

地層処分の性能評価手法の 高度化に関する研究

研究概要

(核燃料サイクル開発機構 研究委託内容報告書)

2001年3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, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan

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

2001

地層処分の性能評価手法の高度化に関する研究

大久保博生*

要 旨

国の評価において示される今後の地層処分研究に関する課題について、性能評価の研究開発に係わる課題を整理した。また、専門家への質疑応答形式の調査を実施し、そこで得られた意見・考え等をもとに、今後注力すべき課題の抽出を行うとともに、それら課題に関する研究開発の将来的な方向性と見通しを整理した。

次に、評価モデル及び評価手法の将来的な高度化の方向性を整理するため、

- ① シナリオ安全解析の品質保証を目的とするデータベースシステム (QUASAR) の検討・開発
- ② 火成活動シナリオ変動ケース (マグマ貫入) を例として SCENIC アプリケーションコードを用いた FEP ベースのプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) 情報文書化システムの検討・開発
- ③ 様々な地震・断層シナリオ変動ケースに対してコンパートメントモデルを用いた“変動ケース適応型アプローチ (VO) 法” の検討・提言
- ④ 「複雑系」の考え方の性能評価への反映可能性に関する調査・検討を実施した。

以上の最新の研究情報を踏えた多角的な検討により、性能評価研究開発の将来的な方向性が提示されるとともに、性能評価モデル・手法についての課題と将来的な高度化の方向性が明示された。

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の委託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

Study on the Advanced Performance Assessment Methods for Geological Disposal

Hiroo Ohkubo*

Abstract

With regard to future research on geological disposal indicated in the government's evaluation, the problems concerning R&D on performance assessment (PA) have been classified. Furthermore, a study has been conducted in the form of a questionnaire for the experts. Based on these opinions, those issues to be focused on in future research have been picked out and the future direction for R&D on these problems has also been discussed.

Secondly to make clear what the future direction should be for advanced assessment model and techniques, ① a database system (QUASAR) designed to assure the quality of the scenario safety analysis, ② a documentation system for FEP-based Process Influence Diagram (PID) information using the SCENIC application as an example of the volcanism variant, ③ "Variant-Oriented (VO) approach" using a compartment model for various faulting variants, ④ the possibility of applying the "complex system" idea to PA, have been studied.

On the basis of the wide range of investigations in the light of the most recent research information, the future directions for R&D on PA have been proposed, with an indication of the future issues related to PA model and techniques and the future direction of sophistication of the PA methods.

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.

目 次

	頁
1. はじめに	1
2. 性能評価に係わる研究開発課題の検討	2
2.1 国の評価結果に基づく課題の整理	2
2.2 専門家の意見に基づく課題の整理	3
3. 処分場のシナリオ安全解析のための品質保証プログラム	
－QUASAR－の開発	7
3.1 序	7
3.2 QUASAR のフレームワーク	8
3.3 QUASAR の機能	10
3.3.1 以前のシナリオ解析に関する活動の検閲	10
3.3.2 新たなシナリオ解析情報の追加	11
3.3.3 パラメータの検閲	12
3.3.4 パラメータの更新	12
3.4 結論と将来の方向性	12
3.4.1 QA 基準と QUASAR 機能の向上及び修正	12
3.4.2 QUASAR データベースに格納されている情報の改良、 修正及び完結	13
4. シナリオ解析のための品質保証(QA)の文書化	
－火成活動シナリオ変動ケース(マグマ貫入)の場合－	15
4.1 序	15
4.2 ニアフィールドのプロセス・インフルエンス・ ダイヤグラム(PID)	15
4.3 RES 形式	16
4.4 シナリオ解析：火成活動シナリオ変動ケース(マグマ貫入)の例	16
4.5 SCENIC を用いた FEP ベースのシナリオ解析の文書化	17

4.6	QUASARの将来的方向性	19
5.	地震・断層シナリオの概念・アプローチ法の改良化	21
5.1	目的	21
5.2	母岩の相互作用	21
5.3	地震・断層シナリオの変動ケース	22
5.4	地震・断層シナリオ変動ケースのニアフィールドへの 影響のモデル化方法の高度化	24
5.4.1	変動ケース適応型アプローチ	24
5.4.2	コンパートメントモデル	25
5.4.3	まとめ	25
6.	複雑系の放射性廃棄物処分問題への適用性に関する研究	26
6.1	序	26
6.2	複雑系研究の概要	26
6.3	放射性廃棄物処分問題に関連する複雑系の適用事例調査	26
6.3.1	複雑系としての地層処分システム	27
6.3.2	放射性廃棄物処分システム安全性評価における不確実性解析	27
6.3.3	地層処分環境下での連成現象解析	28
6.3.4	天然現象の特性解析	29
6.3.5	亀裂性岩盤中の放射性核種移行現象の解析	30
6.4	複雑系の放射性廃棄物処分問題への適用可能性に関する考察	31
7.	おわりに	33
	参考文献	34

謝辞

図 目 次

	頁
図 3-1 QUASAR の情報関係構造	9
図 3-2 QUASAR プログラムにおける情報再生システムの階層構造	10
図 3-3 新しいシナリオ解析情報を含める QUASAR の構造	11
図 4-1 HLW 処分場のプロセス・システムの等価表現	16
図 4-2 “遠方でのマグマ溜りの貫入” という変動ケースに対する 集約された PID	17
図 4-3 SCENIC における FEP データ入力の例	18
図 4-4 SCENIC におけるインフルエンスデータ入力の例	18
図 5-1 母岩の力学的相互作用に関する RES マトリクス	21
図 5-2 影響を受ける処分場位置と可能な影響に基づく地震・断層シナ リオ変動ケースの突発的事象と長期的プロセスへの分類	23
図 5-3 処分場ニアフィールドに与えるシナリオ変動ケースの影響をモデ ル化する変動ケース適応型アプローチ (VO) 法の構成と展開	24

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構（以下、JNC）殿では、高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発に関わる中核機関として、自主及び他の国内外の研究機関の研究成果を集約し、地層処分の技術的信頼性を示すとともに 2000 年以降実施される処分予定地の選定ならびに安全基準の策定に対する技術的拠り所を与える「第 2 次取りまとめ」を行い、その報告書(JNC, 1999)⁽¹³⁾を作成し 1999 年 11 月に国に提出した。また、現在国による第 2 次取りまとめの評価結果が取りまとめられているところであり、その中で今後の地層処分研究に関する課題が示されることになる。

そのため、今後 JNC 殿が行う高レベル放射性廃棄物地層処分の性能評価に係わる研究開発においては、国の評価において示される課題に適切に対処し、評価モデル及び評価手法の高度化を適宜進めていくことが必要である。

そこで本研究では、最新の研究情報を踏まえた多角的な検討により、国の評価において示される主要な課題に応じた性能評価研究開発の将来的な方向性などを検討するとともに、第 2 次取りまとめで用いた評価モデル及び評価手法についての課題の整理と将来的な高度化の方向性を検討する。具体的には、まず、第 2 次取りまとめに関する課題の整理を、国の評価結果と専門家の知見に基づき実施する(第 2 章)。次に、シナリオ安全解析の品質保証を目的として、データベースシステムを検討・開発する(第 3 章)とともに、火成活動シナリオ変動ケース(マグマ貫入)を例に用いて、FEP ベースのプロセス・インフルエンス・ダイアグラムの情報を文書化するシステムを検討・開発する(第 4 章)。また、地震・断層シナリオの様々な変動ケースを取り扱うための概念モデルの高度化の検討を行う(第 5 章)。最後に、「複雑系」の考え方の性能評価への反映可能性に関する調査・検討を行う(第 6 章)。

2. 性能評価に係わる研究開発課題の検討

2.1. 国の評価結果に基づく課題の整理

第2次取りまとめに対する国の評価(AEC, 2000)⁽⁷⁾では、原子力バックエンド対策専門部会報告書で示している第2次取りまとめの個別目標に対応する研究領域毎に、研究成果の到達度が評価されており、また、その後の研究課題と進め方が提示されている。その中で、まず、JNC 殿自身が今後も検討が必要と認識している事項のいくつかをリスト・アップすると以下ようになる。

- ・ 核種の移行に対して十分な遅延効果（マトリクス拡散や吸着など）が期待できることの確認
- ・ 地下水移行が十分に低く制限できる水理学的状態（動水勾配や岩盤の透水性などに関して）であることの確認
- ・ 地下水と核種との化学的な反応に着目して、核種移行が十分に低く制限できる化学的状态にあることの確認
- ・ 深地層での空洞掘削等の影響が長期間の安全性へ及ぼす影響について、今後とも計測・観測を継続し、データの蓄積を図り、品質管理手法の整備を図ること
- ・ 長期間に亘って徐々に進む反応を考慮した速度論的な評価について、適用できる知見及びデータ自体が不十分であり、解析の信頼性が現時点では不十分であること
- ・ 10万年を超える長期に亘る安全評価の手法及び安全確保のあり方

次に、国が示した今後の研究開発の取り組みについて、以下にリスト・アップする。

- ・ 瑞浪市に計画している結晶質岩を対象とした超深地層研究所と北海道幌延町に計画申入れ中の堆積岩を対象とした深地層研究所（仮称）の施設の円滑な設置、及びこれらの施設を活用した深部地質環境特性に関するデータの蓄積
- ・ 研究開発の効率的な実施のための諸外国との積極的な国際協力の推進
- ・ 今後行われる処分地選定に当たり、各段階において、地層処分の工学技術及び地層処分システムの安全評価と関連付けた、地表から地下深部までの調

査の体系化を図ること

- ・ オーバーパックの腐食や緩衝材の変質に関する詳細な研究や溶接部の信頼性を確保するための検査技術についての検討の具体化
- ・ 処分孔の掘削、廃棄体や緩衝材の遠隔操作を含む搬送、定置作業などの実規模での実証及び建設・操業時の地下水や地層の力学的挙動等に関する計測・観測システムの構築
- ・ 安全評価に用いるデータの蓄積、発生しにくいシナリオを排除する根拠の明確化、確率論的な安全評価手法を用いたリスク評価の検討
- ・ 地質環境調査等で得られた各データ間の相関や入力値のばらつきの評価結果への影響等の詳細な検討、地層処分の各段階において実測値との比較による信頼性の確認及び実際の場所の特性を精度良く再現できるモデルの確立

2.2. 専門家の意見に基づく課題の整理

本研究では、第2次取りまとめが提出される以前から、最新の研究情報や成果の多角的な検討に基づき、少数名の専門家による性能評価に関する研究開発課題の検討・議論が進められてきている(MRI, 1999, 2000)⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾が、今回は、第2次取りまとめ以後の研究開発の課題並びに方向性に関する意見を調査票形式で収集・整理した。

まず、優先度が高いと考えられる問題点/課題等を整理・集約してリスト・アップすると次のようになる。(なお、これらの問題点や課題の反映段階・フェーズとして、比較的初期から候補地選定段階まで(概要及び精密調査地区選定段階まで)をA、サイト特性調査、処分場選定まで(最終処分施設建設地選定段階まで)をB、又、国の規制活動として基本的安全指針、安全審査基準までのフェーズをCとして、上述の各テーマ毎に付記した。)

① 性能評価の考え方・アプローチ法

- ・ 深層防護(Defense-in-Depth)の考え方の性能評価への導入(EX. 処分深度に対する地表からの擾乱の影響の定量化) [A]
- ・ 確率論的安全評価(リスク解析、シナリオの重み付け)の導入 [A]
- ・ 外乱的天然事象の発生場所の処分場からの距離に応じた影響評価 [A]

② モデル化手法

- ・ ミクロマクロ挙動の数学モデルの開発 (EX. 多重バリアの長期機能維持 (物質移行及び吸着、長期変質/変形) に関する量子力学、原子・分子統計力学を用いたモデル解析を含む) [A]
- ・ 不均一な亀裂分布のモデル化とその妥当性の検討 (力学と水理学の双方の観点から) [A]
- ・ 吸着分配係数のパラメータ依存性、及びマトリクス拡散を含めた移行モデルの機構解明とナチュラルアナログの両面からの実証 [B, C]

③ 計算技術

- ・ 精密なモデルに基づく大規模計算シミュレーション技法の開発 [A, B, C]

④ データ

- ・ 溶解度の実測 [A] と、塩水系地下水に対する溶解度の熱力学データベースの整備 [B, C]
- ・ 緩衝材やニアフィールドの長期的な特性/性能に関するデータの取得
- ・ 天然バリアの水理学的安定性の程度に関するデータの取得

⑤ 現象解明

- ・ 地球化学的環境の中でのガラス固化体の溶解挙動とそのベントナイトへの影響の解明 [B, C]
- ・ オーバー・パック/緩衝材系でのガス発生・挙動と、セメント、鉄腐食生成物等の影響の解明 [B, C]
- ・ 有機物や微生物の影響の解明 [A, B, C]
- ・ 岩盤中での核種の化学形態と易動性の解明 [A]
- ・ 圧縮ベントナイト中の核種移行の解明 [B, C]

⑥ その他

- ・ 大前提である地下の安定性、並びに人工バリア隔離性能の頑健性を論理的かつ情緒的に示すこと^(注) [A, B]

(注) 情緒的に示すとは、安全である指標が個々に異なるので、科学だけでなく人間を捉える学問で、どの様に示せばよいかを研究すること、を意味する。

次に、地震・断層活動、火成・火山活動などの天然現象の影響を回避するにはどのような方法・論理立てが考えられるか、に関する専門家の意見を集約・整理したものを以下にリスト・アップする。

① 回避するための方法・論理立て

- ・ 既存の断層は、精密な地震波探査（特に、反射法）による地質構造の精密な同定によって、回避可能である。処分坑道掘削段階で発見した断層は、その規模に応じて回避する手法とマニュアルの整備が肝要である。
- ・ 火山活動は、火山帯を回避することで説明可能である。
- ・ 地質学、地球物理学等の専門家の幅広い意見を反映すべきである。
- ・ 人工バリアのみで十分に機能するという方策を採用できるくらい十分な安定性の根拠を示した上で調査を進めることが必要である。

② 回避できないことを前提とした見解・論理立て

(2-1) シナリオ・リスク解析

- ・ 絶対安全はないという前提に立ち、リスク論を使う。
- ・ 天然事象の発生場所の処分場からの距離に応じてそれぞれの影響シナリオを定量化するとともに、そのシナリオの生起確率をできる限り定量化する。これらのシナリオ生起確率、影響の大きさ及び現在からの時間の遠さ等を考慮して、安全に対する重要度をランク付けする。生起確率がある程度以下のシナリオは、“事故”あるいは“災害”と考えて、これを絶対に避けるというのではなく、これに対してなし得る措置、対策を開発するとともに、将来世代に対して期待される介入措置（災害対策）を考慮する。

(2-2) その他

- ・ 大雑把に想定される処分の影響を容認した上で実現される処分に対し、処分しなかった場合に残される未解決問題の重大さを喚起する。
- ・ 現在の知識でできる限り影響可能性を排除するという姿勢が重要である。
- ・ 幌延施設での調査研究に的を絞って「信頼性の向上」に努める。

最後に、地質環境・設計の情報と結合した性能評価の今後の期待される役割について、専門家の意見を集約・整理したものを以下にリスト・アップする。

① 性能評価に求められる事項

- ・ 人工バリアー天然バリア（ニアフィールド）－天然バリア（ファーフィールド）を連続してカバーする精密な性能評価モデルの確立
- ・ 地質環境を境界条件として効果的に表現して組み込んだ性能評価モデルの作成とシミュレーション
- ・ 実験から得られる部分的情報を踏えた性能評価やパラメータ感度分析（又はパラメータ空間の把握）
- ・ 性能評価のロバスト性をできるだけ論理的に説明できるモデルの再設計
- ・ 天然事象の影響や処分深度に対する地表からの擾乱の影響の定量化、及び総合的安全評価における各シナリオ、モデル、データの不確実性の定量化
- ・ ベントナイトの長期健全性やベントナイト中の核種移行機構、セメントの材料としての実施可能性、地下水流動の評価手法などに関する研究開発

② 性能評価から得られる成果

- ・ 地質調査手法の開発、調査結果の解釈、構造物設計の性能評価モデルに依拠した統一的な説明
- ・ 安全性を踏えたサイト特性調査の調査項目選定や主眼点の明確化並びに処分場設計の重点項目の明確化等を通じた処分場設置プログラムの錬成
- ・ 処分システム全体の信頼性や設計の妥当性（あるいは合理的設計）の獲得
- ・ 各バリア成分の性能の安全に対するインパクトの明確化
- ・ 設計裕度や調査の詳細度の把握

③ その他

- ・ 建設作業中の事故防止の仕組み

3. 処分場のシナリオ安全解析のための品質保証プログラム－QUASAR－の開発

3.1. 序

QUASAR は、JNC 殿が行う処分場のシナリオ安全解析のための品質保証プログラム (Quality Assurance Program for JNC Scenario Analysis of Repository Safety) に基づくコンピュータ・コードである。

QUASAR は、Microsoft Office ACCESS®に基づいて開発されたアプリケーションである。

QUASAR の開発は、MRI が今まで JNC 殿の一連のシナリオ解析プロジェクトで培ってきた経験に基づいて発せられた。新しい計算ケースを実行しようとする時にはいつも、以下のような疑問が生じた。即ち、

- ① 何故このシナリオ計算が必要なのか？
- ② このシナリオ計算は、前の似た計算ケースとどのように異なるのか？
例えば、これは概念モデルが異なるのか、異なった変動ケースなのか、あるいは、単にデータの変更によって異なるのか、などである。
- ③ 概念モデルの何が異なるのか？
- ④ 何故このシナリオを考える値打ちがあるのか？
- ⑤ どのパラメータを何故変えるのか？ その変更のために引用された文献は何か？
- ⑥ この計算の限界は何か？
- ⑦ この計算結果はどの程度信頼のおけるものか？
- ⑧ もしパラメータ値を変えるなら、その変更理由は何か、また、新しい数値の出所は何か、新しい数値の不確実性はどの程度か？

解析者がこれらの疑問に対する答えを見出し、迅速に情報を分類できるように、自動化された情報処理システムの構築が望まれる。このようなことから QUASAR の開発に至った。

3.2. QUASAR のフレームワーク

QUASAR の情報の完全なセットは、次の 2 つから成る。即ち、

- ① シナリオ解析を記述する上で重要な記述（文章）、パラメータ（数値）、
実例（グラフ）
- ② 日付け、参考文献、人名／所属などの QA 情報

全ての情報は、QUASAR では基本データとして蓄積される。QA の目的のこれらの基本データの使用は、基本データ間の多次元関係に基づいて完遂される。基本データの予備的な整理^(注)と関係を図 3-1 に示す。

