

参考資料－1

地質環境の長期安定性に関する補足資料

- 第4回会合資料2抜粋版 p.1-33
- 第5回会合資料1抜粋版 p.34-39
- 第5回会合資料2抜粋版 p.40-73
- 第5回会合参考資料1抜粋版 p.74-107

2014年3月
原子力発電環境整備機構



第4回会合資料2

「地質環境の長期安定性への影響要因と対応方針」 の抜粋版

- 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」p.2
 - 2. 1 熱環境p.3-9
 - 2. 2 力学場p.10-15
 - 2. 3 水理場p.16-24
 - 2. 4 化学場p.25-30
- 3. 物理的隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因p.31-33



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	地温が低いこと	—	地温が65℃以下であること
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
水理場	—	- 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	- 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		

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。

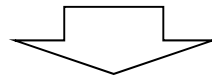
2.1 熱環境： 好ましい地質環境特性の条件

【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℃)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においては60℃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, 長期には, ガラス固化体の発熱量が小さいので, 100℃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ある。
- ・ 「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℃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℃/100mである(総論レポート:3. 2. 4)。

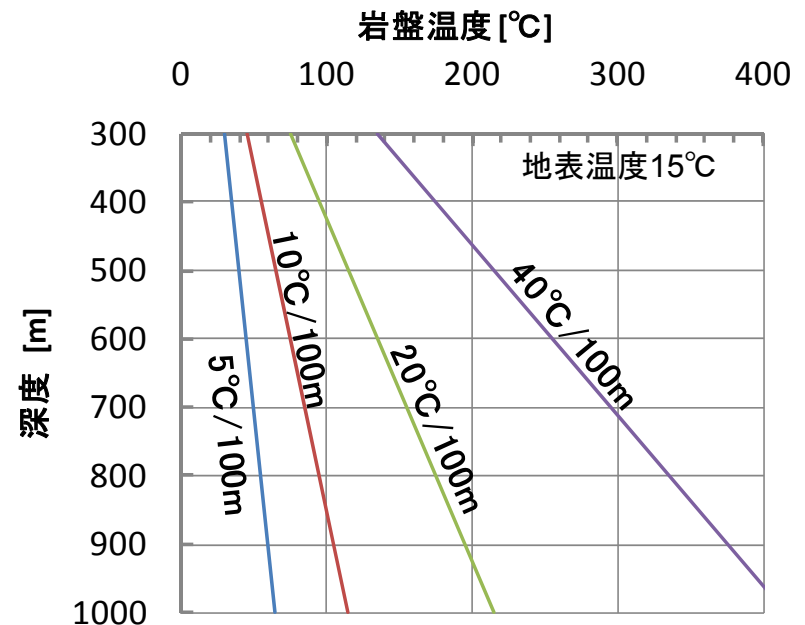
【その後の知見】

- 地熱活動に伴い、地温勾配が5～10℃/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： 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℃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℃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℃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℃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 $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 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 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 高かったとされており、この程度の気温上昇は300m以深の深さ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無い。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】

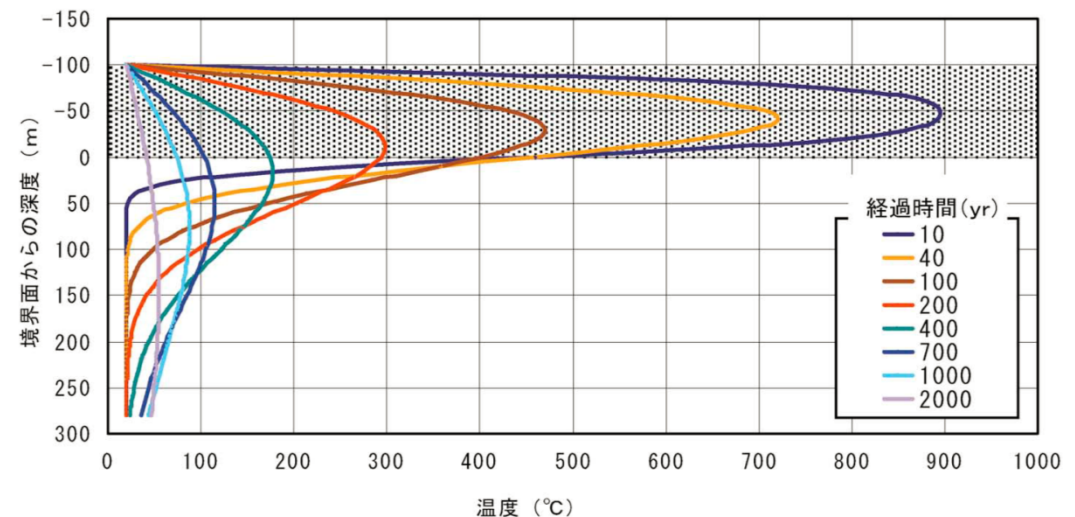
- 大規模火砕流の熱的影響について、事例調査と熱解析を実施した報告があり、層厚100m、温度900℃の火砕流が地温に与える影響を評価している。地下300m付近において、温度は2000年後まで上昇するが、最高60℃程度であることが示されている(石丸・角田, 2002)。

【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℃を下回る(地温勾配が5℃/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℃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合は、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。

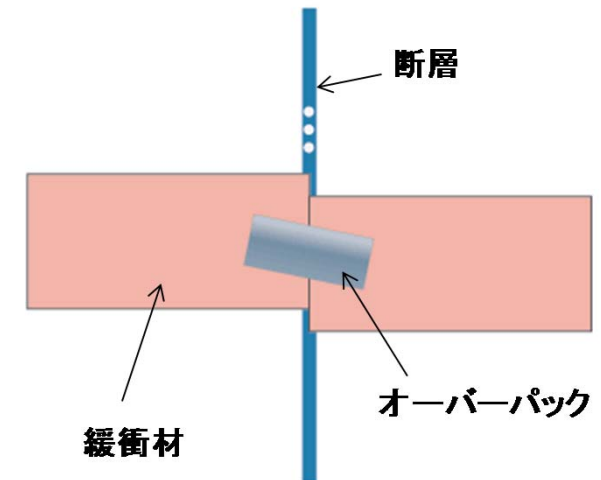
2.2 力学場： 好ましい地質環境特性の条件

【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）

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】

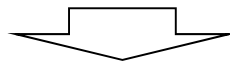
（岩盤のクリープ特性の温度依存性に関連する記述はない）

【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】

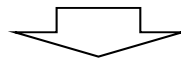
- 確認されている主な活断層の平均変位速度は、0.01～10 m／1000年の範囲で、活断層の変位の向きと速度は、過去数十万年以降、大きく変化していない。(分冊1：2.3.1)

【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、各種の活断層分布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ため、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： 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】

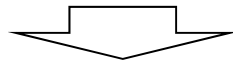
- 地下数百m以深では一般に地震動による影響は小さいと考えられる。(分冊1:2.3.3)
- 地震が起こった際に人工バリアは岩盤と一体となって振動すると考えられるため、想定される最大級の地震動を考慮した上で、工学的な対策を施すことが可能である。

【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。このため、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、放射性物質の移行遅延に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、さらには、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	隆起・海水準変動
	気候・海水準変動，隆起・浸食，断層活動に伴う地形変化
	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	気候・海水準変動に伴う流出点の変化，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	気候変動に伴う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：隆起・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：気候・海水準変動，隆起・浸食，断層活動に伴う地形変化」

【第2次取りまとめの考え方】

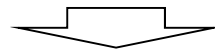
- 将来の動水勾配の分布を推定する上では，隆起や浸食によって地形勾配がどの程度変化するかが重要なパラメータである。
- 隆起・沈降・侵食による地形勾配の増加は，動水勾配を増加させ，地下水流動を変化させることが想定される。
- 動水勾配や地下水位の勾配は，活褶曲や河川近傍を除いてほとんど変化しないと考えられる（以上，分冊1：2.5.2）。

【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：気候・海水準変動に伴う流出点の変化，塩水／淡水境界の移動」

【第2次取りまとめの考え方】

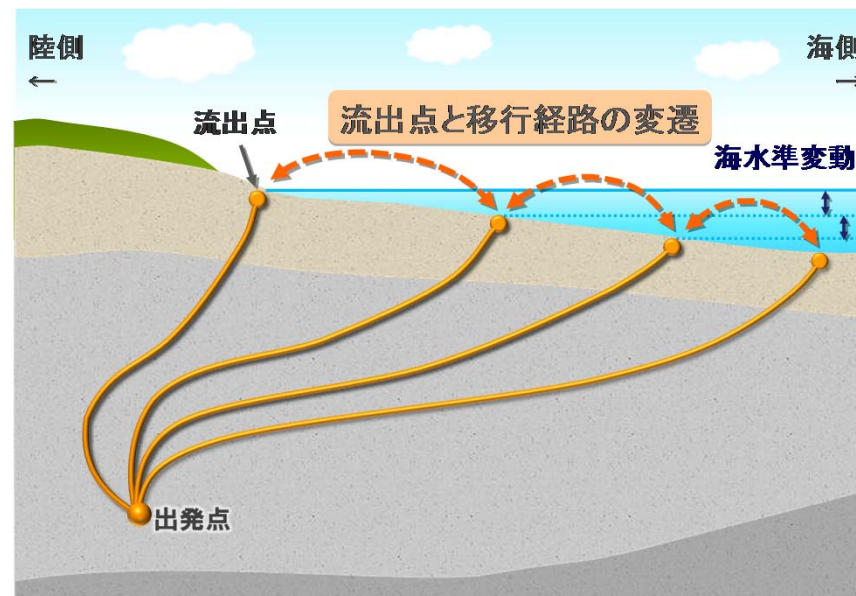
- ・気候変動の地質環境への影響として重要なのは，地下水流動系の変化である。氷期には海水準が低下し，地下水の動水勾配が大きくなり，地下水の水理や水質の変化が予想される（分冊1：2.6.3）。
- ・塩水／淡水境界による地下水流動への影響としては，（塩分濃度の違いによる密度差により）境界に沿って淡水が上昇することがあげられている（分冊1：3. 3. 1）。

【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が変わり，処分場スケールにおける地下水流動経路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の変化，塩水／淡水境界の移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。
- ・なお，広域スケールにおける流出点の変化については，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学的な変化は、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

「気候変動に伴う涵養量の変化：涵養域の降水量の変化」

【第2次取りまとめの考え方】

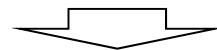
- 降水量の変動に関するデータは限られているが、氷期の日本列島では現在の7割から半分近くまで減少していた可能性が高い（分冊1：2.6.3）。
- 十万年の氷期・間氷期の周期が卓越しているとともに、その中に更に短い周期が認められる（分冊1，2.6.1）。

【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，塩淡水境界の位置の変化，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】

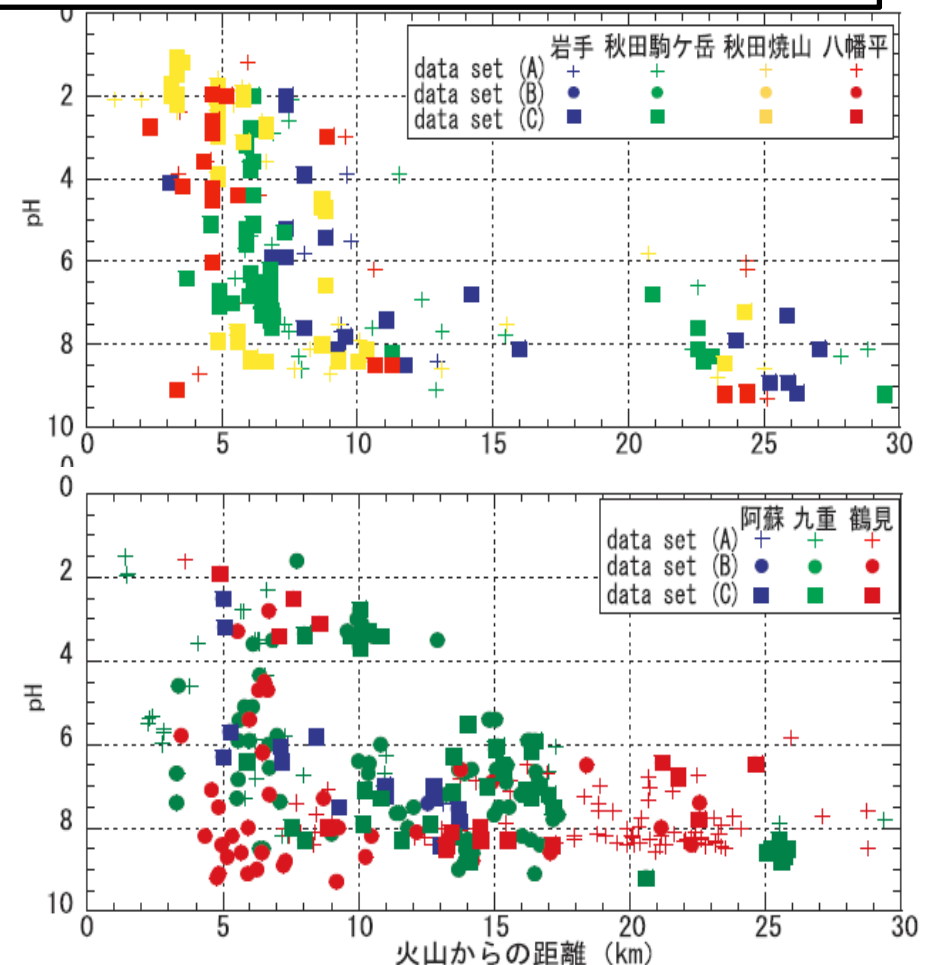
- 酸性地下水や炭酸化学種濃度は地熱活動が活発な第四紀火山の近傍に分布する。酸性地下水の影響は上部の地質構造の影響を受け，広範囲に及ぶこともある。
- 将来，地熱活動が活発化した際に，pHの低下や炭酸富化する可能性があり，著しい影響を与えるので，そのような地域をサイト選定において回避することが必要である。

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)



火山からの距離と地下水のpHとの相関(浅森ほか，2002) 27

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

（超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入の説明は以上）



2.4 化学場：著しい影響を与える事象の特定 「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 炭酸化学種を含む地下水の流入	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)
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. 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】

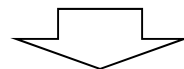
- ・ 地質環境への影響として重要なのは、隆起・沈降・侵食が地下施設を地表へ接近させたり、地下水流動を変化させる可能性である。
- ・ 大規模な隆起・侵食の継続は、土被りを大きく減少させる。
- ・ 山地で地震や豪雨などを引き金として発生する大規模な斜面崩壊は、侵食・削剥による地形変化のプロセスであり、直接的影響のひとつである(分冊1:2.5.3)。

【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



第5回会合資料1

「地質環境の長期安定性への影響要因に対する工学的対策などの技術的根拠」の抜粋版

- | | |
|-------------------|------|
| 1. 総合的評価と工学的対策 | p.35 |
| 2. 総合的評価と工学的対策の方針 | p.36 |
| 3. 総合的評価と工学的対策の事例 | p.37 |



1. 総合的評価と工学的対策

処分場候補地に係る固有の地質環境特性に係る情報が無い現段階では、天然現象の複合事象も考慮して安全機能へ影響を与える可能性のある事象について、施設設計との関連を踏まえた総合的な評価を行うことは難しい。

このため、第4回会合では、既往文献などを基に、安全機能へ影響を与える可能性のある個々の事象毎にその影響を判断し、事象を以下の2つに分類。

- 著しい影響を与え、合理的な工学的対策が困難と考えられる事象
- 著しい影響を与えるとは考えられない、または、合理的な工学的対策が可能と考えられる事象

上記事象のうち、後者については、処分場候補地に係る固有の地質環境特性に係る情報が得られる概要調査段階および精密調査段階で総合的な評価を行い、必要に応じて具体的な対策を検討する。なお、その結果、合理的な工学的対策が困難な場合は、処分場候補地とはならない。

2. 総合的評価と工学的対策の方針

- 着目する安全機能毎(例:緩衝材の移行抑制機能)に総合的評価と工学的対策を検討する。

天然現象の影響(※)と地質環境特性の把握(場の理解)
※サイトに応じた現象の特性を踏まえて複合事象を考慮

工学的対策(処分場位置, 廃棄体の配置, 緩衝材仕様など)設定

必要に応じて工
学的対策の修正

安全機能の評価
安全機能確保の確認

合理的な範囲で工学的対策を施しても安全機能が確保されない場合は、
処分場候補地としない。

- 各安全機能間で工学的対策の整合を取る。

例:緩衝材の移行抑制に関する熱環境の観点からは処分場設置深度を浅くする工学的対策が望ましいが, 天然バリアに関する水理場の観点からは逆に深くする方が望ましい。

長期間にわたって、地温と廃棄体の発熱の影響による緩衝材温度が100℃を超えないことが必要

- **天然現象の影響(→地温)**
 - 将来の近傍の火山・火成活動(火砕流, 溶岩流含む), 地熱活動の想定
 - 将来の地表の気温の変化の想定
 - 将来の隆起・侵食による処分場設置深度の変化の想定

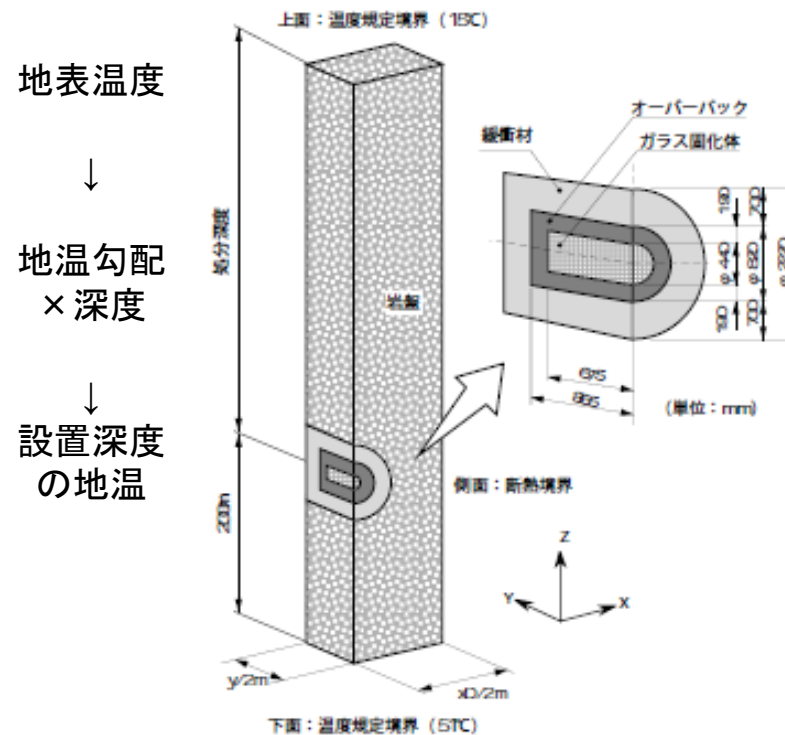
- **天然現象の影響(→地温)**
 - 将来の近傍の火山・火成活動(火砕流, 溶岩流含む), 地熱活動の想定
 - 将来の地表の気温の変化の想定
 - 将来の隆起・侵食による処分場設置深度の変化の想定

- **地質環境特性の把握(→地温, 廃棄体の発熱の影響)**
 - 地温勾配の把握と及びその将来変化の想定(→地温)
 - 岩盤の熱伝導特性の把握とその将来変化の想定(→廃棄体の発熱の影響)

- **地質環境特性の把握(→地温, 廃棄体の発熱の影響)**
 - 地温勾配の把握と及びその将来変化の想定(→地温)
 - 岩盤の熱伝導特性の把握とその将来変化の想定(→廃棄体の発熱の影響)

- 安全機能確保の確認
 - 熱伝導解析

- 安全機能確保の確認
 - 熱伝導解析



解析モデル(分冊2, 図4.2.2-91)
廃棄体1体当たり

4. 総合的な評価と工学的対策の事例

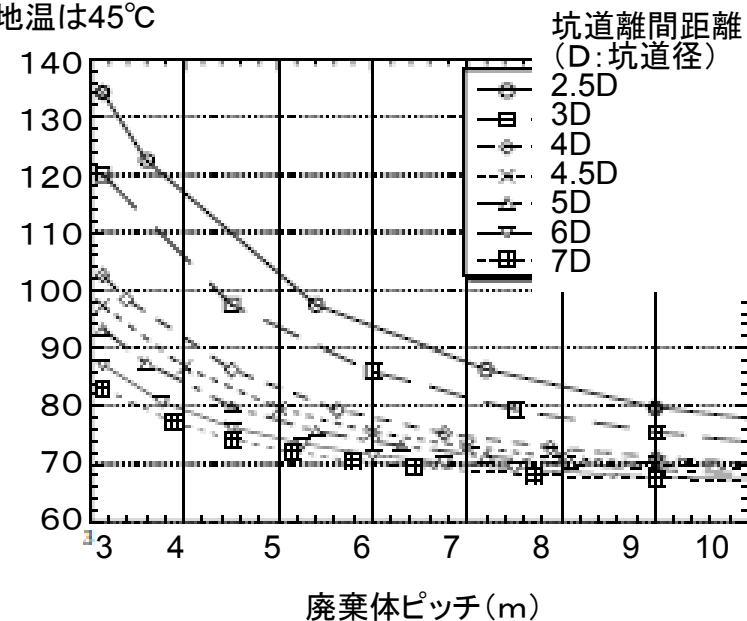
安全機能「緩衝材の移行抑制」(2)

- 工学的対策(→地温, 廃棄体の発熱の影響)
 - 処分場設置深度の設定(→地温)
 - 廃棄体間隔の設定(→廃棄体の発熱の影響)
 - 緩衝材厚さ等の設定(→廃棄体の発熱の影響)



坑道間隔と廃棄体間隔
(横置きの場合)
(分冊2, 図4.2.2-6)

緩衝材の温度(°C)
※地温は45°C



間隔を広げて
も温度上昇抑
制には限界が
ある

廃棄体間隔の効果(分冊2, 図4.2.2-99)
(軟岩系岩盤処分坑道横置き方式)

4. 総合的な評価と工学的対策の事例

安全機能「天然バリアの移行抑制」

物質の移行距離，時間が一定程度以上確保されることが必要
$$\text{移行時間} = \text{移行距離} / (\text{透水性} \times \text{動水勾配} \times \text{遅延性能})$$

- 天然現象の影響(→移行距離，動水勾配)

- 将来の隆起・侵食，海水準変動による将来の地形，処分場深度の変化の想定

- 地質環境特性の把握(→透水性，遅延性能)

- 透水性の把握と及びその将来変化の想定(→透水性)
- 岩盤の収着性の把握とその将来変化の想定(→遅延性能)

- 工学的対策

- 物質の移行距離，時間が一定以上確保できるように，処分場の深度，位置を設定する。

- 安全機能の評価

- 地下水流動解析により移行経路を把握
- 想定した経路及び経路上の遅延性能を用いた物質移行解析



第5回会合資料2

「地質環境の長期安定性への影響要因に関する サイト調査の方針」の抜粋版

1. 段階的な調査の考え方

- 全体方針 p.41
- 調査地域の段階的な絞り込み(調査スケール) p.42

2. 天然現象に関する調査方針

- 火山・火成活動 p.43-56
- 断層活動 p.57-67
- 隆起・侵食作用 p.68-73



1. 段階的な調査の考え方 全体方針

対象となる地域ごとに、全国一律に評価するために、全国規模で体系的にデータが整備されている文献に基づいて、文献調査の対象となることを確認(事前確認)。

【概要調査地区選定段階(文献調査の段階)】



地層処分に明らかに適さない地域は対象としない。

地域ごとに収集した文献情報に基づいて、最終処分施設建設地としての適性が明らかに劣る地域を含まないように、概要調査を行う地区を選定する。

【精密調査地区選定段階(概要調査の段階)】



調査地区の選定の判断においては、地域の意見を尊重する。

- 現地調査の結果に基づいて、文献調査の結果を確認するとともに、追加して除外すべき地域がないかを検討する。
- また、処分施設の設計・施工や、安全性の評価の観点からも、対象地域の地質環境特性の適性を評価し、精密調査を行う地区を選定する。

【最終処分施設建設地選定段階(精密調査の段階)】



調査地区の選定の判断においては、地域の意見を尊重する。

- 地下調査施設からの調査で新たに得られる情報を加味し、設計・および安全性の評価を実施する。地下深部の岩盤の特性が、好ましい地質環境特性の範囲にあることを、安全性、工学的実現性、経済性などについて、総合的に評価し、処分施設を建設地を選定する。

