

核燃料サイクルとバックエンドの基礎

宮原 要

日本原子力研究開発機構

平成22年10月30-31日

週末基礎講座 於福井大学

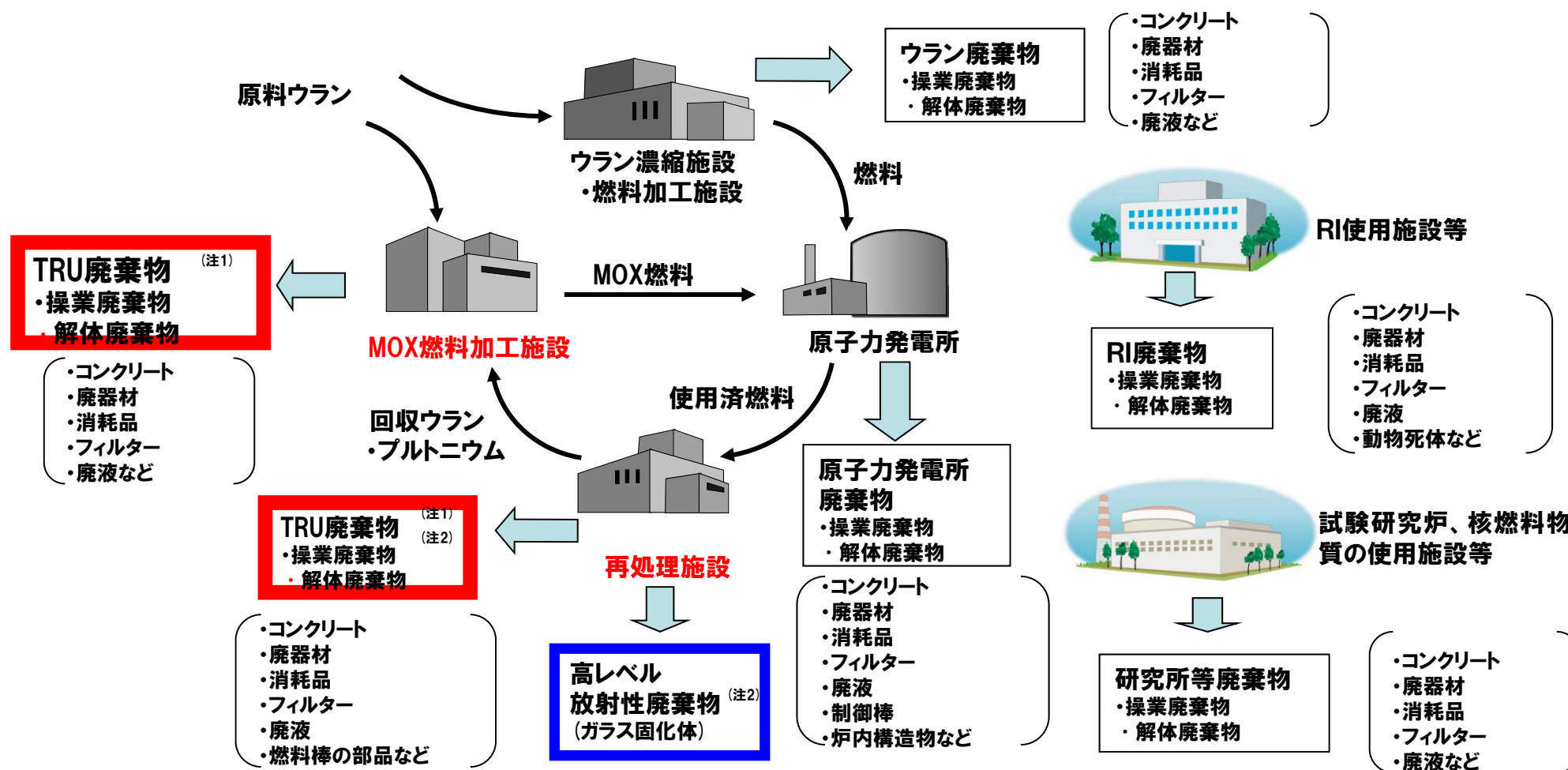
内容

- 放射性廃棄物はどこから生じるのか？
- 高レベル放射性廃棄物とは？
- TRU廃棄物とは？
- なぜ地層処分なのか
- 地層処分で安全に処分することはできるのか
 - 安定な地層とは？
 - 人工バリアや地下施設をつくるための技術は十分か
 - 仮に放射性物質が漏れだした時はどうなるのか
- わが国の地層処分計画は？
- 研究開発はなぜ行うのか

放射性廃棄物はどこから生じるのか？

放射性廃棄物の発生元

放射性廃棄物は、原子力発電所や再処理施設、ウラン濃縮・燃料加工施設などの核燃料サイクル施設、医療機関や研究機関等の操業や廃止措置に伴い発生

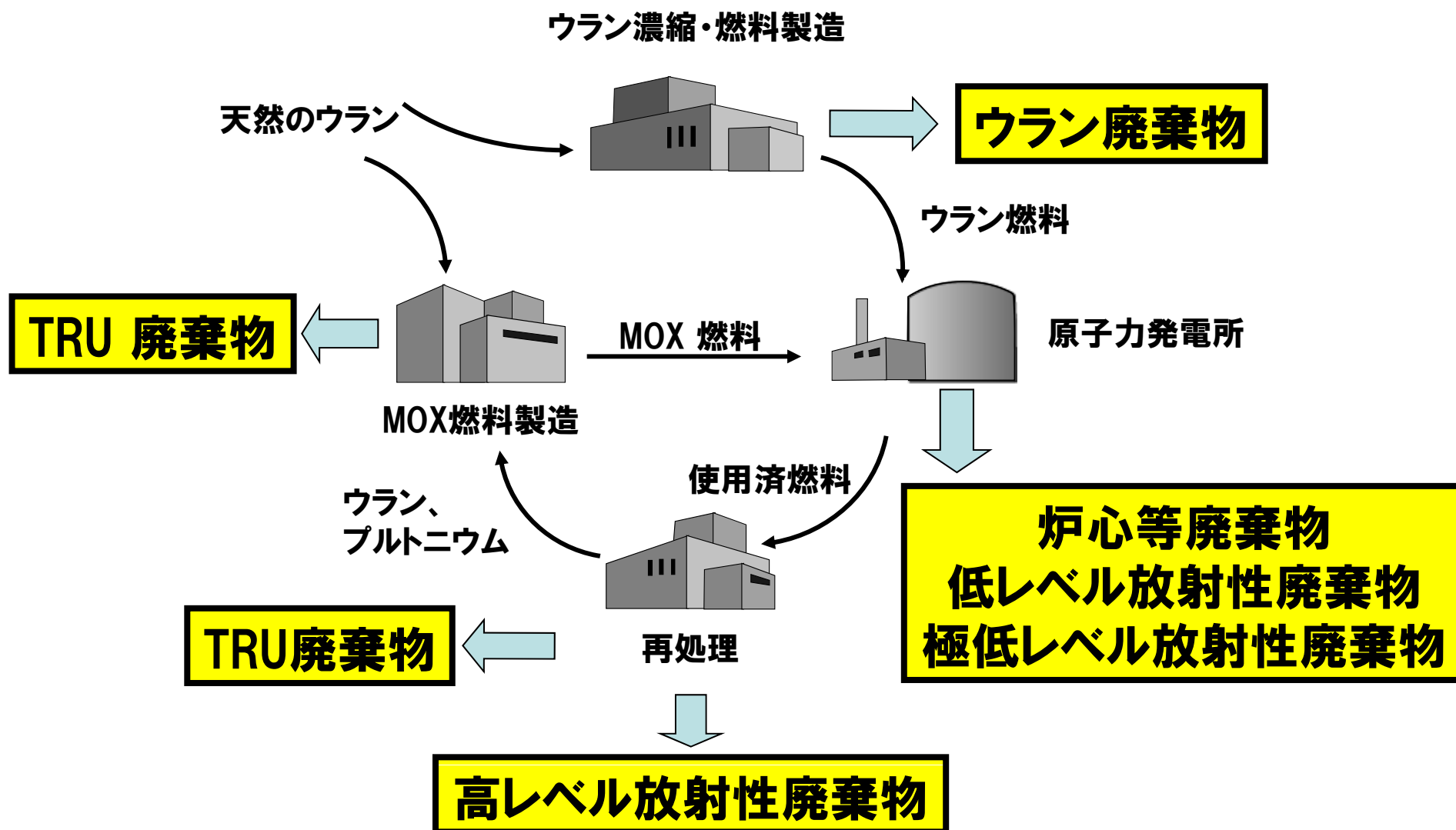


(注1) TRU廃棄物:超ウラン核種を含む廃棄物、

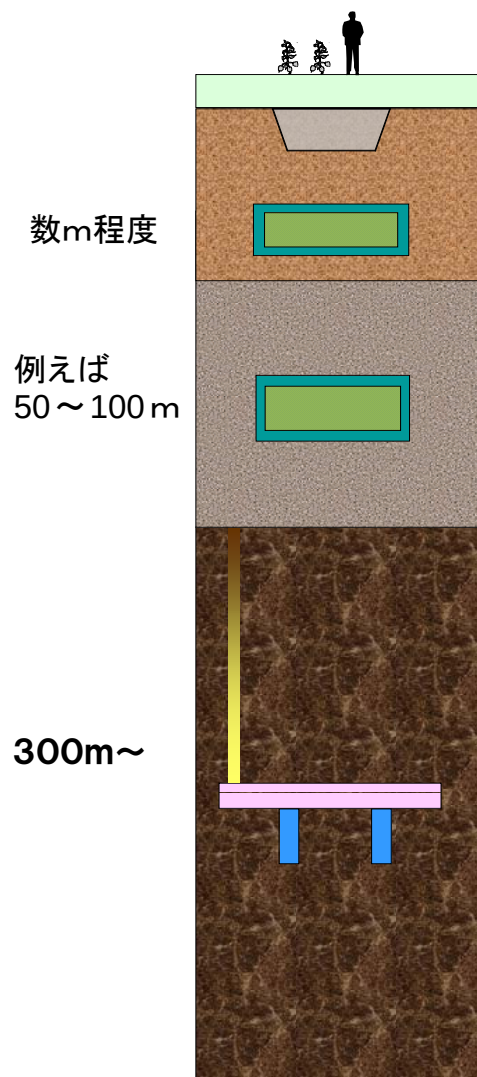
超ウラン核種 (Trans-uranium):ウラン (U: 原子番号92) よりも原子番号が大きい元素(核種)の総称、ネプツニウム (Np)、プルトニウム (Pu) などの人工放射性核種の総称。

(注2) 海外からの返還廃棄物を含む

わが国における核燃料サイクルと放射性廃棄物



放射性廃棄物の種類と処分



トレンチ処分

放射能の極めて低いもの

施設の解体等で発生した
コンクリート・金属等

コンクリート
ピット処分

放射能の比較的低いもの

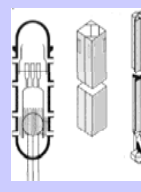
濃縮廃液や使用済樹脂、焼却灰や
フィルター等を溶融・圧縮により減容
したものをセメント等で固化したもの等

余裕深度処分
(一般的な地下利用
に十分余裕を持った
深度への処分)

放射能の比較的高い発電所廃棄物



炉内構造物



制御棒等

地層処分

高レベル放射性廃棄物



ガラス固化体

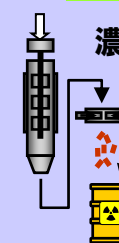


JAEC
茨城県東海村



日本原燃(株)
低レベル放射性
廃棄物埋設センター
(青森県六ヶ所村)

TRU廃棄物の一部



濃縮廃液等

難燃性廃棄物

不燃性廃棄物

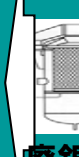
TRU廃棄物の一部



ハル



エンドピース



廃銀吸着材

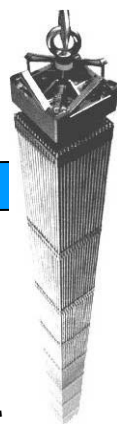
高レベル放射性廃棄物とは？

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)



原子力
発電所

使用済燃料



再処理工場

再処理

約95
～97%

ウランとプルトニウムを回収し、燃料として再利用

約3～5%

核分裂生成物等を含む放射性廃液

ガラス原料

ガラス溶融炉

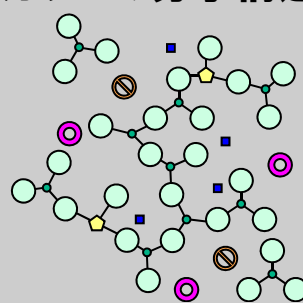
溶融ガラス

溶融ガラス

キャニスター
(ステンレス製容器)

固化ガラス

ガラスの分子構造



(模式図)

