


地層処分事業のための  
安全評価技術の開発（Ⅰ）  
-シナリオ構築技術の高度化-



2011年3月

原子力発電環境整備機構

2011年3月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階

原子力発電環境整備機構 技術部

電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Science and Technology Department

Nuclear Waste Management Organization of Japan

Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2011

**地層処分事業のための  
安全評価技術の開発（Ⅰ）  
-シナリオ構築技術の高度化-**

2011年3月

原子力発電環境整備機構

## 目次

1	はじめに	1
2	シナリオ構築技術の位置付け	2
2.1	セーフティケースおよび安全評価におけるシナリオ構築の位置付け	2
2.2	シナリオの構築における留意事項	3
2.3	第2次取りまとめにおけるシナリオ構築	3
2.4	シナリオ構築手法に関する最近の動向	4
2.5	シナリオ分類の枠組み	5
2.6	NUMOの技術開発の取り組みの概要	5
2.6.1	シナリオ構築手法の高度化	5
2.6.2	沿岸域を対象としたシステムの状態設定手法の開発	5
2.6.3	ニアフィールドの長期変遷に対するシナリオ構築手法の適用性確認	6
2.6.4	断層活動の影響評価に対するシナリオ構築手法の適用	6
3	シナリオ構築手法の高度化	7
3.1	背景と目的	7
3.2	シナリオ構築手順の概要	7
3.3	まとめ	14
4	沿岸域を対象としたシステムの状態設定手法の開発	15
4.1	背景と目的	15
4.2	システムの状態設定手順	15
4.3	例題への適用	15
4.3.1	初期条件の設定	15
4.3.2	標高と地形勾配の分析	16
4.3.3	汀線と塩淡境界の分析	18
4.3.4	環境変遷の記述	25
4.4	まとめ	32
5	ニアフィールドの長期変遷に対するシナリオ構築手法の適用性確認	33
5.1	背景と目的	33
5.2	前提とする考え方	33
5.2.1	地層処分における経年変化の捉え方	33
5.2.2	ニアフィールドにおけるシステム変遷の特徴	34
5.3	手順および例示	35
5.3.1	システムの理解	35
5.3.2	シナリオ構築	44
5.4	まとめ	47
6	断層活動の影響評価に対するシナリオ構築手法の適用	48

6.1	背景と目的 .....	48
6.2	断層活動に関するシナリオ構築 .....	48
6.2.1	断層新生による環境条件への影響に関する情報整理 .....	48
6.2.1.1	力学的影響 .....	48
6.2.1.2	化学的影響 .....	49
6.2.1.3	熱的影響 .....	49
6.2.1.4	水理学的影響 .....	50
6.2.2	処分システムへの影響の検討とストーリーボードの作成 .....	50
6.3	断層活動の影響に関する安全解析の試行 .....	55
6.3.1	断層発生前の核種移行 .....	55
6.3.2	断層発生後の核種移行 .....	55
6.3.3	被ばく線量の算出 .....	56
6.3.4	断層発生後の水理条件の設定と解析ケース .....	56
6.3.5	解析結果 .....	59
6.4	まとめ .....	61
7	まとめ .....	62
8	参考文献 .....	63

## 付録

### 付録-1 ストーリーボード作成手順

## 目 次

図 2.1-1	セーフティケースおよび安全評価におけるシナリオ構築の位置付け	2
図 2.3-1	第2次取りまとめにおけるシナリオ構築のフロー (JNC, 1999a)	4
図 3.2-1	システム理解とシナリオ構築のための統合化手法	8
図 3.2-2	期待する安全機能の時間的な変遷 (JNC, 1999a に基づく例)	9
図 3.2-3	ストーリーボードのイメージ (高レベル放射性廃棄物を対象とした例)	10
図 3.2-4	安全機能とそれらに関連する現象の相互関係の表現例 (核種放出開始後)	12
図 4.2-1	沿岸域を対象とした状態設定の手順	15
図 4.3-1	初期条件として想定した環境	16
図 4.3-2	代表点における標高の時間変化	17
図 4.3-3	侵食速度が隆起速度と等しい場合 (ケース a) の地形勾配の時間変化	18
図 4.3-4	侵食速度が隆起速度と等しい場合 (ケース a) の処分場深度の時間変化	18
図 4.3-5	将来の汀線の移動挙動の侵食速度依存性	19
図 4.3-6	パターン 1 (母岩の透水性が十分高く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できる場合) における環境変遷 (ケース a: 侵食速度=隆起速度の場合)	21
図 4.3-7	パターン 2 (海退時の汀線の移動には追従できるが海進時には追従できない場合) における環境変遷 (ケース a: 侵食速度=隆起速度の場合)	22
図 4.3-8	パターン 3 (母岩の透水性が低く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できない場合) における環境変遷 (ケース a: 侵食速度=隆起速度の場合)	22
図 4.3-9	パターン 4 (母岩の透水性が極めて低く塩淡境界の移動がほとんど生じない場合) における環境変遷 (ケース a: 侵食速度=隆起速度の場合)	23
図 4.3-10	パターン 1 (母岩の透水性が十分高く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できる場合) における環境変遷 (ケース b: 侵食なしの場合)	24
図 4.3-11	パターン 2 (海退時の汀線の移動には追従できるが海進時には追従できない場合) における環境変遷 (ケース b: 侵食なしの場合)	24
図 4.3-12	パターン 3 (母岩の透水性が低く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できない場合) における環境変遷 (ケース b: 侵食なしの場合)	25
図 4.3-13	パターン 4 (母岩の透水性が極めて低く塩淡境界の移動がほとんど生じない場合) における環境変遷 (ケース b: 侵食なしの場合)	25
図 4.3-14	ストーリーボードのための時間・空間区分	27
図 5.2-1	地層処分システムの機能的変遷に対応する特徴の変化	35
図 6.2-1	阿寺断層のダメージゾーンの概念図 (吉田ほか, 2009)	49
図 6.2-2	断層活動の影響に関するシナリオの概念	51
図 6.3-1	断層発生後の核種移行モデル	56
図 6.3-2	断層新生の影響に関する安全解析結果	60
図 6.3-3	シナリオ 2 において破壊されていない廃棄体の人工バリア内側を還元性と仮定した場合の解析結果	60

## 表 目 次

表 3.2-1 安全機能および不確実性を基軸としたシナリオの表現例（核種放出開始後）	13
表 4.3-1 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関して想定する例	16
表 4.3-2 ニアフィールドの前提条件として着目すべき環境条件および影響因子	26
表 4.3-3-(a) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン 3）(1/4)	28
表 4.3-3-(b) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン 3）(2/4)	29
表 4.3-3-(c) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン 3）(3/4)	30
表 4.3-3-(d) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン 3）(4/4)	31
表 5.3-1 安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象の整理例（安全機能と関連する条件）	38
表 5.3-2 安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象の整理例（条件と条件への影響因子）	39
表 5.3-3 ニアフィールド環境変遷ストーリーボード	40
表 5.3-4 各期間におけるシステムの変遷（1/3）	41
表 5.3-5 各期間におけるシステムの変遷（2/3）	42
表 5.3-6 各期間におけるシステムの変遷（3/3）	43
表 5.3-7 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例	45
表 5.3-8 高レベル放射性廃棄物に対する蓋然性が高いシナリオの例（ニアフィールド）	46
表 6.2-2 処分場を横断する新たな断層が生じた場合のストーリーボード	52
表 6.2-3 新生断層の処分場直撃シナリオの記述（深部地下水上昇）	53
表 6.2-4 新生断層の処分場直撃シナリオの記述（酸化性地表水の引き込み）	54
表 6.3-1 シナリオ 1, シナリオ 2 の安全解析の条件	57
表 6.3-2 解析ケース	57
表 6.3-3 各解析ケースの安全解析の条件	58
表 6.3-4 シナリオ 1 における廃棄体区分及び該当する廃棄体数	58
表 6.3-5 シナリオ 2 における廃棄体区分及び該当する廃棄体数	58

## 1 はじめに

地層処分システムの長期安全性評価（以下、安全評価という）は、「地層処分システムに関連する危険性に対して、サイトの地質環境や処分場の設計が技術的な要件を満足するだけの安全機能を発揮し得るか否かを体系的に分析する作業過程」である（IAEA, 2009）。安全評価の手順は、システム理解およびシナリオ構築、安全評価モデルの開発・選定、安全評価データセットの整備、安全解析の実施および基準との比較といった一般的な手順に沿って進める。このうち、シナリオの構築は、地質環境の調査・評価および処分場の設計に基づいて、地層処分システムの特徴と将来挙動を記述したものであり、安全評価の出発点となる。このため、安全規制の動向、国際的な動向、我が国の地層処分事業の特徴を考慮して、シナリオを効率的に構築できるよう技術開発を進めている。

シナリオ構築に関する安全規制の動向としては、原子力安全委員会が、2004年6月に、「放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について」をまとめ、極めて長期にわたる期間の放射性廃棄物の安全評価にはそれに付随する不確実性は避けられず、これを踏まえた評価としてリスク論的考え方の適用が有効であることを示している（原子力安全委員会, 2004）。これは、地層処分システムにおける地質環境や人工バリア材料の変遷などの様々な将来挙動について、発生可能性を考慮してシナリオを構築することの必要性を示唆するものである。

シナリオ構築における近年の国際的な動向としては、従来のFEPに基づくシナリオ解析手法（第2章参照）に対して、作業の効率化や透明性の向上を目的として、安全機能（NUMO, 2011）を基軸としたシステムの理解が重視されてきている（例えば、SKB, 2006；Wakasugi *et al.*, 2009；Ebashi *et al.*, 2010）。システムの理解では、地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した上で、安全機能がシステムのどのような特性によってもたらされるのか、また、システムの将来挙動によって安全機能がどのように変化するかを整理することが必要となる。その上で、シナリオ構築においては、我が国の地層処分事業の特徴として、以下の点を考慮する。

- ・ 公募方式の事業では、地質環境特性として、地理、地形、地質学的にさまざまな条件が想定され、また、地質環境が長期的に変遷する可能性がある。このため、幅広い地質環境特性やその長期変遷に対応できるようにする
- ・ 段階的に拡充されるさまざまな科学的な知見を安全評価に反映できるようにする
- ・ 適切なサイト選定によって回避することが基本である自然事象の著しい影響について、超長期の不確実性を考慮して、地層処分システムに与える影響を仮想的に評価できるようにする

本報告書においては、以上の点を踏まえ、シナリオ構築技術を実用化することを目的として取り組んだ成果について記述する。



## 2 シナリオ構築技術の位置付け

### 2.1 セーフティケースおよび安全評価におけるシナリオ構築の位置付け

安全評価は、近年、セーフティケースの枠組みの中で捉えられる傾向がある（例えば、OECD/NEA, 2004）。セーフティケースは、安全確保策を施すことにより、地層処分が長期にわたって安全性を確保できることをその根拠となる多面的なさまざまな論拠とともに示すために、事業者が構築するものである。さらに、セーフティケースの重要な役割として、幅広いステークホルダーから出される安全性に対する疑問、心配事項や不安要因といったものに応えるための科学技術的な情報を提供することが挙げられる。セーフティケースの主要な構成要素は、「安全確保構想」、「適切なサイト選定と確認」、「適切な工学的対策」、「信頼できる長期安全性の評価」、「安全性にかかわる論拠」からなる。また、セーフティケースには、構築した時点においてどのような不確実性が存在しており、また、その不確実性が地層処分システムの安全性に及ぼす影響や、それらの不確実性を低減するための取り組みなどについても言及する。このような不確実性の取り扱いは、セーフティケースの信頼性を確保する上で重要なポイントである。

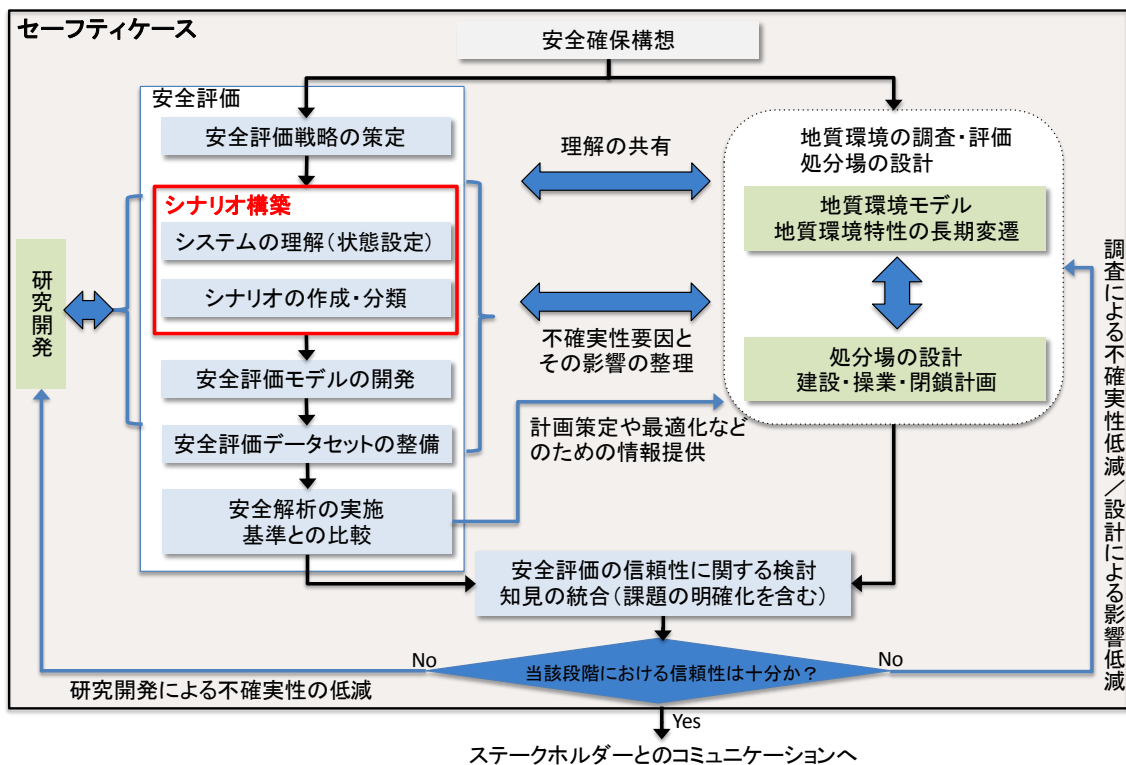


図 2.1-1 セーフティケースおよび安全評価におけるシナリオ構築の位置付け

安全評価は、セーフティケースにおける閉鎖後の長期安全性の主張に定量的な裏付けを与え、その論拠の中心となる役割を担う。このうち、シナリオは、地質環境の調査・評価および処分場の設計によって提示する地層処分システムが閉鎖後の長期間にわたりどのように安全確保上の役割（安全機能）を果たすかを記述したものである。図 2.1-1 に示したように、シナリオの構築においては、まず、地層処分システムの状態とその長期的な変遷について理解を深め（システム理解）、その上で、システム全体の変遷を放射線防護の視点からシナリオとして記述する（シナリオ作成・分類）。

## 2.2 シナリオの構築における留意事項

シナリオの構築においては、不確実性のマネジメントについて配慮が必要である。地下深部の構造を様々な形で知ることができるようになった現在においても、水平方向で数 km から数十 km、地下数 km の深さの広い領域の地質構造を完全に把握することは不可能であり、このような広い領域の地質環境をモデル化する際には、不確実性を完全に排除することができない。また、地質環境の長期的な変遷について予測して、シナリオ化する際にも不確実性が含まれる。

一方で、地層処分安全評価におけるシナリオ構築の目的は、システムの将来挙動のすべてを精緻に把握して科学的に明らかにすることではない。そのため、不確実性の存在を認識しつつ、安全確保の観点から、長期安全性を損なうような重大な抜け落ちがないように、シナリオを作成する。また、不確実性の影響をあらかじめ低減できるような工学的な対策や、地質環境の場の理解の不確実性を低減する調査・評価手法をとるなどの対策を実施し、シナリオに含まれる不確実性をあらかじめ低減する。シナリオの作成において存在が確認された不確実性については、その影響を安全解析により評価することとなる。

以上のようにシナリオ構築においては、不確実性の取り扱いに加え、ステークホルダーへの説明など様々な検討が必要であることから、国際的にその方法論や役割について技術開発がすすめられ、以下に示す留意点について国際的な合意（OECD/NEA, 2001）が得られている。

- ・ 可能性のあるすべてのシナリオを列挙することは不可能であることから、重大な抜け落ちがないように合理的な十分性を目指すことが肝要であること
- ・ 評価に必要な情報の統合に加え、不足している知見の明確化が重要であること
- ・ シナリオの構築過程や判断過程について透明性があり、方法や結果を追跡できること

## 2.3 第2次取りまとめにおけるシナリオ構築

第2次取りまとめ（JNC, 1999a）では、シナリオ構築の手順として図 2.3-1 に示すフローが示されている。このフローでは、シナリオ構築（開発）は、まず、システム特性（Features）、イベント（Events）、プロセス（Processes）（以下、FEP）をリストとして取りまとめ、FEPの個別事象の理解を進めることにより、FEPの内容を明確化し、さらに、地層処分システムの状態の理解に基づいて、安全評価で使用するFEPを選択し、そこからシナリオを作成する。以下では、このようなシナリオ構築手法を「FEPに基づくシナリオ構築手法」という。

第2次取りまとめでは、この手法に基づいてシナリオを構築し、モデル開発と影響解析が実施された。なお、この手法に対して、第2次取りまとめの国際レビューでは、その有効性は認めつつも、システム状態の理解からシナリオの作成、さらには解析ケースの設定に至る一連の流れについて、追跡性を高め、設定根拠などをよりわかりやすくすることが必要であるとされていた（OECD/NEA, 2000a）。

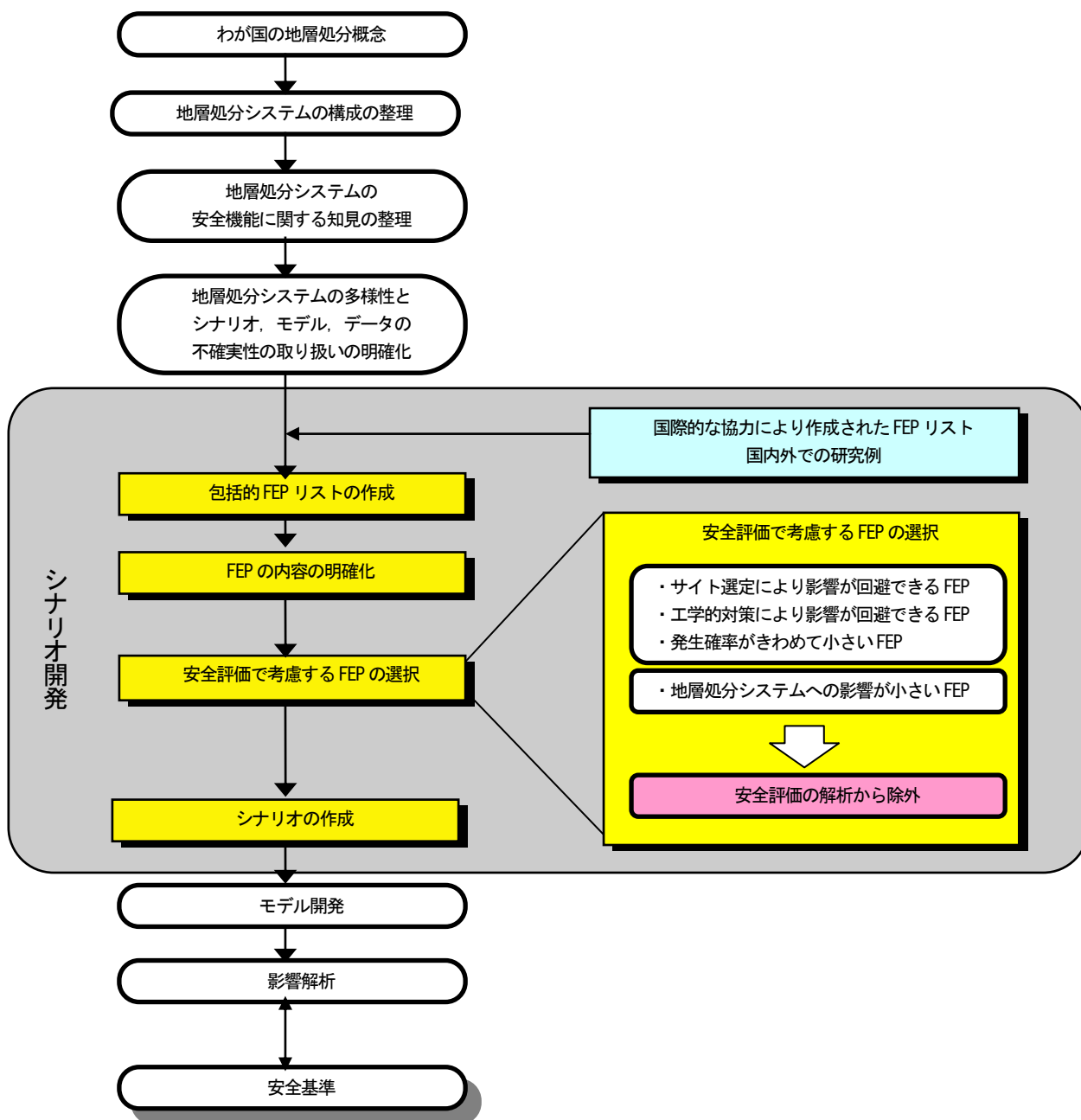


図 2.3-1 第 2 次取りまとめにおけるシナリオ構築のフロー (JNC, 1999a)

## 2.4 シナリオ構築手法に関する最近の動向

海外の実施主体では最近、網羅的な FEP に基づいたシナリオ構築手法に対して、より効率的で説明性を重視したシナリオ構築手法が適用されるようになってきている。例えば、SKB (2006) では、地層処分システムに安全機能を設定し、その安全機能を基軸としてシナリオを構築する方法が適用されている。シナリオの構築においては、安全機能が天然バリアや人工バリアのどのような特性によってもたらされるのか、また、システムの将来挙動によって安全機能がどのように変化するかに着目して記述する。このような安全機能の設定とその変遷の記述を中心としたシナリオ構築手法は、ANDRA (2005) や ONDRAF/NIRAS (2001) などでも取り入れられつつあり、セーフティケース構築の重要な要素であると認識されている (OECD/NEA, 2009)。また、わが国においても、FEP に

関する情報整備（神崎ほか、2009）、マトリクス形式による FEP の相関関係を整理するためのツール（牧野ほか、2007）、FEP と安全機能の関係を階層化する手法（JNC、2005）などが開発されている。なお、NUMO は、このような海外の傾向を取り入れたシナリオ構築手法の開発を進めるとともに（Wakasugi *et al.*, 2009）、スイスの放射性廃棄物管理協同組合（Nagra）と共同で、シナリオ構築に関する国際ワークショップを開催し、諸外国におけるシナリオ構築の動向を把握するとともに、各国共通の考え方について整理している（Ebashi *et al.*, 2010）。

## 2.5 シナリオ分類の枠組み

シナリオ構築においては、地層処分システムの状態とその長期的な変遷にさまざまな可能性が考えられ、それらを効率的に取り扱うためには、分類の枠組みが必要である。第2次取りまとめ（JNC、1999a）におけるシナリオでは、原子力委員会原子力学会バックエンド対策専門部会が示した枠組み（原子力委員会バックエンド対策専門部会、1997）に沿って、地下水シナリオ<sup>1</sup>および接近シナリオ<sup>2</sup>に大別して検討が進められた。このうち、地下水シナリオについては、まず、システムの安全機能が期待通りに働くこと（人工バリアが期待する機能を発揮するなど）を想定し、地下水によって放射性物質が移行するシナリオを基本シナリオとして設定した。さらには、自然現象の影響や将来の人間活動の影響などを基本シナリオに対する擾乱として取り扱う変動シナリオとして考慮し、シナリオの不確実性として複数のシナリオを考慮した。

一方、原子力安全委員会は、避けることができない不確実性を考慮して放射性廃棄物の安全評価を行う際、シナリオの発生可能性とその影響を組み合わせたりリスク論的考え方の適用が有効であると提案している（原子力安全委員会、2004）。この考え方は、第2次取りまとめで想定したシナリオ分類と異なるものであり、シナリオ分類の枠組みが変わることを意味している。すなわち、地層処分システムにおける地質環境や人工バリア材料の変遷などの様々な将来挙動について、発生可能性を考慮してシナリオを構築することの必要性を示唆している。

## 2.6 NUMO の技術開発の取り組みの概要

本報告書では、NUMO が進めている技術開発の概要を示す。

### 2.6.1 シナリオ構築手法の高度化

シナリオ構築では、システムの理解からシナリオの作成、さらには解析ケースの設定に至る一連の流れについて透明性を確保することが重要である。第3章では、従来の手法を透明性の向上や作業の効率化といった観点から改善することを目的として、FEP に基づくシナリオ解析手法と安全機能を基軸としたシステムの理解とを組合せた、シナリオ構築に関する統合化手法の開発例を示す。

### 2.6.2 沿岸域を対象としたシステムの状態設定手法の開発

公募方式の事業では、地質環境特性として、地理、地形、地質学的にさまざまな条件が想定される。このうち、沿岸域の地質環境は、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡境界の長期変遷を、隆起・侵食や気候・海水準変動と関係付けながら取扱う必要がある。そこで、第4章では、これらの点を

---

<sup>1</sup>地下水により放射性物質が処分場から人間環境に運ばれる可能性に関するシナリオ

<sup>2</sup>高レベル放射性廃棄物と人間との物理的距離が接近することによって人間環境に影響が及ぶ可能性に関するシナリオ

踏まえ、地質環境の長期変遷に対するシステムの状態設定手法の開発例を示す。

### 2.6.3 ニアフィールドの長期変遷に対するシナリオ構築手法の適用性確認

ニアフィールドは、地質環境と比較して、サイト固有の地質環境条件から受ける影響が相対的に小さい。このため、ニアフィールドを対象とした技術開発を先行的に進めることは、特定のサイトの特徴を適切に取り込んでいくための起点を準備するという観点から有用である。そこで、第5章では、これらの点を踏まえ、ニアフィールドの長期変遷に対するシナリオ構築手法の開発例を示す。

