

第5章

地質環境の調査・評価技術

第5章 目次

第5章 地質環境の調査・評価技術	5-1
5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方	5-1
5.1.1 自然現象の影響と将来予測	5-1
5.1.1.1 自然現象の影響	5-2
(1) 地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象	5-2
(2) 考慮するそのほかの自然現象	5-3
(3) 地質環境特性の長期変遷	5-3
(4) 自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱い	5-4
5.1.1.2 自然現象の将来予測	5-8
(1) 地層処分事業における将来予測に関する動向	5-8
(2) 将来予測の考え方	5-9
5.1.2 わが国の地質環境の多様性	5-17
5.1.2.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性	5-17
5.1.2.2 多様な地質環境への対応	5-18
5.1.2.3 多様な地質環境に対する調査・評価の事例	5-22
5.2 文献調査および概要調査の基本的な考え方と進め方	5-25
5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方	5-25
5.2.1.1 安全確保にかかわる目標	5-25
5.2.1.2 段階的な調査・評価	5-25
(1) 基本的な考え方	5-25
(2) 地質環境モデルの構築	5-26
5.2.1.3 不確実性の取り扱い	5-30
(1) 不確実性の種類と特徴	5-30
(2) 不確実性の低減	5-30
(3) サイト選定にかかわる不確実性への対応	5-31
5.2.1.4 調査・評価技術の適用性の確認	5-31
5.2.1.5 調査・評価の体系化	5-32
5.2.2 文献調査の進め方	5-35
5.2.2.1 文献調査の目標	5-35
5.2.2.2 文献調査の準備	5-37
5.2.2.3 文献調査の実施	5-40
5.2.2.4 文献調査における評価	5-43
5.2.3 概要調査の進め方	5-44
5.2.3.1 概要調査の目標	5-44
5.2.3.2 概要調査の準備	5-46
5.2.3.3 概要調査の実施	5-51
5.2.3.4 概要調査における評価	5-53
5.2.4 調査・評価における品質マネジメント	5-55

5.2.4.1	品質マネジメントシステムの考え方	5-55
5.2.4.2	品質マネジメントシステムの整備	5-55
5.3	文献調査および概要調査の体系	5-58
5.3.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価	5-58
5.3.1.1	火山・火成活動	5-58
(1)	マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価	5-58
(2)	熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価	5-64
5.3.1.2	地震・断層活動	5-69
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-69
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-70
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-72
5.3.1.3	隆起・侵食	5-77
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-77
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-78
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-79
5.3.2	地質環境特性にかかわる調査・評価	5-84
5.3.2.1	地質環境特性	5-84
(1)	調査・評価の基本的な考え方	5-84
(2)	文献調査における調査・評価の流れ	5-85
(3)	概要調査における調査・評価の流れ	5-88
5.3.2.2	施工・操業安全にかかわる調査・評価	5-94
(1)	異常間隙水圧	5-94
(2)	膨張性地山	5-94
(3)	山はね	5-95
5.4	調査・評価技術の整備	5-96
5.4.1	調査・評価技術の進展	5-96
5.4.1.1	自然現象の影響にかかわる調査・評価技術	5-96
(1)	火山・火成活動にかかわる調査・評価技術	5-96
(2)	地震・断層活動にかかわる調査・評価技術	5-105
(3)	隆起・侵食にかかわる調査・評価技術	5-116
5.4.1.2	地質環境特性にかかわる調査・評価技術	5-121
(1)	地質・地質構造	5-125
(2)	地下水流動特性	5-126
(3)	地下水化学特性	5-134
(4)	岩盤特性	5-137
(5)	物質移行特性	5-138
(6)	施工性・安全性にかかわる事象	5-139
(7)	モニタリング技術	5-140
5.4.1.3	多様な地質環境にかかわる調査・評価技術	5-141
(1)	結晶質岩・淡水系地下水を対象とした調査・評価技術	5-141

(2) 堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価技術.....	5-143
(3) 沿岸域を対象とした調査・評価技術.....	5-146
5.4.2 調査・評価技術の確認.....	5-151
5.4.3 調査・評価技術の評価と信頼性向上に向けた取り組み.....	5-158
5.4.3.1 技術の信頼性の評価.....	5-158
(1) 自然現象の影響.....	5-158
(2) 地質環境特性.....	5-159
5.4.3.2 さらに信頼性向上に向けた取り組み.....	5-160
5.5 まとめ.....	5-164
(1) 調査・評価の基本的考え方.....	5-164
(2) 調査・評価の進め方.....	5-164
(3) 調査・評価を支える技術の進展.....	5-165
参考文献.....	5-167

第5章 地質環境の調査・評価技術

本章では、第3章に示した安全確保に向けた三つの方針の方針1「安全性の繰り返し確認に基づく段階的かつ柔軟な事業推進」に基づく適切なサイト選定と確認のうち、最初の概要調査地区選定段階で実施する文献調査、その次の精密調査地区選定段階で実施する概要調査を中心に、地質環境の調査・評価技術の整備状況について述べる。

5.1では、わが国の地質環境の特徴と地層処分における取り扱い、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の将来予測、多様な地質環境への対応など、調査・評価の前提となる考え方について述べる。5.2では、文献調査および概要調査について、両者に共通する重要な考え方、およびそれぞれの調査・評価の全体像を示す。5.3では、文献調査および概要調査の中で、自然現象の影響および地質環境特性にかかわる個別の調査・評価をどのように進めていくか体系的に示す。5.4では、調査・評価の体系を支える技術について、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降の進展、NUMOによる技術の確認、ならびに技術の信頼性向上に向けた課題と取り組み方針について述べる。

なお、文献調査の実施に当たっては、市町村からの応募による場合と、国が市町村に文献調査の実施を申し入れによる場合がある。これら二つの場合では、文献調査の開始に至るまでの手順に差異があるが、いったん文献調査を開始すれば技術的な実施手順は同じである。従って、本章では、市町村からの応募により文献調査が開始されるという場合を前提として記述する。

また、処分施設建設地選定段階で実施する精密調査（地上からの調査および地下調査施設での調査）に向けた地質環境の調査・評価技術については、第2次取りまとめ以前より国内外の地層処分の実施機関や研究機関などが検討を進めており、知見が蓄積されている。また、5.4に示すとおり、第2次取りまとめ以降進展した個々の技術の多くは、精密調査にも適用することができる。さらに、基盤研究開発機関では、現在、深地層の研究施設計画をはじめとする精密調査に向けた技術開発が進められている。これらの知見や開発成果を取り込んだ精密調査に向けた調査・評価技術については、今後取りまとめて公表していく予定であり、本章では取り扱わないこととする。

5.1 わが国の地質環境の特徴と評価の考え方

3.1.2.1で述べたとおり、わが国は変動帯に位置していることから、地層処分システムを成立させるための前提条件の一つとして、将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避する必要がある。そのため、サイト選定では、応募区域およびその周辺で生じている自然現象について、過去の変動傾向などからその将来の挙動を予測し、選定する地域が将来にわたりそれらの著しい影響を回避できる見通しを得ることが必要である。その上で、地層処分システムの場合となる地質環境特性を把握するとともに、それらの長期的な変遷を理解することにより、閉鎖後長期の安全確保の見通しが得られる場所を処分施設建設地として選定する（NUMO, 2010a）。

ここでは、地層処分システムへの影響の観点から、わが国の自然現象の特徴とその取り扱い、そして多様な地質環境への対応に関する包括的な考え方について述べる。

5.1.1 自然現象の影響と将来予測

サイトおよびその周辺の自然現象に関する情報は、自然現象による著しい影響を回避するために不可欠であるとともに、地質環境特性の長期変遷の評価やそれを考慮した安全評価シナリオを検討

する際の基礎情報となる。以下に、地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象とその特徴、および自然現象の影響評価の基礎となる将来予測の考え方について述べる。

5.1.1.1 自然現象の影響

(1) 地層処分システムに著しい影響を及ぼす自然現象

日本列島は、アジア大陸の東縁部に沿って北東-南西方向に長く延びる弧状列島であり、ユーラシアプレート、北米プレート、太平洋プレートおよびフィリピン海プレートなどの、大陸プレートや海洋プレートの会合部に位置する(瀬野, 1995)。各プレートの運動、さらにはプレート間の相互作用により、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降運動などが生じている(図 5.1.1-1)。さらに、この隆起・沈降運動と、地球規模の周期的な気候変動に伴う海水準変動により、侵食・堆積作用が生じている。このように、わが国では、安定大陸とは異なる変動帯に特徴的な自然現象が、過去から現在まで生じており、それらは将来も続くものと考えられる。これらのうち、火山・火成活動および地震・断層活動は、その破壊的なエネルギーにより、処分場の破壊や放射性物質の地表への噴出といった、地層処分システムの成立性を脅かす現象を生じさせる可能性がある。また、隆起および侵食の速度が著しく速い場合、地下深部の放射性物質が短期間に地表に接近し、地層処分システムの長期的な安全性に影響を及ぼす可能性がある。以上のことから、わが国の地層処分事業においては、地層処分システムへの著しい影響について考慮すべき自然現象として、①火山・火成活動、②地震・断層活動、③隆起・侵食をとりあげる。

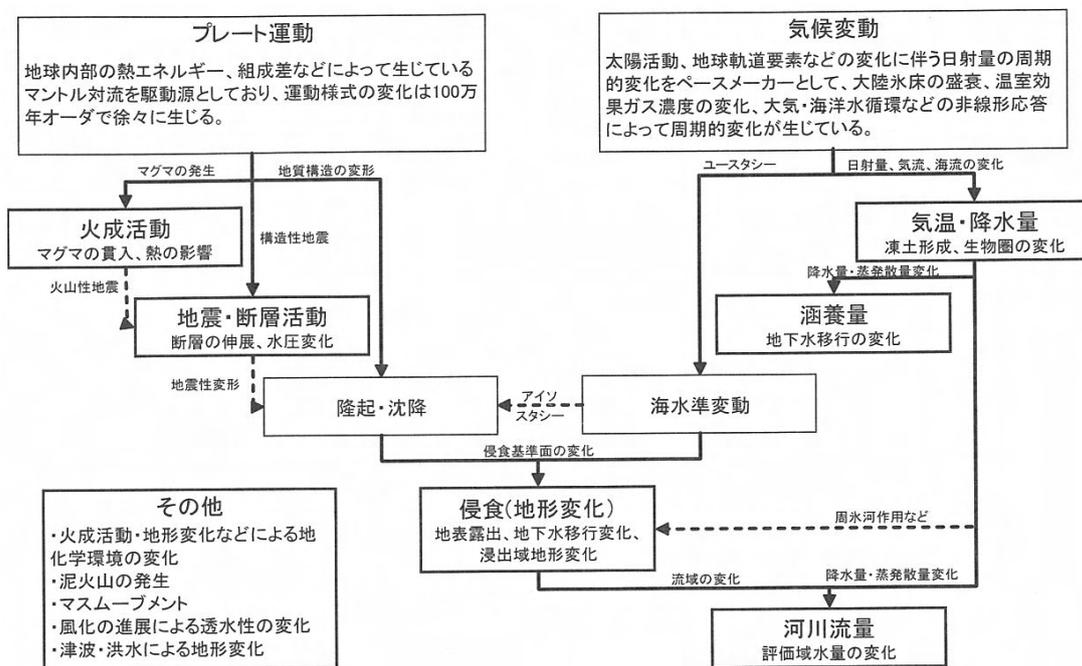


図 5.1.1-1 自然現象と地質環境への影響の関係

(出典：土木学会, 2007)

地層処分システムの長期変遷にかかわる現象は、大きく地球の内部エネルギーによるプレート運動などと、太陽活動や地球軌道要素などの周期的変化を主な要因とする気候変動のいずれか、あるいはその両方を起因として生じている。

(2) 考慮するそのほかの自然現象

気候変動が生じると、気温、降水量、蒸発散量、海水準などが変化し、地下水の涵養量、表流水の流量などにも変化をもたらす。その結果として、地下水の流動特性や化学特性、侵食速度などに対して影響が及ぶことになる。これらは、汎世界的な現象であり、回避できない。このため、地層処分事業においては、過去の気候・海水準変動にかかわる記録に基づき、将来の気候・海水準変動の規模やその周期性を仮定し、サイトにおいて地層処分システムの長期的な安全性の観点からより適切と判断される特性が維持され得るかどうかを評価する。さらに、設計・施工での対応（例えば、処分施設のレイアウトなど）を含めて、地層処分システム全体の安全性能（例えば、地下水の流動特性や化学特性などの変化を考慮した隔離機能など）について検討する。なお、近年の地球温暖化が将来の気候・海水準変動に及ぼす影響についても、国内外における研究動向を踏まえ知見を取り入れていく。

(3) 地質環境特性の長期変遷

地層処分では、閉鎖後数万年以上にわたる長期の安全性に対する評価が求められる。その際には、地層処分の観点からより適切と判断される地質環境特性（地下水流動特性、地下水化学特性、物質移行特性など）が、閉鎖後長期にわたって持続する見通しを示す必要がある。そのための方法として、後述する地質環境モデルに記述された現状の地質環境の各特性が、将来の自然現象の変動に伴う地形や地質構造の変化に応じて変化する様子を、複数の時間断面で表現することが考えられる（太田ほか、2007）。

地質環境特性は、過去から現在に至るさまざまな地質学的な過程を経て形成される。このため、地質環境特性の長期変遷の評価に当たっては、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの個々の自然現象について理解するだけでなく、それらがどのように相互に関連しているか、単独にあるいは複合して地質環境に影響を及ぼすのか、などについて理解することが重要である。例えば、汎世界的に生じる海水準変動に加えて断層活動による地域的な隆起（沈降）が起きると、当該地域の地形面と海面との差はより大きくなる可能性がある。これにより、侵食速度や動水勾配の変化が生じ、地下水流動特性や化学特性に影響を及ぼす可能性がある。このように、地質環境は、個々の自然現象間の相互作用、個々の地質環境特性間の相互作用、および自然現象と地質環境特性の間の相互作用など、さまざまな現象が相互に影響を及ぼし合うシステムとして挙動する。このため、地質環境特性の長期変遷の検討に当たっては、当該地域の地形・地質構造発達過程に関する検討、個々の自然現象に関する検討、ならびに個々の地質環境特性に関する検討などの連携を図り、過去の地質環境の変遷の理解に基づき、将来の長期変遷を予測・評価する。

(4) 自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱い

(1) で述べた各自然現象の地層処分システムへの影響とサイト選定における取り扱いについて、表 5.1.1-1 に取りまとめた。以下に、その詳細について述べる。

表 5.1.1-1 わが国で考慮すべき自然現象が地層処分システムに及ぼす影響とその取り扱い

自然現象	地層処分システムおよび地上施設に及ぼす影響	影響の程度	サイト選定における取り扱い
火山・火成活動	<ul style="list-style-type: none"> マグマの貫入・噴出による地下施設の直接的破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 放射性物質の地表への放出の可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報や現地調査データに基づいて、第四紀の火山・火成活動の痕跡が認められる場所や、過去の火山・火成活動の傾向・規則性から、将来火山・火成活動が生じると明確に判断される場所は、回避する
	<ul style="list-style-type: none"> 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 	<ul style="list-style-type: none"> 地層処分システムの性能低下などの大きな影響を及ぼす可能性がある 	
	<ul style="list-style-type: none"> 大規模なマグマ噴出や火砕流などによる地形の変化およびそれに伴う地下水流動状況の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 火山活動によって生じる地形変化の規模に応じて地下水流動状況が変化する 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、地形変化の規模や位置を想定して、地質環境の長期変遷の一因として考慮する
	<ul style="list-style-type: none"> 降灰、火山泥流、火砕流などによる地上施設の破壊または安全機能の喪失 	<ul style="list-style-type: none"> 操業期間中における地上施設の安全機能を損なう可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、操業期間中に発生する可能性のある火山現象、規模、サイトへの到達可能性、地上施設への影響の程度を評価して、その影響の程度に応じて回避または対策を検討する (※原子炉施設の設計における対処についての指針・規格は現在規定されていない)
地震・断層活動	<ul style="list-style-type: none"> 地震動による地下施設の破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 既往の観測事例では、地表に比べて小さく、極めて大きな地震動の発生は考えづらい 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、耐震設計による対処が可能であることを評価・確認する
	<ul style="list-style-type: none"> 地震前後における地殻内のひずみの変化に起因する、地下水位や地下水圧の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 数週間～数ヵ月後には元の状態に回復する観測事例があり、地下水流動に対して恒常的な影響を及ぼさないと考えられる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、その発生と影響について検討する
	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤の破断・破砕に伴う地下施設や廃棄体の直接的破壊 	<ul style="list-style-type: none"> 新たに形成される断層破砕帯を経路として、放射性物質が地下施設から漏出し、地表に向けた移行が加速される可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、活断層などの存在が明らかな場所は回避する
	<ul style="list-style-type: none"> 破断・破砕・変位に伴う周辺岩盤の力学的変化 小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化 	<ul style="list-style-type: none"> 処分施設に大きな影響を与える規模のものではなく、割れ目が開口することなどにより、周辺岩盤の状態が変化する程度と考えられる 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および現地調査データに基づいて、断層周辺岩盤にひずみ、小断層、節理などが生じている範囲やその性状を検討して、地質環境特性の一環として評価する
	<ul style="list-style-type: none"> 地震動による地上施設の破壊または安全機能の損失 	<ul style="list-style-type: none"> 操業期間中における地上施設の安全機能を損なう可能性がある 	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報および実測データに基づいて、耐震設計による対処が可能であることを評価・確認する
隆起・侵食	<ul style="list-style-type: none"> 地下施設の地表への接近、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 	<ul style="list-style-type: none"> 処分深度に対して隆起量、侵食量が大きい場合、地下施設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 	<ul style="list-style-type: none"> 著しい隆起が生じる地域では隆起量に応じた侵食が生じる可能性があり、地層処分システムに及ぼす影響は大きいことから、隆起が著しい場所は回避する

(土木学会, 2001, 2006a ; NUMO, 2004 などを参考に作成)

(i) 火山・火成活動

火山・火成活動は、地下深部からのマグマの貫入・噴出やそれに伴い熱・熱水の放出などが生じる急激かつ局所的な現象である。火山・火成活動が地層処分システムや地上施設に及ぼす影響としては、マグマの貫入・噴出による処分施設の直接的破壊と、それに伴う地表への放射性物質の放出が考えられる。また、熱・熱水の放出による周辺岩盤の温度の上昇や変質、熱水対流の生成、地下水への熱水・火山ガスなどの混入による地下水流動状況および地化学条件の変化などが考えられる。このため、マグマの地殻への貫入や地表への噴出、ならびに熱・熱水の放出を、最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。

これらの現象については、既存情報や現地調査データに基づき、第四紀においてその痕跡が認められる場所や、過去の火山・火成活動の傾向・規則性から将来それが生じると明確に判断される場所をサイト選定において回避する。

そのほか、火山活動に伴う降灰、火山泥流、火砕流などは、建設・操業・閉鎖期間中の地上施設に影響を及ぼす可能性がある。これらの影響の程度は、発生した火山現象の種類、発生の規模、発生・到達時期によって異なると考えられるが、著しい場合は地上施設の破壊または安全機能の損失が生じる可能性がある。このため、既存情報および現地調査データに基づいて、建設・操業・閉鎖期間中に発生する可能性のある火山活動、規模、サイトへの到達可能性、地上施設への影響の程度を評価して、その影響の程度に応じて回避または対策を検討する。その際には、「金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針」（原子力安全委員会、2002a）、「使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における『自然環境』の考え方について」（原子力安全委員会、2008）、「原子力発電所火山影響評価技術指針」（日本電気協会、2009）を念頭に、建設・操業時の安全確保の一環として評価を行う。一方、閉鎖後については、大規模なマグマの噴出や火砕流などにより、地形の変化やそれに伴う地質環境特性の変化が生じる可能性がある。これらについては、地質環境特性の長期変遷の要因の一つとして適宜検討する。

火山に関連した熱水活動のほかに、非火山性の温泉（例えば、紀伊半島南部の温泉）が地層処分システムに影響を与える可能性がある。非火山性の温泉の熱源について、これまで中新世の火成活動に関連する伏在火成岩体を熱源とする考え（中村ほか、1958）や、比較的若くかつ温かい四国海盆の沈み込みに伴う広域的な熱源からの熱伝導によるものであるとする考え（大石ほか、1995）が示されていた。しかし、近年、温泉ガスのヘリウム同位体比に基づく検討（Matsumoto et al., 2003）、震源分布や地震波速度構造などの地球物理学的検討（Salah and Zhao, 2003）が進められ、紀伊半島下では海洋地殻に加えて、スラブマントルから脱水した高いヘリウム同位体比を有する流体が、岩盤中の亀裂を通して上昇していると考えられること（Umeda et al., 2006a）が示されている。このように、非火山性の温泉の成因や起源を評価することが可能となり、マグマの貫入・噴出に伴う熱水活動との違いを検討することが可能となってきた。さらに、非火山性の温泉の熱源にかかわる近年の研究事例（例えば、Umeda et al., 2009）では、地球物理学的データ、温泉水の地化学データ（ヘリウム同位体比）などを組み合わせた調査・評価が行われ、能登半島における温泉の熱源は、火成活動に由来するものではなく、地下深部の花崗岩の放射壊変による熱が、断層に沿って上昇したものであるとの考え方が示されている。これらのことを踏まえ、非火山性の熱水の影響については、地下水の流動特性、化学特性、および岩盤特性として、地質環境特性にかかわる調査・評価の中で検討する。

(ii) 地震・断層活動

地震とは、地殻内に蓄積されたひずみエネルギーが岩盤の破壊強度を超えたとき、岩盤を構成する岩石の一部に破壊（断層運動）が生じ、ひずみエネルギーを一気に解放するとともに、そこから地震波（実体波、表面波など）が発生する現象である（宇津，1984；加藤，1989 など）。断層運動が地層処分システムに及ぼす影響として、岩盤の破断・破碎に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊，周辺岩盤の破断・破碎・変位に伴う力学的変化，小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化，地震前後の地殻内のひずみ変化に起因する地下水圧の変化，地震動による地下施設や地上施設の破壊などが考えられる。

活断層などが分布する場所は、大規模な地層のずれ（変位）や変形が生じることから、処分施設の破壊が生じることが想定される。また、断層破碎帯を経路として、地下施設から漏出した放射性物質の地表に向けた移行が加速される可能性がある。このことから、既存情報および現地調査データに基づいて、活断層などの存在が明らかな場所は、処分施設を配置することが困難な場合に当たると判断し、最終処分法に定められている「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱い、サイト選定において回避する。なお、調査・評価の対象とする活断層の定義については、既往文献（例えば、中田・今泉，2002；JNC，1999b）を踏まえて設定した「過去数 10 万年前以降繰り返し活動したことのある断層で、将来も活動する可能性のある断層」（NUMO，2004）を踏襲する。

断層活動により断層周辺の岩盤内にひずみ，小断層，節理などが生じている範囲については、力学的・水理学的特性が変化した領域と考えられるが、処分施設に大きな影響を与える規模のものではなく、割れ目が開口することなどにより周辺岩盤の特性が変化する程度と考えられる。このことから、処分施設の著しい変形，埋設した放射性廃棄物の地表への接近をもたらす「地層の著しい変動」には該当しないとし、地質環境特性にかかわる調査・評価の一環として、断層周辺岩盤にひずみ，小断層，節理などが生じている範囲やその性状を検討・評価する。

地震動による地下施設への影響については、鉱山や地下発電所の空洞における地震観測事例から、地下深部におけるゆれ（地震動）は地表に比べて小さいと指摘されている（Shimizu et al., 1996；Ishimaru and Shimizu, 1997 など）。また、近年飛躍的に整備された KiK-net などの地震観測網のデータの分析からも、地震波の入射角などの違いに起因する一部の例外を除き、その傾向には変わりがないことが示されている（Goto et al., 2009）。一方、地震動による地上施設への影響として、建設・操業段階から閉鎖段階の間にサイトにおいて規模の大きな地震が発生した場合、地上施設が破壊する，または安全機能を損失する可能性が考えられる。しかし、地震動による地下施設または地上施設への影響については、耐震設計などの工学的対策を施すことにより対応することが可能である。このため、地震動による影響は、「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱わないこととする。

既往の地下水の水圧や水質の観測事例（例えば、Shimizu et al., 1996；Ishimaru and Shimizu, 1997）において、地震の発生に伴い比較的広い範囲でそれらが変化することが知られている。しかし、これらの地震の発生に伴う変化は、一時的で短期間の間に元の状態に戻ること（例えば、1946 年南海道地震時の例：川辺，1991），季節に伴う変化に比べて小さいこと（JNC，1999b），浅層地下水中的の変化である（佐藤ほか，1999；阿部・酒井，1999）との知見がある。これらのことから、地震時の一時的な周辺岩盤の水理学的な影響については、「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

断層活動に伴い地下深部のすべり面付近では、高温状態になると考えられており（福留，1984），

破碎帯中の断層面などに沿ってシュードタキライトという岩石が形成されることがある（狩野・村田，1998）。鉱物の地質温度計や基質の化学組成を用いて見積もられたシュードタキライト形成時の摩擦溶融の温度は，これまでに 750°C から 1,400°C 以上の値が報告されている（林，2010）。しかしながら，シュードタキライトの幅は，数 mm 程度（例えば，Lin et al., 2003, 2005）である。断層活動に伴う摩擦熱は，野島断層を貫くボーリングコア試料を用いた研究によると，フィッシュン・トラック法では 200～300°C（田上ほか，1998），電子スピン共鳴（ESR）法では 300～350°C（福地ほか，2002）に達したことが示されている。一方，野島断層を貫くボーリング調査で確認された断層破碎帯中には比較的低温（150°C 以下）で安定な鉱物（スメクタイトや沸石など）が多量に存在すること（藤本ほか，1998），跡津川断層帯茂住断層の破碎帯中にもスメクタイトが確認され，熱による再結晶などの痕跡が認められないこと（佐竹・村田，1998）が示されている。このように，断層活動に伴う熱的影響は，局所的で瞬間的なものと考えられることから，「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

（iii）隆起・侵食

隆起・沈降は，プレート運動に伴う断層および褶曲などの活動，地殻へのマグマの供給や地表への噴出，氷床の消長や海水準変動などのアイソスタティックな変動（荷重変化による弾性的な変動）などによる地殻の鉛直方向の運動である。侵食は，陸上で重力や流水などの営力（地質学的な現象を起こす自然の力）により地表が削剥される現象である。侵食は，降雨による雨食，河川の流れによる河食，水との化学反応による溶食，氷河の流れによる氷食，風の流れによる風食，波打ち際の波の作用による海食に区分される。周囲を海に囲まれ，温暖多雨な気候と起伏の大きい地形を有する日本列島では，河食と海食が主要なものとなっている。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し，隆起・沈降の発生に伴い，主として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・侵食は，その変動量が長期間にわたり累積する。隆起・侵食が生じると，例えば，将来 10 万年程度で，地下施設の地表への露出や，それに伴う地下水の流動特性や化学特性の大きな変化が生じる地域があると考えられる。このため，そのような大きな変化を引き起こすような著しい隆起・侵食を，最終処分法に定められた「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱う。

一方，上記のような大きな変化を伴わない小規模な隆起・侵食の影響については，過去の隆起・侵食の規模や傾向などにに基づき，隆起・侵食による地形変化（処分施設の設置深度や地形勾配の変化），それに伴う地下水の流動特性や化学特性の変化，岩盤特性の変化などの評価を行い，地下施設的设计による対処などを含めて検討する。

なお，沈降については，堆積が生じることにより地表から放射性廃棄物への距離が増す方向への変動となることから，地層処分システムへの影響における検討の中では「地層の著しい変動」として取り扱わないこととする。

5.1.1.2 自然現象の将来予測

(1) 地層処分事業における将来予測に関する動向

地層処分システムに著しい影響を及ぼす可能性のある自然現象について、第2次取りまとめでは、過去から現在までの自然現象の活動履歴に関する情報の整備、各自然現象の規則性や傾向(周期性、継続性、地域性、変動範囲など)の把握、それらに基づく将来における活動の場、変動の規模や地質環境への影響などについて検討を行い、次のように整理している (JNC, 1999a, 1999b)。

- ・ 自然現象の種類や地域によって得られる情報の量や精度に違いはあるものの、おおむね過去数10万年まで遡って、活動の場所や変動の規模を追跡することができた。
- ・ 自然現象によっては、過去数100万年における活動の特徴や傾向を推定することができた。
- ・ これらの結果に基づき、10万年程度の将来にわたって、自然現象の活動やその影響が十分に小さいと期待できる場所を見出すことができるとの見通しを得た。

地層処分事業における地質環境の将来予測については、原子力委員会や土木学会においては、以下のような考え方が示されている (原子力委員会, 1997; 土木学会, 2001, 2006a)。

- ・ 天然現象の中には、地震・断層活動や火山・火成活動のように急激かつ局所的な現象と、隆起・沈降・侵食および気候・海水準変動のように緩慢かつ広域的な現象があり、それぞれ地下深部の環境に影響を及ぼしている。
- ・ 前者については、場所によっては地質環境への影響は大きいものの、大きな変形を伴うような影響を及ぼす地域は比較的狭い範囲に限定されており、また過去数10万年の時間スケールでみれば、これらの現象が規則的に起こっていることから、今後10万年程度であれば、その規則性および継続性から、それらの影響範囲を推論することができると考えられる。
- ・ 一方、後者は、地下水系などに広い範囲で影響を及ぼすが、緩慢かつ広域的であるから、過去数10万年程度について、広域にわたる比較的正確な地質学的記録が残されている。
- ・ それらの記録を基に、将来についても10万年程度であれば、その及ぼす影響の性質や大きさ、また影響の範囲の移動や拡大の速度などを推測することができると考えられる。

以上の知見・見解を踏まえ、NUMOは、日本列島周辺のプレートシステムおよび広域的な造構応力状態の変遷について整理し、自然現象の将来予測の考え方について、次のように取りまとめた (NUMO, 2004)。

- ・ 日本列島を取り巻くプレート配置やプレート運動の方向と速度は、将来10万年程度は安定であると考えられ、たとえ変化があったとしても10万年程度では大きな変化がないことが予測され、今後10万年程度は現在と同様の造構応力状態が継続すると推定される。
- ・ 従って、プレート運動に関連する地震などの自然現象については、外挿法により、過去数10万年程度の地質学的記録を基に、最終処分法で求められている将来数万年程度の予測が可能と考えられる。

このような背景のもと、地層処分事業においては、地質環境の長期的な変遷の要因となる自然現

象の将来予測期間を将来 10 万年程度と想定し、技術的な検討を進めてきた。

一方、近年、原子力安全委員会において、放射性廃棄物の処分に関する安全基準や安全評価の考え方などの検討が進められた。2010 年 4 月に公表された「余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方」（原子力安全委員会、2010a）では、「各国では、その国際的考えを参考にしつつ、それぞれの国の基準（判断の根拠）を定めており、わが国においても、各国の考えを参考としつつ、安全評価に際し数万年から数 10 万年の長期のシナリオ評価を行うことが必要であり、それによる不確かさの大きさなどを勘案すると、判断の根拠としては、余裕をみて、スウェーデン、スイス、英国などと同様に、管理期間終了以後のリスクを 10^{-6} 年以下とすることが妥当と判断した」とされた。このため、余裕深度処分における安全評価においては、評価対象となる自然現象（火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食、気候・海水準変動）に対して、各自然現象の時間的変遷を十分に考慮したシナリオを設定することが求められている。

さらに、将来 10 万年より先の将来予測については、産総研（2007a）において、「地質および気候関連事象の超長期予測でも、評価対象地域で過去に起きた地質学的な事象の履歴を明らかにし、これを将来に外挿することが基本となり、将来 10～100 万年間に外挿するのであれば、これと同じかこれ以上の過去にまで遡る必要がある」との考え方が示されている。

このような状況を鑑み、NUMO では、最新の科学的な知見を加味して上述の将来 10 万年程度までの将来予測の考え方をさらに推し進め、それを超える期間を含めた将来予測の考え方について、以下のとおり取りまとめた。

（2）将来予測の考え方

ここでは、まず検討の結果導かれた将来予測の基本的なスタンスを示し、それ以降でそれに至るまでの論理を展開し、最後にサイト調査・評価からみた将来予測期間の区分について述べる。

（i）将来予測の基本スタンス

自然現象の将来予測は、主に外挿法により、事象および地域ごとに異なる過去の情報の量、精度さらには地質構造発達過程を考慮し、予測の前提条件を明らかにした上で、予測期間とその精度を適切に設定して行う。

（ii）将来予測の方法論

地質環境の長期変遷の要因となる自然現象の将来を予測する方法は、外挿による方法、類推による方法、現象論的モデルなどを用いた数値解析による方法、確率論による方法の四つに大別される（例えば、田中・千木良、1997）。外挿による方法（以下、外挿法という）は、過去から現在までに発生した変動の傾向を明らかにし、その傾向を将来へ外挿する方法であり、時間的な変動特性（継続性、周期性など）の外挿（図 5.1.1-2）、空間的な変動特性（活動の場の収れん、移動、空白域など）の外挿を組み合わせることで予測を行う。類推による方法は、予測しようとする現象と類似の事例を検討することにより現象の一般化を図り、その類推から将来の変動・変化を予測する方法である。現象論的モデルなどを用いた数値解析による方法は、現象のメカニズムを解釈するために現象論的なモデルを構築し、それに基づき現象を複数のパラメータで数値モデル化し、数値解析により将来を予測する方法である。確率論による方法は、地殻変動の発生の可能性を数量的に見積もり、発生確率を求める方法である。

自然現象の将来予測では、これら四つの方法のうち外挿法が最も一般的な方法であるとされており（例えば、田中，2004），地層処分事業における自然現象の将来予測においても，外挿法を基本とし，必要に応じてほかの手法を補完的に組み合わせる。

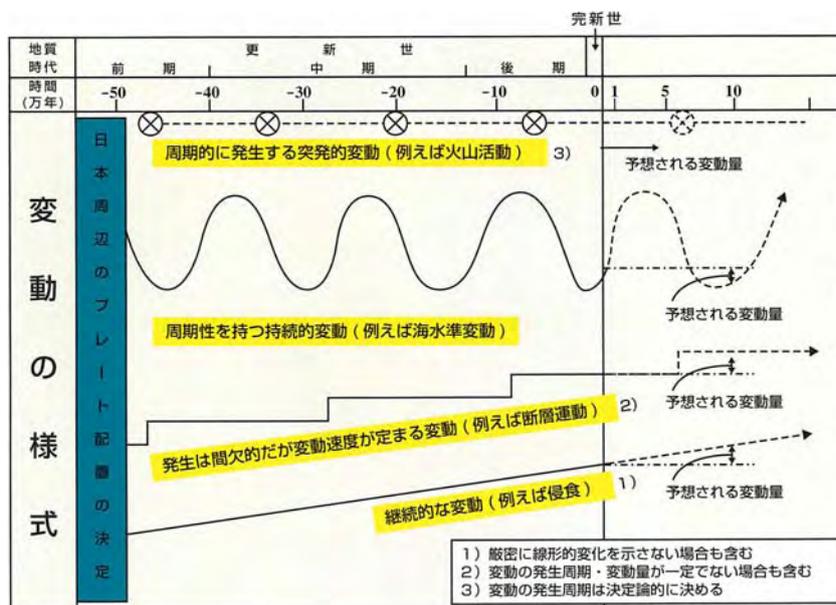


図 5.1.1-2 自然現象の時間的な変動様式
(地質環境の長期安定性研究委員会，2011)

将来の自然現象については，過去から現在までの変動を検討し，その中から周期性，法則性，地域性などを見出すことにより過去の現象を将来へ外挿することが可能となる。この場合，変動の背景となるテクトニクス（例えば，プレートの運動など）の傾向が継続すると考えられる期間などの検討が重要である。

(iii) 外挿法による将来予測の考え方

外挿法による将来予測では，まず，自然現象の過去から現在までの変動を明らかにすることが必要である。一般に，過去から現在までの変動の解明は，次に示す①～④の順序に従って検討される（図 5.1.1-3）。

- ① 過去から現在までの状態の把握・・・隆起量の分布など
- ② 変動傾向（法則性）の把握・・・周期性，継続性，規則性，偏在性など（図 5.1.1-2）
- ③ 変動を引き起こすメカニズムの解明・・・断層運動，褶曲運動など
- ④ メカニズムの駆動力となる外部要因との関係の解明・・・プレート運動など

外挿法により将来発生する自然現象の予測を行う場合，基本的にこの順序を逆にたどって検討することとなる。ただし，②と④との関係，すなわち，変動の傾向と，その原因と考えられるプレート運動などの継続性の関係（経験則）に基づいて議論されることもある。

一般に，自然現象の将来を予測するためには，何らかの仮定が必要である。そのための本質的な考え方として，「自然現象には何らかの秩序があり，同様の条件のもとでは，同様の現象が生じる」という斉一説（Lyell, 1830 など）がある。上記の検討順序でいえば，②～④のいずれかの段階で齊

一説に基づく仮定をおくことが将来予測には必要となる。例えば、②から予測をはじめると場合には、過去の変動傾向（法則性）が将来も続くことが仮定となる。また、③の場合では、現在生じている変動のメカニズムが将来も継続することが仮定となる。④の場合は、変動のメカニズムを継続させる外部要因が継続することが仮定となる。ここで重要な点は、できるだけ確からしい仮定を用いることである。

変動傾向に対して、そのメカニズムを明らかにできれば、法則性自体の妥当性を検証することが可能となる。また、③と④の関係を明らかにすることは、以下に述べるように、外挿法による将来予測が可能な期間を検討する際に重要である。

ただし、実際には、対象とする事象のメカニズムやその駆動力となる外部要因について、必ずしも把握できるとは限らない。また、将来予測における議論の前提を②～④のいずれに置くことができるかは、地域性があり、対象とする事象によっても異なると考えられる。従って、NUMO では、議論を開始する上での前提条件を明確にした上で将来予測を行う。

さらに、自然現象の外挿に際しては、時間・空間スケールにも留意する必要がある。例えば、プレート運動が100万年スケールでは変化しても、10万年程度の時間でみればほぼ一定と近似できる場合がある。あるいは、広域的には、変形を伴った空間的に一様ではない隆起運動であっても、ごく狭い範囲では一様とみなせることもある。一方、断層運動のような、より短い時間スケールで議論すべきものは、平均的な運動と個別のイベントを区別して議論する必要がある。このため、予測の対象とする事象の変化の時間スケールと空間スケール、ならびに、それらの関係に留意して外挿を行う。なお、各自然現象の将来予測において導入する具体的な仮定については、5.3.1 に述べる。

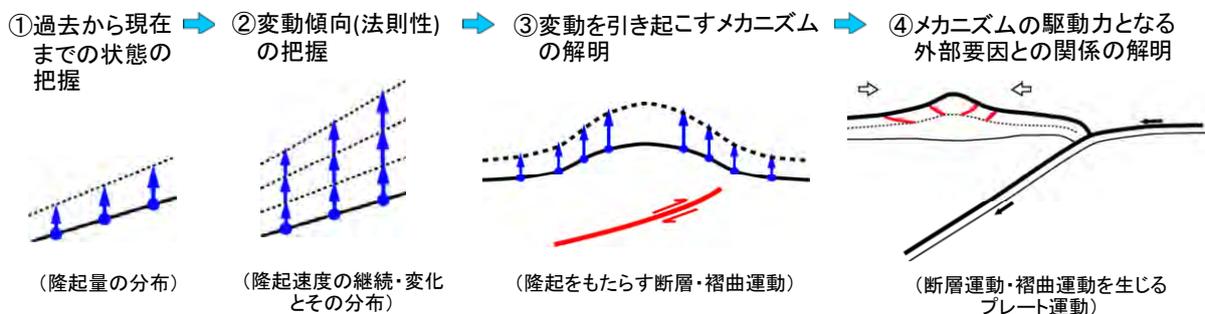


図 5.1.1-3 過去から現在までの変動の解明の基本的な流れ（隆起運動の例）

(iv) 自然現象の履歴の把握

外挿法による将来予測の確からしさは、外挿に用いる過去から現在までのデータの品質と量に依存する。一般に、予測期間に対して十分に長い期間にわたって外挿の根拠となるデータがある場合、さらには、データ量が多い場合には、将来予測に含まれる不確実性は小さく、逆に、予測期間に対して取得されているデータの期間が短く、データが少ない場合には、将来予測に含まれる不確実性が大きいと考えられている。従って、できるだけ長い期間に遡り自然現象（運動）の履歴を把握することが、外挿法の不確実性を低減させる。

過去の履歴を把握するための調査・評価手法は、測地学的手法、地形学的手法、地質学的手法に大別される。各手法がどの程度の過去の履歴把握に適用できるかは、それぞれの手法で利用する現象の時間スケールに依存し、大局的には、測地学的手法が最も至近の変動を対象とし、地質学的手

法が最も長い変動をとらえるものである。従って、より長期間の運動履歴を把握するためには、必然的に地質学的手法の果たす役割が大きく、10 万年程度を超える長期間の変動傾向や地質構造発達過程を把握する際には、10 万年オーダーと 100 万年オーダーの運動の関係（地形学的手法と地質学的手法の連携）に留意する。なお、各自然現象の具体的な調査・評価については、5.3.1 に述べる。

(v) 外挿法による将来予測期間の考え方

外挿法による将来予測期間の考え方は、変動傾向やメカニズムの継続性を仮定するか、変動のメカニズムの駆動力となる外部要因の継続性を仮定するかにより異なる。変動傾向やメカニズムの継続性を仮定する場合、どの程度の期間のデータに対して、どの程度の将来の予測が可能かという時間スケールについては明確に定めることが難しく、外挿に用いるために取得したデータに基づき判断することが重要となる。将来予測期間に関する既往の検討（例えば、JNC, 1999a; 土木学会, 2001, 2006a など）では、過去数 10 万年程度の履歴に基づき、将来 10 万年程度の将来予測が可能とされている。一方、運動のメカニズムとそれを引き起こした外部要因の関係に基づき、外部要因の将来の継続性を仮定した場合、将来予測が可能期間が外部要因の継続する期間に置き換わる。

例えば、外部要因として太平洋プレートの運動を考えた場合、その運動の継続性が仮定として認められれば、仮定した太平洋プレートの運動の継続期間に応じた 10 万年程度よりも長い期間の将来予測も可能であると考えられる。JNC の東北日本弧の検討例（JNC, 1999b）では、東北日本弧の南北方向の軸をもつ隆起帯と沈降帯の配列を太平洋プレートからの圧縮応力による上部地殻の座屈褶曲によるものとし、プレートの運動が大きく変化しない限り、隆起・沈降帯の分布は現在と大きく変化せず、褶曲と逆断層による山地の隆起と盆地の沈降が継続するとした。この将来予測の例に当てはめれば、メカニズムの駆動力となる外部要因（上記 (iii) の④）であるプレート運動の継続性から検討されており、その継続性を仮定できる時間が外挿可能な期間と考えられる。

変動傾向または変動のメカニズム、または、メカニズムの外部要因の継続性を仮定する際、過去から現在までの運動に関するデータが取得される期間は地域により異なる点にも留意し、将来予測が可能期間を調査データに基づき検討する。なお、安全評価シナリオの区分および時間枠を設定するためには、自然現象の将来予測可能な期間を考慮する必要がある。なお、安全評価シナリオ区分の考え方については、7.1.3 に述べる。

(vi) テクトニクスの継続性と将来予測期間

前述したように、運動のメカニズムとプレート運動の継続性とを結び付けることができれば、将来予測が可能期間は、プレート運動の継続時間としてとらえることができる。プレート運動の継続性に関する知見は以下のように整理できる（NUMO, 2004）。

日本列島周辺では、30Ma（Ma：100 万年前を表す地質学的な時間単位）頃から生じたアジア大陸東縁部での背弧海盆の形成がほぼ 15Ma に終了し（Jolivet et al., 1994）、15Ma から 14Ma にかけて日本列島周辺のプレートシステムの基本的枠組みが定まり、現在に至っている。また、日本列島周辺の海洋プレートの運動方向については、太平洋プレートが約 2.5Ma 以降、フィリピン海プレートが約 1.5Ma 以降変化がなく、現在に至っている（Kamata and Kodama, 1999）。このように、日本列島周辺のプレート運動の変化（プレートの運動方向・運動速度、プレートの沈込み角度など）をみると、日本海、千島海盆、四国海盆の拡大などは 15Ma 頃に終了した後、現在に至るまで大きな変化はなく、ほぼ定常状態に達していると判断される（Jolivet et al., 1994 ; Kimura and Tamaki, 1986 ;

Okino et al., 1998)。日本列島における造構応力状態については、地域性があるが、少なくとも過去数 10 万年間以上にわたって、東西方向の圧縮状態で特徴付けられる地殻変動が継続していると考えられる。

例えば、太平洋プレートの運動に関しては、地磁気異常の縞模様や海山列のデータに基づき、少なくとも 15~0Ma の間ほぼ一定であることが算定され（丸山・瀬野, 1985）、ハワイ海山列の並びから 5~2.5Ma にかけて運動方向が時計回りに数度以内で変化した（Cox and Engebreston, 1985; Pollitz, 1986）とされている。また、太平洋プレートの運動方向の大きな変化について、ハワイ-天皇海山列の屈曲が 50~42Ma に生じた（Sharp and Clague, 2006: 図 5.1.1-4）とされるが、近年、ハワイ-天皇海山列の形成年代やマンテル内の物理的過程の検討などに基づき、81~47Ma の間にハワイホットスポットが移動したとの知見（例えば, Tarduno et al., 2009）が示されている。この知見を考慮すると、太平洋プレートの運動方向が大きく変化した期間は少なくとも 47~42Ma で、最大約 500 万年間と見積られる。一方で、プレートシステムの転換には少なくとも 100 年以上の期間を要する（JNC, 1999b）とされている。従って、太平洋プレートの運動の 100 万年程度の継続性を仮定することは十分に受け入れられると考えられる。これを (v) でとりあげた JNC の東北日本弧の検討例（JNC, 1999b）に当てはめるならば、数 10 万年~100 万年の遠い将来における予測の不確実性は大きくなるかもしれないものの、評価対象とする事象にかかわる変動（地史）と、変動の駆動力となるプレート運動の関連性にかかわるデータに基づいて、100 万年程度の将来予測の議論は可能といえる。

このように、プレート運動の一様性を将来予測の仮定とし、その継続時間を予測期間に置き換える場合には、地域レベルでの地質構造発達過程を解明し、プレート運動と対象となる自然現象の時間的・空間的スケールの関連性を把握することが重要である。NUMO は、地域性、さらには、データの品質・量により、外挿法により予測が可能な期間に差異がある点に留意して、将来予測期間を設定する。

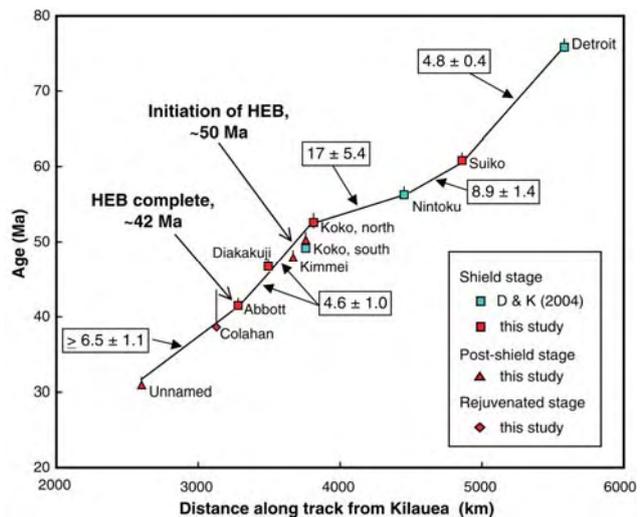
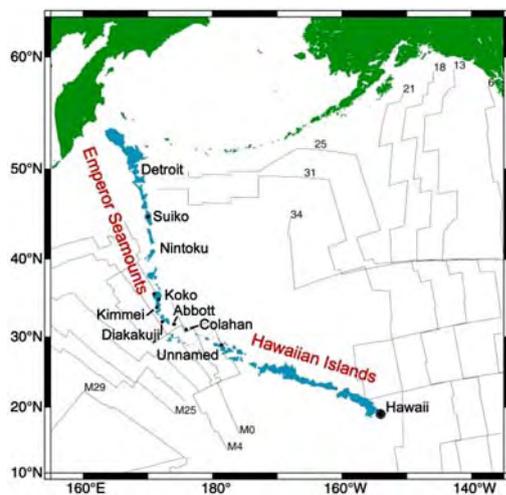


図 5.1.1-4 ハワイ-天皇海山列の位置および形成年代
(Sharp and Clague, 2006 を編集)

左：ハワイ-天皇海山列の位置，黒丸は海山の形成年代測定試料位置を，灰色線は地磁気極性編年に基づく海洋底の縞状磁気異常（数値：縞状地磁気異常番号）を示す。
右：ハワイ-天皇海山列の形成年代（ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代）と現在のホットスポットの位置であるキラウエア火山からの海山列に沿った距離の関係，青四角は Duncan and Keller (2004) からの引用データを示す。ハワイ-天皇海山列の屈曲（HEB）は 50~42Ma に生じたとされる。

(vii) 外挿法が適用できない場合の評価

(a) プレート運動の一様性が仮定できない地域の評価

わが国には，海底の拡大，小陸塊の衝突やそれに伴うプレート境界の移動などにより，現在もテクトニクスが変化している可能性がある地域が存在する（日本海東縁部，新潟-神戸ひずみ集中帯，中央構造線沿い，伊豆半島の一部および伊豆-小笠原背弧リフト帯周辺，沖縄トラフなど）。これらの地域については，将来予測に関してより慎重な検討が必要である（NUMO, 2004）。

なお，プレート運動が変化している地域であっても，当該事象の変化そのものの法則性やメカニズムを把握できるならば，その法則性やメカニズムの進行を仮定した現象論としての将来予測は原理的に可能である。しかしながら，そのような地域では，信頼性の担保された予測期間を設定することは困難であり，予測に含まれる不確実性に十分注意することが必要である。

(b) 外挿自体ができない将来の評価

全く外挿し得ない将来については，現在の状態から移り変わるであろう次の状態（プレート運動の変化，広域応力場の変化など）を仮定し，そのような状態にあるほかの地域で起こっている自然現象を参考に，推定した状態に対して発生する可能性がある自然現象（例えば，圧縮場から引張場に変化した場合の，断層の再活動・新生やカルデラ火山形成など）を想定することが考えられる。

(viii) 将来予測の時間スケール

将来予測の時間スケールの設定では，まず，予測可能性と不確実性を整理することが重要である。この観点から，予測期間を定性的に以下の三つの期間に区分できると考えられる（表 5.1.1-2）。

期間 A : 十分な過去の情報に基づく外挿法による将来予測が可能な期間

予測期間に対して十分長い期間の過去の情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に基づき将来を予測することができる。過去の変動傾向に関する仮説が複数あったとしても，将来予測の差は小さいと考えられる。

期間 B : 不確実性は大きくなるが外挿法による将来予測が可能な期間

予測期間よりも短い期間の過去の情報（変動傾向，メカニズム，駆動力）に関する情報しか得られない場合，外挿を否定する積極的なデータがないことを前提に，将来を予測する。情報量や知識の不足あるいはばらつきなどに起因し，過去の変動傾向について複数の仮説が考えられ，それらを考慮することにより，将来予測の不確実性はより大きくなる。

期間 C : 外挿法による将来予測が難しい期間

過去～現在のデータからでは変動傾向が得られない，過去～現在の変動傾向やその要因が継続するわからない，あるいは継続しないことが想定され，将来予測の不確実性は著しく大きくなる。

基本的には，前項までに示した考え方に沿って検討を行い，事象ならびに地域性を考慮して，各期間に対して具体的な年代を与える。さらに，3.1.2.3 に述べたとおり，各期間における将来予測の不確実性を考慮して，安全評価に向けたシナリオを構築する。なお，シナリオ区分の意義，ならびに，将来予測とシナリオ設定の関係については，7.1.3 に述べる。

表 5.1.1-2 サイト調査・評価からみた自然現象の将来予測期間の区分の考え方の整理

将来予測期間の区分		期間A	期間B	期間C
		十分な過去の情報に基づく外挿法による将来予測が可能な期間	不確実性は大きくなるが外挿法による将来予測が可能な期間	外挿法による将来予測が難しい期間
将来予測の考え方		<ul style="list-style-type: none"> 予測期間に対して十分長い期間の過去の情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づく将来予測が可能 過去の変動傾向に関する仮説が複数あっても将来予測の差は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 予測期間よりも短い期間の過去の情報（変動傾向、メカニズム、駆動力）に基づき将来を予測する 情報や知識の不足・ばらつきに起因する変動傾向に関する複数の仮説を考慮することにより不確実性がより大きくなる 	<ul style="list-style-type: none"> 将来のプレート運動の変動傾向が変化する可能性が否定できない、あるいは過去の変動傾向が把握できないことから、将来予測の不確実性が著しく大きくなる 変動傾向が変化した場合の状態において生じうる現象を想定する
将来予測における不確実性	相対的な大きさ	小	中	大
	主な種類	データの不確実性	概念化の不確実性、データの不確実性	概念化の不確実性
	パラメータ設定における留意点	<ul style="list-style-type: none"> 本来的な現象のばらつき、調査時の観測誤差などを考慮する 	<ul style="list-style-type: none"> 変動傾向に関する複数の仮説を考慮することによる不確実性に、本来的な現象のばらつきや観測誤差を併せて考える 	<ul style="list-style-type: none"> 変動傾向の解釈に大きな不確実性が含まれる 変動傾向が変化した場合の状態を仮定し、そのような状態にあるほかの地域の情報を参考に、適切なパラメータを設定する
考慮する不確実性の例	火山・火成活動	火山の分布、火山フロントの位置の経時変化・ゆらぎなど		新たな火道の発生など
	地震・断層活動	空間的分布、活動性、変形帯の範囲、断層の分岐・伸展など		地質断層の再活動、断層の新生など
	隆起・侵食	隆起量・侵食量の見積り誤差など	左記に加え、運動様式による差異など	隆起・沈降の傾向や運動様式の急激な変化など

5.1.2 わが国の地質環境の多様性

5.1.2.1 地層処分にとって重要な地質環境の特性

地層処分における地質環境の役割としては、人工バリアにとって適切な設置環境を提供するとともに、それ自体が天然バリアとして機能すること、さらにそれらが長期的に維持されることが求められる。

人工バリアの設置環境については、処分施設と人工バリアの建設・施工性、および人工バリアの品質維持の両面から検討する必要がある。前者に関しては、処分空洞の安定性や作業環境の観点から、岩盤特性（地温や応力状態ならびに媒体としての諸物性）および地下水の流入量を評価することが重要である。後者については、オーバーパックの腐食、ガラス固化体の溶解、あるいは緩衝材の変質などの観点から、地下水の化学特性や流動特性、ならびに岩盤の熱特性が重要となる。一般的には、地下水が還元的でその動きが遅いことなどが、人工バリアの劣化や放射性物質の溶解・移動を抑制する観点から、より適切と判断される条件となる。また、岩盤については、地温が低く熱伝導性が高いこと、応力や力学的異方性が小さく、十分な強度を有することなどがより適切と判断される条件となる。

天然バリアとしての機能については、人工バリアの設置環境としての条件に加えて、地下水を媒体とする物質移行に着目することが必要である。地下水によって岩盤中を移動する物質は、その過程において徐々に分散し希釈される。また、鉱物による収着現象や岩石のマトリクス中への拡散現象などにより、物質の移行が遅延される。

人工バリアの設置環境や天然バリアとしての機能については、気候・海水準変動や断層活動に起因する相対的な隆起・沈降現象や、それに伴う地質環境特性の変遷（例えば、隆起・侵食による地形変化に伴う地下水の流動特性や化学特性の変化など）を考慮しても、期待する機能が長期的に維持されることを、安全評価を通して示すことが求められる。

このように地層処分にとって重要な地質環境特性としては、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性が挙げられる。また、これらの基盤的な情報として地質・地質構造が挙げられる。

岩石の種類や分布・連続性、断層や割れ目の分布・形状などは、岩盤特性だけではなく、地下水や物質の移行経路の構造やその中の地下水と岩石の化学的な反応などに影響を及ぼす可能性がある。このため岩盤と地下水の特性を理解する際に、地質・地質構造との関係を考慮する必要がある。特に、地下水や物質の移行経路となる大小さまざまな地質構造要素に着目し、その幾何学的形状・構造や化学的な性質を把握することが重要である（JNC, 1999b）。また、岩体の形状・規模は、地下施設の施工性、操業性、廃棄体の収容能力などと密接な関係があり、処分施設設計の基本的な条件となる（土木学会, 2001）。NUMO は、地下施設を設置しようとする地層およびそれを包含する地層において、割れ目、風化、変質、岩相変化が少ないこと、地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを、概要調査地区の選定にかかわる地質環境特性の総合的な評価を高める条件（以下、より好ましい条件とする。）とした（NUMO, 2004, 2009b）。

地下水の化学特性は、オーバーパックの腐食およびガラス固化体の溶解に影響を及ぼすほか、緩衝材の化学的な安定性や緩衝材および岩盤中での放射性物質－鉱物－地下水の相互作用を支配する重要な要素である。特に地下水の酸化還元状態は、オーバーパックの腐食速度や放射性物質の溶解度に大きく影響する（JNC, 1999b）。NUMO は、概要調査地区の選定において、地下水が著しく酸性あるいはアルカリ性でないこと、地下施設を設置しようとする地層や地下水が広範囲に酸化され

ていないことを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

地下水の動きや水みちの連続性などは、物質移行経路と関連性があり、地層処分システムの閉じ込め機能に大きな影響を及ぼす (土木学会, 2006a)。また、地下水の動きは、地下水の水質とともにオーバーパックの腐食速度やガラス固化体および放射性物質の溶解速度を支配し、地下水の動きが大きい場合には、緩衝材自体の物理的な安定性に影響を及ぼすことも考えられる (JNC, 1999b)。NUMO は、概要調査地区の選定において、地下施設を設置しようとする地層での地下水の流量・流速が小さいことを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

岩盤特性 (力学特性、熱特性など) については、人工バリアの仕様や地下施設のレイアウトなどを決める上で重要な要素である。岩盤の熱特性は、処分場の温度環境や人工バリアの化学的な反応に影響を及ぼす。特に緩衝材の化学的な安定性は、その品質維持にとって重要である。一方、力学特性は、処分場の建設・操業時における空洞安定性やオーバーパックや緩衝材の力学的な安定性を左右する (JNC, 1999b)。土木学会 (2001, 2006a) では、第四紀の堆積層のうち未固結なものは、強度が著しく小さく、坑道掘削が困難であることから、地下施設の設置対象から除外する必要があるとしている。NUMO は、概要調査地区の選定において、法定要件にも定められていることを受けて、文献情報に基づいて処分を行おうとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域は含めないこととし、処分施設を設置しようとする地層およびそれを被覆する地層において岩盤の強度が低いこと、変形が小さいこと、地温勾配が小さいこと、地下施設を収容し得る深さに良好な地層が広く分布することを、より好ましい条件とした (NUMO, 2004, 2009b)。

岩盤中での物質移動は、天然バリアとしての機能に直接的に関与するものである。岩盤中における物質移動の主な原動力は地下水の動きであるが、単に動水勾配に沿った流れ (移流) だけではなく、濃度勾配により物質が岩石のマトリクス中に拡散する現象 (マトリクス拡散) を考慮することも重要である。また、地下水を媒体として移動する過程においては、物質が希釈・分散することや、鉱物の表面に収着するような現象にも注目すべきである (JNC, 1999b)。また、地下水中のコロイド、有機物、微生物の存在は、物質の移行挙動に影響を及ぼすと考えられている。岩盤中における物質の移行経路となり得る地質構造要素としては、岩石中の粒子間の間隙 (粒子間間隙)、岩石組織に起因する割れ目 (層理面や片理面沿いに形成される割れ目など)、地殻構造圧による岩石の破壊に伴って形成される割れ目 (節理、断層など)、加えて堆積岩層中の砂岩レンズなどが挙げられる。

5.1.2.2 多様な地質環境への対応

現在の日本列島の地質的な特徴としては、成因や形成時期が異なる多種多様な岩石で構成されており、地質分布が複雑であること (図 5.1.2-1)、また、断層が多数分布することが挙げられる。日本列島に分布する岩石の約 56% は堆積岩類 (付加コンプレックスを含む) であり、約 40% は火成岩類 (付加コンプレックスを含む)、変成岩類は約 4% 程度である (村田・鹿野, 1995)。火成岩類、堆積岩類および変成岩類は、それぞれの起源となったマグマ、堆積物、原岩の性質およびそれらが固結する過程での温度や圧力などの条件の違いにより、さらに多種多様な岩石に分類される。また、形成後の環境条件の違いにより、岩石の性質は変化する。

一方、地理・地形的な特徴としては、日本列島は起伏が大きく、国土の多くを丘陵や山地が占めており、山地が海岸付近まで迫っているところも少なくない。また、比較的温暖な気候や豊富な降水量、周囲を海に囲まれた島国といった特徴により、わが国では一般に地下水の水位が高く、地表付近まで地下水に満たされている。海岸付近の地下では、内陸部からもたらされた天水起源の淡水

系地下水と海水起源の塩水系地下水が接していると考えられる。このような地理的・地形的条件は、わが国における大局的な地下水の流動特性や化学特性を特徴付けている。さらに、これらは、隆起・侵食、および気候・海水準変動による長期的な影響を受けやすいといった特徴を有している。

わが国の地質環境特性の調査・評価に当たっては、上述した特徴に留意した上で、当該サイトの地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能を抽出し、それらにかかわる特性を的確に把握するための調査・評価を行うことが重要である。

地質・地質構造に着目した場合、層状構造の発達する堆積岩は、反射法地震探査などの地表からの調査により、比較的容易に地下の地質・地質構造の分布・性状を推定することができる。一方、結晶質岩、特に花崗岩などの火成岩は、比較的大きく均質な岩体を形成し、堆積岩のような層状構造が発達していないことから、地表からの調査により岩体内部の岩相や地質構造の分布・性状を推定することは、堆積岩より難しくなる。

地下水の化学特性に着目した場合、地下水の起源は①天水起源、②海水起源、③マグマ由来の三つに区分される。天水起源の淡水系地下水は、主として内陸部に分布し、海水起源の塩水系地下水は沿岸域（海岸線付近の陸地から浅海域までを含む領域）に分布する。また、マグマ由来の地下水は火山地域に分布する。沿岸域では天水起源の淡水系地下水と海水起源の塩水系地下水が接し、それらが混合した地下水が存在する。そのような地下水の分布領域は、地層の水理特性、地下水の涵養量や流動特性などの諸条件を反映して、地域によって異なることが想定される。そのため、沿岸域においては、淡水系地下水の領域、塩水系地下水の領域、それらの混合領域、それぞれの分布を把握することが重要となる。さらに、沿岸域以外においても、地下浅部に天水起源の地下水（淡水）、地下深部にマグマ由来の地下水が存在する場合もある。

岩盤特性に着目した場合、岩種と岩石の力学強度の関係から、大きくは硬岩（一軸圧縮強度が20MPa程度以上）と軟岩（一軸圧縮強度が20MPa程度以下）の二つに区分される。岩石の力学強度の違いに基づき区分される軟岩は、岩石の力学強度が硬岩に比べ小さいだけでなく、岩盤（硬岩）と土質地盤（未固結地盤）の中間的な性質を有する。そのため軟岩では、スレーキング、膨張性、クリープなどの現象を生じるものもある。

岩盤中における物質移動、すなわち岩盤中における移行経路の違いに着目すると、①断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤（例えば、花崗岩）、②粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤（例えば、新第三紀の堆積岩）に区分される。断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤では、亀裂性媒体中の物質移行に着目した解析・評価が行われる。一方、粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤では、多孔質媒体中の物質移行に着目した解析・評価が行われる。このような物質の移行経路の違いは、調査・評価において特に着目する構造や組織の違いを生じさせる。断層・節理などが主要な移行経路となる岩盤では、割れ目などの面構造に着目した調査・評価が主体となり、粒子間間隙が主要な移行経路となる岩盤では、岩石の組織や物性（例えば、間隙率）に着目した調査・評価が主体になると考えられる。大局的にみれば、断層・節理などが主要な移行経路となる結晶質岩は硬岩、粒子間間隙が主要な移行経路となる堆積岩は軟岩として区分できる。

このようにわが国は多様な地質環境を有しているが、5.1.2.1に述べた地層処分にとって重要な地質環境の条件や機能に着目すると、地下水や物質の移行経路や岩盤特性の観点からは、結晶質岩と堆積岩に大きく区分できる（図5.1.2-2）。また、地下水の化学特性の観点からは、淡水系地下水と塩水系地下水に大きく区分できる。

以上のように区分される地質環境は、空間的な特性のばらつきを有している。このような地質環

境を効率的に理解するための調査・評価は、基本的には地質環境の区分によらず、広域の調査・評価からサイトスケールの調査・評価へと段階的に進め（5.2.1 参照）、各段階では調査計画の立案、調査の実施、調査データの解釈・解析・統合、地質環境モデル（5.2.1 参照）の構築、調査・評価結果に基づく課題の抽出、次段階の調査計画の立案、の順に進める（5.2.2, 5.2.3 参照）。しかし、沿岸域においては、海域では地表踏査などの調査技術の適用が困難であることや、淡水系地下水と塩水系地下水が混合した地下水が分布すると想定されることなどから、陸域に比べて調査・評価における物理探査の重要性が増すと考えられる。このように、地質環境特性のみならず、当該サイトの地理条件によっても、調査・評価の考え方に違いが生じる。このため、当該サイトに特徴的な地質環境の特性を把握するための調査・評価の考え方やその方法は、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水での調査研究事例、および沿岸域での調査研究を通して有効性が示された調査技術を適切に組み合わせることにより、多様な地質環境にも対応させることが可能になると考える。

＜地質図凡例＞

		堆積岩類	火山岩類	深成岩類	変成岩類
新生代	第四紀	浅藍色	赤色	白色	白色
	新第三紀	黄色	茶色	淡紫色	白色
	古第三紀	緑色	淡紫色	赤色	藍色
中生代		緑色	紫色	赤紫色	藍色
				赤紫色	藍色
古生代		緑色		赤紫色	藍色
		緑色		赤紫色	藍色

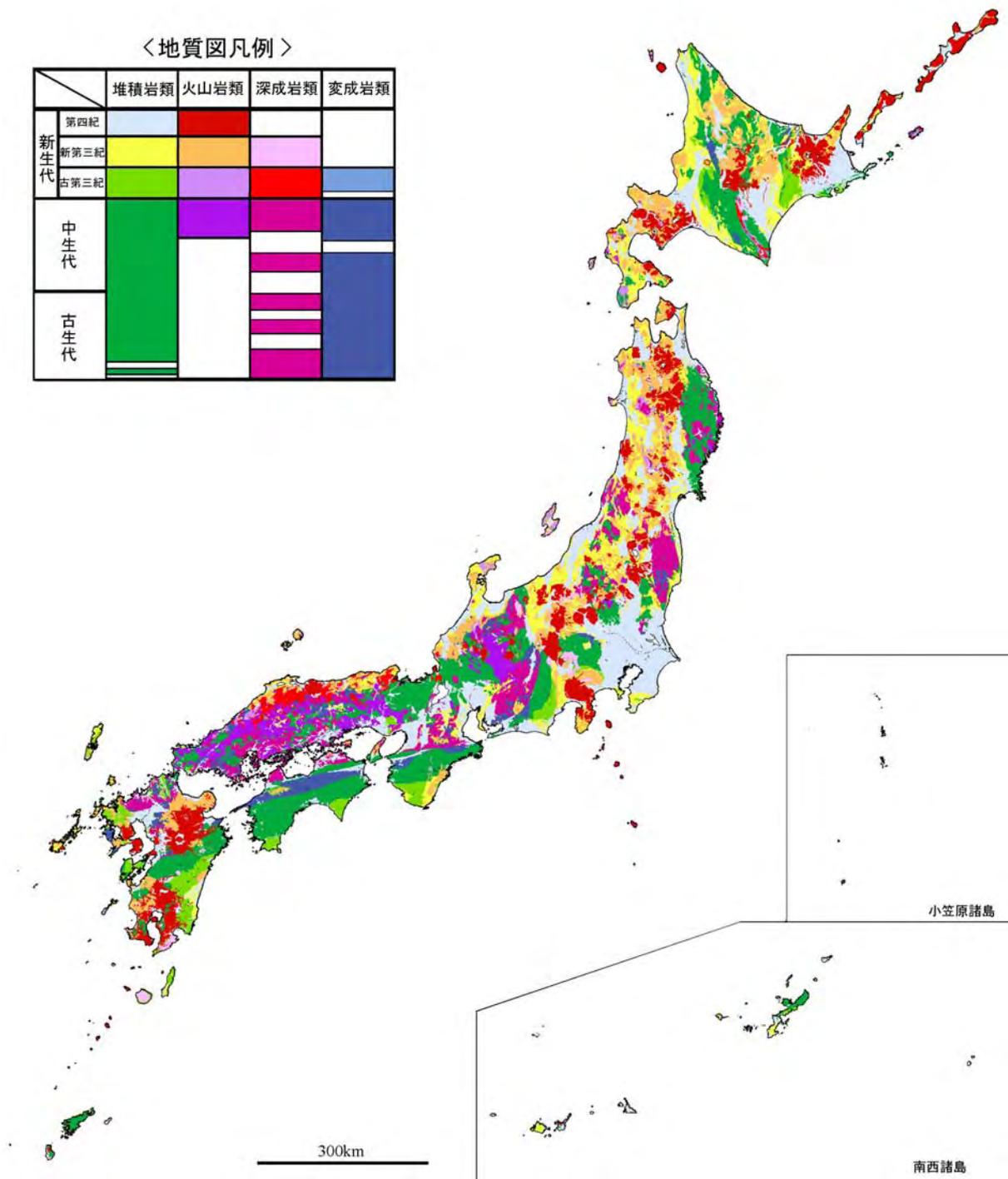


図 5.1.2-1 日本列島の地質分布

日本の地質は、古生代～新生代のさまざまな堆積岩、火成岩、変成岩からなり、大局的にみて弧状列島の伸びの方向とほぼ平行な帯状分布をしている（地質調査所、1995 を編集、承認番号 第 60635500-A-20101122-001 号）。

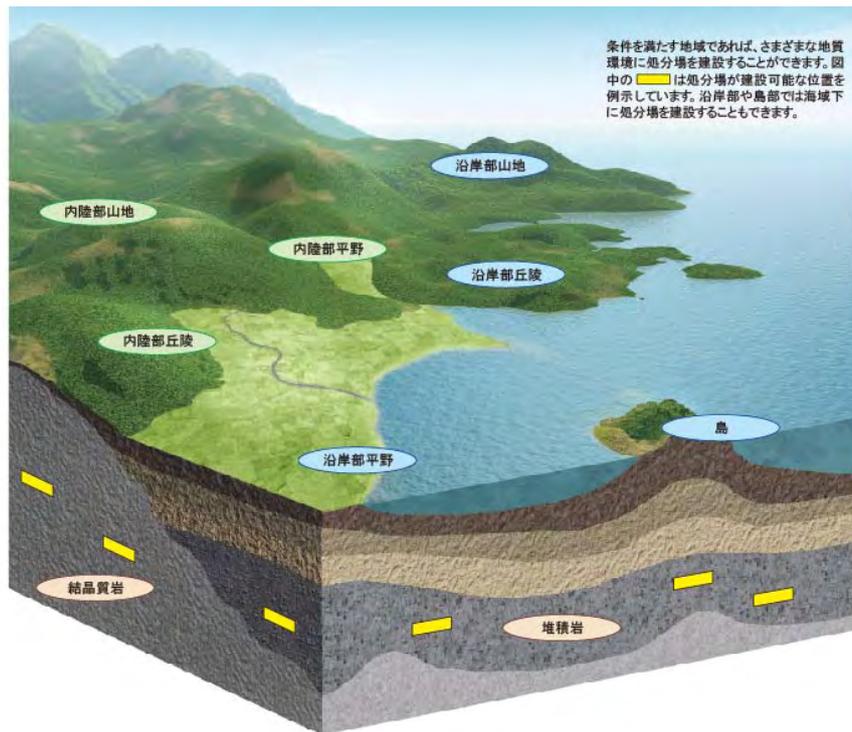


図 5.1.2-2 わが国の地質環境の基本的な分類
(出典：NUMO, 2009a)

わが国の地質環境は、地下水や物質の移行経路や岩盤特性の観点からは、大きくは結晶質岩と堆積岩に分類され、地理的条件からは、内陸部と沿岸域に分類される。

5.1.2.3 多様な地質環境に対する調査・評価の事例

5.1.2.2 に述べたように、わが国の地質環境は、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水に大きく区分される。また、地理的な条件からは、内陸部と沿岸域に区分される。実際には、地表付近に堆積岩が分布し地下深部に結晶質岩が分布する地域、付加体のように亀裂性媒体と多孔質媒体としての特徴をもつ地質がさまざまな割合で存在する地域などが存在する。このような地域においても、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水のそれぞれに特徴的な地質環境、内陸部と沿岸域といった地理条件に応じた調査・評価の考え方やその方法を適切に組み合わせることにより、地質環境を把握することが可能であると考えられる。このような考え方にに基づき、基盤研究開発機関および NUMO では、表 5.1.2-1 に示す研究開発を進めてきた。

JAEA は、2000 年までに整備してきた地質環境の調査技術や評価手法を、実際の地下深部の地質環境に適用することにより、重要な地質環境特性である地下水の流動特性や化学特性、岩盤特性、岩盤中での物質移行特性などに関する理解を深めている。また、これらを体系的に調査・解析・評価するための技術基盤の整備を目的として、深地層の研究施設計画を通じた研究開発を進めている。深地層の研究施設は、わが国の多様な地質環境のうち、結晶質岩・淡水系地下水を対象とした地質環境（瑞浪地域：三枝ほか、2007）と、堆積岩・塩水系地下水を対象とした地質環境（幌延地域：太田ほか、2007）に設置されている（図 5.1.2-3）。

瑞浪地域の超深地層研究所計画では、①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備、②深地層における工学技術の基盤の整備を全体目標として 1996 年以降研究開発が進められており、

2005年3月に第1段階（地上からの調査予測研究段階）の調査研究が終了し、現在は第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究が進められている。また、幌延深地層研究計画では、①深部地質環境の調査・解析・評価技術の基盤の整備、②深地層における工学技術の基盤の整備、③実際の地質環境での地層処分技術の適用性確認を全体目標として、2001年以降研究開発が進められており、2006年3月に第1段階の調査研究が終了し、現在は瑞浪地域と同様に、第2段階に加えて第3段階の調査研究が進められている。これらの深地層の研究施設計画においては、地層処分にとって重要な地質環境特性やその形成プロセスに着目し、地上からの調査研究により研究坑道掘削前の未擾乱の地質環境特性が把握され、取得された情報の統合と解釈を通じて、地質環境モデルが構築されている。さらに調査の進展に伴い取得される情報に基づき、適宜、地質環境モデルが更新され、その結果を踏まえて調査の種類・量、解析・評価の手法および結果の精度との関係が整理され、一連の調査・解析・評価手法の有効性の検証が行われている（三枝ほか、2007；太田ほか、2007）。

