

# 第Ⅱ部

放射性廃棄物処理・処分技術

第 2 章

2

高レベル放射性廃棄物処分

我孫子研究所 研究参事 駒田 広也	我孫子研究所地質部 部長 田中 和広
我孫子研究所地質部 主任研究員 宮川 公雄	我孫子研究所地質部 主任研究員 近藤 浩文
我孫子研究所地質部 主任研究員 阿部信太郎	我孫子研究所地震耐震部 主任研究員 小峰 秀雄
狛江研究所原子力システム部 上席研究員 塚本 政樹	我孫子研究所地質部 上席研究員 五十嵐敏文
我孫子研究所地質部 主任研究員 田中 靖治	我孫子研究所地質部 主任研究員 長谷川琢磨

2 - 1 事業化に向けての技術開発 .....	19
2 - 2 地質環境の長期安定性評価 - 処分候補地選定のための研究 - .....	23
2 - 3 地質・地下水環境特性の調査・評価 - 処分予定地選定のための研究 - .....	25
2 - 4 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤・透水特性 - 処分施設の設計・建設のための研究 - .....	28
2 - 5 人工バリアの性能評価手法 - 処分の安全評価のための研究 - .....	33
2 - 6 天然バリアの性能評価手法 - 処分の安全評価のための研究 - .....	36

駒田 浩也（8 ページに掲載）



宮川 公雄（1983年入所）  
主に放射性廃棄物処分の地層処分に係わる研究に携わってきた。現在は沿岸部・結晶質岩地域における水理地質構造特性の研究に専念している。



阿部信太郎（1992年入所）  
これまで活断層調査の高精度化に関する研究に物理探査の立場から携わってきた。最近では、湖における3次元反射法地震探査や地下レーダーを用いた高精度3次元反射法探査、マグマや地震発生層の把握を目的とした自然地震を用いた深部地殻構造探査に取り組んでいる。今後は、地殻変動のモニタリングや長期変動予測に取り組む。



塚本 政樹（1982年入所）  
高レベル廃棄物地層処分時の核種移行挙動予測手法研究に従事し、ガラスの浸出性評価に関する3国共同研究ではスウェーデンのツツピク社に滞在、TRU廃棄物処分概念構築のための共同作業に参加した後、同廃棄物処分システム安全性研究に取り組んでいる。



田中 靖治（1987年入所）  
入所以来、地下深部の岩盤の水理特性評価試験および地下水流動解析に従事してきた。特に、多孔透水試験のデータに対する逆解析や地盤統計学的手法により、限られたボーリング孔での地下水調査データから岩盤内の水理特性分布を推定することを目指している。



田中 和広（1977年入所）  
これまで、水力、原子力地点の立地選定や建設のための地質調査に従事してきた。最近10年は高レベル放射性廃棄物の地層処分における地質環境の長期安定性の評価や深部地質・地下水調査技術の開発に携わっている。今後はサイト選定へ向けて技術の体系化を図りたい。



近藤 浩文（1991年入所）  
これまで、水力発電所地点の計画および建設に係わる地質調査に携わってきた。また、最近では、高レベル放射性廃棄物の地層処分に係わる火成活動特性評価の研究に従事している。



小峰 秀雄（1987年入所）  
専門は地盤工学。放射性廃棄物処分におけるベントナイト系緩衝材・埋戻し材の特性評価手法の開発の他、都市土木工事における地盤改良技術や火力発電所の石炭灰の処分技術の開発に携わる。現在は、「地盤環境」の観点から、放射性および産業廃棄物処分場建設に係わる研究、特に遮水材料の開発とその特性評価・遮水構造設計手法の開発に取り組んでいる。



五十嵐敏文（1983年入所）  
入所以来、電気事業に伴い発生する廃棄物（放射性廃棄物や石炭灰）に起因する無機物質の地圏における移行・拡散挙動の評価研究に従事。



長谷川琢磨（1994年入所）  
これまで、地下水流動評価の高度化のために、地下水流動に伴う物質やガスの移行などの連成現象について、数値解析手法の開発・適用を行ってきた。今後は、連成する現象を拡張するだけでなく、入力データの統計的評価などに取り組み、その適用性の向上を目指したい。

## 2 - 1 事業化に向けての技術開発

わが国における高レベル放射性廃棄物対策として、2000年に地層処分の実施主体「原子力発電環境整備機構」が設立され、高レベル放射性廃棄物であるガラス固化体の発生時期とその後の固化体の冷却期間等を勘案して、2030年代から遅くとも2040年代半ばまでには処分を開始する計画としている。実施主体によって進められる処分地選定、処分地の特性調査、処分場の設計・建設、処分場の安全評価、廃棄体の埋設、処分場の閉鎖・解体などの一連の処分事業が遅滞なく推進できるように関連する技術を整備しておく必要がある。

これに対して、当所は実施主体が行う一連の実作業を机上の検討で模擬し、わが国において高レベル放射性廃棄物地層処分が事業化の観点から可能であることを示すとともに、地層処分の事業化に必要な関連技術を取りまとめた<sup>(46)</sup>。

### 2-1-1 地層処分施設概念

ここで検討する地層処分施設概念は実現性等を考慮して、これまでに諸外国、核燃料サイクル開発機構等が検討した処分概念をおおむね踏襲するものとした。即ち、地下数百mから1000m深さに、人工バリア(ガラス固化体、オーバーバック、緩衝材などの人工的な製作物)と天然バリア(天然の地層)を組み合わせた多重バリアで、高レベル放射性廃棄物を長期間にわたり隔離し、放射性物質による影響が人間環境に及ぼさないようにするシステムである。

### 2-1-2 処分事業のマスタースケジュール(案)の設定と実施手順

地層処分の事業化にとって、最も重要な課題である事業化のための具体的マスタースケジュールとその実施手順を示した。

10年間程度で処分候補地選定とその後の処分予定地選定、15年間程度で処分予定地のサイト特性調査、処分場設計、安全審査を経て、最終的な処分地の決定、10年間程度の処分場建設期間を見込んで、2030年代半

ばに処分開始のスケジュールを設定し、図2-1-1に示すように、処分事業全体のマスタースケジュールを設定した。

ここで、処分候補地の選定段階では、文献調査を中心とした「処分候補地の要件」に照らした候補地としての適合性評価、候補地の絞り込みを行う。この段階のサイト特性調査では、文献調査、リモートセンシング等、現地に立ち入らない方法で処分候補地を調査しなければならないと想定される。特に、選定には、「最近の火山活動」、「著しい隆起・沈降地域」、「活断層の有無およびその位置」、「地質構造の広がりと構成する地層及び岩相」に注意を要する。

つぎに処分予定地の選定段階では、処分候補地から処分予定地を選定することになる。この段階から実際に現地に入っのサイト特性調査が可能となる。選定には広域な地質学的な適合性、社会経済的環境としての適合性を判断することが基本となる。

さらに進んで処分地の選定では、処分施設の設置位置を絞り込むために行う地上からの詳細調査を行う期間、および処分施設建設予定地において地下特性調査施設を建設し、その施設を用いたサイト特性調査及び処分技術の実証を行う期間とに分けられる。

地上からの詳細調査期間では、処分予定地を対象としたより狭い区域のより詳細なデータと深さ方向の詳細なデータを取得するものとし、地表地質精査、ボーリング調査、物理探査、トレンチ、断層調査ボーリング等からなる。

地下施設での調査および処分技術実証の期間では、地下特性調査施設の建設を行うとともに、地下における岩盤特性、水理特性、地球化学的特性等を把握する「サイト特性調査」、深部地下空洞掘削等の建設施工技術、オーバーバック、緩衝材、埋め戻し材等のハンドリング技術、ならびに原位置でのバリア性能評価を実証する「処分技術の実証」を行う。

### 2-1-3 処分施設概念設計

地層処分施設は主に、高レベル放射性廃棄物である

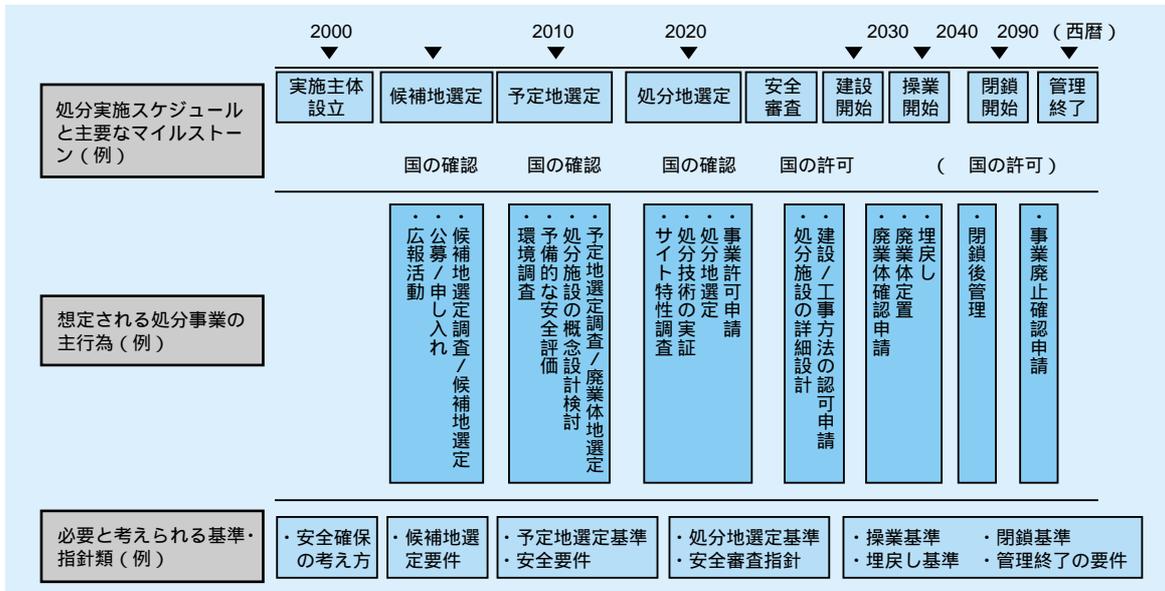


図2-1-1 処分事業の実施スケジュールと実施手順の検討例

ガラス固化体を受け入れる施設等の地上施設とガラス固化体を埋設する地下施設とからなる。これら処分施設の設計の考え方とその例示を行なった。

わが国では、まだ処分地が決定されていないので、処分地の地質条件として、我が国に比較的広く分布する花崗岩等の結晶質岩盤と砂岩・泥岩等の堆積岩盤の2種類を前提として、4万本(日本の商業用原子力発電が運転を開始した1966年から、今後2015年までの原子力発電に伴う発生量に相当)を1箇所に処分する施設を検討した。

・人工バリア

人工バリアはガラス固化体、オーバーパック、緩衝材から構成されるもので、高レベル放射性廃棄物に対して人工的なバリアを構成するものである。これら部位の役割分担を明確して、地質環境条件に応じた設計を行なった結果、図2-1-2に示すように、オーバーパックの厚さ18cm、緩衝材の厚さ40cmとした人工バリアの概念を構築した。

・地上施設

地上施設には、ガラス固化体を受け入れ、オーバーパックに封入・溶接・検査する施設、緩衝材や埋め戻し材を製作する施設、さらに管理棟、資材置き場、掘削ズリ置き場等のような廃棄体を地下施設に定置・埋設するための準備工程や後行程となる様々な施設が建設される。地下施設の埋め戻しには、地下の掘削ズリ

をベントナイトで混合した材料の使用を検討している。図2-1-3に地上施設の鳥瞰図を示した。地上施設の面積として約40万m<sup>2</sup>、他に掘削ズリ置き場として約50万m<sup>2</sup>が必要となる。

