(HLW/TRU廃棄物)計画のスケジュール

H3  
(1992)

H12 (1999)  
/TRU-1(2000)

TRU-2 / H17  
(2005)

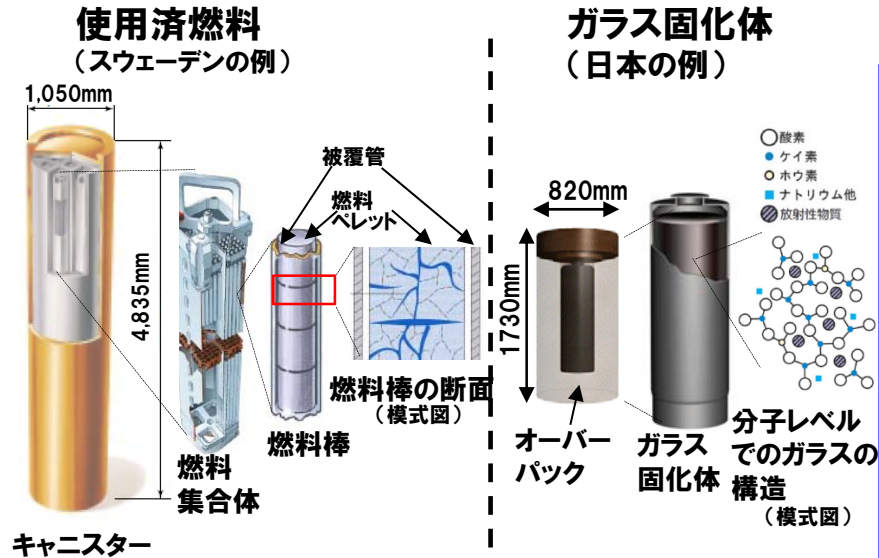
H22  
(2010)

処分場の許認可  
(2030s)



# 使用済燃料の直接処分技術の開発

## 使用済燃料とガラス固化体の違い



- 使用済燃料はガラス固化体と比べて
- ・ウラン/プルトニウムが多量に存在
  - ・燃料棒内の固相、ガス相に核種が存在
  - ・発熱量が大きい
  - ・放射線量が大きい
  - ・臨界可能性がある 等の特性

日本の地下水を対象とした溶解現象や放射線影響等、ガラス固化体と差異がある使用済燃料特有の研究開発が必要

## 【概要】

我が国における使用済燃料の直接処分に関する技術的基盤の構築を目的として、直接処分に特有の事項に着目した研究開発を実施。

## 【研究内容】

### ① 人工バリア概念研究

使用済燃料の特徴(放射線影響、臨界可能性等)を考慮した人工バリア概念の検討を実施。必要な基盤データ(人工バリア材料の耐久性等)を実験等により蓄積する。

### ② 安全評価研究

直接処分に特有な以下の現象等に着目し、それらのモデル開発を進めるとともに、必要となるデータの蓄積を実験等により行う。

- ・使用済燃料の溶解と核種の浸出挙動
- ・廃棄体近傍の地下水の放射線分解による酸化還元状態の変化とその核種移行への影響等

### ③ 総合性能評価研究

使用済燃料から溶解した核種が、地下から地上へどのように移行していくかのシナリオを整備するとともに、そのシナリオに上記①②で開発したモデルや得られたデータを取り込み、地上における線量評価を行う。

### ④ 国際共同研究

スウェーデン、米国等との国際共同研究を実施する。

## 【スケジュール】

H25年度: 第1次取りまとめ(直接処分の実現可否に関する見通しと課題)

