

地層処分の概念的発展と実現への取り組み

平成29年7月25日

科研バックエンド問題研究会

「高レベル放射性廃棄物(HLW)処理・処分施設の社会的受容性に関する研究」
第9回研究会

早稲田大学(早稲田キャンパス)19号館7階713会議室

原子力発電環境整備機構(NUMO)

梅木 博之

humeki@numo.or.jp

内 容

1. 放射性廃棄物管理
2. 地層処分に関する技術的議論
3. 地層処分の社会的側面に関する議論
4. 日本の地層処分事業の現状と展望
5. まとめと今後に向けて

1. 放射性廃棄物管理

放射性廃棄物の発生と管理

放射性廃棄物の定義

- For legal and regulatory purposes, waste that contains, or is contaminated with, radionuclides at concentrations or activities greater than clearance levels as established by the regulatory body (IAEA, 2000)

IAEA (2000): Predisposal Management of Radioactive Waste, Including Decommissioning, Safety Standards Series No. WS-R-2

発生源

- 原子力発電所や核燃料サイクル施設
- 放射性物質を使用する医療機関, 研究所, 一般産業施設
- 運転／廃止措置

管理 (management)

- 輸送 (transportation) を伴う, 発生から, 処理 (processing), 貯蔵 (storage), 処分 (disposal) までを包括的に扱う持続可能性 (sustainability) のある対策
- 持続可能性: 環境, 社会, 経済への適合性を有していること

貯蔵と処分

□貯蔵

- 放射性廃棄物を回収 (retrieval) を念頭に置き、ある施設や場所に保管すること

□処分

- 放射性廃棄物を回収する意図をもたず、ある施設や場所に定置すること
- このことは回収ができないことを意味するものではない

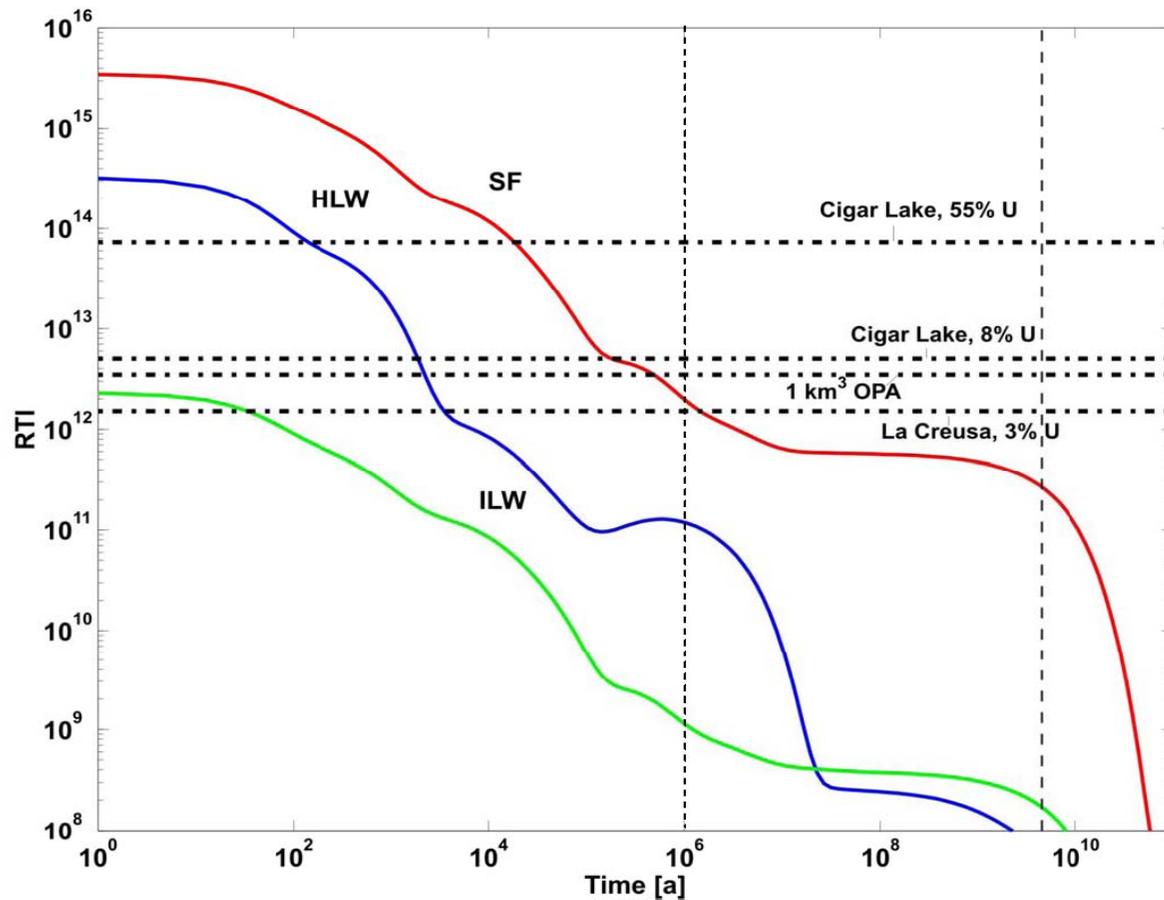
□「貯蔵」も「処分」も放射性廃棄物を人間の生活圏に悪影響を及ぼさないように閉じ込め、隔離するように設計

□重要な違いは、

- 「貯蔵」とは将来の行為が計画されている暫定的なものであるということ
- こうした行為には、廃棄物のパッケージングや、最終的には「処分」が含まれる

放射性廃棄物の潜在的危険性

- 放射性廃棄物の潜在的危険性は含有する放射性物質の放射能や生物学的影響, その物理的・化学的特性によって様々
- 高レベル放射性廃棄物 — 数万年以上に及ぶ潜在的危険性



(NEA, 2009: Nagra Project Opalinus Clayに基づく例)

高レベル放射性廃棄物の処理・貯蔵

日本原燃(株)高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター



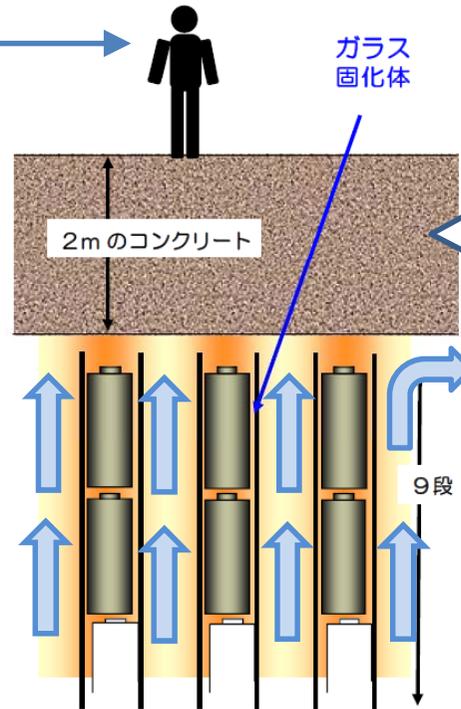
日本原燃(株) 高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター (青森県六ヶ所村)
写真提供: 日本原燃(株)



【製造直後のガラス固化体の特性】

放射線量: 約1,500 Sv/h
 発熱量: 約2,300W
 特性: **自然通風で冷却できる**
核暴走も臨界も起きない

自然通風で冷却



放射線は**約2mの厚さのコンクリート**で安全に遮へい

⇒ その上に人間がいても問題ない

※自然通風による冷却流路を簡略化して示しています。

高レベル放射性廃棄物の処分方法

□ 半世紀にわたる国際的議論

- 技術的に成立するか？
- 社会的に受容可能なものか？

□ 実現に向けた動き

- 地層処分が最も有望な方法であるとの国際的共通認識
- 国際的・地域的枠組みの整備
 - IAEA（放射性廃棄物等安全条約, 処分に関する安全基準文書など）
 - OECD/NEA（加盟国の意見集約）
 - EU（EU指令）, など
- 建設許可申請（スウェーデン（2011）; フィンランド（2012））
- 建設許可発給（フィンランド（2015））

2. 地層処分に関する技術的議論

地層処分の基本概念の形成

□地層処分の着想

- 地層処分概念の提案（NAS, 1957）
- 処分場所として地下深部の岩盤（当初、岩塩層を想定）
 - 潜在的危険性を考慮すべき時間スケールをはるかに超える期間にわたって安定に存在
 - 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

□システムとしての概念確立（1970年代中頃以降）

- 一定の機能を満たす岩盤であれば種類を問わず対象
- 多重バリアシステム＝天然バリア＋人工バリア
- 受動的な安全系（passive safety system:人間の監視が失われても安全性を維持するシステム）

