

次期全体計画の研究開発項目 (案)

2017年9月

原子力発電環境整備機構(NUMO)

研究開発課題の項目立ての考え方

基本的考え方

今後も事業の進展に応じて作成するセーフティケース※¹への反映を見据え、セーフティケースの主要要素に対応した研究開発課題の項目立てとすることが合理的。さらに、過去の研究領域との連続性も確保することが望ましい。

このため、研究開発課題は、以下のような項目立てとして整理してはどうか。

研究開発項目 (案)

地層処分基盤研究開発に関する全体計画（平成25年度～29年度）における研究開発分野の構造

HLW・TRU廃棄物の地層処分研究開発

- ・深地層を調査・評価する技術（地質環境調査評価技術分野）
- ・処分施設の設計や建設等の工学技術（処分場の工学技術分野）
- ・処分施設閉鎖後の安全性を評価する技術（性能評価技術分野）
- ・TRU廃棄物の地層処分に関する技術（TRU廃棄物処分技術分野）

使用済燃料の直接処分※²の研究開発

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

2. 処分場の設計と工学技術

3. 閉鎖後長期の安全性の評価

4. 中長期的に研究開発を進める上での重要事項（国際連携、技術マネジメント、代替処分オプション等）

1章：緒論

2章：安全確保の基本的考え方

3章：地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

4章：処分場の設計と工学技術

5章：閉鎖前の安全性の評価

6章：閉鎖後長期の安全性の評価

7章：わが国における地層処分の技術的信頼性

8章：結論

全国的な文献情報

検討対象とする母岩の設定

母岩の地質環境モデルの構築

処分場の設計の試行

安全評価の試行

・安全な地層処分の実現性の提示
・今後の技術開発項目の抽出

※¹ さまざまな科学技術的な論拠と証拠を示して、処分場の安全性が確かなものであることを説明する文書

※² 基本方針に基づき、幅広い選択肢を確保する観点から、国及び関係研究機関により実施

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化
 - (1) 自然現象の影響
 - (2) 地質環境の特性
2. 処分場の設計と工学技術
 - (1) 人工バリア
 - (2) 地上・地下施設
 - (3) 回収可能性
 - (4) 閉鎖前の安全性評価
3. 閉鎖後長期の安全性の評価
 - (1) シナリオ構築
 - (2) 核種移行解析モデル開発
 - (3) 核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備
4. 中長期的に研究開発を進める上での重要事項



研究開発課題の整理(案)

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(1) 自然現象の影響

□全体概要

- ・地質環境の長期安定性に影響を及ぼす可能性のある自然現象(火山・火成活動, 深部流体の移動・流入, 地震・断層活動, 隆起・侵食)について, 長期的に生じる影響に係る理解を深め, その調査・評価事例の蓄積を通じて調査・評価技術の高度化を図る。

＜火山・火成活動の発生および影響の調査・評価技術の高度化＞

- ・地殻～マントル内の地下構造の調査や数値シミュレーションを通じて, 地下のマグマの発生・上昇に係る既存のモデルの信頼性向上を図る。また, マグマの影響範囲の調査・評価技術について, 調査・評価の事例の蓄積を通じて高度化を図る。
- ・沿岸部海域を対象に, 陸域で有効性が確認された調査・評価技術の高度化を図る。

＜深部流体の移動・流入に係る現象理解および影響の評価技術の整備＞

- ・深部流体の移動・流入に係る調査・評価事例の蓄積を継続し現象理解を深め, その影響の評価技術を体系的に整備する。
- ・沿岸部海域を対象に, 陸域で有効性が確認された深部流体の有無等の調査・評価技術の高度化を図る。

＜地震・断層活動の活動性および影響の調査・評価技術の高度化＞

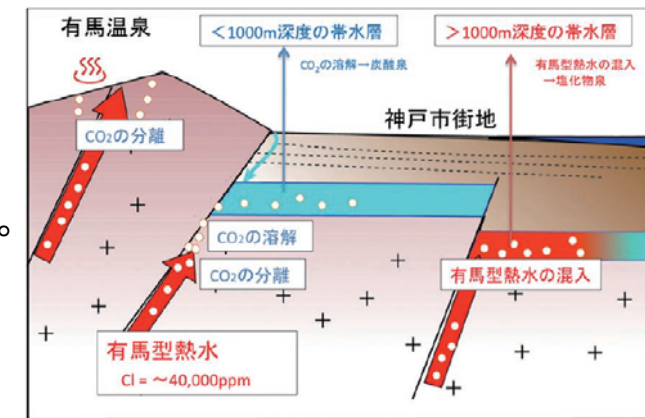
- ・地形的に不明瞭な活断層の分布・活動性, 上載地層がない場合の断層の活動性, 地震・断層活動の水理学的・力学的影響の調査・評価技術について, 従来の地形・地質学的手法に加え, 測地学的・地球物理学的・地球化学的・水理学的手法も組み合わせた調査・評価の事例の蓄積を通じて高度化を図る。
- ・海陸接合部付近における活断層の分布・活動性の調査・評価技術について, 陸・海域で適用性が確認された個別技術の組み合わせに係る適用事例の蓄積を通じて高度化を図る。