このように、結晶質岩と堆積岩、淡水系地下水と塩水系地下水それぞれの地質環境については、JAEAにより研究開発が進められ、それぞれの地質環境特性に対応した一連の調査・解析・評価の方法論が提示されている。また、地上からの調査研究におけるノウハウなどの経験や技術的知見についても整備が進められている（JAEA, 2008, 2009, 2010a）。なお、これらの深地層の研究において得られた知見については、5.4に詳述する。

一方、沿岸域については、内陸部とは調査手法や取得できるデータの質や量が異なり、現状では技術的な課題が残されているが、近年、それらの解決に向けた取り組みが進められ、技術の整備および知見の蓄積が行われつつある。例えば、調査・評価技術の信頼性向上と体系的な整備を目的とした国の基盤研究開発として、北海道幌延町の沿岸域を対象としたプロジェクト（通称、沿岸域プロジェクト）が、2007年から幌延深地層研究計画の一環として進められている（太田ほか、2008）。このプロジェクトでは、一般的に想定される処分場の深度と地質環境特性の把握の観点から、地表～深度1,000m程度の地層を対象にしている。また、地質環境特性とその形成プロセスについては、大規模不連続構造の分布・性状とそれらが及ぼす地下水流動や水質形成への影響、地下水環境（塩水と淡水の混在や長期滞留領域）とその長期変遷を対象として、調査研究が進められている（図5.1.2-4）。これまでに、沿岸域を対象とした地質環境の長期変遷を考慮した調査・評価技術の体系的な枠組みや、沿岸域の地質環境を段階的に調査・評価するための方法論が整備された（Ota et al., 2010）。

NUMOでは、概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的な適用性を確認すること、調査・管理技術の整備を図ることを目的として、沿岸域の堆積岩（付加体）の地質環境にある電中研横須賀地区において、電中研との共同研究として実証研究を進めてきた。なお、これらのプロジェクトによって得られた知見については、5.4.2に詳述する。

以上のように、わが国の地質環境は多様性を有しているが、そうした特徴を踏まえて、深地層の研究施設計画における研究開発および沿岸域を対象とした研究開発が着実に進められている。NUMOは、これらのプロジェクトにより得られた知見を活用し、調査対象サイトの地質環境に適合する調査・評価技術を適切に組み合わせることにより、わが国の多様な地質環境に対応した調査・評価を行う。

表 5.1.2-1 わが国の多様な地質環境の調査・評価に向けた研究開発

研究開発プロジェクト	超深地層研究所計画	幌延深地層研究計画	
		沿岸域プロジェクト*	
実施機関	JAEA	JAEA, 産総研, 電中研, 原環センター	横須賀実証研究*
地下水・物質の移行経路, 岩盤特性による分類	結晶質岩	堆積岩 (新第三系泥岩・砂岩)	
地下水の化学特性による分類	淡水系	塩水系	
地理的条件による分類	内陸部		沿岸部

*: 正式名ではなく通称

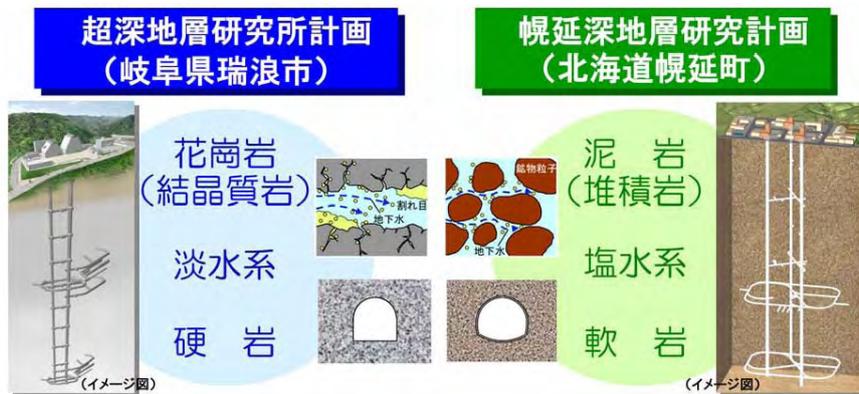


図 5.1.2-3 深地層の研究施設 (JAEA の施設) の計画概要
(出典: JNC, 2005a)

岐阜県瑞浪市では花崗岩 (結晶質岩) と淡水系地下水からなる地質環境, 北海道幌延町では泥岩 (新第三紀の堆積岩) と塩水系地下水からなる地質環境をそれぞれ対象とした研究が進められている。

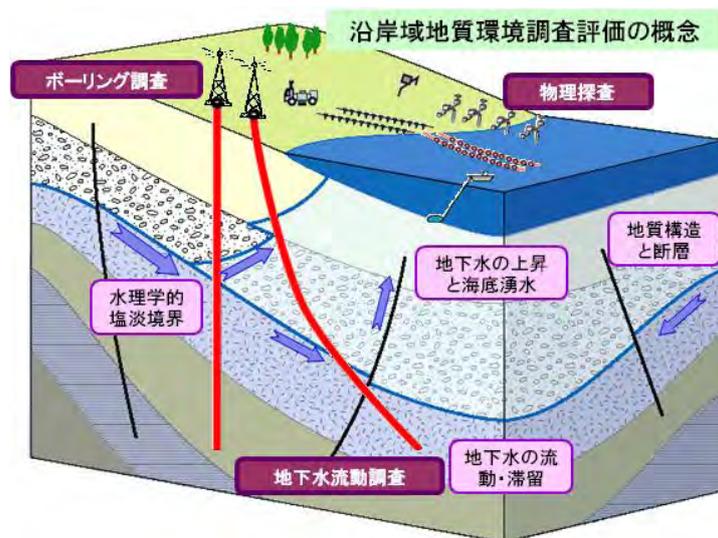


図 5.1.2-4 沿岸域における調査・評価にかかわる技術開発のイメージ
(出典: 大澤ほか, 2008)

断層などの大規模不連続構造の分布・性状と地下水流動や水質形成への影響, 塩水系・淡水系地下水の混合領域や地下水の長期滞留領域, およびそれらの長期変遷に関する調査・評価技術の開発が進められている。

5.2 文献調査および概要調査の基本的な考え方と進め方

本節では、サイト選定の初期段階に実施する文献調査および概要調査において、各段階の目標達成に向けてどのような考え方でどのように調査・評価を進めていくか述べる。まず、両方の調査・評価に共通する基本的な考え方を示し、次に、文献調査および概要調査のそれぞれの進め方について述べる。最後に、調査・評価にかかわる品質マネジメントシステムについて述べる。

5.2.1 文献調査および概要調査の基本的な考え方

ここでは、文献調査および概要調査の両方にかかわる基本的かつ重要な考え方として、サイト調査・評価の安全確保にかかわる目標、不確実性の低減に向けた段階的な調査・評価、不確実性の取り扱い、調査・評価の適用性の確認、調査・評価の体系化について述べる。

5.2.1.1 安全確保にかかわる目標

サイト調査・評価の安全確保にかかわる目標は、地層処分システムが長期にわたって期待される性能を維持・発揮できるような適切な地質環境の条件や機能を満たす安定した場所を選定することにある(3.1.2.1参照)。具体的には、変動帯に位置しているわが国では、まず地層処分システムを成立させる前提として、将来にわたり地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響を回避する。そして、地層処分システムの間となる地質環境の諸特性を把握し、その長期的な変遷を理解することにより、以下に示すような地層処分システムの長期的な安全確保の観点からより適切と判断される条件を有する場所を選定する。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性の観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

また、将来の人間活動による処分施設への侵入を回避する観点から、経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないことも重要な条件の一つである。

5.2.1.2 段階的な調査・評価

(1) 基本的な考え方

地層処分の対象は一辺数 km の地下空間であることから、広範囲の空間的な特性のばらつきを有しており、それらのすべてを把握することは困難である。また、閉鎖後数万年以上にわたる長期の安全性の評価が必要であり、それらにかかわる時間的な不確実性が伴う。これらの時空間的な不確実性に対する取り組みが必要であることが、地層処分事業の大きな特徴の一つである。このような広範囲かつ空間的な特性のばらつきを有する地質環境を、その長期的な安定性を含めて合理的に把握していくための考え方として、段階的なアプローチがある。この段階的な調査・評価は、段階ごと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かつ重要度の高い因子を抽出し、それにかかわる情報を優先的に取得すべく、次段階の活動に取り込んでいくものである。具体的には、地質環境の調査の結果を統合的に解釈した上で地質環境モデルを構築するとともに、そ

の妥当性を確認しつつ不確実性の因子を明確にする。さらに、地質環境の調査・評価の結果に基づき工学的対策および安全評価にかかわる検討を行うことによって、重要度の高い不確実性の因子を抽出し、次段階の調査計画に反映する。

また、調査・評価を段階的に進めることは、地層処分事業と並行して進められる個別要素技術開発の成果を、サイト選定の各段階の調査・評価に柔軟に取り込み、調査・評価の計画を最適化していくことに対しても有効であると考えられる。さらに、各段階の途中や節目ごとに、国内外の専門家や規制当局によるレビューを受け、その妥当性について繰り返し確認することにより、安全性にかかわる論拠を段階的に充実していく。

(2) 地質環境モデルの構築

サイト選定において段階的に意思決定を行う際には、地質環境の調査・評価、工学的対策、安全評価の三つの専門分野が互いに連携を図り、閉鎖後長期の安全性を確保できることを段階的に示すことが重要である。そのためには、対象地域の地質環境に関する情報を相互に利用可能な形式で整理し、地質環境の場の理解や不確実性に関する認識を共有する必要がある。地質環境モデル (Site Descriptive Model) は、地質環境に関する情報を可視化することで、さまざまな分野の関係者間で認識の共有化を図り、調査地域の場の理解を深め、課題の抽出に用いるとともに、次段階の調査計画を作成する際の判断材料として利用する。また、データセットを通じて工学的対策や安全評価に必要なパラメータを受け渡すことを可能にすることから、各種パラメータの適用性、モデルに内在する不確実性やデータの信頼性を実務者の間で共有するためのツールとして使用する。さらに、ステークホルダーの地下深部の地質環境に関する理解を深めるためのツールとしても使えるよう、調査の段階ごとに更新を重ねていくことにより、モデルの信頼性を高めていく。

NUMOでは、海外および国内の先行事例 (例えば、SKB, 2001) を参考に、地質環境モデル構築にかかわる考え方を取りまとめた (NUMO, 2011)。以下に、地質環境モデルと、そのもととなる地質環境の概念モデルについて、定義と留意点について述べる。

<地質環境モデル>

- ・ 地質環境の概念モデルをベースに、地質環境の各種特性の分布や性状を二次元または三次元で定量的に示したものの総称と定義する。
- ・ モデル構築時の情報と地質環境の概念モデルに基づき構築されるため、情報の量や精度、作業仮説に依存した不確実性が内包されていることに留意する必要がある。
- ・ 地質構造モデルを基礎として、水理地質構造 (地下水流動) モデル、地下水化学モデル、岩盤特性モデル、物質移行特性モデルが構築され、それらは互いに整合性が取れていて矛盾がないことが望ましい。

<地質環境の概念モデル>

- ・ 地層処分において重要な地質環境特性の場、現象、メカニズムなどに関する解釈を概念的に示したものと定義する。
- ・ 必ずしも定量的に表現されるものではなく、過去から現在までの変遷に関する解釈、将来の変動に関する予測などの概念を含む場合もある。
- ・ 情報量の不足、現象やメカニズムに対する理解の不足などに起因する不確実性を考慮し、複

数のモデルについて検討しておくことが望ましい。それらは調査の進展に伴う情報量の増加により、一つの概念モデルに絞り込まれることもある。

- ・ 地質・地質構造に関する概念モデルを基礎として、水理地質構造（地下水流動）、地下水化学、岩盤特性などの地質環境特性ごとに概念モデルを構築するが、各モデル間の整合性について検討することが重要である。

各地質環境特性のモデル構築に関する全体の流れのイメージを図 5.2.1-1 に示す。地質環境モデルの妥当性については、次の段階、あるいはその中の複数のフェーズの調査の中で、解析値（モデル）と実測値（調査・試験）を比較して検証する。

地質環境モデルは、モデルの構築目的に応じた空間スケールを設定することが重要である。例えば、広域的な地下水流動状況を表現するためのモデルの場合、当該サイトの広域的な地下水流動系を包括したスケールで、当該サイトの候補母岩を通過する地下水の流動を評価するために必要となる領域（例えば、数 10km 四方）として設定することとなる（三枝ほか、2007）。一方、処分施設的设计（例えば、空洞の力学安定性の検討）に利用するモデルの場合は、構築する空洞の規模や空洞の掘削により物理的・力学的影響が検討可能なものであることが求められる。このため、地質環境モデルの空間スケールを設定する際には、地質環境モデルを利用する工学的対策や安全評価の観点から検討する必要がある。なお、異なる空間スケールの地質環境モデルが構築される場合には、各空間スケール間において、地質環境特性や現象の整合性または連続性を確保することが重要である。地質環境モデル構築のための複数の空間スケールの領域設定の例を図 5.2.1-2 に示す。ここでは、リージョナルスケール、ローカルスケール、サイトスケールからなる三つの空間スケールの領域が設定されている。

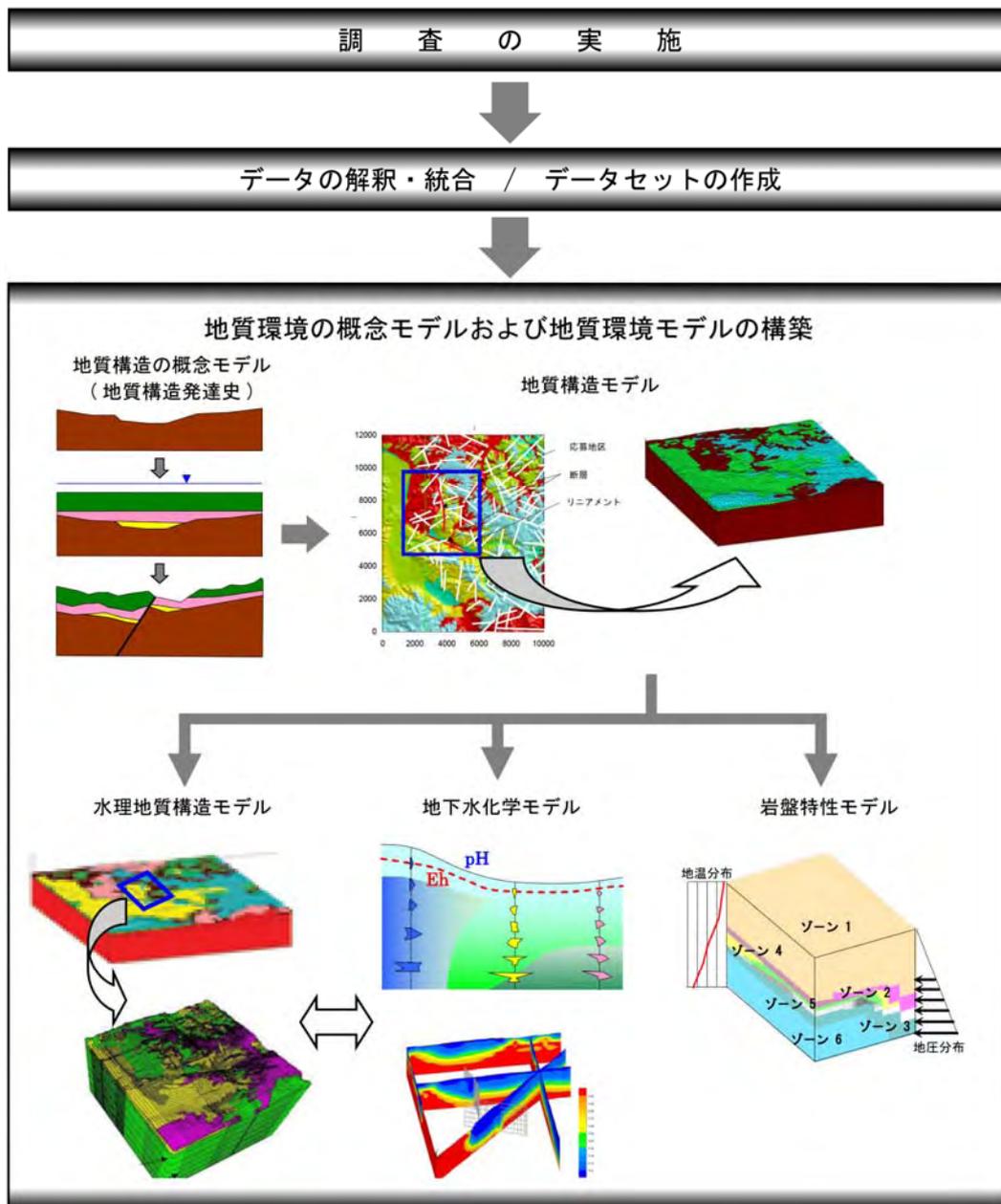


図 5.2.1-1 地質環境モデル構築の流れ (イメージ)

各段階の調査で取得した情報に基づき、地質環境の概念モデル（ここでは地質構造発達概念の例を示す）を構築し、それをベースとして、地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化した地質環境モデル（ここでは地質構造、水理地質構造、地下水化学、岩盤特性のモデルの例を示す）を構築する。

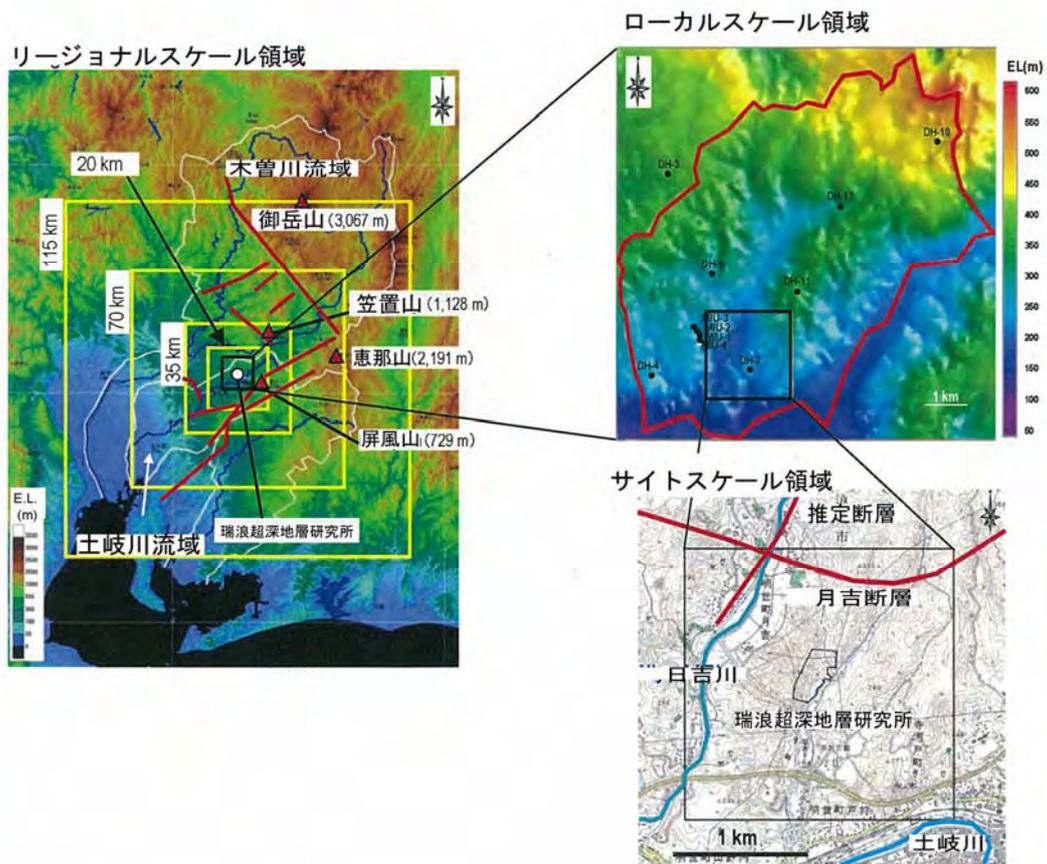
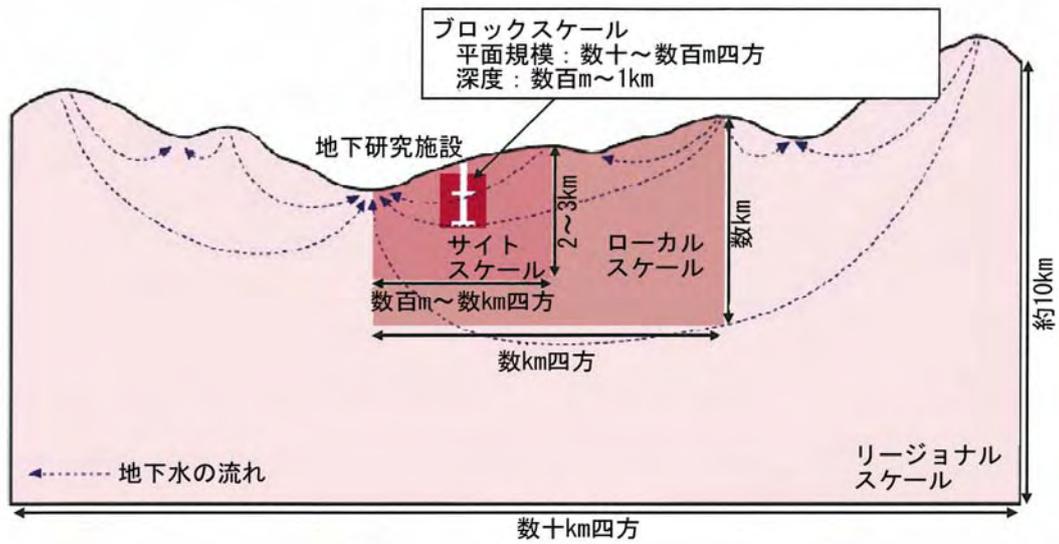


図 5. 2. 1-2 地質環境モデル構築のための複数の空間スケールの領域設定の例
(三枝ほか, 2007 を和訳)

地層処分にとって重要な地下水流動や物質移行などの地質環境特性の段階的な理解および評価の観点から、四つの空間スケールの概念が示され、東濃地域における広域地下水流動研究および超深地層研究所計画では、これまでに三つのスケールが設定されている。

5.2.1.3 不確実性の取り扱い

(1) 不確実性の種類と特徴

3.2.2 に述べたとおり、不確実性の管理は、NUMO における品質保証への取り組みにおいて重要な事項であり、サイト調査・評価から工学的対策、安全評価への連携の際の媒体情報に内在する不確実性についても、適切に管理・伝達されなければならない。

一般に、調査・評価にかかわる不確実性として、次に示すものが挙げられる。

- ① データの不確実性
- ② 地質環境の概念化の不確実性

①のデータの不確実性は、各種の調査により取得されるデータや、複数のデータを統合した情報（例えば、地質環境モデルのデータセット）などに含まれる不確実性である。これらは、測定誤差、測定精度（空間分解能、計測密度）など、複数の要因によって生じる。

②の地質環境の概念化の不確実性は、データの解釈に起因するもので、自然現象の将来予測や当該サイトで生じている現象の理解において不可避な時間的・空間的な不確実性である。時間的な不確実性は、例えば、過去から現在までの変動・変遷の法則性や地質構造発達モデルといった、将来予測に用いる仮説（モデル）が複数の解釈に基づき複数存在するなど、現象の理解に内包される不確実性である。空間的な不確実性は、情報量の不足により個々の現象や複数の現象間の相互作用に関する理解が十分でないことなどに起因する。また、当該サイトが元来有している地質環境のさまざまな特性のばらつきや、データの代表性などにより、地質環境そのものの解釈・推定に伴う不確実性が含まれる。

(2) 不確実性の低減

文献調査で取得されるデータは、地表付近の情報であることが多く、地下深部の情報は限られている可能性が高い。このため、この段階の地質環境モデルには、大きな不確実性があると考えられる。例えば、断層面の三次元分布について、地表における断層の位置と傾斜に関する情報しか得られていない場合、地下深部における分布・形状は、地表付近のデータのばらつきに依存して幅広く推定せざるを得ない。また、概要調査の段階においても、地質環境モデルを構築するための十分な情報が得られず、限られた情報から地質構造、地質環境特性、現象などを推定せざるを得ない場合が生じ得る。このような場合、取得された情報に基づく地質環境の理解度や、その時点における解釈・推定結果に含まれる不確実性の種類やその幅などを特定することが重要である。そのような不確実性にかかわる情報を、モデルやデータセットとともに、工学的対策・安全評価に受け渡す必要がある。さらに、工学的対策・安全評価にかかわる検討との連携を通じて、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全確保に影響を及ぼす重要な構造、地質環境特性、現象などを特定し、その結果を次段階（または次フェーズ）の調査計画に反映するとともに、不確実性を低減させていくように取り組む。

このような段階的な地質環境の調査・評価における不確実性の定量的評価について、柳沢ほか（2004）は、空間的な特性のばらつきを有する地質環境における不確実性を表現する方法として、決定論的モデルと地球統計学的モデルを組み合わせる手法を提案している。ここでは、東濃地域のデータを用いて、文献調査、地表地質調査、ボーリング調査1孔、ボーリング調査2孔の段階的な

調査を想定して解析した結果、調査の進展による情報量の増加に伴い、不十分な知識に基づく解釈に起因する不確実性が減少し、考慮すべき（あるいは否定できない）モデルが絞り込まれることが示された。それと同時に、途中の段階の調査で新たな地質が認識され、不確実性が必ずしも時系列的に単調に減少するとは限らないことも指摘された。

文献情報に基づく評価の不確実性を現地調査により低減した事例としては、幡谷ほか（2005）が挙げられる。河成段丘を用いた隆起量評価では、河成段丘の対比・編年に対する解釈が不確実性の大きな要因である。宮城県南部の陸前川崎盆地周辺の隆起量は、既存の文献情報からは53m/12.5万年などの値が見積もられていた。そこで、地形層序およびテフラ層序にかかわる詳細な現地調査を実施し、河成段丘群の対比・編年の見直しを行った結果、当地域の隆起量は20-30m/12万年であることが明らかになった。

このように、地質環境の調査・評価にかかわる不確実性については、最新の知見と技術に基づき、段階的に十分な調査を繰り返すことにより低減していくことを基本とする。さらに、次項（3）に示すように、サイト調査・評価だけではなく、工学的対策および安全評価との緊密な連携により、不確実性に合理的に対処する。

（3）サイト選定にかかわる不確実性への対応

地質環境の調査・評価にかかわる不確実性については、最新の知見と技術に基づき、段階的に十分な調査を繰り返すことにより低減していくことを前提とする。

概要調査地区選定段階では、文献調査の結果、概要調査地区選定上の考慮事項に照らして明らかに不適格な場所が認められた場合は、その場所を概要調査地区から除外することにより、リスクを回避する。その際、不確実性が大きく不適格かどうか明確に判断できない場合には、不確実性に伴うリスクの評価を保留し、精密調査地区選定段階へと進み、概要調査において不確実性の低減を図る。

精密調査地区選定段階では、概要調査の結果、精密調査地区選定上の考慮事項（検討中）に照らして明らかに不適格な場所が認められた場合は、その場所を精密調査地区から除外することにより、リスクを回避する。その際に、重要な不確実性が存在する場合は、その所在を明らかにし、調査・評価を繰り返すことにより可能な限り低減を図る。そのような不確実性に関する情報を工学的対策と安全評価の分野に的確に受け渡し、それらの検討結果を含めて安全確保の見通しが得られる地域を、精密調査地区として選定する。

なお、それぞれの段階の各分野の調査・評価における不確実性への具体的な対応については、5.3に述べる。

5.2.1.4 調査・評価技術の適用性の確認

3.2.3.1に述べたとおり、NUMOは、十分な信頼度をもって安全確保策を実施していくために、最新の知見を踏まえ、その時点で利用可能な最適で信頼性の高い技術を用いて事業を推進する。ここでの信頼性の高い技術については、事業の効率化や経済性を考慮し、適切なレベルで品質を保証できるものであることが重要である。このため、地質環境の調査・評価には、自然科学、資源探査、防災、土木、原子力施設建設などの分野において使用実績のある技術、および地層処分事業のためにNUMOや基盤研究開発機関が開発した技術を用いる。

自然現象の影響にかかわる調査・評価には、科学的な研究成果を取り込むことによる不確実性が

内在する。それらを低減させるためには、研究の事例を増やすとともに、地層処分事業への適用性を含めた研究成果の検証を行うことが重要である。NUMO は、国内および海外の専門家の参加する国際テクトニクス会議（International Tectonics Meeting : ITM）を開催し、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降などの自然現象の評価に関する既存の技術および新たな知見について議論し、それらのわが国の地層処分への基本的な適用性を確認してきた（Chapman et al., 2009a）。

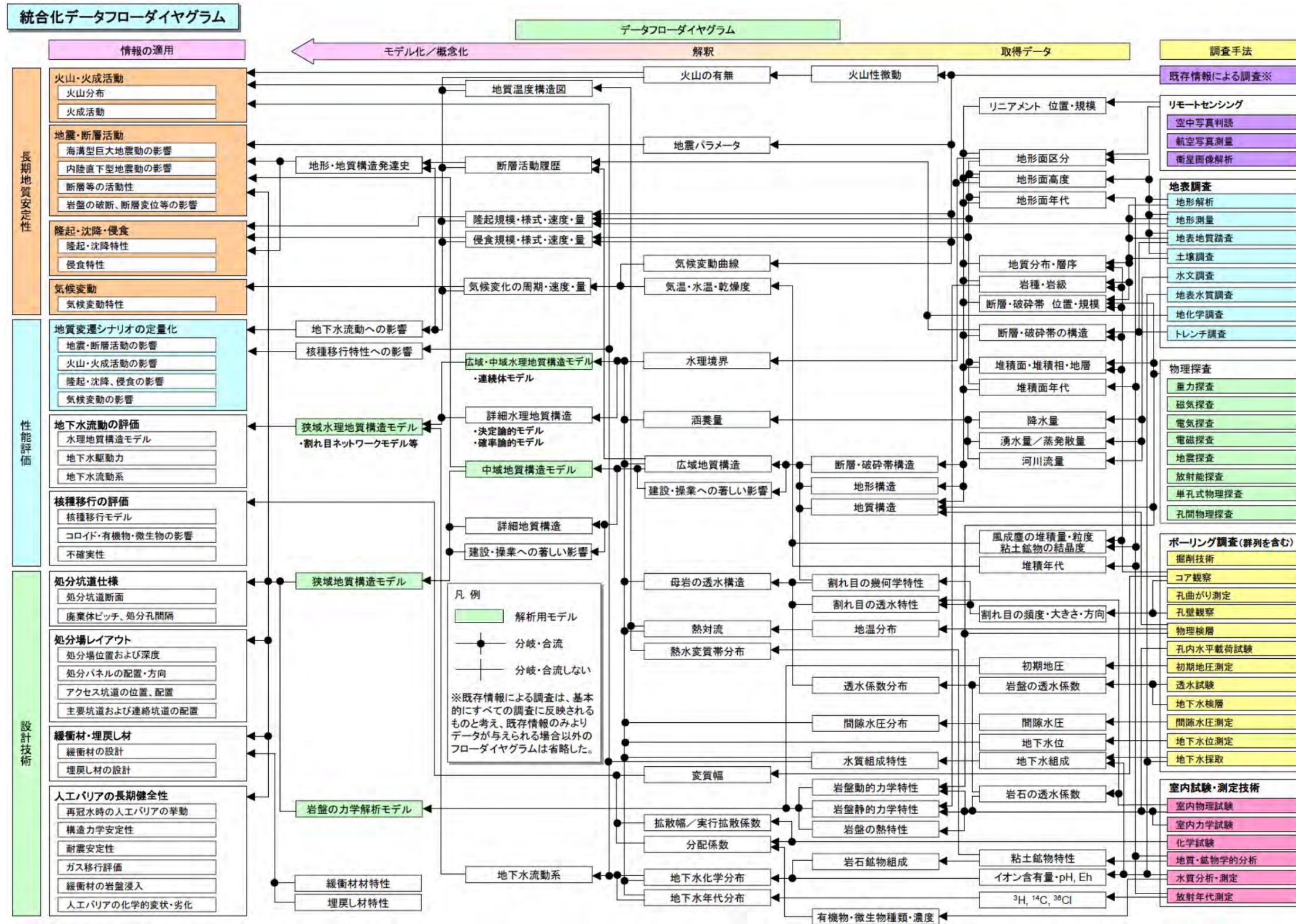
また、地質環境特性にかかわる調査・評価においても、信頼性のある地質環境モデルを構築するためには、内在する不確実性を低減するために、基礎となる個別の研究や地質構造モデルなどの検証を行い、適用性を確認することが重要である。5.1.2 に述べたとおり、NUMO は電中研との共同研究（近藤ほか、2011）を通して、概要調査の主要な実施項目であるボーリング調査を中心とした体系的な調査・評価技術について、実施主体の観点から適用性を検討している。現在、JAEA は二つの深地層の研究施設計画において第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究を進めている。今後、これらの結果に基づき、第1段階（地上からの調査予測研究段階）の調査研究で整備した、地質環境モデルの構築を含む深部地質環境の調査・解析・評価技術が検証される予定である。

以上のような調査・評価技術の確認は、セーフティケースの重要な構成要素の一つであり、今後ともさらに力を入れて進めていくことが必要である。

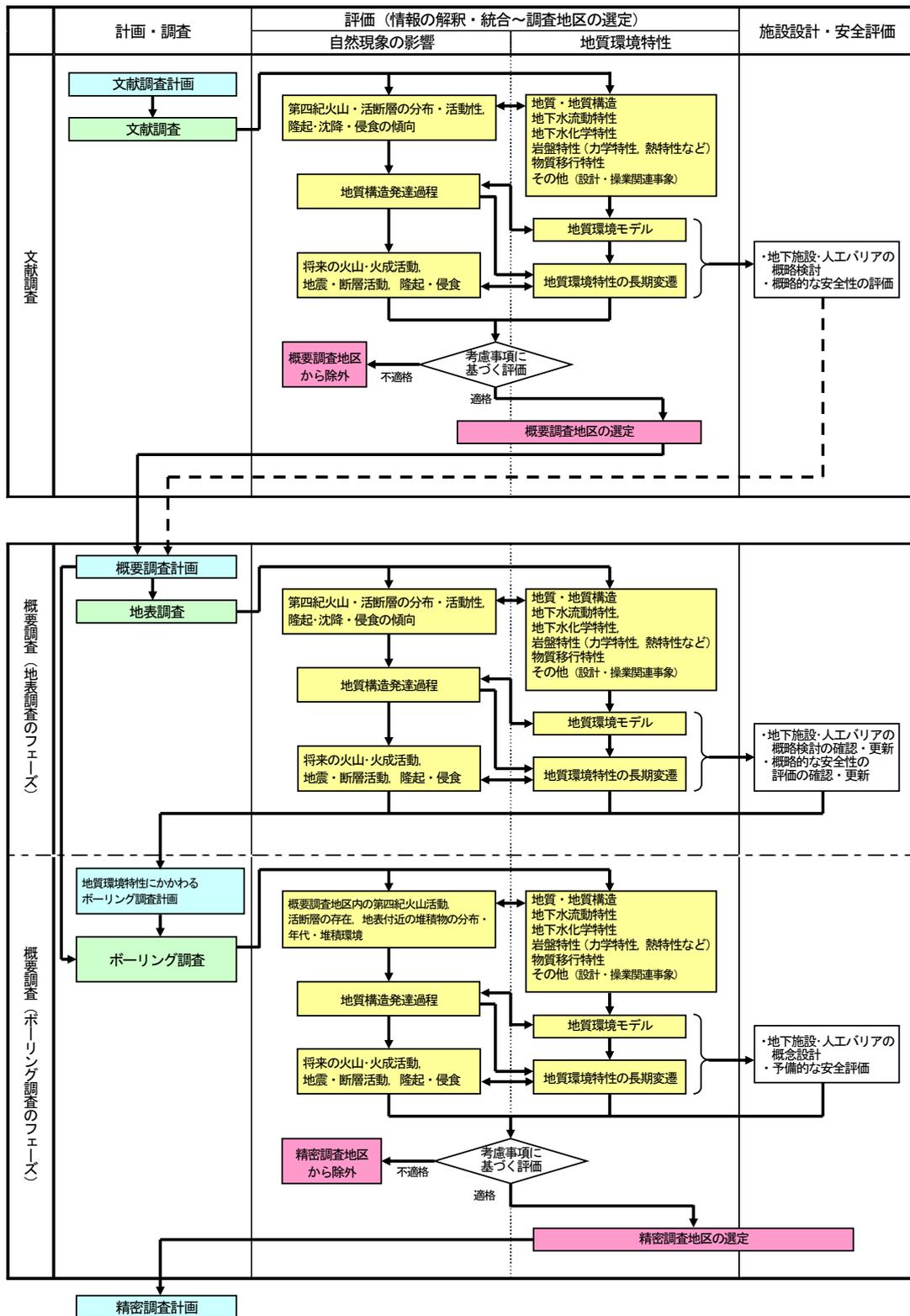
5.2.1.5 調査・評価の体系化

調査・評価の計画立案や実施に際しては、自然現象の影響評価、工学的対策および安全評価に必要な情報と、個別の調査・試験・解析などから得られるデータや情報について、相互の関連性や取得に至るプロセスを体系的に整理し、調査全体の中での位置付けや重要度を理解することは非常に重要である。体系的な調査・評価を進める上で参考となる知見として、統合化データフローダイアグラム（三枝ほか、2007；太田ほか、2007；Ota et al., 2010；原環センター、2007：図 5.2.1-3）が挙げられる。これらを利用することにより、データの取得から、調査結果の統合・解釈、概念化・モデル化に至る一連の情報の流れを把握することができ、さらに、調査・評価の過程の追跡性および透明性を確保すること、処分施設的设计や閉鎖後長期の安全性の評価との関連性を把握することもできる。

文献調査および概要調査における地質環境の調査・評価は、自然現象の影響と地質環境特性の二つの分野に大別される。これらの調査・評価では、5.3 に述べるように、基本的には個々の評価項目に応じた調査を行う。しかしながら、図 5.2.1-4 に示すように、自然現象の影響に関する情報と地質環境特性に関する情報は、相互に関連している。例えば、地質環境特性として取得する地質・地質構造の情報は、自然現象の分野における各事象の分布や傾向、地質構造の発達過程を検討するための基本的な情報となる。一方、自然現象の影響の分野における地質構造の発達過程や将来予測の検討結果は、地質環境の長期変遷に関する評価に対する入力情報となる。また、さまざまな調査を実施する場合、ある調査によって取得された情報が、別の調査を計画・開始する際の入力情報となることがある。このようなことから、当該サイトの調査・評価に当たっては、調査・評価項目ごとの調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用を考慮して有機的に結び付け、体系的に調査・評価を進めることが重要である（木方ほか、2011）。NUMO は、この考え方に基づき、5.3 に述べる調査・評価の体系を整備した。



長期地質安定性、性能評価、設計技術の各項目の評価に向けて、どのような調査手法を用いてどのようなデータを取得し、どのような解釈を経て地質環境の概念モデルや地質環境モデルを構築し、データの流れと関連性を系統的に示している。



□：計画、■：調査、■：検討・評価項目、■：意思決定、□：他の計画、調査、検討・評価項目

図 5.2.1-4 文献調査および概要調査の流れ，調査や情報の連携・共有化（検討例）

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。サイト調査・評価を合理的・効率的に進めるために、自然現象の影響と地質環境特性の評価において地質・地質構造や地質構造発達過程に関する調査は、両分野において連携して行い、情報を共有化する。

5.2.2 文献調査の進め方

5.2.2.1 文献調査の目標

文献調査の目標は、最終処分法に照らして、自然現象の著しい影響が避けられないような明らかに不適格な場所を回避するとともに、地下施設の建設が明らかに困難な場所、鉱山開発などによる人間侵入の可能性の高い場所を避けて、概要調査地区を選定することである（4.2.1.1 参照）。また、文献情報に基づき地質環境モデルを構築するとともに、地下施設や人工バリアの概略検討、および概略的な安全性の評価（感度解析）に必要な、地形、地質・地質構造、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性などの地質環境特性にかかわる情報を受け渡す。これらの結果に基づき、次段階で安全確保における不確実性を低減するために優先的に取得すべき情報を把握し、概要調査計画の立案に反映させる。

概要調査地区選定上の考慮事項（NUMO, 2009b）は、最終処分法および同施行規則に定める法定要件に基づき、さらに、概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件（原子力安全委員会, 2002b）を踏まえ、処分施設建設地としての適性が明らかに劣る地域を含めないように概要調査地区を選定するために、考慮する事項とその評価の考え方などを示したものである。

概要調査地区選定にかかわる法定要件を以下に示す。

- ・ 地震等の自然現象による地層の著しい変動の記録がないこと
- ・ 将来にわたって、地震等の自然現象による地層の著しい変動が生ずるおそれが少ないと見込まれること
- ・ 地層処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物であるとの記録がないこと
- ・ 地層処分を行おうとする地層において、その掘採が経済的に価値が高い鉱物資源の存在に関する記録がないこと

これらの法定要件に対する適格性を評価するための具体的な基準として、地震、噴火、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物および鉱物資源に関する「法定要件に関する事項」を設定した。これらは、全国規模でデータが整備された情報に基づき一律の基準により法定要件への適格性を評価するための「全国一律に評価する事項」と、個別の応募区域およびその周辺の地域を対象に概要調査地区としての適格性を評価するための「個別地区ごとに評価する事項」に分類されている。

【地震】

全国一律に評価する事項：

陸域では空中写真判読など、海域では海上音波探査などに基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

くり返し活動し、変位の規模が大きい活断層などについて、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定する。

- ① 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がある場所
- ② 活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲
- ③ 活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲

④ 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲

【噴火】

全国一律に評価する事項：

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、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

第四紀火山の中心から半径 15km 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は含めないように、概要調査地区を選定する。また、将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

【隆起・侵食】

個別地区ごとに評価する事項：

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は含めないように、概要調査地区を選定する。

【第四紀の未固結堆積物】

個別地区ごとに評価する事項：

地層処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

【鉱物資源】

個別地区ごとに評価する事項：

地層処分を行おうとする地層において、その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

また、法定要件に対する適格性が確認された地区を対象に、概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相対比較を行うための「付加的に評価する事項」を設定した。これらは、法定要件には該当しないものの、「安全性確保の前提のもと、経済性および効率性にも留意する」という NUMO の事業推進に関する方針を踏まえ、精密調査地区および処分場建設地の選定段階の法定要件や建設・操業の段階で必要な事項に関し、文献調査で可能な範囲で見通しを得るためである。

① 地層の物性・性状

岩盤の強度、変形・割れ目・風化・変質の状況、地温勾配、岩体の形状・規模、隆起・侵食の速度、異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性

② 地下水の特性

地下水の流量・流速、水温、pH、酸化還元性

③ 地質環境の調査・評価

調査の範囲・規模・期間、調査技術・評価手法などの適用性、火成活動・断層活動などの地

質環境の評価・モデル化の容易性、調査に対する土地利用などの制約

- ④ 建設・操業時における自然災害
地震・地すべり・洪水などの重大な自然災害が発生する可能性
- ⑤ 土地の確保
土地の確保の容易性
- ⑥ 輸送
利用可能な港湾または港湾候補地からの距離などの輸送の容易性

5.2.2.2 文献調査の準備

NUMO は、文献調査を合理的・効率的かつ的確に遂行するために、文献調査マニュアルを整備してきた。文献調査マニュアル(案)には、①実施体制の構築、②応募区域の地質的条件の事前確認、③文献調査計画書の作成など、の文献調査の準備にかかわる業務、そして、④文献・資料の収集と管理、⑤文献情報の抽出・整理、⑥文献情報の総合的な解析・評価(地質総合解析)などの文献調査の実施にかかわる業務、さらに⑦概要調査地区の選定、⑧品質管理などの業務の具体的な進め方(方法)について記述している。これらの文献調査にかかわる業務の基本的な流れを図 5.2.2-1 に示す。ここでは、①から③の文献調査の準備について述べる。なお、④から⑥の文献調査の実施については 5.2.2.3 に、⑦の概要調査地区選定については 5.2.2.4 に、⑧の品質管理については 5.2.4 に、それぞれ述べる。

文献調査に当たっては、サイト調査・評価の担当部署を中心とする実施体制を構築する。概要調査地区選定のプロセスや、公開する文書などの技術的な妥当性については、NUMO が設置しているレビュー組織である技術アドバイザー国内委員会(以下、DTAC という。)および技術アドバイザー国際委員会(以下、ITAC という。)において、文献調査のためのレビューチームを限定的に組織し、それぞれ国内および海外の最新知見を踏まえた確認を行う。

応募受付後、文献調査開始に先立ち、概要調査地区選定上の考慮事項のうち、全国一律に評価する事項である「全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所が含まれないこと」、および「第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域が含まれないこと」の 2 点を応募区域の地質的な条件とし、下記の文献の記載情報に基づいて、条件を満足しているかどうかを確認する。

- ・ 陸域活断層：「活断層詳細デジタルマップ(中田・今泉, 2002)」
- ・ 海域活断層：「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)」の付図「日本周辺海域の第四紀地質構造図」
- ・ 第四紀火山：「日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM) (第四紀火山カタログ委員会, 1999)」

事前確認の実施に当たっては、NUMO 地理情報システム(NUMO-GIS)を活用する。このシステムは、地理情報、上記の指定文献に記載された第四紀火山、活断層の情報のほか、NUMO が全国規模を対象とした地形・地質関連の文献・資料を収集し、その情報を GIS データに変換し、整備・データベース化したシステムで、現在も継続的に情報を蓄積・拡充している。

次に、以下の項目からなる文献調査計画書を作成する。

- 文献調査の位置付けと目的
- 応募受付から報告書作成までの流れ
- 文献調査の具体的な内容
- 応募区域の自然環境などに関する補充情報収集と「文献情報に基づく処分場の概要」の作成

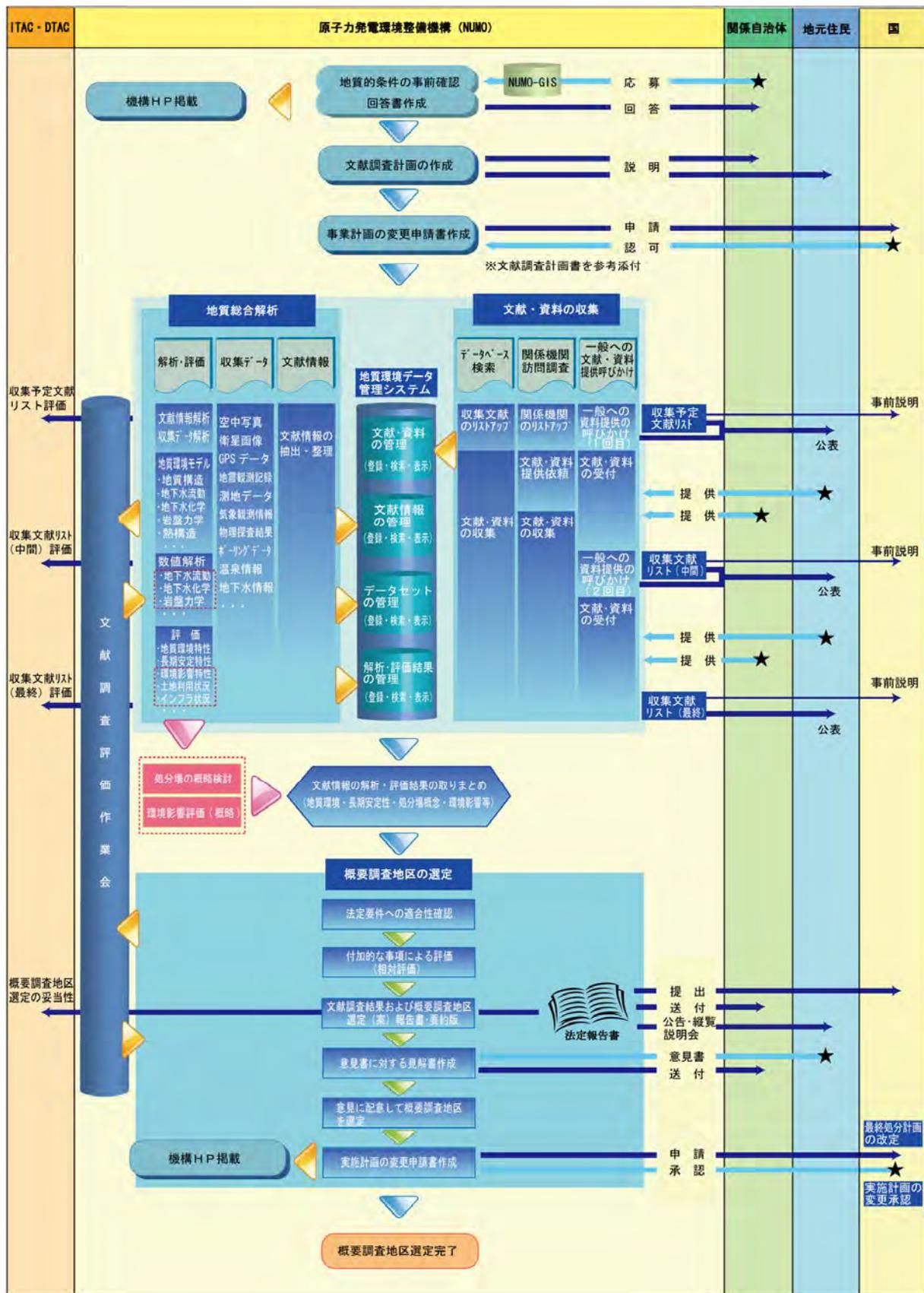


図 5.2.2-1 文献調査にかかわる業務の基本的な流れ (公募の場合の検討例)

5.2.2.3 文献調査の実施

文献調査を実施する範囲は、応募区域およびその周辺の地域を対象とした「概要調査地区選定上の考慮事項」の評価に必要な情報を取得することができるように設定する。具体的には、表 5.2.2-1 に例として示すように、国内外の調査事例を参考に、収集する情報の項目に応じて目安とする調査範囲を設定する。ただし、応募区域の広さ、地質環境の条件、調査途中の情報などに応じて、必要性が認められる場合は、範囲を拡大する。

文献調査の対象文献は、考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価に関連する情報を鑑み、収集予定文献リストを作成した上で情報を収集する。収集する情報は、法定要件に関する事項（地震（地震・活断層）、噴火（火山・火成活動、熱・熱水）、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源）と付加的に評価する事項（主に地質環境特性）とに区分されている。それぞれの区分ごとに、文献情報の項目、文献・資料の収集の目的、収集する情報および文献・資料の例を表 5.2.2-2、表 5.2.2-3 に示す。収集する情報は、考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価を目的とするため、応募区域だけでなく、その周辺地域に関する情報も収集することになる。また、実際に文献・資料を入手する場所はさらに拡がり、都道府県庁など広域の関係機関の所在地に及ぶことが考えられる。文献・資料の収集に当たっては、網羅的に収集するため、データベース検索を用いた収集、関係機関への訪問調査による収集、一般の方々からの提供による収集の3種類の方法で実施する。考慮事項に対する応募区域の適格性などの評価に必要な情報は、文献・資料によって、同じ対象（例えば、断層や火山など）であっても見解が異なり、数値の信頼性に差があることが考えられるため、文献情報を見解の相違点、データの取得方法などの観点で情報項目ごとに整理した上で解析する。

収集したすべての情報は、概要調査地区選定の透明性・追跡性を確保するため、NUMO が整備した地質環境データ管理システムにより一元管理する。このシステムは、文献情報管理データベースと解析・評価データベースの二つのデータベースからなる。前者は、収集する文献・資料に関する情報を登録・保管するためのデータベースであり、後者は、文献・資料に記載された情報を用いて実施する各種解析・評価の結果を登録・保管するためのデータベースである。

一方、収集して情報を抽出し上記データベースへの登録が完了した文献・資料の原本は、順次 NUMO の文書管理システムに登録した上で、資料の複写・公開などに対応するため、適切に管理・保管する。

地質総合解析は、収集した情報を解析し、概要調査地区の選定に必要な情報を取りまとめることを目的として、次に挙げるような解析を適宜実施する。

- ・ リモートセンシングデータの判読および解析：空中写真、衛星画像など
- ・ 地形情報の解析：地形データ（水系、接峰面、高度分散量、谷密度、開析度など）
- ・ 測地情報の解析：測地データ（水準点、GPS、干渉合成開口レーダーなど）
- ・ 物理探査データの再解析：地震探査（反射法・屈折法）記録・海上音波探査記録、重力・磁気・放射能の異常分布、微小地震の観測記録など

また、以上の解析結果を用いて、地形、地質・地質構造、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食、鉱物資源、岩石・岩盤・地下水の物性・性状、気象・水文、自然災害などについて文献情報の整理・分析を行う。そして、考慮事項の評価対象である地形・地質の総合解釈、断層活動、

火山活動，隆起・侵食，鉱物資源などの事項，および文献情報をもとに構築される初期的な地質環境モデルに対して総合的な解析・評価を行う。

文献調査の期間については，標準的な工程として2年程度が想定されている。

表 5.2.2-1 文献調査で収集する情報の項目と調査範囲の目安（検討例）

情報の項目	調査範囲の目安
広域の地質・地質構造	応募区域の中心から半径 30km*の範囲
火山・火成活動	応募区域およびその外側 160km*の範囲
自然環境（動植物，水・土壌など）	応募区域およびその外側 10km の範囲
地下水の流動	後背地地形と大規模な断層などから想定される広域的な地下水の涵養域から流出域（応募区域が含まれる流域全体など）
地震・断層活動	断層活動：応募区域およびその外側 30km*の範囲 地震活動：応募区域およびその外側約 100km の範囲
隆起・侵食	応募区域および（場合により）その外側数 10km の範囲
第四紀未固結堆積物	応募区域内
鉱物資源	
地層の物性・性状	応募区域の地層・地下水が分布すると想定される範囲
地下水の特性	
自然災害	応募区域内
土地の確保	
輸送	輸送港湾候補地，輸送ルート

*：「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き（原子力安全委員会，2010b）」，「原子力発電所火山影響評価技術指針（日本電気協会，2009）」などを参考に検討した例。実際には，応募区域の広さ，地質環境の条件，調査中の状況などにより，必要に応じて変更する。

表 5.2.2-2 文献調査で収集する情報 (1/2)

【基本情報】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
広域地質・地質構造	複数の法定要件に関係した共通事項である、応募区域およびその周辺地域の地質環境を理解する	<ul style="list-style-type: none"> ・広域的な地質・地質構造 ・地質構造発達史 ・広域的な水理地質構造 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 など

【法定要件に関する事項】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
地震・断層活動	<p>繰り返し活動し、変位の規模が大きい活断層などについて、次の事項に該当すると明確に判断される場所、範囲は含めないように、概要調査地区を選定する</p> <ul style="list-style-type: none"> ・活断層がある場所 ・活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲 ・活断層の分岐など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 	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層の存在、性状 ・断層破碎帯の幅、変形の及ぶ範囲 ・震源分布 ・活褶曲、活撓曲の存在および変形の及ぶ範囲 	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層調査報告書 ・地形図（数値情報を含む） ・空中写真 ・断層分布図 ・物理探査記録 ・断層露頭スケッチ など
火山・火成活動	<p>第四紀火山の中心から半径15km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は含めないように、概要調査地区を選定する</p> <p>将来も含め、マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・第四紀の火山、火口、岩脈などの存在 ・火山噴出物や貫入岩の分布、年代 ・基盤構造 ・地殻変動データ ・地下の温度構造 ・地下水の化学的特性 	<ul style="list-style-type: none"> ・地形図（数値情報を含む） ・空中写真 ・火山岩の年代測定結果 ・物理探査記録 ・GPS 測量データ ・温泉の分布と水質 など
隆起・侵食	<p>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は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・段丘の対比・編年 ・段丘の分布 ・地質層序 ・地質構造（分布） ・侵食の規模 ・沖積層の分布 	<ul style="list-style-type: none"> ・地形図（数値情報を含む） ・地形分類図 ・GPS 測量データ ・ダム の 堆 砂 量 など
第四紀未固結堆積物	<p>最終処分を行おうとする地層が、第四紀の未固結堆積物である地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・未固結堆積物の分布、性状 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 など
鉱物資源	<p>最終処分を行おうとする地層において、その採掘が経済的に価値が高い鉱物資源が存在する地域は含めないように、概要調査地区を選定する</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱物資源の種類、分布、規模、品質 ・権利関係 	<ul style="list-style-type: none"> ・ボーリング調査結果 ・採掘権 など

表 5.2.2-3 文献調査で収集する情報 (2/2)

【付加的に評価する事項】

情報の項目	文献・資料の収集の目的	収集する情報	文献・資料の例
地層の物性・性状	応募区域における地層の物性・性状を把握し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤の強度、変形・割れ目・風化・変質の状況 ・地温勾配 ・岩体の形状・規模 ・隆起・侵食の速度 ・異常間隙水圧・膨張性地山・ガス突出・山はね・大出水の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・岩盤力学試験結果 ・地温勾配図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 ・段丘面分布図 ・トンネル工事中の災害記録 <p>など</p>
地下水の特性	応募区域における地下水の特性を把握し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水の流量・流速 ・水温 ・水質 ・pH ・酸化還元性 	<ul style="list-style-type: none"> ・地下水位 ・岩盤水理試験結果 ・井戸の水温、水質 <p>など</p>
地質環境の調査・評価	応募区域の地質環境の調査・評価のしやすさなどを評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・地質・地質構造 ・調査に対する土地利用などの制約 	<ul style="list-style-type: none"> ・地質図 ・ボーリング調査結果 ・物理探査記録 ・開発制限 <p>など</p>
建設・操業時における自然災害	建設・操業期間中の安全確保の観点から、応募区域における重大な自然災害が発生する可能性を評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・災害の発生記録 ・災害の予測 	<ul style="list-style-type: none"> ・地震災害記録 ・ハザードマップ <p>など</p>
土地の確保	応募区域を土地の確保の容易さの観点で評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・土地の利用状況・利用計画 ・土地の取得などに関係する法令・条例 	<ul style="list-style-type: none"> ・鉱業原簿、施業案 ・都市計画書 ・自然環境保全計画書 <p>など</p>
輸送	応募区域を輸送の容易さの観点で評価し、そのほかの事項と共に概要調査地区としての特性を総合的に評価し、必要に応じて相对比较を行う	<ul style="list-style-type: none"> ・既存港湾の規模と設備 ・既存道路の規格 	<ul style="list-style-type: none"> ・港湾台帳 ・道路台帳 <p>など</p>

5.2.2.4 文献調査における評価

文献調査の評価では、まず「概要調査地区選定上の考慮事項」(NUMO, 2009b)に照らして、概要調査地区としての適格性・特性の評価を行う。続いて、概要調査地区として選定された地域に対しては、精密調査地区の選定に必要な情報の不確実性を効果的に低減させるための調査・評価の課題や優先順位を明確にした上で、調査計画の立案に向けた検討を行う。

概要調査地区選定上の考慮事項のうち、法定要件に関する事項について評価し、概要調査地区としての適格性が明らかに劣る地域を除外する。この検討結果に基づいて、NUMOは概要調査地区を選定し、「文献調査に関する法定報告書」を作成する。なお、自然現象の著しい影響の可能性が残り(地形調査で活断層の存在を示唆する地形が新たに見つかるなど)、詳しい調査が必要と判断された場合は、その項目を概要調査の項目として追加設定する。

法定要件に関する事項の適格性を確認した後、付加的に評価する事項に関する情報に基づき、概要調査地区としての特性を総合的に評価する。応募区域が複数存在する場合は、必要に応じて相对比较を行い評価する場合も想定している。収集した文献情報に基づき、当該地域における地質環境の概念の検討・考察(概念モデルの作成)を行い、初期的な地質環境モデルを構築する。自然現象の影響にかかわる調査・評価の情報に基づき、地質環境特性の長期変遷を検討する。この地質環境

モデルと地質環境特性の長期変遷の検討結果を、地下施設・人工バリアの概略検討および概略的な安全性の評価のために受け渡す。なお、文献調査の段階で得られる地質環境特性の情報は限定的なものであり、大きな不確実性を伴うものと考えられる。これらの不確実性については、モデルを活用した感度解析結果に基づき、自然現象が地層処分システムの安全性に与える影響の程度や感度の高いパラメータなど、次段階の調査により取得すべき安全性にかかわる重要なサイトの情報を特定し、次段階の概要調査計画に反映する。

5.2.3 概要調査の進め方

5.2.3.1 概要調査の目標

概要調査の目標は、法定要件に照らして、地表調査、物理探査、ボーリング調査などの地上からの調査により、自然現象の著しい影響を回避できるか、坑道の掘削に支障がないか、地下施設に悪影響を及ぼさないかについて判断し、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て精密調査地区を選定することである（4.2.1.2 参照）。この目標を達成するために、現地の情報を直接取得し、文献調査における評価結果を確認するとともに、地質環境の概念モデルや地質環境モデルを更新する。さらに、これらの情報をもとに地下施設や人工バリアの概念設計を行い、予備的な安全評価を行う。このため、工学的対策には、地質環境モデルおよび付随するデータセットを介して、地下施設設置位置の設定（6.3.3.1 参照）、地下施設レイアウトの設定（6.3.3.3 参照）、一般労働安全の確保（6.4.4.2 参照）に関する検討に必要な情報を受け渡す。また、安全評価には、サイトの地質環境の長期変遷、地下水流動解析、地球化学解析、力学解析、核種移行解析、熱・水・応力・化学連成解析などに用いるモデルおよびパラメータセットを受け渡す（図 7.2.2-6、表 7.2.2-1）。以上の検討結果に加え、操業期間中の安全確保、事業の効率性・経済性などの観点を踏まえた総合的な評価を行い、より適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。さらに、次段階で安全確保における不確実性を低減するために優先的に取得すべき情報を把握し、精密調査計画の立案に反映させる。

「精密調査地区選定上の考慮事項」については、4.2.1.2 で述べたとおり、今後、精密調査地区選定に対する原子力安全委員会の検討状況などを踏まえつつ、精密調査地区選定段階の開始までに策定し、公表する予定である。ここでは、概要調査の目標設定の参考情報として、4.2.1.2 (2) の内容を再掲する。

精密調査地区選定に際しては、地層処分事業における安全確保を念頭におき、最終処分法に定められている要件（法定要件）への適格性を第一に評価を行う。また、精密調査地区選定はサイト選定の中間段階に当たることから、精密調査地区選定上の考慮事項の策定においては、本段階に関する法定要件はもとより、前段階（概要調査地区選定段階）の考慮事項への適格性などの確認、さらには次段階（処分施設建設地選定段階）の法定要件も踏まえて行う。

本段階に関する法定要件は次のとおりである。

- ・ 当該対象地層等において、地震等の自然現象による地層の著しい変動が長期間生じていないこと
- ・ 当該対象地層等が坑道の掘削に支障のないものであること
- ・ 当該対象地層等内に活断層、破碎帯又は地下水の水流があるときは、これらが坑道その他の地下の施設に悪影響を及ぼすおそれが少ないと見込まれること

- ・ その他経済産業省令で定める事項

精密調査地区選定上の考慮事項のうち、上記の法定要件に関する事項に関しては、地層の著しい変動、坑道掘削への支障、地下水の水流による地下施設への影響の観点から、地層処分事業の成立性を判断するための要件として設定する。「地層の著しい変動」については、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食などの自然現象の著しい影響、「坑道掘削への支障」および「地下水の水流による地下施設への影響」については、地質環境特性にかかわる事項として検討を行う。以下に現在議論を進めているそれらの検討内容の例を挙げる。

自然現象の著しい影響にかかわる事項では、例えば、地震・断層活動に関しては、断層沿いのずれ破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、これを最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価することとし、活断層や活褶曲・活撓曲が存在していたり、将来的に断層の分岐などの可能性が高いと明確に判断される場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

火山・火成活動に関しては、マグマの貫入・噴出に伴う力学的・熱的な破壊が地下施設および廃棄体へ直接的に破損を与える可能性があることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価することとし、第四紀にマグマが地表付近へ貫入または地表へ噴出したことが明らかな範囲や、マグマによる著しい熱・熱水活動の著しい影響が及ぶ範囲、あるいはマグマの地表付近への上昇や地表への噴出の可能性の高い範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

隆起・侵食に関しては、地下施設の地表への露出や地下環境の酸化雰囲気への変化が地層処分システムの「隔離」あるいは「閉じ込め」機能の喪失につながることから、最終処分法に定める「地層の著しい変動」として精密調査地区としての法定要件への適格性を評価する。従って、地下深部への地下施設の設置を考慮しても、隆起・侵食により地下施設および廃棄体が露出したり、地下施設周辺の環境が酸化的な雰囲気へ変化することが明らかな場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

地質環境特性にかかわる事項である「坑道掘削への支障」に関しては、事業期間中の安全確保の観点から成立性を判断する事項について評価する。例えば、地層処分を行おうとする地層において未固結堆積物が分布していたり、地山の強度が著しく小さい、あるいは膨張性地山などにより難工事が予想されるなどの理由により、必要な廃棄体本数を定置するための処分坑道を安全かつ合理的（現実的な対策の範囲内）に掘削することが困難であると判断される場所および範囲は含めないように精密調査地区を選定する。

また、大規模な破碎帯などの高透水性の構造が存在する場合は、地下水がその構造を介して浅層あるいは地下深部から地層処分を行おうとする地層に到達し、地下水の流動特性や化学特性、岩盤の熱特性が変化することにより、地下施設のもつバリア性能に著しい影響を及ぼす恐れがある。そのため、最終処分法に定める「地下水の水流による地下施設への影響」に相当すると判断し、法定要件として適格性を評価する。

一方、概要調査に続いて実施する精密調査には、新たな大規模坑道掘削工事の実施に伴い多大な費用と期間を要するため、精密調査地区選定においては、実施主体として安全確保はもとより事業推進の面からも地層処分事業としての成立性の見通しを可能な限り得ておく必要がある。従って、法定要件に対する適格性の確認とともに、精密調査地区としての特性に関して、閉鎖後長期の安全

確保や建設可能性および事業期間中の安全確保、環境影響の低減、土地の確保、経済性および工程確保などの観点から、法定要件以外に関する事項（地質環境特性、自然環境特性、社会環境特性などに関する事項）についても総合的に評価を行い、地層処分の成立性の判断および相対比較を行う。

5.2.3.2 概要調査の準備

概要調査を的確かつ効率的に実施するためには、着手前の計画立案と調査実施中の管理が重要である。このため、NUMOは、概要調査計画立案マニュアル（NUMO，2011）および概要調査施工管理マニュアルを作成した。概要調査の実施に当たっては、概要調査計画立案マニュアルに従い、目的、範囲、方法、成果物、工程、実施体制などを明示した調査計画を立案する。

概要調査計画立案マニュアルは、海外および国内の先行事例における経験や教訓を踏まえて、概要調査計画の立案に際して考慮すべき検討方針、手順、留意点などの基本的な考え方を取りまとめたものである。図 5.2.3-1 に計画立案手順を示す。調査計画の立案はステップ1～ステップ7の七つのステップからなる。

手順の前半（ステップ1～3）では、概要調査の目標を設定するための準備段階である。ステップ1では、実施体制の整備、データベースの準備、文献情報の整理を行う。ステップ2では、文献調査で取得した情報に基づき地質環境の概念モデルや地質環境モデルを構築し、計画立案時における地質環境の理解の程度や不確実性を把握する。ステップ3では、地質環境モデルの情報に基づき行われる設計・性能評価に関する検討の結果から、概要調査への要求事項を把握する。

手順の後半（ステップ4～7）では、調査目標を達成するために具体的な計画立案にかかわる検討を行う。ステップ4では、地質環境の理解、考慮事項への適格性の確認および設計・性能評価からの要求などを踏まえ、文献調査終了時点の課題を整理し、調査目標を設定する。ステップ5では、当該サイトの地質環境条件や制約条件を考慮しながら、調査目標を達成する上で有効と考えられる調査手法を抽出・選定する。この際には、併せて、気象・海象、実施に必要な関連法令、環境影響、インフラストラクチャなど、調査の実施に対する制約条件や調査に必要な予算や工期についても検討する。また、調査目標の達成およびステップ2で構築した地質環境モデルの更新も考慮して、当該サイトおよびその周辺においてデータを取得する調査の範囲を検討する。さらに、取得するデータの量や精度の観点から、調査の密度や調査手法の組み合わせについても整理する。ステップ6では、調査目標の達成に向けて設定した複数の調査・評価を、適切な手順で組み合わせ整理・統合することにより、概要調査計画を立案する。まず、調査データの取得に伴い期待できる地質環境の理解の進展（不確実性の取り扱い）を考慮し、概要調査の枠組み（調査フェーズの数）を設定する。次に、調査で得られたデータを解釈する手法や、それらを地質環境モデルに反映する解析手法などについても検討する。さらに、ステップ5において抽出した調査と評価とのつながりについて、データの流れに着目して具体化し、調査目標の達成に向けた調査・評価の効率的な組み合わせとその手順を設定する。その際、社会的な制約条件や、複数の分野で活用できる調査データの効率的な取得を考慮した調査仕様などを設定する。続いて、調査フェーズ、調査・評価の組み合わせと手順に基づき、各項目の時間展開を策定し、概要調査計画の全体工程案を決定する。また、それぞれの調査・評価を完了させるために必要な期間、資源（人員、機材、予算）を算定する。ステップ7では、立案した概要調査計画案が妥当かどうかについて検討する。具体的には、①ステップ4において設定した調査目標の全てに対応した計画となっているか（設定した調査目標の重要度・優先度が反映されているか）、②概要調査を実施する上での制約条件や期間および資源（人員・機材・予

算) の効率性を考慮して、立案した計画が実現可能であるかが妥当性評価のポイントである。もし妥当ではないとの判断に至った場合は、ステップ4にもどり、設定した調査目標を再検討し、それ以降の検討ステップを慎重に進める。

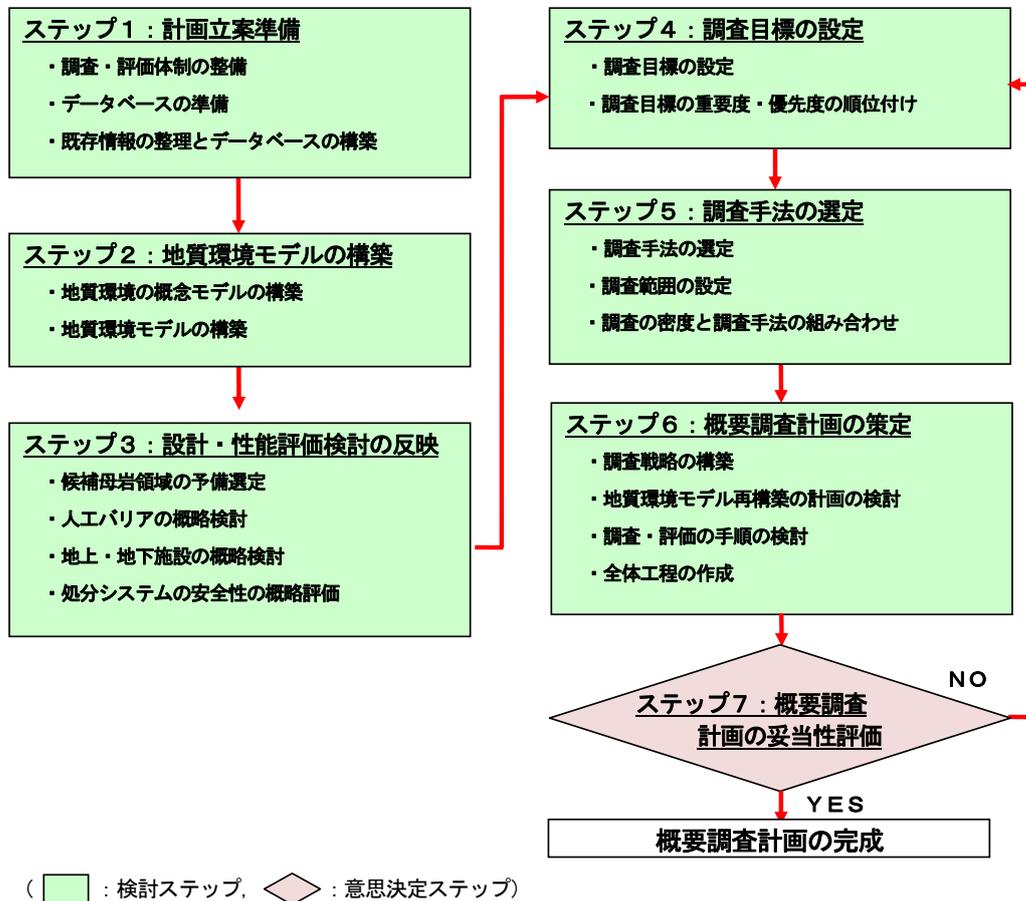


図 5.2.3-1 概要調査計画立案の流れ（検討例）

（出典：NUMO，2011）

概要調査計画は、七つのステップにより立案する。ステップ1～3では調査目標の設定に向けた検討、ステップ4～7では調査目標を設定しそれを達成するための具体的な検討を行う。

概要調査施工管理マニュアルは、当該サイトの地質環境を考慮し立案された概要調査計画を円滑に実施するため、個々の調査仕様の決定、実施計画の確定、調査の工程・品質・安全などの管理、想定外の事象発生時の対策など、概要調査実施時に必要となる現場管理の方法や手順、管理上の留意点など示したものである。施工管理のフローを図 5.2.3-2 に示す。ここでは、ステップ1～9に示す広範な活動に対して、マネジメントの手引きや確認事項をすべての調査手法で共通に取り扱う事項と調査手法ごとに取り扱う事項として整理している。

