

原子力発電環境整備機構(NUMO)における 技術開発の現状について

2017年5月

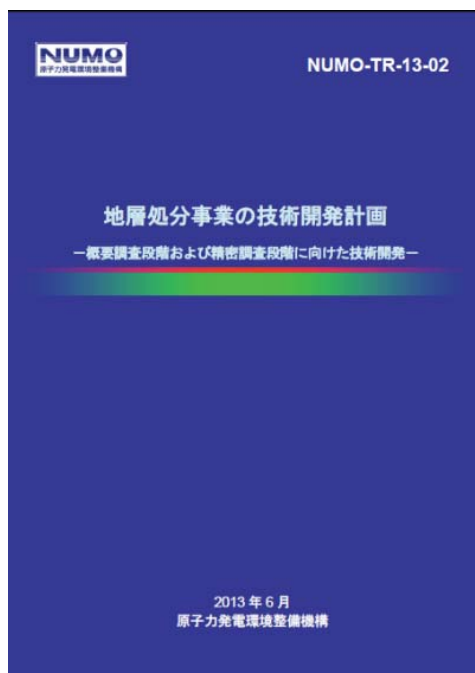
原子力発電環境整備機構(NUMO)

NUMO中期技術開発計画(1/4) -位置づけ-

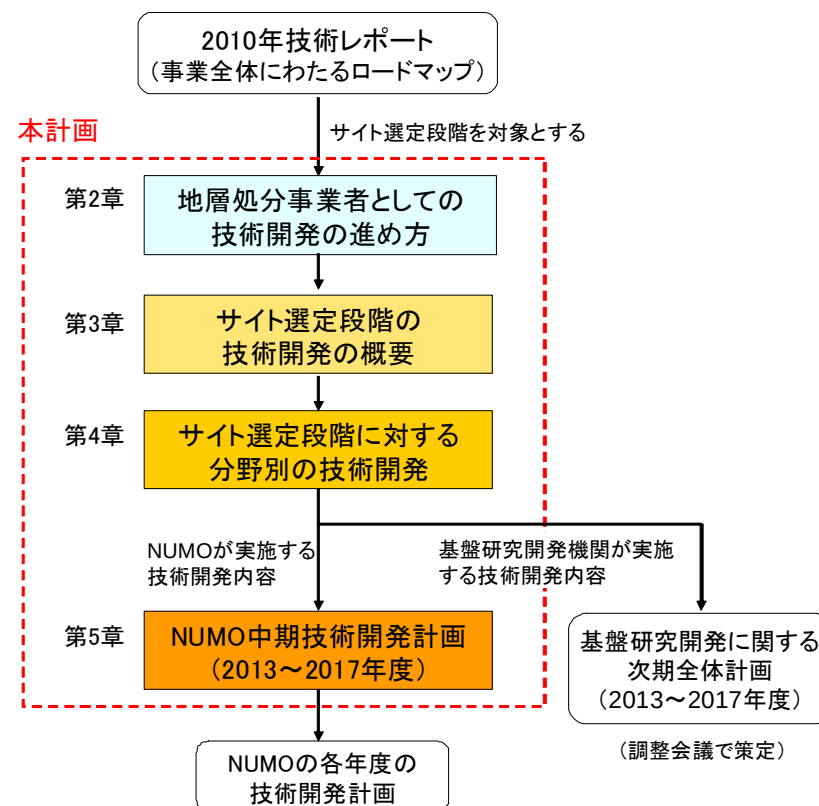
✓地層処分事業に向けた技術開発を確実にかつ効率的に推進するため、

- 概要調査段階および精密調査段階に向けた技術開発のマネジメントに関するNUMOの考え方
- NUMOおよび基盤研究開発機関などの技術開発の方向性

を示すことを目的に、中期的な技術開発計画「地層処分事業の技術開発計画」を策定し、2013年6月に公表。その後、技術開発の状況等を踏まえ、適宜、見直しを実施。



http://www.numo.or.jp/technology/technical_report/201316010406.html



「地層処分事業の技術開発計画」の構成

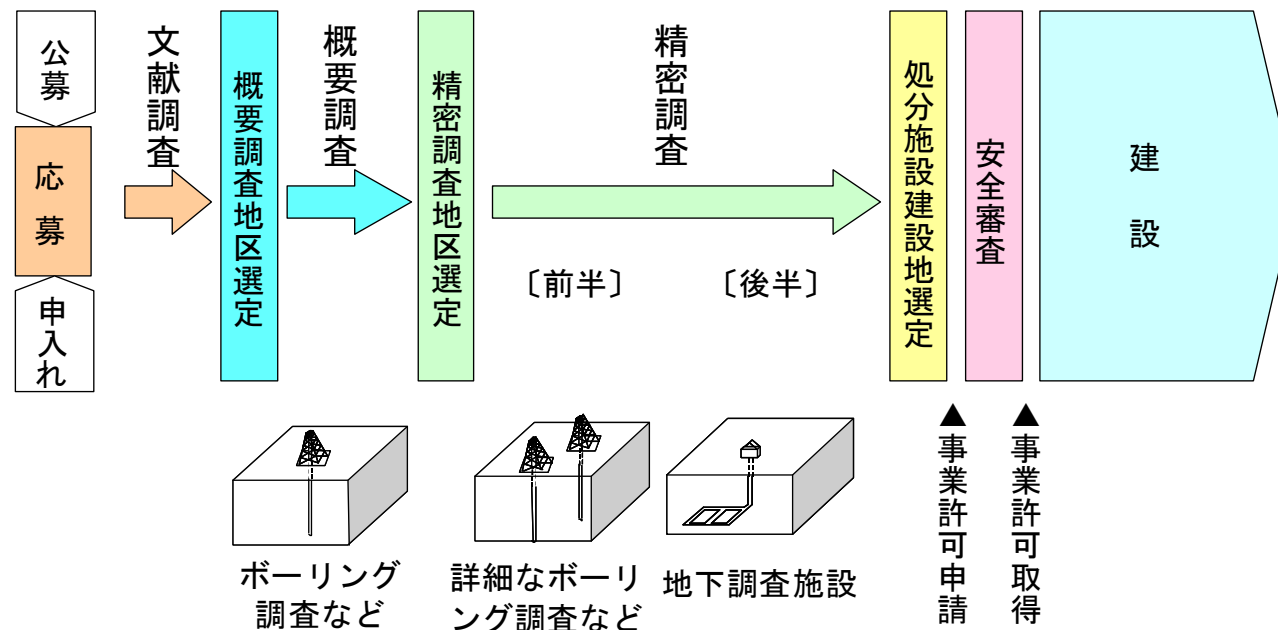
NUMO中期技術開発計画(2/4) -技術開発スケジュール-

✓技術開発スケジュール

➤ 至近に文献調査が開始され、順調に概要調査、精密調査へと進捗したとしても、事業に必要な技術が遅滞なく準備できるよう、以下のスケジュールを設定して、ジェネリックな技術開発（地域を特定せず、幅広い地質環境条件に共通的に必要となる技術開発）を実施。