【認可申請】



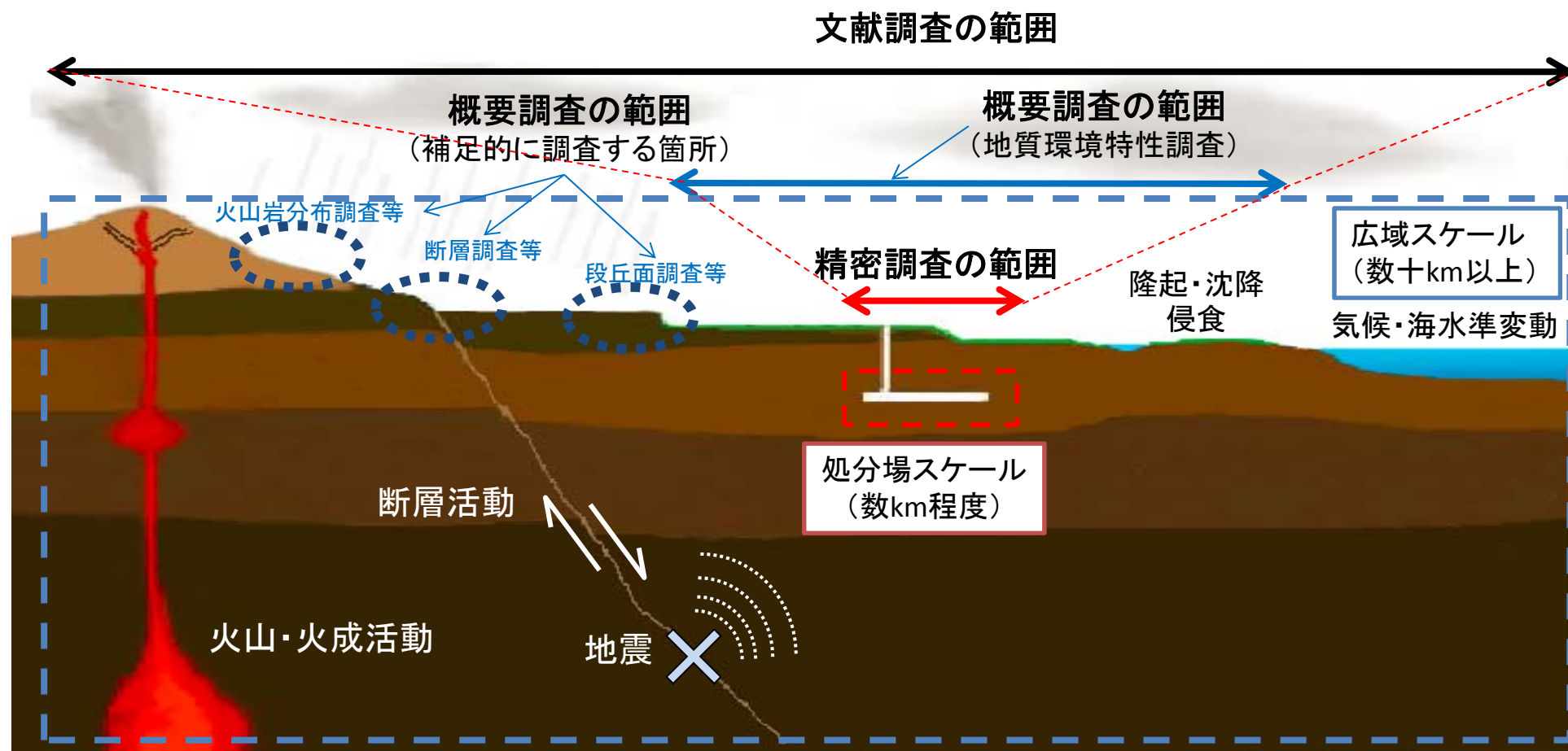
建設地の選定の判断においては、地域の意見を尊重する。

- 対象となる地域の地質環境特性などを踏まえ、処分施設の安全性を国が確認する。

1. 段階的な調査の考え方

調査対象地域の段階的な絞り込み(調査スケール)

- 著しい影響を与える天然現象が含まれないように、調査地域を段階的に絞り込むことで、好ましい地質環境特性を有する地層または岩体に処分施設を設置する。
- また、文献調査、概要調査(地表からの現地調査)、精密調査(地下調査施設からの現地調査)と段階が進むごとに、対象地域が絞り込まれるため、地下深部の地質環境について詳細に情報収集することが可能となる。





2.1 火山・火成活動

著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

(第4回資料の抜粋)

○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

- 熱環境の好ましい条件: 例えば, 地温が初期に60℃程度, 長期には100℃を超えない。地温勾配が10℃/100mを超えないなど。
- 化学場の好ましい条件: 低pHあるいは, 高pHではない, 炭酸化学種濃度が高くない(例えば0.5 mol/dm³を超えない)。

○サイト選定における回避の考え方

【回避対象】

- マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域
- 地熱活動が盛んな地域
- **深部流体など非火山性熱水が流出する地域**(第4回WG意見を踏まえ別項目化)

【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。

影響範囲の考え方も含め, 詳細に説明



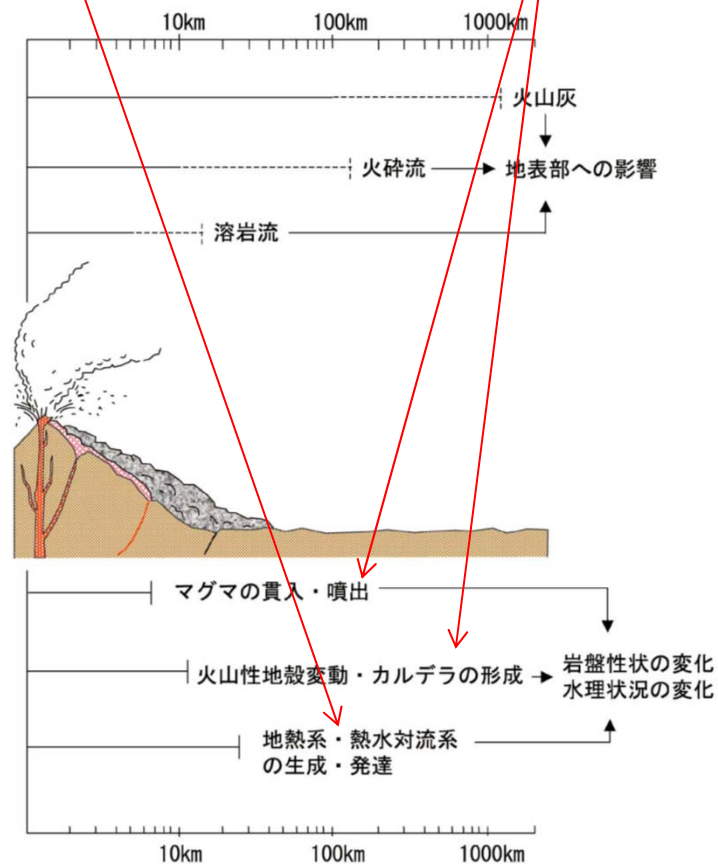
2.1 火山・火成活動

著しい影響を回避する対象の考え方

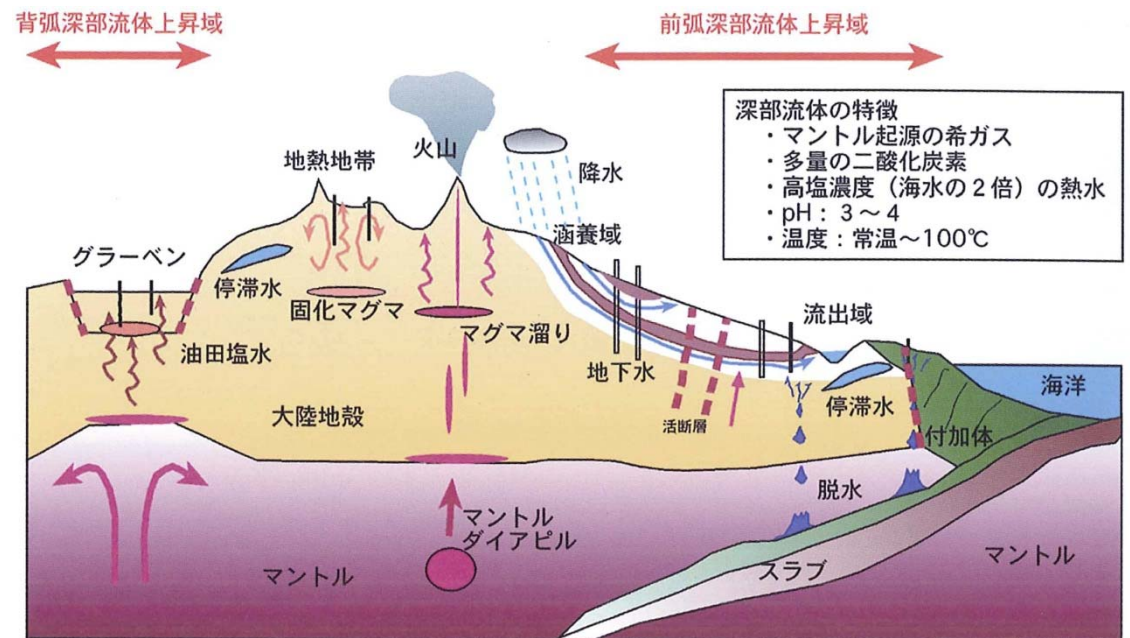
調査において回避の対象となる現象が発生する地域のイメージを示す。

A) マグマの貫入・噴出の可能性が高い地域

B) 地熱活動が盛んな地域



C) 深部流体など非火山性熱水が流出する地域



深部流体の起源に関する概念図

産総研(2007): 第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集, p.31

火山・火成活動の概念図(石丸・角田, 2002)

2.1 火山・火成活動：影響範囲の考え方

A) マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域(1)

【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), 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)。背弧域では、下部地殻の再加熱により火山が新規に出現したケースもあると考えられている(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、中国山地および日本海側の地域に限定されてきている。これは、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ていると考えられている(Kimura et al., 2003など)。

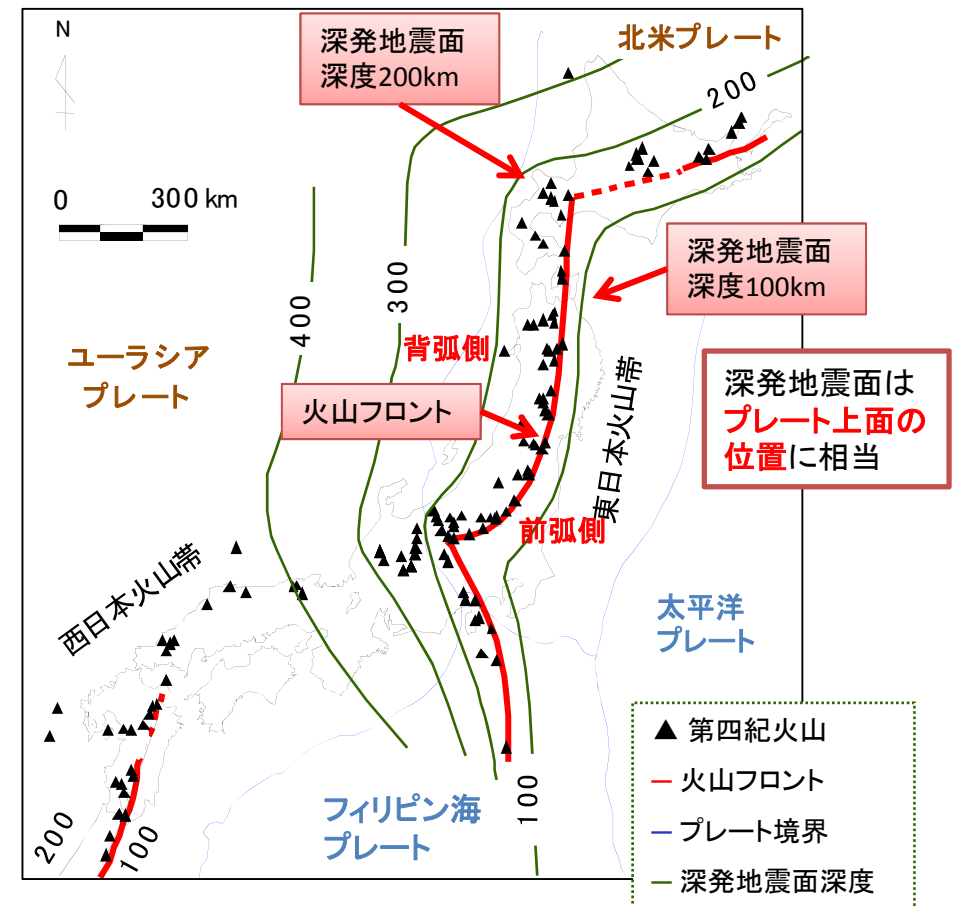
2.1 火山・火成活動:影響範囲の考え方

A) マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域(2)

【NUMOの考え方】

○日本列島におけるマグマの成因と火山の分布

- 海洋プレートが沈み込む際に、100-200 km程度に達する深さで、プレート上面の含水鉱物の脱水に伴い、地殻下部の岩石の融点が低下し、かつ、高温状態にあるためマグマが発生する。
- 東北地方には火山フロントが形成され、マグマの発生深度よりプレート上面の深度が浅い前弧側では、広い範囲で地温勾配が低く、火山が分布していない。
- 背弧側では、火山が分布する領域と、分布しない領域(空白域)が存在する。
- 西南日本に関しては、フロントが明確ではない。



日本列島周辺のプレート配置と第四紀火山の分布

(分冊1, 図2. 4-1)(第四紀火山カタログ委員会編, 1999を編集)

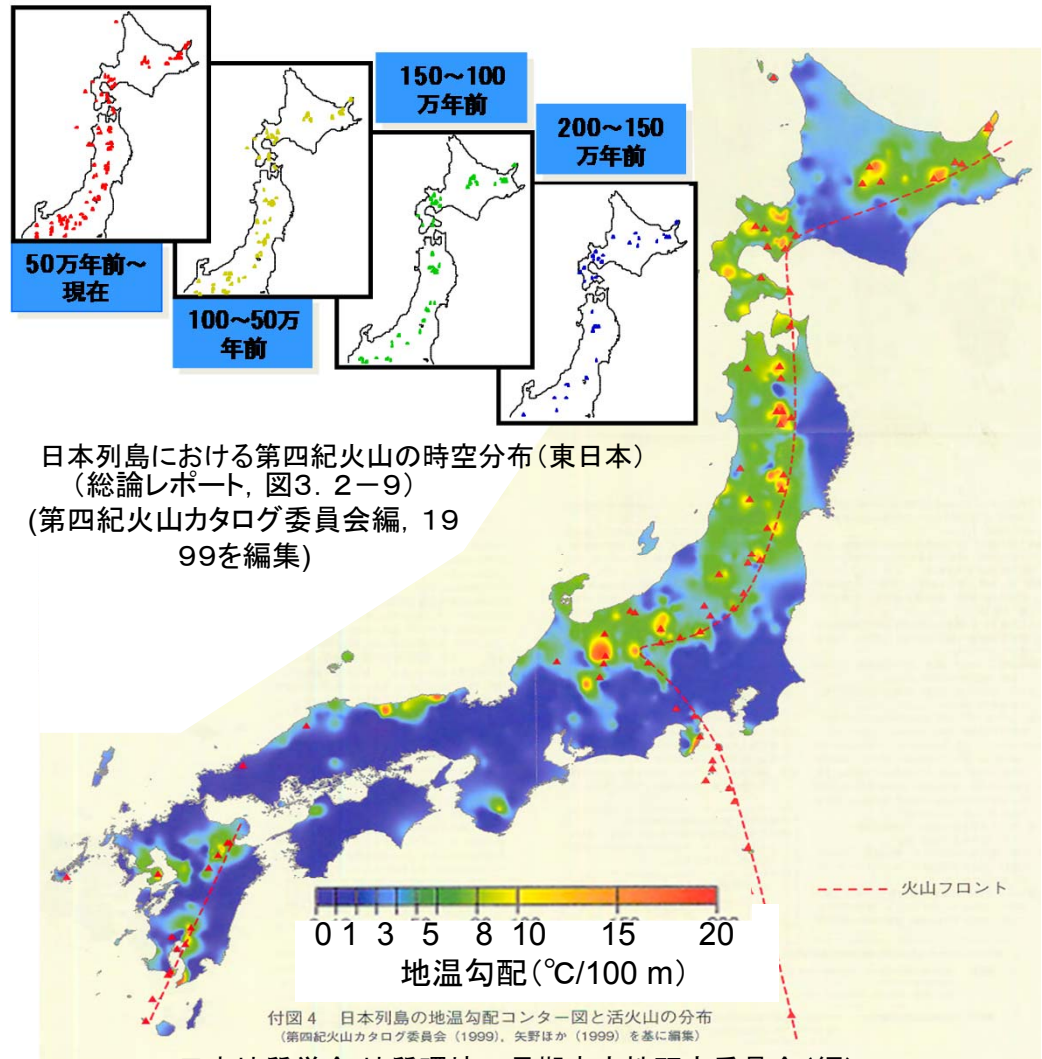
2.1 火山・火成活動：影響範囲の考え方

A) マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域(3)

【NUMOの考え方】

○火山活動(マグマ)の継続性

- 日本列島におけるマグマの分布は、プレートシステムと密接に関係があり、最近の地質時代に活動した火山は、特定の地域に偏って分布しているという傾向がある。
- 一般には過去200万年の間にその傾向に大きな変化は認められないことから、今後も、プレートシステムが大きく変わらなければ、現在の火山活動などの傾向が著しく変化することは考えにくい。
- なお、現在、地殻内の温度が低い(地温勾配が低い)領域において、マグマが発生する可能性は低いと考えられる。



日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会(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.

2.1 火山・火成活動：影響範囲の考え方

A) マグマの貫入・噴出が起こる可能性が高い地域(4)

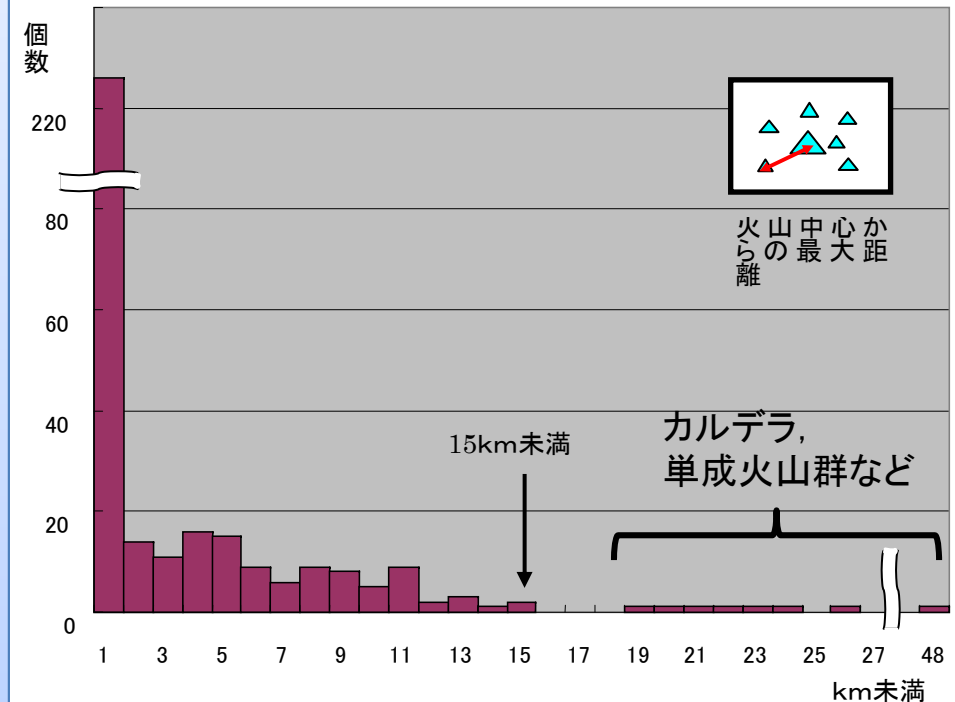
【NUMOの考え方】

○文献情報に基づくマグマ活動の範囲

- 文献情報(日本の第四紀火山カタログ, 1999)に基づく、陥没カルデラを形成する第四紀火山や、単成火山群など8つの火山を除けば、個々の第四紀火山の位置(その火山を代表する位置)を中心として、多くの火山が数kmの範囲内にあり、すべての火山で半径15kmの円の範囲に収まる。したがって、全国一律には、上記の範囲を対象として、回避することが必要と考えられる。(なお、産総研(2013):「日本の火山第3版」などの最新の文献を用いた再評価を検討している。)
- なお、巨大カルデラなどの個別の火山におけるマグマ活動の範囲は、上記の範囲を超える可能性もあることから、地下物理探査などを含む現地調査に基づいて評価し、回避する必要があると考えられる。

○将来のマグマの貫入・噴出の場の評価方法

- 将来的なマグマの貫入・噴出の推定は、既存の火山の活動位置、マグマの活動範囲の広がり、火山の形成過程などの観点から、火山・火成活動の規則性に関する評価を行うことが基本となる。
- その際、単成火山のような不規則な活動、巨大カルデラ噴火の再活動あるいは火山の新規出現の将来予測なども考えられる。



第四紀火山の中心と個別火山体との距離と頻度
(日本の第四紀火山カタログ, 1999に基づき作成)

2.1 火山・火成活動：影響範囲の考え方

B) 地熱活動が著しい地域

【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。
- 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。
- 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)。

【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)。
- 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, 2012, 川村ほか, 2009)。
- 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, 2009)。
- 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、地下水へのマグマ分離成分の影響が50km遠方にまで及ぶとの報告(産総研, 2010)もある。

2.1 火山・火成活動：影響範囲の考え方

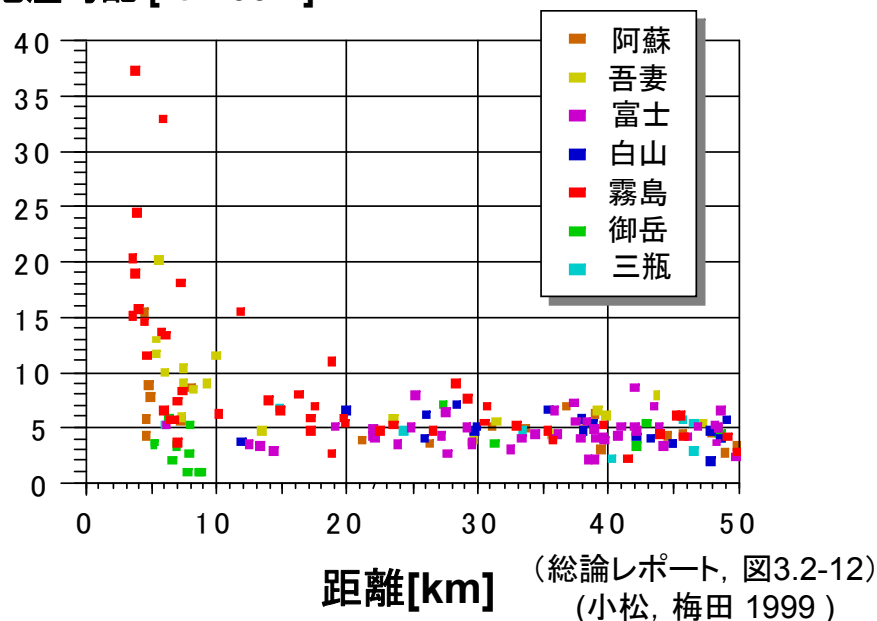
B) 地熱活動が著しい地域

【NUMOの考え方】

○文献情報に基づく地温勾配が高い地域

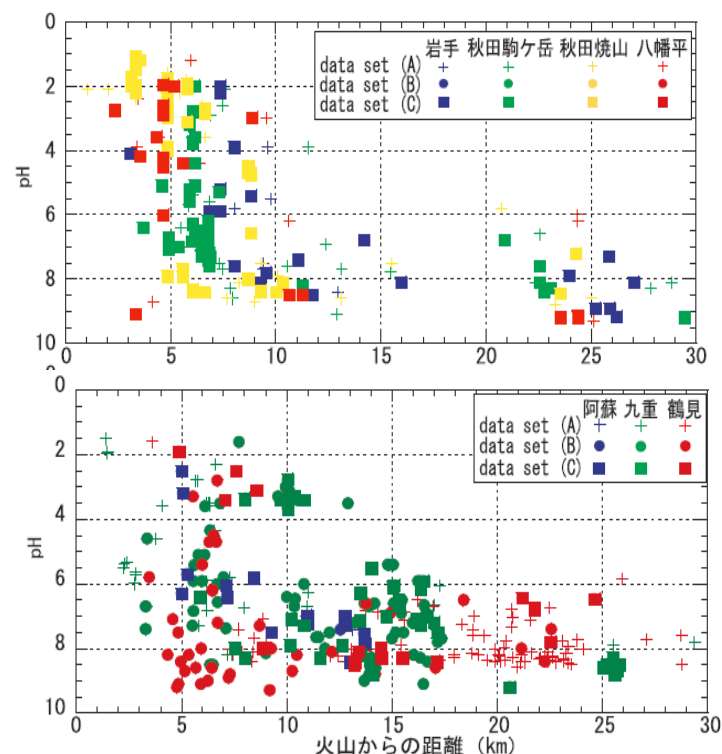
- 地温勾配が $10^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ を超える高温異常域は、火山の分布と整合的であり、少なくとも第四紀火山の中心から10kmの範囲は影響が大きいと考えられる。
- なお、カルデラなどについては、より広範囲に影響する可能性もあることから、現地調査に基づいて個別に評価する必要があると考えられる。

地温勾配 [$^{\circ}\text{C}/100\text{m}$]



○文献情報に基づく熱水による化学的な影響範囲

- 右記の事例では、熱水のpHが4程度の酸性となる領域は、火山からおおむね15km程度の範囲に分布している。
- なお、カルデラなどについては、より広範囲に影響する可能性もあることから、現地調査に基づいて個別に評価する必要があると考えられる。



火山からの距離と地下水のpHとの相関(浅森ほか, 2002)

