

高レベル放射性廃棄物 地層処分の安全確保の考え方

平成29年4月24日

原子力安全研究協会
石川博久

地層処分とは

深い地下の特徴を活かした廃棄物対策



閉じ込め

- ・酸素が少ないためものが変化しにくい
- ・ものの動きが非常に遅い



隔離

- ・人の生活環境や地上の自然環境から隔離されている

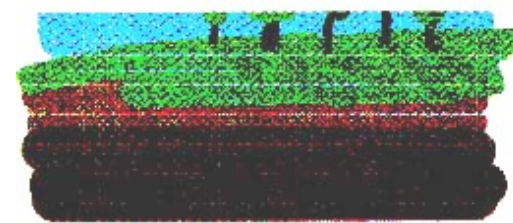


長期間にわたり人間の生活環境に影響が及ばない

地表と地下の比較



地表(人間による管理)



地下(処分)

自然現象



地震, 火山, 断層, 台風,
地滑り, 津波, 隕石, 他

火山, 断層

人の行為



破壊, 爆発, 火事, 公害,
事故, 戦争, テロ, 他

掘削

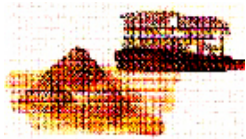
ものの動き
(100m動く)



空気: 台風 ~数秒
水 : 河川 ~数分

空気: なし
水 : ~数万年以上 (地下水)

残されて
いるもの



文字: ~数千年
建物: ~数千年

化石: ~数億年
鉱物: ~数億年

地下深部の特徴

地表に比べて変動を受けにくい

- ・地表に比べて人間活動や自然現象の影響を受けにくい

物質が変質しにくい

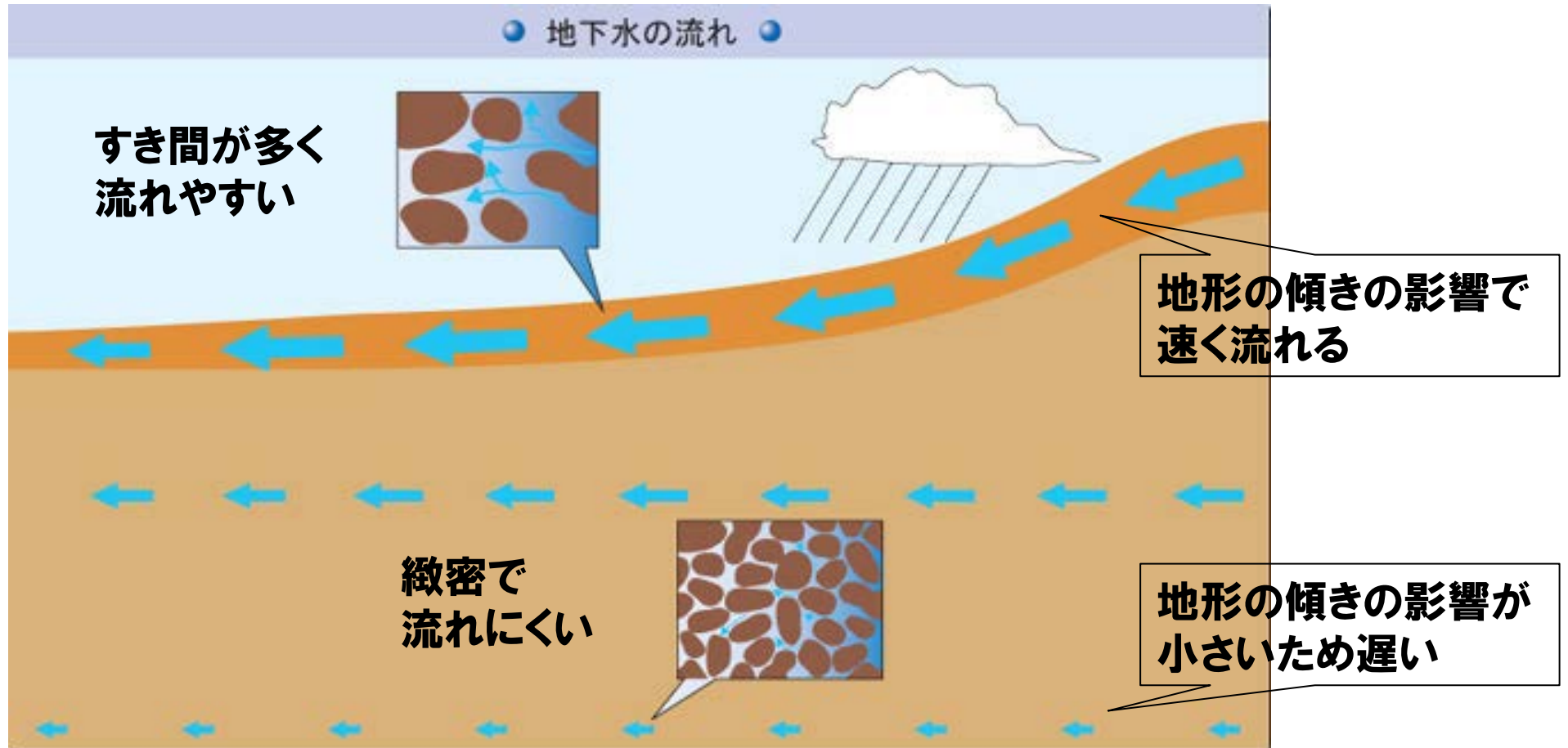
- ・地下深部には酸素がほとんど存在せず，化学的な反応がおこりにくい

物質が動きにくい

- ・地下深部でものを動かす媒体となりうる地下水の動きが極めて遅い

深い地下の地下水の特徴

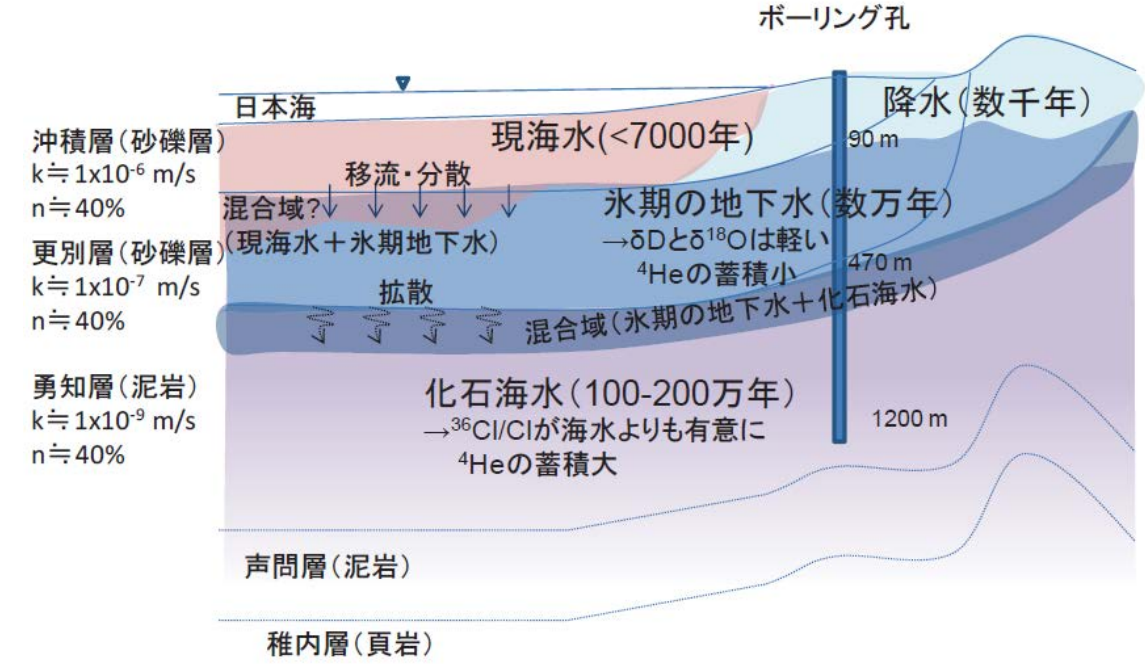
- ・深いほど岩盤が固くて緻密であり、また地形(地表の傾き)の影響が小さいため、地下水の流れは遅い



古い地下水の存在(物質が動きにくい)