図 3-1 は、いくつかの箱間の結線状況を示している。これらの結線は、テーブル間の“関係”を表わしている。QUASAR には 3 種類の関係が用いられる。即ち、

- ① 1 対 1 対応（“1-1”結線）
- ② 1 対多対応（“1-∞”結線）
- ③ “1 対 1”、“1 対多”対応以外の関係

(注) 他の整理の仕方もちろんあり得るが、ここで行った予備的な整理は、紛れもなくシナリオ計算の情報の流れに沿ったものである。

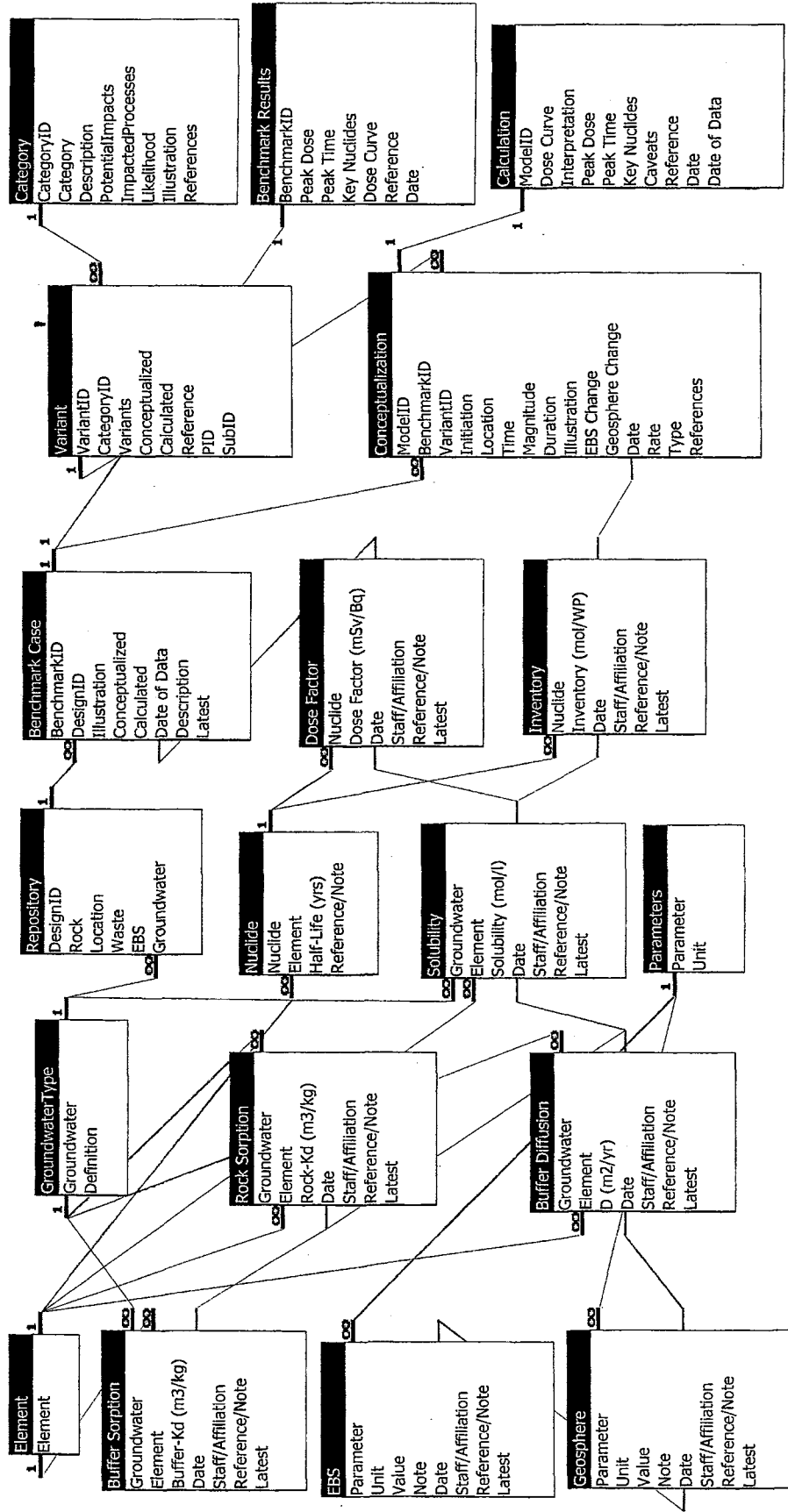


図 3-1 QUASAR の情報関係構造

各箱はデータベース中のテーブルを表わし、それぞれに固有の情報を 1 つずつ含む。箱の内側にはテーブルのフィールドのフィールド名（カラム）名が並べられ、各テーブルには少なくとも 1 つのフィールドが含まれる。

3.3. QUASAR の機能

3.3.1. 以前のシナリオ解析に関する活動の検閲

今までの解析の検閲は、将来の解析を効率良く行う上でしばしば必要となる。
この機能は、図 3-2 にまとめて示されるような階層的な形式に従う。

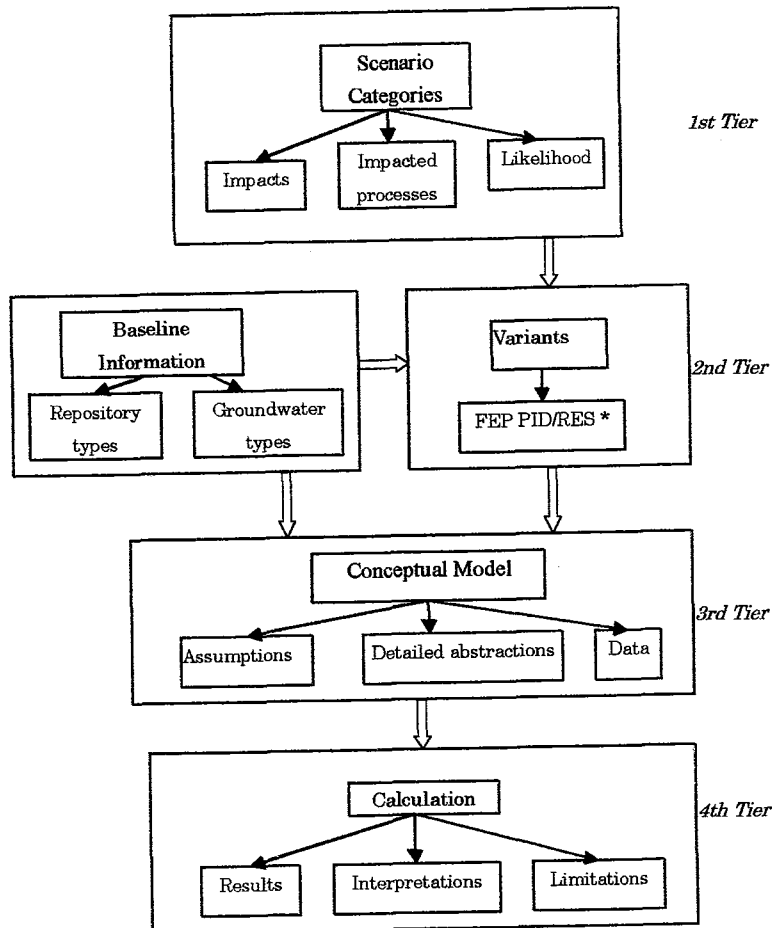


図 3-2 QUASAR プログラムにおける情報再生システムの階層構造

記号*は、FEP 解析が THMC 解析と結合・補足され得ることを意味する。

階層的な情報の質問形式は、図 3-1 に示される基本データの関係に基づいて達成される。

3.3.2. 新たなシナリオ解析情報の追加

QA 情報の容器として、QUASAR は、新たな情報をデータベースに追加することが期待される。この機能は、次のようなものに関するいかなる新しい情報をも追加するため、QUASAR に含まれる。

- ① シナリオカテゴリー
- ② 変動ケース
- ③ 概念モデル
- ④ 計算ケース

図 3-3 に新たな情報を含めるための実例を示す。

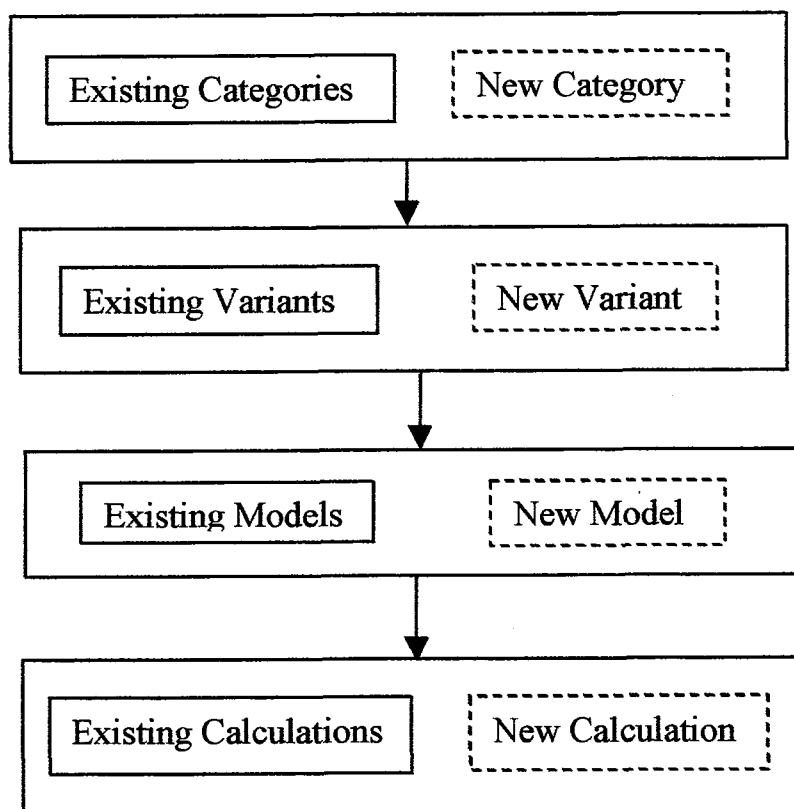


図 3-3 新しいシナリオ解析情報を含める QUASAR の構造

一旦新たな情報がうまく追加されると、情報は 3.3.1 項に述べた機能に基づいた検閲を早急に受けることとなる。

3.3.3. パラメータの検閲

シナリオ計算には多くのデータが含まれている。これらのデータを検閲し、更新過程を追跡することが必要である。QUASAR のデータ検閲機能では、ユーザーが効率良く更新過程を追跡し、計算に使われたあるパラメータに対する現在の使用状況を把握することができるようになっている。これによって、ユーザーが、データの選択並びにパラメータの更新すべきか否かについての結論を導くことが支援される。

3.3.4. パラメータの更新

パラメータの数値の変更は、新たな計算につながる。もし新たな数値が古い数値と非常に近ければ、新たな数値に基づく新たな計算結果は、古い結果と区別がつかないかもしれない。従って、計算は冗長となり得る。このため、QUASAR では、同じパラメータの全ての既存の数値と新しい数値との接近度をチェックする。

一旦更新が完了すると、更新されたパラメータは 3.3.3 項で述べた QUASAR のデータ検閲機能に基づいて早急に検閲されることとなる。

3.4. 結論と将来の方向性

3.4.1. QA 基準と QUASAR 機能の向上及び修正

ここで提示する作業では、QUASAR のフレームワークに焦点を絞る。JNC 殿が QUASAR の使用に慣れて、コメントが出されることが望まれる。そのあとに、JNC 殿と MRI が協力して、以下のことに取り組めるだろう。

- ① データベースに追加すべき他の種類の情報があるかどうかを決定すること。
例えば、パラメータや概念モデルの不確実性をデータベースに追加すべきかどうかといったこと。
- ② 基本データの関係について、もし変化や修正があれば、それを同定し、修正すること。
- ③ 図 3-2 に示すような情報質問階層においてももし変化や修正があれば、それを同定し、修正すること。

- ④ どのフィールドが義務的か、あるいは選択的かを定めることのような情報更新システムの QA 基準において、もし変化や修正があれば、それを同定し、修正すること。
- ⑤ QUASAR によって設定されるべき QA 基準が他にあるかどうかを決定すること。以下にMRIによって同定され、MRIの見解に基づいてリストアップされた事項を示す。
 - 1) ユーザー権限の付与：何人かのユーザーには、既存の情報を編集する権利を与え、編集作業が記録されること。
 - 2) 以前にすでに計算された既存の概念モデルへ新しい計算ケースを追加できるようにすること。
 - 3) 母岩の種類、地下水の種類などのような新たなベースライン情報を追加できるようにすること。
 - 4) 新たな元素、核種、EBS/地質圏パラメータなどの新しいパラメータの追加ができるようにすること。
 - 5) 全く同じシナリオ解析情報がデータベースに追加されることを禁ずること。
 - 6) パラメータに対する不確実性解析が自動的に行えるようにすること。
- ⑥ QUASAR に追加すべき他の機能があれば、それを同定すること。以下にMRIの見解に基づくリストを示す。
 - 1) QUASAR を PID/RES 生成コードを結合する、あるいは、PID データベースを QUASAR のサブデータベースとして含めること。
 - 2) MESHNOTE コードまたは TIGER コードの入力ファイル形式にデータを自動的に選定・出力すること。
 - 3) ネットワーク形態で公開できるような機能を追加することにより、利害関係者が様々の場所から QUASAR を利用することができること。

3.4.2. QUASAR データベースに格納されている情報の改良、修正及び完結

このタスクは、QUASAR の内容全体にまたがるものである。まず初めに、原案のデータベースが JNC 殿のシナリオ解析プロジェクトに関する MRI の経験 (MRI, 1999⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾) に基づいて開発され、QA 手順に関する予備的な計画が立てら

れた。多くの記録は、不幸にも、不完全もしくは多分不正確であり、基本的な QA 基準を満足していない。この状況を改善するためには、JNC 殿の基本的な QA 基準を満足するように情報を監査・修正し、完結させることが必要であろう。従って、以下のような作業が提案される。

- ① JNC 殿と MRI はデータベースの全ての記録を監査し、妥当性をチェックし、必要ならば正しい情報に置き換えること。これらの全てが QUASAR によって QUASAR 内で文書化されること。
- ② JNC 殿と MRI は、現行の QUASAR データベースの空白状態にある義務的情報を探し、それを埋めること。
- ③ JNC 殿は、JNC 殿自身のシナリオ解析プロジェクトに基づく情報を（所望ならば MRI のサポートのもとで）所定の QUASAR 形式で供給すること。
- ④ JNC 殿と MRI は、シナリオの信頼性などのある重要なシナリオ情報に関する外部の専門家のコメントを得るためにワークショップを開催し、その結果を QUASAR 内に記録し、必要ならば既存の情報に置き換えること。
- ⑤ MRI は、JNC 殿のベース（あるいはベンチマーク）ケースと主要なシナリオ変動ケースに対する更新した PID もしくは RES を開発すること。

4. シナリオ解析のための品質保証 (QA) の文書化

－火成活動シナリオ変動ケース (マグマ貫入) の場合－

4.1. 序

本章の目的は、QUASAR の全体的な方法の一部を例示すること、特に、以前に開発された SCENIC アプリケーションコードを用いて、複数の FEP をプロセス・システム・モデル (MRI, 1994) ⁽¹⁶⁾ に体系化・文書化することである。このシナリオ基盤のアプローチ法に基づき、シナリオカテゴリーの変動ケースを体系化し、グラフ化し、全体的な QA フレームワークに基づいて記述することができる。

4.2. ニアフィールドのプロセス・インフルエンス・ダイヤグラム (PID)

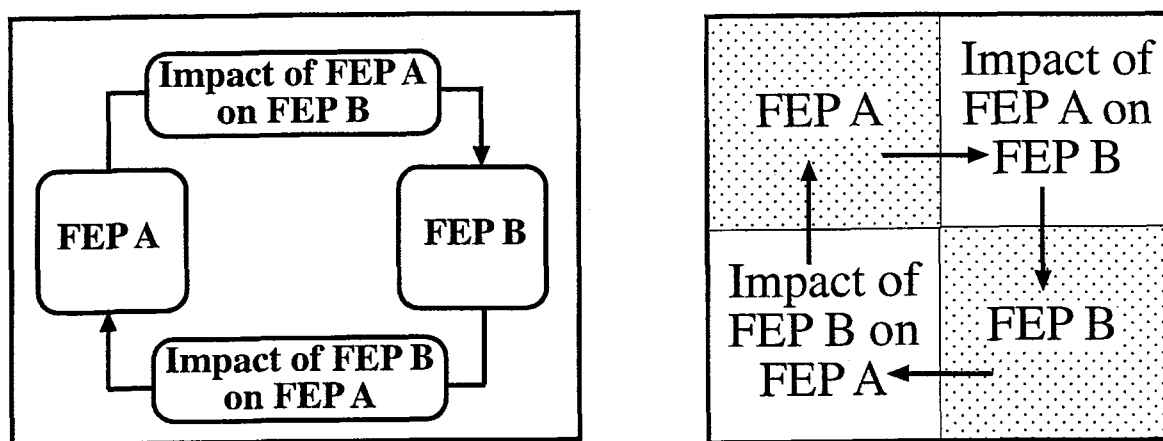
プロセス・インフルエンス・ダイヤグラム (PID) は、地層処分システムの関連する特徴・事象・プロセス (FEP) 並びに FEP 間の影響関係をグラフ表示したものである (Chapman et al., 1995) ⁽⁶⁾。PID は、安全性評価に重要な要素を示すだけでなく、安全性評価に関する様々な利害関係者間の議論のための共通基盤を与える、非常に有効な可視化ツールである。PID 形式あるいは位相的に同等の RES (Rock Engineering System) (例えば、Hudson, 1992 ⁽¹⁰⁾) ^(注) を用いて、安全性評価に関する “what if?” といった質問を迅速かつ効率的に検討することができる。

シナリオ解析のための FEP 及びインフルエンスの容易で迅速な QA 文書化を可能とするツールとして、(すでに中レベル廃棄物 (ILW) 処分場向けに開発している) アプリケーション (名称: SCENIC) がある。SCENIC は、Windows、Apple いずれのオペレーティング・システムにも適用可能なアプリケーション・ソフトウェアである Filemaker Pro[®] パッケージに基づいて開発されている。

^(注) 処分場システムの挙動を体系化し、記述する他の方法として多分、最も著名なものは、熱学的、化学的、水理学的、力学的、放射線学的プロセスを表わし、システム内のエネルギー・質量フローをプロットすることに基づくものであろう。理論的には、FEP 方式と、この THMC 方式のものとは一致し、相互に転換可能であるべきであり、いずれを選択するかは、どんなことに応用しようとするかによる。

4.3. RES 形式

前述したように、FEP 及び FEP 間の相互関係を表わす別の方法として、RES (Rock Engineering System) アプローチ (Hudson, 1992)⁽¹⁰⁾がある。この形式では、FEP が相互関係マトリクスもしくはテーブルの下向き対角線上に展開シート状で並べられる。グラフ形態の PID と展開シート形式の RES の等価性を図 4-1 に示す。



(a) グラフ形式のプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) (b) 展開シート形式のロック・エンジニアリング・システム (RES)

図 4-1 HLW 処分場のプロセス・システムの等価表現

4.4. シナリオ解析：火成活動シナリオ変動ケース（マグマ貫入）の例

図 4-2 は、本編の図 4-3 の着色部分を取り出したものであり、想定されるマグマ貫入シナリオ (“MI(1)” と表記) の影響を受けるかもしれない特定の FEP とインフルエンスを例示するために再編成した簡易化された PID である。

