

分置01

高レベル放射性廃棄物

地層処分技術開発成果報告

—可能性ある地層の総合評価—

技術資料		
開示区分	レポート No.	受領日
T	N1410 98-010	1998.9.30
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		

昭和59年3月26日

動力炉・核燃料開発事業団

目 次

1	序	1
1.1.	地層処分技術開発の必要性と国の方針	1
1.2.	動力炉・核燃料開発事業団の役割	2
1.3.	海外諸国の現状	4
2	動燃事業団における地層処分研究開発	5
2.1.	研究開発の経緯と体制	5
2.2.	研究開発の内容	7
3	総合評価の結果と今後の展望	9
3.1.	我国での高レベル廃棄物地層処分の可能性	9
3.2.	今後の展望	10
4	地層の調査	11
4.1.	目 的	11
4.2.	地層調査の手順	11
4.3.	調査項目の検討	12
4.4.	調査対象とする地層の抽出	12
4.4.1.	調査の対象となりうる岩石の抽出	
4.4.2.	調査対象とする地域の抽出	
4.5.	調査対象地域の調査	18
4.5.1.	調査内容	
4.5.2.	調査方法	
4.5.3.	調査結果のまとめ	

個人著者なし
団体著者扱い

5.	地層処分システム	21
5.1.	地層処分システム	21
5.2.	地層の包蔵性	22
5.2.1.	地層の包蔵性の調査研究の方法	
5.2.2.	地層の包蔵性の調査研究	
5.2.3.	OECD/NEAストリパ共同研究	
5.2.4.	まとめ	
5.3.	工学バリア	28
5.3.1.	工学バリアの機能	
5.3.2.	廃棄物固化体	
5.3.3.	固化体容器	
5.3.4.	充填材	
5.3.5.	その他の工学バリア	
5.3.6.	工学バリアの相互作用とモデリング	
5.4.	地層処分施設	35
5.4.1.	地層処分施設設計の考え方	
5.4.2.	地下設備の概要	
5.4.3.	機器設備の概要	
5.4.4.	地下設備の建設	
5.5.	地層処分の性能評価	44
5.5.1.	性能評価のためのシナリオ	
5.5.2.	性能評価の手法	
6.	海外の動向	48
6.1.	サイト選定に至る考え方	48
6.2.	技術開発の進め方	49
6.3.	社会的受容に対する考え方	51

7.	今後の研究開発と問題点	52
7.1.	有効な地層の選定について	52
7.2.	研究開発の課題	52
7.3.	高レベル廃棄物地層処分の実施に至る考え方	53
8	結 び	54

1. 序

1.1. 地層処分技術開発の必要性和国の方針

放射性廃棄物を適切に処理処分することは、原子力の研究・開発・利用を推進していく上での極めて重要な課題である。このため、原子力委員会は、昭和51年6月に研究開発計画を策定し、この計画に沿って、昭和52年以来、動力炉・核燃料開発事業団、日本原子力研究所等において研究開発が鋭意進められている。

原子力委員会は、昭和51年10月に公表した「放射性廃棄物対策について」において、放射性廃棄物対策の基本方針を示しているが、この中で高レベル放射性廃棄物（以下、高レベル廃棄物と呼ぶ）については、その基本的考え方として「半永久的に生活圏から隔離し、安全に管理することが必要である」としている。更に「処分（永久的な処分及びこれに代る貯蔵）については、長期にわたる安全管理が必要であること等から国が責任を負うこととし、必要な経費については、発生者負担の原則による」こととしている。また、高レベル放射性廃棄物対策の目標及び推進方策として、次のような考えを明らかにしている。「処分については、当面地層処分に重点をおき、我国の社会的、地理的条件に見合った処分方法の調査研究を早急に進める。」その後、原子力委員会は、昭和54年1月に放射性廃棄物対策専門部会を設置した。昭和55年12月、同専門部会は、上述した原子力委員会の基本方針を踏まえ、「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」と題して、地層処分に関する新しい研究開発計画を策定し、地層処分研究開発の基本的考え方として、次の2点を明確にしている。

- (1) 「できるだけ地下水が少ない安定した地層を選出するよう努めるとともに、多重バリアの考え方、即ち、「地層という天然バリアに工学的バリアを組み合わせることによって処分システムを構成する」という考え方を処分の基本的概念とする」
- (2) 「長期的な展望のもとに段階的に研究開発を行い、各段階の成果を踏まえて次の段階に進むものとする」

我国の高レベル廃棄物処分に対する研究開発は、以上の基本的考え方のもとに進められ、現在、放射性廃棄物対策専門部会報告（55年12月）の研究開発計画における第1段階を終了するところである。

1.2 動力炉・核燃料開発事業団の役割

放射性廃棄物対策専門部会が昭和55年12月に策定した高レベル廃棄物処理処分研究開発計画のうち、地層処分研究開発計画においては、一連の研究開発全体を5段階に分け、「可能性ある地層の調査」—「有効な地層の調査」—「模擬固化体現地試験」—「実固化体現地試験」—「試験的処分」と進めることとされている(図1-1)。動力炉・核燃料開発事業団(以下、動燃事業団と略称)はこの計画に沿って地層処分研究開発スケジュールの第一段階である「可能性ある地層の調査」に関する各種の調査・研究を進めてきた。専門部会による研究開発計画においては、第1段階の「可能性ある地層の調査」の進め方として、次のように述べている。「動燃事業団においては、——— ①地層に関する調査研究、②工学バリアに関する研究及び、③地層処分システム研究を行い、これらの成果を踏まえて、昭和58年度に可能性ある地層について総合評価する。その結果を、国のしかるべき評価機関においてチェックし、次の段階の広域調査を行うべき有効な地層を国として選定する。」

動燃事業団は、昭和52年より調査・検討を進めてきており、以上の計画に従って58年度に可能性ある地層の総合評価を行った。総合評価の基本的な内容は、次の2点である。

- (1) 第2段階において調査研究対象とされる有効な地層の選定に資するため、地層に関する調査研究、工学バリアに関する研究及び地層処分システム研究等の成果をとりまとめ、かつ評価する。
- (2) 第2段階研究開発における項目、内容、方法、設備等について、基本プログラムを明らかにする。

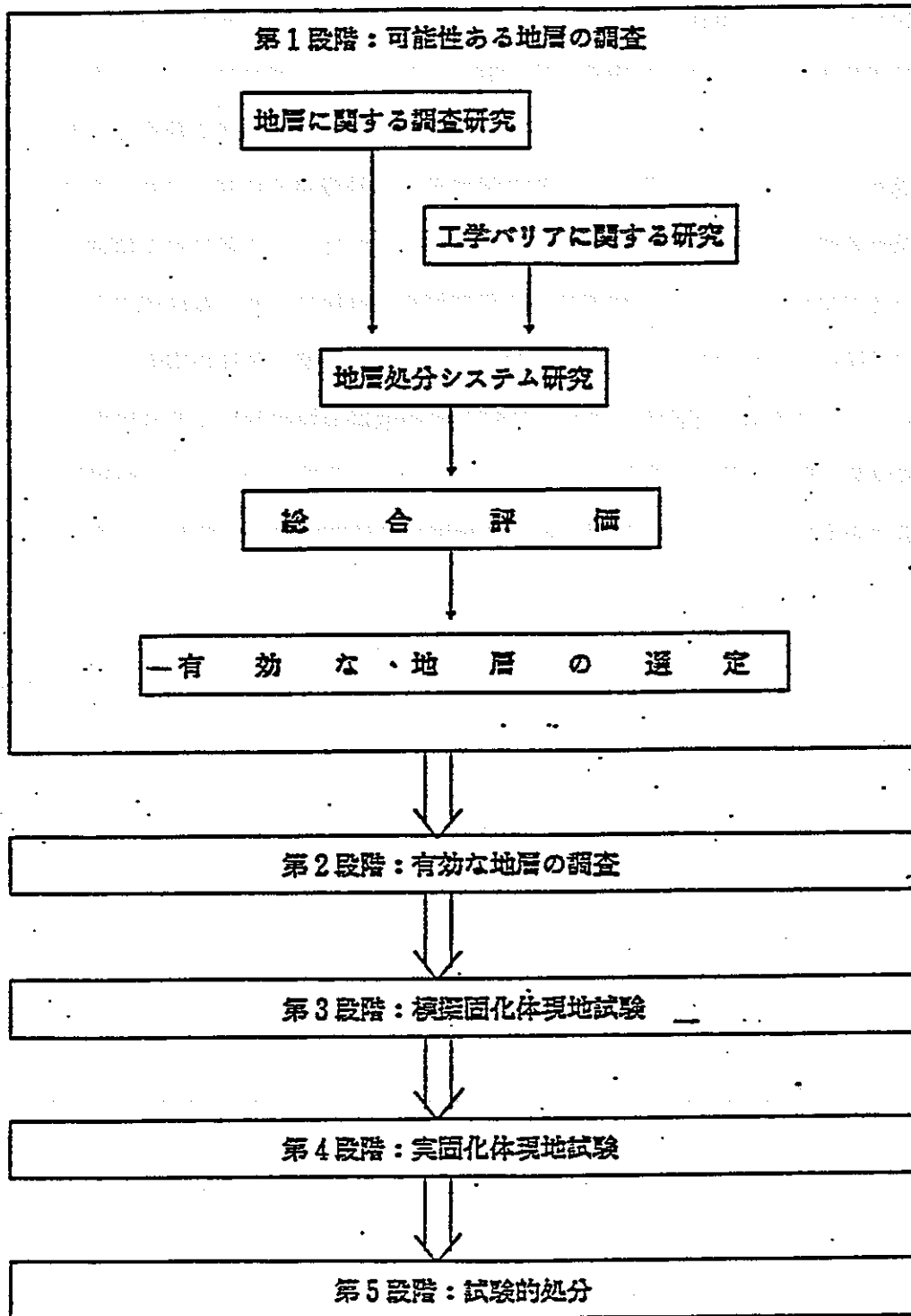


図1-1 地層処分研究開発計画

〔高レベル放射性廃棄物対策専門部会：
「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」
(昭和55年12月19日)〕より要約。

1.3. 海外諸国の現状

諸外国においては、各国夫々の自然的・社会的条件に適した、地質・地点を選び、高レベル廃棄物地層処分について調査研究が続けられている。特にアメリカ、西ドイツ、スウェーデン、ベルギー、カナダ、スイス、イギリス、フランス等の諸国が、精力的な研究を進めている。しかし、高レベル放射性廃棄物の地層処分に関しては、自然的・社会的要因が複雑に絡み合っているため、現時点においては、その最終的な解決までに到達している国はない。しかし、地層処分の研究開発の進展により、解決策の基本的条件は次第に明確になりつつあり、この点においては、ある程度の共通の理解ができつつある。特に、アメリカは、1983年1月に「1982年放射性廃棄物政策法」を発効させ、地層処分研究開発を新たな段階に前進させようとしている。我国においても、先進諸外国との国際協力を進めるとともに、我国における地層処分研究開発を一層強力に推進していく必要があると考えられる。

2. 動燃事業団における地層処分研究開発

2.1. 研究開発の経緯と体制

動燃事業団は、昭和51年10月の原子力委員会の「放射性廃棄物対策について」の中で、高レベル廃棄物対策の研究開発の中核のひとつとして位置づけられ、事業団内の体制の強化、人材の確保及び国立試験研究機関等と協力して研究開発をすすめることを要請されている。動燃事業団においては、昭和51年8月に「廃棄物対策室」を設置したほか東海事業所において高レベル廃棄物を主な対象として研究をすすめて来た。

動燃事業団の地層処分研究開発の実施体制を、図2-1に要約した。同図にみる通り動燃事業団の地層処分研究開発は民間機関の協力を得て進めてきた。また、この間、学識経験者による地層処分委員会及び地層処分総合評価分科会等の助言を仰ぐとともに内外のデータを参照し、OECD/NEAの行っている国際共同計画にも参加している。