### 2.6.4 断層活動の影響評価に対するシナリオ構築手法の適用

安全評価では、対象とする時間スケールが超長期となるため、適切なサイト選定によって回避することが基本である断層活動などの自然現象の著しい影響について、その発生時期や発生可能性に関する不確実性を考慮することが必要となる。そこで、第6章では、断層活動の著しい影響評価に関するシナリオ構築手法の開発例を示す。

### 3 シナリオ構築手法の高度化

#### 3.1 背景と目的

第2次取りまとめ（JNC, 1999a）におけるシナリオ構築では、国際的に合意が得られた体系的なアプローチ（OECD/NEA, 1991）を踏襲しながら、FEPに基づくシナリオ構築手法によりシナリオを作成した。第2次取りまとめの国際レビューでは、その手法の有効性は認めつつも、システムの理解からシナリオの作成、さらには解析ケースの設定に至る一連の流れについて、追跡性を高めるとともに、設定根拠をよりわかりやすくすることが必要であると指摘されていた（OECD/NEA, 2000a）。

近年は、FEPに基づくシナリオ解析手法に対して、安全機能（NUMO, 2011）を基軸としたシステムの理解が重視される傾向にある（例えば、Nagra, 2002；ANDRA, 2005；SKB, 2006）。システムの理解では、地質環境の調査・評価および処分場の設計と連携した上で、安全機能がシステムのどのような特性によってもたらされるのか、そして、システムの将来挙動によって安全機能がどのように変化するかを整理することが必要となる（以下では、「安全機能を基軸としたシステムの理解に基づくシナリオ構築手法」という）。これにより、FEPに基づくシナリオ解析手法の課題に対して、作業の効率化や透明性の向上といった観点からの改善が期待できるものと考えられる。

以上を踏まえ、本章では、従来の手法を透明性の向上および作業の効率化の観点から改善することを目的として、「FEPに基づくシナリオ解析手法」と「安全機能を基軸としたシステムの理解に基づくシナリオ構築手法」を組合せ（Wakasugi *et al.*, 2009）、それぞれの特徴を相互補完的に活用した統合化手法（以下、統合化手法）を検討した内容について述べる。

#### 3.2 シナリオ構築手順の概要

システムの理解およびシナリオ構築に関する手順の概要を図 3.2-1 に示す。システムの理解は、地質環境の調査・評価によって明らかにされる地質環境条件や設計によって具体化される処分施設・人工バリアの仕様を適宜取り入れつつ進めることが必要であり、一方、地質環境の調査・評価および処分場の設計はシステム理解に基づき行われるものである。このため、これらと並行しつつ、図 3.2-1 に示す過程を以下の点に配慮しつつ反復的に進める。

システムの理解にあたっては、まず、閉鎖後の閉じ込めを確保するために必要な安全機能とその機能を担う地層処分システムの構成要素、およびそれぞれの安全機能がどのように時間変化するかを整理する。図 3.2-2 は、安全機能の考え方に基づき、第2次取りまとめ（JNC, 1999a）における地層処分システムを対象として期待する安全機能の時間的変遷を整理した例である。このような整理により、各時間枠で期待する機能やこれらの機能間の相互関係（多重性や相互補完性）を明らかにすることができる。なお、安全機能を基軸としてシステムの変遷を理解する上では、各安全機能に関連する現象についても整理を行うことが必要となる。なお、安全機能の整理および後述するシステムの将来挙動の記述は、反復的に進めるとともに、整合性を確保することが肝要である。

システムの将来挙動を記述する際には、安全機能に着目した上で、個々のFEPに関する最新の情報や安全機能に対する影響についての感度解析によって得られた知見なども活用しながら、関係する幅広い専門家の知見を統合しつつ適切に取り込むことが重要である。

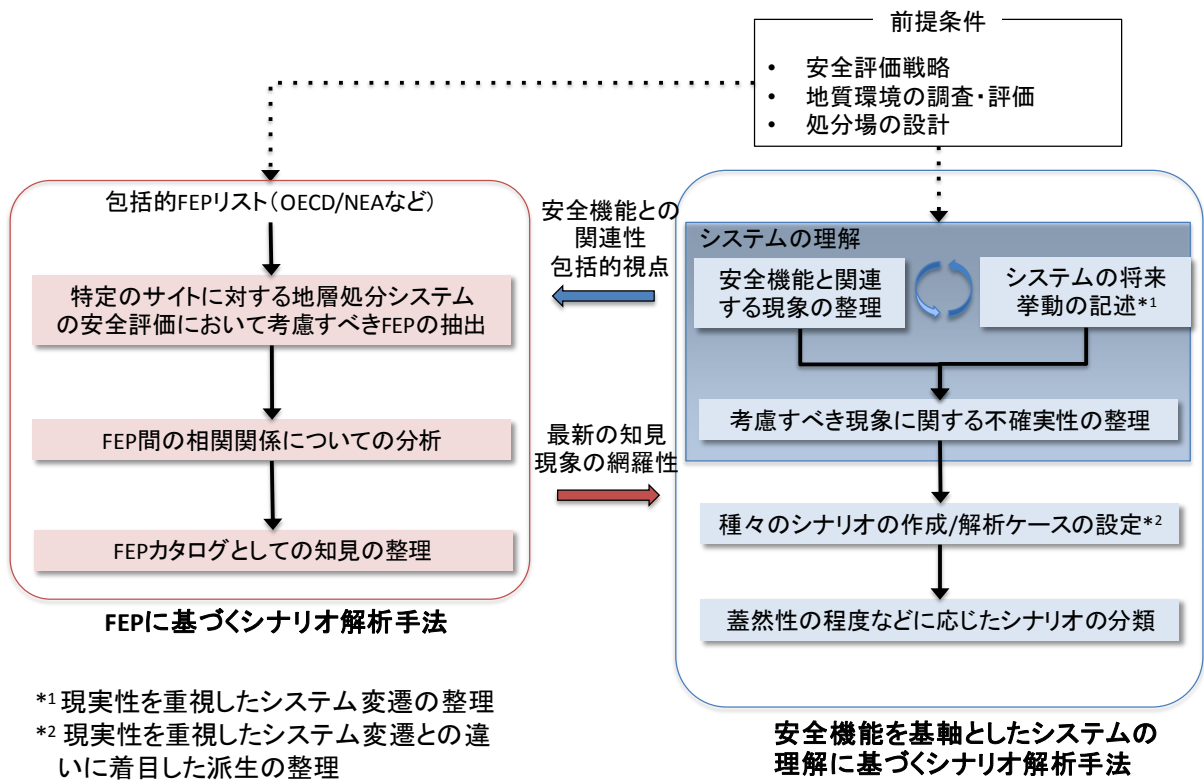


図 3.2-1 システム理解とシナリオ構築のための統合化手法

このためには、分野の異なる専門家が議論する際の共通の枠組みを提供することが必要となり、このような枠組みとしてストーリーボード<sup>3</sup>を適用する。ストーリーボードは、安全機能とその時間的変遷を基軸として、安全評価で考慮すべき時間および空間スケールを区分し、各時間・空間領域における地層処分システムの振る舞いについての関連する諸分野の知見を統合して記述するものである。

ストーリーボードの枠組みを用いて分野横断的なシステム理解の整理を行うことにより、分野間での理解の齟齬や矛盾する知見などがある場合には、これらの所在が浮き彫りとなる。このため、地質環境の調査・評価および処分場の設計と安全評価との緊密な連携が促進される。また、ストーリーボードにおける地層処分システムの将来挙動の表現は、多角的かつ視覚的に捉えやすいものでもあり、システムの理解を効果的に深めることができる。

図 3.2-3 は、自然現象の著しい影響をサイト選定により回避することを前提として、各時間および空間スケールにおける地層処分システムの蓋然性の高い状態変化と核種移行プロセスを専門家の議論に基づいて作成したストーリーボードの例である。ストーリーボードの作成手順の概要を以下に示す。なお、括弧内の記述は、図 3.2-3 の事例において想定した前提条件や時間/空間区分などの検討例を補足的に示すものである。また、ストーリーボードを作成する際の具体的な手順については付録-1 に示す。

<sup>3</sup> 対象とする時間スケールあるいは空間スケールごとに、バリアの状態や核種の移行に関するプロセスを、概念図と言葉を用いて描写したもの

- ・ 前提条件の設定：  
安全評価の前提となる地層処分システムとその状態変遷を設定する（仮想的な地質環境を対象とする）
- ・ 時間枠の設定：  
環境条件や安全機能の変遷を考慮して設定する（建設前，建設・操業・埋め戻し・閉鎖，再冠水までの過渡期，オーバーパックの閉じ込め期間，核種の放出開始～気候変動の開始，自然事象の予測可能な期間）
- ・ 対象領域の設定：  
各分野の専門家の知見を包括的に取り込めるように，対象領域の空間スケールを設定（人工バリアスケール，処分場スケール，天然バリアスケール，地表水文系スケールを設定）
- ・ 各欄への記載内容：  
発生可能性が高いと考えられる現象やプロセスのうち，安全機能の観点から安全評価上重要と考えられるものを記述する。この際，環境変遷，安全機能の時間変化，核種移行挙動について，概念図と文字を用いて記述し，ほかの時間枠と対象領域における記述内容と連続性を持たせて齟齬がないようにする。進め方としては，ゼネラリストが出発点となるストーリーボードを作成し，それに基づいて関連する分野の専門家と議論しながら改訂していく。
- ・ シナリオの設定や不確実性の分析において基盤となる情報：  
発生可能性が高く，安全評価上重要と考えられる現象やプロセスについて，知見不足などの理由により明言できない事項や，蓋然性は必ずしも高くはないが可能性を否定できないような代替的な状況の存在，あるいは意見の一致が得られないような異なる解釈の競合といった問題点が生ずる可能性がある。これらの内容は，各時間枠における留意事項の欄に記述する。

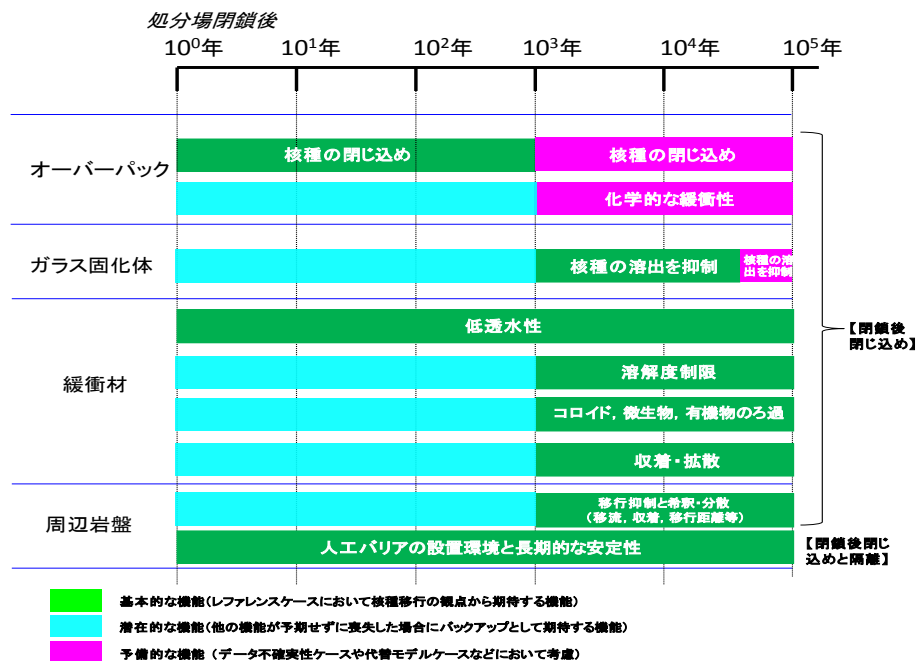


図 3.2-2 期待する安全機能の時間的な変遷 (JNC, 1999a に基づく例)



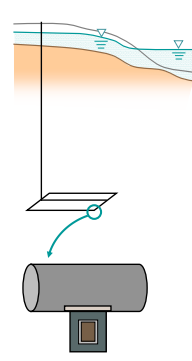
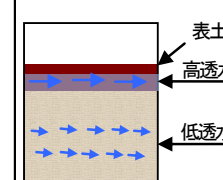
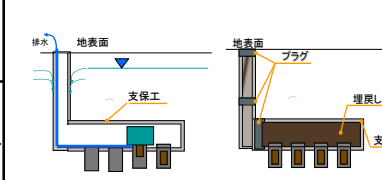
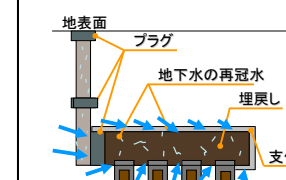
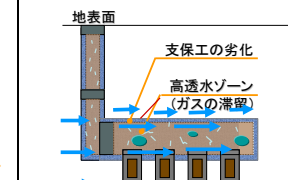
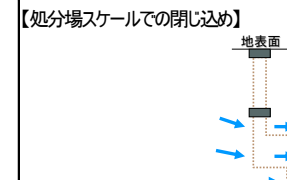

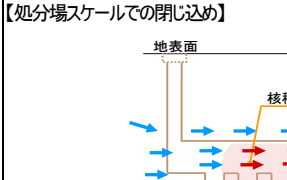
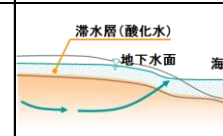
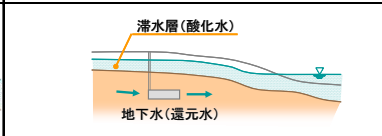
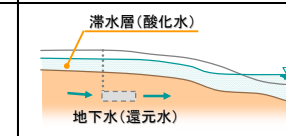
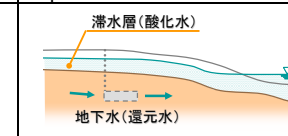
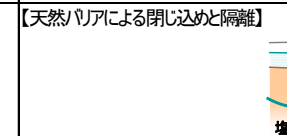
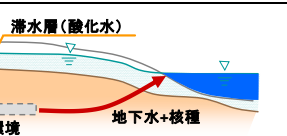
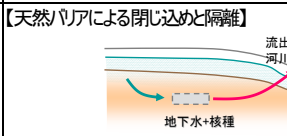
場と状態遷移の理解		基本パラメータ (現在)				基本パラメータ (水期最盛期)					
現状の場の理解		処分場の深度とレイアウト				水期最盛期での状況					
		建設・操業・埋戻し・閉鎖		再冠水までの過渡期		オーバーバックの閉じ込め期間		核種の放出開始～気候変動の開始		自然現象の予測可能期間	
<b>処分概念</b> ・陸地処分 ・ガラス固化体 4 万本 ・堆積岩 ・処分場(平面配置) ・廃棄体設置方式 	人工バリアスケール	建設前	掘削中 EBS 定置中 埋戻し中	再冠水までの過渡期	オーバーバックの閉じ込め期間	核種の放出開始～気候変動の開始	自然現象の予測可能期間	核種のプルームの拡大			
	処分場スケール	 <p>処分場深度における状態 ・初期応力 ・間隙水圧 ・地温 ・塩水の存在(古海水など)</p>	 <p>【オーバーバックによる閉じ込め】                      ・掘削→掘削影響領域(EDZ)の発生→間隙の増大、応力緩和→透水性の増加                      ・覆工背面での排水→不飽和領域の発生                      ・オーバーバックからの発熱→ベントナイトの温度上昇                      ・ベントナイトへの再冠水→膨潤圧発生                      ・岩盤のクリープ変形→岩盤応力の回復                      ・埋戻し部への再冠水→EDZ 不飽和領域の回復</p>	 <p>【オーバーバックによる閉じ込め】                      ・廃棄体の発熱→ベントナイト温度上昇                      ・再冠水→間隙水圧の回復→ベントナイトの膨潤                      ・岩盤のクリープ変形→岩盤応力の回復                      ・支保工の劣化→高 pH プルームの発生→間隙増加→透水性増大</p>	 <p>【オーバーバックによる閉じ込め】                      ・地下水のオーバーバック接触                      ・腐食→ガス発生→ベントナイト中の移行                      ・腐食膨張→ベントナイト変形                      ・腐食生成物→ベントナイトの変質                      ・岩盤のクリープ変形→岩盤応力の回復                      ・支保工の劣化→高 pH プルームの発生→間隙増加→透水性増大</p>	 <p>【人工バリアによる閉じ込め】                      ・地下水とガラス固化体の接触                      →ガラス固化体の溶解→核種の浸出→ベントナイト中の拡散移行(収着)→EDZ/埋戻し中への移行(拡散・希釈・収着)                      ・オーバーバックの腐食進展→腐食膨張/腐食生成物→ベントナイトとガラス固化体の変質・変形の進展→安全機能への影響                      ・高 pH プルームによる岩盤/ベントナイトの変質の進展→安全機能への影響</p>	 <p>【処分場スケールでの閉じ込め】                      ・核種の人工バリアからの放出(地下水流動の方向と EDZ に沿って卓越経路の移行可能性)                      ・コンクリート支保工の劣化→坑道に沿っての地下水流動の卓越ルート形成                      ・高 pH 環境の形成</p>	 <p>【処分場スケールでの閉じ込め】                      ・核種の人工バリアからの継続した放出</p>			
	天然バリアスケール	 <p>・地下水移行が基本プロセス                      ・隆起・侵食速度                      ・淡水、還元環境</p>	 <p>・建設・操業中の排水→アクセス坑道、処分坑道周辺の間隙水圧の減少、地表近辺の地下水面の低下                      ・オーバーバックの発熱→処分場全域での温度上昇                      ・埋戻し→再冠水→間隙水圧の回復                      ・埋戻し→処分場周辺心力場の回復                      ・プラグ設置→地表への地下水経路の遮断</p>	 <p>・オーバーバック発熱→処分場周辺の温度上昇→熱対流の発生                      ・再冠水→処分場周辺の間隙水圧の回復                      ・支保工の劣化→坑道周辺の高透水領域の発生→坑道に沿っての地下水流動                      ・支保工の劣化→高 pH プルームの発生</p>	 <p>・地下水は処分場内の高透水ゾーンを優先的に移動                      ・熱の影響の低減                      ・コンクリート支保工の劣化→EDZ を含めて沿っての地下水流動の卓越経路発生の可能性(ガスの移行経路)                      ・高 pH 環境の形成</p>	 <p>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】                      ・初期の地下水流動系の維持→移行・分散・拡散での核種移行可能性                      ・気候変動の始まり→海水準変動→地下水変動→地下水流動系の変化(有意な変化なし?)</p>	 <p>【天然バリアによる閉じ込めと隔離】                      ・流出点の変化(海から河川に)                      ・地下水+核種</p>	 <p>・気候変動→海水準変動→地下水流動系の変化→流出点の変化(海から河川に)                      ・高透水ゾーンに沿った核種移行速度の増大                      ・天然バリア中の核種収着</p>			
	地表面水	現状での海水産物の消費状況が基本となる	初期状態の継続	・初期状態の継続	・初期状態の継続	・初期状態の継続	地下水の流出点→海底堆積物での収着→海水による希釈→現状の生態系維持	・水河期の到来→生物圏の変化(海から河川に) →凍土の発生→地表面水の変化→生態系の変化			
その他の天然事象	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避	火山・活断層・泥火山・マスマーブメントによる著しい影響はサイト選定と工学的対策で回避				
不確実性など留意事項	・処分深度に古海水の存在の確認	・処分システムの安全機能への残渣物の影響度[セメント材料による高アルカリ影響] ・建設・操業による天然バリアへの影響(領域と程度) ・海底の堆積物・食物チェーン	・再冠水のプロセスと環境回復の程度 ・処分場スケールでの不飽和領域の残存の影響 ・EDZ に沿った卓越経路の形成	・オーバーバックの腐食膨張と生成物の安全機能への影響 ・EDZ と支保工劣化に伴う卓越経路の形成可能性(プラグなどの工学的対策の効果)	・高アルカリ、腐食生成物、ガス、微生物によるベントナイトの変質プロセスと安全機能への影響 ・生物圏の設定	・気候変動ともなう地表面水と地形の変化予測 ・凍土発生時の深さと分布 ・生物圏の設定					

図 3.2-3 ストーリーボードのイメージ (高レベル放射性廃棄物を対象とした例)

システムの理解においては、システム変遷を記述するとともに、これらの知見に含まれる不確実性についても併せて整理を行うことが重要である。また、考慮すべき現象に関する知見や含まれる不確実性については、国際的な FEP リスト (OECD/NEA, 2000b) や国内外の事例 (JNC, 1999a や電事連・JNC, 2005a, b) に基づき、以下の項目について整理した結果を FEP カタログとして記録する。この際、膨大な FEP 情報から考慮すべき知見を効率的に収集するため、安全機能にかかわる現象に着眼して整理することが重要である。

- ・ 名称：対象とする現象や特性の名称を記述する (FEP ナンバーを含む)。
- ・ 概要：対象とする現象や特性に対する一般的な知見やその対象範囲について記述する。
- ・ プロセス間の関係：対象とする現象やほかの関連事象との関係を記述する (例えば、プロセスインフルエンスダイアグラムの活用)。
- ・ 現象、特性に関する理解の現状：対象とする現象や特性について、文献から得られた知見をまとめる。
- ・ 発生の安全機能への影響の可能性と関連する不確実性：対象とする現象や特性が安全機能に与える影響を記述するとともに、考慮すべき不確実性とその範囲を記述する。
- ・ 可能性および関連する不確実性：対象とする現象に対する発生可能性について記述する。
- ・ 核種移行評価上の取り扱い：既存の知見に基づき、核種移行評価上の取り扱いについて記述する。また、更新された知見の核種移行評価上の取り扱いについても記述する。
- ・ 今後の課題：上記の整理を通じて、今後検討が必要と判断できる課題を記述する。
- ・ 文献：上記の整理において、使用した文献を記述する。

システムの理解と併せて上述した FEP カタログの整理を行った上で、ストーリーボードで定義した時間および空間スケールの区分に従い、安全機能とそれらに関連する現象の相互関係を整理する。このような安全機能と現象の対応および現象間の相互関係をフローチャートによって視覚的に整理した事例を図 3.2-4 に示す。種々のシナリオの構築では、安全機能とそれらに関連する現象の相互関係に基づき、発生可能性やその影響の観点から現実性を重視したシナリオでは無視できるような現象を明記し (図 3.2-4 において N と標記されたものに対応)、それらを除いた現象を対象としてシナリオを構築し (表 3.2-1 参照)、解析ケースを設定していく。

シナリオの分類では、構築したシナリオを、影響の程度と発生可能性の観点から分類し、シナリオ分類の枠組みと対応付けていく。なお、これらの対応付けは、一義的に定まるものではなく、採用する安全確保対策、時間スケールの考え方、安全規制の動向などに依存して対応関係が変化するものである。

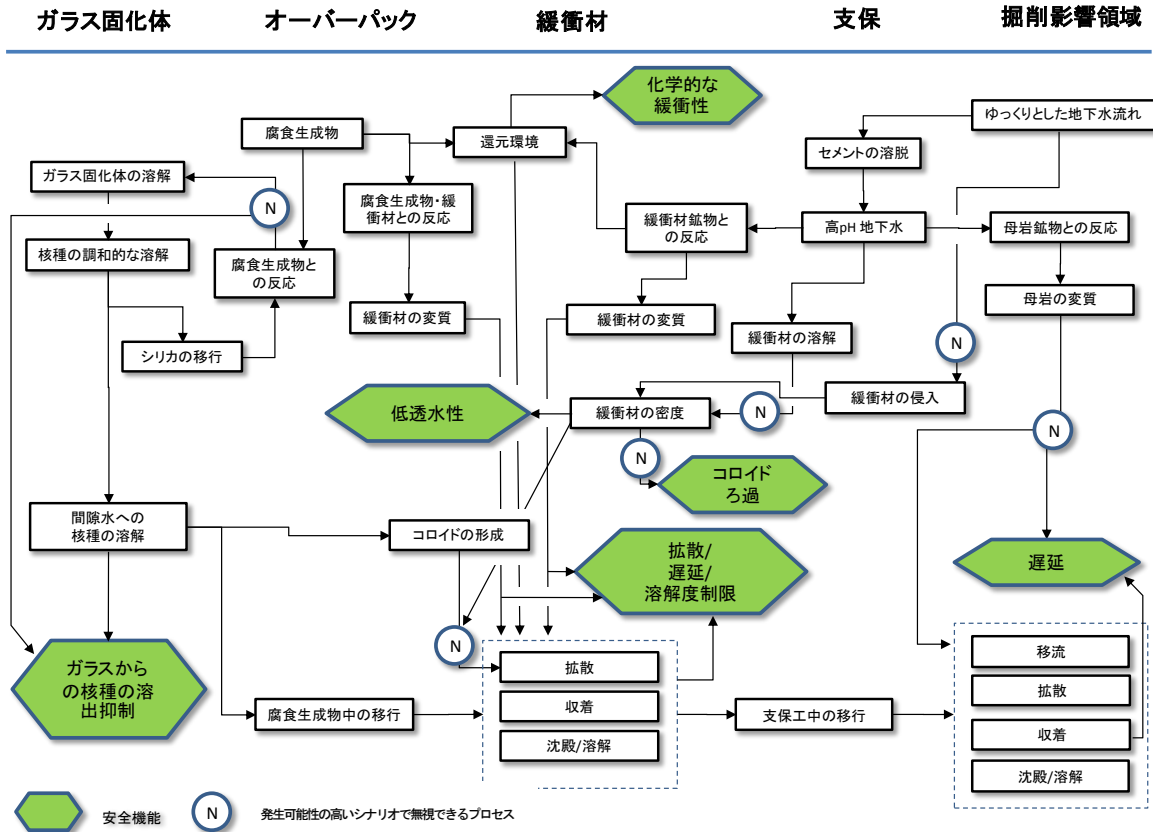


図 3.2-4 安全機能とそれらに関連する現象の相互関係の表現例 (核種放出開始後)