変動ケース MI(1) の影響を受ける可能性がある重要と判断されたインフルエンスを図 4-2 に番号表示した。また、右端の例の FEP は、本質的には、ニアフィールドの性能を評価するための計算ステップを表わしたものであることに留意されたい。このような FEP は、PID/RES 形式のシステム記述と、MRI が以前 JNC 殿に暗示した Assessment Model Flowchart (AMF, Chapman et al., 1995⁽⁶⁾参照) の概念との結合を意味する。

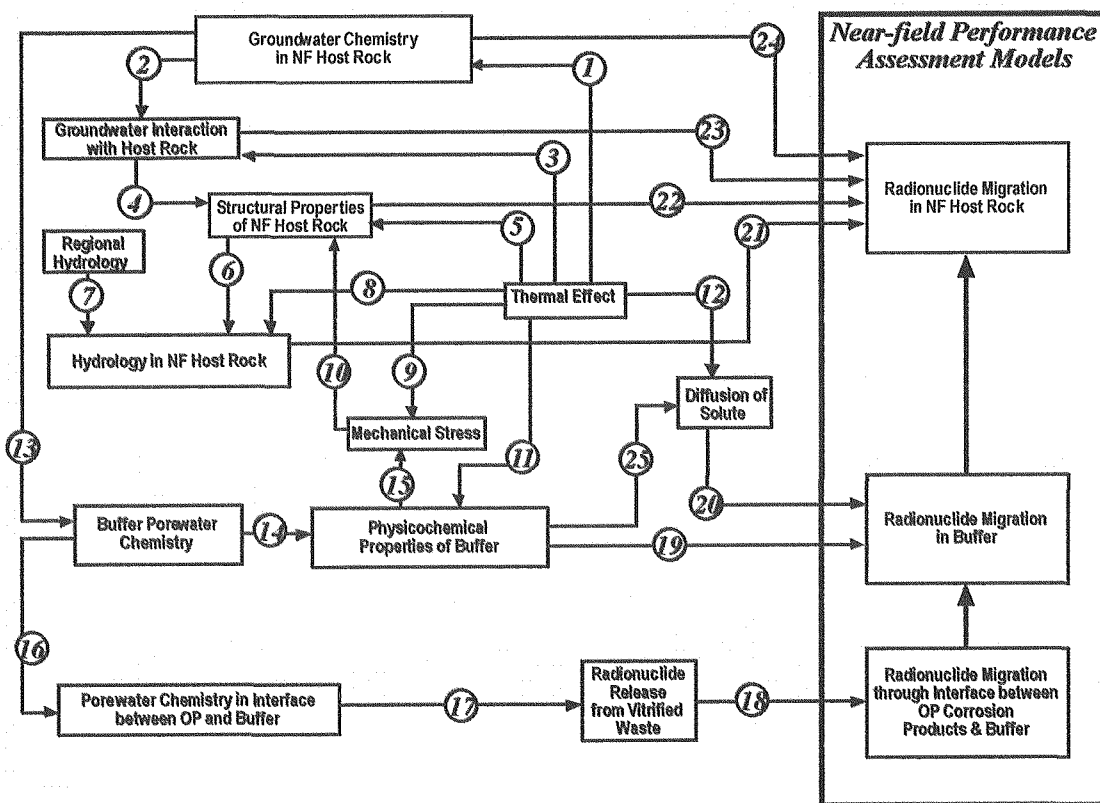


図 4-2 “遠方でのマグマ溜りの貫入” という変動ケースに対する集約された PID

ここでは、重要な影響を受ける FEP とインフルエンスのみ（番号を付けた矢印で）示す。

4.5. SCENIC を用いた FEP ベースのシナリオ解析の文書化

図 4-2 に示す 15 の FEP と 25 のインフルエンスは、後に続く安全性評価計算に対して技術的に根拠のある追跡可能な基盤を与えるために定義されなければならない。FEP とインフルエンスを文書化するために作成された形式の例を図 4-3、図 4-4 に示す。

HEP ENTRY

Number
 Name

Text

Regions:
 Waste Package
 Backfill
 Biosphere
 Mortar
 Damaged Rock
 Concrete Barrier
 Intact Rock

Subregions:
 Waste Form
 Concrete Barrier
 Intact Rock
 Canister
 Backfill
 Biosphere
 Mortar
 Damaged Rock

Process Type:
 Chemical
 Radiological
 Feature
 Hydrological
 Thermal
 Event
 Mechanical
 Biological

Linked FEP's	Name	Regions	Region Type

Influenced By: Name Level
 Influences To: Name Level

Linked Influences

Influenced By	Name	Level

Influences To	Name	Level

図 4-3 SCENIC における FEP データ入力の例

INFLUENCE ENTRY

Number Name

Origin FEP Destination FEP

Influence Level

Influence Description

Influence Information

Scenario Group ID	Date
General Knowledge: <input type="checkbox"/> Well Known <input type="checkbox"/> Moderately Known <input type="checkbox"/> Poorly Known <input type="checkbox"/> Controversial	Expertise of Group: <input type="checkbox"/> Expert <input type="checkbox"/> Educated Guess <input type="checkbox"/> No Expertise
Group Consensus: <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Majority <input type="checkbox"/> No	

Explanatory Notes

図 4-4 SCENIC におけるインフルエンスデータ入力の例

“Influence Level”並びに“Influence Description”はいずれも異なるシナリオ毎に大きく変わり得る。

FEP並びにインフルエンスの入力形式には、客観的情報（例えば、参考文献）と主観的情報（例えば、インフルエンス・レベル）の双方が含まれる。それらは、新しい情報が得られたり、判定が改善されると、更新されなければならない。

4.6. QUASAR の将来的方向性

SCENIC を用いてプロセス・システム・モデルが構築され、文書化されると、今度は、シナリオ計算を実行するために QUASAR が QA 文書化と管理を行う。

シナリオ解析に対する FEP ベースのアプローチは、2つの重要な利点を有する。

① 品質と技術的整合性の内的保証

シナリオベースのアプローチは、処分場プログラムの中での内的な技術的整合性や追跡可能性を保証する。

② 合理的安全性の対外的保証

グラフを活用したシナリオアプローチは、安全性の概念に関する関心ある利害関係者との対外的な対話を行うための容易で有益なツールを提供する。

シナリオ解析に対する簡単な使い勝手の QA システムの内的及び対外的利点の双方を実現するため、安全性の合理的保証を提供する QA プログラムの要素として、以下に示す4つの“DARE”ステップが強く推奨される。

(1) 文書化 (Document)

QUASAR フレームワークの一部として SCENIC 内でベース（ベンチマーク）ケースについて FEP、インフルエンス、想定される概念モデル、基本データの文書化を行うことを含め、基本となる“処分場システム（又はサブシステム）概念”を定義・文書化することは、どのような QA システムにとっても絶対に重要なことである。このステップで主に重要なことは、この基本となる記述やデータにおける不確実性の文書化である。

(2) 解析 (Analyze)

基本システムの記述内容が文書化されると、JNC 殿及びその契約者のグループは、可能性のある主要なシナリオを正式に検討し、そのシナリオについての特定の情報や想定を記録しなければならない。このような活動によって得られる結果

として次の2つがあるだろう。

① シナリオの検討によって生ずる主要なデータの不確実性と情報の必要性の
同定

② 各シナリオ変動ケースに対する特定の計算ケースの設定に関する指導

これらの結果に基づいて、処分場の安全性に関する一連の新たなシナリオ計算
が行われる。

(3) 改訂 (Revise)

新しいデータが収集され、古いプロセスモデルは更新され、以前の想定が修正
され、技術サイド及び非技術サイドの利害関係者から新たな論点が提起される。
シナリオ解析と強く結合した QA プログラムを実行することによって、このよう
な新しい情報を体系的にレビューし、必要に応じて改訂を施すことが可能である。

(4) 評価 (Evaluate)

QA は、関心ある全ての利害関係者がプログラム上の決定理由を理解し、安全
性の合理的保証が確立されるかどうかの信頼性を試すことを可能にする。技術サ
イドの利害関係者と非技術サイドの利害関係者（例えば、地方の政治家、共同団
体、報道機関）の双方がともに、安全性が合理的に保証されるという結論付けを
積極的に行えるようにならなければならない。従って、安全性の保証の実例を示
し、文書化するための理解しやすい形式が必要となる。このような安全性の保証
を得る上で、“what if ?” という確かな論点に焦点を当てた、シナリオベースの
グラフ活用型 QA プログラムの支援を多大に受けるべきである。

5. 地震・断層シナリオの概念・アプローチ法の改良化

5.1. 目的

日本における地震・断層活動の遍在性は、必然的にステークホルダーの関心と疑問を引き起こすだろう。あらゆる“地震・断層シナリオ”、それらの発生可能性と深部地下処分場への潜在的な影響を調べる必要がある。本章の目的は、“地震・断層シナリオ”を検討するシステムをどのように作成するかに関する“トップダウン的”考え方を適用して、計算上修正が必要となり得る箇所を同定することである。従って、このようなシナリオについてもっと体系的かつ詳細な処分場安全性解析を行うことに基本が置かれた。

5.2. 母岩の相互作用

図 5-1 は、処分場性能に重要な下記の 3 つの FEP によってもたらされる双方向に結合された 6 つの相互作用を RES 形式で示している (Hudson, 1992)⁽¹⁰⁾。

- ・ 母岩の応力（広域的な一定の応力と地震によって生ずる一過的な応力の双方を含む）
- ・ 母岩の構造（健全なマトリクスと不連続部の双方を含む）
- ・ 地下水流れ

ROCK STRUCTURE	Interaction 1 Fractures affect the values and orientation of the stresses.	Interaction 2 The fracture network governs the secondary permeability.
Interaction 6 Stresses can open or close fractures, and also create them.	ROCK STRESS	Interaction 3 In general, the higher the normal stress, the lower the permeability.
Interaction 5 Continual water flow in fractures affects their properties	Interaction 4 Normal stresses reduced by water pressure	WATER FLOW

図 5-1 母岩の力学的相互作用に関する RES マトリクス

例えば、“母岩の応力”は、“長期的応力状態”（広域的な長期に亘る構造地質学的特性）と、“一過的応力状態”（近くの地震事象によって生ずる）とに分けることが可能である。このような FEP の分割により、“地震・断層シナリオ”のカテゴリー全体の中で変動ケースが同定される。次の節では、これらの確かな“変動ケース”のいくつかを、突発的事象による影響なのか、緩慢なプロセスによる影響なのかによって分類する。

5.3. 地震・断層シナリオの変動ケース

図 5-2 は、“地震・断層シナリオ”のカテゴリーとして考え得る変動ケースの簡単な階層図である。ここでは、変動ケースのクラス^(注)として“突発的事象”と“長期的プロセス”に分けて考える。

突発的事象は、処分場システムの特性に多かれ少なかれ即時的变化をもたらす地震・断層活動による応力を考慮することによって生ずる事象である。一般に、これは、断層の生成（あるいは再活動化）として考えることができる。このような突発的事象がもたらすと考えられる影響を部分的にリスト・アップしたものを以下に示す。

- ・ 母岩の構造変化と不連続部によるニアフィールド母岩の特性の即時的变化
- ・ 地震事象による緩衝材内空隙水の超静岩圧発生による岩体の水理学的破碎
- ・ 既存の不連続部に沿った角礫岩帯の生成と、角礫岩帯に沿った（放射性物質を含む）EBS の部分的突出の可能性
- ・ 母岩の不連続部に沿った緩衝材粘土の急速な突出
- ・ 廃棄物パッケージの剪断（あるいは、もっとあり得るのは、廃棄物パッケージの劣化）とその結果生ずるソースタームの円筒形状の喪失

(注) もちろん、変動ケースは、単純にはパラメータ変動として生成することもできるが、そのような場合は、“感度解析”と言う方がより適切であろう。

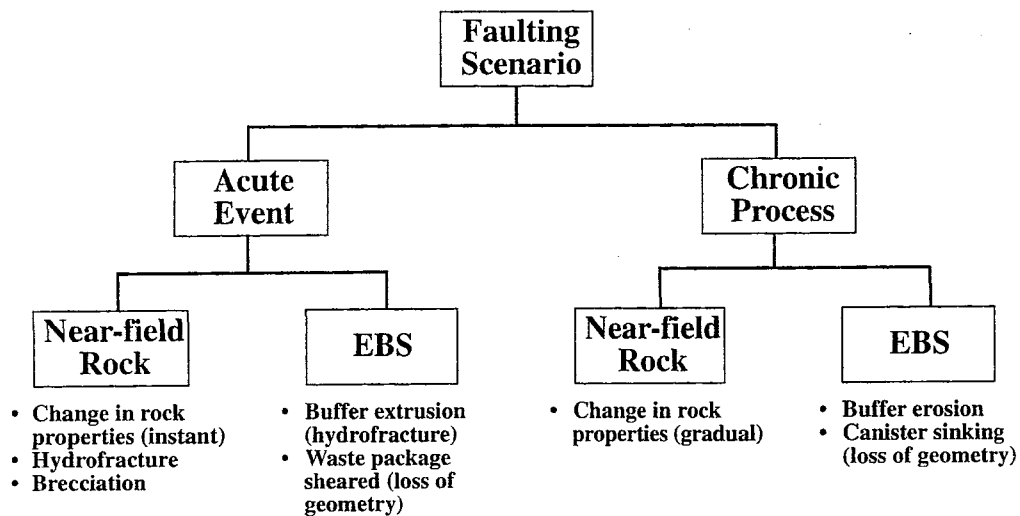


図 5-2 影響を受ける処分場位置と可能な影響に基づく地震・断層シナリオ変動ケースの突発的事象と長期的プロセスへの分類

長期的プロセスは、処分場システムの累積的变化を引き起こす応力と関連するプロセスである。このような長期的事象がもたらすと考えられる影響を部分的にリスト・アップしたものを以下に示す。

- 母岩の構造変化と不連続部によるニアフィールド母岩の特性の緩慢な変化（例えば、微小亀裂の累積）
- 母岩の不連続部に沿った緩衝材粘土のゆっくりした侵食
- 規則的な地震事象によって引き起こされる空隙水圧の一過的ゆらぎによって生ずる持ち上がったキャニスターの沈下もしくは変位

多くの変動ケースとそれらの影響は、既存のソースタームモデルや計算コードで容易に評価することはできない。確かにそれらの計算コードは、処分場内における通常の進展状態のもとで EBS が初期に円筒状の対称性を有するという計算上の理由に基づいたものであるが、多くの地震・断層シナリオ変動ケースの考えられる影響は、物質の物理的な分断や変位であるため、そのような対称性を崩してしまうものであろう。さらに、現行の評価モデルでは、特性の緩慢な変化を容易にシミュレーションすることができない。

5.4. 地震・断層シナリオ変動ケースのニアフィールドへの影響のモデル化方法の高度化

5.4.1. 変動ケース適応型アプローチ

ここでは、モデル化手法の高度化に必要な事項を提示する。高度化手法は、“変動ケース適応型アプローチ(VO)法”という概念に基づくものである。

概念モデルは、変動ケースの PA 上の重要な論点（例えば、緩衝材の喪失、形状変化、緩衝材の諸特性の緩慢な変化）に従う。しかし、この方法では、対象とするそれぞれの変動ケース毎に計算コードを開発する必要はない。そうではなく、VO 法では、あるクラスの変動ケースをモデル化するのに“オブジェクト”を創出（あるいは、“いくつかのブロックを構築”）し、次に、これらの“ブロック”からある特定の変動ケース用にモデルを“構築する”というものである。

VO 法の実例を図 5-3 に示す。

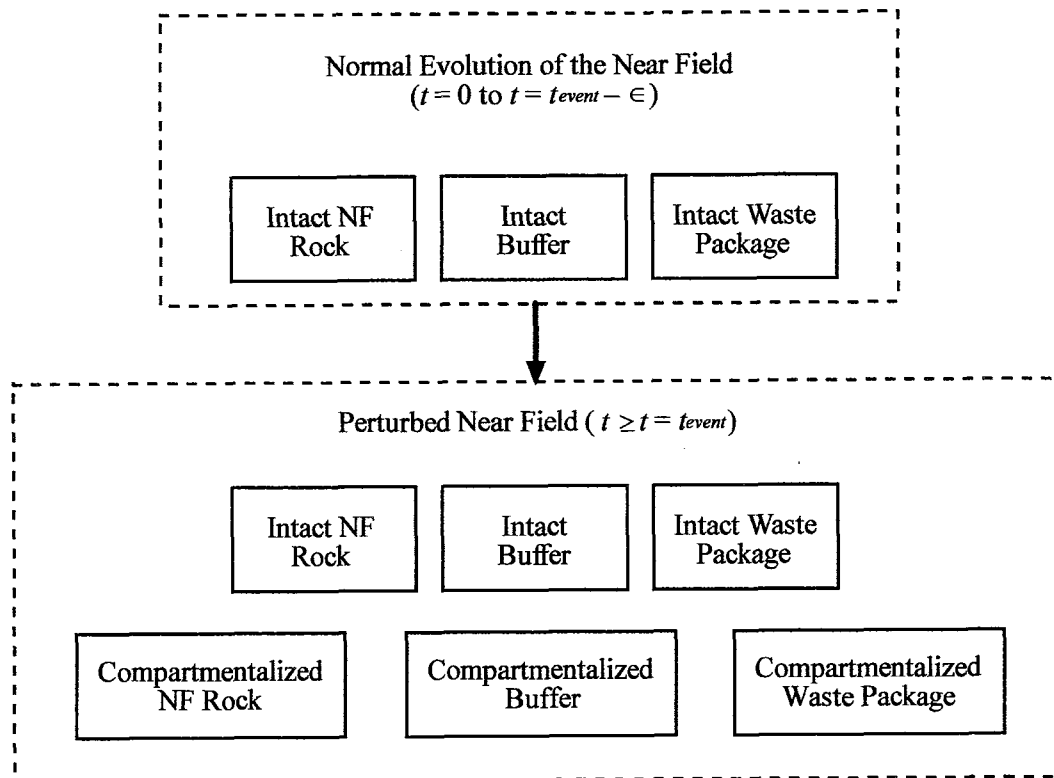


図 5-3 処分場ニアフィールドに与えるシナリオ変動ケースの影響をモデル化する変動ケース適応型アプローチ(VO)法の構成と展開

VO法の展開では、一般に、図5-3に示すように次のような2つのステップが含まれる。

- ① 健全な構成要素のオブジェクト（即ち、“健全なニアフィールド母岩”、“健全な緩衝材”、“健全な廃棄物パッケージ”）を用いて処分場の通常の進展状況を $t=0$ （埋設時点）から $t=t_{\text{event}}-\varepsilon$ （ ε は無限小、即ち、 $t_{\text{event}}-\varepsilon$ は、事象が発生する直前の時点）までシミュレートする。各ニアフィールド構成要素は、通常進展期間中、一定の諸特性をもち、物理的に健全なものと想定される。
- ② $t \geq t_{\text{event}}$ において、コンパートメント化された構成要素と健全な構成要素のオブジェクトとを結合して、シナリオ事象のもとでシステムをシミュレートする。各コンパートメント化された構成要素のオブジェクトは、複数のコンパートメントのオブジェクトから構築される。

