

地層処分計画と研究開発の動向

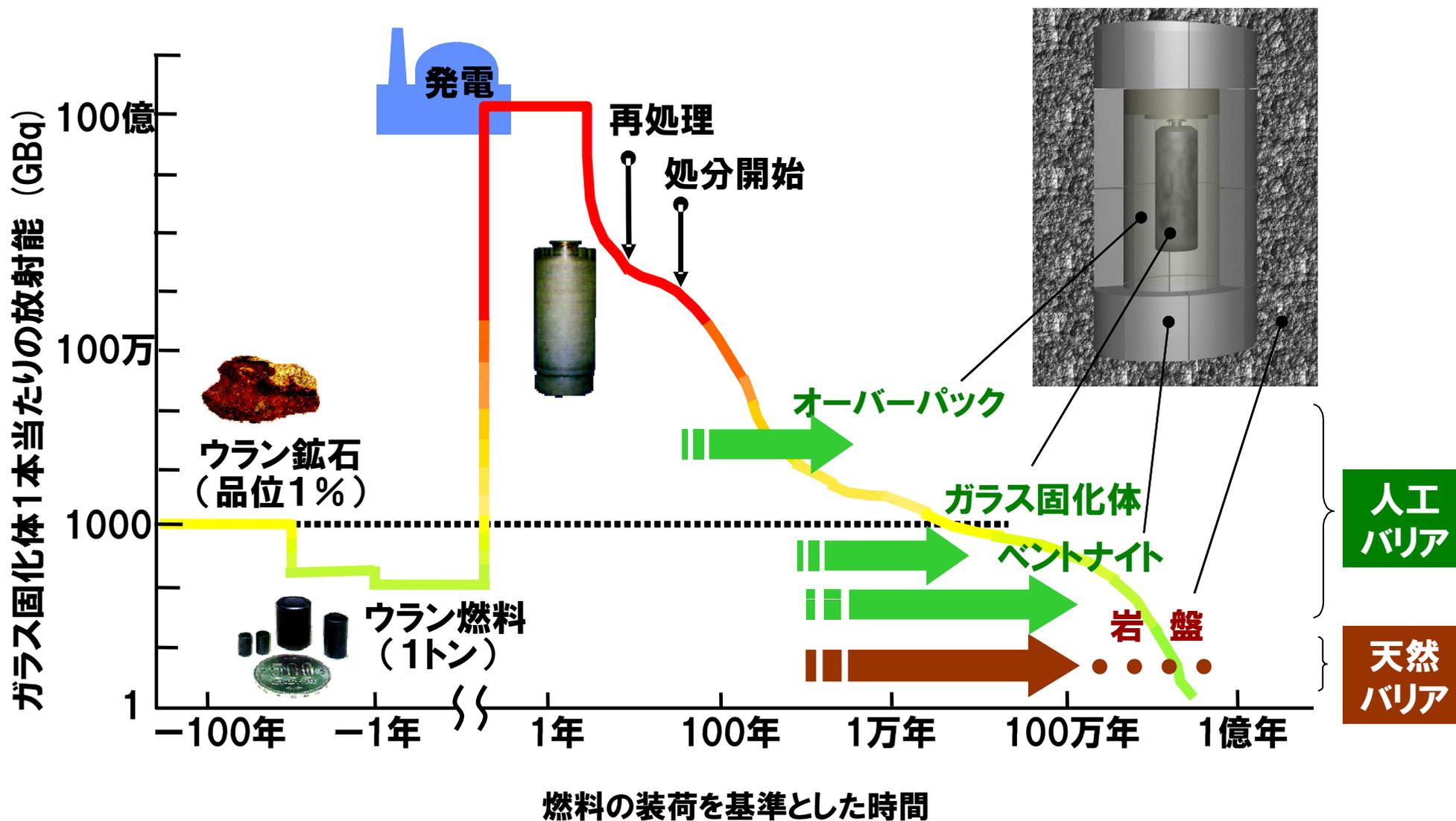
－研究開発に関連する最近の状況－

平成23年12月3日
日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門

- 1. 地層処分概念と安全評価の考え方**
- 2. 地層処分研究開発の現状**
- 3. 海外情勢**
- 4. TRU廃棄物の地層処分**

地層処分概念と安全評価の考え方

高レベル放射性廃棄物の特徴



なぜ地層処分か？



高レベル放射性廃棄物は、数万年以上というこれまで経験したことのない時間スケールを考慮した対策が必要

技術的視点：

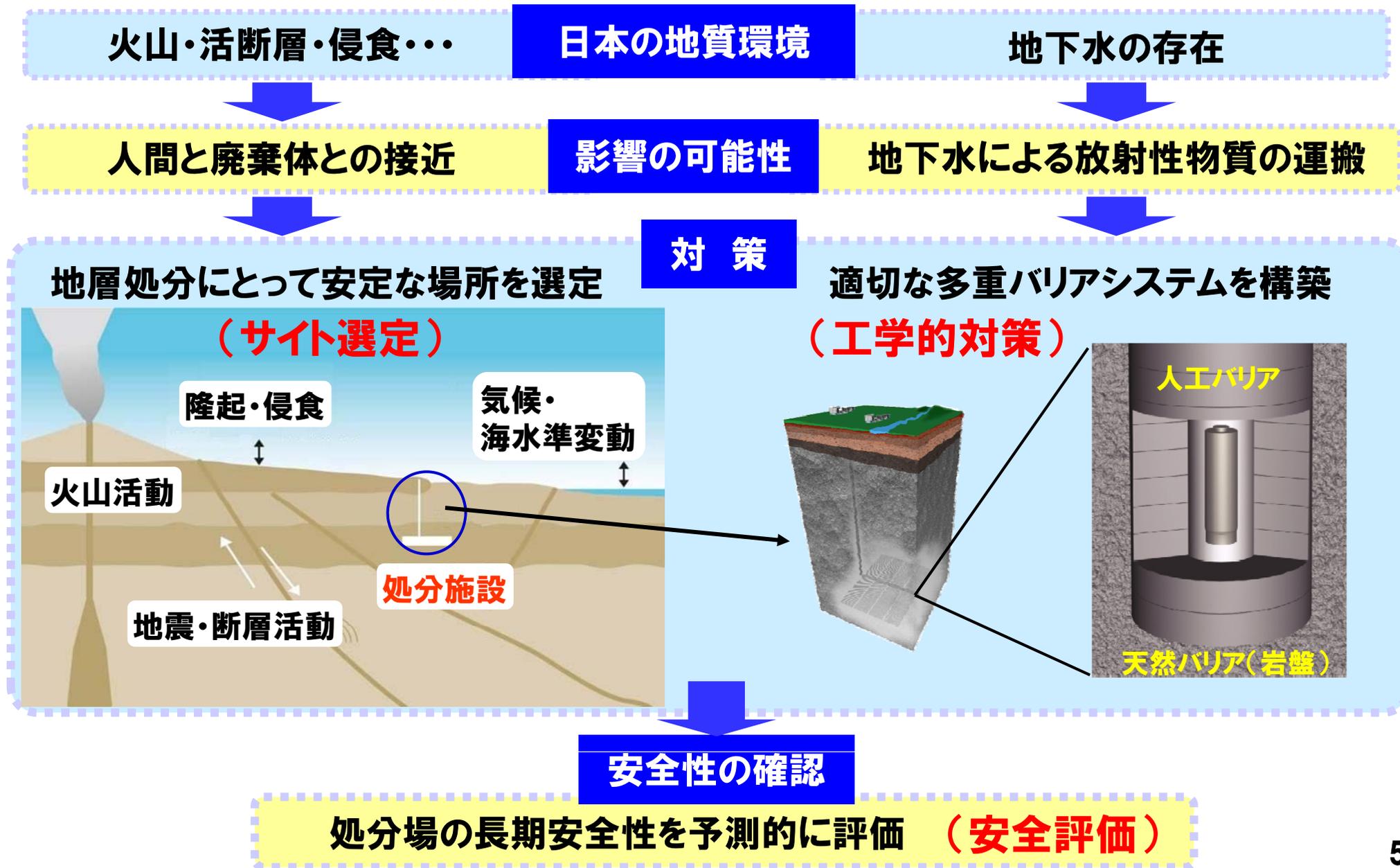
- 現実的な方法で実現可能であること
 - 地層処分は
 - ✓ 安定な環境として地下深部を活用
 - ✓ 人間が関与しなくても安全に隔離できるシステム(受動的な安全系 (Passive Safety System))

倫理的視点：

- 世代間の負担の公平性
 - 不当に将来世代の選択の自由を奪わない
 - 将来世代に過度の負担を課さない
- 世代内における負担の公平性
 - 問題解決のための適切な資源配分
 - 公平かつ公開性のある意思決定プロセス

地層処分が最も有望な隔離方法であるとの認識は、国際的に合意されており、各国ともに地層処分を選択

地層処分の安全確保の仕組み



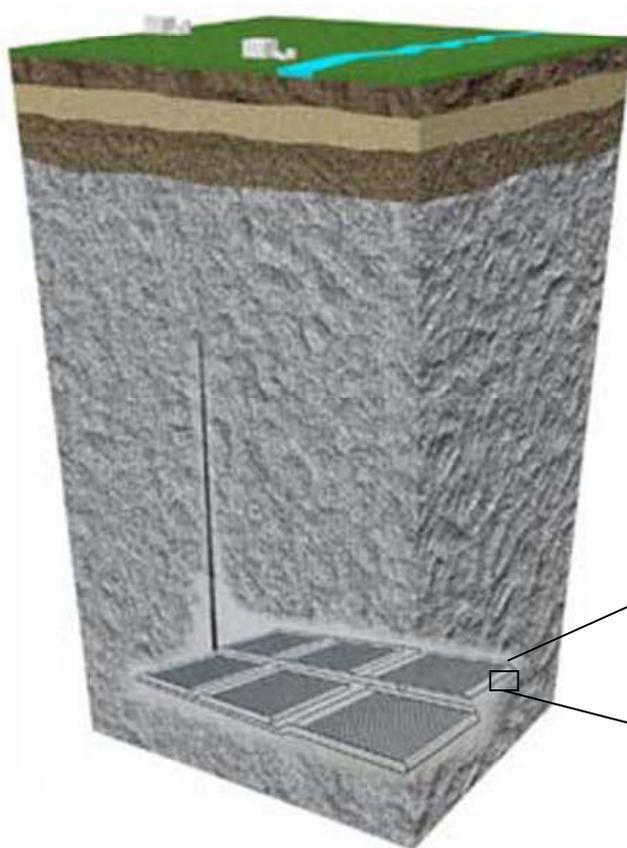
地層処分システムの構成要素と期待される安全機能



(サイクル機構: 第2次取りまとめ総論レポート第II章より)

長期的に安定で好ましい条件を有する地質環境に構築される**多重バリアシステム**

地質環境



天然バリア

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)

オーバーパック

(炭素鋼)

緩衝材

(ベントナイトを主成分)

緩衝材

岩盤

地質環境

長期的な安定性

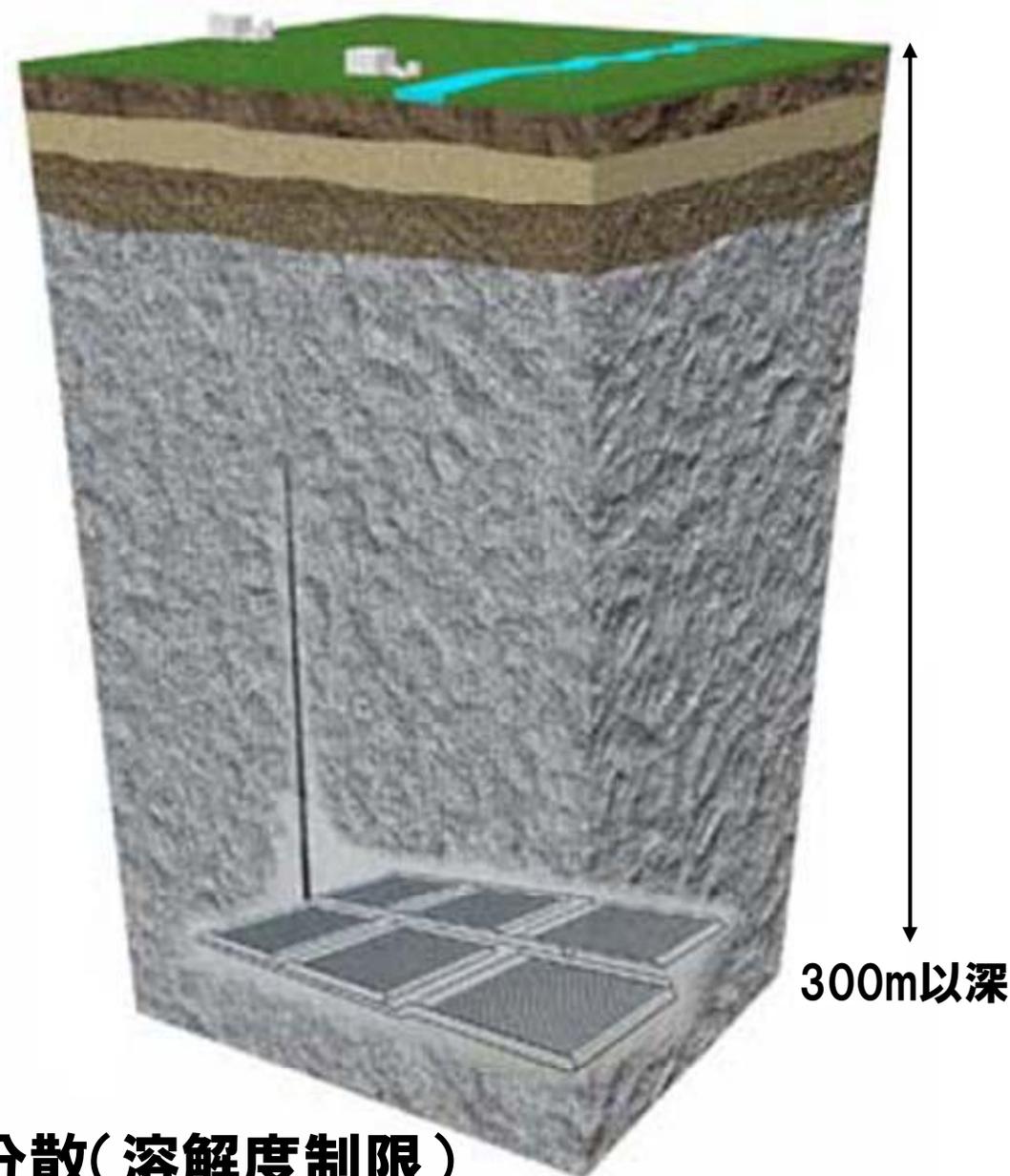
- ・火山活動がない
- ・活断層が存在しない
- ・著しい隆起・侵食が生じない
- ・気候変動によって著しい影響を受けない
- ・資源が存在しない

人工バリアの設置環境

- ・好ましい地下水化学(還元性等)
- ・小さな地下水流束
- ・力学的安定性
- ・人間環境からの物理的障壁

天然バリアとしての機能

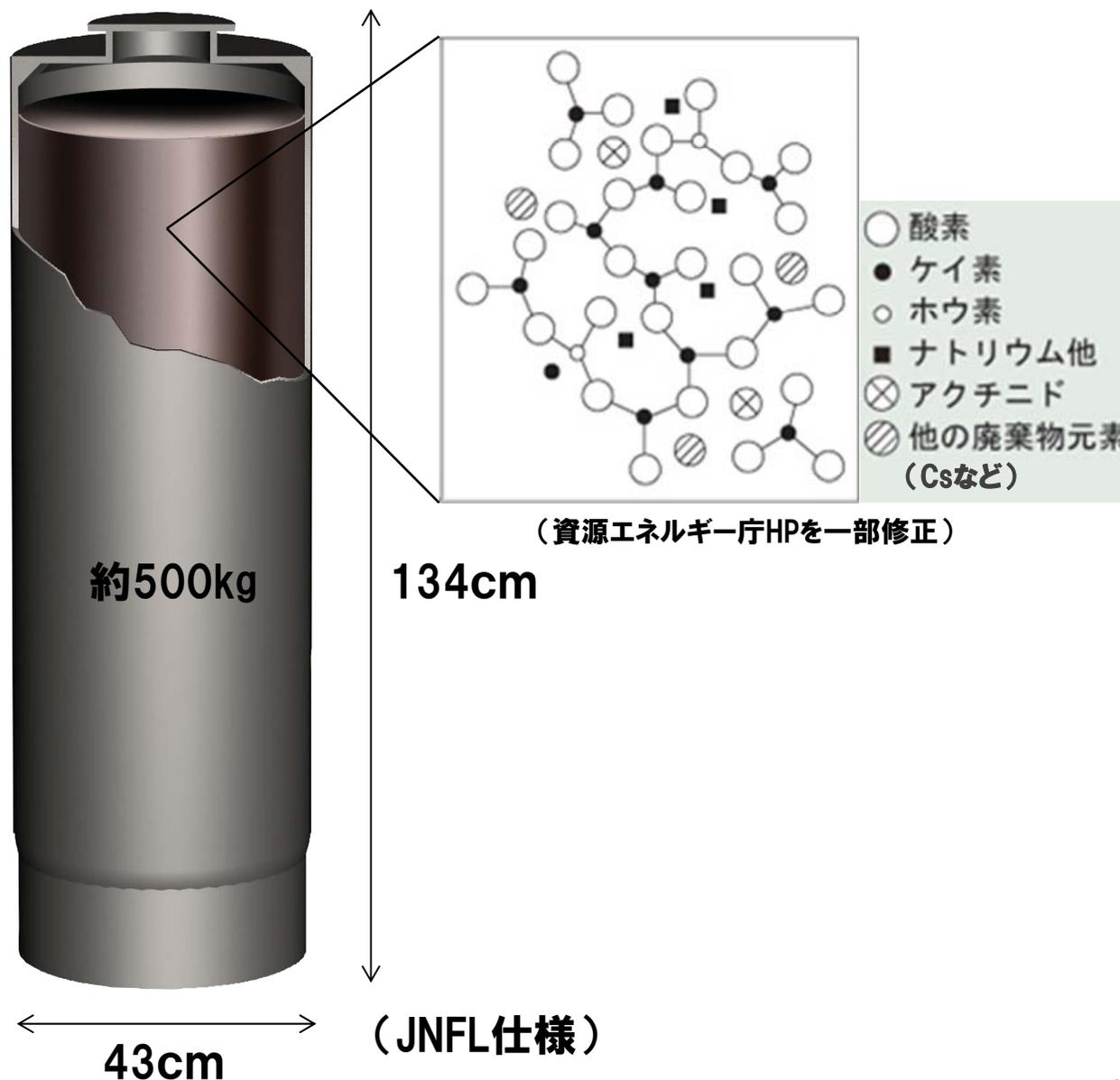
- ・放射性核種の移行抑制と希釈・分散(溶解度制限)



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)

- 放射性核種を均一かつ安定に固定
- 高い化学的耐久性により地下水への放射性核種の溶出を抑制(例:Cs)
- 熱や放射線に対する安定性



オーバーパック

(炭素鋼, 銅, チタン)

- ガラス固化体の発熱や放射能が高い期間, 地下水とガラス固化体の接触を阻止(1000年間)
- 地下水との反応によりガラス固化体近傍の還元性を維持
- 放射性核種の腐食生成物への収着