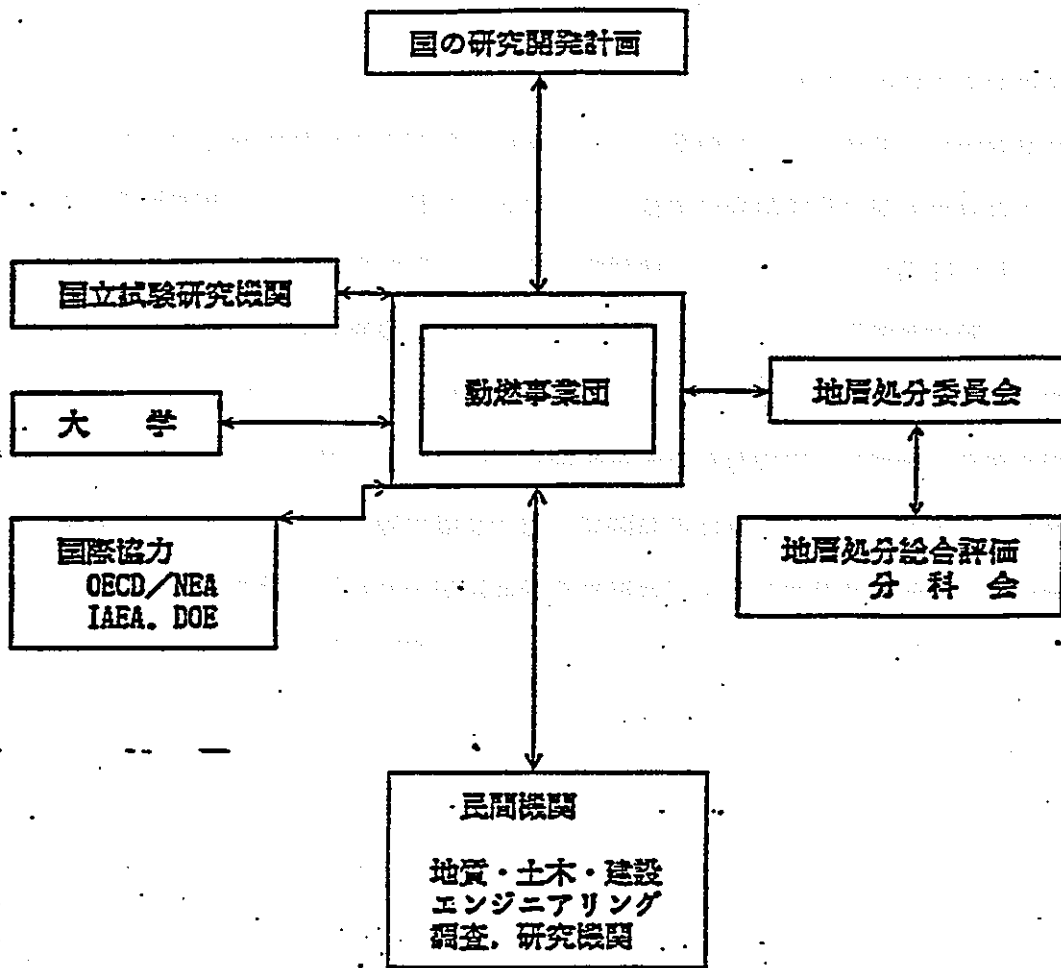


図 2-1 動燃事業団の地層処分研究開発実施体制

2.2. 研究開発の内容

動燃事業団の地層処分技術研究開発は以下の基本的考えに従って進めてきた。

(1) 研究開発の目標

本研究開発の目標は、我国における地層処分技術を確立することである。このため、日本の自然的、社会的諸条件に合致した地層処分システムを開発し、同システムの安全性を確立する。

(2) 地層処分システムの構成

地層処分システムは、地層という天然バリアに加えて、高レベル廃棄物固化体自身から処分場の地下施設までを包含する工学バリア、更にこれらに対する監視・管理等により構成することとした。本研究開発においては、この地層処分システムの考え方にに基づき、廃棄物の長期隔離をシステム全体として確保することを目指す。

(3) 社会的受容

地層処分に係る研究開発が円滑に進み、かつ本研究により開発された技術が我国で実施されるためには、法的な許認可を含め社会的な受容が得られなければならない。そのためには、本研究の意義および内容が広く社会に理解されることが必要であり、このため本研究開発の各段階を通じて、地層処分に関連する情報が正確で平易な形で社会に普及されるよう努める。

(4) 国際協力

IAEA、OECD/NEA、米国エネルギー省等との情報交換を行っているほか、OECD/NEAを通じてスウェーデン、ストリバにおける国際共同計画に参加し、地層処分に関する技術開発に努める。

以上の基本的考え方に従って動燃事業団が昭和52年度以降、昭和59年度まで実施及び実施予定の研究開発（スケジュール）を図2-2に示す。

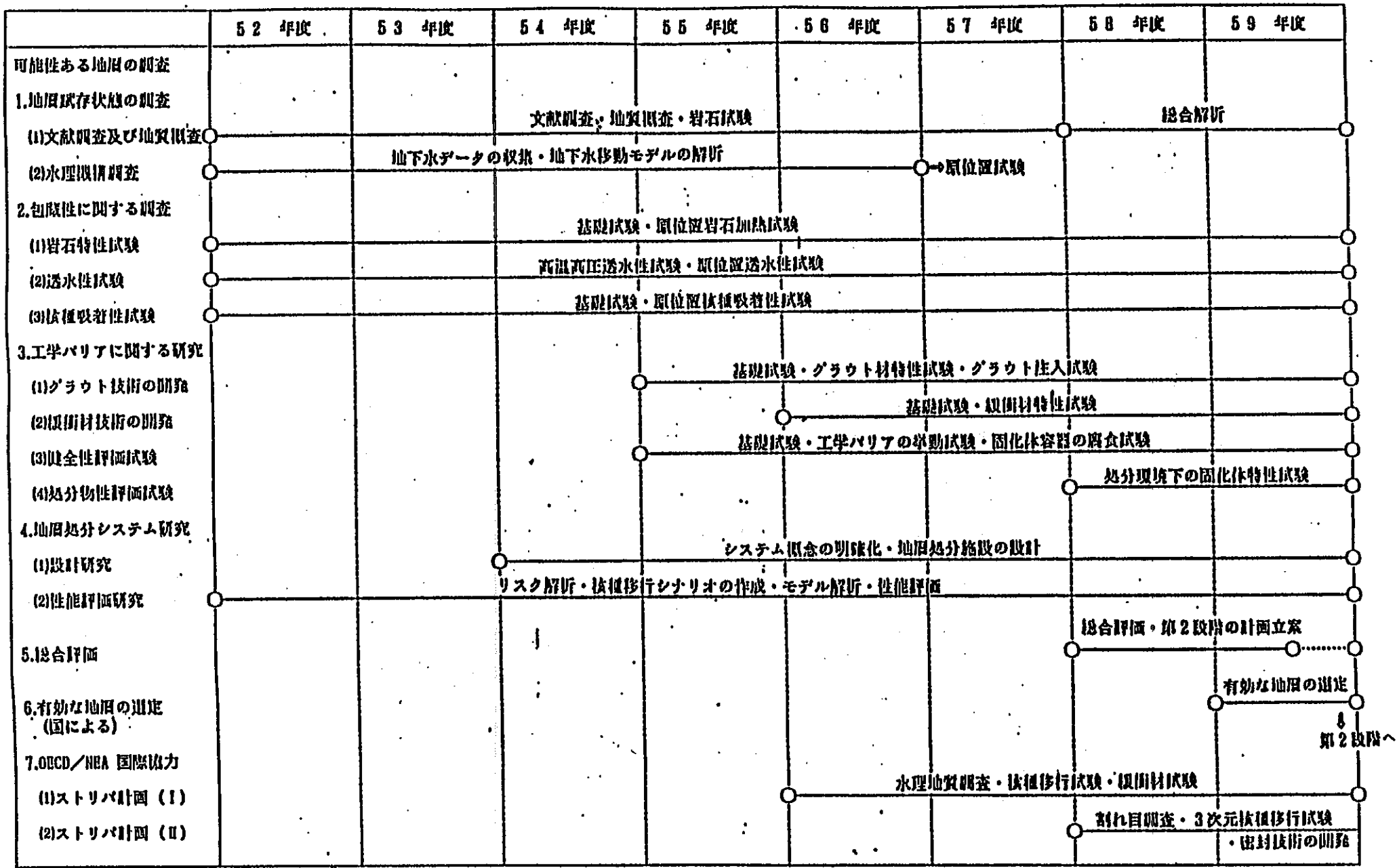


図2-2: 助燃事業団の地層処分研究開発スケジュール

3. 総合評価の結果と今後の展望

3.1 我国での高レベル廃棄物地層処分の可能性

第1段階における研究開発の結果、我国において高レベル廃棄物を地層処分することは、技術的可能性を有するものであると結論することができる。すなわち、我国の自然的・社会的条件を考慮すると、地層という天然バリアに工学バリアを組み合わせた地層処分システムが、妥当であると考えられる。従って、今後は、我国の特性に適合する地層処分システムを開発するため、研究開発を次段階に進めることが適当と考えられる。

(1) 地層に関する調査研究では、我国に広範に分布する地層及び諸外国において検討の対象となっている地層について、代表的に分布する地域の調査を進めた。調査は、高レベル廃棄物の地層処分の観点から重要と考えられ、また、諸外国でも調査の対象とされている自然的、社会的要因について文献調査、現地概査及び岩石試験を実施した。また、地層の包蔵性に対する検討の資料として、熱特性、透水性、及び放射性核種（以下核種とよぶ）の吸着性等に関する調査・試験を行った。この結果、我国で地層処分を行いうる地層は存在すると考えられる。

(2) 工学バリアとしては、ガラス固化体、ステンレス鋼等金属製の固化体容器及び粘土等の充填材などが考えられ、これらの材料および施工法等について調査及び試験を行った。この結果、固化体としてのガラスの化学的耐久性が高いこと、固化体容器として耐食性の高い金属材料があること、我国に存在する粘土・沸石類等は充填材として不透水性・核種吸着性等の点で良好な性質をもつものがあり、核種の環境への放出の抑制に有効であることが明らかとなった。

(3) 地層処分システムに必要な施設の機能及び構造等について検討した。この結果、関連する施設の設計と建設は現有技術で対応できるものが多く、今後の検討が必要な課題についても、その多くは既存の技術の積み重ねや将来の技術進歩によって解決できるものと考えられる。性能評価研究では、各バリアにおける核種の移行経路を想定したシナリオを策定し、これを基に各バリアの隔離性能及び核種の移行遅延効果を数式モデルにより解析した。

3.2 今後の展望

これまでの高レベル廃棄物地層処分についての検討結果を基礎として、我国の自然的・社会的条件に適合した地層処分システムの研究開発を進める。その際、地層処分及び長期貯蔵の両概念を有機的に結合させることに対しても考慮する。

今後、動燃事業団は、地層に関する調査を更に進めると共に、地下深部岩体の特性把握のための試験研究を行う。また、工学バリアの物性およびその適用に関する検討を行い、地層処分システム設計、性能評価等について、さらに研究開発を重ね、安全性の高い地層処分システムの確立をはかる。海外諸国における研究開発の状況等の内外の情報収集を積極的に行うとともに海外機関との協力によって処分技術の研究を進める。

地層処分の技術研究開発と並行して、地層処分に関する社会的受容性および事業主体等の制度的問題についても検討を行う。

4. 地層の調査

4.1. 目的

高レベル廃棄物の地層処分において行う地層調査は、高レベル廃棄物を隔離する能力をもつ地質環境を求めての調査研究であるが、一般の地質調査にはない下記の要素を含んでいる。

- ① 隔離能力をもつ地質環境。
- ② 隔離能力を超長期間にわたり維持しなければならない時間的要素。
- ③ 社会的受容。

動燃事業団の第1段階における地層調査は、調査対象となりうる地層について地層処分の見地からその特徴を把握することを目的として実施した。

なお、本報告書で用いる「地層」とは慣用的に地下の地質環境全体を意味するものとして、地質、地下水理、岩盤力学、地球化学等、地層処分から見て重要な要因や現象を含むものである。

4.2. 地層調査の手順

地層調査は下記の手順によって実施した。

1) 調査項目の検討

地層調査に必要とされる調査項目の検討を行う。

2) 調査対象となりうる岩石の抽出

我国に広い分布を有する岩石、及び諸外国で研究対象となっている岩石を検討し、調査の対象となりうる岩石を抽出する。

3) 調査対象とする地域の抽出

日本全域について調査対象となりうる岩石の分布図を作成し、この中から活断層の周辺、火山活動の活発な地域、人口密度の高い地域などを除外し調査対象地域を抽出する。

4) 対象地域の調査

各調査項目に沿った調査方法を検討し実施する。

5) 調査結果のまとめ

調査結果をとりまとめ地層処分の見地から地層ごとにその特徴を把握する。

4.3. 調査項目の検討

文献調査等による検討を行い、地層処分において明らかにすべきものとして、下記6項目が集約される。

- ① 地層の立体的な規模と安定性
- ② 水理・水文の性質
- ③ 地球化学的性質
- ④ 地層処分施設の建設・操業・閉鎖時における健全性
- ⑤ 人類の活動、環境保護、人口状況等の社会的・経済的な問題点
- ⑥ 地層処分技術開発を推進するにあたっての社会的受容に対する配慮