5.4.2. コンパートメントモデル

コンパートメントモデルは、有限差分法と同等の数値的手法である。違いは、コンパートメントモデルでは、低次の空間分解を用いるのに対し、詳細な有限差分モデルでは、通常、高次の空間分解を用いることである。シナリオ計算では、影響に関する知識の限界に由来する不確実性の方がしばしば空間分解への要求以上に大きくなり得るため、コンパートメントモデルが提供する柔軟性は、望ましい特性の1つである。

5.4.3. まとめ

地震・断層シナリオへの概念的なFEPベースのアプローチ法と同様、これまでの計算での経験によると、現在の評価モデルとツールは、多分、将来必要となる安全性解析には不適切であることがわかった。特に、処分場特性の緩慢な変化や円筒状の対称な形状の喪失などの問題点が他のシナリオカテゴリー同様、“地震・断層シナリオ”の多くの変動ケースにおいて生ずる。これらの問題点を克服するための効率的で確信的な基盤として、他の処分場計画ですでに開発され、テストされている“コンパートメントモデル”を用いた“変動ケース適応型アプローチ（VO）法”が推奨される。

6. 複雑系の放射性廃棄物処分問題への適用性に関する研究

6.1. 序

本研究では、放射性廃棄物処分問題に対し、複雑系の考え方・手法等の適用可能性を検討・考察することを目的とし、複雑系の適用事例の調査・整理、および、複雑系の放射性廃棄物処分問題への適用可能性に関する考察を実施した。

6.2. 複雑系研究の概要

ここでは、複雑系の定義と特徴、複雑系研究のツールとモデル、複雑系研究の領域についてとりまとめた。複雑系 (complex system) とは 1990 年代に入り注目を集めるようになった新しい思考方法である。その一般的な定義は、従来の要素還元主義的な方法論では理解が困難であるような複雑なシステム (物理システム、生体システム、社会システムなど) であり、「多くの要素があり、その要素が互いに干渉し、何らかのパターンを形成したり、予想外の性質を示す。そして、そのパターンが各要素そのものにフィードバックする」系として捉えられる (Arthur, 1997)⁽⁴⁾。このような複雑系の一般的性質としては、全体性、創発性、学習・適応性、予測不可能性等があり、本研究ではこれらの概要について説明した。さらに、複雑系研究の代表的なツールおよびモデルとして、カオス、フラクタル、パーコレーションモデル、セルオートマトン、進化型コンピューテーション、マルチエージェントシミュレーションを取り上げ、これらについての基本事項と複雑系研究における位置づけについて整理した。また、複雑系研究の対象や領域を概観し、複雑系研究で世界的に有名な米国サンタフェ研究所で行われている研究分野とプロジェクトの例⁽⁹⁾を示した。

6.3. 放射性廃棄物処分問題に関連する複雑系の適用事例調査

ここでは、地層処分システムを複雑系として捉える根拠を明確にした上で、放射性廃棄物処分問題を念頭に、複雑系の考え方、手法等を適用した一般的事例を調査・整理した。

6.3.1. 複雑系としての地層処分システム

放射性廃棄物処分における多重バリアシステムは「天然の地質環境だけではなく、地質環境の条件を考慮に入れて適切に設計された工学的な対策を組み合わせることで、処分された放射性廃棄物を人工の構造物と天然の地層から成る多重の障壁（バリア）で人間環境から隔離するシステム」と定義される(JNC, 1999)⁽¹³⁾が、各バリアは相互補完的に機能し、また、個々のバリア性能、または、システムの安全性評価に用いるパラメータ値の変化が、全体に非線形な影響を及ぼす。さらに関連する、物理的、地球化学的、工学的パラメータは極めて多く、システム全体の安全性評価においては、これらのパラメータ値の経時的な変化や不確実性が、超長期におよぶシステム性能に与える影響を把握する必要がある。このような観点から、地層処分システムは典型的な大規模複雑系と見なすことができる。また、地層処分システム内の現象には極めて多くのプロセスが相互作用しながら存在している。このようなシステムは連成系(coupled system)と呼ばれ、それらの解析が安全性評価において極めて重要となっているが、連成系は複雑系に他ならない。以上の観点から、本研究では、放射性廃棄物処分システムの安全評価上の不確実性評価についての取り扱い方について、さらには地層処分環境下での連成現象解析について適用が有望と考えられる既往の研究例を調査した。さらに、地層処分システムを構成するコンポーネントや安全性評価に大きな影響を与える現象の中には、その特性を複雑系の考え方で把握できるものがある。このような例として、複雑系の手法を適用した、天然現象の特性解析、亀裂性岩盤中の放射性核種移行現象の解析についての研究例を調査・整理した。

6.3.2. 放射性廃棄物処分システム安全性評価における不確実性解析

第2次取りまとめ(JNC, 1999)⁽¹³⁾における決定論的手法と米国 DOE によるユッカマウンテンサイトの安全性評価(VA レポート)(USDOE, 1998)⁽²²⁾における確率論的手法について概要および関連論文を整理した。従来、わが国で用いられてきた安全性評価においては、個々のデータの不確実性の取り扱いについて可能な限り現実的なデータを用いるものの、不確実性について十分に把握されていないデータについては保守的な値を用いることとされており、

基本的には安全サイドの決定論的な安全評価手法となっている。第 2 次取りまとめでは、地質環境のバリエーション、デザインのオプション、シナリオの不確実性、概念モデルの不確実性、データの不確実性、の 5 項目の不確実性に関する解析を系統的に進めるために、結果を相互に比較するための基準となる解析ケースとしてレファレンスケースを設定し、レファレンスケースと対比する形で上記の不確実性のカテゴリごとに解析ケースを設定している。これに対し、VA レポートでは各種データの不確実性に対する確率論的なアプローチが採用されている。この評価手法においては、処分場および付随した地質構造を表すための一連の決定論的モデルシステムに加え、特定の位置（クリティカルグループの居住地域、処分場から 20km）における線量率分布の計算を通して、パラメータの不確かさを捉えるためにモンテカルロ的手法を採用している。本研究では、このようなモンテカルロシミュレーションによる不確実性評価の考え方と手法を記述した。地層処分システムの安全性評価は世界的にも決定論的手法から確率論的手法へと移行しつつあり、後者は、極めて多数の要素やプロセスが関連する複雑系システムである地層処分システムについての合理的な性能評価手法として極めて有効なものと考えられる。

6.3.3. 地層処分環境下での連成現象解析

連成系とは、2 つ以上の現象が相互に影響を及ぼし合い、それらを独立にはなく同時に解かなければならない系のことであり、複雑系と極めて近い概念である。また、連成系は関連するパラメータが多く、また、プロセス同士が非線型に依存しているため、実験による研究には限界があり、数値シミュレーションによる研究が主流となっているが、必要となる計算機資源は極めて大きなものとなり、3 つ以上の連成現象に関する研究は少ない。もんじゅの事故も温度計さやと流体の連成振動が原因と結論されており、連成系の挙動解析の難しさと重要性を示唆している。一方、地層処分システムにおいては様々な連成現象が存在する。例えば、廃棄体パッケージや構造体の劣化速度、あるいは、天然バリア中の放射性核種の移行速度の評価においては、系内の相互に影響を及ぼし合う熱的、力学的、化学的、水理学的プロセスなどを同時に考慮する必要がある。本調査では、地層処分システム内の連成現象の解析

に有効と考えられる 2 つのグループによる研究例を整理した。前川らの研究グループ (Maekawa et al., 1998⁽¹⁵⁾ ; Ishida, 1999⁽¹²⁾) では、種々の外荷重および環境作用下における、長期的な材料の品質と構造性能変化の予測ツールとして、微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システムが開発されている。このシステムでは、大別して、固体の形成から長期にわたる劣化・変成現象に関して熱力学的な観点から数量化を試みる熱力学連成解析システム (DuCOM) と、地震力等の外荷重を受ける構造物の力学的挙動を予測する数値解析手法 (COM3) からなり、さらに、両者の相互連関を考慮し、両システムを一元的に統合した性能評価手法を提案している。DuCOM では、水和発熱モデル、空隙構造形成モデル、水分・保持移動モデル、塩化物イオン移動モデル、二酸化炭素移動・平衡モデル、イオン平衡モデル、炭酸化反応モデル、酸素移動・平衡モデル、鋼材腐食モデルが組み込まれ、これらの反応の連成が統合的に扱われている。また、古川ら (Furukawa et al., 1985)⁽¹¹⁾ は温度変化と外力を同時に受ける中空円筒の連成を考慮した非定常熱応力を数値計算により解析している。その結果、連成を考慮すると温度分布は内圧や力学的境界条件の影響を受け軸方向ひずみが拘束される場合に内圧の影響が大きくなること、熱応力成分も内圧の影響を受けることを見出した。この体系は、オーバパック、ベントナイト、処分坑道と形状が類似している例として興味深い。

6.3.4. 天然現象の特性解析

第 2 次取りまとめでは、地層処分システムが初期の安全性能を発揮するためには、地層処分の場となる地質環境が、期待される環境条件や機能を長期にわたって維持することが必要であり、地質環境に急激な変化、あるいは緩慢ではあるが累積的な変化をもたらすような天然現象によって、地層処分システムの性能が著しく損なわれることのないよう、十分に安定な場所を選び、また、想定される変化を見込んで適切な工学的対策を施すことが重要と述べられている。また、考慮すべき天然現象としては、1) 地震・断層活動、2) 火山・火成活動、3) 隆起・沈降・浸食、および 4) 気候、海水準変動が挙げられている。その上で、地質環境条件の調査研究の目標の 1 つとして、それらの天

然現象について、過去の活動に認められる傾向や地域性に基づいて、将来の活動を類推し、地層処分にとって十分に安定な地質環境が我が国に存在することを示す（地層処分にとって安定な地質環境の提示）ことが明記されている。

天然現象の発生頻度、発生メカニズム、発生時の時系列的な特性に関しては、フラクタル理論やカオス理論を適用した研究例が比較的多く存在する。本研究では放射性廃棄物処分問題に対する適用が有望と考えられる例として、地震現象の特性（地震の大きさ分布、震源・活断層の空間分布、地震発生時刻の2点相関）についてのフラクタル解析手法、長期的な天然現象の最悪の事象の程度やシビアな事象の発生確率を予測する手法としてのR/S解析手法、過去の履歴データから天然現象の長期的変動を予測する手法としてカオス的時系列解析手法、についての研究例とそれらの概要を整理・調査した。

6.3.5. 亀裂性岩盤中の放射性核種移行現象の解析

放射性廃棄物処分場は不透水性の岩盤に建設されることが提案されているが、岩盤中の亀裂網が人工バリアから漏洩した核種の輸送経路となることが想定されるために、岩盤中の亀裂網における核種輸送を理解していくことが、処分場の選定や安全性の評価に際して重要である。従来、亀裂網中の核種輸送モデルでは主に、単一无限平板形状を仮定したモデル、または、等価な均一空隙状媒体モデルが用いられてきた(Harada et al., 1980⁽⁸⁾ ; Pigford et al., 1980⁽²¹⁾ ; Chambre et al., 1982⁽⁵⁾ ; Ahn et al., 1990⁽¹¹⁾)が、これらのモデルは共に、保守主義の観点に立った簡略化がなされており、現象のより詳しい理解に基づく評価の必要性が指摘されている。この視点に立ち、地層中の亀裂分布のフラクタル性に着目し、パーコレーション理論に基づいて地層中の物質移動を解析する研究がなされており、本研究では、この分野の理論と研究例を調査・整理した。パーコレーション格子状の拡散速度については、通常の規則格子状の拡散は平均二乗距離が時間に比例する($\langle R_w^2 \rangle \propto t$)という Fick の拡散法則に従うのに対し、パーコレーション格子状では、「行き止まり」の枝があるために拡散に遅れが生じる、スタート点から等距離にある点に至るまでに費やす最短ステップ数が経路によって異なる、等の性質があるため、

通常の Fick 型拡散とはならず、 $\langle R_w^2 \rangle \propto t^{2/d_w}$ を満たす異常拡散指数 d_w を用いて、その振る舞いが特徴づけられる。安らの研究グループ (Ahn et al., 1991⁽²⁾ ; Kohama, 1990⁽¹⁴⁾ ; Akaishi, 1991⁽³⁾) は、ボーリングによって得られた地層中の亀裂網に関する情報を基に、コンピュータ上で 2 次元六角格子上に擬似的な亀裂網を生成し、そこでの核種の移動をランダムウォークシミュレーションで記述し解析した結果、異常拡散現象を再現することに成功した。また、Fick 型拡散に対するガウス分布を拡張しパーコレーション格子を特徴づけるフラクタル次元、フラクトン次元、異常拡散指数によって、パーコレーション格子上の異常拡散を定式化することに成功している。

6.4. 複雑系の放射性廃棄物処分問題への適用可能性に関する考察

放射性廃棄物処分システムの安全性評価における不確実性解析に関しては、従来の決定論的な評価手法から、モンテカルロ法などを用いた確率論的な評価手法が主流となりつつあり、過度に保守的な評価ではない、合理的な評価が可能になるものと考えられる。今後はさらに、放射性廃棄物処分システム大規模複雑系の特性評価についての数理的な手法およびシミュレーション手法の開発が期待される。

連成系解析については、数値シミュレーションによる解析が主流となっており、構造一流体、構造一電磁場などの連成系の解析システムがハードおよびソフトの両面で活発に研究されている。しかしながら、3 つ以上のプロセスからなる連成システムや、化学的、水理学的プロセスを考慮に入れた研究例は極めて少ない。計算機資源上の制約やモデルの不在により、大規模連成系の解析は困難であるのが現状であって、このことが地層処分システムの安全評価における不確実性の大きな要因となっている。今後は、熱的、化学的、水理学的プロセスを考慮に入れた大規模連成システムの解析手法が望まれるが、これまでの比較的小規模の連成系に対する数値シミュレーションシステムをハードおよびソフトの両面で高度化していくことが、最も現実的なアプローチと考えられる。

天然現象の特性解析に関しては、本研究で取り上げた地震現象のフラクタル解析、天然現象の R/S 解析、天然現象のカオス的時系列解析と長期予測に

については多くの研究例があり、天然現象の時間的および空間的な発生パターンや発生時の特性について有益な知見を与え、合理的な立地選定や安全評価に大きく寄与するものと考えられる。但し、これらの手法による長期予測は当然のことながら不確実性をはらんでいること、また、超長期的な時間スケールを考慮する場合、地層などに構造的な変化が生じ、過去の履歴データから導き出される統計的性質が妥当しなくなる可能性があることに留意する必要がある。

亀裂性岩盤中の放射性核種移行現象の解析については、パーコレーション理論による研究例をレビューしたが、これらは複雑系の手法を最も直接的に放射性廃棄物処分問題に適用した例の一つとなっている。地層中の浸透現象はパーコレーション理論の応用が最も多く行われている分野でもあり、今後はこの理論を放射性廃棄物処分システムに適用すべく、各核種の拡散速度の計算や他のプロセスとの連成解析、さらには実験結果との比較研究などが望まれるところである。

複雑系研究はいまだ発展途上の分野であって、放射性廃棄物処分問題への適用例は少なく、その寄与の度合いも限定的であるのが現状である。しかしながら、放射性廃棄物処分システムは大規模複雑系そのものであり、複雑系研究の進展は、放射性廃棄物処分問題の克服にとって不可欠である。今後得られる新しい知見により、その解決に対し大きな寄与をする可能性があると考えられる。

7. おわりに

本年度の実施内容は、以下の通りである。

(1) 性能評価に係わる研究開発課題の検討

国の評価において示される今後の地層処分研究に関する課題について、性能評価の研究開発に係わる課題を整理した。また、専門家への質疑応答形式の調査を実施し、そこで得られた意見・考え等をもとに、今後注力すべき課題の抽出を行うとともに、それら課題に関する研究開発の将来的な方向性と見通しを整理した。

(2) 評価モデル及び評価手法の高度化の検討

評価モデル及び評価手法の将来的な高度化の方向性を整理するため、

① シナリオ安全解析の品質保証を目的とするデータベースシステム (QUASAR) の検討・開発

② 火成活動シナリオ変動ケース(マグマ貫入)を例として SCENIC アプリケーションコードを用いた FEP ベースのプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) 情報文書化システムの検討・開発

③ 様々な地震・断層シナリオ変動ケースに対してコンパートメントモデルを用いた“変動ケース適応型アプローチ (VO) 法”の検討・提言

④ 「複雑系」の考え方の性能評価への反映可能性に関する調査・検討を実施した。

以上の最新の研究情報を踏えた多角的な検討により、性能評価研究開発の将来的な方向性が提示されるとともに、性能評価モデル・手法についての課題と将来的な高度化の方向性が明示された。

今後の検討課題としては、以下のものが指摘し得る。

- ① 専門家知見によって指摘されたいくつかの研究課題への具体的取り組み
- ② 今回検討・開発したデータベースシステム及び PID 情報文書化システムの今後のシナリオ解析における実用化
- ③ 今回検討・提言した VO 法を用いたシナリオ解析の実現
- ④ 「複雑系」の考え方を取り入れた性能評価モデルの開発

参 考 文 献

- (1) J. Ahn and A. Suzuki : 「Sensitivity Analysis for a High-Level Radioactive Waste Repository with the Bounding Fracture-Transport Model」 Rad. Waste Manage., Nuclear Fuel Cycle, 14, 257-273 (1990).
- (2) J. Ahn, Y. Furuhashi, Y. Li and A. Suzuki : 「Analysis of Radionuclide Transport through Fracture Networks by Percolation Theory」 J. Nucl. Sci. Technol., 433-446 (1991).
- (3) 明石 : 卒業論文 東京大学 (1991).
- (4) ブライアン・アーサー : 「収穫逡増の経済学入門」週刊ダイヤモンド編集部ハーバード・ビジネス編集部共編 複雑系の経済学 ダイヤモンド社 (1997).
- (5) P. Chambre, et al. : 「Analytical Performance Models for Geologic Repositories」 LBL-14842 (1982).
- (6) N. Chapman, J. Andersson, P. Robinson, K. Skagius, C.-O. Wene, M. Wiborgh and S. Wingefors : 「System Analysis, Scenario Construction, and Consequence Analysis Definition for SITE-94」 SKI TR 95:26, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1995).
- (7) 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会 : 「我が国における高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術的信頼性の評価」第 66 回原子力委員会資料第 1-1 号 (2000).
- (8) M. Harada, et al. : 「Migration of Radionuclides through Sorbing Media; Analytical Solution-I」 LBL-10500 (1980).
- (9) <http://www.santafe.edu/>
- (10) J. Hudson : 「Rock Engineering Systems : Theory and Practice」 Ellis Horwood, New York, NY (1992).
- (11) 古川、竹内 : 「温度変化および外力を同時に受ける中空円筒の連成を考慮した非定常熱応力」日本機械学会論文集(A編) 51, 2799 (1985).
- (12) 石田、前川 : 「物質・エネルギーの生成・移動と変形・応力場に関する連成解析システム」土木学会論文集 627/V-44 13 (1999).