＜地形・地質学的情報に基づく隆起・侵食の調査・評価技術の高度化＞

- ・地形学的手法や年代測定などを用いた隆起・侵食の調査・評価および有効な指標に乏しい沿岸部陸域・海域の隆起・侵食の調査・評価の事例の蓄積を通じて, 気候・海水準変動も考慮した隆起・侵食の調査・評価技術の高度化を図る。

＜長期的な自然現象の発生可能性および地質環境の状態変遷の評価技術の整備＞

- ・過去から現在までの自然現象の発生およびその地質環境へ及ぼす影響に係る調査・評価事例の蓄積および現象理解を踏まえ, 自然現象の変動傾向の地域的特徴やその時間変遷を把握し, 長期にわたる自然現象の発生可能性および地質環境の状態変遷に係る評価技術を体系的に整備する。



深部流体(深部上昇水)の上昇の
模式図(産総研, 2012)

1. 地層処分に適した地質環境の選定およびモデル化

(2) 地質環境の特性

□全体概要

- ・閉鎖後長期の安全評価における地下水移行シナリオの信頼性向上に向け、広域地下水流動系から微細透水構造における物質移動の場までを統合的に把握する観点から、これまでに整備された調査・評価技術の高度化を図り、技術基盤を強化する。

＜水みちの水理・物質移動特性の評価技術の整備＞

- ・これまでに整備された広域的かつ緩慢な水理・物質移動現象の統合的な解析技術について、長期的な水理場の変化を考慮しつつ地下水の水質や年代の三次元分布との対比などを通じてその妥当性を確認するための方法論を整備する。
- ・原位置試験などを通じて、これまでに整備された断層・割れ目の三次元分布や水理・物質移動特性を調査・評価するための個別技術の高度化を図るとともに、体系的な方法論を整備する。

＜沿岸海底下の地質環境特性の調査・評価技術の整備＞

- ・サイト調査の観点から沿岸部海域を対象とした既存の地下探査技術の適用性を評価し、この結果を踏まえ実証的な取り組みを通じて、沿岸海底下に長期にわたり安定に存在する水理場や化学環境の調査・評価技術を体系的に整備する。

＜地質環境特性の長期変遷のモデル化技術の高度化＞

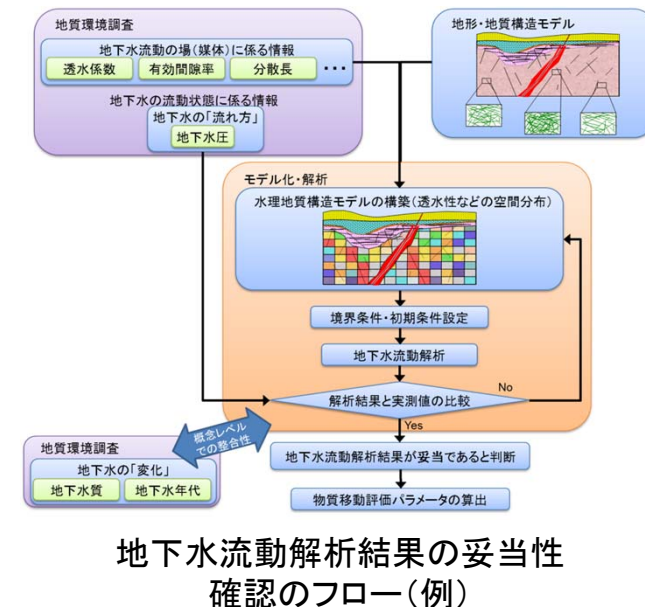
- ・過去から現在までの長期にわたる地形や地質構造の変化に伴う物理・化学現象に係る科学的知見を蓄積し、これを活用しつつ、これまでに整備された水理場や化学環境の時間的・空間的な変遷のモデル化技術の高度化を図る。

＜ボーリング孔における体系的な調査・モニタリング・閉塞技術の整備＞

- ・サイト調査の観点から国内において調査実績がない脆弱な地層を挟在する堆積岩を対象としたボーリング孔の掘削・調査技術に加え、わが国の多様な地質環境を考慮し、ボーリング孔における長期にわたる岩盤の変形や地下水の水圧・水質の変化のモニタリング技術およびボーリング孔の閉塞技術を体系的に整備する。

