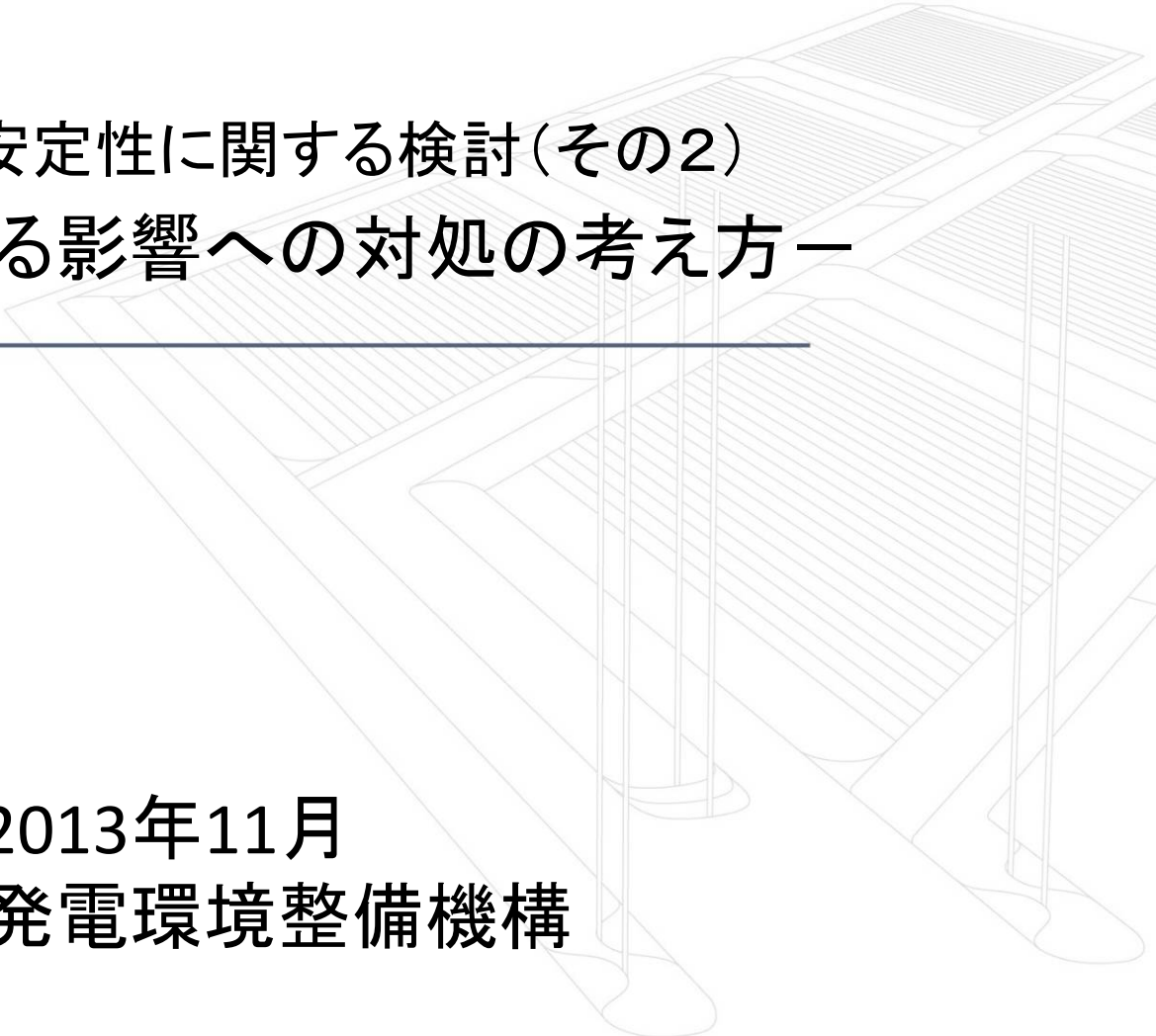


地質環境の長期安定性に関する検討(その2)
—各天然現象による影響への対処の考え方—

2013年11月
原子力発電環境整備機構



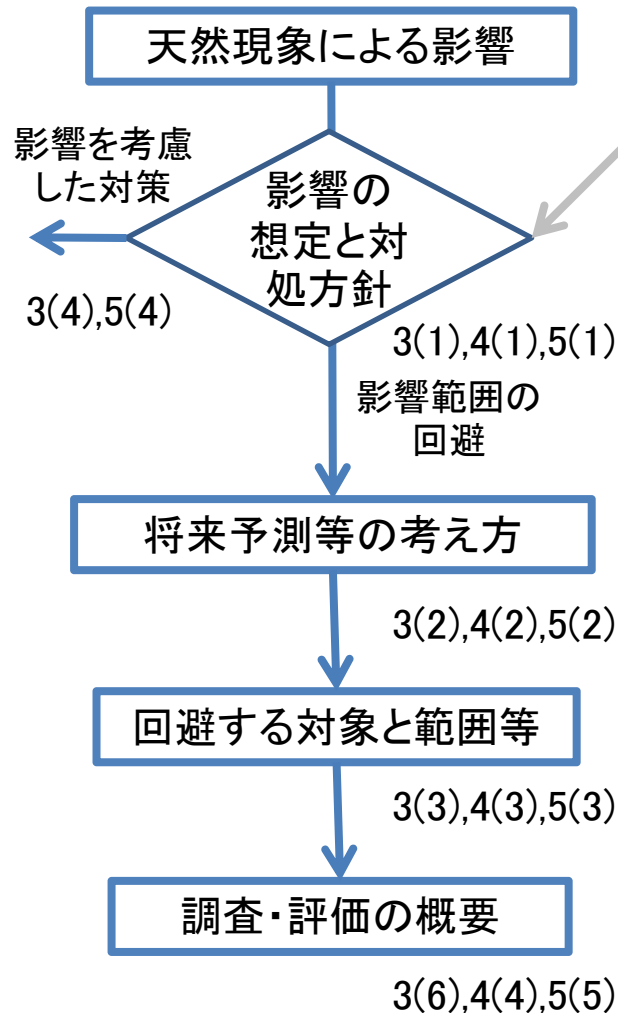


目次

1. 天然現象による影響への対処方針
 - (1) 天然現象による影響への対処方針
 - (2) 天然現象に対する基本的考え方
2. サイト調査・選定の方針
 - (1) 基本方針
 - (2) 概要調査の範囲
3. 地震・断層活動
 - (1) 影響の想定および対処方針
 - (2) 将来予測などの考え方
 - (3) 回避対象や範囲など
 - (4) 地質環境特性変化把握などの対象
 - (5) 地震による地下水状況変化の事例検討
 - (6) 調査・評価の概要
4. 火山・火成活動
 - (1) 影響の想定および対処方針
 - (2) 将来予測などの考え方
 - (3) 回避対象や範囲など
 - (4) 調査・評価の概要
5. 隆起・侵食／気候・海水準変動
 - (1) 影響の想定および対処方針
 - (2) 将来予測などの考え方
 - (3) 回避対象や範囲など
 - (4) 影響程度に応じて処分場深度などを設定する対象
 - (5) 調査・評価の概要

1(1) 天然現象による影響への対処方針

第2次取りまとめに示された基本的考え方に基づき、最近の知見を踏まえて、NUMOは対処方針を具体化している。



影響の想定と対処方針

資料1で説明

天然現象		対処方針
地震・断層活動	断層活動 ・ くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層 ・ 活断層の分岐等の発生の可能性が高い範囲 ・ 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲	影響範囲を回避
	地震動の影響	地質環境特性の変化を把握し、工学的対策やバリア機能を確認
	地震による地下水状況変化	
火山・火成活動	マグマの貫入・噴出	影響範囲を回避
	熱・熱水	影響範囲を回避
隆起・侵食	地表露出	影響範囲を回避
	地表接近	影響の程度に応じて処分場の位置や深度などを設定
気候・海水準変動		



1(2) 天然現象に関する基本的考え方

天然現象に関する基本的考え方	関連する 公開文献情報
■ 地層処分システムに影響を与える天然現象は、大きく、地球の内部エネルギーによるプレート運動や、太陽活動や地球軌道要素などの周期的変化を主な原因とする気候変動のいずれか、あるいはその両方に起因して生じている。 ■ わが国においては地域ごとに異なるものの、地殻変動の傾向や火山活動の場は数十万年～数百万年間にわたって著しい変化が認められていない。したがって、今後、プレートシステムの転換が生じなければ、現在の地殻変動の傾向や火山活動の場が今後も維持されると考えられる。また、プレートシステムに何らかの変化が生じた場合にも、システムの転換には100年以上の期間を要することから、将来十万年程度であれば、現在の地殻変動、火山活動などの傾向が著しく変化するとは考えにくい。 ■ 一方、現在、背弧海盆の拡大や小陸塊、巨大海山の衝突などが生じている可能性を有する地域も一部ある。 ■ 過去数十万年間は、急激な温暖化と穏やかな寒冷化が約十万年周期で繰り返されている。将来も同様の変動が繰り返されると考えられる。	1, 2, 3

(プレート運動および地殻応力場の安定性)

1. 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、今後少なくとも10万年間は現在と大きく変わることはないと考えられる(吉田・高橋, 2004など)。プレートの相対運動の変化に伴う広域応力場の変化は、数十年以上の時間スケールで生じており、200万年前頃までに日本列島のほぼ全域で成立した東西圧縮の広域応力場は、現在まで大きく変わることなく維持されており、今後も維持されると推測される(山崎, 2004など)。
2. 近年のGPS観測技術の発達により、プレートの一部はサブプレートあるいは拡散的な変形帯として区別されるようになり、それらの内部には、将来10万年にわたり恒久的な内部擾乱が極めて起こりにくい数十km以上の規模のブロックが存在する(Cloos, 2009)。

(氷期・間氷期サイクル)

3. 南極およびグリーンランドの氷床コアや、生物化石などの記録から読み取られた酸素・水素同位体比などにより、中期更新世以降の約10万年周期の氷期・間氷期サイクルに対応した、地球規模の気温やCO₂濃度、海水準などの変動がより精緻に把握されている(Lisiecki and Raymo, 2005など)。これらの成果は、気候変動に関する政府間パネルの報告書に取りまとめられ、世界各国で認識が共有されている(Jansen et al., 2007)。



2 サイト調査・選定の方針（1）基本方針

- サイト選定の調査・評価は3段階（文献調査，概要調査および精密調査）で実施する。
 - 広範囲の空間的な特性のばらつき，時間的な不確実性に対処するために段階的に調査・評価する。
 - 段階毎に安全確保の目標達成レベルを判定し，その時点で不確実性が大きく重要度の高い因子を抽出し，次段階の活動に取り組んでいく。

■ 3段階の調査と評価する項目

評価する項目	文献調査	概要調査	精密調査
天然現象（断層活動，火山・火成活動，隆起・侵食）			■ ■ ■ ■ ■
建設可能性（第四紀未固結堆積物）			■ ■ ■ ■ ■
人間侵入（鉱物資源）			■ ■ ■ ■ ■
地質環境特性	■ ■ ■ ■ ■		

- 文献調査段階（概要調査地区選定上）の考慮事項（法定要件に関するもの）
 - 全国一律評価：断層活動，火山・火成活動のみ
 - ✓ 全国的に調査された文献に示されている活断層を回避
 - ✓ 全国的に調査された文献に示された第四紀火山の中心から半径15kmの範囲を回避
 - 個別評価
 - ✓ 断層活動，火山・火成活動，隆起・侵食，第四紀未固結堆積物，鉱物資源

■ 天然現象の特徴に応じた対処の考え方

現象	特徴	対処方針
断層活動，火山・火成活動	急激，1回でも影響，偏在，局所的	影響範囲を避ける
隆起・侵食， 気候・海水準変動	緩慢，累積量による影響，広範囲	一部の変動の著しい地域を回避の上，影響の程度に応じて処分場の位置や深度等を設定

2 サイト調査・選定の方針 (2) 概要調査の範囲

■ 応募区域の面積の目安: 10km²程度

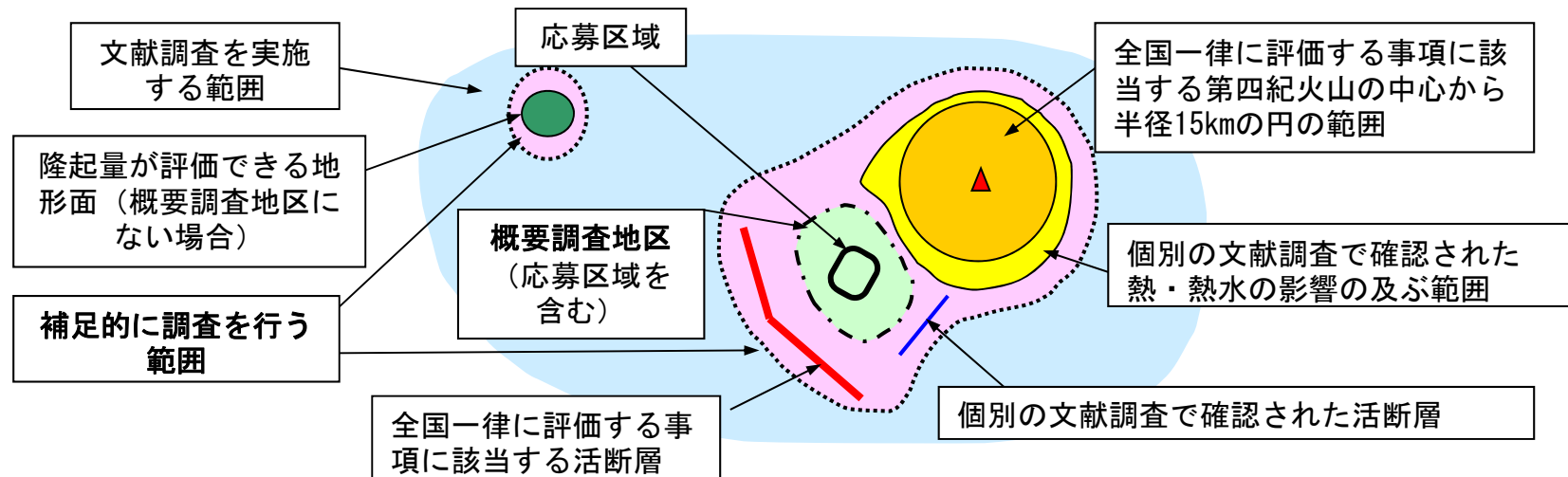
■ 概要調査を実施する範囲: 「概要調査地区」, 「補足的に調査を行う範囲」

■ 概要調査地区の設定

- 応募区域およびその周辺の地域のうち, 「概要調査地区選定上の考慮事項」に適合する範囲の中から設定
- 広域地下水流動系を把握するための水理境界(地下水流動に影響を及ぼす尾根, 河川, 断層など)が含まれること
- 将来の隆起・侵食および海水準変動を考慮に入れた大局的な地下水流動の上流側(涵養域)から下流側(流出域)が含まれること
- 少なくとも処分場の想定設置深度までの情報を取得するための調査が実施可能であること

