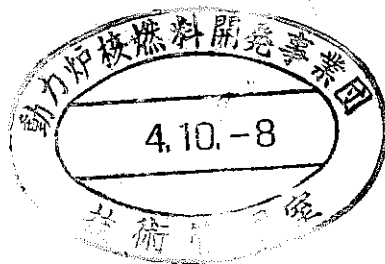


地層処分研究開発

その背景と現状



平成4年9月
動力炉・核燃料開発事業団

目次

はじめに	1
1. 地層処分研究開発の背景	2
1.1 高レベル放射性廃棄物	2
1.2 高レベル放射性廃棄物の処分	4
1.3 地層処分の考え方	5
2. 地層処分研究開発の現状	6
2.1 地質環境条件の調査研究	6
2.2 処分技術の研究開発	10
2.3 多重バリアシステムの性能評価研究	12
2.4 今後の研究開発	20

はじめに

原子力発電の使用済燃料から分離される高レベル放射性廃棄物の対策について、原子力委員会は、「原子力開発利用長期計画」(昭和62年)において「安定な形態に固化した後、30～50年間程度冷却のための貯蔵を行い、その後、地下数百メートルより深い地層中に処分(地層処分)する」との我が国の基本的な方針を示している。

動燃事業団は、原子力委員会の方針にもとづき、地層処分が安全確保のうえで有効であることを、地域や地層を特定することなく科学的・技術的に明らかにするという目標をもって地層処分研究開発を進めている。

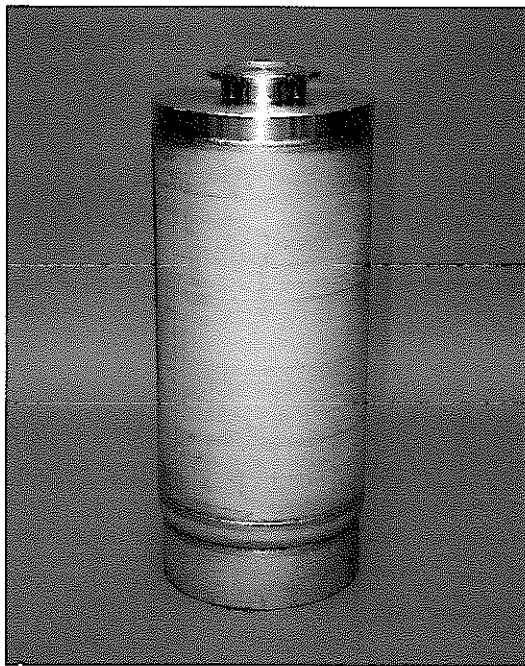
本資料は、地層処分研究開発の背景と、動燃事業団が平成3年度までの研究開発成果にもとづいて取りまとめた「高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書—平成3年度—」にそって研究開発の現状について紹介したものである。

1. 地層処分研究開発の背景

1.1 高レベル放射性廃棄物

人間社会におけるさまざまな活動、たとえば家庭での日常生活、病院、大学での研究、工業などの産業活動からは、それ以上使わないもの、すなわち「廃棄物」が発生する。この廃棄物の中で、放射性物質を含んだ廃棄物、あるいは放射性物質が付着した廃棄物は「放射性廃棄物」と呼ばれる。

原子力発電所で発電に使用された燃料(使用済燃料)から、ふたたび燃料として利用できるウランやプルトニウムを取り出すための処理(再処理)をするときに、放射能レベルの高い廃液が分離される。この廃液中の放射性物質を含む成分は、ガラスの原料とともに高温で溶かされたのち、ステンレス製の容器(キャニスタ)に入れられ、物理的・化学的に安定なガラスとして固められる。この固化ガラスとキャニスタから構成されるガラス固化体を、我が国では「高レベル放射性廃棄物」と呼ぶ。



動燃事業団東海再処理工場で作られる予定のガラス固化体写真(模擬)
寸法 外形430mm×1040mm
重量 約380kg (固化ガラス約300kg)

(1) 高レベル放射性廃棄物の特性

高レベル放射性廃棄物には、核分裂によってできた放射性核種(核分裂生成物)と、ウランが中性子を吸収してできた放射性核種(アクチノイド元素)が含まれている。

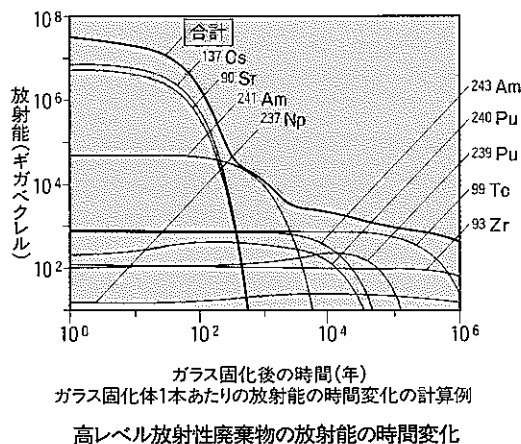
核分裂生成物には、セシウム-137、ストロンチウム-90などの半減期の比較的短い放射性核種が多く、高レベル放射性廃棄物の中に含まれる量も多い。一方、プルトニウムやネプツニウムなどに代表されるアクチノイド元素の多くは、半減期が非常に長い、その量は少ない。

高レベル放射性廃棄物は、ガラス固化の後の数百年間は核分裂生成物の放射能のために、その放射能レベルが高い。ガラス固化したときには、核分裂生成物から放出される放射線によってガラス固化体1体あたり1~2キロワットの発熱があるが、この発熱量は核分裂生成物の崩壊が進むことによって時間とともに減少し、30~50年後には数分の1になる。そこでこの期間、地上において冷却することにより地層処分を効率的に行うことができる。

放射能レベルは、核分裂生成物の崩壊がさらに進むことによって急速に低くなり、ガラス固化の千年後には数千分の1になる。これ以後の期間は、アクチノイド元素などによる低いレベルの放射能が、ゆるやかに低下しながらも長期にわたって続く。

核分裂生成物		半減期
ストロンチウム-90	⁹⁰ Sr	28.5年
セシウム-137	¹³⁷ Cs	30.0年
テクネチウム-99	⁹⁹ Tc	21.3万年
ジルコニウム-93	⁹³ Zr	150万年
アクチノイド元素		半減期
アメリシウム-241	²⁴¹ Am	433年
アメリシウム-243	²⁴³ Am	7380年
プルトニウム-240	²⁴⁰ Pu	6560年
プルトニウム-239	²³⁹ Pu	24100年
ネプツニウム-237	²³⁷ Np	214万年

