



地層処分研究開発と地層科学研究

原 啓二 武田精悦 安藤康正
石川博久* 湯佐泰久*² 坪田浩二*²

環境技術開発推進本部
* 東海事業所環境技術開発部
*² 東濃地科学センター

資料番号：100-13

Research and Development on Geological Disposal and
Geoscientific Research

Kaiji HARA Seietsu TAKEDA Yasumasa ANDO
Hirohisa ISHIKAWA* Yasuhisa YUSA*² Koji TSUBOTA*²
Radioactive Waste Management Project, Head Office
* Waste Technology Development Division, Tokai Works
*² Tono Geoscience Center

高レベル放射性廃棄物の地層処分の研究開発については、原子力委員会の方針に従い、2000年前までに研究成果の第2次とりまとめを行い地層処分の技術的信頼性を示すことを当面の目標として、現在、性能評価研究、処分技術の研究開発、地質環境条件の調査研究ならびにそれらの基盤となる地層科学研究を推進している。また、TRU 廃棄物の処分研究については、1990年代末までに処分概念の見通しを示すため、高レベル廃棄物処分研究開発の成果を活用しつつ、TRU 廃棄物の処分に特有な課題について研究開発を進めている。

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物ガラス固化体については、原子力委員会の基本方針に基づき、地下数百メートルより深い安定な地層中に処分することにより、長期間にわたって、人間とその生活環境に影響を与えないようにすることとしている。

地層処分の研究開発の目的は、人工バリア（ガラス固化体とその保護容器であるオーバーパックおよびその周辺岩盤との間に充填する緩衝材からなる）と天然バリア（岩盤）からなる多重バリアシステムによる安全確保の仕組みの妥当性を、科学的・技術的に明らかにし、地層処分技術の確立を図ることである。動燃事業団は、原子力委員会により研究開発の中核推進機関と位置づけられており、平成4年度に、それまでの研究開発の成果を「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書（平成3年度）」¹⁾として取りまとめ、これを公表し、国に報告した。この第1次取りまとめにより、我が国における地層処分の安全確保に関し、多重バリアシステムの技術的可能性を明らかにした。これに対し、原子力委員会から、研究開発の進め方とその成果がおおむね妥当であることおよび今後の課題が示された。さらに平成6年の

原子力委員会「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画」において、動燃事業団は2000年までに研究開発の成果を取りまとめ（以下「第2次取りまとめ」という）、これを公表するとともに、国はその報告を受け、我が国における地層処分の技術的信頼性等を評価することとされている。

動燃事業団では、この第2次取りまとめに向け、「性能評価研究」、「処分技術の研究開発」、「地質環境条件の調査研究」の三つの主要な研究分野について研究開発を推進するとともに、地層処分研究開発の基盤となる「地層科学研究」を進めている（図1）。当面の研究の進め方としては、これまでの成果を踏まえ、我が国に広く分布する結晶質岩系と堆積岩系について、深部地質環境条件の把握に基づき、放射性物質の長期的な閉じ込め性能が期待できるニアフィールド（人工バリアとその近傍の岩盤とを併せた領域）の研究に重点的に取り組むこととしている。

「性能評価研究」では、多重バリアシステムの核種の閉じ込め性能を評価するため、東海事業所の地層処分基盤研究施設における実験室規模から工学規模の試験を中心として、性能評価モデルの開発改良およびその妥当性の確認、データの取得整

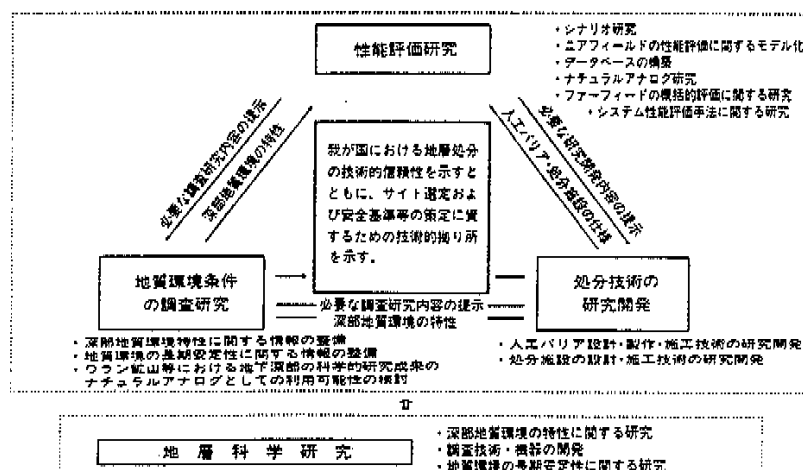


図1 研究開発の構成

備を進めている。

「処分技術の研究開発」では、現在の工学技術による処分システムの実現性を具体的に示すため、人工バリアに関し、代替案も含めオーバーバックおよび緩衝材について期待される性能を発揮できるような設計、製作、施工技術に関する検討を進めている。また、処分施設の設計・建設・操業・閉鎖に関する要素技術、工程、安全対策、経済性などについて検討を行っている。「地質環境条件の調査研究」では、地層科学研究の成果を活用し、地層処分の観点から地質環境に関する情報を整備するため、地下深部の地下水や岩石の性質に関する情報の蓄積を図っている。また、地震・断層活動や火山活動等の天然現象の特徴と地質環境への影響について、知見の取りまとめを行っている。これらの研究の基盤となる「地層科学研究」では、地質環境の特性について、東濃鉱山やその周辺、および釜石鉱山を利用した調査研究を進めている。また、深部地質環境の長期安定性に関し、火山活動や断層活動等の地域性、周期性やその影響の程度、範囲等の把握をめざした事例研究を実施している。

我が国における当面の高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発計画については、現在、原子力委員会の原子力バックエンド対策専門部会にて審議されているところである。動燃事業団は、同部会による計画の策定を受けて、上記の取り組みについて確認、見直しを行い、適切に研究開発を進めていく計画である。

一方、TRU核種を含む放射性廃棄物については、含まれるアルファ核種の放射能濃度の低いものは、原子炉施設から発生する低レベル放射性廃

棄物と同様に、浅地中処分が考えられるとされており、それ以外の、含まれるアルファ核種の放射能濃度が比較的高いものについては、人工バリア等が高度化された処分や地層処分等の「浅地中処分」以外の地下への処分方法（「浅地中以外の地下埋設処分」）が適切と考えられている（このような処分の対象となる放射性廃棄物は「TRU廃棄物」と呼ばれる）。これについては、1990年代末を目途に具体的な処分概念の見通しを得られるよう研究開発を進めることが原子力委員会の基本方針として示されており、動燃事業団では、高レベル放射性廃棄物処分研究開発の成果を活用しつつ、TRU廃棄物処分に特有な課題について研究開発を進めてきているところである。

2. 高レベル放射性廃棄物等の処分研究開発

2.1 地質環境条件の調査研究

地層処分システムによる安全確保の仕組みにおいて、地質環境には、長期間にわたり、①廃棄物を物理的に隔離すること、②人工バリアにとって好ましい設置環境を維持すること、③天然バリアとしての十分な隔離機能を維持すること、が期待される。我が国においては、当面、対象とすべき地質環境を幅広く想定して研究開発を進めることが、国の方針となっている。

したがって対象とする岩種や地域を限定しない現段階においては、我が国の地質環境条件の一般的な特徴を概括的に把握することが重要である。このような観点から、主として文献調査により、我が国の岩石および地下水の性質等に関するデータの収集、整備を進めている。このうち、地質環

境の基本的なパラメータである地下水の流動や水質および岩石の熱力学特性に関して、これまでの調査によって取得した主な知見を次項以下にまとめる。

なお、地質環境条件の把握においては、岩石や地下水の性質の三次元的な分布や時間的な変化等を考慮する必要がある、そのためには、数km程度の空間的な広がりをもった地質環境を研究対象として、体系的なデータの取得や、天然現象による地質環境への影響を検討すること等も重要となる。これらについては、地層処分研究の基盤となる「地層科学研究」において、東濃鉱山周辺や釜石鉱山での試験研究および火山活動や断層活動等の天然現象を対象とした事例研究を実施している。これらの成果は、地質環境条件の調査研究をはじめ、地層処分研究開発全般に反映されていくものであるが、本稿においては、地層科学研究の項でまとめて紹介する。

(1) 岩盤の熱特性および力学特性

岩盤の熱や力学に関する情報は、特に地下施設の設計条件を検討する上で不可欠な情報である。地層処分システムの性能評価や処分技術の検討において考慮すべき岩盤の特性としては、以下のような項目が重要と考えられる。

①熱特性：熱伝導率、比熱、熱膨張率等

②力学特性：一軸圧縮強度、ヤング率、ポアソン比、せん断強度、内部摩擦角、圧裂引張強度等

③物理特性：有効間隙率、含水比、密度、超音波伝播速度等

これらの特性の値や分布、岩石の種類や深度との関係等を把握するために文献調査を実施した。調査の対象としたのは、土木工学、地質、鉱山、水資源等に関する公開文献であり、表1に示す岩種区分に基づき、各特性値に関するデータの収集を行った。

これまでに、1959年～1989年に発行された約180件の文献を調査し、約3600件のデータを収集した。ただし、データ数には項目によってバラツキがあり、一軸圧縮強度や弾性係数に関しては、1000件以上のデータが収集されたが、熱伝導率に関するデータは極めて少なかった。また、岩石の種類や時代によっても、データ数に相当の偏りがあった。岩石の強度や密度等については、「新しい堆積岩（新第三紀堆積岩）」と「古い堆積岩（先第三紀堆積岩）」および結晶質岩（火成岩と変成岩）」との間で比較的明瞭な差が認められるが、後者（古い堆積岩および結晶質岩）の岩種間においては有意の差は認められなかった。

表1 岩種区分と主な岩石

(佐藤ほか、1992より)

岩種区分	主な岩石名
カコウ岩種	：カコウ岩・カコウ斑岩・石英斑岩・石英閃緑岩・石英閃長岩・文象斑岩・片麻岩
ハンレイ岩種	：ハンレイ岩・閃緑岩・角閃岩・超基性岩
流紋岩・デイサイト類	：流紋岩・デイサイト
安山岩・玄武岩類	：安山岩・玄武岩
新第三紀堆積岩	：砂岩・泥岩・礫岩・凝灰岩
先第三紀堆積岩	：砂岩・泥岩・礫岩・チャート
石灰岩	：石灰岩
片岩	：結晶片岩・千枚岩

