

地層処分性能評価における シナリオ解析の高度化（ ）

- 概要報告書 -

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

2003年2月

株式会社 三菱総合研究所

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

〒319 - 1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-282-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構
(Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2003

地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化()

- 概要報告書 -

(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

大久保博生*

要 旨

本研究では、まず、核燃料サイクル開発機構(以下サイクル機構とする)が作成した天然バリアに関するFEP情報データの記述レベルや記載内容等について、最新の情報を踏えて多角的に検討した。具体的には、記述項目の統一、記述の詳細度や他のFEPとの相関性のチェック、第2次取りまとめとの照合、第2次取りまとめ以降の情報の反映などを行い、FEP毎に記載内容を整理・変更した。

次に、シナリオ解析手法に関する検討を行った。具体的には、緩衝材を例に、基本シナリオと火成活動シナリオについて、相互関連性マトリクスとPPM(パラメータ、プロセス、モデル)データベースを用いた計算ケース設定までの一連のプロセスを明示した。また、相関関係マトリクスを用いる手法との比較を通じ、今後の課題を整理した。

最後に、地層処分システムに対し、変動シナリオをより現実的に解析するための評価技術に関する検討を行った。具体的には、隆起・侵食シナリオに関してどのような概念・数学モデルが考えられるのかを検討・提示した。

以上の検討結果により、今後の性能評価におけるシナリオ解析の高度化の方向性と取り組むべき課題が明確化された。

本報告書は、株式会社三菱総合研究所が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター

処分研究部 システム解析グループ

* 株式会社 三菱総合研究所

The Advanced Scenario Analysis
for Performance Assessment of Geological Disposal ()
- Summary Document -
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Hiroo Ohkubo *

Abstract

As the first step of this study, description level and content of the FEPs with regard to the FEP information data on the Natural Barrier System developed by JNC have been examined from various angles on the basis of the latest research information. Each content of the FEP data has been classified and modified by means of integrating descriptive items, checking detail levels and correlations with other FEPs, collating with the H12 report, and adding technical information after H12 report.

Secondly, scenario analysis method has been studied. As an illustrated example, a procedure for deriving a calculation case by using Connectivity Matrix and PPM (Parameters, Processes, Models) database was applied for buffer in base scenario and then volcanism scenario. Also, another approach based on Correlation Matrix has been comparatively discussed to list up future subjects.

Lastly, in relation to the geological disposal system, assessment techniques have been examined for more practical scenario analysis on variant scenario. Possible conceptual models have been proposed for uplift and erosion scenario.

As a result of these researches, a future direction for advanced scenario analysis on performance assessment has been indicated, as well as associated issues to be discussed have been clarified.

This work was performed by Mitsubishi Research Institute, Inc. under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

* Mitsubishi Research Institute, Inc. (MRI)

目 次

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | はじめに | 1 |
| 2. | FEP リストの記述に関する情報整理 | 2 |
| 2.1 | はじめに | 2 |
| 2.2 | FEP リストの体系に関する検討 | 3 |
| 2.2.1 | マトリクスを用いたリストの整理 | 3 |
| 2.2.2 | リストの階層構造 | 3 |
| 2.2.3 | 海外レポートに記載されている FEP リストとの比較 | 5 |
| 2.2.4 | 各 FEP データの記載内容についての検討 | 5 |
| 2.3 | 今後の課題 | 6 |
| 3. | 性能評価のためのシナリオ解析の実施とフレームワーク構築に関する検討 .. | 8 |
| 3.1 | はじめに | 8 |
| 3.2 | 相互関連性マトリクスを用いた検討 | 9 |
| 3.2.1 | 考え方及びアプローチ | 9 |
| 3.2.2 | マトリクスの試作 | 12 |
| 3.2.3 | シナリオ作成から解析ケース設定に至るプロセスの検討 | 16 |
| 3.3 | 相関関係マトリクスを用いた検討 | 27 |
| 3.3.1 | 相関関係マトリクスを用いたシナリオ解析手法 | 27 |
| 3.3.2 | 相関関係マトリクスを用いたシナリオ計算ケース設定に至る プロセスの検討 | 30 |
| 3.4 | シナリオ解析手法に関するまとめと課題の整理 | 43 |
| 3.4.1 | 相互関連性マトリクスと相関関係マトリクスの比較 | 43 |
| 3.4.2 | マトリクス中の FEP 相関について | 44 |
| 3.4.3 | 重要度、影響度の設定について | 45 |
| 3.4.4 | 概念・数学モデル構築のアプローチについて | 45 |
| 4. | 変動シナリオに関する解析技術の検討 隆起・侵食シナリオ | 47 |
| 4.1 | はじめに | 47 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.2 | 隆起・侵食による間接的な影響 | 47 |
| 4.2.1 | 温度 | 47 |
| 4.2.2 | 水理学 | 47 |
| 4.2.3 | 力学的負荷 | 48 |
| 4.2.4 | 化学 | 48 |
| 4.2.5 | その他の問題 | 49 |
| 4.3 | 隆起・侵食による変動シナリオのコンパートメントモデルを使った表現. | 50 |
| 5. | おわりに | 58 |
| | 参考文献 | 59 |

目 次

| | | |
|--------|---|----|
| 図 1 | マトリクスと階層構造との整理の比較 | 4 |
| 図 2 | シナリオ解析フレームワークの提案 | 11 |
| 図 3 | 非対角線上の FEP 間の影響を表す相互関連性マトリクスの展開 | 14 |
| 図 4 | 提案されるシナリオ解析手法のフローチャート | 17 |
| 図 5 | 全ての影響レベル(InfL)を含む第 2 次取りまとめ基本シナリオの相互関連性マトリクス..... | 19 |
| 図 6 | ImpL 8 のときの第 2 次取りまとめ基本シナリオの相互作用マトリクス | 21 |
| 図 7(1) | 全ての InfL 値を含む火成岩貫入シナリオの相互関連性マトリクス..... | 23 |
| 図 7(2) | 修正後の InfL 値を伴う影響を表わす火成岩貫入シナリオの相互関連性マトリクス | 24 |
| 図 8 | ImpL 8 のときの火成岩貫入シナリオの相互作用マトリクス..... | 26 |
| 図 9 | 相関関係マトリクスの概念図 | 27 |
| 図 10 | 相互関連性マトリクス | 28 |
| 図 11 | 重要度を付加した緩衝材に関する相関関係マトリクス (基本シナリオ) | 32 |
| 図 12 | 重要度を用いてスクリーニングした相関関係マトリクス (重要度 8 以上)(基本シナリオ) | 33 |
| 図 13 | 重要度を付加した緩衝材に関する相関関係マトリクス(変動シナリオ) | 35 |
| 図 14 | 重要度を用いてスクリーニングした相関関係マトリクス(重要度 8 以上) (変動シナリオ) | 36 |
| 図 15 | FEP 相関から概念・数学モデル構築までのフロー | 38 |
| 図 16 | 各プロセスの影響およびプロセス同士の関連の整理のイメージ図..... | 43 |
| 図 17a | 隆起・侵食シナリオ - 段階 1 - (第 2 次取りまとめの基本シナリオ) . | 53 |
| 図 17b | 段階 1 のコンパートメントモデルによる表現..... | 53 |

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 図 18a | 隆起・侵食シナリオ - 段階 2 - | 54 |
| 図 18b | 段階 2 のコンパートメントモデルによる表現 | 54 |
| 図 19a | 隆起・侵食シナリオ - 段階 3 - | 55 |
| 図 19b | 段階 3 のコンパートメントモデルによる表現 | 55 |
| 図 20a | 隆起・侵食シナリオ - 段階 4 - | 56 |
| 図 20b | 段階 4 のコンパートメントモデルによる表現 | 56 |
| 図 21a | 隆起・侵食シナリオ - 段階 5 - | 57 |
| 図 21b | 段階 5 のコンパートメントモデルによる表現 | 57 |

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構）は、我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分の研究成果を取りまとめ、平成11年11月に「第2次取りまとめ」を国へ提出した。これに伴い、国による第2次取りまとめの評価が行われ、今後の研究課題が示された。また、平成12年11月「原子力の研究、開発及び利用に関する長期計画」（以下、原子力長計）において、最終処分の実施に向けて必要な取り組みや役割分担が示された。この原子力長計によれば、サイクル機構には、「深地層の研究施設、地層処分放射化学研究施設等を活用し、深地層の科学的研究、実測データの着実な蓄積とモデル高度化による地層処分技術の信頼性向上と性能評価手法の高度化に向けた研究開発を着実に推進する」ことが求められている。

一方、第2次取りまとめにおけるシナリオ解析では、国際的に同意が得られている体系的なアプローチを踏襲しながらシナリオの作成を行い、一定の評価を受けているものの、国際レビュー等ではシナリオから解析ケースを設定する流れについてより分りやすく提示する必要があるとの指摘を受けた。

これらのことを踏まえ、今後シナリオ解析では、実際の地質環境への適用を念頭におきながら、透明性や追跡性などを確保しつつ、分りやすいアプローチを開発し、その成果を性能評価手法の高度化に反映していくことが必要である。またシナリオ解析で対象とするシナリオは基本シナリオのみならず、天然事象に起因するシナリオ（変動シナリオ）も含まれることから、変動シナリオを合理的に設定し、現実的な範囲で可能な限り詳細な解析を実施するための評価手法の検討もあわせて必要となる。

そこで本研究では、第2次取りまとめにおいてまとめられたシナリオに関する情報について最新の研究情報を踏まえた多角的な検討を行う（第2章）とともに、シナリオ解析を透明性や追跡性などを確保しつつ、分りやすく示していくための方法論の検討、さらに方法論に基づくシナリオ解析の試解析を通じてシナリオ解析手法の改良を行う（第3章）。また、変動シナリオにおいては、地層処分システムに摂動を与える現象およびそのプロセスを整理し、現実的な影響評価を行うことを目指した評価モデルについて検討する（第4章）。

2. FEP リストの記述に関する情報整理

2.1 はじめに

サイクル機構が発表した第2次取りまとめ (JNC,1999)⁽⁴⁾では、国内外での研究例を参考にして、安全評価上重要な現象について、見落としがないように、包括的 FEP リスト (以下第2次取りまとめの FEP リスト) が作成されている。また、各 FEP 項目について安全評価上の取扱いの判断や、シナリオの作成に資するために、これまで得られている知見や理解が、FEP データとして別途取りまとめられている。これらの情報について、最新の研究情報を踏まえて多角的な研究を行うと共に、整合的、かつ体系的に整理することを目的に、

最新の研究情報を踏まえた各 FEP データに関する検討

記述レベルの整合性を考慮した、シナリオ解析に最適な FEP リストの階層構造に関する検討を行った。

本章の目的は、第2次取りまとめの FEP リスト、および FEP データの記載内容について、安全評価のためのシナリオ作成に資するものであるかということ念頭において、多角的に検討を加えることである。

具体的には、第2次取りまとめの FEP リストの体系が、シナリオを構築するのに適したものになっているかどうかを検討する。

FEP データの記載内容の検討に際しては、

各FEPの記述レベルは適切であるか？

各FEPの記述の詳細度に偏りはなにか？

他のFEPとの相関に関する記述があるか？

相関関係に不整合はないか？

第2次取りまとめに記載されている情報が網羅されているか？

第2次取りまとめの記述とFEPの記述に顕著な不整合はないか？

適宜、サイクル機構内外で蓄積された最新の知見を取り込んでいるか？

の各点に注意しつつ、データの記載内容を充実することとした。

なお、本章においては、「プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材」および「母岩 (掘削影響領域、断層破碎帯含む)」に関する FEP 項目についてのみを検討の対象とする。

2.2 FEP リストの体系に関する検討

2.2.1 マトリクスを用いたリストの整理

第 2 次取りまとめにおいて、「地層処分システムを構成する場」と「分類された現象・特性」からなるマトリクスを用いて第 2 次取りまとめの FEP リストが作成されている(本編付・表 B-1 参照)。

前年度検討を行ったように、FEP リストを、マトリクスを用いて整理することにより、システムの個々の構成要素での現象・特性に対する理解と網羅性の確認が容易となる。また、各 FEP を、分類された現象・特性と関連付けて理解することができ、シナリオを実際に分析していくには曖昧で、体系化されていない FEP 項目を削除することによって、FEP 項目の数を大きく減らすことができる。

しかしながら、前年度指摘したように、マトリクスを用いた FEP リストの整理には、関連する特性・事象・プロセスを描写する上での「完全性」に関する疑問が残る。例えば、プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材の熱的現象・特性として、「熱物性」、「温度」、「熱膨張」の 3 つの項目が FEP リストとして採用されているが、これらの項目だけで、熱的現象・特性に関する FEP として完全だろうかといった思いを引き起こさせる。

他の指摘としては、FEP 項目の定義の曖昧さが挙げられる。「熱物性」などは構成要素を網羅するには適した名称だが、極めて一般化された名称であり、記述されるべき内容の具体性に乏しい。

また、本年度検討を行った「プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材」については、構成部材によっては、異なる材料を用いることが考えられるが、FEP リストの構成は緩衝材とほぼ同じであり、粘土材料を特に意識した構造になっている。これは他の材料に対しては不適格な FEP リストである可能性がある。このような問題を避けるために、異なる材料が含まれるプラグ/グラウト、支保、埋め戻し材の FEP リストとしては、材料毎に区分するような構造を用いて整理することも考えられる。

2.2.2 リストの階層構造

次に、FEP リストの階層構造について検討する。リストの階層構造を調べるこ

とによって、リストの網羅性の検証、項目間の関連性、およびデータとしての記述内容が整合的になっているかどうかを検証することが可能になる。

ここで、検証の例として、「プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材」の「熱的現象・特性」についての階層構造を取り上げて議論を展開する。この部分の階層構造と、第2次取りまとめのFEPリストとを比較したのが下の図である。

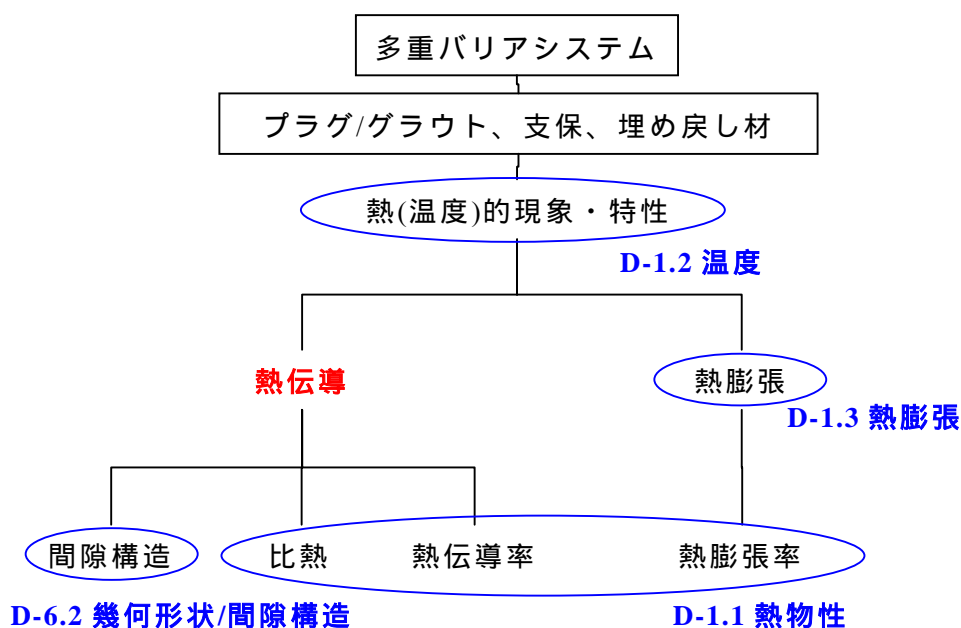


図1 マトリクスと階層構造との整理の比較
(プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材での熱的現象・特性)

階層構造から得られた項目と、第2次取りまとめのFEPリスト中にあるFEP項目を比較してみると、「熱伝導」に関しては、現象に影響を与える特性についてのFEP項目はあるが、現象自身を記述するFEP項目が無く、また、「熱膨張」に関しては、現象、特性いずれもそれらに相当するFEP項目が存在している。このように、階層構造で第2次取りまとめのFEPリストを整理することによって、第2次取りまとめのFEPリストは、必ずしも体系的に整理されたものではないと考えられる。

2.2.3 海外レポートに記載されている FEP リストとの比較

前年度報告したように、海外の FEP リストは、地層処分システムに対する疑問と、地層処分について調査している実施機関および規制当局から挙げられた問題点をもとにして作成されている例が多い（例えば、SKB,1999⁽⁹⁾、Nagra,1994⁽⁷⁾、OECD,2000⁽⁸⁾）。これら海外の FEP リストは、地層処分システムの長期安全性に関心を向けている様々な関係者からの疑問、問題から生まれたものであり、いわゆる「生の言語に基づいた」FEP リストと呼ばれている。

一方、第 2 次取りまとめの FEP リストは、多重バリアシステムの各構成要素の物理化学的現象・特性に注目して整理されている。このような FEP リストは、「生の言語に基づいた」FEP リストとは異なり、「工学的見地に基づいた」FEP リストと呼べる。「生の言語に基づいた」FEP リストには、例えば「種の起源」⁽⁸⁾等、数学モデルを用いたシナリオ解析では体系的に取り扱いにくい項目が含まれることがある。しかしながら、「工学的見地に基づいた」FEP リストでは、物理化学的現象・特性を地層処分システムの構成要素毎に、マトリクスを用いて整理していることから、数学モデルを用いたシナリオ解析では、体系的には取り扱いにくい FEP 項目を排除することができる。また、結果として「工学的見地に基づいた」FEP リストは、「生の言語に基づいた」FEP リストとは明らかに短くなる。網羅性の観点からは、FEP リストが短いということが必ずしも良い点とは言えず、上述したように、短い FEP リストは「これで完全に網羅されているだろうか？」という完全性に関する疑問を投げかける可能性がある。

2.2.4 各 FEP データの記載内容についての検討

各 FEP データの記載レベルの適切さについて検討する場合、各 FEP の全てに対して、共通に適用される階層レベルが存在するとは考え難いこと、各 FEP について、現在得られているそれぞれの知見レベルが異なっていること、安全評価の観点から見ると、各 FEP の感度は異なっていること、などから、全ての FEP 項目に対して共通な記述レベルの深さを要求することが必ずしも適切であるとは考え難い。また、FEP リストの階層構造を見ても、全 FEP 項目が、同じレベルに属しているわけではなく、データを同じ詳細度で記述することを困難にしている。

以上のことから、記述レベルを同じにするのではなく、むしろ、安全評価における重要度が高く、知見レベルも高いものについては、詳細に記述し、安全評価における重要性は高いが、知見レベルが低いもの、及び知見レベルは高いが、安全評価における重要性が低いものについては、概括的な記述にとどめる。といったルールに従って記述するのが今回は適切であると考えられる。

上記のことを踏まえて、FEP リストに基づいてシナリオの解析を行うために適した FEP データの記述を行うために、各 FEP データを以下の構成に従って記述した。

- ・ FEP の名称
- ・ 当該 FEP の概要
- ・ 発生可能性、安全性への影響機構及び感度
- ・ 現象理解の現状
- ・ 性能評価での取扱いとその理由
- ・ 当該 FEP に相関がある FEP 項目
- ・ 参考文献

なお、具体的な記述内容は、本編に添付した CD-ROM 版記録(FEP データ)に格納されている通りである。

2.3 今後の課題

第 2 次取りまとめの FEP リストの体系について検討した結果から、現在の FEP リストをより体系的に整理するためには、今後更に詳細な検討が必要である可能性があると考えられる。今後、FEP リストをより体系的に整理していくために、マトリクスを用いた手法だけではなく、海外の FEP リストで見られる、「生の言語に基づく」手法や、また階層構造を用いた手法等から、FEP として想定される全ての項目を網羅的に挙げ、それをマトリクスで整理する場合、どのような構造にするべきか、また、必要ならば FEP の名称をどのように変更するべきかを検討し、最適な構造を有するマトリクスに、各 FEP 項目を配置していくといった整理を行うが必要があると思われる。このように、FEP 項目を配置していくといった整理を行う必要があると思われる。このように、複数の手法を用いて多角的に FEP

リストを検証することで、階層的であり、かつマトリクスで整理する利点も活かされた FEP リストを作成することが可能になると考えられる。

今年度検討したプラグ/グラウト、支保、埋め戻し材については、複数の構成要素が含まれており、それぞれに異なる材料が用いられることが考えられる。マトリクスを用いて整理する場合に、マトリクスの横軸を各場所で分類するという発想には一定の理解はできるが、縦軸が材料に依存する特性、現象で分類されていることから、プラグ/グラウト、支保、埋め戻し材についても、材料別に再分類し、マトリクス中にそれぞれに対応する列を設定することも今後検討する必要があると思われる。

