

地質調査所における 高レベル放射性廃棄物地層処分研究の方向

小出 仁¹⁾

1. はじめに

我が国における最近のエネルギー需要の増大傾向から見て、原子力発電への期待は今後ますます大きく、その発電量は著しく増加するであろう。その場合でも、高レベル放射性廃棄物の絶対量は少量に留まることが予想される。しかし、極く少量とはいえ、高レベル放射性廃棄物の特徴は、数千年～数万年以上の長寿命の潜在的有害性を持っていることである。既に高レベル放射性廃棄物は存在し、今後の原子力発電量の増大の程度にかかわらず、高レベル放射性廃棄物への対策は急務といえる。その意味で、本対策は、原子力発電の将来を超越した不可避の課題になっている。

このたび、地質ニュース及び地質調査所月報に、当所における高レベル放射性廃棄物に関する研究報告を特集することになった。本研究報告は、研究段階における個々の研究成果によるものが多い。現在の研究はまだ初期の段階にあるので、各報告に記述された個々の見解は今後の研究の進展によっては、多少変わりうることに御留意いただきたい。また、今回の特集に際し、所内外の方々から直接・間接の御助力や御寄稿をいただいたことに感謝します。

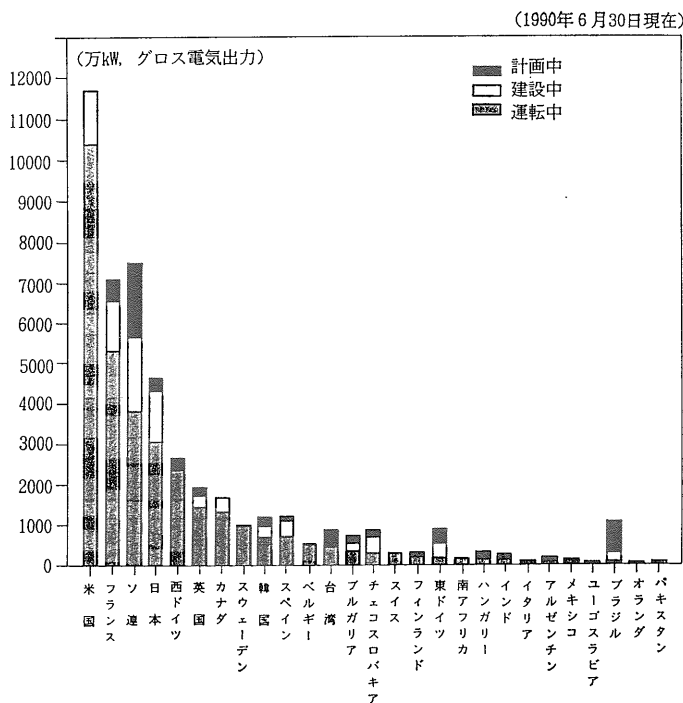
この小論では、高レベル放射性廃棄物処分の概要と、我が国における研究開発計画の中で、地質調査所の位置付けと今後の研究方向について述べることにする。

2. 高レベル放射性廃棄物の地層処分について

世界における原子力発電所は、27カ国(地域)で423基が運転中(1990年6月末)で、総発電電力量は1兆8545億kWhに達する

(原子力委員会, 1990)。これは世界の総発電電力量の約17%に当たり、すべて石油を使って発電したとすると、我が国の年間石油消費量の1.5倍に当たる4億5千万klの石油を必要とする。原子力発電が実用化されていなければ、エネルギー事情は今よりもっと危機的であり、地球環境問題ももっと深刻になっていたことは明白である。我が国の原子力発電は総発電電力量の4分の1を越え、世界第4位の原子力利用国である(第1図)。

原子力発電の特徴は、ごくわずかの量の核燃料から大きな量のエネルギーが得られることである。1000MW年の発電をするために、石炭は230万t、石油は180万klそれぞれ必要であるのに、軽水炉では平均で30tの低濃縮



第1図 原子力発電国(地域)の原子力発電設備容量(原子力委員会, 1990)

1) 地質調査所 環境地質部

キーワード: 高レベル放射性廃棄物, 地層処分, 研究計画, 日本, 地質調査所

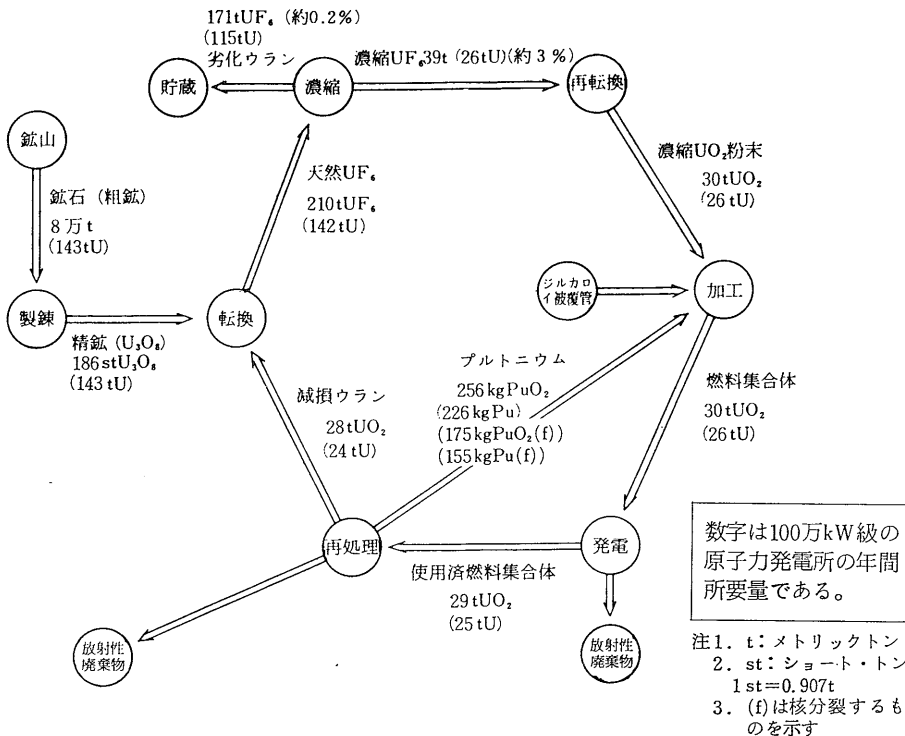
酸化ウラン燃料があればよい(浅田ほか, 1989)。燃料の量が少ないことは、廃棄物の量が少ないことにも結びついている。核分裂反応によって、熱エネルギーや放射線が放出されるが、それとともに生成する核分裂生成物や超ウラン核種は、ほとんどそのまま燃料体内部に保持されている。すなわち、核分裂反応で生成する放射性物質のほとんどは小さな燃料体中に閉じ込められている。有害な廃棄物の量がきわめて少ないことは、原子力発電の長所である。

原子力発電所で作業に使用する手袋や作業衣等も、使用後は放射性廃棄物として扱われるが、これらにはごくわずかししか放射性物質は混入していないので低レベル放射性廃棄物(LLW: Low-level Waste)と呼ばれる。低レベル放射性廃棄物は、放射能レベルが低くだけでなく、放射性が持続する寿命が短い。しかし、使用済の核燃料体には、核分裂反応に伴って生成する放射性物質のほとんどを小さな容積内に封じ込めているため、放射能レベルが高く、さらに長寿命の放射性核種を含んでいる。この使用済核燃料が高レベル放射性廃棄物(HLW: High-level Waste)の源であり、原燃料のウランの他に、核分裂生成物とプルトニウム等の超ウラン(TRU)元素が生じている。核分裂生成物の多くは不安定な核種であるため、激しく放射線と熱を出しながら壊変するが、数百年