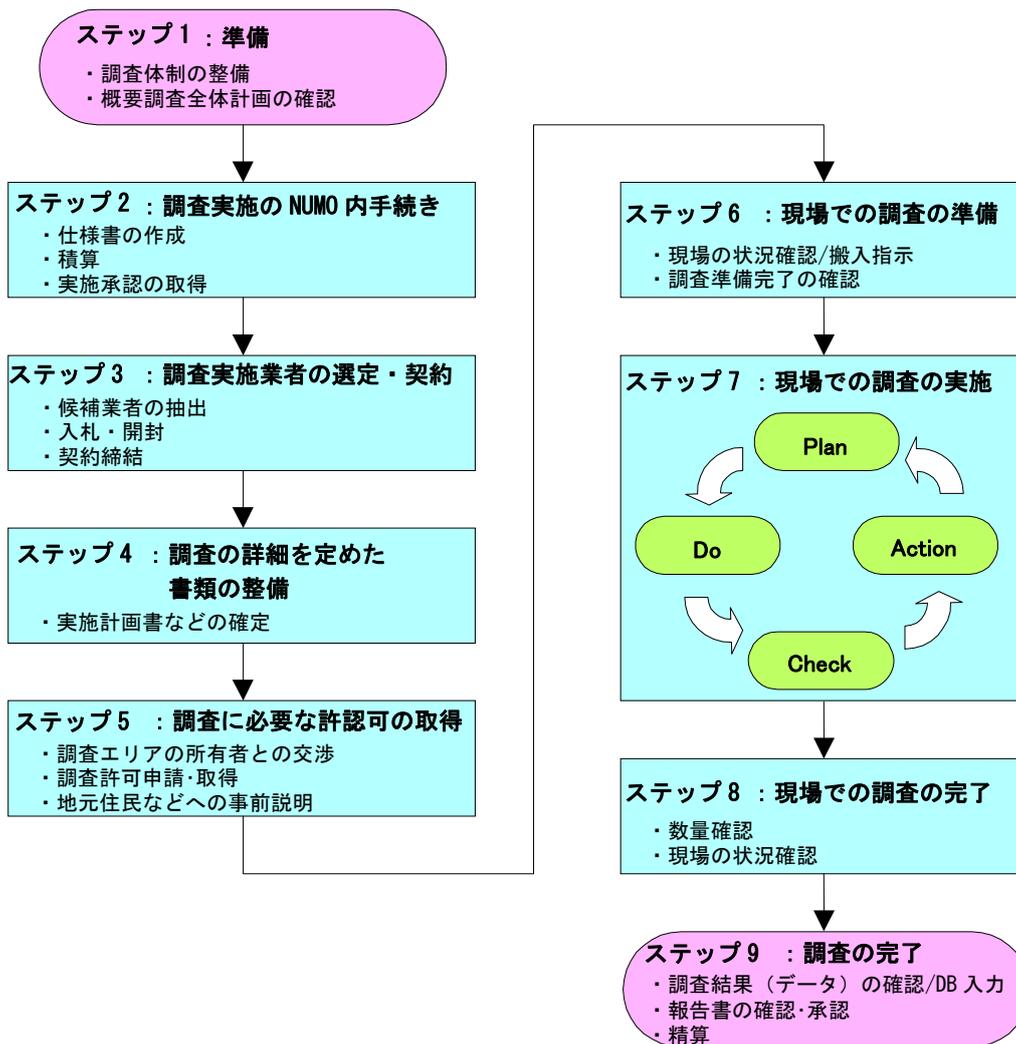


図 5.2.3-2 概要調査の施工管理の流れ

概要調査施工管理マニュアルはステップ1～9の活動に対するマネジメントの手引きや確認事項を提示する。

これらのマニュアルに沿って、概要調査の実施体制について検討した例を図 5.2.3-3 に示す。ここでは、概要調査における調査・評価は、サイト調査・評価、処分施設の設計・施工、安全評価の三つの分野の連携が不可欠であることから、各部署から派遣されるメンバーにより地質環境評価を実施するチームを編成し、処分場概念の検討、地質環境モデルの構築、現地調査を実施するチームと連携しながら業務を進めることとしている。

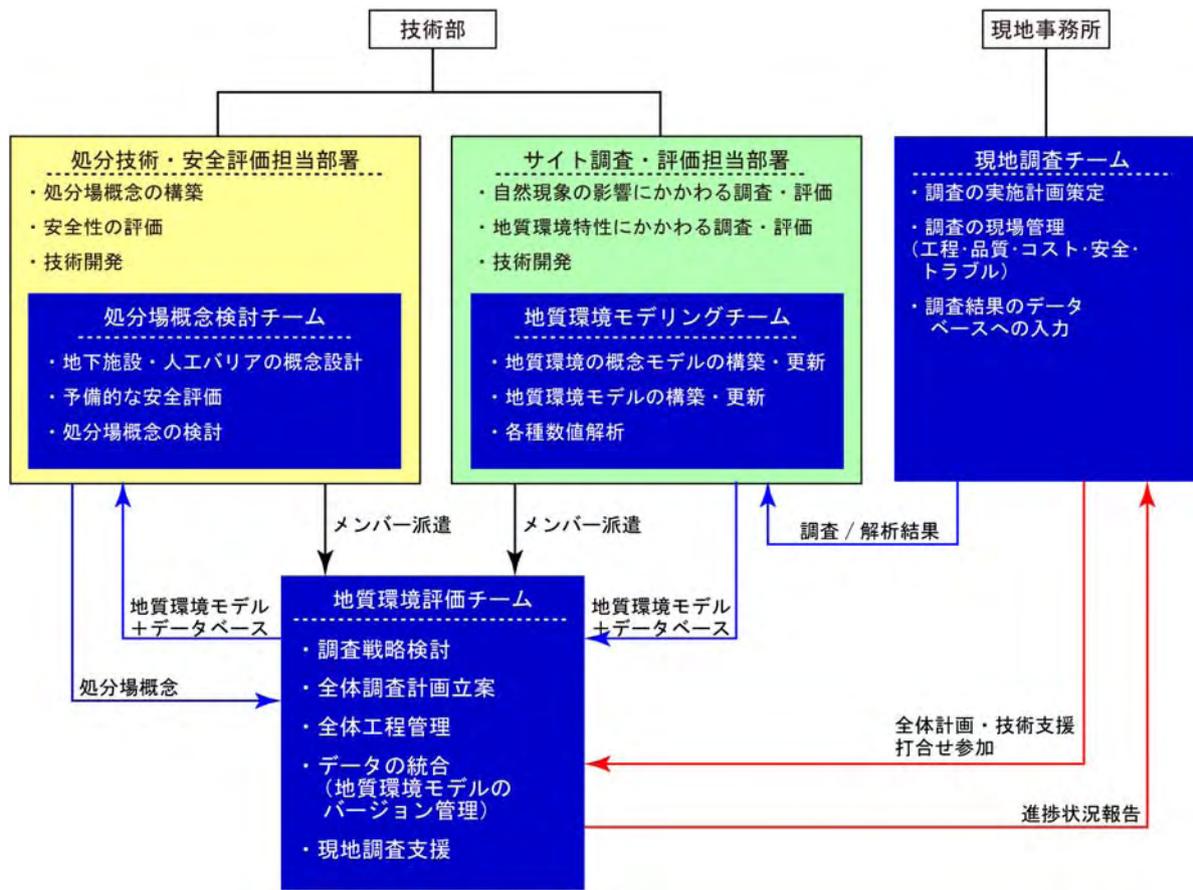


図 5.2.3-3 概要調査の実施体制にかかわる検討例

(出典：NUMO，2011)

各部署から派遣されるメンバーにより地質環境評価を実施するチームを編成し、処分場概念の検討、地質環境モデルの構築、現地調査を実施するチームと連携しながら業務を進める。なお、この実施体制は検討例であり、実際の概要調査においては、対象地点やNUMO内の状況に応じて適切な体制を組織する。

概要調査を実施する範囲は、「概要調査地区」と「補足的に調査を行う範囲」からなる。概要調査地区は、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する。この際、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保に関する評価に必要な地質環境特性に関する情報を取得できるよう、以下のことを念頭におく。

- ・ 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
- ・ 少なくとも処分施設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

また、概要調査の段階では、概要調査地区における火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などに関する自然現象の影響や、それらによる地質環境特性に対する影響をより詳細に評価するため、概要調査地区の周辺で補足的に調査を行うことが必要になる場合がある。この場合、概要調

査地区の周辺に、次に示す観点を踏まえて補足的に調査を行う範囲を設定する。

- ・ 概要調査地区の評価に当たり、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、概要調査地区およびその周辺の広い範囲における調査が必要となる場合がある。
- ・ 活断層や第四紀火山などが応募区域およびその周辺に存在する場合、これらを含めないように概要調査地区を設定するが、それらの影響が及ばないことを念のため確認するために調査が必要となる場合がある。
- ・ 隆起・侵食については、広域的な自然現象であるため、概要調査地区内においてそれらの評価が可能な海成段丘や河成段丘などが分布しない場合、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がある。

以上のことから、概要調査地区では、地質環境特性にかかわる調査・評価が主体となり、補足的に調査を行う範囲では、地震・断層活動、火山・火成活動、隆起・侵食といった自然現象の影響にかかわる調査・評価や広域の地質構造発達過程にかかわる調査が主体となる。このような考え方に基づき設定する概要調査地区および補足的に調査する範囲のイメージを図 5.2.3-4 に示す。

なお、各調査項目における具体的な調査範囲・位置の設定の考え方については、5.3 に述べる。

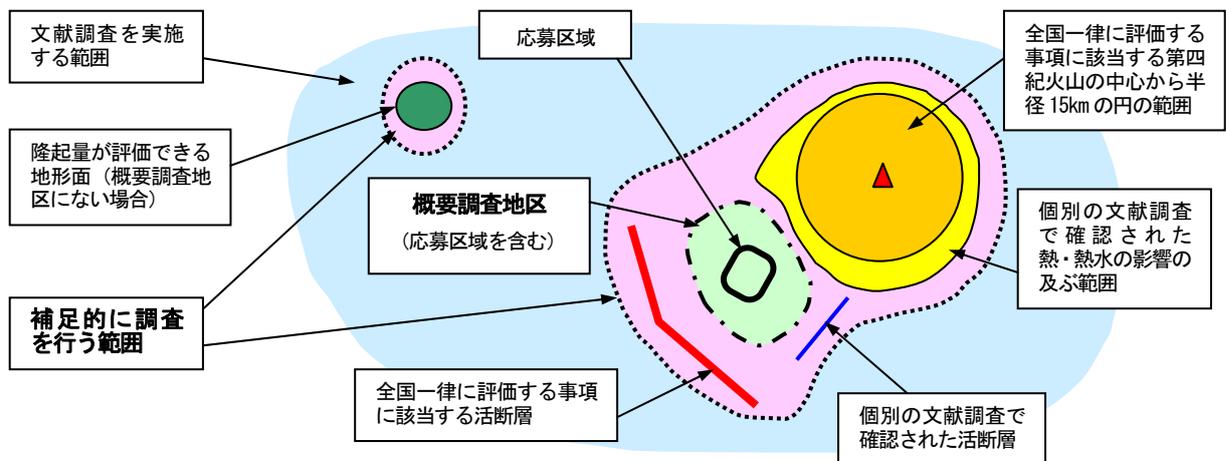


図 5.2.3-4 概要調査地区および補足的に調査する範囲の設定イメージ
(NUMO, 2009b を一部修正)

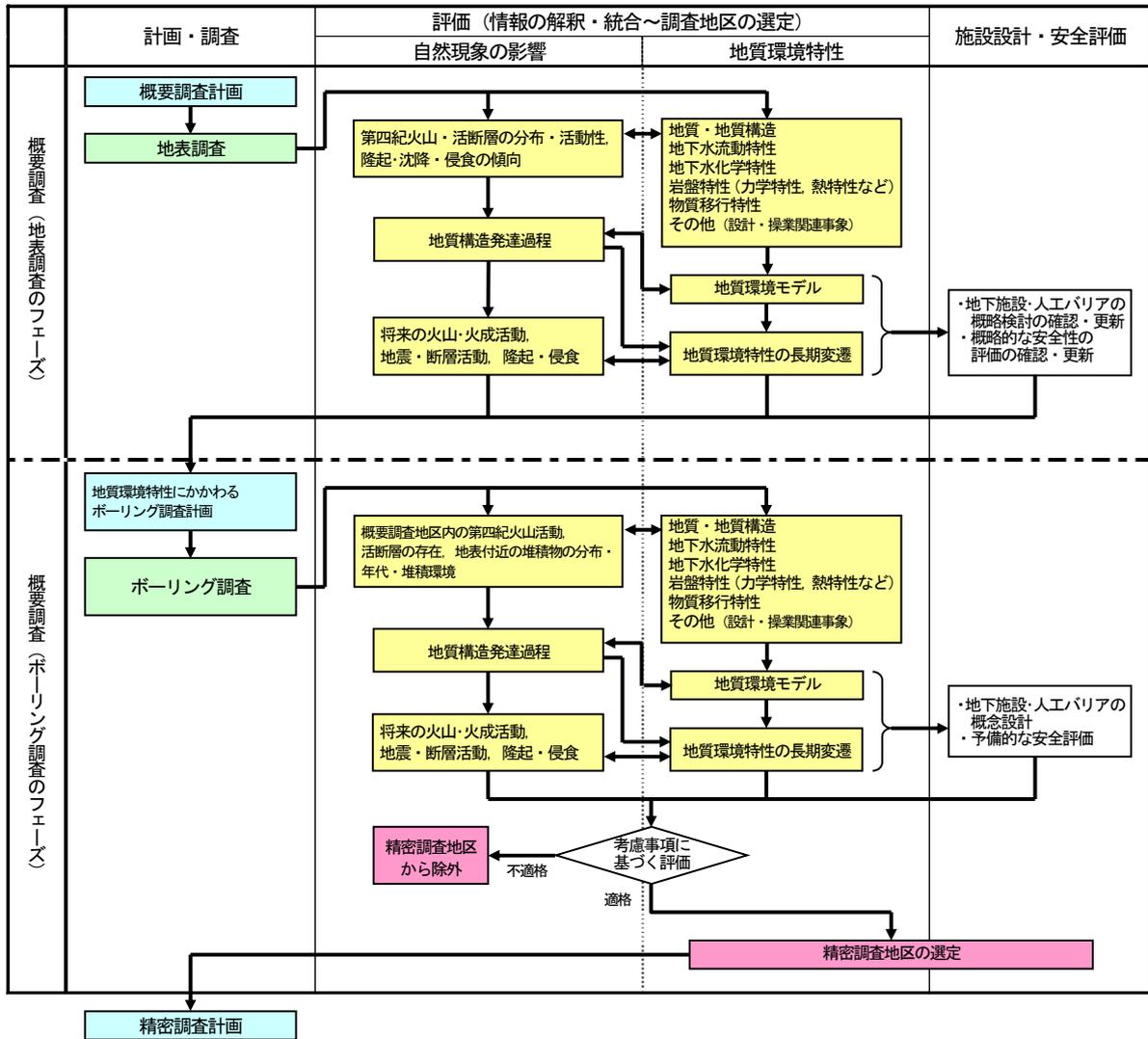
- ・ 法定要件に該当する活断層や火成活動などの分布範囲および著しい影響範囲は、概要調査地区に含まない。
- ・ 活断層や火成活動などに該当する範囲との位置関係、応募区域の大きさなどによっては、概要調査地区は応募区域より広がるが、広がった部分は概要調査などを行うにとどめ、処分施設建設地とすることはない。
- ・ 概要調査地区の特性をより詳細に評価するため、概要調査地区の周辺でも補足的に調査を行うことがある。

5.2.3.3 概要調査の実施

概要調査は、概要調査地区およびその周辺の地質環境を評価する上で必要な情報を確実かつ効率的に取得できるように、概要調査を複数のフェーズに区分し、段階的に実施することを基本とする（図 5.2.3-5）。段階的に調査を行うことにより、フェーズごとに調査結果を取りまとめ評価し、次のフェーズの調査計画をより適切なものに見直すことができる（NUMO, 2011）。

調査・評価のフェーズ設定は、一般土木構造物の建設にかかわる地質調査（全国地質調査業協会連合会, 2009）、わが国の深地層の研究施設計画（三枝ほか, 2007；太田ほか, 2007）、諸外国の地層処分事業（SKB, 2000）などを勘案すると、概要調査を前半と後半の二つのフェーズに区分することが適切と考えられる。このうち、前半の地表調査のフェーズでは、文献調査の評価結果を現地を確認し、その信頼性を向上させること、概要調査地区の地質環境特性の概要を把握すること、次フェーズの計画立案に資することを目的として、主に地表踏査、物理探査（空中、地上、海上）を実施する。これらは、ボーリング調査に比べて、対象となる地質環境の場を乱すことなく、広い範囲の面的な情報を取得することができることから、可能な限り有効に活用する。後半のボーリング調査のフェーズでは、地表調査のフェーズで取得できない地下深部の実測データを取得し、前フェーズで認識された不確実性を低減することを主目的として、大深度のボーリング調査を実施する（図 5.2.3-6）。ボーリング調査では、地質分布の確認、ボーリング孔内での各種検層を行い、必要に応じて単孔式物理探査（地表-ボーリング孔間の探査を含む）も併せて実施する。なお、各フェーズにおける調査項目やその実施順序については、調査地域の地質環境特性に応じて柔軟に設定する（例えば、地表調査のフェーズにおいて物理探査結果の解釈に利用するため、ボーリング調査の一部を実施するなど）。また、サイト選定の段階やフェーズにかかわらず、地質環境とその形成過程を理解するためには、対象とする事象のメカニズムやプロセスに関する情報を得ることが重要である。そのために、自然現象および地質環境特性に関する情報については、時間・履歴に関する情報も取得する。

概要調査の期間については、内部的な検討に基づき、標準的な工程として4年程度が想定されている。しかしながら、当該調査地区の地質環境特性、文献による情報の量・精度、当該調査地区の広さ、地理条件などに応じて長くも短くもなり得る。特に、5.2.3.1 に述べた精密調査地区選定段階における安全確保に関する目標や、閉鎖後長期の安全評価にとって重要となる事項については、十分に調査・評価を行うこととする。



□ : 計画, □ : 調査, □ : 検討・評価項目, □ : 意思決定, □ : 他の計画, 調査, 検討・評価項目

図 5.2.3-5 概要調査の基本的な流れ (検討例)

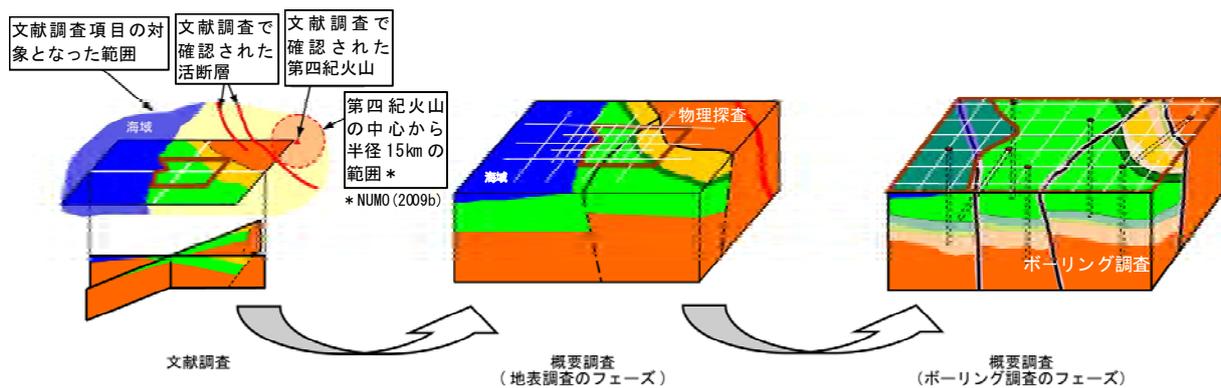


図 5.2.3-6 概要調査における段階的なアプローチの成果イメージ (2 フェーズの例)

概要調査を合理的に進めるために段階的なアプローチを採用し、二つのフェーズ（地表調査のフェーズ、ボーリング調査のフェーズ）に区分した例を示す。

5.2.3.4 概要調査における評価

概要調査では、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、精密調査地区としての適格性を評価する。基本的な考え方として、自然現象の著しい影響を回避できるか否かを判断し、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する(4.2.1.2 参照)。

自然現象については、文献には記載されていない第四紀の火山・火成活動や活断層の分布・影響、あるいは、概要調査地区周辺の第四紀火山や活断層による影響の有無について評価する。また、隆起・侵食については、基本的に文献・資料などによる隆起量を確認・修正し、将来において地層処分システムの安全性に著しい影響が及ぶ可能性について評価する。以上の評価結果にかかわる判断については、将来の第四紀火山や活断層、および隆起・侵食による地層処分システムへの著しい影響が否定できない、あるいは評価における不確実性が大きく地層処分システムへの影響を判断できない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

地質環境特性については、処分場の設計および安全評価に必要な基本的情報である、岩盤の割れ目分布、化学組成、透水性、物理・力学特性、熱特性、地下水の水圧分布・水質などに関するデータ(表 6.3.3-1, 表 7.2.2-1)を取得し、調査フェーズごとに文献調査で構築した地質環境の概念を見直し、地質環境モデルを段階的に更新する。概要調査では、工学的対策や安全評価に影響を及ぼすと考えられる岩盤の割れ目分布や透水性などに関する情報が拡充され、地質環境モデルに記述される項目や内容はより詳細になると考えられる。しかしながら、概要調査(特にボーリング調査)により得られる情報の量や精度には空間的な差があり、それらを補間する技術を用いても、空間的な不確実性を完全に排除することはできない。この前提に立ち、当該地区などに地層処分システムの安全性に著しく悪い影響を及ぼし得る地質環境特性(例えば、広く分布する未固結堆積物、地下水の大きな水流、広く分布する酸化的な環境など)が把握された場合は、その場所は精密調査の対象から除外する。

更新された地質環境モデルをもとに地下施設や人工バリアの概念設計を行い、これらに対して予備的な安全評価を行う。上述のように、地質環境モデルの不確実性を完全に排除することはできないため、複数の地質環境モデルを考慮した概念設計や安全性の評価を行う可能性もあり得る。これ

らの結果に加え、閉鎖後長期の安全確保や建設可能性および事業期間中の安全確保、環境影響の低減、土地の確保、経済性および工程確保などの観点を踏まえて総合的に評価を行い、より適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。概要調査地区が複数の場合にも、総合的な評価の結果を踏まえて相対的比較を行い、より適切と判断される地区を選定する。

最後に、精密調査計画を立案するための情報を整理する。その際、精密調査により最終的な処分施設建設地が選定されることから、以下の点に留意する。

- ・ 精密調査で行われる地質環境モデルの更新に反映させるため、概要調査の段階における地下施設・人工バリアの概念設計ならびに予備的な安全評価によって抽出された、閉鎖後長期の安全性の観点から重要な地質環境特性を効果的に取得できること
- ・ 自然現象の著しい影響を回避できているか否かを判断するために追加的・補足的な対策ができること
- ・ セーフティケースを構築するためのデータを取得できること

5.2.4 調査・評価における品質マネジメント

5.2.4.1 品質マネジメントシステムの考え方

3.2.3.3 に述べたとおり、NUMO では、JEAC4111 に従った品質保証を目指す。そのために、ISO9001:2000 の考え方に基づき、概要調査地区選定段階における技術文書などを中心とする技術業務を対象に品質マネジメントシステムを構築し運用している。この基本的な仕組みは、ISO9001 と同様で、プロセスの管理とレビューが中心である。サイト選定段階では、各段階の法定報告書などの文書を成果品として、成果品に至るまでの重要な一連の業務（プロセス）を明確にし（文書化）、これを管理するとともに、文書化されたとおり実施していることを確認し、プロセスの透明性・追跡性を確保する。

文献調査では、重要度の高い「文献調査に関する法定報告書」や文献調査の対象となる文献に関する「収集予定文献リスト」、「収集文献リスト」などの技術文書を作成する。文献調査における品質保証は、これらの技術文書が、科学的・技術的な妥当性を確保できているか、「概要調査地区選定上の考慮事項」に基づき概要調査地区としての適格性を評価する際の客観性・公平性が確保できているかということに重点をおく。文献調査では、国内外の地質学、地球物理学、土木工学、原子力工学などの専門家や、地層処分の事業者および関係機関に所属する専門家（DTAC および ITAC の委員など）によるレビューチームを組織し、調査・評価のプロセスや結果について、科学的・技術的な妥当性を確認しつつ進めていく。このような品質保証の活動を支援するツールとして、これまでに文献調査システムフローや地質環境データ管理システムを構築した。これは、文献による情報の収集・整理から始まり、個別の情報の分析・評価、地質環境モデルの構築、考慮事項に基づく評価に至る一連の作業と情報の流れを系統的に表示し、記録保存するシステムである（5.2.4.2 参照）。

概要調査では、文献調査と同様に重要度の高い「概要調査に関する法定報告書」や関連する技術文書などが成果品となる。文献調査との大きな違いは、概要調査では、地表踏査、物理探査、ボーリング調査などを現地で実施し、自然現象の影響や地質環境特性にかかわる情報（実測データ）を取得することである。実測データに基づく成果品は、地層処分システムの安全性に関するセーフティケースの構築において、重要な情報になる。従って、NUMO では、概要調査の実施に向けて、一連の作業と情報の流れを系統的に表示するシステムフローや取得データを適切に管理するシステムなどの体系的な整備を進めている。さらに、今後の技術の進展や新たな知見に応じて、調査・評価のプロセスや結果に対する判断が適切になされていることを客観的に示すことも重要である。そのために、技術業務を遂行する実施部門としては独立性を有する部門において、定められたとおりに確実に業務が遂行されていることを確認する品質マネジメントの体制を整えていく予定である。

5.2.4.2 品質マネジメントシステムの整備

NUMO 地理情報システム、地質環境データ管理システム、および文献調査システムフローの関連性について図 5.2.4-1 に示す。地質環境データ管理システムは、文献調査と、それに続く概要調査および精密調査において取得する各種地質環境の情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムである。そして、NUMO 地理情報システムに格納される地質環境の情報や文献調査システムフローと連携することにより、文献調査を網羅的・効率的に進めることができるよう、システムを改良・拡充している。

文献調査では、短期間に膨大な量の文献・資料やそれに記載された図面・数値・記述文書などの地質環境の情報、さらには、空中写真や衛星画像、地震観測データ、気象観測データ、既往の物理

探査やボーリング調査の結果など、さまざまな形式の地質環境情報を取り扱う。また、文献・資料の収集ならびに文献情報の整理を行うとともに、各種解析作業および評価作業を同時並行で進める。

これらのことから、地質環境データ管理システムでは、収集した文献・資料およびそれらに記載されている地質環境の情報と、文献情報から解析に用いるデータセット、さらには解析・評価結果に至るまでの意思決定レベルの異なる地質環境の情報を体系的に保管・管理するとともに、各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指して整備を進めている。本システムを活用することにより、合理的・効率的な文献調査の実施、選定過程の記録・管理、選定作業の品質保証を確保できるものと考えている。

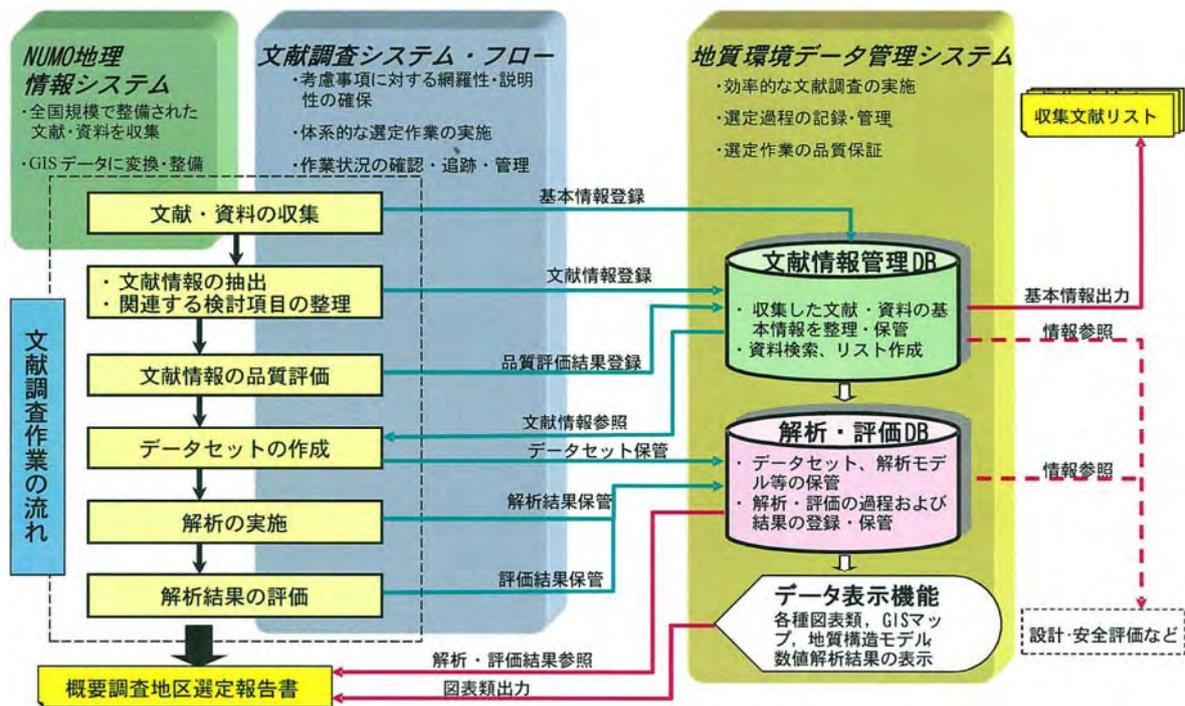


図 5.2.4-1 文献調査のための地質環境データ管理システムと支援ツールの概要

地質環境データ管理システムは、各種地質環境情報の解析・評価作業を円滑に進めるためのシステムであり、地質環境情報を体系的に保管・管理するとともに、各分野の技術者が必要時に必要な情報を適切かつ網羅的に検索・抽出することが可能なシステムを目指している。

文献調査システムフローは、文献調査を網羅的に進めることができるよう、概要調査地区を選定する際において必要となる各考慮事項について、文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備した（図 5.2.4-2）。

文献調査結果の品質保証の観点からは、文献情報から解析・評価結果に至るまでの作業プロセスおよび意思決定プロセスの追跡性を確保し、それらの妥当性を示すことが重要である。そのため、地質環境データ管理システムに保管される調査データや解析・評価結果などの情報について、文献情報の収集・整理から解析・評価に至るさまざまな作業や意思決定のプロセスを追跡的に管理することができるように、文献調査システムフローの改良および地質環境データ管理システムとの連携機能の整備を進めている。

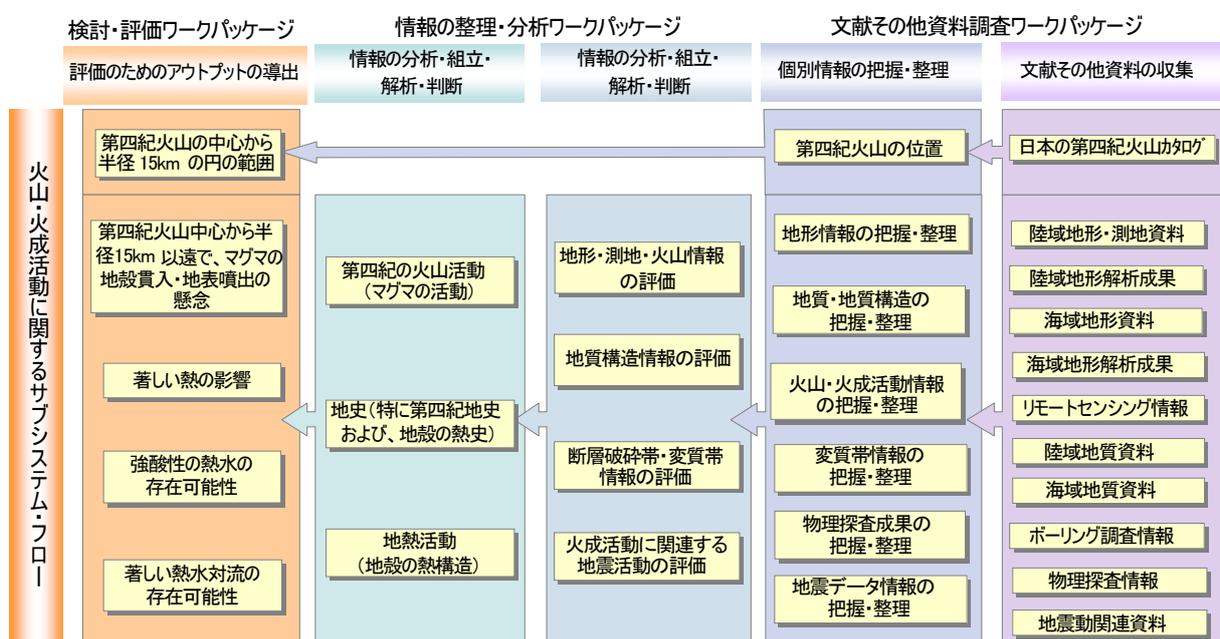


図 5.2.4-2 文献調査システムフロー（火山・火成活動の評価）

文献調査システムフローは、文献調査を網羅的に進めるために、概要調査地区を選定する上で必要となる各考慮事項（ここでは火山・火成活動）について、文献情報から解析・評価結果に至るまでの一連のプロセスを体系的に実施するための方策として整備している。

5.3 文献調査および概要調査の体系

本節では、文献調査および概要調査のそれぞれにおいて、自然現象の影響と地質環境特性の調査・評価をどのように進めるか具体的に述べる。なお、本節で取りあげている技術のうち、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降特に進展したものについては、5.4において改めて述べる。

5.3.1 自然現象の影響にかかわる調査・評価

ここでは、火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食について、調査・評価の基本的な考え方、そして文献調査と概要調査における調査・評価の流れについて述べる。

5.3.1.1 火山・火成活動

5.1.1.1 に述べたように、火山・火成活動による地層処分システムおよび地上施設への影響としては、マグマの貫入や噴出による処分施設の直接的な破壊、熱・熱水による地質環境の変化（例えば、地温の上昇、熱水対流系の形成、地下水質の変化など）、大規模なマグマの噴出や火砕流などによる地形変化に伴う地下水流動状況の変化、降灰・火山泥流・火砕流などによる地上施設の破壊または安全機能の喪失が挙げられる（表 5.1.1-1）。これらの影響のうち、マグマの貫入や噴出による処分施設の直接的な破壊、熱・熱水による地質環境への影響を、「地層の著しい変動」に該当する事象として取り扱い、サイト選定において回避する。一方、火山活動による地質環境の変化については、活動の発生時期、規模、サイトへの影響の程度などを考慮して、適切な工学的対策や地層処分システムの長期安全性の評価により対処する。ここでは、処分施設に直接的な破壊を生じるマグマの貫入・噴出および、熱・熱水活動の影響のそれぞれについて述べる。

(1) マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置することから、基本的には将来のマグマの貫入・噴出は回避されていると考えられる。しかしながら、その可能性を否定できない地域（例えば、火山フロントより背弧側など）では、確認のための調査・評価を行う。

第四紀の定義については、国際地質科学連合が、2009年6月に地質時代としての「第四紀」の始まりを従来より約80万年さかのぼり258万年前とする国際層序委員会や国際第四紀学連合の提案を批准し、わが国においてもこの定義を受け入れた（遠藤・奥村, 2010）。NUMOにおける調査・評価対象としての第四紀火山は、既存文献やデータベースが定義変更に対応していないことを鑑み、当面はこれまでどおり、「日本の第四紀火山カタログ」（第四紀火山カタログ委員会, 1999）に示された、およそ200万年前から現在にかけて活動した火山を第四紀火山とし、同文献に記載されている新第三紀鮮新世の一部の火山や時代未詳の火山に加えて、文献調査や概要調査の結果、火山地形（火山原面）が残っていると判断される火山も調査・評価の対象として検討する。

わが国には、348の第四紀火山があり（第四紀火山カタログ委員会, 1999）、千島弧～東北本州弧～伊豆小笠原弧および山陰～九州～南西諸島にかけて二つの帯状に分布している。第四紀火山の分布は、島弧の中軸部で最も密となり、大陸側（背弧側）に向かって疎となっている。また、第四紀火山が分布する領域の海溝側の境界を火山フロント（杉村, 1958）といい、その地理的位置は、沈み込んだ海洋プレートの上面に相当する深発地震面の深度が100～110km程度のところにほぼ一致している。東北本州弧における火山フロントは、新第三紀中新世後期～鮮新世以降（背弧海盆拡大

停止以降)、時間の経過とともに西側へ移動し、遅くとも 10Ma 頃までに現在の火山フロントの東約 10km に達したとされている。それ以降現在まで大きな移動はなく、8~6Ma 頃に現在から最大 30km 東進したことを除くと、0~20km 程度の「ゆらぎ」にとどまる(大口ほか, 1989; 吉田ほか, 1995)とされる。わが国の火山フロントの背弧側に分布する第四紀火山の時間的・空間的分布に関する検討(JNC, 1999b など)によれば、第四紀火山は特定の地域に偏在し、その中で活動を繰り返す傾向がある。火山フロントが不明瞭な山陰や九州地方北部では、深部からのマントル上昇に伴いマグマがもたらされ火山活動が生じている可能性が指摘されている(Iwamori, 1992; 宇都, 1995)。この地域の火山活動は独立単成火山群の分布が特徴であるが、鮮新世以降の活動域は全体的に山陰側に限定される傾向が認められる(宇都, 1995; Kimura et al., 2003)。日本列島のような島弧におけるマグマの発生プロセスについては諸説あるが(巽, 1995; 高橋, 2000)、火山フロントよりも背弧側の地表付近からマントルまでの地球物理学的データでは、火山・火成活動の可能性を示唆する上部マントル内の高温領域の分布が示されている(例えば、地震波速度構造:長谷川ほか, 2004)。また、上部マントルにおける高温領域は、第四紀火山の集中域に対応していることが明らかにされている(Tamura et al., 2002)。

マグマの貫入・噴出に関する将来予測は、以上のような過去の火山分布の偏在性に関する知見に基づいて行う。具体的には、島弧スケールおよび個々の火山体スケールにおける火山・火成活動の傾向や規則性、地下のマグマの存否を把握し、その結果に基づいて時間的・空間分布を外挿することにより評価する。また、必要に応じて確率論的評価手法(Martin et al., 2004; Chapman et al., 2009b; Jaquet et al., 2008 など)を用いた評価も参考にする。

(ii) 文献調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

文献調査では、応募区域における第四紀のマグマの貫入・噴出の有無、および将来のマグマの貫入・噴出の可能性を検討するための調査・評価を行う。その結果に基づき、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価し、概要調査地区を選定する。

全国一律に評価する事項:

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、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内にある地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項:

第四紀火山の中心から半径 15km 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は含めないように、概要調査地区を選定する。

(b) 調査

文献調査におけるマグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-1 に示す。

文献調査では、文献・資料の収集・整理のほか、応募区域の周辺に分布する第四紀火山およびその周辺を対象として、空中写真判読、レーザープロファイラ画像解析などのリモートセンシング手法(佐々木・向山, 2009 など)を活用し、火山地形や火口配列などの認定、火成岩類の分布・岩相・層序・年代・化学組成、活動履歴、火山体およびその周辺の地下構造、火山活動にかかわる地殻変動などの情報を取得する。なお、火山体およびその周辺の地下構造、特に地表からマントルまでの

高温領域の分布に関する情報については、必要に応じて既往の物理探査データの再解析を実施する。

(c) 評価

(b) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の第四紀火山を認定するとともに、第四紀以前を含め可能な限り過去にさかのぼり活動履歴と発達過程を把握する。続いて、地震・断層活動、隆起・侵食、地質・地質構造、地質環境モデルの情報を考慮し、地形・地質構造発達過程を検討する。それらの結果を踏まえ、火山の分布・活動性、マグマの存在について評価する。また、マグマが将来移動する可能性については、三浦ほか (2006)、土志田ほか (2006) などの検討事例を参考に、当該地域の火山活動の傾向や規則性の外挿、地形・地質構造発達過程の外挿、プレート運動との関連性や火山の寿命などを考慮して評価する。

これらの結果に基づき、第四紀火山の中心から半径 15km の円の範囲内に加え、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側の地域において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を含めないように概要調査地区を選定する。

文献調査における評価は、文献情報や既存データの再解析結果であるため、十分な判断ができない場合がある（例えば、第四紀火山から離れた場所に年代未詳の火山岩（噴出岩あるいは貫入岩）が分布する場合や、火山地形が明瞭であるが活動年代に関する情報がない場合など）。このような不確実性については、応募区域との離隔距離や周辺の第四紀火山との関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において検討の対象とする。

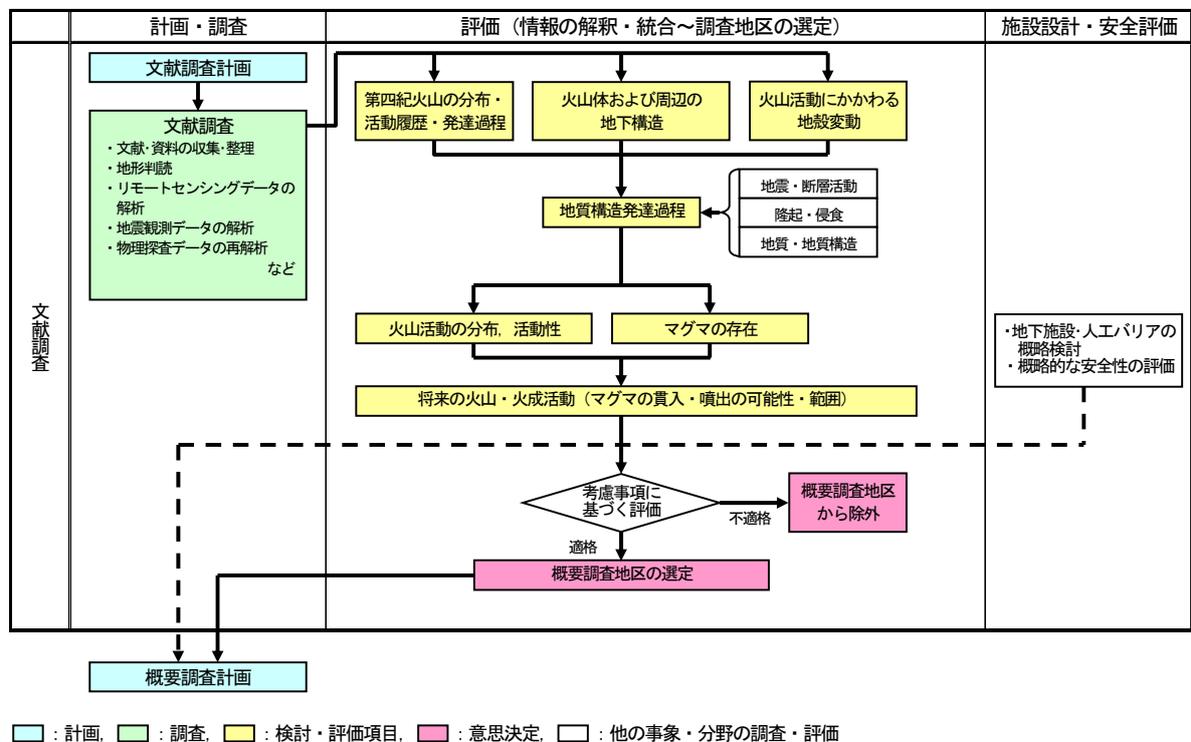


図 5.3.1-1 文献調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における火山・火成活動（マグマの貫入・噴出）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(iii) 概要調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

概要調査では、文献調査で応募区域の近傍に第四紀火山あるいはマグマ供給系が存在する可能性が認められた場合に、将来のマグマの貫入・噴出の可能性や範囲に関する調査・評価を行う。さらに、概要調査地区において、第四紀火山のマグマの貫入・噴出を示す証拠の有無を確認する。これらの情報を施設・人工バリアの概念設計および予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(b) 調査

概要調査におけるマグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-2 に、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-1 にそれぞれ示す。

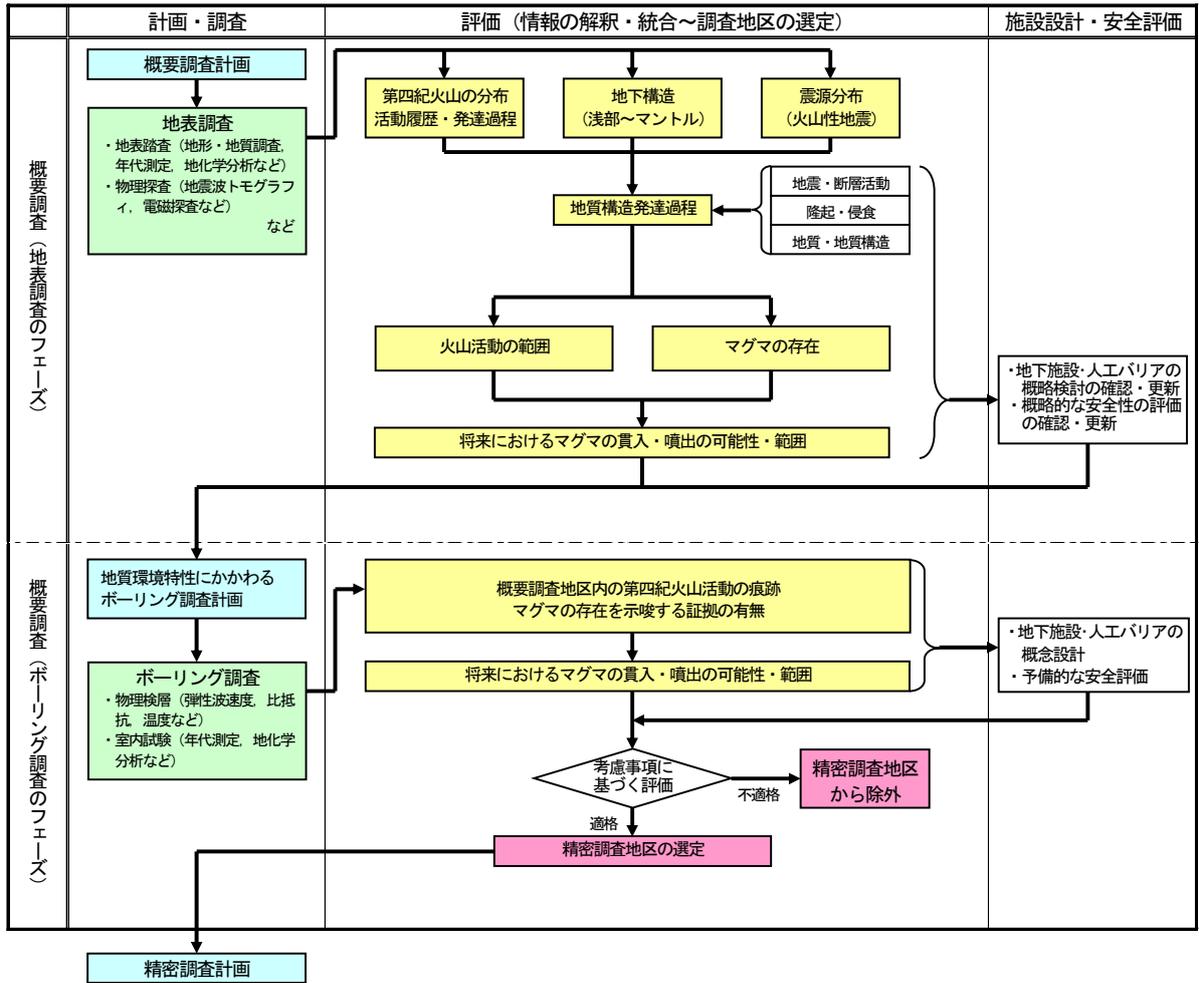
地表調査では、補足的に調査を行う範囲において、物理探査や地表踏査（岩石および地下水の年代測定や地化学分析を含む）などを実施する。特に、文献調査で明らかにされた、火山層序の不確実性がある個所や、年代値・化学分析値のデータが不足している個所、地質・地質構造、地殻変動と火山活動との対応関係を明らかにする上で重要な個所について重点的に実施する。この際、必要に応じて、火山体やその周辺の概略的な地下構造やマグマの分布を把握するために、地震波トモグラフィによる地震波速度構造解析（Xia et al., 2007 など）や電磁探査による比抵抗構造解析（浅森・梅田, 2005 ; Umeda et al., 2006b など）などの地球物理学的手法を用いる。活動的な第四紀火山が対象となる場合、測地学的手法（GPS 測量や傾斜計による観測など）も有効であり、必要に応じてこれらの情報も取得する。また、地下のマグマの存否を示す証拠として、地下水の遊離ガスや溶存ガスに含まれるヘリウム ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) や炭素 ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比) の同位体比が有効であるため、Umeda (2009) に示されているように、これらの地球化学的手法を組み合わせ、調査結果の信頼性の向上を図る。

概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において、火山岩（噴出岩あるいは貫入岩）が認められた場合は、コアの年代測定や地下水の同位体分析などを行う。さらに、物理検層により温度のデータを取得する。

(c) 評価

(b) に述べた調査により取得された情報に基づき、概要調査地区内の第四紀の火山活動の痕跡（第四紀の火山岩）やマグマの存在を示唆する証拠（例えば、地震波低速度域、低比抵抗域、高い地温勾配など）の有無を確認する。概要調査地区の周辺地域については、将来的なマグマの貫入・噴出の可能性とその範囲について評価する。その結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価の結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、第四紀にマグマが地表付近へ貫入または地表へ噴出したことが明らかな範囲、あるいはマグマの地表付近への上昇や地表への噴出の可能性の高い範囲などを除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。



□ : 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

図 5.3.1-2 概要調査における火山・火成活動 (マグマの貫入・噴出) にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、火山・火成活動 (マグマの貫入・噴出) にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-1 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	適用限界・精度・条件など	備 考
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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	—	<ul style="list-style-type: none"> 第四紀火山の活動性と形成発達史の検討の基礎データとして、また、マグマの地下での移動、およびそれと関連する火山活動の要因や地質構造要素との関係を検討するための基礎データとして有効である。
	放射年代測定 (K-Ar 法、フィッシュ トラック法)	火山岩類の放射年代	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	適用年代範囲 K-Ar 法：10 ⁴ ～10 ⁹ 年 フィッシュトラック法：10 ³ ～10 ⁹ 年	<ul style="list-style-type: none"> 調査の目的に応じた適切な試料採取が重要であり、文献情報の年代値を正しく解釈・評価するための基礎データとして有効である。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	測定限界 主要成分：0.1wt% 微量成分：1～0.1ppm	<ul style="list-style-type: none"> 地殻内のマグマ溜りなどにおける諸過程・条件を推定するための基礎データとして有効である。
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	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	可探深度：500m 程度 (電磁探査)	<ul style="list-style-type: none"> 広範囲の地下地質情報が得られる。
	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	<ul style="list-style-type: none"> 第四紀火山下の低速度域、Vp/Vs 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、Vp/Vs 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。 	可探深度：40km 程度	<ul style="list-style-type: none"> 広い地域のデータが得られるが、解像度はせいぜい数 km 程度である。 低 SN 比・多量データの処理の効率化が必要である。
	電磁探査 (MT 法)	二次元比抵抗構造	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	可探深度：数 10km 程度 精度：深度の 1/10 程度	<ul style="list-style-type: none"> 比較的容易に深部構造のデータを得ることができる。 比抵抗断面の解釈（部分溶解域か、熱水変質域かなど）が難しい場合がある。 岩石の種類、温度、マグマ・水などの液相の関与により比抵抗が変化する。
測地学的 手法	GPS 観測	基準点変動量 (水平・上下)	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	精度：数 mm	<ul style="list-style-type: none"> 地殻変動調査としては一般的である。データを連続取得できる。20km 程度の間隔で既設置点がある。

(2) 熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価

(i) 調査・評価の基本的な考え方

応募区域は、第四紀火山の中心から半径 15km の円の外側に位置するが、マグマに起因する熱・熱水活動の可能性を否定できない地域（例えば、火山フロント背弧側など）では、確認のための調査・評価を行う。

日本列島における全国規模の温度構造、地熱資源賦存領域については、日本地熱資源賦存地域分布図（地質調査所、1980）などに示されており、地域レベルの情報としては、地熱資源図として熱水賦存領域の特徴（タイプ）が取りまとめられている。また、孔井や温泉などから得られる地温分布や地下水（熱水）の地球化学的な性質については、地温勾配図（矢野ほか、1999；田中ほか、2004）、日本の熱水系アトラス（村岡ほか、2007）などに取りまとめられており、酸性熱水や火山性の熱水の分布状況、深部熱水の地化学温度や特徴を概観できる。玉生ほか（2008）は、地質データ、地球物理データ、孔井データを総合的に解釈し、熱・熱水活動による高温域を抽出する方法を提示するとともに、高温域を含む地域のタイプ区分を示し、各タイプにおける熱・熱水活動の具体的な特徴を明らかにしている。

将来における熱・熱水の影響については、過去から現在までの熱水活動の範囲や規模、および地下のマグマ供給系の有無を把握し、(1) に述べた将来のマグマの貫入・噴出の可能性とその範囲に関する評価結果を考慮して評価する。

(ii) 文献調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

文献調査では、応募区域における過去の熱・熱水活動の著しい影響の有無、および将来の熱・熱水活動の著しい影響の可能性について検討するための調査・評価を行う。それらの結果に基づき、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

個別地区ごとに評価する事項：

マグマによる著しい熱の影響、強酸性の熱水、あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域は含めないように、概要調査地区を選定する。

(b) 調査

文献調査における熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-3 に示す。

文献調査では、まず文献・資料の収集・整理に加え、空中写真判読、衛星画像解析などのリモートセンシング手法により、地下水の水質（温度、化学組成など）、岩盤中の変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。また、地下深部の熱源の位置を検討するために必要な情報（例えば、地震波速度構造、熱構造など）も取得する。この際、必要に応じて既存の物理探査データの再解析を実施する。

(c) 評価

(b) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の地下構造（特に、熱源の位置など）や、変質帯の分布やその形成年代などから熱史（地史）を検討する。また、現在の熱水賦存領域が応募区域の近傍に位置する場合には、広域的なモデルや解析手法の精度や不確実性に留意

しつつ、必要に応じて数値解析（中尾ほか，2008 など）により対流系（流体流動）の評価を行う。それらの結果および(1)のマグマの貫入・噴出にかかわる評価の結果を踏まえ、将来における熱・熱水の影響を評価する。

これらの結果に基づき、将来も含めて火山・火成活動による著しい熱の影響（例えば、大きい地温勾配）、強酸性の熱水あるいは著しい熱水対流が存在すると明確に判断される地域を含めないように概要調査地区を選定する。なお、文献調査における評価は、文献情報の分析や既存データの再解析に基づくため、十分な判断ができない場合がある（例えば、変質帯の形成年代が不明な場合、数値解析による熱水対流系の評価結果の解釈が分かれる場合など）。このような不確実性がある場合には、文献調査から予想される応募区域との離隔距離や熱・熱水の影響範囲との関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において検討の対象とする。

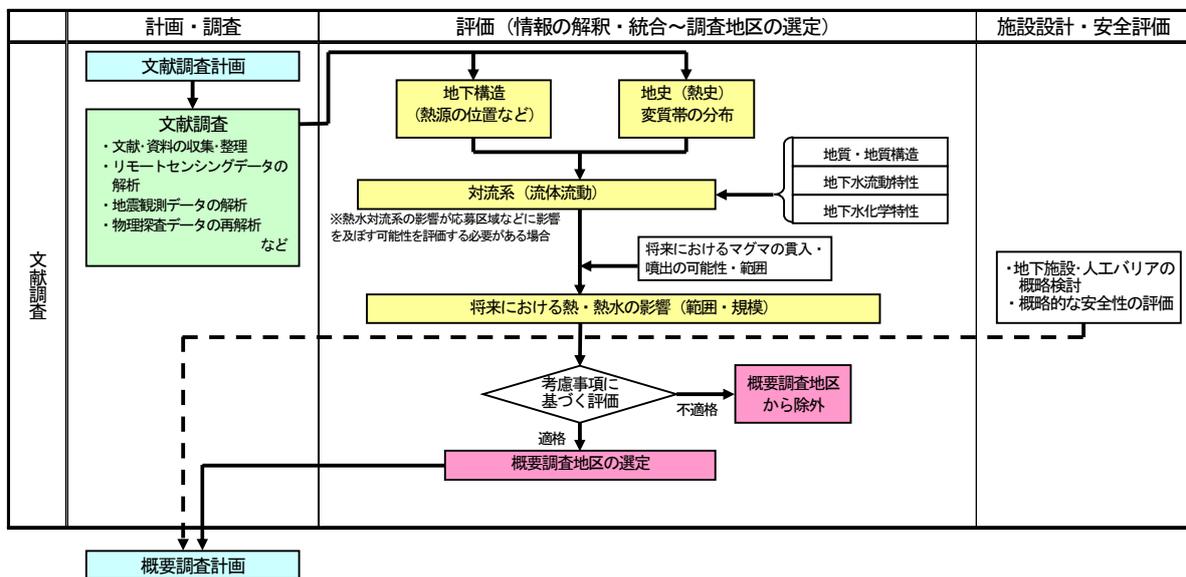


図 5.3.1-3 文献調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における火山・火成活動（熱・熱水の影響）にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(iii) 概要調査における調査・評価の流れ

(a) 目標

概要調査では、文献調査で応募区域の近傍に熱・熱水活動の存在あるいは発生の可能性が認められた場合に、将来の熱・熱水活動の範囲や規模について評価する。併せて、概要調査地区において、第四紀の熱水活動を示唆する証拠の有無を確認する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(b) 調査

概要調査における、熱・熱水活動の影響にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-4 に、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-2 にそれぞれ示す。

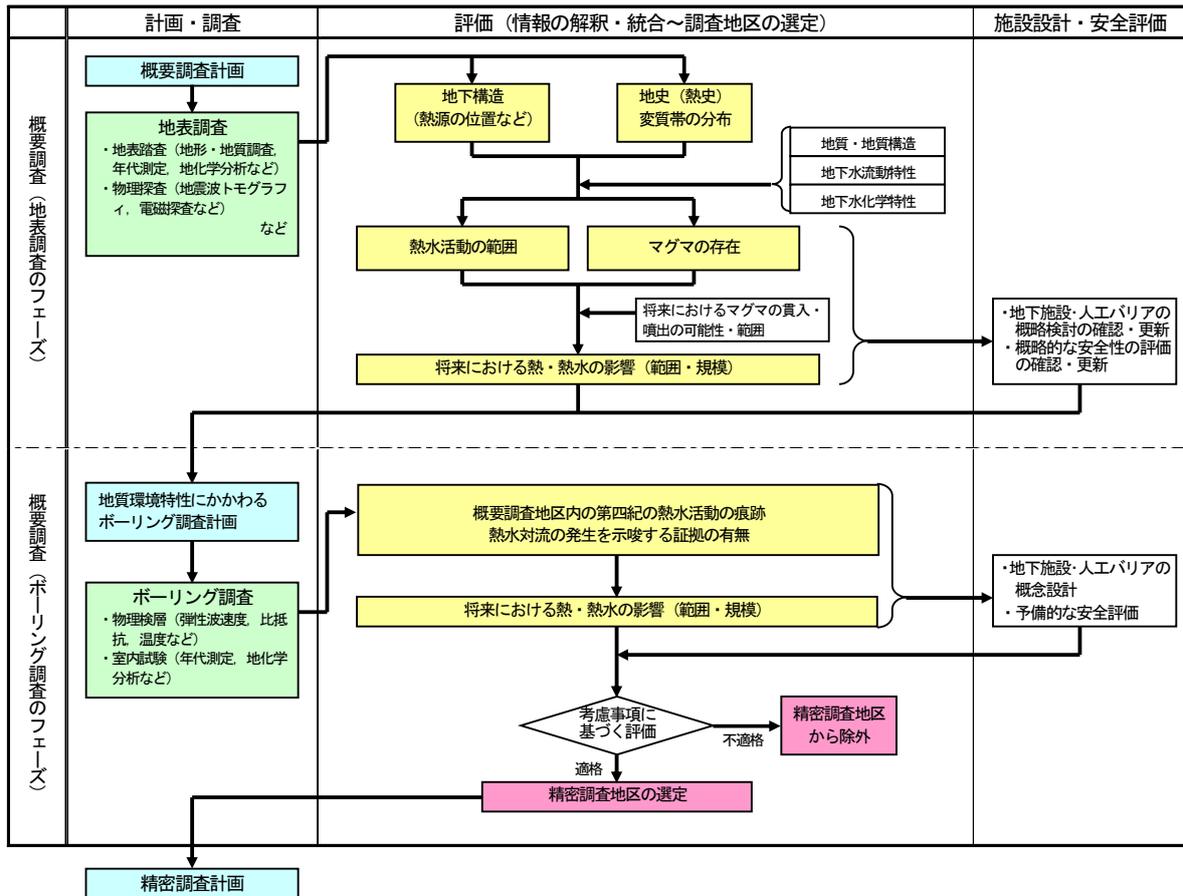
地表調査では、補足的に調査を行う範囲において、物理探査や地表踏査などを実施する。調査範囲は、応募区域周辺の第四紀火山の分布とその活動性、熱水賦存領域、地下構造（マグマの存在を示唆する構造）を考慮して設定する。これらの調査により地下水の水質（温度、化学組成など）、岩盤中の変質帯の分布やその形成年代などに関する情報を取得する。この際、マグマの貫入・噴出にかかわる調査・評価でも述べたように、必要に応じて、地球物理学的手法や地球化学的手法を組み合わせ合わせて適用し、調査結果の信頼性の向上を図る。

概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において著しい熱水変質が認められた場合は、コアおよび地下水の年代測定や地化学分析などを行う。さらに、物理検層により温度のデータを取得する。

(c) 評価

(b) に述べた調査により取得された情報に基づき、熱水活動の範囲やマグマの存在について評価する。その際には、深部熱源を評価した事例（Umeda et al., 2006b など）や熱源からの影響を評価した事例（JNC, 2005a ; 坂川ほか, 2005 など）を参考に、総合的な評価を行う。さらに、概要調査地区におけるボーリング調査の情報に基づき、第四紀の熱水活動の痕跡（例えば、第四紀の熱水変質）、将来の熱水対流の発生を示唆する証拠（例えば、高い温度勾配、地震波低速度域、低比抵抗域、マグマ由来の地下水など）の有無を確認し、将来的な熱・熱水活動の影響の範囲や規模について評価する。その結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果ならびに工学的対策および安全評価にかかわる検討結果を踏まえ、精密調査地区選定段階の開始までに公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、マグマによる著しい熱・熱水の影響が及ぶ範囲を除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。



□ : 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

図 5.3.1-4 概要調査における火山・火成活動 (熱・熱水の影響) にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、火山・火成活動 (熱・熱水の影響) にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-2 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	適用限界・精度・条件など	備考	
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	—	・変質帯の形成は、地層の年代によっては複数回の熱・熱水の影響を受けている可能性があることに留意する必要がある。	
		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	・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。	対象となる主な年代範囲： 10 ⁴ ～10 ⁶ 年	・変質年代の測定は、試料の状況により適切な手法を適用する（熱ミネラル法、フィッソントラック法、ESR法、U-Th/He法、K-Ar法など）。
		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		測定限界： 一般水質：10 ⁻² mg/l 同位体比：10 ⁻¹ ‰	・井戸水や温泉水に含まれるHe同位体の分析結果から、マントル起源の流体の寄与について考察できる。
	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。	—	・深度方向の情報が取得され、過去から現在の地温との関係が考察できる。
		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		対象となる主な年代範囲： 10 ⁴ ～10 ⁶ 年	・温度プロファイルは、特殊な環境ではわずかな間隔で大きく異なることがあることに注意する必要がある。
		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		ボーリング孔の掘削孔径や地下の温度状況により適用できない場合もある。	
		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		測定限界： 一般水質：10 ⁻² mg/l 同位体比：10 ⁻¹ ‰	
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。	(電磁探査) 可探深度：500m程度	・広範囲の地下情報が取得できる。	
	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	・地殻（～マントル）内の低速度域、Vp/Vs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。	可探深度：40km程度	・広い地域のデータを取得できるが、解像度は数km程度である。 ・精度向上には、三次元速度構造を把握することが望ましい。	
	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、断層構造、変質帯の位置を検討する。	(MT法) 可探深度：数10km程度 精度：深度の1/10程度 (CSAMT法) 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	・MT法では比較的容易に深部構造のデータを取得できるが、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT法では、比較的浅部について精度のよい地下構造のデータを取得できるが、比抵抗構造の解釈が難しい場合がある。また、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。	
	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。	可探深度：数10km 測定精度：0.1mgal	・比較的容易に大域的な基盤構造を推定できる。 ・想定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的に決まらない。	

5.3.1.2 地震・断層活動

(1) 調査・評価の基本的な考え方

5.1.1.1 に述べたように、地震・断層活動による地層処分システムおよび地上施設への影響として、岩盤の破断・破碎に伴う処分施設や廃棄体の直接的破壊、断層活動に伴う力学的変化、小断層や節理の発生に伴う周辺岩盤の透水性の変化、地震前後における地殻内のひずみの変化に伴う一時的な地下水位や地下水圧などの変化、地震動（ゆれ）による地下施設や地上施設の破壊が挙げられる。これらのうち、活断層などの分布範囲およびその周辺の影響の著しい範囲は、「地層の著しい変動」に該当する事象が認められる場所として取り扱い、サイト選定において回避する。一方、地震動による影響については、耐震設計などによる対処（工学的対策）の可能性について検討し、地震・断層活動に伴う地質環境の変化については後述する地質環境特性の一環として評価・検討する。

日本列島およびその周辺の活断層や活褶曲などの分布を網羅的に整理した資料としては、「50 万分の1 活構造図」、「新編 日本の活断層」（活断層研究会、1991）、「活断層詳細デジタルマップ」（中田・今泉、2002）、「日本周辺海域の第四紀地質構造図」（徳山ほか、2001）などがある。また、阪神・淡路大震災以降、地震調査研究推進本部が中心となり、活断層調査が精力的に進められており、活断層の分布や活動性などに関する評価結果が公開されている。これらは、文献調査に先立つ事前確認や概要調査計画立案などに用いる。

その一方で、わが国では、2000 年以降 M7 前後の被害地震が、これまでに活断層の存在が認められていなかった地域において複数発生している（例えば、2000 年鳥取県西部地震（M7.3）、2004 年新潟県中越地震（M6.8）、2008 年岩手・宮城内陸地震（M7.2）など）。これらの地震の震源域では、地形学的、地質学的、地球物理学的な調査などが行われ、短い活断層や活動性の低い活断層が存在することや、その活動性などに関する調査結果が報告された（例えば、井上ほか、2002；岡村・石山、2005；鈴木ほか、2008；遠田ほか、2010 など）。

断層の新生・再活動、活断層の分岐・伸展といった課題に対しては、東北日本弧では中新世の堆積盆を形成した正断層が現在の応力場に応じて逆断層として再活動していること（インバージョンテクトニクス；Kato et al., 2004）、横手盆地縁辺部に位置する逆断層の分岐（フロントマイグレーション）により活断層の位置が移動すること、中央構造線、阿寺断層、野島断層などでは西南日本の主要な構造線や活断層が新生代の初期にはすでに活動していたこと（Tagami and Murakami, 2007 など）などが明らかにされている。また、断層の発達過程、断層活動の累積に伴う地層の変形の進行に関しても、断層模型実験による検討や数値解析的な検討（例えば、上田、2009）により知見が得られてきている。

また、これらの研究と並行して、原子力発電の分野では、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会、2006）の改訂がなされ、より詳細な活断層の調査・評価が求められることとなった。この指針を受けた「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き」（原子力安全委員会、2010b）では、既存文献の調査や変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査などを適切に組み合わせた十分な調査を行うことが記されている。

これらの知見に基づき、活断層の調査・評価に関する最新の知見や技術を活用することにより活断層の分布や活動性などに関する情報を取得し、地形・地質構造発達過程を踏まえて、応募区域およびその周辺に分布する活断層、活褶曲などの分布とその活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について評価する。なお、活断層の幅とは、断層活動に伴い岩石が破碎され、不規則な割れ目の集合体となった断層破碎帯（角礫部、粘土部を含む）のことを指し、その外側の変形帯と

は、断層活動に伴う地層の変形が生じている領域のことを指す。

活断層などの分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の評価については、変動地形学的な考え方（渡辺・鈴木，1999）を重視した地形調査，地質学的調査，地球物理学的調査などにより把握する。また，被覆層などが不整合に覆って地下に伏在している断層を検出するため，測地学，地球物理学（地震学を含む）に加えて，地球化学的な観点からも検討する。伏在断層の活動性は，当該断層の上位を覆う被覆層に変位が及んでいるか否かによりそれを判断し，評価する。

活断層や活褶曲など運動の将来予測は，活断層などの分布・活動性などにかかわる地形学的・地質学的な記録や測地学的な情報，地震学的な観点からの検討結果に基づき，それを外挿することにより評価する。その際，想定される変位量や断層の長さなどのパラメータと断層破碎帯の幅との相関関係（Otsuki，1978；緒方・本荘，1981）に関する知見，断層模型実験（上田ほか，2003；上田，2009 など）から得られる知見，断層周辺のプロセスゾーン（金折，2001；吉田ほか，2009 など）に関する知見などを参考にする。一方，活断層の幅の外側の変形帯の範囲に関する将来予測については，外挿法による予測を基本とするが，必要に応じて確率論的手法（例えば，各種地殻変動量に基づく歪速度モデルによる確率論的評価手法：Chapman et al.，2009b）を用いた評価を考慮する。

また，地震動による影響（地下施設や地上施設の破壊）については，耐震設計による対処が可能であるか，当該サイトおよびその周辺における地震の履歴や活断層の調査結果に基づき検討するための情報を取得し，工学的対策の検討に対して情報を受け渡す。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では，応募区域において，過去数 10 万年の間に繰り返し活動を生じている活断層，活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯，活断層の分岐などの発生の可能性が高い場所の有無について検討するための調査・評価を行う。その結果に基づき，以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

全国一律に評価する事項：

陸域では空中写真判読など，海域では海上音波探査などに基づいて全国的に調査された文献に示されている活断層がある場所は含めないように，概要調査地区を選定する。

個別地区ごとに評価する事項：

繰り返し活動し，変位の規模が大きい活断層などについて，次の事項に該当すると明確に判断される場所，範囲は含めないように，概要調査地区を選定する。

- ① 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がある場所
- ② 活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲
- ③ 活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲
- ④ 顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲

(ii) 調査

文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-5 に示す。

文献調査では，まず文献・資料の収集・整理，空中写真や高解像度数値標高モデルを用いた地形

判読、測地データの解析、既往の物理探査の記録の再解析、地震観測記録の解析などにより、応募区域およびその周辺の活断層の分布・活動性、変動地形の分布、震源分布に関する情報を取得する。

(iii) 評価

(ii) に述べた調査によって取得された情報に基づき、応募区域周辺の活断層や活褶曲などを認定するとともに、それらの分布・規模や活動性を把握する。また、変動地形の分布域や震源分布を把握し、文献情報で示されている活断層などとの関係についても検討する。それらの結果に加えて、火山・火成活動、隆起・侵食、地質・地質構造の情報を考慮して、地形や地質構造の発達過程を総合的に取りまとめる。その上で活断層などの分布・活動性、活断層の幅およびその外側の変形帯の範囲について検討・評価する。また、将来における活断層の分岐などの可能性や範囲については、過去から現在までの活断層などの位置やその時間的・空間的变化、地形や地質構造の発達過程、プレート運動との関連性などに基づいて評価する。

これらの結果に基づき、繰り返し活動し変位の規模が大きい活断層などについて、そのような活断層の場所、活断層の幅（断層破碎帯）およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生可能性が高い範囲、顕著な活動を継続している活褶曲や活撓曲の分布範囲に位置すると明確に判断される場所を含まないように概要調査地区を選定する。なお、文献調査における評価は、文献情報や既往データの再解析結果であるため、十分な判断ができない場合がある（例えば、活動履歴が不明な断層が存在する場合や、変動地形が認められるが断層の存在に関する情報が存在しない場合）。このような不確実性については、応募区域との位置関係を考慮した上で、概要調査またはそれ以降の調査において調査・評価していく。

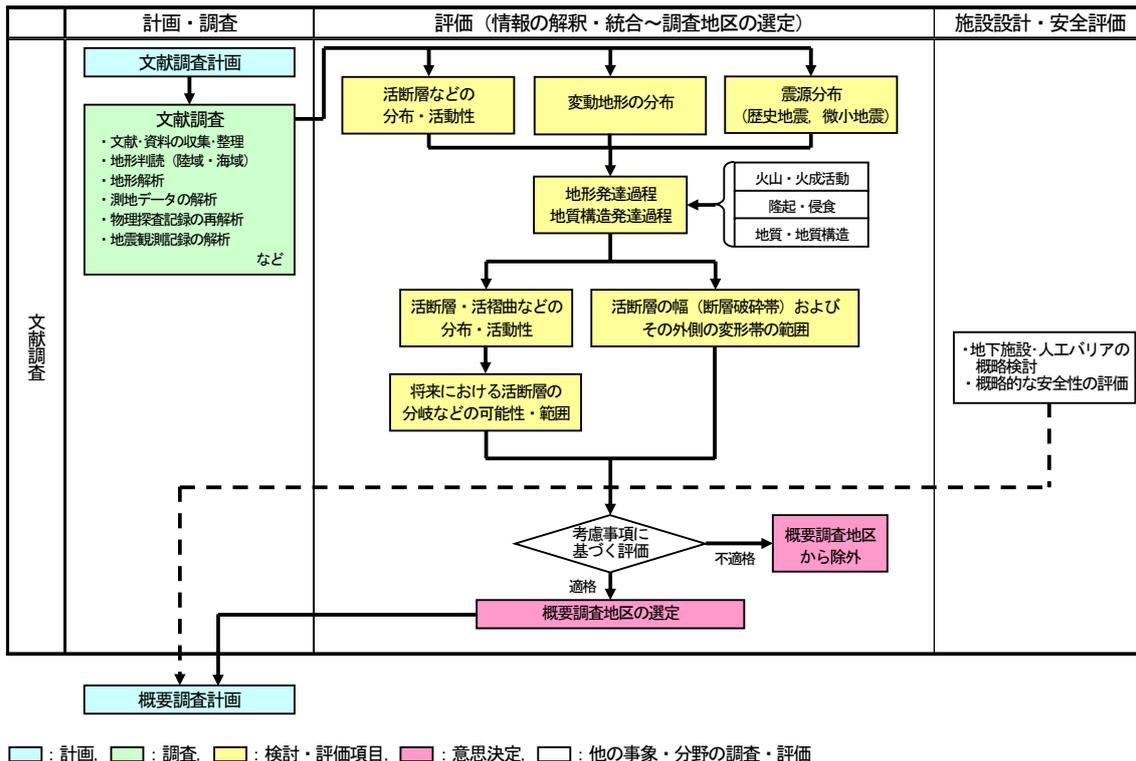


図 5.3.1-5 文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲において、地層処分システムの長期安全性に影響を与える活断層の有無を確認し、影響の及ぶ範囲を評価する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(ii) 調査

概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-6 に示すとともに、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-3 および表 5.3.1-4 に示す。

概要調査地区では、文献に記述された活断層などが分布する場所、活断層の幅およびその外側の変形帯に含まれる範囲、活断層の分岐などの発生の可能性が高い範囲は除外されている。概要調査では、その評価結果の妥当性を確認するとともに、文献調査では十分な判断ができなかった事項（例えば、文献では活断層が認められていないが変動地形が分布する場所、活動性が不明な断層）について現地調査に基づき総合的な評価を行う。これらの調査範囲は、活断層などの存在を示唆する変動地形が分布する領域のほか、段丘の分布や測地学的データなどから把握される隆起・沈降運動の境界を含む範囲を含めるように設定する。この調査範囲において物理探査を実施する場合は、活断層などの存在を示唆する変動地形を横断する位置に測線を設定する。また、第四系が広く分布する地域で物理探査により伏在断層の有無を把握する場合には、その第四系を横断および縦断する位置

に測線を設定する。また、浅層のボーリング調査を実施する場合には、活断層などの存在を示唆する変動地形に対応する断層などの有無、第四系や段丘面などにより変位の有無を把握することができるように、また、断層の性状を把握できるように掘削位置と掘削深度を設定する。

概要調査地区内に文献調査時に活断層である可能性が疑われた断層があれば、それらについて、地表踏査、物理探査、ボーリング調査（例えば、群列ボーリング）、トレンチ調査などを実施し、活動性を評価する。

また、概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査において確認された断層・破碎帯については、次に示す手順により地質構造の発達過程に基づき断層の活動性を検討・評価し、概要調査地区内の活断層などの存否について確認する。

- ① 分布・性状の確認（活断層と明確に判断される断層との比較を含む）
- ② 断層系のグルーピング
- ③ 各断層系の形成順序の検討
- ④ 活動性評価（最も新しい断層が、処分施設に著しい影響を与えるようなものか否かなど）

