

地質環境特性に関する検討(その1)
—安全機能等と好ましい地質環境特性—

2013年12月
原子力発電環境整備機構

はじめに

■地層処分システムの長期間にわたる安全性を考える上で、処分場を設置する地質環境特性とその長期安定性を把握することが重要となる。

- 第1回会合：最新知見を踏まえた、わが国の地質環境の長期安定性と地質環境特性の概括
- 第2回会合：地層処分システムの安全機能に影響を与える天然現象とその対処の考え方



■今回のご説明内容

- 地層処分システムの安全機能を支える地質環境特性に対する考え方
 - ✓安全機能等と好ましい地質環境特性(資料1でご説明)
 - ✓好ましい地質環境特性に対する考え方(資料2でご説明)



最新の科学的知見を踏まえた
好ましい地質環境特性に対する考え方が適切か？

1. 地層処分システムの安全機能等と地質環境特性との関係
2. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境: 放射性物質の浸出抑制
3. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境: 緩衝材中での移行抑制
4. 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性: 天然バリア
5. 建設可能性の観点からの好ましい地質環境特性
6. 好ましい地質環境特性のまとめ

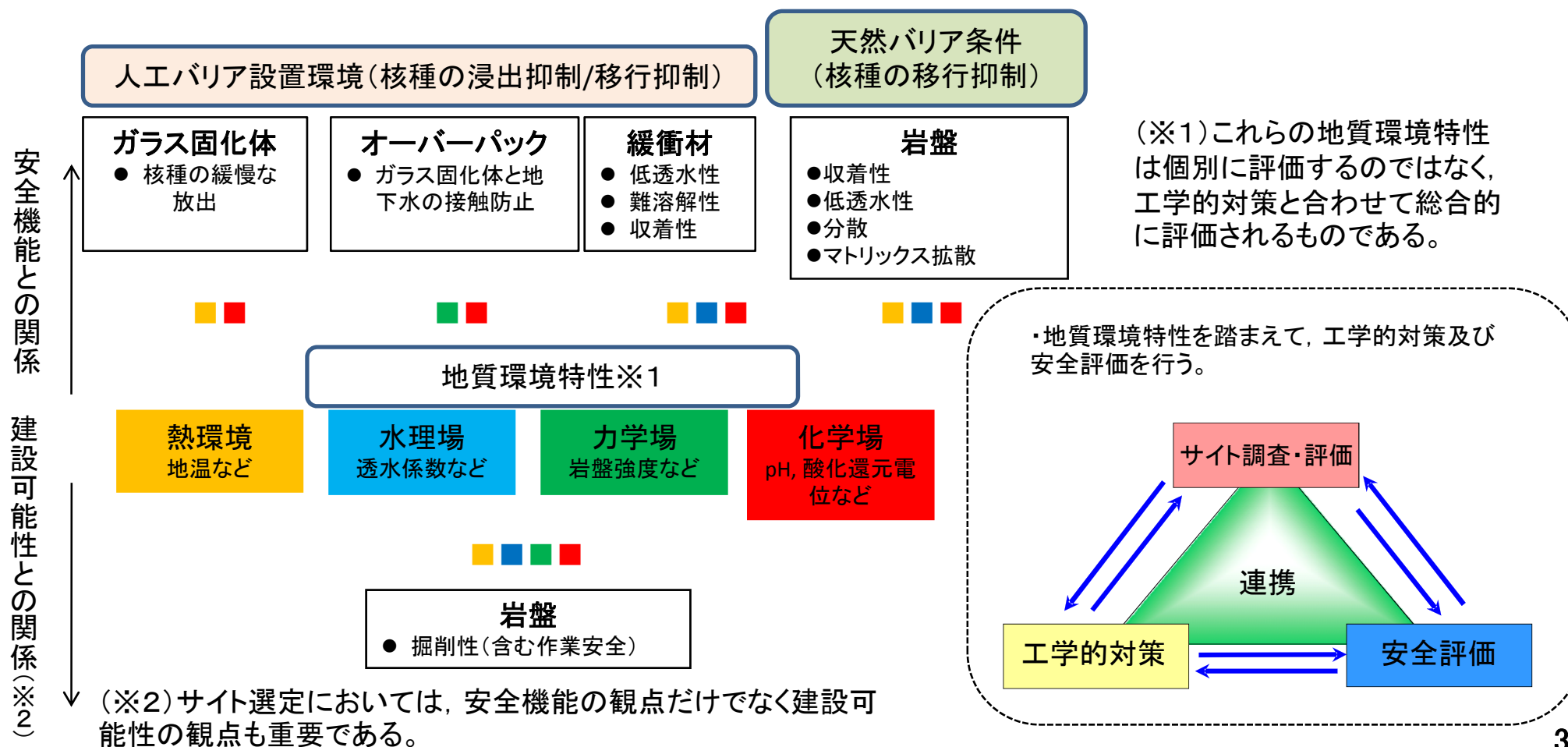
参考1 時間軸を考慮した安全機能と地質環境特性の関係

参考2 好ましい地質環境特性設定の理由及び論拠(人工バリア設置環境, 天然バリア)

参考3 好ましい地質環境特性設定の理由及び論拠(建設可能性)

1 地層処分システムの安全機能等と地質環境特性との関係

- 天然現象(火成活動, 断層活動, 著しい隆起・浸食)による著しい影響を受ける可能性のある範囲を回避する。
- その上で, 調査により地下深部の地質環境特性(熱環境, 水理場, 力学場, 化学場)を把握し, その適性を以下の観点から確認する。
 - 人工バリアの安全機能が確実に発揮されるよう, 人工バリア設置環境として適した特性を有するか?
 - 天然バリアとして, 放射性物質の移行を抑制する特性を有するか?
 - 対象となる岩盤において, 現状及びその改良技術により処分施設の建設を安全かつ合理的に行うことが可能か?





2 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性

人工バリア設置環境：放射性物質の浸出抑制

オーバーパックは、地下水の熱対流や放射線分解などの厳しい条件下での放射性核種移行が起こらないよう、放射性物質の崩壊に伴うガラス固化体の発熱が著しい期間、ガラス固化体と地下水との接触を防止する。また、ガラス固化体と地下水の接触後は、ガラス固化体の溶解を抑制（放射性物質を緩慢に放出）する*。これらは、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえ、工学的対策とあわせて担保する。

* 時間軸を考慮した安全機能と地質環境特性の関係は、参考1を参照。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
浸出抑制 (ガラス固化体、 オーバーパック)	熱環境	・ ガラス固化体の溶解（溶解速度）が著しく促進されないこと	・ 地温が低いこと（参考2-1参照）
	力学場	・ オーバーパックの構造健全性が確保されること	・ 岩盤のクリープ変形量が小さい（参考2-2参照）
	水理場	・ ガラス固化体の溶解（溶解速度）が著しく促進されないこと	（緩衝材の低透水性により、ガラス固化体の周囲の地下水の流れは無視できる）
	化学場	・ ガラス固化体の溶解（溶解速度）が著しく促進されないこと ・ オーバーパックの耐食性（腐食形態、腐食速度）に影響を与えないこと	・ 地下水の水素イオン指数（pH）が高pHあるいは低pHではないこと ・ 酸化性雰囲気ではないこと ・ 地下水の炭酸塩濃度が高くないこと （以上、参考2-3、2-4参照）



3 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性, 人工バリア設置環境:緩衝材中での移行抑制

緩衝材は、低透水性、間隙水中での放射性物質の難溶解性、収着性の機能により、ガラス固化体から浸出した放射性物質が天然バリアに移行することを遅延させる*。この機能が長期間維持されるよう、緩衝材の劣化（変質、密度低下）を抑える必要がある。これらを、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえ、工学的対策とあわせて担保する。

* 時間軸を考慮した安全機能と地質環境特性の関係は、参考1を参照。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
移行抑制 (緩衝材)	熱環境	・ 緩衝材の物理的・化学的特性を著しく損なわないこと	・ 地温が低いこと(参考2-5参照)
	水理場	・ 緩衝材の低透水性が維持されること	・ 緩衝材に接触する地下水の流速が小さいこと(参考2-6参照)
	化学場	・ 緩衝材の収着性と放射性物質の難溶解性の性能が著しく低下しないこと	・ 地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと ・ 酸化性雰囲気ではないこと ・ 地下水の塩分濃度が著しく高くないこと (以上、参考2-7, 2-8参照)



4 安全機能の観点からの好ましい地質環境特性： 天然バリア

地下深部の岩盤は、人工バリア設置環境としての場を提供するとともに、それ自身も放射性物質の移行に対するバリアとして機能する(天然バリア)*。このため、天然バリアとしては、動水勾配が小さく、岩盤や割れ目の透水性が低い、地下水の流れが緩慢であることが好ましく、さらに、放射性物質が収着やマトリックス拡散により、放射性核種の移行を遅延することも期待する。このため、地質環境特性の調査・評価結果に基づいて、岩盤の天然バリアとしての特質を安全評価に反映する。

