

地層処分技術WG第12回会合参考資料

平成27年3月

総合資源エネルギー調査会
電力・ガス事業分科会 原子力小委員会
地層処分技術WG

1. 最終処分施設に求められる地質環境特性

※説明資料2-1関連

熱環境「地温が低いこと」

(中間とりまとめ(第3章)、第11回WG資料等)

地温が低いことにより、温度による緩衝材等の変質を防ぐことが期待できる。

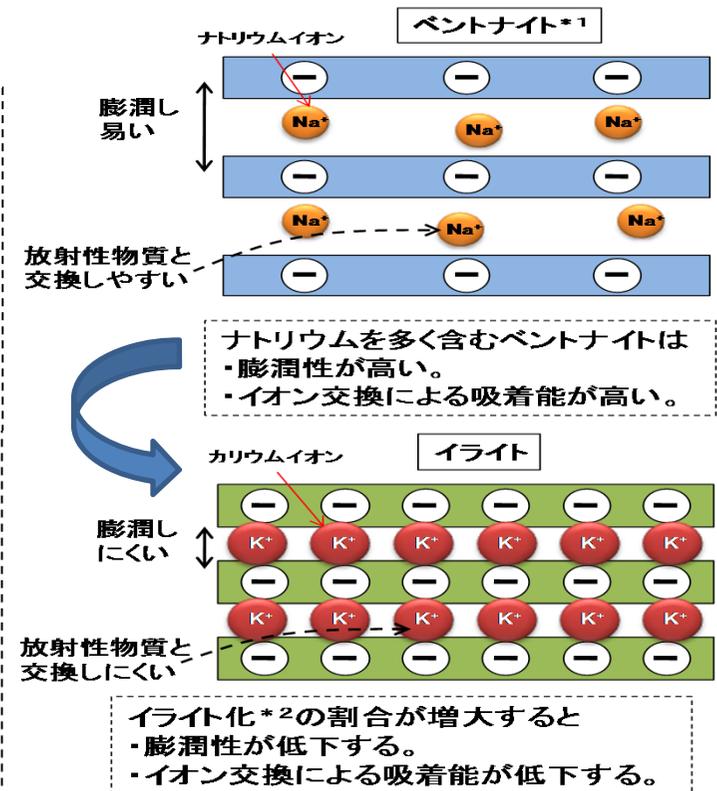


- 好ましい要件 : 処分深度で安全性が大きく向上する程度に、地温が低いこと。
- 好ましい範囲の基準: 安全性の大きな向上が見られる明確な基準が設定できない。

なぜ「地温が低いこと」が必要か

- 人工バリアのうち、緩衝材であるベントナイトについては、長期にわたり100°Cを大きく超えると鉱物学的に変化し(イライト化)、特にそれが著しい場合には、主要な機能の一部喪失につながる恐れがある。
- したがって、緩衝材の熱変質を対象として、地温が100°Cを大きく超える期間が、長期に亘り継続しないことが必要。
- 一方で、緩衝材の性能(透水係数、熱伝導率等)において、特に性能が大幅に向上するような温度を設定することは難しい。
- なお、地下深部の地温については、地温勾配によってある程度推定することが可能であり、火山地域等の高温異常域を除けば地温勾配はおおむね3~5°C/100 m程度であることは一般的知見とみなすことができる、そのため、地下深部の地温が低い環境(※)は広く存在していると考えられる。

※年平均地表温度を15°Cとし、地温勾配3~5°C/100 mとすると地温は深度300 mでは24~30°C、深度500 mでは30~40°C、深度1000 mでは45~65°Cと推定できる。



*1: 実際には、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトという鉱物が膨潤性や吸着能を有する。

*2: 100°C以上ですべてのベントナイトが直ちにイライトに変化するわけではない。カリウムが絶えず供給される条件に、100万年以上の極めて長期間さらされると、ベントナイトの一部が徐々にイライトに変化する。

力学場「岩盤の変形が小さいこと」

(中間とりまとめ(第3章)、第11回WG資料等から作成)

岩盤の変形が小さいことにより、処分場の破壊を防ぐことが期待できる。



- 好ましい要件 : 処分深度で安全性が大きく向上する程度に、岩盤の変形が小さいこと。
- 好ましい範囲の基準: 安全性の大きな向上が見られる明確な基準が設定できない。

なぜ「岩盤の変形が小さいこと」が必要か

- 地下深部では地下水の水圧や緩衝材の変形に伴う外力がオーバーパックに作用する。さらに、岩種、地形、断層や処分深度の条件によっては、岩盤中の断層変位やクリープ変形等が考えられる。
- これらに対して、岩盤の変形が著しい場合には、オーバーパックの破損を招かないように強度を上げる必要がある。(オーバーパックの厚さを増す等の対策も考えられるが、施工の難易度も高くなる。)
- よって、「岩盤の変形が小さいこと」が求められる。
- 一方で、オーバーパックの厚さは、作用する外力の中で最も大きい地下水の水圧が支配的であり、「岩盤の変形が小さいこと」の明確な基準を設定することは難しい。
- 第2次取りまとめや深地層研究所等の研究結果から、岩盤の変形については設計で対応が可能な範囲と考えられるため、好ましい特性を有する地質環境は広く存在している、

	作用外圧値 [MPa]	
	硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
地下水静水圧	9.80	4.90
岩盤のクリープ変形および腐食生成物膨潤圧による緩衝材の圧密反力	0.86 (岩盤クリープは考慮しない)	1.87
合計	10.7	6.8

