

地層処分の安全性に関するQ&A集(案)

原子力発電環境整備機構

※5～6月に開催したシンポジウムで頂いたご質問等を踏まえ、国民のご関心に応える観点から、NUMOにて作成したもの。10月の国民対話月間に合わせてHPで公開し、シンポジウムでも配布することを予定。

目次

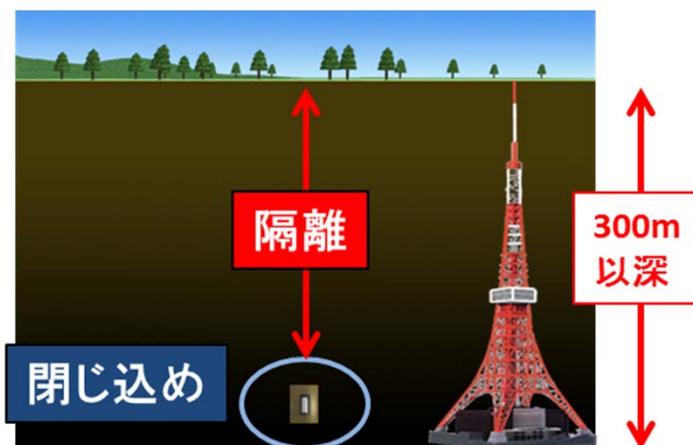
Q1 : 高レベル放射性廃棄物を数万年もの間地下で管理できるのか？	3
Q2 : ヨーロッパに比べ地層が新しく不安定な日本では地層処分はムリでは？	4
Q3 : 地震の多い日本では地層処分はムリでは？	5
Q4 : 火山国の日本では地層処分はムリでは？	6
Q5 : 地下300mよりも深いところに埋設したとしても、遠い将来地下の変動によって放射性物質が地表まで上がってくることはないのか？	7
Q6 : 断層の活動は大丈夫か？	8
Q7 : 地震等で地下水の流れが変わることはないのか？	9
Q8 : 地下研究所ではたくさんの水が出ているが地層処分は大丈夫か？	10
Q9 : 処分深度は300メートルで十分なのか？	11
Q10 : ガラス固化体になぜ割れやすいガラスを使うのか？	12
Q11 : ガラス固化体の放射能レベルは時間とともにどのように減っていくのか？	13
Q12 : オーバーパックは劣化して機能が低下するのでは？	14
Q13 : 人工バリアの緩衝材でなぜベントナイトを用いるのか？	15
Q14 : 地層処分技術が確立しているのなら、なぜ研究開発をしているのか？	16
Q15 : 長期にわたっての安全をどのように確認していくのか？	17
Q16 : 万一の事態にも安全が確保されるような対応はできているのか？	18
Q17 : 処分場がテロの対象となることを想定しているのか？	19

Q1：高レベル放射性廃棄物を数万年もの間地下で管理できるのか？

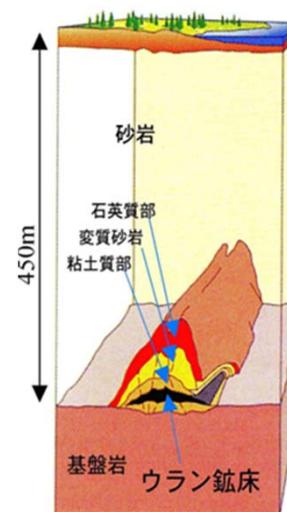
【回答】

高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)を地下深くに閉じ込め・隔離するということが地層処分の基本的な考え方です。

数万年以上の期間、人間の管理によって高レベル放射性廃棄物の安全性を確保することは困難です。そのため、地下深くに埋設することにより、地下が本来持つ閉じ込めと隔離の機能を利用して、放射性物質が人間の生活環境に影響を及ぼさないようにします。



地層処分の基本的考え方である隔離・閉じ込め



カナダのシガーレイクにおけるウラン鉱床

カナダのシガーレイクにおけるウラン鉱床では、ウランが約13億年にわたって地下に閉じ込められていましたが、地上で生活している人間には、最近になるまでその存在すらもわかっていませんでした

Q2：ヨーロッパに比べ地層が新しく不安定な日本では地層処分はムリでは？

【回答】

ヨーロッパでは20億年近く前の古い地層が存在するのに対し、わが国では古くても数億年程度の地層しかないことは事実です。

しかし、地層処分にあって地層に求めることは、大きく二つあります。一つは今後数万年間、火山や活断層の影響を受けないことであり、地層の古さと、火山や活断層の存在には直接的な関係はありません。もう一つは、処分しようとする地下深部で、地下水の流れが緩慢で、酸素がほとんどなく、また、坑道が掘削可能な強度をもっているかということで、これまでの研究から、地下深部(たとえば300m以深)であって、地層がしっかりと固まっていれば、必要な条件を満たしていると考えられています。