以上を参照し、我が国の地質環境に適用されうる調査項目(要因)を検討した。これらの調査項目を表4-1に要約した。

なお、この調査項目については、我が国における調査研究の進展状況及び先進諸国での成果を参照し、逐次改訂を進めていくことが必要である。

4.4. 調査対象とする地層の抽出

第1段階における地層調査を行う対象地層を抽出するため、はじめに調査の対象となりうる岩石の抽出を行い、その分布地について自然的社会的要因による選択を加えた。

4.4.1. 調査の対象となりうる岩石の抽出

調査対象とする地層を抽出するため、第一に我が国に分布する岩石について検討を行った。

表 4 - 1 地 層 調 査 項 目

	条 件	調 査 項 目
自 然 的 要 因	地層は充分な深さかなければならない。	分布深度、河川作用、地すべり、地形、岩石のタイプ、氷河作用、隕石衝突、風化
	地層は垂直的に充分な厚さかなければならない。	垂直の厚さ、空洞、力学的強度、割れ目、均一性・等方性
	地層は水平的に充分な広さかなければならない。	水平的広がり、空洞、割れ目、均一性・等方性、力学的強度
	地層の物理的保全を脅かす隆起・沈降があってはならない。	構造発達史、地盤負荷、地震
	地層の物理的保全を脅かす断層があってはならない。	割れ目、地盤負荷、地震、構造発達史、均一性・等方性
	地層の健全性に危険を及ぼす地震、火山活動があってはならない。	火山活動、地温勾配、マグマ活動、地震、構造発達史
	地下水による放射性核種の生物圏への移行は充分小さくなくてはならない。	水の移動、排水層、空洞、水位、割れ目、透水層、水理的历史、溶解、鉱物、岩石崩壊、吸着
	放射線によって地層の包蔵性が損なわれてはならない。	放射線による分解、エネルギーの留積、力学的強度、鉱物
	崩壊熱によって地層の包蔵性が損なわれてはならない。	熱伝導、熱膨張、力学的強度、水の移動
	地層は充分な力学的特性をもっていなければならない。	力学的強度、割れ目、均一性・等方性、鉱物、岩石のタイプ、岩石崩壊、熱膨張性、風化
地層にかかる応力は長期健全性に危険を及ぼすものであってはならない。	応力分布、割れ目、地震、均一性・等方性、力学的強度、構造発達史	
調査対象地域の地質・地理・地形は施設の建設に適合したものでなければならない。	施設、岩石のタイプ、地形、気象、土地利用、人口	
社 会 的 要 因	鉱物資源開発の可能性ある地域をできるだけ避けなければならない。	資源分布、資源、資源品位、既存の利権、資源需要
	水資源開発の可能性ある地域をできるだけ避けなければならない。	既存の利権、排水層、流量、土地利用、人口、地形、水位、岩石のタイプ
	土地利用に関する競争の少ない地域でなければならない。	土地利用、人口

4.4.1.1. 我国の地質の特徴

日本列島はフェッサ・マグナによって東北日本と西南日本に、西南日本は中央構造線によってさらに内帯と外帯に大きく区分される。この地質構造に関係して新生代古第三紀以前の地層群は、日本列島の骨格を作っているものという意味で、基盤岩類であるということが出来る。これに対し、新生代新第三紀以後の地層群は、前述の基盤岩類をおおっているものという意味で、被覆層とよぶことができる。

我国には表4-2にその大要を示すような多様な岩石の分布が認められているが、単一の地層として大きなものは少ない。表4-3に我国の主要な岩石の分布状況を示した。

4.4.1.2. 岩石の検討

我国に分布する主要岩石の分布状況を基に、

- ・我国に分布する主な岩石と海外で調査対象となっている岩石との関連性
 - ・我国に分布する主な岩石の一般的性質
- について検討し、以下の岩石を調査対象とすることにした。

- ・火成岩 輝緑岩 (塩基性岩類)
花崗岩類 (花崗岩, 花崗閃緑岩, 石英斑岩など)
- ・古第三紀以前の堆積岩
泥質岩 (頁岩, 粘板岩, 砂岩との互層等)
石灰岩
- ・新第三紀の堆積岩
泥質岩 (泥岩, 頁岩, 砂岩との互層等)
凝灰岩
- ・変成岩 結晶片岩

なお、以上の岩石を第一段階において調査の対象とすることとしたが、ここで調査の対象から外した岩石、例えば、新第三紀の火山岩類等は地層処分の対象地層として可能性がないことを示すものではない。

表4-2 我国に分布する主な岩石

区 分		主 な 岩 石
変成岩		片麻岩, 結晶片岩, 千枚岩など
火成岩	超塩基性岩	橄輝岩, 蛇紋岩など
	塩基性岩	玄武岩, 輝緑岩, 粗粒玄武岩, はんれい岩など
	中性岩	安山岩, 閃緑岩, ひん岩など
	酸性岩	流紋岩, 石英安山岩, 花崗岩など
堆積岩	碎屑岩	泥, 砂, 礫, 泥岩 (頁岩, 粘板岩を含む), 砂岩, 礫岩
	火山碎屑岩	火山灰, 凝灰岩, 凝灰角礫岩など
	その他	石灰岩, 石炭, 豆炭, チャート, 珪藻土など

地質調査所 (1978) 日本地質図 (1/100 万) 等を参照して作成

表4-3 我国の主要岩石の分布状況

岩 石		面 積 (km ²)	面積率 (%)
変成岩	広域変成岩	13.300	3.6
堆積岩	古生代, 中生代の堆積岩	79.600	21.5
火成岩	花崗岩類	49.300	13.3
	塩基性および超塩基性岩	5.800	1.6
堆積岩	古第三紀の堆積岩	69.900	18.9
	新第三紀の堆積岩		
	第四紀の堆積岩	76.500	20.7
火成岩	新第三紀~第四紀の火成岩	75.400	20.4
合 計		369.800	100.0

都城秋穂 (1965) "変成岩と変成帯" より作成

4.4.2. 調査対象とする地域の抽出

調査の対象とした岩石について、その分布を調査し、図4-1を作成した。図4-1のうちから下記の要因に係わる地域を除外して調査対象地域を抽出した。

自然的要因

河川作用：浸食の激しい河川の周辺、洪水の発生率の高い地域

地すべり：地すべり発生率の高い地域

地形：地形が急峻な地域

割れ目：破碎帯または活断層、及びその周辺地域

地盤負荷：第四紀における地盤の隆起・沈降の激しい地域および活褶曲の認められる地域

地震：大規模な地震の発生率が高い地域


火山活動：活火山の分布する地域および影響が大きい地域

透水層：第四紀地層の分布する地域

社会的要因

土地利用：三大都市圏、国立公園等の環境保全地域

人口密度：人口密度の高い地域

 調査の対象とした岩石の分布する地域

調査対象とした岩石の内訳

火成岩

堆積岩 (第四紀を除く)

変成岩

4.4.2.項を参照

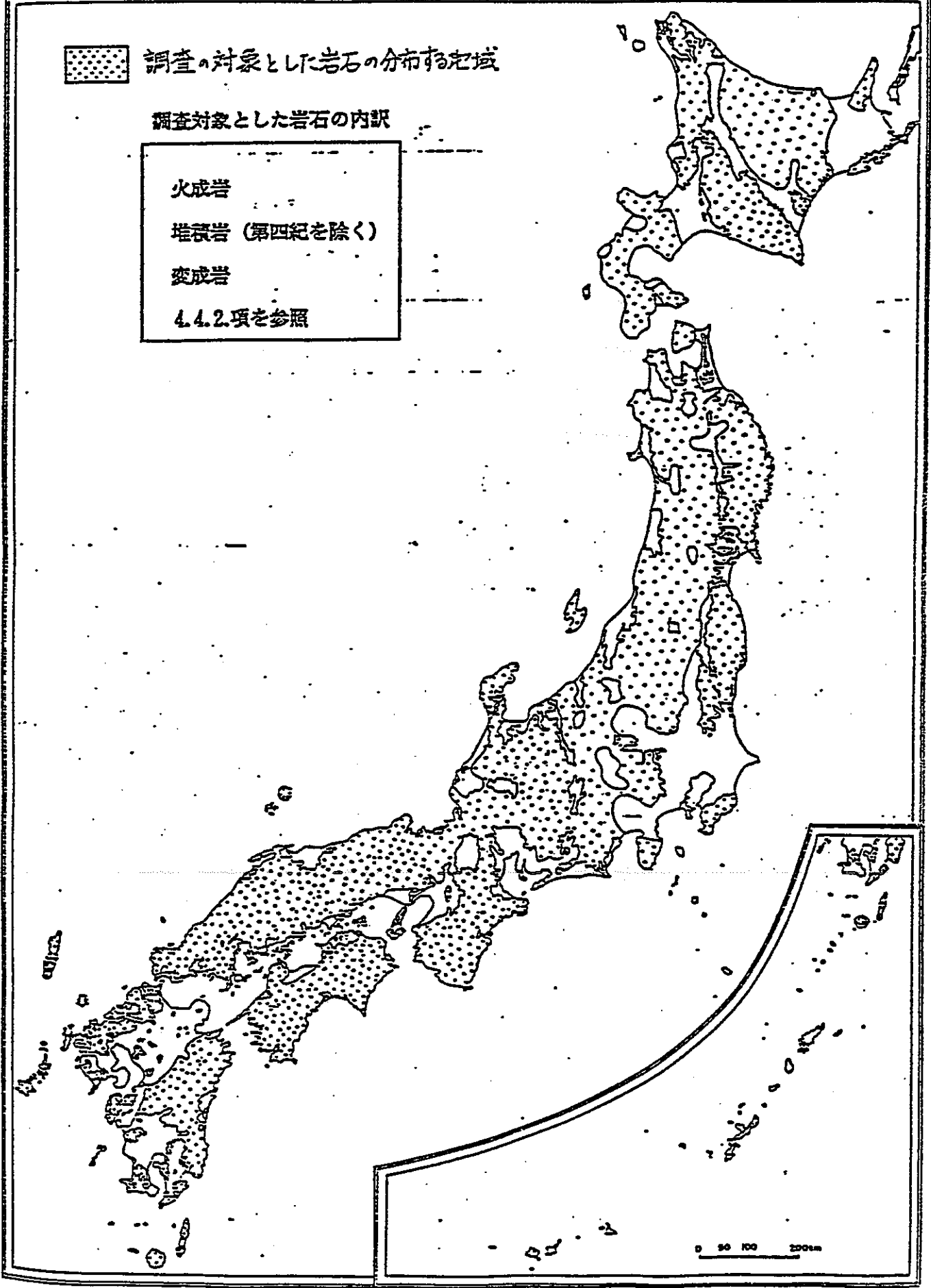


図4-1 調査の対象とした岩石の分布図

4.5. 調査対象地域の調査

4.5.1. 調査内容

表4-1を参照して以下の調査項目を抽出し、調査内容を検討した。

自然的要因

- 地すべり.....対象地層の分布する地域における地すべりの有無・分布状況・発達状況等
- 分布深度.....対象地層の分布する深度、すなわち地表から地下深部までの分布状況
- 垂直的厚さ.....対象地層の垂直方向の厚さ
- 水平的広さ.....対象地層の地表に露出している面積
- 割れ目.....断層・破碎帯の性状・分布、発達状況および断層や破碎帯における透水性等
- 水の移動.....対象地層の透水性
- 河川作用.....対象地層の分布地域における河川の分布・規模・浸食状況・河川堆積物の状況等
- 地形.....対象地層の分布地域における地形の状況
- 岩石のタイプ.....対象地層の岩質
- 均一性・等方性.....岩質の垂直的および水平的な変化
- 空洞.....対象地層中にある天然及び人口空洞の有無・種類・規模・分布状況および水理との関連性
- 力学的強度.....岩石試験による物性
- 熱特性.....岩石試験による熱膨張及び熱伝導特性
- 地質構造発達史.....対象地域の地史、特に第四紀における隆起・沈降等の構造運動及び火山活動
- 岩石組織.....顕微鏡による岩石の組織観察
- 鉱物.....岩石試料による組成鉱物の同定