ガラス固化体

- ・ 高さ: 約 1.3 m
- ・ 外径: 約 40 cm
- ・ 重さ: 約 500 kg
- ・ 固化ガラス容積: 約150ℓ

100万キロワットの原子炉を
1年間運転 ⇒ 約30本

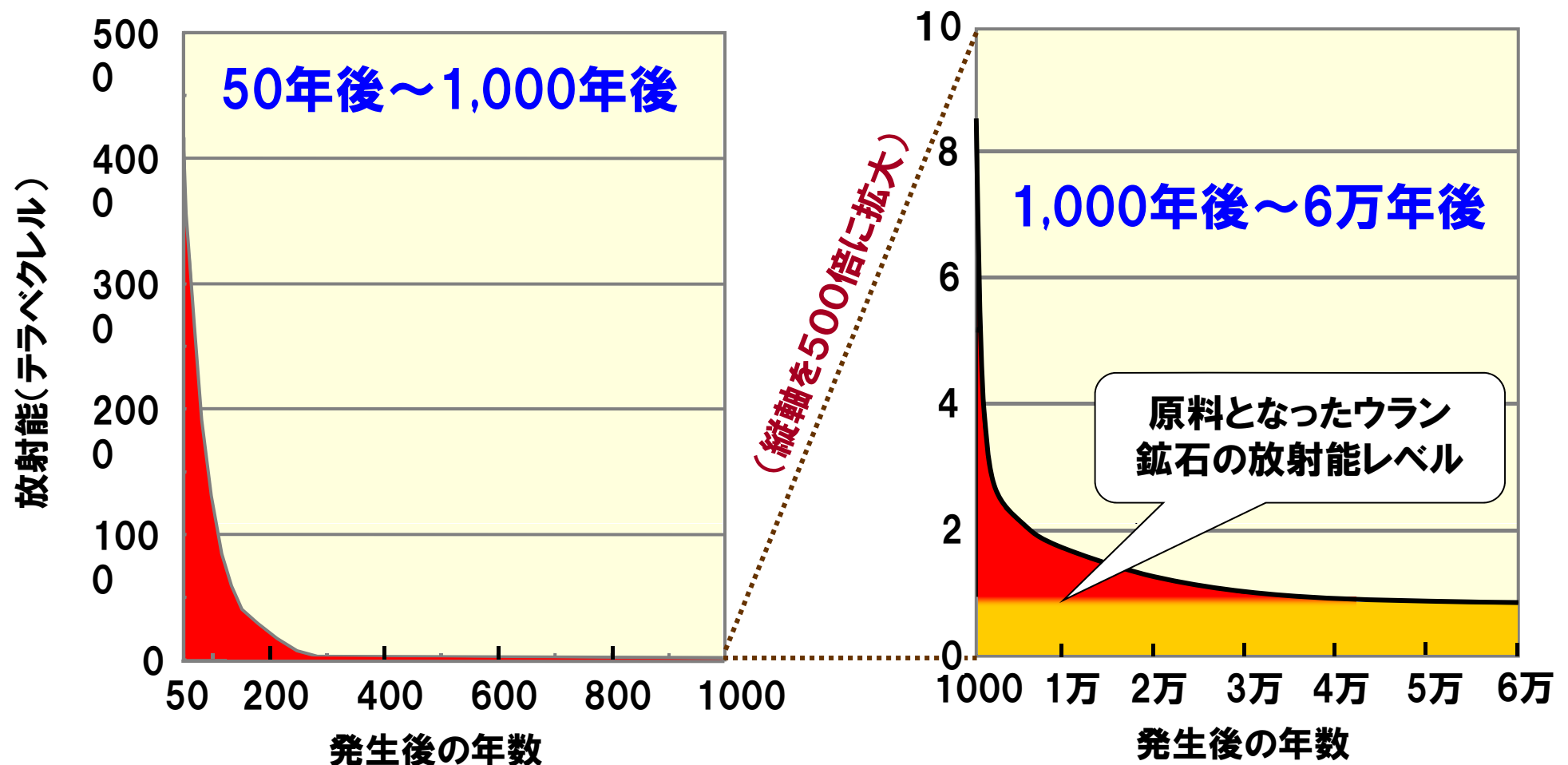


再処理により発生した廃液を
ホウケイ酸ガラスに混ぜて
約1,200℃で溶融したものを
ステンレス容器に注入・固化

ガラス固化体の放射能

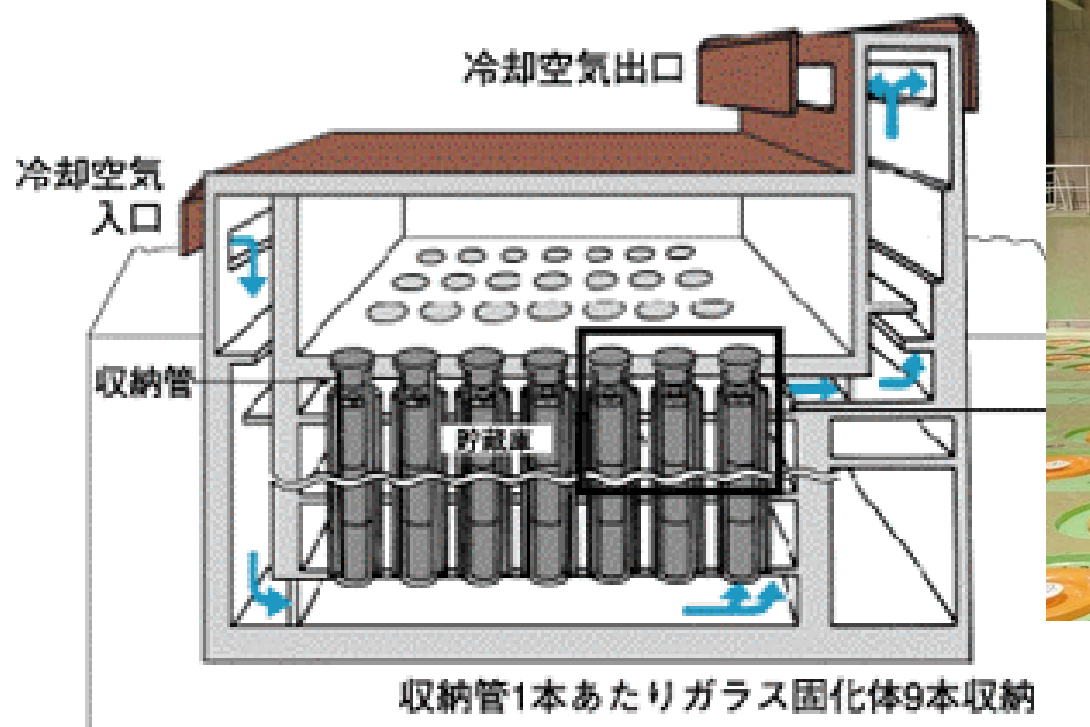
8

- ・発生直後は高い放射能→時間の経過とともに減少(千年で3千分の1)
- ・数万年でウラン燃料の原料となったウラン鉱石の放射能レベル



ガラス固化体は、どこにあるのか？

・30年～50年、地上で保管・冷却した後、地層処分



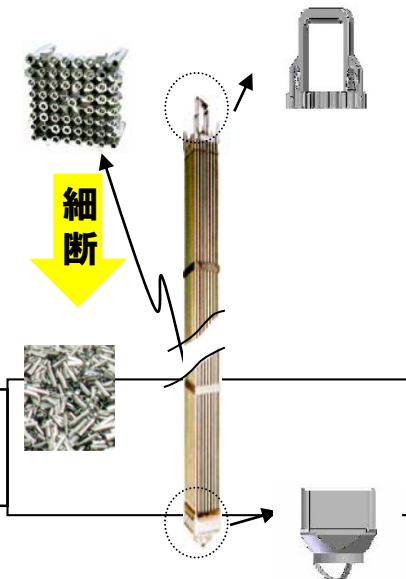
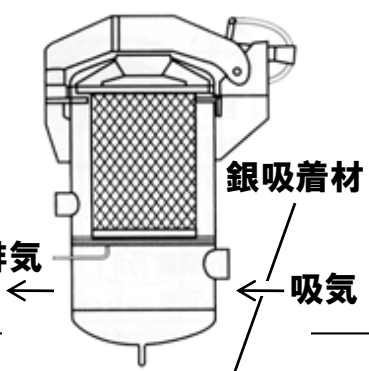
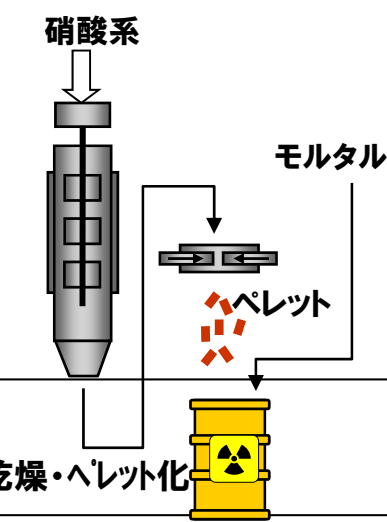
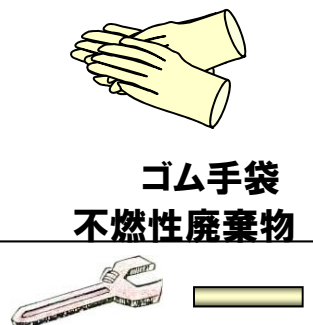
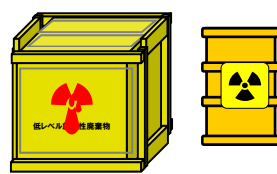
高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター
青森県六ヶ所村、日本原燃(株)

- ・ガラス固化体の国内保管量: 1,614本(2008年4月末現在)
- ・発生済みの使用済燃料: 21,300本相当(2007年12月末現在)
- ・今後発生する使用済燃料: 累計約4万本 相当(2021年頃)

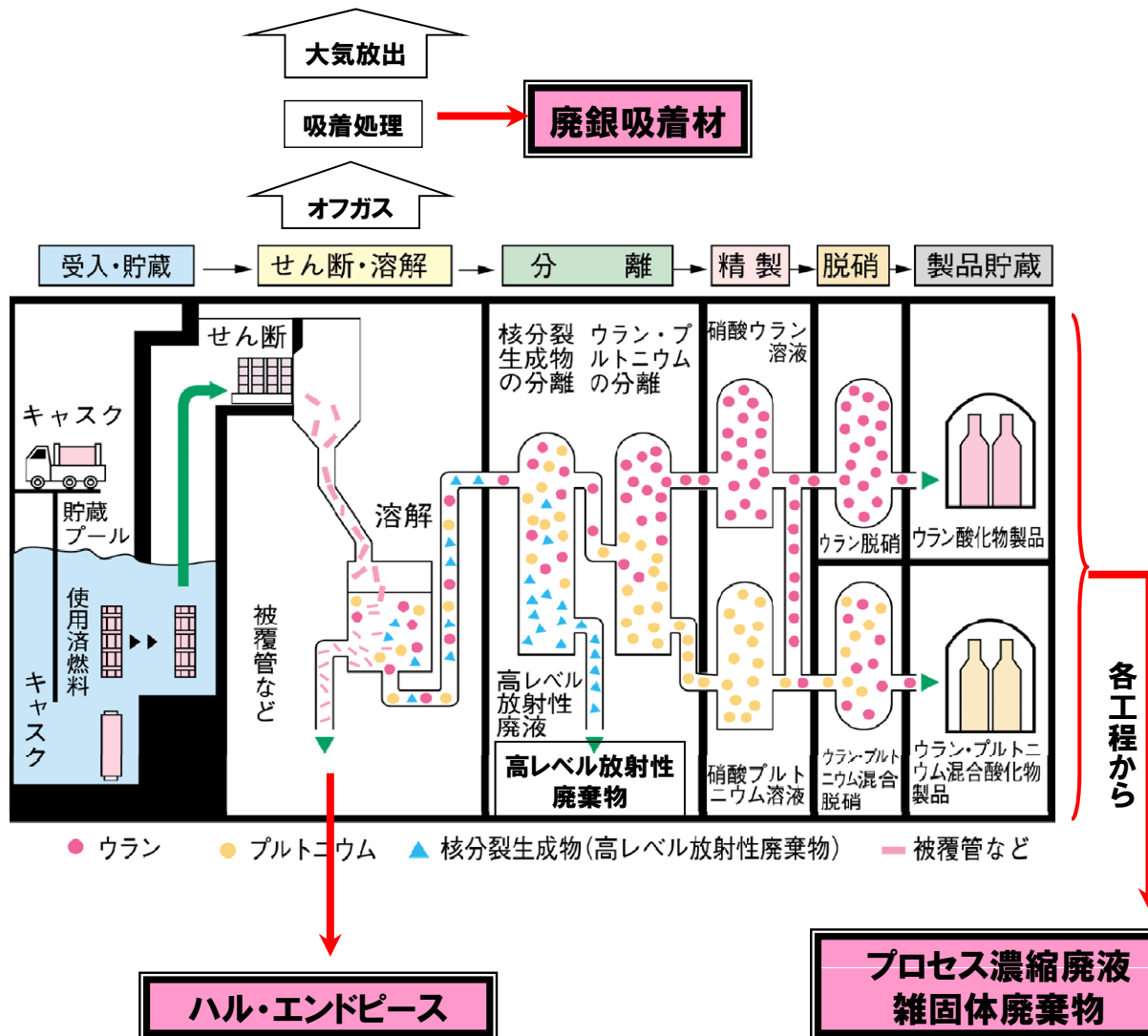
(資源エネルギー庁ホームページより)

TRU廃棄物とは？

TRU廃棄物とはどんなものか

処分方法	地層処分		余裕深度処分・浅地中処分	
概要	ハル エンドピース 細断 	廃銀吸着材 銀吸着材 排気 吸気 放射性のヨウ素を除去する吸着材 	濃縮廃液 硝酸系 モルタル ペレット 乾燥・ペレット化 	難燃性廃棄物 ゴム手袋 不燃性廃棄物 工具 金属配管 
廃棄体イメージ				
特徴	・発熱量が比較的大 ・C-14を含む	・I-129を含む	・硝酸塩を含む	—

再処理施設から発生するTRU廃棄物



【TRU廃棄物の種類】

○ハル

- ・数cmにせん断された燃料棒を、溶解槽で溶解させた際に溶け残る燃料被覆管

○エンドピース

- ・使用済燃料集合体の末端部分
- ・集合体のせん断時に、切断除去

○プロセス濃縮廃液

- ・酸回収、溶媒再生、除染、分析等により発生し、蒸発濃縮等の処理後、固化

○雑固体廃棄物

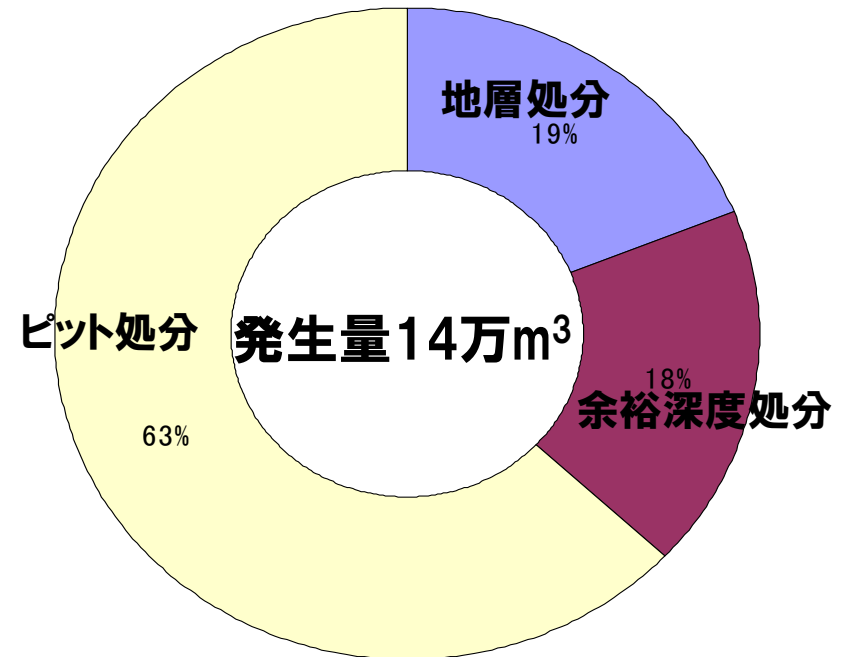
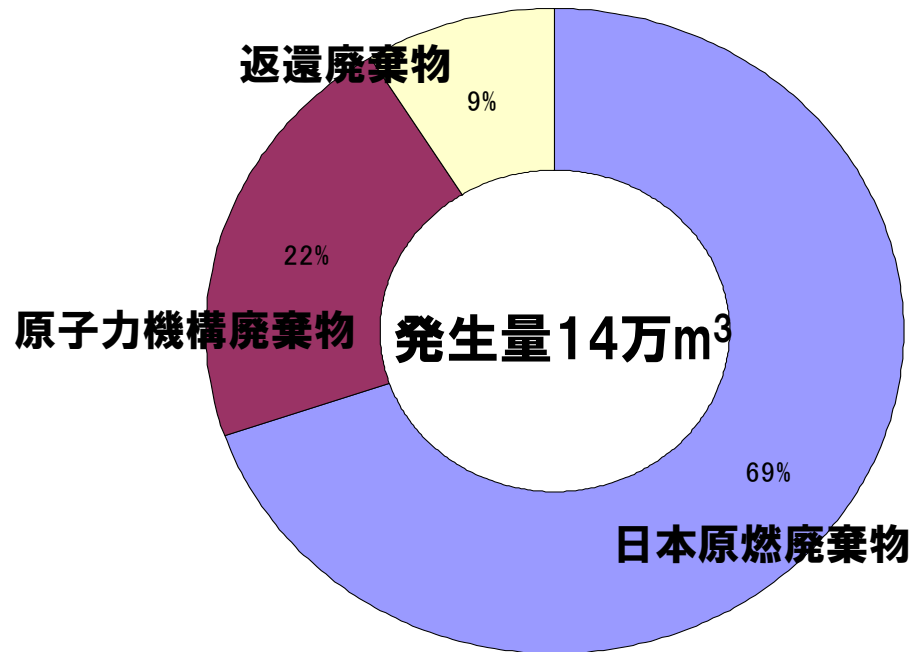
- ・再処理工程の各工程で発生する雑多な固体状の廃棄物
- ・可燃性(紙、布等容易に焼却できるもの)、不燃性(金属配管、ガラス等焼却できないもの)に分類
(MOX燃料加工施設の操業・解体からも発生)