■ 補足的に調査を行う範囲の設定

- 広域の地質・地質構造の分布や発達過程などを把握するため
- 活断層や第四紀火山などの影響が及ばないことを念のため確認するため
- 広域的な自然現象である隆起・侵食について, 概要調査地区の外に分布する海成段丘や河成段丘などの調査が必要となる場合



3 地震・断層活動 (1) 影響の想定および対処方針

天然現象		影響の想定	対処方針
地震・断層活動	①断層活動による直接的破壊	岩盤の破断・破碎に伴う処分場や廃棄体の直接的破壊が想定される。新たに形成される断層破碎帯を経路として、放射性物質が処分場から漏出し、地表に向けた移行が加速される可能性がある。	影響範囲を回避 <回避対象> A. くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層 B. 活断層の分岐等の発生の可能性が高い範囲 C. 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲
	②上記①以外の断層活動による影響	上記①に該当しない小断層などによる、または上記①の影響範囲の周辺で力学的影響、水理学的影響が考えられるが、影響が小さい。	地質環境特性の変化を把握し、工学的対策やバリア機能確認を実施
	③地震による力学的影響	地下深部の地震動は地表と比べて小さく、処分場は周辺岩盤と一体として動くため、影響は小さいと考えられる。	
	④地震による地下水状況変化	変化したとしてもその期間は地層処分で考慮する超長期に比べると限られたものと考えられる。	

3 地震・断層活動 (2) 将来予測などの考え方

将来予測などの考え方	関連する 公開文献情報
■ 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起因としている。日本列島周辺のプレート運動は過去数十万年程度安定し今後も少なくとも10万年程度はその様式を継続すると考えられるから、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る。	1, 2, 3, 4, 5

(プレート運動および地殻応力場の安定性)

1. 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様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。ただし、逆断層帯の幅の拡大など、地域によって活動性や活動様式が異なるため、地域の特徴を十分に考慮し、検討する必要がある(分冊1:2.3.3項)。
2. 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、今後少なくとも10万年間は現在と大きく変わることはないと考えられる(吉田・高橋, 2004など)。プレートの相対運動の変化によって生じる広域応力場の変化は数十年以上の時間スケールで生じており、200万年前頃までに日本列島のほぼ全域で成立した東西圧縮の広域応力場は、現在まで大きく変わることなく維持されている(山崎, 2004など)。したがって、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(吉田・高橋, 2004など)。
3. 近年のGPS観測技術の発達により、プレートの一部はサブプレートあるいは拡散的な変形帯として区別されるようになり、それらの内部には、将来10万年にわたり恒久的な内部擾乱が極めて起こりにくい数十km以上の規模のブロックが存在する(Cloos, 2009)。
4. 日本列島のほぼ全域にわたる東西圧縮の広域応力場は大局的には安定であるものの、局所的には、プレート運動の大規模な変化がなくとも地殻応力場の時間的・空間的な変化が生じている(Yamaji et al., 2003など)。また、2011年東北地方太平洋沖地震のような大地震に伴う地殻応力場の変化も生じており、このような変化は、地震・断層活動だけでなく、火山・火成活動や隆起・沈降にも影響を及ぼしていると考えられる(鷲谷, 2009など)。
5. 東西圧縮の広域応力場にある北海道から東北日本の日本海東縁部および新潟から近畿地方にかけての日本海側では、東西短縮の変形が集中した帯状の地域(ひずみ集中帯)が形成されている。このような地域では、地殻の変形(ひずみ)の集中に起因して地震・断層活動が引き起こされている(Sagiya et al., 2000など)。

3 地震・断層活動 (3)回避対象や範囲など(1/5)

回避する対象	関連する 公開文献情報
「①断層活動による直接的破壊」として、以下の対象を回避する。 A. くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層 活断層: 過去数十万年以降くり返し活動し、将来も活動する可能性のある断層 くり返し活動し、変位の規模が大きい: 地表に明瞭な痕跡がある等により過去の調査で存在が確認されているものや、地表に痕跡が無くても、ボーリング調査や物理探査などの現地調査により確認されるもの	5, 6
➤ 全国的に調査された文献に示されている活断層(文献調査段階の全国一律評価) ✓ 活断層詳細デジタルマップ(中田, 今泉, 2002)付図, 200万分の1日本列島活断層図 ✓ 日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史(徳山ほか, 2001)付図, 日本周辺海域の第四紀地質構造図	9
➤ 全国一律に評価する事項で用いた以外の文献によって認められる活断層 個別地区を対象とした文献の詳細検討により、分布が確認または推定された活断層 ➤ 現地調査により、くり返し活動し、変位の規模が大きいと認められる活断層	7, 8, 9, 10

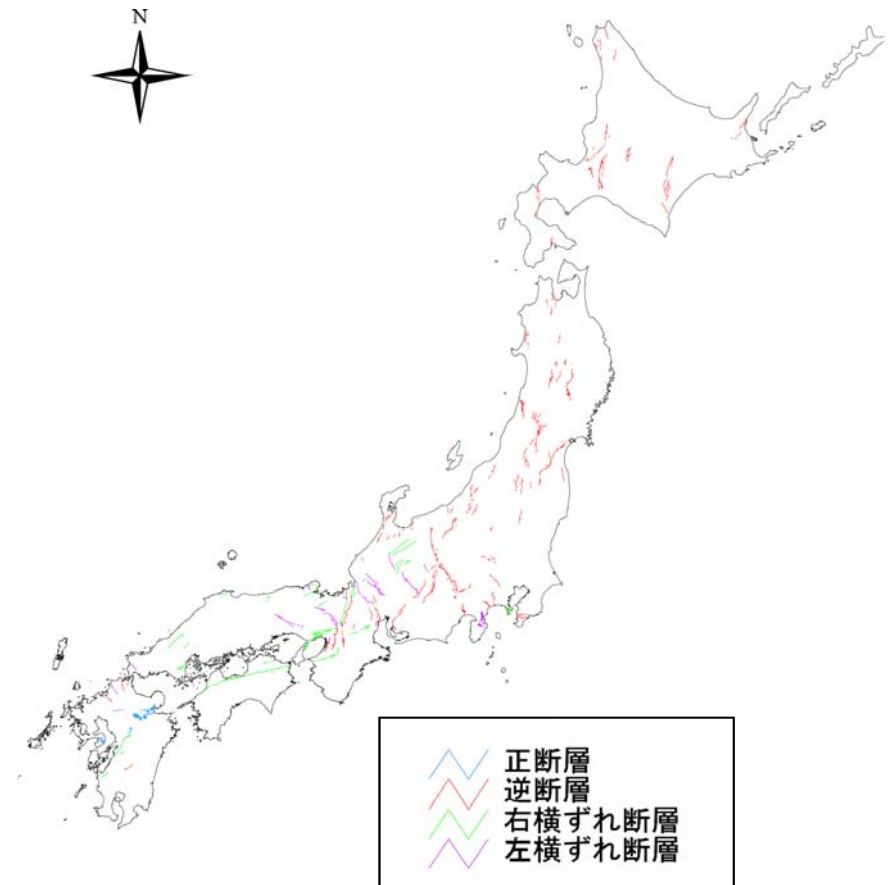
(現在までの断層の繰り返し活動および活動様式)

- 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)。その活動性や活動様式は、地質構造の発達史や地殻物性の違いなどを反映して地域によって異なっている。
- 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おり、その中でとくに主要な活断層帯や確実度の高い活断層については、繰り返し活動の平均間隔や開始時期などが、その地域的な特徴とともに評価されている(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ではなく、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)。

3 地震・断層活動 (3)回避対象や範囲など(2/5)

(活断層が不明瞭な地域における地震・断層活動)

8. わが国における主な活断層の分布はおおむね把握されているが、とくに広い沖積平野など伏在活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:要約)。
9. 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、各種の活断層図の拡充が図られており(中田・今泉, 2002など)、主要な110の活断層帯については、その位置や形状などが明らかにされている(地震調査研究推進本部ホームページ)。しかしながら、活断層として認定されていない断層の存在や、活断層の見落としの可能性も指摘されている(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011など)。
10. 近年、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(地震調査研究推進本部 地震調査委員会, 2000など)。このよう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、震源断層が必ずしも特定できていないものの、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(杉山ほか, 2005など)。また、変動地形学的調査や既存の物理探査結果の再解釈などを通じて、活断層の分布あるいは分布の可能性を指摘している事例もある(渡辺ほか, 2008など)。



活断層タイプ別分布図

(分冊1, 図2.3-5)

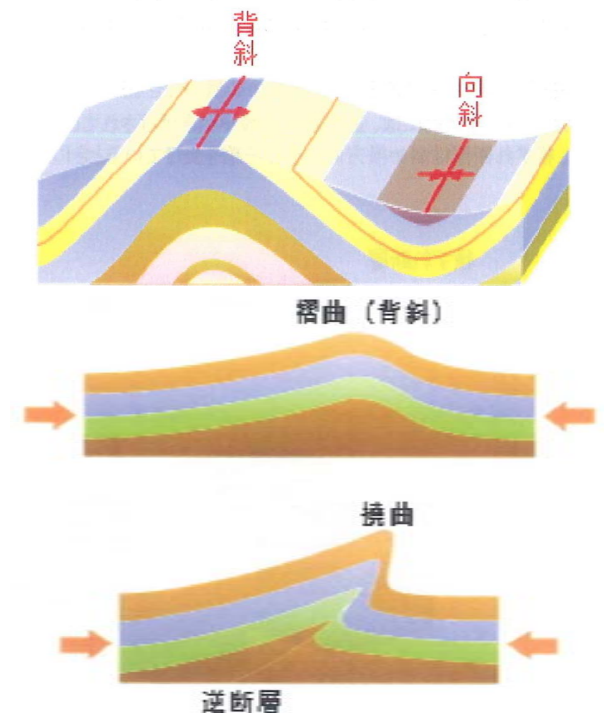
(200万分の1活断層図編纂ワーキンググループ, 1999)

3 地震・断層活動 (3)回避対象や範囲など(3/5)

回避する対象	関連する 公開文献情報
B. 活断層の分岐等の発生の可能性が高い範囲 くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層以外でも、活断層の拡大・分岐、伸展、地質断層の再活動の発生が考えられ、廃棄体等の直接的破壊をもたらす可能性のあるものは回避する。	11, 12, 13, 14
C. 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲 周辺の地層を著しく変形させる活褶曲や活撓曲で、廃棄体等の直接的破壊をもたらす可能性があるものは回避する。	

(将来の断層の新生および再活動)

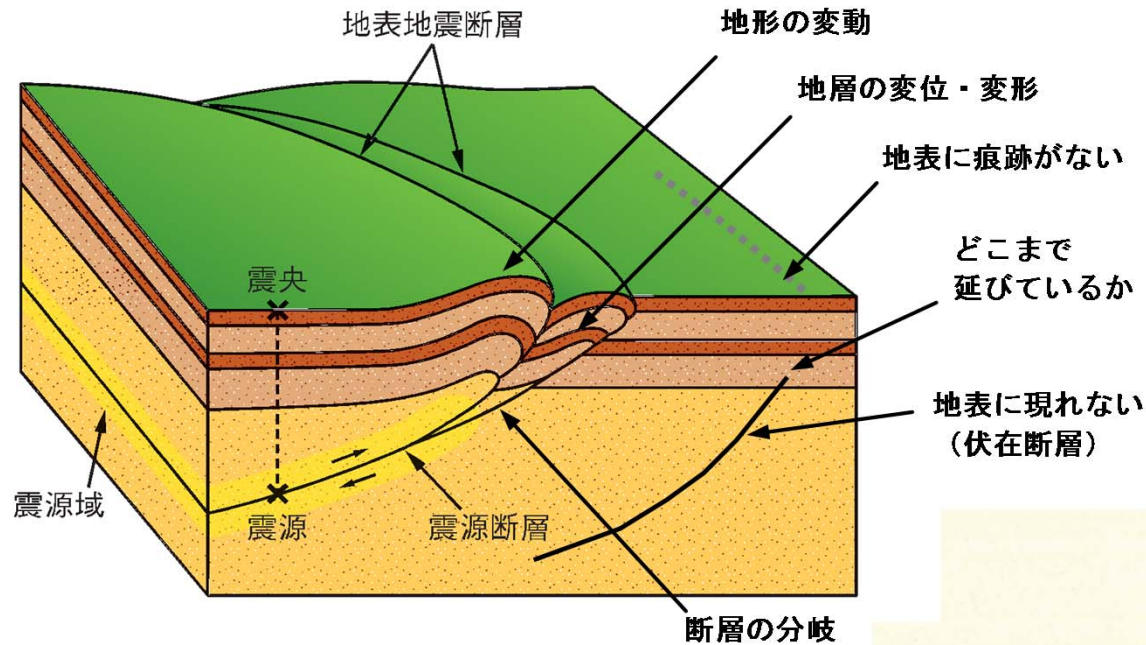
11. 活断層が現存しない地域において、地質環境に重大な影響を与える断層が、将来新たに発生する可能性は小さいと考えられる。しかし、水理学的、地質学的に特異で、過去に群発地震が発生したような地域や、規模の大きい活断層帯の延長にある主要な非活断層帯については、注意が必要である(分冊1:2.3.1項)。
12. 地層中の古い断層は弱面となり繰り返し活動する。堆積岩では、新しい断層は、局所的な応力場の変化などに起因して再活動した基盤岩の断層上に位置することが多い。一方、結晶質岩では、新たな断層は、活断層から離れた場所に生じることはほとんど無く、既存の断層の活動に伴う分岐あるいは進展により生じたものである(Cloos, 2009)。
13. したがって、地下に多数存在する活断層とは認定されていない断層は、その活動性が必ずしも明らかになっていなくとも、地殻応力場の変化などに起因して再活動する可能性を否定することはできないと考えられる(山崎, 2004)。また、複数の断層が直線状に(並行あるいは雁行して)配列するような場合は、断層活動の連動により活動の場が拡大することがある(岡田, 2006)。
14. 活断層とは認定されていない断層についても、活断層の近傍に位置し活断層と同じ運動様式を有する場合や、活断層の延長上に位置する場合などは、現在の地殻応力場においても再活動する可能性があると考えられる(梅田ほか, 2010など)。



