

埋設後長期の安全性確保に係る 科学的有望地選定要件・基準の候補 好ましい要件・基準

2015年2月
原子力発電環境整備機構



はじめに

前回は、埋設後長期の安全性確保に係る科学的有望地選定要件・基準の候補として「回避すべき要件・基準」、「回避が好ましい要件・基準」を整理した。

今回は、埋設後長期の安全性確保に係る科学的有望地選定要件・基準の候補のうち「好ましい要件・基準」を以下の構成で整理する。

- 好ましい要件・基準の定義
- 地質環境特性の適性を判断する好ましい要件の検討
- 要件・基準の候補抽出の手順
- 地質環境特性
 - 熱環境
 - 力学場
 - 水理場
 - 化学場
- 天然現象
- まとめ



好ましい要件・基準の定義

■前回会議での御指摘事項を踏まえ、要件、基準については以下の通り整理

要件： 科学的有望地の選定にあたって、求められる条件(回避に関する要件、好ましい要件)

基準： 上記の要件の下で、それぞれの範囲(回避に関する要件について: 回避すべき範囲、回避が好ましい範囲; 好ましい要件について: 好ましい範囲)を特定するために設ける閾値

■上記を踏まえ、好ましい「要件」、「基準」を以下の通り定義

【好ましい要件】: 積極的に考慮することで、地層処分システムの安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になる可能性が高いため、好ましい範囲と評価するための要件

【好ましい基準】: 上記要件下において、好ましい範囲を特定するための閾値

※基準を設定するにあたっての留意事項

- ✓ 明確で合理的な範囲・基準(値)が設定できること
- ✓ 全国規模の文献・データが存在すること

地質環境特性の適性を判断する好ましい要件の検討

- 地質環境特性の適性の判断

- ✓ 対象地点の詳細な情報(埋設後長期の将来予測を含む)を取得し工学的対策と併せて総合的に検討



- ✓ 概要調査段階、精密調査段階における調査・評価が大きな比重を占める。

- したがって、サイトが特定されておらず詳細な現地の情報が無い現段階における、科学的有望地の選定においては、地質環境特性に関する好ましい要件の検討には限界がある。

- このような限界に留意しつつ、個々の地質環境特性が、地層処分システムの安全性の大きな向上あるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になることに、寄与する好ましい要件について検討することとする。併せて、個々の天然現象に関する好ましい要件についても検討することとする。

- なお、サイトが特定されていない現段階においては、仮定された幾つかの地質環境条件を用いて概念的な設計(工学的対策)案が第2次取りまとめ等において提示されている。検討にあたっては、このような標準的と考えられる工学的対策案を用いる。

- このように現状提示されている工学的対策案は標準的であるため、地層処分システムの安全性が大きく向上するような好ましい基準の設定が難しい場合は、同時に安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になるような好ましい基準も設定が難しいと考えられる。

要件・基準の候補抽出の手順

技術WG中間とりまとめ

【好ましい地質環境】

好ましい地質環境特性

熱環境	地温が低いこと
力学場	岩盤の変形が小さいこと
水理場	地下水流動が緩慢であること
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 ・地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと

わが国における地質環境の長期安定性に関連する

重要な天然現象

要件・基準の候補の抽出

好ましい要件の抽出

(地層処分システムの安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること)

好ましい範囲の基準

合理的で明確な範囲

No

設定しない

Yes

全国規模の文献の存在

No

科学的有望地選定に適用しない

Yes

科学的有望地選定に適用する

好ましい要件・基準：熱環境「地温が低いこと」(1)

◆要件

- 処分深度で「地温が低いこと」により、安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「地温が低いこと」による安全性/工学的対応への影響

- ガラス固化体の溶解速度は地温が低くなると低下する傾向はあるものの、温度低下による性能の大幅な向上は見られない(図1)。
- 緩衝材の性能のうち、分配係数や拡散係数(図2)、透水係数(図3)、熱伝導性(図4)とも、温度低下による性能の大幅な向上は見られない。
- このように、安全性が大きく向上するとは考えにくいことから、安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になることも考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

—

(「地温が低いこと」に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる)

◆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(日本列島と地質環境の長期安定性, 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, 付図4)

なお、このような条件は各バリア機能が期待される期間において要求されるため、ガラス固化体、緩衝材は数万年以上の期間における将来予測が必要である。

好ましい要件・基準: 熱環境「地温が低いこと」(2)