＜サイト調査のための技術基盤の強化＞

- ・わが国の多様な地質環境の特性およびその長期的な安定性に係る科学的知見や陸域～海域を対象とした地質環境調査・評価技術に係る技術的知見の拡充に加え、地質環境調査・評価に適用する品質マネジメントシステムなどの整備を継続し、サイト調査のための技術基盤を強化する。



2. 処分場の設計と工学技術

(1) 人工バリア

□全体概要

- ・これまで研究開発されてきた人工バリアに加えて、複数の代替材料などの設計オプションや合理的な設計を可能とする技術を整備し、人工バリアの閉じ込め機能や製作・施工性をさらに向上するための技術の開発を進める。

<人工バリア代替材料と設計オプションの整備>

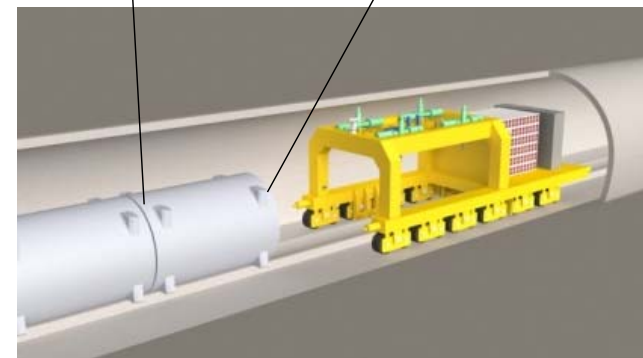
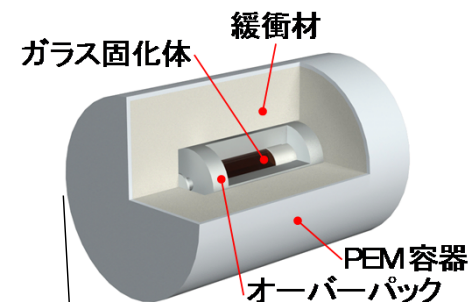
- ・人工バリア材料の合理的な選定や仕様設定に必要な特性データについて、多様な環境条件を考慮し、様々な代替材料(例えば、炭素鋼鋳鋼品や銅コーティングによるオーバーパック、Ca型ベントナイトによる緩衝材など)に対して取得することによって一層の拡充を図り、技術的な成立性を確認する。
- ・これまで検討してきた複数の人工バリア概念と上記の代替材料に関する研究を踏まえ、安全性に加え回収の容易性なども考慮した設計オプションの選定を行い、人工バリア仕様の最適化を進める。

<TRU廃棄物※1に対する人工バリアの閉じ込め機能の向上>

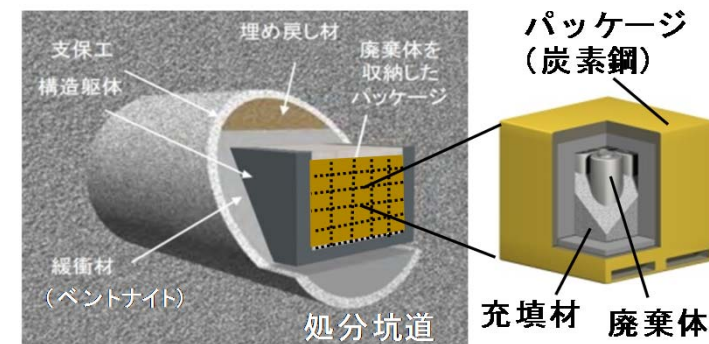
- ・これまでの設計概念に基づく廃棄体パッケージについて、製作性及び構造健全性に関する実証的な試験等を実施して改良し、閉鎖後長期の放射性核種の閉じ込め性に加えて、操業中の安全性や定置性などの性能の向上を図る。
- ・閉じ込め機能の一層の向上を図る観点から、可溶性で収着性が低いと考えられる陰イオン核種に対して、これまで研究開発されてきた固定化技術の開発を継続するとともに、新たに吸着材を開発する。

<高レベル放射性廃棄物に対する人工バリア製作・施工技術の開発>

- ・地上施設でガラス固化体と人工バリアを一体化するPEM(Prefabricated Engineered barrier system Module)方式などの人工バリアの製作・施工、搬送定置といった人工バリアの構築技術について、適用性・実用性という観点で段階的に技術の実証と遠隔化を含む装置の改良を進める。また、施工プロセスの品質管理に加えてそれを補完するモニタリングにより、構築された人工バリアが閉鎖後長期の安全性を担保することを示すための品質保証体系を整備する。