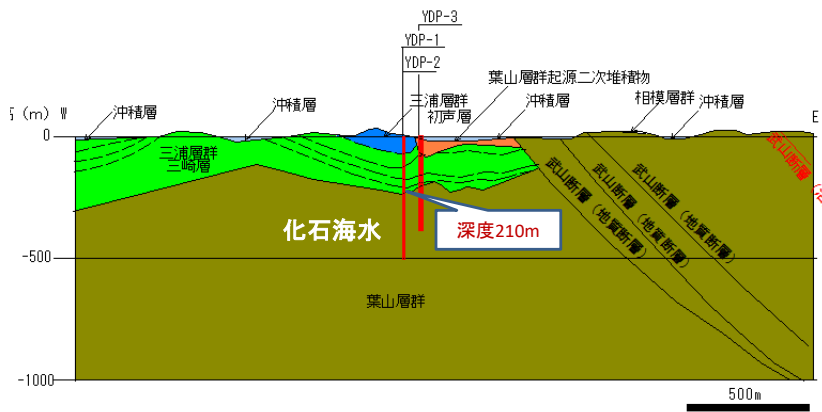
- 北海道の幌延では、約100万年以上前の化石海水が確認されている。
- 横須賀では、約700万年前の化石海水(地下210m以深)が確認されている。

幌延の例
 (100万年以上(幌延地下研サイト:地下300m; 浜里サイト:地下470m以深))



(資源エネルギー庁平成27年度 沿岸部処分システム 高度化開発報告書より引用)

横須賀の例
 (約700万年(地下210m))

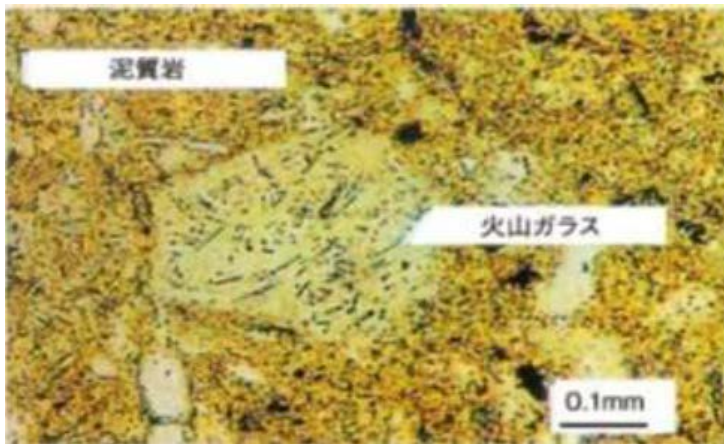


横須賀における調査結果の例
 (電力中央研究所 長谷川ほか, 2011)

物質が変質しにくい例

古いものが地下に埋まった状態であまり変化しないで残っている

約100万年前の火山ガラス



千葉県にて算出。約100万年前に堆積した泥質層の中に埋まった「火山ガラス」からは、ガラスの成分の溶け出しがほとんどないことが確認されている。

約730年前の鉄



出雲大社境内遺跡から出土した鉄斧。粘土で覆われた状態で発見され、その表面が薄い錆で覆われていたが、完全な形を残していた。

約1800年前の銅鐸



堺市下田遺跡から発掘された銅鐸。粘土の中で、1800年間腐食がほとんどなく、金属光沢が保たれていた。

日本の地質環境を考慮した対策

火山・地震・隆起/侵食

わが国の地質環境

地下水の豊富

処分施設の破壊

影響の可能性

地下水による放射性物質の移動

地層処分にとって安定な場所を選定

対策

適切な多重バリアシステムを構築

(サイト選定)

隆起・侵食

気候・海水準変動

火山活動

地震・断層活動

処分施設

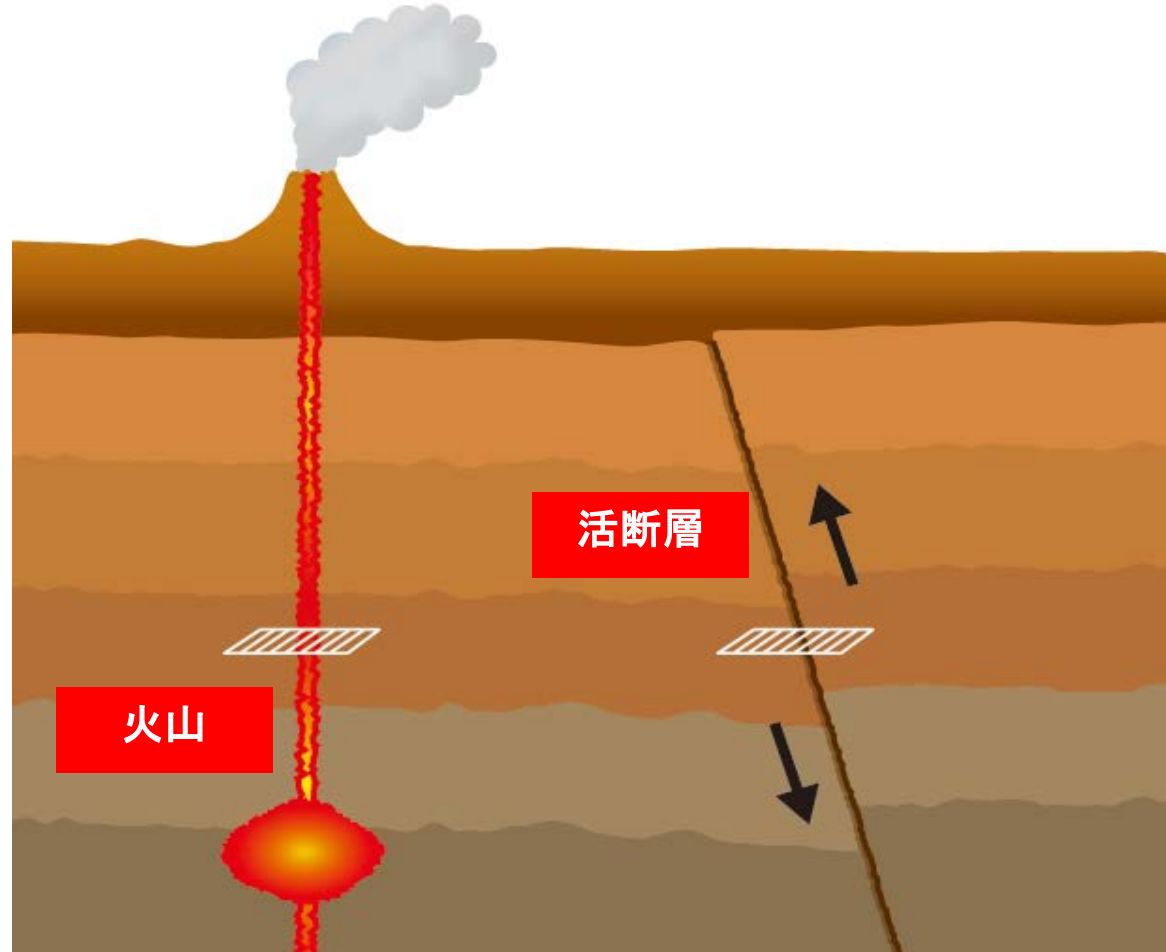
(工学的対策)

人工バリア

天然バリア(岩盤)

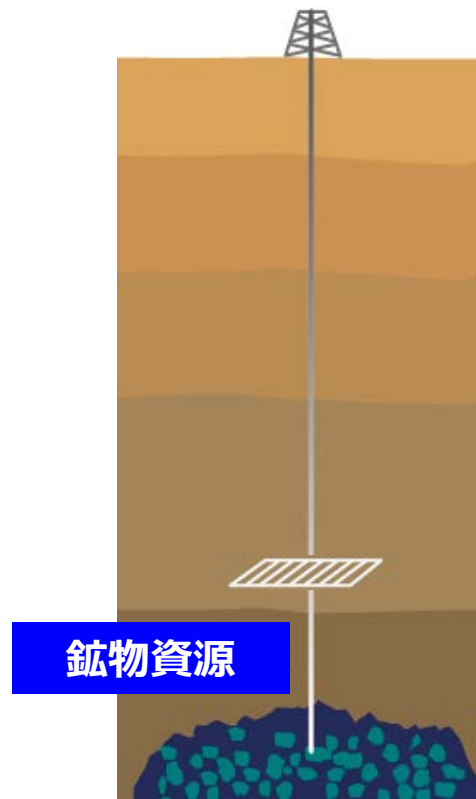
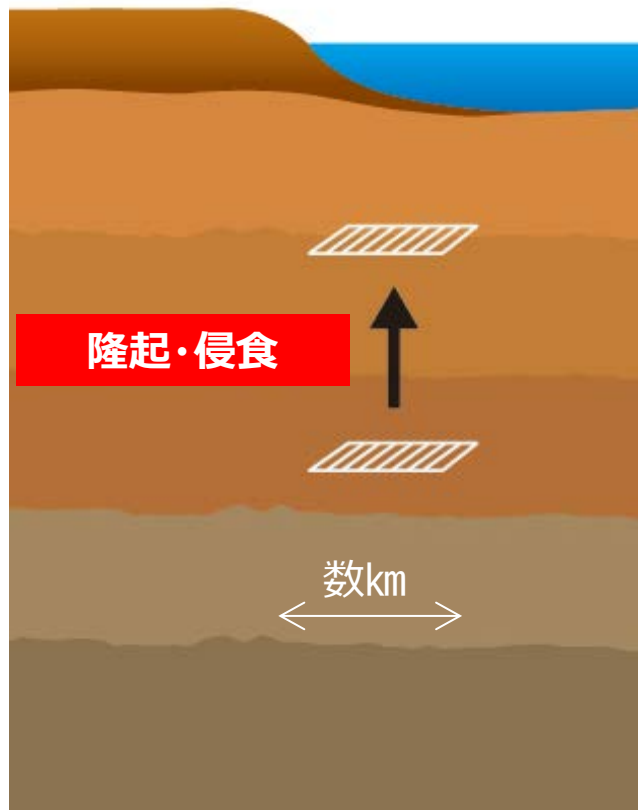
火山活動や断層活動等の影響の大きい所は避ける