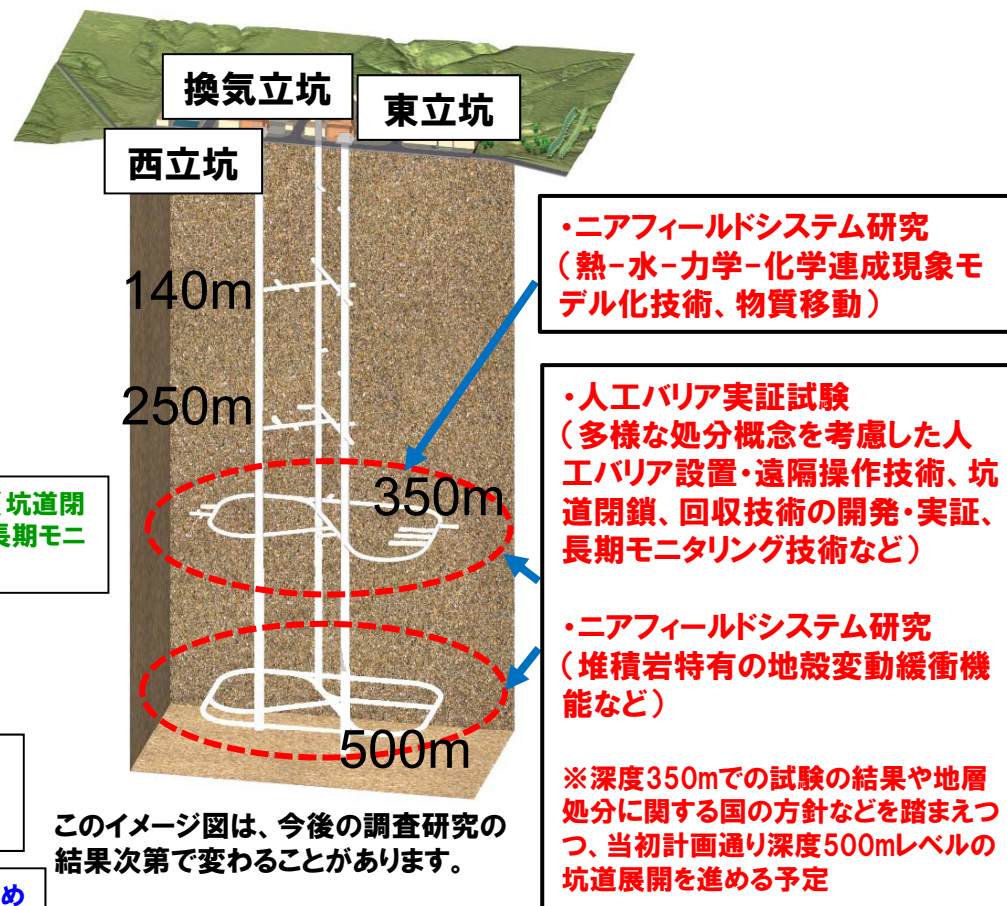
H29年度: 第2次取りまとめ(直接処分の技術的信頼性)



# 今後の研究開発における重要課題

- 1) 超長期の安全性評価のための予測技術の信頼性向上
  - 3.11を踏まえたシビアアクシデントに対する地層処分の安全性検討  
(巨大地震・津波の影響、とくに操業時など)
- 2) 処分場建設・操業・閉鎖に係る工学技術の実証
  - 人工バリアの実規模性能実証試験
  - 遠隔制御、自動化技術の開発・実証
- 3) 使用済燃料管理政策の柔軟性確保のための処分概念の検討
  - ステークホルダーの合意形成に資する「可逆性や回収可能性」、  
モニタリングを考慮した処分場システムの開発
  - 使用済燃料直接処分の研究開発の充実
- 4) 地層処分の知識マネジメントシステム開発の継続
  - 先端的ITや知識工学を利用した地層処分の学際的知識のマネジメント
  - 人材育成と将来世代への伝達
- 5) 地層処分の安全規制基準の整備

