

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)

2002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

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)
2002

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

まず、核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構とする）が作成した人工バリアに関する 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、シナリオ作成プロセスに関する検討を行った。具体的には、シナリオ作成プロセスの透明性及びわかりやすさの向上に向けた検討として、処分場の物理化学的特性間の相関マトリクス（RES 形式）概念に基づき、処分場システムの表現、FEP 特性の定義やプロセス相互作用について考察を行った後、実際に、第 2 次取りまとめに基づく RES 相互作用マトリクスの作成を試みた。

最後に、地層処分システムに対して強い摂動を生ずる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、地震、断層、岩脈貫入の各シナリオに関してどのような概念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
(Document Prepared by Other Institute, Based on the Trust Contract)

Hiroo Ohkubo *

Abstract

First of all, with regard to the FEP information data on the Engineered Barrier System (EBS) developed by JNC, description level and content of the FEPs 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-modeling process has been studied. The study has been conducted by evaluating representation of the repository system, definition of FEP properties, and process interactions based on the concept of the interaction matrix (RES format) which represents influences between physicochemical characteristics of the repository, followed by an experimental development of the actual RES interaction matrix based on the H12 report as the examination to improve the transparency, traceability and comprehensibility of the scenario analysis process.

Lastly, in relation to the geological disposal system, assessment techniques have been examined for more practical scenario analysis on particularly strong perturbations. Possible conceptual models have been proposed for each of these scenarios; seismic, faulting, and dike intrusion.

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 に基づくシナリオ構築	2
2.3	本章の目的	2
2.4	FEP リストの体系に関する検討	3
2.5	各 FEP データの記載内容についての検討	5
2.6	FEP データ	6
2.7	今後の課題	9
3.	シナリオ解析システムの検討	11
3.1	序	11
3.2	化学工学的アプローチ (ChEng 法) によるシナリオ解析の概要	11
3.2.1	処分場システムの表現	11
3.2.2	プロセスと相互作用	12
3.2.3	第 2 次取りまとめを基本にした RES 相互作用マトリクス	15
3.2.4	今後の展開について	16
3.3	シナリオ解析プロセスに関する考察	18
4.	変動シナリオに関する解析技術の検討	22
4.1	序	22
4.2	シナリオの発端となる FEP: 「弱い」摂動と「強い」摂動	22
4.3	地震シナリオ	24
4.3.1	地質学的環境に与える影響	24
4.3.2	人工バリアシステムに与える影響	25
4.4	断層シナリオ	28
4.4.1	地質学的環境に与える影響	28

4.4.2	人工バリアシステムに与える影響	29
4.5	岩脈貫入シナリオ	32
4.5.1	地質学的環境に与える影響	32
4.5.2	人工バリアシステムに与える影響	33
5.	おわりに	37
	参考文献	39

表 目 次

表 1	基本プロセスと特定プロセス	12
表 2	シナリオ解析のための段階的方法の例	18
表 3	第 2 次取りまとめ変動シナリオの発端となる事象の強弱対比表	23

目 次

図 1	マトリクスと階層構造の整理と比較	4
図 2	処分場システムシナリオ解析のための ChEng 法簡略図 (システムの構成要素)	11
図 3	Tsang によってまとめられた連成プロセス	14
図 4	FEP ベースのシナリオ解析に対する ChEng 法アプローチの 第 2 次取りまとめに基づく RES フォーマット表現	17
図 5	シナリオ解析プロセスの基本概念	20
図 6	地震シナリオとオーバーパック沈下の概念図	25
図 7	埋設孔内の緩衝材の流出とオーバーパック沈下につながる 地震シナリオを示すコンパートメントの段階的進行	27
図 8	亀裂性母岩の不連続に関する定義	28
図 9	ニアフィールドにおける断層シナリオの図式化	30
図 10	断層による緩衝材の部分的喪失と母岩への直接放出を表わす 一般化コンパートメントモデル	31
図 11	薄板状の岩脈に沿って上昇するマグマについて 考えられるある展開	34
図 12	薄板状の岩脈に沿って上昇するマグマについて 考えられる別の展開	35
図 13	3 種類の二次的変動の可能性が考えられる岩脈貫入シナリオ	36

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下サイクル機構）殿は、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、現在第2次取りまとめ以降の地層処分研究に関する課題がまとめられ、今後実施される概要調査地区の選定ならびに安全基準等の作成に向けた、国内研究機関の役割分担が議論されている段階である。

その中で、シナリオ解析技術の開発に関して、

- ・具体的な地質環境に対する地上からの調査による地質環境の情報に基づく Features, Events and Processes^(注)（以下 FEP）データベースが例示できること
- ・具体的な地質環境を対象として、抽出された FEP を基に概略的にシナリオを構築することができること

などの課題に取り組むこととしており、2005年頃に予定されている概要調査地区の選定への反映を一つのマイルストーンとして研究開発を進めている。このため、第2次取りまとめにおいて蓄積した成果を含めて、シナリオ解析に関連する情報を体系的に整理することにより、具体的な地質環境を想定したシナリオ解析を行うための高度化を進めておく必要がある。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連する知見に対して、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、シナリオ解析の透明性やわかりやすさの向上のための検討と課題の整理を行う（第3章）。さらに、これまで簡略かつ保守的に行われてきた地震・断層、および火成活動に関して、より現実的なシナリオおよびモデルを用いて解析するための評価技術について検討する（第4章）。

^(注) 地層処分システムに影響を及ぼすと考えられるシステムの特徴（Features）、そこで生じる事象（Events）や過程（Processes）を言う。

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 次取りまとめでは(JNC,1999)⁽³⁾、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 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。

2.2 FEP に基づくシナリオ構築

FEP 間の関連性を考慮したインフルエンスダイアグラムを参照しながら、これらを組み合わせたものとしてシナリオは構築される。従って、FEP リストがシナリオ構築に適した構造を有しており、またデータとしては、得られている知見だけでなく、地層処分システムに関する不確実性や他の FEP との相関に関する情報も記載されていることが求められる。

このような FEP リストを用いることによって、構築されたシナリオから導かれる解析ケースの設定、及びそれぞれの FEP が有する不確実性に対応したモデルやパラメータの変更を容易にすることが可能となる。

2.3 本章の目的

本研究の目的は、第 2 次取りまとめの FEP リスト、及び 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への適用性の向上などを目指して、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。

一方、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いか？

他のFEPとの関連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、サイクル機構の内外で蓄積された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、本研究においては、人工バリア（ガラス固化体とその近傍、オーバーパック、緩衝材）に関するFEPについてのみを検討の対象とする。

2.4 FEPリストの体系に関する検討

第2次取りまとめのFEPリストは、「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整理されている。

マトリクスを用いる利点は、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ことである。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必要のないFEPを削除することによって、FEPの数を大きく減らすことができる。

一方、欠点は、まず、関連する特性・事象・プロセスを描写する上での完全性の評価についてである。分類された現象・特性に関して、これだけの項目だけで、FEPとして完全だろうかといった思いを引き起こさせる。

他の欠点としては、FEPの定義の曖昧さが挙げられる。第2次取りまとめのFEPリストには「熱物性」というFEPがあるが、これは人工バリア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。

次に、FEPリストの階層構造について検討を行った。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、及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、「ガラス固化体とその近傍」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図1である。

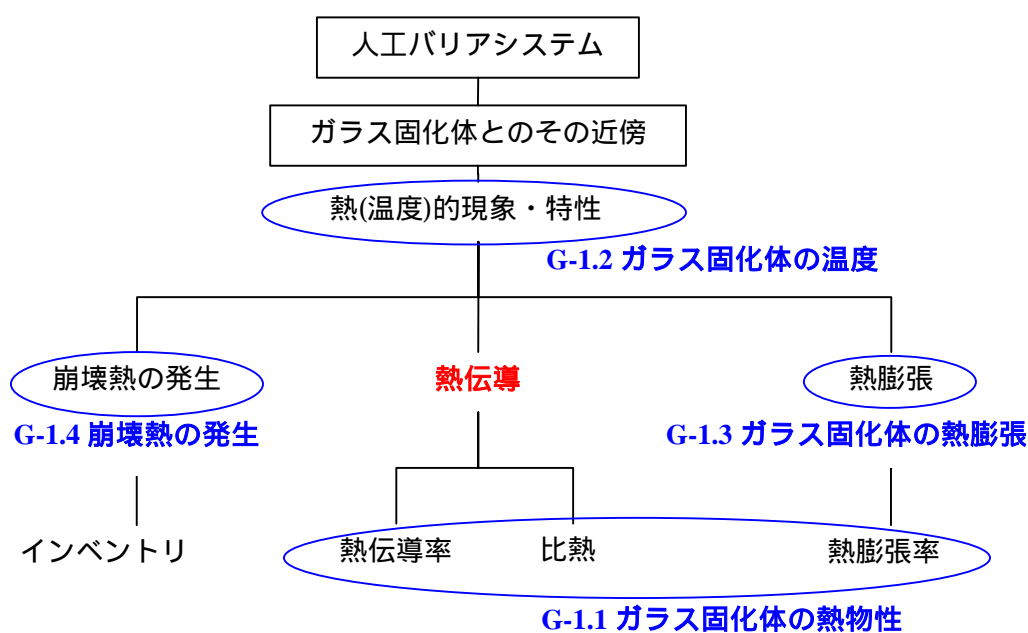


図1 マトリクスと階層構造の整理と比較
(ガラス固化体とその近傍での熱的現象・特性)

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はあるが、熱伝導自体を記述するFEPが無く、また、「崩壊熱の発生」については、現象を表すFEPはあるが、現象に影響を与える特性に関するFEPが無い。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いうことが明らかになった。

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及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く（例えば、SKB,1999⁽⁸⁾、Nagra,1994⁽⁶⁾）、これら海外の FEP リストを、「生の言語に基づいた」FEP リストと呼ぶことができる。

一方、サイクル機構が作成された FEP リストは、廃棄体、オーバーパック、緩衝材の物理化学的現象・特性に注目して整理されており、「工学的見地に基づいた」FEP リストと呼べる。「工学的見地に基づいた」FEP リストでは、シナリオ解析には適していない、体系化されておらず、また的外れな FEP を排除することができることから、「生の言語に基づいた」FEP リストより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。

2.5 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、全 FEP が同一の階層レベルで整理されるわけではないこと 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 の影響度は異なっていること、などから、全ての FEP 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。

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再整理した。

- ・ 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
- ・参考文献

2.6 FEP データ

ここでは、例として「G-1.1 ガラス固化体の熱物性」の FEP データを記述する。他の FEP データは添付した CD-ROM を参照されたい。

1. FEP の名称

ガラス固化体の熱物性 (G-1.1)

2. 当該 FEP の概要

当該 FEP で取り扱うガラス固化体の熱物性とは、定容比熱、熱伝導度、密度および線膨張係数である。ガラス固化体のこれらの物性値は、割れの有無、温度、圧力、均一性等に依存する。これらの熱物性値は、緩衝材の温度制限値を満足するように廃棄体埋設密度を調節すること等を目的とした処分場の熱解析において用いられる。また線膨張係数は、他の地層処分システムの各構成要素との力学的相互作用に影響を及ぼす可能性がある。

