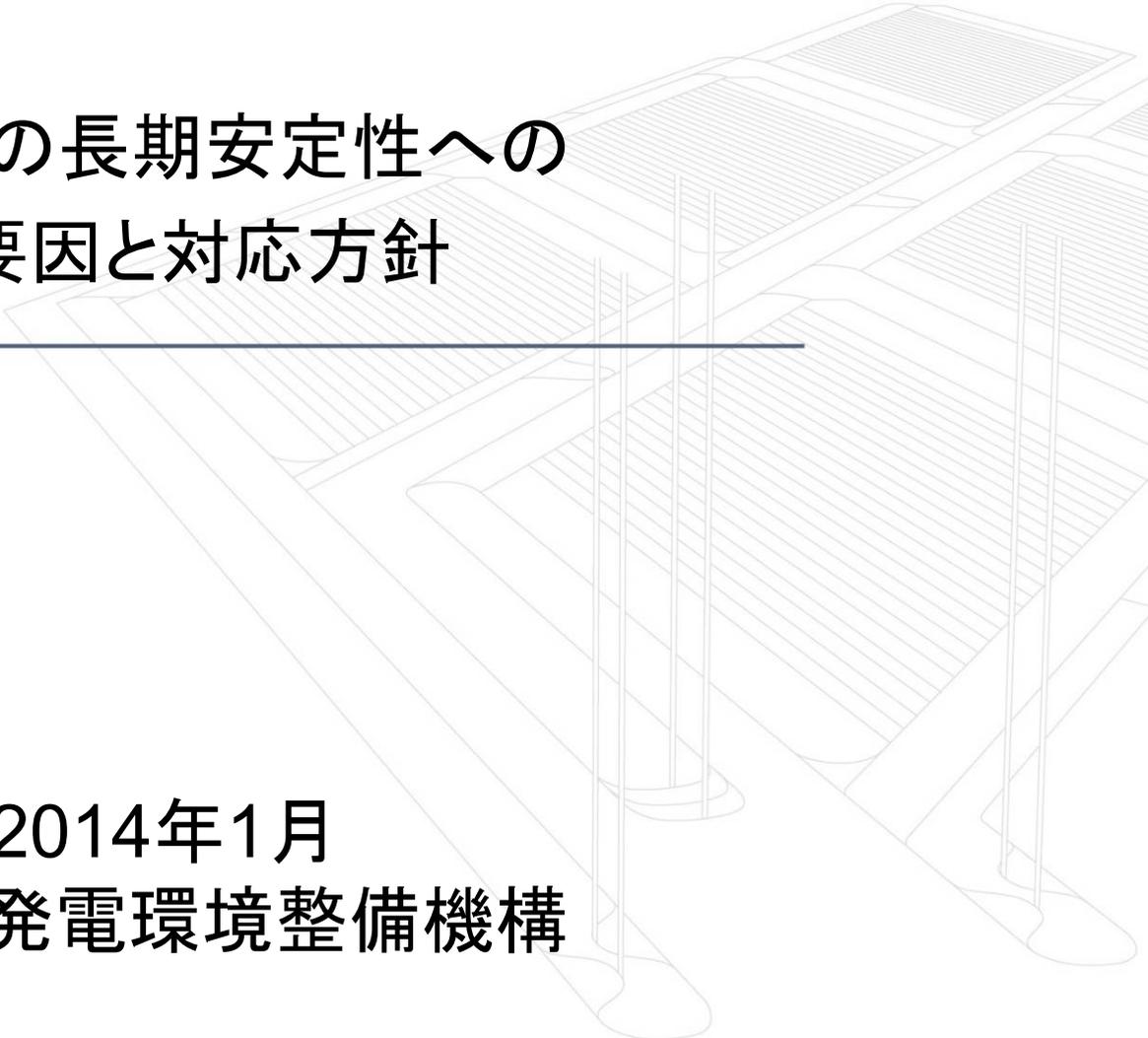




地質環境の長期安定性への 影響要因と対応方針

2014年1月
原子力発電環境整備機構





目次

1. はじめに
2. 閉じ込め機能に必要な地質環境に対する影響要因
 - 2.1 熱環境
 - 2.2 力学場
 - 2.3 水理場
 - 2.4 化学場
3. 物理的隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因
4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

1. はじめに

- 第3回会合において、安全機能等の観点から、好ましい地質環境特性を有する地域が日本に存在することについておおよその見解の一致を得た。
- 今後は地質環境に擾乱を与える天然現象(地質環境の長期安定性)について審議していただく。



■ 今回のご説明内容

1. 閉じ込め機能(移行抑制含む)を維持するために必要となる好ましい地質環境特性(熱環境, 力学場, 水理場, 化学場)に擾乱を与える地質学的な影響要因
2. 人間の生活環境から廃棄体を物理的に隔離する機能を喪失させる地質学的な影響要因
3. 抽出した影響要因から特に影響が著しく, サイト選定において回避が必要な事象の特定など, 「対応の考え方」



閉じ込め機能および物理的隔離機能に擾乱を与える影響要因の考え方と, これらへの対応の考え方が適切か?

		天然現象			
		火山・火成活動	地震・断層活動	隆起・侵食	気候・海水準変動
閉じ込め機能の喪失	熱環境				
	力学場	安全機能の喪失につながる著しい影響要因を特定			
	水理場				
	化学場				
物理的隔離機能の喪失					

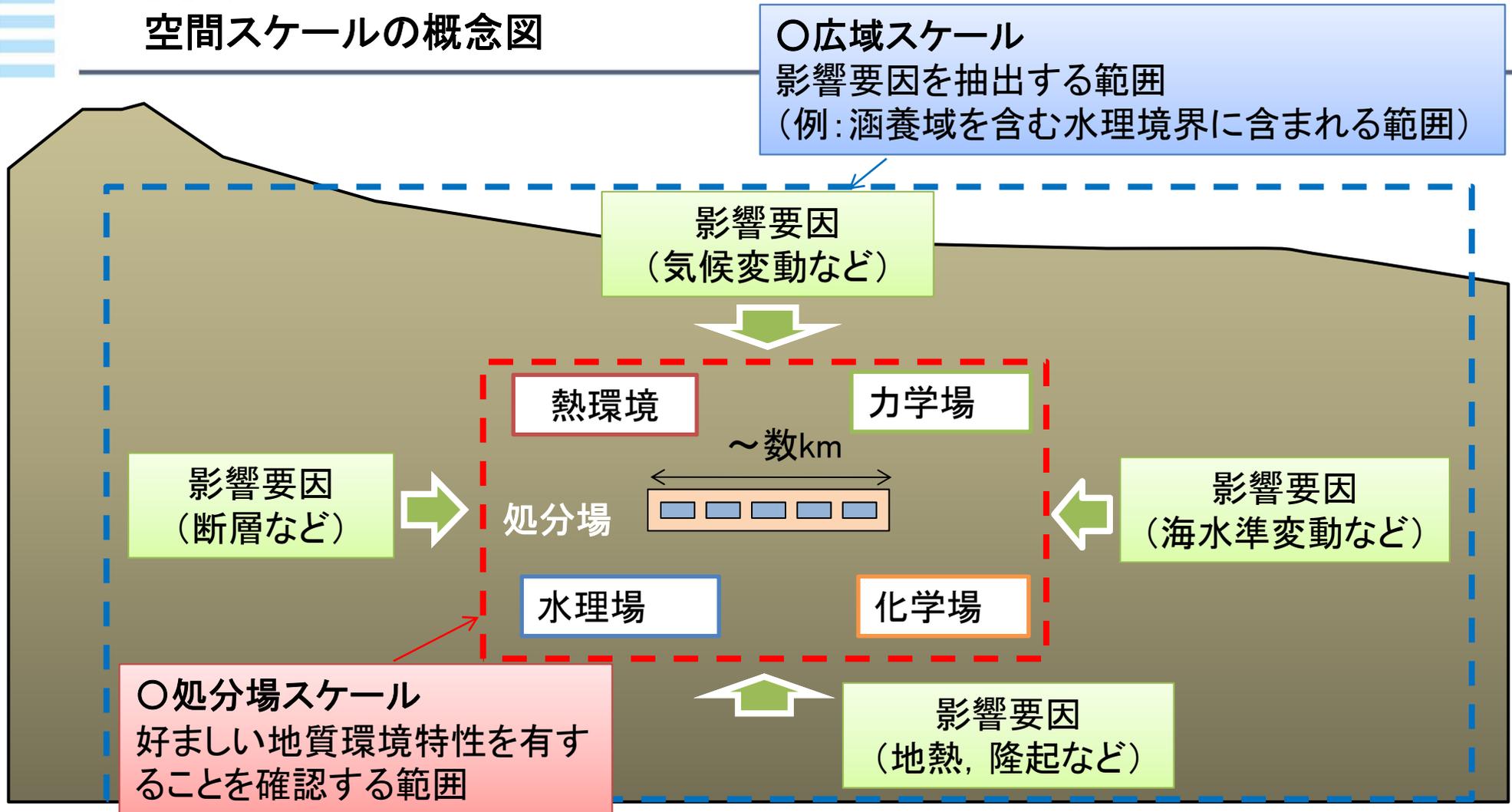
1. はじめに 空間スケールの考え方

地質環境の長期安定性を議論する上で、「好ましい地質環境特性」を確保すべき領域と、その擾乱となる影響要因を考慮する領域に分類して、前提とする空間スケールの考え方を示す。

- ・「好ましい地質環境特性」を確保すべき領域：処分場スケール
 - 処分場及びその近傍を対象とした空間
 - 処分場を設置する岩盤が、好ましい地質環境特性を有することを確認する対象
 - 処分場(地下施設)の水平方向の広がり(2～3km 四方)とその周辺の岩盤を含む領域を目安とする。
- ・擾乱となる影響要因を考慮する領域：広域スケール
 - 処分場スケールの範囲を含み、さらに広範囲かつ深い領域を対象とした空間
 - 好ましい地質環境特性に影響を与える外的な要因(天然現象など)を抽出する対象
 - 例えば、水理場の検討においては、処分施設を通過する地下水流動の涵養域から流出域まで含む範囲(数10 km以上)での検討が必要。

- ・水平方向で数km程度の処分場スケールの領域を、閉じ込め機能に必要な「好ましい地質環境特性」を確保をする領域とする。
- ・広域スケールから地質環境特性の擾乱となる影響要因を抽出する。

1. はじめに 空間スケールの概念図



処分場スケール(赤枠内)において閉じ込め機能に必要な「好ましい地質環境特性」を確保する対象とする。

1. はじめに

時間スケールの考え方

地質環境の長期安定性を議論する上で、影響要因を考慮する期間が、人工バリアおよび天然バリア毎に異なるため、時間スケールの考え方を示す。

○閉鎖後直後の過渡的な期間(p. 6の期間①)

- 地下施設掘削前の元の還元環境の回復、ガラス固化体の発熱量の低下、地下水位の回復と地下施設の再冠水、緩衝材の再冠水が完了するまでの期間。
- 過渡的な期間は100年程度継続すると考えられる(岩盤に依存し、最大1000年程度)。

○オーバーパックによる放射性物質の浸出抑制を期待する期間(p. 6の期間②)

- 過渡的な期間に対し、オーバーパックの機能により、ガラス固化体が地下水と接触することを防止し、放射性物質の浸出を抑制する期間。
- 過渡的な期間が含まれるよう、オーバーパックの機能を1000年以上維持する。

○ガラス固化体の放射性物質の浸出抑制を期待する期間(p. 6の期間③)

- ガラス固化体が地下水に溶けにくいことを利用して、放射性物質の浸出を抑制する期間。
- ガラス固化体が溶解するのに、7万年程度を要すると考えられる。

○緩衝材、天然バリアにより放射性物質の移行抑制を期待する期間(p. 6の期間③およびそれ以降)

- ガラス固化体から浸出した放射性物質の移行を抑制することで、地下深部に放射性物質を長期間とどめ、その間に放射能を減衰させる期間

閉じ込め機能を維持する期間を10万年程度とし、その期間を対象として「好ましい地質環境特性」に対する擾乱となる影響要因を抽出する。

1. はじめに

好ましい地質環境特性の長期安定性に関する時間スケール概念図

「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		
天然対するバリアの影響機能	地質の長期的な変動からの防護	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	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					
	移行抑制			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	
人工バリアの影響機能に対する影響	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		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。	
	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。



2. 閉じ込め機能に必要な地質環境に対する影響要因 説明の流れ

1. 好ましい地質環境特性の条件

好ましい条件の考え方

2. 擾乱となる影響要因と関連事象の抽出

「好ましい地質環境特性」の擾乱となる**影響要因とその関連事象は何か？**

3. (各要因に対し) 著しい影響を与える事象の特定

影響要因のうち、閉じ込め機能の喪失につながる著しい影響を与える事象で、サイト選定により**回避が必要な事象は何か？**

4. サイト選定における回避の考え方

著しい影響要因となる事象をどのように**回避することが可能か？**

* 著しい影響とならない場合は「3.著しい影響を与える事象の特定」までを説明する。

2. 閉じ込め機能に必要な地質環境に対する影響要因 安全確保のために特に重要な「好ましい地質環境特性」

第3回会合資料1「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－」p8より抜粋

	人工バリア設置環境として 好ましい主な地質環境特性	天然バリアとして 好ましい主な地質環境特性	建設可能性の観点から 好ましい主な地質環境特性
熱環境	<ul style="list-style-type: none"> 地温が低いこと 	—	<ul style="list-style-type: none"> 地温が65℃以下であること
力学場	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤のクリープ変形量が小さいこと 	—	<ul style="list-style-type: none"> 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
水理場	—	<ul style="list-style-type: none"> 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 	—
化学場	<ul style="list-style-type: none"> 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 	—	—
	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の炭酸化学種濃度が高くないこと 		

閉じ込め機能の長期間の維持の観点から、環境・場ごとに好ましい地質環境特性に擾乱を与える影響要因と関連事象を抽出する。

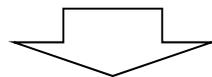
2.1 熱環境： 好ましい地質環境特性の条件

【好ましい地質環境特性】

- 地温が低いこと

【好ましい条件の考え方】

- **緩衝材の最高温度が長期間にわたり制限温度(100°C)を超えないようにすることが必要。**
- 工学的対策として処分深度を浅くすること, 坑道離間距離や廃棄体定置間隔を広くとることにより, 対応は可能であると考えられる。
- ただし, 合理的な対策の範囲としては, 処分深度における岩盤の温度は、廃棄体の発熱量が大きい初期(①の期間)においては60°C未満であることが好ましい(温度条件は、**ガラス固化体の発熱量に依存**)。
- また, ①の期間以降は, ガラス固化体の発熱量が小さいので, 100°C程度を下回るような地温が好ましい。



地下深部の地温が著しく高くなり, 緩衝材の熱変質の可能性が高くなる温度条件となる場合に, 著しい影響を与える事象と考える。

2.1 熱環境：擾乱となる影響要因と関連事象の抽出

【擾乱となる影響要因】

- 将来において地温を上昇させる要因としては、処分場の周辺における新たな「**熱源の移動・発生**」と「**地表の温度の上昇**」が考えられる。
- 「熱源の移動・発生」に関連する主な地質現象としては、マグマや熱水に代表される**地熱活動**が考えられる。また、断層が活動する際に、**断層面において摩擦熱**が発生することも考えられる。
- 「地表の温度の上昇」に関連する主な地質現象としては、**気候変動**による日射量等の変化に伴う気温変化が考えられる。また、火山活動に伴い発生した**火砕流**が地表に到達した場合にも、地温が変化することが考えられる。

抽出した影響要因と主な関連事象

影響要因	主な関連事象
熱源の移動・発生	地熱活動
	断層活動に伴う摩擦熱
地表の温度の上昇	気候変動による日射量等の変化に伴う気温変化
	火砕流による地表温度の上昇

2.1 熱環境： 著しい影響を与える事象の特定 「熱源の移動・発生：地熱活動」

【第2次取りまとめの考え方】

- マグマや高温岩体の存在により，火山周辺の地下では深度100mあたり5～10°C以上の高い勾配で地温が上昇するとされている。一方，地下1～2km程度の浅い地殻内の温度は，熱源の深度に支配され，熱源が10km以深では熱的影響は無視できる(分冊1:2. 4. 2)。
- 最も大きな地温勾配は38°C/100mである(総論レポート:3. 2. 4)。