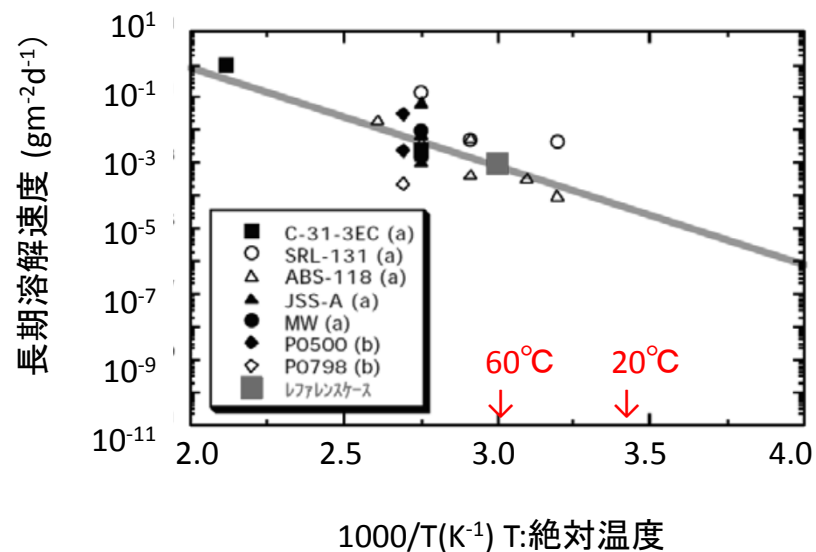


図1 各種ガラス固化体の溶解速度の温度依存性
(第2次取りまとめ分冊3, 図5.3.1-4)

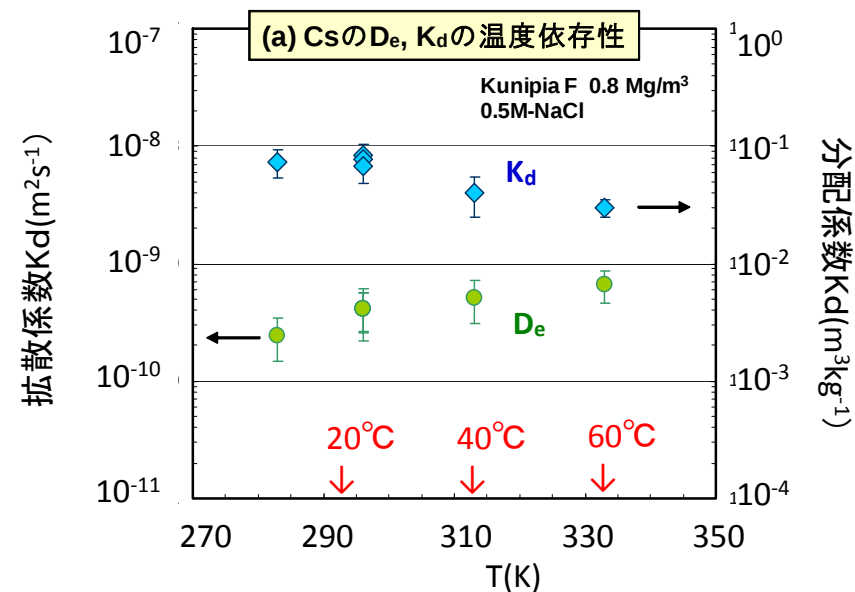


図2 Csの緩衝材内における分配係数と拡散係数の温度依存性
(平成22年度 処分システム化学影響評価高度化開発 報告書, JAEA, 2011)

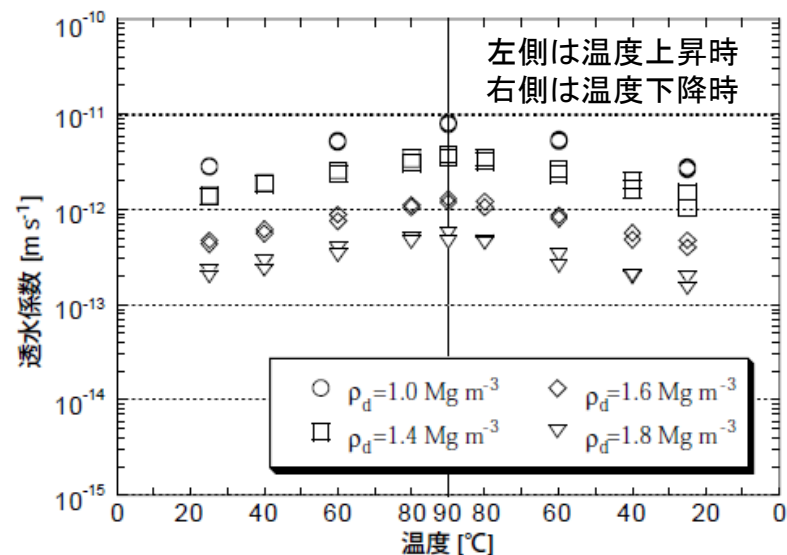


図3 透水係数の温度依存性(ケイ砂混合体(30wt%))
(第2次取りまとめ分冊2, 図4.1.2-16)