3. 性能評価のためのシナリオ解析の実施とフレームワーク構築に関する検討

3.1 はじめに

3 章で議論する内容は、性能評価のためのシナリオ解析の実施と記録に役立つフレームワークの構築に関するものである。性能評価のためのシナリオは、FEP リストを出発点とし構築されるが、その際に FEP をどのように取り扱い、透明性や追跡性を確保しつつシナリオさらにはモデルや解析ケースまで展開するののかについての方法論について議論する。

ここでは、以下に示す各 FEP 間の関係を整理する 2 つの手法を提案する。

1. 相互関連性マトリクスを用いた整理

相互関連性マトリクスとは、各 FEP 間の関係を整理するために、全 FEP 間の相互関連性を一つ一つ検証するために用いられるものである。検証のために、マトリクスの対角要素に全 FEP 項目を配置し、関連が認められる項目同士が交わる非対角要素に各関連性について整理するものである。なお、それぞれの関連の内容については、別途データベースとして整理される。

2. 相関関係マトリクスを用いた整理

相関関係マトリクスは、マトリクスの対角要素に FEP 項目のうち Features に相当する特性や状態等が配置されるという構造を持っている。対角要素の特性や状態は、FEP リストにある現象やプロセスを通して変化すると考えることができることから、相関関係マトリクスの各非対角要素は、それぞれの特性や状態を支配する現象やプロセスに相当する Events および Processes が配置されることになる。すなわち、相関関係マトリクスは、相互関連性マトリクスとは異なり、マトリクスの全要素が FEP 項目によって構築されるものである。また、相互関連性マトリクスは、FEP 間の関連について別途データベースとして整理するが、相関関係マトリクスの場合には、FEP リスト自体をそのデータベースとして用いることもできる。

本章では、この 2 つの手法を用いたシナリオ解析の実施と記録に役立つフレームワークの構築について議論を展開する。

3.2 相互関連性マトリクスを用いた検討

3.2.1 考え方及びアプローチ

本節は、性能評価（PA）のためのシナリオ解析の実施と記録に役立つフレームワークの構築を目的とするものである。このフレームワークには、シナリオ解析のための方法論と、より体系的で一貫性のある性能評価作業へ導くためのメカニズムとしてその方法論を利用するコンピュータ・ツールが含まれる。

このプロジェクトの動機は、FEP（特質、事象、プロセス）リストから PA 計算までのシナリオ解析作業に伴って生ずる品質保証・文書化・透明性・追跡可能性を確保することの必要性にある。その作業のためのフレームワークは以下の通りである。（図 2 参照）

前年度の研究（MRI, 2002）⁽⁶⁾で定義した基本シナリオにおける FEP 間の**相互作用を表わすマトリクス**¹（以下、これを相互関連性マトリクスと呼ぶ）を抽出する。第 2 次取りまとめ分冊 3 の表 4.1-1 の FEP リスト²がマトリクスの対角成分を規定する。このマトリクスが任意のシナリオに対するモデル作成と計算の基本となる。

相互関連性マトリクスで重要な FEP のみ抽出された**マトリクス**（以下、これを相互作用マトリクスと呼ぶ）に関して、任意のシナリオの性能評価のモデル作成と計算に適切な処分場システムのプロセスの基礎支配方程式（モデル³）や経験的モデルがあれば、それらを規定する**概念**を具体的に示す。

計算を実行するため、**で示された概念**に要求されるパラメータの値を特定する。

記録保持の目的はもとより、公的検査および規制当局による検査のため

¹ ロック・エンジニアリング・システムではないので以降「マトリクス」の前の「RES」を省略する。

² 最終的にコンピュータ・ツールが開発されると、FEP リストを導入するためのデータベースが設計される。よって本節においては、「データベース」と「リスト」は置き換え可能な言葉として用いられている。

³ モデル作成者がまず研究対象となるシステムを概念化することを一般にモデリングと言う。一つのシステムが多種多様にモデル化されることもある。各概念化がモデルとしてみなされ、概念・数学モデルが数式に表わされることもある。

各作業を記録する手段を提供する。

この準備段階において、例証目的として、第2次取りまとめの処分場システムにおける一つのバリア構成要素について一つの基本シナリオと適当な一つの変動シナリオだけを対象に、この方法論を手作業で実行する。もし問題があれば発見して解決することにより、この方法論のアプローチと段階を改良することが狙いである。また、PA アプリケーションにおいてこの方法論の実現可能性を明確にすることも期待できる。その後が続くのは、より複雑で大量の情報を伴う全処分場システムを処理するにあたってこの方法論を実行するための、最新のデータベースとグラフィック・テクノロジーを用いたコンピュータ・ツールを開発することである。最終的にこのフレームワークの開発に加えて、様々な処分場概念・処分場設計・岩石層・地下水タイプ等を取り扱うことができるように一般化することも可能である。

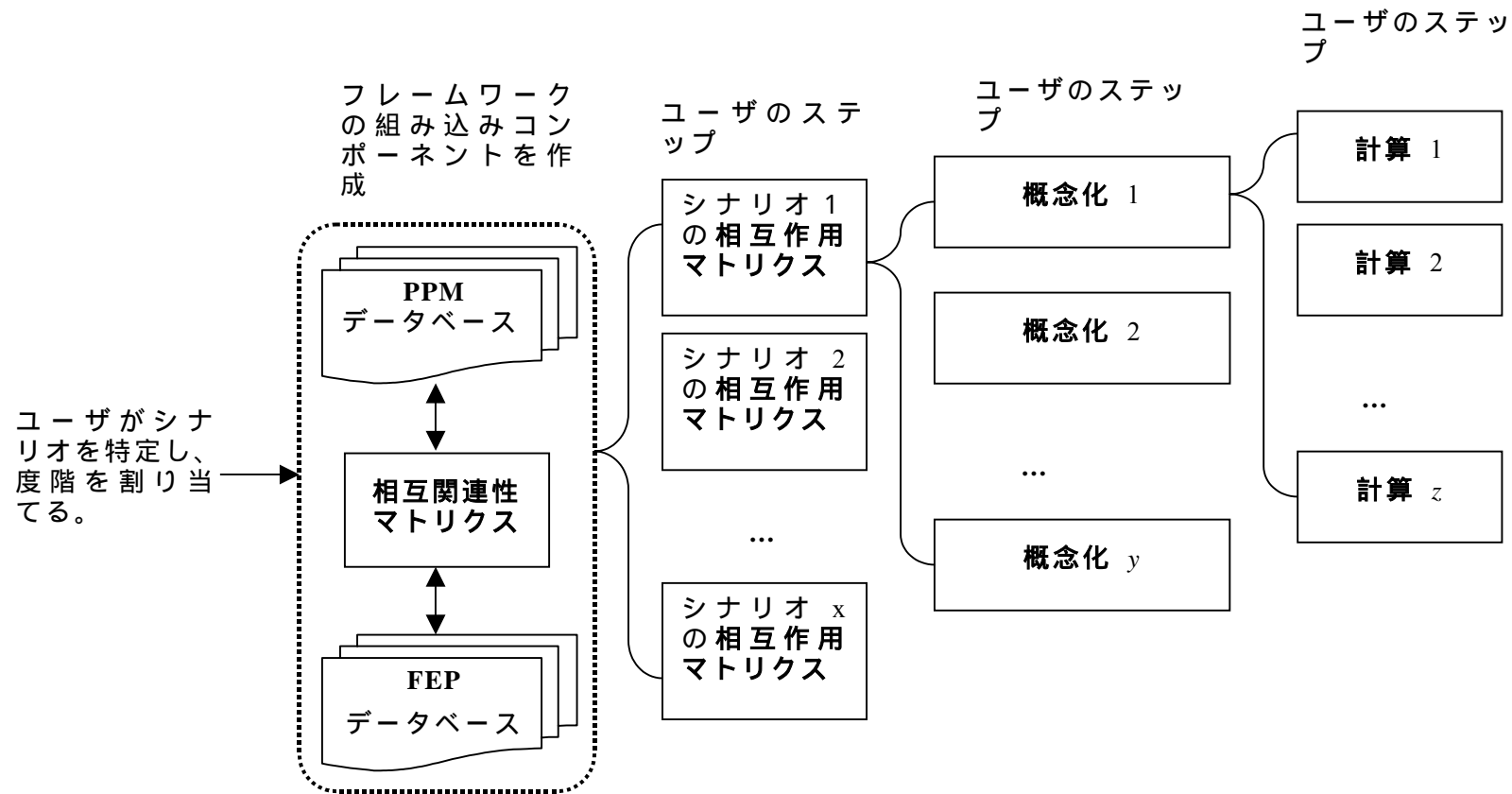


図 2 シナリオ解析フレームワークの提案

全段階が定められた品質管理規格に沿って進められる。ユーザは必要に応じて全てのデータベース、マトリクス、資料をインターフェイスを介して見ることができる。

3.2.2 マトリクスの試作

(1) 考え方

本項の目的は、相互関連性マトリクスと PPM(パラメータ、プロセス、モデル)データベースのアプローチを適用することにある。このアプローチを始める基本セットとして、第 2 次取りまとめ報告書⁴ 分冊 3 の表 4.1-1 の FEP(特質・事象・プロセス)を選択した。

本項では、相互関連性マトリクス及び関連の PPM アプローチを例証するために、第 2 次取りまとめ基本シナリオの緩衝材に限定した FEP のサブセットを用いた。

(2) 第 2 次取りまとめ基本シナリオ

第 2 次取りまとめ分冊 3 の表 4.1-1 は主要な FEP の一覧であるが、それらは第 2 次取りまとめ基本設計における様々なバリアのマトリクスと熱的 - 水理学的 - 力学的 - 化学的 - 放射線学的 - 物質移動の要因に基づくものである。これらの後者の要因にはプロセス、状態、特性の混成が含まれており、それらが結果的にプロセス、状態、特性の混成である第 2 次取りまとめ分冊 3 の表 4.1-1 の任意のバリア(緩衝材など)に関する FEP につながるということに注意が必要である。

本項が基本シナリオの緩衝材 FEP を中心に扱っているため、第 2 次取りまとめ基本シナリオ(第 2 次取りまとめ分冊 3 図 4.1-1 参照)の前提が「設計どおりに機能する人工バリア」であることをはっきりさせておく必要がある。従って、本項の FEP、相互関連性マトリクス、関連する PPM は、第 2 次取りまとめの設計どおりに機能する緩衝材にまず限定して検討を行う。

(3) 影響：概要

図 3 は第 2 次取りまとめの基本シナリオに関する緩衝材の基本的な FEP を示している。対角線上の FEP に対する非対角線上の影響の関係を図示したものとしては、第 2 次取りまとめ分冊 3 の図 5.3.3-3 を参照することができる。

以下の二点が重要な情報として検討され、本編付録 A に記録された。：

⁴ 第 2 次取りまとめ英訳版。

支配方程式あるいはモデル（適用可能な場合）

参考のための第 2 次取りまとめ内の参照データまたはデータ源

各 FEP において概念・数学モデルが記述され、必要に応じて一般的な数式が引用される。また、その影響から生ずる概念・数学モデルの不確実性あるいは帰結も必要に応じて記述される。

データは第 2 次取りまとめの適切な部分から引用した。追加の情報源もまた検討された（例：Bethke, 1996⁽¹⁾; Domenico and Schwartz⁽²⁾, 1998; Ingebritsen and Sanford, 1998⁽³⁾; Tsang, 1987⁽¹⁰⁾; Velde, 1995⁽¹¹⁾）。

(4) 影響：ワークショップによる導出

一連の内部ワークショップでは、FEP の相互作用から生じ得る非対角線上の各影響が体系的に検討された。対角線上の FEP に様々なプロセス、状態、特性を仮定すると、影響はその FEP 間の相互プロセスや対応する数学モデル上の境界条件や主要なパラメータになり得る。

ある FEP が別の FEP に与える相互作用では、特定できるほど顕著な影響が現れないことが多い。その他、仮定される影響は理論的には不可能でないかもしれないが、その影響は取るに足らない微小なものと判断されるケースがある。従って、それらの影響は除外された（図 3 の非対角線上のセルは空白になる）。

また、前述したとおり、第 2 次取りまとめ基本シナリオの定義によって、「緩衝材中での地下水流動」FEP に関連する全ての影響は、発生が不可能である（あるいはまずあり得ない）と判断された。緩衝材の低透水設計に関連した隔離機能がいくつかある（例えば、移流による移行の阻止、拡散移行の安定、コロイドと微生物のろ過、等）。変動シナリオや接近シナリオに対する今後の検討は、同じシナリオ解析手法を用いて行うことができるが、それらのシナリオが小規模あるいは大規模な緩衝材の地下水流動をもたらし得ることは明白であり、除外された

| a ↓ b → | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | | |
|--|------------------------------|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------------------|---|--|--|--|--|--|--|--|-----------------------------------|
| | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | | |
| Thermal properties of buffer | 1 | 1.1 Thermal properties | Fourier's Law | Thermal expansion coefficient | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | Thermal properties of buffer | | | |
| Temperature of buffer | 2 | | 2.2 Temperature | Expansion with changing temperature | Soret effect | Effect of $\nabla T/x$ on satn. distribution | Effect of $\nabla T/x$ on convection | Define standard state | Temperature-induced stresses | | 1 See [2, 3] and [2, 8] | T gradient, mineralogical changes | 1 See [2, 12] | 1 See [2, 12] | Temperature effects on gas pressure | Temperature effects on viability | Thermal degradation | Temperature effect on dissolution | Temperature effects on chemistry | Temperature effects on salt dissoln. / pptn. | | Affects kinetics of recombination | Anneals damage | | 1 See [2, 4] & [2, 12] | | 1 See [2, 4] & [2, 12] | 2 | Temperature of buffer | |
| Thermal expansion of buffer | 3 | | | 3.3 Thermal expansion | Effect on porosity & permeability | 1 See [3, 4] | | | Differing thermal expansion | | 1 See [8, 10] | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | Thermal expansion of buffer | | |
| Hydrological properties of buffer | 4 | | | 4.4 Hydrological properties | Porosity, perm. capillarity affects inflow | Porosity, permeability | | | | | | Effect of porosity on sorption | | Effect on mineral reactivity | Pore volume affects gas pressure | | | | 1 See [4, 12] | | | | | | | Diffusive flux proportional to porosity, De | 1 See [4, 24] | 1 See [4, 24] | 4 | Hydrological properties of buffer |
| Saturation of buffer | 5 | Expansion & conductivity vary with H2O | 1 See [5, 1] | 1 See [5, 1] | 5.5 Saturation of buffer | Degree of saturation affects inflow | Degree of saturation affects load | 1 See [5, 9] | Saturation rate and gradient | Effect of saturation gradient | 1 See [5, 9] | 1 See [5, 14] | 1 See [5, 14] | Degree of satn. interaction | Degree of satn. affects distrib. | Viability depends on H2O, nutrients | | | 1 See [5, 12] | Coating of bentonite particles | | Transition from gas-to-water radiolysis | | | Transition from gas-to-water transport | 1 See [5, 24] | 1 See [5, 24] | 5 | Saturation of buffer | |
| Hydraulic flow in buffer | 6 | | Effect of inflow on T distribution | | Water inflow rate | 6.6 Hydraulic flow | 1 See [6, 5] & [5, 7] | 1 See [6, 5] & [5, 9] | 1 See [6, 5] & [5, 9] | 1 See [6, 5] & [5, 9] | | | | 1 See [5, 14] | 1 See [5, 15] | 1 See [5, 16] | 1 See [14, 17] | | 1 See [6, 12] | | | | | | 1 See [4, 24] | | 6 | Hydraulic flow in buffer | | |
| Mechanical properties of buffer | 7 | | | Mechanical resistance to expansion | | | 7.7 Mechanical properties | 1 See [7, 10] | | Uneven mechanical loading | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 | Mechanical properties of buffer | | |
| Mechanical stress of buffer | 8 | | | Stress resistance to expansion | | | 8.8 Mechanical stress | | Uneven mechanical stress | 1 See [9, 8] & [8, 11] | | | | | | | | | | | | | | | 1 See [8, 25] | May deform pore structure | 1 See [8, 25] | 8 | Mechanical stress of buffer | |
| Swelling of buffer | 9 | | | 1 See [8, 3] | Change in dist. of porosity, permeability | | | | Swelling stress | 9.9 Swelling of buffer | 1 See [9, 8] & [8, 10] | Filling of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | 1 See [9, 4] & [8, 25] | 1 See [9, 4] & [8, 25] | 9 | Swelling of buffer | |
| Deformation of buffer | 10 | | | 1 See [8, 3] | Change in porosity, permeability | 1 See [10, 4] | | Non-uniform mechanical properties | Uneven swelling stress | | | 10.10 Deformation of buffer | Presence of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | 1 See [10, 4] & [8, 25] | 1 See [10, 4] & [8, 25] | 1 See [10, 4] & [8, 25] | 10 | Deformation of buffer |
| Extrusion of buffer | 11 | | | | Change in porosity, permeability | | Contact with fractures, cracks; direct | | | | | 11.11 Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | | | | 1 See [11, 4] & [8, 25] | 1 See [11, 4] & [8, 25] | 1 See [10, 4] & [8, 25] | 11 | Extrusion of buffer |
| Chemical properties of buffer | 12 | Thermal properties of minerals | 1 See [12, 1] | | Link between mineralogy and porosity | Uptake of g/w, different minerals | | Mineralogic distribution | Mineralogic distribution | Amount of bentonite (swelling) | Change in mineral distribution | 1 See [12, 9] | 12.12 Chemical properties | Mineral-water reactions | Mineral-water reactions | Provision of nutrients (organics) | Organic content of buffer | Colloid-forming minerals | 1 See [12, 14] | | | 1 (via Interaction of buffer-water) | Defines buffer mineral properties | Defines sorption properties | | | 1 See [12, 24] | 12 | Chemical properties of buffer | |
| Porewater chemistry | 13 | | Exothermic or endothermic reactions | | Mineral diss. or pptn.; effects on porosity | | | 1 See [12, 7] | 1 See [12, 8] | Salinity effects | 1 See [13, 9] & [13, 12] | 1 See [13, 9] & [13, 12] | Mineral dissolution / precipitation | 13.13 Porewater chemistry | Mineral-water reactions | Gas-generating reactions | Provision of nutrients / reactions | Dissolution of organic material | Dissolution of coll.-forming minerals | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Sets concentration of reactive species | Sets concentration of alpha-nuclides | Salinity effects | 1 See [13, 4] | Salinity effects | 13 | Porewater chemistry | |
| Interaction of buffer with groundwater | 14 | 1 See [12, 1] | Exothermic or endothermic reactions | 1 See [12, 1] | Mineral diss. or pptn.; effects on porosity | | | 1 See [12, 7] | 1 See [12, 8] | 1 See [12, 9] & [13, 9] | 1 See [14, 12] & [14, 13] | 1 See [14, 12] & [14, 13] | Mineral-water reactions | Mineral dissolution / precipitation | 14.14 Interaction with g/water | Degradation of organic material | Provision of nutrients / reactions | Dissolution of organic material | Dissolution of coll.-forming minerals | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Reactive species added | Anneals damage | Sorption of some nuclides | 1 See [14, 4] | Sorption of some nuclides | 14 | Interaction of buffer with groundwater | |
| Gas generation and effects | 15 | Include gas in thermal properties | Gas flow on change in T distribution | 1 See [15, 8] & [8, 3] | | Direct effect on water saturation | Gas influences water flow | Gas pressure applies stress | Gas pressure applies stress | Gas pressure resistance to swelling | Preferential pathways / disruption | Gas may prevent rock-buffer contact | | Gas dissolution / exsolution | 15.15 Gas generation and effects | | | | | 1 See [15, 6] | | | | Reactive species added | Formation of gas channels | Formation of gas channels | Change to unsaturated conditions | 15 | Gas generation and effects | |
| Microbial activity | 16 | | | | Clogging of porosity | | | | | | | | 1 (indirect via mineral changes) | Microbially-catalyzed reactions | Microbially-catalyzed reactions | Microbially-catalyzed reactions | 16.16 Microbial activity | Microbes ==> organic material | Presence of microbes as colloids | Microbially-catalyzed reactions | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 16 | Microbial activity | |
| Organics | 17 | Change in thermal properties | 1 See [17, 1] | | Precipitation will reduce porosity | | | Change in mechanical properties | Change in mechanical stress | | Effect only significant if organics incr. | | Only for major change in organics | Dissolution of organics | Reactions involving diss. organics | Degradation of organics | Provision of nutrients (organics) | 17.17 Organics | Dissolution of organics | Reactions involving organics | | Reactive species added | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 17 | Organics | |
| Colloid formation | 18 | | | | Clogging of porosity | | | | | | | | | | | | | Source of nutrients (organics) | 18.18 Colloid formation | | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 18 | Colloid formation | |
| Chemical alteration of buffer | 19 | Formation of new minerals | 1 See [19, 1] | 1 See [19, 1] | Mineral changes affect porosity | | | Only if big change in mineralogy | Only if big change in mineralogy | Only if big change in bentonite | Only for big change in mineral distr. | Only if big change in bentonite | Change in mineralogy | Mineral-water reactions | | Only if degradation of organics | | Only if degradation of organics | Mineral dissolution | 19.19 Chemical alteration | Solubility limits | | | | | | | 19 | Chemical alteration of buffer | |
| Salt accumulation | 20 | Salt accumulation in buffer | 1 See [20, 1] | 1 See [20, 1] | Salt pptn. / diss. affects porosity | | | | Salt pptn. => reduction in swelling | 1 See [20, 9] | Salt pptn. => reduction in extrusion | Change in mineral composition | Salt dissolution | Ion exchange | | | | | High salinity will reduce colloids | 20.20 Salt accumulation | | | | | 1 See [20, 4] | 1 See [20, 4] | 1 See [20, 4] | 20 | Salt accumulation | |
| Radioactive decay & ingrowth | 21 | | Radiogenic heating | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | 21.21 Radioactive decay | Radiolytic species/yield dependence | Alpha radiation field | | | | | 21 | Radioactive decay & ingrowth | |
| Radiolysis of porewater | 22 | | | | | | | | | | | | | Affects pH and Eh | H ₂ may be produced | Viability of microbes | Degradation of organics | | | | | 22.22 Radiolysis of porewater | | | | | | 22 | Radiolysis of porewater | |
| Radiation damage to buffer | 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23.23 Radiation damage | | | | | 23 | Radiation damage to buffer | |
| Mass transport properties | 24 | | | | | 1 [4, 5] & [25, 5] | 1 [4, 6] & [25, 6] | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24.24 Mass transport properties | | Migration rate proportional to D _e and ϵ | 24 | Mass transport properties | |
| Geometry & pore structure | 25 | | | | Sets hydro-logical properties | Controls re-saturation | Pore geometry sets low permeability | | | | | | Sets the available water volume | 1 (via Porewater Chemistry) | Sets the available gas volume | | | | | | | | | | | Porosity and D _e (tortuosity, constrictivity) | 25.25 Geometry & pore structure | Migration rate proportional to D _e and ϵ | 25 | Geometry & pore structure |
| Radionuclide migration in buffer | 26 | | | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | Possible co-precipitation of nuclides | | Sets nuclide concentrations in buffer | Alpha-nuclides may sorb on clay surfaces | | | 26.26 Radionuclide migration | | 26 | Radionuclide migration in buffer |