・硬岩系岩盤は深度1000m、軟岩系岩盤は深度500mを想定している。

(※)オーバーパックと岩盤の間の緩衝材がない場合は、オーバーパックの腐食膨張によるオーバーパックへの反力は岩盤の変形が小さい(硬い)ほど、逆に大きくなる。

水理場「地下水流動が緩慢であること」

(「中間とりまとめ」(第3章)、第11回WG資料等)

緩やかな地下水の動きの場所を選ぶことにより、短期間に放射性物質が生活環境に放出されることを防ぐことが期待できる。



- 好ましい要件 : 安全性が大きく向上する程度に、地下水流動が緩慢であること。
- 好ましい範囲の基準 : 安全性の大きな向上が見られる明確な基準を設定することが難しい。

なぜ「地下水の流れが緩慢であること」が必要か

- 地下深部の地下水の流速が緩慢である場合、放射性物質の移行にかかる時間が長くなり、その間に放射能が減衰する。
- そのため、岩盤の低い透水性と小さい動水勾配(注1)を以て、地下水流動が緩慢であることが必要。
- 地下水流動が非常に緩慢で拡散が支配的な場(注2)は安全性が大きく向上すると考えられる。この場合、地下水移動に対する緩衝材による工学的対応が容易になる可能性がある。
- 地下水流動が非常に緩慢で拡散が支配的な場は、具体的には透水性が非常に小さい場所、動水勾配が非常に小さい場所、ならびに古い地下水が滞留している場所がこのような場になる。動水勾配については地形による影響を殆ど受けないほどの地下深部や海底下などが考えられる。
- また、海水準が下がった場合でも、地下水流動速度が緩慢である場所なども考えられる。

(注1) 動水勾配は水が流れる方向の単位距離あたりの水頭(※)の差。着目している場所を通る水の経路の始点と終点の水頭差が小さいほど、始点と終点間の距離が長いほど動水勾配は小さくなる。

(※) 水の持つエネルギー(位置、水圧など)を水柱の高さに置き換えたもの。

(注2) 放射性物質は一般的に、地下水の流れによって運ばれる「移流」と濃度の大きい場所から小さい場所へ移動する「拡散」により移行する。地下水流動が非常に緩慢である場合、移行のうち「移流」が殆ど無くなり「拡散」が移行の大部分を占めることになる。

化学場①「高pHあるいは低pHではないこと」

(「中間とりまとめ」(第3章)、第11回WG資料等)

高pHあるいは低pHでない化学環境により、短期間にオーバーパックの腐食が進み、ガラスが溶け地下水に放射性物質が溶け出すことを防ぐことが期待できる。



- 好ましい要件 : 安全性が大きく向上する程度に、高pHあるいは低pHでないこと。
- 好ましい範囲の基準 : 安全性の大きな向上が見られる明確な基準を設定することが難しい。

なぜ「高pHあるいは低pHではないこと」が必要か

- 地下水が高pHあるいは低pHの場合、ガラス固体の溶解速度が速く、放射性物質の浸出率が増加する
- また、高pHの場合はオーバーパックが不動態化し、局部腐食や応力腐食を引き起こしやすくなるが、緩衝材によるpH緩衝作用により、地下水のpHが12程度までであれば、不動態化を防ぐことができる。
- また、緩衝材が変質しやすい。
- そのため、地下水が高pHあるいは低pHではないこと(=中性付近であること)が必要。
- ただし、中性付近の領域であれば一定性能は確保されるものの、安全性が大きく向上するポイントは定められないため明確な基準の設定は難しい。

オーバーパックの腐食の違い

地下水のpHが中性付近

- 皮膜を作りにくい。
- ゆっくりと均一に腐食。

地下水が高pH条件

表面の不動態皮膜が形成されると腐食は進みにくい。

皮膜が一部欠損すると、局部的に腐食が進む。

化学場②「酸化性雰囲気ではないこと」

(「中間とりまとめ」(第3章)、第11回WG資料等)

酸化性雰囲気でない化学環境により、短期間にガラスが溶け地下水に放射性物質が溶け出すことを防ぐことが期待できる。



- 好ましい要件 : 安全性が大きく向上する程度に、酸化性雰囲気でないこと。
- 好ましい範囲の基準: 長期にわたり、酸化還元電位が負であること。

なぜ「酸化性雰囲気でないこと」が必要か

- オーバーパックは酸化性条件で、不動態化・局部腐食しやすい
- 酸化性雰囲気では、ネプツニウム(Np)など一部の放射性物質が酸化され、イオンとして溶けるようになるため、溶解度が増加する。
- 上記の放射性物質は、酸化されることで吸着の状態も変わるので、緩衝材、および天然バリアともに収着能が低下する。

Npの溶解度の常用対数(mol/kg)