- (13) 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).
- (14) 古濱：卒業論文 東京大学 (1990).
- (15) 前川、石田、土屋：「微細空隙を有する固体の変形・損傷と物質・エネルギーの生成・移動に関する連成解析システム」第3回 IML シンポジウム講演集 (1998).
- (16) ㈱三菱総合研究所：「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(Ⅱ)－地下水シナリオの変動に関する概略的検討－」PNC TJ1222 94-001 (1994).
- (17) ㈱三菱総合研究所：「不均質媒体中での核種移行解析手法の高度化に関する研究(コア研究協力)」JNC ZJ1400 99-010 (1999).
- (18) ㈱三菱総合研究所：「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－地下水シナリオに対する天然事象の影響－」JNC TJ1400 99-019 (1999).
- (19) ㈱三菱総合研究所：「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(Ⅱ)」JNC TJ1400 99-046 (1999).
- (20) ㈱三菱総合研究所：「地層処分の性能評価手法及びモデルの高度化に関する研究」JNC ZJ1400 99-048 (2000).
- (21) T. Pigford, et al.：「Migration of Radionuclides through Sorbing Media; Analytical Solution-II」LBL-11616 (1980).
- (22) US DOE：「Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain」DOE/RW-0508 (1998).

謝 辞

本研究(特に第2章)では、前年度までの研究協力者⁽²⁰⁾である各大学の先生方の御指導のもとに進めることができた。その結果、いくつかの研究開発上の課題が抽出・整理され、また、今後の研究の方向性や見通しなどについての有意義な知見が得られたと言える。

ここに御協力いただいた諸先生方に深く謝意を表する次第である。

2001年3月

株式会社 三菱総合研究所

Study on the Advanced Performance Assessment Methods for Geological Disposal

(REPORT ON RESULT OF JNC-COMMISSIONED RESEARCH SUMMARY)

March, 2001

Mitsubishi Research Institute, Inc.

Study on the Advanced Performance Assessment Methods for Geological Disposal

Hiroo Ohkubo*

Abstract

With regard to future research on geological disposal indicated in the government's evaluation, the problems concerning R&D on performance assessment (PA) have been classified. Furthermore, a study has been conducted in the form of a questionnaire for the experts. Based on these opinions, those issues to be focused on in future research have been picked out and the future direction for R&D on these problems has also been discussed.

Secondly to make clear what the future direction should be for advanced assessment model and techniques, ① a database system (QUASAR) designed to assure the quality of the scenario safety analysis, ② a documentation system for FEP-based Process Influence Diagram (PID) information using the SCENIC application as an example of the volcanism variant, ③ "Variant-Oriented (VO) approach" using a compartment model for various faulting variants, ④ the possibility of applying the "complex system" idea to PA, have been studied.

On the basis of the wide range of investigations in the light of the most recent research information, the future directions for R&D on PA have been proposed, with an indication of the future issues related to PA model and techniques and the future direction of sophistication of the PA methods.

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.

2001年3月

地層処分の性能評価手法の高度化に関する研究

大久保博生*

要 旨

国の評価において示される今後の地層処分研究に関する課題について、性能評価の研究開発に係わる課題を整理した。また、専門家への質疑応答形式の調査を実施し、そこで得られた意見・考え等をもとに、今後注力すべき課題の抽出を行うとともに、それら課題に関する研究開発の将来的な方向性を見通しを整理した。

次に、評価モデル及び評価手法の将来的な高度化の方向性を整理するため、

- ① シナリオ安全解析の品質保証を目的とするデータベースシステム (QUASAR) の検討・開発
- ② 火成活動シナリオ変動ケース (マグマ貫入) を例として SCENIC アプリケーションコードを用いた FEP ベースのプロセス・インフルエンス・ダイアグラム (PID) 情報文書化システムの検討・開発
- ③ 様々な地震・断層シナリオ変動ケースに対してコンパートメントモデルを用いた“変動ケース適応型アプローチ (VO) 法” の検討・提言
- ④ 「複雑系」の考え方の性能評価への反映可能性に関する調査・検討を実施した。

以上の最新の研究情報を踏えた多角的な検討により、性能評価研究開発の将来的な方向性が提示されるとともに、性能評価モデル・手法についての課題と将来的な高度化の方向性が明示された。

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の委託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

TABLE OF CONTENTS

	page
1. Introduction	1
2. Discussion of the Research and Development Issues Concerned with Performance Assessment	3
2.1 Classification of Problems in Accordance with the Government Evaluation Results	3
2.2 Systematic Overview of the Problems Based on Expert Opinions	5
3. Descriptions of QUASAR-Quality Assurance Program for Scenario Analysis of Repository Safety	10
3.1 Introduction	10
3.2 Framework of QUASAR	11
3.3 Functionalities of QUASAR	13
3.3.1 Inspection of Previos Scenario Analysis Activities	13
3.3.2 Addition of New Scenario Analysis Activities	14
3.3.3 Parameter Inspection	15
3.3.4 Parameter Updating	15
3.4 Conclusion and Future Work Recommendations	15
3.4.1 Enhancement and Modification of QA standards and QUASAR Functionalities	15
3.4.2 Improvement, Modification and Completeness of Information Stored in the QUASAR Database	16
4. Quality Assurance Documentation of Scenario Analysis : Illustration for a Magma Intrusion Variant	18
4.1 Introduction	18
4.2 Near-field Process Influence Diagram	18
4.3 RES Format	19

4.4	Scenario Analysis : Example of Magma Intrusion Variant for Volcanism	19
4.5	Documenting a FEP-based Scenario Analysis Using SCENIC	20
4.6	Future Direction for QUASAR	22
5.	Revised Conceptualization and Approach for Faulting Scenario	24
5.1	Purpose	24
5.2	Rock Interactions	24
5.3	Variant Cases for Faulting Scenario	25
5.4	Enhanced Approach to Model Seismic and Faulting Scenario	
	Variant Impacts on the Near Field	27
5.4.1	Variant-Oriented Approach	27
5.4.2	Compartment Model	28
5.4.3	Summary	28
6.	Research Concerning the Use of the Complex System for Resolving the Problems of Radioactive Waste Disposal	29
6.1	Introduction	29
6.2	Outline of the Complex System Study	29
6.3	Investigation of Previous Examples in Which the Complex System Idea has been Applied to the Problems of Radioactive Waste Disposal	30
6.3.1	The Geological Disposal System as a Complex System	30
6.3.2	Uncertainty Analysis in the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal System	31
6.3.3	Analysis of Coupled Phenomena under the Geological Conditions of the Disposal Site	32
6.3.4	Analysis of the Characteristics of the Natural Phenomena	33
6.3.5	Analysis of Migration Phenomena in Fissured Bedrock	35
6.4	Observation on the Application Potential of the Complex System to the Problems of Radioactive Waste Disposal	36
7.	Conclusion	38
	References	40
	Acknowledgment	

CONTENTS OF FIGURES

	page
Fig. 3-1 Relational information structure of QUASAR.....	12
Fig. 3-2 The hierarchical structure of information retrieval system in QUASAR program	13
Fig. 3-3 QUASAR structure of inclusion of new scenario analysis information	14
Fig. 4-1 Equivalent Representations of the Process System for a HLW Repository	19
Fig. 4-2 Reduced PID for a "Distant Intrusion of a Magma Chamber" Variant	20
Fig. 4-3 Example of SCENIC Data Entry for FEPs	21
Fig. 4-4 Example of SCENIC Data Entry for Influences	21
Fig. 5-1 RES Matrix of Rock Mechanical Interactions	24
Fig. 5-2 Variant Classification of Faulting Scenarios into Acute Events and Chronic Processes, According to Location in Repository Impacted and Possible Consequences	26
Fig. 5-3 Structure and sequence of Variant-Oriented approach to model scenario variant impacts on the near field of the repository	27

1. Introduction

The Japan Nuclear Cycle Development Institute (“JNC” below) plays a key role in research and development concerning the HLW geological disposal and has demonstrated the technical reliability of the HLW geological disposal on the basis of its own research results and those of other institutions both at home and abroad. In this context, JNC concluded its Second Findings defining the technical grounds for selecting the candidate disposal site from 2000 onwards and for establishing the safety standards and summed up these findings in H12report (JNC, 1999)⁽¹³⁾ that was submitted to the government in November 1999. At present, the government is in the process of summing up its evaluation results of the H12report. The evaluation document will indicate the problem areas of future research on geological disposal.

In the research and development work, JNC will undertake in connection with the performance assessment of HLW geological disposal site, it will therefore be necessary to achieve further progress in the development of more sophisticated evaluation models and methods by responding in an appropriate manner to the problem areas indicated in the government’s evaluation.

Thus scrutinizing the latest research data and information from a wide range of perspectives, the present study examines the future research and development avenues with regard to performance assessment by giving due consideration to the main issues set forth in the government’s evaluation and it also analyzes the problems concerning the H12report in a systematic manner and assesses the directions for future development work on more advanced models and methods. More specifically, an attempt has been made, first, to systematically order the problems related to the H12report in accordance with the government’s evaluation data and the expert opinions (Chapter 2). The next step is to examine and develop a database system for the purpose of quality assurance concerning the scenario safety analysis (Chapter 3). Furthermore, a scenario variant due to volcanic activity (magma intrusion) will be used as an example for studying and developing a system for documenting FEP-based Process Influence Diagram information (Chapter 4). Furthermore, the development of a high-level concept model

shall be investigated with a view to handling various variant cases of faulting scenario (Chapter 5). Finally, a study is made to scrutinize the potential for reflecting the “complex system” idea in performance assessment (Chapter 6).

2. Discussion of the Research and Development Issues Concerned with Performance Assessment

2.1. Classification of Problems in Accordance with the Government Evaluation Results

The Government's evaluation of the H12report (AEC, 2000)⁽⁷⁾ assess the level of attainment of the research results for each research area corresponding to the individual targets of the H12report laid down in the AEC's Expert Subcommittee Report and suggests the research problem for the future and the way in which research should proceed. In this context, the various items JNC itself feels it should investigate in the future can be listed up as follows :

- Confirming whether an adequate delay effect on nuclide migration (such as matrix diffusion and sorption) can be expected
- Checking whether the hydrological conditions are capable of limiting groundwater migration to a sufficiently low level (with respect to the hydraulic gradient and hydraulic conductivity of the rock)
- Confirming the chemical conditions capable of limiting nuclide migration to a sufficiently low level by focusing on the chemical reactions between groundwater and the nuclide
- Concerning the effects of the excavation of cavities in deep underground strata on long-term safety, measurements and monitoring should be continued and gather data and develop quality control methods.
- There is an inadequate amount of findings and data that can be used in an evaluation of the reaction rates applicable to the reaction occurring gradually over a long period, and the analysis procedures do not have a sufficient level of reliability.
- Methods for evaluating long-term safety over period in excess of 100,000 years and ways in which safety should be assured.

The following list is an itemized account of the future research and development efforts indicated by the government.

- Accumulation of data on the conditions in the in-depth ground environment by building an ultra-depth research station for crystal rock planned in Mizunami City and an in-depth Research Center (provisional name) aimed at the sedimentary rock under planning application in Horonobe Town in Hokkaido and by using these facilities.
- Positive promotion of international cooperation with foreign countries for the effective execution of research and development.
- For each step in the future site selection, efforts are required for a systematic approach to the investigation of the deep underground from the surface in connection with the engineering aspects of geological disposal and safety assessment of the geological disposal system.
- Detailed investigation on overpack corrosion and on degradation of buffer material and concrete studies on inspection techniques for ensuring the reliability of weld joints
- Establishment of measurement and monitoring system concerning dynamic behavior of groundwater and ground strata during the processes of verification, construction and operation such as the drilling of disposal shaft, transport and stationary operation including remote handling of waste and buffer material
- Accumulation of data used for safety assessment, identification of the reasons for discarding scenarios that are unlikely to materialize, and study of risk assessment using probabilistic safety assessment techniques
- Detailed study of the correlation between the data obtained from studies of the geological environment and of the effect of variations in the input values on the evaluation results. Confirming the reliability of the data by comparison with the actual measurement values at every stage of geological disposal, and establishing the models capable of representing the characteristics of the actual site at high accuracy.

2.2. Systematic Overview of the Problems Based on Expert Opinions

In the course of this study before the submission of the H12report, the research and development issues pertaining to performance assessment have been investigated and discussed by a small number of experts on the basis of the most recent research information and an analysis of the results from all angles (MRI, 1999, 2000)^{(17) (20)}. On this research, however, the opinions of the experts in the field concerning the issues and future direction of research and development after the H12report have been collected in a questionnaire inquiry and systematically ordered.

First, those issues and problems that are considered as having a high priority have been classified and condensed to be listed up as follows : (The stage or phase in which these issues and problems are reflected have been entered against each of the above themes in such a manner that the process from the comparatively initial stage to the selection of the candidate site (selection stage of area under outline or precise survey) is A, the process from the study of the site characteristics to the disposal site selection (selection stage of site for constructing final disposal facility) is B and the phase from the basic safety guidelines for government activities to the safety investigation criteria is C.)

① Principle and approach concerning performance assessment

- The application of the principle of defense-in-depth to performance assessment (e.g., quantification of the effect of perturbations from the surface on the depth of the disposal site) [A]
- Introduction of probabilistic safety (risk analysis, scenario weighting) [A]
- Evaluation of impact of natural external perturbation phenomena in response to the distance of the location of these external disturbances from the disposal site [A]

② Modeling techniques

- Development of numerical model joining micro and macro behaviors (e.g., including model analysis using quantum mechanics and atomic/molecular statistical dynamics related to long-term maintenance of multi-barrier function (material migration and sorption, long-term degradation/ deformation)) [A]

- Modeling of non-uniform fracture distribution and model validation studies (from the viewpoints of both dynamics and hydrology) [A]
 - Verification in terms of both the mechanical description of the migration model and natural analogues, including the dependence of the parameters on the sorption distribution coefficient and matrix diffusion [B,C]
- ③ Calculation techniques
- Development of large-scale calculation simulation techniques based on precise modeling [A,B,C]
- ④ Data
- Actual measurement of solubility [A] and development of a thermodynamic database for the solubility in saline groundwater [B, C]
 - Acquiring data on the long-term characteristics/performance of the buffer material and near field
 - Acquiring data on hydrological stability of the natural barrier
- ⑤ Elucidation of the phenomena
- Clarifying the solution behavior of solidified glass matrix in a geochemical environment and its effect on bentonite [B, C]
 - Clarifying the influence of such factors as the evolution and behavior of gases in the overpack and buffer material system and the effect of cement and iron corrosion products [B,C]
 - Clarifying the effect of organic materials and microorganisms [A,B,C]
 - Clarifying the chemical form and the mobility of nuclide in the bed rock [A]
 - Clarifying the migration of nuclide in compressed bentonite [B,C]
- ⑥ Miscellaneous
- Logical and intuitive* demonstration of the stability of the underground as the essential precondition and of the robustness of the isolation performance of the

* Intuitive demonstration in this context means a way of doing research not only in an objective scientific manner but also in a subjective way of looking at things seeing that the indices for what is safe depend from one individual to another.

artificial barrier [A,B]

Secondly, expert opinions on the issue as to the method and logic to be established in order to avoid the influence of natural phenomena such as seismicity and faulting, igneous and volcanic activity, etc. have been collected and classified to be listed up as follows :

① Methods and Theoretical Construct for Avoidance of these phenomena

- Existing faults can be avoided by in-depth seismic wave surveys at high accuracy (especially by using the reflection method) to identify the geological structure of the ground. For faults detected when the tunnel ways for disposal are excavated, it is important to develop a manual and establish the methods for avoiding such faults in accordance with the scale or size.
- The avoidance of volcanic activity can be explained by avoiding volcanic zone.
- The views of the experts in the geology and geophysics should be reflected on a wide scale.
- It is necessary to proceed with studies only after it has been sufficiently proven that adequate stability does exist so that measures which achieve adequate functional performance with artificial barriers alone can be adopted.

② Opinions and logical constructs assuming that the Influences cannot be obviated

(2-1) Scenario and risk analysis

- Risk theory must be employed on the premise that there is no absolute safety.
- While quantifying the scenario influence corresponding to the distance of the location giving rise to natural phenomena from the disposal site, the procedure must be to quantify the probability of this scenario with the greatest possible accuracy. The possibility of occurrence of these scenarios, the magnitude of the effect and the remoteness of time from the present have to be taken into account to establish an importance ranking of safety. A scenario with a probability of occurrence below a certain level should not be considered an absolute assurance that “accident” or “disasters” can or will be avoided but rather that feasible measures or actions should be developed and interventions (countermeasures against disasters) expected to be taken by future generations should be considered.

(2-2) Miscellaneous

- When disposal has taken place in full recognition of the roughly anticipated effects of disposal, attention has to be called to the importance of the unresolved questions that still remain unanswered in case that disposal has not taken place.
- It is important to adopt the attitude that the possibility of effects should be eliminated as best is possible with current knowledge.
- Efforts are needed to “improve reliability” by focusing on investigation and research at the Horonobe facility.

Finally, the expert opinions on the role that performance assessment linked to both information on the geological environment and design information can be expected to play in the future, have been gathered and ordered in a systematic manner. The following overview is a summary of the information.

① Item required for performance assessment

- Establishing a precise performance assessment model covering artificial barrier-natural barrier (near field) –natural barrier (far field) continuously
- Effectively expressing the geological environment as boundary conditions to prepare a complex performance assessment model and perform simulation
- Performance assessment and parameter sensitivity analysis (or parameter space determination) based on the partial information obtained from experiments
- Redesigning the model to permit logical explanation of the robustness of the performance assessment as best is possible.
- Quantifying the effect of natural phenomena and the effect of disturbances from the surface with respect to the disposal depth as well as quantifying the uncertainty of the scenario, model, and data used in general safety assessment.
- Research and development need to be carried out on the long-term soundness of the bentonite, the nuclide migration mechanism in the bentonite, the possibilities of using cement materials for the structure, and evaluation techniques for assessing the groundwater flow.

② Results obtained from performance assessment

- Uniform and consistent explanations concerning the development of geological survey methods, the interpretation of survey data and the design of structures on the basis of performance assessment models
- Consolidating the program for constructing the disposal site through the selection and identification of the most important aspects of survey items for studying the site characteristics related to safety and identification of the most important points in the design of the disposal site
- Achieving reliability for the disposal system as a whole and establishing the validity of the design (or rationality of the design)
- Identifying the impacts on safety performance of each barrier component
- Determining the “extra margin” of the design and the level of detail of the design

③ Miscellaneous

- System for preventing accidents during the construction works

3. Descriptions of QUASAR – Quality Assurance Program for Scenario Analysis of Repository Safety

3.1. Introduction

QUASAR is a computer code that stands for *Q*uality Assurance Program for JNC Scenario Analysis of Repository Safety. QUASAR is an application developed from Microsoft Office ACCESS®.