さらに、必要に応じて、概要調査地区周辺の補足的に調査する範囲に分布する活断層の調査を実施し、精密調査地区として選ばれる可能性のある地域への影響がないことを確認する。一方、活断層などが海域に分布するような場合には、音響測深やサイドスキャンソナーなどの海底地形測量、海上音波探査などの物理探査、ピストンコアなどの海底試料採取、年代測定などを実施する。これらの調査により、活断層などの位置、活動性などに関する情報を取得する。

地震動による影響については、既存観測点における地震観測データの収集を引き続き行うとともに、必要に応じて地震観測を行う。

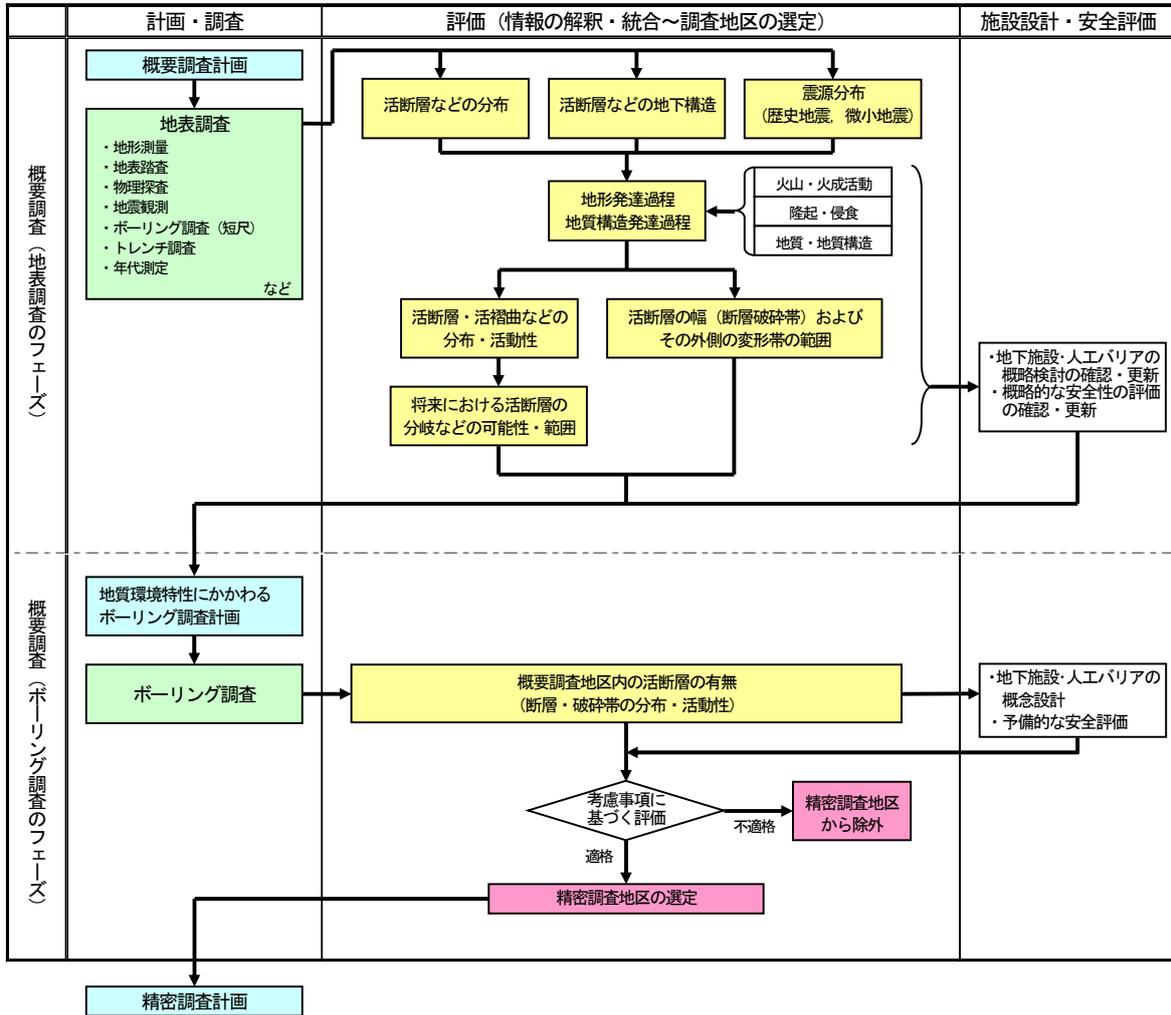
(iii) 評価

概要調査では、基本的には文献調査と評価事項が同じであること、概要調査地区だけではなく、補足的に調査を行う範囲における調査結果も含めて検討する必要があることから、(ii) に述べた調査により取得された情報に基づいて、文献調査と同様の流れで評価を行う。まず取得した情報に基づき、文献・資料に記載されていない活断層の有無を確認する。そのような活断層が認められた場合には、概要調査地区の周辺に分布する活断層も含めて、分布・活動性、幅およびその外側の変形帯の範囲、将来における活断層の分岐の可能性および範囲について評価する。これらの評価結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、母岩の選定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価にかかわる検討結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、例えば、活断層や活褶曲・活撓曲が存在していたり、将来的に断層の分岐などの可能性が高いと明確に判断される場所および範囲は除外した上で、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区として選定する。

なお、不確実性が大きい遠い将来における断層の新生や再活動などの事象については、それらを引き起こす要因となる広域応力場の変化などの地殻の状態が変化し得る時期を踏まえ、安全評価上の仮想的なシナリオとして取り扱い、万が一の場合にも極端に大きな影響は生じないことを確認す

る。



□ : 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

図 5.3.1-6 概要調査における地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、地震・断層活動にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-3 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（その1：陸域）

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考
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。	—	・調査の進行状況に応じて、適切な精度（概査→精査）で実施する必要がある。
	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。	—	・地下の情報を直接取得できる。
	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。	—	・断層を直接確認できる。
	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。	適用年代範囲 火山灰層序：10 ⁰ ～10 ⁶ 年 K-Ar 法：10 ⁴ ～10 ⁸ 年 ¹⁴ C年代測定：10 ² ～5×10 ⁴ 年	
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。	可探深度：起震方法により異なる インバクター：1km S波/パイプレータ：1.5km P波/パイプレータ+爆薬：5km 空間分解能：数10m（受振点間隔による）	・深部データを比較的精度よく求めることができる。 ・結晶質岩では、岩石密度および地震波速度の変化が小さく明瞭な反射面が得られない場合がある。 ・層状構造を有する堆積岩分布域では、有効な手法である。
	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。	可探深度： 浅部：100～200m 深部：数km～100km 精度：深度に対して±10%	・反射法地震探査に比べ、探査深度に対して長い測線長（探査深度の7～10倍）、大きな起震エネルギーを必要とする。 ・断層に伴う破碎帯の分布や規模を低速帯として検出することは可能であるが、断層の変位・傾斜を評価することは困難である。
	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。	（MT法） 可探深度：数10km 精度：深度の1/10程度 （CSAMT法） 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	・堆積岩分布域では、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT法の場合、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	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。	可探深度：数10km 測定精度：1mgal	・比較的容易に大域的な基盤構造を推定できる。 ・総定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的には決まらない。
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。	精度：数mm	・地殻変動調査としては一般的であり、データを連続的に取得できる。 ・20km程度の間隔で既設置点がある。
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。	—	・すべての活断層、地震断層および地質断層の探査に有効な手法ではない。 ・土壌ガスの濃度異常は、測定孔周辺の地質、土壌、閉鎖的な地下ガス循環系などを反映することから、ほかの調査データと併せて解釈する必要がある。

表 5.3.1-4 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（その2：海域）

調査手法		取得される情報	検討内容	適用限界・精度・条件など	備考
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。	適用水深：10,000m 以下 測定精度：(水中音速度補正+潮汐高補正) 浅海域 (200~500kHz)：10cm 深海域 (10~20kHz)：水深の1/100	
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。	最大20m程度 (海底の層相、採取方法によって異なる)	・地下データを直接得られる。 ・堆積物の種類に応じて適切な手法を選択する必要がある。
	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。	—	・地下の情報を直接取得できる。
	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。	適用年代範囲 火山灰層序：10 ⁰ ~10 ⁶ 年 ¹⁴ C年代測定：10 ² ~5×10 ⁴ 年 微化石分析：10 ⁵ ~10 ⁷ 年	
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。	可探深度 (音源によって異なる) ソフローブ：~30m程度 スーパーカー：30~200m程度 ウォーターガン：100~1,000m程度 エアガン：数100~数1,000m 精度 (分解能)：(音源によって異なる) ソフローブ：10~50cm程度 スーパーカー：0.5~3m程度 ウォーターガン：1~数10m程度 エアガン：数~数10m	・深部データを比較的精度よく求めることができる。 ・結晶質岩では、岩石密度および地震波速度の変化が小さく明瞭な反射面が得られない場合がある。 ・層状構造を有する堆積岩分布域では、有効な手法である。
	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。	(MT法) 可探深度：数10km 精度：深度の1/10程度 (CSAMT法) 可探深度：1km 精度：深度の1/10程度	・堆積岩分布域では、比抵抗断面の解釈が難しい場合がある。 ・CSAMT法の場合、測定点から離れた位置に送信源を設置する必要がある。
	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。	可探深度：数10km 測定精度：1mgal	・比較的容易に大局的な基盤構造を推定できる。 ・総定する密度構造モデルにより結果が異なり、一義的には決まらない。

5.3.1.3 隆起・侵食

(1) 調査・評価の基本的な考え方

5.1.1.1 に述べたように、隆起・侵食による地層処分システムへの影響としては、地下施設の地表への接近や、それに伴う地下水の流動状況や地球化学的条件の変化が挙げられる。規模の大きな隆起・侵食では、地層処分システムへの影響が大きくなることから、これらの事象を「地層の著しい変動」に該当すると考え、サイト選定において回避する。一方、規模の小さい隆起・侵食については、処分施設の設置位置や深度の設定といった工学的対策などの対処を含めて検討する。

隆起・沈降運動は、火山・火成活動、地震・断層活動などと密接な関係があり、プレート運動とも深くかかわっている。また、氷床の消長や海水準変動に伴うアイソスタティックな変動によっても生じる。従って、隆起・沈降運動の影響評価においては、隆起・沈降量の分布、侵食量の分布について調査し、気候・海水準変動、そのほかの自然現象との関連性を考慮する。

隆起・沈降量の調査・評価手法には、1,000年から10万年オーダーの隆起量を把握できる段丘を用いた地形学的手法（吉山・柳田，1995；小池・町田，2001など）、1,000年から100万年オーダーの隆起量を把握できる堆積深度が明らかな地層を用いた地質学的手法（成瀬，1990；増田ほか，2001；藤原ほか，2005aなど）などがあり、これらの適用可能な時間スケールの違いを考慮しつつ、適切に組み合わせて調査・評価を行う。この際、測地学的手法（多田ほか，1997；国見ほか，2001など）により把握できる期間は、最大でも過去100年程度であり（水準測量）、ほかの手法によって把握される隆起・沈降の傾向と必ずしも一致するとは限らないことに留意する。

一方、侵食量については、ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法（Yoshikawa，1974；藤原ほか，1999など）に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている。しかしこれらのマップに用いられているデータ期間は短い。地域ごとの侵食量評価の知見としては、内陸では河川の下刻量（深さ）と隆起量がほぼ釣り合うというもの（高木ほか，2000）や、地質学的手法に基づき侵食量を評価した事例（高橋ほか，2005）がある。また、海岸部における侵食については、氷河性の最大海面低下約140mと地殻変動による評価期間内の海面変化量の合計値（最大相対的海面変化量）を考慮する方法（産総研，2007aなど）がある。これらの既往の評価事例を参考に、サイトの地形発達状況、特に侵食により形成された地形の分布やその規模など、地質分布状況などについて調査し、侵食量を評価する。

隆起・沈降量の将来予測については、過去の変動量、法則性などを外挿することにより、将来10万年程度の予測を行う。さらに、プレート運動との関連性を考慮し、隆起・沈降運動をもたらした地形・地質構造発達過程を明らかにすることにより、プレート運動の継続性を想定できる期間において、地質構造発達過程を外挿することにより予測する。ただし、これらの予測期間については、地域ごとに異なる地質構造の発達過程を考慮して設定する。一方、侵食量（最大下刻量）や将来の地形変化については、予測された隆起・沈降に対して、過去の侵食履歴などを考慮して評価する。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では、応募区域において、過去における著しい隆起・侵食の有無、および、将来における著しい隆起・侵食の可能性について検討するための調査・評価を行う。その結果に基づいて、以下に示す「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件への適格性を評価する。

個別地区ごとに評価する事項：

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は含めないように、概要調査地区を選定する。

(ii) 調査

文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-7 に示す。

文献調査では、文献・資料の収集・整理、空中写真や高解像度の数値標高モデルを用いた地形判読などにより地形・地質情報を取得し、応募区域およびその周辺の隆起・沈降量とその分布、侵食量、測地学的な境界、気候・海水準変動などを把握する。

(iii) 評価

「概要調査地区選定上の考慮事項」への適格性を評価する場合には、海成・河成段丘を用いた地形学的手法が最も適している。続いて、火山・火成活動（第四紀火山の分布など）、地震・断層活動（活断層などの分布など）、地質・地質構造の情報を考慮し、地形・地質構造発達過程を検討する。それらの検討結果を踏まえ、必要に応じて内挿・外挿するなどして、応募区域およびその周辺の過去の隆起量（分布）、侵食量（最大下刻量）を評価する。将来の隆起・侵食については、地形・地質構造発達過程の外挿、地形変化予測モデルなどにより評価する。地形変化予測モデルによる地形変化の将来予測については、新旧地形面からの類推/モデル化 (Sasaki et al., 2009)、地形変化シミュレーション (JNC, 2005a) といった研究事例を参考にして、河川による下刻だけではなく、河川の側刻、海岸侵食や断層運動の地形変化への影響も含めて検討する。これらの結果に基づき、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を含めないように概要調査地区を選定する。

なお、文献調査における評価は、文献情報や空中写真などの地形判読によるものであるため、隆起量算出の基準となる地形面（例えば、海成段丘や河成段丘）の形成年代に対して複数の解釈がある場合や、異なる手法により推定された隆起量が異なる場合がある。このように文献調査により当該サイトの隆起量が明らかにできない場合には、概要調査またはそれ以降の調査において詳細に検討する。

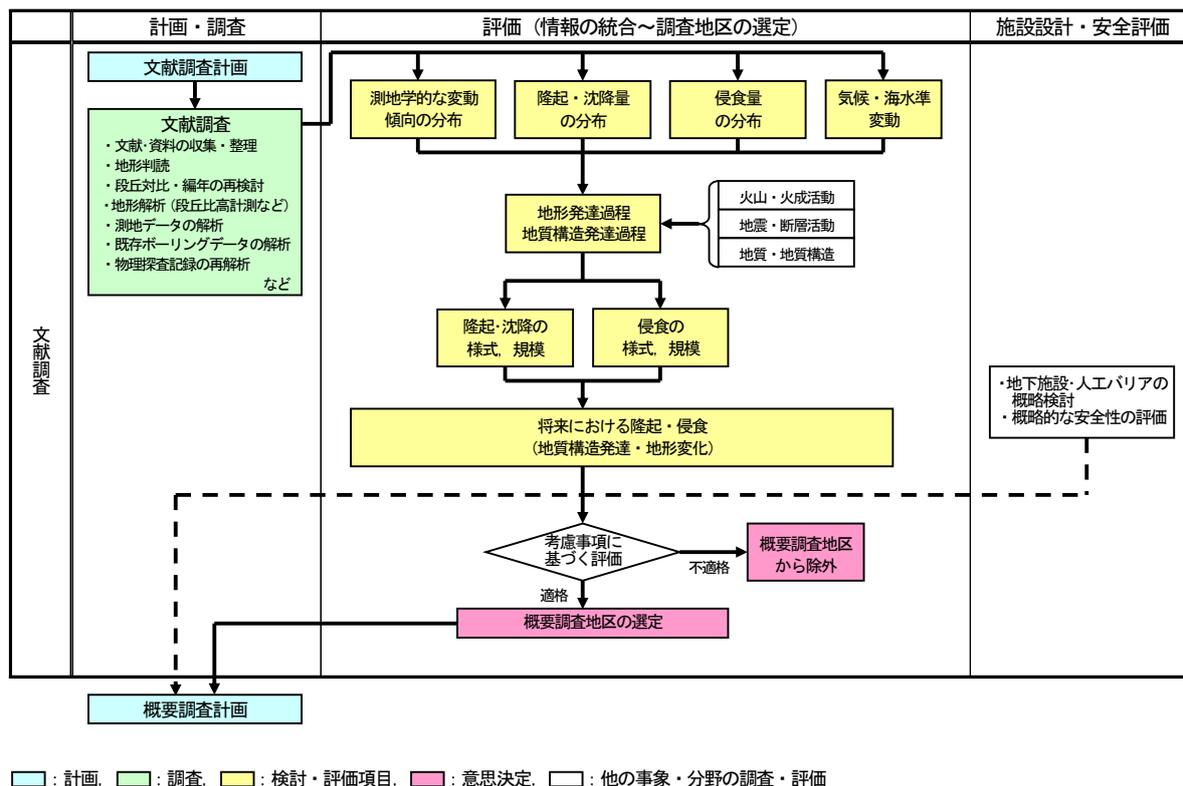


図 5.3.1-7 文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、現地調査に基づき、概要調査地区において著しい隆起や侵食が生じる可能性について評価する。これらの情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し、その結果と合わせて現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」に対する適格性を評価し、精密調査地区を選定する。

(ii) 調査

概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを図 5.3.1-8 に示す。また、主な調査手法とそれらの適用性について表 5.3.1-5、表 5.3.1-6 に示す。

概要調査では、文献調査により取得することができなかった情報（例えば、形成年代未詳の地形面の形成年代）を取得する。調査は概要調査地区および補足的に調査を行う範囲にまたがって実施し、これらの調査結果を総合的に解釈して評価を行う。このため、調査範囲の設定は、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲の両者を合わせたものとして考える。この設定に当たっては、段丘を用いた隆起量評価、最大下刻量の見積り、さらに、隆起・沈降運動の様式、地形・地質構造発達過程の把握といった観点から、概要調査地区の近傍を流下する河川の河口から上流域までを包含し、既知の活断層などの存在を示唆する変動地形の分布、測地学的な隆起・沈降境界などに留意することが重要である（木方ほか, 2011）。従って、概要調査地区および補足的に調査を行う範囲には、

変動地形と隆起・沈降境界が含まれるように設定する。また、最終氷期の侵食深さの指標となる最終氷期以降の堆積物を対象とする場合には、主要河川の河口部において、河川に対してできるだけ直交する方向に測線を設定し物理探査を実施する。さらに、堆積物の確認のためのボーリング調査を実施する場合には、その最深部に到達することができるようにボーリング調査地点を選定する。

概要調査における隆起・侵食にかかわる調査は、基本的に地表調査において実施する。ここでは、隆起量や侵食量の指標となる段丘面の構成層やその形成年代に関する情報を取得するため、必要に応じて浅層のボーリング調査を実施する。その際には、同一段丘面内であっても段丘を構成する地質に多様性が認められる場合があること、ある段丘の形成年代の誤認がその地域の段丘全体の対比・編年に誤った評価をもたらす、隆起量評価の見直しが生じる可能性があることから、一つの段丘において地表踏査と浅層ボーリング調査を組み合わせ、複数個所で調査を実施する。

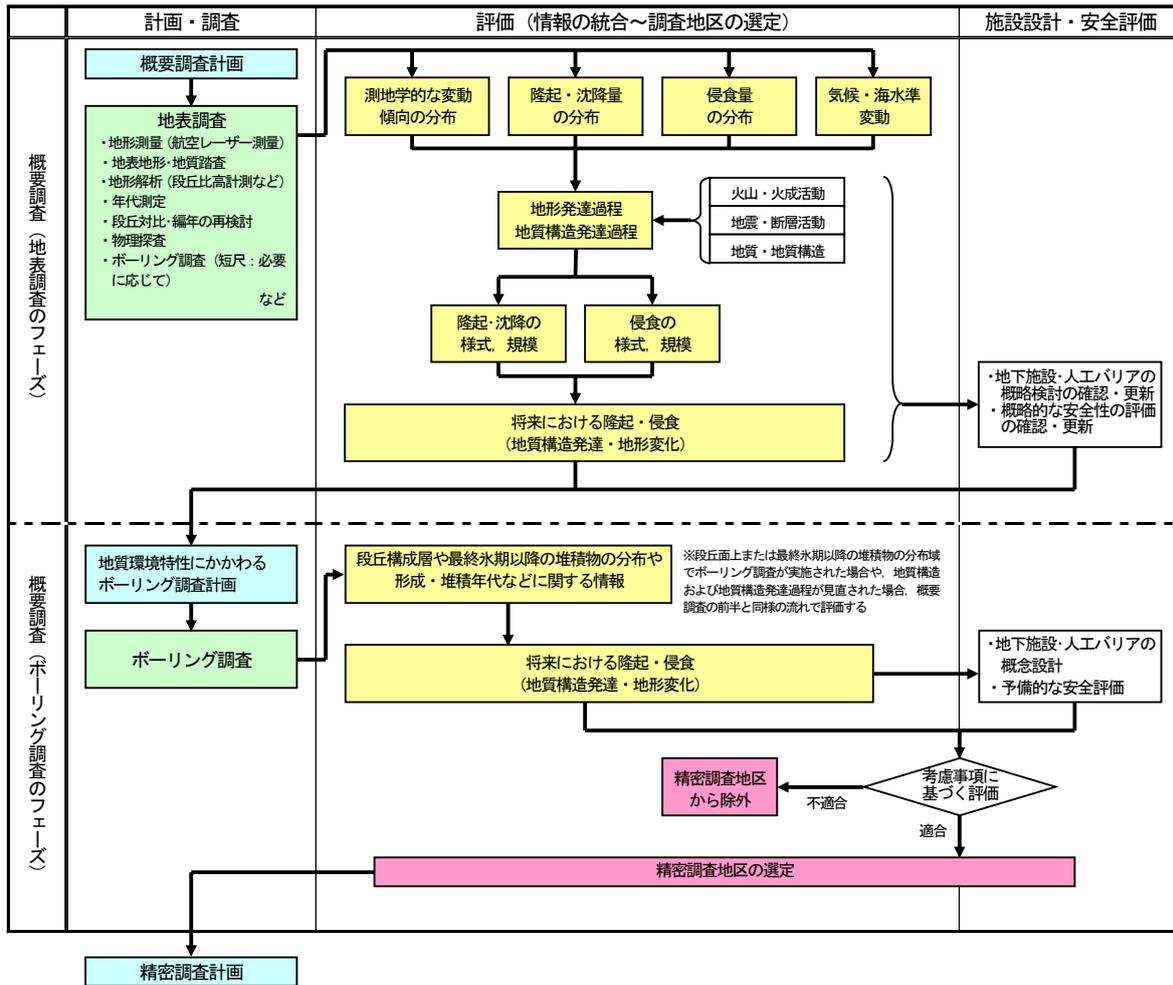
また、概要調査地区の地質環境特性にかかわるボーリング調査を、隆起量や侵食量の指標となる地形面上、または最終氷期以降の堆積物の分布域において実施する場合には、地表付近の堆積物の分布、形成年代、堆積環境などを、中・後期更新世の隆起量の指標となる情報、または最終氷期（海水準低下期）の侵食量の指標となる情報として取得する。

侵食については、最終氷期以降の堆積物の厚さを、最終氷期の侵食深さの指標とみなせることから、これを把握するための物理探査やボーリング調査などを必要に応じて実施する。

(iii) 評価

概要調査では、基本的には文献調査と評価事項が同じであること、概要調査地区だけではなく、補足的に調査を行う範囲における調査結果も含めて検討する必要があることから、(ii) に述べた調査により取得された情報に基づいて、文献調査と同様の流れで評価を行う。ただし、本段階では、海水準変動に伴う侵食基準面の低下、それに伴う地形変化、風化などを考慮し、将来にわたり地下施設が酸化的な雰囲気へ接近する可能性などについても検討する。以上の評価結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の検討（例えば、処分深度の設定や安全評価シナリオの構築）に資する情報として受け渡す。

概要調査に基づく評価結果、工学的対策および安全評価の結果を踏まえ、今後公表する「精密調査地区選定上の考慮事項」に照らして、事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て、精密調査地区を選定する。その際、例えば、地下深部への地下施設の設置を考慮しても、隆起・侵食により地下施設および廃棄体が露出したり、地下施設周辺の環境が酸化的な雰囲気へ変化することが明らかな場所および範囲は除外する。



□：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

図 5.3.1-8 概要調査における隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れ（検討例）

図 5.2.3-5 に示した概要調査の流れのうち、隆起・侵食にかかわる調査・評価の流れを詳細に示したものである。

表 5.3.1-5 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	適用限界・精度・条件など	備 考
地形的 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。	適用条件：海成段丘分布域 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年(更新世段丘) 10 ⁰ ～10 ³ 年(完新世段丘)	・海洋酸素同位体ステージ5eの海成段丘は、わが国の沿岸地域に広く分布する。 ・海成段丘の編年に対する信頼性と精度が重要である。 ・主な調査・研究事例として、小池・町田(2001)が挙げられる。
	河成段丘	河成段丘の分布・形成年代、河成段丘同士の比高		適用条件：河成段丘分布域 対象期間：10 ⁵ 年	・河成段丘は、わが国の内陸部に比較的多く分布する。 ・河成段丘の編年、特に海洋酸素同位体ステージ6段丘の認定に対して信頼性と精度が重要である。 ・主な調査・研究事例として、吉山・柳田(1995)、田力・池田(2005)、幡谷(2006a; 2006b)が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁶ 年	・Ohmori(1987)は、赤石山地における最大隆起速度を5～7mm/yと見積もっている。
	山地の地形的基準面	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。	対象期間：10 ⁶ 年	・評価の前提となる、準平原の認定、第三紀末の形成、第四紀以降の隆起という仮説にそれぞれ不確実性があり、それらに起因する見積りの不確実性がある。 ・主な調査・研究事例として、第四紀地殻変動グループ(1968)が挙げられる。
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。	対象期間：10 ³ ～10 ⁶ 年	・相対的な隆起・沈降量を示すが、段丘から見積られる隆起量などと組み合わせ、絶対的な隆起・沈降量を見積ることができる場合がある。 ・主な調査・研究事例として、活断層研究会(1991)、中田・今泉(2002)が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ³ ～10 ⁶ 年	・原理的には、地層の新旧を問わないが、評価結果は、指標とする地層の形成以後のすべての変動が積分されたものである点に留意する必要がある。 ・主な調査・研究事例として、藤原ほか(1996; 1997)、白井・阿部(2001)が挙げられる。
	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)		対象期間：10 ⁵ ～10 ⁶ 年	・盆地での沈降量/速度の見積りに有効である。 ・堆積層の年代決定精度が良くないため、分解能は必ずしもよくない。 ・主な調査・研究事例として、小池・町田(2001)が挙げられる。
	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。	対象期間：地震隆起時	・2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震に伴う隆起量の見積りに使われている。
	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。	対象期間：10 ⁶ ～10 ⁷ 年	・数100万年オーダーの長期間における隆起・沈降量の積分値が把握できる。 ・主な調査・研究事例として、田中ほか(1992)、原山(1994)、伊藤(2006)が挙げられる。
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。	対象期間：数ヶ月～10年	・鉛直変位の精度は水準測量より低いのが、リアルタイムで変動を把握することができる。 ・地震予知連絡会報で随時公表されている。
	水準測量	一等水準点などの変動量		検出精度：0.1mm 対象期間：10 ⁰ ～10 ² 年	・測地学的手法において検出精度が最も高いが、適用できる場所が限られている。 ・主な調査・研究事例として、壇原(1971)、国見ほか(2001)が挙げられる。
	潮位観測	潮位観測(変動)記録	対象期間：1日～10 ² 年	・海水量増減の影響もあることに留意する必要がある。 ・地震予知連絡会報で随時公表されている。	
	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。	対象期間：数ヶ月～10年	・地震発生時など、変動の前後の変化を面的に把握することができる。 ・主な調査・研究事例として、藤原(2006)、宇根ほか(2008)が挙げられる。

表 5.3.1-6 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	適用限界・精度・条件など	備考
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。	対象期間：数ヶ月～10 ⁴ 年 ・主な調査・研究事例として、早川・松倉（2003）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・海成段丘について検討された事例（藤原ほか、2005b）がある。
	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。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、磯ほか（1980）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、鈴木（1969）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、Ohmori（1987）が挙げられる。
	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。	適用条件：現在および過去の河床勾配が平衡状態に達していること 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年 ・高木ほか（2000）によれば、内陸部では、第四紀後期の隆起量と侵食量がほぼ釣り合うとされる。
	地形変化シミュレーション	地形変化量	・地形断面、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。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁵ 年 ・シミュレーション結果である将来の地形変化の検証方法に課題がある。 ・主な調査・研究事例として、Nogami et al.（2003）、JNC（2005a）、Sasaki et al.（2009）が挙げられる。
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。	対象期間：10 ² ～5×10 ¹ 年 ・主な調査・研究事例として、藤原ほか（1999）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・主な調査・研究事例として、阿子島（1983）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁴ 年 ・海退時における現在の海岸線付近の最大下刻量を見積ることができる。 ・主な調査・研究事例として、鳥越ほか（2002）が挙げられる。
	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。	対象期間：10 ⁶ ～10 ⁷ 年 ・数100万年オーダーの長期間における侵食量の積分値が把握できる。 ・主な調査・研究事例として、田中ほか（1992）、原山（1994）、伊藤（2006）が挙げられる。
	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。	適用条件：火山や熱水の影響を受けていないこと 対象期間：10 ⁶ 年 ・古地温勾配、古地表温度の推定方法に課題がある。 ・主な調査・研究事例として、高橋ほか（2005）が挙げられる。
	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。	適用条件：石英を含む岩種が分布し、侵食速度が一定であると推定される地域 対象期間：10 ⁴ ～10 ⁶ 年 ・オーストラリアの花崗岩分布域などにおける適用事例がある。 ・わが国における適用事例は少ない（例えば、若狭ほか、2004；Matsushi et al., 2006；Shiroya et al., 2010）。

5.3.2 地質環境特性にかかわる調査・評価

ここでは、自然現象の著しい影響を回避した上で、処分施設を設置しようとする地層および周辺の地質環境特性を把握する調査・評価について述べる。

なお、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうち法定要件に関する事項として設定された、「第四紀の未固結堆積物」、「鉱物資源」については、地質分布と関連性があるため、これらの項目にかかわる調査・評価についても、本節において述べる。また、5.1.1.1 に述べたとおり、非火山性の熱水については、地下水の流動特性および化学特性の調査・評価の一環として考慮する。

本節では、5.3.2.1 に調査・評価の基本的な考え方、文献調査および概要調査における調査・評価の流れ、5.3.2.2 に施工・操業安全にかかわる調査・評価について述べる。

5.3.2.1 地質環境特性

(1) 調査・評価の基本的な考え方

地質環境特性の調査・評価の目的は、5.2.1.1 に述べたとおり、自然現象の著しい影響を回避した領域において、地層処分システムの観点からより適切と判断される以下の条件を有する場所を選定するために、地質環境の諸特性を把握し、それらの条件が長期にわたって維持される可能性が高いことを示すことにある。

- ・ 坑道掘削や人工バリアの構築など、工学的対策の観点からより適切と判断される条件（力学的に安定であること、施設を通過する地下水流量が小さいことなど）
- ・ 人工バリアや天然バリアの放射性物質の移行抑制など、地層処分システムの閉鎖後長期の安全性にの観点からより適切と判断される条件（還元性、地下水流速が遅い、放射性物質の移行距離が長い、擾乱に対する緩衝能力あるいは回復力を有するなど）

そのためには、重要な地質環境特性を直接把握し、それらの空間的な分布と長期的な変化を推定するための情報を取得する必要がある。

地層処分にとって重要な地質環境特性は、5.1.2.1 に述べたように、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性などである。また、これらの空間分布と長期変遷の場を形成している重要な基盤情報として、地質・地質構造の特性が挙げられる。これらは、それぞれが独立しているのではなく相互に密接に関連していることから、各特性の相互関係とその整合性を踏まえた評価が重要である。そのため、NUMO は、各段階の調査において取得した情報を統合・解釈し、地質環境モデルを構築（更新）するとともに、それらを適切に活用して工学的対策や安全評価にかかわる検討を行い、その結果を地質環境特性の評価にフィードバックし、次段階の調査に反映していく。

地質環境の特性は、過去から現在に至る自然現象の相互作用により形成されてきていることから、地質環境特性の把握と形成過程の理解を踏まえ、過去からの変遷の理解に基づき将来の長期変遷を予測・評価することが重要である。

概要調査計画の立案においては、文献調査で構築した初期的な地質環境モデルの不確実性を低減させるために、文献調査で取得できていない情報や、工学的対策や安全評価の観点から重要度・優先順位の高い地質環境特性にかかわる情報を効率的に取得することが重要である。その際には、工学的対策や安全評価の観点（例えば、地下施設設置位置の設定（6.3.3.1 参照）、坑道仕様の設定（6.3.3.2

(1) (i), 地下施設レイアウトの設定 (6.3.3.3 参照), 安全評価のシナリオ構築 (7.2.1 参照) から必要とされる情報を取得することが求められる。

地質環境特性にかかわる包括的かつ体系的な調査・評価については, 結晶質岩を対象にした事例 (三枝ほか, 2007), 堆積岩を対象とした事例 (太田ほか, 2007), 沿岸域を対象とした基盤研究開発によって得られた知見 (Ota et al., 2010; Amano et al., 2010; Niizato et al., 2010) を通じて得られた成果 (例えば, 体系的な調査・評価技術および調査・評価に係るノウハウ) を踏まえて進める。また NUMO では, 調査・評価技術の体系化検討を踏まえ, 電中研・横須賀地区において, 電中研との共同研究により概要調査技術 (特に物理探査とボーリング調査) の実証 (5.4.2 参照) を行い, その適用性を確認していることから, ここで得られた成果も有効に活用する。

(2) 文献調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

文献調査では, 処分施設を設置しようとする領域における第四紀の未固結堆積物の有無, 当該地層における経済的価値の高い鉱物資源の有無を確認する。さらに, 地層処分にとって重要な地質環境特性について, 人工バリアにとって適切な設置環境であること, 地質環境が天然バリアとして機能すること, それらが長期的に維持されることの見通しを得る。これらの結果に基づき, 「概要調査地区選定上の考慮事項」の法定要件に関する事項 (第四紀の未固結堆積物, 鉱物資源) への適格性を評価する。さらに, 地下施設・人工バリアの概略検討および概略的な安全性の評価の結果を踏まえて, 概要調査地区としての特性を総合的に評価する。

(ii) 調査

文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを, 図 5.3.2-1 に示す。文献調査では, 文献・資料の収集・整理, 空中写真判読, 衛星画像解析, 地形判読のほか, 必要に応じて既存の物理探査データの再解析を実施し, 以下に示す情報を取得する。

- ・ 第四紀の未固結堆積物の分布
- ・ 採掘に値する経済的に価値が高い鉱物資源の分布 (採掘権の有無, 経済的に価値の高いと判断できる公的な記録)
- ・ 地質・地質構造: 岩体および断層などの不連続構造の形状・規模, 岩盤の割れ目・風化・変質の状況など
- ・ 地下水流動特性 (非火山性熱水を含む): 涵養域および流出域の推定, 降水量・河川流量・地下水位などの表層水理, 地形, 地下水の流量・流速・動水勾配, 岩盤の透水性など
- ・ 地下水化学特性 (非火山性熱水を含む): 水温, pH, 電気伝導度, 酸化還元性, 水質など
- ・ 岩盤特性: 岩盤の強度, 初期応力, 変形の状況, 熱物性, 地温勾配など
- ・ 物質移行特性: 物質移行経路となる構造の分布や性状, 鉱物学的特性, 分散, 希釈, 収着, マトリックス拡散の特性など

(iii) 評価

(ii) に述べた調査により取得された情報のうち, 「概要調査地区選定上の考慮事項」として, まず第四紀の未固結堆積物の分布および鉱物資源に関する情報について統合・整理する。その結果に

に基づき、処分施設を設置しようとする地層が第四紀の未固結堆積物である地域、その採掘が経済的に価値の高い鉱物資源が存在する地域を含まないように概要調査地区を選定する。

次に、取得した情報に基づき、各特性について情報の集約・解釈を行い、地質構造発達過程の編纂を行うとともに、地質環境特性とその長期変遷にかかわる概念化を図り、それを踏まえて広域的な地質環境モデルを構築する（地質環境モデルの定義や役割は5.2.1.2（2）参照）。

地質・地質構造について、文献調査では既往の地質図幅などの地表付近の地質・地質構造に関する情報が主体になると考えられる。地下水の流動特性や化学特性、岩盤の物理・力学・熱特性については、当該サイトおよびその周辺を対象とした文献情報や既存のデータベース（土木学会、2006b など）に基づき評価する。この際、非火山性の熱水の存在とその範囲などについても検討する。当該サイトおよびその周辺を対象としたデータが得られない場合、類似する地質環境において取得されたデータに基づいて推定することとなる。地下水化学特性については、オーバーパックの腐食速度に影響する酸化還元電位、緩衝材の性能に影響する海水起源の地下水分布やガラスの溶解に影響する pH などのパラメータなどを評価項目として、取得された情報に基づきどのような水質が分布するか評価する。ただし、当該サイトにおいて十分な情報が得られない場合には、類似した地質環境における事例などをもとに推定する。岩盤の物理・力学特性については、地下空洞の安定性に関連して、処分場の設計・施工性、地下空洞の形状および建設時の施工性、支保形状など処分場の設計や地下空洞での作業性に係るパラメータ取得が重要である。また、岩盤の熱特性は、坑道内での作業性、緩衝材の変質に影響することから、当該地区の地温勾配は地温勾配図（矢野ほか、1999；田中ほか、2004）などを参考にして、取得した文献情報から地下深部の温度分布状況の評価する。物質移行特性については、主要な物質移行経路となる地質構造、大規模な断層などの地質構造を抽出・評価することになるため、水理地質構造と関連付けて評価を行う。また、上述のデータに加えて、例えば、断層周辺の岩盤における力学強度、透水性やその分布幅などについては、既往の資源探査やトンネルなどの地下構造物の調査・建設時に取得された情報も加えて評価する。これらの評価において、地質環境モデルに含まれる不確実性の種類とその幅（大きさ）を特定する。さらに、5.3.1 に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果を踏まえ、地質構造発達過程を解釈し、古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価も適用し、現在の地質環境の状態がどのように変化するか検討・評価する。特に、「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や、汎世界的な気候・海水準変動に伴う地下水流動状況の変化や地下水化学特性の変化、断層活動に伴う周辺岩盤の力学的変化や透水性の変化などについて検討する。

これらの評価の結果を地下施設・人工バリアの概略検討や概略的な安全性の評価に対して情報を提供し、さらに、概略的な処分施設の構築結果、概略的な安全性の評価結果をもとに、概要調査地区としての適格性を総合的に評価する。文献調査により、複数の概要調査候補地がある場合は、ここに挙げた地質環境特性について相対評価を行い、処分場としてより適切と判断される場所を概要調査地区として選定することも検討する。

地質環境モデルは、モデル構築時まで取得された情報をもとに構築された地質環境の概念モデルをベースとして、地質環境の各特性の分布や性状を定量的に可視化したものであり、地質環境の各特性の分布を支配する幾何形状がベースとなる。そこで、水理地質構造モデルや岩盤特性モデルの構築に先立ち、幾何形状要素に地質環境特性を包含するための地質構造モデルを構築する（モデル構築の流れは、図 5.2.1-1 参照）。

具体的には、取得された地質学的な情報（岩種・岩相、層序、割れ目分布、破碎性状、風化程度、

変質程度など)に基づいて、水理地質構造、岩盤特性(力学特性、熱特性など)、地下水の地化学モデルを構築する上で重要と考えられる地質構造要素(岩体または地層、断層など)の分類・特徴付けを行い、それらの形成プロセスなども考慮して地質構造の概念モデルを構築する。次に、地質構造の概念モデルをベースとして、各地質構造要素の三次元分布を定量的に表現(可視化)した地質構造モデルを構築する。なお、各地質構造要素の分布は、取得した情報をベースとして、内挿または外挿により推定する。

地質環境モデルのうち、水理地質構造モデルの構築に当たっては、まず、取得した水理学的情報(透水係数など)と上述した地質構造要素との関係を勘案して水理地質区分を行い、水理地質構造の概念モデルを構築する。次に、各水理地質区分の地下水流動の場の概念(多孔質媒体、亀裂性媒体、多孔質媒体と亀裂性媒体の両方など)を考慮した上で、水理地質構造モデルの空間スケールや解像度に応じた補間方法を採用し、代表的な水理特性を設定する。それを踏まえて、各水理地質区分の水理特性の三次元分布を表現した水理地質構造モデルを構築する。また、地形状況、ポテンシャル分布、水文状況などの情報に基づいて、地下水の涵養域と流出域を推定して、当該サイトの地下水流動にかかわる境界条件を整理する。

地下水の地化学モデルの構築に当たっては、取得した地下水の水質に関する情報に基づく水質区分を行う。その際には、水理地質構造モデルを利用した地下水流動解析の結果や地下水流動の概念モデルと比較し、それらとの整合性について検討することが重要である。また、文献情報により可能である場合には、地下水の起源、岩石-水反応などを考慮する。このような検討において、地質・地質構造、地下水流動特性および地下水化学特性にかかわる概念モデルに不整合が認められる場合には、地質・地質構造の解釈に加えて、地下水流動解析における境界条件、水理地質区分やその水理特性の設定など再検討してモデルを再構築する。

岩盤特性モデルの構築に当たっては、まず、取得した物性値などの情報と地質構造要素の関係を踏まえて岩盤区分を行い、それらの特徴を記述した岩盤特性の概念モデルを構築する。次に、これに基づき、各岩盤区分の境界や物性分布を表現した岩盤特性モデルを構築する。各岩盤区分の特性については、空間スケールや解像度に応じた補間方法(例えば、クリギング法など)を採用する。

また、地質環境モデルに含まれる不確実性の低減および工学的対策や安全評価からの要求も考慮し、閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定し、地質環境モデルを通じて概要調査において明らかにすべき事項、概要調査における構造・特性・現象に関するデータ取得の優先度などを明確にし、それらを概要調査計画に反映する。

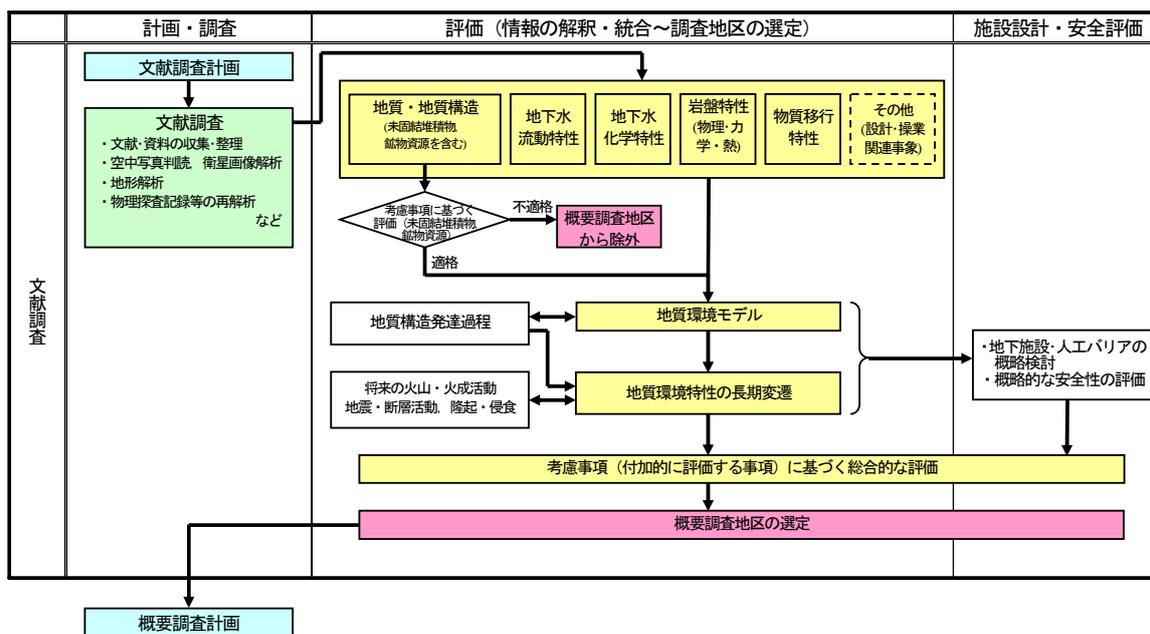


図 5.3.2-1 文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。図 5.2.1-4 に示した調査・評価の流れのうち、文献調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを抽出したものである。

(3) 概要調査における調査・評価の流れ

(i) 目標

概要調査では、文献調査による評価の結果を確認するとともに、現地調査データに基づき当該サイトの地質環境特性を把握するための調査・評価を行う。その結果、地質環境が天然バリアとして機能するとともに人工バリアにとって適切な設置環境であり、それらが長期的に維持されることにより閉鎖後長期の安全確保の見通しを得ること、さらに、事業期間中の施工性・安全性の確保の見通しを得ることを目標とする。

具体的には、調査・評価の結果を、地下施設・人工バリアの概念設計や、予備的な安全評価に対して情報を提供し、それらの結果と合わせて、法定要件に基づく観点から精密調査地区としての適格性を評価する。このうち、地下施設の建設・操業・閉鎖の観点からは、地質・地質構造（岩種、断層、褶曲など）、地下水流動特性（透水性、地下水の水流、水みちの分布など）、地下水化学特性（水温、pH、水質など）、岩盤特性（岩盤の強度、地温勾配など）を対象に評価を行う。また、地層処分システムへの影響の観点からは、地質・地質構造（岩種、断層など）、地下水流動特性（透水性、水みちなど）、地下水化学特性（水温、酸化還元状態、pH、水質など）を対象に評価を行う。これらの結果に基づき、「精密調査地区選定上の考慮事項」として現在検討している要件、例えば、地山の強度が著しく小さく、処分坑道を安全かつ合理的（現実的な対策の範囲内）に掘削することが困難であると判断される場所や、大規模な破碎帯などの高透水性の構造が存在し、地下施設のもつバリア性能に著しい影響を及ぼす恐れがある場所を除外するための要件への適格性を評価する。さらに、地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価の結果を踏まえて、精密調査地区としての特性を評価する。

(ii) 調査

概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを、図 5.3.2-2 に示す。まず、概要調査地区内において、地表踏査や物理探査（空中、地表、海上）などの地表調査を実施する。また、地質構造モデルの信頼性の向上や地質構造発達過程の検討のために、必要に応じて補足的に調査を行う範囲を設定し、地表調査を実施する場合もある。

地表踏査では、地質環境の理解の基本となる地質・地質構造、ならびに地下水の移行経路となる割れ目（節理や小断層）、破碎帯、不整合面、岩石中の間隙構造や変形組織などのデータを取得する。また、地下水流動特性および地球化学特性の観点から、概要調査地区の地下水の涵養域と流出域を設定し、水収支に関する水文調査、表層水や地下水の水質や年代分析を実施する。さらに、露頭の岩石試料を収集し、岩盤の物理・力学・熱特性に関するデータを取得する。

概要調査地区において実施する物理探査測線の設定では、応募区域およびその周辺の地下深部の地質構造を把握できるような配置とし、測線間隔は、調査対象地域における地質分布、地形、人工構造物、もし海域を含む場合は沿岸域の地理的条件、海底地形、そして応募区域との位置関係を考慮して設定する（図 5.3.2-3）。物理探査の探査深度は概要調査地区の地質、地理的条件、処分場の設置深度などに密接に関係するため、一概には設定できないが、各特性の分布やプロセスの理解に必要な大規模な地質構造を把握するために、概ね処分場を包含する地下水流動解析の範囲を調査対象とする。概要調査地区が沿岸域に位置し、調査対象領域に海域が含まれる場合には、海底地形測量、物理探査、海底試料採取などを実施し、地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性などに関する情報を取得する。そのうち、海底地形測量では、サイドスキャンソナーなどの音響システムにより海底地形を面的に把握するとともに、サブボトムプロファイラーも併用して海底堆積物の極浅部構造も併せて取得する。また、沿岸域に特化した物理探査としては、三次元音波探査（佐伯ほか、2006；朴ほか、2008 など）や海底電磁探査（吉村ほか、2006a など）などがあり、調査の必要性に応じて適用を検討する。なお、海底堆積物には、過去の気候・海水準変動に関する情報が含まれることがあるため、試料採取では堆積状態をできるだけ乱さない状態で取得できるピストンコアリングなどの手法を適用する。なお、この段階では、各特性の分布やプロセスの理解に必要な大規模な地質構造を把握し、そのうち重要なものはボーリング調査を通じて取得する。

ボーリング調査は、段階的な調査・評価のアプローチに従い、基本的には地表調査の結果を踏まえて実施する。しかしながら、当該サイトの条件によっては、地表調査の段階に物理探査と組み合わせ実施するなど、柔軟に対応する場合もある。ボーリング調査地点の選定では、応募区域およびその周辺において、地質・地質構造、岩盤の水理特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）のうち不確実性が大きく、かつ工学的対策や安全評価の観点から重要度の高い地質構造や地質環境特性を把握できるように、地表踏査や物理探査の結果も考慮して位置を選定する。ただし、物理探査結果の解釈において、地質・地質構造との対比を行うことの優先度が高い場合には、物理探査測線上あるいはその近傍にボーリング調査地点を設定する。また、水理学的に重要となる構造や地下水流動に影響を及ぼす構造（断層など）の水理特性の把握なども考慮する。ボーリング孔の掘削深度は、処分場の設計や安全評価の観点で重要な地下深部のデータを取得するとともに、処分施設の想定設置深度、地下水流動状況、地下水質の分布を考慮して設定する。ボーリング調査では、コア観察、孔壁観察、物理検層、水理試験、コア試料の室内試験、地下水試料の分析などを行う。さらに、ボーリング孔を利用した単孔式物理探査（VSP、トモグラフィなど）も必要に応じて実施する。これらの調査により、以下に示す情報を取得する。

- ・ 地質・地質構造：未固結堆積物の分布，岩体および断層などの不連続構造の形状・規模，岩盤の割れ目・風化・変質の状況など
- ・ 地下水流動特性（非火山性熱水を含む）：涵養域および流出域の特定，降水量，河川流量・地下水位，蒸発散量などの表層水理，地形，地下水の流量・流速・動水勾配，岩盤の透水性，間隙水圧分布，高透水性構造の分布，塩淡境界の形状など
- ・ 地下水化学特性（非火山性熱水を含む）：水温，pH，電気伝導度，酸化還元電位，水質（溶存成分，同位体，溶存ガスなど），地下水中のコロイド・有機物・微生物など
- ・ 岩盤特性：岩盤の強度，初期地圧，変形の状況，時間依存挙動，地温勾配，岩石の熱特性など
- ・ 物質移行特性：物質移行経路となる初生構造要因（分断，変形，層理面，不整合面など）の構造の分布や性状，鉱物学的特性，分散・希釈・収着・マトリックス拡散特性など

調査終了後のボーリング孔については，初期ベースラインを理解するための水位，水圧，水質などのモニタリング孔として利用することも検討する。

(iii) 評価

(ii) に述べた調査により取得された情報に基づき，文献調査結果の妥当性を確認するとともに，概要調査地区内の地質環境特性とその長期変遷をより詳細に評価し，文献調査により構築された地質環境モデルを更新する。また，候補母岩を含むスケール（広域的な地質環境モデルより一回り小さい空間スケール）の地質環境モデルを作成する。なお，工学的対策，安全評価と連携して検討する候補母岩の選定については，8.3.5 に述べる。

概要調査を二つのフェーズに分けて実施する場合，前半の地表調査のフェーズ終了時には，地表調査により取得された情報に基づき，広域的な地質環境モデルを更新するとともに，地質構造発達過程などを見直し，地下施設の概略検討や概略的な安全性の確認を行う。これらの結果や，更新された地質環境モデルの不確実性，工学的対策・安全評価側からの要求を踏まえ，ボーリング調査の計画を立案する。

後半のボーリング調査のフェーズ終了時には，ボーリング調査によって取得された情報を加えて，地質環境特性とその長期変遷について解釈を行い，地質環境モデルを更新するとともに，地質構造発達過程を見直すことにより，候補母岩を包含するスケールの地質環境モデルを構築する。ボーリング調査のフェーズ終了時には，地質・地質構造に関する情報だけでなく，岩盤の水理特性，地下水流動特性，地下水化学特性，岩盤特性（力学特性，熱特性など），物質移行特性などに関する情報も網羅的に取得されるため，地質環境の概念モデルや地質環境モデルの更新においては，それぞれの関連性を考慮し，整合的な解釈を図る。

その際，地下水流動解析などの解析結果と実測データの比較を行うなどして，各モデルの整合性を確認し，整合性がとれない場合にはその要因を特定し，次の段階の調査計画に反映する。

岩盤中における物質の移行経路となり得る地質構造（粒子間隙，層理面や片理面沿いに形成される割れ目，節理，断層など）は，遮水性を示すこともあるため，その性状に注意して評価する（原環センター，2006；中俣ほか，2007）。また，岩盤中での物質移行を遅延する現象であるマトリックス拡散や収着については，国内外の地下研究施設における原位置試験（例えば，Ota et al., 1999；Ota et al., 2003；Alexander et al., 2009 など）や室内実験などを通じて現象・挙動の理解に関する研究が進

められている（例えば、吉田ほか，2002；栃木ほか，2007）。概要調査の段階では，その地質環境下においてマトリクス拡散や収着が生じるかどうか，既往の研究事例などを踏まえてその影響の程度を検討していく。これらの検討に必要な情報を地下水試料やボーリングコア試料を用いた分析などにより取得し，必要に応じて物質移行特性にかかわるボーリング孔を中心とした概念モデルの構築を行う。

地下水中のコロイド，有機物，微生物が物質移行に対して及ぼす影響についても原位置試験や室内試験を通じて研究開発が進められている（例えば，村上ほか，2003；黒澤ほか，2004；Yoshida and Suzuki, 2006；上岡，2007；SKB，2009など）。このため，概要調査の段階では，地下水に含まれるコロイド，有機物，微生物の種類やその量について調査した上で，その条件下においてどのような現象や影響があるか，その影響の程度を検討する。

さらに，5.3.1 に述べた自然現象にかかわる調査・評価の結果，地質構造発達過程や古水理地質学的アプローチによる地質環境の変化の予測・評価，例えば，堆積岩中に存在し，その生成と変遷に関連した地下水の性状などを踏まえ，現在の地質環境の状態がどのように変化するかというような検討を行い評価する。特に，「地層の著しい変動」に該当しない程度の隆起・侵食による地形変化や，汎世界的な気候・海水準変動，断層活動による地域的な隆起・沈降による変動によって生じる塩淡水境界の移動や動水勾配の変化に対しても，それがどのように地下水流動特性や地下深部の地球化学的環境に影響するか，さらに，これらが周辺岩盤の力学的変化や透水性にどのように影響するかなどについて検討する。

これらの地質環境特性に関する情報を地下施設・人工バリアの概念設計や予備的な安全評価に提供し，それらの結果と合わせて，現在検討中の「精密調査地区選定上の考慮事項」の法定要件，例えば，大規模な破砕帯などの高透水性の構造の存在や，その著しい影響などに関する要件に対する適格性を評価する。さらに，次の二つの観点から，総合的な評価を行う。

- ① 地下施設の建設・操業・閉鎖の観点
- ② 地層処分システムへの影響の観点

①については，建設・操業時の安全性から見た地下水の湧水，空洞掘削に伴い変化する可能性のある地下水流動特性（透水性，地下水の水流，水みちの分布など）や地下水化学特性（水温，pH，水質など），処分場のレイアウト，空洞掘削時の安定性，空洞内での作業性および空洞の形状や支保形態に係る岩盤特性（岩盤の強度，亀裂分布，断層・破砕帯などの脆弱部，地温勾配など）に基づき総合的に評価し判断する。

②については，地質・地質構造（岩種，断層など），地下水流動特性（透水性，水みちなど）および地下水化学特性（水温，酸化還元状態，pH，水質など）に基づき総合的に評価し判断する。

以上の全ての評価結果に基づき，事業期間中の安全確保および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て，精密調査地区を選定する。

また，地質環境モデルに含まれる不確実性の低減や信頼性の向上，および工学的対策や安全評価からの要求も考慮し，閉鎖後長期の安全性を確保する上で特に重要な構造・特性・現象を特定し，精密調査において明らかにすべき事項やそれらの優先度などを明確にし，精密調査計画に反映させる。

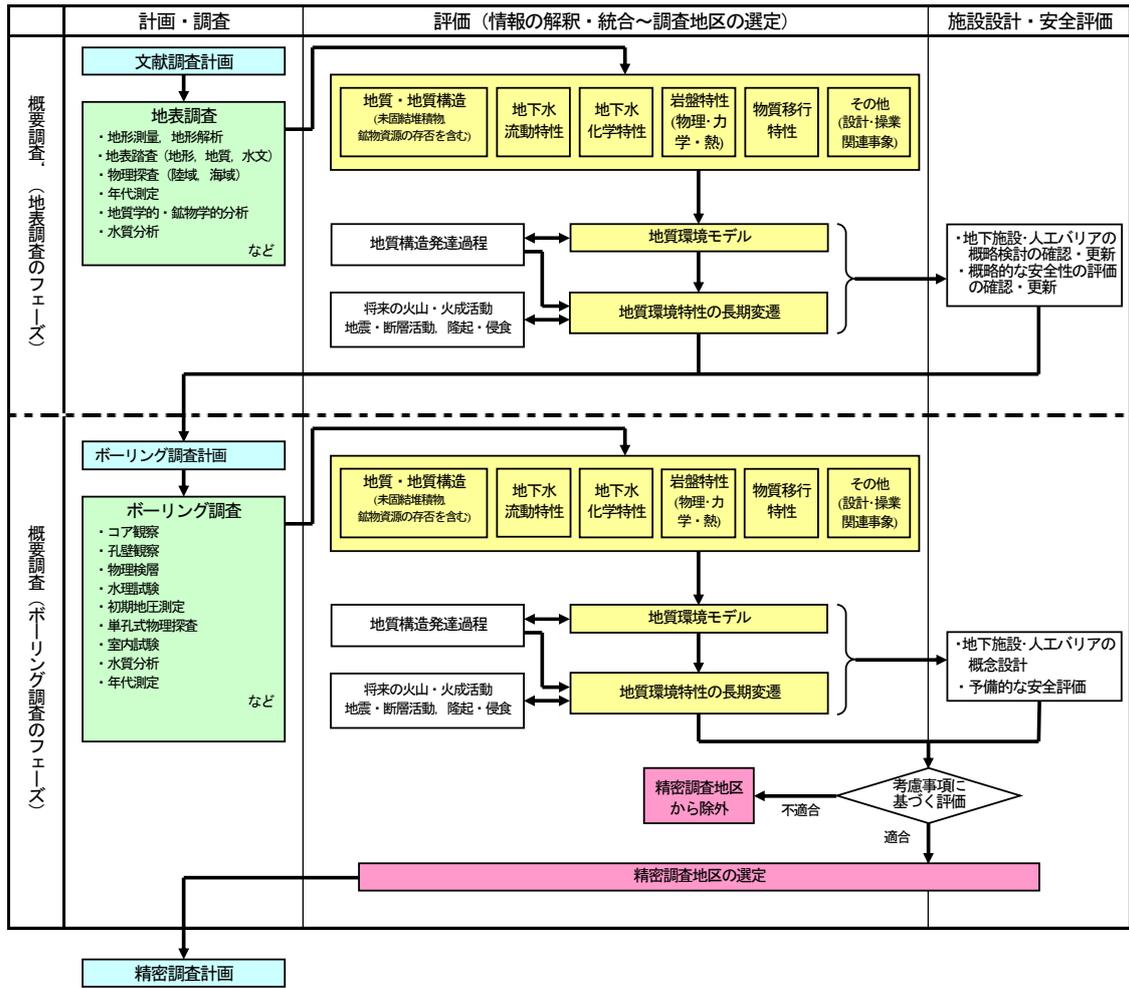


図 5.3. 2-2 概要調査における地質環境特性にかかわる調査・評価の流れ (検討例)

わが国の多様な地質環境において、共通する情報の取得から各調査地区選定までの流れを例示したものである。図 5.2. 3-5 に示した概要調査の流れのうち、地質環境特性にかかわる調査・評価の流れを抽出したものである。

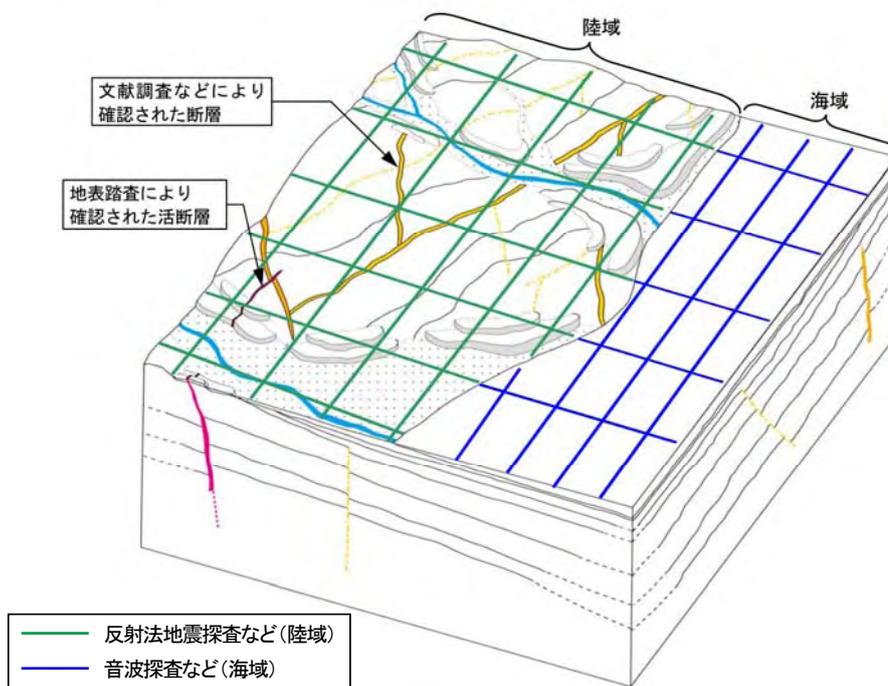


図 5.3.2-3 物理探査測線設定の検討例
(原環センター, 2002 を編集)

沿岸域の堆積岩を対象として、反射法地震探査および音波探査により陸域から海域に連続した測線設定を検討した例である。

5.3.2.2 施工・操業安全にかかわる調査・評価

施工・操業安全にかかわる事項としては、自然災害（地すべり、洪水など）、異常間隙水圧、膨脹性地山、山はね、有害ガスなどが考えられる。ここでは、これらの事象のうち坑道掘削への影響の観点から重要と考えられる異常間隙水圧、膨脹性地山、山はねについて、文献調査および概要調査における調査・評価の考え方を述べる。

(1) 異常間隙水圧

異常間隙水圧は、膨脹性地山、大量湧水の原因の一つになると考えられている。施工時に異常間隙水圧に遭遇した場合、坑道の崩壊、坑道内への著しい押し出しなどが発生し、坑道の掘削が難航するなど施工に影響が生じることがある。また、異常間隙水圧の解放に伴い発生する事象として、泥火山が知られている。泥火山が発生した場合、急激な流体の移動が生じることにより、天然バリア機能に対して影響を及ぼす可能性がある。

わが国における異常間隙水圧は、秋田・新潟などの油田地帯で実測されており（千木良・中田，1994）、第三紀～第四紀堆積岩分布地域、特に油田・ガス田地域の地下深部（1,000～2,000m程度）などの限られた条件を有する地域に分布していると考えられている（土木学会，2001）。異常間隙水圧の解放により発生したものと考えられる泥火山については、背斜軸や断層などに沿って分布していることが知られている。わが国においては、北海道新冠町（千木良・田中，1997）、新潟県松代町（新谷・田中，2005）などで認められている。

これらの知見を踏まえ、異常間隙水の存在が認められる地域と同様の特徴を有する地域であるか検討する。その際には、既往事例において異常間隙水の存在が認められる地域の地質・地質構造、水圧などと、当該サイトにおいて取得された情報を比較し、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、地質構造、間隙水圧などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全性への影響を評価し、その影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

(2) 膨脹性地山

施工時に膨脹性地山に遭遇した場合、坑道の内空への著しい押し出しが発生し、坑道の掘削が難航するなど施工時に影響が生じることがある。膨脹性地山の原因について、現状では、せん断破壊説、吸水膨脹説、クリープ説、大きな地圧説、高压のガス・間隙水圧説などがあるものの、それぞれの要因が複雑に関連し、定説がない状況である。既設トンネルの工事などにおいて、膨脹性地山に遭遇した事例が多く報告されており、遭遇した場所は志田原ほか（2004）により整理されている。このような膨脹性地山は、新第三紀の泥岩・凝灰岩、変成帯や構造帯の蛇紋岩、熱水変質帯など特定の場所で発生していることが知られている（土木学会，1983）。また、膨脹性地山に遭遇した場所の地層には、膨脹性にかかわる粘土鉱物（スメクタイトなど）の含有量が高く、一般に強度が低いことなど（仲野，1975，1995；朝倉・小島，1995）が知られている。

これらの知見を踏まえ、膨脹性地山が見られる地質と同様の特徴を有した地質が、当該サイトに分布するか検討する。その際には、既往事例において膨脹性地山が見られる地点の地質・地質構造、物理・力学特性などと、当該サイトにおいて取得された情報を比較し、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、地質構造、岩盤特性などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設建設時の安全確保、処分施設の成立性、閉鎖後長期の安全性の観点からも検

討を行い、それらに対して影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

(3) 山はね

山はねは、坑道の掘削時に坑壁が崩壊し岩片の急激な飛散が発生する事象であり、坑道の掘削に影響を及ぼす事象である。山はねの原因については、大きな地圧により脆性な岩盤中に応力集中を生じ、そこから亀裂が発生・連通し、連続的な破壊により周辺岩盤の弾性ひずみエネルギーが解放されることなどに起因すると考えられている（川本ほか、2001）。既設トンネルの工事などにおいて発生した山はねは、地下深部の割れ目の少ない均質・堅硬な岩盤でかつ空洞周辺の応力が岩盤の破壊条件に近い条件となる場合に発生することが多いことが知られている。

このような知見を踏まえ、山はねが生じるような力学特性を有する岩体が当該サイトに分布するか検討する。その際には、岩盤中の割れ目頻度、力学特性などに関する情報に基づいて、検討・評価する。これらの検討・評価を行うため、地質分布、岩盤特性などの情報を取得する。また、それらの情報に基づき、処分施設建設時の安全確保、処分施設の成立性の観点からも検討を行い、それらに対して影響が大きいと判断される場合には、その影響を受けないように回避するなどの対策を講じる。

5.4 調査・評価技術の整備

本節では5.3に示した調査・評価の体系を支える技術について、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）以降に進展したものを中心に整備状況を取りまとめる。ここでは、現在開発中であるが、今後の処分事業にとって有望と考えられるものについても併せて紹介する。加えて、概要調査の技術を、NUMOが事業の効率化・合理化および品質保証の観点から確認した結果について述べる。最後に、NUMOが精密調査地区を的確に選定する上での、技術の信頼性向上に向けた課題と取り組み方針について述べる。

5.4.1 調査・評価技術の進展

調査・評価の技術体系を支える技術について、第2次取りまとめ時点での状況と課題、およびそれ以降の技術開発による個々の技術の進展と現状を、自然現象の影響、地質環境特性という二つの分野における調査・評価、それに加えて多様な地質環境に対する調査・評価という観点で取りまとめた。

5.4.1.1 自然現象の影響にかかわる調査・評価技術

(1) 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までに、火山の分布や活動年代を明らかにする年代測定法などの調査手法の整備に伴い、日本列島における第四紀火山分布図が編集された。その結果、第四紀火山の活動が偏在していること、過去数10万年の火山活動の変化が地域レベルの火山活動域の拡大・縮小として捉えられることなどが示された。また、火山の温度や地下水などへの影響を把握する手法が、地熱開発分野などにおける研究でも整備され、日本列島の地温勾配の分布が取りまとめられたことにより、火山からの影響範囲、マグマ溜りからの熱的な影響範囲とその期間などが検討された。第2次取りまとめでは、背弧側や西南日本の単成火山群などにおける新たな火山活動の発生可能性、および非火山地域における高温異常の評価などの課題が挙げられた。

第2次取りまとめ以降の進展としては、火山灰アトラスの改訂（町田・新井, 2003）によりテフラの対比の精度が向上したことが挙げられる。また、地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い、火山の新規発生と移動の評価手法、深部熱源評価手法などの開発が進められた。また、地球化学的手法を活用した深部熱水の評価法が示され、わが国にマグマ起源以外の熱水が存在することが明らかにされた。さらに、海外で用いられている確率論的な火山活動の評価手法を、わが国の背弧側や独立単成火山群の分布域の評価に適用する検討が行われた。

火山・火成活動にかかわる調査・評価技術については、検討の基礎となる情報整備および火山活動履歴の評価、主要な検討事項であるマグマの貫入と噴出の評価、熱・熱水の評価、さらに確率論的評価という項目に分けて記述する。表5.4.1-1と表5.4.1-2に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

表 5.4.1-1 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術 (1/2)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
情報整備	全国規模の情報として、日本の第四紀火山 ¹⁾ 、新編火山灰アトラス ²⁾ 、坑井温度プロファイルデータベース ³⁾ 、温泉地化学データベース ⁴⁾ 、日本の熱水系アトラス ⁵⁾ が整備された。	○			1)産総研 (2010a) 2)町田・新井 (2003) 3)坂川ほか (2004) 4)浅森ほか (2003) 5)村岡ほか (2007)
火山活動履歴調査	放射年代測定の利用が困難な第四紀火山噴出物試料に対して、肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法 (RIPL 法) ⁶⁾ 、微量成分化学組成 ⁷⁾ 、火山灰起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成 ⁸⁾ 、斜長石斑晶の屈折率を用いた手法 ⁹⁾ が開発された。		○		6)古澤 (2004) 7)田村・山崎 (2004) 8)古澤・中村 (2009) 9)大石 (2010)
マグマの貫入・噴出の評価	新規火山の発生評価	東北日本弧において、火山と地形・地下構造、地震波低速度分布、プレート運動の関連性の検討から、将来の火山発生評価手法 ^{10), 11)} が示された。また、カルデラ・大規模火砕流についてはカルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ ^{12), 13)} 、カルデラ生成噴火を評価するための作業仮説 ¹⁴⁾ が提案されている。	○	○	10)Kondo (2009a) 11)Kondo (2009b) 12)Miura (2005) 13)三浦・和田 (2007) 14)鍵山 (2010)
	既存火山からのマグマの移動の評価	マグマの移動の評価として、マグマの化学組成と火道分布方位の関係を現地調査で明らかにした火口移動に関する研究成果を用いて、マグマの水平移動に影響する要素を抽出する水平移動の評価法 ^{15), 16)} が提案されている。	○	○	15)三浦ほか (2006) 16)土志田ほか (2006)
	深部熱源評価	東北の背弧側火山の空白域での深部熱源評価を地震波トモグラフィによる地震波速度構造、微小地震分布、MT法による比抵抗構造、地化学データ (³ He/ ⁴ He) などの組み合わせで行い、地下のマグマの状態やマグマ起源の熱的影響を評価する手法 ^{17), 18), 19)} が示され、能登半島では非火山性温泉の熱源を解明するため、温泉ガスの希ガス同位体分析および三次元比抵抗構造解析を行い解明 ²⁰⁾ した。	○	○	17)浅森・梅田 (2005) 18)Umeda et al. (2006b) 19)Umeda (2009) 20)Umeda et al. (2009)
	深部構造評価手法	マグマの貫入・噴出の評価を支える新しい技術として、Double Difference トモグラフィ法 ²¹⁾ 、レシーバ関数 ²²⁾ 、後続波 ²³⁾ を利用した地震波解析技術が開発され、地下深部でのマグマの存在や上昇過程の評価の精度が向上した。	○	○	22)Zhang and Thurber (2003, 2006) 22)Shiomi et al. (2004) 23)Xia et al. (2007)

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-2 火山・火成活動にかかわる調査・評価技術 (2/2)

項目と内容		概要	段階			文献
			文献調査	概要調査	精密調査	
熱・熱水の評価	総合的な熱・熱水の評価	評価の基礎として、地質・地球物理データの重ね合わせ表示による熱・熱水異常地域の抽出 ²⁴⁾ が行われ、高温域を含む地域のタイプ分け ²⁵⁾ がなされた。これをもとに、地熱シミュレータによる地温分布の評価手法 ²⁶⁾ 、温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握手法 ²⁷⁾ 、変質帯の解析手法 ²⁸⁾ が示された。また、流体/岩石反応で形成される地下水形成過程の解析法 ²⁹⁾ が示されている。さらに地化学手法をもとにした深部熱水の評価手法の開発 ³⁰⁾ が行われている。	○	○	○	24) 玉生ほか (2008) 25) 玉生 (2008) 26) 中尾ほか (2008) 27) 阪口 (2008) 28) 茂野 (2008) 29) 佐々木 (2008) 30) 産総研 (2009)
	熱履歴評価	複数の放射年代手法を組み合わせた熱年代学的手法による非火山地域の高温泉周辺の熱水変質履歴の評価手法 ³¹⁾ 、大規模火砕流の熱の影響をフィッシュトラック法による熱履歴解析 ³²⁾ で深部に外挿する解析手法の構築などが行われた。低温(約70度以上)の熱履歴の解析には、(U-Th)/He 法年代測定システムが適用可能となった ³³⁾ 。		○	○	31) 花室ほか (2008) 32) 松崎ほか (2004) 33) JAEA (2010b)
	熱源・火山からの影響評価	一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法 ³⁴⁾ 、マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードである Magma2002 による三次元熱水系シミュレーションによる手法 ³⁵⁾ などの技術開発が行われている。	○	○	○	34) JNC (2005a) 35) 坂川ほか (2005)
確率論的評価		火山の時空間分布や地球物理学的情報に基づき、確率モデルにより、将来10万年間の火山発生予測を行う手法 ^{36), 37)} 、独立単成火山に対する確率的評価手法、列島スケールの規模で、地球物理情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだ multiple inference モデルによる手法の開発 ³⁸⁾ が進められている。	○	○		36) Chapman et al. (2009b) 37) Jaquet et al. (2008) 38) Martin et al. (2004)

○ : 主な適用段階

(i) 情報整備

日本の第四紀火山カタログ（第四紀火山カタログ委員会，1999）に続いて，第2次取りまとめ以降には，日本の第四紀火山（産総研，2010a），新編火山灰アトラス（町田・新井，2003），坑井温度プロファイルデータベース（坂川ほか，2004），温泉地化学データベース（浅森ほか，2003），日本の熱水系アトラス（村岡ほか，2007）などの火山・火成活動にかかわるデータベースが整備されている。