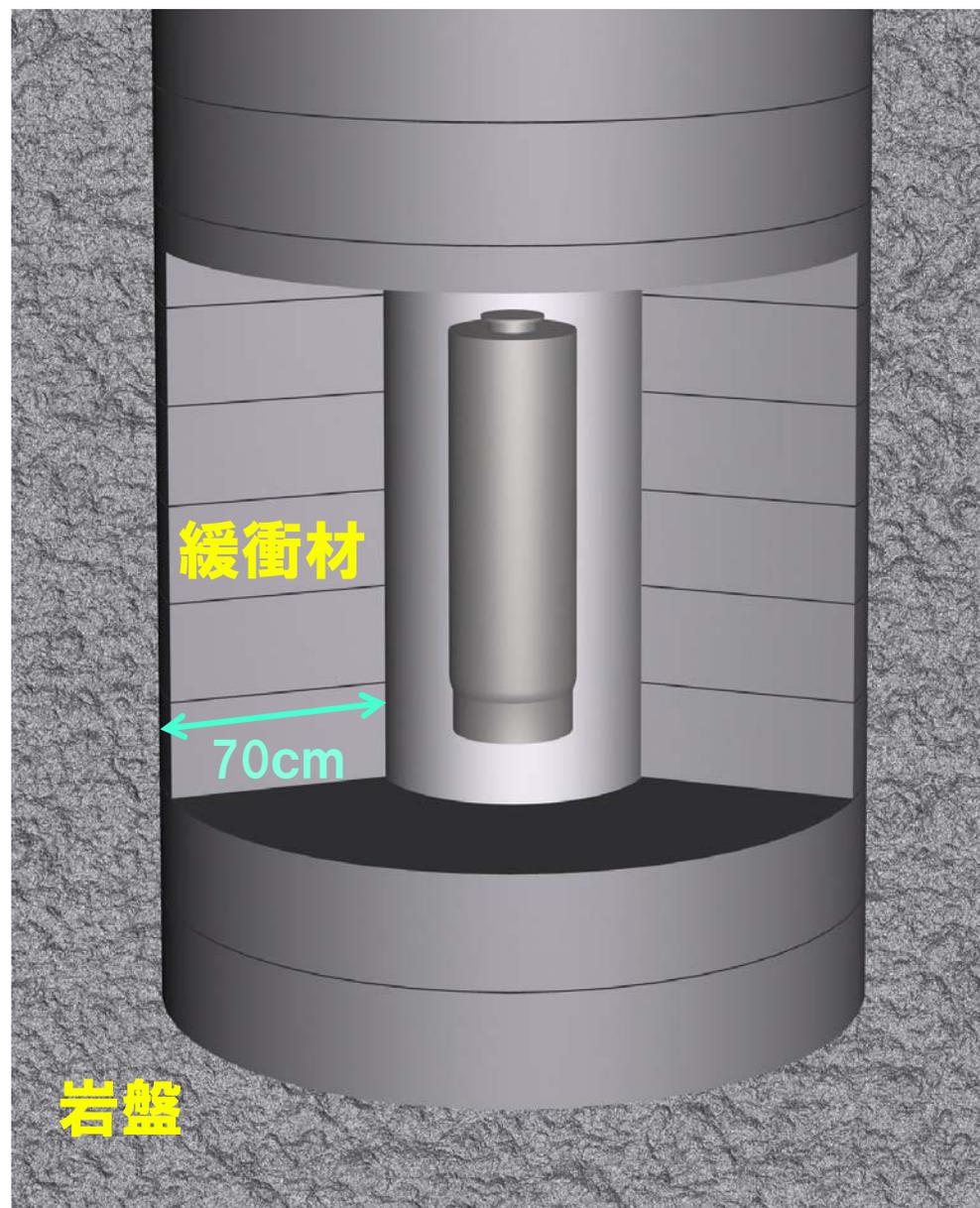


厚さ19cm(炭素鋼の場合)

緩衝材

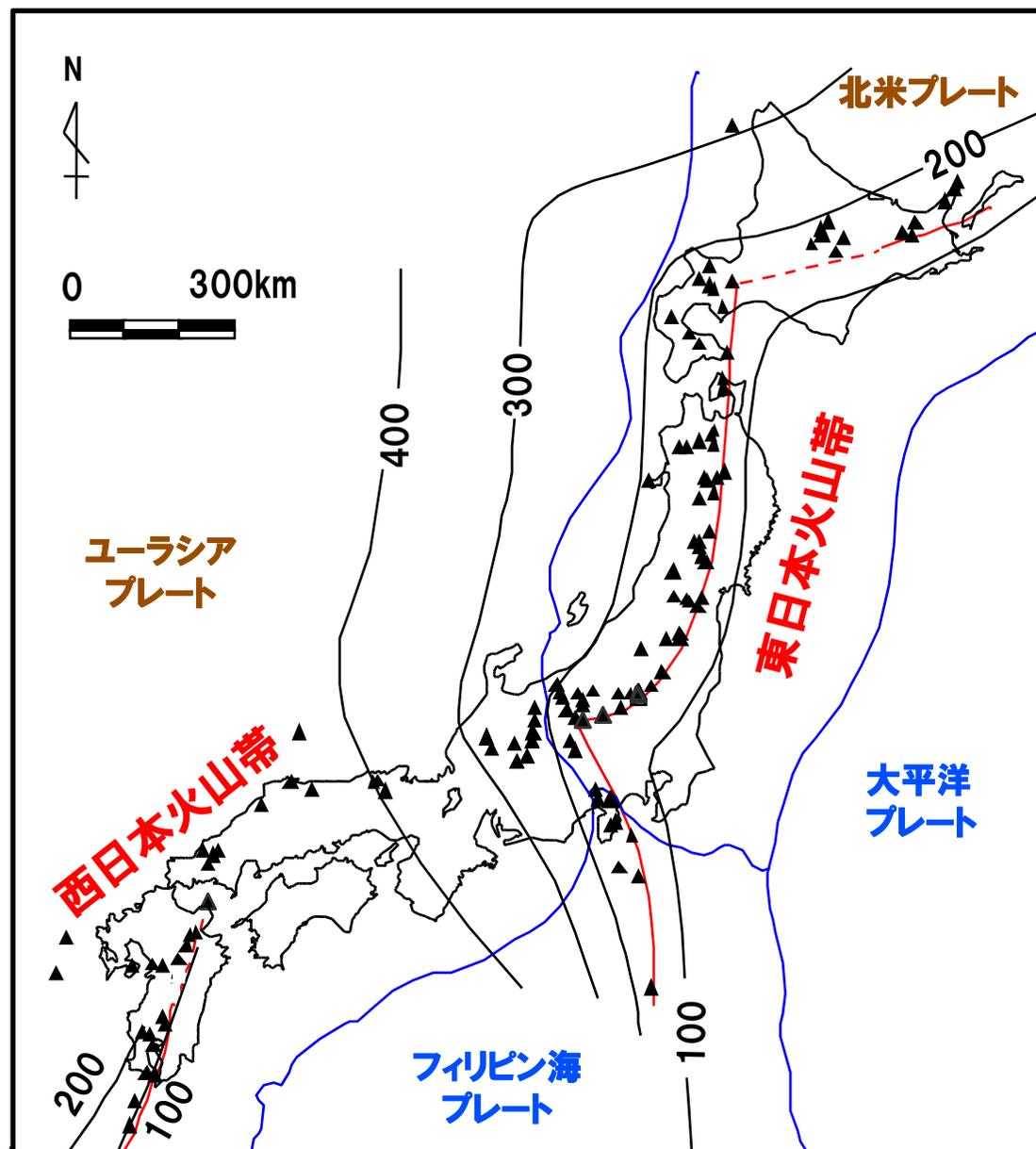
(ベントナイトを主成分)

- 低透水性(オーバーパックと地下水の接触抑制)
- 小さな物質移動速度
- 放射性核種の移行遅延(収着)
- 膨潤性と可塑性
- 化学的緩衝性
- 空隙水中での低い溶解度
- コロイド, 微生物, 有機物の移動に対するフィルター効果



緩衝材の厚さは30wt%ケイ砂混合, 乾燥密度 1.6Mgm^{-3} とした場合

火山の分布とプレートの配置

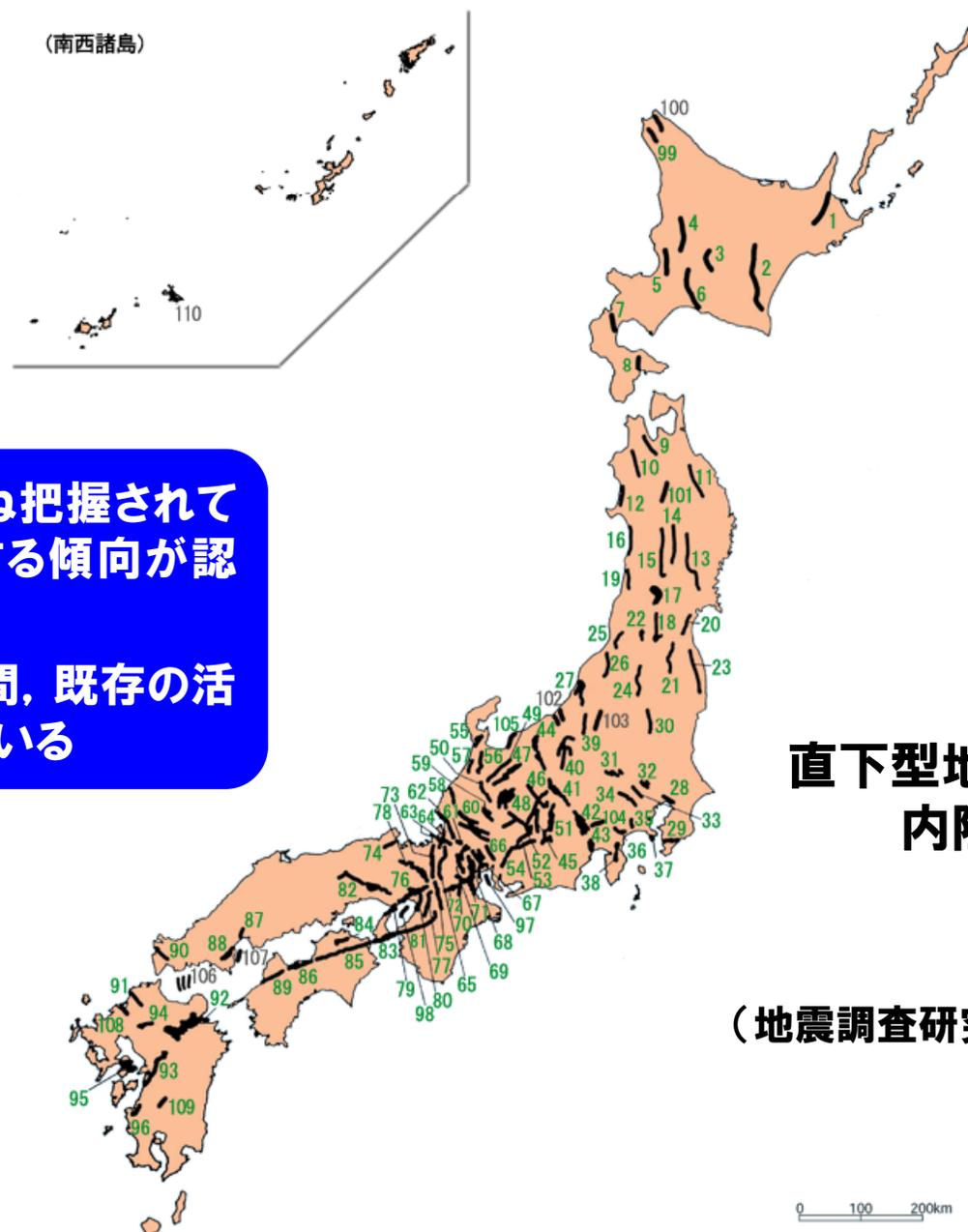


- 火山の配置は規則的で、その多くは海溝から一定の距離をおいて分布する
- 200万年前から現在に至るまで、火山の活動地域はほとんど変化していない

- ▲ 第四紀火山
- 火山フロント
- プレート境界
- 深発地震面の深度 [km]

(第四紀火山カタログ委員会編, 1999を編集)

主要活断層の分布

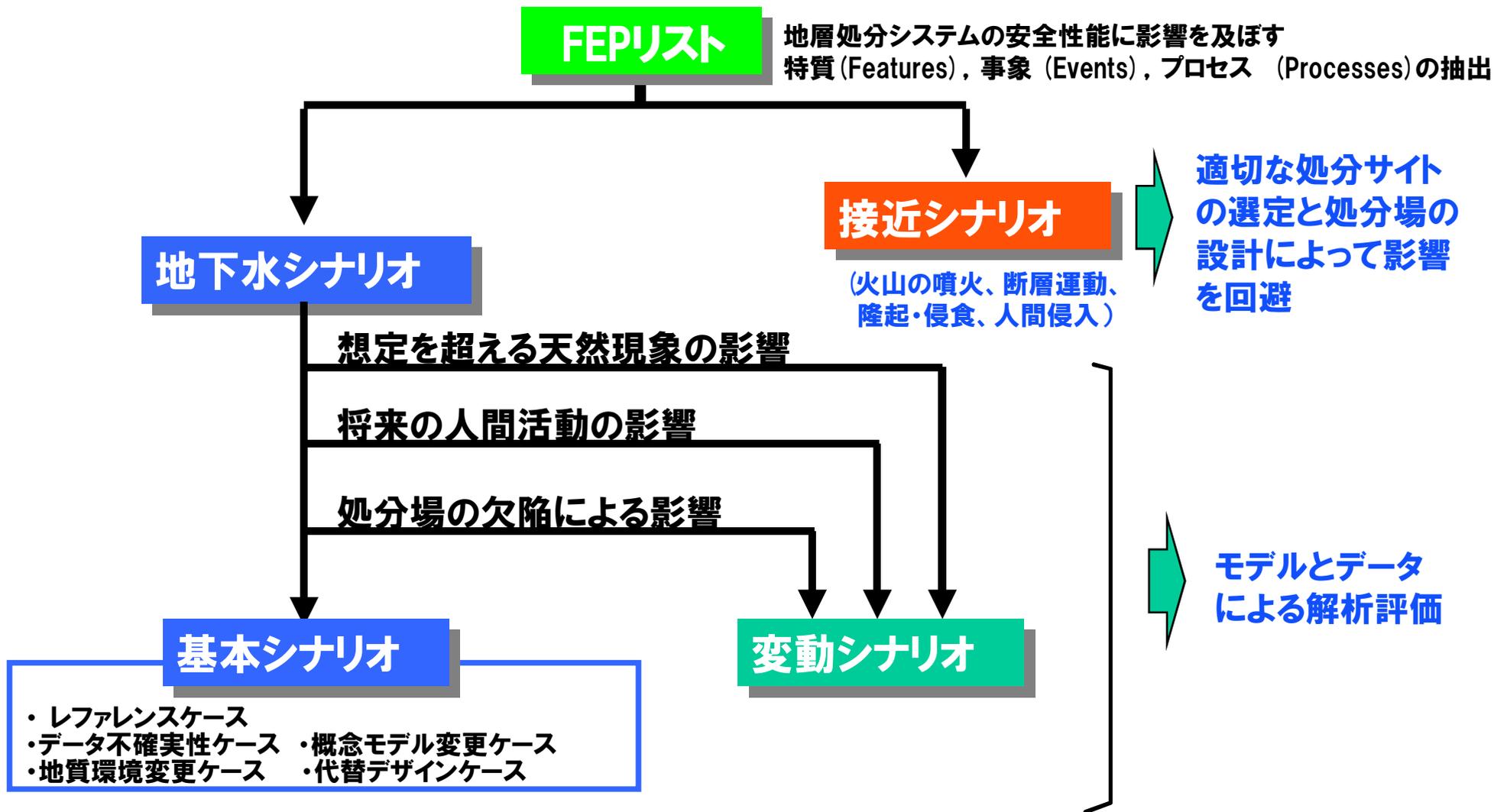


- 全国の活断層の分布は概ね把握されており，地域によって偏在する傾向が認められる
- 断層活動は過去数十万年間，既存の活断層帯で繰り返し起こっている

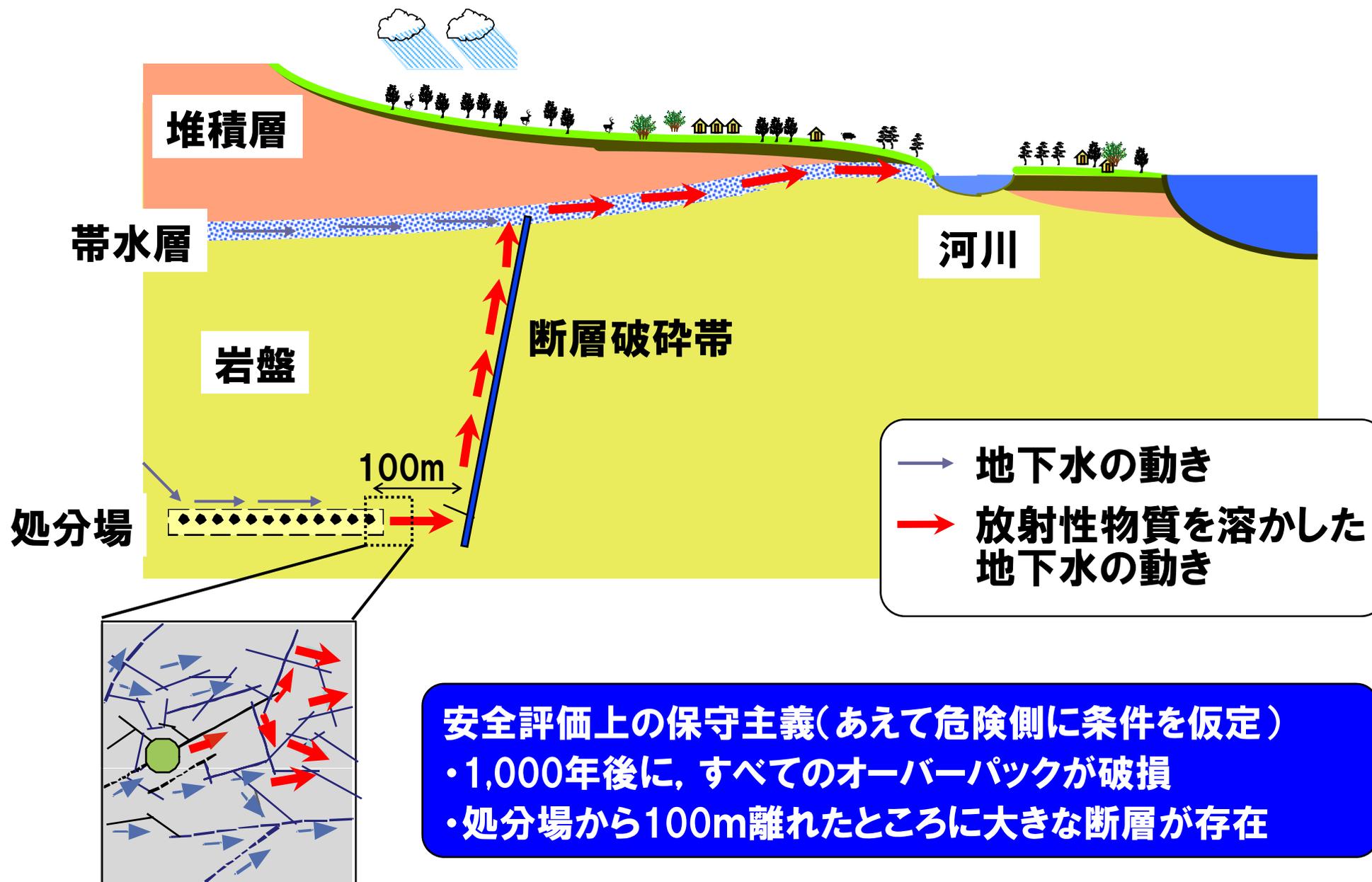
**直下型地震を引き起こす
内陸の活断層**

(地震調査研究推進本部より)