The development of QUASAR is motivated from MRI experience on previous scenario analysis projects for JNC. Whenever a new calculation case was to be conducted, questions such as the following arose :

- ① Why this scenario calculation is needed?
- ② How different this scenario calculation is from previous similar calculation cases? For example, is this a different conceptual model, a different variant, or simply different because the data are changed?
- ③ What are the differences in the conceptual model?
- ④ Why does this scenario merit consideration? What are likely variants?
- ⑤ What parameters might be changed and why? What are the references cited for the change?
- ⑥ What are the limitations for this calculation?
- ⑦ How credible this calculation results are?
- ⑧ If parameter values are changed, what are the reasons for the change, and what are the sources for the new values? What are the uncertainties for the new values?

An automated information processing system is desired that helps analyst find answers to questions and sort information quickly. This has led to the development of QUASAR.

3.2. Framework of QUASAR

The complete set of information in QUASAR consists of :

- ① Descriptions (text), parameters (numerical values), and illustrations (graphics) that are crucial to describe a scenario analysis, and
- ② QA information including dates, references, staff/affiliations, etc.

All of the information is stored as *elementary data* in QUASAR. Usage of these elementary data for QA purposes is accomplished through multi-dimensional relationships among the elementary data. The preliminary arrangement* and relationships of elementary data is shown in Fig. 3-1. Fig. 3-1 also shows lines between some boxes. These lines connecting boxes represent *relationships* among the tables. Three types of relationships are used in QUASAR :

- ① One-to-one (“1 – 1” lines)
- ② One-to-many (“1 – ∞” lines)
- ③ The relationship other than “one-to-one” and “one-to-many”

* Alternative arrangements are, of course, possible. However, this preliminary arrangement genuinely follows the flow of information for scenario calculations.

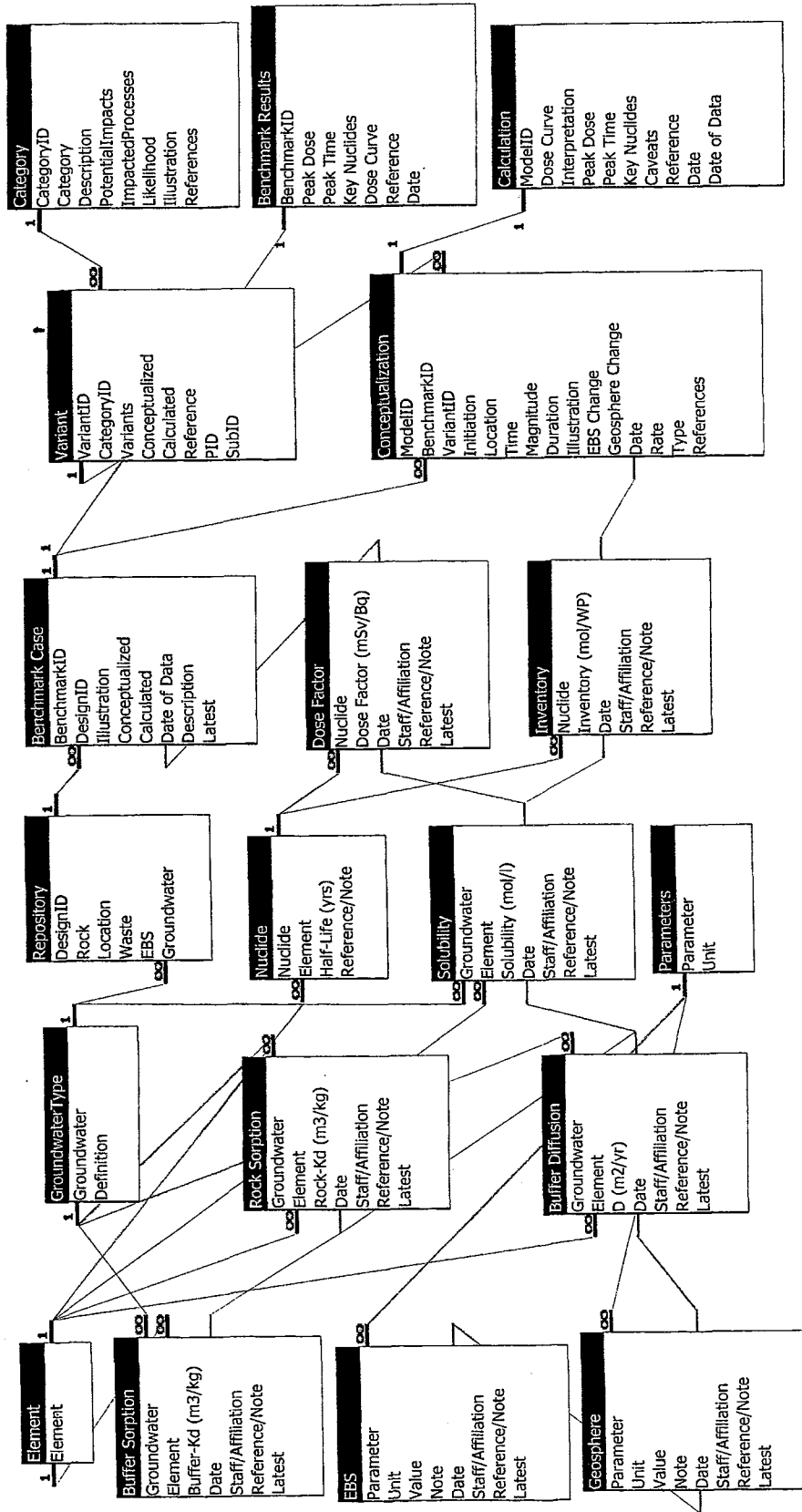


Fig.3-1 Relational information structure of QUASAR

Boxes are tables in the database, each containing a unique piece of information. The table field (column) names are listed inside the boxes. Each table contains at least one field.

3.3. Functionalities of QUASAR

3.3.1. Inspection of Previous Scenario Analysis Activities

Inspection of previous analysis is often needed in order to effectively configure future analysis. This function follows a hierarchical format, as abstracted in Fig. 3-2.

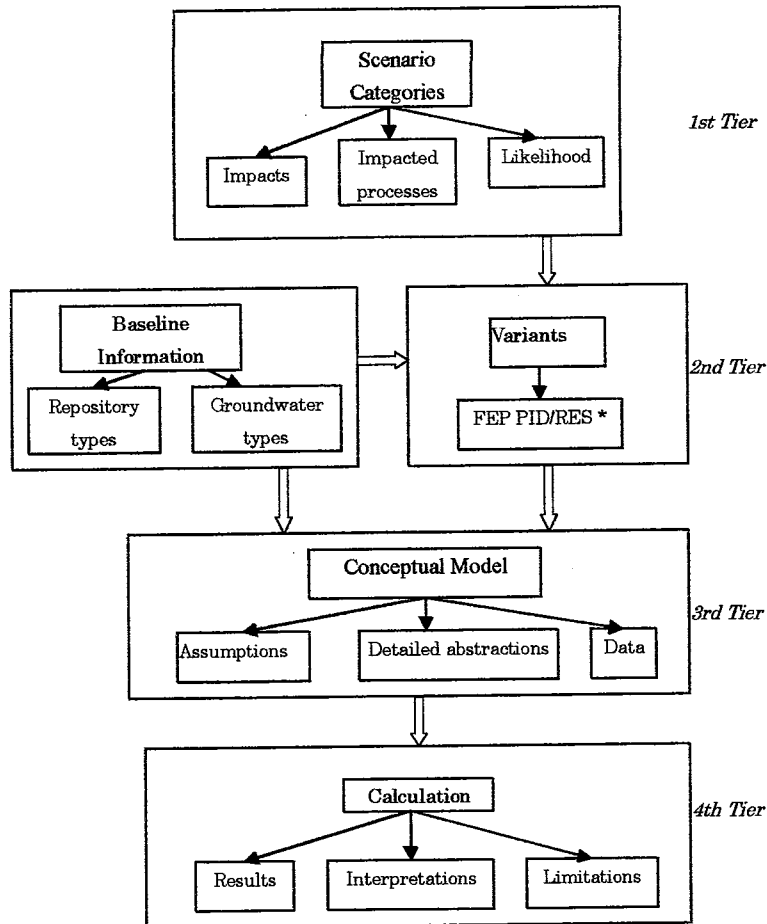


Fig. 3-2 The hierarchical structure of information retrieval system in QUASAR program.

Symbol “*” indicates that FEP analysis could be combined and complemented by THMC analyses.

The hierarchical information query format is achieved by the relationships of elementary data shown in Fig. 3-1.

3.3.2. Addition of New Scenario Analysis Activities

As a QA information container, QUASAR expects new information to be added into the database. This functionality is included in QUASAR for adding any new information, including :

- ① scenario category,
- ② variant,
- ③ conceptual model, and
- ④ calculation case.

The inclusion of new information is illustrated in Fig. 3-3.

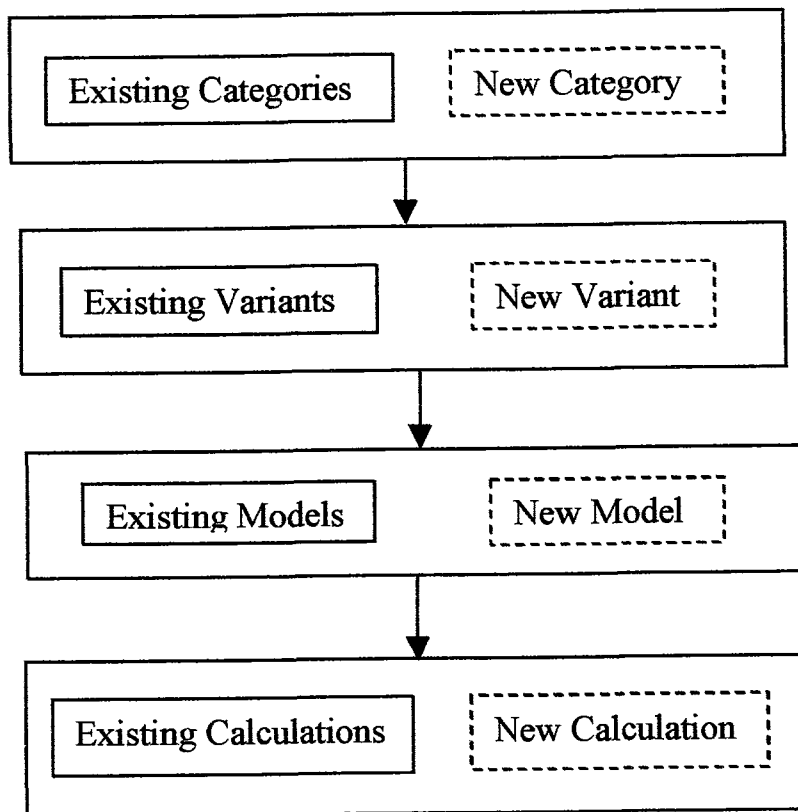


Fig. 3-3 QUASAR structure of inclusion of new scenario analysis information

Once the new information is added successfully, the information is immediately available for inspection by the function described in Section 3.3.1.

3.3.3. Parameter Inspection

There are a lot of data involved in scenario calculations. It is necessary to inspect these data and track their updating histories. QUASAR's Data Inspector allows users efficiently tracking updating histories and obtaining current usage status for a particular parameter used in the calculations. This helps users draw conclusions on data choice and on whether or not the parameter should be updated.

3.3.4. Parameter Updating

Changing values of parameters may lead to new calculations. If the new values are very close to the old values, the results from the new calculation based on the new values may be indistinguishable from the old results. Hence the calculation could be redundant. For this reason, QUASAR checks the closeness of the new value with all of the existing values for the same parameter.

Once the update is accomplished, the updated parameter is immediately available for inspection by Data Inspector of QUASAR, described in Section 3.3.3.

3.4. Conclusion and Future Work Recommendations

3.4.1. Enhancement and Modification of QA Standards and QUASAR Functionalities

This proposed activity focuses on the framework of QUASAR. It is proposed that JNC familiarize itself with QUASAR, and make comments. JNC and MRI would then work together on the following aspects :

- ① Decide if there are any other types of information that should be added to the database. For example, whether parameter and conceptual model uncertainties should be added into the database.
- ② Identify changes and modifications, if any, on elementary data relationships.
- ③ Identify changes and modifications, if any, in the information query hierarchy, as shown in Fig. 3-2.

- ④ Identify changes and modifications, if any, in QA standards in information updating system, such as to decide which fields should be compulsory, or optional.
- ⑤ Decide if there are any other QA standards that should be imposed by QUASAR. The following is a list identified by MRI and based on MRI's point of view :
 - 1) User authorization assignment: some users will be given rights to edit the existing information and the editing action will be recorded.
 - 2) Allow addition of new calculation cases to existing conceptual models that have already been calculated previously.
 - 3) Allow addition of new baseline information, such as rock types, groundwater types, etc.
 - 4) Allow addition of new parameters, e.g., new elements, nuclides, and EBS/geosphere parameters.
 - 5) Prohibit identical scenario analysis information from being added into the database.
 - 6) Automatically conduct uncertainty analysis for parameters.
- ⑥ Identify other functionalities, if any, that should be added to QUASAR. The following is a list from MRI's point of view:
 - 1) Link QUASAR with PID/RES generating code or include PID database as a sub-database in QUASAR.
 - 2) Select and automatically output data into MESHNOTE or TIGER input-file format.
 - 3) Add web-publishing capabilities, so stakeholders can use QUASAR from different places.

3.4.2. Improvement, Modification and Completeness of Information Stored in the QUASAR Database

This task covers the content of QUASAR. As a starting point, the protocol database has been developed based on MRI's experience on JNC scenario analysis projects (MRI, 1999⁽¹⁸⁾, 2000⁽¹⁹⁾), and preliminary plans on QA procedures. Many records are unfortunately either incomplete or possibly inaccurate, which will not meet basic QA standards. To improve this situation, it will be necessary to audit, modify, and complete information

in order to meet JNC's basic QA standards. Therefore, the following work is proposed :

- ① JNC and MRI would audit all the records in the database, check the validity, and replace the information with the correct one if necessary. All of these would be documented by and within QUASAR.
- ② JNC and MRI would seek and fill the absent but compulsory information in the current QUASAR database,
- ③ JNC will supply information based on JNC's own scenario analysis projects, in the prescribed QUASAR format (assisted by MRI, if desired),
- ④ JNC and MRI will conduct a workshop to obtain outside expert comments on some important scenario information, such as credibility of a scenario, etc, and record the results into QUASAR and replace the existing information, if necessary.
- ⑤ MRI will develop an updated PID or RES for the JNC Base (or Benchmark) Case, as well as key scenario variants.

4. Quality Assurance Documentation of Scenario Analysis: Illustration for a Magma Intrusion Variant

4.1. Introduction

The purpose of this chapter is to illustrate a sub-part of the overall QUASAR strategy, specifically the organization and documentation of FEPs into a process system model (MRI, 1994)⁽¹⁶⁾ description using a SCENIC application code previously developed by MRI. Based on this “scenario-based approach”, variant cases for scenario categories can be organized, graphically portrayed, and described within the context of an overall quality assurance framework.

4.2. Near-field Process Influence Diagram

A “process influence diagram” (PID) is the graphical representation of the relevant features, events, and processes (FEPs) of a geological repository system, as well as the impacts or influences between FEPs (Chapman et al., 1995)⁽⁶⁾. PIDs are an extremely effective visual tool for presenting the key components to safety assessment, as well as providing a common basis for discussions of safety assessment among diverse stakeholders. “What if?” questions regarding the safety assessments can be quickly and efficiently examined using the PID format, or the topologically identical RES (rock engineering system) formats (e.g., Hudson, 1992)^{(10)*}.

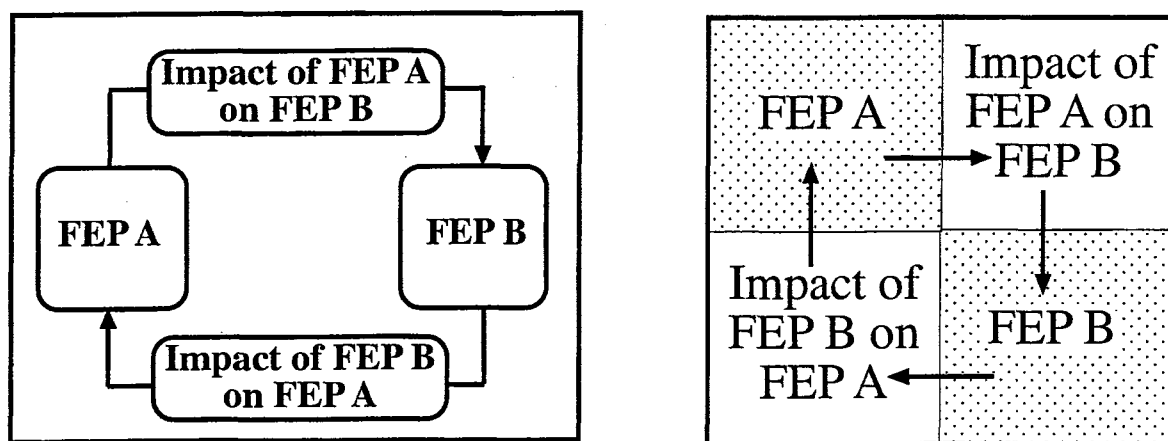
Fortunately, MRI has previously implemented a proprietary application, titled SCENIC, to permit easy and rapid quality assurance documentation of FEPs and influences for scenario analysis (developed for an intermediate level waste, ILW, repository). A SCENIC template has been developed based on the Filemaker Pro® software package,

* It should be noted that alternative methods for organizing and describing the behavior of a repository system is possible, most notably a system based on plotting the energy and mass flows within the system, showing combined thermal, chemical, hydrological, mechanical and radiological processes. In theory, FEP and THMC style descriptions ought to be compatible and convertible, and selection of one approach over another may be a matter of intended application.

selected because this software is available as cross-platforms applications for both Windows and Apple operating systems.

4.3. RES Format

As noted previously, an alternative method of showing FEPs and interactions among FEPs is the RES (Rock Engineering System) approach (Hudson, 1992)⁽¹⁰⁾. In this format, the FEPs are listed in a “spreadsheet format” along a descending diagonal of an interaction matrix or table. The equivalency of the graphical PID format and the spreadsheet RES format is shown in Fig. 4-1.



(a) Graphical Process Influence Diagram (PID) (b) Spreadsheet Rock Engineering System (RES)

Fig. 4-1 Equivalent Representations of the Process System for a HLW Repository

4.4. Scenario Analysis: Example of Magma Intrusion Variant for Volcanism

Fig. 4-2 takes the color-coded portion of Fig. 4-3 of main report and reorganizes it into a simplified PID illustrating specific FEPs and influences that may be impacted by the postulated magma intrusion scenario.

The specific influences judged to be potentially and importantly impacted by the MI(1) variant are numbered in Fig. 4-2. Also note that the right hand FEPs essentially represent calculational steps in assessing the performance of the near field. Such FEPs are the links between the formal PID/RES system description and the concept of Assessment Model Flowchart (AMF, see Chapman et al., 1995)⁽⁶⁾ that MRI has previously advocated to JNC.

