

# 地層処分システムの性能評価における シナリオ開発手法に関する研究

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	N1410 92-092	1995. 6. 12
この資料は技術管理室保存資料です 閲覧には技術資料閲覧票が必要です 動力炉・核燃料開発事業団 技術協力部技術管理室		

平成4年9月

動力炉・核燃料開発事業団

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒107 東京都港区赤坂1-9-13

動力炉・核燃料開発事業団

技術協力部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technical Evaluation and Patent Office, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 9-13, 1-chome, Akasaka, Minato-ku, Tokyo 107, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1994

地層処分システムの性能評価におけるシナリオ開発手法に関する研究

内藤 守正<sup>\*</sup>, 梅木 博之<sup>\*</sup>, 高瀬 博康<sup>\*\*</sup>

要 旨

高レベル放射性廃棄物地層処分システムの性能評価は、地層処分に起因すると考えられる人間環境への影響を予測することによって行われる。

一般に、性能評価の体系は、地層処分システム及びその環境の将来にわたる挙動を想定するシナリオの開発、そのシナリオに基づいてその挙動を表現するためのモデルの開発、及びこのモデルと適切なデータを用いて行う影響解析から構成される。本報告書は、このうちシナリオ開発の方法論について検討したものである。まず、シナリオ開発の一般的な枠組みについて論じ、これに沿って、

- 1)地層処分システムの状態を長期間に変化させる可能性が考えられる現象群の抽出
- 2)影響モードによるシナリオの概略分類とアプローチ法の検討
- 3)現象群の相関関係にもとづきシナリオを作成するための手法についての検討

を行った。さらに、このようなシナリオの検討を踏まえ、具体的な影響解析の枠組みの構築を試みた。

---

\* : 本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ

\*\* : 本社 環境技術開発推進本部 処分研究グループ (現在 : 日揮(株) 原子力事業本部)

## 目 次

1. はじめに	1
2. シナリオ解析の手順	4
2.1 シナリオの役割	4
2.2 シナリオ解析の一般的方法論	4
2.2.1 FEPの抽出, 分類及びスクリーニング	7
2.2.2 シナリオの作成	8
3. シナリオ解析	11
3.1 FEPリストの作成	11
3.2 FEPリストの分類 (影響モードの解析)	13
3.3 シナリオに対するアプローチ法	16
3.3.1 地下水シナリオのアプローチ	16
3.3.2 接近シナリオのアプローチ	18
4. 地下水シナリオ	19
4.1 地層処分システムの構成と機能	19
4.2 地下水シナリオ	20
4.2.1 地質環境	20
4.2.1.1 地下水の流動	21
4.2.1.2 地下水の化学的性質	29
4.2.1.3 鉱物組成及び微視的空隙構造	33
4.2.2 ニアフィールド	35
4.2.2.1 坑道群	35
4.2.2.2 人工バリア及び周辺母岩	37
4.2.3 地下水シナリオの記述	40
4.2.3.1 地下水シナリオの基本ケース	40

4.2.3.2 地下水シナリオの変動ケース .....	51
4.3. 影響解析のためのモデル体系の構築 .....	52
5. まとめと今後の課題 .....	55
5.1 まとめ .....	55
5.2 今後の課題と研究開発の進め方 .....	55
5.2.1 研究開発課題とアプローチ .....	55
5.2.2 必要とされる研究の内容 .....	57
文献 .....	59

## 図表目次

図 1—1	地層処分システム性能評価の体系 .....	3
図 2—1	シナリオ解析の一般的手順 (OECD/NEA, 1992) .....	6
表 3—1	作成された F E P リスト .....	12
図 3—1	人間環境への影響機構によるシナリオの分類 .....	15
図 3—2	地下水シナリオを規定する現象 .....	17
図 4—1	結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩における地下水流動系 .....	23
図 4—2	割れ目の少ない堆積岩における地下水流動系 .....	24
図 4—3	割れ目の少ない堆積岩に覆われた結晶質岩等の地下水流動系 .....	25
図 4—4	結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩における局所流動系 .....	27
図 4—5	割れ目の少ない堆積岩における局所流動系 .....	28
図 4—6	地下水供給域における地球化学的な構成 .....	30
図 4—7	深部の岩体における地球化学的な構成 .....	32
図 4—8	鉱物組成及び微視的空隙構造 .....	34
図 4—9	処分施設のレイアウト .....	36
図 4—10	人工バリアの仕様例 .....	38
図 4—11	ニアフィールドにおける地下水流動パターン (McKinley, 1989) .....	39
図 4—12	地下水シナリオにおける地層処分システムの時間・空間分割の例 .....	41
図 4—13	インフルエンス・ダイアグラムによる地層処分システムの場と状態の記述 .....	42
図 4—14	処分システム要素に関連する F E P 及びその状態を表現するためのインフルエンス・ダイアグラム (地質環境：広域流動系) .....	45
図 4—15	処分システム要素に関連する F E P 及びその状態を表現するためのインフルエンス・ダイアグラム (地質環境：地下水の地球化学) .....	46
図 4—16	処分システム要素に関連する F E P 及びその状態を表現するためのインフルエンス・ダイアグラム (ニアフィールド環境の変遷) .....	48
図 4—17	地下水シナリオの基本ケースに対する解析モデルの体系 .....	54

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分システムの性能評価は、地層処分に起因すると考えられる人間環境への影響を予測することによってなされる。一般に、性能評価の体系は、地層処分システムとその環境の将来にわたる挙動を想定するシナリオ開発、そのシナリオにもとづきその挙動を表現するためのモデル開発、及びこのモデルと適切なデータを用いて行う影響解析からなる。影響解析の結果は、安全基準と比較することによって、地層処分システムの安全性が判断されることになる。これらの関係を簡単に示したものが図1-1である。

シナリオ解析の役割は、地層処分システム及びその環境の将来を時系列的に描像し、モデル開発やデータ収集の枠組みを与えることである。従来行われてきた性能評価では、最も重要なシナリオとして、地下水を移行媒体とする放射性核種の移行に関するシナリオが考えられ、これをもとに予想される現象のモデル化が進められてきた。しかし、シナリオとして、どのようなものをどの程度まで考えればよいかという問題について、系統的かつ透明性をもって対応がなされているかという点、必ずしもそうではない。近年、考慮すべきシナリオを体系的に作成するための一般的な枠組みを開発する努力がなされている。シナリオの作成については、それが将来のことに関わることから、重要なシナリオの選択やその起こりやすさの推定は、専門家の判断に依存する面が大きく、シナリオの構築過程が明確に示されていないこともあった。しかしながら、アプローチ法を明確にし体系的にシナリオ開発を行うことによって完備性を高め、性能評価の中で考慮すべきシナリオの範囲に関する合意の形成にも資することができるものと考えられる。

ここではシナリオ開発の一般的方法論にしたがい、具体的に、長期間にわたって地層処分システムとその環境の状態を変化させる可能性が考えられる現象群の抽出、影響モードによるシナリオの概略分類とそのアプローチ法の検討、そして現象群の相関関係にもとづきシナリオを構成するための手法についての検討を行ったうえでシナリオの作成を試みた。またそのシナリオに沿ったモデル開発並びに影響解析の枠組みの構築を行った。

現在、日本では、地域や岩種を特定することなく、日本の地質環境条件を幅広く視野に収めて行うことを、性能評価を進めるうえでの前提としている。このため、性能評価の枠組みにおいては一般性を重視することが必要であり、シナリオ開発についてもこのような観点から進められた。すなわち、現時点においては、詳細なシナリオそれ自体を作成するのではなく、シナリオ開発を行うためのアプローチ法や必要な情報の性格を明確にすると

ともに、影響解析との一貫性を具体的に示唆することを主要な目的としている。そのため、ここで記述したシナリオに関する検討については、それが十分なものであるかどうかの吟味が尽くされている訳ではなく、今後、研究開発の進展に従って何度も見直されるべきものである。



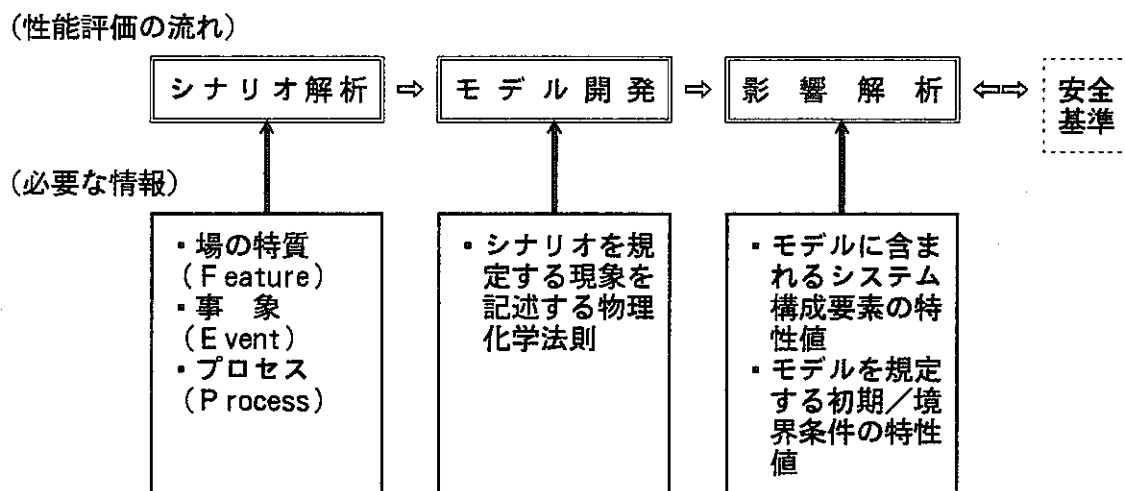


図 1 - 1 地層処分システム性能評価の体系

## 2. シナリオ解析の手順

### 2.1 シナリオの役割

地層処分システムの性能評価にあたっては、高レベル放射性廃棄物の放射性核種が、人間に有意な影響を及ぼす可能性があると考えられる長期の間に、地層処分システムがどのように変化するかということについて検討を行う必要がある。このため、地層処分システムの現在の状態（つまり、処分直後の状態）に加えて、長期間のうちに現在の状態を変化させる可能性のある現象群を規定し、これらを用いて地層処分システムの将来挙動を描いておくことである。OECD/NEAの報告書（OECD/NEA, 1992）では、このような「放射性廃棄物処分場の安全性評価の対象として想定しうるシステムの状態の明確化、幅広い記述及び選定」を「シナリオ解析」と呼んでいる。また、これによって明らかにされる種々の将来状態それぞれを表すために、「シナリオ」という語を用いている。したがって、「シナリオ」とは、特定された可能性のある事象及びプロセスそれぞれの特性とそれらの間の関連性に関する幅広い記述を与えるものである。本研究においても、これをシナリオの定義として、シナリオを作成することにより、地層処分システムの性能を解析するための道筋が規定され、その解析に必要なモデルの開発やデータ収集の枠組みを与えることができる。

### 2.2 シナリオ解析の一般的方法論

シナリオ解析では各分野の専門家の判断に負うところが大きい（たとえば、SKB, 1983; Nagra, 1985; USDOE, 1986）。しかしながら、体系的な手順にもとづいてこれらを行うことによって抜け落ちを防いだり、用いられた主観的な判断を明記して開発の過程を追跡しておくことは可能である。またOECD/NEAのワーキンググループでは、シナリオ解析を体系的に進めるための方法論について議論が行われ、その結果を一般的な手順としてまとめている（Hodgkinson and Sumerling, 1990; OECD/NEA, 1992）。シナリオ解析は、このような一般的な手順にしたがって、広い視野から関連する諸事項を鳥瞰するとともに、予測解析に対して種々の代替手法、モデルを包括しうるような論理的かつ整合的な枠組みを与えることができるように進められるべきことが強調されている。

OECD/NEAのワーキンググループでは、このシナリオ解析の開発を体系的に進めていくための方法として、図2-1に示すように、6つの段階からなるフレームを示している（OECD/NEA, 1992）。

- S1: 現象を規定する特質 (Feature), 事象 (Event) 及びプロセス (Process) の  
明確化 (Identification)
- S2: FEP の分類 (Classification)
- S3: FEP の選別 (Screening)
- S4: FEP の結合 (Formation)
- S5: シナリオ案の選別 (Screening)
- S6: 影響解析のためのシナリオ集約 (Grouping)

ここで、FEPとは、処分場のデザインや地質構造などの特質 (Feature), 突発的に生じる事象 (Event), 及び緩慢に進行するプロセス (Process) の総称として頭文字を合わせたものである。S1～S3は、シナリオ解析に必要なFEPの包括的なリストを作成する過程、S4～S6は、そのリストにもとづいてシナリオを作成する過程である。

上記のS1～S6の手順にしたがって、具体的にシナリオを解析する作業や手法について、以下にその概要をまとめる。

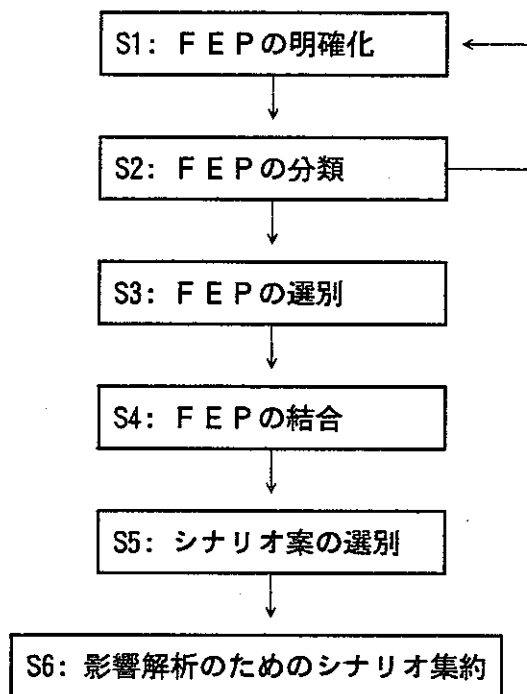


図 2—1 シナリオ解析の一般的手順 (OECD/NEA, 1992)

## 2.2.1 F E Pの抽出, 分類及びスクリーニング

シナリオ解析において, その基礎となるものは, 地層処分システムの長期的性能に関連する可能性のある現象群のリストである。リストの作成は, F E Pの抽出, 分類及びスクリーニングという3つの過程を経て行われる。

### (1) F E Pの抽出

リストの作成にあたっての最初の作業は, F E Pの抽出である。この作業には, 地層処分に関係する幅広い分野の専門家の参加とその作業方法の定式化が不可欠である。これによって, 想定されるかぎりできるだけ多くのF E Pが盛り込まれるようにし, 各専門家が持っているかもしれない先入観による無意識のスクリーニングを避けるような努力がなされる。国際原子力機関(IAEA)やOECD/NEAのワーキンググループ(OECD/NEA, 1992)によって作成された現象リストは, この作業の出発点として参考となる(IAEA, 1983)。

### (2) F E Pの分類

F E Pの分類は, 抽出されたF E Pを種々の視点から体系化する作業であり, この作業を通じて, 抽出の過程でもれていたF E Pを明らかにするとともに, F E Pの重複を避けることができる。F E Pの分類作業は, (1)の抽出作業と相互に密接な関連を有するものである。分類の視点の例としては,

- ・自然現象, 人間活動及び地層処分システム自体に起因するもの
- ・核種放出, 物質移動, 被ばくに関連するもの
- ・核種の移行媒体
- ・時間枠
- ・ニアフィールド, ファーフィールド及び生物圏
- ・生物圏への放出モード

が挙げられる。

### (3) スクリーニング

上記の2過程で抽出し分類された多くの現象群の中には, 地層処分システムの長期的な性能に対して有意な影響を及ぼさないものも含まれている可能性がある。そこで, これらを明確な理由にもとづいて排除することが必要となる。そのため, 抽出されたF E Pは,

1つずつ検討されることになる。スクリーニングの基準として用いられる例としては、

- 科学的合理性
- 発生の確率
- 地層処分システムや環境への影響の程度
- 規制上の要件

等が挙げられる。

## 2.2.2 シナリオの作成

シナリオを作成する方法については、これまでに種々のものが提案されている。これらは、F E Pリストから出発する方法（ボトムアップな方法）、地層処分システムの性能項目から遡って関連しうるシナリオを作成する方法（トップダウンな方法）、及び地層処分システムの変化を直接シミュレートする方法（環境シミュレーション）に大別されている（Hodgkinson and Sumerling, 1990）。

### (1) F E Pリストを起点とする方法

この方法は、作成されたF E PリストからF E Pを組合せることによってシナリオを作成するものであり、米国サンディア国立研究所（SNL）で開発された方法（Cranwell, 1982, 1987）がその例である。この方法は、OECD/NEAが示した一般的手順のベースとなったもので、ロジックダイアグラムによるF E Pの分類、シナリオの選別及び集約という3つの手続きから構成されている。現象の看過を防ぐために、ロジックダイアグラムを作成し、すべての組合せを考慮しながら、それらの現象が核種放出あるいは核種移行に影響を及ぼすかどうかをチェックするものである。この過程には、プロセスや事象の因果関係にもとづく順序づけも含まれている。

しかしながら、この方法では、多数の事象やプロセスを扱う場合において、それらの間の相関関係も膨大な数となり、ロジックダイアグラムの作成が事実上不可能となってしまう。サンディア国立研究所が開発した方法の適用を試みた例（Anderson, 1989; Stephens, 1989）においても、より実際的なものに改良される必要があることが指摘されている。

この問題を克服するために、プロセスシステムの概念が導入された（Anderson, 1989）。プロセスシステムは、地層処分システム全体を通して共通に生起する物理・化学的過程のすべてを包括して、これらを有機的に関連づけたものである。そして、それ以外のF E Pは、外部因子としてまとめられている。種々のシナリオのバリエーションは、プロセスシ

