

第48回原子力委員会
参 考 資 料 第 5 号

第46回原子力委員会
資 料 第 4 - 3 号

地層処分技術の信頼性について

2012年10月24日

原子力発電環境整備機構 (NUMO)

1. 国における地層処分の技術基盤の整備 (P.2-10)
2. 地層処分事業の安全確保に向けたNUMOの取り組み (P.11-13)
3. 東日本大震災を踏まえた地層処分の安全性の再確認 (P.14-24)
4. まとめ (P.25-26)

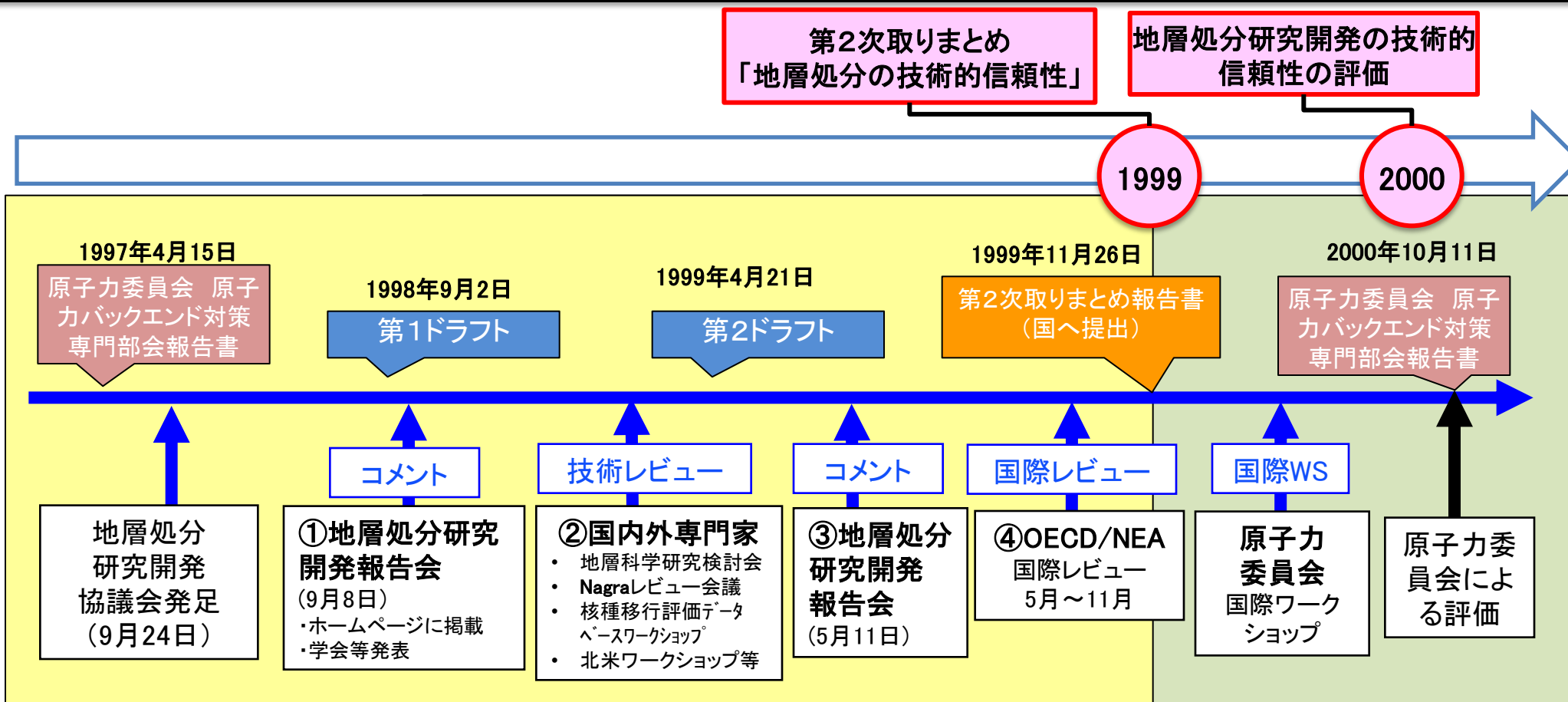
1. 国における地層処分の技術基盤の整備

(1) わが国における地層処分の検討経緯

- 高レベル放射性廃棄物の対策について、1976年に原子力委員会が示した方針に基づき、地層処分に重点がおかれた研究が開始された。
- 1992年に、旧動力炉・核燃料開発事業団（現日本原子力研究開発機構）が研究成果報告（第1次取りまとめ）を取りまとめ、わが国における地層処分の技術的可能性が明らかにされた。
- 1999年に旧核燃料サイクル開発機構（現日本原子力研究開発機構）が取りまとめた研究成果報告（第2次取りまとめ）により、技術的信頼性が示され、わが国でも地層処分が可能であることが明らかにされた。
- 2000年に第2次取りまとめに基づき、地層処分の技術的信頼性を国（原子力委員会）が確認した。
- 「特定放射性廃棄物の地層処分に関する法律」が2000年に制定され、その法律に基づき同年、原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）が設立された。

(2)「第2次取りまとめ」の評価実施の経緯

- ・「第2次取りまとめ」作成過程にて、多数の国内外の専門家によるレビューを受けている。
- ・「第2次取りまとめ」公表後も、国際ワークショップにて国内外の専門家により技術的コメント等を受けている。



(3)「第2次取りまとめ」の内容

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

総論レポート

(A4版562ページ, 参考文献数802報)

分冊1

わが国の地質環境

(A4版509ページ, 参考文献数966報)

分冊2

地層処分の工学技術

(A4版649ページ, 参考文献数503報)

分冊3

地層処分システムの安全評価

(A4版486ページ, 参考文献数570報)

別冊

地層処分の背景

(A4版75ページ, 参考文献数24報)

* 参考文献数は各章の合計数であり、一部に重複するものも含む

総ページ数 2,281ページ



原子力研究開発機構:

<http://www.jaea.go.jp/04/tisou/houkokusyo/dai2jitoimatome.html>

「第2次取りまとめ」で整備された事項(1／2)

研究開発により、地層処分の技術基盤が以下のように整備された。

- 地層処分概念の成立に必要な条件を満たす地質環境がわが国に広く存在し、特定の地質環境がそのような条件を備えているか否かを評価する方法が開発された。
 - 過去数十万年程度にわたる火山や断層の活動地域は限定されていることから、将来における活動地域やその影響範囲を予測可能
 - 隆起・侵食の過去の変動には規則性が認められることから、将来における変動の速度や幅を推定可能
 - わが国の地下深部では、地下水が還元的で動きが緩慢、応力がほぼ均等に作用、地下水による物質の移動が遅延など、地層処分に適した特性を有する地質環境が広く分布

「第2次取りまとめ」で整備された事項(2／2)