核分裂生成物とアクチノイド元素の代表例



(2) 高レベル放射性廃棄物の発生量

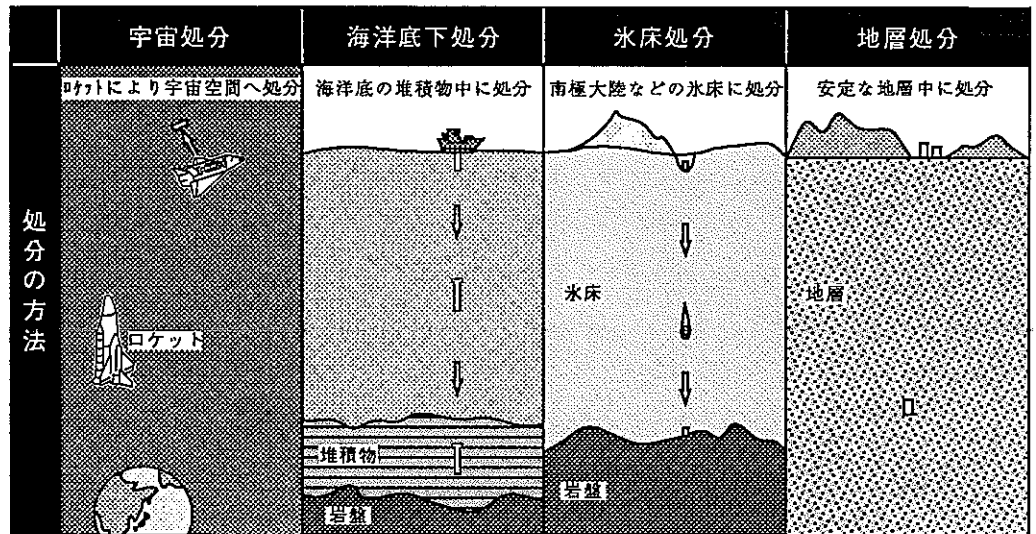
出力100万キロワットの原子力発電所を1年間運転することによって、約30トンの使用済燃料が発生する。この使用済燃料を再処理したときに分離される高レベル放射性廃液をガラス固化すると、体積100リットル程度のガラス固化体が約30本発生することになる。

現在、日本では電気の3割が原子力で発電されており、これによって発生する高レベル放射性廃棄物量を日本人1人あたりで計算すると、サイコロ1個(1辺が約1センチメートル)程度である。

1.2 高レベル放射性廃棄物の処分

原子力発電を利用する世代は、その恩恵を受けると同時に、高レベル放射性廃棄物を発生させることになる。このような世代は、将来にわたって人間とその環境が高レベル放射性廃棄物による影響を受けないように適切な対策をとる責任があると考えられる。この考え方は、広い意味での発生者が責任をとる考え方であり、国際的にも共有されている(脚注を参照)。

この対策として、貯蔵して管理する方法は将来の世代に責任を継続して負わせることになるため、原子力の恩恵を受けた世代で完結できる方法として、これまでに「宇宙処分」「海洋底下処分」「氷床処分」「地層処分」などが考えられてきている。このうち、世界各国において、最も合理的で実現できる見通しのある方法として考えられているのが地層処分である。



さまざまな処分の概念

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全原則(国際原子力機関, 1989年)

① 将来の世代への責任

将来の世代に、処分システムの安全を保ち続けるための責任を負わせたり、処分場が存在することによって大きな制約があったりしないように、高レベル放射性廃棄物を人間とその生活環境から長い間、隔離しなければならない。

② 放射線安全性

人間とその環境の放射線に対する安全は、国際的に受け入れられている放射線防護の規準にそって保証されなければならない。

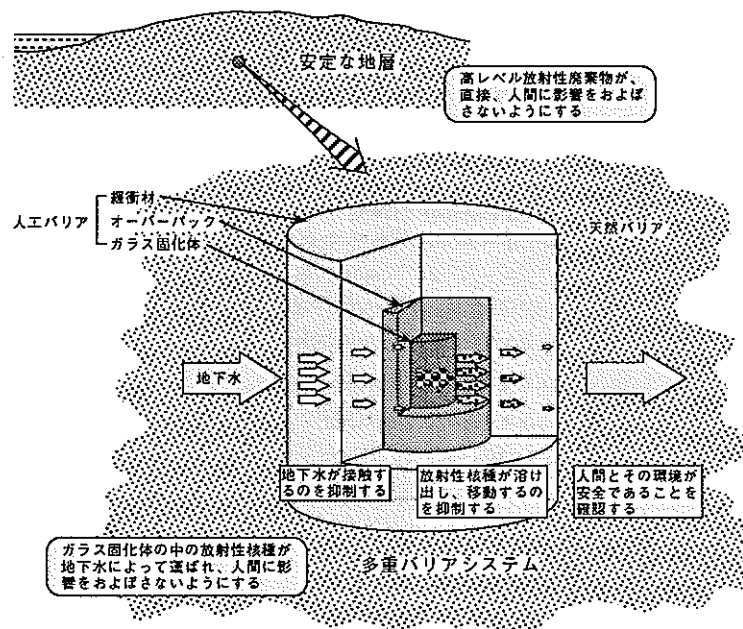
1.3 地層処分の考え方

地下(地層)が長い間ものを閉じ込めておくのに適した場所であることは、数千年前の古代文明の遺跡や1千万年以上も前にできた鉱床が地層中から発見されることから経験的に知られている。人間とその環境に対し、長い期間にわたって影響をおよぼさないように高レベル放射性廃棄物を埋めておくための場所として地下深部が考えられたことは、このような経験にもとづく自然な着想であった。

この地層処分を日本において安全に実施するためには、火山の噴火や隆起・侵食といった自然現象や地層中に存在する地下水によって、人間とその環境に影響がないことを確認しておかなければならない。このうち、自然現象については、その影響のない地域を選ぶことが基本である。一方、地下水の存在については、地下水によって高レベル放射性廃棄物の中に含まれる放射性核種が人間とその環境へ運ばれてくる可能性について十分な対策がとられなければならない。この対策に必要な要件は以下の三項目である。

- ・高レベル放射性廃棄物と地下水が接触する可能性を十分低く制限しておくこと(地下水接触の抑制)。
- ・高レベル放射性廃棄物と地下水が接触したとしても、高レベル放射性廃棄物の中の放射性核種が溶け出しにくいようにし、さらに、処分された場所から移動しにくいようにしておくこと(溶出・移動の抑制)。
- ・放射性核種が移動したとしても、それが人間とその環境に有意な影響をおよぼさないことを確認しておくこと(環境安全の確認)。

この三つの要件を満たすような仕組みとして、人工的に設けられるいくつもの層からなる安全防護のシステム(「人工バリア」と呼ばれる)と、さまざまな安全防護のはたらきをもと備えている地層(「天然バリア」と呼ばれる)とを多重に組み合わせた「多重バリアシステム」が考えられている。



地層処分による安全確保の考え方

2. 地層処分研究開発の現状

地層処分研究開発の目標は、日本において地層処分が安全に実施できることを科学的・技術的に明らかにすることである。現在の地層処分研究開発は、できるだけ広い地質環境(地層や地下水など)に設置ができる多重バリアシステムを対象とし、地質環境を特定することなく、地下水に対する多重バリアシステムの性能を明らかにするための研究に重点をおいて進めている。一方、日本の地質環境、火山の噴火や隆起・侵食といった自然現象については、地層処分の観点から、基本的なデータ・情報を収集・整理している。