図 3 非対角線上の FEP 間の影響を表わす相互関連性マトリクスの展開

「緩衝材中での地下水流動」に関連する影響を再検討した上で、おそらくそれらを取り入れなくてはならないだろう⁵。

その他の FEP の相互作用について、影響が認められたとしても、この影響は実際には「間接的」影響として示すか、あるいはそう考えるべきであると判断されるものがあった。それらの非対角線上の「間接的」影響は「I」記号で略記し、関連するより直接的な影響を記載した。

関連問題として FEP の重複がある。つまり、第 2 次取りまとめ分冊 3 の表 4.1-1 から引用された対角線上の FEP のいくつかは同等と考えられるものがあるということである。ワークショップにおいて、FEP が類似あるいは同等と判断された場合、参加者は影響の特定の一組を詳細に記述することに重点的に取り組み、関連する影響を「間接的」影響として記載するか、説明文（以下の段落を参照）に二つの影響が同一であると判断されたと記載するかした。

その他の影響について、ワークショップにおいて、概念・数学モデル/数式と第 2 次取りまとめの補助的なデータ源の完全な記述が行われた。そのようなデータは第 2 次取りまとめの分冊 2 と分冊 3 の両方に分散しているが、概して両方のデータ源が引用された。第 2 次取りまとめの補足的な情報として必要に応じてその他の資料からも引用した（例：Bethke, 1996⁽¹⁾; Domenico and Schwartz, 1998⁽²⁾; Ingebritsen and Sanford, 1998⁽³⁾; Tsang, 1987⁽¹⁰⁾; Velde, 1995⁽¹¹⁾）。本編付録 A には、ワークショップによって記録された各影響の個別のリストを収録した。

(5) 相互関連性マトリクスの展開

図 3 に展開した相互関連性マトリクスは、本報告書では添付・表示していないが、そのもとになっているのは、より複雑なエクセル形式のファイルである。このエクセル形式のファイルは、図 3 と同一のものに各影響に関する全テキストファイル（本編付録 A 参照）の表示機能を追加したものである。このエクセル式ファイルのワークシート上でただカーソルを動かすだけで、それぞれの個別の影響

⁵ 実際に今後変動シナリオあるいは接近シナリオに対する検討を行っていく上で、第 2 次取りまとめ基本シナリオに対してここで報告した想定される影響について、再評価が必要になるであろうことは強調しておかなくてはならない。

について概念・数学モデルとデータに関する第1層と第2層の全ての情報を見ることが出来る。代替し得る概念・数学モデルに関する第3層の情報についても、必要であれば、後で簡単に追記できるようになっている。

(6) まとめ

本項は、相互関連性マトリクスと PPM (パラメータ、プロセス、モデル) データベースのアプローチをシナリオ解析手法として開発し、適用するものである。具体的には、サイクル機構の規定する第2次取りまとめ基本シナリオの緩衝材バリアに関する FEP (特質、事象、プロセス) を用いて、基本的な相互関連性マトリクス (図3) を明示した。第2次取りまとめ基本シナリオに関するこれらの緩衝材 FEP 間で生ずる一連の相互作用あるいは「影響」が概念・数学モデルと関連数式に関して特定され、さらにこれらの影響に係る第2次取りまとめからの参照データもまた特定された。この情報の第1層と第2層は、基本シナリオ解析で検討が必要な主要な影響の調査に利用できるように、図3及び本編付録Aの形式 (もとはエクセル版相互関連性マトリクスシート) で示された。変動シナリオあるいは接近シナリオから生ずる影響に関する今後の検討においてもまた、そのような代替的なシナリオに特有の影響を明らかにするための始点及び指針として、この基本シナリオの相互関連性マトリクスと関連する影響を用いることができるだろう。

3.2.3 シナリオ作成から解析ケース設定に至るプロセスの検討

本項では、シナリオ仕様の性能計算に組み入れる主要な影響を導き出すための段階的かつ反復的な手順を簡単にまとめて記述した (図4参照)。その目的は、予想されるシナリオと予想外のシナリオを整理して計算するための体系的かつ包括的な追跡可能な手法を提供することである。

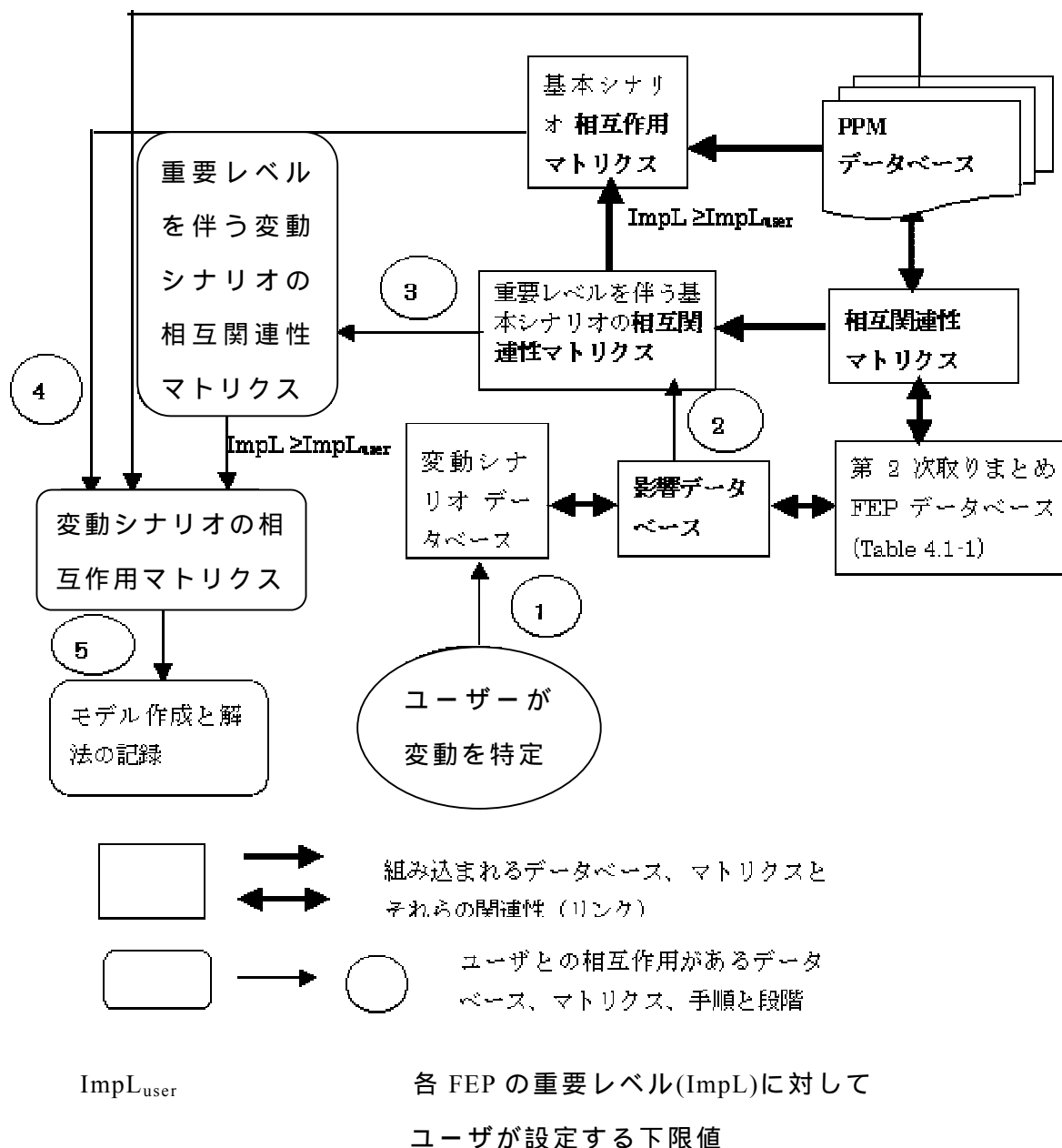


図 4 提案されるシナリオ解析手法のフローチャート

この手法の出発点として、既存の特質、事象、プロセス（FEPs）の包括的なセットから一つを特定する。国内外の処分場計画による FEP リストの情報源は多数ある。このプロセスの説明には、第 2 次取りまとめでサイクル機構が提示した FEP リスト（JNC, 1999）⁽⁴⁾ が選択されたが、サイクル機構が提案する「特性 - 状態」FEP の概念など、その他の概念をこの手法に取り入れて再構成してもよい。

次の反復の段階では、FEP 間に予想される相互作用あるいは影響（即ち、始点となる FEP の終点となる FEP への影響）を記述する。各影響ごとにその影響のモデルやデータに利用できる情報を記録し、情報提供源として参照するべきである。この作業によって、後に計算に用いられる情報が追跡可能になる。

次に解析者は、主観的に、数値あるいは「影響レベル」(InFL)を各 FEP 間の影響に割り当てなくてはならない。影響レベル (InFL) 値の初期の割り当ては、処分場システムの全体的な安全評価システムにその影響を含むときあるいは除外するときの影響を考慮して行うことが肝要である。その影響を除外した結果、終点となる FEP への影響の解析においてその技術的有効性が完全に損われるとき、InFL 値は 10 になる。逆に、その影響を除外しても終点となる FEP の安全評価の信頼性を維持できるとき、InFL 値は 0 になる。ここで注意が必要なのは、「モデルの有効性」あるいは「データの不確実性」などの検討事項は、InFL 値の割り当てでは考慮されないということである。このことからわかるのは、ここで提案するシナリオ手法は、多分に非効率的で技術的にも疑わしい「ボトムアップ」アプローチではなく「トップダウン」方式でその後の R&D の優先事項の方針を定めるのに利用され得るということである。影響に対して適正に InFL 値を割り当てた後に、R&D の要求事項の全体方針を定める一環として、「モデルの有効性」や「データの不確実性」などの情報を調べて記録してみることは、解析者にとって意義のあることであるとは言うまでもない。

これらの段階をまとめたものがいわゆる「相互関連性マトリクス」である。そのような相互関連性マトリクスを第 2 次取りまとめの基本シナリオ(JNC, 1999)⁽⁴⁾ について作成した(図 5 参照。ここで InFL=10(赤)、8(橙)、6(黄)、4(緑)、2(青)を表す)。

| a, b | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | | |
|--|--|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---|--------------------------------------|---|---------------------------------|--|-------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|--|---|--|--|------------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|--|----------------------------------|
| ↓ b → | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | | |
| Thermal properties of buffer | 1.1 Thermal properties | Fourier's Law | Thermal expansion coefficient | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | Thermal properties of buffer | | |
| Temperature of buffer | | 2.2 Temperature | Expansion with changing temperature | Soret effect | Effect of T/x on satn. distribution | Effect of T/x on convection | Define standard state | Temperature-induced stresses | | | | T gradient, mineralogical changes | | | Temperature effects on gas pressure | Temperature effects on viability | Thermal degradation | Temperature effect on dissolution | Temperature effects on chemistry | Temperature effects on salt dissoln. / pptn. | | | Affects kinetics of recombination | Anneals damage | | | | 2 | Temperature of buffer | |
| Thermal expansion of buffer | | | 3.3 Thermal expansion | Effect on porosity & permeability | | | | Differing thermal expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | Thermal expansion of buffer | |
| Hydrological properties of buffer | | | | 4.4 Hydrological properties | Porosity, perm capillarity affects inflow | Porosity, permeability | | | | | | Effect of porosity on sorption | | Effect on mineral reactivity | Pore volume affects gas pressure | | | | | | | | | | | | | 4 | Hydrological properties of buffer | |
| Saturation of buffer | Expansion & conductivity vary with H2O | | | | 5.5 Saturation of buffer | Degree of saturation affects inflow | Degree of saturation affects load | | | | | | | Degree of satn. affects interaction | Degree of satn. affects distrib. | Viability depends on H2O, nutrients | | | | Coating of bentonite particles | | Transition from gas-to-water radiolysis | | Transition from gas-to-water transport | | | | 5 | Saturation of buffer | |
| Hydraulic flow in buffer | | Effect of inflow on T distribution | | | Water inflow rate | 6.6 Hydraulic flow | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 | Hydraulic flow in buffer | |
| Mechanical properties of buffer | | | Mechanical resistance to expansion | | | | 7.7 Mechanical properties | | | | | | | | | Mechanical resistance to gas pressure | | | | | | | | | | | | 7 | Mechanical properties of buffer | |
| Mechanical stress of buffer | | | Stress resistance to expansion | | | | Stress-strain relationship | 8.8 Mechanical stress | | | | | | | | | | | | | | | | | May deform pore structure | | | 8 | Mechanical stress of buffer | |
| Swelling of buffer | | | | Change in dist. of porosity, permeability | | | | Swelling stress | 9.9 Swelling of buffer | | Filling of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 | Swelling of buffer | |
| Deformation of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | | Non-uniform mechanical properties | Uneven swelling stress | | 10.10 Deformation of buffer | Presence of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | Deformation of buffer | |
| Extrusion of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | Contact with fractures, cracks, direct | | | | | 11.11 Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | Extrusion of buffer | |
| Chemical properties of buffer | Thermal properties of minerals | | | Link between mineralogy and porosity | Uptake of g/w, different minerals | | Mineralogic distribution | Mineralogic distribution | Amount of bentonite (swelling) | Change in mineral distribution | | 12.12 Chemical properties | Mineral-water reactions | Mineral-water reactions | | Provision of nutrients (organics) | Organic content of buffer | Colloid-forming minerals | | | | | Defines buffer mineral properties | Defines sorption properties | | | | 12 | Chemical properties of buffer | |
| Porewater chemistry | | Exothermic or endothermic reactions | | Mineral diss. or pptn., effects on porosity | | | | | Salinity effects | | | 13.13 Porewater chemistry | Mineral-water reactions | Gas-generating reactions | Provision of nutrients / reactions | Dissolution of organic material | Dissolution of coll.-forming minerals | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Sets concentration of reactive species | Sets concentration of alpha-nuclides | Salinity effects | | Salinity effects | | | 13 | Porewater chemistry | |
| Interaction of buffer with groundwater | | Exothermic or endothermic reactions | | Mineral diss. or pptn., effects on porosity | | | | | | | | 14.14 Mineral dissolution / precipitation | Mineral-water reactions | Degradation of organic material | Provision of nutrients / reactions | Dissolution of organic material | Dissolution of coll.-forming minerals | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Reactive species added | Anneals damage | Sorption of some nuclides | | Sorption of some nuclides | | | 14 | Interaction of buffer with groundwater | |
| Gas generation and effects | Include gas in thermal properties | Gas flow on change in T distribution | | | Direct effect on water saturation | Gas influences water flow | Gas pressure applies stress | Gas pressure applies stress | Gas pressure resistance to swelling | Preferential pathways / disruption | Gas may prevent rock-buffer contact | | Gas dissolution / exsolution | | 15.15 Gas generation and effects | | | | | | | Reactive species added | | Formation of gas channels | Formation of gas channels | Change to unsaturated conditions | | 15 | Gas generation and effects | |
| Microbial activity | | | | Clogging of porosity | | | | | | | | Microbially-catalyzed reactions | Microbially-catalyzed reactions | Microbially-catalyzed reactions | | 16.16 Microbial activity | Microbes ==> organic material | Presence of microbes as colloids | Microbially-catalyzed reactions | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | | 16 | Microbial activity | | |
| Organics | Change in thermal properties | | | Precipitation will reduce porosity | | | Change in mechanical properties | Change in mechanical stress | | Effect only significant if organics incr. | | Only for major change in organics | Dissolution of organics | Reactions involving diss. organics | Degradation of organics | Provision of nutrients (organics) | 17.17 Organics | Dissolution of organics | Reactions involving organics | | Reactive species added | | | | Enhanced mobility of some nuclides | | 17 | Organics | | |
| Colloid formation | | | | Clogging of porosity | | | | | | | | | | | | Source of nutrients (organics) | | 18.18 Colloid formation | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | | 18 | Colloid formation | | |
| Chemical alteration of buffer | Formation of new minerals | | | Mineral changes affect porosity | | | Only if big change in mineralogy | Only if big change in mineralogy | Only if big change in bentonite | Only if big change in mineral distr. | Only if big change in bentonite | Change in mineralogy | Mineral-water reactions | | Only if degradation of organics | | Only if degradation of organics | Mineral dissolution | 19.19 Chemical alteration | Solubility limits | | | | | | | 19 | Chemical alteration of buffer | | |
| Salt accumulation | Salt accumulation in buffer | | | Salt pptn. / diss. affects porosity | | | | | Salt pptn. => reduction in swelling | | Salt pptn. => reduction in extrusion | Change in mineral composition | Salt dissolution | Ion exchange | | | | High salinity will reduce colloids | Ion exchange | 20.20 Salt accumulation | | | | | | | 20 | Salt accumulation | | |
| Radioactive decay & ingrowth | | Radiogenic heating | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | | 21.21 Radioactive decay | Radiolytic species/yield dependence | Alpha radiation field | | | | | 21 | Radioactive decay & ingrowth | |
| Radiolysis of porewater | | | | | | | | | | | | | Affects pH and Eh | | H ₂ may be produced | Viability of microbes | Degradation of organics | | | | | 22.22 Radiolysis of porewater | | | | | 22 | Radiolysis of porewater | | |
| Radiation damage to buffer | | | | | | | | | | | | Increase in reactivity of minerals | | | | | | | | | | | 23.23 Radiation damage | | | | | 23 | Radiation damage to buffer | |
| Mass transport properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24.24 Mass transport properties | | Migration rate proportional to D _e and ε | | 24 | Mass transport properties | |
| Geometry & pore structure | | | | Sets hydrological properties | Controls re-saturation | Pore geometry sets low permeability | | | | | | Sets the available water volume | Sets the available water volume | Sets the available gas volume | | | | | | | | | | Porosity and D _e (tortuosity, constrictivity) | 25.25 Geometry & pore structure | Migration rate proportional to D _e and ε | | 25 | Geometry & pore structure | |
| Radionuclide migration in buffer | | | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | Possible co-precipitation of nuclides | | Sets nuclide concentrations in buffer | Alpha-nuclides may sorb on clay surfaces | | | | 26.26 Radionuclide migration | | 26 | Radionuclide migration in buffer |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | | |
| | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | | |

図 5 全ての影響レベル (InfL) を含む第 2 次取りまとめ基本シナリオの相互関連性マトリクス

次の反復の段階では、相互作用マトリクスを導出する。相互作用マトリクスとは、FEP 間の影響レベル(InfL)から導出される各 FEP の重要レベル(ImpL)に対して解析者が主体的に設定する特定の限界重要レベル値 $ImpL_{user}$ に基づく影響のサブセットである。例えば、限界 ImpL 値を 2 以上に設定すると、多数のサブプロセスが含まれることになり、その結果計算モデルの連鎖はほぼ完了するが、それだけ計算時間がかかることになる。対照的に、ImpL 値が 8 以下の場合には最も重要なプロセスモデルだけが含まれることになり、計算時間は大幅に短縮されるが完全性は失われる。限界 ImpL 値は、希望する計算の種類に合わせて解析者が設定する必要がある。相互作用マトリクスの例として、第 2 次取りまとめの基本シナリオで ImpL 値が 8 以上のケースを示した。(図 6 参照)

| a ↓ b → | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
|--|--------------------------------|-------------------------------------|---|---|--------------------------------------|--|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|--|-------------------------------------|--------------------|----------|-------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---|----------------------------|---|---------------------------|----------------------------------|----|
| Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | |
| 1.1 Thermal properties | Fourier's Law | Thermal expansion coefficient | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.2 Temperature | | Expansion with changing temperature | | | Effect of $\Delta T/x$ on convection | | | Temperature-induced stresses | | | | | | | | | | Temperature effects on chemistry | | | | | | | | |
| 3.3 Thermal expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.4 Hydrological properties | | | | Porosity, perm capillarity affects inflow | | Porosity, permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | Diffusive flux proportional to porosity, De | | | |
| 5.5 Saturation of buffer | | | | | Degree of saturation affects inflow | | | | Saturation rate and gradient | Effect of saturation gradient | | | Degree of satn affects interaction | Degree of satn affects gas distrib. | | | | | Coating of bentonite particles | | Transition from gas-to-water radiolysis | | Transition from gas-to-water transport | | | |
| 6.6 Hydraulic flow | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.7 Mechanical properties | | | Mechanical resistance to expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.8 Mechanical stress | | | Stress resistance to expansion | | | | Stress-strain relationship | | | | | | | | | | | | | | | | | May deform pore structure | | |
| 9.9 Swelling of buffer | | | Change in dist. of porosity, permeability | | | | | Swelling stress | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10.10 Deformation of buffer | | | Change in porosity, permeability | | | Non-uniform mechanical properties | | Uneven swelling stress | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11.11 Extrusion of buffer | | | Change in porosity, permeability | | | Contact with fractures, cracks; direct | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12.12 Chemical properties | Thermal properties of minerals | | | | | | Mineralogic distribution | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.13 Porewater chemistry | | | | | | | | Salinity effects | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14.14 Interaction of buffer with groundwater | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15.15 Gas generation and effects | | | | | Direct effect on water saturation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16.16 Microbial activity | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17.17 Organics | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18.18 Colloid formation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19.19 Chemical alteration of buffer | | | | Mineral changes affect porosity | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20.20 Salt accumulation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21.21 Radioactive decay & ingrowth | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22.22 Radiolysis of porewater | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23.23 Radiation damage to buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24.24 Mass transport properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25.25 Geometry & pore structure | | | | Sets hydro-logical properties | Controls re-saturation | Pore geometry sets low permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26.26 Radionuclide migration in buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

図 6 ImpL 8 のときの第 2 次取りまとめ基本シナリオの相互作用マトリクス

しかしながら、影響及び FEP は一連の複合連鎖によって関連付けられるため、FEP への重要レベルの割り当ては、局所レベルではなく全体レベルで行わなくてはならない。全体的な重要レベルを FEP に割り当てる際、簡単な最小-最大の法則を用いるが、それによってまた局所的には重要性を持つ（終点となる FEP への影響に高い InfL 値が割り当てられる）が全体としての重要性は低い（終点となる FEP そのものは次の FEP にとってそれ程重要ではない）影響も排除される。

このシナリオ手法の次の段階では、任意の変動シナリオに関して相互関連性マトリクスの修正を行う。第 2 次取りまとめ基本シナリオの相互関連性マトリクスについて、各影響の監査が解析者によるシナリオの詳細かつ主体的な記述に照らして行われる。これを説明する例として、マグマ溜りの遠方での火成岩貫入(MRI, 1997⁽⁵⁾を参照)を選択する。「地層処分システム隔離性能に関する稀頻度事象定量化手法の検討()」(MRI, 1997)⁽⁵⁾の具体的な推定に基づき、解析者は、(1)その影響が依然として該当するか、あるいは修正・除外の必要があるか、(2)前に除外した影響が今度は該当するか否かの判断、(3)該当する全ての影響に割り当てられた InfL 値を修正する必要があるか、を検討しなくてはならない。これらの評価を組み合わせることによって、火成岩貫入の相互関連性マトリクスが作成される（図 7 参照）。

| a ↓ b → | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | |
|--|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------------|---|---|---|--|----------------------------------|
| | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | |
| Thermal properties of buffer | 1.1 Thermal properties | Fourier's Law | Thermal expansion coefficient | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | Thermal properties of buffer | |
| Temperature of buffer | | 2.2 Temperature | Expansion with changing temperature | | | Effect of $\alpha T/x$ on convection | | Temperature-induced stresses | | | | | | | | | | | Temperature effects on chemistry | | | | | | | | 2 | Temperature of buffer | |
| Thermal expansion of buffer | | | 3.3 Thermal expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | Thermal expansion of buffer | |
| Hydrological properties of buffer | | | | 4.4 Hydrological properties | Porosity, perm. capillarity affects inflow | Porosity, permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4 | Hydrological properties of buffer | |
| Saturation of buffer | | | | | 5.5 Saturation of buffer | Degree of saturation affects inflow | | | Saturation rate and gradient | Effect of saturation gradient | | | | Degree of satn. affects interaction | Degree of satn. affects gas distrib. | | | | | Coating of bentonite particles | | Transition from gas-to-water radiolysis | | | Diffusive flux proportional to porosity, De | Transition from gas-to-water transport | 5 | Saturation of buffer | |
| Hydraulic flow in buffer | | | | | | 6.6 Hydraulic flow | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 | Hydraulic flow in buffer | |
| Mechanical properties of buffer | | | Mechanical resistance to expansion | | | | 7.7 Mechanical properties | | | Uneven mechanical loading | | | | | | Mechanical resistance to gas pressure | | | | | | | | | | | 7 | Mechanical properties of buffer | |
| Mechanical stress of buffer | | | Stress resistance to expansion | | | | Stress-strain relationship | 8.8 Mechanical stress | | Uneven mechanical stress | | | | | | | | | | | | | | | May deform pore structure | | 8 | Mechanical stress of buffer | |
| Swelling of buffer | | | | Change in dist. of porosity, permeability | | | | Swelling stress | 9.9 Swelling of buffer | | Filling of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | 9 | Swelling of buffer | |
| Deformation of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | | Non-uniform mechanical properties | Uneven swelling stress | | 10.10 Deformation of buffer | Presence of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | Deformation of buffer | |
| Extrusion of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | Contact with fractures, cracks, direct | | | | | 11.11 Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | Extrusion of buffer | |
| Chemical properties of buffer | Thermal properties of minerals | | | | | | Mineralogic distribution | | Amount of bentonite (swelling) | | | 12.12 Chemical properties | Mineral-water reactions | Mineral-water reactions | | | Organic content of buffer | Colloid-forming minerals | | | | | Defines buffer mineral properties | Defines sorption properties | | | 12 | Chemical properties of buffer | |
| Porewater chemistry | | | | | | | | Salinity effects | | | | 13.13 Porewater chemistry | Mineral-water reactions | | | | | | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Sets concentration of reactive species | | | Salinity effects | Salinity effects | 13 | Porewater chemistry | |
| Interaction of buffer with groundwater | | | | | | | | | | | | Mineral dissolution/precipitation | 14.14 Interaction with g/water | | | | | | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Reactive species added | | | | | 14 | Interaction of buffer with groundwater | |
| Gas generation and effects | | | | | Direct effect on water saturation | | | | | | | Gas dissolution/exsolution | | 15.15 Gas generation and effects | | | | | | | | Reactive species added | | Formation of gas channels | Formation of gas channels | Change to unsaturated conditions | 15 | Gas generation and effects | |
| Microbial activity | | | | | | | | | | | | | | | | 16.16 Microbial activity | Microbes \Rightarrow organic material | Presence of microbes as colloids | | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 16 | Microbial activity | |
| Organics | | | | | | | | | | | | | | Degradation of organics | Provision of nutrients (organics) | 17.17 Organics | | | | | | Reactive species added | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 17 | Organics | |
| Colloid formation | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18.18 Colloid formation | | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 18 | Colloid formation | |
| Chemical alteration of buffer | | | | Mineral changes affect porosity | | | | | | | | Change in mineralogy | Mineral-water reactions | | | | | | | | | 19.19 Chemical alteration | | | | | 19 | Chemical alteration of buffer | |
| Salt accumulation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20.20 Salt accumulation | | | | 20 | Salt accumulation | |
| Radioactive decay & ingrowth | | | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | | | 21.21 Radioactive decay | Radiolytic species/yield dependence | Alpha radiation field | | | 21 | Radioactive decay & ingrowth | |
| Radiolysis of porewater | | | | | | | | | | | | | Affects pH and Eh | | | | | | | | | | 22.22 Radiolysis of porewater | | | | 22 | Radiolysis of porewater | |
| Radiation damage to buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23.23 Radiation damage | | | 23 | Radiation damage to buffer | |
| Mass transport properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Migration rate proportional to D_v and ϵ | 24 | Mass transport properties | |
| Geometry & pore structure | | | | Sets hydrological properties | Controls re-saturation | Pore geometry sets low permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Porosity and D_v (tortuosity, constrictivity) | 25.25 Geometry & pore structure | Migration rate proportional to D_v and ϵ | 25 | Geometry & pore structure |
| Radionuclide migration in buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 26.26 Radionuclide migration | 26 | Radionuclide migration in buffer |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | |
| | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | |

図 7(1) 全ての InFL 値を含む火成岩貫入シナリオの相互関連性マトリクス

| a ↓ b → | Properties and Processes | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|
| | 1 Thermal properties of buffer | 2 Temperature of buffer | 3 Thermal expansion of buffer | 4 Hydrological properties of buffer | 5 Saturation of buffer | 6 Hydraulic flow in buffer | 7 Mechanical properties of buffer | 8 Mechanical stress of buffer | 9 Swelling of buffer | 10 Deformation of buffer | 11 Extrusion of buffer | 12 Chemical properties of buffer | 13 Porewater chemistry | 14 Interaction of buffer with groundwater | 15 Gas generation and effects | 16 Microbial activity | 17 Organics | 18 Colloid formation | 19 Chemical alteration of buffer | 20 Salt accumulation | 21 Radioactive decay & ingrowth | 22 Radiolysis of porewater | 23 Radiation damage to buffer | 24 Mass transport properties | 25 Geometry & pore structure | 26 Radionuclide migration in buffer | |
| Thermal properties of buffer | 1.1 Thermal properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 Thermal properties of buffer |
| Temperature of buffer | | 2.2 Temperature | | | | Effect of $\nabla T/x$ on convection | Define standard state | Temperature-induced stresses | | | | T gradient: mineralogical changes | | | Temperature effects on gas pressure | | Thermal degradation | | Temperature effects on chemistry | | | Affects kinetics of recombination | Anneals damage | | | | 2 Temperature of buffer |
| Thermal expansion of buffer | | | 3.3 Thermal expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 Thermal expansion of buffer |
| Hydrological properties of buffer | | | | 4.4 Hydrological properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 4 Hydrological properties of buffer |
| Saturation of buffer | | | | | 5.5 Saturation of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 5 Saturation of buffer |
| Hydraulic flow in buffer | | | | | | 6.6 Hydraulic flow | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 Hydraulic flow in buffer |
| Mechanical properties of buffer | | | | | | | 7.7 Mechanical properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 7 Mechanical properties of buffer |
| Mechanical stress of buffer | | | | | | | | 8.8 Mechanical stress | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 8 Mechanical stress of buffer |
| Swelling of buffer | | | | | | | | | 9.9 Swelling of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | 9 Swelling of buffer |
| Deformation of buffer | | | | | | | Non-uniform mechanical properties | | | 10.10 Deformation of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | 10 Deformation of buffer |
| Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | 11.11 Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | 11 Extrusion of buffer |
| Chemical properties of buffer | | | | Link between mineralogy and porosity | | | | Mineralogic distribution | | Change in mineral distribution | | 12.12 Chemical properties | | | | | | | | | | | | | | | 12 Chemical properties of buffer |
| Porewater chemistry | | | | | | | | | | | | 13.13 Porewater chemistry | | | | | | | | | | | | | | | 13 Porewater chemistry |
| Interaction of buffer with groundwater | | | | | | | | | | | | | 14.14 Interaction with g/water | | | | | | | | | | | | | | 14 Interaction of buffer with groundwater |
| Gas generation and effects | | | | | | | | | | | | | | 15.15 Gas generation and effects | | | | | | | | | | | | | 15 Gas generation and effects |
| Microbial activity | | | | | | | | | | | | | | | 16.16 Microbial activity | | | | | | | | | | | | 16 Microbial activity |
| Organics | | | | | | | | | | | | | | | | | 17.17 Organics | | | | | | | | | | 17 Organics |
| Colloid formation | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18.18 Colloid formation | | | | | | | | | 18 Colloid formation |
| Chemical alteration of buffer | Formation of new minerals | | | | | | | Only if big change in mineralogy | Only if big change in mineralogy | Only if big change in bentonite | Only for big change in mineral distr. | | | | | | | | Mineral dissolution | 19.19 Chemical alteration | | | | | Change in mineralogy and porosity | 19 Chemical alteration of buffer | |
| Salt accumulation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20.20 Salt accumulation | | | | | | | 20 Salt accumulation |
| Radioactive decay & ingrowth | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 21.21 Radioactive decay | | | | | | 21 Radioactive decay & ingrowth |
| Radiolysis of porewater | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 22.22 Radiolysis of porewater | | | | | 22 Radiolysis of porewater |
| Radiation damage to buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23.23 Radiation damage | | | | 23 Radiation damage to buffer |
| Mass transport properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24.24 Mass transport properties | | | 24 Mass transport properties |
| Geometry & pore structure | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 25.25 Geometry & pore structure | | 25 Geometry & pore structure |
| Radionuclide migration in buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 26.26 Radionuclide migration | 26 Radionuclide migration in buffer |

図 7(2) 修正後の InfL 値を伴う影響を表わす火成岩貫入シナリオの相互関連性マトリクス

この時点で解析者は、第2次取りまとめ基本シナリオの相互関連性マトリクスと全く同様の方法で、このシナリオの相互関連性マトリクスにおいても反復を行うことができる。限界 ImpL 値を任意に設定し、最小 - 最大ルールを全体に適用することによって、そのシナリオ特定の相互作用マトリクスが作成される（図 8 参照）。この火成岩貫入の相互作用マトリクスについて、安全性の計算設定に重要となる新たな影響として(あるとすれば)どの影響を特定するかを見出すため、第2次取りまとめ基本シナリオの相互作用マトリクスとの比較を行うことができる。当然のことながら、シナリオに関する相互関連性マトリクス及び相互作用マトリクスの作成手順は全く一般的であり、第2次取りまとめで検討された全ての変動シナリオに適用できる。

| a ↓ b → | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | |
|--|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|---|--|--|-----------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--|---|-----------------------------------|--|--|--|-----------------------------------|---------------------------|
| Thermal properties of buffer | 1.1 Thermal properties | Fourier's Law | Thermal expansion coefficient | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | Thermal properties of buffer | | |
| Temperature of buffer | | 2.2 Temperature | Expansion with changing temperature | | | Effect of T/x on convection | Define standard state | Temperature-induced stresses | | | | T gradient: mineralogical changes | | | Temperature effects on gas pressure | | Thermal degradation | | Temperature effects on chemistry | | | | | Anneals damage | | | 2 | Temperature of buffer | |
| Thermal expansion of buffer | | | 3.3 Thermal expansion | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 3 | Thermal expansion of buffer | |
| Hydrological properties of buffer | | | | 4.4 Hydrological properties | Porosity, perm. capillarity affects inflow | Porosity, permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Diffusive flux proportional to porosity. De | | 4 | Hydrological properties of buffer | |
| Saturation of buffer | | | | | 5.5 Saturation of buffer | Degree of saturation affects inflow | | | | Saturation rate and gradient | Effect of saturation gradient | | | Degree of satn. affects interaction | Degree of satn. affects gas distrib. | | | | | | Coating of bentonite particles | | Transition from gas-to-water radiolysis | | Transition from gas-to-water transport | | 5 | Saturation of buffer | |
| Hydraulic flow in buffer | | | | | | 6.6 Hydraulic flow | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 6 | Hydraulic flow in buffer | |
| Mechanical properties of buffer | | | Mechanical resistance to expansion | | | | 7.7 Mechanical properties | | | | Uneven mechanical loading | | | | | Mechanical resistance to gas pressure | | | | | | | | | | | 7 | Mechanical properties of buffer | |
| Mechanical stress of buffer | | | Stress resistance to expansion | | | | Stress-strain relationship | 8.8 Mechanical stress | | | Uneven mechanical stress | | | | | | | | | | | | | | May deform pore structure | | 8 | Mechanical stress of buffer | |
| Swelling of buffer | | | | Change in dist. of porosity, permeability | | | | Swelling stress | 9.9 Swelling of buffer | | Filling of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | 9 | Swelling of buffer | |
| Deformation of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | | Non-uniform mechanical properties | Uneven swelling stress | | 10.10 Deformation of buffer | Presence of fractures, cracks | | | | | | | | | | | | | | | | 10 | Deformation of buffer | |
| Extrusion of buffer | | | | Change in porosity, permeability | | Contact with fractures, cracks; direct | | | | | 11.11 Extrusion of buffer | | | | | | | | | | | | | | | | 11 | Extrusion of buffer | |
| Chemical properties of buffer | Thermal properties of minerals | | | Link between mineralogy and porosity | | | Mineralogic distribution | Mineralogic distribution | Amount of bentonite (swelling) | Change in mineral distribution | | 12.12 Chemical properties | Mineral-water reactions | Mineral-water reactions | | | Organic content of buffer | Colloid-forming minerals | | | | | | Defines buffer mineral properties | Defines sorption properties | | 12 | Chemical properties of buffer | |
| Porewater chemistry | | | | | | | | | Salinity effects | | | 13.13 Porewater chemistry | Mineral-water reactions | | | | | | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Sets concentration of reactive species | | Salinity effects | Salinity effects | 13 | Porewater chemistry | | |
| Interaction of buffer with groundwater | | | | | | | | | | | | Mineral dissolution/precipitation | 14.14 Interaction with g/water | | | | | | Mineral-water reactions | Solubility limits | | Reactive species added | | | | 14 | Interaction of buffer with groundwater | | |
| Gas generation and effects | | | | | Direct effect on water saturation | | | | | | | Gas dissolution/exsolution | | 15.15 Gas generation and effects | | | | | | | | | Reactive species added | Formation of gas channels | Formation of gas channels | Change to unsaturated conditions | 15 | Gas generation and effects | |
| Microbial activity | | | | | | | | | | | | | | | | 16.16 Microbial activity | Microbes => organic material | Presence of microbes as colloids | | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 16 | Microbial activity | |
| Organics | | | | | | | | | | | | | | Degradation of organics | Provision of nutrients (organics) | 17.17 Organics | | | | | | | Reactive species added | | | Enhanced mobility of some nuclides | 17 | Organics | |
| Colloid formation | | | | | | | | | | | | | | | | | | 18.18 Colloid formation | | | | | | | | Enhanced mobility of some nuclides | 18 | Colloid formation | |
| Chemical alteration of buffer | | | | Mineral changes affect porosity | | | | | Only if big change in bentonite | Only for big change in mineral distr | | Change in mineralogy | Mineral-water reactions | | | | | | Mineral dissolution | 19.19 Chemical alteration | | | | Change in mineralogy and porosity | | 19 | Chemical alteration of buffer | | |
| Salt accumulation | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 20.20 Salt accumulation | | | | | | | 20 | Salt accumulation | |
| Radioactive decay & ingrowth | | | | | | | | | | | | Affects nuclide concentrations | | | | | | | | | 21.21 Radioactive decay | Radioalytic species yield dependence | Alpha radiation field | | | | 21 | Radioactive decay & ingrowth | |
| Radiolysis of porewater | | | | | | | | | | | | Affects pH and Eh | | | | | | | | | | 22.22 Radiolysis of porewater | | | | | 22 | Radiolysis of porewater | |
| Radiation damage to buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 23.23 Radiation damage | | | | 23 | Radiation damage to buffer | |
| Mass transport properties | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 24.24 Mass transport properties | Migration rate proportional to D, and ϵ | 24 | Mass transport properties | |
| Geometry & pore structure | | | | Sets hydrological properties | Controls re-saturation | Pore geometry sets low permeability | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Porosity and D, (tortuosity, constrictivity) | 25.25 Geometry & pore structure | Migration rate proportional to D, and ϵ | 25 | Geometry & pore structure |
| Radionuclide migration in buffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 26.26 Radionuclide migration | 26 | Radionuclide migration in buffer | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | | | |
| | Thermal properties of buffer | Temperature of buffer | Thermal expansion of buffer | Hydrological properties of buffer | Saturation of buffer | Hydraulic flow in buffer | Mechanical properties of buffer | Mechanical stress of buffer | Swelling of buffer | Deformation of buffer | Extrusion of buffer | Chemical properties of buffer | Porewater chemistry | Interaction of buffer with groundwater | Gas generation and effects | Microbial activity | Organics | Colloid formation | Chemical alteration of buffer | Salt accumulation | Radioactive decay & ingrowth | Radiolysis of porewater | Radiation damage to buffer | Mass transport properties | Geometry & pore structure | Radionuclide migration in buffer | | | |