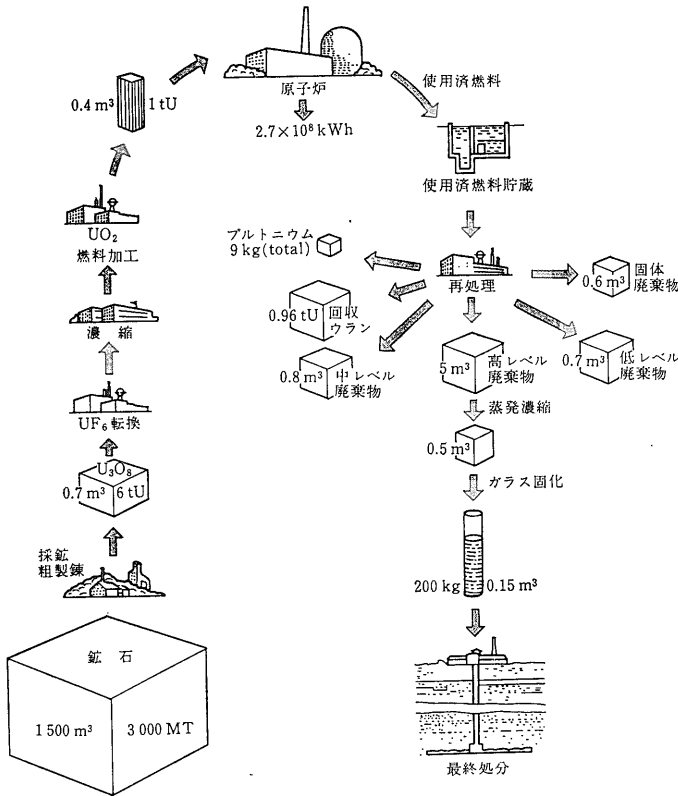
でほとんど減衰してしまう。しかし、超ウラン元素等の長寿命核種があるため、低いが無視できない程度の放射性がなお(原子炉のタイプや燃焼の程度によって)数千年ないし数十万年にわたり持続する。

米国・カナダ・スウェーデン等の国々は、使用済核燃料のままで、処分する方針であるが、エネルギー資源に乏しい我が国では、使用済核燃料を再処理して、核燃料として使用できるウランやプルトニウムを抽出して再利用する方針である。原子力発電におけるウラン・プルトニウムのリサイクル利用の過程を核燃料サイクルと呼ぶ(第2図)。再処理の際に、使用済核燃料からウラン・プルトニウムを分離した後の廃液に核分裂生成物とプルトニウムを除く超ウラン(TRU)核種の大部分が含まれる。この高レベル再処理廃液を固化して、安定な固相にする(第3図)。固化法には、ガラス固化・セラミック固化・シンロック(人工岩石)固化等の方法が研究されているが、現在実用化されているのはガラス固化である。日本では、高レベル再処理廃液を固化したガラス固化体を地層処分する予定であり、高レベル放射性廃棄物(HLW)といえ、通常はこのガラス固化体を指している。

上記の高レベル放射性廃棄物(HLW)にも低レベル放射性廃棄物(LLW)にも分類できないものは、中レベル放射性廃棄物(MLW)などと呼ばれる。中レベル放射性



第2図 核燃料サイクル図(科学技術庁原子力局編, 1985)



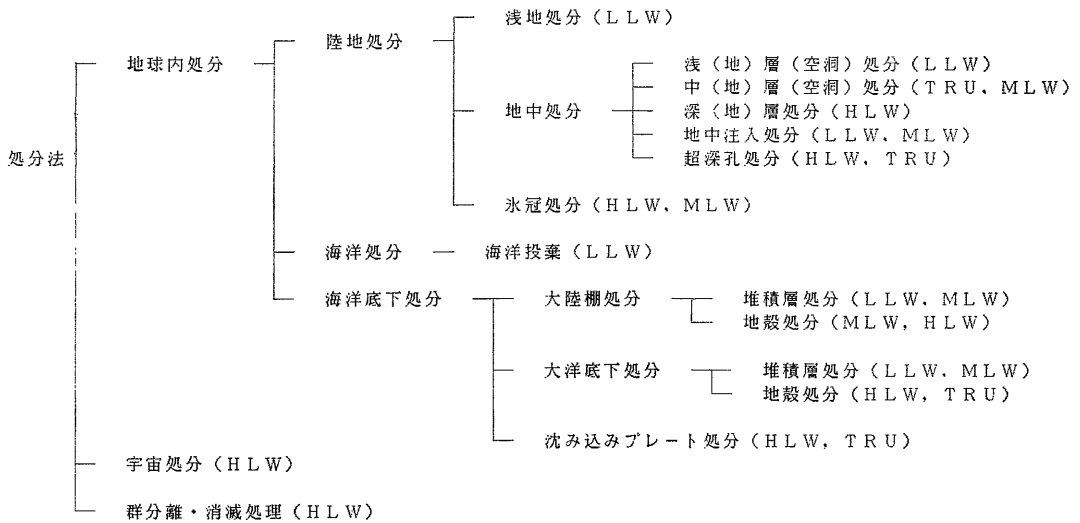
第3図 再処理サイクルにおけるマテリアルフロー（装荷燃料1 t 当たり表示）
（浅田ほか，1989）

廃棄物であっても長寿命の放射性核種を相当量含んでいるものは、やはり長期間隔離をする必要がある。再処理工程の中で出てくる廃棄物の中で、超ウラン核種 (TRU) を無視できない程度含んでいるものがあり、TRU 廃棄物と呼ばれる。TRU 廃棄物は放射能レベルは高くないが、長寿命であるので、高レベル廃棄物に準じた長期隔離が必要である。TRU 核種は、また、α線を出すことが特徴である。

高レベル放射性廃棄物は量が少なく、量の多少は問題にならない。しかし、高レベル放射性廃棄物は、使用済核燃料を含めて、既に存在しているので、今後の原子力発電の量に関わりなく、処分は必要である。

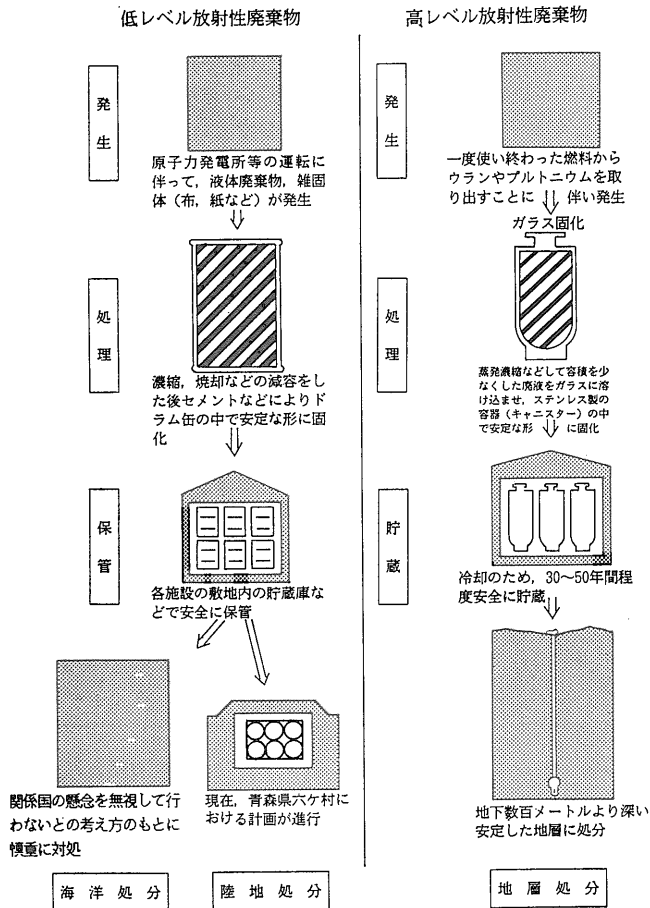
放射性廃棄物の処分方法としては、様々な提案がなされている（第4図）。これらのうち、高レベルおよび中レベル放射性廃棄物の処分方法として実用的と考えられているのは地中処分法であり、海洋底下処分法も代替法として研究されている。