- 幅広い地質環境条件に対して人工バリアや処分施設を適切に設計・施工する技術が開発された。
- 地層処分の長期にわたる安全性を予測的に評価する方法が開発された。それを用いて評価したところ、適切なサイト選定やサイト特性調査がなされ、それに基づいて処分場の設計がなされることにより、安全性を確保できることが確認できた。

核燃料サイクル開発機構(1999)「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」, JNC TN1400 99-020～024

(4)「第2次取りまとめ」の国内・国際レビュー

地層処分研究開発協議会の構成

動燃事業団, 他7機関*および大学等専門家(原子力工学, 地質学, 土木工学)で構成

*: 日本原子力研究所, 地質調査所, 防災科学技術研究所, 電力中央研究所, 原子力環境整備センター, 電気事業連合会, 高レベル事業推進準備会

国内・国際レビュー

①地層処分研究開発報告会 (1998年9月8日 参加者約820名)

②国内外専門家レビュー

- 地層科学研究検討会 (国内の地質学等の専門家36名)
- スイスNagra専門家レビュー会議
- 核種移行評価データワークショップ° (スイスポールシュラー研究所等の専門家5名)
- 北米研究機関のレビューワークショップ° (ローレンスバークレイ, ロスアラモス研究所等の8機関の専門家19名)

③地層処分研究開発報告会 (1999年5月11日, 参加者約1,000名)

④OECD/NEA国際レビューチーム (1999年5月～11月) ⇨ P.8参照

- Jésus Alonso (ENRESA: スペイン放射性廃棄物管理公社)
- Kenneth Dormuth (AECL: カナダ原子力公社)
- Ferruccio Gera (IAEA: 国際原子力機関)
- Claudio Pescatore (OECD/NEA: 経済協力開発機構／原子力機関)
- Helmut Röthemeyer (BfS: ドイツ放射線防護庁)
- Lars Werme (SKB: スウェーデン核燃料廃棄物会社)

「第2次取りまとめ」レビュー結果例:

OECD/NEA国際レビュー(1999年5月～1999年11月)

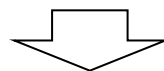
OECD/NEAによる国際レビューの結果の取りまとめ報告書から抜粋して作成
(<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/senmon/old/backend/siryo/back26/siryo7.htm>)

【全体へのコメント】

- 地層処分の工学技術については、人工バリアの設計と性能に関する分野でのサイクル機構の研究成果は非常に高い水準に達していることを特記しておく。
- データベースが一般的なものであることや日本の地層処分計画が比較的初期段階にあることを考慮すれば、今回評価した研究成果は感銘を与えるものであり、処分計画を次段階へ進めるうえで十分な成果と言うことができる。

【主たる懸念事項へのコメント】

- 日本の地殻変動は比較的活発で、世界的にみても放射性廃棄物の地層処分を計画している他の国々よりも大きなものとなっている。
- 新たな断層が発生する確率が小さい地域を特定することは合理的であり、また信憑性もあるが、日本の地層処分概念を確固たるものとし、その性能を示すためにも、断層シナリオを安全評価に加えることを推奨する。



コメントを受け、断層が処分場を直撃し、人工バリアの機能が失われたと想定して安全評価を実施した。その結果、被ばく線量はわが国の自然放射線レベルを大きく超えることはないため、発生確率が小さいことを考慮すれば、断層活動による地層処分システムへの影響は問題とならないことが示された。

(5)原子力委員会による「第2次取りまとめ」の評価

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」 2000年10月11日に基づく

1999年11月 核燃料サイクル開発機構 「第2次取りまとめ」提出

1999年12月～2000年10月 「地層処分研究開発第2次取りまとめ評価分科会」

- 専門家23名 主査 小島圭二
- 分科会10回, サブグループ会合(3分野) 計13回

2000年7月 評価報告書(案)の公開

- 1ヶ月間の国民からの意見募集
- 41名から67件の意見が寄せられる。

2000年8月8日～9日 国際ワークショップ

- 基調講演者 2名, パネリスト 18名
(海外:米・独・英・加・典・IAEA 6名)
- 公募による一般参加者 215名
- 原子力バックエンド対策専門部会委員 16名
- 地層処分研究開発第2次取りまとめ評価分科会委員11名
- その他関係者 25名

⇒ P.10参照

2000年10月11日 「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」報告書公開

評価体制

原子力バックエンド対策専門部会

主査 熊谷信昭

構成員 計31名(途中交代含む)

地層処分研究開発
第2次取りまとめ評価分科会

主査 小島圭二

構成員 計23名

地質環境・評価
サブグループ
計7名

処分技術・評価
サブグループ
計7名

安全性・評価
サブグループ
計7名

原子力委員会は、専門部会報告書を受け、「第2次取りまとめには、我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が示されているとともに、処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となることが示されていると評価する。このことから、第2次取りまとめは地層処分の事業化に向けての技術的拠り所となると判断する。」として、委員会決定。

国際ワークショップでの専門家からのコメント

原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会, 2000年10月11日,
「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」

■【全体へのコメント】

- ・国内外のパネリストの方々からは, 専門部会報告書に重点項目が明確に示されており, これに基づいて取り組まれた第2次とりまとめにより地層処分の実現へ向けた基盤技術の整備充実がはかられた, との見解が共通して示された。

■【技術的コメント】

- ・サイト選定においては, 自然は標準化できないものであるため, 絶対的な基準値だけで決めるのではなく, サイト特性調査の結果を重要視すべきである。
(J. West: 英国地質調査所 主任研究員(当時))
- ・品質管理, 工学技術, 安全評価の観点からは, 人工バリアが最も重要となる。特に, 品質管理は重要である。
(A. Bonne: IAEA 燃料サイクル部 廃棄物管理部長(当時))
- ・地下水移行経路を取り扱う評価とこれに基づくより詳細な不確実性の解析が重要である。サイトを特定しないと難しいものもあるが, 課題をどのように取り扱うのかについてある節目を設けて研究開発に取り組むべきである。
(N. A. Chapman: 英国シェフィールド大学 教授(当時))

2. 地層処分事業の安全確保に向けたNUMOの取り組み

(1) NUMOの処分事業の取り組み

- 「第2次とりまとめ」以降、NUMOは事業者の立場から、「閉鎖後長期の安全確保」と「事業期間中の安全確保」を目標とし、それを達成すべく新知見も加えて事業に必要な技術の整備を進めている。
- また、「閉鎖後長期の安全確保」のため、サイト選定プロセス、地下施設建設や操業の各段階で、最新知見に基づき、以下の安全確保策を繰り返し実施することとしている。

■ 適切なサイトの選定と確認

地層処分事業の安全確保(2010年度版)*より抜粋

- 地質環境の長期安定性に影響を与える恐れがある火山、活断層や著しい地殻変動(隆起)が懸念される地域を除外する。
- 地下水の動きが緩慢で還元環境であるなど、天然バリアとしての機能を有し、かつ人工バリアの設置に適した環境を選定する。