表 3.2-1 安全機能および不確実性を基軸としたシナリオの表現例 (核種放出開始後)

安全機能	蓋然性の高い安全機能の変遷の記述	核種移行に関連するプロセス	不確実性
ガラス固化体からの核種の緩慢な放出	<ul style="list-style-type: none"> <li>オーバーパック破損後、ガラスマトリクス溶解とガラス固化体近傍の Si 濃度の急速な飽和</li> <li>Si 飽和後、長期のガラス溶解は Si 濃度に依存</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>オーバーパック破損後、地下水がガラス固化体と接触</li> <li>ガラスマトリクス溶解に伴う廃棄体に含まれた放射性物質の放出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>二次鉱物の沈殿とオーバーパック腐食生成物による Si の共沈/収着による溶出した Si の消費に起因したガラス溶解度の加速</li> </ul>
オーバーパックの化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材中の還元環境の維持</li> </ul>		
緩衝材中の拡散	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材の低透水性の確保による放射性物質の移行抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性物質の拡散による移行</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水による緩衝材中の鉱物の溶解に起因する緩衝材密度の低下</li> </ul>
緩衝材中の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材中を移行する放射性物質の鉱物への収着。これにより移行が遅延され、緩衝材からの短寿命核種の放出が低減される</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性物質の緩衝材鉱物への収着</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>腐食生成物による緩衝材の変質と緩衝材の移行特性の低下</li> <li>高アルカリ地下水による緩衝材の変質と緩衝材の遅延機能の低下</li> </ul>
低い溶解度	<ul style="list-style-type: none"> <li>還元環境下ではほとんどの核種は難溶性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水中の核種濃度は溶解度により制限</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水の影響による溶解度の変化</li> </ul>
緩衝材の化学的緩衝作用	<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水の緩衝材への侵入によっても、緩衝材中の pH 緩衝材鉱物との反応により pH8~9 を維持</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の遅延機能の低下</li> </ul>
低透水性 (地下水フラックスの制限)	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材の低透水性の確保による地下水の浸入抑制</li> <li>緩衝材の膨潤による、施工時に生じたすべての隙間および開口部の閉塞。これによりニアフィールドは均質で詳細な隙間構造を確保</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水の影響による変質に起因する緩衝材の透水性の上昇</li> <li>二次鉱物の沈殿に起因する隙間の減少 (物質移行の抑制)</li> </ul>
母岩の核種移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性物質の岩盤中の鉱物への収着</li> <li>十分な核種移行距離の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>母岩中における放射性物質の分散を伴う移流</li> <li>地下水で移動する放射性物質は収着により移行が遅延</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高アルカリ地下水の影響による変質に起因する母岩の透水性の上昇</li> <li>高アルカリ地下水の影響による母岩の変質と遅延機能の低下</li> </ul>
処分場に適した環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>地下水化学特性は還元環境を維持</li> <li>母岩は処分場の建設や人工バリアの定置に適した力学特性を確保</li> </ul>		

### 3.3 まとめ

本章では、従来のFEPに基づくシナリオ解析手法と安全機能を基軸としたシステムの理解に基づくシナリオ構築手法を組合せた統合化手法について検討した。これにより、FEPに基づくシナリオ解析手法の課題に対して、作業の効率化の観点から改善する方向性を示すとともに、国際的な動向や安全規制の動向を踏まえてシナリオ構築技術を実用化する上での出発点を整備したものとする。今後は、これらの手法をさまざまな現象に適用することを通じて、システムの理解やシナリオの構築手法の具体化、最新の知見を考慮したFEPカタログの整備などに取り組んでいく必要がある。

## 4 沿岸域を対象としたシステムの状態設定手法の開発

### 4.1 背景と目的

公募方式の事業においては、地質環境特性として、地理、地形、地質学的にさまざまな可能性が考えられる（例えば、地理的には内陸部、沿岸部、島部、地形的には山地、丘陵、平野など）。このため、想定されるさまざまな地質環境特性に対応できるように、安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の多様性への対応という観点から重要である。また、地質環境特性は、隆起・侵食や気候・海水準変動などに影響を受けて、長期的に変遷していく可能性がある。例えば、沿岸域の地質環境は、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡境界の長期変遷を考慮する必要があるといった特徴を有する。このような特徴を考慮した安全評価手法を整備しておくことは、地質環境の長期変遷への対応という観点から重要である。

ここでは、以上を踏まえて、地質環境の多様性および長期変遷の観点からシナリオ構築技術を実用化することを目的として、地質環境の長期変遷に関するシステムの状態設定について例示する。具体的には、沿岸域の特徴を考慮したシステムの状態設定手順およびそれらを例題に適用した内容について記述する。

### 4.2 システムの状態設定手順

沿岸域では、特に、内陸部に比べて、海水の影響や塩淡境界の変遷などを、隆起・侵食に伴う標高と地形勾配の変化、それらと関係する汀線と塩淡境界の変化を取り扱う必要がある。これらを取り扱うためのシステムの状態設定手順を図 4.2-1 に示す。

なお、この検討は、図 3.2-1 に示した手順のうち、システムの将来挙動の記述について検討したものである。

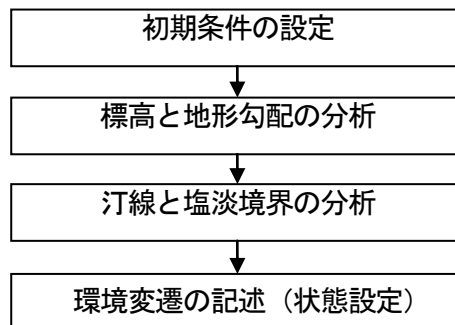


図 4.2-1 沿岸域を対象とした状態設定の手順

### 4.3 例題への適用

#### 4.3.1 初期条件の設定

気候・海水準変動および隆起・侵食のように現在生じており今後も継続すると考えられる天然事象によって地質環境は長期的に変遷するものと考えられる。ここでは、安全評価上のシナリオを構築する上での前提条件を基にした、気候・海水準変動及び隆起・侵食による処分場を含む地域の環境変遷の類型化を、沿岸域を例として実施した。

表 4.3-1 に仮想的に設定した初期条件を示す。地形には、一定の勾配を持つような初期条件を設

定した。また、初期条件として想定する環境の例を図 4.3-1 に示す。

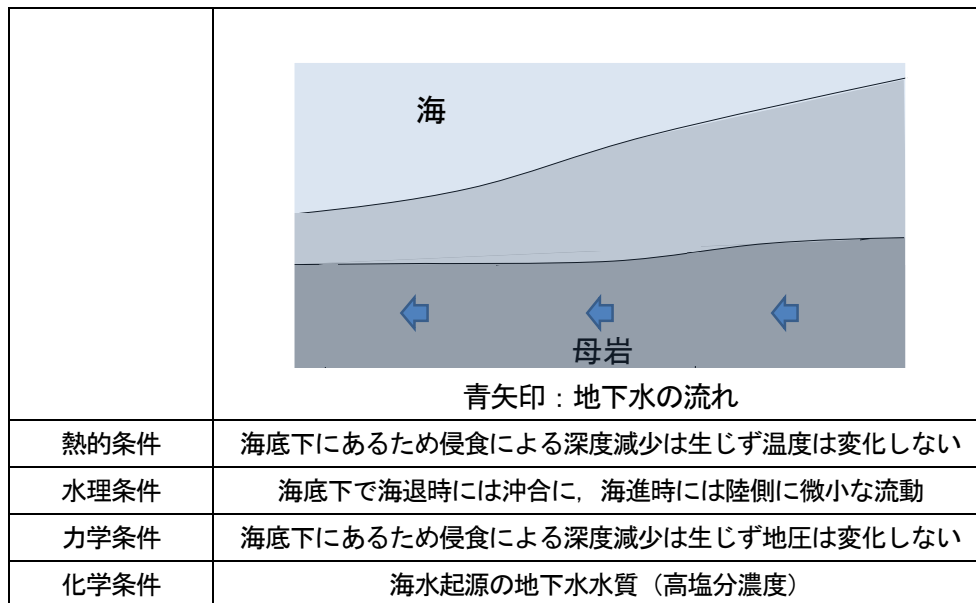


図 4.3-1 初期条件として想定した環境

表 4.3-1 気候・海水準変動及び隆起・侵食による環境変遷に関して想定する例

海水準変動の周期	10 万年 海退：7.5 万年 海進：2.5 万年	参考：過去数 10 万年程度については 10 万年程度の明瞭な周期性が認められている（JNC, 1999b など）。
海水準変動の範囲	現在の海水準～-120m	参考：過去数 10 万年程度の海水準は、現在の水準と比較して、+数 m～-120 m 程度の範囲で変動している（JNC, 1999b など）
地形勾配	5%	—
隆起速度	0.5 mm/y	参考：藤原ほか（2005）によれば、日本列島における隆起速度は最大 1mm/yr 程度であり、中でも 0.6mm/yr を超える地域は分布が限られる。
侵食速度	<隆起速度	参考：JNC（1999b）など
地温勾配	3°C/100m	参考：日本における平均的な地温勾配
初期の地下施設の標高	-750 m	—

#### 4.3.2 標高と地形勾配の分析

表 4.3-1 に示した条件に従い、海水準の周期的変動及び代表点（現在の汀線から沖合にそれぞれ 3km, 4km, 5km 離れた海底面とした）の標高（現在の海水準に対する）を算出した結果を図 4.3-2 に示す。各代表点では 0.5 mm/y の速度で継続的に隆起が生じているものとし、また、現在のように海底に位置している期間には侵食は生じないが、隆起及び海退によって海底面が将来地表に露出した際には、当該期間を通じて隆起速度を上回らない程度の侵食が生じることを仮定している。なお、堆積については、深度が増すという意味で処分システムにとって有利な面が大きいことおよび地表



に接近する場合と比較して、地表から遠ざかる場合には環境条件の変化が小さいことを考慮して、保守的に無視している。各代表点の標高は、侵食速度によって異なるが、本検討では、侵食速度が隆起速度と等しいとした場合（ケース a）と、侵食速度を 0 とした場合（ケース b）について検討し、将来を幅でとらえる。侵食速度を隆起速度と等しいとした場合（ケース a）には、図 4.3-2 の実線で示したように、海底に位置する期間には標高は 0.5 mm/y で上昇し、また、地表に露出している期間には、隆起が等量の侵食によって相殺されるため標高は変化しない。一方、侵食速度を 0 とした場合（ケース b）、同図において破線で示したように、時期によらず各代表点の標高は 0.5mm/y という一定の速度で上昇する。侵食速度の不確実性に起因する各代表点の標高の幅について、ケース a とケース b とは、それぞれ、下限と上限に対応することとなり、実際の各代表点の標高はこの両極端の間（図 4.3-2 における実線と点線の間）で推移するものとする。

侵食速度の想定に関するケース a とケース b とでは、環境変遷の様相が顕著に異なるものとする。ケース a では、海退時の侵食によって隆起量が相殺されるため、将来、このような期間の割合が増すにつれて標高の上昇は徐々に鈍化する。そして、その後は海水準の振幅の範囲内に留まり、海進・海退の度に海底と陸域の環境が交互に現れる。一方、ケース b では、標高の上昇が一定速度であるため、各代表点は 20 万年～40 万年後には離水し、その後は恒久的に陸域の環境となって丘陵から山地へと推移することが予想される。

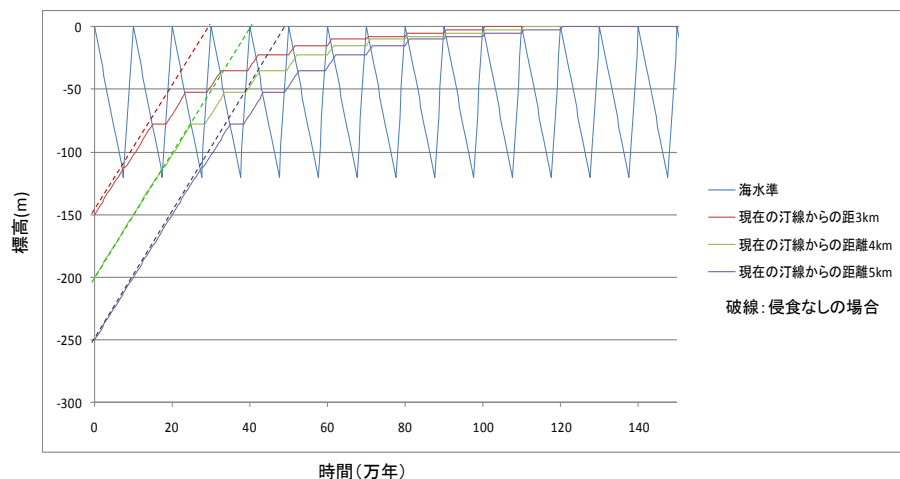


図 4.3-2 代表点における標高の時間変化

上図に示したように、標高が上昇する速度の鈍化は、現在の汀線に近い位置から順に始まることとなり、初期の標高の低い沖合の代表点の標高が、汀線に近く標高の高い代表点に徐々に追いついていくという挙動を示す。そして、このことは、ケース a の場合には、海底の地形勾配が徐々に小さくなることを示唆している。実際、現在の汀線から 8km の範囲内の海底地形の変化を算出した結果（図 4.3-3）が示すように、時間の経過とともに地形勾配は減少する。例えば 60 万年後には、現在の汀線から 8km にある範囲が海水準の振幅の範囲内に含まれるようになり、また、70 万年後にはこの範囲の平均地形勾配が 1% を下回る。



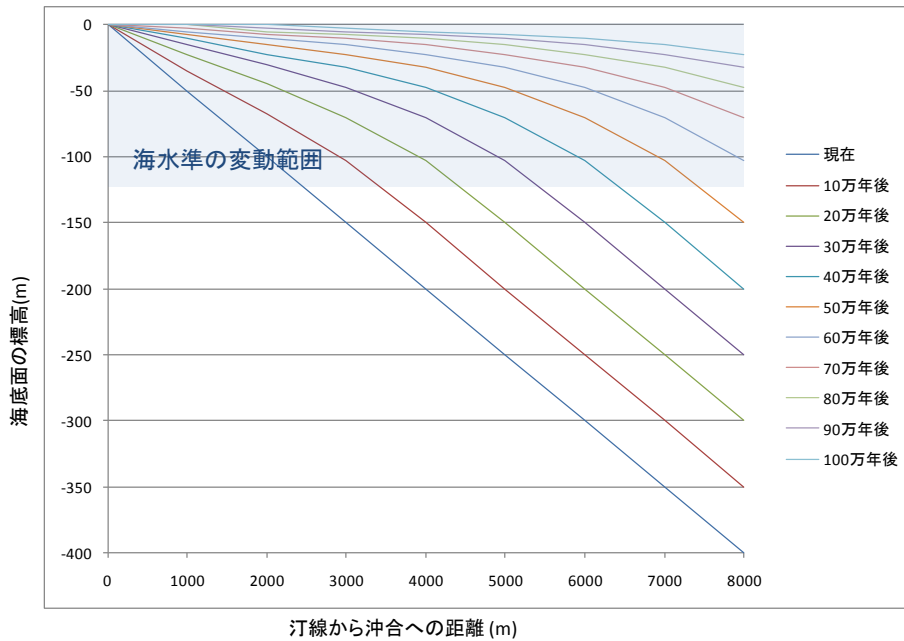


図 4.3-3 侵食速度が隆起速度と等しい場合（ケース a）の地形勾配の時間変化

各代表点に処分場を設置することを想定した場合、ケース b では、侵食速度を 0 と仮定しているために、処分場深度（直上の海底（時期によっては地表）面までの土被り厚）は全く変化しないのに対して、地表に露出している期間には隆起速度と等しい侵食が生ずることを仮定したケース a では、図 4.3-4 に示すように処分場深度が徐々に減少することとなる。

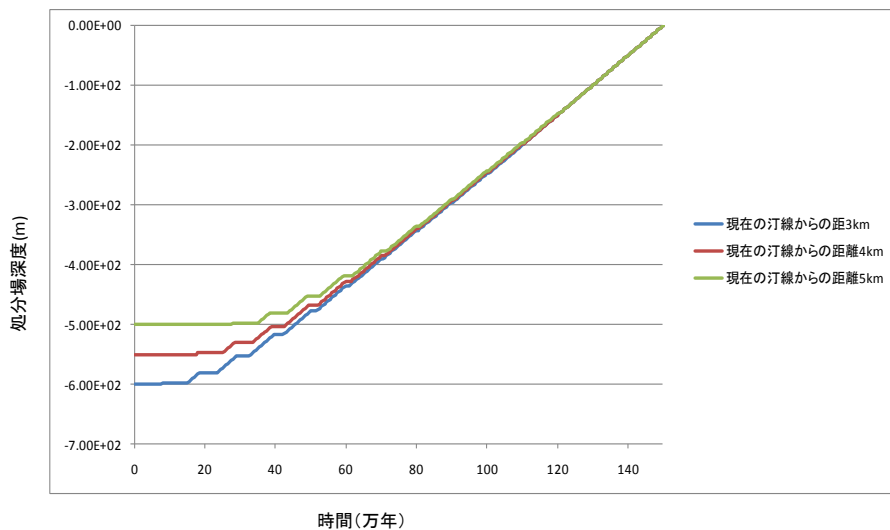


図 4.3-4 侵食速度が隆起速度と等しい場合（ケース a）の処分場深度の時間変化

#### 4.3.3 汀線と塩淡水境界の分析

次に、汀線と塩淡水境界の分析について述べる。

時間とともに変遷する地形（ケース a の場合、図 4.3-4）から、各時期における海水準（図 4.3-2）に相当する地点を抽出することによって、汀線の移動を把握する。

侵食速度の不確実性に対応して想定した前述の2つのケースに応じて、図 4.3-5 に示すように、将来の汀線の移動も大きく異なったものとなり、以下のような特徴を有する。なお、海退時の汀線位置は、侵食の影響に依存しないため、いずれのケースでも同じである。

- ・ ケース a では、海退時の汀線は時間の経過とともに徐々に沖合へと移行するのに対して、海進時の汀線は一定である。また、このため、汀線の移動距離は徐々に拡大する
- ・ ケース b では、海進時も海退時も汀線が徐々に沖合へと移行し、汀線の移動距離は時間に依らず一定である

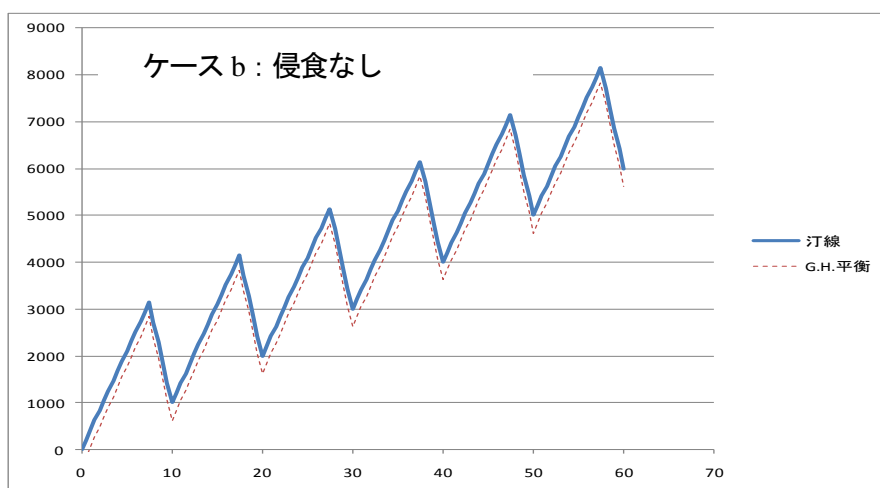
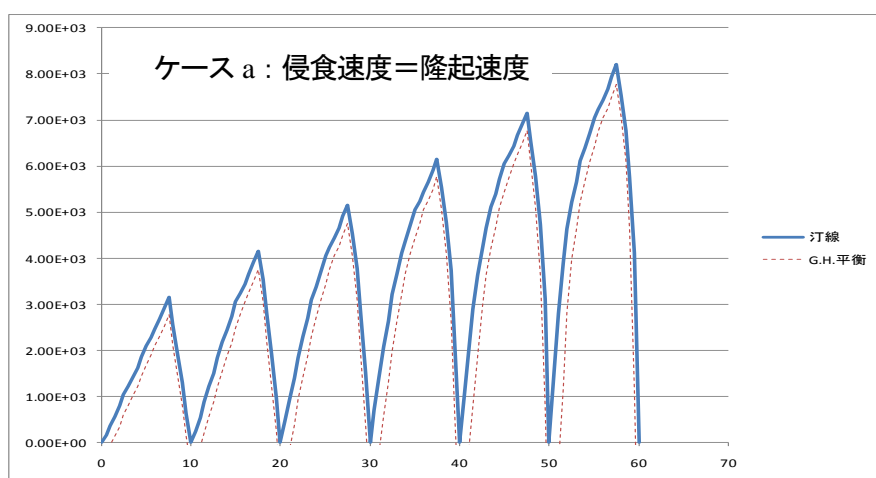


図 4.3-5 将来の汀線の移動挙動の侵食速度依存性

地下深部においても、塩水域と淡水域との境界（塩淡水境界）が生ずるが、その位置は、汀線とは一致しないことが知られている。なお、実際には、塩水と淡水とは非混合性ではないために遷移域を伴うが、ここでは、対象とする系全体のスケールに比して遷移域は十分に小さいものと仮定する。

地下水流動が定常状態にある場合、塩淡境界の平衡位置を、ガイベンヘルツベルグの式 (Domenico and Schwartz, 1998) から推定すると、淡水と海水の密度差 (約 2.5%) に起因して、陸域の塩淡境界は当該地点の標高の 40 倍に相当する深度に位置する。なお沿岸地域の地下では、比重の大きい海水が淡水の下方にくさび状に入り込み、塩淡境界が形成されていると想定すると、ガイベン・ヘルツベルグの法則は、陸域と海域の条件が長期間一定であったとした時の塩淡境界形状を表す法則である。陸域の地下水位 (海水面から地下水面までの高さ) を  $h$ 、淡水の密度を  $\rho_f$ 、海水の密度を  $\rho_s$ 、重力加速度を  $g$  とすると、水圧の釣り合いから海水面から塩淡境界面までの深さ  $H$  は、次式により求められる。

$$\rho_s g H = \rho_f g (H + h) \quad (1)$$

$\rho_f = 1000 \text{kg/m}^3$ 、 $\rho_s = 1025 \text{kg/m}^3$  を代入すると、 $H/h = 40$  となり、地下水位の 40 倍程度深部に塩淡境界が形成されることになる。図 4.3-5 に示した汀線近傍の赤い点線は、想定される処分場位置として、例えば標高-750m における塩淡境界の位置を示したものである。

ガイベン・ヘルツベルグの法則は、陸域と海域の条件が長期間一定で塩淡境界形状が定常であると仮定したときに成立する。一方、より長期的な海水準変動および隆起浸食の影響を考慮すると、図 4.3-2 に示したように海水準及び標高が時間とともに変化するような、動的な系で塩淡境界を設定する必要がある。この場合、深部の塩淡境界を上記のような定常状態を前提とした方法で予測するのは適切ではなく、非定常な状態を想定する必要がある。このように地下水流動が非定常な場合には、非定常密度流解析によって塩淡境界の位置を推定する方法がある。低透水性の地層の存在や不均質な地質構造によって、汀線の移動に対する塩淡境界の位置の移行パターンも影響を受けることとなる。特に、地層処分の母岩となるような低透水性の地層では、塩淡境界が海水準及び標高の変化に追従できず、図 4.3-6 に示すように、定常状態を仮定して求めた境界の位置に対して遅れが生ずることが予想される。ここで、海退時には、陸側の地形勾配を駆動力として塩淡境界が沖合へと移動するのに対して、海進時には海側に残留した淡水と海水との比重の差を駆動力として塩淡境界が陸側へと移動することとなる。このため、塩淡境界の移動は、一般に、海退時のほうが海進時よりも大きい傾向がある。一方、図 4.3-2 に示したように、海退時において、海水準は約 7.5 万年間で 120m 低下するのに対して、海進時には約 2.5 万年間で 120m 上昇することから、汀線の移動は、海進時のほうが 3 倍程度速い。以上の解析結果に基づいて、母岩の透水性に応じて、地下深部の塩淡境界の移動を、以下のように類型化した。

- ① 母岩の透水性が十分高く、海進・海退のいずれにおいても、汀線の移動に追従しガイベン・ヘルツベルグ平衡の位置にある
- ② 海退時には汀線の移動に追従しガイベン・ヘルツベルグ平衡の位置にあるが、海進時には追従できない
- ③ 母岩の透水性が低く、海進・海退のいずれにおいても汀線の移動に追従できない
- ④ 母岩の透水性が極めて低く、塩淡境界はほとんど移動しない

ここでは、侵食速度が隆起速度と等しいことを想定したケース a において、上記に従って、気候・

海水準変動及び隆起・侵食に伴う環境変遷の類型化を行った。類型化の結果を図 4.3-6～図 4.3-9 に示す。図中、青線は地形変化および海水準変動に従って移動する汀線の位置を表す。赤い実線は、非定常状態の塩淡境界を例示したものである。

沿岸域のサイトでは、海水準変動および隆起・侵食の作用による汀線の移動により、処分場の直上とその周辺の地表環境が海域から陸域に変化し、再び海域に戻ることを繰り返す複雑な環境に置かれる。また、地下においても、塩淡境界（塩水と淡水の接触境界）の移動により、処分場の周辺の地下水流速や化学環境（塩分の濃度分布）が変化する。ここでは、隆起速度、侵食速度、海水準変動、気候変動などがどのようなサイクルで変遷していくか設定し、以降の解析に用いる。