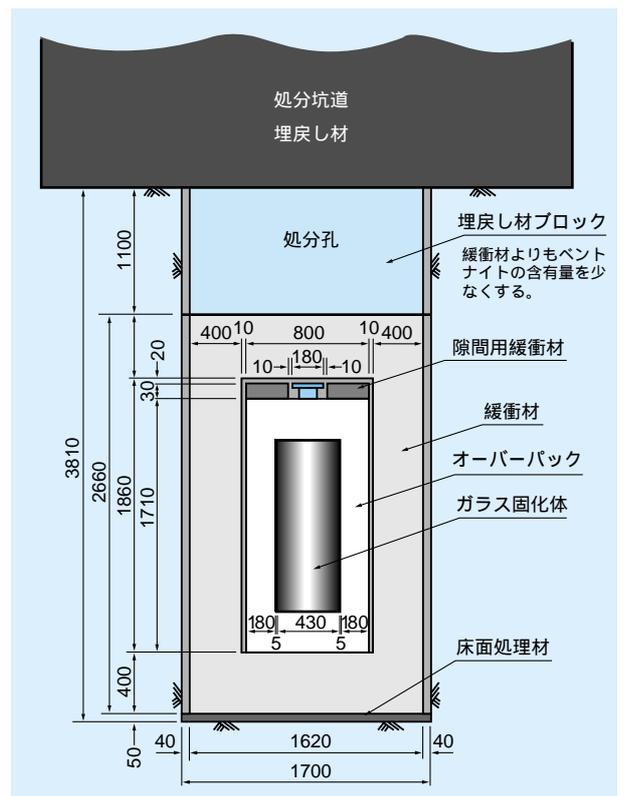


図2-1-2 人工バリアの設計

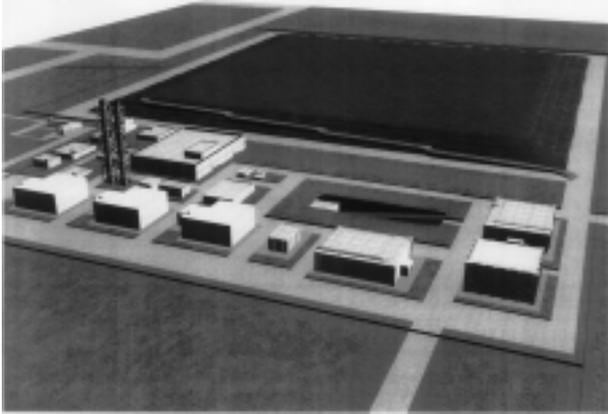


図2-1-3 地上施設の鳥瞰図

・地下施設

地下の岩盤中に処分坑道を掘削して、その底部の処分孔にガラス固化体を収納した廃棄体を埋設していくことになる。地下施設には、図2-1-4に示すように、その他に廃棄体の搬入、作業員の通路、換気用の各種坑道等の建設も必要となる。廃棄体の埋設間隔は処分坑道や処分孔の力学的安定性保持の条件と、廃棄体からの発熱を消散させる熱的条件とから決定される。設計例として堆積岩盤の地下約500mに4万本を処分する場合、処分坑道の総延長が約200km、地下施設の面積が約2.5km<sup>2</sup>になった。

・廃棄体のハンドリング

廃棄体を地上施設から地下施設に搬入して処分孔に定置し埋設することになる。廃棄体1体は約5t、緩衝材は約10tにもなり、いずれもかなりの重量となる。しかも、ハンドリングには廃棄体からの被ばく低減を

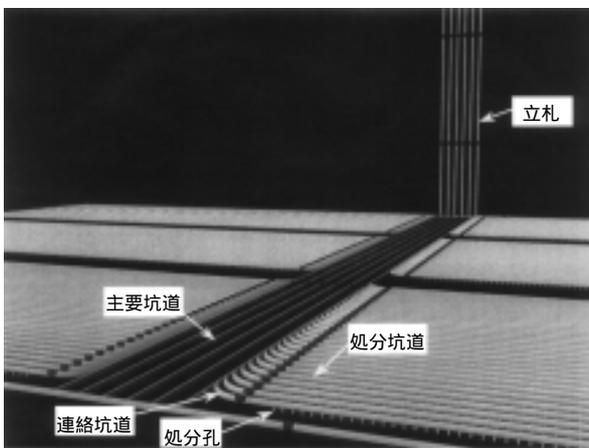


図2-1-4 地下施設での空洞（坑道）群の構成

図るために、遠隔で操作する設備が必要となり、それらの設備の概念設計を行った。

・地下施設の埋め戻し

廃棄体の埋設が終了すると、事前に決められた閉鎖の条件を満たしていることを確認して、地下施設を閉鎖するために埋め戻すことになる。埋め戻し材としては、ベントナイト、砂、礫、現地発生ズリ等の混合材を適切に配合した材料を検討している。

### 2-1-4 処分施設の安全評価

処分施設が将来にわたって人間環境への影響がないことを評価する必要がある。本検討では、国内外の安全評価に関する現状の考え方を参考にして、図2-1-5のような安全評価のシナリオを設定してした。地下水シナリオでは廃棄物からの漏洩した放射性核種が人間および環境に接触するプロセスを検討し、人間への長期的な影響を被ばく線量当量等で表し、目標線量当量と比較することによって行われるのが一般的である。一方、接近シナリオでは放射性核種が地下水を媒介せずに人間環境に接近し、被ばくをもたらすことを想定している。

安全評価例として、堆積岩盤の地下500mに設置された処分施設の地下水シナリオの場合を図2-1-6に示す。隆起・侵食シナリオが最も線量当量が高くなっているが、どのシナリオに対しても、現行の低レベル放射性廃棄物埋設で用いられている10 $\mu$ Sv/yよりも1オーダー以上低くなっている。なお、隆起・侵食シナリオでは、一定速度で隆起し、同じ割合で侵食をうけると想定し、最大300mの隆起・侵食を受け、最終的には土被り厚さ200mと想定している。

この結果は、安全評価手法の一つの例示としてとらえる必要があるが、ここで例示した処分施設は、長期にわたっておおむね良好な性能を持つものと考えられる。

今後、実際の処分場が決定されるに際し、ここで仮想した処分地との相違が生じるが、提示した検討手法は広く応用可能であり、実際の処分事業推進に貴重な情報を提供するものである。すなわち、核燃料サイクル開発機構等での地層処分成立性への技術検討に加え、ここで示した手順に準拠し、もしくはこれを応用する

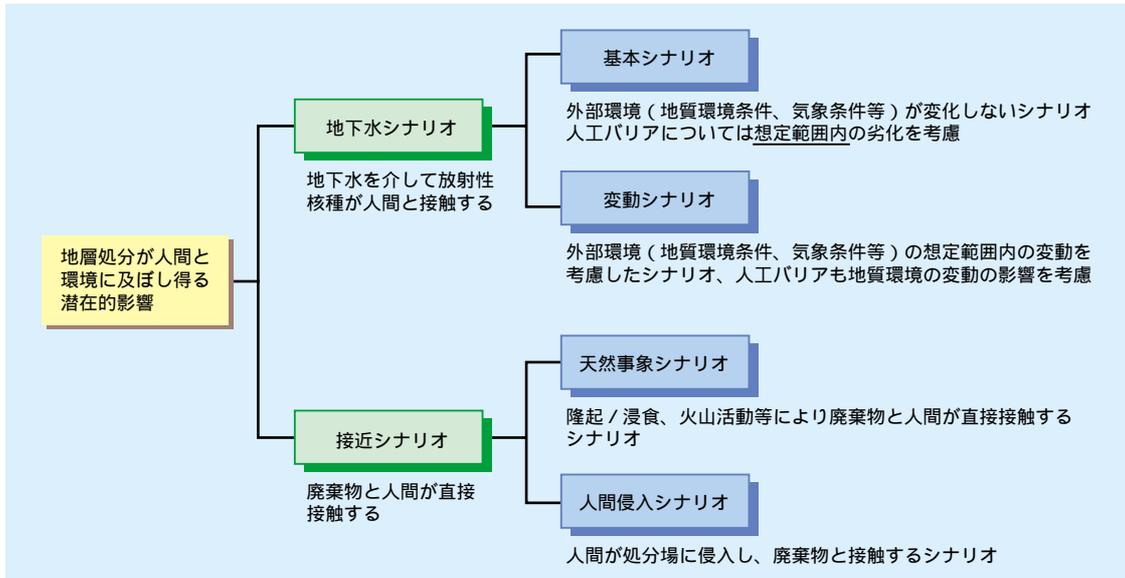


図2-1-5 安全評価シナリオの分類

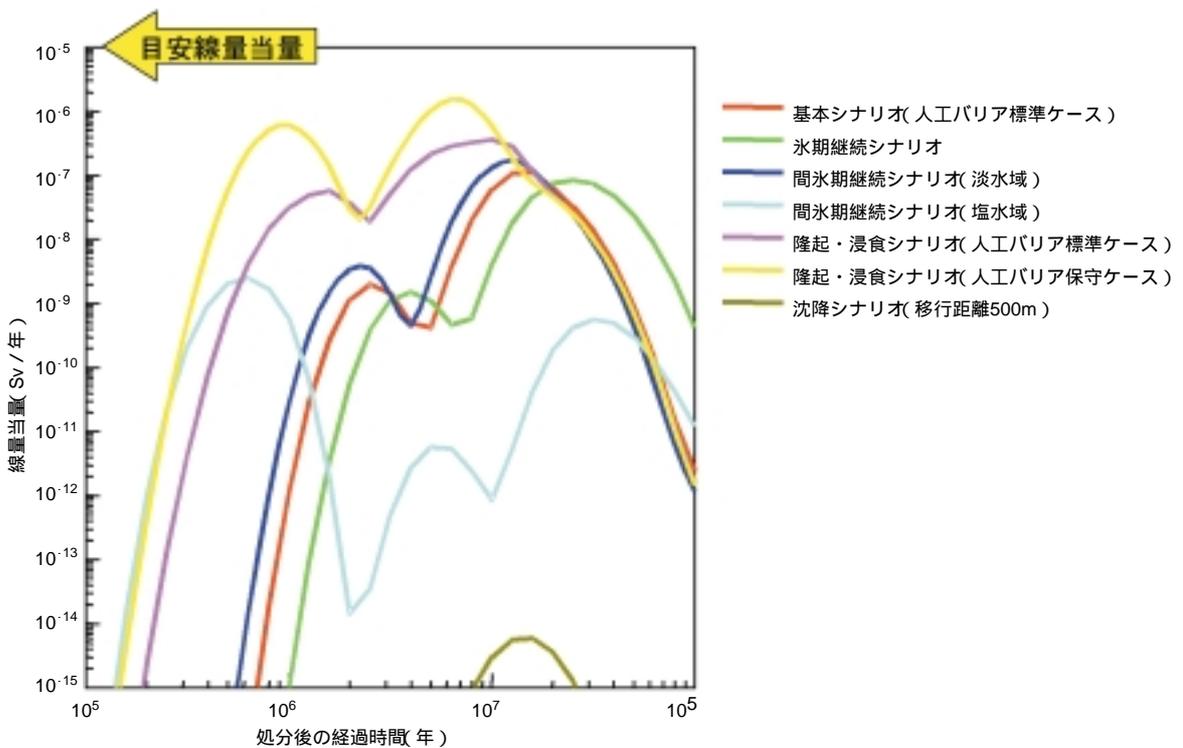


図2-1-6 被ばく線量当量評価例(堆積岩サイト、設置深度500m)

ことにより、実施主体は必要な技術の開発および許認可対応等の事業推進に必要な技術事項へのタイムリーな対応をすることができるものと確信する。

処分事業化の検討は始まったばかりであり、今後の

研究開発、実証に依存する点も多いが、当面の処分事業を技術面から軌道に乗せる作業の一部は行えたものとする。

## 2-2 地質環境の長期安定性評価 - 処分候補地選定のための研究<sup>(1)~(5)</sup> -

放射性廃棄物は長寿命の放射性核種を含むことから、長期的な安全性の確保が重要であり、そのためには処分場を設置する地下深部環境の長期的な安定性の評価が重要である。候補地選定の段階においては文献調査から、処分場に致命的な影響を与える可能性のある地点は除外することが求められている。地質環境の長期的な安定性の検討のためには、特に将来の変動の予測が重要な課題となっている。

このため、地層処分の安全性に影響を与える地質要因の抽出、将来予測の考え方について検討を行うとともに、断層活動、火山活動、隆起・沈降、気候変化について既往の知見の整理を行った。さらに、個別の地質環境条件である、隆起・沈降、火山活動、地震時の地下水挙動に関してそれぞれの変動特性調査・評価手法の検討を行った。

### 2-2-1 将来予測の考え方

将来的な地質変動の予測に関しては、確率論による方法、外挿法による方法、類推による方法、モデルを用いたシミュレーションによる方法などがある。現状では、過去から現在までの変動の履歴を検討し、その中から時間的、空間的な変動の普遍性、法則性を見出すことにより、その傾向を将来へ外挿する「外挿法」がもっとも一般的である。将来の予測のためには、変動の時間的、空間的な特徴を明らかとするとともに、現象発現の背景となるメカニズムを検討することが重要である。

### 2-2-2 隆起運動

隆起運動は、処分施設の地上への接近による周辺地質環境の変化や場合によっては露出により人間環境に重大な影響を与える事が予想される。このため、段丘等の地形基準面を用いた過去十数万年間の隆起速度を求める手法を開発した。特に、内陸部を含めた隆起速度の検討のため、同様の環境下において形成された時