3. 安全性への影響機構及び感度

3.1 安全性への影響機構

地層処分システムにおいて、ガラス固化体の温度が 500 以上にならないこと、また緩衝材の温度を 100 以下に保つことが重要である。ガラス固化体の温度が 500 以上になるとガラス組成が変化し、放射性物質の浸出特性が変化する可能性がある。また、緩衝材材料であるベントナイトの主成分であるスメクタイトを長期間、高温状態に置くとイライトに変質し、緩衝材のバリア機能が低下する可能性がある（「B-4.8 緩衝材の化学的変質」参照）。従って、ガラス固化体にはこれ

らの制限温度を越えないような熱物性が求められる。しかしながら、イライト化については、イライト変質に必要なカリウムが地下水中にあまり含まれない場合には、緩衝材温度が 100 を超えても発生しない可能性が高い。

ガラス固化体とオーバーパックスの線膨張係数が非常に異なる場合、埋設後、温度変化による体積変化に差が生じるがそれが拘束されると応力が発生してガラス固化体が割れる可能性がある。ガラス固化体の割れは表面積を増加させ、核種放出率に影響を与える可能性がある。

3.2 感度

ガラス固化体の熱物性値は温度依存性を有しており、ガラス固化体自身からの発熱、熱伝導媒体（ガラス固化体、オーバーパックス、緩衝材、母岩）との相互関係により決定されるガラス固化体の温度に影響される。処分後のガラス固化体の発熱は、初期の数百年間は Cs-137 や Sr-90 といった比較的短半減期の核種の崩壊熱、その後はアクチニド核種の崩壊熱が支配的となる。中間貯蔵における冷却期間を経た後に処分を行う現在の計画では、ガラスの変質や再結晶化、緩衝材のイライト化が生じるような温度には至らないと考えられる。

線膨張係数の変化については、オーバーパックスと緩衝材との力学的相互作用として別途オーバーパックスの腐食膨張（「OP-3.4 オーバーパックスの腐食膨張」参照）を考慮しているため（腐食後の体積は腐食前の 3 倍と仮定）、これと比較すれば、線膨張係数の変化による体積変化は無視し得る程度と考えられる。

4 . 現象理解の現状

4.1 ガラス固化体の熱物性についての理解の現状

ガラス固化体を含めたニアフィールドの温度の時間的な変化は、有限要素法汎用解析コード FINAS[1]を用いて解析が行われている。現在リファレンス仕様とされている JNFL（日本原燃株式会社）のガラス固化体の熱物性（熱伝導率、定容比熱、密度）が不明であることから、解析では、COGEMA 仕様のガラス固化体に関する熱物性値を用いている。また、解析では、それぞれの熱物性値を温度によらない一定値として取り入れており、初期温度は埋設深度における温度としている。

上記の仮定のもと、ニアフィールド領域の温度の時間的な変化を解析的に求めて

おり、ガラス固化体および緩衝材ともに、長期に渡って制限温度を越えることがないことが報告されている。

主要な不確実性

ガラス固化体の熱物性値は、ガラス固化体の割れの有無、温度、圧力、均一性等に依存するが、解析では、これらの依存性を取り入れていない。しかしながら、実際の処分場環境によっては、様々な要因で温度が大きく変化し、温度依存性を考慮する必要が生じる可能性もある。

また、オーバーパックの腐食寿命は 1,000 年とされており、その間に腐食膨張によって体積が 3 倍になると設定されている（「OP-3.4 オーバーパックの腐食膨張」参照）。体積膨張によってガラス固化体に割れが発生し、割れの有無によっても熱物性値が変化することが考えられ、これらが安全評価上の不確実性として残る。

4.2 核種移行への影響

上記の解析の結果、ニアフィールドの温度は埋設後、数十年後に最高温度に到達するが、ガラス固化体、緩衝材いずれの温度も制限温度を下回ることが示されている。従って、ガラスの変質や緩衝材のイライト化等の要因を考慮する必要性は必ずしも高くないと思われる。

主要な不確実性

上記でも述べたように、この解析では熱物性の温度変化を考慮しておらず、また初期温度として、埋設深度の地層温度を用いている。しかしながら、中間貯蔵後に埋設される時点では、ガラス固化体の温度は地層温度より高温である可能性があり、埋設初期の時点では、熱物性の温度に対して一定という仮定が成立しない可能性がある。高温領域でのガラス固化体とオーバーパックの熱膨張係数が大きく異なった場合、熱応力によりガラス固化体に割れが発生し、その後の溶解速度に影響を与える可能性もある。

5. 性能評価での取り扱いとその理由

5.1 第2次取りまとめでの取り扱い

リファレンス仕様としている JNFL のガラス固化体の熱物性が不明のため、設計の熱解析で使用されているガラス固化体の熱物性は、COGEMA 仕様のガラス固化体の値を用いている。ガラス固化体として用いられているホウケイ酸ガラスの熱物性は、その組成に大きくは依存しないことから安全評価上の影響は顕著ではない。また、ガラス固化体の熱物性値は割れの有無、温度、圧力、均一性等に依存しない一定値として取り扱った。

5.2 今後の課題

廃棄体の定置法の違いが、温度に与える影響を明らかにし、熱物性値の温度依存性を考慮する必要があるかどうかを明らかにする必要がある。

6. 当該 FEP に関連がある FEP

当該 FEP と関連する上流側、下流側 FEP を以下に示す。

上流側 FEP		下流側 FEP	
G-1.2	ガラス固化体の温度	G-1.2	ガラス固化体の温度

7. 参考文献

[1] 動力炉・核燃料開発事業団(1992): 汎用非線形構造解析システム FINAS, V.12 使用説明書、PNC TN520 92-006.

2.7 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、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から、想定される全ての項目を挙げ、それをマトリクスで整理する際に、多角的に FEP リストを検証し、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 リストを構築していくことが必要だと思われる。

FEP リストが、シナリオを構築するための部品であるということを認識すれば、

各 FEP に関する情報を管理しておくことが、シナリオを解析する上でも非常に重要であることが分かる。ここでの情報には、既に分かっていることだけでなく、地層処分に関連した不確実性を含む必要がある。それらの情報の質と量は、研究・開発の進歩に伴い、時間経過とともに変化していくものである。例えば、変化していく情報を統一的に管理するツールを作成し、そのツールに、ある FEP に関する情報の変化が、シナリオ解析にどのような影響を与えるのかといったことを記録する機能を持たせておけば、FEP リストからのシナリオ構築、および解析という一連の作業がより効果的になることが期待できる。

3. シナリオ解析システムの検討

3.1 序

シナリオ解析支援に関する本年度検討において、本章は、「化学工学的 (ChEng)」アプローチについて考察するものである。

本章の目的は、シナリオ解析における ChEng 法を評価し、その適用性で考えられる課題について検討することである。内容としては、全ての物理的構成要素と物理化学的特性に関するレビュー、またそれに基づき一連のシナリオ解析システムとするための初期の RES 相互作用マトリクスの開発がある。

3.2 化学工学的アプローチ (ChEng 法) によるシナリオ解析の概要

3.2.1 処分場システムの表現

図 2 は処分場システムにおける ChEng 法の図を抽出・簡素化したものである。処分場システムの構成要素間の相互作用を示すことが可能であり、また、どの隣接する構成要素もその相互作用は、物理的/化学的特性とフラックスの間に連続性

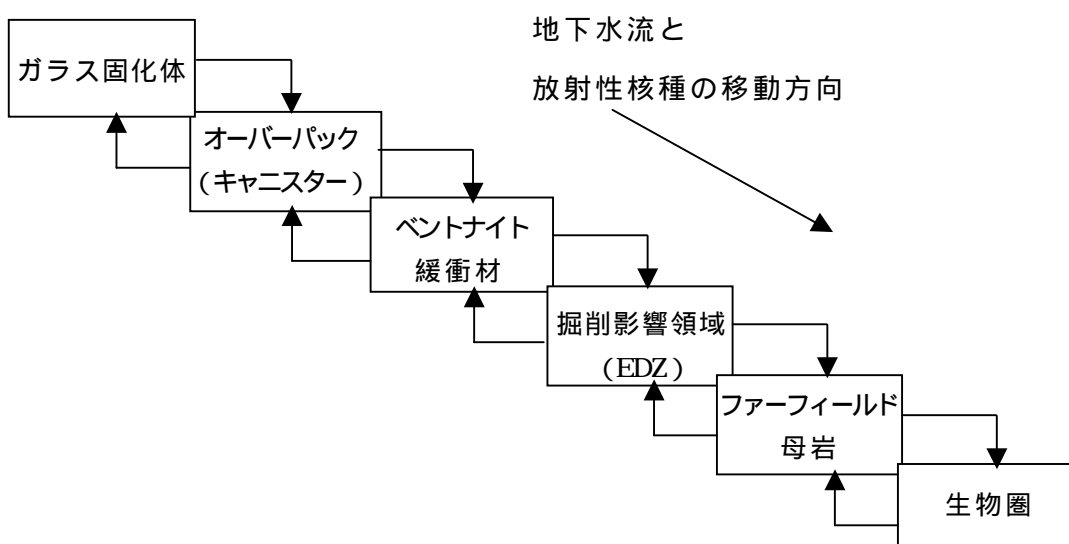


図2 処分場システムシナリオ解析のための ChEng 法簡略図
(システムの構成要素)

を必要とする。隣接するバリアの接点をまたがる運動量・エネルギー・質量の移動については明白に考慮されなくてはならない。

さらには、最終的な性能評価の際に重要な要素となる放射性核種の移動方向についても、この図を使って表わすことが可能である。

3.2.2 プロセスと相互作用

(1) FEP 特性の定義

表1は基本となる特性とプロセス及びその移動量を簡単に編集したものである。基本特性/プロセスとしては熱的、水理学的、力学的、化学的プロセスなどがあり、そのそれぞれに多様な特性/プロセスが含まれている。モデル作成者はそのような特殊なプロセスに関して実際にモデルを作成し、計算を実行することができる。ChEng法マトリクスにおいて対角線上のFEPセルの特性をどのように定義するかは未定であるが、二つの可能性があると考えられる。

表1 基本プロセスと特定プロセス

基本プロセス	特定プロセス	移動
熱的	熱伝導、対流、放射線、など	エネルギー / 質量
水理学的	地下水流、二相流、など	質量 / 運動量
力学的	亀裂、など	運動量
放射線学的	放射線分解、放射線損傷、など	放射線
化学的	溶解 / 沈殿、腐食、など	質量

一つ目は、「特性」という言葉によって指し示されるのは単にバリアの熱的、力学的、放射線学的、化学的特性のみである可能性があるため（例えば、熱伝導度、透水性、降伏応力、中性子吸収、等）、物理的/化学的状态（例えば、温度、地下水組成、亀裂現象など）からは区別されるべきなのではないかということである。しかしながら、ChEng法は、時間とともに処分場システムがどのように進展し得るのか、また、未来の仮想事例（シナリオ）が通常シナリオにどのような摂動を与え得るのか、ということを考えるためのものであるから、ChEng法マト

