

10万年をこえる安全に 最新の科学技術で挑む

原子力発電によって生じる高レベル放射性廃棄物を処分する方法として、地下深くに埋設する「地層処分」が考えられています。地層処分を行う場所の選定や処分場の建設・操業などを行うために、2000年に設立されたのがNUMO（原子力発電環境整備機構）です。NUMOはあらゆる科学技術を総動員して、安全な地層処分の実現に挑んでいます。

提供：NUMO（原子力発電環境整備機構）

人工知能（AI）の急速な普及などにより、日本の電力需要は今後、増加すると予想されています。電力需要の増加に対応するための電源として、発電時に温室効果ガス（二酸化炭素）を排出せず、安定的な発電が可能な原子力発電が再評価されています。

ただし、原子力発電にはさけて通れない問題があります。それは「放射性廃棄物」の問題です。原子力発電は、ウランを燃料とし、核分裂反応によって生じるエネルギーを利用して発電します。そのため、どうしても放射性廃棄物が生じます。なかでも、強い放射線を放つ「高レベル

放射性廃棄物」の処分は、原子力発電の長年の最重要課題の一つです。

高レベル放射性廃棄物は、原子力発電を行う各国が自国内で「地層処分」することが国際的な共通認識となっています。地層処分とは、地下深くの安定した岩盤に高レベル放射性廃棄物を埋設することで、人間の

生活環境から隔離し、閉じこめる処分方法です。

地層処分は 科学技術の集合体

下の図は、地層処分を行う「処分場」のイメージです。処分場は、地上施設と地下施設から構成されます。

日本では、原子力発電所から出た使用済燃料は、まず再処理工場へと運ばれます。そこでウランやプルトニウムなどを取り出し、約95%を燃料として再利用します。再利用できない残りの約5%は廃液となります。廃液は強い放射能を持ち、発熱量も大きくなっています。

この廃液を、ガラス原料と高温で融かしあわせ、ステンレス容器の中に入れて冷やし固めます。こうしてつくられたものが「ガラス固化体」とよばれる高レベル放射性廃棄物です。処分場に埋設されるのは、使用済燃料ではなく、ガラス固化体です。

また、再処理の工程で発生する「低レベル放射性廃棄物（TRU廃棄物）」の一部も地層処分を行います。これは、発熱量は相対的に小さいものの、

放射能が低下するまでに長い時間がかかる（半減期が長い）放射性廃棄物です。

処分場に運ばれてきたガラス固化体は、地上施設で専用の容器に封入されたあと、地下へと搬送され、埋設される計画になっています。

ガラス固化体の放射能が十分に低くなるには、10年以上の時間がか

かります。その期間にガラス固化体や地下はどう変化するのか、安全に隔離するにはどのような場所にどう埋設すればよいのか。それを見定めて安全な地層処分を実現するには、人類が蓄積してきた物理学や化学、地質学、土木工学、原子力工学などの幅広い知識や技術を、最大限に活用する必要があります。

海上輸送によりガラス固化体を搬入

ガラス固化体は専用の輸送容器（キャスク）に入れられ、貯蔵施設から処分場に船などで運ばれます。

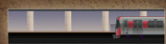


ガラス固化体を埋設する処分場

地層処分を行うための施設（処分場）のイメージです。ガラス固化体の受け入れや埋設のための準備などを行う地上施設と、ガラス固化体を埋設する地下施設に分かれています。処分場は、活断層や火山などの影響を受けるリスクが高い場所をさけて建設されます。

地下施設には、ガラス固化体を埋設するための坑道が縦横に走っています。地下300メートルよりも深い場所につくられ、広さは6～10平方キロメートルほどが想定されています。

《参考》
都営地下鉄大江戸線六本木駅の
ホーム（地下約42メートル）



ナチュラルアナログ

埋まった物が長期にわたって変化しにくいという地下の性質（閉じこめ機能）を実証する例が、いくつもみつかっています。たとえば、大阪府の下田遺跡では、約1800年前の銅鐸がきれいな保存状態でみつかっています（下の画像）。地下の閉じこめ機能を類推できる自然の現象は「ナチュラルアナログ」とよばれます。