これらの情報は，文献調査計画や文献調査の段階などにおいて基礎的なデータとして火山・火成活動の評価に取り入れて活用することができる。

(ii) 火山活動履歴の評価

火山起源の物質の対比や火山の年代を測定する手法については，カリウム-アルゴン（K-Ar）法，フィッシュトラック法などの放射年代測定法，テフラ層序学などに基づく手法があり，基本的には確立されている。近年は，精度や信頼性を向上させることを目的とした研究が進められた。例えば，放射年代測定の適用が困難な第四紀火山噴出物の試料に対して，肉眼では識別できないテフラ起源物質やテフラ降灰層準を認定する手法（RIPL法：古澤，2004）が開発され，地層処分にかかわる調査研究などに適用された（梅田・古澤，2004）。また，微量成分化学組成を用いたテフラの対比（吉川ほか，1991；吉川ほか，2000；田村・山崎，2004）も行われている。これらの手法は概要調査の段階以降で第四紀火山の活動性の把握のほか，地震・断層活動や隆起・侵食にかかわる調査・評価などにおける地層対比にも利用できると考えられる。さらに，テフラ起源の石英中のガラス包有物の主成分化学組成を用いたテフラの同定（古澤・中村，2009），斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラの対比（大石，2010）などの新しい手法の研究開発が進められている。

これらの手法については，今後，適用限界や信頼性を確認した上で必要に応じて利用する。

(iii) マグマの貫入・噴出の評価

第四紀の火山活動は，プレート配置やプレートの沈み込み角度に支配され，限定された地域で繰り返し活動し，火山の分布に偏在性があることが理解されており，さらにマグマの存在や活動性を評価する技術が求められている。

文献調査段階および概要調査段階で適用される技術では，既存情報または既存情報と現地調査データに基づく，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009a，2009b），既存火山からのマグマの移動を評価する手法（三浦ほか，2006；土志田ほか，2006）が提案されている。また，火山体の深部や非火山地域を評価する手法として，物理探査データや地化学情報の組み合わせで地下のマグマの状態やマグマの活動性を評価する手法が開発されてきた（浅森・梅田，2005；Umeda，2009など）。

以上のうち，新規火山の発生評価手法（Kondo，2009aなど）では，はじめに島弧スケールの情報として，対象地域の火山フロントとの位置関係，プレートの沈み込みの継続性を考慮し，評価の時間スケールを設定する。次に，火山岩の分布や岩相，層序，年代，化学成分の検討から，火山同士の時間的，空間的分布について評価する。続いて，地形データ，断層運動の分布とその時間変化，隆起・沈降運動の分布とその時間変化，重力データの検討から，火山活動に関連する地殻構造・変動を評価する。最後に，地震波速度構造の解析結果をもとに，マントルウェッジ中の高温域について，地震波低速度異常域の位置と広がり現状を把握した上で，火成活動の時間的，空間的分布パターンとの対比に基づき，その持続性に関する評価を行う（図 5.4.1-1）。以上の評価に基づき，将

来の火山が発生する可能性とその範囲を評価する。

火山地帯、非火山地帯を問わず高温域における熱源については、震源分布、地震波トモグラフィ解析、MT 法による深部比抵抗構造解析や地化学情報を組み合わせることによって評価が可能であると考えられている (Umeda et al., 2006b ; Umeda et al., 2009 ; Umeda, 2009 など)。例えば、非火山地域の中生界火山岩類からなる飯豊山での事例 (Umeda et al., 2006b ; Umeda et al., 2007a) では、地震波トモグラフィによる解析や電磁探査 MT 法による二次元断面解析で、飯豊山直下にマグマの存在を反映する可能性がある異常域を捉えている (図 5.4.1-2)。この異常域はさらに地殻深部まで連続する傾向があり、地表ではマンテル起源の He 同位体を多く含む高温泉が分布することや、異常域上部周辺に発生している微小地震の分布がマグマ溜りの周辺に発生している微小地震の分布と類似することなどから、この低比抵抗で地震波低速度層が示す異常域は、地殻の部分熔融を示すものであり、新しいマグマの活動を反映する可能性があることが示されている。以上のように異なる手法を適切に組み合わせることによって、対象地域と高温域の熱源の評価を行うことが可能であると考えられる。

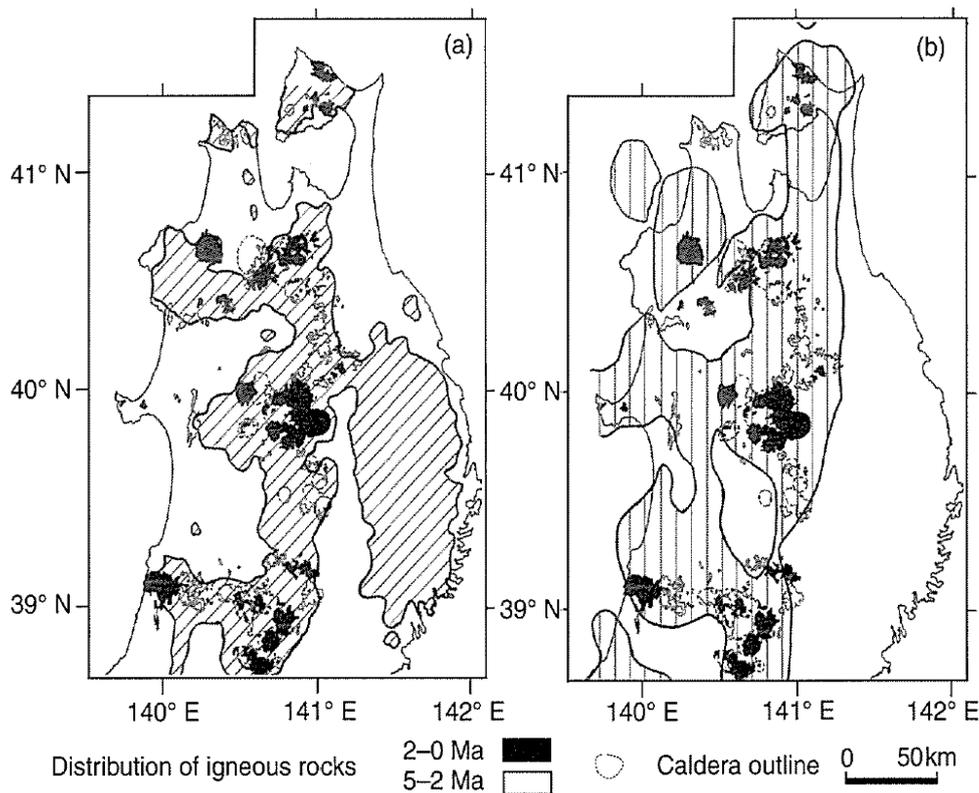


図 5.4.1-1 新規火山の発生可能性に関する検討例

(出典 : Kondo, 2009a)

左図 : 東北地方の 5Ma 以降の火山岩の分布と標高 500m 以上の山地の分布 (斜め線) の重ね合わせ。
 右図 : 5Ma 以降の火山岩の分布と沈み込むプレートに沿ったマンテルウェッジ内の地震波低速度領域 (縦線) の重ね合わせ。これらの事象が重なる地域では、将来火山が発生する可能性が相対的に高いと考えられる。

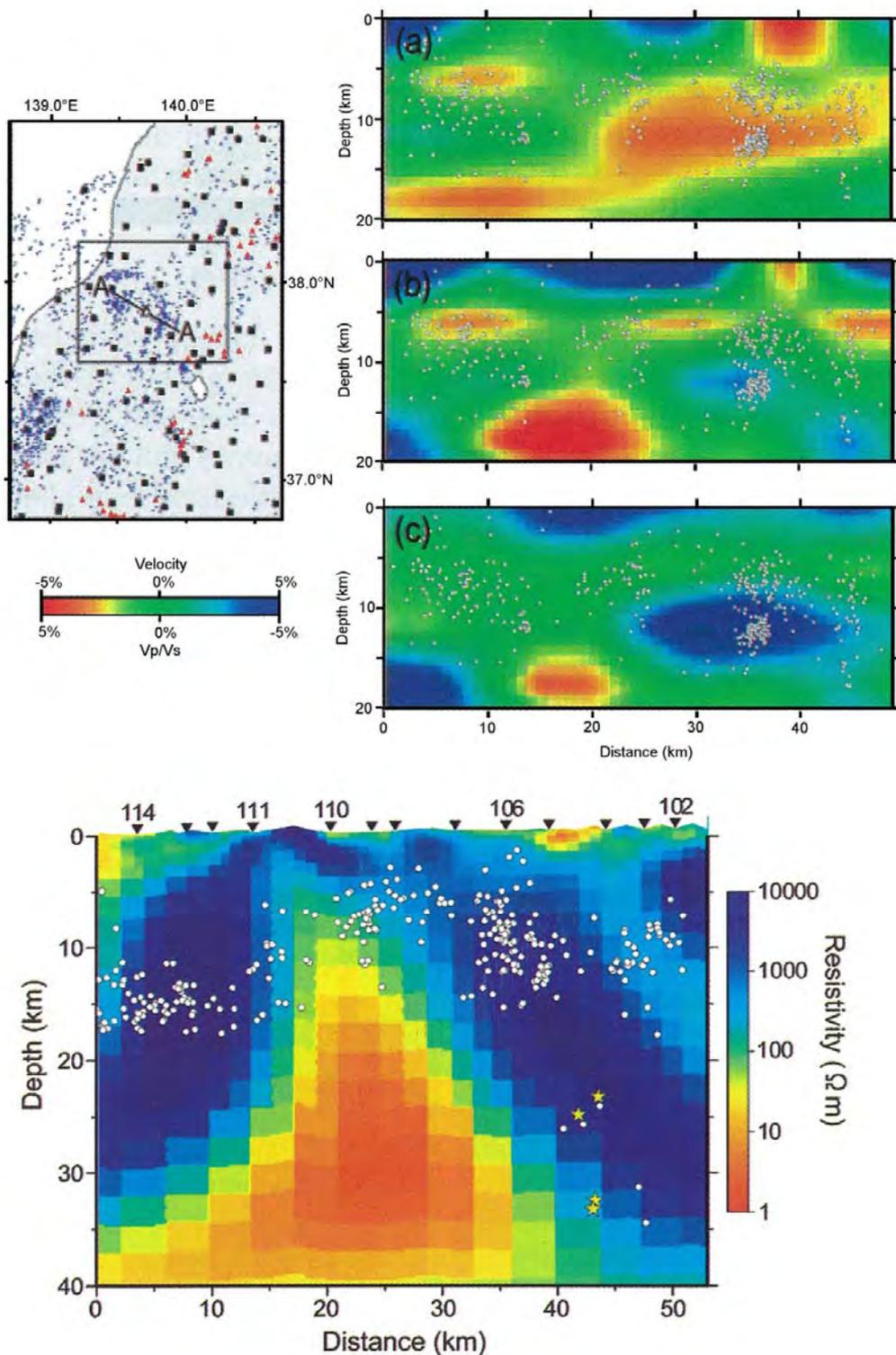


図 5.4.1-2 地球物理学的手法を用いたマグマの存在に関する検討例
(Umeda, 2009 を編集)

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

カルデラ・大規模火砕流についての新しい知見としては、カルデラ形成とテクトニクスとの関係が明らかにされ (Miura, 2005 ; 三浦・和田, 2007), カルデラを形成する噴火の準備過程の進行状況を評価するための作業仮説が提案され, その検証の必要性が示されている (鍵山, 2010)。

これらの手法は, 各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に適用することが可能であると考えられる。

上記の評価手法を支える技術として, 地震波解析では, 地震観測網の整備とともに新しい解析手法である Double Difference トモグラフィ法 (Zhang and Thurber, 2003, 2006), レシーバ関数 (Shiomi et al., 2004), 後続波 (Xia et al., 2007) を利用した手法が開発され, 長谷川ほか (2004) や Tamura et al. (2002) などの研究に取り入れられているように, 地下深部の構造, 地震, マグマの存在の推定や発生メカニズムなどに関する情報提供に寄与している。

(iv) 熱・熱水の評価

熱・熱水にかかわる調査・評価技術は, 地熱資源開発の分野で開発されてきた技術が基本となる。

文献調査段階から概要調査段階に適用可能な手法として, 産総研は, 深部流体の評価手法を示し, 非火山性の熱水の存在とその主要な分布を明らかにしている (産総研, 2009)。玉生ほか (2008) は, 熱水活動域のタイプ別区分方法を示し, 中尾ほか (2008) はシミュレーションによる地温分布の評価手法を示している。さらに, 熱履歴の解析手法としては, 低温域に対応した (U-Th) /He 年代測定システムの開発があり (JAEA, 2010b), 熱年代学的手法による熱履歴評価手法の適用事例としては, Umeda et al. (2007b), 花室ほか (2008), がある。熱源や火山からの影響評価手法としては, 大規模火砕流の熱的影響を評価する手法 (松崎ほか, 2004), 一次元熱輸送モデルによる熱流束や流体速度を評価する手法 (JNC, 2005a ; Umeda et al., 2007c), マグマ溜りの周辺岩盤の熱や地下水理などを計算するための解析コードである Magma2002 による三次元熱水系シミュレーションによる手法 (坂川ほか, 2005) などの技術が開発されている。

これらの総合的な熱・熱水の評価手法, 深部流体の評価手法は, 対象地域の概略的な評価に有効である。特に, 熱源や火山からの熱的影響の評価手法は, 的確な条件 (熱源の位置, 物性など) が与えられれば, 主に概要調査の段階以降に有効な評価手法として適用することが考えられる。

(v) 確率論的評価

上述した決定論的手法を補足する手法として, 確率論的に将来の火山活動の評価を行う手法が検討されてきた。NUMO では, 国際テクトニクス会議 (ITM) での日本の火山・火成活動評価に関する議論 (Chapman et al., 2009a) に基づき, 東北地方や九州地方において海外で用いられているカーネル法やコックスプロセス法などの確率モデルを適用し, 将来の火山発生可能性を評価する手法を開発した (Chapman et al., 2009b, 2009c, 2009d ; Jaquet et al., 2008, 2009 : 図 5.4.1-3, 図 5.4.1-4)。また, JNC (2005a) による独立単成火山群に対する評価手法や, Martin et al. (2004) による島弧規模の地球物理学的情報をベイズ法で確率モデルに取り込んだ multiple inference モデルの開発が進められている。

これまでの検討により, 確率論的な評価手法のわが国の地質環境への基本的な適用性が確認された。一方, これらの評価手法は, 火山の分布や活動年代が主な入力情報であり, その精度は情報の質に依存する。限られた情報しか得られない場合や, より小さなスケールへの適用性, そして確率論的評価の結果をどのように活用していくか, などの検討課題が残されている。

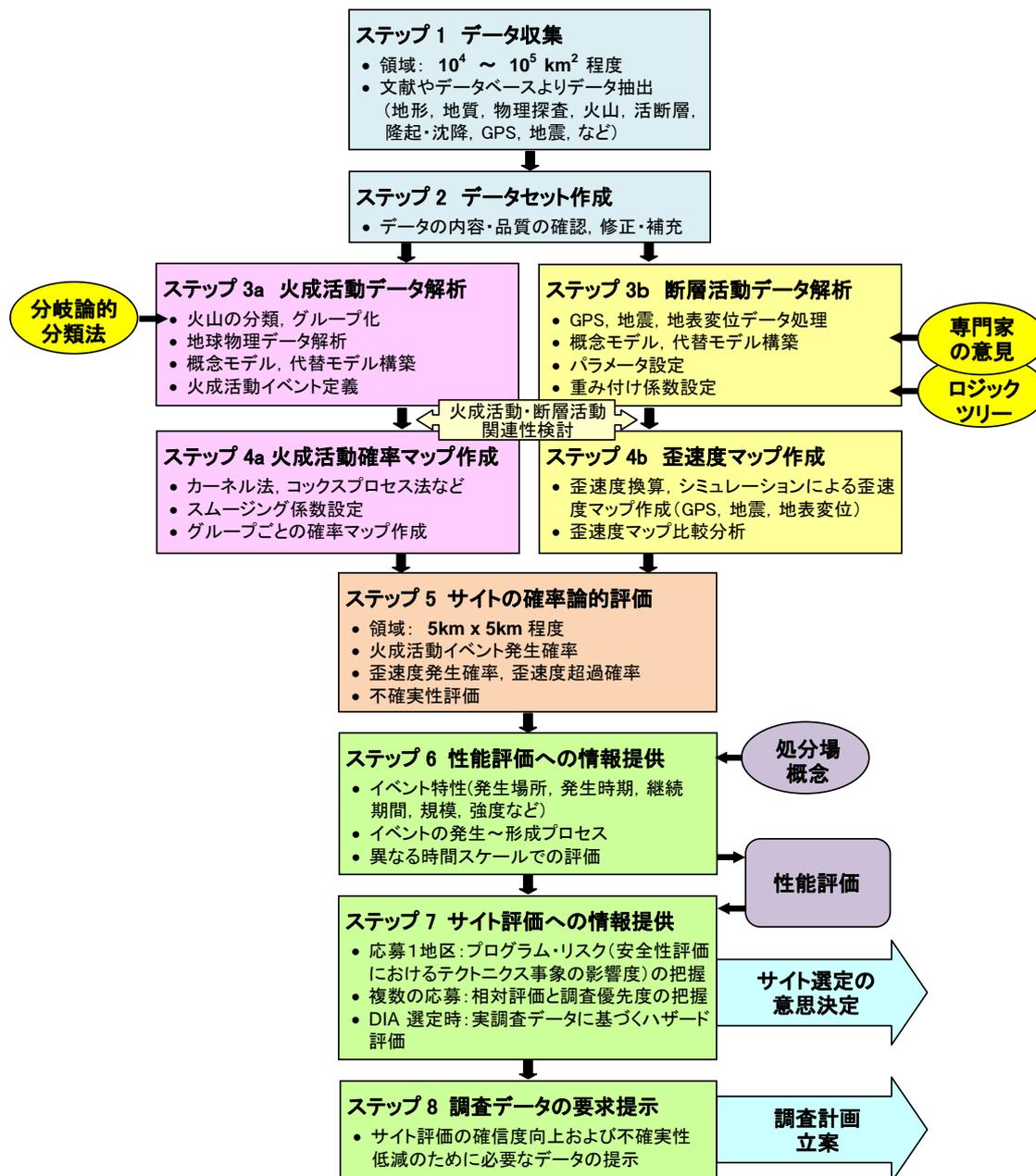


図 5.4.1-3 国際テクトニクス会議 (ITM) を通じて構築した確率論的評価手法 (Chapman et al., 2009a に基づき作成)

データの収集から、テクトニクスや火成活動の傾向・法則性の理解、確率論的解析および解析結果の使い方までを含む包括的な手法で、文献情報のみに基づく文献調査およびそれに現地調査データが加わる概要調査の各段階で用いることができる。また、科学的知見の進展に応じて、その時々最適な技術を取り入れ、手法そのものを改良していく柔軟性を有している。

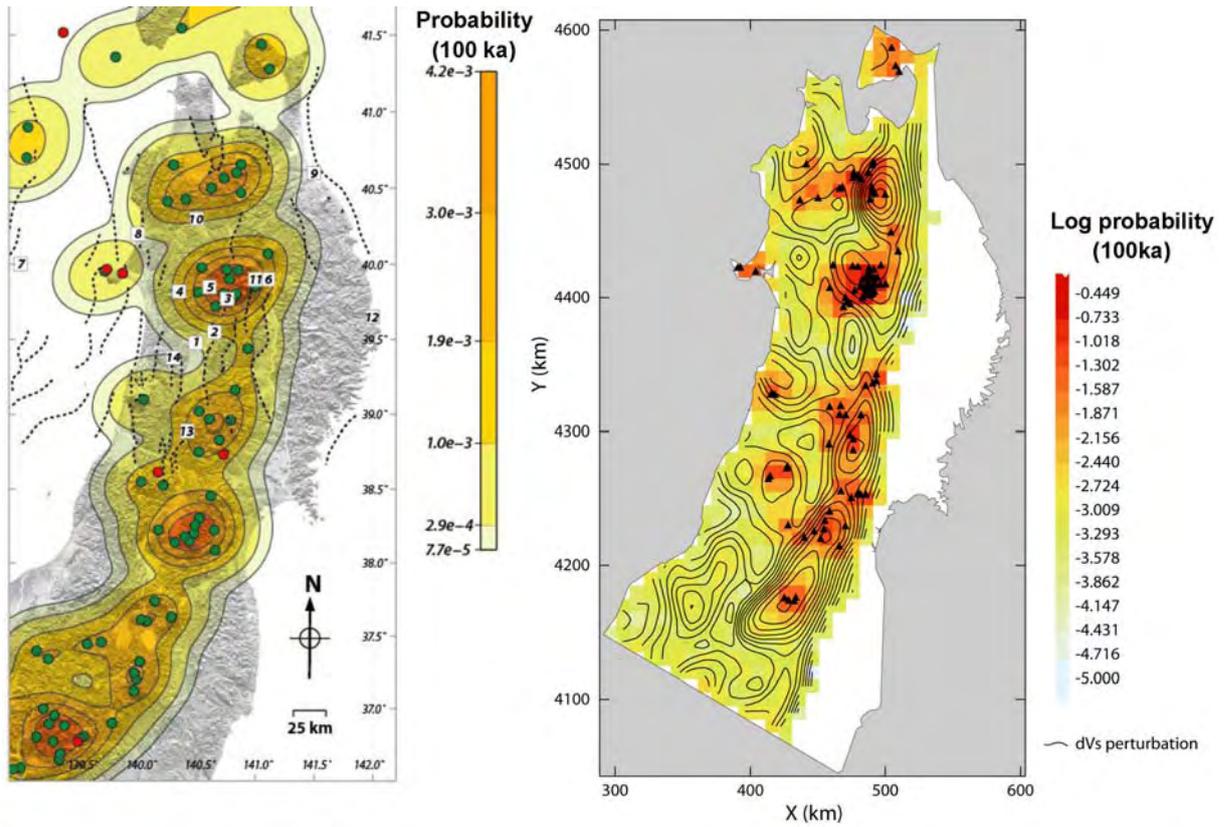


図 5. 4. 1-4 東北地方のケーススタディにおける火山発生確率マップの例
(Chapman et al., 2009c を編集)

- (左) 定まった関数の確率ポテンシャルに基づき平均的な確率を導くカーネル法による, 将来 10 万年間に 5km 四方の領域内に一つまたはそれ以上の火山が発生する確率。緑と赤の点は第四紀火山を示す。
- (右) ランダムな確率ポテンシャルに基づきあらゆる不確実性を内包した確率を導くコックスプロセス法による, 将来 10 万年間に 10km 四方の領域内に一つまたはそれ以上の火山が発生する確率。黒三角は第四紀火山を示す。

(2) 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術

第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までには、主要な活断層の分布を把握する手法、活断層周辺の岩盤や地下水の性状を把握する手法などが整備され、全国規模の陸域の活断層分布が200万分の1日本列島活断層図などとして示された。また、主な地震・断層活動は既存の断層帯において過去10万年間にわたり同様の活動様式で繰り返し生じていること、活断層の分布密度には偏在性があり、タイプと活動性には地域性があることが示された。第2次取りまとめ（JNC, 1999b）では、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の検出手法や断層活動による影響の評価が課題として挙げられていた。

第2次取りまとめ以降は、地表で活断層が認識されていなかった内陸地域でM7クラスの被害を伴う地震（2000年鳥取県西部地震、2003年宮城県北部地震、2004年新潟県中越地震、2008年岩手・宮城内陸地震など）が発生し、それらの震源域を対象とした調査が行われた。2000年鳥取県西部地震（M7.3）は、長さ20km、幅10kmの震源断層により生じたが、地表において確認された変位はわずかなものであった。本地震後の調査では、震源断層の直上付近に短い推定活断層やリニアメントが認められている（井上ほか、2002など）。2004年新潟県中越地震（M6.8）や2007年新潟県中越沖地震は、背弧海盆に堆積岩類が厚く分布し活褶曲が発達する地域において生じた地震である。これらの地震については、断層関連褶曲の考え方にに基づき、伏在した断層の活動により生じたものであるとの解釈がなされている（岡村・石山、2005；青柳・阿部、2007など）。2008年岩手・宮城内陸地震（M7.2）の発生域は山間部であり、これまで十分な調査が行われていない地域であることから、活断層の存在は認められていなかった。しかし、地震後の調査では、短い活断層が存在することが報告されている（鈴木ほか、2008；遠田ほか、2010など）。これらの調査の結果、震源断層と活断層の関係を把握することの重要性が認識された。また、このような地表に明瞭に出現しない断層は、伏在断層、未成熟な断層などとされ、その検出や評価の重要性が再認識された。

このような課題に対し、例えば、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には変動地形学的手法、断層関連褶曲の考えをもとにした数値解析や模型実験を含めた解釈、地質断層の再活動を考慮した解釈が行われるようになってきた。また、断層の影響範囲の評価にも数値解析や模型実験と現状の比較で評価する手法が示された。さらに、国際テクトニクス会議（ITM）の提言をもとに確率論的に将来の断層発生の可能性を評価する確率論的手法が開発され、決定論的手法とは別の観点からの評価が試みられている。

以下、地震・断層活動にかかわる項目は、活断層の存在の把握、活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握、地質断層の再活動性の評価、断層活動に関する確率論的評価に分けて記述する。表5.4.1-3と表5.4.1-4に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

表 5.4.1-3 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術 (1/2)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
活断層の存在の把握	文献情報など	○			1) 徳山ほか (2001) 2) 中田・今泉 (2002) 3) 産総研 (2010b) 4) 池田ほか (2002) 5) 国土地理院 (例えば、渡辺ほか, 2001) 6) 汐見ほか (2009)
	測地学的手法 (SAR, GPS)	○			7) 雨貝ほか (2008) 8) sagiya et al. (2000) 9) 鷺谷 (2009)
	地形学的手法 (変動地形)	○	○		10) 青柳・阿部 (2009) 11) 丸山ほか (2009) 12) 高田ほか (2003) 13) 木下ほか (2005) 14) 田力・池田 (2005) 15) 幡谷 (2006b) 16) 幡谷・濱田 (2009) 17) 田力ほか (2009)
	構造地質学的手法 (地質構造解析, 年代測定)		○	○	18) 小林・杉山 (2004) 19) 相澤ほか (2005) 20) 田上ほか (2010) 21) 伊藤 (2006) 22) Tagami and Murakami (2007) 23) 池原 (2000)
	地球物理学的手法 (反射法地震探査, 電磁探査, 地震波解析)			○	○

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-4 地震・断層活動にかかわる調査・評価技術 (2/2)

項目と内容		概要	段 階			文 献
			文献調査	概要調査	精密調査	
存在の把握 活断層の	地球化学的手法 (H ₂ , He)	岩石の破壊により生じる水素ガスの測定や、地下水や温泉、土壌ガスに含まれるヘリウム同位体の測定から断層の位置、断層を評価する手法の開発 ^{38),39),40)} が進められた。		○		38) 黒澤ほか (2010) 39) Shimada et al. (2008) 40) Umeda and Ninomiya (2009)
	総合的評価手法	地表に明瞭な地震断層が出現しないような地域で、微小地震活動、航空レーザー測量、反射法地震探査で震源断層にかかわる活構造を評価する手法 ⁴¹⁾ が示された。	○	○		41) 青柳・阿部 (2009)
活断層周辺の 変形帯・影響範囲の把握	変形領域の把握 (活褶曲など)	堆積環境にある海域では断層関連褶曲解析 (growth strata など) を利用して音波探査データとの組み合わせなどで断層構造の抽出に対して成果を上げている ⁴²⁾ 。 日本の活褶曲の形成メカニズムとタイプ分け ⁴³⁾ が行われ、模型実験による活褶曲・逆断層帯の発達過程・影響帯の評価 ^{44),45)} や、断層関連褶曲の考え方にに基づき既存の地質データとバランス断面法による評価 ⁴⁶⁾ が行われている。 逆断層や横ずれ断層に関する評価として、地質調査結果をもとにバランス断面法を適用した手法 ^{47),48),49)} 、断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定に数値解析プログラムを適用する手法の有効性 ⁵⁰⁾ が確認されている。	○	○		42) 岡村 (2000) 43) 池田 (2002) 44) 上田ほか (2005) 45) 上田 (2011) 46) 岡村・石山 (2005) 47) 楳原ほか (2006) 48) 小坂ほか (2009) 49) Kagohara et al. (2009) 50) JAEA (2010b)
	断層の発達・伸展 の評価	逆断層に関して、模型実験による発達過程の解析からの評価手法 ⁵¹⁾ が検討されている。 横ずれ断層に関して、中国地方と中部地方の主要断層の発達程度の比較 ⁵²⁾ 、実験・シミュレーションによる評価 ^{53),54),55),56)} が行われている。	○	○		51) 上田ほか (2003) 52) 松田ほか (2004) 53) 上田 (2009) 54) 澤田・上田 (2009) 55) 小山・谷 (2003) 56) Kase and Day (2006)
	断層破碎帯の評価	地下水流動など地下環境変化にかかわる断層のダメージゾーン、プロセスゾーンの地質学的評価 ^{57),58),59)} 、MT 法探査で取得された比抵抗によるダメージゾーンの広がり ⁶⁰⁾ の事例が示されている。	○	○	○	57) 金折 (2001) 58) 吉田ほか (2009) 59) Yoshida et al. (2005) 60) 麻植ほか (2007)
地質断層の再活動性の評価		近年発生した被害地震 (2003 年宮城県北部地震、2008 年岩手・宮城内陸地震など) の断層活動や南関東の立川断層などでは、既存の地質断層の再活動による可能性が示されている ^{61),62),63)} 。また、モデル実験や数値解析による地質断層の再活動性の検討 ⁶⁴⁾ が進められている。	○	○		61) Kato et al. (2006) 62) 遅沢 (2009) 63) 山崎 (2006) 64) 山田・松岡 (2004)
断層活動に関する 確率論的評価		活断層・隆起などの地表変化、GPS データ、歴史地震データから得られる各々の歪速度分布、年間歪速度の超過確率から将来 10 万年程度の断層発生予測手法 ⁶⁵⁾ が開発されている。 確率論的な地震ハザード解析として、防災分野 ^{66),67)} では数 10 年程度の予測が行われている。	○	○		65) Chapman et al. (2009b) など 66) 地震調査研究推進本部 (2010) 67) Stirling et al. (2002)

○ : 主な適用段階

(i) 活断層の存在の把握

① 文献情報など

文献情報に関して、全国規模で整理された情報のうち、第2次取りまとめ以降にまとめられた主なものとしては、活断層詳細デジタルマップ（中田・今泉，2002），日本周辺海域の第四紀地質構造図（徳山ほか，2001），活断層データベース（産総研，2010b）がある。また、地域的な情報として、第四紀逆断層アトラス（池田ほか，2002）や国土地理院による都市圏活断層図（例えば，渡辺ほか，2001）の出版などが挙げられる。現在，地震調査研究推進本部は，活断層に対する情報の体系的収集・整備と評価の高度化により，活断層の詳細位置に各種調査・評価結果を併記した「活断層基本図（仮称）」の作成を進めている（地震調査研究推進本部，2009）。

全国規模の情報取得システムとしては，防災科学技術研究所による地震観測網（K-net・KiK-net，Hi-Net，F-net）や国土地理院によるGPS観測網の整備が行われ，精度の高い解析により活断層などの存在の把握にも活用が可能となっている。

② 測地学的手法

広域のかつ継続的なデータ取得による解析を可能とした手法として，地球観測衛星搭載の合成開口レーダーシステムとGPSによる観測データがある。

地球観測衛星「だいち」の合成開口レーダー（PALSAR）システムでは，数10kmの範囲の地殻変動を数cmの精度で捉えることが可能であり，2008年岩手・宮城内陸地震地域への適用では，解析結果として得られる干渉画像から断層の走向や変位のセンスを求められることが示されている（雨貝ほか，2008）。GPS観測データからは，東北地方から近畿にかけての日本海側で，三角測量で指摘されていた変形集中帯の存在が明瞭となり（Sagiya et al., 2000），この変形帯と内陸地震との関連の可能性が指摘されている。また，定常時の地殻変動を広範囲で精度よく得られることから，解析が手軽に行えるようになり，広域的にはプレート境界におけるすべりの時空間分布やすべり欠損分布の推定が試みられ，数km間隔で設置されたGPS観測点のデータに基づき活断層周辺の歪の蓄積過程を捉えることが可能となっている（鷲谷，2009）。

サイト調査・評価の各段階において，合成開口レーダーやGPS観測などのデータを用いた測地学的手法を用いた地殻変動調査を行うことにより，断層周辺の地殻変動の状況を把握し，活動性の評価に反映することができる。

③ 地形学的手法

変動地形学の基本的な考え方は，渡辺・鈴木（1999）や日本応用地質学会応用地形学研究小委員会（2002）などにまとめられているが，近年の地震において，起震断層相当の活断層などが全国規模の活断層図などに記載されていなかった事例もあり（2008年岩手・宮城内陸地震など），空中写真判読に代表される地形調査により不明瞭な変動地形を事前に検出することは，現在も重要な課題となっている。

この課題に対する近年の新たな研究として，高田ほか（2003）および木下ほか（2005）は，活断層であるかどうか不明確なリニアメントの偏在性に着目し，明瞭な活断層が地表に分布しない地域に対してリニアメント判断基準の検討を行っている。また，広域的な地殻変動を把握するという観点から，段丘から見積った隆起量の分布，あるいは，区分した段丘の分布から変動を抽出し，地表での位置が不明瞭な活断層の検出・活動性評価に活用する試みがなされた（田力・池田，2005；田

力ほか, 2009 ; 幡谷, 2006b ; 幡谷ほか, 2006 ; 幡谷・濱田, 2009)。さらに, 航空レーザー測量で作成された DEM (Digital Elevation Model, 以下 DEM という) の地形情報は, これまでにない解像度と客観性を有している。2008 年岩手・宮城内陸地震域での適用事例 (丸山ほか, 2009) では, 山間部の植生のある地域において断層変位地形が抽出されている。また, DEM を用いて地形の微小変化を捉えるための手法などが開発・提案されている (佐々木・向山, 2009 など)。

サイト調査・評価の各段階では, 変動地形学的手法は伏在断層の抽出や活動性の評価に適用が可能である。レーザー測量は詳細な DEM から変動地形を抽出する際に適用可能と考えられ, 必要に応じて概要調査の段階以降に適用できると考えられる。

④ 構造地質学的手法

現地調査において確認された断層の活動性の評価に際して, 断層とそれを覆う地層との関係に基づく評価ができない場合がある。このため, 断層を構成する物質 (断層岩) から直接断層の活動性を評価する手法の開発が進められている (田上ほか, 2010)。また, 断層岩の性状 (断層沿いの破碎, 変形, 変質などの状況) や断層ガウジの色調から断層の活動性を評価する手法の開発が進められ (小林・杉山, 2004 ; 相澤ほか, 2005), さらに, 断層岩や周辺地層の熱年代学的調査を含めた地質構造発達過程を踏まえて断層の活動履歴を評価する手法 (Tagami and Murakami, 2007 ; 伊藤, 2006 など) も検討されている。断層の摩擦熱によって形成される断層岩 (シュードタキライト) や断層熱に関する知見は, Lin et al. (2003, 2005) や福地ほか (2002) などに示されている。

海域では, 海底のタービダイトの詳細な解析により, 地震発生の頻度を解析する手法が開発されている (池原, 2000)。

これらの研究開発はその多くが現在進行中であり, その適用性にかかわる研究動向を注視しながら, 概要調査の段階とそれ以降の段階で, 状況に応じて適用する。

⑤ 地球物理学的手法

活断層調査に適用される一般的な物理探手法は, 反射法地震探査 (海域では音波探査), 電磁探査, 重力探査などであり, このほか地震波を利用した解析・評価手法がある。

反射法地震探査は, 特に層構造をなす堆積岩地域で有効な手法である。近年二次元解析処理技術や三次元地震探査技術の進展が著しく, 資源探査や海域での構造調査, 表層の地形, 堆積物調査への有効性が示され, 活断層の調査にも活用が進んだ。この 10 年間で多くの事例が蓄積され, 最も信頼性が向上した調査手法の一つである。さらに, より小規模な地質構造を把握する試みもなされている。佐々木ほか (2008) は, 六ヶ所村の鷹架層を対象とした地質詳細調査に三次元地震探査を適用し, ボーリング調査で認められていた中角度の落差数 10m の sf-c 断層について, 調査地域での連続性を明らかにした。また, 同地域で実施されていたボーリング調査などでは, 把握できていなかった小規模な変位の断層 (落差は約 5m) を sf-c 断層の上部に抽出しており (図 5.4.1-5), その後に掘削された調査坑道において, 固結・ゆ着した面なし断層として確認したことでその有効性を示した。

海域では, 浅海域を対象としたマルチチャンネル音波探査システムが開発され, 2007 年の能登半島地震の海底断層の調査などで使用された (井上ほか, 2007)。

以上のような反射法地震探査については, 概要調査における探査深度や目的に応じて, 多様な周波数の震源を組み合わせ, 適切な調査仕様を選択することにより, 水平方向の地質構造の比較や,

地下深部から浅部までの情報を取得する際に活用していく。

電磁探査では、海上音波探査を補完する水深 200m から波打ち際に対応した電磁探査システムの開発や改良が行われ（吉村ほか，2006a；大澤ほか，2010），ほかの電磁法と組み合わせることにより沿岸域から海域に及ぶ電磁探査法の適用性が検討されている（吉村ほか，2009；大里ほか，2009；上田ほか，2010）。

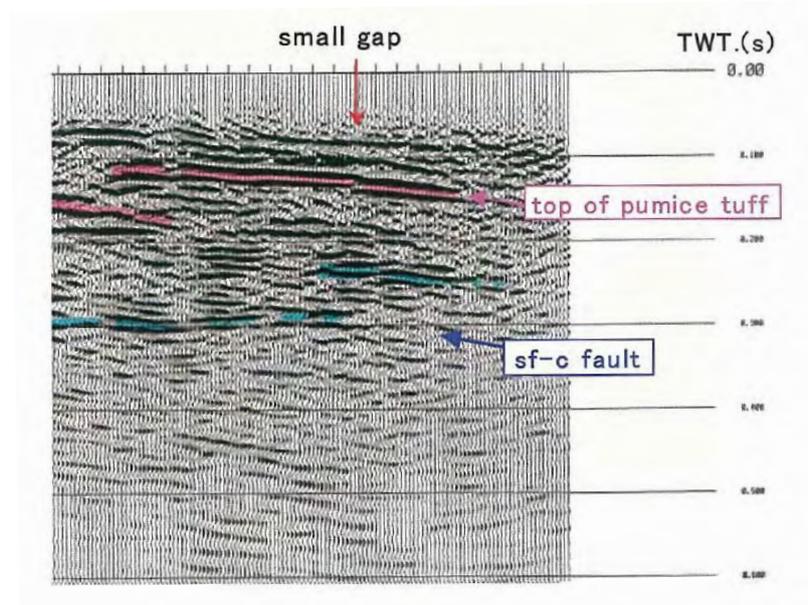


図 5.4.1-5 三次元地震探査で検出された小断層
(出典：佐々木ほか，2008)

sf-c 断層上盤の軽石凝灰岩最上部の反射面 (top of pumice tuff) に小さな変位を与える明瞭な小断層を確認。走向 N50° E，落差は約 5m（区間速度を 2000m/s と仮定）と推定された。

主要な活断層近傍では、重力変化の大きい急変帯となっていることや、断層長が重力の急変帯を超えることは少ない（井上ほか，2006）ことなどから活断層の概略の位置，連続性を評価する手法の一つとして重力探査の活用も考えられる。

地震波を利用した解析手法は、地震観測網の整備と解析手法の高度化により精度の高い地下構造の評価が可能となっている。岡田・長谷川（2005）は、地震観測データをトモグラフィ解析することにより 1995 年兵庫県南部地震域，2003 年宮城県北部地震域での震源断層のイメージングを行った。また、地震データの解析をもとにした、活褶曲地域における震源断層評価として、青柳・阿部（2007）は新潟県中越地震の震源域において、補正した震源分布から震源断層を推定し、有限要素法による模擬的変動解析と地質構造とを対比する手法で、活褶曲地帯での断層評価を行う手法を示している。

概要調査では、調査対象地域の特徴に応じた地球物理学的手法を組み合わせることでサイト選定のための調査・評価を進める。特に、現地調査の初期では、二次元の反射法地震探査（海上音波探査）を優先的に行い、必要に応じて三次元の反射法地震探査などを取り入れる。

⑥ 地球化学的手法

伏在断層の存否および活動性を地球化学的に抽出、評価する手法の開発が進められている。主な手法として、岩石の破壊により生じる水素ガス (Kameda et al, 2003) を地表で測定する手法 (黒澤ほか, 2010 ; Shimada et al., 2008) や温泉, 地下水, 土壌中のガスに含まれるヘリウム同位体を測定することにより変動地形が不明瞭な断層や伏在断層を抽出する技術 (Umeda et al., 2008 ; Umeda and Ninomiya, 2009 など) などがある。

これらの手法は、事例の蓄積など、実証性の向上にかかわる動向に留意し、概要調査の段階以降において、活断層の分布を把握する際に必要に応じて適用する。

⑦ 総合的評価手法

近年、震源断層の評価として、複数の調査手法を組み合わせ、総合的に評価する方法論が検討されている。青柳・阿部 (2009) は、微小地震活動のデータ解析, 航空レーザー測量による地形起伏量の変化ゾーンの抽出, 反射法地震探査による不連続地下構造の解析を組み合わせることにより、震源断層にかかわる活構造を評価する手法を示している。

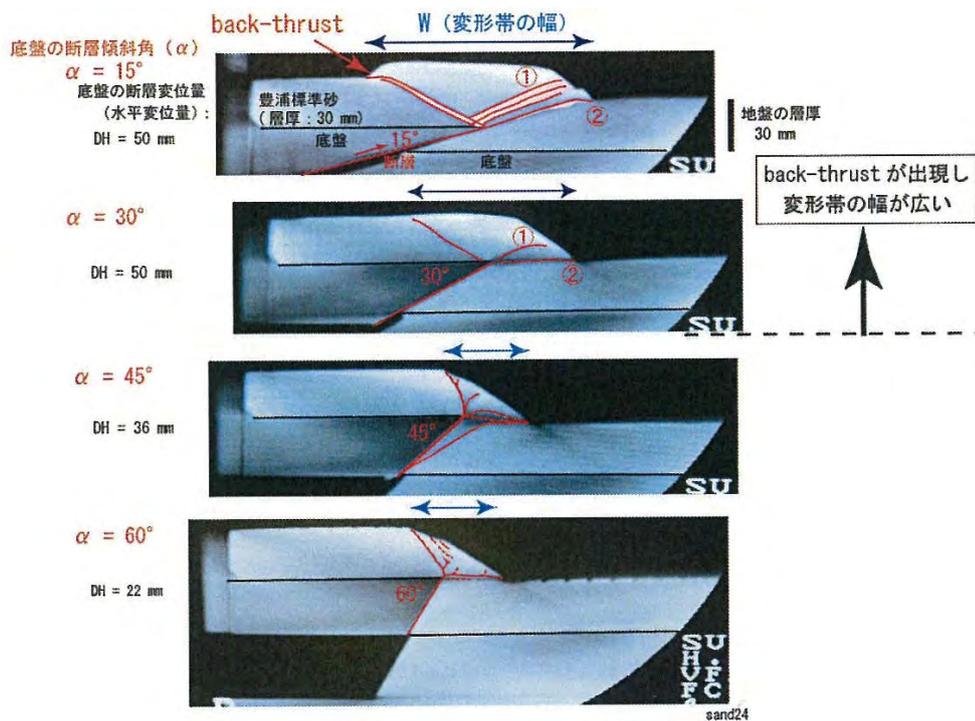
地下深部の活断層の存在を三次元的に把握するためには、それぞれの個別の調査手法はもとより、測地, 地質学, 物理探査, 地球化学, ボーリング調査, 数値解析など複数の調査手法を適切に組み合わせることが重要であり、総合的な評価手法については今後も高度化していく必要がある。

(ii) 活断層周辺の変形帯・影響範囲の把握

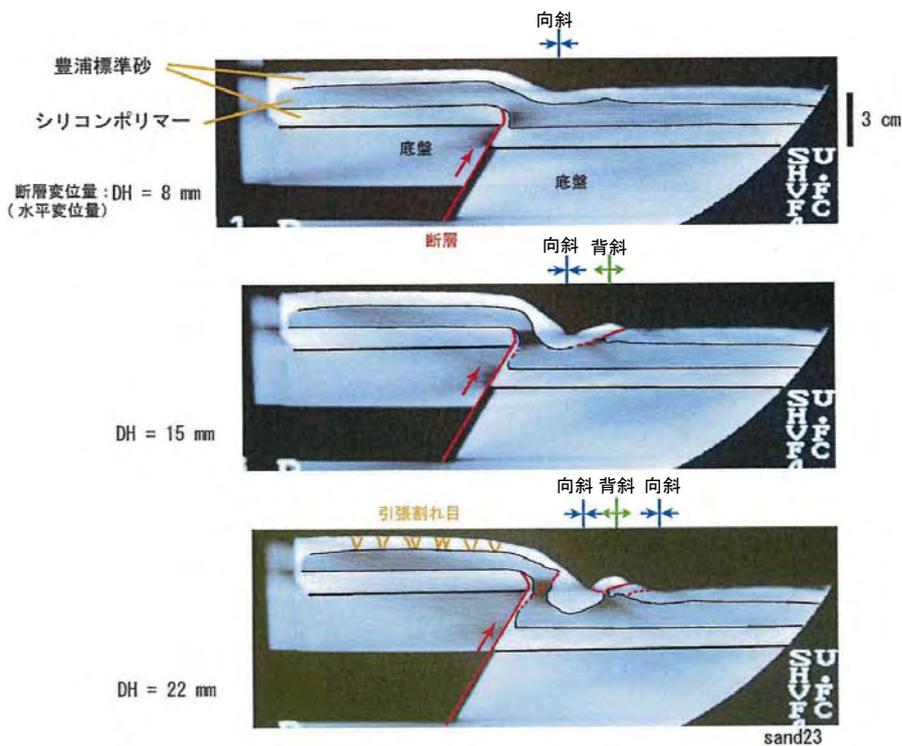
① 変形領域の把握

断層関連褶曲の評価には、断層運動によって形成される撓曲および活褶曲の発達過程に伴い形成される特徴的な堆積構造 (growth triangle および growth strata) について、音波探査データなどをもとにバランス断面法などを活用し、解析・評価する手法 (岡村, 2000) が適用されている。

活褶曲に関する知見は、池田 (2002) により形成メカニズムに基づくタイプ分けとして示されている。活褶曲に関する評価手法は、2004年新潟県中越地震域を対象に開発・検討されており、模型実験による逆断層・活褶曲帯の発達過程・影響範囲を評価する手法 (上田ほか, 2005 ; 上田, 2011), 断層関連褶曲の考えに基づき既存の地質構造データとバランス断面法により地下の断層形態を推定する手法 (岡村・石山, 2005) が示されている。上田 (2011) は、基盤岩 (花崗岩類・先新第三系など) の逆断層の変位に伴い形成される被覆層内 (新第三紀層など) の活断層・活褶曲群の形態や発達過程が、基盤岩の逆断層の傾斜角や被覆層の性状の違いによりどのように変化するか検討するために、乾燥砂やシリコンポリマーを用いた模擬被覆層の変形に関する模型実験を行った (図 5.4.1-6)。基盤岩の逆断層の傾斜角を変えた乾燥砂の単層の実験では、断層の傾斜角が低角の場合は逆向きに傾斜する断層 (back-thrust) が生じ、高角の場合に比べ変形帯の幅が広がった。乾燥砂・シリコンポリマーの複数層の実験では、基盤の逆断層の変位増大に伴い、主要な撓曲崖の低下側に小規模な褶曲群・逆断層群が形成された。このような変形様式は、実際の逆断層・活褶曲帯における地質構造の解釈と整合することから、このような地域の変形領域を評価する際には、基盤の断層傾斜角, 累積変位量, 被覆層の構成・物性を現地調査で明らかにすることが重要であると指摘した。



(a)



(b)

図 5.4.1-6 逆断層・活褶曲帯の発達過程・影響範囲に関する模型実験 (CT スキャン断面)
(上田, 2011 を編集, 一部加筆)

- (a) 基盤岩の逆断層の傾斜角の違いによる乾燥砂層の変形様式の変化：基盤岩（底盤）の逆断層の傾斜角が低角の場合は逆向きに傾斜する断層（back-thrust）が生じ、高角の場合に比べ変形帯の幅が広がる。
- (b) 基盤岩の逆断層の変位に伴う乾燥砂・シリコンポリマー複数層の変形過程：基盤岩（底盤）の逆断層の変位増大に伴い、主要な撓曲崖の低下側に小規模な褶曲群（向斜・背斜）や逆断層群が形成される。

逆断層帯の形成過程および変形領域の評価は、地質構造調査（地形、地質、物理探査）から得られた地質構造をもとにバランス断面法を適用して解析する手法が用いられる。小坂ほか（2009）は、北上低地西縁断層帯に、楮原ほか（2006）、Kagohara et al.（2009）などは、横手盆地東縁断層帯・千屋断層を対象に解析を行っている。

横ずれ断層については、JAEA が、断層周辺の岩盤の変形領域や地形変化の範囲の推定を既存の数値解析プログラムで解析し、その有効性と適用性を確認している（JAEA, 2010b）。

以上のような断層関連褶曲の概念をもとにした解析は、影響範囲の評価や調査計画の立案における参考情報あるいは目安となる。概要調査では、現地調査と解析結果との整合性を確認しながら、その適用について検討する。

② 断層の発達・伸展の評価

逆断層の評価としては、模型実験による発達過程の解析による評価手法（上田ほか、2003）があり、横ずれ断層の評価については、中部地方と中国地方での、横ずれ断層の発達程度の比較（松田ほか、2004）や模型実験・シミュレーションによる横ずれ断層の発達過程や幅の検討が小山・谷（2003）、Kase and Day（2006）、上田（2009）、澤田・上田（2009）などにより行われている。

横ずれ断層評価事例の中で、上田（2009）は、断層変位に伴う岩盤の変形過程に関して模型実験と実地盤の地表の変形帯の比較を行い、その結果から変形特性を把握し変形帯の幅を予測する手法と評価する上での留意点を示している。すなわち、変形過程の初期に、断層変位の増大に伴いリーデルせん断に相当する雁行状のフラクチャー群が形成され、次にリーデルせん断は連結し屈曲部を有する一連の主断層が形成される。屈曲部では逆断層成分を有する新しいフラクチャーが分岐・発生し外側へ発達するため断層の幅が広がる。しかし、屈曲部の岩盤深部ではフラクチャーゾーンの幅は狭く、より直線状の主断層が形成される。このような事実に基づき断層変位に伴う岩盤の変形を評価する上での留意点は、評価対象の断層の形態・活動性を把握し、断層の成長過程（発達段階）と岩盤の物性と応力状態を考慮し評価を行うことであるとしている。

上記の手法については、必要なデータが得られた段階で、モデル実験やシミュレーションを組み合わせた解析を行い、その結果を追加調査の立案へ反映させたり、断層の発達・伸展の評価・予測に供する。

③ 断層破碎帯の評価

断層の発達過程で形成される破碎帯やその分布範囲に関する知見は、地下水流動、地下水の地球化学的状態の変化、岩盤中での物質の移動にかかわる影響を評価する上で重要である。例えば、破碎された部分は水みちに、さらに細かく破碎され粘土化した部分は遮水構造になり得るため、岩盤の透水性や物質移行特性に影響を及ぼす可能性がある。また、破碎帯は、地表付近の酸素を溶存した地下水の流入経路にもなり得るため、地下深部の酸化・還元環境に変化を与える可能性がある。一般的に断層の規模が大きいほど破碎帯の幅も大きくなるとされている。断層運動の影響が周囲の岩盤に及んだ範囲に関する地質学的知見は金折（2001）にまとめられている。近年では、花崗岩分布域において割れ目の発達過程や変質の程度などについて地質学的、地球化学的な調査を行い、地下水流動や岩盤中での物質の移動にかかわるダメージゾーンの研究が進められている（例えば、Yoshida et al., 2005；吉田ほか、2009）。吉田ほか（2009）は、断層および割れ目の充填鉱物を用いることにより、断層の影響の及んだ範囲に形成される割れ目（酸化物で充填された連続性の悪いネ

ットワーク状の割れ目)と既存の岩体に普遍的に形成されたバックグラウンド割れ目(連続性がよく熱水性起源の充填鉱物を有する単一割れ目)を区分する手法を示している。また、その手法を岐阜県東部の阿寺断層に適用し、200m程度の範囲に短い割れ目の密度が増加し、ダメージゾーンが形成されていると評価している。さらに、断層の近傍では、母岩の主成分元素のうちNa, K, Siなどの減少が見られることや酸化鉱物が見られることから熱水変質と天水の循環が生じていたことを示唆している。

地球物理学的手法を適用した事例として、麻植ほか(2007)は、電磁探査MT法で断層深部の比抵抗のイメージングにより、ダメージゾーンの広がり进行评估している。

概要調査の段階以降の地表調査、ボーリング調査、地下調査施設における調査において、これらの手法はダメージゾーンの判定や割れ目の形成履歴の解析を通じて地質環境特性(岩体中の割れ目の状態や分布特性、水理学的な影響範囲など)の評価に適用可能と考えている。

(iii) 地質断層の再活動性の評価

東北日本弧では、新第三紀中新世に形成された正断層帯が新第三紀鮮新世～第四紀の広域的なテクトニクスの変化により逆断層活動へと変化しているとされ(佐藤, 1996; Kato et al., 2006), 近年発生した被害地震である2003年宮城県北部地震や2008年岩手・宮城内陸地震などは、地質断層の再活動によることが示されている(Kato et al., 2004; 遅沢, 2009など)。また、山崎(2006)によれば、南関東では基盤に大きな変位を与える中新世に形成された正断層(基盤断層)のうち、長津田付近から東北東方向に推定される基盤断層が、鮮新世末頃に再活動を開始したが、前期更新世末には活動を停止したことが示されている。一方、北西走向の立川断層は反射断面や変位速度などによる考察から、中期更新世に逆断層として再活動をはじめ、現在も継続しているとしている。このような基盤断層の再活動の時期が顕著に異なる原因について、山崎(2006)は伊豆半島の衝突による応力場の局所的な変化によると推定している。梅田ほか(2010)では、活断層の多くが地質断層の分布と整合的であり、既存の地質断層が応力場の変化に伴い再活動したことを指摘している。以上のことから、活断層以外では規模の大きな地質断層を対象に再活動性を検討していくことが重要であると考えられる。

山田・松岡(2004)は、既存断層の再活動の評価について、既存断層面の再活動ポテンシャルを検討することにより可能であるとしている。ここでの三次元的な解析では、最大圧縮主応力軸方向と断層面の走向方向が30°程度にあるとき、最も再活動しやすいと述べている。

このように、断層の再活動に関する知見は蓄積されているものの、その評価手法は確立されたとは言いがたく、概要調査地区内で検出された活断層ではない断層の遠い将来における再活動については、不確実性が大きい。このため、5.3に述べたように、再活動の可能性を安全評価上のシナリオとして考慮し、ここに紹介した研究事例を安全評価シナリオ構築の参考とする。

(iv) 断層活動に関する確率論的評価

国際テクトニクス会議での日本の地震・断層活動評価に関する議論(Chapman et al., 2009a)に基づき、決定論的な評価を補足するための手法として、GPS、地震、地表変位などのデータを活用した断層活動の確率論的な評価手法が開発された(Chapman et al., 2009b, 2009c, 2009d)。ここでは、過去数万年の地表変位データ(活断層、活褶曲、隆起・沈降)、数10年間のGPSデータ、約400年間の歴史地震データからそれぞれの歪速度モデルを作成し、パラメータの幅や概念モデルの不確実

性を考慮したロジックツリーを構築し、それに基づくモンテカルロ・シミュレーションを行うことにより、確率論的な歪速度分布図を作成し評価を行っている（図 5.4.1-3, 図 5.4.1-7）。

また、防災の観点からは、数 10 年程度の予測として地震ハザード解析をもとにした地震動の発生確率値が示されている（地震調査研究推進本部, 2010）。同様な地震のハザードマップはニュージーランドでも作成されている（Stirling et al., 2002）。

サイト調査・評価の各段階において、確率論的手法による評価結果は、用いるデータの精度を考慮した上で、決定論的手法による評価の参考情報として利用することができる。また、火山・火成活動に関する手法と同様に、限られた情報しか得られない場合や、より小さなスケールへの適用性、そして確率論的評価の結果をどのように活用するか、などの検討課題が残されている。

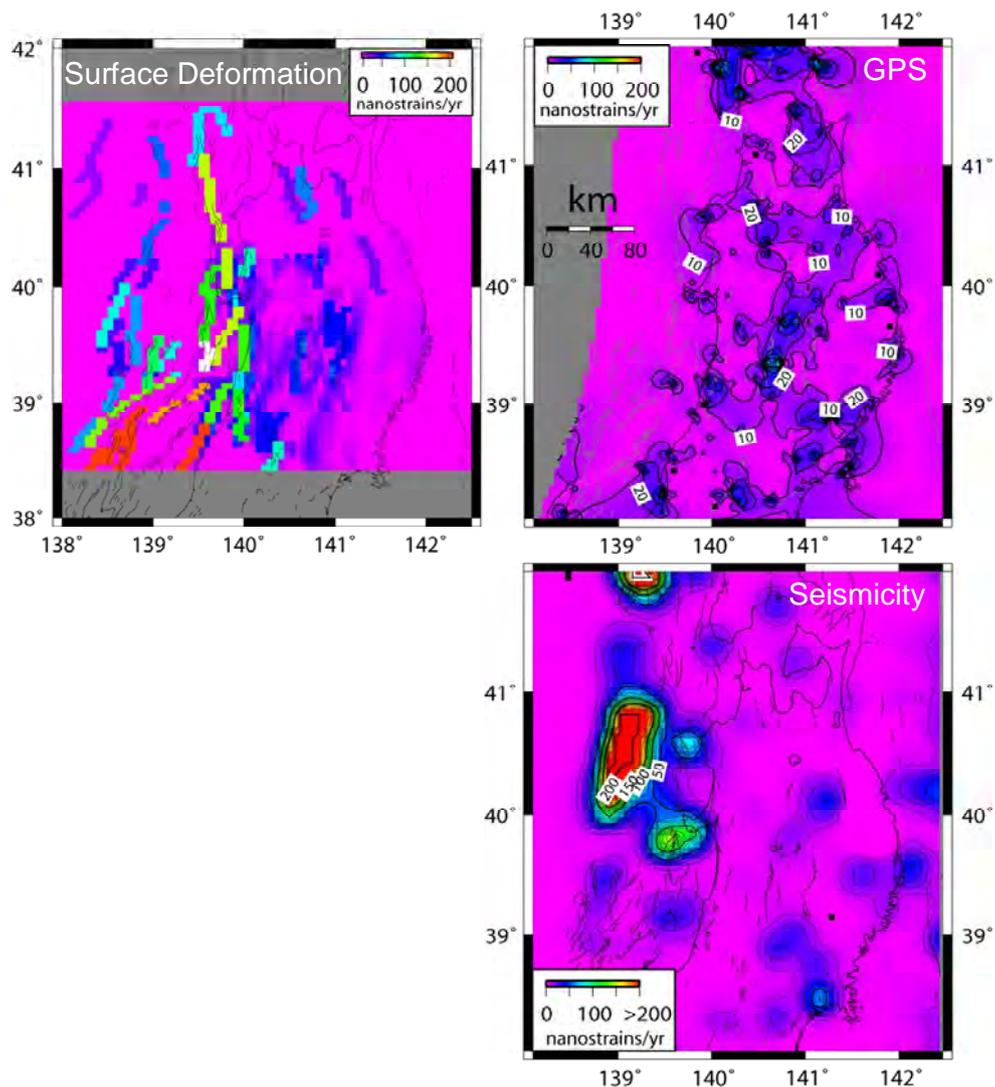


図 5.4.1-7 東北地方のケーススタディにおける確率論的な歪速度分布図の例
 (Chapman et al., 2009c を編集)

地表変形（断層変位と傾動）（左上）、GPS（右上）、歴史地震（右下）の文献情報に基づくそれぞれのロジックツリーをモンテカルロ・サンプリングすることにより得られる、5km 四方の領域の「最も生じる可能性の高い歪速度」の分布。歪速度の単位はナノストレイン/年。例えば、10 万年間に 5km の区間が 2m 変位した場合の歪速度は、4 ナノストレイン/年に相当する。

(3) 隆起・侵食にかかわる調査・評価技術

隆起・侵食については、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までに、段丘などを指標とした過去の隆起量、侵食量を評価する手法の整備が行われた。全国の隆起・沈降速度の概略的な分布が把握され、各地の侵食速度については、面的な侵食と線的な侵食（下刻）に分けて検討が行われた。面的な侵食については地形の起伏状態と相関が大きいことを利用して全国の分布図が作成され、線的な侵食については代表的な河川を例として侵食の規模やプロセスが検討された。第2次取りまとめ（JNC, 1999b）では、内陸部の隆起・侵食量の評価手法の信頼性向上、海水準変動を含めた将来の地形変化予測手法の開発が課題として挙げられていた。

隆起・侵食、気候・海水準変動に関する基本的な調査・評価手法については、第2次取りまとめ以降、情報整備がなされ、さらに、事例研究などを通じて、隆起・沈降量調査・評価、侵食量・侵食速度調査・評価、気候・海水準変動の復元などの手法の改良、高度化、体系化が図られている。後述するように、河成段丘の対比・編年の信頼性の向上に伴い、過去10万年間程度の内陸部の隆起量とその不確実性を評価することが可能となり、活断層の活動性評価にも応用できる可能性が示された。将来の地形変化予測では、過去の侵食履歴に基づき、気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法や拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発が進められ、長期的な地下水流動解析への情報提供が行われている。表 5.4.1-5 に、以上の項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

(i) 情報整備

全国規模の情報として、日本の海成段丘アトラス（小池・町田, 2001）、最近約10万年間の全国の隆起・沈降量分布図（NUMO, 2004）、最近約10万年間の隆起速度分布図（藤原ほか, 2005a；地質環境の長期安定性研究委員会, 2011）がある。藤原ほか（2005a）は、わが国に10万年間の隆起の総量が300mを超えない地域が広く分布していることが示した。また、侵食に関連する情報として、200万分の1日本列島の地すべり地形分布図（藤原ほか, 2004）が整備された。

表 5.4.1-5 隆起・侵食（気候・海水準変動含む）にかかわる調査・評価技術

項目と内容	概要	段階			文献	
		文献調査	概要調査	精密調査		
情報整備	全国規模の情報として、日本の海成段丘アトラス ¹⁾ 、最近約10万年間の全国の隆起・沈降量分布図 ²⁾ 、最近約10万年間の隆起速度分布図 ³⁾ 、200万分の1日本列島の地すべり地形分布図 ⁴⁾ が整備された。	○			1)小池・町田(2001) 2)NUMO(2004) 3)藤原ほか(2005a) 4)藤原ほか(2004),地質環境の長期安定性研究委員会(2011)	
隆起・沈降量の調査・評価	段丘対比・編年	年代測定データの誤解釈を避けるため、地形層序・地質層序・年代情報のバランスを重視した総合的な段丘対比・編年の考え方が示され ⁵⁾ 、詳細な火山灰分析手法 ⁶⁾ を使って実証された ⁷⁾ 。これらを支える技術として、数値標高モデル(DEM)を用いた段丘面の定量化手法とその段丘対比への応用 ⁸⁾ 、河成段丘を構成する被覆層と段丘礫層の風化指標の見直しが行われた ⁹⁾ 。これらにより、内陸部の隆起量評価に用いる海洋酸素同位体ステージ6の後期(14万年前頃)に形成された河成段丘の同定の信頼性が向上した。	○	○	5)幡谷(2005,2006a);幡谷ほか(2005) 6)古澤(2004) 7)幡谷ほか(2006) 8)山本ほか(2008) 9)濱田・幡谷(2009,2011)	
	河成段丘を用いた内陸部の隆起量評価	河成段丘を用いた内陸部の隆起量評価の適用性を取りまとめ、誤差要因が整理された ¹⁰⁾ 。また、活断層の落差と段丘の比高から求められる断層両側の隆起量差とが釣り合うことから、河成段丘を用いた隆起量の見積りの妥当性が示された ¹¹⁾ 。	○	○	10)田力・池田(2005) 11)幡谷(2006b)	
	堆積物による隆起・沈降運動の復元	年代が明らかな地層の堆積時の深度と現在の分布高度と海水準を比較することにより、過去から現在までの隆起・沈降運動を把握する手法 ¹²⁾ 、シーケンス堆積相解析手法を用いて古地理、内陸盆地の発達過程を解明する手法 ¹³⁾ が示された。		○	12)白井・阿部(2001) 13)守屋ほか(2008)	
侵食量・侵食速度の調査・評価	地形変化の予測 地形変化モデル	新旧海成段丘面上の侵食地形の比較から過去の侵食履歴・侵食量を見積り、これと気候・海水準変動を組み合わせた地形変化予測手法 ¹⁴⁾ 、拡散方程式による地形変化シミュレーションによる地形変化予測手法 ¹⁵⁾¹⁶⁾ の開発が行われている。また、氷期-間氷期の1周期の間に形成される海成段丘面上の開析谷の深さとその体積をDEMを使って求め、これらから下刻速度と段丘全体の平均侵食速度を求める手法 ¹⁷⁾ が提案された。	○	○	14)Sasaki et al.(2009) 15)JNC(2005a) 16)三箇・安江(2008) 17)藤原ほか(2005b)	
	年代測定手法を応用した長期的侵食(削剥)量の評価	鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて、年代測定手法を応用し、数100万年オーダーの地質体の上昇(隆起)、削剥速度の評価を行う手法 ¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾ 、鉱物・有機物の熱による変化(シリカ鉱物相転移など)と堆積物の埋積深度、年代、埋積時の地温勾配の推定などにより堆積層の隆起、削剥量を推定する手法 ²¹⁾ が開発された。		○	○	18)川上ほか(2006) 19)末岡ほか(2010) 20)Yamada and Tagami(2008) 21)JNC(2005a);石井ほか(2008)
	宇宙線生成核種を用いた侵食速度測定	地表物質と宇宙線が反応することにより生成される原位置宇宙線生成核種とその核種の年間生成量から、露出していた期間や侵食速度を推定する手法 ²²⁾²³⁾²⁴⁾ の開発が進められている。		○		22)若狭ほか(2004,2008) 23)松四ほか(2007) 24)Matsushi et al.(2006)
気候・海水準変動の復元	段丘の風成層の解析 ²⁵⁾ 、内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析 ²⁶⁾ 、花粉分析 ²⁷⁾ により、地域的な気候変動の解析や植生変遷の復元が進められている。		○	○	25)Kimura et al.(2001) 26)佐々木ほか(2006) 27)守田ほか(2006)	

○：主な適用段階

(ii) 隆起・沈降量調査・評価

サイトの隆起・沈降特性を的確に把握するためには、海岸部と内陸部にわたる隆起・沈降量（速度）分布の把握が必要である。海岸部の隆起量については、海成段丘を使った手法により過去 10 万年間の隆起速度分布が日本全国網羅的に取りまとめられた（小池・町田，2001）のに対し、内陸部の研究が遅れていたため、その解決に向けた検討が進められた。また、地形学的手法では見積りが難しい 10 万年よりも長期の隆起・沈降量評価に向けた検討も進められた。

① 河成段丘を用いた内陸部の隆起量調査・評価

過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量評価については、河成段丘を用いる手法が提案されていたが（吉山・柳田，1995）、河成段丘の対比・編年の信頼性を確保することと、隆起量の指標となる河成段丘の比高が隆起量をどの程度正しく反映しているかを示すこと、という信頼性向上にかかわる二つの課題があった。前者については、地形層序・地質層序・年代データのバランスを重視した段丘対比・編年手法の検討が進められ、河成段丘の対比・編年の信頼性が向上した（幡谷，2005，2006a；幡谷ほか，2005，2006；幡谷・濱田，2009；山本ほか，2008；濱田・幡谷，2009，2011）。後者に対しては、隆起量の指標となる河成段丘の比高の信頼性について適用性の取りまとめと誤差要因の整理や、断層変位との比較による妥当性の検証がなされた（田力・池田，2005；幡谷，2006b；Hataya et al.，2009：図 5.4.1-8）。これらの研究を通じ、段丘を指標とした隆起量評価の不確実性の所在が整理され、誤差はやや大きい場合があるものの、不確実性を考慮した評価ができるようになった。

これらの手法は、文献調査では既存データによる概略的な評価、概要調査では詳細なデータによる評価が可能であり、対象地域における隆起量とともに、地殻変動の把握に向けた情報取得のため、各段階で適用する。

② 堆積物による隆起・沈降運動の復元

2000 年以前には、藤原ほか（1997）、下山ほか（1999）といった、海洋酸素同位体ステージ 5e に堆積した海成層から地殻変動を復元した検討事例があった。これに対し、2001 年以降には、より長期の変動が復元されるようになった。

例えば、白井・阿部（2001）は、堆積層中の基準面を設定し、その上位の各地層の形成年代および汎世界的海水準から水深と基準面までの層厚を差し引くことで、現在の海水準に対する基準面の高度変化（隆起・沈降）を把握する手法を提案し、40 万年程度の地殻変動の解析を行っている。また、守屋ほか（2008）は、新庄盆地の鮮新統の堆積層解析から堆積シーケンスの区分を行い、フィッシュトラック年代測定と合わせた構造発達史を示している。

これらの手法は、基本的には、地層の堆積当時の深度と現在の分布標高あるいは深度との比較から隆起・沈降量を見積るという基本的な原理に基づくものである。サイト調査・評価においては、堆積深度の見積り、堆積年代などに含まれる不確実性に留意し活用していく。

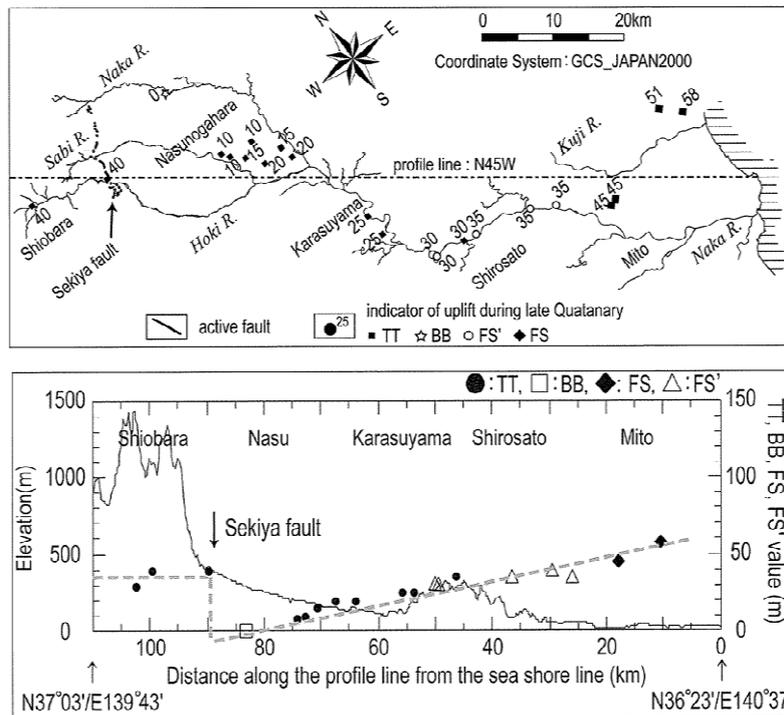


図 5.4.1-8 河成段丘を用いた内陸部の隆起量の調査・評価事例
(出典：Hataya et al., 2009)

上：那珂川流域の河成段丘の調査位置と用いた手法。下：河成段丘の詳細な対比・編年に基づく第四紀後期の隆起量のプロットと地形断面図。TT, BB, FS, FS' は吉山・柳田 (1995) により定義された過去 10 万年程度の隆起量の算出に用いた手法。活断層の南東側の地域の傾動運動が明瞭に認められる。

(iii) 侵食量・侵食速度の調査・評価

侵食量については、ダムの堆砂量データや高度分散量により評価する方法に基づいて全国規模の侵食に関するマップが整備されている (Yoshikawa, 1974; 藤原ほか, 1999 など)。しかし、これら侵食量の見積りの根拠となったデータの取得期間は短い。このため、近年は、より長期の地形変化予測手法、地形変化 (侵食量) の直接測定にかかわる検討が進められている。

① 地形変化の予測, 地形変化モデルの構築

地形変化の予測手法としては、過去の侵食履歴に基づき、気候・海水準変動も考慮した地形変化予測手法 (Sasaki et al., 2009) や、DEM を利用した海成段丘の開析谷の体積から侵食速度を求める手法が提案された (藤原ほか, 2005b)。内陸の侵食量評価では、大河川の中～上流域では 1 サイクルの氷期・間氷期ごとに下刻量と隆起量がほぼつりあい、隆起量がおおむね長期的な下刻速度となることが示された (高木ほか, 2000)。気候段丘モデル (貝塚, 1977) も含め、これらの研究成果により、内陸部も含めた考え得る最大の下刻量の見積りが可能となった。

一方、開発途上の研究開発としては、拡散方程式による地形変化シミュレーション技術の開発がある (JNC, 2005a; 三箇・安江, 2008 など)。これらの研究開発上の課題としては、現実に即したパラメータの設定、河川の側方侵食、河川の凹形度、地質分布を含めたプログラムの開発、沿岸部を取り込んだシミュレーションの実行などが挙げられる。これらの手法は、地形変化の検証が大きな課題となっているが、評価の保守性が確保できれば、これらの結果をもとにした地質環境の評価

に利用することも可能であると考えられる。従って、研究開発の進行状況を鑑み、その保守性を確認し、適切に取り入れていく。

② 年代測定手法などを応用した長期的な侵食（削剥）量の評価

熱年代学的手法による長期的な変動履歴の解析手法として、鉱物の閉鎖温度と埋没深度の関係に基づいて、フィッシュントラック法・(U-Th)/He法などの年代測定手法を応用した数100万年オーダーの地質体の上昇（隆起）、削剥速度の評価（川上ほか、2006；Yamada and Tagami, 2008；末岡ほか、2010）が行われている。また、鉱物・有機物の熱による変化（シリカ鉱物相転移など）と堆積物の埋積深度、年代、埋積時の地温勾配の推定などで堆積層の隆起、削剥量を比較的長い地質時代を対象に評価する手法の開発が進められている（JNC, 2005a；高橋ほか、2005；石井ほか、2008）。

また、現在、宇宙線生成核種を用いた年代測定手法を応用した侵食速度の推定手法の開発が進められている（若狭ほか、2004；松四ほか、2007；Mahara et al., 2010 など）。これは、地表が宇宙線の照射を受けた期間に、地表物質と宇宙線が反応することにより生成され、地表物質中に蓄積された、原位置宇宙線生成核種量とその核種の年間生成量から、露出していた時間や侵食速度を測定する手法である。この手法を適用し、中期更新世の海成砂岩層の侵食速度の推定（Matsushi et al., 2006）、河床の露出年代から下刻速度を推定（若狭ほか、2008）している事例がある。

熱年代学的手法や鉱物・有機物の熱による変化を利用した手法は、過去の地温勾配を仮定する必要があるなど不確定要素が含まれ、分解能の高い評価が困難な場合もあるが、数100万年の長期の概略的な評価を可能とした。また、宇宙線生成核種を利用した侵食速度測定技術は、地形変化モデルの検証への適用が期待されている。概要調査の段階以降においては、これらの適用事例を参考にしつつ、最新の情報を取り入れて必要に応じて活用していく。

