

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きます。

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

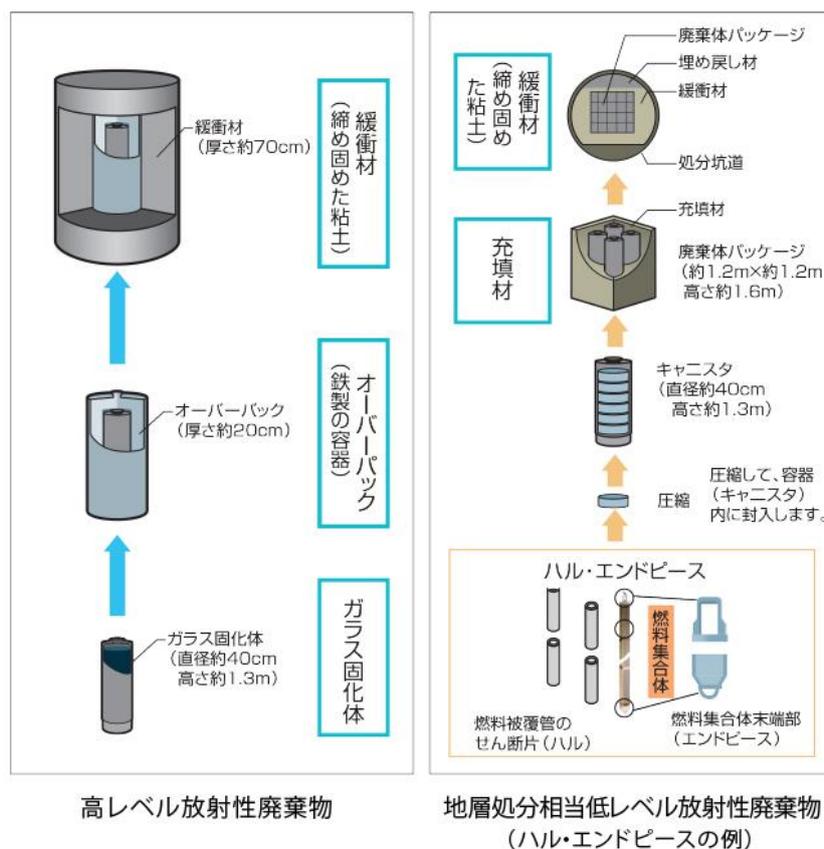
天然バリアと人工バリアからなる多重バリアシステムのうち、人工バリアの役割について説明します。

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。

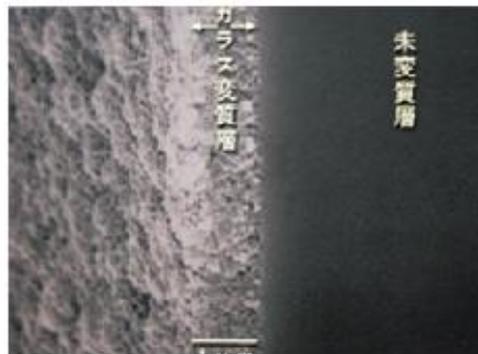


(写真提供：PPS通信社)

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

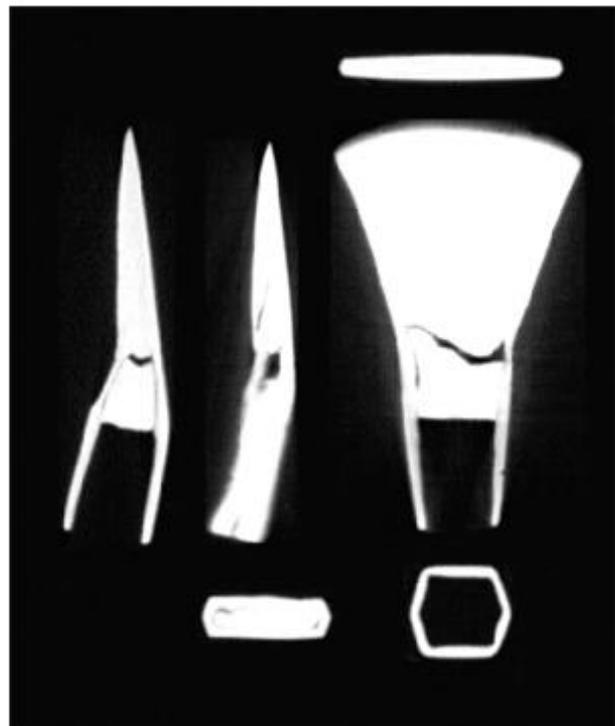
(写真提供：核燃料サイクル開発機構(現 日本原子力研究開発機構))

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 年前の鉄斧が出土しました。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。