システムに各外部因子が結びつくことによって生じることとなる。実際には、火山の噴火や、将来の人間活動による廃棄物の回収等、プロセスシステムとは独立したシナリオにおいて検討されているものもある。

処分システムの性能評価に対してイベントツリーを利用した解析の適用も試みられている(Bingham, 1979; Hunter, 1983)。しかし、この方法に対しては、性能評価において重要な現象の多くは、瞬時に発生する事象よりも、むしろゆっくりとした連続的なものであること、事象間の関係がフィードバックループを含むこと等の理由から、いくつかの問題が指摘されている(Cranwell, 1982; Ross, 1989)。また、この場合にも、調べるべき組合せの数が非常に多くなるというボトムアップなアプローチに共通した問題がある。岩塩層のように、安全性がバリアの物理的な健全性と直接結びついている場合には、イベントツリーの特徴をうまく活かせると考えられる。

## (2) 地層処分システム性能への影響を起点とする方法

F E P リストから出発する方法では最初に扱う現象の数が膨大となるという短所を排するために、地層処分システムへの影響を起点とする方法が考案されている (Billington, 1990)。この方法では、地層処分システムを“シナリオ要素”と呼ばれるいくつかの要素に分割し、その各要素が異なる状態をとることによって種々のシナリオのバリエーションが作成される。その手順は、一般的に次のようなものである(Hodgkinson and Sumerling, 1990)。

### ①シナリオ要素の定義

### ②シナリオ要素間の相関を表すインフルエンスダイアグラムの作成

### ③各シナリオ要素の取りうる状態の定義

### ④シナリオ要素の状態を記した樹形図の作成 (この図の中で、可能な状態の組合せのそれぞれが一つのシナリオを表す)

### ⑤非合理的もしくは重要ではない状態の組合せを排除することによるスクリーニング

### ⑥各シナリオ要素の状態に生起確率を付与することによるシナリオ発生確率の推定

上記の作業において、F E P リストが参照される。シナリオ要素を定義するための視点としては、地層処分システムに生起する現象の因果関係 (原因としては、たとえば、自然現象、人間活動、地層処分の実施によるものという分類、また帰結としては、帰結の生じる領域 (ニアフィールド、ファーフィールド、生物圏)、もしくは帰結の種類 (核種放出、核種移行、被ばく) が視点となる) や、バリア機能が考えられる。この手法は、シナリオ

要素の種々の状態により処分システムの状態変化を表すことができるという点でも有利である。

### (3) 環境シミュレーション

環境シミュレーションは、現象リストを起点とするということでは、(1)に述べたF E P リストを出発点とする方法に類似している。ただし、この方法は、地層処分システムとその環境の将来の状態を離散的なシナリオ群として推定するのではなく、モンテカルロ法等の統計的手法によって直接シミュレートするという点で異なるものである。

このような手法の最初の試みは、米国 Columbia Plateau 地域で適用された地質環境シミュレーションモデルである(Intera, 1983a)。入力パラメータに確率分布関数(pdf's)を与え、モンテカルロサンプリングを用いて、連続した天然プロセスや突発的な事象をモデル化している。したがって、シミュレーションモデルの結果は、pdf's の妥当性に大きく依存する。上述のモデルは、さらに、気象、氷河、ダイヤピル、褶曲、マグマ活動、断層、掘削などといった、より広範な事象やプロセスを含むモデルに発展している(Intera, 1983b)。

最近の例では、英国環境省(UKDoE)の研究開発(Laurence, 1989)がある。この例では、モンテカルロシミュレーションモデルにもとづく環境の変化を扱うモデルと、環境の変化に対応した境界条件や物性の時間変化を考慮して地下水の移動を解析するモデルとを組み合わせ評価を行っている。英国でこの種の研究が行われているのは、多くの相関のある不確定な現象を、その発生可能性も含めて考慮し、リスクを評価することを目的としているからである。とはいえ、モデルは非常に複雑であり、困難な作業である。米国で環境シミュレーション手法の適用が中断された理由は、依存性の高い多数の入力パラメータに関するpdf's を得ることが難しいということによる。



### 3. シナリオ解析

ここでは、上述の一般的方法論にしたがって、日本の地質環境を考慮し、人工バリア及び処分施設の設計例にもとづいて、具体的にシナリオ解析を試みる。シナリオ解析にあたっては、科学的に非合理的なものについてのみ現象のスクリーニングを行い、できるだけ包括的なリストを作成することに留意した。2.2に述べたシナリオ作成の方法論は、いずれも開発途上にあり、最良のものが存在しているわけではない。そこで、既往の研究から種々の利点が指摘されているトップダウンな方法により、まずシナリオを概略的に分類し、分類されたシナリオそれぞれに対する取扱い方を決定したうえで、ボトムアップな方法を適用して、F E P間の関係を記述するという方法をとった（増田ほか、1991）。

まずF E Pリストの作成を行い、次に地層処分された高レベル放射性廃棄物の人間への影響のモードにもとづいて抽出されたF E Pを分類した。最後に、各影響モードごとに対応するシナリオを作成し、それにしたがって行われる影響評価の枠組みを示した。以下に、それぞれの内容について述べる。

#### 3.1 F E Pリストの作成

OECD/NEAのワーキンググループでは、IAEAのリストを出発点として、より詳細な現象リストの例を作成している(OECD/NEA, 1992)。抽出されたF E Pは、自然現象、人間活動、及び廃棄物や処分場に起因するものに大別されている。このリストには、種々の地層を対象とした地層処分システムに関連するF E Pが含まれている。そこで、このリストにもとづいて検討を行い、地質環境を特定しないで、性能評価のためのシナリオを開発するための現象リストを作成することとした。

OECD/NEAのワーキンググループにより作成された現象リストには、岩塩層を対象とした地層処分システムに関連するF E Pを含んでいるため、まずこれらについては除外することとした。次に残りのF E Pに対し、その具体的な内容と、地層処分の長期的性能との関係についての検討を行った。この過程で、必要に応じて新たなF E Pのリストへの追加を行った。結果として得られたF E Pリストを表3-1に示す。この結果、日本において考慮すべき現象として102項目のF E Pを整理できた。

ここで作成したF E Pリストは、それが完全であるかどうかの吟味が尽くされているわけではない。しかしながら、各専門分野の研究者により、今後さらにシナリオを検討していくうえで、とりあえず念頭に置くべき現象は抽出されていると考えている。今後、性能

表 3-1 作成された F E P リスト

A. 自然現象		B. 人間活動	C. 廃棄物及び処分場に関する現象
<p>1. 地球外の現象</p> <p>1.1 隕石の衝突</p> <p>1.2 太陽放射</p> <p>2. 地質学的現象</p> <p>2.1 プレート運動/テクトニクス的变化</p> <p>2.2 地磁気の変化</p> <p>2.3 火成活動</p> <p>2.4 変成作用</p> <p>2.5 結成作用</p> <p>2.6 隆起/沈降</p> <p>2.7 地震/断層運動</p> <p>2.8 岩体の不均質性(透水性, 鉱物組成)</p> <p>3. 気候学的現象</p> <p>3.1 降雨, 気温, 土壌の水収支</p> <p>3.2 洪水</p> <p>3.3 海面変動</p> <p>3.4 永久凍結層の影響</p> <p>3.5 水河作用(水河侵食等)</p> <p>4. 地形学的現象</p> <p>4.1 地滑り</p> <p>4.2 表面削除</p> <p>4.3 河川侵食</p> <p>4.4 河川の蛇行</p> <p>4.5 海食</p> <p>4.6 堆積作用</p> <p>4.7 寒冷気候の影響(ソリフラクション等)</p> <p>4.8 化学的侵食作用及び風化作用</p> <p>5. 水理学的現象</p> <p>5.1 地下水循環</p> <p>5.2 不均質系での地下水流動</p> <p>5.3 地下水流動状況の変化</p> <p>5.4 地下水系への海水の浸入</p>	<p>5.5 塩炎境界の影響</p> <p>5.6 被圧帯水層</p> <p>5.7 地熱の影響</p> <p>6. 物質移動及び地球化学的現象</p> <p>6.1 移流/分散</p> <p>6.2 拡散</p> <p>6.3 マトリクス拡散</p> <p>6.4 ガスを媒体とした物質移動</p> <p>6.5 多相流及びガスに駆動された地下水流動</p> <p>6.6 吸着(線型/非線型, 可逆/不可逆)</p> <p>6.7 溶解, 沈澱及び結晶化</p> <p>6.8 コロイドの生成, 溶解及び移動</p> <p>6.9 錯形成種</p> <p>6.10 亀裂表面の風化及び鉱物化</p> <p>6.11 土壌や有機物の残渣の蓄積</p> <p>6.12 質量, 同位体, 化学種の希釈</p> <p>6.13 化学的分配(電気化学的効果及び化学的浸透)</p> <p>6.14 放射能核種及び酸化生因子のチャンネル流</p> <p>6.15 再濃集</p> <p>6.16 pHの変動</p> <p>6.17 酸化性雰囲気</p> <p>7. エコロジー的現象</p> <p>7.1 植物による吸入</p> <p>7.2 動物による吸入</p> <p>7.3 土壌及び堆積物中のバイオターベーション</p> <p>7.4 土壌生成作用</p> <p>7.5 化学的变化</p> <p>7.6 微生物との相互作用</p> <p>7.7 生態系の変化(山火事等)</p> <p>7.8 気候変動への生態系の追従(砂漠化等)</p> <p>7.9 動植物の進化</p>	<p>1. 処分場の設計及び建設</p> <p>1.1 未検出の過去の掘削(試錐孔等)</p> <p>1.2 調査用試錐孔の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化</p> <p>1.3 立坑又は連絡坑道の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化</p> <p>1.4 応力場の変化(地盤沈下, 沈降, 空洞の形成)</p> <p>1.5 母岩の脱水</p> <p>1.6 人工材料の欠陥(オーバーパックの早期破損等)</p> <p>2. 操業及び閉鎖</p> <p>2.1 緩衝材又は埋め戻し材の圧縮あるいは空隙の生成</p> <p>2.2 廃棄物の不均質性(物理的あるいは化学的)</p> <p>3. 閉鎖後の地下活動(処分場への侵入)</p> <p>3.1 廃棄物あるいは資材回収</p> <p>3.2 テロ行為あるいは戦争</p> <p>3.3 試錐</p> <p>3.4 探鉱</p> <p>3.5 地熱エネルギー生産</p> <p>3.6 資源採取</p> <p>3.7 トンネル工事利用</p> <p>3.8 地下構造物建設(居住, 他の廃棄物の処分)</p> <p>3.9 考古学的調査</p> <p>3.10 液体廃棄物等の注入</p> <p>3.11 地下水のくみ上げ</p> <p>4. 閉鎖後の地表の活動</p> <p>4.1 記録の喪失</p> <p>4.2 ダム, 貯水池の建設, 放水</p> <p>4.3 河川の引水</p> <p>4.4 灌漑</p> <p>4.5 土壌改良及び地下水水質制御</p> <p>4.6 農(酪農を含む)林水産業</p> <p>4.7 人口変化及び都市開発</p> <p>4.8 人間活動による気候変化(温室効果等)</p> <p>4.9 採石・泥炭採取</p>	<p>1. 熱的現象</p> <p>1.1 母岩の亀裂開口幅変化</p> <p>1.2 熱による水理条件の変化(対流, 水圧・粘性変化)</p> <p>1.3 熱による化学条件の変化(溶解度・吸着性・分種化の変化, 鉱物化)</p> <p>2. 化学的現象</p> <p>2.1 金属の腐食(局部/均一腐食, 内部因子及び外部因子による腐食, 水素等のガス発生)</p> <p>2.2 母岩・地下水と廃棄物・人工材料との相互作用</p> <p>2.3 有機物による効果</p> <p>2.4 微生物の効果</p> <p>3. 力学的現象</p> <p>3.1 廃棄物の移動</p> <p>3.2 応力場の変化</p> <p>3.3 母岩の変形</p> <p>3.4 処分坑道の破断</p> <p>3.5 ガスによる効果</p> <p>4. 放射線学的現象</p> <p>4.1 放射線分解(<math>\alpha</math>線, <math>\beta</math>線)</p> <p>4.2 照射損傷</p> <p>4.3 臨界</p> <p>4.4 放射線変(崩壊連鎖における)</p> <p>5. 水理学的現象</p> <p>5.1 再冠水</p> <p>5.2 緩衝材中の水の移動</p>

評価研究の進展にしたがって、何度も見直されるべきものである。

### 3.2 FEPリストの分類（影響モードの解析）

FEPの分類のために、このFEPリストからロジックダイアグラムを用いてシナリオを作成していくというボトムアップな手法では、すでに述べたように現象が多くなると組合せの数が膨大なものとなり、實際上取扱いが困難となると考えられた。そこで、地層処分システムの性能項目から遡って関連する現象をもとにシナリオを作成するというトップダウンな方法により、これを解決することとした。この性能項目を具体的に表現するものとして、高レベル廃棄物中の放射性核種が人間環境へ放出されるモードを図3-1に示すように「間接的機構」と「直接的機構」とに大別して想定し、これらに関連させてFEP間の因果関係を記述することとした。

ここで、「間接的機構」とは、ガラス固化体から放出された放射性核種が何らかの移行媒体を介して、間接的に人間環境に回帰する機構であり、この移行媒体としては地下水が考えられる。したがって、この機構に関しては、地下水中及び地下水-岩石間での物質移動並びに化学反応といった現象を網羅性を失うことなく合理的に含むことが必要である。このような現象群のみからなる間接的機構をここでは「地下水シナリオ」と定義することとした。

一方、「直接的機構」とは、高レベル廃棄物と人間とが物理的に接近する機構であり、図3-1に示すように、

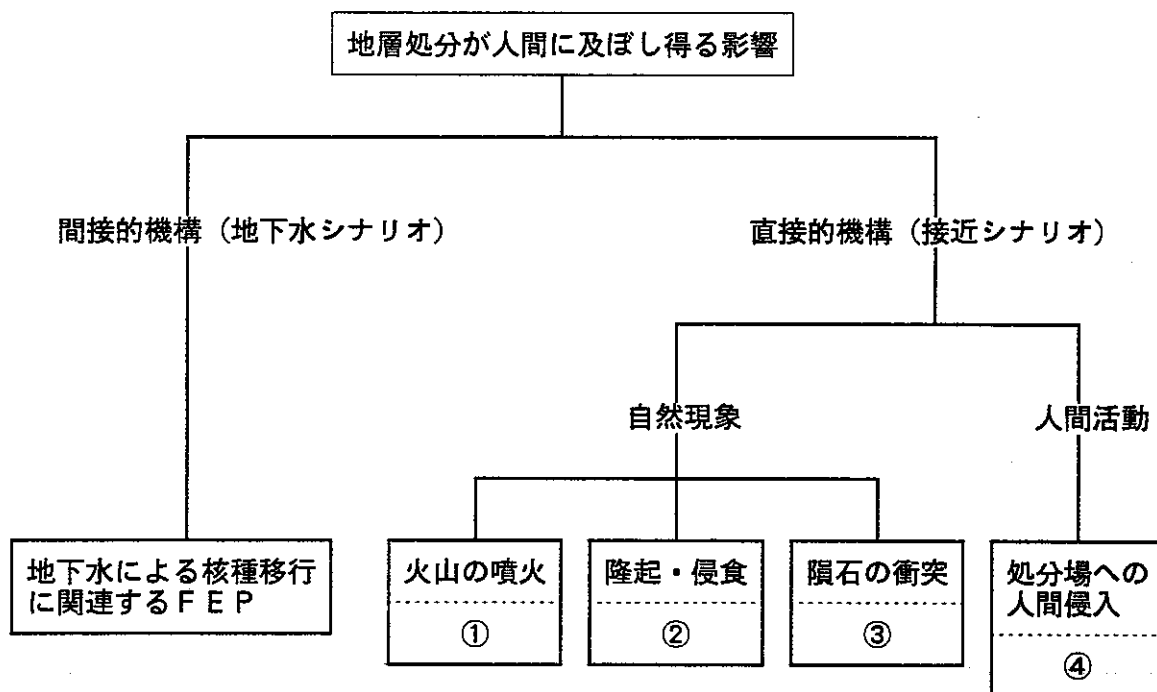
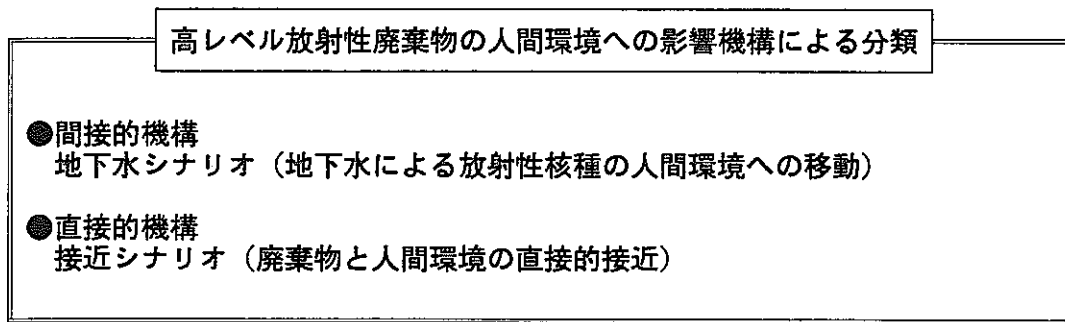
- ①火山の噴火（FEPリスト（表3-1）中の「A 2.3 火成活動」に関連する現象）、
- ②隆起・侵食（FEPリスト（表3-1）中の「A 2.6 隆起／沈降」、「A 2.7 地震／断層運動」及び「A 4. 地形学的現象」に関連する現象）、
- ③隕石の衝突（FEPリスト（表3-1）中の「A 1.1 隕石の衝突」）、
- ④処分場への人間侵入（FEPリスト（表3-1）中の「B 3. 閉鎖後の地下活動（処分場への侵入）」に関連する現象）、

という4つの現象が発端となるシナリオが想定された。これらを「接近シナリオ」とよぶこととした。

各影響モードの解析において、そのモードを引き起こすFEPが発生しない、あるいは発生しても人間への影響につながらなければ、その影響モードは考えなくてよい。このようなFEPの例として、OECD/NEAのFEPリストに示されている気体（ガス）としての核種の放出については、ガラス固化体がガス状の放射性物質を含まず、またガラス固化体か

ら溶出した後ガス状態になるとは考えられないため、以後の検討では除外することとした。また、地層処分システムに起因する爆発によって放射性廃棄物が人間環境に至るという影響モードについても、物理的非合理性により除外した。

このような解析により、性能評価を行うべきシナリオに関してもれなく規定するための枠組みを示すことができ、シナリオに適切な評価法を選定することができる。以下にそのアプローチ法について述べる。



注)

- ① FEPリスト (表3-1)中の「A 2.3 火成活動」に関連する現象.
- ② FEPリスト (表3-1)中の「A 2.6 隆起/沈降」, 「A 2.7 地震/断層運動」及び「A 4. 地形学的現象」に関連する現象.
- ③ FEPリスト (表3-1)中の「A 1.1 隕石の衝突」.
- ④ FEPリスト (表3-1)中の「B 3. 閉鎖後の地下活動 (処分場への侵入)」に関連する現象.