(iv) 気候・海水準変動の復元

気候・海水準変動の解析については、過去数10万年間の地球規模での氷期-間氷期サイクルが存在することに対する知見は整理されているが（EPICA community members, 2004 など）、地域的な規模の変動に対する解析手法の整備と知見の蓄積が必要とされている。

近年の研究としては、段丘の風成層の解析（Kimura et al., 2001）、内陸盆地で掘削されたコアの堆積物解析（佐々木ほか、2006）、花粉分析（守田ほか、2006）などの研究により、地域の気候変動の解析や植生変遷の復元が進められてきた。

ここに示した気候・海水準変動の解析手法は、細粒堆積物の分布が必要条件であり、対象地域にそのような地層が分布する場合には適用できる。

5.4.1.2 地質環境特性にかかわる調査・評価技術

地質環境特性にかかわる分野では、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）までには、特に地層処分を目的として地下深部の地下水流動や岩盤中での物質の移動などにかかわる評価に必要なデータを取得する機器や手法の開発、サイト調査の基礎になる要素技術（物理探査など）について適用性の確認や基盤技術の整備が行われてきた。それに続く第2次取りまとめ以降の技術開発の目標には、幌延および瑞浪の深地層の研究施設を利用して、手法の高度化と体系化を図りつつ、わが国の代表的な地質環境である堆積岩と結晶質岩における地質環境の特性のばらつきに関する知見の蓄積が挙げられている。これに基づき、第2次取りまとめ以降の深地層の研究施設計画では、地質・地質構造に関するデータ取得から解釈・モデル構築までの一連の調査・評価の調査研究の成果を用いて、文献に基づく調査段階から地上からの調査段階（精密調査の前半までに相当）までを対象とした手法の高度化ならびに統合的調査評価システムが開発された。また、沿岸域を対象にした調査評価手法の整備では、沿岸域の断層評価手法、塩淡水界面形状把握、海底地下水湧出探査技術、ボーリング技術、物理探査技術の高度化調査などが行われてきた。

ここでは、地質環境特性にかかわる項目について、地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性（力学特性、熱特性など）、物質移行特性、そのほかの特性、地質環境、周辺環境、放射線の状況などを対象としたモニタリング技術に区分して記述する。表 5.4.1-6～表 5.4.1-8 に、これらの項目ごとの調査・評価技術の概要と、その技術を適用できる調査段階（文献調査、概要調査、精密調査）、ならびに関連する文献を示す。

なお、ここに示した調査手法は、既存の手法を調査・評価対象に応じて改良したものや解析手法の高度化が行われたものである。NUMO は調査地域の地質環境特性に応じて、概要調査の段階以降、実績が豊富な既存の調査・評価手法はもとより、これらの高度化手法も選択肢として適用する。得られた結果は地質環境モデルの構築に反映する。

表 5.4.1-6 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (1/3)

項目と内容		概要	段階			文献	
			文献調査	概要調査	精密調査		
地質・地質構造	物理探査	反射法地震探査（海域では音波探査）においては、二次元手法の処理法の進展 ¹⁾ と三次元手法による資源調査 ²⁾ 、海域での地質構造解析、活断層、堆積物、地形調査 ^{3) 4) 5)} や、陸域での地質地盤調査（落差 5m 程度の小規模断層）分野 ⁶⁾ での適用が進んでいる。また、浅海域の地質構造を精度よく把握するためのマルチチャンネル音波探査システム ⁷⁾ が開発されている。音波探査を補完する水深 200m～波打ち際に対応した海底電磁探査システムの開発 ⁸⁾ や、陸域から海域に対応した手法の整備と三次元解析手法の開発 ⁹⁾ が進められている。MT 法の解析に必要な高品質データの取得に重要なスタッキング法の開発 ¹⁰⁾ が行われている。		○	○	1) Yilmaz (2001) 2) 芦田 (2005) 3) 松岡 (2007) 4) 佐伯ほか (2006) 5) 朴ほか (2008) 6) 佐々木ほか (2008) 7) 井上ほか (2007) 8) 吉村ほか (2006a) 9) 吉村ほか (2006b) 10) 根木ほか (2007a, 2007b)	
	ボーリング掘削	掘削方位や傾斜を制御しコア採取や孔内調査を行うことができるシステムとして開発され、沿岸域などでの掘削にも対応している ^{11), 12)} 。		○	○	11) 木方ほか (2006) 12) 木方ほか (2009)	
	結晶質岩中の亀裂解析	花崗岩中のボーリング孔の亀裂と基盤岩地形・断層との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法 ¹³⁾ 、異なるスケール間の亀裂分布の法則性・相互関係を考慮可能なマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術 ¹⁴⁾ が開発されている。		○	○	13) 栗原ほか (2008) 14) 小池ほか (2008)	
	堆積岩中の亀裂解析 (三次元構造)	水理特性解析の基礎となる断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法について異なるスケールで開発 ¹⁵⁾ されている。ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法 ¹⁶⁾ 、断層の成長メカニズムを考慮した岩盤力学的応力計算に基づく高透水構造の空間分布の調査・解析手法 ¹⁷⁾ 、シリカ鉱物の続成作用に基づく背斜構造の成長開始時期の調査・解析手法 ¹⁸⁾ なども整えられている。		○	○	15) 石井・福島 (2006) ; 石井ほか (2006) 16) 舟木ほか (2009) 17) Ishii et al. (2010) 18) 石井ほか (2008)	
地下水流動特性	水理特性	深部岩盤の水理特性の把握	深部岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法 ¹⁹⁾ の開発で透水性などの水理パラメータを適切に解析するための一連の手法が開発され、堆積岩中の溶存ガスを含む地下水条件に対応するための試験装置が考案 ²⁰⁾ されている。		○	○	19) 竹内ほか (2007) 20) 竹内・平田 (2003)
		透水性割れ目・水みちの把握	高感度孔内流速検層により孔井内の湧水個所と逸水個所を評価する手法 ²¹⁾ 、電気伝導度検層により透水性割れ目（水みち割れ目）を抽出、推定する方法 ²²⁾ 、光ファイバ温度検層により流出・流入個所を流速の変化する個所として捉える水みち分布モデルの推定手法 ²³⁾ などが開発された。		○	○	21) 関ほか (2005) 22) 松岡ほか (2007) 23) 末永ほか (2000)
	地下水流向・流速の把握	固体トレーサの移動軌跡を超音波センサ追跡することによって、地下深部の極低流速に対応した 10^{-9} m/s 程度の流向・流速の測定を可能とする計測方法 ²⁴⁾ が開発された。		○	○	24) 戸井田ほか (2007a, 2007b)	

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-7 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (2/3)

項目と内容		概要	段階			文献	
			文献調査	概要調査	精密調査		
地下水流動特性	水理地質構造モデル・ 地下水流動解析	結晶質岩系	岩盤中の地下水流動を評価するための数値モデルの作成から地下水流動解析までを統合した GEOMASS システムの開発 ²⁵⁾ が行われている。		○	○	25) 稲葉・三枝 (2003)
		堆積岩系	地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化とガスが溶存する塩水系地下水の存在する堆積岩地域での解析 ²⁶⁾ 、地層間隙内の地下水の結合度合い (pF) に応じた地下水の安定性のモデル化 ²⁷⁾ などを進めている。		○	○	26) 操上ほか (2008) 27) 産総研 (2010c)
		長期変遷のモデル化	堆積岩が分布する沿岸域を対象として気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として考慮した、将来の長期間の地下水流動評価 ²⁷⁾ 、古地形分布モデルを用いた過去から現在までの地下水流動解析 ^{28), 29), 30), 31)} が行われている。		○	○	28) 操上ほか (2007) 29) 尾上ほか (2009) 30) 中田・長谷川 (2010) 31) 長谷川ほか (2010)
地下水化学特性	水質, 年代評価	地下水の採水, 分析技術に関する検討事例 ³²⁾ 、地下深部に分布する化石海水に関して、地下の岩盤中で生成される ^{36)Cl} 地下水年代評価と安定同位体データをもとにした化石海水の同定手法を提案 ³³⁾ している。		○	○	32) 岩月ほか (2009) 33) 馬原ほか (2006)	
	地下水化学モデル	経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析 (Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis) ³⁴⁾ 、岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め、地下水流動との関係を考察した事例 ³⁵⁾ がある。			○	34) 阿島ほか (2006) 35) 伊藤ほか (2010a)	
岩盤特性	力学特性評価	一軸圧縮強度, RQD, 割れ目の状態の3要素を指標とする岩盤評価方法 ^{36), 37)} が示された。地圧測定では、軟岩に適したオーバーコアリング法による応力測定システムの開発 ³⁸⁾ 、深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発 ³⁹⁾ が行われている。 花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸圧縮強度の違いについての考察 ⁴⁰⁾ 、珪質岩の力学的な特徴を評価のため力学特性と岩盤特性との相関の深度方向での整理 ⁴¹⁾ が行われている。また、接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討 ⁴²⁾ が行われている。瑞浪超深地層研究所では、地表からボーリング調査を行い、その結果を用いて岩盤の力学的概念モデルを構築している ⁴³⁾ 。		○	○	36) 澤田ほか (2009) 37) 澤田ほか (2011) 38) Ghimire et al. (2004a) 39) 坂口ほか (2006) など 40) 藤井ほか (2005) 41) 真田ほか (2009) 42) 藤井ほか (2006) 43) 松井ほか (2000)	
	熱特性評価	高温低温下における岩盤物性 (物理, 力学, 透水, 熱) について、既往文献調査をもとにデータベース化を行い ⁴⁴⁾ 。高温環境下における堆積軟岩の力学特性 (三軸圧縮強度, クリープ特性の温度依存性) ⁴⁵⁾ が示されている。		○	○	44) 土木学会 (2006b) 45) 岡田 (2005, 2006)	
	難工事評価	既存情報の整理より、事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針 ⁴⁶⁾ が提示され、また、概要調査段階までの情報で難工事遭遇可能性を評価する手法 ⁴⁷⁾ が示された。断層・破砕帯部の立坑施工時に発生する蓋然性の高い崩落形態である高抜けと覆工破損に対してより安全な工法 ⁴⁸⁾ が提示されている。		○	○	46) 高橋ほか (2004) 47) 新ほか (2011a, 2011b) 48) 櫻井ほか (2006)	

○ : 主な適用段階

表 5.4.1-8 地質環境特性にかかわる調査・評価技術 (3/3)

項目と内容	概要	段階			文献
		文献調査	概要調査	精密調査	
物質移行特性	熱力学・収着・拡散データベース ⁵⁰⁾ が整備されている。結晶質岩中の透水性割れ目における放射性物質の移行・遅延を規制するプロセスや場の構造などの把握、原位置試験手法やモデル化手法などの開発 ^{51) . 52) . 53)} が進められている。		○	○	50) JAEA (2005-2009) 51) JNC (2005b) 52) 三枝ほか (2007) 53) 太田ほか (2007)
そのほかの特性	泥火山噴出の起源となる流体は、深度 2km より深部から上昇し ⁵⁴⁾ 、流体の形成に粘土鉱物の脱水の寄与が大きく、生物起源有機物の熱分解で生成した炭化水素ガスを含むこと ⁵⁵⁾ 、また、外国の事例から泥火山の活動周期、噴出量についての知見 ⁵⁶⁾ が得られている。泥火山の地下構造や地表での形態・規模を測地または物理探査手法により推定する事例 ^{57) . 58)} が示されている。中新統の泥ダイヤピルについての知見から、形成メカニズムや規模に関する検討が行われている ⁵⁹⁾ 。		○		54) 井尻 (2009) 55) 新谷・田中 (2009) 56) 高橋ほか (2006) 57) 鈴木ほか (2009) 58) 田近ほか (2009) 59) 宮田ほか (2009)
	マスムーブメント	伊吹山の大规模崩壊によって形成された堰止湖堆積物の ¹⁴ C年代から崩壊の頻度を推定し、美濃帯で発生する可能性がある大规模崩壊の予測手法 ⁶⁰⁾ が示され、地震時の大规模地すべりの事例 ⁶¹⁾ が示されている。		○	60) 小嶋ほか (2006) 61) 大野ほか (2010)
モニタリング	瑞浪および幌延におけるボーリング孔を利用した地下水の水圧、水質の長期モニタリング ^{62) . 63)} 、JAEA 東海事業所では、人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進められている。このほかでは、データ伝送技術 ⁶⁴⁾ 、センサや計測手法に関する技術選択肢 (技術メニュー) の整備に関する開発が進められている ^{65) . 66)} 。		○	○	62) JNC (2005a) 63) 太田ほか (2007) 64) 高村ほか (2006) 65) 竹ヶ原ほか (2004) 66) 原環センター (2009a)

○ : 主な適用段階

(1) 地質・地質構造

地質・地質構造にかかわる調査・評価技術については、文献情報と地表踏査のデータに基づき岩盤中の特性のばらつき（岩相、地層の分布、割れ目帯）や不連続構造の三次元分布を把握するための手法や、物理探査とボーリング調査により地質・地質構造をモデル化するための技術が、おおむね整備されてきている。

物理探査技術の進展は、近年の電子技術やコンピュータ関連技術の発展に伴い、大量の情報を高精度で効率よく取得、解析できるようになったことに負うところが多く、特に解析技術の進展によって精度の高い地質構造の把握が可能となってきている。技術開発が行われている分野は、地球科学の研究分野、土木地質、資源開発関連などさまざまであるが、地層処分にも適用可能なものが多い。このうち、反射法地震探査は、層状構造を有する堆積岩分布地域では有効な手法であり、データ処理技術の進展、例えば重合前マイグレーション処理（Yilmaz, 2001）などの適用が広がり、断層構造など複雑な地質構造での解析精度が向上している（Schapper et al., 2009）。また、データ取得装置の多チャンネル化と併せて、二次元探査よりも探査結果の信頼性が高い三次元探査の適用も広がり、海域および陸域での資源探査（芦田, 2005）、詳細な堆積物や古地形情報、断層構造の三次元的解析（松岡, 2007；佐伯ほか, 2006；朴ほか, 2008）が行われている。例えば、佐々木ほか（2008）は、地質地盤調査の小規模断層調査において、落差約 5m の小規模断層を反射波の不連続構造から抽出しており、地下構造を正確に理解しやすく可視化する技術として利用されている。

沿岸浅海域を対象とした調査では、これまで地球科学研究分野や資源探査分野で広く用いられてきたマルチチャンネル音波探査システムが沿岸域の地震活動に伴う断層調査に適用され、能登半島地震の海底断層の調査（井上ほか, 2007）で使用されるなど、地質構造調査における使用実績が増えている。特にマルチチャンネル音波探査では、三次元探査の導入でデータの空白域がなくなったことに加えて、二次元探査では不確実性が大きかった断層分布について、取得データの時間スライス解析することで、数 10m 程度の空間分解能を有する三次元分布が把握できるようになり、断層の見落としが減少している。

自然の地磁気・地電流を用いる MT 法電磁探査では、鉄道や送電線などに起因する人工ノイズの影響を低減できる重み付けスタッキング法（根木ほか, 2007a, 2007b）が開発されて深部の地下構造の解析に用いられている。沿岸域においては、極浅海域や結晶質岩地域など、従来の音波探査が適用困難な環境における補完的調査手法として、浅海用電磁探査法が開発され（吉村ほか, 2006a）、既存の電磁探査法と併せて陸域から浅海域までの連続した調査手法が整備されている。データ解析技術では、解析結果の信頼性向上を目的とした三次元解析技術開発が進められ、結晶質岩中の断層構造探査、堆積岩地域の断層構造探査および地下深部に塩水系の地下水が分布する堆積岩地域における地質構造探査など、多様な地質環境における技術の適用性評価が行われている（吉村ほか, 2006b など）。

ボーリング掘削技術は、地下の情報を直接取得する手法として、ほとんどの地球科学分野で重要な調査技術として用いられている。資源探査（石油、地熱、鉱物資源など）では従来から使用されており、内陸や海域で現在も広く用いられている技術である。また、火山・深海掘削などの科学掘削においても雲仙火山科学掘削プロジェクトや統合国際深海掘削計画などに伴う技術開発が進められている。地層処分の分野では、沿岸海底下での調査が困難な地形・地質条件下で、掘削の方位や傾斜を自由に制御しコア採取・孔内調査を効率的に行うことを目的としたコントロールボーリング掘削・原位置調査技術システムの開発（木方ほか, 2006, 2009）が行われている。

地質・地質構造の不均質や不連続構造として、地層中の亀裂に関する情報を取得することは、岩盤の物理・力学特性、地下水流動特性の観点から重要な調査・評価項目である。結晶質岩中の亀裂に関する研究における進展として、ボーリング孔の亀裂データと断層や基盤岩地形との関連を考慮した空間的な亀裂密度分布推定手法（栗原ほか，2008）やマルチスケールでの亀裂分布のシミュレーション技術が開発（小池ほか，2008）されている。堆積岩中の亀裂分布解析としては、断層などの透水構造の三次元分布を把握する手法（石井ほか，2006；石井・福島，2006；Ishii et al., 2010）、ボーリング調査結果に基づく亀裂の特性解析手法と地質構造モデルの構築手法（舟木ほか，2009）などが開発されてきている。このような地質・地質構造を調査・評価する技術については、測定原理に基づく精度や適用限界、適用する地質環境を適切に判断し、また岩盤中の亀裂に関する研究成果を参考にしつつ、調査地域での使用環境も考慮して活用する。

(2) 地下水流動特性

岩盤の水理特性にかかわる調査・評価技術については、ボーリングコアやボーリング孔を利用した試験・検層に基づき、岩盤中の水みちとなる亀裂に対する評価手法はおおむね整備されている。ここでは、岩盤の水理特性や岩盤中の地下水の流向・流速の調査技術、また、水理地質構造のモデル化および地下水流動解析技術の現状について述べる。サイト選定のための調査・評価の各段階では、利用可能なデータの量や精度を考慮し、適切なツール（モデリングソフト、地下水流動解析コードなど）を利用した調査・評価を行う。なお、その際には、既往の解析事例を参考に、解析条件などの設定を行う。

(i) 水理特性の調査技術

ボーリング孔を利用した原位置水理試験は、従来から一般土木分野において、浅部の地盤を対象として適用されてきた技術であり、試験方法やデータの解析方法については、すでに規格化されている（地盤工学会，2004）。放射性廃棄物の地下施設は地下 300m 以深に設置するため、原位置水理試験のうち、深部岩盤に適用可能な水理試験方法を適用する。

深部岩盤を対象とした水理試験方法では、竹内ほか（2007）が、図 5.4.1-9 に示す試験装置を用いてパルス試験、スラグ試験、揚水試験および回復試験などの複数の非定常試験を連続的に行う手法（シーケンシャル水理試験手法）を開発している。この手法は、水理試験を相対的に短時間で終了できるパルス試験から開始し、リアルタイムで岩盤の透水性を算定しながら順次時間を要する試験を実施するものである。この手法による原位置水理試験の適用事例を図 5.4.1-10 に示す。この事例では、試験中にリアルタイムで圧力データとその時間微分プロットを確認し、これに基づいた水理パラメータの把握や試験終了の判断を行うことにより、深部岩盤での水理試験を効率的に実施できることを示している。このほか、堆積岩中において溶存ガスを含む地下水に対応した手法（竹内・平田，2003）も開発されている。また、高透水性の割れ目の分布と透水性を把握するための調査技術では、新しい検層技術として、ボーリング孔内の湧水個所や逸水個所を評価する高感度孔内流速検層（関ほか，2005）、ボーリング孔内の電気伝導度分布の経時変化から透水性割れ目を検出する電気伝導度検層（竹内ほか，2004；松岡ほか，2007；Takeuchi et al., 2008）、光ファイバを用いて深度ごとの経時的な温度変化を高精度に測定することで水みちを推定する光ファイバ温度検層（末永ほか，2000）などが開発されている。実際の調査においては、ボーリング孔内や地質の性状を勘案して適切な手法を選択する。

(ii) 地下水流向・流速の調査技術

ボーリング孔内において、岩盤中の地下水の流向、流速を計測する調査技術は、従来から浅部の一般土木調査の分野で適用されている。しかし、地下施設の設置深度では、一般土木調査で対象とする浅層の地下水流速と比べて極めて遅いため、極低流速場でも適用可能な計測技術が開発されている（斎藤ほか，2006；戸井田ほか，2007a, 2007b など）。このうち、戸井田ほか（2007a, 2007b）は、ボーリング孔内の一定区間をパッカーで仕切り、計測区間中に固体粒子トレーサを浮遊させて、その軌跡を1組の超音波センサで追跡し、固体粒子トレーサの流動軌跡から三次元的流向・流速を測定する技術を開発している。開発された測定装置は室内の性能試験により 10^{-9} m/s 程度の流向・流速を計測することが可能であることが示されており、概要調査において極めて低い流速場の調査・評価を行う場合には、本技術の適用についても検討する。

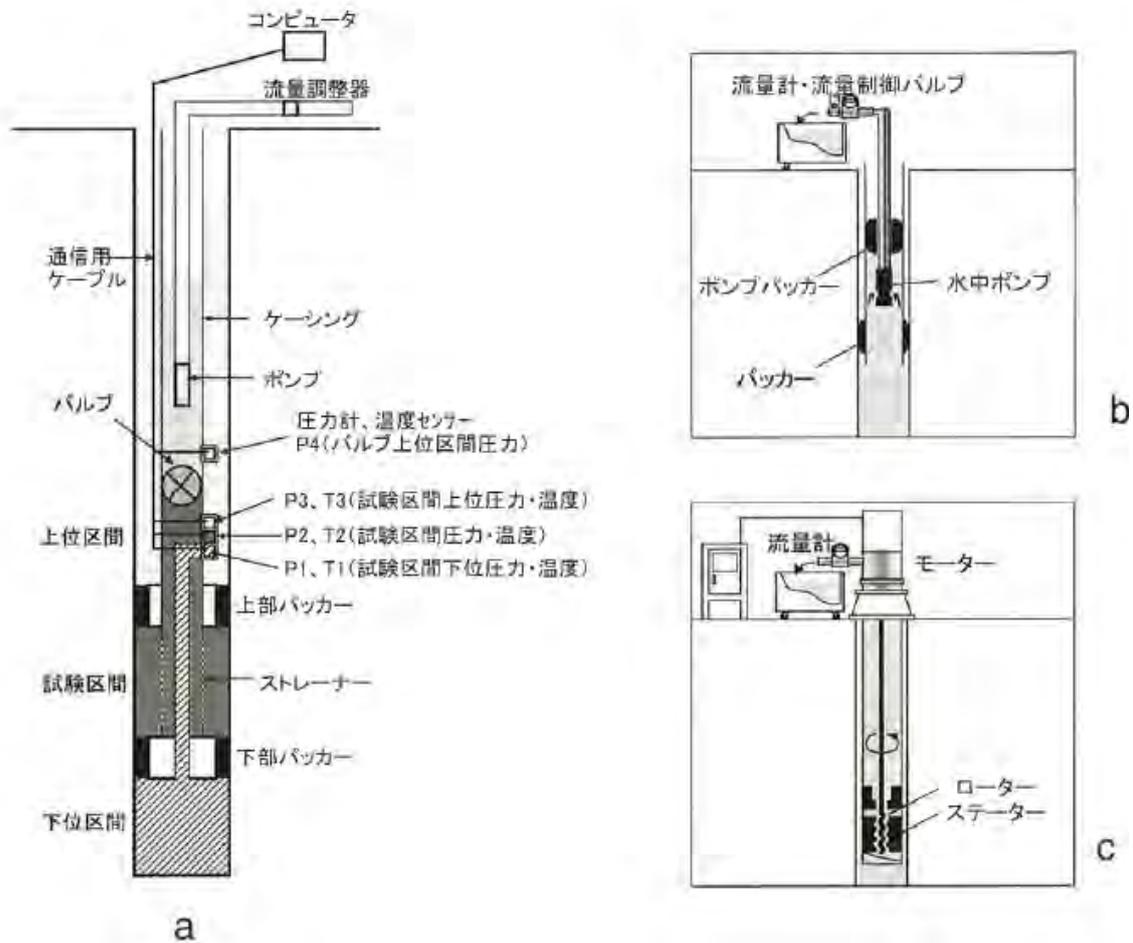
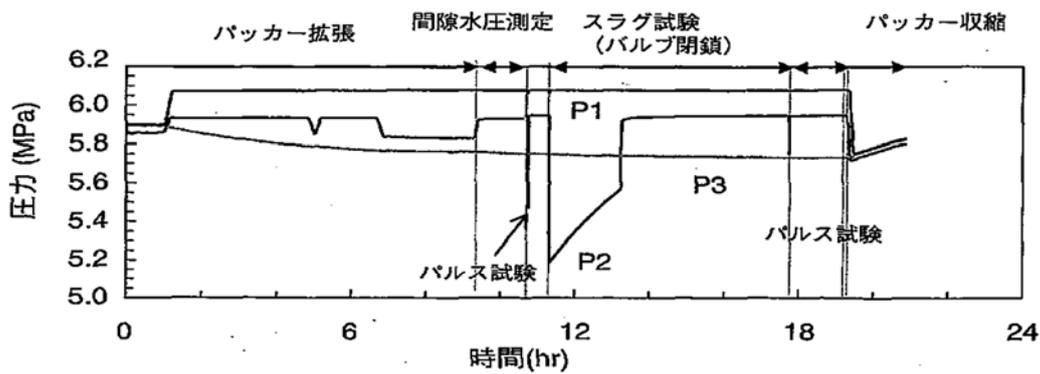


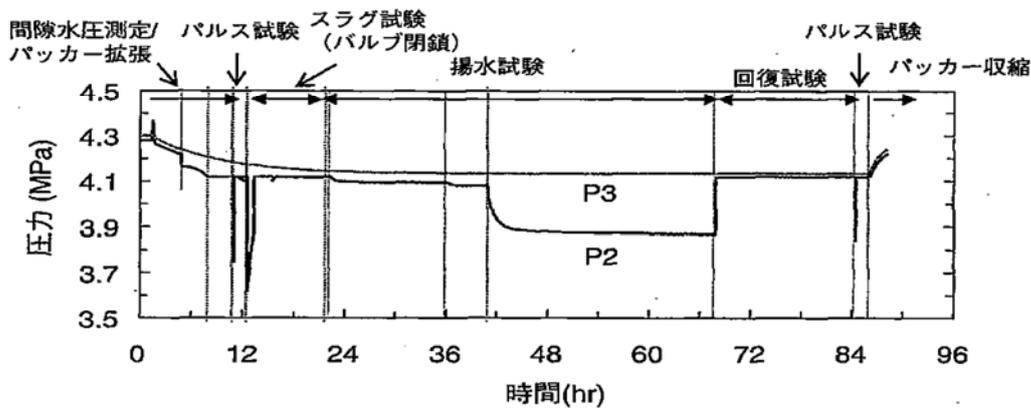
図 5.4.1-9 水理試験装置の概念図

(出典：竹内ほか，2007)

- a: 水理試験装置は、試験区間を形成するための上下のパッカー、試験区間の圧力 (P2) と温度 (T2) を測定するセンサ、および試験区間の圧力漏洩の有無や試験開始前の圧力の安定を確認するための試験区間上下の圧力・温度センサ (上側: P3, T3 下側: P1, T1)、地下水をくみ上げるためのポンプ、試験区間の圧力を制御するための開閉バルブなどで構成される。
- b: 揚水ポンプの上位にパッカーを接続し閉鎖系で揚水することにより、地下水をくみ上げる際の孔内貯留の影響を低減することができるポンプパッカー、
- c: 連続的に無脈動で定量性が高く、流量を制御しやすいキャビティポンプなどの装置が開発されている。



a



b

図5 シーケンシャル試験の例

a: 低透水性岩盤における例

b: 高透水性岩盤における例

Fig. 5 Example of sequential tests

a: Test for a low permeable rock

b: Test for a high permeable rock

図 5.4.1-10 シーケンシャル水理試験手法の適用例

(出典: 竹内ほか, 2007)

本手法では、相対的に短時間で終了できるパルス試験から開始し、リアルタイムで岩盤の透水性を算定しながらスラグ試験、揚水試験および回復試験などの時間を要する複数の非定常試験を連続的に行う。最初のパルス試験で低透水性と判断された場合 (a) はスラグ試験を中心に、高透水性と判断された場合 (b) は揚水試験を中心に試験を実施する。

(iii) 水理地質構造モデル化および地下水流動解析技術

処分施設の設置領域周辺の空間的な地下水流動状況は、地質環境の調査データに基づいて水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析を実施して評価する。ここでは、水理地質構造モデルの構築と地下水流動解析技術の現状について述べる。

① 結晶質岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

稲葉・三枝 (2003) は、各種地質データの解析を支援する Landmark 社製ソフトウェア群、地質構造モデルの構築および可視化を支援する EarthVision、水理地質構造モデルの作成と数値解析を行う Frac-Affinity を統合化した GEOMASS システムを開発した。このうち、Landmark 社製ソフトウェ

ア群は、地質データの統合管理、地質データの可視化、物理探査データの解析、衛星画像処理などを行う。EarthVision は、地質構造の複雑な幾何学形状の効率的なモデル化を行い、Frac-Affinity は、地質構造モデルに対して指定したパラメータを可視化することが可能である (図 5.4.1-11)。東濃地域の地下水流動解析に本システムを適用した結果では、水頭分布については、システムによる解析値と実測値に差が認められたが、水頭分布の傾向は一致したほか、これまでの地下水流動結果と整合した結果が得られ、GEOMASS システムは複雑な地質構造をモデル化・解析する場合や、複数のモデルを作成するような場合 (感度解析など) に有効であるとされている (稲葉・三枝, 2003)。NUMO は、これらの成果を参考に、サイトの地質環境の条件に適したモデル化および地下水流動解析の手法を選択し評価を行う。

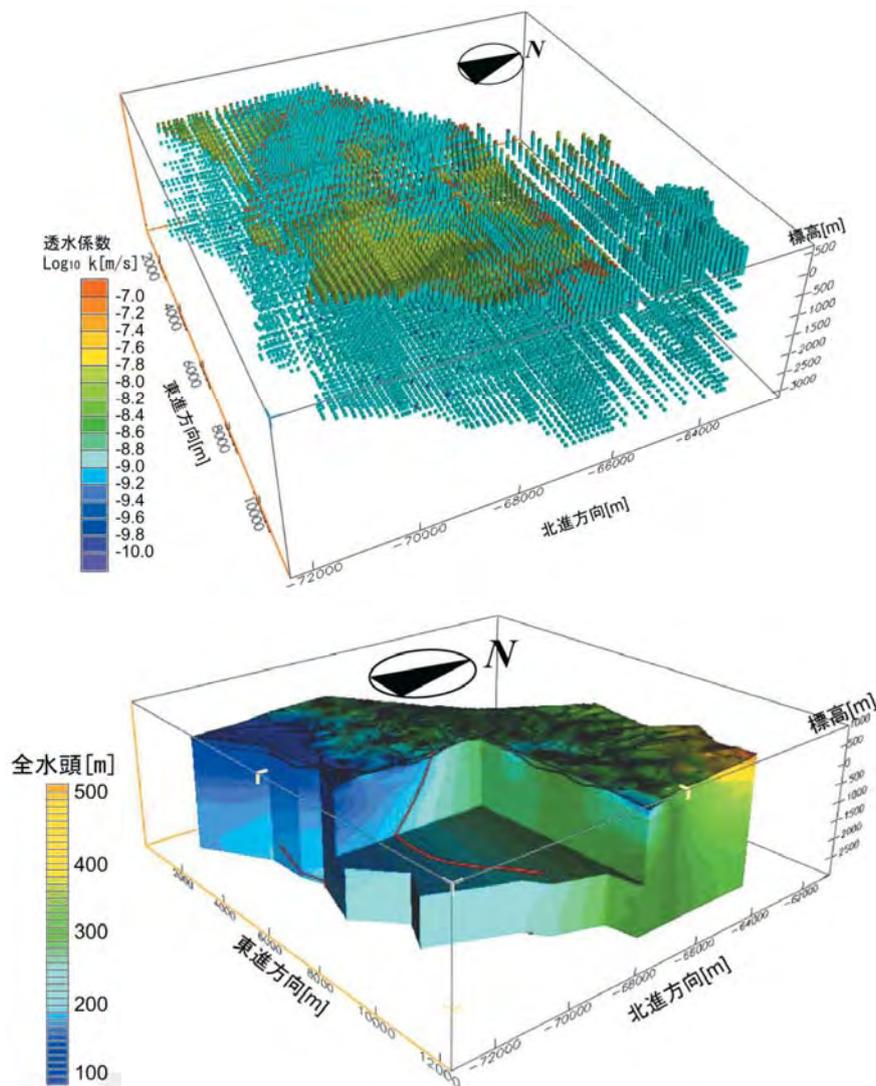


図 5.4.1-11 GEOMASS システムによる水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析の事例 (稲葉・三枝, 2003 を編集)

上 : Frac - Affinity による各格子の中心 (節点) とその点における透水係数の分布の表示。
 下 : EarthVision による地下水流動解析結果の可視化。

② 堆積岩系サイトにおける水理地質構造モデル化・地下水流動解析の事例

操上ほか(2008)は北海道幌延地域に分布する新第三紀堆積岩を対象とした地下水流動系の把握に関する事例研究を通じて、地下水流動解析を用いた地上からの調査の体系化、ガスが溶存する塩水系地下水が存在する堆積岩地域での調査のための技術開発の概要を取りまとめている。また、調査や解析の各々の要素を比較することで相互の妥当性を確認するプロセスを示している。

産総研では、地下水流動とその滞留時間、深部地化学環境に関する研究が実施されており、地層間隙内の地下水の結合度(pF)に応じた地下水の安定性に係る研究により、深部地下水環境の安定性がモデル化されつつある(産総研, 2010c)。

③ 地質環境の長期変遷の検討事例

操上ほか(2007)は、幌延周辺において堆積岩が分布する沿岸域を対象として、自然現象の長期変遷による地下水流動への影響に着目し、気候・海水準の長期的な変動を時間変動境界条件として設定して、12万年で変動する気候・海水準モデルを用いて、将来60万年間の地下水流動、物質移動の感度解析を行った。その結果、涵養量や海水準変化は地下水流動や塩分濃度の経時的な変化をもたらし、その影響の大きさは透水係数分布や着目する場所により異なるとしている。また、今井ほか(2009)は、断層活動、隆起・沈降・侵食、気候・海水準変動などの自然現象による地質環境の変遷が地下水流動に与える影響を連続的にモデル化することのできるシステムを考案した。さらに、そのシステムを用いて、幌延地域を対象として過去150万年間の地質構造発達に伴う応力状態の変化や堆積過程、氷期の涵養量の変化や地下水の塩分の密度差が地下水流動に与える影響について解析的な検討を行った。その結果、過剰間隙水圧の発生を理解するためには間隙率や有効応力の変化に応じた透水係数の設定が重要であること、氷期の涵養量の設定に伴う影響が丘陵部や沿岸域で認められること、密度差の影響は沿岸域の地下水流動に影響を与え地下深部での淡水の侵入を抑制することが示された(図 5.4.1-12)。

尾上ほか(2009)は、東濃地域において、地下水流動に影響を及ぼす可能性が考えられる長期的な地形変化に着目し、概略的な過去の古地理分布を推定して150万年前から現在までの地下水流動解析を実施し、これをもとにした地形変化による将来の地下水流動の変化を推定する方法論を示した(図 5.4.1-13)。地下水流動解析結果の妥当性については、既往の調査データと地下水流動解析結果を比較して検討し、概略的には妥当であるとしている。文献調査および概要調査では、これらの成果を参考にしつつ、地質環境特性の長期変遷について検討する。

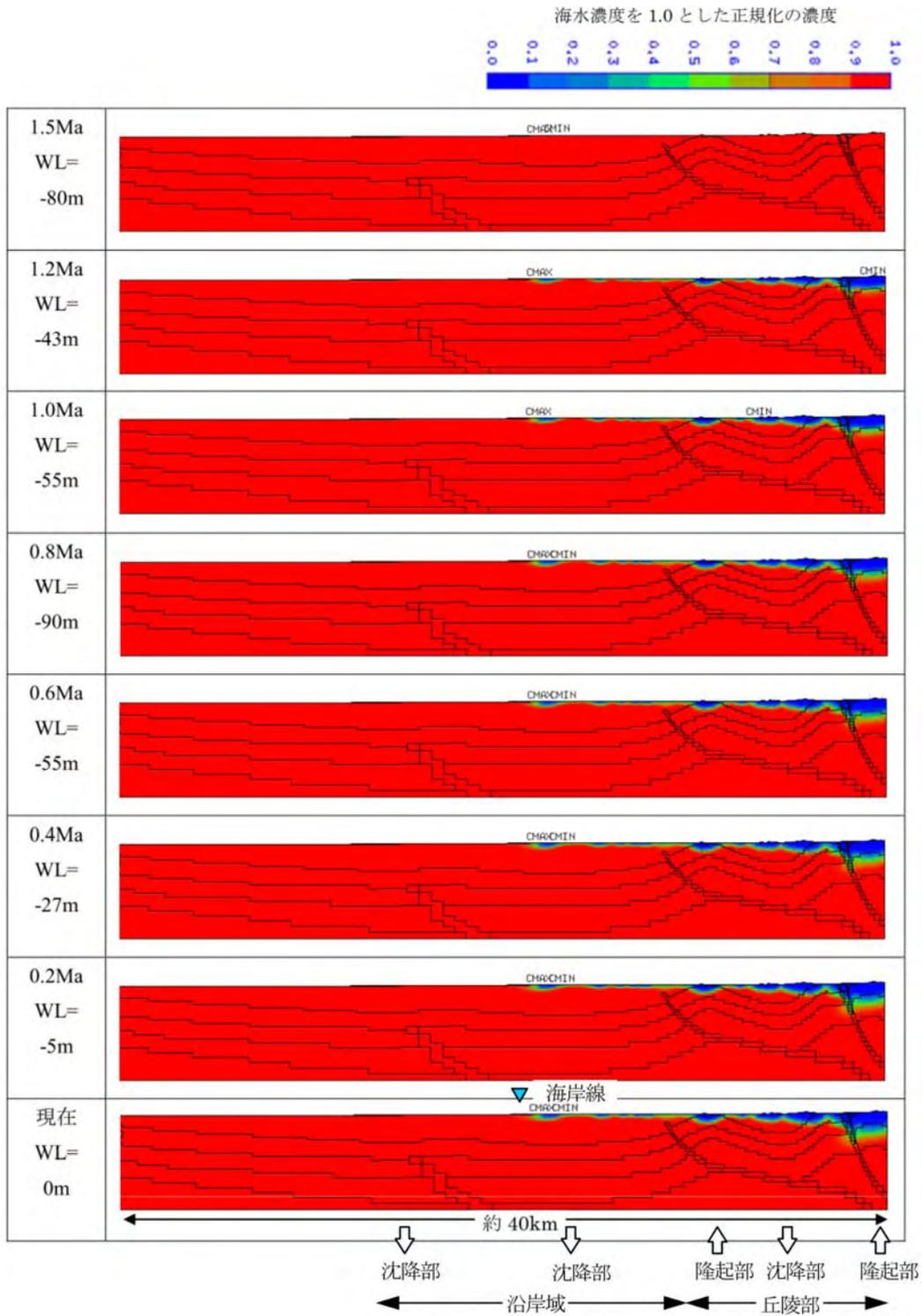


図 5.4.1-12 過去 150 万年間の地質環境の変遷を考慮した幌延地域の地下水流動解析結果
(今井ほか, 2009 に一部加筆)

過去 150 万年間を 10 万年または 20 万年のステップに分割し、地質構造および透水係数の時間変化、ならびに海水準変動および氷期と間氷期の涵養量の変化を考慮した地下水流動解析結果（濃度分布）を示す。淡水化は主に丘陵部で生じ、隆起域では深部から塩分を含んだ地層の上昇が示されている。また、丘陵部から沿岸域にかけて淡水化が広く生じている。

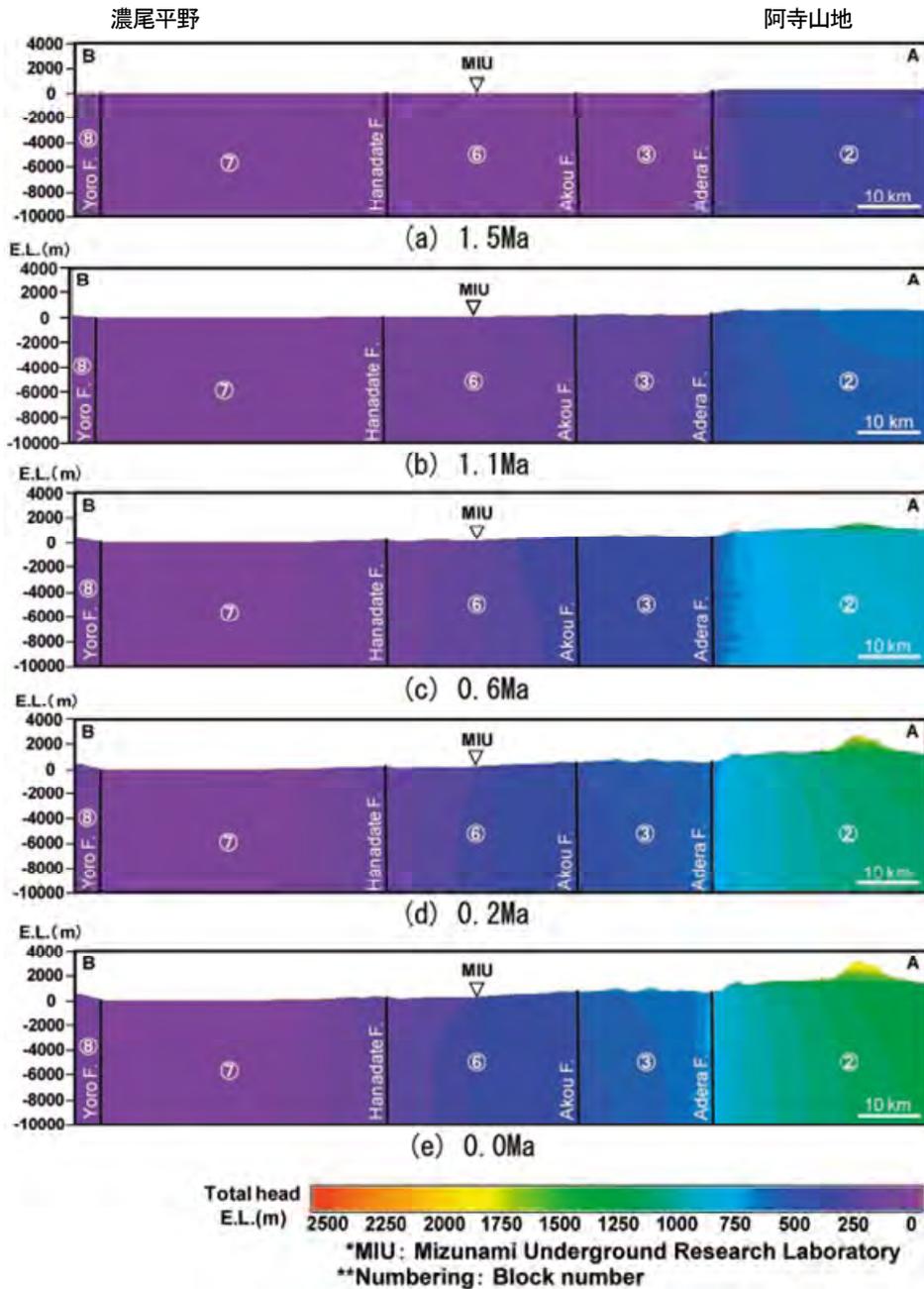


図 5.4.1-13 過去 150 万年間の地形変化を考慮した東濃地域の地下水流動解析結果
(尾上ほか, 2009 に一部加筆)

断層で囲まれたブロックに分割し、各ブロックにおける山地の隆起開始時期や断層の変位量の時間変化を考慮し、隆起速度と侵食速度が一定、または沈降速度と堆積速度が平衡であると仮定し復元された古地形を反映した地下水流動解析結果(全水頭分布)を示す。阿寺山地を涵養域とし濃尾平野を流出域とする地下深部までの大局的な地下水流動が形成されていることが示されている。また、山地が本格的に隆起し始めた0.6Maでは阿寺断層東側のブロック②では地形の起伏が明瞭となり、動水勾配が他のブロックに比べ大きくなっていることが示されている。

(3) 地下水化学特性

地質環境の長期評価において、現状の地下水化学特性を精度良く把握し、過去から現在までの地下水の変遷を理解することは、処分場の性能を評価する上で重要である。このことに関しては、近年地上からの調査で岩盤や地下水化学的特性の不均質な分布を把握するための地下水の採取技術、調査技術（地下水組成、同位体組成の分析技術など）、データの解析、モデル化の手法が整備されている。また、第2次取りまとめ以降の課題となっていた数100万年程度の地下水年代を評価する技術の整備が行われている。概要調査段階以降では、以下に示す最新の知見も考慮して地下水化学特性を把握する。ここでは、近年進展の見られた水質・年代評価技術と水質形成のモデル化に関する事例を示す。

(i) 水質・年代評価

地下水化学特性の調査では、井戸やボーリング孔から地下水を採取し分析することにより、地下水化学特性を表す溶存イオン成分やpH、酸化還元電位などの物理化学パラメータを取得する。ボーリング孔を利用した地下水化学特性に関する調査はこれまで多く事例が報告されている（例えば、古江ほか、2003、2005；彌榮ほか、2004；岩月ほか、2009）。このうち、岩月ほか（2009）は、地下水の採水および分析技術について、地下深部に分布する地下水の物理化学パラメータ（pH、酸化還元電位、温度）を測定する際の考え方や測定値の補正方法を取りまとめて整理している。また、馬原ほか（2006）は、地下深部に分布する化石海水に関して、地下の岩盤中で生成される ^{36}Cl の放射平衡論の議論をもとにした地下水年代評価と安定同位体データをもとにした地下水起源の情報を加味した化石海水の同定手法を提案している。中田・長谷川（2010）、長谷川ほか（2010）は、幌延地域の堆積岩および東濃地域の結晶質岩を対象にして、 ^4He 、 ^{14}C 、 ^{36}Cl を用いた地下水年代評価法を適用し、既存の調査から推定される広域的な地下水流動と整合していることを示した（図 5.4.1-14）。堆積岩中の地下水年代について中田・長谷川（2010）は、標高-200mで200万年、-600mでは1,000万年と評価しており、調査地域では堆積時からほとんど地下水が移動していないことを示している。地下水の水質は人工バリアシステムの性能、また地下水年代は地下水流動の長期的評価に不可欠であるため、信頼性の高いデータを取得するために、上記手法の適用についても検討する。

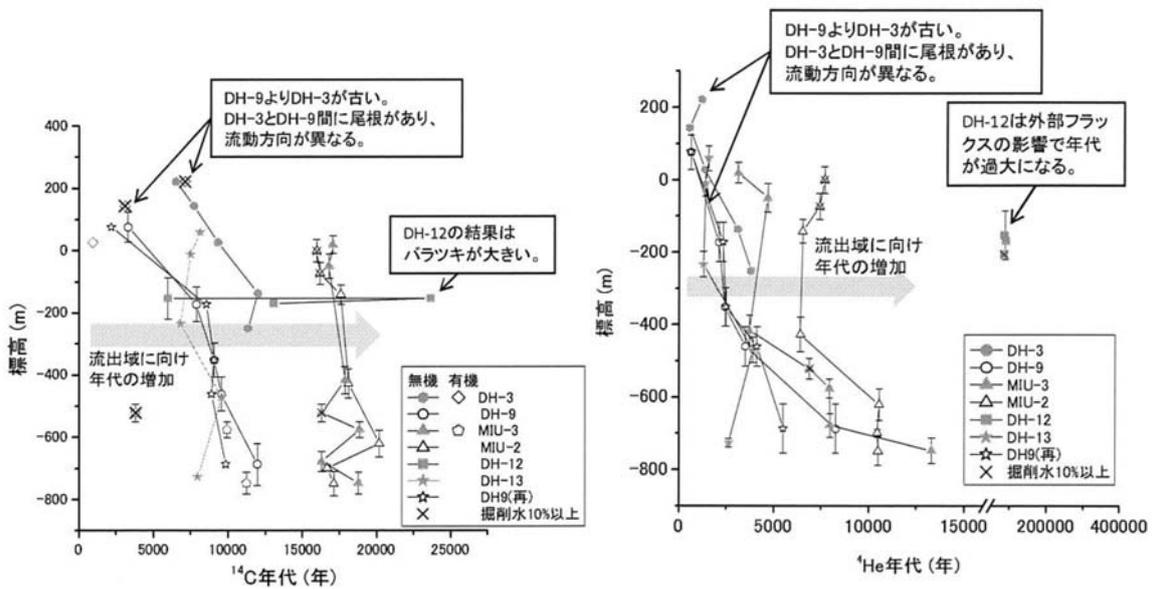


図 5.4.1-14 東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定結果
(長谷川ほか, 2010 を編集)

涵養域と流出域の中間に位置するボーリング孔 (MIU-2, MIU-3 など) の地下水年代は、涵養域に位置するボーリング孔 (DH-9, DH-3 など) の地下水年代に比べて古く、流出域に向けて地下水年代が増加しており、広域的な地下水流動を反映していると考えられている。

(ii) 地下水化学モデル

処分施設周辺の地下水化学特性を空間的に表現するための地下水化学モデルの構築手法や岩石-水の化学反応を考慮した解析手法を適用した事例の報告として、阿島ほか (2006) などが挙げられる。ここでは、地下研究施設の建設に付随して起こる経時的な地下水の水質変化の範囲や程度などを定量的に評価するため、主成分分析に混合とマスバランス計算を組み合わせた M3 解析 (Multivariate Mixing and Mass balance modeling analysis) を適用している (図 5.4.1-15)。伊藤ほか (2010a) は、京都府亀岡市の砂岩からなる試験地の深度 100m ボーリングの岩石コアから抽出した間隙水のイオン濃度を求め、地下水流動との関係を考察している。試験地では間隙水のイオン濃度の深度方向の分布は、陽イオン濃度が地下水の結合度 (pF) によって異なる傾向を示し、浅部では地下水流動が活発であること、深部では地下水が滞留し間隙水の水質が長期間変化しなかったことを示している。これらの手法は、深部地下水の長期安定性評価や、地下水化学モデルの構築に適用できる。

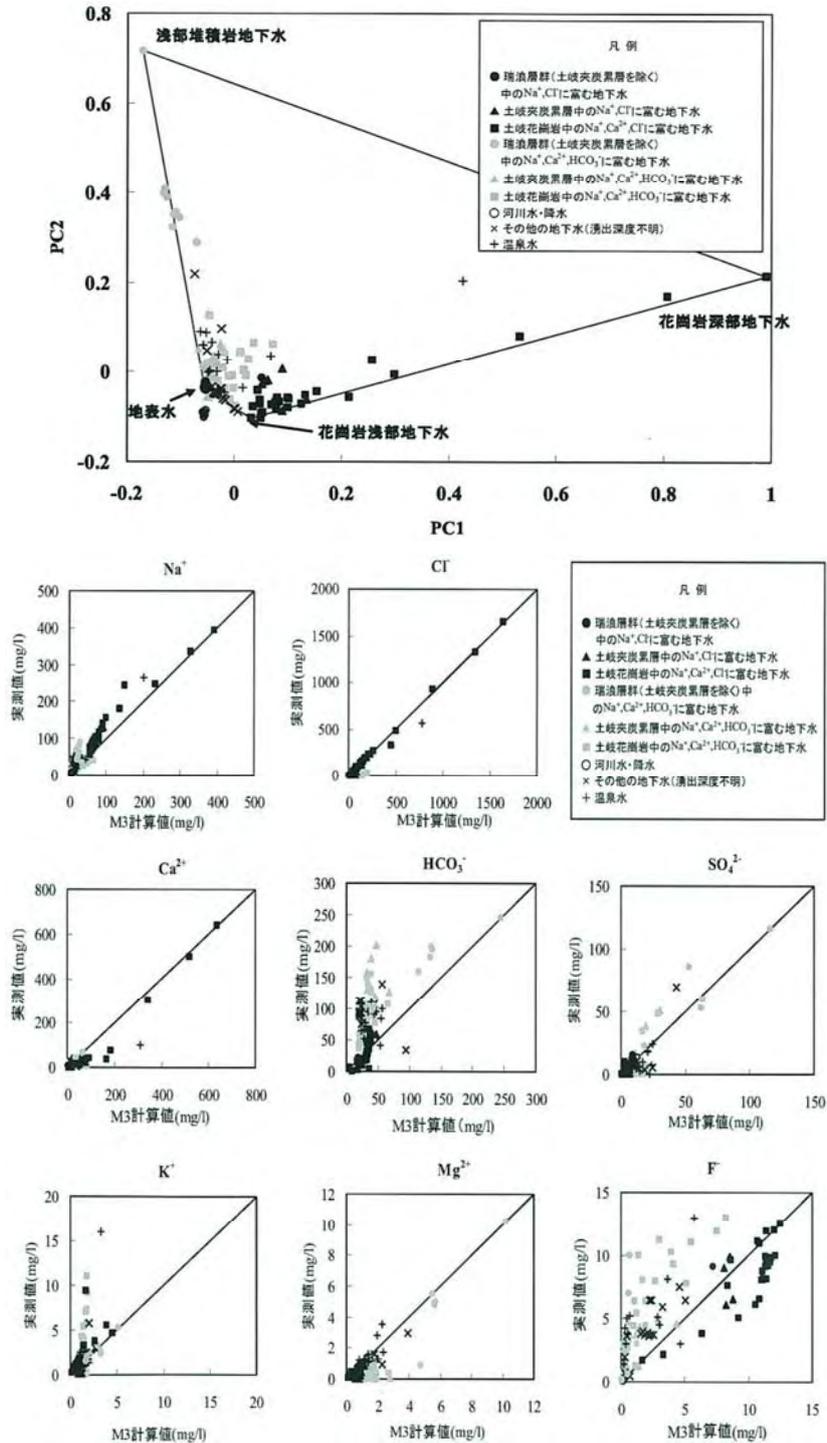


図 5.4.1-15 M3 解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水の M3 解析結果 (阿島ほか, 2006 を編集)

上：主成分分析結果, $PC1=0.53[Na]+0.20[K]+0.49[Ca]-0.13[Mg]-0.18[HCO_3]-0.15[SO_4]+0.17[F]+0.56[Cl]$,
 $PC2=0.10[Na]+0.29[K]+0.20[Ca]+0.56[Mg]+0.45[HCO_3]+0.53[SO_4]-0.17[F]+0.09[Cl]$

下：マスバランス計算の結果 (地下水組成の実測値と M3 計算値の比較)

主成分分析の結果から、混合の端成分として「花崗岩深部地下水」、「花崗岩浅部地下水」、「地表水」、「浅部堆積岩地下水」の 4 種類の地下水が考えられるが、マスバランス計算結果では、Cl⁻を除く各成分で実測値と計算値に違いが生じており、検討地域の地下水の形成については端成分地下水の混合だけでなく、水-岩石反応などを考慮する必要があると考えられている。

(4) 岩盤特性

対象となる地層を地下施設の工学的実現性の観点から評価するためには、岩盤の力学特性、熱特性などに関する情報を取得する必要がある。以下に、既存情報や地上からの調査（ボーリング調査など）を用いて、岩盤特性や三次元応力分布を把握するための調査研究の事例を示す。

(i) 力学特性

地下施設の建設可能性について、澤田ほか（2009, 2011）は、坑道建設評価のための岩盤評価法を示している。また、坑道設計に重要な入力データとなる地圧の測定技術に関しては、Ghimire et al.（2004a, 2004b）や坂口ほか（2006）が新たな測定方法の開発を行い、コントロールボーリングシステムの開発の中では、孔内での応力測定装置の開発・高度化が進められている（木方ほか, 2009）。

概要調査段階では、地表からのボーリング調査や物理探査が行われ、ボーリングコアなどから地下岩盤の情報を得ることができる。澤田ほか（2009, 2011）は、ボーリング調査から得られたコアで岩盤を分類し、岩盤の物性値や施工性を推定する岩盤評価法を開発し、岩盤の硬さ（一軸圧縮強度）、割れ目間隔、割れ目状態の3要素で岩盤を分類し、それに応じて強度や変形性、さらに掘進速度や支保程度を推定する評価分類図を作成している。既往ダムの国内施工実績を整理・分析した結果に基づいて作成された、岩盤の粘着力に関する評価分類図の例を図 5.4.1-16 に示す。

また、力学特性にかかわる技術開発では、稲田花崗岩を試料とした鉱物比の違いによる一軸引張割れ目の特性についての考察（藤井ほか, 2005）、力学特性と岩盤特性との相関を深度方向で整理した珪質岩の力学的な特徴の評価（真田ほか, 2009）、接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の測定手法の検討（藤井ほか, 2006）などが行われている。瑞浪超深地層研究所では、地表からボーリング調査を行い、その結果を用いた岩盤の力学的概念モデルが構築されている（松井ほか, 2000）。ボーリング掘削時には、岩石サンプルを行うため、調査地区の力学特性評価には、従来技術のほかにこれらの技術の取り込むことも含めて検討する。

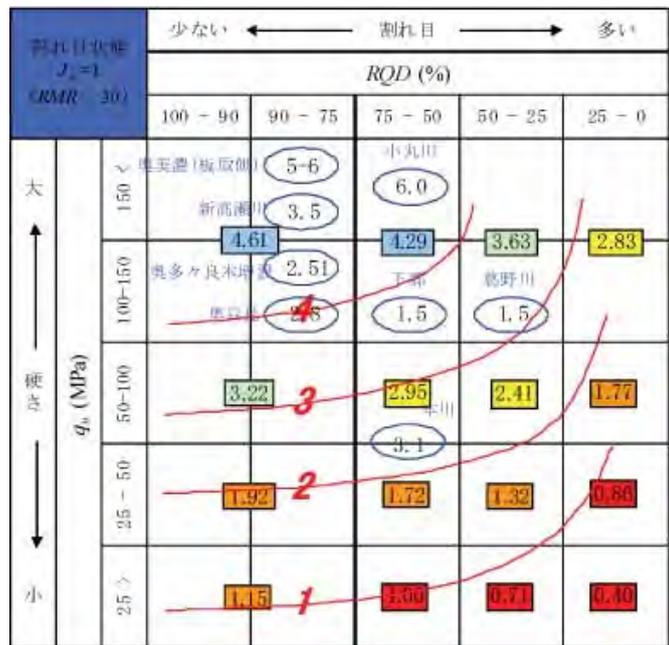


図 5.4.1-16 岩盤分類評価要素からの粘着力の評価図
(出典：澤田ほか，2009)

ボーリング調査から得られる岩盤情報 3 要素（一軸圧縮強度 q_u ，割れ目間隔 RQD，割れ目状態 J_c ）から粘着力を推定する評価図。この図は、5 段階に区分した J_c のうち $J_c=1$ （割れ目の状態が最も良好な場合、RCM では評点 30 に相当し、不連続面の状態が粗い、不連続、密着、新鮮に相当する）での評価図である。赤で示す数値および曲線は、組み合わせマトリクス上の粘着力 (MPa) を示す。四角内の数値は、既往ダム基礎岩盤データについて、各要素の組み合わせマトリクスにおける粘着力の平均値 (MPa) を示す。地点名と合わせて楕円内に示す数値は、既往地下発電所地点で得られている粘着力 (MPa) を表し、本評価図とおおむね整合している。なお RMR (Rock Mass Rating System) は Bieniawski (1989) により提案された評点式岩盤分類。

(ii) 熱特性

高温・低温下における熱特性を含む岩盤物性について、既往文献の調査結果をもとにデータベース化が行われている（土木学会，2006b）。また、岡田（2005，2006）は高温環境下における堆積軟岩の力学特性の温度依存性評価を行い、三軸圧縮強度は、常温と比較して 60°C で低下し、変形特性は、同条件で細粒砂岩のヤング率が減少する傾向が見られた。また、クリープ特性の温度依存性は、常温から 95°C の範囲の実験結果で凝灰岩のクリープ特性に温度の影響が見られ、最小ひずみ速度や破壊時間なども温度に依存することを示した。岩盤物性に対する地熱勾配の影響や廃棄体からの熱の影響を検討するに当たっては、これらの研究成果も参照する。

(5) 物質移行特性

物質移行特性については、前述の地下水流動特性や岩盤特性などをもとにした解析が行われる。深地層研究計画（三枝ほか，2007；太田ほか，2007），では、物質移行にかかわるデータ取得、解析手法などについての知見の蓄積や、熱力学・収着・拡散データベースの整備（JAEA，2005-2009），ボーリングコアを用いて重要な元素（Cs，Se，Np，Th）についての物質移行・遅延プロセスの室内試験からモデル化などを進めている（牧野ほか，2005 など）。

マトリクス拡散・収着についての原位置試験や室内試験を通じた研究 (Ota et al., 2003 ; 増田ほか, 2009 ; Alexander et al., 2009 ; 吉田ほか, 2002 ; 栃木ほか, 2007 など) やコロイドや微生物の物質移行に及ぼす影響についての検討 (村上ほか, 2003 ; 黒澤ほか, 2004 ; 上岡ほか, 2007 など) が進められている。

増田ほか (2009) は、地層中の物質移行にかかわるパラメータのうち、拡散や分配係数を原位置でかつ1週間程度の短期間で測定できる、マイクロ流路法の適用性の検討を行っている。マイクロ流路法は、測定対象となる岩石表面に微小流路計測器を押し当てて、極少量のトレーサ溶液 (重水、ウラン、カリウム) を通液した結果を測定し、破過曲線を得た後、移流・分散方程式を解き、フィッティングで拡散係数および分配係数を得る方法である。花崗岩中に掘削されたボーリング孔を利用した原位置での試験結果は、室内試験のデータ、ほかの試験法による結果などと同様であり、手法の妥当性が確認されたとしている。

物質移行については、今後の地下研究施設を用いた調査研究などにおける移行・遅延プロセスの解明やモデル化・解析の検討成果を取り込み評価に適用していく。

(6) 施工性・安全性にかかわる事象

(i) 難工事事象

地下施設建設工事の施工計画や安全性などを検討する上で、工事の計画変更、建設費の大幅増額や重大な事故につながる難工事の可能性を事前に把握しておくことは重要である。最近の研究成果としては、既往トンネル工事事例の情報を整理・分析した結果 (志田原ほか, 2004) から難工事遭遇可能性を評価するための岩盤評価法が開発 (新ほか, 2011a, 2011b) されている。新ほか (2011a, 2011b) は、難工事につながる事象として山はね、地山の膨張、大湧水、有害ガスなどを挙げているが、このうち地山膨張ならびに山はねについて、遭遇可能性評価の検討を行っている。また、超大深度立坑工事で発生する可能性の高い崩落形態についての考察 (櫻井ほか, 2006) や、事前の地質情報からトンネル施工時の地山の押出し性を判断・評価する基準および施工方法の設計方針 (高橋ほか, 2004) などが提示されている。

(ii) そのほかの自然事象

そのほかに関分場建設時および閉鎖後長期の安全性に重大な影響を及ぼす可能性のある事象として、泥火山、泥ダイアピルおよびマスムーブメントが挙げられる。

泥火山や泥ダイアピルは、急激な堆積により堆積物が厚くなった場所やプレートの収束域に集中する傾向があるとされる (山縣・小川, 1989)。泥火山は火山ガスの噴出を伴う円錐形をした泥や岩石の堆積体であるとされ (Bates and Jackson, 1987)、国内陸域では北海道の新冠や新潟県十日町市松之山などに知られ、海域では近年資源探査に伴う詳細な海底調査などで多くの泥火山の存在が明らかになっている (Kopf, 2002)。

松之山の泥火山については、ボーリング調査、物理探査、地化学探査などでその物理化学的性状や構造、含まれる流体の起源についての知見が得られている (新谷・田中, 2009 ; 石原・田中, 2009 ; 鈴木ほか, 2009 など)。また、泥火山の特性は、膨張性地山を形成することと高塩分濃度の地下水からなることであり、高橋ほか (2006) によれば国外の事例から泥火山の活動周期、噴出量についての知見が得られている。

泥ダイアピルの形成には、異常間隙水圧の発生、大きな圧力差が発生するための異常間隙水圧を

開放する機構（例えば断層運動など）が必要であるとされている（山縣・小川，1989）。

宮田ほか（2009）は、紀伊半島の中新統に認められる泥ダイヤピルの産状を記載し、貫入形態を明らかにしてダイヤピルの上昇機構を考察している。また、実験により上昇機構の要因の検討を行っている。ダイヤピルの規模は数10m～200m程度であり、周囲約400mに泥岩脈を伴うことがあり、形態的には円筒、ドーム、ラコリス状で堆積層の物性により形態が異なる可能性が指摘されている。形成要因は下位層に封じ込められた泥水（ガス）であり、現在の熊野海盆の海底では音波探査（Baba and Yamada, 2004）で泥ダイヤピルの存在が推定されているとしている。

マスマーブメントは、地表の構成物質がそれ自体の重みで塊（マス）として動く現象で、崩壊（地崩れ）、地すべり、土石流、クリープからなる（高浜，1996；産総研，2007a）。100万m³を超えるような巨大規模崩壊は、火山体周辺と四万十帯の泥質堆積岩地域に多く、これら以外では付加体堆積物中の石灰岩体周辺、三波川帯の結晶片岩地域、グリーンタフ地域に比較的多いとされる（千木良，1995；産総研，2007a）。

小嶋ほか（2006）は、付加体である美濃帯の伊吹山の大规模崩壊によって形成された堰止湖堆積物の¹⁴C年代から崩壊の頻度を推定し、美濃帯で発生する可能性がある大规模崩壊の発生周期予測手法を示している。また、大野ほか（2010）により地震時の大规模地すべりの事例が、田近・岡村（2010）により大规模地すべり地形の発達の事例が示されている。

泥火山、泥ダイヤピル、マスマーブメントは特殊な地質環境で発生する現象であることから、上記の事例などを参考に対象地域ごとに評価を行う。

（7）モニタリング技術

概要調査の段階あるいは精密調査の地上からの調査段階に開始するベースラインモニタリング（地下調査施設の建設による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態を示す「初期ベースライン」を把握するためのモニタリング；3.3.2参照）には、以下の技術を適用することができる。これらはモニタリング技術として、主に国およびJAEAにより開発、整備されている。主なモニタリング技術として、JAEAが所有する岐阜県瑞浪市と北海道幌延町の2カ所の深地層の研究施設において、ボーリング孔を利用した地下水の水圧、水質の長期モニタリングが導入されている（JNC，2005a；太田ほか，2007）。JNC（2005a）は、既存の地下水の水圧・水質の長期モニタリングシステムをまとめており、このうち、幌延深地層研究所においては、ピエゾ水頭計測方式のシステムおよび直接圧力計測方式のシステムを設置してモニタリングを行っている。2カ所の深地層の研究施設においては、このほかにも、精密制御定常信号システムを利用して、従来の物理探査技術よりも、地下構造の把握と岩盤物性や水理場の時間変動を高分解能で推定する技術や光ファイバ地中変位計の開発（中山ほか，2008）などの技術開発ならびにそれらの適用性確認が行われている。また、JAEAの東海研究開発センターでは、室内連成試験設備などを利用して人工バリアの性能確認のためのモニタリングの技術開発および適用性確認を進めている（JNC，2005b）。モニタリングに関する技術開発で、国は、地中無線通信による伝送技術などの開発（例えば、高村ほか，2006）とともに、各機関の計画するモニタリングに柔軟に資することができるように、「なぜ（目的）、いつ（時期・期間）、どこで、誰が、何を、どのように（手法）モニタリングを行うか」の視点で分類した「技術的選択肢（技術メニュー）」の開発を進めている（竹々原ほか，2004；原環センター，2009a）。また、ここでは地下施設で、温度、圧力、水分量などのモニタリングを念頭にしたモニタリングの在り方に関する検討も行われている（須山ほか，2010）。

5.4.1.3 多様な地質環境にかかわる調査・評価技術

わが国の多様な地質環境を代表する結晶質岩・淡水系地下水と堆積岩、および堆積岩・塩水系地下水を対象に、実際の地質環境への地層処分技術の適用性確認を目的とした調査研究が、それぞれ超深地層研究所計画および幌延深地層研究計画として進められている。これら二つの深地層の研究施設計画の第1段階では、第2次取りまとめ（JNC, 1999b）に示された地質環境の調査・評価技術を実際の地質環境に適用することにより、その実用性や信頼性を確認することとともに、体系的な調査・評価技術を整備してきた。ここでは、調査—予測—検証のプロセスを繰り返し、地質環境の理解を段階的に深め、次の調査を最適化していくアプローチを採用している（JAEA, 2010b）。

一方で、調査実績や経験的な知識が少なく研究開発の余地の大きい沿岸域を対象とした研究開発もこれらに並行して進められている。沿岸域では、地層処分に関する研究のほか、資源探査、活断層調査、土木工事に関する調査が行われており、これらから得られる知見は、地層処分へ有効に反映できる可能性があると考えられる。

以下に、これらの研究の概要を示すとともに、既存および新たに開発された調査・評価技術の地層処分事業への適用性や課題について述べる。

(1) 結晶質岩・淡水系地下水を対象とした調査・評価技術

結晶質岩・淡水系を対象とした体系的な調査・評価技術に関する検討は、JAEA が超深地層研究所計画で実施している。本研究開発は、1996年度に岐阜県瑞浪市のJAEA用地（正馬様用地）で開始され、その後は瑞浪超深地層研究所用地において進められている。本研究開発の第1段階調査（地上からの調査予測研究段階）は、2005年3月に終了し、現在は第2段階（研究坑道の掘削を伴う研究段階）および第3段階（研究坑道を利用した研究段階）の調査研究が進められている。

第1段階の調査では、設定した課題に対して5段階のステップによる繰り返しアプローチ（調査—予測—検証プロセス）を適用している。具体的には、調査研究の進展に伴う情報の種類・量と地質環境の理解度や不確実性との関係を順次評価するとともに、その評価結果に基づき次のステップの調査研究課題を明確にしてその計画に反映している。その結果は、地質構造モデルや水理地質構造モデルなどの変遷として示され（図 5.4.1-17）、地層処分にとって重要な地質環境特性やプロセスについて理解を深めることができた（三枝ほか, 2007）。

第1段階では、地質・地質構造については、不連続構造などを予測・把握するための手法、地下水流動特性については、ローカルスケール（数キロメートル四方以上）やサイトスケールの調査・解析領域の設定手法や段階的調査解析手法が検討されている（JNC, 2005a）。地下水化学特性については、水質形成プロセスを把握するためのM3解析手法（阿島ほか, 2006）や溶存成分に関する複数の調査手法（阿島ほか, 2006；三枝ほか, 2007）が検討されている。また、ローカルスケールやサイトスケールにおける物理・力学特性、初期応力状態および地下の地下環境温度を把握する技術を整備し、これをもとにしたモデル化手法や掘削影響予測手法の検討も行われている（JNC, 2005a）。以上の個々の手法や、それに基づき作成されたモデルについては、第2段階および第3段階の調査研究でその妥当性の確認や適用性の検討が行われる（JAEA, 2010b）。

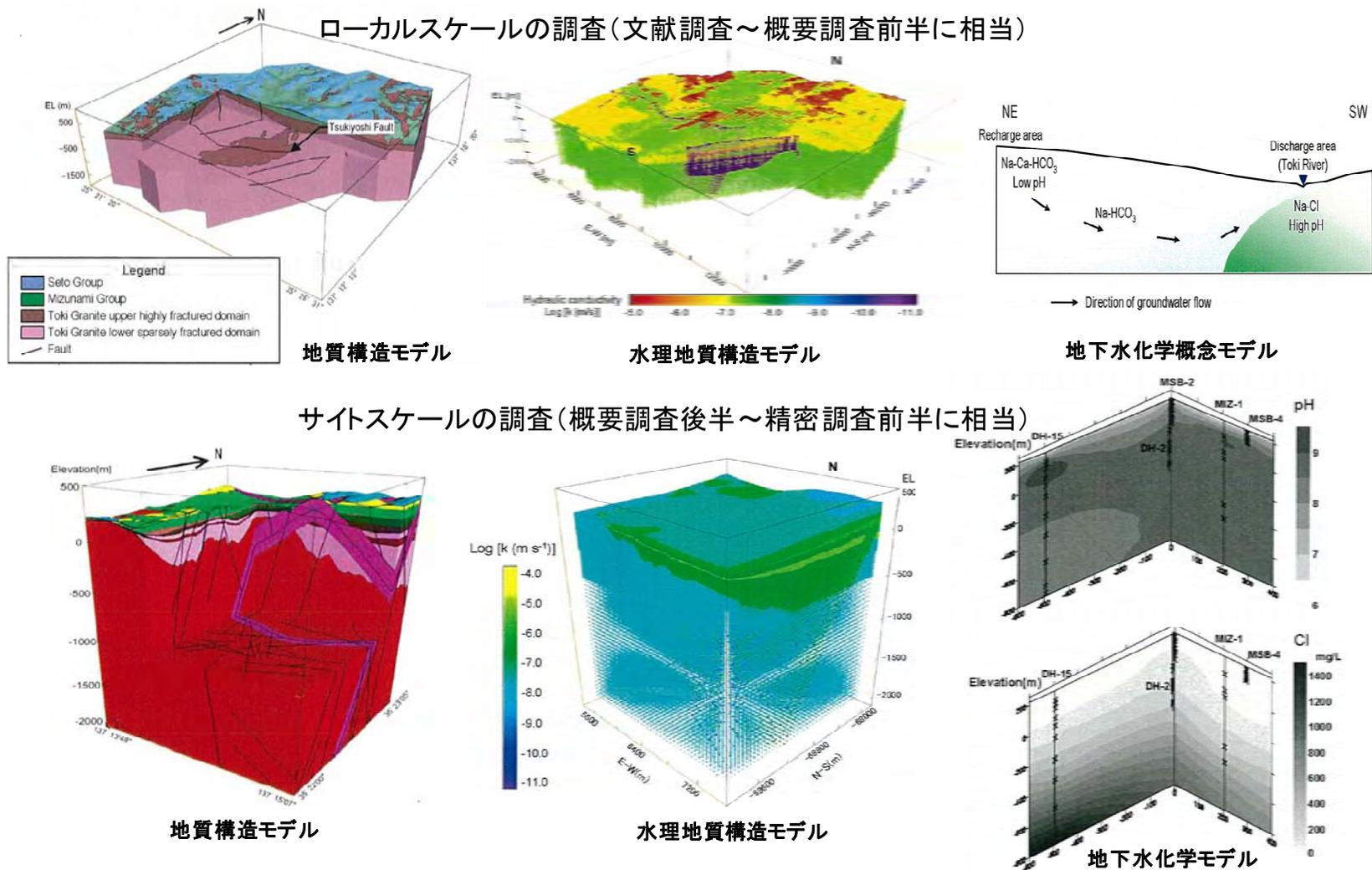


図 5.4.1-17 超深地層研究所計画第1段階(地上からの調査予測研究段階)の地質環境モデルの例
(三枝ほか, 2007 を編集)

調査フェーズの進展に合わせてより詳細なスケールの地質環境モデルを構築し、理解度や不確実性を段階的に把握している。

第2段階および第3段階の調査研究では、物質移行特性について、岩盤中の水みちとなる断層や割れ目の性状、またそれらの天然バリア機能としての収着・拡散といった特性を把握することが重要である。そのための情報整備として深層ボーリングのコアを用いた室内試験による収着データベースの構築などが重要となる。その例として、釜石鉾山の花崗岩類の収着係数、拡散係数の妥当性の確認や(太田ほか, 2005) 物質移行場の構造特性・空隙構造特性の値や範囲の推定が挙げられる。