地中処分法にも様々な種類があるが、高レベル放射性廃棄物は地下数百メートル以上の深部に、鉱山のように坑道を掘って廃



HLW：高レベル放射性廃棄物
MLW：中レベル放射性廃棄物
TRU：TRU 廃棄物
LLW：低レベル放射性廃棄物

第4図 放射性廃棄物の処分法



第5図 放射性廃棄物処理処分の基本的な考え方（原子力委員会，1990）

棄物を厳重に埋設する深地層処分法（「地層処分」というと、狭義には、深地層処分のことを指すことが多い）によって処分する予定になっている（第5図）。

深地層処分が高レベル放射性廃棄物処分法として世界各国で妥当な方法と考えられているのは、

- ①現在及び将来の世代の人間の健康の防護
- ②長期的な環境の保護
- ③将来の世代に負担をかけない

という廃棄物対策の三原則を基本的に満たしているためである。地層処分には、この三原則に合った以下のような長所がある（浅田ほか，1989）。

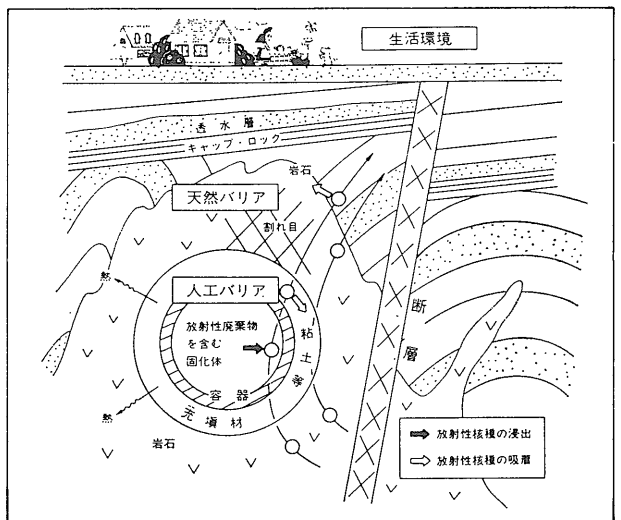
- ①長期的な廃棄物管理という立場にたったとき、地下に閉じ込めた方がその安全保証の安定性が高い。
- ②処分後、積極的に人間が面倒を見なくとも、十分な安全性を保ち得る。
- ③自国内に地層処分サイトを見つけることができ得る。

④地層処分場の建設に当たり、従来の土木、鉱業の技術を活用でき、その費用も妥当な範囲に入り得る。

地層処分は、ガラス固化体・容器（キャニスター）・緩衝材といった多重バリアーにより、放射性物質を封入するが、長期にわたっては地層（母岩）自身の天然の隔離性能と耐久性が最も重要なバリアーとなる（第6図）。天然バリアーとしての地層（地殻）の変動の限界の長期予測が重要な研究ポイントになる（第7図，第1表）。地層処分の技術システムにおいては、「丈夫で長持ち」（“robust”）することが最も大切であり、最先端であっても確実性に乏しい技術に頼ることはできない。

なお、貯蔵（storage）という言葉は、再取り出しをすることが前提に設置される場合に用いられ、通常積極的な管理をするのに対し、処分（disposal）という言葉は、将来にわたって、再取り出しや積極的な管理をする必要のない状態に置くことを意味している。このことは、処分では、再取り出しや監視（モニタリング）を実施しないということを必ずしも意味しているのではなく、再取り出しや監視の必要のない程度まで安定な状態に廃棄物を封入することを意味する。

地中処分法のうち、超深孔処分は、再取り出しが、狭義の地層処分法より難しいために、適当な方法とは考えられていないが、確実な再取り出しが可能になれば、将来再び考慮されるよ



第6図 地層処分の安全確保のしくみ（多重バリアシステム）

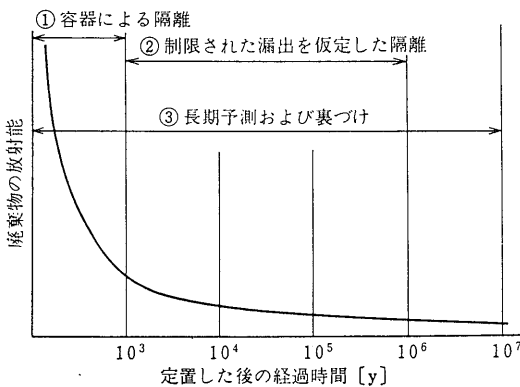
第1表 地質環境特性に関する IAEA 安全シリーズ60の基準 (浅田ほか, 1989)

項 目	要 件
サイトの空間的広がり	サイトは、処分システムを十分包有できる大きさの地層をもたなければならない。同時に処分場周辺に適切な容量の地下緩衝部 (Buffer Zone) と、適切な広さの地表立入り制限区域をとり得る広がりをもたなければならない。
地質 (岩質・深さ)	処分場は、そこで処分される廃棄物のカテゴリと量に対応して適切な岩質と深さをもつ地質媒体の中に設置されなければならない。
水 理 地 質	地質環境は処分場内への地下水の流れを制限するのに役立つ水理地質学的特性をもっていなければならない。
放射性核種の移行特性	地質環境は放射性核種の移動を制限するのに役立つ物理化学的特性および地球化学的特性をもっていなければならない。
構造運動と地震	処分場は、構造運動および地震の影響の少ない地域に設定しなければならない。すなわち処分場の安全性が損なわれることのないように、主要な構造運動の地域から十分離れた地域に処分場を設置しなければならない。
人工的および自然的特徴	処分場の設置場所を決めるには、構造的不安定性を生じさせるおそれのある人工的および自然的特徴を考慮に入れなければならない。
資源の可能性	有用な地下資源あるいは将来の可能性のある資源の存在を検討すべきである。特定の場所と時間における処分場の必要性を、現在および将来の有用な地下資源の必要性と価値に対して比較評価しなければならない。
地表への配慮	地形的に不安定な環境や極端な気候の条件、および地表に影響を及ぼし得るその他のプロセスの発生について、それらが処分場の性能に有意な影響を及ぼさないことを、明確にするために配慮しなければならない。

研究内容	目的
① 容器による隔離	多数核種の取扱いに伴う相乗的不確定性の削減 処分システムの本来の安全評価 ① ② の評価の前提条件の長期的変動限界の推定、およびナチュラルアナログ等の裏づけの研究
② 制限された漏出を仮定した隔離	
③ 長期予測および補完的研究	