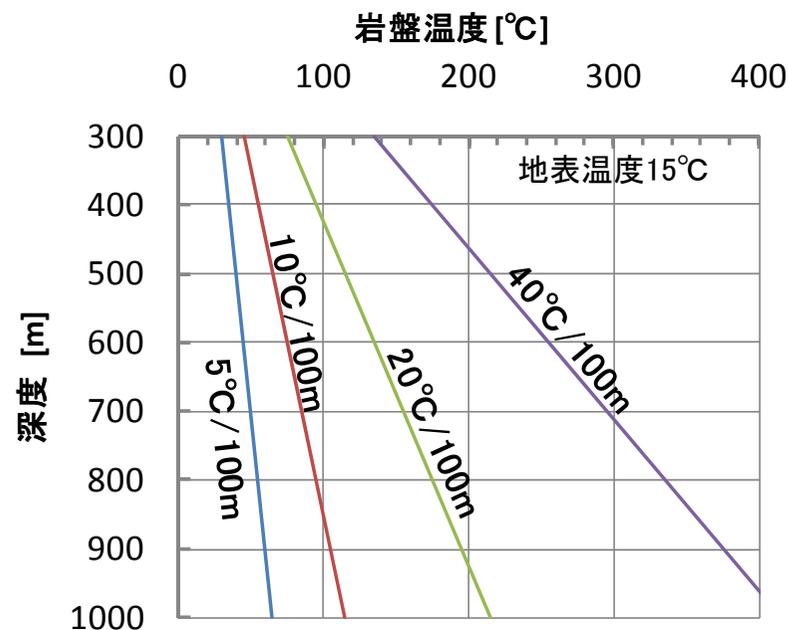
【その後の知見】

- 地熱活動に伴い，地温勾配が5～10°C/100mを超える地域が国内にも分布する(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)。

【NUMOの考え方】

- 高い地温勾配を生じるような地熱活動が発生すると，地下深部の地温が高くなるので，著しい影響を与える事象と考えられる。
- したがって，将来，地熱活動が発生する可能性が高い地域は，サイト選定において回避することが必要。

著しい影響を与えると考えられるので
サイト選定における回避の考え方を提示



地温勾配に基づいた岩盤温度の推定

2.1 熱環境: サイト選定における回避の考え方(1/2)

「熱源の移動・発生: 地熱活動」

【第2次取りまとめの考え方】

- 地温の上昇, 熱水対流系の形成など, 火山・火成活動によって深部地質環境の熱的状态が大きく変化し得る範囲は, 一般に火山の噴出中心から数km~20km程度までとみなすことができる。個々の地域においては, 評価の対象とする火山や火山地域などに応じた影響の範囲を考慮することにより, 地層処分システムに対する著しい影響は回避できると考えられる(総論レポート: 3. 2. 4を一部改変引用)。

【その後の知見】

- 高地温勾配($>10^{\circ}\text{C}/\text{m}$)地域は活火山の分布と極めて整合的で, 地熱活動は火山活動と密接に関連している。また, 火山フロントの背弧域における多数の熱水変質帯や鉱床の分布は, **地熱活動も火山活動と同様に過去から現在にわたり偏在する地質現象**であることによると考えられる(高橋・Martin, 2004, 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)
- **現在の地熱活動域は, 現在のテクトニクスが維持される限りは大きく変わらない**と考えられる(八幡, 2002)。
- 第四紀火山から数十km以上離れた地域において存在する **$5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 以上の高温域**は, 地熱活動が最近になって新規に生じたということではなく, **その地域に長期にわたって継続する地質現象**と考えられている。(Matsumoto et al., 2003; Umeda et al., 2009; 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)
- わが国における火山活動の場は, 今後, 少なくとも100万年程度は継続すると考えることができる(産業技術総合研究所, 2012, 高橋・Martin, 2004など)。ただし, 中部・南部九州では, テクトニクスの不安定さに起因して, 火山活動評価に関する将来予測の不確実性が残されている(Chapman et al., 2009など)。

2.1 熱環境： サイト選定における回避の考え方(2/2)

「熱源の移動・発生：地熱活動」

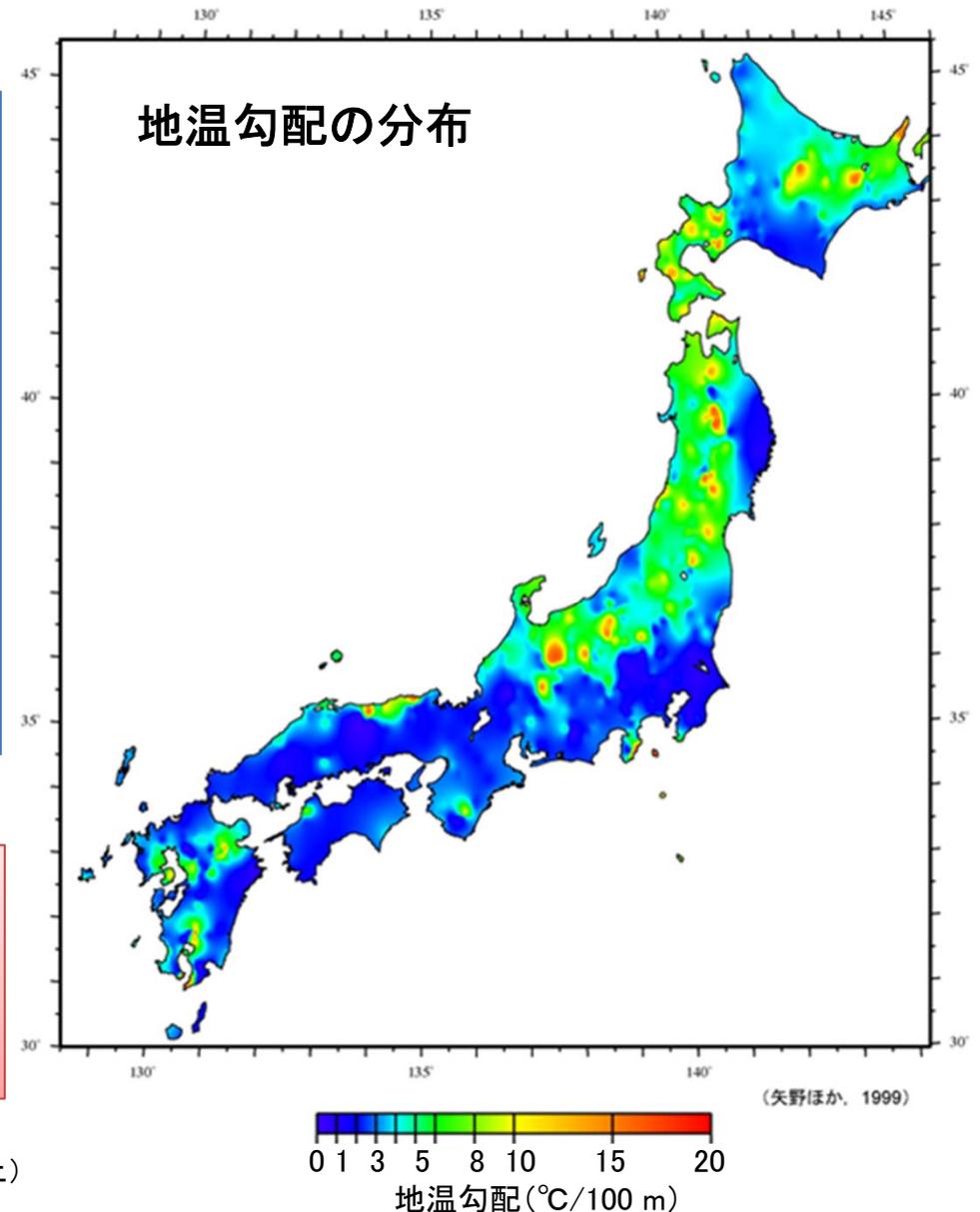
【NUMOの考え方】

- **地熱活動**は地下のマグマの分布と強い相関性があり、現在のテクトニクスが維持される限りは、**その分布は大きく変わらない**と考えられる。
- **非火山性の地熱活動**も、その分布は大きく変わることなく、**長期にわたって継続**するものと考えられる。
- これらの地熱活動が盛んな地域は、**現在においても地温勾配が高く**、地下深部の地温が高いと考えられる。
- そのような地域の分布を文献情報や現地調査に基づいて把握することは可能である。



- 地熱活動の著しい影響をサイト選定により回避することが可能であると考えられる。
- このような地域を避けることで、好ましい条件を満足する地域を選定できる。

(地熱活動の説明は以上)



2.1 熱環境： 著しい影響を与える事象の特定 「熱源の移動・発生：断層活動に伴う摩擦熱」

【第2次取りまとめの考え方】

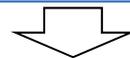
- 断層が活動した結果として、断層面に沿って摩擦熱が発生する可能性がある。ただし、熱の影響は一時的で、範囲は破碎帯内にとどまる(分冊1:2.3.2)。

【その後の知見】

- 阿寺断層では、現在の破碎帯内で現在の断層に沿って2,000万年前頃ないし第四紀以前に広い範囲で200°Cには達しない加熱があったことを確認(山田ほか, 2012)
- 野島断層の上盤側に認められる幅約50 mの断層破碎帯には、熱水変質に伴う濁沸石化などが見られており、形成初期の断層活動期に150~280°Cの熱水があったと考えられる(Boullier et al., 2004a)
- 台湾集集地震(1999年9月21日, Mw7.6)の際に活動した断層の黒色断層ガウジ帯(幅十数cm)では摩擦熱により350°C以上の高温流体が発生し、その高温流体は低透水性の断層ガウジから外部に拡散しなかったと考えられる(Ishikawa et al., 2008)

【NUMOの考え方】

- 断層活動に伴う摩擦熱により150~400°C程度の熱水が断層破碎帯内において形成される可能性がある。
- ただし、このような摩擦熱の発生は一時的なもので、**粘土鉱物を熱変質させることなく、短時間で地温程度に戻ると考えられる**。また、**熱的影響の範囲は、断層破碎帯内にとどまると考えられる**。
- 以上のことから、処分場内で摩擦熱を伴うような断層活動が発生した場合、一時的に好ましい条件を超えて地温が著しく上昇する可能性がある。
- したがって、**断層活動に伴う摩擦熱は著しい影響を与える事象ではない**と考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

(断層活動に伴う摩擦熱の説明は以上)

2.1 熱環境： 著しい影響を与える事象の特定

「地表の温度：気候変動による日射量等の変化に伴う気温変化」

【第2次取りまとめの考え方】

- 現在に比べ間氷期の最温暖期には**2°C～3°C高かった**と考えられる(分冊1, 2. 6. 3)。

【その後の知見】

- 氷床コアのデータによれば、最後の間氷期(約12.5万年前)における極域の平均気温は、**現在より3～5°C高かった**とされており、この程度の気温上昇は300m以深の地下の温度分布に影響を与えないことがモデル計算などで示されている(IPCC,2007*など)。

【NUMOの考え方】

* 参照：<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/>

- **長期的な平均気温の変動幅は10°C程度**と考えられ、現在と比較しても著しく高温になることはない。地表付近の平均温度と地温勾配から見積もった平均地温の変動範囲も同程度と考えられる。
- 長期的な平均気温の変動に対しては、合理的な範囲で工学的対策が実施可能であると考えられる。
- したがって、**気候変動による日射量等の変化に伴う気温変化は著しい影響を与える事象**ではないと考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

(気候変動による日射量等の変化に伴う気温変化の説明は以上)

2.1 熱環境： 著しい影響を与える事象の特定 「地表の温度：火砕流による地表温度の上昇」

【第2次取りまとめの考え方】

(火砕流による地表温度の上昇の長期的な影響に関する記述はない)

【その後の知見】

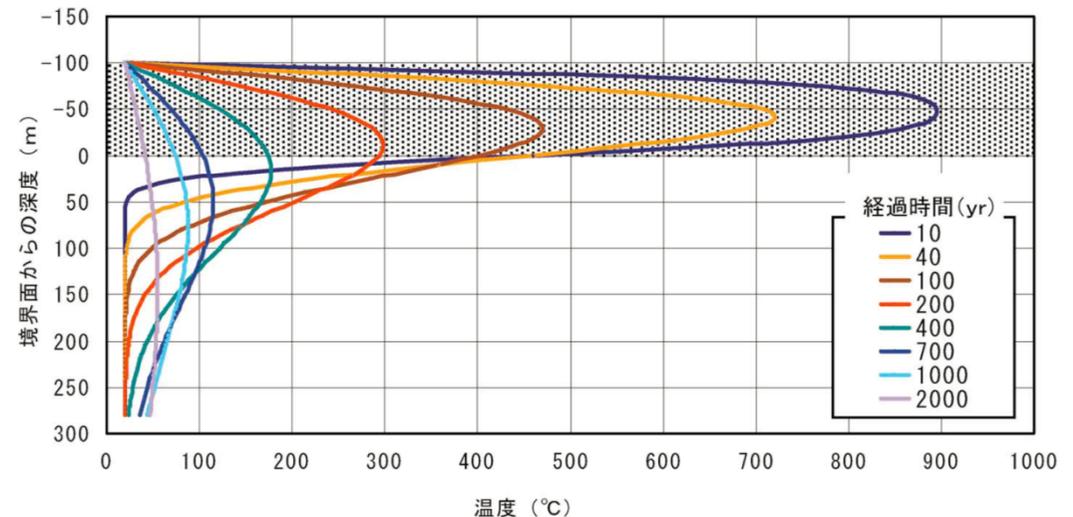
- 大規模火砕流の熱的影響について、事例調査と熱解析を実施した報告があり、層厚さ100m、温度900°Cの火砕流が地温に与える影響を評価している。地下300m付近において、温度は2000年後まで上昇するが、最高60°C程度であることが示されている(石丸・角田, 2002)。

【NUMOの考え方】

- 大規模火砕流が長期間地表を覆ったとしても、地下1000m程度までの範囲の温度上昇は100°Cを下回る(地温勾配が5°C/100m以下の場合)。
- 合理的な範囲で工学的対策が実施可能と考えられる。
- 以上のことから、**火砕流による地表温度の上昇は著しい影響**ではないと考えられる。

著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

(火砕流による地表温度の上昇の説明は以上)



層厚さ100m、温度900°Cの火砕流が地温に与える影響
(石丸・角田, 2002)

2.1 熱環境：まとめ

【影響要因となる事象と回避の必要性のまとめ】

影響要因	関連事象	回避の必要性	考慮すべき天然現象
熱源の移動, 発生	地熱活動	○	火山・火成活動 (非火山性熱水も含む)
	断層活動の摩擦熱	—	地震・断層活動
地表の温度の 上昇	地表面の気温変動	—	気候・海水準変動
	火砕流による地表温度の上昇	—	火山・火成活動

- 影響要因のうち、サイト選定において**回避が必要な事象としては「地熱活動」**があげられる。
- 高い地温勾配を生じる地熱活動は火山活動や非火山性高温岩体と密接に関係があり、また、**現在の火山活動の場は、今後も継続する**と考えられる。
- したがって、熱環境に対する擾乱をさけるために、火山の分布する領域をはじめとする**高い地温勾配を有する地域を回避することは可能**である。
- なお、このような地域を避けることで、好ましい条件を満足する地域を選定できる。

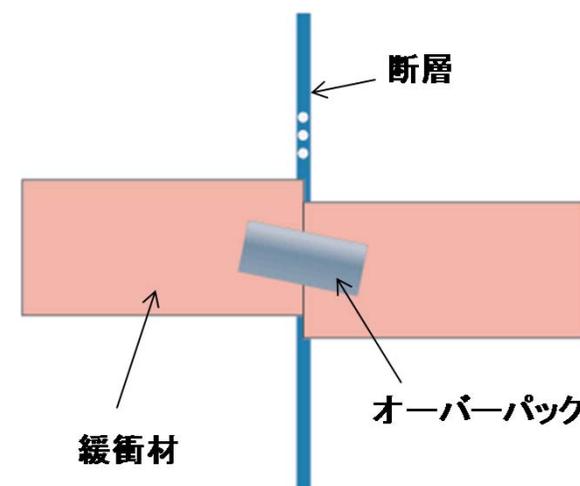
2.2 力学場： 好ましい地質環境特性の条件

【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」→影響要因を広く抽出するため、「岩盤の変形が小さいこと」として検討。

