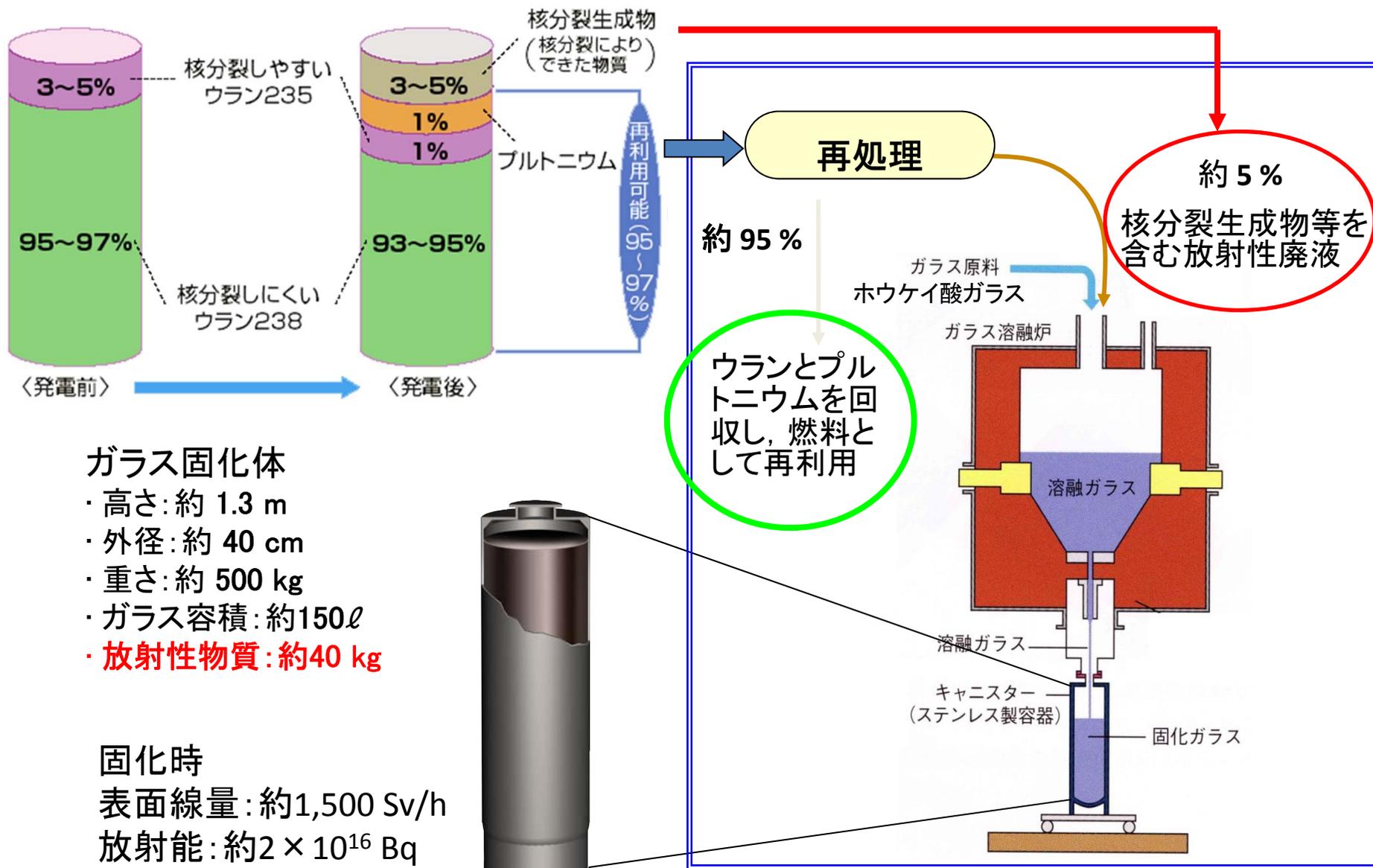


高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体) の処分について

2012年(平成24年)1月26日

(公財)原子力安全研究協会
処分システム安全研究所所長
朽山 修

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体) 実際に燃えて(核分裂して)灰になるのは約5%



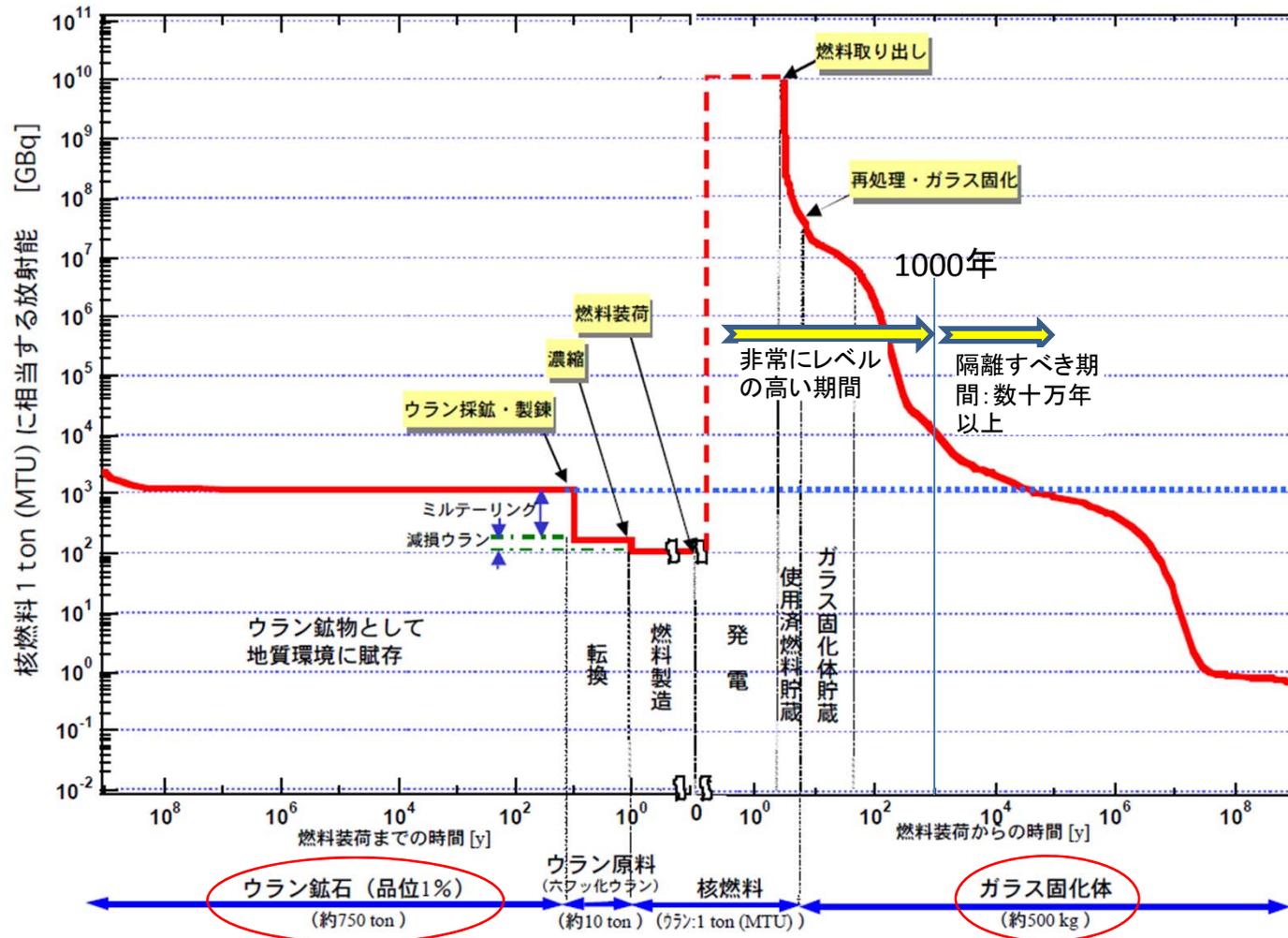
ガラス固化体

- ・ 高さ: 約 1.3 m
- ・ 外径: 約 40 cm
- ・ 重さ: 約 500 kg
- ・ ガラス容積: 約150ℓ
- ・ **放射性物質: 約40 kg**

固化時

- 表面線量: 約1,500 Sv/h
- 放射能: 約 2×10^{16} Bq
- 発熱量: 約2 kW

放射能の推移から眺めた高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の特徴 (濃縮度4.5%の核燃料1MTU相当)



ガラス固化体の放射能は非常に長期間(数万年以上)高いレベルで残る
 その間の人間社会の変化を予測することは困難
 ⇒人間による管理が失われても問題のない処分方法が必要

出典:「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- 総論 を編集

処分の目的＝隔離・閉じ込め：自然現象、人の行為から守り続ける



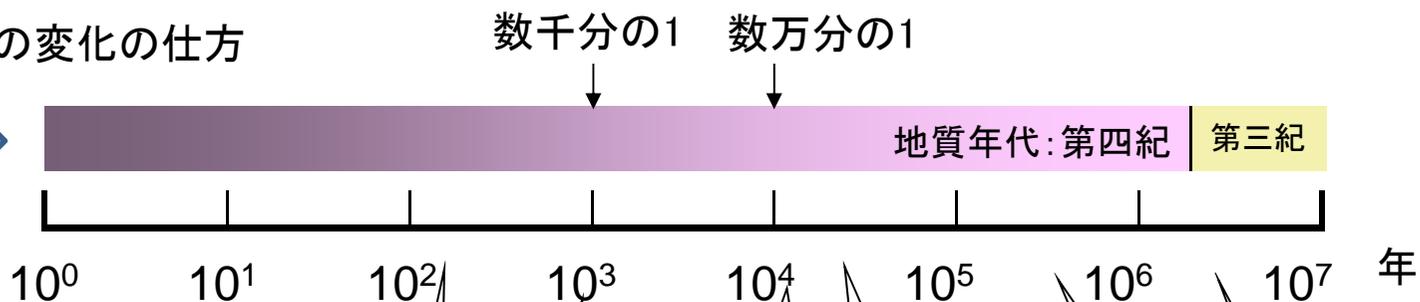
ガラス固化体(固体になって閉じ込められている)の危険性

放射線影響により環境や公衆に危険を与えるには、ガラス固化体を自然現象または人の行為により破壊し、何らかの力(自然現象、人の行為)により環境に飛散させなければならない。