リクス中の対角線上の要素をバリア特性だけで定義したのでは適切ではないと思われる。

そこで、二つ目の解釈を提案する。この場合、「特性」という言葉はバリアの特性と状態の二つを意味するものとする。対角線上の FEP をこのように解釈することにより、ChEng 法では、安定状態（長期的、通常の）と摂動状態（シナリオ）の両方に対して柔軟に考慮することができるようになる。

(2) 各 FEP の多様な特性と影響

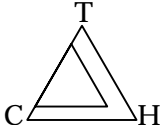
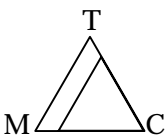
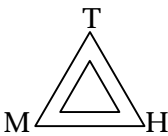
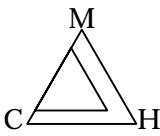
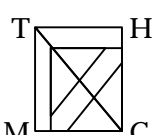
各 FEP は多数の異なる「特性」を持つことになる。例えば、「HLW の化学特性」には溶解速度、溶解度、多数の相とその数、主要・非主要成分の組成などが含まれる。これら全ての「特性」が性能評価において等しく重要なのではない。また、これらの特性の相対的重要性はシナリオによって変化し得るものである。

しかし、このような一つの「特性」FEP の中に多数の「生の言語」FEP を組み込んだ ChEng 法に関する問題に対処する方法もある。最も簡単なのは、現在の RES フォーマット用コンピュータ・プログラムを用いて、使用者が特定のバリア構成要素を強調できるような機能を付け加える方法である。一個のバリアを強調することによって、そのバリアについての詳細な FEP がまとまって表示され、各特性とプロセスが同様の RES フォーマット上に個々の FEP として表わすことができるようになる。

(3) プロセス相互作用

あるバリア構成要素において、多様なプロセスがほぼ同時に相互作用し得る。これを連成プロセスと呼ぶ。連成プロセスの型は、図 3 のように Tsang (1987)⁽⁹⁾ によってまとめられた。連成プロセスの相互作用と影響レベルを ChEng 法図を使って表わすのには二つの問題点がある。

まず、基本プロセスについてであるが、二つの基本プロセス間の相互作用は多様なプロセス / 特性間における相互作用が集積されたものだといえる。前項で述べたとおり、特定のプロセス / 特性間の様々な相互作用についての影響レベルを区分するのに一種類の数値（この場合は色）を用いるのでは十分とはいえない。

No.	Type	Example
1.	T = C	相変化
2.	T = H	浮揚流
3.	T = M	熱で生成した亀裂
4.	H = C	溶解と沈殿
5.	H = M	水理学的亀裂
6.	C - M	応力腐食
7.		熱水理学系における 化学的反應及び輸送
8.		熱化学的変形による 力学的応力の変化を伴う熱力学的影響
9.		熱による亀裂岩体の水理力学的挙動
10.		化学的輸送に影響する可能性のある (亀裂における)水理力学的影響
11.		熱水理場における亀裂中の化学的反應と輸送

注) T = 熱的、M = 力学的、H = 水理学的、C = 化学的。

「 - 」は弱い結合を、「 = 」は強い結合を示す。

図3 Tsang(1987)⁽⁹⁾によってまとめられた連成プロセス

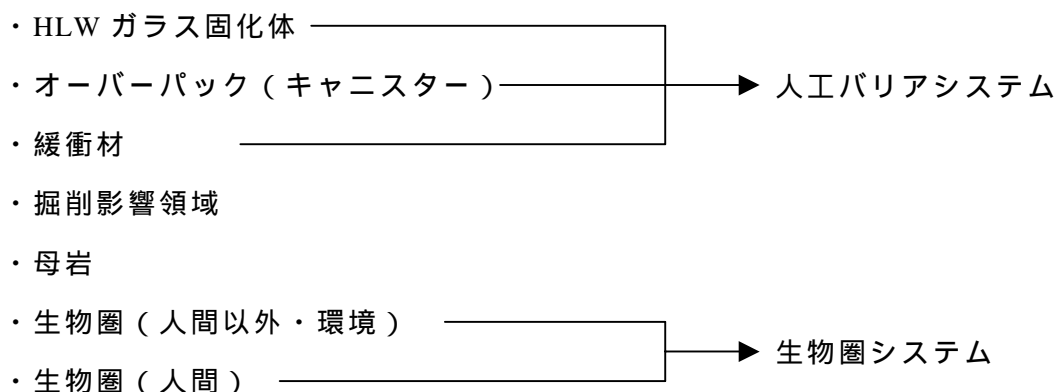
次に、連成プロセスに関する問題がある。ChEng 法図では、二つのプロセスについてはどの結合も表現できるが(図3、タイプ1-6)、3つ以上のプロセスの完全結合(図3、タイプ7-11)を直接表わすことは不可能である。

例えば連成プロセスコードの多くは、連成プロセスへの二元的な段階的アプローチをとっている：はじめに温度 水理結合が、次に温度 化学結合、そして水理 化学結合がモデル作成される。このような連成プロセスモデル作成の段階的アプローチに対しては、現在の ChEng 法 RES フォーマットによる二元的な表現で十分である。

他方、影響レベルに基づいて対角線外のセルを色分けした RES マトリクス図を見れば、使用者は即座に連成プロセスの強弱を知ることができる。

3.2.3 第 2 次取りまとめを基本にした RES 相互作用マトリクス

FEP は主に第 2 次取りまとめに記述された処分場の人工及び天然バリアシステム (JNC, 1999)⁽²⁾⁽³⁾に基づいて定義される。それらとは：



各々のバリアシステムは、バリアシステムの性能を評価するときに重要となるバリアシステムの特性を規定するために数個の FEP を必要とする。生物圏 (非バリアシステムとみなす) を除いては、主要な特性は以下のように分類される：

熱的特性

力学的及び物理的特性

化学的特性

水理学的 / 物質移動特性

放射線学的特性

HLW ガラス固化体システムは、処分場に埋設された廃棄物のインベントリ (ソースターム) を規定するために、もう一つの FEP を追加する。生物圏については二つのシステムに区分することを提案する。：1) 植物及び人間以外の動物の生態系とともに、生物以外の要素にも影響を与える処分場の独立した評価を可能とす

る環境生物圏、2) 処分場性能の人間に与える影響を特別に規定する人間生活圏。従って、処分場システム全体を記述するために最低 26 個の FEP を提案する。

図 4 は第 2 次取りまとめに基づいた完全な RES 相互作用マトリクスを提案するものである。主要な FEP は黄色のセルによって表わされ、マトリクスの対角線を構成している。このマトリクスとその関連データベースは、RES 型マトリクス構築だけのために Filemaker Pro[®]を用いてあらかじめ開発した専用コンピュータ・プログラムを使って作られたものである。

対角線外のセルは FEP 同士が与え合う影響を表わしている。対角線外の影響セルには二種類の「タイプ」がある。: 1) 隣接するバリア構成要素間の連続状態を表わすもの、2) 同一のバリア、もしくは隣接するバリアのある特性が別の特性に与える影響を表わすもの。連続影響セルは赤色で表わされている。「特性」影響セルはバリアシステムの性能評価において認知される重要性(影響レベル)によって主観的に色分けされている。最終的な重要性レベルは特性に関する感度分析などの研究に基づいて専門家集団によって決定されるのが望ましい。

3.2.4 今後の展開について

まとめとして、本項で検討したシナリオ解析に対するこの新しい ChEng 法を実行するにあたって考慮に入れるべきことは以下の通りである。

FEP リスト作成:

- a. 処分場システムの全ての構成要素をリストアップする
- b. 処分場システムの全ての基本プロセスをリストアップする
- c. 構成要素ごとの各基本プロセスについて全ての特定プロセスをリストアップする

不適切かつ重要でない、あり得るとはいえない特定プロセスの削除

全ての特定プロセス相互作用を仮定、有向グラフ法(Harary et al., 1965)⁽¹⁾

または RES マトリクスフォーマットで結果を表示

相互作用の影響レベルの判定

コンピュータ・プログラムを用いた評価ケースの導出

作成されるプロセス(結合、完全結合、単一方向結合を含む)の分類

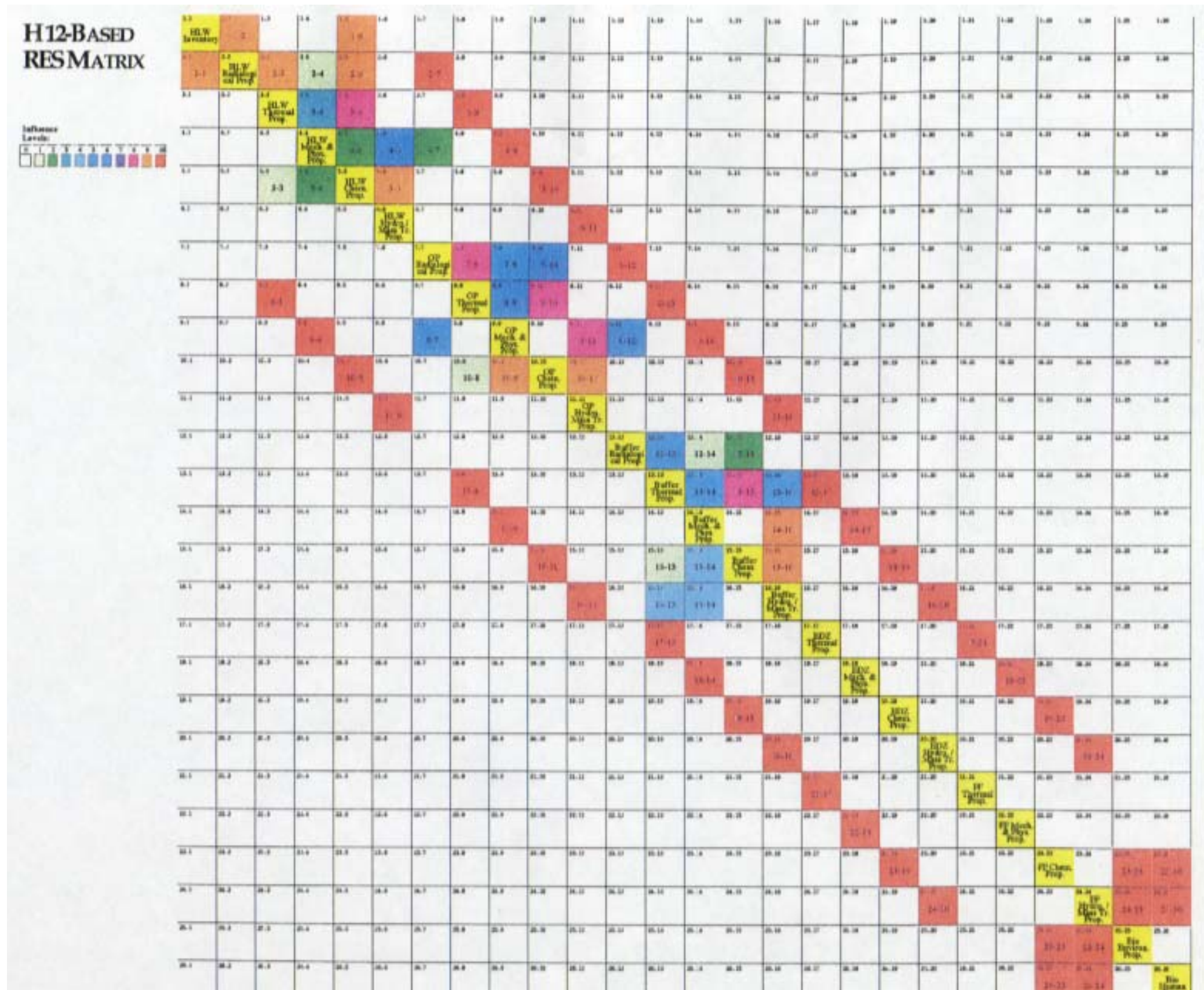


図4 FEP ベースのシナリオ解析に対する ChEng 法アプローチの第 2 次取りまとめに基づく RES フォーマット表現
 黄色セルは基本特性 / プロセスの FEP を、赤色セルは隣接バリア構成要素の連続状況を、連続セルによって作られた帯の間にあるセルは
 特定バリア構成要素のある FEP が別の FEP に与える基本的な影響を表す。これらの基本影響セルの相対的重要性は色別コードで示されている。