2.1 火山・火成活動: 影響範囲の考え方

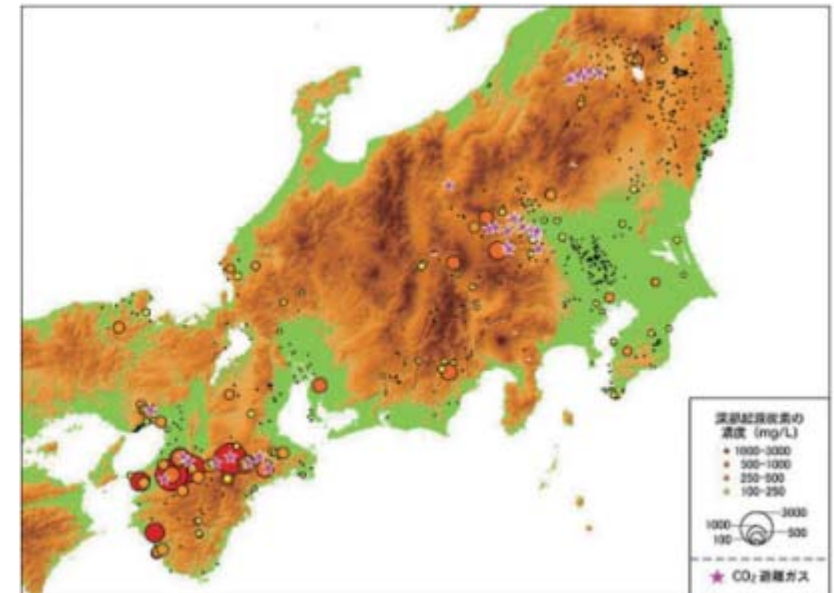
c) 深部流体など非火山性熱水が湧出している地域

【第2次取りまとめの考え方】

(記述なし)

【その後の知見】

- 非火山性熱水の起源は、地殻熱流量による加熱(常磐地域)、基盤岩に由来する崩壊熱による加熱(能登半島)、石油・天然ガス地帯における熱水(新潟平野)、およびスラブ起源の深部流体(紀伊半島、有馬温泉)などが報告されている(田中ほか, 2004, 産総研, 2007; 2012など)。
- このうち、スラブ起源である深部流体は、高塩分濃度、低pH、多量のCO₂であり、また、高温であることから、熱環境や化学場に影響を与えと考えられる。
- 深部流体は、沈み込むスラブやマントルから放出される流体を起源とすると考えられており、地表にまで上昇する際には、地殻下部にまで達するような構造線や大断層が主経路であると考えられている(産総研, 2007; 2012)。



地下水中の深部起源無機炭素濃度および二酸化炭素の遊離ガスの分布(産業技術総合研究所, 2007)

【NUMOの考え方】

- 温度が高い非火山性熱水や深部流体の流出は、過熱や流出のメカニズムを考慮すると、偏在性があると考えられる。
- また、化学的な影響の範囲については、地下水の同位体成分の分析などが必要である。ただし、全国規模で体系的にまとめた文献がないため、個別の地域で評価する必要があると考えられる。



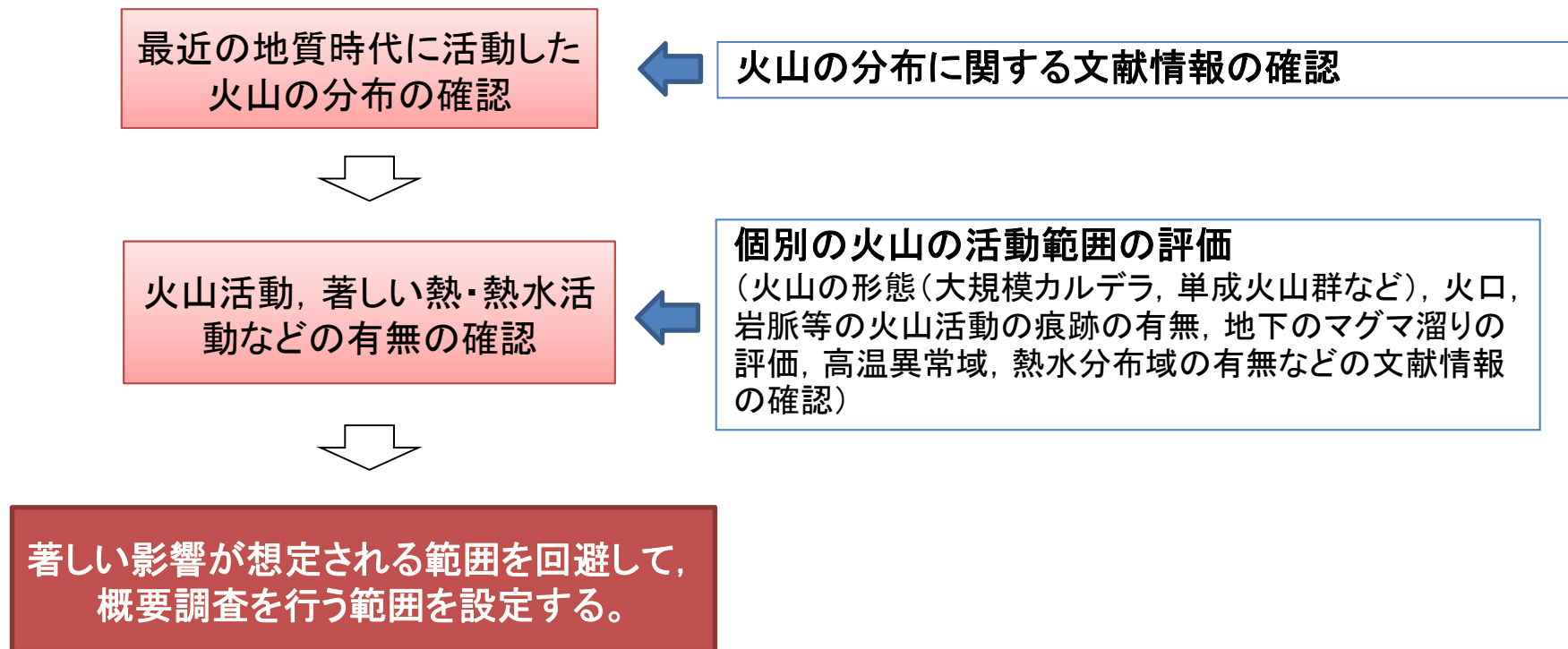
2.1 火山・火成活動 評価対象と影響範囲の考え方のまとめ

評価対象	影響範囲の考え方
A) マグマの貫入・噴出が起 こる可能性が高い地域 (火山では、地下のマグ マ溜りから、火道を通じ て地表にマグマが上昇 するので、火山の分布 に基づいてマグマの活 動範囲を推定すること が基本となる)	・東北地方の火山活動は、<u>火山フロントを境界として、前弧側と背弧側で異なる</u>。 この状態は、現在のプレート運動が大きく変動しない限りは、将来も継続すると 考えられる。 ➢ 前弧域では、火山活動が200万年程度にわたり観測されていない。 ➢ 背弧域では、火山が分布する地域としない地域(空白域)がある。 ・西南日本でも、火山フロントが認められるが、東北日本よりは不明瞭である。 ・以上の分布傾向も踏まえ、最近の地質時代において活動した火山は、将来も 活動する可能性があるため、回避する必要がある。 ➢ 全国規模で体系的に収集された文献情報に基づく、活動範囲は、個々の第四紀火 山の位置(その火山を代表する位置)を中心として、<u>多くが数km以内にあり、すべての 火山で半径15kmの円の範囲に収まる</u>。 ・なお、カルデラなどの個別のマグマの活動範囲や、将来の範囲については、上 記の範囲の外側についても、現地調査に基づいて評価する必要がある。
B) 地熱活動が著しい地域	・熱環境については、<u>概ね10 km程度の範囲</u>が特に著しいと考えられる。 ・化学場については、<u>概ね15 km程度の範囲</u>が特に著しいと考えられる。 ・なお、カルデラなどは、<u>上記よりも広い範囲に影響を与えることがあるので</u>、個 別の火山の影響範囲は、現地調査などに基づいて、詳細に評価する。
C) 深部流体などの非火山 性熱水が湧出している地域	全国規模で体系的にまとめられた文献がないため、個別地区ごとに評価する。

2.1 火山・火成活動：調査・評価の進め方

文献調査の段階(A:マグマの貫入・噴出, B:地熱活動および C:非火山性熱水)

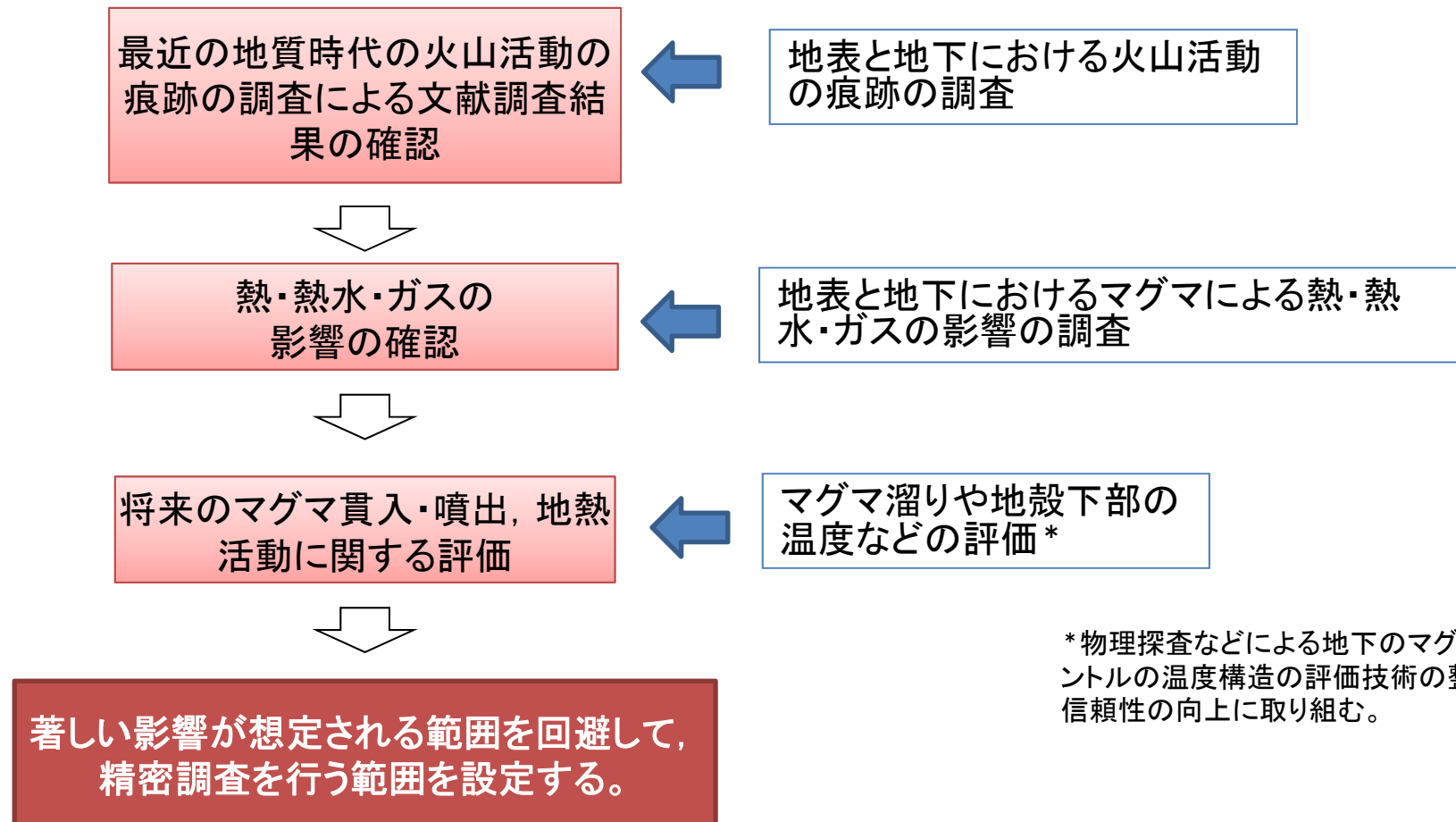
個別の断層の情報は地域によっては十分でない可能性もあるため、存在が明らかな火山とその範囲を対象として回避する。明確でない場合には、概要調査の段階も含めて判断する。なお、深部流体については、文献情報でその存在が明確に判断できる場合に、概要調査地区に含めない。



2.1 火山・火成活動：調査・評価の進め方

概要調査の段階（地表からの調査）（A：マグマの貫入・噴出およびB：地熱活動）

現地調査が可能となるため、地表地質調査やボーリング調査により、地表および地下の活動の痕跡を確認する。また、ボーリング調査により、地下の地温の確認や地下水の化学分析を実施し、地熱活動の影響の有無および範囲を把握する。さらに、物理探査などによりマグマ溜りの存在の評価を実施する。

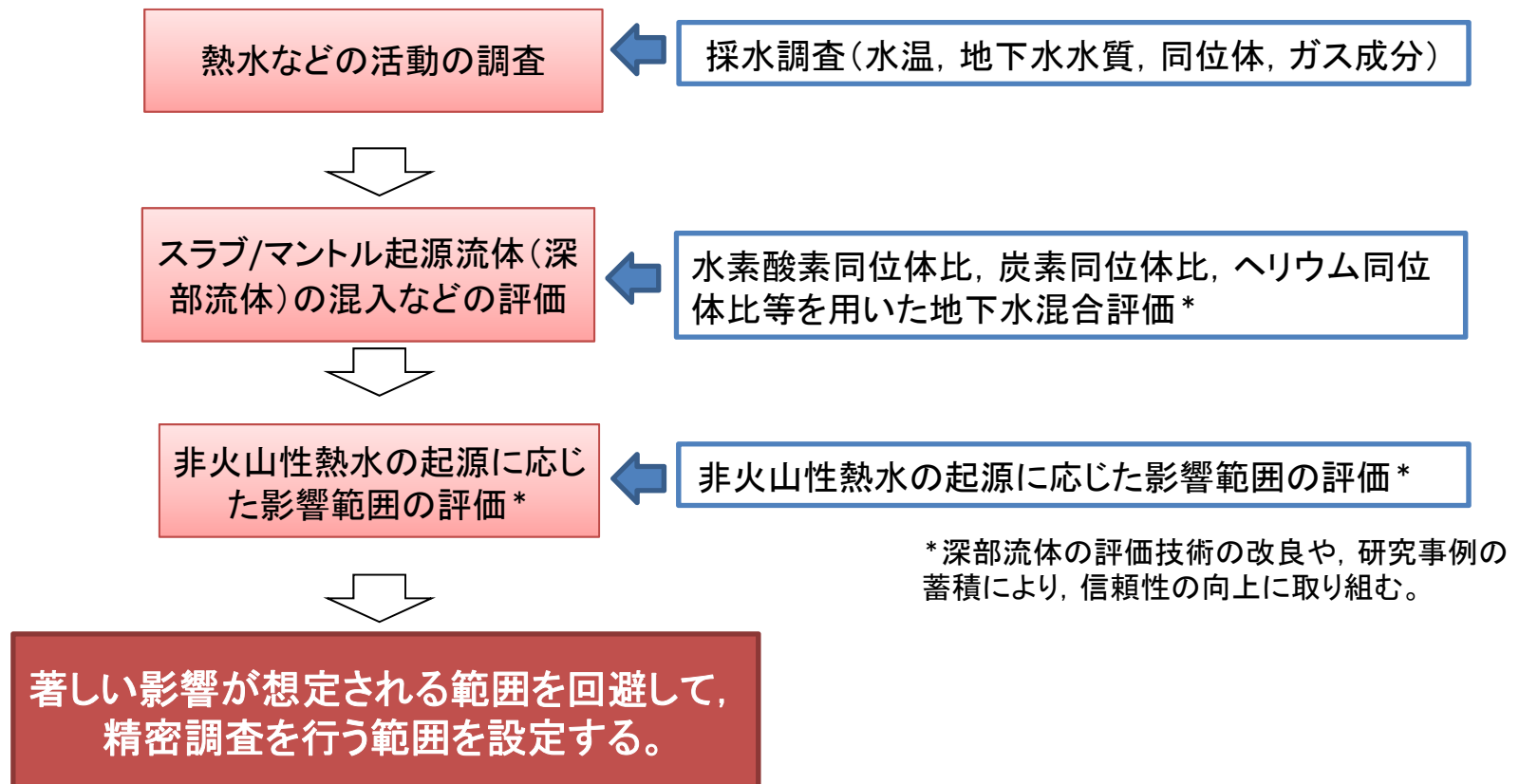


*物理探査などによる地下のマグマ溜りやマントルの温度構造の評価技術の整備を進め、信頼性の向上に取り組む。

2.1 火山・火成活動：調査・評価の進め方

概要調査の段階（地表からの調査）（c：深部流体などの非火山性熱水が湧出している地域）

深部流体については、メカニズムや構造線の有無などに基づいて、影響範囲を推定するため、その他の非火山性熱水の可能性も含めて起源を特定することが必要となる。また、その他の非火山性熱水についても、温度や化学組成が適さない場合には除外する必要がある。



2.1 火山・火成活動 信頼性向上の取り組み

【信頼性向上の取り組み】

○A) 火山の分布およびB) 地熱活動の評価に関する取り組み

現在、地下にマグマ溜りが存在せず、地殻下部の温度が低い地域は、当面は火山が新規に発生する可能性は低いと考えられる。ただし、地殻下部が加熱される事象(マントルからの熱源の移動)については、マグマ成因論、およびマントル内の物質移動論に基づく熱輸送モデルなどの評価手法の開発などに取り組むことも重要と考えられる。また、背弧域の火山活動については、事例研究を蓄積し、火山の空白域における将来の火山活動の評価技術の開発を継続的に進める必要がある。なお、地熱活動はマグマの分布と密接に関係があるため、上記の取り組みにおいて、一緒に検討する。

○C) 深部流体などの非火山性熱水の評価に関する取り組み

非火山性熱水に関する調査事例を蓄積し、形成・移動メカニズムなどの検討成果を、調査技術や将来予測に反映する取り組みを進める必要がある。



2.2 断層活動

著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

○著しい影響を与える事象

(第4回資料の抜粋)

【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)

- 力学場の好ましい条件: 岩盤の変形が大きい。
- 水理場の好ましい条件: 地下水流動が緩慢である。移行経路が長い。
- 化学場の好ましい条件: 低pHあるいは、高pHではない、炭酸化学種濃度が高くない(例えば0.5 mol/dm³を超えない)、酸化性雰囲気ではないなど。

○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。

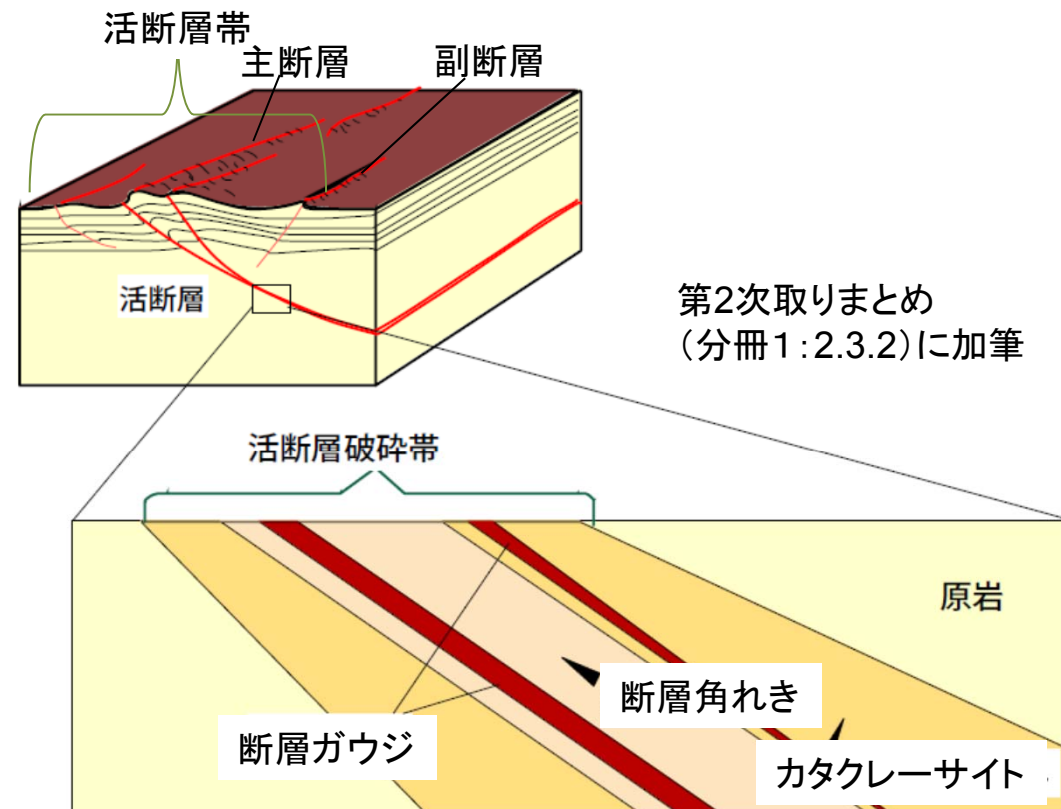
影響範囲の考え方も含め、詳細に説明

2.2 断層活動

著しい影響を回避する対象の考え方

- A)繰り返し活動し、変位の規模の大きな断層(活断層)の分布
- 上記断層の影響範囲
 - B)断層活動に伴い破碎される範囲(断層破碎帯)
 - C)断層の分岐などの活動範囲の拡大(活断層帯)

* 断層活動に伴う地層の変位・変形の範囲(変形帯)や地形の変動(活褶曲・活撓曲の分布範囲)についても、影響が著しい場合には回避することを検討する。



2.2 断層活動：影響範囲の考え方

A) 繰り返し活動し、変位の規模の大きな断層の分布

【第2次取りまとめの考え方】

わが国における主な活断層はおおむね把握されているが、特に広い沖積平野など伏在断層の存在が考えられる地域や海域などについては、ボーリングや物理探査などを用いた地下構造調査によって、活断層の有無や分布を確認する必要がある(分冊1:2.3.3)。

【その後の知見】

- 従来の活断層の認定は、主に空中写真を用いた地形判読のみで、そのため現地調査が不十分なものも多い。したがって、地形的に未成熟な活断層については、見落とされているものがある(産業技術総合研究所, 2007)
- 2000年以降、全国規模で抽出された既知の活断層以外で、規模の大きな地震が発生し、活断層の存在が後に指摘された主な事例として、以下があげられる。
 - 2000年鳥取県西部地震(当麻ほか, 2000; 井上ほか, 2002; 高田ほか, 2003; 草野ほか, 2010など)
 - 2004年新潟県中越地震(産業技術総合研究所, 2005; 加藤ほか, 2006; Maruyama et al., 2007など)
 - 2005年福岡県西方沖地震(岩淵ほか, 1998; 岡村ほか, 2009など)
 - 2007年能登半島地震(片川ほか, 2005; 佐藤ほか, 2007; Yoshimura et al., 2008; 草野ほか, 2010など)
 - 2007年新潟県中越沖地震(東京電力, 2007, 2008; 杉山, 2008; 原子力安全・保安院, 2008など)
 - 2008年岩手・宮城内陸地震(産業技術総合研究所, 2009a,b; 鈴木ほか, 2008; 東京大学地震研究所ほか, 2008など)
- なお、このような地形的に未成熟な断層についても、現地調査により、事前に検出は可能であり、概要調査では、地質学的に認められる既存の断層を対象とした調査が必要となる(産業技術総合研究所, 2007)。

2.2 断層活動：影響範囲の考え方

A) 繰り返し活動し、変位の規模の大きな断層の分布

【NUMOの考え方】

○断層活動の要因と継続性

- 断層活動はプレート運動により地殻内に生じたひずみを解放するものであり、プレート運動を主な要因としている。日本列島の東西圧縮の広域応力場は、200万年前頃までにほぼ全域で成立し、現在まで大きく変わることなく維持されており、プレートの運動様式が大きく変化しない限りは、現在の広域応力場は今後も維持されると考えられる。
- なお、広域応力場は大局的には安定であるものの、局所的には、地殻応力場の時間的・空間的な変化が生じている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の際には、日本列島が広い範囲で、東西方向に伸張し、これに関連すると考えられる地震が東日本各地で発生した（例えば、2011年4月11日の湯の岳断層など）。

○繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層の分布

- 第四紀以降に再活動している断層のうち、最近数十万年間（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。
- ただし、2000年以降、これまでに活断層が認識されていなかった地域において規模の大きな地震が発生している。全国規模で整備された活断層の分布に関するデータベースは、空中写真による地形判読に基づいて、活断層を認定していることが多いことから、地表の痕跡（リニアメントなど）が不明瞭である場合などには、活断層が存在していても“見落とされる”可能性がある。
- 2000年以降の内陸地殻内地震を対象として、現地で詳細な調査が実施された結果、地表地震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。
- したがって、活断層の存在は、全国規模のデータベースの情報だけでなく、より綿密な空中写真判読、地表調査、物理探査、ボーリング調査などの現地調査に基づいて、確認する必要がある。