* 時間軸を考慮した安全機能と地質環境特性の関係は、参考1を参照。

安全機能	地質環境特性	安全機能から見た要件	好ましい地質環境特性
移行抑制 (天然バリア)	熱環境	・ 熱対流による地下水流速の上昇が小さいこと	・ 地温勾配が小さいこと
	水理場	・ 核種の移行時間が十分長いこと	・ 動水勾配が小さいこと ・ 岩盤の透水性が低いこと ・ 割れ目の透水性が低いこと ・ 核種の移行経路が十分長いこと (以上、参考2-9, 2-10参照)
	化学場	・ 放射性物質が難溶解性を示す条件であること	・ 地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと ・ 酸化性雰囲気ではないこと (以上、緩衝材参考2-8と同様の考え方)

5 建設可能性の観点からの好ましい地質環境特性

建設期間中は、作業従事者の安全が確保されるよう、地下施設の空洞の力学的安定性を確保する。また、建設を合理的に進める上では、湧水量が少なく、有害ガスの発生量も少ない岩盤が好ましい。これらについて、地質環境特性の調査・評価結果を踏まえて、合理的な工学的対策が実施可能か確認する。

項 目	地質環境特性	建設可能性から見た要件	好ましい地質環境特性
建設可能性	熱環境	・コンクリート構造物の強度に著しい影響を与えないこと	・地温が65℃以下であること(参考3-1参照)
		・作業環境を合理的な対策で維持できること	・作業環境を維持するため、坑内の温度を法令(労働安全衛生規則 第611条)で定められる温度(37℃)以下に維持するために必要な換気・空調設備の規模が現実的であること(参考3-2参照)
	力学場	・建設・操業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること	・初期応力に対する岩盤の一軸圧縮強度が大きいこと(参考3-3参照)
			・処分場を想定する深度において一軸圧縮強度が1 MPa以上であること(未固結堆積物を避けるための目安)(参考3-4参照)
			・鉛直方向応力と水平方向応力が同程度であること(参考3-5参照)
			・吸水膨張性を示さないこと(参考3-6参照)
	水理場	・坑道掘削作業に著しい影響を与えず、合理的な対応策が実施できる範囲であること。	・坑道内での湧水量が少ないこと(参考3-7参照)
	化学場		・坑道内の有害ガス発生量が小さいこと(参考3-8参照)

6 好ましい地質環境特性のまとめ

- 地質環境特性の各項目（熱環境、水理場、力学場、化学場）において、支配的と考えられる特性を選定し（表中の青字）、これらについて、最新の科学的知見を踏まえ、地質環境特性に対する考え方を示す（資料2）。
- なお、この考え方は、具体的なサイトが特定されていない現段階における考え方である。実際の地質環境特性の適性は、文献調査、概要調査、精密調査を通じて、人工バリアなどの工学的対策の効果もあわせて、確認する。

	人工バリア設置環境としての 好ましい地質環境特性	天然バリアとしての 好ましい地質環境特性	建設可能性の観点からの 好ましい地質環境特性
熱環境	・地温が低いこと	・地温勾配が小さいこと	・地温が65℃以下であること ・坑内の温度を一定(37℃)以下に維持するために必要な設備規模が現実的であること
力学場	・岩盤のクリープ変形量が小さいこと		・初期応力に対する一軸圧縮強度が大きいこと ・鉛直応力と水平応力が同程度であること ・吸水膨張性を示さないこと
水理場	・緩衝材に接触する地下水の流速が小さいこと	・動水勾配が小さいこと ・岩盤の透水性が低いこと ・割れ目の透水性が低いこと ・核種の移行経路が十分長いこと	・坑道内での湧水量が少ないこと
化学場	・地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと ・地下水が酸化性雰囲気でないこと		・坑道内の有害ガス発生量が小さいこと
	・地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと ・地下水の塩分濃度が高くないこと		



以下, 參考資料

参考1 時間軸を考慮した安全機能と地質環境特性の関係

多重バリアシステムの安全機能		①の期間 ②の期間 ③の期間 ①ガラス固化体の発熱、緩衝材の再冠水などの過渡的な期間 ②オーバーパックの機能を期待する期間 ③ガラス固化体の機能を期待する期間			
		(下表:T:熱環境, H:水理場, M:力学場, C:化学場, 実線は安全機能の発現期間。点線は潜在的に安全機能を有するが、発現が要求されない期間。)			
天然バリアの機能	地質の長期的な変動からの防護	地下深部であれば、地表の気候変動や津波などの影響を受けにくく、また地形変動の影響を回避可能			
	人の接近の抑制	地下深部であれば、偶発的な人の接近の抑制が可能			
	移行抑制	H:地下深部の地下水の動きが緩慢(移行抑制)			
		C:岩盤の放射性物質を吸着する能力(移行抑制)			
人工バリアの機能	浸出抑制(ガラス固化体)	C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性の範囲(ガラス固化体の溶解抑制)			
	浸出抑制(オーバーパック)	①の過渡的な期間のガラス固化体が地下水の接触防止			
		C:地下水は還元性, pHが中性から弱アルカリ性で、炭酸塩濃度が低い(オーバーパックの耐食性)			
	移行抑制(緩衝材) ・低透水性 ・難溶解性 ・収着性	M:岩盤変形量が小さい(オーバーパックの構造健全性)			
		T:地温勾配が3-5°C/100mの範囲(緩衝材の温度制限100°C)			
		C:地下水の塩分濃度が降水～海水の広い範囲(低透水性)			
		C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性の範囲で、かつ還元性(難溶解性)			
		C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性の範囲(収着性)			



参考2 好ましい地質環境特性 設定の理由及び論拠 (人工バリア設置環境, 天然バリア)

参考2-1 人工バリア設置環境の安全機能から見た要件(核種の浸出抑制:熱)

- 安全機能から見た要件
 - ・ ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地温が低いこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ ガラスの溶解速度は温度が高いほど増加するため

論拠の例示

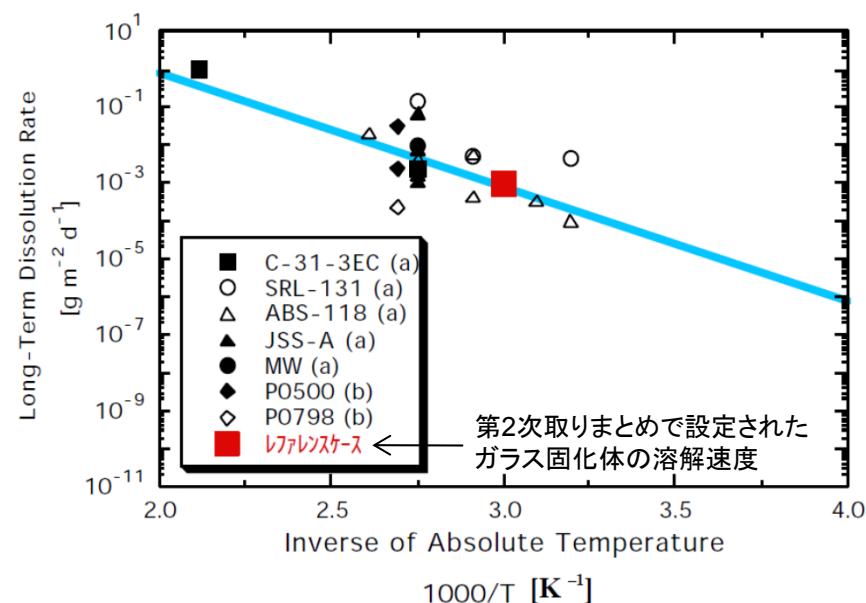
ガラス固化体の溶解(溶解速度)は、接触する地下水の水質や温度等に環境条件によって変化することが指摘されている(JNC, 1999: Grambow and Muller, 2001)依存する。

このような現状の認識のもと、地質環境特性としての温度に関しては、ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されない環境として、地温は低いことが好ましい。

(※地下水水質に関しては、化学場(参考1-3)で後述)

引用元:

※1: JNNC, (1999): “わが国における高レベル放射性廃棄物の地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3”, JNC TN1400 99-023.