- ・概要調査段階に向けた技術開発 : 2013年度頃に終了
- ・精密調査段階（前半）に向けた技術開発 : 2017年度頃に終了
- ・精密調査段階（後半）に向けた技術開発 : 2021年度頃に終了

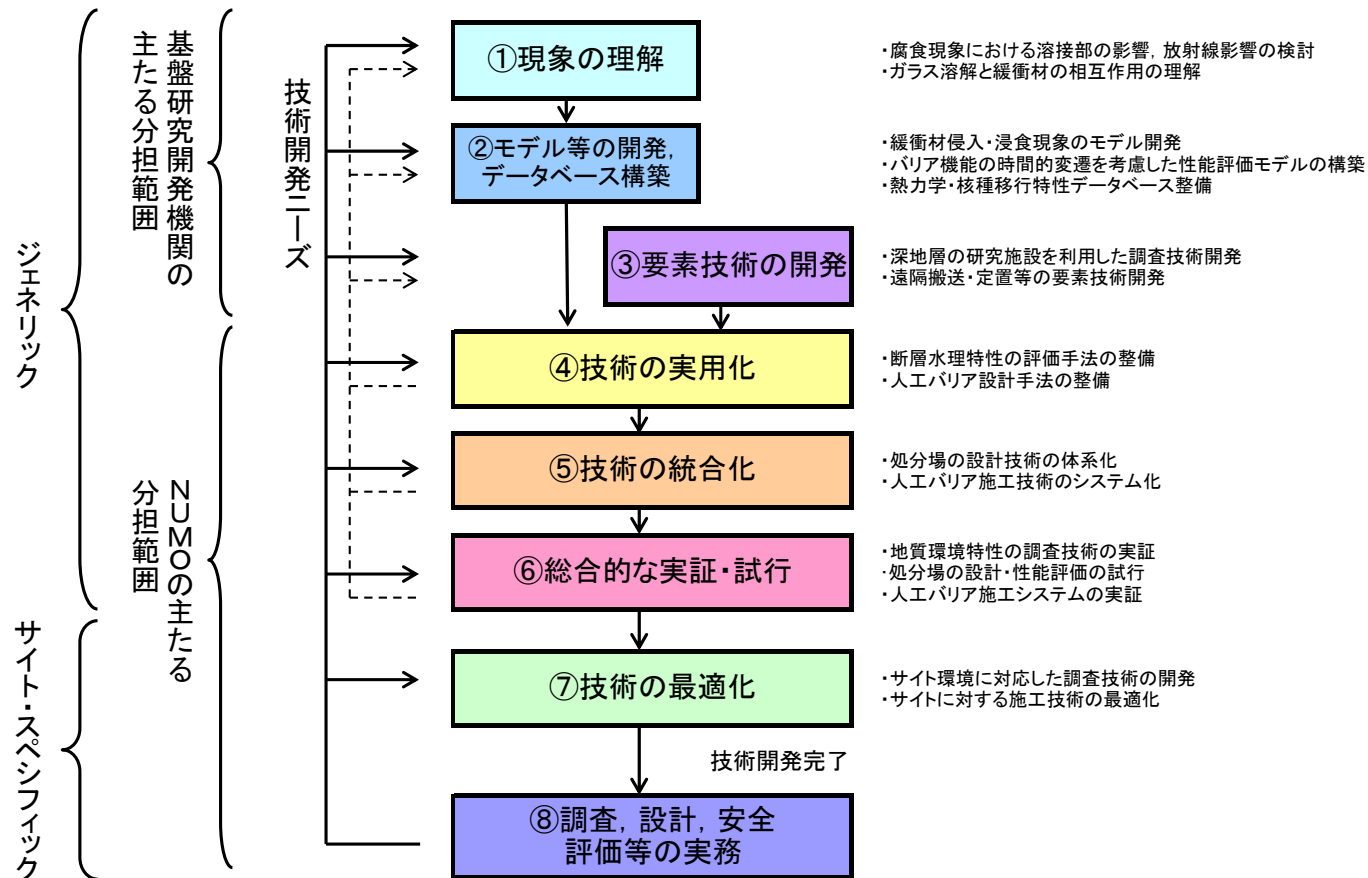
➤ サイト・スペシフィックな技術開発（特定の地域における地質環境に応じて必要となる技術開発）については、文献調査が開始され、サイト条件が特定された後に実施。



NUMO中期技術開発計画(3/4) -基盤研究開発機関との分担-

分担の基本的考え方

- ✓ 基盤研究開発機関：最終処分安全規制・安全評価のために必要な研究開発、深地層の科学的研究等の基盤的な研究開発及び最終処分技術の信頼性の向上に関する技術開発等
 - 現象の理解、モデル等の開発、データベース構築、要素技術の開発
- ✓ NUMO：最終処分事業の安全な実施、経済性及び効率性の向上等を目的とする技術開発
 - 技術の実用化、技術の統合化、総合的な実証・試行、技術の最適化、調査、設計、安全評価等の実務