制度的管理の不確実性

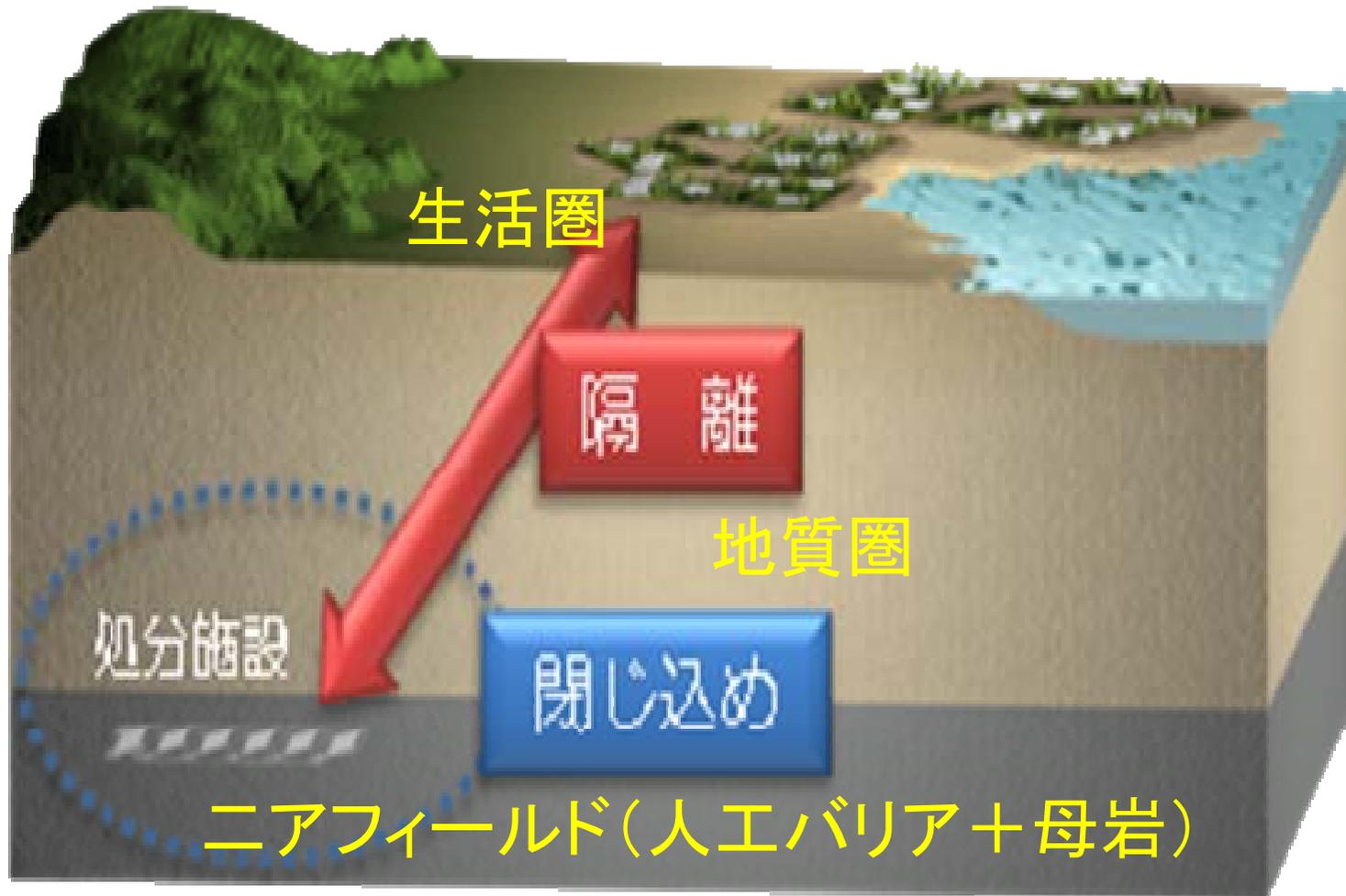
社会構造が遠い将来まで変わらない，あるいは，技術は進展し続けるという想定を置かず制度的管理に依存しない対策（受動的な安全確保）を目指すべき（OECD/NEA, 1982）



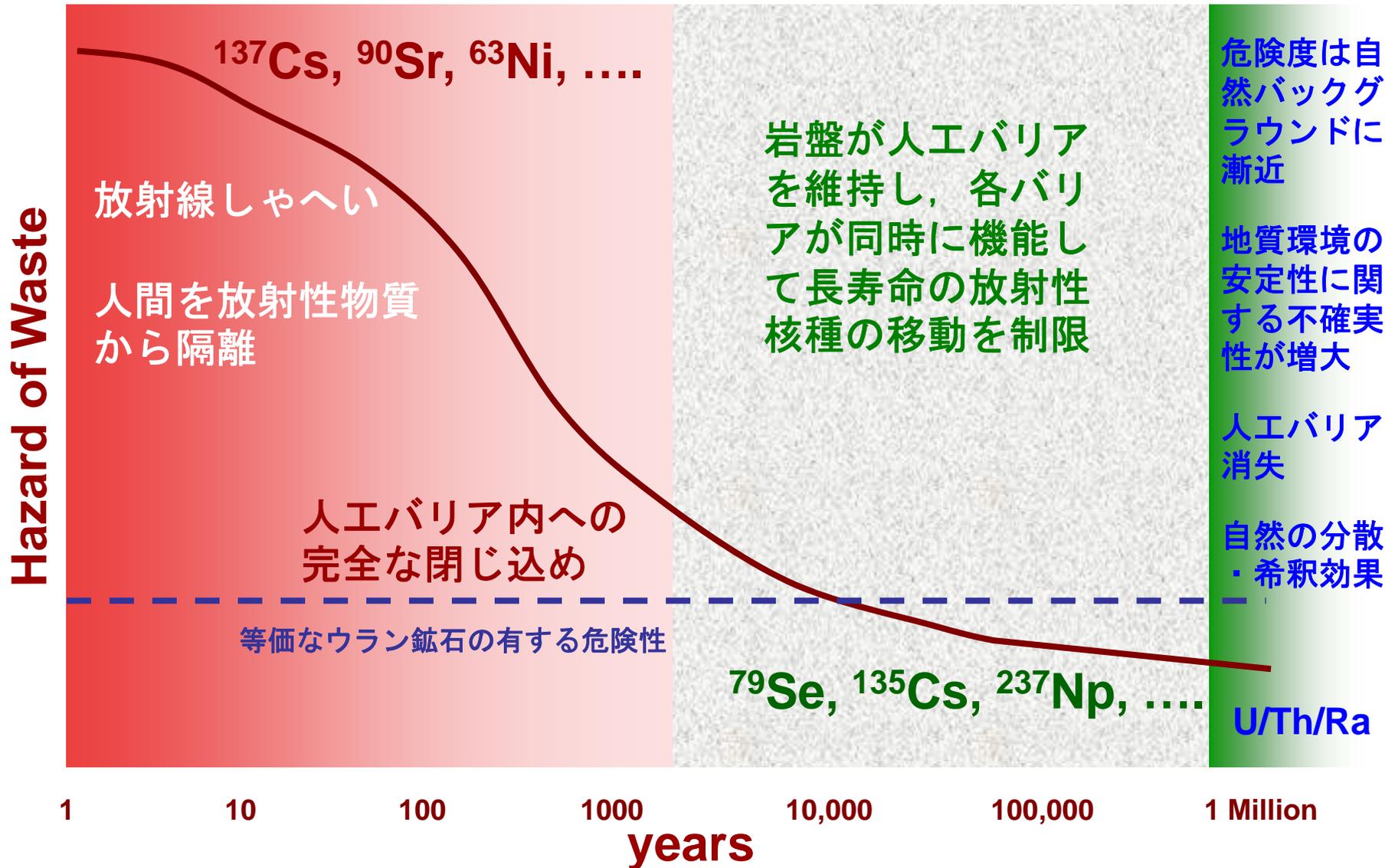
Figure 5.11: European political boundaries 500 years ago (N. Chapman, private communication – redrawn after information in “The Times History of Europe” 2001 (OECD/NEA, 2009))



地層処分システムを構成する場



多重バリアシステムによる隔離と閉じ込め

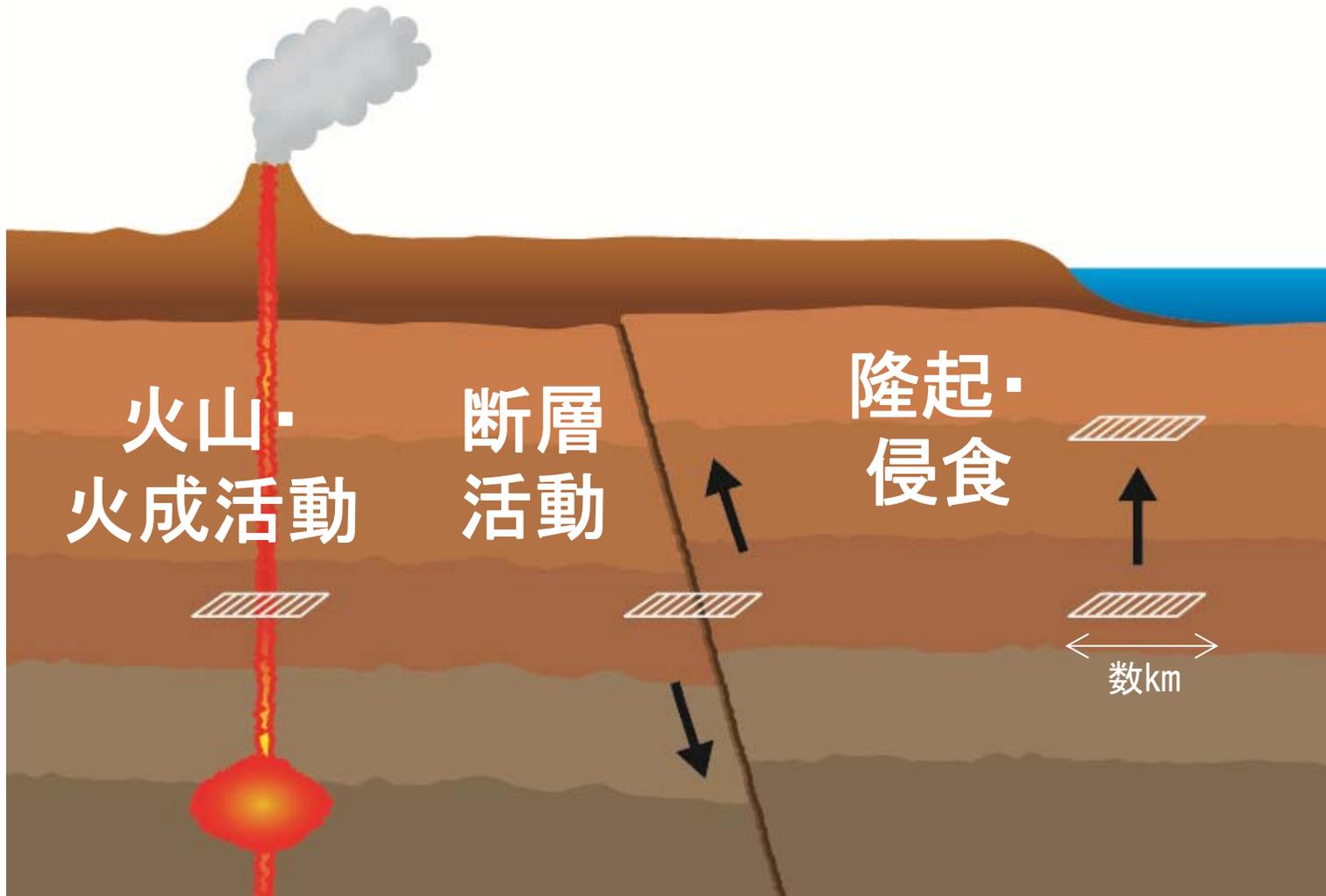


地層処分のリスク

- 高レベル放射性廃棄物の潜在的危険性に対し、地層処分という対策をとった場合のリスク
 - 処分の事業期間(サイト選定から処分場の建設・操業・閉鎖までの約100年間)に生ずる可能性のあるリスク(放射線影響, 労働災害, 環境影響など)
 - 処分場閉鎖後に生ずる可能性のあるリスク(人間や環境に対する放射線影響)
- 地層処分の安全性
 - $\text{=(想定されるリスク)} < \text{(許容可能なレベル)}$
 - 許容可能なレベルは安全規制により提示