長期浸出試験における各種ガラス固化体の溶解速度(※1)

Ohe, et.al.,(1991)のアレニウスプロットで用いられたデータ(図中(a))に、石黒・増田(1990)のデータ(図中(b))を加え、回帰直線を求め直したもの

参考2-2 人工バリア設置環境の安全機能から見た要件(核種の浸出抑制:力学場)

- 安全機能から見た要件
 - ・ オーバーパックの構造健全性が確保されること
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 岩盤のクリープ変形量が小さいこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 安全機能を期待する期間内(1000年)に閉じ込め機能が喪失しないことが必要であるため

論拠の例示

表-1 オーバーパック設計時の作用荷重の組み合わせ(サイクル機構, 1999に加筆)

	荷重の組み合わせ
硬岩系岩盤 (深度 1,000 m)	[地下水静水圧] + [オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の 圧密反力(緩衝材の膨潤応力含む)]
軟岩系岩盤 (深度 500 m)	[地下水静水圧] + [岩盤クリープ変形により生じる緩衝材の圧密反力] + [岩盤クリープ終了後, オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材 の圧密反力の増加分(緩衝材の膨潤応力含む)]

表-2 オーバーパック設計時の作用荷重(サイクル機構, 1999に加筆)

	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

オーバーパックの厚さの設計

オーバーパックには、耐食性、耐圧性および放射線遮へい性の観点から、適切な厚さを設定することが必要となる。このうち、耐圧性については、オーバーパックに作用する荷重に対して耐えるように厚さを設定する。作用する荷重は、表-1に示すように地下水静水圧、岩盤のクリープ変形、オーバーパックの腐食膨張により生じる緩衝材の圧密反力がある。

作用する荷重の大きさは、表-2に示す結果が第二次取りまとめに示されている。この結果からも明らかのように、処分場の設置を想定する深い岩盤中では地下水静水圧が支配的である(表-2の軟岩系岩盤は深度500mを想定した地下水静水圧を考慮している)。したがって、岩盤のクリープ変形がオーバーパックの耐圧性に与える影響は相対的に小さいと言えるが、クリープ変形量が小さい方が耐圧性にとって有利であり好ましい。

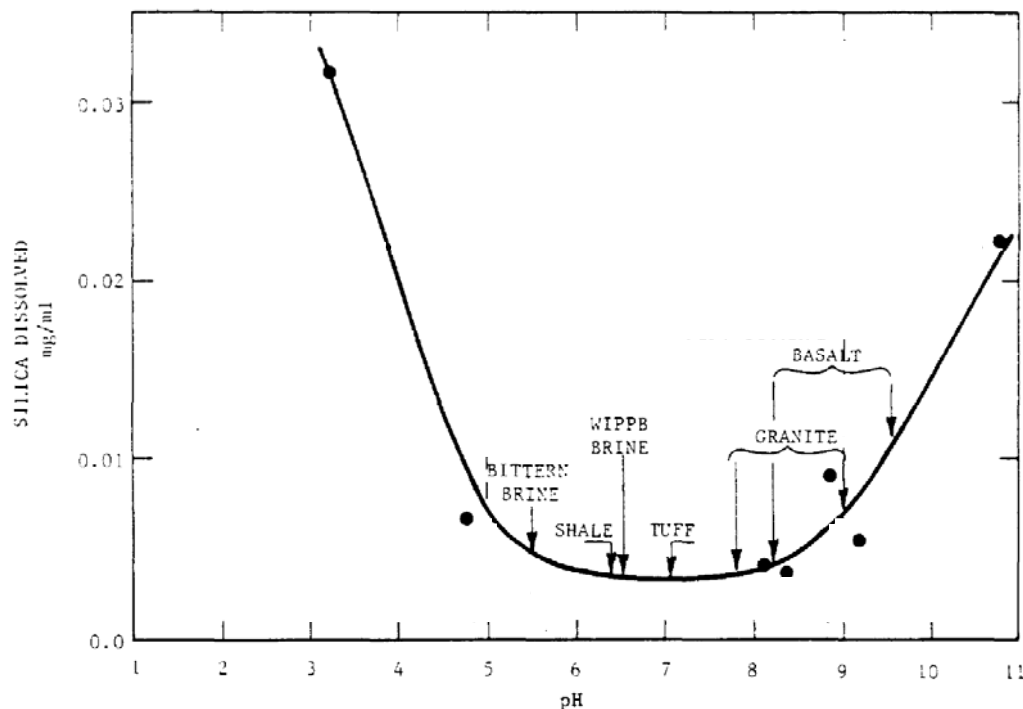
- 安全機能から見た要件
 - ・ ガラス固化体の溶解(溶解速度)が、著しく大きくならないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地下水の水素イオン指数(pH)が高pHあるいは低pHではないこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ ガラス固化体の溶解(溶解速度)はpH依存性があり、高pHあるいは低pHの地下水による溶解(溶解速度)の顕著な増加を回避するため

論拠の例示

ガラス固化体の溶解は、弱酸性から弱アルカリ性の範囲では比較的一定であるものの、強酸性(低pH)あるいは強アルカリ性(高pH)の環境においては著しく促進することが報告される(例えば、George G. Wicks, et al., 1982)。

その原因として、低pH環境での溶解促進は、水和反応によってガラスマトリクスに侵入した水素がB-O、Al-O結合の加水分解反応を促進することによるものであり、一方、高いpHでの溶解促進はSi-O結合の加水分解反応が促進されることによるものと考えられている(P.K. Abratis, et al., 2000)。

そのため、ガラス固化体の溶解(溶解速度)が著しく促進されない環境として、地下水の水質に関しては、pHが高pHあるいは低pHでないことが好ましい。



(米国)Savannah River Plant Waste Glassの
シリカの溶解に対するpH依存性

引用元: George G. Wicks, et al., (1982): "The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater", Journal of American Ceramic Society.

- 安全機能から見た要件
 - ・ オーバーパックの耐食性(腐食形態, 腐食速度)に影響を与えないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地下水のpHが高pHあるいは低pHではないこと
 - ・ 地下水の炭酸化学種濃度が低いこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ オーバーパックの不動態化による局部腐食や, 応力腐食割れなどの可能性を低減するため

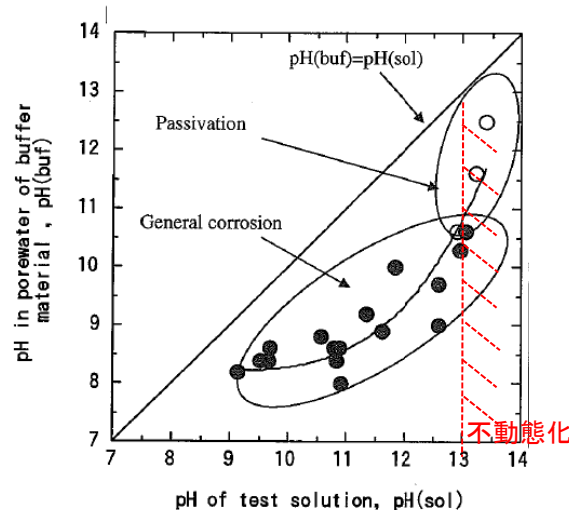
論拠の例示

オーバーパックに関しては, ある程度の腐食は許容して, 腐食代によって貫通を防ぐことを基本的な考え方にしている。このため, 現実的な腐食代の設定が困難なほどに腐食の進展が大きくなる可能性がある環境は避ける必要がある。

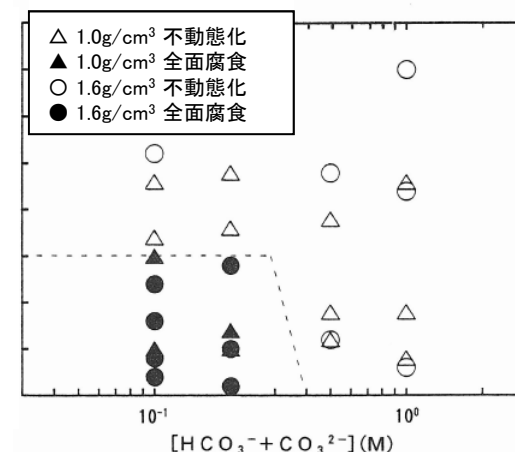
炭素鋼オーバーパックに関しては, 顕著な腐食進展の代表的な現象として, 局部腐食が挙げられる。このため, 炭素鋼が不動態化して孔食・すきま腐食などの局部腐食が生じる環境, 換言すれば, 不動態化せず全面腐食を起こす環境での使用が望まれる。これまでの炭素鋼の不動態化に関する実験の結果から, 炭酸・炭酸塩濃度の高い環境, またpHの高い環境で不動態化しやすいことが示される(谷口ほか, 1999, 2002)。

チタンをオーバーパック材料に使用する場合には, 処分環境において考慮する腐食形態として, すきま腐食と水素脆化が挙げられる。すきま腐食は塩化物濃度が高いほど発生しやすいものの, NiやPdの添加によって耐すきま腐食性は向上する。このため, 水素脆化の観点から, 水素発生速度(腐食速度)が大きい環境を避ける必要がある。腐食速度は, 高pHのほか, 高炭酸塩濃度でも増加することが確認されており, このような環境では水素脆化の促進が懸念される(JNC, 2005)。

オーバーパック材料の候補の一つである純銅は, 優れた特徴として, 酸素のない環境で熱力学的な安定性を有することが挙げられる。しかし, 硫化物の存在する環境ではこの特徴を低下させる傾向にあるため(Garrels and Christ, 1990), 長期的に腐食量が無視できないほど硫化物が存在する環境は避けた方が望ましい。



炭素鋼の不動態化のpH依存性(※1)



炭素鋼の不動態化に対する緩衝材空隙水pHと炭酸濃度依存性(※2)

引用元:

※1: 谷口直樹, 他, (2002): “ベントナイト/ケイ砂混合体における炭素鋼の不動態化条件”, JNC TN8400 2001-025.