社会的要因

資源分布……………対象地域及び周辺における金属鉱物・石炭・石油等の地下資源が存在する可能性、種類・分布状況・開発状況

土地利用……………対象地層の分布する地域におけるダムの有無・河川に関する土地の利用状況および農業・林業・工業等に関する土地の利用状況

人口……………対象地域における集落等の分布状況

4.5.2. 調査方法

文献調査、現地概査および岩石試験により調査した。

文献調査における自然的要因の調査は、地質調査所、金属鉱業事業団、大学、地質に関する学会、地質研究者などが公表した文献を収集し、それらの記載事項を地層処分の観点から整理した。社会的要因の調査は、官公庁から発行されている文献や調査の対象とする地域に含まれる市町村で作成した要覧などを主たる調査対象とした。

現地概査は、主要道路沿いの地域について実施し、文献調査の結果を検証するとともに、岩石試料の採取等を行った。

岩石試験は、対象地層について代表的な数箇所より新鮮な試料を採取し、その機械的強度・熱的特性等10数項目にわたる室内試験を実施した。

4.5.3. 調査結果のまとめ

調査の対象とした地域の調査結果をもとに、各地層の特徴を検討した。各地層の特徴は以下のとおりである。

輝緑岩（塩基性岩類）は、必要な空間的大きさを持ち、且つ本来の岩質として硬く、水を透し難い岩石である。しかし、一部地域では割れ目に沿った地下水の浸透が認められている。また、一部では金属等の鉱物資源が認められている。

花崗岩類は、我国に分布する岩石としては最も大規模な岩体を成しているもので、本来、岩質は硬く、水を通し難い等、地層処分にとって好ましい点を多く持つ

ものである。しかし、地域的に割れ目が発達し、地下水の浸透、風化等が認められ、その一部、特に浅い部分等で激しい風化の結果、強度等の点で地層処分に適さないものもみとめられる。鉱物資源は一般に乏しい。

古第三紀以前の泥質岩は、必要な空間的大きさを持ち、本来の岩質は硬く、水を透し難い岩石であり、一般に核種等の吸着能力が高い。一方、断層等の割れ目に沿った地下水の浸透が部分的に認められる。一般に鉱物資源は乏しい。

石灰岩は、必要な空間的大きさを持ち、且つ岩質は硬く、水を透し難い岩石である。一般に割れ目は少ないが、岩体内に空洞が多く、空洞下部等には地下水が認められる。石灰岩は窯業原料等としての価値があるほか、一部地域では金属等の鉱物資源も認められる。

新第三紀の泥質岩は、一般に広い分布、厚い層厚をもつもので、水を透し難く、且つ核種等の吸着能力が高い等、地層処分にとって好ましい点を持つ岩石の一つであるが、一部においては軟弱層、地すべり等が認められている。石油、ガス等の資源が一部地域で認められている。

凝灰岩は、一般に厚く、広い分布を持ち、核種等に対して高い吸着能力を持つ岩石である。一部で黒鉱等の鉱物資源が認められている。

結晶片岩は、厚く、広い分布、硬い岩質を持つ岩石である。一部では金属等の鉱物資源が認められている。

5. 地層処分システム

5.1. 地層処分システムの内容

地層処分システムの内容は高レベル廃棄物が直接・間接いずれの面においても生物圏に影響を与えないように、深部地層中に隔離し封じ込めることを目的とするものである。

高レベル廃液はガラス等により固化され、除熱を含め一定期間貯蔵管理された後、地層処分場に収容される。

地層処分場は固化体を地下深部に収容し、工学バリア・天然バリアの持つ隔離性能によって、廃棄物の放射能が減衰し、生物圏に悪影響を与えなくなるまで確実に地層中に隔離するための施設である。

工学バリア及び天然バリアに対し要求される隔離性能としては、高レベル廃棄物が地層に与える影響、処分場の建設が地層に与える影響、等を前提として地下水その他放射性物質の漏えいに結びつく媒体を廃棄物に接触させないことであり、この間には隔離妨害に結びつく人間の侵入、及び非常に長い時間の間に発生する各種の異変においてもその隔離性能が機能しうるものでなければならない。

高レベル廃棄物が地層に与える影響の主要なものとしては、高レベル廃棄物がもつ化学的、熱的特性が地層との間で起こす相互作用があり、また処分場の建設、固化体の投入等の実施において岩盤及び水文学的環境に与える影響が考えられる。

更に地層処分においては現在の知見からは予測困難な地震など地殻変動等をも考慮しなければならないので、出来るだけ安定な地質環境中にその立地地点を選ぶと共に、工学バリアをも利用する多重バリアの考え方を地層処分システムにおける基本的な考え方としたものである。

5.2. 地層の包蔵性

地層の包蔵性とは、収納した高レベル廃棄物から水の接近を妨げる、あるいは少なくすることや隕石などの物理的衝撃から防護する機能並びに地下水等の媒体によって運ばれる核種の移行を遅らせる機能である。

高レベル廃棄物地層処分の性能評価において、核種を人間環境に運ぶ要因のうち最も可能性が高いものは地下水を媒体として地下水の移動に伴うものがあげられる。このため、地層の包蔵性に関する課題は、地層中の水の移行速度や経路などの水理機構の解明並びに地層構成岩石のもつ核種吸着機構の解明等があげられ、その主要なものは次の4点に集約される。

- ① 地層中での地下水の移行など水理学的な挙動の把握
- ② 岩石の核種吸着機構の解明
- ③ 上記①、②に基づく包蔵性評価モデルの開発・検証
- ④ 包蔵性評価モデルの入力データ測定技術の開発

5.2.1. 地層の包蔵性の調査研究の方法

前項で述べたように包蔵性の調査研究の主たる課題は水理機構と核種吸着機構の解明であるが、地層処分における本研究の特徴としては、地下深部の岩盤中での現象でありかつ、放射線と崩壊熱の負荷によって環境条件が変化することを前提として解明する必要がある点である。したがって、地層の包蔵性を評価するうえでは、まず地下岩盤とその環境の特性を把握した上で地下水を含む岩盤に及ぼす放射線及び熱負荷の影響を把握し、地下水と核種の挙動を明らかにすることが必要である。

なお、地層の包蔵性の評価すなわち天然バリアの特性の解明における難点として次のことが指摘できる。

- ① 岩盤は非均質性、異方性を有し、多くの不連続面を内包している。
- ② ①の理由もあり、岩盤はサイト固有の性質を持つ。
- ③ 岩盤はきわめて大きい寸法効果を有している。
- ④ 岩盤を調査するための手段（ボーリングやトンネルの掘削など）そのものが、岩盤本来の特性を変える可能性がある。

このような状況下において地層処分に必要とされる長期的な地層の包蔵性を評価するためには、各種の現地調査に加えて室内試験・原位置試験を実施し、多くの基礎データを収集しなければならない。しかし、長期的、かつきわめて広い領域の現象は、調査や実験では完全に把握することは困難である。この点を補うため、シミュレーションモデルによる現象の予測が広く行われている。この予測においては各種の調査や試験で解明された現象をモデル化し、そのモデルに調査及び試験で得られたデータを入力して、シミュレーションによって長期的かつ広い領域の現象を予測することとしている。したがって、モデルの妥当性がきわめて重要な問題となるので、モデル確立のためにはモデルの検証、改良を繰り返さなければならない。

以上のように、地層の包蔵性評価のためには、各種の調査、試験、およびモデル開発が必要になる。本「可能性ある地層の調査」の段階における包蔵性の調査研究においては水理学的挙動に関する現象観察とモデルの開発及び核種吸着機構に関するデータの収集を行った。さらに岩石中における試験方法の開発およびモデルやデータの適用とそのフィードバックに資する研究を原位置試験等において実施した。

5.2.2. 地層の包蔵性の調査研究

動燃事業団における調査研究の実施状況は次のとおりである。

5.2.2.1. 地下水の挙動の把握

(1) 文献および現地調査

- ・比較的地下構造の知られている鉱山などで、地表と地下水の水質を調査し、水の移行経路を推測する。
- ・その中からいくつかの例を抽出し、さらに詳細な水文学的調査を実施し、地下水挙動解析のデータとする。

(2) モデル開発

- ・上記のデータをもとに、地下水挙動解析モデルを開発する。
- ・開発したモデルをもとに、シミュレーションを行い、現地調査の結果と比較する。

(3) 室内試験

- ・多孔媒質として扱った岩石サンプルの透水試験

・割れ目を含んだ岩石サンプルの透水試験

・大きい岩石サンプルの透水試験

(4) 原位置試験

・原位置における岩盤を対象にした各種の透水試験

・開発したモデルを適用することによるモデルの検証

5.2.2.2. 核種吸着機構の解明

(1) 文献および現地調査

・原位置試験場などでの地球化学的環境の調査

・文献による岩石と核種の相互作用に関するデータの収集

(2) 室内試験

・岩石と核種の相互作用に関するバッチ試験およびカラム試験

・岩石および地下水の地球化学的検討

(3) 原位置試験

・地下岩盤における核種移行試験

・分配係数モデルの適用と検証

(4) モデル開発

・地球化学的モデルの開発

・地球化学的モデルの原位置試験への適用

5.2.2.3. 包蔵性評価モデルの開発・検証

(1) 文献および現地調査

・熱と地下水挙動に関しての地熱地帯に関する文献および現地の調査

(2) 室内試験

・高温状態における岩石強度試験

・高温状態における岩石透水試験

・高温高圧状態における岩石透水試験

(3) 原位置試験

・地下岩盤に対する岩石加熱試験

・地下岩盤に対する岩石加熱透水試験

(4) モデル開発

- ・地熱地帯における地下水挙動解析モデルの開発
- ・熱応力解析モデルの地下岩盤に対する岩石加熱試験への適用
- ・熱と地下水挙動の複合モデルの開発と地下岩盤に対する岩石加熱透水試験への適用

5.2.2.4. 入力データ測定技術開発

前記のモデルに入力すべきデータの種類の種類はモデルによって異なり、また必要な精度も異なる。したがって、データ測定技術の開発もモデル開発と不可欠のものである。

入力データについては、現地調査、室内試験や原位置試験においてそれぞれ測定されているが、測定方法が確立していない場合について、測定技術の開発、あるいは既存技術による測定データから推測することを試みた。

5.2.3. OECD/NEAストリバ共同研究

ストリバ計画は、OECD/NEAの放射性廃棄物の地層処分に関する国際共同研究計画の一つとして行われている結晶質岩に関する原位置の共同実験計画

(ストリバ計画 (I) : 昭和55~59年 (1980~1984) , ストリバ計画 (II) : 昭和58~61年 (1983~1986)) である。動燃事業団は、昭和56年度 (1981年) からOECD/NEAを通じて同計画に参加してきた。

ストリバ鉱山は、スウェーデンの中央部に位置し、鉄鉱床に隣接して花崗岩体があり、この岩体の深部約350mに改めて空洞が掘削され、地層処分の基礎的かつ一般的課題について調査・試験を行っている。

5.2.3.1. ストリバ計画 (I)

(1) ボーリング孔による水理地質調査

水平及び垂直のボーリング孔を利用した透水性試験等を行い、割れ目を伴う花崗岩体の水理特性を把握する。また、ボーリング孔より地下水を採取分析し、深部地下水の地球化学的性質を明らかにする。

(2) 割れ目内の核種移行試験

非吸着性及び吸着性トレーサーを用いて、単一割れ目内のトレーサー試験を行い、割れ目を移行する核種の吸着現象を把握する。

(3) バッファマス試験（工学バリアの挙動試験）

模擬キャニスターを岩盤中に埋設し、岩盤及びバッファマス（ベントナイト、ベントナイ／石英砂混合）への熱の影響並びに地下水の浸透に伴うバッファマスの挙動を観測する。

ストリバ計画（Ⅰ）で開発された調査試験技術は汎用性のあるものであり、今後、我国における地層処分技術開発に適用されるものである。

5.2.3.2. ストリバ計画（Ⅱ）

ストリバ計画（Ⅱ）は昭和57年（1982年）10月総合技術委員会（JTC）で実施項目が決定され、昭和58年（1983年）1月より調査・試験が開始された。

ストリバ計画（Ⅱ）はストリバ計画（Ⅰ）の調査・試験等の過程で指摘された問題点を発展させたもので、次の4項目からなる。

- (1) 破砕帯調査技術に関する試験
- (2) 三次元物質移行試験
- (3) 割れ目の地下水流と核種移行に関する試験
- (4) ボーリング孔及び坑道の密封技術に関する試験

5.2.4. まとめ

以上の地層の包蔵性の調査研究を実施した結果、試験方法や評価方法について多くの知見を得たほか各種のデータを蓄積することができた。しかし、今後解明しなければならない多くの課題が残されており、これらは次の段階で検討しなければならない。