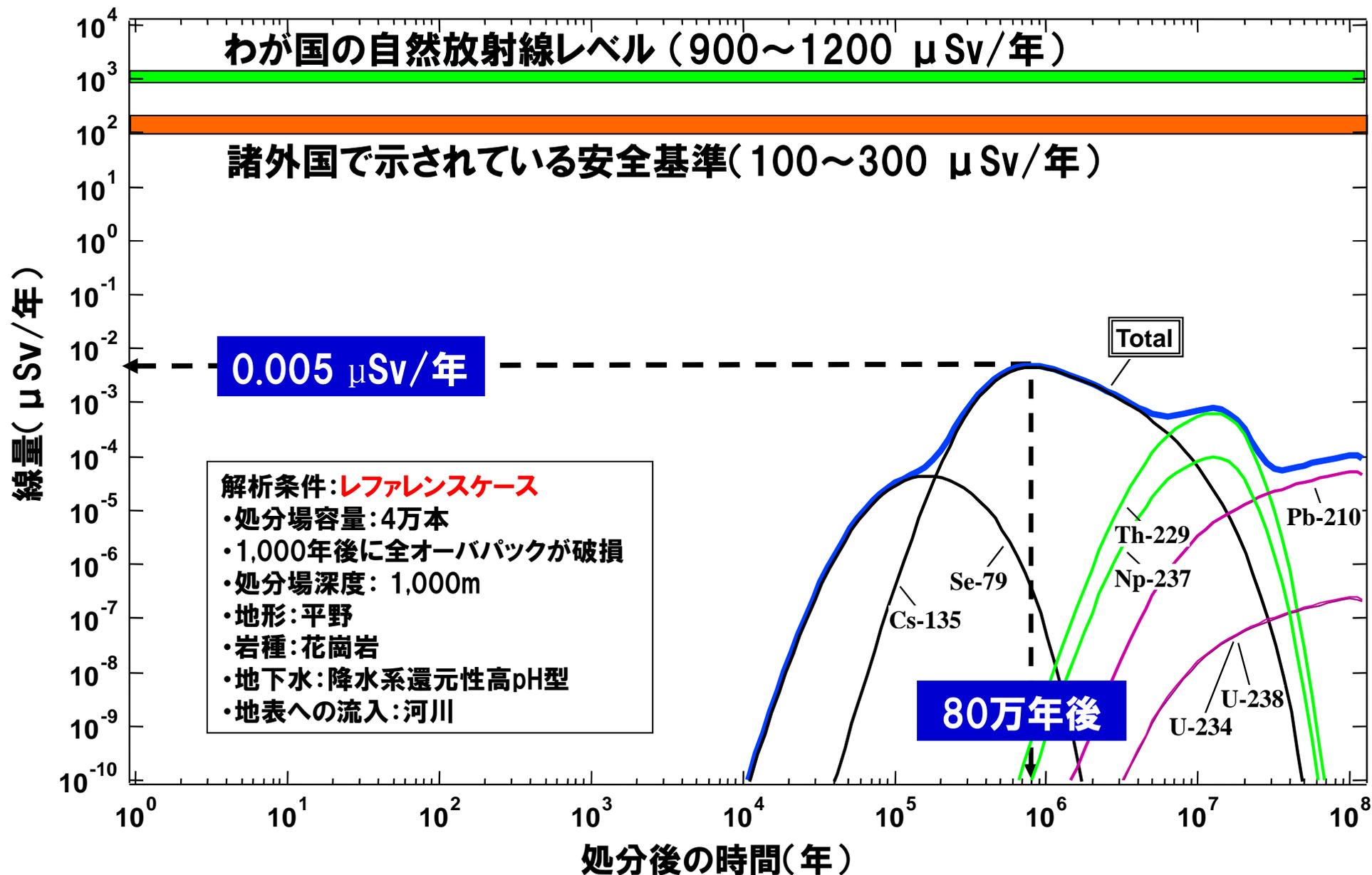
地層処分の安全評価シナリオ



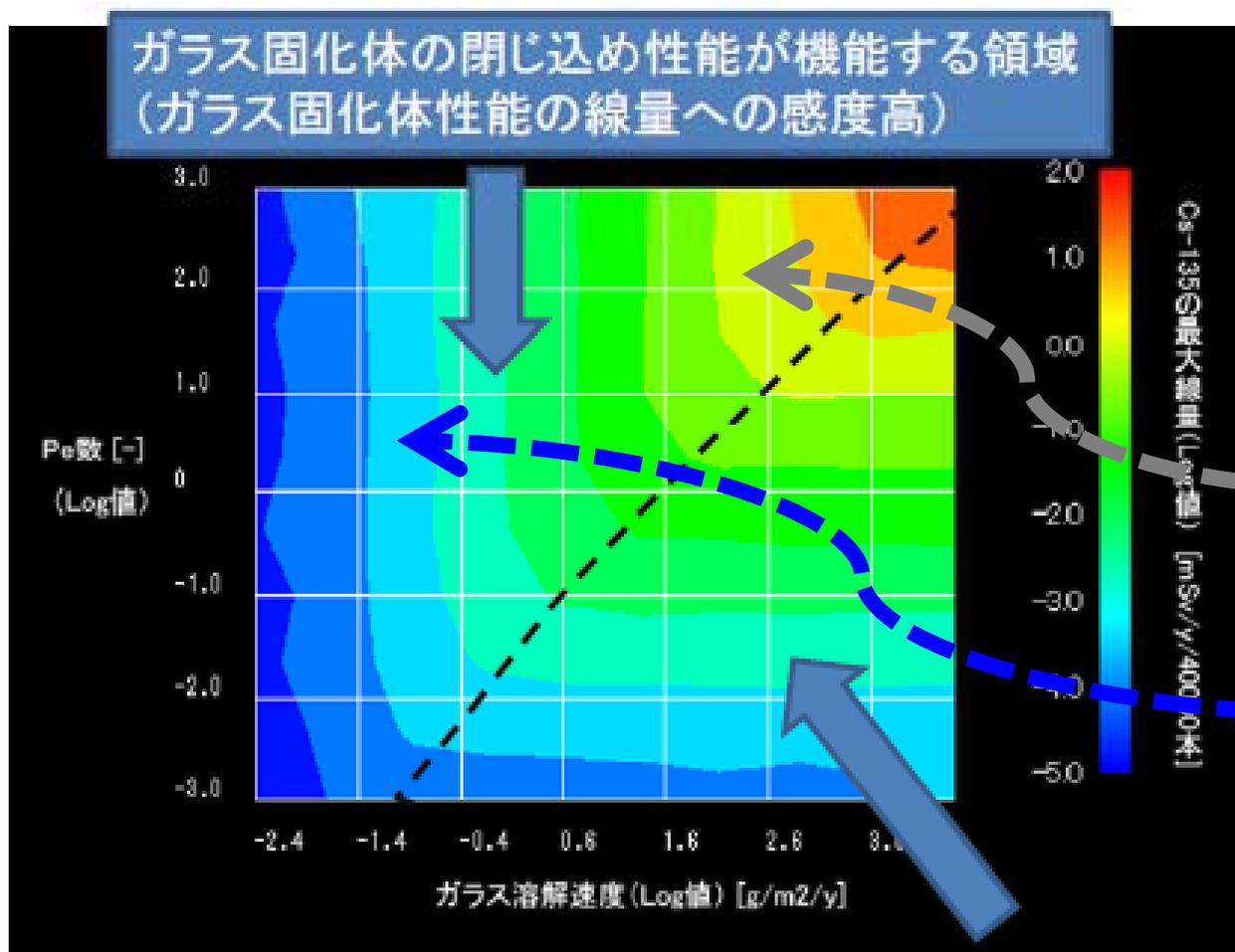
地下水シナリオの評価



地下水シナリオに基づく影響評価



ガラス固化体および緩衝材の閉じ込め機能



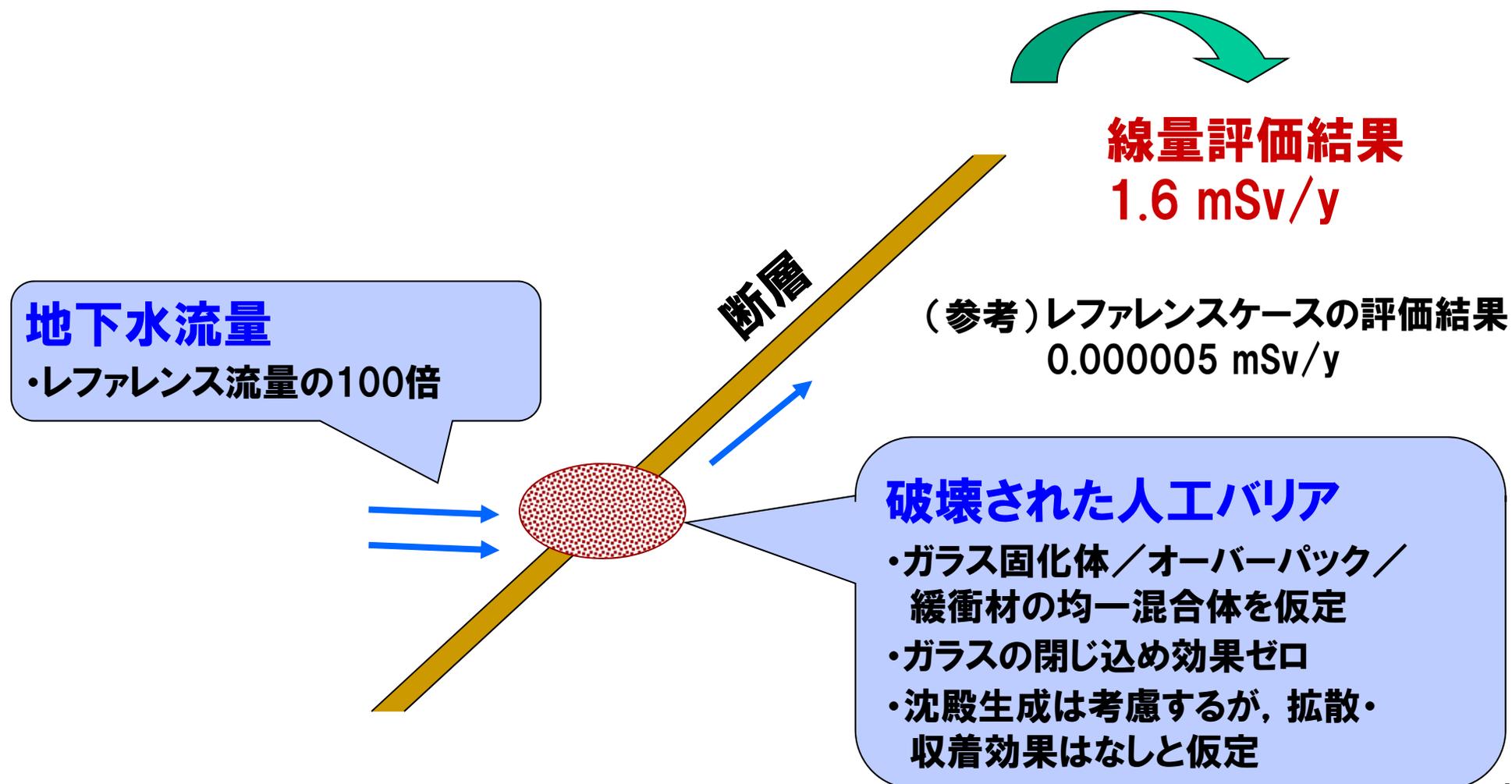
- 人工バリアの個別の安全機能の効果を検討
- ガラス溶解速度が高く、緩衝材中のペクレ数が大きいほど線量は高い
- ガラス固化体が適切に機能（溶解速度が小さい）すれば、緩衝材が十分には機能を発揮しない（ペクレ数が大）場合でも最大線量は低く抑えられる（核種移行は抑制）

緩衝材の閉じ込め性能が機能する領域
(ガラス固化体性能の線量への感度低)

天然現象による仮想的シナリオの評価事例

活断層直撃ケース

仮想条件: 処分後1,000年で、断層のズレにより4万本中300本が破壊

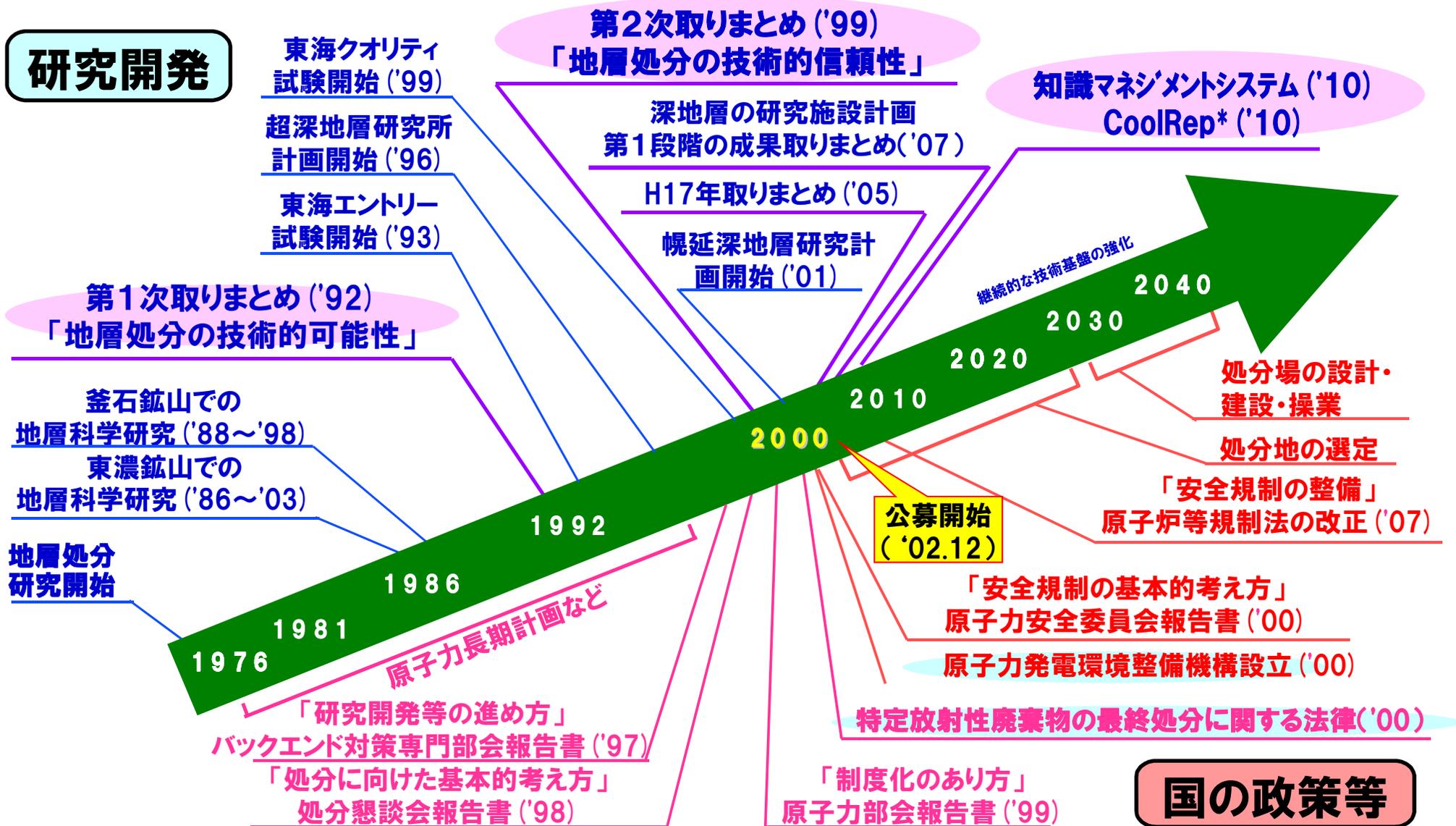


地層処分研究開発の現状

わが国の高レベル放射性廃棄物地層処分計画

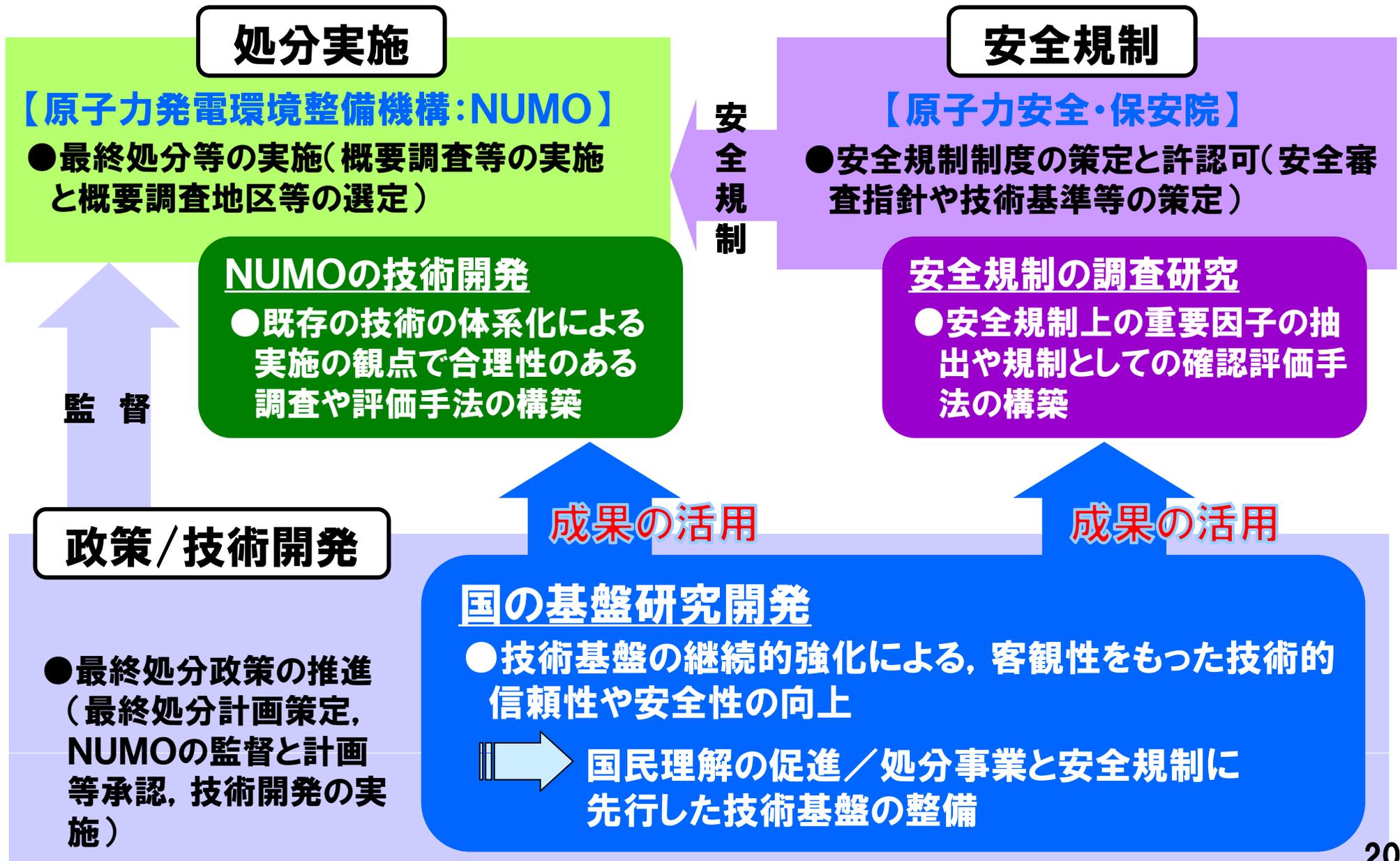


研究開発



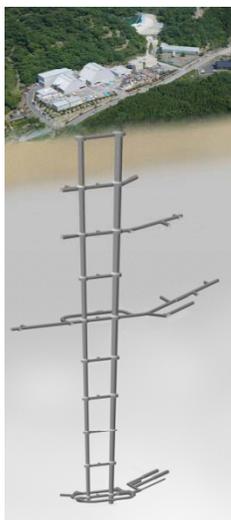
国の政策等

わが国の処分実施体制と国の基盤研究開発の位置付け



東濃地科学センター

- 瑞浪超深地層研究所
(結晶質岩)

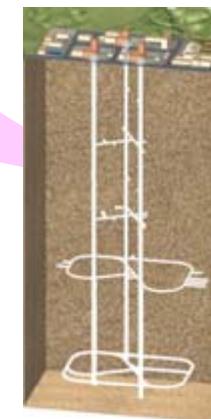


(イメージ図)



幌延深地層研究センター

- 幌延深地層研究所
(堆積岩)



(イメージ図)

