



地層処分システムの概念と 動燃事業団における研究開発

内田 雅大

環境資源部

資料番号：65—3

The Concept of Geological Disposal of HLW and the
R & D Works in PNC

Masahiro Uchida

(Waste Management and Raw Materials Division.)

動燃事業団は、昭和52年に地層処分研究開発を開始し、第2段階（処分予定地の選定）において研究開発の中核推進機関として地層処分技術の確立を目指した研究開発、地質環境等の適性を評価するための調査を推進している。地層処分研究開発は、諸外国においても精力的に研究が行われており、動燃の研究開発もこれらの動きと歩調を合わせていく必要がある。本資料では、地層処分の国際的概念とそれを踏まえた動燃の研究開発の現状について述べる。

1. まえがき

高レベル放射性廃棄物の地層処分は、原子力発電の実用化が久しく、すっかり国民生活に定着した現在にあって、原子力発電による恩恵を受けた世代の我々が解決すべき重要な課題である。世界的には、地層処分の研究開発は1950年代に開始され、OECD/NEA(1984)¹⁾によると、現在の状況は、「……研究開発の必要性は、特定の分野の理解のより良い理解の助けを得るために生じるものであり、地層処分の概念の成立性に対する疑念に基づくものではない。……」とされており、処分システム概念の高度化と安全評価手法の改良に向けて精力的に研究開発が進められている。我が国においても、1977年より地層処分研究開発が開始され、現在、動燃事業団を中核推進機関として、処分予定地の選定に向けた研究開発が実施されている。

しかしながら、地層処分は他の原子力施設と異なり、数1,000年以上というオーダーの超長期的安全性を保証する必要があること、そのために人工的障壁にのみたよることなく天然の障壁（＝地層）を加えてシステムを構築する点において大きく異なるといえる。このため、動燃事業団においては、国民各層

の理解を得るべく、国際的な研究開発の動向を十分考慮しつつ研究開発を推し進めている。

本稿においては、まず地層処分の概念を紹介し、これに対して行っている動燃事業団の研究開発の概要と、主要な成果を紹介する。

2. 何故地層処分か？

2.1 高レベル放射性廃棄物の特性

使用済燃料を再処理することにより発生する高レベル放射性廃棄物は、簡単にいうと以下の特徴を有している。

(1) 核燃料からエネルギーを取り出すことにより発生した核分裂生成物の99%程度が高レベル放射性廃棄物に含まれており、原子炉より取り出してから1年半を経過した時点で、図1に示すように約400万キュリーと放射能レベルが高く、放射線遮蔽と遠隔操作が必要であるとともに、崩壊熱による自己発熱現象が著しく、使用済燃料1トンウラン当たりの発熱量は、図2に示すように原子炉より取出してから半年後で17kw、10年で約1kwであり、工学的な除熱対策が必要である。

(2) さらに、長半減期のアルファ核種が含まれてお

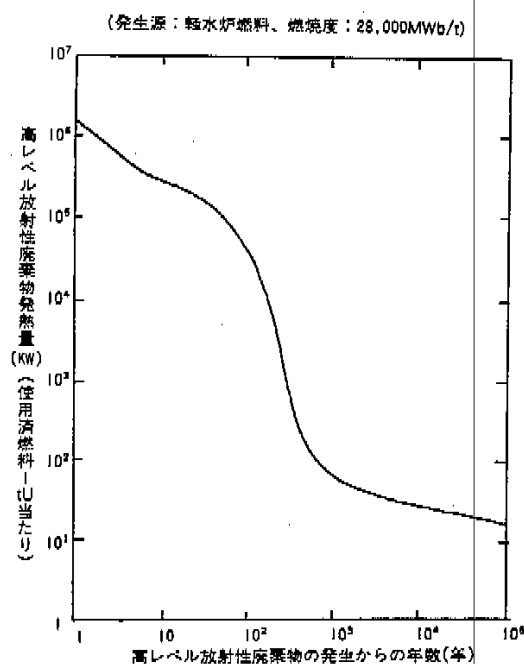


図1 高レベル放射性廃棄物の放射能

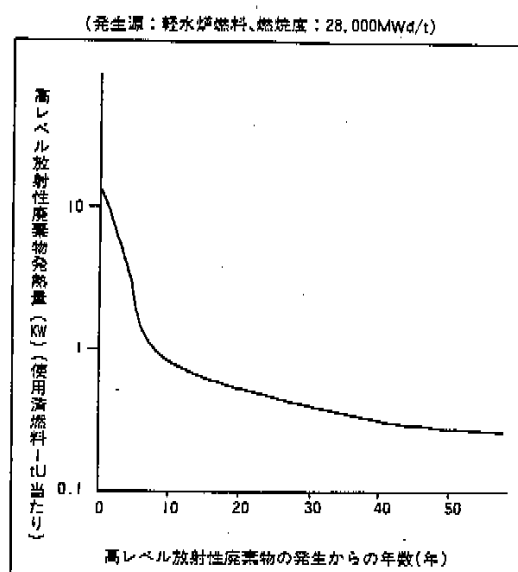


図2 高レベル放射性廃棄物の発熱量

り、多くの核分裂生成物が減衰してしまう約1,000年以降は、アルファ核種の方が相対的に優勢となり、これがウラン鉱床の放射能の影響程度まで減衰するまでには、図3のように数1,000年以上必要である²⁾。このため、長期にわたる人間環境からの隔離が必要となる。

2.2 各種の処分方法

(1) 処分方法の要件

2.1で述べたように、高レベル放射性廃棄物は、①高い放射能と②熱の発生を伴い、さらに③長寿命の放射性核種を含有するという特性を持っている。このため、処分方法の選択に際しては、これらの特性を十分考慮したものでなければならない。

この点を踏まえ、処分の目標として世界的にも、次の3項目が掲げられている³⁾。

- ① 現在及び将来の世代の人間の健康の防護
- ② 長期的な環境の防護
- ③ 将来の世代に対する責任

ここに共通した精神は、遠い将来の世代を含む、長期的な観点に立って対策をとるべしということであり、さらに廃棄物処分とは、このような長期的観点に立ち、人間の健康の防護と環境の保護を、原子力発電による恩恵を享受した世代が後世の世代に負担をかけずに実施することが求められるということ

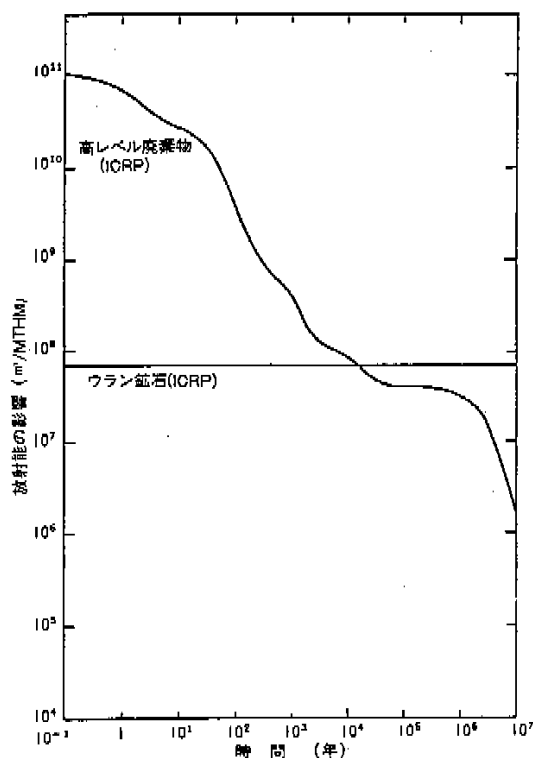


図3 高レベル廃棄物と元のウラン鉱石に含まれる核種による影響の比較

である。

(2) 種々の処分方策

上記の要件を満足するものとして、提案されている処分方策とその特徴を表1にまとめて示す。

A：地球上での処分

これは、地球上の適切な場所に廃棄物を隔離する方法で、最も実現性が高いと考えられている。この方法は、処分を行う場所、深度に基づき、さらに①陸地への深地層処分（いわゆる「地層処分」）、②海洋底下処分、③超深孔処分、④氷河地帯への処分、に区分できる。

①、③は共に陸地で行われるが、①は通常数100mから約1,000mの深さを対象とし、適切に処理した固化体を定置した後、アクセス路を埋め戻す方法で、後述するように、技術的実現性等から最も有望とされている方法であり、各国で研究開発及び立地選定が行われている方法である。③では、数1,000mから約10,000mの非常に深い地下へ埋没する方法である。技術的に不明な点が多いが、米国 IRG 報告では、石油及びメタンガス資源との関連で調査することを勧告している。②は、海洋の海底下の厚い堆積層中へ処分する方法で、OECD/NEA においてワーキンググループを設置し技術的検討がなされている。しかし、この方法は国際的にみて、ロンドン海洋投棄条約で禁止