発達を待つべきであるという意見もある。しかし、将来の世代に負担を残すだけという倫理的問題の他に、何もしないで放置した時のリスクは、厳重な方法で処分した時のリスクより明らかにずっと大きいという事実がある。処分の時期を選ぶのは様々な条件を考慮して慎重に判断すべきであるが、いずれにせよ、何もしないで、いくら待っても、解決はありえない。

再処理では、ウランとプルトニウムだけを取り出して再利用しているが、プルトニウム以外の超ウラン元素やストロンチウム・セシウム群などをそれぞれ分離抽出し (群分離という)、原子炉や加速器で短寿命の核種に変換したり (消滅処理という)、有効利用したりする方法も研究されている (第8図)。群分離・消滅処理が実現しても、処分対象になる廃棄物がなくなるという期待はできないので、処分法の代替にはならないが、廃棄物の寿命を短くできれば、処分技術の負担を軽減することが期待される。しかし、それでも、数千年以上の隔離を必要とする。廃棄物は相当量発生すると思われるので深地層処分法の開発の必要性はなくなることはない。



第7図 地層処分システムの性能研究 (浅田ほか, 1989)

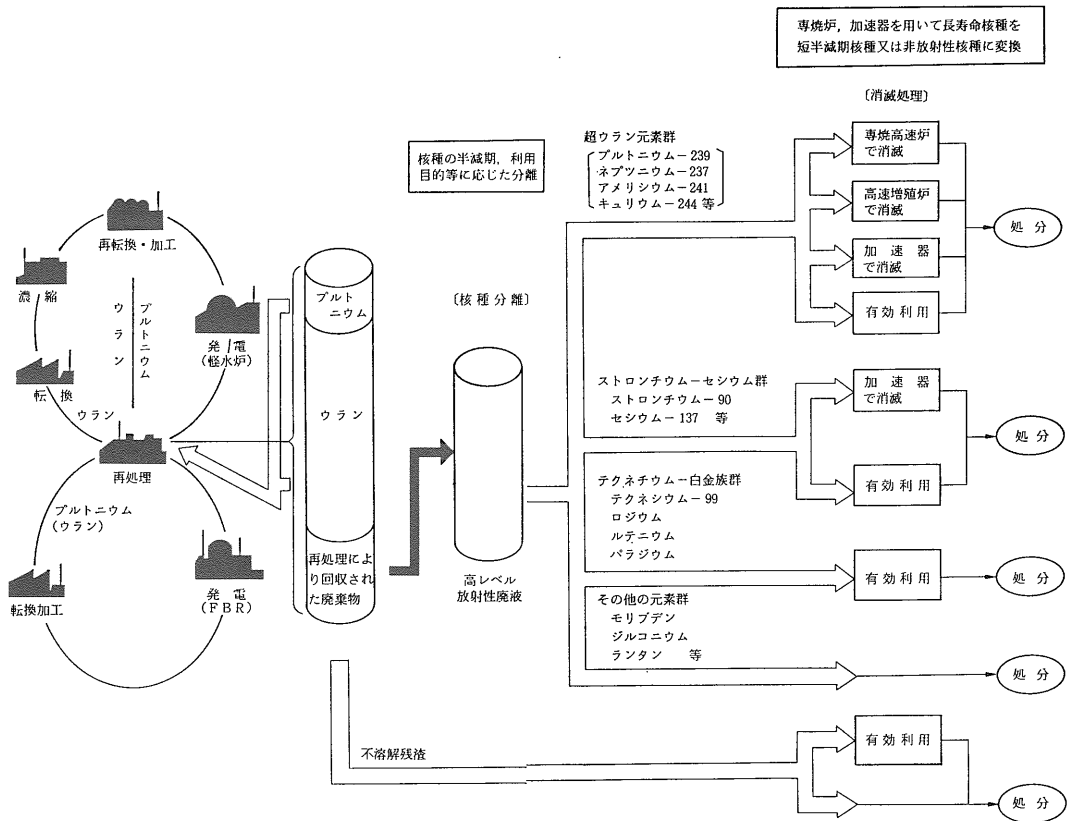
うになるかもしれない。

海洋底下処分は代替法として研究がなされているが、コストが難点といわれている。しかし、スウェーデンでは、低・中レベル放射性廃棄物の浅海底下貯蔵所が既に実現している。宇宙処分は、打ち上げのリスクが地層処分と比較してはるかに大きいので、実用的な方法ではない。

何もしないで、廃棄物をそのまま置いておき、科学の

3. 我が国における高レベル放射性廃棄物処分研究

現在の我が国の高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発は、1984年 (昭和59年) 8月の原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会「放射性廃棄物処理処分方策について (中間報告)」及び1985年10月の原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会「放射性廃棄物処理処分方策について」で示された4段階の開発計画に基づいている。こ



第8図 群分離・消滅処理概念図(原子力委員会, 1989)

の計画は、1980年12月に出された原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会報告「高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について」で出された5段階の研究開発計画を、その第1段階の成果を踏まえて改訂したものである。

1980年の5段階計画では、

- 第1段階：可能性ある地層の調査
- 第2段階：有効な地層の調査
- 第3段階：模擬固化体現地試験
- 第4段階：実固化体現地試験
- 第5段階：試験的処分

となっていたが、1984年の計画では、

- 第1段階：有効な地層の選定
- 第2段階：処分予定地の選定
- 第3段階：模擬固化体による処分技術の実証
- 第4段階：実固化体処分

と4段階に短縮され、実際の処分に直接続く段階まで含まれるようになった(第9図)。1985年の報告では、

- 第1段階：有効な地層の選定
- 第2段階：処分予定地の選定

1991年3月号

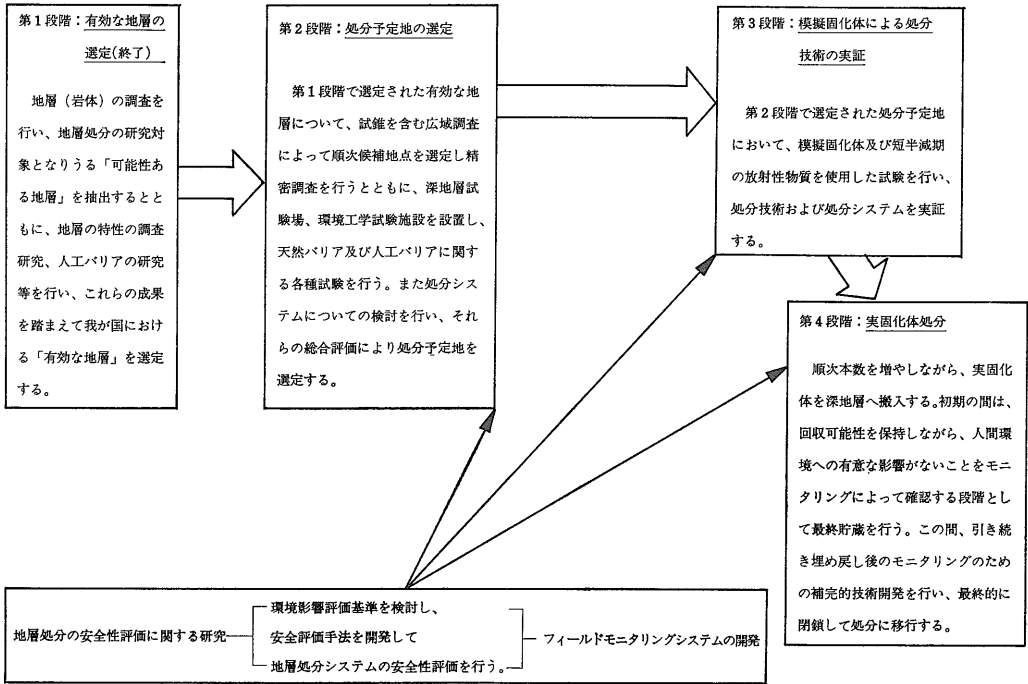
第3段階：処分予定地における処分技術の実証

第4段階：処分場の建設・操業

と第3及び第4段階の名称が変更され、現在まで踏襲されている。

第1段階は1984年度で終了し、「我が国における“有効な地層”としては、未固結岩等の明らかに適性に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得るものである」と結論している。1985年(昭和60年)度より第2段階の「処分予定地の選定」を目標とした研究開発段階に入り、現在まで続いている。1986年7月に出された総合エネルギー調査会原子力部会「原子力ビジョン—21世紀の原子力を考える—」(通商産業省編, 1986)では、高レベル放射性廃棄物の処分技術の実証を2000年頃、処分時期を2030年以降と見込んでいる。また、官民の協力により国全体として技術開発を総合的に推進することを求めている。