図 3 - 1 人間環境への影響機構によるシナリオの分類

### 3.3 シナリオに対するアプローチ法

#### 3.3.1 地下水シナリオのアプローチ

地下水シナリオについては、後述するように関連するF E Pが複合的に組み合わさった多くのケースが考えられる。これらのF E Pは、図3—2に示すように、以下の二種類に大別することができる。

- ①岩体あるいは人工バリア材料と地下水との化学反応や、地下水による溶質の移動に代表される緩慢で長期にわたって進行するプロセス
- ②地震活動、断層運動や火成活動といった突発的な変化をもたらす事象

①に示す緩慢に進行するプロセスのみを考え、さらに地質環境条件は定常状態で変化せず人工バリアは設計どおりに機能する（欠陥なし）という条件のもとに構成されるシナリオを「基本ケース」として取り扱うこととした。この基本ケースについては、さらに詳細な記述を行い、それらの因果関係を整理して、地層処分システム挙動のモデル作成、その定式化及びパラメータについての検討を行い、影響解析の枠組みを設定していくこととした。

他方、地質環境条件の漸進的変化過程や、②に示す突発的に発生する事象については、基本ケースに対する変動因子として考え、「変動ケース」として扱うこととした。変動ケースについては、基本ケースに対するモデルのパラメータを変化させたり、モデル自体を変更することによって対応することができると考えられる。いずれにしても、基本ケースのモデル体系を確立することが重要であるので、本報告書では基本ケースに焦点をあてて検討を行うこととした。

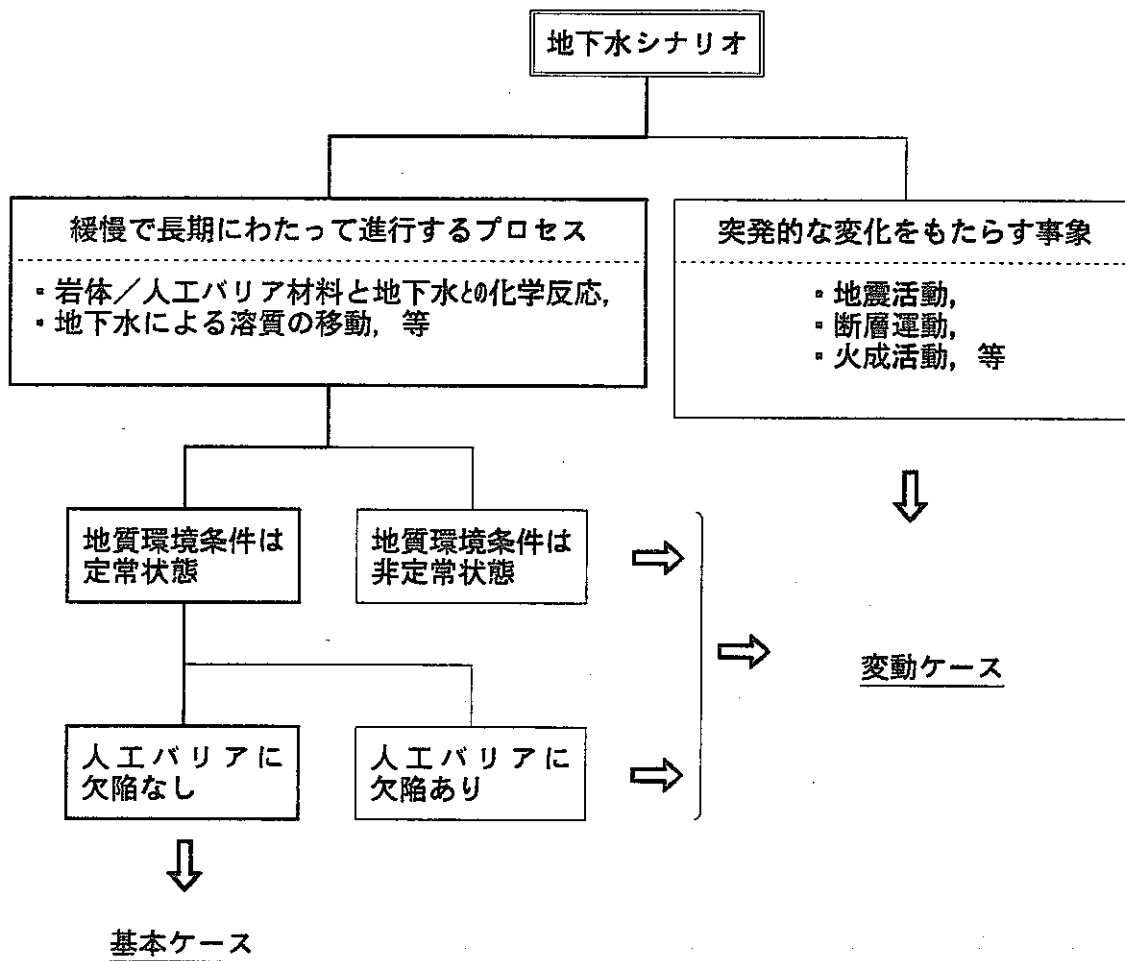


図3-2 地下水シナリオを規定する現象

### 3.3.2 接近シナリオのアプローチ

接近シナリオを引き起こす可能性のある4つの現象群は、それぞれ単独でも放射性廃棄物の物理的な接近を引き起こす特徴を有している。

このうち、「火山の噴火」及び「隆起・侵食」については、日本における状況を地域性等に注目しながら地質学的、地球科学的に把握することが必要である。また、「隕石の衝突」は、高レベル放射性廃棄物地層処分システムの性能評価において考慮すべき期間が長期にわたるということからFEPの一つに考えられている。これについては、日本においてのみの特徴的な現象ではなく、地球上においてランダムに発生するものである。これまでに行われた評価例 (Diebold and Müller, 1985 ;内藤ほか, 1992) によれば、隕石の衝突が地層処分システムの性能に影響を及ぼす可能性は極めて小さいと考えられている。さらに、処分場の閉鎖後である将来において、種々の動機から誤ってボーリングを行うことによって生じると想定される、いわゆる「処分場への人間侵入」については、これを含めて、現在、将来の人間活動に起因するシナリオの扱い方について国際的な場での議論がなされているところである(Grimwood and Thegerström, 1990)。今後、このような議論を踏まえて検討を行っていく必要があるが、現在までのボーリングの数及び深さのデータ(国土庁, 1983; 新妻編, 1982)を参考にすれば、ボーリングの数は深度が深くなるにつれて、大きく減少する傾向がある。

以上、これらの4つの現象群は日本固有の地域依存性が強いものや国際的なデータが共通して利用できるものであり、基本的には処分場を設ける地域と深度を適切に設定することなどにより対処できるものと考えられ、将来処分場サイトが選定される時点で詳細に接近シナリオが検討されることとなる。

地下水シナリオと接近シナリオを引き起こす現象とが組み合わさったシナリオも考えることができ、これらは地下水シナリオの変動ケースとして考慮することとした。



## 4. 地下水シナリオ

本章では、表3-1のFEPリストを参照しながら、まず前提条件として多重バリアシステムの構成とその機能をまとめた後、これを念頭に置いて地下水シナリオの基本ケースの記述を行う。

### 4.1 地層処分システムの構成と機能

地層処分システムでは、まず地層が高レベル放射性廃棄物と人間とが物理的に接近することにより人間が直接的な影響を受けることを避けるための障壁として期待されている。また普遍的に存在する地下水が、ガラス固化された高レベル放射性廃棄物体（ガラス固化体）中の放射性核種を溶出させ、これを人間の生活圏に運ぶというシナリオに対しては、多重バリアシステムとして機能する。

ガラス固化体は、オーバーパックに封入され地層中に設置される。この際、オーバーパックと地層との間には粘土質の緩衝材が充填される。これらの人工的に設けられる多層の安全防護系が「人工バリア」である。一方、核種の吸着や遅延といった安全防護機能を本来的にそなえている地層は「天然バリア」とよばれ、人工バリアと天然バリアのもつ種々の機能を多重に組み合わせたものが「多重バリアシステム」である。期待される機能は以下のようにまとめられる。

- ①透水性の低い緩衝材は、周囲からの地下水の浸透を制限し、その中での地下水の動きを極めて遅くする効果がある。これによって、ガラス固化体と地下水との接触を抑制する。
- ②オーバーパックは、透水性の低い緩衝材によって地下水との接触が制限されるため、腐食が生じにくく、ガラス質に封じ込まれた放射性核種を容器内に長期間閉じ込めておくことができる。
- ③オーバーパックが破損（腐食等により、上記②での放射性核種の閉じ込め機能が失われること）し、地下水が廃棄物と接触したとしても、緩衝材中に浸入する地下水の量は限られており、また長半減期の放射性核種の大部分はもともと深部の地下水に溶解しにくいと考えられていることから、ガラス固化体から溶出する放射性核種の量は制限される。また、地下水に対して比較的溶けやすい一部の核種については、固化材であるガラスの化学的耐久性によってその溶出が制限される。
- ④緩衝材中ではほとんど水の動きがないため、地下水中に溶け込んだ放射性核種の移動

は拡散支配となる。また、粘土質の緩衝材は、放射性核種を吸着しやすい性質を持っているので、それによっても核種の移動は制限される。このため放射性核種の移動には長時間を要し、結果としてこの間に放射性核種の放射能は減衰する。

⑤緩衝材から地層に移行した放射性核種は地下水とともに移動するが、地層中の地下水の動きが緩慢であるうえに、周辺の岩石へ吸着するため、その動きは地下水の動きに比べてさらに遅くなる。この移動中に放射性核種が有する放射能は、時間の経過とともに減衰していく。また、地層の複雑な空隙構造によって、地下水中の放射性核種は分散し、次第に希釈されていく。

日本における地層処分概念として、オーバーパックの材料として炭素鋼を、緩衝材としてはベントナイトを考えた人工バリアの仕様例が示されている(Saotome et al., 1992)。以下では、これらを念頭に置いた地層処分システムの構成と機能を踏まえ、地下水シナリオの記述を行う。

## 4.2 地下水シナリオ

地下水シナリオの記述にあたっては、地下水の流動や化学的性質に影響を与える地層処分システムの場合としての特徴や、そこで生ずると考えられる種々の事象及びプロセスを検討する必要がある。そのため、人工バリアが設置される環境である「地質環境」と、人工バリアと人工バリアの設置によって影響を受ける周囲の地層を総称した「ニアフィールド」という二つの空間領域によって地層処分システムを大別して、まず場としての特徴を記述し、次いでそれぞれの領域において生ずると考えられる事象及びプロセスを考慮して地下水シナリオを展開することとした。

なお、地下水シナリオにもとづく想定にしたがって、ガラス固化体から溶出した放射性核種が最終的に到達する生物圏についての記述は、それが将来の人間活動等にも関わることであり、この分野における国際的な動向も踏まえながら検討すべき今後の課題と考え、本報告書では取り上げていない。

### 4.2.1 地質環境

地下水シナリオに関しては、人工バリアの境界条件を与える地下水の流動状況と化学的性質に注目して、また核種移行等に関連する化学反応や物質移動を規定する場として、地質環境を捉える必要がある。地下水の流動状況については、広域流動系と局所的流動系と

によって、また地下水の化学的性質については、地下水供給域と深部岩体における地球化学的特徴によって考えることができる。地球化学反応や物質移動に対しては、鉱物組成及び微視的空隙構造が重要である。このような観点から、地質環境を概念的に捉えることとした。

#### 4.2.1.1 地下水の流動

##### (1) 広域流動系

広域の地下水流動系は、地下水供給域から地下水排出域までの循環系全体の地下水流動状況を記述するものとして重要である。広域の地下水流動系をモデル化するためには、日本で観察される地形や地質にもとづき、系の境界条件と系内での流動経路を規定する水理地質構造を設定することが必要である。そこで、系の上部境界条件は、土壌下面のポテンシャルによって規定し、下部境界としては、一般的に透水性が深部に行くにしたがい減少することから、系全体の流動状態に対して流束が相対的に無視しうような深度を考えるものとする。他方、側方境界は、地形や地質的要因によって、地下水系が分断される場合と、他種の水系である海との境界として設定される場合とが考えられる。断層は前者の例として考慮される必要がある。したがって、鉛直断面に着目すると、側方境界のバリエーションとしては、図4-1に示すように以下の組み合わせが考えられる。

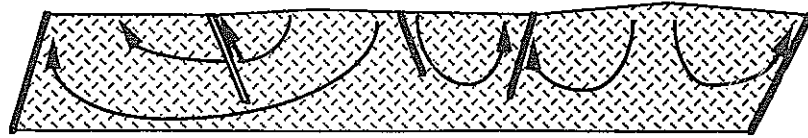
- ① 断層 — 断層
- ② 断層 — 海
- ③ 断層 — 山
- ④ 山 — 山
- ⑤ 海 — 海
- ⑥ 山 — 海

ここで、“山 — 山”を側方境界とするパターンの中には、峡谷と盆地とが含まれる。これらは三次元的な流束の集散状況が異なることから、流動系としては区分して考える。結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩においては、地下水流動系が断層により分断されていることが一つの特徴となるのに対して、新第三紀系などの割れ目の少ない堆積岩系では、図4-2に示すように平野あるいは堆積盆として形成されている。ここでは、透水性の異なる層（たとえば、砂岩と泥岩等）が発達し、巨視的流動状況は、この層序に支配されることが特徴である。また、難透水性層の下位に高透水性層が位置するような場合には、被圧帯水層が形成されることとなる。

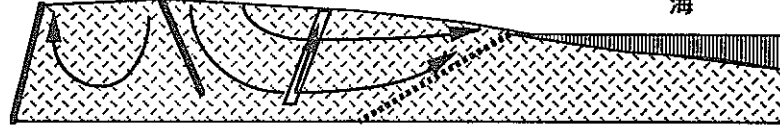
さらに、これら2種類の系が共存するパターンとして、割れ目の少ない堆積岩に覆われた結晶質岩等がある。図4-3にその概念を示すように、この系では、上記の特徴に加えて、新第三紀堆積岩と結晶質岩との境界において、新第三紀堆積岩層での流動状況に対応

したポテンシャル分布が生じ、これが下位の結晶質岩中の地下水流動に関する上部境界条件を規定することとなる。

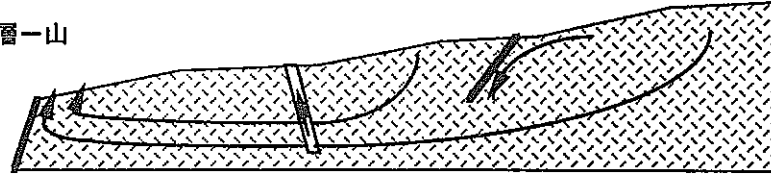
断層—断層



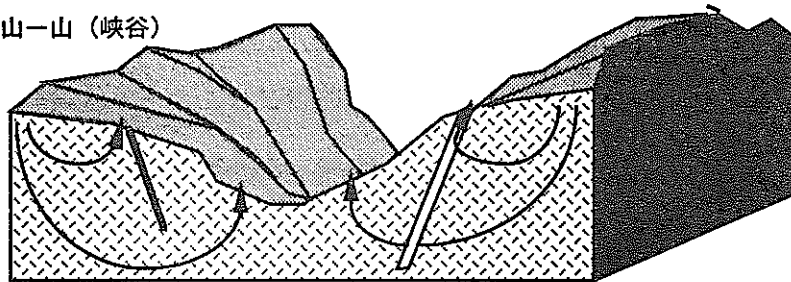
断層—海



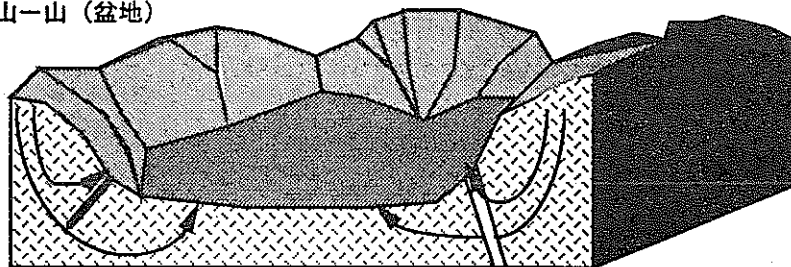
断層—山



山—山 (峡谷)



山—山 (盆地)



海—海 (島、半島)