収集したデータのうち、試料の採取深度が明らかかなものは、全体の1割程度の約450件であった。さらに、その約半分は100m以下のデータで、500m以下のデータは64件であった(表2)。これらの64件のデータの多くは、新第三紀堆積岩の熱伝導率、有効間隙率、密度に関するデータで、その他、流紋岩・デイサイト類、安山岩・玄武岩類についても同様の項目に関するデータが得られた。ポアソン比、弾性係数、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、せん断強度、内部摩擦角については500m以下のデータは得られなかった。64件のデータにおける岩種ごとの平均値としては、新第三紀堆積岩がその他の2岩種に比べて、熱伝導率、超音波速度および密度で小さく、有効間隙率で大きい傾向が認められた。また、深度が明らかな新第三紀堆積岩のデータのうち、熱伝導率や有効間隙率等の比効的件数の多い項目について、深度との関係を比較したが、顕著な傾向は認められなかった。

(2) 地下水の流動特性

地下水流動は、人工バリアの設置条件としても、

表2 岩石物性データの深度別件数

(佐藤ほか、1992より)

岩種	総データ数	(その内、深度明示データ数)					
		0 ～ 100 m	100 ～ 200 m	200 ～ 500 m	500 ～ 1,000 m	1,000m 以上	計
カコウ岩種	565	9	13	4	0	0	26
ハンレイ岩種	116	19	8	0	0	0	27
流紋岩・デイサイト類	131	2	2	11	9	1	25
安山岩・玄武岩類	733	1	1	4	5	2	13
新第三紀堆積岩	976	66	32	93	20	27	238
先第三紀堆積岩	819	93	3	3	0	0	99
石灰岩	68	0	0	0	0	0	0
片岩	262	22	0	1	0	0	23
(総計)	3,671	21	59	116	34	30	451

また、天然バリアの隔離機能にとっても基本的な要素であり、処分システムの性能評価において考慮すべき最も重要な地質環境条件のひとつである。地下水流動を解析・評価するにあたっては、①水理・水文学的な地質・地質構造に関する情報と②岩盤の透水性に関する情報が必要となる。

1) 水理・水文学的な地質・地質構造

地下水は岩盤の空隙や亀裂等を通して流動する。したがって、岩盤自体の空隙の性質・形態によって、地下水の流動特性は大きく支配される。このような観点からは、岩盤は多孔質岩盤と亀裂性岩盤に大別できる。多孔質岩盤は、粒状ないし塊状の固体と、これを取り巻く空隙部分が混在した集合体であり、未固結の堆積層や新第三紀以降の堆積岩の一部がこれにあたる。地下水の賦存状態や流動を考える上で、多孔質岩盤は、構成単位の岩層毎には近似的に等方均質な性質を示すと考えられるが、岩層が堆積した面に平行な方向と垂直な方向では、透水性に違いがあると考えられる。亀裂性岩盤は、緻密で硬いが、割れ目が発達していることが多い。主に火成岩、変成岩および古第三紀以前の堆積岩がこれに相当する。岩盤中の割れ目は、岩石の生成時やその後の応力履歴にしたがって生じたものである。亀裂性岩盤中の地下水の流動は、割れ目の透水性や分布状態（割れ目間の連結性）およびその場の応力分布によって不規則に変化すると考えられる。

2) 岩盤の透水性

日本の岩盤の透水性の範囲を把握するため、土木工学等の分野でこれまでに公開された文献（1970～1990年の20年間を対象）から、原位置で測定された約1500件の透水係数値をとりまとめた。その結果によれば、透水係数は、第四紀の堆積層で 10^{-2} から 10^{-3} cm/sec程度、それ以外の岩盤では、 10^{-4} cm/sec前後であることがわかった（表3）。また、深度100m程度までの第四紀の堆積層および新第三紀の堆積岩といった多孔質岩盤の透水係数は、岩石を構成する粒子の粒径に左右され、砂礫質岩は 10^{-2} から 10^{-3} cm/sec程度、泥質岩は 10^{-3} から 10^{-4} cm/sec程度であることがわかった。さらに第四紀堆積層以外の岩盤には、地表付近から深度500m以深にかけて、透水係数の最頻値が 10^{-4} cm/secから 10^{-6} cm/secに徐々に低下する傾向（透水性の深度依存性）が認められた。なお、このような透水係数に関するデータは、主に土木工事に伴って取得されたものである。土木工事等において施工上問題となるのは、透水性が比較的高い岩盤であり、難透水性の岩盤については厳密

表3 岩質を考慮した亀裂性岩盤の透水係数のオーダーの頻度分布

岩石の種類	件数	透水係数のオーダー (cm/s)								
		10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	
カコウ岩類 (風化部)	47	0	2	2	16	18	4	2	3	
(破砕部)	10	0	0	1	5	3	0	1	0	
流紋岩・デイサイト類 (風化部)	4	0	0	0	1	2	0	0	1	
28	0	0	1	9	14	4	0	0		
3	0	0	0	2	1	0	0	0		
安山岩・玄武岩類 (風化部)	43	0	1	1	16	22	1	2	0	
3	0	0	0	2	1	0	0	0		
新第三紀堆積岩 (風化部)	46	0	0	2	15	25	3	1	0	
10	0	0	0	4	5	1	0	0		
(破砕部)	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
石灰岩	5	2	0	0	2	0	1	0	0	
片岩 (風化部)	15	0	0	1	5	7	2	0	0	
6	0	0	1	3	2	0	0	0		
第四紀火山岩類 (破砕部)	39	1	1	5	11	10	8	2	0	
1	0	0	0	0	1	0	0	0		

注) ①室内試験データを除く。

②括弧内はそれぞれ、全体のうち、特に、風化あるいは破砕部の記載のあるものを示す。

な値まで計測しないのがむしろ一般的である。したがって、文献調査によって得られたデータは、実際よりも大きい側に偏っていると考える必要がある。

(3) 地下水の地球化学特性

地下水の化学的な性質は、核種の溶解度や人工バリアの腐食速度等を規制する重要な要素であり、処分システムの性能評価においては、地下水の流動と並んで、最も重要な地質環境条件である。

我が国における地下水の地球化学特性を概括的に把握する観点から、1953年～1988年の36年間に発行された全国各地の地下水に関する公開文献約3600件を収集し、地下水の水質と母岩の種類や深度との関係等を調べた。その結果、新第三紀堆積岩中の地下水の化学的特徴として、以下のことが明らかになった（図2）。

①水質は $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ 型を示す。

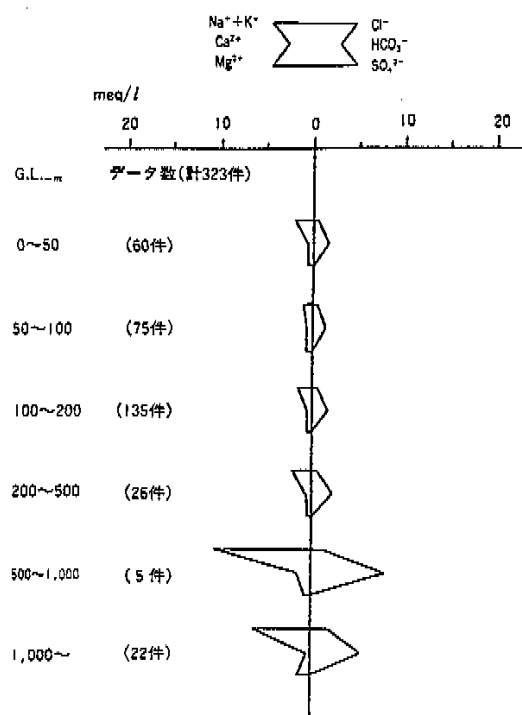
②深度が深くなるにしたがって、pHおよび HCO_3^- 、 Na^+ 濃度が高くなる傾向がある。特に500m以深で、 HCO_3^- 、 Na^+ 濃度が明瞭に増大する。

③採水深度と K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 濃度との間には、相関が認められない。

④ Na/HCO_3^- （当量）比は1に近い。

⑤ HCO_3^- 濃度と K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 濃度との間には、相関はほとんど認められない。

一方、東濃地域で実施している地層科学研究の成果としても、深部に行くにしたがって、水質は



注：深度は採水した孔底深度またはストレーナ設置深度

図2 新第三紀堆積岩地帯の陸水起源と考えられている地下水の化学組成の深度別変化（ヘキサダイアグラム）

$\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$ -型から $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$ -型へと変化し、pHは中性からアルカリ性へと変化する（図3）ことが確認されている。このような特徴は、文献調査によって得られた新第三紀堆積岩中の地下水のそれと一致している。さらに、この地下水は、化学平衡論に基づき設定される4種類のモデル地下水（a：降水系-高pH型地下水、b：降水系-低pH型地下水、c：海水系-高pH型地下水、d：海水系-低pH型地下水）のうちaのモデル地下水の実測データとモデルによって導き出された地下水組成と近似しているといえる。このことは、化学平衡論に基づく水-岩石反応モデルの妥当性を示す一例と考えることができる。

(4) 今後のすすめ方

以上、地質環境条件として重要な岩石および地下水の特性に関する、これまでの主な調査結果をまとめた。これらの特性を規制しているのは、主にその地域の地質構造であり、とくに地質環境条件の空間的な分布や時間的な変遷を評価するためには、地質構造の把握が、まず必要である。この

ような観点から、断層等の断裂系の分布や地層・岩体の分布等の地質構造に関する調査についても実施中である。また、取得・収集した地質環境情報を効率的に管理・活用するため、データベースの整備を並行して進めている。

今後は、文献調査を継続するとともに、試錐孔や地下深部の空洞等における地層科学研究の成果を活用しつつ、地質環境条件としての情報の整備を図っていく。

2.2 性能評価研究

地層処分の研究開発における性能評価研究の目的は、地下深部に埋設した放射性廃棄物が人間環境に影響を及ぼす道筋（シナリオ）を同定し、その影響を定量的に評価することである。

そのため、現在、(1)シナリオ研究、(2)人工バリアの中の核種移行研究、(3)天然バリア中の核種移行研究、(4)多重バリアシステム全体の性能評価研究等を進めている。

(1) シナリオ研究

シナリオ研究においては、地層処分システムで想定される様々な事象（Event）、プロセス（Process）、特性（Feature）を網羅的に抽出し（FEPリスト）、それらを適切に分類・スクリーニングしてシナリオを同定し、評価の枠組みを定めること