※2: 谷口直樹, 他, (2008): “ベントナイト中の炭素鋼の不動態化条件の検討”, サイクル機構技報, No.4.

参考2-5 人工バリア設置環境の安全機能から見た要件 (緩衝材中での移行抑制: 熱環境)

- 安全機能から見た要件
 - ・ 緩衝材の物理的・化学的特性が著しく損なわれないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地温が低いこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 緩衝材が熱変質(イライト化等)を生じることにより物理的・化学的特性(低透水性、核種の収着性)が著しく損なわれることを回避するため

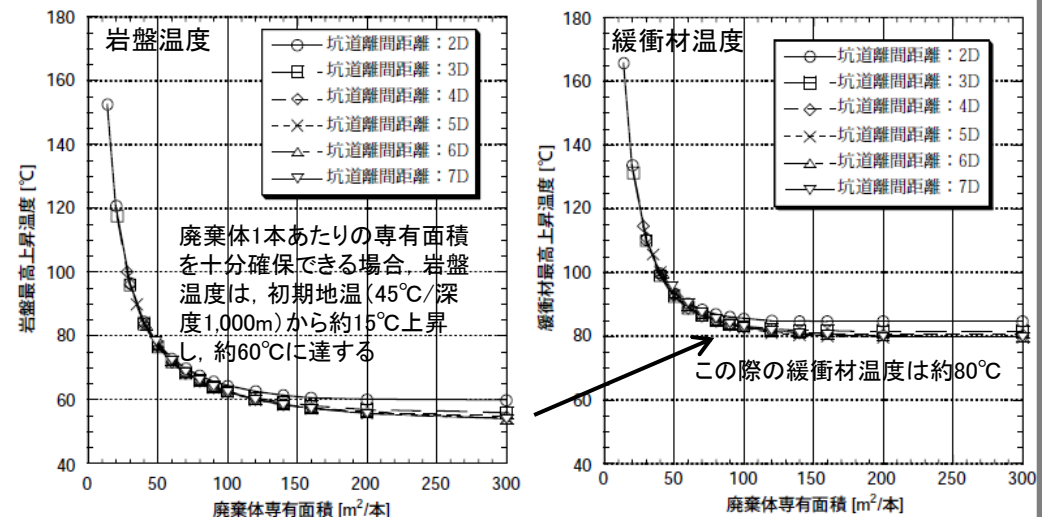
論拠の例示

ガラス固化体からの発熱により、岩盤や緩衝材の温度は上昇する。

緩衝材が高温環境に曝された場合、緩衝材の主材料であるベントナイトの主要構成鉱物であるスメクタイトのイライト化や、アモルファスシリカ等の二次鉱物の沈殿(セメンテーション)がある。

JNC(2005)では、ベントナイトの熱的安定性に関する既往研究の結果を整理し、100℃以上になる場合においてもイライト化の可能性は低いがセメンテーションの発生可能性は高く、緩衝材の長期安定性に影響を及ぼすことを報告している。

また、JNC(2005)は、100℃を超える場合の緩衝材性能への長期的影響に関する知見が乏しいことから、熱的条件としては100℃以下が好ましいとしている。



ガラス固化体の発熱量を考慮した岩盤ならびに緩衝材の温度上昇に関する熱解析結果(硬岩系岩盤、処分坑道横置きの場合の解析結果の例)(JNC, 1999)

JNC(1999)の熱解析の結果を参照すると、岩盤の初期地温度が65℃を超えない場合には、ガラス固化体の発熱の影響により地温が15℃上昇しても、地温の到達温度は80℃以下であり、緩衝材の温度は100℃を超えないものと推定される。

引用元:

JNC(1999):“地層処分研究開発第2次取りまとめ 分冊2 地層処分の工学技術”, p.IV-279, JNC TN1400 99-022.

- 安全機能から見た要件
 - ・ 緩衝材の低透水性が維持されること(緩衝材により拡散場が維持されること)
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 緩衝材に接する地下水流速が小さいこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 緩衝材に接する地下水流速が早い場合、緩衝材が流出し、性能が低下する恐れがあるため。

論拠の例示

緩衝材の主要材料であるベントナイトに関して、ゲル化した層の変形やコロイド状粒子の流出現象を評価する実験が行われている。この実験では、蒸留水および海水系地下水相当の濃度のNaCl溶液を、流速を変えて緩衝材に通水し、次の結果が得られている。

【蒸留水の通水実験の場合】

ベントナイトコロイドの流出が確認された平均流速: $2 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$

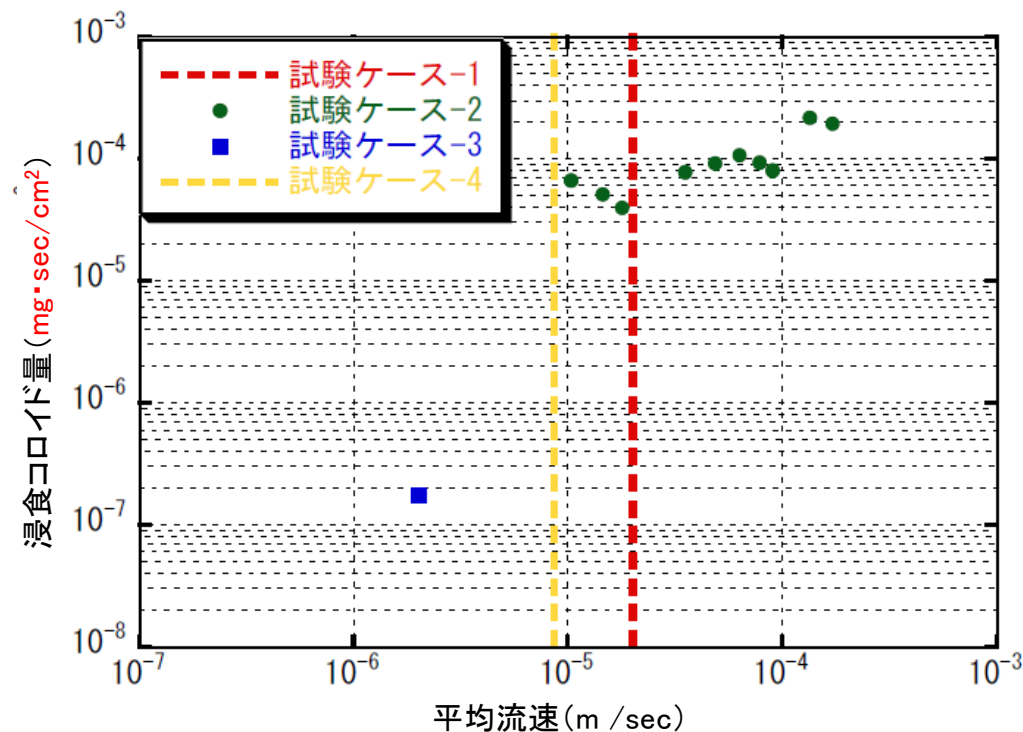
【NaCl溶液の通水実験の場合】

ベントナイトコロイドの流出: 蒸留水の試験で流出が確認された条件よりも早い平均流速 $8 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ においても流出が確認されない。

上記結果に基づけば、流出による緩衝材の密度低下を抑制するためには、地下水の塩分濃度が低い場合には、地下水流速が小さいことが好ましい。一方、海水のように塩分濃度が高い場合には、流出の可能性は低い。なお、ベントナイトコロイドが流出する地下水の臨界流速は、地下水の塩分濃度に依存して変化すると考えられる。

引用元:

※1: JNC(2005): 放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築
—平成17年取りまとめ—



ベントナイトコロイドの流出と地下水流速の関係(※1)

ケース1: ベントナイトのゲル層の変形を評価した蒸留水の通水実験
 ケース2~3: ベントナイトコロイドの流出を評価した蒸留水の通水実験
 ケース4: ベントナイトコロイドの流出を評価したNaCl溶液の通水実験

- 安全機能から見た要件
 - ・緩衝材の低透水性が維持されること、・緩衝材の収着性と放射性物質の難溶解性の性能が著しく低下しないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・地下水の塩分濃度が低いこと、・地下水が高pHあるいは低pHではないこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・塩分濃度が著しく高い場合や、地下水のpHが高pHあるいは低pHである場合には、緩衝材に期待する物理的・化学的特性(透水性, 膨潤性, 収着性)などが影響を受ける可能性があるため

論拠の例示

緩衝材の力学特性として、一軸圧縮強度や弾性係数はイオン強度による違いはとくに認められないことが報告される(例えば, JNC, 2005)。飽和透水特性, 膨潤特性に関しては、緩衝材の有効ベントナイト乾燥密度が低密度の場合、イオン強度に依存して低下する傾向にあるが、有効粘土密度が1.6 Mg/m³以上では、イオン強度が1 mol/dm³を超えない範囲においてその低下はあまり認められないことが報告される(例えば, JNC, 2004)。