したがって、地層処分にとっては、必ずしもヨーロッパにあるような古い地層である必要はなく、地層処分の対象となり得る、火山や活断層がなく、処分に適した特性を持った地層(地域)は、わが国にも広く分布していると考えています。

Q3：地震の多い日本では地層処分はムリでは？

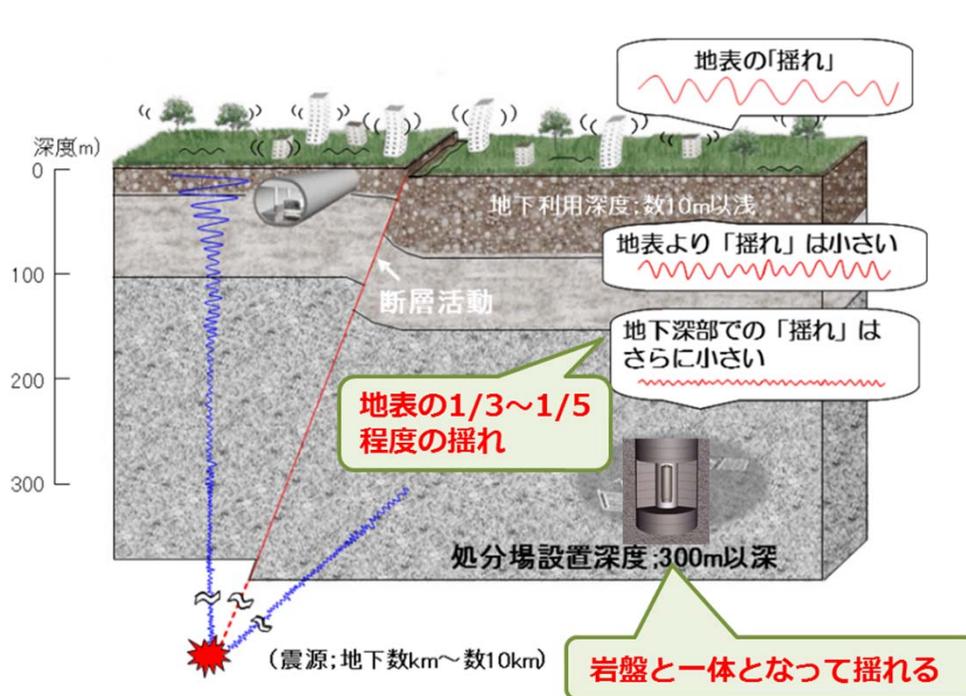
【回答】

わが国では地震の発生自体を避けることは不可能ですが、地震の揺れに対しては対策を講じることで安全を確保することは基本的に可能です。

地下の岩盤は地表付近に比べて硬く、また、地下では地表面に比べて岩盤が動きにくい状態にあるため、地震時の地下の揺れは地表に比べて小さくなります。東日本大震災の際も、地下の揺れは地表の1/3～1/5程度であったことが記録により確認されています。

また、廃棄体の埋設後は、オーバーパックと岩盤の隙間が緩衝材でしっかり充填されており、地震時には廃棄体は周囲の岩盤と一体となって揺れるため、地震の揺れによって処分場が破壊される可能性は非常に小さいと考えられます。地表に比べ、地下の被害が非常に少ないことは、阪神淡路地震、新潟県中越地震、東日本大震災などでも見られます。

これらより、地震の多い日本でも安全な地層処分は可能だと考えています。



震度7直下型地震における被害事例



地表の被害

地表の壊滅的な被害に対し、トンネルの空洞が保たれている



トンネル内の被害

新潟県山古志村の木沢トンネル (2004年10月中越地震)

(土木学会 (第1次) ・地盤工学会合同調査団 調査速報より)

Q4：火山国の日本では地層処分はムリでは？

【回答】

火山活動に伴い、マグマが処分場を直撃するようなことは避ける必要があります。

わが国の火山の分布には偏りがあります。これは、日本列島の下に潜り込む太平洋側のプレートの運動に密接に関係しています。プレート運動の傾向は、過去数百万年程度変わっておらず、火山の分布に大きな変化は見られません。将来数万年程度についてもプレート運動は継続すると考えられ、火山活動もこれまでと同様な地域で継続するものと考えられます。