実施にあたっては、これらの各段階について文書化することは不可欠である。シナリオ解析に関する ChEng 法と関連する全ての情報を同定、グラフ化、文書化できるコンピュータ・プラットフォームを構築することを強く提案する。

3.3 シナリオ解析プロセスに関する考察

ここでは、RES / PID 形式から概念モデルや解析ケースへの落とし込みまでのプロセス（シナリオ解析プロセス）についての考察を行った。

FEP に基づくシナリオと計算ケースを統合的に同定するための一つのアプローチは表 2 のとおりである。

表2 シナリオ解析のための段階的方法の例

第 1 段階	包括的な予備 FEP を作成する
第 2 段階	いくつかの代表的（もしくは一般的）特質（特性と状態：必ずしも上位 FEP でなくともよい）を規定する。その理由は； <ul style="list-style-type: none"> 特質はプロセスや事象と比べると比較的安定した FEP の結合となり得る。特質における特性の一組は入力パラメータとして比較的容易にプロセスとモデルにリンクすることができる。また、特質における状態の一組は入力 / 出力のどちらとしてでも比較的簡単にプロセスとモデルにリンクすることができる（このことはそのようなアプローチがシナリオと計算ケースを統合的に作成するためのわかりやすく理解しやすい方法に寄与することを意味する）。
第 3 段階	特質を用いて影響図（ID）あるいは RES マトリクスを作成する（RES マトリクスの場合、特質は対角線上のセルに配置される）。
第 4 段階	特質との関係を考慮しながら（特質がプロセス及び / または事象を入力出力したものであるということイメージしながら）ID または RES マトリクス上にプロセスと事象を割り当てる。
第 5 段階	特質、プロセス、もしくは事象の補助的な、あるいはより詳細な表現を導入し得る階層構造を構築する。この段階においては、それらを割り当てやすくするために必要に応じて予備 FEP リストの改良を行う。
第 6 段階	それらの階層から科学的根拠あるいは判断の理由を記録しながら特質、プロセス、事象を選び出す。この段階においては（商品化または開発された）コンピュータ・ソフトを利用することも有効である。それらの中で関連性を持つ特質、プロセス、事象の一組がシナリオに相当することになる。
最終段階	潜在的代替モデルそして / またはデータの不確実性をそれらのシナリオに割り当てる。この段階では前の段階に比べてより深い階層から特質、プロセス、事象を選び出すことになる。

FEP データ情報に基づいてシナリオを生成し、解析ケースを設定するまでの一連のプロセス（シナリオ解析プロセス）としてどのような概念が考えられるのかを検討・整理した。即ち、

シナリオ作成に必要な基本的情報源（これは通常、FEP 情報データベースとして用意されているべきもの）を活用すること（ボトムアップ的アプローチ）

最終的な性能評価に適用される核種移行モデルを中心とするモデル体系を念頭に置くこと（トップダウン的アプローチ）

という双方の要求を満足するためには、RES マトリクスの対角成分としてどのようなレベルの Features (properties & states) を設定し、それに付随して同非対角成分として Processes & Events を設定すべきか、といった問題に帰着すると考えられる。

この問題を解決するには、多分、性能評価モデルの特徴を把握した上で、これらのモデル・パラメータへの関連データ・情報の反映を効率良く行えるように、FEP データ情報源から FEP 連鎖を導く方法を開発しなければならない。そのためには、図 5 に示すように、トップダウン的アプローチとボトムアップ的アプローチの接点となり得る領域において、FEP 情報源から、パラメータのモード化やケース・パターン分類化、モデル結合などが行えるようなモデル・パラメータ・データ等に関する詳細情報を、RES マトリクスの各成分毎に階層的に整理・設定しておく必要があると考えられる。

そこで、パラメータ情報とともにシナリオを生成する方法の一例として、緩衝材の熱的及び化学的現象・特性にのみ着目した場合のシナリオ開発プロセスを検討した。

その検討結果に基づき、今後のシナリオ解析プロセスではどのようなことが検討対象となり得るのか、その基本事項を以下にリスト・アップした。

FEP リスト自体の見直し

モデルへの反映を念頭に置きつつ、ボトムアップ的アプローチのスタートとなり得るより網羅的な FEP リストを作成。

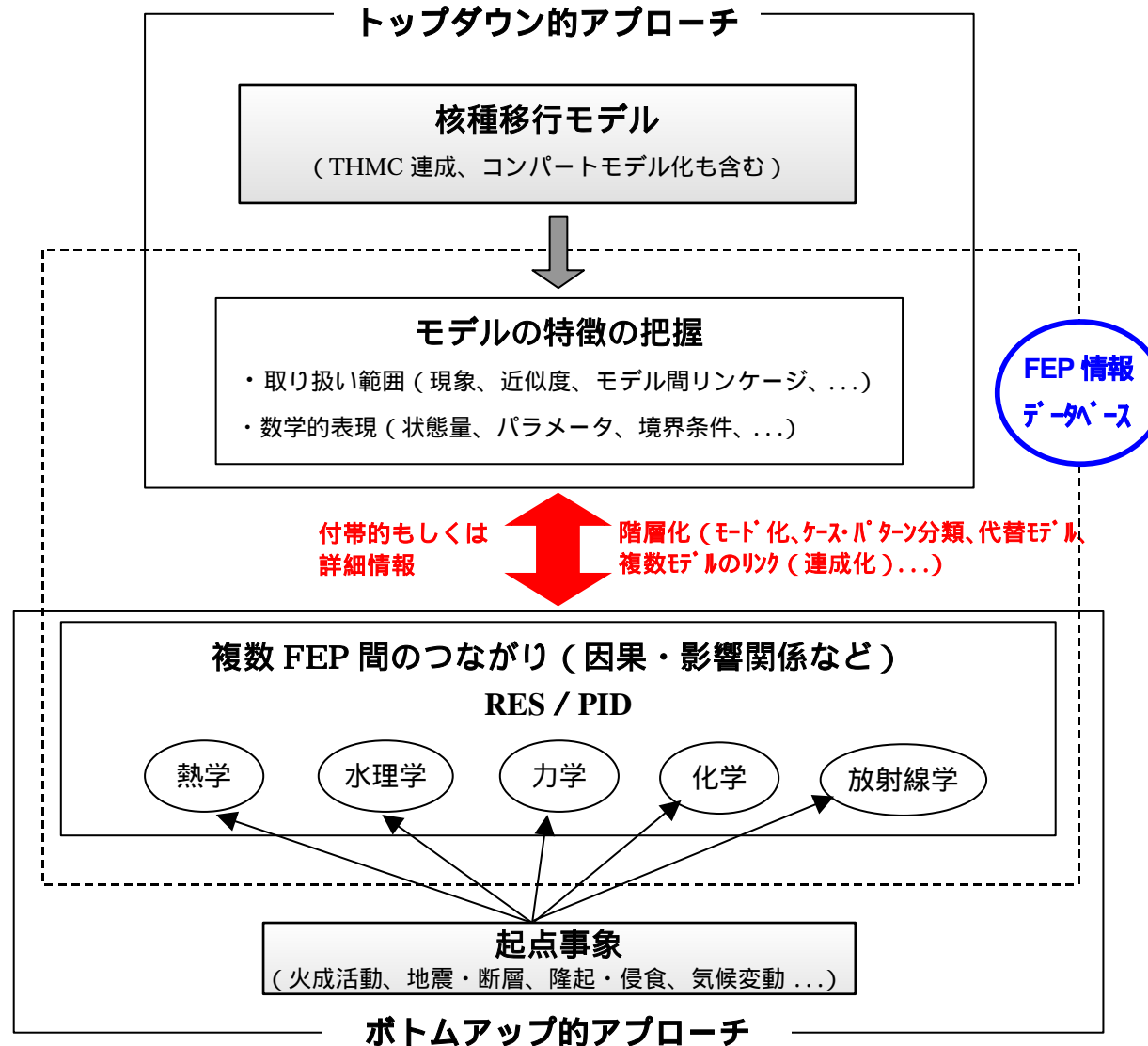


図5 シナリオ解析プロセスの基本概念

解析モデルに基づき、Features を抽出する。

Features を抽出する段階で、解析モデルを特定し、モデルに必要な入出力データを抽出する。(ボトムアップ的アプローチとトップダウン的なアプローチの接点)

なお、この時点で FEP のスクリーニングやグループ化が必要となる可能性も有り得る。

パラメータ情報の整理

各 Features に相当する入出力データを整理し、データベースにまとめる。

4. 変動シナリオに関する解析技術の検討

4.1 序

本章の目的は、シナリオ解析における変動ケースをより現実的にモデル化するために要求され得るものとその方法論について検討することである。本検討が課題とするシナリオのカテゴリーは以下の通りである：

- ・ 地震
- ・ 断層
- ・ 火山活動（岩脈貫入）

第2次取りまとめで示される「変動シナリオ」を、ここでは「弱い」摂動（バリアやバリア機能の喪失がない場合のバリアの諸性質の変化）と「強い」摂動（バリアの諸性質の変化並びにバリアやバリア機能の喪失）との対比から規定する。その目的は、起こり得る「強い」摂動を概念化し、関連する未解決の問題を確認し、それらをどのように規定すればよいかということについて提案することである。提案は概して次の二つのカテゴリーに分けられる：

- ・ 「強い」摂動によって生ずる限界的な状況のモデル化（解析上の取り扱い方針も含む）
- ・ 適切なデータの収集 / より優れた評価モデルの開発

生物圏への直接放出ケース（接近シナリオ）のモデル化は、その性質上、岩脈貫入ケースとして検討されている。

4.2 シナリオの発端となる FEP：「弱い」摂動と「強い」摂動

「弱い」摂動、「強い」摂動とは何を意味するものか？本章においては、（人工・天然の両バリアを含む）処分場システムの特質を（徐々にまたは即時に）変化させ、バリア機能を（徐々にまたは即時に）低下させ得るが、バリアの幾何形状には変化をもたらさないような外的事象を「弱い」摂動、一方、バリアの特性を（徐々にまたは即時に）変化させ、一つ以上のバリア機能を喪失させ、バリアの幾何形状を変化・喪失させるような外的事象を「強い」摂動と考えることによって、便宜的に区別することを推奨する。表3はこれらを簡単なマトリクスで整理したものである。