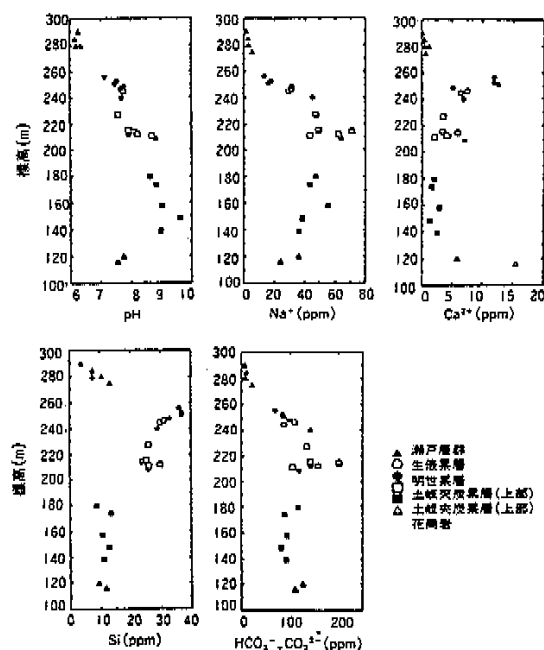


図3 東濃地域の地下水の化学組成と深度

が重要である。

これまでの研究により、日本における地層処分システムの性能評価で考慮すべき現象として、自然現象、人間活動ならびに処分場に起因する102のFEPが抽出・リスト化されている⁹⁾。放射性廃棄物が人間環境に影響を与え得るシナリオとしては、放射性核種が地下水を介して人間に影響を及ぼす地下水シナリオと、火山活動や隆起、沈降、人間侵入等により放射性廃棄物と人間の物理的距離が接近し、影響を与える接近シナリオとに大別されている。特に地下水シナリオについては、地質環境が変化することなく人工バリアが初期の性能を維持することを仮定した基本ケースと、これらの変動を想定した変動ケースとに分類して検討を進めている(図4)。

現在、これらの分類に基づいて、個々のFEPの影響度を把握するため、FEPに対する地層処分システムの性能指標(被ばく線量または核種の移行率等)の感度解析を行っている。今後はこれらの感度解析の情報およびFEPに関連するデータの変動範囲を把握することによって、詳細なシナリオを開発し、評価の枠組みを構築していく計画である。

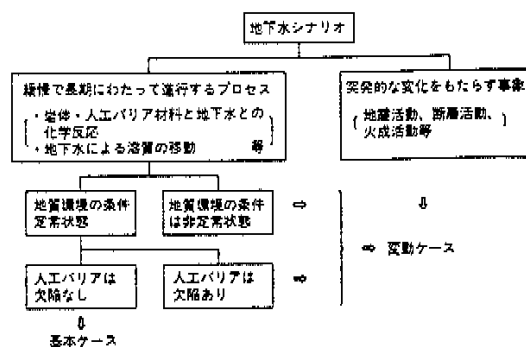


図4 地下水シナリオを規定する現象

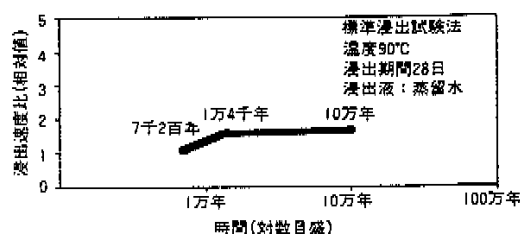


図5 ガラス固化体の浸出性に対するアルファ崩壊の影響試験の結果

(2) 人工バリア中の核種移行研究

人工バリア中の核種移行研究については、人工バリアを構成するガラス固化体、オーバーバックおよび緩衝材のそれぞれの放射性核種の閉じ込め性能、耐久性等に関する研究を実施するとともに、核種移行等に係わるデータベースの整備を進めている。

1) ガラス固化体からの核種浸出

これまでの研究により、ガラス固化体からの核種の浸出機構に関しては、圧縮ベントナイト中のPu含有ガラスの浸出試験等により、一次反応モデルの適用性が確認されている。また、火山ガラスのナチュラアナログ研究から、ガラスの長期の変質速度に関するデータ、知見が得られており、特に泥質岩中に埋没した火山ガラスでは100万年間ほとんど変質が進行していないという結果が得られている⁷⁾。さらに、ガラス固化体の α 線に対する長期耐久性の知見を得ることを目的として²⁴⁴Cmを添加した加速試験として10万年相当の α 線ダメージを受けた固化体についての浸出試験を実施しており、その結果では、 α 線照射によるガラス固化体の物性変化は認められず、浸出率および重量減少量も無添加のデータとほぼ同オーダーの値が得られている(図5)。

2) オーバーバックの腐食

オーバーバックについては、候補材料である炭素鋼について、電気化学的手法を用いた腐食試験を実施するとともに腐食メカニズムに基づく全面腐食モデル、局部腐食モデルの開発を進めている。全面腐食は炭素鋼が不動態化しない場合に進行するが、これまでの研究で、酸素による全面腐食については、溶存酸素のベントナイト中における拡散が律速として評価した結果では、地下水飽和のベントナイト中では酸素による腐食への寄与はほとんど無視できることが分かっている。一方、炭素鋼が不動態化した場合には局部腐食が進展する可能性があるが、不動態を維持するためには酸素の供給が必要であることから、ベントナイト中の酸素の移行に基づいた計算評価を行った。その結果、地下水飽和のベントナイト中では局部腐食は速やかに停止するという結果が得られている。また、ベントナイトに包まれた炭素鋼の長期耐久性に関するナチュラアナログ研究も実施しており、粘土質土壌中に埋設されていた鋼管の腐食の状態から経験的腐食モデル式を作成している¹⁰⁾。また、他のオーバーバック候補材料である銅について、考古学材料を用いたナチュラアナログ研究から、シルト質砂層中に約1800年間埋蔵されて

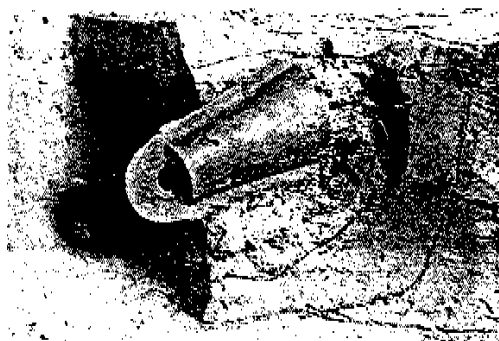


図6 1800年間シルト質砂層に埋まっていた銅鐸
〔(財)大阪府文化財調査研究センター提供〕

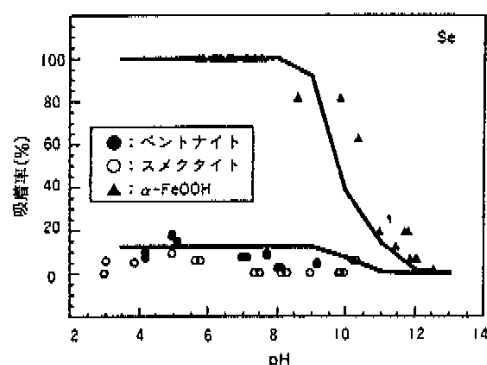


図7 Seのベントナイト等への吸着率のpH依存性
(実線は表面錯体反応モデルによる解析結果)

いた銅鐸(図6)の腐食量を見積もり平均腐食深さを推定する等、オーバーバックの腐食挙動に関するデータ、知見の蓄積を図っている⁹⁾。

3) 緩衝材中の核種移行

ベントナイトへの核種の吸着特性に関しては、ベントナイトへの吸着モデルとしてスメクタイト層間のイオン交換モデルおよび鉄鉱物の表面水和基による表面錯体モデルの適用性を検討している(図7)。ベントナイト中での核種の拡散については、主要な元素の見かけの拡散係数、実効拡散係数の測定を実施するとともに、拡散するイオンとスメクタイト表面との電気的相互作用を考慮し、電気二重層理論を用いてモデル化を実施している。

また、緩衝材の鉱物学的な長期安定性を調べるために、粘土の主成分鉱物であるスメクタイトのイライト化変質について調査を行っている。これまで、既存の変質速度式を用いて処分環境で緩衝材が受ける温度変化からイライト化率の時間変化

を計算しており、現状の処分設計条件ではイライト化は大きな影響を及ぼさないという結果が得られている。一方、ナチュラアナログ研究として、天然におけるイライト化現象の調査も合わせて行っているが、これまでにマグマの貫入による熱影響を受けた貫入岩の存在するベントナイト鉱床を調査した結果、処分環境で想定される温度条件下では、200万年間はイライト化が起こらない事が推定されている⁹⁾。

放射性核種の移行に関する研究として、核種の溶解度に関するデータ取得試験を進めている。これまでに、アクチニド元素のアナログとしてNd、Smを用いた雰囲気制御下での水酸化物、炭酸塩の溶解度測定等から既存の熱力学データベースの評価を実施してきており、今後、性能評価で重要な主要元素について、熱力学データベースの整備、ベントナイトへの核種の収着、拡散係数等のデータベース化を進めていく計画である。

(3) 天然バリア中の核種移行研究

天然バリアとしての地質媒体は評価上、花崗岩等の結晶質岩で代表される亀裂性媒体と砂岩/泥岩等の堆積岩で代表される多孔質媒体に分けられるが、これらの地質媒体の核種の閉じ込め性能を定量的に示すため、現在、亀裂ネットワーク構造や不均質性を取り込んだ詳細モデルの開発およびその適用性の評価を進めている。

亀裂ネットワークモデルは岩盤中の個々の亀裂を直接モデル化することから、亀裂の幾何形状を詳細に表現することができ、また、水理地質データを直接モデルに反映させることが可能である。動燃事業団では亀裂ネットワークモデルのこうした長所に着目して、ストリバプロジェクトにおいて高い評価を得たFracMan/MAFICコードを導入し、その高度化をはかっている。これまで亀裂ネットワークモデルを適用して、釜石鉱山試験エリアにおけるKD-90坑道への湧水量予測解析やトレーサー試験解析、スウェーデンエスポ島のトンネル掘削に伴う水位低下試験解析を行い、その適用性の評価を進めている。