図 8 ImpL 8 のときの火成岩貫入シナリオの相互作用マトリクス

3.3 相関関係マトリクスを用いた検討

3.3.1 相関関係マトリクスを用いたシナリオ解析手法

(1) はじめに

ここでは、相互関連性マトリクスとは異なる体系を有するマトリクス（相関関係マトリクス）を用いた場合のシナリオ解析手法について記述する。

3.2.2 項では、相互関連性マトリクスについて、シナリオ構築手法の構築を念頭において、検討が加えられている。相互関連性マトリクスは、FEP 間の相関を容易に表示し、またエクセルを用いたシステムでは、相関関係について詳細な記述を表示することができ、これらはシナリオ構築にあたり非常に有効であると考えられる。

一方、相関関係マトリクスは、図 9 に示すように、異なる行列構造を有している。この行列では、Features FEP が行列の対角要素に配置され、Process, EventFEP が非対角要素に配置されるという構造になっている。従って、行列中の全ての要素に、各 FEP が配置されることになる。

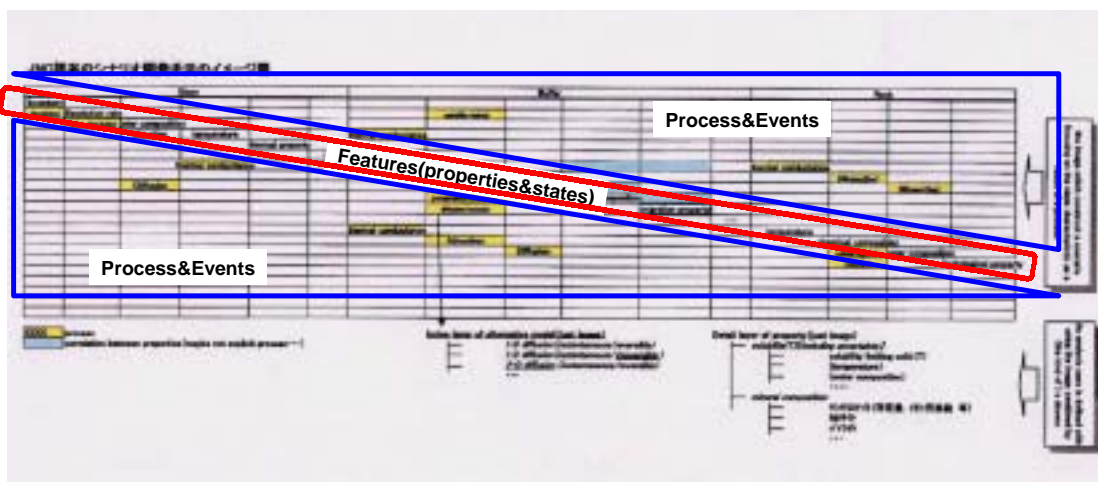


図 9 相関関係マトリクスの概念図

相関関係マトリクスについては、前年度その適用可能性について、簡単な例題を基にして検討された。

他方、図 10 に示すように相互関連性マトリクスは、相関関係マトリクスとは異なる構造を有している。全ての FEP は対角要素に設定され、そして FEP 間の相関が非対角要素に設定される。相互関連性マトリクスでは、非対角要素のスペースに FEP 間の相関関係に関する説明を付けることができる。ただし、非対角要素は、FEP リストには含まれていない。各相関関係に関するパラメータ、プロセスそしてモデルは PPM データベースとして整理されている。

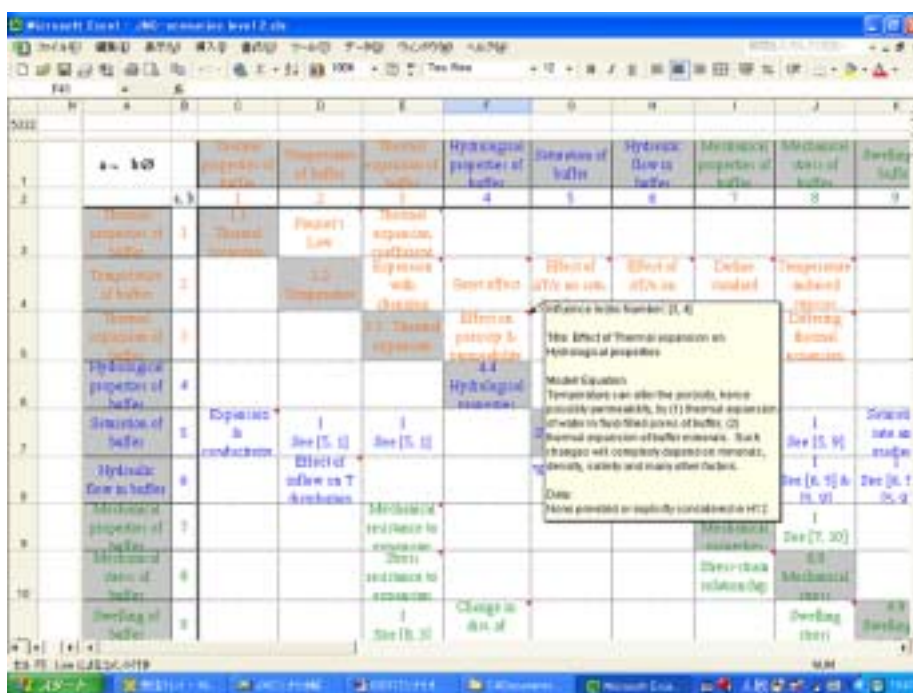


図 10 相互関連性マトリクス

一方、相関関係マトリクスでは、対角要素にある Features FEP は、非対角要素にある Process, Event FEP は、Features FEP を通じて関連している。おそらく二つの異なる行列を用いても、類似した FEP 相関関係を導き出すことが可能だと考えられる。

(2) 各マトリクスを用いた FEP の整理上の問題点

新たに FEP を加える可能性

行列の構造に関係なく、常に新たに FEP を追加する必要がある可能性はある。特に、変動シナリオを考えた場合には、新規に FEP を行列に追加する必要があると考えられる。3.2.2 項にも記述があるように、変動シナリオ、接近シナリオなどの他のシナリオについて検討した場合には、第 2 次取りまとめの FEP データベース自体をレビューし、行列についても再検討し、必要ならば一部変更することが求められる可能性がある。

非常に大きな行列になる可能性

相互関連性マトリクスの場合、対角要素に全ての FEP を配置することから、行列自体が非常に大きなものになる可能性がある。またもし、新たに FEP を追加する場合には、行列は更に大きくなる。解析ケースを設定する手法として考えた場合には、あまりに大きな行列では取り扱いが困難になる可能性がある。一方、相関関係マトリクスを用いた場合、その構造の特徴からマトリクスは現実的な大きさに成り得る。このことは、適切な大きさの行列を構築するためには、解析に用いる数学モデルを念頭におき、それらの数学モデルに落とし込み易いアプローチ（トップダウン的なアプローチ）を取る必要性を示していると考えられる。

“Process FEP”からの新たな相関

相互関連性マトリクスでは、全ての FEP が対角要素に配置されていることから、いずれの FEP 間の相関を定義することは容易である。一方、相関関係マトリクスでは、Process FEP は非対角要素に配置されていることから、Process FEP 間の相関関係を表現することが困難になっている。例えば、B-4.5 微生物の影響から B-4.4 ガスの発生/影響に直接関連が存在すると判断された場合には、このようなプロセス間の関連を取り込むことが、相互関連性マトリクス程は容易ではない。この点は、相互関連性マトリクスの利点の一つである。

ただし、相互関連性マトリクスを用いた場合でも、ProcessFEP を見直すことで対処できる可能性は当然ながら考えられる。

過度に多くの FEP 相関関係の可能性

特に、相互関連性マトリクスの場合、全ての FEP 間での相関を考慮することから、非常に多くの相関関係が生じる可能性がある。過度に多くの相関関係を避けるために、各 FEP の定義、意味付けをより明確にする必要がある。

(3) シナリオ構築手法に適した FEP データベースの構築

本研究を通じてシナリオ構築手法が構築された後、その手法に適した FEP データベースを整理するために、再度データベースのレビューが必要だと考えられる。FEP データベースの内容は、これまでに議論されている相互関連性マトリクスや相関関係マトリクス等、FEP の関連を整理手法にも依存するものと考え、ここで議論されている 2 つのマトリクスに対しても、最適なデータベースは異なることが考えられる。

3.3.2 相関関係マトリクスを用いたシナリオ計算ケース設定に至るプロセスの検討

ここでは、3.3.1 項の図 9 に示した相関関係マトリクスを用いて、概念・数学モデルを導出する過程について検討を加える。

(1) はじめに

3.3.1 項で示した相関関係マトリクスに基づきシナリオ計算ケースの設定を行う場合のプロセスについて以下で検討する。これは、3.2.3 項で議論した相互関連性マトリクスに基づく議論に相当するものであり、またシナリオ計算ケースの設定に至る基本的なプロセスは 3.2.3 項の記述内容に準じるものである(図 4 参照)。但し、用いるマトリクスが相関関係マトリクスになり、PPM データベースに相当するデータベースは FEP データベースを用いることが念頭に置かれている。用いるマトリクスが異なることから、計算ケースの設定に至る細部で取り扱いが異なる点があり、それらについてもここで記述する。

(2) 基本シナリオの相関関係マトリクスの作成及び重要度の設定によるスクリーニング

まず、FEP リストを、相関関係マトリクスを用いて整理した。なお、第 2 次とりまとめ FEP リストにない項目で、新たに追加した方がより適当と判断される項目も幾つか追加した。また、一部、今回の検討からは削除した項目もある。追加または削除について以下に整理する。

- 「緩衝材中での核種の放射線学的特性」を追加
- 「システムの擾乱となり得る現象」を削除
- 「核種濃度」を追加
- 特性の温度依存性および幾何形状/間隙構造による特性変化に関する項目を追加

次に、第 2 次取りまとめ基本シナリオを念頭において、相関関係マトリクスの各項目に重要度を設定した一つの例を示す(図 11 参照)。今回の場合には、重要度を設定する対象が非対角要素に配置されている各 FEP 項目自体であることから、Events & Process に相当する各 FEP 項目自体に重要度を設定することになる。本検討では、対角要素である Features (特性等)には重要度を設定しなかった。

FEP 相関関係から解析ケースを設定する場合、重要度の限界値を用いて解析ケースに取り込む FEP 相関(すなわちモデルおよびパラメータ)を選択することが可能となる。なお、特性(Features に相当)は基本的には全て解析ケースに取り込むべきと考えられるが、重要度を用いたスクリーニングの結果、関係する現象やプロセスが全てスクリーニングアウトされた Feature FEP に関しては、解析ケースには取り込まない。

重要度限界値を 8 以上とすれば、重要と判断された相関関係のみが解析ケースに取り込まれることになる(図 12 参照)。但し、重要度限界値を 8 に設定しても、全ての Feature FEP は解析ケースに取り込まれることが分かる。

| | B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-3.1 緩衝材の力学特性 | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | 緩衝材中での核種の放射線学的特性 | B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | B-6.2 幾何形状/間隙構造 | 核種濃度 |
|---------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------|---|------------------|---|--|-------------------------|
| B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.1 緩衝材の熱物性 | 特性による温度の変化 | | | | | | | | |
| B-1.2 緩衝材の温度 | 特性の温度変化 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.2 緩衝材の飽和 | 特性の温度変化 | 緩衝材の化学的変質 B-4.9 塩の蓄積 特性の温度変化 | 特性の温度変化 | | 特性の温度変化 | B-1.3 緩衝材の熱膨張 | |
| B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | |
| B-3.1 緩衝材の力学特性 | | | | 緩衝材の力学特性 | | | | | 緩衝材の応力 B-3.3 緩衝材の体積変化 B-3.4 緩衝材の変形 緩衝材の流出 | |
| B-4.1 緩衝材の化学特性 | | | 緩衝材の化学的変質 | | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 B-4.8 緩衝材の化学的変質 | | B-4.4 ガスの発生/影響 B-4.5 微生物の影響 B-4.6 有機物の影響 B-4.7 コロイドの形成 | B-4.8 緩衝材の化学的変質 | |
| B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | | | | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 緩衝材の化学的変質 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | 地下水化学による特性変化 | | |
| 種の放射線学的特性 | | | | | | 緩衝材中の間隙水の放射線分解 | 緩衝材中での核種の放射線学的特性 | B-5.3 緩衝材の放射線損傷 | | B-5.1 緩衝材中での核種の放射性崩壊 |
| B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | | | | | | | | 緩衝材の物質移動特性 | | B-6.3 緩衝材中での核種の移行 |
| B-6.2 幾何形状/間隙構造 | 幾何形状/間隙構造による特性変化 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | B-3.2 緩衝材の応力 | 幾何形状/間隙構造による特性変化 | | | 特性変化 | B-6.2 幾何形状/間隙構造 | |
| 核種濃度 | | | | | | | 緩衝材中での核種の放射性崩壊 | | | |

ImpL=10
 ImpL=8
 ImpL=6
 ImpL=4
 ImpL=2

図 11 重要度を付加した緩衝材に関する相関関係マトリクス（基本シナリオ）

| | B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.1 緩衝材の水理特 性 | B-3.1 緩衝材の力学特 性 | B-4.1 緩衝材の化学特 性 | B-4.2 緩衝材中の地下 水化学 | 緩衝材中での核 種の放射線学的 特性 | B-6.1 緩衝材の物質移 動特性 | B-6.2 幾何形状/間隙構 造 | 核種濃度 |
|-------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|
| B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.1 緩衝材の熱物性 | | | | | | | | | |
| B-1.2 緩衝材の温度 | | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.2 緩衝材の飽和 | | | | | | | |
| 緩衝材の水理特 性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.1 緩衝材の水理特 性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | | B-2.3 緩衝材中での地 下水流動 | | B-2.3 緩衝材中での地 下水流動 | | |
| 緩衝材の力学特 性 | | | | 緩衝材の力学特 性 | | | | | | |
| 緩衝材の化学特 性 | | | | | 緩衝材の化学特 性 | B-4.3 緩衝材と地下水 の反応 | | | | |
| 緩衝材中の地下 水化学 | | | | | 緩衝材と地下水 の反応 | B-4.2 緩衝材中の地下 水化学 | | 地下水化学によ る特性変化 | | |
| 種の放射線学的 特性 | | | | | | | 種の放射線学的 特性 | | | 緩衝材中での核 種の放射性崩壊 |
| B-6.1 緩衝材の物質移 動特性 | | | | | | | | 緩衝材の物質移 動特性 | | B-6.3 緩衝材中での核 種の移行 |
| B-6.2 幾何形状/間隙構 造 | | | 緩衝材中での地 下水流動 | | | | | | 幾何形状/間隙構 造 | |
| 核種濃度 | | | | | | | 緩衝材中での核 種の放射性崩壊 | | | |

図 12 重要度を用いてスクリーニングした相関関係マトリクス(重要度 8 以上)(基本シナリオ)

(3) 変動シナリオの(マグマ貫入ケースの場合)相関関係マトリクスの作成及び重要度の設定によるスクリーニング

ここで考えるマグマ貫入ケースでは、処分場から水平方向に 20km はなれた深層（深度 5km）マグマ溜りの貫入が想定する。このようなマグマの貫入が生じることによって、次のような事象が生じることが考えられる。

- ・ 強制対流に起因する地下水流速の増加
- ・ 熱対流伝導による処分場温度の上昇
- ・ マグマの流入による地下水組成の変化、または高温での母岩-地下水の平衡の変化
- ・ 水平方向の応力成分の相対する垂直方向の応力成分の上昇

上記した内容を踏まえて、基本シナリオの場合と同様に、相関関係マトリクスを作成した上で重要度を再検討し（図 13 参照）、図 14 に IL 8 の場合の緩衝材に関する相関関係マトリクスを示した。

図 12 と図 14 を比較しても分かるように、変動シナリオの場合の相関関係マトリクスの方が、基本シナリオの場合よりもより多くのプロセスを含んでいることが分かる。これは、変動シナリオでは比較的低い重要度が設定されていたプロセスが、マグマの貫入によって重要度が高くなったことに起因する。従って、実際に解析を行う場合にも基本シナリオよりは多くのプロセスを含んだ解析を行う必要がある。

| | B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-3.1 緩衝材の力学特性 | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | 緩衝材中での核種の放射線学的特性 | B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | B-6.2 幾何形状/間隙構造 | 核種濃度 |
|---------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------|---|------------------|---|--|-------------------------|
| B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.1 緩衝材の熱物性 | 特性による温度の変化 | | | | | | | | |
| B-1.2 緩衝材の温度 | 特性の温度変化 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.2 緩衝材の飽和 | 特性の温度変化 | 緩衝材の化学的変質 B-4.9 塩の蓄積 特性の温度変化 | 特性の温度変化 | | 特性の温度変化 | B-1.3 緩衝材の熱膨張 | |
| B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | |
| B-3.1 緩衝材の力学特性 | | | | 緩衝材の力学特性 | | | | | 緩衝材の応力 B-3.3 緩衝材の体積変化 B-3.4 緩衝材の変形 緩衝材の流出 | |
| B-4.1 緩衝材の化学特性 | | | 緩衝材の化学的変質 | | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 B-4.8 緩衝材の化学的変質 | | B-4.4 ガスの発生/影響 B-4.5 微生物の影響 B-4.6 有機物の影響 B-4.7 コロイドの形成 | B-4.8 緩衝材の化学的変質 | |
| B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | | | | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 緩衝材の化学的変質 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | 地下水化学による特性変化 | | |
| 種の放射線学的特性 | | | | | | 緩衝材中の間隙水の放射線分解 | 緩衝材中での核種の放射線学的特性 | B-5.3 緩衝材の放射線損傷 | | B-5.1 緩衝材中での核種の放射性崩壊 |
| B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | | | | | | | | 緩衝材の物質移動特性 | | B-6.3 緩衝材中での核種の移行 |
| B-6.2 幾何形状/間隙構造 | 幾何形状/間隙構造による特性変化 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | B-3.2 緩衝材の応力 | 幾何形状/間隙構造による特性変化 | | | 特性変化 | B-6.2 幾何形状/間隙構造 | |
| 核種濃度 | | | | | | | 緩衝材中での核種の放射性崩壊 | | | |