※本図は、技術開発の基本的なプロセスを示したものである。実際には、プロセス間でのフィードバックや、各プロセスのスキップや統合があり得る。

■ 中期技術開発計画（2013年度～2017年度）の実施項目

1. 地質環境の調査評価

- (1) 自然現象の影響にかかわる技術開発
- (2) 地質環境特性の把握にかかわる技術開発

2. 工学的対策

- (1) 人工バリアの設計・施工にかかわる技術開発
- (2) 地下施設の設計にかかわる技術開発

3. 閉鎖後長期の安全性評価

- (1) 安全評価の実施技術にかかわる技術開発
- (2) 安全性の論拠の統合にかかわる技術開発

4. 事業期間中の安全確保

- (1) 安全設計にかかわる技術開発
- (2) 環境配慮にかかわる技術開発

5. 廃棄体とインベントリ

6. モニタリング

7. 事業推進にかかわる検討

1. 地質環境の調査・評価

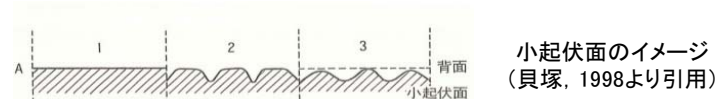
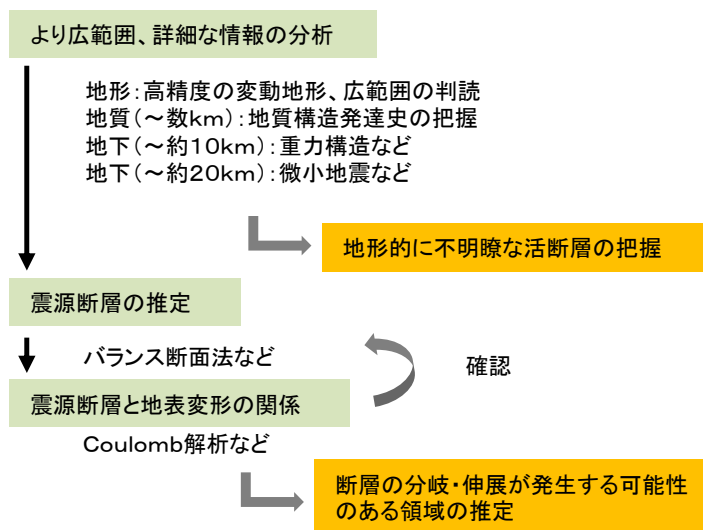
(1) 自然現象の影響にかかわる技術開発

□全体実施概要

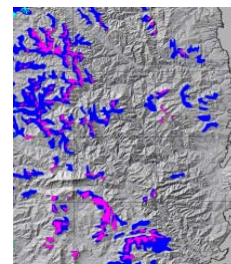
- ・地上からの精密調査技術の体系化として、隆起・侵食及び活断層について、より詳細な調査手法を用いた精度の高い評価に向け、概要調査の段階における適用を念頭に開発した技術をさらに改良する。

□主な成果

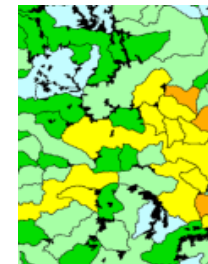
- ・侵食小起伏面などの地形情報を用い、山地単位(数十～数百kmスケール)の長期的な隆起・侵食量の評価手法を検討した。その結果を踏まえ、地殻変動傾向の不均質性に着目し、法定調査区域(数kmスケール)の長期的な隆起・侵食量の評価手法の整備を進めている。
- ・地形的に不明瞭な活断層の把握や断層の分岐・伸展が発生する可能性のある領域を推定することを目的として、比較的広範囲の地表の変動地形並びに地下深部の地質構造や地震に関する情報などの、これまでより広範囲かつ詳細な情報の分析により、震源断層を推定するとともに、震源断層と地表変形との関係を解析的に検討する評価手法の整備を進めている。



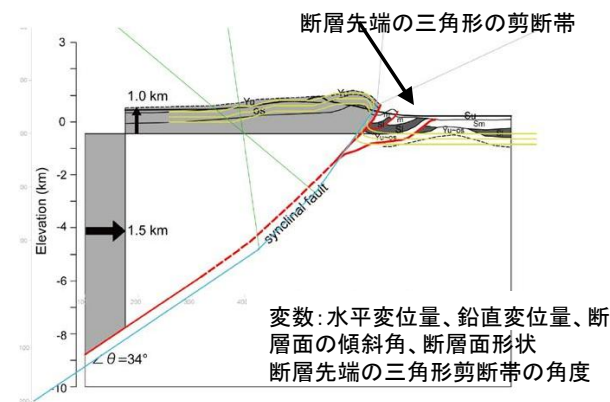
小起伏面のイメージ
(貝塚, 1998より引用)



小起伏面の評価(赤:再判定 青:従来)→この範囲(山地スケール)の過去の標高



山地スケールの過去の標高と現地形等から推定した小流域毎の侵食速度分布
・緑-薄緑-黄色の順に侵食速度が速い。
・黒色:小起伏面分布。



バランス断面法により解析の一例

- 断層変位前後で各地層の面積が一定という条件の下、変動地形に整合するように、水平変位量と地下の断層面の形状を推定する。
- 簡易な面積バランス法(求めた断層面形状は赤色の線)に加えて、断層先端の三角形の剪断帯を扱える手法(求めた断層面形状は水色の線)を実施した。

1. 地質環境の調査・評価

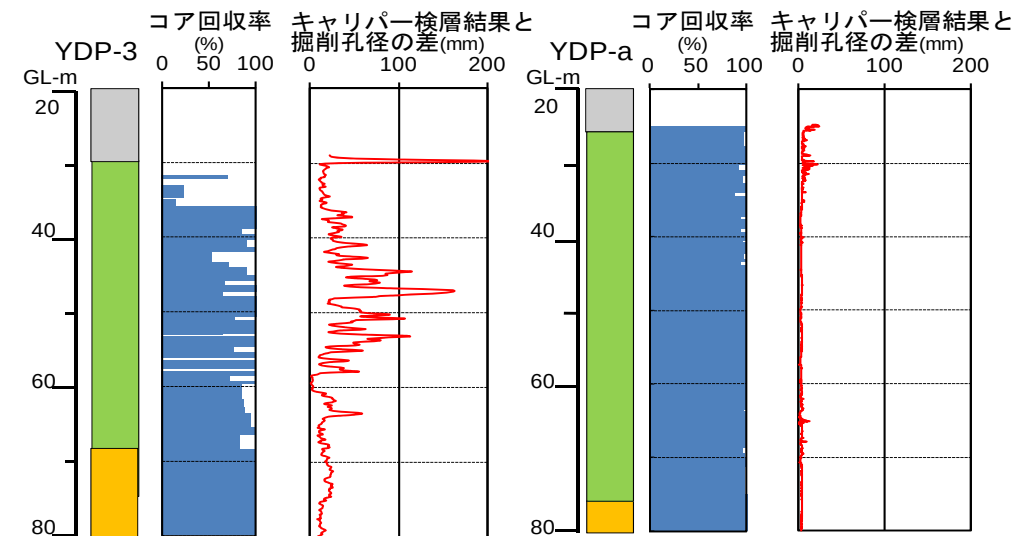
(2) 地質環境特性の把握にかかわる技術開発

□全体実施概要

- ・処分施設建設地選定上の考慮事項の策定、および地上からの精密調査の計画を立案するための技術・知見を整備する。
- ・ボーリング孔間の物理探査や水理試験の技術、ならびに断層の力学的・水理的な影響の調査・評価技術の原位置での技術の確認・実証を行うとともに、地上からの調査技術の体系化を行う。
- ・地上からの調査の情報・品質管理技術を整備する。