代の異なる河成段丘面の比高差を用いた手法の適用を行なった(図2-2-1)。さらに、得られた隆起速度の分布や地球物理学的データ、超短期地殻変動などのデータを総合化し、地殻変動特性区分を検討した。また、段丘面の形成年代の検討のため、新たに、熱ルミネッセンス(TL)法、光励起蛍光(PSL)法を用いた堆積物年代測定手法の開発を行なった。

### 2-2-3 火山活動

火山活動は、処分場の直撃による破壊や熱対流、地化学環境の変化により処分の安全性に大きな影響を与えることが予想される。このため、東北地域をケーススタディ地域として、約1400万年前以降の火山活動の時

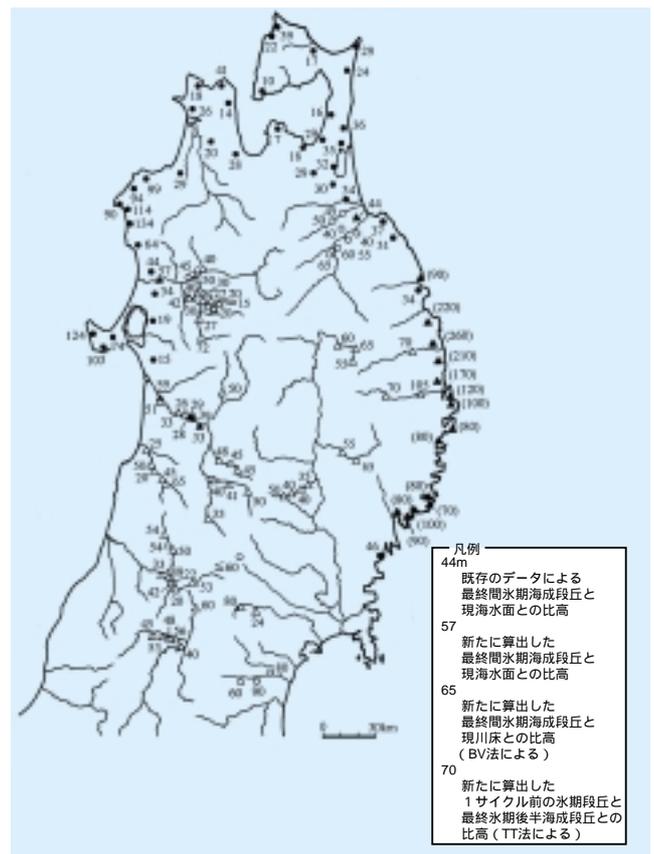


図2-2-1 東北中北部地域における最近12万年間の隆起量の検討例(60)は参考値

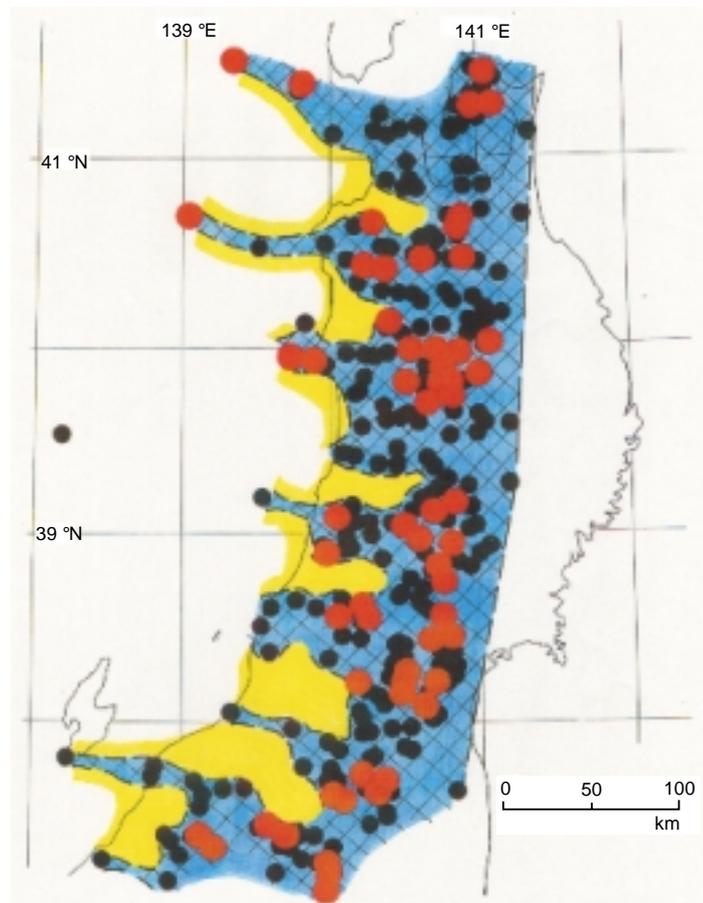
空的変遷の検討を行ない、火山活動は火山フロントの位置に規制されること、活動域、非活動域が存在すること、活動域は時代とともに収斂し第四紀の活動は火山群(クラスター)の中に限定されることなどを明らかにした(図2-2-2)。火山や温泉などの地熱活動についてもデータ整理を行い、第四紀火山から約20kmまでが影響範囲であることを明らかにした。さらに、サイトの特性評価のため自然地震波を用いた、地下深部におけるマグマの可視化技術の開発を行なった(図2-2-3)。

#### 2-2-4 地震時の地下水挙動

地震の前後における地下水変動の地層処分を与える影響の評価のため、兵庫県南部地震を対象としてデー

タ取得と、シミュレーションを行なった。その結果広域的に地下水が変動するがその程度は地震断層沿いを除くと水位変動は数10cm～数m程度であること、変動の特性は地殻の応力-ひずみ解析により説明できること等を明らかにした。以上より、地震時の地下水挙動が地層処分の安全性に与える影響は小さいものと判断される。

今後、地層処分に重大な影響を与えられられる地質環境条件について、過去の変動特性から避けるべき範囲などを決定する。また、候補地が決定された後に、選定において判断した結果をデータで検証するための手法の開発を行うことが必要である。



赤丸：第四紀火山、黒丸：140万年前から170万年前の火山中心相

図2-2-2 東北日本背弧側における140万年前以降の火山活動域と非火山活動域の分布

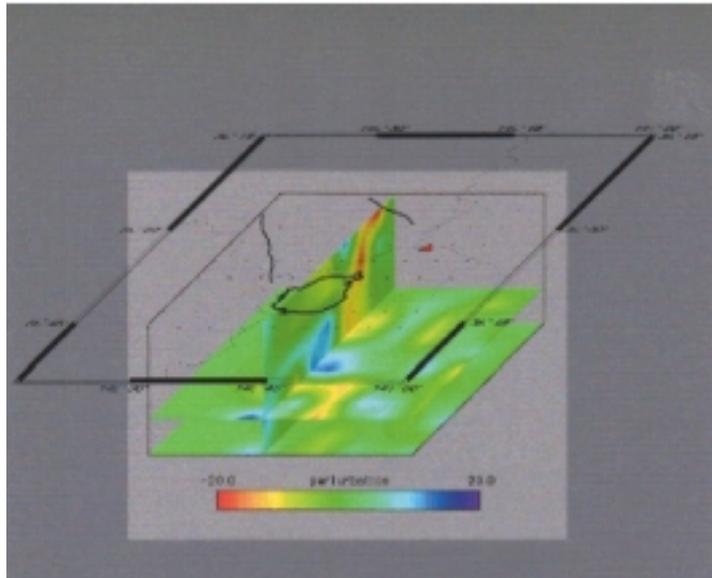


図2-2-3 鬼首火山地域における3次元地震波トモグラフィー結果の例  
(明るい部分が低速度域でマグマの可能性がある。)

## 2 - 3 地質・地下水環境特性の調査・評価 - 処分予定地選定のための研究<sup>(6)~(14)</sup> -

地層処分の安全性を確保するには、天然バリアである地下深部岩盤の地質・地下水特性を明らかにすることが重要であり、サイト選定や選定されたサイトの特性調査の各段階における調査や評価のための手法の開発、体系化を行う必要がある。このため当所では、電力構造物の建設に伴う調査・評価等において開発・蓄積された技術をさらに発展させるとともに新たな技術開発を含む技術の体系化を図っている。

### 2-3-1 地質・地下水調査の考え方

当所における天然バリアの評価研究の考え方を図2-3-1に示す。地質・地下水に関する天然バリアの安全性は岩盤中の地下水流動評価と核種移行評価により総合的に評価がなされる。地下水流動評価については、対象岩盤の地下水の流れやすさ(透水性)? どのように水が流れているか(地下水流動特性)? といった二つの側面から判断される。透水性に関しては、透水係数や水みちといったパラメータや概念が重要であり、

地下水流動特性に関しては地下水流速・流向、地下水年代(滞留時間)等が重要となる。地下水の地化学特性は核種の移行に影響を与えることが予想され、酸化還元電位などが重要なパラメータとなる。また、地下水の流動の場であり地下水の水質形成に影響を与える地質・地質構造の調査は、上記の特性を評価する上で特に重要と考えられる。

### 2-3-2 水理特性調査

地下水理特性調査としては地下水位測定、間隙水圧測定、流向・流速測定、フローメータ検層、トレーサー試験、ラドン検層、透水試験(原位置, 室内)等の開発を行なっている。図2-3-2に水みちを特定するため新たに開発したフローメータ検層装置の適用結果について示す。また、図2-3-3に孔間透水試験結果から逆解析により求めた透水係数の2次元分布を示す。

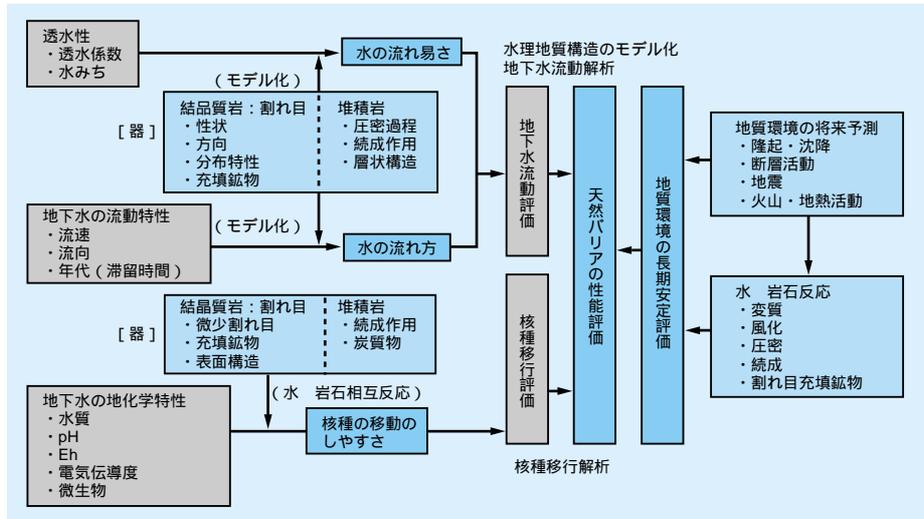


図2-3-1 天然バリアの性能評価の考え方

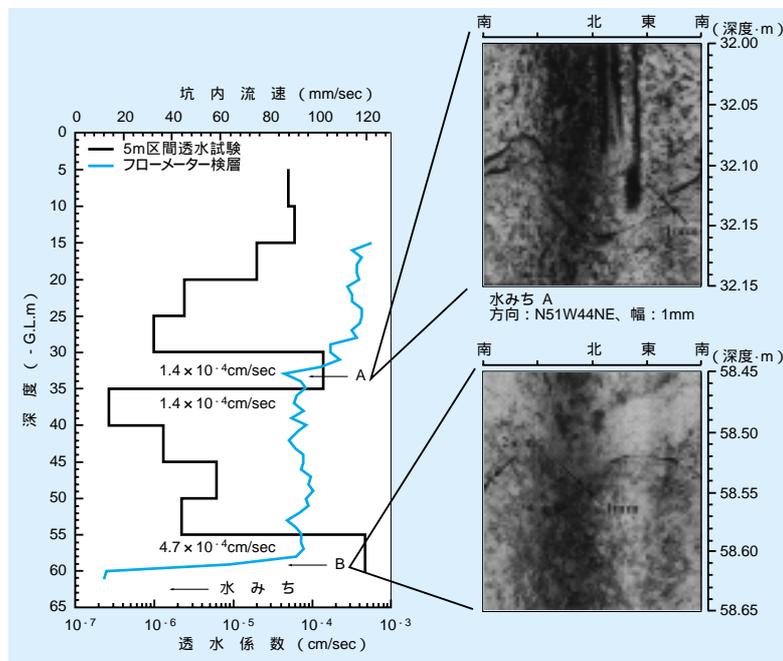


図2-3-2 水みちを特定するためのフローメータ検層装置の適用例(孔内流速の変化箇所は透水係数が大きく開口割れ目が観察され、水みちとなっている。)