火山活動や断層のずれにより処分場を破壊することのない場所を選ぶ



隆起・侵食の大きい所、鉱物資源のある所は避ける

隆起・侵食で処分場が地表に近づいたり、鉱物資源を求めて将来人間が地下に侵入する可能性がある場所は避ける



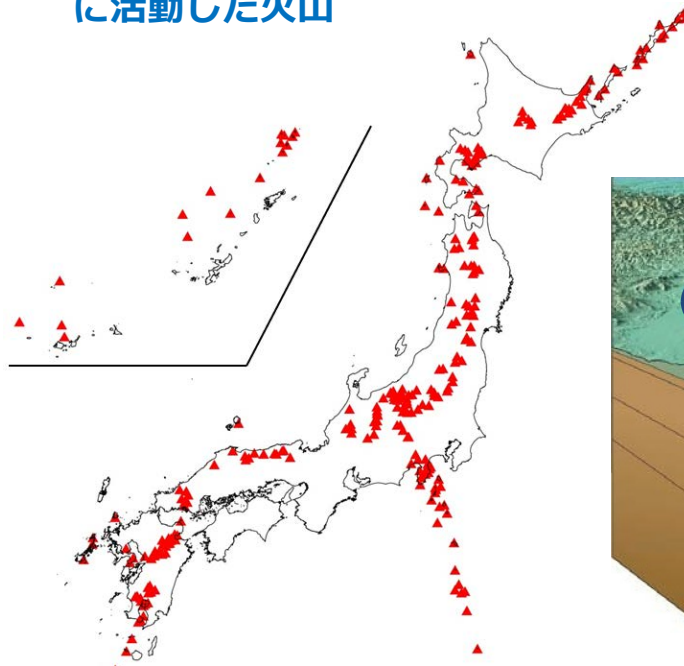
日本における火山の分布

- プレートの活動は、過去200～100万年前からほとんど変化がない
- 火山の活動地域と影響範囲は推定可能であり、影響範囲を避けて処分場を建設することが可能⇒ 火山の中心から概ね半径15kmの範囲に活動がとどまっている

約260万年前～
約80万年前
に活動した火山

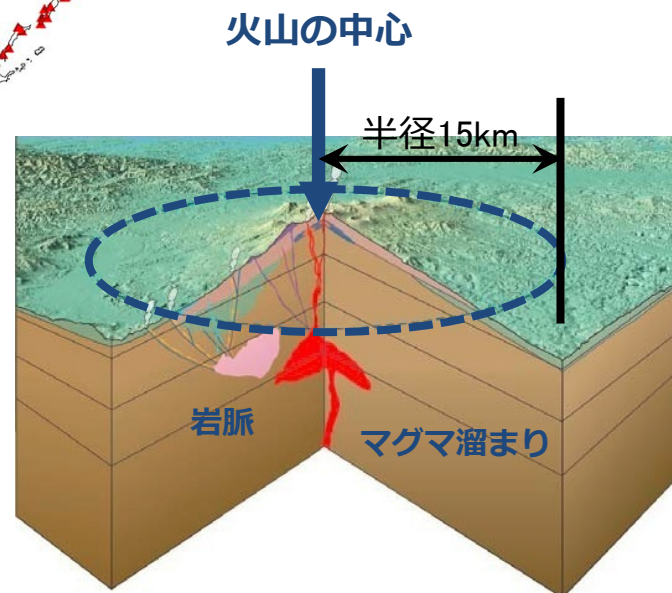


約80万年前～現在
に活動した火山



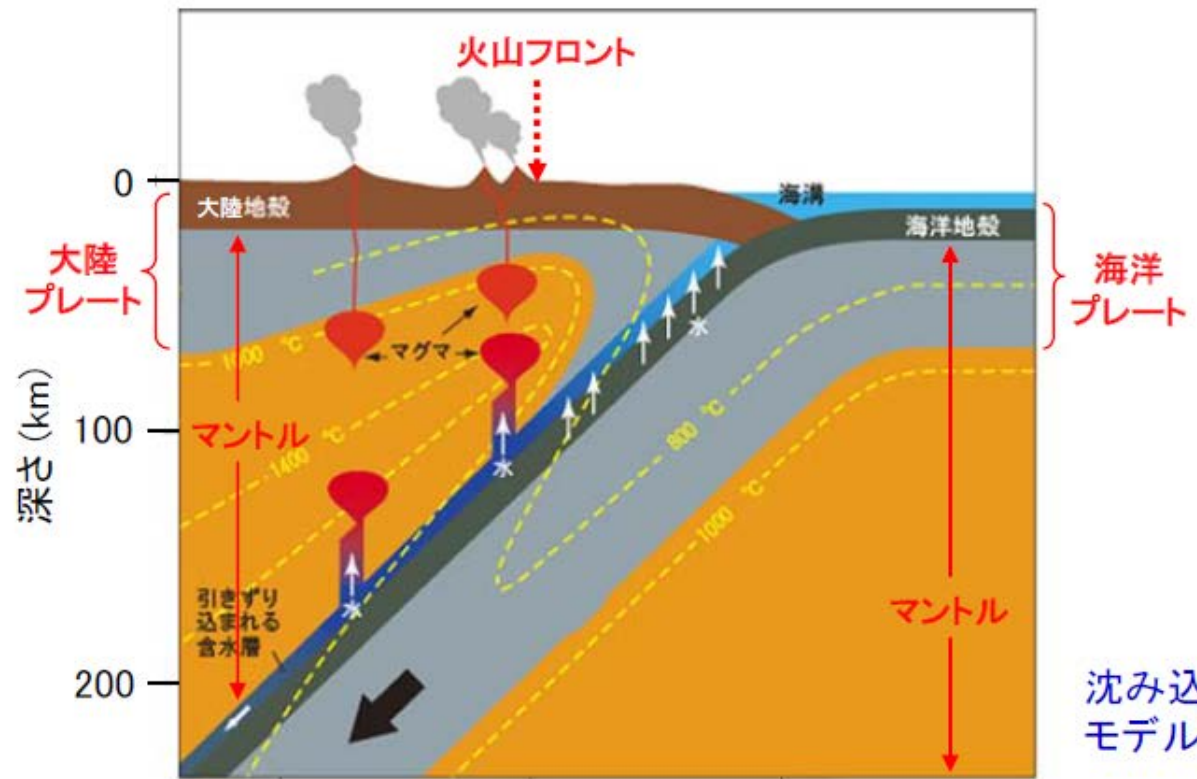
日本の火山（第3版）
（産業技術総合研究所地質調査総合センター、2013）に基づいて作成

約80万年前：中期更新世の始まり
約260万年前：第四紀の始まり



火山発生メカニズム（プレート沈み込みモデル）

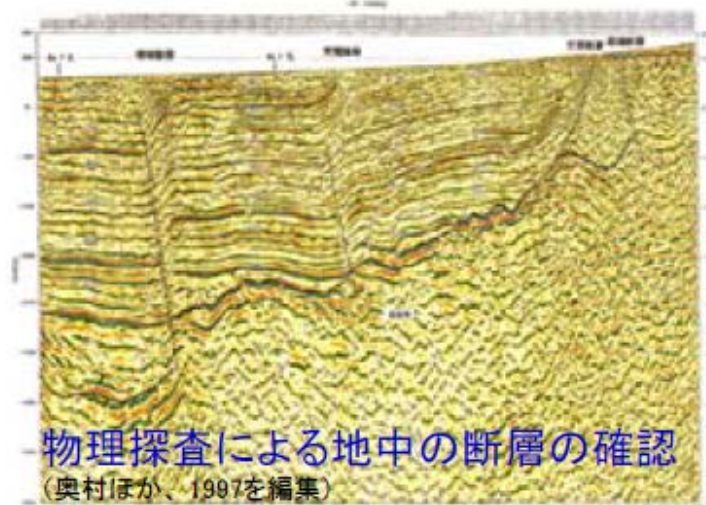
- 水分を含んだ海洋プレートが日本列島の下にもぐり込むと、温度・圧力が上昇して岩盤から水分が放出される
- この水分によりマントルの融点が下がり（溶けやすくなり）、マグマが発生。これが上昇し地表に噴出して火山となる
- マグマが発生する深さは約100km以深であるため、多くの火山はプレートが沈み込む位置（日本海溝など）からおおよそ一定の距離に分布（火山フロントを形成）