隆起速度、侵食速度の設定は、将来に地形がどのように変化するかを記述するのに必要な情報である。また、海水準変動の設定は次に述べる密度流解析において必要な情報となる。氷期・間氷期サイクルによる気象変動は生物圏評価を行う上で必要な情報となる。

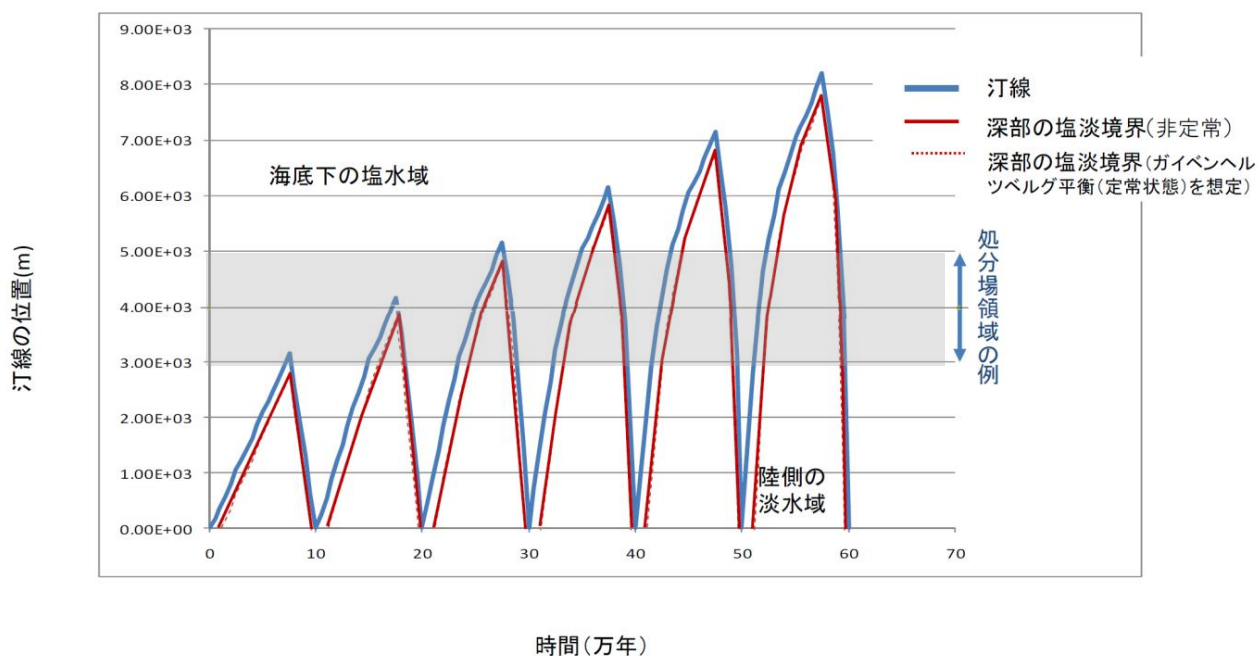


図 4.3-6 パターン1（母岩の透水性が十分高く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できる場合）における環境変遷（ケース a：侵食速度＝隆起速度の場合）

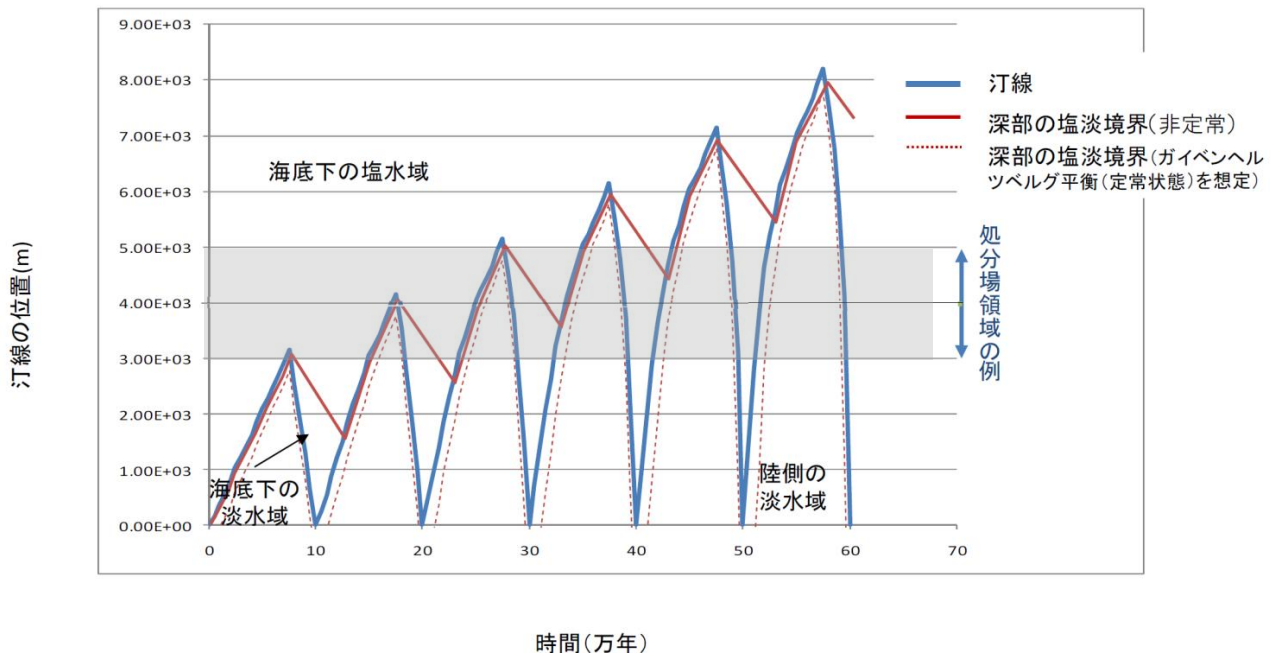


図 4.3-7 パターン 2 (海退時の汀線の移動には追従できるが海進時には追従できない場合) における環境変遷 (ケース a : 侵食速度=隆起速度の場合)

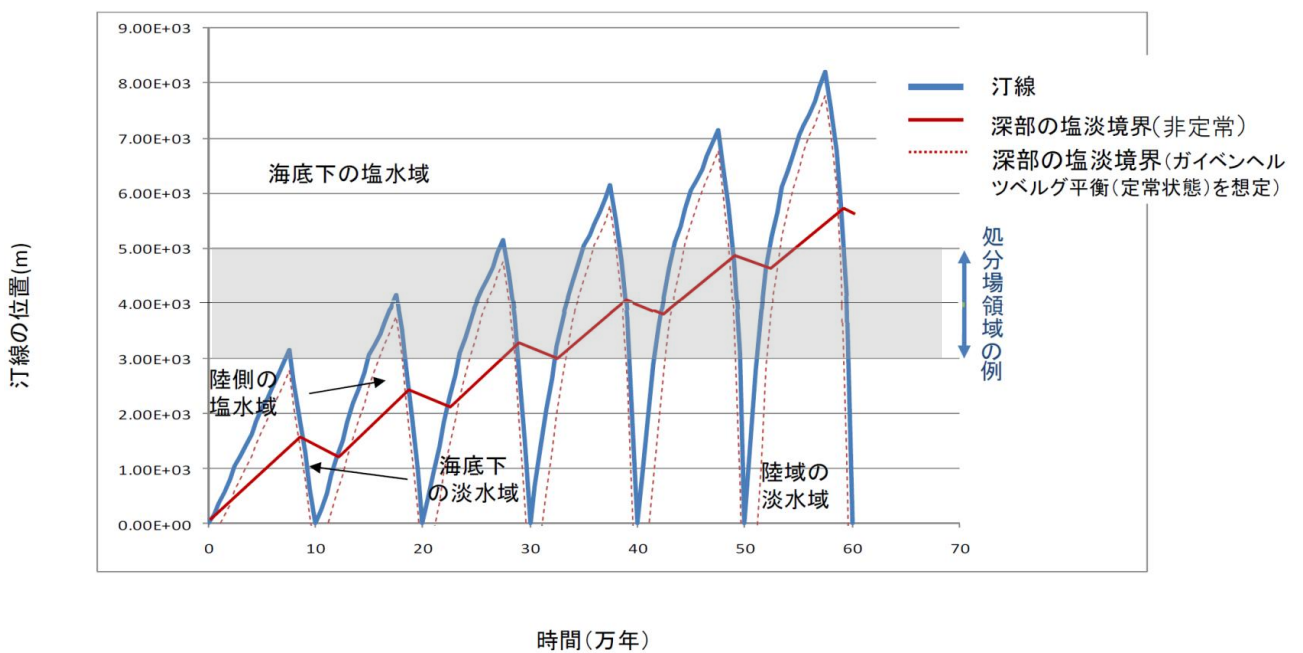


図 4.3-8 パターン 3 (母岩の透水性が低く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できない場合) における環境変遷 (ケース a : 侵食速度=隆起速度の場合)

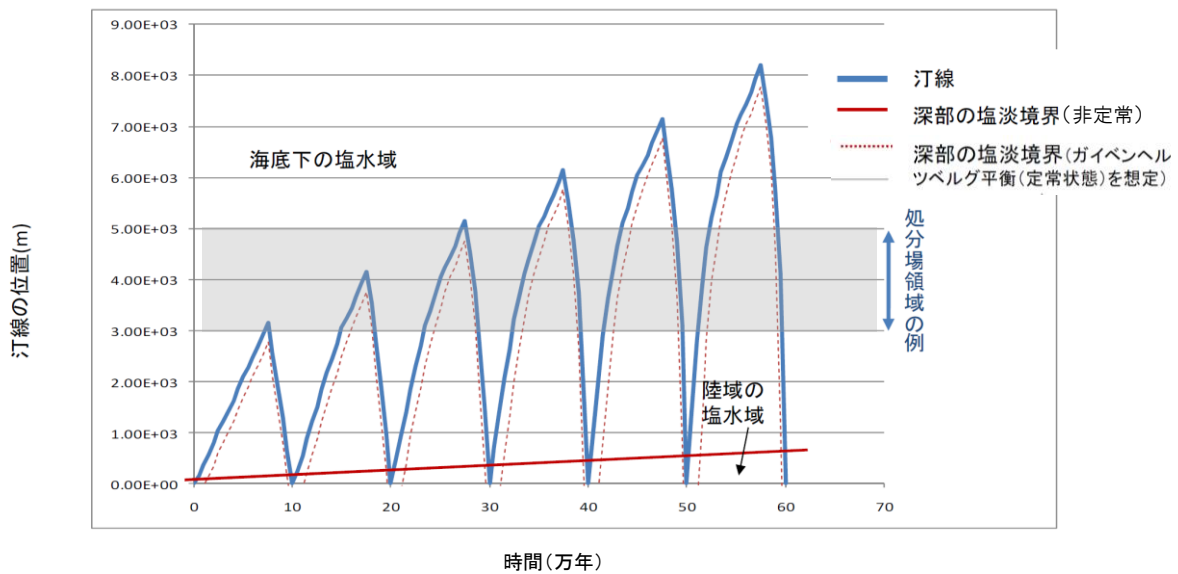


図 4.3-9 パターン 4 (母岩の透水性が極めて低く塩淡境界の移動がほとんど生じない場合) における環境変遷 (ケース a : 侵食速度=隆起速度の場合)

図 4.3-7 及び図 4.3-8 に示したように、低透水性の母岩中における塩淡境界の移動が海進時あるいは海退時の汀線の移動から遅れることで、海底下に淡水が取り残された領域 (図中の「海底下の淡水領域」) や陸域に取り残された塩水 (同, 「陸側の塩水域」) が生ずる。このような過渡的な環境を含めて考えた場合、例えば、現在の汀線から沖合 3km~5km の範囲に処分場を展開した場合の中心部 (沖合 4km) での環境は、各パターンにおいて、時間とともに、次のように推移することとなる。

- パターン 1 : 海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の淡水域 . . . . .
- パターン 2 : 海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域 . . . . .
- パターン 3 : 海底下の塩水域⇒陸側の塩水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の淡水域⇒海底下の淡水域⇒陸側の淡水域 . . . . .
- パターン 4 : 海底下の塩水域⇒陸側の塩水域⇒海底下の塩水域⇒陸側の塩水域 . . . . .

侵食速度を 0 と仮定したケース b においても、同様の類型化を行うことが可能である。この場合には、すでに述べたように、一定期間を経過すると、処分場を含む領域は離水し、完全に陸域の環境へと推移することとなる。

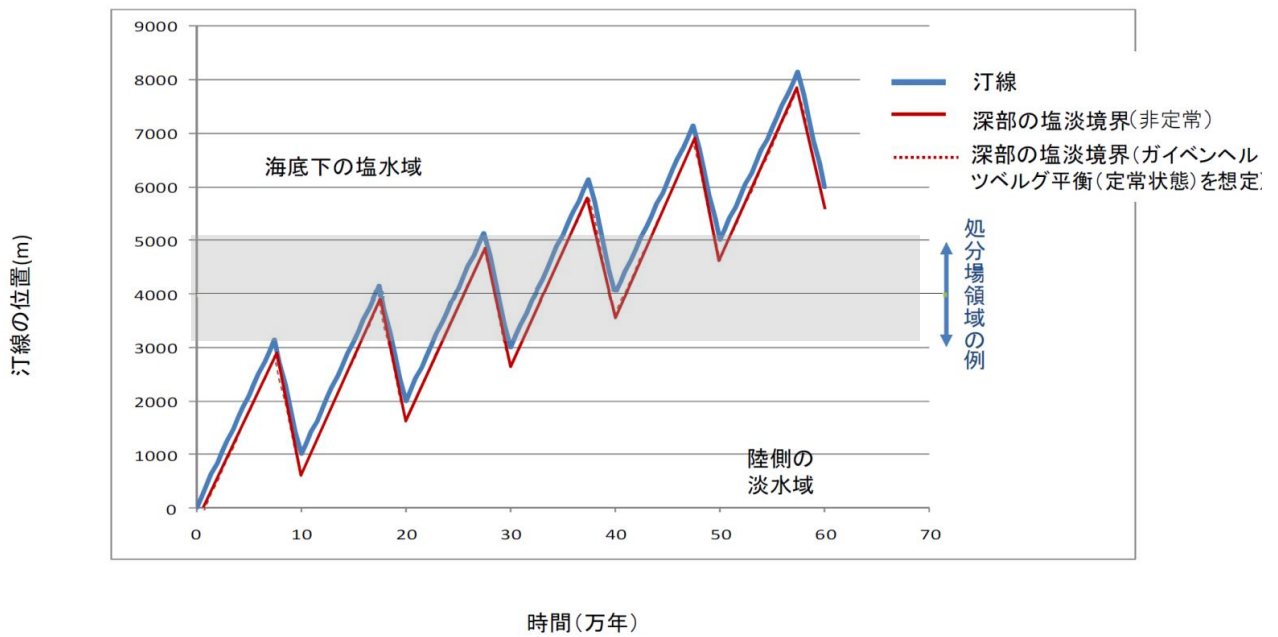


図 4.3-10 パターン1（母岩の透水性が十分高く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できる場合）における環境変遷（ケースb：侵食なしの場合）

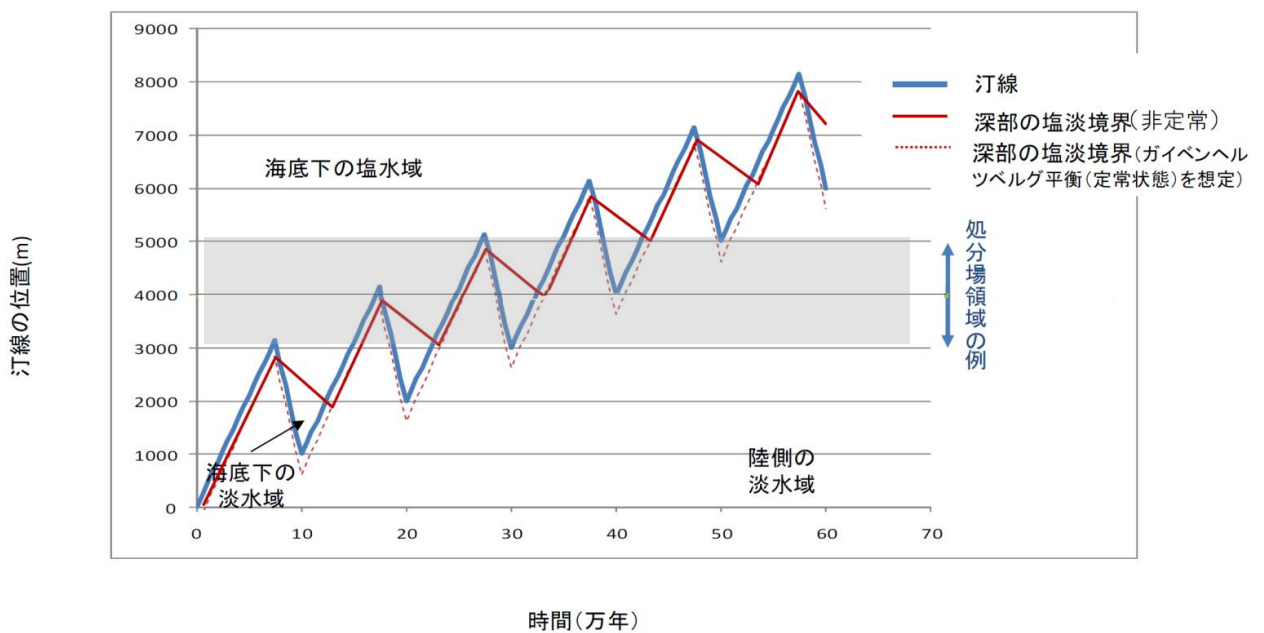


図 4.3-11 パターン2（海退時の汀線の移動には追従できるが海進時には追従できない場合）における環境変遷（ケースb：侵食なしの場合）



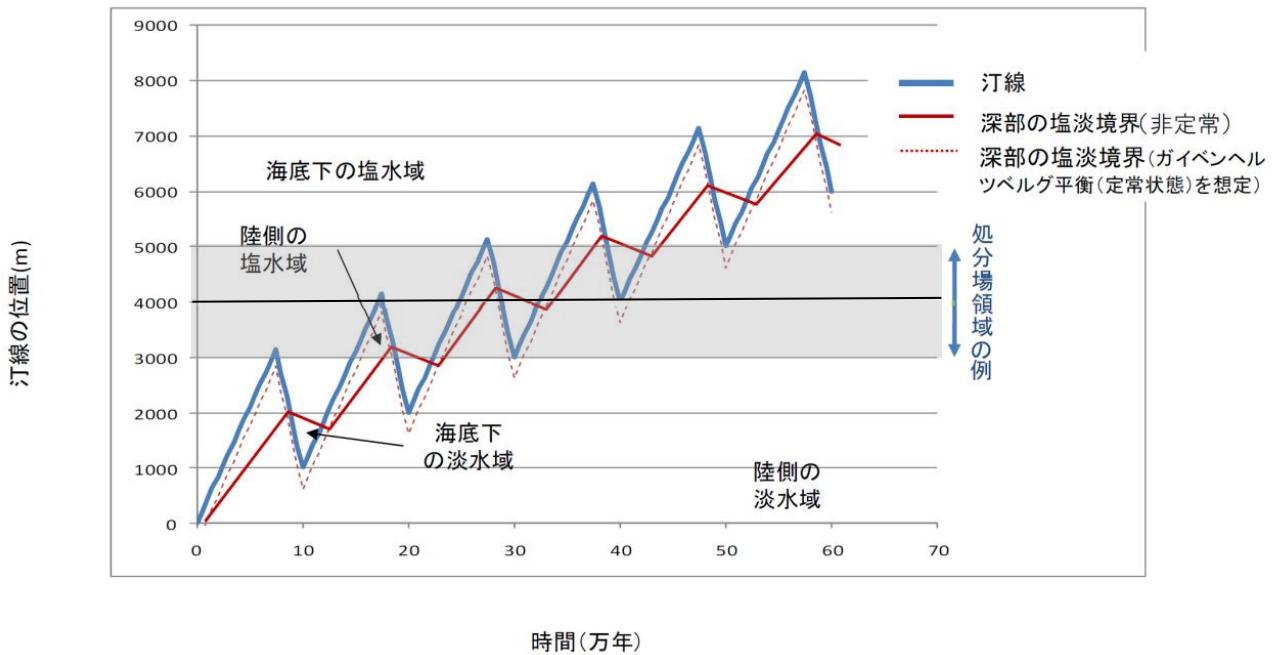


図 4.3-12 パターン3 (母岩の透水性が低く海進・海退のいずれでも汀線の移動に追従できない場合) における環境変遷 (ケースb: 侵食なしの場合)

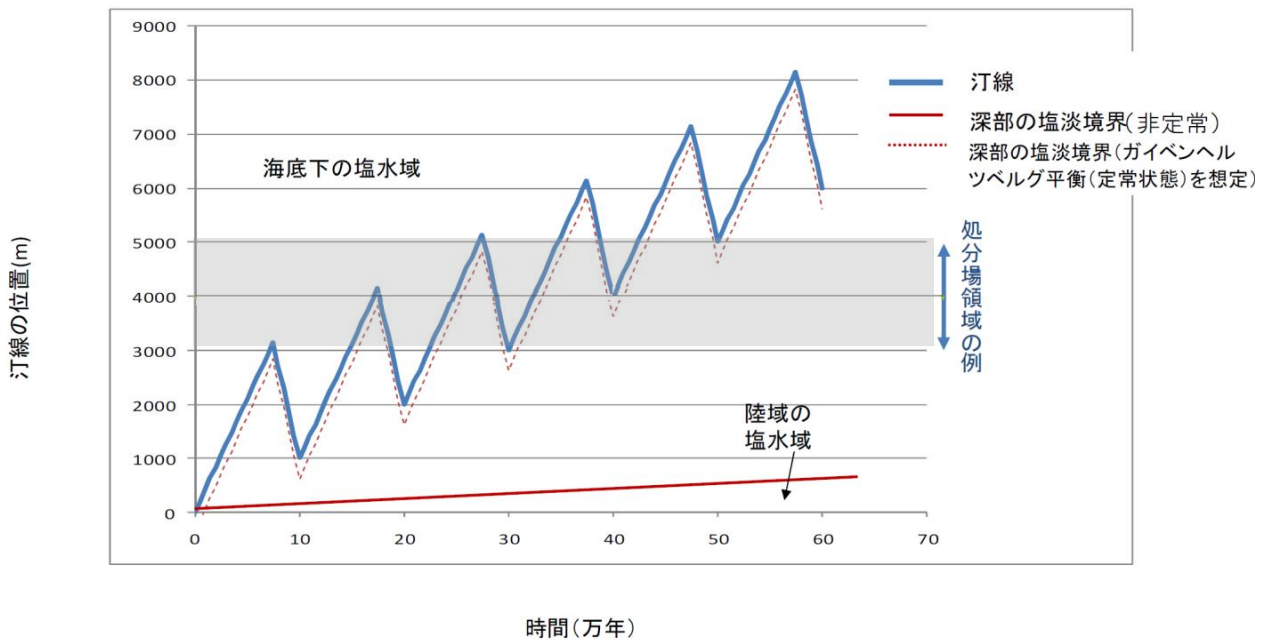


図 4.3-13 パターン4 (母岩の透水性が極めて低く塩淡境界の移動がほとんど生じない場合) における環境変遷 (ケースb: 侵食なしの場合)

#### 4.3.4 環境変遷の記述

前項において述べたように、将来の気候・海水準変動および隆起・侵食の複合的な影響によって



生ずる沿岸域での環境変遷は、ある程度類型化することが可能と考える。

一方、ニアフィールドについては種々の安全機能を期待することになり、これらの安全機能の性能は、熱的条件、水理条件、力学・物理条件、および化学条件といった環境条件に影響を受ける。従って、ここで整理する環境変遷は、ニアフィールドのシナリオを構築する上での境界条件となるものであるとともに、ニアフィールドの環境条件がどのような現象によって時間とともに推移するかという視点から整理することが効果的と考える。そこで、ケース a のパターン 3 (図 4.3-8) を例として、ニアフィールドの前提条件として着目すべき処分場周辺の環境条件と、気候・海水準変動や隆起・侵食による環境条件への影響因子とを整理した (表 4.3-2)。

表 4.3-2 ニアフィールドの前提条件として着目すべき環境条件および影響因子

	環境条件	影響因子
熱的条件	・ 地温	・ 隆起・侵食による深度減少
水理条件	・ 地下水流向分布 ・ 地下水流量分布 ・ 圧力分布	・ 隆起・侵食による地形変化 ・ 海水準変動による動水勾配の変化 ・ 塩淡境界の移動による流向・流速の変化 ・ 気候変動による涵養量の変化
力学および物理条件	・ 地圧 ・ 水圧	・ 隆起・侵食による深度減少 ・ 海水準変動による基準面の変化
化学条件	・ 地下水水質	・ 塩淡境界の移動による水質変化 ・ 異なる水質間での混合

表 4.3-2 に挙げた観点を参考として、ストーリーボードを作成した (表 4.3-3(a)～表 4.3-3(d))。ここでは、図 4.3-14 に示した環境変遷のパターンに従い、時間および空間を以下のように区分することとした。

- ・ 空間区分：現在の標高-750m において汀線から沖合 3km～5km に展開される処分場領域の中で、汀線からの距離に応じて環境変化に位相差が生ずることから、処分場領域を陸側、中央部および沖合側の三つに区分する
- ・ 時間区分：上記の三つの処分場領域において環境変化の生ずる 2 回目～6 回目の海水準変動のそれぞれにおいて処分場よりも汀線が陸側にある期間と海側にある期間とを区分する