### 2-3-3 地化学特性調査

地化学特性調査としては、岩盤地化学特性調査(充填鉱物の化学分析)、地下水の地化学特性調査(水温、電気伝導度、pH、Eh、溶存酸素、一般水質、微量元素、溶存有機物、安定同位体、放射性元素、溶存ガス)がある。図2-3-4に沿岸域における地下水の比抵抗と割れ目分布を示す。

### 2-3-4 地質構造特性調査

地質・地質構造特性調査は、その目的、スケール、精度、調査の段階などの観点から、リモートセンシング技術(衛星など)、地表調査技術、トレンチ調査技術、物理探査技術(ジオトモグラフィー等)、ボーリング孔を利用した調査技術(ボーリング掘削技術を含む)、坑道を利用した調査技術、室内試験、環境影響評価技術、

長期計測技術等に関する技術開発を行なっている。特に結晶質岩の水理特性を支配する様々なスケールの割れ目構造の調査技術や堆積岩の層状構造を明らかとする

るための新たなボーリング技術の開発を含む調査手法の開発と体系化を行なった。

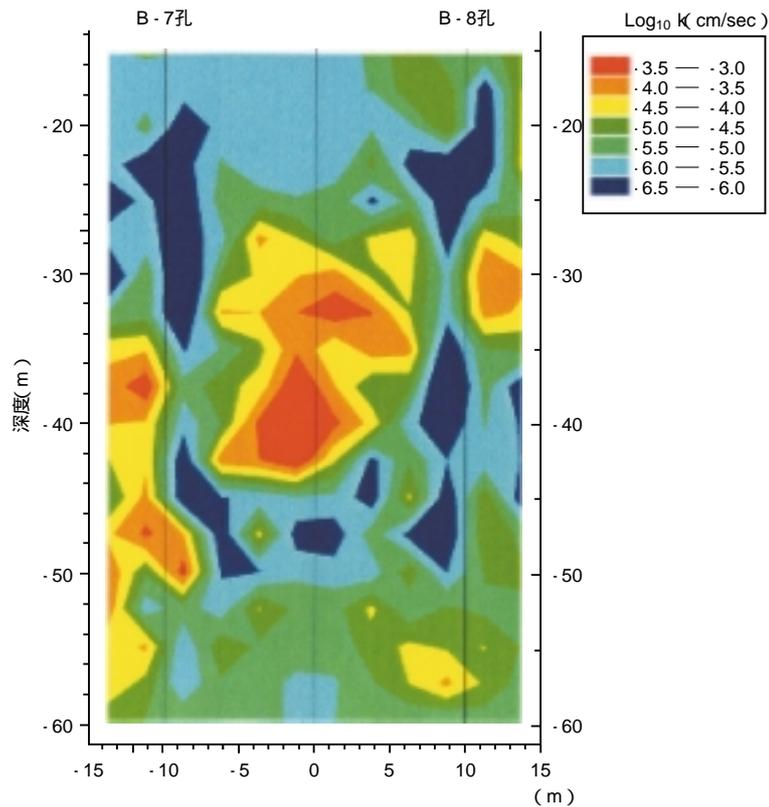


図2-3-3 孔間透水試験結果より求めた透水係数の2次元分布の例

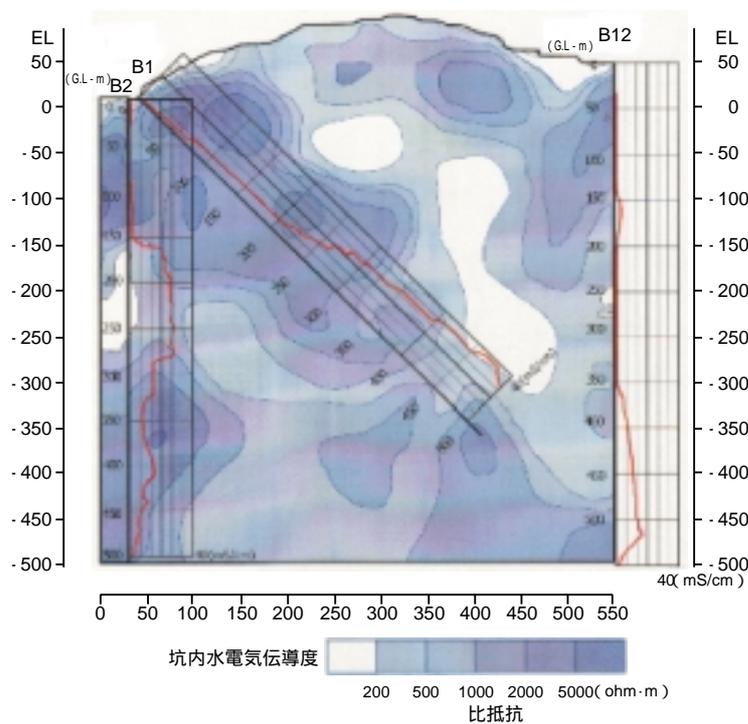


図2-3-4 沿岸域における地下水の比抵抗と電気伝導度の分布の例

## 2-4 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の膨潤・透水特性 - 処分施設の設計・建設のための研究 -

### 2-4-1 高レベル放射性廃棄物処分とベントナイト系粘土材料

高レベル放射性廃棄物の地下処分施設の建設に際し、廃棄物収納容器と周辺地盤との間を埋め戻す材料の開発が必要とされている。この材料には、放射性核種を長期間隔離する必要性等から、非常に高い止水性や膨潤性等が要求されており、ベントナイトと呼ばれる粘土材料の利用が考えられている。ベントナイトの止水性や膨潤性は締固めることにより、一層向上するので、実際の処分では、高圧で締固めて利用することが有望視されている。また、ベントナイトのみで実施することは経済的ではないので、比較的安価な砂や現地発生土をベントナイトに混合して利用することも考えられている。このようなベントナイトを含有する粘土材料は緩衝材と呼ばれており、長期間にわたり廃棄物を人間の生活圏から隔離することは勿論のこと、処分施設の建設に伴い生じる廃棄物収納容器や周辺地盤との間の隙間部分を、膨潤変形により充填する役割が期待さ

れている(図2-4-1)。

一方、処分孔ピット間を連結する坑道部においても、砂・ベントナイト混合材料の利用が有望視されている。この部分に用いられる材料は、「埋戻し材」と呼ばれ、先の緩衝材と比べてベントナイトの含有量が低い混合材料の利用が検討されている。埋戻し材には、坑道部を充填しトンネル周辺岩盤の緩み域の拡大や過度の変形を可能な限り防ぎ、かつ埋戻し部が水みちなどの水理的な弱点にならないようにする役割が期待されている。このような観点から、埋戻し材にも低透水性をはじめ、処分坑道内に有意な水みちを発生させずに低透水性をより向上させるための機能として膨潤性が要求されている。

以上のように、ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材は、高レベル放射性廃棄物の処分技術において重要な役割を期待されている。特に、その膨潤特性と低透水性は緩衝材・埋戻し材としての役割を果たすための重要な機能と考えられている。このような背景から、当所では、ベントナイトを含有する粘土材料の透水特性および膨潤特性について実験的な調査を進める

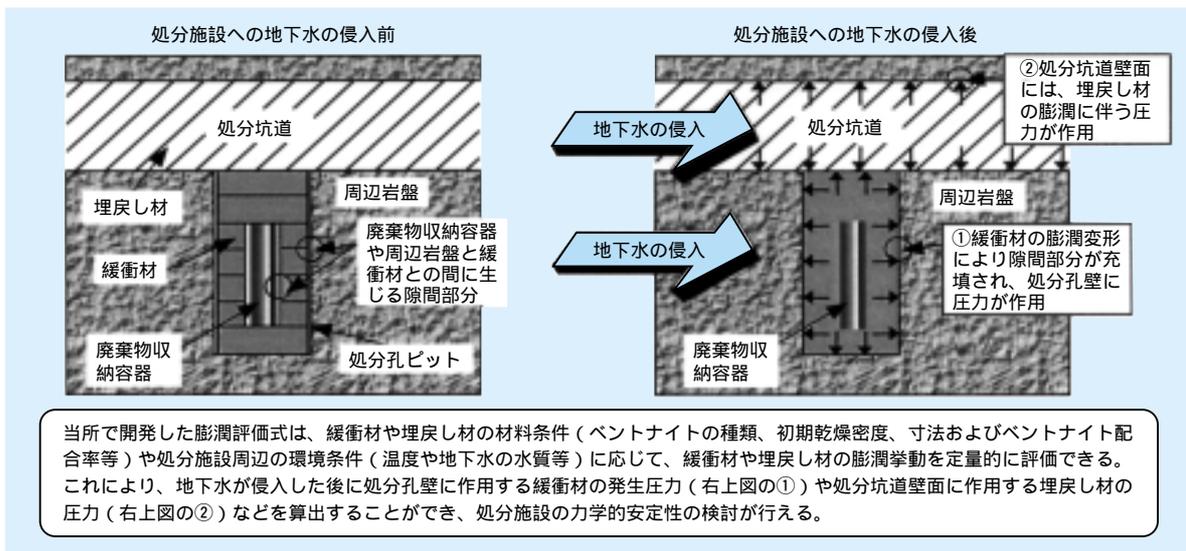


図2-4-1 高レベル放射性廃棄物処分における緩衝材・埋戻し材の役割

と共に、緩衝材・埋戻し材に要求される性能に応じて、砂とベントナイトの質量比率や締固め密度などの材料仕様を設計できる手法の開発を行っている。

ここでは、当所で実施している緩衝材・埋戻し材の膨潤および透水特性について概説すると共に、当所で開発した膨潤評価式とその利用について述べる。

## 2-4-2 緩衝材・埋戻し材の膨潤特性と評価式の開発

緩衝材や埋戻し材には、周辺岩盤との間に生じる隙間を充填するための高い膨潤性が要求されており、このような観点からの材料設計が必要とされている(図2-4-1)。このような背景から、当所ではベントナイトのみを締固めた材料に対する膨潤評価式を提案し、国産ベントナイトに対して適用性を確認してきた<sup>(15)、(16)</sup>。今後は、比較的安価な砂や現地発生土をベントナイトに混合して利用することや海外産ベントナイトを利用することにより、経済性を高めることが重要である。これらの材料への適用を可能にするため、様々な材料条件(密度や砂・ベントナイトの配合割合、陽イオンの種類等)や環境条件(地下水の水質や温度等)を考慮した膨潤評価式を新たに構築し提案している<sup>(17)</sup>。

当所では、粘土鉱物結晶間の反発力を評価できる拡散二重層理論式と結晶間の引力である van der Waals 力を評価できる理論式を、小峯らの提案するパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」の算出式<sup>(18)、(19)</sup>と組み合わせることにより、緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式を提案した(図2-4-2)。この膨潤評価式では、砂とベントナイトの質量比率に関するパラメータを導入することにより配合割合を考慮している。また、ベントナイトに含有される主要陽イオンである Na、Ca、K、Mg の個数やイオン半径、価数等に関するパラメータを用いることにより、陽イオンの種類と組成を考慮できるようにしている。

この膨潤評価式の適用性を調べるため、国産ベントナイトを用いた緩衝材・埋戻し材(ベントナイトの配合率：5～100%、乾燥密度：1.19～2.27 Mg/m<sup>3</sup>)および海外産ベントナイトや他の国産ベントナイト(乾燥密度：0.99～2.01 Mg/m<sup>3</sup>)の膨潤圧・膨潤変形特性に関する実験データと提案した膨潤評価式の計算結果を比較

したところ、ほぼ整合することが分かった(図2-4-3)<sup>(17)</sup>。

提案した膨潤評価式によれば、地下水が浸入した後には処分孔壁や坑道壁面に作用する緩衝材や埋戻し材の圧力を算出することができ、実際に用いる材料や環境条件に則した処分施設の力学的安定性の検討が可能となる(図2-4-1)。

## 2-4-3 緩衝材・埋戻し材の透水特性とその内部構造観察

緩衝材・埋戻し材の最も重要な性質は放射性核種を人間の生活圏から長期間隔離するための低透水性であり、当所では、砂・ベントナイト混合材料の透水特性について実験的研究を行っている。ここでは、砂・ベントナイト混合材料の基本的な透水特性および最長120日間にわたってデータを取得した長期透水特性について述べる<sup>(20)～(22)</sup>とともに、電子顕微鏡による微視的な観察結果<sup>(18)、(19)</sup>も合わせて報告する。

