



高レベル放射性廃棄物の
地層処分研究開発特集

地層処分研究

2. 性能評価研究

2-1 シナリオ解析

環境技術開発推進本部

資料番号：85-4

Research on Geological Disposal

2. Performance Assessment

2-1 Scenario Analysis

(Radioactive Waste Management Project)

高レベル放射性廃棄物地層処分の研究開発において、シナリオ解析の目的は地層処分された高レベル放射性廃棄物中の放射性物質が最終的に人間とその生活圏に影響を及ぼす可能性についてのシナリオを抽出し、性能評価の枠組みを定めることである。この目標に対し、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基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い、シナリオに沿った影響解析の枠組みの構築を試みた。

1. はじめに

性能評価の体系は、地層処分システムおよびその環境の将来にわたる挙動を想定するシナリオ解析、そのシナリオに基づいてその挙動を表現するための数学モデルの開発、ならびにこの数学モデルと適切なデータを用いて行う影響解析からなる。これらの関係を簡単に示したものが図1である。

このうちシナリオ解析の役割は、地層処分システムおよびその環境の将来を描像し、モデル開発やデータ収集の枠組みを与えることである。これまで、専門家の判断によって最も重要なシナリオとして、地下水を移行媒体とする核種移行に関するシナ

リオが考えられ、これを基に予想される現象のモデル化が進められてきた。また一方では、近年において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することから、もともと想像の産物という性格を含まざるを得ず、重要なシナリオの選択やその起こりやすさの推定は、個人の判断に依存する面が大きい。しかしながら、アプローチ法を構築し体系的に行うことによって抜け落ちや主観性を低減することが可能となり、さらに性能評価を行う上で考慮すべきシナリオの範囲に関する合意の形成に役立つものである。

このシナリオ解析においては、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、ならびに現象群の相関関係に基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い、シナリオに沿ったモデル開発ならびに影響解析の枠組みを構築することが可能となった^{1),2)}。