東海研究開発センター



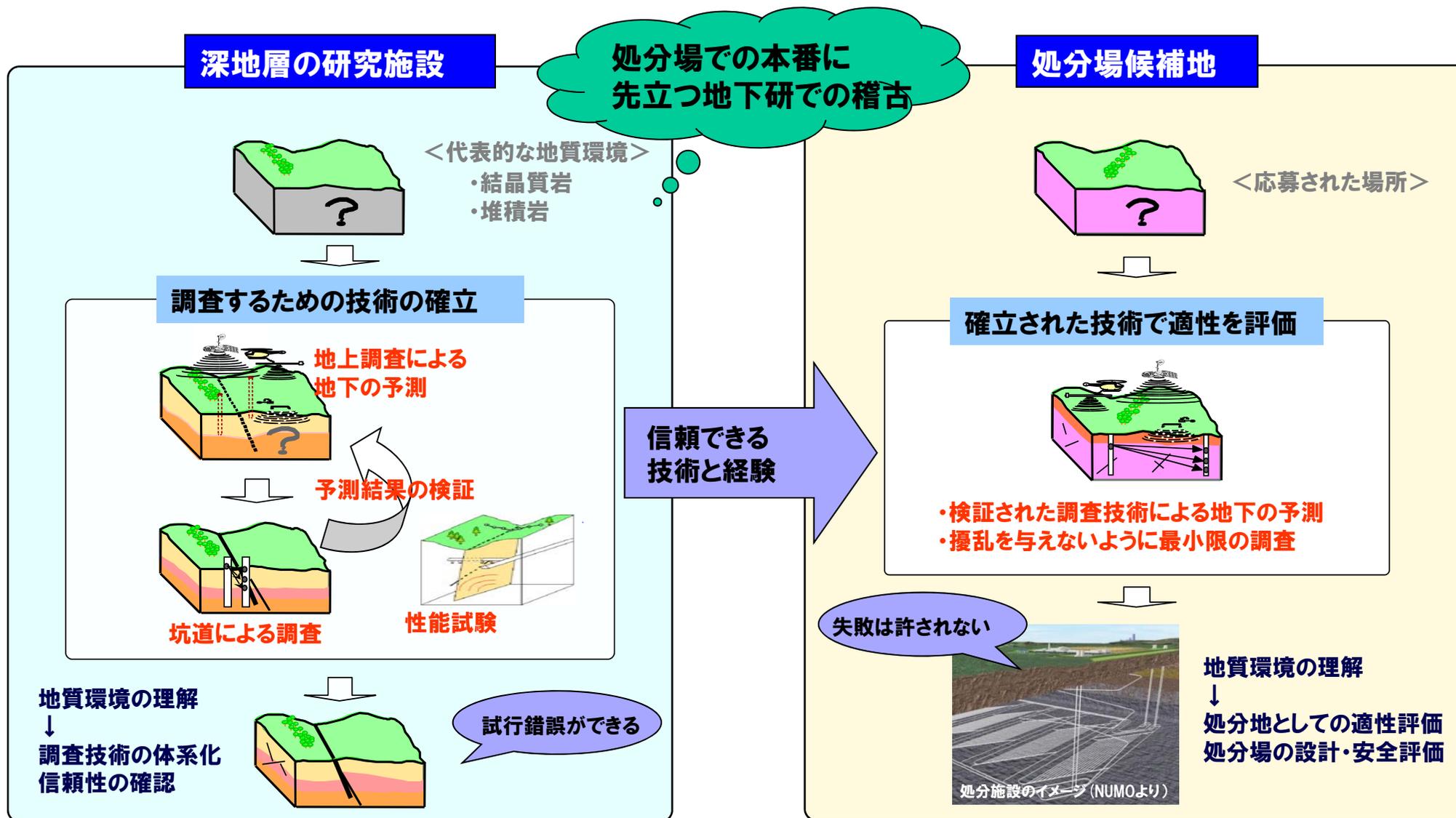
エントリー



クオリティ



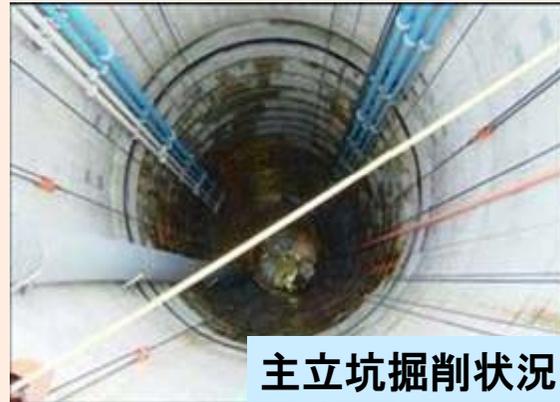
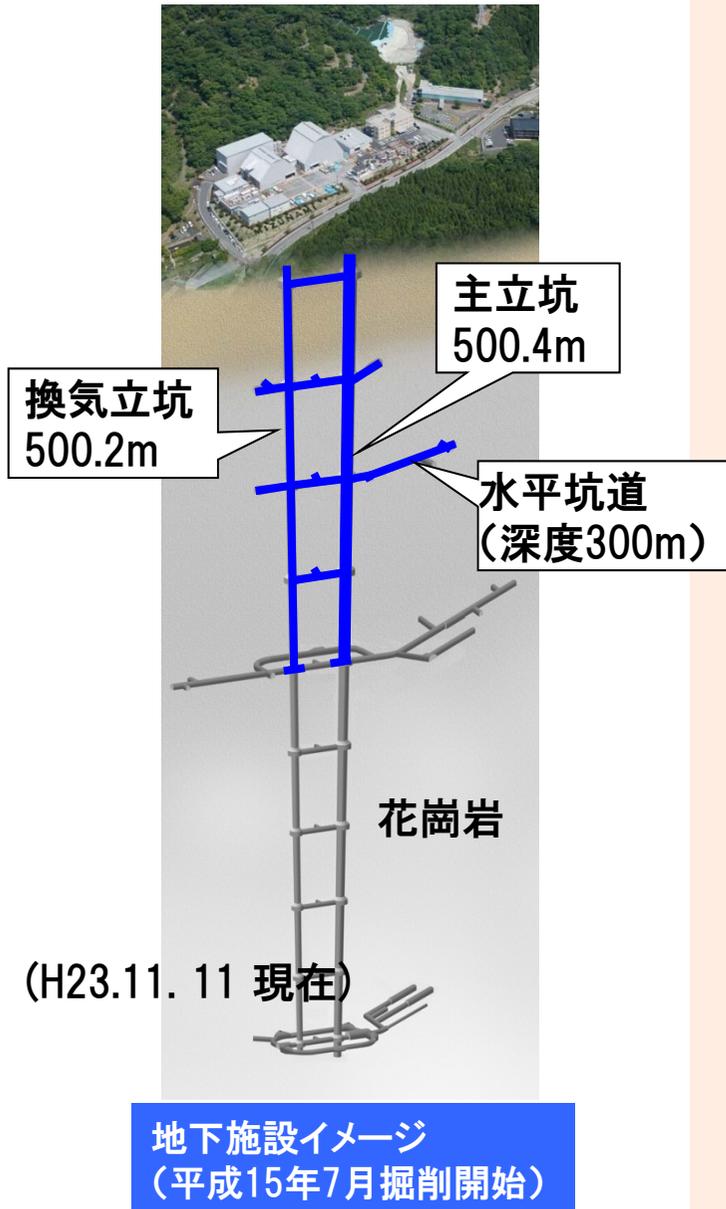
地下研の成果の処分事業への反映



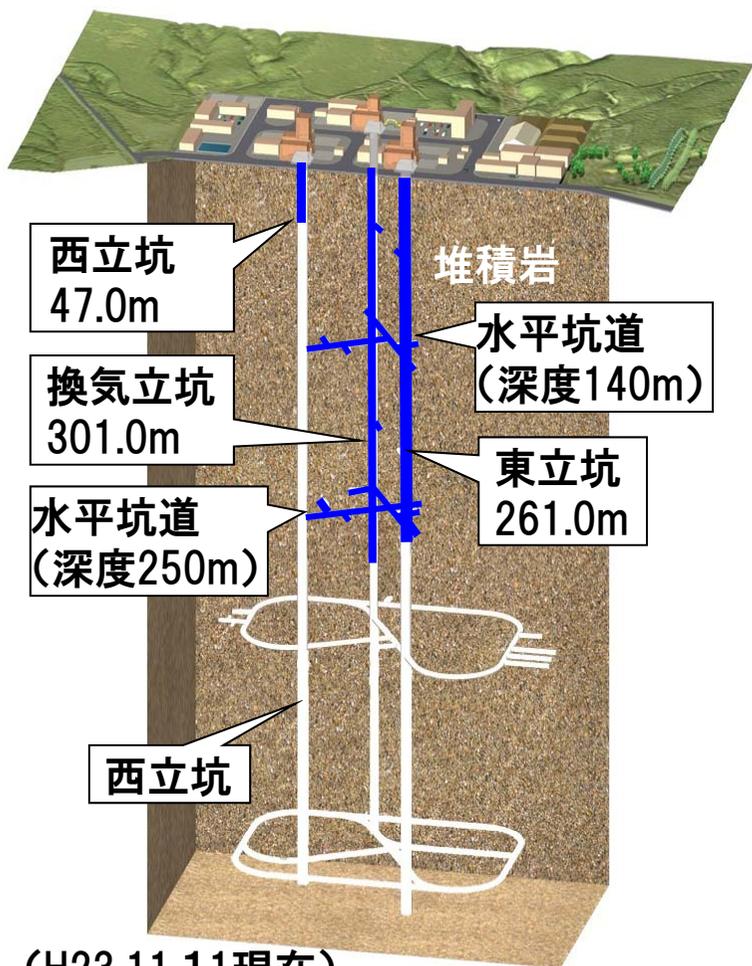
地層処分 = 初めての経験 + 長期の事業 + 国民理解が前提

≠ ぶっつけ本番

深地層の研究施設計画：瑞浪超深地層研究所(結晶質岩の研究)



深地層の研究施設計画：幌延深地層研究所(堆積岩の研究)



地下施設イメージ
(平成17年11月掘削開始)

換気立坑掘削状況



PR施設

ゆめ地創館



初期地圧測定用ボーリング調査

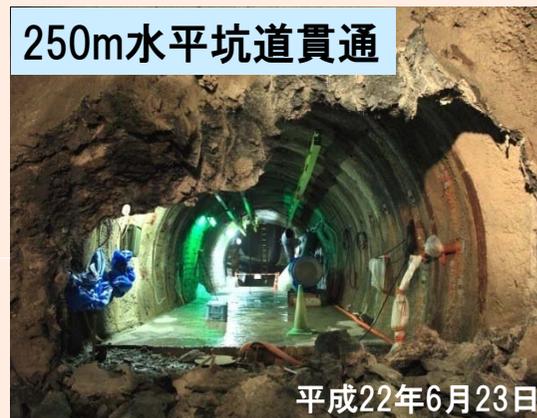


低アルカリ性セメントを用いた
コンクリートによる吹付け施工

立坑地上部の全景



250m水平坑道貫通



平成22年6月23日

原子力機構における研究開発目標と課題



目標

実際の地質環境への地層
処分技術の適用性確認

地層処分システムの
長期挙動の理解

研究課題

深地層の
科学的研究

地質環境特性の調査・
評価技術の開発
深地層における工学技術
の基礎の開発

地質環境の長期安定性
に関する研究
(隆起・侵食、地震・断層活動、
火山活動、ナチュラルアナログ等)

地層処分研究開発

工学技術の
信頼性向上

処分場閉鎖等の工学
技術の信頼性向上

人工バリア等の基本特性
データベースの開発
人工バリア等の長期複合
挙動に関する研究

安全評価手
法の高度化

処分技術および安全評価
手法の実際の地質環境へ
の適用性の確認

安全評価シナリオの充実
安全評価モデルの高度化
核種移行データベースの
整備

知識ベースの開発、
知識管理システムの構築

実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認



(候補地での調査)

概要調査

地上からの精密調査

坑道での精密調査

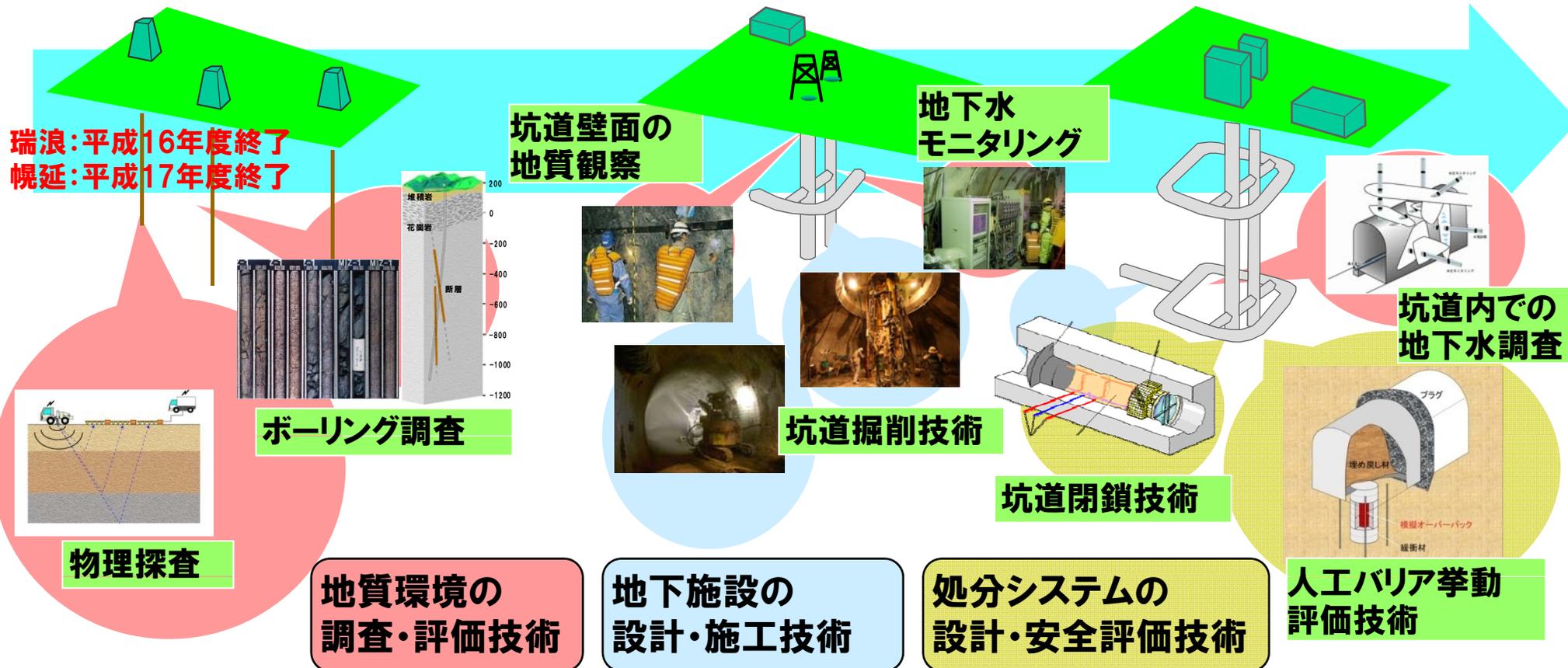
調査期間: 約20年

候補地での調査に先行した技術の整備

第1段階
地上からの調査研究

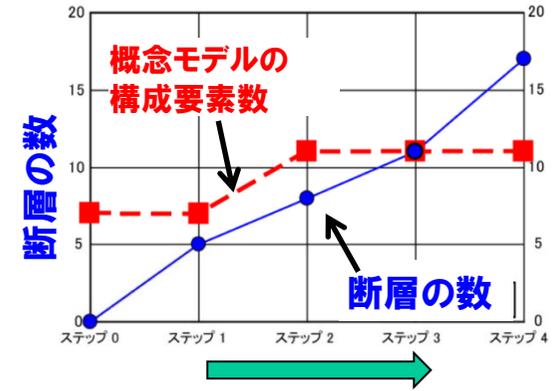
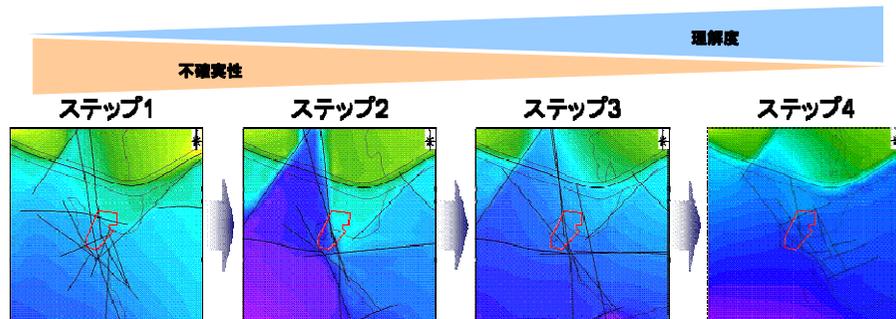
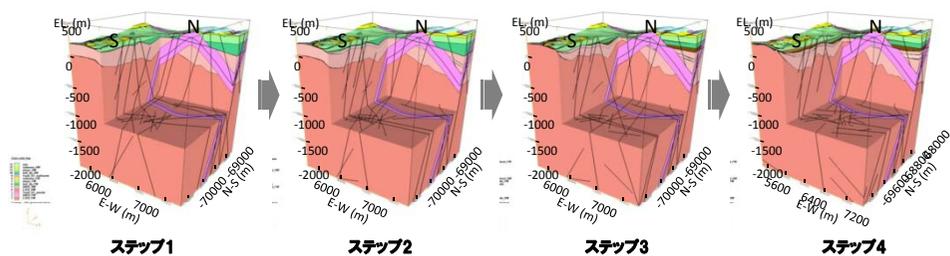
第2段階
坑道掘削時の調査研究

第3段階
地下施設での調査研究

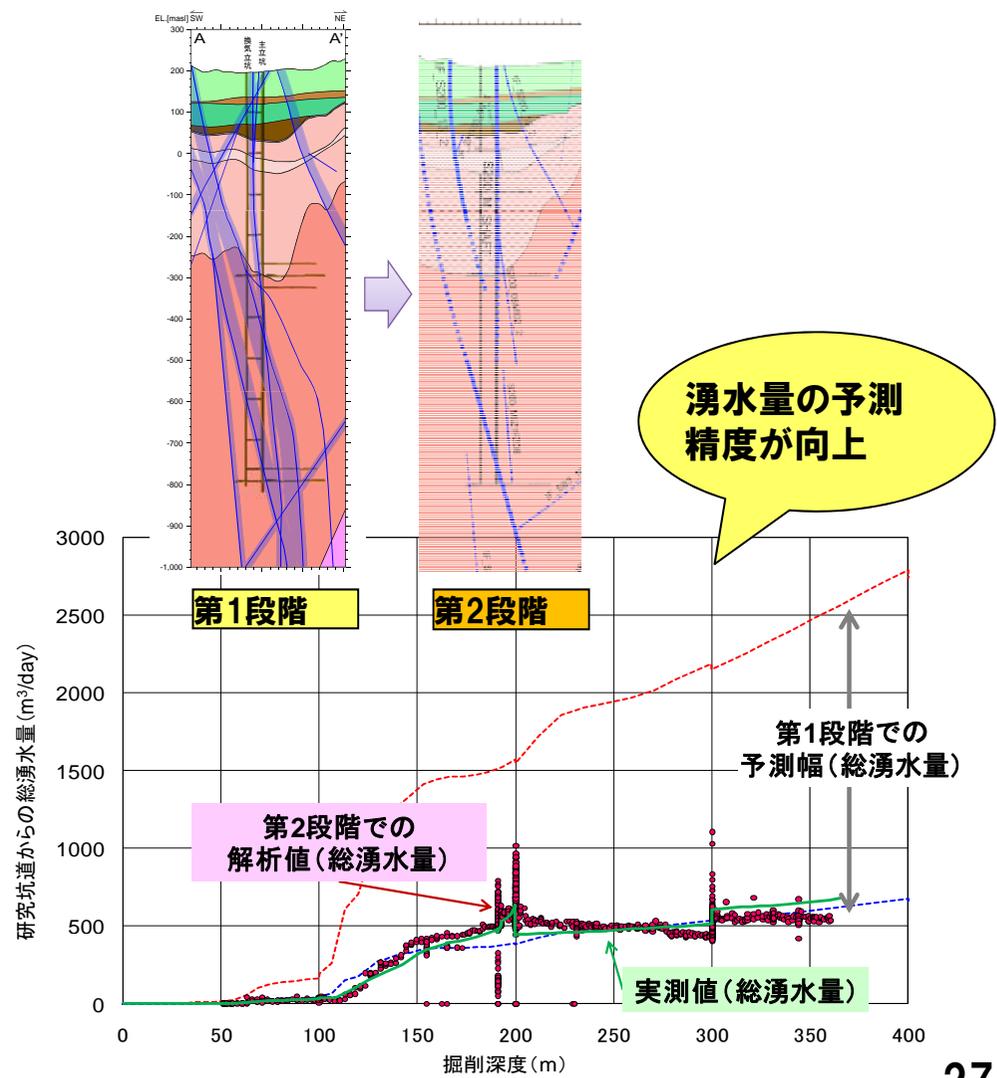


地質構造の三次元構造 / 地下水の流動特性

調査・解析・評価を繰り返し実施し、次の段階で調査・評価すべき項目を抽出
 ⇒地質構造や地下水流動特性に関する理解度を合理的に向上

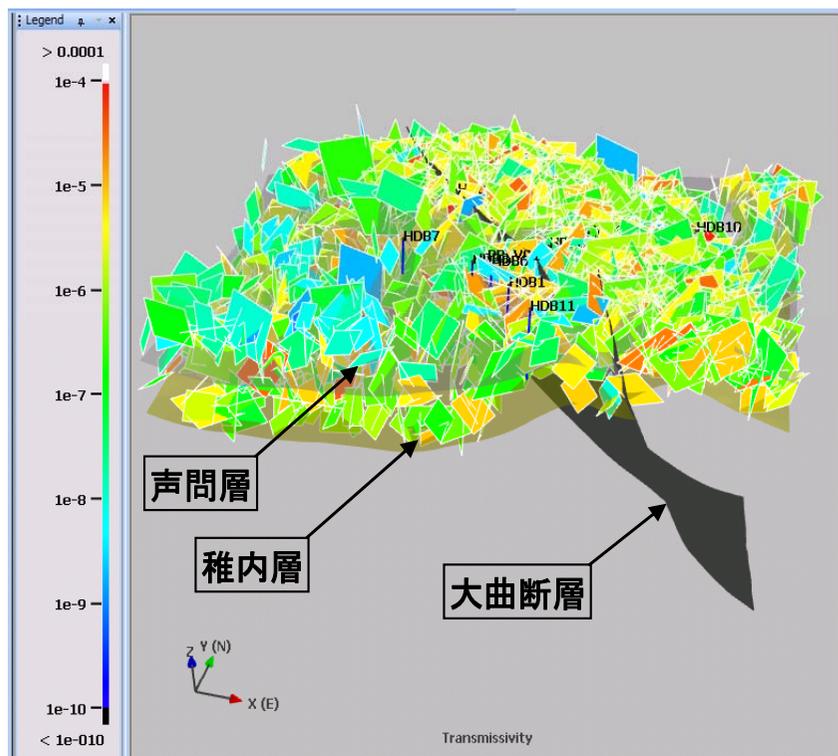


断層の数は増えてもモデルに表現すべき地質構造の要素数は一定(理解度の向上)