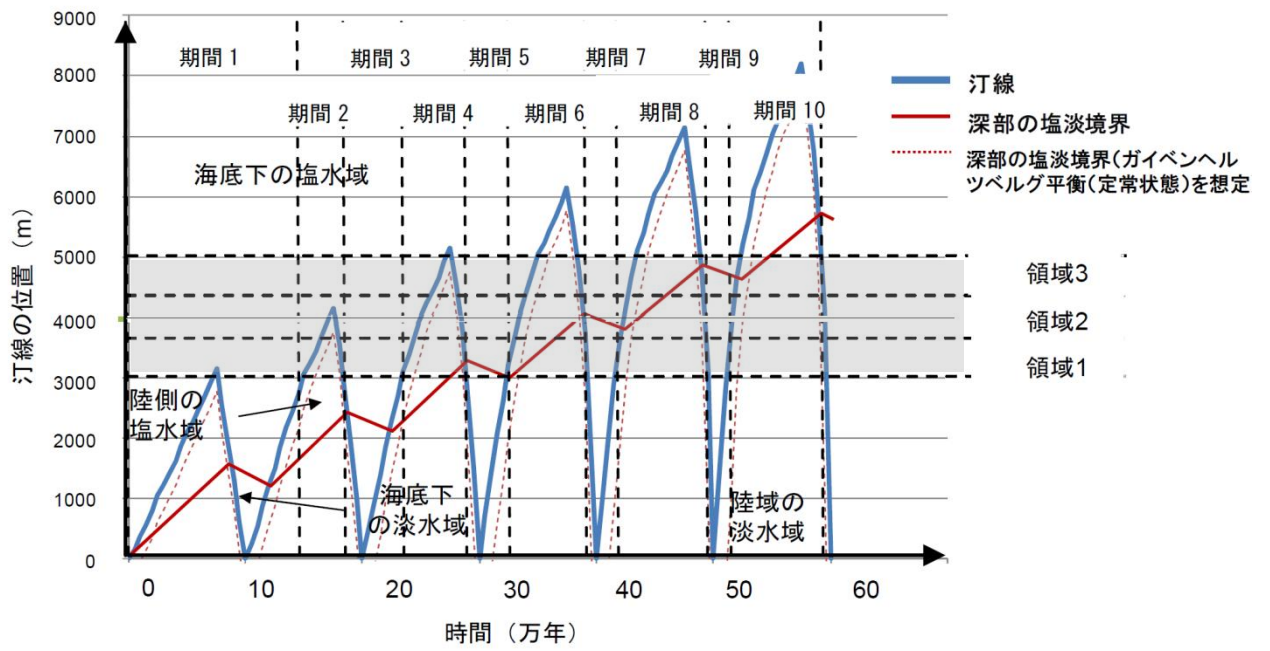


図 4.3-14 ストーリーボードのための時間・空間区分

表 4.3-3-(a) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン3）（1/4）

		期間 1	期間 2	期間 3
領域 1	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない
	水理条件	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 2	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

（矢印は、地下水の流向と大きさを意味する）

表 4.3-3-(b) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン 3）（2/4）

		期間 4	期間 5	期間 6
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下		
	水理条件	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）
領域 3	熱的条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず温度は変化しない		
	水理条件	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ
	力学条件	海底下にあるため侵食による深度減少は生じず地圧は変化しない		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）

(矢印は、地下水の流向と大きさを意味する)

表 4.3-3-(c) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン3）（3/4）

		期間7	期間8	期間9
領域1	熱的条件	深度減少により10万年間で1.5°C程度低下		
	水理条件	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きが遅い流れ	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速度い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きが遅い流れ
	力学条件	10万年間で地圧が数MPa程度低下		
	化学条件	降水起源の地下水	降水起源の地下水	降水起源の地下水
領域2	熱的条件	深度減少により10万年間で1.5°C程度低下		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速度い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きが遅い流れ
	力学条件	10万年間で地圧が数MPa程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水	降水起源の地下水
領域3	熱的条件	深度減少により10万年間で1.5°C程度低下		
	水理条件	海底下で海退時には沖合に、海進時には陸側に微小な流動	汀線よりも陸側、塩淡水境界よりも海側にあり、海側に向かった遅い流れ	海底下に軽い淡水があるため対流による上向きが遅い流れ
	力学条件	10万年間で地圧が数MPa程度低下		
	化学条件	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	海水起源の地下水水質（高塩分濃度）	降水起源の地下水

（矢印は、地下水の流向と大きさを意味する）

表 4.3-3-(d) 気候・海水準変動および隆起・侵食による環境変遷に関するストーリーボードの例（ケース a：パターン3）（4/4）

		期間 10
領域 1	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下
	水理条件	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水
領域 2	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下
	水理条件	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水
領域 3	熱的条件	深度減少により 10 万年間で 1.5°C 程度低下
	水理条件	汀線および塩淡水境界よりも陸側にあり地形勾配による比較的速い流れ
	力学条件	10 万年間で地圧が数 MPa 程度低下
	化学条件	降水起源の地下水

（矢印は、地下水の流向と大きさを意味する）

#### 4.4 まとめ

本章では、沿岸域における海水の影響や塩淡境界の分布の時間的な変遷をより現実的に取り扱うためのシステムの状態設定手法を例示した。これにより、地質環境の多様性と長期変遷に対応するための技術を示した。

具体的には、沿岸域におけるシステムの頑健性を検討する際に重要となる将来の気候・海水準変動および隆起・侵食というような要素を抽出し、これらの複合的な影響によって生ずる地形変化、汀線や塩淡境界の移動といった沿岸域での環境変遷を4種類のパターンに類型化した。そのうちの一例についてシステムの状態の変遷を整理し、ストーリーボードを作成した。

今後の課題としては、不確実性を考慮した密度流解析結果の取り込み、核種移行解析モデルへの展開、調査計画および設計へのフィードバック、不確実性を考慮した密度流解析結果の取り込みについてそれぞれ具体化することが必要である。

## 5 ニアフィールドの長期変遷に対するシナリオ構築手法の適用性確認

### 5.1 背景と目的

ニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩には、放射性物質を抑制する安全機能を期待する。このため、ニアフィールドにおけるシステムの将来挙動を理解することは、処分場の設計および安全評価の共通的な基盤となるものである（NUMO, 2011）。そのため、ニアフィールドにおける長期的変遷が人工バリアや周辺母岩へ及ぼす物理的・化学的影響の理解を深化させるために、研究開発を進めている。地層処分事業においては、段階的に知見を拡充するとともに、それらを適切な段階で安全評価に取り込むことができるようにしておくことが必要である。

また、ニアフィールドは、核種移行を抑制するバリアとして重要な役割を果たすと同時に、サイト固有の地質環境に依存する程度が、天然バリアと比較して、相対的に小さい。従って、特定のサイトがない現段階においても、ニアフィールドを対象とした技術開発を先行的に進めることは、特定のサイトの特徴を的確に取り込んでいくための起点を準備するという観点から有用と考える。

以上を踏まえ、ここでは、第3章で述べたシナリオ構築手法をニアフィールドの長期変遷に対して適用し、シナリオを構築する上で前提とする考え方を示すとともに、新たな知見を考慮してシステムの理解およびシナリオの構築を行う手順について例示する。

### 5.2 前提とする考え方

#### 5.2.1 地層処分における経年変化の捉え方

地層処分システムは、以下の二つの特徴を有する。

- ① 非修復系による受動的安全性：地層処分システムの機能が求められる期間が極めて長期に及ぶため、その間の状態の監視および修復に依存しない受動的な安全性を達成することを基本として設計される。
- ② 経年変化を前提とした機能性：高レベル放射性廃棄物の閉鎖後初期の状態においては、放射性廃棄物の発熱のために高温であり、また、人工バリア内が未飽和で酸化性環境にあるような状態であり、この間は鉄製のオーバーパックにより放射性廃棄物を閉じ込めることが基本である。その後、温度低下、水分飽和、還元性環境への推移、そして異なる人工バリア材の境界での種々の反応と変質などが進行して定常的な状態となった後には、低透水性や低拡散性あるいは収着性といった安全機能へと重点を移していくこととなる。また、密封性を失った後のオーバーパックも、将来の酸化性地下水の侵入や水の放射線分解による酸化剤の生成といった変動要因に対する頑健性をもたらすものとして期待することができる。このように、経年変化を前提として、安全機能が時系列的に展開されるように多重バリアシステムの設計が行われる。

上記の②は、地層処分システムにおいては、着目する安全機能によっては経年変化が必ずしも「劣化」ではないことを意味しており、また、このことが、修復に頼ることなく長期にわたって受動的に安全性を確保するという①の要請を満足する上で重要な要件となっている。

このような前提のもとに、NUMOの行う地層処分事業においては、最新の知見に基づき地層処分システムの長期変遷についての理解をまとめ、これを安全評価の前提とすることに加え、システムの理解に基づく初期条件の設定（処分場の設計）と品質管理に情報を提供することが重要である。



## 5.2.2 ニアフィールドにおけるシステム変遷の特徴

初期の期間における地層処分の安全確保の目標は、高い放射能を有する高レベル放射性廃棄物を閉鎖後の地下施設に搬入・定置して保持する際の安全性の確保（人工構築物としての安全性）である。これに対して、数万年以上の長期の時間経過後においては、安全確保の目標が、沈殿（二次鉱物生成）や鉱物などへの収着などによる放射性物質の地質環境中における安定性の確保（より天然に近い系としての安定性）へと変化する。そして、この間の変遷期には、「人工構築物としての安全性」と「より天然に近い系（環境に適応して材料間の境界などが変質した人工バリアシステム）としての安定性」とを、放射能の減衰および不確実性を勘案して組み合わせることで、双方が共に喪失することのないよう、前者から後者へと推移することが重要である。

人工構築物としての安全性は、構造的な強度や応力緩衝性あるいは材料の耐久性によった以下のような工学的対策によってもたらされるものである。

- ・ 高レベル放射性廃液のガラス固化
  - 放射性物質（特に可溶性のもの）の溶出率制限
- ・ オーバーパックへのガラス固化体の封入
  - ガラス固化体と地下水の接触の抑制
- ・ 緩衝材の設置
  - 止水性
  - 力学的緩衝性

一方、上述した工学的対策の組み合わせによる施設としての安全性を補完し、徐々に長期的安全確保の主役となるものは、人工バリアを含むより天然に近い系としてのニアフィールドの安定性であり、これは、

- ・ 難溶解性の元素の沈殿や結晶化
- ・ 収着
- ・ 材料の表面や異種材料間の境界面に緻密な変質層が形成されることによる物質移動抑制
- ・ 可塑性に優れた緩衝材の進入あるいは二次鉱物の沈殿による開口部の自己シーリング
- ・ 自然事象の影響などの処分場周辺環境の急激な変化に対する頑健性

といった種々のメカニズムによってもたらされるものと考えられる。

また、このような機能的な変遷は、図 5.2-1 にまとめたように、地下深部の環境と必ずしも整合的ではない人工構築物の特徴が、周囲の環境に適応していく過程と見られることもできる。

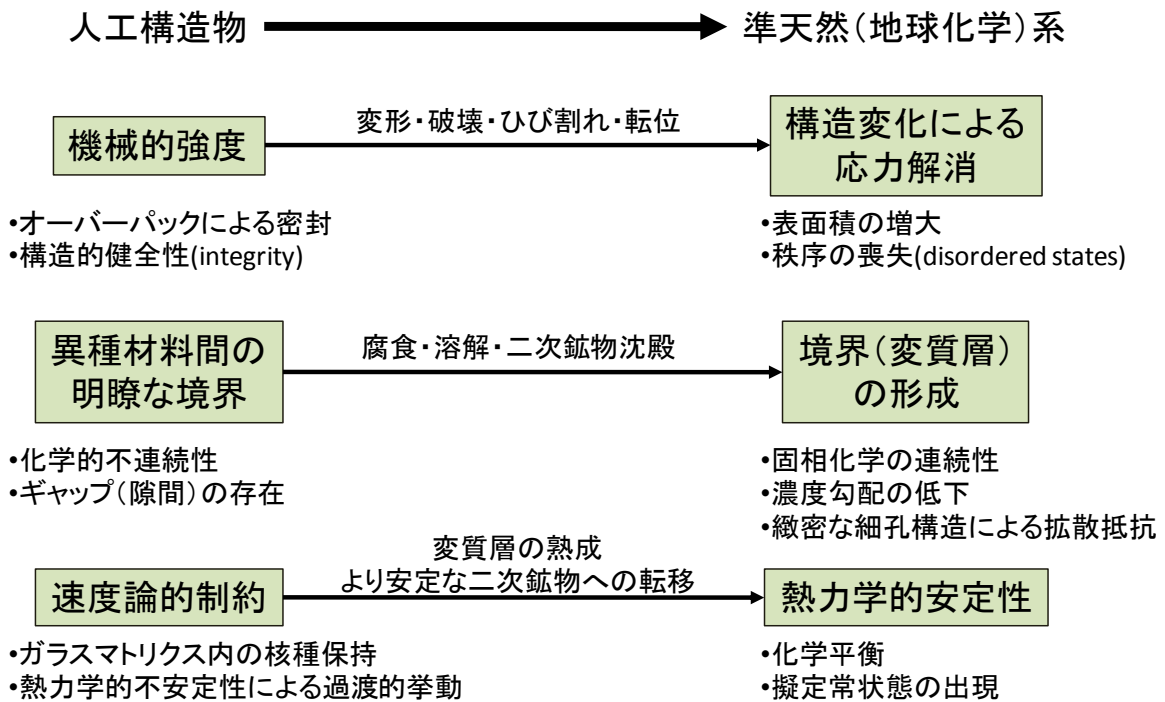


図 5.2-1 地層処分システムの機能的変遷に対応する特徴の変化

### 5.3 手順および例示

#### 5.3.1 システムの理解

ここでは、システムの理解に基づく安全機能の設定の考え方を述べる。地下水による放射性物質の漏出と移行を想定した場合のニアフィールドでの閉じ込めは、核種移行率の低減および移行を遅延する間の放射能の減衰を目指すものであり、以下に挙げる安全機能が考えられる (NUMO, 2011)。

- ・ 放射性物質の浸出抑制 (固化マトリクスによる浸出抑制, 発熱が著しい期間の地下水接触の防止など)
- ・ 放射性物質の移行抑制 (放射性物質の溶解度制限, 移流による移行の抑制, コロイド移行の防止・抑制, 収着による放射性物質の移行遅延, 分散による移行率の遅延など)

また、これらの安全機能は、高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物の地層処分において共通的に適用可能なものであり、放射性廃棄物の特徴や処分概念に対応して適切な機能を選択し、組み合わせることで安全確保を目指す。

安全機能を選定して設計を行うためには、将来の地層処分システムの物理・化学的状态および状態の変化をもたらすような現象群を十分に理解するとともに、現状の知見では排除することのできない不確実性を抽出することを目的とした「システム理解」が重要である。

システム理解は、以下に示す手順に従い行う。

- ① 地下水による放射性物質の漏出・移行に関連する地層処分システムの特徴 (以下、「特性」という) あるいは現象を抽出する。
- ② 抽出した特性と安全機能とを対応付け、各安全機能を地層処分システムのどの部位に期待す

るかを明らかにする。

- ③ 特性に影響を与えるような地層処分システムの環境条件（以下、「環境条件」という）を抽出する。
- ④ 環境条件の変遷に関与するような具体的な現象（以下、「条件への影響因子」という）を抽出する。
- ⑤ 地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ、「条件への影響因子」によって生ずると予想される「環境条件」の変遷、環境条件の変遷に対応した「安全機能に寄与する特性」の振る舞いについて、当該時点で得られる最適の科学的知見を整理する（FEP カタログ）。また、科学的知見に含まれる不確実性要因を抽出する。
- ⑥ 上述の整理を踏まえ、システムの状態設定を行う（ストーリーボードの作成）。

なお、サイト調査によって明らかにされる地質環境の条件や設計によって具体化される処分施設・人工バリアの仕様を適宜取り入れつつ、システム理解が進められることが必要である。一方、サイト調査および設計はシステム理解に基づき行われるものであるため、これらと並行しつつ、上記の①～⑥の過程は、反復的に繰り返しつつ進めるものである。そして、核種移行挙動、安全機能に寄与する現象、環境条件および環境条件への影響因子（これらを総括して、以下、「システム理解に関連する FEP」という）について、地層処分システムの構成要素および安全機能と対応付けながら整理するものである。この際、必要に応じて時間や空間スケールにも留意する。また、この成果は、処分場の設計および地質環境の調査・評価との連携も勘案して、多角的かつ視覚的に利用可能なものとすることが求められ、さらに、多分野間の整合的な情報の共有にも留意することが必要である。

以下では、上述の手順に沿って、第2次取りまとめのリファレンスケースを例に、一連の手順を検討状況について示す。

①～④に沿って、安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象を整理した（表 5.3-1～表 5.3-2）。なお、⑤については、既存の FEP 情報を適用した（神崎ほか，2009）。また、⑥については、安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象およびそれらの相互作用に着目しつつ、ニアフィールド環境がどのように変遷するかをストーリーボードとして整理した（表 5.3-3～表 5.3-6）。

ストーリーボードを作成する際には、期間を区分することが必要である。この期間区分は、安全機能を視軸として、放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や生物圏の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などに留意して決定するものと考え。ここでは、安全機能のうち、オーバーパックによる発熱が著しい期間の地下水接触の防止に着目して、第2次取りまとめ以降更新された知見を踏まえて設定した。

第2次取りまとめ以降のオーバーパック腐食に関する研究開発において還元環境での炭素鋼の全面腐食速度を  $2\mu\text{m}$ /年程度と想定することが現実的であることが示されている（JNC，2005）。このため、オーバーパックの開口時期は、第2次取りまとめのリファレンスケースの設定（1,000年）よりも現実的には長くなると考え、ニアフィールドの環境変遷を、安全確保上の意義の観点から以下の三期間に区分した。

- ・ 期間 I：坑道閉鎖後の過渡期（坑道閉鎖～1,000年後）
  - 廃棄体からの熱および処分場の建設・操業時に導入された空気の影響（不飽和領域の形成

および酸化性条件への推移) が回復して核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する

- 緩衝材中のベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで、物質移動が拡散によって支配される場が確保される
- ・ 期間Ⅱ：オーバーパック開口までの期間（1,000年後～1万年後）
  - 炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という異種材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで定常的な地球化学的構造（地下水の分布）が成立する
  - オーバーパックの水密性により、上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる
- ・ 期間Ⅲ：1万年後～10万年後
  - オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始するが、ガラス近傍のSi濃度の上昇および表面変質層による溶解抑制によって浸出率は徐々に低下する
  - ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持され、アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する
  - オーバーパックの外側では期間Ⅱまでに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される

表 5.3-1 安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象の整理例（安全機能と関連する条件）

安全機能		特性	関連する条件	
安全機能 (閉鎖後閉じ込め)	放射性物質の浸出抑制	発熱が著しい期間の地下水の接触防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 耐食性</li> <li>・ 力学的強度</li> <li>・ 構造的健全性</li> <li>・ 溶接部耐食性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質 (pH, Eh および主要な塩分濃度など)</li> <li>・ 緩衝材水分飽和度</li> <li>・ 温度</li> <li>・ 放射線</li> <li>・ 外荷重 (水圧, 地圧, 緩衝材による圧密反? など)</li> </ul>
		ガラスマトリクスによる浸出抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガラス固化体の低浸出性</li> <li>・ 核種の難溶解性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など)</li> <li>・ 温度</li> <li>・ 地下水流速</li> </ul>
	放射性物質の移行抑制	収着による放射性物質の移行遅延	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材への核種の収着</li> <li>・ 岩石への核種の収着</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質 (pH, Eh および主要元素濃度など)</li> <li>・ 緩衝材の鉱物組成</li> <li>・ 岩石の鉱物組成</li> <li>・ 亀裂充填鉱物</li> </ul>
		放射性物質の溶解度制限	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 溶解挙動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水質</li> <li>・ 温度</li> </ul>
		移流による移行の抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 拡散</li> <li>・ 分散</li> <li>・ 緩衝材の止水性</li> <li>・ 岩盤の低透水性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材の材料組成と乾燥密度</li> <li>・ 緩衝材中のギャップおよび割れ目の有無と形状</li> <li>・ 母岩マトリクス部の透水性</li> <li>・ 母岩中の亀裂特性</li> <li>・ 坑道掘削影響領域の透水性</li> </ul>

\* 「コロイド移行の防止・抑制」および「アクセス坑道およびその周辺が卓越した移行経路となることの抑制」については、適切な対策により確保されていることを前提とする

表 5.3-2 安全機能を基軸としたシステムの理解に関する現象の整理例（条件と条件への影響因子）

条件		条件への影響因子（現象）
熱的条件	温度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガラス固化体の発熱</li> <li>・ 熱伝導（人工バリアおよび岩盤）</li> <li>・ 蒸発および水蒸気の移動</li> </ul>
水理条件	地下水（実）流速	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下水飽和流動（定常流れ，密度差による非定常流れ）</li> </ul>
	緩衝材水分飽和度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 再冠水</li> <li>・ 蒸発および水蒸気の移動</li> </ul>
力学的条件 （物理条件を含む）	母岩マトリクス 坑道掘削影響領域の透水性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）</li> <li>・ 地下水流動</li> <li>・ 岩盤の割れ</li> <li>・ 応力場の変化による亀裂開口幅の変化</li> <li>・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）</li> </ul>
	圧力（水圧，地圧およびそのほかの応力）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 岩盤クリープ</li> <li>・ 緩衝材の膨潤</li> <li>・ 炭素鋼の腐食膨張</li> </ul>
	緩衝材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材の膨潤</li> <li>・ 緩衝材の化学的変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）</li> <li>・ 緩衝材の侵食</li> </ul>
化学条件	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 埋め戻し材の膨潤</li> <li>・ 埋め戻し材の化学的変質</li> <li>・ 埋め戻し材の侵食</li> </ul>
	水質（pH，Eh および主要塩分濃度など）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地下水水質形成</li> <li>・ 地下水 - 岩石反応</li> <li>・ 微生物および有機物の反応</li> <li>・ 作業時の空気の侵入</li> <li>・ Fe の腐食および腐食生成物と水の反応</li> <li>・ 緩衝材と水の反応</li> <li>・ セメント系材料の溶脱・変質</li> </ul>
	緩衝材の鉱物組成	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 緩衝材の化学的変質</li> </ul>
	岩石の鉱物組成（亀裂充填鉱物，亀裂表面，マトリクス（変質部，未変質部など）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 岩石の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）</li> <li>・ 亀裂表面および充填鉱物の変質（溶解，イオン交換，二次鉱物沈殿）</li> </ul>

表 5.3-3 ニアフィールド環境変遷ストーリーボード

		期間 I : 処分場閉鎖～1,000 年後	期間 II : 1,000 年後～1 万年後	期間 III : 1 万年後～10 万年後
システムの 状態				
安全確保上 の意義		<p>廃棄体発熱および処分場建設・操業時に導入された空気の影響(不飽和領域形成および酸化性条件への推移)が回復し核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する。</p> <p>ベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することで、物質移動が拡散によって支配される場が確保される。</p>	<p>炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という異なる材料を配置した場合、熱力学的に安定ではないため、材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで、定常的な地球化学的構造が成立する。オーバーパックの水密性で、上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。</p>	<p>オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始する。アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する。オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材(二次鉱物を含む)に収着され遅延される。</p>
環境条件	T	<p>廃棄体の発熱により温度が上昇するが緩衝材中の最高温度は 100℃以下である。放射能の減衰により数百年後には地温程度にまで低下。</p>	期間 I の定常状態が継続する	
	H	<p>坑道閉鎖後岩盤中の地下水の圧力水頭が回復し、緩衝材への浸透が生ずる。岩盤透水係数が小さい場合には緩衝材冠水に数十年を要する。</p>		
	M	<p>緩衝材の膨潤によりギャップが閉塞し一様な圧縮場となる。岩盤中の応力条件が変化し、坑道のクリーブ変形が生ずる。</p>	<p>オーバーパックの腐食による強度低下および腐食膨張による緩衝材圧密によってオーバーパックが変形し開口に至る。ガラスの破砕が進む。</p>	<p>炭素鋼の腐食膨張が継続し緩衝材の圧密およびガラス固化体の破砕が継続する。</p>
	C	<p>閉鎖時に残留した酸素はオーバーパック、緩衝材中の鉄鉱物や微生物によって速やかに消費される。</p>	<p>Fe イオンによる変質(内側)および高 pH 条件での変質(外側)により緩衝材の境界部に変質層が形成され間隙が閉塞に向かう。</p>	<p>ガラス溶解により核種が浸出する。ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持される。</p>

T : 熱的条件 H: 水理条件 M: 力学条件 C: 化学条件



表 5.3-4 各期間におけるシステムの変遷 (1/3)

期間 I ; 坑道閉鎖後の過渡期 (0~1,000 年後)

