

1. 目次

はじめに

放射性廃棄物の地層処分

1. 発電にともなうさまざまな廃棄物

1. 1. 原子力発電にともない放射性廃棄物が出ます
1. 2. 高レベル放射性廃棄物と一部の低レベル放射性廃棄物は地層処分します
1. 3. 放射性物質を長期間閉じ込めておくためにガラスで固めます
1. 4. ガラス固化体の放射能と発熱量は次第に減衰します
1. 5. 地層処分相当低レベル放射性廃棄物はその特徴にあわせて処分します

2. 地層処分が選択された理由

2. 1. 長期にわたり貯蔵を継続することは困難です
2. 2. 放射性物質の寿命を短くする研究も行われています
2. 3. 深い地下には環境が安定した場所が存在します
2. 4. 国の方針として地層処分が選択され研究開発が行われてきました
2. 5. 地層処分は国際的にも認められた方法です
2. 6. 地層処分は、処分する場所の地下をよく知ることが大切です

3. 安定した地下深部を選定します

3. 1. 火山などの影響が著しい場所は避けます
3. 2. 地下深くは地震のゆれなどの影響を受けにくい環境です
3. 3. 断層のずれの影響が著しい場所は避けます
3. 4. 隆起・侵食の影響が著しい場所は避けます
3. 5. 鉱物資源の採掘などにより人間が廃棄物に接近するおそれがある場所は避けます
3. 6. 段階的に地下深部の様子を把握し、より好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い範囲を選びます

4. 地層処分の安全性を高めます

- 4. 1. 地下深部の地層は放射性廃棄物を閉じ込める役割を担います
- 4. 2. 人工的な対策で放射性物質の隔離をより確実なものにします
- 4. 3. 放射性物質をガラスと一体にして、地下水に溶けにくくします
- 4. 4. オーバーパックはガラス固化体と地下水の接触を防ぎます
- 4. 5. 緩衝材は地下水の流れを遅くし、放射性物質の動きも抑えます
- 4. 6. 充填材は廃棄体パッケージの中でドラム缶やキャニスタを固定し、放射性物質の移動を遅くします
- 4. 7. 建設時、操業時、輸送時の安全性も高めます
- 4. 8. 処分場の建設・操業中は周辺環境への影響に対しても十分な対策を行います

5. 遠い将来の安全性を確かめます

- 5. 1. まず、遠い将来の予測を行います
- 5. 2. 将来の不確実なことは、安全性に悪い影響を与えるように仮定して評価します
- 5. 3. 何万年もかかる現象は小さな現象に分割して実験し、数学モデルでつなぎ合わせ評価します
- 5. 4. 安全評価によって処分場の性能を確認します
- 5. 5. 放射性廃棄物の放射線による生活圏への影響は、自然放射線よりもはるかに小さいものです

はじめに

放射性廃棄物の地層処分

私達が何らかの活動をする、必ず廃棄物が発生します。一般の家庭では台所などからごみが出ます。発電事業も例外ではなく、事業にともないさまざまな廃棄物が発生します。

私たちは、再利用できるごみとそうでないごみに分別しリサイクルします。原子力発電で発生する使用済燃料は、これを廃棄物として処分することにしている国もありますが、エネルギー資源に乏しい日本では、資源を有効利用するため燃料を再利用することとし、使用済燃料からウランやプルトニウムを取り出し、再び燃料として利用する原子燃料サイクルを進めています。

この再利用の過程で発生する放射性廃棄物のうち、高レベル放射性廃棄物と半減期の長い核種を多く含む低レベル放射性廃棄物は、放射能が十分に低くなるまでに長い時間が必要なことから、私たちの生活環境から長期間にわたり隔離する必要があります。そのために選んだ最終処分方法が、これらを地下 300 メートルより深い安定した地層（岩盤）へ埋設する地層処分です。

地層処分と聞くと、「地下に放り込んで、後は知らん顔」というイメージを持たれる方もおられるのではないのでしょうか。しかし実際には、地層処分は深い地層が持っている特徴を活かし、各国が長年の研究成果を踏まえて選択した、科学技術的な根拠に基づく処分方法です。

廃棄物が有害である期間が限られていれば、人間の管理により安全を確保し続けることが可能ですが、高レベル放射性廃棄物等は寿命の長い放射性物質を含んでいるので、数万年以上にわたり有効な安全対策を施す必要があります。地下深くには、岩盤や地下水の状態が長期間にわたりほとんど変化していない地層があります。地層処分は、深い地下には、地表に比べてはるかに長期にわたり安定した環境であることに着目して考えられたものです。日本列島の地下にも長期にわたって安定していると判断される地質環境が存在しています。

地層処分ではまず、放射性物質が廃棄物から地下水へ溶け出すことによる影響が地上に及ばないように長期にわたり安定し、地下水の流れの遅い岩盤を探します。そして廃棄物を放射性物質の移動を妨げる複数の「人工バリア」を施して埋設し、岩盤という「天然バリア」とともに多重バリアシステムを構成することにより、廃棄物中の放射性物質を長期にわたって人間の生活環境から隔離します。このようにすることによって、人が積極的に安全管理をしなくても、長期にわたってこの廃棄物によるリスクを十分小さく維持することができるのです。

1. 発電に伴うさまざまな廃棄物

私たちの生活に伴ってさまざまな廃棄物が発生します。

産業はもちろんですが、家庭からのごみが発生します。私たちの暮らしを支える発電の場合も例外ではありません。発電に伴わない廃棄物が発生します。火力発電では二酸化炭素が、原子力発電では放射性廃棄物が発生します。

日本では放射性廃棄物は、低レベル放射性廃棄物と高レベル放射性廃棄物に区分されています。

これらの放射性廃棄物は、その特徴に合わせて処分しますが、浅い地中に処分するものから深い地下に地層処分するものまで、処分方法もさまざまです。地層処分を行う放射性廃棄物は、高レベル放射性廃棄物と、一部の低レベル放射性廃棄物です。

高レベル放射性廃棄物は、発電で使い終えた燃料を再処理してリサイクルする際に残る放射能の高い廃液をガラスで固めて安定化させたものです。

地層処分する低レベル放射性廃棄物（地層処分相当低レベル放射性廃棄物）は、リサイクルの過程やその施設の解体などにより発生するもので、さまざまな種類があるため、その特徴にあわせて処分します。

1.1. 原子力発電に伴わない放射性廃棄物が出ます

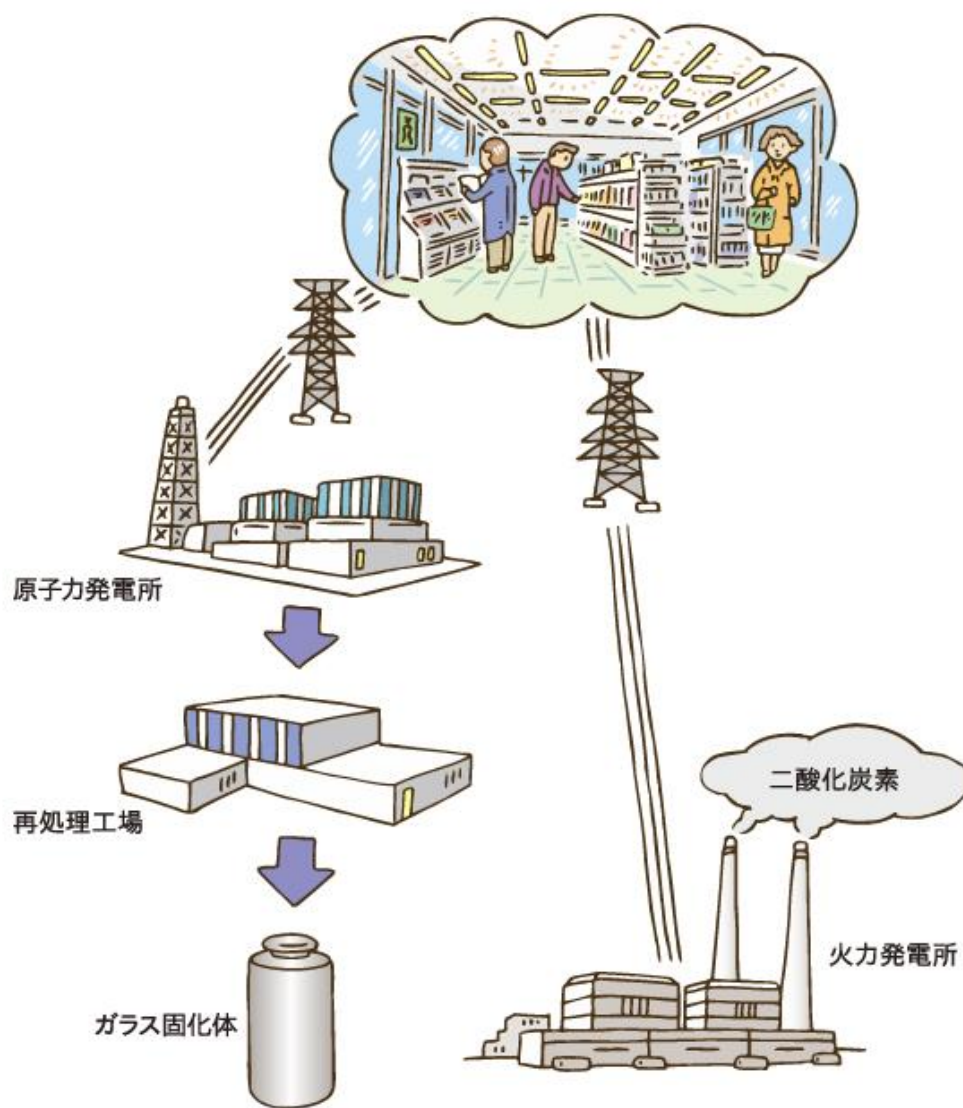
スイッチひとつでつく電灯、冷蔵庫、炊飯器、洗濯機、エアコン、これらによって私たちは毎日を快適に過ごすことができます。また、24時間営業しているコンビニエンスストア、エレベータ、電車なども私たちの生活を便利にしています。普段はあまり気にすることはありませんが、これらは主として電気に頼っています。発電所では電気を作る際に、火力発電の場合には二酸化炭素が、原子力発電の場合は放射性廃棄物が出ます。

原子力発電所では、ウランを燃料として使いますが、使い終えた燃料を「使用済燃料」と呼んでいます。しかし、この中にはまだ燃料として使えるウランやプルトニウムとともに、ウランの核分裂などにより新たに生成された再利用できない放射性物質（核分裂生成物など）が含まれています。

再処理工場では、使用済燃料から再び燃料として使えるウランやプルトニウムを化学的に分離し、回収しますが、このとき、再利用できない放射能の強い放射性物質を含んだ高レベル放射性廃液が残ります。これをガラス原料と高温で融かし合わせて固めます。このガラス固化体を日本では「高レベル放射性廃棄物」と呼んでいます。

また、このほかに再処理工場などでは、高レベル放射性廃棄物よりも放射能が低く発熱が小さいものの、半減期の長い放射性核種を一定量以上含む、「地層処分相当低レベル放射性廃棄物」などが出ます。