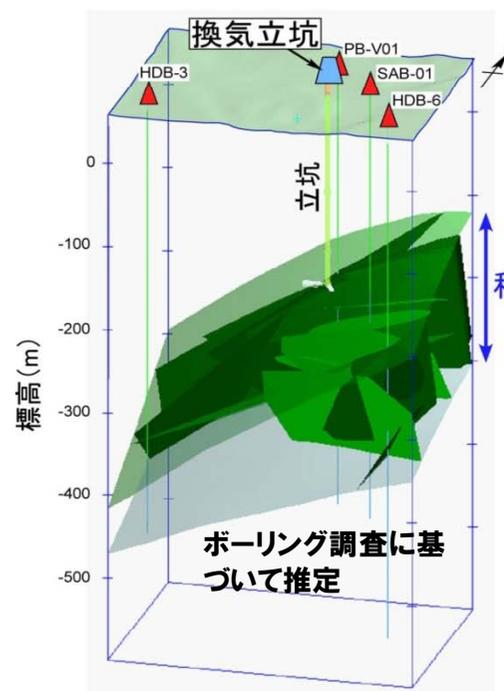
わが国固有の地質特性の把握(堆積岩)

ボーリング調査、水圧観測、地質構造のモデル化
⇒重要な水理地質構造(断層、割れ目)の分布、形成プロセスを把握

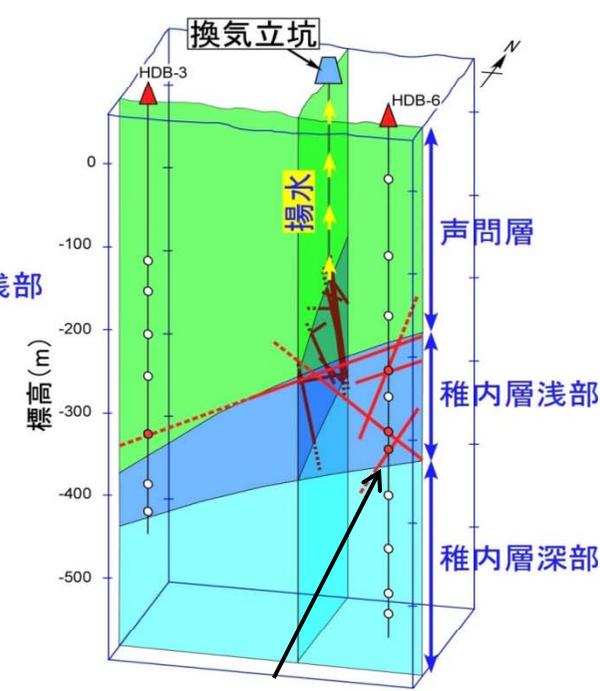


幌延(声問層・稚内層)における透水性割れ目のネットワーク構造

URL周辺の地質構造と水圧応答



透水性断層の3次元分布(推定)



水圧応答箇所

地下施設周辺のボーリング孔の水圧応答

地震・断層活動

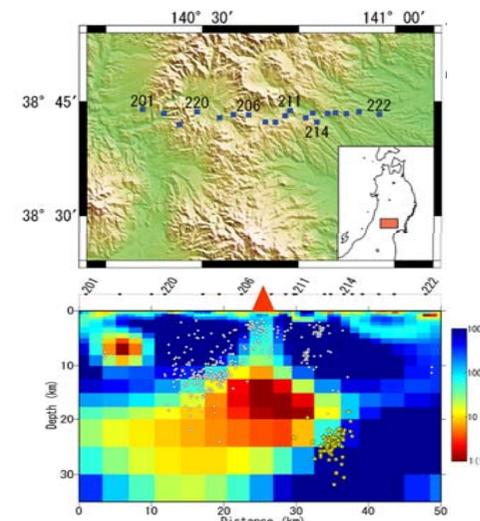
火山・熱水活動

隆起・侵食 / 気候・海水準変動

① 調査技術の開発・体系化

→ サイト選定や安全性の検討に必要なデータの取得

- 活断層に関する調査技術
- 地下深部のマグマ・高温流体等の調査技術
- 火山・熱水活動履歴の調査技術
- 古地形・古気候の復元技術 等

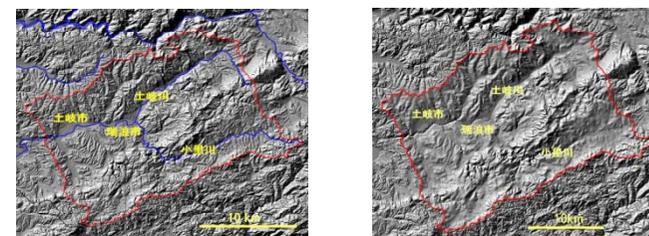


② 長期予測・影響評価モデルの開発

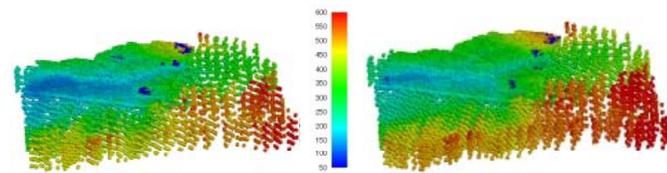
→ 天然現象による影響を考慮した安全評価への反映

- 断層活動の影響評価モデルの開発
- 火山活動等の長期予測 (確率) モデルの開発
- 熱水活動等の影響評価モデルの開発
- 三次元地形変化モデルの開発 等
- 分析技術開発 (共通基盤技術の整備)

地形



水圧



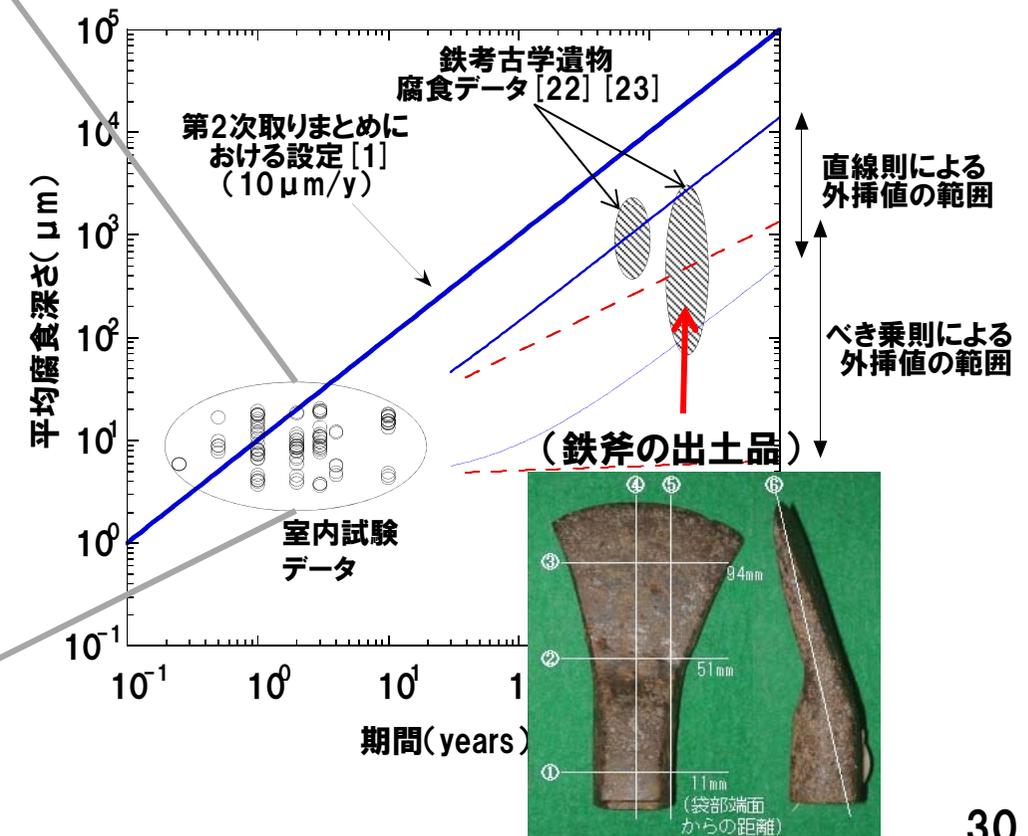
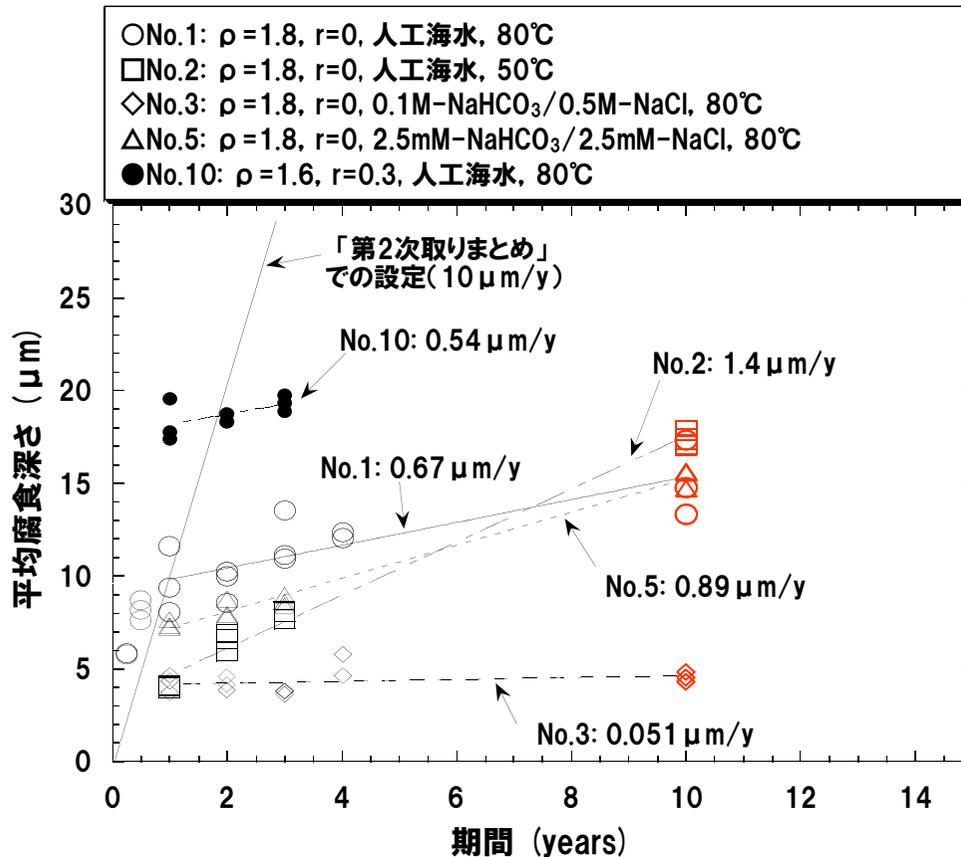
現在

12万年後

オーバーパックに関する 10年間の長期腐食試験データ

室内試験の結果とナチュラル アナログによる腐食評価

室内試験結果



熱-水-応力-化学連成挙動

1. 目的

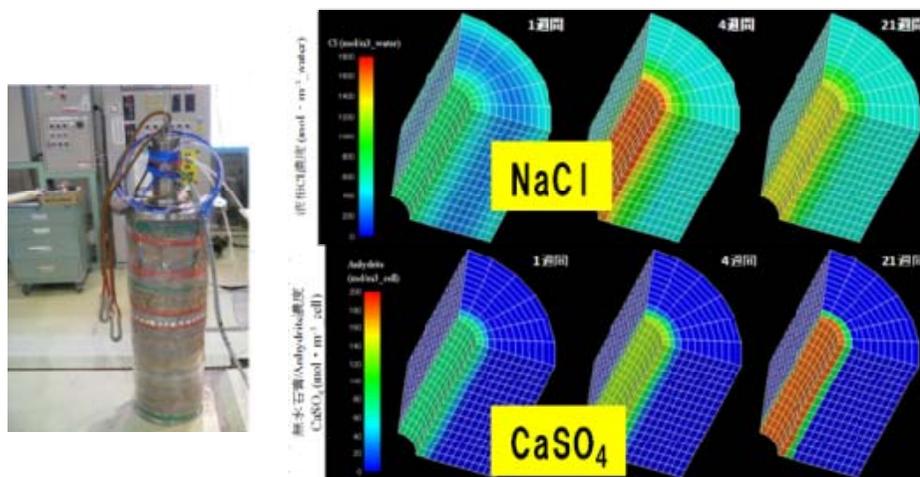
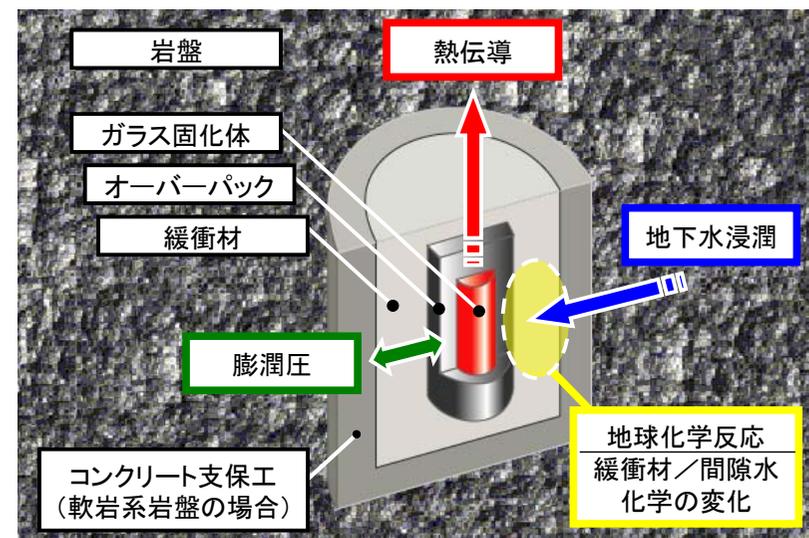
坑道掘削、廃棄体定置、閉鎖後におけるニアフィールドの熱的、水理的、力学的、化学的なプロセスの時間的／空間的変遷を評価

2. 実施内容

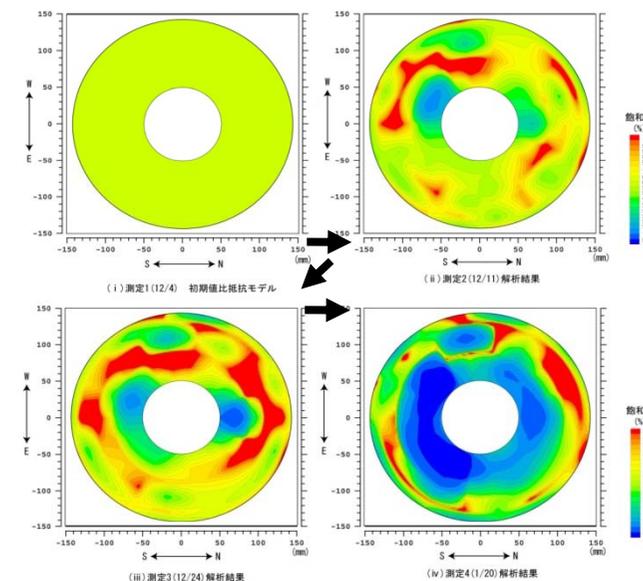
室内・原位置試験や共同研究等を通じた、熱-水-応力-化学連成解析コード、評価するパラメータの設定方法、現象を把握するための計測技術を開発。

3. 反映先

評価結果は、処分場の設計の保守性や信頼性、処分場閉鎖時の判断材料、処分場閉鎖後の性能評価へ反映。



室内試験結果に基づく連成解析結果の例



非破壊計測技術(比抵抗トモグラフィーに基づく緩衝材中の水分量変化の推定事例)

研究開発の目的

わが国のような割れ目が多く地下水が流出しやすい深部地質環境の処分場の長期性能への影響を考慮



地下坑道掘削・施工段階を対象とした湧水抑制対策技術(グラウト技術)の高度化開発

●要素技術開発

- グラウト技術に関する調査
- グラウト材料の開発
- グラウト注入技術の開発

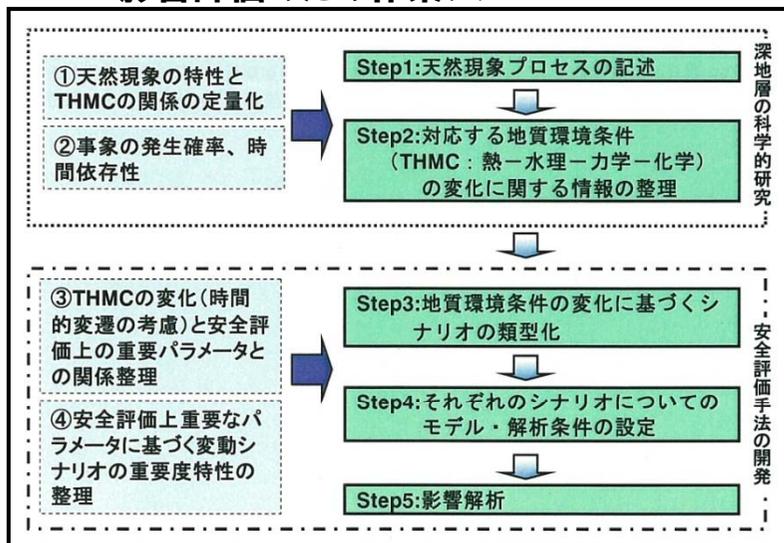
●グラウト影響評価技術の開発



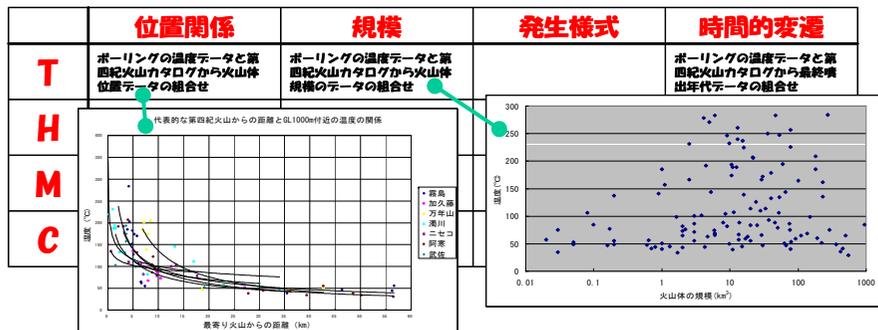
天然現象の影響評価手法の開発

天然現象が処分システムの性能に与える影響を評価するための一連の技術を整備する

影響評価のため作業フレーム

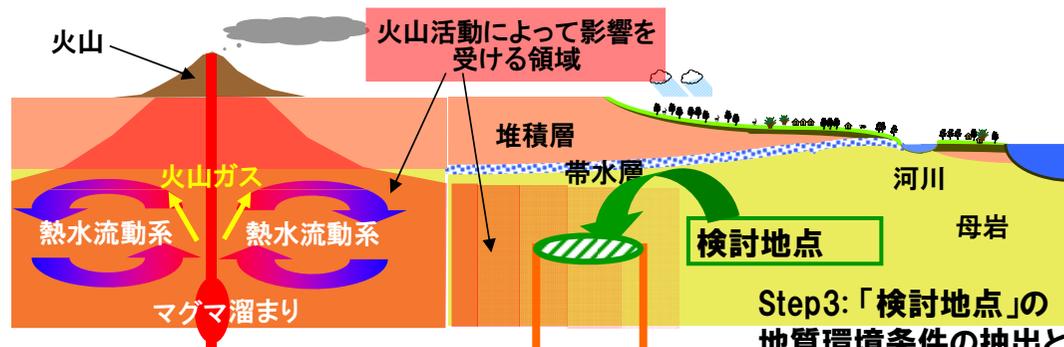


(川村ほか, 2006)