<p>安全確保上の意義</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄体からの熱および処分場の建設・操業時に導入された酸素の影響（不飽和領域の形成および酸化性条件への推移）が回復して核種の閉じ込めに適した地下深部本来の条件が成立する</li> <li>緩衝材中のベントナイトの膨潤により一様な圧縮応力場が形成され、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞することにより、物質移動が拡散によって支配される場が確保される</li> </ul>			
<p>環境条件の変遷および関連する現象</p>		<p>廃棄体</p>	<p>緩衝材</p>	<p>坑道支保・周辺岩盤</p>
<p>T</p>		<p>Sr-90 や Cs-137 の崩壊熱により温度が上昇するが、これらの核種の放射能の減衰と緩衝材への熱伝導によって徐々に地温まで低下</p>	<p>廃棄体からの熱伝導により温度が上昇する。緩衝材中に地下水が浸透することによって熱伝導率は上昇し、また、ベントナイトの膨潤によってギャップが閉塞して熱伝導が改善されるため、緩衝材内側の温度上昇は 100℃以下に制限される</p>	<p>緩衝材からの熱伝導により温度が上昇するが、坑道周辺において顕著な熱対流が生じるほどの温度勾配とはならない</p>
<p>H</p>		<p>オーバーパックの水密性のために水は廃棄体の内部には浸透しない。</p>	<p>周囲の岩盤からの湧水により緩衝材と坑壁間のギャップは底部から水没し、これに伴って緩衝材中への地下水の浸透が生ずるが、その速度は温度勾配によって影響される。緩衝材中の地下水は蒸発し、水蒸気の移動も生ずる。緩衝材の水分飽和後はベントナイトの膨潤・自己シールによって止水性が確保される</p>	<p>処分場建設・操業中に低下していた地下水圧は坑道閉鎖後徐々に回復し、同時に、緩衝材への地下水浸透が生ずる</p>
<p>M</p>		<p>ベントナイトの膨潤圧に対してオーバーパックが十分な強度を有するため有意な変形は生じない</p>	<p>緩衝材の水分飽和に伴い、ベントナイトが膨潤し、緩衝材中および隣接したバリアとの間のギャップが閉塞する（自己シール）。ベントナイトの膨潤後は、人工バリア内はほぼ均一な圧縮場となる</p>	<p>ベントナイトの膨潤圧によって応力場が変化する。亀裂開口幅の変化や岩盤クリープによる坑道形状変化の可能性</p>
<p>C</p>		<p>初期にはFeの酸素消費型腐食が生ずるが、緩衝材中の酸素は速やかに消費されるため減肉は問題とはならない</p>	<p>閉鎖時の空隙中には酸素が残されているがその中の酸素は緩衝材中の鉄鉱物および微生物によって消費されるため、緩衝材の水分飽和後は速やかに還元性へと推移する。100℃以下ではベントナイトの熱変質は有意なものとはならない</p>	<p>坑道閉鎖時に残留する酸素は亀裂中を流下するが、亀裂充填物中の鉄鉱物および微生物によって速やかに消費される</p>
<p>条件変化の程度および時間・空間スケール</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>温度変化および緩衝材再冠水の時間スケール</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材中の温度は数十年でピークに達し、1,000年以内に地温程度に低下する</li> <li>周囲の岩盤からの地下水供給が遅い場合には緩衝材の冠水に数百年を要し、この場合には、緩衝材中のピーク温度が20℃程度上昇する</li> </ul> </div> <div style="width: 45%;"> <p>残留酸素消費の時間スケール</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材中の黄鉄鉱により間隙水中の溶存酸素は1年以内に消費される</li> <li>微生物活動あるいはシデライト溶解・酸化の寄与を考えれば酸素の消費はさらに速やかに生ずる</li> </ul> </div> </div>			
<p>不確実性要因</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>緩衝材中あるいは境界上のギャップの大きさ（影響先：緩衝材の自己シール）</li> <li>周辺岩盤透過性および坑道閉鎖時点での地下水圧力水頭の低下程度（影響先：冠水期間と最高温度）</li> <li>緩衝材中の黄鉄鉱の含有率および反応に寄与する比表面積（影響先：溶存酸素の消費速度）</li> <li>緩衝材中の微生物の種類と含有率（影響先：溶存酸素の消費速度）</li> </ul>			

T : 熱的条件 H: 水理条件 M: 力学条件 C: 化学条件



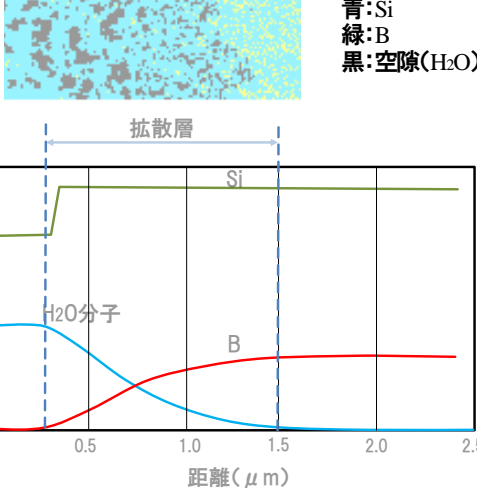
表 5.3-5 各期間におけるシステムの変遷 (2/3)  
 期間 II ; オーバーパック開口まで (1,000 年~1 万年後)

<p>安全確保上の意義</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭素鋼と緩衝材、緩衝材とコンクリート支保という、異種材料間の溶質移動と化学反応に伴い、環境に対してより整合的な二次鉱物の境界層が形成され、間隙が閉塞することで、定常的な地球化学的構造が成立する。</li> <li>オーバーパックの水密性により、上記の定常的な地球化学的構造が出現するまで廃棄体中に核種が閉じ込められる。</li> </ul>		
<p>環境条件の変遷および関連する現象</p>	<p>廃棄体・オーバーパック</p>	<p>緩衝材</p>	<p>支保・周辺岩盤</p>
<p>T/ H</p>	<p>期間 I における定常状態が継続する</p>		
<p>M</p>	<p>炭素鋼の腐食により、未腐食部の減肉による強度低下と腐食生成物による体積増加に伴う緩衝材膨潤圧の増大が生じて変形し、開口に至る。また、これに伴いガラス固化体が破砕する</p>	<p>オーバーパックの腐食膨張により緩衝材の圧密が生ずる一方で、ベントナイトが周辺岩盤中の亀裂に侵入し地下水によって侵食されるが、前者が優勢となるため、緩衝材の密度および膨潤圧は上昇する。下記の化学的変質領域では力学特性が変化</p>	<p>緩衝材中のベントナイトが周辺岩盤中の亀裂に侵入し、先端部では侵食が生ずる</p>
<p>C</p>	<p>還元環境で水素発生型の腐食が進み、腐食生成物としてシデライトやマグネタイトが生ずる。孔食などの局所的な腐食の進展は時間の経過とともに顕著なものではなく、腐食深さは全面的にほぼ一様となる。腐食により生ずる水素ガスは、オーバーパックと緩衝材の境界での蓄積・圧力上昇と緩衝材中の通気・圧力低下を繰り返す</p>	<p>炭素鋼の腐食で生ずる溶存鉄イオンが内側から緩衝材中に拡散し、ベントナイトの変質（陽イオン交換、鉄スメクタイト化など）が生ずる。外側からは支保中のセメントの溶脱により水酸化物イオン、Ca、Na、や K などが拡散してベントナイトの変質（陽イオン交換、モンモリロナイト溶解、CSH、CASH やゼオライトの沈殿）が生ずる。水素ガスの蓄積により圧力が上昇すると緩衝材中の間隙を押し広げて通気する</p>	<p>支保中のセメントの溶脱により水酸化物イオン、Ca、Na、や K などが緩衝材中に拡散し、同時に周辺岩盤の亀裂中に進入する</p>
<p>条件変化の程度および時間・空間スケール</p>	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p><b>オーバーパック変形によるガラスの破砕</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>初期割れ目のない場合（表面積の顕著な増大）</li> <li>初期割れ目のある場合（破片の移動で歪みが解消され表面積増大は顕著ではない）</li> </ul> <p>1mmオーダーの割れ目</p> </div> <div style="width: 45%;"> <p><b>オーバーパック変形・破断（側面）</b></p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p><b>緩衝材中の定常的（非平衡でない）鉱物分布</b></p> <p>モンモリロナイト溶解、クローライトやサポナイトの生成によりベントナイトの膨潤特性などが変化する領域</p> </div>		
<p>要因</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>還元環境での炭素鋼の全面腐食速度（シデライトなどの被膜による腐食抑制効果の有無）</li> <li>高 pH での炭素鋼の不動態化および孔食</li> <li>Fe イオンの見かけの拡散係数およびベントナイトとの反応生成物の種類</li> <li>高 pH でのモンモリロナイト溶解速度および二次鉱物の種類</li> <li>ガス通気時の境界変質層（緩衝材と Fe あるいはコンクリート間）の破壊</li> </ul>		

T : 熱的条件 H: 水理条件 M: 力学条件 C: 化学条件

表 5.3-6 各期間におけるシステムの変遷 (3/3)

期間 III ; 核種移行期間 (1 万年後~10 万年後)

<p>安全確保上の意義</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ オーバーパック開口後ガラス固化体が接液し溶解と核種の浸出が開始するが、ガラス近傍の Si 濃度の上昇および表面変質層による溶解抑制によって浸出率は徐々に低下する</li> <li>・ ガラス近傍での水の放射線分解によって生ずる酸化剤は鉄腐食生成物によって消費されるために還元環境が維持され、アクチニドなどの濃度は溶解度で制限され超過分は沈殿する</li> <li>・ オーバーパックの外側では期間 II までに達成された定常的な場において拡散による核種移行が生ずる。この際、核種は鉄腐食生成物や緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される</li> </ul>		
<p>環境条件の変遷および関連する現象</p>	<p>ガラス固化体</p>	<p>オーバーパック</p>	<p>緩衝材・岩盤</p>
<p>M</p>	<p>オーバーパックの変形により破碎する。この間、表面の変質により力学特性が変化する</p>	<p>炭素鋼の腐食膨張が継続し変形が進む</p>	<p>オーバーパックの腐食膨張により緩衝材の圧密が進む</p>
<p>C</p>	<p>イオン交換で生じた欠陥を水分子が拡散して加水分解が生じ、ガラスマトリクスの崩壊・溶解に至る。未変質部と変質部の境界付近のシリカやホウ素の残留している部分（拡散層）での水分子の拡散は、加水分解に対する律速機構となり得る。溶出したシリカの一部は再沈殿して変質層（ゲル層）を形成し、他はオーバーパックや緩衝材へと散逸し、種々の化学反応に寄与する 水の放射線分解により酸化剤が生成される</p>	<p>ガラス表面での放射線分解で生じた酸化剤は鉄腐食生成物（シデライトやマグネタイトなど）との反応によって消費され、還元環境が維持される</p>	<p>期間 II における定常的な鉱物組成分布が継続する</p>
<p>核種移行</p>	<p>ガラス溶解に伴い、核種は含有率に応じて調和的に溶出する。その後、アクチニドなどの難溶解性の核種の濃度はそれぞれの溶解度で制限され超過分は沈殿する</p>	<p>核種は鉄腐食生成物に収着すると考えられるが、関連する情報やデータは限られている</p>	<p>核種を含むコロイドは緩衝材中で濾過され、溶存した核種のみが拡散によって岩盤に至る。この間、緩衝材（二次鉱物を含む）に収着され遅延される</p>
<p>条件変化の程度および時間・空間スケール</p>	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> <p><b>ガラス表面変質層による溶解抑制</b></p> <p>ガラスの水和変質は、まず、ガラスマトリクスと水素イオン（ヒドロニウムイオン）とが反応することによって開始され、この水素イオンは液相側から供給されるため、表面変質層を拡散により通過して健全なガラスマトリクスに到達することが必要となる。従って、変質層中の実効拡散係数が小さい場合には、この水素イオンの変質層中の拡散がガラス変質の律速過程になるものと考えられる。一方、表面変質層の成長していない初期段階や変質層の拡散係数が大きい場合には、ガラス溶解の反応速度が律速過程になる可能性も考えられる。</p> </div> <div style="flex: 1;">  <p style="text-align: right;">青:Si 緑:B 黒:空隙(H<sub>2</sub>O)</p> </div> </div>		
<p>要因 不確実性</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガラスから溶出した Si が鉄腐食生成物あるいは緩衝材に収着することによる溶解促進の可能性</li> </ul>		

M: 力学条件 C: 化学条件

### 5.3.2 シナリオ構築

サイト調査や地層処分システムの設計と連携をとりつつ、前項に述べた方法によってシステムの理解を図り、その結果をストーリーボードやFEPカタログとして取りまとめた後、これを踏まえて安全評価上想定すべきシナリオを構築することとなる。それぞれのシナリオにおいては、以下の要素が相互に矛盾なく記述する必要がある。

- ・ 環境条件の変遷：地質環境の特徴や処分施設・人工バリアの仕様を踏まえ、環境条件への影響因子によって生ずると予想される環境条件の変遷
- ・ 安全機能の時間的変化：環境条件の変遷に対応した、安全機能に寄与する現象および期待できる性能の程度
- ・ 核種移行挙動：環境条件の変遷および安全機能に寄与する現象と期待できる性能の程度に応じた核種移行

シナリオの構築に当たっては、安全評価上想定するシナリオについて合理的な十分性を確保することが必要である。そこで、事象の連鎖としてのシナリオを展開する際に、データのばらつきや知識の不足などのために可能性を一通りに特定することができないため、複数の代替的なシナリオを選択肢として考慮せざるを得ない箇所（シナリオ分岐）を抽出する必要がある。ただし、環境条件の変遷や安全機能の時間的変化あるいは核種移行挙動に関するすべての可能性を列挙することは不可能であり、合理的な十分性とは、長期安全性を主張する上で遺漏がないという実践的な意味において理解されるべきものである。具体的には、以下のように、安全評価の目的に応じて有意と考える差異を明確化することで、シナリオの離散化を行うことが合理的と考える。

- ・ 時間区分：安全機能を視軸として、放射性廃棄物中の放射能の減衰、人工バリア材の変質、地質環境や生物圏の変遷およびこれらに関する不確実性の増大などの観点からの評価期間を区分する
- ・ 様相区分：安全機能に期待できる性能および核種移行挙動への影響の観点から環境条件を定性的に区分した様相（モード）の定義。

ここでは、沿岸域を対象としたシステムの状態設定（第4章）を前提条件として、ニアフィールドを対象に上記の時間区分および様相区分を行った（表 5.3-7）なお、時間区分については、前出のストーリーボード（表 5.3-3）と同じものを想定している。

このようなこれらの区分のもとに、各時間区分において、環境条件、安全機能に関する性能、および核種移行挙動のすべてが同じ様相にあるような二つのシナリオは同一視することが合理的である。逆に、どこかの時間区分において、環境条件、安全機能に関する性能、および核種移行挙動のうち一つでも異なる様相にあるようなシナリオが派生する可能性がある場合には、シナリオの分岐が生ずるものとする。なお、知見や不確実性を考慮してシナリオの分岐を効果的に整理するためには、過去に行われた解析やそのほかの検討の結果得られた知見（FEPカタログ）を活用することが適切であるとする。

以上を前提として、まず、ストーリーボードとして表現されるシステム理解に基づき、各時間区分における環境条件、安全機能に関する性能、および核種移行挙動のそれぞれについて、蓋然性が高

く通常生じると想定せざるを得ないような様相およびその時間的変遷の原因となるような現象（影響因子）を指定することによって、シナリオを定義する。この際、いずれも蓋然性が高いと考えられるような複数の可能性が存在する場合には、シナリオの分岐を考える。なお、分岐の妥当性については定量的な解析を行う段階で感度解析を行って確認する。

既出の沿岸域のサイトにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分のニアフィールドを対象として、システム理解に基づき 10 万年後までを対象として、蓋然性が高いシナリオを整理した（表 5.3-8）。

表 5.3-7 高レベル放射性廃棄物地層処分におけるニアフィールド環境条件の様相区分の例

環境条件		様相の区分
熱的条件	温度	標準（地温程度）／やや高（ガラス溶解促進・核種移行特性変化）／高（緩衝材熱変質）
水理条件	処分孔周辺の地下水流速	低（ニアフィールドの核種移行が母岩中の拡散によって支配される）／中（母岩中の移流によって支配される）／高（緩衝材中の拡散によって律速される）
	緩衝材水分飽和度	乾燥（施工時よりも低下した状態）／初期値／飽和
	母岩マトリクス部の透水性	標準（拡散支配となる状態）／高（移流支配となる状態）
	坑道掘削影響領域の透水性	小（処分孔周辺地下水流速低）／初期状態（同中）／大（同高）
力学的条件 および 物理条件	圧力（水圧、地圧およびそのほかの応力）	低（標準以下）／標準（水圧＋容器腐食膨張後の緩衝材膨潤圧）／高（標準以上）
	緩衝材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	緩衝材中ギャップ・割れ目	なし／あり
	埋め戻し材中ベントナイト有効密度	低（初期値以下）／初期値／高（初期値以上）
	埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし／あり
化学条件	水質（pH）	低（標準以下）／標準（地下水－緩衝材反応の平衡状態）／高（標準以上）
	水質（Eh）	還元性／酸化性
	緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型／Ca 型
	緩衝材中の初期成分以外の鉱物割合	低（初期不純物の反応・溶解）／初期状態／高（二次鉱物の沈殿）

（標準や初期値以上あるいは以下として定義される様相については、FEP カタログに含まれる過去の解析や検討の事例および予察な解析の結果などを踏まえ、安全評価の観点から「有意な」差異とみなすべきしきい値を設定する。）

表 5.3-8 高レベル放射性廃棄物に対する蓋然性が高いシナリオの例（ニアフィールド）

		閉鎖後 1,000 年間	1,000 年～1 万年後	1 万年～10 万年後	
核種 移行	核種の溶解	—	—⇒○	○	
	核種の拡散	—	—⇒○	○	
	核種の移流・分散	—	—	—⇒○(母岩のみ)	
安全 機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	○	○⇒—	—	
	ガラスマトリクスによる浸出抑制	△	△⇒○	○	
	収着による放射性物質の移行遅延	△	△⇒○	○	
	放射性物質の溶解度制限	△	△⇒○	○	
	移流による移行の抑制	△	△⇒○	○	
環境 条件	熱	温度	やや高⇒標準* <sup>1</sup>	標準	
		処分孔周辺地下水流速	中		
	水 理	緩衝材水分飽和度	初期値⇒飽和* <sup>2</sup>	飽和	
		母岩マトリクス透水性	標準		
		掘削影響領域透水性	初期状態		
		圧力	低	低⇒標準* <sup>3</sup>	標準
	力 学 物 理	緩衝材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低* <sup>4</sup>	低
		緩衝材中ギャップ・割れ目	あり⇒なし* <sup>5</sup>	なし	
		埋め戻し材ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低* <sup>6</sup>	低
		埋め戻し材中ギャップ・割れ目	なし		
		水質 (pH)	標準	標準⇒高* <sup>7</sup>	高⇒標準* <sup>8</sup>
		水質 (Eh)	酸化性⇒還元性* <sup>9</sup>	還元性	
	化 学	緩衝材のベントナイトタイプ	Na 型	Na 型⇒Ca 型* <sup>10</sup>	Ca 型
		緩衝材中初期成分以外の鉱物割合	初期状態	初期状態⇒高* <sup>11</sup>	高

注 1：安全機能の「○」は安全機能として期待されていることを、「△」はほかの機能のバックアップとして期待されていることを、「—」は機能が期待されていないことを示す。

注 2：表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる箇所を示す。

注 3：環境変遷の要因：\*1（廃棄体発熱量低下・熱伝導）、\*2（緩衝材再冠水）、\*3（緩衝材膨潤・容器腐食膨張）、\*4（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、\*5（緩衝材膨潤・自己シール）、

\*6（アルカリ条件でのベントナイト溶解）、\*7（セメント反応・水酸化物イオンの拡散）、\*8（セメント溶脱による C/S 比低下）、\*9（残留酸素の散逸・Fe などの反応による消費）、\*10（セメント反応・Ca の拡散・イオン交換）、\*11（アルカリ条件での二次鉱物沈殿）

#### 5.4 まとめ

本章では、研究開発などにより得られた最新の知見をシナリオ構築へどのように取り込んでいくかについて、安全機能とストーリーボードに基づくシステムの理解に着目し、ニアフィールドの長期変遷を例として示した。

各安全機能に関連するバリア特性や条件変遷に係る現象の抽出を行い、ストーリーボードを構築した。ここでは、第4章で例示した沿岸域のサイトにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分を例とし、ニアフィールドを対象として蓋然性の高いシナリオを構築した。

これにより、最新の知見の考慮や地質環境の多様性への観点からシナリオ構築技術を実用化することができた。今後は、不確実性を考慮した変動シナリオの抽出およびFEPカタログの整備などについてより具体化することが必要となる。

## 6 断層活動の影響評価に対するシナリオ構築手法の適用

### 6.1 背景と目的

断層活動および火山・火成活動の著しい影響については、適切なサイト選定によって回避することが地層処分事業の基本的な考え方である。しかしながら、地層処分の安全評価において対象とする時間スケールが超長期となることから、その発生時期や頻度に関する不確実性を考慮する必要となる。このため、わが国の一般的な特徴やサイト固有の特徴を考慮した上で、遠い将来において自然事象の著しい影響を仮想的に評価するための手法を整備しておくことは重要である。以上を踏まえ、ここでは、自然事象がシステムに与える影響を仮想的に評価するための技術基盤を整備することを目的として、断層活動を例としたシナリオ構築および影響評価手法について記述する。

### 6.2 断層活動に関するシナリオ構築

シナリオの記述に際しては、地層処分システムの安全機能を規定するような熱、水理、力学及び化学に関する環境条件のそれぞれについてどのような影響がどのような時間・空間スケールで生ずるかを体系的に整理することが有用と考えられる。ここでは、このような観点から、既往の研究成果に基づき断層活動による環境条件の変化を整理した。

#### 6.2.1 断層新生による環境条件への影響に関する情報整理

##### 6.2.1.1 力学的影響

地表に露出している断層露頭の調査、及び断層を貫くボーリング調査により、過去に活動を幾度も繰り返している断層沿いには、岩石が機械的に破壊されてできる破砕帯が分布することが知られている。破砕帯の構造は、模式的には、断層変位の大半を賄う断層コアと、その周辺の割れ目や小断層が密に発達するダメージゾーンとで構成される (Chester *et al.*, 1993)。なお、Scholz *et al.*(1993)や Vermilye and Scholz (1998)では、破砕帯の構造を、断層活動に伴うすべる面を含むカタクレーサイトゾーンと、その周辺の肉眼～顕微鏡スケールの割れ目が密に発達するプロセスゾーンとの2層構成としているが、これらは、前者の断層コアとダメージゾーンとに対比される (Scholz, 2002)。

破砕帯にはしばしば、断層活動に伴う岩石の破壊と変形により、断層岩が形成される。断層岩の分類方法は、記載に基づく分類 (Sibson, 1977 ; 高木・小林, 1996) と成因を考慮した分類 (Higgins, 1971 ; Wise *et al.*, 1984 ; Braathen *et al.*, 2004) とがあるが、脆性変形が卓越する地下数 km～十数 km より浅い領域では、一般的には、断層ガウジ (細粒・未固結の断層内物質)、断層角礫、カタクレーサイト (再結晶をほとんど伴わない固結した断層岩) で構成される。

破砕帯や断層岩の産状は、断層の形成深度 (封圧) や周辺岩盤の種類、さらには断層形成後の物理・化学的作用や断層に沿う熱水作用などにより様々な形態を呈し、それぞれの箇所毎に水理的・力学的な特性は異なる。

断層破砕帯の構造について吉田ほか (2009) は、阿寺断層を例として構造を図 6.2-1 に示すように、断層ガウジとその両側を構成するダメージゾーンに区分し、ダメージゾーンは断



層破碎帯（断層及び破碎帯）とその外側の割れ目帯で構成される構造の概念を示している。

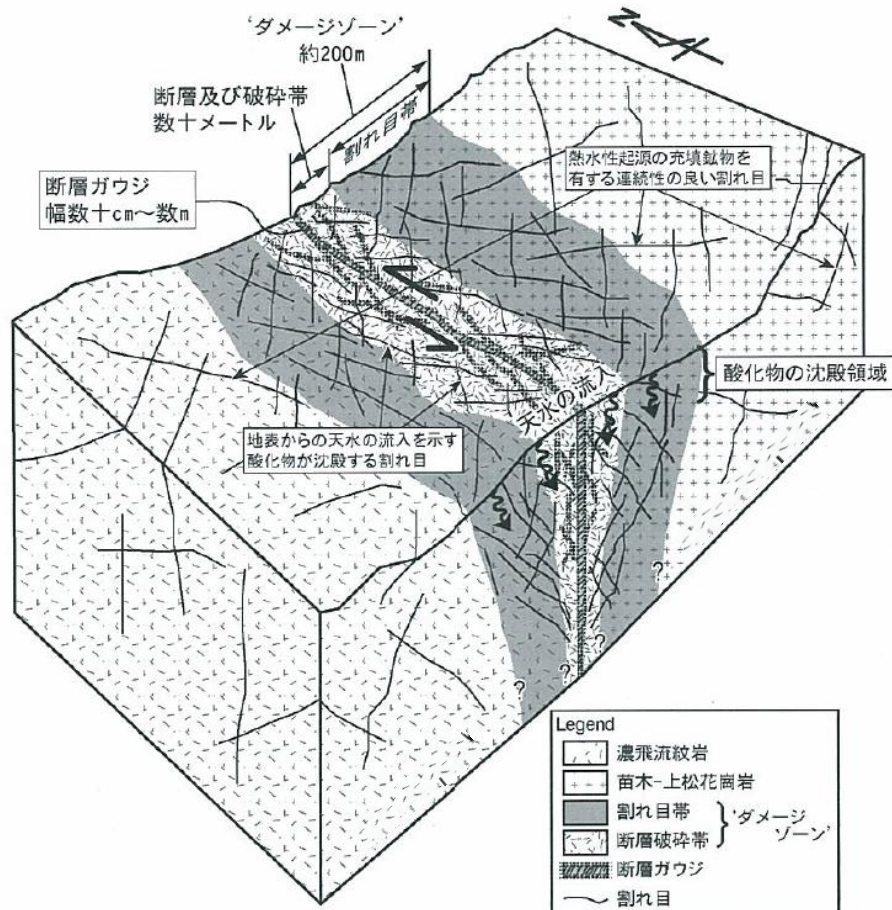


図 6.2-1 阿寺断層のダメージゾーンの概念図（吉田ほか，2009）

### 6.2.1.2 化学的影響

断層の新生により，地表から涵養される地下水との化学的相互作用や断層に沿った熱水作用などにより，角礫や砂状の破碎物などの比表面積の大きい部位の変質が進むと考える。

### 6.2.1.3 熱的影響

断層活動による断層摩擦発熱により温度の上昇が生じる。断層摩擦発熱は，断層活動の深度に応じた地圧と岩盤の強度，活動の様式などにより影響を受ける。断層摩擦発熱により上昇する断層周辺の温度は，熱により形成された断層ガウジの鉱物組成や鉱物の帯磁率測定，電子スピン共鳴（ESR）信号の測定などにより推定され，一般に 300°C以上と言われている。Fukuchi ほか（Fukuchi *et al.*, 2007）による野島断層の断層ガウジの研究開発では，断層ガウジの中心部の幅約10cmにわたって黒色化している箇所ESR測定から，過去には400~450°C