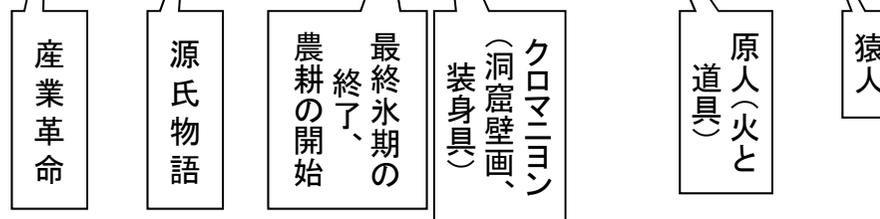


長期にわたり外的擾乱事象に対して抵抗力のある(隔離・閉じ込めができる)処分方法が必要

過去の地質環境の変化の仕方



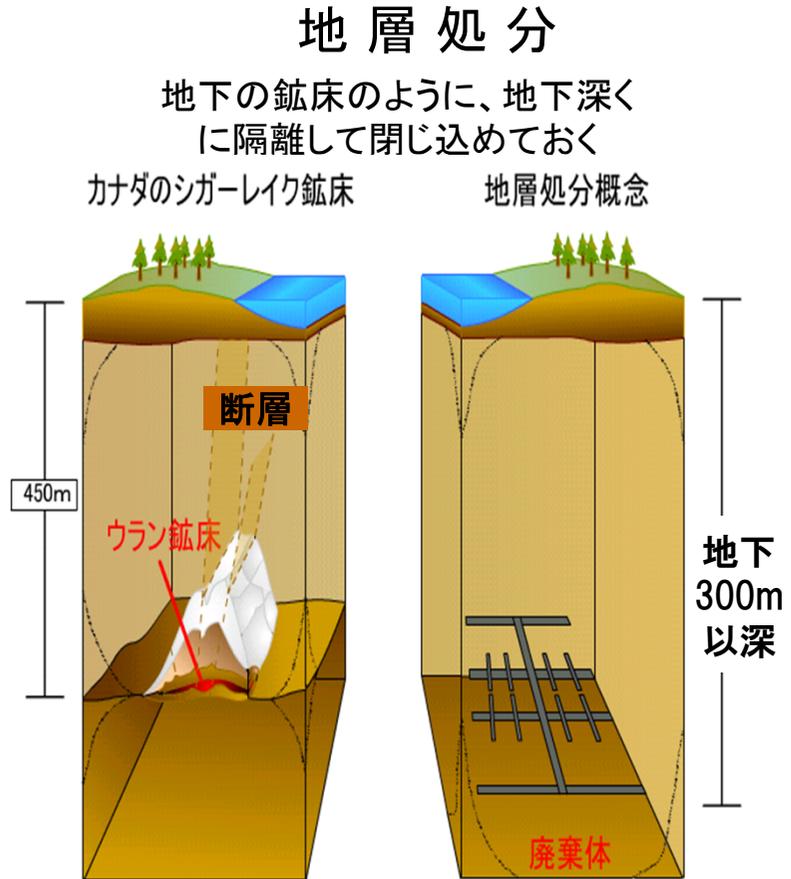
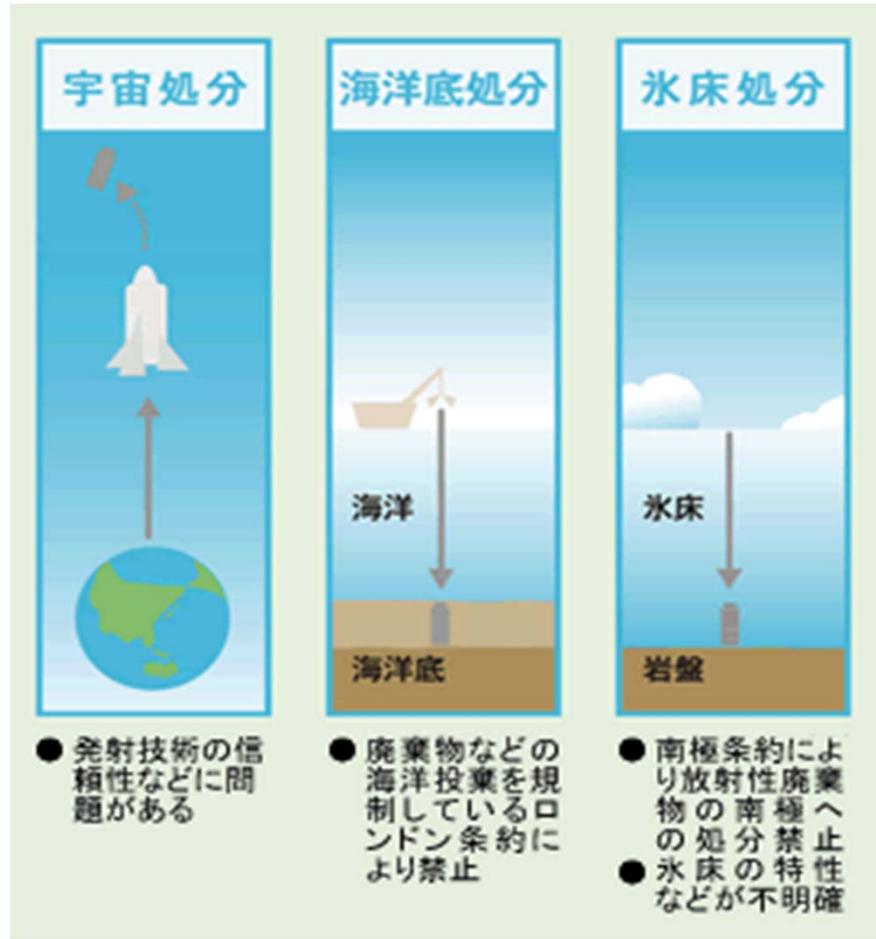
過去の人間社会の変化の仕方



長期地上管理

- 将来世代に負担(管理・保守を行わねばならない)
- 社会の安定性、管理能力が失われた際の防護が問題となる(社会システムの安定性に対して期待できるのは数百年ほど)

その他の隔離・閉じ込め方法と地層処分の比較



約13億年前に形成

300 mより深く
(500~1000m)

自国の廃棄物は自国内で処分することが好ましい
未知の要素(不確実性)が少ないことが好ましい



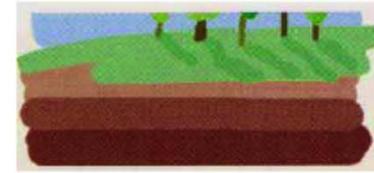
地下は長期(何万年~何千万年)にわたって極めて安定で地表の影響を受けにくい
地表においておくより安全

地表と地下の比較

地下深部はものを閉じ込めておくうえで安定している。



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 地層：～数十億年

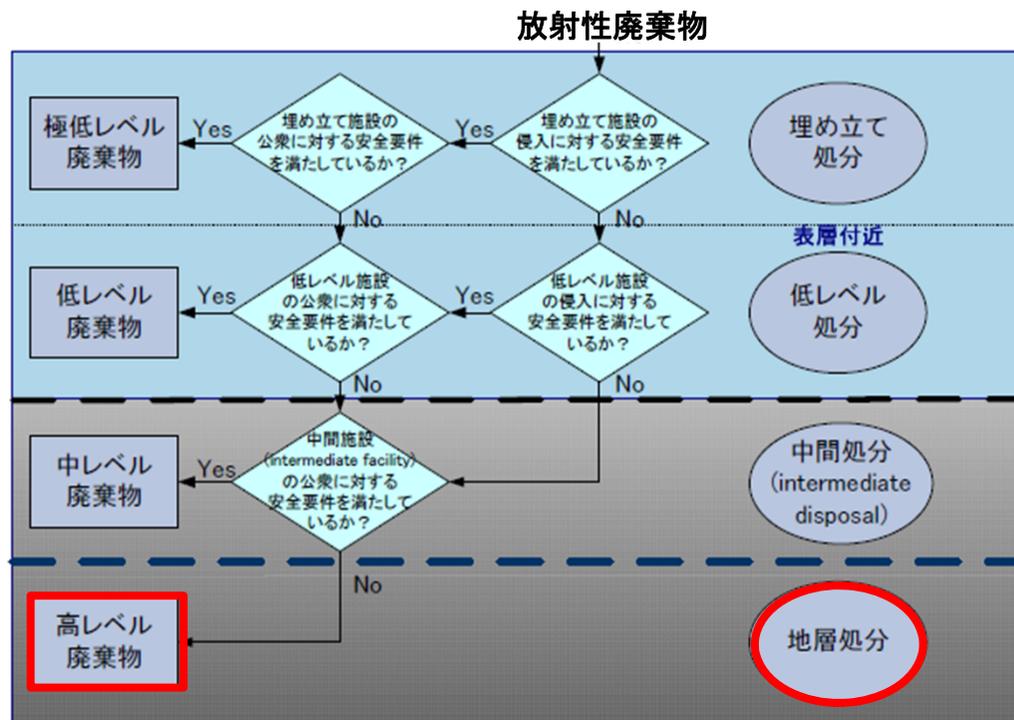
地下での様々な変化は地質学的時間スケールで起こり極めて緩慢

- ◆ 受動的な安全系(Passive Safety System)：外的擾乱事象に対して抵抗力があり、内的な原因で危険がもたらされることがない
- ◆ 処分場を閉鎖するまでは、再取り出しができ、将来世代に意思決定の余裕を残す
- ◆ 閉鎖後もモニタリング、記録の保存、マーカーなどにより時間とともに緩やかになる管理で安全確保ができ、管理の負担が小さい
- ◆ 他の国に迷惑をかけない
- ◆ より安全になるような工学的設計ができる

全ての放射性廃棄物の管理のための好ましい戦略

(IAEA 個別安全要件: Disposal of Radioactive Waste, No. SSR-5, 2010)

- ◆ 接近可能な生活環境からの隔離: 潜在的危険性に応じて、人間の侵入の可能性を低減するためにより深い深度を選び、漏出した放射性物質が生活環境に至るまでに時間がかかるようにする
- ◆ 廃棄物固化体、容器および処分施設への閉じ込め: 生活環境への漏出を抑制する



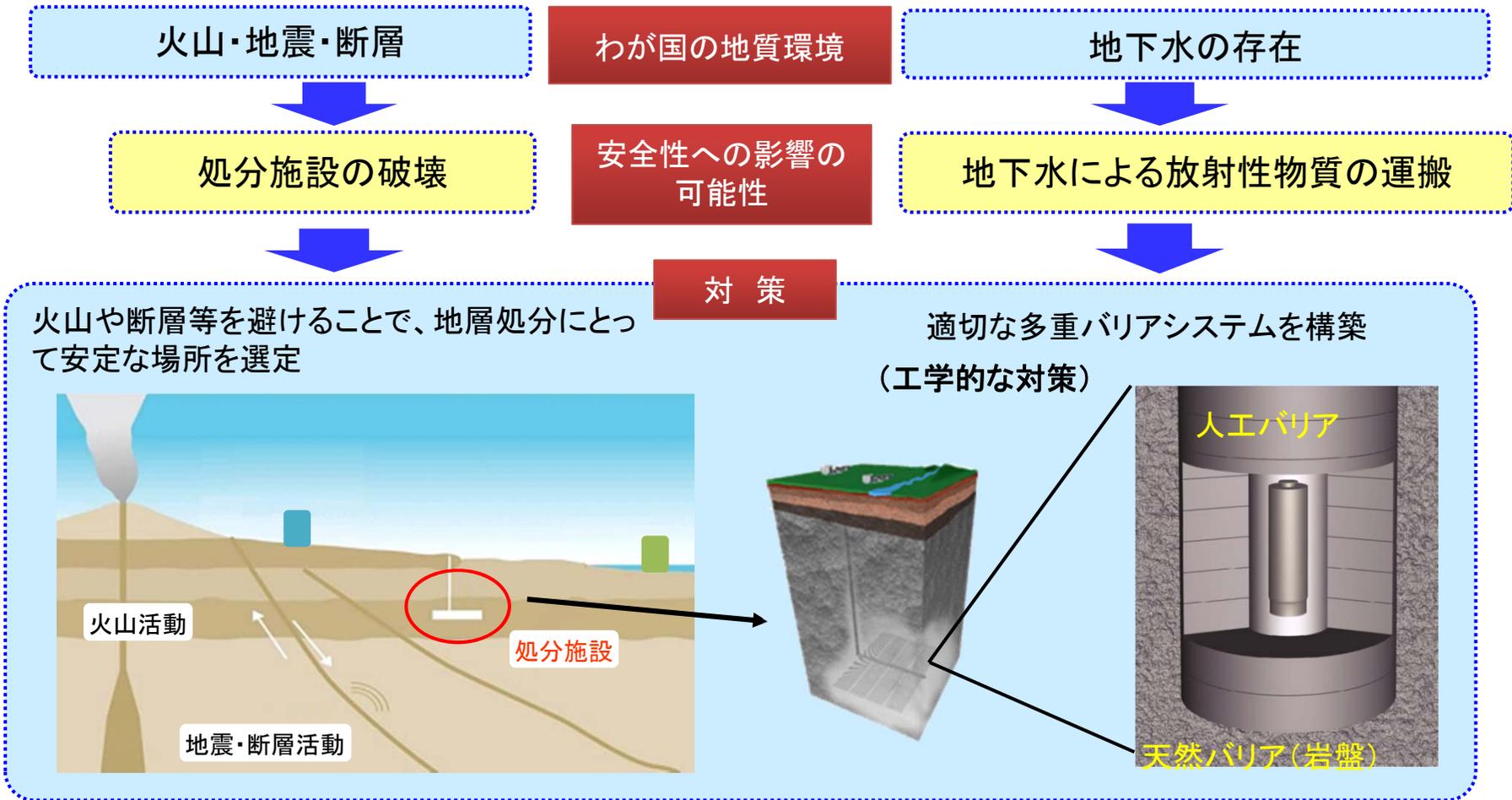
管理型処分
安全なレベルになるまで
管理する

図はIAEA, Classification of Radioactive Waste General Safety Guide, IAEA Safety Standard Series No. GSG-1 (2010)を改変