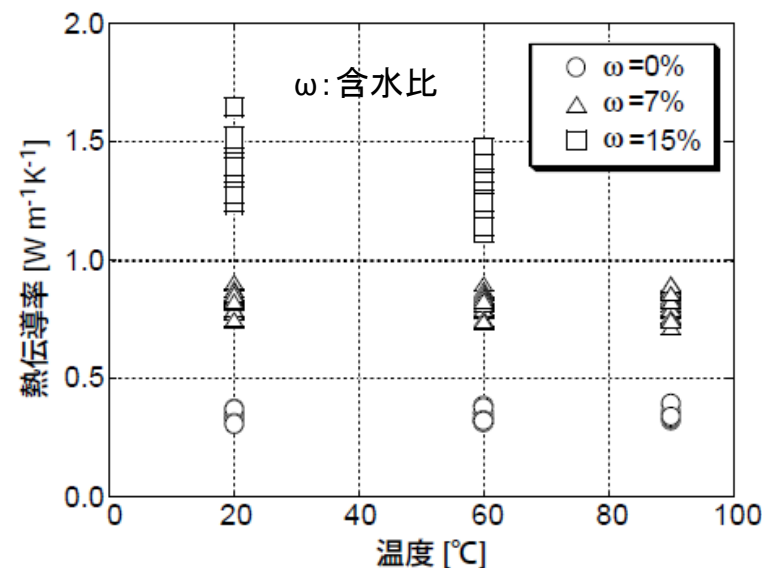


図4 熱伝導率の温度依存性(ケイ砂混合体, 乾燥密度 1.6Mg・m⁻³)(第2次取りまとめ分冊2, 図4.1.2-10)

好ましい要件・基準：力学場「岩盤の変形が小さいこと」

◆要件

- 処分深度で「岩盤の変形が小さいこと」により安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「岩盤の変形が小さいこと」による安全性/工学的対応への影響

- 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」により、性能が大きく向上することはない(下表)(※)。
- このように、安全性が大きく向上するとは考えにくいことから、安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になることも考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

—

(「岩盤の変形が小さいこと」に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる)

◆全国規模の文献・データ

—

なお、オーバーパックの地下水接触を抑制する機能は千年程度以上の期間必要とされるため、岩盤の変形について千年程度以上の将来予測が必要である。

オーバーパック設計時の作用荷重（第2次取りまとめ分冊2，表4.1.1-8）

	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。

好ましい要件・基準：水理場「地下水流動が緩慢であること」

◆要件

- 地下水流動が緩慢であることにより安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「地下水流動が緩慢であること」による安全性/工学的対応への影響

- 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。水理場として好ましい条件は、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である。(技術WG中間とりまとめ、3.1.3(1))
- 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。

◆好ましい範囲の基準

(「地下水流動が緩慢であること」に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる)

- 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。
- このような地下深部の透水性、動水勾配については、詳細な現地調査が必要である。また、この要件は数万年以上の埋設後長期の期間における将来予測が必要である。

◆全国規模の文献・データ

(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。

好ましい要件・基準：化学場「高pHあるいは低pHではないこと」(1)

◆要件

- 処分深度で高pHあるいは低pHではないことにより安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「高pHあるいは低pHではないこと」による安全性/工学的対応への影響

- 低pH、高pHの場合を除いて、ガラス固化体の溶解の程度はほぼ一定の低い値にとどまる(図1)。
- 溶液のpHが12.5程度以下であれば、オーバーパックは全面腐食を呈する(図2)。
- ある範囲の中性であれば低い溶解度であるが、高いpHで更に溶解度が低下する核種もある(図3)。
- 分配係数は、pHの違いに伴う明確な変化の傾向はない(図4)。

上記のいずれの場合も、中性付近の領域にあれば人工バリアの安全機能は確保されるものの、中性に近づく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。

このように、安全性が大きく向上するとは考えにくいことから、安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になることも考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

—
(「高pHあるいは低pHではないこと」に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる)

◆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, 2011)
- 全国地熱ポテンシャルマップ(産総研地質調査総合センター, 2009)