□主な成果

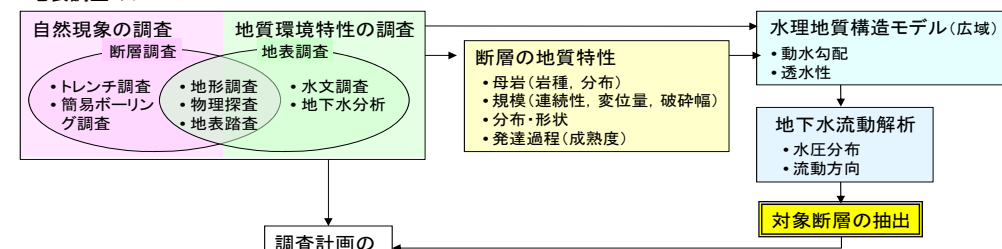
- ・地層の著しい変動や非火山性熱水の影響に係る考慮事項を検討するとともに、火山性熱水・深部流体に係る最新の知見を収集・整理した。また、地質環境の熱・水理・力学・物理特性データベースを整備した。
- ・実務的手引書の拡充・更新を図り、概要調査計画策定を試行した。また、沿岸海域を対象とした調査技術に係る技術的情報を取りまとめた。
- ・横須賀実証研究を通じて、付加体の堆積岩中に地層処分に適した地層の分布を確認するとともに、技術課題として特定された、脆弱な堆積岩層を対象とした安定なボーリング孔掘削およびコア回収率の確保のために、最適な泥水・掘削手法の選定の見通しを得た。
- ・既往事例を基に構築した断層の水理特性の調査・評価の基本的な考え方・進め方に従い、米国バークレー周辺の新第三紀堆積岩中の断層を対象に物理探査やボーリング調査などを実施し、その結果を踏まえて調査・評価フローを整備した。
- ・概要調査の段階に適用する品質管理の手引書を整備するとともに、横須賀実証研究で取得したデータの品質評価を通じて、品質保証の考え方や基準を策定した。また、GISを活用した地質環境情報・品質マネジメントに係る技術・ノウハウの移転を進めている。



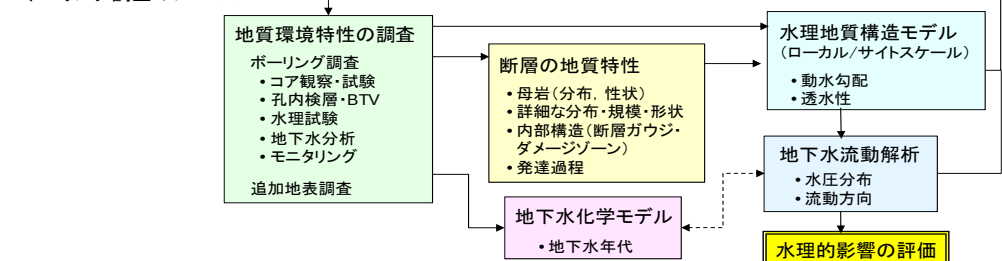
地質凡例： 沖積層 葉山層群起源の二次堆積物 三浦層群三崎層

脆弱な堆積岩層を対象とした新たな掘削手法の適用
(左(YDP-3孔)：従来の手法, 右(YDP-a孔)：新たな手法)

地表調査のフェーズ



ボーリング調査のフェーズ



断層の水理特性に関する調査・評価フロー

2. 工学的対策

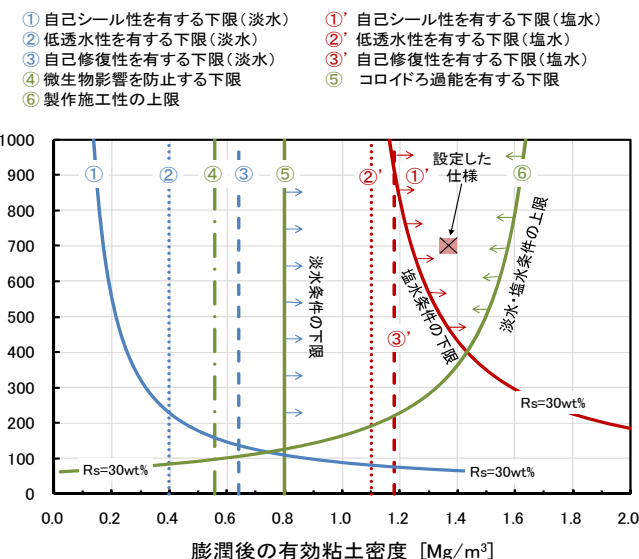
(1) 人工バリアの設計・施工にかかわる技術開発

□全体実施概要

- ・人工バリアの長期挙動に関する科学的知見や施工技術オプションの開発成果を踏まえ、人工バリアの材料選定や仕様設定に必要な要件と判断指標を網羅的かつ体系的に整備し、設計の具体的手順と方法を明確にする。
- ・過渡期の不確実性を低減させる観点から、閉鎖後一定期間の閉じ込め機能を確保したTRU廃棄体パッケージの仕様を安全性の論拠とともに示す。
- ・人工バリア施工技術オプションの技術的な比較検討を実施し、実現性や安全性に加え、回収のやり易さなども考慮して、有望な施工技術の方法と手順を設定する。