ImpL=10
 ImpL=8
 ImpL=6
 ImpL=4
 ImpL=2

図 13 重要度を付加した緩衝材に関する相関関係マトリクス (変動シナリオ)

| | B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-3.1 緩衝材の力学特性 | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | 緩衝材中での核種の放射線学的特性 | B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | B-6.2 幾何形状/間隙構造 | 核種濃度 |
|---------------------|------------------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| B-1.1 緩衝材の熱物性 | B-1.1 緩衝材の熱物性 | 特性による温度の変化 | | | | | | | | |
| B-1.2 緩衝材の温度 | 特性の温度変化 | B-1.2 緩衝材の温度 | B-2.2 緩衝材の飽和 | 特性の温度変化 | 緩衝材の化学的変質 特性の温度変化 | 特性の温度変化 | | 特性の温度変化 | B-1.3 緩衝材の熱膨張 | |
| B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.2 緩衝材の飽和 | B-2.1 緩衝材の水理特性 | B-2.2 緩衝材の飽和 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | |
| 緩衝材の力学特性 | | | | 緩衝材の力学特性 | | | | | | |
| 緩衝材の化学特性 | | | 緩衝材の化学的変質 | | B-4.1 緩衝材の化学特性 | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 | | | 緩衝材の化学的変質 | |
| B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | | | | B-4.3 緩衝材と地下水の反応 緩衝材の化学的変質 | B-4.2 緩衝材中の地下水化学 | | 地下水化学による特性変化 | | |
| 種の放射線学的特性 | | | | | | | 種の放射線学的特性 | | | 緩衝材中での核種の放射性崩壊 |
| B-6.1 緩衝材の物質移動特性 | | | | | | | | 緩衝材の物質移動特性 | | B-6.3 緩衝材中での核種の移行 |
| B-6.2 幾何形状/間隙構造 | | | B-2.3 緩衝材中での地下水流動 | | | | | | 幾何形状/間隙構造 | |
| 核種濃度 | | | | | | | 緩衝材中での核種の放射性崩壊 | | | |

図 14 重要度を用いてスクリーニングした相関関係マトリクス(重要度 8 以上) (変動シナリオ)

(4) 相関関係マトリクスからの概念・数学モデルの導出フロー

ここでは、これまでに整理した相関関係マトリクスからどのようにして概念・数学モデルを導出するかについて、図 2 で示したシナリオ解析フレームワークに基づいて検討を行う。この概念・数学モデルの導出は、前述したフレームワークに基本的には沿うものであるが、用いるマトリクスが相関関係マトリクスであることから、若干の相違がある。

FEP 相関から概念・数学モデルを構築する過程は、大きく 3 つのステージに分けられるものと考えられる。すなわち、FEP 同士の相関を整理した後 (Stage1)、各現象とモデル (経験則を含む) の対応を別途整理し (Stage2)、最後により大きな現象モデルへ展開することによって (Stage3)、概念・数学モデルの導出を行うことができると考えられる (図 15 参照)。ここで、Stage1 が図 2 中にあるフレームワークの組み込みコンポーネントの作成後に、相互作用マトリクスを導出する過程に相当する。すなわち、相関関係マトリクスを構築後、重要度を用いてスクリーニングされた相関関係マトリクスを Stage1 の段階で導出する。次に Stage2 は前出の PPM データベースからの対応するモデル等の抽出に相当するが、ここでは新たに別途データベースを構築するのではなく、FEP データベースを活用することを提案する。また、ユーザの設定に伴い、最終的にマトリクスを概念化するのが Stage3 に相当する。

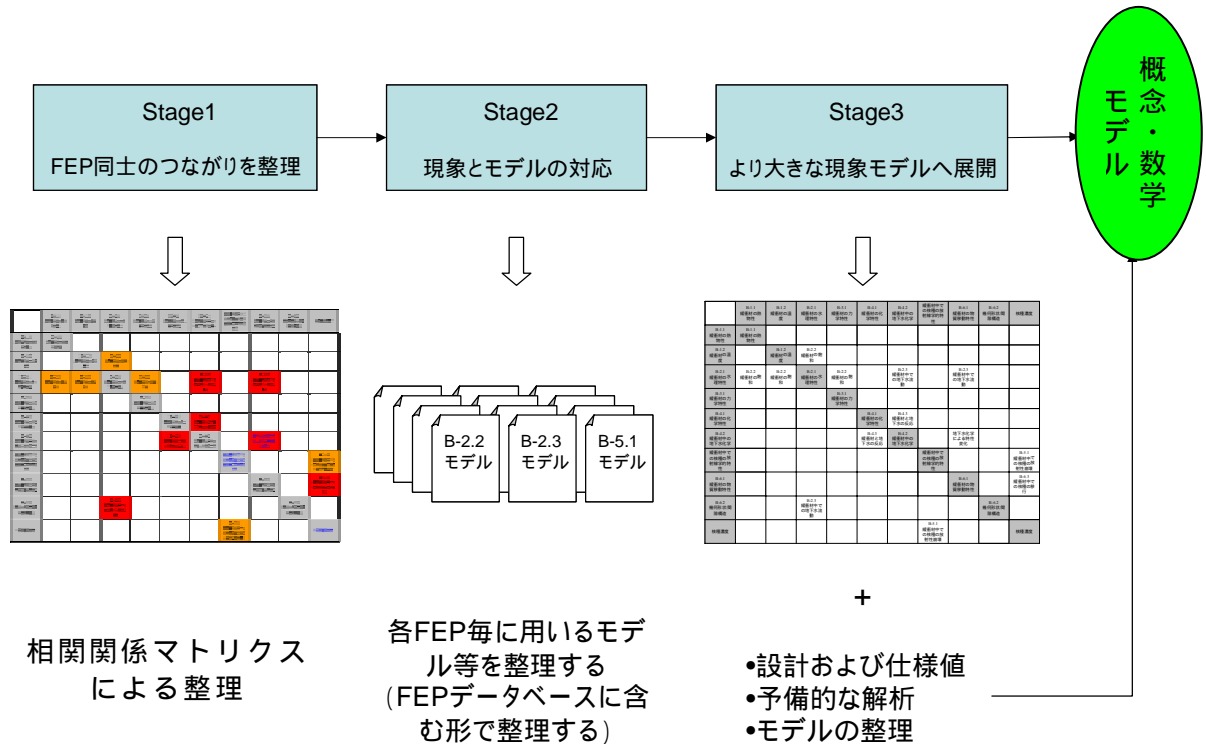


図 15 FEP 相関から概念・数学モデル構築までのフロー

ここで、Stage3 に相当する FEP の相関関係から、より大きな現象モデルへの展開(Stage1 Stage3)は概念的には次のような手順となることが考えられる。

- I. 重要度を用いたスクリーニングを通じて、FEP 相関のうちそれぞれのシナリオ構築する上で重要と判断される相関を特定し、導出する。
- II. 導出された其々の FEP 相関を記述するプロセスがどの程度の影響を有しているのかを整理する。
- III. プロセスがどのように影響しているのか、プロセス同士がどのように関連を持っているのかについても整理し、必要ならばプロセスのグルーピングや再配置を行う。
- IV. また、影響の程度は時間によって変化することも考えられることから、時間毎の影響の程度を必要ならば整理し、. . .と同様の整理を行う。
- V. 上記で整理した結果に基づき、連成して解析が必要なプロセスモデルや単独で取り扱うことが可能なプロセスモデルを、時間変化も含めて整理を行い、整理した結果をシナリオとしてまとめて、概念・数学モデルを構築する。

異なるシナリオ（変動シナリオ）を導出する場合には、そのシナリオに応じた重要度が設定された相関関係マトリクスを用いて上記した同様の作業を行うことになる。また、時間経過による影響度の変化については 3.2 節では明確には議論していないが、ここでは概念化のための整理の手法の一つとして検討を加える。

なお、上記手順のうち、. . . については既に重要度というパラメータの導入によって取り扱いが可能となっている。それ以外の手順を実施するために、各プロセスを数学モデルで記述した場合に、数学モデルから導出される各 Feature に対応する特性値の変化量の程度を表すパラメータ（影響度）を導入することを検討する。この影響度は、前述した影響レベル(InfL)に相当するものであるが、ここでは FEP の相関関係を整理する手法（マトリクス）が根本的に異なる点等、両者のシナリオ解析手法に基本的な相違が認められることから、「影響度」という名称を用いることにする。

なお、影響度は Events & Process FEP に対応する各現象やプロセスが特性 (Feature) に与える影響を表すものであることから、非対角要素に配置されている Events&ProcessFEP に対して設定されるパラメータである。

(5) 影響度の取り扱いについて

各プロセスが影響を与える Features に対してどの程度の影響（そのプロセスによって、特性 (Features) が定量的にどの程度変化をするか）を与えるかについては、幾つかの手法を用いて決定することができるものと考えられる。ただし、ここで注意すべきことは、重要度とは異なり、影響度の場合には、例えプロセスが同じでも、相関関係にある Features が異なれば、影響度は異なることが考えられるということである。従って、相関関係マトリクス中に同じプロセスが複数存在している場合には、それぞれ個別の影響度を検討する必要があると考えられる。これは、例え同じプロセスでも、対象とする特性が異なることによってそのプロセスが与える影響が異なることを反映したものである。例えば、図 12 中には、「B-2.2 緩衝材の飽和」はマトリクス中 4 箇所が存在しており、同じ重要度が設定されたが、影響度については、4 つそれぞれの「B-2.2 緩衝材の飽和」について個々に検討する必要がある。

エキスパートジャッジメントによる影響度の設定

今回の検討では、重要度は、既存の情報に基づき、プロセスのメカニズム等に基づいたエキスパートジャッジメントによって決定されることを念頭においた。影響度についても同様に、影響のメカニズムおよび程度について整理し、その結果に基づいて各プロセスを一つ一つ確認しながら、エキスパートジャッジメントによって設定していく方法が考えられる。

この場合、非常に重要なことは、ジャッジメントの根拠をエビデンス（証拠）として整理し、保存しておくことである。エキスパートジャッジメントの根拠は、この相関関係マトリクスとリンクさせ容易に検索できるようにする等して、簡便に判断根拠が検索、閲覧できるようにしておくことが重要である。

予備的な解析を実施し、その結果に基づいた影響度の設定

影響度は、エキスパートジャッジメントによって設定されたものであり、主観的な要因が大きい。より客観的に影響度を設定する手法として、各プロセスをそれぞれ別々に解析し、各々のプロセスがどの程度特性に影響を与えるかを整理し、その結果に基づいて影響度を設定することも考えられる。Stage2において、別途、現象とモデルが整理されていることから、各プロセスを個別に取り扱い、予察的解析を実施することは比較的容易だと考えられる。

ただし、このような手法を用いても解析結果から影響度を設定する場合になんらかのエキスパートジャッジメントが必要となり、主観的な判断が依然として介在する。また、予備的な解析の結果は、特に基本シナリオの場合、エキスパートジャッジメントの判断根拠となった証拠と同じである場合が多いとも考えられる。従って、客観的に影響度を設定する手法としては今後も検討を続けていく必要があると考えられる。

影響度の時間的変化の取り扱いについて

例えば、緩衝材の飽和というプロセスは、飽和過程では様々な特性に影響を与えることが考えられるが、飽和後は、飽和自体というプロセスが収束しており、特性に変化を与えることは考えられない。従って、緩衝材の飽和に関する影響度は、飽和前と飽和後で異なることが考えられる。このように影響度が時間変化を

示す場合には、時間毎の影響度を整理しておく必要があると考えられる。時間毎に影響度を整理する場合、基本的には全ての影響度が時間変化する可能性もある。全ての時間変化を詳細に検討するのが困難な場合には、解析の対象となっているケースを念頭に置いて、考慮する時間区分を予め設定しておき、その区分を用いて設定するといった対応が必要になる可能性も考えられる。

(6) 概念・数学モデルの記述

重要度に基づくスクリーニングを実施した後、新たに影響度を各非対角要素に設定し、解析に用いる数学モデルによって各 Feature に相当する特性がどの程度変動するかを表す指標である影響度を用いて再度スクリーニングを実施する。影響度を用いた整理を通じて、既に述べたように影響度は、考察の対象となる時期によって異なる値を持つことが考えられ、初期の段階では緩衝材中の核種移行に対する環境（地下水、化学等に関する環境）の条件が整備され、その後、実際に核種が移行する際には、その環境条件はほとんど変化することなく、核種移行解析に必要な各パラメータが既に設定されていると考えることができる。

また、今回の検討では基本シナリオを想定しているが、緩衝材中の環境を設定するステージと、設定された環境条件（パラメータ値）から核種移行解析に必要なものを抽出するステージと区分することも可能だと考えられる。従って、前者はボトムアップ的アプローチに基づいた環境条件の設定であり、ここで設定された環境条件に基づいた核種移行解析を実施することも可能となる。

時間毎に影響度を設定する場合、影響度自体と、区切りとなる時間をどこにするかを決定する必要がある。これらの判断根拠等も別途整理しておく必要がある。

注意すべきことは、ここで議論しているのは影響度であり、影響度が小さいというのは、プロセスによって環境が変化する変動幅が小さいということの意味しているということである。解析の際に考慮される環境は様々なプロセスによって支配されることになる。それぞれのプロセスによって、環境を表すパラメータ（温度等）が変化しなくても、そのパラメータ値を設定するためには各プロセスが重要となる場合もある。従って、このような場合には、影響度は低くとも、高い重要度が設定され、解析ケースを構築するためには考慮の対象となる。

ボトムアップ的なアプローチに基づく整理は、各現象とモデルの対応を整理し

ておくだけでなく、プロセス同士がどのように関連しているのかも含めて整理し、整理の結果、必要ならばプロセスのグルーピングや再配置を行う。一方、トップダウン的なアプローチに基づく整理では、既存の評価体系や用いるコードを念頭において、核種移行解析で取り扱っている現象、逆に言えば、影響を考慮していない現象を整理する。この2つの整理の結果を比較、検討し、ボトムアップ、トップダウンいずれの見地も含み、かつ数学モデルに基づく解析ケースへの展開をより容易にするような概念・数学モデルの構築を図る。

各プロセスの影響およびプロセス同士の関連の整理のイメージを、緩衝材の飽和を例として図 16 に示す。ここで、相関関係マトリクスの各場所に配置されている緩衝材の飽和という現象に対応するプロセスモデルおよび関連するパラメータは、既にデータベース（PPM または FEP データベース）として整理されている。それぞれのプロセスモデルおよびパラメータには他のモデルやパラメータとの間に相関関係が存在しているが、その相関関係の影響度は異なっている。そこで、影響度の大きいもの同士等は、一つのより大きなモデルとして取り扱ったり、また、逆に影響度が十分に小さい場合には、そのプロセスを考慮しないことも考えられる。このように取り扱うことによって、概念・数学モデルの設定をより効果的に行うことができる可能性がある。

このように、影響度に基づいて、その値の違いを考慮しつつ、プロセスモデルを統合して、グルーピングを行う。

以上のようにして、プロセス毎にグルーピングを行い、ボトムアップ的なアプローチに基づいた環境条件の設定を行うというアプローチを取ることも考えられる。

このようなグルーピングの結果と核種移行解析で取り扱っている現象とを比較検討し、核種移行解析に必要な情報をボトムアップ的なアプローチから抽出することによって、概念・数学モデルをトップダウンおよびボトムアップ両者のアプローチを融合して設定を行うことが可能だと考えられる。

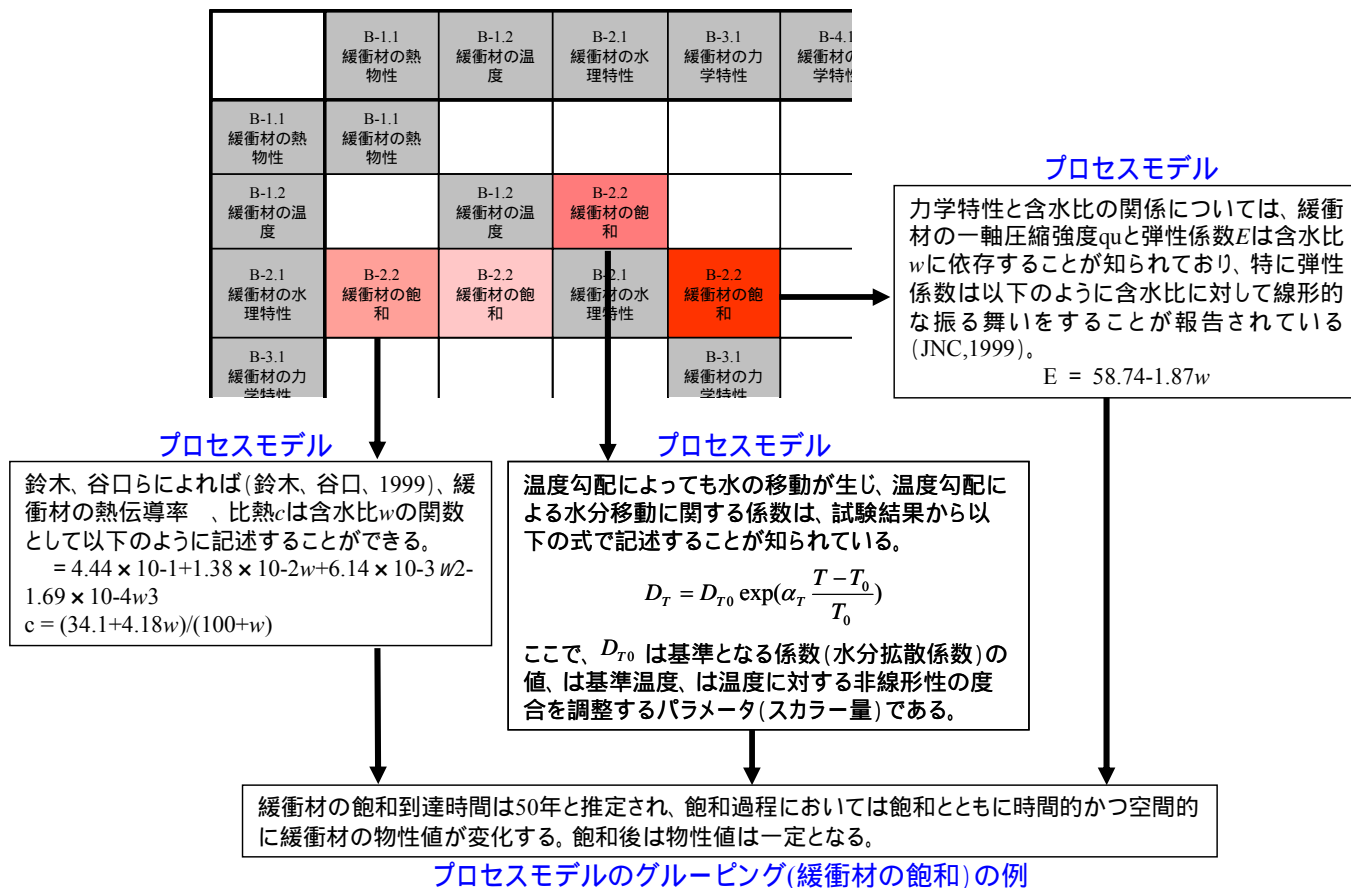


図 16 各プロセスの影響およびプロセス同士の関連の整理のイメージ図

3.4 シナリオ解析手法に関するまとめと課題の整理

3.4.1 相互関連性マトリクスと相関関係マトリクスの比較

相互関連性マトリクスの場合、全 FEP をマトリクスの対角線上に配置し、それぞれの関連を整理するという手法を取っている。一方、相関関係マトリクスの場合には、Features に相当する特性や状態の項目のみをマトリクスの対角線上に配置し、Events および Process に相当する項目を用いて関連を整理するという手法を用いている。

このように二つの手法で FEP 項目の取り扱いが異なるが、相関関係マトリクスを用いた手法のように、FEP 項目の構造に着目し、より簡便に FEP 間の関連を整理する手法を採用した場合、この段階におけるシナリオ解析の複雑さが軽減される。しかしながら、注意しなくてはならないこととしては、手法の複雑さを後の

段階に持ち越すことになる可能性も秘めているということである。今回、検討した手法では、後の段階で取り扱いの煩雑さが増してしまうようなことは無いと判断されるが、シナリオ解析の技術的信頼性、追跡可能性、完全性への要求に対しての配慮を常に示すべきであり、そのような「近道」のアプローチは、最大限の注意を払う必要がある。

今回の検討でも分かるように、FEP リストの全項目を対角要素に配置した相互関連性マトリクスでは、マトリクス自体が非常に大きくなり、個々の関連を整理するのが非常に煩雑となる。また、各関連自体は、FEP リストとは別途整理することから、新たなデータベース（PPM データベースに相当）を構築して整理する必要もあり、この段階での手続きが非常に複雑かつ煩雑であることは否めない。

上記した点に注意を払う必要はあるが、逆にこれらの要求を満足し、かつ複雑さや煩雑さを低減できる他の手法を開発する必要性は高いものと考えられる。本検討では、その手法として相関関係マトリクスを用いた手法を提示した。