（写真提供：公益財団法人大阪府文化財センター，資料：大阪府指定文化財，所蔵：大阪府教育委員会）

《参考》
東京タワー
（高さ333メートル）

地下施設
（地下300メートル～）

地下水の流れ
（年間約10メートル）

坑道（立坑）

「隔離機能」と「閉じこめ機能」

地下施設がつくられる深さと、地下深部が持つ特徴をえがきました。地下施設がつくられる地下300メートルという場所は、一般的に私たちが利用している地下空間とは大きくはなれており、たがいに影響を与えることはありません。

地下深部には、物質が移動しにくい（特徴1）、腐食（変化）しにくい（特徴2）といった特徴があります。10万年以上という長期間にわたって物質を閉じこめておくのに非常に適した場所なのです。

特徴1 地下水の流れがきわめて遅い

地表近くの地層は水を通しやすく、地表の傾斜（高低差）などの地形の影響も受けやすいため、地下水は比較的速く流れています。一方の地下深部では、岩盤の緻密さに加え、地形の影響がほとんどないため、地下水の流れはほとんど動いていないといえるほど、きわめてゆっくりとした状態になります。

地下水の流れ（年間数ミリメートル）

地下深部は生活圏から遠く、物の動きが遅く、さびにくい

地層処分を行う地下施設は、地下300メートルよりも深い場所につくられます。日本で最も深い場所にある地下鉄のホーム（都営大江戸線・六本木駅）は地下約42メートルですから、300メートルという深さが一般的に利用される地下空間よりもかなり深いことがわかります。地下300メートルは人間の生活環境から「隔離」された場所であり、容易に近づくことはできません。

物質が移動しにくく、さびにくい

ガラス固化体の処分場所として地下深部が選ばれるのには、いくつかの理由があります。まず地下深部は、地上にくらべて、台風や大雨などの

自然災害や、火災や事故などの人間活動の影響を受けにくい場所です。そして、地下深部は、物質を「閉じこめる」のに適した場所であることがわかっています。

地下深部の特徴として、地表や地下の浅い場所とくらべて、物質の動きが遅いことが挙げられます。地下で物を動かす主な原動力は、地下水の流れによるものです。地下深部では、地下水の流れがきわめて遅くなっています（下の図の特徴1）。

地表付近と地下深部では、地下水の性質も異なります。地下深部の地下水には、酸素がほとんど含まれていません（特徴2）。酸素は金属を腐食させる原因となる物質です。つまり、地下深部ではガラス固化体をおおう容器が腐食しにくいのです。

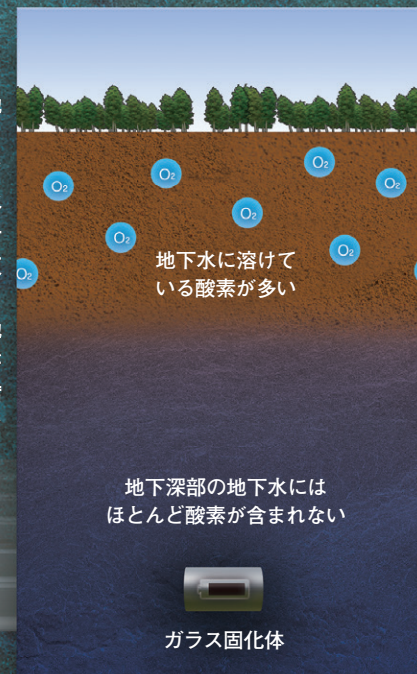
さらに、地下深部は地震によるゆれが小さいという特徴もあります。地下300メートルのゆれは、地表のゆれの2～3割ほどだといわれています。地下の岩盤はかたいので、地表にくらべてゆれにくいのです。

地層処分の10万年以上という時間は、人間の感覚だときわめて長い時間です。一方で、約46億年の地球の歴史からすれば、10万年はあっという間です。自然現象や人間の活動によっていちじるしく変化する地上にくらべて、地下には過去数十万年にわたって大きく変化せず、安定した地層が広く存在します。そのような地層を適切に選べば、10万年以上にわたって放射性物質を地下に隔離し、閉じこめることは可能だと考えられています。