PEMの仕様例と搬送・定置の概念



TRU廃棄物に対する人工バリアの構成

※1 再処理やMOX燃料製造に伴って生ずる半減期の長い核種を一定量以上含む地層処分対象の低レベル放射性廃棄物

2. 処分場の設計と工学技術

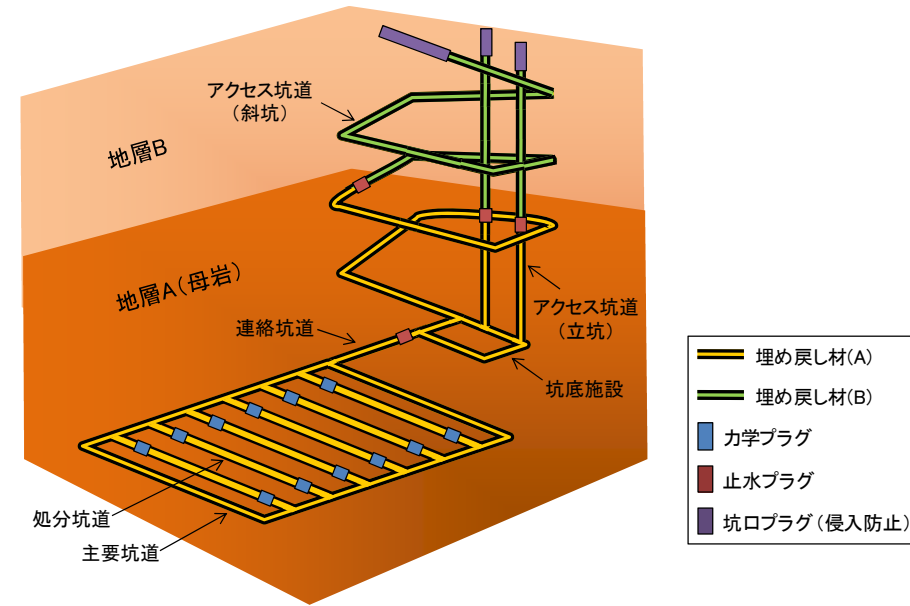
(2) 地上・地下施設

□全体概要

- ・これまで開発してきた湧水対策や坑道安定対策、掘削影響領域の把握など、地下施設の設計・施工に関連する技術について、地下環境下における検討を中心に、操業期間中と閉鎖後長期の安全性、および作業性などを総合的に考慮した技術のさらなる高度化を進める。

<処分施設の設計技術の向上>

- ・これまでに整備してきた地下施設レイアウトや廃棄体定置条件などの設計要件に対する判断基準を設計オプションも含めて整備し、今後の実証試験などにより拡充される実際の地下でのデータを活用しながら妥当性を確認することによって、継続的に整備・更新を進める。
- ・建設・操業期間中の地下施設の安全で良好な作業環境を維持するために、換気・排水システムについて、さらにシステムの異常状態までも考慮した安全性を高めるための検討を進める。



坑道の埋め戻しとプラグ設置位置の概念

<処分場閉鎖後の水みち形成を防止する技術の整備>

- ・処分場の閉鎖後に坑道が水みちとなることを防止するためのプラグや埋め戻し材などのシーリング技術については、処分場全体の閉じ込め性能に与える影響の評価や、湧水をともなう割れ目帯などの様々な地質環境を考慮した実証試験を通じて、これまでの設計概念を詳細化するとともに、施工技術の適用性評価を通じて技術的成立性を確認していく。

<処分場建設の安全性を確保する技術の高度化>

- ・坑道の掘削影響領域における長期的な水理特性の変化や坑道交差部の力学特性の変化については、引き続きデータを計測し、これまで開発してきた掘削に伴う影響領域の評価技術の信頼性の向上を図る。
- ・掘削技術について、施工の遠隔化も含めた検討を進め、処分場建設技術のさらなる安全性と効率性の向上を図る。
- ・グラウトなどの湧水対策技術については、これまで材料や注入技術開発を中心に整備してきたが、湧水の排水にかかるコストや周辺環境への影響についても考慮しつつ、設計・施工方法や影響評価技術の高度化を図る。