Step2: 温度-水理-力学-化学 (THMC) で分類、整理

火山・地熱活動の例



Step3: 「検討地点」の地質環境条件の抽出と設定

Step1: 「天然現象が発生したらどうなるか？」の記述



Step4, 5: THMCの変化と処分システムの性能に係るパラメータの変化との関係の検討へ

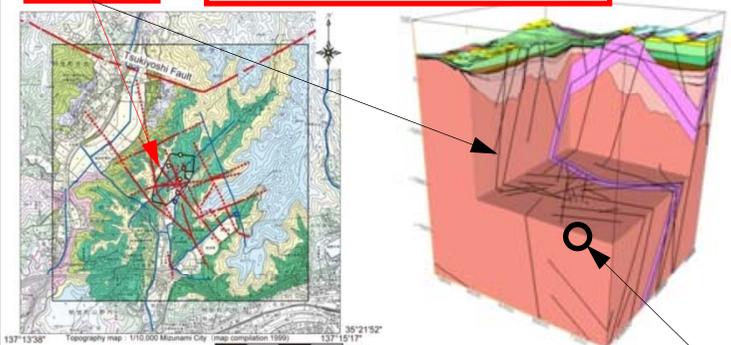
調査の段階に応じた地質環境の理解と不確実性を見通しを踏まえた設計、性能評価技術の体系化手法の整備

深地層の研究施設計画における調査の考え方

【瑞浪での超深地層研究所計画の例】

検出可能な大規模断層

不確実性を見通し:
- 大規模構造内の特性と不均質性
- 透水特性(透水異方性や低透水性など)

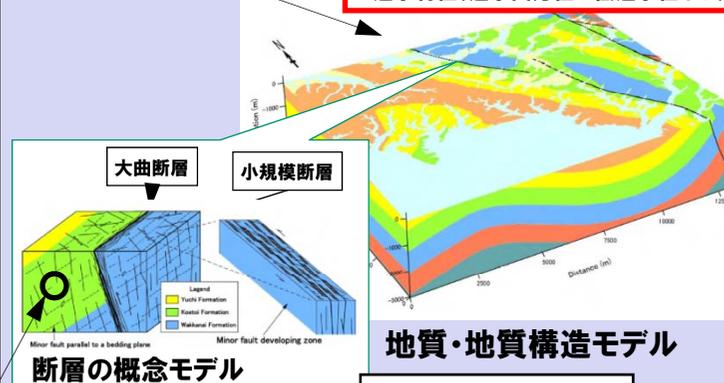


地上からの調査段階 地質・地質構造モデル

【幌延深地層研究計画の例】

検出可能な大規模断層

不確実性を見通し:
- 大規模構造内の特性と不均質性
- 透水特性(透水異方性や低透水性など)



地質・地質構造モデル

地上からの調査段階

土岐花崗岩や、声間層や稚内層の小規模断層や亀裂などの小構造

地下研究坑道からの調査研究段階



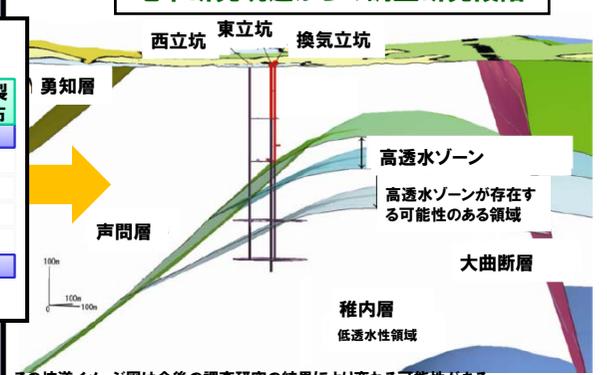
超深地層研究所深度300mアクセス坑道と坑道に交差する亀裂

不確実性を見通し: 母岩領域の特性

数10 m

小断層や亀裂の構造や分布
移流/分散
透水量係数
亀裂頻度
有効間隙率
亀裂開口幅
収着/拡散

地下研究坑道からの調査研究段階



この坑道イメージ図は今後の調査研究の結果により変わる可能性がある

幌延深地層研究所の坑道と主要な地質構造

設計と性能評価手法
(様々な環境条件を想定した場合)

地上からの調査段階

- ・地質環境の理解の程度
- ・不確実性を見積もり

1. 保守性に基づいた設計と安全評価を提示

2. 不確実性の種類や程度に応じた、多様な設計オプションと、多様な安全評価の手法を提示

地下坑道での調査計画の立案

知識マネジメントシステムの開発

情報の増大

地層処分に関する情報は多岐・大量，時間とともに増加するため，必要な情報へのアクセスが困難化

知の喪失

地層処分は長期にわたるため，専門家の経験・ノウハウが，世代交代により消失

従来の情報管理では間に合わぬ！

人材育成・技術継承がままならぬ！

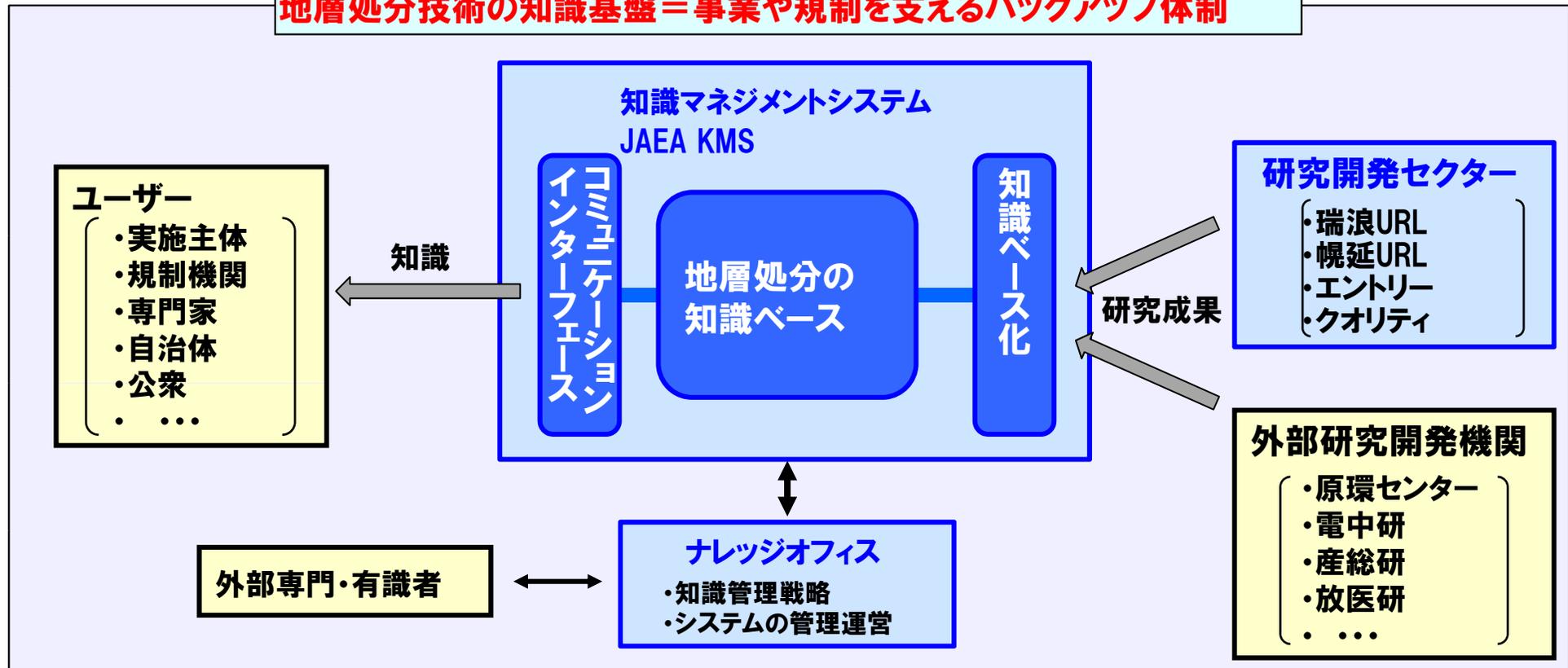
表出化

必要な情報に容易にアクセスできるように，研究成果や関連する知見を最適な形態で保存し，最適な構造・体系で管理

データベースを超越した管理方法の構築

チャレンジ

地層処分技術の知識基盤＝事業や規制を支えるバックアップ体制



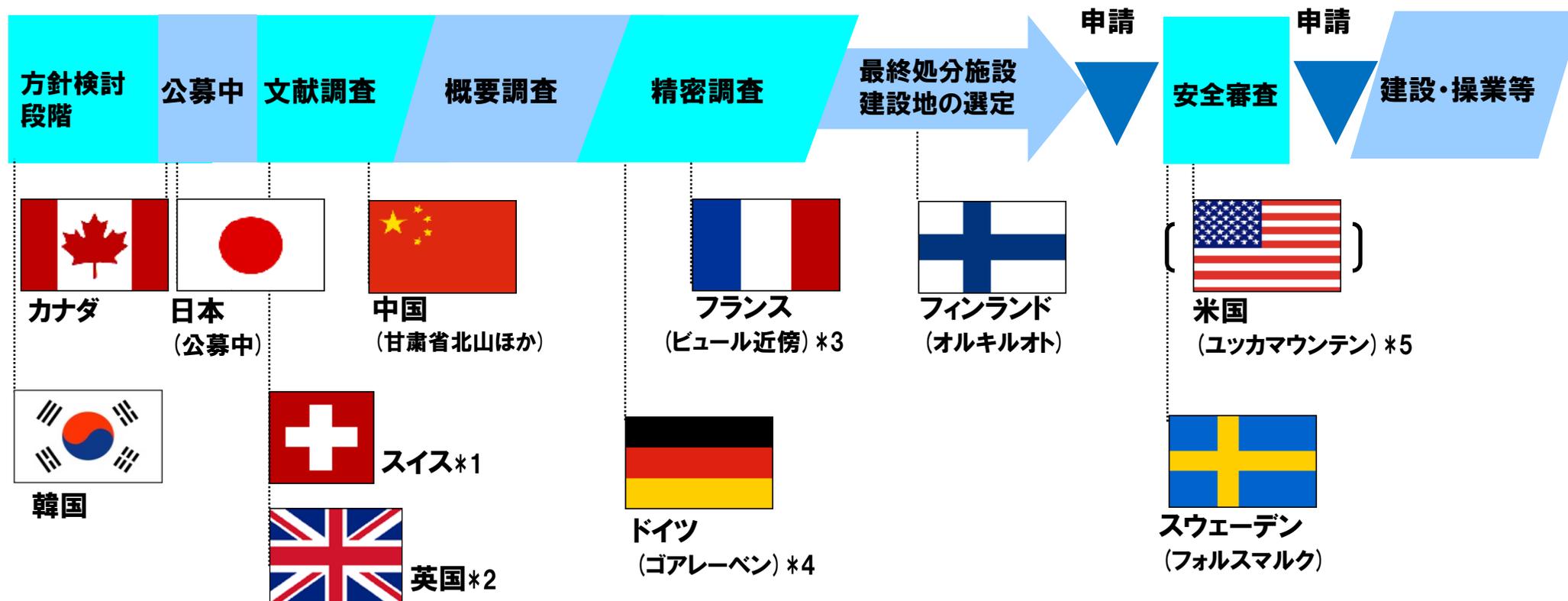
海外情勢

以降, 図等の出典:

経済産業省資源エネルギー庁(2011): 諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について

江守 稔(2010): 基礎講座II『地層処分に関する諸外国の動向』, 2010年度バックエンド週末基礎講座

主要国における地層処分事業の進捗段階



*1: 連邦政府が3つの候補サイト地域を公表(2008年10月)し、審査等を実施中。

*2: カンブリア州(2008年12月)と同州内の2つの市(2008年7月, 2009年2月)が関心表明を政府に提出し、初期選別を実施中。

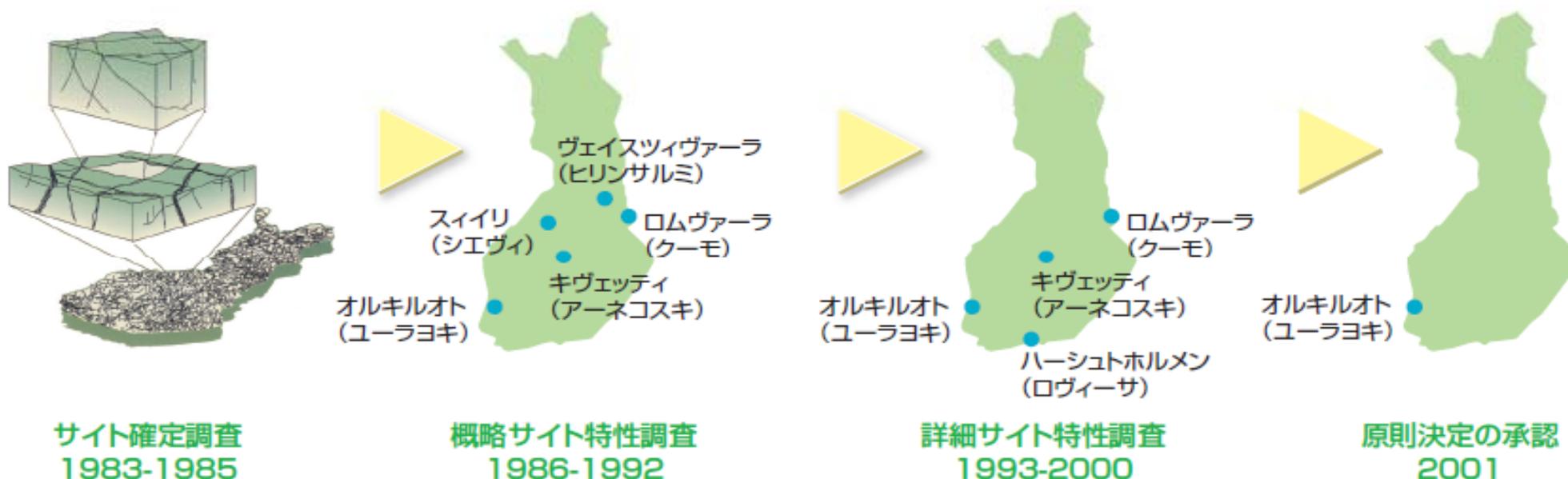
*3: 実施主体であるANDRAが詳細調査の候補サイト(ビュール地下研究所近辺30km²の区域)を政府に提案(2009年12月)し、政府が了承(2010年3月)。

*4: 2009年秋、ゴアレーベンでの探査凍結を解除する方針が示され、同サイトでの探査再開に向けた準備が進行中。

*5: 現政権がユツカマウンテン計画を中止。2010年3月、DOE(連邦エネルギー省)は許認可申請の取下げ申請をNRC(原子力規制委員会)に提出し、NRCが取扱いを検討中。また、DOEは代替方策を検討するために特別委員会(ブルーリボン委員会)を設置(2010年1月)し、検討を開始。

※国旗に括弧が付された国は、現段階での事業の進捗を示しているものの、計画の中止などで変更があり得る。

- 1978年:地層処分の実現可能性調査への着手
- 1983年:政府による処分場地点選定スケジュール等の決定を受けて、電力会社が地点選定作業を開始。
- 1995年:2つの電力会社が処分実施主体となるポシヴァ社を設立。
- 1999年:オルキオトを処分地として選定。
- 2001年:原子力法に基づく原則決定^(※)手続きにより、オルキオトが最終処分地に決定。
- 2004年:オルキオトで地下特性調査施設(ONKALO)の建設を開始。
- 2012年:建設許可申請。
- 2020年:操業開始。

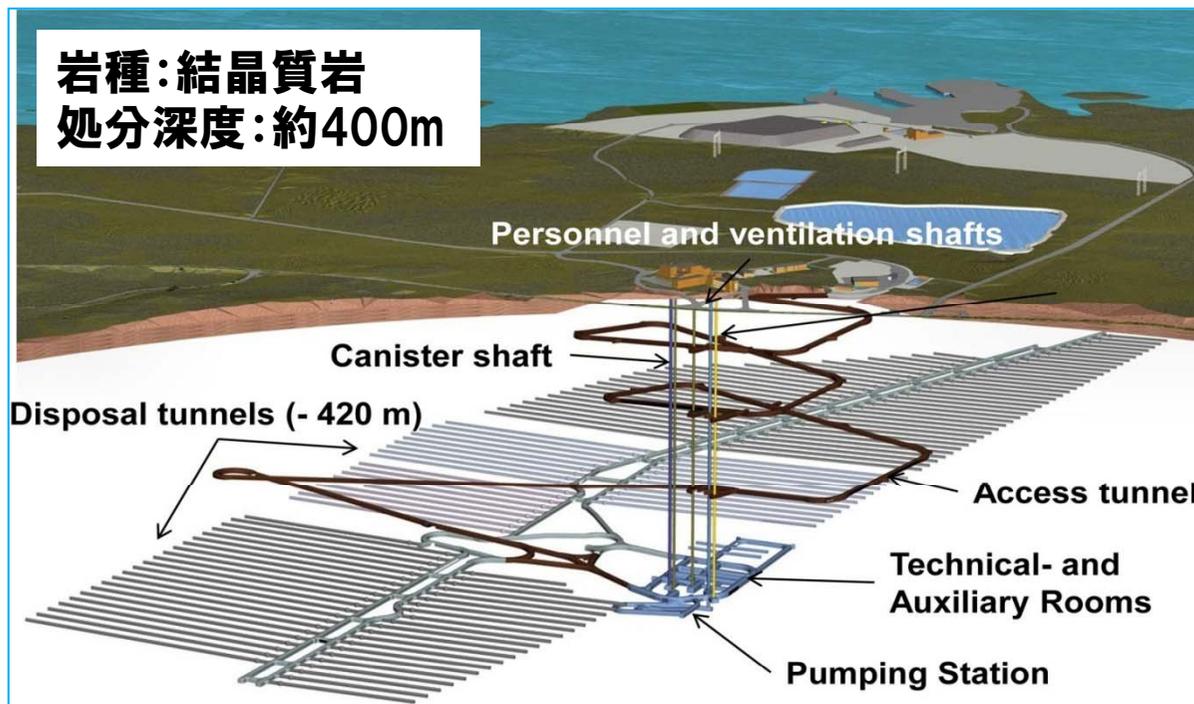


フィンランドにおける地層処分概念



使用済燃料をキャニスタに封入し、その周囲を緩衝材(ベントナイト)で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した地層(結晶質岩)に定置(KBS-3概念)。

岩種: 結晶質岩
処分深度: 約400m

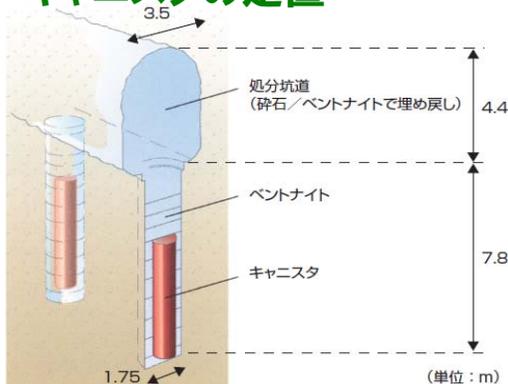


銅- 鋳鉄キャニスタ

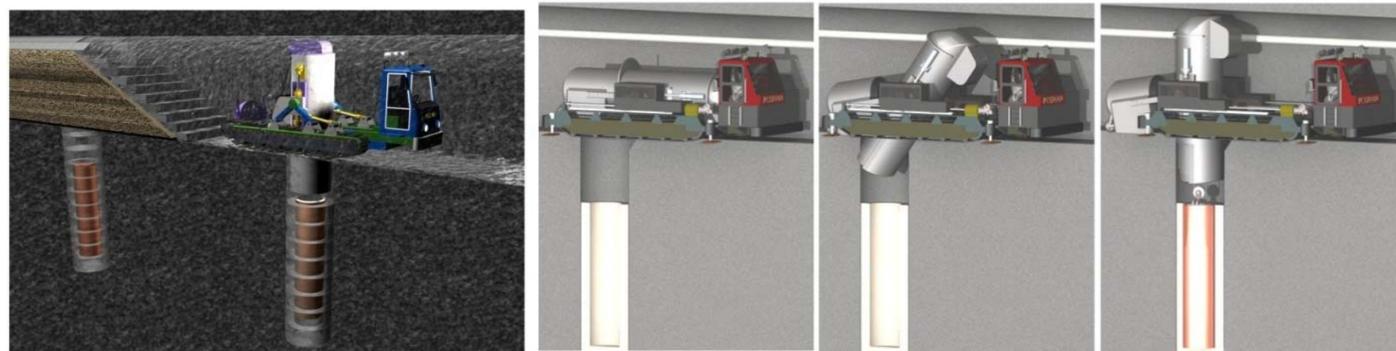
使用済燃料は、外側が銅製の容器、内側が鋳鉄製の容器という2重構造の容器(キャニスタ)に封入して処分。