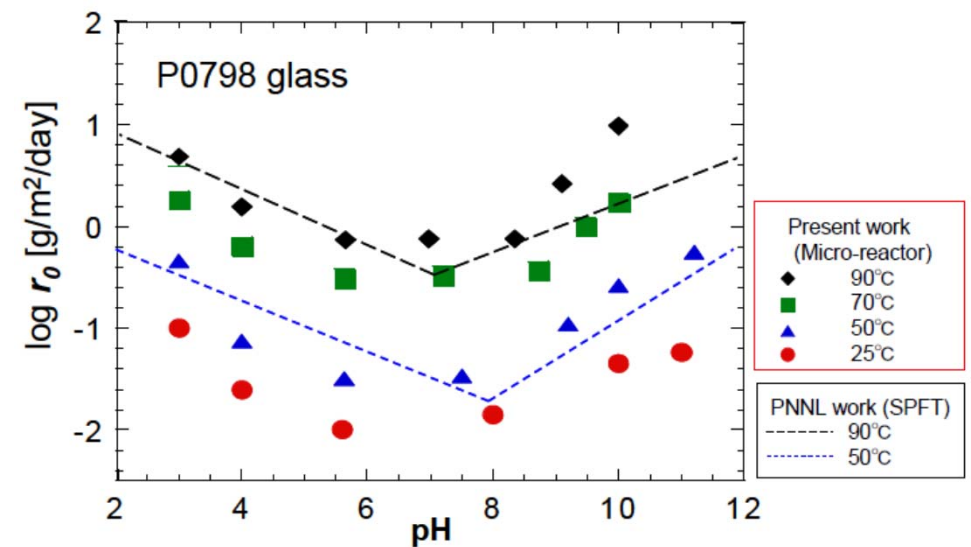
なお、このような条件は各バリア機能が期待される期間において要求されるため、オーバーパックは千年程度以上、ガラス固化体、緩衝材および天然バリアは数万年以上の期間における将来予測が必要である。

好ましい要件・基準: 化学場「高pHあるいは低pHではないこと」(2)

➤低pH、高pHの場合を除いて、ガラス固化体の溶解の程度はほぼ一定の低い値にとどまる。

図1 ガラスの初期溶解速度のpH依存性

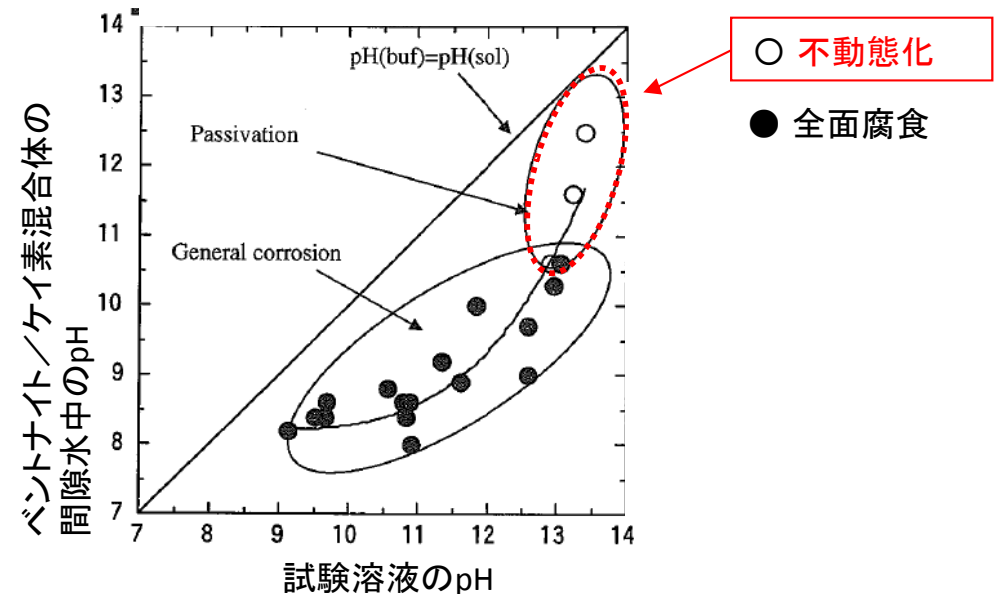
酒谷圭一、稲垣八穂広、牧垣光、出光一哉、有馬立身
日本原子力学会「2010 年秋の大会」: マイクロリアクタ流水試験によるガラス固化体溶解/変質の速度論的評価: ガラス初期溶解速度のpH/温度依存性



➤溶液のpHが12.5程度以下であれば、オーバーパックは全面腐食を呈する。

図2 炭素鋼の不動態化のpH依存性

谷口ほか (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.