【好ましい条件の考え方】（※数値は第2次取りまとめの例）

- **オーバーパック**は、1000年以上の期間の耐食性と構造健全性を考慮して、**厚さを190mm**に設定している。
- 構造健全性に関連して、オーバーパックに**作用する外力**として、以下を考慮している。
 - 静水圧：地下300～1000mにおいて、3～10MPa
 - 岩盤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の合計（硬岩：0.9MPa，軟岩：1.9 MPa）
- 以上の外力に対し、**構造健全性に必要な厚さを110 mm**としている。
- 最も影響が厳しいと考えられるのは、廃棄体を横切るように、断層が変位する場合である。模型試験では緩衝材厚さの80%程度の変位量を受けた場合にも、緩衝材が塑性変形するため、オーバーパックが回転し、破損しないことを評価している（せん断速度100 mm/秒）。
- ただし、**変位量が緩衝材の厚さ(700 mm)を超えた場合**には、オーバーパックに直接せん断力が作用するため、**破損する可能性が高くなる**。
- また、**緩衝材**についても、**その厚さを超えてせん断変形**を受けると、緩衝材の性能が低下する可能性が高くなる。



「岩盤の変形」の人工バリア設置環境に対する影響の概念図(断層のずれの場合)
(JAEA, 2008 に基づいて作成)

地下深部における岩盤の変形(例えば、断層の変位量)が緩衝材の厚さを上回る場合に、著しい影響を与える事象と考える。

2.2 力学場： 擾乱となる影響要因と関連事象の抽出

【擾乱となる影響要因】

- 将来において岩盤が変形する要因としては、地下深部の「**岩盤のクリープ変形量の増大**」, 「**岩盤の破断・破碎**」, 「**岩盤の弾性変形**」が考えられる。
- 「**岩盤のクリープ変形量の増大**」に関連する主な地質現象としては、温度上昇に伴う岩盤のクリープ特性の変化があり、温度上昇の要因としては**地熱活動**が考えられる。
- 「**岩盤の破断・破碎**」に関連する主な地質現象としては、**地下数千m以深にある震源断層**の変位が、**断層のずれ**として処分深度(300-1000mと想定)にある岩盤に到達することが考えられる。
- 「**岩盤の弾性変形**」に関連する主な地質現象としては、**地震動による岩盤のひずみ**が考えられる。ただし、この変形は地震動が発生している間だけの一時的なものである。

表 抽出した影響要因と主な関連事象

影響要因	主な関連事象
岩盤のクリープ変形量の増大	地温上昇(地熱活動)
岩盤の破断・破碎	処分深度に達する断層のずれ
岩盤の弾性変形	地震動による岩盤のひずみ

2.2 力学場： 著しい影響を与える事象の特定

「岩盤のクリープ変形量の増大：地温上昇（地熱活動）」

【第2次取りまとめの考え方】

（岩盤のクリープ特性の温度依存性に関連する記述はない）

【その後の知見】

- 常温と比較し、温度60℃では堆積軟岩の三軸圧縮強度はやや低下するが、変形特性の温度依存性は見られないか、わずかである（岡田，2005）。
- 泥岩のクリープ特性の温度依存性はないが、凝灰岩には依存性があり、岩種により異なる（岡田，2006）。

【NUMOの考え方】

- 岩盤のクリープ特性の温度依存性が認められるが、その影響は岩種により異なる。
- 温度依存性が認められる場合には、クリープ変形量に基づいて人工バリアの設計に反映するなど、工学的対策を実施することが可能であると考えられる。
- したがって、**地温上昇は力学場に対する著しい影響要因とはならない**と考えられる。



著しい影響要因とはならないと考えられる。

2.2 力学場： 著しい影響を与える事象の特定 「岩盤の破断・破砕：処分深度に達する断層のずれ」

【第2次取りまとめの考え方】

- 確認されている主な活断層の平均変位速度は、0.01～10 m／1000年の範囲で、活断層の変位の向きと速度は、過去数十万年以降、大きく変化していない。(分冊1:2.3.1)

【その後の知見】

- 地震防災の観点などから実施された調査の結果に基づき、各種の活断層図が拡充されているが、上記の範囲を超える事例の報告はない(中田・今泉, 2002; 産業技術総合研究所ホームページなど)。

【NUMOの考え方】

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層は、変位量が大きく、その影響範囲が広いと、合理的な範囲の工学的対策が容易ではないと考えられる。
- 一方、それ以外の断層については、処分パネルの形状や大きさの設計、廃棄体定置位置を合理的に設定するなどの工学的対策が可能であると考えられる。
- **以上のことから、繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層は、著しい影響を与える事象であると考えられる。**



著しい影響を与えると考えられるので
サイト選定における回避の考え方を提示

2.2 力学場:サイト選定における回避の考え方(1/2)

「岩盤の破断・破砕:処分深度に達する断層のずれ」

【第2次取りまとめの考え方】

- わが国における主な地震・断層活動は、既存の活断層帯において、過去数十万年程度にわたり同様の活動形式で繰り返し起こっており、この間、地殻応力場はおおむね安定して持続してきたとみなすことができる。このことから、十万年程度の将来についても、現在の活動の場が継続するものと考えることができる。
- 断層活動による地質環境への影響は、主に活断層破砕帯およびその周辺に限られる。活断層破砕帯の幅は数mから最大でも数百m程度であり、また、断層活動にともない、周辺岩盤中にずれ変位が生じる可能性のある小断層などの分布範囲は、大きな活断層でも数km程度以内と考えられる。(分冊1:2.3.3)

【その後の知見】

- 日本列島は、第四紀よりも古い時代に当時の広域応力場の下で形成された断層が、第四紀以降の東西圧縮の広域応力場に応じて、あるいは局所的な地殻応力場の変化などに起因して、一時的にあるいは繰り返し再活動している(山崎, 2006など)。
- 第四紀以降に活動している断層のうち、最近約40万年前以降に同一の場所で繰り返し活動している断層は活断層として認定されている(地震調査研究推進本部 地震調査委員会 長期評価部会, 2010)。
- 通常、M7以下の地震では断層のずれが地表まで達することはなく、M6以下では極めてまれである(Cloos, 2009)。地表において確認できない場合、あるいは見落としがある場合などを含めて、地下には活断層とは認定されていない断層が多数存在する(高橋ほか, 2006など)。
- 近年、過去に活断層が認識されていなかった地域において発生した規模の大きな内陸地殻内地震を対象として詳細な調査が実施された結果、処分深度に達する断層や活断層に関連する地下構造、過去の活動履歴などが確認されている(杉山ほか, 2005など)。
- 大規模な活断層帯では、断層活動による力学的影響は、プロセスゾーンあるいはダメージゾーンの幅に基づくと断層から数百m程度であるものの、数kmにも及ぶ場合もある(金折, 2001, 長友・吉田, 2009など)。影響範囲は断層の長さ按比例して変化し(Scholz, 2002)、定量的に推定することが可能である。

2.2 力学場： サイト選定における回避の考え方(2/2)

「岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ」

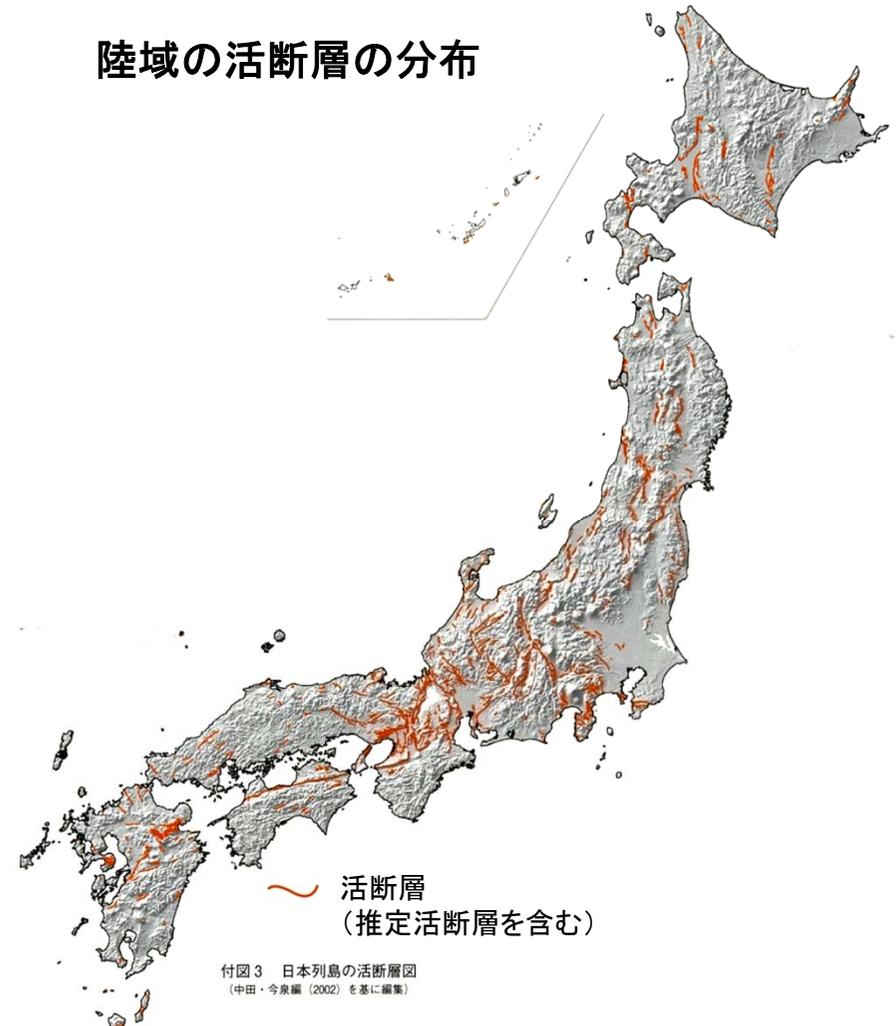
【NUMOの考え方】

- わが国における地震・断層活動は、既存の活断層帯において過去数十万年にわたり同様の活動様式で繰り返し活動しており、**十万年程度の将来も既存の活断層帯において、現在の活動様式が継続する**と考えられる。
- 断層の力学的影響が及ぶ範囲は、**断層から数百m～数kmの範囲**であり、断層の長さから定量的に推定することが可能である。

- このような活断層とその影響領域を避けることで、「岩盤の変形が小さいこと」を満足できる地質環境を選定できる。
- なお、現在認定されている活断層以外のうち、現地調査によりその存在が確認される断層については、活動性を評価するとともに、工学的対策の実施なども含めて、対応を検討する。
- また、断層の活動性の評価技術については、今後も開発を進め、精度の向上に努める。

(処分深度に達する断層のずれの説明は以上)

陸域の活断層の分布



(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)

2.2 力学場： 著しい影響を与える事象の特定 「岩盤の弾性変形：地震動による岩盤のひずみ」

【第2次取りまとめの考え方】

- 地下数百m以深では一般に地震動による影響は小さいと考えられる。(分冊1:2.3.3)
- 地震が起こった際に**人工バリアは岩盤と一体となって振動する**と考えられるため、想定される最大級の地震動を考慮した上で、**工学的な対策を施すことが可能**である。

【その後の知見】

- 深度250m以深(87地点)のKiK-net観測データから、東北地方太平洋沖地震を含めたM7以上の地震において、深度250m以深における地震加速度は、深度に依存せず同一地点の**地表での観測値に対して1/3～1/5程度**であることが確認された(藤川ほか, 2012)。

【NUMOの考え方】

- 地下深部の地震加速度は、深度に依存せず同一地点の地表での観測値に対して1/3～1/5程度である。
- 地震動が処分場に入射しても**人工バリアは岩盤と一体となって振動する**ため、影響は小さい。
- ただし、長期的な影響については、再来性や人工バリア特性の変化などを考慮した解析などにより確認し、必要に応じて人工バリア設計に反映することが可能であると考えられる。
- したがって、**地震動による岩盤のひずみは、著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

(地震動による岩盤のひずみの説明は以上)

2.2 力学場：まとめ

【影響要因となる事象と回避の必要性のまとめ】

影響要因	関連事象	回避の必要性	考慮すべき天然現象
岩盤のクリープ変形量の増大	地温上昇(地熱活動)	—	火山・火成活動
岩盤の破断・破碎	処分深度に達する断層のずれ	○	地震・断層活動
岩盤の弾性変形	地震動による岩盤のひずみ	—	地震・断層活動

- 影響要因のうち、サイト選定において**回避が必要な事象としては「岩盤の破断・破碎」に関連して「処分深度に達する断層のずれ」**があげられる。
- 断層活動は、既存の活断層帯において過去数十万年にわたり同様の活動様式で繰り返し活動しており、**十万年程度の将来も既存の活断層帯において、現在の活動様式が継続する**と考えられる。また、力学的な影響範囲は数百mから数kmと考えられる。
- したがって、力学場に対する著しい擾乱をさけるために、繰り返し活動し、規模の大きい活断層とその影響範囲を**候補地域から回避**することが考えられる。
- このような地域を避けることで、好ましい条件を満足する地域を選定できる。
- なお、現在認定されている活断層以外の断層で、現地調査によりその存在が確認される断層については、活動性を評価するとともに、工学的対策の実施なども含めて、対応を検討する。また、断層の活動性の評価技術については、今後も開発を進め、精度の向上に努める。

2.3 水理場:好ましい地質環境特性の条件

【好ましい地質環境特性】

- 岩盤中の動水勾配や透水性, 割れ目の透水性が小さく, **地下水流動が緩慢なこと**

【好ましい条件の考え方】

- 処分場スケール**を対象とした, 地下水の動きは, 主に動水勾配と岩盤自体の透水性に支配されている。
 - 動水勾配は, 地表付近では地形に強く依存するが, 地下深部では地表に比べて局所的な地形の影響が少ないため, 動水勾配は緩やかになると考えられる。過去に**動水勾配が0.1となるケースで安全性を評価**しているが, この程度の動水勾配であれば, **有意な影響を与えない**ことを確認している。
 - 岩盤の透水性は, 地下水の通り道となる**割れ目**や, 岩石を構成する鉱物粒子間の**間隙の構造**に依存する。
- 広域スケール**を対象とした, 地下水の動きは, 地域の地質構造や地理的条件(地形, 気候)に依存する。
 - 地質構造としては, 特に**地下水の移行経路となり得る断層・破碎帯(透水性が高い場合)**などが重要な要素となる。
 - 地理的条件としては, **涵養量(地形の効果も含む), 降水量や蒸発散量**, さらに, 沿岸部であれば, 地下深部の**塩水域と淡水域の分布**も地下水流動に影響を与える。

処分場スケールにおいて, 地下深部の動水勾配が0.1を大きく超える場合や, 地下水の通り道となり得る割れ目が極端に密集するような場合に, 著しい影響を与える事象と考える。

2.3 水理場： 擾乱となる影響要因と関連事象の抽出

【擾乱となる影響要因】

- 将来において水理場が変動する要因としては、地下深部の「**動水勾配の増加**」,「**地下水流動経路の変化**」,「**涵養量の変化**」が考えられる。
- 「動水勾配の増加」に関連する主な地質現象としては、沿岸部においては、**海水準変動**により海側の水位が低下することや、侵食作用に伴う**地形変化**が考えられる。また、**地震に伴う地下水位(または水圧)の変化**も考えられる。
- 「地下水流動経路の変化」に関連する主な地質現象としては、地下水の地表における**流出点の変化**や、**塩淡水境界の位置が変化**することによる経路の変化が考えられる。また、対象地域にある**断層がずれる**ことにより、その透水性が変化した場合も、地下水流動経路に影響を与える可能性がある。
- 「涵養量の変化」に関連する主な地質現象としては、**涵養域の降水量の変化**があげられる。

抽出した影響要因と主な関連事象

影響要因	主な関連事象
動水勾配の増加	海水準変動
	地形変化
	地震に伴う地下水位(または水圧)の変化
地下水流動経路の変化	流出点の変化, 塩水／淡水境界の移動
	断層のずれに伴う透水性の増加
涵養量の変化	涵養域の降水量の変化

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定 「動水勾配の増加：海水準変動」

【第2次取りまとめの考え方】

- 気候変動の地質環境への影響として重要なのは、地下水流動系の変化である。氷期には海水準が低下し、地下水の動水勾配が大きくなり、地下水の水理や水質の変化が予想される(分冊1:2.6.3)。
- 過去数10万年における海水準は、**現在に比べて+5 m~-120m程度**の範囲で変動してきた(分冊1:2.6.3)。

【その後の知見】

- 氷期には海水準が**最大で150 m程度低下**し、最終間氷期には、グリーンランド氷床の大幅な縮小が約5mにおよぶ海水準の上昇をもたらしたと推測されている(Cuffey and Marshall,2000など)。

【NUMOの考え方】

- 沿岸部では隆起作用と気候変動に伴い、広域スケールで**相対的に海水準が変動し、水頭分布が変化**するため、**動水勾配が変化**する可能性がある。
- 広域スケールにおける海水準変動の幅が、+5 m~-150mの範囲内であれば、処分場スケールにおける動水勾配の変化に応じて、処分深度を深くすることや、施設配置の工夫などの工学的対策が合理的な範囲で実施可能と考えられる。
- したがって、**海水準変動は著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