従って、現在知られている火山とその周囲を避けることで、火山の直接的な影響は回避可能と考えています。

約260万年前～約80万年前 に活動した火山



日本の火山（第3版）
（産業技術総合研究所地質調査総合センター，2013）に基づいて作成

約80万年前～現在 に活動した火山



約80万年前：中期更新世の始まり
約260万年前：第四紀の始まり

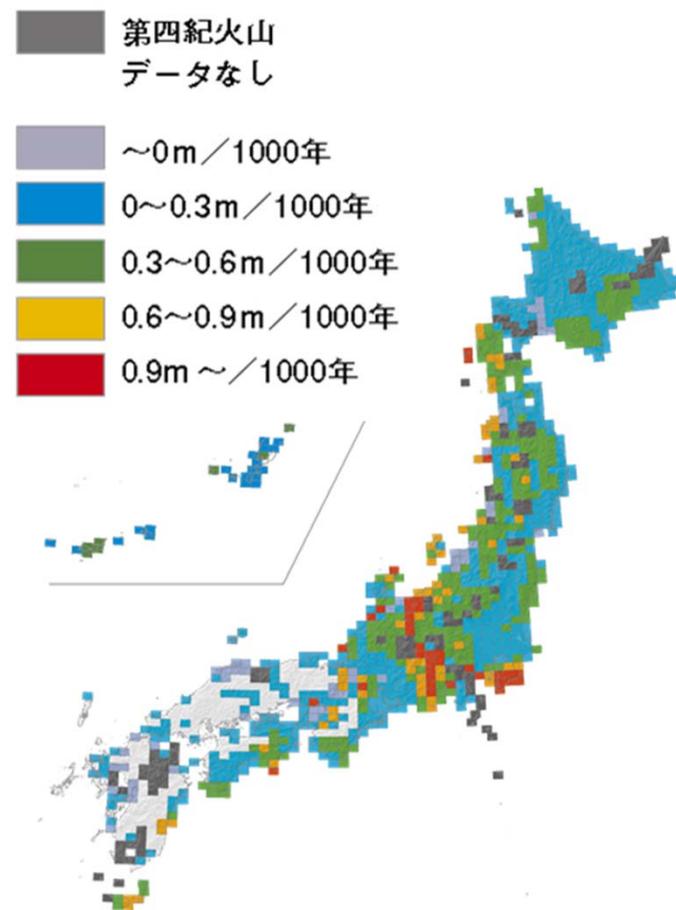
Q5：地下300mよりも深いところに埋設したとしても、遠い将来地下の変動によって放射性物質が地表まで上がってくることはないのか？

【回答】

放射性物質が地表まで上がってくる可能性として二つが考えられます。①隆起・侵食による処分場の地上への接近。②地下水による放射性物質の移動です。

①地層処分では、隆起・侵食により将来、処分場が地上に露出することがないように、隆起・侵食が著しい地域を避けるとともに、十分な深さに処分場を設置します。

②地下深部では、地下水の流れが極めて遅く、1年間に概ね数mm程度です。また、緩衝材や岩盤への吸着等により放射性核種の移動は地下水の移動よりもさらに遅くなります。そのため、仮に地下水の流れに沿って放射性物質が地表に流れ出るとしても、それまでには非常に長い期間がかかり、その間に放射能は減衰し、人間に影響のないレベルになります。