緩衝材の収着性に関しては、多くの核種において、弱酸性からアルカリ性の範囲ではpHに依存して収着分配係数(K_d)の値は大きくなる傾向にある。ただし、一部の核種は、地下水の酸化還元の状態にもよるが、弱酸性から弱アルカリ性までの範囲ではpHに依存して K_d の値は高くなるが、高pHの環境になると値が低下するものも認められる(JAEA, 2008)。

そのため、緩衝材に期待する物理的・化学的特性を確保するため、地下水水質としては、イオン強度が海水程度(約0.7mol/l)までであること、またpHは高pHあるいは低pHでないことが好ましい。

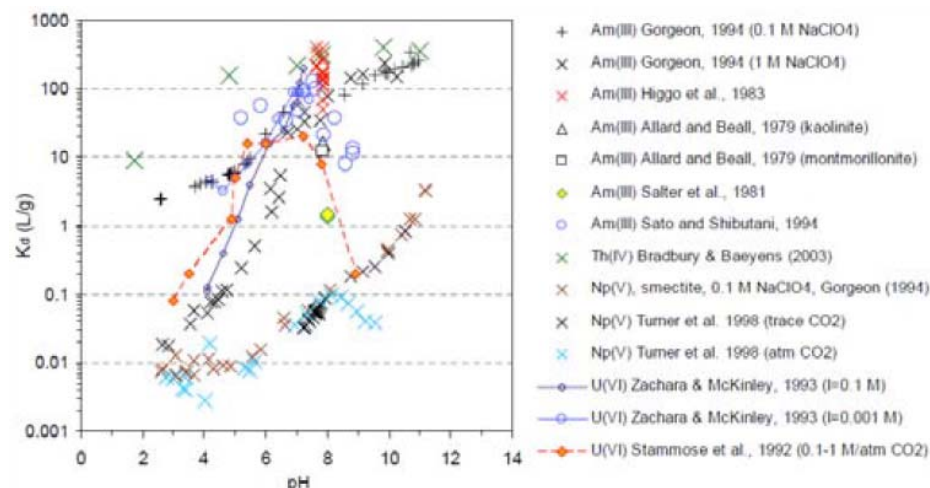
引用元:

※1: 鹿島建設(2005): “人工バリア材料の力学的物性取得試験”, JNC 契約業務報告書, JNC TJ8400 2004-036.

※2: 舘幸男, 他, (2008): “地層処分安全評価のための核種の収着・拡散データベースシステムの開発”, JAEA-Data/Code 2008-034.

イオン強度による緩衝材の飽和透水係数、平衡膨潤圧の変化(※1)

有効ベントナイト 乾燥密度 (Mg/m ³)	地下水イオン強度 (mol/l)	飽和透水係数 (m/s)	平衡膨潤圧 (MPa)
1.6	0	1.3×10^{-13}	2.03
	1	2.5×10^{-12}	1.53
	3	1.1×10^{-11}	1.31
1.4	0	3.1×10^{-13}	1.35
	1	2.4×10^{-11}	0.13
	3	3.0×10^{-10}	0.16



核種-緩衝材の分配係数のpH依存性(※2)

- 安全機能から見た要件
 - ・ 緩衝材の収着性と放射性物質の難溶解性の性能が著しく低下しないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地下水のpHが高pHあるいは低pHではないこと
 - ・ 酸化性雰囲気でないこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 緩衝材内部(間隙水中)において、核種の溶解度が著しく高くなることを回避するため

論拠の例示

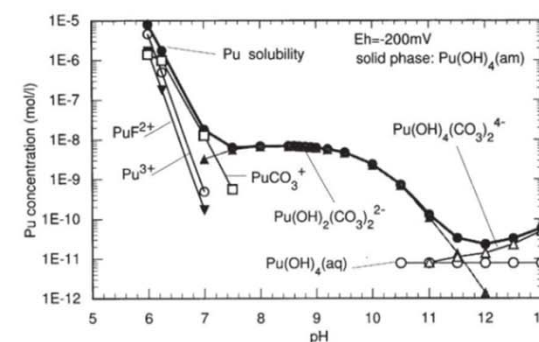
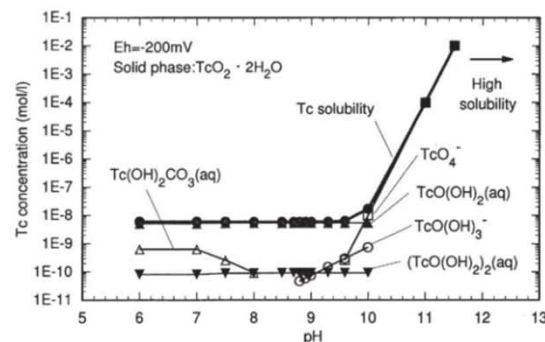
地質環境条件(地下水水質)の変化に対する核種の溶解度について、実験や地球化学モデルを用いた計算により求められており、核種によっては、高pHあるいは低pHの環境では溶解総濃度が大きくなる(武田, 1999)。また、同じpHであっても、酸化還元電位(Eh)が異なる場合には、核種の溶解度を支配する化学種が異なり、とくに酸化性の雰囲気では顕著に溶解度が高くなることが報告される(Barbara, 2005)。

このため、緩衝材内部(間隙水中)での核種の溶解度を低く抑えるため、地下水の水質としては、緩衝材に含有される鉱物と地下水が十分に反応した後でも、間隙水のpHやEhが、高pHあるいは低pH、酸化性の間隙水が形成されない地下水であることが好ましい。

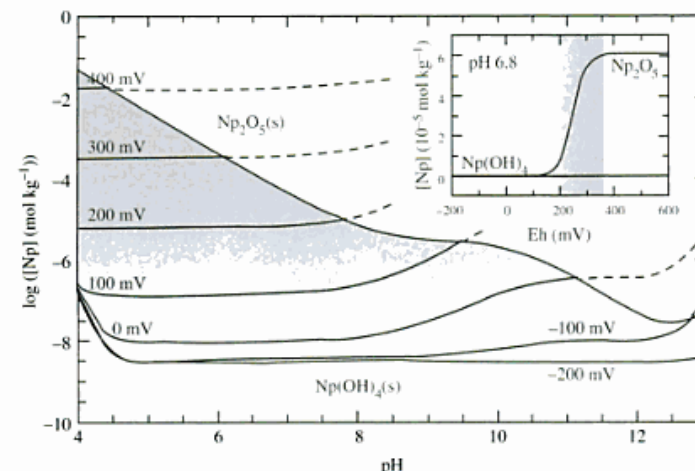
引用元:

※1: 武田聖司(1999): “地下水中におけるAm, Pu, Tcの溶解度の解析”,
JAERI Research 99-047.

※2: Barbara S. Lollar(Ed.), (2005): “Environmental geochemistry”,
p.235.



イオン強度による緩衝材の飽和透水係数、平衡膨潤圧の変化(※1)



核種-緩衝材の分配係数のpH依存性(※2)

- 安全機能から見た要件
 - ・ 核種の移行時間が十分長いこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 動水勾配が小さいこと ・ 岩盤の透水係数が小さいこと, 割れ目の透水性が小さいこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 核種移行の主たる要因となる岩盤中の地下水流動が緩慢である方が, 核種の移行に要する時間がかかり, その間に放射能が減衰するため。

論拠の例示

地下水移行シナリオでは, 地下水に溶存した核種の移行を評価するものである。核種は地層内に止まる期間が長いほど減衰が期待できることから, 地下水の生物圏までの移動時間が母岩の性能を決定する因子となる。

地下水の生物圏までの移動時間は, 場の透水性, 亀裂の性状と頻度, 動水勾配, および移行経路長に支配されることから, 透水性, 亀裂頻度, 動水勾配に関しては小さい方が好ましい。

核種の移行率に関しては, 上に示した4つのパラメータが連成して決定されることから, ひとつひとつのパラメータに関して独立に目安を設定できるものではない。

しかしながら, これらのパラメータの中では, 透水性(透水量係数, または透水係数)の取り得る範囲が他のパラメータに比較して変動範囲が広いものと考えられる。右図に, 亀裂透水量係数(分布の対数平均値)を変動させた解析結果を示す。

目安とする線量を $10\mu\text{Sv/y}$ と仮定する場合, 亀裂透水量係数は $10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ 以下であることが望ましいと考えられる。