地層の褶曲・撓曲のイメージ図

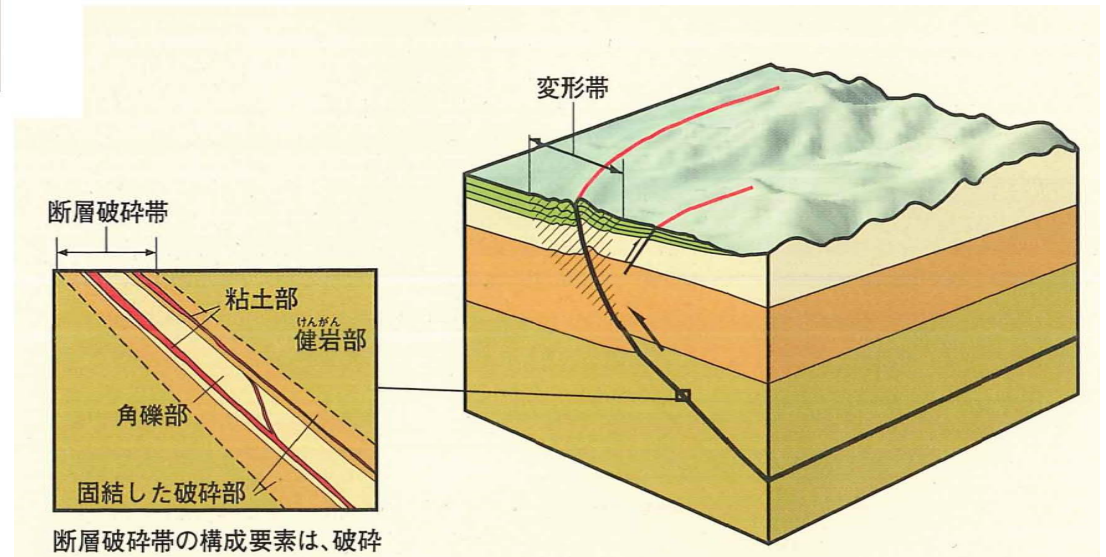


3 地震・断層活動 (3)回避対象や範囲など(4/5)



地震を起こした地下の断層を「震源断層」、そのときの断層運動に伴って地表に達した食い違いを「地表地震断層（地震断層）」と呼んで区別します。

活断層の分岐のイメージ図



断層破碎帯の構成要素は、破碎

変形帯のイメージ図

3 地震・断層活動 (3)回避対象や範囲など(5／5)

回避する範囲など	関連する 公開文献情報
● 活断層について回避する範囲:断層破砕帯およびその外側の変形帯に含まれる範囲 断層の破砕帯幅, 累積変位量, 長さにはある関係が成り立つものと考えられ, 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が及ぶ範囲を想定することは可能と考えられる。(範囲の例) 断層破砕帯:数百m程度(下記文献14) 変形帯:断層から約1km以内(土木学会, 地下環境部会報告書) ● 活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲の例 逆断層帯で盆地側へ向かって数km程度拡大, 10万年に増加する長さは最大でも数km程度 幅方向5km伸長方向10km以内に隣接した活断層をグルーピングした「活断層帯」 ● 活褶曲・活撓曲:報告例がほとんどないことから個別に検討する。	15, 16, 17, 18, 19
	分冊1, 2, 3

(断層活動による影響の範囲)

15. 活断層破砕帯の幅は数mから数百m程度。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, 大きな活断層の近傍でも数km程度以内(分冊1:2.3.3項)。
16. 個々の地域については, 近傍の活断層を詳細に調査し, その影響範囲を検討し, 伏在活断層の有無や小規模な活断層の分布などを調べることが必要(分冊1:2.3.3項)。

(断層活動による力学的影響)

17. 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)。
18. 既存の断層を事例とした詳細な構造地質学的調査などを通じて, 断層活動による破砕帯の形成過程やその規制要因などが把握されている(長友・吉田, 2009など)。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など)。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(Scholz, 2002)により推定することが可能である。

(断層活動による熱的・水理学的影響)

- 19 一方, 断層活動に伴う摩擦熱や熱水活動による熱的影響, および流体の発生や循環による水理学的な影響についても, 大規模な活断層帯を対象とした事例調査から, 断層破砕帯内にとどまることが示されている(谷ほか, 2001など)。また, 断層破砕帯の透水性に関しては, 断層活動時の水みちの形成やその後の閉塞などにより変化すると考えられる(Lin et al., 2007)。¹²

3 地震・断層活動 (4)地質環境特性変化把握などの対象(1/2)

地質環境特性の変化を把握し、工学的対策やバリア機能確認を実施する対象	関連する 公開文献情報
■「③地震による力学的影響」 地下深部の地震動は地表と比べて小さく、処分場は周辺岩盤と一体として動くため、影響は小さいと考えられる。耐震設計などの工学的対策や地震時のバリア機能確認などを行う。	20, 21, 22
■「④地震による地下水状況の変化」 変化したとしてもその期間は地層処分で考慮する超長期に比べると限られたものと考えられる。	23, 24, 25

(地下深部における地震動の影響)

20. 地下数百m以深では一般に地震動による影響は小さい(分冊1:2.3.3項)。
21. 全国規模での地震観測網の整備が進み、地表および地下深部における地震動に関する観測データの蓄積が図られている(藤川ほか, 2012)。
22. 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、地震動の影響が大規模な地下施設などに損傷を与えることはないということが確認されている(吉田・大藤, 2012)。同様の事例として、1976年唐山地震(Mw7.5)では、地表では85%以上の建物の崩壊により約25万人の死者が出たものの、その地下にある最大深度1000mの炭鉱では、施設への被害は地表から地下20mまでであり、1万人の坑内労働者は地震にほとんど気付かなかったことが報告されている(Huixian, et al., 2002)。

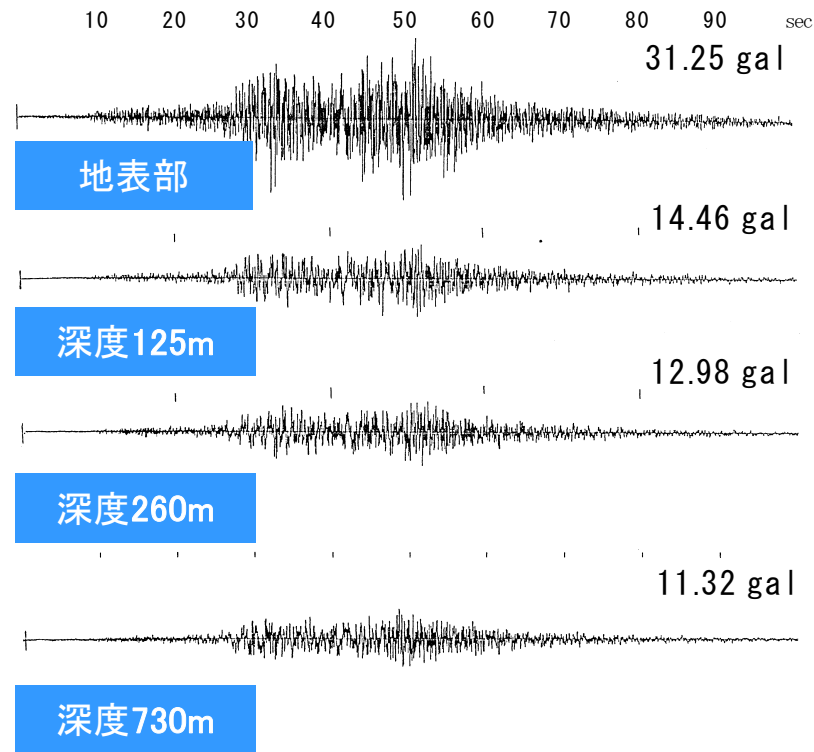
(地震による地下水環境の変化)

23. 地震前後の地下水流動や水質の変化は小さい。また、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(分冊1:2.3.2項)。
24. 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。
25. 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(大槻, 2012など)。



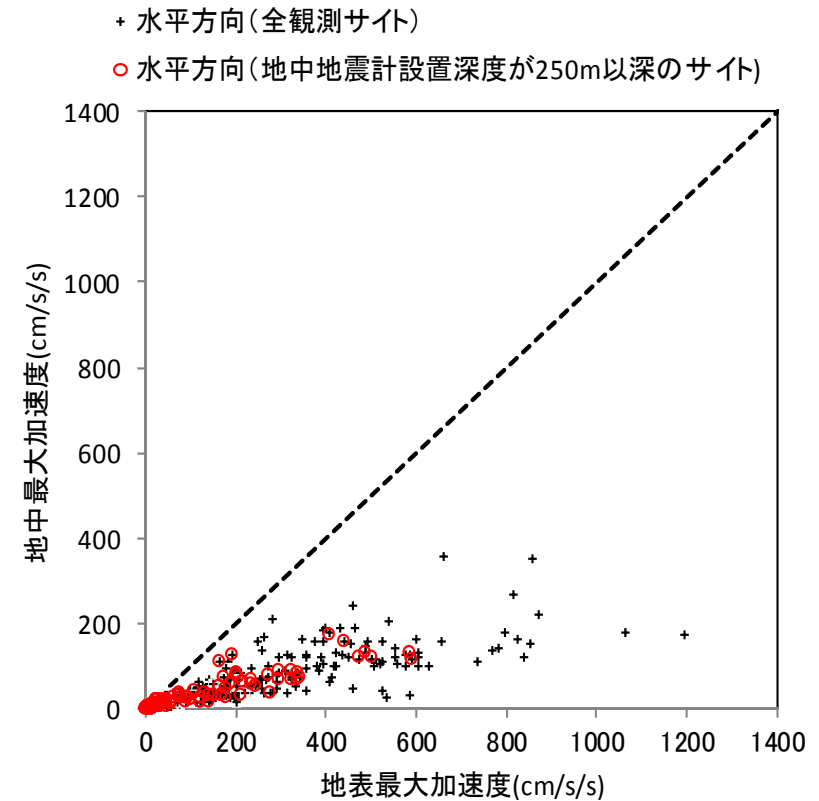
(5)地震による地下水状況変化の事例検討

3 地震・断層活動 (4)地質環境特性変化把握などの対象(2/2)



釜石鉱山での地震観測例(1994年 三陸
はるか沖地震:M7.5, 震央距離 212.6 km)

(原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会
第二種廃棄物埋設分科会, 第3回資料, 1999)

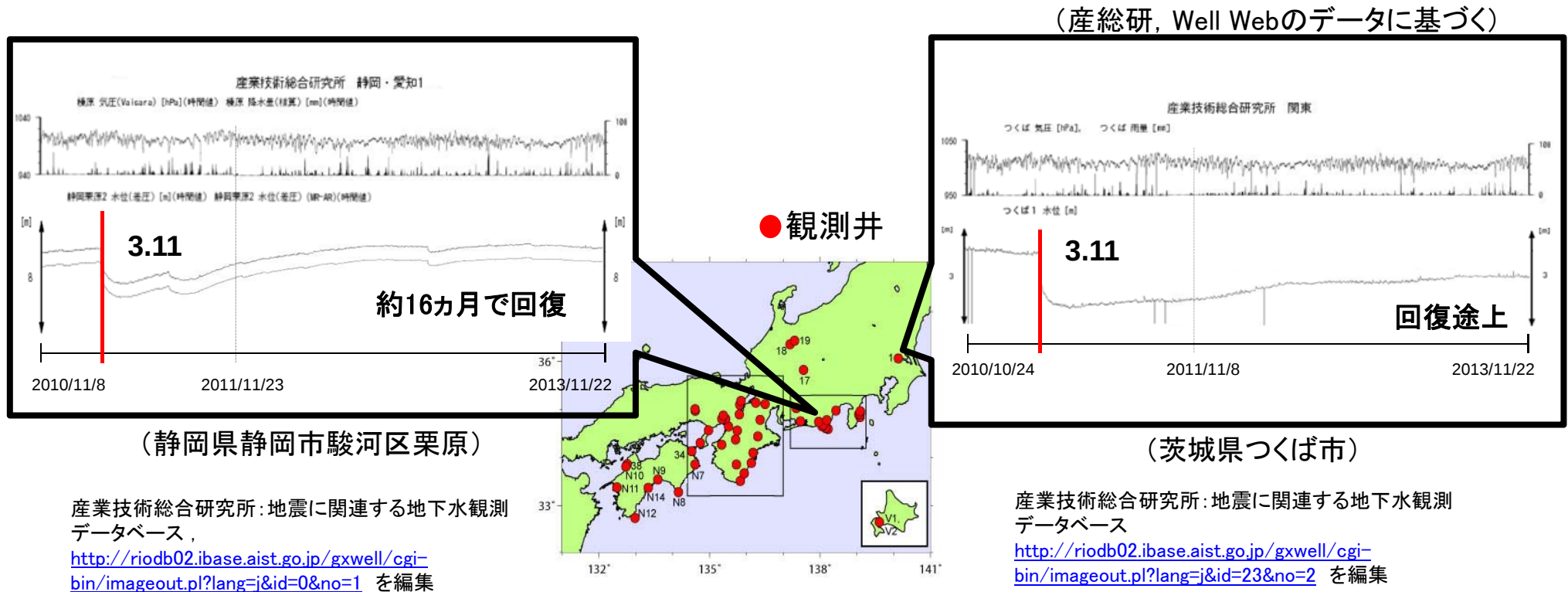


2011年東北地方太平洋沖地震における地表および
地中の最大加速度の関係(藤川ほか, 2012)

2地震・断層活動(5)地震による地下水状況変化の事例検討(1/3)

■東北地方太平洋沖地震後の全国的な地下水位の変化

- 産総研WellWebにある観測データ(約70)のうち、26データに関して、地震後に水位の変化が認められる。水位変化量は±3m以内であった。多くの例で2～16か月後には回復。
- つくば市では、18ヶ月程度経過後においても水位は回復途上にある。ただし水位変化は1m程度。