以下に、このような性能評価の体系の中で進められているシナリオ解析について報告する。

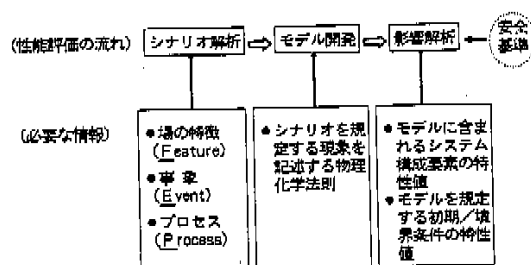


図1 地層処分システム性能評価の体系

A. 自然現象	B. 人間活動	C. 廃棄物および処分場に起因する現象	
1. 地球外の現象 1.1 隕石の衝突 1.2 太陽放射 2. 地質学的現象 2.1 プレート運動/テクトニクスの変化 2.2 地磁気の変化 2.3 火山活動 2.4 成成作用 2.5 成成作用 2.6 隆起/沈降 2.7 地盤/断層運動 2.8 岩体の不均質性(親水性、鉱物組成) 3. 気候学的現象 3.1 降湿、気温、土壌の水収支 3.2 洪水 3.3 海面変動 3.4 氷雪凍結層の影響 3.5 水合作用(水河侵食等) 4. 地形学的現象 4.1 地層り 4.2 表面剥離 4.3 河川侵食 4.4 河川の蛇行 4.5 海食 4.6 堆積作用 4.7 寒冷気候の影響(ソリフラクション等) 4.8 化学的浸食作用および風化作用 5. 水理学的現象 5.1 地下水循環 5.2 不均質系での地下水流動 5.3 地下水流動状況の変化 5.4 地下水系への海水の侵入 5.5 塩化境界の影響 5.6 振圧帯水層 5.7 地熱の影響	6. 物質移動および地球化学的現象 6.1 移流/分散 6.2 拡散 6.3 マトリクス拡散 6.4 ガスを媒体とした物質移動 6.5 多相流およびガスに駆動された地下水流動 6.6 吸着(結晶/非結晶、可逆/不可逆) 6.7 溶解、沈殿および結晶化 6.8 コロイドの生成、溶解および移動 6.9 微形成 6.10 電解質の風化および鉱物化 6.11 土壌や有機物の腐敗の蓄積 6.12 質量、同位体、化学種の希釈 6.13 化学的勾配(電気化学的効果および化学的浸透) 6.14 放射性核種および酸化性因子のチャンネル流 6.15 再濃縮 6.16 pHの変動 6.17 酸化性雰囲気 7. エコロジー的現象 7.1 植物による吸入 7.2 動物による吸入 7.3 土壌および堆積物中のバイオオーバーシジョン 7.4 土壌生成作用 7.5 化学的変化 7.6 微生物との相互作用 7.7 生態系の変化(山火事等) 7.8 気候変動への生態系の適応(沙漠化等) 7.9 動植物の進化	1. 処分場の設計および建設 1.1 未検出の遺物の掘削(試掘孔等) 1.2 調査用試掘孔の開削欠陥あるいは閉鎖材劣化 1.3 立坑または連絡坑道の閉鎖欠陥あるいは閉鎖材劣化 1.4 応力場の変化(地盤沈下、沈降、空洞の形成) 1.5 母岩の漏水 1.6 人工材料の欠陥(オーバーパックの早期破損等) 2. 掘削および閉鎖 2.1 掘削材または埋め戻し材の圧縮あるいは空隙の生成 2.2 廃棄物の不均質性(物理的あるいは化学的) 3. 閉鎖後の地下活動(処分場への侵入) 3.1 廃棄物あるいは資料回収 3.2 テロ行為あるいは戦争 3.3 試掘 3.4 掘削 3.5 地熱エネルギー生産 3.6 資源採取 3.7 トンネル工事利用 3.8 地下構造物建設(居住、他の廃棄物の処分) 3.9 考古学的調査 3.10 液体廃棄物等の注入 3.11 地下水のくみ上げ 4. 閉鎖後の地表の活動 4.1 記録の喪失 4.2 ダム、貯水池の建設、放水 4.3 河川の引水 4.4 掘削 4.5 土壌改良および地下水水質制御 4.6 農(除害を含む)林水産業 4.7 人口変化および都市開発 4.8 人間活動による気候変化(温室効果等) 4.9 採石・泥炭採取	1. 熱的現象 1.1 母岩の電解質開口部腐食 1.2 熱による水理条件の変化(対流、水圧、粘性変化) 1.3 熱による化学条件の変化(溶解度、吸着性、分極化の变化、鉱物化) 2. 化学的現象 2.1 金属の腐食(局部/均一腐食、内部因子および外部因子による腐食、水素等のガス発生) 2.2 塩化-地下水と廃棄物、人工材料との相互作用 2.3 有機物による効果 2.4 微生物の効果 3. 力学的現象 3.1 廃棄物の移動 3.2 応力場の変化 3.3 母岩の空裂 3.4 処分坑道の破断 3.5 ガスによる効果 4. 放射学的現象 4.1 放射線分解(α線、β線) 4.2 照射損傷 4.3 境界 4.4 放射線誘発(崩壊連鎖における) 5. 水理学的現象 5.1 再取水 5.2 掘削材中の水の移動

図2 作成された現象リスト

2. 性能評価のためのシナリオ分類

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るための方法として、以下の6つの段階からなるフレームを示している³⁾。

- S1: 重要と考えられる特徴、事象およびプロセス (Features, Events and Processes: FEP's) 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)

このOECD/NEAによって示された体系的なシナリオ解析の方法論を基に、日本における地層処分システム性能評価のためのシナリオ解析を進めるため、まずFEPリストの作成を行った。この作成においてはIAEAで示されているチェックリスト⁴⁾や諸外国の研究例等を参考にしつつ、日本において考慮すべき現象として102項目のFEPを整理できた。これを図2に示す。抽出されたFEPは、自然現象、人間活動、ならびに廃棄物および処分場に起因するものに大別される。

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、現象が多くなると組合せの数が増大になり、実際上取扱いが不可能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しうる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仮想的モードを想定し、図3に示す