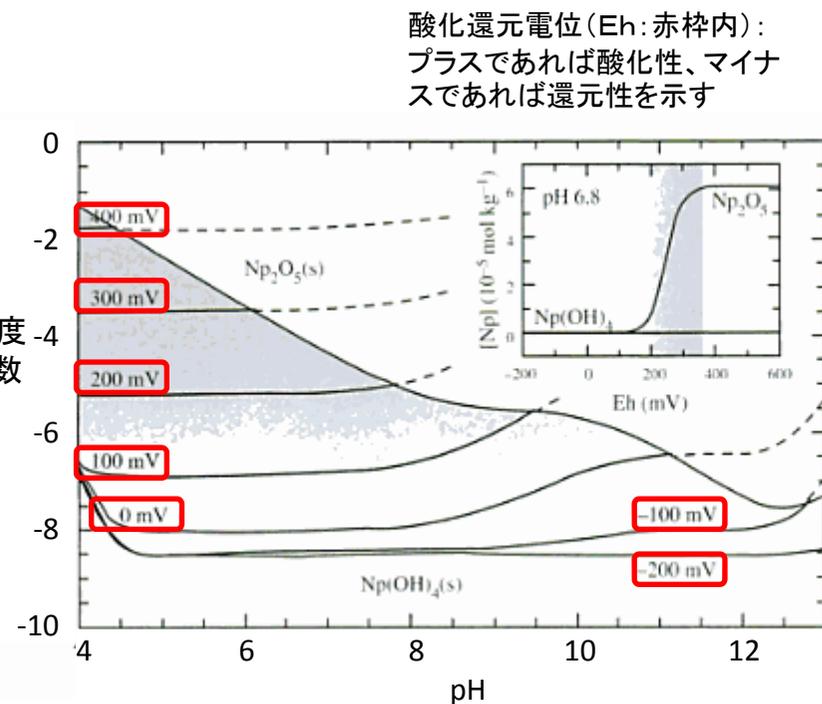


図1 酸化還元電位(Eh)の違いによる核種の溶解度の変化の例

Lollar(Ed.) (2005): "Environmental geochemistry", p.235.

化学場③「炭酸化学種濃度が低いこと」

(「中間とりまとめ」(第3章)、第11回WG資料等)

炭酸化学種濃度が低い化学環境により、短期間にオーバーパックスの腐食が進み、地下水に放射性物質が溶け出すことを防ぐことが期待できる。



- 好ましい要件 : 安全性が大きく向上する程度に、炭酸化学種濃度が低いこと。
- 好ましい範囲の基準 : 安全性の大きな向上が見られる明確な基準を設定することが難しい。

なぜ「炭酸化学種濃度が低いこと」が必要か

- 炭酸化学種濃度が 0.5 mol/dm^3 以上となる条件ではオーバーパックスが不動態化、局部腐食を招きやすくなる
- 一方、炭酸化学種濃度が 0.5 mol/dm^3 未満であれば人工バリアの安全機能は確保されるものの、炭酸化学種濃度が小さいほど人工バリアの安全性が大きく向上するわけではないため、明確な基準の設定は難しい。

オーバーパックスの腐食の違い

炭酸化学種濃度が低い

- 皮膜を作りにくい。
- ゆっくりと均一に腐食。

炭酸化学種濃度が高い

表面の不動態皮膜が形成されると腐食は進みにくい。

皮膜が一部欠損すると、局所的に腐食が進む。

2. 地質環境の長期安定性について

※説明資料2-2. 関連

火山に関連する現象 (マグマの処分場への貫入と地表への噴出)

(第10回WG資料等)

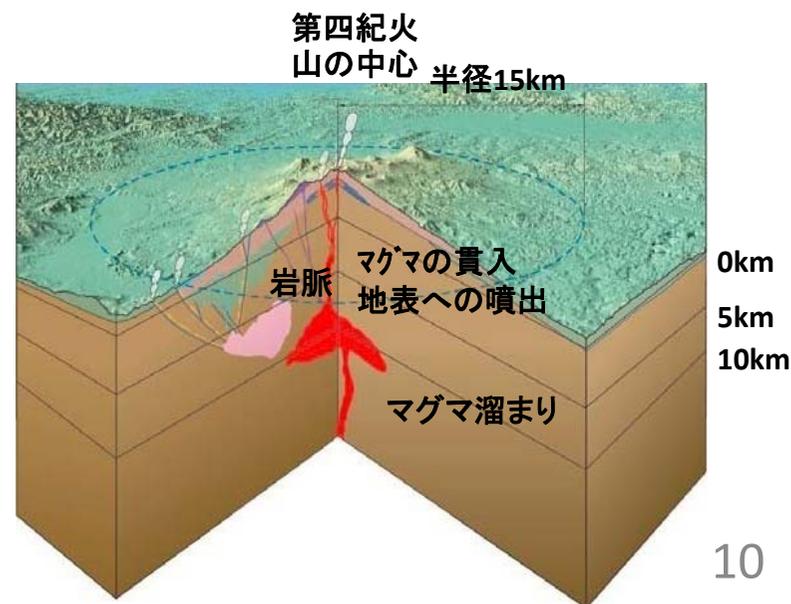
マグマの処分場への貫入と地表への噴出により、放射性廃棄物と人間が直接接触するリスクがある。



- 回避に係る要件: マグマの処分場への貫入と地表への噴出により、物理的隔離機能が喪失されないこと。
- 回避すべき範囲の基準: 第四紀火山から15km内および第四紀の火山活動範囲が15kmを超える巨大カルデラの範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準: -
- 全国規模の文献・データ: 日本の火山(第3版)(産総研地質調査総合センター, 2013)

設定の根拠

- 第四紀(約260万年～現在)の間の火山活動の場所に大きな変化は認められず、将来数万年以上にわたっても同様の傾向を示すと考えられる。
- 多くの火山では過去のマグマの活動は半径15km程度の範囲に収まっている。ただし、大規模なカルデラを有する火山ではこの範囲を超えている場合もある。
- 第四紀に活動した火山の位置やカルデラの範囲などをまとめた全国規模の文献・データが存在することから、これを用いて回避すべき範囲を科学的有望地として除外