以上のような各段階の調査を展開する上で、調査手法の組み合わせ、取得するデータの種類・解釈、情報の統合を行う統合化データフローの構築による体系的な調査・評価手法が示されている。

本研究開発は、わが国の代表的な地質環境である内陸部の結晶質岩を対象として、地質環境の調査・評価技術の適用性を評価してきたものである。図 5.4.1-17 に示した特定の地質環境下における地質環境モデル構築に至るまでの調査・評価の過程および結果の統合は、5.2.1.2 に示した段階的な調査・評価の具体例とみなすことができる。

本研究開発を通して整備された調査・評価技術や知見の多くは、場所や地質環境の条件が異なっても、普遍的に適用できると考えられる(三枝ほか, 2007) ことから、今後も引き続き、NUMO で構築した調査・評価体系に反映していく。

(2) 堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価技術

堆積岩・塩水系を対象とした体系的な調査・評価技術に関する検討は、JAEA が幌延深地層研究計画で実施している。本研究開発は、第1段階(地上からの調査予測研究段階)として、2001年3月から2006年3月にかけて、「研究所設置地区および研究所設置場所の選定」、「地上からの地質環境の調査研究」、「深地層における工学技術の基礎の開発」、「地下施設建設に伴う周辺環境への影響調査」が実施された(例えば、太田ほか, 2007)。第2段階(研究坑道の掘削を伴う研究段階)では、2005年度から坑道掘削時の調査研究が進められており、現在は第3段階(研究坑道を利用した研究段階)の調査研究も一部並行して実施されている。

第1段階の研究で得られた主な技術的知見として、地質・地質構造については、海成堆積物の地層中で断層帯の位置とその水理特性を把握するために、物理探査技術において地下浅部の地層の比抵抗を把握することが有効であること、一方でVSP探査は物性値の変化に乏しい地層では有効性が低いことが示された。また、珪藻化石を用いた後背地解析法は、古流向から碎屑物を供給した供給源を推定することで過去の堆積・削剥環境(海陸分布)を把握するのに有効であったとしている。さらに、段丘の対比をする上でのRIPL法(表 5.4.1-1)の有効性やGPS基線長(観測点間の距離)と自然地震との関係を検討することが地質環境(応力や歪)に対する地震の影響の有無や程度の把握に有効であることなどが示されている。

地下水流動特性については、対象地域が多孔質岩盤であるか、亀裂性岩盤であるかを初期の段階で見極めることが重要であること、また岩盤の水理特性に応じた手法の開発と柔軟な対応が求められること、さらに、深部の地下水流動と生物圏の境界である表層水理に関する調査が重要であることが示されている。ボーリング孔を利用した調査では、流体検層から水理試験位置選定のプロセスや水理試験シーケンスなどがほぼ体系化され、流体電気伝導度検層では、水みち個所の抽出やその透水性などについて総合的な検討が可能となっている。また、ボーリング孔を利用した調査を実施する場合に調査対象の岩盤、地下水化学特性などに適した調査手法(調査の組み合わせ)が異なるため、調査の早い段階でその場に合わせた調査手法の体系化が必要であることが知見として得られている。

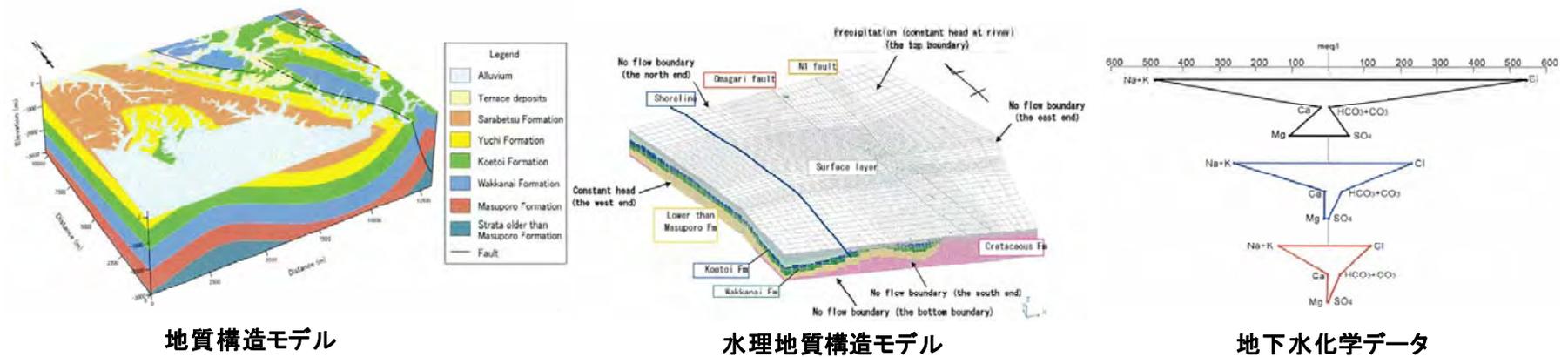
地下水化学特性については、透水試験中の揚水した地下水、コアからの間隙水の抽出水の分析など、適用した調査手法および解析手法（主成分解析など）の有効性が示され、個々の要素技術は地層処分事業における調査・評価に適用できることが示されている。

岩盤特性に関する調査研究では、調査の進展に伴う新たな不確実性の存在が示された。地表調査（物理探査、地表踏査）の結果からは、調査地域の岩盤は水平方向に岩相変化に乏しい新第三紀の堆積岩であり、均一な特性の地層が深部にも連続するものと予測された。その後のボーリング調査では、岩盤特性は深度方向に必ずしも均一ではないことが明らかになった。このような地域の岩盤調査では、物理検層データのように深度方向の連続データの重要性が認識された。初期応力測定では、大曲断層を挟んだ東西領域の深度 500m 程度までの主応力の方向や値のデータが得られている。

以上に述べてきた第 1 段階における段階的な調査・評価の結果は、図 5.4.1-18 に示す地質環境モデルに集約されている。また、地上からの調査研究で得られた知識と経験に基づき、段階的な調査・解析・評価の体系的な枠組みとして、統合化データフローダイヤグラムが構築されている。現在、主に坑道掘削中および坑道からの調査研究が進められ、地上からの調査の段階の結果が検証されつつあり、NUMO は、これらの知見を着実に調査・評価体系に反映していく。

さらに、幌延深地層研究計画では、深地層の研究施設を設置するという前提条件に基づき地質環境要件と安全要件を基本的な要件として設定し、既存情報を用いた調査および広域的な調査から研究所設置地区の絞り込みを行い、さらに、ボーリング孔を利用した調査結果などに基づき研究所設置地区を選定している。このようなプロセスは、概要調査から精密調査に至るサイト選定の手順と同様なものであることから、その知見についても NUMO におけるサイト選定に反映していく。

広域スケールの調査(文献調査～概要調査前半に相当)



サイトスケールの調査(概要調査後半～精密調査前半に相当)

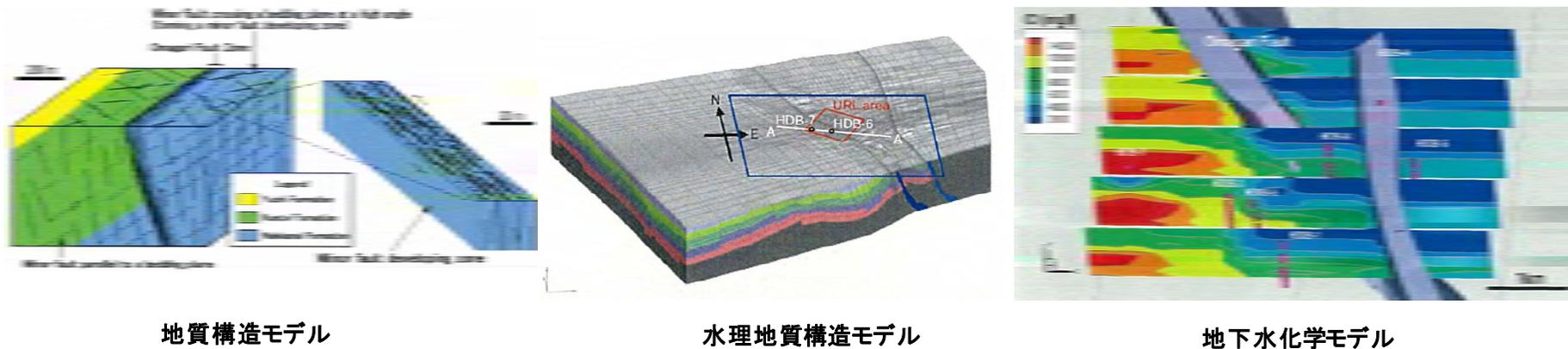


図 5.4.1-18 幌延深地層研究計画第1段階(地上からの調査予測研究段階)の地質環境モデルの変遷
(太田ほか, 2007 を編集)

本研究計画においても, 調査フェーズの進展に応じて広域スケールおよびサイトスケールの地質環境モデルを構築し, 理解度や不確実性を段階的に把握している。

(3) 沿岸域を対象とした調査・評価技術

沿岸域を含む海域においては、前出のように物理探査技術分野において、ここ10年間で大量の情報を高精度で効率よく取得、解析できるようになっている。特に反射法地震探査では、従来の二次元データの解析では、データがカバーされていない領域に対しては、内挿による推定が必要であったが、三次元探査の導入でデータの空白域がなくなったことが挙げられる。さらに、二次元探査では不確実性が大きかった断層分布について、取得データの時間スライスを解析することにより、三次元分布が把握できるようになり、見落としが減少したことも挙げられる。そして、反射波と岩石の特性を解析することにより、チャンネル構造や堆積物の三次元形態分布が把握できるようになったように、三次元可視化技術と堆積学とが融合した新しい学問・技術領域が提唱されている（高野ほか、2006）。こうした三次元反射法地震探査はすでに石油・天然ガスの資源探査では、重要な調査・評価技術として適用されている。地層処分分野でも資源エネルギー庁の委託事業として、沿岸域を対象とした研究も行われており、これまで技術的な空白域であった領域が補完されてきている。沿岸域を対象にした研究事例として、高精度物理探査技術高度化調査（平成12年度～平成18年度）、塩淡境界面形状把握調査（平成14年度～平成18年度）、平成19年度から開始された沿岸域プロジェクト（太田ほか、2008）などがある。地層処分関連研究以外の沿岸域（海域）における調査は、海上保安庁による沿岸域海底活断層調査、文部科学省の交付金による地方公共団体の活断層調査の一部、国土地理院による沿岸海域基礎調査、石油・ガスなどの資源探査、海底トンネル工事、そのほかの研究機関による学術調査などが行われている。

以下にこれらの技術の概要と地層処分に応用した場合に考えられるサイト調査・評価技術としての現況を述べる。

① 高精度物理探査技術高度化調査

本研究開発では、概要調査段階で適用する物理探査を対象にして、要素技術を高度化開発したもので、沿岸域については、技術的な空白を補完するものとして海底電磁法の計測機器および海水の影響を補正できる解析手法の開発が行われた（原環センター、2004）。この研究では米国西海岸のモンテレー湾において、沿岸域の活断層を対象にした探査結果が示されている。これは、音波探査では水深が浅く不明確であった海底下の断層を対象に海底電磁法探査を実施し、断層の分布位置、地下深部への延長および花崗岩質岩盤の健全度や劣化状況に関する情報を得たものである（吉村ほか、2006a）。

本研究開発成果は、結晶質岩の地質環境や音波探査が困難な極浅海域において、沿岸域では一般に実施される音波探査を補完する技術として適用できるものと考えられる。

② 塩淡境界面形状把握調査

沿岸域では天水を起源とした淡水系地下水と海水を起源とした塩水系地下水が互いに接して、境界面を形成していると考えられている。塩淡境界面形状把握調査（産総研、2007b など）は、野外調査により塩淡境界の形状やその周辺における地下水流動状況の把握と、地質状況に応じた塩淡境界の形成機構の解明を通して概要調査で適用可能な精度の高い塩淡境界の形状推定手法の開発を目的として行われた。ここでは、千葉県および茨城県の沿岸域での現地調査に基づく研究と井戸台帳、地下水・岩石試料を用いた統合データベースが構築された。

千葉県蓮沼海浜公園の研究試験地では、ボーリング調査および物理探査法による塩淡境界の把握

手法の検証・評価が行われた（丸井ほか，2004；上原ほか，2007）。深部の塩淡境界の構造解明のための AMT 法による調査・解析手法の開発が行われ，海岸平野の電磁探査では，探査深度の異なる三つの手法（AMT，TEM，ループ法）を適用し地層の比抵抗分布を解析している（Mitsuhata et al., 2006）。また，検層により塩淡境界の深度，形状を推定する手法として，地下水化学特性を把握する地化学検層が有効であることが明らかにされている（丸井ほか，2004）。

茨城県東海村の研究試験地では，蓮沼海浜公園研究試験地で開発した手法で塩淡境界の把握を試み，地下水観測井による塩淡境界の観測を行っている（伊藤ほか，2007）。さらに地下水流動解析を行うための基礎データとして弾性波探査で地質構造の解明などを行っている。

上記の先行調査事例は，地質環境の調査・評価において，沿岸域の塩淡境界の形状把握に適用できる部分がある。ただし，地下深部の塩淡境界の形状把握については，次項で説明する沿岸域プロジェクトの進展で得られる成果を反映していくことが効果的と考える。

③ 沿岸域プロジェクト

沿岸域プロジェクト（通称）は，幌延深地層研究計画の一環として，海域から陸域までを包括した地質環境を対象に，沿岸域特有の地質環境特性に関する知識を蓄積しつつ調査・評価技術の信頼性向上と体系化を進めることを目標として，基盤研究開発機関により平成 19 年度から 5 カ年程度の計画で開始された（太田ほか，2008）。具体的な研究内容は，塩淡境界/地下水総合評価技術の開発，沿岸域地質構造/断層評価技術の開発，関連データベースの開発からなり，以下のように段階的に研究開発を進めることとしている。

- ・ 既存の技術や知見，幌延と瑞浪の両地層研究所で整備した地上からの体系的な調査・評価技術や統合化データフローなどを活用し，一連の調査・評価の考え方を体系的に整理する。
- ・ 物理探査やボーリング調査などを組み合わせて適用し，個々の調査・評価技術の適用性を確認するとともに，塩水と淡水が混在する場における地下水流動や水質形成・変化，その時間変遷などに関する理解を深め，その調査・評価技術を整備する。
- ・ 地下水流動と地下水年代を関連付けて評価する技術，孔内での各種調査を組み合わせたコントロールボーリング技術，海底における地下水湧水の探査技術などの最新の技術を適用し，沿岸域に特徴的な現象や地質環境条件に関する知見を拡充しつつ，調査・評価技術の信頼性を向上する。
- ・ 沿岸域を対象とした一連の調査・評価技術の適用性確認や信頼性向上などの研究開発成果を統合するとともに，工学的対策・安全評価の観点も念頭において，沿岸域における体系的な調査・評価技術の方法論として取りまとめる。

沿岸域プロジェクトは現在進行中のプロジェクトであり，沿岸域に適用可能な技術の開発や信頼性の向上，高度化が進められている（原環センター，2009b；産総研，2008，2010c：図 5.4.1-19）。現在までに得られた成果のうち，幌延町の沿岸域では，海岸線付近の陸域から浅海域を含む範囲で複数の電磁探査法の実施と既存データを用いた解析から，塩淡境界や断層系に着目した電磁法探査技術の適用性の検討（吉村ほか，2009；大里ほか，2009 など）が行われ，二次元または三次元比抵抗分布の把握ができることが初めて示され，地質構造および地下水の水質分布に関する情報が得られた。しかし，既存調査で指摘されている沿岸海域の断層に対して，本手法では明瞭な比抵抗不連

続構造が得られていないなど、堆積岩における電磁探査法の技術的な限界も示されている（吉村ほか、2009）。

地下水流動解析では、地下水の長期的な流動・滞留状況の評価に主眼をおいた塩淡境界の現状解析と海水準変化（120m 低下）を考慮した予測（伊藤ほか、2010b）が試みられている。また、電磁探査法から得られた比抵抗構造から推定した地下水の水質分布と地下水流動解析の結果が対比されている（吉村ほか、2010）。ここでは、沿岸海域に推定される断層の透水性、海岸部の背斜構造および浅部地質の透水性などの水理地質構造が水質分布に影響することが示されている。しかし地下水流動解析結果と電磁法の比抵抗分布とが整合せず、間隙水圧分布や透水異方性など電磁法では取得できない地質環境特性が地下水流動特性に影響するため、ボーリング調査などの手法との組み合わせが必要であることが示されている（吉村ほか、2010）。

JAEA は北海道幌延町の沿岸域を事例とした古水理地質学的研究を進めており、沿岸域に特徴的な地質環境特性（塩水と淡水の混在など）に着目し、その時間的・空間的変遷の調査・評価をとおして、沿岸域の地質環境を対象とした総合的な調査・評価技術の整備を図っている。具体的には、沿岸域プロジェクトを含む幌延深地層研究計画において整備した調査・評価技術や取得した地質環境の特性や長期変遷に関する数多くの情報を踏まえ、①沿岸域を対象とした統合化データフローダイアグラムに基づき、沿岸域における地質環境特性の長期変遷を段階的に調査・評価するための方法論の整備（Ota et al., 2010）、②地質環境特性に影響を及ぼすと考えられる地形変化や気候・海水準変動を把握し（Niizato et al., 2010）、長期的な地下水流動の様式やその変遷を表現する概念モデルの構築（Amano et al., 2010）を実施している。①については、他地域での適用性の確認を通じて信頼性を向上させることにより、汎用的な技術とする方針である（Ota et al., 2010）。

④ 地層処分関連研究以外の沿岸域（海域）での調査

海上保安庁などの活断層関連の調査（海上保安庁、2010）は、1995年から開始され、沿岸域海底活断層調査では18カ所、地方公共団体の活断層調査では、沿岸海域の調査は10カ所程度で実施されている。調査では、基本的に音波探査とピストンコアリング（ボーリング調査）の組み合わせによる地質構造の解明が行われている。そのほか、断層の延長部の調査事例では、沿岸部における海上全磁力探査による磁気異常から断層の延長を推定する手法が示されている（長尾ほか、2009）。

国土地理院の調査は、沿岸海域の開発、利用、促進を目的にし、沿岸陸域から水深50m程度までを対象に地形・地質の基本情報整備として1999年から行われ、これまで4地域の結果が沿岸海域地形図としてまとめられている。

資源調査は海域を対象に物理探査やボーリング調査により深部構造の把握が行われ、近年では2007年に三次元資源探査船「資源」が導入されて、日本海沿岸や三陸沖で物理探査（反射法地震探査）が行われている。石油・天然ガス資源を調査する基礎試錐調査によって掘削深度3,000m級の大深度ボーリングが掘削されている。さらに、三次元地震探査データを単に構造解釈に用いるだけでなく、地震波のさまざまな属性に着目して、地層流体を含んだ岩石特性の変化を把握するための技術開発などが進められている。このような物理探査を用いた地層の評価技術は、地層処分対象となる地層を含む領域を非破壊で推定、評価できるため、地層処分事業では重要な調査手法であるといえる。

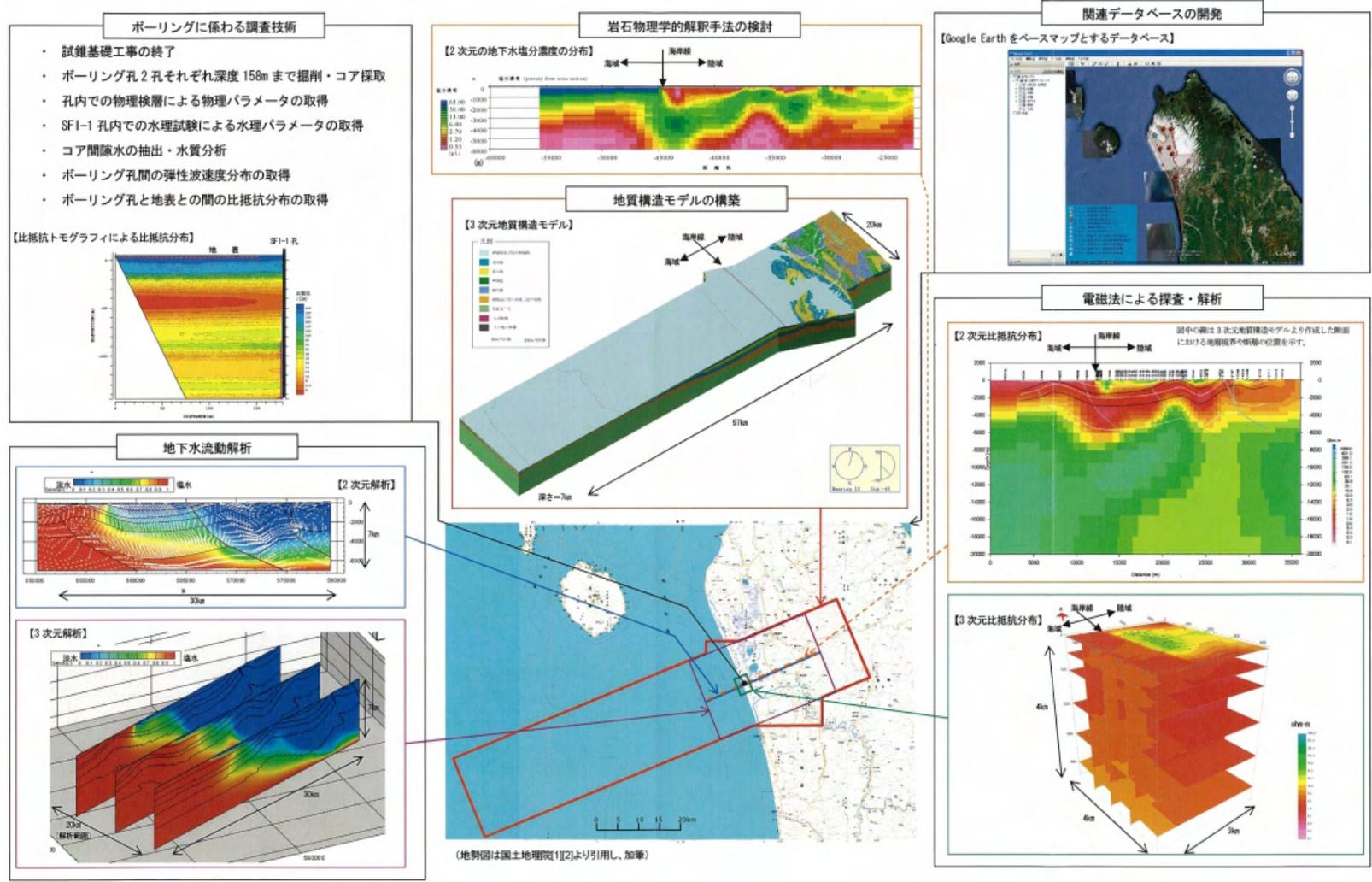


図 5.4.1-19 沿岸域プロジェクトにおける検討成果の例
(出典：原環センター，2009b)

幌延深地層研究計画の一環として、陸域から浅海域にかけての電磁探査による空間的な比抵抗分布の把握、それとボーリング調査の組み合わせによる地質構造および地下水の水質分布の推定、ならびに長期的な地下水の流動・滞留状況の評価に向けた塩淡水境界の把握と地下水流動解析などが行われている。

海底トンネル工事では青函トンネルにおいて、規模の大きな出水個所が貫入岩の位置に対応しており、磁気探査で予測可能とされている事例がある（日本鉄道建設公団，1990）。

各研究機関による沿岸海域を対象とした物理探査（空中重力、海底磁力、反射法地震探査など）による調査、研究が多数行われており、空中重力探査（Segawa et al., 2005 ; 西坂ほか，2006）では、陸域と海域で等価のデータが、短時間で取得可能であることから沿岸域での活用が期待される。また、沿岸域の重力探査空白域を補完することを目的とした海底重力計の開発（大熊ほか，2010）も行われている。

地球科学的研究分野においては、物理探査船の「大陸棚」、海洋研究開発機構の地球深部探査船「ちきゅう」およびさまざまな海洋調査船による調査研究が進められている。また、手法の組み合わせによる事例では、マルチチャンネル反射法地震探査とボーリングや検層データとの組み合わせで、100万年スケールの地質変動が解明できる可能性が示されている（古屋ほか，2009）。

⑤ 沿岸域での調査事例の地層処分への反映

沿岸域を対象とした地層処分に関する技術の適用性、高度化は現在も継続している。公的機関による既存手法による活断層調査や資源探査からの深部地質構造に関する知見や調査解析事例は地層処分にも適用される一般的な手法である。

沿岸域での地質構造調査で最も適用性の高い手法は音波探査（反射法地震探査）であり、解析手法の高度化やイメージング技術の発達、三次元探査の適用などにより詳細な構造の把握が可能となってきている。音波探査に加え、重力探査、電磁探査などの開発・高度化されつつある物理探査手法やボーリング調査などを組み合わせることにより、基本的にはさまざまな環境に対応した調査を行うことが可能となってきていると考えられる。

沿岸域における地下水流動や地下水の地球化学的性状の調査には、電磁探査などによる比抵抗分布のイメージングが有効であると考えられる。しかし、塩淡境界の将来的な変化を地下水流動解析により解明するためには、気候変動とそれに伴う海水準変動や地形変化も組み込む必要があり、今後もそれらの予測手法の高度化が必要と考えられる。

5.4.2 調査・評価技術の確認

概要調査に適用する地表踏査，物理探査，ボーリング調査などの調査技術については，既存の技術を当該サイトの地質環境や制約条件などを考慮し適切に選択するとともに，概要調査では，それらの調査技術を組み合わせることにより，信頼性の高い調査を行う。

JAEA は，岐阜県瑞浪地域に分布する結晶質岩・淡水系地下水，北海道幌延地域に分布する堆積岩・塩水系地下水を対象とし，地上からの調査予測研究段階（精密調査の地上からの調査までの段階に相当）に関する調査・研究を実施した。ここでは，両地域における地質環境特性にかかわるデータの取得から解釈・地質環境モデル構築までの一連の検討を行い，地下深部の地質環境に対する地上からの調査技術として，その成果を取りまとめた（三枝ほか，2007；太田ほか，2007）。これらの技術の有効性については，現在進めている研究坑道の掘削を伴う研究段階および研究坑道を利用した研究段階の結果に基づき検証される。

このような状況のもと，NUMO では，概要調査の実施に向けて検討・構築してきた調査技術・評価手法の体系的適用性を確認すること，調査・管理技術の整備を図ることなどを目的として，2006年度から電中研横須賀地区の研究所敷地内において，ボーリング調査を主体とする実証研究を電中研との共同研究として進めてきた。実証研究では，文献調査および概要調査の各段階に相当するサイト調査を模擬して実施した（図 5.4.2-1）。

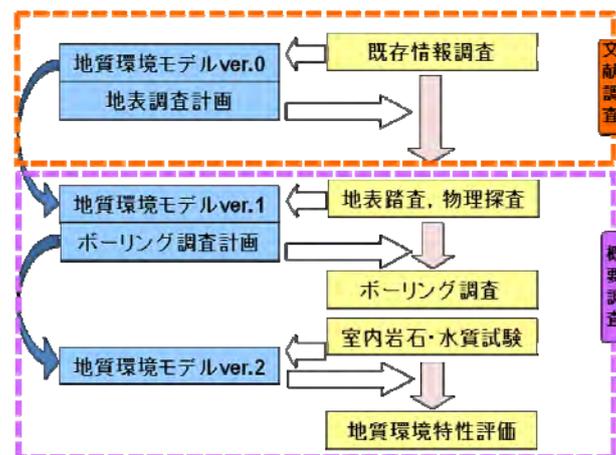


図 5.4.2-1 実証研究の全体フロー

文献調査に相当する既存情報調査においては，収集・整理した文献情報および空中写真判読結果から概要調査地区選定上の考慮事項に基づき，法定要件に関する事項および付加的に評価する事項に関する情報を整理し，評価した。

概要調査に相当する地上からの調査では，電中研横須賀地区の研究所敷地内を対象とした地表踏査，物理探査および同敷地内で2孔（掘削深度 350m および 500m，離間距離約 10m）のボーリング調査を実施した（図 5.4.2-2）。地上での物理探査は，電気探査，電磁探査，反射法地震探査を実施した。さらに，ボーリング孔を利用した VSP 探査を実施した。

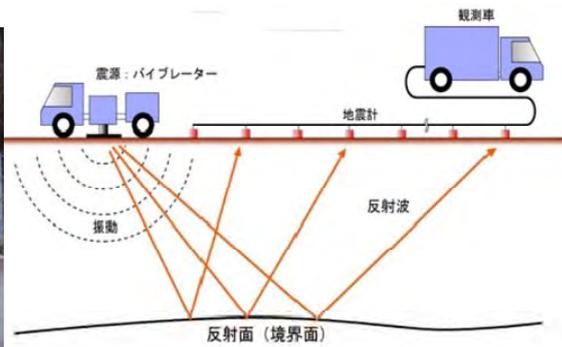


図 5.4.2-2 電中研横須賀地区における共同研究の実施状況

左上写真：反射法地震探査で用いる小型起震車
 左下写真：ボーリング調査現場の全景

右上図：反射法地震探査の概念図
 右下写真：ボーリング調査（孔内検層）の様子

ボーリング調査の実施に当たっては、コア採取率およびコア形状保持の向上を基本方針とし、調査計画段階ではケーシングプログラムをはじめ、掘削孔径、泥剤の選定などについて検討した。調査実施段階では、一部の区間において孔壁の押し出しによる掘削障害などが発生したが、地質性状と孔壁の状態を的確に把握し、掘削ビット形状の改良、ビット径の変更など、その都度状況に応じて既存調査技術の適切な選択・適用と一部の改良をタイムリーに実施することによって、深度 500m までのボーリング調査を比較的高いコア採取率とコア形状保持を維持しながら工程遅延をきたすことなく実施することができた（近藤ほか、2011）。また、当該サイトにおける岩石や地下水の特性を把握するため、概要調査にて実施する各種の孔内検層・試験および室内岩石・水質試験を実施し、地質・岩盤性状の違いに応じた孔内検層・試験の手法・手順の適用性を確認することができた（近藤ほか、2011）。

実証研究により取得した地質環境にかかわるデータは、調査段階ごとに整理し、その結果に基づき、地質環境モデルを調査の進展に応じて構築・更新した。実証研究では、実際の概要調査に比べ

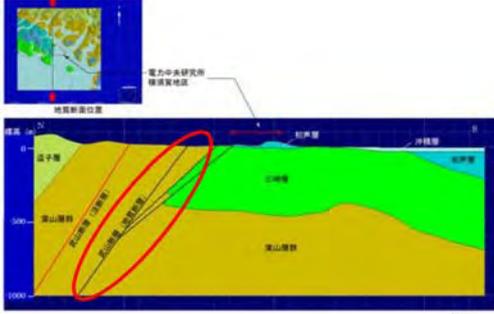
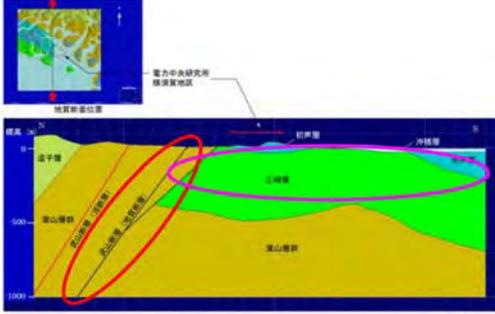
て調査・取得データが限られているものの、既存情報調査段階、地表調査段階、ボーリング調査段階と調査の進展に応じて地下深部の地質環境特性に関するデータが取得・蓄積された。これらのデータを整理・解釈し、モデルに反映することによって地質環境モデルに内在する地下深部の地質環境特性に関する不確実性が低減し、その信頼性を向上させることができることを確認した（表 5.4.2-1）。

なお、実証研究において実施した一連の調査・試験に関する調査管理技術を整理することにより、文献調査から概要調査に至る調査・評価の流れを検討した。同時に、調査範囲や調査位置の制約のある中での調査ではあるが、地質・岩盤性状の違いに応じたボーリング掘削、孔内検層・試験の内容とその手順についても検討し、取りまとめを行った（表 5.4.2-2、図 5.4.2-3）。

さらに、ボーリング調査を実施する際に想定される発生事象に対するリスク評価についても検討した（表 5.4.2-3）。リスク評価は、人的災害にかかわる事項と技術的な不具合にかかわる事項に分類し、各作業工種の評価指標を分析してリスクレベルを整理した。抽出した発生事象については、低減措置、残存リスク発生時の対策を取りまとめることにより、調査・試験に携わる作業従事者が潜在的なリスクの存在とその重大性、対策を認識する情報となり、災害の未然防止に役立てることができた。

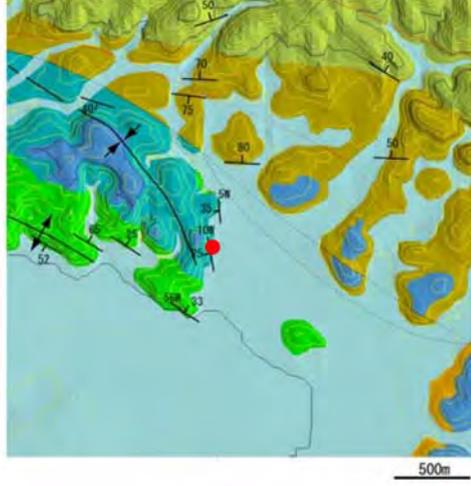
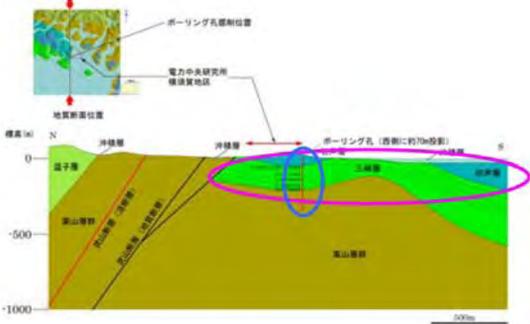
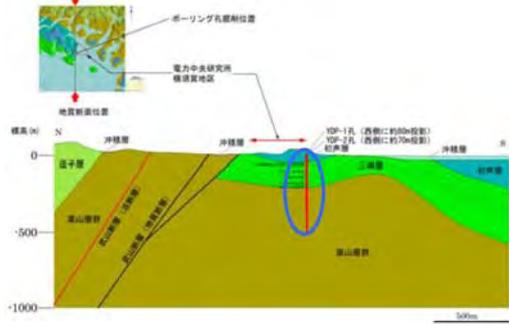
以上のように、既存情報調査、地表調査（地表踏査、物理探査）およびボーリング調査からなる一連の実証研究を実施した結果、文献調査から概要調査の実施に向けて検討・構築してきた地質環境の調査・評価の体系（5.3 参照）のうち、主に地質環境特性に係る調査・評価の論理的な手順や取得データの多角的な利用に関する適用性を実証することができた。また、概要調査の計画立案から調査・評価に至る一連の業務を実施することにより、調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や安全管理に関する手法の有効性などを確認することができた。地質・地質構造の判定、掘削方法などについても、研究経過および結果の評価を適切に行うことができた。さらに、この実証研究では、技術的信頼性をより確実なものにしていくため、広く国内外の専門家との意見交換を行いながら進めた。これらの実証研究で得られた成果は、概要調査計画を策定する際に反映できる知見であり、概要調査実施時において工程遅延防止や適切な手法の選択に活用できるほか、地層処分事業者である NUMO に求められる適確で迅速なマネジメントの実現に寄与できるものと考えている。

表 5.4.2-1 地質構造モデルの変遷と不確実性・信頼性の評価（例）

		既存情報調査段階	地表調査段階
地質構造モデル	地質平面		
	地質断面		
確実性		<ul style="list-style-type: none"> 地表地質分布は、地表踏査などに基づき作成された既存情報（地質図）であることから確実性は高いが、地下深部の情報という点では、地表分布に基づく推定のため確実性は低い。 	<ul style="list-style-type: none"> 地表地質分布の変更点は、現地での観察結果によるもので確実性は高いが、地下の地質分布については、新たなデータによる更新はなく、前段階と同じである。
信頼性		<ul style="list-style-type: none"> 公的機関の資料（地質調査所発行の地質図幅など）に基づくデータであり、信頼性は高い。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルの地表付近の更新部分は、地表踏査および横坑内地質観察による観察データに基づくものであり、信頼性は高い。

○：地質構造モデルの更新箇所（既存情報調査段階⇒地表調査段階），○：地質構造モデルの更新箇所（地表調査段階⇒ボーリング調査段階：YDP-1 孔），○：地質構造モデルの更新箇所（ボーリング調査段階：YDP-1 孔⇒ボーリング調査段階：YDP-2 孔），●：ボーリング調査地点

表 5.4.2-1 地質構造モデルの変遷と不確実性・信頼性の評価（例）（つづき）

		ボーリング調査段階（YDP-1 孔）	ボーリング調査段階（YDP-2 孔）
地質構造モデル	地質平面		
	地質断面		
	確実性	<ul style="list-style-type: none"> ボーリング掘削地点の深度 354m までは、ボーリング調査（コア観察、孔壁観察など）の結果によるデータであり、確実性は高い。ボーリング調査地点以外については、前段階と同じである。 	<ul style="list-style-type: none"> 葉山層群については、岩相分布、層理面や岩相境界の走向・傾斜、微化石分析結果を基に両ボーリング孔の対比が行われているが、側方連続性が悪く、葉山層群を細分し、モデルに表現することは困難である。 ボーリング調査地点以外については、前段階と同じである。
	信頼性	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルの更新部分は、ボーリング調査結果に基づくものであり、信頼性は高いが、葉山層群と解釈した深度 207.43m 以深の泥岩（破碎質）については、堆積年代と地層対比の関係に問題が残る。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質構造モデルの更新部分は、基本的にボーリング調査結果に基づくものであり、信頼性は高い。ただし、ノンコア区間においては岩相境界深度の正確な認定は困難であり、やや信頼性に劣る。

○：地質構造モデルの更新箇所（既存情報調査段階⇒地表調査段階），○：地質構造モデルの更新箇所（地表調査段階⇒ボーリング調査段階：YDP-1 孔），○：地質構造モデルの更新箇所（ボーリング調査段階：YDP-1 孔⇒ボーリング調査段階：YDP-2 孔），●：ボーリング調査地点

表 5.4.2-2 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査内容
(近藤ほか, 2011 を編集)

	掘削・調査計画 (孔壁の安定性が高い) (例：三浦層群)	掘削・調査計画 (孔壁の安定性が低い) (例：葉山層群)
計画深度	500m	500m
掘削孔径 (最終孔径)	HQ (98.4mm)	PQ (123mm)
掘削水の種類	泥水 (ベントナイト泥水)	泥水 (フレックス泥水, KCl ポリマー泥水)
掘削方法	ワイヤーライン工法	ワイヤーライン工法
ケーシング プログラム	2段階 (1 段目：孔口保護, 2 段 目：掘削・調査スパンを考 慮)	3 (~4) 段階 (1 段目：孔口保護, 2 段目 以降：掘削・調査スパンを 考慮)
掘削・調査 スパン	200~300m	100m (葉山層群出現深度以深)
検層・試験時 の孔内状況	・清水環境 (孔内洗浄によ り置換) (泥水環境下で取得デー タの品質に影響がない 検層・試験項目につい ては, 泥水環境下で実施)	・泥水環境 (泥壁を保持) (泥水環境下で適用可能 な検層・試験を選択の上 実施. 透水試験・採水の 際には, フラッシングを 実施)

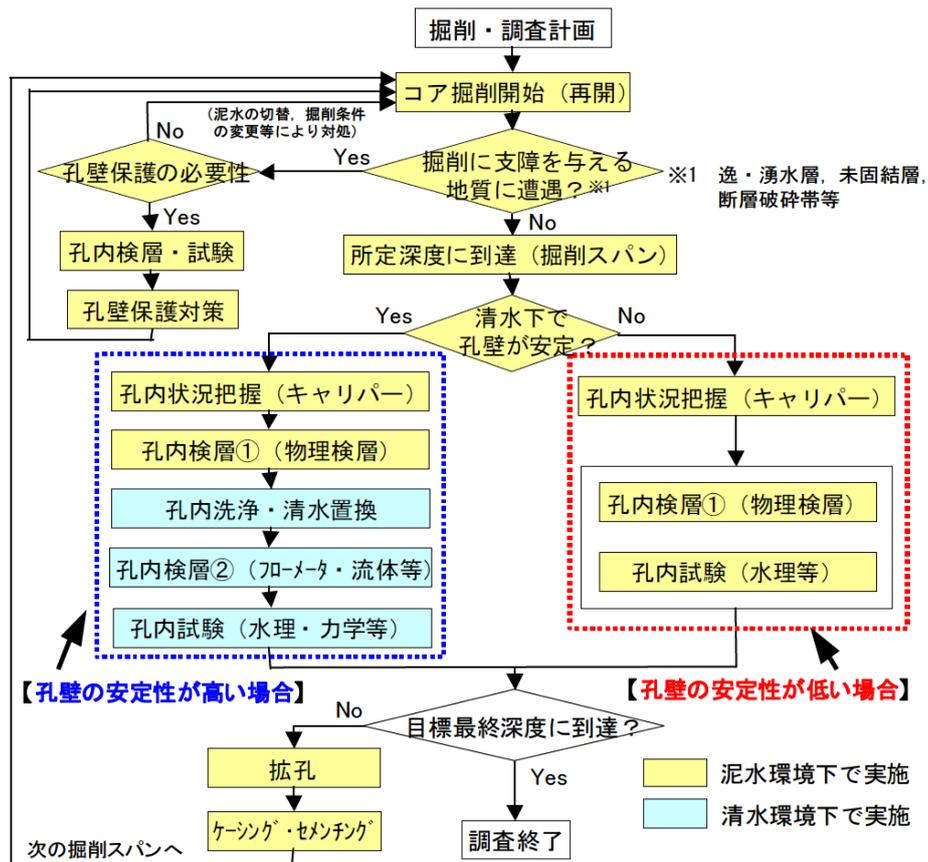


図 5.4.2-3 地質・岩盤性状に応じたボーリング掘削・調査手順
(出典：近藤ほか, 2011)

清水環境下で孔壁が自立可能か否かに着目し、ボーリング掘削・調査内容および手順を検討した。

表 5.4.2-3 ボーリング調査におけるリスク評価結果の例
(人的災害にかかわる事項)

発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
	作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1 クレーンの転倒	仮設工 (櫓設置撤去)	3	2	6	30	a	作業計画の遵守	連絡、必要な場合は病院への搬送
2 巻き込まれ、挟まれ	ボーリング掘削工	3	2	6	30	a	回転物の防護	連絡、必要な場合は病院への搬送
3 作業床の不備	孔内試験	3	2	3	15	b	作業周囲の整理・整頓	連絡、必要な場合は病院への搬送

(技術的な不具合にかかわる事項)

発生事象	評価点				リスクレベル		低減措置	残存リスク発生時の対策
	作業	作業の頻度	危害の発生可能性	危害の重大性	評価値	レベル		
1 すでに掘削した浅部にて、地盤応力により孔形状が変形し、装置が仰留	掘削	1	3	6	24	a	キャリパー検層やボアホールTVの実施 場合によってはダミーバッカーの降下試験 結果によって拡幅掘削	拡幅掘削などにより、形状復旧
2 スライム化した掘削泥水が装置内部に浸入し、操作不能	透水試験	2	3	6	30	a	孔内洗浄の徹底 装置の操作マニュアルの事前確認	スライムなどの排出作業による操作性の復旧
3 孔壁への載荷荷重が大きすぎるために孔壁を壊してしまい、載荷板が仰留	孔内水平載荷試験	1	2	6	18	b	適切な実施計画による載荷荷重の設定	拡幅掘削などにより装置の回収、孔形状の復旧
4 ロッドの孔内落下	ロッドを使う全作業	3	2	3	15	b	手順書の確認 特にホールドの確認	同一のロッドやタップによる回収
5 昇降中、ワイヤーが切断して、装置が孔内に落下	ワイヤーを使う全作業	3	3	6	36	a	作業前のワイヤーの点検と装置荷重の確認	ワイヤー交換 タップによる回収

(評価指標と算定表)

評価項目	評価点	評価の目安
頻繁にある	3	工事期間中毎日
時々ある	2	特定作業中
めったにない	1	工事期間中2~3回

評価項目	評価点
確実に起こる	4
可能性が高い	3
可能性がある	2
ほとんどない	1

評価項目	評価点
極めて有害	6
有害	3
わずかに有害	1

評価項目	評価値	リスクレベル	
重大なリスク	大きなリスク	24以上	a
	中程度のリスク	12~23	b
小さなリスク	6~11	c	
些細なリスク	5以下	d	

評価値 = (作業の頻度 + 危害の発生可能性) × (危害の重大性)

5.4.3 調査・評価技術の評価と信頼性向上に向けた取り組み

NUMO は、3.2.3.2 に述べた技術開発の体系的整理の方法に従い、「的確に精密調査地区を選定する」という目標の達成に必要な調査・評価技術について、基盤研究開発機関との議論を経て、達成目標レベル、現状の技術レベル、今後の技術開発課題、成果が必要となる時期、技術開発の業務分担（基盤研究開発機関あるいは NUMO）について取りまとめた。（NUMO, 2010b）。ここでは、その内容を中心に、概要調査にかかわる技術の評価とさらなる信頼性向上に向けた取り組みについて述べる。

5.4.3.1 技術の信頼性の評価

(1) 自然現象の影響

ここでは、一般に確度の高い評価が可能とされている将来 10 万年程度を対象とした火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）に関する調査・評価技術について検討を行った（表 5.4.3-1, 表 5.4.3-2）。

火山・火成活動については、対象地域の第四紀火山、熱・熱水の分布や活動履歴に関するデータを取得し、マグマの貫入・噴出などの精度の高い評価ができることが目標となる。そのための技術は、現状でも十分なレベルにあると考えられる。個々の手法については、検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上と、それらの技術の体系化を進めることが重要である。具体的には、後期鮮新世～前期更新世を含めた火山の活動履歴をよりの確に評価するための年代測定技術の高度化や、確率論的評価手法の高度化（概要調査規模の領域の評価、安全評価への情報提供の方法）などが挙げられる。

地震・断層活動については、対象地域の活断層の分布の把握や活動履歴と将来の活動性（伸展、再活動など）、断層周辺の変形帯や影響範囲の評価が行えることが目標となる。そのための基本的な調査・評価手法は整備されていると考えられる。個々の手法については、今後は手法の適用事例の蓄積や改良により信頼性の向上、体系化を進めることが重要である。特に重要な課題として、断層の活動性の評価手法（地質断層の再活動、ボーリング調査や坑道で出現した断層が活断層であるかどうかの評価手法）、伏在断層の検出方法と評価手法、地表の短い活断層の評価手法（震源断層との関連の有無）、確率論的評価手法、地域特性に応じた総合的調査・評価手法（数値モデル・模型実験による評価も含む）などが挙げられる。

隆起・侵食（気候・海水準変動を含む）については、過去 10 数万年間またはそれ以前からの隆起・沈降量および侵食量、気候・海水準変動、地形変化を把握できることが目標となる。現状の技術では大きな誤差を見込まざるを得ない場合もあるが、それに伴う不確実性について整理されてきていることから、隆起・侵食の評価はおおむね可能であると考えられる。今後、改良や高度化、信頼性の向上が必要なものとして、河成段丘の対比・編年にかかわる情報整備、隆起量評価事例の蓄積、岩石・鉱物の化学組成・結晶構造、有機物組成に基づく温度・時間指標を用いて数 100 万年程度の長期的な隆起量・侵食量を間接的に推定・評価する手法、宇宙線生成核種の濃度測定や閉鎖温度の低い鉱物を用いた年代測定による直接的な侵食量評価手法、シミュレーションなどによる地形変化予測手法などが挙げられる。

また、安全評価の観点から、自然現象の将来 10 万年程度を超える超長期の評価が求められる可能性がある。これはサイト選定に必要な要件ではないが、プレート運動の継続性を含めた将来予測の可能性や不確実性に関する科学的立場からの検討が課題である。

(2) 地質環境特性

ここでは、地質環境の場の理解にかかわる項目（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤特性、物質移行特性、そのほかの特性（泥火山、マスマーブメント、など）、と地質環境特性の長期変遷について検討を行った（表 5.4.3-3）。

地質環境の場の理解については、JAEA の 2 カ所の深地層の研究施設計画における、地上からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して、わが国の主要な岩種である結晶質岩・淡水系地下水と堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは、地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し、地質環境の理解を深め不確実性を低減させていく、体系的な調査・評価の具体的な事例が示された。一方、沿岸域については、文献情報に基づく活断層の推定、海上・海底での物理探査、塩淡境界面の形状把握、海底の地下水湧出探査、コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ、陸域から海域にかけてのひと続きの調査・評価が可能になりつつある。さらに、後述する概要調査技術の実証的な検討を通して、付加体からなる地質環境の調査・評価に関する知見が得られている。以上のことから、NUMO は、これまで構築してきた調査・評価体系に、以上の知見を取り入れることにより、わが国の多様な地質環境に対する調査・評価を的確に実施できると考えている。

これらの技術において、検討事例の蓄積による技術の信頼性の向上や、技術の体系化に関する課題以外に、検討が必要と考えられる項目は以下のとおりである。

地質・地質構造の把握については、適用する岩種によって物理探査の検出能力が異なるため、多様な地質環境（結晶質岩、堆積岩、陸域、海域など）における地質・地質構造検出の程度および限界の検討をしておく必要がある。これについては横須賀での実証研究で沿岸域を対象にした各種物理探査の適用性について検討を進めている。しかし沿岸域については、波浪の影響を受ける潮間帯を含むいわゆる波打ち際の調査については、依然として物理探査などの計測技術に関する課題が残されている。地下水流動特性については、断層が水みちになるか遮水壁となるかなど、断層の性状と水理特性の関係などを考慮して、調査・評価を合理的・効率的に行うための体系的な手法が必要と考え、現在 NUMO と LBNL（米国ローレンスバークレー国立研究所）が共同で検討を進めている（Karasaki et al., 2010）。ここでは、物理探査とボーリング調査を併用して、断層を的確に検出するための手法の検討も併せて実施している。

岩盤特性については、坑道掘削時に重要となる岩盤の三次元応力場の解析手法が検討されてきたが、まだ開発途上であるため、今後も引き続き検討していく。

物質移行特性については、コロイド、有機物、微生物に関する理解は進んできたが、原位置での分析事例はまだ少なく、それらが物質移行に及ぼす影響の検討を含めた評価技術の整備が課題である。

塩淡境界面の分布・形状については、現在、幌延地域などにおいて国および基盤研究開発機関による検討が進められている。今後の課題としては、過去から現在に至る塩淡境界の変遷を把握する手法が挙げられる。

海域におけるボーリング調査は、主に資源探査や科学的研究を目的としてきたため、地下水化学特性を含めた詳細な地質環境特性を直接確認している事例は極端に少ない。現在、沿岸域を対象とした基盤研究開発が実施されているが、海域におけるボーリング調査技術の適用性に関する検討は、まだ行われていない。このため今後は、沿岸から海域における各種試験を含む調査・評価技術につ

いて、実証試験を含め、事例の蓄積や技術の体系化が課題である。

地質環境モデルの構築・評価技術に関しては、ボーリング調査などの進展に従い情報量が増加した領域については精度が向上し不確実性が低減されるが、それ以外の領域に対する不確実性は低減されない。これについては、今後、地球統計学的手法などによる空間的な情報の補間方法や、工学的対策や安全評価への影響に関する検討などを含めて、不確実性への対処方法について検討していく必要がある。

地質環境特性の長期変遷については、予備的な安全評価を行うために、将来 10 万年程度における長期的な状態の変化をおおむね設定できることが目標となる。そのために、今後検討が必要と考えられる項目としては、将来 10 万年程度の地質環境特性（地質・地質構造、地下水流動特性、地下水化学特性、物質移行特性）の時間的・空間的変遷に関する知見の整理、長期的な地質環境の変化を評価する手法の確立、その体系化・実用化などが挙げられる。

5.4.3.2 さらに信頼性向上に向けた取り組み

前項で抽出した検討項目のうち、知見・実績の蓄積、整備、高度化などに関する各課題は、今後の基盤研究開発の進展や調査・評価事例の蓄積によって解決されることが期待される。一方、NUMO では、本節で紹介した調査・評価手法の適用性の確認、あるいはモデルの検証を進めていく。さらに、基本的考え方の整備や地層処分事業に即した技術の体系化など、事業者として検討すべきと認識された以下の技術課題については、現在 NUMO 内で検討を進めている。

- ・ 自然現象の超長期評価の考え方および方法論の構築
- ・ 地質環境特性の長期変遷を評価する手法の確立および体系化
- ・ 沿岸域から海域における深部地質調査技術の適用性確認および実証

NUMO は、今後も最新の科学的知見や技術開発の成果を取り込み、これまでに体系化した調査・評価技術を改善していく。これと並行して、精密調査に向けた技術開発のニーズの取りまとめを行い、基盤研究開発機関と業務分担あるいは共同して、必要な技術開発を進めていく。

表 5.4.3-1 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (1/3)

	項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題
火山・火成活動	情報整備	<ul style="list-style-type: none"> ・第四紀火山、火山灰、温泉、熱水賦存領域の分布やその特徴などに関する全国規模のデータベースが整備された。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各段階の調査における基礎データとして活用することができる。 	—
	火山活動履歴の調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> ・火山の活動履歴を把握する手法は基本的に確立されており、テフラの認定や対比などについて精度や信頼性を向上させるための研究開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・概要調査の段階およびそれ以降において、各手法の適用限界や精度を確認した上で活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・年代測定技術の高度化
	マグマの貫入・噴出の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・地質学的・地球物理学的・地球化学的データに基づき、第四紀火山の活動性や深部熱源を総合的に評価する手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・サイト選定の各段階において、各調査地区とマグマ活動との関連性の評価を行う際に活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事例の蓄積、探査・測定技術の高度化
	熱・熱水の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・熱水賦存域の調査・評価手法は、地熱資源分野の技術開発において確立されており、地質学的・地球物理学的・地球化学的データなどに基づき、熱・熱水の影響を総合的に評価する手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・総合的な熱・熱水の評価手法などは、概略的な評価に有効であり、熱源や火山からの熱的影響の評価手法は、評価に必要な情報が得られた場合に有効であると考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・評価事例の蓄積、探査・測定技術の高度化
	確率論的評価	<ul style="list-style-type: none"> ・NUMO や JAEA により、確率論的に将来の火山活動を評価する手法の開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・決定論的手法を用いた評価を補足する手法として適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・確率論的手法による結果の利用方法に関する検討、手法の高度化
地震・断層活動	活断層の存在の把握	<ul style="list-style-type: none"> ・活断層データベースなどの全国規模の情報整備、SAR や GPS など測地学的手法、航空レーザ一測量を用いたなど地形学的手法の整備が進み、微細な変位地形やひずみの分布などに基づいた検討が行われるようになってきた。 ・物理探査手法では、三次元探査の適用、沿岸海域に対応したシステムの開発、解析手法の高度化などが進められている。また、トモグラフィの解析精度の向上は深部地質構造の解明に大きく寄与した。 ・断層の分布や活動性を評価する際に適用する、地球化学的手法や構造地質学的手法の開発が進められている。 ・上記の手法を総合的に組み合わせて評価する手法の開発が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・文献調査の段階における基礎データとして活用することができる。 ・測地学的手法や地形学的手法は文献調査や概要調査の初期の段階で適用する。 ・物理探査、地化学探査などは概要調査で地下での活構造の検出や確認に活用していく。 ・構造地質学的手法は上載法が適用できない場合など有効な手法であり手法の高度化を進めながら適用していく。 ・総合的な評価手法は、対象地域に応じて適切な手法を組み合わせて適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> ・断層の活動性（特に地下で遭遇する）を評価するための手法の高度化 ・伏在断層の検出・評価手法の高度化 ・地表の短い活断層などの評価手法の高度化 ・地域の特性に応じた総合的な評価手法（モデル実験など含む）の高度化

表 5.4.3-2 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (2/3)

	項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題
地震・断層活動	活断層周辺の変形帯の把握、活断層周辺の影響範囲の把握、断層の発達・伸展の評価、断層破碎帯の評価	<ul style="list-style-type: none"> 断層関連褶曲の考え方に基づく検討が進展し、褶曲地帯の地表変形と深部の断層の理解が進んだ。 横ずれ断層や逆断層の模型実験や数値解析による検討で、断層の発達過程や周辺への影響についての理解が進んだ。 ダメージゾーンやプロセスゾーンに対する地質学的手法の適用や物理探査（比抵抗法）によるイメージングによる解析が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、各手法の適用性を考慮して評価に適用していく。 概要調査の段階およびそれ以降の地質調査、ボーリング調査、地下調査施設における調査において、適用可能である。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質調査と模型実験やモデル解析を組み合わせた手法の整備 花崗岩地域以外の地質環境での事例検討、探査手法の高度化
	地質断層の再活動性の評価	<ul style="list-style-type: none"> 応力場の変化に伴う既存断層の再活動の事例が示され、モデル実験などによる解析も進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 事例を参考に評価を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 活動性評価のための手法の整備・高度化
	確率論的評価	<ul style="list-style-type: none"> 数 10 年程度の地震動の発生確率はハザードマップとして公表されている。10 万年程度の予測としては、NUMO の歪速度による確率論的評価手法が開発されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 決定論的手法を補足する目的での適用が考えられる。 	<ul style="list-style-type: none"> 確率論的手法による結果の利用方法に関する検討や手法の高度化
	隆起・侵食	情報整備	<ul style="list-style-type: none"> 海成段丘アトラス、最近 10 万年間の隆起速度分布図など全国規模の情報が整備された。 	<ul style="list-style-type: none"> 各段階の調査における基礎データとして活用することができる。
隆起・沈降量の調査・評価		<ul style="list-style-type: none"> 河成段丘について、対比・編年、内陸部隆起量評価の指標としての信頼性について検討が行われ、手法の妥当性や信頼性が向上した。また堆積物を用いた隆起・沈降運動を復元する手法の検討事例が蓄積された。 	<ul style="list-style-type: none"> 文献調査や概要調査の段階において、隆起量の評価だけでなく、活断層などの抽出にも適用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 信頼性の高い段丘対比・編年データの蓄積 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価事例の蓄積 堆積物を用いた隆起量評価事例の蓄積
侵食量・侵食速度の評価		<ul style="list-style-type: none"> 年代測定、鉱物相転移の温度依存性を利用した長期的侵食速度の推定手法や、宇宙線生成核種を利用して直接的に侵食速度を推定する手法の開発が進められている。また、長期の地形変化を予測する手法の開発が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食速度測定手法などは、概要調査の段階およびそれ以降において、その適用性などを考慮して必要に応じて活用していく。 地形変化予測手法は、適用限界を考慮しつつ地下水流動解析への基礎データとしても利用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 侵食速度測定手法の改良、わが国における事例の蓄積など 地形変化シミュレーションの検証 過去の履歴に基づく評価と地形変化シミュレーションを組み合わせた体系的な調査・評価手法の高度化
気候・海水準変動の復元		<ul style="list-style-type: none"> 風成層やコアの堆積物の解析により地域的な気候変動を解析する研究が進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して活用していく。 	<ul style="list-style-type: none"> 評価事例の蓄積、分析手法の高度化

表 5.4.3-3 概要調査に向けた調査・評価技術の評価 (3/3)

項目	現状	調査・評価への適用性	さらなる信頼性向上に向けた課題	
地質環境特性	地質・地質構造	<ul style="list-style-type: none"> 地下構造を把握するための二次元または三次元の物理探査技術（解析手法を含む）の改良や高度化、沿岸域などの地質環境に応じた手法の開発が進められている。 結晶質岩、堆積岩を対象とした亀裂の分布解析手法の検討が進められた。 沿岸海底下において効率的に調査を行うボーリングシステムの開発が行われている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して、概要調査の段階およびそれ以降に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 海域におけるボーリング調査事例の蓄積とそれに基づく調査・評価手法の体系化 多様な地質環境（結晶質岩、堆積岩、陸域、海域）における地質構造検出の程度および限界の検討 波打ち際での計測技術の高度化
	地下水流動特性	<ul style="list-style-type: none"> シーケンシャル水理試験法をはじめとする地下水深部を対象とする水理試験手法、地下水流向・流速測定手法などが整備された。また、堆積岩、結晶質岩における水理地質構造モデルの作成から地下水流動解析が行われ、さらに気候・海水準変動を考慮した解析手法が示された。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、対象地域に応じた手法を選定して適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動に影響する断層の検出手法の検討 断層に関連した水理特性評価の手法の体系化
	地下水化学特性	<ul style="list-style-type: none"> 地下水の安定同位体を利用した地下水年代測定から地下水の特性や流動解析を行う手法の整備が進められ、また、地下水化学モデルの構築手法が提示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> 各手法の適用性などを考慮して、概要調査の段階およびそれ以降に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地質環境の長期変遷を考慮した評価手法の高度化
	岩盤特性	<ul style="list-style-type: none"> 既存情報や地上からの調査で得られる情報に基づき地下施設の建設可能性や難工事遭遇可能性を評価する岩盤評価手法が構築されている。 熱特性については、データベースの整備、および堆積軟岩の温度依存性評価が行われた。 	<ul style="list-style-type: none"> 主に概要調査以降からデータの取得を行い、手法の適用は対象地域の特性に応じて行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 三次元応力場解析手法の高度化
	物質移行	<ul style="list-style-type: none"> 物質移行特性ではデータベースの整備や物質移行プロセスのモデル化などが進められている。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水流動や概要調査などで取得したデータに基づく概略の評価に適用する。 	<ul style="list-style-type: none"> 今後の地下研究施設などでの物質移行・遅延プロセスの解明、モデル化の検討による評価技術の整備
	その他の特性	<ul style="list-style-type: none"> 泥火山・泥ダイアピルやマスマーブメントに対する知見の蓄積が進んだ。 	<ul style="list-style-type: none"> 泥火山やマスマーブメントは特殊地質環境で発生する現象であることを考慮し対象地域の評価に反映させる。 	—
総合的な調査・評価	<ul style="list-style-type: none"> 深地層の研究施設計画などでは、統合化データフローダイアグラムを構築し、体系的な調査・評価手法が示されている。 	<ul style="list-style-type: none"> サイト選定の各段階において、体系的な調査・評価を行う上での参考事例として活用することができる。 	<ul style="list-style-type: none"> 沿岸域および海域における調査・評価手法の体系化 データのない部分の空間的補間方法、不確実性が工学的対策・安全評価に与える影響の検討 	

5.5 まとめ

第5章では、概要調査地区選定段階における文献調査および精密調査地区選定段階における概要調査を中心に、NUMOが地質環境の調査・評価をどのような考え方でどのように実施していくのか、そしてそれに必要な技術がこの10年間でどの程度進展したか述べてきた。以下にそれらの要点をまとめる。

(1) 調査・評価の基本的考え方

わが国は変動帯に位置するため、処分施設建設地として選定されるサイトは、将来にわたり火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・侵食などの自然現象による著しい影響を回避できる場所であることが求められる。その上で、地層処分の場合となる地質環境の特性を把握するとともに、それらの長期変遷を理解し、処分場の設計・施工および閉鎖後長期の安全確保の観点からより適切と判断される場所を処分施設建設地として選定する。

地層処分の対象となる地質環境は、広範囲の空間的な特性のばらつきを有しており、それらをすべて調査し把握することは困難である。また、閉鎖後数万年以上にわたる長期の安全性の評価には、時間的な不確実性が伴う。このため、段階的な調査・評価により、節目ごとに安全確保の目標に対する達成レベルを確認するとともに、不確実性が大きくかつ重要度の高い因子を抽出し、次段階にそれにかかわる情報を優先的に取得する。そのために、地質環境モデルを段階的に構築・更新し、サイト調査・評価、工学的対策、安全評価の三つの分野で地質環境の場の理解や不確実性に関する情報を共有する。自然現象の影響評価のための将来予測は、対象とする地域および事象ごとに主に外挿法により行い、予測に伴われる不確実性の程度に応じて、期間A：十分な過去の情報に基づく外挿法による予測が可能な期間、期間B：不確実性は大きくなるが外挿法による予測が可能な期間、期間C：外挿法による予測が難しい期間の三つに区分して情報を整理する。

わが国の地質環境は、地層処分の観点からは、大きくは結晶質岩（硬岩）と堆積岩（軟岩）、そして淡水系地下水と塩水系地下水の区分の組み合わせにより代表される。また、淡水系と塩水系の地下水が接する沿岸域については、内陸部とは一部異なる調査・評価の考え方や技術が必要である。これらの地質環境に対する調査・評価技術については、基盤研究開発機関を中心に検討が進められており、NUMOはその成果を活用し個別地点の地質環境に対応した調査・評価を行う。

(2) 調査・評価の進め方

【文献調査】

文献調査では、「概要調査地区選定上の考慮事項」のうちの地震（地震・活断層）、噴火（火山・火成活動、熱・熱水）、隆起・侵食、第四紀の未固結堆積物、鉱物資源にかかわる法定要件に関する事項に照らして、自然現象の著しい影響が避けられないような明らかに不適格な場所を回避するとともに、地下施設の建設が明らかに困難な場所、鉱山開発などによる人間侵入の可能性の高い場所を避けて、概要調査地区を選定する。なお、この段階での評価において、情報量の不足などに起因する不確実性のため明確な判断を下せない場合は、次の概要調査において判断する。

法定要件に関する事項の適格性を確認した後、付加的に評価する事項（地層の物性・性状、地下水の特性、調査・評価の難易度、自然災害、土地や輸送経路など）について総合的に評価し、概要調査地区としての特性を総合的に評価する。応募区域が複数存在する場合は、必要に応じて他地点との相対比較を行う。

また、以上の作業と並行して、地質・地質構造、地下水の流動特性および化学特性、岩盤特性の地質環境モデルを構築する。それに基づき、不確実性の所在と程度を把握し、工学的対策や安全評価からの要求も考慮して優先度を明確にし、概要調査計画に反映する。

【概要調査】

概要調査では、法定要件に照らして、地表調査、物理探査、ボーリング調査などの地上からの調査により、自然現象の著しい影響を回避できるか、坑道の掘削に支障がないか、地下水の水流が地下施設に悪影響を及ぼさないかについて判断し、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保の見通しを得て精密調査地区を選定する。この段階における法定要件のうち、「地層の著しい変動」に対しては、例えば、火山・火成活動、地震・断層活動および隆起・侵食にかかわる評価を行う。その結果、地層処分システムへの著しい影響が否定できない、あるいは評価における不確実性が大きく明確な判断が下せない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

地質環境特性の調査・評価は、基本的には地表調査とボーリング調査の二つのフェーズに分けて実施する。まず、地表踏査や物理探査などの地表調査の結果に基づき、地質環境モデルを更新し、地質環境特性の長期変遷について検討する。これらの情報をもとに地下施設・人工バリアの概略検討や概略的な安全性の評価を行い、その結果を踏まえてボーリング調査の計画を検討する。次に、ボーリング調査により取得した情報に基づき地質環境モデルを更新し、地質環境特性の長期変遷の検討を経て、地下施設・人工バリアの概念設計や、予備的な安全評価を行う。その結果、法定要件の「坑道掘削への支障」に対する未固結堆積物、「地下水の水流による地下施設への影響」に対する大規模な高透水性構造（水みち）などの項目について、地層処分システムへの著しい影響が否定できない場合、事業期間中の安全確保が困難であると判断される場合、あるいは評価における不確実性が大きく明確な判断が下せない場合には、そのような場所を精密調査地区から除外する。

さらに、法定要件以外にも、事業期間中および閉鎖後長期の安全確保、自然環境への影響、経済性などの観点から総合的な評価を行い、事業を進める上でより適切と判断される場所を精密調査地区として選定する。概要調査地区が複数の場合にも、総合的な評価の結果を踏まえて相対的比較を行い、より適切と判断される地区を選定する。

(3) 調査・評価を支える技術の進展

第2次取りまとめでは、わが国には地層処分に必要な条件を満たす地層が広く存在し、当時の調査・評価技術を用いて、そのような条件を備えているか否かを判断できることが示された。第2次取りまとめ以降、NUMO および基盤研究開発機関では、地層処分事業の推進を見据え、個々の調査・評価技術を改良・高度化するとともに、わが国の多様な地質環境を考慮した体系的な調査・評価技術に関する検討を進めてきた。ここでは、自然現象と地質環境特性の項目ごとに、上述の調査・評価支える技術の進展について述べる。

火山・火成活動については、わが国の火山灰に関するデータが整理され、テフラの対比の精度が向上した。また、地震波トモグラフィなどの地下深部の解析技術の高度化に伴い、火山の新規発生やマグマの移動の評価手法、深部熱源の評価手法における信頼性が向上した。さらに、地球化学的手法を活用した深部熱水の評価手法が開発され、マグマ起源以外の熱水の存在が明らかになった。これらの決定論的な評価を補足する手法として、海外で用いられている複数の確率論的手法に基づく火山発生確率の評価手法が開発され、わが国の広域的な領域や単成火山群の評価に対する適用性

が確認された。以上の技術の進展により、対象地域の第四紀火山の分布や活動履歴に関するデータを取得し、将来の評価を行うことは、現状の技術で可能と考えている。

地震・断層活動については、地表で活断層が認識されていなかった内陸地域の被害地震に対する調査を通して、震源断層と活断層の関係、伏在断層や未成熟な断層の検出、既存の活断層図の十分性などの課題が見出された。このような課題に対し、例えば、地表に明瞭な変位を伴わない活断層の評価には、変動地形学的手法、断層関連褶曲の考えに基づく数値解析や模型実験、地質断層の再活動を考慮した解釈などが取り入れられてきている。また、断層の影響範囲の評価にも、数値解析や模型実験と現状を比較することにより評価する手法が示された。これらの決定論的な評価を補足する手法として、測地などの複数のデータの歪速度に基づき将来の断層活動を確率論的に評価する手法が開発され、わが国の広域的な領域への適用性が確認された。以上の技術の進展により、対象地域の活断層の分布や活動性、活動履歴を把握し、将来の評価を行うことは、現状の技術で概ね可能と考えている。

隆起・侵食については、情報の整備および事例研究などを通じて、隆起・沈降量、侵食量・侵食速度の推定、気候・海水準変動の復元などの手法の高度化、体系化が図られた。河成段丘の対比・編年の信頼性の向上に伴い、過去 10 万年間程度の内陸部の隆起量の見積りへの信頼性が向上した。また、過去の侵食履歴と気候・海水準変動に基づく、将来の地形変化の予測手法やシミュレーション技術の開発が進められ、長期的な地下水流動解析への情報提供が可能になってきた。これらの技術の進展により、隆起・沈降量および侵食量、気候・海水準変動、地形変化を把握し、将来の評価を行うことは、現状の技術で概ね可能と考えている。

地質環境特性については、JAEA の二つの深地層の研究施設計画における、地表からの調査段階（NUMO の文献調査から精密調査の前半に相当）の調査研究を通して、わが国の代表的な地質環境である内陸部の結晶質岩・淡水系地下水および堆積岩・塩水系地下水を対象とした調査・評価に関する知見が得られている。ここでは、地質環境特性の各項目のデータ取得からモデル構築に至る一連の作業を段階的に繰り返し、地質環境の理解を深め不確実性を低減させていくという、体系的な調査・評価の具体的な事例が示された。一方、沿岸域については、文献情報に基づく活断層の推定、海上・海底での物理探査、塩淡境界面の形状把握、海底の地下水湧出探査、コントロールボーリングによる掘削・調査などに関する技術開発が行われ、陸域から海域にかけての一続きの調査・評価が可能になりつつある。以上の知見を NUMO がこれまで構築してきた調査・評価の体系に取り込むことにより、わが国の多様な地質環境に対する調査・評価を的確に実施することができる。

NUMO は、体系的な調査・評価技術の適用性を確認すること、および調査管理技術の整備を図ることを目的として、現地調査に基づく実証的な検討を行った。その結果、文献調査、地表調査、ボーリング調査を通じて段階的にデータを取得・解釈し、地質環境モデルを更新する過程を通して、地質環境モデルの不確実性が低減されることを確認した。また、調査計画立案から結果の評価に至る一連の業務を実施することにより、調査実施の工程管理・品質管理にかかわる的確かつ合理的な意思決定や、安全管理などに関する手法の有効性を確認することができた。

以上に述べてきたことから、今後あらゆる地点からの応募に対して、NUMO が的確に文献調査および概要調査を実施し、サイト選定にかかわる評価を行うための基本的な準備は整ったと考えている。

参考文献

- 阿部寛信, 酒井隆太郎 (1999) : 地震・断層活動が水理環境に及ぼす影響, サイクル機構技報, No.5, pp.77-83.
- 相澤泰隆, 小林健太, 梅津健吾, 山本亮 (2005) : 2000年鳥取県西部地震の余震域およびその周辺に分布する断層岩類, 地質学雑誌, 第111巻, 第12号, pp.737-750.
- 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治 (2006) : 多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築, 応用地質, 第47巻, 第3号, pp.120-130.
- 阿子島功 (1983) : 山形県馬見ヶ崎川流域における過去2万年間および最近の侵蝕速度, 地形, 第4巻, 第1号, pp.97-106.
- Alexander, W. R., Frieg, B. and Ota, K. (2009) : The Nagra-JAEA in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock III: The RRP project final report, Nagra Technical Report NTB 00-07.
- 雨貝知美, 鈴木啓, 和田弘人, 藤原みどり, 飛田幹男, 矢来博司 (2008) : 干渉合成開口レーダーを用いた平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動の検出, 国土地理院時報, 第117集, pp.15-20.
- Amano, K., Niizato, T., Yokota, H., Ota, K., Lanyon, B. and Alexander, W. R. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (2) Integrated palaeohydrogeological approach for development of site evolution models, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan.
- 青柳恭平, 阿部信太郎 (2007) : 2004年新潟県中越地震と地質構造の関係ー活褶曲地域における震源断層評価ー, 電力中央研究所報告, N06030.
- 青柳恭平, 阿部信太郎 (2009) : 明瞭な活断層が見出されない地域での震源断層評価ー長野県西部地震震源域における地球物理学的調査ー, 電力中央研究所報告, N08038.
- 朝倉俊弘, 小島芳之 (1995) : 膨張性地山の調査・試験・解析, 地質と調査, 63, pp.7-14.
- 浅森浩一, 梅田浩司 (2005) : 地下深部のマグマ・高温流体等の地球物理学的調査技術ー鬼首・鳴子火山地域および紀伊半島南部地域への適用ー, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.147-155.
- 浅森浩一, 梅田浩司, 石丸恒存, 小松亮 (2003) : 温泉地化学データベースの作成, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7450 2002-003.
- 麻植久史, 小池克明, 吉永徹, 高倉伸一 (2007) : 布田川ー日奈久断層帯の深部比抵抗構造のイメージングと微小地震分布からの考察, 応用地質, 第48巻, 第4号, pp.180-191.
- 芦田譲 (2005) : 日本列島をめぐる領土と資源エネルギー, 季報エネルギー総合工学, Vol.28, No.1, pp.48-57.
- Baba, K. and Yamada, Y. (2004) : BSRs and associated reflections as an indicator of gas hydrate and free gas accumulation: An example of accretionary prism and forearc basin system along the Nankai Trough, off Central Japan, Resource Geology, Vol.54, No.1, pp.11-24.
- Bates, R.L. and Jackson, J.A. (1987) : Glossary of geology, third edition, American Geological Institute.
- Bieniawski, Z. T. (1989) : Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York.