○廃銀吸着材

- ・使用済燃料のせん断・溶解時に発生するオフガス中の放射性ヨウ素を吸着した使用済みのフィルター

TRU廃棄物の推定発生量

13



発生量推定の前提条件

<日本原燃>

操業期間: 約40年

再処理量: 32,000tU

<原子力機構>

操業期間: 約30年

再処理量: 1,286tU

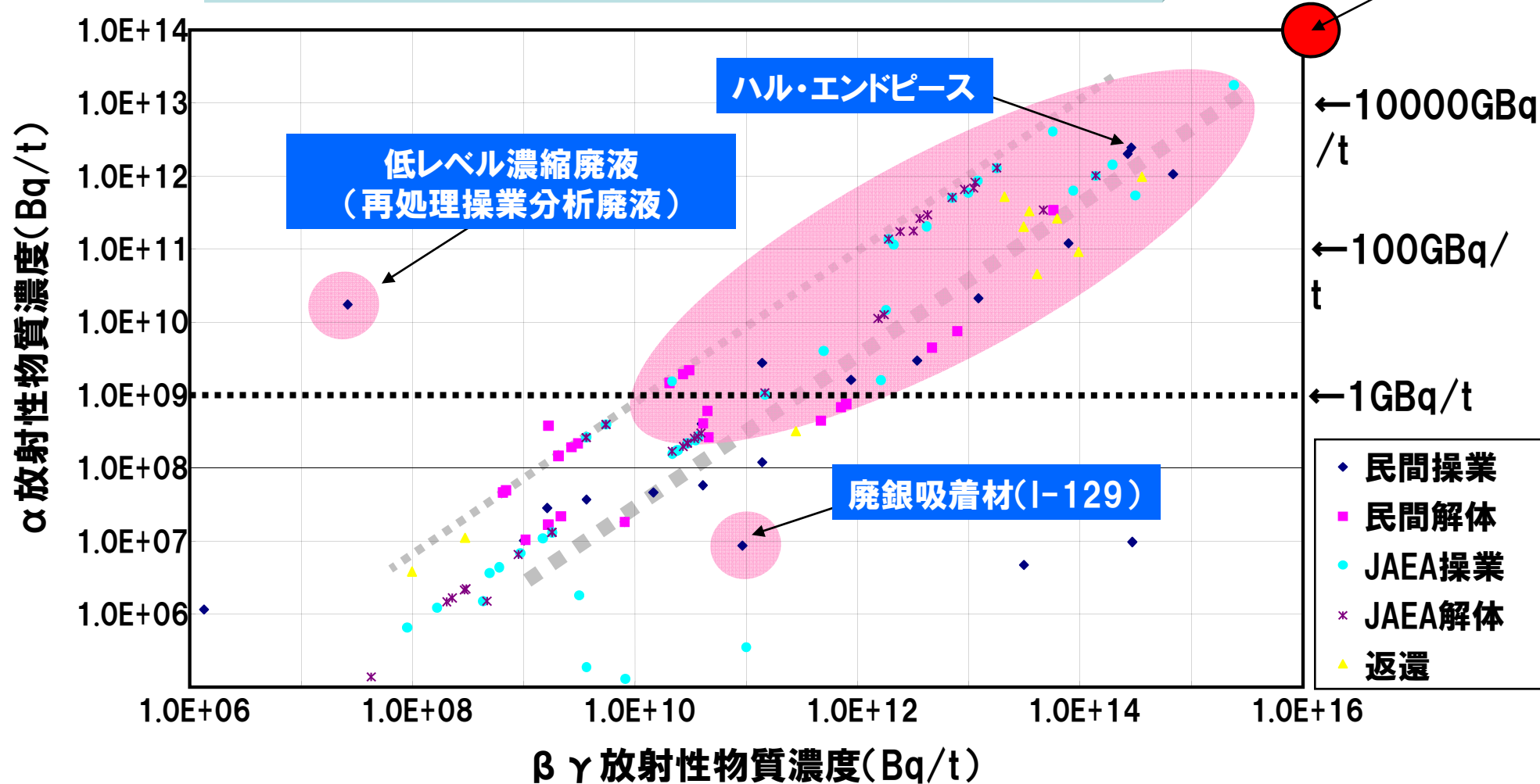
・約7割が日本原燃より発生

・地層処分対象の廃棄物は全体の約2割程度

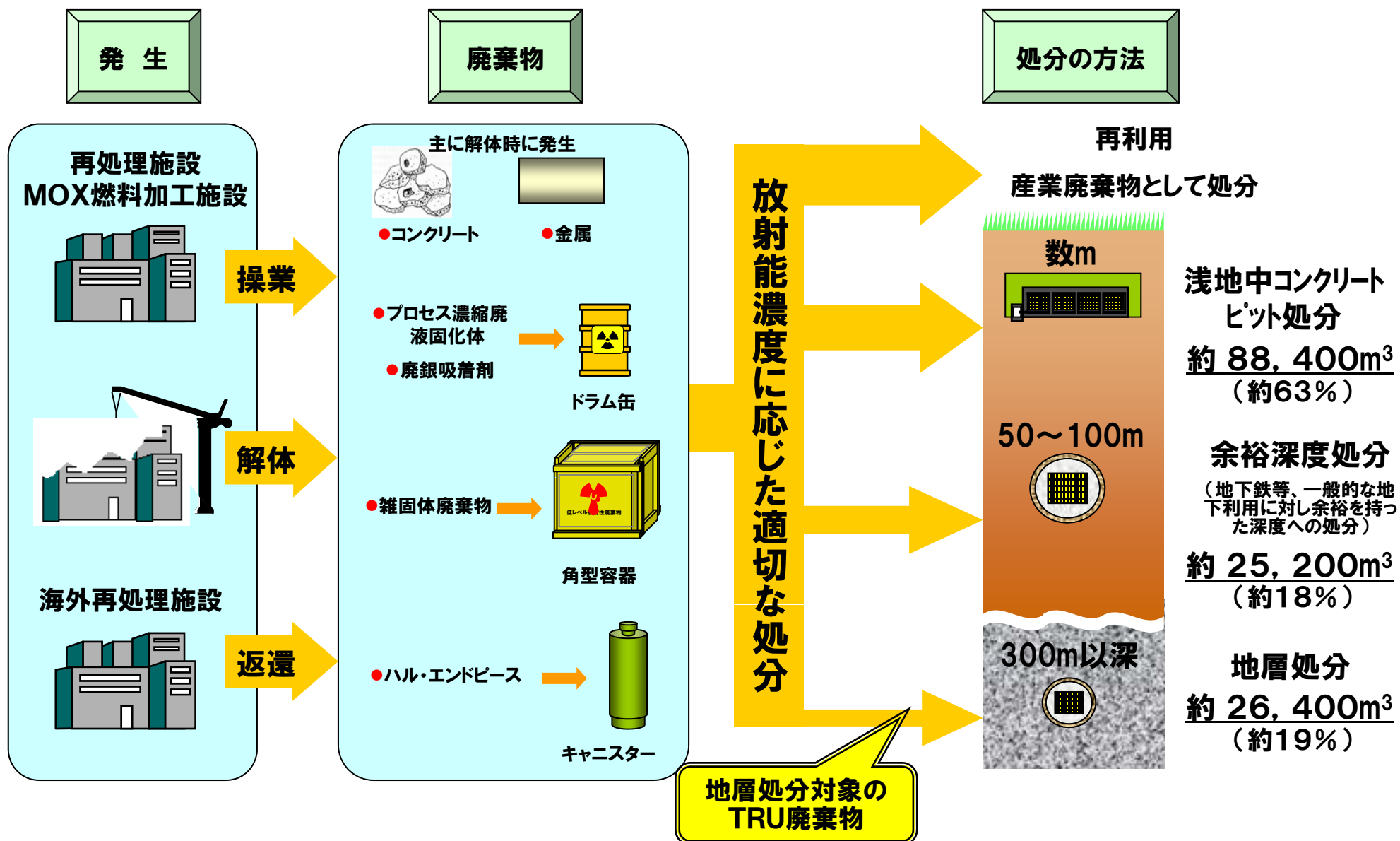
地層処分対象のTRU廃棄物

- ・グループ1: 廃銀吸着材(ヨウ素-129を含む)
- ・グループ2: ハル・エンドピース(炭素-14を含む)
- ・グループ3: 濃縮廃液等の固化体(硝酸塩、有機物を含む)
- ・グループ4: 焼却灰、不燃物セメント固化体

高レベル
放射性廃棄物
(ガラス固化体)

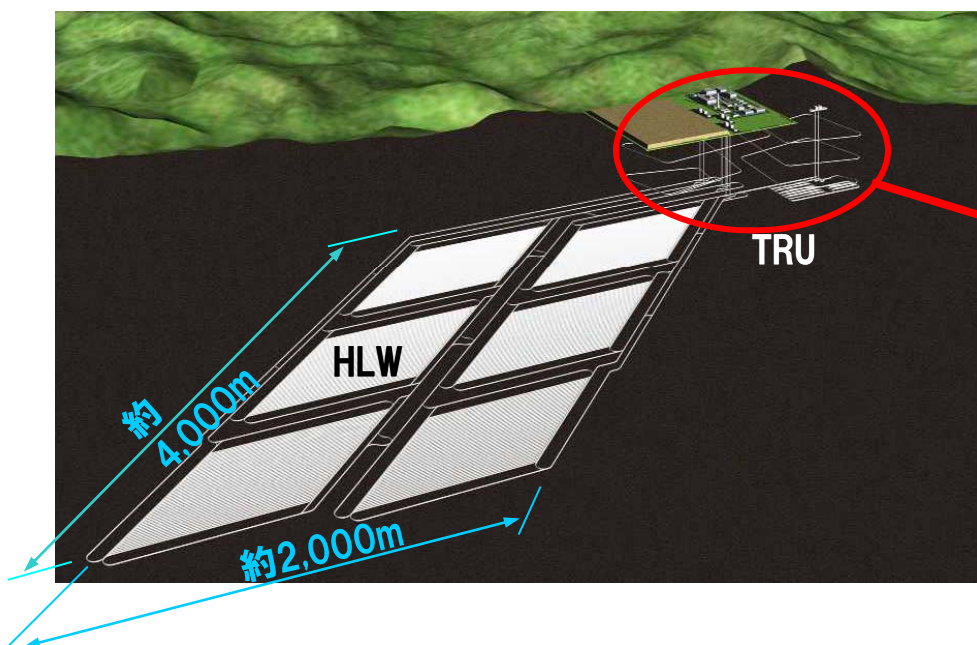


TRU廃棄物の処分の方法

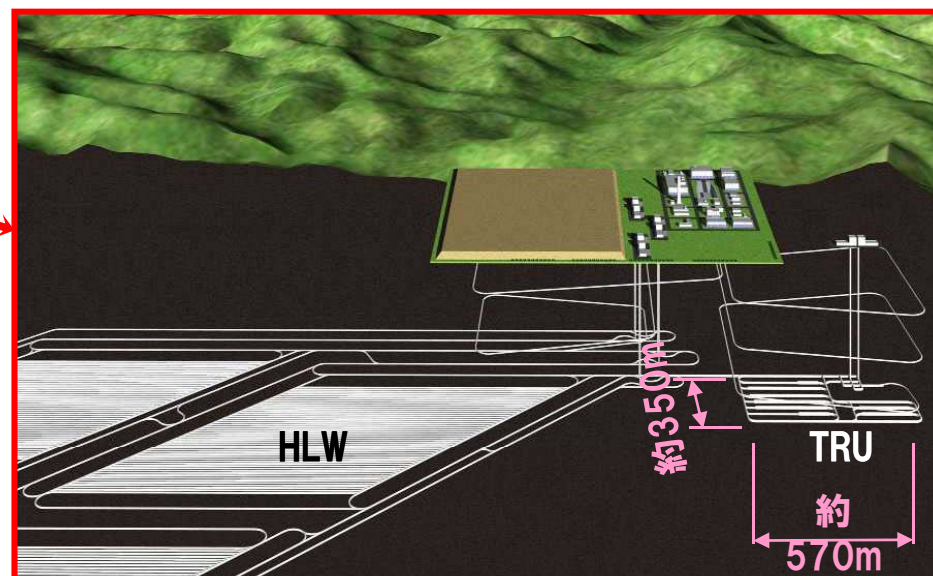


高レベル放射性廃棄物処分場と TRU廃棄物処分場の併置とその評価

併置処分の全体レイアウトの例



TRU廃棄物処分区域付近



地下施設の面積比

HLW TRU廃棄物

30 : 1

なぜ地層処分なのか

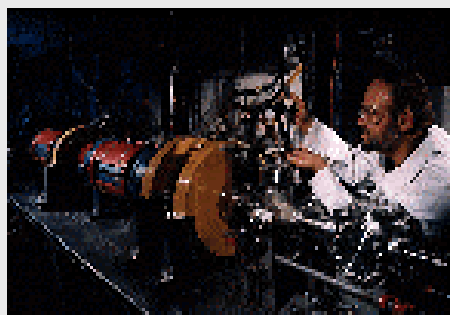
なぜ地層処分なのか？

- 現代社会の産業活動では廃棄物の発生は不可避
- 消費に伴う便益を受けた世代が、廃棄物の処分に関して考え得る限りの対応をしておかなければならない
- 原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物も同様
- 高レベル放射性廃棄物は、その放射能レベルが低くなるまでには非常に長い年月がかかり、そのままにしておくと、将来の世代に負担を残す
- そこで原子力を利用している私たちの世代の責任において、生活環境から隔離し、将来にわたって確実に処分することが必要
- 高レベル放射性廃棄物を地上で管理する場合、何万年もの間、自然災害や人災などの地上のリスクに対応しなくてはならない
- 地下深い安定した地層中に埋設することが、国際的に共通した考え方になっている

高レベル放射性廃棄物への対策

源流対策

発生量の低減



核種分離変換

- ・基礎研究の段階
- ・発生量の低減は可能であるが全量は困難
- ・残りは処分が必要

制度的管理

人間による監視



長期管理

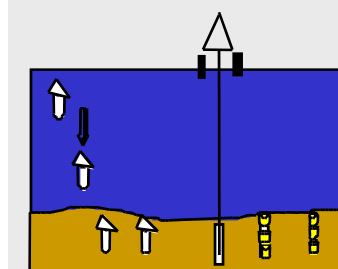
- ・現状技術で対応可能
- ・管理責任が明確であるが無期限には困難
- ・いずれ処分が必要

永久隔離

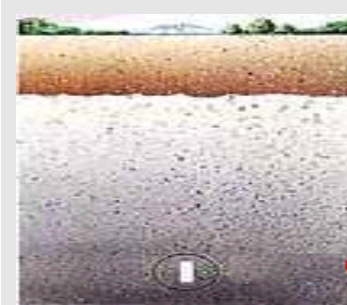
処分



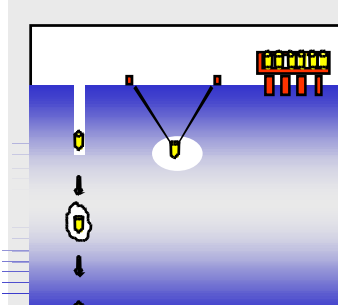
宇宙空間



海洋底下



深地層中



南極氷床

地下深部の特徴

- ・地上に比べて、自然現象や人間活動の影響が及びにくい
- ・地下水の動きが極めて遅い
- ・酸素が欠乏しており、物質の溶解や腐食が起こりにくい



約1800年前の銅鐸
(堺市下田遺跡出土品)

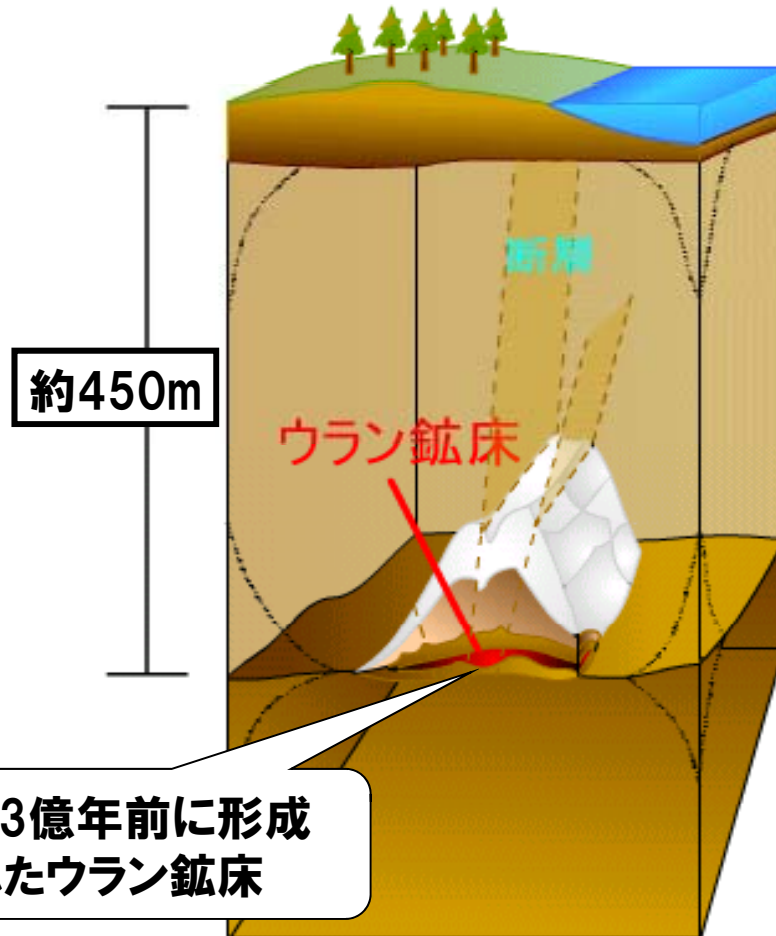
1800年間、粘土の中で酸素欠乏状態に置かれ、腐食せず、銅の金属光沢が保たれている



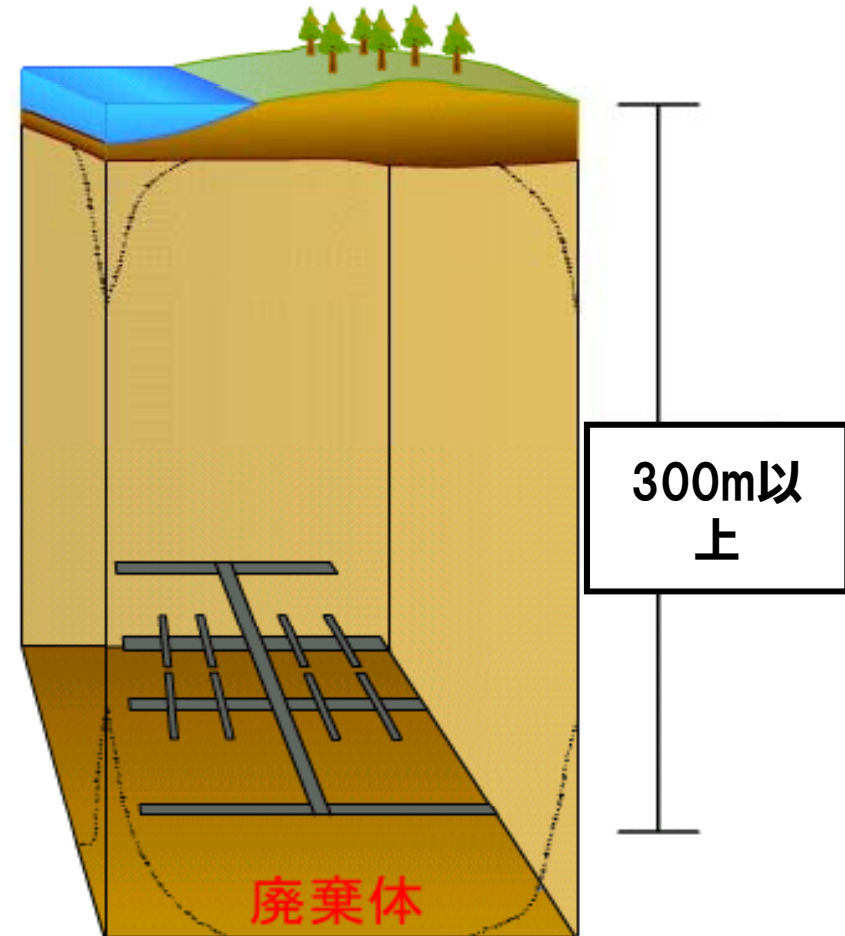
約750年前の鉄製斧
(出雲大社出土品)