■ 適切な工学的対策の実施

- 一つのバリアの性能に依存することなく安全性が確保でき、将来の処分環境の変動を考慮して各人工バリアは余裕を持たせた設計とする。

■ 閉鎖後長期の安全性評価

- 極めて長い時間スケールと広大な地下の空間領域を評価対象とすることを念頭に置いて、様々な不確実性を取り込んで評価することで、安全性を検討することができる。

応募・申し入れ～建設

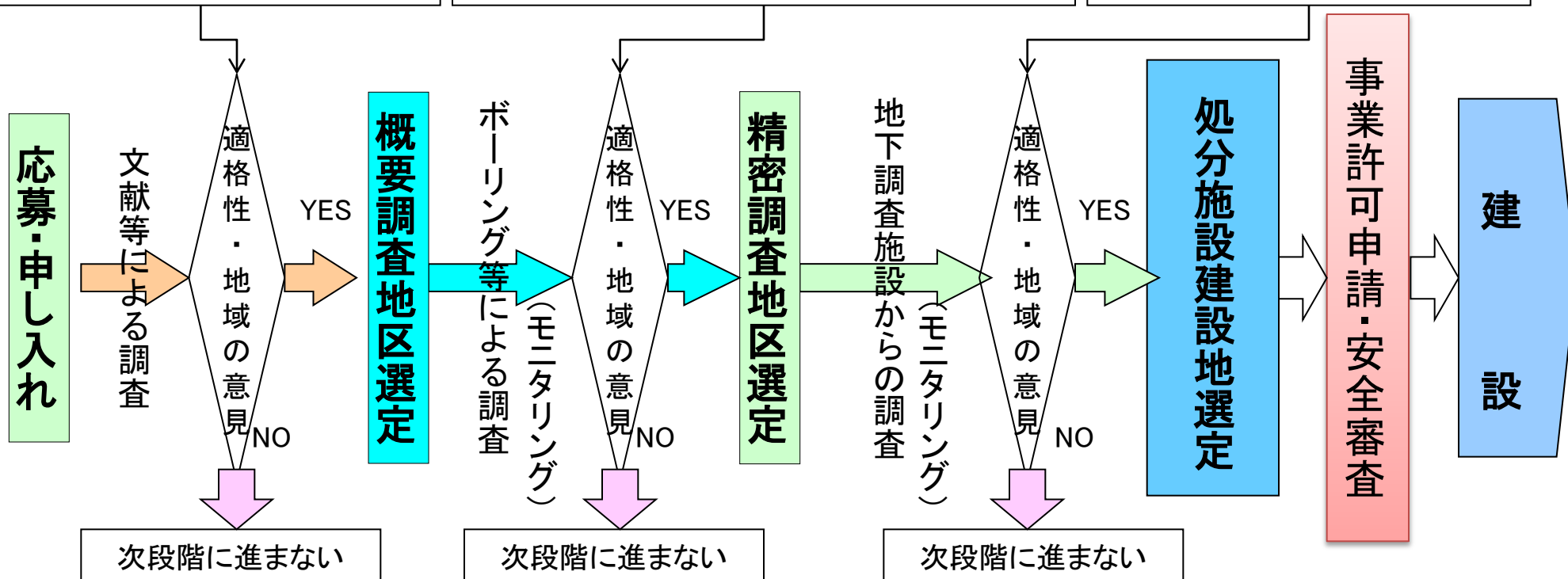
各調査段階において3つの安全確保策を実施することで、地層の技術的な適格性を確認していく。加えて、地域の皆様の意見を尊重してサイトを選定し、次段階へ進む。

地層処分事業の安全確保(2010年度版)*に基づいて作成

調査目的: **地震等の自然現象**による地層の変動の記録がなく、かつ将来にわたってそれらが生ずるおそれが少ないと見込まれること等の確認

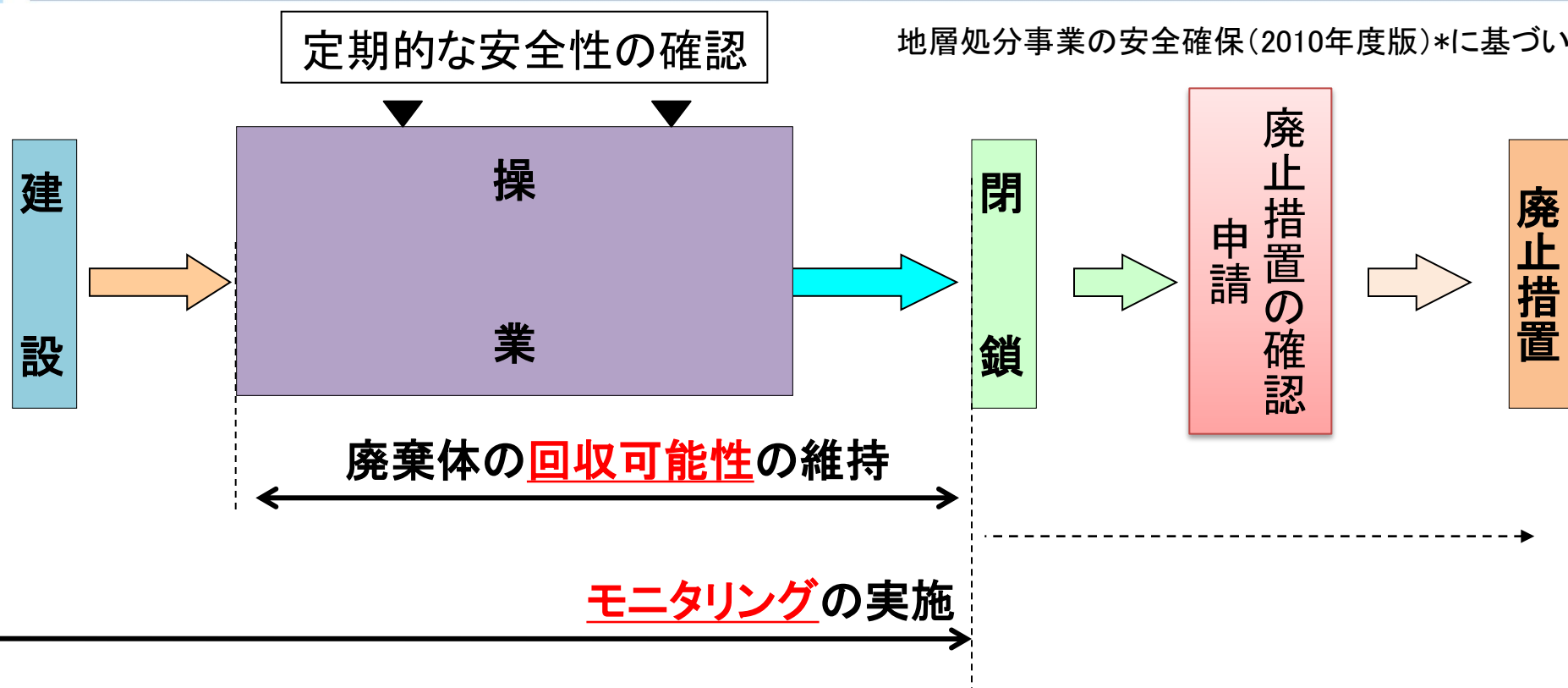
調査目的: **地層およびその周辺の地層が安定**していること、坑道の掘削に支障がないこと、地下の水流等が地下施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること等の確認