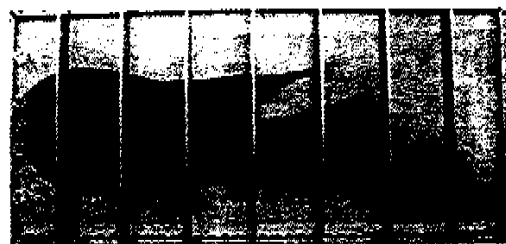
地層処分基盤研究施設(ENTRY)では、人工的に作製した凹凸を有する割裂亀裂を有する岩体を用い、透水/トレーサー試験(LABROCK)を実施している。本試験では、垂直荷重を5、10、15トンの3段階で変化させることにより、開口幅、圧力分布およびトレーサーの移行経路が変化する状況を調べている。これまでに物質移行上の開口幅と水理学的開口幅に関して、人工的に作製した亀裂では天然亀裂のように亀裂内部の層状構造等

がないため両者はほぼ等しいという結果になっている。

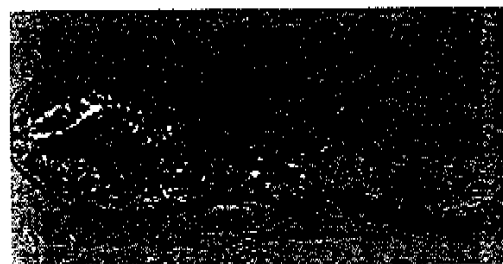
また、不均質媒体中の分散現象に関する研究として、粒径の異なるガラスビーズを用いて不均質な透水係数場を作成し、トレーサ試験を実施し、分散挙動の観察および解析を行っている。これまでに本試験で使用した不均質透水場は透水係数と距離の相関関係がべき乗則に従うと仮定して発生させたものである。解析では、移流プロセスのみを考慮したパーティクルトラッキング法を使用している。解析結果と観測結果については移行の初期の段階ではほぼ一致(図8)したが、時間が経過するにつれて解析結果に数値的な分散の影響が現れ、観測結果とのずれが生じており、今後、解法を改良して行く計画である。

一方、原位置での移流・分散に関する研究の一環として、花崗閃緑岩が分布する釜石原位置試験場において、①透水性割れ目の分布とその連結性の把握、②透水性割れ目に作用する動水勾配(間隙水圧分布)の把握、③透水性割れ目に挟まれ透水性が低いブロックの分布・大きさの把握、④高間隙水圧ゾーンと低間隙水圧ゾーンを隔てる境界(水理バリア)の把握、を目的とした水理地質構造調査を実施している。調査では約80m~100mの長さの試験孔を順次掘削し、新規の試験孔掘削時に、既存の試験孔を区切るためのパッカーをその中に設置し、複数の観測区間を設定できるマルチパッカーシステムと間隙水圧自動観測装置を設置し、間隙水圧の変化を観測している。これまでの試験の結果、水理学的に連結する“水みち”が抽出されているが、これらの水みちは、①それぞれ水圧干渉を示さない、②それぞれ異なる間隙水圧を示す、という特徴がみられた。これらのことから、本領域は固有の水圧を保持し、互いに独立した複数の水理的領域に分けられるものと推定できる。

また、海外の地下研究施設を利用した国際共同研究として、スイスグリムゼル試験サイトに存在する破砕帯を対象として、NAGRA(スイス放射性廃棄物管理共同組合)と共同で放射性核種を使用したトレーサ試験を実施している。これまでの試験の解析の結果、弱吸着性の $^{22/24}\text{Na}$ 、 ^{85}Sr においては線形平衡論モデルで説明できることが示されたものの、実験室で測定された分配係数 K_d 値をそのまま核種移行評価や原位置試験の予測計算に使用することは結果を過小に見積もることになるという結果が得られており、現在その原因を調査中である。



染料トレーサ試験観測結果(8.5時間後)



シミュレーション結果

図8 多孔質媒体水理試験設備での試験の様子とシミュレーション結果

また、スウェーデンエスボ島の地下研究施設の斜坑を掘削する際に生じた周辺地域における大きな水圧変化を予測するために、亀裂ネットワークモデルを用いて断層破砕帯をモデル化し、水圧変化の予測解析を行っている。その結果、各パッカーで区切られた観測区間における水圧の実測値と解析値の差の平均値については、良好な結果を得られるとともに、構造モデルが非常に重要であることが示されている¹²⁾。

(4) 多重バリアシステム性能評価研究

多重バリアシステム性能評価研究の目的は、核種の移行率や被ばく線量等の性能指標を用いて、人工バリアおよび天然バリアからなる多重バリアシステム全体の性能を定量的に把握し、我が国において、地層処分が安全に実施できることを示すことである。

平成4年の第1次取りまとめ¹³⁾においては、それまでに開発された人工バリアおよび天然バリア中の核種移行モデル/コードを用いて、地下水シナリオに基づいて放射性核種が人間環境に至るといった過程に沿った一連の解析により、人工バリアおよびその周辺岩盤(ニアフィールド)に大きな核種移行遅延性能が期待できることが示された。

現在は、これらの結果をより確かなものとする

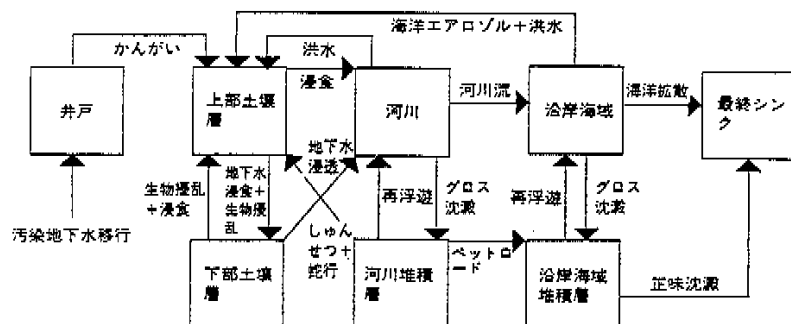


図9 井戸への汚染地下水移行に対する代表的生物圏モデルで考慮するコンパートメントとコンパートメント間の核種の移行プロセス

ため、個々の現象をより詳細に表現し、信頼性の高い評価を行うためのモデル/コードの開発・改良を進めるとともに、評価の信頼性を向上させるための品質管理手法に関する研究を継続して行っている。

モデル/コードの開発・改良に関しては、人工バリア中の核種移行と天然バリア中の核種移行の相互作用を考慮し、ニアフィールドの核種移行を詳細に扱うことが可能な人工バリアと天然バリアの連成解析コード⁶⁾、および代表的生物圏モデル(図9)を採用した被ばく評価コードを開発している。また、品質管理手法等の開発に関しては、コンピュータ上において、データベースを介して解析に用いるデータ、コードならびに解析結果を統合的に管理する統合管理システムの開発を進めている。

今後は、これらの成果を用いて当面の目標であるニアフィールドの核種閉じ込め性能を定量的に解析し、信頼性の高い結果を示していく計画である。

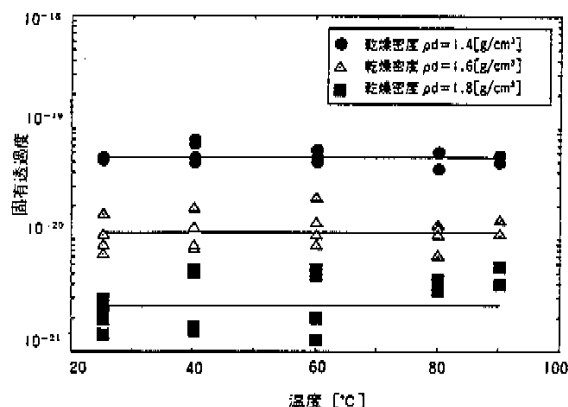
2.3 処分技術の研究開発

処分技術の研究開発では、地層処分システムに要求される性能が確保できるような人工バリアの設計、製作および施工技術、ならびに処分施設の設計、建設、操業および閉鎖の要素技術に関する研究開発を行い、工学的観点から地層処分の技術的信頼性を示すこととしている。

(1) 人工バリア技術の研究開発

人工バリア技術の研究開発では、要求性能を念頭に置き、人工バリア候補材料の基本的な特性の評価と人工バリアの設計解析、製作および施工技術について検討評価を行っている。

オーバーバックについては、炭素鋼を第一に研



クニゲルVI (100%) 試料

図10 固有透過度の温度依存性

究すべき材料として取り上げ、腐食性、耐圧強度、遮蔽性等の設計検討を行うとともに、実寸大オーバーバックの試作を行い、設計および製作技術の評価を実施してきており、現在、耐食性向上の観点から外面をチタンでコーティングするなどの複合オーバーバックの開発を実施中である。

緩衝材については、ベントナイトを有力な材料として取り上げ、熱伝導性、固有透過度(図10)、強度等の基本的な物性の評価を行うとともに、熱-水理-応力連成モデルの開発、構造力学安定性の解析検討ならびに製作施工法の検討を進めている。

また、緩衝材大型室内試験や釜石鉱山での原位置試験(図11)¹³⁾を通じて、緩衝材の連成モデルの開発および施工技術の確認を実施してきている。また、ENTRYでは、熱-水-応力連成試験(COUPLE)、緩衝材流出試験(BENTFLOW)、水素ガス移行挙動試験(HYDROGEN)等の工学規模の

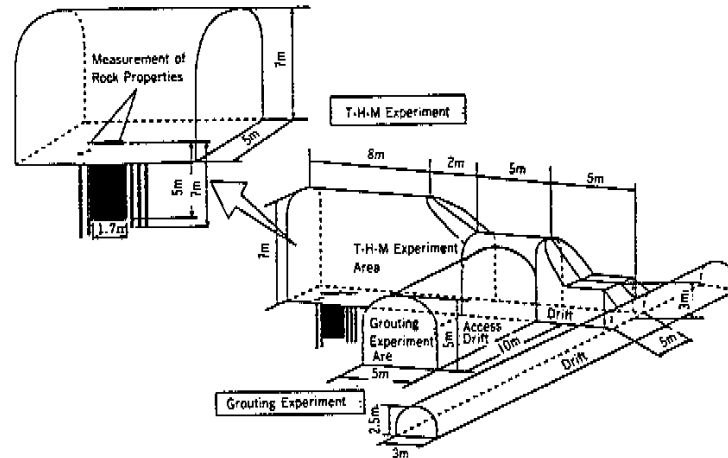


図11 粘土充填・熱負荷試験レイアウト

試験を進めている。

人工バリアの耐震安定については、工学規模の試験を実施するとともに、土-水2相系の非線形解析モデルを開発中である。

(2) 処分施設に関する要素技術開発

処分施設に関する要素研究開発では、処分施設に要求される性能を確保し得る技術的方法を明らかにするため、処分施設の設計研究および建設、操業、閉鎖の要素技術開発を行っている。処分施設の設計研究では、我が国の地質環境条件を考慮した施設の構成、地下施設の安全対策とレイアウト、地下施設へのアクセスの検討を実施するとともに、結晶質岩系岩盤と堆積岩系岩盤を対象とした地下施設の空洞安定性や廃棄体の発熱影響等について設計解析手法と処分場の仕様を検討している。また、建設、操業、閉鎖の各段階に必要な施工技術およびこれらの施工手順、施工方法について検討を行っている。処分システムの性能を確保する上で特に重要な閉鎖技術については、「埋戻し」、「プラグ」、「グラウト」の各要素技術の開発を実施している。