(海水準変動の説明は以上)

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定 「動水勾配の増加：地形変化」

【第2次取りまとめの考え方】

- 将来の動水勾配の分布を推定する上では、隆起や侵食によって地形勾配がどの程度変化するかが重要なパラメータである。
- 隆起・沈降・侵食による地形勾配の増加は、動水勾配を増加させ、地下水流動を変化させることが想定される。
- 動水勾配や地下水位の勾配は、活褶曲や河川近傍を除いてほとんど変化しないと考えられる（以上、分冊1：2.5.2）。

【その後の知見】

（地形変化について、従来の考え方と異なる知見の報告は見いだされなかった。）

【NUMOの考え方】

- 隆起・沈降・侵食，海水準変動に伴う侵食，地表の断層のずれなどにより**広域スケールで地形が変化し**，水頭分布などが変化して，**処分場スケールの動水勾配が変化する可能性がある**。ただし，**地下深部に行くほど地形が動水勾配に与える影響は小さくなる**。
- したがって，処分深度を深くすることや，施設配置の工夫するなどの工学的対策が合理的な範囲で実施可能と考えられ，**著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

（地形変化の説明は以上）

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定

「動水勾配の増加：地震に伴う地下水位（または水圧）の変化」

【第2次取りまとめの考え方】

- 地震前後の地下水流動や水質の変化は、季節変化などの経時変化に比べて小さい。また仮に大きな地震があったとしても、その変化は一時的であり、**数カ月後にはもとの水位に戻る**と思われる。（分冊1：2. 3. 2）。

【その後の知見】

- 2011年東北地方太平洋沖地震では、地下水の水位や水質はわが国の広範囲にわたり変化が観測されたものの、ほとんどの観測地点において**1年以内に地震発生前の状態に回復**している（産業技術総合研究所ホームページ*1ほか）。また、1年以上にわたり変化が継続した場合でも、長期的には安定な状態に回復しており、以上のような変化は過去の観測事例（奥澤・塚原，2001など）と同様である。
- 一方、**2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う温泉の自噴**は、地震の発生から2年以上にもわたり**継続**している（産業技術総合研究所ホームページ*2など）。

【NUMOの考え方】

*1 <https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/index.shtml>

*2 <http://unit.aist.go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen.html>

- 地震に伴う地下水位（または水圧）の変化は、広域スケールで発生するが、サイトの地質構造（遮水性断層の有無など）に依存して、処分場スケールでも変化すると考えられる。
- 影響の程度は、水圧変化が発生している頻度や範囲に依存するが、これまでの観測の範囲の変化であれば、新たな工学的対策は必要ないと考えられる。
- したがって、**著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。
- ただし、**福島県浜通り湧水の事例については、原因が十分に解明されていないので、今後も検討を進める。**



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

（地震に伴う地下水位の変化の説明は以上）

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定

「地下水流動経路の変化：流出点の変化，塩水／淡水境界の移動」

【第2次取りまとめの考え方】

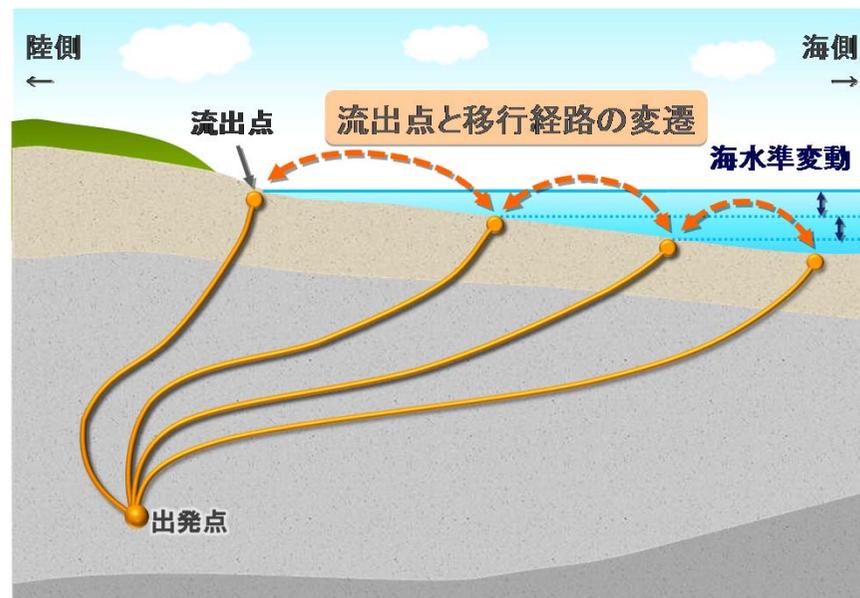
- 気候変動の地質環境への影響として重要なのは，地下水流動系の変化である。氷期には海水準が低下し，地下水の動水勾配が大きくなり，地下水の水理や水質の変化が予想される(分冊1:2.6.3)。
- 塩水／淡水境界による地下水流動への影響としては，(塩分濃度の違いによる密度差により)境界に沿って淡水が上昇することがあげられている(分冊1:3. 3. 1)。

【その後の知見】

- 動水勾配の長期的変化については，海水準変動などを考慮した非定常の地下水流動解析により，地下水の水頭分布などから推定する方法の開発が進んでいるが(尾上ほか，2009)，上記と異なる知見の報告はない。

【NUMOの考え方】

- 沿岸部では海水準変動により，広域スケールで塩淡水境界位置や流出点^①が変化し，処分場スケールにおける地下水流動経路^②が変化する可能性があるが，そのような影響を取り込んで，処分場の設置位置や深度など工学的対策を実施することは可能である。
- したがって，広域スケールにおける流出点^①の変化，塩水／淡水境界の移動は著しい影響を与える事象^③とはならないと考えられる。
- なお，広域スケールにおける流出点^①の変化については，安全評価において考慮する。



海水準変動に伴う移行経路(地下水流動経路)の変化の概念図

著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

(流出点の変化，塩水／淡水境界の移動の説明は以上)

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定

「地下水流動経路の変化：断層ずれに伴う透水性の増加」

【第2次取りまとめの考え方】

- 地震・断層活動が地層処分システムへ与える影響としては、岩盤の破断・破碎とこれに伴う**地下水移行経路の形成**、地震動による岩盤や地下水の性質の変化などが想定される。
- 野島断層の活動に伴う湧水のトリチウム年代は、数年～数十年前であった（佐藤ほか，1999）。このことから野島断層の活動に伴う湧水は、地下深部に由来する地下水ではなく、地表付近の地下水と考えられる。したがって、断層活動に伴う水理的な変化は、主に地下浅部で起こり、地下深部での影響は小さいものと推察される（分冊1：2.3.2）。

【その後の知見】

- 野島断層を事例として、活動直後、断層付近の透水性が上昇したが、8年以内に回復したと考えられる（北川ほか，2008，Tadokoro and Ando, 2002など）。

【NUMOの考え方】

- **処分場スケール**で活断層の透水性が変化し、それが主要な地下水流動経路となる場合には、天然バリアの性能に**著しい影響を与える**ため、**処分場の設置領域からは回避**することが望ましい。
- なお、広域スケールにおいては、断層の透水性が変化した場合、流動経路を変化させるので、安全評価において考慮する。



著しい影響を与えられられる。

サイト選定における回避の考え方を提示（“岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ”を参照）

（断層ずれに伴う透水性の増加の説明は以上）

2.3 水理場：著しい影響を与える事象の特定 「涵養量の変化：涵養域の降水量の変化」

【第2次取りまとめの考え方】

- 降水量の変動に関するデータは限られているが、氷期の日本列島では現在の7割から半分近くまで減少していた可能性が高い（分冊1：2.6.3）。
- 十万年の氷期・間氷期の周期が卓越しているとともに、その中に更に短い周期が認められる（分冊1，2.6.1）。

【その後の知見】

- 最終氷期極大期には、降水量が現在の**5～7割に減少**していたと推定される（松末ほか，2000）。
- わが国における約25万年前から現在までの気候変動が詳細に把握され、将来予測に必要な情報が蓄積されている（大場，2006など）

【NUMOの考え方】

- 氷期には、現在と比較して、降水量は5～7割程度に減少する可能性がある。
- 約10万年周期の氷期・間氷期サイクルよりも短い数万年周期の気候変動についても留意する必要がある。
- 涵養量は、広域スケールにおいてサイトの地形や局所的な気候に依存するので、サイトごとに涵養量を評価し、処分場スケールに対する影響を評価する必要がある。
- ただし、このような変化に対しては、処分場の設置位置など工学的対策を実施可能と考えられ、**著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。



著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

（涵養域の降水量の変化の説明は以上）

2.3 水理場:まとめ

【影響要因となる事象と回避の必要性のまとめ】

影響要因	主な関連事象	回避の必要性	考慮すべき天然現象
動水勾配の増加	隆起, 海水準変動	—	隆起・侵食, 気候・海水準変動
	地形変化	—	隆起・侵食, 気候・海水準変動 地震・断層活動
	地震に伴う地下水位(または水圧)の変化	—	地震・断層活動
地下水流動経路の変化	流出点の変化, 塩水／淡水境界の位置の変化	—	気候・海水準変動
	断層のずれに伴う透水性の増加	○	地震・断層活動
涵養量の変化	涵養域の降水量の変化	—	気候変動

- サイト選定において**回避が必要な影響要因**としては、「**地下水流動経路の変化:断層の透水性変化**」があげられる。
- 断層の透水性変化は、活断層のずれに起因するので、活断層の回避の考え方に基づいて、活断層とその影響範囲を**候補地域から回避**することが出来れば、水理場に対する擾乱をさけることができる。
- このような地域を避けることで、好ましい条件を満足する地域を選定できる。
- なお、海水準変動による広域スケールの流出点の変化、塩淡境界の位置の変化、断層のずれに伴う透水性の増加などは、処分深度や施設配置などの工学的対策なども考慮した上で、安全評価において取り扱うことが可能であると考えられ、著しい影響とはならないと考えられる。

2.4 化学場：好ましい地質環境特性の条件

【好ましい地質環境特性】

人工バリア設置環境、天然バリアとしての安全機能として、以下の特性が好ましい。

- (a) 高pHあるいは低pHではないこと
- (b) 酸化性雰囲気でないこと、
- (c) 炭酸化学種濃度が高くないこと

【好ましい条件の考え方】

以下の理由により、人工バリアおよび天然バリアの放射性物質に対する浸出抑制や移行抑制の機能が低下するため。長期安定性が必要な期間は、安全機能が必要な期間に依存する。

(a) 中性～弱アルカリ性の範囲

- 強アルカリ性条件では、ガラス固化体の溶解速度が速く、放射性物質の浸出率が増加するため。
- 強アルカリ性条件ではオーバーパックが不動態化し、局部腐食を招きやすくなるため。
- 酸性あるいは強アルカリ性条件では、緩衝材が変質しやすいため。
- 酸性、強アルカリ性条件では、一部の放射性物質の溶解度が増加するため。
- 酸性条件では、緩衝材、および天然バリアともに収着能が低下するため。

(b) 酸化還元電位が低いこと

- 酸化性条件では、オーバーパックの耐食性が著しく低下するため。
- 酸化性条件では一部の放射性物質の溶解度が増加するため。
- 酸化性条件では、緩衝材、および天然バリアともに収着能が低下するため。

(c) 炭酸化学種濃度が 0.5mol/dm^3 以下

- 炭酸化学種濃度が高い条件ではオーバーパックが不動態化、局部腐食を招きやすくなるため。

以上の条件が満たされない場合に、著しい影響を与える事象と考える。

2.4 化学場：擾乱となる影響要因と関連事象の抽出

【擾乱となる影響要因】

- 将来において水理場が変動する要因としては、地下深部への「**低pH地下水の流入**」, 「**高pH地下水の流入**」, 「**酸化性地表水の流入**」, 「**炭酸化学種濃度の上昇**」が考えられる。
- 「低pH地下水の流入」および「炭酸化学種を含む地下水の流入」に関連する主な地質現象としては、**火山性熱水や深部流体の移動・流入**が考えられる。
- 「高pH地下水の流入」に関連する主な地質現象としては、**超塩基性岩**が地下水と反応することにより蛇紋岩化するとともに、**強アルカリ性の地下水が生成**することが考えられる。
- 「酸化性地表水の流入」に関連する主な地質現象としては、処分深度に到達している**断層が活動**した際に、**断層の透水性が増加**することにより、地表水が地下に向けて流入する可能性が考えられる。

抽出した影響要因と主な関連事象

影響要因	主な関連事象
低pH地下水の流入(aに対して)	火山性熱水や深部流体の移動・流入
炭酸化学種を含む地下水の流入(cに対して)	
高pH地下水の流入(aに対して)	超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入
酸化性地表水の流入(bに対して)	断層のずれに伴う透水性の増加

2.4 化学場：著しい影響を与える事象の特定

「低pH地下水の流入，炭酸化学種濃度の上昇：熱水の移動・流入」

【第2次取りまとめの考え方】

- pH4.8未満の地下水は**主に第四紀火山及びその周辺地域**に分布する(分冊1:2. 4. 2)。
- マグマに含まれる揮発成分は火山ガスの組成などから、 H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl を主成分とする。これらはマグマの上昇に伴う圧力の低下によって放出され、地下水に溶解する。

【その後の知見】

- **pHは火道近傍で4.8以下**，それ以遠は中性～弱アルカリ性と考えられる(浅森ほか，2002，川村ほか，2008)。
- 水質は，火道ごく近傍で SO_4^{2-} 卓越，近傍では Cl^- 卓越，**その周りで HCO_3^- 卓越**(川村ほか，2008)。
- また，深部流体についても同様の影響を考慮する必要がある(産業技術総合研究所，2012)。

【NUMOの考え方】

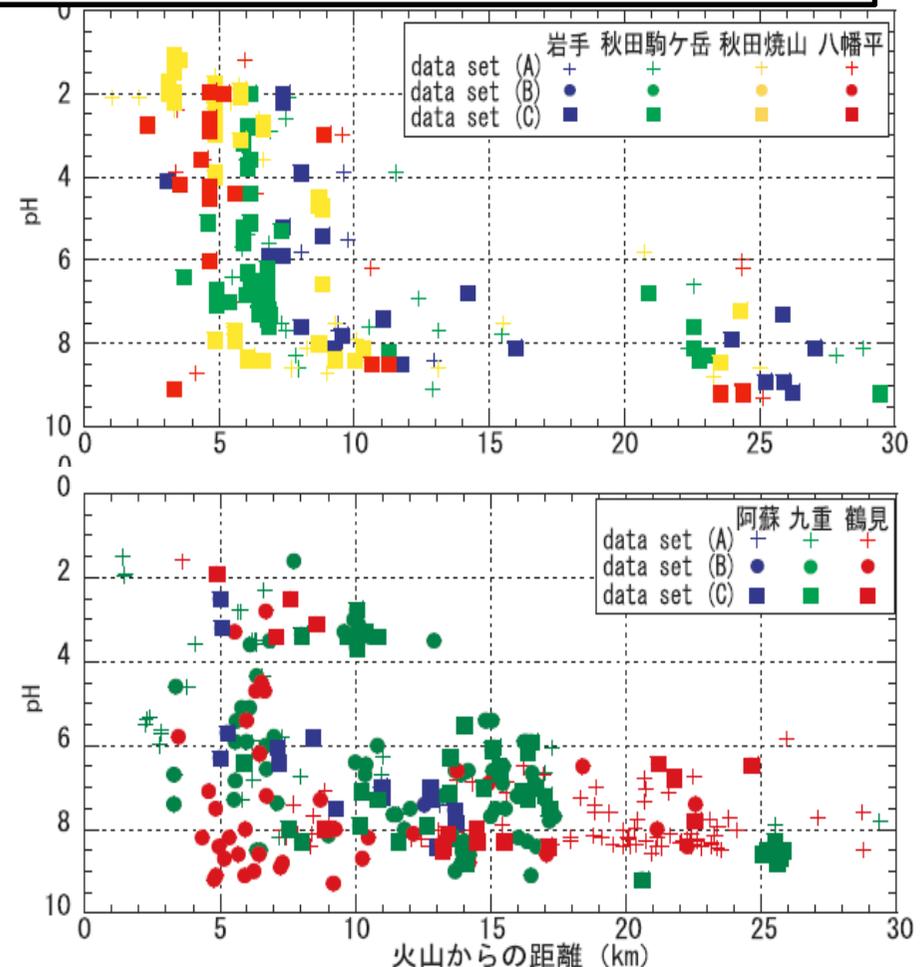
- **酸性地下水や炭酸化学種濃度は地熱活動が活発な第四紀火山の近傍に分布する**。酸性地下水の影響は上部の地質構造の影響を受け，広範囲に及ぶこともある。
- 将来，地熱活動が活発化した際に，pHの低下や炭酸富化する可能性があり，著しい影響を与えるので，そのような地域を**サイト選定において回避**することが必要である。