表3 第2次取りまとめ変動シナリオの発端となる事象の強弱対比表

発端となる事象	バリア特性	バリア機能	バリアの幾何形状
「弱い」摂動	(徐々の、あるいは即時の)変化	(徐々の、あるいは即時の)変化	変化なし
「強い」摂動	(徐々の、あるいは即時の)変化	(徐々の、あるいは即時の)変化 / 喪失	(徐々の、あるいは即時の)変化 / 喪失

「基本ケースモデル」(地質学的環境が安定し、現在の状況と変わらないとき)はシナリオ解析の論理的な起点となるものであり、「基本ケースモデル」の性能と特質は、定義としては、安定かつ不変な状況(この「状況」はバリア特性、バリア機能、バリアの幾何形状を意味する)のモデル化を目的としている。そのような簡単な性能や特質は、「基本シナリオ」の計算には有効であるが、定義によって状況変化を想定するような複雑なシナリオ解析に同じコード/モデルが用いられる場合には限界をきたすものとなり得る。

例えば、第2次取りまとめの解析に用いられた人工バリアシステム(EBS)の優秀なモデル/コードである MESHNOTE は、一定の境界条件の下に一定数のバリア領域において一定一様な諸性質を持つとともに、固定円筒座標系のバリア・インターフェイスに基づいている。シナリオの影響を計算するために MESHNOTE を利用できるようにいくつかの便宜的な「近似」が考案された。例えば、MESHNOTE の計算設備では、それぞれで定義されたバリア領域ごとに別個の特性(もしくは境界条件)を与えて連結させた。もう一つの「近似」として、緩衝材を二つ(もしくはそれ以上)の領域にさらに分割した。

しかしながら、これらの便宜的な「近似」は、バリア特性に変化を与える(けれどもバリア機能や幾何形状の喪失を伴わないような)比較的弱い摂動を評価するにとどまるものである。更に、基本ケースモデルを用いることによってできるのは、考えられるシナリオに基づいて生ずる全てのバリア特性の変化(即時的変化、一時的変化、周期的変化、など)を近似することだけである。

更に、いくつかの異なるコード/概念的モデルがニアフィールド(MESHNOTE など)とファーフィールド(MATRICES など)に用いられるため、これらのコードのインターフェイスに適切な境界条件を適合させることが常に懸念されている。

まとめとしては、「基本シナリオ」の安全評価モデルとコードは、第2次取りまとめで定義されたように、ある限られた「変動シナリオ」を近似的に取り扱うために便宜的に用いることができる。これらを本章では、時間の経過に従ってバリア特性に変化を示すが、バリア機能やバリアの幾何形状の喪失につながるような強い摂動ではない、弱い摂動として類別する。次節では、強い摂動がどのようにモデル化され得るかについて概念的に検討することにする。

4.3 地震シナリオ

第2次取りまとめは、日本全土に頻発し、実質上遍在すると考えられている地震現象(地震など)から起こり得る摂動について検討している。これら潜在的摂動は、地質学的環境(母岩、水理場、地球化学など)への影響もしくは人工バリアシステム(EBS)への影響に区分される。

4.3.1 地質学的環境に与える影響

地震が処分場の地質学的環境に与え得る4つの基本的影響は以下の通りである。

- ・ 地盤の揺れと加速
- ・ 地下水化学
- ・ 地下水流
- ・ 母岩の歪

このような地震から起こり得る影響のうち最初の3つについては、結果として起こる摂動の規模が小さく、持続時間も少ないことから考慮不要である。母岩の歪については、処分場性能に関連する影響はおそらく、母岩における亀裂の増大によって起こる透水係数の増加によるものだろう。第2次取りまとめでは、地震事象を母岩の歪に関連させ、そのような蓄積歪を母岩亀裂及び/もしくは母岩の透水係数に変換するために必要な定量的モデルをまだ持っていない。この意味においては、地震による歪の影響は実際は、小規模な(おそらく地域的な)母岩の亀裂生成が透水係数の緩慢な連続的变化をもたらすという「断層」シナリオのサブ・カテゴリーである。このような変化は、母岩の機能もしくは幾何形状を失うことなく、母岩の特性(透水係数/透水性)だけが変化すると考えられるので、「弱い」摂動と言えるだろう。

4.3.2 人工バリアシステムに与える影響

第2次取りまとめの証拠は例えば、模擬地震事象によって最初に緩衝材内の空隙水圧が増加することについて示している。地盤の揺れに対する廃棄体容器の向きの影響、複数の地震事象から生ずる歪の拡大効果や蓄積、飽和ベントナイトに関する適切な構成要素モデル、（液体が排出したとき、または、排出していないときの）母岩の典型的な境界条件、非線形の応力歪特性のモデル化など、この摂動の規模に関する未解決の問題は今だに重要性を保ち続けている。

これらの問題が未解決であるため、一定の地震事象が飽和緩衝材内に過剰な空隙水圧を与えるというシナリオについて検討すべきであることを提案したい。そのような事象に基づく潜在的影響のうち主要なものを図6で概念的に示した。図6aに示すように、シナリオは、一つの（もしくは再発した）地震事象から始まる。

もし空隙水圧が静岩力と母岩の張力の和を一瞬でも上回ると、母岩に水圧による亀裂が生じ、この新しい亀裂に沿って飽和緩衝材の一部が流出することが予想される（図6b参照）。母岩に対する「強い」摂動であることを証明する明白なデータがないので、図6bによって示されている状況は、第2次取りまとめの安全評価にあるような実在する概念的な計算コードによって評価することができる「弱い」摂動のケースであると考えられる。

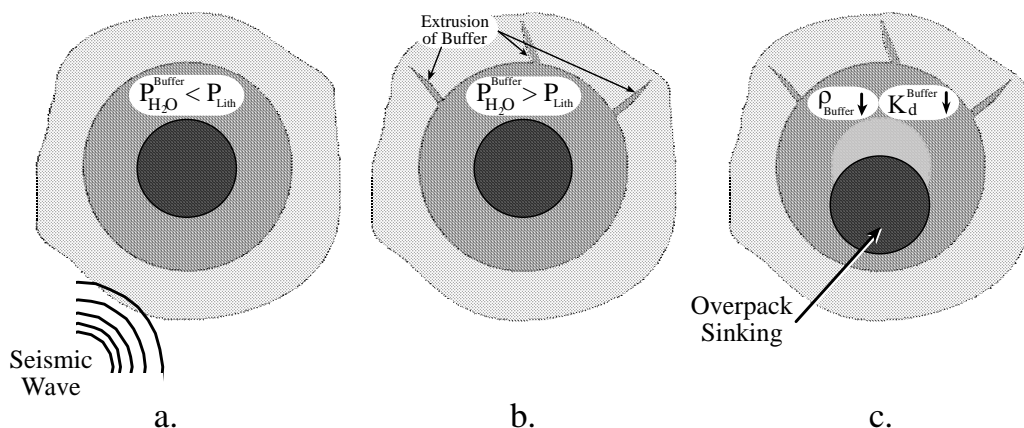


図6 地震シナリオとオーバーパック沈下の概念図

地震事象によって引き起こされる過剰な空隙水圧と亀裂から生ずる「強い」摂動（図6c）であり得るものの一つにオーバーパック沈下（第2次取りまとめ 分冊2 付録D.2（英語版））がある。オーバーパック沈下は緩衝材の密度が低下（その結果、比較的重量があるHLW廃棄体による負荷を支える力学的「耐性」能力

も低下)することによって促進されると考えられる。第2次取りまとめによると、処分場の高圧状態で起こるベントナイトと砂から成る圧密混成物のレオロジー的特性に関して実際適用できる法則はまだ確立されていない。ベントナイト緩衝材の負荷(母岩と緩衝材の間の流体の境界条件(液体が排水しているか/液体が閉じ込められているか)の性質)の反応の仕方によっては、緩衝材密度の低下がオーバーパック沈下のきっかけとなるかもしれない。

(地震事象あるいは自然現象にかかわらず)オーバーパック沈下は、1)ソースターム・モデルに用いられる円筒型幾何形状を喪失する結果となる 2)オーバーパックが母岩と直接接触した場合には緩衝材の機能(放射性核種吸着、コロイドフィルトレーションなど)の喪失につながる、と考えられる。

オーバーパック沈下が安全性に重大な影響を及ぼすかどうか評価するためには、オーバーパックが最終的に埋設地点のボアホールもしくはドリフトの底に落ち着くという限界的な状況(図6c)をモデル化するべきである。この時点では、母岩の内部にHLW廃棄体からの直接的な移流による放出経路があり、重要な緩衝材機能(放射性核種吸着、コロイドフィルトレーションなど)は失われてしまっている。この直接経路に加えて、移動したオーバーパックを包囲する埋設地点のボアホール/ドリフト内に残った緩衝材を通して少しずつ拡散する放出経路も残されている。この非対称な幾何形状の二つの経路を結合するには、コンパートメント・モデルを用いるのがよいと考えられる(図7参照)。

オーバーパック沈下の結果が重大な影響を持つと示唆するものと仮定すると、技術やモデル化についての一連の未解決の問題は、地震現象が緩衝材に過剰な圧力を与え流出させるかどうか、もしそうならそれはどのようにして起こるのか、またこの流出がオーバーパック沈下の沈下速度と規模にどのような経時的影響を与え得るかということを理解することによって考えることができる。これらの問題には以下のものが含まれる:

- ・ 単一のもしくは複数の水理的亀裂事象は繰り返し起こる地震事象から予測できるか?
- ・ 水理的亀裂と生じた亀裂に沿って生ずる緩衝材の流出の範囲、速度、規模はどのくらいか?
- ・ 流出した緩衝材の潜在的喪失によって生ずる緩衝材特性(密度、 K_d 、負荷

耐性)の経時的変化とはどのようなものか？

- ・ 地震事象による緩衝材の空隙水圧の上昇は、他にも影響 (HLW 廃棄体の分解、隣接する廃棄体への圧力/応力の伝播) を及ぼすことがあるか？
- ・ 流出した緩衝材は吸着した放射性核種の優先的な放出経路にもなり得るか？
- ・ オーバーパック沈下は廃棄体の垂直もしくは水平方向の位置について大きな問題となるか？
- ・ 緩衝材の関連するレオロジー・モデル及び緩衝材と母岩の間の流体境界条件を考慮するとして、オーバーパックはどの程度の速さでどの深さまで沈むか？