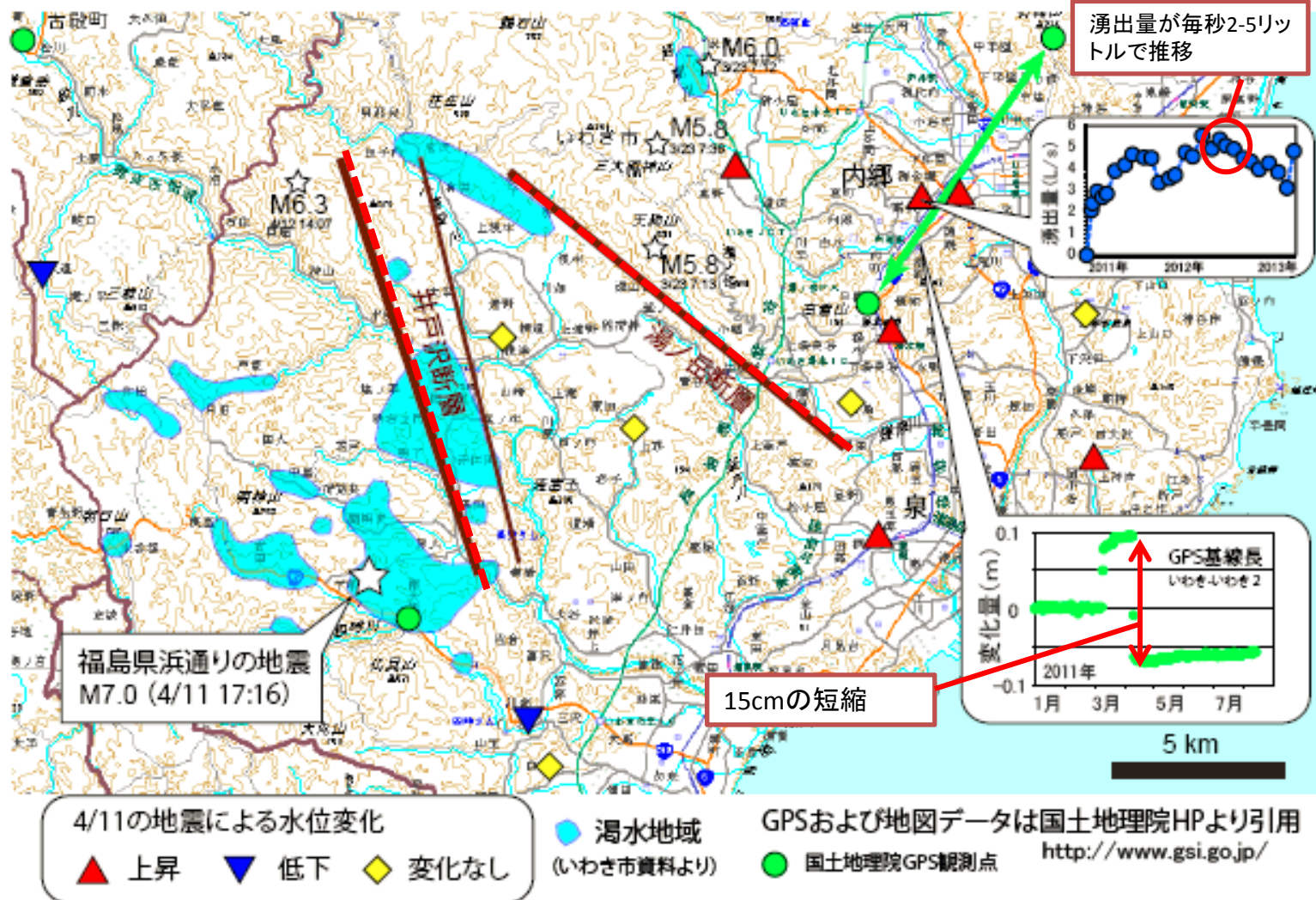


地下水観測が継続して行われている観測井のうち、東北地方太平洋沖地震の前後で水位変化があった茨城県つくば市および静岡県静岡市栗原の例

3 地震・断層活動 (5)地震による地下水状況変化の事例検討(2/3)

■ 2011年4月11日の福島県浜通りの地震に伴う地下水状況の変化

2011年4月11日福島県浜通りの地震(M7.0)に伴う温泉変化の分布図



- 3/11: 地殻は東西方向に伸長したため、**地下水位は低下**
- 4/11: 湯ノ岳断層を震源として、M7の地震が発生
- 断層の西側あるいは南側では**地下水位が低下**、北側あるいは東側で**水位は上昇**
- 上昇域の一部(アパートの床下)より、約27℃の**地下水が湧出**。現在も毎秒2~5リットルで推移
- 断層東側ではGPSによる測量により**15cmの縮み**が確認
- また、いわき市の山側では、地震の数ヵ月後から深刻な**湧水が発生**

3 地震・断層活動 (5)地震による地下水状況変化の事例検討(3/3)

■ 東北地方太平洋沖地震後の全国的な地下水位の変化

- 従来の想定期間より長いものの、比較的短期間で収束しており、変化の程度は数m程度である。
- 変化の期間は地層処分で考慮する超長期と較べると十分に短い。
- 地下水位は地下深部の水圧に影響する。地下水流速は水圧の勾配に比例する。局部的で数m程度の水位変化があっても、想定する物質移行距離全体(数百m)においては水圧勾配の変化は小さい。

■ 2011年4月11日の福島県浜通りの地震: 現在も継続している, いわき市内郷地区の住宅地にある, アパートの床下における地表への地下水の湧出

- 地下水の起源などについては現在も特定されていない。
- 地表への湧出は, 想定している移行経路を変える可能性がある。
- 以下のような可能性について考察するとともに, 引き続き情報の収集に努める。
 - 表層付近の地下水挙動変化が原因である場合
 - 地下深部の地下水挙動変化が原因である場合
 - 過去の炭鉱開発による人為的な擾乱が原因である場合

3 地震・断層活動 (6)調査・評価の概要(1/3)

文献調査の調査・評価の流れ

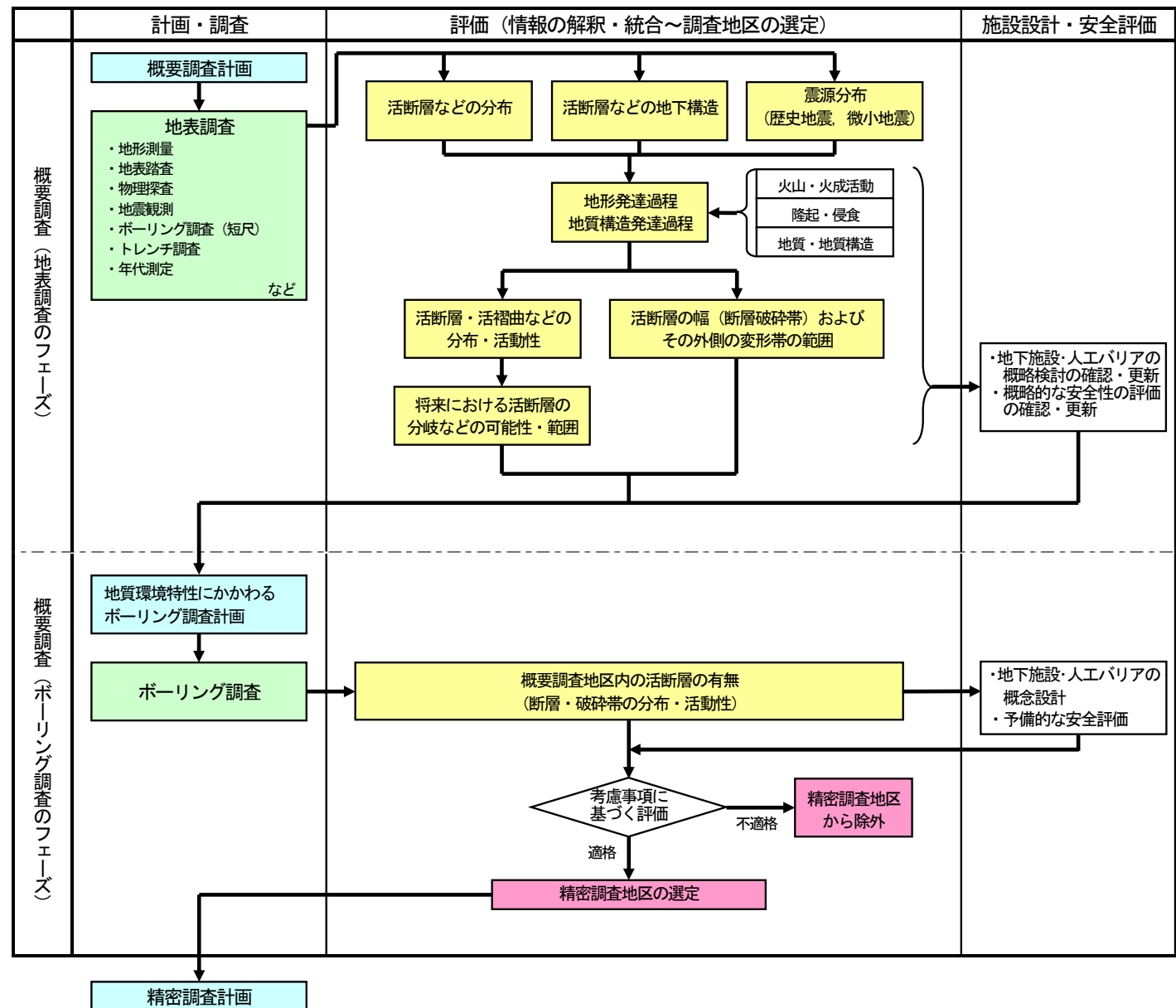
- 評価は右図の地表踏査のフェーズと同じ
- 調査は文献調査



概要調査の調査・評価の流れ

1. 地表踏査のフェーズ
2. ボーリング調査のフェーズ

右図: 検討例



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価



3 地震・断層活動 (6)調査・評価の概要(2/3)

概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法(陸域)

調査手法		取得される情報	検討内容
地質学的手法	地表踏査	地質層序, 地質構造, 微地形, 断層の性状など	・活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。
	ボーリング調査	地質層序(地質柱状図), 地質構造など	・活断層・活褶曲・活撓曲の有無・分布・活動性などを検討する。
	トレンチ調査	断層の性状, 断層周辺の地層の変形状況など	・活断層の有無・分布・活動性を検討する。
	年代測定	第四系の堆積年代, 地形面の形成年代, 火山岩の形成年代など	・活断層・活褶曲・活撓曲の活動性を検討する。
地球物理学的手法	反射法地震探査	二次元(三次元)地層境界などの反射面構造(反射断面)	・反射断面に基づき, 断層・褶曲の有無・位置・形状, 活動性を推定する。
	屈折法地震探査	二次元(三次元)地震波速度構造	・地震波速度構造に基づき, 断層・褶曲の有無・位置を推定する。
	電磁探査(MT法, CSAMT法など)	二次元(三次元)比抵抗構造	・比抵抗構造に基づき, 断層の有無・位置・形状を推定する。
	重力探査	重力異常分布, 密度構造	・局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。
測地学的手法	GPS観測	基準点変動量(水平・鉛直)	・地殻変動と断層活動の関係を検討する。
地震学的手法	微小地震観測	微小地震の震源分布	・微小地震の震源分布に基づき震源断層を推定する。 ・微小地震の震源分布と活断層の分布, 地質構造などの関係から, 活断層の形状などについて検討する。
地球化学的手法	地化学調査(Ra, He, CO ₂ など)	土壌ガス(Ra, He, CO ₂ など)の濃度分布	・土壌ガスの濃度分布に基づき, 断層・破碎帯の有無・位置を推定する。



3 地震・断層活動 (6)調査・評価の概要(3／3)

概要調査における地震・断層活動にかかわる主な調査手法(海域)

調査手法		取得される情報	検討内容
地形学的手法	海底地形測量(音響測深, サイドスキャンソナーなど)	変動地形および変動地形の可能性のある地形の分布	・変動地形やその可能性がある地形を抽出する。
地質学的手法	海底試料採取	地質情報, 層序	・音波探査や年代測定などの結果と併せて, 断層・褶曲の位置・活動性を推定する。
	ボーリング調査	地質層序(地質柱状図), 地質構造など	・音波探査や年代測定などの結果と併せて, 断層・褶曲の位置・活動性を推定する。
	年代測定	第四系の堆積年代, 地形面の形成年代, 火山岩の形成年代など	・変位・変形に関与している地層, 関与していない地層の年代を把握する。
地球物理学的手法	音波探査	二次元(三次元)地層境界などの反射面構造(反射断面)	・反射断面に基づき, 断層・褶曲の有無・位置・形状, 活動性を推定する。
	電磁探査(MT法, CSAMT法)	二次元(三次元)比抵抗構造	・地下構造から断層の有無・位置・形状を推定する。
	重力探査	重力異常分布, 密度構造	・局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ断層位置・規模を推定する。

4 火山・火成活動 (1) 影響の想定および対処方針

天然現象		影響の想定	対処方針
火山・火成活動	① マグマの貫入・噴出による直接的破壊	マグマの貫入・噴出による処分場の直接的破壊が想定される。放射性物質の地表への放出の可能性があると考えられる。	影響範囲を回避 <回避対象> ● 最近の地質時代におけるマグマの貫入・噴出の痕跡の周辺 ● 将来、マグマの貫入・噴出が想定される場所
	② 熱・熱水による影響・	熱の放出による周辺岩盤の温度の上昇や変質などの変化、熱水対流系の生成やそれに伴う放射性物質の移行促進、地下水への熱水・火山ガスなど混入による地下水流動および地化学条件の変化が想定される。地層処分システムの性能低下などに大きな影響を及ぼす可能性がある。	影響範囲を回避 <回避対象> 火山、マグマ、高温岩体等に起因する著しい熱および熱水・ガスの影響が及ぶと考えられる場所
	③ 上記①②以外の火山・火成活動による影響	上記①②の影響範囲の周辺で熱的、化学的、水理学、力学的影響などが考えられるが、影響が小さい。	地質環境特性の変化を把握し、工学的対策やバリア機能確認を実施

4 火山・火成活動 (2) 将来予測などの考え方(1/2)

将来予測などの考え方	関連する 公開文献情報
■ 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火山が発生する(火山フロント)ことから、プレート運動が大きく変化しない限り、火山フロントより太平洋側では火山が発生しないと考えられる。火山フロントより日本海側では、火山活動が想定される場所と想定されない場所に分かれる。	2, 3, 4

(島弧・火山列スケールでの火山活動の時空間的变化)

2. 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)。島弧・火山列(数百~数十km)スケールでは、東北日本における火山フロントは後期中新世以降、太平洋プレートの沈み込みとともに徐々に日本海側に移動する傾向にある(Honda and Yoshida, 2005)。
3. 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)。
4. 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)。