2. 処分場の設計と工学技術

(3) 回収可能性

□全体概要

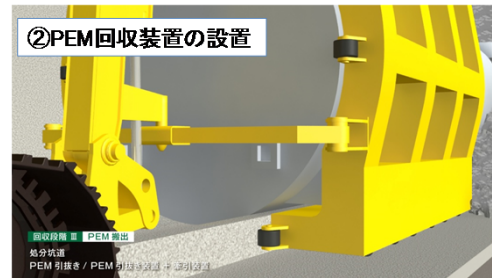
- ・処分施設の閉鎖までの間の回収可能性の確保および回収可能性を維持した場合の影響等について、引き続き調査研究を進め、処分施設の閉鎖までの間の廃棄物の管理の在り方の具体化に向けた検討を進める。

<廃棄体の回収可能性を確保する技術の整備>

- ・高レベル放射性廃棄物に対する廃棄体回収技術については、横置きPEM方式を対象としてこれまでに整備を進めた地下の試験環境および要素技術開発の成果に基づき、地下環境での実証試験を実施して技術的実現性を確認するとともに、遠隔化技術など回収装置の改良を進める。
- ・TRU廃棄物に対する廃棄体回収技術の開発では、回収容易性を高めた人工バリア仕様の検討を進めた上で、廃棄体グループに応じた回収技術の実証に取り組む。
- ・様々な処分概念や坑道埋め戻し状態に対する回収の容易性を設計に反映するため、回収可能性を維持した時の地質環境や人工バリアへの影響について、これまでに実施した包括的な影響要因等の抽出結果を踏まえて、さらに定量的な検討を進めるとともに、個々の影響要因に対する評価技術や対策技術を整備する。

回収可能性を維持した場合の影響の検討例

回収可能性の維持に関する留意事項		状態A	状態B	状態C
回収可能性	回収手順の複雑さ	・緩衝材の除去 ・廃棄体の回収	・処分坑道の埋め戻し除去 ・緩衝材の除去 ・廃棄体の回収	・主要坑道の埋め戻し除去 ・処分坑道の埋め戻し除去 ・緩衝材の除去 ・廃棄体の回収
地質環境に対する想定影響	処分場周辺の地下水の流速	速い		遅い
	処分場周辺の地下水位	低下範囲が大きい		低下範囲が小さい
	処分場周辺の地下水の酸化還元電位	酸化性		還元性
人工バリアに対する想定影響	人工バリアの温度	高い		低い
	緩衝材の流出	影響大		影響小
	オーバーバックの腐食	影響大		影響小
坑道の維持管理	坑道類の維持管理の範囲	処分坑道、主要坑道 連絡坑道、アクセス坑道	主要坑道、連絡坑道 アクセス坑道	連絡坑道、アクセス坑道
	排水量	多い		少ない