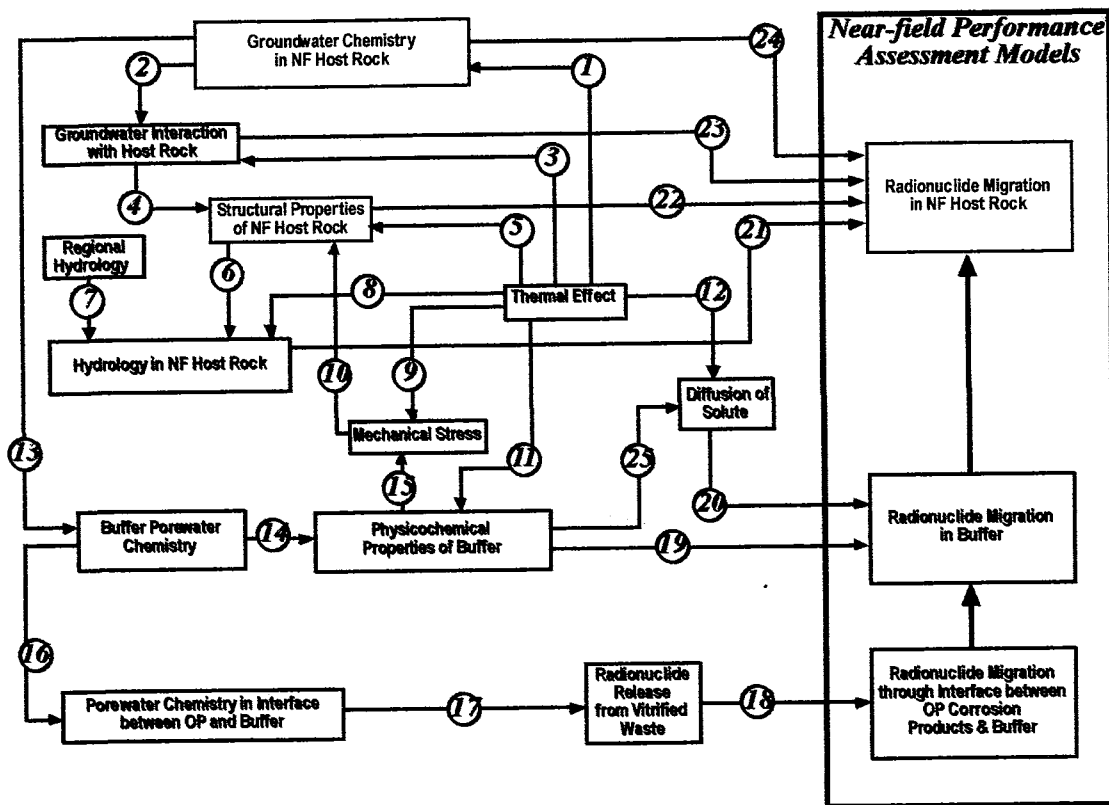


Fig. 4-2 Reduced PID for a “Distant Intrusion of a Magma Chamber” Variant, Showing Only FEPs and Influences (Numbered Lines) Significantly Impacted.

4.5. Documenting a FEP-based Scenario Analysis Using SCENIC

The 15 FEPs and 25 influences shown in Fig. 4-2 must be defined to provide a technically based and traceable foundation to subsequent safety assessment calculations. Examples of the formatting that has been developed for documenting FEPs and Influences are shown in Fig. 4-3 and Fig. 4-4.

Note that the “Influence Level”, as well as the “Influence Description” both could be significantly changed for different scenarios.

The FEP Entry and Influence Entry forms contain both objective information (e.g., references) as well as subjective information (e.g., influence level).

FEP ENTRY

Number

Name

Test

Regions
 Waste Package
 Backfill
 Biosphere
 Mortar
 Damaged Rock
 Concrete Barrier
 Intact Rock

Subregions
 Waste Form
 Concrete Barrier
 Intact Rock
 Canister
 Backfill
 Biosphere
 Mortar
 Damaged Rock

Process Type
 Chemical
 Radiological
 Feature
 Hydrological
 Thermal
 Event
 Mechanical
 Biological

Name	Regions	Region Type

Linked Influences	Influenced By		Influences To	
	Name	Level	Name	Level

Fig. 4-3 Example of SCENIC Data Entry for FEPs.

INFLUENCE ENTRY

Number Name

Origin FEP Destination FEP

Influence Level

Influence Description

Influence Information	Scenario	Date
General Knowledge	<input type="checkbox"/> Well Known <input type="checkbox"/> Moderately Known <input type="checkbox"/> Poorly Known <input type="checkbox"/> Controversial	Expertise of Group <input type="checkbox"/> Expert <input type="checkbox"/> Educated Guess <input type="checkbox"/> No Expertise
Group Consensus	<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> Majority <input type="checkbox"/> No	

Explanatory Notes

Fig. 4-4 Example of SCENIC Data Entry for Influences

4.6. Future Direction for QUASAR

QUASAR, in turn, provides the QA documentation and control to actually conduct scenario calculations, once a process system model has been structured and documented using SCENIC.

A FEP-based approach to scenario analysis has two vital advantages.

① Internal Assurance of Quality and Technical Consistency

A scenario-based approach assures internal technical consistency and traceability within a repository program.

② External Assurance of Reasonable Safety

A graphically based scenario approach provides a readily useful tool for external communication of the safety concept to concerned stakeholders.

To implement both internal and external advantages to a simple-to-use QA system for scenario analysis, the following four “DARE” steps are strongly recommended as components of a QA program to provide reasonable assurance of safety.

(1) Document

It is absolutely vital for any QA system to define and document a reference “repository system (or subsystem) concept”, including documentation of FEPs, influences, assumed conceptual models and reference data as a Base (or “Benchmark”) Case within SCENIC as part of a QUASAR framework. Of key importance at this step is the documentation of the *uncertainties* in this reference description and data.

(2) Analyze

Once the reference system description is documented, group JNC and its support contractors must formally consider potential key scenarios and record specific information and assumptions regarding such scenarios. There would be two outputs from such an activity :

- ① identify key data uncertainties and informational needs arising from consideration of scenarios, and
- ② guidance regarding the set-up of specific calculational cases for each scenario variant.

Based on these outputs, a series of new scenario calculations on repository safety would be conducted.

(3) Revise

New data are collected, older process models are updated, previous assumptions may be modified, and novel concerns from technical and non-technical stakeholders are raised. By implementing a QA program firmly linked to scenario analysis, such new information can be systematically reviewed, and revisions made as necessary.

(4) Evaluate

QA permits all concerned stakeholders to understand the reasons for programmatic decisions and to test their confidence that reasonable assurance of safety is established. Both technical stakeholders and non-technical stakeholders (e.g., local politicians, community groups, news media, etc.) must be encouraged to conclude that safety is reasonably assured. Accordingly, an easy-to-understand format for illustrating and documenting safety assurance is needed. A scenario-based, graphically capable QA program, which focuses on credible “what if?” issues, should greatly help to provide such assurance of safety.

5. Revised Conceptualization and Approach for Faulting Scenario

5.1. Purpose

The ubiquity of seismic activity and faulting in Japan will inevitably raise concerns and questions by stakeholders. It will be necessary to examine various “faulting scenarios”, their likelihood and their potential impacts on a deep geological repository. The purpose of this chapter is to apply a “top-down” view regarding how to develop a system of consideration on “faulting scenarios”, and to identify possible computational modifications needed. Thus, the groundwork is laid for more organizing and conducting more detailed calculations of repository safety for such scenarios.

5.2. Rock Interactions

Fig. 5-1 shows six binary coupled interactions (Hudson, 1992)⁽¹⁰⁾ arising from consideration of three FEPs (features, events and processes) key to repository performance by using RES matrix :

- rock stress (including both fixed regional stress and transient stress from earthquakes),
- rock structure (including both intact matrix and any discontinuities), and
- groundwater flow.

ROCK STRUCTURE	Interaction 1 Fractures affect the values and orientation of the stresses.	Interaction 2 The fracture network governs the secondary permeability.
Interaction 6 Stresses can open or close fractures, and also create them.	ROCK STRESS	Interaction 3 In general, the higher the normal stress, the lower the permeability.
Interaction 5 Continual water flow in fractures affects their properties	Interaction 4 Normal stresses reduced by water pressure	WATER FLOW

Fig. 5-1 RES Matrix of Rock Mechanical Interactions

For example, “rock stress” could be subdivided into “long-term stress conditions” (set by regional, long-duration tectonic characteristics) and “transient stress conditions” (arising from a nearby earthquake event). This subdivision of FEPs leads to the identification of “variant cases” within the overall category of the “faulting scenario”. In the following section, some of these more credible “variant cases” are classified according to whether consequences arise from *sudden* events or *gradual* processes.

5.3. Variant Cases for Faulting Scenario

Fig. 5-2 shows a simple hierarchy of possible variant cases that might be considered for the “faulting scenario” category. Here two types of variants classes* are identified, “Acute Events” and “Chronic Processes”.

Acute Events are events arising from consideration of faulting/ stress state that cause of more or less instantaneous changes in properties of the repository system. Generally, this can be considered as formation (or reactivation) of a fault. A partial list of speculative consequence of such an acute event includes

- instantaneous changes in the properties of the near-field host rock due to change in structure of rock and discontinuity,
- hydro-fracturing of the rock mass by formation of super-lithostatic pressure in pore water within buffer due to a seismic event,
- formation of a breccia zone along an existing discontinuity, with possible extrusion of portions of EBS (including radioactive material) along breccia zone,
- rapid extrusion of clay buffer material along discontinuity in rock,
- shearing of waste package (or, more likely, degraded waste package) with consequent loss of cylindrical geometry for source term.

* Variant cases can, of course, also be generated by simple parameter variation, but such cases would be more properly termed “sensitivity analyses”.

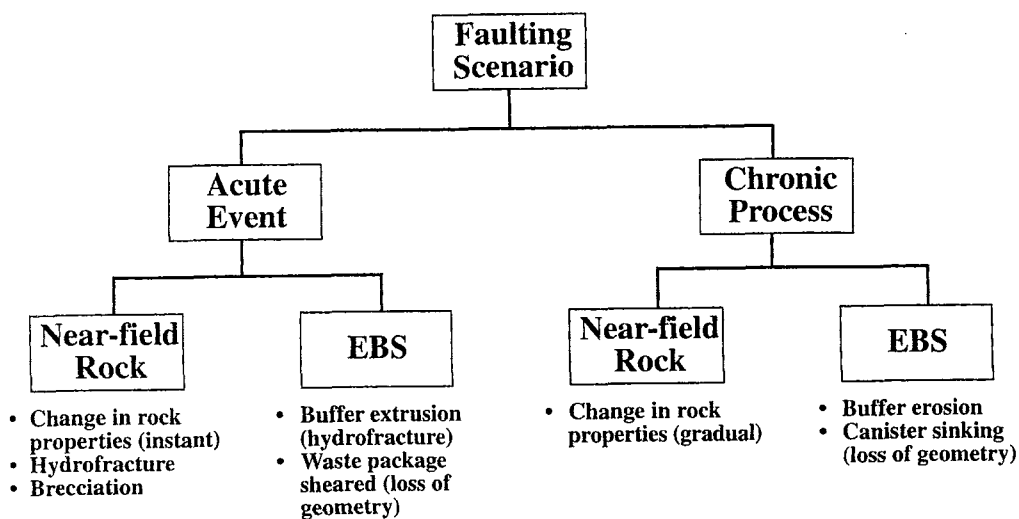


Fig. 5-2 Variant Classification of Faulting Scenarios into Acute Events and Chronic Processes, According to Location in Repository Impacted and Possible Consequences.

Chronic processes are stress-related processes that induce cumulative changes in the repository system. A partial list of speculative consequence of such a chronic event includes :

- gradual changes in the properties of the near-field host rock due to change in structure of rock and discontinuity (e.g., accumulation of micro-fractures),
- slow erosion of clay buffer material along discontinuity in rock,
- enhanced canister sinking or displacement, arising from transient excursions in pore water pressure induced by regular seismic events.

Many variants and their consequences cannot be readily evaluated with existing source-term models and codes. Such codes understandably are based for computational reasons on the initial cylindrical symmetry of the EBS within a repository under normal evolution conditions. Physical disruption and displacement of materials are the potential consequences of many faulting variants, however, and would cause a breakdown of this symmetry. In addition, current assessment models do not readily allow simulation of gradual changes in properties.

5.4. Enhanced Approach to Model Seismic and Faulting Scenario Variant Impacts on the Near Field

5.4.1. Variant-Oriented Approach

This suggests the need for an enhanced modeling approach. The enhanced approach would be based on the concept of “*Variant-Oriented*” (VO) approach. The conceptual model follows important PA issues of the variant (e.g., loss of buffer, change in geometry, gradual change in barrier properties, etc). This approach, however, does not necessitate the development of individual computer codes for every variant considered. Instead, the VO approach is to create “*objects*” (or “*building blocks*”) for modeling a class of variants and then “*build*” a model for a particular variant from these “*blocks*”.

The VO approach may be illustrated in Fig. 5-3.

The sequence of a VO approach would, in general, involve the following two steps as shown in Fig. 5-3 :

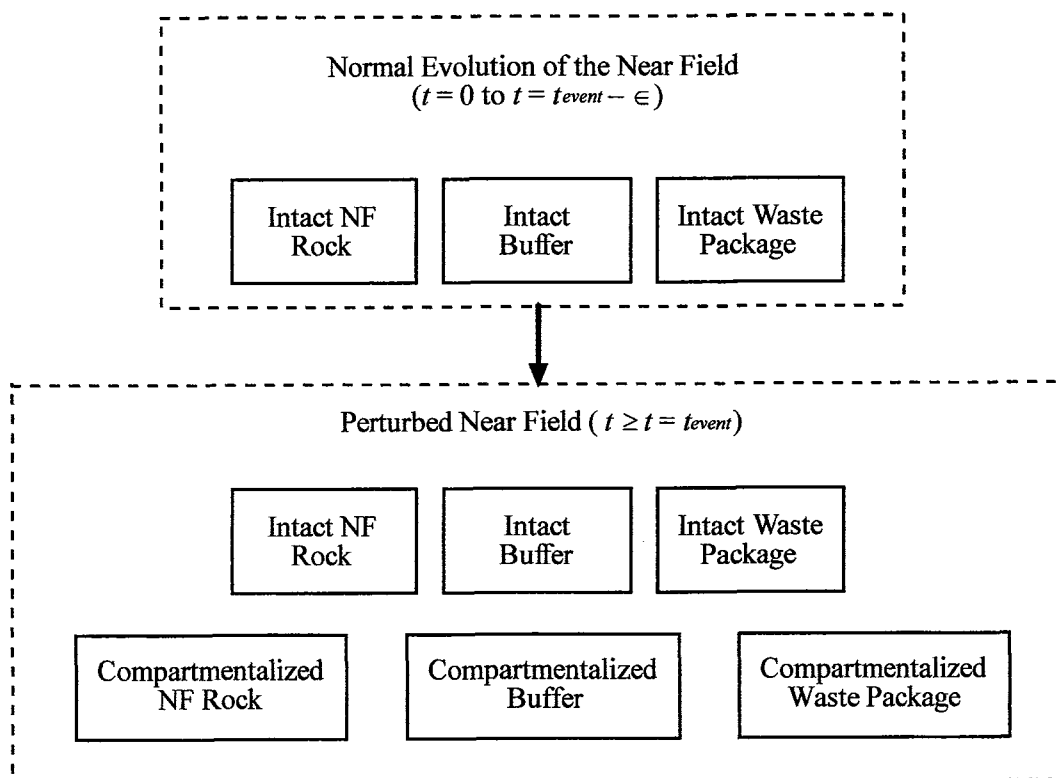


Fig. 5-3 Structure and sequence of Variant-Oriented approach to model scenario variant impacts on the near field of the repository.

- ① Simulate the normal evolution of the repository using the intact component objects (i.e., “Intact NF Rock,” “Intact Buffer,” and “Intact Waste Package”) from $t = 0$ (the emplacement time) to $t = t_{event} - \epsilon$ (ϵ is an infinitesimal; i.e., $t_{event} - \epsilon$ is the time right before the event takes place). Each near-field component is assumed to be physically intact during normal evolution with fixed properties.
- ② Simulate the system under the scenario event using the combination of compartmentalized component and intact component objects for $t \geq t_{event}$. Each compartmentalized component object is built from the compartment objects.

5.4.2. Compartment Model

A compartment model is a numerical method similar to the finite-difference method. The distinction is that a compartment model uses a lower spatial resolution, while a detailed finite-difference model usually uses a higher resolution.

In scenario calculations, uncertainties arising from limited knowledge on the impact can often overwhelm the demand for spatial resolution. Hence, flexibility offered by the compartment model is a desirable feature.

5.4.3. Summary

Previous calculational experiences, as well as the conceptual FEP-based approach to the faulting scenario, indicates that current assessment models and tools are likely to prove inadequate to future needs in safety analysis. In particular, issues involving gradual changes in repository properties and loss of cylindrically symmetric geometry arise in many variant cases for the “faulting scenario,” as well as other scenario categories. A “Variant-Oriented” approach using the “compartment model,” already developed and tested for other repository programs, is recommended as an efficient and reliable basis to overcome these issues.

6. Research Concerning the Use of the Complex System for Resolving the Problems of Radioactive Waste Disposal

6.1. Introduction

The aim of the present study was to examine and discuss the possibility of applying the “complex system” principles and methods to the problems of radioactive waste disposal. For this purpose, an investigation was made to examine and classify some practical examples or embodiments of the complex system and study their application for resolving the problems of radioactive waste disposal.

6.2. Outline of the Complex System Study

We have here summarized the definition and essential features of the complex system and described the research tools and models for this system as well as the scope of complex system research. The complex system is a new idea that began to attract attention in the early 1990s. Its generally accepted definition emphasizes the complexity (comprising physical, eco-, and social systems) and in this sense it has been difficult to understand with the conventional elemental reductionist methodology of the past. As identified in Arthur, 1997⁽⁴⁾, it has the unpredictable nature of a system consisting of a multitude of factors that interfere and interact with each other by forming certain patterns which are fed back to the individual elements or factors. The general nature of such a complex system is characterized by features such as totality, emergence, learnability and adaptability, and unpredictability. This study has concentrated in a description of these factors. The most representative tools and models for system research focus on the notions of chaos, fractal, percolation model, cellular automata, evolutionary computation, and multi-agent simulation. These basic concepts and their respective importance and role have been analyzed in the course of complex system research. Moreover, it has been attempted to give a broad overview of the targets and scope of complex system research by presenting some research fields and project examples engaged in by the Santa Fe Research Institute in the United States, the world's most famous research institution on complex systems⁽⁹⁾.

6.3. Investigation of Previous Examples in Which the Complex System Idea has been Applied to the Problems of Radioactive Waste Disposal

After substantiating the grounds on which the geological disposal system can be considered a complex system, we then proceeded to a study and systematic analysis of the general examples in which the complex system ideas and methods have been applied concerning radioactive waste disposal problems.