なお、海外では使用済燃料の再処理を行わない国もありますが、その場合は、使用済燃料そのものが高レベル放射性廃棄物となります。



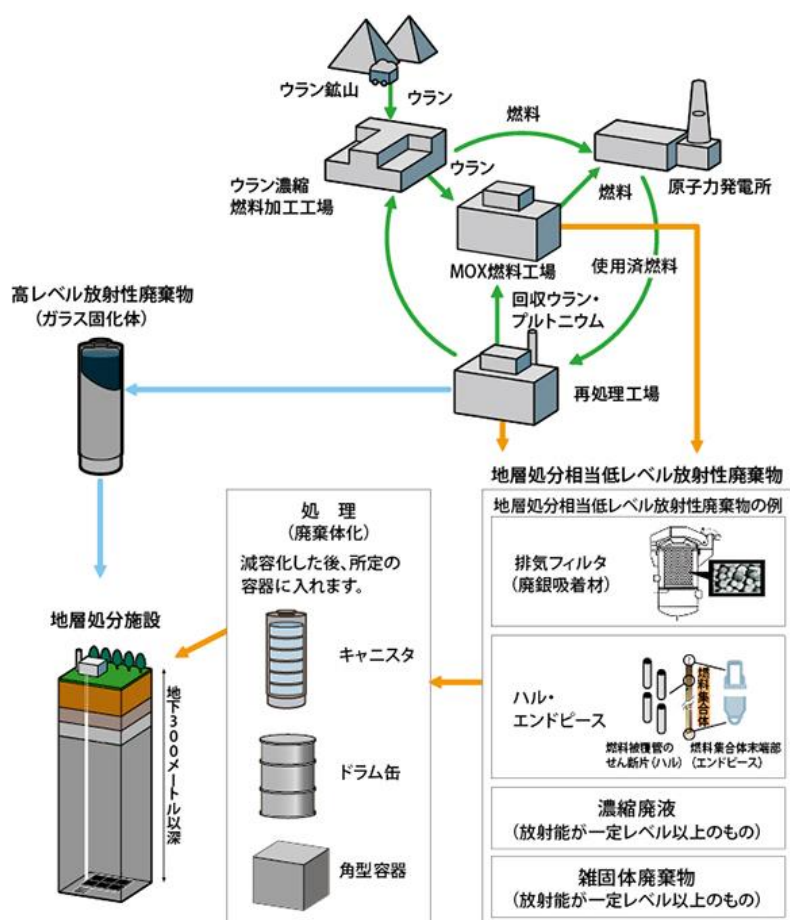
発電と廃棄物

1.2. 高レベル放射性廃棄物と一部の低レベル放射性廃棄物は地層処分します

「高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）」は、再処理工場において使用済燃料を溶解し、ウランとプルトニウムを再利用するために抽出した後に残る核分裂生成物などを含む廃液を、ガラス原料と高温で融かし合わせて固めたものです。放射能が高く、発熱も大きいため、処分場に定置するのに適した温度に下がるまでの間、貯蔵施設で冷却しながら貯蔵します。青森県六ヶ所村には高レベル放射性廃棄物のための貯蔵施設があり、すでにフランスとイギリスから返還された高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）を自然空冷方式で冷却しながら一時貯蔵しています。

再処理工場や、MOX 燃料工場の操業中や解体時に、高レベル放射性廃棄物に比べて放射能が低く発熱が小さいさまざまな放射性廃棄物が発生します。この廃棄物の一部は半減期の長い放射性核種が一定量以上含まれることから、高レベル放射性廃棄物と同様に地層処分します。

この廃棄物を「地層処分相当低レベル放射性廃棄物」と呼びます。これらの廃棄物はドラム缶などの容器に入れられ、処分に適した形状に加工（廃棄体化）されて、廃棄体として処分場に搬入されます。



地層処分を行う放射性廃棄物の発生の流れと分類

1.3. 放射性物質を長期間閉じ込めておくためにガラスで固めます

使用済燃料を再処理すると再利用できない高レベル放射性廃液が残ります。

これは、放射性物質を含んでいる液体ですから、こぼれて散らばってしまったり、容器に穴が空いて漏れたりしては危険です。そのため、固めることが必要です。さらに固体であっても、すぐに溶けたり、ぼろぼろに崩れたりしては困ります。長い期間にわたって安定な状態を維持できることが必要です。高レベル放射性廃液は、高温で融かしたガラス原料とともにキャニスタと呼ばれるステンレス製容器の中で冷やして固めます。これをガラス固化体と言います。

では、なぜガラスで固めるのでしょうか？

ガラスが放射性廃棄物を取り込む能力に優れているからです。

ガラスにいろいろな物質を融かし込むとその物質特有の色を持つ色ガラスを作ることができます。古代エジプト時代に作られた色ガラスは、割れても、何千年たっても色が抜けていません。高レベル放射性廃液とは、実は、さまざまな放射性物質（放射性核種）が液体に溶けたもので、それらを色ガラスの原理でガラスに融かし込んで固めたものがガラス固化体です。したがって、色ガラスから色が抜けにくいように、ガラス固化体は放射性物質が外に漏れ出ないように長期間閉じ込めておきます。

なぜガラスで固めるかというと、ガラスはその網目構造の中に放射性物質をきっちりと取り込み長期間安定な状態を保つからです。



ガラス固化体の閉じ込め能力

1.4. ガラス固化体の放射能と発熱量は次第に減衰します

ガラス固化体は、高レベル放射性廃液をガラス原料とともに高温で融かし合わせたものを、キャニスタと呼ばれるステンレス製容器の中で冷やし、固めたものです。

ガラス固化体には、ウランの核分裂によりできたさまざまな放射性物質が含まれています。その半減期は長いものから短いものまでさまざまです。ガラス固化体製造直後には半減期の比較的短い放射性物質（セシウム 137、ストロンチウム 90。半減期は約 30 年と約 29 年）によって、人間が近づくことができないほど高い放射能を持っています。そのため、容器や壁などによる遮へいや遠隔操作が必要になりますが、現在、青森県六ヶ所村で安全に保管されている実績から、十分安全に取り扱うことができます。

放射能は時間とともに減衰する性質があります。ガラス固化体の放射能は、半減期の比較的短い放射性物質の影響で比較的早く減衰し、ガラス固化体の放射能は 1000 年後にはガラス固化体製造直後の約 3000 分の 1、1 万年後には約 1 万分の 1、10 万年後には約 3 万分の 1 になります。

これ以降は、半減期の長い放射性物質（テクネチウム 99／約 21 万年、ジルコニウム 93／約 153 万年、ネプツニウム 237／約 214 万年など）の放射能が大部分となり、ゆっくりと減衰します。

ガラス固化体は放射性崩壊にともなって発熱していますが、放射能の減衰とともに、発熱も低下していきます。

製造直後の発熱は約 2300 ワット（2.3 キロワット）と、電気ポット 2～3 個分の発熱に相当しますが、30 年後には約 560 ワット、50 年後には約 350 ワットまで低下します。

なお、ガラス固化体には核分裂する物質がほとんど含まれないことから、臨界状態になることはなく、爆発することはありません。

1.5. 地層処分相当低レベル放射性廃棄物はその特徴にあわせて処分します

地層処分相当低レベル放射性廃棄物は、放射能や発熱が、高レベル放射性廃棄物（ガラス固化体）と比較して低いことからガラス固化体のように 1 体ずつ離して処分する必要はなく、集めて処分することができ、地下施設の広さは高レベル放射性廃棄物に比べて、約 30 分の 1 で済みます。

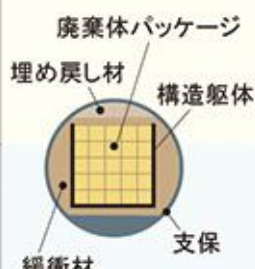
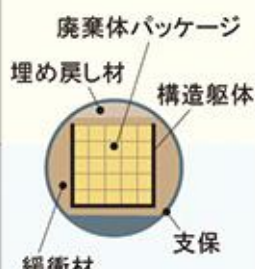
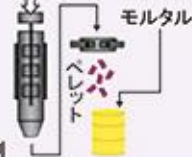
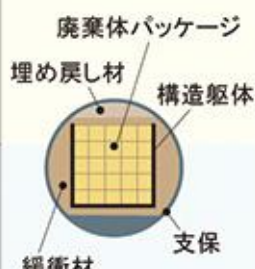
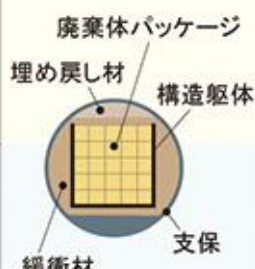
また、地層処分相当低レベル放射性廃棄物には、さまざまな種類の放射性物質が含まれているため、それぞれの廃棄物の特徴にあわせて、処分する必要があります。

グループ1は、ヨウ素129を吸着するために使用された排気フィルタです。この廃棄物の発生量は少ないのですが、ヨウ素129は人工バリアや天然バリアに吸着されにくいという特徴があるため、人工バリアには、高レベル放射性廃棄物と同様に水を通しにくい緩衝材を使用します。

グループ2は、燃料集合体の部品であったハル（燃料被覆管のせん断片）やエンドピース（燃料集合体の末端部）であり、高レベル放射性廃棄物ほどではありませんが発熱があります。そのため、発熱による人工バリアへの影響を避けるため、坑道断面内の定置数を少なくしたり他の坑道との間隔を広げたりします。また、吸着しにくい炭素14を含むため、グループ1と同様に緩衝材を使用します。

グループ3は、使用済燃料を溶解するために使われた硝酸の廃液を濃縮固化したもので、人工バリアの性能に影響を与える硝酸塩を多く含むという特徴があります。そのため、他の廃棄体の人工バリアに影響を与えないよう、地下水の流れる方向の下流側に、このグループの処分坑道を設置するようにします。

グループ4は、施設の操業や検査のときに使われ、放射性物質が付着した工具類などの雑固体であり、グループ1から3には含まれないさまざまな放射性物質が含まれています。グループ2と同様に、発熱が高い廃棄物を一部含み、発熱の影響を避けるための対策をとります。

	内 容	特 徴	処分坑道断面 (円形坑道の場合)
1	排気フィルタ等 (廃銀吸着材) 	●半減期が長く岩盤等に吸着されにくいヨウ素129を多く含む ●発生量が少ない	
2	ハル・エンドピース 	●半減期が長く岩盤等に吸着されにくい炭素14を多く含む ●発熱量が比較的大きい	
3	濃縮廃液等 (放射能が一定レベル以上のもの)  硝酸系廃液の処理例	●人工バリアに影響を与える硝酸塩を多く含む	
4	雑固体廃棄物 (放射能が一定レベル以上のもの) 	●グループ1～3のような特徴を持たない	

地層処分相当低レベル放射性廃棄物のグループ分けの例

2. 地層処分が選択された理由

高レベル放射性廃棄物等には寿命の長い放射性物質が含まれているので、長期にわたって人間とその生活環境に対して放射能の影響が及ばないようにする必要があります。その方法としては、次の3つが考えられます。

- 人間の生活環境へ影響が及ばないように長期にわたって人間が監視するなど管理を行う。
- そもその危険性をなくしてしまう。
- 人間の生活環境から十分離れた場所に長期にわたって隔離する。

最初に挙げた、人間の管理による方法を貯蔵と言っています。貯蔵については、原子力発電所敷地内での使用済燃料の貯蔵をはじめ、青森県六ヶ所村での高レベル放射性廃棄物の貯蔵など多くの実績があります。しかし、貯蔵を将来にわたって続けていくことは、施設の修復や建て替えが必要となります。また、地震、津波などの自然現象やテロ、戦争といった人間の行為の影響を受けるリスクがあります。これらは、将来の世代に負担をかけることになり、現実的ではありません。

2番目の危険性をなくす方法は放射性核種の分離変換と呼ばれ、高レベル放射性廃棄物等の中に残る寿命の長い放射性物質を、半減期の短い、あるいは安定した物質に変換するための技術で、基礎的な研究が進められています。しかし、この技術はまだ研究開発の段階であって、実用規模で実現されるためには多くの時間が必要とされていますし、将来、この技術が実用化されても、すべての寿命の長い放射性物質がなくなるというわけではありません。

最後の人間の生活環境から離れた場所に隔離する方法としては、横方向へ遠ざけると別の人に近づくことになるので、上（宇宙）に隔離する方法と下（地下深く）に隔離する方法が考えられます。このうち、宇宙空間に放出する方法は、ロケットの打ち上げ失敗の例が示すように、技術的な問題、不測の事態における地球規模での影響の広がりや経済性などの問題があり、現在では検討されることもほとんどありません。地下深部に隔離（地層処分）するのは、地層に本来備わっている「物質を閉じ込める機能」を利用する方法です。

安定した地下に廃棄物を隔離する、これが地層処分です。日本では、1960年代から検討が開始され、1980年代に国の方針として地層処分が選択されました。また、地層処分は国際的にも認められた方法です。

地層処分で大切なことは、その安全性が大きく依存する地下の環境をよく知ることです。

地層処分する低レベル放射性廃棄物（地層処分相当低レベル放射性廃棄物）は、リサイクルの過程やその施設の解体などにより発生するもので、さまざまな種類があるため、その特徴にあわせて処分します。

2.1. 長期にわたり貯蔵を継続することは困難です

高レベル放射性廃棄物のガラス固化体は、フランスでは 1970 年代から専用の施設で貯蔵されています。また、日本でも、海外に委託した再処理によって発生したガラス固化体などが、日本原燃(株)高レベル放射性廃棄物貯蔵管理センター（青森県六ヶ所村）などで、安全に貯蔵されています。

地層処分相当低レベル放射性廃棄物は、日本原燃(株)や国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）の再処理工場や MOX 燃料工場の操業や解体にともない発生します。操業中の廃棄物は工場内の施設に貯蔵されます。また、フランスから返還される廃棄体も一部含まれ、これらは日本原燃(株)の低レベル放射性廃棄物受け入れ・貯蔵施設（青森県六ヶ所村）に貯蔵される予定です。