残された課題の主なものは次のとおりである。

- ① 岩石中の割れ目系の調査方法の確立とその透水性のモデル化
- ② 大規模かつ長期間の緩慢な現象の観察
- ③ 地球化学的な現象の解明とモデル化
- ④ 複合現象の解明とモデル化
- ⑤ 天然バリアと工学バリアを組み合わせた地層処分システムの原位置試験
- ⑥ 原位置試験と評価モデル間の比較・検討

5.3. 工学バリア

工学バリアは廃棄物固化体、キャニスター、オーバーバック、充填材、地下施設等で構成され、天然バリアと相補うことによって全体としての地層処分システムを組立てるものである。

5.3.1. 工学バリアの機能

地下深部に収容された廃棄物固化体中の核種が、人間環境に移行する場合、最も可能性の高いシナリオとしては地下水が処分施設に侵入し、キャニスターやオーバーバックを侵食した後、ガラス固化体に接触し、その中の核種が水に溶解又は微粒子として水中に移行した上で人間環境に達するというものである。このようにして地下水に移行した核種が生物圏に達する間には充填材等の工学バリアや周辺の岩石中を通過しなければならない。この間、吸着、沈澱をくり返すことによって核種の移行する速度は地下水の流速に比べて遅いと考えられる。以上のシナリオにおける工学バリアの機能を要約すると下記の事項が挙げられる。

- ・ 廃棄物固化体に地下水が接触するのを防ぐとともに、固化体から発生する熱を周辺の岩盤に効果的に伝導する。
- ・ 万一地下水中に核種が溶出した場合、同核種が施設周辺の岩盤中に移行するのをできるだけ遅らせる。

工学バリアの種類と機能を表5-1に示す。

表5-1 工学バリアの種類と機能

バリアの種類		主な機能
廃棄物固化体		化学的安定性、熱的安定性
固化体容器	キャニスター	耐蝕性、耐圧性、熱伝導性
	オーバーパック	耐蝕性、耐圧性、熱伝導性、放射線遮蔽
充填材	緩衝材 埋戻材	止水性、核種吸着性、自己シール性、膨潤性、熱伝導性
その他	グラウト シーリング プラグギング など	止水性、岩盤補強

5.3.2. 廃棄物固化体

高レベル廃棄物の固化材としては、ガラス、岩石、セラミックなどが考えられ、その安定性等についての検討が内外の研究者によって進められている。現在、これらのうちで、ホウケイ酸ガラスについての研究が広く、且つ積極的に進められている。これは、ガラスが長期間安定した物質であるほか水に対する核種の浸出及びキャニスターとの両立性についても良好な特性を示すことに基づいている。

5.3.3. 固化体容器

固化体容器であるキャニスター及びオーバーバックが健全である間は、核種は地層中に拡散する可能性はない。この意味で固化体容器は重要なバリアの一つである。従って、固化体容器は、耐蝕性、耐圧性、耐熱性、耐放射線性において優れた材料であることが要求される。

・ 我国及びスウェーデンでのキャニスター及びオーバーバックの設計例を表5-2に示す。スウェーデンの場合は、Cr-Ni 鋼製のキャニスターにガラス固化体を封入し、さらにオーバーバックとして、内側に10cm厚の鉛と、その外側に6mm厚のチタンとで被覆する案が有力である。チタンが地下水に溶解するのに数1,000年、鉛が溶解するのに100万年を要すると考えられている。

表5-2 キャニスター及びオーバーパックの設計例

	日 本 (動燃事業団)	スウェーデン
廃棄物の形態 重量 (kg)	ガラス固化体 300	ガラス固化体 420
キャニスターの材質 径 (cm) 高 (cm)	SUS 304L 43 1.345	Cr-Ni鋼 40 1.500
オーバーパック	Ti合金, Ni合金等	内層: (材質) 鉛 (厚さ) 10 (cm) 外層: (材質) チタン (厚さ) 6 (cm) (外径) 61.2 (cm)

5.3.4. 充填材

高レベル廃棄物の地層処分においては、キャニスター又はオーバーバックと周囲の岩石との間に或る種の材料を充填することが必要である。充填材には以下の機能が要求される。

- ・地下水とキャニスター及びオーバーバックとの接触を極力抑止する。
- ・地下水に溶出した核種を吸着し、周囲の岩石への移行を抑える。
- ・廃棄物固化体の溶出、容器材料の腐食を抑えるために、 pH や Eh など地下水の化学条件を制御する。
- ・周囲の岩石の変形によって生じる応力を緩和して廃棄物固化体を保護する。
- ・廃棄物固化体から発生する熱を周囲岩石へ効果的に伝導する。

このような機能に優れた材料として、止水性及び膨潤性に優れたベントナイト、核種吸着性に優れた沸石類、熱伝導性に優れた石英砂等が挙げられており、地層処分においては夫々の機能を有効に活用した材料の選定・施工方法をとることによってその機能が満足されることになる。

5.3.5. その他の工学バリア

地層処分施設には、立坑、トンネルなどの空洞が設けられる。この空間は固化体への地下水の浸透或いは核種の移行の通路となる可能性がある。そのため、これらの空洞はその使用目的が終了した時点において充填、密封して止水および強度の増加をはかることが必要である。このようなシーリング、ブラッキングに要求される機能としては止水性、耐圧性、長期健全性等があげられる。このようなシーリング、ブラッキングの技術は油田、ガス田、および、鉱山などの分野で研究開発・実用化されている。

これらに使用される材料としては、セメント、粘土、碎石、グラウト、金属、セラミックなど種々の材料が考えられている。

図5-1はシーリング、ブラッキング状況の一例を示すものである。

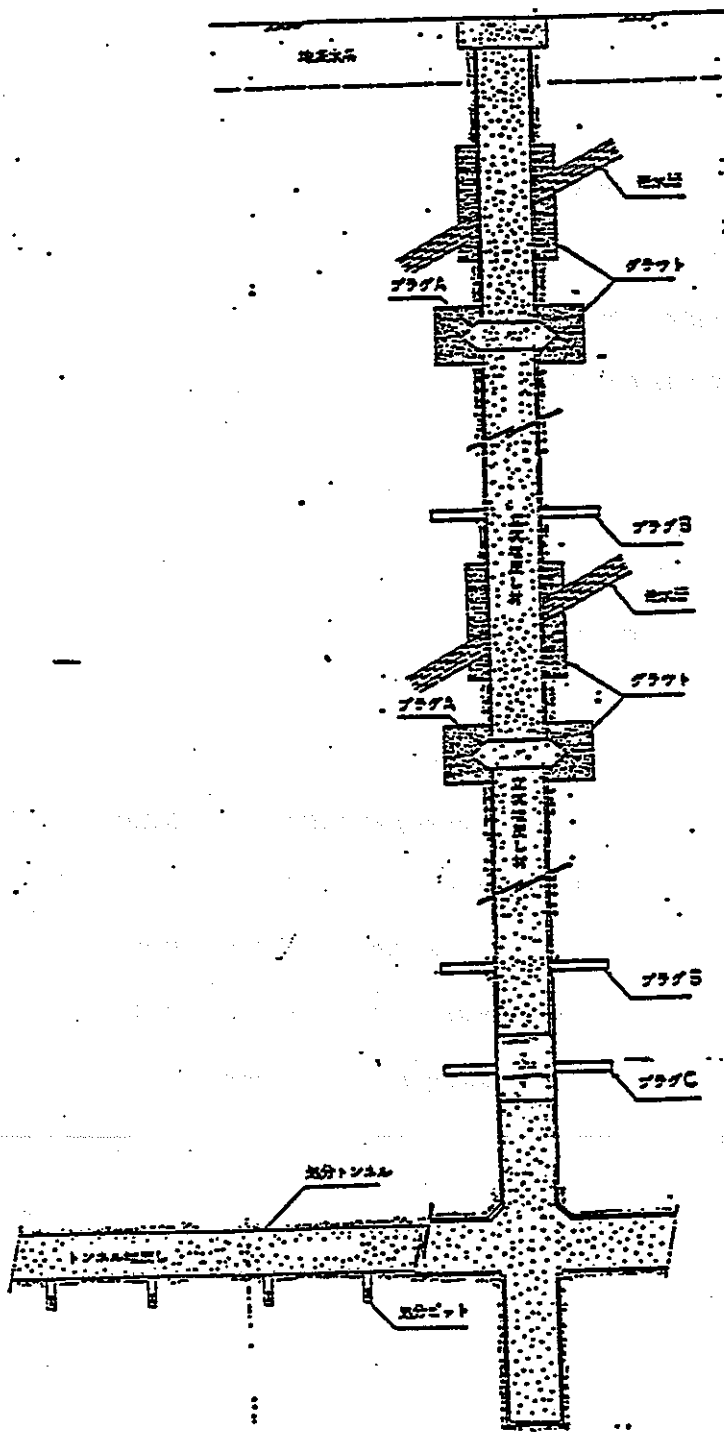


図5-1 シーリング、プラグングの一例

また、地層処分施設周辺の岩盤の補強及び地下水の浸入を防ぐ方法としてグラウト技術の利用がある。グラウトの性質としては、一般の岩盤のグラウトで要求されているような、止水性、強度増加のほかに地層処分の観点から以下の機能が要求される。

- ・温度変化に対する歪が小さい。
- ・岩盤の動きに対して追随する。
- ・核種の拡散を防ぐ能力をもっている。
- ・長期耐久性を有する。
- ・地下水中に含まれる水素イオン、塩素イオン等に対して不活性である。

しかし、これら各項についてどの程度の値が保証されるかについては今後の研究に待つ面が多く残されている。

5.3.6. 工学バリアの相互作用とモデリング

地層処分における工学バリアの健全性を図るため、基礎試験や原位試験のデータにもとづいて、現実的条件から作成したモデルによる長期間の健全性評価手法の開発が必要である。このため我国の自然環境を考慮し、ガラス固化体をはじめとする核種の工学バリアの健全性及び工学バリア全体としての健全性並びに工学バリア相互の物理的・化学的作用等について把握することが必要である。

このため、モデルの開発とともに下記の工学バリア及び周囲の岩石についての基礎データの収集が必要と考えられる。

- ・地下水の挙動及び化学的性質
- ・キャニスター及びオーバーバックの腐食挙動
- ・廃棄物固化体の浸出挙動
- ・工学バリア及び周囲の岩盤による核種の吸着
- ・熱による工学バリア及び周囲の岩盤の物理的、化学的変化
- ・放射線による工学バリア、周囲の岩盤及び地下水の化学的変化

5.4 地層処分施設

地層処分施設は、地下深部で高レベル廃棄物を安全・確実に搬送・格納し、更に長期間に亘ってその隔離機能が損なわれないものでなければならない。従って、天然バリアの持つ核種の隔離性能、及び、工学バリアの性能を有効に利用し、且つ安全確実に運営される様に設計され建設されねばならない。

地層処分施設の構成を図5-2に示す。

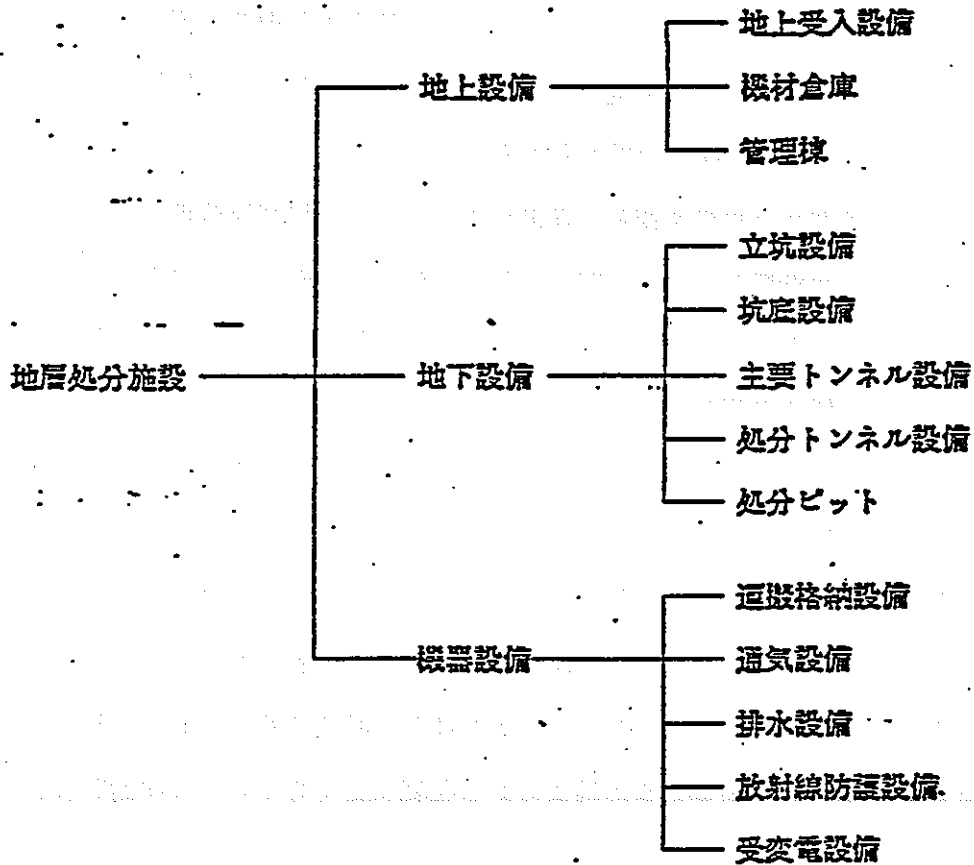


図5-2 地層処分施設の構成

5.4.1. 地層処分施設設計の考え方

- **地上設備：** 廃棄物固化体を受入・検査・保管・払出を行うもので、放射性物質を取扱う施設における諸基準に適合するものである。
- **地下設備：** 高レベル廃棄物が収納される処分ピット、それに至るトンネル群と地下機器設備室等により成り、岩盤を掘削することにより建設される。収容される固化体は放射能をもつ発熱体であるから、処分ピット及び処分トンネルは、放射能及び熱による影響を考慮した形状配列が求められる。その他のトンネル群や地下機器設備室等は、地圧、地震に対する岩盤及び空洞の安定、長期健全性の解析をもとに、形状・寸法・配列が求められるものである。
- **機器設備：** 地層処分施設を運転・運営するのに必要な機器設備類である。これらは指設備の安全・確実な運転と監視・管理が十分に行なえるものであると共に、公害防止の面でも十分対応し得る様に、核種を取扱う場合の諸基準や、地下に於ける人貨搬送等に係る諸基準等に適合するものである。