以上で5分間に相当する摩擦熱を被り、最近では少なくとも300~350°Cで約5分間に相当する摩擦熱を被った可能性が推定されている。このような情報から、断層活動により、地温は、活動直後の短時間に限り300°C以上まで上昇する場合もあることが考える。

#### 6.2.1.4 水理学的影響

断層活動の水理学的影響としては、地震に伴う地下水圧（水位）の変化と、破砕帯の形成に伴う透水構造の変化が挙げられる。地震に伴う地下水圧の変化は、一般的には一時的なものであり、変化量も通常の季節変化の範囲内に収まるとされている（Ishimaru and Shimizu, 1997）。破砕帯の透水性については、結晶質岩や堆積硬岩の場合、透水性が母岩より低い断層コアと、高いダメージゾーンからなり、ダメージゾーンが断層コアを挟むように分布するサンドイッチ構造をなすことが多い（Wibberley and Shimamoto, 2003 ; Lockner *et al.*, 2009）。

断層の透水性は、断層を構成する構造ごとに異なることが一般的に知られており、多くの建設工事の事例や研究開発事例などを収集・整理することで、表 6.2-1 のように断層の構造ごとの透水係数の範囲を推定することができる。断層構造には様々な呼称があるが、ここでは、（吉田ほか, 2009）に従った表記としている。

断層発生後の核種移行解析においては、断層・破砕帯および周辺の広範な変形領域が母岩に比べてどれだけ大きい透水性を有するかが重要となるが、本解析では、表 6.2-1 の結果から、断層・破砕帯の透水性は母岩の約 1,000 倍程度、また、周辺の広範な変形領域の透水性は母岩の約 10 倍程度と設定する。

表 6.2-1 断層の各構造における透水係数に関する情報のまとめ

区分	断層の構造	透水係数 (m/sec) の範囲
断層・破砕帯	ガウジ部	$10^{-14} \sim 10^{-7}$
	破砕部	$10^{-10} \sim 10^{-5}$
広範な変形領域	マイロナイト 割れ目発達部	$10^{-13} \sim 10^{-6}$
母岩	—	$10^{-13} \sim 10^{-8}$

区分と断層の構造は（吉田ほか, 2009）に基づき設定した。

#### 6.2.2 処分システムへの影響の検討とストーリーボードの作成

以上に述べた知見に基づき、将来、処分場を横切る断層が新生した場合、断層によって直撃される廃棄体については、廃棄体や人工バリアの破壊といった直接的な影響が生ずる可能性があると考えられ、それ以外の廃棄体についても、地下水流動や地下水水質の変化といった間接的な影響が生ずるものと想定される。処分場への影響をまとめると、下記のようなになる。

断層の新生時の地下水流動パターンとしては、地表と地下での封圧差に伴い、一般的には深部地下水の上昇（シナリオ1）であると考えられるが、地表水の引き込み（シナリオ2）についても完全には否定できないので、シナリオの一つとして考慮することにする。図 6.2-2 にこれらのシナリオ概念を示す。このうち、シナリオ1においては、新生断層から一定の範

圏内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮されることとなるが、それ以上離れた廃棄体については移行距離は不変と考えられる。なお、このシナリオでは断層及び母岩中の地下水は還元性であるものと考えられる。他方、シナリオ2では、新生断層を通じて深部に下降した地表水は処分場を通過して他の既存の透水性断層等に至り、そこから地表に向かうという悲観的な仮定をおくこととする。ここで、断層破碎帯と交差するものも含め全ての廃棄体について核種移行距離は不変と仮定することができる。なお、このシナリオでは母岩及び断層中の地下水は酸化性であるものと想定する。

なお、以降に記述するシナリオ構築ならびに安全評価解析では、断層によってダメージゾーン幅は異なるものの、金折（2001）の3kmという値を参照して、断層活動によって処分場全体が広範囲な変形領域に覆われるという保守的な仮定を設定した。

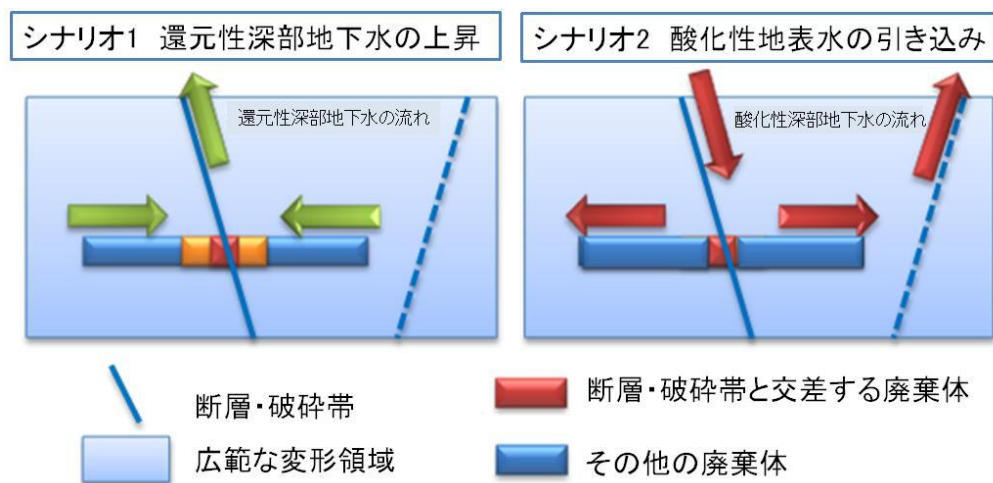


図 6.2-2 断層活動の影響に関するシナリオの概念

以上の2種類のシナリオ、及び断層との位置関係に応じた廃棄体区分のそれぞれについて、ストーリーボード及びシナリオの記述を行った。結果を表 6.2-2～表 6.2-4 にそれぞれまとめる。

表 6.2-2 処分場を横断する新たな断層が生じた場合のストーリーボード

		断層新生直後の現象	その後の定期的変遷
		<p>廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 温度上昇 核種の溶解・散逸</p> <p>断層変位</p> <p>熱水対流</p> <p>岩石のせん断 卓越流路形成</p> <p>角礫</p> <p>割れ目の形成 透水性上昇</p> <p>細粒破砕物</p>	<p>再活動</p> <p>定常流れ (上昇流の場合)</p> <p>定常流れ (下降流の場合)</p> <p>酸素の緩衝材への拡散 鉄鉱物などによる還元</p> <p>ダメージゾーン 岩石-地下水反応</p> <p>ダメージゾーンの拡大</p> <p>角礫の変質</p> <p>細粒破砕物の変質 断層ガウジの生成 透水性低下</p>
シナリオ1 深部地下水の上昇	断層と交差する廃棄体	熱: 断層摩擦発熱により 300°C以上まで上昇 (数分間) 水: 発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 力: 廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 化: 核種の溶解及び人工バリア外への散逸	熱: 再活動時の温度上昇 水: 発熱に起因する熱水対流 力: 緩衝材の反復的せん断 化: 核種は枯渇
	それ以外の廃棄体	熱: 若干の温度上昇 (短期間) 水: 間隙水圧変化による過渡的流動 力: 断層活動による変形 化: -	熱: - 水: 透水性上昇に伴う流速増大 力: 断層活動による変形 化: 還元性雰囲気での核種移行
シナリオ2 地表水の引き込み	断層と交差する廃棄体	熱: 断層摩擦発熱により 300°C以上まで上昇 (数分間) 水: 発熱に起因する熱水対流・緩衝材止水性低下 力: 廃棄体の破壊・緩衝材のせん断 化: 核種の溶解及び人工バリア外への散逸	熱: 再活動時の温度上昇 水: 発熱に起因する熱水対流 力: 緩衝材の反復的せん断 化: 核種は枯渇
	それ以外の廃棄体	熱: 若干の温度上昇 (短期間) 水: 間隙水圧変化による過渡的流動 力: 断層活動による変形 化: -	熱: - 水: 透水性上昇に伴う流速増大 力: 断層活動による変形 化: 周辺地下水の酸化・緩衝材中の鉄鉱物による還元

表 6.2-3 新生断層の処分場直撃シナリオの記述（深部地下水上昇）

		断層新生直後	その後の定常状態			
断層と交差する廃棄体	安全機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	-	×		
		ガラスマトリクスによる浸出抑制	○⇒×	×		
		収着による放射性物質の移行遅延	○	○		
		放射性物質の溶解度制限	○	○		
		移流による移行の抑制	○⇒×	×		
	環境条件	熱	温度	標準⇒高（300℃） <sup>*1</sup>	標準（地温程度）	
			水理	母岩透水係数	標準⇒高々（×1000） <sup>*1</sup>	高々（断層）
		EDZ 流量		初期状態⇒高 <sup>*1</sup>	高	
		緩衝材透水係数		標準⇒高 <sup>*1</sup>	高	
		緩衝材水分飽和度		飽和	飽和	
		力学		圧力	過渡的応力変動	⇒標準（地圧程度） <sup>*2</sup>
			ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低 <sup>*3</sup>	
			緩衝材中割れ目	なし⇒あり <sup>*1</sup>	あり	
			緩衝材最小厚さ	初期値⇒小 <sup>*1</sup>	小	
			母岩中亀裂頻度	初期値⇒高 <sup>*1</sup>	高	
		化学	水質（pH）	標準	標準	
			水質（Eh）	還元性	還元性	
			緩衝材中鉄鉱物量	標準	標準	
		その他の廃棄体	安全機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	-	×
				ガラスマトリクスによる浸出抑制	○	○
収着による放射性物質の移行遅延	○			○		
放射性物質の溶解度制限	○			○		
移流による移行の抑制	○			○		
環境条件	熱		温度	標準（地温程度）	標準	
			水理	母岩透水係数	標準⇒高（×10：一部） <sup>*1</sup>	高（一部⇒全廃棄体） <sup>*1</sup>
	EDZ 透水係数			初期値⇒高 <sup>*1</sup>	高	
	緩衝材透水係数			標準	標準	
	緩衝材水分飽和度			飽和	飽和	
	力学			圧力	標準（地圧程度）	標準
			ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低 <sup>*3</sup>	
			緩衝材中割れ目	なし	なし	
			緩衝材最小厚さ	初期値	初期値	
			母岩中亀裂頻度	初期値⇒高（一部） <sup>*1</sup>	高（一部⇒全廃棄体） <sup>*1</sup>	
	化学		水質（pH）	標準	標準	
			水質（Eh）	還元性	還元性	
			緩衝材中鉄鉱物量	標準	標準	

\*1 断層新生の影響、\*2 セメント影響によるベントナイト変質、\*3 断層新生後の条件復旧

注1：安全機能の「○」は安全機能として期待されている機能が健全であることを、「×」は安全機能が喪失していることを、「-」は安全機能が期待されていないことを示す。注2：表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる箇所を示す。

表 6.2-4 新生断層の処分場直撃シナリオの記述（酸化性地表水の引き込み）

		断層新生直後	その後の定常状態			
断層と交差する廃棄体	安全機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	×	×		
		ガラスマトリクスによる浸出抑制	○⇒×	×		
		収着による放射性物質の移行遅延	○	○		
		放射性物質の溶解度制限	○⇒(×)	(×)		
		移流による移行の抑制	○⇒×	×		
	環境条件	熱	温度	標準⇒高 (300°C) *1	標準 (地温程度)	
			水理	母岩透水係数	標準⇒高々 (×1000) *1	高々 (断層)
		EDZ 流量		初期状態⇒高*1	高	
		緩衝材透水係数		標準⇒高*1	高	
		緩衝材水分飽和度		飽和	飽和	
		力学		圧力	過渡的応力変動	⇒標準 (地圧程度) *2
			ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*3	
			緩衝材中割れ目	なし⇒あり*1	あり	
			緩衝材最小厚さ	初期値⇒小*1	小	
			母岩中亀裂頻度	初期値⇒高*1	高	
		化学	水質 (pH)	標準	標準	
			水質 (Eh)	還元性⇒酸化性*1	酸化性	
			緩衝材中鉄鉱物量	標準	標準⇒低	
		その他の廃棄体	安全機能	発熱が著しい期間の地下水接触の防止	×	×
				ガラスマトリクスによる浸出抑制	○	○
収着による放射性物質の移行遅延	○			○		
放射性物質の溶解度制限	○			○		
移流による移行の抑制	○			○		
環境条件	熱		温度	標準 (地温程度)	標準	
			水理	母岩透水係数	標準⇒高 (×10 : 一部) *1	高 (一部⇒全廃棄体) *1
	EDZ 透水係数			初期値⇒高*1	高	
	緩衝材透水係数			標準	標準	
	緩衝材水分飽和度			飽和	飽和	
	力学			圧力	標準 (地圧程度)	標準
			ベントナイト有効密度	初期値	初期値⇒低*3	
			緩衝材中割れ目	なし	なし	
			緩衝材最小厚さ	初期値	初期値	
			母岩中亀裂頻度	初期値⇒高 (一部) *1	高 (一部⇒全廃棄体) *1	
化学	水質 (pH)	標準	標準			
	水質 (Eh)	還元性⇒酸化性*1	酸化性			
	緩衝材中鉄鉱物量	標準	標準⇒低			

\*1 断層新生の影響, \*2 セメント影響によるベントナイト変質, \*3 断層新生後の条件復旧

注1: 安全機能の「○」は安全機能として期待されている機能が健全であることを、「×」は安全機能が喪失していることを、「(×)」は酸化性への変化に伴い溶解度が上昇する核種については安全機能の低下が生ずることを、「-」は安全機能が期待されていないことを示す。注2: 表中のピンク色の網掛けは様相変化が生じる箇所を示す。

### 6.3 断層活動の影響に関する安全解析の試行

前項に述べたシナリオに従い、処分場を横断する新たな断層が将来生じた場合の仮想的な状況を想定して、安全解析の試行を行った。解析にあたって、以下のような仮定を置くこととした。

#### 6.3.1 断層発生前の核種移行

断層発生前のモデルとしては、第2次取りまとめレファレンスケースと同一の核種移行モデルおよびデータセットを用いる。また、断層新生以前の核種移行距離はいずれの廃棄体についても100mと想定する。

#### 6.3.2 断層発生後の核種移行

6.2.2において想定したとおり、新生断層に沿った地下水流動パターンとしては、深部地下水の上昇(シナリオ1)および地表水の引き込み(シナリオ2)の2種類を考える(図6.2-2)。これらのシナリオに関する核種移行の概念モデルを図6.3-1に示す。

シナリオ1においては、新生断層と交差する廃棄体及び人工バリア中の核種は瞬時に断層に至るものとする。また、新生断層から100m以内にある廃棄体については母岩中の移行距離が短縮されることとし、それ以上離れた廃棄体については移行距離は100mのまま不変であるとする。なお、シナリオ1では断層及び母岩中の地下水は還元性であるものとする。

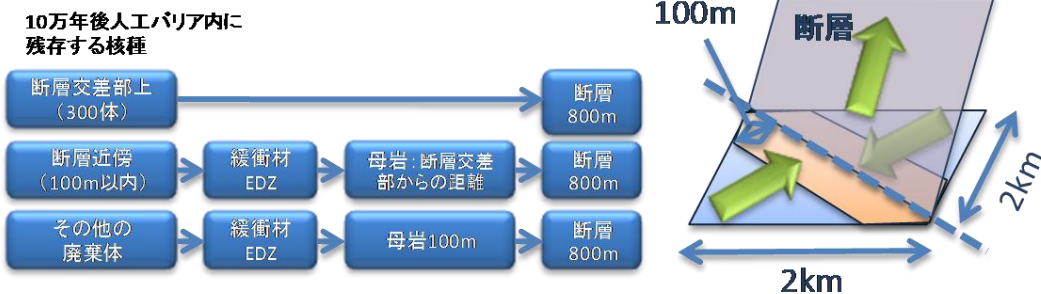
シナリオ2では、新生断層を通じて深部に下降した地表水が地下施設を通過してほかの既存の透水性断層等に至り、そこから地表に向かうものとする。ここで、断層割れ目帯と交差するものも含め全ての廃棄体について核種移行距離は100mと仮定する。シナリオ2では母岩及び断層中の地下水は酸化性であるものと仮定する。

どちらのシナリオにおいても、断層活動直後の過渡的な地下水流動は数日から数か月程度の短期的なものであるため無視できるものとする。また、その後の地下水流動の変化は応力場の変化による間隙水圧の変化ではなく、断層活動に伴う岩盤の透水性の変化によるものとし、広域的な動水勾配も初期の値に復帰するものと仮定する。

自然事象の将来予測については、外挿法を中心として、これまで種々の検討がなされており、わが国では、「過去数10万年程度の地質学的記録をもとに、将来10万年程度の推論は可能である」との合意がある(土木学会 原子力土木委員会 地下環境部会, 2006)。また、10万年を越える将来の地質環境の変遷や自然事象の発生に係る予測の精度については、事象ごと、地域ごとに異なると考えられる。上記のような背景を踏まえ、新たな断層は10万年後に生じるものと仮定する。



### シナリオ1 還元性深部地下水の上昇



### シナリオ2 酸化性地表水の引き込み

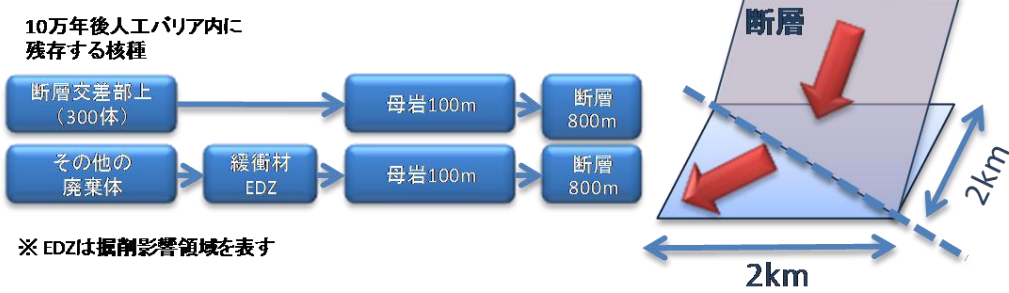


図 6.3-1 断層発生後の核種移行モデル

#### 6.3.3 被ばく線量の算出

断層からの距離に基づいて廃棄体を区分し、区分ごとに核種移行解析を行い、廃棄体 1 体あたりの核種移行率に各区分の廃棄体数と線量換算係数を乗ずることによって、被ばく線量を算出する。生物圏モデルは断層発生による影響を受けないものと仮定し、第 2 次取りまとめにおける河川水／平野モデルの農作業従事者グループに対する被ばく線量換算係数（JNC, 1999a）を用いる。

核種移行解析および被ばく線量の算出には解析コード GoldSim (GoldSim Technology Group, 2010) を用いた。

#### 6.3.4 断層発生後の水理条件の設定と解析ケース

主要な解析条件を表 6.3-1 に示す。ここで、断層・破砕帯およびその周辺の広範な変形領域の水理特性については、現状の知見に顕著な不確実性が含まれることから、それぞれ代替的なモデルを考えることとした。特に、広範な変形領域については、個々の既存亀裂の開口に伴い透水量係数が 10 倍になるというモデル、および既存亀裂の開口幅は変わらず、同等の開口幅を持つ亀裂が多数発生することによって亀裂頻度が 10 倍になると仮定したモデルの両者（いずれも広範な変形領域の平均透水係数は 10 倍となる）について解析を行うこととした。

シナリオ 1 で主要な核種移行経路となる新生断層とシナリオ 2 における既存の断層では水

理特性が異なる可能性も考えられるが、安全解析では簡単のため同等と仮定した。表 6.3-1 に、シナリオ 1 とシナリオ 2 の解析条件の違いを示す。

上記のシナリオと断層モデル、広域な変形領域モデルを組み合わせることにより、表 6.3-2 に示す解析ケースを設定した。表 6.3-2 に示すそれぞれの解析ケースでの解析条件を表 6.3-3 に示す。

表 6.3-1 シナリオ 1, シナリオ 2 の安全解析の条件

	溶解度および分散係数		母岩中核種移行距離		
	断層新生前	断層新生後	断層新生前	断層新生後	
シナリオ 1	断層新生前後とも第 2 次とりまとめのレファレンスケース		すべての廃棄体：100m	断層割れ目帯と交差する廃棄体(300 体)	0m
				断層近傍の廃棄体	廃棄体と断層と距離から設定
				そのほかの廃棄体	100m
シナリオ 2	第 2 次とりまとめのレファレンスケース	酸化性条件の値	すべての廃棄体：100m		

表 6.3-2 解析ケース

解析ケース番号	シナリオ	断層割れ目帯	広範な変形領域の亀裂特性
1-1	シナリオ 1	断層モデル 1	広範な変形領域 1
1-2			広範な変形領域 2
1-3		断層モデル 2	広範な変形領域 1
1-4			広範な変形領域 2
2-1	シナリオ 2	断層モデル 1	広範な変形領域 1
2-2			広範な変形領域 2
2-3		断層モデル 2	広範な変形領域 1
2-4			広範な変形領域 2

表 6.3-2 において、断層モデル 1 では断層の透水係数として母岩平均透水係数より 2 桁高い値を設定し、断層モデル 2 では第 2 次とりまとめの断層に相当する透水係数を設定した。線量換算係数については、断層発生の前後もに第 2 次取りまとめのレファレンスケースにおける線量換算係数を用いた。また、広範な変形領域 1 では透水量係数分布は断層新生前（第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同一とし、亀裂頻度のみ 10 倍とした。広範な変形領域 2 では、透水量係数分布は断層新生前（第 2 次取りまとめレファレンスケースの母岩）の 10 倍、亀裂頻度は断層新生前と同一とした。



表 6.3-3 各解析ケースの安全解析の条件

解析ケース 番号		断層透水係数	広範な変形領域 の亀裂透水係数 の幾何平均	広域的な 動水勾配
シナリオ 1	1-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	0.01
	1-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	1-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	1-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
シナリオ 2	2-1	$6.4 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ※1	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-2		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	
	2-3	$1.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$ ※2	$10^{-9.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※3	
	2-4		$10^{-8.99} \text{m}^2/\text{s}$ ※4	

※1；母岩平均透水係数より2桁高い値

※2；第2次とりまとめの断層に相当する値

※3；断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）と同じ透水量係数分布（亀裂頻度は10倍）

※4；断層新生前（第2次取りまとめレファレンスケースの母岩）の透水量係数分布の10倍（亀裂頻度は同一）

表 6.3-4 シナリオ1における廃棄体区分及び該当する廃棄体数

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	0m	300
核種移行距離が 短縮される廃棄体	0m-10m	264
	10m-20m	560
	20m-30m	556
	30m-40m	551
	40m-50m	548
	50m-60m	544
	60m-70m	539
	70m-80m	536
	80m-90m	532
90m-100m	527	
それ以外の廃棄体	100m以上	34543

表 6.3-5 シナリオ2における廃棄体区分及び該当する廃棄体数

	断層からの距離	廃棄体数
断層と交差する廃棄体	100m	300
それ以外の廃棄体	100m	39700

### 6.3.5 解析結果

解析結果の例を図 6.3-2 に示す。これらの結果から、安全解析において着目した不確実性要因の感度は次のようにまとめられる。

- ・ シナリオ 1 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が  $1\mu\text{Sv/y}$  程度であるが、シナリオ 2 ではいずれのケースにおいても最大被ばく線量が  $100\mu\text{Sv/y}$  以上となっており、地下水の酸化還元状態が大きな感度を有することが分かる。
- ・ 断層活動直後に生じる最大被ばく線量は、ケース 1-3 およびケース 1-4 を除いて、断層活動の直接的な影響を受けないその他の廃棄体（広範な変形領域）によって支配される傾向にある。
- ・ シナリオ 1 においては、断層によって破壊された廃棄体からの放射性物質が断層に直接流入するために断層の透水係数は大きな感度を示すのに対して、シナリオ 2 においては、いずれの廃棄体においても広範な変形領域中で一定の核種移行距離が確保されているため、断層の透水係数の感度は小さい。
- ・ 広範な変形領域のモデルの感度は顕著なものではなく、断層新生による影響が亀裂頻度の上昇をもたらすものであっても、あるいは亀裂開口幅の増大をもたらすものであっても、平均透水係数が一定であれば影響の大きさはほぼ同じになるものと考えられる。

図 6.3-2 におけるシナリオ 2 についての解析結果において、被ばく線量の合計に対して支配的な寄与を有するのは、断層によって破壊されていない広範な変形領域内の総数の多い廃棄体であり、これらがすべて酸化性条件下にあることによるものと考えられる。一方、酸化性地下水が人工バリアの周囲を流れたとしても、これらの廃棄体については、緩衝材の止水性が確保されており、酸化剤の進入は拡散によるものであること、および緩衝材の内側には大量の  $\text{Fe(II)}$  鉱物が残留していることから、断層新生後 10 万年程度以上の間、廃棄体近傍は還元性に保たれる可能性がある。そこで、新生断層によって破壊される廃棄体の近傍は酸化性となるが、それ以外の廃棄体については還元性（ただし、緩衝材の外側はすべて酸化性）と仮定した解析を行った。結果は図 6.3-3 に示すとおりであり、最大被ばく線量は  $1\mu\text{Sv/y}$  程度となることが分かる。