調査目的: **地層の物理的・化学的性質等が地層処分施設の設置に適している**と見込まれること等の確認



建設～廃止措置

地層処分事業の安全確保(2010年度版)*に基づいて作成



- 処分場を閉鎖するまでの間、廃棄体の回収可能性を維持し、また、閉鎖・事業廃止までのモニタリングを実施する。
- 閉鎖の可否、閉鎖以降の回収可能性・モニタリングについて将来世代の意思決定を尊重する。

3. 東日本大震災を踏まえた地層処分の安全性の再確認

(1) 再確認項目と検討方法

■ 震災以降に収集・分析された、以下の4点の地層処分への影響を検討

- ・ 地震による「ゆれ」の影響
- ・ 活断層による「ずれ」の影響
- ・ 地下水の「流れの変化」の影響
- ・ 「津波」の影響

■ 検討方法：

【事業期間中の安全確保】

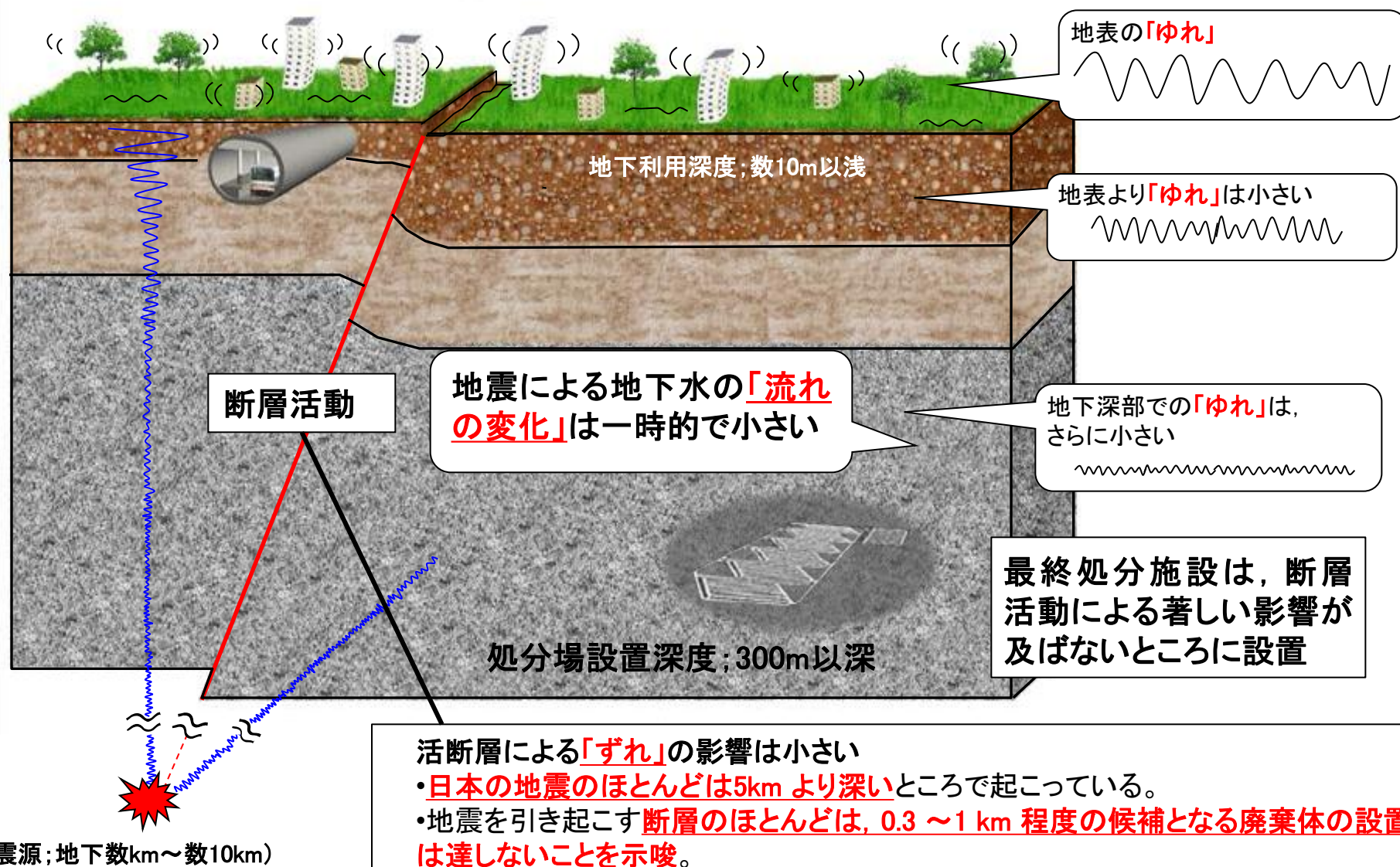
想定を超える外部事象に対する「総合的健全性の確保」と「万が一の事故への対応」を検討。

【閉鎖後長期の安全確保】

下記の考え方に従い、遠い将来における不確実性を考慮した安全性の評価を震災以前より実施。

「地質や工学対策の将来的な変化が正確に予測できなければ、地層処分の安全性が説明できないわけではない。設定する地質条件に、不確かさの程度に応じた適切な幅を持たせることにより、今の地球科学のレベルでも地層処分の安全性を十分に検討することはできる。」

地震に伴う処分場への影響(概念図)



(S. Yoshida, 2009, OECD/NEA Workshop proceedings, pp. 133-145)