されている海洋投棄に相当しているか否か明確でないなど、問題が残っているとされている。④は地球上でも特殊な場所である南極または北極の厚い氷の中へ処分する方法である。極圏の氷は、過去1～300万年は動いておらず、人間社会との隔離距離の面でも有利とされているが、氷床の安定性や将来の気候の変化に関する情報がきわめて不確実であり、本格的な検討はなされていない。

B：地球外への処分

宇宙処分とも呼ばれ、ロケットで廃棄物を地球外へ発射する方法である。この方法は、少量のものについて実施の可能性が考えられるが、方法の経済性及び安全性の両面でおお基本的な検討が必要であるとされている。

C：核変換による消滅

長寿命の核種を適切な原子炉において中性子を照射することにより、安定核種または短寿命の放射性核種に核変換する方法である。原理的には、これは理想的な方法といわれている。しかし、この方法を適用する過程で、長寿命核種の化学的分離と核変換が完全にはできないことから、さらに別の廃棄物が増えてしまうことが考えられる。この方法が実現性を持つためには、なお基礎的な研究が必要とされている。

表1 種々の処分方法

処分方法	① 地層処分	② 海洋底下処分	③ 超深孔処分	④ 氷河地帯への処分	⑤ 地球外への処分	⑥ 核変換による消滅
特 徴	地下数百メートルから千メートル程度の地層へ処分する方法である。	海底下にある地層中へ処分する方法である。	地層処分よりも更に深い孔（数十キロメートルから数十キロメートルの深さ）に処分する方法である。	氷河にガラス固化体を置き、ガラス固化体の発熱で氷を溶かしながら流れて処分する方法である。	宇宙空間に廃棄物を放出し、処分する方法である。	寿命が長い放射性元素に放射線をあてて安定した、放射線を出さない元素に変える方法である。
長 所	・地下深部は安定であるとともに、技術的・経済的・社会的に最も現実的かつ現実性をもつ方法である。 ・既存技術の適用が可能である。	海洋底が長期間安定であるとともに、人間社会との隔離距離の点でも有利である。	完全な隔離が可能である。	氷は過去1～300万年は動いておらず人間社会との隔離距離の点でも有利である。	完全に隔離できる。	処分すべき放射性廃棄物の放射線を減少できる。
短 所	・人間侵入の危険性がある。	・国際的合意形成に問題がある。 ・廃棄物の定置技術が未開発である。	・廃棄物の定置技術が未開発である。 ・深層的に掘削が困難である。	各国のコンセンサスを得ることに問題がある。	・打ち上げ事故の発生確率をゼロにはできない。 ・大量処分ができない。	研究が始まったばかりである。
現 状	現在最も有望とされており開発中である。	海洋底、海洋底下地質等については不明な点が多いので国際協力下で研究され、その可能性について検討しようとしている。	技術的にも不明な点が多いが、米国 IRG 報告では石油及びメタンガス資源との関連で調査することを勧告している。	氷床の安定性や将来の気候に関する情報がきわめて不確実であるため現状では処分に適しないと見られ、考えただけで調査は行われていない。	この方法は少量のものについて実施の可能性が考えられているが、方法の経済性及び安全性の両面でおお基本的な検討が必要であるとされている。	この方法が現実性を持つためには、なお基礎的な研究が必要とされている。

2.3 地層処分選定理由

2.2(2)で述べたように、高レベル放射性廃棄物の処分方法としては、実現性の低いものも含めいくつか考えられているが、各国とも次のような理由で地層処分を最も現実的なオプションとして考えている。

- ① 地層処分では、廃棄物を安定な地下空間に閉じ込めることができる（鉱山の坑道等、地震による被害は稀であり、地表より地下の方が安定である）。
- ② 埋め戻した後は、人間が積極的に管理する必要がない（＝将来の世代に対する責任）。
- ③ 地層処分のために、各国は自国内に処分サイトを見つけることができる。
- ④ 処分場の建設に当たり、従来の土木、鉱業の技術を活用することができ、その費用も妥当な範囲に入る。

3. 地層処分システム概念

地層処分システムは、図4のような要素で構成されており、これらは、大きくわけて人工バリアと天然バリアに区別される。

3.1 人工バリア

(1) 廃棄物固化体

地層処分システムにおける第1のバリアである。ここでの機能は、固化体中に核種を封入することにより、地下水と接触した際に核種の漏出を抑制することである。また、このためには、長期間化学的に安定であり、耐放射性、耐熱性に優れていることが要求される。現在、ガラス、人工岩石、セラミック等が候補材と考えられているが、上述の特性に優れたこと、工業的観点等から、ホウケイ酸ガラスが世界的にも研究され有望視されており、我が国においても、国により同ガラスを中心とした技術開発を進めることとされている。

(2) 固化体容器（キャニスター、オーバーパック）

固化体を封入してある容器（キャニスター）は、さらにオーバーパックと呼ばれる容器に入れられる。このオーバーパックが、第2のバリアとなる。キャニスターはこの場合、長期的にはバリア効果を期待されていない。オーバーパックの機能は、地下水と固化体の接触開始時期を遅らせることと、自ら腐食溶解することにより、地下水の化学的雰囲気を改善する効果が期待されている。オーバーパック材料に

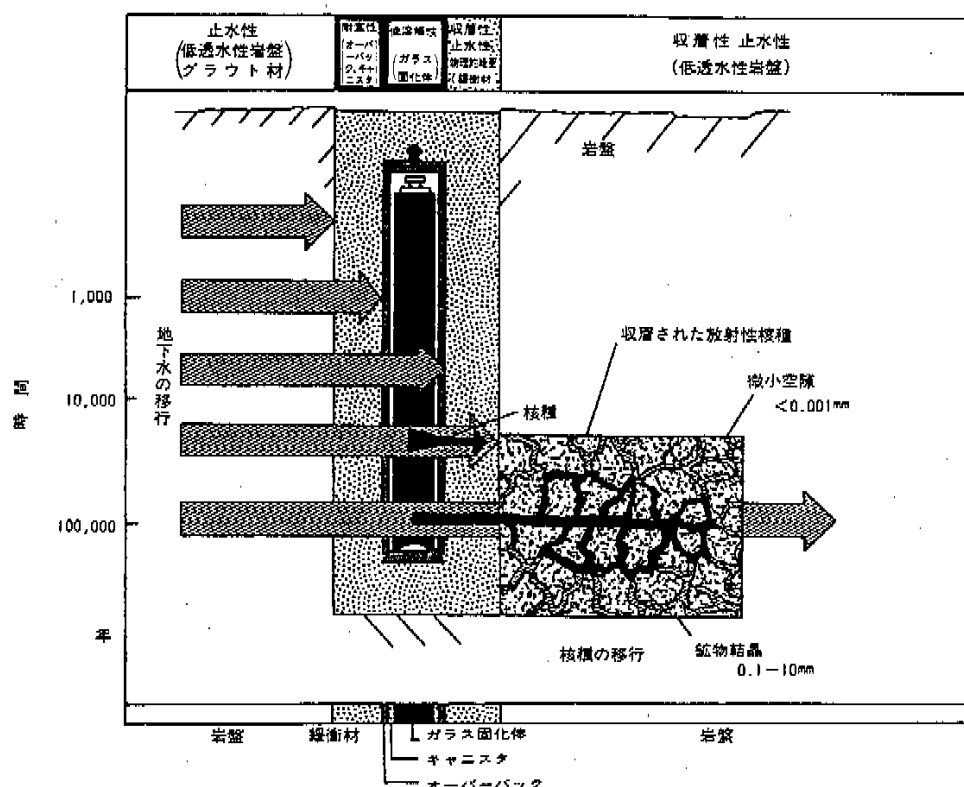


図4 処分システムの隔離シナリオ

については、鋳鉄、銅、チタン、ステンレス鋼等各種の材料が検討されている。

(3) 緩衝材

固化体容器を地下の岩盤中の処分孔に設置する際、固化体容器と処分孔の間の空間には、緩衝材と呼ばれる材料が充填される。この緩衝材が第3のバリアであり、次のような多重的な機能を果たす。

- ① 岩盤と固化体容器の間を流れる地下水の流れを極力抑制することにより、固化体容器の腐食を抑制する。
- ② 緩衝材を通過する地下水のpH、Eh及び化学成分に緩衝作用を及ぼすことにより、固化体容器の腐食を抑制するとともに、固化体容器内に地下水が侵入し、固化体と接触を開始した後は、核種の固化体からの溶出を抑制する。
- ③ 核種が固化体より漏出した場合には、収容作