埋戻し材については、室内試験により力学・水理物性を取得している。プラグとグラウトについては、釜石鉱山やカナダ原子力公社(AECL)の地下研究施設において原位置試験を実施しており、実際のフィールドにおいて処分技術の施工品質、性能の確認を進めているところである。

2.4 TRU 廃棄物の処分研究開発

TRU 廃棄物は、高レベル放射性廃棄物とは異なり、非発熱性のものが大部分であるため、処分

空洞に廃棄物をまとめて処分することが可能である。廃棄体間の充填のための候補材料としてセメント系材料が、また、緩衝材としてベントナイト等の粘土系材料が考えられる(図12)¹⁴⁾。動燃事業団では、高レベル放射性廃棄物の処分研究の成果を反映しつつ、(1)人工バリア構成材の物理・化学的特性の研究、(2)固化体からの核種の浸出評価研究、(3)核種の移行に関する研究、(4)ヨウ素等の移行抑制材料の研究、(5)ガスの影響の研究、(6)大空洞処分技術研究、(7)性能評価研究等について研究を進めている。

(1) 人工バリア構成材の物理・化学的特性の研究

セメント系材料については、地下水による成分の浸出等により長期的に変質していく挙動を調べるために浸出試験を実施している。これまでに、セメント系材料の浸出特性はセメント構成物質の

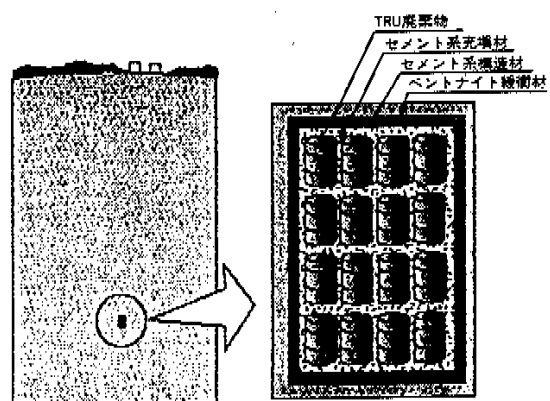


図12 TRU 廃棄物の処分概念の一例

配合(セメントのCa/Siモル比)によって異なり、Ca/Siモル比が小さなものほど、セメント構成成分の浸出は小さくなるという結果が得られている。また、Ca/Siモル比を変化させることにより、セメント系材料の間隙水の化学的条件を制御することも確認されている。

ベントナイトについては、セメント系材料の影響によって、1)カルシウム型ベントナイトへの変質、2)ベントナイトの溶解による変質が考えられる。ベントナイトのカルシウム型化については、人工的にベントナイトをカルシウム型化させ透水係数、膨潤圧および一軸圧縮強度等の力学特性に着目したデータを取得している。これまでに乾燥密度が 1.8g/cm^3 程度のベントナイトにおいて、上記性能は変質させる前とほぼ同程度であることが分かっている。また、ベントナイトの溶解による変質については、セメントの模擬間隙水中で $50\sim 200^\circ\text{C}$ の温度をかけて変質促進試験を実施しており、ベントナイトの変質速度および生成鉱物の同定を行っている¹⁹⁾。

(2) 固化体からの核種の浸出評価研究

TRU廃棄物として、可溶性の塩を重量の半分程度含有するプロセス濃縮廃液固化体(アスファルト固化体)について、模擬固化体を作製し固化体の核種の閉じ込め性能を把握するための浸出試験を行っている。ブローンアスファルトに硝酸ナトリウムおよびヨウ化セシウムを添加して模擬固化体を作製し、IAEA提案の標準浸出試験法にて約160日までの試験を行い、ナトリウム、硝酸、セシウムおよびヨウ素の各イオンの浸出率を測定している。

(3) 核種の移行に関する研究

核種の移行に関する研究としては、1)セメント系材料の影響を受けた高pH領域での核種の溶解度測定、2)セメント系材料およびカルシウム型化ベントナイトに対する核種の吸着・拡散挙動の研究、3)有機物の核種移行挙動に与える研究を実施している。

セメント系材料の影響を受けた高pH領域での核種の溶解度測定については、これまでに、セメント系材料の浸出液に塩酸あるいは水酸化ナトリウムを添加してpHを $10\sim 13.5$ に調整し、低酸素雰囲気中でPuの過飽和側からの溶解度試験を実施した。Puの溶解度は、このpHの範囲では中性領域(pH7.5前後)より約3桁小さな値となっている。

各種セメント系材料およびカルシウム型化ベントナイトに対する重要核種の吸着・拡散挙動の研究として、セメント系材料についてはセシウムお

よびヨウ素の吸着試験を実施した。カルシウム型化ベントナイトについては、In-Diffusion法によりセシウムおよびヨウ素の見掛けの拡散係数を取得した。カルシウム型化ベントナイトのセシウムおよびヨウ素の見掛けの拡散係数については、変化する前のナトリウム型ベントナイトと同程度の値となっている。

有機物の核種移行挙動に与える研究については、固化材として用いられているアスファルトを化学分解、放射線分解および微生物分解させ、分解生成物存在条件における核種の溶解度の測定を行っている。化学および放射線(α 線)分解については分解生成物存在条件においてPuの溶解度を測定したが、その影響はほとんどないという結果が得られている¹⁹⁾。微生物分解については、アスファルトを分解する微生物の調査を実施しているところである。また、セメント系材料の施工性の観点から使用される有機系の混和剤の核種の溶解度への影響に関する試験も行っている。

(4) ヨウ素等の移行抑制材料の研究開発

ヨウ素は、処分環境で陰イオンとなるためベントナイトや岩石への吸着遅延機能がほとんど期待できない。このためヨウ素を吸着する材料の調査を行っている。

これまでにクリソタイル、酸化マグネシウム、酸化アルミニウム、ピスマス/マグネシウム系無機イオン交換体およびハイドロタルサイトについて、還元性かつセメント系材料の環境でヨウ素の吸着試験を実施した。最もヨウ素を吸着したものはハイドロタルサイトであったが、炭酸イオンが共存する場合には、大きく低下し、吸着材として機能しにくいという結果が得られている。

(5) ガスの影響の研究

TRU廃棄物からのガスの発生については、1)ドラム缶等の金属の腐食、2)有機物の放射線分解、3)微生物分解の影響によってガスが発生し、人工バリアにガスの移行経路の生成や地下水の流れに影響を及ぼす可能性がある。この影響を調査するためにベントナイト混合土に対してガスの透気試験を行っている。試験では、ケイ砂の混合率を変化させガス透過係数および透気し始めたガス圧の測定等を行っている。

(6) 大空洞処分技術開発

TRU廃棄物の処分として、大空洞処分概念が考えられる。処分空洞は、岩体の物理的特性に左右される。これまで、既存の地下構造物について岩種、深度、空洞の大きさおよび空洞の掘削手法について調査を行ってきた。さらに、弾塑性モデ

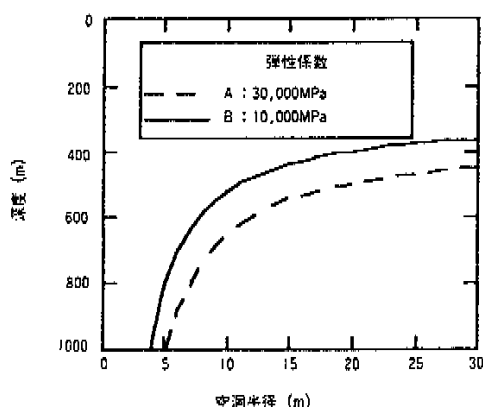


図13 深度と空洞半径との関係（結晶質岩）

ルに基づいて深度と空洞半径の検討を行っている（図13）。これまでの検討により既存技術を使用し、岩体によっては、地下数百mで半径数m程度の空洞を掘削することが可能であることが示されている。

(7) 性能評価研究

図12で示した処分システム等を想定し、予備的性能評価を実施している。代表的なTRU廃棄物としてハル等の廃棄物およびプロセス濃縮廃液固化体（アスファルト）について核種移行計算を実施し、処分システムの核種閉じ込め性能および被ばく線量を支配する核種を把握している。両廃棄物ともに被ばく線量を支配する核種は、初期においてCs-137、I-129およびC-14であり長期的には4n+2系列の核種である傾向を示されている。

2.5 社会環境研究

地層処分の研究開発は、その性能評価等の時間枠が超長期にわたり、地下深部の地質環境を研究対象とするため、得られた研究成果や処分の基本的考え方等を一般公衆や分野の異なる専門家に、より分かりやすく表現し、的確に解説することが求められる。

地層処分の研究開発を平易にかつ、的確に表現することは、公衆の理解を得る上で重要な要素との位置づけから原子力関係者への関連情報の提供を当面の目標としている。

本稿では、これらの目的に沿って実施している研究開発の内容について紹介する。

(1) 情報の認知に係わる研究

本研究は、地層処分に関する研究開発等の情報やその情報提供手法と公衆がいかにそれらを認知するかを明らかにすることを目的としている。

本研究においては、「高レベル廃棄物の地層処分は、現世代の我々が原子力発電による恩恵を受けた結果として我々の世代内でできるかぎり解決すべき問題であり、将来世代に過度の負担を強いないようにすることを目標とした処分方法である」という国際的な共通認識を含め、一般公衆がどのように受け止めているかをリスク・パーセプション（リスク認知）の観点から研究を行っている。