1987年6月に改訂された原子力委員会「原子力開発利用長期計画」では、第2段階においては、国の重要プロジェクトとして、(1)地層処分技術の確立を目指した研究開発、(2)地層環境の適性を評価するための調査及び(3)処



第9図 地層処分に至る全体像(原子力委員会放射性廃棄物専門部会, 1984)

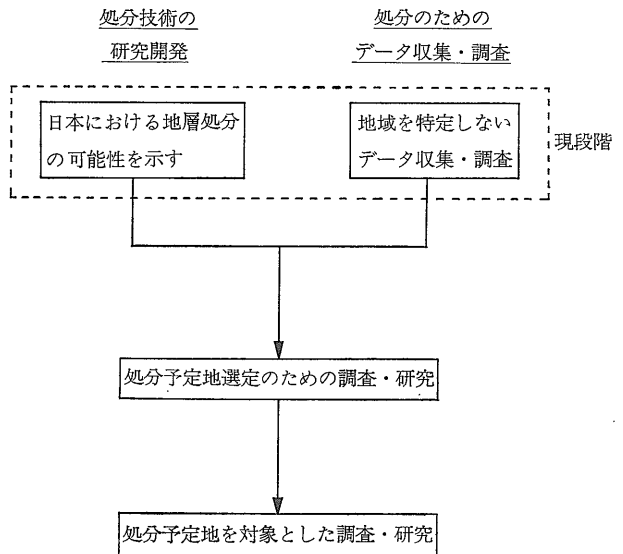
分予定地の選定を実施するとしている。現在はまだ第2段階の前半であり、日本における地層処分の可能性を示すため、地域を特定しない研究を実施している段階である(第10図)。「長期計画」では、地層処分技術の確立を目指した研究開発は、日本原子力研究所、地質調査所等との役割分担の下に、動力炉・核燃料開発事業団を中核推進機関として推進することとしている。

我が国の高レベル放射性廃棄物処分の基本方針は、「高レベル放射性廃棄物については、安定な形態に固化し、30年間から50年間程度冷却のため貯蔵を行った後、深地層中に処分する」(1987年原子力開発利用長期計画)ことになっている(第5図)。安定な形態に固化するためには、ホウケイ酸ガラスによる固化技術を用い、深地層とは地下数百メートルより深い岩盤の予定地である。

1989年(平成元年)12月には原子力委員会「放射性廃棄物対策専門部会報告書」が出され、当面の期間において我が国が特に重点的に進めるべき研究開発項目とその進め方を示している。この報告書による、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究の概念を以下に要約する。

(1)高レベル放射性廃棄物対策の特徴

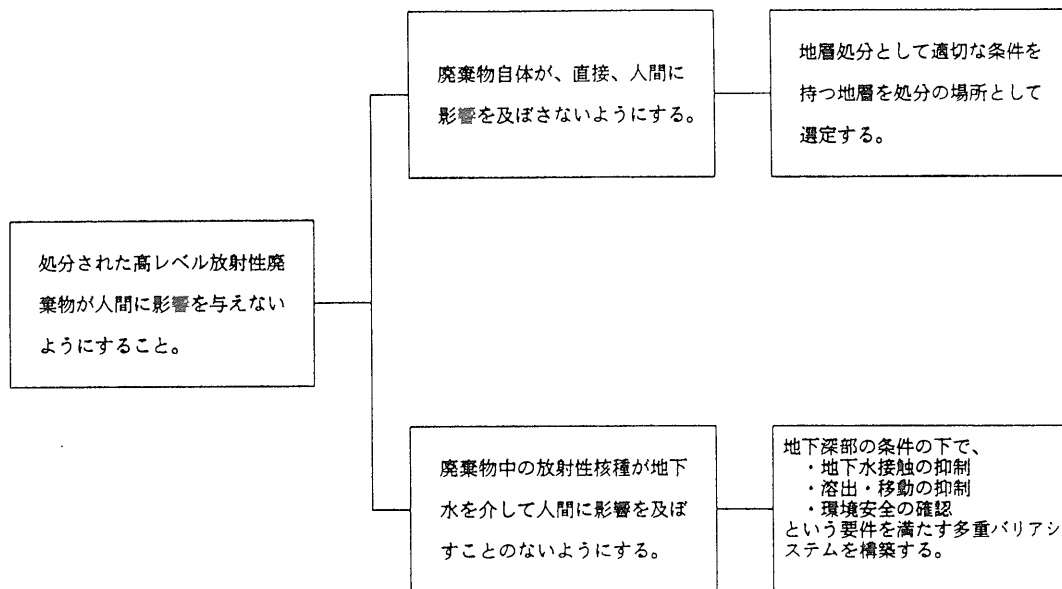
- ①放射能のほとんどは発生後数百年の間に急速に減少するため、この期間の高レベル放射能に対する



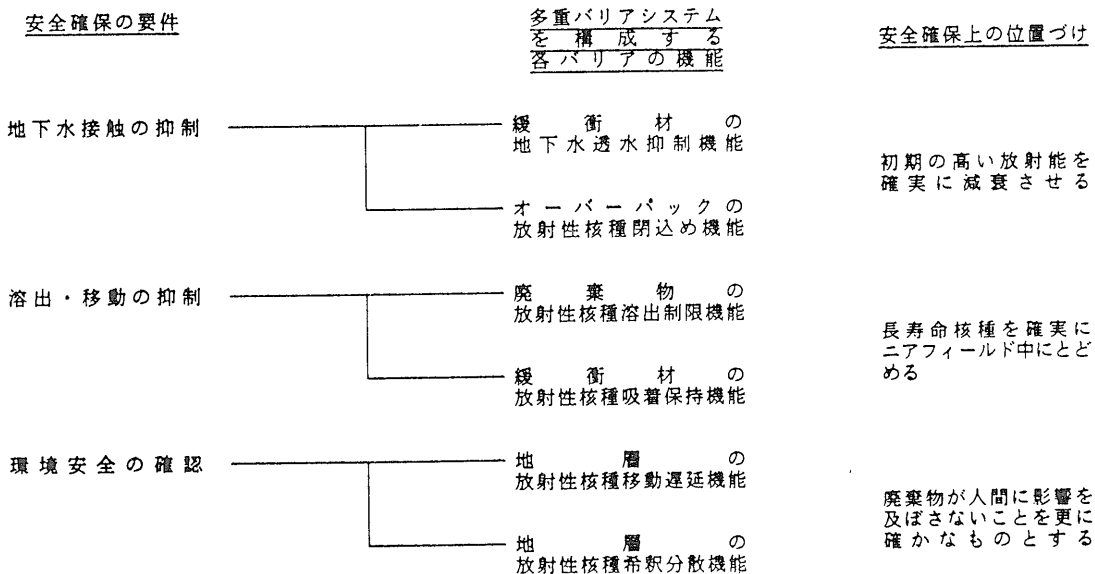
第10図 第2段階の進め方

安全確保

- ②高レベル放射能が減衰してからも長期にわたって残留する放射能に対する長期的な安全確保
 - ③発生量が極めて少ない
- (2)地層処分システムの安全確保に必要な基本的要件