隆起・侵食に関連する現象

(第10回WG資料等)

隆起・侵食により地表と処分場の距離が縮まることにより、放射性廃棄物と人間が直接接触するリスクがある。



- 回避に係る要件: 著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近により、物理的隔離機能が喪失されないこと。
- 回避すべき範囲の基準: 過去十万年における最大侵食量が300mを超えたことが明らかな範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準: 隆起速度が90m以上/10万年である沿岸部
- 全国規模の文献・データ: 最近約10万年間の隆起速度の分布(地質リーフレット4 日本地質学会、地質環境の長期安定性研究委員会 編 2011)

設定の根拠

- 過去10万年間の最大侵食量が300mを超えていた場所は、将来、侵食が著しく大きく、処分場が地表へ著しく接近すると考えられるが、全国規模の文献・データは無い。
- 過去約10万年間の隆起速度の全国分布図があり、区分値の最大は「90m/10万年以上」。
- 保守的に隆起した分だけ侵食されることを想定し、沿岸部はさらに保守的に海面が低下して陸化した分(最大150m/10万年)も侵食されると想定すると、沿岸部の「90m/10万年以上」の場所は、将来、侵食が著しく大きく、処分場が地表へ著しく接近または露出する可能性が大きい。



隆起に伴う侵食

- ・海底面が隆起して陸化すると河川などにより侵食される。
- ・全国規模の文献には、隆起量が大きい地域として、過去10万年間の隆起量が90m以上の場所が示してある。

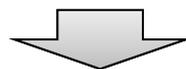
海面低下に伴う侵食

- ・海面が低下して陸化する場合も、隆起の場合と同様に侵食が起こる。
- ・過去10万年間に海面は現在より最大150m程度低下している。

火山に関連する現象（地熱活動）

（第10回WG資料等）

地熱活動に伴う熱が緩衝材を変質させ、放射性物質を吸着する機能が低下することにより、放射性物質が早く生活環境に出てくるリスクがある。

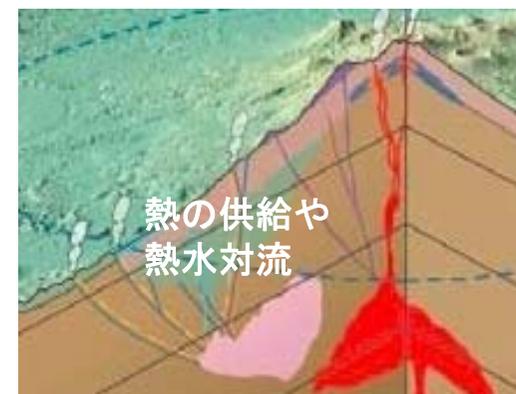


- 回避に係る要件：処分システムに著しい熱的影響を及ぼす地熱活動により、閉じ込め機能が喪失されないこと。
- 回避すべき範囲の基準：・処分深度で地温が長期に100°Cを大きく超える範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準：処分深度で100°Cを超えるような地温勾配の範囲。
- 全国規模の文献・データ：日本列島の地温勾配コンター図と活火山の分布（日本地質学会リーフレット，2011）等

設定の根拠

- 緩衝材は長期間100°Cを大きく超えると変質しやすい。
- 長期間100°Cを大きく超える範囲を示す、全国規模の文献・データは現状ないため、代わりに全国規模の情報のある地温勾配を用いて処分深度の地温を推定し、100°Cを超える地温勾配の地域を回避が好ましい範囲の基準として設定。
(地表温15°Cとすると、処分深度が300mの場合28.3°C/100m、1000mの場合8.5°C/100m)

火山周辺の地熱活動



活動を終えたマグマ溜まり マグマ溜まり

火山性熱水、深部流体に関連する現象

(第10回WG資料等)

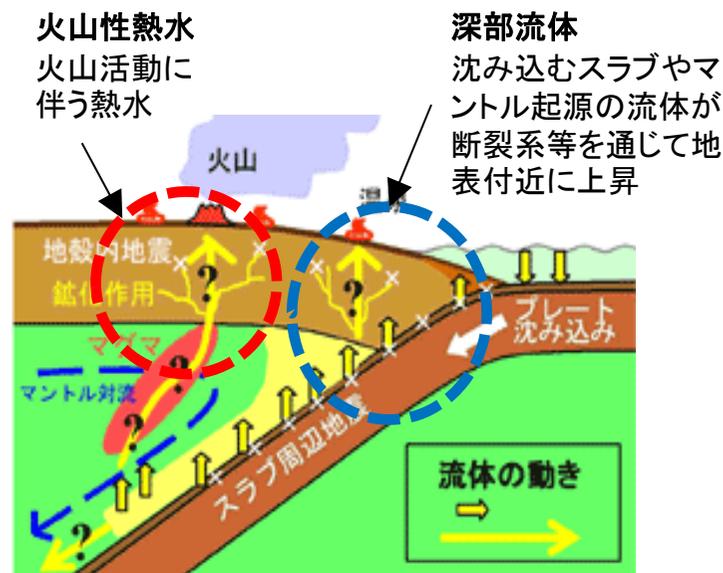
ガラスを溶かしやすくする、オーバーパックを腐食しやすくすることなどの特性を持つ地下水により、放射性物質が早く生活環境に出てくるリスクがある。