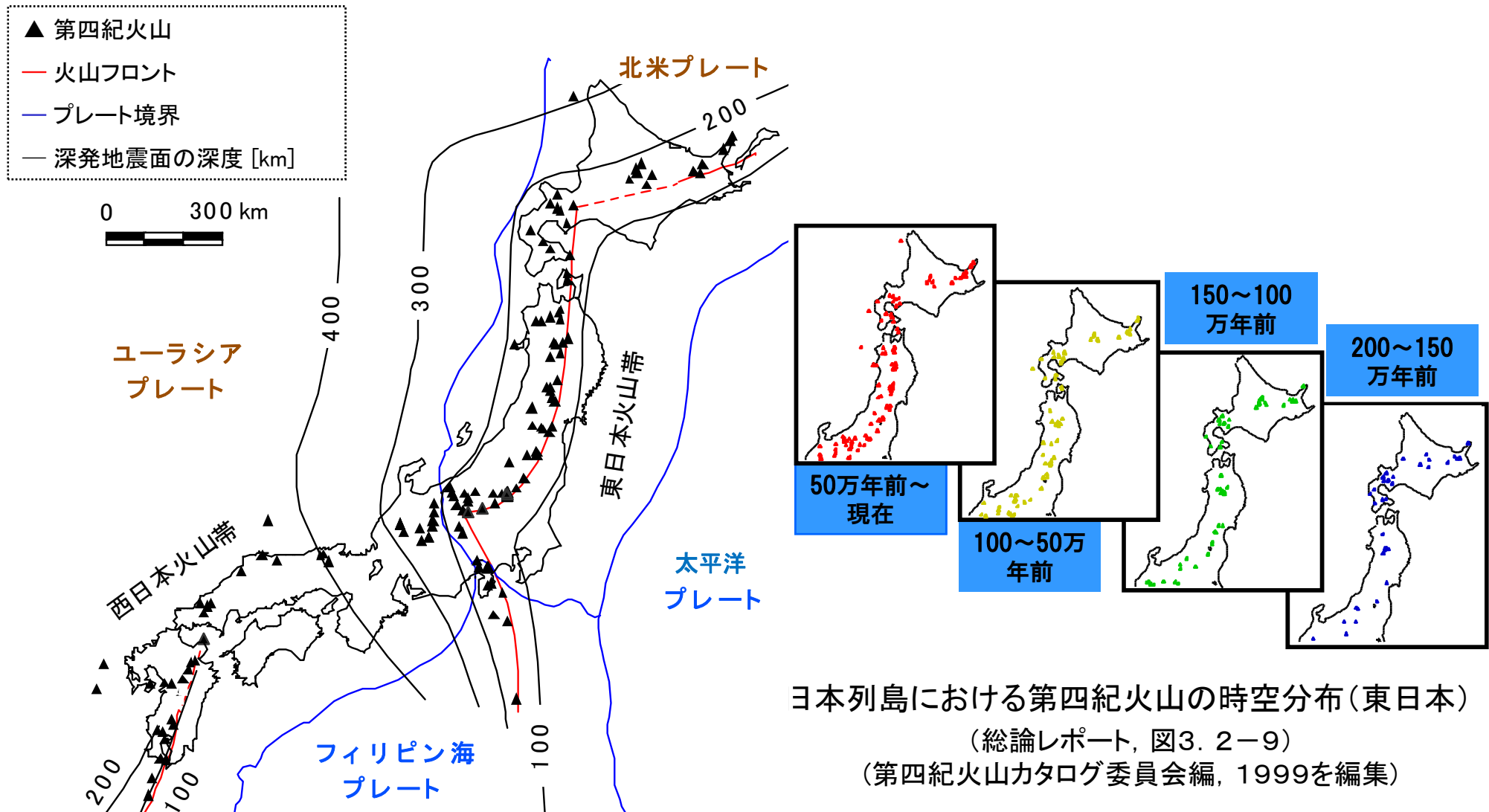
(過去の火山活動)

1. 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)

(火山体スケールでの火山活動の時空間的变化)

5. 火山体(数km)スケールでは、地殻応力場の変化によるマグマの移動などに伴う火山活動域の変動は局所的であり、その範囲も限定される(中田・田中, 2001など)。

4 火山・火成活動 (2) 将来予測などの考え方(2/2)



日本列島における第四紀火山の時空分布(東日本)

(総論レポート, 図3. 2-9)

(第四紀火山カタログ委員会編, 1999を編集)

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)

4 火山・火成活動 (3)回避対象や範囲など(1/4)

回避する対象や範囲など	関連する 公開文献情報
■「①マグマの貫入・噴出による直接的破壊」として以下を回避する。 ● 最近の地質時代におけるマグマの貫入・噴出の痕跡の周辺 ➢ 全国的に調査された文献に示された第四紀火山の中心から半径15kmの範囲(文献調査段階の全国一律評価) - 将来数万年にわたるマグマの活動範囲の拡がりの可能性を考慮して回避する。 ➢ 上記の円の外側の地域でも、将来数万年にわたりマグマの地殻への貫入や地表への噴出が明確に判断される地域	1～4, 5
● 将来、マグマの貫入・噴出が想定される場所 ➢ 地下にマグマだまりが存在すると考えられる場所 ➢ 物理探査等の調査結果により将来マグマが発生すると考えられる場所	6, 7, 8, 9

(将来の火山活動)

6. 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)。

(島弧・火山列スケールでの将来の火山活動評価)

7. わが国における火山活動の場は、今後、少なくとも100万年程度は安定であると考えられる(産業技術総合研究所, 2012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)。

(マグマ供給系の時空間的变化)

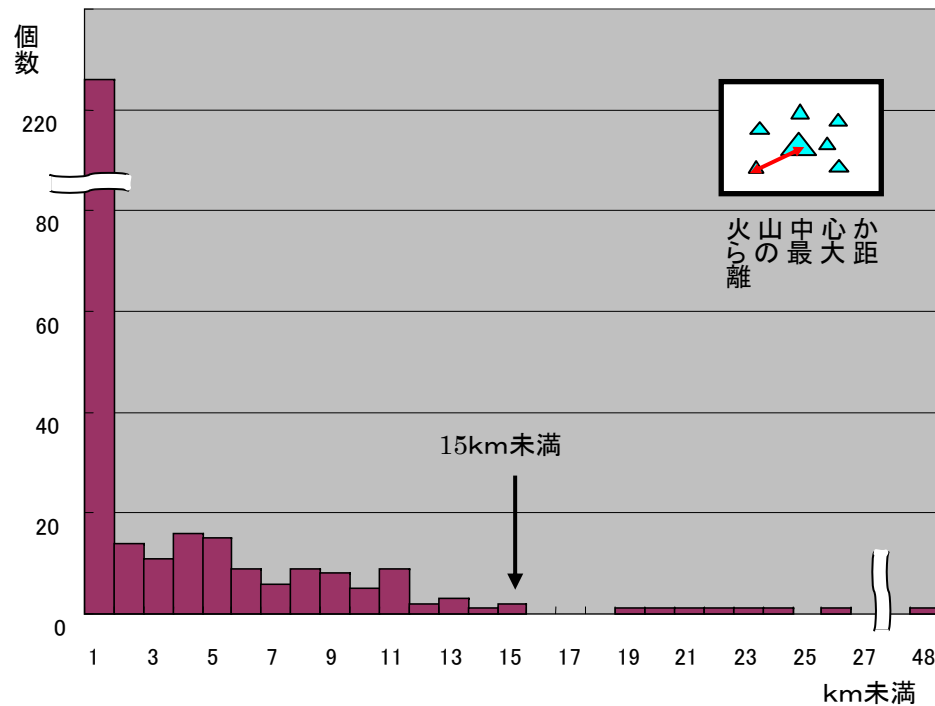
8. また、地下深部には第四紀火山の活動に関連するマグマ供給系が確認されており(Tsumura et al., 2000など)、その長期安定性の観点からも、現在認められる火山活動の偏在性は今後10年以上にわたって継続すると考えられる(高橋・Martin, 2004)。
9. したがって、火山フロントの前弧域では、今後も火山活動が発生する可能性は極めて小さいものの、火山フロントの背弧域では、新たな火山活動の発生可能性に関する不確実性が残されている(高橋・Martin, 2004)。



4 火山・火成活動 (3)回避対象や範囲など(2/4)

＜全国一律評価の「第四紀火山中心から半径15kmの円内」の根拠＞

第四紀火山の位置を中心とする半径15kmの範囲を超えて第四紀個別火山体が分布する第四紀火山



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

火山番号	第四紀火山名	第四紀個別火山体数	第四紀火山の位置から第四紀個別火山体までの最大距離(km)	備考
171.5	南スミスカルデラ／スミスリフト	2	47.6	陥没カルデラー海嶺状火山 伊豆ー小笠原弧背後のリフト帯の断層に沿う海嶺状の火山であり、他の第四紀火山と形成の場が異なる
39	青野山	13	23.6	単成火山群
13	始良・桜島	10	23.0	陥没カルデラー成層火山
177	硫黄島	2	22.9	陥没カルデラー成層火山
18.75	口之津層群	2	21.2	溶岩流ー溶岩ドーム
15	加久藤カルデラ	4	20.1	陥没カルデラ
12	“阿多カルデラ” 阿多火砕流	3	19.3	陥没カルデラ
43.5	横田	5	18.8	単成火山群

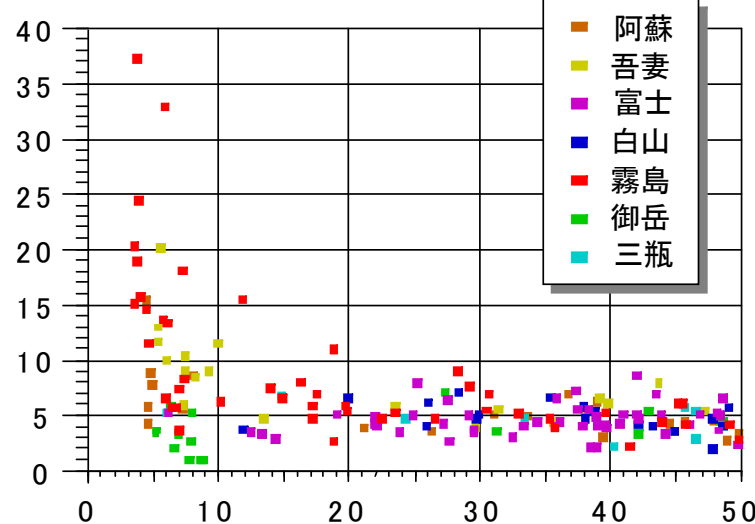
第四紀火山の位置、火山番号および第四紀火山名は、
第四紀火山カタログ委員会編(1999)による

4 火山・火成活動 (3)回避対象や範囲など(3/4)

回避する対象や範囲など	関連する 公開文献情報
■「②熱・熱水による影響範囲」として以下を回避する。 ● 火山, マグマ, 高温岩体等に起因する著しい熱および熱水・ガスの影響が及ぶと考えられる場所	8, 9, 10~12
● 地下水流動などの変化の一つとして, 非火山地帯における温泉等による著しい熱・熱水の影響が想定される場所	13, 14

火山からの距離と
温度, 水質

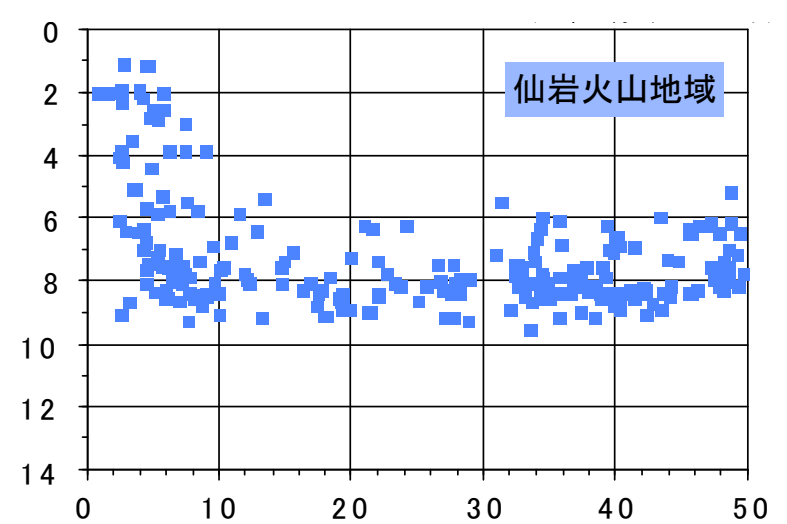
地温勾配 [$^{\circ}\text{C}/100\text{m}$]



距離[km] (総論レポート, 図3.2-12,13)
(小松, 梅田 1999)

概ね噴出中心から10~20km程度でその地域のバックグラウンド程度の値

pH



距離[km]

火山から10km以内に, 自然界における実質的な酸性領域であるpH4. 8未満の温泉の多くが存在

4 火山・火成活動 (3)回避対象や範囲など(4／4)

(熱・熱水)

10. 火山の地下に存在する熱源(マグマ溜まりなど)によって、火山周辺には熱的、水理学的、地球化学的影響などが認められる場合がある。これらの影響は一般に火山の噴出中心から離れるにしたがって小さくなる傾向があるが、その程度は火山によって異なる。これらの原因として熱源の大きさや深度、基盤の地質構造の違いが考えられる。また、化学的な影響を支配する主な要因として、火山から放出される熱エネルギーがあげられる(分冊1:2.4.3項)。

(火山・火成活動に伴う熱的な影響)

11. 地熱活動は火山活動と密接に関連しており、その活動域は火山活動と同様に偏在性を有している(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011など)。したがって、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ものの(八幡, 2002)、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(産業技術総合研究所, 2012など)。

(火山・火成活動に伴う水理学的・地球化学的な影響)

12. 一方、マグマや高温岩体などの地下水環境への影響については、火山の中心から離れるほど小さくなる傾向が認められるものの(馬原ほか, 2000など)、数十kmにまで及ぶ事例も認められる(産業技術総合研究所, 2012など)。

(非火山地域における熱水活動)

13. 第2次取りまとめ以降、常磐地域、能登半島、新潟平野、紀伊半島などの非火山地域における熱水活動に関する公開文献情報が蓄積されている(田中ほか, 2004など)。
14. このような熱水活動には地殻熱流量、基盤岩に由来する放射性元素の崩壊熱、スラブから脱水した高温流体、断層周辺の深部熱水などが関与しており、マグマの存在が関与する可能性がないことが示されている(原子力安全基盤機構, 2007)。

4 火山・火成活動 (4) 調査・評価の概要(1/4)