特徴2 酸素がほとんどない

地表に降った雨や雪が地面にしみこんで地下水となり、地中深くに浸透していきます。その際、地下水に含まれていた酸素は岩盤中の鉱物や有機物と反応して失われていきます。

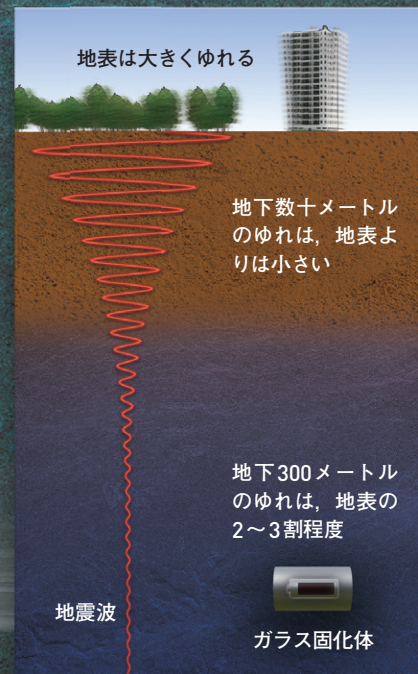
そのため、地下深部の地下水にはほとんど酸素が含まれておらず、金属が腐食しにくい環境となっています。



地下深部は地震のゆれも小さい

震源から地表に向かって地震波が伝わる時に、やわらかい地層内では、ゆれ（地震波の振幅）が大きくなるという特徴があります。そのため、同じ地震であっても、地下深部のかたい岩盤内のゆれは、地表にくらべて大幅に小さくなります。

また、地下に埋設されたあとのガラス固化体は、岩盤と一体となってゆれるため、地震のゆれによって破壊されることはないと考えられています。



放射性物質を逃さぬように人工と天然の“壁”を重ねる

放射性物質を閉じこめたガラス固化体は、地下施設に掘られた坑道にそのまま単体で埋められるわけではありません。ガラス固化体は、専用の金属容器（オーバーパック）に入れられたうえで、全体を粘土の緩衝材（ベントナイト）で包まれます。ガラス固化体を含めて3重のバリア（人工バリア）で放射性物質を閉じこめます。

人工バリアを一つに組み立てたものを「**PEM（一体型人工バリアモジュール）**」とよびます（下の図）。地上施設でPEMを組み立てたうえで地下施設

設に運び、定置する方法が考えられています。ここではPEMを定置する方法の一例を示します。

「人工バリア」が放射性物質を閉じこめるしくみ

地下施設には多くの処分坑道が掘られています（106～107ページ参照）。坑道に一定の間隔をあけながらPEMを置いていき、掘削土と粘土をまぜたもの（埋戻し材）で坑道とPEMの

すき間を埋めたら、埋設作業は完了です。埋設後も、一定期間はガラス固化体を回収できるような配慮がなされます。

最終的に処分場が閉鎖されたあと、超長期にわたって放射性物質が人間の生活環境に漏れださないようにするには、人工バリアのはたらきがきわめて重要です。強い放射能を持つ廃液をガラスとまぜて固める（ガラ

ス固化体にする）のは、ガラスは非常に水に溶けにくい性質を持ち、ガラスの中に放射性物質を閉じこめるはたらきがあるからです。

ガラス固化体を、さらに鉄（炭素鋼）製のオーバーパックに入れることで、地下水がガラス固化体に接触するのを防ぎます。それらを包む緩衝材（ベントナイト）は、水を吸うとふくらむうえ、物質を吸着しやすい

性質を持ちます。周囲から地下水がしみこんでいても、緩衝材が膨張して水の通り道を塞ぐことで地下水の動きをきわめて遅くします。

万が一、放射性物質が地下水に溶けだしても、緩衝材が放射性物質を吸着します。つまり、地下水の流れを遅くする効果と放射性物質を吸着する効果によって、放射性物質が周囲へ広がるのを長期間おさえこみ、人

工バリア内にとどめておくことができます。

人工バリアによって閉じこめられた放射性物質は、物質の移動や変化がおきにくい地下の岩盤中に埋設されます。この「人工バリア」と「天然バリア（岩盤）」を組み合わせた「多重バリア」によって、10万年という超長期にわたって放射性物質を地下深部に閉じこめておくのです。