- 回避に係る要件: 処分システムに著しい化学的影響を及ぼす火山性熱水や深部流体の流入により、閉じ込め機能が喪失されないこと。
- 回避すべき範囲の基準: 処分深度に火山性熱水または深部流体が存在し、かつ化学場への影響が明らかな範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準: 地下水が酸性あるいは炭酸化学種濃度 $0.5\text{mol}/\text{dm}^3$ 以上を示す範囲。
- 全国規模の文献・データ: 深層地下水データベース(高橋ほか, 産総研地質調査総合センター, 2011)など

設定の根拠

- 酸性の地下水の場合、ガラスや放射性物質が溶けやすくなる。酸性の目安として、「pH4.8未満」を用いる(第2次取りまとめ注1, 腐食防食協会(2001)注2など)。注1)分冊1(2.4.2,5)熱水の化学組成「4.8未満は自然界における実質的な酸性領域」、注2)腐食・防食ハンドブックCD-ROM版(1.1.3淡水のpHと炭酸塩平衡)
- 炭酸化学種が地下水中に $0.5\text{mol}/\text{dm}^3$ 以上含まれている場合、オーバーパックの腐食速度が大きくなる可能性がある。
- 火山性熱水や深部流体など起源と共に整理した全国規模の文献・データが現状ないため、保守的に上記特徴をもった地下水の存在する場所を回避が好ましい範囲として設定



文部科学省科学研究費補助金新学術領域研究(研究領域提案型)「地殻流体: その実態と沈み込み変動への役割」より 13
<http://www.geofluids.titech.ac.jp/a03.html>

断層活動に関連する現象

(第10回WG資料等)

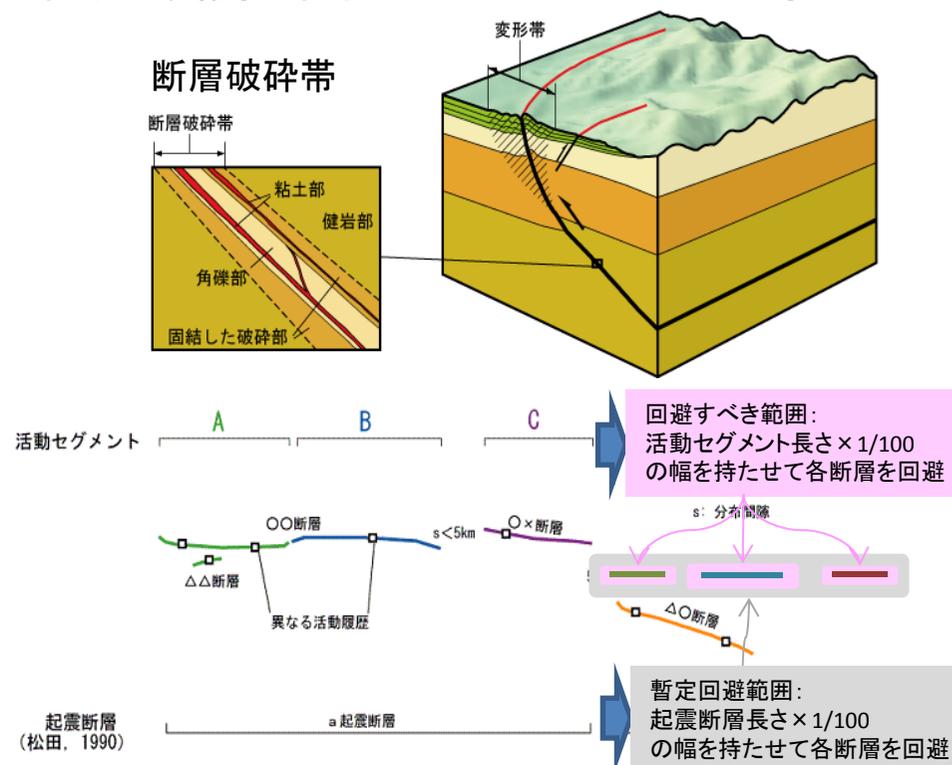
断層活動により処分場が破壊されると共に、断層の透水性が高まり地下水が流れやすくなるなどにより、放射性物質が早く生活環境に出てくるリスクがある。



- 回避に係る要件:断層活動による処分場の破壊、断層のずれに伴う透水性の増加等閉じ込め機能が喪失されないこと。
- 回避すべき範囲の基準:活断層に、活動セグメント長さの1/100の幅を持たせた範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準:活断層に、起震断層長さの1/100の幅を持たせた範囲。
- 全国規模の文献・データ:活断層データベース(産総研地質調査総合センターウェブサイト)等

設定の根拠

- 活断層(最近の地質時代(約200万年前~)において繰り返し活動し、変位規模の大きい既知の断層)は、将来数万年程度もほぼ同じ場所で同様の活動を繰り返すと考えられる
- 断層活動に伴って地層が破碎された範囲(破碎帯)は将来の断層活動によりずれを発生する可能性が考えられる。
- 破碎帯の幅は、断層の長さの1/100~1/350程度との知見がある。
- 活断層に関する全国規模のデータとして、地震を繰り返す最小単位「活動セグメント」と、いくつかの活動セグメントと一緒に活動する可能性が高いグループ「起震断層」が整備されている。