深地層の閉じ込め機能

カナダのシガーレイク鉱床



地層処分概念



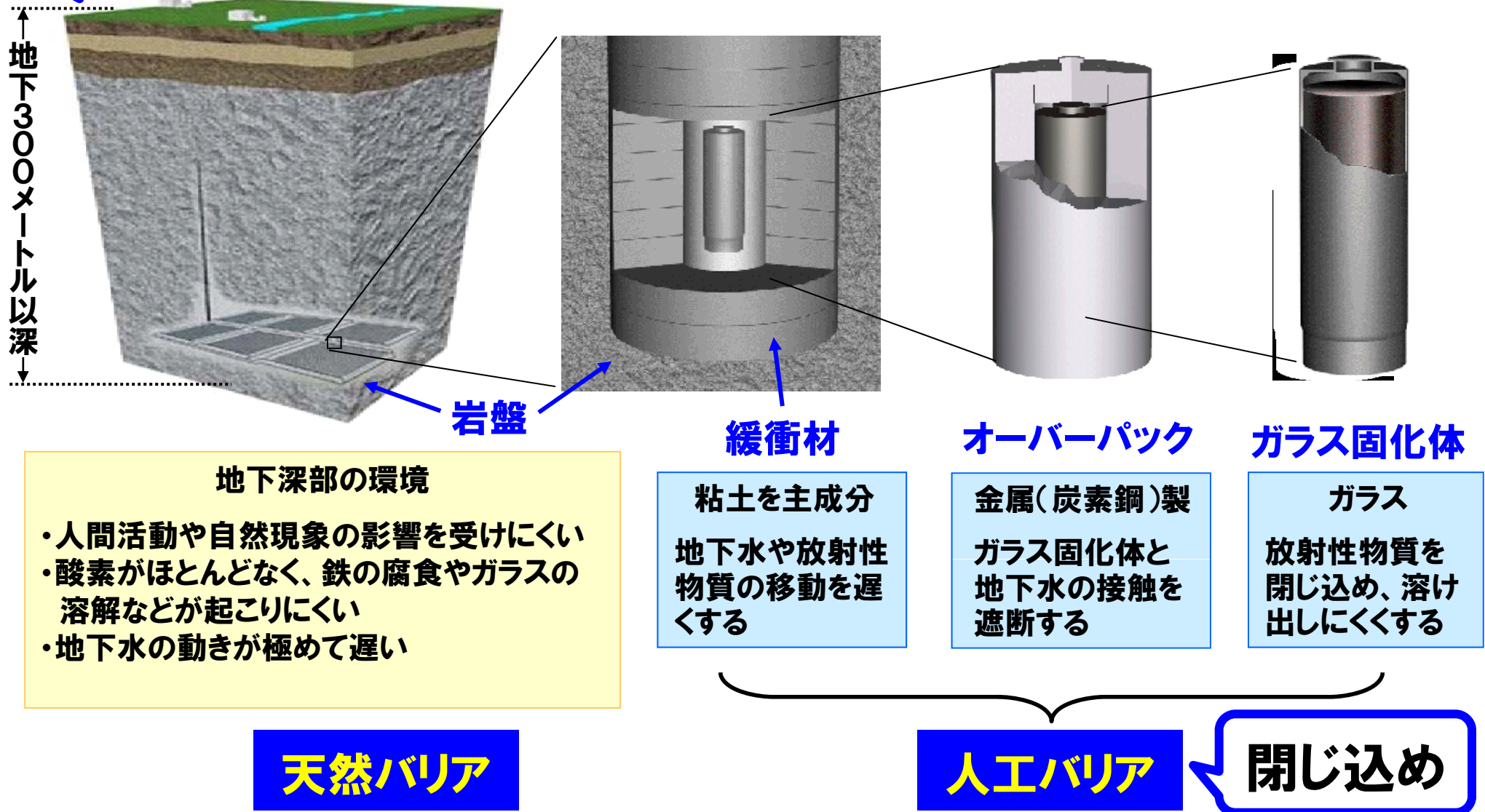
・地下の環境は長期間にわたり物質を閉じ込める能力を有している

**地層処分で安全に処分することは
できるのか**

どうやって地層処分するのか？

隔離

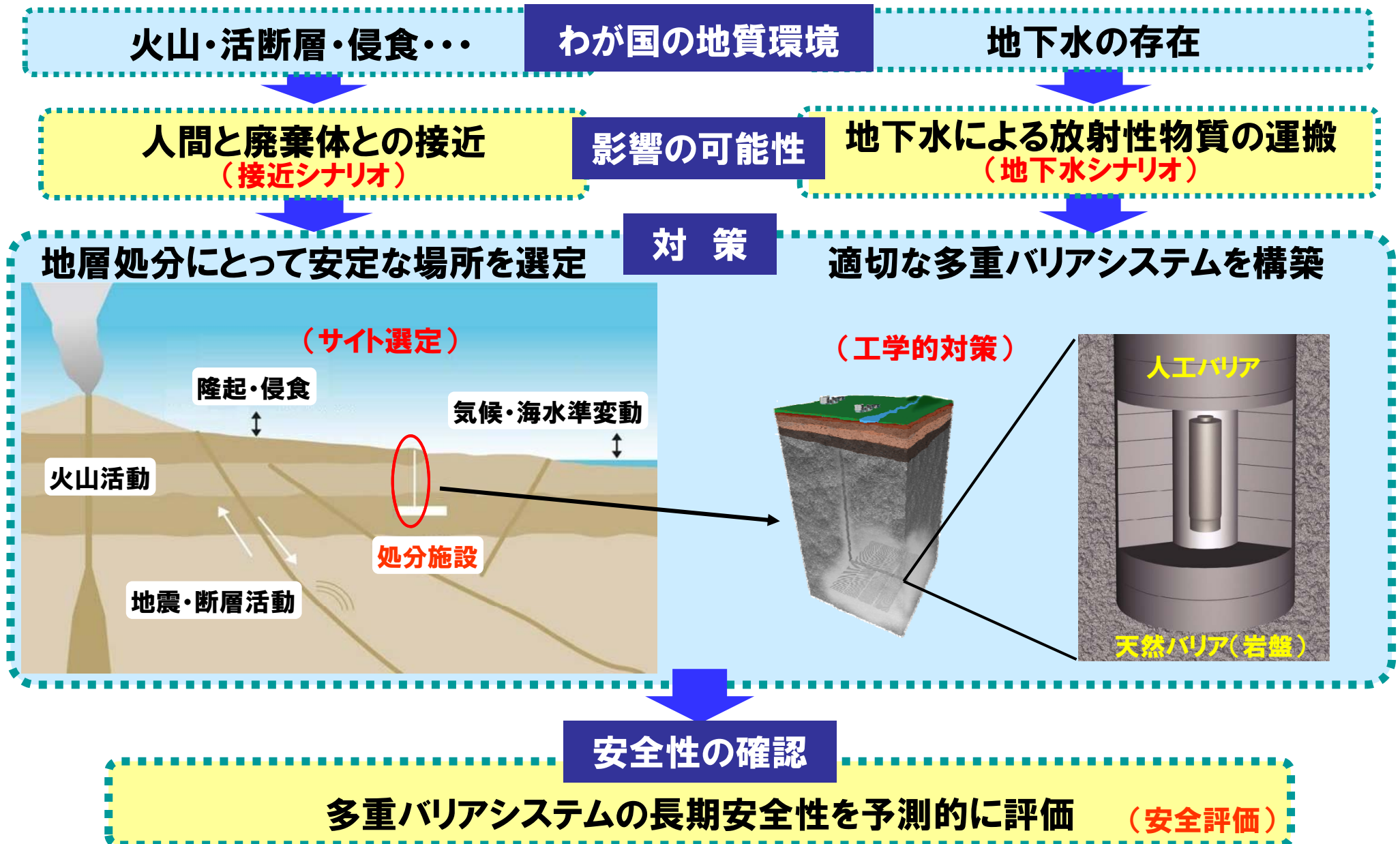
・天然の岩盤と人工物を組み合わせた**多重バリアシステム**



実物大の人工バリア

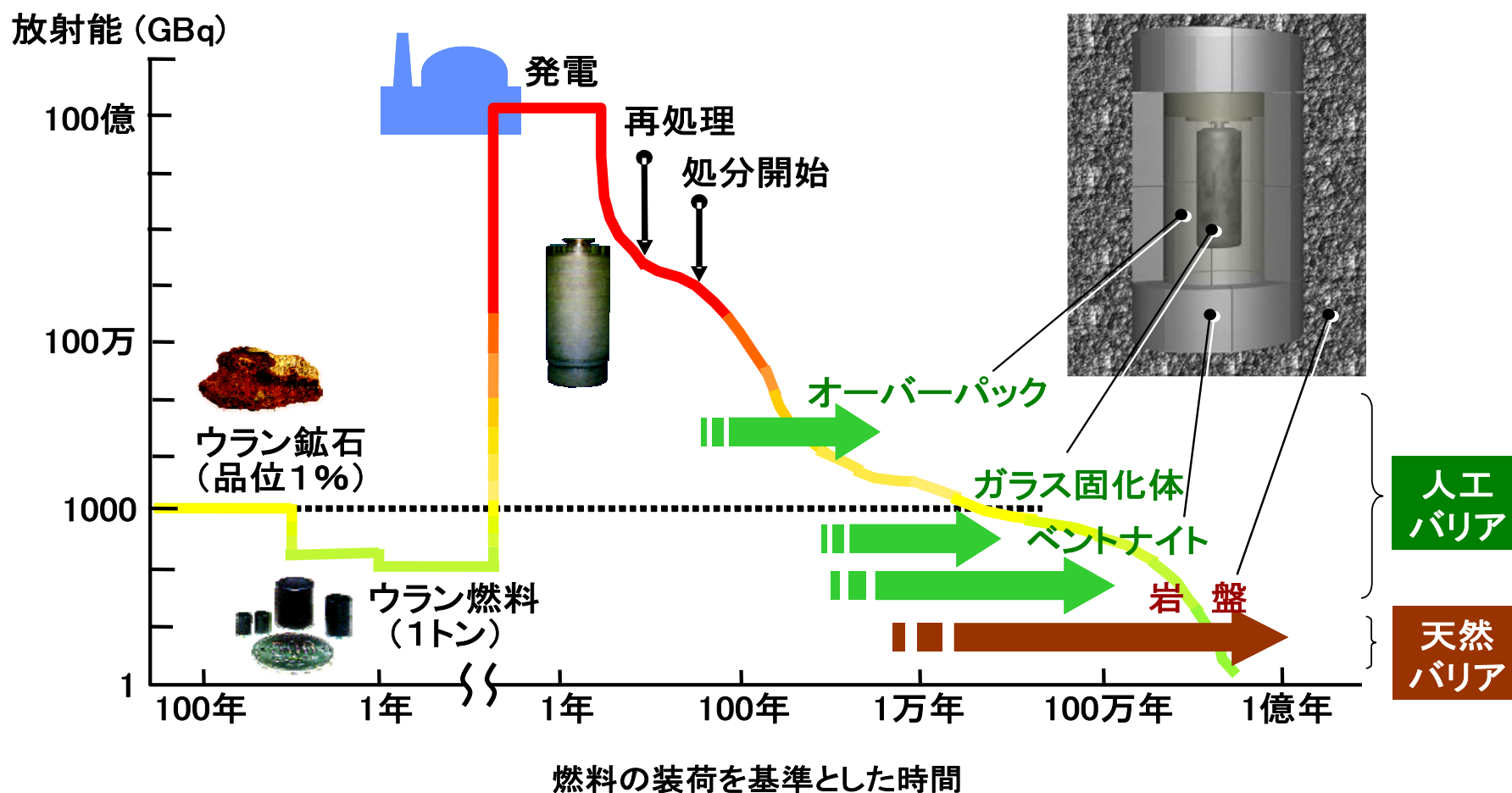


安全確保の仕組みは？



放射能の時間変化と処分システムの性能

高レベル放射性廃棄物の放射能は極めて高いが、時間とともに減衰し、やがて元のウラン鉱石なみになる



地層処分で安全に処分することはできるのか

- 処分場が設置できる安定な地層は広く存在し、それを見い出すことが可能
- 人工バリアや地下施設をつくるための技術は、基本的に現状技術で対応可能
 - 地下研究施設などを利用した実証で更に確かなものができる
 - さらに合理的な設計のための技術開発は今後の課題
- 現状の安全評価手法により、安全性の判断のための予測は可能
 - データ蓄積や科学的知見によって信頼性の高い判断根拠を示すことが可能

安定な地層とは？

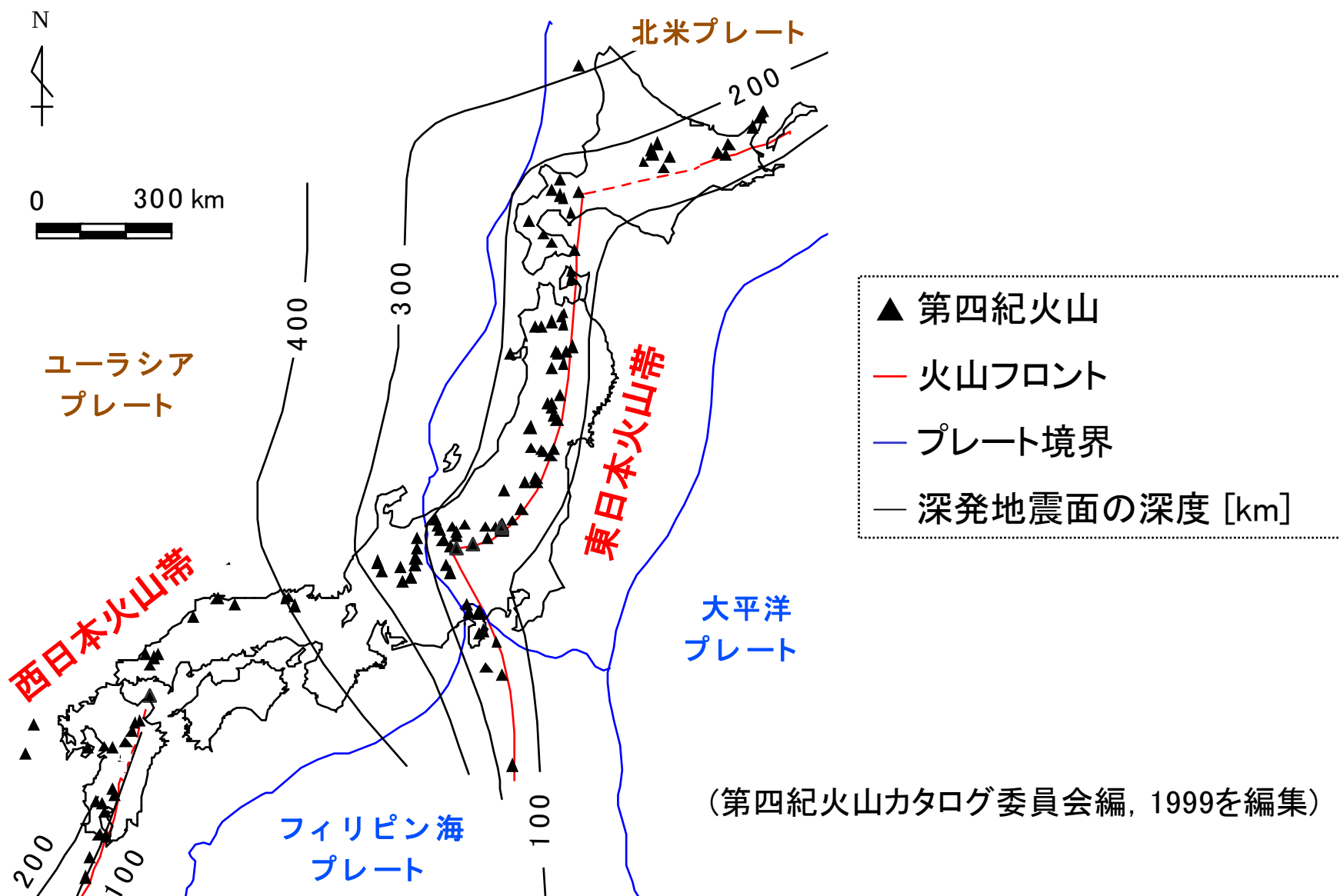
安定な地層とは

- 処分施設の著しい変形，廃棄体の地表付近への接近などの処分場へ重大な影響を及ぼす地層の変動としては，「火山，地震・断層，隆起・侵食」が考えられる
- 地層の変化・変動があっても，処分場への重大な影響を及ぼすものでなければ，処分場は設置可能（そのような地層を処分場が設置できる「安定な地層」という）
- 「全く変化・変動のない地層」を意味するものではない