処分地の選定

処分場の安全機能に著しい影響を及ぼす自然現象の回避



処分地の選定

様々な調査で地層処分に好ましい性質であることを確認

力学的性質: 岩盤の強度が十分あること(十分でない場合, 地下施設の建設への支障や岩盤変位による人工バリアの長期的な変形などが生ずる可能性がある)

水理的性質: 地下水の流速が遅いこと(地下水流速が速い場合, 放射性物質の移動速度が速くなったり, 緩衝材の流出など人工バリア性能の劣化を招く可能性がある)

熱的性質: 処分深度での岩盤温度が高くないこと(高いと緩衝材の変質など人工バリア性能の劣化を招く可能性がある)

地下水の化学的性質: 還元性であることや極端な酸性や高アルカリ性でないことなど(このような条件でない場合, ガラスや放射性物質の溶解性が増し人工バリアの閉じ込め性能を低下させる可能性がある)



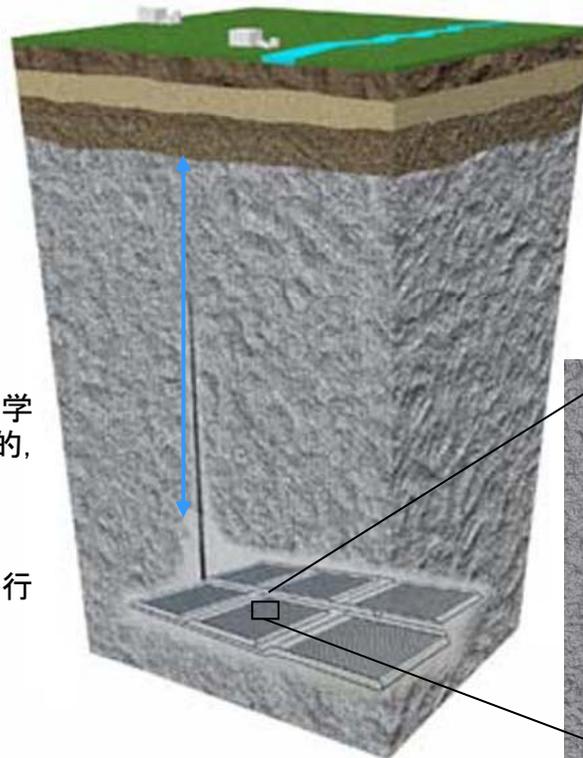
地層処分システムの設計

(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

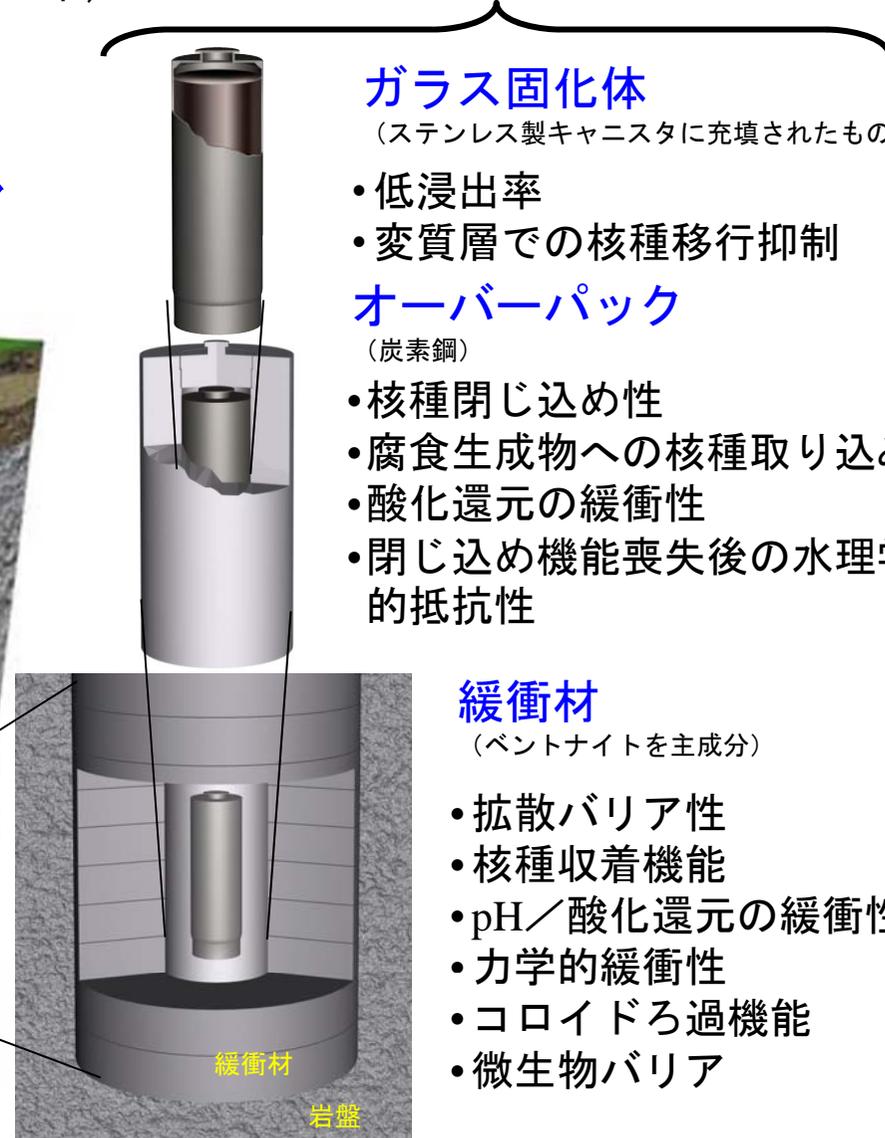
(炭素鋼)

- 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

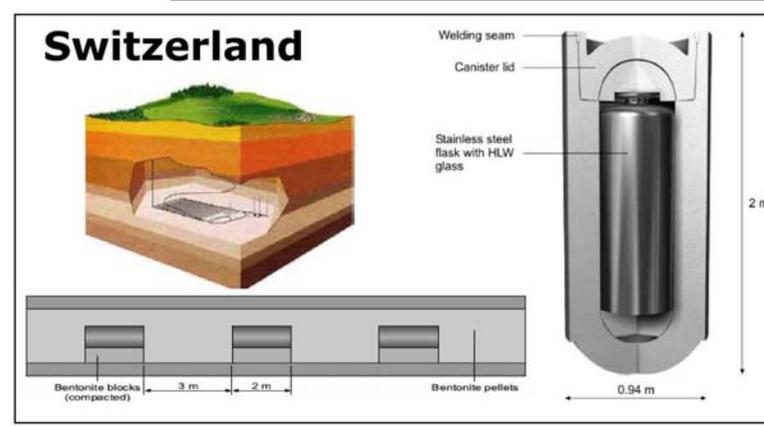
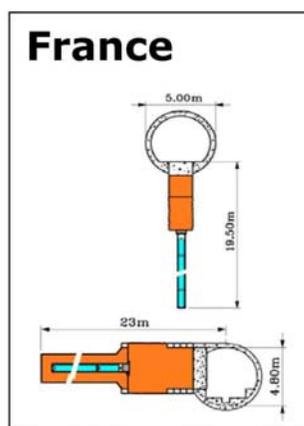
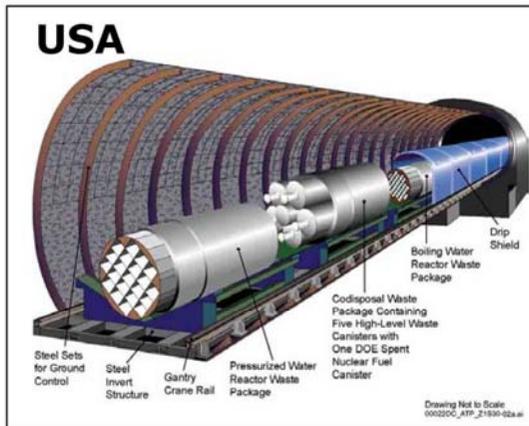
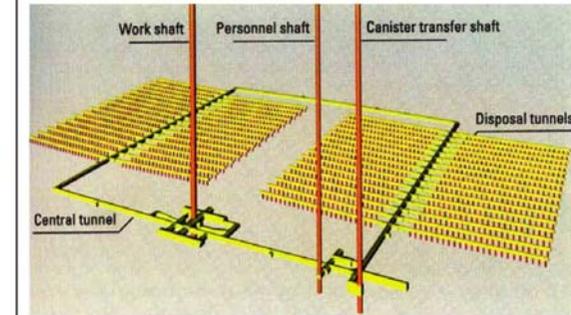
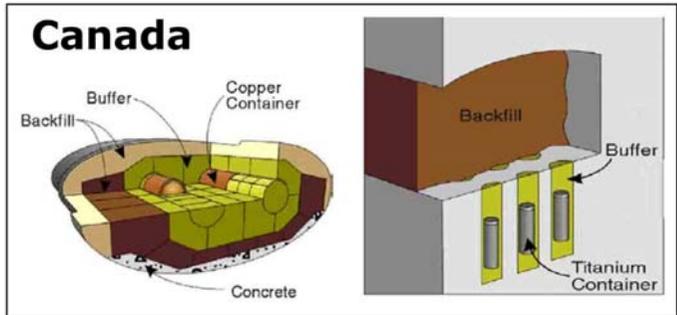
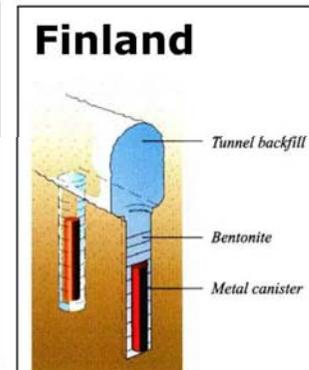
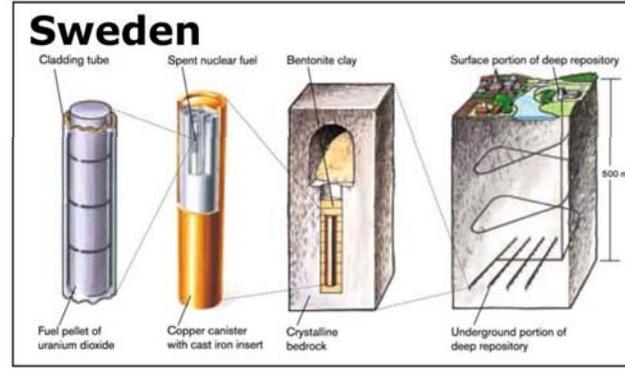
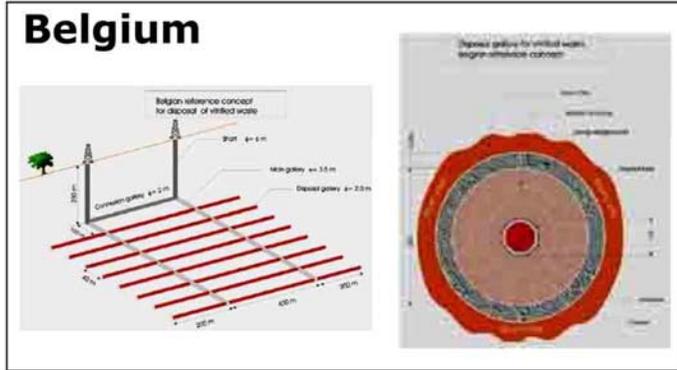
緩衝材