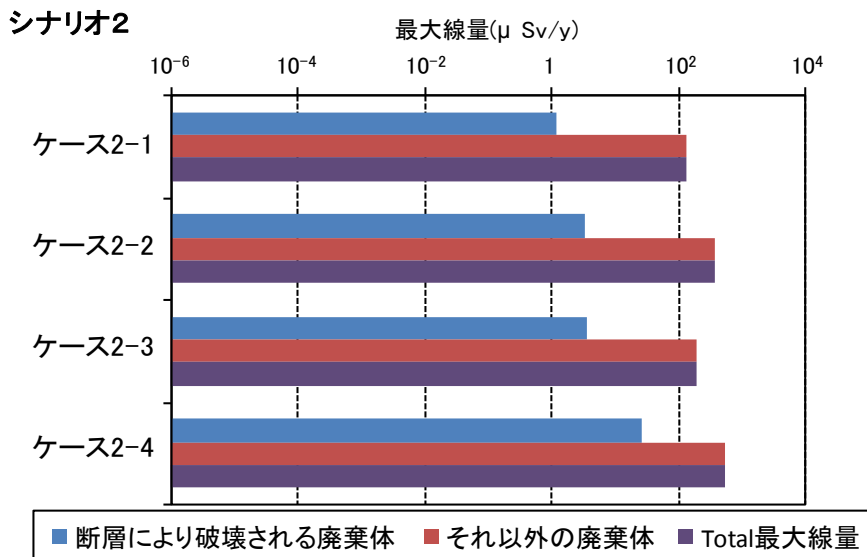
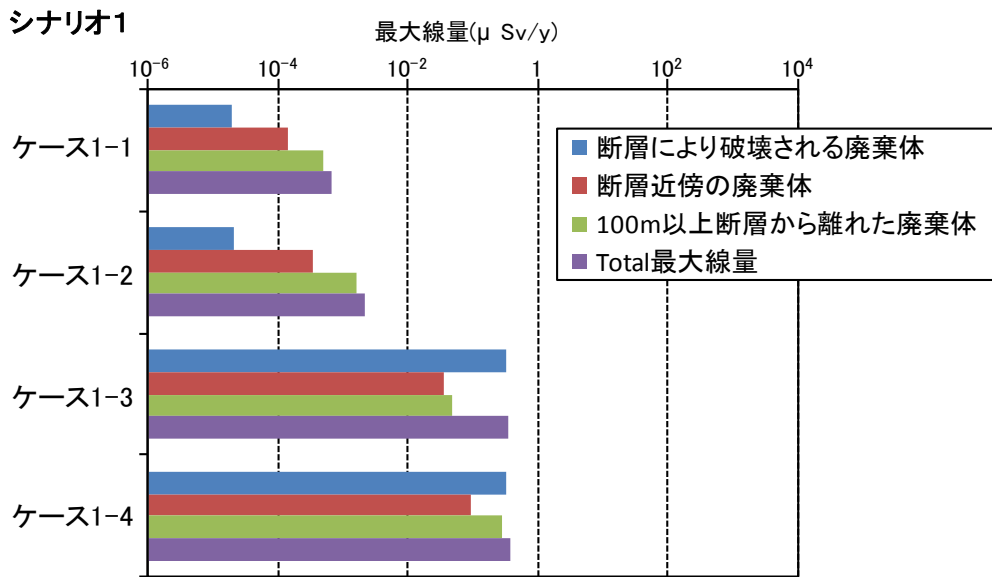


図 6.3-2 断層新生の影響に関する安全解析結果

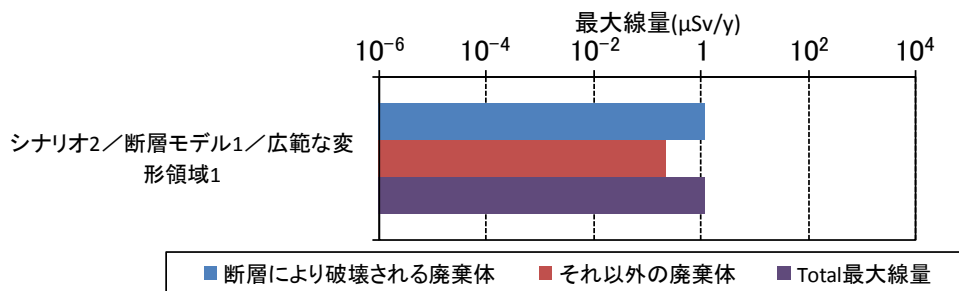


図 6.3-3 シナリオ2において破壊されていない廃棄体の人工バリア内側を還元性と仮定した場合の解析結果

## 6.4 まとめ

わが国の地層処分の閉鎖後長期の安全性を議論する際に、考慮すべき自然事象との一つである断層活動を例として、これらの稀頻度の自然事象に関するシナリオ開発および安全解析についての予察的な検討を行い、断層活動の影響に関する安全解析を行った結果を示した。

具体的には、地層処分システムの安全機能を規定するような熱、水理、力学及び化学に関する環境条件のそれぞれについてどのような影響が生ずるかを体系的に整理することを目的として、既往の研究成果を環境条件毎に整理し、そのうえで、将来、処分場を横切る断層が新生した場合に生ずる、処分場への影響をまとめた。これらの情報をもとに、断層活動に関するシナリオを構築し、構築したシナリオに基づいて断層活動の影響に関する安全解析を行った。

安全解析の結果は、第2次取りまとめと同様の地質環境を想定して10万年以降に処分場を直撃するような断層が新生することを想定しても、処分システム全体として一定の性能が保持されることを示唆している。ただし、本解析結果は、地質環境特性に強く依存するものと考えられることから、今後、対象地域が特定された時点でサイトに固有の地質環境特性を考慮して同様の解析を行う必要がある。また、断層活動が地層処分システムに与える影響については、事例数が限られることなどから上記のシナリオおよびモデルには不確実性が内在するため、今後の専門家間の議論を通じてコンセンサスを得ながら進めることも必要である。

## 7 まとめ

本検討を通じて、処分事業に必要なシナリオ構築手法を高度化するとともに、沿岸域における海水の影響や塩淡水境界の分布の時間的な変遷をより現実に即して取り扱うためのシステムの状態設定手法を整備した。さらには、安全機能とストーリーボードに基づくシステムの理解に着目し、ニアフィールドの長期変遷に関するシナリオを開発するための手法を検討するとともに、断層活動の著しい影響を不確実性を考慮しつつ評価する手法を整備した。

沿岸域を対象としたシナリオ構築では、地質環境の多様性と長期変遷の観点から、将来必要性が生ずる可能性のある沿岸域の地質環境特性に焦点を当て、処分場概念などの前提条件と併せてシステムの状態設定を例示した。具体的には、沿岸域におけるシステムの頑健性を検討する際に重要となる将来の気候・海水準変動および隆起・侵食というような要素を抽出し、これらの複合的な影響によって生ずる沿岸域での環境変遷について検討を行った。その結果、このような影響によって生ずる環境変遷はある程度類型化することが可能であることが示された。また、ニアフィールドの境界条件として着目すべき処分場周辺の環境条件と、気候・海水準変動や隆起・侵食による環境変遷において予想されるこれらの環境条件への影響因子を整理し、さらに環境条件およびこれらに対する影響因子に着目してシステムの状態を設定した。今後の課題としては、不確実性を考慮した密度流解析結果の取り込み、核種移行解析モデルへの展開、調査計画および設計へのフィードバック、不確実性を考慮した密度流解析結果の取り込みについてそれぞれ具体化することが必要である。

ニアフィールドの長期変遷を考慮したシナリオ構築技術では、ニアフィールドを構成する人工バリアや周辺母岩について種々の知見を考慮して、システムの現実的な変遷を時系列的にストーリーボードとして整理し、さらに現実性を重視したシナリオを構築する手順を例示した。具体的には、各安全機能に関連するバリア特性や条件変遷に係る現象の抽出を行い、ストーリーボードとして記述した。今後は、不確実性を考慮した変動シナリオの抽出およびFEPカタログの整備などについてより具体化することが必要となる。

断層活動に関するシナリオ構築技術では、我が国の地層処分の閉鎖後長期の安全性を議論する際に、考慮すべき自然事象との一つである断層活動を例として、シナリオ開発を行った。具体的には、地層処分システムの安全機能を規定するような熱、水理、力学及び化学に関する環境条件のそれぞれについてどのような影響が生ずるかを体系的に整理することを目的として、既往の研究成果を環境条件毎に整理し、そのうえで将来、処分場を横切る断層が新生した場合に生ずる、処分場への影響を検討した。

断層活動が処分場に与える影響は、地質環境特性に強く依存するものと考えられることから、今後、対象地域が特定された時点でサイトに固有の地質環境特性を考慮することが必要である。また、これらの影響については、事例数が限られることなどから上記のシナリオおよびモデルには不確実性が内在するため、今後の専門家間の議論を通じてコンセンサスを得つつ進めることも必要と考える。

## 8 参考文献

- ANDRA (2005) : Dossier Argile 2005.
- Braathen, A., Osmundsen, P.T. and Gabrielsen, R.H. (2004) : Dynamic development of fault rocks in a crustal-scale detachment; an example from western Norway. *Tectonics*, 23.
- Chester, F.M., Evans, J.P., Biegel, R.L. (1993) : Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault. *Journal of Geophysical Research* 98, 771±786.
- 土木学会 原子力土木委員会 地下環境部会 (2006) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 2006年1月.
- Domenico, P. A. and Schwartz, F. W. (1998) : *Physical and Chemical Hydrogeology* 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : TRU 廃棄物処分技術検討書—第2次TRU廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013/FEPC TRU-TR2-2005-02.
- 電事連 (電気事業連合会)・JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : TRU 廃棄物処分技術検討書 根拠資料集, FEP 辞書.
- Ebashi, T., Ishiguro, K., Wakasugi, K., Kawamura, H., Gaus, I., Vomvoris, S., Martin, A. J., Smith, P. (2010) : Trends in Scenario Development Methodologies and Integration in NUMO's Approach, Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management (ICEM2010) , ICEM2010-40124, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan [in printing].
- 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005) : “地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, 原子力バックエンド研究, 11, 113-124.
- Fukuchi, T., Yurugi, J., and Imai, N. (2007) : ESR detection of seismic frictional heating events in the Nojima fault drill core samples, Japan. *Tectonophysics*, Vol.443, p.127-138.
- 原子力委員会 原子力バックエンド対策専門部会(1997) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方.
- 原子力安全委員会(2004) : 放射性廃棄物処分の安全規制における共通的な重要事項について.
- GoldSim Technology Group (2010) : *GoldSim User's Guide (Volume 1,2)*.
- Higgins, M. W. (1971) : *Cataclastic rocks*, USGS Professional Paper no.687, 97p.
- IAEA (2009) : *Disposal of Radioactive Waste, Draft Specific Safety Requirements No.SSR-5 DS354 Draft4*, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.
- Ishimaru, T. and Shimizu, I. (1997) : Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan-A study for stability of geological environment in Japan-, *The 30th International Geological Congress Proceedings*, 24, 31-41.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : 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—, 分冊 3 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-023.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999b) : 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—, 分冊 1 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005) : 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築—平成17年取りまとめ—分冊 3 —安全評価手法の開発—, JNC TN1400 2005-016.

- 金折裕司 (2001): “断層の影響はどこまで及んでいるか”, 応用地質, 41(6), pp.323–332.
- 神崎裕, 武田聖司, 木村英雄 (2009) : 高レベル放射性廃棄物処分における地下水移行にかかわる安全評価のシナリオ構築のための FEP データベース (受託研究), JAEA-Data/Code 2009-011.
- Lockner, D. A., Tanaka, H., Ito, H., Ikeda, R., Omura, K. and Naka, H. (2009) : Geometry of the Nojima Fault at Nojima-Hirabayashi, Japan — I. A Simple Damage Structure Inferred from Borehole Core Permeability, *Pure and Applied Geophysics*.
- 牧野 仁史, 川村 淳, 若杉 圭一郎, 大久保 博生, 高瀬 博康(2007) : 高レベル放射性廃棄物地層処分安全評価のシナリオ解析のための計算機支援ツールの開発, JAEA-Data/Code 2007-005, February 2007, 67p.
- Nagra (2002) : Project Opalinus Clay: Safety Report, Nagra Technical Report 02-05, Nagra, Wettingen, Switzerland.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011) : 処分場の安全機能と技術要件, NUMO-TR-10-11.
- OECD/NEA (1991) : Review of Safety Assessment Methods, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- OECD/NEA (2000a) : Regulatory Review of Assessments of Deep Geologic Repositories: Lessons Learnt, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- OECD/NEA (2000b) : Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste – An International Database –.
- OECD/NEA (2001) : Scenario Development Methods and Practice, An Evaluation Based on the NEA Workshop on Scenario Development, May 1999, Organization for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency, Madrid, Spain.
- OECD/NEA (2004) : Post-closure Safety Case for Geological Repositories - Nature and Purpose - , OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France.
- OECD/NEA (2009) : International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC), Outcome of the INTESC Project, NEA No. 6251, OECD Nuclear Energy Agency, Paris, ISBN 978-92-64-99103-3.
- ONDRAF/NIRAS (2001) : Technical Overview of SAFIR-2: Safety Assessment and Feasibility Interim Report 2, ONDRAF/NIRAS Report NIROND 2001-05E, Belgium.
- Scholz, C.H., Dawers, N.H., Yu, J., Anders, M.H., and Cowie, P.A. (1993) : Fault growth and fault-scaling laws: preliminary results: *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, no. B12, p. 21,951-21,961.
- Scholz, C.H. (2002) : *Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, 2002.
- Sibson, R.H. (1977) : Fault rocks and fault mechanisms, *Journal of the Geological Society*, London 133, 191–213.
- SKB (2006) : Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar – a first evaluation, Main Report of the SR-CAN project, SKB Technical Report TR-06-09, SKB, Stockholm, Sweden.
- 高木秀雄, 小林健太 (1996) : 断層ガウジとマイロナイトの複合面構造—その比較組織学, *地質学雑誌*, 第 102 巻, 第 3 号, 日本地質学会, p170-179.
- Vermilye, J.M. and Scholz, C.H. (1998): The process zone: A microstructural view of fault growth, *Journal of Geophysical Research*, vol. 103, no. B6, pp. 12,223-12,237, 1998.
- Wakasugi, K., Ishiguro, K., Koyama, T., Shiratsuchi, H., Yashio, S. and Kawamura, H. (2009) : Developing a

methodology for scenario analysis based on understanding of long-term evolution of geological disposal systems, the 33rd International Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management (MRS 2009 meeting) , May 24-29, 2009 Saint Petersburg, Russia.

Wise, D.U., Dunn, D.E., Engelder, J. T., Geiser, P. A., Hatcher, R. D., Kish, S. A., Odom, A. L. and Schamel, S. (1984) : Fault-related rocks; suggestions for terminology: *Geology*, v. 12, p. 391–394.

Wibberley, C.A.J., and Shimamoto, T. (2003) : Internal structure and permeability of major strike-slip fault zones: The Median Tectonic Line in Mie Prefecture, southwest Japan: *Journal of Structural Geology*, v. 25 p. 59-78.

吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫 (2009): 断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴—阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み—, *応用地質*, 第50巻, 第1号, 16-28頁, 2009, *Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, Vol.50, No.1, pp.16-28, 2009.



## 付録1 ストーリーボード作成手順

ここでは、ストーリーボードの役割およびストーリーボードの作成手順について記述する。

### 1. ストーリーボードの役割

時空間における処分システムの状態変遷を俯瞰するストーリーボードには、作成作業の過程を含めて以下に示す3つの役割を期待している。

- 知見の統合

各時間・空間領域における地層処分システムの振る舞いについての関連する諸分野の知見を統合して記述する。なお、ストーリーボードの枠組みを用いて分野横断的なシステム理解の整理を行うことにより、分野間での理解の齟齬や矛盾する知見などを把握することが期待できる。

- 分野が異なる専門家が議論する枠組みの提供

地層処分全体を理解する管理者や各分野の専門家が議論するための共通の枠組みを提供し、地質環境の調査・評価および処分場の設計と安全評価との緊密な連携が促進される。また、ストーリーボードにおける地層処分システムの将来挙動の表現は、多角的かつ視覚的に捉えやすいものでもあり、システムの理解を効果的に深めることが期待できる。

- ステークホルダーとの理解の共有

非専門家も含めたステークホルダーとの対話においても、理解を共有するための場として有効に活用できる。

このような役割を踏まえ、ストーリーボードを段階的に作成するための手順を整理した。

## 2. 第1段階のストーリーボード

さまざまな分野の専門家との議論の前に、安全評価の専門家を中心となり、安全機能に着目した処分システムの状態変遷に関わる知見を集約し、以下の手順で第1段階のストーリーボードとして取りまとめる。

### (1) ストーリーボードの枠組み構築

ストーリーボードは、処分システム全体の状態変遷を俯瞰することから、横軸に時間の経過を示す枠組み、縦軸に処分システムの空間領域を示す枠組みをとり、大きさを問わず1枚で収まる記述で作成することを原則とする。

### (2) ストーリーボードの各欄への記載

#### a. サイト固有の地質環境特性の記述

サイト固有の地質環境特性は、別途サイト調査・評価から得られる情報をもとに作成されるサイト地質環境モデルや蓋然性の高いと推定される長期変遷予測モデルを参照し、処分場の概略位置を含め2次元の地質構造図と特性値の表で記載する。例えば、確実に発生する隆起・侵食の速度や気候変動による地形の変化や海水準変動などが対象となる。

#### b. 処分場概念の記述

サイト特性と安全概念に対応して構築される処分場概念の概要を図とともに記述する。例えば、第2次取りまとめでの処分場の標準レイアウトや人工バリアの概略仕様などがそうとする。ストーリーボードには、処分場のイメージがわかる概略の図のみを記述する。

#### c. 処分システムの状態変遷の時間枠の設定

蓋然性の高い状態変遷を記述するストーリーボードの横軸として、大きく処分場の閉鎖までと閉鎖後の状態変遷に着目した時間枠を設定する。閉鎖までの時間枠は、初期状態を出発点として、建設・操業・閉鎖による人工バリアおよび処分場とその周辺の地質環境の状態変遷に着目する。閉鎖後の時間枠では、多重バリアシステムの状態変遷と安全機能の状態および放射性核種の挙動に着目する。

- ① ストーリーボードの前提となる初期状態の確認のため、処分場の建設が開始される前の時間枠を設定する。
- ② 処分場が閉鎖されるまでの処分場とその周辺環境の変遷を記述するために、処分場の建設から閉鎖までの時間枠を設定する。
- ③ 処分場が閉鎖されたのち、処分場周辺の環境の回復状況を記述するために、処分場内の再飽和までの時間枠を設定する。この時間枠は、解析的なアプローチで設定するものとする。
- ④ 金属製の容器による閉じ込めを期待する期間を時間枠として設定する。
- ⑤ 次期の氷河期の到来で、海水準変動に伴い地表近傍の地質環境や生態系が変化する時間枠を設定する。
- ⑥ 閉鎖後の多重バリアシステムで放射性核種の移行を抑制する機能の変遷として、自然現象の将来予測が可能な期間の時間枠を設置する

#### d. 処分システムの対象領域とスケールの設定

処分システムの状態変遷を記述する対象領域をストーリーボードの縦軸として、処分場が立地する地質環境の境界条件、人工バリアや処分場のレイアウト、想定する核種移行経路や形態などの情報をもとに領域とそのスケールを設定する。領域は、安全評価上着目する安全機能の対象（地下水移行に伴う遅延、希釈）と考慮すべきスケールにも依存するため、初期段階でのストーリーボード作成では、以下のような領域とスケールを出発点とする。

- ・ 人工バリア領域：想定する人工バリアの構成要素の1ユニットが記述できるスケールとする。掘削影響領域（EDZ）も含める。
- ・ 処分場領域：閉鎖に伴うプラグの有効性や地表への短絡路の可能性を記述するために、処分坑道やアクセス坑道が記述できるスケールとする。
- ・ 天然バリア領域：処分システム全体の地下水流動場（流入点と流出点）を記述できるスケールとする。
- ・ 地表近辺の水文領域：生物圏と天然バリアとの境界面を含み、将来の気候・海水準変動を考慮して河川、湖沼、海などの3次元的な水文系の変化が記述できるスケールとする。

#### e. 状態変遷の説明文とイメージ図の作成

時間枠と領域で規定されるマトリクスの枠内には、その枠内での状態変遷の記述とイメージ図を以下のルールに従い記述する。

##### 【状態変遷の記述】

時間枠と領域の枠組み規定されるマトリクス内では、これまでの知見をベースに蓋然性が高いと推定する処分システムの状態変遷とそれに伴うバリアの安全機能（閉じ込め、遅延、隔離など）の変化や変質、変化した場合での核種の移行挙動を概説することを原則とする。

記述のルールとして、例えば、「処分場閉鎖後、人工バリア内への地下水の浸入→ベントナイトの飽和→膨潤圧の発生」など、事象の発生や状態を体言止めで記述し、その影響の伝播プロセスを→で表すこととする。

##### 【イメージ図の記述】

状態変遷の記述をベースに、事象やプロセスを概観できるイメージ図をカラーで以下のルールで作成する。

- ・ 時間枠での代表的な状態変遷や核種移行の挙動を示す。
- ・ 図は評価の時間枠と評価領域との連続性を考慮して作成する。
- ・ 変遷のレベルが分かるように図化する（例えば、変質の進展を色分けや点線で示す）。
- ・ 安全機能の要素（例えば人工バリアの構成要素）は区別ができるように色分けする。
- ・ 動きのある状態（例えば地下水流動やガスの挙動、核種移行など）は、矢印などでその方向性も示す。
- ・ 視覚的な理解も重要であることから、変遷図の説明文は最小限にする。

### (3) 留意点、不確実性の記述

状態変遷を記述する際に、留意した点、留意すべき点および不確実性がある事項について、ストーリーボードの下段に、時間枠ごとに取りまとめる。例えば、オーバーパックの腐食生成物のガラス固化体やベントナイトに与える影響など、現状での知見が十分でない事項について、留意点として記載しておく。

### 3. 第2段階のストーリーボード

第2段階のストーリーボードは、さまざまな分野専門家との議論に基づき、第1段階のストーリーボードを改善する。

基本案をベースにストーリーボードを見直すために、議論に参加する専門家を選定する。例えば、地質・地質構造の変遷、地下水流動、地化学、岩盤力学、人工バリア設計、処分場の建設、操業、埋め戻し、人工バリア材料の変質、放射性核種移行、気候・海水準変動、生物圏などに係る専門家を召集する。ストーリーボードを共通の枠組みとして専門家との議論をするためのルールを以下に示す。

- ① ストーリーボードの基本案を作成した前提や境界条件、ルール、記述事項の現状を説明する。この説明では、処分システム全体の状態変遷の全体像の理解を図る。特にストーリーボード作成では、現状の知見を集約し、最も起こりやすい現実的な事象やプロセスを記述していくことを目標とすることを確認する。
- ② 議論を進めるために、ファシリテータを選出し、基本案を出発点として全体を総括した議論から開始する。専門家間の議論では、基本案の記述事項に関連する事項について時系列的なつながり、領域間のインターフェイスなども着目する。
- ③ 第1段階のストーリーボードの記載事項の議論に関連して、専門家が提示する現状での知見、エビデンス、留意事項、課題などを取りまとめ、ストーリーボードの記載事項の訂正・追記を行う。この作業はストーリーボード基本案の作成のルールに従う。
- ④ 議論で得られた知見の集約は、安全確保に関連した蓋然性の高い事象やプロセスとしてFEPカタログの作成に反映する。

#### 専門家との議論における論点

- ・ スケールにより異なる状態変遷に対して、数字での時間軸を設けるかなど：ストーリーボードの役割と安全機能での期待する時間枠の設定に依存する。現実的なシナリオ作成とも密接に関連する。
- ・ マトリクス内での状態変遷に関する記述をどのレベルとするか：知見の集約とした場合、安全確保に係る事項のみの記述とすることも考えられる。
- ・ マトリクス間の相互関連性をどこまで記述するか：時間枠と評価領域の境界と連

続性について議論する（EDZ や GBI の状態変化や核種の挙動）。

- ・ 留意点や不確実性に関する記述のレベル：蓋然性は高くないが起こる可能性のある事象やプロセスに関する取り扱いの事前整理が必要となる。

#### (a) 状態変遷図作成のルール

マトリクス内には、議論と並行して状態変遷のイメージ図を作成し、議論に応じて改訂していく。

- ・ 時間枠での代表的な状態変遷や核種移行の挙動を示す。
- ・ 図は評価の時間枠と評価領域との連続性を考慮して作成する。
- ・ 変遷のレベルが分かるように図化する（例えば、変質の進展を色分けや点線で示す）。
- ・ 安全機能の要素（例えば人工バリアの構成要素）は区別ができるように色分けする。
- ・ 動きのある状態（例えば地下水流動やガスの挙動、核種移行など）は、矢印などでその方向性も示す。
- ・ 目で見てイメージが湧くことが大事なので変遷図には説明文を付記しない。

#### (b) 不確実性など留意事項の記述

ストーリーボード作成では、現実的なプロセスに着目することもあり、現象としては想定できるが、核種移行への影響には不確実性が含まれる。従って、専門家との議論の中で、明らかとなった事象やプロセスに関連する不確実性に関して、箇条書きで記述する。

#### (c) 記録の保存

ストーリーボードは、議論の展開に伴い記述内容が変更・改良されていく。ストーリーボードの各時間枠の議論での不確実性の存在や、意見の一致が見られなかった内容などを記録する仕組みを準備する。ストーリーボードは、作成の初期段階では、多くの疑問点や不明点が存在し、更新される知見を反映することにより、段階的に改良する。その進展の記録は、判断や意思決定のプロセスとして極めて重要となる。