用により緩衝材内での移行時間を遅延させる。

④ 処分孔周辺の岩盤の変形によって生じる応力を、自らが塑性変形することにより緩和し、固化体容器及び固化体を物理的に保護する。

⑤ 固化体から発生する熱を周辺岩盤へ効率的に伝播する。

以上のような特性を満たす材料として、多くはベントナイト等の天然の粘土物質を主体としたもの及びセメントが候補材として検討されている。

(4) その他の人工バリア

地層処分場は、立坑、横坑から成るが、所定量の廃棄物の収納が完了した後は、これらのトンネルを図5のように密封することになる。この際、このトンネルが固化体から人間環境へ核種が移行する通路となる可能性がある。この密封に用いられる材料を埋め戻し材と呼んでいる。埋め戻し材の機能は、地下水の流れを抑制することであり、止水性、耐圧性、長期健全性が要求される。候補材料としては、掘削工事より出る土砂、ベントナイトと砂の混合物、セメント等の種々のものが考えられている。

この他にも、地層処分施設周辺の岩盤の透水性を低下させ地下水の浸入を防ぐ方法として、グラウト材と呼ばれる固化材を岩盤中に圧入する場合がある。特性としては低透水性、長期健全性が要求され、セメント、ベントナイト等をベースとした材料が種々検討されている。

3.2 天然バリア

人工バリアの外側から、地上の人間環境との間には、厚い天然の地層（岩盤）が介在しており、この第5のバリアは天然バリアと呼ばれている。別の言葉でいうと、「水理地質環境中の核種の生物圏への輸送を制限することにより、密封と隔離をもたらす、かつ将来の人間の干渉を最小限にとどめる物質（地層）」（米国エネルギー省）⁹⁾ということになる。天然バリアの機能は、大きく分けて2つに分類される。

(1) 第1には、透水性、動水勾配の小さい地層と地域を選ぶことにより、核種の運び手である地下水の流量及び流速を制限することができる。これにより、固化体から核種の浸出を浸出率律速ではなく、溶解度律速にすることが可能となる。いいかえると、地下水の動きが遅ければ地下水が飽和してしまい、それ以上核種が溶けないということである。また、それに加え核種を含んだ地下水が人間環境に到達するまでに十分な時間を確保できることとなる。

(2) 第2の機能は、地層自身が核種を岩石中に捕捉することにより、地下水の動きに対して核種の移行を遅らせることである。このことは、井戸水が自然

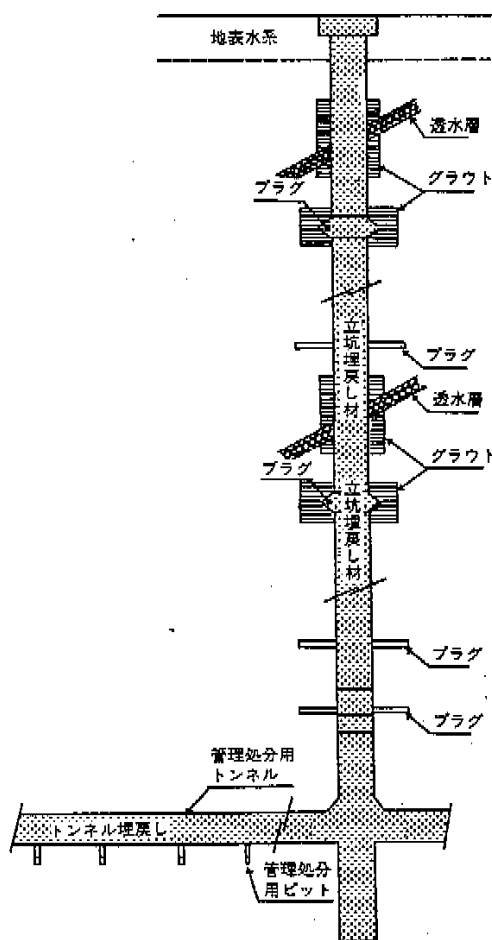


図5 坑道の充填・密封の一例

浄化作用により飲料水になっているように、地層には地下の水の中の混入物を除去する自然浄化作用を有していることから、我々も経験的に認識していることである。このような、核種が地下水に対して遅れて移行する現象は、総称して「遅延現象」と呼ばれている。この遅延現象は、吸着、沈殿、イオン交換、マトリックス拡散等のプロセスの結果を総称的にいう場合用いられる。具体的に、個々のプロセスは、次のような機構で核種に対する遅延に寄与している。

- ① 吸着：地下水中に存在する核種が、岩石の表面（微小割れ目の面）及び鉱物結晶の内部に捕捉される。
- ② 沈殿：地下水中の核種の溶解度が温度変化等に伴い変化することにより、地下水中に溶解していた核種が沈殿する。
- ③ イオン交換：イオン状態にある核種が、イオン化傾向のより高い元素を含む岩石と接触すると、イオン化傾向のより高い元素が地下水中に溶解し、核種は岩石中に析出する。
- ④ マトリックス拡散：地下水のような媒質内での分子は不規則な運動をしているため、濃度の高い領域から低い領域への溶質の移動が起こる。地質環境においては、岩石中の結晶間の微小な空隙中の地下水を通じて拡散が生じる。このことをマトリックス拡散と呼んでいる。マトリックス拡散が大きいほど核種は地下水の移動部から岩盤中の停滞した地下水または間隙水へ奥深く取り込まれることとなる。

表2

地層処分施設	地上施設	地上受入設備
		機械倉庫
		管理棟
	地下施設	立坑 坑底施設 主要トンネル 処分トンネル 処分ピット
機器設備		運搬格納設備
		通気設備
		排水設備
		放射線防護等の安全関連設備
		架空電設備

(3) 以上の機能の他にも忘れてならないのは、長期間におたる侵食作用、隕石の落下等による物理的衝撃、さらには人間の接近から、地層自身の厚さにより防護するという機能も果たしている。

このような機能が天然バリアに要求されるわけであるが、具体的には、OECD/NEAで地層処分の対象岩種としては①花崗岩類(及び変成岩類)、②凝灰岩、③粘土質岩(泥質岩)、④玄武岩、⑤岩塩層を挙げている¹⁾。我が国においては、岩塩層は分布しないので対象外であるが、未固結岩等の明らかに特性の劣るものを除いて、すべての岩種が対象となりうるものと考えられている²⁾。

3.3 地層処分場を構成する施設

地層処分場を施設としての観点からみると、表2、図6に示すように地層処分に適した特性を備えた地質環境に計画された一定面積を有する敷地(サイト)と、そのサイト内の地質環境に適合するよう設計、建設された地下施設、操業(運転・運営)時に廃棄物を受け入れたり、収納するための地上施設及び機器設備類から構成される。

地層処分施設では、3.1、3.2で述べた主として閉鎖後の隔離機能に加え、操業時において、例えば図7のように高レベル放射性廃棄物の受け入れ、搬入及び処分孔への収納(定置、埋設)等の作業が安全に、かつ効率的に行われる必要がある。

(1) 地上施設

地上施設は、高レベル放射性廃棄物の受け入れ、検査、記録、保管等を行う施設である。その設計及び建設は、放射性物質を取り扱う施設の安全性に関する諸基準に合致する必要がある。

(2) 地下施設

地下施設は、高レベル放射性廃棄物が収納される処分孔及びそこに至る立坑、主要トンネル、処分トンネル等から成り、地下施設及び空洞等には、地圧、地震に耐えられることをはじめ、長期的な健全性と信頼性が要求される。

また、地下施設の設計に際しては、高レベル放射性廃棄物が発熱し、高放射能を有することを考慮した処分孔の配列にするとともに、地下水の影響を最小限にするための止水対策等を考慮する必要がある。

(3) 機器設備

機器設備は、主として高レベル放射性廃棄物の搬送を行うためのキャニスター台車、立坑エレベーター等の設備、処分孔に定置し、緩衝材を周囲に充填する機器、換気・排水設備、監視(モニタリング)設備等から成る。