PEMの回収方法のイメージ

2. 処分場の設計と工学技術

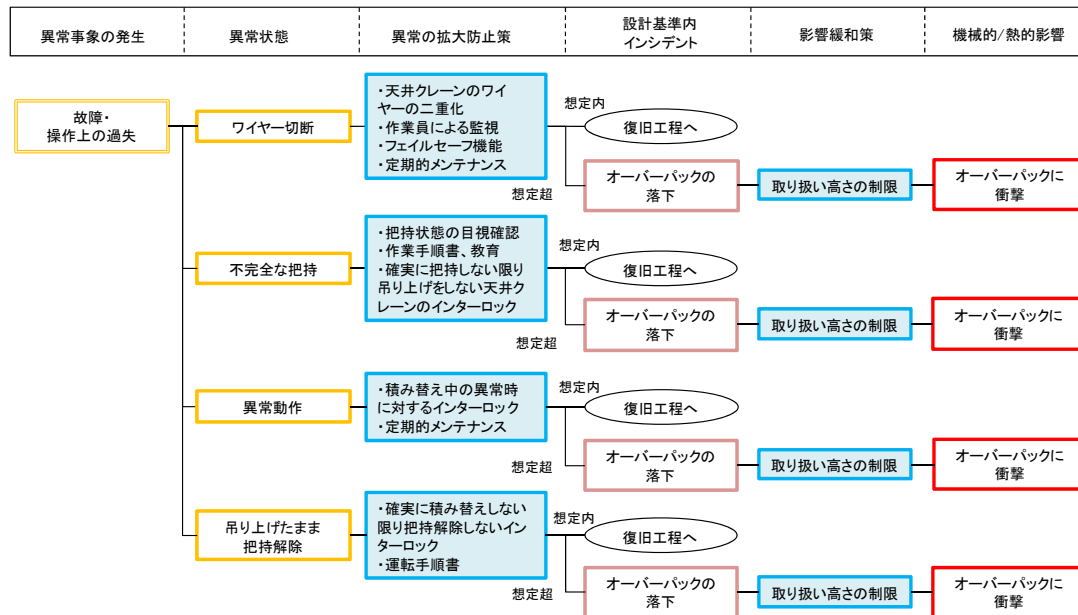
(4) 閉鎖前の安全性評価

□全体概要

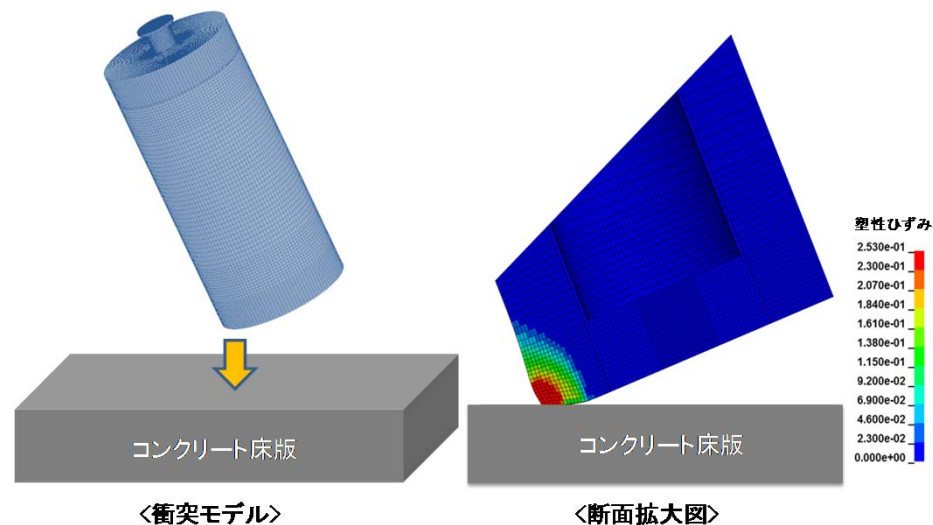
・これまでに整備してきた閉鎖前の安全性評価技術について、処分場の建設・操業において発生する可能性がある異常事象を網羅的に把握し、安全評価のシナリオを作成すること、および廃棄体への衝撃や火災などの地下施設特有の事象に対する影響評価技術のさらなる高度化を進め、安全性評価の信頼性の向上を図る。

<閉鎖前の処分場の安全性評価技術の向上>

- ・閉鎖前の処分場で発生する可能性のある異常事象として、これまでに特定された事象に加えて、事象が重畳化した場合の事故分析を繰り返し実施し、発生の可能性を考慮した上で安全性評価シナリオの一層の充実を図る。
- ・廃棄体に対する様々な異常状態を想定したシナリオにおける条件設定の蓋然性を高めるとともに、シナリオをよりリアルに評価するための解析手法の高度化を進めて、評価結果の妥当性、信頼性のさらなる向上を図る。
- ・放射性物質の漏洩を伴う事故や坑道の崩落などが起きた場合の対応策と復旧策については、具体的な事故事例を参考にしたより実践的な検討を継続し、事故対応技術の着実な整備・拡充に努める。



評価シナリオの作成における影響伝播分析図の例
(坑底施設における積み替え時のオーバーバックの落下)



オーバーバック落下衝撃に対する構造解析の例

3.閉鎖後長期の安全性の評価

(1)シナリオ構築

□全体概要

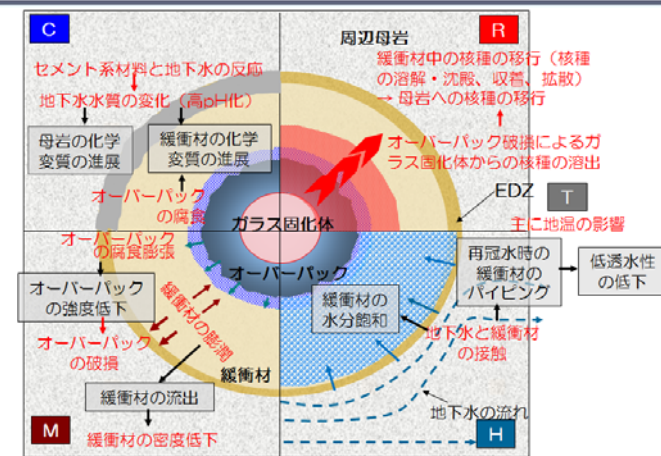
- ・これまで、シナリオ構築に必要な処分場閉鎖後の地層処分システムの状態の理解を目的とし、熱(T)、水理(H)、力学(M)、化学(C)の観点から重要な現象に関する解析モデルを開発してきた。今後は、地層処分システムの様々な構成要素間の相互作用と諸現象間の連成に重点を置き、現象解析モデルの高度化を進める。
- ・これまでに開発した発生可能性を考慮したシナリオ構築手法について、システムの状態の理解から、シナリオ作成、核種移行解析ケース設定までを、より円滑に追跡性を高めて行うことが可能となるように高度化する。