坑道に横置きする PEM 方式

中心部にガラス固化体を収めた「PEM」が、地下施設の処分坑道に埋設されるようすをえがきました。専用の搬送装置を使って、かまぼこ形の坑道に円柱状のPEMを横置きに並べていきます。並べたあと、坑道とのすき間を埋めて、坑道を閉鎖します。

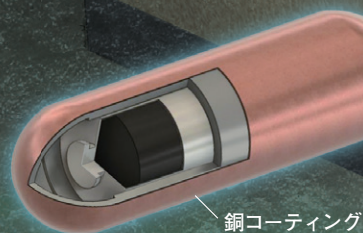
人工バリアの性能をより高めるために、オーバーパックの材料やコーティング方法などについての技術開発が、地層処分の実現をめざす海外の機関とも協力しながら進められています。

人工バリア1 ガラス固化体

ステンレス製の容器の中に、ガラスとまぜて固められた放射性物質が入っています。放射性物質は、分子レベルでガラスの中に閉じこめられます。容器を含むガラス固化体の高さは約130センチメートル、直径は約40センチメートル、重さは約500キログラムです。

人工バリア2 オーバーパック

厚さ7センチメートルほどの鉄（炭素鋼）でガラス固化体をおおうことで、ガラス固化体と地下水の接触を防ぎます。耐食性を高めるために、周囲をさらに銅でコーティングする技術（下の図）も開発されています。



銅コーティング

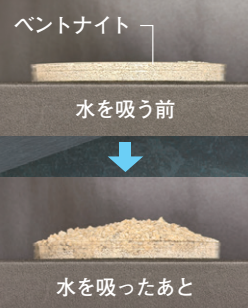
PEM (Prefabricated Engineered Barrier System Module)

オーバーパック
ガラス固化体

緩衝材

人工バリア3 緩衝材

オーバーパックの周囲を、ベントナイトという天然の粘土でおおいます。厚さは40センチメートルです。ベントナイトは、水を吸うとふくらむ性質があるため（右の写真）、すき間をなくして地下水の動きを遅くすることができます。また、放射性物質を吸着し、人工バリア内にとどめるはたらきもあります。



水を吸う前



水を吸ったあと

PEM容器：厚さ3センチメートルの鉄（炭素鋼）製の容器です。長さ約2.5メートル、直径約1.5メートル。

PEM台座：PEM容器を固定するための台座。鉄（炭素鋼）製の型枠の中に、埋戻し材（掘削土と粘土の混合物）が詰まっています。

コンクリート：坑道の床と側面、天井は、コンクリートで補強されます。

天然バリア 地下深部の岩盤

坑道の周囲の岩盤は地下水の流れがきわめて遅いため、もし放射性物質が坑道から漏れだしても、移動する速度は非常にゆっくりです。また、岩盤に放射性物質が吸着されるため、移動速度はさらに遅くなります。

たて 縦置き方式もある

ガラス固化体の埋設方法として、右の図のようにガラス固化体をたてに埋設する方式もあります。ただし、この方式では地下で坑道の床面に穴を開けたり、緩衝材を詰めたりといった作業が必要です。そのため、地上で組み立てたPEMを横置きにして坑道に並べる方式のほうが、地下での複雑な作業が減り、人工バリアの品質管理もしやすいといった利点があります。



— 活断層
▲ 火山（第四紀火山）

データ出典

活断層：https://gbank.gsj.jp/activefault/search

第四紀火山：https://gbank.gsj.jp/volcano/

日本各地にある活断層

海側のプレートから押されることで、陸側のプレートにひずみが蓄積します。それが限界をむかえると、プレート内に断層が生じます。何度もずれ動いて地震（内陸型地震）を発生させる活断層は、日本各地に2000以上存在することが知られています。

ユーラシアプレート

北アメリカプレート

プレート境界

太平洋プレート

太平洋プレート

マントル

列島を走る火山の列

日本列島では、沈みこみ型のプレート境界と並行するように火山が列をなしています。プレートが沈みこむと地下の一定の深さでマグマが生じ、それが湧き上がることで火山ができます（右下の図）。地図上に示したのは、第四紀（約258万年前から現在まで）に活動した日本の火山です。