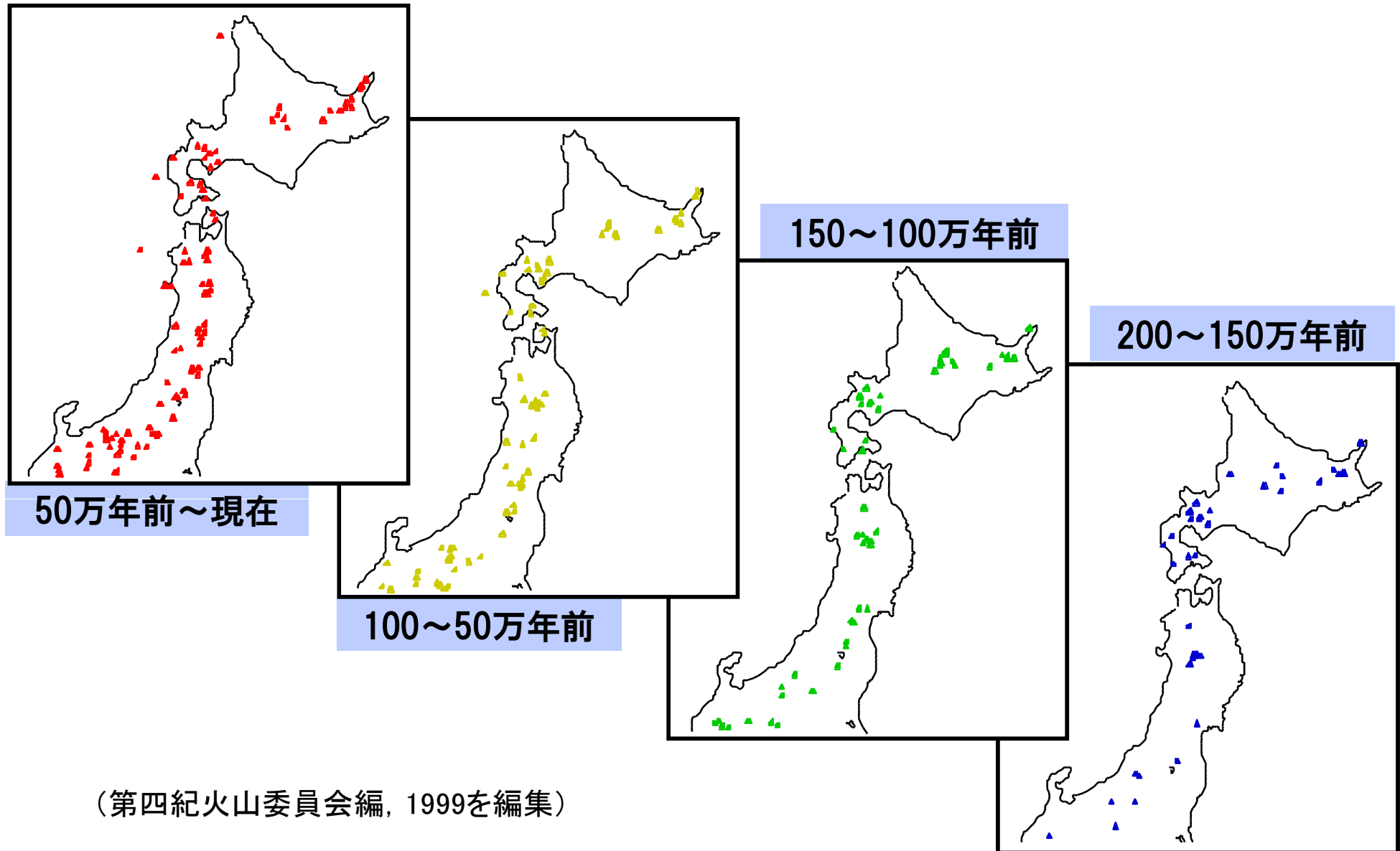
安定な地層とは

- 「火山，地震・断層，隆起・侵食」のような処分場に重大な影響を及ぼす現象については，数十万年～数百万年前の過去から現在までの活動様式や変動傾向を示すデータに基づき，将来，数万年程度の活動や処分施設への影響の評価が可能
- －火山：日本列島における火山活動は，現在の火山周辺の限定された地域内で繰り返し起こっているため，そのような地域を避けることが可能
 - －地震・活断層：処分場の破壊をもたらすような「活断層」は，繰り返し活動し，何らかの痕跡を残しているため，その存在を確認し，避けることが可能。未知の活断層についても，調査により確認可能。地震に伴う地下の「揺れ」，応力や地下水の変化等による影響は十分に小さい
 - －隆起・侵食：地形データ等により，変動量を推定可能。一部の山岳地帯などを除けば，推定される変動量は十分に小さい

火山の分布とプレートの配置



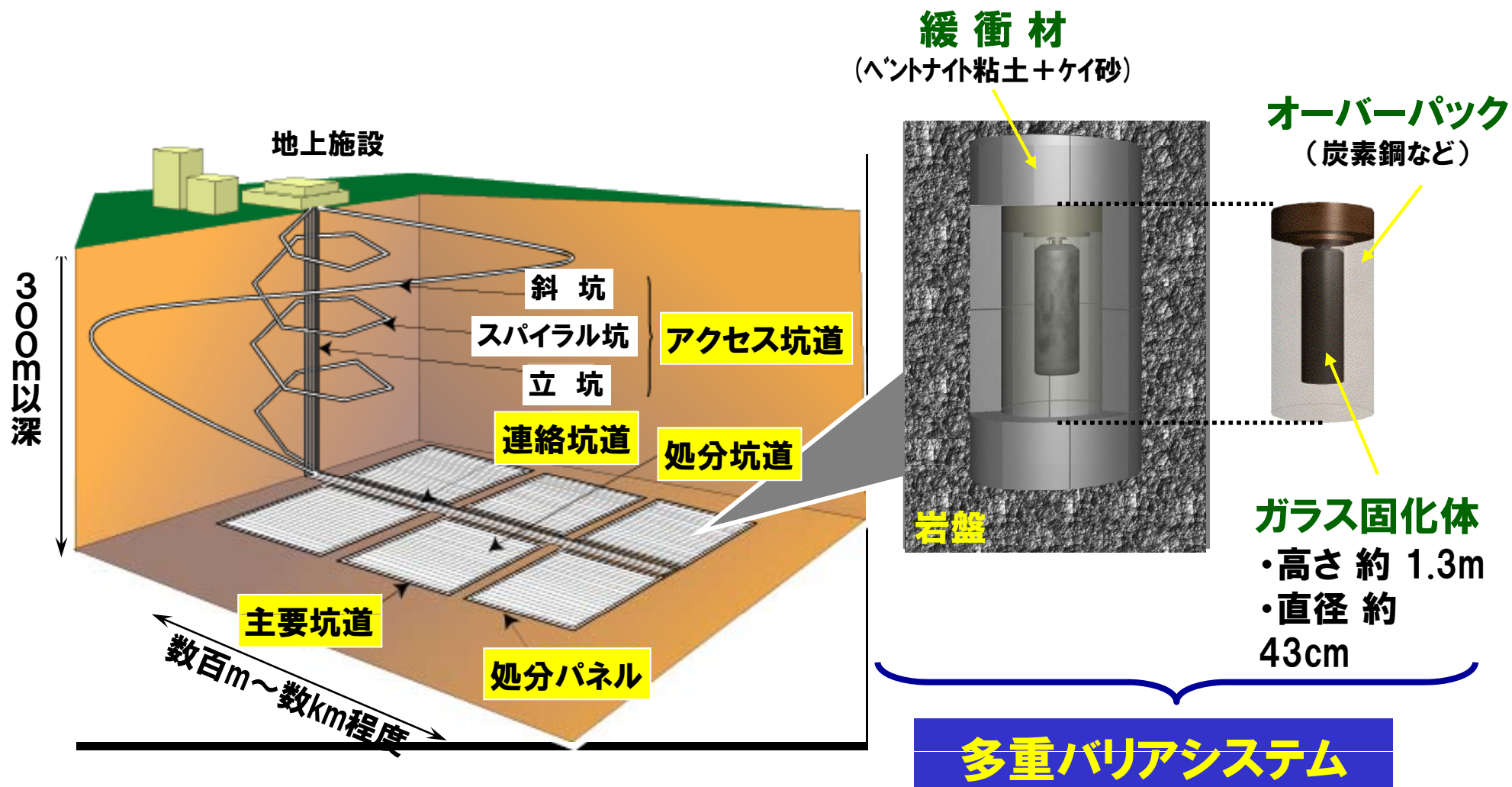
第四紀の火山活動(東北日本)



(第四紀火山委員会編, 1999を編集)

**人工バリアや地下施設をつくるため
の技術は十分か**

地層処分システムの基本概念



- 現状技術で処分場を建設することが可能

- 地下深部の掘削やトンネル建設は長い歴史と豊富な経験をもつ土木、鉱山技術を利用

- (地下深部の掘削・トンネル建設の経験)

- ・ 深さ: 別子銅山(最下低坑道は海面下1,000m)
 - ・ 長さ: 青函トンネル(54キロメートル)
 - ・ 拡がり : 葛野川地下発電所(空洞規模: 高さ54m, 幅34m, 長さ210m, 掘削容量250,000m³)

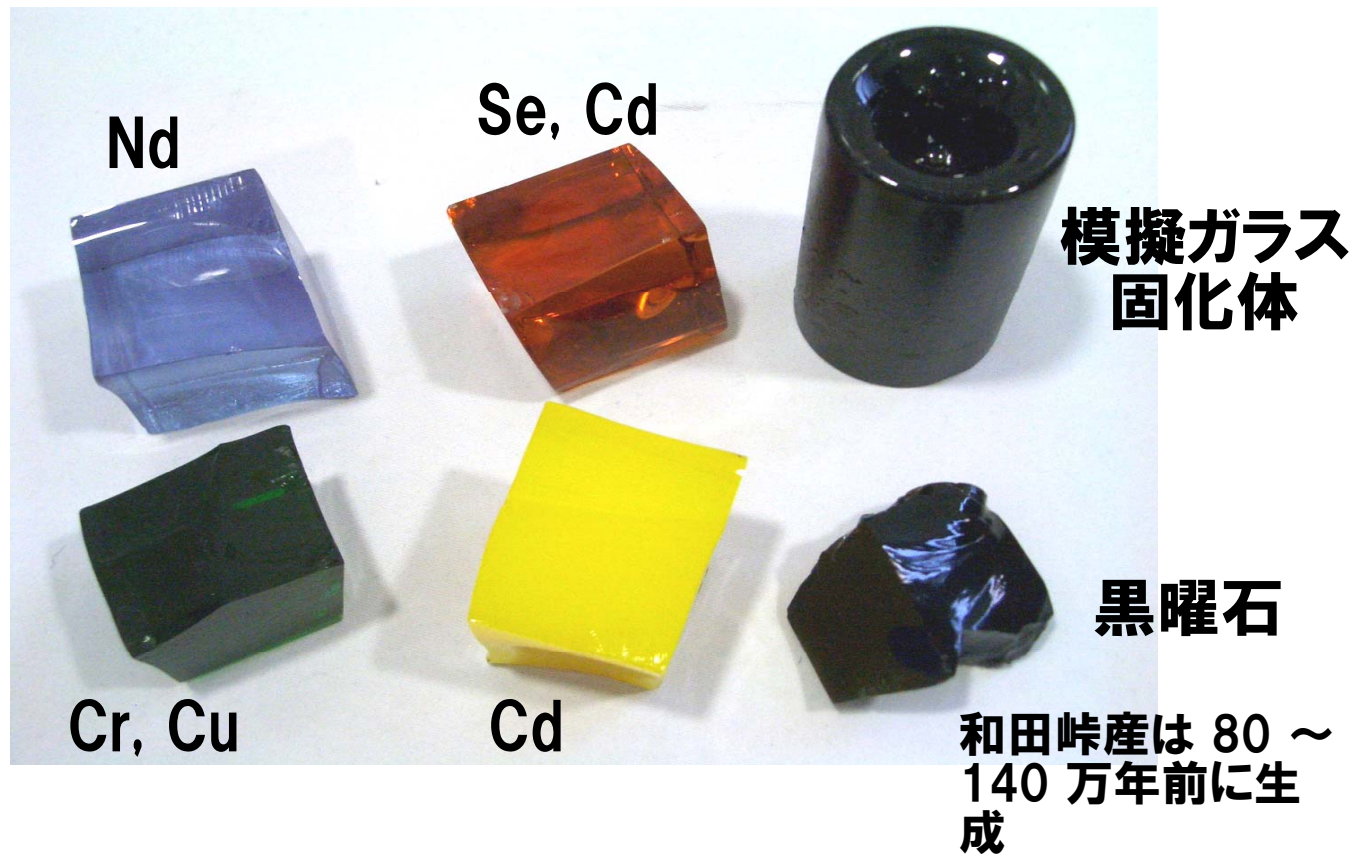
- **人工バリアを製作することと廃棄体を地下へ設置することが可能**
 - **人工バリアの材料は，古くから使われよく知られたもの**
 - ・ ガラス，鉄，粘土
 - **ガラス固化体の輸送について十分な実績**
(日本，フランス，イギリス，ドイツ等)
 - **オーバーパック，緩衝材について製作実証試験を実施済み**

● さらに確かなものへー工学技術の実証試験の実施

➤ 地下研究施設の利用例

- ・ スウェーデン（地下～460m程度）；掘削技術，人工バリア設置技術
- ・ フランス（地下～500m程度）；掘削技術
- ・ スイス（地下～450m程度）；掘削技術，人工バリア設置技術

ガラスの性質



古代エジプト
のガラス

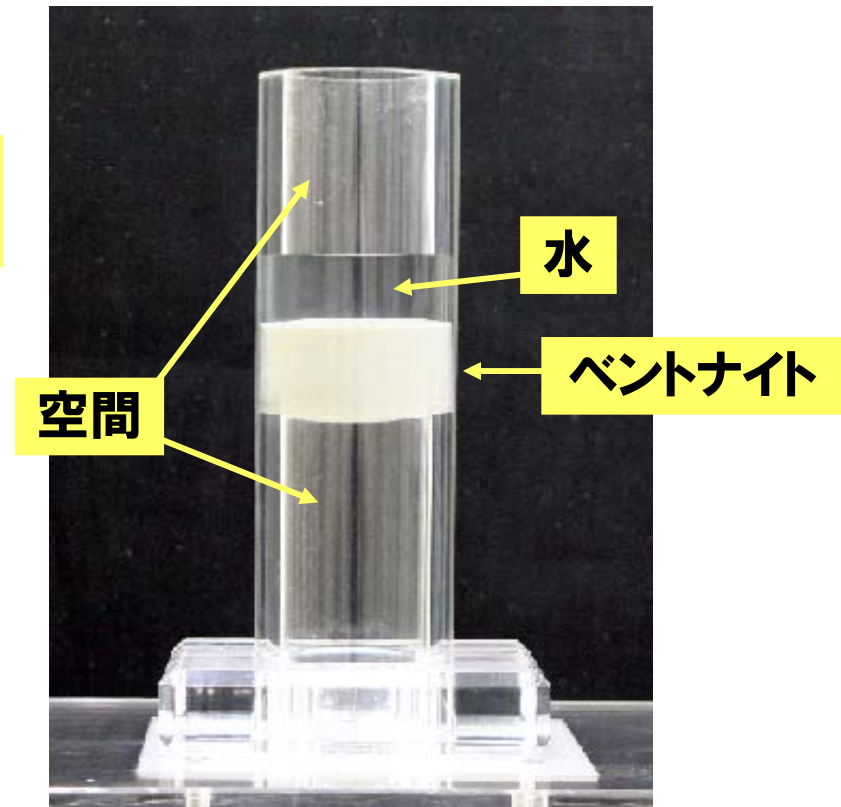
(紀元前14世紀)
岡山市立オリエント美術館蔵

- ・ガラスに様々な元素を溶かし色ガラスを作ることができる
- ・ガラスは極めて安定で、水には容易に溶けない

緩衝材(ベントナイト)の性質



ベントナイトは水を吸収すると
膨れて隙間を埋める



ベントナイトは水の浸透を
遮断する

ベントナイトはイオン交換作用や吸着作用により、
水中に溶解している物質を捕獲する

**仮にガラス固化体から地下水へ
放射性物質が移行した時は
どうなるのか**

安全評価とは？

- ・将来に予想される変化や心配される状況をシナリオとして描き、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
- 接近シナリオ
- 基本シナリオ
- 変動シナリオ