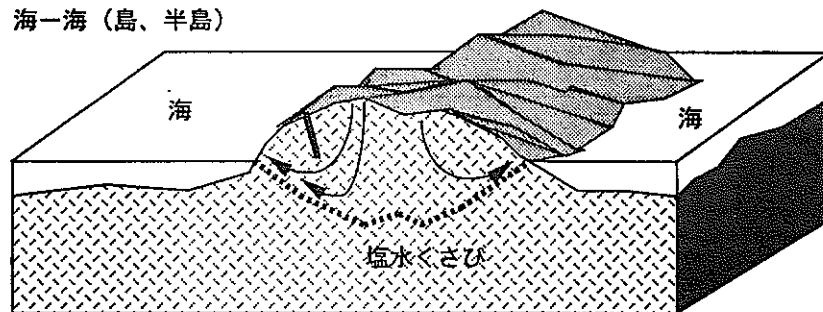


図 4 - 1 結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩における地下水流動系

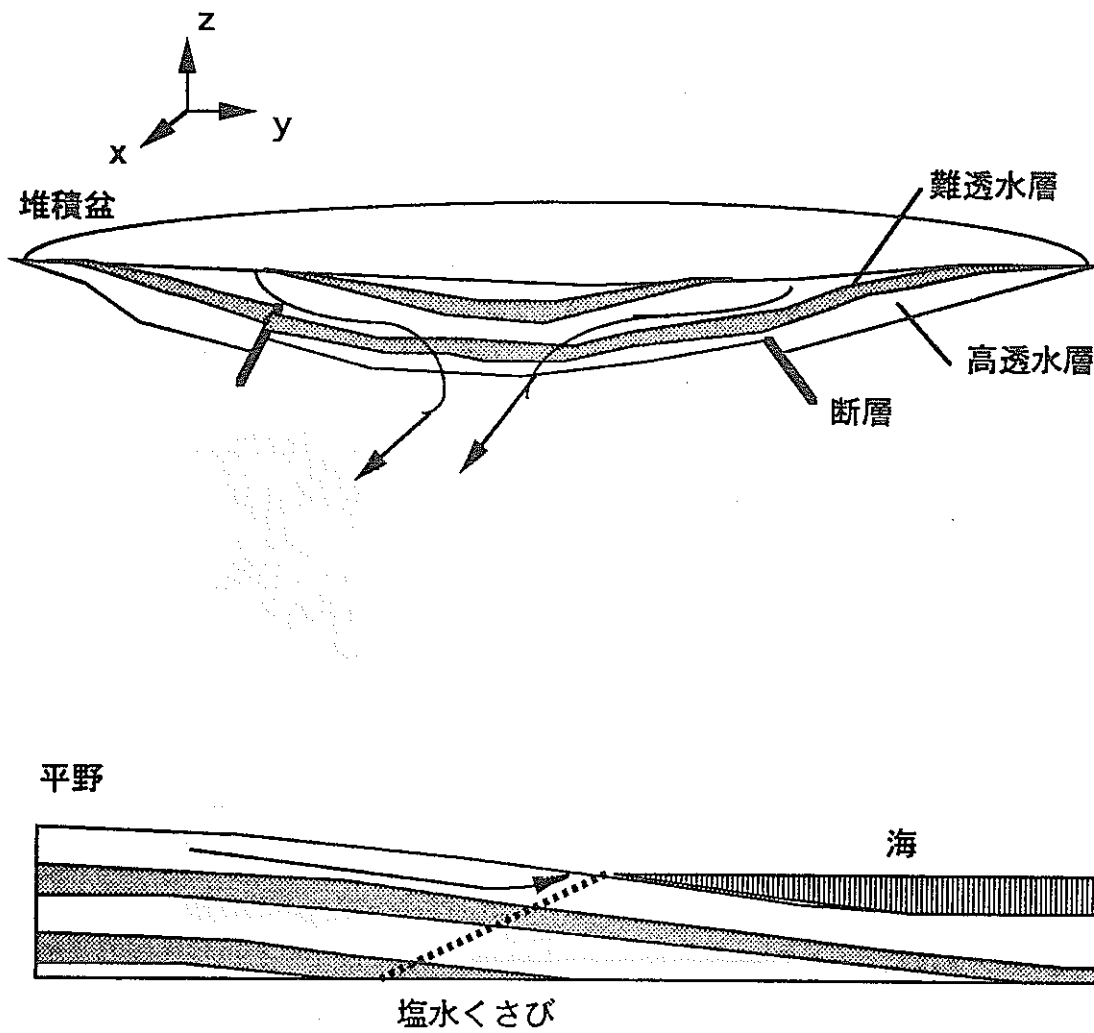


図 4 - 2 割れ目の少ない堆積岩における地下水流動系

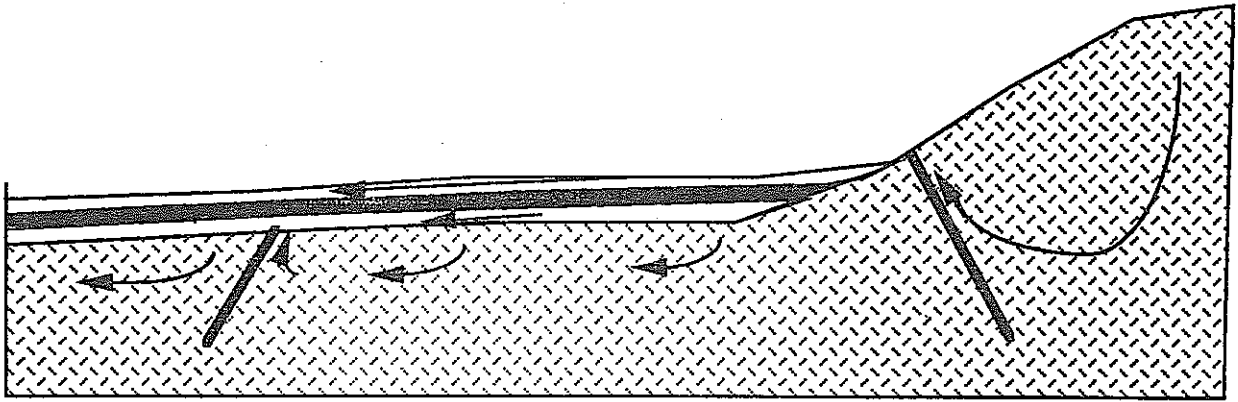


図 4 - 3 割れ目の少ない堆積岩に覆われた結晶質岩等の地下水流動系

## (2) 局所的流動系

結晶質岩や固結の進んだ堆積岩は、一般に比較的小さい空隙率を示すが、岩体の生成時より存在している一次空隙に加えて、その後の応力履歴等を反映した二次的な空隙、すなわち、割れ目、節理等を有することが特徴である。この二次空隙は、岩体中の粒界等の不均質境界に応力が加わってクラックを生ずることによって形成される。形成された二次空隙は、地下水の卓越した流路となり、選択的に風化作用、あるいは熱水による変質作用を受けることとなる。(図4—4参照)

可塑性を有する堆積岩では、岩石形成時以降に加えられる応力にしたがって変形することにより、一般に、大きい開口割れ目等は生じにくいと考えられる。これらの岩石は、堆積時の粒子間空隙に対応した一次空隙を有しており、この空隙は、堆積後の続成作用において圧密による空隙の縮小と二次鉱物の沈殿過程を経る。したがって、微視的構造は、碎屑粒子間を二次鉱物群がとりまき、かつ、一次空隙が一部残されたものとなっている。このような堆積岩においては、一般に層序が顕著であり、また異方性が認められる。特に、泥岩中に砂岩層が存在する場合においては、それが相対的に高透水性の地下水流路となる。(図4—5参照)



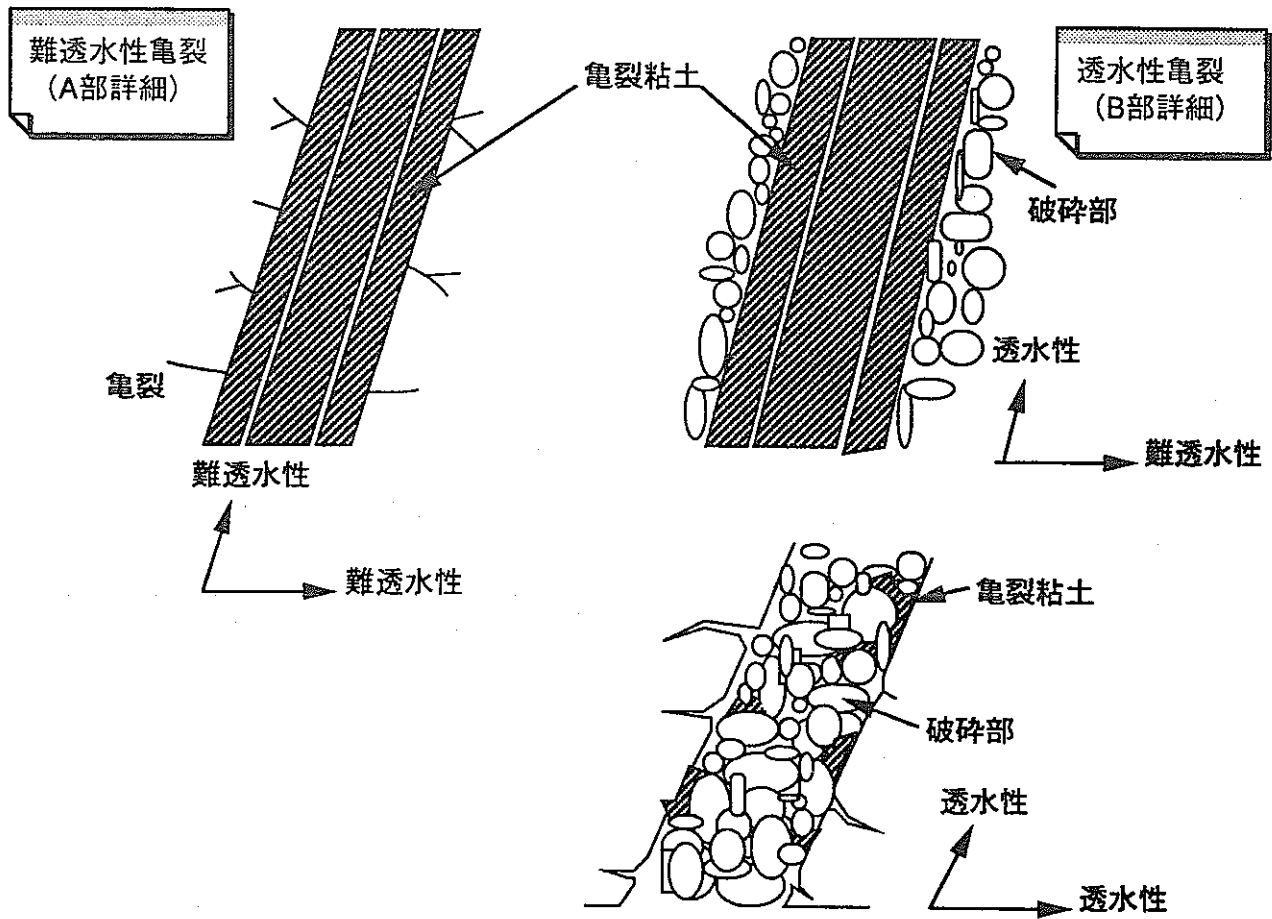
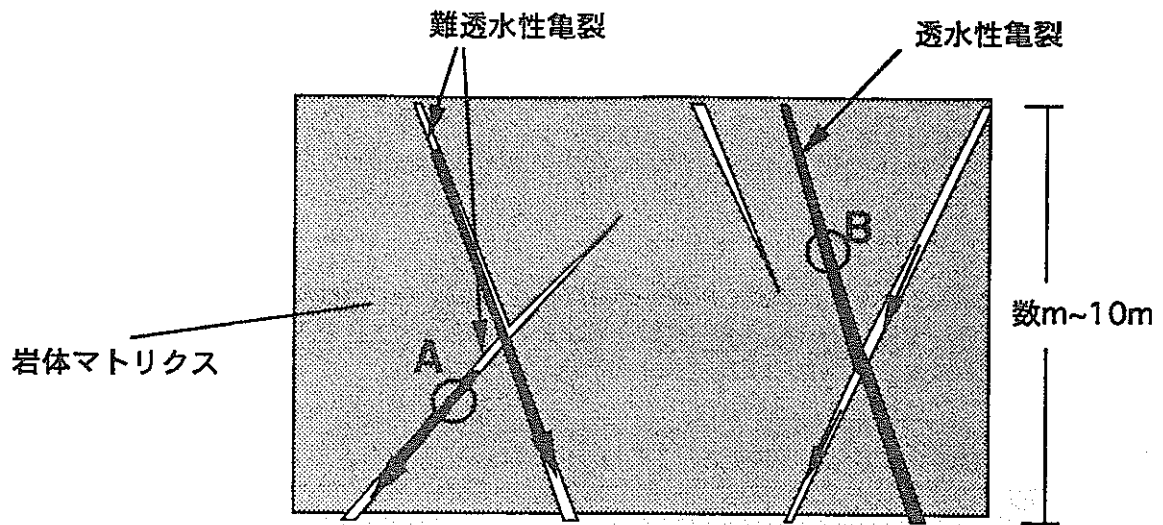


図4-4 結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩における局所流動系

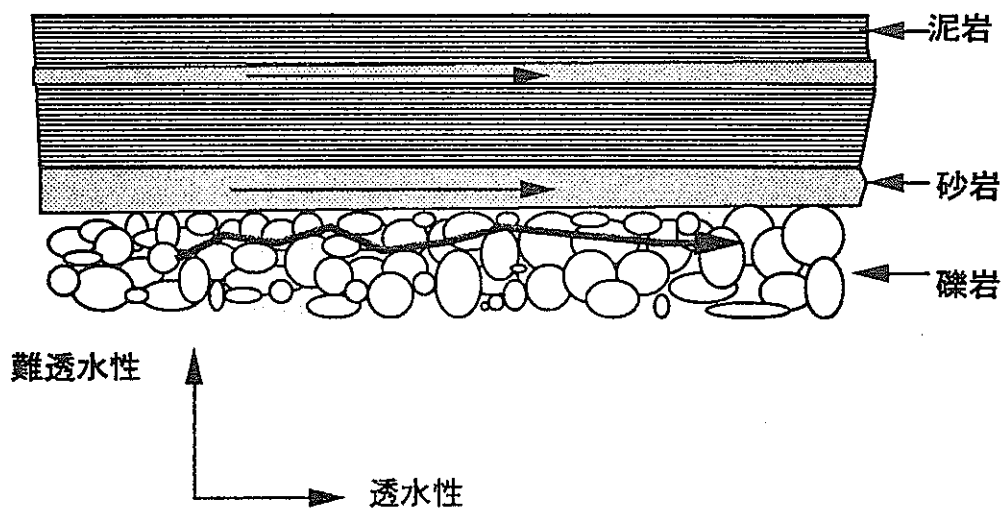


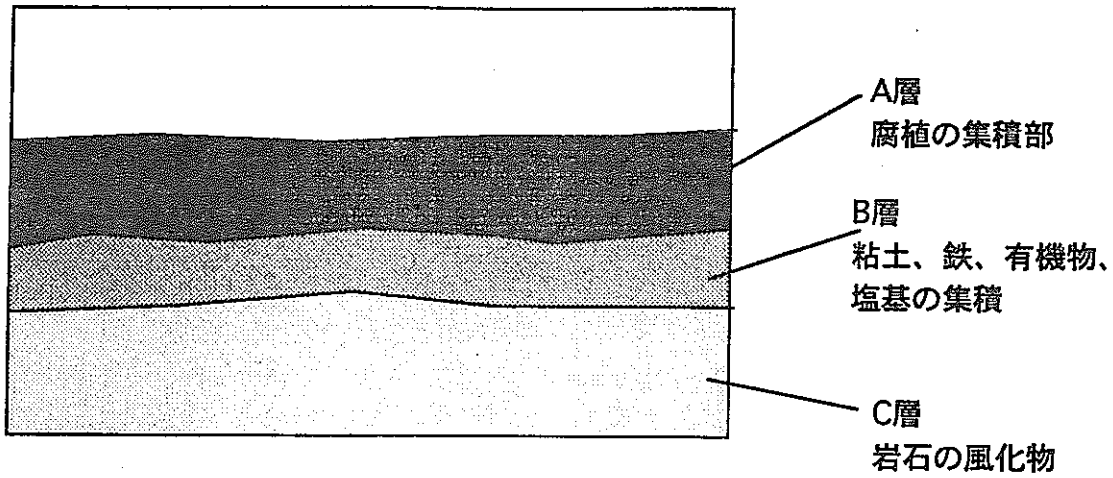
図4-5 割れ目の少ない堆積岩における局所流動系

#### 4.2.1.2 地下水の化学的性質

##### (1) 地下水供給域

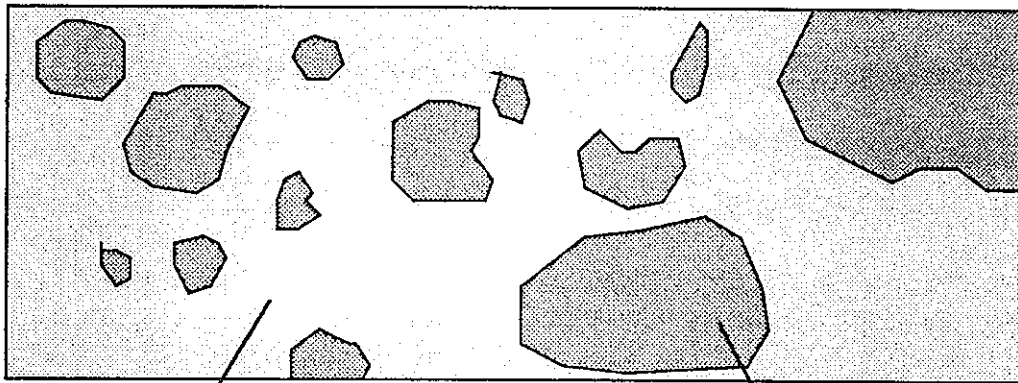
地下水供給域は、地下水の水質形成に関する地球化学的プロセスの初期条件を考えるうえで重要な要素となる。この領域においては、広く土壌が分布しており、生物圏との接点として、有機物を介した化学反応が活発に生じている。特に、有機物の腐敗は、地表水に含まれる溶存酸素を消費することで、深部地下水が還元性を維持する重要な因子となる。また、カコウ岩や石灰岩の風化によって生じた表層は、植物の成育に必要な養分に乏しく、したがって植相もそれほど発達しないため、有機物を介した化学反応も活発とならない傾向がある。（図4—6参照）