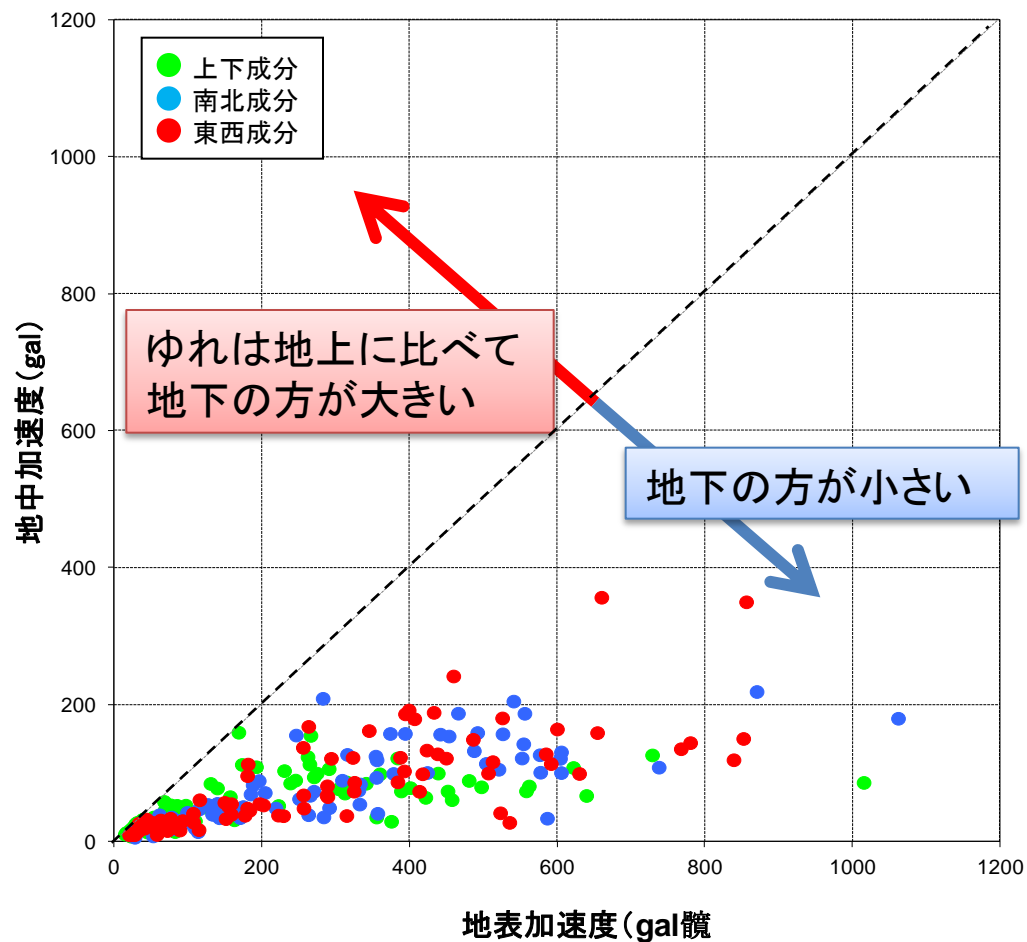


(2)地震の「ゆれ」の影響

- 地震の加速度は地上に比べ、地下の方が小さい傾向がある。
(⇒「ゆれ」の影響①)
- 操業中に安全上重要な施設(ガラス固化体の受け入れ施設や地下施設)には十分な耐震性を持たせた設計とする。
(⇒「ゆれ」の影響②-1, 「ゆれ」の影響②-2)
- 閉鎖後は、人工バリアは岩盤と一体となって動くため、「ゆれ」の影響は操業中よりもさらに小さくなると考えられる。

「ゆれ」の影響①: 東北地方太平洋沖地震の観測例

地上と地下の地震加速度の比較



震央より300km以内で、地上および地下（地震計設置深度が100mより深い地点）の地震観測記録が同一地点で得られているケースのみを収集対象とした。

深度毎のデータ数

深度約100m: 31地点

深度100－150m: 33地点

深度150－200m: 11地点

深度200－300m: 9地点

深度300m: 2地点

最深設置深度: 504m（茨城県ひたちなか市）

KiK-net（防災研）の観測データを使用。

地下における「ゆれ」は地上における「ゆれ」よりも、小さい。

「ゆれ」の影響②-1:

地上施設の遮へい壁の耐震性に関する裕度の検討

■ 予定される設計

- ・ 厚さ1m以上の鉄筋コンクリート壁による遮へいと耐震性の確保
- ・ 敷地境界からの建屋の離隔

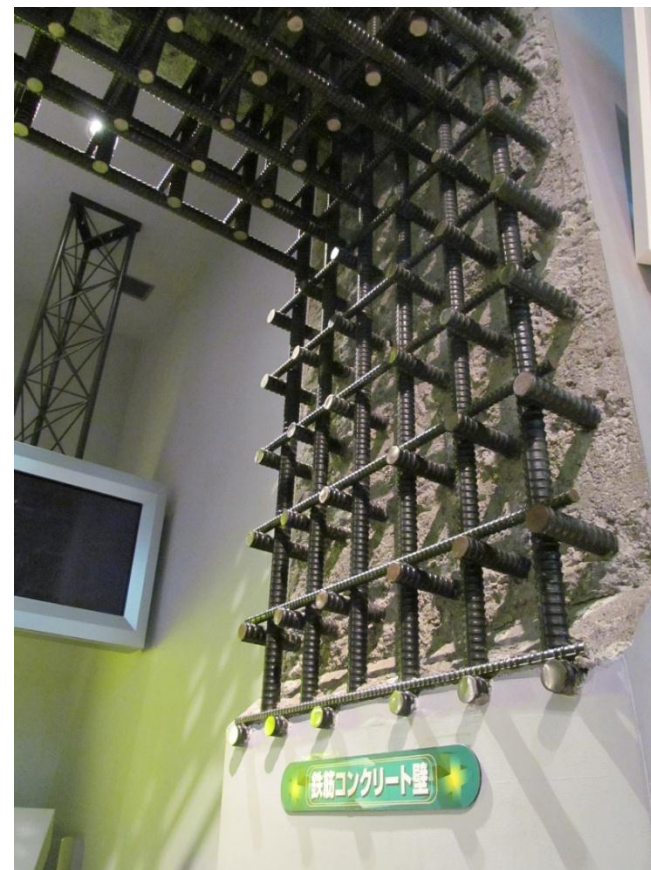
■ 安全裕度の検討

- ・ 遮へいのために壁厚をかなり厚くする必要があり、その厚さが耐震に必要な壁厚を上回る可能性が高い。
- ・ 仮に設計想定以上の地震時に許容限界を超える変形が生じたとしても、ひび割れ面の凹凸のため、放射線は直接透過しない。

■ 万が一の事故

- ・ 解析によれば、多数の貫通ひび割れの発生により、遮へい機能が1/100になったとしても、敷地境界では線量当量限度である1mSv/y以下となる。

(ガラス固化体28本(受け入れ施設での仮置き数)を線源とし、敷地境界までの距離を200m以上とした。)



原子力施設の鉄筋コンクリート壁内部の配筋構造の実規模大模型
(日本原燃株式会社六ヶ所PR館に展示)