- ◆ 放射性廃棄物の安全規制の枠組みの世界標準を決める文書では、放射能レベルが高く、長寿命核種が多く含まれている放射性廃棄物は、長期の隔離・閉じ込めが必要であり、地層処分すべきとしている
- ◆ IAEAによる処分(disposal)の定義 = 放射性廃棄物の回収を意図せずに施設または場所に廃棄物を定置すること(「けりをつける、放置してあとは何もしない」という意味は含まれていないことに注意)

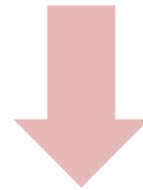
地層処分を選択

- ◆ 日本は火山や地震が多く、地下水が豊富といった特徴がある
- ◆ これらを考慮した適切な処分施設建設地の選定と工学的対策を講じることで対応可能



日本の地層処分の技術的成立性

1. 火山や地震の多い変動帯にある日本で、地層処分システムの設置に適した安定な地質環境を見つけることができるか
2. 人工バリアや処分施設が、技術的にも経済的にも無理なく設計施工できるか
3. 構築された地層処分システム(地質環境、人工バリア)の長期にわたる性能を信頼性をもって評価すること(安全性を判断すること)ができるか



肯定的知見

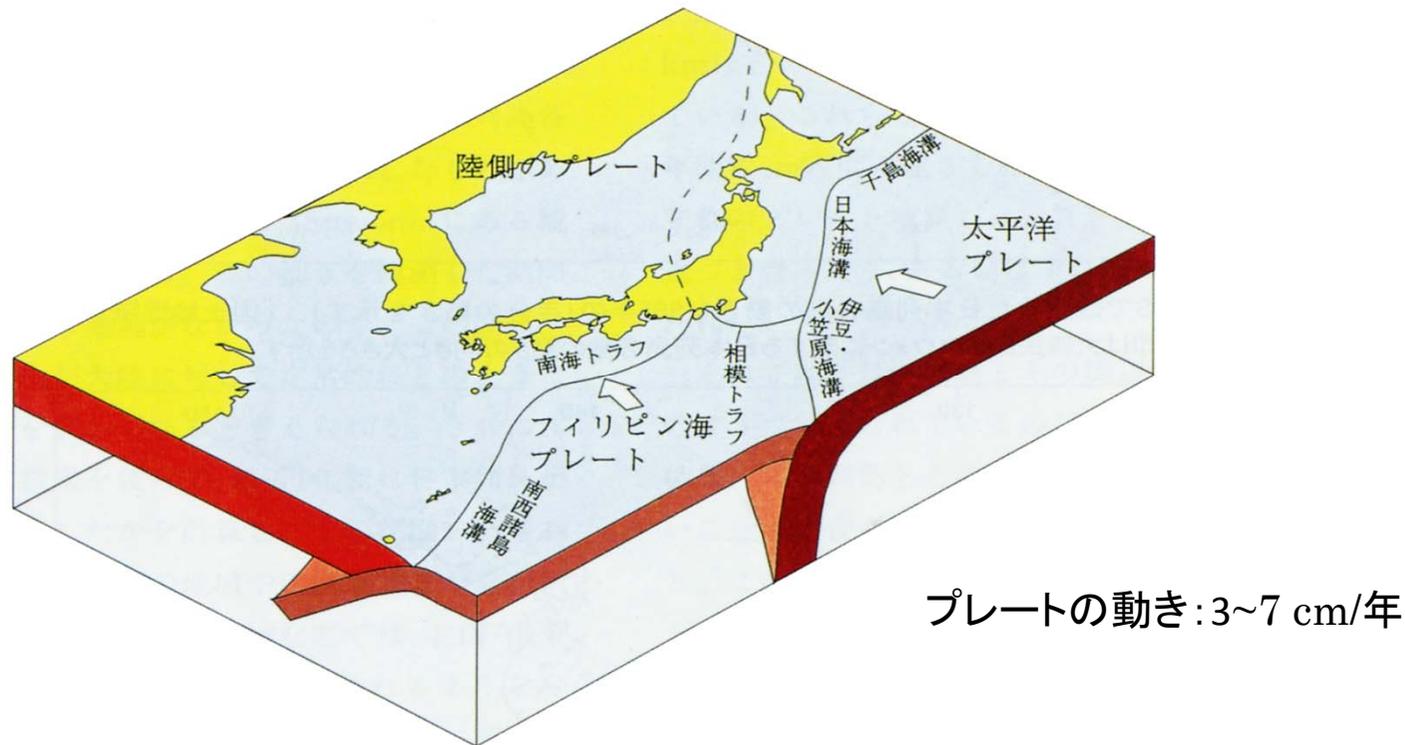
- ◆ 原子力研究開発機構:「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性」—地層処分研究開発第2次取りまとめ— (1999)
- ◆ 原子力発電環境整備機構:「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」—「処分場の概要」の説明資料—(2004)
- ◆ 原子力発電環境整備機構「地層処分事業の安全確保(2010年度版)」～確かな技術による安全な地層処分の実現のために～(2011)
- ◆ 海外、国内の、文献(既存知識)、実験室研究、フィールド(地上、地下)研究による知見

日本の地層処分の技術的成立性

1. 火山や地震の多い変動帯にある日本で、地層処分システムの設置に適した安定な地質環境を見つけることができるか
2. 人工バリアや処分施設が、技術的にも経済的にも無理なく設計施工できるか
3. 構築された地層処分システム(地質環境、人工バリア)の長期にわたる性能を信頼性をもって評価すること(安全性を判断すること)ができるか

日本に火山と地震が多い理由

- ◆ 日本は太平洋プレート、フィリピン海プレートといった海洋プレートが、ユーラシアプレートや北米プレートといった大陸プレートの下に沈み込んでいるため、火山や地震が多い
- ◆ プレートの位置や運動方向・速度は約200～100万年前からほとんど変化がなく、今後も10万年程度はほとんど変化しないと考えられている

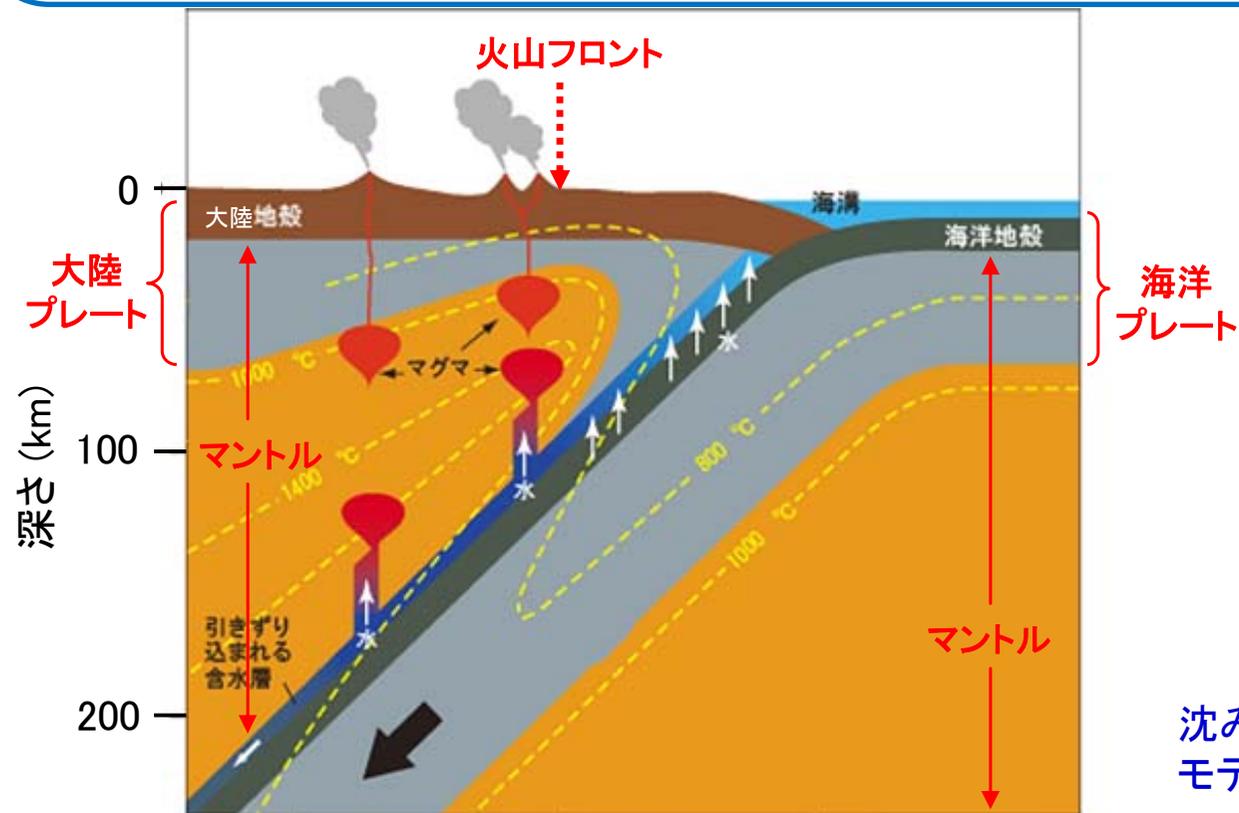


日本列島とその周辺のプレート

(地震調査研究推進本部地震調査委員会編、1997に一部加筆)