このうち、監視設備については、万一放射性物質

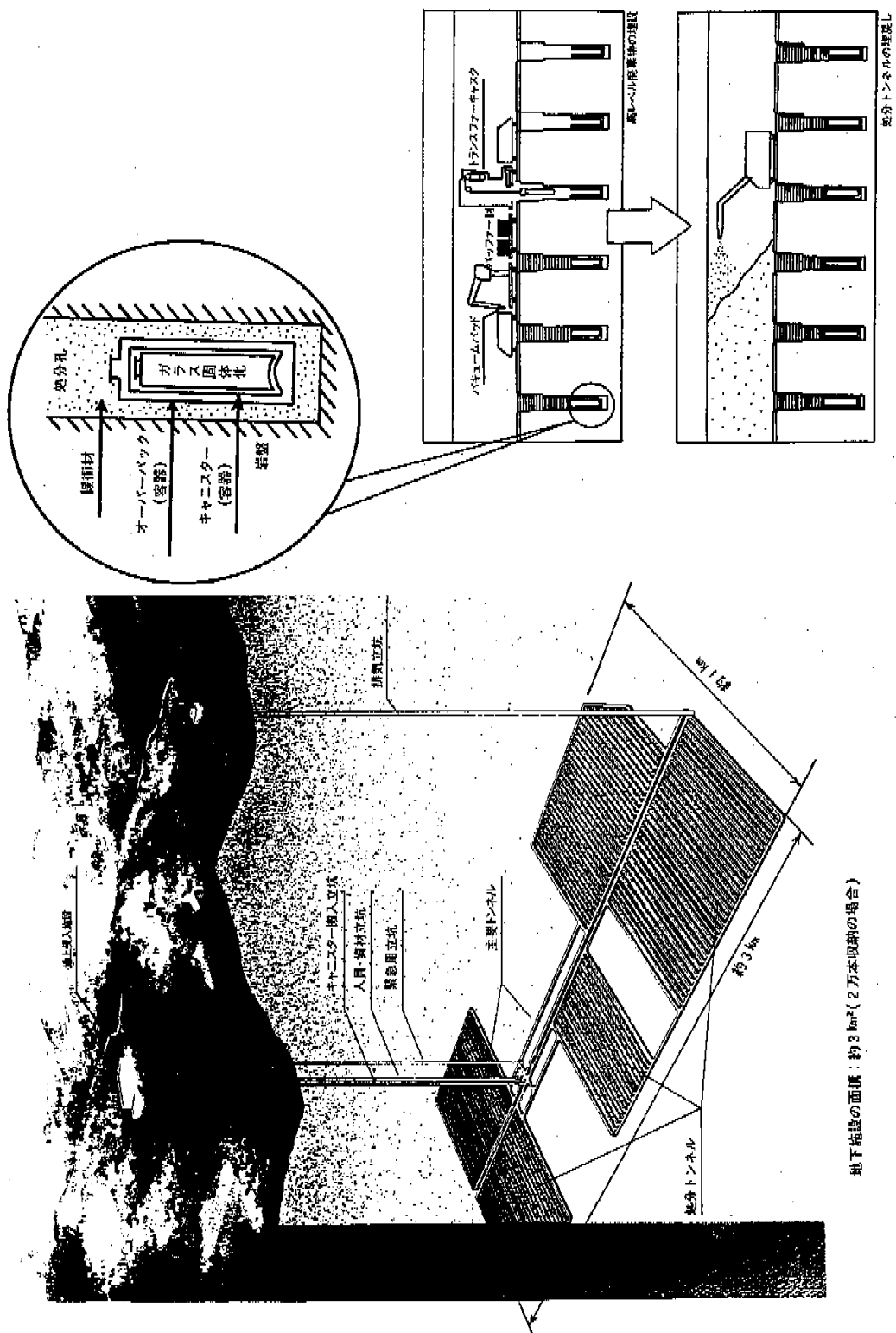


図6 地層処分場概念の一例

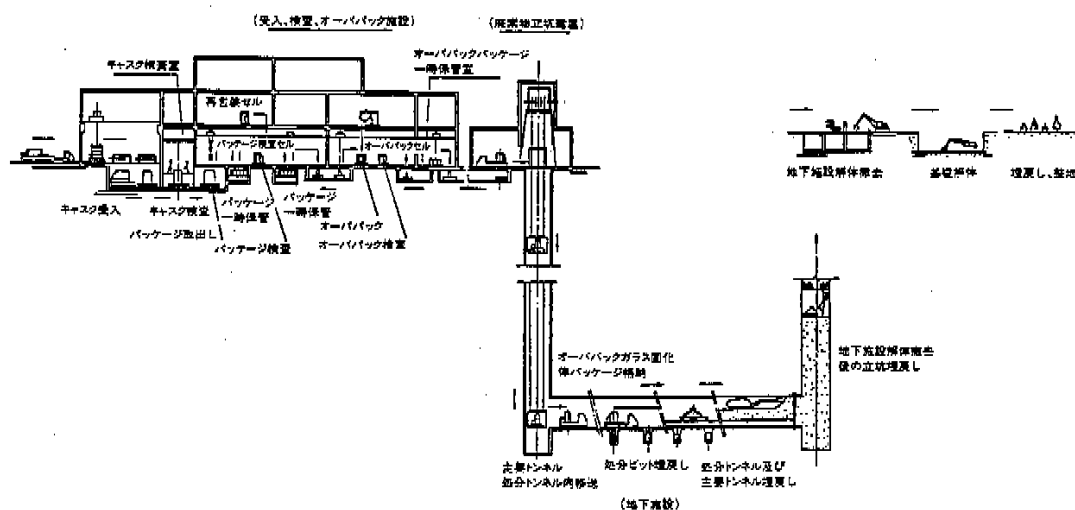


図7 処分プロセス及び処分場閉鎖に至るフローの概念図

が漏出した場合適切に対応できるような系統的監視システムが必要とされるほか、地層処分独特の機能として天然バリア及び人工バリアが高レベル放射性廃棄物の固化体の収納後どのような影響を受けるか監視し、地層処分システムの性能全体が当初予測したものと異なることを明らかにすることにより、最終的に処分データを提供することが要求される。

3.4 閉鎖

綿密に計画された監視設備により得られたデータを基に、これらを科学的に評価し、閉鎖時期が決定され、万全な方法で確実な閉鎖作業が展開されることとなる。

閉鎖作業は、次のようなステップで進められるものと考えられている。

- ① まず、処分ビットをベントナイト等の充填材で密閉する。
- ② 処分トンネルの埋め戻しが完了した後、坑底の運搬坑道、立坑の順で埋め戻す。埋め戻しには、低透水性、長期耐久性、機械的強度を有する充填材が用いられる。立坑については、内部の機器・設備を撤去し、地下水の通路となりそうな区間にはプラグと呼ばれる栓をしたり、グラウトを行って岩盤の補強をし、埋め戻した後坑口を密封する。
- ③ 地上施設を解体・撤去し、地表を元の状態に復元する。
- ④ 処分場の閉鎖後については、原則として人間による積極的な管理は行わないことになるので、後世の人々が地下深部に侵入して地層処分システ

ムを破壊しないようにすることが必要となる。そのための措置として、処分場の正確な位置を示すデータ、処分場の規模に関するデータ、操業データ、地層及び地表に関するデータ、高レベル放射性廃棄物に関するデータを正確に記録し保存すること、及び処分場の位置に標識を設けることが考えられている。

処分場の建設開始から閉鎖までのスケジュールについては、閉鎖時の手続きにどの位の期間が必要かによるが、およそ次のように考えられている。

まず、建設開始から最初の固化体の搬入までは、アメリカにおいては約5年間が見込まれている⁹⁾。しかし、この時点では地下施設の一部が完成した段階であり、建設が終了するまでの期間は、搬入と建設が並行して進められることとなる。スイスにおいては、建設期間として15年間を見込んでいる⁹⁾。

さらにアメリカにおいては、高レベル放射性廃棄物の搬入・収納が開始されてから50年間は処分場のすべての性能が十分かつ予測通り安全に機能していることが立証されるまでは、再取り出しが可能という設計することが定められている⁹⁾。