地層処分研究開発では、「地質環境条件の調査研究」、「処分技術の研究開発」、「多重バリアシステムの性能評価研究」という三つの研究開発を進めており、以下に、これらの研究開発の現状について紹介する。

2.1 地質環境条件の調査研究

地質環境条件の調査研究は、岩石の種類や地域を特定することなく、地層処分の前提となる日本の地質環境とその長期にわたる安定性について幅広くデータや情報を収集・整理し、処分技術の研究開発および多重バリアシステムの性能評価研究に役立てることを目的としている。この調査研究にあたっては、これまでに学会などで蓄えられてきている研究の成果やデータを活用しているほか、地下の坑道などを利用して行っている地層に関する科学的な研究(地層科学研究)の成果も取り入れている。

(1) 日本の地質環境

① 日本列島の地質構造と地形

日本列島は世界的にみても変動の激しい地域の一つである。地質の構成は複雑であり、その分布は地域により大きく異なっている。新第三紀よりも前の時代の地質構造は、大きな断層(構造線)によって地層や岩体が区分される。一方、新第三紀～第四紀の地質構造は、ゆるやかな褶曲と規模の小さな断層によって特徴づけられている。

日本列島の地形は、山地、火山、丘陵、台地、低地に大きく分けられる。その特徴は山地・火山・丘陵が多いことであり、それらは国土の約4分の3を占めている。

地質年代表

代	紀	世	年代(百万年前)
新 生 代	第 四 紀	完新世	0.01
		更新世	1.64
	新第三紀	鮮新世	5.2
		中新世	23.3
	古第三紀	漸新世	35.4
		始新世	56.5
		暁新世	65.0
中 生 代	白 亜 紀		145.6
	ジュラ紀		208.0
	三 疊 紀		245.0
古 生 代	二 疊 紀		290.0
	石 炭 紀		362.5
	デボン紀		408.5
	シルル紀		439.0
	オルドビス紀		510.0
	カンブリア紀		570
先カンブリア時代			

② 岩石

日本列島には、さまざまな鉱物組成や化学組成をもった岩石(火成岩、堆積岩、変成岩)が分布し、部分的には、風化作用・続成作用・熱水により変質している。これらの岩石中の鉱物の特性は、地下水の水質や放射性核種の吸着などを検討するうえで、基礎的な情報となる。また、さまざまな岩石の密度、熱伝導率、強度などは人工バリア付近の温度の評価や地下施設の設計研究などに必要なデータである。

③ 地下水

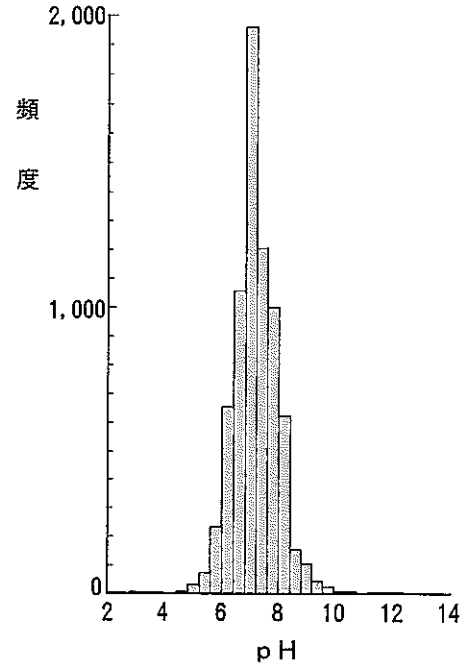
地下水は地層(岩盤)中の空隙や割れ目の中を流れたり、あるいは、そこに溜まったりする。地下水の水理学的な特性に影響を与え、それを決めているおもな要因は岩盤中の空隙や、割れ目の性質や形態である。このような岩盤は水理学的な特性の観点から、大きく「多孔質の岩盤」と「亀裂性の岩盤」に分けられる。

- ・ 多孔質の岩盤：粒子と空隙が混在しており、第四紀の堆積層や新第三紀の堆積岩の一部がこれにあたる。地下水の流れやすさは、一般的には、どの方向にも同等(等方均質)とみなすことができるが、堆積岩の層理面に平行な方向と垂直な方向では多少の違いがある。
- ・ 亀裂性の岩盤：一般に固く緻密で、割れ目をもった岩盤であり、おもに火成岩、変成岩、新第三紀より前の堆積岩がこれにあたる。地下水の流れやすさは、この割れ目の分布する場所、方向、密度、大きさによって変化する。

日本の岩盤の透水性について、文献の調査から得られた深度が明らかな透水係数データ(第四紀の堆積層を除く)についてみた場合、透水係数は地表付近から地下500mより深部へ向けて小さくなる傾向にある。また、地下100mよりも浅い岩盤についてみた場合、亀裂性の岩盤の透水係数に比べると、多孔質の岩盤のうちの砂岩・礫岩の透水係数は1~2桁大きく、泥岩の透水係数は同じか、むしろ小さい傾向にある。

一方、日本の地下水の地球化学的な特性について、文献の調査から得られた水質データの検討を行った。地下水の起源としては、降水、海水、マグマ水などが考えられる。また、地層が堆積するときに封じ込められた海水などを化石水と呼ぶ。海水を起源とする地下水や温泉水は溶け込んでいる成分の濃度が高い。一方、降水を起源とする地下水の水質は、おもに母岩との反応によってできたものと考えられ、母岩との反応が進む(深度が増す)と、溶け込む成分の濃度が高くなり、ナトリウム-炭酸水素イオン($\text{Na}-\text{HCO}_3$)型の水質となる。

温泉などを除いた地下水についてみた場合、pHはほぼ5～10の範囲にある。また、地下水の酸化還元電位は、金属の腐食に大きな影響をおよぼす。深部の地下水についてこれを測定した例は極めて少ないが、一例として、新第三紀の堆積岩の地下165m地点において-300mVという測定値が得られている。この測定値は、この地下水が還元性であり、金属の腐食が起こりにくいことを示している。



地下水のpHのヒストグラム(温泉などを除く)

(2) 地質環境の安定性に関連するおもな自然現象の特徴

① 地震活動および断層活動

地震活動は断層の発生・発達に関係しており、地震によって地表にあらわれた断層の多くは、それまでに存在していた断層がふたたび活動したものである。この地震活動が地質環境におよぼす影響は、地下の坑道などにおける地震観測の結果から、地表よりも小さいことがわかっている。

日本列島において、活断層の分布は地域により大きく異なっているが、一定の期間における断層活動によるズレ(変位)の平均速度は、大部分が5m/千年以下である。

現在ある断層がふたたび活動する可能性については、その形態や過去の活動を調べることで予測することができると考えられる。また、第四紀に発生した断層の頻度から判断すれば、ある狭い地域において新たに断層が発生する可能性は非常に小さいといえる。