(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



各国の処分場概念 (使用済燃料 / ガラス固化体)

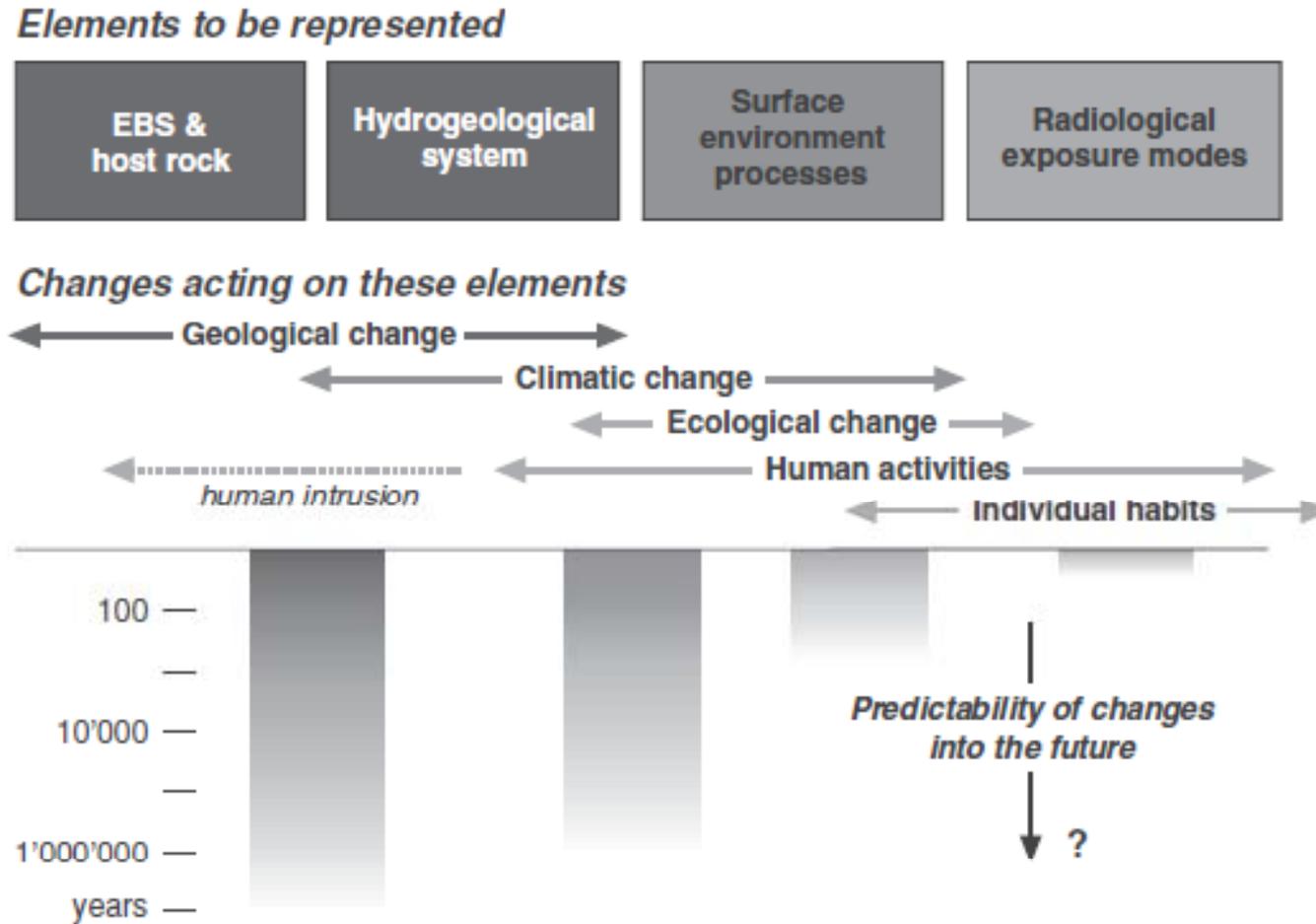


処分場閉鎖後長期の安全機能の成立性

- 性能評価（performance assessment）／安全評価（safety assessment）に基づく方法論
 - 超長期にわたる実証は不可能
 - シナリオ／モデル／データに基づく将来のシステムの振る舞いに関する予測解析（シミュレーション）による影響（リスク）の定量化
 - 言い当てることが目的ではなく，システムによって安全が確保されるかどうかを判断するための材料を提供（安全評価上の保守主義の立場）
 - 安全評価の妥当性は，シナリオ，モデル，データの信頼性に依存（モデルの“確証（validation）”に関する長い議論

性能評価に伴う不確実性

- モデルの予測可能性



性能評価における様式化 (stylisation)

- 様式化によるモデルやシナリオの表現とは：
 - “性能評価において処分システムの要素を標準化あるいは簡素化された方法によって取り扱おうとする立場であり、一般的に実験的証拠をそろえることができず性能評価に用いるパラメータの設定が判断に大きく依存するような場合に必要” (OECD/NEA, 1997)
 - “システムの安全機能を「説明し」(illustrate), コミュニケーションを図るために、本来的に低減することのできない不確実性が存在するような状況において典型的に適用” (OECD/NEA, 2000)
 - “具体的に適用されているのは、例えば地層処分場への人間侵入シナリオや生活圏評価に係る特質など” (OECD/NEA, 2001)

安全性の判断の基準

- 安全規制によって規定
- 設計や安全評価の考え方や指針
 - 設計で考慮すべき事象と取り扱い
 - 安全評価の枠組み
 - 評価期間
 - 評価手法(決定論的／確率論的)
 - 評価尺度(線量／リスク, 補完的安全指標)
 - 防護基準(ICRPやIAEAなどの勧告)
 - 不確実性の取り扱い(様式化の方法など)
 - …