代表的な火山の発生モデル

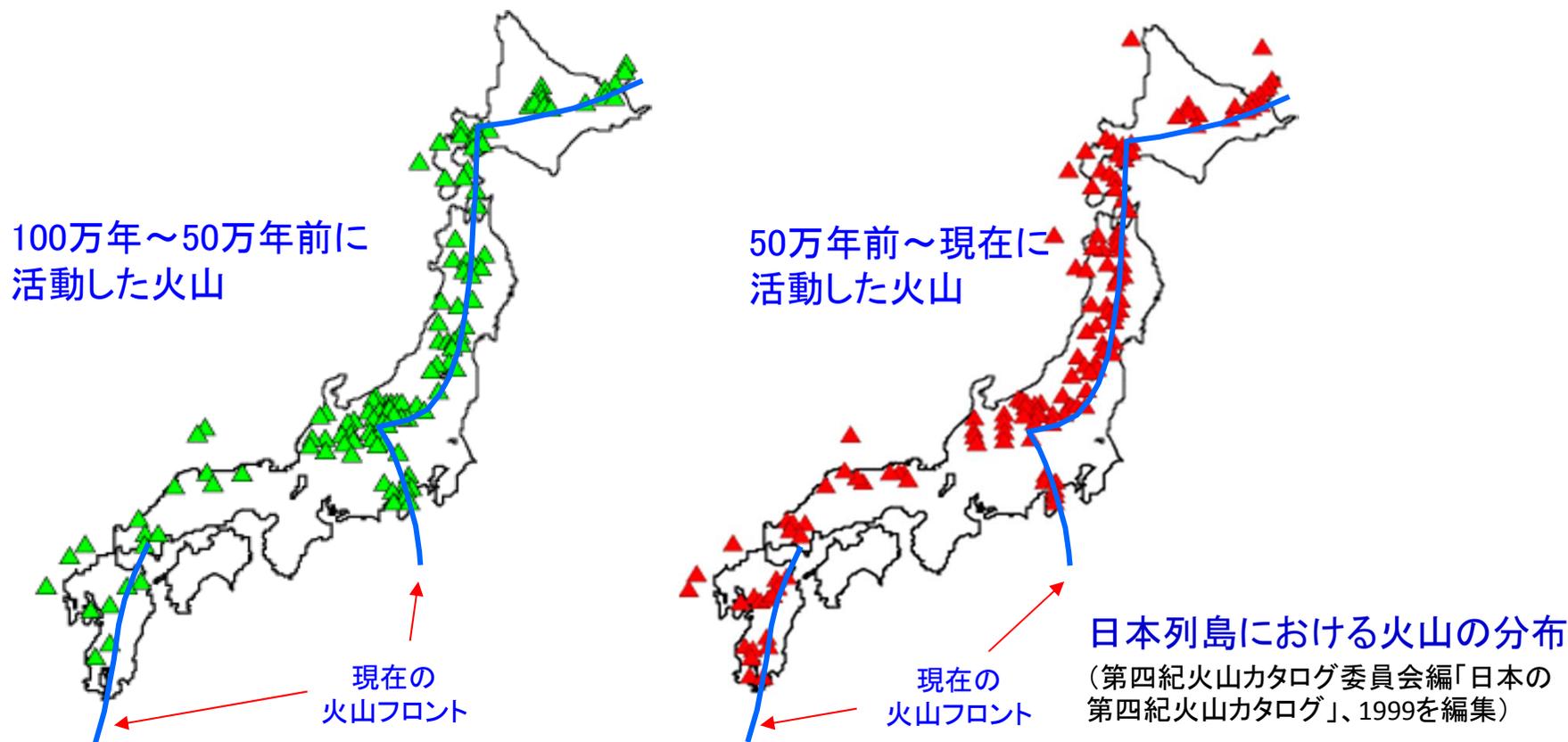
- ◆ 水分を含んだ海洋プレートが日本列島の下にもぐり込むと、温度・圧力が上昇して岩盤から水分が放出される
- ◆ この水分によりマントルの融点が下がり(溶けやすくなり)、マグマが発生。これが上昇し、地表に噴出して火山となる
- ◆ マグマが発生する深さは約100km以深であるため、多くの火山はプレートが沈み込む位置(日本海溝など)からおおよそ一定の距離に分布(火山フロントを形成)



沈み込み帯におけるマグマ発生モデルの例 (巽、1995を編集)

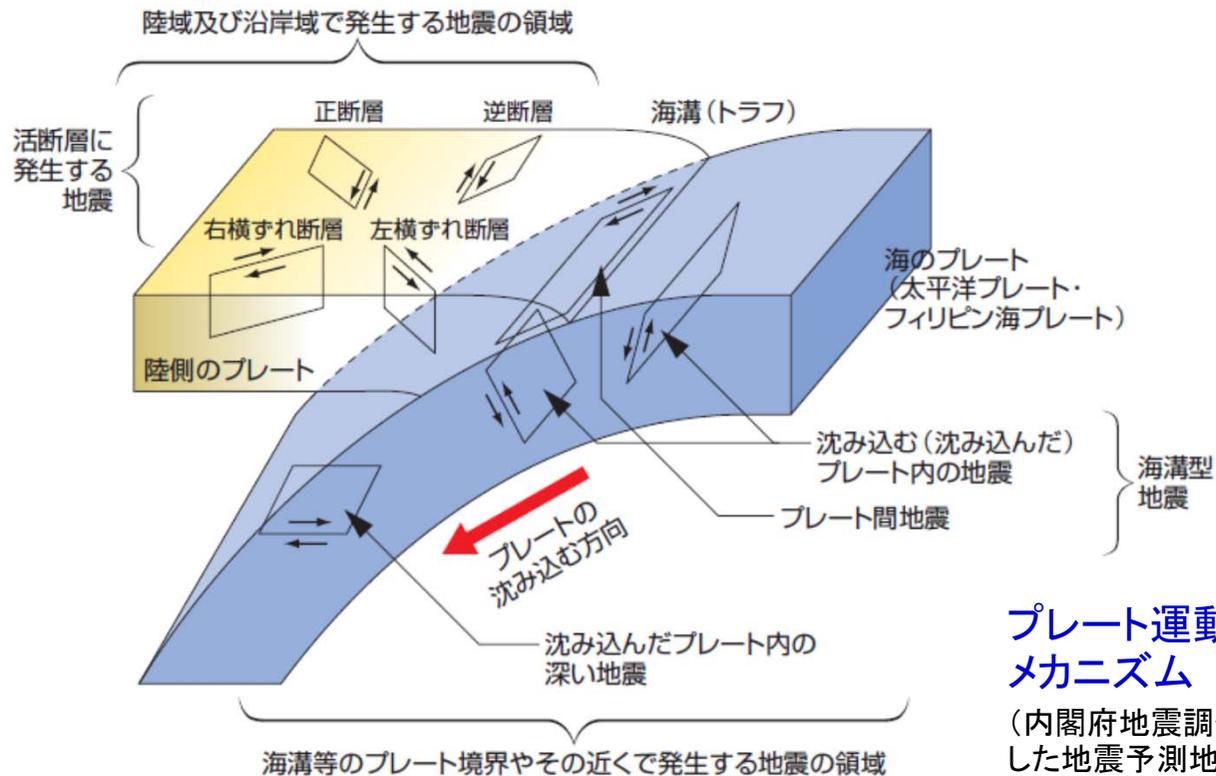
日本周辺の火山分布の特徴

- ◆ プレートの沈み込む位置や運動方向・速度は、過去約200～100万年前からほとんど変化がない
 - ⇒ 火山フロントの位置はほとんど変わっていない
 - 火山が集中する地域と存在しない地域がある
- ◆ 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



地震の発生メカニズム

- ◆ 地殻にたまった力が、岩盤がずれて破壊し解放されることで、地震が発生。このずれが断層となる
- ◆ 一度できた断層は、弱面となってそこで繰り返し活動する傾向にある。過去数十万年以降に繰り返し活動したことが確認され、将来も活動する可能性がある断層を活断層という
- ◆ プレート運動による地殻への力のかかり方が大きく変わらない限り、新しい断層が突然できることはないと考えられている



プレート運動にともなう地震発生のメカニズム

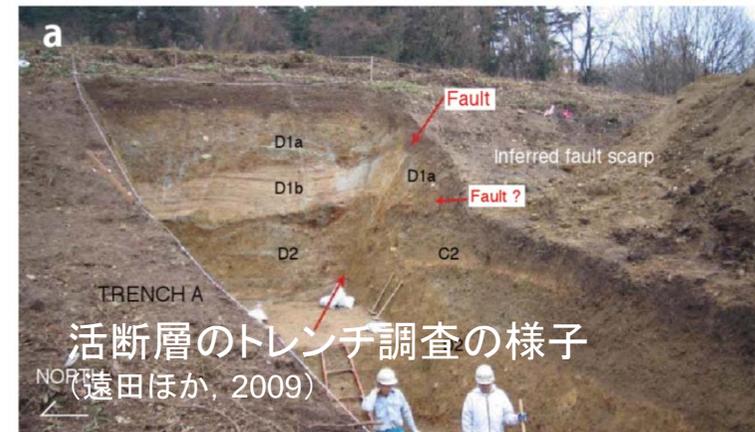
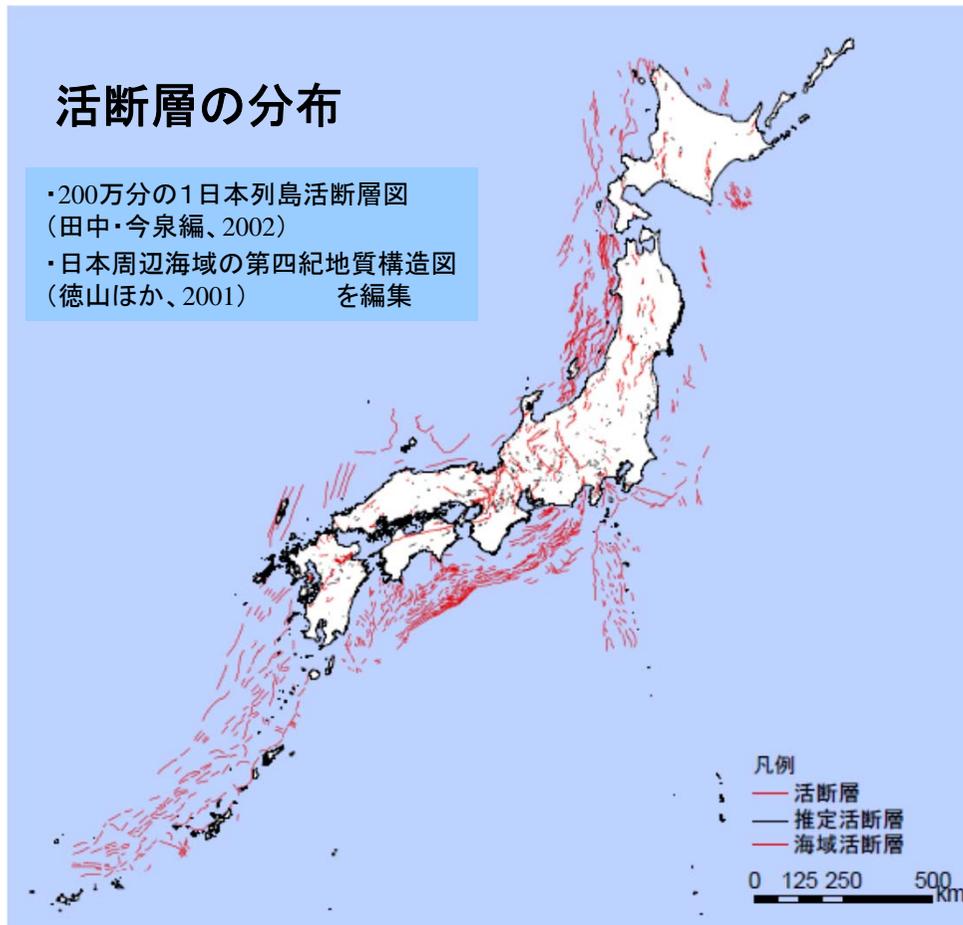
(内閣府地震調査研究推進本部「全国を概観した地震予測地図」)

活断層の回避

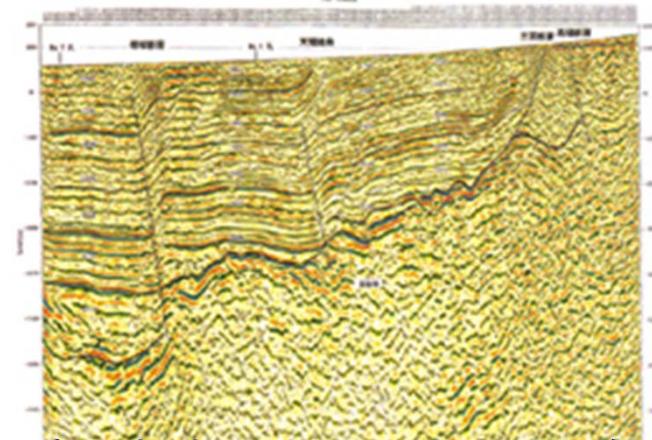
- ◆ この20年間で全国の活断層分布図が急速に整備され、活断層は偏在している(密集している地域とそうでない地域がある)ことが確認されている
- ◆ 候補地が決まれば、ボーリング調査やトレンチ調査、物理探査などを行って活断層の有無を詳細に調査し、影響のある活断層を回避する

活断層の分布

- ・200万分の1日本列島活断層図(田中・今泉編、2002)
- ・日本周辺海域の第四紀地質構造図(徳山ほか、2001)を編集



活断層のトレンチ調査の様子
(遠田ほか、2009)