**幌延深地層研究所**



## 地下施設全体イメージ図



## 3. まとめ

### 1. 工学技術の実証整備

候補サイトに対し、直ちに適用できるように地質環境調査、大規模技術および安全規制評価などの工学技術の実証整備

### 2. 恒常的体制の整備と知識化

地層処分の長期事業期間および安全確保の超長期性を考慮した中長期計画の実施と規制を、恒常的に支援できる体制整備と研究開発成果の知識化が重要

### 3. 地層処分技術:21世紀のチャレンジ

#### 1) 受入れ地域における信頼と科学技術的プライドの獲得

地層処分技術の社会的受容と受入れ自治体における先進性(研究開発機能)の確保、公開性と受入れ地域における対話の重要性

#### 2) 代替研究開発、とくに減容・有害度低減の分離変換技術の開発

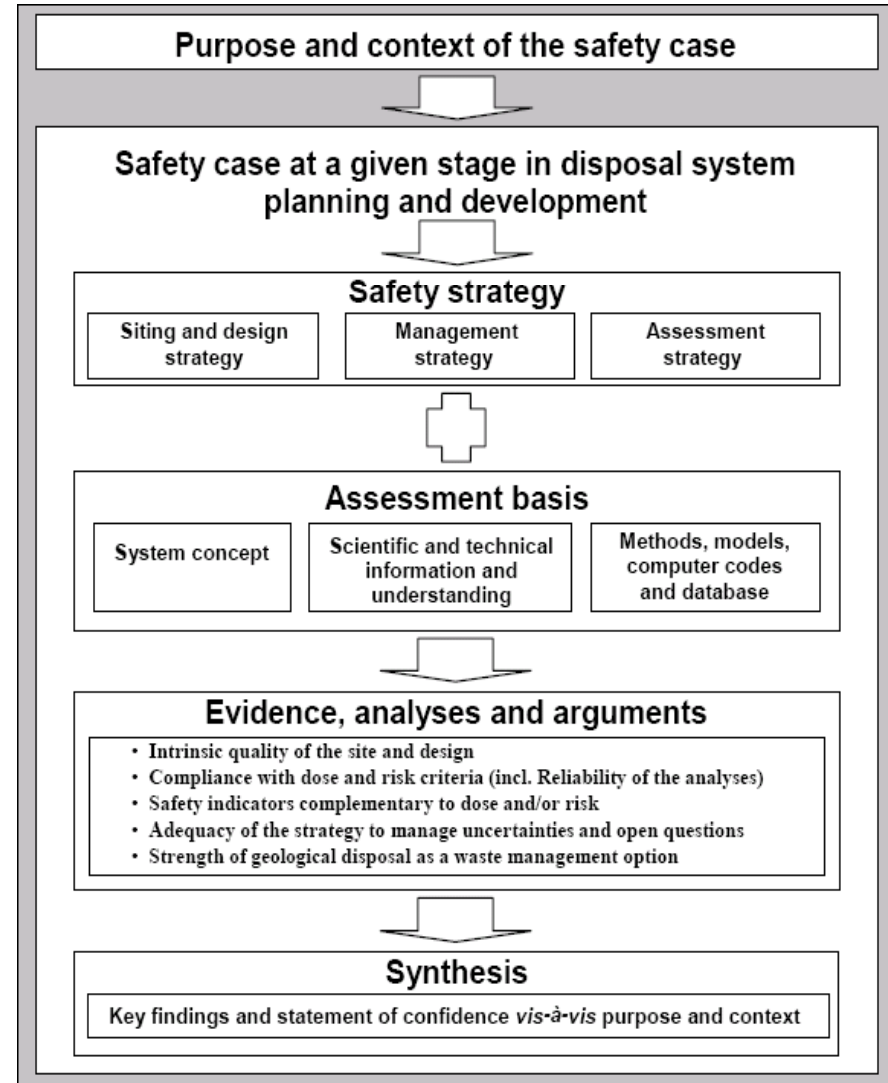


## 参考資料



# セーフティケースとは？

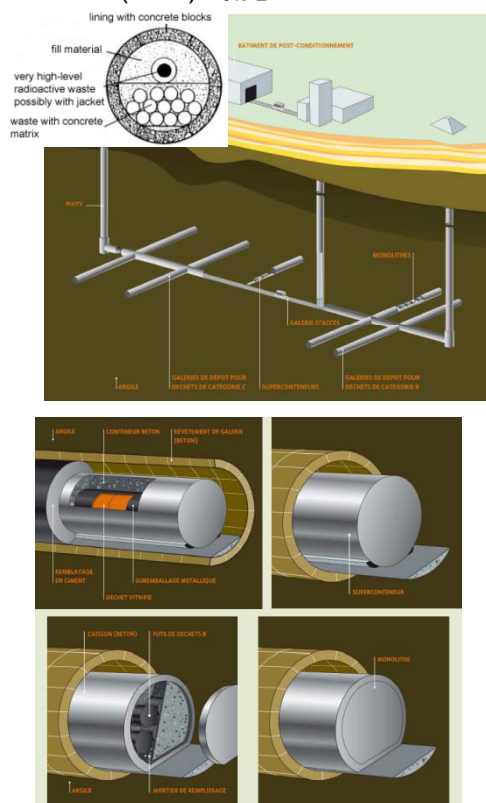
- 多様な論拠に基づく地層処分システムの長期的安全の主張及びその信頼性の評価
- 与えられた前提条件(対応する意思決定の種類、安全基準、技術基準など)の下でセーフティケースに含めるべき論拠の要件
  - 適切なサイトが選定されていること
    - ・ 地質環境の長期安定性
    - ・ 好ましい地質環境特性(還元性・小さな地下水流量と流速)
  - 処分場が適切に設計されていること
    - ・ 適切な設計思想(多重バリア、頑健性、安全裕度、品質管理、経験の豊富な材料の使用、経済性)
    - ・ 建設・操業・閉鎖技術の実現可能性
  - 信頼できる安全評価手法を用いていること
    - ・ 網羅的かつ体系的なシナリオ解析
    - ・ 評価モデルの検証及び確認
    - ・ ソフトウェアやデータの品質管理
    - ・ 最新の科学技術的知見との整合性
    - ・ 不確実性への対処
  - 求められるレベルの安全性を有していること
    - ・ 長期的安全性が基準を満足すること
    - ・ 不確実性を考慮した補完的安全性の説明
    - ・ 閉鎖前安全性