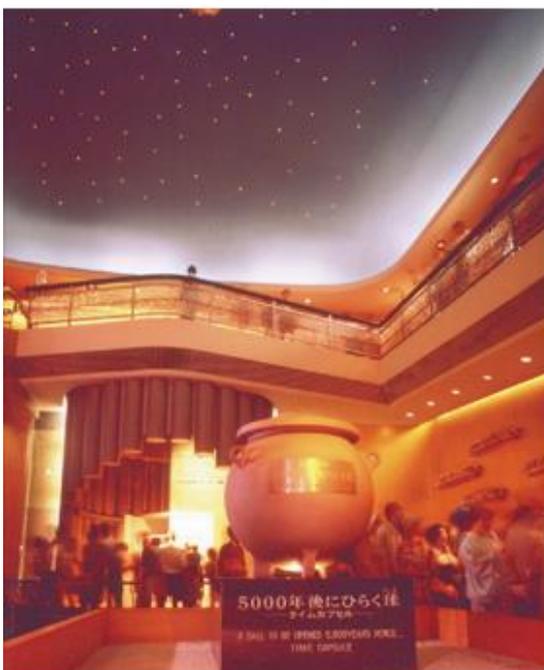
(写真提供：核燃料リサイクル開発機構
(現 日本原子力研究開発機構))

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

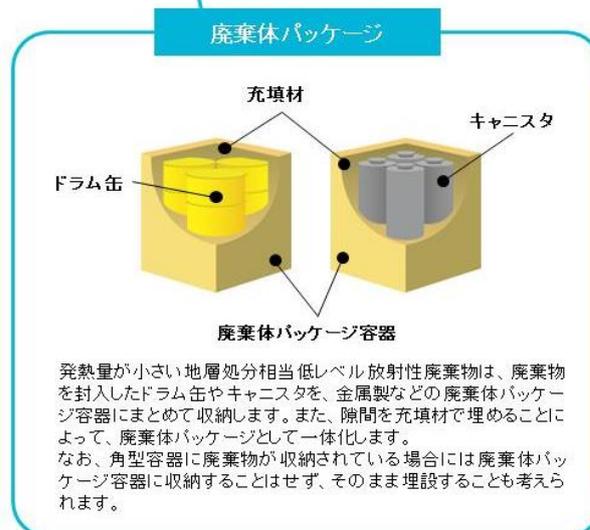
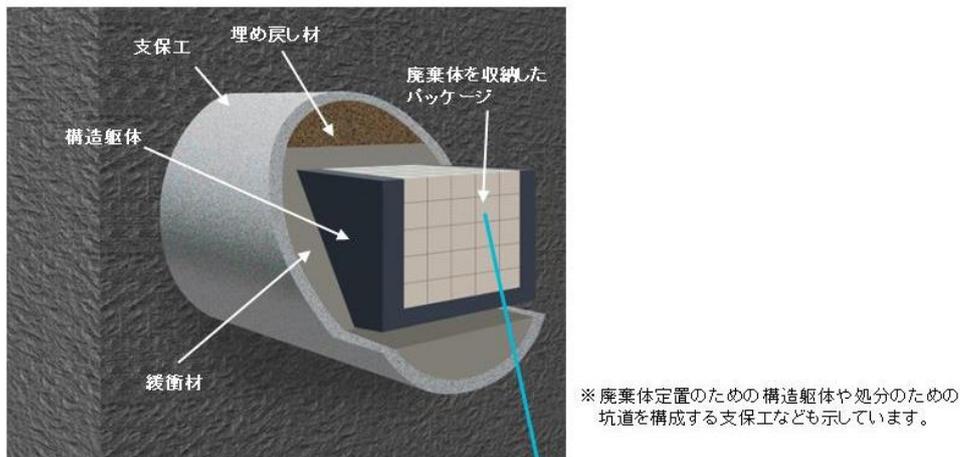
また、ベントナイトには、浄水器のように、水に溶けている物質（不純物）を吸着する性質があります（ただし、吸着の強さは、吸着される物質によって異なります）。ですから、溶け出した放射性物質が緩衝材中を移動している間にも、その一部の放射性物質は緩衝材に吸着されるため、地層へ到達するまでには、地下水の動きと比べてもさらに長い時間を要します。そしてこの間にも、放射性物質は放射性崩壊により減衰していきます。

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。

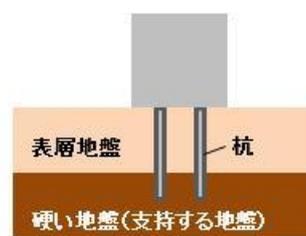
地下施設を設置しようとする深度に未固結堆積物が存在する場所は避けます。建設前と建設中に地下環境を十分に調査し、地下深部の地圧に対して、岩盤の強度と設計の工夫により、坑道を安定させます。