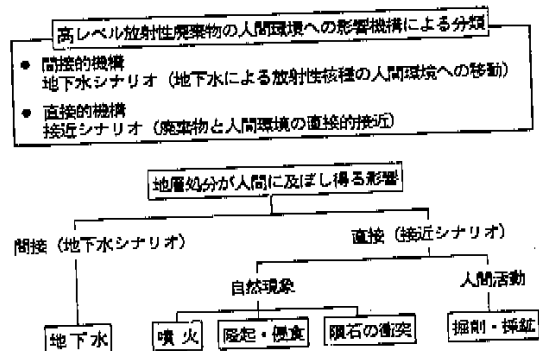


図3 シナリオの開発と分類

うに間接的機構と直接的機構とに大別して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。

間接的機構とは、高レベル廃棄物であるガラス固化体と人間環境との位置関係は変化しないが、ガラス固化体から放出された核種が何らかの移行媒体を介して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、地下水中および地下水-岩石間での物質移動なら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。

この地下水シナリオに関連する現象については、後述するように関連する現象が複合的に組み合わさった多くのケースが考えられ、これらのうち緩慢に進行するプロセスのみを考え、地質環境条件は定常状態でかつ人工バリアは欠陥なしという条件の下に構成されるものを基本ケースとし、それ以外のものを変動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、その定式化およびパラメータについてその枠組みを設定した。この際、表1に示すように時間領域を、処分場の操業期間、閉鎖後の過渡期間および定常的期間とに、また空間領域を土壌、地質環境、ニアフィールド中母岩、緩衝材、オーバーバックおよびガラス固化体とに分割し、それぞれ各空間領域ごとに関連するプロセスとそれに基づく状態を記述するとともに、それを規定する状態変数の時間変化を表記できるインフルエンスダイアグラムを作成した。このインフルエンスダイアグラムの1例を図4に示す。

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に示すように火

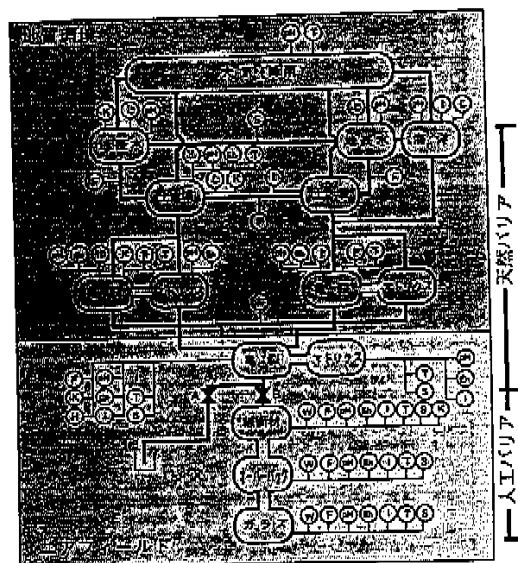


図4 インフルエンスダイアグラムによる地層処分システムの場と状態の記述の一例

山の噴火、隆起・侵食、隕石の衝突および処分場への人間侵入という4つの現象が発端となるシナリオが想定され、これらを接近シナリオとよぶこととした。これらの現象はそれぞれ単独で物理的な接近を引き起こす可能性があるという特徴を有している。しかしながら、これら4つの現象は、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と考えられるため、現時点では地層科学研究の成果を中心とした基礎情報を蓄積していくこととした。

さらに、地下水シナリオに接近シナリオを引き起こすような現象とが組み合わさったケース（最終的に人間環境へいたる核種の移動は地下水によるケース）も考えることができ、これらは上述の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。

このような分類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、地下水シナリオについて述べる。

3. 地下水シナリオ

地下水シナリオの記述にあたっては、作成された

表1 地下水シナリオにおける時間・空間分割の例

	1. 操業期間	2. 閉鎖後の過渡期間	3. 定常的期間
A: 地質環境 (土壌)	A1~A3		
B: 地質環境 (土壌以外)	B1~B3		
C: ニアフィールド中母岩	C1	C2	C3
D: 緩衝材		D2	D3
E: オーバーバックと腐食生成物		E2	E3
F: ガラス固化体			F3

FEPリストを基に、地下水の流動や化学的性質に影響を与えるような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およびプロセスを検討する必要がある。このため、地層処分システムを、人工バリアが設置される周囲の地質環境と、人工バリアおよび人工バリアの設置によって影響を受けるニアフィールドという二つの空間領域に大別してまず場としての特徴を整理し、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ならびにプロセスを考慮して地下水シナリオを作成することとした。なお、地下水シナリオに基づく想定にしたがって、ガラス固化体から溶出した核種が人間の生活圏に移行した後の生物圏についての記述については、それが将来の人間活動等に関わることで今後の研究開発を要することから、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した。