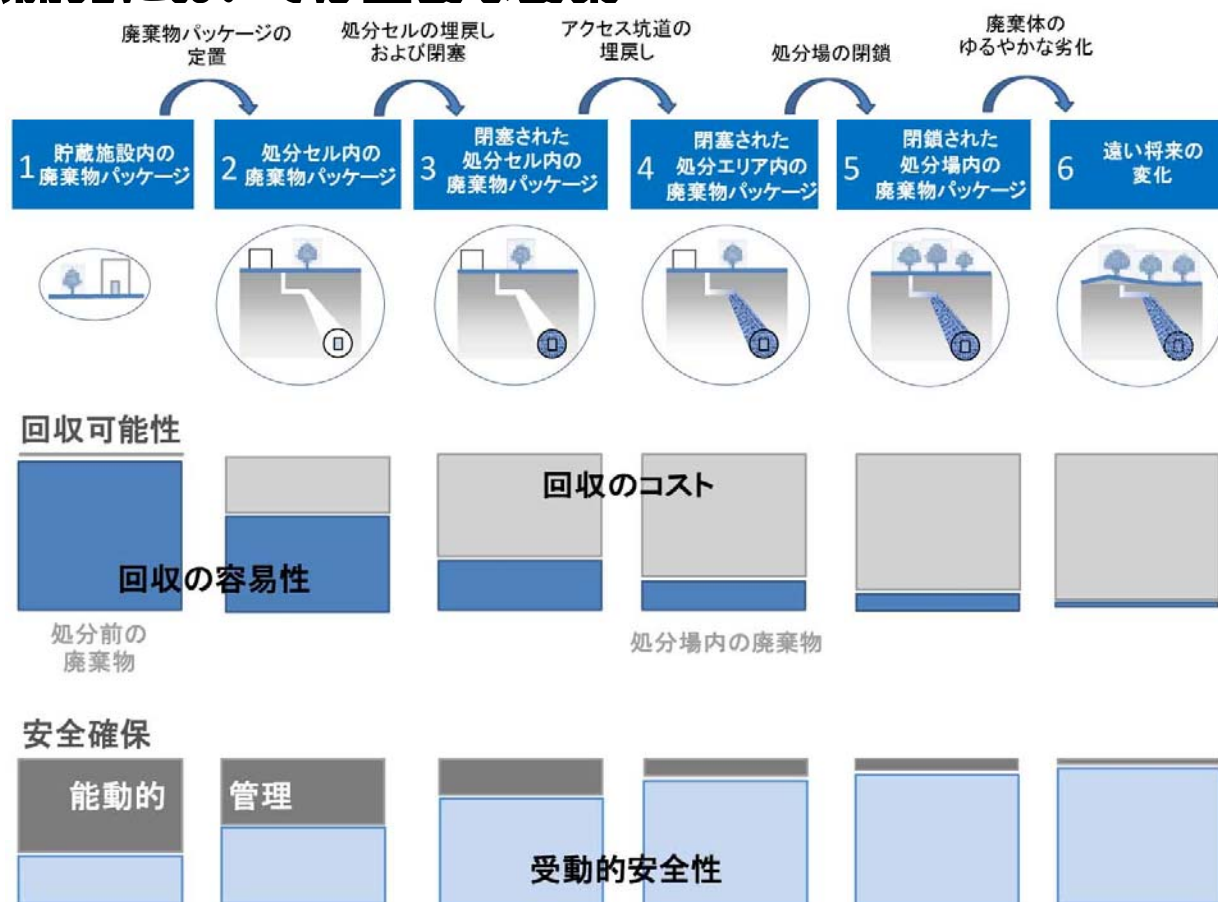
- **可逆性**: 地層処分のある段階から以前の段階に計画を戻すことを可能とすること
- **回収可能性**: 地下に埋設した廃棄物を回収することを可能とすること
- 現代的な地層処分概念開発においては重要な要素

## 回収可能性を考慮した人工バリアの例

### SAFIR(1989)の概念



ベルギー(ONDRAF/NIRAS)の共処分概念

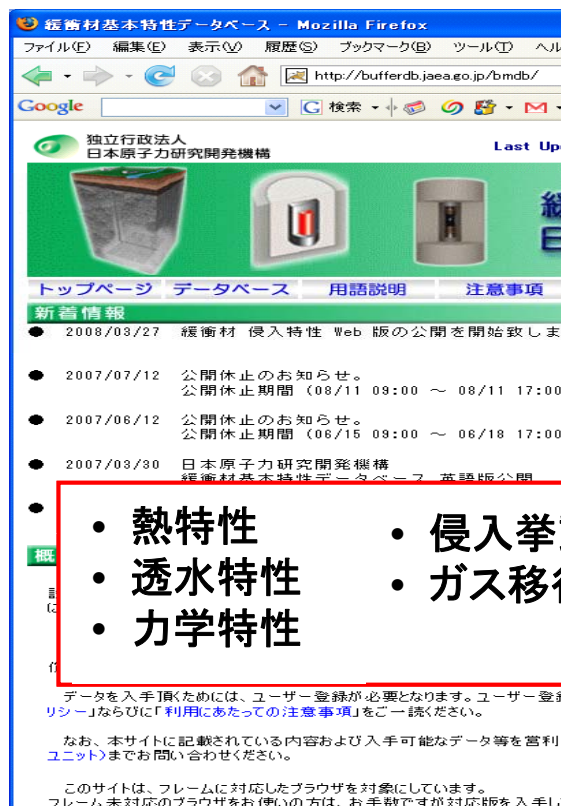


処分事業の各段階に対応した回収可能性の程度(容易さvs回収コスト), 能動的管理への依存度(能動的vs受動的)の推移(NEA, 2013より)