この貯蔵は国内外で多くの実績がある方法ですが、人間の管理によって安全を確保する方法であるため、人間の関与を継続することが前提となります。

高レベル放射性廃棄物や地層処分相当低レベル放射性廃棄物には、ネプツニウム 237（半減期約 214 万年）やジルコニウム 93（半減期約 153 万年）などの非常に長い半減期をもつ放射性物質が含まれているため、放射能が人間の生活環境に影響を及ぼさなくなるまで、数万年以上といった長期間にわたり地上施設を維持・管理していく必要があります。しかし、これを保証することは大変難しいことです。また、将来の世代に管理の負担を負わせることにもなります。このため、恒久的な人間による管理を行わなくてもよいように、いずれは人間の生活環境から遠い場所に隔離することが必要となります。

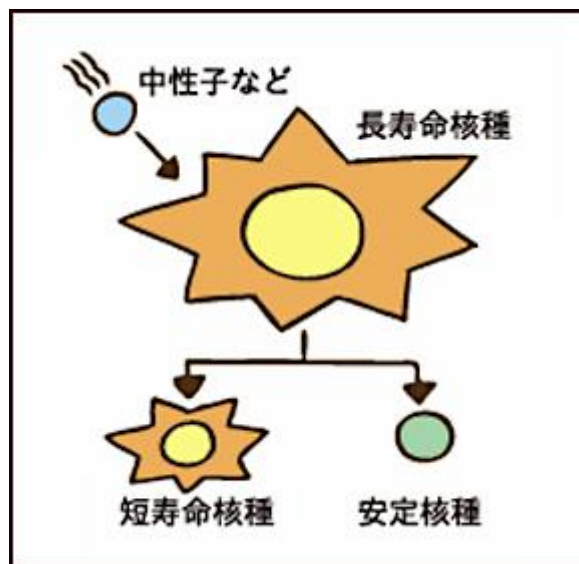
2.2. 放射性物質の寿命を短くする研究も行われています

高レベル放射性廃棄物等には半減期の長い放射性核種が含まれています。この半減期の長い放射性核種（長寿命核種）を、半減期が短い核種（短寿命核種）あるいは安定な核種に変えるための研究が行われています。

具体的には、長寿命核種を高速炉という原子炉の中や加速器で核反応をさせるというもので、その基礎的研究が、日本を含め、アメリカ、フランスなどいくつかの国で進められています。

この技術は、高レベル放射性廃棄物等に含まれる長寿命核種の量を少なくすることにより、廃棄物問題の解決に貢献できると考えられていますが、まだ研究開発の段階ですので、実用化にあたっては核反応の効率の向上や、長寿命核種を分離する技術の向上など、多くの課題を解決する必要があります。なお、この技術については国の報告書で、高レベル放射性廃棄物の処理および処分の負担を軽減する可能性を秘めたものとして研究開発を進めることとされています。ただし、高レベル放射性廃棄物等から半減期の長い放射性物質を 100 パーセント分離すること、あるいは分離したものを 100 パーセントの

効率で変換することは原理的・工学的に不可能なため、この技術が実用化されても地層処分の必要性がなくなるわけではないことに留意する必要があるとも述べられています。



長寿命核種を短寿命あるいは安定核種へ変換する方法の概念図

2.3. 深い地下には環境が安定した場所が存在します

地層処分の基本は、物質を閉じ込めるという地下の環境が本来持つ性質を利用し、地下深くの安定した場所に廃棄物を埋設することにより、数万年以上にわたり高レベル放射性廃棄物等を人間の生活環境から隔離することです。

その考え方は、高レベル放射性廃棄物等の隔離を、人間の管理から自然の手にゆだねるというものです。

地下深くには、長期にわたり環境が十分安定した場所があります。

地下深くの環境が安定していることを示す次のような例があります。カナダのシガーレイクのウラン鉱床では、放射性物質であるウランが10億年以上にわたって閉じ込められていたことがわかりました。また、日本の岐阜県東濃地域にあるウラン鉱床では、これまでに断層活動や地盤の隆起・侵食などの自然現象の影響を受けてきたにもかかわらず、地層中には1,000万年程度の長期にわたり、ウランが保持されていることがわかりました。

2.4. 国の方針として地層処分が選択され研究開発が行われてきました

高レベル放射性廃棄物を深い地中に隔離して処分する方法は、1950年代に海外のいくつかの論文で提唱されました。

日本では、1962年の原子力委員会で議論が開始され、1976年には地層処分に重点をおいた研究開発が開始されました。1980年には高レベル放射性廃棄物を安定な形態であるガラス固化体にし、冷却のため一定期間貯蔵した後、地層に処分すること（地層処分）を基本にするとの方針が決められました。

この方針に基づき、動力炉・核燃料開発事業団（現 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）や電力会社および関連機関で研究開発が行われ、1999年には核燃料サイクル開発機構（現 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構）は、高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性を示す報告書を作成しました。一方、1995年には、原子力委員会に、高レベル放射性廃棄物処分懇談会（以下、処分懇）が設置され、制度的、社会的、倫理的側面からの検討が行われました。処分懇においては、幅広い領域の専門家、有識者による議論にあわせて、国民各層からの意見を聞くとともに、全国5カ所で意見交換会が行われました。これらを踏まえて1998年に公表された報告書では、社会的な理解を得るための検討、処分の制度の検討として実施主体のあり方、事業資金の確保のための制度などが、具体的な施策を含めて示されました。これらの報告書を受け、2000年には「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」（最終処分法）が制定され、高レベル放射性廃棄物は地下300メートルより深い安定した岩盤へ埋設＝地層処分すること、処分実施主体を設立すること、文献調査、概要調査、精密調査の3段階のプロセスによって処分地を選定すること、最終処分費用を拠出制度によって確保することとなりました。

そして、同年10月には実施主体として原子力発電環境整備機構（NUMO）が設立され、2002年12月には文献調査を行う調査区域の公募を開始しました。その後、2007年に最終処分法が改正され、NUMOが行う地層処分事業の対象に地層処分相当低レベル放射性廃棄物が加えられました。

2.5. 地層処分は国際的にも認められた方法です

1960年代から80年代にかけて、各国あるいは国際的に共同で行われた研究開発、および専門家間で議論された地層処分概念の妥当性に関する確認作業を経て、80年代後半以降には、処分事業の実現化に向けた動きがスウェーデン、アメリカ、フィンランドなどの国で見られるようになりました。

国際原子力機関（IAEA）は、地層処分の実現に向けて必要とされる安全規制の考え方や基準類の整備に着手し、処分場設計のための、国際的に合意された原則と基準を 1989 年に取りまとめました。

また、経済協力開発機構の原子力機関（OECD/NEA）は 1991 年に取りまとめた長期の安全評価に関する報告書で、注意深く設計された放射性廃棄物処分システムに関して、放射線が人間と環境に与える長期にわたる潜在的な影響を適切に評価する方法、すなわち安全性を事前に評価する方法が確立されたことを専門家の合意として表明しました。

さらに OECD/NEA は、国際的な環境問題への取り組みに対応し、環境保護と世代間と世代内の倫理の観点から地層処分の是非について検討しました。1995 年に「長寿命放射性廃棄物の地層処分の環境的および倫理的基礎」と題する報告書を公表し、環境保護の面からも倫理的な面からも、数百年以上にわたって生活圏（人間が活動する範囲）から隔離される長寿命放射性廃棄物の地層処分場の開発を継続することは正しいという結論を出しました。

2.6. 地層処分は、処分する場所の地下をよく知ることが大切です

地層処分の安全性は、物質を閉じ込める地下の環境に大きく依存することになるため、その場所特有の地質の特性や自然現象を考慮、検討することが必要になります。

特に日本は、火山が多い、地震がよく起きるなどの特徴を持っています。

このような国土の中で、地層処分を安全に実施できるような場所がはたしてあるのか、という疑問を多くの方がお持ちになると思います。

地下深くに処分した廃棄物が人間の生活環境に影響を及ぼす可能性としては、火山活動や断層活動などの自然現象により処分場が破壊されて廃棄物が地表に接近する場合や、地下資源の採掘などのため人間が廃棄物に接近する場合が考えられます。

このため地層処分においては、火山活動や断層活動などの影響を受けない安定な場所を選ぶとともに、人間が廃棄物に接近しないように経済的価値の高い鉱物資源が存在していない場所を選び、かつ人間の生活圏から離れた深いところに隔離することが重要となります。

そのような安定な場所であっても、地層中には地下水があります。この地下水によって廃棄物中の放射性物質が溶かし出され、さらに地表に運ばれ、人間に影響を及ぼす可能性を考えておかなければなりません。したがって、安全性を確保するためには、地下水の動きが大きい場所を避けて好ましい地下水条件を持つ場所を選ぶとともに、地下水に対する対策を考えることが重要になります。

3. 安定した地下深部を選定します

地層処分は安定した地下深部に放射性廃棄物を埋設する方法です。地下深部の物質を閉じ込めるという性質を利用します。

このような安定した地下深部の環境を確保するために、影響を与えるかもしれない自然事象に留意します。

洪水や津波、あるいは台風などの影響は地表付近に限られます。地下深部の環境に影響を与える可能性がある自然事象として、火山や地震などが考えられます。日本は火山国、地震国として知られています。

火山はマグマが上昇して地表に噴き出すことでできます。このマグマの活動やそれともなう現象が処分場に著しい影響を及ぼす可能性があります。

地震は東北地方太平洋沖地震のようにプレート境界のずれや、兵庫県南部地震のように断層のずれなどにより生じます。地震によるゆれも影響の一つですが、断層のずれが処分場を直撃した場合に著しい影響を及ぼす可能性があります。

この他にも、地盤が非常に長い時間をかけて持ち上げられたり削られたりする隆起や侵食は、長い時間が経過すると地下深部に設置した処分場を地表に近づかせ、著しい影響を及ぼす可能性があります。

また、地下深部には人間が容易に近づくことができないという特徴がありますが、鉱物資源があるとその採掘などのために、人間が接近する可能性があります。

このような著しい影響の可能性がある場所を避けるとともに、地下水の流れが遅いなどの物質を閉じ込めるために好ましい地質環境を選定します。このような場所を段階的な調査により選定します。

3.1. 火山などの影響が著しい場所は避けます

地下からマグマが上昇し、地表の火山が形成されます。このようなマグマの活動により、処分場へマグマが貫入すると、処分場が破壊されるといった重大な影響を及ぼすおそれがあります。

マグマの活動により著しく高い地温が存在することや、強い酸性の地下水や熱水が処分場やその周辺へ流入することにより、人工バリアや天然バリアが、放射性物質を閉じ込める機能を喪失するおそれがあります。

火山とは直接関係ないものの、地下水が熱せられ熱水となった非火山性熱水や、地殻（注1）よりも深い位置を起源とする流体が断層や亀裂などを通じて地表付近に上昇し、酸性が強い等の特徴を持つ深部流体があります。これらが処分場やその周辺に流入すると、火山の熱水と同様の影響を及ぼすおそれがあります。

このような影響が著しいと考えられる場所を避けて、処分場を設置します。

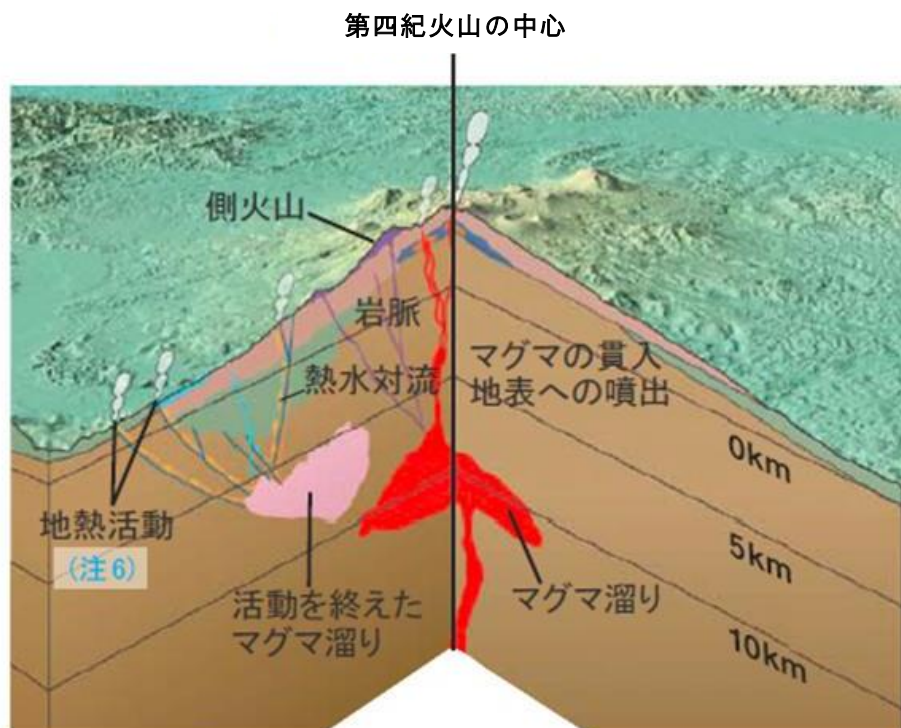
火山については、日本の火山活動は特定の地域に偏って分布し、その傾向が過去数百万年程度大きく変わっていません。火山活動の要因と考えられるプレートの動きについては、過去数百万年、現在の状況が継続しており、その転換には百万年以上の期間を要すると考えられますので、将来も同様の地域での活動が考えられます。