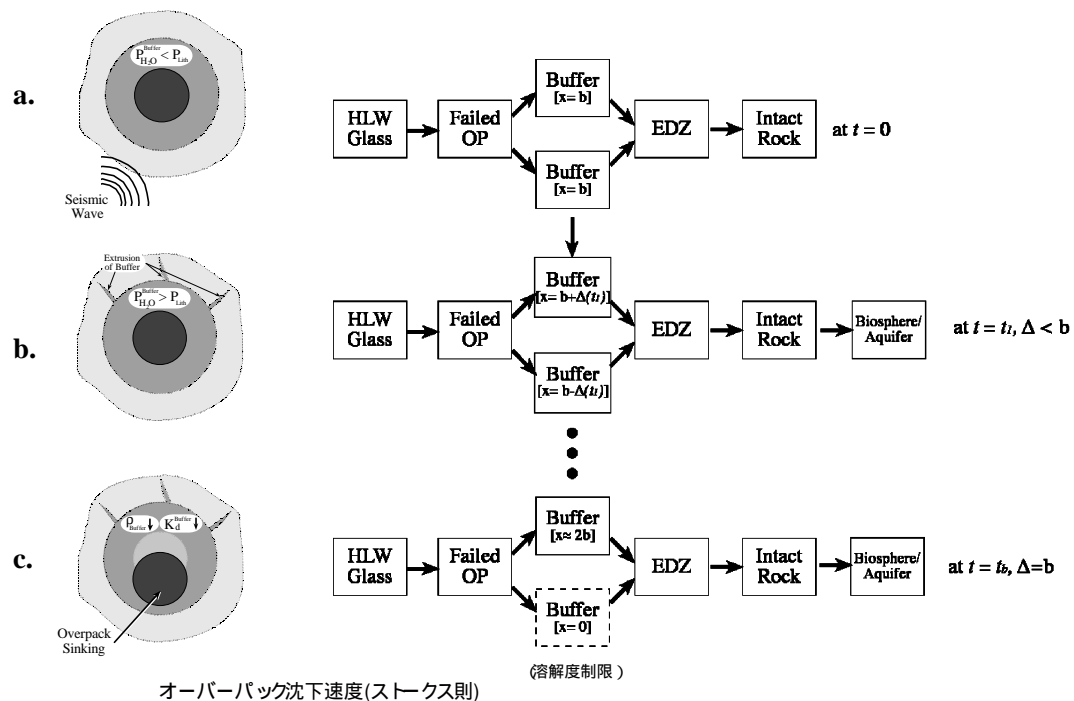


図1 埋設孔内の緩衝材の流出とオーバーパック沈下につながる地震シナリオを示すコンパートメントの段階的進行

「緩衝材」コンパートメントの特性はどちらも継続的に変化し続け、オーバーパックが埋設孔の底に接する時 (t_b) まで止まらない。そのとき下位の「緩衝材」コンパートメントを放出量計算に考慮することはもはやない。また「生物圏」コンパートメントは省略した。それは $t=0$ では処分場から生物圏への放射性核種放出はありえないので、無用な利害関係者の動揺を避けるという単純な理由によるものである。

4.4 断層シナリオ

断層活動は第2次取りまとめ（総論、5.6.3項）では明確に変動シナリオであると評価されていない。母岩の不連続性についての基本的概念と定義は「断層シナリオ」の論議には欠かせない。図8は、Pusch and Hökmark, 1992⁽⁷⁾に基づく次のような有用な定義付きの図案を示している。

- ・ 亀裂 / 節理：（fractures/joints）（4次の断裂）は互いに平行なユニットで形成された母岩の切れ目で、自己の岩面に生じた（溝が掘られた）切れ目が大概 2-7 m 間隔を伴って比較的短く（<10 m）広がったもので、（肉眼で）最もよく観察される構造的特徴である。
- ・ 亀裂帯：（fracture zones）（2次 - 3次の断裂）は短い間隔で並ぶ互いに連結した裂け目で、概して地質構造の圧力により生じ、50-150 m オーダーの間隔で幅 1-10 m に及ぶものと定義される。
- ・ 剪断帯：（shear zones）（1次 - 2次の断裂）とは母岩が強烈に粉砕して大規模な剪断が起こった結果であり、数キロメートルにも及ぶことがある。幅と間隔は亀裂帯と同程度である。

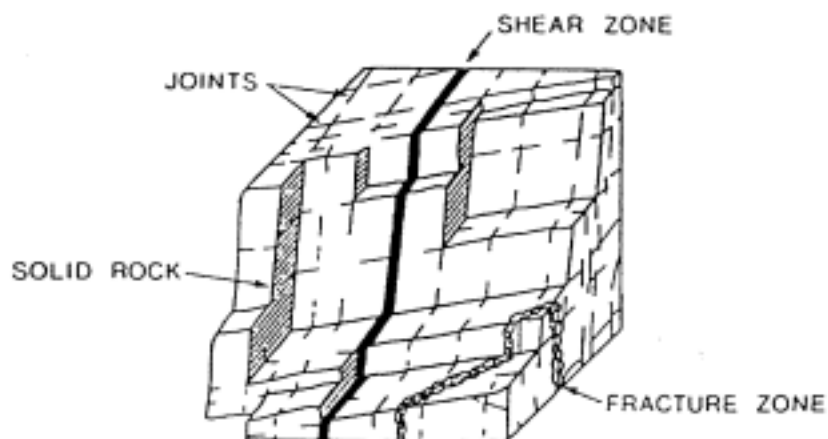


図8 亀裂性母岩の不連続に関する定義（Pusch and Hökmark, 1992⁽⁷⁾より）

「断層シナリオ」は、おそらく4次の亀裂 / 節理が3次の亀裂帯への再活性化あるいは転化したものか、もしくは3次の断裂を4次（かそれ以下）の断裂と誤認識した結果のいずれかであると想像できる。

4.4.1 地質学的環境に与える影響

第2次取りまとめの「基本シナリオ」は、人工バリアシステムと実在する主要

な水みち特性（即ち断層破碎帯）との間に 100m 長の経路があって、放出された放射性核種を上層の帯水層へ迅速に垂直移動させると想定している。よって、新しく出現した大きな断層（亀裂帯）は、人工バリアシステムから帯水層へ垂直に移動する間の経路長が短縮化したものと簡略に概念化される。

人工バリアシステムの突端や主要な水みち特性から見て、次にどこで断層が生じ得るかをどうやって同定するかが今後より重要な問題となると考えられる。この問題に唯一明白な答えはない。

しかし、重要なのは、母岩における大規模な断層は重大な問題か？ということである。重要ではないと答えるいくつかの理由がある。まず、前述したように、今後起こり得る母岩における断層は、既存の安全評価モデルによってわずかな近似を用いて簡単に対処することができるので「弱い」摂動とみなすことができる。次に、第2次取りまとめの人工バリアシステムと似た設計に対して Nagra によって計算された以前の「ロバスト・シナリオ」によると、処分場システムの天然バリアの部分がなくても許容範囲程度の低レベルの放出率が達成できるということである。3番目として、処分場のレイアウト（第2次取りまとめ総論、5.6.1項）を具体的に考慮することも、母岩内の新たな断層の位置にかかわらず、広範囲に分布した複数の廃棄体から放出される放射性核種に与え得る影響を減らすのに効果的である。4番目として、シナリオというのは今後起こり得る事象や状況の例示であり、そのような事象の発生時期や場所、規模に関する便宜的な同定については確実なものとする事はできない。かわりに、いろいろな想定を用いた様々なシナリオ計算ケースを実行することによって、処分場性能の全体的な頑健性を確立することは可能である。

4.4.2 人工バリアシステムに与える影響

新たな断層の生成（または古い断層の再活性化）は、断層に沿って生じた累積的変位（図 9a）次第では、人工バリアシステムに対する「強い」摂動を示し得る。剪断による数ミリメートル単位の変位では、緩衝材もしくはオーバーパックの健全性（と、結果的に機能）を物理的に崩壊させるのには不十分である（図 9b）が、10 cm 以上の断層の変位（図 9c）では、緩衝材とおそらく長寿命（寿命 1000 年以上）のオーバーパックの健全性と機能を喪失させることだろう。

中程度の変位 (10 mm 以下、図 9b 参照) については、主要な摂動により、HLW ガラス固化体から母岩へ放射性核種が移行するときの、緩衝材内の拡散する経路長が短縮されると思われる。この「弱い」摂動は既存のソースターム・コードとモデルを用いて容易に近似できると思うが、重要な問題は変位が累積的なものかあるいは単発の事象であるかということである。