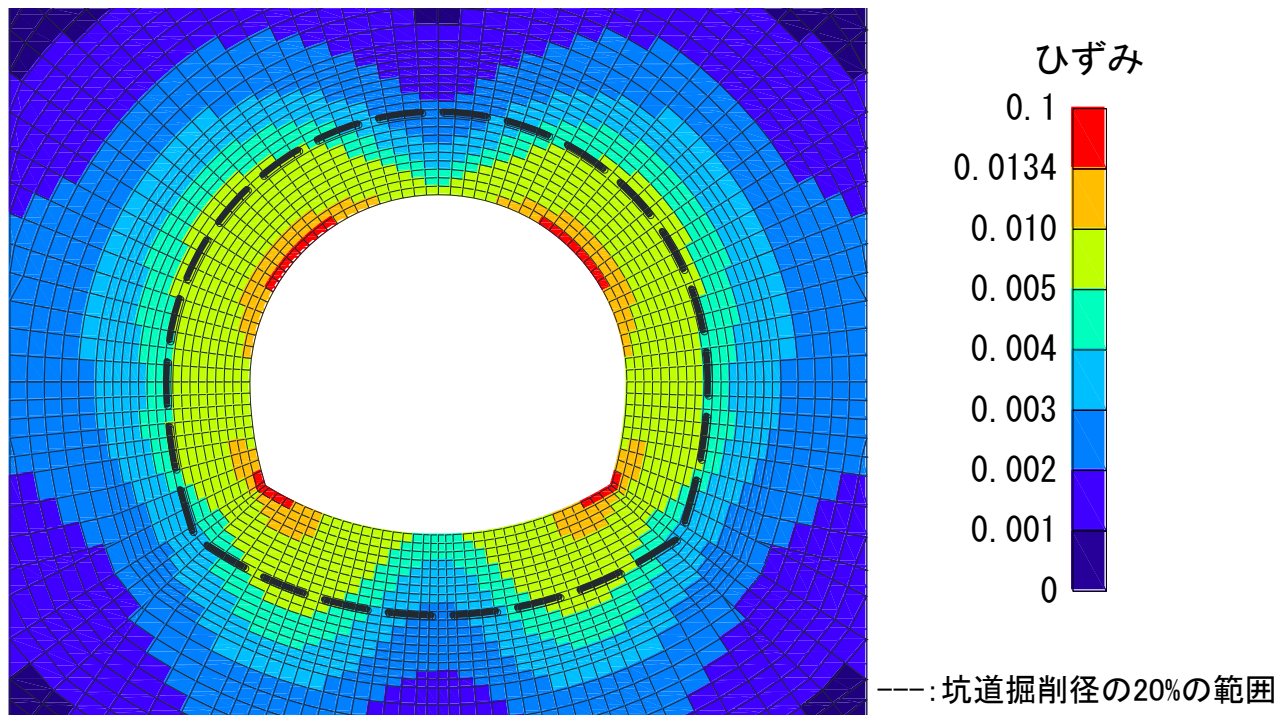
地上施設に対する地震の「ゆれ」の影響は小さい。

「ゆれ」の影響②-2:

東日本大震災の地震波データを用いた地下坑道安定性の解析例

検討用地震波概要

地 名		牡 鹿
マグニチュード		9.0
震央距離 (km)		121
観測位置		地表面 深度10mで
最大 加速度 (Gal)	南北方向	921
	東西方向	688
	上下方向	254



地震時の坑道周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布
(トンネル深度 500m, 断面図)

地震応答解析から得られる岩盤のせん断ひずみは局所的に「限界せん断ひずみ」(0.0134=1.34%)を超えるが、その範囲が坑道直径の20%の範囲に収まっているため問題とはならない。(鉄道トンネルの設計指針より)

地下施設に対する地震の「ゆれ」の影響は小さい。

(3) 活断層の「ずれ」の影響

- 断層は繰り返し同じ場所で活動する傾向にあるため、活断層と確認された場合には、サイト選定段階において施設の設置を避ける。地表から確認できない断層についても、地下調査施設などにおいて詳細な調査を実施する。
- 地殻の応力状態が安定している地域では、断層が新生する可能性は極めて低いとされる。
- なお、わが国の地震のほとんどは地下5km以深で発生しており、廃棄物の埋設深度にまで断層の「ずれ」が達することはまれであると考えられる。仮に新生しても「ずれ」がわずかであれば、緩衝材の物理的な緩衝性によりオーバーパックの破壊は回避できる。

(⇒「ずれ」の影響①)

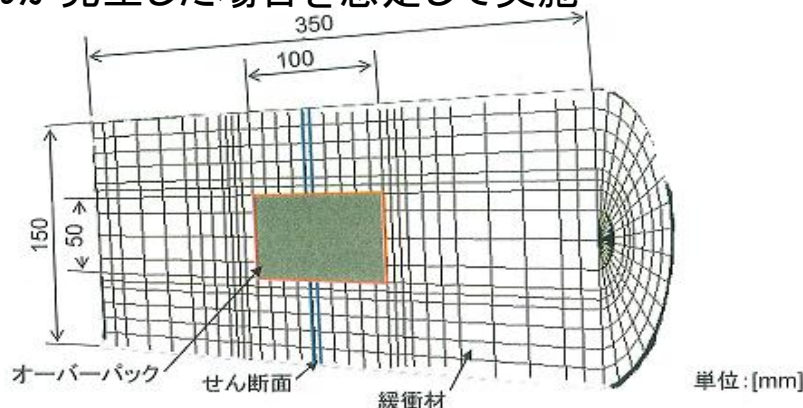
- 仮に新生した断層により、人工バリアの機能が喪失する状態を考慮しても、被ばく線量はわが国の自然放射線レベルを大きく超えることはない。

(⇒「ずれ」の影響②)

「ずれ」の影響①: 緩衝材の物理的緩衝性

処分場において断層によるずれが生じる場合を想定し、模型実験によりオーバーパックの破壊の可能性を検討した結果、一定の条件下では、緩衝材が変形の影響を緩和(物理的緩衝性)するため、オーバーパックは破壊されないことが確認できた。

処分坑道横置き方式における人工バリアの中央に、鉛直方向にオーバーパックの直径に対して80%の断層ずれが発生した場合を想定して実施

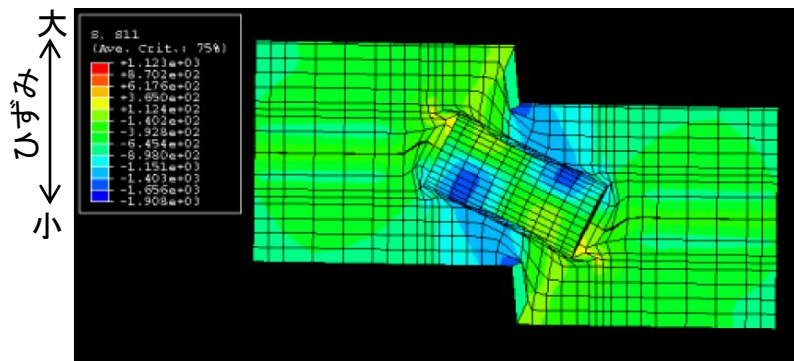


縮小模型実験の解析モデル(1/16スケール)