マグマの貫入・噴出

文献調査の調査・評価の流れ

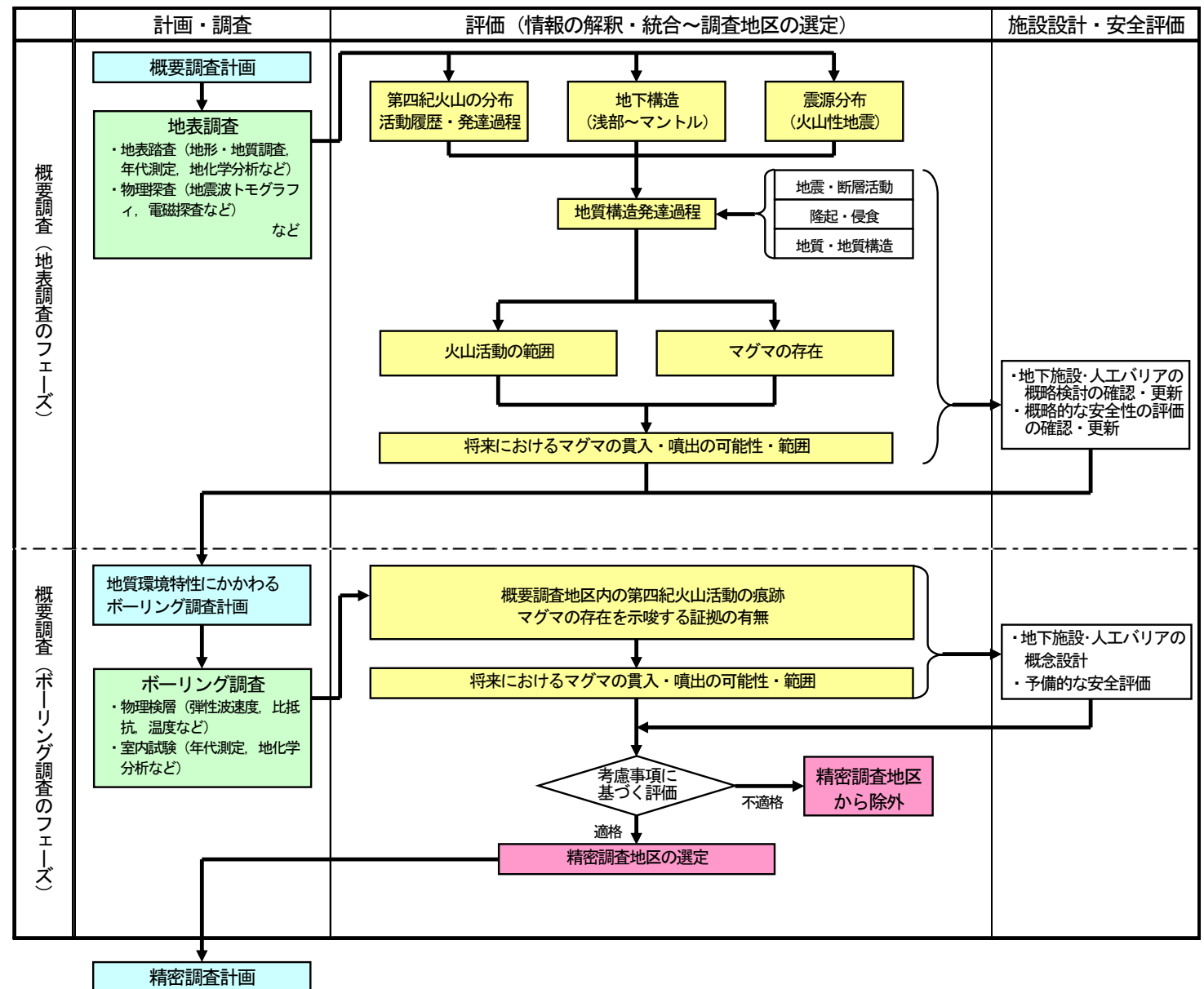
- 評価は右図の地表踏査のフェーズと同じ
- 調査は文献調査



概要調査の調査・評価の流れ

1. 地表踏査のフェーズ
2. ボーリング調査のフェーズ

右図：検討例



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価



4 火山・火成活動 (4)調査・評価の概要(2/4)

概要調査における火山・火成活動(マグマの貫入・噴出)にかかわる主な調査手法

調査手法		取得される情報	検討内容
地質学的手法	地表踏査	火山岩類(噴出岩類, 貫入岩類)の岩相・分布・層序, 火口・岩脈の分布・配列, 潜在する火山活動の兆候, 火山活動と関連する地質・地質構造	・年代・化学組成のデータと併せて, マグマ供給系の基本単位としての個々の第四紀火山を認定するとともに, マグマの地下での移動および活動範囲の変遷と, 火山の形成発達史を検討する。 ・地質・地質構造, 地殻変動と火山活動との対応関係を把握する。
	放射年代測定(K-Ar法, フィッショントラック法)	火山岩類の放射年代	・火山岩類の岩相・分布・層序と併せて, マグマ供給系の基本単位としての第四紀火山を認定し, 活動の履歴を明らかにする。 ・火山岩類の岩相・分布・層序と併せて, 第四紀火山の時間的・空間的な活動の規則性・偏在性を把握する。
	化学分析(全岩分析, 鉱物分析など)	岩石・鉱物の主成分および微量元素の化学組成	・マグマ溜りなどにおける諸過程(結晶分化, マグマの注入・混合など), および条件(温度・圧力など)を推定する。 ・火山の形成発達史に伴うこれらの変化と, マグマの地下での移動との対応関係について検討する。
地球物理学的手法	空中磁気探査 空中電磁探査	広域的な磁気異常と比較的浅部の比抵抗構造	・磁気異常や比抵抗分布に基づき, 変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。
	微小地震観測 地震波トモグラフィ	微小地震の震源分布, 三次元地震波速度構造, S波反射面分布	・第四紀火山下の低速度域, V_p/V_s 比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。併せて, S波反射面や, 液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関係から, マグマ供給系の位置・規模, 構造を把握する。 ・第四紀火山が分布しない地域においても, 地殻(～マントル)内の低速度域, V_p/V_s 比から現在のメルト・高温領域の有無を検討する。併せて, S波反射面や, 液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。
	電磁探査(MT法)	二次元比抵抗構造	・マグマ供給系に関連する地下構造, 水理構造を推定する。 ・地殻(～マントル)内の比抵抗構造を把握し, マグマ(熱源)の分布に関する情報を取得する。
測地学的手法	GPS観測	基準点変動量(水平・上下)	・地殻変動と火山活動(特に, マグマの移動)との関係・影響範囲を検討する。

4 火山・火成活動 (4) 調査・評価の概要(3/4)

熱・熱水の 影響

文献調査の調査・ 評価の流れ

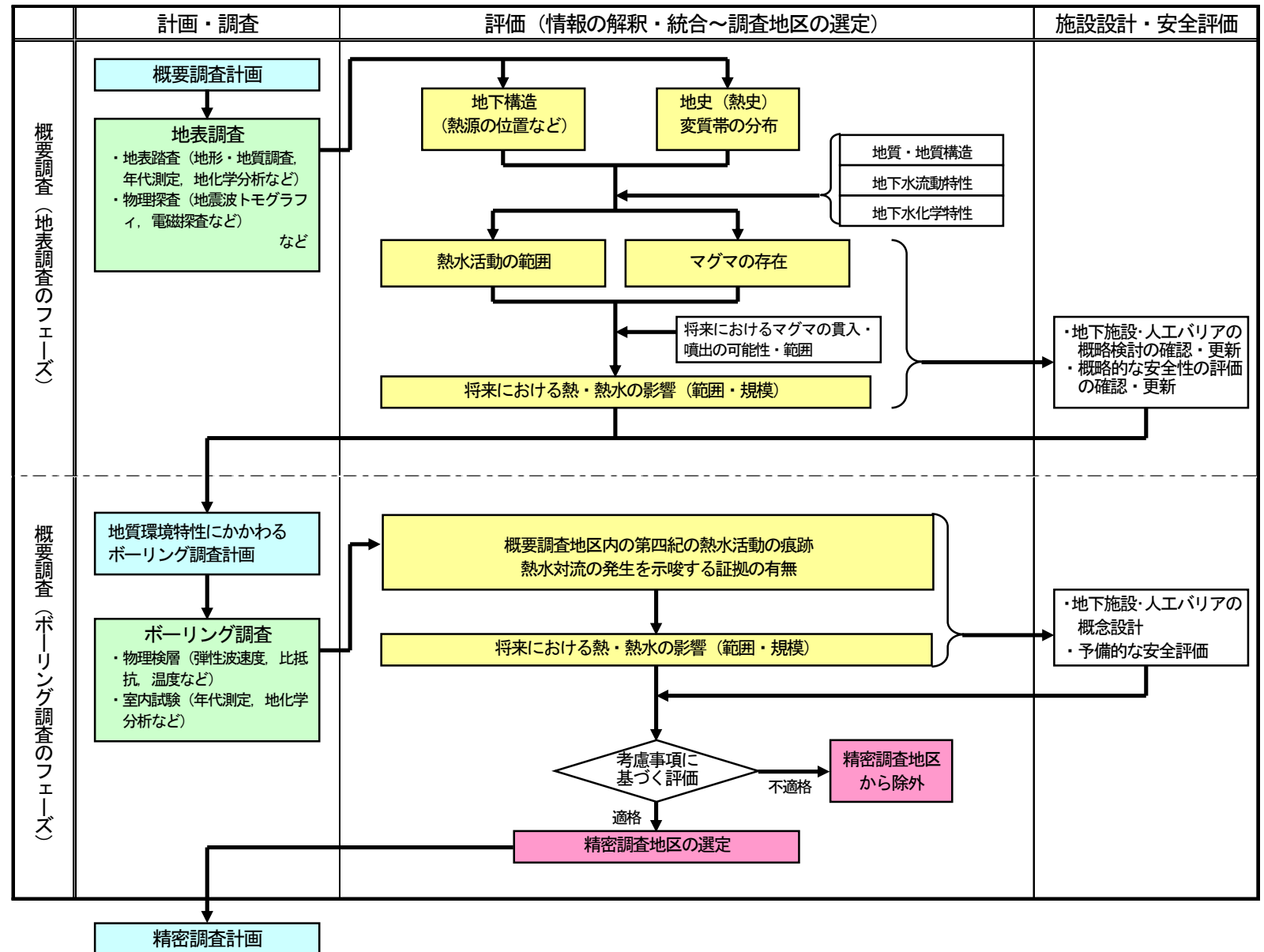
- 評価は右図の地表踏査のフェーズと同じ
- 調査は文献調査



概要調査の調査・ 評価の流れ

1. 地表踏査のフェーズ
2. ボーリング調査のフェーズ

右図：検討例



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の事象・分野の調査・評価

4 火山・火成活動 (4)調査・評価の概要(4/4)

概要調査における火山・火成活動(熱・熱水の影響)にかかわる主な調査手法

調査手法			取得される情報	検討内容
地質学的手法	地表調査	地表踏査(変質帯調査)	変質帯の分布・規模・性状	- 変質帯の種類, 形成履歴, 形成過程, 地質・地質構造や火山との関連について検討し, 変質鉱物や変質帯形成にかかわった熱水系の性状(温度, 泉質)を検討する。 - 温泉・地下水の分布, 温度, 成分などから地下深部での貯留温度(地化学温度)や天水・火山性起源流体などの混合状態の検討, 同位体分析結果から火山性起源流体の有無や地下水の滞留年代の推定などを行う。
		化学分析(鉱物分析を含む)	変質鉱物の種類・分布	
		年代測定	変質岩・変質帯の変質年代	
		温泉・地下水等調査	温泉・噴気分布, 泉温, 泉質, 湧出量	
		流体化学分析(同位体分析を含む)	主要溶存成分, 同位体成分	
	ボーリング調査	コア観察	変質帯の分布・規模・性状	- 地層の分布, 比抵抗分布, 変質鉱物の分布などから変質帯の連続性を検討し, 地表の変質状況と併せた変質の解析, 変質鉱物や変質帯形成にかかわった熱水系の性状などを把握する。 - 温度プロファイル, 地化学温度, 地層分布などから周辺地域の地下温度構造を検討する。
		化学分析(鉱物分析を含む)	変質鉱物の種類・分布	
		年代測定	変質岩・変質帯の変質年代	
		検層, 孔内調査(温度, 比抵抗など)	温度プロファイル, 温度勾配, 地層ごとの温度特性, 比抵抗分布	
		流体採取および化学分析(同位体分析を含む)	主要溶存成分, 同位体成分	
地球物理学的手法	空中磁気・電磁探査		広域的な磁気異常分布 広域的な比較的浅部の比抵抗構造	磁気異常分布および比抵抗分布に基づき, 変質による低磁性・低比抵抗岩体を抽出する。
	微小地震観測 地震波トモグラフィー		微小地震の震源分布 三次元地震波速度構造 S波反射面分布	- 地殻(～マントル)内の低速度域, V_p/V_s比から現在のメルト・高温領域の分布を推定する。併せて, S波反射面や, 液相の運動によって生じると考えられる低周波地震との関連を検討する。 - 地震波速度構造と高温領域の関係, 地殻の温度構造と地震発生深度の関係, 深部流体と微小地震分布の関係, 比抵抗構造や地化学データを組み合わせて熱源の位置・規模を検討する。
	電磁探査(MT法, CSAMT法)		二次元(三次元)比抵抗構造	- MT法では, 低比抵抗域から変質帯, 熱水貯留構造, 熱原の位置・規模および高透水帯の分布を推定する。 - CSAMT法では, 比抵抗分布から火成岩の貫入場所, 断裂構造, 変質帯の位置を検討する。
	重力探査		重力異常分布, 密度構造	局所的な重力異常域の分布から推定される基盤構造を踏まえ, 熱源の位置・規模を推定する。

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (1) 影響の想定および対処方針

天然現象		影響の想定	対処方針
隆起・侵食	①隆起・侵食による地表露出, 地表への著しい接近の影響	隆起や海水準の低下に伴う侵食により処分場の地表への著しい接近, ならびに地形変化に伴う地下水流動および地化学条件の変化が想定される。処分場の深度に対して隆起量, 侵食量が大きい場合, 人間接近の可能性の発生, 処分場の酸化的環境への移行, 地下水の流速・流量の増大など, 大きな影響を及ぼす可能性がある。	影響範囲を回避 ＜回避対象＞ A. 過去十万年間の隆起量が300mを超えている場所 B. 隆起, 海水準低下などに伴う侵食による地表への著しい接近
	②上記①以外の影響	地表への接近の度合いが小さい場合などは, 地下水流動および地化学条件の変化による影響が小さいと考えられる。また, 沿岸部の海水準変動に伴う地化学条件の変化(降水系, 海水系)による影響も小さいと考えられる。	● 影響の程度に応じて処分場の位置や深度などを設定 ● 地質環境特性の変化の把握とバリア機能の確認
③気候・海水準変動の影響			

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (2) 将来予測などの考え方(1／4)