起震断層と活動セグメントの模式図

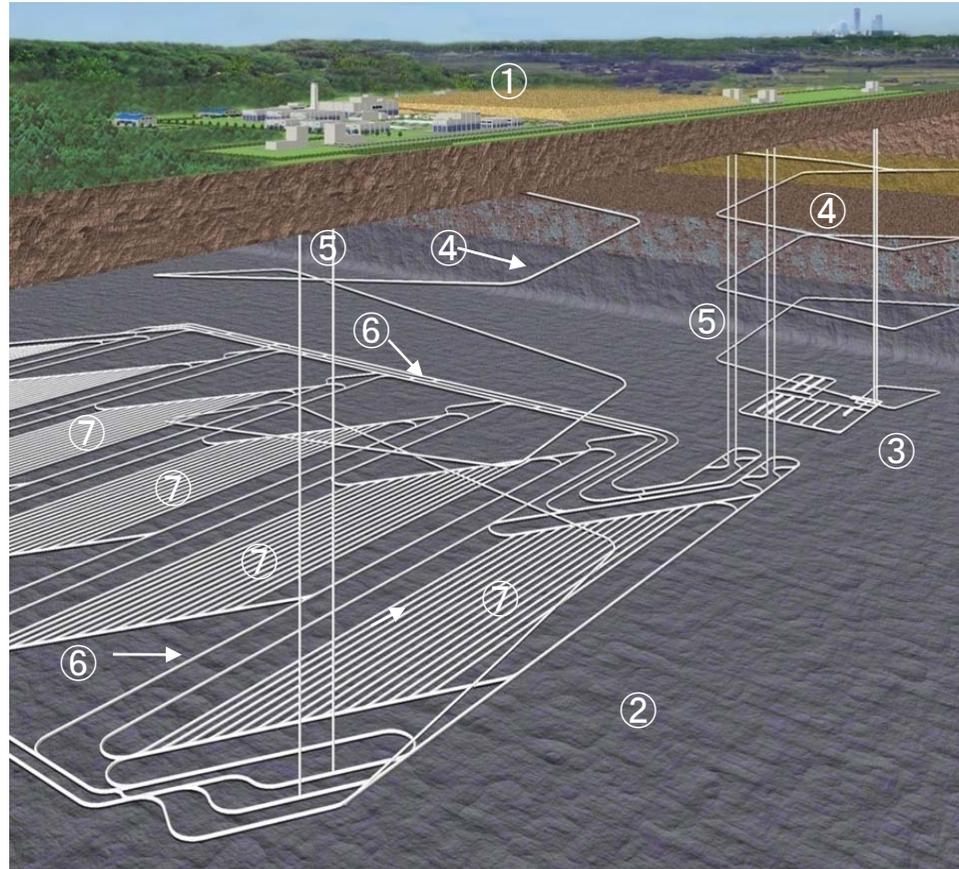
3. 地下施設建設・操業時の安全性確保について

※説明資料2-3関連

地下施設のイメージ

(第9回WG資料等)

- 埋設後長期の物理的隔離機能を担保するため、地下300mより深い、安定した岩盤に地下施設を設置することが求められている。



地下施設の配置例

- ①地上施設、②高レベル放射性廃棄物処分場の地下施設、③地層処分低レベル放射性廃棄物処分場の地下施設、④斜坑、⑤立坑、⑥連絡坑道、⑦処分パネル(処分坑道の集合した区画)
(「処分場の概要(放射性廃棄物の地層処分事業について 分冊-1)」より)

未固結堆積物

(第11回WG資料等)

未固結堆積物中に延長の長い坑道を掘削する場合、適切な対策を講じても、坑道が崩壊する潜在的危険性ある。

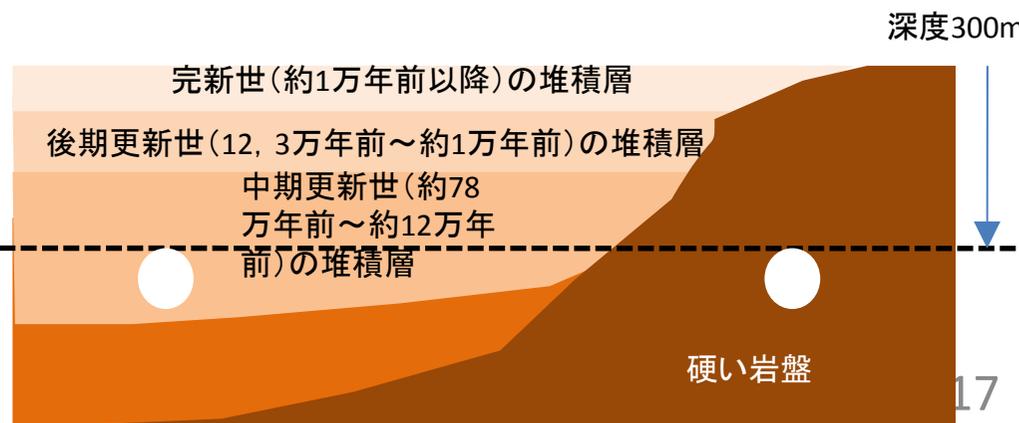


- 回避に係る要件: 処分場の地層が第四紀未固結堆積物でないこと。
- 回避すべき範囲の基準: 処分深度に第四紀(約258万年前以降)未固結堆積物層が分布する範囲。
- 回避が好ましい範囲の基準: 深度300mまで中期更新世(約78万年前以降)の地層が分布する範囲。
- 全国規模の文献・データ: 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(越谷・丸井, 2012)

設定の根拠

- 未固結堆積物の深度方向の分布を全国規模で示した文献は現状ない。地質の形成年代と地層の強度にはある程度の相関があり、約78万年前(中期更新世)以降に形成した地層は概ね未固結堆積物の地層に相当するので、これを代替指標とする。
- 最終処分法では、処分深度は300m以深と規定されている。