# 処分場候補サイトへの工学技術適用を 支援する知識の蓄積

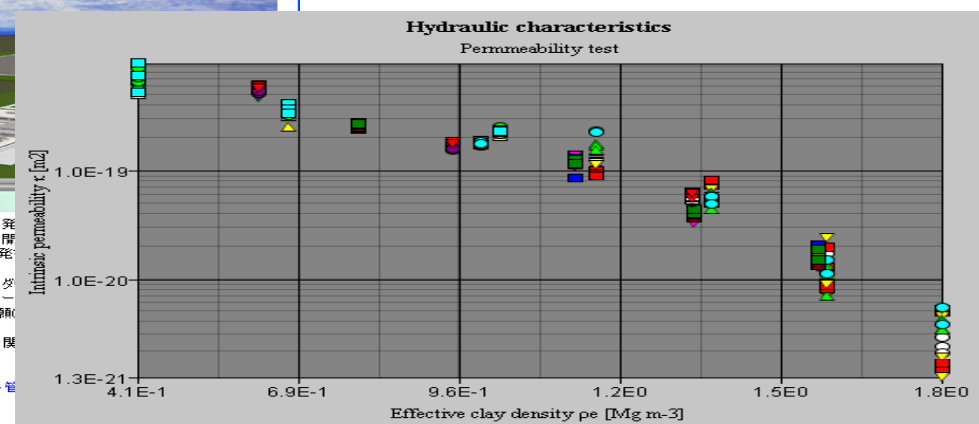
データベースの  
トップページ



<input type="checkbox"/> ベントナイト系材料	<input type="checkbox"/> クニゲル V1 (Na型)	<input type="checkbox"/> クニゲル OT-9607 (Na型)
<input type="checkbox"/> 水質	<input type="checkbox"/> 蒸留水	<input type="checkbox"/> 人工海水
<input type="checkbox"/> イオン強度 I [mol dm <sup>-3</sup> ]	<input type="checkbox"/> 幌延地下水 (HDB-6)	<input type="checkbox"/> NaCl 溶液
<input type="checkbox"/> 乾燥密度 $\rho_d$ [Mg m <sup>-3</sup> ]		
<input type="checkbox"/> ケイ砂混合率 $R_s$ [wt%]		
<input type="checkbox"/> 有効粘土密度 $\rho_e$ [Mg m <sup>-3</sup> ]		
<input type="checkbox"/> 試験温度 T [°C]		

➤ 密度や砂の混合割合、試験に使用した溶液の水質、試験温度などによる検索

検索機能(透水特性を一例)