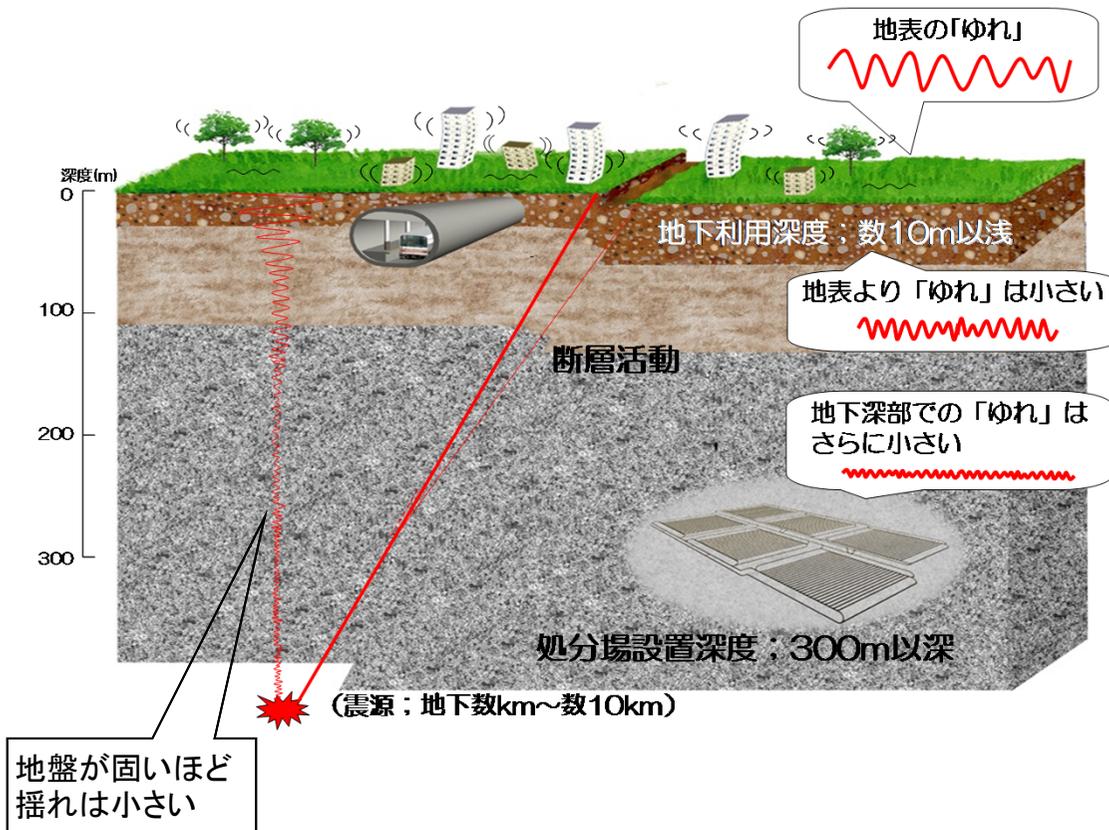


物理探査による地中の断層の確認
(奥村ほか、1997を編集)

地震が及ぼす処分施設への影響

- ◆ 一般に地表部は地盤が軟らかく、地震によるゆれが大きい。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

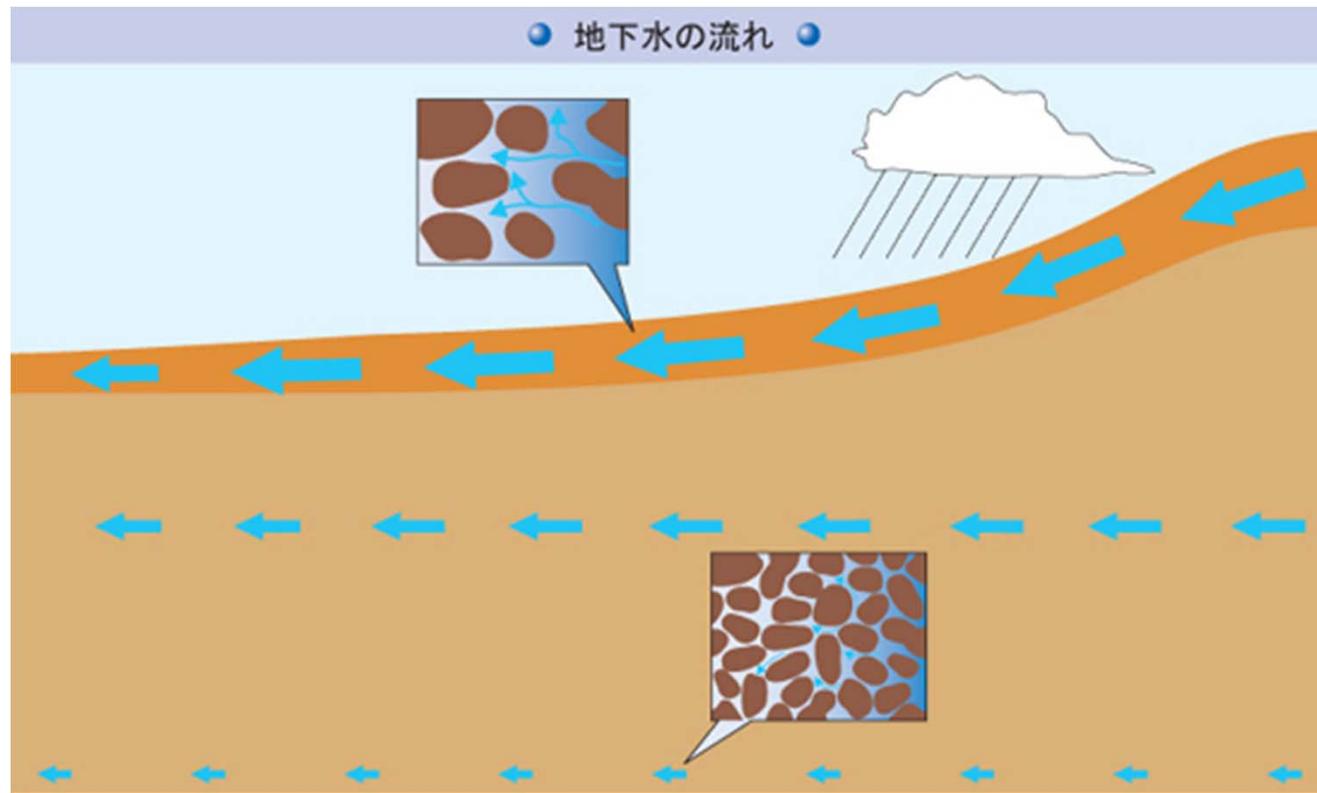
地表の壊滅的な被害に対し、トンネルの空洞が保たれている



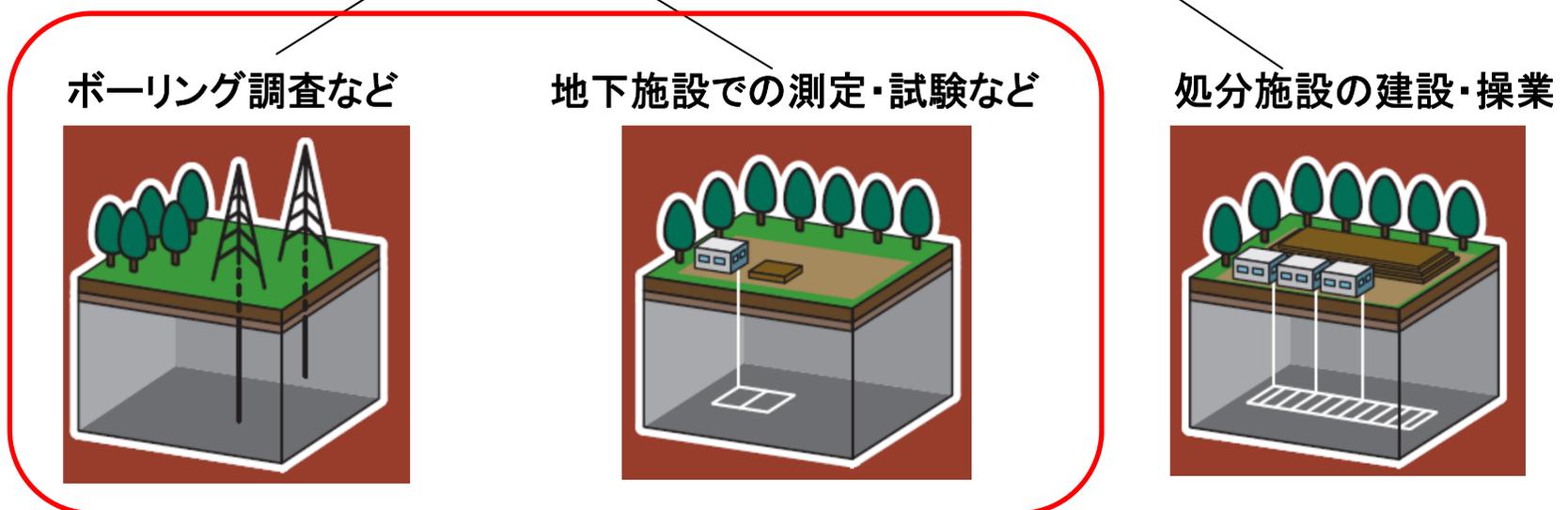
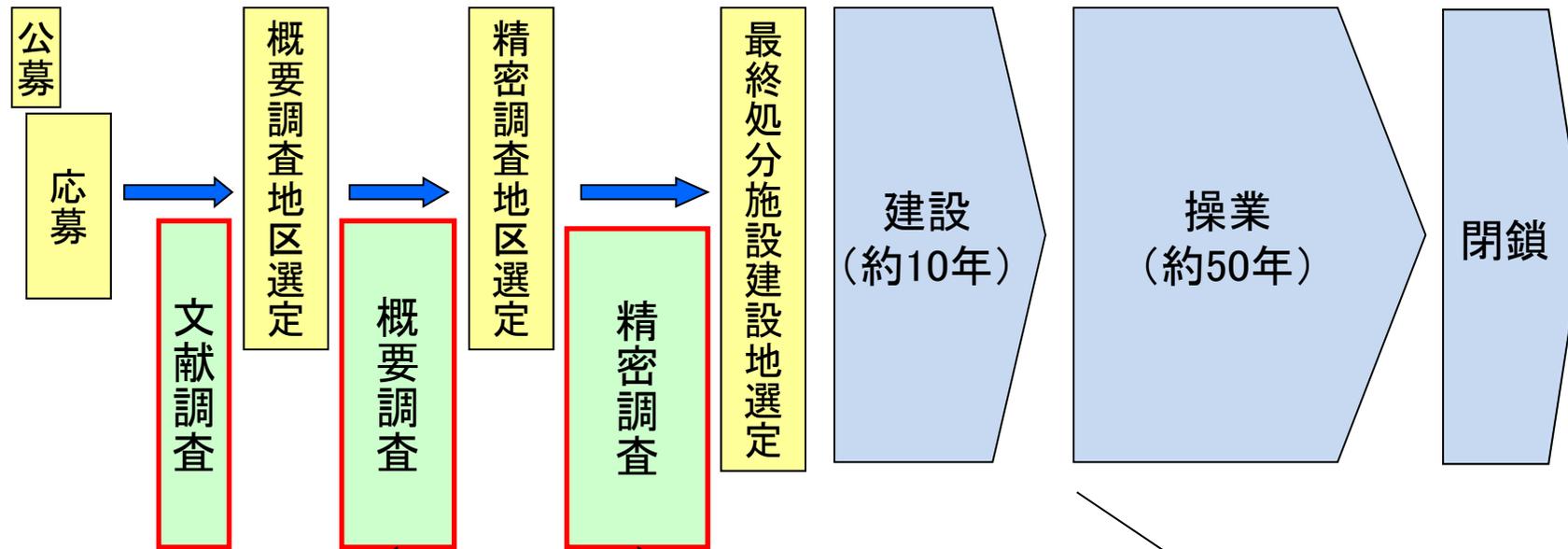
(土木学会(第1次)・地盤工学会合同調査団 調査速報より)