軟らかい表層地盤



高い地熱

(第11回WG資料等)

地温が著しく高い場合、コンクリート支保の性能低下による坑道が崩落、湧水が水蒸気で噴出、また作業環境の悪化による健康被害などのリスクがある。



- 好ましい要件: 高温の地盤に対して、工学的対応により、安全性が大きく向上すること。
- 好ましい範囲の基準: 処分深度での地温が45°C以下となる地温勾配の範囲。
- 全国規模の文献・データ: 日本列島の地温勾配コンター図と活火山の分布(日本地質学会リーフレット, 2011)等

設定の根拠

- 建設中の作業従事者の作業環境として、トンネル内の温度は法令*で37°C以下に維持することが必要
- 一般的なトンネル工事では、通常換気設備だけでトンネル内温度を法定温度以下に調整しているが、地温が高すぎる場合、換気設備だけでなく冷房設備を導入しなければ、法定温度以下にはできない。
- 換気設備だけで坑内温度37°C以下にするためには、地温が45°C程度以下であることが目安となる。
- 処分深度における地温そのものを示す、全国規模の文献・データは現状ないため、代わりに全国規模の情報のある地温勾配を用いて処分深度の地温を推定し、45°C以下の地温勾配の地域を好ましい範囲とした。
(地上温度15°C、上限地温が45°C程度とすると、処分深度が300mの場合で10°C/100m以下)

* 労働安全衛生規則 第611条

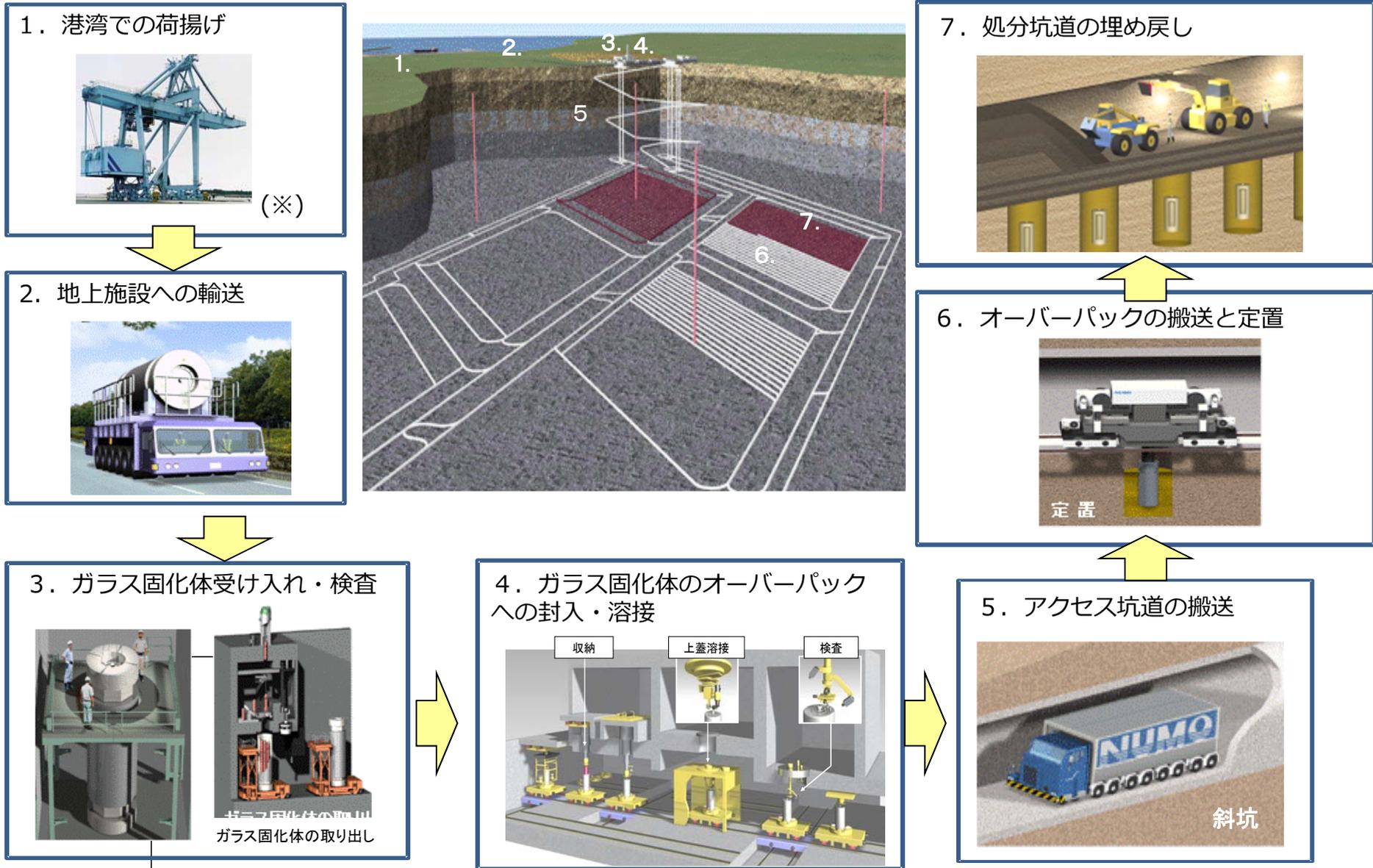


4. 地上施設操業時の安全性確保について

※説明資料2-4関連

地上施設における作業全体の流れ

(第9回WG資料等)