第11図 地層処分の基本概念（原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会，1989）



第12図 多重バリアシステムの構成とその機能（原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会，1989）

(第11図)

- ① 廃棄物と地下水との接触の可能性を十分低く制限しておく（「地下水接触の抑制」）
- ② 廃棄物中の放射性核種が溶出しにくく、かつ埋設場所から移動しにくいようにしておく（「溶出・移動の抑制」）
- ③ 生活圏に有為な環境影響を及ぼさないことを確認する（「環境安全の確認」）

(3)多重バリアシステムの機能（第12図）

- ① 緩衝材の有する「地下水透水抑制機能」
- ② オーバーパックの有する「放射性核種閉じ込め機能」
- ③ 廃棄物自体の有する「放射性核種溶出制限機能」
- ④ 緩衝材の有する「放射性核種吸着保持機能」
- ⑤ 地層の有する「放射性核種移動遅延機能」
- ⑥ 地層の有する「放射性核種希釈分散機能」

(4)地層処分研究開発の重点項目

[1] 性能評価研究

①地層処分の概念の有効性の確認

②多重バリアシステムの有効性の解析

(a)ニアフィールドについての研究開発

- ・緩衝材中の地下水の透水
- ・人工バリア材と地下水との反応
- ・金属材料の腐食
- ・放射性核種及びガラスの地下水への溶解・沈澱
- ・放射性核種の緩衝材への吸着
- ・放射性核種の緩衝材での拡散
- ・処分場建設時の坑道掘削が地下水理に及ぼす影響

(b)ファーフィールドについての研究

- ・広域の地下水理・水文機構に関する研究
- ・地層中の放射性核種の移動遅延機能と希釈分散機能に関する研究

[2] 処分技術の研究開発

[3] 地質環境条件の調査研究

(5)研究開発の進め方

- ①高レベル放射性廃棄物の発生量がもともと非常に少ないことに留意して、その特徴をできるだけ生かす
- ②長期的研究開発を効率的かつ着実に進展させるための計画性と柔軟性
- ③地層処分の観点から見た我が国の地質環境条件的に把握し、その特性に応じた処分概念と処分技術を開発していくこと

なお、この1989年「放射性廃棄物対策専門部会報告書」では、「性能評価研究においては、将来予測のための科学的方法の開発等の長期的研究開発課題が含まれることを考えあわせると、そのような地層処分研究開発には、今後10数年以上はかかることが想定される」と指摘している。また、「地層処分技術は総合科学技術の一つであり、その有効性を実証していくためには、個々の技術を統合化し計画的にその開発を進めていくことが肝要である」としている。

一つだけ挙げるとすれば、長期にわたる隔離が必要である点であろう。数千年～数万年という長期は、人間の歴史時代の長さを越えている。近代科学は、経験科学とも実験科学ともいわれるように、人間の経験を重視している。簡単には経験できないことは、実験を行って、その現象を実現させ、その経験によって「実証」したとする。ところが、数千年～数万年の現象は、人間が経験できないし、実験による再現も事実上不可能である。長期ということが、高レベル放射性廃棄物の最大の障害になっている。

しかし、地球は約46億年の歴史があり、その過程で発生した様々な出来事の痕跡が、堆積物や岩石中に残されている。地球にとっては、数万年はごく短い時間でしかない。人間の歴史を越えた現象の「実証」は、このような自然が実施した実験から学ぶことにより、はじめて可能になる。したがって、このような長期問題に、地質学・第四紀学・地球物理学・地球化学等の地球科学からの貢献は必須である。

1984年の原子力委員会放射性廃棄物対策専門委員会「放射性廃棄物処理処分方策について(中間報告)」の中で、地質調査所は、地質に関する総合研究機関としての特性を生かして、専門的見地から貢献することを要請され、高レベル放射性廃棄物地層処分の研究に参加することになった。この中間報告では、地質調査所に対して、下記のような具体的課題が課された。

(地質調査所における研究開発課題)

① 核種移行に関する研究

天然の岩石・鉱物の核種包蔵性と長期安定性に関する地球化学的調査・研究を行い、高温高圧下の地下水と岩石の相互反応にともなう核種移行の機構を解析する。

② 岩体強度と割れ目透水性に関する研究

ガラス固化体の発熱によって、地下水・ガス等の高温・高圧の流動体が岩盤内部から力学的に岩体の破壊を行う危険性について実験的研究を行い、割れ目形成による透水性変化を見積り、長期隔離に有効な処分条件を把握する。

これらの課題に対応して、1985年(昭和60年)度より、次のような研究プロジェクトを開始した。

(原子力平和利用技術)

「高レベル放射性廃棄物の深層隔離に関する地質学的研究」(昭和60年4月～平成2年3月)

高レベル放射性廃棄物は、最終的には地層処分する方針が原子力委員会によって定められている。地層処

4. 地質調査所における高レベル放射性廃棄物地層処分研究

高レベル放射性廃棄物の地層処分システムは、複合的なトータル・システムであり、様々な分野からの研究開発が必要である。これまで述べたように、高レベル放射性廃棄物対策の特徴は様々であるが、最も顕著な特徴を

分は、地層という天然バリアに工学バリアを組み合わせることにより、高レベル放射性廃棄物を人間環境から隔離するものであるが、数万年以上の長期隔離をしなければならないため、工学バリアには限界があり、天然バリアが最も重要である。本研究は、高レベル放射性廃棄物を地下深部の岩体中に安全に永久処分する方法を開発し、深部の高温高圧下における長期安定な、廃棄物の化学的・力学的形態を研究し、放射性核種が地下深部の岩体中の空隙や割れ目・地層を通る地下水に浸出・移動し、また、吸着・固定化する機構・条件を調べ、実験地学的手法によって長期隔離にもっとも有効な地質環境とその廃棄物包蔵性を検証する手法を見出す。

1. 廃棄物—粘土—水—岩石系の実験岩石学的研究：廃棄物固化体を地下に封入した場合の、人間環境に対する隔離効果を検証するため、深部の高温高圧の地下水による放射性核種の固化体からの浸出と岩石・粘土への移行・吸着のメカニズムを究明する。このため、熱水浸出・吸着実験と実地検証のための天然の放射性核種の移行・分布の研究を行う。
2. 地下深部環境下における岩体強度と割れ目透水性の研究：地下深部の温度・圧力と放射性廃棄物の発熱のため、高温高圧の地下水・ガスや粘土等流動体が処分サイト周辺の岩盤中に貫入・破壊する危険が問題になる。高温高圧液体の力学的効果による岩石破壊の進展について実験的研究を行い、割れ目形成による透水性変化を見積り、長期隔離に有効な処分条件を見出す。