地下水の特徴

- ◆ 一般に、深いほど岩盤が固く、緻密であるため、地下水は流れにくい
 - ◆ 日本は地質変化に富み、地質構造が複雑であるため、地下水の流れ方も変化に富む
- ⇒ 様々な調査・解析を行って、候補地周辺における地下水の流れや成分（化学組成など）を評価する



段階的な候補地の選定により安定な地質環境を選定する

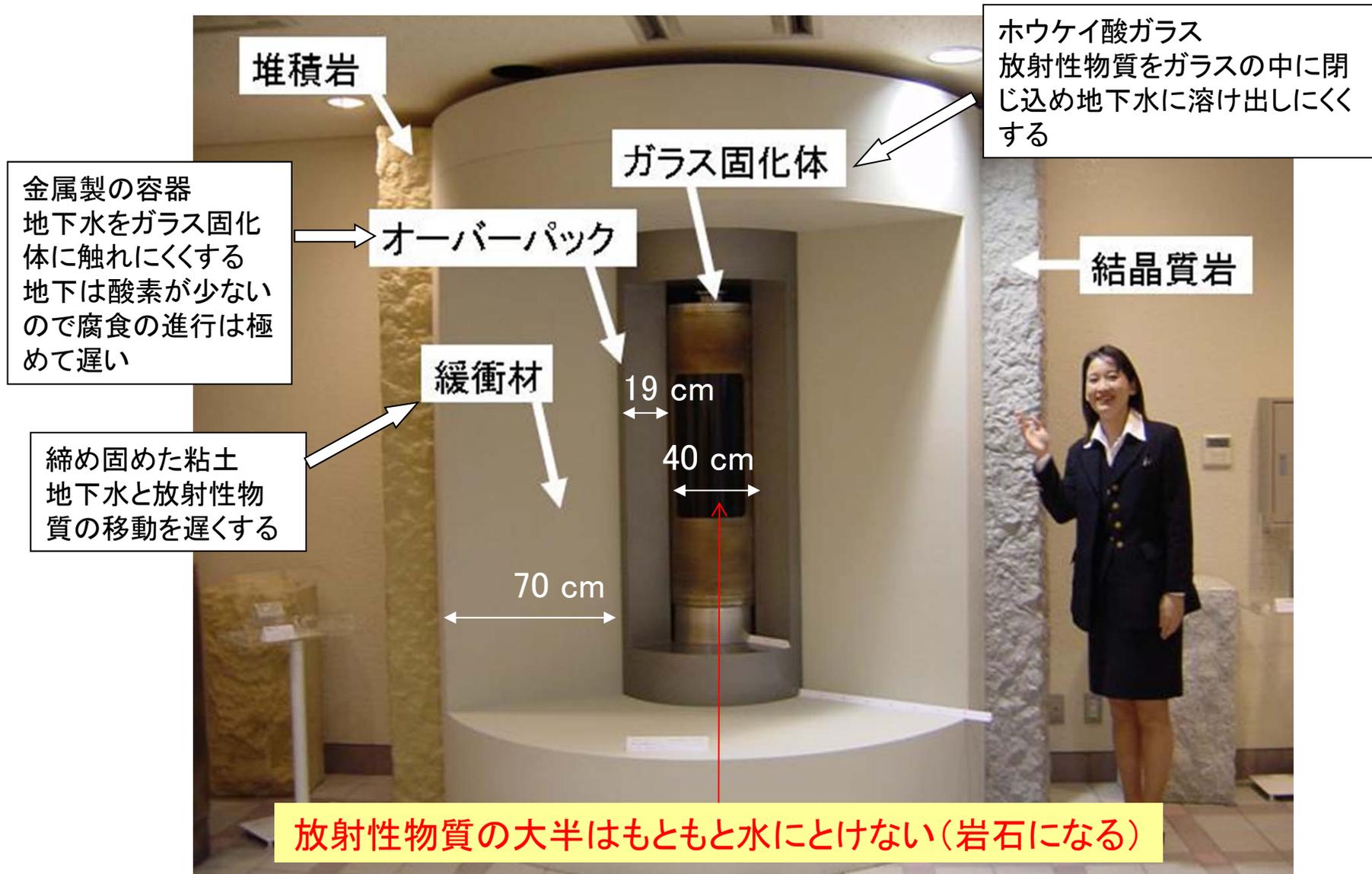


各調査結果の妥当性は規制によりレビューされる(規制は判断指標を準備中)

日本の地層処分の技術的成立性

1. 火山や地震の多い変動帯にある日本で、地層処分システムの設置に適した安定な地質環境を見つけることができるか
2. **人工バリアや処分施設が、技術的にも経済的にも無理なく設計施工できるか**
3. 構築された地層処分システム(地質環境、人工バリア)の長期にわたる性能を信頼性をもって評価すること(安全性を判断すること)ができるか

人工バリア：放射性物質の閉じ込めをより確実に



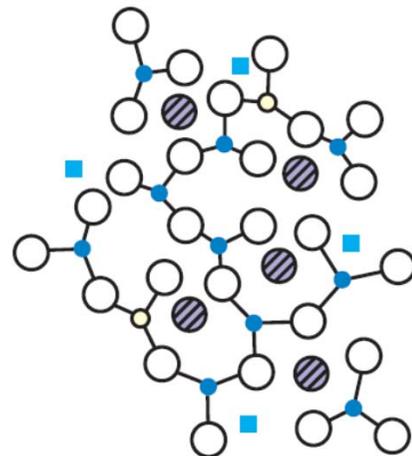
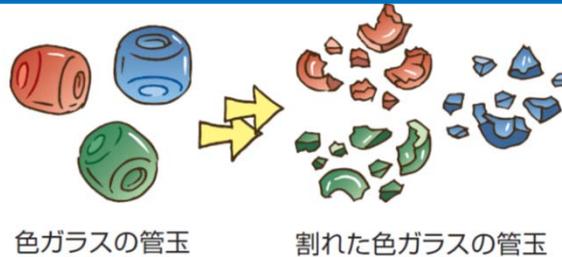
ガラス固化体の特徴(人工バリア)

- ◆ ガラス固化体は、放射性物質を閉じ込める役目を持つ
- ◆ 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漏れ出すことはない
- ◆ ガラスは水に溶けにくい(ガラス固化体が速く溶けるとしても全てが溶けるのに約7万年かかると評価)
- ◆ たいていの放射性物質も極めて水に溶けにくい



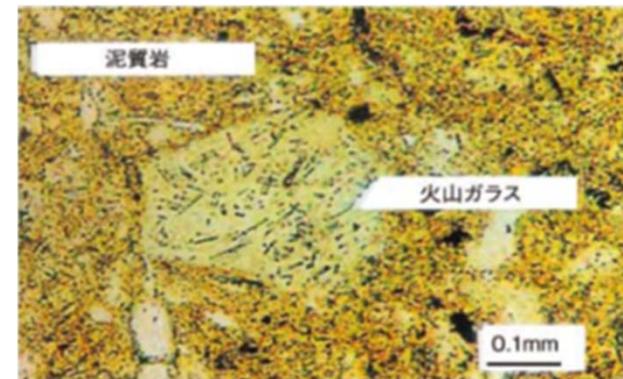
【ガラス固化体の仕様例】

材質: ガラス
寸法: 高さ 134cm
直径 43cm
重量: 500kg
ガラス容積: 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

100万年前の火山ガラス



およそ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だしがほとんどないことが確認されている(千葉県にて産出)

日本原子力研究開発機構パンフレット
「地層のことを考える」

オーバーパックの特徴(人工バリア)

- ◆ オーバーパックは、ガラス固化体と地下水の接触を遮断し、1000年間水との接触を避ける役目を持つ
- ◆ 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(長期腐食実験の結果、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などを考慮して大きめに評価しても32mm程度)

オーバーパック



長期腐食実験などを踏まえて、1000年間の腐食量は保守的に32mmと想定

【オーバーパックの仕様例】

材質: 炭素鋼
寸法: 高さ 173cm
直径 82cm
厚さ 19cm(※)
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、必要な厚さを安全側に19cmと設定した例

鉄は遊離の酸素がない環境ではほとんど腐食しない

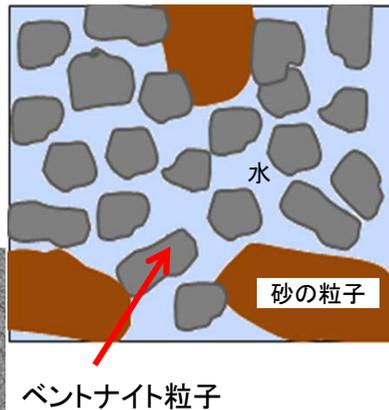
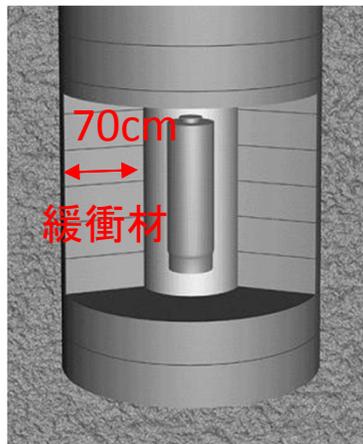


英国インテシュルの古代ローマ軍の要塞跡の鉄釘(約1900年前)

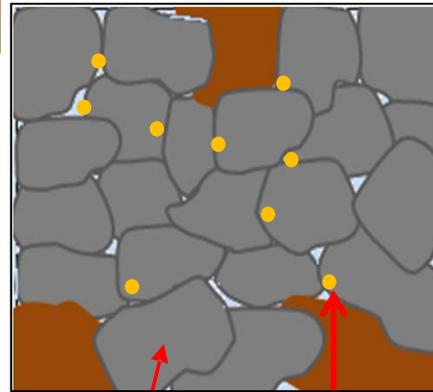
これまで考古学で出土した鉄製品の長期腐食事例からは、1000年間の鉄製品の腐食深さは1~14mm

緩衝材の特徴(人工バリア)

- ◆ 緩衝材は、オーバーパックへの地下水の浸透や、放射性物質の移行を遅らせたり、放射性物質を吸着する役目などを持つ
- ◆ 緩衝材は、天然の粘土(ベントナイト等)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
- ◆ 地下水を非常に通しにくいため、内部の環境が安定的に保持される