地層処分に係る公衆の意識構造を分析し、地層処分に対する公衆の態度を知るため、公衆を対象としたヒアリング調査をしてISM（Interpretative Structural Modelling）法等を適用して地層処分に対する態度と事実認識の関係の解明を試みている。

これにより、この問題に対する意識の概略の構造モデルを構築し、その枠組みと構成要素の妥当性について検討を進めている。ヒアリングの結果からは、地層処分に対しては、現段階では問題意識に比べてリスク感が大きいことが示された。

(2) 情報提供効果の評価モデルの開発

原子力利用や放射性廃棄物対策に関して人々の合意を得るため、従来から広く実施されてきたパブリック・アクセプタンス（PA）活動は経験的な判断に負うところが大きく、その効果や評価はおおむね定性的であり主観的要素が強い。そこで、人々のPAへの反応過程に法則性を見だし、これを定量化することによりPA活動やPA効果を定量化し、PA活動の効率化を図り、活動の効果対費用比を高めるという観点から「放射性廃棄物対策に係わる情報提供効果の評価モデルの開発」を行っている。評価モデルとしては、新聞・テレビからの情報を直接得て情報提供対象層の態度が確立するとする、標準モデルを中心に開発・整備をした。また、実際の廃棄物施設に対する態度の経年変化を調査する事例解析をした結果、本評価モデルが信頼度93%で実測値を再現できた。さらにマスメディアから受けた情報を人々が相互に刺激しあって態度が変化するという、相互コミュニケーション効果やPA活動の最適化因子を本評価モデルに付加して事例解析をした結果、このモデルの有用性が確認された。

(3) 情報素材の検討と提供

本研究は、国内外の高レベル放射性廃棄物問題を取りまく社会環境の把握・分析および情報提供によって得られた知見・教訓に沿って、パンフレット、ビデオ、模型等の素材を制作し、情報提供活動を通して、効果的な情報のあり方等を検討することを目的としている。

表4 情報提供対象とコミュニケーション手段

手段 \ 対象	A	B	C	D	E	F	G	H
プレス関係						○		
広告							○	
展示			○	○	○	○	○	
報告会等	○	○	○	○	○			
施設見学	○	○	○	○	○	○		
海外見学	○	○						
著名人							○	
個人面接	○							○
パンフレット		○	○	○	○	○	○	
ビデオ	○	○	○	○		○		
技術報告	○	○						
広報誌		○			○	○	○	
新聞雑誌					○	○	○	
著作物								
世論調査					○			

A：学界・専門家 E：地産住民（サイト周辺）

B：官庁（自治体） F：マスコミ

C：電力 G：一般公衆

D：産業界 H：海外関係

○部分が、現時点の評価対象を意味する。）

パンフレット、ビデオ、模型等の素材を用いた情報提供の研究では、対象とする階層および情報提供方法の関係を設定するにあたり、海外の事例（例えば、スウェーデンSKBおよびスイスNAGRA）等を参考にして表4のような整理を行い、報告会に重点を置き、学会・専門家、官庁（自治体）、電力、産業界等を当面の情報提供対象として研究を実施している。

(4) 結語

社会環境研究の研究成果は、当面の目標であった地層処分研究開発の平成3年度技術報告書の理解のための情報提供、特に平成4年9月の地層処分研究開発報告会以降開催している報告会に反映してきた。その結果、多くの原子力関係者の地層処分研究開発に対する関心に十分に関与できたものとする。

(5) 今後の進め方

社会環境研究の当面の目標は、西暦2000年前までを目途にまとめられる地層処分研究開発に係わる第2次取りまとめについて一般の人々にも評価されるような情報提供のあり方を明確にし、その成果を用いて理解される案地を醸成するために情報素材とその提供方法を準備することに置く。

このため、社会環境研究は、双方向のコミュニ

ケーションを念頭に置き、今後も情報提供とその効果の把握、その成果の情報への反映といったサイクル的な進め方を通して、地層処分の概念や研究開発成果を理解する上で必要な情報の質の向上と情報提供方法の改良、それに必要な社会環境情報の把握・分析を継続する。

3. 地層科学研究

地層科学研究は、地層処分研究開発の基盤の研究であり、地質環境が本来備える特性を理解するための「地質環境の特性に関する研究」と地質環境の長期的な変化やその影響を明らかにするための「地質環境の長期安定性に関する研究」および、地表から地下深部までの地質環境特性を明らかにするための調査技術開発から構成されている。

研究の対象は、地下深部の岩盤や地下水の性質、そこで起こる現象、地震活動や火山活動等の天然現象等、地球科学の幅広い分野にわたる。したがって、その成果は、地層処分研究開発の全般に共通する基盤となるとともに、我が国における地下深部についての学術的研究にも広く寄与するものである。

地層科学研究の主要な研究項目は以下のとおりである。

(1) 地質環境の特性に関する研究

- ①地下水の流動に関する研究
- ②地下水の地球化学に関する研究
- ③岩盤の工学的特性に関する研究（坑道掘削による周辺岩盤への影響等）
- ④岩盤中での物質移動に関する研究
- ⑤調査技術および機器の開発
- (2) 地質環境の長期安定性に関する研究
- ①地震・断層に関する研究
- ②火山活動に関する研究
- ③隆起・沈降・侵食に関する研究
- ④気候・海水準変動に関する研究

3.1 地質環境の特性に関する研究

地質環境の特性に関する研究は、東濃鉱山およびその周辺地域（東濃地域と呼ぶ）ならびに釜石鉱山の既存坑道を利用して実施している。

(1) 東濃地域における試験研究

東濃地域を対象に、地質環境の特性を把握するための総合的な調査研究を展開している。東濃鉱山は、岐阜県土岐市および瑞浪市に分布する月雷ウラン鉱床を調査するために開削された研究開発用の坑道である（図14、15）。東濃地域の地質は、花崗岩類を基盤として新第三紀の堆積岩がこれを

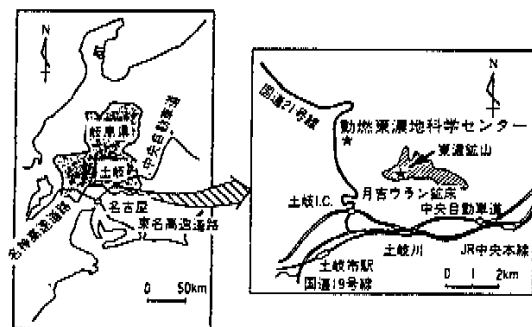


図14 東濃鉱山位置

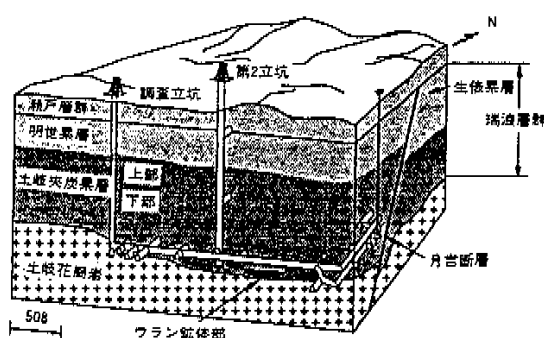


図15 東濃鉱山断面

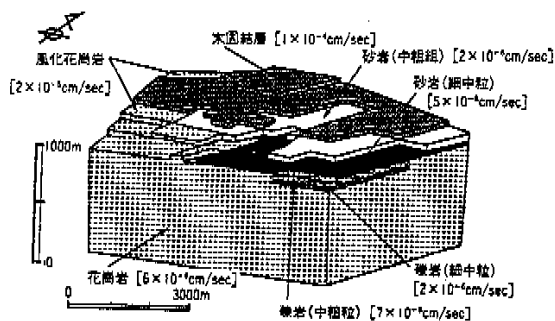


図16 深部地下水調査研究領域水理地質モデル

覆う構造をなしており、ウラン鉱床は堆積岩の最下部に存在している。

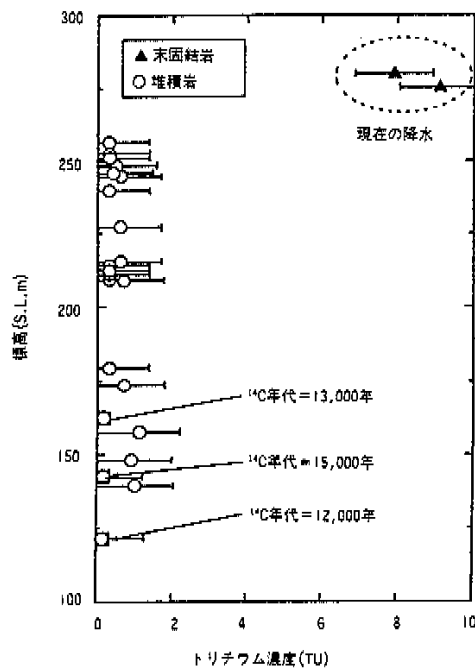
動燃事業団は、昭和61年度から東濃地域で、地下水の流動・地球化学、坑道掘削による周辺岩盤への影響、岩盤中での物質移動等に関する調査研

究を進めている。

地下水の流動に関する研究では、深度500m程度までの信頼性の高い実測データの蓄積、水理地質構造モデルの構築(図16)、モデルを用いた地下水流動解析の実施とその検証のための長期観測を実施している。これまでの、堆積岩を対象とした水理試験の結果では、粗粒の部分ほど透水性が高いことが確認されており、中粒～粗粒砂岩の透水係数は 10^{-6} cm/secのオーダーであるのに対し、凝灰質砂岩や細粒～中粒砂岩では、おおむね 10^{-8} cm/secの透水係数が得られている。また、花崗岩においては、開口割れ目部分ではおおむね 10^{-3} ～ 10^{-4} cm/secの高透水性を示すが、健岩部および割れ目であっても粘土鉱物が充填している部分では 10^{-8} ～ 10^{-9} cm/secの難透水性を示すことがわかった。東濃地域の3次元地下水流動解析によると、地下の間隙水圧は、浅層部を除くと、ほぼ静水圧分布を示し、地下500m以深の動水勾配(単位距離あたりの水圧の変化)は0.04未満であった。