図2-4-4に砂・ベントナイト混合材料の透水係数とベントナイト配合率の関係を示す。ベントナイト配合率とは、全試料の乾燥質量に対するベントナイトの乾燥質量を百分率で表示したものである。ベントナイトには山形県月布産のクニゲルV1(クニミネ工業製)、砂には粒径53～590 μmの三河珪砂6号を用いている。この図から、ベントナイト配合率が5～20%の範囲では、ベントナイト量の増加に伴い透水係数は著しく低下するが、20%以上になると透水係数の低下の割合が小さくなるのが分かる。配合率が5～20%の場合、透水係数は $1 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-12}$  m/secの範囲で大きく変化しているが、20%以上では $5 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-12}$  m/secの範囲にある。

上記の結果をより深く理解するため、試料周辺の温度と水蒸気圧が制御できる走査型電子顕微鏡により、砂・ベントナイト混合材料中のベントナイトの膨潤挙動を観察した。図2-4-5、2-4-6はベントナイト配合率が10%および50%の砂・ベントナイト混合材料内部におけるベントナイトの膨潤挙動の観察結果を例示したものである。いずれの写真も、加水前には水みちになると考えられる間隙が観察されている。また、混合材料中のベントナイトが吸水により体積膨張している状況が観察写真から認められる。ベントナイト配合率10%の

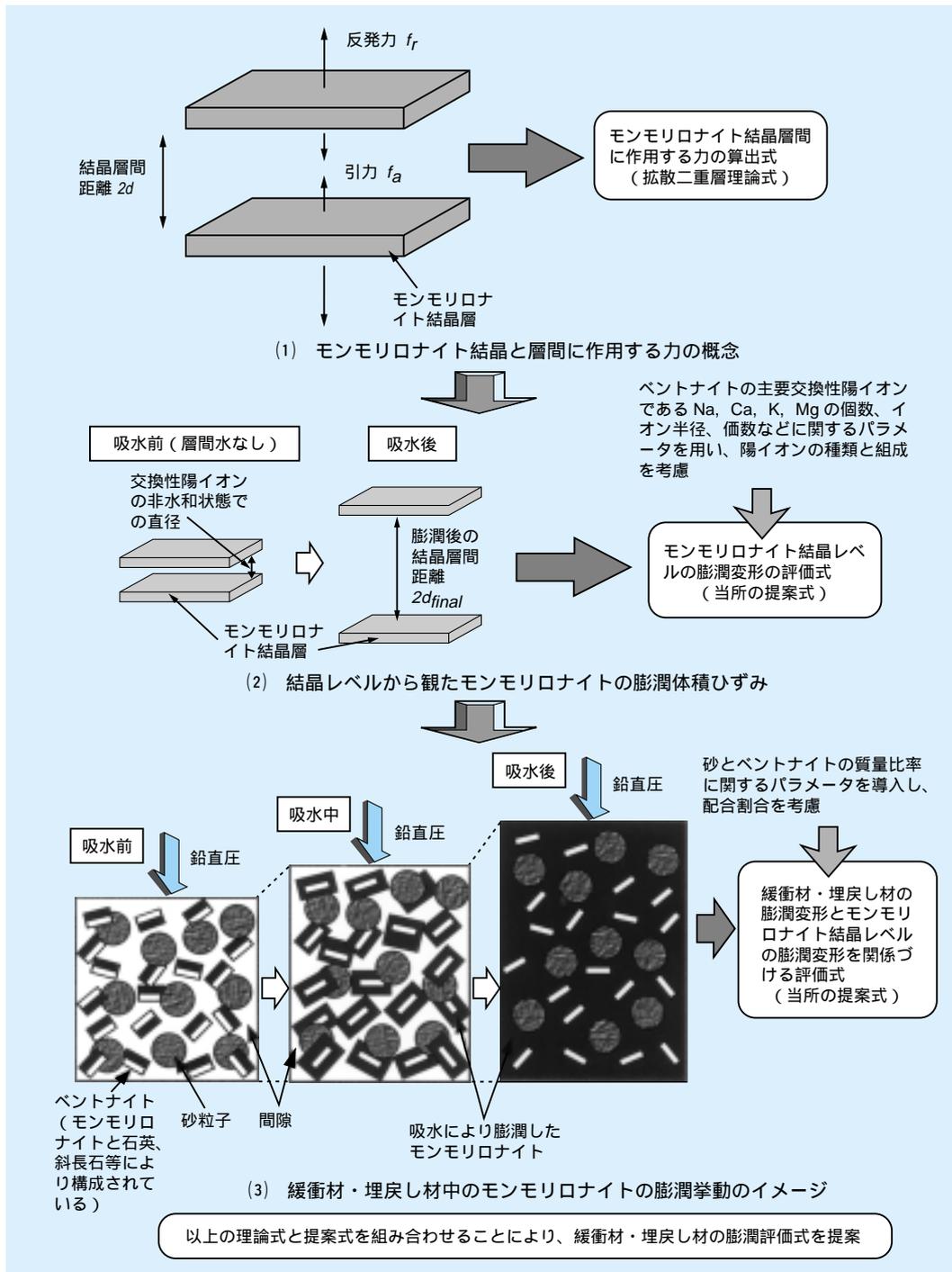


図2-4-2 緩衝材・埋戻し材の膨潤評価式 の概念

混合材料では、吸水によるベントナイトの体積膨張は水みちとなり得る間隙を十分に充填するまでに至ってなく、加水後も間隙が存在していることが分かる。一方、ベントナイト配合率50%の混合材料の観察結果では、ベントナイトが吸水により体積膨張し、それにより水みちとなり得る間隙がほぼ完全に充填されていることが分かる。同様の観察をベントナイト配合率5%、20%、

30%の混合材料に対し行ったところ、ベントナイト配合率が20%以上の試料では、間隙がベントナイトの体積膨張により徐々に充填され、最終的には完全に間隙が充填されている状況が認められた。

図2-4-4に示すように砂・ベントナイト混合材料の透水係数は、配合率が5～20%の範囲では、ベントナイト量の増加に伴い透水係数は大きく低下している。一方、

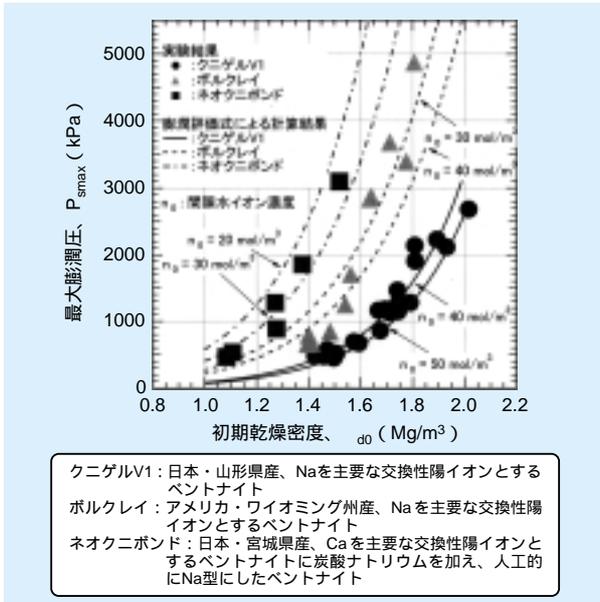


図2-4-3 膨潤評価式の適用性

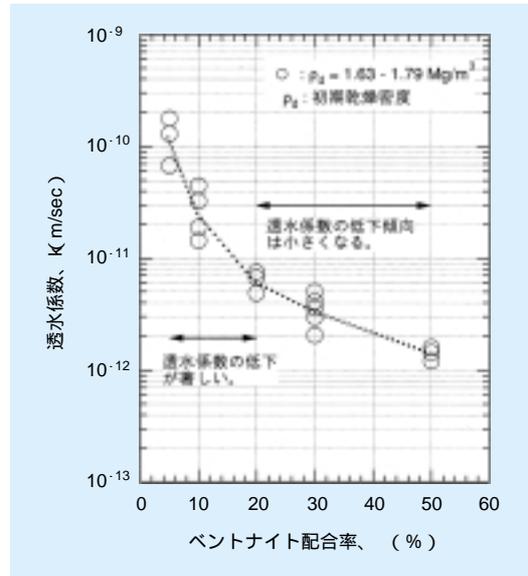


図2-4-4 砂・ベントナイト混合材料の浸透係数とベントナイト配合率の関係

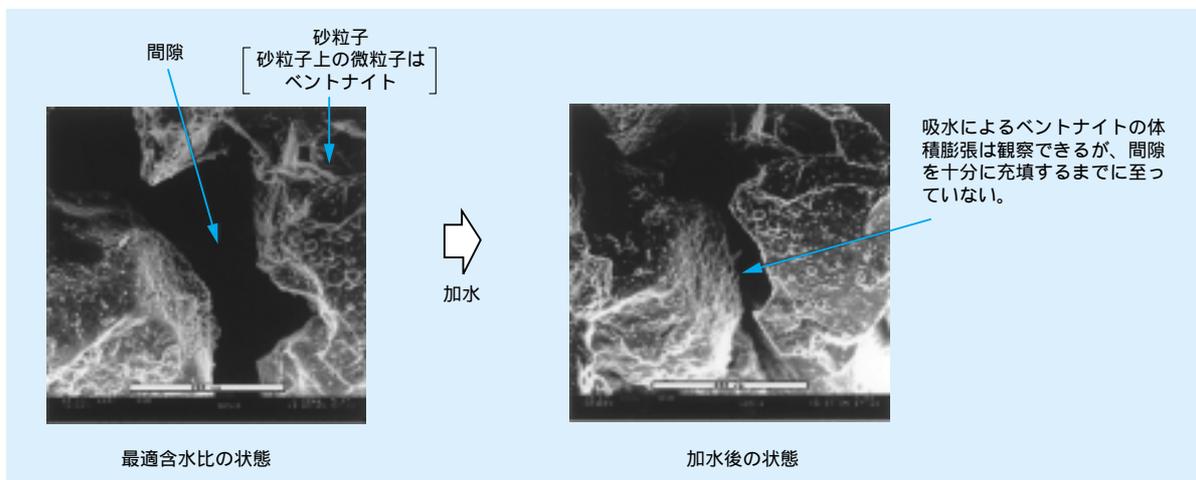


図2-4-5 ベントナイト配合率10%の砂・ベントナイト混合材料中のベントナイトの膨潤挙動

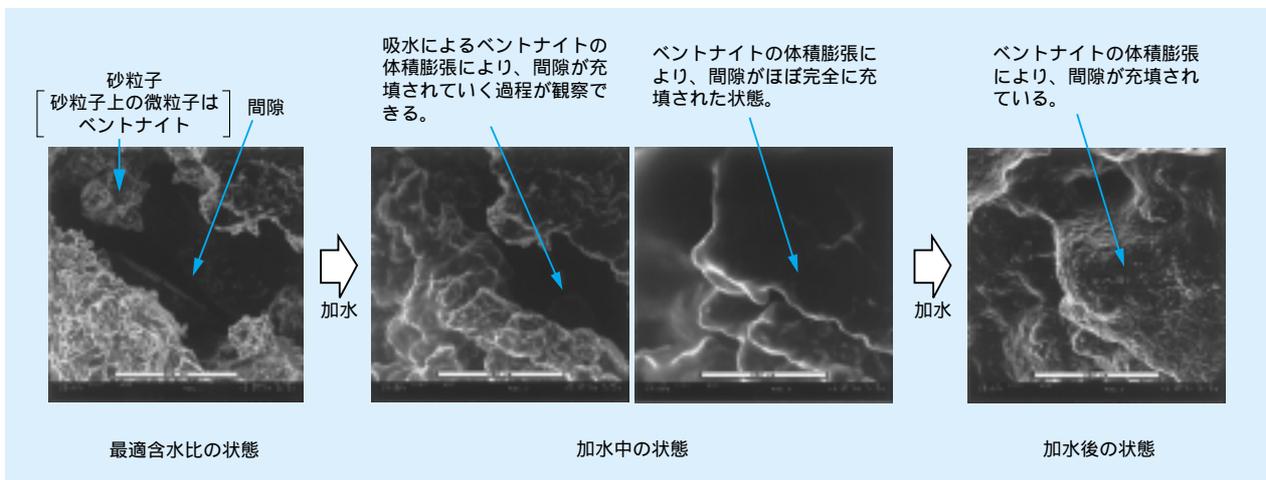


図2-4-6 ベントナイト配合率50%の砂・ベントナイト混合材料中のベントナイトの膨潤挙動

20%以上になると透水係数の低下の割合が小さくなる。図2-4-5に例示するように、配合率5%、10%では、間隙が完全には充填されない。このような場合は、ベントナイト量の増加により間隙の充填程度は大きく変化するが、透水性の変化も大きくなるものと考えられる。一方、図2-4-6に例示するように、ベントナイト配合率が20%以上の場合は、ベントナイトの膨潤により混合材料中の間隙がほぼ完全に充填されるので、混合材料の透水係数は $10^{-11}$  m/sec以下と非常に小さく、またベントナイト量の増加に伴う透水係数の低下傾向も小さくなるものと考えられる。