3.1 地質環境

地質環境については、地下水の流動状況と化学的性質、さらに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捉える必要がある。このうち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。さらに地球化学反応や物質移動に対しては、鉱物組成およ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の調査研究の成果を参照しつつ多重バリアシステムの性能を解析・評価するために地質環境を概念的に捉えることとした。

(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基づき、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生物圏の下層部にあたる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るような深さを考えることができる。他方、側方境界は、地形および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。また、割れ目の発達した系では、断層が側方境

界の一つ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、以下の組み合わせが考えられる。

- 断層 — 断層
- 断層 — 海
- 断層 — 山
- 山 — 山
- 海 — 海
- 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評価対象としては区分して考えることができる。結晶質岩およ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、新第三紀系等の割れ目の少ない堆積岩系は、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、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。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。

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的空隙に加えて、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。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。このようにして形成された二次空隙は、地下水の卓越した流路となり、風化作用を受けやすい。

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的空隙を有しており、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

においては、一般に顕著な層序や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は、それが相対的に高透水性の地下水流路となる。

(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上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一条件となる。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育成に必要な養分に乏しく、したがって植生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。

2) 深部岩体

割れ目を有する系においては、二次空隙の近傍において、粘土鉱物、鉄鉱物およ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においては、二次空隙はこれらの鉱物によって充填され、割れ目のもつ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に対応して、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）が満たされていることとなる。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ているのが普通である。

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2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。

(3) 鉱物組成および微視的空隙構造

1) 結晶粒の等方的分布

砂岩、深成岩および片麻岩では、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えることができる。ただし、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。

カコウ岩類およ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、石英および黒雲母であり、特に斜長石や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。ハンレイ岩類およ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）、角閃石、輝石および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、炭酸塩鉱物およ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、頁岩およ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、石英や長石の粒子およ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、ガラス質部分の変質に伴い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。

3.2 ニアフィールド

ニアフィールドとは、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。このため、ニアフィールドは埋め戻された坑道群と人工バリア、およびこれらが建設されたことによる影響を受けた周辺母岩とから構成される。

(1) 坑道群

廃棄物を定置する処分坑道は複数のパネルに分割され、また各パネルの外周は主要坑道と呼ばれる資材や人員運搬用の坑道で囲まれる。さらに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、操業および閉鎖は、各パネル単位で行い、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。

(2) 人工バリアおよび周辺母岩

人工バリアは、ガラス固化体、炭素鋼製オーバーバック、および緩衝材であるベントナイトによって構成され、処分坑道内に水平に設置（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。周辺母岩は、処分坑道の掘削により力学的および水理学的な影響を受け、ゆるみ領域を形成する。人工バリア周辺の地下

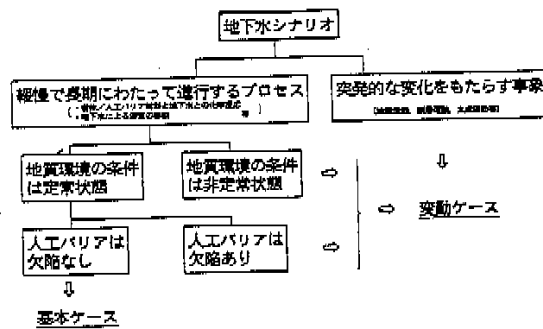


図5 地下水シナリオを規定する現象

水の流動については、すでに述べた母岩の局所的流動系における異方性および不連続性の向き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。

3.3 地下水シナリオの記述と解析の範囲

上述した地層処分システムの場合としての特徴に基づいて、そこで生ずると考えられる種々の事象およびプロセスについて検討し、地下水シナリオとして以下に記述する。

地下水シナリオには多くの事象およびプロセスが複合的に関係し、これらを図5に示すように以下の2種類に大別した。

- 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
- 地震活動、断層活動や火成活動といった突発的な変化をもたらす事象

このうち、緩慢に進行するプロセスに対しては、それらの相互関係を考慮して地層処分システムの挙動を解析するモデルの開発を目的とした。その際、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の条件は定常状態にあり、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下での挙動を、地下水シナリオの基本ケースと定義した。