② 隆起・沈降運動および侵食作用

第四紀における隆起の期間を現在までの100万年間とした場合、隆起の速度は日本列島の多くの地域で0.5～1mm/年であり、山地・山脈では1～7mm/年を示すところもある。また、日本列島には沈降した主要な臨海平野もみられる。

現在の侵食速度は、おもに第四紀の隆起量の大きい山地・山脈で0.1～1mm/年程度、最大6mm/年であり、標高の低い地域ではそれ以下である。第四紀の隆起量の大きい場所ほど侵食の速度も大きく、隆起・侵食には地域的な傾向がある。

③ 火成活動

日本列島における火成活動のもとになるマグマの発生は、プレートの沈み込む動きとその深さに関係していると考えられている。現在、日本列島には約200の火山(群)が、プレートの沈み込む場所、すなわち海溝と並行に分布している。

火山の活動期間は、1回だけの噴火でできる火山の場合が数日～数年であるのに対し、ほぼ同じ場所で何度も噴火を繰り返してできる火山の場合は数千～数十万年である。また、現在の火山と新第三紀の火山岩の分布から、1800～1200万年前ごろに西南日本および東北・関東地方の太平洋側で火山活動があったが、その後、日本列島の火山活動の場所は大きく変わっていないことがわかっている。

④ 気候変動と海面変化

第四紀の、とくに70万年前から現在までの気候変動は、急激な温暖化と緩やかな寒冷化のパターンが約10万年の周期で繰り返されてきている。また、この気候変動にともなう氷河の発達・後退(消長)によって、海水面の変化も起きている。現在は、緩やかな寒冷化の初めの段階にあると考えられている。

2.2 処分技術の研究開発

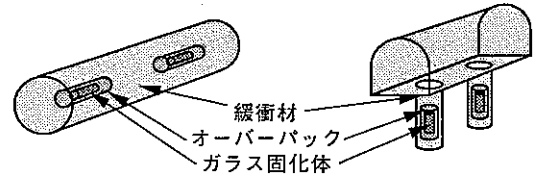
処分技術の研究開発は、人工バリアと処分施設に必要な技術を工学的に評価し、地層処分が技術的に実現できることを確かめるために行っている。

この研究開発では、40000本のガラス固化体が、冷却のために30年間貯蔵された後、地下1000m程度までの結晶質岩(たとえば、カコウ岩)または堆積岩の岩盤に処分されることを前提としている。

(1) 人工バリア

人工バリアは、「ガラス固化体」、ガラス固化体を入れる「オーバーパック」、それらを取りかこむ「緩衝材」の三つの部分から構成される。

ガラス固化体を処分するための坑道(処分坑道)に置く方式としては、「横置き方式」と「たて置き方式」の二つを考える。



横置き方式

たて置き方式

ガラス固化体の定置の方式の例

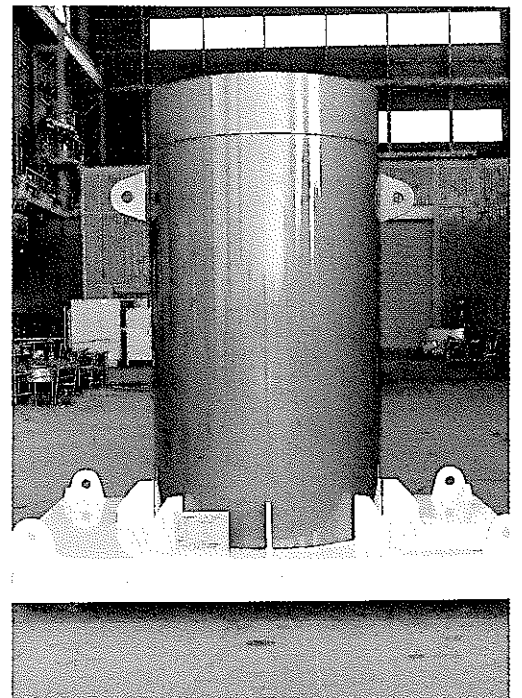
① ガラス固化体

ガラス固化体は地下水に溶けにくく、その母材のガラスに含まれる放射性核種が地下水に溶け出すことを抑制するはたらきをもつ。

② オーバーパック

オーバーパックには、地下水とガラス固化体との接触を抑制するはたらきが要求される。このはたらきが、ガラス固化体の放射能レベルが十分に低くなるまでのおよそ千年間保たれるように、炭素鋼、チタン、銅などの材料について、腐食・応力に耐えるか、製作・加工しやすいかなどの点から比較・検討を行う。

その結果、炭素鋼は、腐食について評価しやすい、応力に耐える、周囲の環境を還元性に保つなどの性能をもち、製作・加工がしやすいことから、これを第一に研究すべき材料として選んだ。炭素鋼オーバーパックについて、地下1000mにおける耐圧性、および千年間の腐食量を解析し、腐食しろを含めた厚さ300mmのオーバーパックを試作した。



炭素鋼オーバーパックの試作例
高さ1.95m 外形1.09m 重量11.4t

この厚さ300mmのオーバーパックにガラス固化体を封入した場合、外側の表面の放射線量率を計算すると、放射性物質の輸送容器の基準値よりも小さい値となり、このオーバーパックが十分に放射線をさえぎることがわかる。

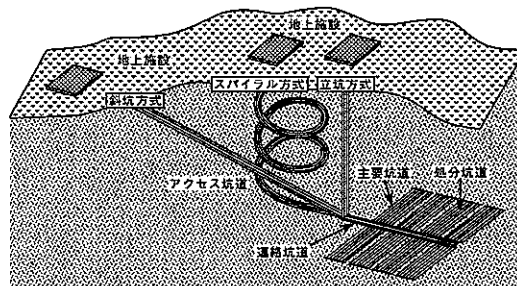
③ 緩衝材

緩衝材には、長期にわたり地下水の浸入を抑制し、放射性核種の移動を遅らせるはたらきが必要される。現在、その材料としてベントナイトが候補となっている。

研究開発の結果から、圧縮されたベントナイトには、地下水をとおしにくい、放射性核種を吸着しやすいなどの特性があり、地下水がしみ込むと膨張してすきまを埋め、地下水の水質を放射性核種が溶けにくいように変化させる特性も持っていることがわかっている。また、約100°C以下では熱による変質は無視でき、長期にわたり安定であるという結果も得られている。

(2) 処分施設

処分施設は、地上施設と地下施設から構成され、地下施設にはアクセス坑道、主要坑道、処分坑道、連絡坑道が含まれる。ガラス固化体の発熱による緩衝材の変質を避けるためには、ガラス固化体を埋める間隔を適切にとる必要がある。人工バリアと周辺の岩盤における三次元の有限要素法を用いた熱解析から、緩衝材の最高温度が100°Cを超えないようにするためには、ガラス固化体を、結晶質岩・地下1000mの横置き方式で約100m²に1本、たて