ベントナイトの膨潤



- 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



写真提供 (財)大阪府文化財センター

【緩衝材の仕様例】

材質:ベントナイト70%、ケイ砂30%
寸法:高さ 310cm、外径 220cm、内径 80cm
厚さ 70cm

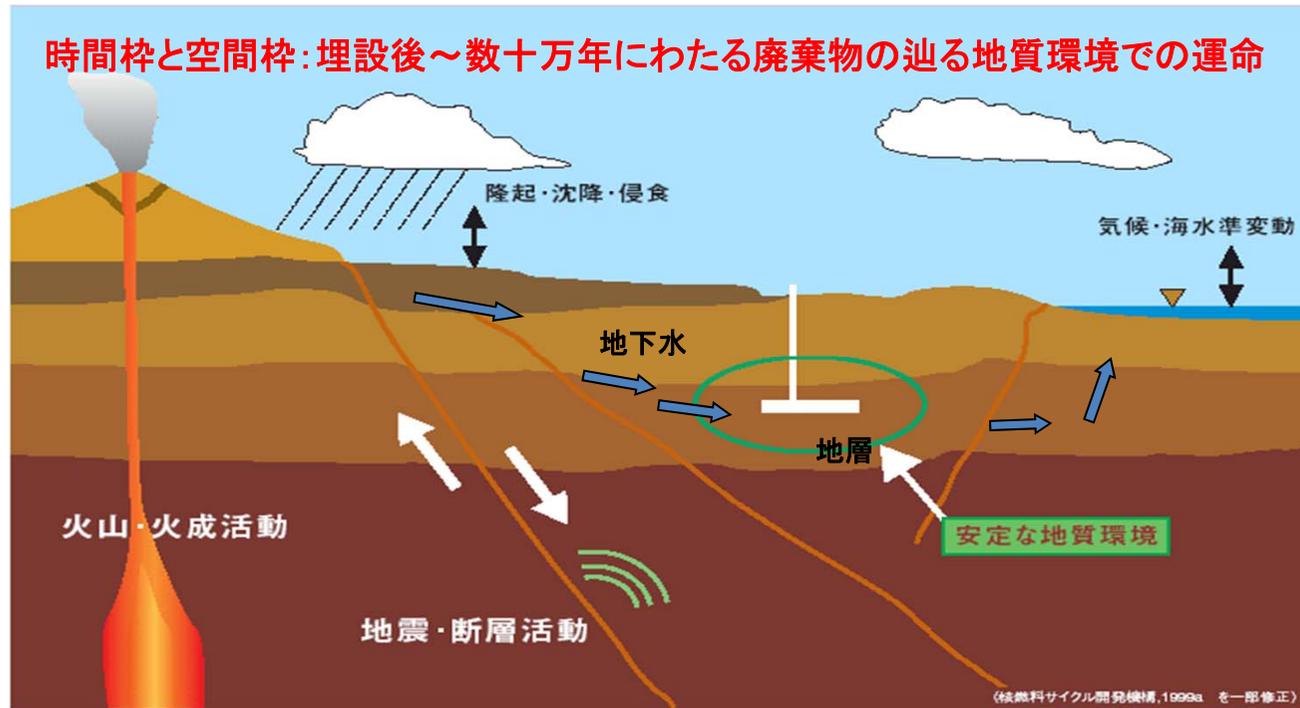
NUMO提供資料を改変

日本の地層処分の技術的成立性

1. 火山や地震の多い変動帯にある日本で、地層処分システムの設置に適した安定な地質環境を見つけることができるか
2. 人工バリアや処分施設が、技術的にも経済的にも無理なく設計施工できるか
3. 構築された地層処分システム(地質環境、人工バリア)の長期にわたる性能を信頼性をもって評価すること(安全性を判断すること)ができるか