土 壤



カコウ岩類及び石灰岩の表層

: 土壌に比して有機物少



風化部

新鮮部

長石類 (-)  
 雲母類 (-)  
 粘土鉱物 (+)  
 炭酸塩鉱物 (+)  
 硫化鉱物 (+)  
 その他 (-)

カコウ岩類  
 石英  
 長石類  
 雲母類  
 炭酸塩鉱物  
 硫化鉱物  
 その他 (磁鉄鉱、角閃石、イルメナイト等)

石灰岩  
 炭酸塩鉱物  
 石英  
 粘土鉱物  
 硫化鉱物

図 4 - 6 地下水供給域における地球化学的な構成

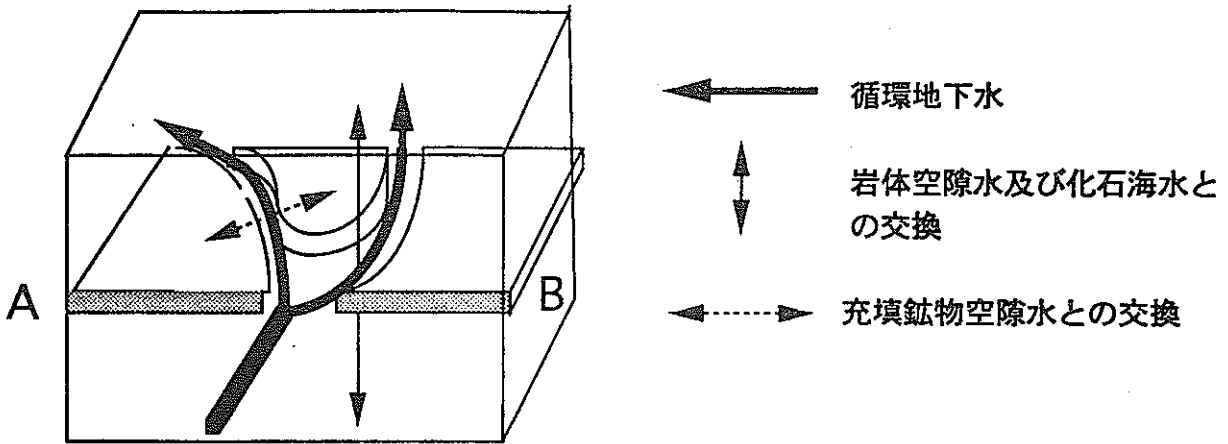
## (2) 深部岩体

割れ目を有する系では、二次空隙の近傍において、粘土鉱物、鉄鉱物及び炭酸塩鉱物に富む場合がある。また、反応生成物である二次鉱物、特に粘土鉱物が滞留するような条件下では、二次空隙はこれらの鉱物によって充填され、割れ目とそれ以外の部分との間の水理学的な不連続性を次第に失う。

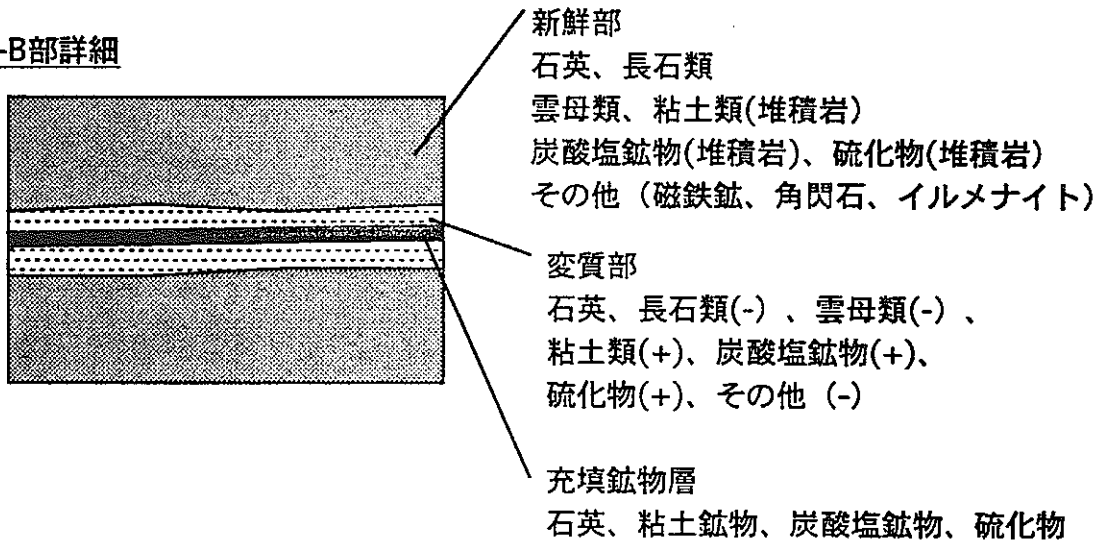
また、このような微視的構造でみれば、原則的には二次空隙中には循環水が、一次空隙中には岩石の生成時点の水（固結の進んだ堆積岩の場合、堆積時の海水が陰イオン排除により閉じ込められた化石水等）が満たされた状態となる。しかし、実際には、これらのそれぞれ異なる水は、溶質の拡散により混合され、平均化しているのが普通である。（図4—7参照）

他方、割れ目の少ない堆積岩中では、粘土鉱物に富む層で、かつ、陰イオン排除が生ずる程度に地圧の高い深部で形成されたものにおいては、化石水が空隙を満たしているものと考えられる。これらの二条件のうち少なくとも一方を満足しない層においては、循環水が存在すると考えられる。この場合にも、これら二種類の水は溶質の拡散による混合作用を受けているものと推定される。（図4—7参照）

結晶質岩及び割れ目の発達した堆積岩



A-B部詳細



割れ目の少ない堆積岩

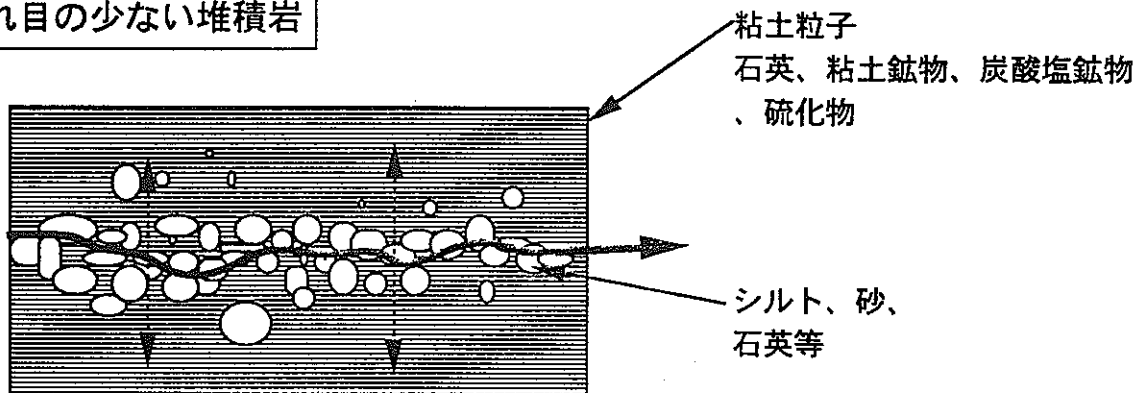


図4-7 深部の岩体における地球化学的な構成

#### 4.2.1.3 鉱物組成及び微視的空隙構造 (図4—8参照)

##### (1) 結晶粒の等方的分布

砂岩、深成岩及び片麻岩では、基本的に結晶粒が等方的に分布し、粒間に空隙が存在する。このような空隙中の物質移動の支配的メカニズムとしては、基本的には拡散を考慮することができる。ただ砂岩については、水理学的条件によって、移流が物質移動の支配的メカニズムとなる場合もあると考えられる。

カコウ岩類及び同系の片麻岩を構成する主要な鉱物は、斜長石 (Naに富む)、アルカリ長石、石英及び黒雲母であり、特に斜長石、アルカリ長石については、変質に伴う空隙が見られる例が多い。ハンレイ岩類及び同系の変成岩においては、これに代わって斜長石 (Caに富む) と角閃石、輝石、カンラン石が主要鉱物となる。

また、砂岩については、石英を多く含むが、同時に、長石、雲母、粘土鉱物、炭酸塩鉱物及び硫化鉄等の鉱物を含む。カコウ岩類についても、変質層の近傍においてはこれと同様の鉱物組成が考えられる。

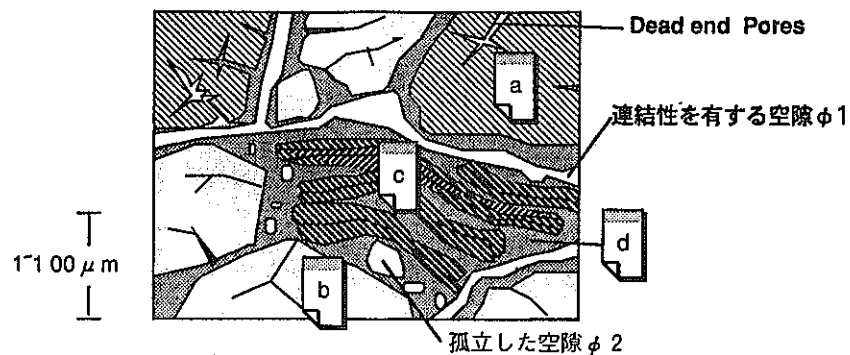
##### (2) 粘土粒子等の異方的分布

泥岩、頁岩及び結晶片岩においては、シート状の粘土粒子等が方向性を持って重なりあい、そこに石英や長石の粒子及び有機物片や黄鉄鉱が入り込むという配置を示す。

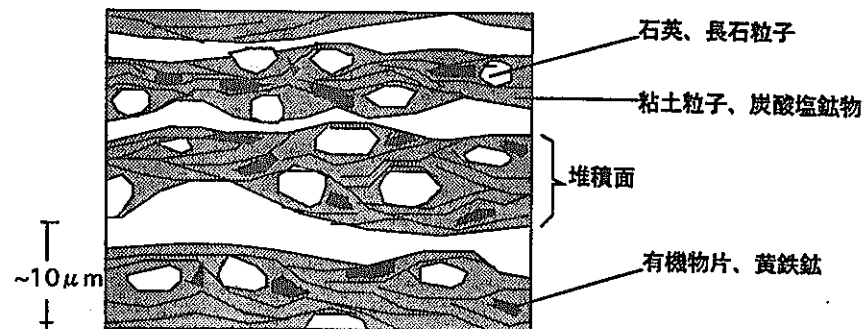
##### (3) ガラス質マトリクス

火山岩は、生成時に比較的速やかに冷却されたことにより、非晶質のガラスをマトリクスとして有する。この中に、黒雲母、石英、斜長石 (Naに富む) あるいはカンラン石、輝石、斜長石 (Caに富む) が点在する。また、ガラス質の変質に伴って、ある領域がスメクタイト等の粘土鉱物によって占められる場合もある。

(1) 結晶粒の等方的分布 -砂岩、深成岩、片麻岩-



(2) 粘土粒子等の異方的な分布 -泥岩、頁岩、結晶片岩-



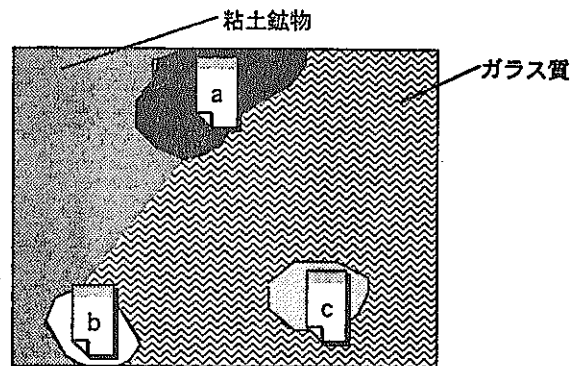
新第三紀の砂岩  
 圧縮度 (小)  
 a 斜長石 (Na に富む)  
 b 石英  
 c 黒雲母  
 d 粘土粒子、炭酸塩鉱物、硫化物

深成岩及び片麻岩  
 カコウ岩 及び同系の片麻岩      ハンレイ岩類 及び同系の片麻岩  
 圧縮度 (大)      圧縮度 (大)  
 a 斜長石 (Na に富む)      a 斜長石 (Ca に富む)  
 b 石英      b 輝石、カンラン石  
 c 黒雲母

圧縮度：泥岩 < 頁岩、結晶片岩

層間の空隙は、圧縮度が増すに従い減少する。

(3) ガラス質マトリクス -火山岩-



先新第三紀の砂岩  
 圧縮度 (大)  
 a 斜長石 (Na に富む)  
 b 石英  
 c 黒雲母  
 d 粘土粒子、炭酸塩鉱物、硫化物

φ1、φ2 は圧縮度が増すに従い減少

φ (新第三紀砂岩) > φ (先新第三紀砂岩、深成岩、変成岩)

流紋岩類  
 a 黒雲母  
 b 石英  
 c 斜長石 (Na に富む)

玄武岩、安山岩類  
 a カンラン石  
 b 輝石  
 c 斜長石 (Ca に富む)

図 4 - 8 鉱物組成及び微視的空隙構造



#### 4.2.2 ニアフィールド

ニアフィールドは、処分施設と人工バリアの影響が大きいという意味で、地下水流動の観点からは、局所的流動系の特異な領域と考えられる。なおニアフィールドは、埋め戻された坑道群と人工バリア、及び処分場の建設や廃棄物を設置したことによる影響を受ける周辺母岩とから構成される。

##### 4.2.2.1 坑道群

廃棄物を定置する処分坑道は、図4-9にその一例（五月女ほか，1992）を示すように、複数のパネルに分割され、各パネルの外周は、主要坑道とよばれる資材や人員運搬用の坑道で囲まれる。また、地上施設と地下施設との間は、アクセス坑道で連絡される。

建設、操業及び閉鎖は、パネル単位で行い、処分場全体として見れば、これらの工程が並行して進むことがあり得る。

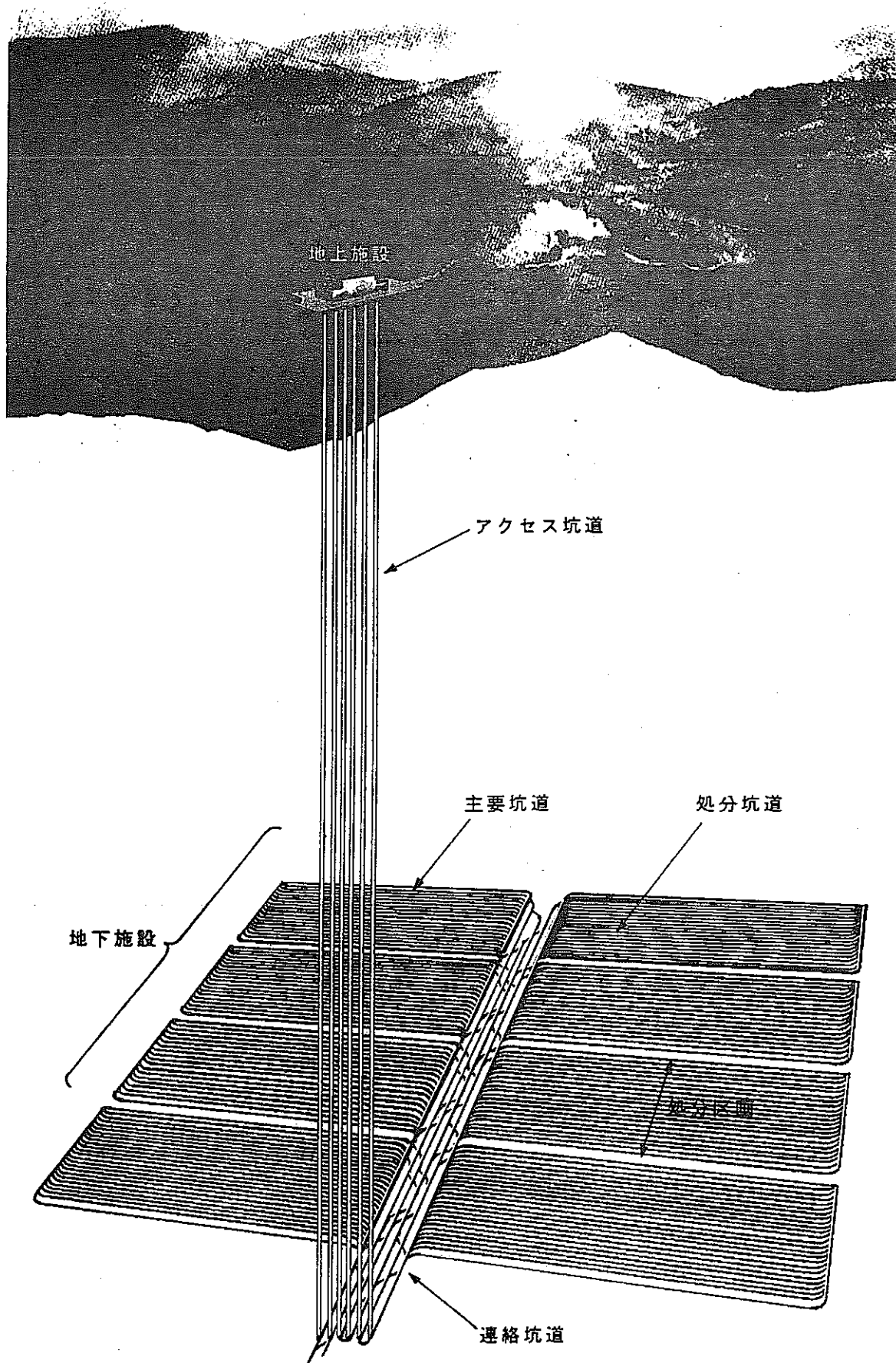


図 4 - 9 処分施設のレイアウト

#### 4.2.2.2 人工バリア及び周辺母岩

人工バリアは、図4—10に示すように、ガラス固化体、炭素鋼製オーバーパック及びベントナイトの緩衝材によって構成され、処分坑道内に水平（坑道横置方式）あるいは処分坑道に垂直に掘削された処分孔に設置（坑道縦置方式）される（藤田ほか、1992）。坑道等の周辺母岩は、処分坑道の掘削により力学的、水理学的に影響を受け、掘削影響領域を形成する。人工バリア周辺の地下水の流動については、図4—11に示すように、すでに述べた異方性及び不連続性にもとづく母岩の局所的流動系における地下水の流動方向と処分坑道の向きとの組み合わせによって、種々のパターンが考えられる(McKinley, 1989)。