このような知見から、まずは過去約 200 万年の間に活動した火山周辺の一定の範囲を避けます。このような火山は国の研究機関による全国規模の資料にまとめられています。

さらに、地表を踏査して火山噴出物などを調べるとともに、地下の温度の調査や地震波による探査などにより地下のマグマの状況などを調べます。このように火山の性状を詳しく調べて、著しい影響が考えられる範囲を避けます。

深部流体についても地下水の化学成分の調査などの地下の状況の調査を実施し、著しい影響が考えられる範囲を避けます。

（注1）地殻：地球の表面近くにある固体状の部分进行。厚さは一様ではなく、大陸地域で厚く（数十 km 程度）、海洋地域で薄く（5～10km 程度）なっている。地球は、この地殻と中心部の核、その間のマントルから構成されている。



3.2. 地下深くは地震のゆれなどの影響を受けにくい環境です

地震による処分場への影響は、以下の点が考えられます。

- ①地層の変位・変形を起こす断層活動（断層のずれ）
- ②地震によるゆれ
- ③地震にともなう岩盤の亀裂の発生、地下水の動きや化学的性質の変化などの地質環境の変化

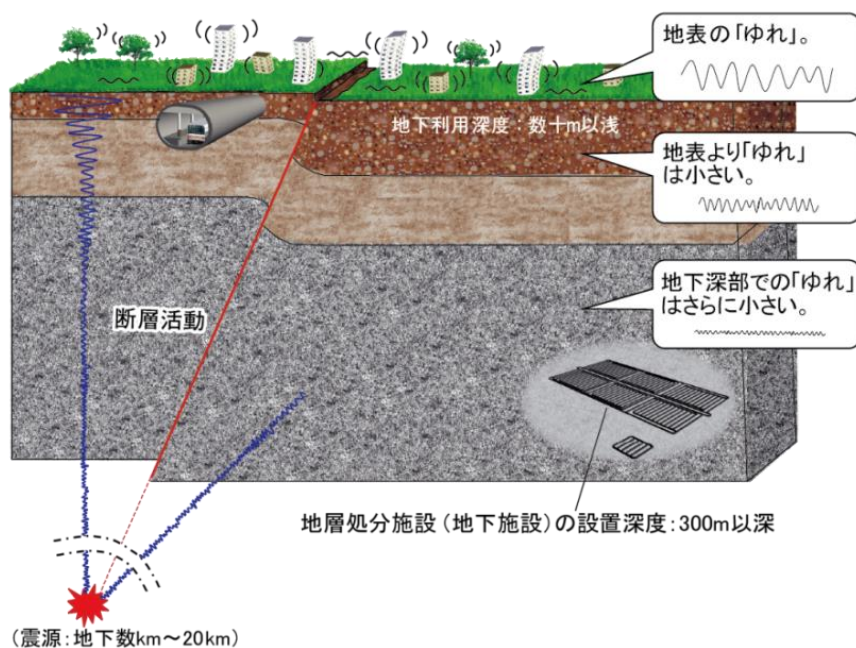
このうち①については、人工バリアや天然バリアに大きな影響を与えるおそれがあります。（参照：断層のずれの影響が著しい場所は避けます）

②③については、①と比較すると、以下のようなことから影響は小さいものと考えられます。

一般的に断層活動による地震の震源は地下数 km～20km 程度の深さであり、地下施設を設置する深度は震源になるものではありません。また、地下施設での地震動は地表付近と比較して約 1/3～1/5 と小さくなります。また、処分場を閉鎖した後では、岩盤（天然バリア）と人工バリアが一体となってゆれるため、廃棄体が著しく破壊される可能性は非常に低いと考えられます。

なお、地震によって一時的に水圧などの地下水の状況が変化することもあります。時間が経てば元の状態に戻ることが観測されています。

このように、地下深部は、地震によるゆれ、それにともなう地下水の流動などの変化を受けにくい環境であると言えます。



地震による「ゆれ」の影響

3.3. 断層のずれの影響が著しい場所は避けます

地震による処分場への影響のうち、「地層の変位・変形を起こす断層活動(断層のずれ)」は、人工バリアを構成するオーバーパックなどの破壊、断層とその周辺の地下水を通しやすさの増加などにつながり、放射性物質を閉じ込める機能の喪失につながるおそれがあります。

具体的には、次のような場所は断層活動により閉じ込め機能を喪失するおそれがあります。このように影響が著しいと考えられる場所を避けて、処分場を設置するようにします。

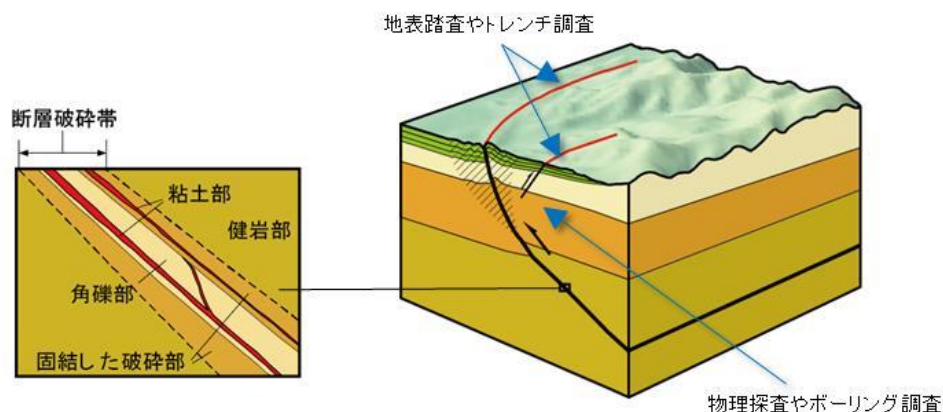
- 繰り返し活動し、変位の規模が大きい活断層
- ずれている断層の周辺
- 将来断層が伸展したり、分岐するような場所

日本の断層活動は特定の地域に偏って分布し、その傾向が過去数十万年程度大きく変わっていません。断層活動の要因と考えられるプレート運動や地殻変動が過去数十万年から百万年の時間規模で継続していることなどから、将来も同じ断層とその周辺が繰り返し活動することが考えられます。

このような知見から、まずは過去数十万年の間に活動した活断層の周辺の一定の範囲を避けることとします。このような活断層は国の研究機関による全国規模の資料にまとめられています。

さらに、地表では地表踏査やトレンチ調査を行い、地下に対しては物理探査やボーリング調査を行い、断層の位置、破碎帯などの性状、断層の過去の活動の傾向を把握します。また、ボーリング孔を用いた現地調査や、採取した岩石試料を用いた室内試験などにより、断層面やその周りの破碎帯などの地下水の通しやすさなどを把握します。

このような詳細な調査により、将来、断層が伸展したり、分岐するような場所も含めて、著しい影響が考えられる範囲を避けるようにします。



活断層の概要と調査

3.4. 隆起・侵食の影響が著しい場所は避けます

隆起・沈降は、地盤が広い範囲にわたって上がる、あるいは下がる現象です。侵食は、風化、崩壊、流水および海面の低下などによって地表面が削りとられ、地形が変化する現象です。

隆起・侵食の速度が大きい場所では、地下深くに設置した地下施設が岩盤と一緒に隆起したり、地表面が侵食されることによって徐々に人間の生活環境と廃棄物との距離が接近するおそれがあります。

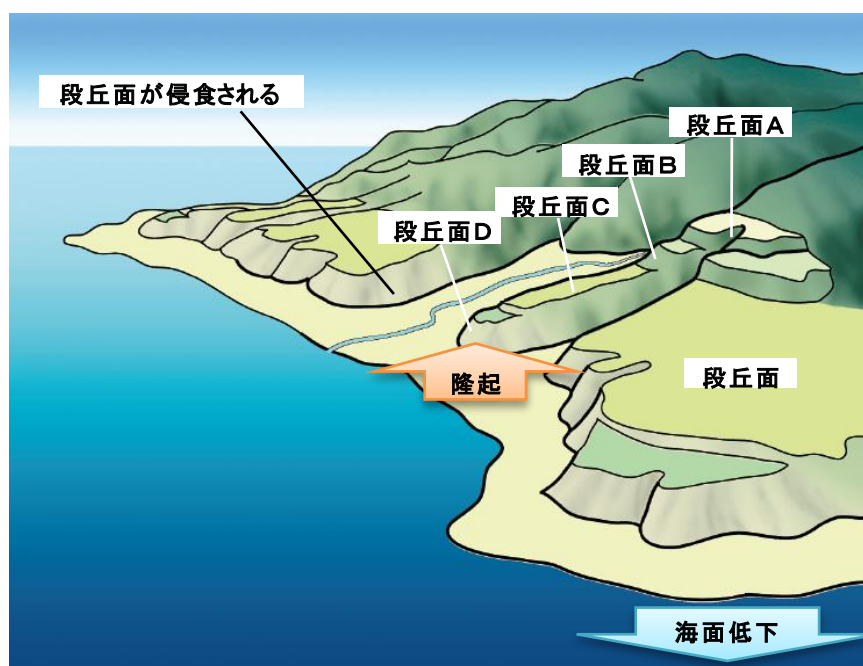
侵食にはいろいろな形態がありますが、河川による侵食が最も大きく、隆起や河川が注ぎ込む海面などの低下などによって激しくなります。

著しい隆起が生じるような地域では、隆起量とほぼ同じ量の侵食が生じる可能性があります。

海面の高さは、約十万年周期で緩やかに上昇・下降を繰り返しており、世界的には現在よりも最大 150m ほど低かったことが知られています。海岸付近を中心に、この海面の低下に応じた侵食が生じる可能性があります。

日本では、同じような地殻変動が少なくとも過去数十万年から百万年の期間において継続していること、海面の高さの変動は約十万年の周期で繰り返していることから、将来も同じような隆起と侵食の傾向が続く可能性が高いと考えられます。

このような知見から、まずは過去の隆起量が大きい沿岸部を避けることとします。過去の隆起量については学会による全国規模の資料にまとめられています。



沿岸部における隆起・侵食の概念図

さらに、現地調査により詳しく調べます。例えば沿岸部では、海面下で堆積した地層が、沿岸の隆起にともない陸化し、平らな地形面（段丘）を形成します。段丘の地層中に堆積した過去の火山灰などにより段丘の形成時期を調べ、段丘の標高と合わせて、過去の隆起の速さを推定します。

海岸付近では海面の高さの変動にともない侵食と堆積が繰り返されています。侵食については、例えば、最近もっとも海面が低下した時の侵食の深さを、その時期から堆積した沖積層の基底の深度から推定することができます。

このような詳細な調査により、隆起・侵食による著しい影響が考えられる範囲を避けるようにします。

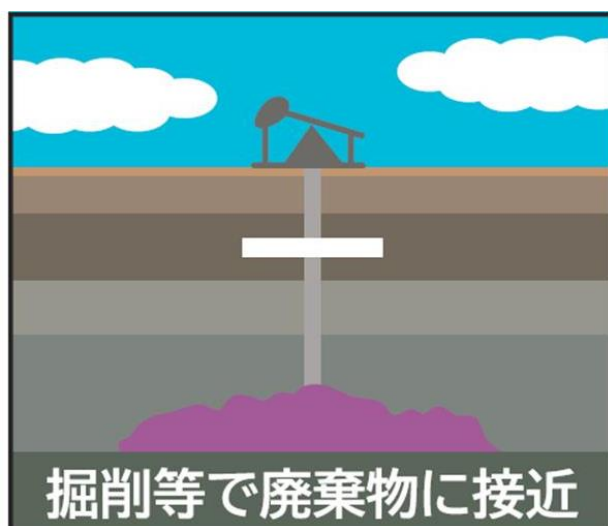
3.5. 鉱物資源の採掘などにより人間が廃棄物に接近するおそれがある場所は避けます