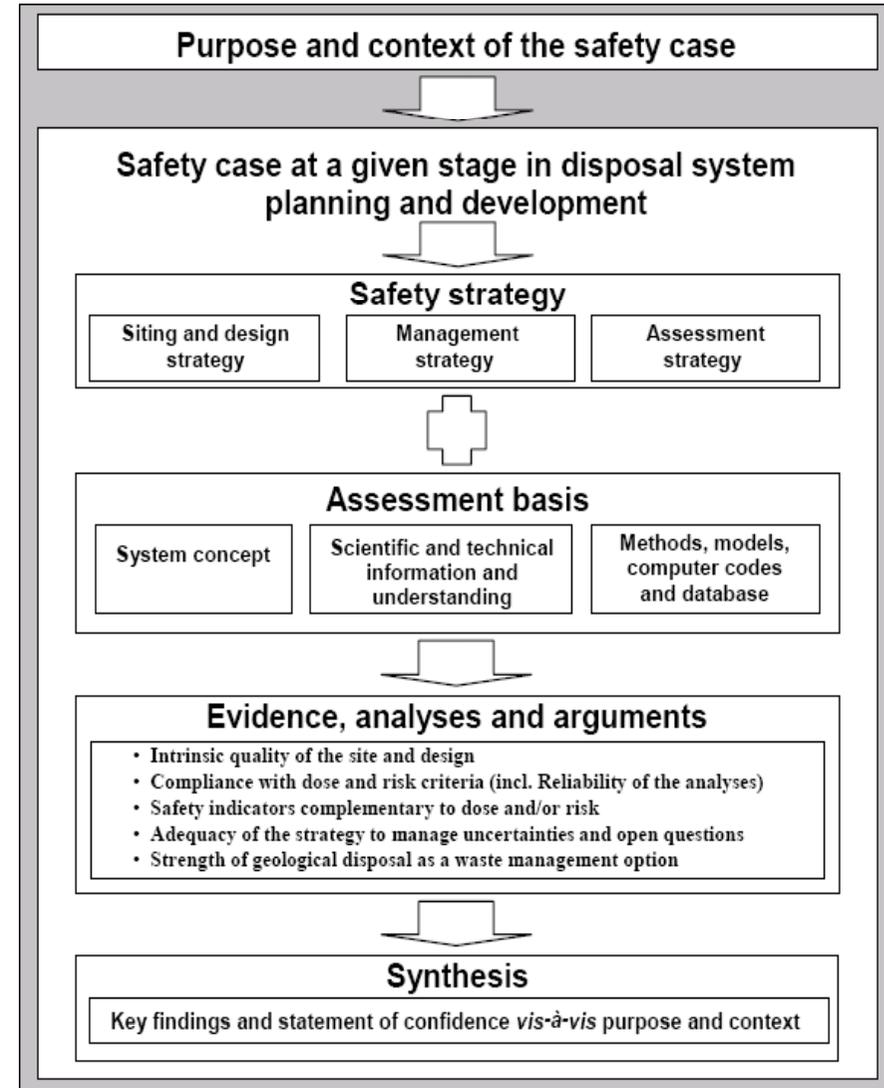
安全評価からセーフティケースへ

- ・ 鍵となるのは、長期安全性の信頼度
 - 安全評価によってリスクが許容できることが示されれば十分か？
- ・ 安全規制機関を含む様々なステークホルダーが「受け入れることのできるような十分な信頼を獲得」できるかどうか重要
 - 安全評価の結果だけでなく、安全性の確保に関する様々な論拠・証拠を統合して、地層処分システムの安全性を説明する「セーフティケース」概念の導入

セーフティケースとは？

- 最大限の努力を払って証拠を集め、論を尽くして処分システムの安全性を説明したもの
 - 適切なサイトの選定
 - 適切に設計された処分場
 - 信頼できる安全評価手法
 - 安全基準を満足

- 地層処分計画を進める中で科学技術的の進歩やサイトの地質環境情報の蓄積を反映して繰り返し作成，恒常的に信頼性を向上



3. 地層処分の社会的側面に関する議論

地層処分の社会的正当性に関する議論

□各国における困難さへの直面

- 技術論のみに基づく処分計画の挫折

□国際的な議論

- 社会的・倫理的側面を考慮することの必要性，公平性・信頼性についての要求は地層処分の本質的要素
(OECD/NEA, 1977 ; NAS, 1990など)
- “環境及び倫理的側面” (OECD/NEA, 1995)
 - 世代間の公平性
 - 将来世代の選択の自由
 - 将来世代への過度な負担の排除
 - 世代内の公平性
 - 適切な資源配分
 - ステークホルダーの参加の必要性

地層処分の選択

□OECD/NEA(1977)以来, 地層処分の選択に関する様々な議論

- 地層処分が技術的に最も有望で社会的側面からも受け入れられるものであることを繰り返し確認

□考慮された処分オプション

- 地層処分
- 氷床処分
- 海洋底処分
- 宇宙処分
- 長期貯蔵
- 分離変換

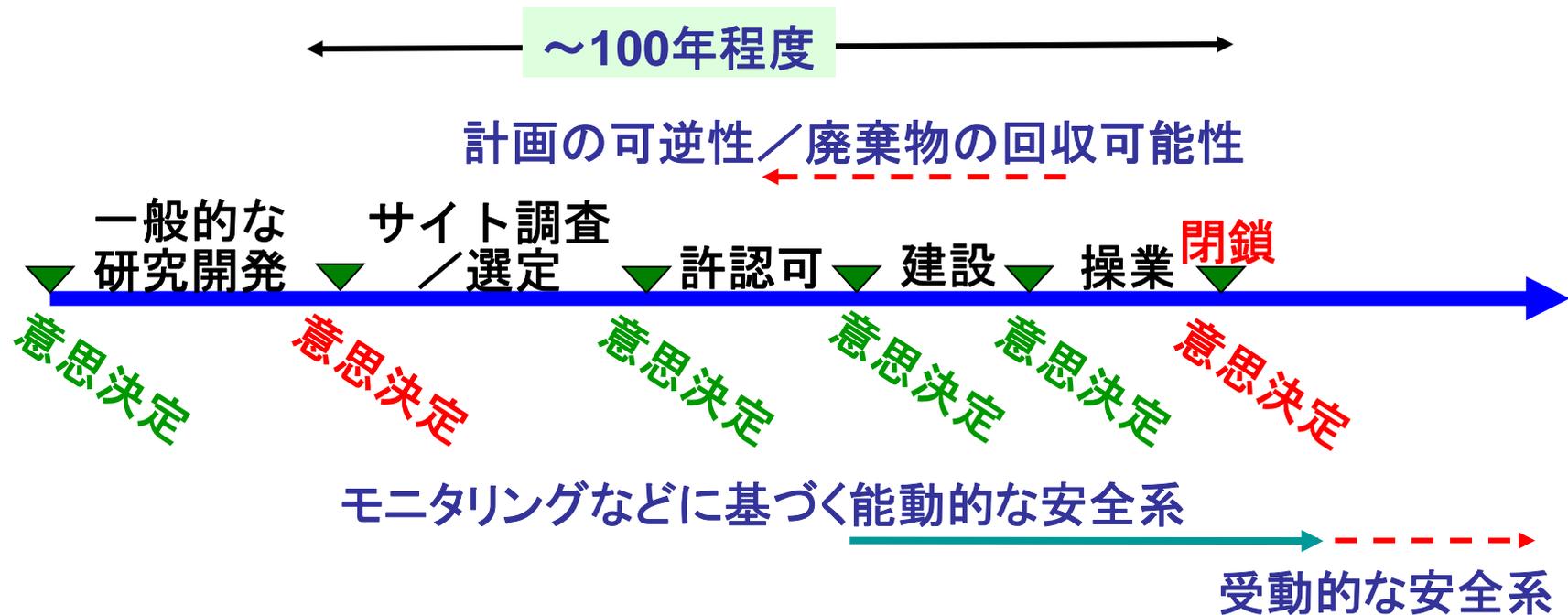
処分計画の実施プロセスに関する議論

□ 社会的意味決定プロセス

- 段階的アプローチ／適応型アプローチ (adaptive approach) (e.g. OECD/NEA, 2004; NAS, 2003)
- 不確実性への対処 (複数の選択肢の確保)
- 意味決定の材料としてのセーフティケース
- 世代を超えた様々なステークホルダーの参加

□ 可逆性と回収可能性 (OECD/NEA, 2011)