好ましい要件・基準: 化学場「高pHあるいは低pHではないこと」(3)

➤ある範囲の中性であれば低い溶解度であるが、高いpHで更に溶解度が低下する核種もある。

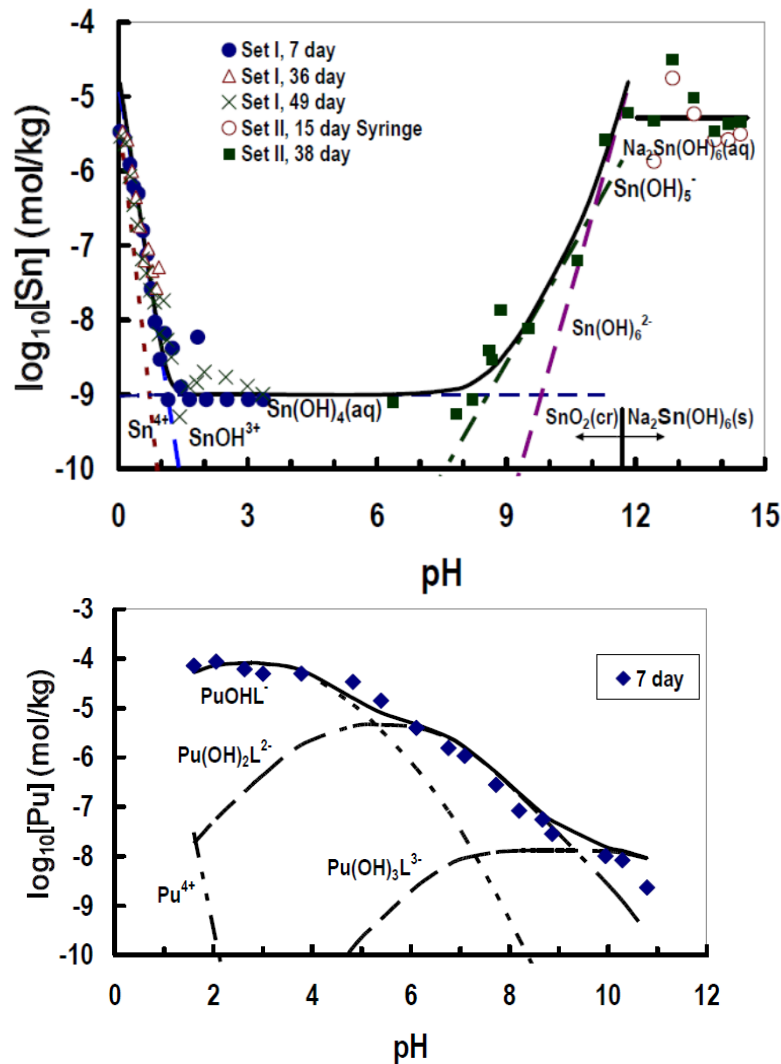


図3 Sn, Puの溶解度のpH依存性

Dhanpat RAI* and Mikazu YUI (2013): Thermodynamic Data Development Using the Solubility Method, JAEA-Technology 2013-002)による取りまとめ結果