□主な成果

- ・人工バリアの設計要件への適合性を判断する指標を設定し、仕様成立範囲を提示した。また、淡水系地下水や塩水系地下水の場合など、多様な地質環境への対応を考慮した人工バリアの設計を試行した。試行した人工バリアの設計を基に、自重沈下、オーバーパックの腐食膨張、地震動による影響などについて評価し、人工バリアの安全機能が長期にわたり維持できる見通しを得た。
- ・TRU廃棄物*に対する廃棄体パッケージの安全機能に影響を与える要因とそれに伴う影響事象を抽出し、その対処に必要な事項を設計要件に追加した。これらの要件に基づき操業期間中の安全性の向上を目的とした設計オプションの可能性について検討し、操業中に加えて閉鎖後300年程度の機能確保が期待できる廃棄体パッケージの仕様を示すことができた。
- ・高レベル放射性廃棄物処分の廃棄体の搬送定置技術として、縦置き・ブロック方式、横置き・原位置施工方式、横置き・PEM定置方式について、技術オプションの比較評価に必要な論拠整備を行い、工学実現性、閉鎖後長期安全性の観点から特徴付けを行った。さらに、縦置き方式、横置き・PEM方式をについて、廃棄体回収方法および手順の検討を実施し、工学的な実現可能性の見通しを示した。



多様な環境条件を考慮した緩衝材の仕様成立範囲
(縦置き・ブロック方式)



縦置き方式



横置き・PEM方式

廃棄体回収技術の検討例

* 再処理工場やMOX燃料製造工場の操業及び解体に伴って発生する低レベル放射性廃棄物のうち地層処分の対象となる廃棄物

2. 工学的対策

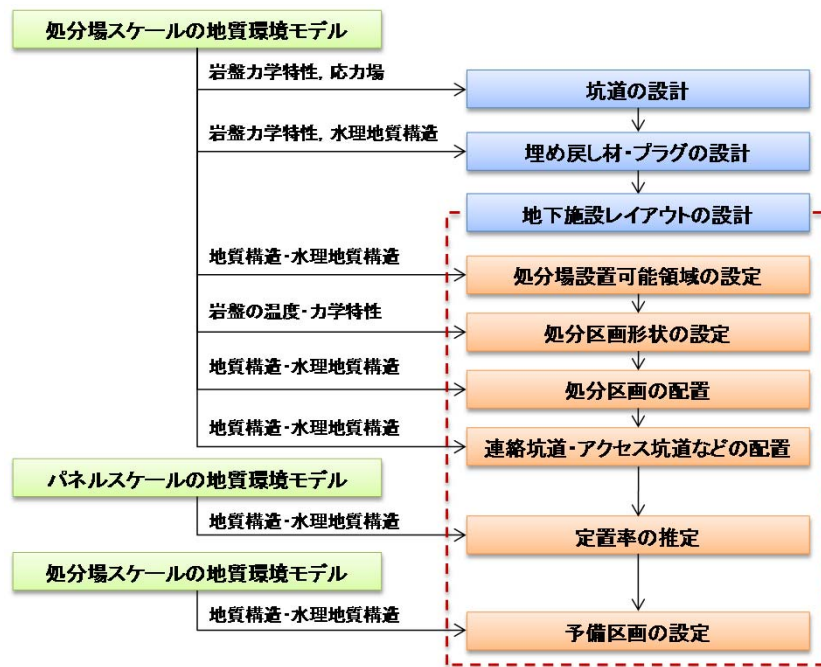
(2) 地下施設の設計にかかわる技術開発

□全体実施概要

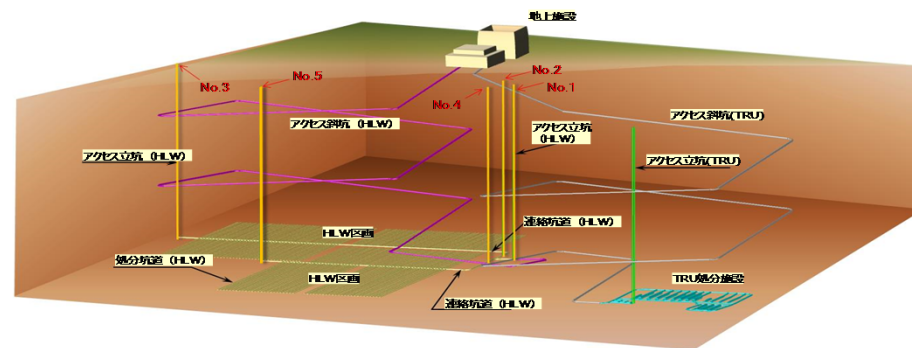
- ・多様な地質環境に柔軟に対応した処分場の設計が可能であることを示すことを目的として、地下施設が所要の安全機能を確保するための設計の考え方、手順および方法を体系的に整備する。
- ・地下施設設置に好ましい候補母岩を選定するための要件および廃棄体の定置可否に関する判断基準と対応策を整備する。
- ・坑道断面、坑道配置、パネルの数・形状・方向、アクセス坑道の配置など地下施設レイアウト設計に必要な要件を明確にし、地質環境情報の拡充に応じた対応と安全評価との連携試行を通じて、設計方法の妥当性を確認する。

□主な成果

- ・現実的な地質環境に対応した地下施設の設計手法として、断層の分布を考慮したレイアウトの判断指標、割れ目からの湧水を考慮した廃棄体定置の判断指標を導入し、既存知見に基づいた基準値の目安を設定した。
- ・サイト選定で想定される三種類の候補母岩を対象として、処分場の設計を試行し、所要の設計要件を満足する処分場の仕様を提示した。地下施設については、地質環境に応じた柔軟なレイアウトの設計が可能であり、設計オプションの得失を把握することができた。また、建設と操業を同時並行で実施しても作業環境が維持できる設計例を構築することができた。
- ・これを基にプラグや埋め戻し材等の坑道シーリングシステムを検討して、その有効性を評価した。



地下施設の設計フロー



処分場のレイアウト例

3. 閉鎖後長期の安全性評価

(1)安全評価の実施技術にかかわる技術開発(1/2)

■全体実施概要

シナリオの構築手法や処分システムの長期挙動(状態変遷)に関する評価方法, 人工バリア/天然バリア/生活圏における核種移行モデル, および核種移行データベースを整備する