将来予測などの考え方

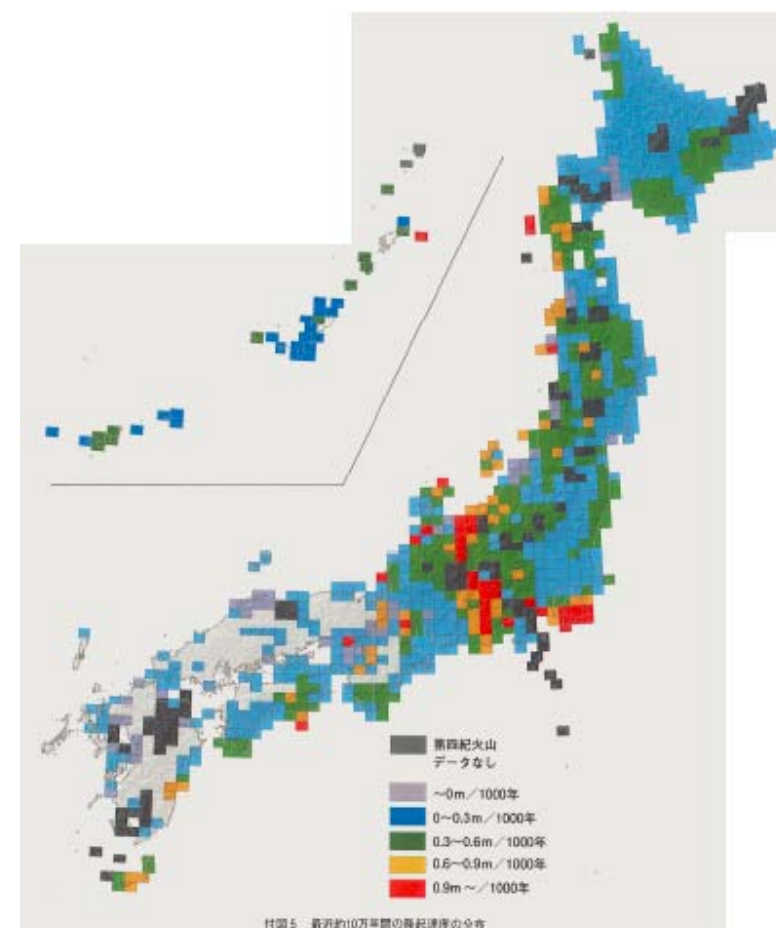
関連する
公開文献情報

1～9

- 日本列島における隆起・沈降は、主にプレート運動に起因する地殻応力場に対応して、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。
- 解析手法として、測地学的手法(対象期間100年程度まで)、地形学的手法(同数十万年:地形面, 1000万年:侵食速度および隆起速度の平衡モデル)および地質学的手法(数百万年)がある。

(わが国における隆起・沈降の特徴)

1. 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。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。一方、ほかの多くの地域の隆起・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)。
 2. 海成段丘および河成段丘の対比・編年や、河成段丘面の比高から隆起速度を算定する手法の信頼性の向上により、過去数十万年間の隆起・沈降に関するデータが全国規模で蓄積され、隆起速度分布図などが公開されている(日本地質学会 地質環境の長期安定性研究委員会, 2011など)。それによると、最近10万年間の隆起総量が300mを超えない地域がわが国にも広く分布する。
- #### (内陸河川流域・沿岸域における隆起・沈降)
3. 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。



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)

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (2) 将来予測などの考え方(2／4)

(丘陵・山地・山脈における隆起・沈降)

4. 丘陵・山地・山脈では、内陸河川流域および沿岸域に比べて大きな隆起が生じている傾向があり、北アルプスなどの一部地域では、過去10万年間の隆起量が数百mにも達すると推定される(末岡ほか, 2011など)。

(隆起・沈降のプロセス)

5. 隆起・沈降の変動プロセスは地域のテクトニクスを反映して多様である。日本海東縁変動帯では褶曲・撓曲および断層活動に伴う隆起(酒井ほか, 2011など), 内陸部では山地・山脈の縁辺に発達する逆断層の活動に伴う傾動(幡谷, 2006など), 太平洋沿岸部では間欠的な地震性隆起(澤井, 2007など)や規模の大きな地震と地震との間に生じる非地震性沈降(吾妻ほか, 2005)などが生じている。

(隆起・沈降の継続性および将来予測)

6. 変動の地域性は各地のテクトニクスを反映したものと考えられ、その傾向は将来10万年程度の期間については大きくは変わらないものと推察される(分冊1:2.5.3項)。
7. 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。
8. 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。
9. したがって、わが国における隆起・沈降の傾向および速度は、中期更新世以降、一様に継続してきており、将来10万年程度も継続する可能性が大きいと考えられる(梅田ほか, 2013)。この将来予測の信頼性をさらに向上させるためには、近年、精度良く把握されつつある短期的な変動(村上・小沢, 2004)およびその変動を引き起こすプロセスと、長期にわたる地殻変動との関係(池田ほか, 2012)を把握することが重要であると考えられる。

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (2) 将来予測などの考え方(3／4)

将来予測などの考え方	関連する 公開文献情報
■ 侵食の強さは、隆起による地盤の比高の増大、氷期・間氷期に対応した降水量の増減および海水準変動に応じて変化する。隆起している場所では侵食が、沈降している場所では堆積が生じる。隆起が著しい場合には、それに見合った顕著な侵食が生じることが否定できない。 ■ 面的侵食は降水量や地質よりもむしろ基準高度分散量に支配されると考えられる。	10～13

(侵食の特徴および将来予測)

10. 山地の中心部では侵食速度が年間1mmを越えるところも多いが、丘陵や平野の大部分では年間0.5mm以下である。なお、河川においては、氷期－間氷期の気候変動サイクルに対応して、河床の侵食と埋積を繰り返しつつ、次第に谷底が下刻されていく。過去数十万年間の平均的な下刻の速度は河川ごとにほぼ一定で、その地域の隆起速度を反映している(分冊1:要約)。

(山地・丘陵における侵食)

11. 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。このような場所を除けば、10万年間に侵食される深さは数十m～百m程度と推定される。海岸部の最大下刻量は、隆起と氷期の海面低下量を合計して評価する必要があるが、それでも多くの場合、10万年で200m未満と考えられる(分冊1:2.5.3項)。
12. 主に山地・丘陵などを対象として、侵食・削剥速度に関する情報が蓄積されている(若狭ほか, 2008)。侵食・削剥速度は、地殻変動の活発さに影響を受け、地殻変動が活発な地域あるいは期間では10万年あたり50mを超え、河川の下刻作用による侵食も著しい(末岡ほか, 2010)。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)。

(侵食と隆起・沈降との関係およびその影響)

13. 一般に、隆起が継続すると侵食の程度も増加し、山地・丘陵では、隆起速度および侵食速度は数十万年から100万年程度で平衡状態に達する(藤原ほか, 2005)。また、主要河川の流域において、気候・海水準変動1サイクル(約10万年)の期間に、中～上流域では下刻量および隆起量がほぼつり合い、河口付近では下刻による侵食量が隆起量を数十m程度上回ると見積もられている(鳥越ほか, 2003)。

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (2) 将来予測などの考え方(4／4)

将来予測などの考え方	関連する 公開文献情報
■ 過去数十万年間は、急激な温暖化と穏やかな寒冷化が約10万年周期で繰り返されている。将来も同様の変動が繰り返されると考えられる。 ■ 第四紀の気候・海水準変動の周期や変動の大きさは地層、地形あるいは氷床に残された証拠から推定される。	14～18

(氷期・間氷期サイクル)

14. 10万年の氷期・間氷期の周期が卓越している(分冊1:2.6.3項)。
15. 南極およびグリーンランドの氷床コアや、生物化石などの記録から読み取られた酸素・水素同位体比などにより、中期更新世以降の約10万年周期の氷期・間氷期サイクルに対応した、地球規模の気温やCO₂濃度、海水準などの変動がより精緻に把握されている(Lisiecki and Raymo, 2005など)。これらの成果は、気候変動に関する政府間パネルの報告書に取りまとめられ、世界各国で認識が共有されている(Jansen et al., 2007)。
16. また、これまでミランコビッチ理論では必ずしも説明ができなかった、約10万年周期の地球規模で生じた気候変動メカニズムについて、日射変化に対する大気－氷床－地殻のフィードバック機構に起因していることなどが明らかになりつつある(Clark et al., 2009)。

(海水準変動および気候変動)

17. 過去数十万年間における海水準は、現在に比べて+5m～-120m程度の範囲で変動してきた。気温は、現在に比べて氷期には8～10℃程度低く、間氷期の最温暖期には2～3℃高かったと考えられる。降水量は、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項)。

(海水準の変動範囲)

18. 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(Huybrechts, 2002など)。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(Cuffey and Marshall, 2000など)。

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (3)回避対象や範囲など

回避する対象や範囲など	関連する 公開文献情
■「①隆起・侵食等による地表露出，地表への著しい接近による影響」として，以下を回避する。 A. 過去10万年間の隆起の総量が300mを超えていることが明らかな地域（文献調査段階） B. 廃棄体を埋設した地層が地表へ著しく接近し，必要な離隔およびバリア機能を失う恐れがあると判断される範囲 ➤ 最終処分を行う深さと併せて考える。 ➤ 海水準変動に伴って低海面期に海岸部で発生が予想される侵食も併せて考える。	1, 4, 11, 12

(わが国における隆起・沈降の特徴)

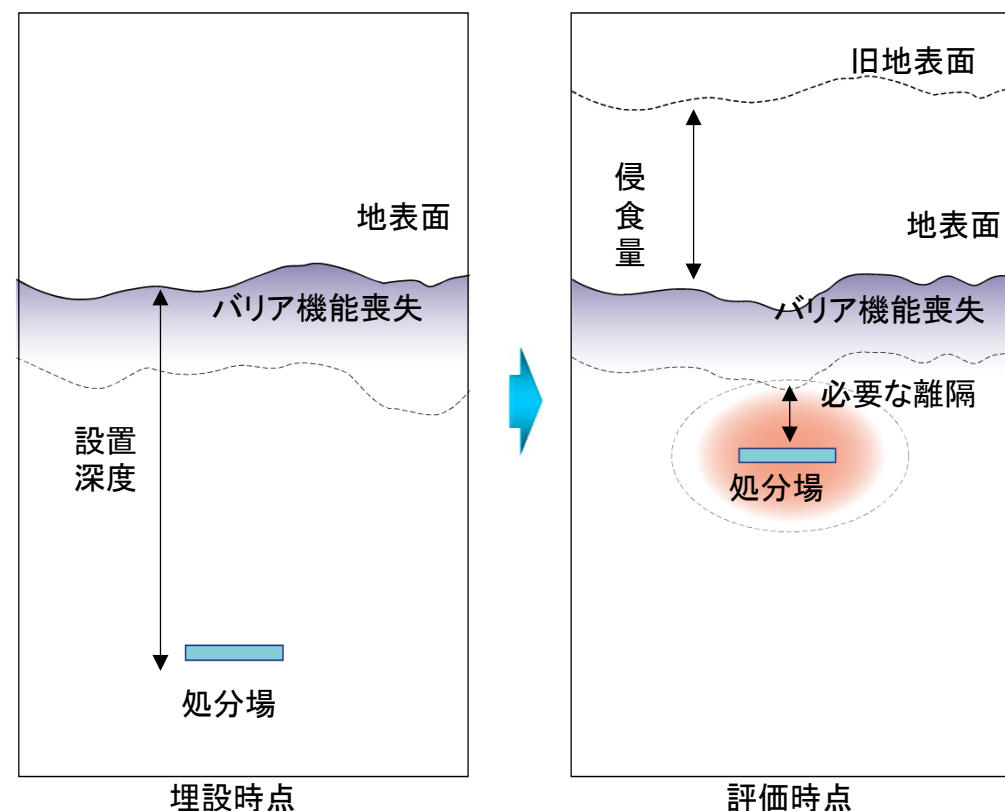
1. 10万年あたり100mを越える大きな隆起速度は，主として褶曲断層山脈と逆断層地塊からなる山地や地震隆起をする海岸で認められ，最大で10万年あたり数百mに達する地域もごく一部で存在する。（分冊1:2.5.3項）。

(丘陵・山地・山脈における隆起・沈降)

4. アルプスなどの一部地域では，過去10万年間の隆起量が数百mにも達すると推定される（末岡ほか，2011など）。

(山地・丘陵における侵食)

11. 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項）。
12. 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）。



地表近くへの接近のイメージ図



5 隆起・侵食／気候・海水準変動

(4) 影響程度に応じて深度などを設定する対象

影響程度に応じて深度などを設定する対象	関連する 公開文献情報
■「②隆起・侵食による地表露出等の著しい影響以外の影響」,「③気候・海水準変動の影響」 ● 広範で緩慢な現象であることから、影響の程度に応じて処分場の位置や深度などを設定する、または地質環境特性の変化の把握し工学的対策やバリア機能の確認を実施する。	1, 3, 10, 11
(わが国における隆起・沈降の特徴) 1. 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)。 (内陸河川流域・沿岸域における隆起・沈降) 3. 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。 (侵食の特徴および将来予測) 10. 丘陵や平野の大部分では年間0.5mm以下である(分冊1:要約)。 (山地・丘陵における侵食) 11. 隆起が激しい山地中心部や地震隆起海岸を場所を除けば、10万年間に侵食される深さは数十m～100m程度と推定される。(分冊1:2.5.3項)。	

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (5)調査・評価の概要(1／3)