- 朴進牛, 鶴哲郎, 野徹雄, 瀧澤薫, 佐藤壮, 金田義行 (2008) : 紀伊半島南東沖南海トラフでの高分解能 3 次元反射法地震探査と重合前深度マイグレーション処理, 物理探査, 第 61 巻, 第 3 号, pp.231-241.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Ellis, S., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K. (2009a) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-Summary Report -, NUMO-TR-09-03.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Hasenaka, T., Jaquet, O., Kiyosugi, K., Litchfield, N., Mahony, S., Miyoshi, M., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M., Villamor, P., Wallace, L., Goto, J., Miwa, T., Tsuchi, H. and Kitayama, K. (2009b) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-The Kyushu Case Study-, NUMO-TR-09-02.
- Chapman, N., Apted, M., Beavan, J., Berryman, K., Cloos, M., Connor, C., Connor, L., Jaquet, O., Litchfield, N., Mhony, S., Smith, W., Sparks, S., Stirling, M. and Wallace, L. (2009c) : Development of Methodologies for the Identification of Volcanic and Tectonic Hazards to Potential HLW Repository Sites in Japan,-The Tohoku Case Study-, NUMO-TR-08-03.
- Chapman, N., Goto, J. and Tsuchi, H. (2009d) : Likelihood of Tectonic Activity Affecting the Geological Stability of a Repository in Japan: Development of NUMO's ITM Methodology, Stability and Buffering Capacity of Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste : Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, pp.67-75.
- 千木良雅弘 (1995) : 風化と崩壊, 近未来社.
- 千木良雅弘, 中田英二 (1994) : 堆積岩の続成作用 (その 1) - 圧密・脱水と水理地質特性 -, 電力中央研究所報告, U94026.
- 千木良雅弘, 田中和弘 (1997) : 北海道南部の泥火山の構造的特徴と活動履歴, 地質学雑誌, 第 103 巻, 第 8 号, pp.781-791.
- 地質調査所 (1980) : 日本地熱資源賦存地域分布図, 地質調査所.
- 地質調査所 (1992) : 新潟県中部地域, 日本油田・ガス田図 13.
- 地質調査所 (1995) : 100 万分の 1 日本地質図第 3 版 CD-ROM 版, 数値地質図 G-1, 地質調査所.
- 地質環境の長期安定性研究委員会 (2011) : 地質リーフレット 4 日本列島と地質環境の長期安定性, 日本地質学会.
- Cox, A. and Engebreston, D. (1985) : Change in motion of pacific plate at 5My BP., Nature, 313, pp.472-474.
- 第四紀地殻変動研究グループ (1968) : 第四紀地殻変動図, 第四紀研究, 第 7 巻, 第 4 号, pp.182-187.
- 第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ v.1.0 (CD-ROM 版), 日本火山学会.
- 壇原毅 (1971) : 日本における最近 70 年間の総括的上下変動, 測地学会誌, 第 17 巻, 第 3 号, pp.100-108.
- 土木学会 (1983) : トンネルの地質調査と岩盤計測, 土木学会.
- 土木学会 (2001) : 概要調査地区選定時に考慮すべき地質環境に関する基本的考え方, 土木学会原子力土木委員会地下環境部会.
- 土木学会 (2006a) : 精密調査地区選定段階における地質環境調査と評価の基本的考え方, 土木学会原

子力土木委員会地下環境部会.

土木学会 (2006b): 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—, 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.

土木学会 (2007): 余裕深度処分及安全評価における地下水シナリオに用いる核種移行評価パラメータ設定の考え方, 土木学会エネルギー委員会低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会.

Duncan, R.A. and Keller, R.A. (2004) : Radiometric ages for basement rocks from the Emperor Seamounts, ODP Leg 197, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.5, No.8, Q08L03, doi:10.1029/2004GC000704.

遠藤邦彦, 奥村晃史 (2010): 第四紀の新たな定義: その経緯と意義についての解説, *第四紀研究*, 第49巻, 第2号, pp.69-77.

EPICA community members (2004) : Eight glacial cycles from an Antarctic ice core, *Nature*, Vol. 429, pp.623-628.

藤井幸泰, 竹村貴人, 高橋学, 林為人, 赤岩俊治 (2005): 異方性を考慮した稲田花崗岩の一軸引張割れ目の特性, *応用地質*, 第46巻, 第4号, pp.227-231.

藤井義明, 大高憲道, 中川嘉文, 児玉淳一 (2006): 接線ヤング率の変化に基づく岩盤応力の推定に関する基礎実験, *資源と素材*, Vol.122, No.10/11, pp.483-488.

藤本光一郎, 大谷具幸, 田中秀美, 樋口孝幸, 富田直人, 伊藤久男, Agar, S.M. (1998): 地震直後の断層破砕帯の性質—地質調査所平林坑井のコアの物質科学的解析, *地球号外*, 断層解剖計画, Vol.21, pp.149-153.

藤原治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 布施圭介, 斉藤晃 (1997): 房総半島南部の完新世津波堆積物と南関東の地震隆起との関係, *第四紀研究*, 第36巻, 第2号, pp.73-86.

藤原治, 増田富士雄, 酒井哲弥, 岡崎浩子, 斉藤晃, 鈴木俊秀 (1996): 海浜堆積物から見た下総台地の隆起運動像, *堆積学研究*, 43, pp.39-46.

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, pp.85-93.

藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005a): 地層処分からみた日本列島の隆起・侵食に関する研究, *原子力バックエンド研究*, Vol.11, No.2, pp.113-124.

藤原治, 柳田誠, 三箇智二, 守屋俊文 (2005b): 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として—, *原子力バックエンド研究*, Vol.11, No.2, pp.139-146.

藤原治, 柳田誠, 清水長正, 三箇智二, 佐々木俊法 (2004): 日本列島における地すべり地形の分布・特徴, *日本地すべり学会誌*, 第41巻, 第4号, pp.335-344.

藤原智 (2006): 宇宙から大地の動きを見る衛星干渉合成開口レーダー (SAR)による地殻変動検出, *ないふる*, No.56, pp.2-3.

福地龍郎, 溝口一生, 嶋本利彦, 林愛明 (2002): ESR解析による断層摩擦発熱温度の推定—野島断層と高速剪断実験結果を例として—, *地球号外*, 沈み込み帯地震発生帯—その物質科学と深海掘削—, Vol.36, pp.82-89.

福留高明 (1984): 熱源として見た活断層, *秋田大学鉱山学部地下資源研究施設報告*, 49, pp.33-40.

舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也 (2009): 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?, *応用地質*, 第50巻, 第4号, pp.238-247.

古江良治, 岩月輝希, 濱克宏 (2005): 深層ボーリング孔を用いた地下水の地球化学調査の課題に対

- する試み, 応用地質, 第 46 卷, 第 4 号, pp.232-236.
- 古江良治, 岩月輝希, 水野崇, 彌榮英樹 (2003): 試錐孔を利用した地下水の地球化学特性調査手法と品質管理, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7520 2003-001.
- 古澤明 (2004): RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見いだした火山活動, 地質学雑誌, 第 110 卷, 第 1 号, pp.19-37.
- 古澤明, 中村千怜 (2009): 石英に含まれるガラス包有物の主成分分析による K-Tz の識別, 地質学雑誌, 第 115 卷, 第 10 号, pp.544-547.
- 古屋裕, 伊藤谷生, 佐藤比呂志, 平田直, 駒田希充, 津村紀子, 浅尾一巳, 荒井良祐, 半場康弘 (2009): 反射法地震探査による房総半島南西部内房沿岸の浅部地下構造, 地震研究所彙報, Vol.84, pp.307-329.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2002): 平成 13 年度地層処分経済性向上調査地層処分サイト評価技術確証試験 報告書 (第 3 分冊)調査システムの総合評価.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2004): 平成 15 年度地層処分技術調査等高精度物理探査技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2006): 平成 17 年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2007): 平成 18 年度地層処分技術調査等地質環境評価技術高度化調査.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009a): 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 高レベル放射性廃棄物処分関連 処分システム工学要素技術高度化開発 報告書 (第 3 分冊)ーモニタリング技術の開発ー.
- 原環センター (原子力環境整備促進・資金管理センター) (2009b): 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 沿岸域塩淡水境界・断層評価技術高度化開発.
- 原子力安全委員会 (2002a): 金属製乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵施設のための安全審査指針 (平成 22 年 12 月 20 日一部改訂).
- 原子力安全委員会 (2002b): 高レベル放射性廃棄物処分の概要調査地区選定段階において考慮すべき環境要件について.
- 原子力安全委員会 (2006): 発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針.
- 原子力安全委員会 (2008): 使用済燃料中間貯蔵施設の安全審査における「自然環境」の考え方について.
- 原子力安全委員会 (2010a): 余裕深度処分の管理期間終了以後における安全評価に関する考え方.
- 原子力安全委員会 (2010b): 発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き.
- 原子力委員会 (1997): 高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発等の今後の進め方について, 原子力委員会原子力バックエンド対策専門部会.
- Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T. and Nakama, S. (2004a) : Development of Stress Measuring System by Overcoring Method Suitable for Soft Rocks, Shigen-to-Sozai, Vol.120, No.1, pp.32-38.
- Ghimire, H.N., Ishijima, Y., Sugawara, T., Matsui, H. and Nakama, S. (2004b) : Stress Measurement in Weak Rock by Borehole Deformation Method-A Case Study of Horonobe, Shigen-to-Sozai, Vol.120, No.10/11, pp.545-554.

- Goto, J., Tsuchi, H. and Mashimo, M. (2009) : Examination on earthquake ground motion in the deep underground environment of Japan, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD-NEA No.6362, pp.227-234.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太 (2009) : 段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討—新潟県中越地域等に分布する段丘の観察・分析結果に基づいて—, 電力中央研究所報告, N08063, 33p.
- 濱田崇臣, 幡谷竜太 (2011) : 河成段丘を用いた内陸部隆起量評価手法の適用性の検討—経験的指標を重視したアプローチ—, 電力中央研究所報告, N10050 (印刷中).
- 花室孝広, 梅田浩司, 高島勲, 根岸義光 (2008) : 紀伊半島南部, 本宮および十津川地域の温泉周辺の熱水活動史, 岩石鉱物科学, Vol.37, No.2, pp.27-38.
- 原山智 (1994) : 世界一若い露出プルトンの冷却史—北アルプス, 滝谷花崗閃緑岩の年代と冷却モデル—, 地質学論集, 第 43 号, pp.87-97.
- 長谷川昭, 中島淳一, 海野徳仁, 三浦哲, 諏訪謡子 (2004) : 東北日本弧における地殻の変形と内陸地震の発生様式, 地震, 第 56 巻, 第 4 号, pp.413-424.
- 長谷川琢磨, 中田弘太郎, 富岡祐一, 後藤和幸, 柏谷公希, 濱克宏, 岩月輝希, 武田匡樹, 小坂寛 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 12) : —東濃地域における ^4He と ^{14}C 地下水年代測定の適用性検討—, 電力中央研究所研究報告, N10001.
- 幡谷竜太 (2005) : 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (1)—段丘対比の考え方の提案と河成段丘の編年に関わるケーススタディー—, 電力中央研究所報告, N05005.
- 幡谷竜太 (2006a) : 河成段丘を用いた第四紀後期の隆起量評価手法の検討 (2)—那珂川沿いに分布する河成段丘の層序—, 電力中央研究所報告, N05016.
- 幡谷竜太 (2006b) : 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)—過去 10 万年間の隆起量分布により明らかにされる内陸部の地殻運動—, 電力中央研究所報告, N05017.
- 幡谷竜太, 濱田崇臣 (2009) : 河成段丘の分布から見た内陸部の隆起特性評価—新潟県中越地域の例—, 電力中央研究所報告, N08044.
- Hataya, R., Yanagida, M. and Sato, M. (2009) : Study on characterisation of Quaternary tectonic movement by uplift estimation using fluvial terraces, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.217-225.
- 幡谷竜太, 柳田誠, 佐藤賢, 佐々木俊法 (2005) : 宮城県川崎盆地における海洋酸素同位体ステージ 6 河成段丘の認定とその意義, 第四紀研究, 第 44 巻, 第 3 号, pp.155-167.
- 幡谷竜太, 柳田誠, 山本真哉, 佐藤賢, 古澤明 (2006) : 新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序, 応用地質, 第 47 巻, 第 3 号, pp.140-151.
- 早川裕一, 松倉公憲 (2003) : 日光, 華厳滝の後退速度, 地学雑誌, 第 112 巻, 第 4 号, pp.521-530.
- 井尻暁 (2009) : 海底泥火山堆積物中の間隙水の起源, 地学雑誌, 第 118 巻, 第 3 号, pp.435-454.
- 池田安隆 (2002) : 日本の活褶曲帯の形成メカニズムとその起源, 活断層研究, 第 22 号, pp.67-70.
- 池田安隆, 今泉俊文, 東郷正美, 平川一臣, 宮内崇裕, 佐藤比呂志 (2002) : 第四紀逆断層アトラス, 東京大学出版会.
- 池原研 (2000) : 北海道北端部, 利尻トラフの海底堆積物中にタービダイトとして記録された地震第四紀研究, 第 39 巻, 第 6 号, pp.569-574.

- 今井久, 山下亮, 塩崎巧, 浦野和彦, 笠博義, 丸山能生, 新里忠史, 前川恵輔 (2009): 地下水流動に対する地質環境の長期的変遷の影響に関する研究 (委託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2009-001.
- 稲葉薫, 三枝博光 (2003): 地下水流動の予測解析統合システム (GEOMASS システム)の概要と東濃地域への適用事例, サイクル機構技報, No.18, pp.71-82.
- 井上大榮, 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, 第54巻, 第4号, pp.557-573.
- 井上直人, 楠本成寿, 竹村恵二 (2006): 重力異常からみた活断層・地震断層・地殻変動, 号外地球, 活断層・古地震とアクティブテクトニクス, No.54, pp.233-238.
- 井上卓彦, 村上文敏, 岡村行信, 池原研 (2007): 2007年能登半島地震震源域の海底活断層, 地震研究所彙報, Vol.82, pp.301-312.
- 石原朋和, 田中和広 (2009): 泥火山周辺の地質構造と地下水の地化学特性—新潟県十日町市蒲生における検討—, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.350-372.
- 石井英一, 福島龍朗 (2006): 新第三紀珪質岩における断層の解析事例, 応用地質, 第47巻, 第5号, pp.280-291.
- Ishii, E., Funaki, H., Tokiwa, T. and Ota, K. (2010): Relationship between fault growth mechanism and permeability variations with depth of siliceous mudstones in northern Hokkaido, Japan, Journal of Structural Geology, Vol.32, pp.1792-1805.
- 石井英一, 安江健一, 大平寛人, 古澤明, 長谷川健, 中川光弘 (2008): 北海道北部, 大曲断層近傍の背斜成長の開始時期, 地質学雑誌, 第114巻, 第6号, pp.286-299.
- 石井英一, 安江健一, 田中竹延, 津久井朗太, 松尾公一, 杉山和稔, 松尾重明 (2006): 北海道北部, 幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性, 地質学雑誌, 第112巻, 第5号, pp.301-314.
- Ishimaru, K. and Shimizu, I. (1997): Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan: A study for stability of geological environment in Japan, Proc. 30th International Geological Congress, Vol.24, pp.31-41.
- 磯望, 山川克己, 米澤宏, 松原敏子 (1980): 岐阜県高原川流域における土石流による岩屑供給と沖積錐の成長速度, 地理学評論, 第53巻, 第11号, pp.699-720.
- 伊藤久敏 (2006): 閉鎖温度の低い年代測定法を用いた地殻浅部の熱履歴と変動史の評価—野島断層と柳ヶ瀬断層の例—, 電力中央研究所報告, N05060.
- 伊藤成輝, 町田功, 丸井敦尚 (2010a): 間隙水の化学的性質と地下水流動との関係—3段階で遠心分離した砂岩間隙水の水質分析結果に基づいて—, 地下水学会誌, 第52巻, 第2号, pp.183-194.
- 伊藤成輝, 丸井敦尚, 越谷賢 (2010b): 幌延沿岸域における地下水流動・塩淡境界解析の解析条件, 日本地下水学会春季講演会講演要旨, pp.108-111.
- 伊藤成輝, 丸井敦尚, 宮越昭暢, ガヤルドアドリアン, 市村隆人 (2007): 揚水に伴う沿岸域堆積軟岩中の塩淡境界形状と地下水流動の変化, 地下水学会誌, 第49巻, 第1号, pp.33-48.
- Iwamori, H. (1992): Degree of Melting and Source Composition of Cenozoic Basalts in Southwest Japan: Evidence for Mantle Upwelling by Flux Melting, J. Geophys. Res., Vol.97, No.B7, pp.10983-10955.
- 岩月輝希, 森川佳太, 細谷真一, 吉川英樹 (2009): 深部地下水の物理化学パラメータ (pH, 酸化還元電位)の測定とその留意点, 地下水学会誌, 第51巻, 第3号, pp.205-214.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2005-2009): 熱力学・収着・拡散データベース, 2005-2009JAEA.

- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2008) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2009) : 平成 20 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010a) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費 地層処分共通技術調査 地質環境総合評価技術高度化開発.
- JAEA (日本原子力研究開発機構) (2010b) : 深地層の科学的研究カーネル.
- Jaquet, O., Connor, C. and Connor L. (2008) : Probabilistic Methodology for Long-Term Assessment of Volcanic Hazards, Nuclear Technology, Vol.163, No.1, pp.180-189.
- Jaquet, O., Lantuéjoul, C and Goto, J. (2009) : Cox process models for the estimation of long-term volcanic hazard, Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities, edited by Connor, C.B., Chapman, N.A. and Connor, L.J., Cambridge University Press, pp.369-384.
- 地盤工学会 (2004) : 地盤調査の方法と解説, 地盤工学会.
- 地震調査研究推進本部 (2009) : 新たな地震調査研究の推進について.
- 地震調査研究推進本部 (2010) : 全国地震動予測地図 2010 年版.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999a) : 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) (1999b) : 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 わが国の地質環境, JNC TN1400 99-021.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005a) : 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 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 1 深地層の科学的研究, JNC TN1400 2005-014.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (2005b) : 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 - 平成 17 年取りまとめ - 分冊 2 工学技術の開発, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 2005-015.
- Jolivet, L., Tamaki, K. and Fournier, M. (1994) : Japan Sea, opening history and mechanism: A synthesis, J. Geophys. Res., Vol.99, No.B11, pp.22237-22259.
- 鍵山恒臣 (2010) : カルデラ生成噴火の準備過程解明に向けた研究の展望, 地質学雑誌, 第 116 巻, 第 9 号, pp.463-472.
- 楮原京子, 今泉俊文, 宮内崇裕, 佐藤比呂志, 内田拓馬, 越後智雄, 石山達也, 松多信尚, 岡田真介, 池田安隆, 戸田茂, 越谷信, 野田賢, 加藤一, 野田克也, 三輪敦志, 黒澤英樹, 小坂英輝, 野原壯 (2006) : 横手盆地東縁断層帯・千屋断層の形成過程と千屋丘陵の活構造, 地学雑誌, 第 115 巻, 第 6 号, pp.691-714.
- Kagohara, K., Ishiyama, T., Imaizumi, T., Miyauchi, T., Sato, H., Matsuta, N., Miwa, A. and Ikawa, T. (2009) : Subsurface geometry and structural evolution of the eastern margin fault zone of the Yokote basin based on seismic reflection data, northeast Japan, Tectonophysics, Vol.470, No.3/4, pp.319-328.
- 海上保安庁 (2010) : 海域活断層域を含む沿岸調査及びその成果, 海上保安庁海洋情報部, <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAIYO/FAULTS/main.html>, (参照 2011 年 4 月 3 日).
- 貝塚爽平 (1977) : 日本の地形, 岩波書店, 234p.
- Kamata, H. and Kodama, K. (1999) : Volcanic history and tectonics of the Southwest Japan Arc, Island Arc, Vol.8, No.3, pp.393-403.

- Kameda, J., Saruwatari, K. and Tanaka, H. (2003) : H₂ generation in wet grinding of granite and single-crystal powders and implications for H₂ concentration on active faults, *Geophysical Research Letters*, Vol.20.
- 上岡昇 (2007) : コロイドによる核種吸着性—希土類元素を中心に, *地質ニュース*, 631 号, pp.29-32.
- 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*, 第41 卷, 第6 号, pp.323-332.
- 狩野謙一, 村田明広 (1998) : *構造地質学*, 朝倉書店.
- Karasaki, K., Onishi, T., Gasperikova, E., Goto, J, Miwa, T., Tsuchi, H., Ueta., K., Kiho, K. and Miyakawa, K. (2010) : Development of characterization technology for fault zone, *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10*, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan., ICEM2010-40121.
- Kase, Y. and Day, S.M. (2006) : Spontaneous rupture processes on a bending fault, *Geophysical Research Letters*, Vol.33, pp.L10302, doi:10.1029/2006GL025870.
- Kato, N., Sato, H. and Umino, N. (2006) : Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan, *Journal of Structural Geology*, Vol.28, No.11, pp.2011-2022.
- Kato, N., Sato, H., Imaizumi, T., Ikeda, Y., Okada, S., Kagohara, K., Kawanaka, T. and Kasahara, K. (2004) : Seismic reflection profiling across the source fault of the 2003 Northern Miyagi earthquake (Mj 6.4), NE Japan: basin inversion of Miocene back-arc rift, *Earth Planets and Space*, Vol.56, No.12, pp.1369-1374.
- 加藤碩一 (1989) : *地震と活断層の科学*, 朝倉書店.
- 活断層研究会 (1991) : *新編 日本の活断層 - 分布図と資料*, 東京大学出版会.
- 川辺岩夫 (1991) : 地震に伴う地下水・地球化学現象, *地震2*, 第44 卷, 特集号, pp.341-364.
- 川上源太郎, 大平寛人, 在田一則, 板谷徹丸, 川村信人 (2006) : 熱年代学データに基づく日高山脈の上昇史, *地質学雑誌*, 第112 卷, 第11 号, pp.684-698.
- 川本眺万, 石黒幸文, 呉旭 (2001) : 山はねとその対策に関する文献調査, *トンネルと地下*, 第32 卷, 第7 号, pp.47-56.
- 木方建造, 新孝一, 鈴木浩一, 宮川公雄, 岡田哲実, 増原康布, 井ヶ田徳行, 小早川博亮, 山本真哉 (2006) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ1), 電力中央研究所報告, N01.
- 木方建造, 新孝一, 大津正士, 宮川公雄, 鈴木浩一, 岡田哲実, 須永崇之, 小早川博亮, 末永弘, 井ヶ田徳行, 山本真哉 (2009) : コントロールボーリングによる掘削・調査技術の開発 (フェーズ2), 掘削・調査システムの高度化と断層への適用—電力中央研究所報告, N03.
- 木方建造, 新孝一, 近藤浩文, 田中靖治, 幡谷竜太, 上田圭一, 長谷川琢磨 (2011) : 高レベル放射性廃棄物処分に係る概要調査の体系化研究—調査・評価フローの構築と要素技術開発—, 電力中央研究所報告, N11.
- Kimura, G and Tamaki, K. (1986) : Collision, rotation and back arc spreading: the case of the Okhotsk and Japan Seas, *Tectonics*, 5, pp.389-401.
- Kimura, J., Okada, Y., Nakayama, K. and Okada, S. (2001) : Variations of magnetic susceptibility and fine quartz accumulation rate in Daisen loam over the past 200000 years: Interaction between winter and summer monsoons in south-west Japan, *Island Arc*, Vol.10, No.2, pp.85-97.
- Kimura, J., Kunikiyo, T., Osaka, I., Nagano, T., Yamauchi, S., Kakubuchi, S., Okada, S., Fujibayashi, N., Okada, R., Murakami, H., Kusano, T., Umeda, K., Hayashi, S., Ishimaru, T., Ninomiya, A. and 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*, Vol.12, No.1, pp.22-45.
- 木下博久, 野原壯, 中田高, 池田安隆, 伊藤潔, 大槻憲四郎, 鷺谷威, 高田圭太, 遠田晋次 (2005): 比較的規模の大きな地下活断層の特徴とその調査手法の検討, *活断層研究*, 第 25 号, pp.27-37.
- 小林健太, 杉山雄一 (2004): 2000 年鳥取県西部地震の余震域とその周辺における断層と断層岩—"未知の断層" の検出に向けて, *地質ニュース*, 第 602 号, pp.36-44.
- 小池克明, 劉春学, 天野健治, 栗原新 (2008): 広域的な地質構造・物性分布の空間モデル作成と有効性の検証—東濃地域における亀裂分布を主としたケーススタディー, *Journal of MMIJ*, 第 124 巻, 第 12 号, pp.700-709.
- 小池一之, 町田洋 (2001): 日本の海成段丘アトラス (CD-ROM および付図), 東京大学出版会.
- 小嶋智, 西尾洋三, 徐勝, 永澤智江, 後藤紘亮, 大谷具幸, 矢入憲二 (2006): 滋賀県東部, 姉川流域に分布するせき止め湖堆積物の特徴と ^{14}C 年代, *応用地質*, 第 47 巻, 第 4 号, pp.196-207.
- Kondo, H. (2009a): Regional-scale volcanology in support of site-specific investigations, *Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear Facilities*, edited by Connor, C., Chapman, N, Connor, L., Cambridge University Press, pp.307-325.
- Kondo, H. (2009b): Understanding the Characteristics of Long-term Spatio-temporal Variation in Volcanism and the Continuity of the Related Phenomena for Estimating Regions of New Volcano Development, Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, *Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007*, OECD/NEA No.6362, pp.247-255.
- 近藤浩文, 木方建造, 五嶋慶一郎, 長谷川琢磨, 濱田崇臣, 大山隆弘, 鈴木浩一, 後藤和幸, 末永弘, 中田弘太郎, 田中姿郎, 長岡亨, 窪田健二, 土宏之, 三和公, 村元茂則, 河野一輝, 伊藤久敏 (2011): 高レベル放射性廃棄物等の処分地選定のための概要調査技術に係わる実証研究—地質環境条件に応じた掘削・孔内調査・試験手法の適用性と課題—, *電力中央研究所報告*, N15.
- Kopf, A.J. (2002): Significance of mud volcanism, *Reviews of Geophysics*, Vol.40, No.2, 1005, doi:10.1029/2000RG000093.
- 小坂英輝, 立石良, 三輪敦志, 市川八州夫, 鎌滝孝信, 今泉俊文 (2009): 北上低地西縁断層帯・花巻市下堰田地区の断層露頭と地層変形—バランス断面による地下断層形状の推定, *活断層研究*, 第 30 号, pp.37-46.
- 小山良浩, 谷和夫 (2003): 横ずれ断層の模型実験で観察された砂地盤の表面に発達するせん断帯の構造分析, *土木学会論文集*, 750 巻, III-65 号, pp.171-181.
- 國見利夫, 高野良仁, 鈴木実, 斉藤正, 成田次範, 岡村盛司 (2001): 水準測量データから求めた日本列島 100 年間の地殻上下変動, *国土地理院時報*, 第 96 集, pp.23-37.
- 栗原新, 天野健治, 劉春学, 小池克明 (2008): 花崗岩体上部に発達する低角度亀裂の空間分布特性と地質学的解釈—瑞浪超深地層研究所周辺の土岐花崗岩からの知見—, *Journal of MMIJ*, Vol.124, No.12, pp.710-718.
- 操上広志, 安江健一, 新里忠史, 今井久, 塩崎功, 山下亮 (2007): 気候・海水準変動が地下水流動に与える影響に関する解析的検討—幌延地域を例として—, *地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム発表論文集 (日本地下水学会)*, pp.59-66.
- 操上広志, 竹内竜史, 藪内聡, 瀬尾昭治, 戸村豪治, 柴野一則, 原稔, 國丸貴紀 (2008): 幌延深地層研究計画の地上からの調査研究段階における地下水流動に関する調査研究, *土木学会論文集 C*, Vol.64, No.3, pp.680-695.

- 黒澤英樹, 石丸恒存, 島田耕史, 丹羽正和, 小坂英輝, 齊藤聡, 二ノ宮淳 (2010) : 水素ガス原位置測定による断層破碎帯調査手法の検討, JAEA-Research 2009-043.
- 黒澤進, 茨木希, James, S., 油井三和, Alexander, R. (2004) : グリムゼル岩盤試験場におけるコロイドと核種の移行遅延実験に関する解析, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN8400 2004-016.
- Lin, A., Lee, C., Maruyama, T. and Chen, A. (2005) : Meso- and microstructural of coseismic shear zone of the 1999 Mw 7.6 Chi-Chi earthquake, Taiwan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.95, pp.485-501.
- Lin, A., Tanaka, N., Uda, S. and Satish-Kumar, M. (2003) : Repeated coseismic infiltration of meteoric and seawater into deep fault zones: a case study of the Nojima fault zone, Japan, Chem. Geol., Vol.202, No.1/2, pp.139-153.
- 林愛明 (2010) : 地震の化石—シュードタキライトの形成と保存—, 近未来社.
- Lyell, C. (1830) : Principle of Geology, Volume 1. (Secord J.A. 編, 河内洋佑訳 (2006) : 地質学原理 (上), 朝倉書店).
- 町田洋, 新井房夫 (2003) : 新編火山灰アトラス [日本列島とその周辺] , 東京大学出版会.
- 馬原保典, 中田英二, 大山隆弘, 宮川公雄, 五十嵐敏文, 市原義久, 松本裕之 (2006) : 化石海水の同定法の提案—太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と地下水年代評価—, 地下水学会誌, 第48巻, 第1号, pp.17-33.
- Mahara, Y., Hohjo, K., Kubota, T., Ohta, T., Mizuochi, Y., Tashiro, T., Sekimoto, S., Takamiya, K., Shibata, S. and Tanaka, K. (2010) : Vertical distribution of ^{10}Be , ^{26}Al , and ^{36}Cl in the surface soil layer of weathered granite at Abukuma, Japan, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, Vol.268, No.7/8, pp.1197-1200.
- 牧野仁史, 澤田淳, 前川恵輔, 柴田雅博, 笹本広, 吉川英樹, 若杉圭一郎, 小尾繁, 濱克宏, 操上広志, 國丸貴紀, 石井英一, 竹内竜史, 中野勝志, 三枝博光, 竹内真司, 岩月輝希, 太田久仁雄, 瀬尾俊弘 (2005) : 地質環境の調査から物質移行解析にいたる一連の調査・解析技術 — 2つの深地層の研究施設計画の地上からの調査研究段階 (第1段階)における地質環境情報に基づく検討—, JNC TN1400 2005-021.
- Martin, A., Umeda, K., Conner, C., Weller, J., Zhao, D. and Takahashi, M. (2004) : Modeling long-term volcanic hazards through Bayesian inference: An example from the Tohoku volcanic arc Japan, J. Geophys. Res., Vol.109, B10208, 20p, doi:10.1029/2004JB003201.
- 丸井敦尚, 楠瀬勤一郎, 林武司 (2004) : 沿岸域の塩淡境界面と地下水流動, 物理探査, 第57巻, 第4号, pp.351-357.
- 丸山茂徳, 瀬野徹三 (1985) : 日本列島周辺のプレート相対運動と造山運動, 科学, Vol. 55, pp.32-41.
- 丸山正, 遠田晋司, 吉見雅行, 小俣雅志 (2009) : 2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層沿いの詳細地形—地震断層・変動地形調査における航空レーザ計測の有効性—, 活断層研究, 30号, pp.1-12.
- 増田富士雄, 藤原治, 酒井哲弥, 荒谷忠 (2001) : 房総半島九十九里浜平野の海浜堆積物から求めた過去6000年間の相対的海水準変動と地震隆起, 地学雑誌, 第110巻, 第5号, pp.650-664.
- 増田遊介, 大江俊昭, 吉田拓真, 野下健司, 加藤和之, 長崎晋也, 天野健治, 二口克人, 金子岳夫 (2009) : マイクロ流路法による花崗岩盤原位置での拡散係数・分配係数の同時測定, 原子力バックエンド研究, Vol.16, No.1, pp.3-15.
- 松田時彦, 岡田真介, 渡邊トキエ (2004) : 横ずれ活断層の累積変位量・断層長・破碎帯幅から見た断層の発達度—中国地方と中部地方の比較, 活断層研究, 第24号, pp.1-12.

- 松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫 (2000) : MIU-3 号孔における力学特性調査結果及び正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル, 核燃料サイクル開発機構, JNC TN7420 2001-001.
- Matsumoto, T., Kawabata, T., Matsuda, J., Yamamoto, K. and Mimura, K. (2003) : $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in well gases in the Kinki district, SW Japan surface appearance of slab-derived fluids in a non-volcanic area in Kii Peninsula, *Earth Planet. Sci. Lett.*, Vol.216, pp.221-230.
- 松岡清幸, 竹内真司, 新堀雄一 (2007) : 電気伝導度検層を用いた水みちの検出例, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 166, pp.149-152.
- 松岡俊文 (2007) : 地圏環境資源研究における物理探査の役割, 産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門研究成果報告誌, *Green Report 2007*, pp.13-15.
- Matsushi, Y., Wakasa, S., Matsuzaki, H. and Matsukura, Y. (2006) : Long-term denudation rates of actively uplifting hillcrests in the Boso Peninsula, Japan, estimated from depth profiling of in situ-produced cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al , *Geomorphology*, Vol.82, pp.283-294.
- 松四雄騎, 若狭幸, 松崎浩之, 松倉公憲 (2007) : 宇宙線生成核種 ^{10}Be および ^{26}Al のプロセス地形学的应用, *地形*, 第28巻, 第2号, pp.87-107.
- 松崎達二, 角田地文, 石丸恒存, 鎌田浩毅, 檀原徹, 岩野英樹, 吉岡哲 (2004) : 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討ーフィッション・トラック法による熱履歴解析ー, *応用地質*, 第45巻, 第5号, pp.238-248.
- 彌榮英樹, 岩月輝希, 古江良治, 水野崇 (2004) : 超深地層研究所計画 (第1段階)における地下水の地球化学特性調査, *サイクル機構技報*, No.23, pp.41-49.
- Mitsuhashi, Y., Uchida, T., Matsuo, K., Marui, A. and Kusunose, K. (2006) : Various scale electromagnetic investigations of high-salinity zones in a coastal plain, *Geophysics*, vol.71, no.6, pp.B167-B173.
- Miura, D. (2005) : Effects of changing stress states on the development of caldera-bounding faults: Geological evidence from Kumano caldera, Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.144, pp.89-103.
- 三浦大助, 和田穰隆 (2007) : 西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山, *地質学雑誌*, 第113巻, 第7号, pp.283-295.
- 三浦大助, 土志田潔, 幡谷竜太, 阿部信太郎 (2006) : 活火山の火口移動に関する検討ー電力重要構造物の立地に関わる基本的留意点ー, *電力中央研究所報告*, N05024.
- 宮田雄一郎, 三宅邦彦, 田中和広 (2009) : 中新統田辺層群にみられる泥ダイアピル類の貫入構造, *地質学雑誌*, 第115巻, 第9号, pp.470-482.
- 守田益宗, 関口千穂, 佐々木俊法, 宮城豊彦, 須貝俊彦, 柳田誠, 古澤明, 藤原治, 守屋俊文 (2006) : 東海地方の中間温帯における中期更新世以降の植生変遷ー内陸小盆地堆積物の花粉分析からー, *季刊地理学*, 第58巻, 第3号, pp.123-139.
- 守屋俊治, 鎮西清高, 中嶋健, 檀原徹 (2008) : 山形県新庄盆地西縁部の鮮新世古地理の変遷ー出羽丘陵の隆起時期と隆起過程, *地質学雑誌*, 第114巻, 第8号, pp.389-404.
- 村上由記, 岩月輝希, 長沼毅 (2003) : 東濃地域における地下水化学と地下微生物の相互作用, *地学雑誌*, 第112巻, 第2号, pp.277-287.
- 村岡洋文, 阪口圭一, 玉生志郎, 佐々木宗建, 茂野博, 水垣桂子 (2007) : 日本の熱水系アトラス, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 村田泰章, 鹿野和彦 (1995) : 「100万分の1日本地質図第3版 CD-ROM版」から求めた日本列島を構成する岩石の分布面積, *地質ニュース*, 493号, pp.26-29.

- 長尾年恭, 神谷親征, 佐柳敬造 (2009) : 静岡県・焼津沖 (想定糸魚川-静岡構造線延長部)での海上磁気探査, 東海大学海洋研究所研究報告, 第 30 号, pp.39-44.
- 中俣公德, 鶴田忠彦, 天野健治, 西本昌司, 吉田英一 (2007) : 遮水性構造として機能する断層の内部構造と変形・変質作用—瑞浪超深地層研究所に分布する土岐花崗岩での研究事例—, 日本応用地質学会平成 19 年度研究発表会講演論文集, pp.207-208.
- 中村久由, 前田憲二郎, 鈴木孝 (1958) : 紀伊半島中南部地方の温泉群について, 地質調査月報, Vol.9, pp.357-370.
- 仲野良紀 (1975) : 膨張性地山の実体, トンネルと地下, 第 6 巻, 第 10 号, pp.15-25.
- 仲野良紀 (1995) : 膨張性トンネルの吸水膨張説再考—限界状態の土質力学の観点より—, 地質と調査, Vol.63, pp.37-43.
- 中尾信典, 菊地恒夫, 玉生志郎 (2008) : 熱・熱水の影響を考慮した広域地下水流動の数値シミュレーション, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.53-64.
- 中田弘太郎, 長谷川琢磨 (2010) : 地下水年代測定評価技術の開発 (その 10)—北海道幌延地域における ^4He ・ ^{36}Cl 法適用の試み—, 電力中央研究所報告, N09027
- 中田高, 今泉俊文 (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.
- 中山雅, 真田祐幸, 杉田裕 (2008) : 幌延深地層研究計画; 平成 19 年度調査研究成果報告, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-074.
- 成瀬洋 (1990) : 日本の第四紀盆地の形成と変遷, 大阪経済大学教養部紀要, Vol.8, pp.69-86.
- 根木健之, 梅田浩司, 浅森浩一 (2007a) : MT 法スペクトル・データの効果的なスタッキング方法, 物理探査学会第 116 回学術講演会論文集, pp.176-179.
- 根木健之, 梅田浩司, 松尾公一, 浅森浩一 (2007b) : MT 法データのロバスト・スムージング手法の開発とスタッキングへの応用, 物理探査学会第 117 回学術講演会論文集, Vol.117, pp.195-198.
- 日本電気協会 (2009) : 原子力発電所火山影響評価技術指針, 電気協会原子力規格委員会, JEAG 4625-2009.
- 日本応用地質学会応用地形学研究小委員会 (2002) : 応用地形フォーラム (2), 応用地質, 第 43 巻, 第 5 号, pp.320-327.
- 日本鉄道建設公団 (1990) : 津軽海峡線工事誌 (青函トンネル上・下), 日本鉄道建設公団青函建設局.
- Niizato, T., Amano, K., Ota, K., Kunimaru, T., Lanyon, B. and Alexander, W.R. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (3) Conceptualisation of long-term geosphere evolution, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan, ICEM2010-40052.
- 西坂直樹, 大野裕記, 浅野彰洋, 瀬川爾朗 (2006) : 四国北西部伊予灘周辺地域におけるヘリコプター搭載型重力測定, 電力土木, 321 号, pp.122-126.
- Nogami, M., Fujiwara, O. and Sanga, T. (2003) : Landform Development Simulation of a Small Drainage basin during the Future of 120,000 years., Trans. Jap. Geomorphology Union, Vol.24, pp.105-106.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2004) : 概要調査地区選定上の考慮事項の背景と技術的根拠, —「概要調査地区選定上の考慮事項」の説明資料—, NUMO-TR-04-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009a) : 公募関係資料 処分場の概要 分冊—1.

- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2009b) : 公募関係資料 概要調査地区選定上の考慮事項 分冊-2.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010a) : 安全確保構想 2009 ~安全な地層処分の実現のために~, NUMO-TR-09-05.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2010b) : 地層処分技術開発ニーズの整理, ~精密調査地区選定に向けて~, NUMO-TR-10-02.
- NUMO (原子力発電環境整備機構) (2011) : 概要調査計画立案の基本的考え方, NUMO-TR-10-08.
- 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, Vol.8, No.1, pp.40-53.
- 緒方正虔, 本荘静光 (1981) : 電力施設の耐震設計における断層活動性の評価, 応用地質, 第 22 卷, pp.67-87.
- 大口健志, 吉田武義, 大上和良 (1989) : 東北本州弧における新生代火山活動域の変遷, 地質学論集, 第 32 号, pp.431-455.
- 大石朗, 村松容一, 吉田裕, 橋詰良吉 (1995) : 流体包有物による和歌山県本宮地域の熱水活動の検討, 温泉科学, Vol.45, pp.63-75.
- 大石雅之 (2010) : 斜長石斑晶の屈折率を用いたテフラ対比の検討, 第四紀研究, 第 49 卷, 第 1 号, pp.35-42.
- 大熊茂雄, 駒澤正夫, 押田淳 (2010) : 海底重力計の製作と実海域実験, 物理探査学会第 123 回学術講演会論文集, pp.127-130.
- Ohmori, H. (1987) : Mean Quaternary Uplift Rates in the Central Japanese Mountains Estimated by Means of Geomorphological Analysis, Bull. Dept. Geogr. Univ. Tokyo, Vol.19, pp.29-36.
- 大野亮一, 山科真一, 山崎孝成, 小山倫史, 江坂文寿, 笠井史宏 (2010) : 地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—, 日本地すべり学会誌, 第 47 卷, 第 2 号, pp.8-14.
- 大里和己, 山岡昌信, 中嶋智, 吉村公孝, 岡崎幸司, 茂田直孝, 藪内聡, 山中義彰 (2009) : 幌延地域の沿岸域電磁法探査 (その 2)—調査結果とその解釈—, 物理探査学会第 121 回学術講演会論文集, pp.79-82.
- 大澤英昭, 太田久仁雄, 濱克宏, 澤田淳, 竹内真司, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 宮本哲雄, 豊田岳司, 岩月輝希, 前川恵輔, 國丸貴紀, 新里忠史, 浅森浩一, 平賀正人, 山中義彰, 重廣道子, 島田顕臣, 阿部寛信, 梅木博之 (2008) : 「地質環境総合評価技術高度化開発: 次世代型サイト特性調査情報統合システムの開発」平成 19 年度成果報告書 (受託研究), 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-085-1.
- 大澤健二, 光畑裕司, 上田匠, 内田利弘, 佐波瑞恵, 佐藤龍也 (2010) : 浅海電磁探査システムの改良・動作試験と幌延沿岸域における予備実験, 物理探査学会第 122 回学術講演会論文集, pp.271-274.
- 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.
- 岡田知己, 長谷川昭 (2005) : DD トモグラフィによる震源断層とアスペリティのイメージング—1995 年兵庫県南部地震 (M7.3)・2000 年鳥取県西部地震 (M7.3)・2003 年宮城県北部地震 (M6.4) の場合—, 地震予知連絡会会報, 73, pp.624-628.

- 岡村行信 (2000) : 音波探査プロファイルに基づいた海底活断層の認定—fault related fold, growth strata 及び growth triangle の適用—地質調査所月報, 第 51 巻, 2/3 号, pp.59-77.
- 岡村行信, 石山達也 (2005) : 2004 年新潟県中越地震震源域での地質構造を用いた伏在断層モデルの作成, 活断層・古地震研究報告, 第 5 号, pp.17-28.
- Okino, K., Kasuga, S. and Ohara, Y. (1998) : A New Scenario of the Parece Vela Basin Genesis, Marine Geophysical Researches, Vol.20, No.1, pp.21-40.
- 遅沢壮一 (2009) : 荒砥沢ダムにおける 2008 年岩手・宮城内陸地震 (M6.9)の地表地震断層,後期中新世カルデラ縁正断層が再動した逆断層, 地球科学, 第 63 巻, 第 5 号, pp.321-326.
- Ota, K., Amano, K. and Ando, T. (1999) : Brief overview of in situ contaminant retardation in a fractured crystalline rock at the Kamaishi In Situ Test Site, Proc. International Workshop for the Kamaishi In Situ Experiments, Kamaishi, Japan, 24-25 Aug. 1998, JNC TN7400 99-007, pp.67-76.
- Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B. and Schild, M. (2003) : Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations, J. Contam. Hydrol., Vol.61, pp.131-145.
- 太田久仁雄, 佐藤稔紀, 竹内真司, 岩月輝希, 天野健治, 三枝博光, 松岡稔幸, 尾上博則 (2005) : 東濃地域における地上からの地質環境の調査・評価技術,核燃料サイクル開発機構, JNC TN7400 2005-023.
- 太田久仁雄, 安部寛信, 山口雄大, 國丸貴紀, 石井英一, 操上広志, 戸村豪治, 柴野一則, 濱克宏, 松井裕哉, 新里忠史, 高橋一晴, 丹生屋純夫, 大原英史, 浅森浩一, 森岡宏之, 舟木泰智, 茂田直孝, 福島龍朗 (2007) : 幌延深地層研究計画における地上からの調査研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 分冊「深地層の科学的研究」, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-044.
- 太田久仁雄, 茂田直孝, 丸井敦尚, 内田利弘, 木方建造, 長谷川琢磨 (2008) : 沿岸プロジェクト (1) 全体計画, 日本原子力学会 2008 年秋の大会.
- Ota, K., Amano, K., Niizato, T., Alexander, W.R. and Yamanaka, Y. (2010) : Development of comprehensive techniques for coastal site characterisation: (1) Strategic overview, Proceedings of the ASME 13th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM 10, October 3-7, 2010, Tsukuba, Japan, ICEM2010-40056.
- Otsuki, K. (1978) : On the relationship between the width of shear zone and the displacement along fault, Journal of the geological Society of Japan, Vol.84, No.11, pp.661-669.
- Pollitz, F.F. (1986) : Pliocene change in Pacific-plate motion., Nature, Vol.320, pp.738-741.
- 三枝博光, 瀬野康弘, 中間茂雄, 鶴田忠彦, 岩月輝希, 天野健治, 竹内竜史, 松岡稔幸, 尾上博則, 水野崇, 大山卓也, 濱克宏, 佐藤稔紀, 久慈雅栄, 黒田英高, 仙波毅, 内田雅大, 杉原弘造, 坂巻昌工 (2007) : 超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階 (第 1 段階)研究成果報告書, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2007-043.
- 佐伯龍雄, 稲盛隆穂, 高野修 (2006) : 熊野海盆北縁部における三次元地震探査, 物理探査, 第 59 巻, 第 3 号, pp.249-259.
- 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 2, 第 61 巻, 特集号, pp.S479-S487.
- Sagiya, T., Miyazaki, S. and Tada, T. (2000) : Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, Pure Appl. Geophys., Vol.157, pp.2303-2322.
- 齋藤宏則, 大江俊昭, 新屋敷直木, 八木原晋, 海野裕哉, 戸井田克, 田中真弓, 佐藤光吉, 鈴木健彦, 長井敏, 西垣誠 (2006) : 超音波反射エコーを用いた地下水 3 次元流向・流速測定のための安定浮遊固体トレーサの開発, 原子力バックエンド研究, Vol.13, No.1, pp.23-30.

- 坂川幸洋, 梅田浩司, 鈴木元孝, 梶原竜哉, 内田洋平 (2004) : 日本の坑井温度プロファイルデータベース, 地震 2, 第 57 巻, 第一号, pp. 63-67.
- 坂川幸洋, 梅田浩司, 浅森浩一 (2005) : 熱移流を考慮した日本列島の熱流束分布と雲仙火山を対象とした熱・水連成シミュレーション, 原子力バックエンド研究, Vol.11, No.2, pp.157-166.
- 阪口圭一 (2008) : 温泉放熱量に基づく熱異常抽出・特性把握方法に関する検討, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.65-69.
- 坂口清敏, 吉田宣生, 南将行, 原雅人, 鈴木康正, 松木浩二 (2006) : 深部地圧計測のための下向き円錐孔底ひずみ法の開発と室内実証試験, 資源と素材, Vol.122, No.6/7, pp.338-344.
- 櫻井春輔, 清水則一, 芥川真一, 吉田秀典, 佐藤稔紀, 山地宏志 (2006) : 国内超大深度立坑工事の地山崩壊形態から見た崩壊発生機構に関する考察, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.4, pp.662-673.
- Salah, M.K. and Zhao, D. (2003) : 3-D seismic structure of Kii Peninsula in southwest Japan: evidence for slab dehydration in the forearc, Tectonophys., Vol.364, pp.191-213.
- 真田祐幸, 丹生屋純夫, 松井裕哉, 藤井義明 (2009) : 堆積履歴が幌延地域に分布する珪質岩の力学特性や微視的構造変化に及ぼす影響, Journal of MMIJ, Vol.125, No.10/11, pp.521-529.
- 三箇智二, 安江健一 (2008) : 河床縦断形のシミュレーション, 地形, 第 29 巻, 第 1 号, pp.27-49.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2007a) : 概要調査の調査・評価項目に関する技術資料—長期変動と地質環境の科学的知見と調査の進め方—, 産業技術総合研究所深部地質環境研究センター, 地質調査総合センター研究資料集, no.459.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2007b) : 平成 18 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 塩淡境界面形状把握調査.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2008) : 平成 19 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発 成果報告書.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2009) : 平成 20 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)平成 20 年度事業報告書.
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010a) : 日本の第四紀火山, http://riodb02.ibase.aist.go.jp/strata/VOL_JP/, (参照 2011 年 3 月 17 日).
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010b) : 活断層データベース, <http://riodb02.ibase.aist.go.jp/activefault/>, (参照 2011 年 3 月 17 日)
- 産総研 (産業技術総合研究所) (2010c) : 平成 21 年度地層処分技術調査等委託費, 地層処分共通技術調査, 沿岸域塩淡境界・断層評価技術高度化開発.
- 佐々木寿, 向山栄 (2009) : 地形判読を支援する新しい地形表現方法の開発とその利用—航空機レーザスキャナ DEM を用いたカラー標高傾斜図 (ELSAMAP), 応用地質, 第 49 巻, 第 6 号, pp.318-330.
- 佐々木宗建 (2008) : 地下水水質の形成過程の基礎的数値解析, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.117-122.
- 佐々木泰, 浜田憲彦, 藤原八笛, 鶴旨純, 中東秀樹 (2008) : 地盤調査のための三次元反射法地震探査による詳細地質解析, 物理探査, 第 61 巻, 第 3 号, pp.243-249.
- Sasaki, T., Morimoto, T., Ikeda, H., Shiraishi, T. and Sugi, S. (2009) : Groundwater flow prediction method in consideration of long-term topographic changes of uplift and erosion, Stability and Buffering Capacity

- of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.277-288.
- 佐々木俊法, 須貝俊彦, 柳田誠, 守田益宗, 古澤明, 藤原治, 守屋俊文, 中川毅, 宮城豊彦 (2006) : 東濃地方内陸小盆地地埋積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動, 第四紀研究, 第 45 巻, 第 4 号, pp.275-286.
- 佐竹洋, 村田正信 (1998) : 地下水から見る断層周辺の水の動き, 月刊地球, Vol.20, No.3, pp.160-164.
- 佐藤比呂志 (1996) : 日本列島のインバージョンテクトニクス, 活断層研究, 第 15 号, pp.128-132.
- 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, pp.13-24.
- 澤田昌孝, 上田圭一 (2009) : 横ずれ断層の進展に伴う地盤の破壊領域評価のための数値シミュレーション, 電力中央研究所報告, N08028, 19p.
- 澤田昌孝, 新孝一, 秦野輝儀, 津田延裕, 三和公, 土宏之 (2009) : 概要調査段階の処分空洞建設性評価ーボーリングコアを利用した評点式岩盤評価法ー, 第 38 回岩盤力学シンポジウム, pp.347-352.
- 澤田昌孝, 新孝一, 猪原芳樹, 志田原巧, 秦野輝儀 (2011) : 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その 3)ー割れ目を有する硬質岩盤に対するボーリングコア情報を用いた施工性・岩盤物性の評価法ー, 電力中央研究所報告, N10016.
- Schapper, S., Jefferson, R. and Calvert, A. (2009) : Anisotropic velocities and offset vector tile prestack-migration processing of the Durham Ranch 3D, Northwest Colorado, The Leading Edge, Vol.28, pp.1352-1361.
- Segawa J., Komazawa, M., Kumar, K., Nakayama, E., Joseph, E. J., Kusumoto, S., Onodera, K. and Kuroishi, Y. (2005) : Examination of consistency of marine gravity with land gravity in and around the Japanese Islands using a helicopter-borne gravimeter, Earth Planet Space, Vol.57, pp.243-252.
- 関陽児, 菱田省一, 小西千里, 内藤一樹, 渡部芳夫 (2005) : 高感度ヒートパルス式孔内流速計の現場適用例 : みずみちの捕捉と低透水性岩盤への浸透流の検出, 応用地質, 第 46 巻, 第 4 号, pp.190-197.
- 瀬野徹三 (1995) : プレートテクトニクスの基礎, 朝倉書店.
- Sharp, W.D. and Clague, D.A. (2006) : 50-Ma Initiation of Hawaiian-Emperor Bend Records Major Change in Pacific Plate Motion, Science, Vol.313, pp.1281-1284.
- 志田原巧, 秦野輝儀, 大塚正幸, 荒井融, 畑元浩樹, 土宏之 (2004) : 事前検討段階での地下施設の施工難易度推定に関する予備的検討, 平成 16 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.97-100.
- 茂野博 (2008) : 地熱井変質データベースの構築と事例 6 地域のモデル化による多様な変質環境の検討, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.71-107.
- Shimada, K., Tanaka, H. and Saito, T. (2008) : Rapid and Simple Measurement of H₂ Emission from Active Faults Using Compact Sampling Equipments, Resource Geology, Vol. 58, No.2, pp.196-202.
- Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S. (1996) : Earthquake-related ground motion and groundwater pressure change at the Kamaishi Mine, Engineering Geology, Vol. 43, pp.107-118.
- 下山正一, 木下裕子, 宮原百々, 田中ゆかり, 市原季彦, 竹村恵二 (1999) : 旧汀線高度からみた九州の後期更新世地殻変動様式, 地質学雑誌, 第 105 巻, 第 5 号, pp.311-331.

- 新孝一, 澤田昌孝, 猪原芳樹, 志田原巧, 秦野輝義 (2011a): 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その1)~難工事事象の地質要因の分析と山はね予測評価法の提案~, 電力中央研究所報告, N10013.
- 新孝一, 澤田昌孝, 猪原芳樹, 志田原巧, 荒井融 (2011b): 地上からの調査に基づく坑道建設性評価 (その2)~膨張性地山の予測評価法の提案~, 電力中央研究所報告, N10014.
- 新谷俊一, 田中和広 (2005): 新潟県十日町市松代に分布する泥火山の地質, 自然災害科学, Vol.24-1, pp.49-58.
- 新谷俊一, 田中和広 (2009): 新潟県十日町市における泥火山噴出物の起源, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.340-349.
- Shiomi, K., Sato, H., Obara, K. and Ohtake, M. (2004): Configuration of subducting Philippine Sea plate beneath southwest Japan revealed from receiver function analysis based on the multivariate autoregressive model, *J. Geophys. Res.*, Vol.109, B04308, doi:10.1029/2003JB002774.
- 汐見勝彦, 小原一成, 針生義勝, 松村稔 (2009): 防災科研 Hi-net の構築とその成果, 地震2, 第61巻, 特集号, pp.S1-S7.
- 白井正明, 阿部信太郎 (2001): 浅海成堆積サイクルの詳細な解析による地殻変動復元手法の検討, 電力中央研究所報告, U01016, 20p.
- Shiroya, K., Yokoyama, Y. and Matsuzaki, H. (2010): Quantitative determination of long-term erosion rates of weathered granitic soil surfaces in western Abukuma, Japan using cosmogenic ¹⁰Be and ²⁶Al depth profile, *Geochemical Journal*, Vol.44, pp.e23-e27.
- SKB (2000): Geoscientific programme for investigation and evaluation of sites for the deep repository, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-00-20.
- SKB (2001): Site investigations, Investigation methods and general execution programme, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-01-29.
- SKB (2009): Äspö Hard Rock Laboratory Annual report 2008, *Svensk Kärnbränslehantering AB*, TR-09-10.
- Stirling, M.W., McVerry, G.H. and Berryman, K.R. (2002): A New Seismic Hazard Model for New Zealand, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol 92, No.5, pp.1878-1903.
- 末永弘, Schreck, M., 宮川公雄, 中川加明一郎 (2000): 光ファイバ温度検層による水みち推定への適用性検討, 電力中央研究所報告, U99068.
- 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, 第119巻, 第1号, pp.84-101.
- 杉村新 (1958): “七島—東北日本—千島” 活動帯, 地球科学, 第37巻, pp.34-39.
- 須山泰宏, 田辺博三, 江藤次郎, 吉村公孝 (2010): 閉鎖時の意志決定における地層処分モニタリングのあり方に関する検討, *原子力バックエンド研究*, vol.17, No.2, pp.71-84.
- 鈴木浩一, 徳安真吾, 田中和広 (2009): 電磁探査法および地形・地質調査による新潟県十日町市泥火山の深部地下構造, 地学雑誌, 第118巻, 第3号, pp.373-389.
- 鈴木隆介 (1969): 日本における成層火山体の侵食速度, 火山, 第14巻, 第3号, pp.133-147.
- 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——関市巖美町付近の調査速報——, 活断層研究, 第29号, pp.25-34.

- 田近淳, 岡村俊邦 (2010): 大規模地すべり地形の発達, 積丹半島沼前地すべりの例, 日本地すべり学会誌, 第47巻, 第2号, pp.15-21.
- 田近淳, 中迎誠, 石丸聡, 原口強, 中田賢, 志村一夫 (2009): 2003年十勝沖地震に伴う新冠泥火山の変動の記録, 北海道立地質研究所報告, 第80号, pp.147-156.
- 多田堯, 鷺谷威, 宮崎真一 (1997): GPS でみた変動する日本列島, 科学, Vol.67, No.12, pp.917-924.
- Tagami, T. and Murakami, M. (2007): Probing fault zone heterogeneity on the Nojima fault: Constraints from zircon fission-track analysis of borehole samples, *Tectonophysics*, 443, pp.139-152.
- 田上高広, 長谷部徳子, 蒲原秀典, 竹村恵二 (1998): 500m コアのフィッショントラック熱年代学から見いだされた野島断層近傍の温度異常 (総特集 断層解剖計画), 地球, 号外, Vol.21, pp.175-179.
- 田上高広, 渡辺裕美子, 板谷徹丸 (2010): 地震断層の年代学—最近の新展開と今後の展望, 月刊地球, Vol.32, No.1, pp.3-9.
- 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, 第44巻, 第4号, pp.229-245.
- 田力正好, 池田安隆, 野原壯 (2009): 河成段丘の高度分布から推定された, 岩手・宮城内陸地震の震源断層, 地震2, 第62巻, 第1号, pp.1-12.
- 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号, pp.77-91.
- 高木俊男, 柳田誠, 藤原治, 小澤昭男 (2000): 河岸段丘から推定した河床高度変化の歴史, 地学雑誌, 第109巻, 第3号, pp.366-382.
- 高浜信行 (1996): マスムーブメント, 新版地学事典, 地学団体研究会編, 平凡社.
- 高橋浩, 進士正人, 中川浩二 (2004): 事例に基づく押出し性地山におけるトンネルの設計・施工法の提案, 土木学会論文集, 777, VI-65, pp.83-96.
- 高橋一晴, 新里忠史, 安江健一, 石井英一 (2005): 北海道北部幌延町における地球化学的特徴を用いた侵食量の推定, 核燃料サイクル開発機構 (研究報告), JNC TN5400 2005-011.
- 高橋正明, 森川徳敏, 戸丸仁, 高橋浩, 大和田道子, 竹野直人, 風早康平 (2006): 遠別旭温泉・歌越別泥火山について, 地質ニュース, 第627号, pp.48-53.
- 高橋正樹 (2000): 島弧・マグマ・テクトニクス, 東京大学出版会.
- 高村尚, 奥津一夫, 須賀原慶久, 虎田真一郎, 大内仁 (2006): 地下深部岩盤中における無線データ通信特性に関する検討, 原子力バックエンド研究, Vol.12, No.1/2, pp.21-29.
- 高野修, 荒戸裕之, 中西健史, 松岡俊文, 佐伯龍男 (2006): 三次元反射法地震探査技術の進展がもたらす地質学, とくに堆積学分野へのインパクト, 物理探査, 第59巻, 第3号, pp.225-231.
- 竹ヶ原竜大, 虎田真一郎, 朝野英一, 大内仁, 坪谷隆夫 (2004): 地層処分にかかわるモニタリングの研究—位置付け及び技術的可能性—, 原環センター技術報告書, RWMC-TRJ-04003.
- 竹内真司, 下茂道人, 城まゆみ, Chin-Fu Tsang (2004): 電気伝導度検層による深部花崗岩中の水みちの抽出と水理特性の評価, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.451-456.
- 竹内真司, 中野勝志, 平田洋一, 進士喜英, 西垣誠 (2007): 深層岩盤を対象としたシーケンシャル水理試験手法の開発と適用, 地下水学会誌, 第49巻, 第1号, pp.17-32.

- Takeuchi, S., Amano, K., Takeuchi, R. and Saegusa, H. (2008) : Fluid electric conductivity logging: Useful application for characterization of water-conducting features, Proceedings of 36th IAH Congress, October, 2008, Toyama, Japan.
- 竹内竜史, 平田洋一 (2003) : 溶存ガスを含む地下水調査手法に関する一考察, 第 38 回地盤工学研究発表会 講演論文集, pp.1259-1260.
- 玉生志郎 (2008) : 地下温度分布から見た高温地区を含む広域地域のタイプ分けー東北地方と中国・四国地方の例ー地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.45-52.
- 玉生志郎, 阪口圭一, 佐藤龍也, 加藤雅士 (2008) : 地質・地球物理データの重合処理による熱・熱水異常地域の抽出ー東北地方と中国・四国地方の例ー, 地質調査研究報告, 第 59 巻, 第 1/2 号, pp.7-26.
- 田村糸子, 山崎晴雄 (2004) : 北陸層群のテフクロノロジーーテフラ層序および広域テフラ層との対比に基づく北陸層群の堆積年代ー地質学雑誌, 第 110 巻, 第 7 号, pp.417-436.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H.(2002) : Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones, Earth Planet. Sci. Lett., Vol.197, pp.105-116.
- 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 DGM P-5, 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- 田中秀実, 坂幸恭, 安部武史, 小浜俊介, 板谷徹丸 (1992) : 赤石裂線の断層ガウジとその K-Ar 年代, 地質学雑誌, 第 98 巻, 第 1 号, pp.39-48.
- 田中和広 (2004) : 地質環境の将来予測の考え方と現状, 月刊地球, Vol.26, No.6, pp.344-348.
- 田中和広, 千木良雅弘 (1997) : 我が国の地質環境の長期変動特性評価 (その 1)ー将来予測の基本的考え方と課題ー, 電力中央研究所報告, 研究報告, U96027.
- Tarduno, J., Bouge, H.P., Sleep, N. and Hansen, U. (2009) : The Bent HawaiianーEmperor Hotspot Track: Inheriting the Mantle Wind, Science, Vol.324, pp.50-53.
- 巽好幸 (1995) : 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会, 186p.
- 栃木善克, 甲川憲隆, 向井悟, 神徳敬, 笹本広, 柴田雅博, 油井三和 (2007) : 花崗岩質岩石のマトリクスにおける拡散深さに関する研究, JAEA-Research 2007-024.
- 遠田晋次, 丸山正, 吉見雅行, 金田平太郎, 栗田泰夫, 吉岡敏和, 安藤亮輔 (2010) : 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層ー震源過程および活断層評価への示唆ー地震 2, 第 62 巻, pp.153-178.
- 戸井田克, 田中真弓, 長井敏, 鈴木健彦, 佐藤光吉, 小舞正文, 大江俊昭, 西垣誠 (2007a) : 超音波反射エコーを利用した孔内地下水 3 次元流向・流速計測手法について, 地下水学会誌, 第 49 巻, 第 4 号, pp.291-307.
- 戸井田克, 田中真弓, 杉本映湖, 菱谷智幸, 西垣誠, 大江俊昭, 佐藤光吉, 小舞正文 (2007b) : 孔内 3 次元流向・流速測定における計測区間内の地下水流動状況評価について, 地下水学会誌, 第 49 巻, 第 4 号, pp.309-326.
- 徳山英一, 本座英一, 木村政昭, 倉本真一, 芦寿一郎, 岡村行信, 荒戸裕之, 伊藤康人, 徐垣, 日野亮太, 野原壯, 阿部寛信, 坂井眞一, 向山建二郎 (2001) : 日本周辺海域の中新世最末期以降の構造発達史, 海洋調査技術, 第 13 巻, 第 1 号, pp.27-53.
- 鳥越祐司, 幡谷竜太, 柳田誠, 佐藤賢, 佐々木俊法 (2002) : 氷期 (最大海退期)における海面低下による影響を考慮した河川の下刻作用による最大侵食ポテンシャルの履歴, 日本地質学会第 109 年学術大会講演要旨, 日本地質学会, P-266.

- 土志田潔, 三浦大助, 幡谷竜太 (2006) : マグマの水平移動に対する評価法の提案—隠岐島前火山の火道分布に基づく化学組成の影響の検討—, 電力中央研究所報告, N05026.
- 上田圭一 (2009) : 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の3次元変形過程—ヘリカルX線CTを用いた断層変位実験による検討—, 電力中央研究所報告, N08039.
- 上田圭一 (2011) : 模型実験による逆断層-活褶曲帯の発達過程の検討, 電力中央研究所報告, N10049.
- 上田圭一, 井上大栄, 宮腰勝義, 宮川公雄, 三浦大助 (2003) : 長大な活断層系における活動性調査法の高精度化—現地調査・模型実験による断層系の発達過程・断層変位地形の形成過程に関する検討—, 電力中央研究所報告, U03022.
- 上田圭一, 井上大栄, 鳥越祐司 (2005) : 2004年新潟県中越地震震源域における上部新生界の変形機構—模型実験による基礎的検討—, 地震2, 第58巻, 第3号, pp.309-327.
- 上田匠, 内田利弘, 光畑裕司 (2010) : 沿岸域MT法における2次元解析の検討と幌延沿岸域データへの適用, 物理探査学会第122回学術講演会論文集, pp.275-278.
- 上原大二郎, 菊池晃, 田中篤史, 勝田充, 永川誠, 大熊勝, 渡辺京志, 光畑裕司 (2007) : 九十九里浜沿岸地域における陸上—海底横断電気探査法の適用, 物理探査, 第60巻, 第6号, pp.489-499.
- Umeda, K. (2009) : An Integrated approach for detecting latent magmatic activity beneath non-volcanic regions: An example from the crystalline Iide Mountains Northeast Japan, In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, Workshop Proceedings, Manchester, United Kingdom, 13-15 November 2007, OECD/NEA No.6362, pp.289-301.
- 梅田浩司, 古澤明 (2004) : RIPL法によるテフラ降灰層準の認定と最新の噴火活動の推定, 月刊地球, Vol.26, No.6, pp.395-400.
- Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) : Helium isotopes as a tool for detecting concealed active faults, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.10, 10Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
- Umeda, K., Ogawa, Y., Asamori, K. and Oikawa, T. (2006a) : Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol.149, pp.47-61.
- Umeda, K., Asamori, K., Negi, T. and Ogawa, Y. (2006b) : Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a non-volcanic region, northeast Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.7, pp.Q08005, doi:10.1029/2006GC001247.
- Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S. and Oikawa, T. (2007a) : Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.112, .B05207, doi:10.1029/2006JB004590.
- Umeda, K., Hanamuro, T., Yamada, K., Negishi, Y., Iwano, H. and Danhara, T. (2007b) : Thermochronology of non-volcanic hydrothermal activity in the Kii Peninsula, Southwest Japan: evidence from fission track dating and helium isotopes in paleo-hydrothermal fluids, *Radiation Measurements*, 42, pp.1647-1654, doi:10.1016/j.radmeas.2007.09.013.
- Umeda, K., Sakagawa, Y., Ninomiya, A. and Asamori, K. (2007c) : Relationship between helium isotopes and heat flux from hot springs in a non-volcanic region, Kii Peninsula, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, .L05310, doi:10.1029/2006GL028975.
- Umeda, K., McCrank, G.F. and Ninomiya, A. (2008) : High ^3He emanations from the source regions of recent large earthquakes, Central Japan, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol.9, .Q12003, doi:10.1029/2008GC002272.

- Umeda, K., Ninomiya, J. and Negi, Y. (2009) : Heat source for an amagmatic hydrothermal system, Noto Peninsula, Central Japan, *J. Geophys. Res.*, Vol.114, .B01202, doi:10.1029/2008JB005812.
- 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*, Vol.32, No.1, pp.52-63.
- 宇根寛, 佐藤浩, 矢来博司, 飛田幹男 (2008) : SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析, *日本地すべり学会誌*, 第 45 卷, 第 2 号, pp.125-131.
- 宇都浩三 (1995) : 火山と年代測定 : K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定の現状と将来, *火山*, 第 40 卷, 特別号, pp.S27-S46.
- 宇津徳治 (1984) : 地震学 第 2 版, 共立出版.
- 若狭幸, 松崎浩之, 松倉公憲 (2004) : 原位置宇宙線生成核種年代測定法—侵食地形変化速度の解明への適用, *地形*, 第 25 卷, 第 3 号, pp.247-265.
- 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寢覚ノ床における下刻速度, *季刊地理学*, Vol.60, No.2, pp.69-76.
- 渡辺満久, 鈴木康弘 (1999) : 活断層地形判読, 古今書院.
- 渡辺満久, 堤浩之, 鈴木康弘, 金幸隆, 佐藤尚登 (2001) : 都市圏活断層図「小千谷」, 都市圏活断層図 1:25,000 国土地理院技術資料 D.1-No.388, 国土地理院.
- Xia, S., Zhao, D., Qie, X., Nakajima, J., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A. (2007) : Mapping the crustal structure under active volcanoes in central Tohoku, Japan using P and PmP data, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.34, No.10, .L10309, doi:10.1029/2007GL030026.
- Yamada, K. and Tagami, T. (2008) : Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U-Th) /He thermochronology and fission track analysis, *J. Geophys. Res.*, Vol.113, pp.B03402, doi:10.1029/2007JB005368.
- 山田泰広, 松岡俊文 (2004) : 地質構造モデリングによる小断層の形態と断層再活動ポテンシャルの推定, *物理探査学会第 110 回学術講演会論文集*, pp.117-120.
- 山縣毅, 小川勇二郎 (1989) : 混在岩の形成における泥ダイアピリズムの役割, *地質学雑誌*, 第 95 卷, 第 4 号, pp.297-310.
- 山本真哉, 幡谷竜太, 濱田崇臣 (2008) : 数値標高モデルを用いた段丘面形状の定量化と段丘対比への応用, *電力中央研究所報告*, N07017, 25p.
- 山崎晴雄 (2006) : 関東平野の地震地質—南関東の基盤断層と活断層の関係—, *月刊地球*, Vol.28, No.1, pp.8-16.
- 柳沢孝一, 大澤英昭, 武田精悦, 高瀬博康, 青山裕司, 古市光昭, 戸井田克, 須山泰宏, 若松尚則, 西垣誠 (2004) : 地質環境特性評価の不確実性解析手法に関する検討—variability と ignorance を考慮した不確実性解析の方法論の構築および東濃地域への適用—, *原子力バックエンド研究*, Vol.10 No.1/2, pp.5-20.
- 柳沢幸夫, 小林巖雄, 竹内圭史, 立石雅昭, 茅原一也, 加藤碩一 (1986) : 小千谷地域の地質, *地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅)*.
- 矢野雄策, 田中明子, 高橋正明, 大久保泰邦, 笹田政克, 梅田浩司, 中司昇 (1999) : 日本列島地温勾配図, 地質調査所.
- Yilmaz, O. (2001) : Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data, *Society of Exploration geophysicists books Chapter 5*.

- 吉田英一, 佐藤治夫, 仙波毅 (2002) : マトリクス拡散による物質移動の遅延効果の評価手法とその検討, 応用地質, 第 43 巻, 第 1 号, pp.24-34.
- 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, 第 50 巻, 第 1 号, pp.16-28.
- Yoshida, H., Takeuchi, M., Metcalfe, R. (2005) : Long-term stability of flow-path structure in crystalline rocks distributed in an orogenic belt Japan, *Engineering Geology*, Vol.78, pp.275-284, doi:10.1016/j.enggeo.2005.01.002.
- Yoshida, T. and Suzuki, M. (2006) : Migration of strontium and europium in quartz sand column in the presence of humic acid: Effect of ionic strength, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, Vol.270, No.2, pp.363-368.
- 吉田武義, 大口健志, 阿部智彦 (1995) : 新生代東北本州弧の地殻・マントル構造とマグマ起源物質の変遷, 地質学論集, 第 44 号, pp.263-308.
- 吉川周作, 吉田史郎, 須川栄司 (1991) : 東海層群の火山灰層とその対比, *地球科学*, 第 45 巻, 6 号, pp.453-467.
- 吉川周作, 水野清秀, 加藤茂弘, 里口保文, 宮川ちひろ, 衣笠善博, 三田村宗樹, 中川康一 (2000) : 神戸市東灘 1,700m ボーリングコアの火山灰層序, *第四紀研究*, 第 39 巻, 第 6 号, pp.505-520.
- Yoshikawa, T. (1974) : Denudation and Tectonic Movement in Contemporary Japan, *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, Vol.6, pp.1-14.
- 吉村公孝, 大久保秀一, 山根一修 (2006a) : 海底電磁探査による伏在断層や地下水理情報の取得可能性について, *地学雑誌*, 第 115 巻, 第 3 号, pp.400-415.
- 吉村公孝, 坂下晋, 大久保秀一, 山根一修, 瀬谷正巳 (2006b) : 地層処分における電磁法解析技術の開発 (その 6)—北海道幌延町における AMT 法 3 次元調査—物理探査学会第 115 回学術講演会論文集, pp.209-212.
- 吉村公孝, 岡崎幸司, 大里和己, 大澤健二, 山岡昌信, 中嶋智, 茂田直孝, 藪内聡, 山中義彰 (2009) : 幌延地域の沿岸域電磁法調査 (その 1)—調査の概要—, *物理探査学会第 121 回学術講演会論文集*, pp.75-78.
- 吉村公孝, 若松尚則, 安藤賢一, 橋本修爾, 茂田直孝, 藪内聡 (2010) : 沿岸域の水理地質構造に着目した塩淡水境界に関する地下水流動解析, 日本原子力学会「2010 年春の年会」予稿集.
- 吉山昭, 柳田誠 (1995) : 河成地形面の比高分布からみた地殻変動, *地学雑誌*, 第 104 巻, 第 6 号, pp.809-826.
- 全国地質調査業協会連合会 (2009) : 改訂 地質調査要領—効率的な地質調査を実施するために, 経済調査会.
- Zhang, H. and Thurber, C. (2003) : Double - Difference Tomography: The Method and Its Application to the Hayward Fault, California, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.93, No.5, pp.1875-1889.
- Zhang, H. and Thurber, C. (2006) : Development and Applications of Double - Difference Seismic Tomography, *Pure Appl. Geophys.*, Vol.163, pp.373-403.