第2次取りまとめモデルを適用

移行距離 100m

動水勾配 0.01

亀裂頻度 1/3m

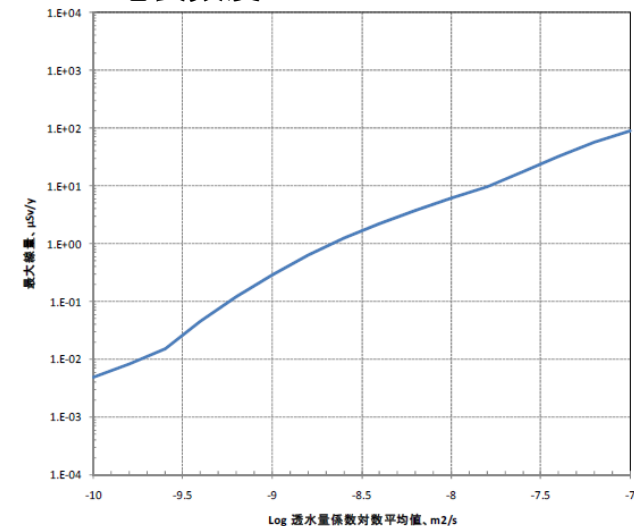


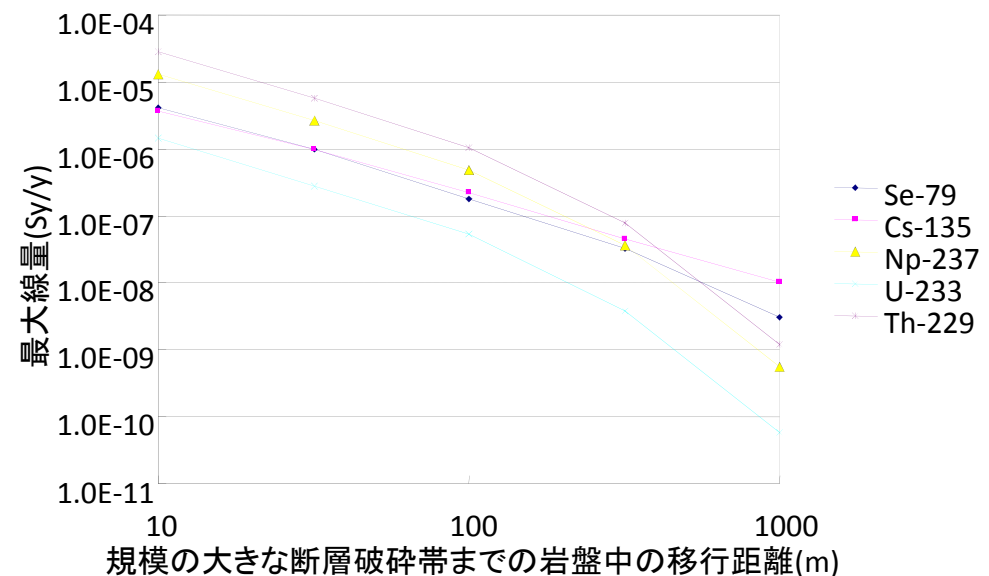
図 3.2-49 チャンネルの透水量係数対数平均と最大被ばく線量の関係

- 安全機能から見た要件
 - ・ 核種の移行時間が十分長いこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 核種の移行経路が十分長いこと
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 核種移行の主たる要因となる岩盤中の地下水流動の評価における不確実性を低減するため。

論拠の例示

安全評価上の核種移行距離

- ・ 安全評価上の核種移行距離は、処分施設から地表までの地下水移行距離の全体ではなく、①想定外の高透水部が不在であることが調査等によって確認可能であり、②分配係数や実効拡散係数等の核種移行特性を保証可能である、という意味で「天然バリア性能を担保することのできる」範囲に限られる
- ・ 最大線量が移行距離によって顕著に異なる(右図試算例)。
- ・ 目標とする線量に基づき、詳細な調査を行うべき範囲を設定するという考え方もあり得る。
- ・ また、少ないデータから信頼性の高い移行距離を設定するためには、想定する処分深度が広域流動場に位置し、移行経路全体にわたり代表的な流動条件を仮定することができることが好ましい





参考3 好ましい地質環境特性 設定の理由及び論拠 (建設可能性)

参考3－1 建設可能性から見た要件（熱環境1）

- 建設可能性から見た要件
 - ・ コンクリート構造物の強度に著しい影響を与えないこと
- 好ましい地質環境特性
 - ・ 地温が65℃以下であること
- 好ましい地質環境特性設定の理由
 - ・ 建設・操業期間中の支保コンクリートの強度低下を回避するため

論拠の例示

表－1に示す温度制限値は、コンクリートの材料特性が温度の影響を受けて著しく劣化することがないように定めたものである。なお、これらの数値の根拠は明らかにされていない（土木学会，2008）。

廃棄体の発熱がセメント系材料の力学性能に与える影響については、セメント系材料の空隙内の水の逸散の程度によって影響の程度が変わるとされており、熱源が内側にあるとさらに周辺温度が高い埋設施設の場合には影響の程度が低いと考えられる。しかし、温度の影響が高い埋設施設の場合には、種々の解析において力学性能の変化を適切に反映するために、事前にセメント系材料における圧縮強度、引張強度およびヤング係数の熱影響による変化の時期や影響程度を確認しておく必要がある。

表－1 原子力関連施設のコンクリートの温度制限（土木学会，2008に加筆）

温度荷重の作用状態		原子炉建屋構造設計指針・同解説 (日本建築学会 1988)		温度荷重の作用状態		コンクリート製原子炉格納容器に関する構造などの技術基準 (通産省告示 452 号)	
長時間	一般部	局部	定常状態	貫通部	その他の部分		
	65℃	90℃		90℃	65℃		
短時間	一般部	局部	非定常状態	ジェット力を受ける部分	その他の部分		
	175℃	350℃		340℃	175℃		

引用元：土木学会エネルギー委員会（2008）：余裕深度処分の安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方，pp. 288.

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 作業環境を合理的な対策で維持できること

■ 好ましい地質環境特性

- ・ 作業環境を維持するため、坑内の温度を法令(労働安全衛生規則 第611条)で定められる温度(37℃)以下に維持するために必要な設備規模が現実的であること(例えば、換気・空調設備容量)

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

- ・ 建設作業の実現性の確保のため

論拠の例示

■ 必要な換気量の概算例

前提: 熱量の供給は坑道壁面の岩盤からの伝熱によるもののみとする
(湧水からの放熱量や操業に必要な機械からの発熱は考慮しない)

$$Q_{5a} = \frac{\alpha \cdot (\theta_s - \theta_t) \cdot S}{Cp \cdot (\theta_t - \theta_0)} \cdot \frac{1}{60\gamma}$$

Q_{5a} : 所要換気量 (m³/min.)

α : 壁面の熱伝達率(ここでは20.9 kJ・m⁻²・h⁻¹・℃⁻¹とした¹⁾)

Cp : 空気の定圧比熱(1.003 kJ・kg⁻¹・℃⁻¹)

θ_s : 岩盤温度(℃)

θ_t : 作業空間の管理温度(ここでは37℃とした)

θ_0 : 切羽への送気温度(ここでは15℃とした)

S : 放熱面積 (m²), 定置方式を横置きとし、坑道径をφ=2.2 mとした。
また、熱量の供給がある坑道の延長は、1つの処分パネルに
含まれる処分坑道延長(約20 km)とした

γ : トンネル内の空気の比重量(ここでは1.2 kg / m³とした)

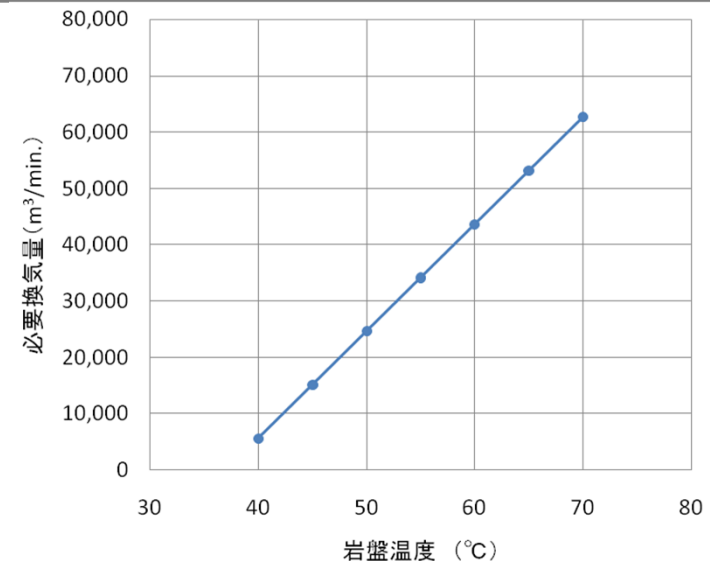


図-1 岩盤温度と必要換気量の関係

■ 坑内の通気速度の制限の例

(4)通気速度

- ①石炭坑(通気専用坑道を除く。)及び石油坑においては、毎分450m以下
- ②石炭坑及び石油坑の立坑並びに石油坑における通気専用坑道においては、毎分600m以下