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。



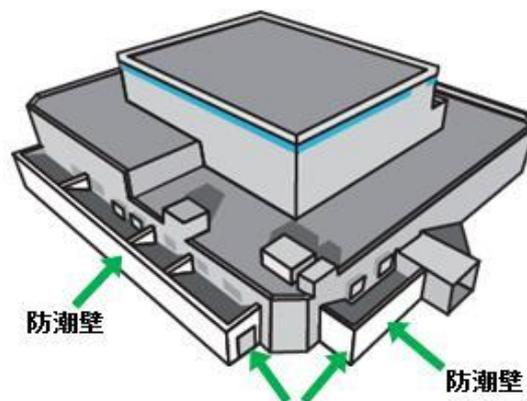
直接支持による対応



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

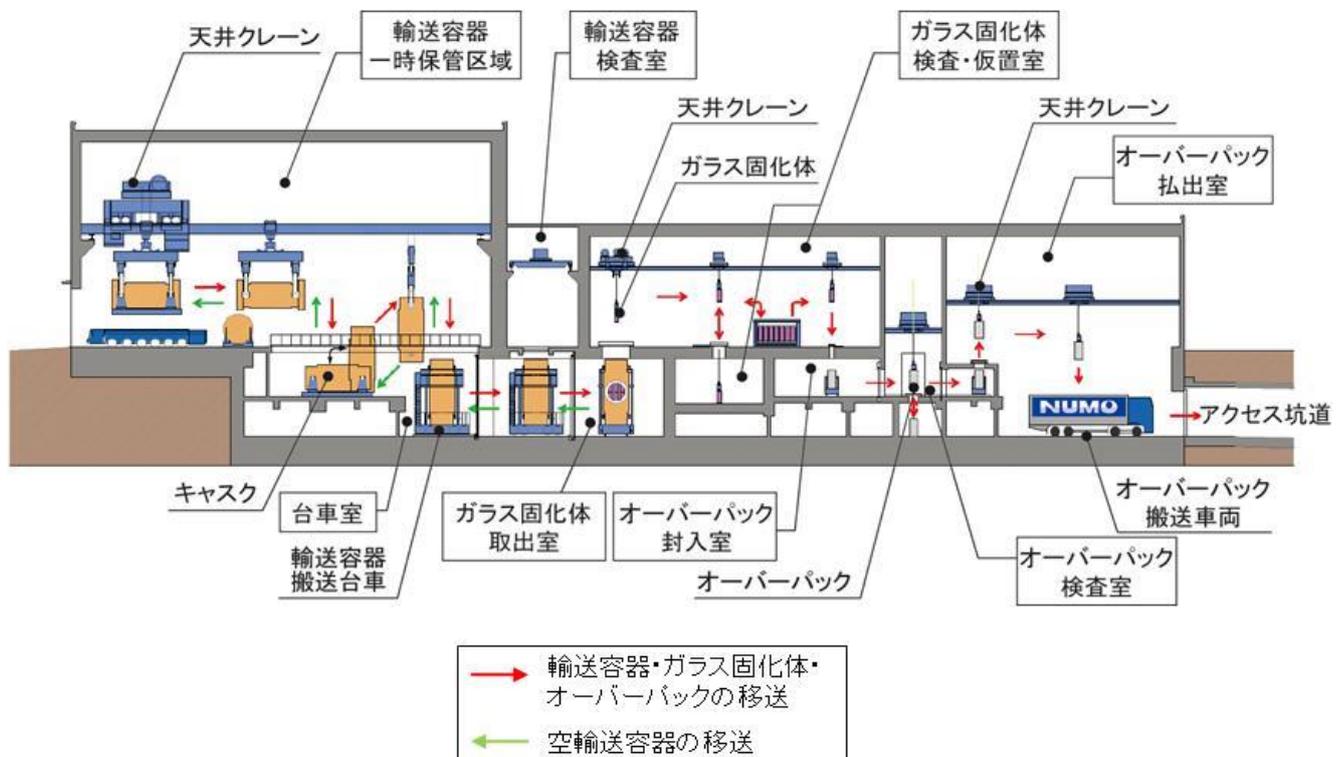
近隣の方々や作業員には廃棄体からの放射線の影響がないようにします。

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。

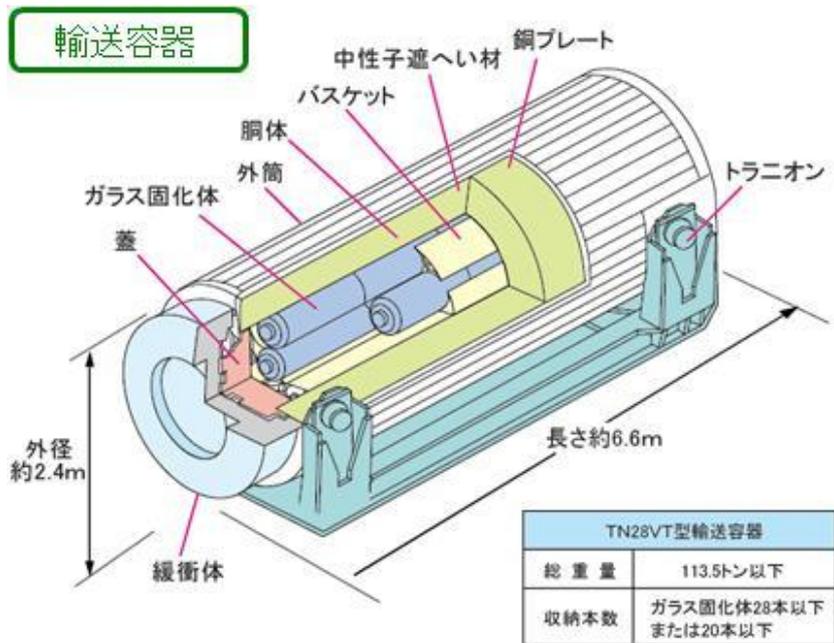
放射性廃棄物の輸送については、基準に適合した輸送容器に入れ、適切な経路を専用船や専用車両などを用いて輸送します。

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。