- ステークホルダーの参加を積極的に維持しようとする方向性

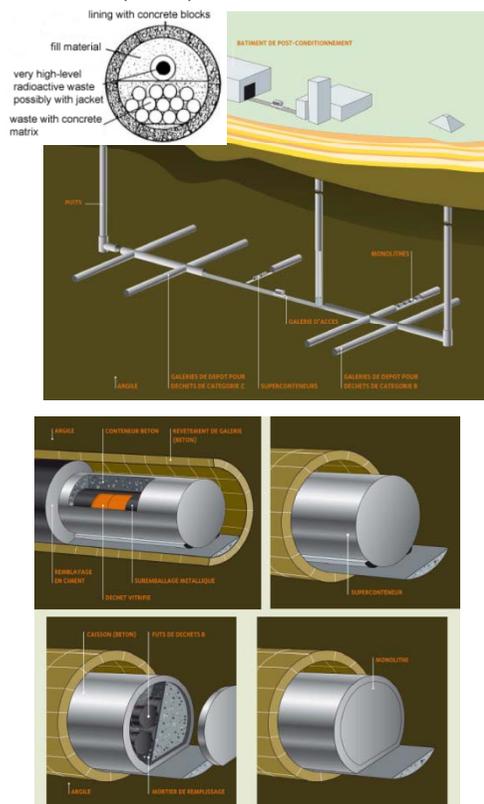


地層処分における可逆性と回収可能性

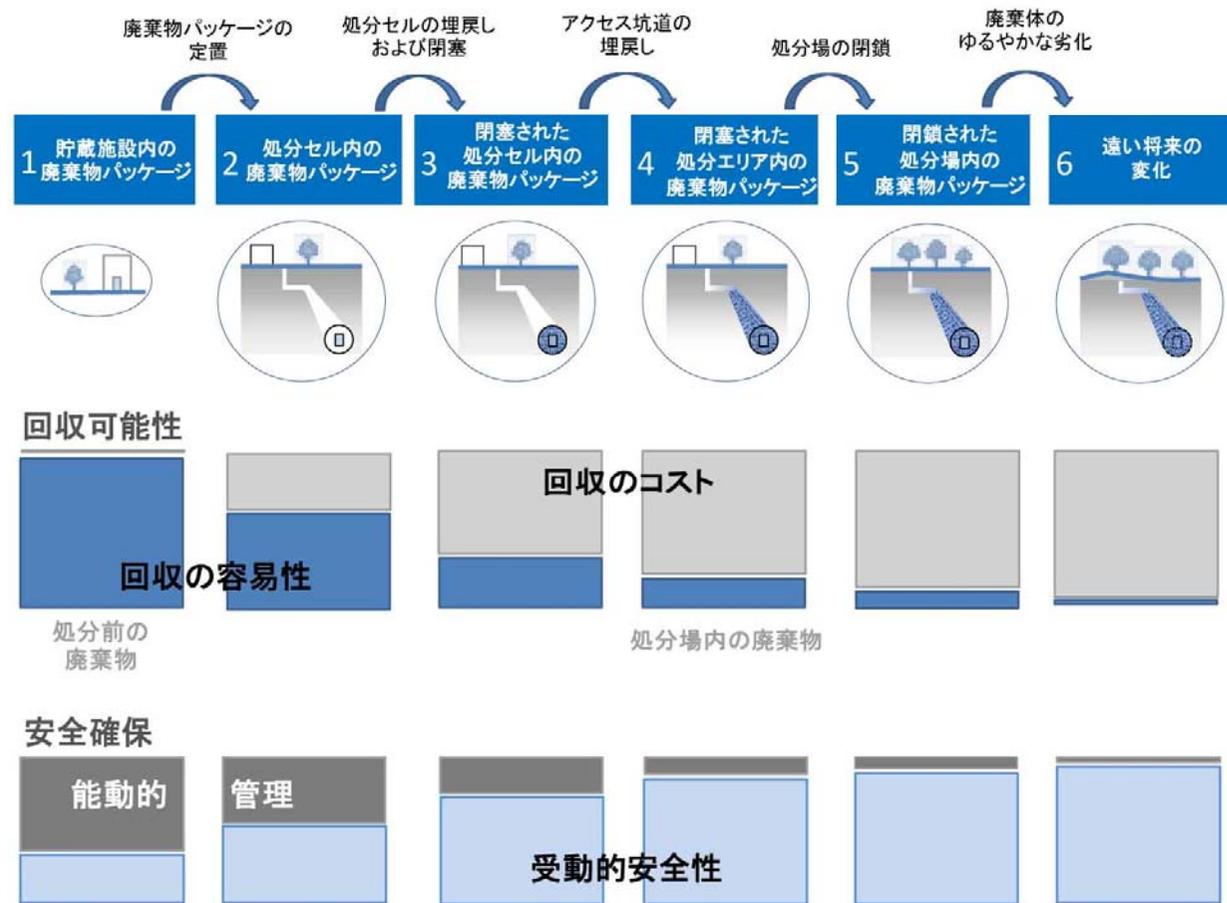
- **可逆性**: 地層処分のある段階から以前の段階に計画を戻すことを可能とすること
- **回収可能性**: 地下に埋設した廃棄物を回収することを可能とすること

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



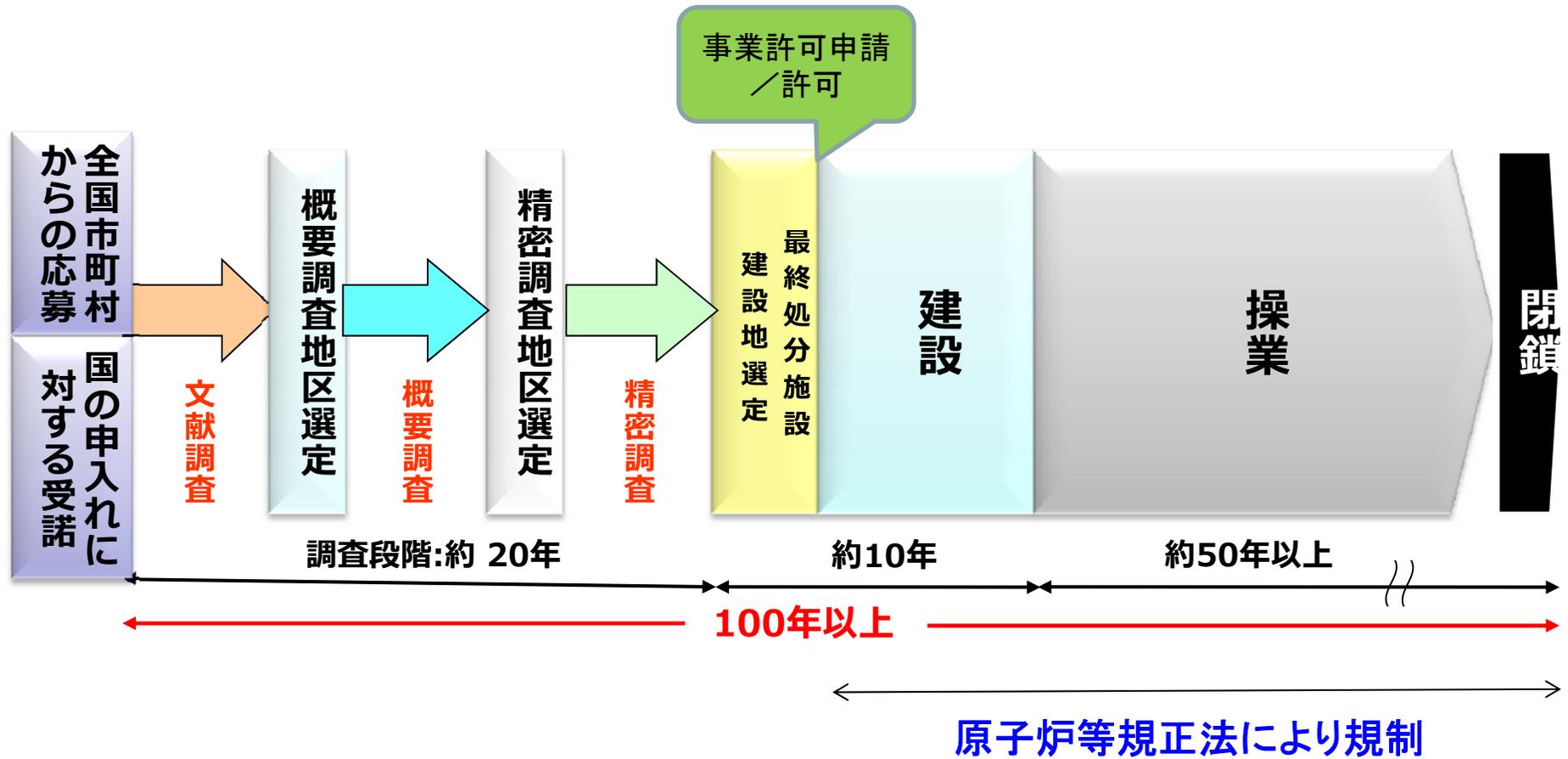
処分事業の各段階に対応した回収可能性の程度(容易さvs回収コスト), 能動的管理への依存度(能動的vs受動的)の推移(OECD/NEA, 2013より)

4. 日本における地層処分事業の変遷

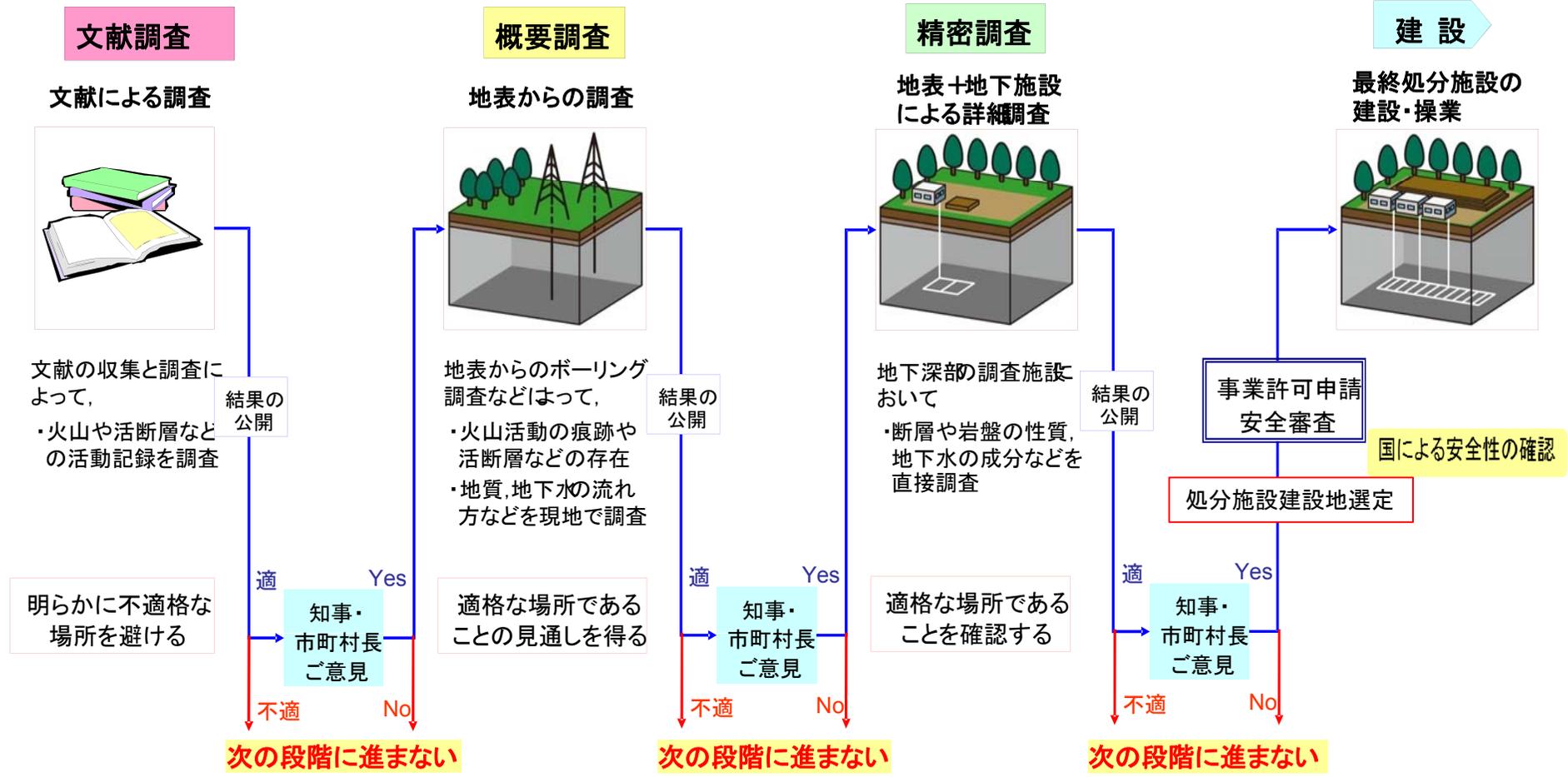
地層処分事業に関する取り組み

- 地層処分研究開発の開始（原子力委員会決定，1976）
 - － 地層処分研究開発の取りまとめ（「第1次取りまとめ」（1992）；「第2次取りまとめ」（1999））
- 原子力委員会 高レベル放射性廃棄物処分懇談会報告書（1998）
- 最終処分法成立（2000）
 - － 地層処分低レベル放射性廃棄物を対象に追加（2007改正）
- 処分地選定プロセス
 - － NUMOとして自治体の公募を開始（2002～）
 - － 高知県東洋町（2007応募→取り下げ），その後応募自治体は現れず
 - － 事業推進の丈の取り組みの強化策として国による申し入れを追加（総合資源エネルギー放射性廃棄物小委員会中間とりまとめ，2007）