著しい影響を与えると考えられる。

サイト選定における回避の考え方を提示

(地熱活動の考え方については，2.1熱環境の項を参照)

(涵養域の降水量の変化の説明は以上)



2.4 化学場：著しい影響を与える事象の特定

「高pH地下水の流入：超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入」

【第2次取りまとめの考え方】

(高pH地下水形成に関する記述はない)

【その後の知見】

- ・ フィリピンManleluag – Saile 鉱山を事例として、アルカリ性地下水の湧出とその近くにあるベントナイト鉱床との反応について検討。アルカリ性地下水(pH11)の発生原因として、一部が地表に露出したオフィオライト層に含まれる超塩基性岩(苦土かんらん石)の蛇紋岩化作用によることを確認(原環センター, 2013)。
- ・ さらに、**アルカリ性地下水と火山ガラスの反応が非常に微小な領域に限られること、ベントナイト鉱床の粘土鉱物が鉱物学的に変質を受けていないこと**などを確認(原環センター, 2013)。

【NUMOの考え方】

- ・ 超塩基性岩は、地下水との反応により**蛇紋岩化作用を生じ、アルカリ性地下水を生成**する。
- ・ ただし、地下水のpHは11程度で、また、その影響は限定的であると考えられる、工学的対策により対応可能と考えられる。
- ・ したがって、超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入は、**著しい影響を与える事象とはならない**と考えられる。
- ・ なお、陸域における超塩基性岩の分布は調査により確認することが可能であるので、候補となる地域にそのような岩盤が存在する場合には、影響を確認しておく必要がある。

著しい影響を与える事象とはならないと考えられる

2.4 化学場：著しい影響を与える事象の特定

「酸化性地表水の流入：断層のずれに伴う透水性の増加」

【第2次取りまとめの考え方】

- ・野島断層（阪神・淡路大震災で活動）の破碎帯の近傍では、酸化性の地下水を引きこんだ形跡がみられる場合があるが、このような断層活動に伴う地球科学的な影響範囲は、野島断層の場合、活断層破碎帯の近傍数十mと考えられる（分冊1，2.3.2）。

【その後の知見】

- ・野島断層を事例として、活動直後、断層付近の透水性が上昇したが、8年以内に回復したと考えられる（北川ほか，2008，Tadokoro and Ando, 2002など）。

【NUMOの考え方】

- ・断層の透水性が変化したとしても、地下水の引き込みは必ずしも発生するわけではなく、**涵養量や地形に依存する**と考えられる。すなわち、酸化性の地下水の引き込みは、ある一定の条件下においてのみ検討すべき事象である。したがって、影響の判断においては、サイト毎に評価を実施する必要がある。
- ・その上で、影響が大きいと判断される場合には、活断層とその影響領域を回避する必要がある。
- ・ただし、このような現象が発生した場合には、放射性物質の難溶解性や収着性など幅広い機能に影響を与えることから、一定の条件下では**著しい影響を与える事象**と考え、また、**将来予測の不確実性などを考慮し、保守的な観点からサイト選定において回避すべき**と考えている。



一定の条件下では、著しい影響を与えられられる。

サイト選定における回避の考え方を提示。

（活断層に関するサイト選定の考え方は“岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ”を参照）。

2.4 化学場:まとめ

【影響要因となる事象と回避の必要性のまとめ】

影響要因	関連事象	回避の必要性	考慮すべき天然現象
低pH地下水の流入	火山性熱水や深部流体の移動・流入	○	火山・火成活動 (非火山性熱水も含む)
炭酸化学種を含む地下水の流入			
高pH地下水の流入	超塩基性岩との反応した地下水の移動・流入	—	
酸化性地表水の流入	断層のずれに伴う透水性の増加	○ (条件による)	地震・断層活動

- サイト選定において回避が必要な事象としては、「**火山性熱水や深部流体の移動・流入**」がある。また、地形などの条件によっては「酸化性地表水の流入:**断層のずれに伴う透水性の増加**」も回避が必要となる。
- 熱水の移動・流入については、火山活動の影響の回避の考え方(熱環境を参照)、断層の透水性増大については、活断層の影響の回避の考え方(力学場を参照)に基づいて、影響範囲を候補地域から回避することが出来れば、化学場に対する擾乱をさけることができる。
- このような地域を避けることで、好ましい条件を満足する地域を選定できる。



3. 物理的隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因

【物理的隔離機能を喪失させる地質現象】

•地下深部に埋設した廃棄体を地表に露出・接近させ、人間の生活圏からの物理的隔離機能を喪失させる影響要因となる地質現象として下記を検討する。

- マグマの処分場への直撃と地表への噴出
- 著しい隆起・侵食作用に伴う処分場の地表への著しい接近

3. 著しい影響を与える事象の特定 「マグマの処分場への直撃と地表への噴出」

【第2次取りまとめの考え方】

- 火山活動によるマグマの貫入・噴出、カルデラの形成などの現象は、その周辺の地質環境に重大な影響を及ぼすことが予想されている(分冊1:2.4.1)

【その後の知見】

- 火山活動について、さまざまな研究事例が蓄積されているが、地層処分に対する影響について、従来と異なる知見は報告されていない。

【NUMOの考え方】

- 地殻下部(深さ100km程度)で発生した**マグマが処分場に直撃し、さらに地表にまで噴出**する場合を想定する。
- この場合、マグマに取り込まれた廃棄体が地表にまで移動する可能性があり、**人間の生活圏からの隔離機能を喪失する**と考えられる。
- 影響範囲は、火道の大きさ(マグマの通り道)に依存するが、カルデラのような巨大な活動の場合、処分場全体が著しく破壊される。
- したがって、**マグマの地表への噴出は、著しい影響を与える事象であると考えられ、サイト選定において回避**する必要がある。



著しい影響を与えると考えられるので、
サイト選定における回避の考え方を提示

3. サイト選定における回避の考え方(1/2)

「マグマの処分場への直撃と地表への噴出」

【第2次取りまとめの考え方】

- 中新世後期～鮮新世以降における日本列島の火山活動には偏在性が認められ、東日本火山帯と西日本火山帯の範囲のみに限って活動が生じている。過去数十万年における火山活動の変化は、島弧スケールでの火山フロントの顕著な移動としてではなく、むしろ火山地域や火山列スケールでの活動域の拡大・縮小、移動などの変化としてとらえることができる(分冊1:2.4.3項)
- 10万年程度の将来については、火山地域・火山列スケールでの過去数十万年間の火山活動の時間的・空間的变化に基づき、将来の活動域を評価する手法が有効である。また、その際には地質情報からの外挿ばかりではなく、地殻応力場などのテクトニクスを考慮することや物理探査によって地下のマグマの存在の有無などを確認することも重要である(分冊1:2.4.3項)。

【その後の知見】

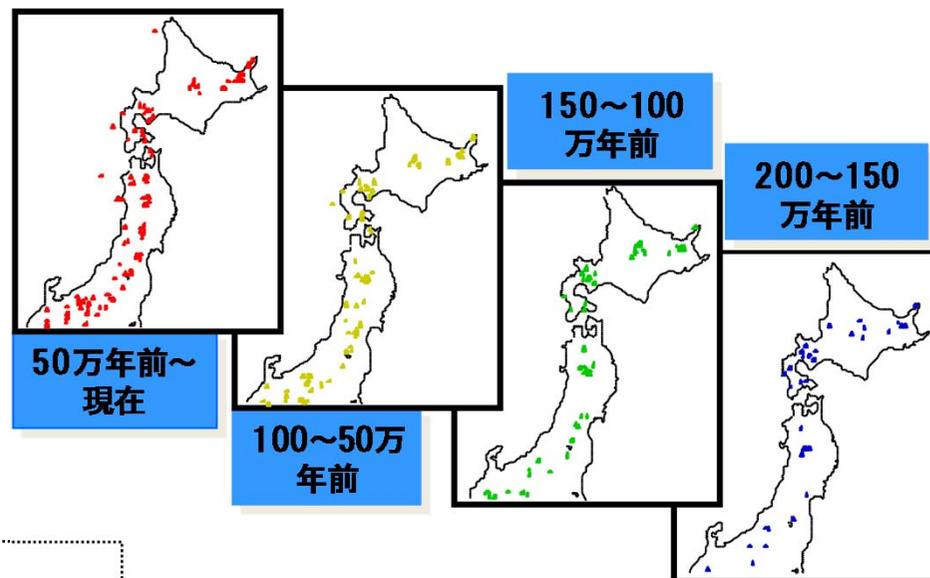
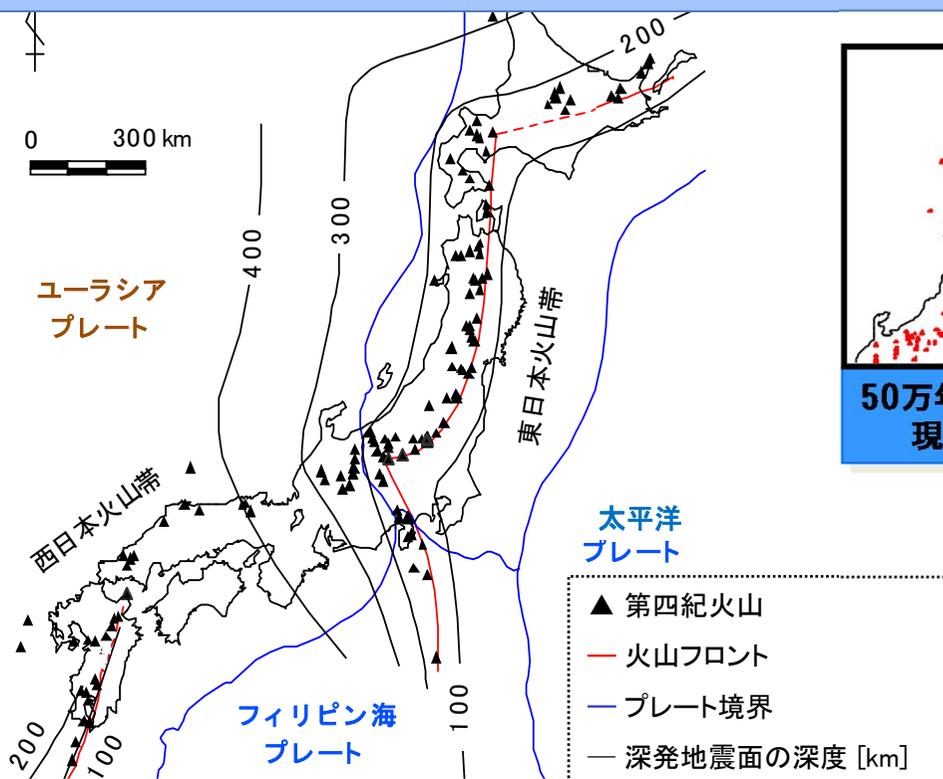
- 日本列島周辺におけるプレートの配置や運動様式は、100万年オーダーの時間スケールで緩慢に変化することから大局的には安定であり(吉田・高橋, 2004)、このプレートの沈み込みに由来する、日本列島における火山フロントの分布も大局的には安定であると考えられる(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)。
- 火山活動は火山フロントの背弧域に限定して繰り返し生じており(山元, 2011など)、この背弧域は火山が集中する火山活動域とそうではない火山空白域とに区分できる。火山活動域はホットフィンガーと呼ばれる熱構造の不均一性により制御され安定であると考えられ、それに対応して地下深部にマグマが存在している(Tamura et al., 2001など)。しかしながら、約30万年前以降は火山空白域においても火山の新規出現が確認されている(Yamamoto, 2007)。
- 一方、西南日本においては火山フロントが不明瞭であるものの、火山活動域の変動はマントルウェッジ内へのフィリピン海プレートの潜入に関連し、中国山地および日本海側の地域に限定されてきている(Kimura et al., 2003など)。

3. サイト選定における回避の考え方(2/2) 「マグマの処分場への直撃と地表への噴出」

【NUMOの考え方】

※2.1熱環境に関する回避の考え方と同様であるが、ここでは、マグマ噴出影響について説明。

- 日本列島における火山活動はプレートの沈み込みに由来している。**プレート上面(深発地震面が相当する)が100km程度より深い場所でマグマが発生する。**
- このため日本列島の火山活動の場は偏在しており、**今後も活動は継続する**と考えられる。
- また、新規の火山活動の発生については、マグマの発生する深度において、高温となる領域の有無の確認が必要である。さらに、マントル内のマグマ発生メカニズムに基づいた将来予測も有効と考えられる。
- このような地域を回避すれば、**我が国にも火山の直撃を受けない領域は存在する**と考えられる。



日本列島における第四紀火山の時空分布(東日本)

日本列島周辺のプレート配置と第四紀火山の分布

(総論レポート, 図3. 2-9)

3. 隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因

「著しい隆起・侵食作用に伴う処分場の地表への著しい接近」

【第2次取りまとめの考え方】

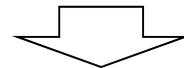
- 地質環境への影響として重要なのは、隆起・沈降・侵食が地下施設を地表へ接近させたり、地下水流動を変化させる可能性である。
- 大規模な隆起・侵食の継続は、土被りを大きく減少させる。
- 山地で地震や豪雨などを引き金として発生する大規模な斜面崩壊は、侵食・削剥による地形変化のプロセスであり、直接的影響のひとつである(分冊1:2.5.3)。

【その後の知見】

- とくに著しい隆起が生じている南アルプスでは、山脈が形成された後期鮮新世以降kmオーダーの著しい削剥が生じている(末岡ほか, 2011)。

【影響要因の考え方】

- **著しい隆起と侵食作用**により、**処分場を設置した岩盤が地表に著しく接近**する可能性が考えられる。
- この場合、**人間の生活環境からの隔離機能が喪失**する。また、影響範囲は、周辺地域一帯が隆起するため、**処分場全体におよぶ**と考えられる。
- したがって、隆起・侵食作用が著しい地域は、サイト選定において回避する必要がある。



著しい影響を与えると考えられるので
サイト選定における回避の考え方を提示

3. サイト選定における回避の考え方(1/2)

「著しい隆起・侵食作用に伴う処分場の地表への著しい接近」

【第2次取りまとめの考え方】

- 10万年あたり100mを越える大きな隆起速度は、主として褶曲断層山脈と逆断層地塊からなる山地や地震隆起をする海岸で認められ、最大で10万年あたり数百mに達する地域もごく一部で存在する。(分冊1:2.5.3)
- 10万年あたり数百mに達するような大規模な侵食は、隆起が激しい山地中心部や地震隆起海岸に限られることが示唆された。(分冊1:2.5.3)。
- 多くの地域の隆起・沈降運動の速さは、10万年あたり50m程度かそれ未満であることが多い(分冊1:2.5.3項)。

【その後の知見】

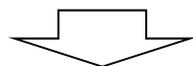
- 内陸河川流域および沿岸域について見ると、多くの地域において10万年あたり50m以下の隆起速度であるものの(道家ほか, 2008など)、過去10万年間の隆起量が100mを超える地域(垣内ほか, 2010など)、あるいは沈降が継続している地域(丹羽ほか, 2009)もある。
- わが国における地殻変動の様式は、プレート運動が支配する地殻応力場に対応して大局的には安定であることから(吉田・高橋, 2004など)、地殻変動に支配される隆起・沈降やそれに伴う侵食は、広域的で変化が遅く、継続性のある現象であると考えられる。
- 山地・山脈では、地域のテクトニクスを反映して隆起速度が異なるものの、その違いに応じて異なる隆起・侵食プロセスを経て、動的平衡状態に向かっている可能性が考えられる(梅田ほか, 2013など)。また、山地発達モデルに基づけば、各山地・山脈において隆起速度が一定となった(一様継続性が成立した)時期には違いがあるものの、遅くとも100~数十万年前以降であると推定される(安江ほか, 2011など)。この時期は、北海道北部の日本海側や関東平野などにおいて隆起・沈降の運動方向が変化し、現在と同様の変動が開始したという地形・地質学的なデータに基づく解釈(田力・池田, 2005など)とも整合する。

4. サイト選定における回避の考え方(2/2)