一般的な地下利用の深さは、地下鉄など数十 m 程度であり、地層処分を行おうとする深度 300m 以深の地下深部には人間が容易に近づくことはできません。

一方で、地下に鉱物資源が存在する場合、将来の世代が探査や採掘を行い、その結果、誤って人間が廃棄物に接近するおそれがあります。

したがって、採掘することが経済的に価値が高いと考えられる鉱物資源が存在する場所を避けます

採掘することの経済的な価値の高さについては、鉱業法（第 3 条第 1 項）に示された鉱物の種類や、採掘権の設定の有無、品位、可採量などにより調べます。



鉱物資源の掘採による放射性廃棄物への人間の接近の概念図

このように鉱物資源のある場所を避けることに加えて、将来の人間の接近を防ぐために次のような方策を講じます。

- 地下の坑道をすべて埋め戻す
- 記録を永久に保存する（最終処分法に規定されています）
- 処分場の敷地およびその周辺とこれらの地下について、許可を受けなければ掘削できないとする（最終処分法、原子炉等規制法に規定されています）

3.6. 段階的に地下深部の様子を把握し、より好ましい特性が確認できる可能性が相対的に高い範囲を選びます

最終処分法に基づき、文献調査、概要調査、精密調査の3段階の調査を実施した上で、処分地を選定します。処分地の段階的な調査・選定は国際的に共通した考え方です。調査段階の進捗にともない、地下の状況などを調査する範囲を絞り、より詳細な調査を行います。

文献調査段階では、火山や活断層などを避けます。また、将来の人間侵入の動機となる可能性がある鉱物資源や地下施設建設が困難となる未固結堆積物も避けます。

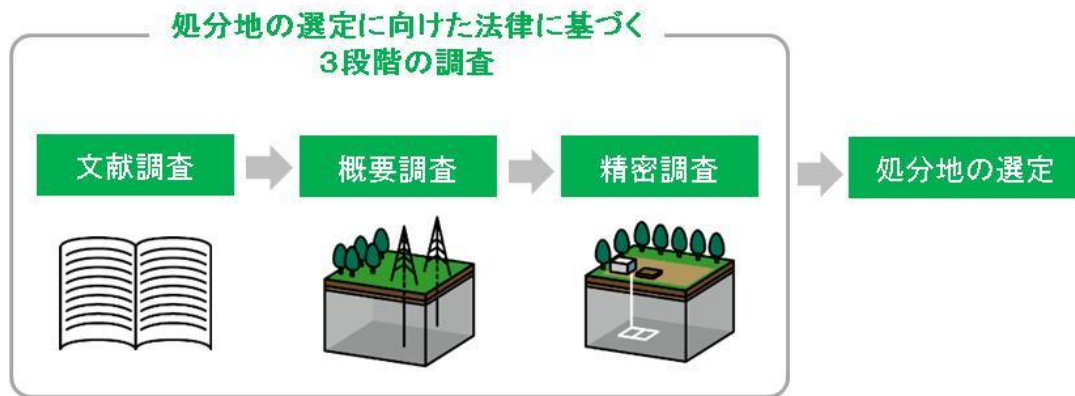
概要調査段階では、火山や活断層などを避けるとともに、岩盤中の破碎帯や掘削に支障がある場所などを避けます。

精密調査段階では、物理的、化学的性質などが地層処分に適している場所を選択します。

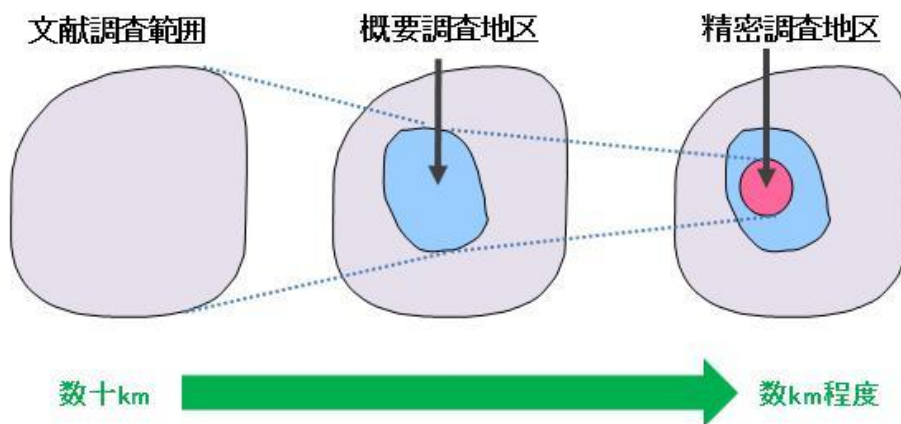
火山や活断層などの著しい影響などを避けた上で、地下深部の地質や、地下水の性状、岩盤の強度、地温などを調査し、より好ましい範囲を選びます。

天然バリアや人工バリアが閉じ込め機能を十分に発揮できる環境であるためには、地下水の流れが遅いことや、ものを溶かしにくい水質であること、地温が高くないこと、岩盤が熱を通しやすいことなどが望まれます。

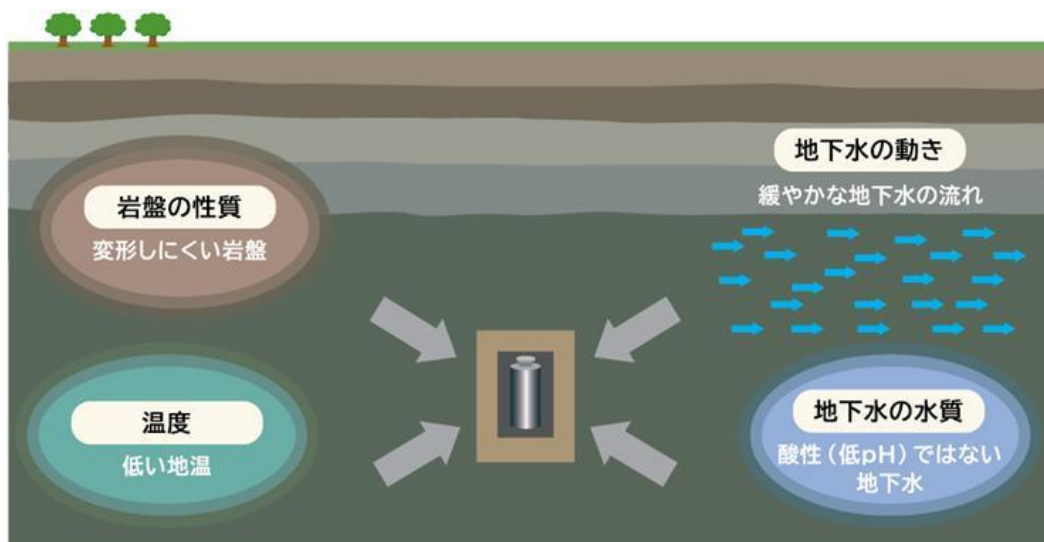
このような地質などの状況が、数万年以上の長期間にわたって安定するとの見通しが得られることも確認します。現在の状況や、数十万年前、数百万年前といった過去の状況を調べて、将来的な安定性を推定します。非常に古い地下水の存在なども有用な情報となります。



段階的な調査



調査スケールの変遷



好ましい地下深部の地質環境

4. 地層処分の安全性を高めます

安全な地層処分を実現するためには、高レベル放射性廃棄物等を人間の生活環境から隔離して長期間閉じ込めておき、そして私たち人間が高レベル放射性廃棄物等に近づかないようにすることが求められます。

自然界には、ウラン鉱床に見られるように放射性物質を長期間閉じ込めていた地質環境が存在します。地質環境には、そもそも物質を閉じ込めておく特徴があり、地層処分にとって優れた天然のバリアとなりますが、そのためには火山活動や断層活動などの影響を受けない場所を選ぶ必要があります。また、場所によっては、経済的に価値の高い鉱物資源が存在することもあり、将来的に人間が地下に侵入することもあると考えられるので、そのような資源が存在しない場所を選ぶことも大切になります。

地層処分では、地下水の影響を考えることも重要です。地下水は、物質をどこかに運ぶとか、ものを腐食させるなど、放射性物質の閉じ込め機能に影響を与える可能性があります。しかし、地下深部では、地下水を流そうとする力が弱く、岩盤が緻密なので地下水の動きはとてもゆっくりです。また、岩盤には物質を吸着する性質があるので、物質が地下水で運ばれる速度は、地下水自体の流れの速度よりさらに遅くなります。さらに、地下深部は、酸素がほとんど無いため、ものの変化が起こりにくい場所でもあり、金属の腐食も極めてゆっくりとなります。そして、これらの地下深部が持つ特徴に加えて、高レベル放射性廃棄物等が地下水と接触することをできるだけ防いだり、放射性物質の移動をより小さくするための人工的な対策（人工バリア）を施します。

地層処分では、天然のバリアとして機能する地質環境のみに依存するのではなく、私たち人間が考え出した人工バリアとを組み合わせ、それらの相乗作用によって長期間の放射性物質の隔離と閉じ込めをより確実なものにしようとする方法を採用します。このような考え方を多重バリアシステムと呼んでおり、地層処分の安全性を確保するうえで基本となる方法として各国の処分方法に採用されています。

一方、廃棄物の輸送時の安全性、処分場の建設・操業中の安全性についても、施設周辺の住民の皆様の安全を確保することはもちろんのこと、作業者の安全確保するために必要な対策も行っています。

4.1. 地下深部の地層は放射性廃棄物を閉じ込める役割を担います

地層処分とは、地下深部の地層が本来持っている「物質を閉じ込める能力」を利用し、長期にわたって放射性物質を人間の生活環境から隔離しようというものです。地層処分を行う場合に重要な役割を担っている地層の物質を閉じ込める能力について説明します。

まず、放射性物質を移動させてしまうと考えられている地下水ですが、その動きは地下深部では非常に遅く、場所によっては、1年間でわずか数ミリメートル程度しか動かないと言われています。さらに地層には、地下水に溶けている物質を吸着する能力があります。そのことによって、放射性物質の移動はさらに遅くなります。そして、その間にも、放射性物質は放射性崩壊により減衰していきます。また、地下深部は、酸素がきわめて少ない環境ですので、ものが溶けにくく、金属が腐食するような反応は起こりにくいのです。このことは、金属製のオーバーパックによる放射性物質の閉じ込め機能を長期に渡って維持する観点でも適していると言えます。

このような地層の物質を閉じ込める能力を示す例としては、古代ローマ時代の遺跡の地下数メートルのところから発見された2000年以上前の原形をとどめている釘、のこぎりで切れるほどの木としての状態を保ったイタリアの粘土層から発見された約200万年前の巨木などがあります。このように、地層には、条件さえ整えば物質を長期間閉じ込めておくことができる能力があるのです。

また、私たちは建物や地下鉄などによって地下を利用していますが、それでも、人間が利用している深度はせいぜい数十メートル程度です。地層処分では300メートルよりも深い場所に埋設するので、数万年以上にわたって放射性物質を人間の生活環境から遠ざけるように隔離することができるのです。

地層はさまざまな機能で放射性物質から私たちを守ってくれる、天然のバリアなのです。



ローマ時代(紀元前約85年頃)の釘



イタリアで発見された約200万年前の木
(写真提供:Elsevier Science Ltd.)