地層処分事業の進め方



最終処分施設建設地選定プロセス



(最終処分法, 2000)

地層処分計画の再構築

- 東日本大震災と福島第一原子力発電所事故
 - 原子力事業全般に対する国民の信頼が失墜
 - 地層処分: 科学技術の限界の自覚(学会議), 最新知見に基づく安全性の定期的な確認と国民との共有の必要性など(原子力委員会の見解)の指摘
- 総合資源エネルギー調査会に二つのWGを設置
 - 放射性廃棄物WG(2013/7) / 地層処分技術WG(2013/10)
 - これまでの地層処分の取り組みや技術的信頼性について原点に立ち返った議論

最終処分に関する基本方針の改定の要点

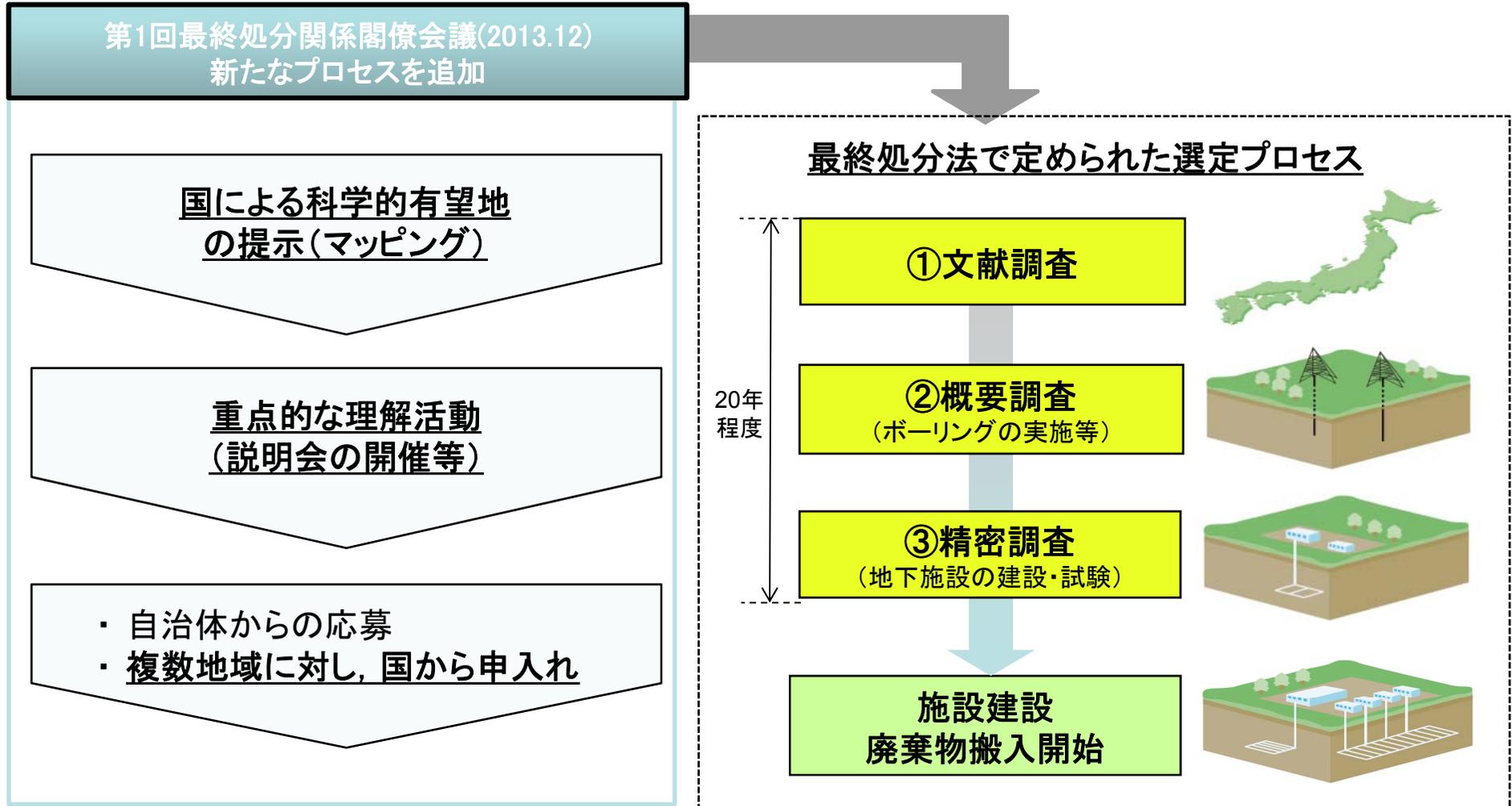
(平成27年5月22日閣議決定)

- **現世代の責任と将来世代の選択可能性**
 - － 将来世代に負担を先送りしないよう地層処分に向けた対策を確実に進める
 - － 可逆性・回収可能性の担保, 代替オプションを含めた技術開発等を進める
- **全国民, 地域との相互理解の醸成**
 - － 事業実現に貢献する地域に対する敬意や感謝の念や社会としての利益還元の必要性が広く理解されること
 - － 国から全国の地方自治体への緊密な情報提供と丁寧な対話
- **国が前面に立った取り組み**
 - － 国が科学的により適性が高いと考えられる地域(科学的有望地)を提示するとともに, 調査等への理解と協力について関係自治体へ申し入れ
- **事業に貢献する地域に対する支援**
 - － 地域の主体的合意形成に向けた多様な住民参画の「対話の場」の設置と活動の支援
 - － 地域の持続的発展に資する総合的な支援措置を検討し講じる
- **推進体制の改善等**
 - － NUMOの体制強化
 - － 信頼性確保のため, 原子力委員会の関与の明確化と継続的な評価, 原子力規制委員会は調査の進捗に応じ安全確保上の考慮事項を順次提示
 - － 使用済燃料の貯蔵能力の拡大

改定を受けた対応

- 科学的有望地選定(国のWGにおける審議)
 - 地球科学的観点 / 社会科学的観点
 - NUMOによる情報提供
- 国民的共通理解の醸成(国/NUMO連携)
 - 全国広報(シンポジウム, 地域ワークショップ, 教育関係者向けワークショップなど)
 - メディア活用(新聞・雑誌等とのタイアップ, SNSやポータルサイトの活用など)
 - 全国自治体等への説明会の拡大展開
- 地域の合意形成のための「対話の場」構築
 - 国, NUMOが積極的に関与
 - NUMOによる場のモデル設計
- NUMOの体制強化, 取組改善
 - 経営理念を新たに確認, 地域交流部の設置(広報部+立地部)
 - 今後, 評議員会の機能評価, 職員の増強などを実施
 - 地質環境調査に加え, 「経済社会的影響調査」を実施
- 代替技術等の開発
 - 減容化・有害度低減(文科省)
 - 代替処分オプション(直接処分, 深孔処分)(経産省)

新たなプロセスの追加



第2回最終処分関係閣僚会議 資料 高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた今後の取組の進め方 より
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisyu_syobun_kaigi/dai2/siryou.pdf

科学特性マップに関する検討の経緯

□ 最終処分関係閣僚会議

- WGにおける「科学的により適性の高いと考えられる地域」に関する要件・基準の議論（地球科学的観点と社会科学的観点）第2回最終処分関係閣僚会議資料 高レベル放射性廃棄物の最終処分に向けた今後の取組の進め方 より
http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisyu_syobun_kaigi/dai2/siryou.pdf

□ 地層処分技術WG

- 地球科学的・技術的観点から要件・基準を検討
- 放射性廃棄物WGにおける審議と連携，評価等を実施
 - 「中間整理」(2015/12)
 - 関係学会等への情報提供・意見照会(2016/1-3)
 - OECD/NEAによる国際レビュー(2016/5)
 - 「とりまとめ案」(2016/8)
 - 意見公募(2016/8-9)
 - 原子力委員会評価報告書(2016/10)
 - 「とりまとめ案」(2017/3)
 - 意見公募(2017/3-4)
 - 「とりまとめ」(2017/4)公表

□ 放射性廃棄物WG

- 「科学的有望地の提示に係る社会科学的観点の扱いについて」(2016/10)

社会科学観点の取り扱いについて

□ 放射性廃棄物WGにおける議論の要点

- 地球科学的・技術的な知見について広く共有していくことが当面の重要課題
- 社会科学観点は、個別具体的には、NUMOが地域の住民や自治体の意向を把握し、事業に反映させていくことが重要
- 廃棄物問題の解決という社会の共通利益を国全体としてどのように分かち合うかという観点から、国土利用のあり方や地域間の公平性のあり方などを総合的に捉えて解決に向けた共通理解を得ていくべき
- 科学的特性マップ提示後は、地球科学的・技術的側面だけでなく地層処分を事業として捉え、社会としてどのように実現していくかについて議論や検討を深めていくことが重要

□ 科学的特性マップの要件・基準については、地球科学的・技術的観点のみに基づくこととし、土地確保の容易性などの社会科学観点をどう扱うべきかについては、マップの提示後に議論を深めていくこととされた