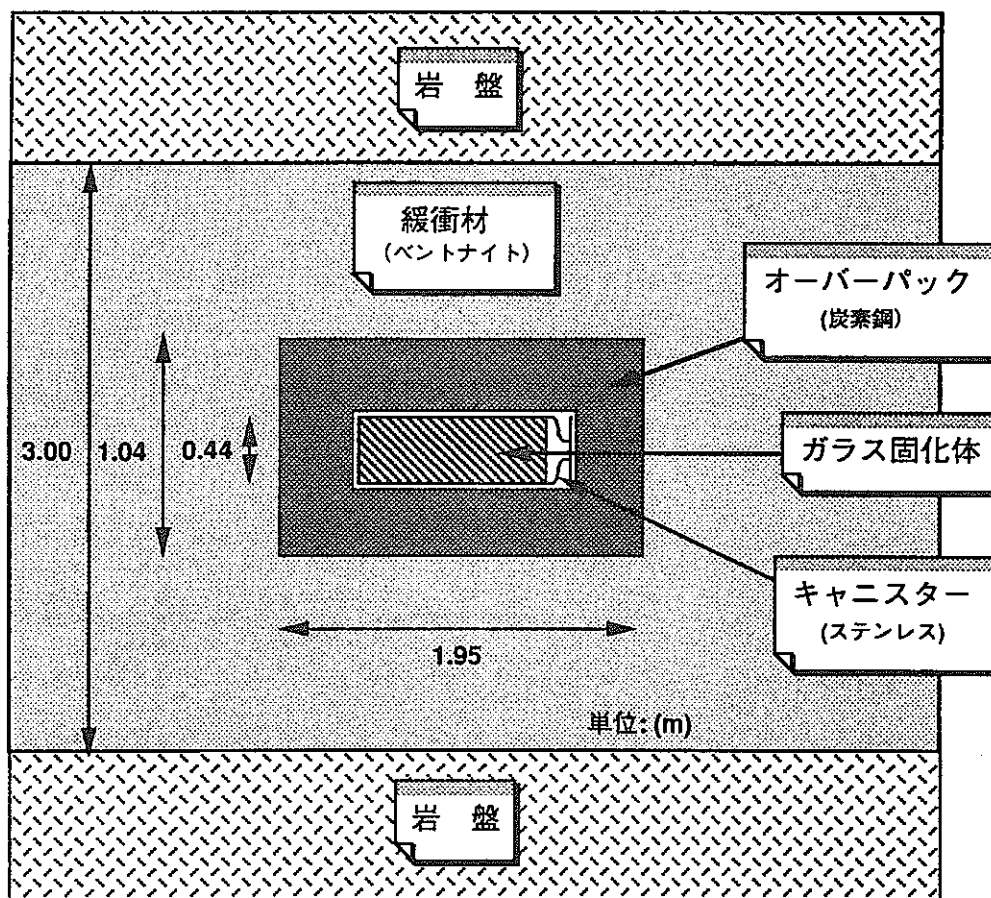
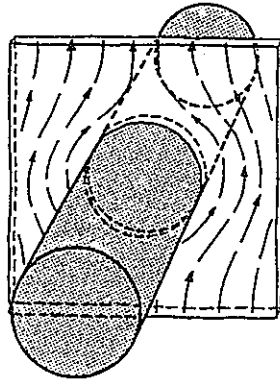


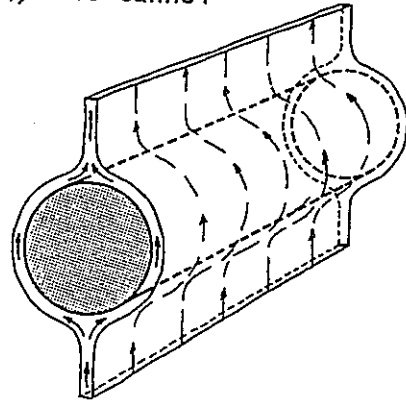
図 4 - 10 人工バリアの仕様別

a) Sub-vertical fissure

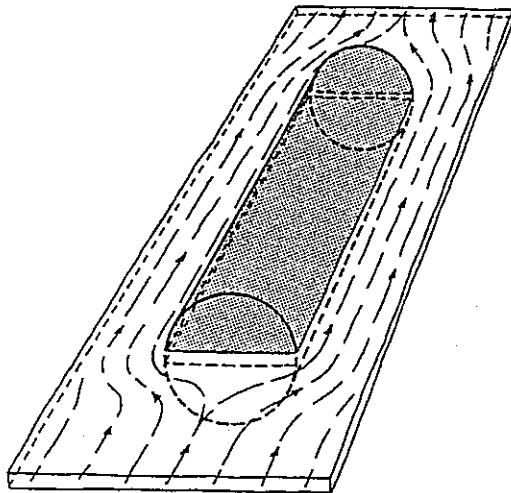
Fissure  $\perp$  to tunnel



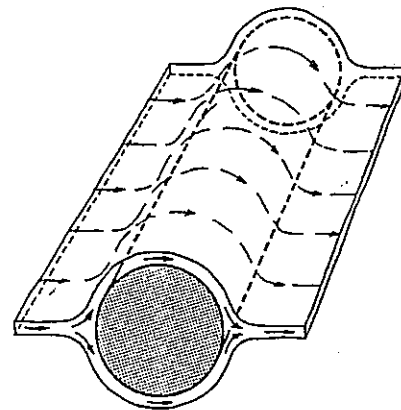
// to tunnel



b) Horizontal fissure/sand layer



Flow // to tunnel



Flow  $\perp$  to tunnel

c) Sand channel

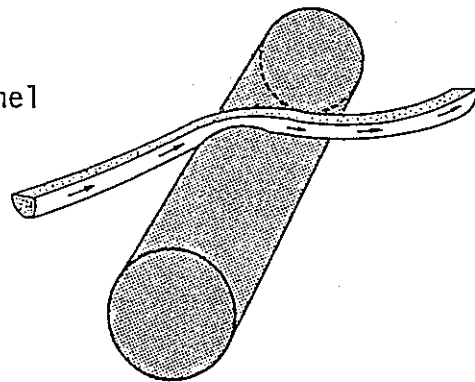


図4-11 ニアフィールドにおける地下水流動パターン (McKinley, 1989)

#### 4.2.3 地下水シナリオの記述とその解析の範囲

これまでに述べた地層処分システムの場合としての特徴にもとづいて、そこで生ずると考えられる種々の事象及びプロセスについて検討し、地下水シナリオとして記述する。

第3章で述べた地下水シナリオの分類を、ここでもう一度繰り返して述べると、地下水シナリオには多くの事象やプロセスが複合的に関係しており、これらは以下の2種類に大別することができた。

- ①岩体あるいは人工バリア材料と地下水との化学反応や、地下水による溶質の移動に代表される緩慢で長期にわたって進行するプロセス
- ②地震活動、断層運動や火成活動といった突発的な変化をもたらす事象

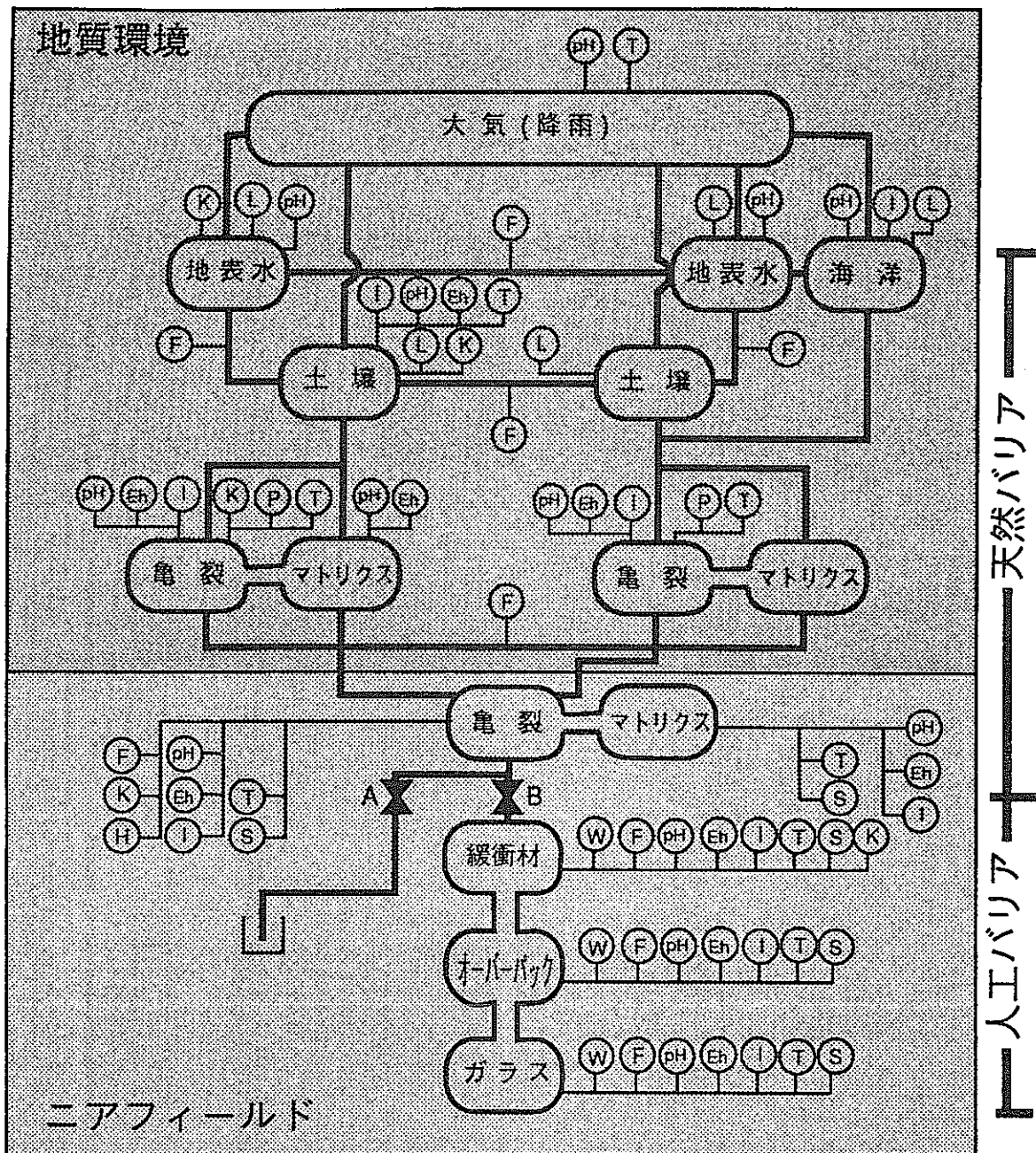
緩慢に進行するプロセスを対象とし、現時点での地下水の流動や化学的性質といった地質環境条件が定常状態にあって今後も変化せず、人工バリアは検討の対象とした仕様例のとおりを実現されていて、欠陥がないという条件のもとで考えられるシナリオを基本ケースとした。他方、地質環境自体の漸進的変化過程や突発的に発生する事象については、基本ケースに対する変動因子として考え、変動ケースとして考えることとした。

##### 4.2.3.1 地下水シナリオの基本ケース

地下水シナリオの基本ケースを記述するうえで、表記法として以下に示すようなインフルエンス・ダイアグラムの手法を利用した。図4-12に示すように、上述した地層処分システムの場合としての特徴にもとづいて、まず処分システムを構成する要素を、空間領域として、土壌、地質環境、ニアフィールド中の母岩、緩衝材、オーバーパック及びガラス固化体によって定義した。次に時間領域を、処分場の操業期間（処分場の建設及び建設以前も含む）、閉鎖後の過渡期間及びその定常的期間に分割し、各時空間領域ごとに関連するプロセス（ここでのプロセスは関連するF E PまたはF E Pの組み合わせ）とその状態を記述するとともに、対応する状態変数を表記できるようなインフルエンス・ダイアグラムを作成した。まず、構築されたインフルエンス・ダイアグラムを図4-13に示す。これにもとづいて、システムの各要素ごとに関連するF E Pとその状態を表現するインフルエンス・ダイアグラムを展開し、各要素ごとの状態を要素間で組み合わせることによって、地層処分システムの挙動をシナリオとして記述することができる。

	1.建設・操業期間	2.閉鎖後の過渡期間	3.定常的期間
A : 地質環境 (土 壤)	A 1 ~ A 3		
B : 地質環境 (土壌以外)	B 1 ~ B 3		
C : ニッパール母岩	C 1	C 2	C 3
D : 緩衝材		D 2	D 3
E : オーバーバックと 腐食生成物		E 2	E 3
F : ガラス固化体			F 3

図 4 - 12 地下水シナリオにおける地層処分システムの時間・空間分割の例



P : Hydraulic Potential    L : Water Level  
 F : Flow Rate            K : Hydraulic Transmissivity  
 H : Hydraulic Gradient    W : Water Content  
 I : Major Ion Activity    S : Stress

図4-13 インフルエンス・ダイアグラムによる地層処分システムの場合と状態の記述



(1) 地質環境のシナリオ (図4-12のA1~A3, B1~B3)

図4-14は、図4-13に示された地質環境における広域流動系に関するプロセスを状態変数の関係で示したものである。また図4-15は、同様に地下水の地球化学に関連するプロセスについて示したものである。

広域流動系によって規定される流動状況にしたがって、地下水は、その供給域である地表から下部に位置する地質環境(深部岩体等)を経て処分場に至る。処分場との位置関係にもとづいて、地下水供給域である地表から処分場までの地質環境を「上流側地質環境」とよぶことにし、上流側地質環境における地下水の流動及び化学的性質の変化の過程について記述する。

地表から上流側地質環境へ浸入する地下水の量は、降雨、蒸発、河川水としての流出といった地表での諸プロセスと、地質環境への涵養プロセスとのバランスにおいて決定される。地質環境への涵養プロセスは、地形に影響される動水勾配の分布を駆動力として、表層と地下深部との透水性にしたがい生ずるものである。また、臨海地域においては海水が陸地の地下に浸入し、密度差により陸水系と区分される塩水くさびが生ずることが特徴となる。深部岩体に供給された地下水は、処分場の設置されているニアフィールドの母岩とその周囲の岩体の透水性の分布にしたがって流動し、これにもとづいてニアフィールドの水理が規定される。

上流側地質環境での地下水の水質形成に関与する地球化学的プロセスとしては、まず、大気中の二酸化炭素や酸素、及び土壌中の有機物からの二酸化炭素が地下水に溶解するプロセスが重要である。これらのプロセスにより、上流側地質環境に浸入する地下水の化学的特性や、その後の地球化学プロセスの進展が規定される。地下水は、上流側地質環境を流動する間に、岩石を構成する鉱物と反応して、その特性が変化し、ニアフィールドへ至る。この過程で考えられる化学反応としては、

- ①二次鉱物として普遍的に存在する方解石等の炭酸塩鉱物の溶解に伴うCa, Mg等の濃度上昇, pH上昇及び重炭酸イオン濃度の上昇,
- ②造岩鉱物, 特に石英等に比して相対的に反応しやすいと考えられる長石等の, 粘土・雲母類への変質と, これに伴う地下水中のアルカリ金属, アルカリ土類金属元素濃度の上昇及びpH上昇,
- ③上記の反応の帰結として生じた粘土鉱物類による, 陽イオン交換反応による主要な陽イオン間の濃度変動,
- ④有機物による酸化還元電位の低下, 重炭酸イオン濃度の上昇(有機物の酸化), 硫酸

イオン濃度の上昇（黄鉄鉱の酸化の場合）及び地下水の酸化還元電位が十分低下した場合の硫酸イオンの硫化水素への還元や有機物の醗酵作用によるメタンガスの生成、が主要なものである。

さらに、過去に海底において生成した堆積岩においては、その空隙中に取り込まれた海水が、その後の圧密（特にモンモリロナイト等、粘土層間のグニー層の圧縮）による陰イオン排除を経て、Na及びClイオンを主要な成分とするイオン強度の高い化石水となることがある。この地下水は、ドロマイトの沈殿によりCa及びMg濃度が海水に比して低いことが特徴であり、また、多くの場合、海底に賦存する有機物の腐敗により低い酸化還元電位を示すとともに、硫化水素への還元が生ずる結果、低い硫酸イオン濃度を示す。

これらの反応は、該当する岩石や鉱物の分布状況、接触時間、温度、固液界面の状態といった因子に影響され、長期的には、定常状態に至るものと考えられる。温度が高く固液界面に反応しやすい新鮮な鉱物が存在しているような系では、地下水の流動が緩慢な場合、反応速度に比して地下水の滞留時間が長いこととなり、系の化学的狀態は局所的に平衡に近づくこととなる。