したがって、処分場の建設から閉鎖までは、少なくとも数10年間の期間が必要と考えられている。

4. 我が国の処分方策と動燃事業団における地層処分研究開発

4.1 国の方針

我が国における高レベル放射性廃棄物の最終的な処分方策については、原子力委員会が昭和62年6月

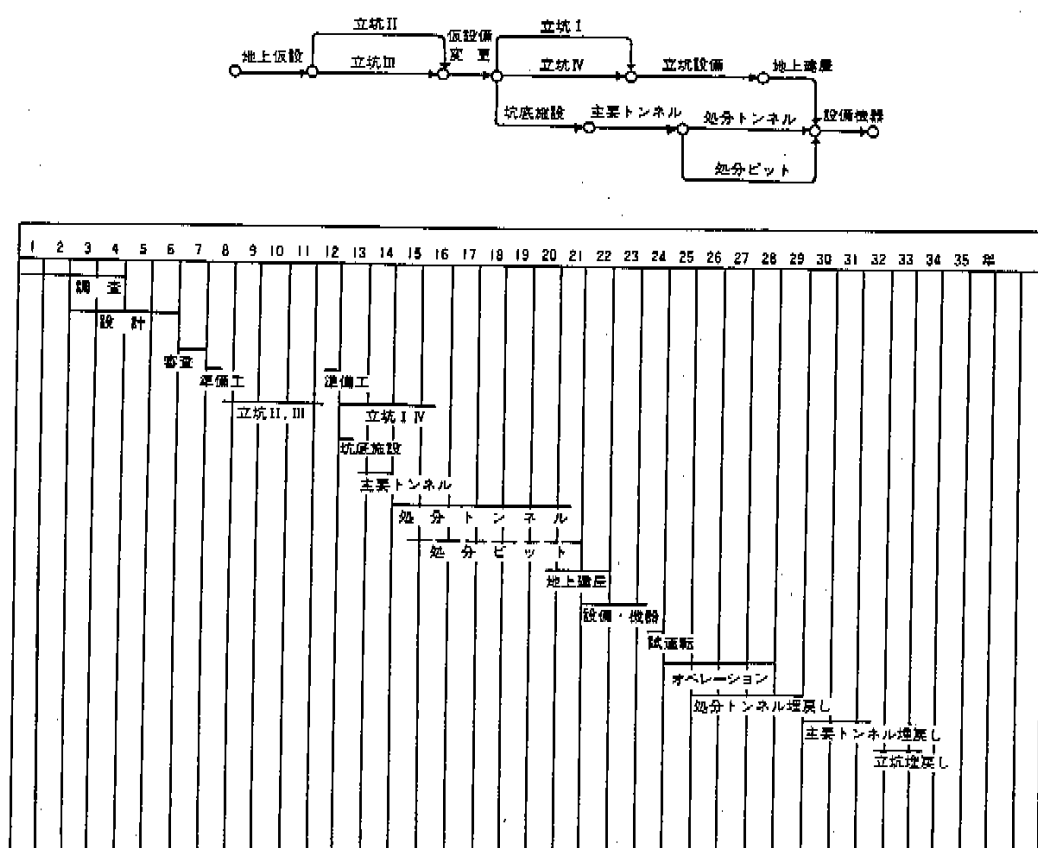


図8 地層処分施設の調査・設計・建設・運転のスケジュールの一例

にとりまとめた「原子力開発利用長期計画」⁹⁾において、「再処理施設において使用済燃料から分離される高レベル放射性廃棄物は、安定な形態に固化した後、30年間から50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下数100メートルより深い地層中に処分する(以下「地層処分」という)ことを基本的な方針とする」とされている。また、同報告書においては、地層処分に至る全体の流れとして、これまでの「有効な地層の選定」(第1段階)の成果を踏まえ、今後、第2段階：処分予定地の選定
第3段階：処分予定地における処分技術の実証
第4段階：処分施設の建設・操業・閉鎖
という段階を踏んで処分の実施に至るというステップが示されている。

この考え方は、第2段階及び第3段階は研究開発の段階であり、第4段階に至って初めて実固化体の試験的処분이開始され、安全性を確認しつつ本格的処分に移行するというものである。

さらに、同報告書においては、「高レベル放射性廃棄物の処分が適切かつ確実に行われることに関して

は、国が責任を負うこととし、この一環として、国は今後の研究開発及び調査の進展状況を見極めた上で、処分事業の実施主体を適切な時期に具体的に決定することとする」とし、当面の第2段階の役割分担を以下のように定めている。すなわち、第2段階におけるテーマとして

- ① 地層処分技術の確立を目指した研究開発
- ② 地質環境等の適性を評価するための調査
- ③ 処分予定地の選定

の3つを掲げ、①については、動燃事業団を中核推進機関とし、日本原子力研究所、地質調査所等との適切な役割分担の下に推進するよう定め、②については動燃事業団が実施するよう定めている。③については処分事業の実施主体が行うこととし、選定の結果は、国が所要の評価等を行って、その妥当性を確認することとしている。

一方、地層処分の安全研究の進め方については、原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会が、「高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画」(昭和61～65年)を昭和60年8月にまとめており、その第

1 回見直し昭和62年8月に行われている。

このような原子力委員会及び原子力安全委員会の基本的な方針に沿って、現在、動燃、原研等において第2段階の地層処分の研究開発が進められている。

4.2 地層処分研究開発の特徴

地層処分の研究開発の特徴を考える場合、他の原子力施設と異なり、その機能を数1,000年以上の超長期間にわたって立証する必要があるということがまず第1に挙げられる。さらに、そのような超長期間にわたる機能を工学的に担保するのみでなく、天然の地層の特性を利用して担保するため、複雑な天然の現象を基礎的領域まで踏み込んで解明していく必要があるという点が挙げられる。したがって、他の原子力施設のように、人間が実感として体験できる期間内に、その機能を実際に確認することができないため、科学的にいかにその機能を立証するかに世界各国において多大な努力が払われている。

第1の特徴である長期的な機能の立証は、「性能評価」という方法において間接的に行われる。性能評価とは、地層処分システムの各機能の挙動をモデル化し、全体機能を超長期的に予測しようとするものである。信頼性の高い性能評価の開発は、各国共通の重要なテーマであり、いくつかの国際協力プログラムが運営されている。例えば、OECD/NEAにおけるHYDROCOIN（地下水流モデルの開発）、INTRACOIN（地層中核種移行モデル国際比較研究）が挙げられる。

第2の点については、地層処分の研究開発は、1980年代に入り従来行われてきた理論的、実験室的研究に加えて実際の地下深部における研究（原位置試験）が開始され、より実証的かつ工学的な研究が行われつつある。原位置試験は、今や室内実験と相まって地層処分研究開発の両輪ともいえる重要な位置を占めると考えられている。つまり、室内試験は条件をコントロールし、現象を単純化することにより現象を明らかにすることに有効であり、原位置試験は、実際の条件を室内実験に提供するとともに、実験室で予測された結果を複合条件下で確認する上で必要であり、さらに長期間のうちにおける腐食など、室内の加速試験では再現できない現象を抽出する上で必要と考えられている。このような考えに立ち、1980年にOECDは、スウェーデンのストリバ鉱山における国際共同プロジェクトを発足させ、現在1991年までの予定で第3フェーズの研究が進められている。

さらに、地層処分の研究開発の特徴として重要な概念は、「Iterative Process」（反復プロセス）とい

う概念である。これはどういうことかということ、地層処分システムを考える際には、地層処分システムは人工バリアと天然バリアが一体として機能するものであるため、個々の要素をバラバラに考えるのではなく、全体の機能で評価（システム評価）しなさいということである。その結果、1ヶ所が変わると他へ波及することになるので、絶えず全体を検討する必要があるということの意味している。したがって、国際的に見ると、例えば地層の透水係数や動水勾配といった個々の特性の下限値を定めるということは行われていない。その点、個々の設計を決めていく他の原子力施設とは異なるところである。

4.3 動燃事業団における地層処分研究開発

(1) 我が国の自然的特徴

地層処分は他の原子力施設と異なり、工学的な構造物を作るのみでなく、自然の地層のもつ特性を利用した技術であるため、その国の地質特性等の自然的条件に適合したものでなければならない。したがって、我が国の自然的条件を十分理解し、技術開発を進めることが必要となる。地層処分の観点から、我が国の自然的条件を考えるとおよそ次のようにまとめられる。

① 日本列島は変動帯に位置し、断層、褶曲等が多く地質構造が複雑である。また、地質時代における火成活動の場が様々に変化している。このため、岩石の種類は多いが、単一の岩種から成る岩体の規模は小さい。また、火山活動、活断層、地震等の地殻変動が安定地塊に位置する国に比較して激しい。

② 深部地下においては、地下水の動きは小さいと考えられる。しかし地表付近、特に山地においては、割れ目が開放されていたり、動水勾配が大きいことにより、地下水の動きが比較的速い可能性がある。また、温帯に位置し比較的降水量が多いため、地下への地下水の涵養量もこれに伴い多いと考えられる。