以上に述べた透水特性および電子顕微鏡観察の結果から、砂・ベントナイト混合材料の止水性能は、ベントナイトが膨潤により混合材料中の間隙を充填することに起因していることが明らかになった。

図2-4-7に、それぞれ $1.58 \sim 1.62 \text{ Mg/m}^3$ および $1.71 \sim 1.79 \text{ Mg/m}^3$ の範囲にある乾燥密度の砂・ベントナイト混合材料の透水係数と経過時間の関係を示す。これらの図から、ベントナイト配合率が10%、20%の場合、透水係数は $7 \times 10^{-11} \sim 4 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ の範囲に、30%と50%では $6 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-12} \text{ m/sec}$ の範囲にあることが分かる。また、同じベントナイト配合率であれば、乾燥密度の大きい供試体の方が、その透水係数はやや低い値になっている。

各供試体の透水係数の経時変化については、ベントナイト配合率が50%の場合は約3000時間経過まで、30%の場合は約1200時間経過までの範囲で、その透水係数の変化はほとんどないことが、図2-4-7の結果から分かる。一方、ベントナイト配合率が10%と20%の場合は、先の30%や50%の配合率の場合と比較して、やや透水係数に変化が認められる。

図2-4-5、2-4-6に示したように、ベントナイト配合率が50%の場合、砂粒子間の間隙部分を膨潤したベントナイトがほぼ完全に充填していたのに対し、配合率が10%の場合には、ベントナイトの膨潤は生じているものの、

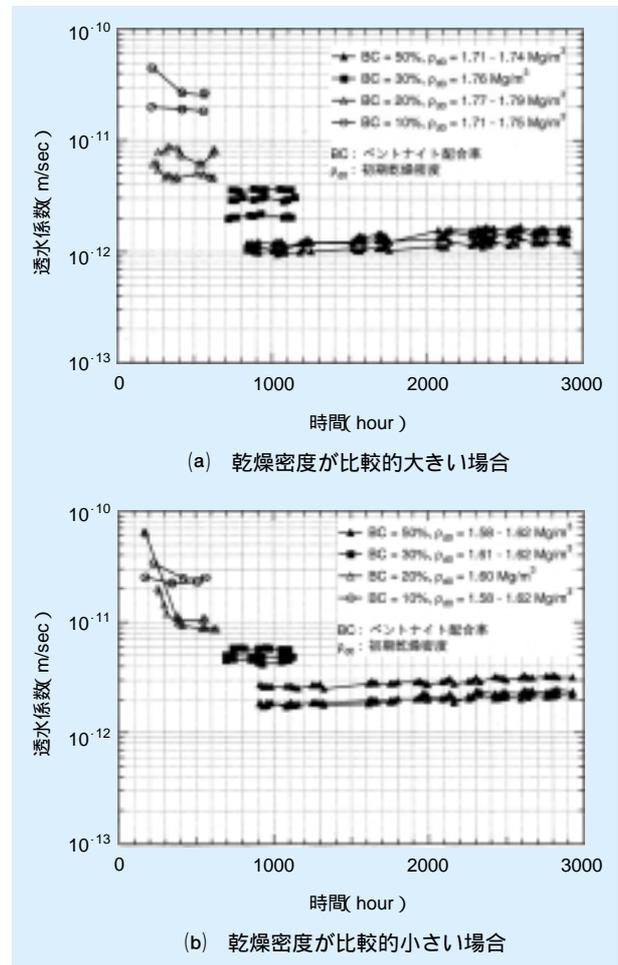


図2-4-7 砂・ベントナイト混合材料の長期透水特性

完全には間隙は充填されていなかった。このことから、ベントナイト配合率が比較的低い10%や20%の場合は、間隙の充填程度が不十分であり、時間の経過に伴いベントナイト粒子が砂粒子間を移動することが考えられる。これにより、時間経過に伴う透水係数の変化が生じたものと思われる。50%等のベントナイト配合率が比較的高い場合には、砂粒子間の間隙はベントナイトの膨潤によりほぼ完全に充填された状態であり、さらに間隙充填後もある程度の圧力を発生している状態にあるため、透水係数は低く時間が経過してもその変化は小さいと考えられる。

## 2 - 5 人工バリアの性能評価手法 - 処分の安全評価のための研究 -

### 2-5-1 人工バリアシステム全体の性能

人工バリア性能評価は人工バリアシステム全体およびシステム構成要素の性能を定量化し、合理的な設計や被ばく評価のための天然バリア解析への入力データを得る目的で実施する。

人工バリアシステム全体の性能は、システム構成要素である高レベルガラス固化体からの溶解、腐食したオーバーパック容器や緩衝材中を通過する放射性核種の移行挙動を、移流分散方程式を基本とした核種移行解析で評価する。この解析を実施するにあたり、ガラス固化体の溶解をはじめとする構成要素の挙動、ならびに吸着反応や沈殿反応など核種の移行に影響する種々の事象の現象論的解析は、長期に渡る性能を実験的に示すことの限界から不可欠であり、システム全体解析のパラメータ条件の妥当性を示すなどの支援的な役割を担う点でも重要である(図2-5-1)。

当所では、システム構成要素の性能を解析するに際し、処分場条件下で起こることが想定される地球化学的反応を考慮できる解析手法を開発し、高レベル廃棄物を対象とした人工バリアシステム要素の性能評価を実施するとともに、他の廃棄物の処分システム性能評価への応用も試みつつある。同時に人工バリアシステム全体性能を評価する移流分散コード、ならびに入力パラメータの頻度分布を考慮したシステム性能の不確

実性を解析するコードも整備した。表2-5-1に当所が開発した人工バリア性能評価コード<sup>23)</sup>、<sup>24)</sup>をまとめた。

### 2-5-2 人工バリア要素の性能評価モデルと評価例

#### (1) ガラス固化体からの核種溶出

STRAG4<sup>23)</sup>、<sup>25)</sup>は、ガラス固化体中の発熱による温度分布、放射性核種の濃度拡散と熱拡散、シリカ成分の溶解反応、ガラス表面層の成長と層中の拡散、溶解したガラス成分と地下水成分との地球化学反応を総合的に解くコードである。

ガラス固化体中での放射性核種の動きやすさは各核種の拡散係数の活性化エネルギーで決まり、拡散によりガラス固化体表面に移動した核種は、ガラス固化体母材ホウケイ酸ガラスマトリクスの溶解に伴い周辺地下水に溶解する。その後一部の核種は地下水成分との沈殿反応により、地下水中濃度が溶解度と等しくなる。従って、ホウケイ酸ガラスの溶解挙動の記述がガラス固化体からの核種溶出を定量的に表す際に重要となる。

ホウケイ酸ガラスの溶解モデルは、その主成分である二酸化ケイ素の溶解機構を説明した遷移状態理論に基づく一次反応速度式に、実放射性ガラスを用いた浸出試験の結果<sup>26)</sup>を基に、経験的な補正項を加えた溶解速度式で表した。この溶解速度式ではガラス周辺の地下水中ケイ酸濃度が飽和濃度に近づくにつれて、溶解速度が補正項である長期溶解速度に近い値となる。本コードは地下水中ケイ酸濃度を地球化学平衡計算で求め、

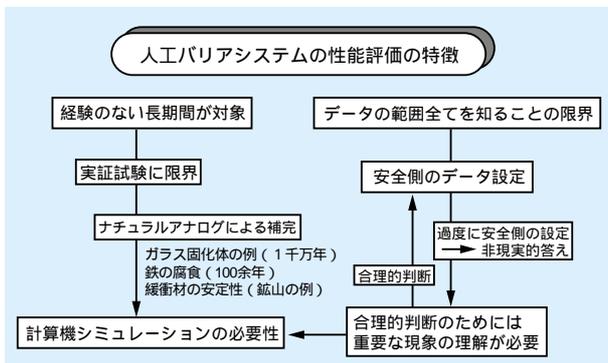


図2-5-1 人工バリアシステム性能評価の特徴

表2-5-1 当所の人工バリア性能評価コード

コード名	略称
ガラス固化体溶解挙動解析コード	STRAG4
オーバーパック容器腐食挙動解析コード	CRANP
緩衝材中核種移行解析コード	GESPER
人工バリア安全評価コード	RAPRAN
人工バリア性能不確実性解析コード	IMUPAS

溶解速度にフィードバックしている。

上記の溶解反応に加え、ガラス成分の溶解に伴い表面に成長する変質層の成長とその中での拡散による物質移動もモデル化した。また、ガラスの溶解の進展に伴い、固化体の表面積が減少する影響も考慮している。さらに固化体周囲のオーバーパック腐食生成物へのケイ酸吸着の効果や鉄イオンとの共沈効果も地球化学平衡反応として取り入れることも可能である。

同コードは種々の実験室データとの比較解析から、モデルやコード内で用いる定数の妥当性を確認した<sup>25, 27)</sup>。

試算によれば、ガラス固化体は処分場温度が90℃で一定という条件でも5万年以上(図2-5-2)<sup>23, 29, 30)</sup>、また、地層の温度と同程度の30℃では100万年程度の寿命が期待できる可能性が示されている<sup>23)</sup>。

このような極めて長期の溶解寿命は、処分後1,000年間には固化体の発熱による影響がなくなり<sup>25)</sup>、固化体の溶解開始時点ですでにケイ酸濃度が飽和溶解度に達するために、ガラスの溶解が極めて小さい長期溶解反応速度のみで決まることによる。

## (2) オーバーパック容器の腐食寿命解析

CRANP<sup>28)</sup>はガラス固化体の周囲のキャニスタあるいはオーバーパックが地下水と接触することにより起こる金属腐食挙動を解析して、容器の封じ込め性能を評価するコードである。鉄の腐食反応と金属材料表面での電極反応を考慮し、以下の反応をモデル化してある。

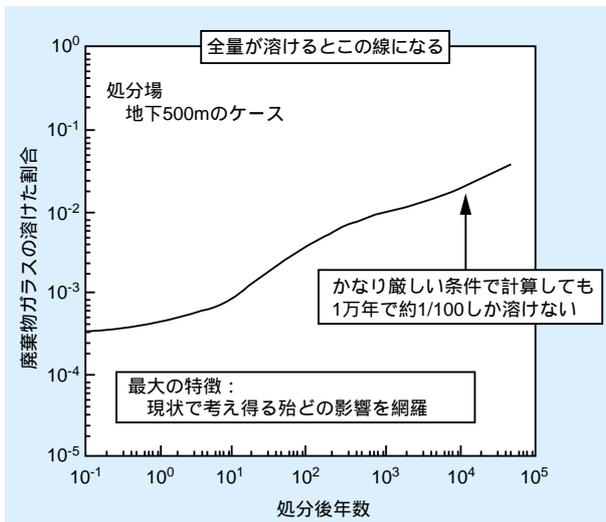


図2-5-2 STRAG4によるガラス固化体溶解挙動予測試算例

- ① 地下水中の溶存酸素による均一腐食反応
- ② 地下水成分の放射線分解で発生する酸素の影響
- ③ 低酸素濃度条件での水還元型腐食反応
- ④ 処分場内の温度変化を考慮した拡散係数の変化

オーバーパック腐食の解析結果を腐食量を時間の関数として図2-5-3に示す。腐食量は1,000年間でおよそ2~4cmであり、殆どが水還元型の腐食反応に起因し、溶存酸素による腐食は1,000年間で僅か数mmである。水素発生型腐食を水の還元と鉄の溶解反応それぞれを電極反応と捉えた場合の反応速度式の定数の設定により、腐食量に約2倍の相違が現れる。腐食量は、短期の室内試験による腐食速度5~6 μm/y<sup>29)</sup>の外挿による推定値と調和するが、腐食生成物による抑制効果を考慮すれば、より小さい値となる可能性が高い。また、水還元型の腐食反応は400年後以降は定常状態となり、一定となった腐食速度から、25cmの厚さ<sup>30)</sup>を想定したオーバーパックの全面腐食寿命を推定すると、反応速度定数の設定により17,000~90,000年となる。

## (3) 緩衝材中の核種移行解析

圧縮したベントナイトを想定した緩衝材領域では、拡散が物質移行のメカニズムとなる。従って拡散方程式が緩衝材中の核種移行解析の基本方程式となる。

一方、ヘンリー吸着を仮定して吸着の程度を表す分配係数は単純で計算コードでの扱いが簡易という利点があるが、化学条件の変化を追従できず、環境条件の変化に伴うパラメータの変動を考慮できない。GESPERは核種と緩衝材との吸着反応機構として、表面錯体生成反応、イオン交換反応を考慮し、それぞれの反応と