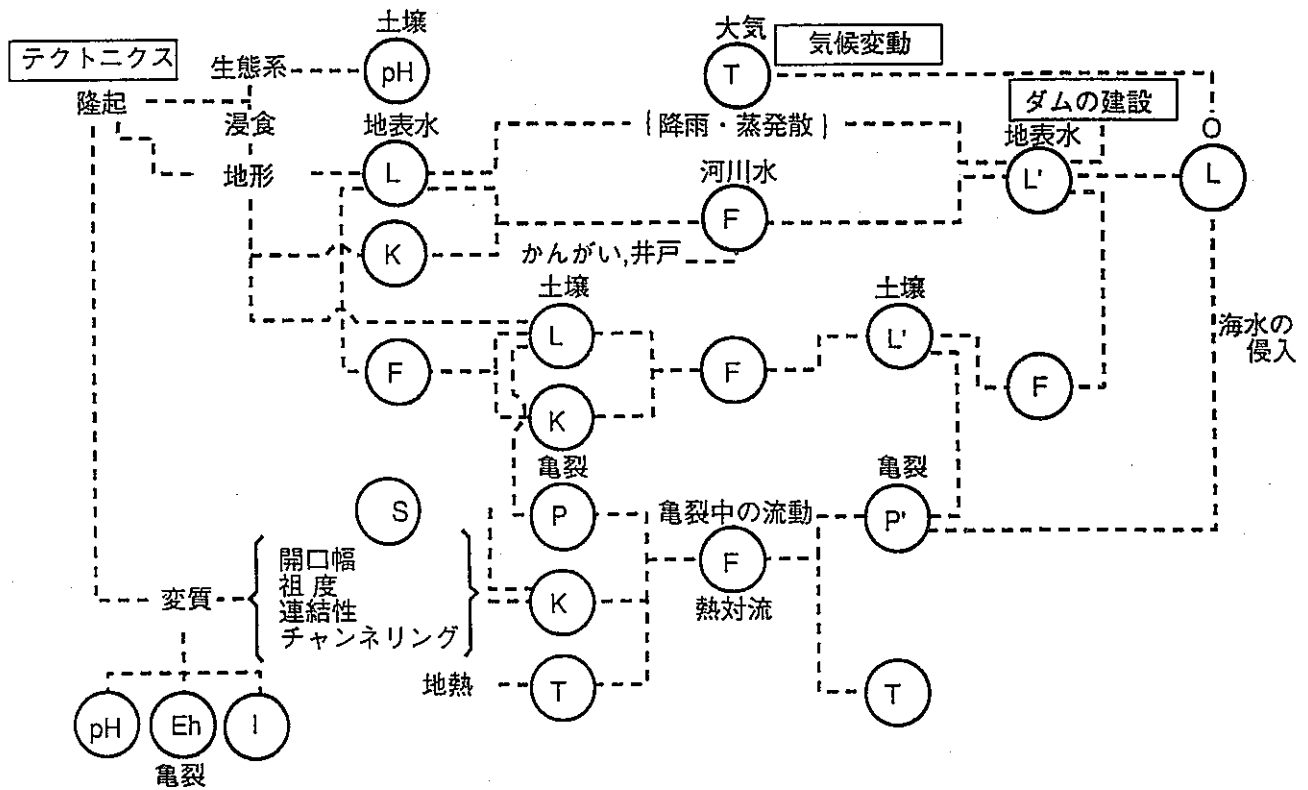


図4-14 処分システム要素に関連するF E P及びその状態を表現するためのインフルエン  
ス・ダイアグラム (地質環境: 広域流動系)

注) 図中に示すF E Pは、地質環境における広域流動系に関するインフレン  
ス・ダイアグラムを記述するために簡略的に用いたF E P (プロセス等)  
であり、表3-1のリストに示すF E Pとは必ずしも一致しない。

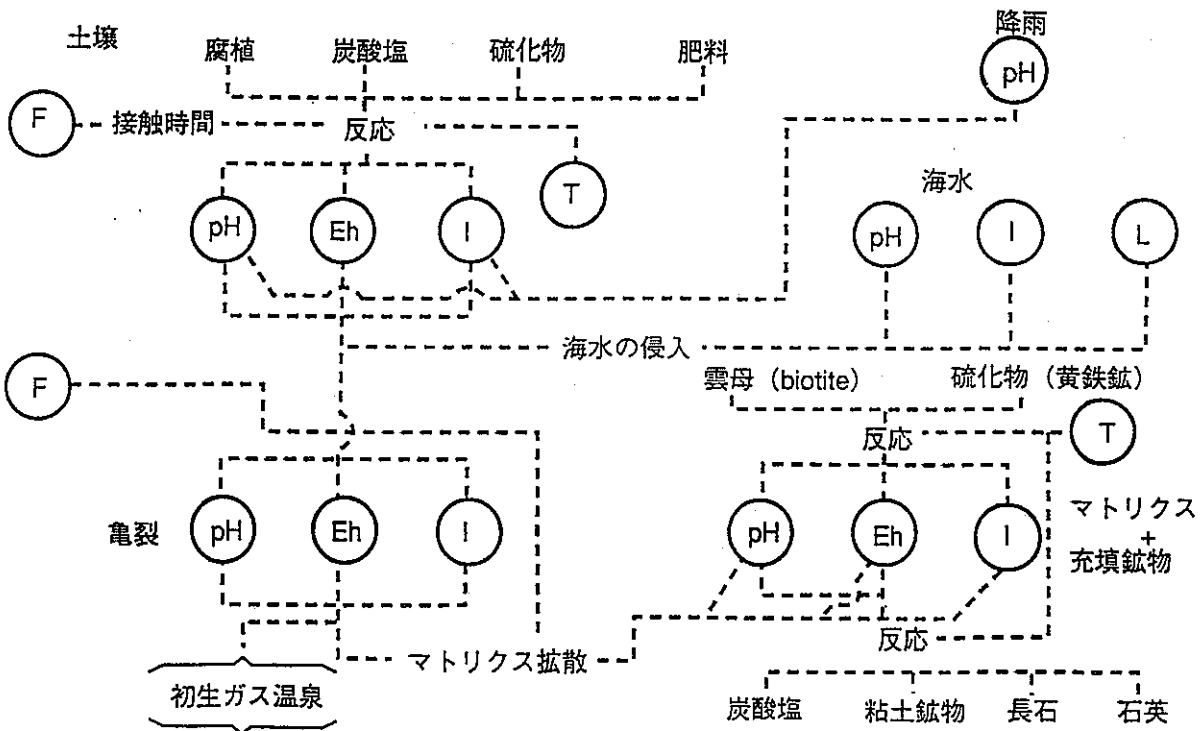


図 4-15 処分システム要素に関連する F E P 及びその状態を表現するためのインフレンス・ダイアグラム (地質環境: 地下水の地球化学)

注) 図中に示す F E P は、地質環境における地下水の地球化学に関するインフレンス・ダイアグラムを記述するために簡略的に用いた F E P (プロセス等) であり、表 3-1 のリストに示す F E P とは必ずしも一致しない。

## (2) ニアフィールド環境のシナリオ

以上に述べたような複合的な過程を経て、地下水はニアフィールド母岩に浸入し、ここでさらに、別の地球化学的プロセスを経ることとなる。図4-16に、ニアフィールドの水理、地球化学に関連するプロセスを状態変数の関係で示す。この領域でのプロセスは、処分場の建設、操業や高レベル放射性廃棄物の発する熱等の影響を受ける。長期的にはこれらのニアフィールド効果は緩衝されることになる。ニアフィールドについては、図4-12に示した時間領域に対して、上流側地質環境で生ずるプロセスの影響と、人工バリア等の設置物の影響とを併せて考慮する必要がある。

### (a) 建設・操業期間（図4-12のC1）

処分場の建設及び操業段階においては、坑道掘削による動水勾配の変化や母岩の応力開放に伴う透水性の変化といった物理的プロセスと、坑道内空気からの酸素や炭酸ガスの供給とこれに起因した化学的プロセスとが重要なものとして挙げられる。

上記の動水勾配の変化は、一般的に開放端である坑道内に向けての地下水流動を生じさせ、局所的に流動経路を変化させる場合もある。また、透水性の変化は、地下水流速や流動方向の変化をもたらす。このため、上流側地質環境での定常的な水質分布を局所的に変動させる可能性もある。

また、化学的プロセスとしては、酸素の侵入による地下水の酸化還元電位の上昇と、二酸化炭素の侵入によるpHの低下が考えられる。さらに、これらに付随して、酸化還元電位の上昇に伴う黄鉄鉱の酸化とpHの低下に伴う方解石の溶解が生ずると考えられる。黄鉄鉱の酸化は、微生物の触媒作用によって加速される可能性があると考えられており、結果として、酸化還元電位の上昇を緩衝するとともに、pHを低下させる。また、この場合の方解石の溶解は、一定の二酸化炭素分圧における開放系での溶解機構であり、上流側地質環境の閉鎖系（総炭酸量一定の条件に対応）での方解石の溶解ほどにはpHを上昇させないことと、重炭酸イオン濃度を相対的に上昇させやすいことが特徴である。坑道内への浸水量と、母岩の連絡する帯水層の規模との関係によっては、この期間中に不飽和領域が現れる可能性がある。この場合には大気からの酸素や炭酸ガスの供給が、より岩体内部に進展することとなる。



(b) 閉鎖以降 (図4-12のC2~C3, D2~D3, E2~E3)

処分場が閉鎖された後、地下水が不飽和の緩衝材中を浸透している期間には、ガラス固化体から発生する熱が、人工バリアと周辺母岩の状態や地下水の浸透過程に影響を与えることが特徴である。また、緩衝材への地下水の浸透により、人工バリア内の温度分布や応力状態も変化していく。

ニアフィールド母岩においては、処分場の建設及び操業期間において、気相から供給された酸素や二酸化炭素による酸化還元電位の上昇とpHの低下といった影響を回復する方向の反応として、さらに黄鉄鉱の酸化と方解石の溶解等が進む。この際、ガラス固化体から発生する熱によって上昇した温度条件の下でこれらの反応が生ずる。

また、緩衝材領域においても、緩衝材中に不純物として含まれる黄鉄鉱の酸化と方解石の溶解等が進むこととなる。さらに、ここでは、ベントナイトの主成分であるナトリウムモンモリロナイトによる陽イオン交換が起こり、方解石の溶解によって生ずるCaを固相に取り込む代わりにNaを液相側に供給する。このため、方解石の溶解は、通常よりも高重炭酸イオン濃度、低カルシウム濃度において平衡することになると考えられる。

緩衝材の主成分であるベントナイトは、微細な薄片状の粘土粒子によって構成されており、かつ、粘土粒子中の陽イオンの不足によってその表面が負に帯電して水分子との間に電気的引力を有するために、飽和後には極めて低い透水性を示す。このため、母岩中の地下水の流動に比して緩衝材中での地下水の流動は緩慢であり、物質の移動は拡散支配となる。

緩衝材が地下水によって飽和された後は、ニアフィールド母岩は、すでに地下水によって飽和されていると考えられ、気相からの酸素や二酸化炭素の供給がない状態で、化学反応が進むことになる。酸素と二酸化炭素は溶存しているもののみが反応に寄与することとなり、反応の進行にしたがって消費され濃度が低下する。

緩衝材領域を飽和しつつ、地下水はオーバーパックと接触を開始し、地下水とオーバーパック材である鉄との化学反応(鉄の酸化反応)が生ずる。この反応により、オーバーパックは腐食して減肉し、最終的には破損する。ガラス固化体の発熱による温度上昇が有意であるのは破損以前の時期であり、この状況下でまず、初期の腐食反応が進展することとなる。オーバーパック表面において、再冠水期間に緩衝材の空隙水中に溶解した酸素と黄鉄鉱の酸化によって生成された硫酸イオンによって鉄の酸化反応が生ずる。硫酸イオンは、バクテリアにより硫化水素イオンに還元されて、鉄の酸化を引き起こす可能性もある。これらの腐食性物質が消費された後には、水の直接的な分解を伴う水素発生型の腐食が生

ずると考えられる。この反応は、緩衝材中の空隙水の酸化還元電位をさらに低下させる。また発生する水素ガスは、腐食の進行や人工バリアの物理的状態あるいは地下水の化学的性質に影響を与える可能性がある。

また、しゃへい効果によって減衰するものの、オーバーパックを透過する放射線が地下水を放射線分解させることによって酸化種を生成し、オーバーパックの腐食速度に影響を与えることも考えられる。

### (3) 核種の溶出及び移行の状態 (図4-12のF3)

上記(1)及び(2)で記述したような環境条件のもとで、オーバーパックの核種閉じ込め機能が喪失すれば、地下水はガラス固化体に接触することになる。この時点から、放射性核種はガラス固化体から溶出してベントナイト中を移行し、さら周辺母岩の空隙中を地下水によって移動することが想定される。この過程において、溶解した核種は、地下水中の溶質との反応により種々の化学形態やコロイド等に変化したり、ベントナイトや岩石中の鉱物等との物理化学的相互作用を経ながら移行していくことになる。また、ガラス固化体あるいは移行する核種からの放射線による地下水の放射線分解並びにベントナイト及び岩石の放射線損傷が、核種の溶出や移行に影響することも考えられる。



#### 4.2.3.2 地下水シナリオの変動ケース

基本ケースにおいて述べた地下水の流動や化学的性質に関連するプロセスの進行に伴って地質環境の場としての状態も変化していく。地表の状態を変化させるものとしては、地表の岩石や土壌が風雨等の外的作用で削り取られる表面削剝、河川による削剝や侵食、海水の波浪、潮流等による海食といった作用や、これとは逆の堆積作用等が挙げられる。これらの作用は、涵養プロセスを規定する要因として重要な地形の変化という形でフィードバックされる。

また、岩石が物理的に破壊される機械的風化作用、地下水と岩石の構成物質との化学反応による化学的風化作用が進行することにより、表層の岩石の諸特性が変化する。堆積物が沈積してから堆積岩となるまでには、続成作用により圧密、脱水等の物理的変化と、鉱物の溶解や生成等の化学的変化が生ずる。風化作用や続成作用の進展に伴い、長期的には土壌とその下部の岩石との境界は変動することも想定される。これらのプロセスは、特に気象条件との相関が強く、短期的には四季により、また長期的に見れば氷期、間氷期の繰り返しによる緩慢な気候変動等により影響を受ける。

地下水の移動に伴って生ずる化学反応と物質の移動により、たとえば、地下水の主要な流動経路にあたる亀裂内においては、初期には地下水と造岩鉱物との反応により上記4.2.3.1(1)①の過程が進行するが、次第に亀裂表面近傍の長石は消費され、逆に二次鉱物である粘土類等が亀裂内を充填する。この結果として、①の反応が低下していくとともに、亀裂の透水性が低下し地下水の浸透流量が低下することに対応して、生成される粘土鉱物はカオリン系のものからスメクタイト系のものに変化する。

このような地質環境自体の場としての状態の漸進的変化は、地下水シナリオの基本ケースに変動を与えることが考えられる。このことに加えて、たとえば自然現象として地震活動、断層運動や火成活動等の突発的現象により、地下水流動状況や地球化学条件の変化が生じ、地下水シナリオの基本ケースを変動させることが考えられる。これらの変動ケースについては、評価の対象とすべきシナリオの範囲を十分に検討し、基本ケースに対して構築された影響評価の枠組みをもとに、今後パラメータやモデルの変更によって対応を行う必要がある。

### 4.3 影響解析のためのモデル体系の構築

影響解析を行うためにシナリオにしたがって、まず基本ケースに対して地層処分システムの挙動を解析するモデル体系の構築を行うこととした。変動ケースについては、基本ケースに対するモデルのパラメータを変化させたり、モデル自体を変更することによって対応することができると考えられる。いずれにしても、基本ケースのモデル体系を確立することが重要であるので、本報告書では、モデル開発のフレームについて基本ケースに焦点をあてて検討を行うこととした。

地下水シナリオの基本ケースに関連する種々の現象は、現時点で必ずしもそのすべてが定量的に解析可能であるというわけではなく、またすべてが定量的に解析される必要があるというものでもない。たとえば、コロイド生成やその移動、腐食に伴うガス発生とその影響等については、現在、数学モデルの開発が進められているところである。また、定性的検討によって、それが地層処分システムの性能に有意な影響を及ぼすものではないことを示すことができるものもあると考えられる。さらに、基本ケースに関連する現象相互の関係は複雑であり、そのすべてを解析のためのモデル体系に取り込むことは容易なことではない。そこで、モデル体系を考えるにあたっては、処分システムのふるまいに対して、適切な安全評価上の保守性を考慮することによって、簡略化したモデルを適用するバウンディング・アナリシスの考え方をを用いる（たとえば、化学反応と物質移動との競合によって定まる地下水の水質、その反応が全く生じない場合と平衡にまで進むという両極を考えることで把握する等）。

このようにして構築されたモデル体系を、図4-17に示す。このモデル体系にしたがって、まず、地質環境条件を、広域の地下水流動と地下水の化学的性質の観点から解析することができる。広域の地下水流動については、日本の地形データにもとづいて、標高、斜面の勾配、平野の規模などをパラメータとした仮想的な水理地質モデルを考え、水理学的境界条件や断層等の存在による動水勾配への影響について、等価多孔質媒体モデルを用いた解析が可能である。この結果と、実在する地域を対象とした解析例とから、ニアフィールドの水理条件及び天然バリア中の核種移行を解析するうえで必要な動水勾配の条件を、十分な安全裕度を見込んで導くことが可能となる。

地質環境における地下水の化学的性質に関しては、地下水シナリオで検討した水質形成に関与する主要な地球化学プロセスを考慮して、平衡論によるモデル化を行い、深部地下水の地球化学的特性を導出することが可能となる。このモデル地下水をニアフィールドにおける地下水の地球化学的特性及び天然バリア中の核種挙動を解析するうえでの基本的条