<地層処分システムの状態設定のための現象解析モデルの高度化>

- ・これまで、ニアフィールドを中心として、個々の構成要素およびそれらの相互作用を表現する現象解析モデルの開発を行ってきた。今後は、現象の連成や要素間の相互作用に重点を置き、より長期の室内試験や原位置試験、ナチュラルアナログによる知見の拡充を行い、処分場閉鎖後の過渡的期間から長期に至る一連の現象解析モデルの開発および高度化を実施する。
- ・過渡的な期間に対しては、処分場の建設・操業によって地質環境が擾乱を受けていることから、それを考慮して再冠水に伴う緩衝材の流出現象や膨潤挙動等に関する現象解析モデルの高度化を図る。
- ・閉鎖後長期に関しては、廃棄体からの核種溶出モデルや、セメント等の処分施設を構成する材料との相互作用による緩衝材や母岩の変質に関するモデル、放射線分解等により生じるガスの影響評価モデル、廃棄体に含まれる硝酸塩の影響評価モデル、および、地下環境及び処分施設由来のコロイド・有機物・微生物の影響を評価するモデル等の高度化を図る。

<リスク論的考え方に則したシナリオの構築手法の高度化>

- ・地層処分システムのふるまいに関する理解に基づき、安全機能を視軸として、FEPを参照しつつシナリオを構築する方法を開発している。今後は、現象解析モデルの高度化に関する研究開発等の成果を反映したFEPの更新や、システムの状態の理解からシナリオ作成を経て核種移行解析のケース設定に至る、整合性と追跡性を確保した方法論の高度化を図る。
- ・上記の方法論において、シナリオの網羅性に資するため、最新の科学的知見を様々な分野の専門家が共有し、処分システムの状態設定を議論することを目的として開発したストーリーボードについて、現象解析の結果を動的に示す機能の追加等の改良を図る。
- ・これまで、国内外における情報を参考に、日本における人間侵入シナリオと稀頻度事象シナリオの検討を実施してきた。今後も継続的に情報を収集し、シナリオやその様式化方法について検討する。



ガラス固化体周囲のストーリーボードの例

3.閉鎖後長期の安全性の評価

(2)核種移行解析モデル開発

□全体概要

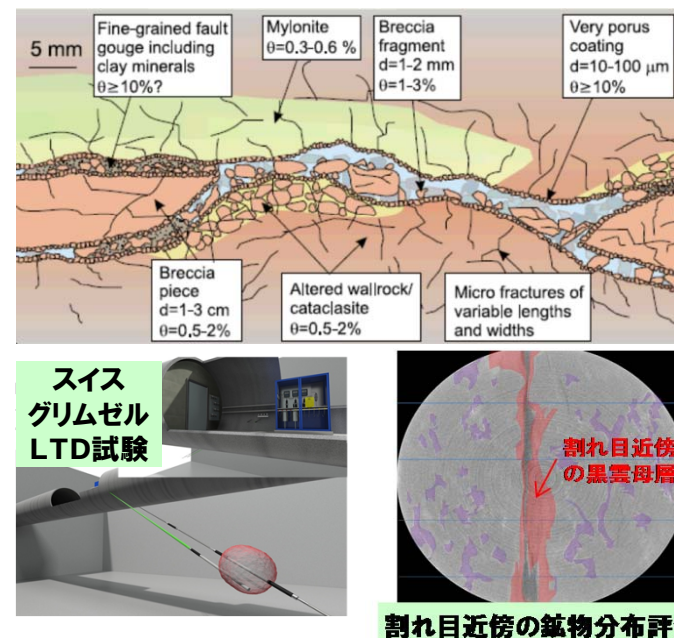
- ・室内試験や原位置試験を通じ、核種移行のモデル化に資する知見の拡充を実施してきた。今後は、試験を通して継続的に知見の拡充を図るとともに、緩衝材の変質等のシステムの状態変遷をより現実的に反映することが可能な核種移行解析モデルの開発を行う。
- ・これまでは、廃棄体処分坑道を中心に、割れ目の連結性を三次元的に考慮することが可能な核種移行解析モデルを構築してきた。今後は、処分施設をより全体的かつ現実的に表現可能なモデルとするための高度化を図る。