更に処分施設は廃棄物収容後、長期間に亘り地層処分システムの隔離機能が損なわれてはならないものであるため、地下設備は、外部インパクトを受けず、十分な収容能力に見合う深さと広がりがあり、地下水の侵入や核種の移行に対する隔離性に優れた特性を持ち、地圧等の自然現象に対し長期安定であるような物理的特性を有する施設であることが要求される。

5.4.2. 地下設備の概要

5.4.2.1. トンネル群の深度

トンネル群の深度については、外部インパクトに対する安全性や廃棄物に対する隔離性能の面から見れば、その深度は大である程望ましく、地層処分の経済性、建設規模の面では、処分トンネル相互間隔が、できるだけ小さいことが望ましい。一方トンネル群の力学的安定性に影響を及ぼす地圧は、深度に比例して増大するので、深度が大きくなると、それに応じたトンネルの形状、配列と、トンネル群を設ける岩体の選択が重要となる。

トンネル群に対する力学的安定解析の結果、硬質岩（岩盤等級B級下限）の場合では深度1000m、処分トンネル間隔10m程度であり、軟質岩（岩盤等級CL級）の場合では深度200m、処分トンネル間隔30m程度が適当であることがわかった。

5.4.2.2. 処分ピットの間隔

地層処分の経済性、建設規模の面からみれば、処分ピットの間隔はできるだけ小さいことが望ましい。しかし、固化体が、発熱体であることから、収容された固化体による地層の温度上昇が地層の持つ特性へ悪影響を及ぼすことを避けるため、許容上限地層温度に見合う処分ピット間隔を設けなければならない。

硬質岩中に発熱固化体を埋設した場合の固化体及び周辺岩盤の温度について軸対称熱伝導解析によるケーススタディを行った。この結果から処分ピット間隔は4～8m程度が適当であることがわかった。解析結果の一例を図5-3に示す。

5.4.2.3. 地下設備のレイアウト

地下設備の広がりとそのレイアウトは、トンネル群の深度、処分ピットの間隔、固化体取扱い能力と収容能力でその骨格が定まり、地層処分施設を安全確実に運営するための通気、排水、搬送等の諸設備が効率良く操作されるよう地下機器設備と地下設備を配置することで基本レイアウトを行い、断層、断層等、地質環境に応じて修正される。固体化収納能力1万本とした時の地下設備の例を図5-4に示す。

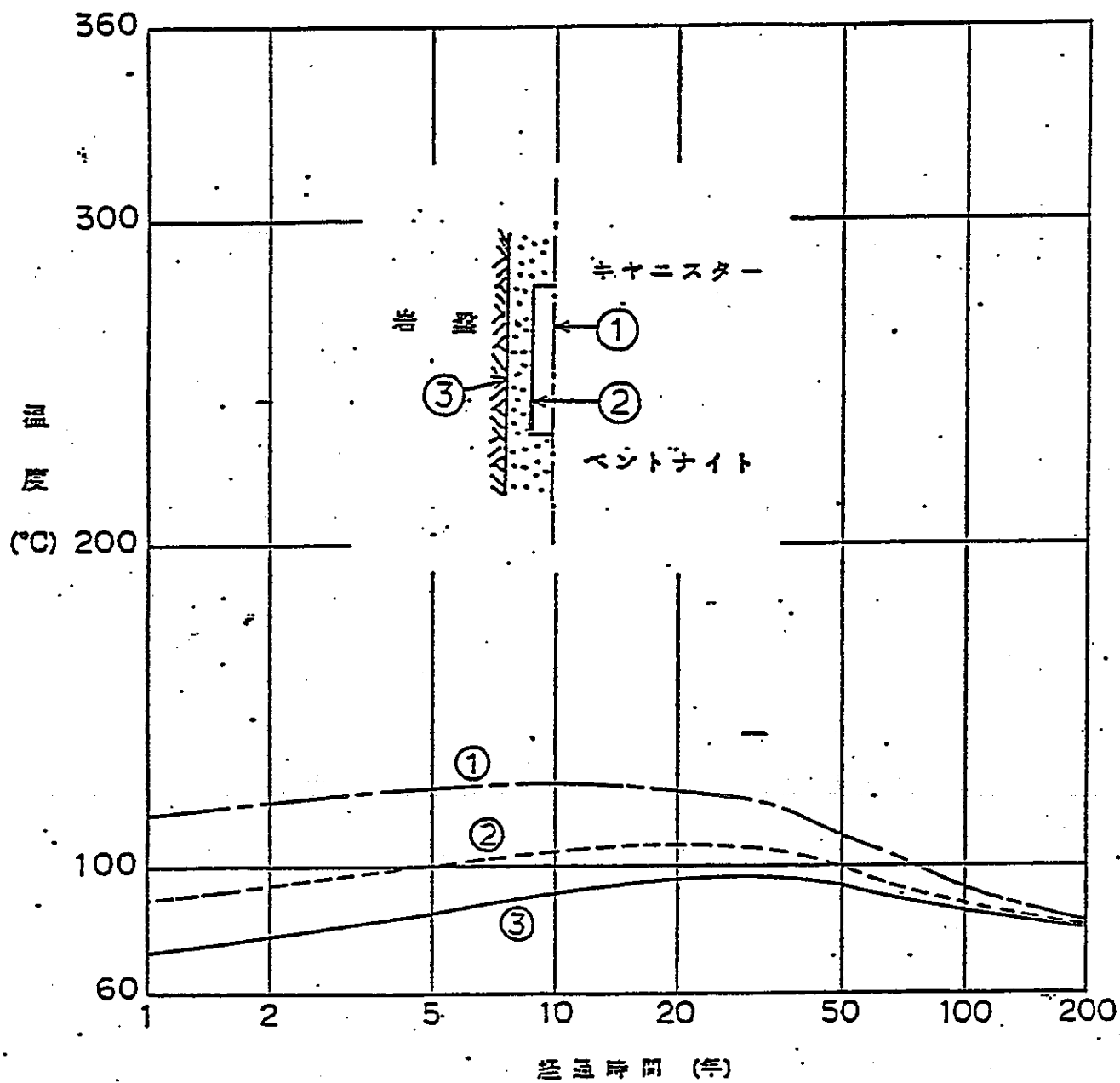


図5-3 軸対称熱伝動解析結果の一例 (30年貯蔵 処分ピット間隔8m)

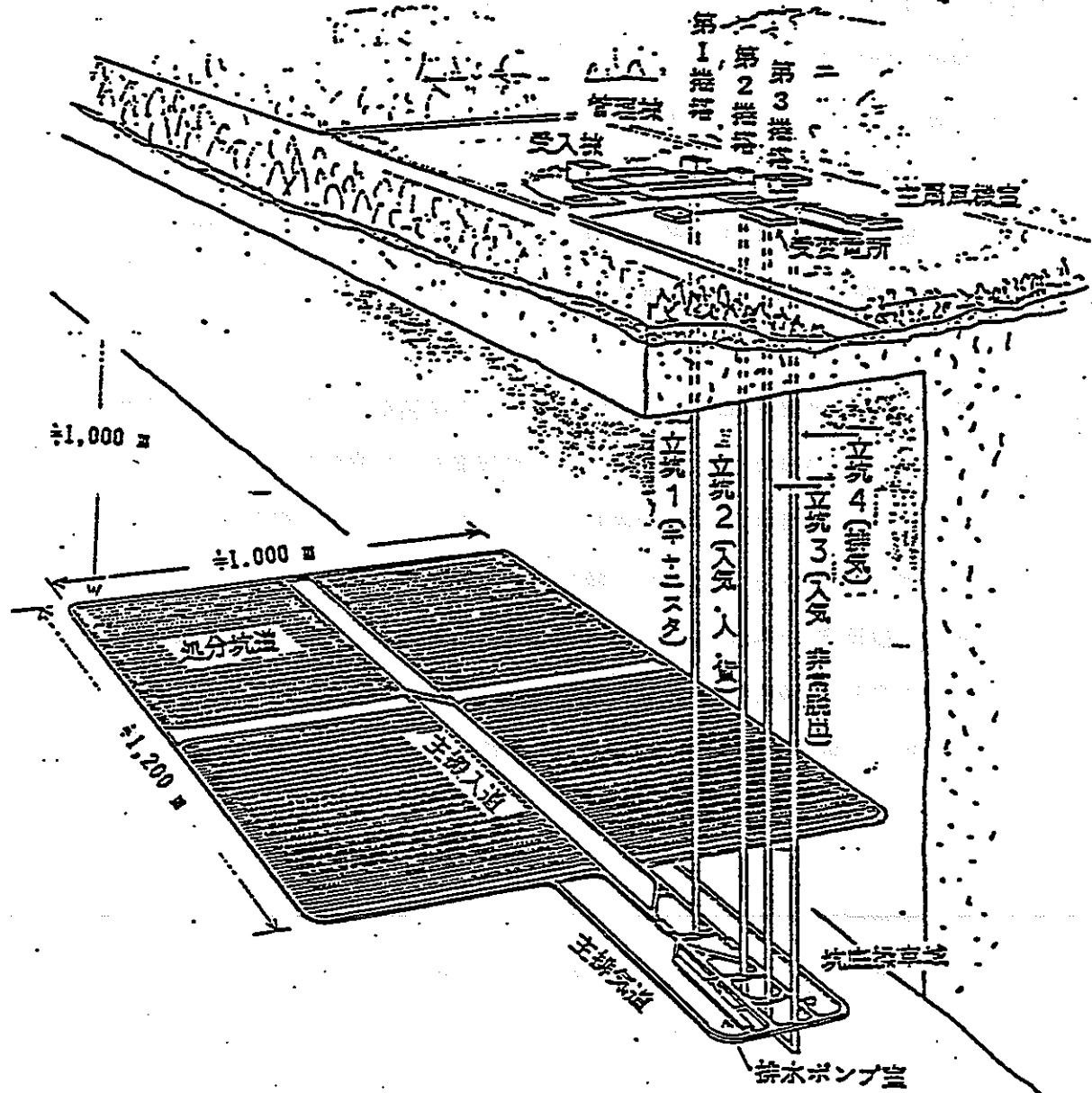


図5-4 高レベル廃棄物地層処分地下設備の一例

5.4.3. 機器設備の概要

固化体収容能力10,000本、硬質岩、深度1,000mとした場合の機器設備の概要を以下に示す。

5.4.3.1. 運搬格納設備

運搬格納設備は図5-5に示すように廃棄物固化体の受入から始まり、安全確実に運搬し、処分ピットに格納するもので、作業従事者の被ばく低減化を図るため、高い信頼性を有する遠隔、自動制御による運転方式をとる。プロセス系で見れば、地上設備における「受入設備」、地下設備における「水平運搬・格納設備」および両者を接続する「垂直搬送設備」に区分される。