処分施設の例

置き方式で約80m²に1本、また、堆積岩・地下500mの横置き方式で約80m²に1本の密度で埋めればよいという結果が得られている。この密度でガラス固化体を埋めるとすると、地下施設の広さは、結晶質岩・地下1000mの横置き方式で約4.0km²、たて置き方式で約3.2km²、また、堆積岩・地下500mの横置き方式で約3.2km²となる。

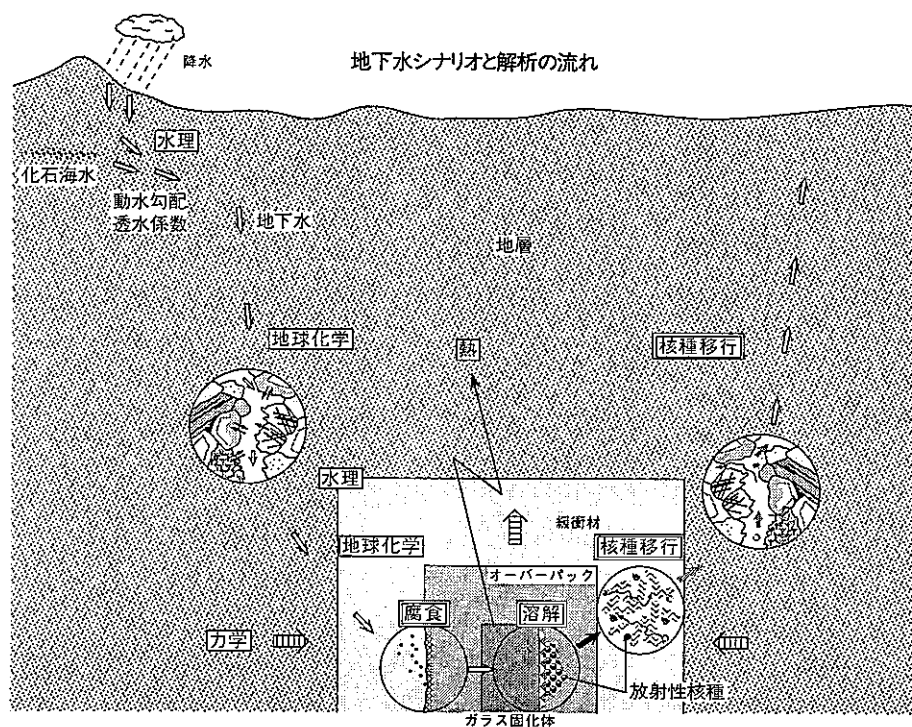
また、それぞれの坑道の施工、ガラス固化体の受け入れから処分坑道に置くまでの取り扱いなどについての検討から、現状の技術を用いて地下施設を建設できる見通しが得られている。

2.3 多重バリアシステムの性能評価研究

多重バリアシステムの性能評価研究の目的は、多重バリアシステムが、地下水によって放射性核種が人間とその環境に影響を与えないようにするはたらきを、長期にわたって保つことができることを科学的に確かめることである。

その長期にわたる性能について検討するために、まず、「地下水によって長い間にガラス固化体から放射性核種が溶け出し、地層中を移行して人間とその環境に到達する」という道すじ（「地下水シナリオ」とよぶ）を想定する。次に、それに関連するさまざまな現象を数学的にあらわすモデルを作成し、このモデルとそれに必要なデータを用いて解析する。

現在行っている解析では、まず、地質環境における地下水の流動と地球化学のモデルについて解析を行い、地質環境の条件を幅広く設定する。次に、この条件を用いてニアフィールドの熱、力学、水理、地球化学の各モデルの解析を行い、人工バリアとその周辺の岩盤（ニアフィールド）の環境条件を明らかにする。これらの条件のもとで、オーバーバックの腐食に対する寿命と放射性核種の溶解度を解析する。さらに、設定されたニアフィールドの水理の条件、および放射性核種の溶解度を用いて、人工バリア中での放射性核種の移行について解析する。一方、天然バリア中での放射性核種の移行については、人工バリアから出てくる放射性核種の量、地質環境における地下水の水理と地球化学の条件を用いて予備的な解析を行う。



(1) 地質環境条件の設定

地質環境の条件としては、地下深部における地下水の流量・流速と地球化学的な特性が重要である。これらの条件を設定するためのモデルの解析には、日本の岩盤の透水係数、地下水の水質や酸化還元電位などの幅広いデータが必要となる。しかし、これらに関する文献の調査(地質環境条件の調査研究)では、これまでに地下深部の十分なデータが得られていない。

このようなことから、地下水の水理の条件を動水勾配の範囲として、また、地下水の水質の条件を地下水と地層中の成分との地球化学的な反応によって形成される水質の範囲として設定する。

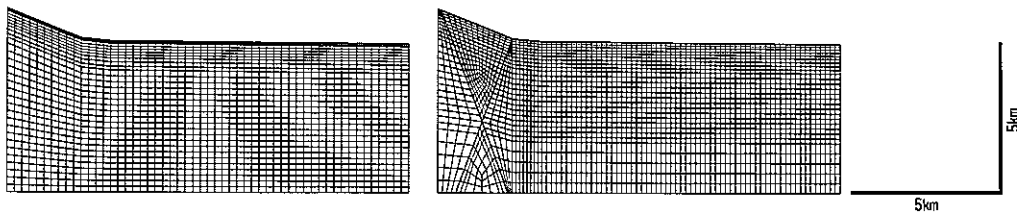
① 地下水の水理の条件

この解析は、ニアフィールドの水理や天然バリア中での放射性核種の移行を評価するときに必要な水理の条件を、動水勾配の範囲として設定するために行うものである。

この目的のために、日本の地形や透水係数などのデータを組み合わせて仮想的な二次元の断面地形モデルを作り、垂直方向の二次元の地下水流動解析を行う。この解析の結果から、断層の存在や透水係数の分布などの違いが動水勾配の値にどのように影響するかを把握することができ、その値は0.01～0.60の範囲にあることがわかる。

一方、これまでに300×300km程度の広さの地域を対象とした三次元の広域地下水流動解析が行われている。それによると、地下500～1500mの動水勾配は0.01～0.1の間に分布しており、その大部分は0.05よりも小さいことがわかっている。