フィリピン海プレート

フィリピン海プレート

マグマの発生と上昇

沈みこみ

日本周辺で4枚のプレートがせめぎあっている

地球の表面は、十数枚の「プレート」とよばれるかたい岩石の層におおわれています。プレートの境界では多くの地震が発生し、火山活動も活発になります。4枚のプレート（太平洋プレート、フィリピン海プレート、ユーラシアプレート、北アメリカプレート）がせめぎあう日本列島には、多くの火山と活断層があるため、処分場をつくる際にはそれらをさける必要があります。

プレートの沈みこみ

海側のプレートは陸側のプレートよりも重いため、陸側のプレートを押しながら、その下へと沈みこんでいきます。押される側のプレートの先端にたまったひずみが解放されると、プレートの境界で地震（プレート境界型地震）が発生します。

火山や活断層が多い日本で、リスクが低い場所を選ぶには

日本は世界有数の地震発生国であり、火山も多くあります。世界の国土面積の0.25%しかない日本で、毎年、世界の地震（マグニチュード6以上）の1～2割が発生しています。

また、世界の活火山（1万年以内に活発な活動が見られた火山）の約7%が日本に存在します。これは4枚もの「プレート」がせめぎあうという、世界的にも特殊な場所に日本が位置していることが原因です（左の図）。

プレートに力が加わると、プレート内の強度が弱い場所が破壊されて、ずれ動きます。ずれ動いたときの衝撃が地表まで伝わったものが地震であり、ずれ動いた場所は断層となります。過去に何度もずれ動き、今後も地震を発生させる可能性がある断層が「活断層」です。日本周辺の地下には2000以上の活断層があります。

断層活動や噴火は同じ場所でくりかえし発生する

地下深部は地層処分に適した環境とはいえ、断層のずれやマグマが地下施設を直撃してしまえば、埋設されたガラス固化体が破損して人工バリアの閉じこめ機能が失われ、隔離

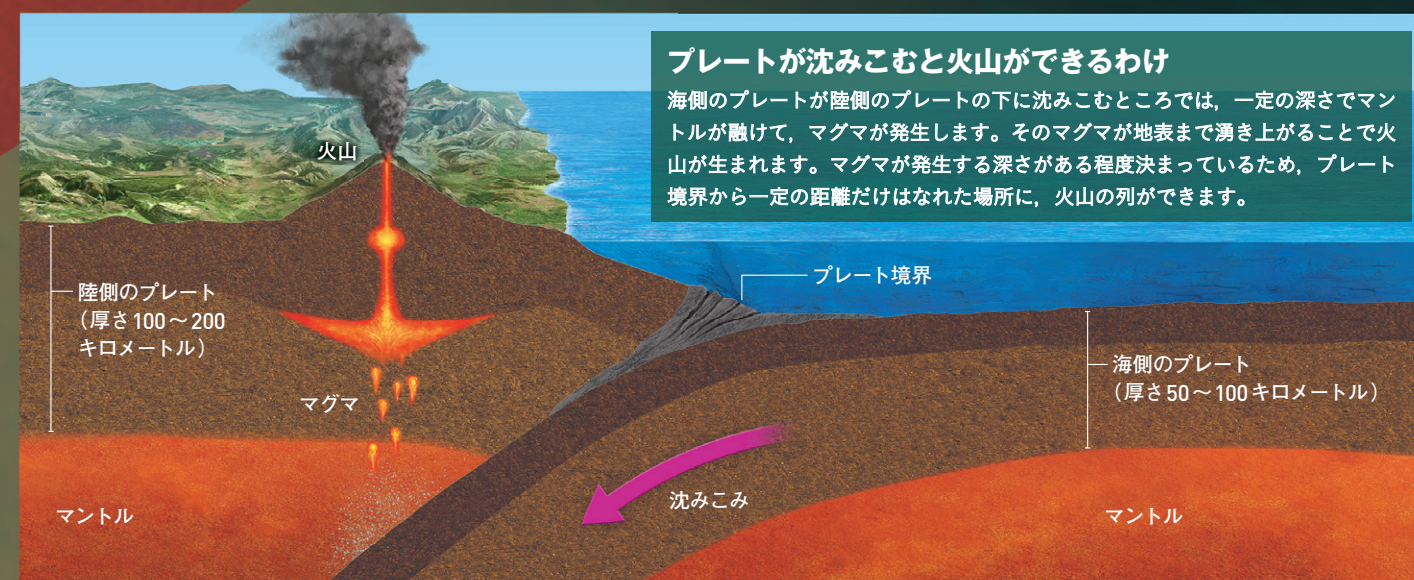
機能も失われます。活断層や火山の影響が大きい場所に処分場をつくるのはさけなくてはなりません。