モデル＆データ

実験や調査に基づく現象の理解、データの取得

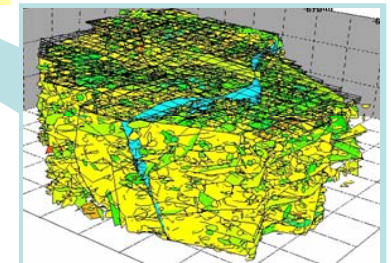
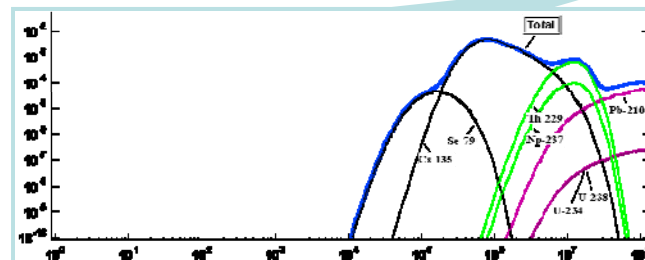
- 地下水の動き方
- 熱・力の伝わり方
- 水と物質の反応の仕方
- … ○… ○…

シミュレーション

現象を表す数学モデルとデータを用いた評価解析

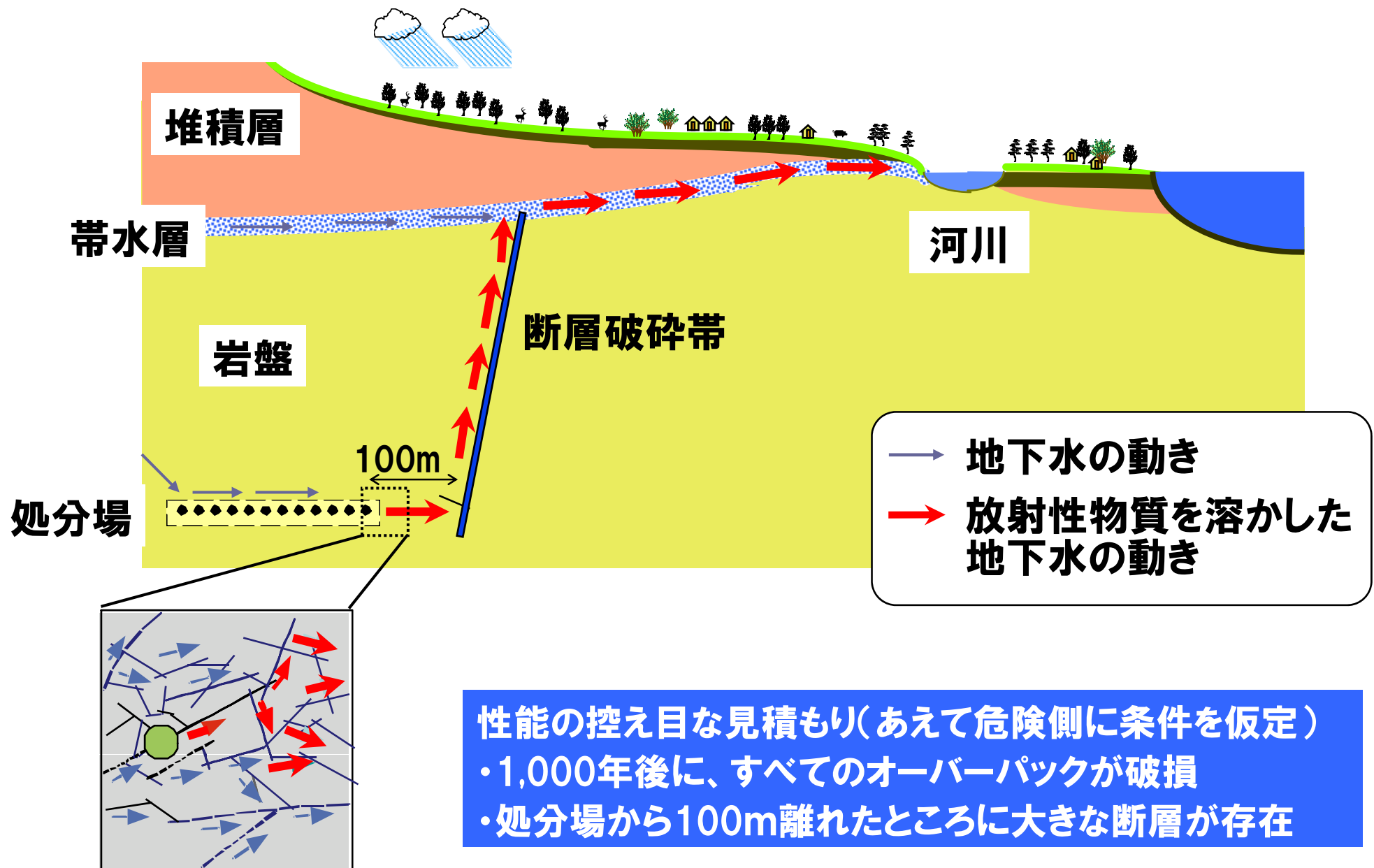
安全性の判断

安全基準

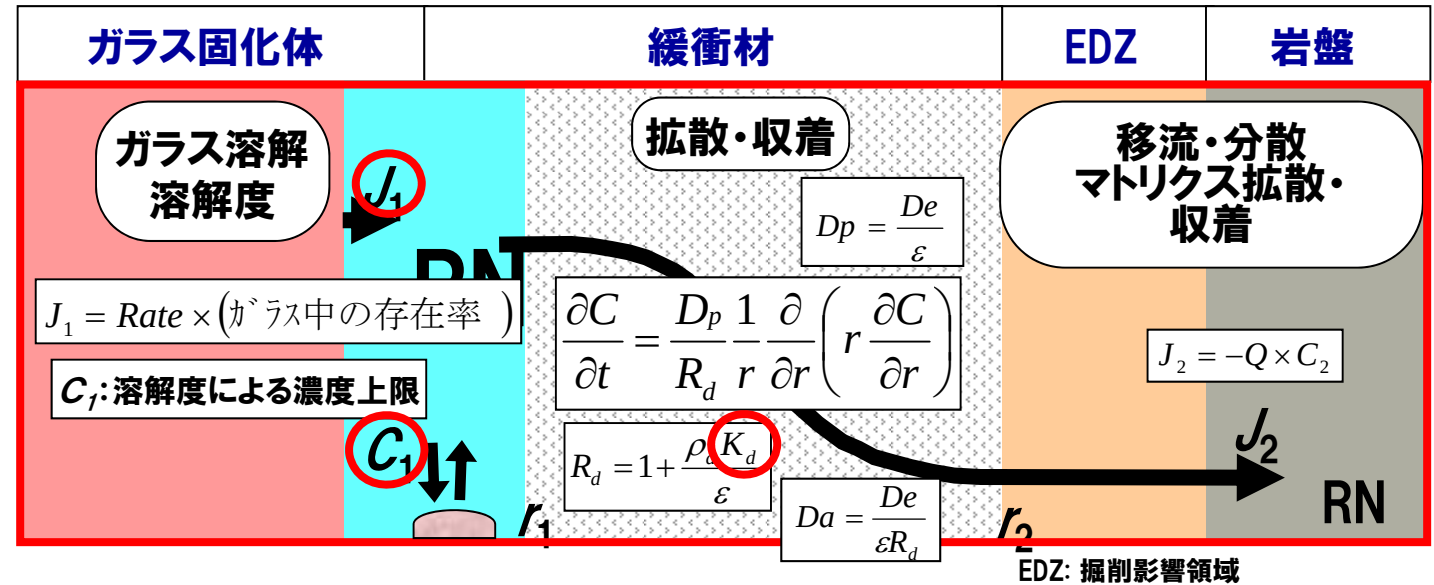
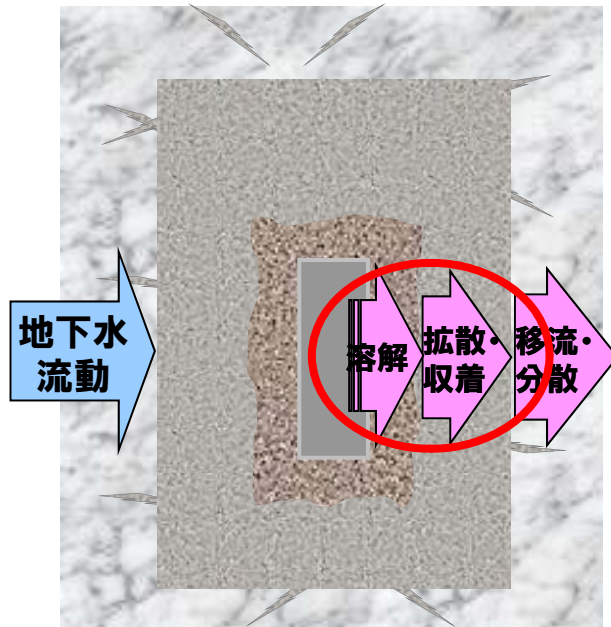


地下水シナリオの評価

42

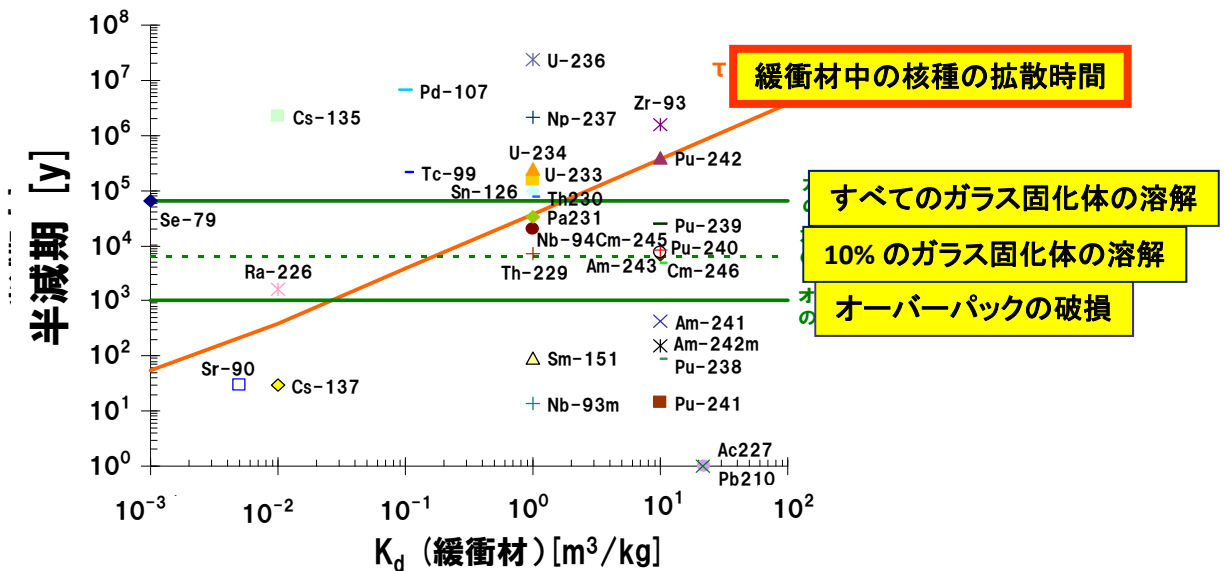


核種移行評価モデルとパラメータ

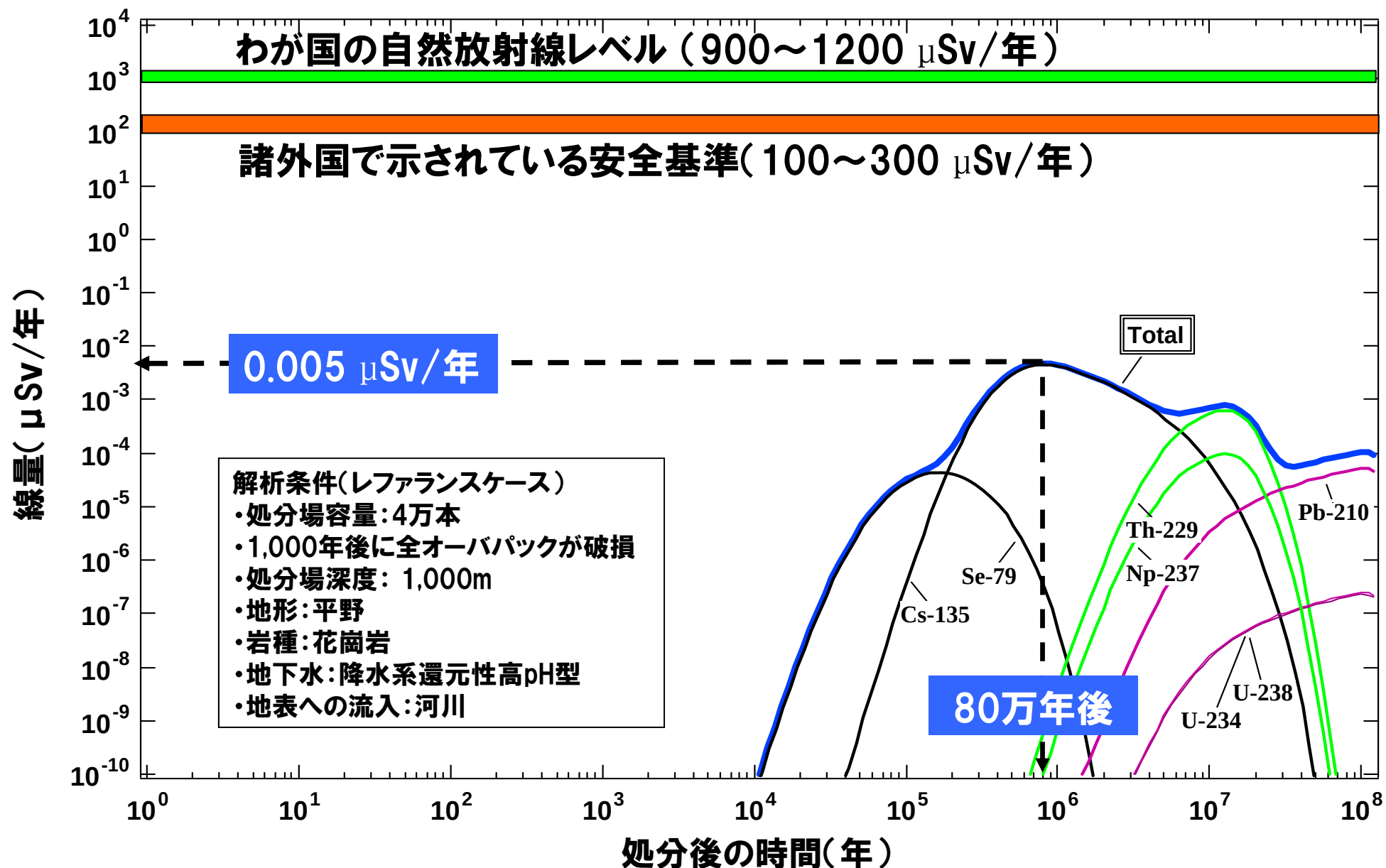


$$\tau = \frac{R_d (r_2 - r_1)^2}{D}$$

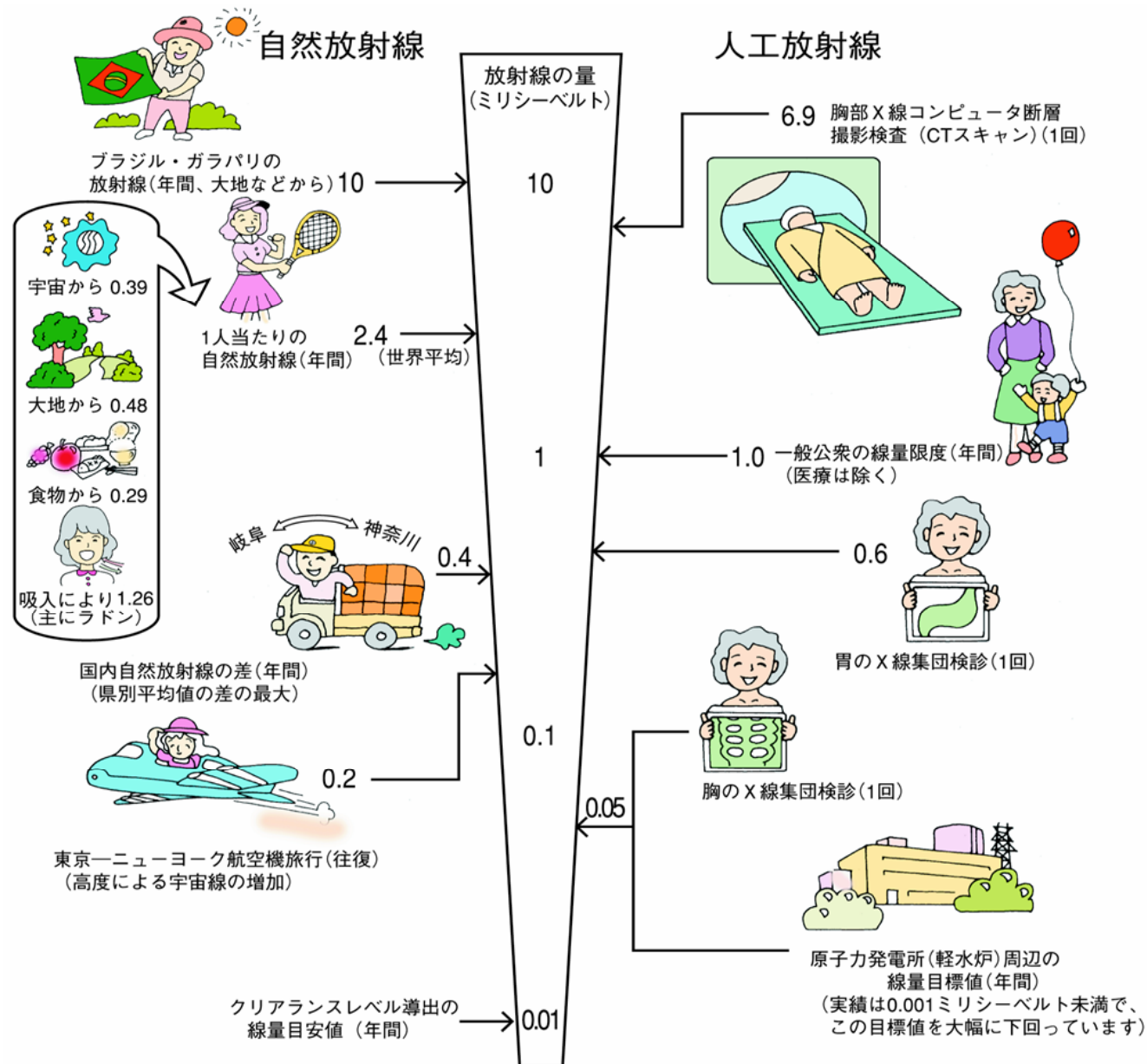
$$R_d = 1 + \rho_b K_d \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}$$