<現象に則した核種移行解析モデルの高度化>

- ・これまで、主に人工バリアを対象として、例えば緩衝材の変質によって生ずるCa型ベントナイトに関する核種移行パラメータの室内試験による取得といった、個々の構成要素の状態変遷を反映した核種移行解析のためのデータを整備してきた。今後は、地質環境特性の長期変遷のモデル化技術や現象解析モデルの高度化に関する研究開発の成果も反映し、シナリオの検討と対応付けながら引き続きデータの拡充と場の変遷に対応した核種移行解析モデルの開発を図る。
- ・これまでに、室内試験を通じて、岩盤基質部へのマトリクス拡散を表現するためのモデル開発を行ってきた。今後は、地質環境特性に関する研究開発の成果等を反映するとともに、室内実験を実施し、割れ目内微細空隙における現実的な核種移行解析モデルの開発を進めるとともに、原位置試験等によりモデルの妥当性について検討を行う。

<施設設計等を反映した核種移行解析モデルの高度化>

- ・これまで、処分坑道とその周辺母岩のニアフィールドスケールを中心として、三次元の割れ目ネットワークモデルによる粒子追跡解析を反映した核種移行解析モデルの開発を行ってきた。今後は、ニアフィールドから広域に至る複数のスケールにおいて、移行経路にある処分場の構成要素の形状・配置、および、その特性の違い等を明示的に評価可能なモデルの構築を進め、さらに異なるスケール間のモデルを結合させる手法を高度化する。
- ・これまでは、想定される種々の地質圏-生活圏インターフェイス(GBI)に対して、それぞれに対し一般化した生活圏モデルを整備してきた。今後は、地質環境特性の長期変遷に関する研究開発等の成果を反映し、GBIの時間的な変化をより現実的に取りあつかうことが可能となるように高度化を図る。

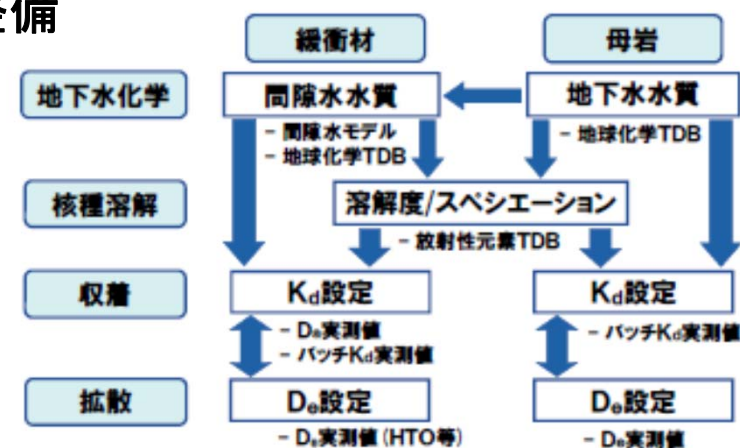


母岩中の核種移行挙動に関する研究

(3)核種移行解析に用いるパラメータ等に関するデータの整備

□全体概要

- ・これまで、核種移行解析や生活圏評価に用いるパラメータ値の設定に用いるデータや関連する情報の拡充と設定手法の検討を実施してきた。今後は、人工バリアの変質等に着目して、これらの検討を継続的に実施する。
- ・シナリオ構築に用いた知見、核種移行解析に用いるモデルやパラメータ、および、その解析結果を、解析の手続き等に関するノウハウなども含めて一元管理するための知識ベースを開発し、シナリオ構築から核種移行解析までの安全評価全体を通じた品質管理に資する。



核種移行パラメータの設定フローの例

＜核種移行等に関するデータの取得およびデータベース整備＞

- ・これまで、熱力学・収着・拡散データベースの拡充を実施してきた。今後は、沿岸海底下や比較的炭酸濃度が高い地下水が存在する場等における地質環境や、人工バリアや母岩の変質等に伴う場の変化に対応した室内試験等を通じてデータの拡充を図る。
- ・生活圏評価のため、表層における核種の土壌への収着データ等を整備してきた。今後も室内試験等を通じて継続的にデータの拡充を行う。
- ・データベースを参照しつつ、サイト調査で取得する地質環境情報を反映した室内試験により取得するデータ等を用いて核種移行パラメータの値を設定するための方法論を構築する。



収着データベースの信頼度評価機能とグラフ化

＜安全評価解析の知識ベースの構築とその品質管理手法の構築＞

- ・これまで、シナリオ構築から核種移行解析に至る一連の技術が整えられ、個々の品質管理を実施してきた。今後は、一連の作業全体をより高い品質で実施できるよう、廃棄体特性情報や、シナリオ構築に関わるFEPや現象解析モデルとその関連知識、および、核種移行解析に用いるモデルやパラメータの設定、解析に係るノウハウや関連する情報、解析結果を一元管理するための知識ベース化を進める。