科学的特性マップ作成に用いられる要件・基準

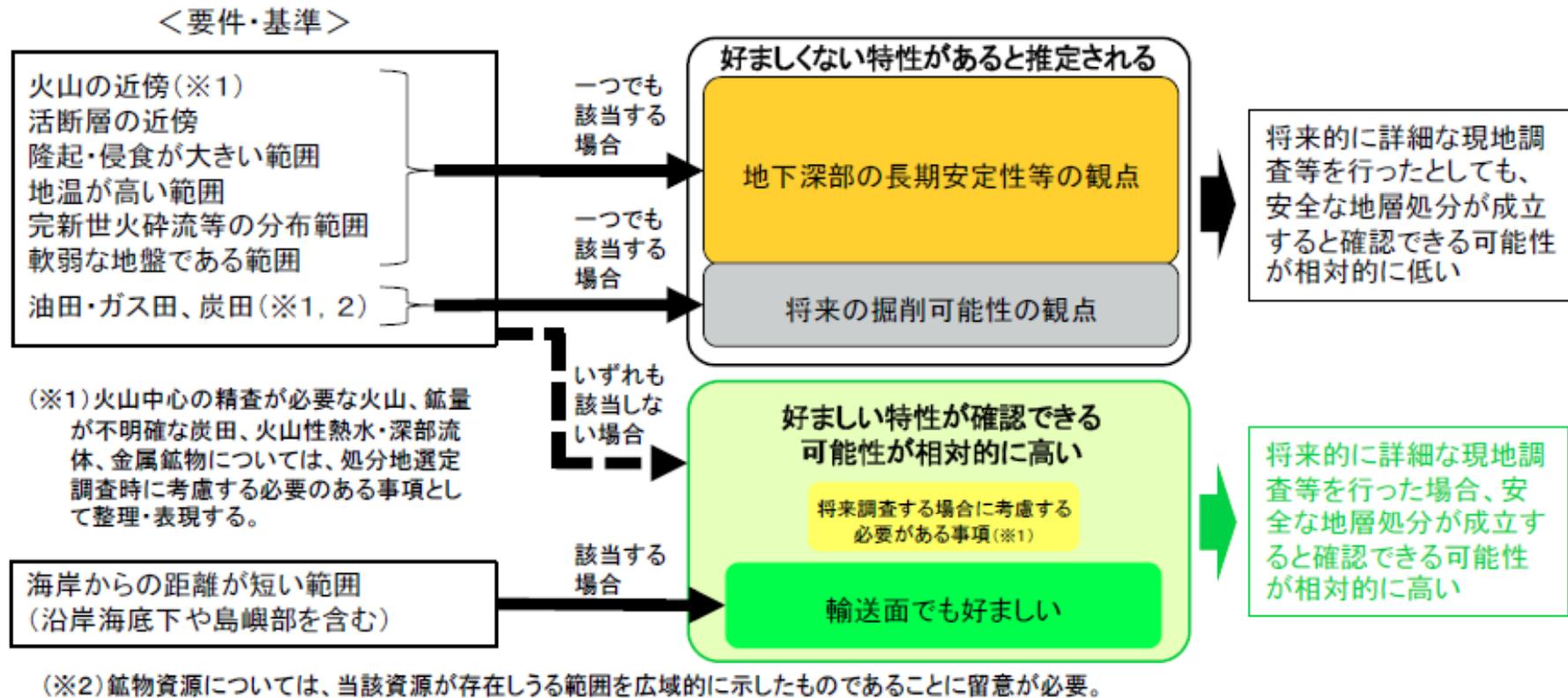
好ましくない範囲の要件・基準

	要件	基準
火山・火成活動	火山の周囲(マグマが処分場を貫くことを防止)	火山の中心から半径15km以内等
断層活動	活断層の影響が大きいところ	主な活断層(断層長10km以上)の両側一定距離(断層長×0.01)以内
隆起・侵食	隆起と海水面の低下により将来大きな侵食量が想定される場所	10万年間に300mを超える隆起の可能性がある、過去の隆起量が大きな沿岸部
地熱活動	地熱の大きいところ(人工バリアの機能低下を防止)	15°C/100mより大きな地温勾配
火山性熱水・深部流体	高い酸性の地下水等があるところ(人工バリアの機能低下を防止)	pH4.8未満等
軟弱な地盤	処分場の地層が軟弱なところ(建設・操業時の地下施設の崩落事故を防止)	約78万年前以降の地層が300m以深に分布
火砕流等の火山の影響	火砕流などが及びうる場所(建設・操業時の地上施設の破壊を防止)	約1万年前以降の火砕流が分布
鉱物資源	鉱物資源が分布する場所(資源の採掘に伴う人間侵入を防止)	石炭・石油・天然ガス・金属鉱物が賦存

好ましい範囲の要件・基準

	要件	基準
輸送	海岸からの陸上輸送が容易な場所	海岸からの距離が20km以内目安

科学的特性マップの要件・基準と地域特性区分との関係

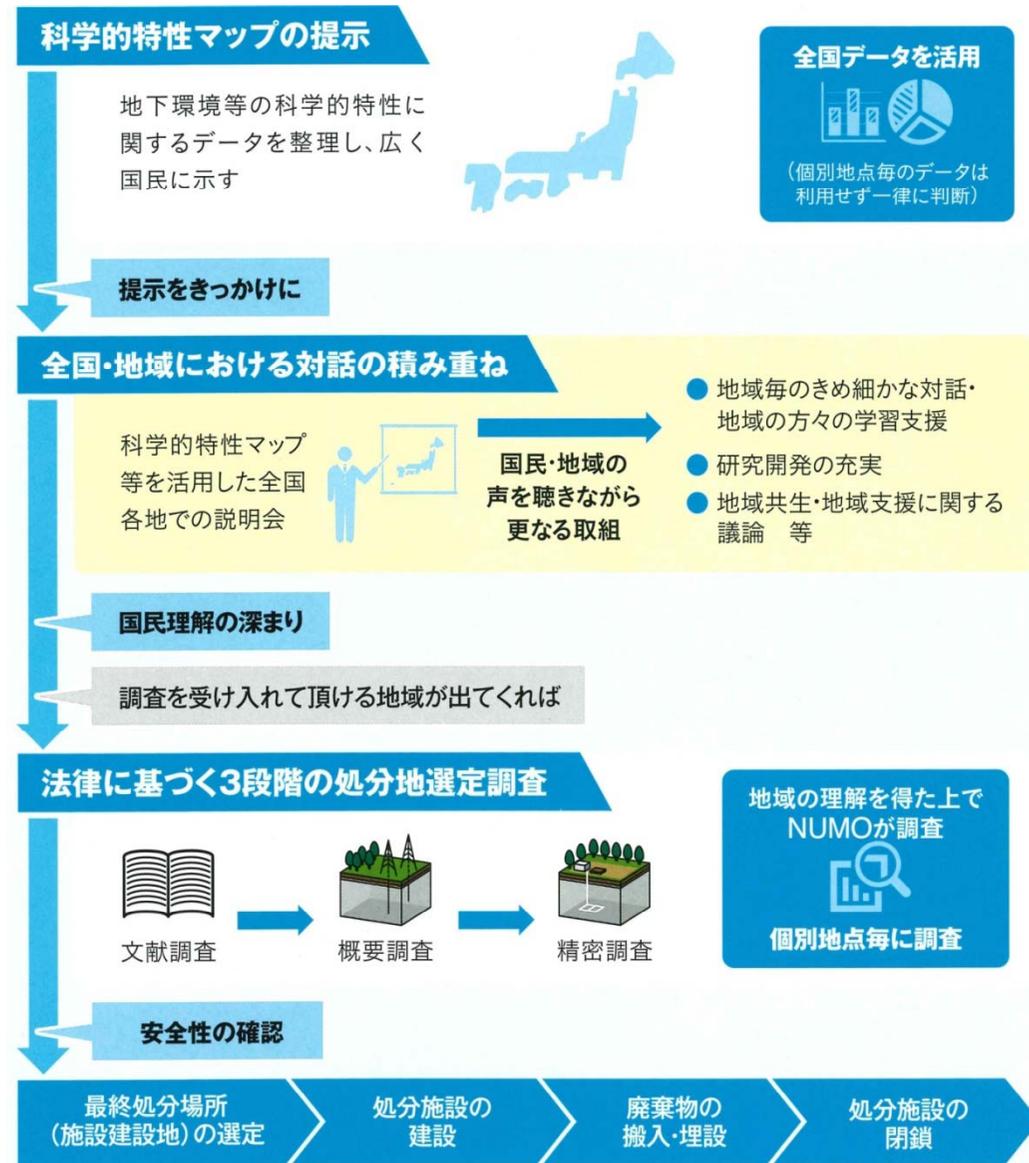


総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術WG
「地層処分に関する地域の科学的な特性の提示に係る要件・基準の検討結果(地層処分技術WGとりまとめ)(平成29年4月)」

(http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/data/pdf/20170417001_1.pdf)

科学的特性マップの提示

- 地層処分のしくみや日本の地質環境への関心喚起と理解の深化が必要
- 「科学的特性マップ」は
 - 地層処分を行う場所の選定に当たって考慮すべき科学的特性やその全国分布を俯瞰できるようにすることによって、国民の不安の解消に役立つことを期待
 - 地層処分に関係する科学的特性を既存の全国データに基づき一定の要件・基準に従って客観的に整理し全国地図の形で示すもの
- ある場所が地層処分に適しているかどうかを判断するためには様々な科学的特性を総合的に検討することが必要で、詳しくは現地調査を実施して把握



5. まとめと今後の課題

- 地層処分はこれまでに経験のない技術的な課題を提示
- 技術的成立性についての専門家による国際的な合意形成が図られてきたが、技術的取り組みのみでこの課題を解決することはできない
- ステークホルダーの参加と信頼獲得による地層処分技術の社会的受容が不可欠
 - － 意思決定に係る公開性と対話の重要性
 - － 長期間にわたる処分事業を通じたセーフティケースの恒常的な信頼性向上
 - － 地層処分技術の知識基盤としての体系化による様々なステークホルダー間のコミュニケーションの促進

ご清聴有難うございました