地下水シナリオに基づく影響評価例



日常生活と放射線



長期にわたる安全性の評価は信頼できるか

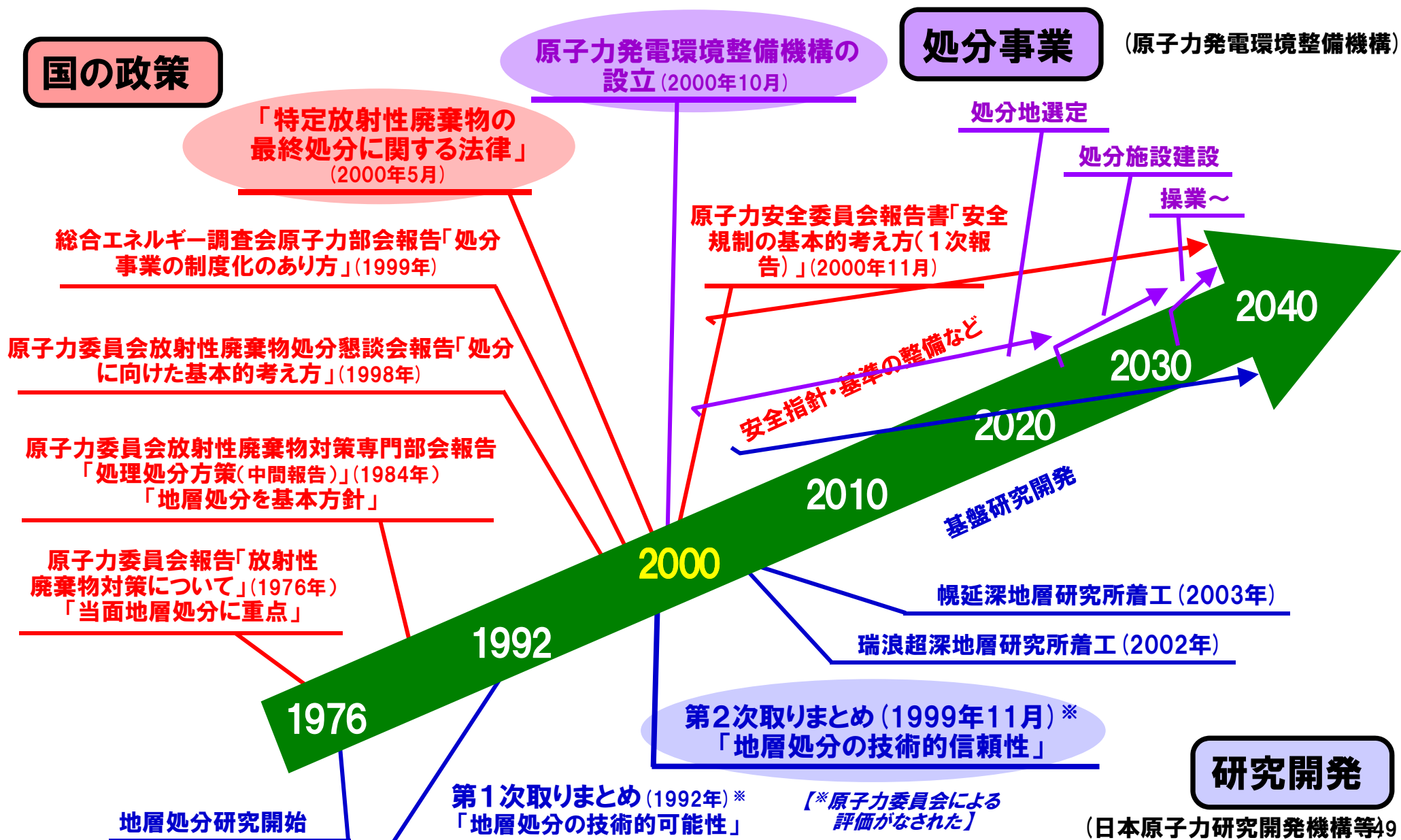
- **安全評価は，利用可能なすべての科学・技術的知識を駆使して実施**
 - **処分場の特性に関する十分な理解（地質環境，人工バリアや処分施設）**
 - **その上で，処分場の安全を損なう可能性のある事態が起こったとして，人間にどの程度の影響を生ずるかをモデルを用いて予測**
 - **「予測」にともなう不確実性をゼロにすることはできないが，安全と認めるかどうかの判断は可能**

長期にわたる安全性の評価は信頼できるか

- 様々な努力によって安全性の評価を信頼できるものとすることが可能
 - 性能の控え目な見積もり：危険性が増すような事態はもらさず考慮，「科学的根拠に基づいて正当化される範囲で」あえて危険側に条件設定
 - 繰り返し実施：処分地の段階的選定にあわせて蓄積されるデータと最新の科学技術の知見を取り込んで評価を更新
 - 評価の内容に関する追跡性と客観性の確保
 - 中立で透明性のあるレビュー

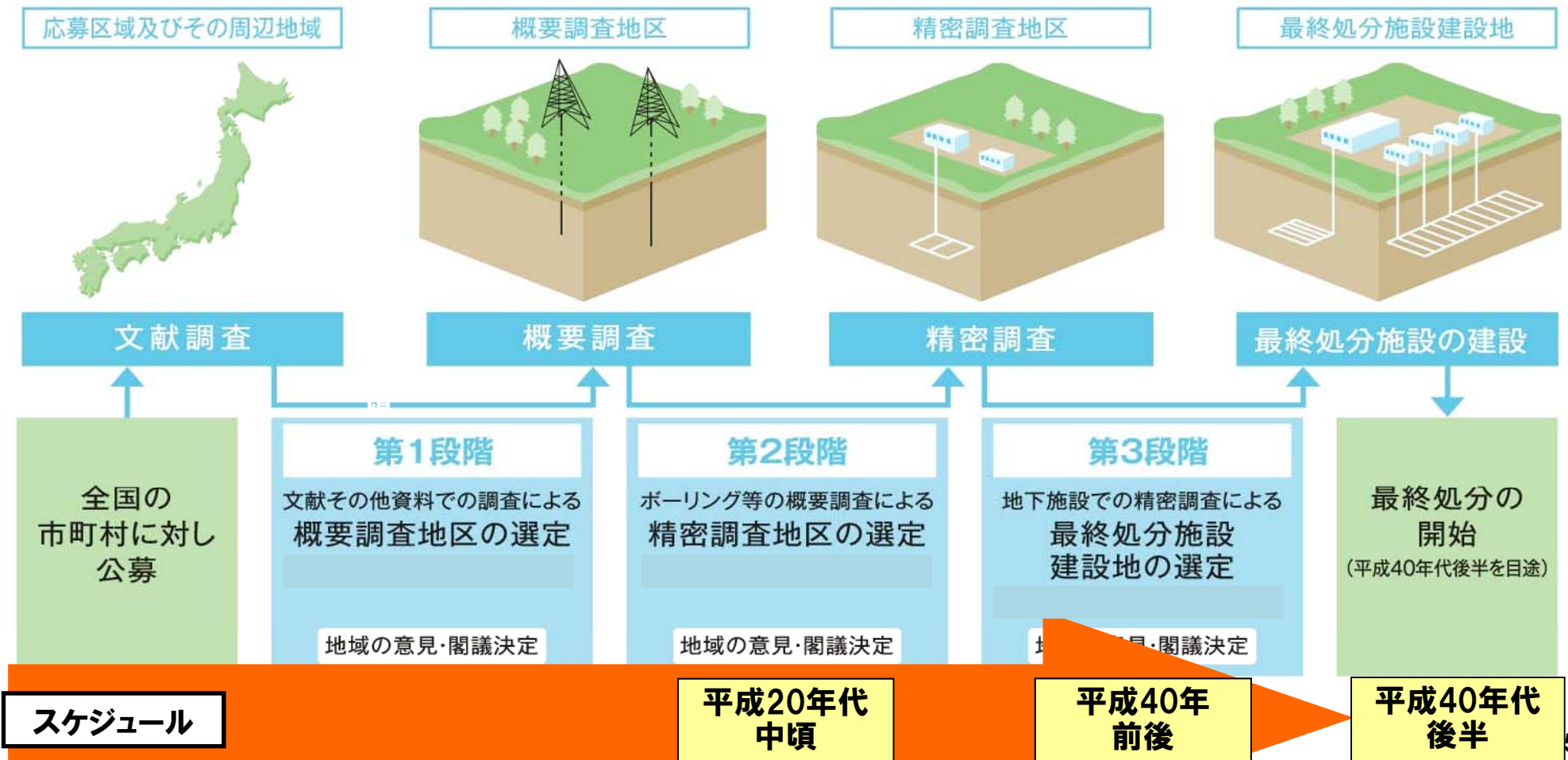
わが国の地層処分計画は？

地層処分計画の経緯と展開



処分事業の段階的進め方

- 処分地の選定は、3段階のプロセスを経て行われる。
- 第1段階の概要調査地区選定のための文献調査については、調査地区を公募。
- 概要調査地区、精密調査地区及び最終処分施設建設地の選定にあたっては、知事及び市町村長の意見を聴き、反対の場合には意見に反して進めないこととしている。



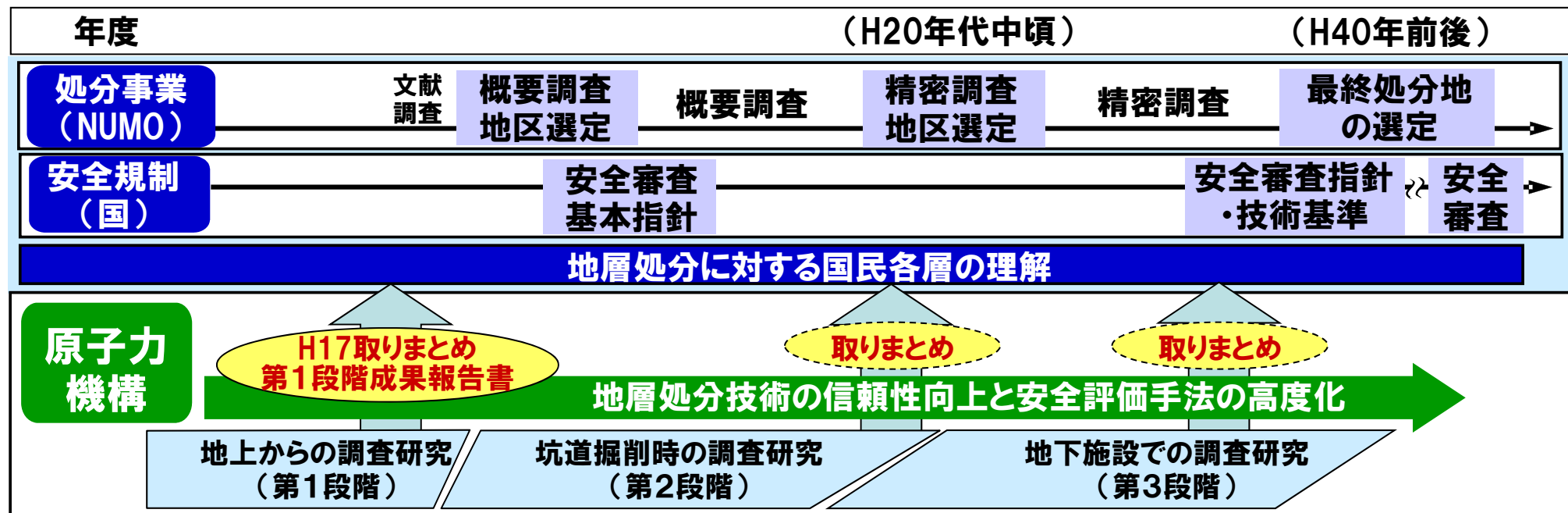
研究開発はなぜ行うのか

研究開発はなぜ行うのか

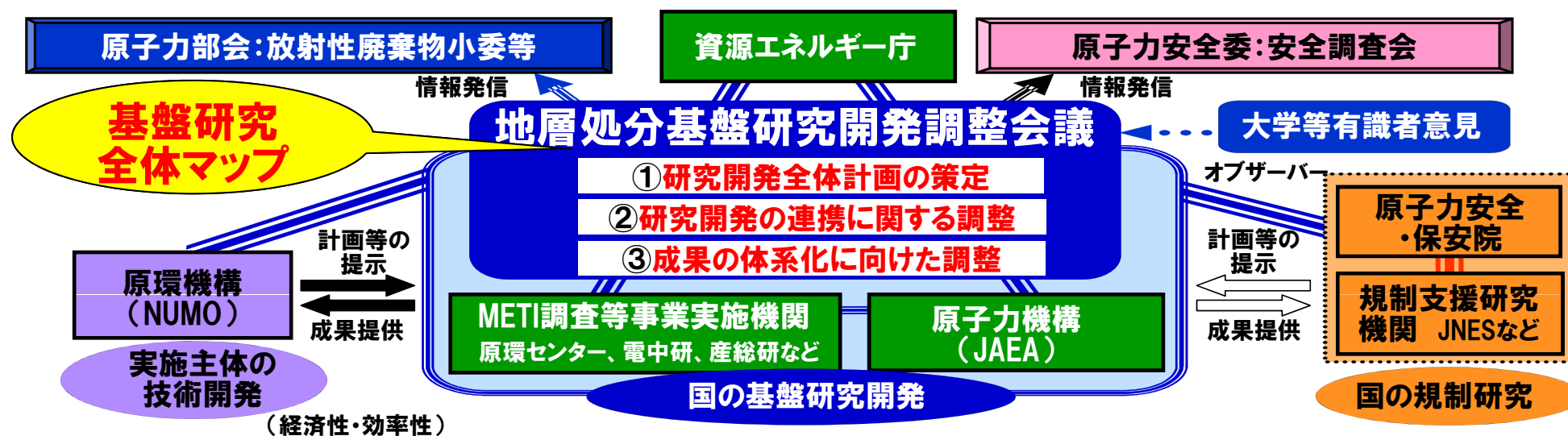
- 処分地の段階的選定にあわせて繰り返し実施される安全評価へのデータや最新の科学技術の知見を反映
 - 評価の内容に関する追跡性と客観性確保の支援
 - 中立で透明性のあるレビューの支援
- 技術の適用性の総合的確認
- 人材育成と知識の継承