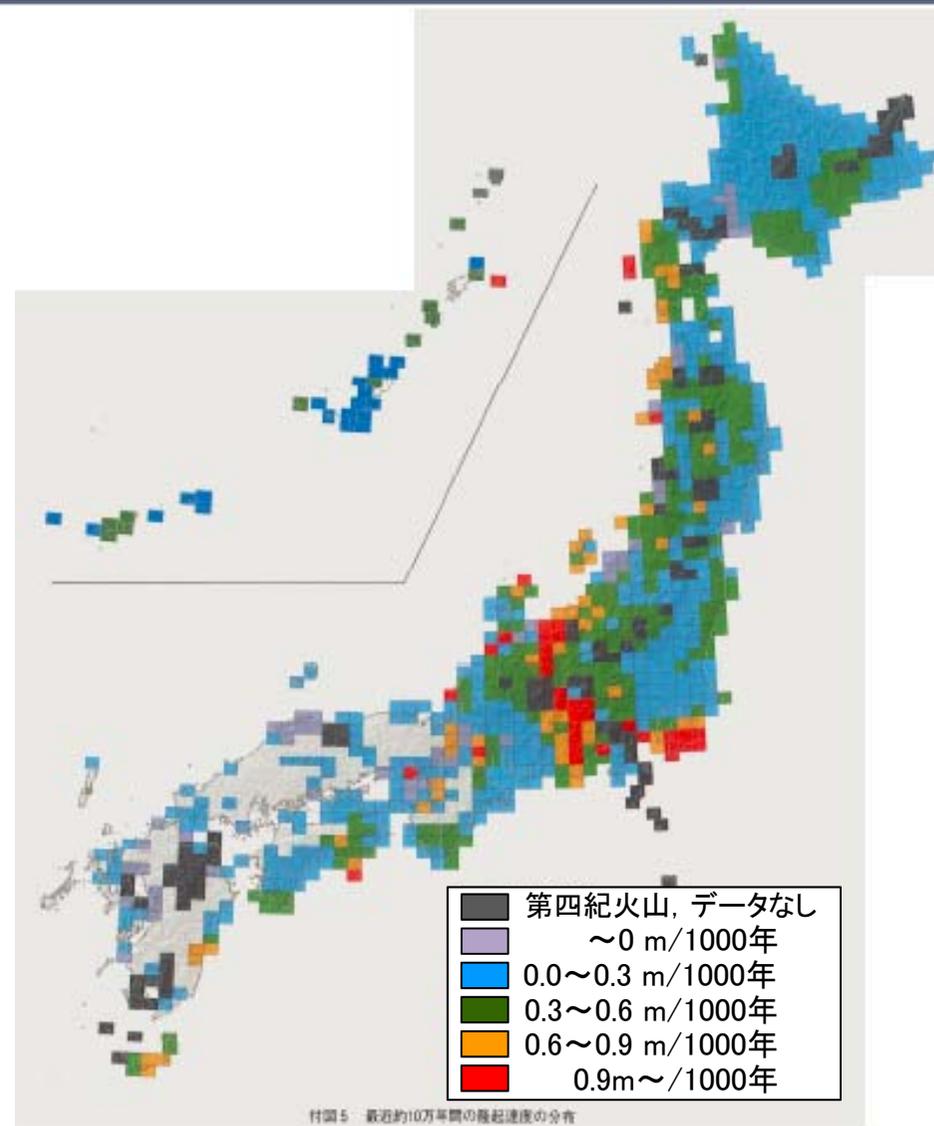
「著しい隆起・侵食作用に伴う処分場の地表への著しい接近」

【NUMOの考え方】

- 著しい隆起速度は、主として褶曲山脈と逆断層地塊からなる山地などで認められ、著しい侵食作用も、このような地域で報告されている。
- 地殻変動に支配される隆起・沈降やそれに伴う侵食は、広域的で変化が遅く、継続性のある現象であると考えられる。



- したがって、著しい隆起速度の場所を回避することで隆起・侵食作用による隔離機能の喪失をさけることは可能である。
- なお、沿岸部では海水準変動(海水面低下)の際の侵食量も合わせて考慮する。



最近約10万年間の隆起速度の分布

(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011, 凡例を見やすく改変)

4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

		天然現象			
		火山・火成活動	地震・断層活動	隆起・侵食	気候・海水準変動
閉じ込め機能の喪失	熱環境	地熱活動	—	—	—
	力学場	—	処分深度に達する断層のずれ	—	—
	水理場	—	断層のずれに伴う透水性の増加	—	—
	化学場	火山性熱水や深部流体の移動・流入	断層のずれに伴う透水性の増加 (条件による)	—	—
物理的隔離機能の喪失		マグマの処分場への貫入と地表への噴出	—	著しい隆起・侵食に伴う処分場の地表への著しい接近	—

著しい影響を与える事象を天然現象毎に分類して、次ページ以降にサイト選定における回避の考え方をまとめる。

4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

火山・火成活動

○著しい影響を与える事象

【閉じ込め機能の喪失につながる要因】

- 地熱活動(熱環境)
- 火山性熱水や深部流体の移動・流入(化学場)

【物理的隔離機能の喪失につながる要因】

マグマの処分場への直撃と地表への噴出

○サイト選定における回避の考え方

【回避対象】

- 地熱活動が盛んな地域
- マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域

【回避の考え方】

- マグマの貫入・噴出, 地熱活動およびそれを引き起こす**火山活動や非火山性熱水活動(深部流体も含む)**は, **分布は大きく変わらず, 長期にわたって継続すると考えられる。**
- また, 新規の火山活動の発生については, マグマの発生する深度において, 高温となる領域の有無の確認が必要である。さらに, マントル内のマグマ発生メカニズムに基づいた将来予測も有効と考えられる。

4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

地震・断層活動

○著しい影響を与える事象

【閉じ込め機能の喪失につながる事象】

- 処分深度に達する断層のずれ(力学場)
- 断層のずれに伴う透水性の増加(水理場・化学場)

【物理的隔離機能の喪失につながる事象】

- (天然バリアの物理的隔離機能を喪失する可能性は小さいと考えられる)

○サイト選定における回避の考え方

【回避対象】

- 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層

【回避の考え方】

- 断層活動は、既存の活断層帯において過去数十万年にわたり同様の活動様式で繰り返し活動しており、**十万年程度の将来も既存の活断層帯において、現在の活動様式が継続する**と考えられる。また、力学的な影響範囲は数百mから数kmと考えられる。
- なお、現在認定されている活断層以外のうち、現地調査によりその存在が確認される断層については、活動性を評価するとともに、工学的対策の実施なども含めて、対応を検討する。
- また、断層の活動性の評価技術については、今後も開発を進め、精度の向上に努める。

4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方 隆起・侵食作用

○著しい影響を与える事象

【閉じ込め機能の喪失につながる要因】

(閉じ込め機能の喪失につながる要因はないと考えられる)

【物理的隔離機能の喪失につながる要因】

著しい隆起・侵食作用に伴う処分場の地表への著しい接近

○サイト選定における回避の考え方

【回避対象】

・**隆起速度が著しく大きな地域**, 主として著しい隆起速度は主として褶曲山脈と逆断層地塊からなる山地。

【回避の考え方】

・隆起・侵食作用による隔離機能の喪失をさけるために, **隆起速度が著しく大きな地域を回避**する。

・なお, 沿岸部を対象とする場合には海水準変動(海水面低下)の際の処分場の設置位置・深度, 侵食量も合わせて考慮する。

4. 著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方 気候・海水準変動

○著しい影響を与える事象

【閉じ込め機能の喪失につながる要因】

（閉じ込め機能の喪失につながる要因はないと考えられる）

【物理的隔離機能の喪失につながる要因】

（単独で隔離機能の喪失につながることはないと考えられる。隆起・侵食作用の影響を検討する際に、海水準変動に伴う侵食作用についても考慮する）

○サイト選定における回避の考え方

工学的対策による対応が可能である。



- 参考資料(その後の知見の補足)

2.1 熱環境： その後の知見の補足(1)

「熱源の移動・発生」

○マグマの貫入, 熱水の流入

- 高地温勾配地域(5-10°C/100m)は, 第四紀火山の分布と 極めて整合的であり, 地熱活動は火山活動と密接に関連する現象であるといえる。したがって, 現在の地熱活動域は, テクトニクスが維持される限りは大きく変わらないと考えられるものの, 地熱活動が未発達の新しい火山においては, 今後それが発達する可能性が指摘されている。以下に関連する知見を示す。
 1. 高地温勾配(>100°C/km)地域は活火山の分布と極めて整合的で, 地熱活動は火山活動と密接に関連していることから, 火山フロントの背弧域における 多数の熱水変質帯や鉱床の分布は, 地熱活動も火山活動と同様に過去から現在にわたり偏在する地質現象であることを示唆(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)
 2. 北海道における新生代の火成活動, およびそれを背景とする熱水活動および鉱化作用は, テクトニクスと密接な関連性を持って変遷しており, 現在のテクトニクスが変わらない限り, 火山活動および熱水活動が活発な地域が将来ともに大きく移動しないことを示唆(八幡, 2002)
 3. 熱源としてのマグマ定置後, 地殻上部に地熱系が発達するためには少なくとも1万年のオーダーが必要であり(Garg and Kassoy, 1981), 活動が比較的新しい活火山では, 現在は顕著な地熱系が未発達であるものの, 今後は周辺に地熱系が発達する可能性あり(産業技術総合研究所, 2012)
- 非火山地域においても熱水活動が存在する。そして, それらは最近になって新規に生じたということではなく, その地域に長期にわたって継続しているものと考えられる。以下に関連する知見を示す。
 1. 常磐地域, 能登半島, 新潟平野, 紀伊半島などの非火山地帯において高温泉の湧出地域が存在(田中ほか, 2004)
 2. 非火山性熱水は, 非火山性天水型(地球深部からの熱伝導による天水の温度上昇), 非火山性海水型(地球深部からの熱伝導による海水起源地下水の温度上昇), 非火山性長期停滞水型(地球深部からの熱伝導による停滞水の水-岩石反応), 非火山性深部熱水型(スラブからの脱水と地表への流動 および水-岩石反応), 断層運動誘起型(断層運動に伴う地表への移行経路の形成による断層周辺深部熱水の地表への流動)に分類(原子力安全基盤機構, 2007)
 3. 第四紀火山から数十km以上離れた非火山地域において存在する50°C/km以上の高温域は, 地熱活動が最近になって新規に生じたということではなく, その地域に長期にわたって継続する地質現象と解釈(Matsumoto et al., 2003; Umeda et al., 2009; 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011)
 4. 紀伊半島の低温(200°C程度)の非火山性熱水活動は, フィリピン海プレートが沈み込みを開始した600万年前頃に開始した可能性が考えられ, ネオテクトニクスの枠組みで生じている長期的な現象であることを示唆(Umeda et al., 2007; 花室ほか, 2008)

2.1 熱環境： その後の知見の補足(2)

「熱源の移動・発生」

○断層活動に伴う摩擦熱

- 断層活動に伴う摩擦熱により断層破碎帯内部において、150～350℃程度の熱水が形成されたことなどが報告されている。また、熱的影響の範囲は、断層 破碎帯内にとどまると考えられる。以下に関連する知見を示す。
 1. 阿寺断層では、現在の破碎帯内で現在の断層に沿って2,000万年前頃ないし第四紀以前に広い範囲で200℃には達しない加熱があったことを把握(山田ほか, 2012)
 2. 野島断層の上盤側に認められる幅約50 mの断層破碎帯は、初期の断層活動期に150～280℃の熱水変質による濁沸石化および摩擦熱による溶解を伴って形成(Boullier et al., 2004a)
 3. 野島断層の上盤では、120万年前以降の地震活動の繰り返しに伴い断層面から幅約5.5 mにわたり(とくに1 m以内では顕著に)、カタクレーサイトおよび断層ガウジの水圧破碎(割れ目ネットワークの形成)および現在の地下水と同様の水質を有する流体の上昇・循環(自形炭酸塩鉱物による割れ目の充填)が発生し(Boullier et al., 2004b)、その透水性は水みちの閉塞および間隙構造の破壊により変化(Lin et al., 2007)
 4. 台湾集集地震(1999年9月21日, Mw7.6)の際に、車籠埔断層の黒色断層ガウジ帯(幅十数cm)では摩擦熱により350℃以上の高温流体が発生し、その高温流体は低透水性の断層ガウジから外部に拡散しなかったために、断層内の間隙水圧が上昇して大きな断層変位を引き起こしたと解釈(Ishikawa et al., 2008)

「地表の温度」

- 間氷期の最温暖期においては、現在と比較して数℃程度気温が上昇すると考えられる。以下に関連する知見を示す。
 1. 北海道における最終氷期のうちの4.2～1.2万年前の年平均気温は、オホーツク海沿岸から根釧原野にかけての連続永久凍土帯の南限地域では-7℃、十勝平野や日本海側北部の不連続永久凍土帯では-7～-3℃で、冬の寒さが厳しい気候であったと推測(三浦・平川, 1995)
 2. 花粉化石分析から復元された最終氷期極大期の気候は、年平均気温が現在よりも4～13℃程度低く、降水量が現在の5～7割に低下(松末ほか, 2000)
 3. 岐阜県瑞浪地域の内陸小盆地堆積物に花粉分析によるベストモダンアナログ法の適用を通じて、年平均気温の寒暖の差は最大で約10℃、年平均降水量は間氷期に比べ氷期は5～7割程度に減少すると推定(佐々木ほか, 2006)
 4. 氷床コアのデータによれば、最後の間氷期(約12.5万年前)における極域の平均気温は、現在より3～5℃高かったとされており*、この程度の気温上昇は300m以深の地下の温度分布に影響を与えないことがモデル計算など**で示されている。

*IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告(2007)

** <http://www.eps.s.u-tokyo.ac.jp/res-du/earth/yamano.html>

**Jessop, A. M(. 1990): Thermal Geophysics. Elsevier, Amsterdam, p306.

**http://proposal.ducr.u-tokyo.ac.jp/cgi-bin/ccr_usr/detail.cgi?num=6250

2.2 力学場： その後の知見の補足(1)

○岩盤クリープ特性の温度依存性

- ・ 常温と比較し、温度60°Cでは堆積軟岩の三軸圧縮強度はやや低下するが、変形特性の温度依存性は見られないか、わずかである(岡田, 2005)。
- ・ 泥岩のクリープ特性の温度依存性はないが、凝灰岩には依存性があり、岩種により異なる(岡田, 2006)。

○断層のずれに伴う岩盤の変形

とくに大規模な活断層帯では、断層活動による力学的影響は、プロセスゾーンあるいはダメージゾーンの幅に基づくと断層から数百m程度であるものの、数kmに及ぶ場合もある(3~8)。この影響範囲は断層の長さに比例して変化し、一般的な関係式(9)によりオーダーで推定することが可能であるなどの知見が得られている。

1. 跡津川断層(延長69 km)および阿寺断層(延長60 km)における断層破砕帯の構造や断層岩の鉱物・化学的性状から、地下の高圧下におけるカタクレーサイトの形成→熱水変質を伴った断層ガウジの形成→隆起および断続的な断層活動に伴う断層ガウジの発達および天水循環による変質部の拡大という断層活動による岩盤の破断・破砕の進行履歴を確認(長友・吉田, 2009; Niwa et al., 2009, 2011)
2. 断層破砕帯の幾何形状および構造は、断層面における位置(端部, 中央部, 隣接する断層へのステップ部), 断層端部でのずれの形態, 断層の成熟度によって強く規制され, そのほか, 岩相, 岩盤の粘弾性, 応力場なども規制要因となると考えられる(Kim et al., 2004)
3. 跡津川断層および臼木谷断層では, 断層長さに比例してプロセスゾーン(断層周辺の母岩内で断層形成にかかわった領域で, その外側の母岩に比べて節理や小断層, 微小割れ目が数多く発達)の幅が増大することを確認(金折, 2001)
4. 跡津川断層では, 主断層上で破砕帯分布密度が最も高く, 幅10 m以上の破砕帯が分布するのに対して, 主断層から約500 m地点では破砕帯分布密度は1/3~1/6以下に急減し, 幅2 m超の破砕帯の分布は認められず, 破砕帯は岩相境界や岩脈などの不連続面に沿った特定の場所で選択的に形成と考えられる(Niwa et al., 2011)
5. 阿寺断層系中北部において数百m間隔で並走する小和知断層および下呂断層の不連続部では, 第四系を変位させる多数の断層によって規制されたブロックや凹地が分布することから, 横ずれデュープレックス構造の形成と考えられる(安江・廣内, 2002)
6. 阿寺断層では, 断層活動に伴う物理的影響範囲は断層からおおよそ200 m程度, および断層運動による影響範囲と考えられるダメージゾーン(地下水流動や物質移動に寄与する断層近傍の割れ目帯や変質部)は従来のプロセスゾーンの見積り範囲と整合することを確認(吉田ほか, 2009)
7. 牛首断層(延長54 km)に付随するせん断帯は, その方向性および横ずれデュープレックスの形態から左横ずれ運動によって後期白亜紀から古第三紀末までに形成されたと考えられ, 断層ガウジや断層角礫に加えて, より深部で形成されたと考えられるカタクレーサイトから成り, 幅は250~600 m程度であることを確認(大橋・小林, 2008)
8. 山口市から出雲市に至る東北東-西南西に延びる山口-出雲地震帯(全長約180 km)は, その約70%に当たる130 kmが活断層および推定活断層に沿っており, 地震学的プロセスゾーン(地震帯)の幅は2~6 kmで, 地震帯の全長から見積もられた地質学的プロセスゾーンの幅とオーダーで一致することを確認(金折・遠田, 2007)
9. 断層のプロセスゾーンの幅Pと断層の長さLとの関係は一般的に $P \sim 10^{-2}L$ の関係が成り立ち(Scholz, 2002), 応力集中に伴う非弾性変形が顕著な断層端部および応力変化が著しい断層間の不連続部としてのステップ部ではその幅が大きくなる傾向があることを確認(Sibson, 2003)