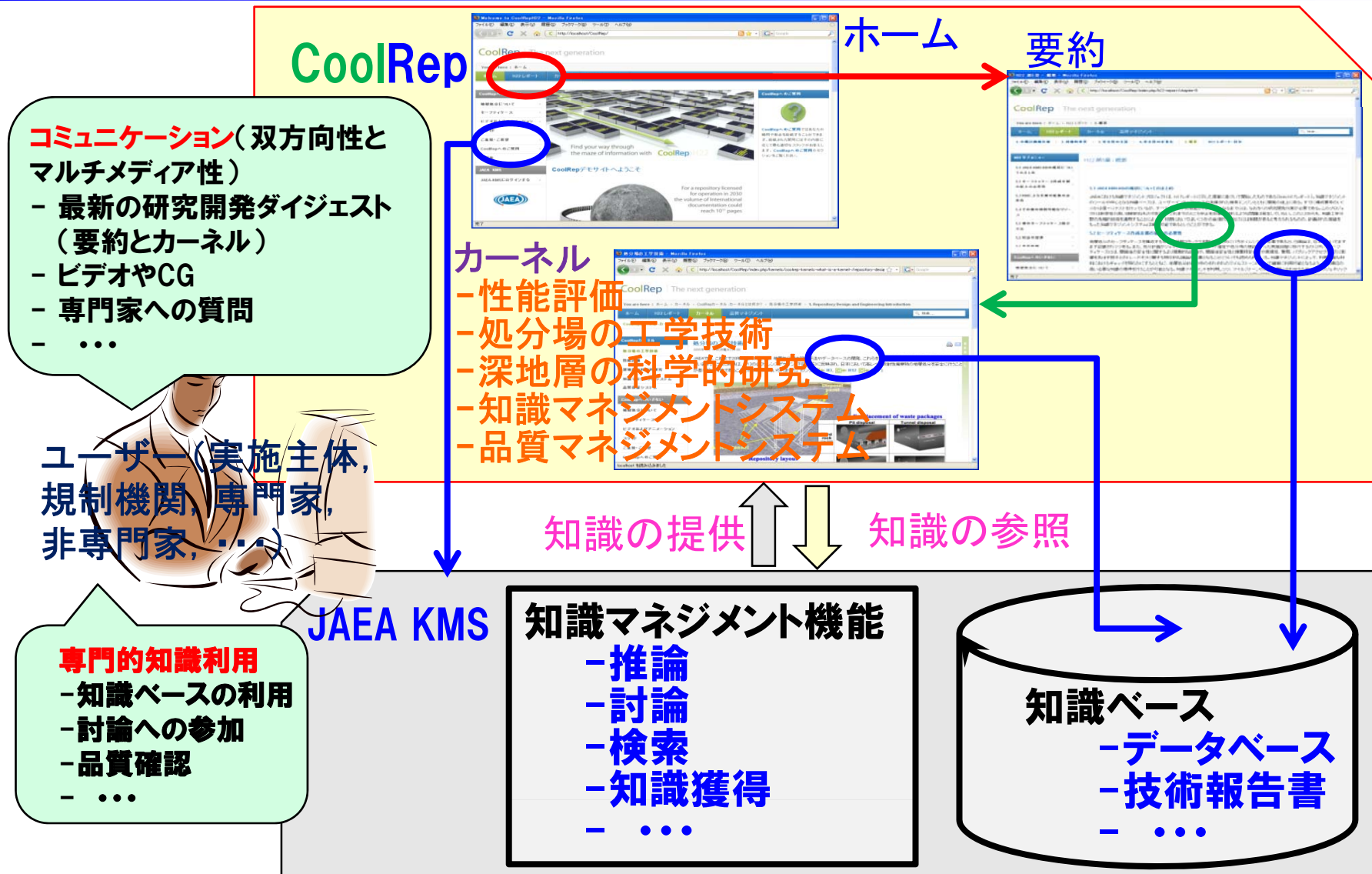


ロバストな人工バリア性能の鍵となる緩衝材に関する包括的なデータベースの開発、特に重要な海水系地下水条件に対応した緩衝材基本特性データの拡充





# 知識ベースの構築： CoolRep/JAEA KMSの構造





# 米国ユツカマウンテン処分場許認可申請書

## 総合安全評価(TSPA: Total System Performance Assessment)の**反復実施**

- TSPA 1991, 1993, 1995
- TSPA-VA (Viability Assessment) 1998
- TSPA-SR (Site Recommendation) 2001
- **TSPA-LA (Licensing Application) 2008**



申請書本文ー  
約1万ページ

→ **共和党政権下で計画  
が進められてきたが  
2009年の政権交代で  
現政権の民主党に  
よって中止**

知識統合

関連データ・情報ー約3,000万ページ

# 地層処分の技術基盤－学際的な知識