日本には多くの活断層があります。また、北から南まで多くの火山があります。では日本に処分場に適した場所がないかといえば、そうではありません。活断層は同じ場所でくりかえしずれ動きますし、火山活動も同じような場所でくりかえされています。過去のデータや地質を詳しく調べれば、将来的にも断層活動や噴火がおきにくい場所を選ぶことができます。

活断層や火山のスケールからすると、処分場に必要面積はきわめて小さなものです。リスクが高い場所をさけて処分場を建設することは、可能だと考えられます。また、隆起や侵食がいちじるしい場所や地下に有用な鉱物資源がある場所も、将来的に人間の生活環境と処分場が接近したりするおそれがあるため、さけることになっています。

プレートが沈みこむと火山ができるわけ

海側のプレートが陸側のプレートの下に沈みこむところでは、一定の深さでマントルが融けて、マグマが発生します。そのマグマが地表まで湧き上がることで火山が生まれます。マグマが発生する深さがある程度決まっているため、プレート境界から一定の距離だけはなれた場所に、火山の列ができます。



調査技術と「もしも」の想定で安全を徹底的に追求する

日本ではまだ、どこに処分場をつくるかが決まっていません。様々なリスクを考慮しながら処分場に適した場所をさがす、処分地選定段階にあります。処分地の選定に向けては、「文献調査」「概要調査」「精密調査」という3段階の調査が行われます。NUMOがこれらの調査を実施したうえで、最終的に処分場を設置する場所を選定します。

地質調査を中心に 環境などへの影響も調査

第1段階の文献調査では、調査対象

地区に関する地質図や学術論文などの文献・データを調べます。文献・データにもとづき、調査対象地区における活断層や火山活動などの影響を評価します。

文献調査では、活断層や火山、地層などに関する評価・検討結果を調査対象地区の皆様に提供します。地層処分について地域で議論を深めていただく対話も、文献調査段階における重要な活動の一つです。

第2段階の概要調査では、調査対象地区で物理探査やボーリング調査などを行います。物理探査とは、海上から音波を出したり、地表で振動（擬

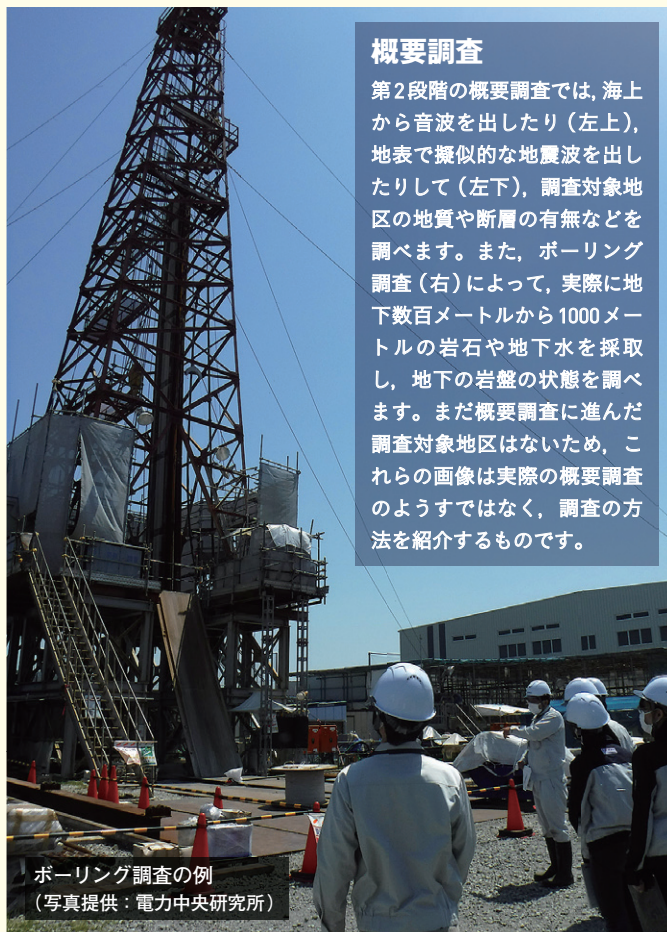
似的な地震波）をおこしたりして、その反射波を解析することで地下の状態をさぐることです（下の写真や図）。