地質調査所では、昭和29年より30年代にかけて放射性鉱物鉱床の探査・研究を大規模に実施した。近年では、動力炉・核燃料開発事業団との密接な連携のもとに、經常研究として「本邦の堆積型ウラン鉱床に関する研究」及び「酸性噴出岩起源のウラン鉱床の研究」を逐次実施してきている。しかし、放射性廃棄物に直接係わる研究は、昭和48年度に「放射性固体廃棄物の保管適地の地質学的研究」が短期間実施された程度であった。昭和58年度、フィージビリティスタディ「実験岩石学による地殻開発の実態に関する調査研究」を実施し、地下利用の推進への社会的ニーズは大きい、その中でも高レベル放射性廃棄物の地層処分技術の開発は社会的重要度が特に高い研究テーマとして抽出された。当所にとっては放射性廃棄物処分は新しい研究分野であるため、米国ロスアラモス国立研究所の高レベル放射性廃棄物処分プロジェクトのリーダーである C. W. Myers 博士を昭和60年7月に招聘し、研究プロジェクトへの助言を求めた。

1991年3月号

1985年（昭和60年）8月には、さらに、原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会「高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画」により、地質調査所に関連して次のようなテーマが示された。

- ①「地質環境の長期安定性に関する基礎的な調査研究」
 - 1)研究目的：天然バリアとしての自然環境の安定性と地殻変動等の要因を研究し、低確率事象の取り扱い方についての考え方を整理するための基礎資料とする。
 - 2)研究内容：
 - (1)天然バリアとしての自然環境と地殻変動・海水準変動等の環境変化要因を研究する。
 - (2)低確率の天然現象の現れ方とその取り扱い方に関する基礎研究を行う。
 - 3)研究期間：昭和62年度～平成2年度
 - 4)実施機関：地質調査所
- ③「地層処分に係わる水・岩石相互作用に関する研究」
 - 1)研究目的：廃棄物処分による地下自然環境への影響、特に水と岩石・粘土との力学的相互作用の研究を行う。
 - 2)研究内容：
 - (1)岩盤応力と水等の流動体による破壊の解析を行う。
 - (2)割れ目形成と閉鎖による地下水挙動の変化を解明する。
 - (3)水と岩石・粘土との化学的相互作用による核種移行のメカニズムを解明する。
 - (4)天然の岩石、鉱物、鉱床の長期核種包蔵性に関する研究を行う。
 - 3)研究期間：昭和60年度～平成2年度
 - 4)実施機関：地質調査所
- ⑧「天然バリア中のウランの挙動研究」
 - 1)研究目的：地層中の核種挙動について天然事象を地球科学的見地から調査することにより、長期に亘る天然バリア中での核種移行等に関する評価手法の確立に資する。
 - 2)研究内容：数千万年以前に生成されたウラン鉱床等について、核種移行現象等、地層中での核種挙動に関する調査を行い、長期的・地球科学的観点より天然バリアの性能等を把握し、地層処分設計に反映する。このため、まず、
 - (1)ウラン及びその娘核種並びに随伴元素について、鉱床から水平的及び垂直的に如何に移行し・分布

しているかを調査する。

(2)上記の元素、核種の分散と地下水の化学的特性との関係、地下水の挙動と地質構造及び岩石の物性との関係を究明する。

3)研究期間：昭和61年度～平成2年度

4)実施機関：動力炉・核燃料開発事業団等、地質調査所

これらの課題の中で、③は既に発足している研究プロジェクトの範囲であるが、①と④は新規の課題であった。このため、下記のように、進行中の研究プロジェクトの小項目を変更して④の内容を追加した。

(原子力平和利用技術)

「高レベル放射性廃棄物の深層隔離に関する地質学的研究」(昭和60年度～平成元年度)

高レベル放射性廃棄物を地下深部の岩盤中に安全に隔離しうることを検証するために、岩石中の核種移行のメカニズムを実験的に解明すると共に、天然の相似核種移行を研究する。

1. 水一岩石相互作用による核種移行の実験岩石学的研究：地下深部環境下における核種移行に関する水熱実験を行う。
2. 天然地質環境における相似核種移行の研究：地層中の相似核種移行を調査し、天然条件下での移行の研究を行う。
3. 地層の物理的安定性と割れ目透水性の研究：深部の圧力・温度と流体圧による破壊と透水性変化について研究する。

また、昭和63年度からは、①に対応して次のような新規プロジェクトがスタートした。

(原子力平和利用技術)

「高レベル放射性廃棄物処分施設安全性評価のための地質環境の長期安定性に関する研究」(昭和63年度～平成4年度)

高レベル放射性廃棄物は地層処分することになっているが、廃棄物の放射能が安全レベルに下るまでの少なくとも数万年間は、その処分施設の安全性が確保されなければならない。しかし、世界有数の変動帯に位置する日本列島では、このような長期間においては施設の地質環境が大きく変化する可能性があり、その立地に当たっては地質環境の長期的変化を考慮・評価する必要がある。

本研究では地質環境の長期安定性に関して、地質学的な手法によって的確な未来予測を行い、処分施設立地評価を行うための手法を構築することを目標とす

る。

1. 処分施設立地上考慮すべき地質事象の抽出研究：高レベル放射性廃棄物施設の安全性が確保されねばならぬ期間中に、地質環境に大きな変化を引き起こすと予想され、今まで取り扱われていなかった低確率、あるいは長周期の地質事象を抽出する。
2. 地質環境変化の事例研究：上記地質事象によって引き起こされる過去数十万年間における土地環境変化の歴史とその要因を、それらが最も明瞭に起きている地域を対象とする事例研究に基づいて解明する。
3. 地質環境の安全性に関する長期未来予測の手法の開発：事例研究の結果に基づいて、地質環境の変化に関する長期的な未来予測法を開発し、廃棄物処分施設立地の際の地質環境の長期安定性評価に資する。

「高レベル放射性廃棄物の深層隔離に関する地質学的研究」は平成元年度で終了し、その成果は、地質調査所月報第42巻第5号及び第6号(平成3年5月および6月)に掲載の予定になっている。1990年(平成2年)度からは、下記の研究プロジェクトを実施中である。

(原子力平和利用技術)

「高レベル放射性廃棄物の地層処分に關する岩盤中の核種移行現象の実証的研究」(平成2年度～6年度)

高レベル放射性廃棄物地層処分の立地に際して直接問題となる岩盤中の核種移行現象について、天然の放射性元素濃集帯での核種賦存状況の調査研究を行い、従来の実験的成果をスケールアップして野外現象に適用するに当たっての妥当性を検証する。また、地層処分に關する実験地学的研究の高度化を図り、野外研究の成果と総合して、実用的な評価基準の策定に役立てる。

1. 放射性元素濃集帯の岩石一地下水系間での物質移動の研究：地域・岩体・岩石・鉱物の各レベルにわたって、放射性核種の保持機構と地下水系による移動機構に明らかにし、地質的年代にわたる変化予測手法を開発する。
2. 深部岩盤裂か系の透水性評価法の研究：核種を移動させる上で最も大きな能力を持つ裂か透水系について、亀裂の形や連続性に即した流動状況を明らかにする。
3. 裂か系にともなう岩石変質と核種保持機構の研究：裂か系では、水一岩石反応によって周りの岩石は変質し、新たな変質鉱物は母岩と異なる核種保持性能を示す。この一連の過程を極微量・極微粒子状の