(2) 我が国における地層処分システムの性能目標

そこで、動燃事業団では研究開発の実施に当たり、我が国の自然的特徴等を考慮し、性能目標（開発目標）を以下のように設定している。

1) 処分場閉鎖前（操業・監視期間）

① 空洞を含む処分場の運転・監視機能が閉鎖までの間確実に保持できること。

② さらに、操業・監視期間中に生じうる各種事故を想定した各種バックアップシステムを有すること。

2) 処分場閉鎖後

- ① 人工バリアによって、放射能が高い期間である閉鎖後約1,000年の間、放射性核種の密封が保証できること。
- ② 我が国の自然的特徴を踏まえ、その補完として、より強力な人工バリアシステムの開発を積極的に進め、密封期間をできるだけ長くすること。
- ③ ガラス固体からの核種の漏洩が起こったとしても、その量はできる限り低いレベルにおさえられること。
- ④ 処分場から人間環境までの地下水の移行時間を十分確保できること。
- ⑤ 地層が十分な核種保持機能（遅延機能）を有すること。
- ⑥ 地震等の地殻変動によって地質環境の隔離性能が影響を受けないこと。

(3) 研究開発項目

1) 人工バリア

① 廃棄物固化体

廃棄物固化体については、長期間化学的に安定であり、耐放射線性、耐熱性等に優れ、世界的にも有望視されており、固化技術についても工学的にはほぼ実用段階にあるホウケイ酸ガラスを対象とし、深部地質環境下における長期的特性の評価を行っている。

このため、天然バリアの研究から得られる深部地質環境の地球化学特性データを基に、これに類似したEh、pH、溶存イオン量等の条件を整備し、室内実験（コールド試験、ホット試験）を通じ、その溶解メカニズムの解明と現象のモデル化を行っている。また、これと並行して、原位置において埋設試験（常温状態、加熱状態）を行い、ホウケイ酸ガラスの浸出率、表面変状等を定期的に調査することにより、モデルから予測された結果の妥当性を確認すべく試験を実施している。

さらに、長期的物性の予測をさらに向上させるため、火山ガラス等の天然の類似物（ナチュラール・アナログ）を用い、数1,000年以上にわたる実際のガラスの超長期的挙動と、室内実験等によって現象をモデル化した結果との比較を行い、モデルを確認すべく研究を進めている。

② 固体化容器（キャニスター、オーバーバック）

キャニスター材については、動燃仕様、海外返還固体化ともステンレス系の素材が採用されている。

しかし、キャニスター材については、長期的隔離の安全評価上、これ自身に核種の隔離機能を期待する役割は大きくはないので、室内溶解試験、原位置埋設試験において、核種の移行過程におけ

る化学的雰囲気への影響因子として評価を行っている。

オーバーバック材については、従来の鉄、銅、チタン合金に加え、我が国の自然的条件を考慮し、高耐食性オーバーバック材として、セラミック材も検討の対象としている。

これらの材料については、長期的特性を評価するため、 γ 線照射試験を含む室内実験を実施し、耐腐食性を評価してモデル化を図るとともに、原位置埋設試験（常温状態、加熱状態）を単独系及びキャニスター材、緩衝材との共存系について実施し、モデルの確認を行って最終的に候補材を選定することになっている。

また、セラミック材については、その材料及び加工技術がまだ確立されていないため、製作・施工技術の開発を行っている。

さらに、長期的特性の予測モデルを確認する意味において、天然の類似物（ナチュラール・アナログ）を用いた研究として鉄器、銅器等の考古学的金属出土品及び鉱山等で使用された金属材料を対象とし、長期間にわたる腐食特性について調査を行っている。

③ 緩衝材

緩衝材については、検討対象として、ベントナイト及びセメントの2種類を考えている。

これらの材料について、熱的、力学的、水理的特性について室内試験を実施するほか、原位置において埋設試験（定温条件、加熱条件）を実施し、将来的には実規模で実施する予定である。また、熱的、力学的特性に加え、地球化学的な特性（核種移行の遅延特性）が重要となるので、TRU元素、ヨウ素、テクネチウム等の長半減期核種を対象とした室内ホット試験を実施し、各材料中の拡散特性／吸着特性を評価している。

ベントナイトの長期安定性については、ベントナイトの主成分鉱物であるス멕タイトが、一定以上の温度に達するとイライトに変化する現象を調査している。緩衝材中の核種の長期的遅延特性については、ウラン鉱床中に存在するモンモリロナイト（粘土鉱物の1種で、ベントナイトの構成鉱物）から成る断層粘土と核種が接触する部分を調査し、核種のモンモリロナイトに対する分配係数・拡散係数を測定している。また、セメントについては、天然材料とは異なることから、その長期安定性について検証する必要があり、ナチュラール・アナログとして、セメントによる人工構造物やセメントに近い組成を持つ天然の鉱物を利用し、その化学的耐久性について評価している。

また、現在有力な緩衝材の候補として考えられているベントナイトは、陰イオン（ヨウ素、テクネチウム等）に対する吸着性が無いことから、これらの核種に対する隔離機能を補うため、高性能緩衝材の開発を行う。

④ その他の人工バリア

埋め戻し材については、使用する材料が大量に必要とされるので、経済的観点も考慮し、止水性、耐圧性、長期健全性に優れた掘削土の最適混合比について研究を行っている。今後、さらに選定された材料を用い、実験室規模の後に実規模で試験を行って技術の実証を図る。

グラウト技術については、室内試験による候補材の物性、施工性の調査に基づき材料選定を行っている。今後、我が国の地質特性に適合した注入工法及び非破壊検査手法を開発し、これらの技術を原位置実規模試験により実証する。

2) 天然バリア

天然バリア研究については、核種の移行を直接的に規制する水理特性、化学特性が第1の研究開発項目となる。次いで、これらの特性の長期的予測を、天然の類似物（ナチュラ・アナログ）を利用して検証することが第2の大きな研究テーマとなっている。第3のテーマとしては、処分場の建設、廃棄物の定置による温度上昇、地震等が、地層の主として水理特性及び化学特性といった核

種の隔離機能に与える影響を研究する分野がある。

これらの研究を進めるに当たり、次の2点に留意して研究開発を進めている。

第1には、第1段階の結論として、未固結岩等の明らかに適性の劣るものは別として、岩石の種類を特定することなく、むしろ広く考えるものとされており、多種多様の岩石について調査する必要がある。この際、多種多様の個々の岩石毎に調査を行うのではなく、特に岩石の水理特性に着目し、新第三紀の泥岩、凝灰岩に代表されるような、均質に岩石中を地下水が移動すると考えられる堆積岩系と、主として花崗岩に代表される、地下水が岩石中の割れ目を伝って移動すると考えられる結晶質岩に大別して研究開発を進めている。

第2には、地層処分とは、地下数100メートル以上の深部地下を利用する技術であるため、そこでのデータが不可欠であり、深部地下での原位置試験が必要となる。この点については、世界各国が共通した認識に立っており、動燃事業団としても原位置試験を研究開発の1つの大きな柱と考えている。

以上の留意点を踏まえた研究開発の概念を以下に述べる。

① 水理・化学的特性

水理特性については、測定技術の開発と個々の測定から岩盤全体の特性を求めるためのソフトウ

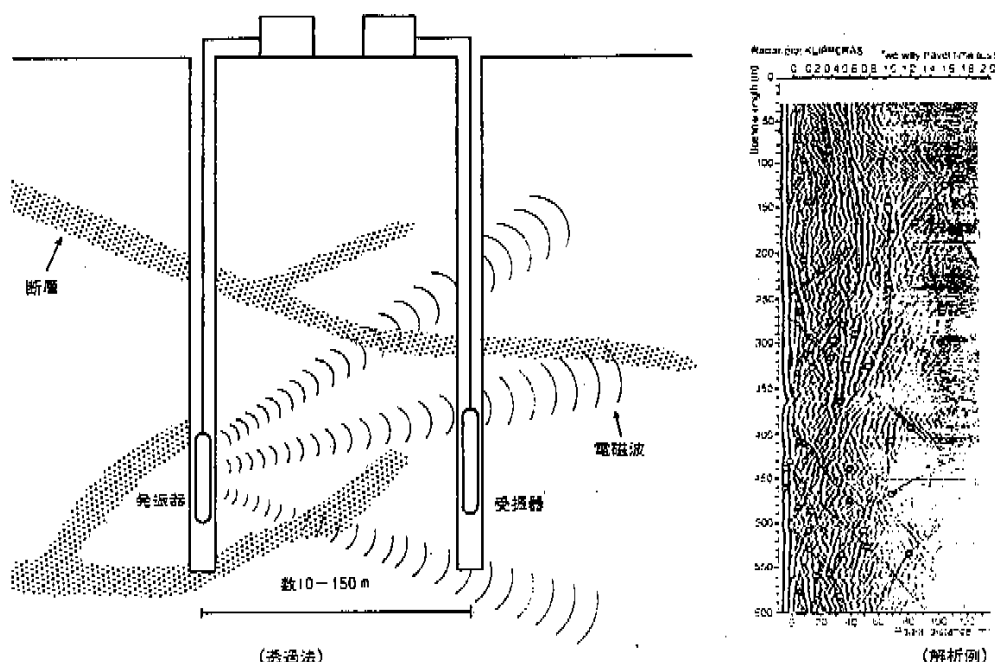


図9 クロスホールレーダー法と解析例

エアの開発及び物理検層、クロスホール技術(図9)を駆使した岩盤の割れ目・物性の調査技術の開発(サイト特性調査技術開発)を行い、次いで原位置(試錐孔)において、水理特性(透水係数等)及び割れ目分布を測定し、両者の関連を研究して水理特性、割れ目分布を基に水理モデルを作成している。