地下水の地球化学に関する研究では、東濃鉱山周辺の地下水の起源・年代および地球化学的性質に関する三次元的な把握と水質形成に係わる熱力学的モデルの構築およびその妥当性の検証などを目標に、試錐孔を利用した複数の深度からの定期的採水と分析を継続している。その結果、堆積岩中の地下水のpHは、深度が増すにしたがって、中性から弱アルカリ性へと変化するが、基盤の花崗岩中の地下水はほぼ中性であることが明らかとなった。また、溶存酸素はどの深度においても非常に低濃度であること、堆積岩中の地下水の水質は、おおむね標高200mを境に、浅部は $\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型であるのに対して、深部では $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ 型であること等が確認された。さらに、酸素および水素の安定同位体の比率から地下水の起源は降水であること、また、炭素の放射性同位体(^{14}C)による年代測定から深度百数十mの堆積岩基底部の地下水の年代は少なくとも1万年以上であることも明らかとなった(図17)。

坑道掘削による周辺岩盤への影響に関する研究としては、坑道掘削影響試験用に内径6m、深さ150mの立坑を掘削し、掘削前の初期条件の把握、事前解析による掘削の影響予測、各種試験の実施、掘削後の長期観測等の一連の試験研究を実施した。立坑周辺の試錐孔を利用した地下水位の観測、坑道内岩盤の内空変位および立坑内の湧水量等の測定は、掘削終了後もすでに2000日以上にわたって継続中である(図18)。これらの試験の結果、発破によって岩盤が損傷した範囲は立坑壁面から1

図 17 東濃地域の地下水中のトリチウムおよび ^{14}C 年代

m 程度であること、周辺岩盤中の間隙水圧が変化する範囲は立坑を中心に半径100m 程度であること等が明らかとなった。

岩盤中での物質移動に関する研究では、東濃地域のウラン鉱床を活用して、天然の放射性核種であるウランの岩盤中での移行・遅延に関する研究やウラン鉱床の生成・保存と地質環境条件との関連に関する研究を実施している。これまでの研究の結果、ウランの移行・濃集には岩石の化学組成のみならず地下水そのものの移行が大きく影響していること、ウランは還元環境下で固定されており、過去数十万年間はほとんど移行していないこと等がわかった。

東濃地域におけるこれまでの試験研究により、東濃鉱山を中心とした地下500m 程度までの岩盤や地下水の性質、岩盤中での物質移動および坑道掘削による岩盤への影響に関する知見がある程度蓄積されてきた。今後は、特に地下深部(1,000m まで)の広域(10km×10km)を対象にした地下水の流動および地球化学に関する調査研究ならびに東濃鉱山を活用した坑道周辺岩盤の力学的安定性や物質移動、断層の水理特性に関する研究等を実施していく。

東濃鉱山では、前述のように天然の放射性核種が観察でき、また、地下数百数十mの還元的な環境

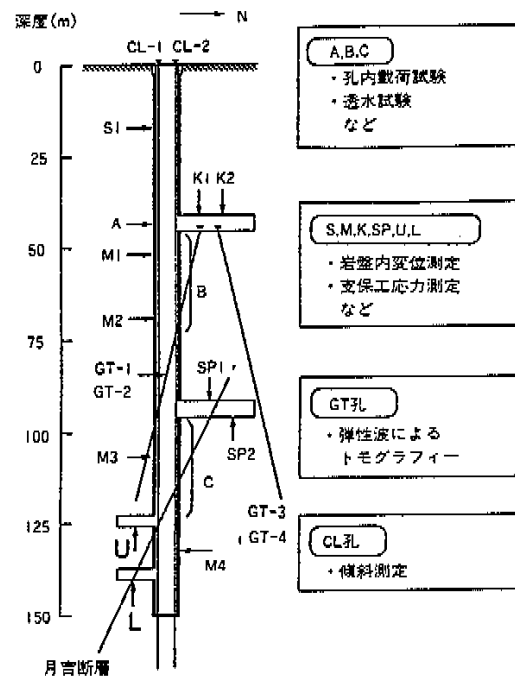


図 18 立坑掘削影響試験での調査概要図

に比較的容易にアクセスできることから、ウラン鉱床を対象にした国際共同研究も進められている。現在、フランス原子力庁(CEA)との間で、地下水中のコロイドと有機物に関する共同研究を、また、スイスの放射性廃棄物管理組合(NAGRA)との間で、ナチュラアナログに関する共同研究を進めている。

(2) 釜石における試験研究

釜石鉱山は、岩手県釜石市の西部(遠野市との境界付近)にある、我が国有数の鉄-銅鉱山である(平成5年3月に採掘終了)。

動燃事業団は、昭和63年から釜石鉱山の既存坑道を利用して、この地域に広く分布する栗橋花崗閃緑岩(前期白亜紀)を対象に地質科学研究を実施している(図19)。

最初の5年間(第1フェーズ)は、550m レベル坑道(深度約300m)を利用して、深部地質環境の特性とそこで起こる現象の把握およびそのための調査技術の適用性の確認等を目標に、試験研究を実施した。その結果、栗橋花崗閃緑岩の強度等の特性、初期応力状態、岩盤の透水性、深部地下水の地球化学的性質、岩盤内に充填したベントナイト粘土の原位置での膨張挙動等に関する知見が得られた。また、坑道掘削による岩盤の水理学的および力学的影響範囲は、坑道壁面から約1m程度

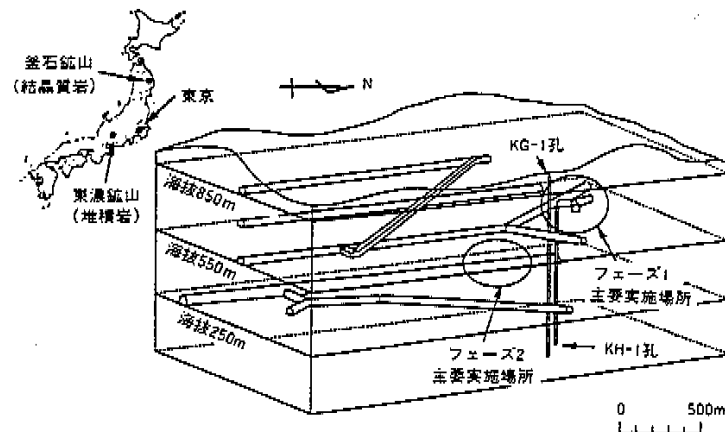


図19 釜石原位置試験実施場所

であることもわかった。

現在実施している第2フェーズ（平成5年度から平成9年度）においては、第1フェーズで抽出された課題、すなわち地質環境特性の深度による違いや坑道周辺の掘削影響領域をより詳細に把握することなどを目標に、以下の研究項目を設定して、550m レベル（深度400m）と250m レベル（深度700m）の2つの坑道を対象に試験研究を進めている。

- ①深部地質環境の地質構造、力学特性、水理特性、地球化学特性の把握
- ②深部岩盤における掘削影響領域の評価
- ③収着・マトリックス拡散および移流・分散に関する研究
- ④粘土充填・熱負荷試験
- ⑤地震の影響に関する研究

これまでの試験研究によって、異なる深度での初期応力状態、物質移動にとって重要な割れ目や微小空隙の構造、坑道近傍の地下水の酸化還元状態等が明らかになりつつある。

(3) 調査技術および機器の開発

地質環境の特性に関する研究においては、地下深部における岩盤や地下水の状態を把握するための技術の整備が必要である。動燃事業団では、地下深部の地下水の流動特性や地球化学特性等に重点を置いて、これらの特性を高精度かつ効率的に計測するための技術や機器の開発、改良を進めている。

地下水の流動に関する調査技術としては、深度1000mまでの透水係数や間隙水圧等を原位置で計測できる水理試験装置を開発した(図20)。現在、本装置の高度化を継続するとともに、長期観測の

ためのモニタリング装置や複数のボーリング孔を利用する試験孔間水理試験装置の開発等を進めている。

地下水の地球化学特性を把握するための技術としては、深度1000mまでの地下水を被圧不活性状態で採取できるバッカー式地下水採水装置や各種物理化学パラメータ（酸化還元電位、pH、溶存酸素濃度等）を原位置で計測できる装置を開発した

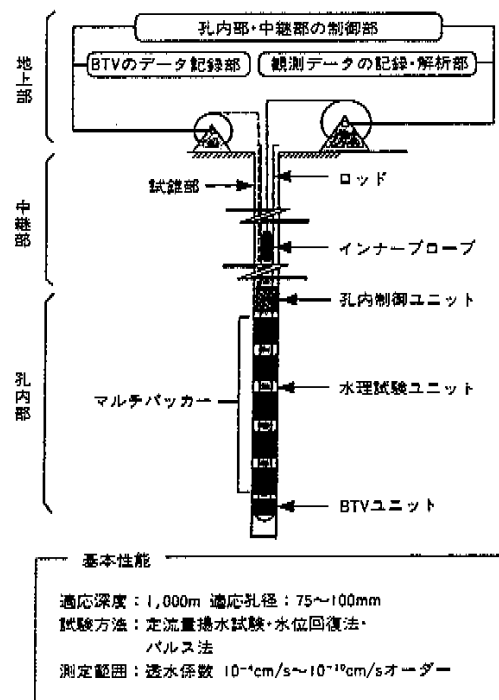


図20 1000m対応水理試験装置の概念

(図21)。現在、これらの装置の高度化を継続するとともに、採取した地下水の生成年代を測定する技術の開発等を行っている。

その他、地下深部の地質構造や岩盤中（特に坑道周辺）の割れ目の分布等を、非破壊で把握する技術として、弾性波やレーザ等を応用した物理探査技術の開発を進めている。

3.2 地質環境の長期安定性に関する研究

地質環境に影響を与える可能性のある天然現象として、地震・断層、火山活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動をとりあげ、それらの現象の特徴や地質環境への影響に関する知見を整備するとともに、将来の地質環境の変化を予測評価する手法を確立することを目標に、国内外の関連文献の調査や事例研究を進めている。

本研究においては、まず個々の天然現象の履歴を明らかにするための文献による調査解析、それらの現象が地質環境に与えた影響の性質や規模を把握するための事例研究、将来における天然現象による地質環境への影響について現実的な変動の幅を示すための手法の確立が主なアプローチとなる。

地震・断層に関しては、断層活動の時間的・空間的变化と断層活動が起こっている場の特性に着目して、新たな断層の発生の可能性について検討を行っている。また、断層活動による周辺の地質環境への影響範囲を評価するため、断層周辺における水理学的変化や地下水の地球化学的变化等を把握するための手法の検討を進めている。