最近約10万年間の隆起速度の分布
地質リーフレット4 日本列島と地質環境
の長期安定性, 日本地質学会, 2011

Q6：断層の活動は大丈夫か？

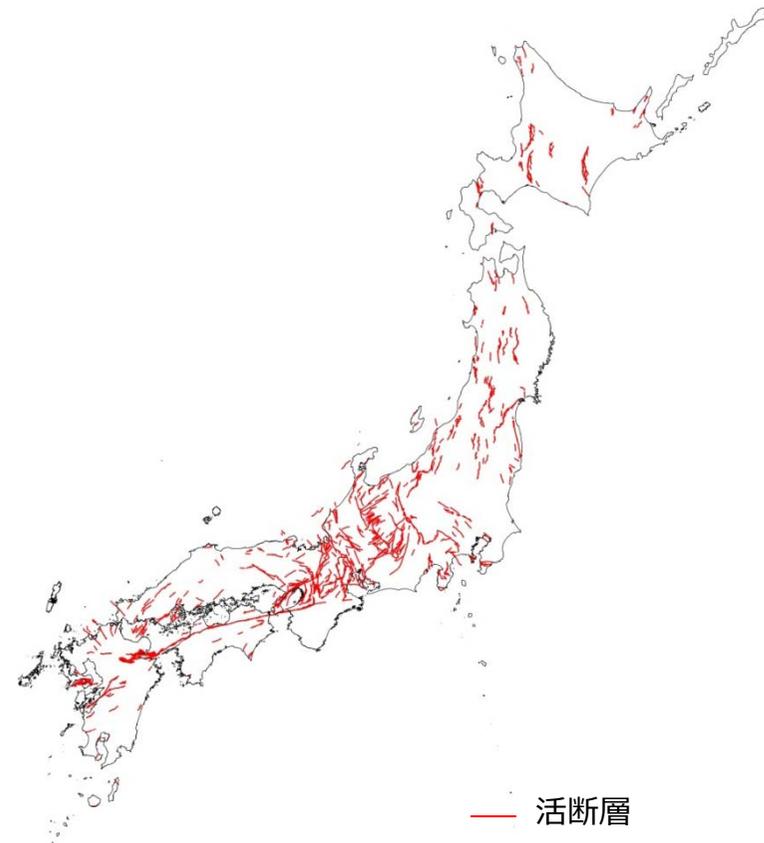
【回答】

断層活動による大規模な地層のずれは避ける必要があります。断層活動は、過去数十万年にわたり同じ場所で繰り返し発生しています。これは長期にわたり同じ傾向を示すプレート運動の結果と考えられ、将来数万年程度についてもプレート運動の傾向は同様に継続すると考えられることから、大規模な活断層が新たに発生するとは考えにくいです。

既知の活断層に加えて、物理探査やボーリング調査により、例えば、堆積物に覆われた活断層を新たに見つけることができます。それらを含め、その影響範囲を把握することで、断層活動による大規模なずれは回避可能と考えられます。

活断層：右図の活断層データベースでは、約10万年前以降に繰り返し活動した断層を活断層として扱っています。

(参考)活断層の影響範囲：断層周辺の岩盤の破壊や変形が生じている領域、ならびに将来、断層が伸展したり、分岐する可能性がある領域のこと



出典：活断層データベース（産業技術総合研究所
https://gbank.gsj.jp/activefault/index_gmap.html）

陸域の活断層分布

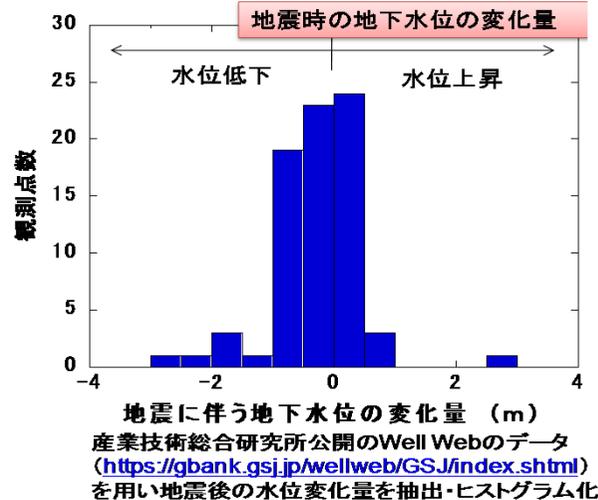
Q7：地震等で地下水の流れが変わることはないのか？

【回答】

地震の前後に温泉がわき出したり、井戸水が枯れるなどの現象は古くから知られています。ただし、そのような変化は、多くの場合一時的で、数日から長くても数年程度で元に戻ることが知られています。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震の際には、日本列島の広範囲で数十cm～数m程度の地下水位の変化が観測されましたが、ほとんどの地点で1年以内に地震発生前の状態に回復しています。また、1年以上にわたり変化が継続した場合でも、安定な状態を維持しています。このような変化は、過去に発生した他の地震でも観測されています。

なお、国内のいくつかの地点では、地震後も長期にわたり温泉が湧き出しつづけている地点もあります。このような現象が継続している原因については、その地域の地質構造とも密接に関係しているので、どこでも同じ現象が起こるわけではありません。これらの事例については、その原因について今後も研究することが必要と考えています。