沈み込み帯におけるマグマ発生モデルの例（巽、1995を編集）

日本における活断層の分布

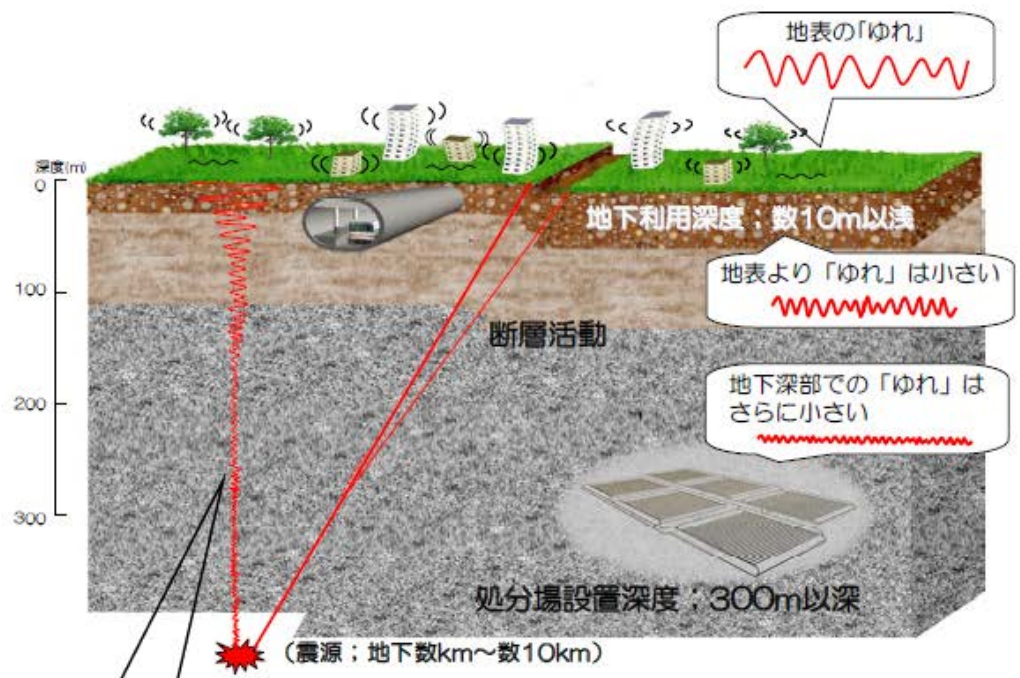
- ・ボーリング調査やトレンチ調査、物理探査などを行って活断層の有無を詳細に調査し、影響のある活断層を回避する



地震が地層処分に及ぼす影響

- 一般に地表部は地盤が軟らかく、地震による揺れが大きい。逆に地下深くなるほど硬いため、地表に比べ地震の揺れが小さい
- 廃棄体は周囲の岩盤と一体になって揺れる

→ 廃棄体が地震により破壊される可能性は非常に小さい



震度7直下型地震における被害事例

地表の壊滅的な被害に対し、トンネルの空洞が保たれている



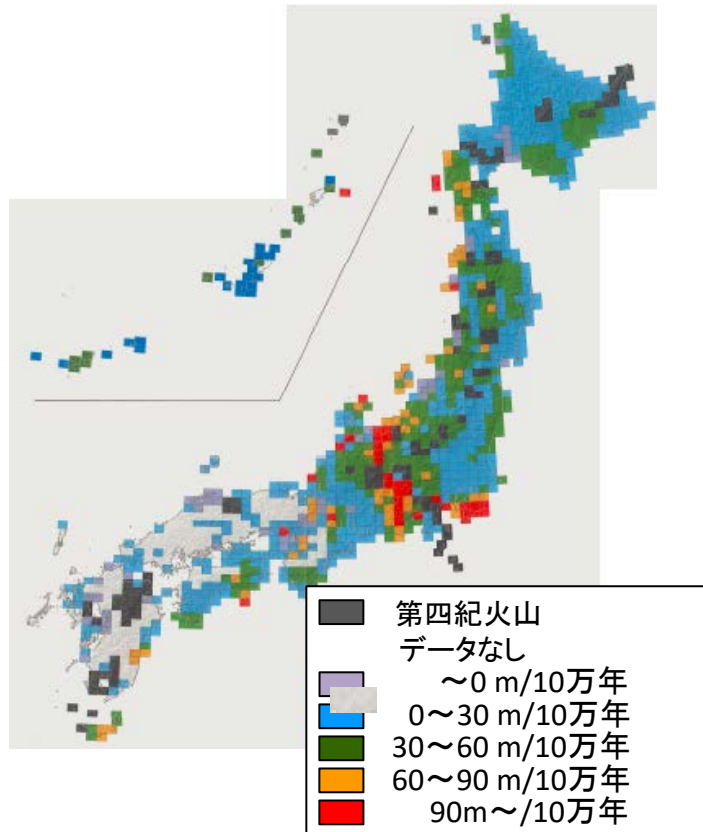
トンネル内の被害

新潟県山古志村の木沢トンネル (2004年10月中越地震) 2004.11.14

隆起・侵食

隆起した分だけ侵食されるとして隆起速度の大きい所は避ける

【最近約10万年間の隆起速度の分布】



(凡例は換算した隆起速度)



地表地質調査

(隆起・侵食速度を推定するために過去の侵食の記録である河岸段丘や海成段丘を調査している様子)

<http://www.jaea.go.jp/04/horonobe/cyousa23.html#03>

我が国での地層処分の考え方

地層処分に著しい影響を及ぼす場所を避ける

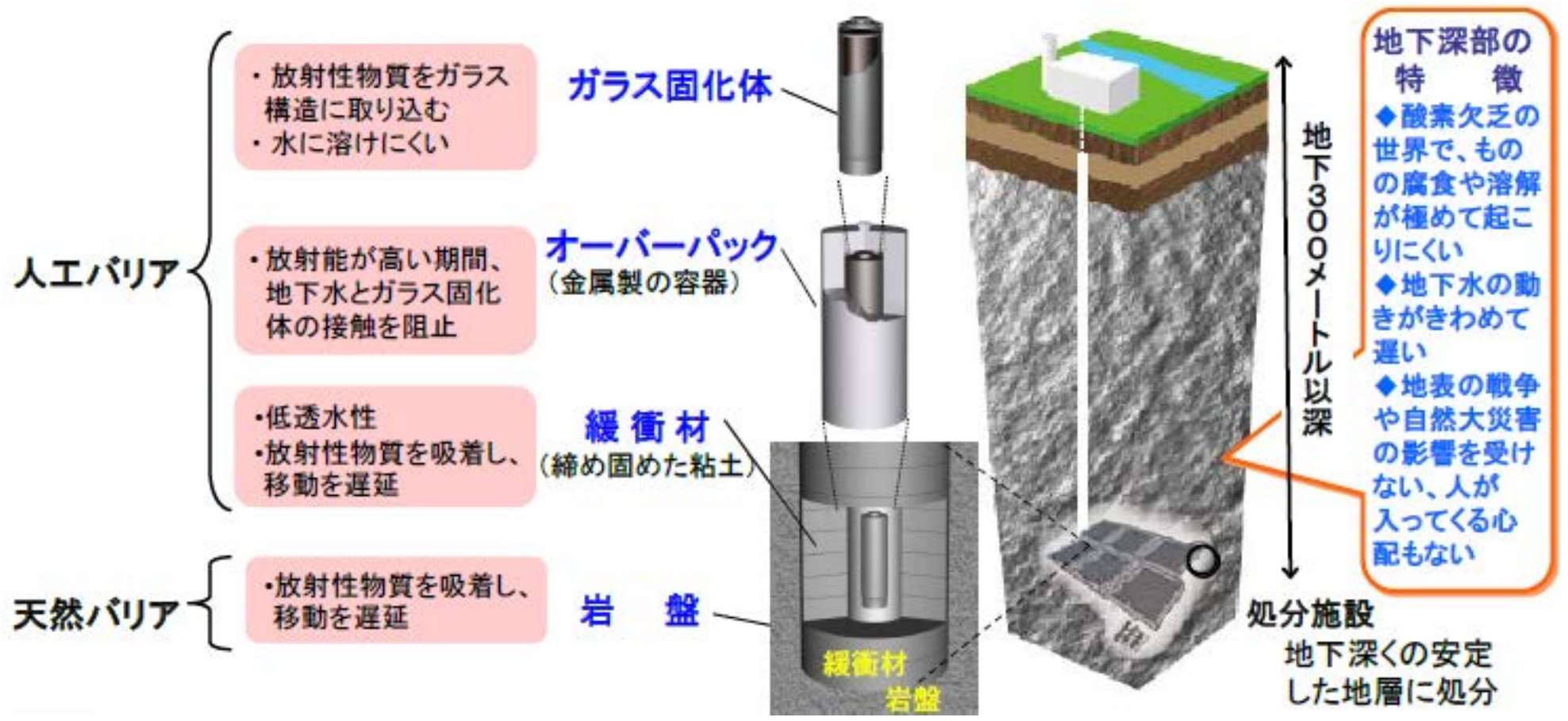
- **火山活動**
- **地熱活動（地下の温度が高い所）**
- **断層活動**
- **隆起・侵食**
- **鉱物資源**