化学特性については、核種の遅延、熱力学データを収集するとともに、室内試験(ホット)において核種収着に関するデータを蓄積している。また、地下水中の溶存物質、地下水の酸化還元電位、pH、温度等の我が国の地下水についての基礎的データを収集するとともに、これと割れ目充填鉱物との関係について研究している。

② ナチュラル・アナログ研究

天然バリアに関するナチュラル・アナログ研究においては、ウラン鉱床を利用し、図10のようにTRU核種の地層中における超長期的挙動を評価すると同時に、その周囲の環境条件である地下水の地球化学的特性と地質特性を解明すべく研究を行っている。具体的には、鉱床と地下水中の核種の濃度を比較し、天然環境下での遅延係数を推定している。さらに鉱床・地下水中のウラン系核種の形態(コロイド特性、化学形、産状等)を調査し、核種の移行のメカニズムを解明して移行モデルに反映させる予定である。

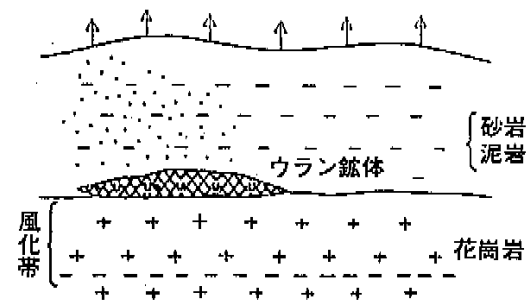
③ 処分場建設、廃棄物定置、地震等の影響

処分場建設による影響については、岩盤を掘削すると、空洞周辺の岩盤の応力が解放されることにより、割れ目が開口もしくは発達したり、応力の再配分が起き、新しい割れ目が発生したりする。この場合、空洞周辺の岩盤の透水性が高まり、閉鎖後において新たな地下水の通路を形成する可能性がある。このため、岩盤をなるべく傷めないスームスプラスティング、機械式掘削等の最適な掘削方法の開発を行っている。

廃棄物定置による影響としては、第1に固化体の発生する熱により、周辺の岩体の強度、間隙率、透水性が変化する可能性が変化する可能性がある。第2には、固化体が発する放射線による影響、特に地下水が分解され地下水の化学的特性が変化する可能性についても考慮する必要がある。したがって、これらの特性について研究するとともに、これらの現象を考慮した地層処分システムの設計を行う。

地震による影響については、空洞の安定性に与える影響と、地下水の地球化学的特性に与える影響の2つの観点がある。空洞の安定性については、

鉱床の生成



鉱床の移動・保存

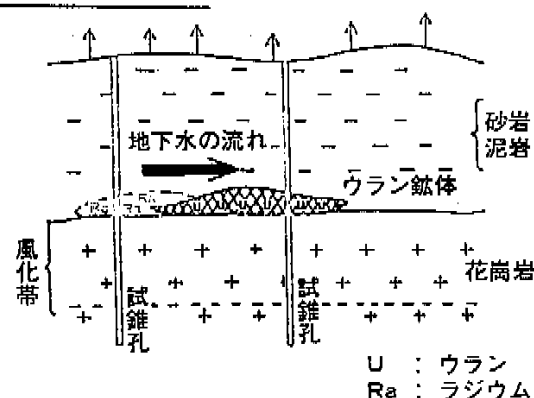


図10 ウラン鉱床のナチュラル・アナログ概念図

北伊豆地震(1930年)の丹那トンネルや伊豆大島近海地震(1978年)の伊豆急行相取トンネルの例に見られるように、断層でずれたところ以外はトンネル自体健全であり、地震動そのものによる崩壊は起こっていない。したがって、短期的には地震動自体による地下施設への被害が発生する恐れは小さいが、長期的観点に立つての評価が必要となる。地下水の地球化学的特性への影響については、今後の検討課題であるが、大地震の発生前には、ラドン、水素等の溶存ガスの濃度変動するという報告¹⁰⁾もあり、この点について調査する必要がある。

3) 処分上の設計研究

地層処分場は、地下数100メートルの深さに、総延長100km以上のトンネル群を掘削して建設される。このような施設は、一部鉱山には見られるが一般土木施設としては経験がない。また、高度の安全性を要求されるので、従来の土木工学のように経験的に得られた安全率に基づく設計だけでは不十分であり、個々のメカニズムの理解に立つ

た設計が必要となる。このため、以下のような技術開発を行っている。

① 設計条件の影響評価

当面の第2段階前半は、サイトが決まらない段階における一般的条件（サイト・ジェネリック）下での設計が必要とされる。したがって、設計条件の変動が設計体系全般に与える影響について検討し、コスト面も考慮したクリティカル・パスを明らかにし、最適化すべき設計項目を明確にする。

② 要素設計の高度化

処分場を構成する各要素の設計で、以下の項目について、現象の解明、基礎的データの取得をも含む設計の高度化を図る。

- ・空洞安定解析手法
- ・耐震解析手法
- ・熱解析手法（図11）
- ・ニアフィールド**における地下水流動解析手法
- ・水理-熱-応力連成解析手法

③ 設計手法のシステム化

研究開発の進展によるデータの質的・量的変化に効率的に対応できるようCADシステムの整備を図るとともに、次々と蓄積されるデータを効率的に出し入れできるよう設計用データベースの整備を図る。

④ ハンドリングシステムの開発

廃棄物の処分量や固化体容器の形態に見合ったハンドリングシステムの検討を行うとともに、異常時も考慮した、プラントの安全性をバックアップする自律運転システムの開発を行う。

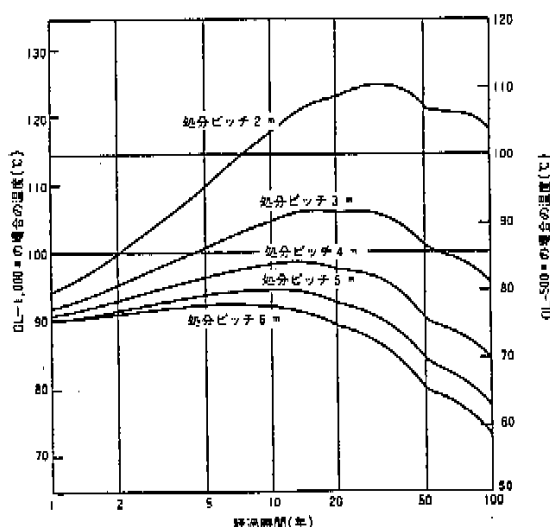


図11 パッケージ表面温度の経時変化

⑤ モニタリングシステムの開発

処分場の建設・操業時におけるモニタリングの方法や範囲について、閉鎖時における許認可等の概念の整理の上に立って検討し、耐久性等を考慮しつつ、所要の機器の開発、保守技術の開発を行う。

4) 性能評価研究

性能評価研究は、シナリオ解析と影響評価とに大別され、各々について研究を進めている。

① シナリオ解析では、処分場からの核種漏洩に係わるすべての事象をリストアップし、天然事象に起因するもの（隕石落下、火山噴火等）、人間活動に起因するもの（探鉱ボーリング等）、廃棄物及び処分施設における諸事象（キャニスターの破損等）の3つのカテゴリー毎に分類したカタログを作るとともに、各々のシナリオの発生確率を評価する。

② 影響評価では、各漏洩シナリオに基づきその影響を評価する。漏洩シナリオの中で最も重要なのは、地下水浸入シナリオ（図12）と考えられているので⁷⁾評価モデルを開発する。この際、ニアフィールド現象の評価には、オーバーバックの腐食モデル、ガラス溶解モデル、緩衝材中の核種移