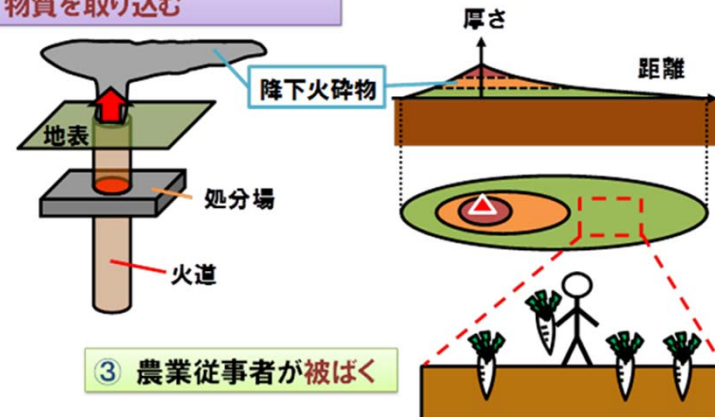
- ・シナリオの分類やその分類に応じたシナリオ構築手法の整備
 - ・シナリオ設定の論拠情報となるFEPの整備
 - ・核種移行を体系的に評価するモデル(モデルチェーン)の整備
 - ・処分システムの長期挙動(状態変遷)に関する解析の信頼性向上
 - ・地質環境や地下水水質の多様性を考慮した核種の溶解度, 収着分配係数, 実効拡散係数に関するデータベースの拡充
 - ・核種移行評価(水理・物質移動評価)の高度化
 - ・生活圏評価モデルの高度化
- 等の実施

■主な成果

- ・基本シナリオおよび変動シナリオを対象として, FEPに基づくボトムアップ・アプローチと安全機能を軸としたトップダウン・アプローチを統合したハイブリット・アプローチによる「シナリオ解析手法」を構築した。
- ・OECD/NEAの国際FEPをベースとしたNUMO-FEPを整理した。
- ・人間侵入シナリオや**自然事象を対象とした稀頻度事象シナリオの検討**, およびそれらシナリオに応じた安全評価の手法を検討した。
- ・三次元地下水流動・粒子追跡解析コードPartridgeを用いて, **ニアフィールド母岩の割れ目の特徴や透水性の分布を考慮した核種移行解析手法**を構築した。これに関しては, Partridgeの品質確認のため, 同様の機能を有する別の計算コードによる検証計算を実施し, 妥当性を確認した。
- ・NUMOの安全評価解析におけるモデルチェーンと主要なデータセットの流れを示した。

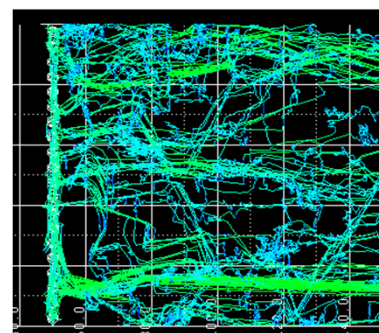
① 閉鎖後10万年後に処分場に貫入したマグマが放射性物質を取り込む

② マグマが地表に噴出し噴出物(火山灰)として堆積



自然事象を対象とした稀頻度事象シナリオの検討

Partridgeによる粒子軌跡算出例



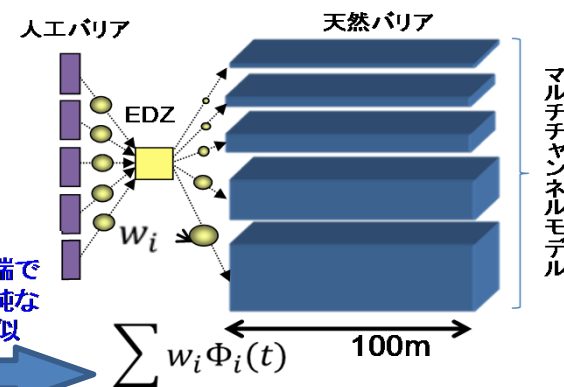
三次元核種移行解析結果

$\Phi_{3D}(t)$

複雑な移行経路を下流端での破過挙動の等しい単純な一次元流路の集合で近似

フィッティングにより亀裂チャンネル毎の重み w_i を決定し, 三次元核種移行解析の結果を反映

各チャンネルへの核種フラックスの配分=重み



$\Phi_i(t)$: 透水量係数の異なる亀裂チャンネルでの核種移行率

ニアフィールド領域の透水性の分布を考慮した核種移行解析手法の構築

3. 閉鎖後長期の安全評価

(1)安全評価の実施技術にかかわる技術開発(2/2)

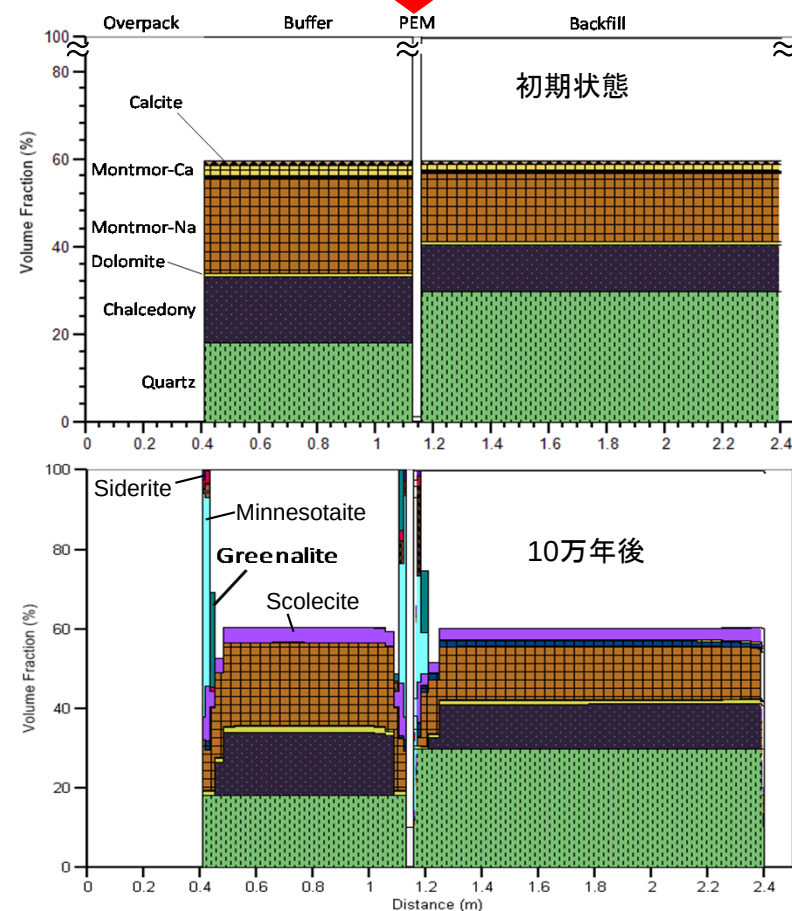
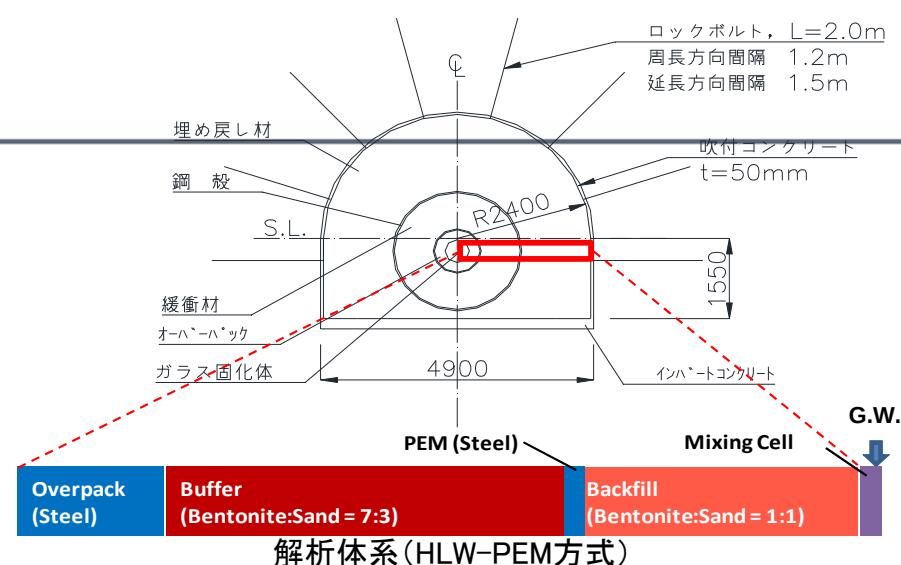
■全体実施概要