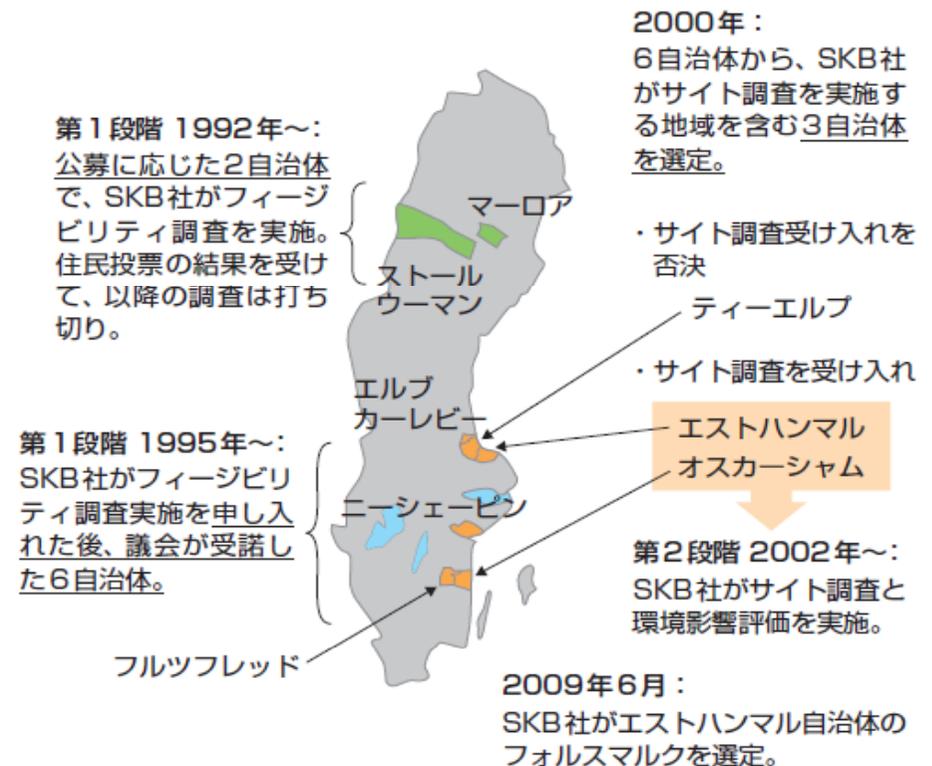
キャニスタの定置



専用車によるキャニスタの移送・定置

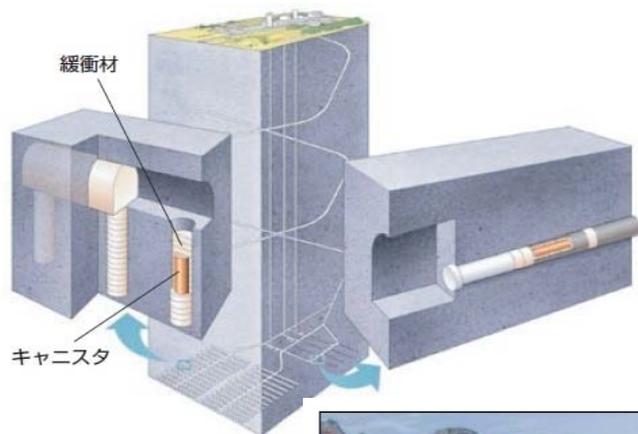


- 1970年代より、地層処分の概念提示や立地に向けた調査が開始されるが、1985年には反対運動により各地でのボーリング調査を中止。
- 1992年：SKB社が策定した研究開発計画において、4つの段階(総合立地調査、フィージビリティ調査、サイト調査、詳細特性調査)からなるサイト選定に向けた調査段階を設定(政府はフィージビリティ調査を5～10自治体で、ボーリング調査等を少なくとも2ヶ所を実施するという条件で了承)。
- 1993年～：公募による2自治体、申入れによる6自治体の計8自治体で、SKB社が順次フィージビリティ調査を実施。
- 2000年：SKB社がサイト調査(ボーリング調査等)を実施する3自治体を選定。
- 2001年：2自治体(エストハンマル、オスカーシャム)の議会がサイト調査の受け入れを可決。
- 2002年～：SKB社が2自治体内でサイト調査を実施。
- 2009年：6月にSKB社がエストハンマル自治体を処分候補地を選定。
- 2011年3月：SKB社が処分場の立地及び建設の許可申請。
- 2025年：処分場の操業開始。



スウェーデンにおける地層処分概念

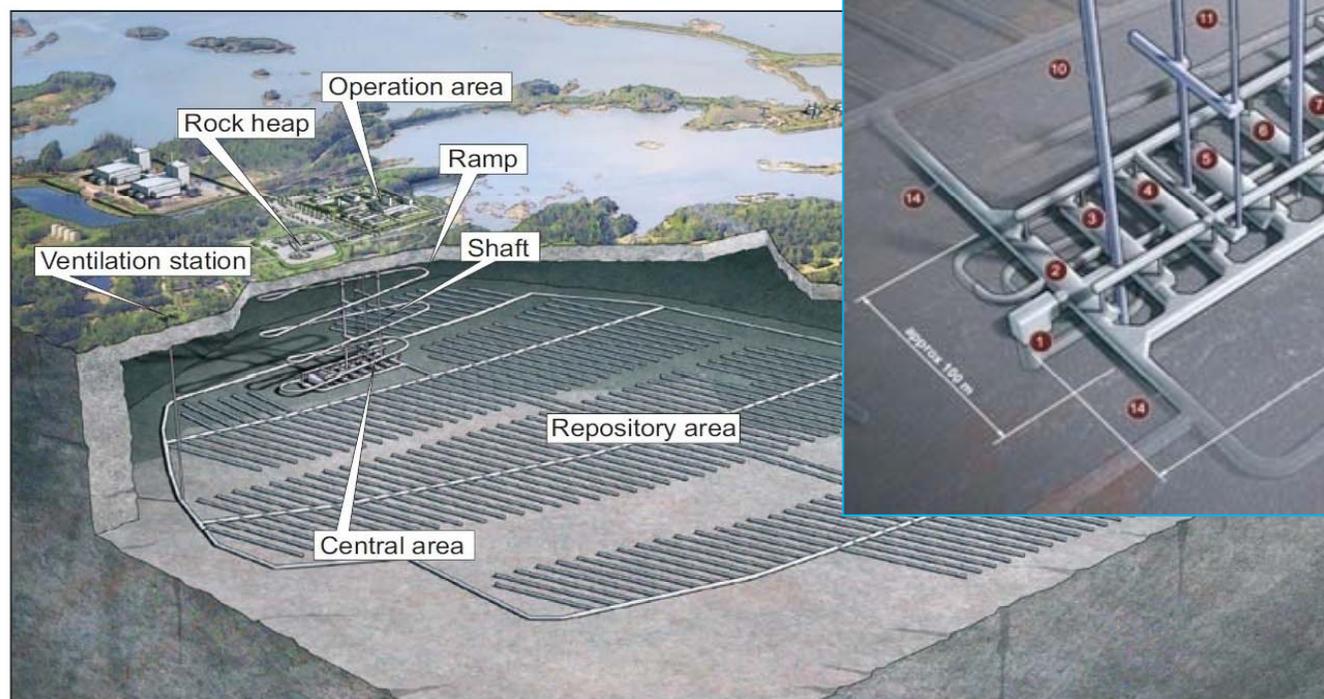
使用済燃料をキャニスタに封入し、その周囲を緩衝材(ベントナイト)で取り囲んで、力学的及び化学的に安定した地層(結晶質岩)に定置(KBS-3概念:フィンランド同様)。



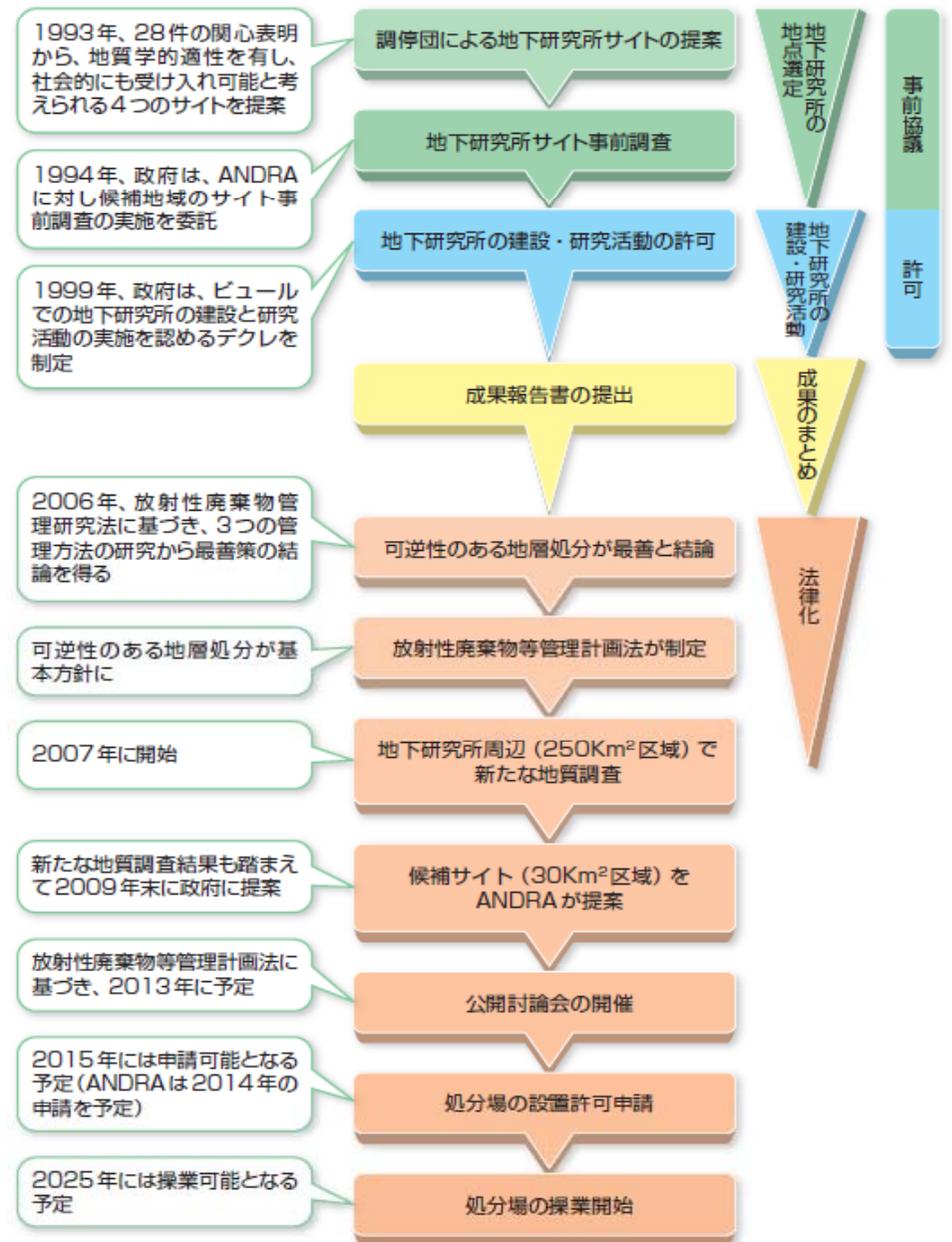
フォルスマルク地下施設設計レイアウト

下図は地上からのアクセス坑道の直下に設置される中央エリア。掘削した岩石の処理, 移送ビークルの駐車エリア, エレベータホール, 資材置き場などが設置される。

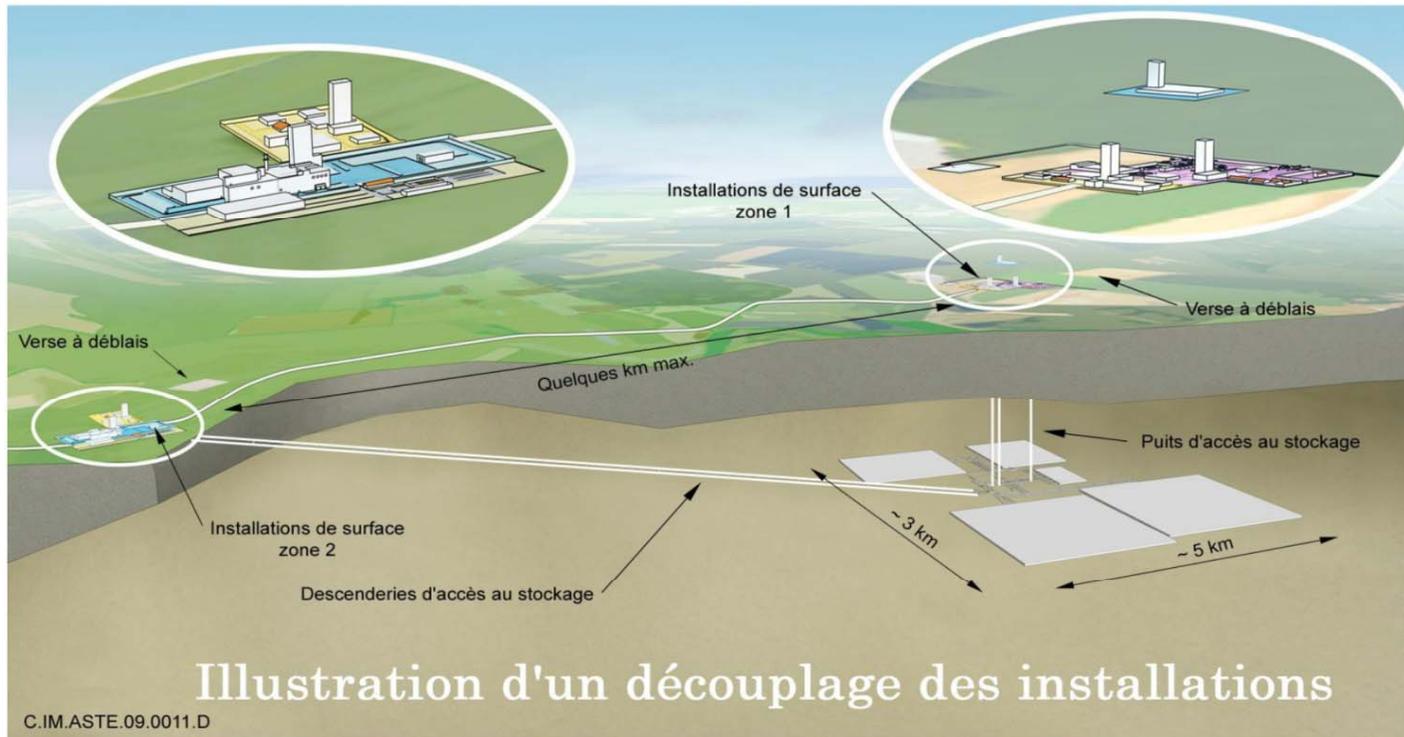
岩種: 結晶質岩
処分深度: 約500m



- 1980年代に開始された地層処分を前提とした取組は、反対運動により1990年に中断。
- 1991年：『放射性廃棄物管理研究法』により、地層処分、核種分離変換、長期貯蔵の3分野についての研究開発を15年間実施。
- 地層処分については、地域の意思を尊重した方法により地下研究所の設置場所を選定し、1999年にビュールでの建設・操業許可を発給。
- 2006年：3分野の研究総括を経て、地層処分を最終管理方策の基本とする『放射性廃棄物等管理計画法』を制定。
- 2009年末：ANDRAは複数の地上施設の配置案に適応可能な候補地点の区域を特定して政府に提案(翌年3月に政府の了承を得て、ANDRAは同区域の詳細調査を開始)。
- 2014年：設置許可申請。
- 2025年：操業開始。

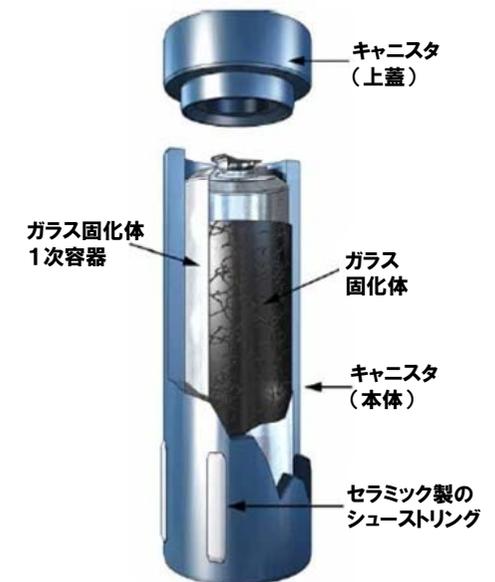
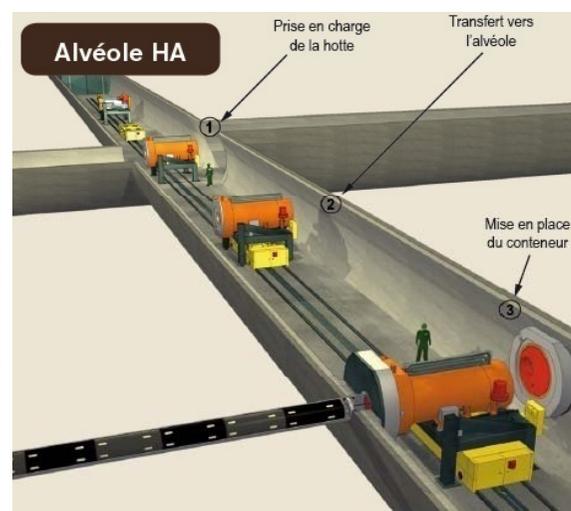
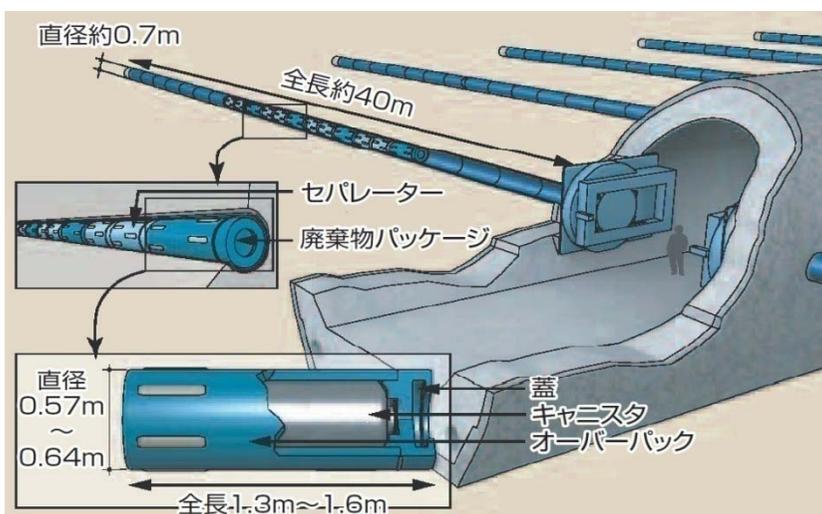