2.2 力学場： その後の知見の補足(2)

○地震動による岩盤のひずみ

2011年東北地方太平洋沖地震のような規模の極めて大きな地震においても、地震動は地表に比べて地下深部では小さく(1)、その影響が既存の地下空洞などに損傷を与えることはないことが確認されている(2)。

1. 深度250 m以深(87地点)の強震観測網(KiK-net)観測データ(防災科学技術研究所ホームページ)から、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)およびM7以上の余震(3月11日, 4月7, 11日), それ以前のM7以上の地震において、深度250 m以深における地震加速度は深度に依存せず同一地点の地表での観測値に対して1/3~1/5程度であることを確認(藤川ほか, 2012)
2. 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)において、岩手県の久慈国家石油備蓄基地では、深度100 m以深の岩盤タンクは地震動による損傷無し(吉田・大藤, 2012)

3.3 水理場:その後の知見の補足(1)

○海水準変動

- 過去数十万年間の海水準変動が世界各地でより精緻に把握されている。氷期には海水準が最大で150m程度低下し、最終間氷期には、グリーンランド氷床の大幅な縮小が約5mに及ぶ海水準の上昇をもたらしたと推測されている。以下に関連する知見を示す。
1. これまで南極氷床の融解とされてきた、最終間氷期における海水準上昇の主たる要因は、グリーンランド氷床の融解であり、最終間氷期のグリーンランド氷床の大幅な縮小は4~5.5 mの海水準の上昇に寄与していたと推察(Cuffey and Marshall, 2000)
 2. 最終氷期におけるグリーンランドおよび南極の氷床量は何れも21,000年前に最大となったが、極域ではその後に降水量が増加したため、グリーンランドでは16,500年前、南極では10,000年前まで氷床量が維持され、それに伴い0.4~3.7 mの付加的な海水準低下が発生(Huybrechts, 2002)
 3. 北緯40° ~80° の地域では、過去70万年間の氷期において、現在と比べて気温は最大 $17 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ 低下し、海水面は最大 125 ± 12 m低下(Bintanja et al., 2005)
 4. バルバドス、バハマ、オーストラリア、ヒューロンにおける既存文献のデータを再検討し、MIS5a, 5c, 5e, 6-7について、3,000~9,000年周期で海水準が6~30 m上下変動する短周期の海水準変動を検出(Thompson and Goldstein, 2005)
 5. フランス南部のリオン湾における音波探査記録およびボーリングコアデータから、氷期の最低海水準は現在よりも 149 ± 10 m(MIS12)、 150 ± 9 m(MIS10)、 86 ± 8 m(MIS8)、 92 ± 7 m(MIS6)、 102 ± 6 m(MIS2.2)低かったと推定(Rabineau et al., 2006)
 6. 播磨灘沿岸域における完新世の海水準は、8,000年前には約-3 m、約7,300年間には約-1 m、7,000~5,300年前には約+1.0~1.5 m、3,800~3,000年前には約+0.5 m、2,700~2,100年前には約0 mであったと推定(佐藤, 2008)
 7. 最終氷期における海水準が現在よりも120 m低かったと仮定すると、第四紀初頭の間氷期は、完新世と同様の気候および海水準(現在と比較して+5~-15 m)であったが、氷期はより寒冷で、海水準は現在よりも 50 ± 20 m低かったと推測(大場, 2010)
 8. 大阪湾における最終氷期極大期以降の海進は、約6,000年前に最大期(海水準は標高+2.2m)を迎え、6,000~4,000年前は現在よりも高い海水面の安定期が続き、その後、海水準はゆるやかに高低を繰り返して現在の海水準に定着(前田, 2013)

3.3 水理場:その後の知見の補足(2)

○地震に伴う地下水位の変化

- 2011年東北地方太平洋沖地震では、地下水の水位や水質はわが国の広範囲にわたり変化が観測されたものの、ほとんどの観測地点において1年以内に地震発生前の状態に回復している。以下に関連する知見を示す。
- 1. スマトラ地震(2004年12月26日, Mw9.0)が発生した際、震央から約5,000 km以上も離れた関東・東海・近畿地方において、地震時に最大5 m程度の地下水位の振動および地震後に数十cm程度の地下水位の変化を観測(Kitagawa et al., 2006)
- 2. 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に伴い、数十cmから最大約30 mの地下水位の変化を広範囲で観測(香川ほか, 2012; 菊川ほか, 2012; Niwa et al., 2012; 大野ほか, 2012; 露口ほか, 2012)や、温泉の湧出量や温度などの変化(堀川, 2012; 板寺ほか, 2011; 神奈川県温泉地学研究所, 2011; 大塚ほか, 2012; 佐々木, 2012)。
- 3. 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)に伴う地下水位の変化は、関東・東海・近畿・四国地方の多くの観測地点で地震発生後1年以内に解消したものの、2地点では1年以上にわたり回復傾向が継続した後、地震発生前よりも低い地下水位でほぼ安定しており、この広範囲にわたる地下水の変化は地震による岩盤の広域的な体積ひずみ変化に起因すると解釈(産業技術総合研究所ホームページ(地震に関連する地下水観測データベース“Well Web”))
- 4. 岐阜県東濃地域では、2007年能登半島沖地震(Mj6.7)の際に全水頭が最大40 cm上昇し、一部の領域では約5カ月間継続、茨城県沖の地震(2008年5月8日, Mj7.0)の際に約4カ月間にわたり全水頭が約1 m上昇し、その後緩やかに低下、駿河湾の地震(2009年8月11日, Mj6.5)の際に約20日間にわたり全水頭が数十cm上昇し、一部の領域では最大1.5 m低下(西尾ほか, 2009; 竹内ほか, 2010; 國丸ほか, 2011, 2012)
- 5. 松代群発地震の初期に大きく変化した水質は元の状態に戻ることなく、1968年頃から現在までほぼ安定(奥澤・塚原, 2001, 2002)
- 6. 1995年兵庫県南部地震(Mj7.2)に伴い、自噴量・深部被圧地下水の静水位および微細な水温変化、自噴や地下水の温度、ガス成分の変化、化学成分の変化の順に伝達速度が遅くなる傾向を把握(西村, 1999)
- 7. 2000年鳥取県西部地震(Mj7.3)および2001年芸予地震(Mj6.7)では、近畿地方およびその周辺地域において地震前の地下水位変化は観測されず、その発生に伴う地震波による短周期変動、直後のステップ状変化、その後のなだらかな変動の3種類の地下水位変化(数十cm未満)が確認され、地震直後のステップ状変化が体積ひずみ変化と良い相関を持つことを把握(小泉ほか, 2002; 高橋ほか, 2002)
- 8. 2003年十勝沖地震(Mj8.0)では、北海道内において地震発生前に地下水の上昇が観測され(太田ほか, 2007; 中山ほか, 2011)、関東・東海・近畿地方におけるスパイク状の地下水位の変化(10 cm未満)および割石温泉における自噴量の増加は、地殻ひずみの影響に加えて地震動の影響によるものと解釈(佐藤ほか, 2004)
- 9. 2004年新潟県中越地震(Mj6.8)では、明瞭な地表地震断層が出現していないものの、再活動したと考えられる既知の活断層およびその延長上の推定伏在断層などに沿って地下深部の高温または高塩分濃度の地下水が上昇し、地下の過剰流体圧・摩擦熱を解放した可能性を指摘(佐藤ほか, 2005)
- 10. 2008年岩手・宮城内陸地震(Mj7.2)では、地震前に震源直上やその近傍で5°C程度の湯温上昇および余震域南端における湯量増加が認められ、傾斜計およびGPSではこれらの前兆を不検出であったことから、地震前の微小なひずみ変化が割れ目間の連結を引き起こしたと解釈(大槻, 2010)
- 11. 地震時および地震後の地下水圧の変化について、地震に伴う地殻変動に関連した要因として、体積ひずみ変化および静的垂直変化、地震動に関連した要因として、動的体積ひずみ変化、透水性の変化や液状化が挙げられており、どの要因が卓越するかは、地震動・地殻変動の大きさ、地質構造、地下水の被圧状態、帯水層の弾性的性質や水門パラメータ、水理学的境界条件に依存(小泉, 2013)
- 12. 福島県浜通りの地震(2011年4月11日, Mj7.0)により、福島県いわき市周辺で生じた地下水位の変化は、岩盤の体積ひずみ変化に起因すると考えられ(大槻, 2012)、いわき市内郷地区では、2~6 L/秒程度の地下水の自噴が地震発生後2年以上にわたり継続(産業技術総合研究所ホームページ(2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)に伴う温泉の変化))



2.4 化学場:その後の知見の補足

化学場に最も影響を与える要因としての火山・火成活動に関する第2次取りまとめ以降の知見を以下に示す。

1. 岩手山西側の活動中心から4.5～10 kmの範囲では、深度約1,000 mの地下水圧・水位の変化や水質の大きな変動は確認されず、火道から水平方向に5 km以上離れた深部の地下水環境は浅層より安定(馬原ほか, 2000)
2. He同位体比(マグマ起源の³Heの供給量)の変動は火山の活動性を鋭敏に反映しており、岩手山の活動の中心から10 kmほど東側(海溝側)でHe同位体比が著しく小さくなることは、この地域の地下深部ではマグマ活動の影響が非常に小さいと解釈(馬原ほか, 2000)
3. 巨大カルデラ火山の地下水系への影響に関する事例研究では、カルデラから50 km遠方域の地下水にまでマグマ分離成分の影響が及ぶものの、その影響を被る区域は新第三系基盤岩の地下構造により規制(産業技術総合研究所, 2012)
4. 巨大カルデラ火山では、マグマの蓄積による地殻の変形、マグマの貫入による地殻の加熱、噴出物による地表の被覆と加熱、カルデラ陥没による地殻の破壊が周囲の地下水環境に影響を及ぼす可能性大(産業技術総合研究所, 2012)

参考文献(1/7)

■ 2.1 熱環境

- Boullier, A.M., Fujimoto, K., Ohtani, T., Roman-Ross, G., Lewin, É., Ito, H., Pezard, P., Ildefonse, B. (2004a) : Textural evidence for recent co-seismic circulation of fluids in the Nojima fault zone, Awaji island, Japan. *Tectonophysics*, 378, 165-181.
- Boullier, A.M., Fujimoto, K., Ito, H., Ohtani, T., Keulen, N., Fabbri, O., Amitrano, D., Dubois, M., Pezard, P. (2004b) : Structural evolution of the Nojima fault (Awaji Island, Japan) revisited from the GSJ drill hole at Hirabayashi. *Earth Planet. Space*, 56, 1233-1240.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Ellis, S., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mhony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H., Kitayama, K. (2009) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan, Summary Report. NUMO-TR-09-03.
- Garg, S.K., Kassoy, D.R. (1981) : Convective heat transfer in hydrothermal systems. In: Rybach, L., Muffler, L.J.P. (Eds.) *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*, John Wiley & Sons, 37-76.
- 原子力安全基盤機構 (2007) : 平成18年度放射性廃棄物処分の技術基準に係る調査研究(地層処分)に関する報告書. 07基廃報0006.
- 花室孝広, 梅田浩司, 高島 勲, 根岸義光 (2008) : 紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史. *岩石鉱物科学*, 37, 27-38.
- Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuoka, J., Tadai, O., Sakaguchi, M., Hirono, T., Mishima, T., Tanikawa, W., Lin, W., Kikuta, H., Soh, W., Song, S.-R. (2008) : Coseismic fluid-rock interactions at high temperatures in the Chelungpu fault. *Nat. Geosci.*, 1, 679-683.
- 石丸恒存, 角田地文 (2002) : 研究報告 日本列島における大規模火砕流の特徴と熱的影響解析. *サイクル機構技報*, 14, 161-170.
- 気象庁 (2007) : IPCC第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約. 気象庁HP (PDF版), 24.
- Lin, A., Maruyama, T., Kobayashi, K. (2007) : Tectonic implications of damage zone-related fault-fracture networks revealed in drill core through the Nojima fault, Japan. *Tectonophysics*, 443, 161-173.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K., Mimura, K. (2003) : $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan: surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 216, 221-230.
- 松末和之, 藤原 治, 末吉哲雄 (2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候. *サイクル機構技報*, No.6, 93-103.
- 三浦英樹, 平川一臣 (1995) : 北海道北・東部における化石凍結割れ目構造の起源. *地学雑誌*, 104, 189-224.
- 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会(編) (2011) : 日本列島と地質環境の長期安定性. *地質リーフレット*4.
- 産業技術総合研究所 (2012) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—立地要件への適合性とその根拠となる調査結果の妥当性. 産業技術総合研究所 地質調査総合センター研究資料集, No.560.
- 佐々木俊法, 須貝俊彦, 柳田 誠, 守田益宗, 古澤 明, 藤原 治, 守屋俊文, 中川 毅, 宮城豊彦 (2006) : 東濃地方内陸小盆地埋積物の分析による過去30万年間の古気候変動. *第四紀研究*, 45, 275-286.

参考文献(2/7)

■ 2.1 熱環境(つづき)

- 高橋正樹, Martin, A.J. (2004) : 今後10万年間どこに火山はできるか? — マグマ供給システムの長期安定性をめぐって. 月刊地球, 26, 386-394.
- 田中明子, 山野 誠, 矢野雄策, 笹田政克 (2004) : 日本列島及びその周辺地域の地温勾配及び地殻熱流量データベース. 数値地質図P-5, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.
- Umeda, K., Hanamuro, T., Yamada, K., Negishi, Y., Iwano, H., Danhara, T. (2007) : Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii Peninsula, southwest Japan: evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids. Radiation Meas., 42, 1647-1654.
- Umeda, K., Ninomiya, A., Negi, T. (2009) : Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, central Japan. J. Geophys. Res.: Solid Earth (1978-2012), 114, B01202, doi:10.1029/2008JB005812.
- 八幡正弘 (2002) : 北海道における後期新生代の鉱化作用および熱水活動の時空変遷. 北海道立地質研究所報告, 73, 151-194.
- 山田国見, 安江健一, 岩野英樹, 山田隆二, 梅田浩司, 小林健太郎 (2012) : 阿寺断層の垂直変位量と活動開始時期に関する熱年代学的研究. 地質学雑誌, 118, 437-448.
- 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司昇 (1999) : 日本列島地温勾配図(1:3,000,000), 地質調査所.

■ 2.2 力学場

- Cloos, M. (2009) : Nature of tectonic hazards. In: Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities [Connor, C.B., Chapman, N.A., Conner, L.J. (Eds.)], Cambridge Univ. Press, 24-73.
- 藤川 智, 奥村俊彦, 岡田康男, 窪田 茂, 末広俊夫, 玉田潤一郎, 藤崎 淳 (2012) : 地下深部の地震動特性に関する基礎的検討. 土木学会第67年次学術講演会講演概要集, 1081-1082.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会 長期評価部会 (2010) : 「活断層の長期評価手法」報告書(暫定版), 平成22年11月25日.
- 金折裕司 (2001) : 断層の影響はどこまで及んでいるか. 応用地質, 41, 323-332.
- 金折裕司, 遠田晋次 (2007) : 中国地方西部に認められるプレート内山一帯出雲地震帯の成因と地震活動. 自然災害科学, 25, 507-523.
- Kim, Y.-S., Peacock, D.C.P., Sanderson, D.J. (2004) : Fault damage zones. J. Struct. Geol., 26, 503-517.
- 長友晃夫, 吉田英一 (2009) : 断層と割れ目系およびその充填鉱物を用いた阿寺断層の地質的履歴解析. 地質学雑誌, 115, 512-527.
- 中田 高, 今泉俊文(編) (2002) : 「活断層詳細デジタルマップ」付図200万分の1日本列島活断層図. 東京大学出版会.
- 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会(編) (2011) : (熱環境で前出)
- Niwa, M., Mizuochi, Y., Tanase, A. (2009) : Reconstructing the evolution of fault zone architecture: field-based study of the core region of the Atera Fault, central Japan. Island Arc, 18, 577-598.
- Niwa, M., Kurosawa, H., Ishimaru, T. (2011) : Spatial distribution and characteristics of fracture zones near a long-lived active fault: a field-based study for understanding changes in underground environment caused by long-term fault activities. Eng. Geol., 119, 31-50.