試料に対する実験手法を開発して解明・理論化し、評価に役立てる。

1990年（平成2年）9月に原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会「高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画」の最新版（平成3年度～7年度）が出され、この計画で、「高レベル放射性廃棄物の地層処分の環境影響の評価が広範囲の知識を必要としていること、今後かなりの長期間にわたって継続的な研究を積み重ねていかななくてはならないと考えられること等から、日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団及び地質調査所を中心に放射線医学総合研究所等の国立研究機関、大学及び民間の研究機関がその特性及び専門領域を活かして具体的な課題を分担し、相互に密接な協力の下に進めていくものとする。さらに、諸外国との国際協力を積極的に進めるものとする。」とされている。さらに、地質調査所が今後取り組むべき研究課題として以下のような課題が示された。これらの課題に対応するためには、今後、地質調査所としても大きな努力を要することは明らかである。

③「地層処分システムの長期安定性に関する研究」

1)研究目的：地層処分システムの長期安定性に影響を及ぼす事象を抽出し、経時的に増加する不確実性を評価することによって、地層処分の安全性を評価する期間の合理的設定に資する。

2)研究内容：地層処分システムの長期挙動を予測する上で影響を与える以下の事象を対象として、系統的に情報を集積するとともに事象の長期変動予測モデルの開発を行う。

さらに、処分システムの安全評価に統合した形で影響評価できるモデルを開発し、不確実性を定量的に評価する手法の研究を実施する。

(1)自然環境の変化予測に必要なデータの収集

地質環境（地下水、地質構造）の変動等に影響を及ぼす気候の変動・地殻変動に関するデータを収集する。

(2)長期変動予測モデルの開発

収集したデータ等を基にして、これらの事象の長期変動を予測するモデルを開発する。

(3)処分場環境の変化の予測モデルの開発

安全評価の対象としている処分環境が、自然環境の変動に伴いどのように変化するか予測する処分場の環境の変化の予測モデルを開発する。斬新的な事象に対しては決定論的な手法を導入し、確率事象として表せる事象に対しては確率論的な手法によってモデル化を行い、長期変動とそれによ

る影響を定量的に予測する全体モデルを作成する。

3)研究期間：平成3年度～7年度

4)実施機関：動力炉・核燃料開発事業団 地質調査所

⑦「天然バリアのナチュラルアナログ研究」

1)研究項目：高レベル放射性廃棄物の地層処分により生じると想定される現象と類似した天然現象を抽出し、地層・地下水・核種の挙動、状態を明らかにすることにより、天然バリアの核種移行遅延機能を評価し、高レベル放射性廃棄物処分の安全性評価に資する。

2)研究内容：

(1)ウラン鉱床等を利用して、鉱床を切る断層及び核種移行評価、花崗岩中における核種のマトリックス拡散に関する研究、コロイド・有機物の研究、鉱石試料を対象とした放射平衡の測定、鉱物相の同定と鉱物相中での核種の定量及び吸脱着試験を実施する。

(2)廃棄物中の長寿命放射性核種の移行挙動を類推するため、岩石中のU・Th系核種又は希土類元素の存在量を測定し、得られる非平衡値及び希土類元素の濃度分布の解析を行う。

(3)金属鉱床とその周辺変質帯に着目し、風化、変質、分解等の諸作用が及んだ際の指標とする核種の挙動を解析する。

3)研究期間：平成3年度～7年度

4)実施機関：日本原子力研究所、動力炉・核燃料開発事業団、地質調査所

⑧「地質環境予測に関する研究」

1)研究目的：地層処分環境の評価に資するために、地質調査、地球化学・地下水調査、ボーリング、物理探査等に基づく地球科学的情報から地下深部の地質環境を解明する。

さらに、地質環境の変化に関する実証的データを基に、地質環境の長期予測を行うための手法を開発する。

2)研究内容：

(1)地下深部の地層の状況を把握するために、地層調査、地球化学的手法による岩盤性能調査、ボーリング、物理探査等を実施する技術を開発する。

(2)地下深部の環境を実験的に再現し、地層・地下水と廃棄物の相互作用のメカニズムを明らかにする。

(3)広域的な地球化学的手法による地質調査により、

地域特性を精密に評価する技術を開発するとともに、指標となる核種の挙動と地質環境の安定性を実証的に解明する。

- (4)地層の変形及び地下の熱・物質移動のメカニズムをモデル化することによって、地質環境の変化を長期にわたって予測するための情報数値モデルを開発する。
 - (5)地質環境の予測に用いる広範なデータベースを構築・整備する。
- 3)研究期間：平成3年度～7年度
4)研究機関：動力炉・核燃料開発事業団，地質調査所

⑬「地層処分に関する地殻変動及び低確率天然事象の研究」

- 1)研究目的：過去数十万年間（第四紀）の地殻変動，巨大火山噴火，マグマ貫入等にみられる低確率天然事象の実態及び発生様式を調査し，その傾向及び出現頻度から，これらの事象の数千年～数万年にわたる長期的な変化を予測し，地質環境の長期安定性を評価する技術を開発する。
- 2)研究内容
 - (1)地殻変動の比較的活発な地域を対象に，過去数十万年間の地殻変動の変化に対する事例研究を行うことによって地殻変動の上限を見積るとともに，その長期的な変化のプロセス及び要因に関する研究を行う。
 - (2)過去数十万年間の断層活動の推移，断層の発達・移行の歴史を調査し，その変化のプロセス及び要因に関する研究を行う。
 - (3)火山灰，岩脈の分布及びそれらの年代測定により，巨大火山噴火，マグマ貫入等の時間的及び空間的な発生パターンを明らかにする。
 - (4)断層及び火山の地下構造，割れ目分布，貫入岩体の構造等を調査し，地殻変動等の天然現象の力学的・熱的影響を明らかにする。
 - (5)過去数十万年間の地殻変動等の天然事象の傾向を未来に外挿することにより，数千年以上にわたる長期的な地質環境の安全性を評価する手法を開発する。

- 3)研究期間：平成3年度～7年度
- 4)実施機関：地質調査所

5. おわりに

以上述べてきたとおり，高レベル放射性廃棄物地層処分研究は，1985年以降地質調査所において活発に行われ，今後とも実施される予定である．地質調査所には，地層処分に関係して，特に長期問題への貢献が期待されている．長期未来予測は，近代科学の枠を越えるような最新の課題であるので，今後，基礎分野からデータ整備に至る広範な総合研究が必要である．

文 献

浅田忠一・大山 彰・倉本昌昭・法貴四郎・三島良績・望月恵一
監修（1989）：新版原子力ハンドブック．オーム社，953p.
原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会（1985）：高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画（昭和61年度～昭和65年度）.
原子力安全委員会放射性廃棄物安全規制専門部会（1990）：高レベル放射性廃棄物等安全研究年次計画（平成3年度～平成7年度）.
原子力委員会（1989）：昭和63年版原子力白書．470p.
原子力委員会（1990）：平成2年版原子力白書．393p.
原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会（1980）：高レベル放射性廃棄物処理処分に関する研究開発の推進について．
原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会（1984）：放射性廃棄物処理処分方策について（中間報告）.
原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会（1985）：放射性廃棄物処理処分方策について．
原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会（1989）：放射性廃棄物対策専門部会報告．
科学技術庁原子力局編（1989）：原子力開発利用長期計画—開発の現状と今後の計画—．日本原子力産業会議，184p.
科学技術庁原子力局編（1985）：原子力ポケットブック．昭和61年版，日本原子力産業会議，475p.
通商産業省編（1986）：原子力ビジョン—21世紀の原子力を考える．通商産業調査会，343p.

KOIDE Hitoshi (1991): Study of geologic disposal of high-level radioactive waste in the Geological Survey of Japan.

<受付：1991年2月19日>