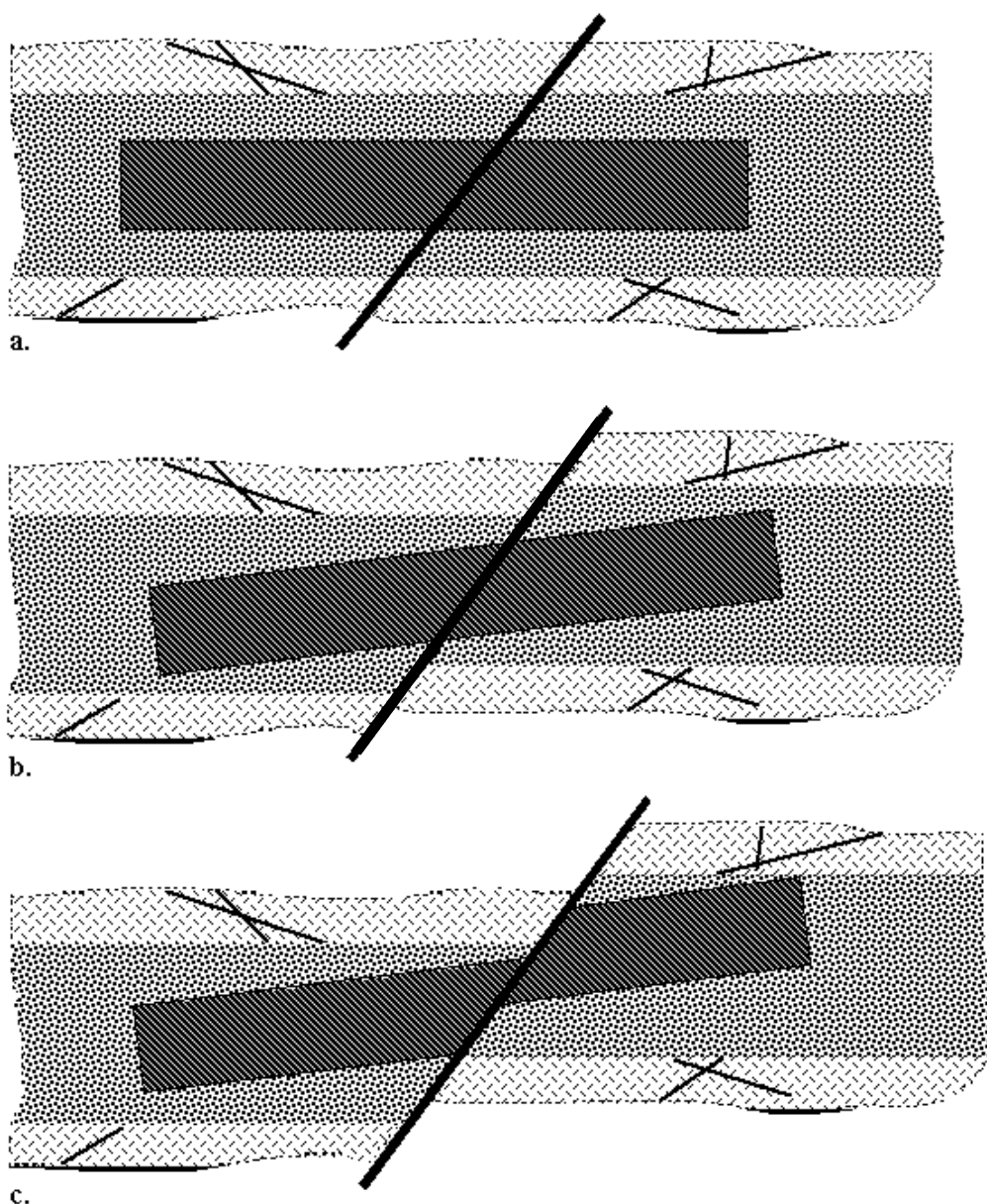


図9 ニアフィールドにおける断層シナリオの図式化

a. 全く変位がないとき b. 中程度の変位があるとき c. 多大な変位があるとき

断層に関する限界的ケース（10 cm 以上の変位、図 9c 参照）は、バリア機能と幾何形状の喪失に付随して、閉じ込められた緩衝材バリア（とおそらく長寿命オーバーパック）の断裂につながると推定される。その結果廃棄体は、拡散バリアを介在せずに母岩 / 掘削影響領域と隣接することとなる。更に、廃棄体と処分場の上層部分（上層帯水層システム）の間を直接つなぐ放出経路を生成し得る高透水性の断層（新しい、あるいは再活性化した亀裂帯）も存在することも考えられる。同じ断層が、近隣にはあるが物理的には崩壊していない廃棄体からの放射性核種の迅速な放出経路として作用することもあり得る。

地震事象 / オーバーパック沈下シナリオと同様、コンパートメント・モデルはそのような断層によって崩壊した人工バリアシステムの複雑で非対称の幾何形状を評価するのに適している（図 10 参照）。物理的に崩壊した廃棄体と、近隣には

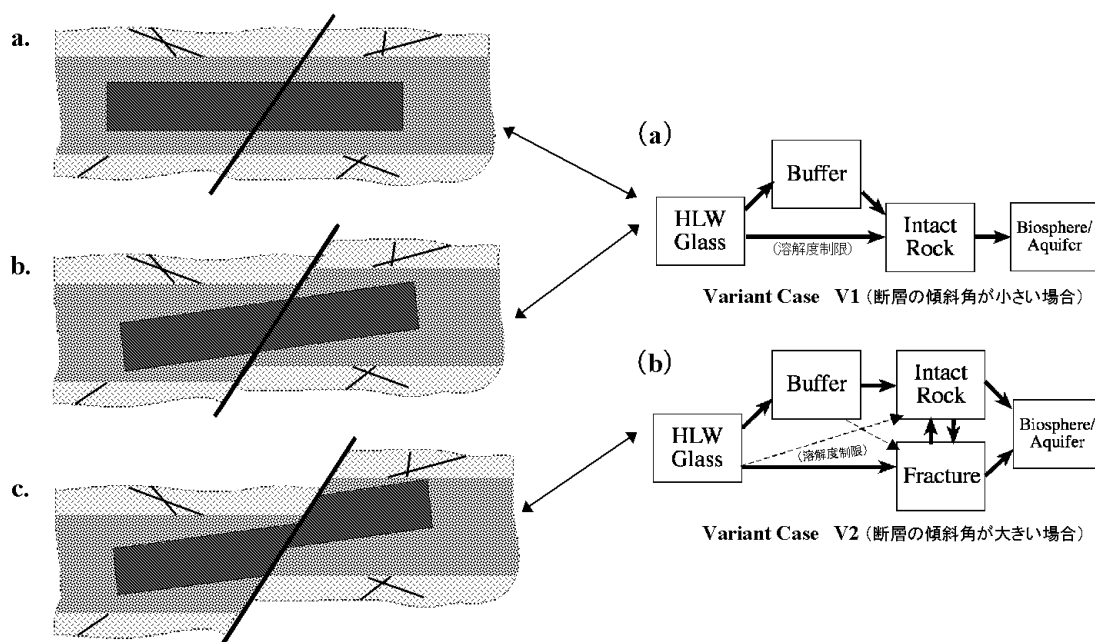


図1 断層による緩衝材の部分的喪失と母岩への直接放出を表わす

一般化コンパートメントモデル

二つの変動が示されている：変動ケース V1 は（例えば軟岩が自己密封したため）断層による母岩への影響がなく緩衝材の喪失のみがあった場合を、変動ケース V2 は緩衝材の喪失があった上に新たな断層が人工バリアシステムから生物圏まで広がった場合を示している。その他の変動ケースもまた考えられる。明確化のためオプションの「破損オーバーパック」と「掘削影響領域」のコンパートメントは省略した。なお、一般には点線矢印で示される経路も考えられる。

あるが崩壊していない廃棄体の双方にとっての迅速な放出経路は同時にモデル化することが可能であり、また結果を適合することもできる。この限界的な断層シナリオをモデル化する際最も難しいのはモデルそのものではなく、新たな亀裂帯に適用するための適切なデータを収集することである。

4.5 岩脈貫入シナリオ

岩脈貫入変動ケースを含む火山活動シナリオは、第2次取りまとめ（総論、5.6節）において計算されることはなかった。岩脈とは、通常、既存の亀裂や断層または脆弱な水平面に沿って、冷えた母岩に貫入したマグマによって形成されるほぼ垂直の薄板のことである。マグマは母岩の同じ部分に繰り返し貫入するかもしれない。このような継続的貫入シナリオでは、マグマは過去の貫入によって凝固したマグマと岩壁との隙間に貫入することが多い。継続的貫入の別のケースでは、岩脈は地表まで張り出し、マグマの噴出経路を形成する。これらのケースにおいては、母岩に生ずる摂動は単発の貫入の場合と比べてより強く、より長期間に亘るものになるだろう。

高レベル放射性廃棄物処分場の近くで起こった岩脈貫入は、それが単発的でも継続的でも、結果として生ずる摂動が処分場の温度と流れ、力学的・地球化学的条件を変えると予想されるので、処分された放射性廃棄物の長期的隔離に影響を及ぼすかもしれない。非常に稀だがより重大な状況においては、貫入した岩脈と直接ぶつかってしまう廃棄体もあるだろう。処分場の潜在的な性能評価の観点からは、最終的に岩脈貫入シナリオを潜在的な変動シナリオ（と、おそらく「接近シナリオ」）に含める必要が出てくるだろう。

4.5.1 地質学的環境に与える影響

岩脈貫入によって母岩に生ずる摂動は以下のように分類される：

熱 水理的：まず、高速・高温で移動するマグマが近隣の母岩に熱を与える。急激な温度上昇が空隙水圧を高め、局所的な地下水流速が増加する。冷却後は凝固した岩脈が不透水性となるため、局所的な流れ場が歪められる。

力学的：本来高温ではない母岩が加圧、加熱されることで、以下のような力学的影響が生ずる。：

- ・ 新たな亀裂 / 節理の形成
- ・ 空隙率と透水性の変化
- ・ 熱的応力と加圧による既存の亀裂の変形、変位、復活

力学的変化はさらに流れ場に影響を与える。

化学的：岩脈貫入が地下水化学に与える影響について二つ考えられる。第一の影響は岩脈（あるいは他のマグマ性物体）に由来し得る熱水が直接加わることである。第二の影響は温度上昇による速度定数と鉱水の平衡定数の変化である。これらのプロセスは互いに排他的ではなく、両者結合して地下水組成に影響を与えることも考えられる。

以前の解析では、単発的または継続的岩脈貫入(MRI, 1998)⁽⁴⁾に関するシステムの熱 - 水理学的連成プロセスの研究が行われた。

4.5.2 人工バリアシステムに与える影響

以前のシナリオ解析と計算プロジェクト(MRI, 1999)⁽⁵⁾では、処分場に岩脈が貫入したときの放射性核種の放出への間接的な影響について研究され、モデル化された。「間接的影響」とは、岩脈との直接的衝突はないが、近隣の岩脈によって摂動が引き起こされるときに廃棄体が受ける影響と定義される。解析は、放射性核種の生物圏への放出率を調べるため、MRI, 1998⁽⁴⁾から得た研究結果（速度増加に関する時空間の分布）を用いて行われている。

対照的に、「直接的影響」とは、この項で述べる通り、岩脈が数個の廃棄体に直接衝突したときに起こる影響と定義される。以前のプロジェクトではこの影響についての研究はされていない。「直接的影響」は「間接的影響」と比べてより重大な影響を処分場システムに与えると考えられる。

まず、図 11a に示されている通り、緩衝材が不透水性であり、また、溶けにくい鉱物性の相を持っているので、最初はマグマは亀裂を埋めながら、掘削影響領域の一部に沿って横向きに流れると考えられる。その後、マグマ源の状況（速度、圧力、頻度、再注入量など）によって、マグマはそれより高く上昇するのをやめて凝固（「静止」）し、徐々に熱を失って行くだろう。ひとたび凝固すると、結晶化したマグマと緩衝材は廃棄体内の水流を阻害する不透水性のバリアを形成し、人工バリアシステムの一部から母岩への放射性核種放出を一時的に「封鎖」する

と考えられる。長期的には、結晶化した岩脈が脆く、亀裂を生じやすいことから、水流に対する不透水性が失われるだろう。

一方、図 11b に示したように、マグマが新旧の亀裂性母岩領域を貫いて上昇し続ける場合もある。母岩とマグマの特性（応力場、密度差、マグマ注入の頻度と量など）によっては、マグマが最終的に地表まで到達し、一定期間噴出することもあり得る。岩脈の注入と噴出が数十年から数百年にまで亘って持続し、MRI, 1999⁽⁵⁾において既に記述されたように、母岩の流れに対して起こり得るより長期間の摂動をもたらすことも考えられる。