受入設備：本施設に搬入された輸送キャスクを検査し、収納されている固化体キャニスターを取出す。輸送キャスクは仮置或いは施設外へ搬出される。キャニスターは、検査セル内で検査され、合格したものは一時保管ラックに収納し、異常が認められたものは、除染や再包装される。

垂直搬送設備：キャニスターを一時保管ラックより取出し、台車に搭載し、立坑巻上設備で台車ごと立坑底まで垂直搬送する。

水平搬送・格納設備：キャニスターを搭載した台車を立坑底より所定の処分ピットへ牽引し、収納する。

5.4.3.2. 通気設備

地下施設における作業従事者に必要な酸素の供給、地下で発生した有害ガスを地上へ排出するとともに、坑内気象（気温・湿度・風速）の改善、維持のため、新鮮な外気等を送り込むための設備、及び万一放射性物質による坑内気流汚染が起こった場合のモニタリング、流路限定や除染を行うための設備である。

高レベル廃棄物固化体による汚染は考えられないが、設備全域にわたって大気圧に対して負にする事は、仮に気流が汚染されても管理、処置が単純、容易であることから強制排気方式が適当と考えられる。

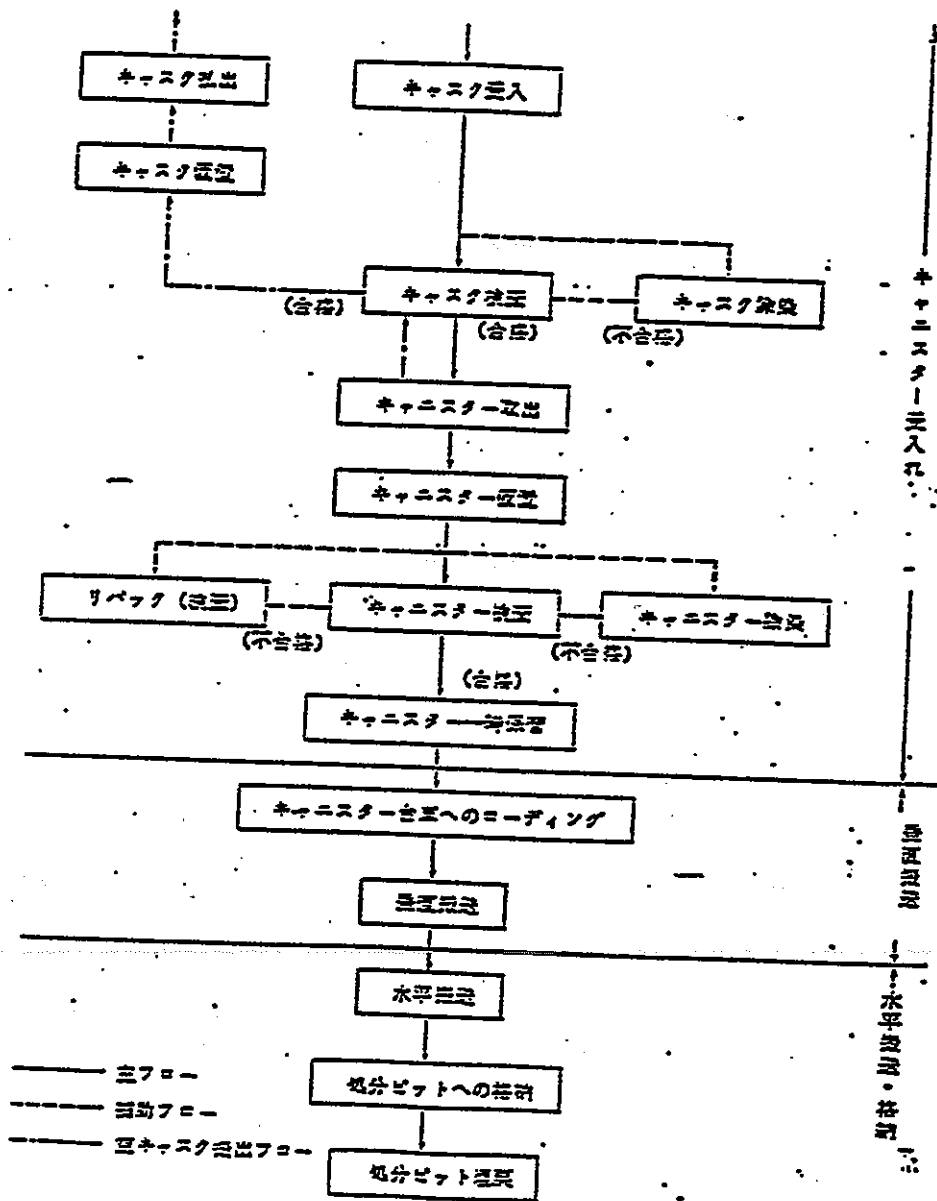


図5-5 高レベル廃棄物地層処分プロセスフロー

5.4.3.3. 排水設備

地下設備は、地下水の少ない、且つ移動が小さい岩盤中に建設されるので、トンネル群への湧水量は少ないものと考えられる。しかし建設中には岩石の断裂等から或る程度湧水する可能性のある箇所を通過することも考えられる。湧水箇所に対して確実な止水処置が完了するまではトンネル内への湧水は自然流下方式等で立坑底排水設備へ集水し、坑外へ排水する方法が最も合理的と考える。

5.4.3.4. 放射線防護設備

作業従事者に対する放射線防護のため、総ての作業・操作を遠隔自動化する。作業内容に応じてトンネル群・諸設備を区域区分し、その区域境界には物的防護、放射線管理に必要な継続的モニタリング設備を設置する。

5.4.3.5. 動力設備

電力を動力とし、地上の受変電設備で一括受電し、変電した後、各設備へ供給する。地下設備への送電は、主系統を別経路で2線、別に予備1線を布設し、異常停電等に備え、非常用自家発電設備を設置する。

5.4.4. 地下設備の建設

地下設備は、地下深部に配置されるトンネル群（10,000本収容の場合、総延長約80kmが予想される。）と、数本の立坑で構成されるものなので、建設工事を手順良く進めると共に、掘削による周辺岩石のバリア性能損傷を最小限に抑止するよう機械力掘削法等を用い、岩盤に与えた損傷については、確実な止水処置で補償する。

建設フローとスケジュールの1例を図5-6に示す。

5.5. 地層処分の性能評価

地層処分に係わる研究開発において性能評価研究は工学バリアと天然バリアで構成される地層処分システムに期待される隔離性能を定量的に評価するための評価手法を確立することを目標としている。

5.5.1. 性能評価のためのシナリオ

5.5.1.1. 地層処分の性能

地層処分の性能とは、放射性廃棄物を長期間にわたって人間環境から安全に隔離するという隔離性能である。廃棄物固化体中の核種が人間環境に到達するまでの過程を考えた場合、火山活動、隕石落下、人類の掘削といった事故が原因となって起きる事象と地下水等の媒体が廃棄物固化体と接触することによって浸出した核種が地下水等の移動に伴って輸送されるという二つのシナリオが考えられ、このうち最も可能性の高いものが地下水を媒体とするシナリオである。この場合、地層処分の性能は以下のようにわけることができる。

- ① 廃棄物固化体と地下水の接触を防ぐ。
- ② 核種の地下水中への溶脱を押さえ、処分場外への放出を遅延・低減化する性能。
- ③ 処分場外に放出された核種が人間環境に達する時間を地下水の長い移行時間と地層による核種の吸着によって遅らせる遅延性能。

①、②は固化体、キャニスタ、オーバーバック、充填材といった工学バリアに主として期待される性能であり、③は地層すなわち天然バリアに主として期待される性能である。

地層処分システム全体の性能は工学バリア、天然バリアの性能を総合して得られるものであるが、以下、核種が生物圏にまで到達する過程として最も可能性が大きい地下水を媒体とした場合について検討を行った。

5.5.1.2. 放出シナリオ

現在想定されている高レベル廃棄物地層処分システムは工学バリアと天然バリアを組み合わせたいわゆるマルチバリアで構成されることとなっている。性能評価で取り扱ったバリアは、工学バリアとして固化体、キャニスタ、オーバーバック、

充填材および天然バリアとして地層がある。

地下水を媒体として隔離されている高レベル廃棄物固化体中の核種が生物圏に到り、人類の被曝に達するまでのシナリオは次の様に想定される。

地下水が処分施設内に浸入し、処分ピット中に浸透した場合、地下水は処分ピット内の充填材を徐々に浸透してオーバーバックあるいはキャニスタの表面に達する。オーバーバックおよびキャニスタ腐食後廃棄物固化体と接触することとなる。地下水が廃棄物固化体に接触すると、廃棄物固化体中の核種が溶脱あるいは固化体そのものの溶解によって地下水中に溶出する。地下水中に溶出した核種は、拡散または地下水の移動によって充填材中を吸着・溶脱をくり返しながら移行し、処分場を取り囲む岩盤中に放出される。

処分場外に放出された核種は処分場を包含する岩盤中を地下水に伴って移動し、最終的に生物圏に到達する。この間、核種の移動速度は岩石への吸着・溶脱をくり返すため、一般に地下水の移行速度よりも小さい。

5.5.2 性能評価の手法

地層処分システムの性能評価は全体性能評価とサブシステム性能評価に分けて行うことが必要と考えられる。すなわち全体性能は、サブシステム性能をいくつかのパラメータによって評価し、各パラメータは物理的・化学的・機械的現象、影響因子、設計条件を考慮して評価し、サブシステム性能評価に供される。この手法によればサブシステムを構成する種々の現象・設計条件等の要素がサブシステム性能パラメータを介して全体性能評価に反映することが出来る。

5.5.2.1. 全体性能評価モデル

地層処分全体に対する性能評価のモデルは工学バリアの性能と天然バリアの性能を構成する各種のサブシステム性能で決定される。高レベル廃棄物地層処分の隔離性能は、地層処分された放射性廃棄物による直接・間接に人類が被曝する放射線量によって評価されるものである。

5.5.2.2. サブシステム性能評価モデル

サブシステム性能評価モデルは全体性能評価モデルを構成するパラメータとしてのモデルであり、主として以下の6モデルによって構成される。

・放射能インベントリ評価モデル

- ・核種放出開始時間評価モデル
- ・核種放出率評価モデル
- ・地下水移行時間評価モデル
- ・遅延性能評価モデル
- ・影響因子評価モデル

以上サブシステム評価モデルによって地層処分システムにおける物理的・化学的・機械的等の諸現象、影響因子、設計条件等が性能評価に含まれることになる。各モデルに関連する構成項目・データを表5-3に要約した。

表5-3 サブシステム性能評価モデルと構成項目・データ

モデル	主な構成項目・データ
放射能インベントリ評価モデル	核燃料の燃焼、冷却期間、核種の廃棄物への付随率、ガラス固化体の発生量、収容本数
核種放出開始時間評価モデル	工学バリアの健全性喪失時間 地下水の侵入時間〔充填材〕 透水係数、形状、地下水挙動解析 腐食時間〔キャニスタ、オーバーバック〕 腐食速度、形状、材料、温度、放射線、応力 核種保持能力
核種放出率評価モデル	ガラス中の核種の拡散係数、核種の溶解度 充填材中の核種の拡散係数、形状、温度
地下水移行時間評価モデル	地下水移行経路、地下水の量及び流速、地下水の物理・化学的特性、地下水挙動解析
遅延性能評価モデル	Kd値、核種、地層、空隙率、密度 多孔質内核種移行評価モデル 岩盤割れ目内核種移行評価モデル
影響因子評価モデル	熱解析モデル 放射能インベントリ（ β 発熱、 γ 発熱）、 熱的物性、形状
	地下水挙動解析モデル 地形、地質構造、透水係数、比貯留係数、降雨量
	応力解析モデル 熱、地圧、形状、埋め戻し材・緩衝材の膨潤圧力

6 海外の動向

我国においては今後地層処分研究開発をさらに推進するために、我国独自の研究開発の推進に努めるとともに、サイト選定に至る考え方、技術開発の進め方、社会的受容に対する考え方等の問題について、海外諸国における経験を参照してゆくことが重要である。

6.1. サイト選定に至る考え方

海外諸国のサイト選定に至る考え方は、各国のおかれている自然的・社会的環境の違いから、各国毎に固有の考え方がとられているが、大きくは2つの考え方に分けられる。その1つは西ドイツ、ベルギーのように具体的サイトが先に候補として与えられ、これが地層処分地として十分であるかを、調査に基づき判断するという考え方があげられ、他の1つとしては、アメリカ、イギリス、スイス、スウェーデンのように何らかの評価項目、基準の下に具体的な調査の実施および結果の評価を繰り返しながら範囲を限定し特定のサイトを選定するという2つの考え方があげられる。