成果の段階的な取りまとめと反映

53



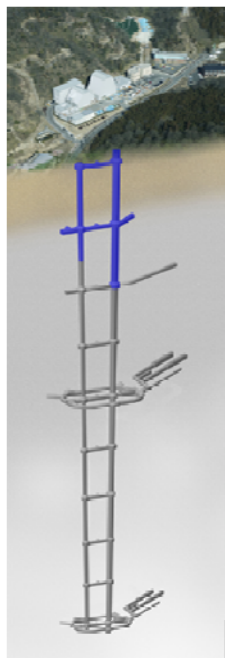
国の基盤研究開発の全体調整・評価の場



原子力機構の研究センター

東濃地科学センター

●瑞浪超深地層研究所（結晶質岩）



地下施設イメージ
平成15年7月掘削開始



200m坑道貫通



主立坑



掘削工事

幌延深地層研究センター

●幌延深地層研究所（堆積岩）



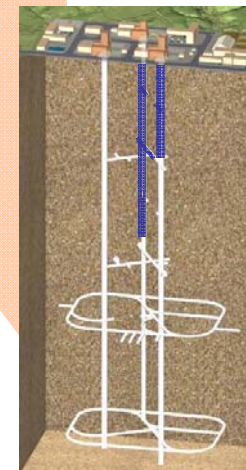
坑道壁面の観察



PR施設



ボーリング調査



地下施設イメージ
平成17年11月掘削開始

東海研究開発センター

●エントリー



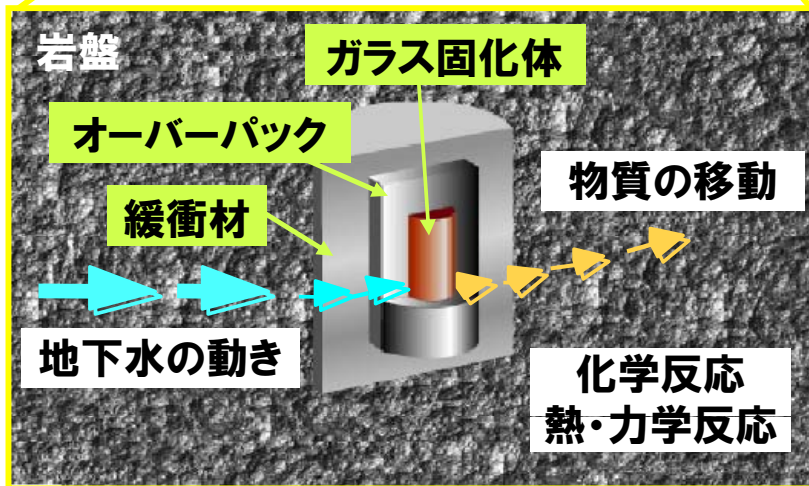
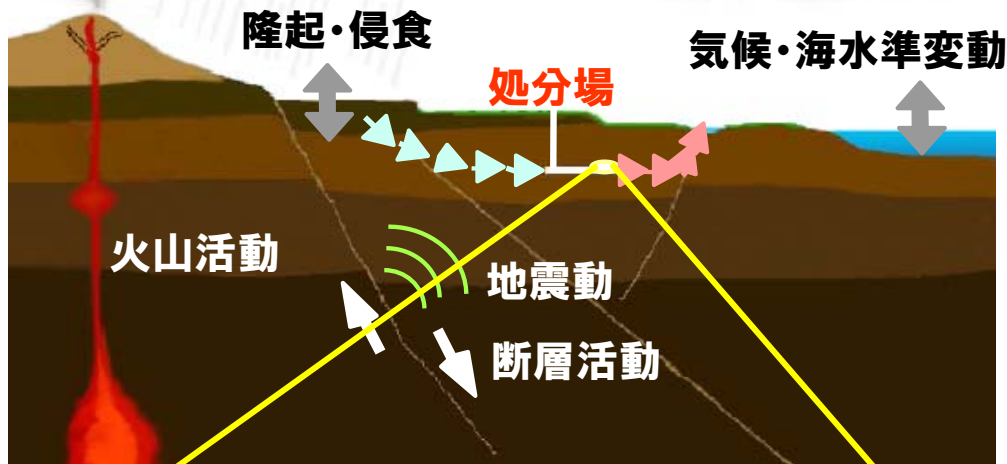
●クオリティ



地下環境模擬試験

地層処分にとって重要な現象の理解

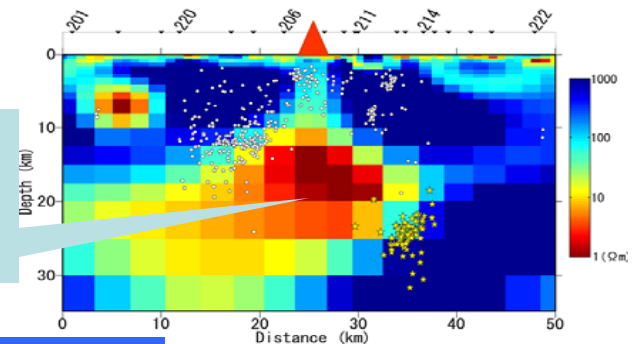
地質環境の長期安定性に関する研究



人工バリアや放射性物質に関する研究

地下のマグマを探知する技術

電磁波を使った地表からの調査で確認されたマグマの姿



ナチュラルアナログ研究



約750年前の鉄製斧
(出雲大社出土品)

大気と遮断された
グローブボックス
の中での試験



地下模擬環境での試験

深地層の研究施設計画

処分事業

文献調査

概要調査

精密調査

(ボーリング調査, 物理探査等)

(地上から精密調査)

(地下での精密調査)

深地層の研究施設

第1段階

地上からの調査研究

第2段階

坑道掘削時の調査研究

第3段階

地下施設での調査研究



深地層の研究施設計画の進展

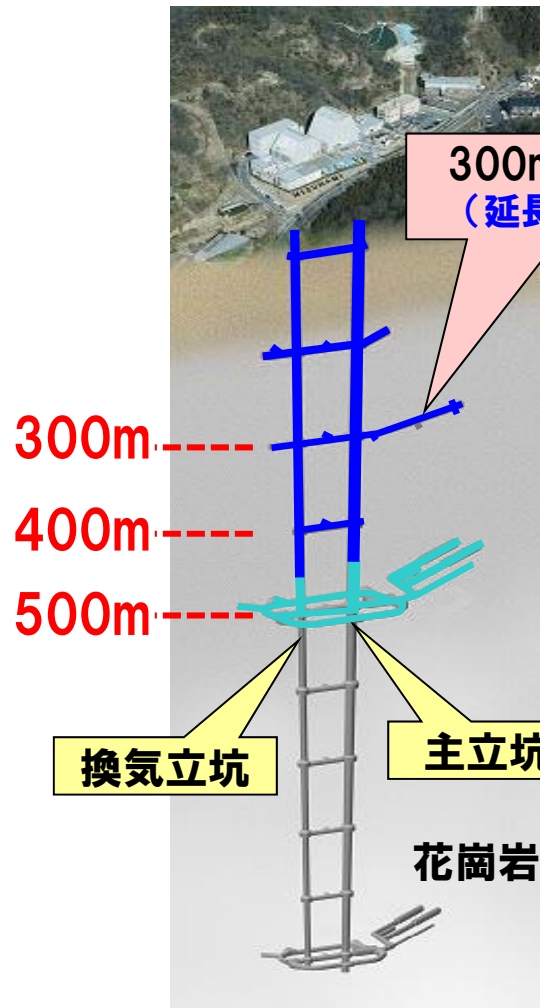
57

瑞浪超深地層研究所

第1期中期計画：H17～H21年度

地上からの調査研究の完了
掘削時の調査研究の進展
→概要調査等の技術基盤
・研究用水平坑道の整備

幌延深地層研究所



水質観測ボーリング孔の掘削
(瑞浪300m水平坑道)



低アルカリ性セメントを用いた
コンクリートによる吹付け施工
(幌延140m水平坑道)

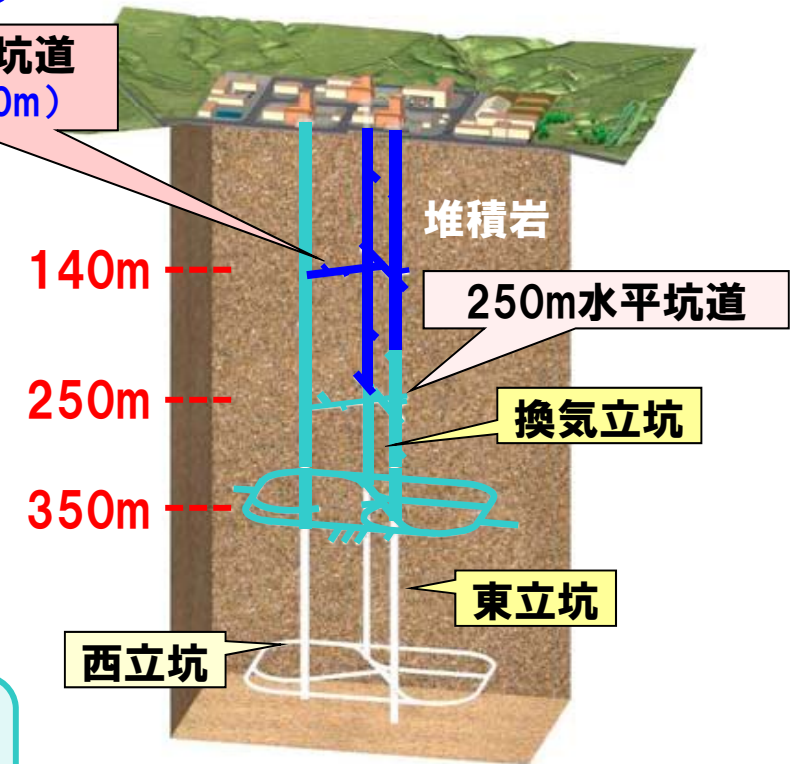
140m水平坑道 (延長約180m)

深地層環境の深度

- ・法定要件(300m以深)を満足
- ・還元環境や低透水性等を確保

第2期中期計画：H22～H26年度

- ・深地層環境までの調査研究
→地上からの精密調査の技術
基盤
- ・国民との相互理解促進活動への活
用



— 第1期中期計画
— 第2期中期計画

*坑道の形状等は現在のイメージであり、今後の検討により具体化される。

総合的な安全評価手法の整備

信頼度情報を付与したデータベースの整備

熱力学・収着・拡散データベース

地層処分安全評価のためのデータベースです。

坑井温度プロファイルデータベース

日本の地質環境の理解や火山・地熱活動の影響評価のためのデータベースです。

グラウトデータベース

地下坑道掘削における湧水抑制のためのグラウト技術のデータベースです。

緩衝材基本特性データベース

緩衝材や処分場の設計と人工バリアの長期挙動評価のためのデータベースです。

温泉地化学データベース

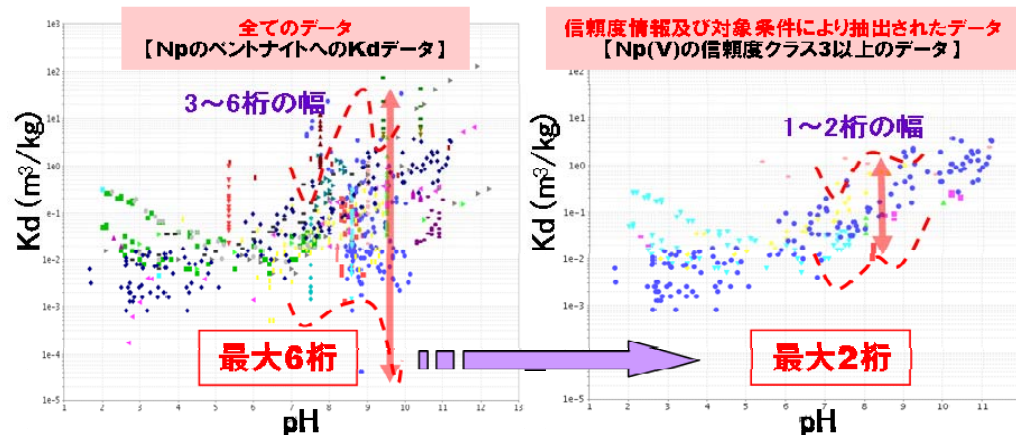
日本の地質環境の理解や火山・地熱活動の影響評価のためのデータベースです。

独立行政法人
日本原子力研究開発機構

核種移行データベース
Nuclide Migration Database

収着データベース
Sorption Database

トップページ | グラフ表示 | ダウンロード | 文献集約表 | 信頼性情報 | ログアウト



総合的な安全評価手法の整備

段階的に実施される地質調査

取得データ

調査計画への提案

地質構造

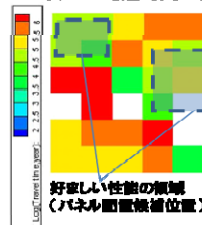
調査計画への提案

調査データ等

情報の質と量に応じた地質環境の理解

物質移行モデル化手法の検討

母岩性態の定量化
(地表への到達時間の分布)



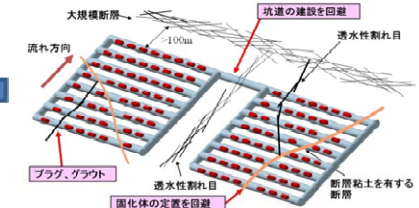
水理構造

各点を出発点とした
地下水流動解析

安全性を向上するための工学的な対処
処分場の位置、深度、パネルの配置

モデルの
改良提案

処分システム
全体としての
性能評価



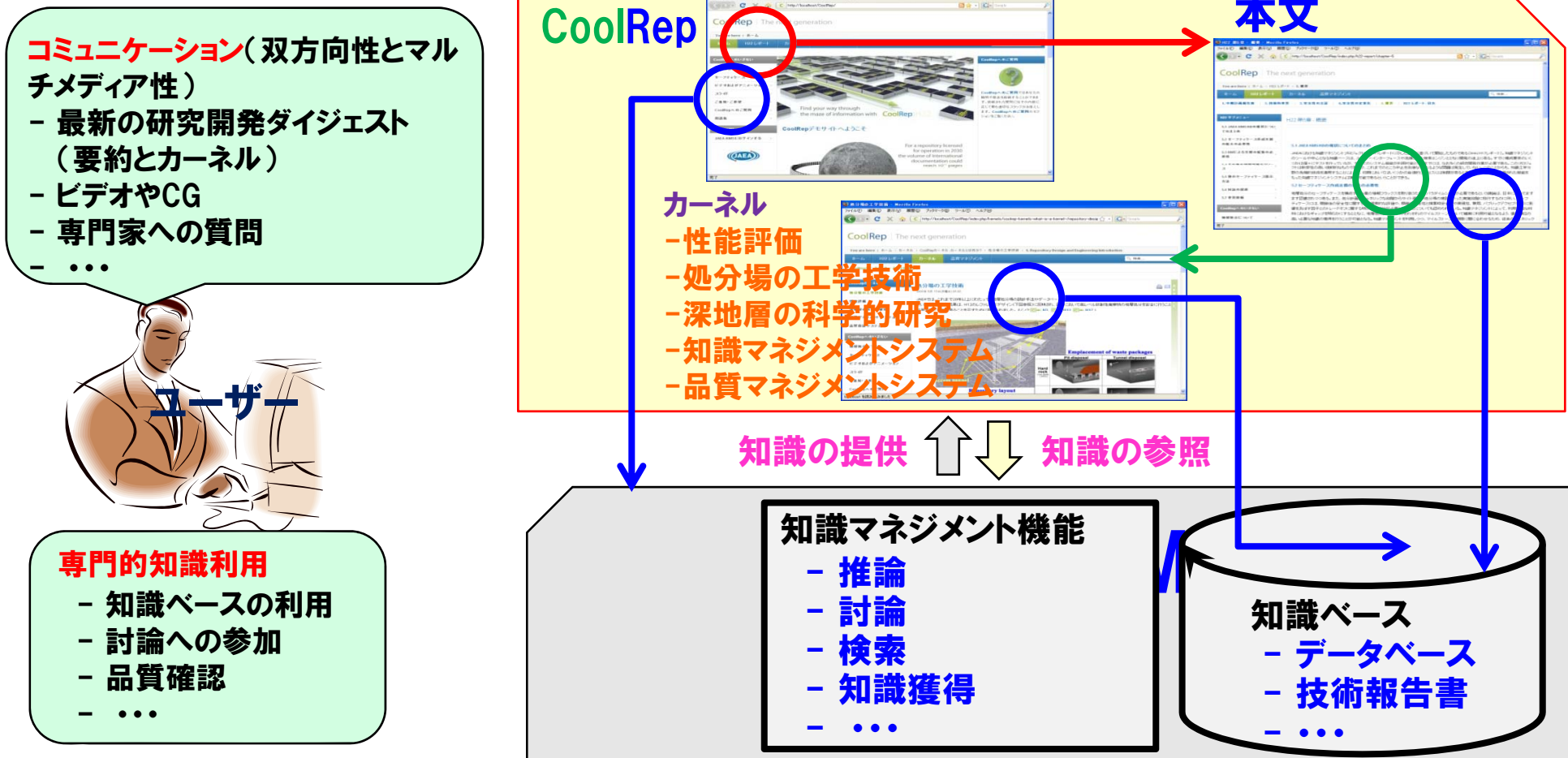
【第2期中期計画】

- 人工バリアや放射性核種の長期挙動に関する放射性核種の長期挙動に関するデータの拡充, モデルの高度化
→ 処分場の設計・安全評価に必要なデータベース・解析ツールの整備・拡充
- 深地層の研究施設等の活用(実際の地質環境条件)
→ 現実的な処分概念を踏まえた総合的な安全評価手法の整備

地層処分の知識マネジメントシステム

59

- 知識マネジメントシステム(JAEA KMS)プロトタイプを平成21年度末に公開
- 研究開発成果の取りまとめ報告書(次世代型文書: **CoolRep H22**)とリンク
<http://www.jaea.go.jp:80/04/tisou/toppage/top.html>



【第2期中期計画】

- 研究開発成果等を総合的な技術として体系化した知識ベースの充実させ、容易に利用できるように管理し、処分事業と安全規制への円滑な技術移転を図る