(※原燃輸送ウェブサイト <http://www.nft.co.jp/equipment/equipment3.html>)

地上施設の例

(第9回WG資料等)

サイト内: 廃棄物の受入・検査・封入施設(①②※)、緩衝材製作施設(③)、換気施設(④)、排水処理施設(⑤)、掘削土の仮置き場(⑥)

サイト外: 港湾(⑦)、輸送道路(⑧)

(※) ①高レベル放射性廃棄物、②地層処分低レベル放射性廃棄物



⑦



地上施設および港湾施設

(「処分場の概要(放射性廃棄物の地層処分事業について 分冊-1)」より)

火山の影響

(第11回WG資料等)

操業時に火砕物密度流等による影響が発生することにより、施設の安全性が損なわれるリスクがある。



- 回避に係る要件: 操業時に火砕物密度流等による影響が発生することにより施設の安全性が損なわれないこと。
- 回避すべき範囲の基準: (現地調査による詳細な情報を基に個別具体的に判断するため、設定せず)
- 回避が好ましい範囲の基準: 約1万年前以降の火砕流、溶岩流などの跡の分布範囲。
- 全国規模の文献・データ: 20万分の1日本シームレス地質図(産総研地質調査総合センターウェブサイト)

設定の根拠

- 施設の操業期間中に活動する可能性がある火山を抽出し、設計で対応できない火砕流、溶岩流などの影響がある場合は回避が必要
- 完新世に活動を行った火山は、将来の活動可能性があるものとして広く受け入れられていることから、これを将来活動の可能性のある火山とする。これより古い火山については現地調査の上、影響を評価する。
- 現地調査の上、詳細な影響評価が必要なため現時点では回避すべき範囲は設定は難しい。
- 代わりに全国規模の文献・データがある、完新世の火砕流堆積物、火山岩(溶岩が固まったもの)、火山岩屑の分布域を回避が好ましい範囲とする。



雲仙岳の火砕流 (平成6年6月24日)



伊豆大島噴火の溶岩流 (昭和61年11月19日)

気象庁ウェブサイト、主な火山災害

(<http://www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsu/volsaigai/saigai.html>)より

施設を支持する地盤

(第11回WG資料等)

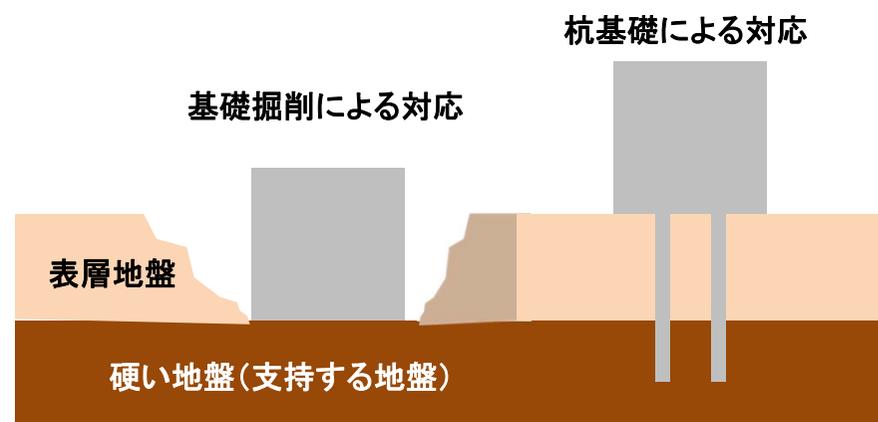
施設の十分な支持性能を発揮させ、安全を確保するため、重要な施設は硬い地盤に支持させることが期待される。



- 好ましい要件: 施設を支持する地盤への対応に際し、工学的対応により安全性が大きく向上すること。
- 好ましい範囲の基準: 中期更新世(約78万年前)以降の地層の厚さが既往の基礎掘削等の深さより小さい範囲。
- 全国規模の文献・データ: 日本列島における地下水賦存量の試算に用いた堆積物の地層境界面と層厚の三次元モデル(越谷・丸井, 2012)

設定の根拠

- 硬い地盤を軟らかい表層地盤が覆っているときは、表層地盤を掘削して硬い地盤を露出させる(基礎掘削)か、硬い地盤まで杭を伸ばして施設を支える(杭基礎)。
- 原子力関係施設で、硬い地盤に支持させたため基礎掘削や杭基礎で対応した深さの実績は数十mであり最大50m程度。
- 軟らかい表層地盤の厚さが、既往の最大基礎掘削厚さ以下であれば、より確実な安全確保が期待できる。
- 施設を支持できない軟らかい表層地盤として、約78万年前以降(中期更新世～完新世)に堆積した地盤が相当すると考えられる。



津波

(第11回WG資料等)

津波の影響により、施設の安全性が損なわれないことが期待される。



- 好ましい要件: 津波への対応に際して、工学的対応により安全性が大きく向上すること。
- 好ましい範囲の基準: 津波高さが、標高に既往の防潮堤高を加えた高さより低い範囲。
- 全国規模の文献・データ: 日本海における大規模地震に関する調査検討会(国土交通省, 2014)等

設定の根拠

- 津波は防潮堤などを構築して対応可能。
- 津波から重要な施設を防護するために設定された防潮堤などの構築物としての高さは、既往の原子力関連施設では15m程度である。
- 防潮堤の上端の標高は設置した場所の標高に防潮堤の構築物としての高さを加えた値となる。
- 津波高さが防潮堤上端の標高以下であれば、より確実な安全確保が期待できる。