アメリカ合衆国では1983年に放射性廃棄物政策法を制定し、これに従い、高レベル放射性廃棄物地層処分サイト選定作業を進めている。選定作業はDOEが行い、最終的に3ヶ所を候補サイトとして推薦しこれを基に、大統領がサイトを決定することとなっているが、この過程において岩塩のみでなく、他の岩石について、候補サイトを選定することが要求されている。

また西ドイツの場合は、予備的なサイトとしてゴアレーベンの岩塩ドームがすでに選定されている。しかし、処分技術の開発はアッセで行うこととなっており、ゴアレーベンではアッセで実証された技術が用いられることとなっている。また、ゴアレーベンが処分サイトとして不適当であることが明らかになった場合には、ニーダザクセン州から岩塩のサイトを再び選定することとなっている。

ベルギーではモルの粘土層が最終的処分に適当なサイトとして選定されており、モル原子力施設の敷地内に地下研究施設を建設している。スイスの場合は、北部の結晶質岩岩室中への処分を計画しており、現在、北部地方の約1,000km²にわたる地域でボーリングを含む地層調査が行われている。次の段階においては、この地域からより詳細な調査を行うため、1~2カ所のより小さな地区を選定する考えであり、最終的にサイトが決定されるのは1995年前後になるものと予定されている。

スウェーデンの場合は、全国より10~20カ所の研究サイトを選定してこれらを調査し、その中から、1990年までに2~3ヶ所のより詳細な調査地区を選定する予定である。最終的なサイトは1995年前後に決定する予定である。

またカナダは、地下研究施設における研究が終了し、地層処分のフィージビリティが政府および国民に受け入れられた後、サイト選定を行うこととしている。この場合まず試験サイトがカナダ盾状地のオンタリオ州付近に存在する火成岩体のなかから選定される。試験が成功すれば、このサイトが本格的処分サイトとなる予定である。

フランスでは、地下研究施設建設を目的とし、いくつかの花崗岩岩体を対象として、ボーリングによる地層調査を行っているが、本格的なサイト選定作業は1985年以降に行われることとなっている。

これに対し、イギリスは現在のところ明確なサイト選定計画を発表してはいない。イギリスの場合は、かつて、全国概査から、精密調査対象地区の抽出を行い、ボーリング調査を行う計画であったが、住民の強い反対運動のため、この計画は中断されている。

6.2. 技術開発の進め方

海外諸国においても地層処分は高レベル廃棄物処分の最も重要な処分方法の1つとして位置づけられており、多くの資金と人員が、地層処分技術開発にあてられている。各国においては、岩石試料の核種吸着特性、透水性、熱特性等に関する実験室試験および工学バリアの材料の機能試験、また廃坑、地下研究施設等を利用した各種原位試験、さらにこれらの試験を有効に活用するためのコンピューターシミュレーションモデルの開発が進められている。さらに、処分施設の概念設計等の作業や、地層処分システムの総合的な性能および安全性評価を含むシステム研究が進められており、地層処分の可能性に対して十分な根拠を持った判断を下せるよう知見の積み重ねが行われている。

アメリカ合衆国の場合、主な研究開発対象岩石として、岩塩、玄武岩、凝灰岩があげられている。各岩石に関して処分施設の概念設計を進めるとともに、実験室・原位試験、シミュレーションモデル開発が行われている。現在は、核種の浸出および移行にかかわる化学モデル開発および再取出性にかかわる岩体の機械的特性の研究に重点がおかれている。

西ドイツではアッセの岩塩ドームに地下研究室を建設し、模擬固化体を用いた原位試験を行っているが、ゴアレーベンでの処分を開始する前に、アッセで実固化体試験を実施することが計画されている。さらに塩水の移動に関する研究をアメリカと共同で進めている。

ベルギーはモルの原子力施設内における地下200メートル程度の粘土層に、地下研究施設を建設しており、ここで粘土層における地層処分に関する研究を進めている。これに先がけ、地表付近の粘土層で金属材料の腐食試験、およびヒーターを用いた予備的加熱試験を行っている。

スイスでは、花崗岩を研究対象としているが、深部のボーリングにより得られた岩石試料を用い、U, Cs, Sr等の核種吸着性試験におけるスウェーデンの岩石とスイスの岩石との比較研究を行っている。さらにグリムゼルに地下研究施設を建設しており、この施設を用いて、ドイツと共同で原位置試験研究を進める計画である。また割れ目をもつ岩体中の核種移行モデルを開発している。

スウェーデンでは、現在のところ主に花崗岩質岩体へ使用済燃料を直接処分することを計画しており、容器の材料としては銅を用いることが計画されている。また国際共同プロジェクトとして、ストリバ鉱山の花崗岩を対象として各種原位置試験を進めているが、これと並行して、地下深部のボーリングによる地下水、岩体の特性に対する調査も進められている。さらに、地震の影響に関する研究、環境影響評価モデルの開発が進められている。

カナダは花崗岩質岩体に処分することを計画しており、現在地質調査を進めるとともに、地下研究施設を建設中である。カナダ盾状地の一部には高濃度の塩素イオンが存在することが知られているため、廃棄物容器の材料としては、銅およびニッケル・チタンの耐食性合金が考えられている。また地層処分の環境影響評価モデルは、処分場の閉鎖後の2つに分けられて開発されており、このモデルでは、使用済燃料の輸送等、地層処分に拘わる作業も含まれている。

フランスでも花崗岩質の岩体を主な研究対象としている。フランスは1984—1985年に地下研究施設の建設開始を計画しており、このための予備調査も含め、現在までに花崗岩について数本のボーリング調査が行われている。またこの岩石試料を用い、Cs, Sr, Np, Pu, Amの核種移行試験を実験室規模で実施している。

イギリスでは現在深部のボーリング調査は実施されていないが、過去における花崗

岩のボーリング調査により採取された岩石試料を用い現在も実験室試験が続けられている。さらにAEREのコーニッシュェサイトでの地下50メートルにおける3年間の岩体加熱試験経験を持ち、ボーリング孔を用いた水理試験、廃鉱を用いた割れ目中の核種移行試験、その他各種実験室試験は継続されている。またこれと同時に核種移行のシミュレーションモデル開発に力が注がれている。

6.3. 社会的受容に対する考え方

原子力発電所の立地問題に関する経験などから、海外諸国における社会的受容確保の重要性に対する認識は高く、各々の国で社会的受容に関する研究が続けられている。しかし、実際に社会的受容を得るための政策は、各国の社会的環境の違いから、それぞれ異なったものとなっている。

スウェーデンにおいては、電力事業者が良好な操業実績を示すことが、社会的受容確保に最も有効であり、産業界や政府の行う活動はかえってマイナスとなるとの考えがある。これに対して西ドイツにおいては、中立性の高い政府期間の活動が有効であるとの考え方があり、PTB、BMTF、地方政府等の活動がさかんである。また西ドイツでは、社会的受容確保に関する活動に具体性を持たせることが重要視されており、サイト見学、海外の実例の紹介等が有効であることがしめされている。またフランスでは、社会的受容性確保のための活動はEDF等の国営の機関中心にさかんに行われており、今後はANDRAがこれを引き継ぐこととなっている。

一方、イギリスにおいては、社会的受容性に関する対応は遅れていたが、地層調査の挫折によりこれに対する反省が出ている。電気事業者およびBNFLも現在に至るまで廃棄物管理面での社会的受容の確保に関する活動は皆無に等しく、今後はNIREXがこの面を担当し、活動を進めてゆく予定である。また、ベルギーの場合は、CEN/CSNのミル研究施設敷地内に地層処分に適した粘土層が見つかったため、社会的受容は得やすく、大きな問題は起きていない。

7. 今後の研究開発と問題点

7.1 有効な地層の選定について

第1段階の調査の結果、地層処分の可能性の観点から、岩石の種類によって優劣をつけることは難しいことが明らかとなった。すなわち、同一の岩石においても、地層処分の適性に係わる性質には地域的な相違があり、その適性は、それがおかれている地質条件によって大きく変わっている。さらに、工学バリアを岩石の性質に応じて設計することにより、地層処分システムとしての安全性は確保しうる可能性のあることも第1段階の調査・研究によって明らかとなった。

これらの結果から、今後、調査を進めるべき有効な地層としては、未固結岩など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、むしろ広く考えるものであるということがいえる。また、このことは、地層処分の実施における社会的要因の変化に柔軟に対処しうることもなる。

問題はどのように広く考える地層から、いかに今後の研究開発の対象とする地層を選定するかである。重要なことは、その研究開発の効率性と合理性であり、限られた地層を対象とした研究によって、他の地層にも適用できる情報を最大限に引き出すことが求められる。有効な地層の選定に当っては、この点の配慮が肝要となる。

7.2 研究開発の課題

高レベル廃棄物地層処分においては、天然バリアとして必要な地質、水理、岩盤力学、地球化学等の面で整合性のあるデータが要求される。また、地球科学の各分野における研究成果、及び第1段階の地層調査結果等から、同一の岩石においても個々の性質は地域によって相違することが明らかとなっている。このような点から、高レベル廃棄物地層処分においては、その実施に先立ってコールド及びホット試験を行い、性能評価システムを開発する等慎重かつ段階的に取組むことが必要である。

地層処分に先立って当面必要とされる調査・検討項目の一例を下記に列挙した。以下の項目のうちフィールド試験は実際の地質環境と同質の地下深部において調査・研究を行うことが必要である。

7.3

①室内試験

- ・ 廃棄物中に含まれる核種、殊に長寿命核種の地層中での挙動
- ・ 廃棄物中に含まれる核種、各種工学バリア及び周辺の岩石間における相互作用

②フィールド試験

- ・ 地質構造
- ・ 岩盤の健全性
- ・ 地下水の挙動 (量、移動)
- ・ 地下水及び周辺の岩石の化学特性
- ・ 固化体、キャニスター、オーバーパック、充填材、周辺の岩石における熱の影響
- ・ 地下水の挙動における熱の影響
- ・ 充填材と周辺の岩石との相互作用
- ・ 地下深部における地震動特性

③研究開発

- ・ 地下深部の開発技術
- ・ 隔離性能評価モデル

7.3 高レベル廃棄物地層処分の実施に至る考え方

特定の物質を超長期にわたって地層中に隔離するという作業は、人類にとって未経験のものである。また、高レベル廃棄物地層処分システムを構成する天然バリア及び工学バリアの隔離性能を長期間にわたって保障するためには入念な検討が必要である。

このような見地から、最終的には処分を目指すものの、当面は地層中において、再取り出し可能な且つ監視及び管理を伴ういわゆる貯蔵を行うことが考えられる。その間に、工学バリア及び天然バリアの挙動を定量的に測定・解析し、このデータを基礎として超長期にわたる隔離性能を実証する。これらの研究開発によって、高レベル廃棄物地層処分の安全確保の見通しを得た上で、地層中における貯蔵から処分に移行することを考える。

8. 結 び

本報告は、動燃事業団が国の地層処分研究開発計画に沿い、昭和52年以来実施してきた第1段階研究開発の成果をとりまとめ総合評価を行ったものである。本報告の内容は、今後、国によって行われる「有効な地層の選定」に資するべくとりまとめられている。

第1段階研究開発の結果、地層処分に必要な基本的条件についての理解が深まり、我国での地層処分は工学バリアとのマルチバリアシステムをとることにより技術的可能性を有するものと考えられるに至った。しかし、地層処分の実現には、なお多くの課題が残されており、今後、我国での地層処分を実現するためには第1段階において明らかとなった課題を中心に研究開発を進めていくことが必要である。

第2段階以降の研究開発は、我国での地層処分研究開発がより本格的な段階に入るものであり、第1段階と比べて、研究開発項目、内容、研究方法、設備、施設、研究資金等の面で格段に充実させていく必要があると考えられる。

地層処分の研究開発は、総合的、国際的な視野の下に進める必要がある。第2段階研究開発においては、動燃事業団等の国の研究機関を中心に、他の国立試験研究機関、大学、民間機関等の幅広い層での研究開発への参加が、第1段階にも増して望まれる。

最後に、我国での地層処分の実現には、国民の幅広い理解と協力が不可欠である。第2段階以降の研究開発においては、実際の地層に対する検討などより具体的な研究開発が進められると考えられるが、この面については、社会的にも多くの課題があるといえよう。官民をあげて、総合的な対応を図り、地層処分研究開発を一層強力に進めることが望まれる。

なお、本研究開発は、動燃事業団に設置した地層処分委員会及び地層処分総合評価分科会に参加された学識経験者各位の指導、助言を頂いて進められたものであり、ここに深く感謝の意を表するものである。