段階的調査により安全な場所を選定

安全な地層処分システムを構築

地層処分システムの基本概念

- 放射能が人間に影響を及ぼさないレベルに下がるまで放射性物質を長期間閉じ込めるために、多重のバリアを施す
- 多重バリアは、ガラス固化体、オーバーパック(金属製容器)、緩衝材(締め固めた粘土)からなる人工バリアと、厚い岩盤による天然バリアから構成

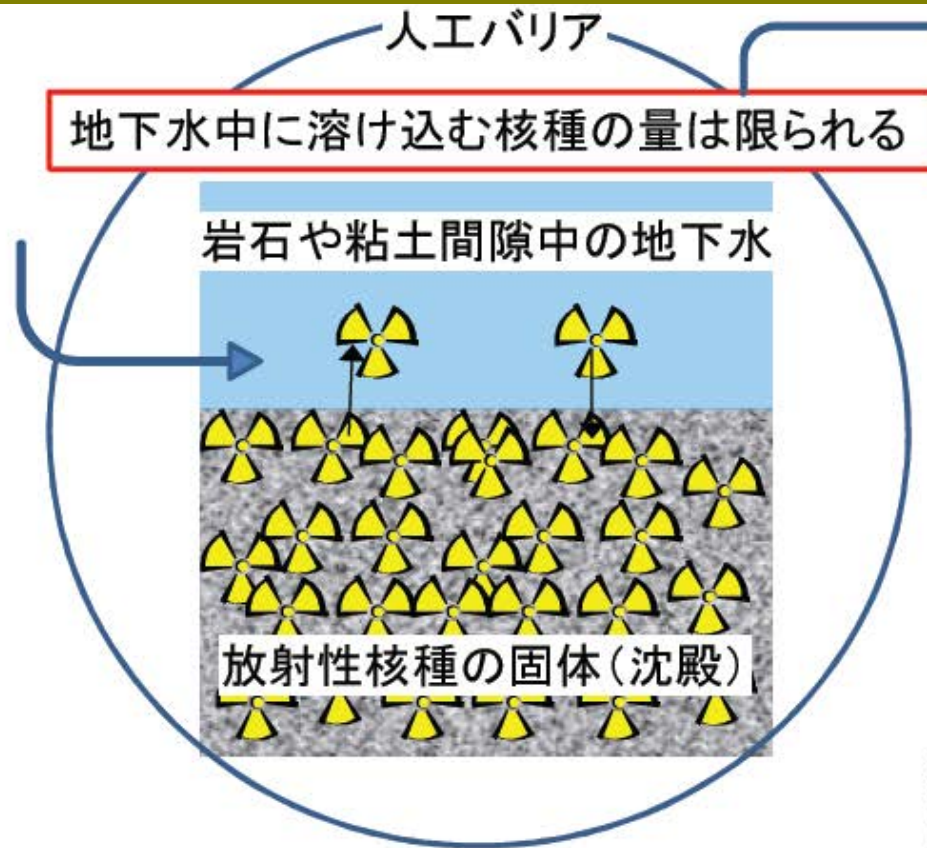


人工バリアの概念

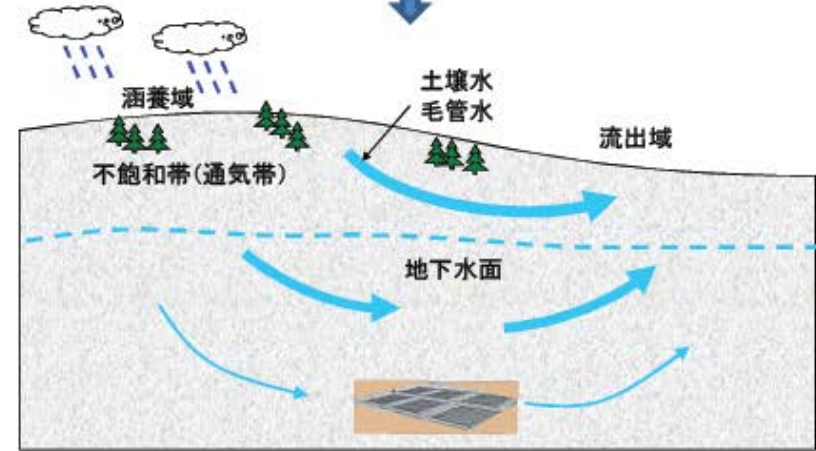
人工バリア：放射性物質の閉じ込めをより確実に



放射性物質の地下水への溶けにくさ



人工バリアを通過して流れる地下水量は極めてわずか(地下水はほとんど動いていない)(ガラス固化体当たり $\sim 0.001 \text{ m}^3/\text{年}$)



地表に至るまでに時間がかかる(核種は崩壊する)
地表付近では極めて大量の水で希釈される

- ほとんどの核種は地下水へ非常に溶けにくい(深い地下水は還元性)
- 地下水が、激しく流れて機械的に固体の微粒子が運ばれることのない限り核種はこれ以上は人工バリアから外へは運ばれない

ガラス固化体(ガラス)の機能と役割

◆ガラス固化体は、放射性物質を閉じ込める役割を持つ

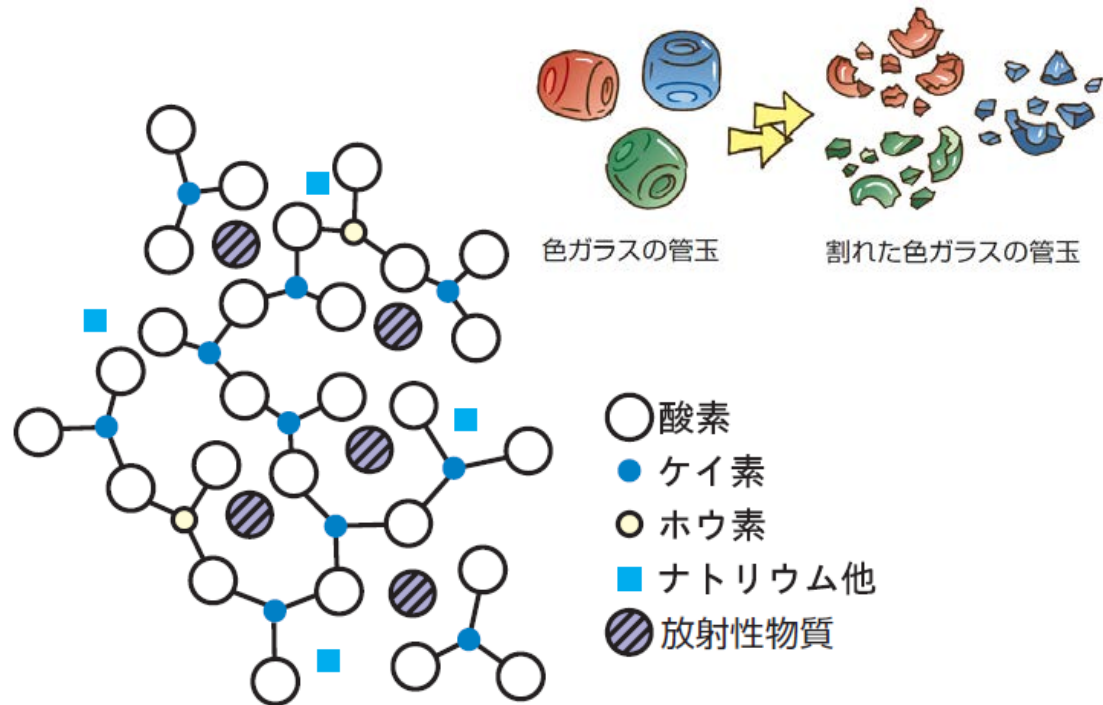
- ・ガラスは分子構造の中に放射性物質を閉じ込めることが可能で、割れても放射性物質が流れ出すことはない
- ・ガラスは水に溶けにくい(ガラス固化体を水に漬けて、全て溶けるのに約7万年かかる)