シナリオの構築手法や処分システムの長期挙動(状態変遷)に関する評価方法、人工バリア/天然バリア/生活圏における核種移行モデル、および核種移行データベースを整備する

- ・シナリオの分類やその分類に応じたシナリオ構築手法の整備
 - ・シナリオ設定の論拠情報となるFEPの整備
 - ・核種移行を体系的に評価するモデル(モデルチェーン)の整備
 - ・**処分システムの長期挙動(状態変遷)に関する解析の信頼性向上**
 - ・地質環境や地下水水質の多様性を考慮した核種の溶解度、収着分配係数、実効拡散係数に関するデータベースの拡充
 - ・核種移行評価(水理・物質移動評価)の高度化
 - ・生活圏評価モデルの高度化
- 等の実施

■主な成果

- ・オーバーパックやセメント系材料との相互作用による緩衝材の状態変遷の評価に関して、最新の知見に基づき化学反応－物質移動連成解析における諸パラメータを整理、解析を行い、**緩衝材の変質は他材料と接触する界面近傍に止まり、大部分は安定に存在することの見通しを得た。**
- ・堆積岩類の実効拡散係数や収着分配係数のデータを拡充するため、泥岩や砂岩等のデータ収集、また劣化したセメント系材料、Ca型化したベントナイトに関するデータ収集(文献調査や直接実験により)を実施した。得られたデータに関しては核種移行データベースの拡充・更新に反映する。
- ・現行のレファレンスケースとしての生活圏評価(地形:平野、地下水:陸水系)のためのデータを整備した。また、具体的なサイト条件が明らかになる場合の準備として、サイト環境に依存した生活様式や市場稀釈の取扱いをより詳細に評価できる生活圏評価モデルの高度化を進めている。



オーバーパックやセメント系材料との相互作用による緩衝材の状態変遷の評価(HLW-PEM方式での解析結果の例)

3. 閉鎖後長期の安全評価

(2)安全性の論拠の統合にかかわる技術開発

■全体実施概要

➤セーフティケース構築のための安全性の論拠の整備

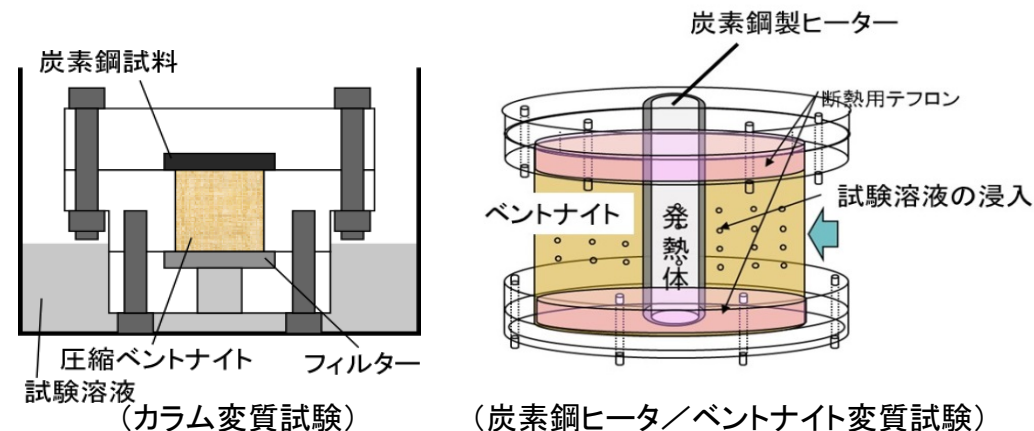
人工バリアシステム(ガラス固化体, オーバーパック, 緩衝材等)の長期挙動に関する現象理解における不確実性の低減(データの拡充)と, それを踏まえた安全評価の高度化(シナリオ, モデル, 核種移行データ等の設定に関する信頼性の向上)。

➤安全評価の品質保証体系の構築

安全評価のシナリオ設定の透明性および追跡性の確保, 評価に用いる解析コードの検証, および核種移行データ設定に関する品質管理に関する方法論の構築

■主な成果

- ・シナリオに応じた解析ケース設定の判断プロセスの透明性・追跡性を確保するため方法論の検討を進めている(JAEAとの共同研究)。
- ・人工バリアシステムの長期挙動評価に関するモデルの高度化や現象理解の不確実性の低減に関して, ①ガラスとオーバーパック, ②**オーバーパックと緩衝材**, ③**緩衝材とセメント系材料との相互作用に関する長期的な試験を開始した**(JAEAとの共同研究)。
- ・核種移行データ設定に関しては, 地層処分環境条件に適合する実測データ群を核種移行データベースから抽出して, 統計分析からデータ設定する方法論を構築した。
- ・地層処分環境で生起する事象に関する情報(論拠となる科学的知見)の整理の一環として, **NUMO-FEPの整備**を進めている。