火山活動に関しては、その活動地域が将来的にも変化しないという見通しを確かめるため、第四紀における火山活動の特性およびその地域性を把握し、火山活動の場と地質構造、応力場、プレート配置等との関係を明らかにするための研究を実施している。また、火山活動による地質環境への影響範囲を評価するため、火山による熱的な影響や地下水への影響を把握することを目指した事例研究を進めている。

隆起・沈降に関しては、将来における変動幅を評価することを目標に、過去の変動量を精度よくとらえるための変動基準面の同定法や対比法および第四紀標準編年表を整備し、日本列島における過去の地殻変動を明らかにするための事例研究を実施している。また、侵食に伴う地形変化や地層の厚さの減少を見積もるため、侵食作用をモデル化し、将来の地形変化を予測するための数値モデルの構築等を目指した研究を進めている。

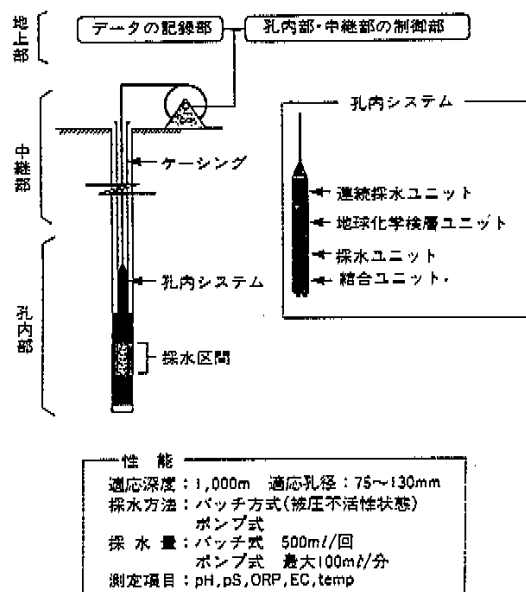


図21 1000m対応地下水の地球化学特性調査機器の概念

気候・海水準変動に関しては、将来における変動の規模と規則性を評価することを目標に、地球規模および日本列島における過去の気候および海水準に関する知見や情報の整理、解析を進めている。

3.3 結語

地質科学研究のような新しい分野においては、広く公衆の理解を得ながら調査や試験を進める必要がある。そのためには、基礎的な研究段階から関連する分野の専門家の参加を得て、幅広い視野から調和のとれた研究開発を、透明性をもって進めること、また、成果を着実に積み上げ公開していくことが重要である。このような観点から、地質科学研究を進めるにあたっては、関係各界の専門家からなる各種委員会を組織して、個々の研究内容および研究計画全体としての進め方やその成果について、各方面からの指導を仰ぎながら研究開発を進めているところである。

また、東濃地域等において実施している地質科学研究を、より一層拡充することを目標に、平成7年8月には、「超深地層研究所計画」を公表し、同年12月には、岐阜県、瑞浪市、土岐市との間で、本計画に関する協定を締結した。

超深地層研究所は、原子力長計に示された「深地層の研究施設」として、動燃事業団が岐阜県瑞浪市に保有する用地に建設するもので、地上施設（室内試験施設や機器整備施設等）と地下施設（地

下1000m程度までの立坑や複数の深度に展開される研究坑道等)から構成される。本施設は、「地層処分研究に共通の研究基盤となる施設であり、我が国における深地層についての学術的研究にも寄与できる総合的な研究の場として整備していくことが重要」(原子力長計)と認識されており、本施設の計画は、処分場の計画とは明確に区別して進められるものである。

超深地層研究所における地層科学研究は、①地質環境の総合的な調査技術の確立、②深部の地質環境に関する情報の取得、③深部岩盤における工学的技術の基礎開発、を目的としている。このような研究開発は、これまで様々な場で進められてきたものであるが、超深地層研究所においては、地下1000mに及ぶ自然な状態の地質環境を対象として、これらの研究を一体的に進めることができる。そのため、個々の要素技術のみならず、調査の手順なども含めた評価や繰り返しが可能であり、技術や知見を体系的に蓄積して行くことが期待できる。研究期間は約20年で、その間、①地表からの調査予測研究、②坑道の掘削を伴う研究、③地下施設を利用する研究という三つの段階が踏まれることにより、調査～予測～検証が繰り返される。

なお、超深地層研究所では、地層科学研究と並行して、地震研究や地下空間を利用した研究が行われる計画である。ここで得られた成果については、施設自体も含めて、全面的に公開していく。また、地層科学研究の終了後についても、東濃研究学園都市の一角として、学術的な研究等に引き続き利用されることが期待される。

4. おわりに

地層処分は極めて多岐にわたる分野の総合技術であり、研究開発を円滑に進めるためには、様々な形で研究協力を図っていくことが大切である。研究開発の中核推進機関として、動燃事業団は現在、アメリカ、カナダ、スイス、フランス、イギリス、スウェーデンとの2国間協力を行うとともに国際プロジェクト等への参加を積極的に進めている。また国内では、大学、研究機関、民間企業等の協力を得て、研究開発を総合的に推進しているところであるが、今後とも一層の協力を得て研究開発を効果的に進めていく考えである。

また、研究の場としての施設の充実が不可欠である。特に深地層の研究施設は、我が国における学術的研究にも寄与できる総合的な研究の場として重要であり、結晶質岩系を対象とした超深地層

研究所、および堆積岩系を対象とした貯蔵工学センター内の深地層試験場の計画について、地元をはじめとする関係者の協力の下に鋭意取り組んでいるところである。また、性能評価上重要となる核種移行に関する基礎データの取得については、国内外の既存の施設を活用していく一方、第2次取りまとめ以降の研究開発も視野に入れ、放射性核種や実廃棄物試料を使用し、地下環境を模擬できる設備を備えた総合的な研究施設を整備していく計画である。

参考文献

- 1) 動燃 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書、PNC TN 1410 92-081
- 2) 佐藤隆紀、石丸恒春他、文献調査による我が国の岩石の物理的特性に関するデータの収集、PNC TN7410 92-018 (1992)。
- 3) 柳澤孝一、古屋和夫他、我が国における地盤の透水性に関する調査・研究(その1)、PNC TN7410 92-015 (1992)。
- 4) 瀬尾俊弘、清水和彦、我が国における地下水の水質に関するデータの収集・解析、PNC TN7410 92-017 (1992)。
- 5) 動燃 (1994) : 地層処分研究開発の現状、PNC TN1410 94-094, pp61-65
- 6) 古田隆史、牧野仁史、大井貞夫：周辺岩体中の核種移行特性及び複数の廃棄体の存在を考慮したニアフィールドの核種移行挙動に関する検討、日本原子力学会 1996 年春の年会予稿集、p656、(1996)。
- 7) 亀井玄人、湯佐泰久他：火山ガラスのナチュラルアナログ研究 (III) 一 数百万年間、泥質岩に埋没していた火山ガラスの変質速度と環境条件一、日本原子力学会1991年秋の大会、(1991)。
- 8) Kamei, G., Yusa, Y. and Sasaki, N.: Natural Analogue Study on the Long-term Durability of Bentonite. Time-temperature Condition and Water Chemistry on Illitization at the Murakami Deposit, Japan. —, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 257, pp.505-512 (1991)。
- 9) 三ツ井誠一郎、久保田満、村上隆：緩衝材中の銅オーバーバックの腐食に関する考古学的アナログ研究— 1,800年間シルト質砂層に埋没していた考古学的銅製品—、日本原子力学会1995年春の年会 (1995)。
- 10) 玉井明志、亀井玄人：土中埋設鋼の長期腐食挙動の評価、腐食防食 '93、(1995)。
- 11) Honda, A., Taniguchi, N., et al.: A Modelling Study for Long-Term Life Prediction of Carbon Steel Overpacks for Geological Isolation of High-Level Radioactive Waste, Draft Proceeding of International Symposium on Plant Aging and Life Prediction of Corrodible Structures, A-II 08 (1995)。
- 12) 内田王夫、澤田淳他：スウェーデン Hard Rock Laboratory 坑道掘削に伴う地下水位低下予測解析、第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集 (1996)。
- 13) T. Fujita, Y. Sugita, T. Sato, et al.: "Plan of Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Experiment at the Kamaiishi Mine", PNC Technical Report, PNC TN8020 94-005 (1994)。
- 14) Masuda, S., Hara, K., et al.: Research and Development Program of Geological Disposal of Radioactive Waste in PNC. 10th Pacific Basin Nuclear Conference. (1996)。
- 15) 久保博、黒木善貴、川地武：ベントナイト-消石灰系反応の促進試験、第40回粘土科学討論、(1996)。
- 16) B. F. Greenfield, Ito, M., et al.: The Effects of the Chemical and Radiolytic Degradation of Asphalt on Plutonium Solubility, *Mat. Res. Soc. Symp. (in preparation)* (1996)。
- 17) 柳澤孝一、今井久、他：立坑掘削に伴う地下水流動影響調査研究—東濃ウラン鉱山試験立坑を例として—応用地質、33, 5, pp.32-49、(1992)。

- 18) 濱克去、瀬尾俊弘、他：東濃地域における深部地下水の地球化学的研究(IV)、日本原子力学会1992年春の大会予稿集、p.114、(1992)。
- 19) 瀬尾俊弘、水谷義彦、他：岐阜県東濃地域における地下水の¹⁴C年代と起源について、日本地下水学会1992年秋季講演会要旨集、pp.50-53、(1992)。
- 20) 杉原弘造、吉岡尚也、他：新第三系堆積岩における立坑掘削影響試験の概要、土木学会、地下空間利用シンポジウム講演要旨集、pp.185-194、(1992)。
- 21) 岩月輝希、瀬尾俊弘、濱克去：東濃地域における地下水の地球化学研究、日本地球化学会 年合講演要旨集、p.94、(1995)。
- 22) Yoshida, H., Sakuma, H. and Yusa, Y.: The Tono-Natural Analogue Study Program, 7th NAWG Proc., pp.315-318, (1995)。
- 23) 濱克去、瀬尾俊弘、他：100m 対応採水装置の開発、日本地下水学会 1995年秋季講演会要旨集、(1995)。
- 24) 中野勝志、竹内竜史、他：1000m 対応水理試験装置の結晶質岩への適用例、第31回地盤工学研究発表会予稿集、2145-2156、(1996)。