他方、地質環境自体の漸進的变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、これらを変動ケースとして取り扱うこととした。この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まず確立することが重要であるので、ここでは基本ケースに焦点をあてて検討を

行うこととした。

(1) 基本ケース

1) 地質環境の状態

広域流動系によって規定される流動状況にしたがって、地下水は地下水供給域から、下部に位置する深部岩体を経て処分場にいたる。処分場との位置関係に基づいて、地下水供給域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とし、上流側地質環境における地下水の流動およ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、蒸発および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を駆動力として生ずるものである。また、臨海地域においては海水が陸地の地下に浸入し、密度差によって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。上流側地質環境の地下水は、処分場の近傍においてはニアフィールドの母岩とその周囲の岩体の水理特性にしたがって流動し、これに基づいてニアフィールドの水理条件が規定される。

地下水の水質形成に関しては、上流側地質環境において生ずる地球化学プロセスとして、まず、大気中の二酸化炭素や酸素、およ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。これらにより、上流側地質環境に浸入する地下水の化学的性質が規定される。その後、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特性が変化し、ニアフィールドへいたる。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の上昇および炭酸水素イオン濃度の上昇
- 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鉱物・雲母類への変質と、これに伴う地下水中のアルカリ金属およびアルカリ土類金属元素の濃度上昇、ならびにpHの上昇
- ③ 上記の反応の副産物として生じた粘土鉱物類が陽イオン交換反応によって生じ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、炭酸水素イオン濃度の上昇（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）および地下水の酸化還元電位が充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、海底において生成した堆積岩においては、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、粘土層間のキューイ層の圧縮）による陰イオン排除を経て、NaおよびClイオンを主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およびMg濃度が海水に比して低いことが特徴である。また、多くの場合において、海底の豊富な有機物の腐敗により、この地下水は低い酸化還元電位を示すとともに、硫化水素への還元過程の結果として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、温度および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いたるものと考えられる。ここで、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において、反応速度に比して地下水の滞留時間が長いこととなり、系の化学的状態は局所的に平衡に近づくこととなる。

2) ニアフィールド環境の状態

以上に述べたような複合的な過程を経ながら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。この領域でのプロセスは、処分場の建設、操業やガラス固化体の発熱等の影響を受ける。しかしながら、時間の経過とともにこれらの影響は存在しなくなり、この領域は上流側地質環境と特に区別されなくなることが想定され、したがって、この領域においては、以下に示すような各時期に対して、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考慮する必要がある。

a. 建設および操業期間

処分場の建設およ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、坑道内の空気からの酸素や二酸化炭素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。

上記のうち、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。またこれらに付随して、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とが生ずると考えられる。黄鉄鉱の酸化については、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、この場合には、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。またここでの方解石の溶解については、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、炭酸水素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二酸化炭素の供給がより直接的に行われることとなる。

b. 人工バリア設置以降

人工バリアが埋設された後、地下水が不飽和の緩衝材中を浸透している期間においては、ガラス固化体からの熱が人工バリアおよび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、地下水の緩衝材への浸透により、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、人工バリア設置後において、建設および操業時に気相から地下水に取り込まれた酸素および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、黄鉄鉱の酸化と方解石の溶解等が進む。この際、ガラス固化体からの熱により上昇した温度条件の下でこれらの反応が生ずることになる。

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、ニアフィールド母岩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。

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、飽和後にはきわ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流動は緩慢であり、物質の移動は拡散支配となると考えられる。

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おり、気相からの酸素および二酸化炭素の供給はない状態で、反応を考えることとする。酸素および二

酸化炭素は溶解しているもののみが反応に寄与し、その濃度は反応の進行にしたがって消費され低下する。

緩衝材領域が飽和した後、地下水はオーバーバックと接触を開始し、地下水とオーバーバック材である鉄との化学反応（鉄の酸化反応）が生ずる。この反応は、オーバーバックの健全性に対しては腐食による減肉と破損をもたらす。破損以前の時期においては、ガラス固化体の発熱により温度が上昇した状況で、まず、初期の腐食反応が進展することとなる。オーバーバック表面において、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る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、遮蔽効果によって減衰するものの、オーバーバックを透過する放射線（ γ 線等）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、オーバーバックの腐食速度に影響を与えることも考えられる。