6.3.1. The Geological Disposal System as a Complex System

A multi-barrier system such as the one employed in the disposal of radioactive wastes is defined as a system that separates the discarded radioactive wastes from the human environment by multiple barriers consisting of manmade structures and natural geological strata not only through the natural geological environment but rather through a combination of technical measures designed by suitably allowing for the conditions of the geological environment (JNC, 1999)⁽¹³⁾. Each of these multiple barriers function in such a manner as to mutual complement and supplement each other. Furthermore, any changes occurring in the performance characteristics of these barriers and the parameters employed in the system's safety assessment have a non-linear effect on the system as a whole. There is also a vast multiplicity of parameters involved such as physical, geochemical and engineering parameters. In a safety assessment of the system in its entirety it is therefore necessary to assess and determine the long-term effects on the system's performance due to the changes in these parameters in the course of time and their uncertainty. From this perspective, the geological disposal system can be considered a typical large-scale complex system. Moreover, there are a vast number of processes at work inside the geological disposal system itself, and all of these interact with each other. A system of this nature is called a coupled system, and its analysis is of extremely great importance for the system's safety assessment. Thus, a coupled system is just a complex system. From this perception, we have in this study examined prior research examples that seemed to have a promising potential for clarifying the role that uncertainty analysis should play in the the performance assessment of a radioactive waste disposal system and also for a possible application to the phenomenal analysis of

the coupled system under the conditions of the geological disposal environment. Amidst the many components that make up the geological disposal system and amidst the phenomena that have a substantial impact on safety assessment there are some whose characteristics can be accurately assessed on the principles of the complex system. Example of this have been studied and systematically investigated for an analysis of the characteristics of the natural phenomena and an analysis of the phenomena associated with the migration of radioactive nuclide in the fissured bedrock where the methods of the complex system have been applied.

6.3.2. Uncertainty Analysis in the Safety Assessment of Radioactive Waste Disposal System

We have carried out a systematic literature study concerning the deterministic method of H12report (JNC, 1999)⁽¹³⁾ and the probabilistic method for the safety assessment of the Yucca Mountain Site (VA report) (USDOE, 1998)⁽²²⁾. Although the utmost effort was made to use realistic data to the greatest possible extent to come to terms with the uncertainty of the various data used for safety assessment in Japan in the past, the practice was to use conservative data for those data whose uncertainty had not been adequately assessed. Thus, basically it can be said to be a sort of deterministic safety assessment approach with safety side. H12report document defines five categories of uncertainty, namely, variation of the geological environment, design options, uncertainty of scenario, uncertainty of the model, and uncertainty of the data. In order to carry out a systematic analysis of these uncertainties the report postulates an analysis case for each of the above categories of uncertainty by way of establishing a reference case for analysis based on a mutual comparison of the results and by comparing each case with the reference case. In contrast to this, the VA report adopts a probabilistic approach to the uncertainties associated with the various types of data. In this evaluation method, a Monte Carlo type method is used to come to terms with the inherent uncertainty of the parameters by calculating the dose distribution in a specific location (installation location of critical groups, 20km from disposal site) in addition to a series of deterministic model systems for expressing the disposal site and related

geological structures. In this study, we have described the principles and methods of uncertainty analysis by conducting a Monte Carlo style simulation. For the safety assessment of geological disposal systems it can be seen that there is a gradual shift worldwide from the deterministic to the probabilistic approach. The latter may be regarded as being extremely useful and as a rational performance assessment method for geological disposal systems, in other words, complex system that are subject to a vast number of elements and processes.

6.3.3. Analysis of Coupled Phenomena under the Geological Conditions of the Disposal Site

In a coupled system, there are two or more phenomena that mutually interact with each other. In this type of system it is therefore necessary to solve the phenomena not independently but simultaneously. This concept comes extremely close to that of the complex system. Because the coupled system possess a very large variety of parameters and the processes in a coupled system are related to each other in a non-linear dependence, there are limiting conditions for experimental research. While the mainstream of present research is based on numerical simulation, the computer resources required for this are vast so that there are not many attempts made to investigate coupled phenomena with three or more factors. The Monju Reactor Accident has been attributed to vibrations of the coupled system of the thermometer sheath and thermometer fluid. This suggests the importance and difficulty of analyzing the behavior of a coupled system. Yet, on the other hand, there is a large variety of coupled phenomena in a geological disposal system. For the evaluation of the rate of aging of the waste package and structure and of the migration rate of the radioactive nuclide in the natural barrier, for example, it is necessary to consider in a simultaneous fashion a great variety of processes such as thermal, mechanical, chemical and hydrological processes that all interact and exert a mutual influence on each other. In this study we have systematically investigated research examples conducted by two groups of researchers and believed to be useful for an analysis of coupled phenomena in a geological disposal system. The Maekawa et al. group (Maekawa et al., 1998⁽¹⁵⁾); Ishida,

1999⁽¹²⁾) developed a coupled system analysis system to investigate coupled phenomena such as the deformation and damage of solids with micro-cracks and the generation and transport of mass and energy as a tool for predicting long-term quality and structural changes under various external loads and environmental actions. In broad terms, this system consists of an analysis system for a thermodynamic coupled system (DuCOM) attempting to quantify the long-term aging and degenerative phenomena on thermodynamic principles on the basis of the formation of solids, and a numerical analysis method (COM3) trying to predict the dynamic-mechanical behavior of structure subjected to external loads such as earthquake. Furthermore, in view of the interrelation that exists between the two, this group also proposes a unified performance assessment methods embracing both these systems. The DuCOM system includes models such as the hydration heat model, porous structure formation model, moisture retention and migration model, chloride ion migration model, carbon dioxide migration and equilibrium model, ion equilibrium model, carbonic acidification reaction model, oxygen transport and equilibrium model, and the steel corrosion model. The coupled system of all of these reactions is dealt with as a unified system. Furthermore, the Furukawa et al. group (Furukawa et al. , 1985⁽¹¹⁾) has analyzed the unsteady thermal stresses occurring in a hollow cylindrical coupled system subject to the simultaneous action of temperature changes and external forces by using numerical computation. Based on the results obtained from this analysis, this group found that in a coupled system, the internal pressure has a great influence on the temperature distribution when the axial strain is restrained under the effect of the internal pressure and the mechanical boundary conditions and that the thermal stress components are also subject to the influence of the internal pressure. This is an interesting system as an example whose shape is similar to that of the overpack, bentonite and disposal tunnel.

6.3.4. Analysis of the Characteristics of the Natural Phenomena

In H12 report it has been pointed out that the geological environment capable of accommodating the geological disposal site needs to maintain the expected environmental conditions and function over a long time in order that the geological

disposal system may lastingly provide its initial safety performance. The report also notes that it is necessary to select with great caution and care a sufficiently safe location so that no dramatic or abrupt changes in geological environment will occur or that the geological disposal system will not lose its performance on a significant scale as a result of gradual but cumulative effect of natural phenomena. The report also argues that it is important to provide suitable mechanical-engineering measures to allow for foreseeable changes. Given as changes that should be allowed for are : 1) seismicity and faulting activities, 2) volcanic and magma activities, 3) uplift/subsidence and erosion, and 4) climate and sea level changes. It has also been noted that one of the objectives of surveying and investigating the conditions of the geological environment is to demonstrate that Japan has a sufficiently stable geological environment for the disposal (indication that the geological environment is stable for the disposal). This conclusion of the stability of Japan's geology should be arrived at by assuming that future geological activities will be analogous to the trends of the past and must therefore be based on the trend pattern of the above natural phenomena recognized in the past and on the regional nature of geological activity.

The frequency at which natural phenomena occur, the mechanism by which they take place and the time-sequential characteristics during their manifestation have been relatively extensively studied using fractal and chaos theories. As an example of a promising way of applying this to the problems of radioactive waste disposal, research has been conducted by using fractal analysis for the characteristics of seismic phenomena (earthquake magnitude distribution, epicenter and active fault line distribution in space, two-point correlation at time of seismic outbreak), by using the R/S analysis method for predicting the probability at which the long-term scenarios of the worst natural phenomena and of severe natural phenomena can occur, and by using time-series chaos analysis techniques for predicting long-term changes in natural phenomena on the basis of past historical data. Outlines of these study findings have been systematically investigated and classified.

6.3.5. Analysis of Migration Phenomena in Fissured Bedrock

It has been proposed that radioactive waste disposal sites should be built in water-impermeable bedrocks. Since it can be assumed, however, that the network of fissures in the rock provides channels for the transport of nuclide leaking from the artificial barriers, it is important to understand the transport of nuclide through the network of fissures in the bedrock when evaluating the safety of the disposal site and making its selection. In the past, the approach used for modeling the nuclide transport in the rock fissure network consisted mainly of the use of models assuming a simple infinite flat-disk shape or models of equivalent uniform porous media (Harada et al., 1980⁽⁸⁾; Pigford et al., 1980⁽²¹⁾; Chambre et al., 1982⁽⁵⁾; Ahn et al., 1990⁽¹⁾). As these models have been simplified from a conservative viewpoint it has been pointed out that there is a need for evaluation on the basis of a more detailed understanding. From this viewpoint, attention has been focused on the fractal nature of the crack distribution in the geological strata and research focused on an analysis of the material transport in the underground strata on the basis of percolation theory. The present study has examined and systematized the theories and examples in this field. The dispersion rate in a percolation lattice follows Fick's dispersion law stating that in a regular dispersion lattice the mean square of the distance is normally proportional to the time ($\langle R_w^2 \rangle \propto t$). In a percolation lattice, however, there are "blind alleys" resulting in a slowdown of the dispersion rate. As a result, the shortest step number from the starting point to a point at the same distance varies according to the path. Owing to these properties, the propagation will not be consistent with a normal Fick type dispersion expression. Thus, the dispersion behavior in this case is characterized in that an anomalous dispersion coefficient d_w is used that meets the expression $\langle R_w^2 \rangle \propto t^{2/d_w}$. The research group under Ahn (Ahn et al. 1991⁽²⁾; Kohama, 1990⁽¹⁴⁾; Akaishi, 1991⁽³⁾) has analyzed the migration of nuclide by using random walk simulation. For this research, the group generated a model fissure network on a two-dimensional hexagonal lattice using a computer on the basis of the information on underground fissure networks obtained from boring investigations. In this manner, the group was successful in reproducing the anomalous dispersion phenomena. The group also succeeded in

establishing the mathematical equations for anomalous dispersion on a percolation lattice with fractal and fracton dimensions and the anomalous dispersion coefficient by expanding the Gauss distribution for Fick's dispersion to characterize the system as a percolation lattice.

6.4. Observation on the Application Potential of the Complex System to the Problems of Radioactive Waste Disposal

With regard to use of uncertainty analysis for evaluating the safety of radioactive waste disposal systems there has been a shift from the conventional deterministic evaluation methods in favor of probabilistic evaluation techniques using the Monte Carlo method, and it is believed that this will lead to a rational evaluation without being excessively conservative. In the future, numerical methods and simulation techniques will be expected to be developed for the evaluation of the characteristics of large-scale complex system for radioactive waste disposal systems.

For coupled system analysis, the main stream approach is to use numerical simulation. Analysis systems for coupled systems such as structure-fluid or structure-electric field systems are being intensively investigated both in hardware and software terms. However, coupled systems that consist of three or more processes have rarely been investigated by allowing for chemical and hydrological processes. Because of the constraints in computer resource availability and the absence of a model it is, at present, difficult to perform an analysis of a large-scale coupled system. This is a major factor of the uncertainty in the safety assessment of geological disposal systems. For the future it will therefore be desirable to have analysis systems for large-scale coupled systems allowing for thermal, chemical and hydrological processes. However, the most realistic approach for the present will be to advance the existing numerical simulation systems for relatively small-scale coupled system to a higher level of sophistication both in hardware and software terms.

For the analysis of the characteristics of natural phenomena, there is a large body of research that has already been conducted with regard to the fractal analysis of the seismic phenomena, R/S analysis of natural phenomena, chaos-type time-series analysis

of natural phenomena, and long-term prediction discussed in this study. These approaches provide valuable insights on the patterns in which natural phenomena occur both in space and time and on their characteristics at the time of occurrence. In this sense, they make a considerable contribution to the effective site selection and site safety assessment. However, it must also be remembered that these methods contain an element of considerable uncertainty despite their natural usefulness in making long-term predictions and also that when allowing for an ultra-long term scale there is a distinct possibility that structural changes will occur in the geological strata and that the statistical properties derived from past historical data will therefore no longer be applicable.

With regard to the transport phenomena of radioactive nuclide in fissured bedrock, a literature review was conducted on previous research using percolation theory, and as a result it was found to be only a single prior study using the complex system method for dealing with the problems of radioactive waste disposal in a most direct manner. The phenomena of underground permeation are the area in which percolation theory is most widely applied. In the future, this theory should therefore be applied to radioactive waste disposal systems, and it is desirable to perform the calculation of nuclide migration rate, coupled analysis of other processes and comparison with practical experiment results.

Complex system research is still in the development stage, and there are only few examples of its application to the problems of radioactive waste disposal so that it can only make a limited contribution to the problem at present. Yet, radioactive waste disposal systems are essentially large-scale complex systems. The further development of complex system research is thus essential for overcoming the problems of radioactive waste disposal. This research has a distinct potential for making a substantial contribution to resolving these problems on the basis of new insights to be gained in the future.

7. Conclusion

The tasks performed in the current fiscal year are as follows :

- (1) Discussion of the research and development issues concerned with performance assessment

With regard to future research on geological disposal indicated in the government's evaluation, the problems concerning the research and development work on performance assessment have been classified. Furthermore, a study has been conducted in the form of a questionnaire for the experts. Based on the opinions and ideas gleaned from this study, those issues have been picked out that need to be focused on in future research. In addition, the future direction for research and development work on these problems has also been reviewed and put into a systematic perspective.

- (2) Discussion of assessment model and sophistication of assessment method

In order to make clear what the future direction should be for the sophistication of assessment model and techniques, the following tasks have been performed :

- ① to study and develop a database system (QUASAR) designed to assure the quality of the scenario safety analysis
- ② to study and develop a documentation system for FEP-based Process Influence Diagram (PID) information using the SCENIC application as an example of the volcanic activity scenario variant case (magma intrusion)
- ③ to study and develop "Variant-Oriented (VO) approach" using a compartment model for various faulting scenario variant cases
- ④ to study and investigate the possibility of applying the "complex system" idea to performance assessment

On the basis of the wide range of investigations in the light of the most recent research information, the future directions for research and development work on performance assessment have been proposed, with an indication of the future issues related to performance assessment model and techniques and the future direction of sophistication of the performance assessment methods.

The following items can be pointed out as requiring further investigation :

- ① Specific research on a number of concrete issues pointed out by the experts in their opinions
- ② Practical application of the database that has now been examined and developed and the PID information documenting system in the process of future scenario analysis
- ③ Achieving a scenario analysis method using the VO approach that has now been examined and proposed
- ④ Developing a performance assessment model that incorporates the “complex system” idea

References

- (1) J. Ahn and A. Suzuki : 「Sensitivity Analysis for a High-Level Radioactive Waste Repository with the Bounding Fracture-Transport Model」 Rad. Waste Manage., Nuclear Fuel Cycle, 14, 257-273 (1990).
- (2) J. Ahn, Y. Furuhashi, Y. Li and A. Suzuki : 「Analysis of Radionuclide Transport through Fracture Networks by Percolation Theory」 J. Nucl. Sci. Technol., 433-446 (1991).
- (3) Y. Akaishi : Bachelor Thesis, Univ. of Tokyo (1991).
- (4) B. Arthur : 「Introduction to Economics of Increasing Return」 Diamond Weekly and Harvard Business Ed., Economics of Complex System, Diamond Co. (in Japanese) (1997).
- (5) P. Chambre, et al. : 「Analytical Performance Models for Geologic Repositories」 LBL-14842 (1982).
- (6) N. Chapman, J. Andersson, P. Robinson, K. Skagius, C.-O. Wene, M. Wiborgh and S. Wingefors : 「System Analysis, Scenario Construction, and Consequence Analysis Definition for SITE-94」 SKI TR 95:26, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden (1995).
- (7) AEC/Backend Subcommittee : 「Evaluation of Technical Reliability of R&D on HLW Geological Disposal in Japan」 The 66th AEC data 1-1 (2000).
- (8) M. Harada, et al. : 「Migration of Radionuclides through Sorbing Media; Analytical Solution-I」 LBL-10500 (1980).
- (9) <http://www.santafe.edu/>
- (10) J. Hudson : 「Rock Engineering Systems : Theory and Practice」 Ellis Horwood, New York, NY (1992).
- (11) T. Furukawa and Y. Takeuchi : 「Unsteady Thermal Stress in a Hollow Cylindrical Coupled System subject to the Simultaneous Action of Temperature Changes and External Forces」 Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers (A) 51, 2799 (1985).

- (12) T. Ishida and K. Maekawa : 「A Coupled System Analysis System for the Generation and Transport of Mass and Energy, and the Deformation and Stress Field」 Transactions of Japan Society of Civil Engineers, 627/V-44 13 (1999).
- (13) JNC : 「Technical Reliability of HLW Geological Disposal in Japan – The Second Findings on R&D of Geological Disposal – Part 3 Safety Assessment of Geological Disposal System」 JNC TN1400 99-023 (1999).
- (14) H. Kohama : Bachelor Thesis, Univ. of Tokyo (1990).
- (15) K. Maekawa, T. Ishida and T. Tuchiya : 「A Coupled System Analysis System on the Deformation and Damage of Solid with Fine Porous, and on the Generation and Transport of Mass and Energy」 Proceedings of The 3th IML Symposium (1998).
- (16) MRI : 「Study of Quantitative Assessment Methods of Events with an Extremely Low Frequency of Occurrence Concerning Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (II) - Preliminary Study on Alternative Groundwater Scenario -」 PNC TJ1222 94-001 (1994).
- (17) MRI : 「Study on the Advanced Performance Assessment Methods Concerning Nuclide Migration through Heterogeneous Media」 JNC ZJ1400 99-010 (1999).
- (18) MRI : 「Quantitative Assessment of Consequences of Natural Events for the Performance of Waste Disposal Isolation System – On Consequences of Natural Events in Groundwater Scenario -」 JNC TJ1400 99-019 (1999).
- (19) MRI : 「Quantitative Assessment of Consequences of Natural Events for the Performance of Waste Disposal Isolation System : Part (II)」 JNC TJ1400 99-046 (1999).
- (20) MRI : 「Study on the Advanced Performance Assessment Methods/Models for Geological Disposal」 JNC ZJ1400 99-048 (2000).
- (21) T. Pigford, et al. : 「Migration of Radionuclides through Sorbing Media; Analytical Solution-II」 LBL-11616 (1980).
- (22) US DOE : 「Viability Assessment of a Repository at Yucca Mountain」 DOE/RW-0508 (1998).

Acknowledgment

The progress of this study, Chapter 2 in particular, was made possible by the guidance of the professors at the respective university who were the research supporters⁽²⁰⁾ up to the previous year. As a result, many issues for the research and development have been extracted and arranged, and significant first-hand knowledge was gained in areas such as the outlook on the direction of the future research efforts.

We acknowledge and give our deep appreciation to each professor.

March 2001

Mitsubishi Research Institute, Inc.