相互関連性マトリクスを用いる場合には、相互関連性マトリクスと基本的には同じ構造を有している FEP 項目に対して別途整理された RES matrix（本編付録 B 参照）との違いについても検討が必要である。相関関係マトリクスと Res matrix、および PPM データベースと FEP データベースの使い分けについても再度検討を要すると考えられる。一方、相関関係マトリクスを用いた場合には、この手法に適した FEP データベースを整理するために、再度データベースのレビューが必要である。また、どちらの手法を採用した場合でも、各 FEP の定義をより明確化することも必要だと考えられる。

3.4.2 マトリクス中の FEP 相関について

FEP 間の関連を整理するためにマトリクスを構築する場合、ケースによらず網羅的に相関関係を抽出することが重要だと考える。しかしながら、網羅的に相関関係を抽出すると、相互関連性マトリクス、相関関係マトリクスによらず、複数のパスが存在し得る。このような場合、複数のパスをどのように取り扱うのかについては、今後検討が必要である。

3.4.3 重要度、影響度の設定について

相互関連性マトリクス、相関関係マトリクスの整理の段階で、FEP 間の相関がシナリオ構築に対してどれほど重要かまた影響を与えるのかを示すパラメータの設定を行う。本報告書中では相互関連性マトリクスの場合には、重要レベル、影響レベルとし、相関関係マトリクスの場合には、重要度、影響度と記述している。

各影響ごとにその影響のモデルやデータに利用できる情報を記録し、情報提供源として参照するべきであり、この作業によって、後に計算に用いられる情報が追跡可能になるようにすることが非常に重要である。

これらのパラメータを設定する場合には、処分場システムの全体的な安全評価システムにどの程度重要（重要度）かまたどの程度の影響（影響度）を与えるかを考慮することが肝要である。但し、「モデルの有効性」あるいは「データの不確実性」などの検討事項は、パラメータ値の割り当ての段階では考慮されないということである。これらを取り扱うためには、現在の知見レベルを適切に取り込めるように手法を今後高度化していく必要がある。

各パラメータを設定する場合、特に影響度は処分後の時間の経過に伴って変化することは容易に考えられる。そこで、相関関係マトリクスを用いた手法では、影響度を時間毎に別途設定し、時間の経過に伴って異なる解析ケースを設定することが可能になるようなシステムの構築を図っている。しかしながら、どのような時間区分にするか等については今後より詳細な検討を行う必要があると考えられる。

3.4.4 概念・数学モデル構築のアプローチについて

相互関連性マトリクスを用いた手法では、全 FEP 項目をマトリクスの対角要素に配置しており、全ての FEP 項目を同等に取り扱うことからシナリオ構築が始まっている。一方、相関関係マトリクスの場合には、そもそも解析で用いるモデルとそのモデルが取り扱うパラメータを、FEP の整理の段階から区別して取り扱うということが発想の起源になっている。このことから、相関関係マトリクスを用いた手法の方が、相互関連性マトリクスを用いた手法よりも、よりモデルや解析ケースへの展開に適したシナリオを構築することが可能な手法だと考えられる。

相関関係マトリクスを用いた手法において、影響度というパラメータを用いる

ことによって、処分場の環境条件等を念頭においたボトムアップ的なアプローチと、その環境条件の下で性能評価に用いられる核種移行解析で用いる数学モデルを念頭においたトップダウン的なアプローチを融合させることによって、概念・数学モデルを構築することを試みた。ここで、時間の経過とともに影響度が変化することが考えられることから、時間毎に影響度を設定した。影響度が小さいということは、プロセスによって環境が変化する変動幅が小さいということをしている。このような設定を行うことによって、各環境条件の設定を行うステージと設定された環境中を核種が移行するステージに大きくは分類して概念・数学モデルの導出を行った。また、各環境条件を設定する場合に関連するそれぞれのプロセスについてグルーピングを行い、そのグルーピングの結果と核種移行解析で取り扱っている現象とを比較検討し、概念・数学モデルの設定を行うことについての可能性について検討した。

トップダウン的なアプローチとボトムアップ的なアプローチ、両者のアプローチをどのように融合させるのかについては、今後も詳細な検討を重ねていく必要があると思われる。

4. 変動シナリオに関する解析技術の検討 隆起・侵食シナリオ

4.1 はじめに

隆起は、広域の地殻を押し上げる地質学的な作用である。隆起がある場所では、河食、雨食、風食、氷食などの侵食作用によって、押し上げられた地表が削り取られる。一般に侵食速度は隆起速度と同程度まで増加するため、ほぼ定常状態の地形が長期かつ広域に維持されることになる（第2次取りまとめ分冊1、2.5節参照）が、隆起場所の地中深くにある岩盤は、上部の岩石層が侵食によって削り取られるにつれて、地表に向かって徐々に隆起する。

本章では、隆起・侵食に関する今後の検討のために、間接的な影響として処分場性能を低下させると考えられるものを特定する。さらに、このような間接的影響をいくつか含む隆起・侵食の一例（変動シナリオ）について、それらをどのようにシナリオ計算ケースに組み込むことができるかを示すため、コンパートメントモデルを用いた説明を行う。

4.2 隆起・侵食による間接的な影響

4.2.1 温度

深度が浅くなるとともに（即ち、処分場が隆起するにつれて）、周囲の母岩の温度は下がる。しかしながら、この温度下降とその関連の影響は、基本シナリオのその後の熱的現象に比べて実際の処分場性能に著しい影響を与えるほど大きくなることはないと予想されるため、保守的に無視し得ると考えられる。

4.2.2 水理学

処分場深度が浅くなるにつれて、母岩層に作用する水頭あるいは動水勾配は変化し得る。特に、深部にある処分場では現われにくい、局地的な地形が動水勾配に与える影響は、より重要になり始めるだろう。

ほぼ垂直な流れの強い領域では、極めて塩度の薄い水（雨水）をより深い深度まで大量に流し込む作用をすることも考えられる。また、ほぼ垂直方向の大きな流れの局所的発生は、将来の氷河期サイクルにおける浅地層での局地的な地盤凍

結の傾向の影響を強く受けると考えられる。

母岩の透水性自体も隆起とともに変化することがある。閉じていた母岩の既存の節理が、隆起の間に生ずる力学的除荷により開かれ得る（次項参照）。さらに新たな亀裂が形成されることもあるだろう。透水性への潜在的な影響は、正確には、母岩の種類、隆起速度、掘削技術の種類、その他多くの要因によって決まる。

海洋近くに所在する処分場において、隆起による水理学的影響として他に考えられるのが塩度の変化である。淡水が陸地から海洋へ流れ込み、高密度の塩水の上に低密度の淡水で出来たくさびを作る。塩水またはかん水の深度に位置する処分場は、処分場内部の地下水の流れ方や地下水化学を変化させながら、このような塩水くさびに向かって上方に移動することがあると考えられる。

4.2.3 力学的負荷

処分場上部における母岩の隆起・侵食は、静岩圧と静水圧を低下させることになる。母岩、緩衝材、オーバーパックの種類等によっては、この負荷の減少が処分場にいくつかの影響を及ぼすことがあると考えられる。例えば、基本シナリオの深度において、静岩力/静水力と均衡する膨潤圧は高く静岩圧と静水圧が低下した時に、緩衝材の母岩への流出を助長することがあり得る。

母岩の力学的除荷そのものは、既存の節理を亀裂させるか、または新たな亀裂さえ形成することがあり得る。母岩の種類と掘削技術の影響を受ける掘削影響領域（EDZ）の特質によっては、透水性の潜在的変化は人工バリアシステム周辺に集中すると考えられる。あるいは、それよりも広範な場合には、ファーフィールド母岩の流れ特性の変化が実質的に最も近くのほぼ垂直の大きな導水層（断層）にまで及ぶことも考えられる。

4.2.4 化学

深度が浅くなることによって、塩度が処分場の地下水に及ぼす潜在的影響については既に述べたが、そのような変化（一般的には塩水が希釈される）の正確な時期と規模は、隆起速度や地表の形状などによってだけでなく、処分場上部が当初陸地であったか海洋であったかによっても変わってくるだろう。局地的に流れが速くなるほぼ垂直な地下水流もまた、隆起した処分場内の化学特性に局地的な

変化をもたらす得る。しかしながら、塩度が処分場性能に与える影響は特に重大なものではない。

主要な化学的影響(実際にあらゆる THMC 要素の中でもより大きな影響であると考えられる) は、処分場が地表に近づくにつれて処分場の地下水が還元状態から酸化状態に潜在的に変化することだろう。多原子価の放射性元素(例 ; Se, Tc, Sn, U, Pu, Np) の溶解度は全て、酸化状態では (多くの場合桁違いに) 高くなると考えられている。

さらに、それらの放射性元素の強い吸着作用もまた、酸化状態が高まるとともに失なわれると考えられる。しかしながら、比較的長寿命 (半減期 > 10 万年) の核種を除けば、人工バリアシステムとおよそ 100m の母岩における吸着は、基本シナリオの放出 (総線量の最大値) に大きな影響を与えるものではない。

次に、隆起した処分場の性能へのより重大な影響として挙げられるのが、人工バリアシステムとファーフィールド母岩に沈澱・吸着していた放射性核種が地下水流に再放出されることである。この放出は、酸化状態が高まることによって、処分場の当該領域における物質の溶解度の増加あるいは吸着係数の低下により生ずる。ある意味では、第 2 次取りまとめの基本シナリオにおける還元状態の下で想定される高い吸着効果は、処分場システムの酸化状態が隆起によって高まるときには、極めて高い放出率につながると言える。

4.2.5 その他の問題

隆起・侵食の間接的な影響に関して、物理化学的要素以外で問題となる要素がさらにあると考えられる。まず、地下水抽出井戸の掘削深度が 50 - 100m まで達することがあり得る。ある隆起速度と母岩の種類の見合わせ条件の下では、飲用水あるいは灌漑用水用の井戸が隆起した処分場に偶発的に貫入する可能性が考えられる。廃棄物注入用の井戸が隆起した処分場に貫入する可能性もある。

次に、処分場が地表へ近づくにつれて微生物群が変化するということがある。そのような変化が処分場性能に影響を及ぼすことがあり得るかどうか、あるとすればどのようなものかということについては、表層からの溶存酸素の流入を効果的に緩衝・防御するための母岩システムの性能 (還元性鉱物成分を含有するとされる) を低下させるということ以外は明確になっていない。

その次に考えられるのは、流水路あるいは山岳氷河から孤立した侵食領域によって、地盤が大部分の地表の深度よりも局地的に下がることもあり得るということである。

4.3 隆起・侵食による変動シナリオのコンパートメントモデルを使った表現

コンパートメントモデルを用いた性能評価の段階的なアプローチは以下のとおりである。

- ・ 処分場の隔離システムを部分ごとに表わす「コンパートメント」を個別に特定する。
- ・ コンパートメントを通る放射性核種の移行形態並びにこの移行を減少あるいは増加させる全てのプロセスを反映させて、各コンパートメントの計算モデルを適切に組み合わせる。
- ・ 各コンパートメントに出入りする質量フラックスを結合する。

解析的なモデルや数値解析技法と比較した場合のこのアプローチの長所はその柔軟性にある。境界条件が変更されたり、新たな「コンパートメント」（例えば、「腐食生成物層」あるいは「酸化したファーフィールド母岩」）が展開しても、これらの変化は修正されたコンパートメントの位相に容易に組み込むことができる。そこで、ここでは、コンパートメントモデルを使った任意の変動シナリオの表現が、どのようにしてその変動シナリオを構成する各段階と結び付けられるかを示す。

図 15a はあらゆる変動シナリオの合理的な始点であり、第 2 次取りまとめ基本シナリオの想定状況である段階 1 を示す。

還元性高 pH 型塩水（第 2 次取りまとめでは SRHP と表示）の沿岸サイトにおける深度 300m が開始地点として想定されている。さらにその上部には、以下の地下水層が确实性の高いものとして想定されている。；SRHP の上を還元性高 pH 型淡水（第 2 次取りまとめでは FRHP と表示）が覆い、さらに地表に近い部分ではその上を酸化性高 pH 型淡水（本報告書では FOHP とする）が覆う。図では地表に目立った特色は示されていないが、地表に近い領域では地形が局所的に異なることによって、ファーフィールド母岩の地下水流速に局地的な摂動が生じ得る。

図 15b は段階 1 のコンパートメントモデルによる具現化を示すものである。こ

の図には各コンパートメントの境界条件とパラメータが示されており、またコンパートメントモデル間の質量移行（拡散、移流、または両方）は矢印で表わされている。

図 16a は、処分場は隆起したものの、同等の侵食速度が本来の地表の形状を維持したときの段階 2 を示す（全段階においてこれと同じ仮定が用いられる）。この時点では、処分場の一部（廃棄体（WP）の X%）が FHRP 地下水層の領域に持ち上げられる。図 16b からは、FRHP 地下水層にある廃棄体からの放射性核種の放出と SRHP 地下水層にある廃棄体からの放射性核種の放出が、個別にコンパートメントモデルを設定することによって別々に計算される。各経路に分けられたコンパートメントには、前述した各コンパートメントの化学状態に適合する境界条件とパラメータが含まれている。

図 17a には段階 3 の概念が示される。ここでは全ての廃棄体が FRHP 地下水層にあることが想定されるため、SRHP 地下水層の放出経路を示すそれまでのコンパートメントの表示を消す（図 17b 参照）。しかしながら、段階 3 では、掘削影響領域の透水性がより広い領域で変化（増加）していると考えられる（図 17a 参照）。この影響は、例えば、処分場システムの力学的除荷による影響と緩衝材の膨潤圧が高圧に維持されることによる影響とが合わさることによって生ずることがあると考えられる。従って、掘削影響領域コンパートメントのパラメータ L は簡便に「L*」と置き換えられ、パラメータ FR は新たな値「FR*」になる（図 17b 参照）。

段階 4 では、地表に接近するまで処分場が隆起し、ファーフィールドの流れ経路に局地的な摂動が想定される（図 18a 参照）。ニアフィールド（廃棄体と緩衝材と掘削影響領域）は全て FRHP 地下水層にとどまるが、一部（廃棄体の Q%、ファーフィールド母岩の当初の体積の Q%にほぼ相当する）について、より大きな流速（FR#）を持つ FOHP 地下水層のファーフィールド母岩での核種移行があると考えられる（図 18b）。また、注意すべきこととして、段階 3 で拡張された掘削影響領域と変更されたパラメータが、段階 4 で引き続き用いられていることがある。

最後の段階である段階 5（図 19a）では、FOHP 地下水層まで完全に隆起した処分場が想定される。段階 3 の掘削影響領域への影響は、段階 5 においても同様であ

る。コンパートメントモデルによる段階 5 の具現化（図 19b）はわかりやすく、その構造と複雑度は段階 1 のコンパートメントモデルに似ているが、ここで想定されているのは SRHP 地下水層ではなく、処分場における全ての空間的なコンパートメントに浸透する FOHP 地下水層である。

その他の影響（ファーフールド経路が短縮される、氷河期サイクルや気候の周期的変動によって海拔が上下して地下水塩度を周期的に変化させる、等）を含む様々な変動シナリオについても、「変動シナリオ概念の図式化」と「コンパートメントモデル表現への変換」の両方の要素を統合することを通じて作成することが可能と考えられる。

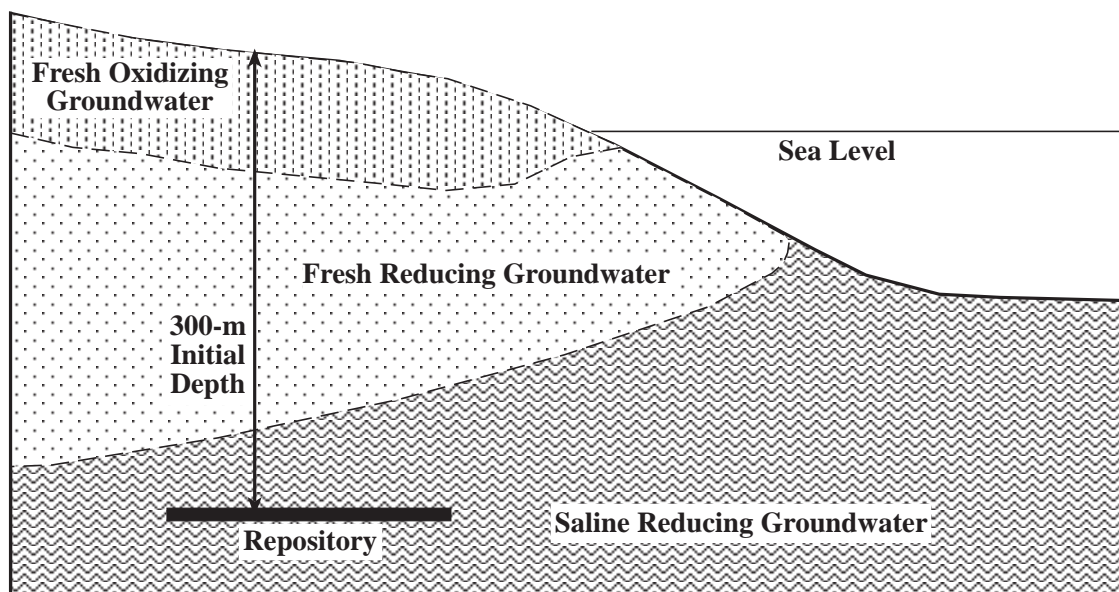


図 15a. 隆起・侵食シナリオ - 段階 1 - (第 2 次取りまとめの基本シナリオ)

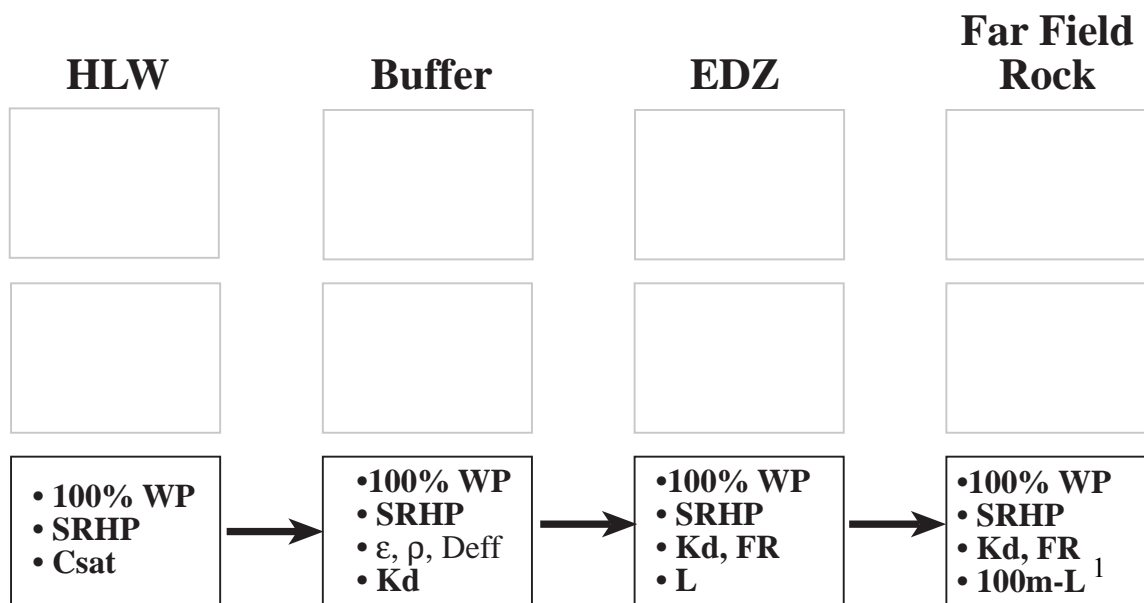


図 15b. 段階 1 のコンパートメントモデルによる表現

記号の意味

- | | |
|------------------|--------------------|
| WP : 廃棄体 | FR : 流速 |
| Csat : 溶解度 | L : EDZ の経路長 |
| Kd : 吸着係数 | SRHP : 還元性高 pH 型塩水 |
| ϵ : 空隙率 | FRHP : 還元性高 pH 型淡水 |
| ρ : 密度 | FOHP : 酸化性高 pH 型淡水 |
| Deff : 実効拡散係数 | |