➤分配係数は、pHの違いに伴う明確な変化の傾向はない。

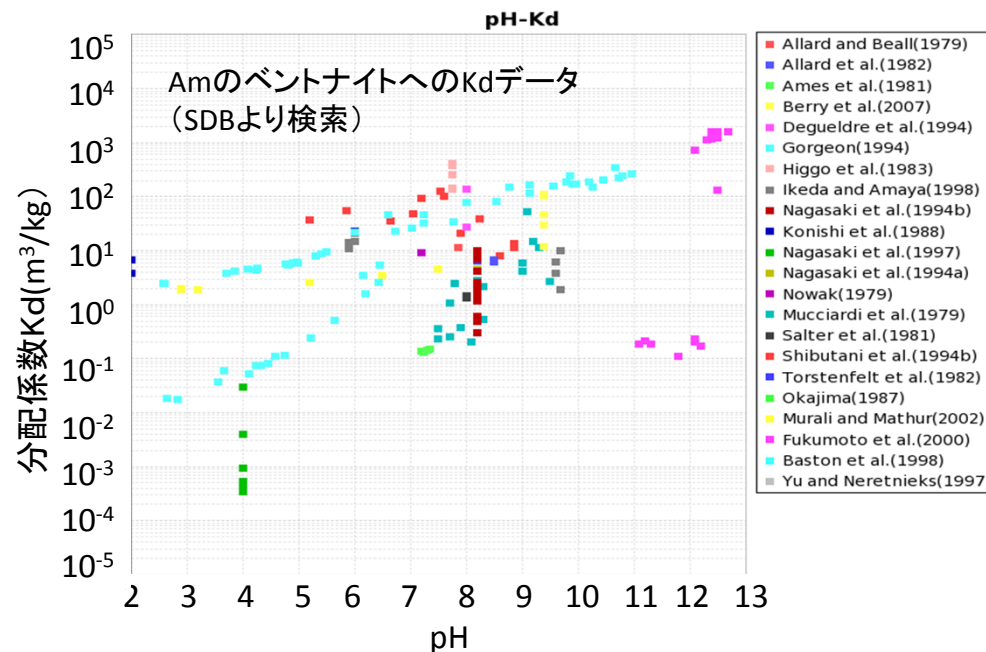


図4 アクチニド元素に対する緩衝材の分配係数のpH依存性

館ほか(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.

好ましい要件・基準: 化学場「酸化性雰囲気でないこと」

◆要件

- 酸化性雰囲気でないことにより安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「酸化性雰囲気でないこと」による安全性/工学的対応への影響

- 酸化性条件では、オーバーパックの耐食性が低下し、また一部の放射性物質の溶解度が増加する。さらに、緩衝材および天然バリアともに収着能が低下する(技術WG中間とりまとめ, 3.1.4(1))
- 還元性環境では、大部分の放射性元素の溶解度は低く抑えられ、地下水中の放射性核種の濃度は制限される(第2次取りまとめ総論レポート, 2.2.1)。大部分の放射性元素は酸化還元電位が負である還元性環境では溶解度が格段に低下すると考えられる(図1)。
- このような条件は核種移行を想定する数万年以上の期間における将来予測が必要であるが、地下深部においては一般的に還元性環境であると考えられる(技術WG中間とりまとめ, 3.1.4(2))
- なお、現状の工学的対策案は還元性環境を前提としているので、工学的対応が比較的容易になることは考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

- 長期に亘り、酸化還元電位が負であること

◆全国規模の文献・データ

酸化還元電位(Eh: 赤枠内):
プラスであれば酸化性、マイナスであれば還元性を示す

Npの溶解度の常用対数
(mol/kg)

酸化還元電位

負

0

正

好ましい範囲

「回避すべき要件」該当無し

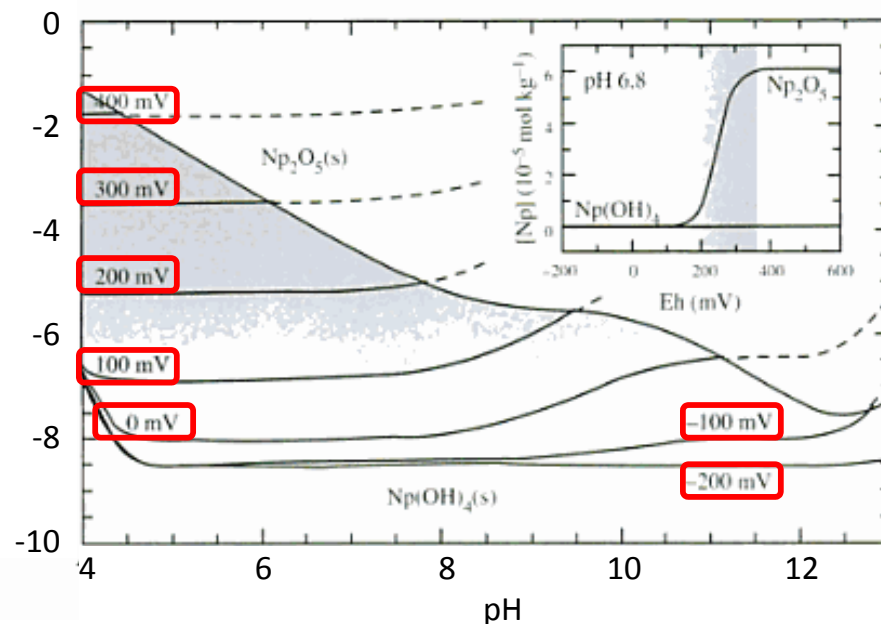


図1 酸化還元電位(Eh)の違いによる核種の溶解度の変化の例

好ましい要件・基準：化学場「炭酸化学種濃度が低いこと」

◆要件

- 処分深度で炭酸化学種濃度が低いことにより安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆「炭酸化学種濃度が低いこと」による安全性/工学的対応への影響