地層によって長期保管されていた古代遺物の例

4.2. 人工的な対策で放射性物質の隔離をより確実なものにします

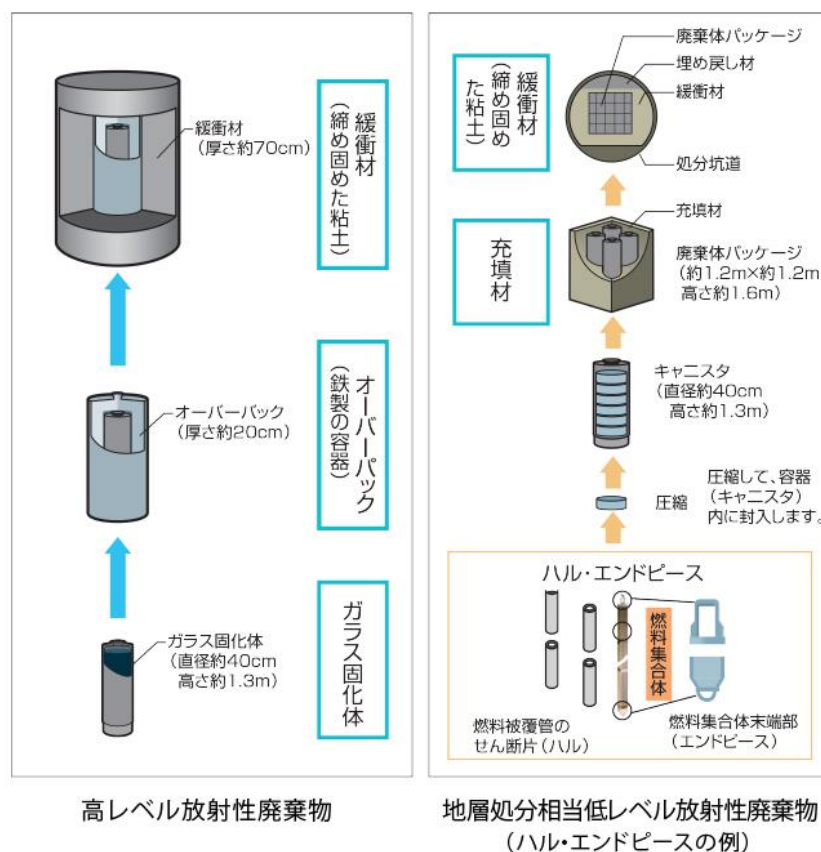
天然バリアと人工バリアからなる多重バリアシステムのうち、人工バリアの役割について説明します。

地層処分では、地層が持っている閉じ込め能力をさらに確実にするため、さまざまな人工的な対策が施されます。この人工的な対策のことを人工バリアと呼んでいます。

人工バリアの役割は、私たち人間の生活環境から放射性物質を確実に隔離するものです。

処分場を閉鎖した後、少なくとも 1000 年間は地下水が放射性廃棄物に接触することを防止します。また、万一放射性物質が地下水へ溶け出したとしても、その移動を遅くしたり、放射性物質を取り込んで(吸着して)地下水の中から放射性物質を取り除きます。人工バリアは、高レベル放射性廃棄物の場合はオーバーパックと緩衝材が、地層処分相当低レベル放射性廃棄物の場合は充填材と緩衝材を用います。

このように、人間の知恵を使って作り出された人工バリアと地層が持つ閉じ込め能力を利用した天然バリアを組み合わせ、多重バリアシステムが構成されます。



人工バリアシステム

4.3. 放射性物質をガラスと一体にして、地下水に溶けにくくします

日頃、私たちは、ガラスのコップが水に溶けるなんて考えません。古代遺跡から、しばしばガラス製品が非常に良好な状態で発掘されることや、地層中に天然のガラスが存在することからもわかるように、ガラスは地下水にも溶けにくく、またガラスの性質は時間がたってもほとんど変わりません。

例えば、天然の火山ガラスが、時間の経過とともにどのくらいの速さで変質してきたかについての研究も行われています。この研究によれば、変質速度は1000年間で、せいぜい数ナノメートル（1ナノメートルは100万分の1ミリメートル）程度と非常に遅いことが確かめられています。

このように、ガラスは長期にわたって水に溶けにくく、安定した性質を持っていますが、一方、割れやすいという性質があります。しかし、ガラスが割れたとしても、放射性物質はガラスの網目構造にしっかりと取り込まれて、ガラスの一部となっているので、ガラス固化体中の放射性物質がすぐにガラスの外に出ていくようなことはありません。



(写真提供：PPS通信社)

発見された古代エジプト時代（B. C. 2900 年頃～B. C. 300 年頃）のガラス工芸品



富士山で見つかった火山ガラス



ガラス変質層の顕微鏡写真

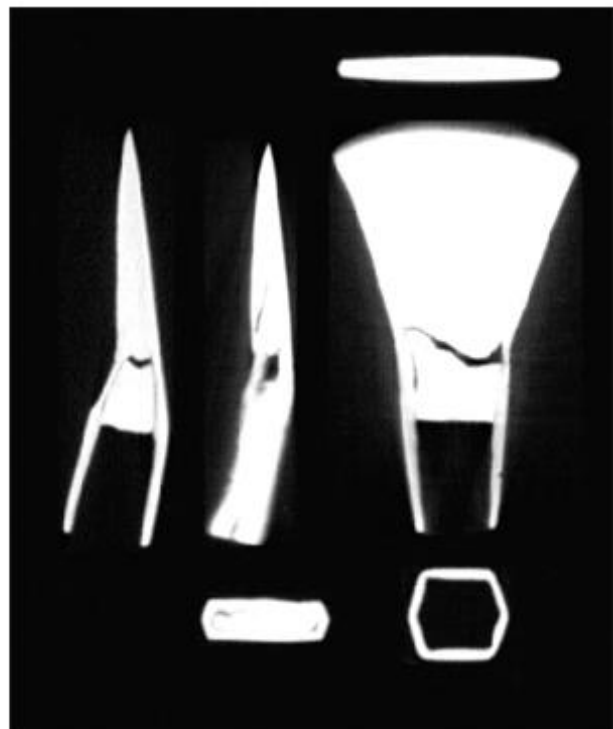
(写真提供：核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構))

自然界のガラス

4.4. オーバーパックはガラス固化体と地下水の接触を防ぎます

ガラス固化体は、地下水に溶けにくく、化学的に安定しているため、放射性物質を長期間保持することができます。この保持能力をより確かなものにするために、放射能が比較的高い期間、ガラス固化体と地下水の接触を完全に遮断してしまうのがオーバーパック（金属容器）の主な役割です。現在、オーバーパックの材料には、鉄鋼材料（炭素鋼）を使用することを考えています。

金属材料は、一般に空気中の酸素と反応してさびます（これを腐食と言います）。地下深部では、酸素が極めて少ないために腐食は進みにくいですが、地下水とは反応しゆっくりと腐食が進むことが知られています。これまでの研究から、地下深部の環境で 1000 年の間にどのくらい腐食するのかについてずいぶんわかってきました。例えば、島根県の出雲大社境内の遺跡からは、土の中から約 750 年前の鉄斧が出ました。この鉄斧は粘土で覆われた状態で発見され、その表面が薄いさびで覆われていましたが、完全な形を残していました。さびの厚さの測定値から、鉄斧が埋まっていた環境での鉄の腐食深さは 1000 年間で 3 ミリメートルよりも浅いことがわかりました。このことは、地下でも腐食は進むものの、その量は地表に比べれば少なく、長期にわたり腐食に十分に耐えるオーバーパックを設計することは可能であることを示唆していると考えています。



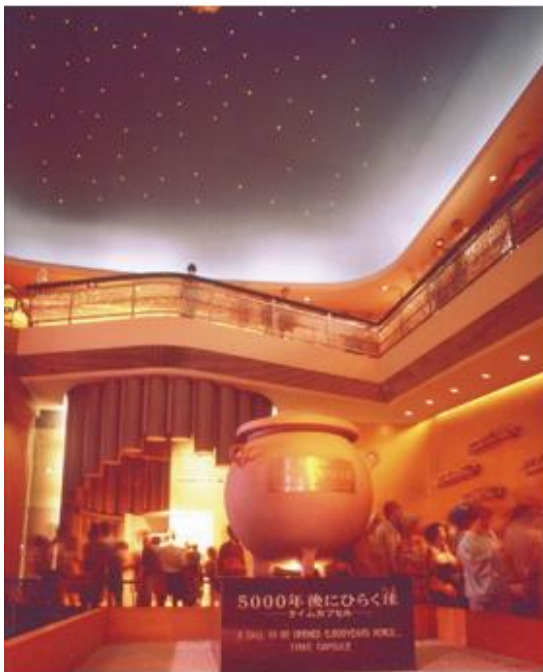
(写真提供：核燃料リサイクル開発機構
(現 日本原子力研究開発機構))

730～750 年前の出雲大社境内遺跡から出土した鉄斧の写真と X 線 CT 画像

4.5. 緩衝材は地下水の流れを遅くし、放射性物質の動きも抑えます

緩衝材には、ベントナイトと呼ばれる天然に産出される粘土が用いられ、オーバーパックと地層の間にオーバーパック全体を取り囲むように設置します。ベントナイトは、そもそも水を非常に通しにくいという性質を持っており、緩衝材の内部では、地層中と比べると地下水の動きは非常に遅くなり、ほとんど止まっていると言ってもいいでしょう。

このベントナイトは、1970 年、大阪万博が開催された際、地下約 15 メートルに埋められたタイムカプセルを地下水から守るためにも使われています。このタイムカプセルは、5000 年後の西暦 6970 年に開封されることになっています。2000 年に発掘された際には、地下水がベントナイトの周辺部分にしか浸入していないことが確認され、ベントナイトが地下水を通しにくいことが証明されました。このように、ベントナイトを用いることで、地下水の動きをほとんど止めてしまい、オーバーパックなどの腐食を遅らせだけではなく、高レベル放射性廃棄物等から放射性物質が出てきたとしても、地下水によって外部へ運ばれるのを著しく遅らせることができるのです。



(写真提供：日本国際万博会記念協会)

タイムカプセル埋設の様子



(写真提供) (株) ホーゲン

1970 年に大阪で埋設されたタイムカプセル

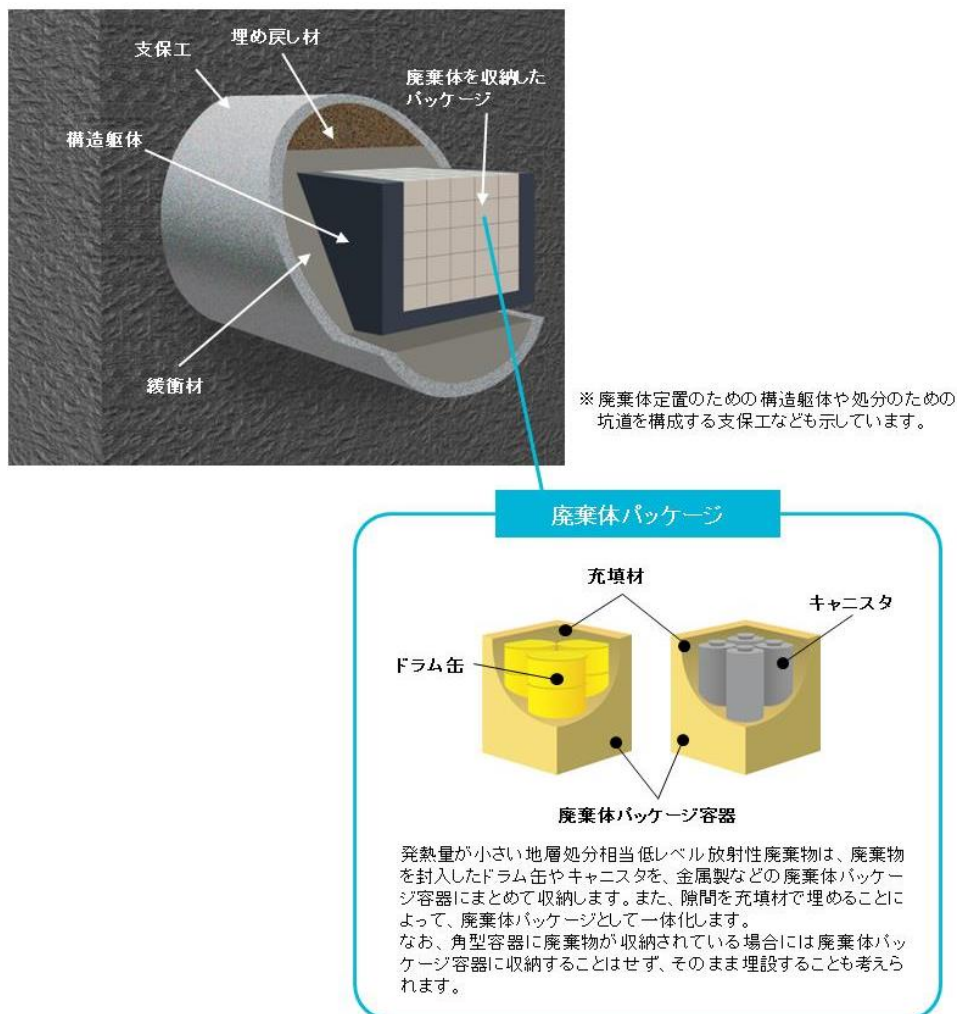
また、ベントナイトには、浄水器のように、水に溶けている物質（不純物）を吸着する性質があります（ただし、吸着の強さは、吸着される物質によって異なります）。ですから、溶け出した放射性物質が緩衝材中を移動している間にも、その一部の放射性物質は緩衝材に吸着されるため、地層へ到達するまでには、地下水の動きと比べてもさらに長い時間を要します。そしてこの間にも、放射性物質は放射性崩壊により減衰していきます。