文献調査の調査・評価の流れ

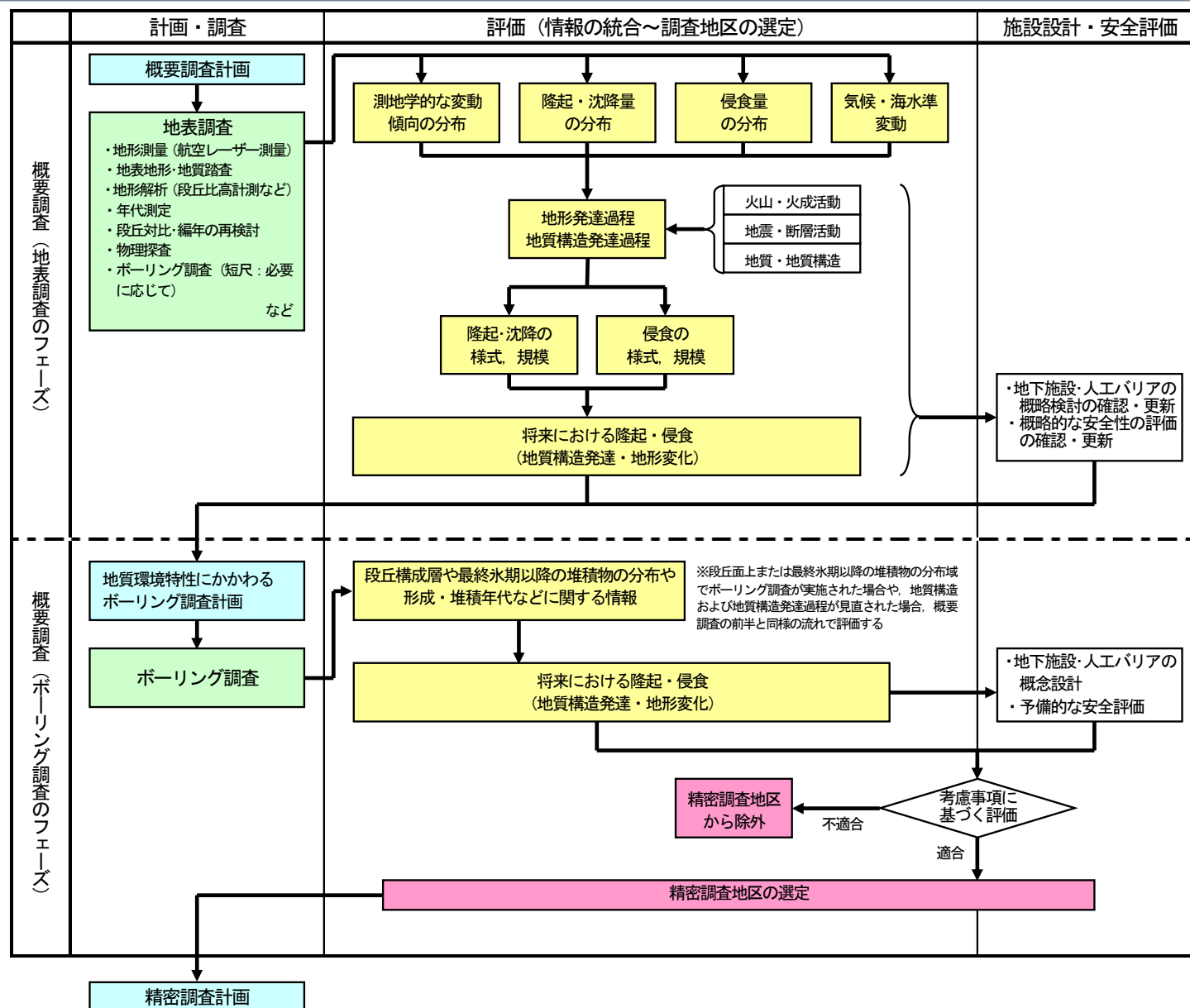
- 評価は右図の地表踏査のフェーズと同じ
- 調査は文献調査



概要調査の調査・評価の流れ

1. 地表踏査のフェーズ
2. ボーリング調査のフェーズ

右図：検討例



5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (5)調査・評価の概要(2／3)

概要調査における隆起・沈降にかかわる主な調査手法

手法		取得される情報	検討内容
地 形 学 的 手 法	海成段丘	更新世の海成段丘の分布・離水年代, 旧汀線高度, 海水面高度	・旧汀線高度または段丘面同士の比高と形成年代に基づき, 過去から現在までの隆起量, 平均隆起速度, 変動の傾向を把握する。
	河成段丘	河成段丘の分布・形成年代, 河成段丘同士の比高	
	山地高度	山地の平均高度・高度分散量	・隆起量と侵食量が平衡状態にあると仮定し, 隆起速度のモデル計算により隆起速度を見積る。
	山地の地形学的基準面	侵食小起伏面の分布・形成年代	・第四紀初期に日本列島が準平原であったとの仮定に基づき, 侵食小起伏面の分布から隆起量を見積る。
地 質 学 的 手 法	活断層の変位速度(鉛直成分)	活断層による変位量, 平均変位速度	・活断層の周辺に分布する変位基準面などの比高と活動時期に基づき, 変位量や平均変位速度を見積る。
	特定の地層形成プロセス	前浜堆積物などの分布・堆積深度, 形成年代	・形成時の堆積環境と年代が推定できる堆積面などを指標として, 現在の分布標高, 埋没深度, 厚さなどを考慮して隆起・沈降量(速度)を見積る。
	地質断面(特定の堆積面)	主に新第三紀～更新世の堆積岩の地層境界面の分布, 堆積深度, 厚さ(埋没深度)	
	特定の生物遺骸	離水したカキ礁などの潮位を示す生物遺骸の分布	・地震発生前の潮位を示す生物遺骸の分布に基づき, 地震に伴う隆起量を把握する。
	花崗岩や貫入岩などの冷却史	花崗岩や貫入岩などの形成年代(FT法, (U-Th)/He法), 形成深度, 現在の分布高度	・過去と現在の地温勾配が同じであるとの仮定のもと, 形成温度から形成時の深度を推定し, 形成年代と分布高度から隆起量を見積る。
測 地 学 的 手 法	GPS観測	基準点変動量(鉛直)	・観測データに基づき, 変動量を把握する。
	水準測量	一等水準点などの変動量	
	潮位観測	潮位観測(変動)記録	
	干渉合成開口レーダー(InSAR)	衛星画像, 干渉SAR画像(変動パターン)	・変動前後の合成開口レーダーのデータを干渉解析することにより鉛直変動量, 変動パターンを把握する。

5 隆起・侵食／気候・海水準変動 (5)調査・評価の概要(3／3)

概要調査における侵食にかかわる主な調査手法

手法		取得される情報	検討内容
地 形 学 的 手 法	海や遷急点の後退	後退距離, 形成時期, 地質分布	・波食台の幅, 滝の後退量などの計測データと, その期間に基づき, 侵食速度を見積る。
	段丘面の侵食	開析谷の形状(深さ, 体積), 段丘面の形成年代	・形成年代が特定されている段丘面を開析する谷の計測データに基づき, 侵食速度, 侵食量を見積る。
	沖積錐などの体積	堆積物の分布・体積, 流域面積, 堆積年代	・沖積錐や扇状地などの体積, 形成年代, 流域面積に基づき, 侵食速度を見積る。
	成層火山の開析度	開析谷の形状(深さ, 体積), 段丘面の形成年代	・形成年代が特定されている溶岩台地や火砕流面などを開析する谷の計測データに基づき, 侵食速度, 侵食量を見積る。
	高度分散量などの山地地形	山地の平均高度・高度分散量	・隆起量と侵食量が平衡状態にあると仮定し, 隆起速度のモデル計算により侵食速度を見積る。
	隆起量と侵食量の釣り合い	河床縦断勾配, 段丘分布, 埋没谷の分布	・現在および過去の河床縦断勾配などに基づき, 間氷期における埋積量, 氷期における侵食量を把握する。
	地形変化シミュレーション	地形変化量	・地形判読, 地形計測などの情報に基づき, 地形変化過程や地形変化量などを把握し, 地形変化シミュレーション技術や外挿法に基づく地形変化予測手法により, 将来の地形を予測する。
地 質 学 的 手 法	ダム堆砂	ダム堆砂量, 堆砂期間, 集水面積	・ダム堆砂量とその堆砂期間に基づき, 侵食速度を見積る。また, 侵食速度と基準高度分散量の相関関係から, 基準高度分散量に基づき, 侵食速度を推定する。
	盆地や湖の堆積物	堆積物の分布・体積, 流域面積, 堆積年代	・盆地や湖に分布する堆積物の体積や流域面積などに基づき, 後背地の侵食速度を見積る。
	沖積層の基底深度	沖積層の分布, 堆積年代	・沖積層の分布深度に基づき, 海退期における最大下刻量を把握する。
	花崗岩, 貫入岩の冷却史	花崗岩や貫入岩などの形成年代(FT法, (U-Th)/He法), 形成深度, 現在の分布高度	・過去と現在の地温勾配が同じであるとの仮定のもと, 形成温度から形成時の深度を推定し, 形成年代, 分布高度などから侵食量(速度)を見積る。
	シリカ鉱物の分布深度	形成時期, 形成深度, 現在の分布高度	・シリカ鉱物の形成深度と現在の分布高度などから, 侵食量を見積る。
	宇宙線生成核種	宇宙線生成核種濃度, 侵食速度, 暴露年代	・宇宙線照射によって石英中に生成された核種の濃度分析結果に基づき, 侵食速度や暴露年代を推定する。

参考文献(1／6)

■ 地震・断層活動

- 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.
- 山崎晴雄(2004): 地層処分における概要調査地区選定後の作業内容とその意義ー活断層の識別・評価を例に. 原子力バックエンド研究, 10, 119-123.
- 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.
- Yamaji, A., Sakai, T., Arai, K., Okamura, Y.(2003): Unstable forearc stress in the eastern Nankai subduction zone for the last two million years. Tectonophysics, 369, 103-120.
- 鷺谷 威(2009): GPS観測に基づく日本列島の地震テクトニクス. 地震第2輯, 61, S479-S487.
- Sagiya, T., Miyazaki, S., Tada, T.(2000): Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. Pure Appl. Geophys., 157, 2303-2322.
- 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.
- 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.
- 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.
- 岡田篤正(2006): 1945年三河地震断層の変位地形と諸性質. 活断層研究, No.26, 163-192.
- 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.
- 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.
- 地震調査研究推進本部: 活断層の長期評価. <http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_danso.htm>; 活断層の地域評価. <http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_chiiki_kyushu.htm>(参照2013年2月1日)
- 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.
- 地震調査研究推進本部 地震調査委員会(2000): 鳥取県西部の地震活動の評価, 平成12年10月11日.
- 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.
- 渡辺満久, 中田 高, 鈴木康弘(2008): 下北半島南部における海成段丘の撓曲変形と逆断層運動. 活断層研究, No.29, 15-23.

参考文献(2/6)

■ 地震・断層活動(つづき)

- 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.
- 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.
- 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.
- Scholz, C.H.(2002) : *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd Edition. Cambridge Univ. Press.
- 谷 篤史, 小林健太郎, 池田隆司(2001) : ESR法による野島断層平林NIEDコアの熱履歴調査, *防災科学技術研究所研究報告*, 61, 231-236.
- 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.
- 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.
- 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.
- Huixian, L., Housner, G.W., Lili, X., Duxin, H.(Eds.) (2002) : *The Great Tangshan Earthquake of 1976*. Tech. Rep. CaltechEERL: 2002.001, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology.
- 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.
- 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.

■ 火山・火成活動

- 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.
- 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.
- Honda, S., Yoshida, T.(2005) : Application of the model of small-scale convection under the island arc to the NE Honshu subduction zone. *Geochem. Geophys. Geosystem.*, 6, Q01002, doi:10.1029/2004GC000785.
- 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.

参考文献(3／6)

■ 火山・火成活動(つづき)

- 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.
- 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.
- 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.
- 中田英二, 田中和広(2001) : マグマの貫入が岩盤に与える影響－活火山周辺に分布するマグマ噴出跡の分布. 日本応用地質学会平成13年度研究発表会講演論文集, 55–58.
- 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.
- 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.
- Tsumura, N., Matsumoto, S., Horiuchi, S., Hasegawa, A.(2000) Three-dimensional attenuation structure beneath the northeastern Japan arc estimated from spectra of small earthquake. Tectonophysics, 319, 241–260.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

参考文献(4/6)

■ 隆起・侵食

- 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.
- 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.
- 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・剝削史の解明. 地学雑誌, 120, 1003-1012.
- 酒井利彰, 井岡聖一郎, 石島洋二, 五十嵐敏文(2011):サロベツ原野における沖積層の地質解析. 応用地質, 52, 2-13.
- 幡谷竜太(2006):河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討(3)ー過去10万年間の隆起量分布により明らかにされた内陸部の地殻運動. 電力中央研究所報告, N05017.
- 澤井裕紀(2007):珪藻化石群集を用いた海水準変動の復元と千島海溝南部の古地震およびテクトニクス. 第四紀研究, 46, 363-383.
- 吾妻 崇, 太田陽子, 石川元彦, 谷口 薫(2005):御前崎周辺の第四紀後期地殻変動に関する資料と考察. 第四紀研究, 44, 169-176.
- 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.
- 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:地層処分安全評価の視点から. 地学雑誌, 122, 385-397.
- 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(2011a):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.
- 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.
- 村上 亮, 小沢慎三郎(2004):GPS連続観測による日本列島上下地殻変動とその意義. 地震第2輯, 57, 209-231.
- 池田安隆, 岡田真介, 田力正好(2012):東北日本島弧ー海溝系における長期的歪みの蓄積過程と超巨大歪み解放イベント. 地質学雑誌, 118, 294-312.

参考文献(5/6)

■ 隆起・沈降・侵食(つづき)

- ・ 若狭 幸, 森口有里, 松崎浩之, 松倉公憲(2008): 宇宙線核種濃度から推定される木曾川上流寝覚ノ床における下刻速度. 季刊地理学, 60, 69-76.
- ・ 末岡 茂, 田上高広, 堤 浩之, 長谷部徳子, 田村明弘, 荒井章司, 山田隆二, 松田達生, 小村健太郎(2010): フィッショントラック熱年代に基づいた六甲地域の冷却・削剥史. 地学雑誌, 119, 84-101.
- ・ 藤原 治, 柳田 誠, 三箇智二, 守屋俊文(2005): 地層処分から見た侵食作用の重要性—海成段丘を対象とした侵食速度の推定を例に. 原子力バックエンド研究, 11, 139-146.
- ・ 鳥越祐司, 幡谷竜太, 柳田 誠, 佐藤 賢(2003): 海水準変動1サイクルの沿岸域における最大侵食評価. 地球惑星科学関連学会2003年合同大会予稿集, Q042-P007.

■ 気候・海水準変動

- ・ Lisiecki, L.E., Raymo, M.E. (2005): A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanogr.*, 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- ・ Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R., Zhang, D. (2007): Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.)], Cambridge Univ. Press, 433-497.
- ・ Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., McCabe, A.M. (2009): The Last Glacial Maximum. *Science*, 325, 710-714.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ 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.
- ・ Ikehara, K. (2003): Late Quaternary seasonal sea-ice history of the northeastern Japan Sea. *J. Oceanogr.*, 59, 585-593.



参考文献(6／6)

■ 気候・海水準変動(つづき)

- 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.
- 加 三千宣, 吉川周作, 井内美郎(2003): 琵琶湖湖底堆積物の年間珪藻殻堆積量記録からみた過去14万年間の降水量変動. 第四紀研究, 42, 305-319.
- 公文富士夫, 河合小百合, 井内美郎(2003): 野尻湖湖底堆積物中の有機炭素・全窒素含有率および花粉分析に基づく約25,000-6,000年前の気候変動. 第四紀研究, 42, 13-26.