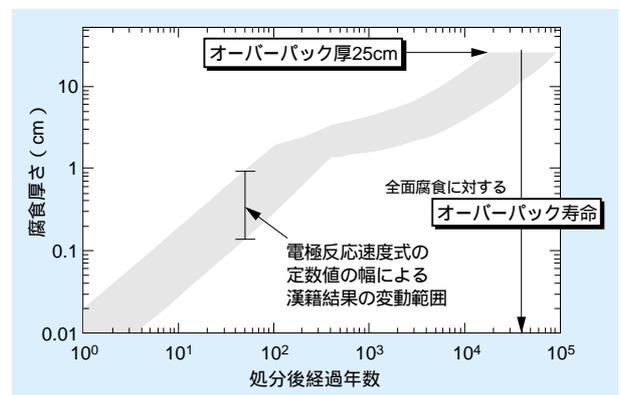


図2-5-3 CRANPによるオーバーパック容器腐食挙動予測試算例

移流・拡散挙動とをカップリングした解析が可能である。従って、環境条件や時間に伴う吸着の程度の変化を解析に取り入れることができる<sup>(30)</sup>。

核種の固体表面への吸着反応を、水溶液中での錯体生成反応に見立てた表面錯体生成反応モデルは、一般的な元素の鉄鉱物や土壌への吸着を対象として研究されてきた<sup>(31)、(32)</sup>。しかし、現状緩衝材の材料として有望視されているベントナイトを対象とした表面錯体モデルに必要なパラメータは希少なため、NpやPu等の吸着データを取得した上で解析を行い、同コードの適用性を検討してきた<sup>(27)、(33)~(41)</sup>。分配係数を用いた評価の妥当性を確かめる一手段として、表面錯体生成反応モデルによるNp、Pu、およびイオン交換モデルによるCsの拡散挙動の詳細解析と、分配係数による簡易解析を比較検討した。

その結果、緩衝材からの核種漏洩の立ち上がり、数値解法上の原因と思われる差が見られたが、定常フラックスはほぼ等しくなり、一定値の分配係数しか取り扱えないモデルでも正しい値の入力により、妥当な結果が得られることが確認できた<sup>(23)</sup>。

### 2-5-3 人工バリアシステム全体の性能評価

分配係数を用いた計算の妥当性に基づく一次元移流分散コードRAPRAN<sup>(42)</sup>は、移行現象を詳細にモデル化しない点で機動性に富み、種々の条件での人工バリアシステムからの核種漏洩挙動の計算が可能である。ま

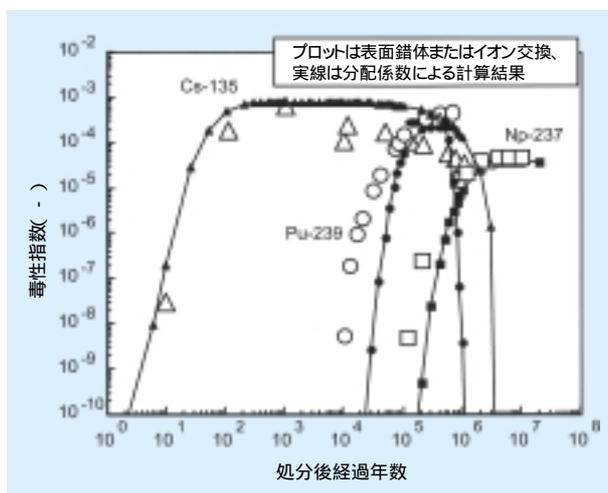


図2-5-4 GESPERによる緩衝材からの核種漏洩挙動の解析結果（吸着モデルの違いによる比較）

た、人工バリア周辺岩盤や天然バリア領域の解析にも対応できる。

これまでに、人工バリアからの核種漏洩挙動に対する液相および固相での溶解度の同位体分配の影響、緩衝材外側の境界条件や周辺岩盤中地下水流速の影響、溶解度等のパラメータの変動の影響、緩衝材の分配係数や間隙率等の時間変化の影響把握に用いている<sup>(23)、(41)、(43)、(44)</sup>。

### 2-5-4 人工バリア性能の不確実性解析

モデルやパラメータの不確かさにより、ガラス固化体の溶解寿命が評価モデルや入力パラメータ設定により異なったり、ベントナイトの種類や環境条件により核種の分配係数が幅広く分布する。人工バリアシステムの性能や仕様を検討する上で、パラメータの分布を考慮することで、評価結果の幅と確率の議論が可能となる。

当所のIMUPAS<sup>(45)</sup>コードは、人工バリアシステム領域の核種移行を解析解で求め、解析解コードに入力するパラメータをその分布関数からLHS法で抽出して繰り返し計算することにより解析結果を分布の形で得ることができる。

図2-5-5はガラス固化体の溶解寿命、人工バリア内部地下水中の核種溶解度、緩衝材への核種吸着分配係数の分布関数を想定し、人工バリア領域からの核種漏洩フラックスの最大値と緩衝材厚さの関係を試算した結果である。

同図には得られた漏洩フラックス最大値の分布の中

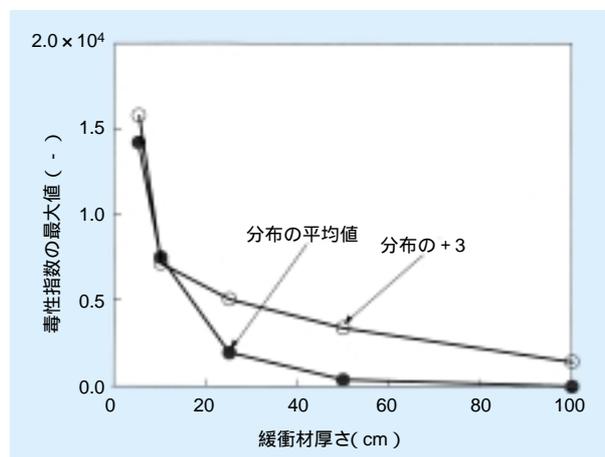


図2-5-5 IMUPASコードによる緩衝材厚さと漏洩フラックスの関係の試算結果

心値と+3（分布の99.5%が含まれる範囲）を示した。両者とも緩衝材の厚さの増加に伴い減少し、凡そ30 cm程度以上では漏洩フラックスの減少の程度が小さくなり、核種漏洩低減の観点からの最適な厚さへのパラメータ分布の影響は小さいことが示された<sup>24)</sup>、<sup>45)</sup>。

これまでに人工バリアシステム要素ならびにシステム全体の性能解析を目的とした核種移行シミュレーションコードを開発し、その時点で入手可能なデータを基に人工バリアシステムの性能評価を行い、入力パラ

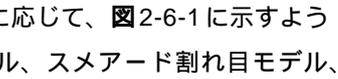
メータのばらつきによるバリア性能の不確実性を評価するコードを開発し、今後の評価に備えた。地下深部の現象の正確な把握をはじめとして、今後解明すべき点が残されているが、開発した手法に適切なパラメータを組み合わせることにより、概略の安全評価が可能と考える。

一連の評価コードは、今後のTRU廃棄物処分システム性能評価に向けて拡張改良する。同時に逐次得られる知見を基に、上記評価を実施する。

## 2-6 天然バリアの性能評価手法 - 処分の安全評価のための研究 -

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全性を評価するためには、人工バリア性能評価に引き続き、人工バリアから放出される核種の天然バリアとなる岩盤中での移行挙動を評価するという天然バリア性能評価が必要となる。そのためには、核種の移行媒体となる岩盤の水理地質構造を適切にモデル化すること、構築された水理地質モデル中の地下水流動を評価すること、そして地下水とともに移行する核種の移行を評価することが重要となる。本節では、当所におけるこれまでの天然バリア性能評価手法の開発・検証・高度化の状況について紹介する。

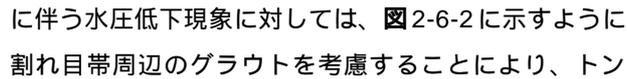
### 2-6-1 水理地質構造のモデル化

現在、岩盤中の地下水流動や核種移行評価のための媒体モデルは、結晶質岩を対象とした亀裂性媒体モデルと堆積岩を対象とした多孔質媒体モデルとに大別される。さらに、亀裂性媒体モデルは、実際の割れ目の性状やそのモデル化手法に応じて、2-6-1に示すように異方性多孔質媒体モデル、スメアード割れ目モデル、離散割れ目モデル、二重間隙モデル、割れ目ネットワークモデル、チャンネルネットワークモデルに細分される。多孔質媒体モデルにおいても、各地層を一定の物性値で代表させるモデルの他、各地層の異方性や深度依存性を考慮できるモデル、さらに同一地層中の物性値のバラツキを考慮できるモデルもある。

前述の高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化研究においては、代表的な地質条件として、花崗岩地域では簡略化した二重間隙モデルを用い、堆積岩地域では各地層を一定の物性値で代表させる多孔質媒体モデルを用いたが<sup>46)</sup>、<sup>47)</sup>、より現実に近い状況をシミュレートできるスメアード割れ目モデル<sup>48)</sup>、<sup>49)</sup>や同一地層中の物性値のバラツキも考慮できるモデル<sup>50)</sup>、<sup>51)</sup>の構築・検証を進めている。

### 2-6-2 岩盤中地下水流動解析手法

構築された水理地質モデルに対して地下水流動解析を行うことになるが、当所ではこれまで、異方性多孔質媒体モデル、スメアード割れ目モデル、離散割れ目モデル、二重間隙モデルによる地下水流動解析手法の開発、検証を行ってきた<sup>48)</sup>、<sup>49)</sup>、<sup>52)</sup>、<sup>53)</sup>。

岩盤中の割れ目を効率的に評価できるスメアード割れ目モデルは、スウェーデン原子燃料廃棄物管理会社（SKB）との共同研究の中で一貫して行っているエスポ地下研究施設を利用した長期揚水試験<sup>48)</sup>、<sup>54)</sup>やトンネル掘削に伴う岩盤中の間隙水圧低下現象<sup>49)</sup>、<sup>55)</sup>に適用し、本手法が有効であることを示した。さらに、トンネル掘削に伴う水圧低下現象に対しては、2-6-2に示すように割れ目帯周辺のグラウトを考慮することにより、トンネル周辺の地下水流動をよりよく表現できることを明らかにした。さらに、地下水の温度や塩分濃度を考慮