2.2 断層活動：影響範囲の考え方

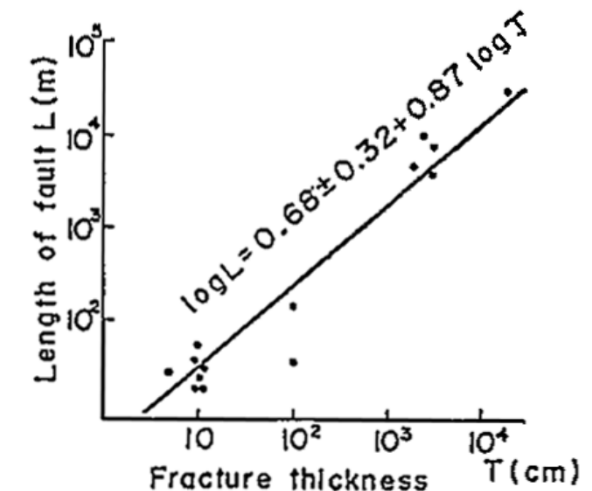
B) 断層活動に伴い破砕される範囲(断層破砕帯)

【第2次取りまとめの考え方】

断層活動による地質環境への影響は、主に活断層破砕帯とその周辺に限られる。その幅は、数mから最大でも数百m程度であり、また、断層活動に伴って、周辺岩盤中に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(破砕帯について)】

- 断層の延長が長く累積変位量が大きいほど、破砕幅も大きい。割れ目の形成および角礫化は、断層の近傍や分岐部の非常に狭い範囲(数m程度)に限定され(Shipton, et al., 2006)、カタクレーサイト化はすべり面沿いに限定的である(Cloos, 2009)。
- 阿寺断層(延長60 km)、跡津川断層(延長69 km)、牛首断層(延長54 km)、山口ー出雲地震帯(全長約180 kmうち約70%が活断層あるいは推定活断層)など、規模の大きい活断層を対象として、断層活動に伴う物理的影響範囲などが調べられており、断層延長と影響範囲の関係は、従来の見積もり範囲と整合する(長友・吉田, 2009; 吉田ほか, 2009; Niwa et al., 2009, 2011; 金折・遠田, 2007, 大橋・小林, 2008など)
- 既往の断層の長さとの破砕帯の幅の関係(緒方・本荘, 1981)では、例えば活断層の長さが10kmに対し、破砕帯の幅は数十m程度と見積もられる。
- 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 $P \approx L/100$ の関係が成り立つ(Scholz, 2002, Sibson, 2003)。



断層の長さとの破砕帯の幅の関係(緒方・本荘, 1981)

【NUMOの考え方】

- 断層の破砕帯幅については、累積変位量および長さとの間に、ある一定の関係があると考えられ、個別地区ごとの検討により得られたデータを総合的に判断することによって、活断層の直接的な影響範囲を推定する。
- 既往の報告事例から、破砕帯幅の保守的な目安として、長さの1/100程度が考えられる。

2.2 断層活動：影響範囲の考え方

c) 断層の分岐などの活動範囲の拡大（活断層帯）

【第2次取りまとめの考え方】

日本列島に分布する規模の大きな活断層は、地表付近でしばしば分岐したり、副次的な断層を伴うことから、活断層の場の変化を評価する際には、分岐断層や副断層を含めたいくつかの断層から構成される活断層帯として、その活動や変化を把握する必要がある。また、逆断層の場合、その活動が盆地側に向かって数km程度拡大する可能性がある（分冊1：2.3.3）。

【その後の知見】

- 活断層詳細デジタルマップでは、活断層をp.29に示す考え方でグループ化し、「活断層帯」としてその分布を示した（中田・今泉編，2002）。
- 高レベル放射性廃棄物処分地の選定に際して、地表付近での断層出現位置の移動等の現象や、地表地震断層による活断層近傍の変形の現象に対処するためには、近い距離にほぼ平行や雁行、あるいは断続的に存在する活断層には含まれる区間を「活断層帯」として評価することが重要（土木学会，2006）。

【NUMOの考え方】

- 活断層の拡大・分岐、進展等については、活断層の分布、走向、センスなどの性状の類似性などの観点から、活断層帯としてその範囲を評価することが有効である。その際、断層の分類（正断層、逆断層、横ずれ断層）に応じた活動域の違いを評価に反映する。
- なお、影響範囲については、個別地域毎に評価する。

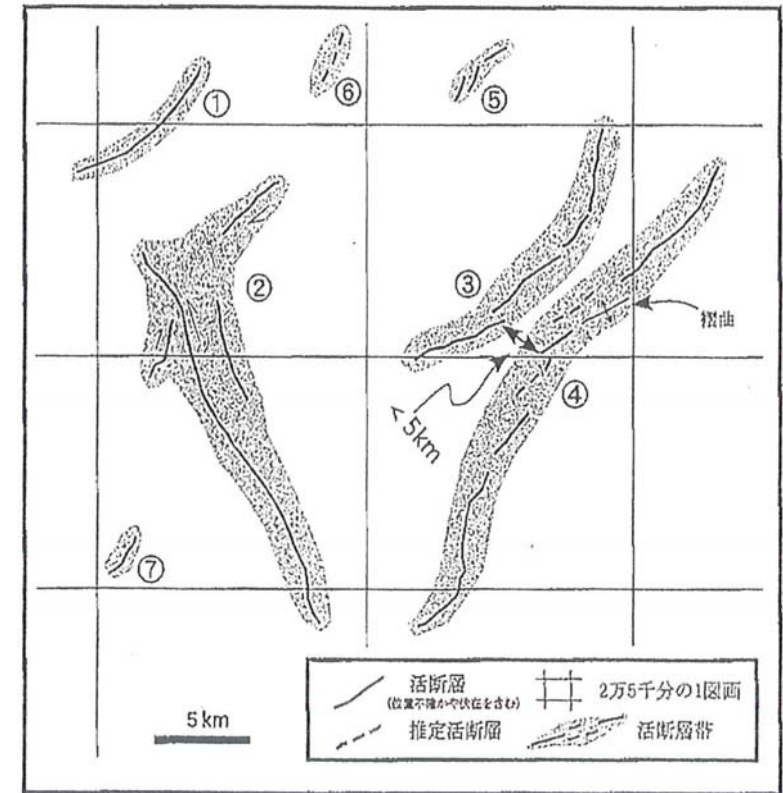
2.2 断層活動：影響範囲の考え方

c) 活断層帯の検討例

活断層帯の評価では、下図も参考としつつ、個別の文献などで明らかになった断層も加えて活断層帯のグループ化作業を実施し、評価に利用することが考えられる。

主要活断層帯のグループ化作業の基本

- A. 活断層が、長さ10 km以上であるもの（①～④、ただし、⑤～⑦のように10 km未満の活断層・推定活断層もグループ化作業は行い「活断層帯名称なし」とした）。
- B. 活断層線が5 km以上の間隔をもって独立しているもの（隣り合った線分との間隔が5 km以上であること。ただし、5 km未満であっても地形・地質構造のデータなどから分離可能と判断できる場合は分けた：③と④）。
- C. 走向・断層のタイプ・変位センスが同じもの（共役断層を含む：②）。
- D. 「活断層」の間に「推定活断層」や活褶曲、伏在断層などが連続的に配列している場合は、活断層帯としてまとめた（④）。



活断層帯のグループ化の考え方(中田・今泉編, 2002)



2.2 断層活動

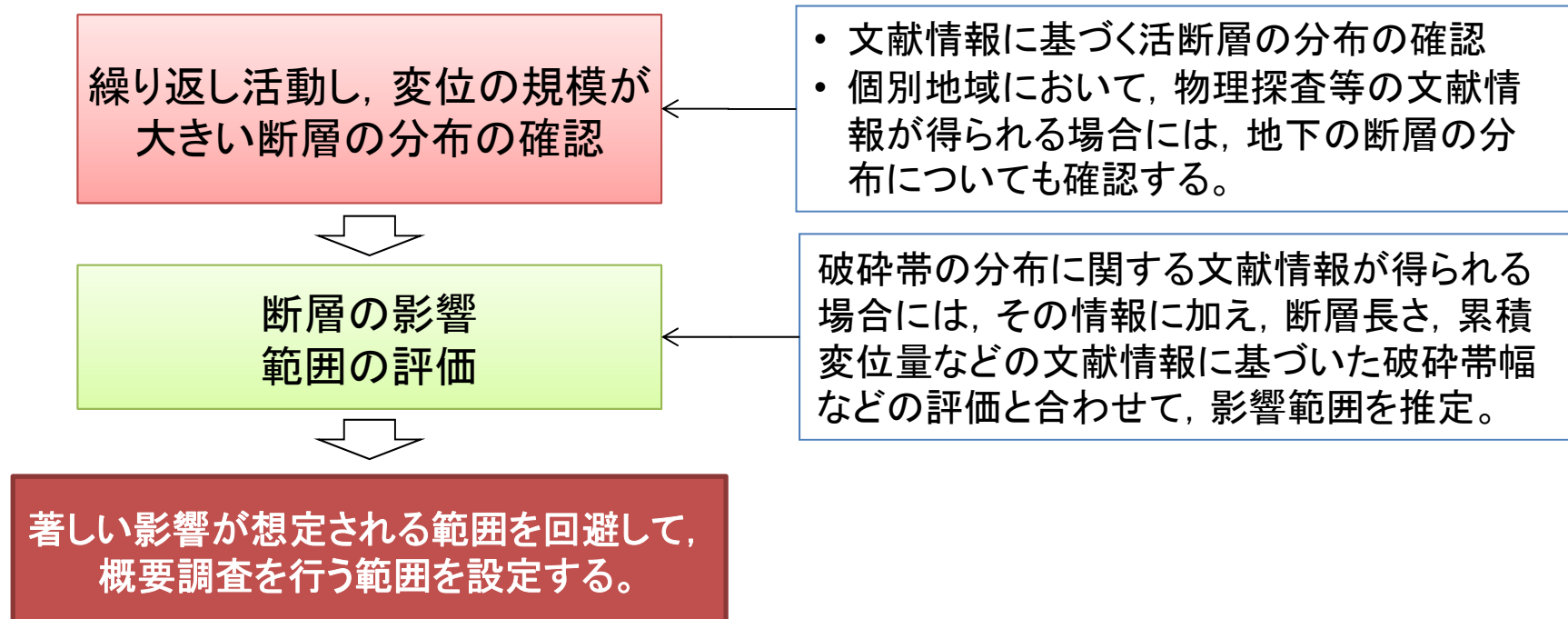
回避対象と影響範囲の考え方のまとめ

回避対象	影響範囲の考え方
A) 繰り返し活動し、変位の規模の大きな断層の分布	- 過去数十万年間繰り返し活動している断層は、今後10万年程度は同様の活動を継続すると考えられる。 - 全国規模で体系的にまとめられた活断層のデータベースに記載がある断層が分布する地域を回避することが必要である。 - なお、<u>未成熟な断層や地表の痕跡が不明瞭な断層</u>は、上記の全国規模の文献などに記載されない可能性があることから、<u>個別地域ごとに調査</u>する必要がある。
B) 断層破碎帯	【断層破碎帯】 個別地域ごとに調査するが、断層の長さに基づいて、推定することは可能。既往の報告事例から、破碎帯幅の保守的な目安として、<u>断層長さの1/100程度</u>が考えられる。
C) 活断層帯	断層の性状(変位方向など)の情報が必要なため、個別地域ごとに調査。

2.2 断層活動：調査・評価の進め方

文献調査の段階

個別の断層の情報は地域によっては十分でない可能性もあるため、文献調査の段階は、存在が明らかな断層のみを対象として回避する。明確でない場合には、概要調査の段階も含めて判断する。



2.2 断層活動：調査・評価の進め方

概要調査の段階（地表からの調査）

現地調査が可能となるため、高精度航空測量、地表地質調査やトレンチ調査などにより、地表の活動痕跡を確認するとともに、物理探査手法やボーリング調査などにより、地下に伏在する断層についても調査する。

断層の分布の確認

○断層の分布の確認方法

- ・ 地表の活動痕跡の確認（高精度航空測量、地表地質調査、トレンチ調査など）
- ・ 地下に伏在する断層・地表の断層の地下での連続性の評価（物理探査手法（反射法地震探査など）、ボーリング調査など）

断層の活動性の評価

○断層の活動性の評価方法（ここでは、繰り返し活動し、変位の規模が大きいことの確認を主な対象とする。）*

- ・ 上載地層法（第四紀地層の断層変位など）を適用した評価が基本となる。
- ・ 上載地層法の適用が困難な場合は、変動地形、破碎帯性状**および活断層帯との関係などに基づいて総合的に評価する必要があるが、調査・評価技術に関して、信頼性向上の取り組みが必要である。
- ・ また、活動性が低く、累積変位量が小さい場合には、断層および破碎帯の性状に応じて、断層が分布する箇所に廃棄体を定置しないなどの工学的対策を検討する必要がある（処分場スケールでは回避しないことも考えられる）。
- ・ 調査により情報が十分得られないなど、活動性評価が困難な場合には、限られた情報に基づいて、判断する必要があると考えられる。その場合にも、出来る限りの情報収集に努めつつ、限られた情報に基づいて、工学的対策を検討し、さらに、影響が顕在化した場合を想定した評価を実施することなどが考えられる。そのため、断層・破碎帯の性状の理解に基づいた、現実的な評価方法の整備など、信頼性向上の取り組みが必要となると考えられる。

断層の影響範囲の評価

○断層の影響範囲の評価

- ・ 変動地形が認められる範囲、破碎帯の分布、断層関連褶曲の有無、微小地震の偏在する範囲、活断層帯のグルーピングなど。

著しい影響が想定される範囲を回避して、精密調査の範囲を設定する。

* 上載地層法が適用できない場合を想定して、既存の断層を対象とした評価指標の開発や、事例調査の蓄積により、信頼性の向上の取り組みを進める。

** 断層または破碎帯の性状：断層（破碎帯）の透水性や、亀裂の頻度、活断層との位置関係などが考えられる。



2.2 断層活動

信頼性向上に向けた取り組み

【信頼性向上に向けた取り組み】

○繰り返し活動し、変位の規模が大きな断層の分布の評価に関する取り組み

2000年以降に発生した規模の大きな地震に関連する活動痕跡が不明瞭な活断層の事例調査を進め、現地調査(地表調査・物理探査、ボーリング調査)などの調査技術を適用する際の課題などを分析し、調査計画に反映する。

○断層の活動性の評価に関する取り組み

地質断層の再活動性に関する事例調査(梅田ほか, 2010など)を蓄積し、活動性評価に反映するとともに、上載法の適用が困難な断層の活動性の評価方法(例えば、断層内の鉱物の生成年代測定技術など)の整備に継続的に取り組む。

○断層の影響範囲の評価に関する取り組み

個別の断層の影響範囲については、現地調査に基づいて評価することが基本となる。そのため、既存の活断層の破碎帯の分布などの事例調査を蓄積し、その成果を調査技術や影響範囲の評価に反映することが必要である。

2.3 隆起・侵食作用

著しい影響要因となる天然現象への対応の考え方

(第4回資料の抜粋)

○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。

影響範囲の考え方も含め,
詳細に説明

2.3 隆起・侵食作用：影響範囲の考え方

【第2次取りまとめの考え方】

・隆起・沈降運動は地域ごとに一定の傾向と速度で数十万年間継続している場合が多い。十万年あたり100 m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、最大で十万年あたり数百mに達する地域もごく一部で存在する。一方、ほかの多くの地域の隆起・沈降運動の速さは、十万年あたり50 m程度かそれ未満であることが多い。【分冊1：2.5.3項「まとめ」】

【その後の知見】

- ・侵食は面的侵食と線的侵食（下刻：下刻は隆起量に依存する）に大別されるが、地表接近という観点からは、一般に後者の影響の方が大きい（土木学会，2006）。
- ・予測侵食量が埋設深度以上になり、廃棄体が地表に露出する可能性がある地域は避ける必要がある（産総研，2007）。

【NUMOの考え方】

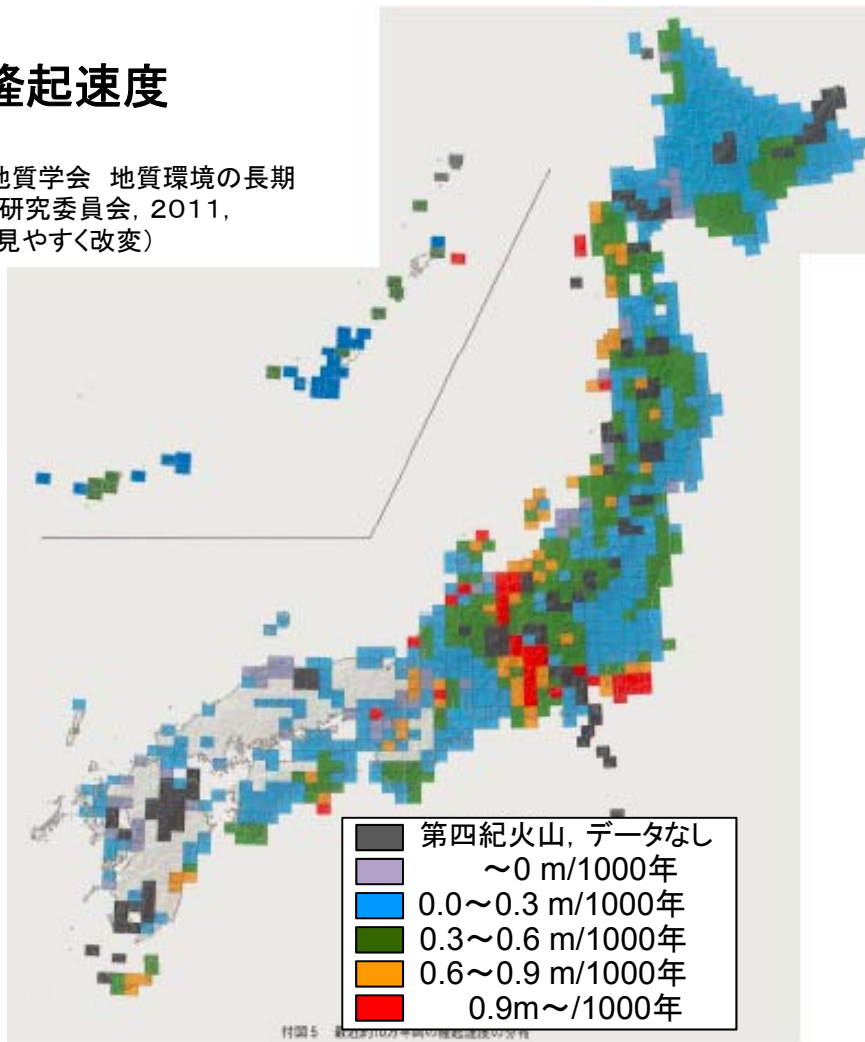
- ・日本における隆起・沈降は、主にプレート運動に起因する近く応力場に対応して、地域ごとに一定の傾向に沿って継続しており、今後も同様に継続すると考えられる。
- ・隆起量については、過去数十万年前から現在、および将来の変動傾向を段丘の地形面等から把握することができる。
- ・一方、侵食については、隆起と異なり、長期の変動傾向を把握することは困難である。一般に、隆起によって生じる侵食量は、隆起量より小さいと考えられるが、線的侵食（下刻）により局所的に侵食が進む可能性もある。
- ・また、沿岸部では、海水面の低下による侵食についても合わせて検討する必要がある。
- ・隆起は、処分場スケールよりも広い範囲で発生すると考えられることから、著しく隆起速度が速い場合には、対象地域一帯が速い可能性がある。

2.3 隆起・侵食作用

わが国の平均隆起速度および平均侵食速度の分布例

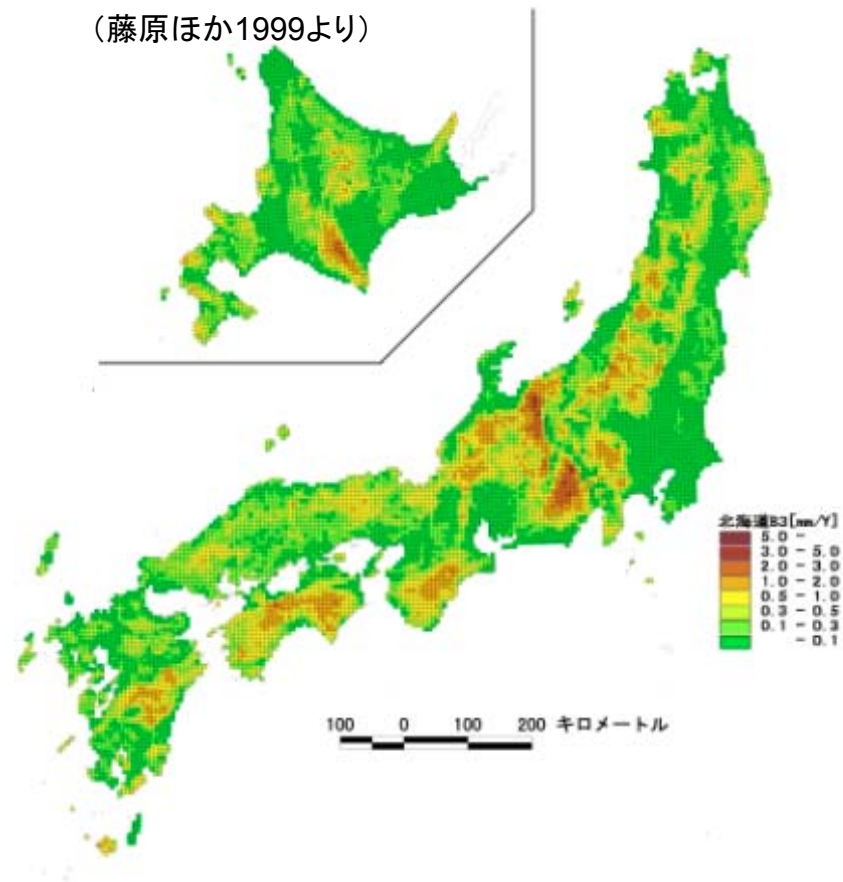
隆起速度

(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)



侵食速度

(藤原ほか1999より)



- 例えば, 10万年あたり300m (3m/1000年)を超える隆起量の報告は, 丹沢山地の3-4m/1000年(250万年間の平均; 貝塚, 1987), 房総半島の4m/1000年, 三浦半島の3.3m/1000年などに限られる(第2次取りまとめ参照)。侵食速度は, 隆起速度が大きい山地で著しい傾向がある。

2.3 隆起・侵食作用：調査・評価の進め方

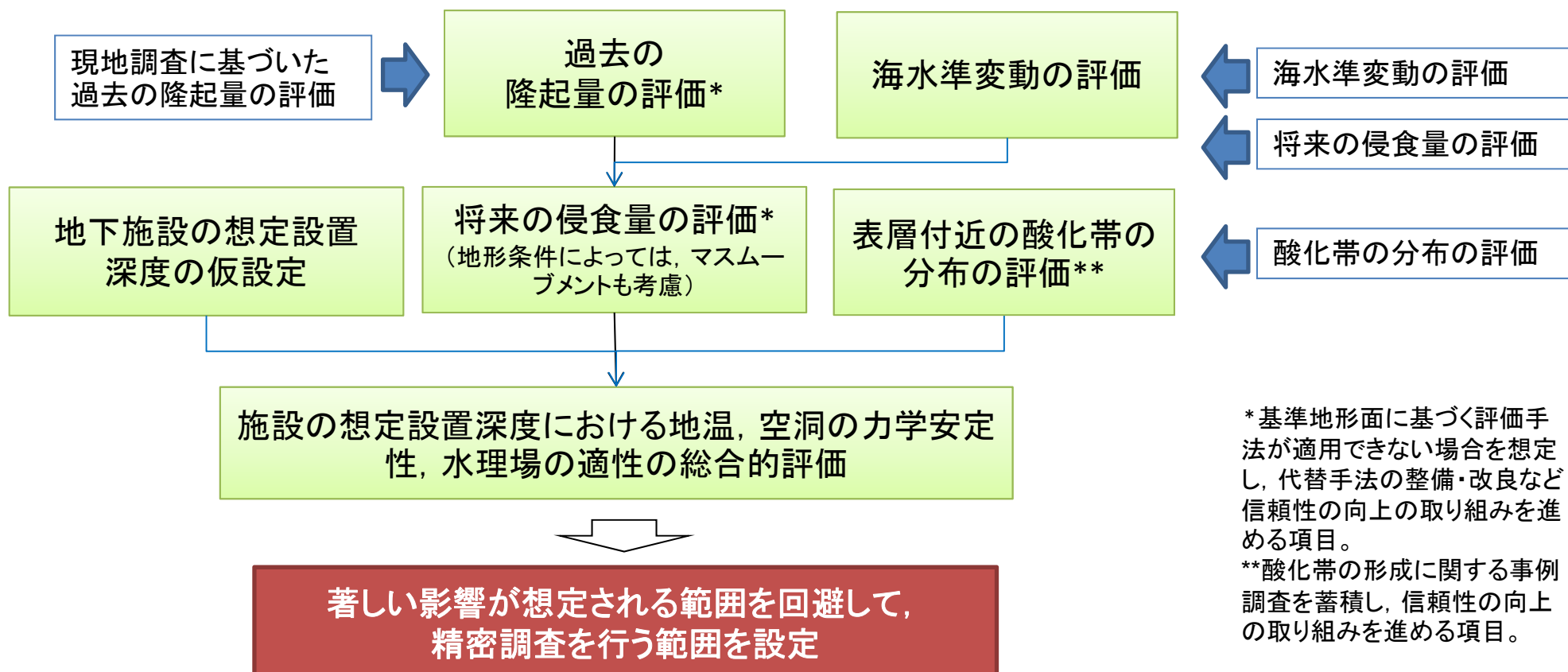
文献調査の段階

- 約12.5万年前にできた地形面は全国的に良く残っており，これらの地形面をもとにおよそ10万年間の隆起量が比較的精度よく求められる。
- 侵食量は最も厳しい場合を想定して，隆起量と同じ量が侵食されるものと仮定することにより評価する。
- 以上に基づいて，過去数十万年程度の地質学的な記録をもとに，過去十万年間の隆起の総量を隆起・侵食に関する評価の目安とする。
- 処分施設の地表近くへの著しい接近については，処分施設の設置深度などと合わせて検討すべきものであるが，地層処分は地下300m以上と定められていることから，文献調査の段階においては，過去十万年間の隆起量が300mを超えていることが明らかな地域を含めないように，概要調査を行う範囲を設定する。