フランスにおける地層処分概念

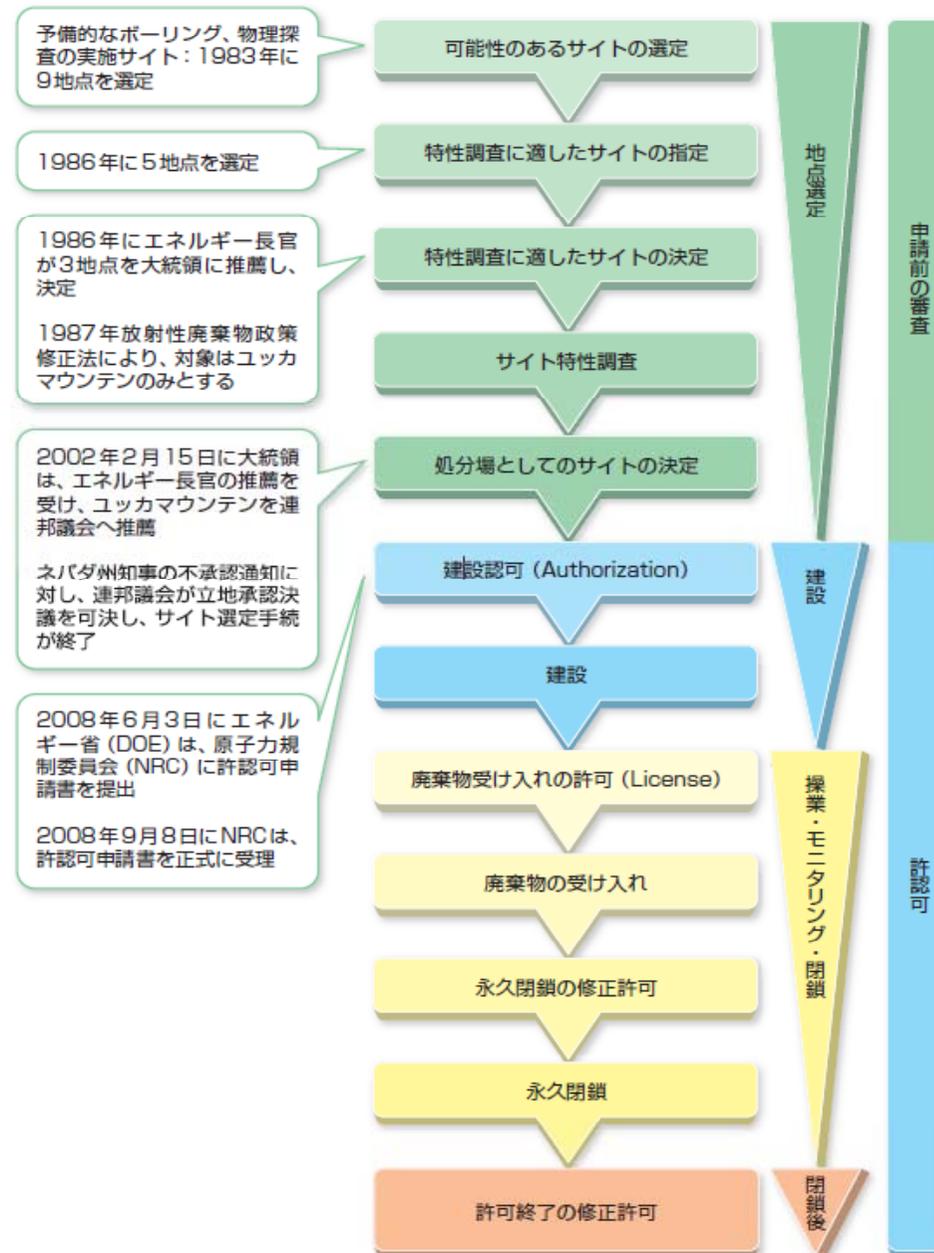


岩種: 粘土質岩
 処分深度: 約500m

高レベル放射性廃棄物
 (ガラス固化体)
 地層処分対象の高レベル放射性廃棄物は、使用済燃料の再処理によって生じるガラス固化体。



- 1982年の『放射性廃棄物政策法』に基づいて、候補地点の選定・絞り込みが行われ、1987年の同法の修正法成立により、ネバダ州ユッカマウンテンを処分候補地として選定。
- 2002年に行われた手続き(次ページで詳述)により、正式にユッカマウンテンを処分地として決定。
- 2008年6月3日に、実施主体であるエネルギー省(DOE)は、処分場建設のための許認可申請書を原子力規制委員会(NRC)へ提出し、2008年9月8日に正式受理(安全審査中)。
- 現政権は、ユッカマウンテン計画を撤回し、代替案を検討する方針。
- 2010年1月29日に、代替案検討の「米国の原子力の将来に関するブルーリボン委員会」を設置。
- 2020年:処分場の操業開始(DOEの計画)

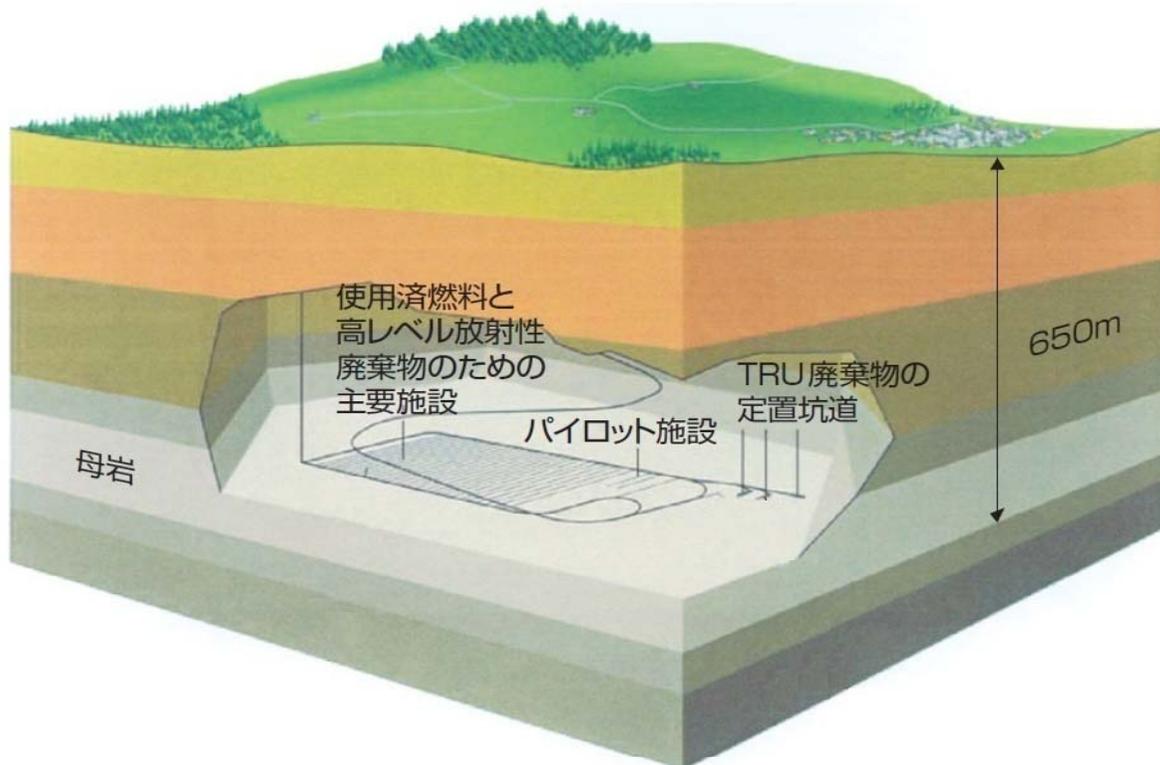


- 2002年に、NAGRAがオパリナス粘土での処分の実現可能性の実証に係る報告書を取りまとめる。
 - 2005年に、放射性廃棄物の地層処分の許可発給を規定した原子力法・原子力令が施行。
 - 原子力令に基づき、3段階の地点選定手続等を規定した特別計画『地層処分場』を2008年4月に最終決定(サイト選定の開始)。
 - 第1段階[複数の候補サイト地域の選定]: 高レベル放射性廃棄物及び中低レベル放射性廃棄物のそれぞれについて候補サイト地域を選定。
 - 第2段階[2カ所以上の候補サイトの選定]: 社会経済的影響調査, 空間開発計画などの評価により, 少なくとも2ヶ所以上の処分場候補サイトを選定。
 - 第3段階[サイト選定]: 高レベル放射性廃棄物及び中低レベル放射性廃棄物のそれぞれについて, 処分場サイトを1ヶ所選定(または全ての廃棄物を処分する処分場サイトを1ヶ所選定)
- ※上記の後, 原子力法に基づく概要承認を申請
- 2008年10月にNAGRAが候補サイト地域を提案。
 - 2018年頃: 処分場のサイト決定
 - 2050年頃: 処分場の操業開始



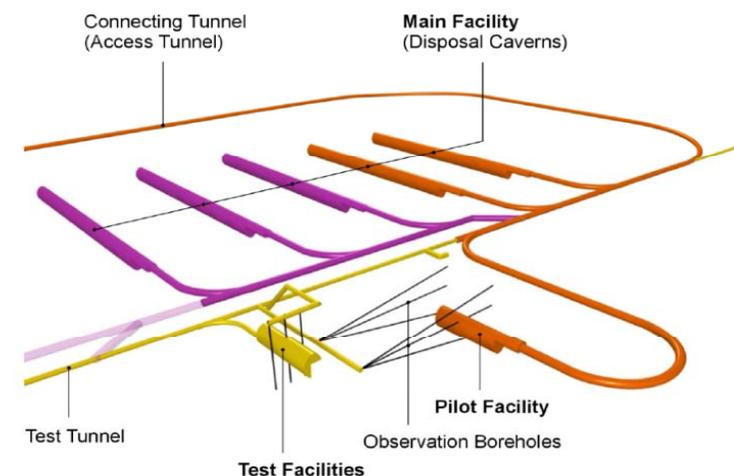
スイスにおける地層処分概念

岩種:粘土質岩, 処分深度:400~900m



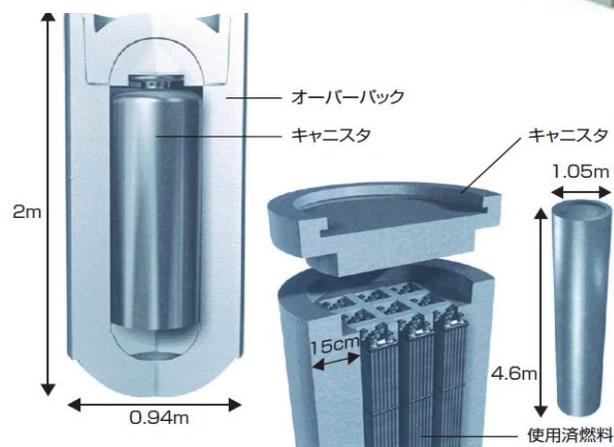
パイロット施設

- パイロット施設(少量の代表的な廃棄物を収納)は, 主要施設から空間的にも水理的にも分離。
- 地層処分場の閉鎖決定のための根拠を提供(パイロット施設において, 廃棄物, 埋め戻し材及び母岩の挙動等をモニタリング)。

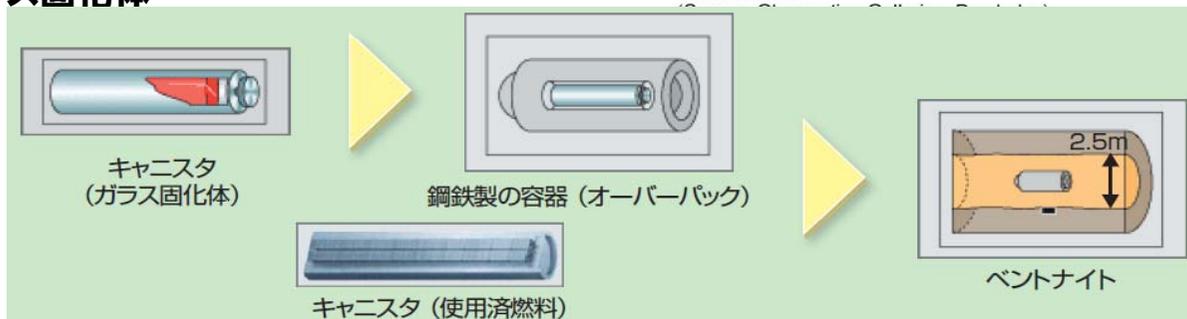


高レベル放射性廃棄物

- 使用済燃料
- ガラス固化体



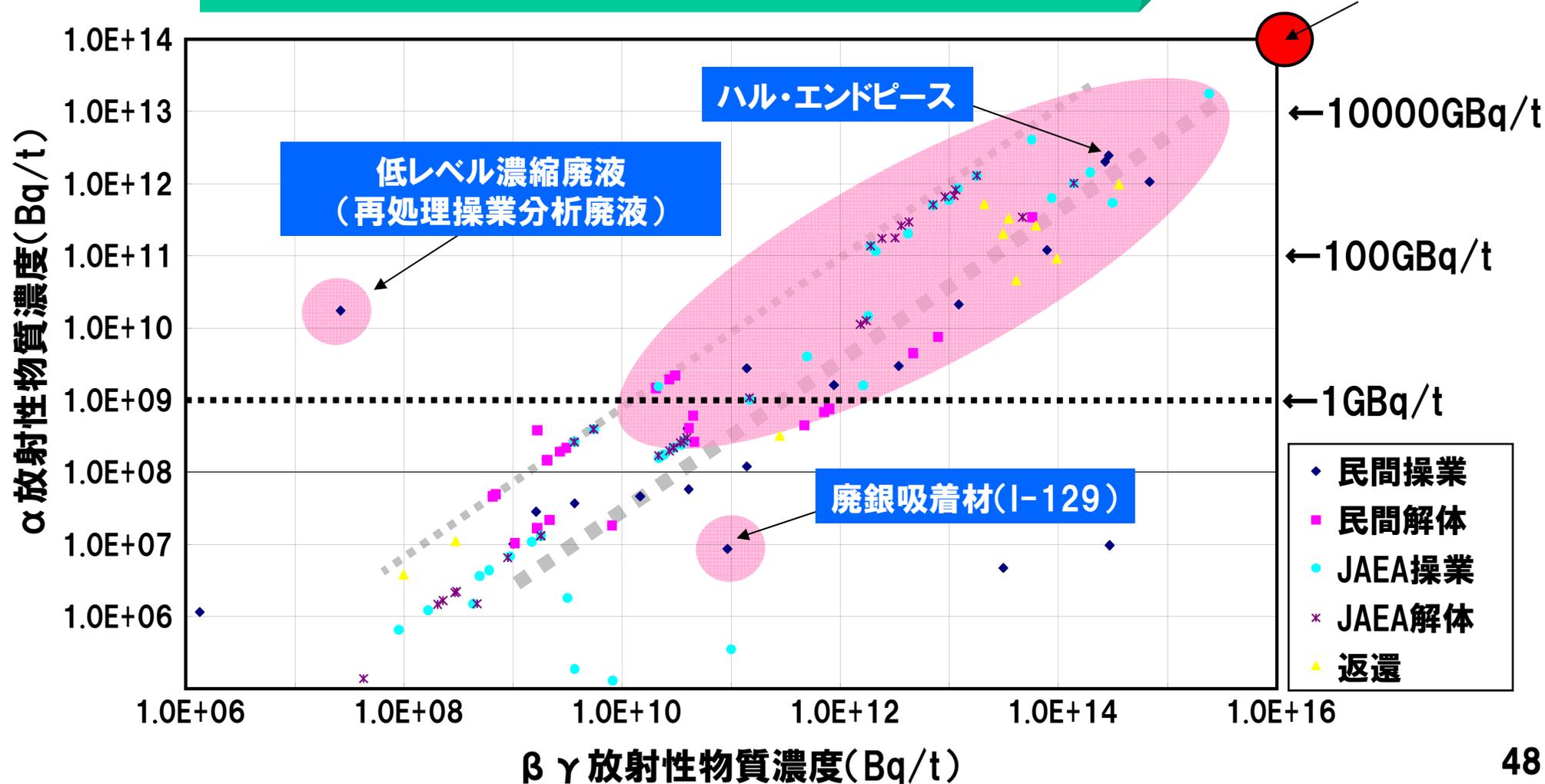
左: ガラス固化体 右: 使用済燃料



TRU廃棄物の地層処分

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



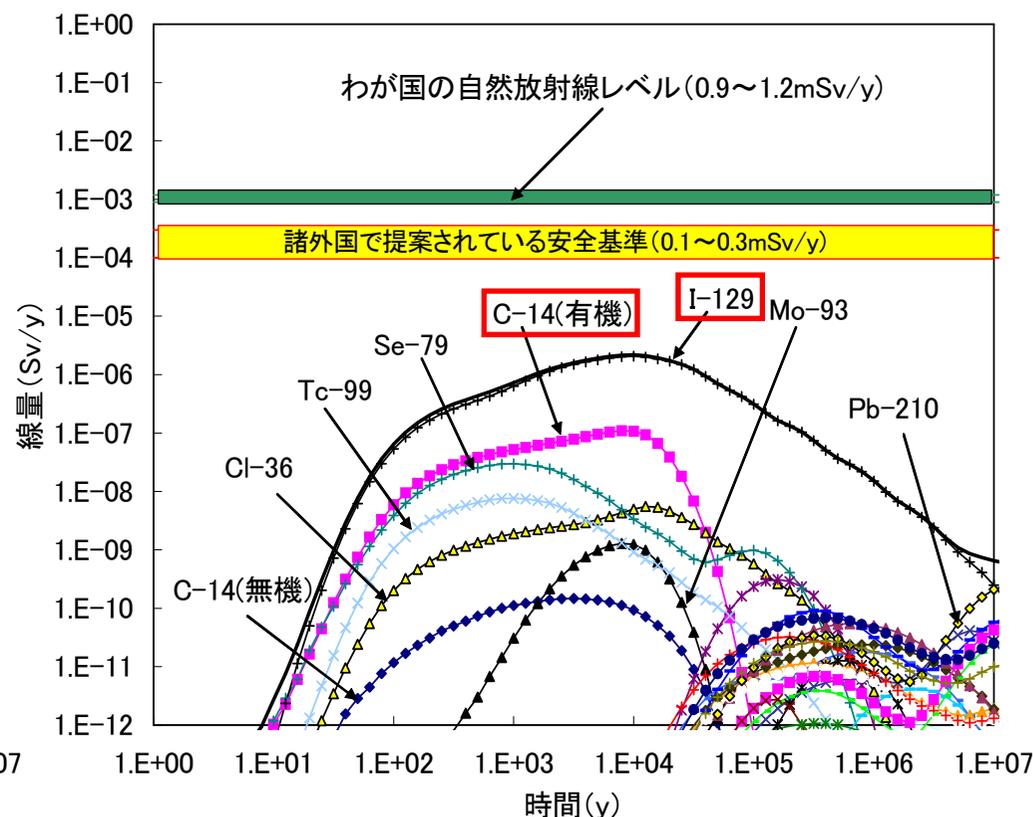
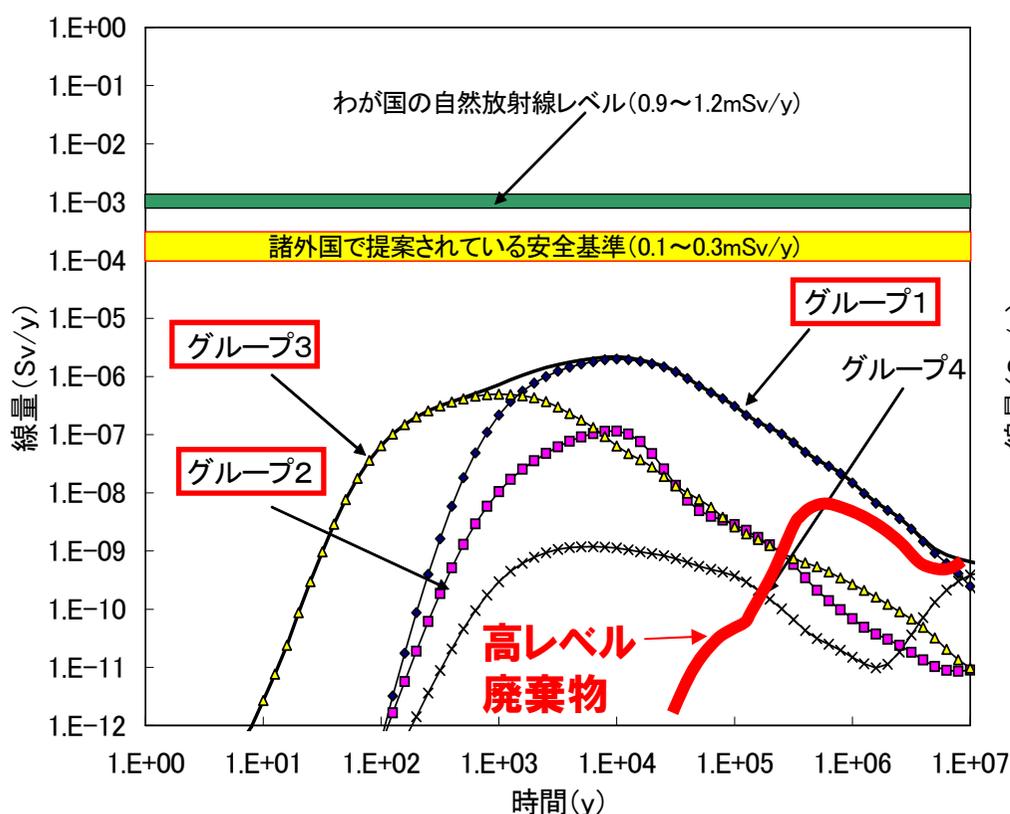
TRU廃棄物の分類

	グループ1	グループ2	グループ3	グループ4
概要	<p>廃銀吸着材</p>	<p>ハル (断面)</p> <p>エンドピース</p>	<p>濃縮廃液等</p> <p>硝酸系廃液</p> <p>乾燥・ペレット化</p> <p>硝酸系廃液の処理例</p>	<p>難燃性廃棄物</p> <p>ゴム手袋</p> <p>不燃性廃棄物</p> <p>工具 金属配管</p>
廃棄体イメージ	<p>(例)</p>	<p>(例)</p>	<p>(例)</p>	<p>(例)</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・I-129を含む 	<ul style="list-style-type: none"> ・発熱量が比較的大 ・C-14を含む 	<ul style="list-style-type: none"> ・硝酸塩を含む 	<p>—</p>

レファレンスケースの線量評価

○レファレンスケースの解析結果は、諸外国で提案されている安全基準(0.1~0.3mSv/y)を十分下回る。最大線量は約10,000年で、約0.002mSv/y

○主要核種は I-129(グループ1, 3), 次は有機形態のC-14(グループ2)



グループ1: 廃銀吸着材, グループ2: ハル・エンドピース,
グループ3: 低レベル濃縮廃液固化体, グループ4: その他雑固体



ご清聴ありがとうございました。