4.6. 充填材は廃棄体パッケージの中でドラム缶やキャニスタを固定し、放射性物質の移動を遅くします

地層処分相当低レベル放射性廃棄物は、ドラム缶やガラス固化体と同様のステンレス容器（キャニスタ）に封入された状態などで処分場の地上施設に搬入されます。このドラム缶やキャニスタを4体ずつ廃棄体パッケージに入れ、充填材で固定します。また、廃棄体パッケージを処分坑道に定置した後、廃棄体パッケージ同士や廃棄体パッケージと処分施設の構造体との隙間を埋めるためにも充填材が使われます。

セメント系の充填材には、放射性物質を吸着するため、将来、放射性物質がドラム缶やキャニスタから漏れ出したとしても、放射性物質を吸着し動きを遅くする働きが期待されます。

また、地上施設から地下施設へ搬送する際に、廃棄体パッケージの中でドラム缶やキャニスタを固定する役割も担っています。



地層処分相当低レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア

4.7. 建設時、操業時、輸送時の安全性も高めます

埋設後の数万年以上の安全性だけでなく、処分場の建設、操業時ならびに廃棄体の輸送時についても安全性を高めます。

地下施設については、地下深部の設置場所の選定や、地下深部の特性に応じた設計・施工を行います。

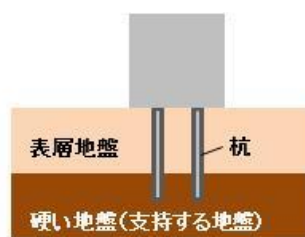
地下施設を設置しようとする深度に未固結堆積物が存在する場所は避けます。建設前と建設中に地下環境を十分に調査し、地下深部の地圧に対して、岩盤の強度と設計の工夫により、坑道を安定させます。

地上施設については、地震・津波などの影響を考慮した対策を講じます。

廃棄物を受け入れて取り扱う施設など、放射性物質を扱う重要な施設は、堅固な地盤に支持させます。地震に対しては、処分地で考えられる最大級の地震動を設定し、それに耐えることができる施設を設計します。津波に対しても、処分地で考えられる最大級の規模のものを設定し、それに耐えることができる施設を設計します。地震、津波以外にも施設の設計や配置などにより対応できない影響がある場所は避け、対応ができる場合はその対策を考えます。



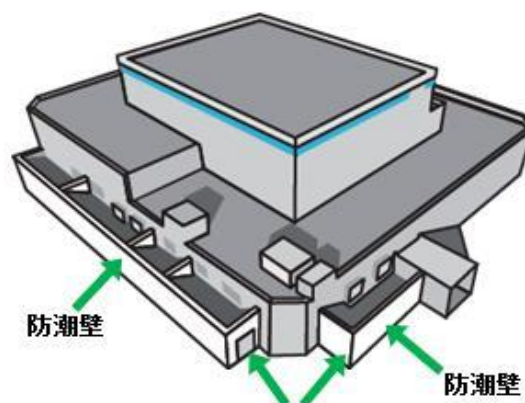
直接支持による対応



杭基礎による対応



耐震性を高めるため鉄筋コンクリート壁



津波時の地上施設への浸水防止策

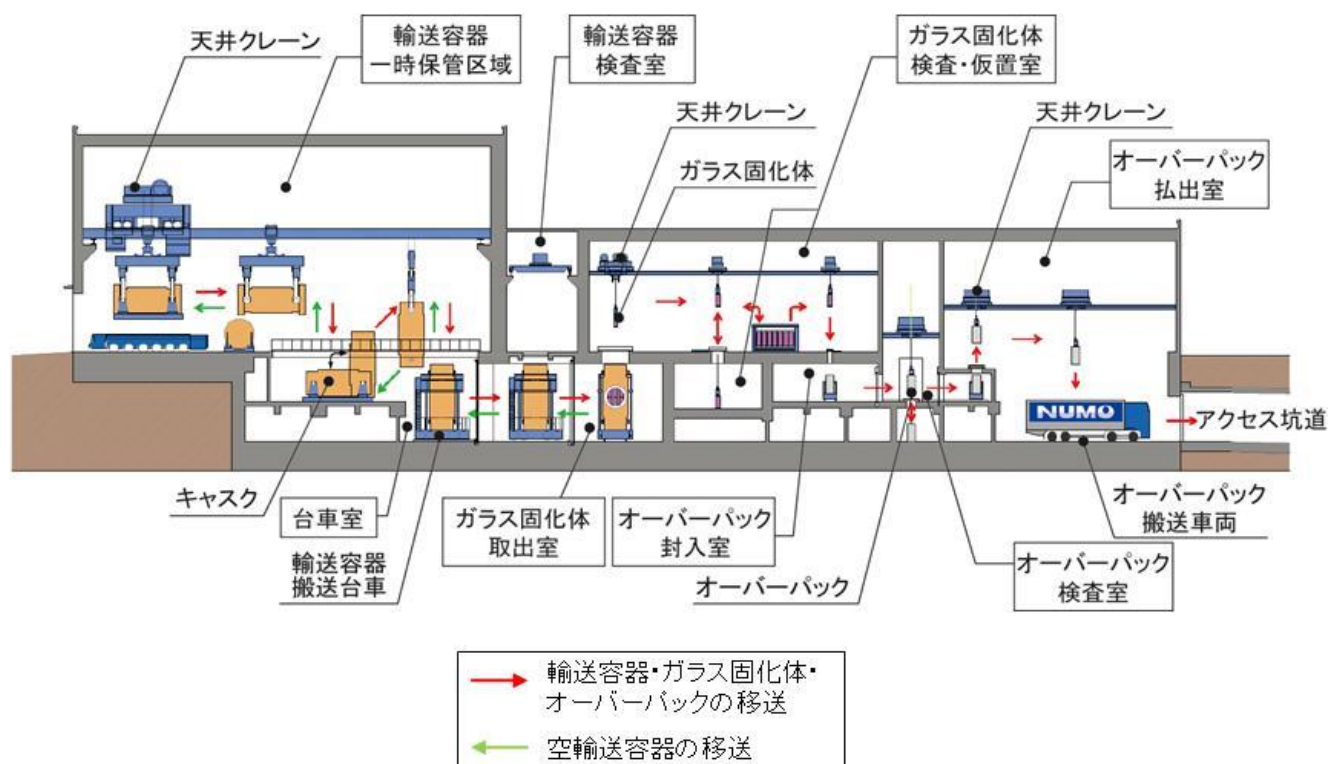
近隣の方々や作業員には廃棄体からの放射線の影響がないようにします。

施設の壁を、放射線の減衰に十分な厚さを持たせるなど、必要な遮へい対策を講じます。また、万が一に備え、施設内の気圧を外部より低くすることにより、周辺環境への放射性物質の漏えいを防止します。ガラス固化体の検査や、オーバーパックの封入などの作業は、十分な遮へいを施した区域内で、遠隔操作により行います。施設には廃棄体の転倒・落下や地震、火災、停電など、万一の事故が発生した場合にも十分な安全性を維持できるように、多重性、フェイルセーフなどの考え方により対策します。

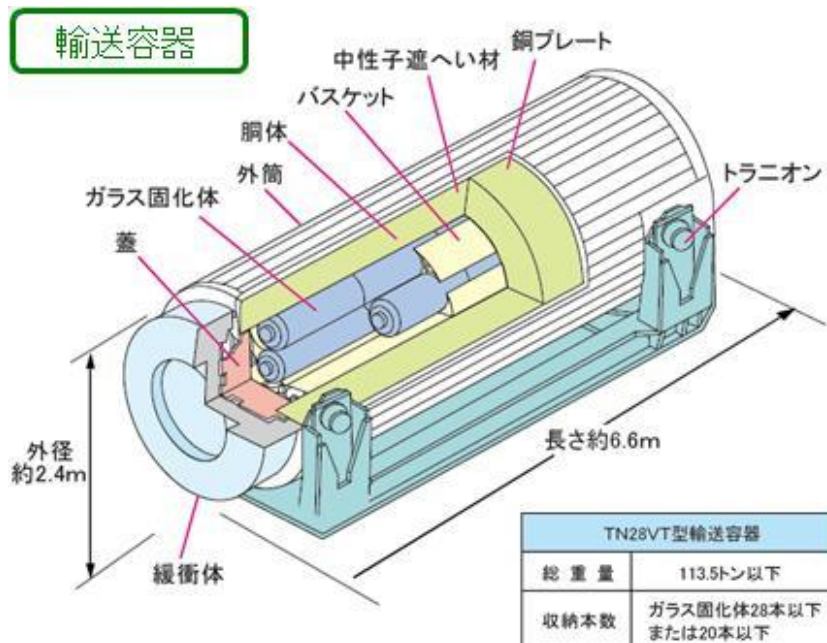
放射性廃棄物の輸送については、基準に適合した輸送容器に入れ、適切な経路を専用船や専用車両などを用いて輸送します。

輸送容器は、放射性物質の閉じ込めや放射線の遮へいが行われるよう、車両の衝突などの万一の事故なども考慮した厳しい基準に基づき設計・製作されます。輸送船は、万一の衝突などを考慮して、船体は二重構造、衝突防止システムや防火設備などが装備されます。輸送車両は、輸送容器の転落防止のための設計や、ブレーキの二重化など十分な安全対策を講じます。

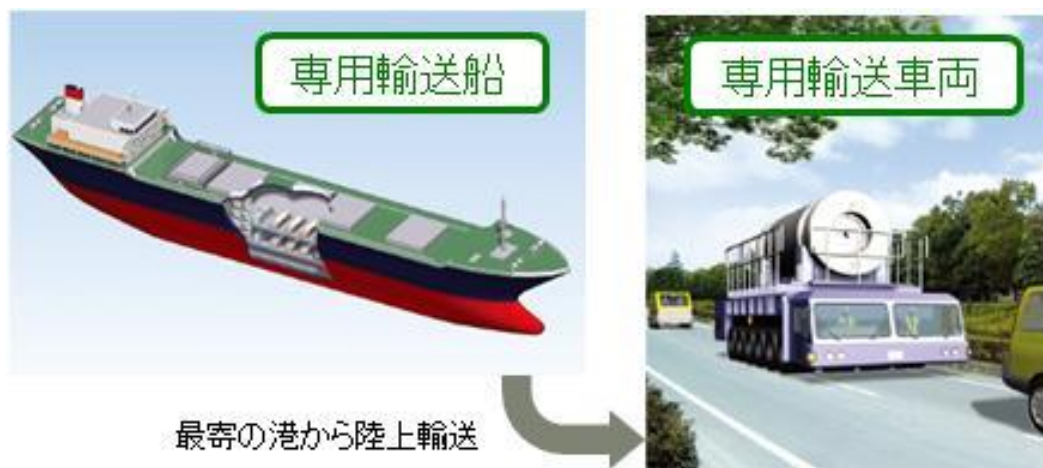
立地や設計による安全確保は、設計時・建設前は解析やシミュレーション、建設時・操業時は計測やモニタリングにより確認します。