放射性廃棄物の処分システムの安全評価の考え方

放射性物質が生活環境に出て行くところに人がいて被ばくすると仮定して、問題になるほど放射性物質が生活環境にもたらされない(隔離・閉じ込めされている)ことを確認する



ガラス固化
体中の放射
性物質

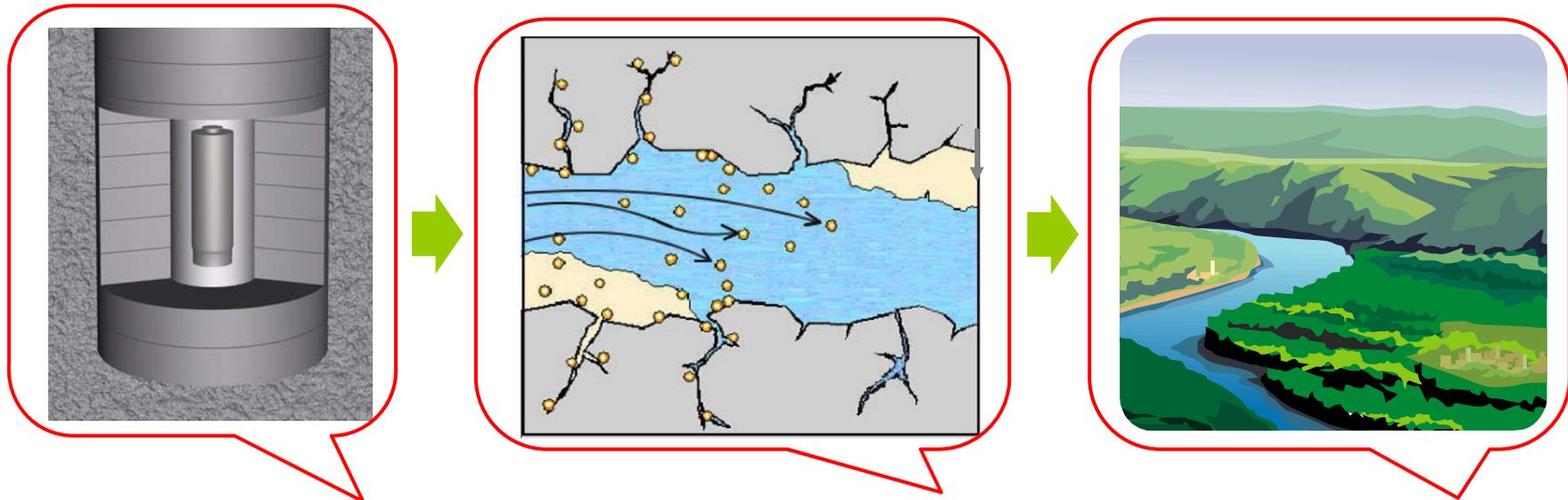


- 放射性物質が溶け出して環境を汚染
- 人間との距離が接近

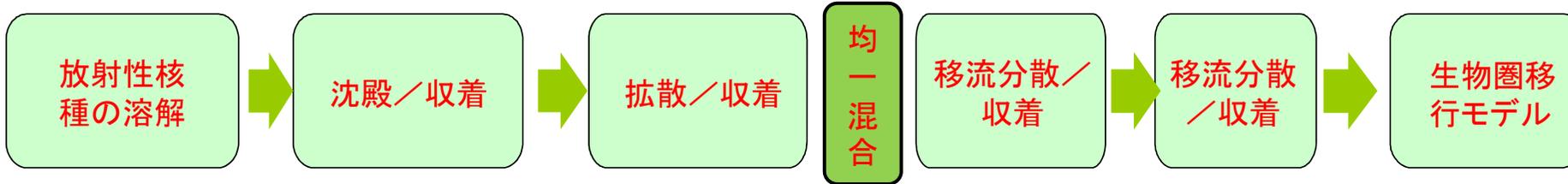
体内に取り込み被ばく
接近して被ばく

↑
様々な外的条件(地質環境、人工バリアの状態と変遷)のもとで起こること

高レベル廃棄物の地層処分システムの安全評価モデル

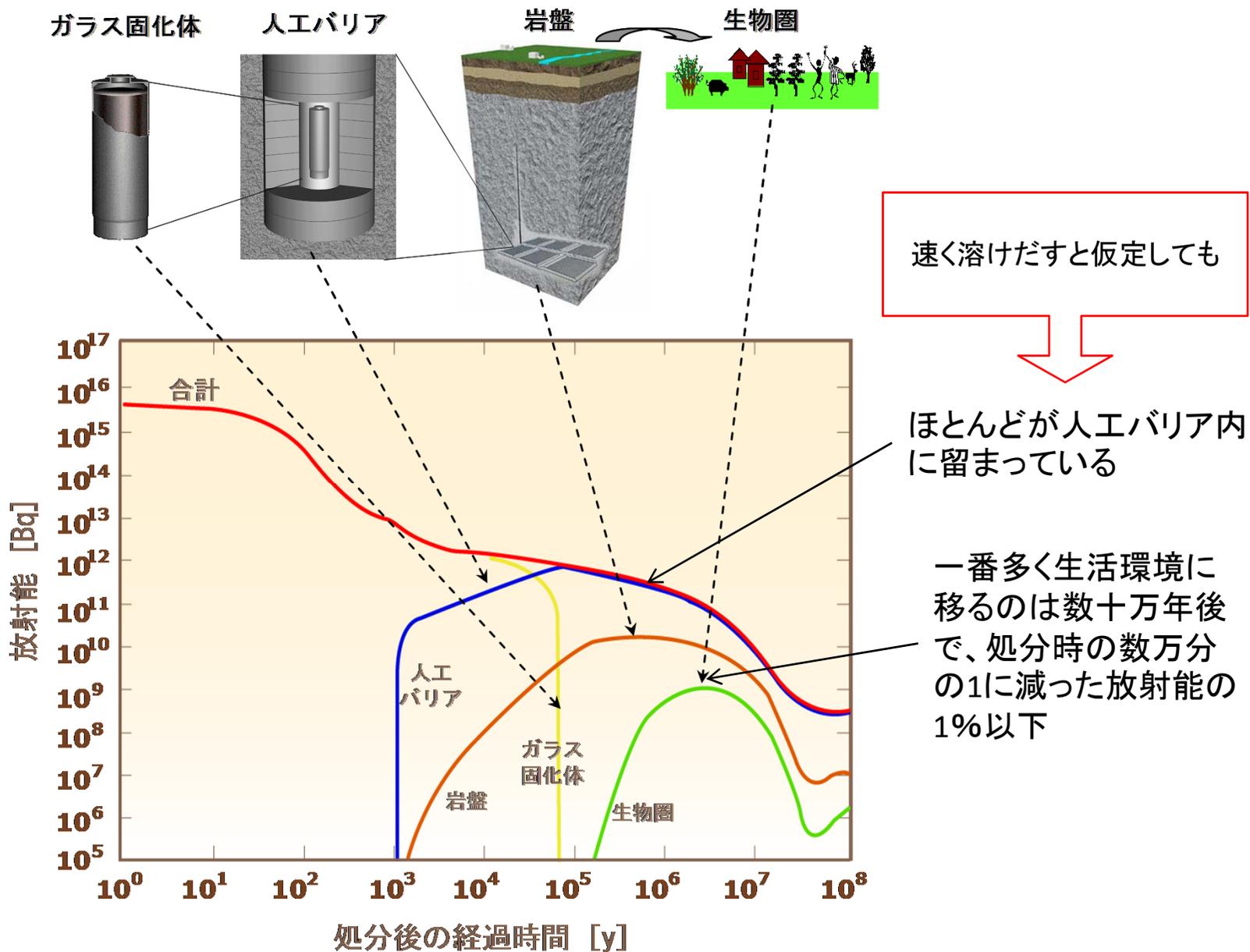


← 人工バリア → ← 天然バリア → ← 生物圏 →



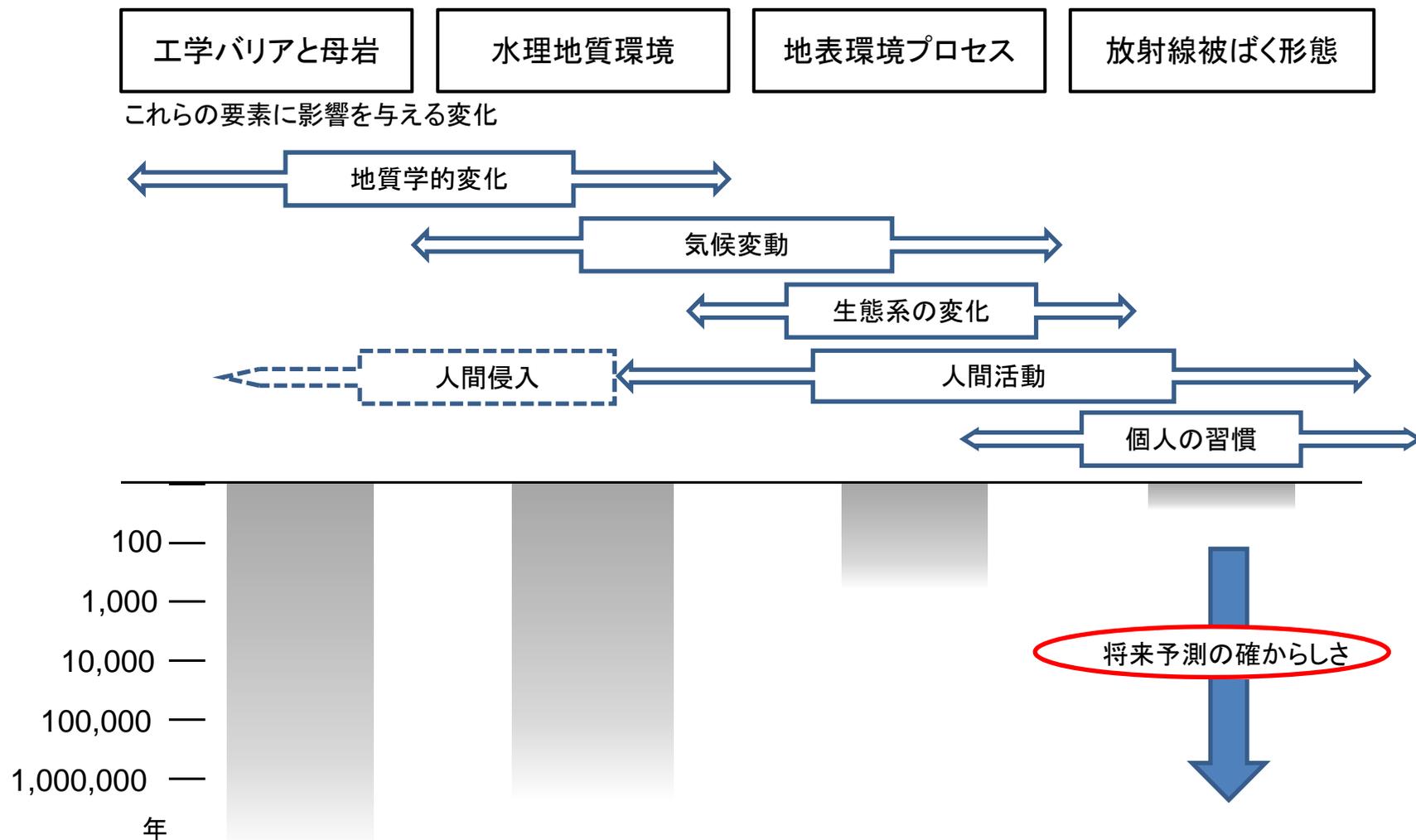
インベントリ評価	溶出率 溶解度	透水係数 拡散係数 収着分配係数	均一混合	透水係数 実流速、分散係数 拡散係数 収着分配係数	希釈水量 移行係数 換算係数
----------	------------	------------------------	------	------------------------------------	----------------------

地層処分多重バリアシステムの閉じ込め機能



NUMO「高レベル放射性廃棄物地層処分の技術と安全性」
 -「処分場の概要」の説明資料-(2004)より改変

不確実性の評価(それぞれの要素と総合したシステムについて)



- 放射能インベントリ(核種の崩壊): ほぼ永遠に正しく予測でき、時間とともに減少する
- 処分システムから生活圏に移行する放射エネルギー: 不確実ながら予測でき、時間とともに不確実さが増大する
- 生物圏における人の生活様式: 数十～数百年以降はまったく予測できない

OECD/NEA, Considering Timescales in the Post-closure Safety of Geological Disposal of Radioactive Waste (2009)を改変

日本の地層処分の技術的成立性

1. 火山や地震の多い変動帯にある日本で、地層処分システムの設置に適した安定な地質環境を見つけることができるか
2. 人工バリアや処分施設が、技術的にも経済的にも無理なく設計施工できるか
3. 構築された地層処分システム(地質環境、人工バリア)の長期にわたる性能を信頼性をもって評価すること(安全性を判断すること)ができるか



- ◆ 技術的に成立するという十分な根拠がある
- ◆ 技術側から主張されている隔離・閉じ込め機能があれば、地層処分は科学技術的、倫理的に考えて最も適切な処分方法である
- ◆ 安全性の主張は、広範な分野の科学技術的知識の集約としてなされているため、専門家、非専門家のそれぞれが有する異なる程度の知識不足に起因する不確実性が残る
- ◆ 地層処分を社会に受け入れてもらうためには、公衆からみた専門家の自信過剰と専門家からみた公衆の不信過剰の溝を埋めるためのコミュニケーションが必要である

使用済燃料の直接処分について

ーガラス固化体と比較した直接処分に関する課題ー

工学技術上の課題	安全評価上の課題
<ul style="list-style-type: none">① 寸法(約3倍)、重量(約7倍)が大きくなることに対する処分坑道、処分孔、人工バリア仕様等の検討2 発熱量(約1.6倍)が大きくなることに対する処分場設計への影響評価3 放射線量が大きくなることに対する遮へい対策④ 放射線分解による酸化還元フロントに対する対策(キャニスター設計の際、必要に応じた見直し)⑤ 臨界を避けるための検討(燃料受入基準、中性子吸収剤の利用等)6 非収着性核種(C-14)に対する被ばく低減化対策7 地上施設の詳細検討⑧ 操業中及び閉鎖後管理段階の保障措置やテロ対策9 使用済燃料は有用資源のため、回収可能性を考慮した人工バリアシステム等の検討	<ul style="list-style-type: none">① 直接処分で評価上考慮するシナリオの選定② 臨界回避・評価(UやPuの集積を仮定した場合等の臨界回避・評価)③ 燃料や構造材からの核種の瞬時放出挙動の把握と影響評価④ UO_2マトリクス溶解挙動とそれに伴う核種溶出挙動およびそれらの影響⑤ 放射線分解や酸化還元フロント進展の挙動と影響⑥ 廃棄体が大きくなることによる掘削影響領域の拡大等の挙動と影響⑦ 非収着性核種(I、C等)の移行挙動や移行特性

数字入り○印は、特に重要と思われる課題。表中の課題の多くは、ガラス固化体及びTRU廃棄物の地層処分の技術をベースとして活用可能。

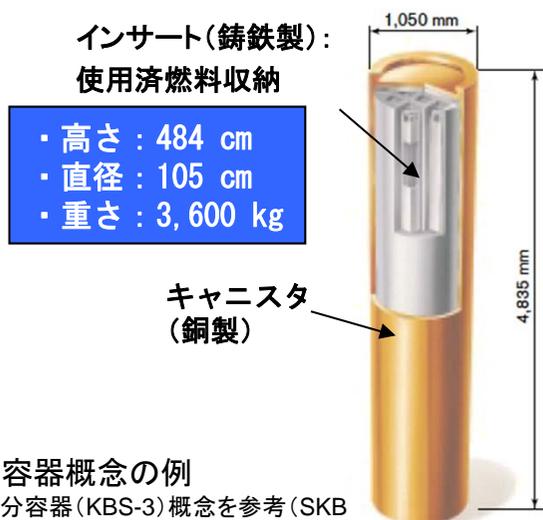
使用済燃料の直接処分について

○基本的な技術はガラス固化体の地層処分技術を流用でき、我が国でも使用済燃料の直接処分を実施することは技術的に可能。

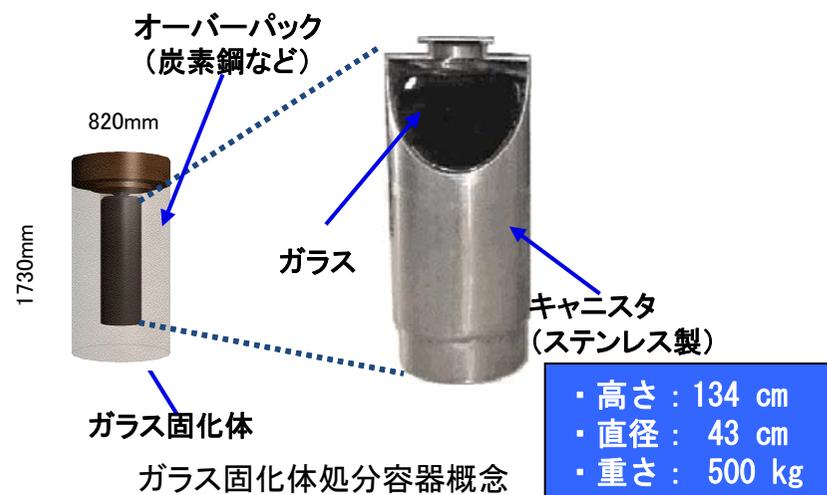
ただし、課題として、ガラス固化体の処分技術と差のある部分について、

ー直接処分の信頼性向上に向けて、工学技術や安全評価上の課題に対して我が国の地質環境を踏まえ、研究開発**16**課題(工学技術9課題、安全評価7課題;うち重要課題は11課題)及び詳細な安全評価を着実に実施する必要がある。

ー先行している海外機関(すでにサイトの選定がされているスウェーデン(SKB)やフィンランド(POSIVA)など)と国際協力を強化することが有効。



使用済燃料の処分容器概念の例
SKB(スウェーデン)の処分容器(KBS-3)概念を参考(SKB
Technical Report TR-02-07より抜粋及び一部加筆)



分離変換技術について

・分離変換により、地層処分すべき廃棄物量は少なくなるが、地層処分が不要になることはない。

(2009年4月 原子力委員会 研究開発専門部会 分離変換技術検討会 報告書及び資料より)

【分離変換技術】

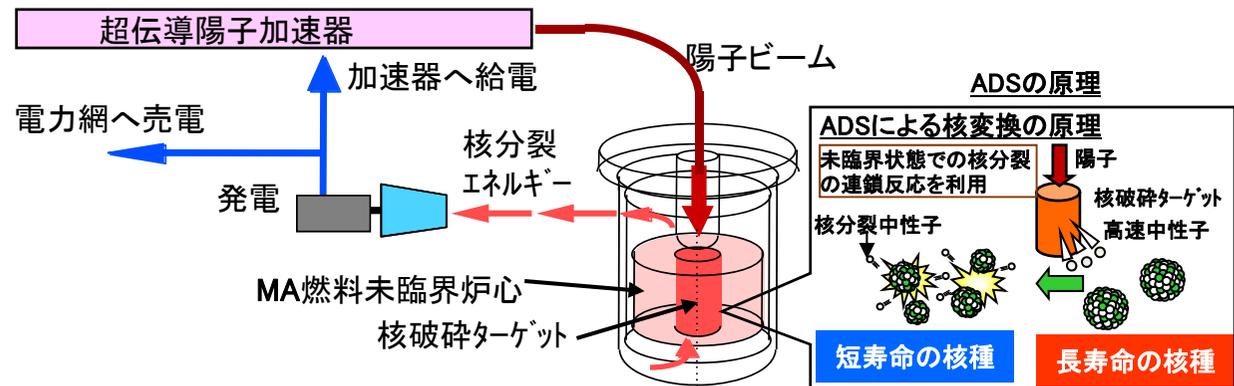
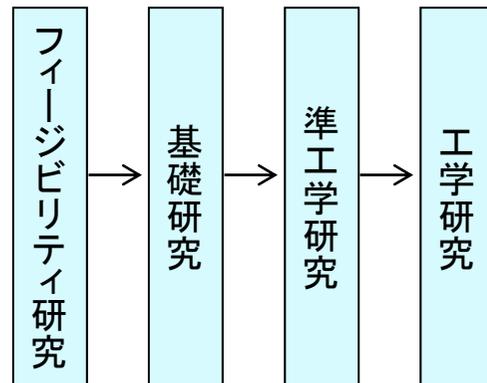
高レベル放射性廃棄物(HLW)に含まれる元素や放射性核種を、その半減期や利用目的に応じて分離するとともに、長寿命核種を短寿命核種あるいは安定な核種に変換する技術

【分離変換の意義】

- ① 潜在的有害度の低減(HLWの長期的な潜在的有害度⇒小)
- ② 地層処分場に対する要求の軽減(処分面積⇒小、貯蔵期間⇒短縮)
- ③ 廃棄物処分体系の設計における自由度の増大(「廃棄物処分体系」設計自由度⇒増)

【研究開発の現状】

核変換や先進湿式再処理等の各技術は、その技術の達成度に応じ以下の4つの段階に分けられる。



核変換技術の概念例

(加速器駆動未臨界炉(ADS)の例: 全体として基礎研究段階)