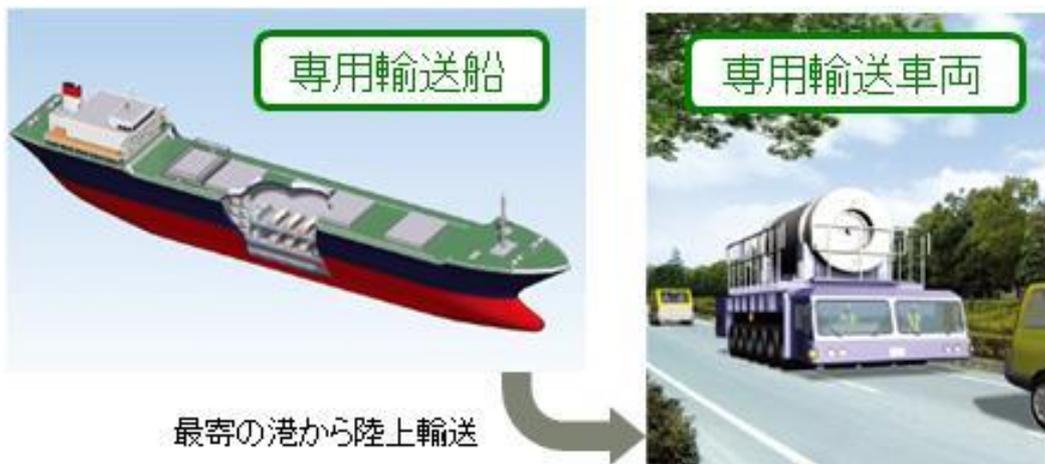
立地や設計による安全確保は、設計時・建設前は解析やシミュレーション、建設時・操業時は計測やモニタリングにより確認します。



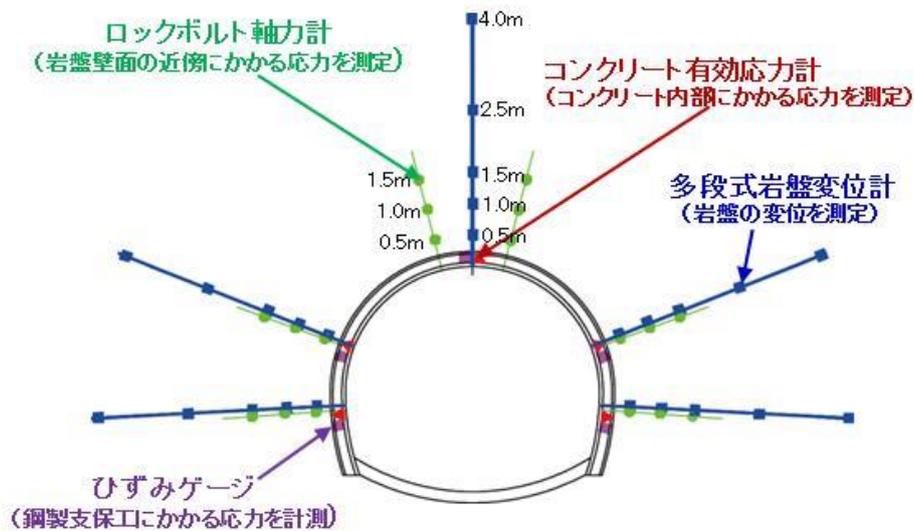
廃棄体受入・封入・検査施設における作業の流れ（高レベル放射性廃棄物の例）



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・作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、処分場の建設や作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・作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。