3) 核種の溶出および移行の状態

上記1)、2) で記述したような環境条件のもとで、オーバーバ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、核種の溶出や移行の過程に対して、ガラス固化体あるいは移行する核種からの放射線によって、地下水の放射線分解やベントナイトおよび岩石の放射線損傷による影響も考えられる。

(2) 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が変化していくことが想定される。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

削削、河川による削削や侵食、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、地質環境中では風化作用や統成作用が進展する。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、統成作用による圧密、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。風化作用および統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、特に気象条件との関係が強く、短期的には四季により、また長期的に見れば氷期や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と考えられる。

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当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述の3.3(1)1)において述べた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、①の反応が低下していくとともに、亀裂の透水性が低下することによって地下水の浸透流量が低下し、それに対応して、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対する変動因子として考えられる。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生じる地下水流動状況や地球化学条件の変化についても地下水シナリオの基本ケースに対する変動因子として想定される。これらの地下水シナリオの変動ケースについては、基本ケースの評価体系の枠組みを基に、今後パラメータ等の変動範囲を検討し、評価の信頼性を向上させていくこととする。

4. 解析のためのモデル体系

上述した地下水シナリオの基本ケースを基に、次のステップであるモデルの作成およびこれに基づく影響解析については、以下のような条件で行った。

基本ケースに関連する種々の現象は、現時点ですべてが定量的に解析可能である訳では必ずしもなく、またすべてが定量的に解析される必要がある

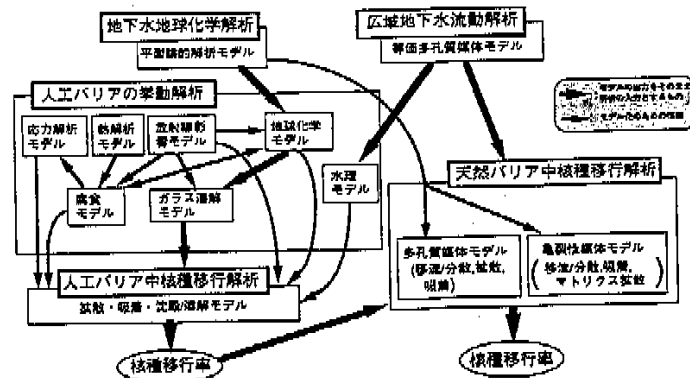


図6 地下水シナリオに対する解析モデルの体系

という訳でもない。たとえば、コロイド生成やその移動および腐食に伴うガス発生とその影響等については、現在、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、基本ケースの中に関連する現象相互の関係は複雑であり、そのすべてをシナリオに従った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。

そこで現時点での解析においては、基本ケースを構成するいくつかの現象群を一括して取り扱い、そのふるまいに対して適切な安全評価上の保守性を考慮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こととした（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を、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、地下水シナリオの基本ケースに関する影響解析のためのモデル体系を、図6に示すように構築することが可能となった。

5. おわりに

シナリオ解析の今後の研究開発については、これ

まで作成されたFEPリストならびにこれに基づくシナリオ分類およびそのアプローチを基本的に踏襲することが可能である。すなわち、接近シナリオを引き起こす現象については、将来処分場サイトが選定される時点で、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基礎的知見を整備していくことが重要である。また、地下水シナリオについては、性能評価モデル開発の対象とした基本ケースを軸とし、基本ケースの充分性および変動ケースの定義と性能評価上の取扱い、さらに自然言語以外のシナリオの表記法も含めた観点から、研究開発を展開していくことが重要である。

(環境技術開発推進本部 処分研究グループ
内藤守正、梅本博之)

参考文献

- 1) 動燃研発研、高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、PNC TN 1410 92-081 (1992)。
- 2) 内藤、高瀬、梅本、"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"、PNC TN 1410 92-092 (1992)。
- 3) Hodgkinson, D.I. and Sumerling, T.J., "A Review of Approaches to Scenario Analysis for Repository Safety Assessment", Proceedings of International Symposium on Safety Assessment of Radioactive Waste Repositories, CEC, IAEA, OECD/NEA, CEA (1989)。
- 4) IAEA, "Performance Assessment for Underground Radioactive Waste Disposal Systems", IAEA Safety Series, No.68 (1984)。