件とすることができる。

次に、解析により導出された地質環境条件にもとづき、人工バリアの仕様例に対して、ニアフィールドの熱、水理、応力、地球化学及び放射線影響に関する諸プロセスを解析し、ニアフィールド環境における熱的条件や構造力学的条件、地下水の水理および地球化学的条件を明らかにすることができる。ニアフィールドの熱的条件や地球化学的条件は、オーバーパックスの腐食挙動の解析とそれにもとづく健全性維持期間の推定に用いることができる。また、ガラス固化体からの核種の溶出については、ニアフィールドの熱的条件やオーバーパックスの腐食による地下水の地球化学的条件の変化も考慮して、難溶性元素の溶解度及び可溶性元素の溶解速度を算出することが可能である。この際、ニアフィールドの水理条件により与えられる緩衝材中の物質移動メカニズムを念頭に置く必要がある。

ニアフィールドにおける地下水の地球化学的条件、オーバーパックスの腐食挙動及びガラス固化体の溶解を解析するうえで、ガラス固化体や溶出した核種による放射線の影響についても検討する必要がある。

人工バリア中の核種移行については、ニアフィールド水理条件から考えられる緩衝材中の物質移動メカニズムにもとづいて、モデル化を行うことが可能である。このモデルに対し、別途算出される溶解度及び溶解速度をガラス固化体と緩衝材界面における境界条件とし、また緩衝材とニアフィールド母岩界面では保守的に濃度を0とする境界条件を与えることによって、人工バリアから天然バリアへの核種移行率を求めることができる。核種の緩衝材への $K_d$ 値を設定する際には、ニアフィールドにおける地下水の地球化学特性を考慮するとともに放射線の緩衝材の材料特性への影響についても検討を行う必要がある。

天然バリア中の核種移行については、地質媒体を物質移動の観点から特徴的な亀裂性媒体と多孔質媒体とに分類してモデル化することが可能である。この解析では、ソースタームとして人工バリアからの核種移行率を、また、水理パラメータの範囲の設定に広域地下水流動解析から得られた動水勾配を用いることができる。さらに、地下水の水質形成に関する地球化学解析からモデル化された地下水の化学的性質は、核種の岩石に対する $K_d$ 値を設定する際に参考とすることができる。

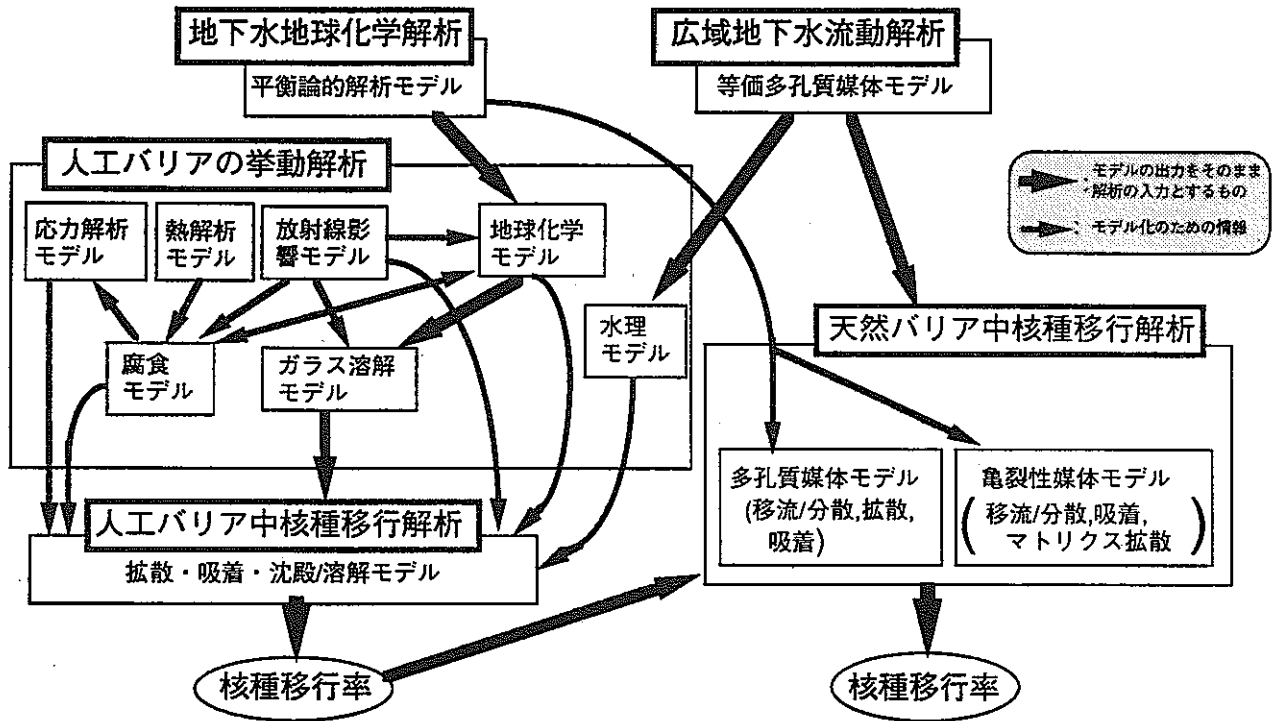


図 4-17 地下水シナリオの基本ケースに対する解析モデルの体系

## 5. まとめと今後の課題

### 5.1 まとめ

本報告書では、地層処分システムの長期的性能の評価のためのシナリオ解析について述べた。このシナリオ解析の最初のステップとして、FEPのリスト化を行い、これらのFEPにもとづいて、シナリオを作成した。シナリオの作成にあたっては、影響モードにしたがって接近シナリオと地下水シナリオとに大別し、それぞれに対応したアプローチ法を考察した。

接近シナリオについては、これを引き起こすと考えられる現象の発生可能性や地域性について、地質学的、地球科学的観点からの情報を蓄積し、基本的にはサイト選定や処分場の設計によって、これを排除するアプローチをとることができると考えられる。

地下水シナリオについては、関連する現象が複合的に組合わさった状態が考えられ、さらに基本ケース及び変動ケースという2つのケースを定義することとした。このような分類は、研究開発の進捗状況を踏まえた性能評価モデルの開発指針を無理なく設定するうえでも必要なことである。このうち、基本ケースでは、現時点での気候、地下水の流動や化学的性質といった地質環境条件が定常状態にあり、また人工バリアは検討の対象として仕様どおりに実現されていて欠陥がないという条件のもとでの地層処分システムの挙動を取り扱っている。他方、気候の長期的な変動、地質環境自体の漸進的変化過程あるいは地震のように突発的に発生する事象については、基本ケースに対する変動因子として考え、変動ケースと定義してこれを扱うこととした。

基本ケースに対しては、地層処分システムを構成する構造的要素ごとに、それを規定する状態変数の時間的変化を表現できるようなインフルエンス・ダイアグラムを作成し、関連する現象の相互関係を記述した。これにもとづいて、地層処分システム全体の性能評価のためにモデル体系を構築することができた。

シナリオ解析は、今後とも研究開発の進展にともなって逐次見直しを行っていくことが必要である。

### 5.2 今後の課題と研究開発の進め方

#### 5.2.1 研究開発課題とアプローチ

今後の研究開発では、人工バリア性能の定量化を目指し、性能評価研究では、人工バリアの固有性能を核として、ニアフィールド岩盤の天然バリアとしての性能の評価に力点を

において、地層処分システムの長期的安全性を高い信頼性をもって示すことが重要となってくる。さらに、天然バリア性能が定量化されるニアフィールド岩盤の領域やそこで考慮される現象の範囲を拡大し、人工バリアの固有性能と併せて多重バリアシステム全体の性能を明らかにしていくことが目標とされている。このような目標に対して、シナリオ解析に関する重要な課題と研究開発の進め方については以下のようにまとめることができる。

まず、これまでに作成されたFEPリスト及びこれにもとづくシナリオ分類とそのアプローチについては、基本的に今後もこれを踏襲することが可能である。すなわち、接近シナリオの起因となる現象に対しては、将来のサイト選定において、処分場を設置する深地層の安定性を評価することが可能となるよう、着実に地球科学的知見を整備していくことが重要である。

地下水シナリオについては、まず性能評価モデル開発の対象とした基本ケースを軸に、次の2つの観点からの研究を拡張していくことが必要である。

#### (1)基本ケースの充分性

基本ケースの記述においては想定されているものの、実際にはモデル化されていない現象に関してシナリオ上の取扱いを明確にする。

#### (2)変動ケースの定義と性能評価上の取扱い

変動ケースに関する記述を行い、その定義を明確にするとともに性能評価上の取扱いについて検討する。この際、接近シナリオの起因となる現象が地下水シナリオに与える影響についても考察する必要がある。これらの現象に関する情報の整備は、地下水シナリオとの関連も視野に入れたものでなければならない。

これらの研究開発は、上記の目標を効率的に達成するため、これまでに構築された性能評価モデル体系の中で、まずニアフィールド性能に強く関連した部分を中心に、FEPリストを参照しつつボトムアップ的に進めていくことが重要である。同時に、FEPリスト自体の見直しを進め、トップダウン的に性能評価上考慮すべき現象の範囲を合理的に設定して全体の整合を図ることが肝要と考えられる。このような枠組みにより、性能評価モデルの開発やデータ取得といった研究開発の進展、人工バリアや処分施設のデザインの変更、さらには地球科学的研究の進展に伴う成果の取り込みに柔軟に対応することが可能となる。

## 5.2.2 必要とされる研究の内容

ここでは、今後の研究開発課題に対応した具体的研究内容を示す。

### (1) シナリオの包括的な表記法の開発

地下水シナリオの基本ケースの充分性に関する検討、変動ケースの定義、接近シナリオの起因する現象に関して必要となる情報の明確化などを行ううえで、種々の研究分野の知見を適切に取り込み、地層処分の長期安全性を評価するためのシナリオを妥当なものとしていくためのツールが不可欠である。これまでに開発を行ったインフルエンス・ダイアグラムの手法をもとに、現象間の相関を状態変数レベルでマトリクス表現する方法等を検討し、FEPリストに含まれる現象を包括的に示す方法を開発する。この表記法は、種々の研究分野の専門家による意見交換の基礎ともなるものであり、自然言語に対応させて理解可能なものにすべきと考えられる。一方、連続する種々のプロセスの組合せの結果として生じる状態については、すべて自然言語によってこれを記述するのは無理がある。そこで、多くの現象を数学的に表現し、これを簡便に解法して系の状態変化を概略把握するようなシナリオ・シミュレーション手法を開発することが考えられる。これらの2つのツールをもとにシナリオの包括的な定義と理解を図ることが重要である。

### (2) シナリオの展開

上記の包括的な表記法を用いて、実際にシナリオを展開する。これまでに作成されたFEPリストを出発点として作業を開始し、特に課題として残されている現象については、研究開発の進展にともなって得られる成果を適宜取り込んでいくことが重要である。

### (3) シナリオの取扱い法の検討

上記の表記法にもとづき明確に定義されるシナリオごとに、性能評価上の処理法の検討を行うことが重要である。シナリオの処理は次のような2段階に分けられる。

#### ①シナリオのスクリーニング

FEPリストや定義されたシナリオに対する専門家の判断(Expert Judgement)の取り込みにより、シナリオ間の相対的な重要度の概略把握を行い、安全評価上考慮すべきシナリオの適用性について検討を行うとともに、委員会等を通じて実際の適用を図ることが考えられる。

#### ②選定されたシナリオの評価法の検討

シナリオのスクリーニングにおいて選定されたシナリオに対しては、その評価上の処理法を明らかにすることが重要である。この処理法としては、以下のものが考えられる。ただし、これまで確立された基本ケースに対する性能評価モデルの体系を前提として新たに

明確化されるシナリオの処理を行うものとする。

(a)不連続事象の定量化

稀頻度事象やランダムに発生すると考えられる現象については、シナリオ解析上、まずその発生に関する検討が必要である。過去に客観的データが十分に存在するような現象に対しては古典的な統計理論や確率理論が適用可能であると考えられる。そうでない場合には、いわゆる主観確率のような確信度を測度として与えることが考えられる。このような測度は、上述した手法にもとづき、専門家の意見を定量化することによって得ることが可能である。

これら不連続事象の発生に起因した接近シナリオによる人間環境への直接的影響、あるいは地下水シナリオに対する変動要因としての影響については、以下の方法により扱うことができる。

(b)パラメータ値の変更

シナリオに含まれた現象や現象間の関係のうち、これまでの性能評価モデル体系に含まれているパラメータ値を変更することによって対処することである。この場合には、パラメータ値の範囲の設定方法について検討する必要がある。

(c)決定論的数学モデルの開発

シナリオに含まれた現象や現象間の関係のうち、これまでの性能評価モデル体系に含まれているパラメータ値を変更することによって対処できないものについては、その時点における最新の知見にもとづいてモデル化のための検討を行う必要がある。

以上、次の研究段階として、まずシナリオ表記法の開発とこれを用いたニアフィールド性能に関するシナリオの詳細な記述を終了することが重要である。また、これらに対応して、シナリオのスクリーニング及び各シナリオに対する評価法の明確化を行い、ニアフィールド性能の定量化が実施可能なように作業を進めていくことが重要である。さらに、地層圏及び生物圏については、概略のシナリオ記述とスクリーニングに関する検討を行い、将来に向けての課題を明確にしていくことが重要である。



## 文 献

Andersson, J. and Eng, T. (1989) : The Joint SKI/SKB Scenario Development Project, SKB TR89-35, 1989.

Billington, D. E., Lever, D. A. and Wisbey, S. J. (1990) : Radiological Assessment of Deep Geological Disposal : Work for UK Nirex Ltd., Proc. Int. Sympo. Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA, Paris.

Bingham, F. W. and Barr, G. E. (1979) : Scenarios for Long-term Release of Radionuclides from a Nuclear Waste Repository in the Los Medanos Region of New Mexico, Sandia National Laboratories Report, SAND 78-1730.

Cranwell, R. M., Cambell, J. E., Helton, J. C., Iman, R. I., Longsine, D. E., Ortiz, N. R., Runkle, G. E. and Shortencarier, M. J. (1987) : Risk Methodology for Geologic Disposal of Radioactive Waste : Final Report, Sandia National Laboratories Report SAND 81-2573 (NUREG/CR-2452).

Diebold, P. and Müller, W. H. (1985) : Szenarien der Geologischen Langzeitsicherheit: Risikoanalyse für ein Endlager für Hochaktive Abfälle in der Nordschweiz, Nagra NTB 84-26.

藤田朝雄, 五月女敦, 原啓二, 納多勝(1992): 人工バリアの構造力学的検討, 動燃技術資料, PNC TN8410 92-053.

Grimwood, P. and Thegerström, C. (1990) : Assessment of the Risks Associated with Human Intrusion at Radioactive Waste Disposal Sites - Some Observations from an NEA Workshop, Proc. of Int. Sympo. Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, pp.385-395, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA, Paris.

Hodgkinson, D. P. and Sumerling, T. J. (1990) : A Review of Approaches to Scenario Analysis for Repository Safety Assessment, Proc. Int. Sympo. Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA, Paris.

Hunt, R. L., Barr, G. E. and Bingham, F. W. (1983) : Scenarios for Consequence Assessments of Radioactive Waste Repositories at Yucca Mountain, Nevada Test Site, Sandia National Laboratories Report, SAND 82-1277.

IAEA (1983) : Concepts and Examples of Safety Analysis for Radioactive Waste Repositories in Continental Geological Formations, IAEA Safety Series No. 58.

Intera Environmental Consultants Inc. (1983a) : FFSM : Far-Field State Model, Office of Nuclear Waste Isolation Report, ONWI-436.

Intera Environmental Consultants Inc. (1983b) : GSM : Geologic Simulation Model for a Hypothetical Site in the Columbia Plateau : Large Computer Version, Office of Nuclear Waste Isolation Report, ONWI-447.

国土庁 (1983) : 全国井戸調書.

Laurens, J. -M., Thompson, B. G. J. and Sumerling, T. J. (1990) : The Development and Application of an Integrated Radiological Risk Assessment Procedure using Time-Dependent Probabilistic Risk Analysis, Proc. Int. Sympo. Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA, Paris.

増田純男, 佐々木憲明, 石黒勝彦, 梅木博之 (1991) : 地層処分システム性能評価のためのシナリオ分類と地下水シナリオの設定, 日本原子力学会1991年秋の大会予稿集.

McKinley I. G. (1989) : The Near-field Geochemistry of HLW Disposal in an Argillaceous Host Rock, Nagra NTB 88-26.

Nagra (1985) : Feasibility Studies and Safety Analysis, National Cooperative for Storage of Radioactive Waste (Switzerland) Project Report, NGB 85-09.

内藤守正, 大久保博生, 梅木博之 (1992) : 隕石の衝突による地層処分システムへの影響に関する検討, 動燃技術資料 PNC TN1410 92-084.

新妻信明編 (1982) : 既存ボーリング資料集.

OECD/NEA (1992) : Systematic Approaches to Scenario Development : A Report of the NEA Working Group on the Identification and Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste Disposal.

Saotome, A., Hara, K., Fujita, T. and Sasaki, N. (1991): Study on Mechanical Stability of Engineered Barrier System for Geological Disposal of HLW, 11th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Tokyo, Japan.

五月女敦, 藤田朝雄, 原啓二, 納多勝 (1992): 地層処分場の熱的安定性の検討, 動燃技術資料, PNC TN8410 92-061.

Stephens, M. E. and Goodwin, B. W. (1990) : Scenario Analysis for the Post Closure Assessment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal, Proc. Int. Sympo. Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA, Paris.

USDOE (1986) : A Multiattribute Utility Analysis of Sites Nominated for Characterization for the First Radioactive-Waste Repository - A Decision Aiding Methodology, USDOE Report, DOE/RW-0074.