2011年東北地方太平洋沖地震後、井戸の観測により得られた地下水位変化

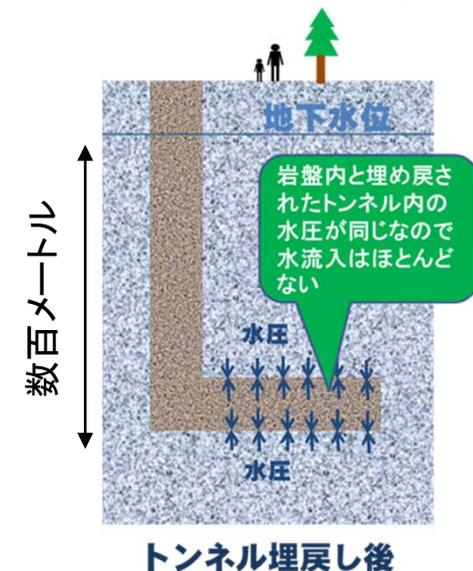
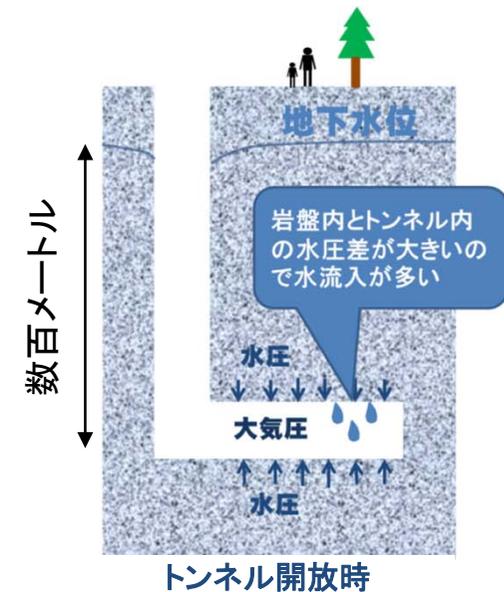
Q8：地下研究所ではたくさんの水が出ているが地層処分は大丈夫か？

【回答】

本来、地下深部では、岩盤自体が水を通しにくく、また、水を流そうとする力(圧力差)も小さいことから、地下水の流れは1年間に数mm程度と非常に遅いです。

一方、地下研究所のトンネル表面は大気圧であるのに対し、岩盤内には深度数百メートル分の水圧がかかっていますので、大きな圧力差が生じます。その結果、岩盤中のすき間からトンネル内に地下水が流入しやすくなります。

地層処分においても、地下施設を建設し、廃棄物を埋めている最中は、地下研究所と同じ状態になります。しかし、最終的にはトンネルは完全に埋め戻され、再び地下水で満たされますので、建設前の状態に戻ります。その状態では、圧力差はほとんどなくなり、地下水の移動は非常にゆっくりとした状態に戻ります。



Q9：処分深度は300メートルで十分なのか？

【回答】

処分深度については、地下300mより深くすることが法律（特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律）で定められています。

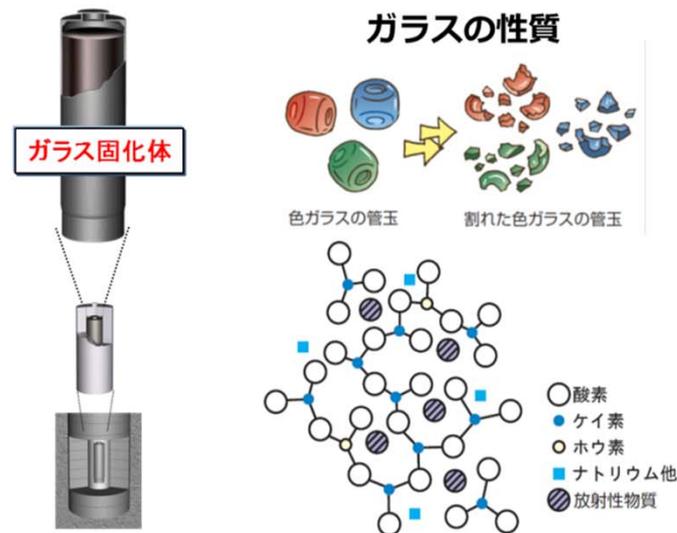
実際の処分場は、300mより深いところで、地下水の流れが遅く、酸素をほとんど含まず（還元性）、トンネルを掘削するのに十分な強度を有するなどの特性を持った十分な広がりのある地層（岩体）に設置することになります。

Q10：ガラス固化体になぜ割れやすいガラスを使うのか？

【回答】

ガラスを使うのは、色ガラスが割れても色が溶け出さないのと同様に、ガラスがいろいろな物質をその分子構造の中に取り込むことができること、そして、ガラス自体の溶解速度が低く水に溶けにくいという特長を持っているためです。