2.3 隆起・侵食作用：調査・評価の進め方

概要調査の段階（地表からの調査）

概要調査の段階は、隆起量や、海水準変動の評価に基づいて、将来の侵食量を評価し、処分施設の設置の実現可能性も加味して、隆起・侵食作用の適格性を判断する。



2.3 隆起・侵食作用 信頼性向上に向けた取り組み

【信頼性向上に向けた取り組み】

○隆起量・侵食量の評価に関する取り組み

- 隆起量評価は、段丘面などの過去の基準となる地形面の変動に基づいた外挿が基本となる。基準となる地形面が得られない場合には、地形学的な手法や、侵食堆積物の年代測定などに基づいて、隆起量あるいは侵食量を推定するなどの技術を適用する可能性があり、これらの技術の適用性の確認が必要である。
- 海水準変動に伴う、侵食作用あるいは堆積作用については、地表面の地形変化の影響要因となるため、地下深部の水理場や化学場などへの影響について、隆起量なども考え合わせて、変化に対する感度を個別の地域で確認する必要がある。

○表層付近の酸化帯分布の評価に関する取り組み

国内外の地下研究所などにおける事例調査に基づいて、表層付近の酸化帯の形成メカニズムの理解などの取り組みを進め、それらの成果を調査計画や評価に反映する必要がある。



第5回会合 参考資料-1

「影響要因への対応に関する補足資料」の抜粋版

- | | |
|-----------------|----------|
| 1. 熱環境 | p.75－79 |
| 2. 力学場 | p.80－84 |
| 3. 水理場 | p.85－90 |
| 4. 化学場 | p.91－94 |
| 5. 天然現象の調査・評価の例 | p.95-105 |



1. 熱環境

影響要因	関連事象	対応方針
熱源の移動, 発生	地熱活動	回避
	断層活動の摩擦熱	(限定的影響)
地表の温度の上昇	地表面の気温変動	工学的対策
	火砕流による地表温度の上昇	工学的対策



1. 熱源の移動・発生：地熱活動

【NUMOの対応の考え方】

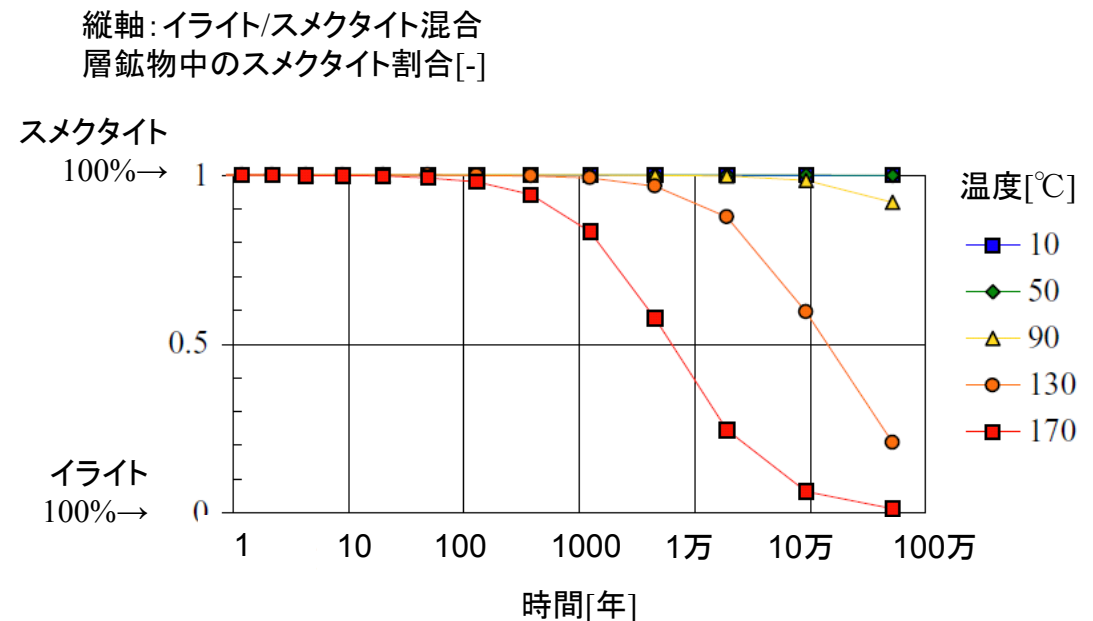
- 高い地温勾配を生じるような地熱活動が発生すると、地下深部の地温が高くなるので、著しい影響を与える事象と考えられる。したがって、将来地熱活動が発生する可能性が高い地域はサイト選定において回避する事が必要。

【想定する変動範囲など】

- 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。(分冊1, 2.4.2)
- 国内における最高地温勾配は38°C/100mである。
- 地温勾配10°C/100m, 地表温度15°C, 深さ1000mの地点に処分場を設計した場合, 処分場の地温は115°Cとなる。
- 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)。
- また、地熱活動であるため、処分場スケールを超える広がりを持つと考えられる。

【技術的論拠】

- 緩衝材の熱的影響による機能劣化は成分である粘土鉱物スメクタイトのイライト化により生じる。
- 長期に渡り処分環境が100°Cを超える場合、スメクタイトのイライト化が懸念されている(右図)。
- したがって、長期にわたって地温100°Cを超える環境では、スメクタイトのイライト化が顕著になると考えられる。
- 処分場を超える広がり万年オーダーの長期にわたる高温状態であるため、影響を除くための断熱等を工学的に施すことは困難であると考えられる。



時間経過に伴うスメクタイトのイライト化
(Karnland et al., 2000より)

- 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.
- Karnland et al.(2000): "Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels", SKB TR-00-22.

1. 熱源の移動・発生: 断層活動の摩擦熱

【NUMOの対応の考え方】

- 断層活動に伴う摩擦熱により150～400℃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が、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。著しい影響を与える事象ではないと考えられる。

【想定する変動範囲など】

熱が発生している断層内の領域の大きさにもよるが、仮に1mの幅で深さ方向に一様に摩擦熱が発生していることを考慮して、熱伝動解析で簡易的に評価したところ、100℃を下回るのに、400℃の条件で60日程度、200℃の条件で10日程度であった。

【技術的論拠】

- イライト化は、スメクタイトと接触する地下水中のカリウムイオン濃度および温度に依存する(右上式)。
- 一方、室内試験、ナチュラルアナログの知見を基に、スメクタイトのイライト化に関する変質速度式が提案されている(右上式)。モンモリロナイトのイライト化(半減期としては、海水程度のカリウム濃度(2mmol/dm³)においては、温度170℃で7000年程度かかる。温度90℃では10万年経過しても、ほとんど変化がない(右図)。
- したがって、イライト化には万年オーダーの時間を要するが、これと比較して、摩擦熱による影響は短時間(1年未満)であり、イライト化には至らないと考えられる。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

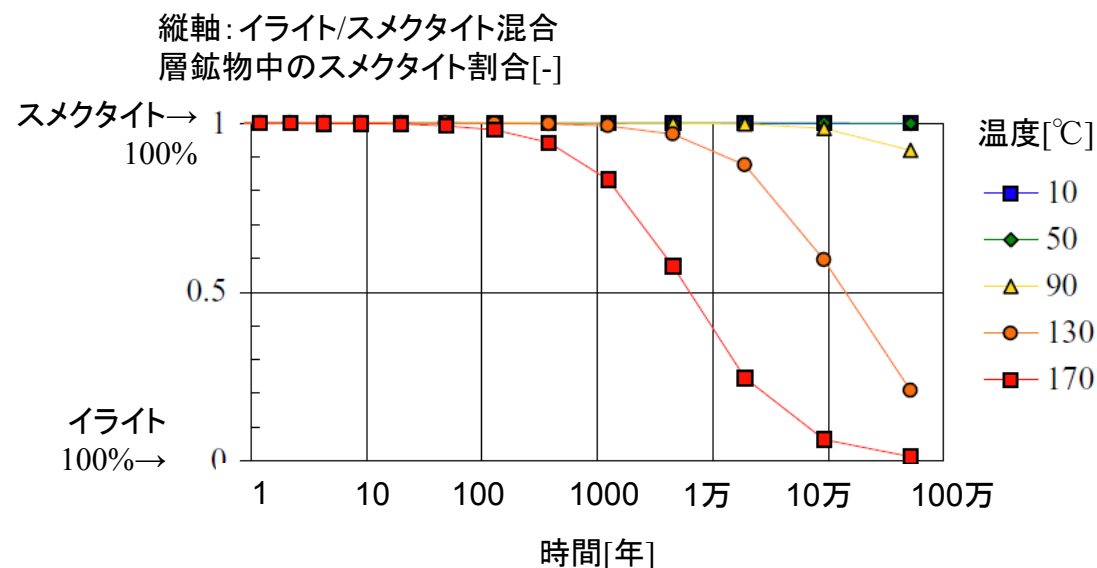
- 【確認事項】地下水中のカリウム濃度の確認が必要。
- 【信頼性向上】摩擦熱の発生時間については、より詳細な解析(地下水対流、三次元化)により、評価の信頼性を向上させることが可能。

イライト化に関する変質速度式

$$-dS/dt = A \cdot [K^+] \cdot S^2 \cdot \exp(-E_a/RT)$$

S: イライト/スメクタイト混合層鉱物中のスメクタイト割合[-]

A: 頻度因子, [K⁺]: カリウムイオン濃度, E_a: 活性化エネルギー, R: 気体定数, T: 温度



時間経過に伴うスメクタイトのイライト化
(Karnland et al., 2000より)

Karnland et al.(2000): "Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels", SKB TR-00-22.



1. 地表の温度の上昇: 地表面の気温変動

【NUMOの対応の考え方】

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。

【想定する変動範囲など】

- 第2次取りまとめにおいて、地表の気温は現在に比べ間氷期の最温暖期には $2^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 高かったと考えられることが示されている(分冊1, 2. 6. 3)
- 長期的な平均気温の変動幅は最大でも 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最大でも同程度と考えられる。
- 温暖化による地表気温の上昇による影響はこの範囲に収まると考えられる。

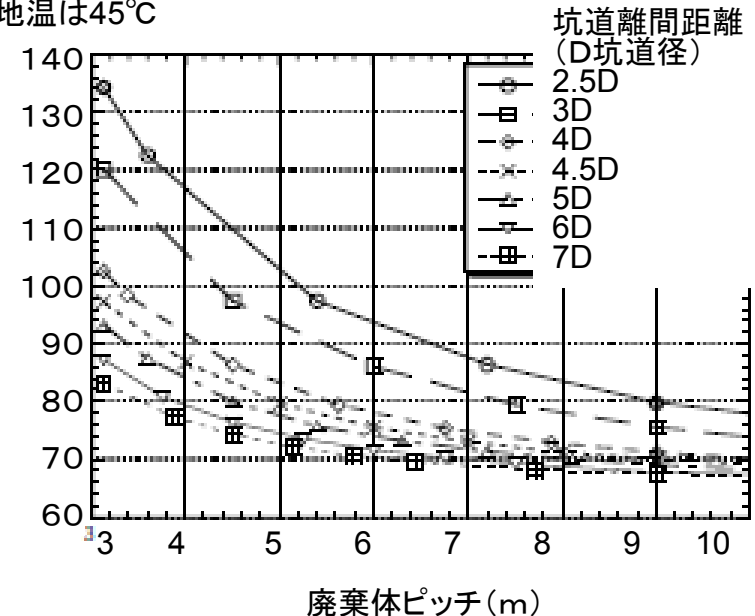
【技術的論拠】

- 緩衝材の最高温度がその制限温度に上記の地温上昇量を加えた値を超えないように、処分深度を浅くする、あるいは、坑道離間距離や廃棄体定置間隔を広くとるなどの対応が可能である(右図)。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】温暖化や間氷期の気候による地表の温度と処分場設置深度の地温の推定。

緩衝材の温度($^{\circ}\text{C}$)
※地温は 45°C



廃棄体間隔の効果(分冊2, 図4.2.2-99)
(軟岩系岩盤処分坑道横置き方式)



地表の温度の上昇：火砕流による地表温度の上昇

【NUMOの対応の考え方】

- 大規模火砕流が長期間地表を覆ったとしても、地下300m以下の範囲の温度上昇は60℃を下回る（地温勾配が3℃/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。

【想定する変動範囲など】

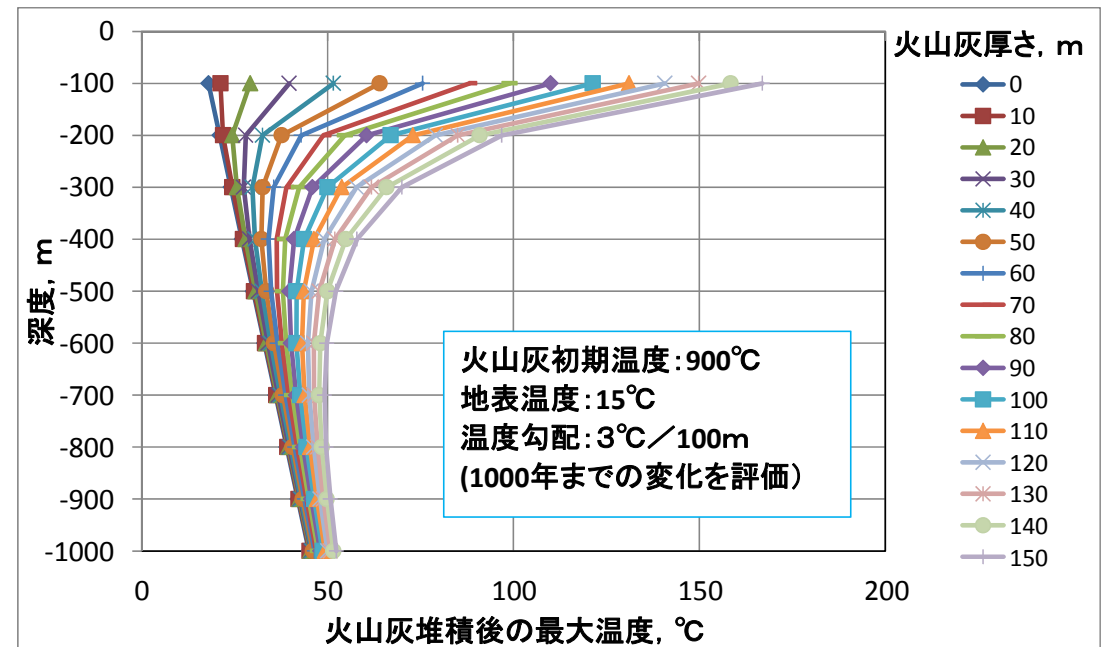
- 第四紀の主要な大規模火砕流30岩体の調査結果では、最大層厚は概して50m以下、最大級で150m程度であり、堆積時の推定最高温度は450～600℃前後以上である。また、供給源からの距離に応じて堆積物の層厚が減る（石丸・角田，2002）。

【技術的論拠】

- 上記の変動範囲を踏まえた条件を設定し、降雨等の冷却条件等を保守的に含めない一次元熱伝導解析を実施した結果では、300m以深の温度は60℃を超えることはなかった（右図）。
- したがって、処分深度の選択や廃棄体の配置間隔などの考慮により合理的な範囲で工学的対策が可能といえる。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】**石丸・角田（2002）にある過去の大規模火砕流事例を参考に、火砕流を引き起こす可能性のある近傍の火山の有無、想定される火砕流の規模等を把握する。
- 【信頼性向上】**火砕流より到達距離は小さいが溶岩流についても影響を検討する。



火砕流堆積時の基盤岩中の温度変化

- 石丸・角田（2002）に倣い、温度変化評価は1次元熱伝導モデルを用いた。

・石丸恒在，角田地文(2002): 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 No.14 2002.3



2. 力学場

影響要因	関連事象	対応方針
岩盤のクリープ変形量の増大	地温上昇(地熱活動)	工学的対策
岩盤の破断・破砕	処分深度に達する断層のずれ	回避(一部は工学的対策)
岩盤の弾性変形	地震動による岩盤のひずみ	(限定的影響)

➤処分深度に達する断層のずれのうち、繰り返し活動し変位の規模が大きい断層については工学的対策が容易でなく回避が必要な理由を、それ以外の断層については、工学的対策や安全性の評価による確認の見通しについて説明する。

2. 岩盤のクリープ変形量の増大: 地温上昇(地熱活動)

【NUMOの対応の考え方】

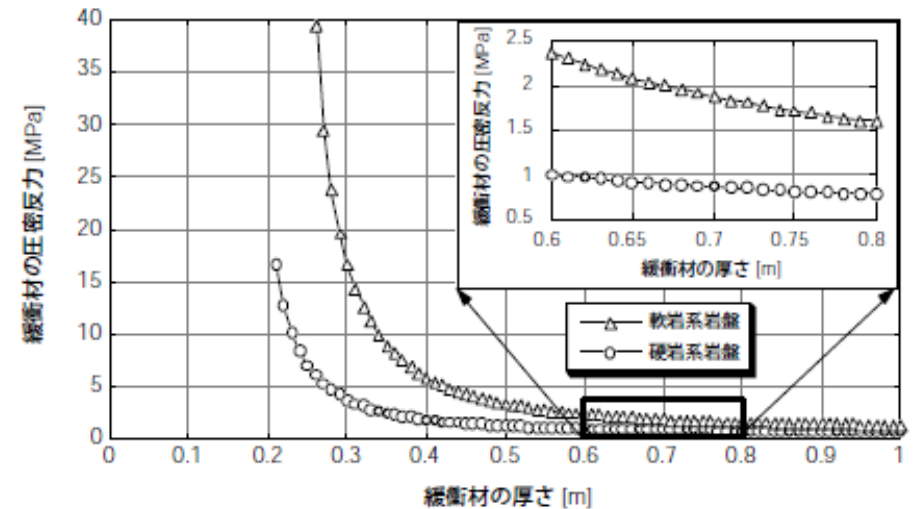
温度依存性が認められる場合には、クリープ変形量に基づいて人工バリアの設計に反映するなど、工学的対策を実施することが可能であると考えられる。

【想定する変動範囲など】

- 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)
- 凝灰岩を対象とした研究事例では、温度が80℃～95℃の条件下での2次クリープ速度は、20℃～60℃におけるそれよりも、1オーダー程度増大するという報告がある(Shibata et al., 2007)

【技術的論拠】

- クリープ速度が増大する場合には一定時間に発生する緩衝材の変形量が増加(間隙比が減少)するため、オーバーパックの設計で用いる作用荷重(圧密反力)が増大。
- 一方で、オーバーパックへの作用荷重のうちクリープ荷重が占める割合は小さい。また、現在の緩衝材厚さの設定値0.7m程度ではクリープ変形などによる圧密圧力の変動は小さい(右図)。
- したがって、緩衝材の厚さを適切に設定することで岩盤のクリープ変形によるオーバーパックへの作用荷重を低減することは可能。
- 深度を浅くし作用荷重を低減することが可能。
- 以上より工学的対策は可能と考えられる。



緩衝材厚さと緩衝材の圧密反力の関係
(分冊2, 図4.1.1-19)

- 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) — 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.
- SHIBATA, K., TANI, K. and OKADA, T. (2007): Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 1, pp. 1- 10.
- 高治一彦, 鈴木英明(1999): 緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041.

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】サイト毎に岩盤のクリープ特性の温度依存性に関するデータを取得する。



2. 岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ(1)

【サイト選定で回避する対象について】

■ NUMOの対応の考え方

- ・ 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、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。

■ 想定する変動範囲

- ・ 主な活断層の平均変位速度は、0.01～10 m／1000年の範囲。(分冊1:2.3.1, 図.2.3-1)。数万年では数十cm～数百 mの累積変位が想定される。

■ 回避が必要な根拠

- ・ 緩衝材の安全機能(移行抑制)から見た要件は、緩衝材の低透水性が維持されることであり、好ましい地質環境特性として緩衝材に水みちを形成させるほどの岩盤変形が生じないことが考えられる。
- ・ このような岩盤変形は、岩盤側の条件(力学特性、せん断速度、せん断の角度など)と緩衝材の設計(工学的対策)の関係から求まるが、岩盤側の条件が未定であることから、大凡の目安として緩衝材厚さ(数十cm)を越えるような大きなせん断変形とする。このような変形に対して水みちを生じさせないような工学的対策は困難であると考えられる
- ・ 上記で想定する岩盤のずれの大きさは、緩衝材厚さを上回る可能性が大きい。

【サイト選定で回避せず工学的に対応する対象について】

■ NUMOの対応の考え方

- ・ 繰り返し活動し、変位の規模が大きい断層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。

■ 想定する対象

- (1)小規模で変位の累積性が小さい活断層、(2)既存の破断・割れ目

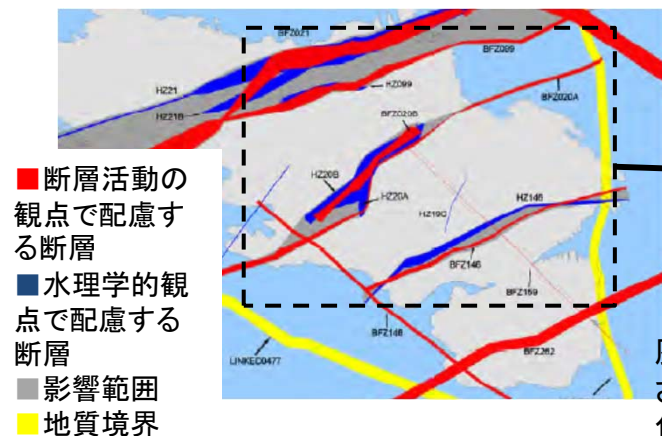
2. 岩盤の破断・破碎：処分深度に達する断層のずれ(2)

【サイト選定で回避せず工学的に対応する対象について(つづき)】

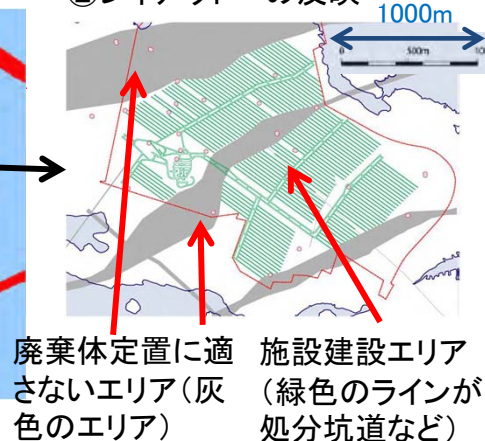
- 技術的論拠 以下の検討事例のような絞り込んだ候補地内においても、工学的対策の技術的見通しがあると考えられる。
- (1)小規模で変位の累積性が小さい活断層への対応：現地調査により実際のサイトの断層の分布とその影響範囲を特定し、これらの小さい活断層に配慮して、断層の線上や近傍を外した処分パネルの形状や定置場所を検討する(左下図)。
 - (2)既存の破断・割れ目への対応：処分場から離れた活断層の影響(右下図)の可能性を評価し、必要に応じてこれらの破断・割れ目に配慮して、坑道や廃棄体定置位置の配置を検討する。

処分深度の地質構造を反映した地下施設レイアウトによる対策の検討事例
(Posiva, 2012に加筆)

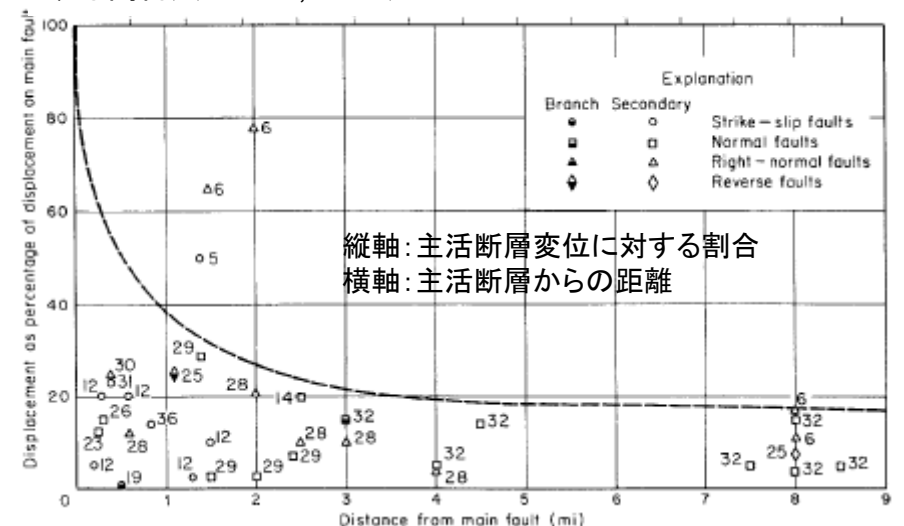
①配慮する地質要素の抽出



②レイアウトへの反映



主活断層から離れた副断層などの変位(主活断層変位に対する割合)(Bonilla, 1970)



■ サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取組み

【確認事項】・レイアウトで配慮すべき地質要素の抽出,

・処分場周辺の活断層の特性の把握と影響を受けると想定される既存の破断・割れ目の抽出

【信頼性向上】・離れた活断層の活動による応力場の変化, 既存の破断・割れ目の挙動などの把握

2. 岩盤の弾性変形:地震動による岩盤のひずみ

【NUMOの対応の考え方】

- 地下深部の加速度は、深度に依存せず同一地点の地表観測値に対して1/3～1/5であり、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。

【想定する変動範囲】

- 東北地方太平洋沖地震で観測された300m以深における最大加速度は176gal(宮城県小野田)である(KiK-net)。

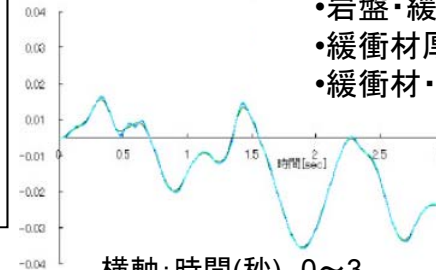
【技術的論拠】

- 過去に起こった巨大地震動を用いて、埋設後の緩衝材の耐震安定性が以下のように確認されている(分冊2, 4.3.3)。
 - 岩盤, 緩衝材, オーバーパックが一体となって振動(右図)
 - 緩衝材に生じるせん断ひずみは微小であり, また, 液状化が生じる可能性は低い。
- 解析用入力地震動の最大加速度は, 深度1000mで300gal程度, 深度500mで800gal程度であり(谷口, 高治, 杉野, 森, 1999), 上記の観測値176Galを上回っている。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】地下深部の地震観測に基づく地震動の設定
- 【信頼性向上】長期的な人工バリア状態の変遷を考慮した動的解析に基づく影響の確認, 振動試験による影響確認, 巨大地震を考慮した地震動の影響の確認, 解析体系の改良, 緩衝材等の力学挙動試験による特性値の拡充

縦軸: 変位(m)
-0.04～+0.04

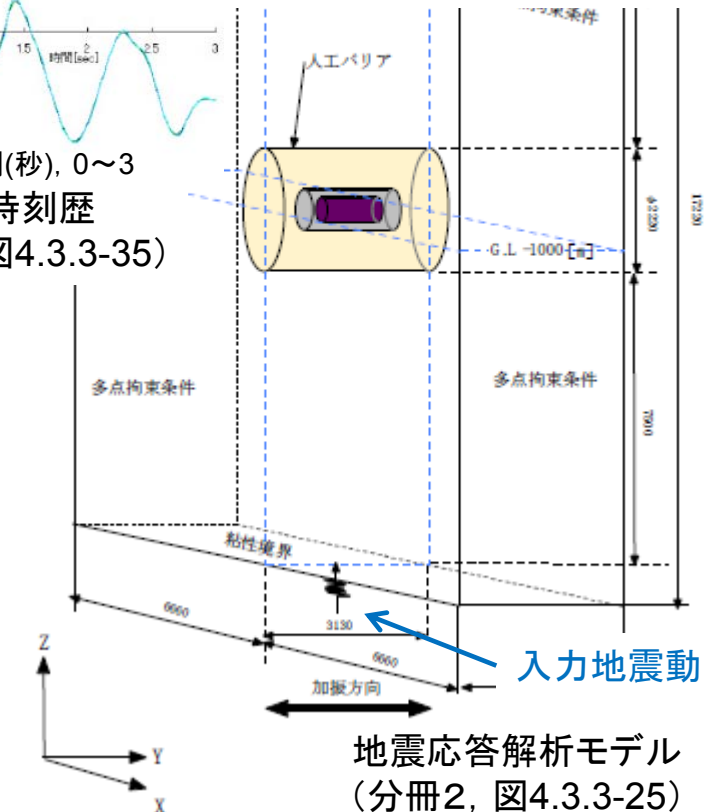


横軸: 時間(秒), 0～3

変位時刻歴
(分冊2, 図4.3.3-35)

解析の結果, 以下の点の変位の時刻歴は殆ど重なっている。

- 岩盤・緩衝材境界の岩盤側と緩衝材側
- 緩衝材厚さ方向中心での2点
- 緩衝材・OP境界の緩衝材側とOP側



3. 水理場

影響要因	関連事象	対応方針
動水勾配の増加	隆起, 海水準変動	工学的対策
	気候・海水準変動, 隆起・浸食, 断層活動に伴う地形変化	工学的対策
	地震に伴う地下水位(または水圧)の変化	(限定的影響)
地下水流動経路の変化	気候・海水準の変動に伴う 流出点の変化, 塩水／淡水境界の位置の変化	工学的対策
	断層のずれに伴う透水性の増加	回避(広域スケールで評価)
涵養量の変化	気候変動に伴う涵養域の降水量の変化	(限定的影響)

3. 動水勾配の増加: 隆起・海水準変動, 地形変化

【NUMOの対応の考え方】

地形変化や, 沿岸部においては隆起・海水準変動に伴う相対的海水準変動により, 広域スケールの地下水水頭分布が変化し, 処分場スケールの動水勾配が変化する可能性がある。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。

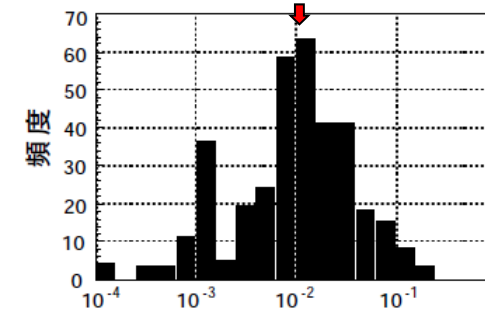
【想定する変動範囲など】

- 海水準変動は, +10m弱(Kopp,R.E. et al,2009)~-150m程度(Clark,P.U. et al.,2009など)と予想される。海水準低下後の沿岸部の地形は, 現海底下の地形に依存する。
- 変化後の地形における地形勾配は, 現在の一般的に存在する低地~山地地形の地形勾配の範囲と考えられる。
- 地表付近の動水勾配は地形勾配に強く支配される。地下深部の動水勾配は, 局所的地形の影響が少ないため, 地表付近に比べて緩やかになる(分冊1, 要約)。

【技術的論拠】

- 地形変化や海水準変動による広域スケールの地下水水頭分布は, 変化後の地形に依存する。
- 低地~山地地形の地形別の動水勾配の違いは, レファレンスの条件に対して1桁程度であり(右図), この違いが安全性に与える影響が確認されている(分冊3, 6.1.3.3)。
- 既往の影響評価結果を踏まえて, 地形変化の影響を見通すことが可能であり, 必要に応じて, 処分深度を深くすることや施設配置の工夫などが出来る。

レファレンスの動水勾配



データ数: 365
平均
全体: 0.015
低地: 0.008
台地: 0.016
丘陵: 0.035
山地: 0.061

地形別動水勾配分布(地下水面傾斜)
(分冊1, 図3.3-2)

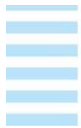
【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】隆起・侵食などによる地形変化と海水準変動を踏まえて将来の地下水の水頭分布を推定する。

Kopp,R.E., Frederik J. Simons,F.J.X., Mitrovica,X., Maloof,A.C. &Oppenheimer1,M. (2009)Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. Nature, 462,863-867.

Clark,P.U., Dyke,A.S., Shakun,J.D., Carlson,A.E., Clark,J., Wohlfarth,B., Mitrovica,J.X., Hostetler,S.W. and Marshall McCabe, A. (2009) The Last Glacial Maximum. Science, 325, 710-714.

Dutton,A. and K. Lambeck (2012) Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial.



3. 動水勾配の増加：地震に伴う地下水位（または水圧）の変化

【NUMOの対応の考え方】

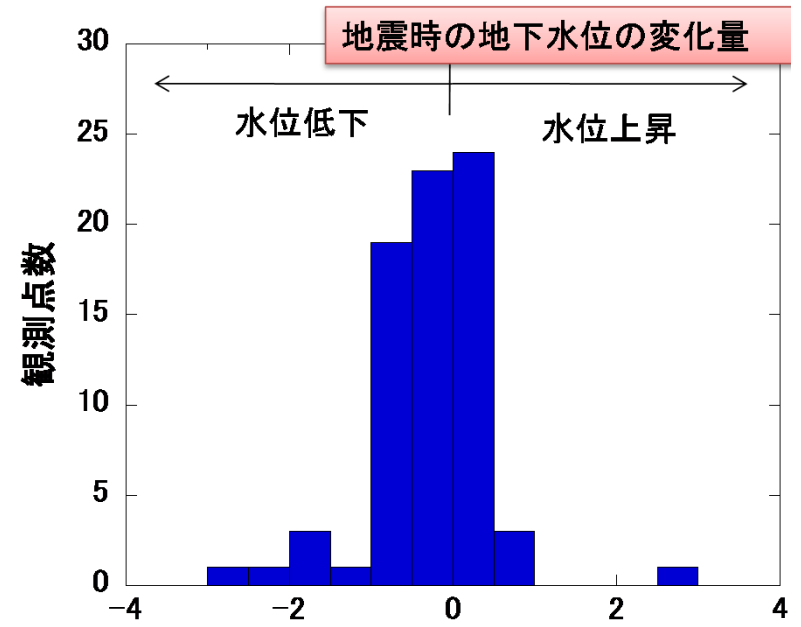
地震に伴う地下水位（または水圧）の変化は、広域スケールで発生するが、サイトの地質構造（遮水性断層の有無など）に依存して、処分場スケールでも変化すると考えられる。影響の程度は、水圧変化が発生している頻度や範囲に依存するが、これまでの観測の範囲の変化であれば、新たな工学的対策は必要ないと考えられる。

【想定する変動範囲など】

- 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。
- 2011年東北地方太平洋地震後、井戸の観測により得られた水位変化は3m以内に収まっている。

【技術的論拠】

- 動水勾配は、単位距離当たりの水位変化量であり、地下水面の変化が広域的であることを考慮すると、動水勾配の変化量は小さいものと推察され、著しい影響を与える事象ではないと考えられる。



地震に伴う地下水位の変化量 (m)

産業技術総合研究所公開のWell Webのデータ
(<https://gbank.gsj.jp/wellweb/GSJ/index.shtml>)
を用い地震後の水位変化量を抽出・ヒストグラム化

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【信頼性向上】調査した中で湧水が継続している事例もあり、原因が十分に解明されていない。湧水となる地下水の起源の確認や局所的な水位変化に関して事例調査を続け、事象を一般化することが必要である。

3. 地下水流動経路の変化: 海水準変動に伴う 流出点の変化, 塩水／淡水境界の位置の変化

【NUMOの対応の考え方】

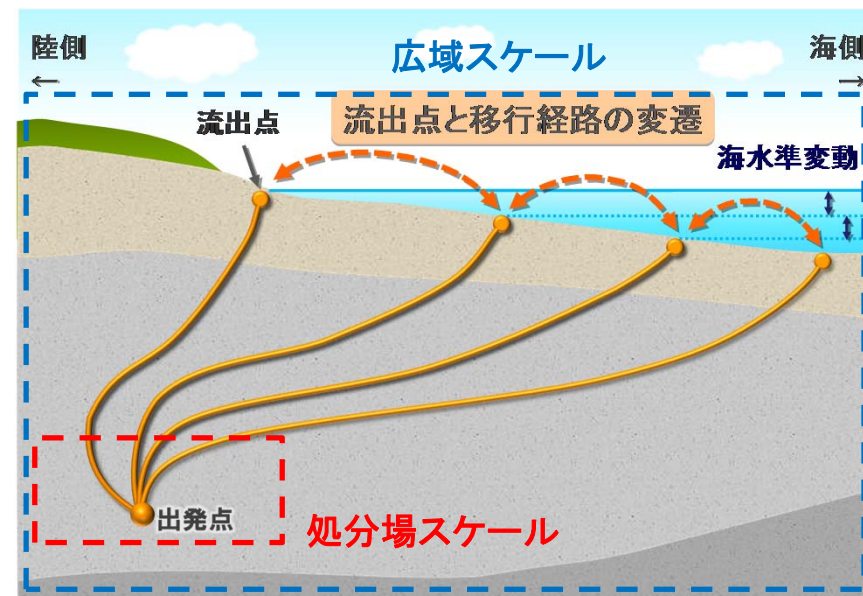
・沿岸部では海水準変動により, 広域スケールで塩淡水境界位置や流出点が変わり, 処分場スケールにおける地下水流動経路が変化し得る可能性があるが, そのような影響を取り込んで, 処分場の設置位置や深度など工学的対策や安全性の評価を実施することは可能である。なお, 広域スケールにおける流出点の変化については安全性の評価において考慮する。

【想定する変動範囲など】

- ・ 海水準の変動は+10m弱 (Kopp, R.E. et al, 2009) ~ -150m程度 (Clark, P.U. et al., 2009 など) と予測されている。
- ・ 塩淡水境界が海退, 海進時に前進, 後退するのに合わせて流出点も沖合へ, 陸地へと移動する。
- ・ このような塩淡水境界, 流出点の移動に合わせて流動経路も変化する。

【技術的論拠】

- ・ 広域スケールにおける流動経路の変化に対して, 処分場スケール付近における流動経路の変化は小さく, 経路長や岩盤の移行特性の変化は小さいと考えられる(右図)。
- ・ したがって影響を見通し, 必要に応じて処分場の設置位置の工夫などの対策が可能である。
- ・ なお, 広域スケールにおいては, 流出点の変化に対応した, 性能を評価することが可能である。



【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

【確認事項】地形, 岩盤水理特性を踏まえた3次元地下水流動解析結果や地下水化学環境の情報から, 処分場の適切な位置を検討する。

3. 地下水流動経路の変化:断層のずれに伴う透水性の増加

【NUMOの対応の考え方】

・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、安全性の評価において考慮する。

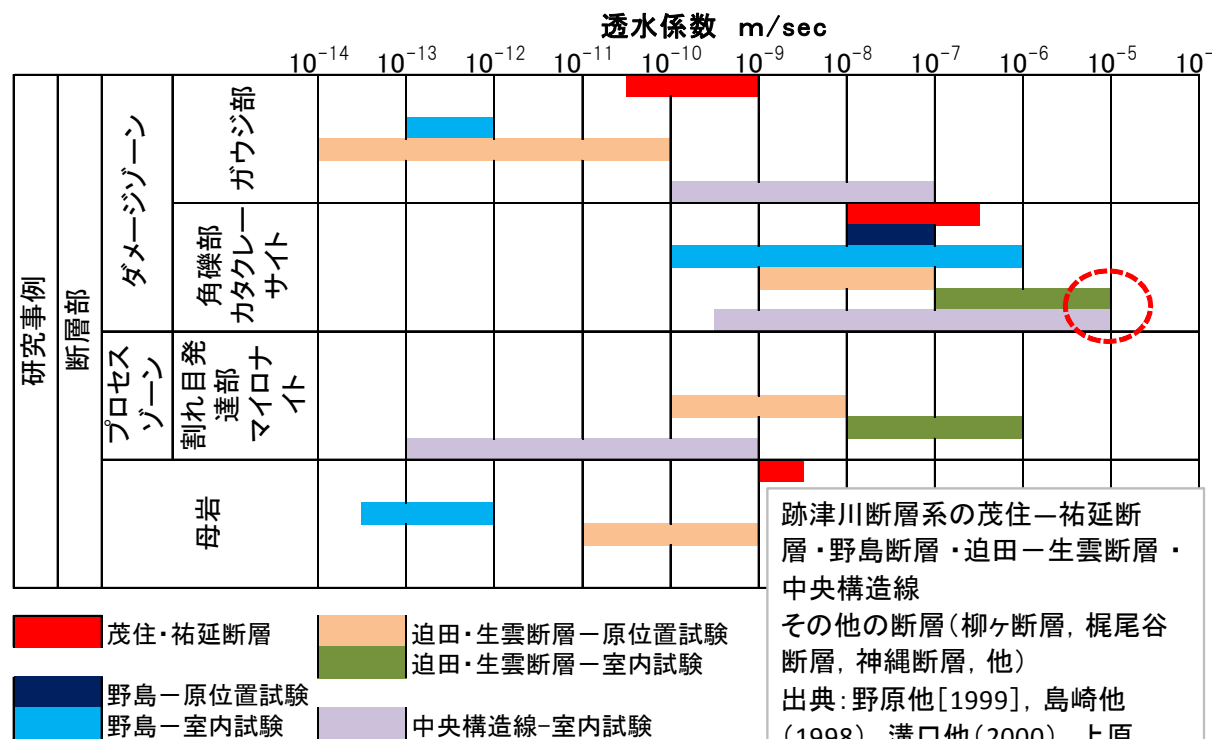
【想定する変動範囲など】

・断層の活動により、岩盤に強い応力が生じる。その結果として、断層角礫部においては、透水係数が 10^{-5} m/s程度まで上昇するケースが確認されている(溝口ほか, 2000 など)。

なお、断層ガウジ等の領域では、粘土鉱物の生成により透水性が低下する場合もある。また、応力伝播が生じるプロセスゾーンにおいては、亀裂の増加に伴い透水性の上昇するケースがある。

【技術的論拠】

- ・処分場に断層の透水係数が 10^{-5} m/s程度の水みちが地表まで達すれば、母岩の天然バリア機能は期待できなくなり、著しい影響を与えるので回避する。
- ・一方、広域スケールにおいてこのような断層が発生する想定においては、流動経路の変化を幅広く想定し、性能を評価することが可能である。



跡津川断層系の茂住一祐延断層・野島断層・迫田一雲断層・中央構造線
 その他の断層(柳ヶ断層, 梶尾谷断層, 神縄断層, 他)
 出典:野原他[1999], 島崎他(1998), 溝口他(2000), 上原(2007)等を集約

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

【確認事項】広域スケールにおいて断層活動による水みちの新規発生等の流動経路変化を幅広く想定しておく。

3. 涵養量の変化: 涵養域の降水量の変化

【NUMOの対応の考え方】

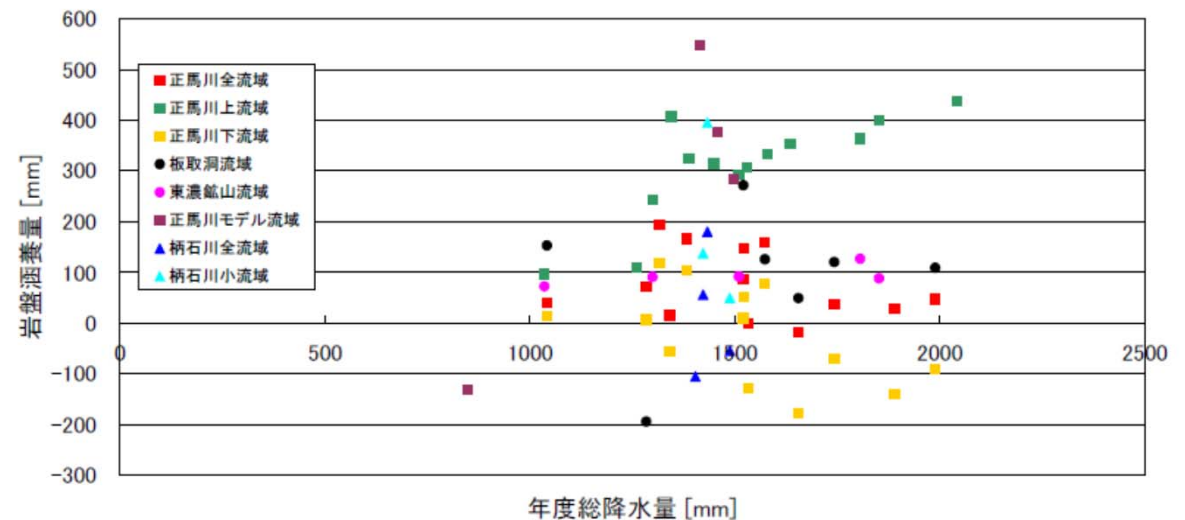
・涵養量は、広域スケールにおいてサイトの地形や局所的な気候に依存するので、サイトごとに涵養量を評価し、処分場スケールに対する影響を評価する必要がある。ただし、氷期における降水量は現在の5～7割程度に減少にとどまり、著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。

【想定する変動範囲など】

- ・ 氷期における降水量は現在の5～7割程度に減少するものと予想されている(分冊1, 2.6.3)。
- ・ 降水量の変動に対応して涵養量も変動する(右図)

【技術的論拠】

- ・ 現在は間氷期であるため、将来の降水量は間氷期には現在と同じ程度、氷期には減少すると考えられる。
- ・ 涵養量の減少は動水勾配を減少させると考えられる。
- ・ 以上のことから将来の涵養量の変化は著しい影響を与える事象とはならないと考えられる。



瑞浪における各年度の降水量と岩盤涵養量の関係
(核燃料サイクル開発機構, 2005, 図4.2.3-12)

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

・【確認事項】シミュレーションにより想定する将来の地形変化に降水量等の気候変動を併せて、将来の地下水流動状況を想定する。

核燃料サイクル開発機構(2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築,
一分冊1 深地層の科学的研究一, 核燃料サイクル開発機構 JNC TN1400 2005-014



4. 化学場

影響要因	関連事象	回避の必要性
低pH地下水の流入	火山性熱水や深部流体の移動・流入	回避
炭酸化学種を含む地下水の流入		
高pH地下水の流入	超塩基性岩と反応した地下水の移動・流入	(限定的影響)
酸化性地表水の流入	断層のずれに伴う透水性の増加	回避(条件による)

4. 低pH地下水, 炭酸化学種を含む地下水の流入: 火山性熱水や深部流体の移動・流入

【NUMOの対応の考え方】

- 将来, 地熱活動が活発化した際, pH低下や炭酸富化の可能性がある。また深部流体(非火山性熱水)も同様の可能性がある。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必要がある。

【想定する変動範囲など】

- pHは火道近傍で4.8以下, それ以遠(15km程度以遠)は中性～弱アルカリ性と考えられる。
- 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。
- 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。(以上, 第4回資料2, p37より)

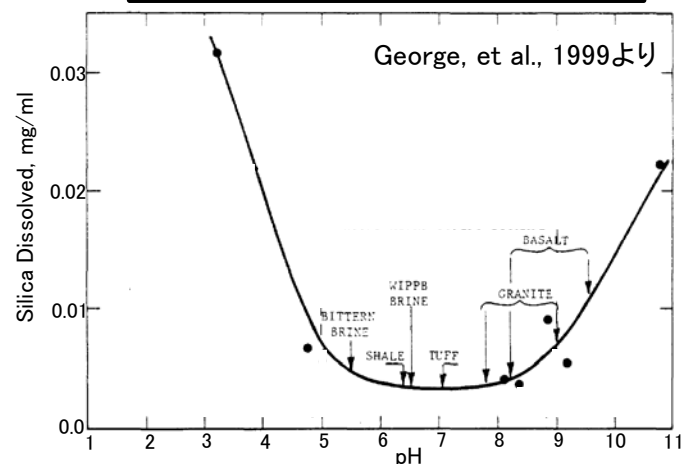
【技術的論拠】

- 酸性条件では, ガラス固化体が溶解しやすい(右上図, George, et al., 1999 など), 緩衝材が変質しやすい, 一部の放射性物質の溶解度が増加しやすい, 緩衝材, および天然バリアの収着能が低下する条件となる。
- また, オーバーパックに関しては, 顕著な腐食現象である局部腐食を招く不動態化の回避が望まれる。これまでの実験の結果から, 炭酸化学種の濃度の高い環境では不動態化しやすいことが示される(右下図, 谷口ほか, 1999)。
- 地熱活動, 深部流体による酸性化, 炭酸富化は広い範囲にわたり, 天然バリア等への影響は工学的対処が難しい。

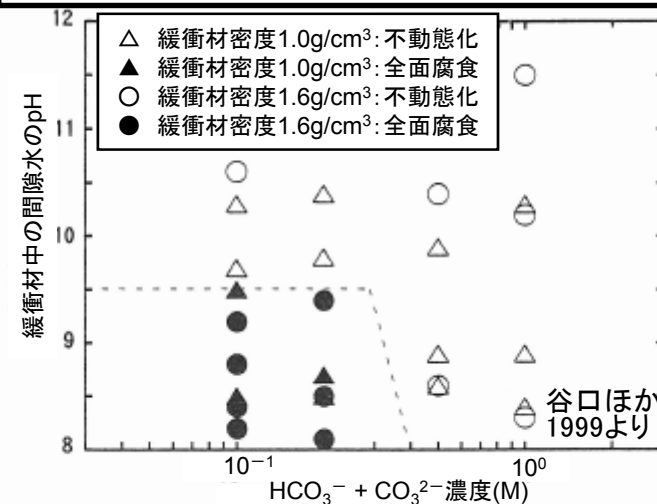
George, et al., (1999): "The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater", Journal of American Ceramic Society., DP-MS-81-104.

谷口 ほか(1999): "ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討", サイクル機構技術報告, No.4, pp.87-91.