最後の段階である精密調査では、概要調査よりも詳細に物理探査などを行ったのち、地下に調査のための坑道を掘ります。そして、地下で岩盤や地下水の状態を調べます。

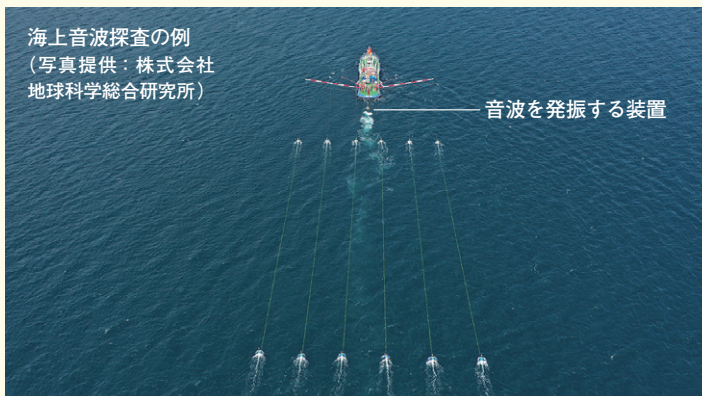
このような3段階の調査を終えて、調査対象地区の中から、処分場の建設地が選定されます。各段階の調査で行われるのは、地下の調査（地質調査）だけではありません。地上施設の安全性や、環境などへの影響についても調査が行われます。

概要調査

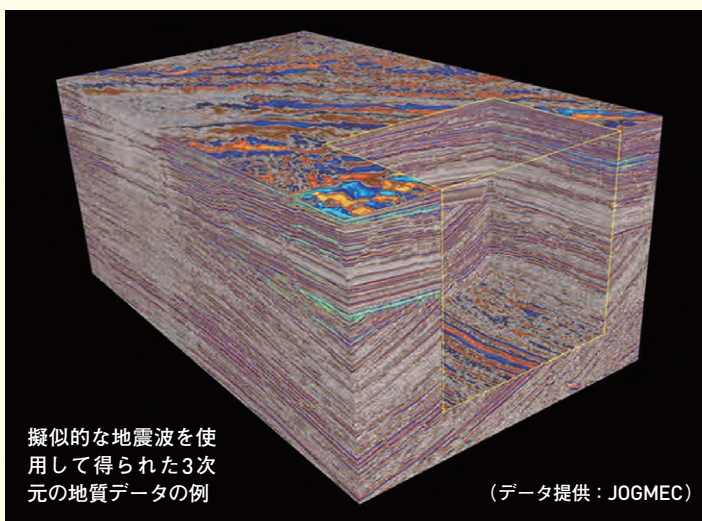
第2段階の概要調査では、海上から音波を出したり（左上）、地表で擬似的な地震波を出したりして（左下）、調査対象地区の地質や断層の有無などを調べます。また、ボーリング調査（右）によって、実際に地下数百メートルから1000メートルの岩石や地下水を採取し、地下の岩盤の状態を調べます。まだ概要調査に進んだ調査対象地区はないため、これらの画像は実際の概要調査のようすではなく、調査の方法を紹介するものです。