- 炭酸化学種濃度が 0.5mol/dm^3 以上となる条件ではオーバーパックが不動態化(図1)、局所腐食を招きやすくなる(技術WG中間とりまとめ, 3.1.4(1))。
- 一方、炭酸化学種濃度が 0.5mol/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。
- このように、安全性が大きく向上するとは考えにくいことから、安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になることも考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

(「炭酸化学種濃度が低いこと」に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる)

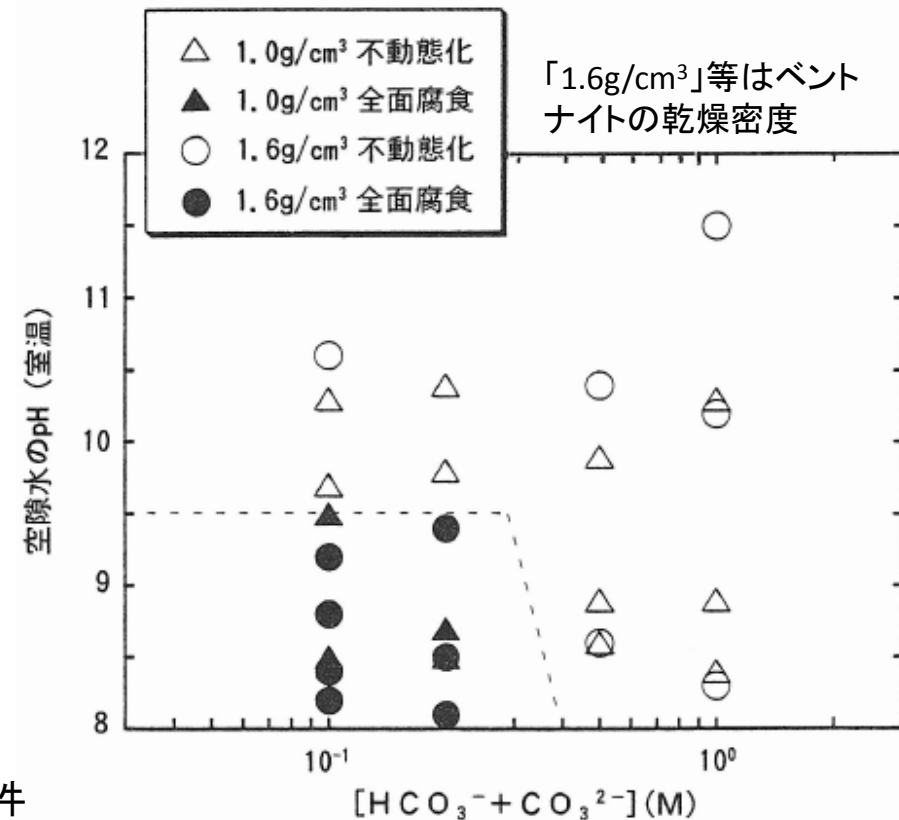
◆全国規模の文献・データ

- 深層地下水データベース(高橋ほか, 2011)
- 全国地熱ポテンシャルマップ(産総研地質調査総合センター, 2009)

なお、オーバーパックの地下水接触を抑制する機能が必要とされる、千年程度以上の期間の将来予測が必要である。

➢ 炭酸化学種濃度が 0.2mol/dm^3 までは空隙水のpHが約9.5以下では全面腐食を呈している。炭酸化学種濃度の 0.1mol/dm^3 と 0.2mol/dm^3 の条件で大きな違いは見られない。

図1 炭酸塩濃度と空隙水pHに対する炭素鋼の不動態化条件



好ましい要件・基準：天然現象

◆ 要件

- 天然現象の有無・程度に依存して、地層処分システムの安全性が大きく向上するあるいは安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になること

◆天然現象の有無・程度に依存した安全性/工学的対応への影響

- 技術WG中間とりまとめで示されている天然現象（地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食、気候・海水準変動）については、回避に関する要件・基準を適用して影響範囲を避けており、さらに好ましい要件・基準を設定することは難しいと判断される。
- 一方、第2次取りまとめにおいては、上記の天然現象に加えて「沈降」が抽出されており（第2次取りまとめ分冊1, 2.5）、安全性の大きな向上や安全性を確保する上で工学的対応が比較的容易になる可能性がある。
- しかしながら、一定の処分深度があれば物理的隔離機能など必要な機能は確保できるため、安全性が大きく向上する「沈降」の程度は明確に決められない。したがって、工学的対応が比較的容易となる可能性も考えにくい。