実験結果

せん断面の付近に応力は集中するが
オーバーパックが回転することにより、
破壊しない



解析結果

(核燃料サイクル開発機構, 2003, 断層ずれに伴う人工バリアの力学的挙動評価, JNC-TN8400-2003-009)

「ずれ」の影響②:

将来の断層の不確実性への対処

- 第2次取りまとめでは、断層の直撃により破壊されたガラス固化体約300本からの放射性核種のみによる被ばく線量を評価した。
- NUMOでは、断層の直撃により破壊されたガラス固化体約300本とその他のガラス固化体からの全放射性核種による被ばく線量を評価した。*

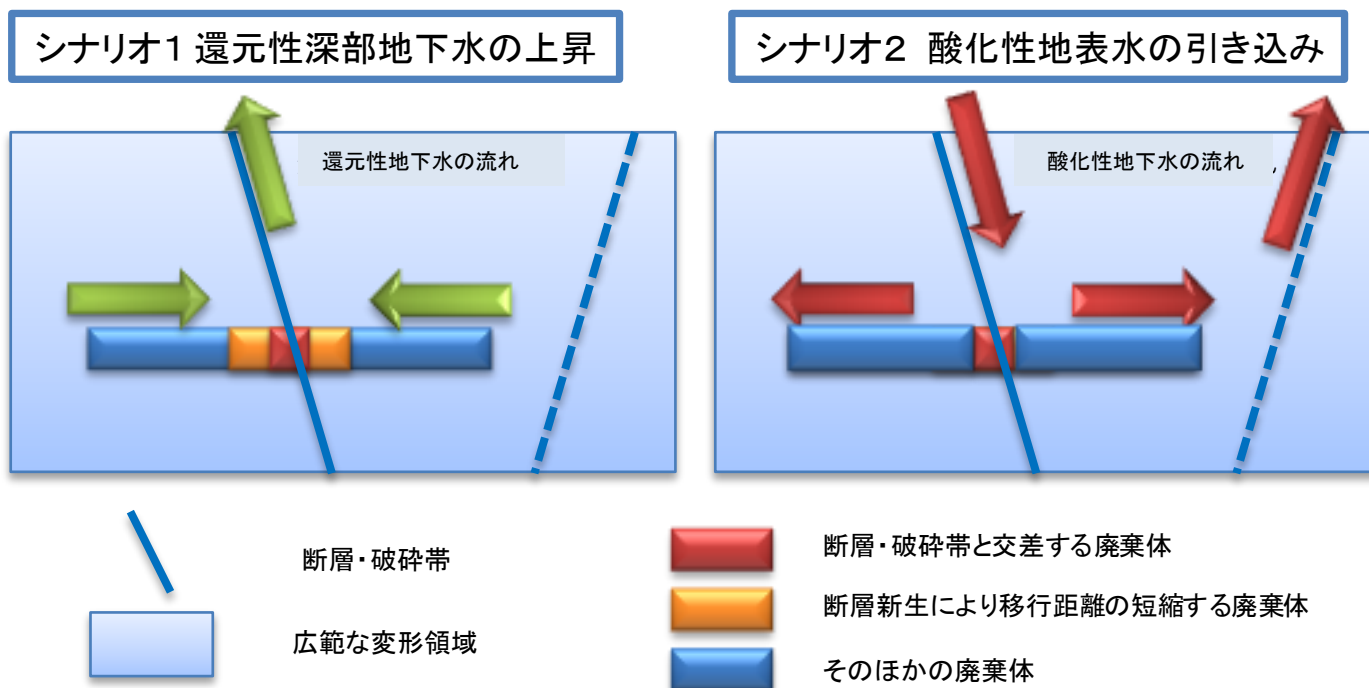
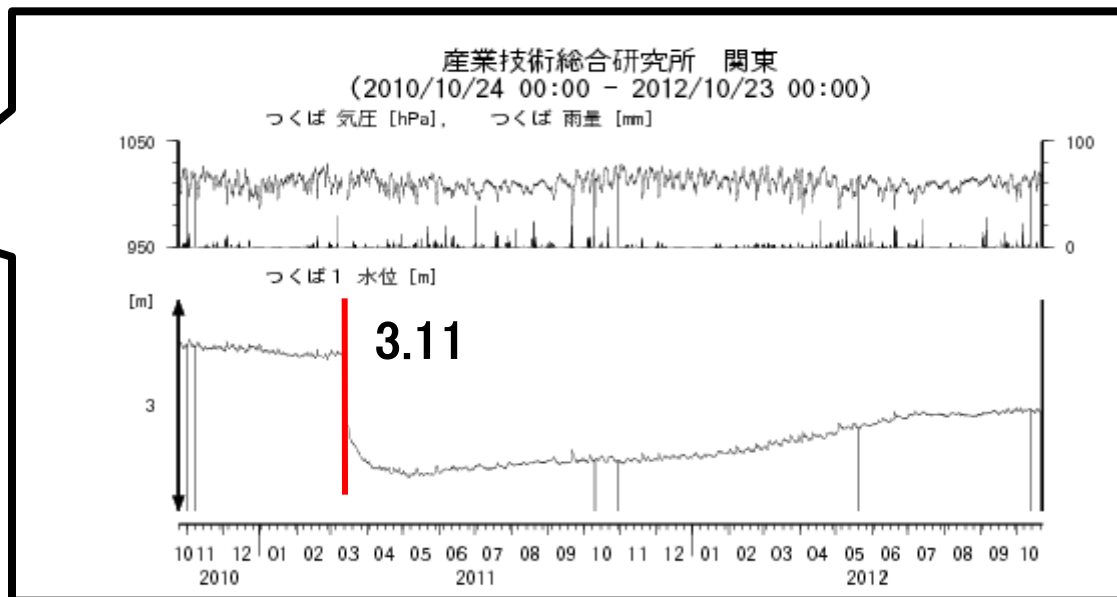
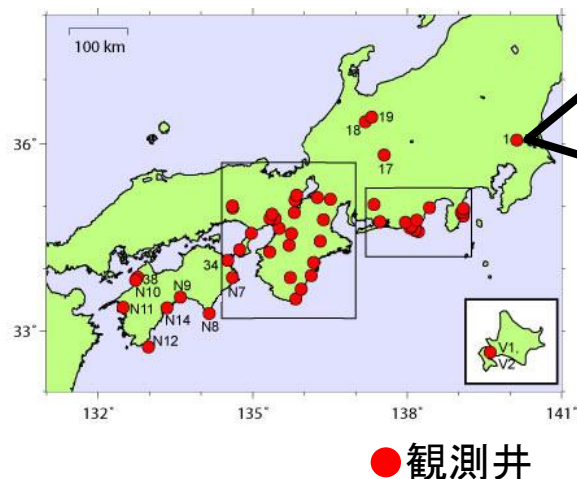