ガラス固化体の溶解挙動のpH依存性



オーバーパックの腐食挙動の炭酸化学種濃度依存性



4. 高pH地下水の流入：塩基性岩と反応した地下水の移動・流入

【NUMOの対応の考え方】

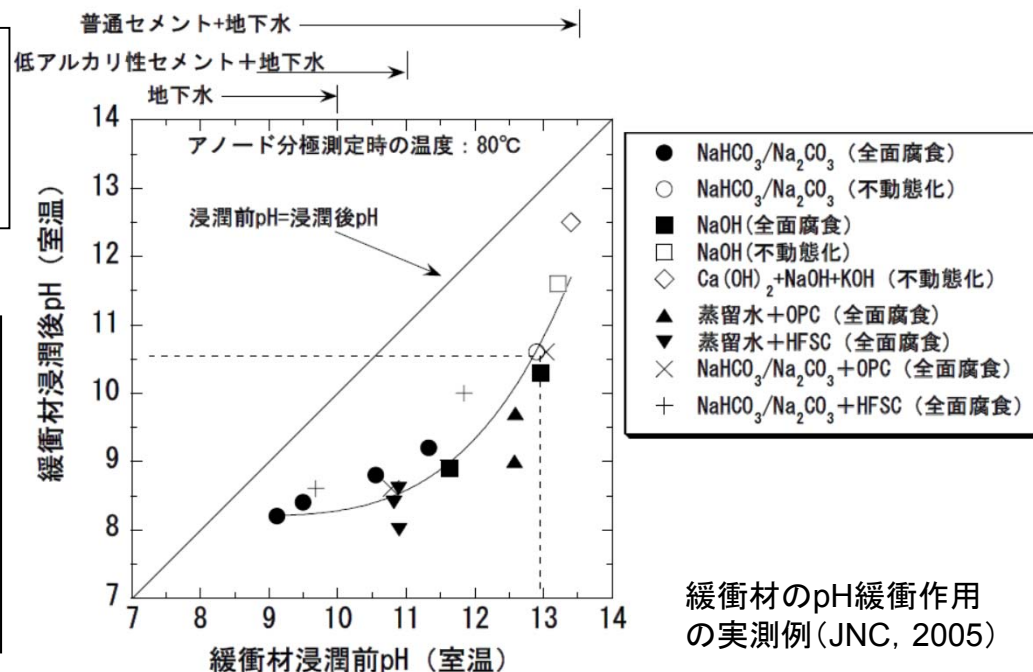
- 超塩基性岩と地下水との反応により蛇紋岩化作用が生じ、アルカリ性地下水が生成するが、この際のpHは11程度である。また、影響の範囲は限定的であり、工学的対策により対応可能である。

【想定する変動範囲など】

- 蛇紋岩化に伴うpHとしては、11程度で、最高11.7の報告がある(原環センター, 2013など)。
- また、起源は特定されていないが、10-11程度のアルカリ性の地下水がある(板寺, 2012)。

【技術的論拠】

- 人工バリアを構成する緩衝材にはpH緩衝作用が期待できる。例えば、緩衝材外側のpH(右図の“緩衝材湿潤前pH”)が11-12程度でも、緩衝材の内側のpH(“緩衝材湿潤後pH”)は8.5-9.5程度となる(JNC, 2005; 右図)。
- したがって、外部の地下水として高pH水が流入しても、オーバーパックの不動態化、ガラス固化体の溶解速度の促進に至らないと考えられる。



【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

【確認事項】超塩基性岩やアルカリ性の地下水の分布を確認し、地下水流動性評価を踏まえて影響が及ぶ範囲を確認する。

【信頼性向上】緩衝材のpH緩衝性について、定置後初期の再冠水の過程における効果などについて検討する。

- 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。
- 板寺一洋(2012):“水文科学が解き明かす不思議な天然水”、日本水文科学学会誌、Vol.42、No.1、pp.21-28
- 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 一分冊2工学技術の開発一、JNC TN1400 2005-015, p.25.

4. 酸化性地下水の流入：断層のずれに伴う透水性の増加

【NUMOの対応の考え方】

- 一定の条件下で発生すると考えられる。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、著しい影響を与える事象と考え、回避すべきと考えている。

【想定する変動範囲など】

- 野島断層では、深度1,300mのカタクレーサイト中の開口性割れ目まで地表近くの酸化的な水が深部まで流入したものと解釈されている。また、影響範囲はまた活断層破碎帯の近傍数十mと考えられる（分冊1, 2.3.2）

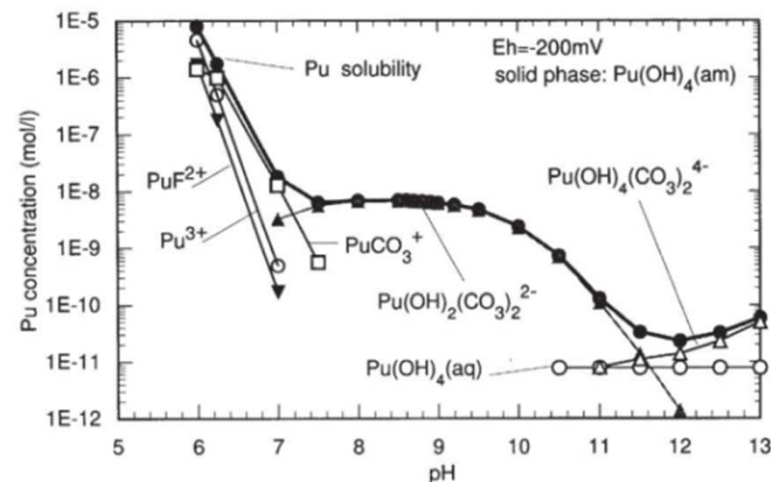
【技術的論拠】

- 以下に示すように酸化性条件では、核種の溶解度が増加し、緩衝材及び天然バリアの収着性が低下する。
 - ✓ 核種によっては酸化性条件で溶解度が著しく高くなる（武田, 1999）。
 - ✓ 同じpHであっても、Ehが異なると、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（Barbara, 2005）
 - ✓ Se, Tc, Np, Pa, Pu およびUなどは、酸化性条件で化学形態が変化し、緩衝材や地質媒体に対する収着性が低下する（分冊3, 6.2.1 : 三原, 2006）。
- 断層のずれ及びそれに伴う地下水流入を工学的に対処することは難しい。

【サイト調査における確認事項または信頼性向上に向けた取り組み】

- 【確認事項】サイト毎に、涵養量や地形等を踏まえて、処分深度に達する断層のずれによる酸化性地表水の引き込みによる擾乱の範囲を解析評価する。

pHの違いによる溶解度の変化の例



武田, 1999より

・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.
Solubility in Groundwater, JAERI-Research 99-047.

・Barbara(Ed.)(2005): Environmental geochemistry, p.235.
・三原 (2006): TRU廃棄物処分システムの安全評価における核種移行データセット, JAEA-Review 2006-011.



5. 天然現象の調査・評価の例



5. 天然現象に関する調査・評価項目および評価事例の一覧

	調査・評価項目	調査・評価事例
火山・火成活動	火山の分布および地熱活動の評価	•地熱活動(熱・熱水・ガス)の調査事例 •地下物理探査に基づく地殻下部のマグマの分布の調査・評価事例
	深部流体などの非火山性熱水の評価	深部流体の調査事例
断層活動	繰り返し活動し、変位の規模が大きな断層の分布の評価	•断層の分布の評価事例
	活動性の評価	•断層の活動性の評価例
	断層の影響範囲の評価	•断層破碎帯の調査例
隆起・侵食	隆起量・侵食量の評価	•隆起量・侵食量の評価例
	表層付近の酸化帯分布の評価	•表層付近の酸化帯分布の評価例

5. 火山・火成活動：地熱活動（熱・熱水・ガス）の調査事例

【評価内容】

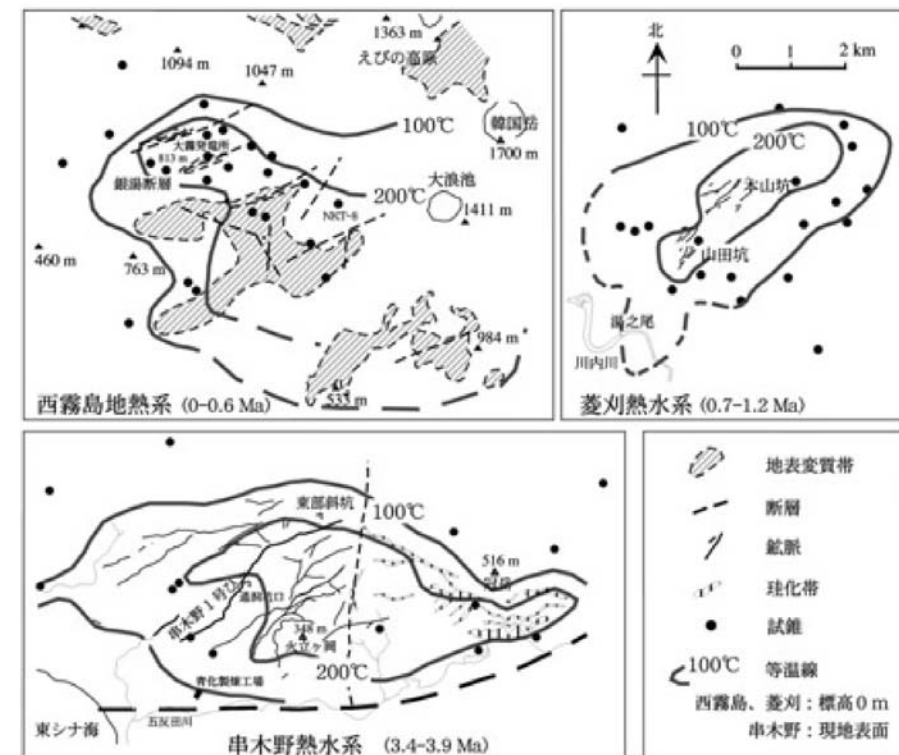
- 概要調査地区において、現地調査に基づいて、火山活動の地表の痕跡である、熱・熱水・ガスの有無と分布を確認する。これらが分布する地域は、今後も地熱活動が継続すると考えられることから、回避して、精密調査の範囲を設定する。

【適用する調査技術】

- 地表踏査，物理探査，ボーリング調査（右の例），地化学分析などにより，著しい熱・熱水対流，熱水・噴気（火山性ガス），著しい第四紀の熱水変質帯，熱源の有無や分布を確認する。

【信頼性向上に向けた取り組み】

- すでに確立された手法であり，新規の技術開発の必要性はないと考えられる。ただし，調査事例を蓄積・分析し，その手順や留意すべき点などを，実際のサイトにおける調査計画に反映することで，調査の合理化や，調査結果の信頼性の向上に資すると考えられる。



熱水変質帯の分布に基づく熱水系の分布の評価事例（井澤，2004）

5. 火山・火成活動：地下物理探査に基づく地殻下部のマグマの分布の調査・評価事例

【評価内容】

- 火山活動の痕跡が認められない場合でも、地下深部にマグマ溜りが存在する可能性を評価する。

【適用する調査技術】

- 物理探査、地震観測、測地観測などにより、地球物理学的アノマリー（地震波速度、比抵抗、重力、磁気、温度）、火山性地震、低周波微動、地殻変動の有無や分布を確認する。

【調査の信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 右記のような、物理探査技術を用いたマグマだまりの事例調査が実施されている。

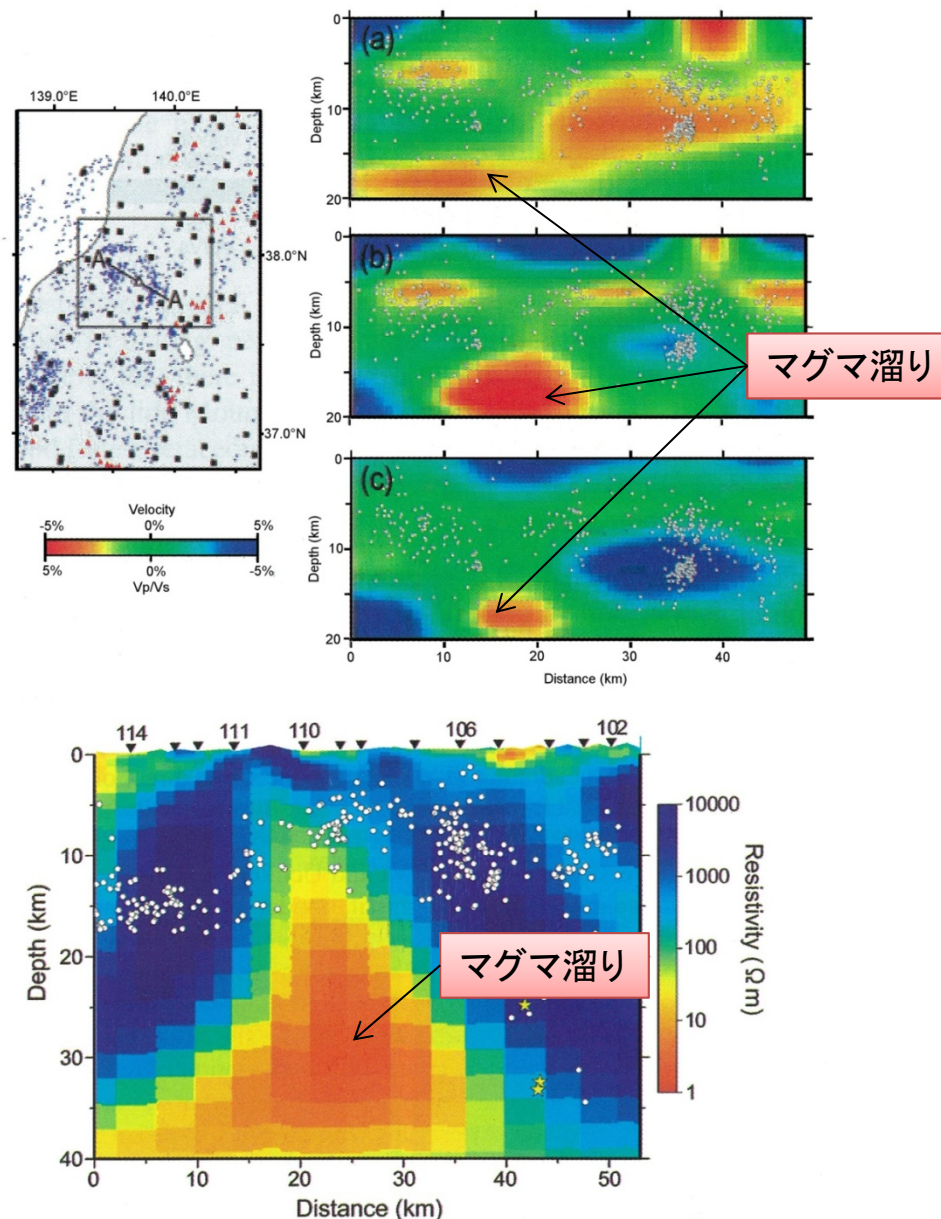
地球物理学的手法を用いたマグマの存在の検討例

(Umeda, 2009)

上図：飯豊山を横切る東西(A-A')の地震波速度構造の断面図〔(a)P波, (b)S波, (c)Vp/Vs〕。

下図：同地域のMT法探査の二次元比抵抗モデル断面図(白点は微小地震の震源, 黄色の☆印は深部長周期地震源)。

両図における深度15km以深のアノマリー(赤色)がマグマの存在を示唆している。





5. 火山・火成活動：深部流体の評価

【評価内容】

- 火山活動の痕跡が認められない場合でも、地下深部にマグマ溜りが存在する可能性を評価する。

【適用する調査技術】

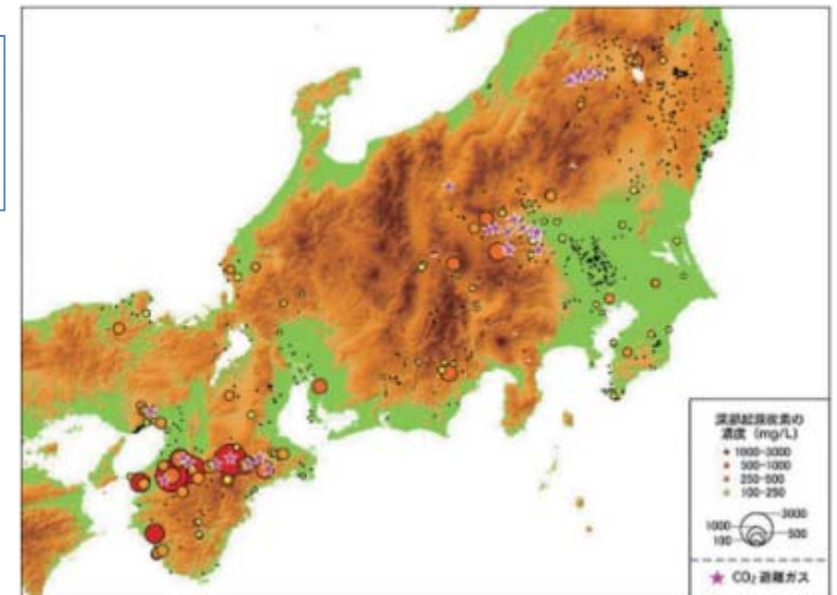
採水調査(水温, 地下水水質, 同位体, ガス成分)や岩石コア採取。
・水素酸素, 炭素, ヘリウム同位体比測定
地下水起源と混合評価技術。

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 右記に示す深部流体に起因すると考えられる炭素濃度や遊離ガスの分析などの事例調査が蓄積されている(産総研, 2007, 2012など)

参考文献

- 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, 地質調査研究資料集, No. 560.
- 岩月ほか(1998): 深地層を対象とした地下水の地球化学調査の現状, バックエンド研究, Vol.



地下水中の深部起源無機炭素濃度および二酸化炭素の遊離ガスの分布(産業技術総合研究所, 2007)

5. 断層活動：断層の分布の評価事例(1)

【評価内容】

- 地表の断層の痕跡や、地下物理探査の結果に基づいて地上および地下の断層の分布を把握する。

【適用する調査技術】

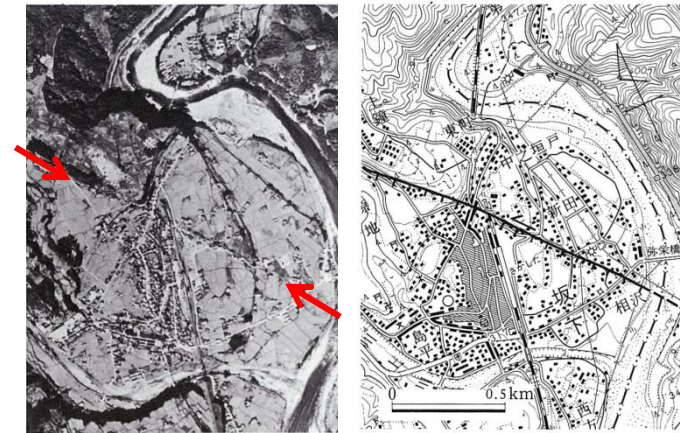
- 空中写真判読(右上図)、地下物理探査(右下図)などにより、断層の分布を調査する。

【信頼性向上に向けた取り組み】

- 断層が未成熟な場合や変位が小さい場合は、空中写真判読だけでは、見落とす可能性がある。ただし、そのような場合においても、反射法地震波探査やボーリング調査、トレンチ調査などを組み合わせることで、断層を特定できることが、事例調査により示されている(井上ほか, 2002など)。

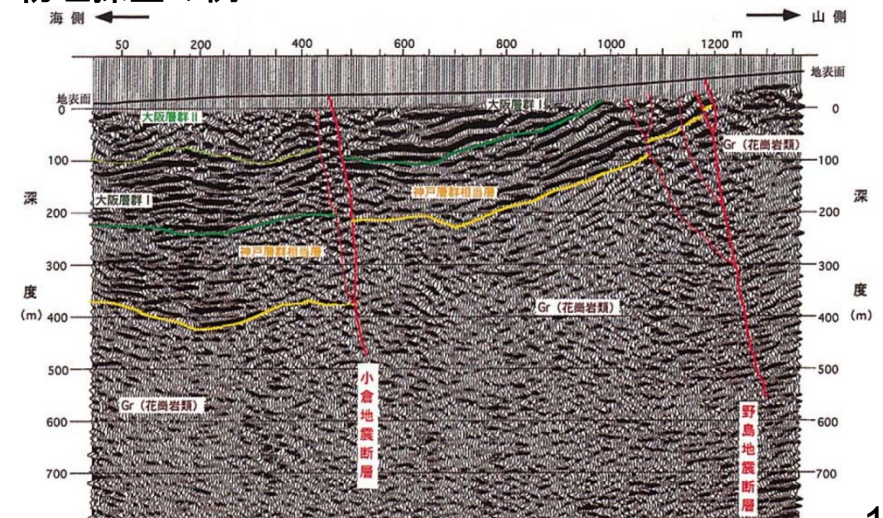
(続く)

空中写真判読の例



活断層研究会編(1991)阿寺断層の例(赤矢印はNUMO追記)

地下物理探査の例



地震断層を横断する反射断面図(岡田ほか, 2000:原著 是石ほか, 1995)

岡田勝也・池田研一・長谷川達也編(2000):活断層調査から耐震設計まで, 鹿島出版会, 203p.

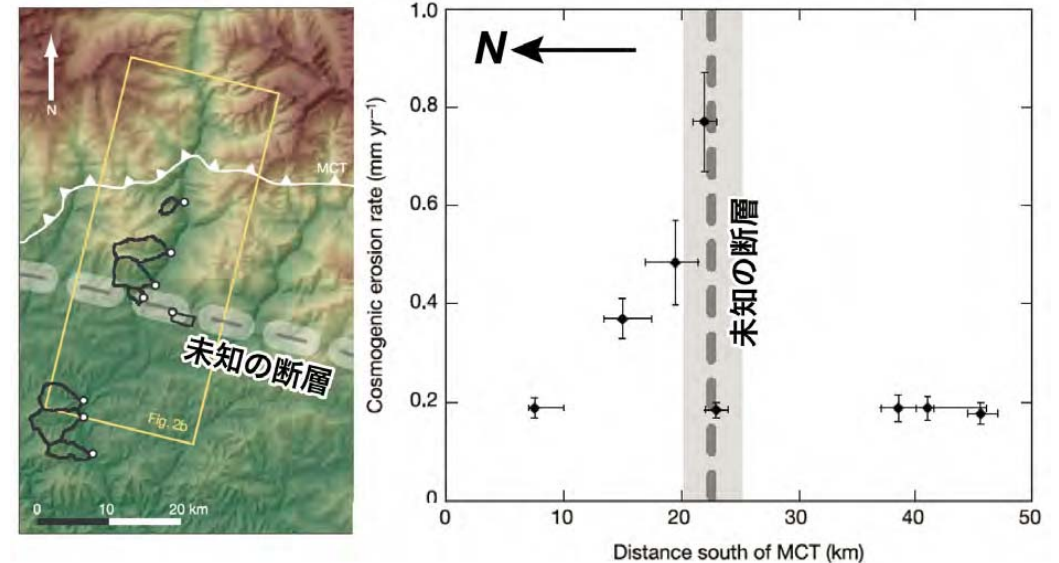
是石康則・江尻寿延・松井和夫・衣笠善博(1995):北淡町野島断層における反射法地震探査, 物理探査学会第92回学術講演会論文集, pp.255-259.