これらの解析の結果を参考に、ニアフィールドの水理などの評価に必要な動水勾配を十分に安全であるという余裕を見込んで設定する。



仮想的な地形モデルの例

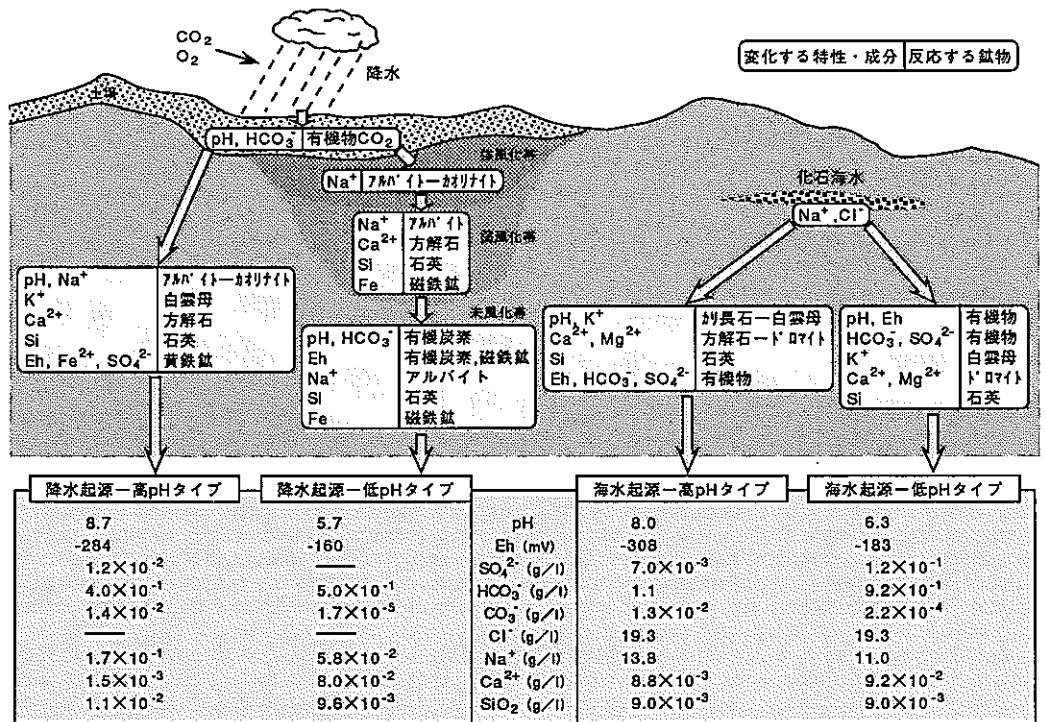
② 地下水の水質の条件

ニアフィールドにおける地下水の地球化学、および人工バリア・天然バリア中での放射性核種の動きを評価するためには、地下水の化学組成やpHなどの特性値のとりうる範囲を設定する必要がある。

そこで、まず、地下水の地球化学的な特性(pH, 酸化還元電位, イオン濃度)に影響を与えと考えられる、以下のような地球化学的プロセスを抽出する。

- ・ pH: 鉱物の風化の度合い
- ・ 酸化還元電位: 鉄、イオウ、炭素の酸化・還元反応
- ・ イオン濃度: 地下水の起源、および鉱物の変質反応

次に、これらの地球化学的プロセスから、地下水の地球化学的な移り変わりの過程をモデル化する。さらに、地球化学コードと熱力学データベースを用い、平衡論にもとづいてその化学組成・pH・酸化還元電位を計算し、水質の条件の範囲を示す四つの「モデル地下水」を設定する。



地下水の地球化学的な変遷モデルと化学組成の解析例

(2) ニアフィールドの環境条件の設定

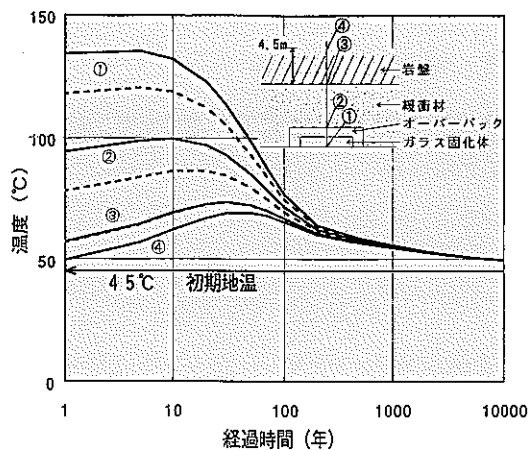
ガラス固化体を埋めた場合、ガラス固化体からの熱の伝達、緩衝材への地下水のしみ込み、それによる圧力の発生と地下水の水質の変化などが想定され、それによってニアフィールドにおける熱、水理、力学、地球化学といった環境条件が変化すると考えられる。

そこで、これらの条件について、それぞれモデルを作成して解析を行う。

① 熱的な条件

ニアフィールドの熱的な環境を評価するために、地温や熱伝導率などの条件を用いて、三次元の有限要素法により解析する。

この解析から、ニアフィールドの温度は、緩衝材の湿潤の状態が変わってくるが、緩衝材がオーバーパックと接触するところでも最高100°C以下とすることができ、ガラス固化体を埋めてから100年後では約70°C、1000年後には約55°Cまで下がるという結果が得られている。このことから、ガラス固化体の発熱によって、オーバーパックや緩衝材の材質が変質する可能性は非常に小さいということが出来る。

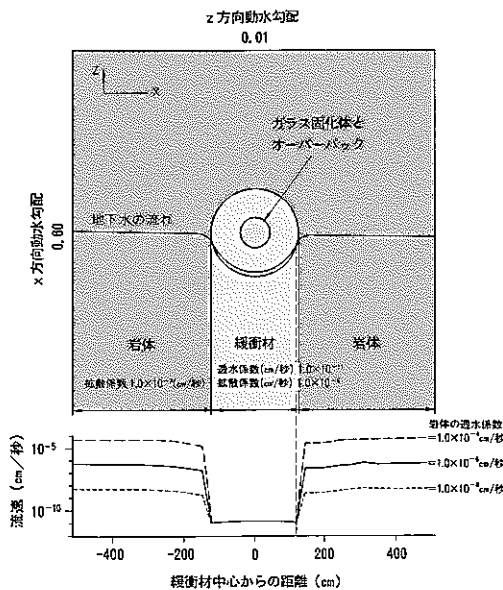


ニアフィールドの温度の変化の解析例

② 水理の条件

ニアフィールドにおける地下水の流動は、放射性核種の人工バリア中での移行を支配するため、ニアフィールド、とくに緩衝材の中における地下水の流れの状態を明らかにすることが重要である。

このため、保守的に考えられる動水勾配、および岩盤の透水係数の値を変化させ、ニアフィールドの地下水の流動について解析を行う。この解析から、緩衝材の透水性が低いため、緩衝材の中では地下水は流れることなく、物質は拡散によって移行していくことがわかる。