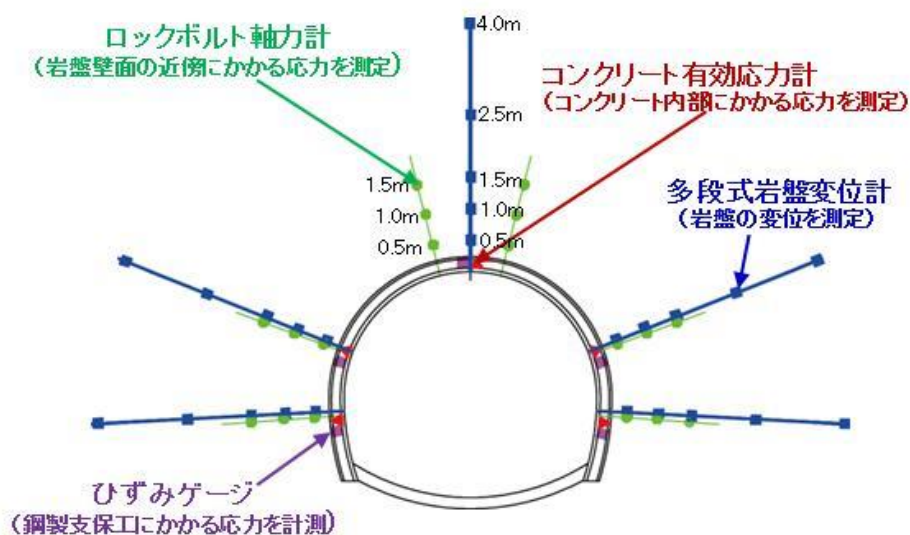
廃棄体受入・封入・検査施設における作業の流れ（高レベル放射性廃棄物の例）



ガラス固化体の輸送容器（出典：原子力・エネルギー図面集）



ガラス固化体の専用輸送船・車両



岩盤の変位計測の例

4.8. 処分場の建設・操業中は周辺環境への影響に対しても十分な対策を行います

地上の施設は約1～2平方キロメートルの敷地を必要としますので、処分場の建設や操業にともなう自然環境への影響について十分に配慮します。

そこで、建設工事の開始前に、建設・操業などの活動が周辺環境に与える影響の予測評価を行います。騒音・振動、動植物、生態系、景観など、一般的な環境調査項目に加え、地層処分事業で特徴的と考えられる地下岩盤の掘削にともなう掘削残土の処理や、地下水のくみ上げにともなう周辺河川への放流などの影響についても、調査と予測評価を行います。

この調査・評価をもとに、影響を回避・低減できるよう適切な環境保全対策を計画し、適切に実施して事業を進めます。また、実施した環境保全対策が、有効に働いていることをモニタリングによって確認します。

5. 遠い将来の安全性を確かめます

火山や断層活動などの影響を受けない場所を選び、処分に適した地層に人間が考え出した人工バリアを加えて処分すれば、放射性物質を長期にわたって閉じ込めて、人間の生活から隔離することが可能です。

地層処分は、ものの変化がきわめてゆっくりで、長期間にわたって環境が安定した地下深部の地層を活用するものですが、この方法が本当に安全なものであるかどうかを判断するためには、遠い将来の安全性を確かめる必要があります。そこで、私たちの経験や歴史をはるかに超えた時間スケールの中で安全性を判断するという、新たな挑戦が必要になります。これが、地層処分の安全評価の目指すところです。

それでは、どのようにして安全性を確かめるのでしょうか。

再処理工場や原子力発電所の安全性は、実物大模型などを使った実験や実プラントの運転により直接的に安全性を確認することができるのですが、地層処分は広大な天然の地層をバリアとして含み、数万年以上の長期にわたる安全性を確かめる必要があるため、直接的に確認することはできません。このため、その評価は将来の予測に基づいた数学的な解析による間接的なものになります。ここでの予測とは、将来を完全に言い当てることではなく、不確実なことも含めて余裕を持って将来を示すことなのです。

何万年もかかる現象ですから、小さな事象に分割して実験し、シミュレーションを行い、これを基に処分場の性能を評価します。それにより、放射性廃棄物の放射線による生活圏への影響を数値で表すことができます。

5.1. まず、遠い将来の予測を行います

地層処分の安全評価は遠い将来の安全性を確かめることですから、処分を行おうとする地下環境の将来を予測する必要があります。それでは、私たちの経験や歴史をはるかに超えた時間スケールの中で、この将来をどのように予測するのでしょうか。

まず、地下深部の地層は、日本では数万年以上、数億年にも及ぶ非常に長い期間の過去の動きを反映しています。この動きは、非常にゆっくりとしたものであり、その傾向は今後 10 万年程度では変わらないと考えられていることから、比較的長期にわたる将来の地下の環境を予測することは可能だと考えられています。

それでは、私たち人間が作り出す人工バリアについてはどうでしょうか。

人工バリアとそのほかの人工物（ビルや橋など）との大きな違いはそれが置かれる環境です。私たちの作り出すほとんどのものは地表に設置されます。地表で起こることは多種多様でその変化も早く、将来予測は大変困難です。しかし地下深部では、すべての変

化がきわめてゆっくりとしていることから、私たちが作り出した人工バリアも地下深部に埋設することにより、その変化は非常にゆっくりとしたものと考えられます。地下の環境を想定した基礎的な実験を行うことによって、人工バリアで生じる現象を理解して将来予測ができるのです。安全評価では、私たちの知見をもとにして、こうなるかもしれないといういろいろな筋書き（シナリオ）を考えて、将来の予測が行われます。

5.2. 将来の不確実なことは、安全性に悪い影響を与えるように仮定して評価します

それでは、地層処分の将来を予測するにあたり、地層処分に係わる多くの現象のすべてを想定し、遠い将来を予測することが可能なのでしょうか。

将来予測のためにシナリオをなるべく網羅的に考えるためには、まずは、地層処分の安全性に影響を与えるかもしれない現象を、地質学、地球科学、材料科学など関連する分野の科学的な知見や専門家の意見をもとに洗い出します。次に、これらの現象が本当に起こる可能性があるのかどうか、また起こった場合には、地層処分に与える影響がどの程度なのかを、ひとつひとつ検討していきます。

しかしながら、すべての現象について、遠い将来の状態を予測することは最新の技術を持ってしても困難なこともあります。ですから、それぞれのシナリオに基づく安全評価では、わからないことについては、地層処分の安全性に悪い影響を与えるような仮定をして安全評価を行います。

このように、必ずこうなるという予測ではなく、わからないことについては余裕をもって、保守的に仮定するような予測なのです。そして予測の範囲については、海外も含めて、最新の研究成果をもとに幅広い専門家によって議論されます。また、新たな科学技術的な知見は積極的に評価に取り込み、予測の妥当性を常に確認していきます。

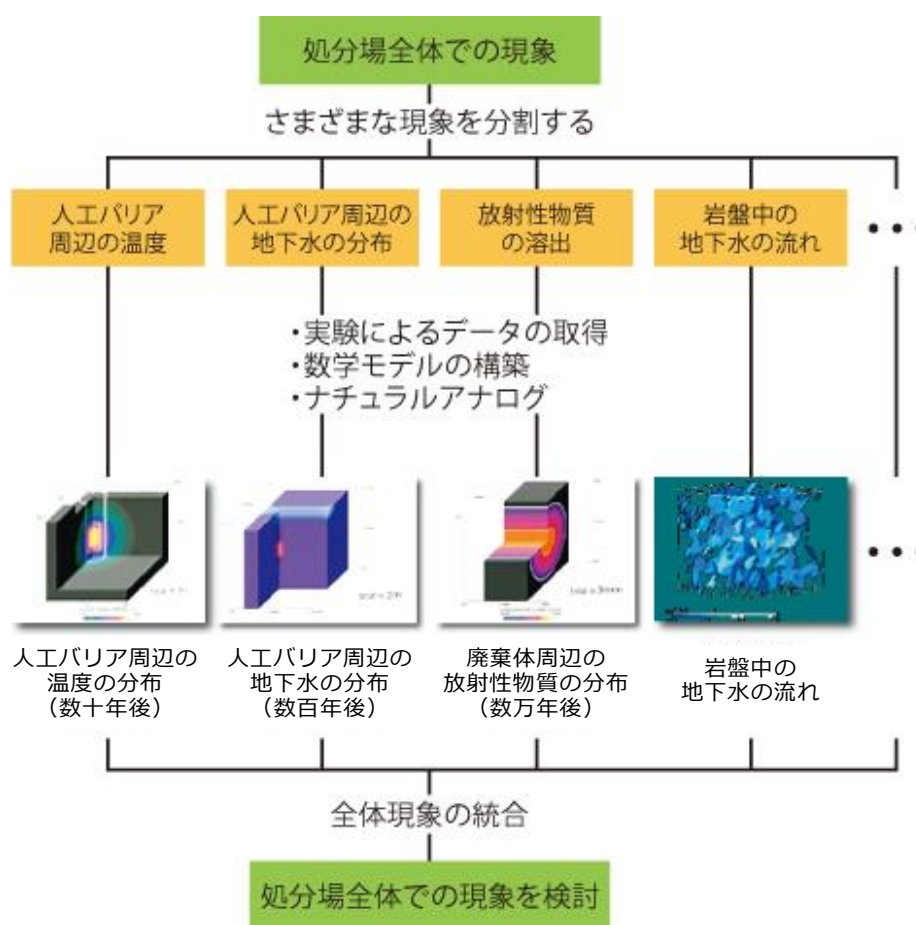
5.3. 何万年もかかる現象は小さな現象に分割して実験し、数学モデルでつなぎ合わせ評価します

地層処分の安全性は直接確認できないために、数学的な解析により間接的に確認しますが、それではどのように行っているのでしょうか。

例えば、処分場から地表まで、放射性物質が地下水によって非常に長い時間をかけて移動する可能性が想定されます。このような長期的でスケールの大きい現象の全体を私たちが経験することはできません。しかし、この現象を、人工バリア周辺の温度変化や地下水の流れ、ガラス固化体からの放射性物質の溶出、そして岩盤中の地下水の流れというように個々の現象に分割すれば、それぞれを実験的に再現して観察しデータを取るこ

ともできますし、また、それぞれの現象について、長い時間継続しているよく似た自然現象（ナチュラルアナログ）を観察することによっても確認できます。

それぞれの現象を数学的なモデルとして表現し、実験的なデータに基づいて入力する値を決めれば、個々の現象を計算により予測することができます。また、個々の現象のシミュレーションを統合することで、複合した現象を計算により予測します。これらの計算結果の妥当性を、より大きな規模の実験や観察と比較することにより確かめることもできます。このような方法で、時間的にも空間的にもスケールの大きな処分場全体の現象について評価することができます。



数学モデルを用いたシミュレーション

（核燃料サイクル開発機構（現 日本原子力研究開発機構）ホームページを一部参照）

5.4. 安全評価によって処分場の性能を確認します

安全評価は、地層処分という大きなシステムが、私たちが期待する性能を発揮するかどうかを確かめるために行うものです。性能を判断する尺度として、被ばく線量（単位はシーベルト）が多く用いられます。これは、放射線による私たちの体への影響の程度を

示すものですが、安全評価の結果で注意しなくてはいけないのは、このような人体への放射線影響が実際に必ず生じるということを意味しているのではないという点です。

安全評価は、地下深くにある放射性物質がもし将来人間に影響を及ぼすとしたらどういうシナリオがあるかをまず考えて、そのシナリオに基づいて行われます。このシナリオでは地層処分の安全性に悪い影響を与えるような仮定をあえて考えることにより評価を行います。この意味から、安全評価の結果は、将来人間が受ける線量を予測しているのではなく、地層処分の安全性を確かめるための材料を提供しているのです。

では、その安全性を判断するための基準はどのように決めているのでしょうか？

何万年先の人類は、体の作りや生活習慣も変化しているかもしれませんが、将来の世代も現在の私たちと同じ体で同じ生活習慣だと仮定し、現在の世代と同じレベルで放射線から防護されるべきであるという考え方が国際的に合意された原則です。この原則に基づいて安全基準が制定されます。そして、評価結果をこの基準と比較することによって、地層処分システムの安全性が確認されるのです。

5.5. 放射性廃棄物の放射線による生活圏への影響は、自然放射線よりもはるかに小さいものです

放射性物質の取り扱いや、原子力利用により発生する放射性廃棄物の安全な取り扱いのために、どの程度の被ばく線量までなら許容してよいかという基準値の設定は重要なことです。世界各国はそれぞれの基準を作成していますが、国際放射線防護委員会(ICRP)は、各国における基準の作成のための国際共通的な考え方を示しています。

地層処分を行う放射性廃棄物の中にはさまざまな放射性物質が含まれていて、それらが放出する放射線が人間の生活環境へ影響を及ぼさないようにすることが地層処分の安全確保の中心的課題となっています。

地層処分の場合には、放射性物質は、地下 300 メートルより深い地層中に人工バリアと天然バリアからなる多重バリアシステムの中にしっかりと閉じ込められます。また、将来的に放射性物質が処分場から出たとしても、ゆっくりとした地下水の流れの中を途中で地層中に吸着されながら移動し、その間にも放射性崩壊により減衰するため、最終的に生活環境に到達する放射性物質の量はわずかです。

地層処分による放射線の影響は、そのような極々少量の放射性物質からの放射線による被ばくを考えることになります。その被ばく線量は、自然放射線による被ばく線量に比較してかなり低い値になっているため、私たちを含め環境への影響は無視できる程度のものなのです。