5. 断層活動:断層の分布の評価事例(2)

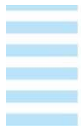
【信頼性向上に向けた取り組み】

(続き)

- 断層活動の痕跡が不明瞭な場合は, 変動地形, 隆起による段丘面の分析や侵食量の空間分布などから(右図の例), 断層の存在が間接的に確認された事例のレビューもある(産総研, 2012)。



TCN(¹⁰Be)による侵食速度の較差から未知の断層が検出された事例. 侵食速度の急変により現在地形的には不鮮明な断層の存在が推定される. (原著Wobus et al., 2005 に追記)(産総研, 2012)



5. 断層活動：断層の活動性の評価例

【評価内容】

- 断層の活動の履歴などに基づいて、過去の断層の活動性を評価し、将来も活動する可能性がある場合に回避して、精密調査の範囲を設定する。

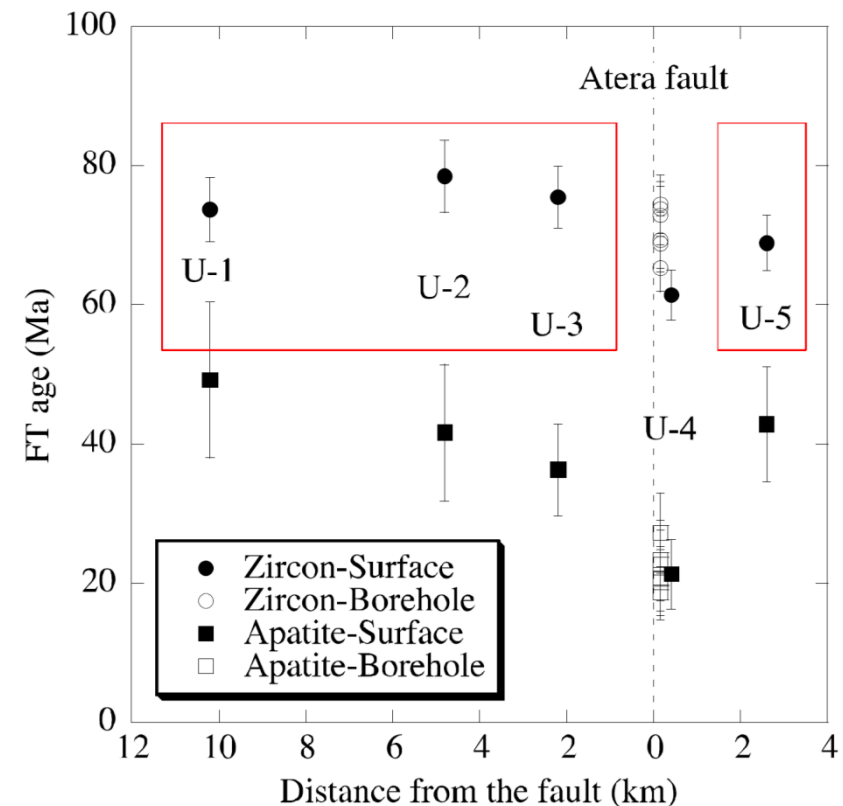
【適用する調査技術】

- 上載地層法に基づいて、トレンチ調査(右図)などに基づいて、最近の地質時代の活動性を評価することが基本である。
- なお、上載地層法の適用が困難な場合には、変動地形の解析や、断層・破砕帯の性状(組織, 充填鉱物など)などの調査手法を組み合わせ、総合的に評価する必要がある。

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- 上載地層法の適用が困難な場合に適用する技術については、断層内の破砕帯の組織構造, 充填鉱物の年代測定など、複数の手法の適用性について事例的な調査が実施されている(JAEA, 2012)。

* 上載地層法: 破砕帯を覆う地層(上載地層)の年代を特定することにより、破砕帯の活動時期を判断する方法のこと



阿寺断層を事例とした断層の年代測定の事例
(http://www.jaea.go.jp/04/tisou/iinkai/anteisei_iinkai/10-6.pdf)

5. 断層活動:断層破碎帯の調査例

【評価内容】

- 現地調査などに基づいて、断層破碎帯の幅を評価し、その領域を回避して、精密調査の範囲を設定する。

【適用する調査技術】

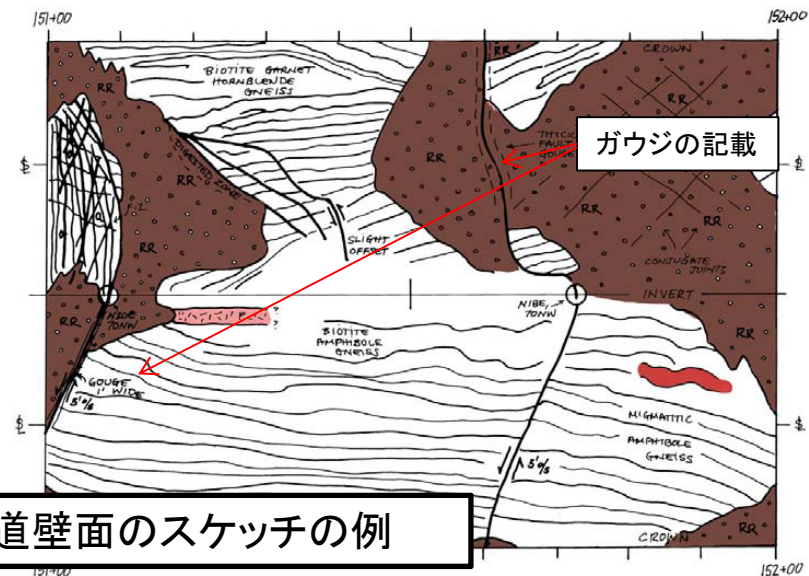
- トレンチ調査, ボーリング調査(サンプリングなど), 地表踏査など

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

日本に分布する代表的な活断層を対象とした以下の事例調査が進められている。

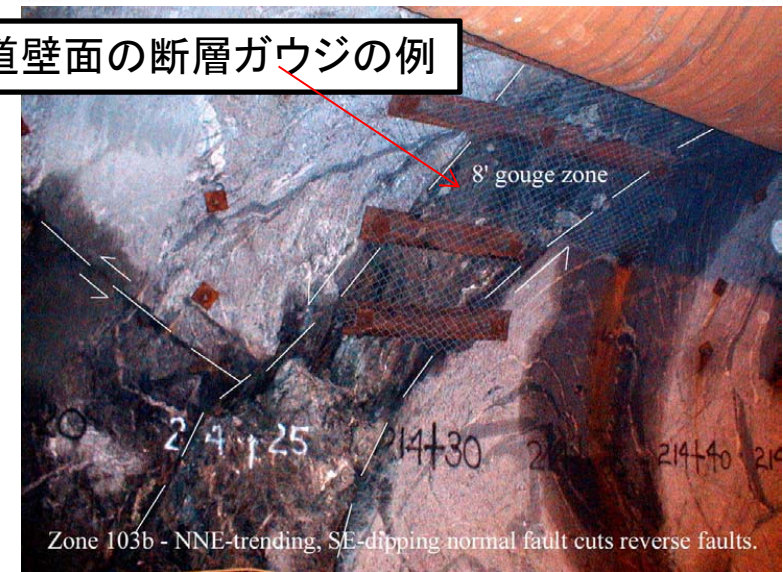
- 阿寺断層(延長60 km), 跡津川断層(延長69 km), 牛首断層(延長54 km), 山ロー出雲地震帯(全長約180 kmうち約70%が活断層あるいは推定活断層)など, 規模の大きい活断層を対象として, 断層活動に伴う物理的影響範囲などが調べられており, 断層延長と影響範囲の関係は, 従来の見積もり範囲と整合する(長友・吉田, 2009; 吉田ほか, 2009; Niwa et al., 2009, 2011; 金折・遠田, 2007, 大橋・小林, 2008など)

Merguerian, Charles, 2002b, Brittle Faults of the Queens Tunnel Complex, NYC Water Tunnel #3: p. 63-73 in Hanson, G. N., chm., Ninth Annual Conference on Geology of Long Island and metropolitan New York, 20 April 2002, State University of New York at Stony Brook, NY, Long Island Geologists Program with Abstracts, 116 p.



坑道壁面のスケッチの例

坑道壁面の断層ガウジの例



ニューヨーク水路トンネルの事例

5. 隆起・侵食：隆起量・侵食量の評価例

【評価内容】

過去の隆起量などに基づいて、将来の隆起・侵食量を推定する。

【適用する調査技術】

- 空中写真判読、測量、地形面の年代測定技術。

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

TCN 法など、地形面の年代測定技術や、基準となる地形面が存在しないケースへの適用性の評価などが進められている（産総研，2012でレビューが取りまとめられている）。

隆起量の調査・評価の流れの事例

海成段丘の分布調査

- 空中写真判読や現地調査に基づき段丘分布図を作成



段丘の高度測定

- 段丘の高度測量を行い地形の隆起量を求める



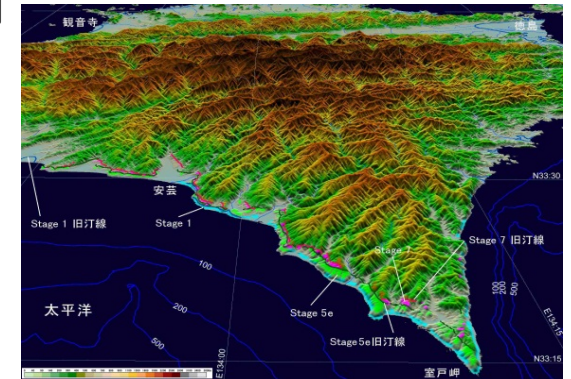
段丘の編年

- 火山テフラ等を用い段丘の形成年代を推定



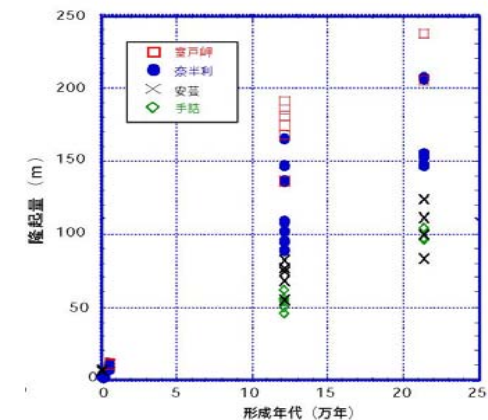
隆起速度の推定

- 段丘の高度を段丘の年代で除し隆起速度を推定



(小池・町田, 1999)

II



第2次取りまとめ(分冊1) (小池・町田編, 1999を編集)

5. 隆起・侵食：表層付近の酸化帯分布の評価

【評価内容】

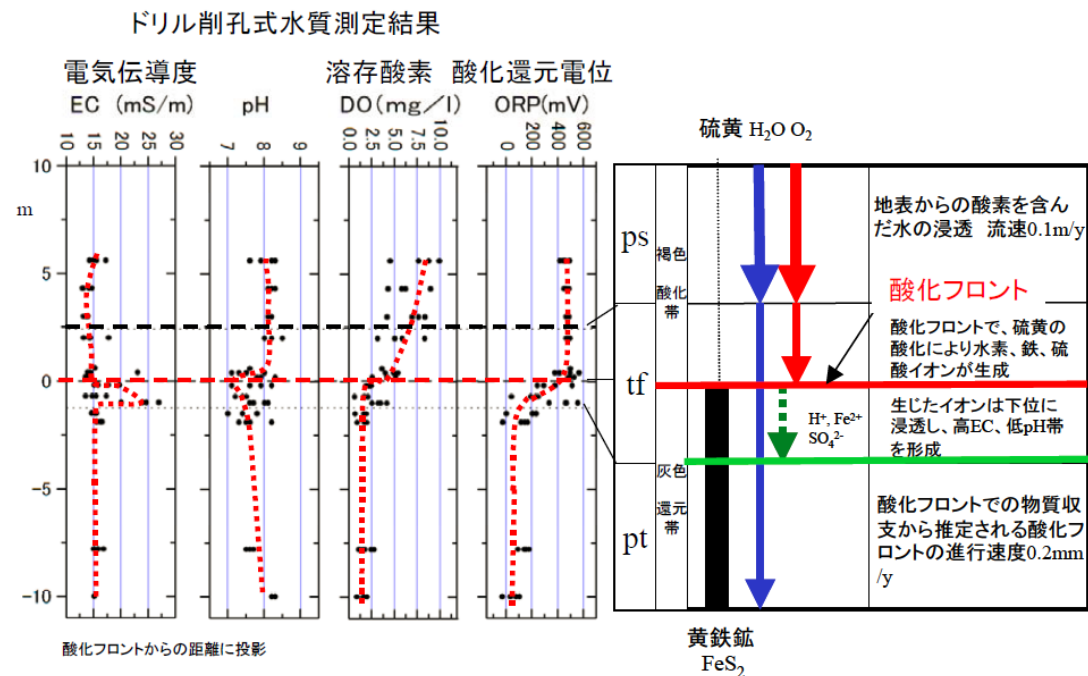
地下水の化学分析に基づいて、表層付近の酸化帯の分布を評価する。

【適用する調査技術】

- 地下水化学分析技術

【信頼性向上に向けた取り組みの事例】

- ボーリング孔の孔内水の化学分析などに基づいて、岩盤の鉱物組成との関係を考慮し、酸化フロントの形成メカニズムなどの事例検討が進められている。



電力中央研究所(2007)N07001

p.1-33に記載の参考文献(1／3)

■ 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.
- Ishikawa, T., Tanimizu, M., Nagaishi, K., Matsuoka, J., Tadaï, 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.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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―, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.
- 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.
- 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.
- 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.

■ 2.2力学場

- 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.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.
- 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.
- 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) ―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) ―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).

■ 2.3水理場

- 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.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.

p.1-33に記載の参考文献(2/3)

■ 2.3水理場(つづき)

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Tadokoro, K., Ando, M. (2002) Evidence for rap-id fault healing derived from temporal changes in S wave splitting. Geophys. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL013644.

■ 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.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一, 分冊1, JNC TN1400 99-021.
- 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.
- 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一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.
- Tadokoro, K., Ando, M. (2002) Evidence for rap-id fault healing derived from temporal changes in S wave splitting. Geophys. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL013644.



p.1-33に記載の参考文献(3／3)

■ 3.物理的隔離機能に必要な地質環境に対する影響要因

- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.
- 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・剝削史の解明. 地学雑誌, 120, 1003-1012.



p.34-39に記載の参考文献

- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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2, JNC TN1400 99-022.

p.40-73に記載の参考文献(1/4)

■ 3.1 火山・火成活動

- ・ 浅森浩一, 丹羽正和, 花室孝広, 山田国見, 草野友宏, 幕内 歩, 高取亮一, 國分(齋藤)陽子, 松原章浩, 石丸恒存, 梅田浩司(2012): 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 2012-024.
- ・ 第四紀火山カタログ委員会編(1999): 日本の第四紀火山カタログ. 日本火山学会.
- ・ 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.
- ・ JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一, 総論レポート, JNC TN1400 99-020.
- ・ JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一, 分冊1, JNC TN1400 99-021.
- ・ 川村賢二(2009): 氷床コアから探る第四紀後期の地球システム変動. 第四紀研究, 48, 109-129.
- ・ 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.
- ・ 小松 亮, 梅田浩司(1999)日本列島における温泉・熱水変質帯について. サイクル機構技報, 4, 121-128.
- ・ 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(2007): 第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集.
- ・ 産業技術総合研究所(2010): 平成 21 年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査(放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質情報データの整備)事業報告書.
- ・ 産業技術総合研究所(2012): 平成23年度核燃料サイクル施設安全対策技術調査(放射性廃棄物処分安全技術調査等のうち地層処分に係る地質評価手法等の整備). 平成23年度事業報告書.
- ・ 産業技術総合研究所(2013): 200万分の1地質図「日本の火山第3版」.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ 八幡正弘(2002): 北海道における後期新生代の鉬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一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.
- ・ 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.

p.40-73に記載の参考文献(2/4)

■ 3.2 断層活動

- 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.
- 土木学会 岩盤力学委員会 岩盤の熱環境に関する研究小委員会(編)(2006): 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざしてー熱物性と解析
- 原子力安全・保安院(2008): 新潟県中越沖における海上音波探査について(中間報告), 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部 会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ(第12回)-配付資料 合同W12-1, 平成20年6月27日.
- 井上大栄, 宮腰勝義, 上田圭一, 宮脇明子, 松浦一樹(2002): 2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査. 地震, 54, 557-573.
- 岩淵 洋, 西川 公, 田賀 傑, 宮寄 進(1998): 福岡湾付近の断層分布. 水路部技報, 16, 95-99.
- JNC (核燃料サイクル開発機構)(1999): わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 ー地層処分研究開発第2次取りまとめー, 分冊1, JNC TN1400 99-021.
- 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ロー出雲地震帯の成因と地震活動. 自然災害科学, 25, 507-523.
- 片川秀基, 浜田昌明, 吉田進, 廉澤宏, 三橋明, 河野芳輝, 衣笠善博(2005): 能登半島西方海域の新第三紀～第四紀地質構造形成, 地学雑誌, 114(5) 791-810 2005.
- 加藤直子, 越後智雄, 佐藤比呂志(2006): 浅層反射法地震探査から見た2004年新潟県中越地震の断層モデル. 月刊地球号外, No.53, 103-109.
- 草野友宏, 浅森浩一, 黒澤英樹, 國分(齋藤)陽子, 谷川晋一, 根木健之, 花室孝広, 安江健一, 山崎誠子, 山田国見, 石丸恒存, 梅田浩司(2010): 「地質環境の長期安定性に関する研究」第1期中期計画期間(平成17年度～平成21年度)報告書(H22レポート). JAEA-Research 2010-044.
- Maruyama, T., Iemura, K., Azuma, T., Yoshioka, T., Sato, M., Miyawaki, R. (2007): Paleoseismological evidence for non-characteristic behavior of surface rupture associated with the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake, central Japan. Tectonophysics, 429, 45-60.
- 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.
- 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.
- 緒方正彦・本荘静光(1981): 電力施設の耐震施設における断層活動性の評価, 応用地質, 22, pp.67-87. 岡村 真, 松岡裕美, 中島徹也, 中田 高, 千田 昇, 平田和彦, 島崎邦彦(2009): 博多湾における警固断層の活動履歴, 地震, 61, 175-190.
- 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.

p.40-73に記載の参考文献(3/4)

■ 3.2 断層活動(つづき)

- 産業技術総合研究所(2005):新潟県中越地震震源域の地質構造. 地震予知連絡会会報, 73, 403-405.
- 産業技術総合研究所(2007):第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集.
- 産業技術総合研究所(2009a):地質学的歪みと測地学的歪みの集中域と地震との関係, 地震予知連絡会会報, 81, 98.
- 産業技術総合研究所(2009b):岩手・宮城内陸地震震源域の重力構造, 地震予知連絡会会報, 81, 137-138.
- 佐藤比呂志, 岩崎貴哉, 金沢敏彦, 宮崎真一, 加藤直子, 酒井慎一, 山田知朗, 宮内崇裕, 伊藤谷生, 平田 直(2007):反射法地震探査・余震観測・地殻変動から見た2007年能登半島地震の特徴について. 東京大学地震研究所彙報, 82, 369-379. 佐藤 務, 坂井隆太郎, 大沢英昭, 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, 13-24.
- Scholz, C.H.(2002):The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd Edition. Cambridge Univ. Press.
- Shipton, Z.K., Soden, A.M., Kirkpatrick, J.D., Bright, A.M., Lunn, R.J.(2006):How thick is a fault? Fault displacement-thickness scaling revisited. Am. Geophys. Union Monogr., 170, 193-198.
- Sibson, R.H.(2003):Thickness of the seismic slip zone. Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 1169-1178.
- 杉山雄一(2008):科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究」の成果(中間報告), 原子力安全委員会 耐震安全性評価特別委員会 第1回 地震・地震動評価委員会-配付資料 震動委第1-3号, 平成20年1月23日.
- 鈴木康弘, 渡辺満久, 中田 高, 小岩直人, 杉戸信彦, 熊原康博, 廣内大助, 澤 祥, 中村優太, 丸島直史, 島崎邦彦(2008):2008年岩手・宮城内陸地震に関わる活断層とその意義——関市厳美町付近の調査速報. 活断層研究, No.29, 25-34.
- 高田圭太, 中田 高, 野原 壯, 原口 強, 池田安隆, 伊藤 潔, 今泉俊文, 大槻憲四郎, 鷺谷 威, 堤 浩之(2003):震源断層となりうる活断層とリニアメントの検討—中国地方を事例として, 活断層研究, 23, 77-91.
- 東京大学地震研究所, 地球科学総合研究所, 岩手大学工学部(2008a):2008年岩手宮城内陸地震震源域北部の稠密アレイ観測による余震分布と地殻構造. 第191回地震調査委員会資料, 1-4.
- 東京大学地震研究所, 東北大学大学院理学研究科, 岩手大学工学部(2008b):2008年岩手宮城内陸地震震源域盤井側沿いの反射法地震探査結果. 第191回地震調査委員会資料, 5-7.
- 東京電力(2007):新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の耐震安全性の検討状況について, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波 地質・地盤合同ワーキンググループ(第2回) 配付資料 合同W2-1-2, 平成19年12月5日.
- 東京電力(2008):東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所敷地周辺海域の地質・地質構造, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ(第6回)-配付資料 合同W6-1, 平成20年4月18日.
- 当麻純一, 佐藤清隆, 矢島 浩, 東 貞成, 芝 良昭, 佐藤浩章, 栃木 均, 河井 正, 金澤健司, 岡田哲実, 豊田幸宏, 宮腰勝義, 上田圭一, 幡谷竜太, 阿部信太郎, 濱田崇臣, 青柳恭平(2000):平成12年鳥取県西部地震調査速報, 電力中央研究所報告, U00019.
- 梅田浩司, 安江健一, 浅森浩一(2010):高レベル放射性廃棄物の地層処分における断層研究の現状と今後の展望. 月刊地球, 32, 52-63.

p.40-73に記載の参考文献(4/4)

■ 3.2 断層活動(つづき)

- 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—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.
- Yoshimura, R., Oshiman, N., Uyeshima, M., Ogawa, Y., Mishina, M., Toh, H., Sakanaka, S., Ichigara, H., Ogawa, T., Miura, T., Koyama, S., Fujita, Y., Nishimura, K., Takagi, Y., Imai, M., Honda, R., Yabe, S., Nagaoka, S., Tada, M., Mogi, T.(2008): Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj 6.9), central Japan. Earth Planet. Space, 60, 117-122.

■ 3.3 隆起・侵食作用

- 土木学会 岩盤力学委員会 岩盤の熱環境に関する研究小委員会(編)(2006):熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして—熱物性と解析.
- 藤原 治, 三箇智二, 大森博雄(1999):日本列島における侵食速度の分布, サイクル機構技報, no.5.
- 貝塚爽平(1987):関東の第四紀地殻変動, 地学雑誌, 96, pp.51-68.
- JNC (核燃料サイクル開発機構)(1999):わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.
- 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(2007):第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集.
- 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—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.
- Yoshimura, R., Oshiman, N., Uyeshima, M., Ogawa, Y., Mishina, M., Toh, H., Sakanaka, S., Ichigara, H., Ogawa, T., Miura, T., Koyama, S., Fujita, Y., Nishimura, K., Takagi, Y., Imai, M., Honda, R., Yabe, S., Nagaoka, S., Tada, M., Mogi, T.(2008): Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (Mj 6.9), central Japan. Earth Planet. Space, 60, 117-122.

p.74-105に記載の参考文献(1/2)

■ 1.1熱環境

- 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.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊1, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2, JNC TN1400 99-022.
- Karnland et al.(2000):”Long term test of buffer material Final report on the pilot parcels”, SKB TR-00-22.
- 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.

■ 1.2力学場

- Bonilla,M.G.(1970):Surface faulting and related effects. In:Earthquake Engineering (Wiegel,R.I.ed.),p21-74
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊1, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999):わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 一地層処分研究開発第2次取りまとめ一,分冊2, JNC TN1400 99-022.
- 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) 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.
- Posiva,(2012): Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto-Description of the Disposal System Fig.4-1,4-2
- SHIBATA, K.,TANI, K. and OKADA, T. (2007): Creep behavior of tuffaceous rock at high temperature observed in unconfined compression test, Soils and Foundations, Vol. 47, No. 1, pp. 1- 10.
- 高冶一彦, 鈴木英明(1999):緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041.
- 谷口 航, 高冶一彦, 杉野弘幸, 森 康二(1999)ニアフィールドの耐震安定性評価, JNC TN8400 99-054

■ 1.3水理場

- Clark,P.U., Dyke,A.S., Shakun,J.D., Carlson,A.E., Clark,J., Wohlfarth,B., Mitrovica,J.X., Hostetler,S.W. and Marshall McCabe, A. (2009) The Last Glacial Maximum. Science, 325, 710-714.
- Dutton,A. and K. Lambeck (2012) Ice Volume and Sea Level During the Last Interglacial.
- 核燃料サイクル開発機構(2005):高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築, 一分冊1 深地層の科学的研究一, 核燃料サイクル開発機構 JNC TN1400 2005-014
- Kopp,R.E., Frederik J. Simons,F.J.X., Mitrovica,X., Maloof,A.C. &Oppenheimer1,M. (2009)Probabilistic assessment of sea level during the last interglacial stage. Nature, 462,863-867.
- 溝口 一生, 廣瀬 文洋, 島崎 邦夫, 安藤 雅季, 西上 欽也, 大志万 直人(2000):野島断層の透水性構造, 月刊 地球, 号外No.31

p.74-105に記載の参考文献(2/2)

■ 1.4化学場

- Barbara(Ed.)(2005): Environmental geochemistry, p.235.
- 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.
- George, et al.,(1999): “The Chemical Durability of Savannah River Plant Waste Glass as a Function of Groundwater”, Journal of American Ceramic Society., DP-MS-81-104.
- 板寺一洋(2012): “水文科学が解き明かす不思議な天然水”, 日本水文科学学会誌、Vol.42、No.1、pp.21-28
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999): わが国における高レベル放射性廃棄物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1, JNC TN1400 99-021.
- 核燃料サイクル開発機構(2005): 高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築 ―分冊2工学技術の開発―, JNC TN1400 2005-015, p.25.
- 三原 (2006): TRU廃棄物処分システムの安全評価における核種移行データセット, JAEA-Review 2006-011.
- 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.
- 谷口 ほか(1999): “ベントナイト中における炭素鋼の不動態化条件の検討”, サイクル機構技報告, No.4, pp.87-91

■ 2. サイト調査手法

- 電力中央研究所(2007): 地下地盤の地化学環境調査・評価技術の開発―六ヶ所サイト試験空洞周辺岩盤の酸化還元状態と将来予測―. 電力中央研究所報告N07001.
- 井上大栄, 宮腰勝義, 上田圭一, 宮脇明子, 松浦一樹(2002): 2000年鳥取県西部地震震源域の活断層調査. 地震, 54, 557-573.
- 井澤英二(2004): 変質帯から見た浅熱水系の広がり(特集: 北薩地域金鉱床調査の歴史と成果--菱刈・串木野鉱床を中心として). 地質ニュース, 49-54.
- 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ロー出雲地震帯の成因と地震活動. 自然災害科学, 25, 507-523.
- 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.
- 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.
- 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.
- 産業技術総合研究所(2007): 第5回深部地質環境研究センター研究発表会資料集.
- 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, 地質調査研究資料集, No. 560.
- Umeda, K., Ninomiya, A. (2009): Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults. Geochem. Geophys. Geosyst., 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- 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―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.