純水中でのガラスの溶解試験の結果を用いて計算すると、ガラス固化体1本に相当するガラスが溶け切るまでには約7万年かかる計算になります。現実には、人工バリアの機能によりガラス固化体に接触する地下水の量は限られますので、溶解試験のようにガラスが水に浸っている状況とは異なります。したがって、処分場では室内試験に比べて溶解が完了するまではさらに長くかかることになります。また、放射性物質はガラスと一体化しているため、仮にガラスが割れても、中から放射性物質だけが飛散・放出することはありません。



発掘された古代エジプト時代のガラス工芸品



B.C.2900年頃～B.C.300年頃に製造されたガラス工芸品が色鮮やかなまま発掘された事例
(写真提供：PPS通信社)

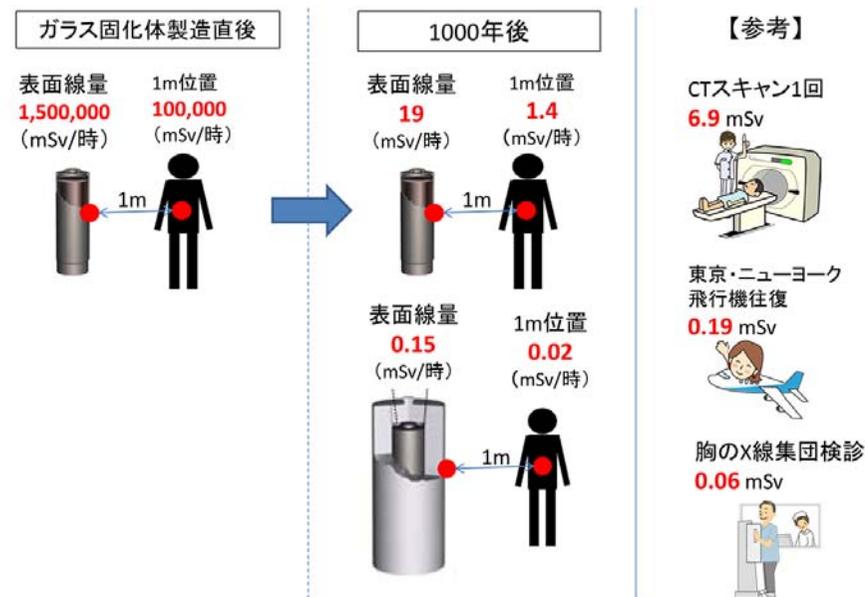
ガラス固化体が全て溶けるまで**7万年以上**かかると考えられています。

Q11：ガラス固化体の放射能レベルは時間とともにどのように減っていくのか？

【回答】

ガラス固化体の放射能は製造直後は非常に高い(2×10^{16} Bq)のですが、急速に減衰し、1000年後には製造直後の約三千分の一になります。

同様にガラス固化体表面における外部被ばく線量(表面線量)は製造時には約1,500,000mSv/時と高いですが、50年後に約160,000mSv/時、1000年後に約19mSv/時と急激に低下します。



ガラス固化体から受ける被ばく線量の低下(仮にこの位置に人間がいた場合)

Q12：オーバーパックは劣化して機能が低下するのでは？

【回答】

オーバーパックの役割は、放射能レベルが高い初期の安全性を確かなものとする事です。このため、放射能レベルが高い少なくとも1000年間については、ガラス固化体を地下水に触れさせないという機能が求められます。それ以降の期間は、オーバーパックの機能が失われても、ガラス固化体や緩衝材が人工バリアとしての機能を維持し、安全性を確保します。

オーバーパックの有力な候補材料として炭素鋼があります。地下深部では劣化(腐食)の原因となる酸素が地上に比べて極めて少ないため、炭素鋼の腐食は非常に遅く、腐食厚さは多めに見積もっても1000年間で約3cmと推定されています。

この腐食厚さを見込んでオーバーパックの厚さを決めておけば、ガラス固化体を地下水に触れさせないという機能は、必要な期間(1000年間)にわたり維持されることとなります。

さらに、出雲大社で出土した粘土に覆われた約750年前の鉄斧の腐食量(約2mm)や、長期(約10年間)の腐食試験の結果からは、オーバーパックの腐食厚さは現在見込んでいる量よりさらに小さいものと考えられます。

これらのことから、少なくとも1000年間はガラス固化体を確実に閉じ込めるという機能が維持できると考えています。



オーバーパックの概念図
(中のガラス固化体を示すためオーバーパックのカットモデルを示してあります)