ガラス固化体



【ガラス固化体の仕様例】

材質:ガラス
寸法:高さ 約1.3m
直径 約40cm
重量:約500kg
ガラス容積:約150ℓ



ガラス固化体は網目構造の中に放射性物質を取り込み
長期間安定な状態を保つ

オーバーパック(金属容器)の機能と役割

- ◆オーバーパックは、ガラス固化体と地下水の接触を、放射能が大きく減る1000年間遮断する役割を持つ
- ・地下の深部では酸素が少ないため、金属の腐食は極めてゆっくりとしか進まない(長期腐食試験の結果、1000年間におけるオーバーパックの腐食量は、地下深部の環境条件の不確実性を考慮して大きめに評価しても約3cm程度)

オーバーパック



長期腐食実験などを踏まえて、1000年間の腐食量は大きめに3cmと設定

【オーバーパックの仕様例】

材質:炭素鋼
寸法:高さ 約1.7m
 外径 約80cm
 内径 約40cm
 厚さ 約20cm(※)
重量:約6トン

※外からの圧力に対する安全性や、オーバーパックを透過する放射線による影響の低減などを考慮して、必要な厚さを約20cmと設定した

鉄は酸素がない環境ではほとんど腐食しない



- ・出雲大社境内遺跡から出土した鉄斧(730~750年前)
- ・粘土で覆われた状態で発見され、その表面が薄い錆で覆われていたが、完全な形を残していた

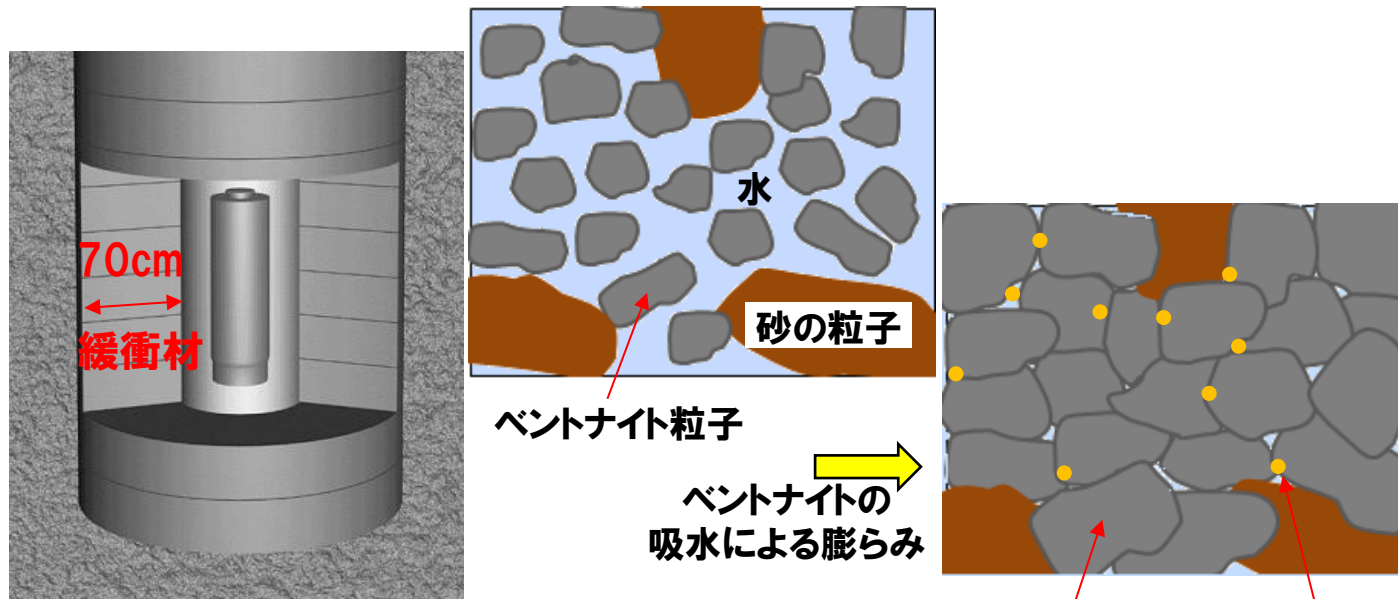
※図中の①~⑥は錆の厚さを内部X線CT調査した断面位置

これまで考古学で出土した鉄製品の長期腐食事例からは、1000年間の鉄製品の腐食深さは0.1~1.4cm

緩衝材(ベントナイト)の機能と役割

◆ 緩衝材は、オーバーパックへの地下水の浸透や、放射性物質の移動を遅らせたり、放射性物質を吸着する役割などを持つ

- 緩衝材は、天然の粘土(ベントナイト)が主成分
- ベントナイトは吸水すると膨らみ、粒子間の隙間を埋めることで水を通しにくくする性質を持つ



- 堺市下田遺跡から発掘された銅鐸
- 粘土の中で、1800年間腐食がほとんどなく、金属光沢が保たれていた



【緩衝材の仕様例】

材質: ベントナイト70%、ケイ砂30%

寸法: 高さ 約3.1m、外径約2.2m、内径約80cm
厚さ 約70cm

岩盤(天然バリア)の機能と役割

- ◆ 岩盤は、人工バリアから漏れ出した放射性物質の移動を遅らせる役割を持つ
- ・ 地下深部は還元性の環境に維持される
- ・ 地下深部の岩盤では地下水の流れは遅く、かつ岩盤は放射性物質を吸着する



どのように安全を確かめるか

○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
- ・ 将来の状態を正確に言い当てるのではなく、危険側に設定して評価

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



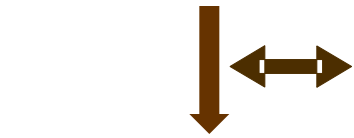
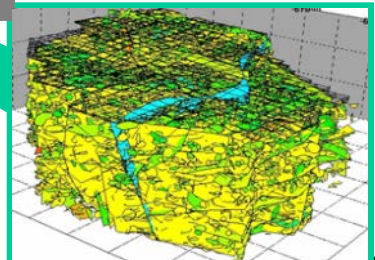
モデル&データ