ニアフィールドにおける地下水の流動の解析例

③ 力学的な条件

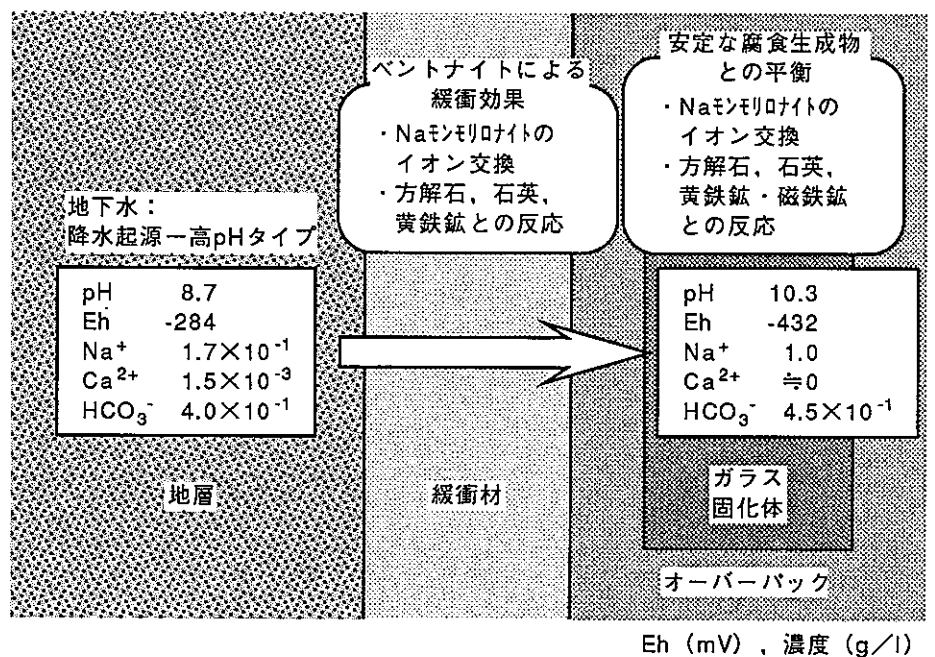
人工バリアを構成するガラス固化体、オーバーパック、緩衝材がもつさまざまな性質や機能についての信頼性は、それらの構造が力学的に安定であることが前提であるため、人工バリアの構造力学的な安定性について検討することが必要である。

このため、初期地圧、緩衝材に地下水がしみ込むことによって発生する膨潤圧、あるいはオーバーパックに腐食生成物ができることによって発生する応力などについて検討を行う。その結果、これらのプロセスによって、人工バリアの構造力学的な安定性はほとんど影響を受けず、また、緩衝材がオーバーパックの空間的な位置を保つはたらきを持つということがわかっている。

④ 地球化学の条件

地下水の水質は、地下水がガラス固化体に接触するまでに、緩衝材およびオーバーパックとの化学的な反応によって変化する。この人工バリアの中での水質の変化は、ガラス固化体からの放射性核種の溶け出しや、人工バリア中での放射性核種の移行に影響を与える。

そこで、まず、人工バリアにしみ込んだ地下水(四つのモデル地下水)が緩衝材(ベントナイト)やオーバーパックと反応し、その水質が変化していく過程をモデル化する。次に、このモデルにもとづいて、地球化学コードを用いた熱力学的な解析を行う。この解析から、緩衝材・オーバーパックをとってガラス固化体に到達する地下水は、緩衝材やオーバーパックの腐食生成物との反応によって、pHはより高くなり、酸化還元電位は低く保たれるという傾向をもつことがわかっている。



ニアフィールドにおける地下水の水質の変化の例

(3) オーバーパックの腐食

設定されたニアフィールドの環境条件におけるオーバーパックの腐食に対する寿命を評価するために、緩衝材の空隙中にある酸素がすべて腐食によって消費されるという保守的な仮定にもとづいて、その間の腐食量を解析する。さらに、酸素が消費された後の水の還元による腐食、バクテリアによる腐食の二つの腐食の反応について、実験データなどにもとづいて長期にわたる腐食の量を評価する。

これらの反応がすべて起こるとした場合、千年間の腐食量は最大でも32mmであるという結果が得られている。

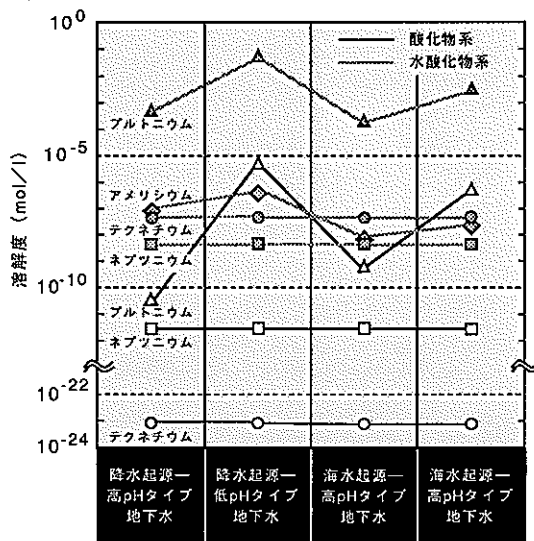
この値は、腐食しろの約3分の2、全体の厚みの約10分の1であり、オーバーパックは、ガラス固化体の中に含まれる初期の高い放射能レベルが減少する千年間以上の寿命がある見通しである。

(4) ガラス固化体からの放射性核種の溶解

人工バリア中の放射性核種の移行を評価するためには、放射性核種の溶解速度と溶解度の条件を設定することが必要である。このため、オーバーパックのはたらきが失われ、ガラス固化体と地下水が接触することを仮定し、ガラス固化体からの放射性核種の溶解について評価する。

ガラス固化体が地下水と接触した場合、放射性核種のうち、セシウムのように溶解度の大きな元素は、ガラスと同じ速度で地下水の中へ溶け出す。この場合の放射性核種の溶解の速度は、ガラス固化体の長期間にわたる溶解の速度として、実験データとモデルの解析にもとづいて設定する。一方、多くの核分裂生成物やアクチニド核種は、還元性の地下水にはごくわずかししか溶けず、 OH^- 、 CO_3^{2-} などと非常に溶けにくい塩(固相)をつくり、ガラスの表面の変質層に残ると考えられる。この場合、ガラスの表面における地下水の中の放射性核種の濃度は、この固相の溶解度によって決まる。

この固相として酸化物系と水酸化物系を考え、実験データと地球化学コードを用いて、ガラスの表面に到達した地下水(四つのモデル地下水)への、放射性核種の溶解度を評価する。その結果、ほとんどの放射性核種の地下水への溶解度は非常に小さく、pHの低い地下水でプルトニウムとアメリシウムの溶解度が大きくなる傾向にあるほかは、四つのモデル地下水の水質の違いによる溶解度の大きな違いはないことがわかっていく。また、固相として水酸化物系を考えた場合には、酸化物系を考えた場合よりも溶解度が一般に大きくなるという結果が得られている。