オーバーパックと緩衝材の相互作用による長期挙動評価試験

※カラム変質試験と炭素鋼ヒータを用いたベントナイト変質試験を組み合わせ, 変質挙動としてベントナイトの溶解速度, 変質鉱物の種類・生成速度等を評価

1	造山運動	16	腐食
2	地質構造の変形	17	高分子化合物の分解
3	地震活動	18	溶解
4	火山・マグマ活動	19	沈殿反応
5	熱水活動	20	化学的変質
6	広域的な侵食と堆積	21	微生物／生物を媒介するプロセス
7	続成作用	22	ガス相の形成
8	気候変動	23	水の輸送
9	放射線分解	24	パイピング／流出
10	放射線損傷	25	材料の体積変化
11	熱プロセス	26	クリープ
12	再冠水／脱飽和	27	未検出の母岩の特性
13	容器の変形	28	処分場による水理学的影響
14	容器の移動	29	処分場による力学的影響
15	水化学		

NUMO-FEPの整備

国際FEPリスト(OECD/NEA)を基に, わが国の地質環境条件, 地層処分システムの特徴を考慮し, NUMOとして安全評価において取り扱うFEPリストを抽出。



5. 廃棄体とインベントリ

□全体実施概要

- ・安全評価上支配的になる可能性のある核種の選定方法を事前に整備するとともに、重要核種の予備抽出を行なう。
- ・概念設計と予備的安全評価の実施に際しては、特に設計に大きな影響を与えるようなパラメータ等については、廃棄物発生者に対して要求事項を明示しておくことが重要であることから、受入基準を予備的に検討する。

□主な成果

- ・ガラス固化体等の核種インベントリを設定するとともに、閉鎖後長期および操業時に考慮すべき線量、発熱率等の観点で重要核種候補を抽出した。
- ・日本原子力学会での検討をもとに、逸脱／軽量固化体について影響評価を行い、埋設処分が可能であることを確認した。
- ・使用済燃料の再処理までの冷却期間の違いについて、熱等の影響が小さいことを確認した。

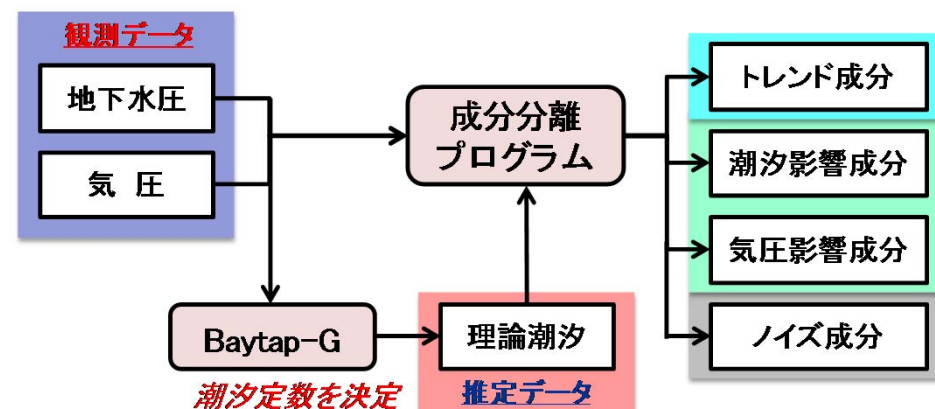
6. モニタリング

□全体実施概要

- ・事業の各段階におけるモニタリングの位置づけについて検討し、モニタリング期間、モニタリングの種類・方法などについて概略の計画を策定する。
- ・ボーリング孔の掘削が水理学的・地球化学的ベースライン条件に与える影響を把握する。
- ・地下水モニタリングデータの地球科学的な解釈を通じて、ベースラインを調査・評価する技術を整備する

□主な成果

- ・戦略・計画の具体化が必要となる時期、規制要件などの整備の見通し、モニタリング技術の現時点における充分性などの視点から、モニタリングを4群(地質環境に関する初期ベースラインの把握と建設・操業に伴う擾乱の把握に資するモニタリング、処分場の閉鎖後長期安全機能に関する性能確認に資するモニタリング、閉鎖後モニタリング、事業期間中の安全確保や法的要件への対応に資するモニタリング)にまとめるとともに、技術開発課題としての優先度を評価し、それらに基づいて今後の取り組み方針(案)を提示した。
- ・ボーリング孔の掘削に伴う地下水の水圧変化を、近接するボーリング孔に設置したモニタリング装置において観測した。
- ・地下水水圧のモニタリングデータについて、大気圧変動、潮汐変動などの影響成分の除去を行い、ベースラインを把握する調査・評価手法の有効性を確認した。また、モニタリング装置の故障、トラブル、これらの対策、およびメンテナンス計画についての知見を取りまとめた



影響成分分離のフロー

7. 事業推進にかかわる検討

□全体実施概要

- ・東北地方太平洋沖地震以降、地震・断層活動に対する安全性や、万が一の事態が発生した際の影響について懸念が示されていることを踏まえ、最新の科学的知見等を踏まえて上記懸念事項を中心に安全性を検討し、今後の技術課題を抽出する。
- ・地層処分事業が社会に受け入れられるために取り組むべき技術的方策を明確化する。

□主な成果

- ・「断層のずれ」の影響について、従来の保守的な断層評価モデルを見直し、実際の断層構造や断層の分岐・伸展に関する科学的知見を取り入れて、プロセスゾーンの透水性を考慮した断層の水理特性のモデル化を行い、状態設定に反映した。
- ・「地震に伴う地下水変化」の影響について、断層活動による岩盤圧縮に伴う地下水変化の影響について定量的な評価を行い、影響が小さいことを確認した。
- ・「地震動のゆれ」の影響について、従来より規模の大きな地震動を想定して三次元の耐震安定性解析を実施。長期挙動の影響評価手法を整備するとともに、地震に伴う断層のゆれが人工バリアに与える影響は極めて小さいことを確認した。
- ・回収可能性を維持する期間の延長に着目し、関連する技術的検討課題を抽出した。また、安全性や事業リスクの観点から、回収シナリオ（回収に至るまでの経緯等についての具体的な想定）を検討・整理した。