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 ○… ○… ○…



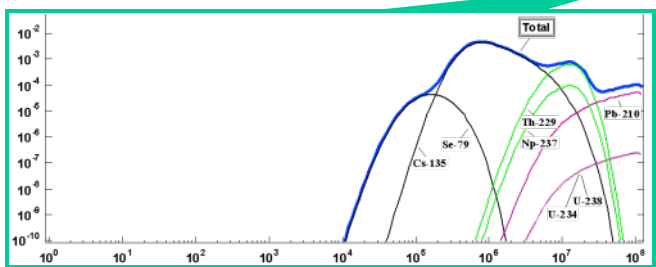
シミュレーション

現象を表す数学モデルとデータを用いた評価解析



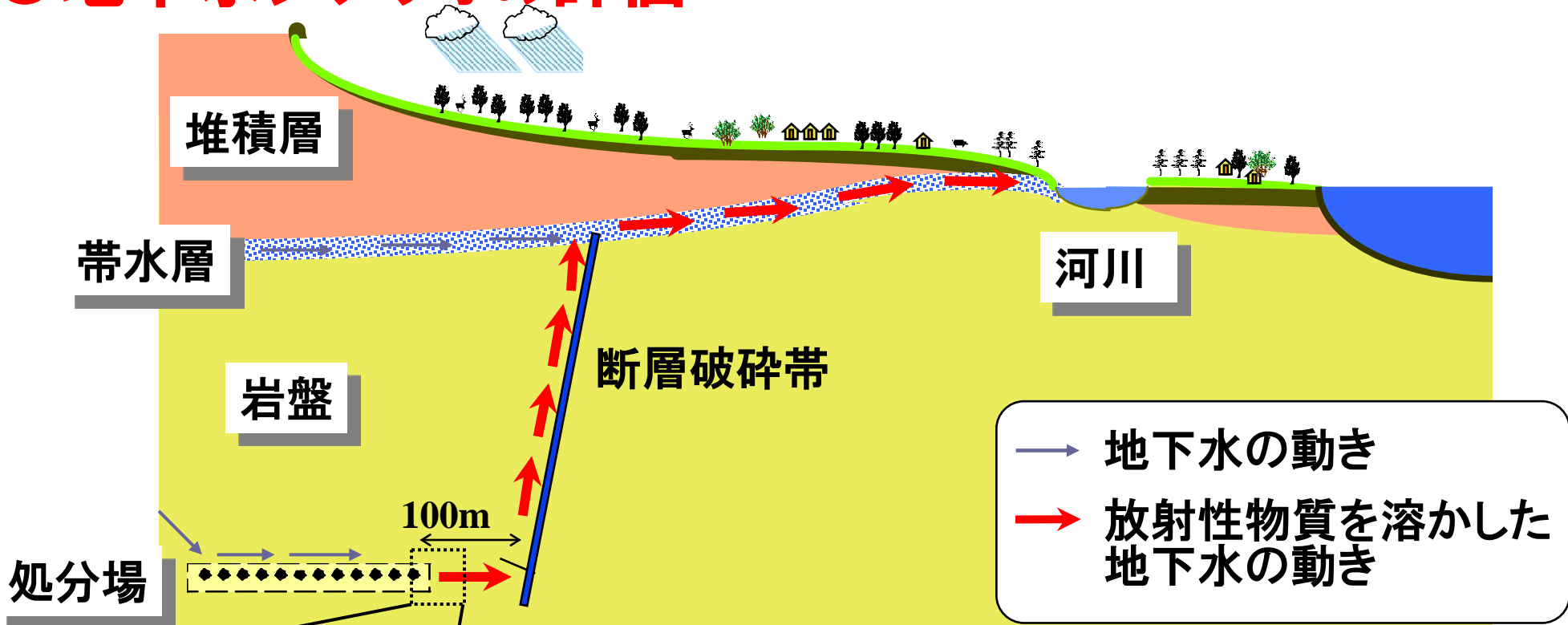
安全基準

安全性の判断



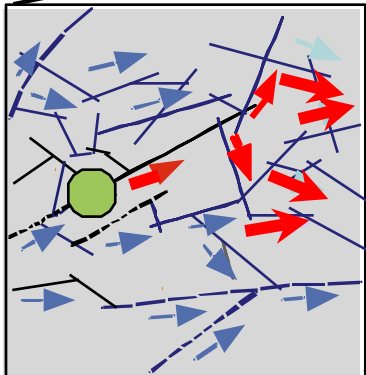
どのように安全を確かめるか

○地下水シナリオの評価



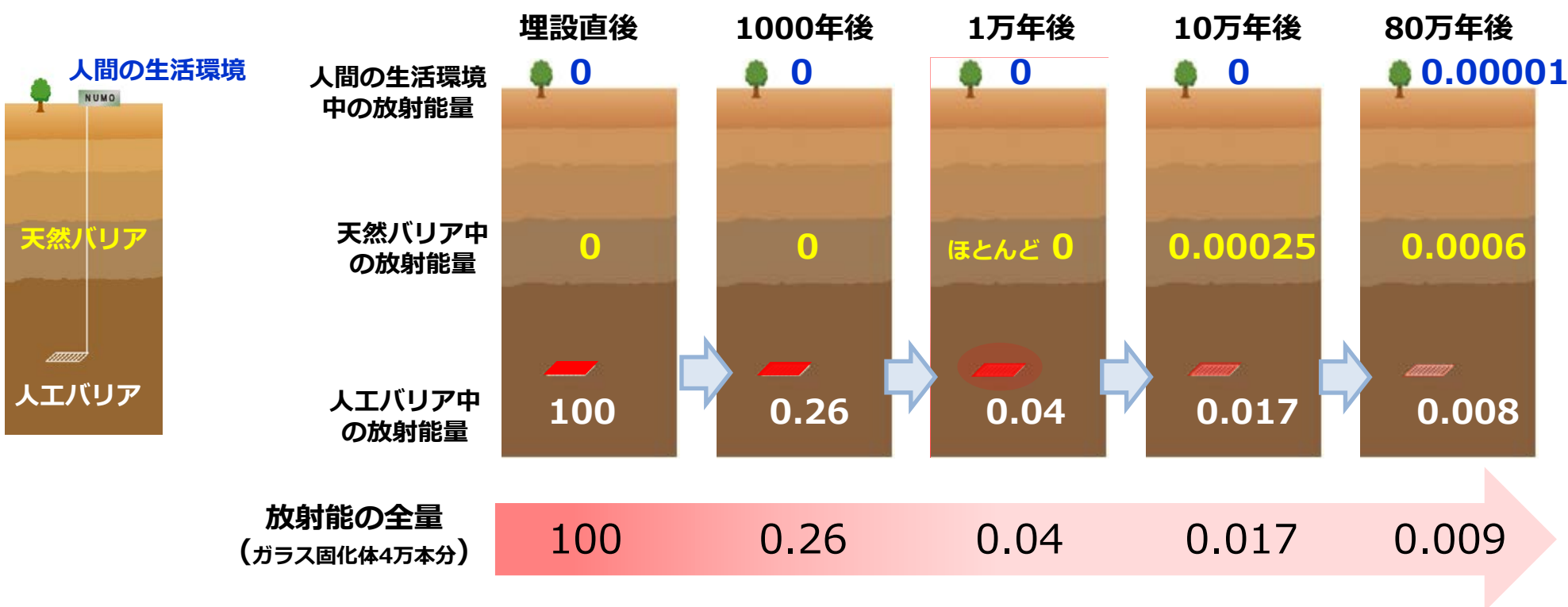
将来の事を正確に予測するのではなく、大きめの見積り安全評価上あえて危険側に条件を仮定

- ・ガラス固化体が水に漬かった状態で溶け出る
- ・1,000年後に、すべてのオーバーパックが破損
- ・処分場から100m離れたところに大きな断層が存在



安全性を評価した例

- 放射能の大部分は人工バリア内に残り人間の生活圏に出てくるのは非常にわずか（埋設直後の1000万分の1程度）
- 人工バリアの機能が失われたとしても天然バリア(地層)の働きで放射性物質の動きは抑制される



第2次取りまとめ結果に基づく

日本の地質と地下研究施設

- 日本の地質は大きく結晶質岩(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。

わが国の地質の分布
(海拔-500m)

わが国の代表的な地質について
研究開発を実施

結晶質岩 (例:墓石)

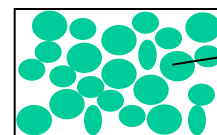
- 岩石は塊状で硬い
- 地下水は岩盤中の割れ目を通る



割れ目

堆積岩 (例:石塀)

- 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



鉱物粒子

瑞浪超深地層研究所
(岐阜県瑞浪市)

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

幌延深地層研究所
(北海道幌延町)

瑞浪の地下研究施設の研究紹介

東濃地科学センター

● 瑞浪超深地層研究所 (結晶質岩)

【深地層の科学的研究】

- ・ 深地層の研究計画
- ・ 地質環境の長期安定性に係る研究
- ・ 深度500m(現在)

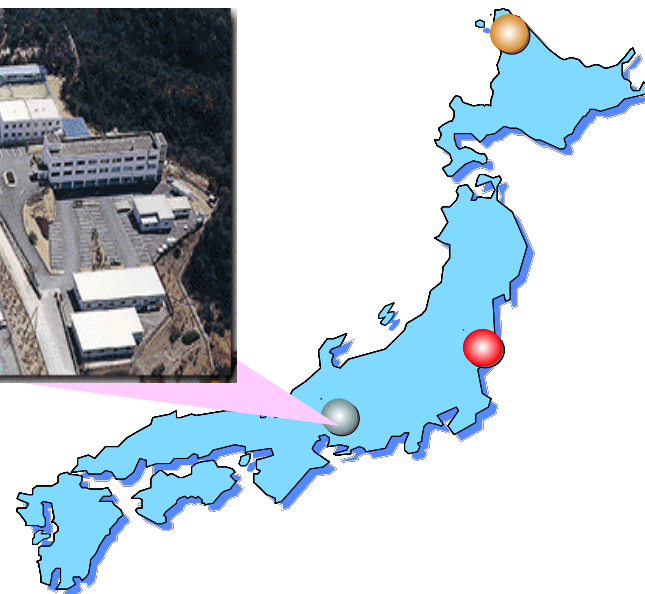
深度500mステージ掘削
(先行ボーリング調査)



深度300m研究アクセス坑道



(イメージ図)