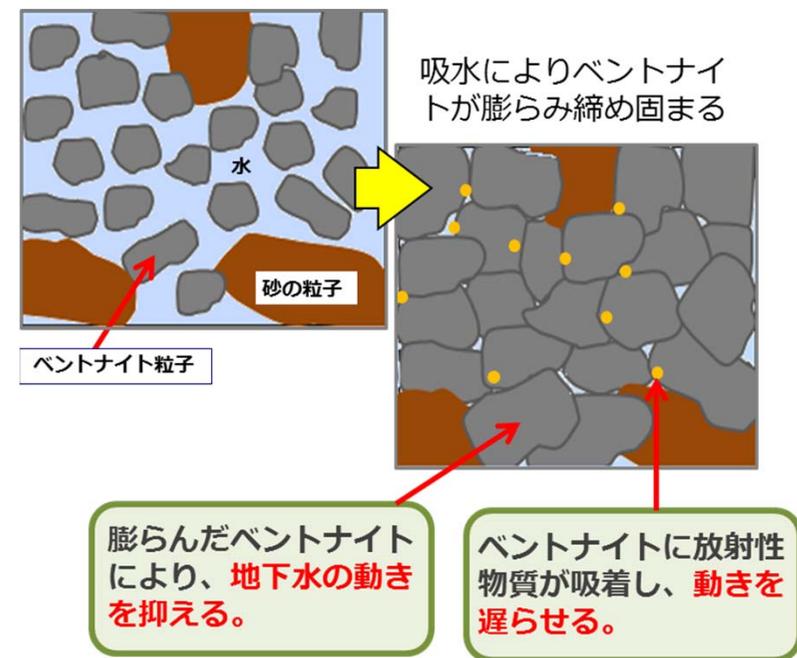
Q13 : 人工バリアの緩衝材でなぜベントナイトを用いるのか？

【回答】

ベントナイトは1970年に大阪万博が開催された際、地下約15mに埋められたタイムカプセルを地下水から5000年間にわたって守るためにも使われています。また、土木工事等でも広く用いられている材料です。

ベントナイトには水を吸って膨れる膨潤という性質があるため、自らの隙間を埋めて、水を流れにくくします。また、ベントナイトの表面は負に帯電しており、水に溶けだした放射性物質はその多くが陽イオンになるので、ベントナイト表面に吸着し、その移動を遅らせる性質も持っています。

ベントナイトを緩衝材として用いることにより、これらの性質を利用して地下水や放射性物質の移動を抑制することができます。



ベントナイトの役割の例

Q14：地層処分技術が確立しているのなら、なぜ研究開発をしているのか？

【回答】

これまでの研究開発によって、日本において、安全な地層処分を実現する技術は確立されていると考えています。

しかし、地層処分では、数万年を超える期間にわたる安全性を確保する必要があるため、将来予測をする上では不確実性が存在します。そうしたことから、安全性に係る不確実性をできるだけ低減させ、より高い信頼性を目指した研究開発を継続していく必要があると考えています。そのような研究開発には、人工バリアの長期的な挙動の評価や天然バリアの特性評価手法の高度化といった内容が含まれます。

また、国民の皆さんのお金を有効に使うという観点から、十分な安全性を確保した上で、経済性や効率性など合理的な処分を目指すことも必要と考えており、そうした研究開発も実施していきます。