◆好ましい範囲の基準

—

（天然現象に関し、好ましい要件を満たすような明確な基準値を設定することは難しいと考えられる）

◆全国規模の文献・データ

—

なお、天然バリアの機能が必要とされる期間である数万年以上の将来予測が必要である。

- 地質環境特性に関する好ましい要件・基準の検討結果
 - ・ 地質環境特性のうち化学場については「酸化還元電位が負であること」が好ましい範囲の基準として考えられるが、全国規模の文献・データが無いいため科学的有望地の選定に適用できない。

	要件	好ましい範囲の基準	全国規模の文献・データの例
熱環境	・処分深度で地温が低いことにより安全性が大きく向上すること。	・ 設定は難しい	・ 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, 2011)
力学場	・処分深度で岩盤の変形が小さいことにより安全性が大きく向上すること	・ 設定は難しい	—
水理場	・地下水流動が緩慢であることにより安全性が大きく向上すること	・ 設定は難しい	—
化学場	・処分深度で高pHあるいは低pHではないこと、酸化性雰囲気でないこと、炭酸化学種濃度が高くないことにより安全性が大きく向上すること	・ 酸化還元電位が負であること	・ 深層地下水データベース(高橋ほか, 2011) ・ 全国地熱ポテンシャルマップ(産総研地質調査総合センター, 2009) (酸化還元電位については無い)

- 天然現象に関する好ましい要件・基準の検討結果
 - ・ 天然現象のうち「沈降」により安全性が大きく向上するあるいは工学的対応比較的容易になる可能性があるが、好ましい範囲の基準が設定は難しいと考えられる。



(参考)各調査段階の調査方針(技術WG第5回資料2より抜粋)

	事前	文献調査の段階	概要調査の段階 (地表調査・物理探査・ ボーリング調査)	精密調査の段階 (地下調査施設からの調査)
著しい影響を与える事象の回避	全国一律に評価	広域スケール	広域スケール	
		文献情報において 影響が明確な地域の回避	現地調査による痕跡の確認と 将来の影響領域の回避	(新たな情報が得られた場合 に評価を実施)
				
地質環境特性の 適性の評価・地域の 絞り込み (好ましい地質環境特性)		(対象地域間の相対評価, 調査計画を検討)	処分場スケール	処分場スケール
			ボーリング調査等による 深部の地質環境特性の把握	地下調査施設からの 地質環境特性の適性評価
			反映 ↓ ↑ フィードバック	反映 ↓ ↑ フィードバック
工学的対策 および 安全性の評価		(処分概念の適用性などの 概略的な検討)	工学的対策の 概念的な設計	工学的対策の設計 工学技術の実証的確認
			反映 ↓	反映 ↓
			予備的な安全性の評価	安全性の評価

「好ましい地質環境特性」の長期安定性を考慮すべき期間が
対象となる安全機能に依存することを踏まえてその影響要因を検討

多重バリアシステムの安全機能			10 ² 年	10 ³ 年	10 ⁵ 年	
			①の期間	②の期間	③の期間	③の期間以降
天然バリアの影響機能	地質の長期的な変動からの防護	物理的隔離機能	地下深部の岩盤の著しい隆起やマグマの貫入の恐れがない領域			
	地下深部の岩盤の著しい隆起やマグマの貫入の恐れがない領域					
	人の接近の抑制					
人工バリアの影響機能に対する影響	移行抑制	閉じ込め機能			H:地下水流動が緩慢である	
					C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性, 還元条件	
	浸出抑制 (ガラス固化体)				C:地下水のpHが中性～弱アルカリ性条件	
	浸出抑制 (オーバーパック)		C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性, 還元条件, 炭酸塩濃度が低い条件			
			M:岩盤変形が小さい			
			T:地温が低い			
移行抑制 (緩衝材) ・低透水性 ・難溶解性 ・収着性		M:岩盤変形が小さい				
		H:地下水流動が緩慢である				
				C:地下水のpHが中性から弱アルカリ性, 還元条件		

T: 熱環境, M: 力学場, H: 水理場, C: 化学場

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

熱環境 (T) : ガラス固化体の発熱性に依存して, ①の期間で求められる地温は, それ以降の期間で求められる地温に比べ低い。

T: 熱環境, M: 力学場, H: 水理場, C: 化学場

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

熱環境(T): ガラス固化体の発熱性に依存して, ①の期間で求められる地温は, それ以降の期間で求められる地温に比べ低い。