参考文献(3/7)

■ 2.2力学場(つづき)

- 大橋聖和, 小林健太(2008):中部地方北部, 牛首断層中央部における断層幾何学と過去の運動像. 地質学雑誌, 114, 16-30.
- 岡田哲実(2005):高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その1)ー三軸圧縮試験による温度依存性の把握. 電力中央研究所報告, N04026.
- 岡田哲実(2006):高温環境下における堆積軟岩の力学特性(その2)ー一軸圧縮試験によるクリープ特性の温度依存性の評価. 電力中央研究所報告, N05057.
- 産業技術総合研究所:活断層データベース. <<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/index.html>>(参照2012年12月1日).
- Scholz, C.H.(2002):The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd Edition. Cambridge Univ. Press.
- Sibson, R.H.(2003):Thickness of the seismic slip zone. Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 1169-1178.
- 杉山雄一, 宮下由香里, 小林健太, 佐藤 賢, 宮脇明子, 宮脇理一郎(2005):鳥取県西部, 小町ー大谷リニアメント系のトレンチ調査. 活断層・古地震研究報告, No.5, 115-138.
- 高橋雅紀, 林 広樹, 笠原敬司, 木村尚紀(2006):関東平野西縁の反射法地震波探査記録の地質学的解釈. 地質学雑誌, 112, 33-52.
- 山崎晴雄(2006):関東平野の地震地質ー南関東の基盤断層と活断層の関係. 月刊地球, 28, 8-16.
- 安江健一, 廣内大助(2002):阿寺断層系中北部の第四紀後期における活動性と構造発達様式. 第四紀研究, 41, 347-359.
- 吉田英一, 大嶋章浩, 吉村久美子, 長友晃夫, 西本昌司(2009):断層周辺に発達する割れ目形態とその特徴ー阿寺断層における‘ダメージゾーン’解析の試み. 応用地質, 50, 16-28.
- 吉田久雄, 大藤友詳(2012):東日本大震災における久慈国家石油備蓄基地の防災活動について. Safety & Tomorrow, No.143, 39-46.

■ 2.3水理場

- Bintanja, R., van de Wall, R.S.W., Oerlemans, J.(2005):Modelled atmospheric temperatures and global sea levels over the past million years. Nature, 437, 125-128.
- Cuffey, K.M., Marshall, S.J.(2000):Substantial contribution to sea-level rise during the last interglacial from the Greenland ice sheet. Nature, 404, 591-594.
- 堀川 有(2012):東北地方太平洋沖地震における茨城県内の温泉(源泉)状況. 温泉科学, 61, 280-285.
- Huybrechts, P.(2002):Sea-level changes at the LGM from ice-dynamic reconstructions of the Greenland and Antarctic ice sheets during the glacial cycles. Quat. Sci. Rev., 21, 203-231.
- 板寺一洋, 菊川城司, 代田 寧(2011):東北地方太平洋沖地震の影響による箱根温泉の変化. 神奈川県温泉地学研究所報告, 43, 39-43.
- 香川 淳, 古野邦雄, 岡部隆男(2012):2011年東北地方太平洋沖地震による関東平野地下水盆南東部における地下水位変動. 日本地質学会第119年学術大会講演要旨, R17-O-9.
- 神奈川県温泉地学研究所(2011):東北地方太平洋沖地震(2011年3月11日 M9.0)の箱根温泉への影響について. <<http://www.onken.odawara.kanagawa.jp/modules/mysection1/item.php?itemid=27>>(参照2012年12月1日).
- 菊川城司, 板寺一洋, 代田 寧(2012):東北地方太平洋沖地震の影響による神奈川県内の温泉・地下水の変化. 温泉科学, 61, 292-298.

参考文献(4/7)

■ 2.3水理場(つづき)

- Kitagawa, Y., Koizumi, N., Takahashi, M., Matsumoto, N., Sato, T. (2006) : Changes in groundwater levels or pressures associated with the 2004 earthquake off the west coast of northern Sumatra (M9.0). *Earth Planet. Space*, 58, 173-179.
- 北川有一, 藤森邦夫, 向井厚志, 加納靖之, 小泉尚嗣(2008) : 断層の修復過程を透水性の時間変化によってモニターする. 地質調査総合センター第11回シンポジウム「地下水のさらなる理解に向けて～産総研のチャレンジ～」, 地質調査総合センター研究資料集, No.473, 61-62.
- 小泉尚嗣(2013) : 地震時および地震後の地下水圧変化. *地学雑誌*, 122, 159-169.
- 小泉尚嗣, 北川有一, 高橋 誠, 佐藤 務, 松本則夫, 伊藤久男, 桑原保人, 長 秋雄, 佐藤隆司(2002) : 2001年芸予地震前後の近畿地方およびその周辺における地下水・地殻歪変化. *地震第2輯*, 55, 119-127.
- 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野 明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野 崇, 丹野剛男, 平野 享, 竹内真司, 尾方伸久, 濱 克宏, 池田幸喜, 山本 勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造(2011) : 超深地層研究所計画 年度報告書(2009年度). *JAEA-Review 2011-007*.
- 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 石橋正祐紀, 上野孝志, 徳安真吾, 大丸修二, 竹内竜史, 三枝博光, 尾上博則, 武田匡樹, 狩野智之, 水野 崇, 萩原大樹, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 丹野剛男, 引間亮一, 森川佳太, 湯口貴史, 尾方伸久, 濱 克宏, 池田幸喜, 山本 勝, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造(2012) : 超深地層研究所計画 年度報告書(2010年度). *JAEA-Review 2012-020*.
- 前田保夫(2013) : 最終氷期最盛期以降の海水面変動に関する研究—大阪湾および播磨灘の海水面変動. *第四紀研究*, 52, 53-58.
- 松末和之, 藤原 治, 末吉哲雄(2000) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候. *サイクル機構技報*, No.6, 93-103.
- 中山 雅, 澤田純之, 杉田 裕(編)(2011) : 幌延深地層研究計画 平成22年度調査研究成果報告. *JAEA-Review 2011-033*.
- 西村 進(1999) : 温泉・地下水と地震. *温泉科学*, 48, 142-153.
- 西尾和久, 松岡稔幸, 見掛信一郎, 鶴田忠彦, 天野健治, 大山卓也, 竹内竜史, 三枝博光, 濱 克宏, 水野 崇, 齋 正貴, 平野 享, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 尾方伸久, 池田幸喜, 山本 勝, 内田雅大, 杉原弘造(2009) : 超深地層研究所計画 年度報告書(2007年度). *JAEA-Review 2009-002*.
- Niwa, M., Takeuchi, R., Onoe, H., Tsuyuguchi, K., Asamori, K., Umeda, K., Sugihara, K. (2012) : Groundwater pressure changes in central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 13, Q05020, doi:10.1029/2012GC004052.
- 大場忠道(2006) : 有孔虫の殻の酸素・炭素同位体比に基づく過去15万年間の日本海と鹿島沖の環境変化. *地学雑誌*, 115, 652-660.
- 大場忠道(2010) : 第四紀の始まりの世界的な気候寒冷化とは何か?—酸素同位体比変動から. *第四紀研究*, 49, 275-281.
- 大野真知子, 福本彦吉, 平井 哲, 向井 圭, 西本優介(2012) : 青森県下北半島地域を事例とした東北地方太平洋沖地震および十勝沖地震に伴う間隙水圧の変動状況. *日本地下水学会2012年秋季講演会講演要旨*, 92-97.
- 大塚晃弘, 高橋孝行, 益子 保(2012) : 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震に伴ういくつかの温泉の変化. *温泉科学*, 61, 286-291.
- 奥澤 保, 塚原弘昭(2001) : 松代群発地震地域に湧出する深層地下水. *地震第2輯*, 53, 241-253.
- 奥澤 保, 塚原弘昭(2002) : 松代群発地震地域に湧出する地下水の直下地震にともなう化学成分変化. *温泉科学*, 51, 147-163.
- 尾上博則, 笹尾英嗣, 三枝博光, 小坂 寛(2009) : 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み. *日本原子力学会和文論文誌*, 8, 40-53.

参考文献(5/7)

■ 2.3水理場(つづき)

- 太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗(2007): 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階(第1段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.
- 大槻憲四郎(2010): 2008年岩手・宮城内陸地震(MJ7.2)に伴う温泉の変動. 地質学雑誌, 116, 161-168.
- 大槻憲四郎(2012): 2011年4月11日福島県いわき市付近で発生した地震(M7)の余震に伴う地下水変動. 地質学雑誌, 118, 695-708.
- Rabineau, M., Berné, S., Olivet, J.L., Aslanian, D., Guillocheau, F., Joseph, P.(2006): Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 yr). Earth Planet. Sci. Lett., 252, 119-137.
- 産業技術総合研究所: 地震に関連する地下水観測データベース“Well Web”. <<http://riodb02.ibase.aist.go.jp/gxwell/GSJ/index.shtml>>(参照2012年12月1日).
- 産業技術総合研究所: 2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)に伴う温泉の変化. <<http://unit.aist.go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen.html>>(参照2012年12月1日).
- 佐々木信行(2012): 東北地方太平洋沖地震時に生じた温泉の白濁化—美霞洞温泉(香川)の例. 温泉科学, 61, 306-309.
- 佐藤早苗, 氏原英敏, 豊島剛志, 小林健太, 渡部直喜, 大川直樹, 和田幸永, 小河原孝彦, 播磨雄太(2005): 2004年新潟県中越地震による地下水異常. 新潟大学 中越地震新潟大学調査団(編): 新潟県連続災害の検証と復興への視点—2004.7.13水害と中越地震の総合的検証, 50-56.
- 佐藤 努, 酒井隆太郎, 大澤英昭, 古屋和夫, 児玉敏雄(1999): 淡路島で地震後異常に湧出した地下水の酸素・水素同位体比, 日本水文科学会誌, 29, 1, 13-24.
- 佐藤 務, 松本則夫, 北川有一, 小泉尚嗣, 高橋 誠, 桑原保人, 伊藤久男, 長 秋雄, 佐藤隆司, 小澤邦雄, 田阪茂樹(2004): 2003年十勝沖地震に伴う地下水位変動(速報). 地質ニュース, No.569, 35-41.
- 佐藤裕司(2008): 瀬戸内海東部, 播磨灘沿岸域における完新世海水準変動の復元. 第四紀研究, 47, 247-259.
- Tadokoro, K., Ando, M.(2002) Evidence for rapid fault healing derived from temporal changes in S wave splitting. Geophys. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL013644.
- 高橋 誠, 小泉尚嗣, 佐藤 務, 松本則夫, 伊藤久男, 桑原保人, 長 秋雄, 佐藤隆司(2002): 2000年鳥取県西部地震前後の近畿地域およびその周辺地域における地下水位・地殻歪変化. 地震第2輯, 55, 75-82.
- 竹内真司, 國丸貴紀, 見掛信一郎, 西尾和久, 鶴田忠彦, 松岡稔幸, 早野 明, 竹内竜史, 三枝博光, 大山卓也, 水野 崇, 平野 享, 尾方伸久, 濱 克宏, 池田幸喜, 山本 勝, 弥富洋介, 島田顕臣, 松井裕哉, 伊藤洋昭, 杉原弘造(2010): 超深地層研究所計画 年度報告書(2008年度). JAEA-Review 2010-014.
- Thompson, W.G., Goldstein, S.L.(2005): Open-system coral ages reveal persistent suborbital sea-level cycles. Science, 308, 401-404.
- 露口耕治, 尾上博則, 丹羽正和, 竹内竜史, 狩野智之(2012): 東濃地域における東北地方太平洋沖地震後の地下水位の変化. 日本地下水学会2012年春季講演会講演要旨, 214-219.

参考文献(6/7)

■ 2.4化学場

- 浅森浩一, 石丸恒存, 岩月輝希(2002): 研究報告 日本列島における火山周辺の酸性地下水分布. サイクル機構技報, 15, 103-111.
- 原子力環境整備促進・資金管理センター(2013): 平成24年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 放射性廃棄物重要基礎技術研究調査 多重バリアの長期安定性に関する基礎情報の収集及び整備. 平成19年度～平成24年度とりまとめ報告書.
- 川村淳, 大井貴夫, 新里忠史, 安江健一, 常盤哲也, 丹羽正和, 島田耕史, 黒澤英樹, 浅森浩一, 河内進, 江橋健, 北村暁, 石丸恒存, 牧野仁史, 梅田浩司, 瀬尾俊弘(2008): 高レベル放射性廃棄物地層処分における天然現象影響評価に関する研究. JAEA-Research 2008-018.
- 北川(2008): (水理場で前出)
- 馬原保典, 中田英二, 田中和弘(2000): 火山活動が高レベル処分のための天然バリアの地下水環境に及ぼす影響評価—文献調査と岩手山における地下水調査. 電力中央研究所報告, U99062.
- 産業技術総合研究所(2012): (熱環境で前出)
- Tadokoro and Ando(2002): (水理場で前出)

■ 3. 隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因

- 第四紀火山カタログ委員会(1999): 日本の第四紀火山カタログ(CD-ROM及び付図), 日本火山学会.
- 道家涼介, 佐藤善輝, 安江健一, 廣内大助(2008): 阿寺断層帯中部, 加子母地区における変位地形と平均変位速度. 活断層研究, 29, 79-86.
- 垣内佑哉, 堤 浩之, 竹村恵二, 鈴木毅彦, 村田昌則(2010): 琵琶湖西岸断層帯北部上寺断層の活動による河成段丘の隆起. 第四紀研究, 49, 219-231.
- Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagao, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A., Tanase, A. (2003): Late Cenozoic volcanic activity in the Chugoku area, southwest Japan arc during back-arc basin opening and reinitiation of subduction. Island Arc, 12, 22-45.
- 日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会(編)(2011): (熱環境で前出)
- 丹羽雄一, 須貝俊彦, 大上隆史, 田力正好, 安江健一, 齋藤龍郎, 藤原 治(2009): 濃尾平野西部の上部完新統に残された養老断層系の活動による沈降イベント. 第四紀研究, 48, 339-349.
- 末岡 茂, Kohn, B.P., 池田安隆, 狩野謙一, 堤 浩之, 田上高広(2011): 低温領域の熱年大学的手法に基づいた赤石山脈の隆起・削剥史の解明. 地学雑誌, 120, 1003-1012.
- 田力正好, 池田安隆(2005): 段丘面の高度分布からみた東北日本弧中部の地殻変動と山地・盆地の形成. 第四紀研究, 44, 229-245.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y., Shukuno, H. (2001): Distribution of Quaternary volcanoes in the Northeast Japan arc: geologic and geophysical evidence of hot fingers in the mantle wedge. Proc. Japan Acad., Ser. B, 77, 135-139.
- 梅田浩司, 谷川晋一, 安江健一(2013): 地殻変動の一樣継続性と将来予測: 地層処分の安全評価の視点から. 地学雑誌, 122, 385-397.



参考文献(7/7)

■ 3. 隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因(つづき)

- Yamamoto, T. (2007) : A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan. J. Volcanol. Geotherm. Res., 167, 119-13.
- 山元孝広(2011) : 地質学から見た高レベル放射性廃棄物処分の安全評価－事象のシナリオに基づく長期予測の方法論. シンセオロジー, 4, 200-208.
- 安江健一, 浅森浩一, 谷川晋一, 山田国見, 山崎誠子, 國分(齋藤)陽子, 丹羽正和, 道家涼介, 草野友宏, 花室孝広, 石丸恒存, 梅田浩司 (2011) : 地質環境の長期安定性に関する研究 年度報告書(平成23年度). JAEA-Research 2011-023.
- 吉田鎮男, 高橋 晋(2004) : 日本近海の中新世以降のプレート運動史. 月刊地球, 26, 349-355.