鉱業権者が講ずべき措置事例(平成16・11・19原院第1号)より抜粋

1) 建設業労働災害防止協会(2012): 新版 ずい道等建設工事における換気技術指針<<換気技術の設計及び粉じん等の測定>>。

■ 建設可能性から見た要件

- ・建設・作業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること

■ 好ましい地質環境特性

- ・初期応力に対する岩盤の一軸圧縮強度が大きいこと

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

坑道の周辺では、掘削による応力再配分により σ_r (半径方向応力)が0に近づき、 σ_θ (接線方向応力)が初期応力の2倍に近づくことが知られている。坑道の壁面では接線方向応力が卓越した一軸応力状態に近づくため、一軸圧縮強度が初期応力の2倍以上あれば坑道の安定性を確保しやすいため

$$\text{地山強度比} = q_u / \gamma \cdot H$$

ここに、 q_u :地山の一軸圧縮強度、 γ :地山の単位体積重量、 H :土被り厚さ
地山強度比が2以上だとトンネルの内空変位が少ないことが示されている

論拠の例示

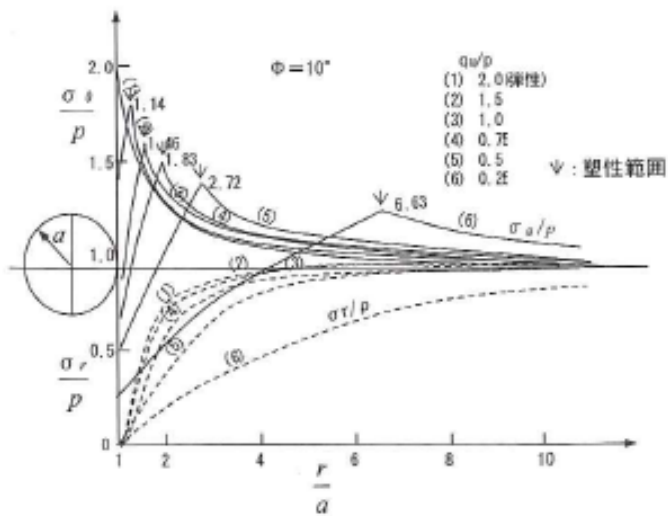


図1 円形トンネル周辺の応力分布

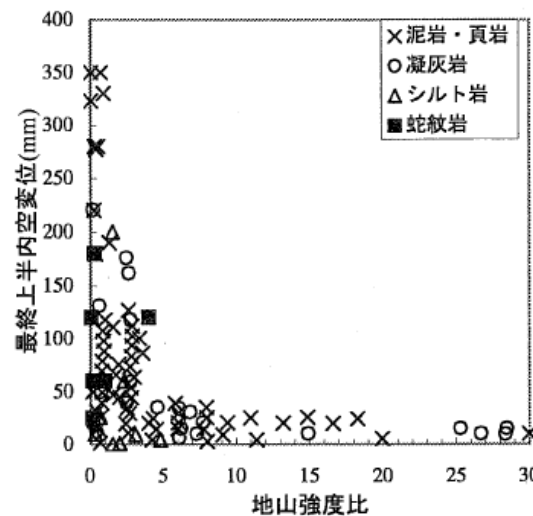


図-3 内空変位量と地山強度比 (C地山)

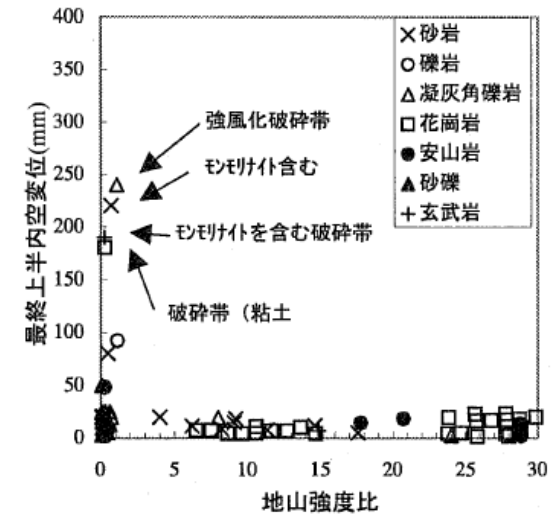


図-4 内空変位量と地山強度比 (ϕ 地山)

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 建設・作業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること

■ 好ましい地質環境特性

- ・ 処分場を想定する深度において未固結の堆積物でないこと。未固結と固結の区分を厳密に定義することは難しいが一軸圧縮強度で1MPa以下のものを未固結と扱う

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

- ・ 坑道掘削に著しい支障があると考えられるため

論拠の例示

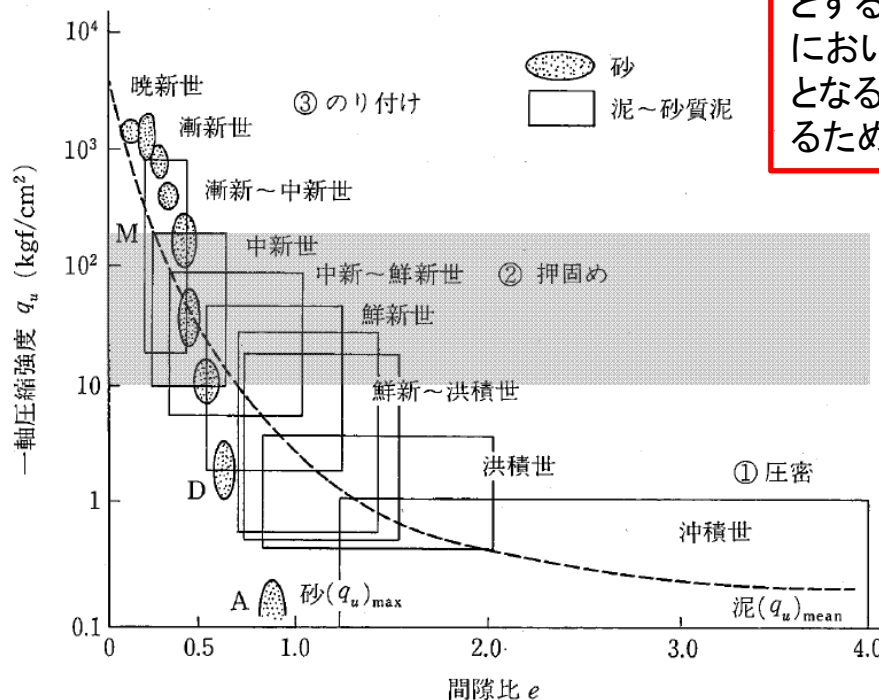


図 1.2.2 岩化に伴う日本の新生代堆積物の物理的性質の変化

仮に、岩盤の単位体積重量を 2.0Mg/m^3 、処分場の深度を 500m とすると、鉛直方向土被り圧は 10MPa となり、このような深度において一軸圧縮強度が 1MPa の地層の地山強度比は 0.1 となる。先に示した好ましい条件の地山強度比 2.0 を大きく下回るため、坑道の掘削に著しい支障があると判断される。

【軟岩】
一軸圧縮強度： $1\text{MPa} \sim 10\text{MPa}$ あるいは 20MPa

未固結堆積物として扱う

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 建設・作業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること

■ 好ましい地質環境特性

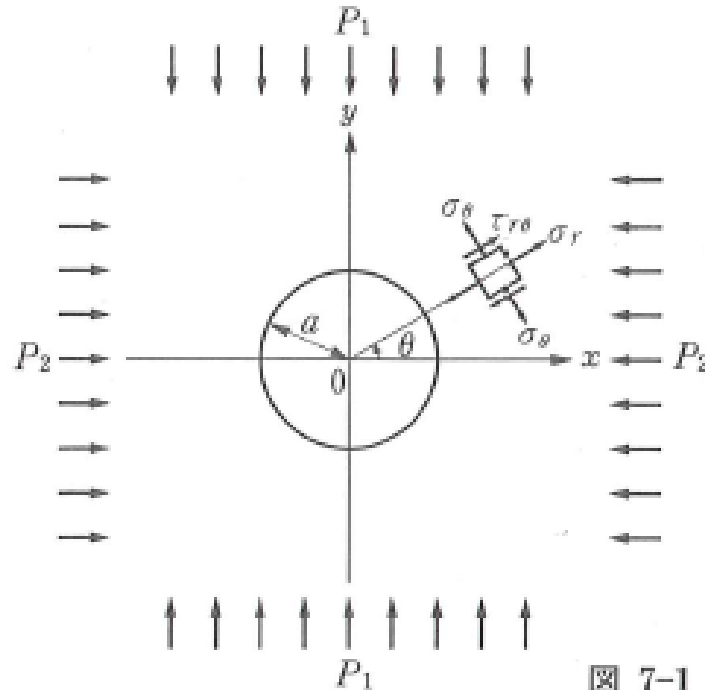
- ・ 鉛直方向応力と水平方向応力(この比を側圧係数という)が同程度(側圧係数が1に近い)であること