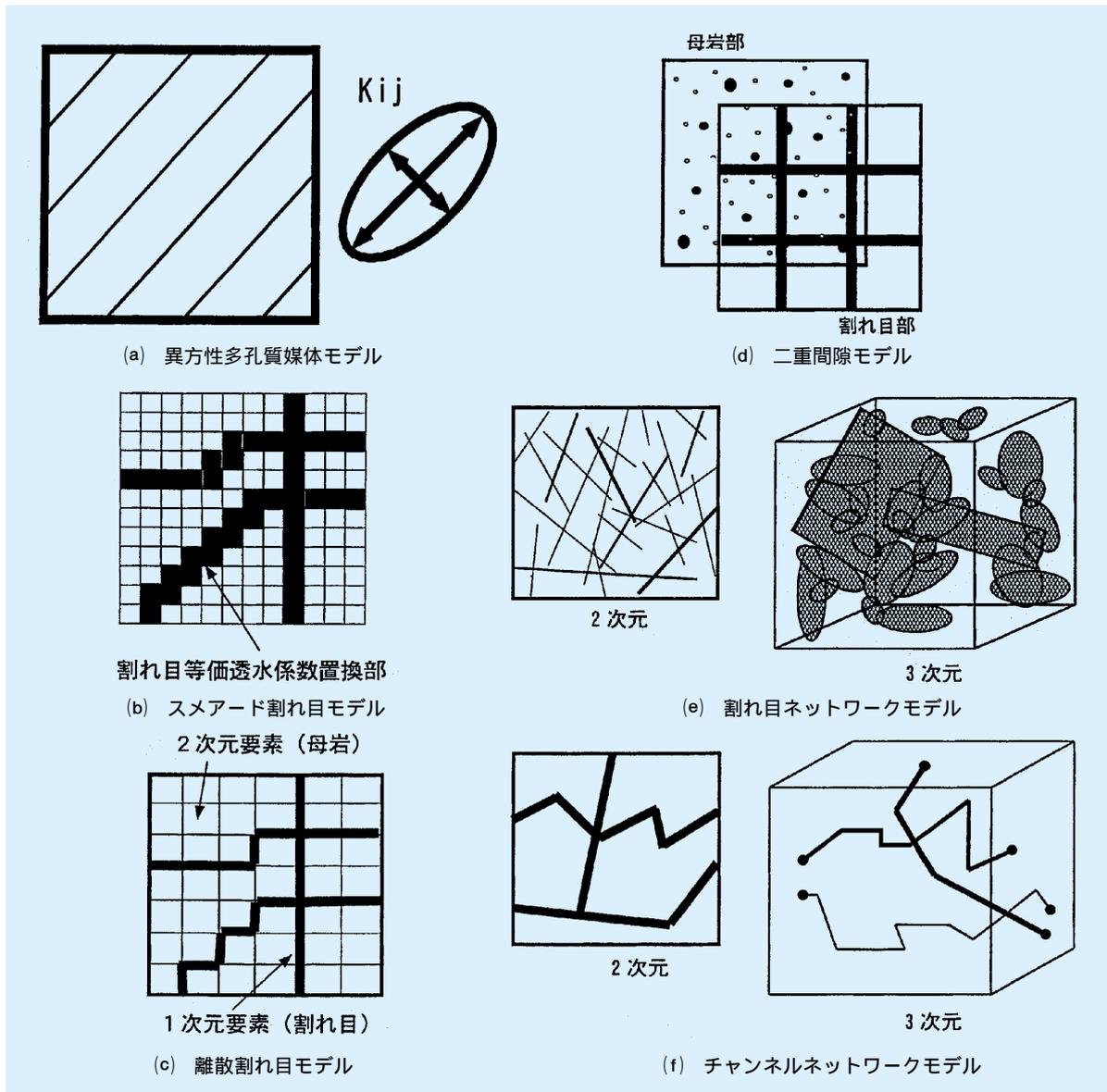


図2-6-1 種々の亀裂性媒体モデル

できるようにモデルの高度化を進めている。

多孔質媒体であっても、物性値、とりわけ透水係数が空間的に分布するような場においては、クリギング等により確率論的にその不均一性を評価する手法を開発し<sup>(54)</sup>、それをSKBで実施中の割れ目を通しての非吸着性トレーサ試験にも適用している<sup>(51)</sup>。

### 2-6-3 核種移行解析・評価手法

地下水流動解析結果を踏まえ、地下水の流れに沿った放射性核種等の溶質の移行挙動解析手法を開発・検証している<sup>(51)、(53)、(56)</sup>。溶質移行においては、移流、分散、

マトリックス拡散、吸着(あるいは収着)、崩壊連鎖、分解の現象をモデル化している。特に、SKBとの共同研究で実施している原位置試験では、単一割れ目を対象として、吸着性トレーサの挙動を流れの不均一性を考慮し、さらにマトリックス拡散や割れ目表面吸着を考慮して評価している<sup>(51)、(56)</sup>。図2-6-3はエスポ地下研究施設において単一割れ目中のKXTT4孔に種々の放射性トレーサを注入し、それを周辺ボーリング孔であるKXTT3孔から揚水した場合に得られた破過曲線を解析結果と比較した図である。この図から、割れ目内の透水性の不均一性のほか、吸着指標である岩盤マトリックスの分配係数と割れ目表面における分配係数を考慮

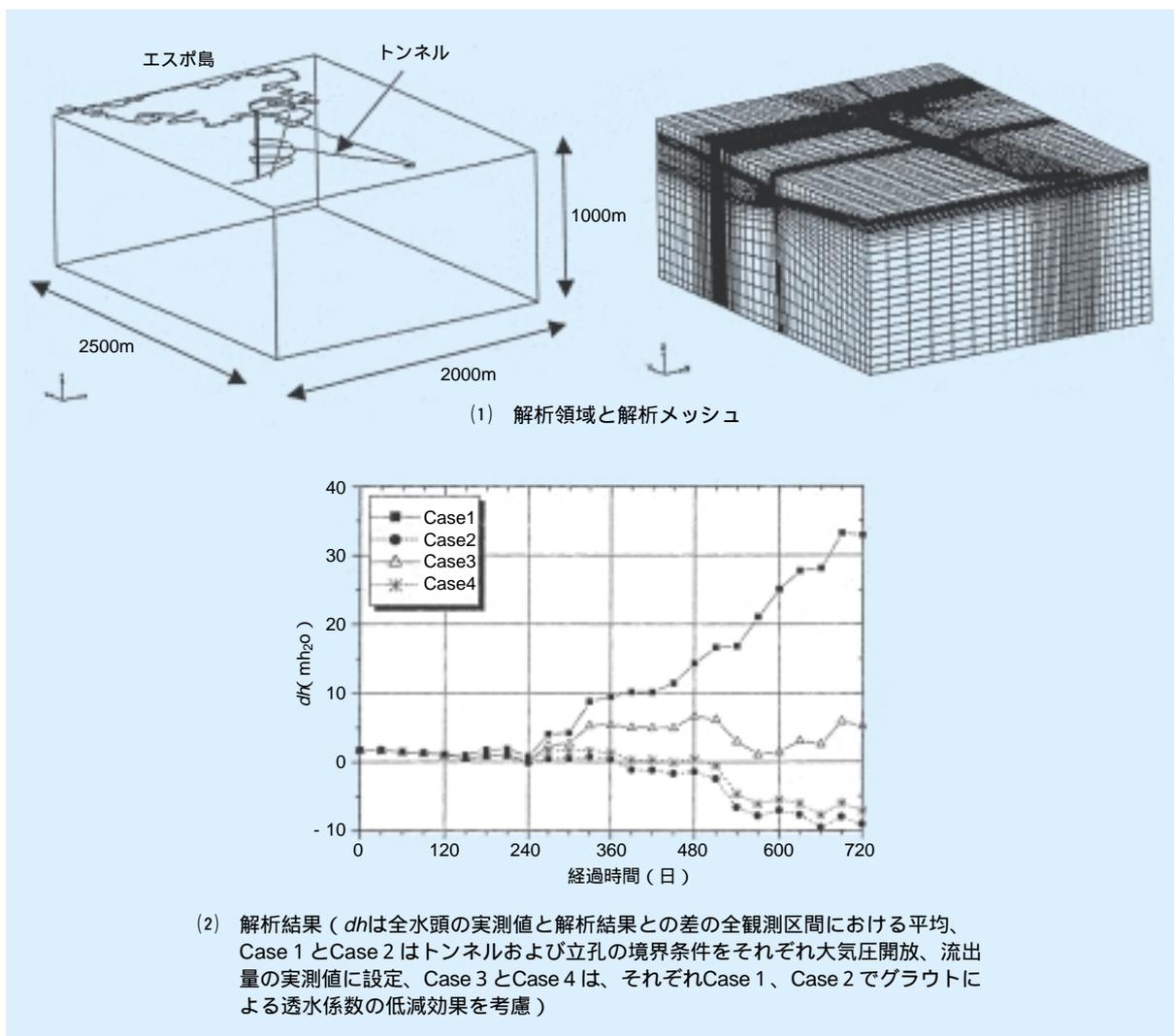


図2-6-2 エスボ地下研究施設におけるトンネル掘削に伴う水圧低下に関する解析

することにより、原位置試験結果を評価できることがわかった。

最近、地下水に本来含まれている成分を天然のトレーサとして、地下水流動の検証を行おうとする試みもなされている。特に、図2-6-4はエスボ地下研究施設のトンネル掘削により周辺地下水の水質が経過時間とともにどのように変化するかを評価したものであり、このような手法を用いることにより、地下水流動だけではなく、溶質移行現象も同時に評価できる。図では、特定の水質成分ではなく、水質の主成分分析から推定された起源水のトンネル掘削前後の分布について示している。同様な観点から、当所独自の地下水中の溶存ガスを利用して地下水の年代や地下水の混合を評価し

ている<sup>57)、58)</sup>。

以上のように、地下水中の溶質移行評価においては、人工トレーサを使用して評価する手法だけでなく<sup>51)、56)</sup>、天然に存在する水質成分、溶存ガス<sup>57)、58)</sup>、微量元素<sup>59)</sup>等を利用する手法が、近年多用されている。

当所では、国内での小規模な原位置試験や国外での本格的な地下研究施設を利用しながら、天然バリア性能評価に関する手法の開発・検証を行っている。さらに、現場調査や室内試験による補完により、来るべき高レベル放射性廃棄物の処分候補地等の選定に際して、天然バリア性能を適切に評価できるよう、一層の改良・高度化を進めていく予定である。

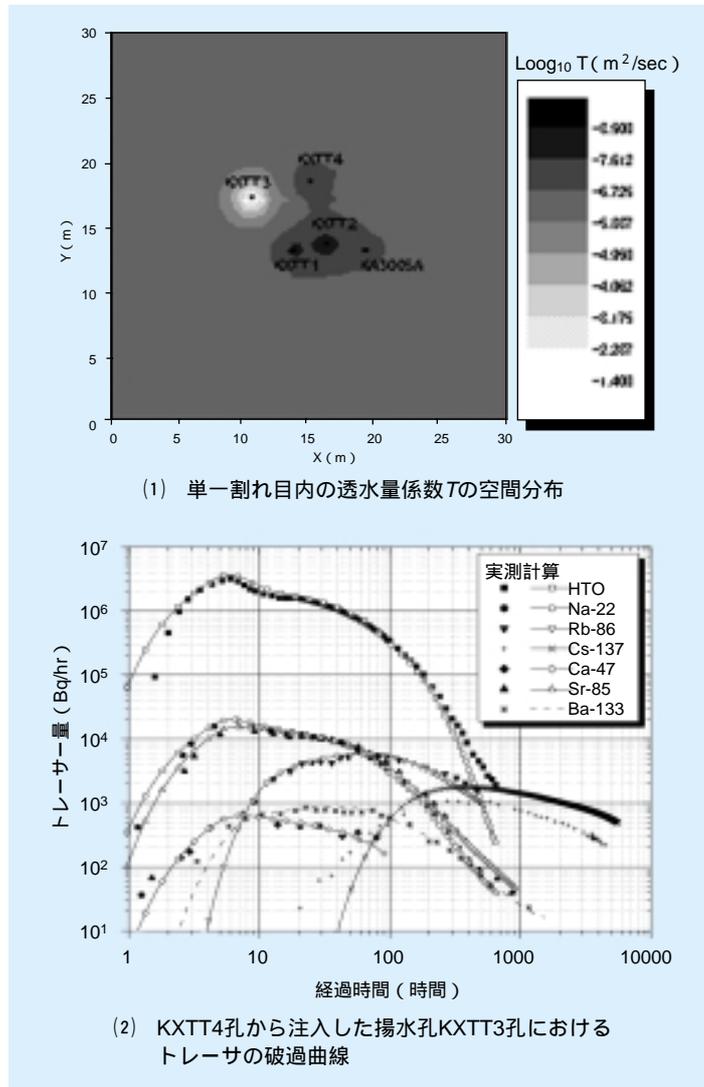


図2-6-3 エスガ地下研究施設における単一割れ目中のトレーサ移行解析

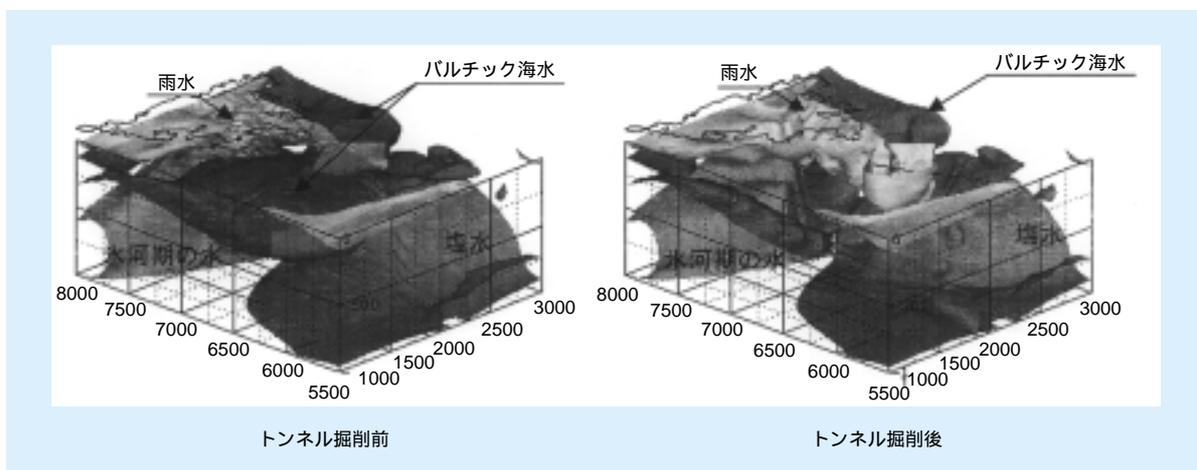


図2-6-4 エスガ地下研究施設におけるトンネル掘削に伴う周辺地下水の水質変化