Q15：長期にわたっての安全をどのように確認していくのか？

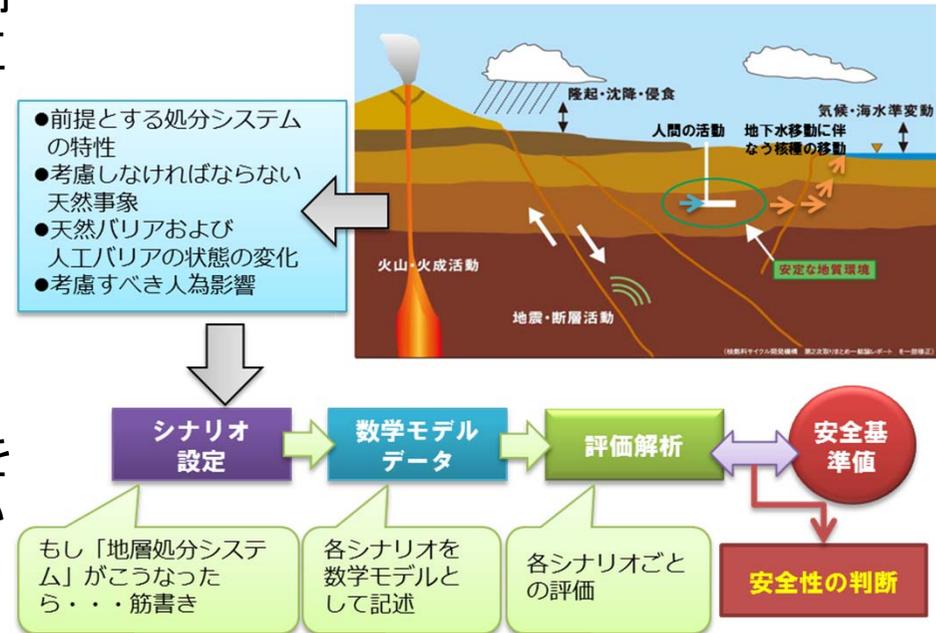
【回答】

地層処分求められる安全確保の期間は数万年以上と非常に長く、実験などで直接的に確かめることはできません。

そこで地層処分では、コンピュータシミュレーションによって予測を行い、これに基づいて安全性を評価しています。

シミュレーションによる予測計算では、将来的に起こりそうな現象を幅広く想定した上で(シナリオ設定)、それぞれの現象を数式に置き換え(数学モデル)、また、用いるパラメータの値に幅を持たせたり、保守的(厳しめの結果になるような設定)に仮定するなどして将来の安全性を評価しています。

こうした手法は諸外国でも用いられてますので、シナリオ設定やシミュレーションプログラムの開発・検証などは、国際的に連携・協力をしながら進めています。



地層処分システムの安全評価の手順

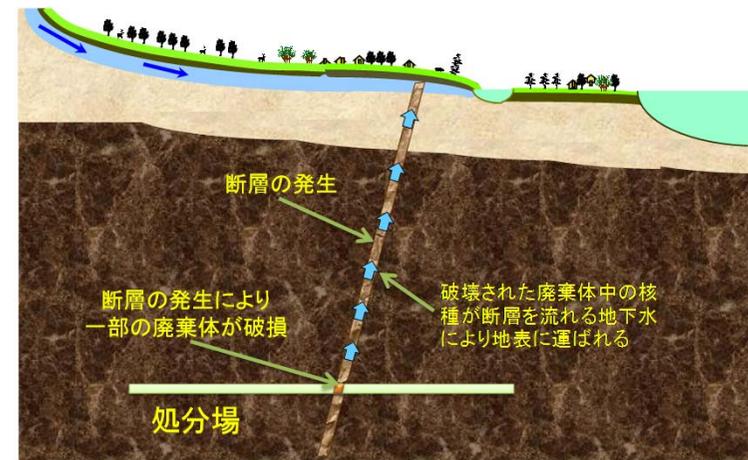
Q16：万一の事態にも安全が確保されるような対応はできているのか？

【回答】

火山や大規模な断層に関しては、3段階のサイト調査で詳細な調査を行い、それらを回避して処分場を設置することにより、閉鎖後の長期安全性に対する影響を排除します。しかし、念には念を入れて、科学技術的な知見に基づけば発生するとは考えられないような事象についても、あえてそれが発生したと想定し、コンピュータ・シミュレーションによってその影響度合いを計算することにより、安全が確保される施設であることを確認します。こうした評価により、十分に裕度を持った施設になるよう配慮することで、万一の事態にも対応できると考えています。

例えば、断層活動については、地表に到達するような大断層が閉鎖後1000年後に処分場を横切るように新たに発生し、ガラス固化体中の放射性物質が断層を介して地下水と共に人間の生活環境にもたらされるという想定をした場合でも、被ばく線量が約 $10\mu\text{Sv}/\text{年}$ （自然放射線の約240分の1）であるという計算結果が得られています¹⁾。

1) K. Miyahara et al. 2008, What-if? Calculations to Illustrate Fault-Movement Effects on a HLW Repository, Proc. of IHLRWM2008, pp.593-599.



処分場を横切るような大規模な断層の発生

Q17：処分場がテロの対象となることを想定しているのか？

【回答】

ガラス固化体に含まれる放射性物質は、再処理によりウランやプルトニウムを除いたものであり、そもそも軍事転用の価値はないものと考えられます。これらのことから、地層処分場がテロの対象にはなりえないと考えています。

ただし、作業時の廃棄物を搬送・埋設する段階でのテロ対策については、類似する原子力施設等と同様な対策を講じることとしています。

なお、地層処分は、地下300mより深い場所に放射性廃棄物を隔離するため、人間が容易に掘り起こしたり、近寄ったりすることができない処分方法です。こうした物質を地下深くに埋設すること自体が一つのテロ対策と言えます。