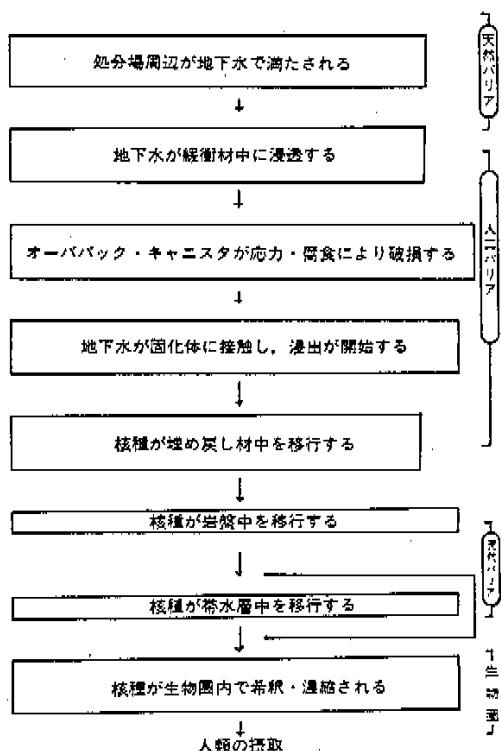


図12 地下水浸入シナリオにおける研究項目

行モデル等人工バリアの機能に係わるモデルと、その機能に影響する諸条件のモデル、すなわち放射線分解、気体発生の影響、ニアフィールドの地球化学現象、コロイドの影響等に分けてそれぞれモデル化する。ファーフールド現象の評価には、堆積岩系、結晶質岩系の各々について地下水流動モデル、核種移行モデルを開発するとともに、ファーフールドの地球化学的現象、コロイドの挙動評価、気体発生による影響についてのモデル化を行う。

③ 性能評価モデルについては、その整備を行うと同時にシミュレーションモデルとして拡充する。また、決定論的モデルでは表現できない現象や過程については、不確実性解析を行う。

さらに、統計的評価手法の開発を行い、サンプリング法の研究、パラメータの従属性に関する評価を行うとともに、パラメータの確率分布データの整備を行う。

4.4 動燃事業団におけるこれまでの研究成果

(1) ガラス固化体特性評価研究

処分環境下における、ガラス固化体の安定性及び核種保持性能を評価するための各種試験が実施されている。模擬ガラス固化体を用いた試験では、各種岩石、緩衝材、固化体容器材料が共存する系において、固化体の浸出率、成分元素溶解度等の評価が行われている。その結果、模擬地下水中や岩石が共存する系では、ガラスの浸出が抑制されること、ベントナイト等の緩衝材は、固化体に接する水の量を制限するため浸出率を低く抑える効果があること等が明らかになった。

(2) オーバーバック材料に関する研究

鉄、銅、チタン、クロム、ニッケル等の金属材料について緩衝材（ベントナイト）共存下を中心に腐食挙動評価試験が実施されている。このうち鉄については、通常の酸素消費型の全面腐食が起り、酸素の供給が律速となることが判明した。また、局部腐食が問題となるチタンについては、緩衝材との間のすき間腐食の発生条件を電気化学的に評価する方法の検討が行われ、その発生電位の測定に成功した。

(3) 緩衝材中の TRU 核種挙動試験

TRU 核種の拡散・吸着特性を評価し、緩衝材の核種隔離機能を評価するため、Np、Am 等の核種について、Na-ベントナイト（アルカリ性カラム）、H-ベントナイト（アルカリ性カラム、酸性カラム）中の挙動に関する試験を実施した。その結果、緩衝材の核種隔離機能は、化学的環境条件（酸化還元ポテンシャル等）に影響され、Np と Am については、酸

性雰囲気になるほど移行しやすいことが明らかとなった。

(4) 岩石と核種の相互作用に関する研究

天然バリアの核種隔離機能のうち、重要な機能の1つである岩石の遅延機能を評価することを目的として、

- ① 地層による長期隔離の地球化学的機構の解明
- ② それに必要な室内・野外の試験方法の確立に関する研究

を以下の核種と鉱物試料について行った。

・評価した核種：Sr、Cs、Eu、Th、Pa、U、Np、Pu、Am、Tc

・用いた鉱物試料：花崗岩、凝灰岩、粘土鉱物（スメクタイト、緑泥石、カオリナイト、セリサイト、ハロイサイト）

これまでに得られた結果は、以下の通りである。

- ① Sr と Cs については、陽イオン交換容量（CEC）の小さい岩石や鉱物ほど分配係数（Kd 値）の変動の幅が大きくなるが、CEC の大きい岩石や鉱物は、ある程度まで Kd の値は増大するがその後一定となる。これらの評価手法により、未知の岩石があっても CEC がわかれば、Cs や Sr の Kd の値、さらに濃度による変動の範囲もある程度予測可能となった。
- ② 花崗岩の場合、鉱物組織が変わっても Kd 値はあまり変化もなく、表面積の大小によって Kd 値が変化することが明らかとなった。
- ③ Kd 値と pH 依存性については、核種の化学形に支配されるので、化学形の吸着過程が重要であることが判明した。
- ④ Kd 値と温度依存性については、一般に温度の上昇とともに増大することが明らかとなった。
- ⑤ 溶液中の Np は、2 種以上の化学形で存在し、それぞれの化学形の吸着特性が異なることが明らかとなった。
- ⑥ 岩種及び pH のいずれの組合せにおいても Am の Kd が Np や Pa に比べて大きい。また、鉄イオンの共存による Kd への影響が重要であることが明らかとなった。

(5) 東濃ウラン鉱床におけるナチュラル・アナログの研究

本研究の目的は、ウラン鉱床を利用し、地質環境下での天然核種の移行速度について評価することである。したがって、このために

- ① 核種を運搬する地下水の流動特性、化学組成、物理化学条件を明らかにすること。
- ② ウラン系核種の地層・地下水中における分布、特に放射平衡状態を把握することが重要である。こ

のため、ボーリング調査坑道でのサンプリングが行われた。

これまでに得られた主な結果は、

- ・地下水の流動特性及び溶存成分は、地質構造に対応し区分される。
- ・ウラン鉱床の胚胎層準の地下水中には0.1ppb程度のウランしか溶存しておらず、現在の地下水条件では、ウランはほとんど移動していないものと考えられる。
- ・鉱床内部では、 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 、 ^{210}Pb はほぼ放射平衡を保っており、ウラン鉱床形成後、核種の移動がほとんどなかったことを示唆している。

(6) サイト特性調査機器の開発

サイト特性調査機器として、これまでに岩盤計測機器及び原位置地下水採水器の開発を実施してきた。

前者については、高温条件下でも使用可能な地圧計、ひずみ計、変位計を開発し、細倉鉱山での現場適用試験によって、堆積岩の1種である凝灰岩でその実用性が示され、開発を終了した。

後者は、現在開発中の機器で、原位置の地下水をボーリング孔内で連続的にサンプリングするための採水器と、Eh、pH、温度等を測定するための検層器とからなる。採水器・検層器とも深部地下水の性質を把握する上できわめて重要な機器であるが、地下500m以上の深部で採水・測定を行うために耐圧性が要求される。本装置は、現場試験を実施し、深度150mまでの連続採水が可能であることを確認した。今後さらに改良を行い、500m級の深度下で試験を実施する予定である。

5. あとがき

動燃事業団は、第2段階（処分予定地の選定）の研究開発を進めるに当たり、動燃事業団の最終目標である処分予定候補地の推薦に至る中間段階に、1ステップを設け、地層処分システムの概念設計（処分場の具体的立地地点を定めない段階での設計）を行い、我が国における地層処分システムの基本的な仕様の明確化を図る予定である。地層処分の研究開発は、地質、地震等の基礎的分野から土木、建築等の工学的分野、さらには社会科学までも包含する幅広い視野を持つ研究分野であり、All Japanとしての技術を結集する必要がある。したがって、今後とも各界の御協力をよろしくお願いする次第である。

参考文献

- 1) OECD/NEA (1984) : Geological Disposal of Radioactive Waste; An Overview of the Current Status of Understanding and Development.
- 2) NAS (1983) : A Study of the Isolation System for Geologic Disposal of Radioactive Waste.
- 3) OECD/NEA (1977) : Objectives Concepts and Strategies for the Management of Radioactive Waste Arising from Nuclear power Programmes.
- 4) DOE (1983) : Management of Commercially Generated Radioactive Waste
- 5) DOE (1983) : Mission Plan for the Civilian Radioactive Waste Management Program
- 6) 原子力委員会 (1987) : 原子力開発利用長期計画
- 7) NAGRA (1985) : Projekt Gewähr 1985.
- 8) NRC (1983) : 10CFR 60.
- 9) OECD/NEA (1982) : Geological Disposal of Radioactive Waste — Geochemical Process
- 10) F. R. Gordon (1970) : Bull. Seismol. Soc. Am. 60, 1739.
- 11) SKBF/KBS (1983) : Final Storage of Spent Nuclear Fuel—KBS - 3.