地下水モニタリング



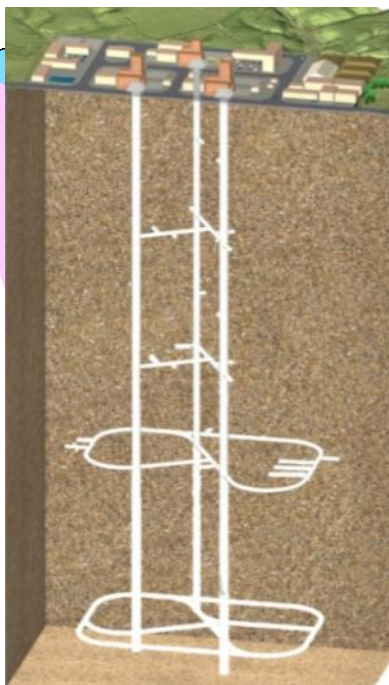
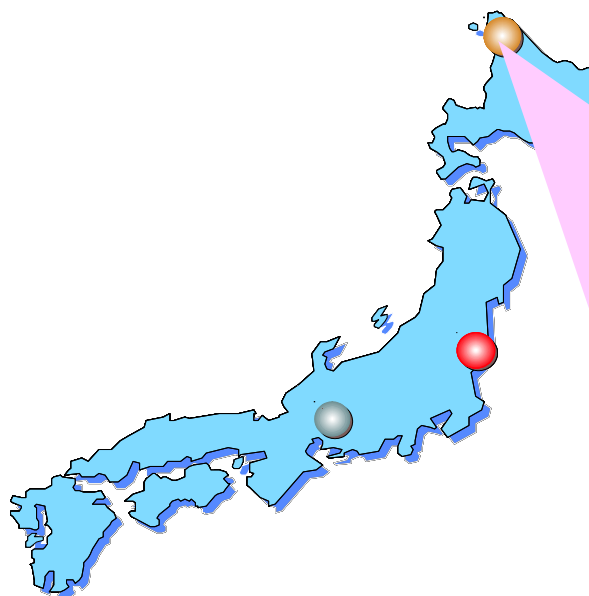
岩石・鉱物の年代測定技術開発



希ガス質量分析計 (K分析)

炎光光度計 (Ar分析)

幌延の地下研究施設の研究紹介



(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)

【地層処分研究開発, 深地層の科学的研究】

- ・ 深地層の研究計画
- ・ 地質環境の長期安定性に係る研究
- ・ 深度350m(現在)



ゆめ
地創館



調査坑道掘削

350m調査坑道



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

JAEAにおける室内試験の研究紹介

東海研究開発センター

【地層処分研究開発】

- ・ 工学技術の信頼性向上
- ・ 安全評価手法の高度化



熱力学・収着・拡散 データベース
 Thermodynamic, Sorption & Diffusion DataBase

<http://migrationdb.jaea.go.jp/>

国立研究開発法人 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 | 文庫集約表 | 信頼性情報 | ログアウト

20子表示

表示条件 | 重要項目のみ

Class1	Class2	Class3	Class4	Class5	Class6	Class7	Class8	Class9	Class10	Class11	Class12	Class13	Class14	Class15	Class16	Class17	Class18	Class19	Class20
7	50	198	24	0	0	0	124	5	18										

検索条件
 元素: In
 Solid Phase: (none) | Fluid Phase: (none) | Reaction: (None available)

1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20

数: 229

処分に使う材料の試験



地下深部を模擬した環境下での試験



Solid Phase	water type	K _d	Notes
silicate	groundwater	1.00E+01 ~ 1.50E+01	Allard and Beal(72)
silicate	groundwater	1.00E+01 ~ 1.20E+01	Allard and Beal(72)
stone/qsar(0.90)	Aq105	1.00E+00	Allard et al.(1979b)
stone/qsar(0.90)	Aq290	2.00E-01	Allard et al.(1979b)
stone/qsar(0.90)	Aq290	2.51E-01	Allard et al.(1979b)
stone/qsar(0.90)	Aq1105	3.00E+00	Allard et al.(1979b)
stone/qsar(0.90)	Aq290	5.01E-01	Allard et al.(1979b)
stone/qsar(0.90)	Aq1105	7.94E+00	Allard et al.(1979b)
stone	de-ionized water #1	1.00E+02	Baston et al.(1999)
stone	de-ionized water #1	1.10E+02	Baston et al.(1999)
stone	de-ionized water #1	1.20E+01	Baston et al.(1999)

核種移行データベースの整備



様々な分析装置 (写真はICP-MS)

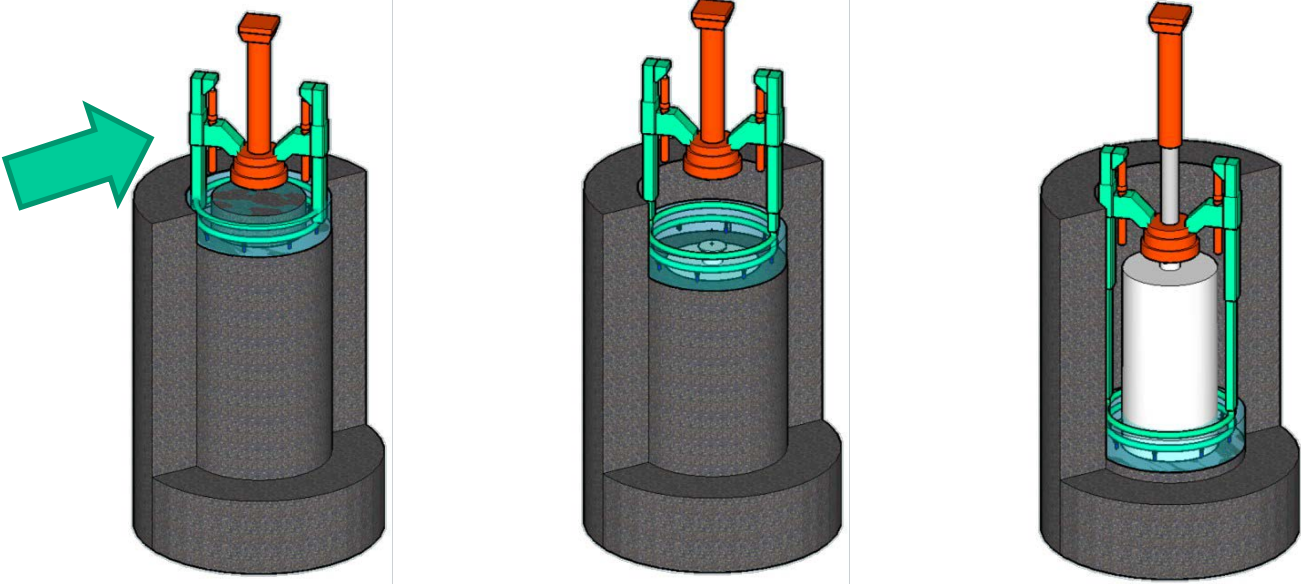
地下深部での廃棄物周辺の環境や材料の長期変化を予測する
 (熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発)

放射性核種を用いて地下深部の化学的環境を模擬した条件での核種移行データの取得

回収可能性の確保

今後の技術その他の変化の可能性に柔軟に対応するため
処分場の閉鎖までの間、回収可能性を確保

緩衝材除去の例

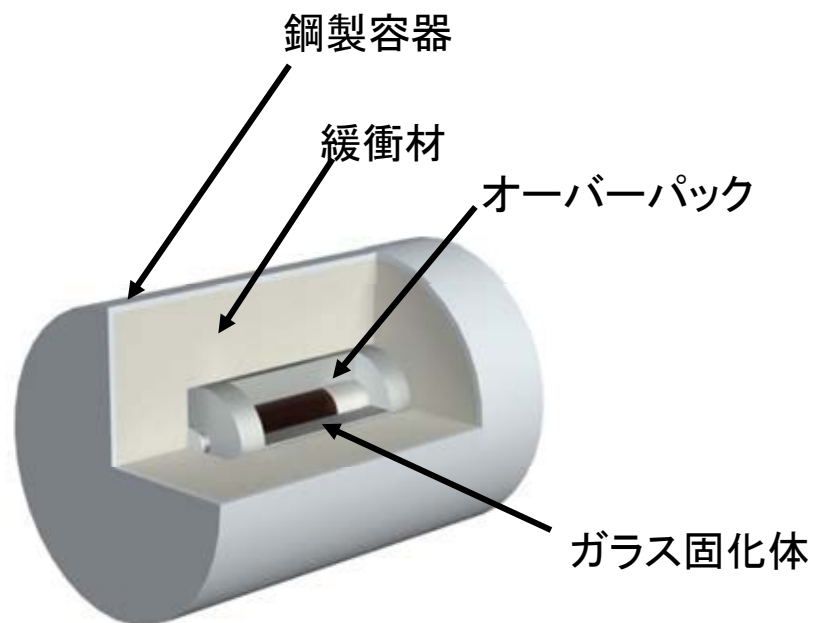


緩衝材除去装置

第16回放射性廃棄物WGおよび原環セン
タートピックスNo.102より

新概念の検討（PEM）

人工バリア(ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材)を一体で製作し鋼製容器に封入



PEM方式の概念



PEM容器の製作例

**ご清聴ありがとうございました。
ございました。**