ボーリング調査の例
（写真提供：電力中央研究所）



海上音波探査の例
（写真提供：株式会社地球科学総合研究所）
音波を発振する装置



擬似的な地震波を使用して得られた3次元の地質データの例
（データ提供：JOGMEC）

おこりそうもない 事態も想定

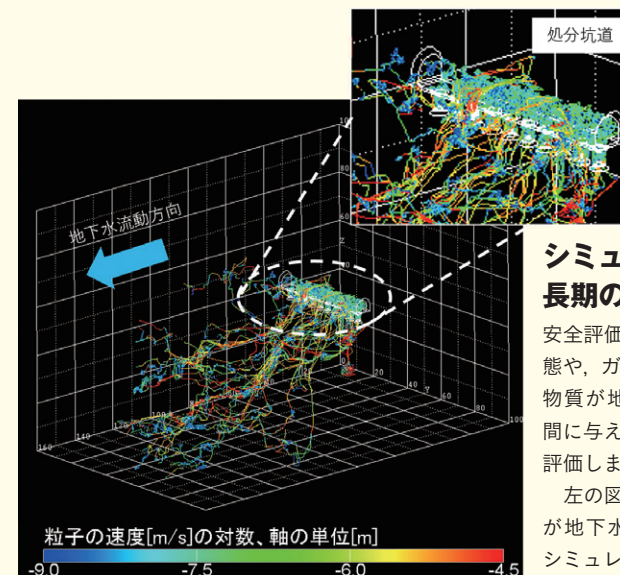
3段階の調査を進める中で、活断層や火山、地下に鉱物資源がある場所（将来的に資源開発が行われそうな場所）などは調査対象地区から除外されます。さらに、調査対象地区の特性を調査で把握し、処分場の施設の配置や人工バリアの仕様などをくふうすることによって、リスクを可能な限り小さくします。

10万年をこえる長期の安全性を評価するうえでは、おこりそうもない事態まであえて「おきる」と想定し、その影響を評価してみることもきわめて重要です。徹底的な調査の結果と最新の科学的知見をふまえ、不確実性に対しては、たとえば事前にみつかっていなかった断層や新たに生じた火山が処分場を直撃するような様々な事態を想定したシミュレーションを実施しています（右の図）。

シミュレーションの結果、処分場に断層や火山が直撃しても、人間への影響は国際的に定められている許容リスクの範囲内に収まることが示されています。

10万年をこえる安全は 実現可能

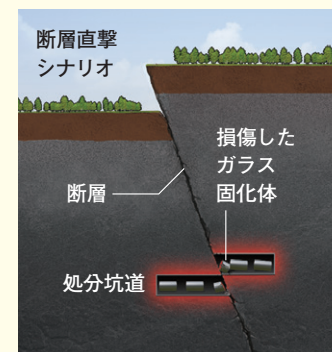
10万年という時間は、人類にとってはとほうもなく長い時間ですが、約46億年という地球の歴史からすればごくわずかな一瞬にすぎません。私たちの住む地上は、気候変動や人間の活動によっていちじるしく変化しますが、地下数百メートルの世界は、何万年、何十万年もの間、ほとんど



シミュレーションを用いた 長期の安全性の評価

安全評価では、人工バリアなどの地下の状態や、ガラス固化体から漏れだした放射性物質が地下水によって移動して地上の人間に与える影響をシミュレーションにより評価します。

左の図は、ガラス固化体中の放射性物質が地下水に溶けて移動していくようすをシミュレーションしたものです。様々な色の線が放射性物質の移動の軌跡であり、色は移動速度のちがいをあらわしています。処分坑道中にとどまるものもあれば周囲の岩盤中に移動するものもあり、移動経路は多岐にわたります。



おこりそうもない事態を想定した評価

安全評価では、地下水により放射性物質が地表へ移動する場合に加えて、おこりそうもない事態も想定しています。たとえば、建設された処分場を事前にみつかっていなかった断層が直撃したり（左の図）、新たに生じた火山のマグマが直撃したりするシナリオも評価します。

変化していません。

地層処分は、この地球がもつ「安定した地下環境」にガラス固化体を託すしくみです。人類がこれまでに蓄積してきた知識や科学技術を活用すれば、安全な処分は可能であるとNUMOは考えています。

処分場に適した場所の選び方、人工バリアの仕様、埋設の方式など、地層処分にかかわるあらゆる要素について、NUMOではよりよい方法をさぐる技術開発を行っています。

処分場の選定や建設にあたっては、科学的なデータにもとづく「安全」に加えて、心理的な「安心」も欠かせません。NUMOでは、調査対象地区周辺に暮らす方々をはじめ、関係

するすべての方々へのていねいな説明や積極的な情報公開に努めています。地層処分を実現するという使命を果たすために、あらゆる取り組みにおいて安全の確保を最優先にしながら、NUMOは今後も事業に取り組む方針です。

NUMOでは、地層処分場の安全性についてYouTubeで動画を公開しています。ぜひご覧ください。



10年以上にわたる
地層処分場の安全性

NUMO
原子力発電環境整備機構