図 断層の活動性の予測が不確実な期間についての影響を検討

人工バリアが機能を失ったことを想定して安全評価を実施した結果、被ばく線量はわが国の自然放射線レベルを大きく超えないことが示された。

(4) 地下水の「流れの変化」の影響

地下水観測が継続して行われている観測井のうち、今回の地震の前後で水位変化があったつくばの例を示す。

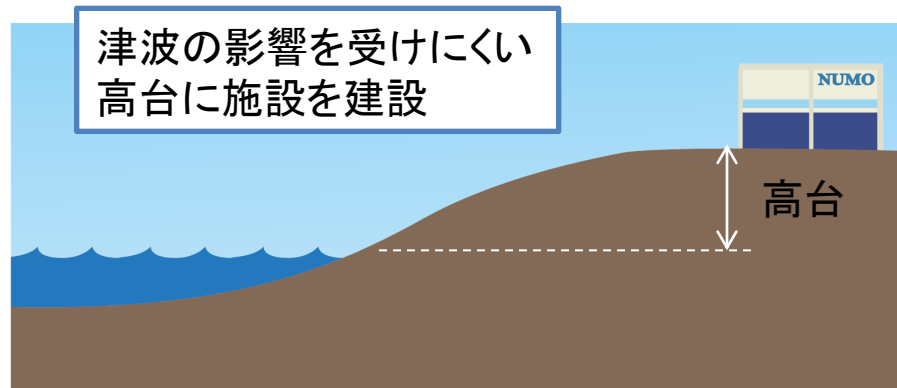


産業総合研究所, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/gxwell/cgi-bin/imageout.pl?lang=j&id=23&no=2>

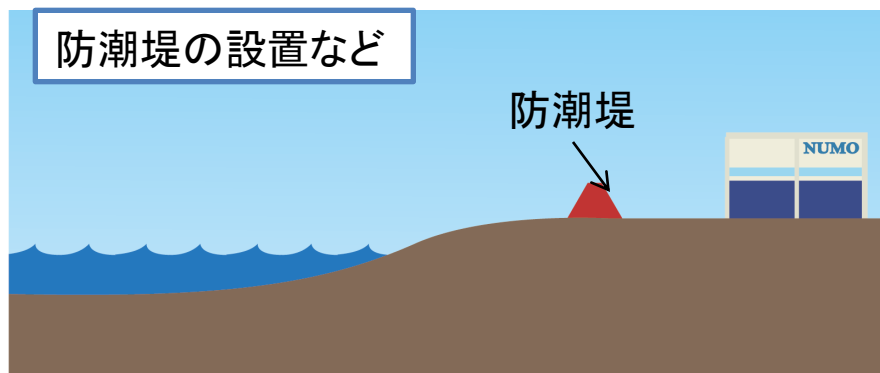
- ・兵庫県南部地震の際の湧水は地表付近の地下水であると推定されていること、また、釜石鉱山では、地震時に地下水圧の変化が生じても数週間で元の傾向に戻ることが観測されていることなどから、地下数百m以深にある処分場周辺の地下水への著しい影響は考えにくい。*
- ・ただし、今回の地震に伴う地下水位変化などのメカニズム解明により新しい知見が得られれば、それらが処分場に与える影響を検討することとしている。
- ・また、サイト選定にあたっては、最新の知見を踏まえ、地質条件の違いや地震による応力変化などの影響を考慮することで、処分場の安全性を確保できると考える。

(5)「津波」の影響

■ 予定される安全対策

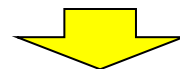


高台に立地できない場合には・・・

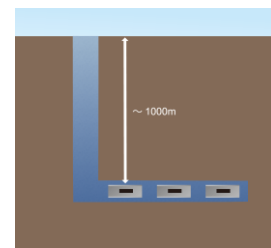


■ 安全裕度(想定を超える津波で施設が浸水した場合)

- 地上のガラス固化体取り扱い施設が水没しても、容器のステンレス製キャニスタが水密性を有する。
- オーバーパックは埋設される深度の地下静水圧以上の圧力に耐えられるように設計されるので、地下坑道において水没しても、その水密性は保たれる。*



周辺への放射線影響はない



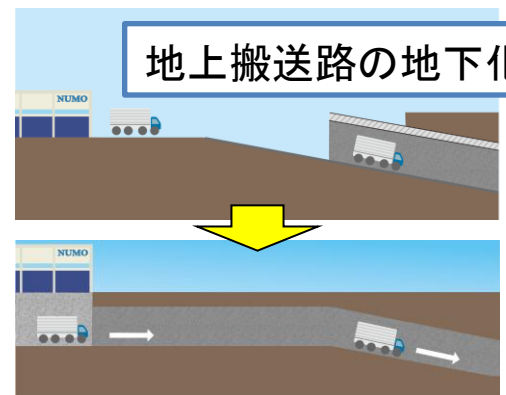
■ 対策の強化のポイント

水密扉の設置



東北電力東通原子力発電所
「PSつうしん」2012年4月26日号より

地上搬送路の地下化



地域の条件に合わせて適切な対策を実施する。

4. まとめ(1/2)

- 1999年に、20年を超える国内の研究開発成果や海外で得られている知見などを取りまとめた報告書「地層処分研究開発第2次取りまとめ」(総ページ数約2,300ページ)が公表された。その中で、変動帯に位置するわが国でも、地層処分が技術的に実現可能であり、地層処分の成立条件を満たす安定な地質環境が広く存在することが示された。
- 取りまとめの過程においては、国際機関によるレビューの他、国内外の専門家によるレビュー、さらに専門家や一般の方々への報告会が1年間にわたり複数回実施され、それらの結果が報告書に反映されている。
- 原子力委員会によって、「第2次取りまとめにおいて地層処分の技術的信頼性が示されているとともに、地層処分の事業化に向けて処分予定地の選定と安全基準の策定に資する技術的拠り所となる」と評価された。

4. まとめ(2/2)

- NUMOはこの第2次取りまとめを受け、事業者の立場から「操業期間中の安全確保」と「閉鎖後長期の安全確保」を2つの方針として、サイト選定から建設・操業・閉鎖までの各段階における事業の進め方について報告書(地層処分事業の安全確保-2010年度版-)に取りまとめた。
- NUMOは東日本大震災を契機として、地層処分事業の安全確保について再確認している。
 - ・ 事業期間中に関しては、安全裕度を十分に有した施設の設計が可能であるため、過酷な事故は起こらず、起こったとしてもその周辺への影響は限定的である見通しを得ている。
 - ・ 閉鎖後長期に関しては、震災後に示されている地震動や断層評価等の最新知見を踏まえても、安定な地質環境の選定と多重バリアシステムの適用等からなる従前の安全確保策により安全性が確保できる見通しを得ている。
- 今後、新たな知見が得られれば、安全確保策の妥当性を確認し、必要に応じて適宜見直していく。