1. 緩衝材出口からファーフールド断層までの距離を 100m と仮定。

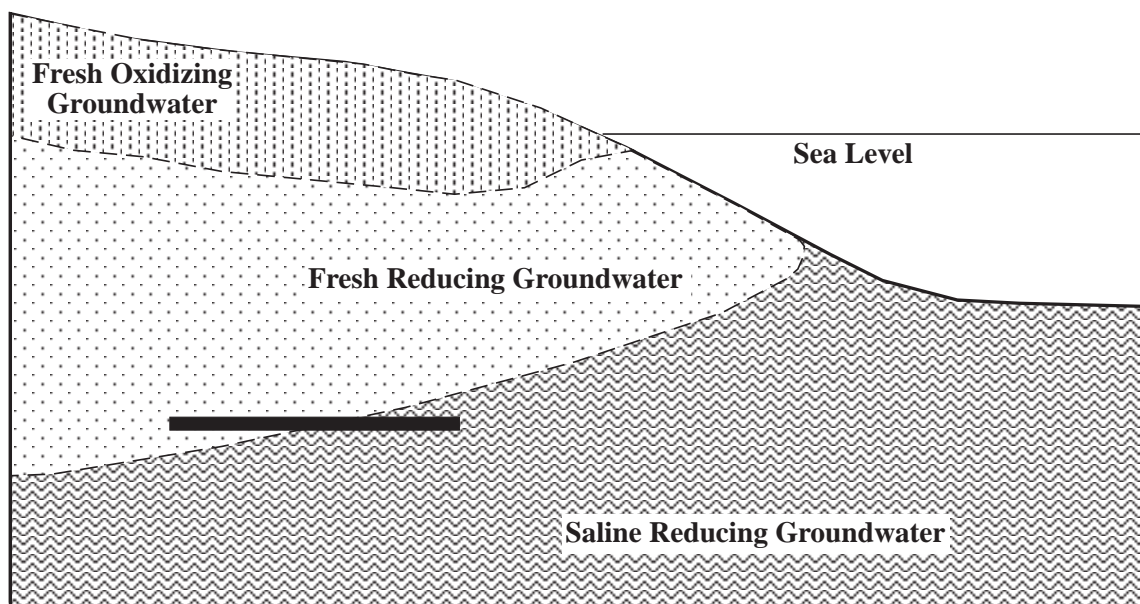


図 16a. 隆起・侵食シナリオ - 段階 2 -

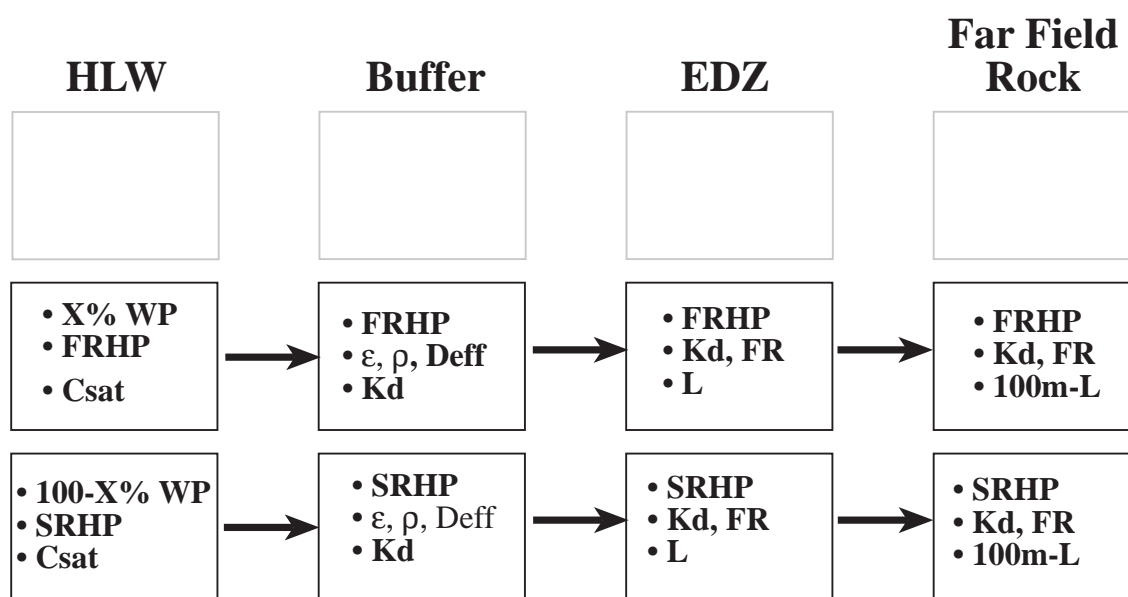


図 16b. 段階 2 のコンパートメントモデルによる表現

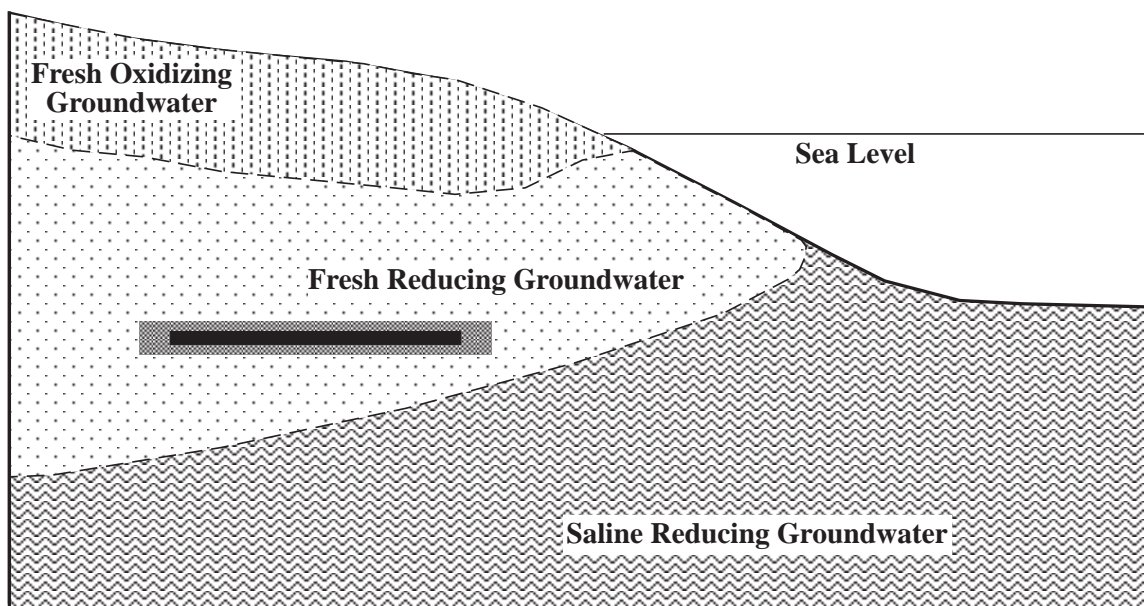


図 17a. 隆起・侵食シナリオ - 段階 3 -

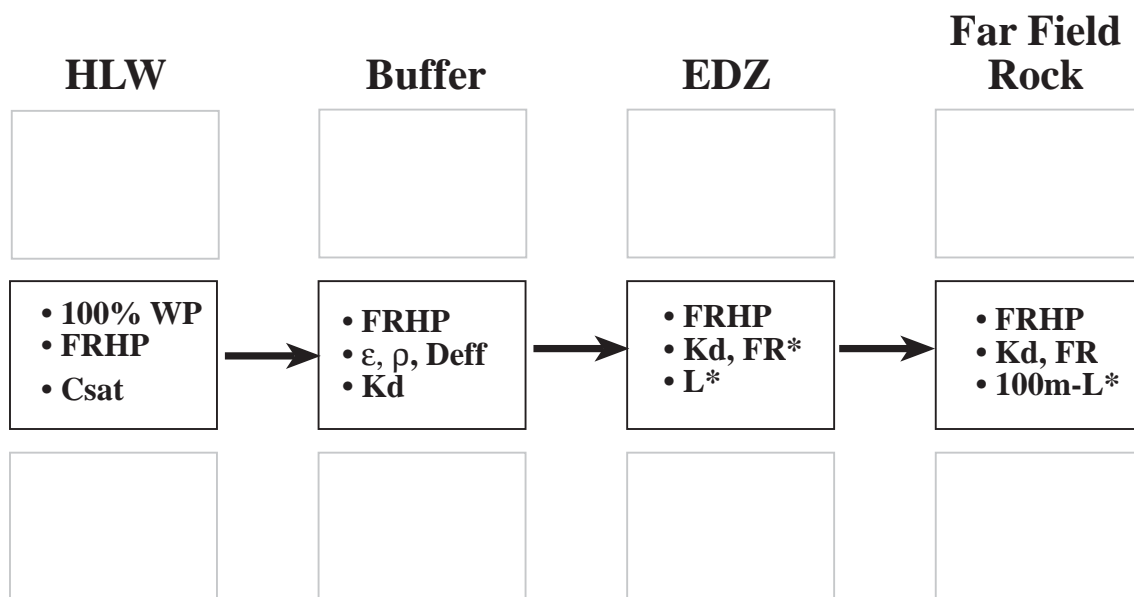


図 17b. 段階 3 のコンパートメントモデルによる表現

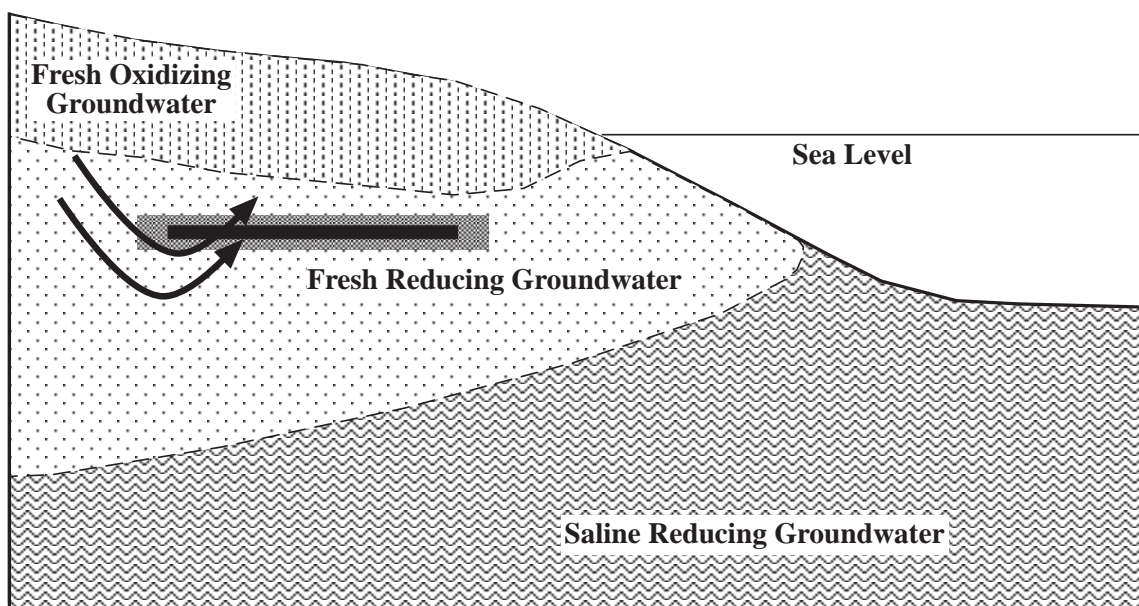


図 18a. 隆起・侵食シナリオ - 段階 4 -

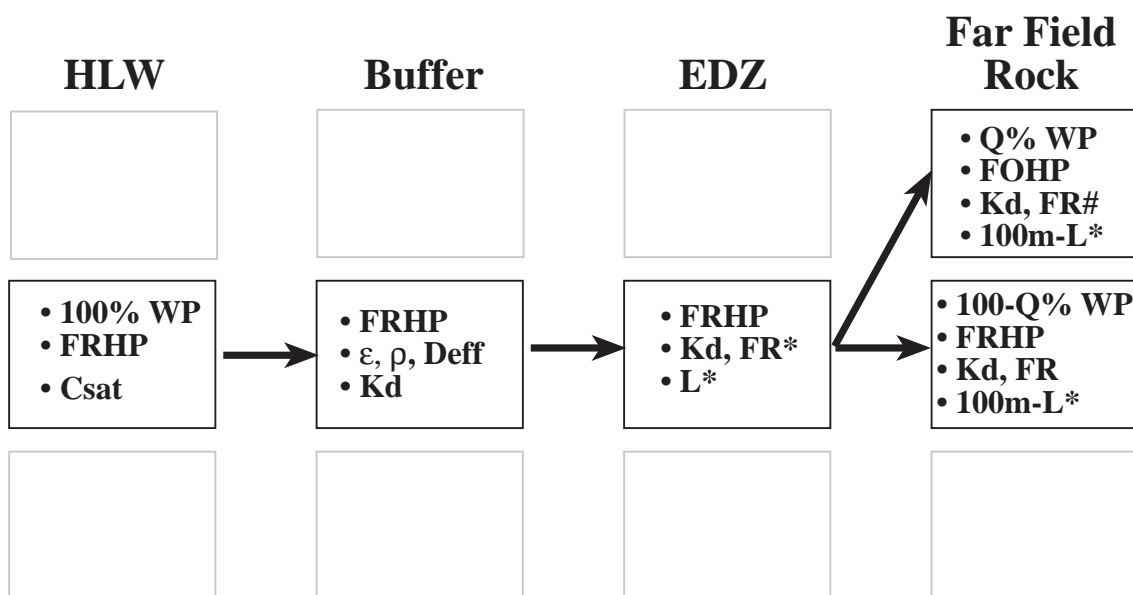


図 18b. 段階 4 のコンパートメントモデルによる表現

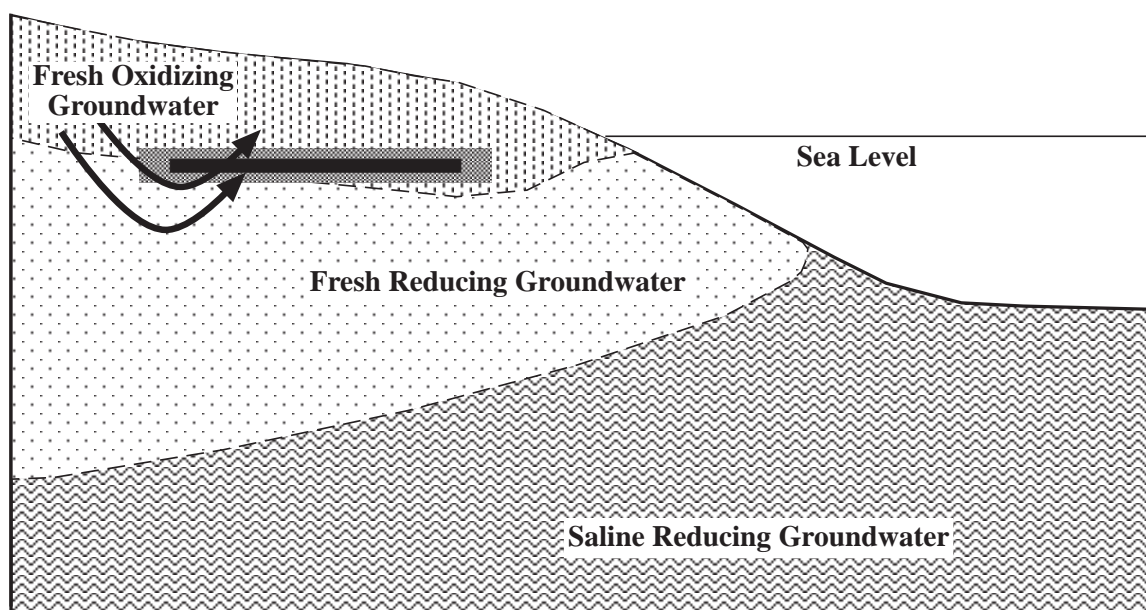


図 19a. 隆起・侵食シナリオ - 段階 5 -

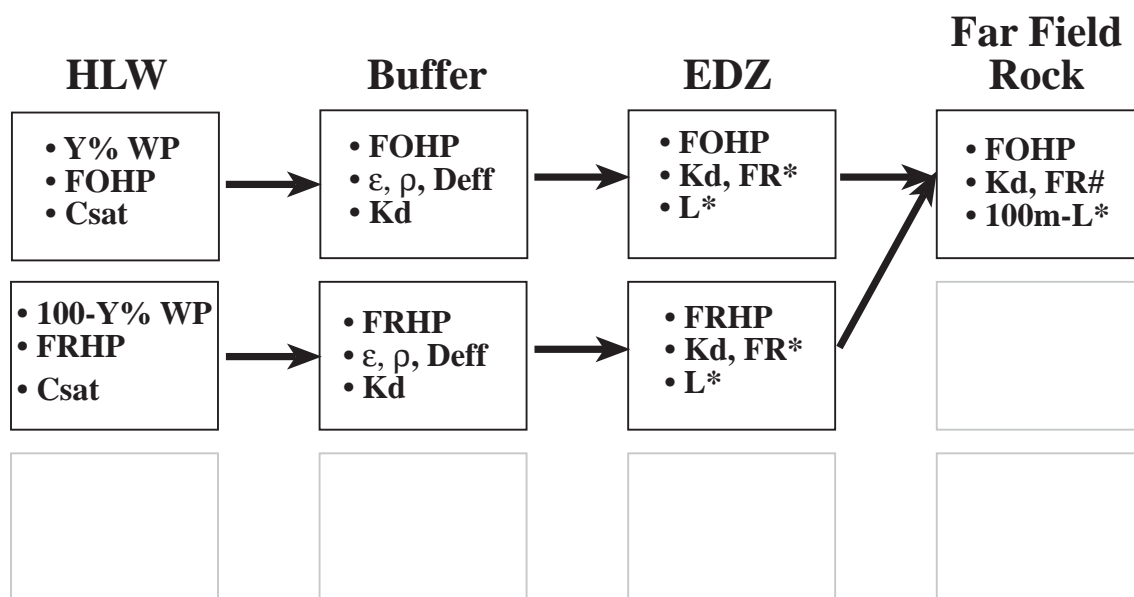


図 19b. 段階 5 のコンパートメントモデルによる表現

5. おわりに

本年度の実施内容は、以下の通りである。

(1) FEP の記述に関する情報の整理

本年度は、天然バリアに関連する FEP についての検討を行った。即ち、FEP リストの構造及び記述内容が、シナリオ解析に適しているか、また、最新の研究結果を踏まえているかを検討することを目的として、マトリクス及び階層的手法を用い、FEP リストの構造を検討し、また文献やインタビューから得られた情報を記述内容に加えた。RES マトリクスを用いて、FEP 間の相関も確認し、不確実性についても記述することによって、シナリオ解析に適した FEP データを整理した。

(2) シナリオ解析手法の検討

FEP 情報からシナリオ解析ケース設定までのシナリオ解析手法の検討を行うことを目的として、まず基本シナリオについて、緩衝材を例に、相互関連性マトリクスと PPM (パラメータ、プロセス、モデル) データベースを作成した。作成にあたっては、相互関連性マトリクスと相関関係マトリクスを用いた検討を行った。また、同手法の火成活動シナリオへの適用についても検討した。さらに、それぞれのマトリクスを用いた手法間での比較を通じ、今後の課題を明瞭化した。

(3) 変動シナリオに関する解析技術の検討

天然事象が地層処分の安全性に与える影響をより現実的に評価解析するための手法を検討することを目的とし、隆起・侵食シナリオに関するプロセスを整理するとともに、それを取り扱うための解析概念として概念・数学モデルを検討し、コンパートメント・モデルの適用性を提示した。

以上の検討により、第 2 次取りまとめまでに蓄積された成果を含めたシナリオ解析の今後の高度化の方向性がより具体的に明示できたと同時に、今後取り組むべき課題を明らかにした。

参 考 文 献

- (1) C. Bethke: Geochemical Reaction Modeling, Oxford University Press, New York (1996).
- (2) P. Domenico and F. Schwartz : Physical and Chemical Hydrogeology, John Wiley & Sons, New York (1998).
- (3) S. Ingebritsen and W. Sanford : Groundwater in Geologic Processes, Cambridge University Press, Cambridge, UK. (1998).
- (4) 核燃料サイクル開発機構 : “ 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 地層処分システムの安全評価 ” , JNC TN1400 99-023 (1999).
- (5) 大久保博生 : “ 地層処分システム隔離性能に関する稀頻度事象定量化手法の検討 () ” , PNC TJ1222 97-003 (1997). (研究委託報告書 ; 三菱総合研究所)
- (6) 大久保博生: “ 地層処分の性能評価におけるシナリオ解析の高度化() ” , JNC TJ8400 2002-014 (2002). (研究委託報告書 ; 三菱総合研究所)
- (7) Nagra : “ Kristallin- , Safety Assessment Report ” , Nagra Technical Report NTB 93-22 (1994).
- (8) OECD/NEA : “ Features, Events and Processes (FEPs) for Geological Disposal of Radioactive Waste ” , An International Database (2000).
- (9) SKB : “ SR97-Identification and structuring of process ” , SKB Technical Report TR-99-20 (1999) .
- (10) C.F. Tsang Ed.:Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Academic Press, Inc. (1987).
- (11) B. Velde Ed. : Origin and Mineralogy of Clays, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1995).