放射性核種の種類と溶解度の例

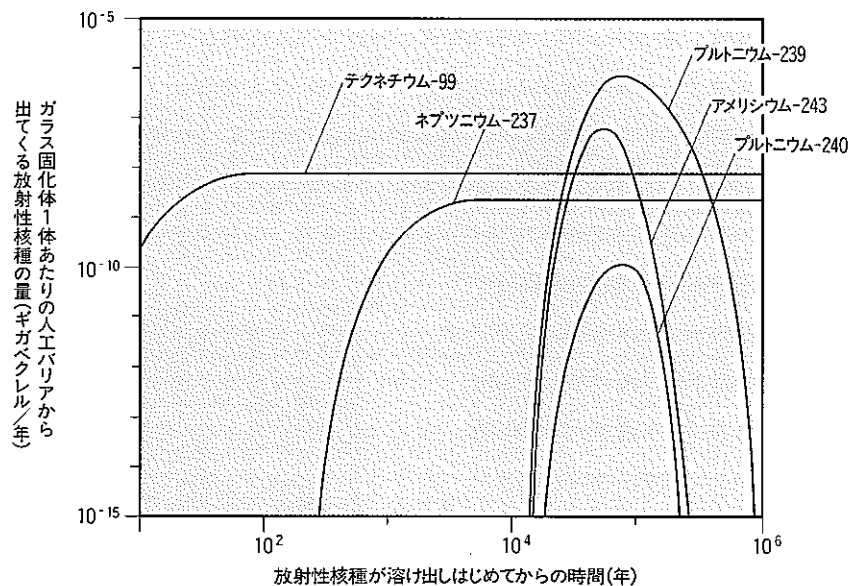
(5) 人工バリア中の放射性核種の移行

緩衝材の中では、ガラス固化体から溶け出した放射性核種は、放射性核種の崩壊、粘土鉱物などへの吸着、沈殿・再溶解などのプロセスをくり返しながら、拡散によって移行していくと考えられる。したがって、人工バリアには放射性核種の移動をさまたげるはたらきが期待できる。

そこで、緩衝材の中でのさまざまな現象を数学的にモデル化し、実験によって得られたデータを用いて人工バリア中の放射性核種の移行について解析を行う。この解析では、地下水に溶けにくい放射性核種に対してはその溶解度を、溶解度の大きい放射性核種に対しては、実験結果と解析にもとづいて設定したガラス固化体の溶解速度によって決まる濃度を緩衝材の内側の濃度として仮定する。また、緩衝材の外側は、放射性核種の濃度を0とする保守的な(放射性核種が放出されやすいような)仮定をおく。

この解析から、ほとんどの放射性核種の人工バリアから出てくる量は、四つのモデル地下水に対して大きな違いがないことがわかる。

したがって、地下水の地球化学的な条件がある程度変わっても、人工バリアの性能は大きく変化することはないという可能性が明らかになっている。



人工バリアから出てくる放射性核種の経時変化の解析例
(酸化物系、降水起源—高pHタイプ地下水)

(6) 天然バリア中の放射性核種の移行

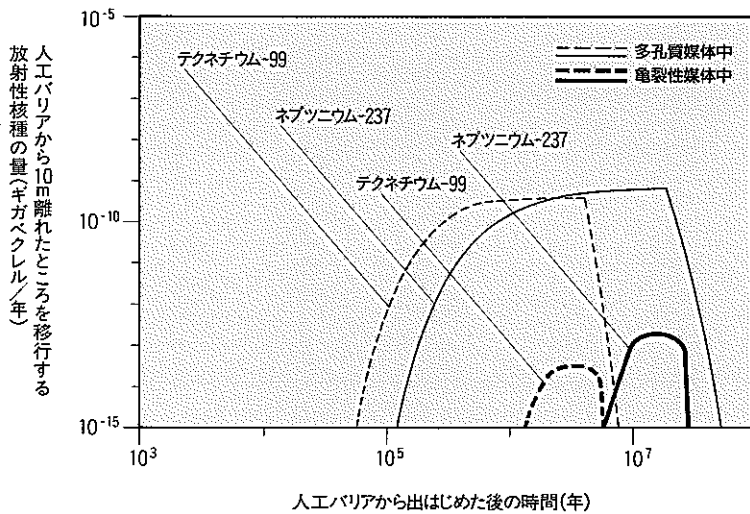
天然バリア(地層)中での放射性核種の移行を詳しく解析するためには、地表から地下深部までの地層についての多くの情報が必要である。しかし、このような情報は現在までに、十分に収集されていないため、現状では、簡単な放射性核種の移行のモデルを作成し、地層のもっている放射性核種の移行を遅らせる効果を、動水勾配、透水係数、空隙の特性などとの関係を明らかにすることによって評価する。

そこで、まず、放射性核種の移行の経路となる地層(地質媒体)の空隙の構造によって、地質媒体を大きく二つに分けて考える。

- ・多孔質媒体：地下水で満たされた空隙が比較的均質に分布しており、放射性核種はその中を移流・分散によって移行する。
- ・亀裂性媒体：亀裂の中を地下水が流れるため、放射性核種は移流と分散によって移行する。それと同時に放射性核種は、母岩中のより小さな空隙へ拡散していく。

次に、それぞれの媒体について、簡単な放射性核種の移行のモデルを作成し、透水係数や動水勾配といった地下水の流れに関係する条件、および拡散係数や遅延係数などの条件をできるだけ幅広く設定する。その設定の範囲内でそれぞれの条件のとり値を変化させ、人工バリアから地層へ出てくる放射性核種の量を条件として、放射性核種の移行を遅らせる効果を評価する。

その結果、地層が天然バリアとして十分なはたらきをもつ場合には、人工バリアの付近の地層だけでも核種の移行が妨げられ、人間と環境に影響をおよぼさないようにすることができる見込みが得られている。

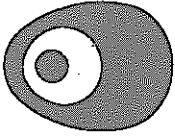


天然バリア中での放射性核種の移行の解析例
(酸化物系、降水起源一高pHタイプ地下水)

2.4 今後の研究開発

これまでの研究開発から、多重バリアシステムの性能について、人工バリアの性能を評価するための解析手法を中心にひととおり解析する手法が整備された。この手法を用いて、幅広く設定した地質環境の条件のもとで、多重バリアシステムの性能について解析を行った。その結果、人工バリアを地質環境の条件に対して適切に設定すれば、安全を確保するための性能を長期にわたり保つことができる可能性があることが示されている。

今後の地層処分研究開発では、解析モデルの信頼性を実験などにより確認し、データを充実させ、今世紀中には人工バリアの性能を確かな、また十分な科学的・技術的な裏づけをもって、明らかにできるようにする計画である。このため、動燃事業団は、東海事業所に建設中の「性能評価研究施設」における試験、放射性核種を用いた室内試験、深地層の研究施設における研究、およびこれらの研究成果をまとめていくための研究を充実させていくとともに、国内の研究機関、大学、有識者などの協力や国際的な協力も得て柔軟に地層処分研究開発を進めていく。



マークの由来

古くから孔雀は毒蛇を食べると言われ、その孔雀を神格化した孔雀明王は一切の毒を除き、また雨を降らせたり止ませたりする力を持つ明王として信仰を集めてきました。

この孔雀明王に因んで、孔雀の羽の模様を地層処分のシンボルとしてデザイン化しました。

重ねられた円は多重バリアシステムを表しております。

高レベル放射性廃棄物は、多重バリアシステムにより、

放射能が閉じ込められ、水の存在を考えても、

決して人間環境に影響を及ぼさないように出来ることを示したものです。

動力炉・核燃料開発事業団

〒107 東京都港区赤坂1-9-13 TEL03-3586-3311(代表)
FAX03-3586-2786