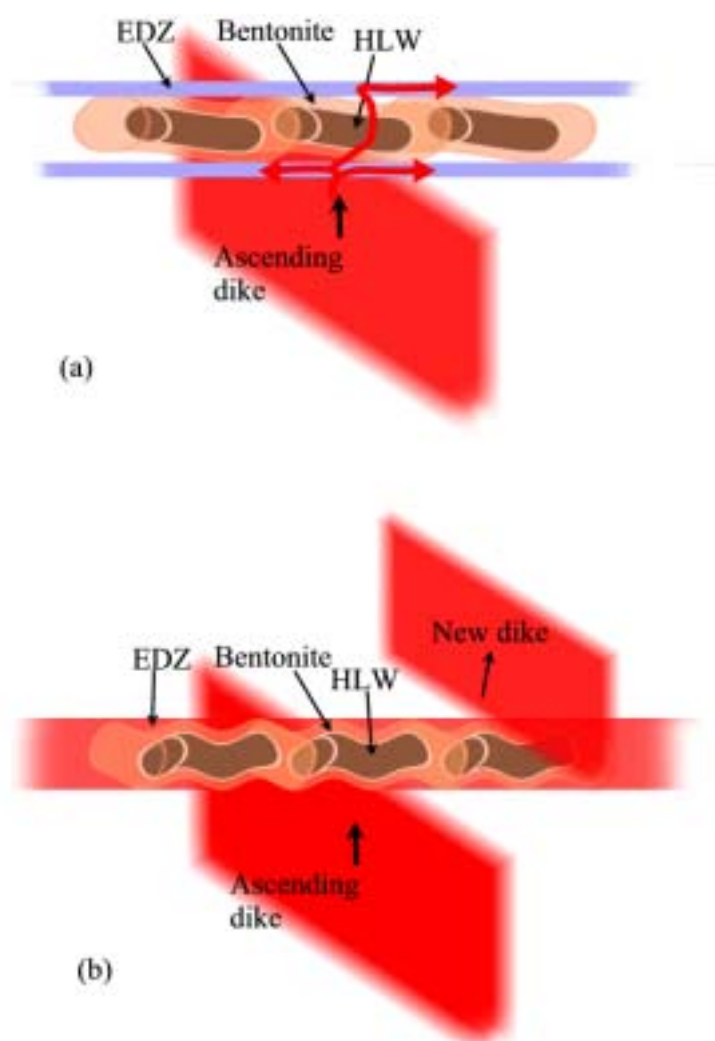


図 11 薄板状の岩脈に沿って上昇するマグマについて考えられるある展開：

- a. マグマが人工バリアシステムに生じた亀裂に沿って広がる。
- b. その後、マグマと溶けたガラス固化体とベントナイトとの混合物質が新たに形成された岩脈に沿って上昇し続ける。

そのような垂直なパイプを通して新しいマグマが継続的に流れると、ニアフィールドの温度が接近するマグマの温度（一般的な玄武岩マグマで~1100℃）と同程度まで引き上げられることもあり得る。ニアフィールドが加熱され、温度が上昇し続ける状況のもとでは、人工バリアシステムに対して一連の摂動が生ずることが予想される。温度 200℃ 台では、ベントナイト緩衝材のスメクタイト成分などの含水層から水分が蒸発し、多数の雲母状の相を形成する。こうして緩衝材の膨潤能力と可塑性が失われると考えられる。約 600-700℃ では不変だったホウケイ酸ガラス廃棄体の一部が溶け始める。深さ 500-1000 m に位置する処分場の飽和状態においては、「花崗岩」の 3 成分系位相図にも見られる通り、緩衝材の部分的熔融が 800-900℃ で始まる。これらのコテクチック熔融は溶けたホウケイ酸ガラス固化体（と含有する放射性核種）と融合し、そしておそらく上昇する岩脈マグマと混合し、溶岩流か火山灰プルームのいずれかとなって地表に噴出するだろう。耐火性で熔融されない人工バリアシステム構成物質の一部もまた上昇するマグマとともに移行することがあるかもしれないが、そのような物質が放射線学的影響をもたらす可能性は低い。

限界的ケースとして、緩衝材と母岩の局所的な応力状態や対照的な透水性とレオロジー特性によっては、急速に貫入した岩脈が人工バリアシステムの一部を物理的に破壊することもあり得る。HLW ガラス固化体と緩衝材を含む人工バリアシステムを構成する物質のある量が、わずかに熔融しただけでも持ち上げられて直接地表に噴出することも考えられる（図 12 参照）。そのように溶け出していない（もしくは部分的に溶け出したにすぎない）放射性核種含有物質が溶岩流と一体化するかまたは火山灰として噴出することもあるだろう。

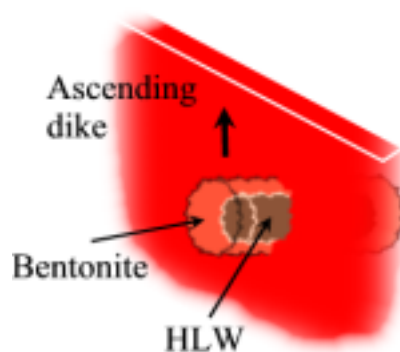


図12 薄板状の岩脈に沿って上昇するマグマについて考えられる別の展開：
マグマがベントナイト緩衝材を打ち破り、ガラス固化体を溶かし、地表に熔融物質を運搬する。

以上より、岩脈貫入シナリオに対するコンパートメント・モデル化の概念を図13に示す。

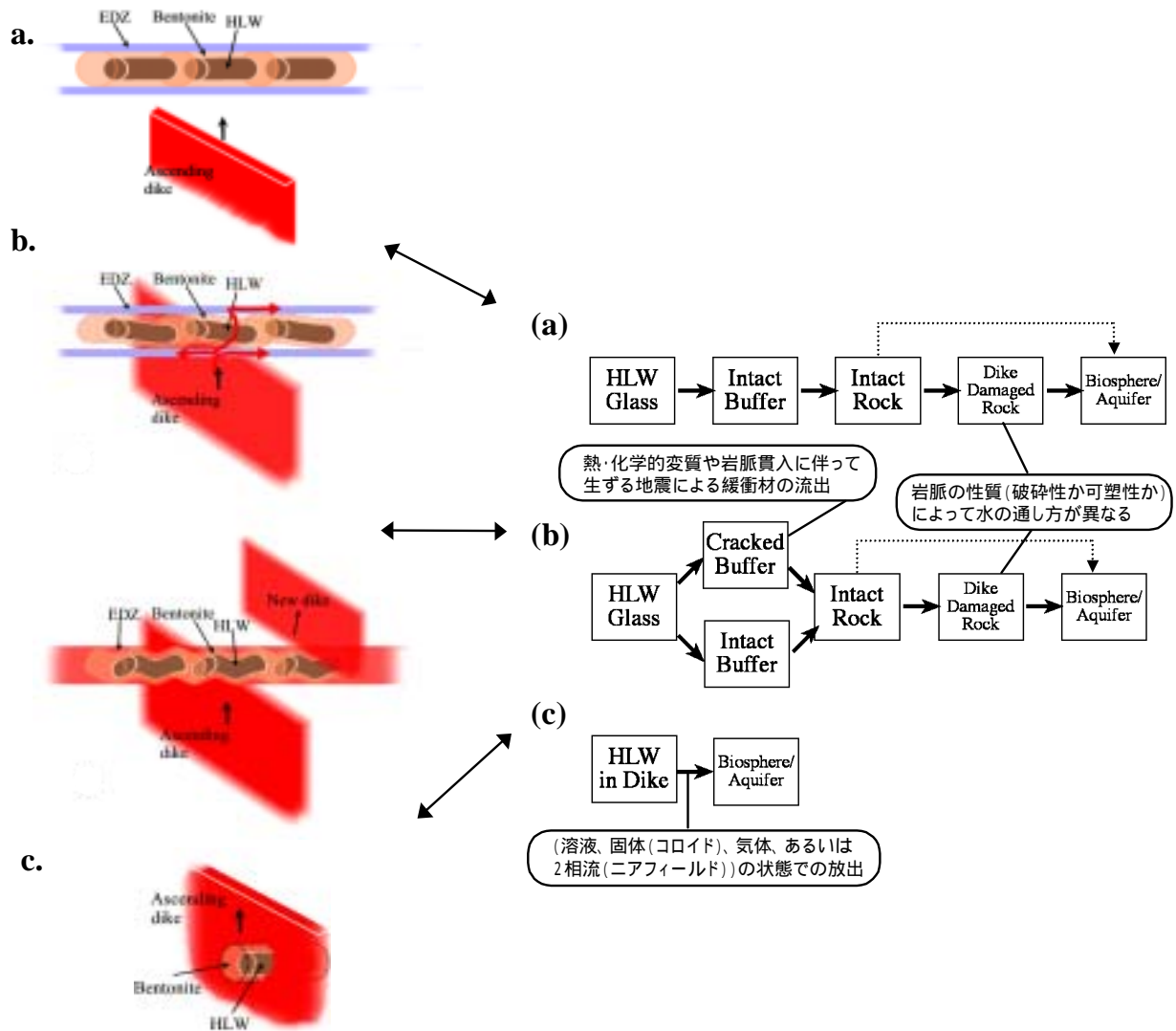


図13 3種類の二次的変動の可能性が考えられる岩脈貫入シナリオ

- (a) 「岩脈によって損傷した母岩」コンパートメントだけを伴う「弱い」摂動を受ける廃棄体
 - (b) 「ひび割れ(石化)した緩衝材」と「岩脈によって損傷した母岩」コンパートメントを伴う「強い」摂動を受ける廃棄体、そして、
 - (c) 岩脈にHLW放射性核種が混入し地表で侵食される
- (注) 一般には点線矢印で示される経路も考えられる。

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整理

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 データが整理された。

(2) シナリオ解析システムの検討

ChEng 法に基づいてシナリオ解析システムのあり方について検討を行うことを目的とし、処分システムの物理的コンポーネント及び FEP の物理化学的特性に関する本概念の特徴を監査・レビューした。その結果、EBS の FEP 間の相互関係に必要な情報源が整理され、第 2 次取りまとめに基づく処分場の物理化学的特性間の相関マトリクス (RES 形式) が試作された。また、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プロセスについての考察を行い、今後の課題が明瞭化された。

(3) 変動シナリオに関する解析技術の検討

第 2 次取りまとめで論じられた変動シナリオ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、特に緊急性の高い課題である地震・断層及び火成活動 (岩脈貫入) に関する「強い」摂動 (バリアの諸性質の変化並びにバリアやバリア機能の喪失) ケースを取り扱うための解析概念として概念モデルを検討し、コンパートメント・モデルの適用性や詳細プロセスのモデル化の必要性が提示された。

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として以下の点が指摘された。

(必要に応じシナリオ解析プロセスにも配慮した) FEP リストのより体系的な整理

シナリオ解析プロセスの具体的検討・試行とルーチン化

シナリオ解析の透明性、追跡性を高めるための ChEng 法関連の全情報の同定、グラフ化及び文書化

変動シナリオ解析概念に適合したモデル化概念の詳細検討とデータの収集

参 考 文 献

- (1) F. Harary, R.Z. Norman and D. Cartwright : Structural Models : An Introduction to the Theory of Directed Graphs, Wiley, New York (1965).
- (2) JNC : “ 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 2 地層処分の工学技術 ” , JNC TN1400 99-022 (1999) .
- (3) JNC : “ 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).
- (4) MRI : “ 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 ZJ1222 98-003 (1998).
- (5) MRI : “ 地層処分システム隔離性能に対する天然事象影響の定量化() ” , JNC TJ1400 99-046 (1999).
- (6) Nagra : “ Kristallin- , Safety Assessment Report ” , Nagra Technical Report NTB 93-22 (1994).
- (7) R. Pusch and H. Hökmark : “ Characterization of near-field rock : A basis for comparison of repository concepts ” , SKB Technical Report 92-06, Stockholm, Sweden (1992).
- (8) SKB : “ SR97-Identification and structuring of process ” , SKB Technical Report TR-99-20 (1999) .
- (9) C.F. Tsang Ed. : Coupled Processes Associated with Nuclear Waste Repositories, Academic Press, Inc. (1987).