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

- ・ 応力の異方性が大きいほど坑道周辺のせん断応力が大きくなり、坑道の安定性確保が難しくなるため

論拠の例示

半径 a のトンネルに鉛直方向に P_1 、水平方向に P_2 の応力が作用している場合の半径方向応力 σ_r 、接線方向応力 σ_θ 、せん断応力 $\tau_{r\theta}$ は下式で与えられる。これより、側圧係数が1の場合($P_2/P_1=1$ の場合)はせん断応力は0になるが、応力の異方性が大きくなると(P_2 と P_1 の差が大きくなると)せん断応力が大きくなることが分かる。



$$\sigma_r = \frac{P_1}{2} \left\{ 1 - \frac{a^2}{r^2} - \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right\} + \frac{P_2}{2} \left\{ 1 - \frac{a^2}{r^2} + \left(1 - 4 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{P_1}{2} \left\{ 1 + \frac{a^2}{r^2} + \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right\} + \frac{P_2}{2} \left\{ 1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right\}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{P_1}{2} \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta - \frac{P_2}{2} \left(1 + 2 \frac{a^2}{r^2} - 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta$$

図 7-1 弾性岩盤内の円形トンネル

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 建設・操業期間中を通して空洞の力学的安定性が確保されること

■ 好ましい地質環境特性

- ・ 吸水膨張性を示さないこと

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

膨張性が大きい場合には掘削断面が著しく縮小し、現実的な対策で所定の断面の空洞の安定性を確保することが困難となり、掘削に支障となると判断されるため。膨張性の要因としては、強度不足に起因するものや吸水膨張を示す地山特性などが挙げられる。強度に関しては、地山強度比などで確認するため、ここでは吸水膨張性を好ましくない要因として挙げた。

論拠の例示

■ 膨張性地山における坑道施工事例

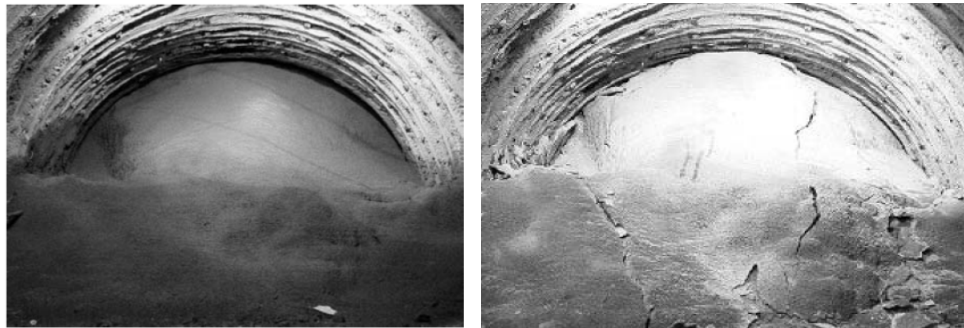


写真-1 膨張性地山における切羽鏡面の押し出し状況(写真左は鏡吹付け直後、写真右は約12時間後の切羽)¹⁾

出典:

- 1) 依田ほか(2006): 膨張性地山の支保構造事例. 地盤工学会中部支部15回調査・設計・施工技術報告会.
- 2) 土木学会(2006): 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方

表-1 膨張性地山の特徴²⁾

膨張性地山の指標	指標の範囲と特徴
岩種	・ 泥岩・凝灰岩、泥岩、凝灰岩、蛇紋岩、火山岩・深成岩・変成岩等の熱水変質(温泉余土)あるいは断層粘土・破碎帯などで発生している
地山強度比	・ 0.03-10.0に分布している。 ・ 2.0以下での発生事例が多い。
モンモリロナイト含有量(%)	・ 測定値が明確なものについては38-80%に分布している。 ・ モンモリロナイトまたは膨張性鉱物が検出された場合に膨張性が発生している事例が多い。
浸水崩壊度(A, B, C, D)	・ 浸水崩壊度CまたはDで膨張性が発生している事例が多い。
塑性指数	・ 5-210の間に分布しており、70以上で膨張性が発生している事例が多い。
変形係数(MPa)	・ 大半が2000MPa以下の値を示している。 ・ 800MPa以下で膨張性が発生している事例が多い。
一軸圧縮強度(MPa)	・ 大半が10MPa以下の値を示している。 ・ 4MPa以下で膨張性が発生している事例が多い。
単位体積重量(g/cm ³)	・ 1.5-2.9g/cm ³ の間に分布している。
自然含水比(%)	・ 0-60%の間に分布している。 ・ 20%以下でも膨張性が発生している事例がある。
液性限界(%)	・ 20-300の間に分布している。 ・ データ数が少ないため全体の傾向が不明である。
2μm以下粒子含有率(%)	・ 20-60%の間に分布しており、30%以上で膨張性が発生している事例が多い。 ・ データ数が少ないため全体の傾向が不明である。
CEC(塩基交換容量試験)	・ 5-160meq/100gの間に分布しており、35meq/100g以上で膨張性が発生している事例がある。
膨張率(%)	・ 0-48%の間に分布している。 ・ 20%以下でも膨張性が発生している事例がある。
弾性波速度(km/sec)	・ Vp=0.2-6.0km/secの間に分布している。 ・ Vsについてはデータ数が少ないため全体の傾向が不明である。

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 坑道掘削作業に著しい影響を与えず、合理的な対応策が実施できる範囲であること。

■ 好ましい地質環境特性

- ・ 坑道内での湧水量が小さいこと

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

- ・ 坑道内への湧水は作業の安全性及び効率性に大きな影響を与えるため

論拠の例示

■ 大出水による難工事事例

トンネル名称 : 地芳トンネル
 施工場所 : 愛媛県～高知県
 工期 : 1999年～2009年
 工事内容 : 長さ 約 3,000 m

- 地質 : 四国カルスト
- 最大土被り : 約400 m
- 大出水による湧水量 : 最大約 20 t/min.
- 最大湧水圧 : 2.65 MPa

- ・ 掘削開始 : 2000年8月
- ・ 突発湧水遭遇まで : 700mの掘削に約8カ月
- ・ 突発湧水遭遇以降 : 700mの掘削に約7年



図-1 地芳トンネル突発湧水状況¹⁾

1) 国土交通省四国地方整備局(2004):一般国道440号地芳道路について,第2回四国地方整備局事業評価監視委員会資料,資料-29

■ 建設可能性から見た要件

- ・ 坑道掘削作業に著しい影響を与えず、合理的な対応策が実施できる範囲であること

■ 好ましい地質環境特性

- ・ 坑道内の有害ガスの発生量が小さいこと

■ 好ましい地質環境特性設定の理由

- ・ 坑道内の有害ガスは作業の安全性に大きな影響を与えるため

論拠の例示

■ 留意すべき有害ガス

- ・ トンネル工事において留意すべき有害ガスとして、メタンガス (CH_4)，硫化水素ガス (H_2S) 等が挙げられる¹⁾。

表-1 自然発生ガスの種類と発生する地層等¹⁾

種別	産 状	発生する地層	発生するガス	摘 要
可燃性ガス	油田ガス	石油を胚胎する新第三紀層	メタン、エタンが主体、地域や層によっては炭化水素も含まれる	北陸、東北、北海道の日本海側に多い
	炭田ガス	古・新第三紀層、第四紀層の狭炭層及びその上下層	メタンがほとんど	北九州、常磐、北海道に多い
	水溶性ガス	新第三紀層及び第四紀層の地層水中に溶存	メタンがほとんど	習慣上、これを天然ガスという
	古期岩層及び現世層中のガス	その他の発生源としての位置付け。古第三紀以前及び泥岩地等	メタンが主体	
	火山・温泉ガス	火山、温泉地帯	硫化水素、二酸化炭素、窒素、二酸化硫黄	
不燃性ガス	水成岩中のガス	古生代-新生代の水成岩	窒素がほとんど	

注) 通常、天然ガスには CO_2 、 N_2 が同時に含まれている。

表-2 メタンガス濃度別坑内作業基準の例¹⁾

適用基準 メタンガス濃度	トンネル作業基準濃度	参 考	
		労働安全衛生規則	石炭鉱山保安規則
0 ~ 0.5Vol%	平常作業 ①定時検査 ②自動警報器の設置	平常作業	平常作業
0.5 ~ 1.0Vol%	平常作業 ①鉱山保安法による爆薬使用 ②注意灯の点滅	平常作業	①発破禁止(導火線) ②電気発破、導爆線発破は可
1.0 ~ 1.5Vol%	切羽作業停止 ①換気、ガス抜き ②作業員退避	平常作業	①発破禁止(導火線) ②電気発破は可
1.5 ~ 2.0Vol%	坑内作業員の退避 ①坑内送電停止 ②坑内換気増強	第322条第2項 ①作業員の退避 ②火源の使用停止 ③通風、換気する	①発破禁止 ②一般作業の中止 ③送電停止
2.0Vol%以上	坑内付近立入禁止措置		特別許可以外の通行、作業禁止

1) 建設業労働災害防止協会(2012):新版 ずい道等建設工事における換気技術指針<換気技術の設計及び粉じん等の測定>