

第Ⅱ部

放射性廃棄物処理・処分技術

第2章

地質地下水 環境調査評価技術

2-1 地質環境長期安定性評価技術	20
2-1-1 隆起・侵食評価技術	
2-1-2 火成活動評価技術	
2-1-3 活断層周辺地盤の変形評価技術	
2-2 地質地下水環境特性調査評価技術	25
2-2-1 コントロールボーリング掘削・調査技術	
2-2-2 地下水年代測定技術	
2-2-3 地下水流動解析技術	
2-2-4 物理特性情報の変換解析技術	
2-3 ニアフィールドの地質・地下水・溶質移行特性の 調査技術	33
2-3-1 坑道掘削影響領域評価技術	
2-3-2 原位置トレーサ試験による溶質移行特性評価技術	
2-4 天然バリア中の地化学・微生物影響調査評価技術	36
2-4-1 地下岩盤の地化学環境調査技術	
2-4-2 処分環境における微生物影響評価技術	
2-5 概要調査における調査・評価手法の体系化	38
2-5-1 概要調査の調査・評価フローの構築	

2-1 地質環境長期安定性評価技術

地質環境長期安定性評価技術については、当研究所では、処分地の選定調査で必要となる調査・評価体系の構築に向けて、隆起・侵食、火成活動、活断層・活褶曲の3項目に関わる調査技術・評価手法の高度化を、NUMO受託研究および関連する当研究所の所内研究として進めてきた。

隆起・侵食については、地層処分事業、余裕深度処分事業のいずれにおいても、処分場の立地選定のための1つの重要な指標となる第四紀後期の隆起量を適切に評価するため、特に、内陸部の河成段丘を用いた隆起量評価手法を高度化するため、段丘の対比・編年の信頼性と精度の向上、ならびに河成段丘を用いた隆起量評価手法の検証を進めてきた。さらに、隆起・沈降量（速度）の調査を海岸域から内陸部まで展開することにより、隆起・沈降運動様式の把握、活構造の検出、ならびに活動性評価への適用に関しても検討を行ってきた。

火成活動については、文献調査により既存の第四紀火山周辺の明らかに処分地に適さない地域が除外された後の調査段階において、長期的な安全性確保のために考慮すべき要件の1つである、マグマの貫入・噴出に関する評価手法の検討に取組み、既存火山におけるマグマの移動特性に関する検討を進めた。また、過去の火山活動の時空分布の特徴（偏在・集中傾向）に対し、関連する現象の重ね合せによる新規火山評価の考え方の構築を進めてきた。

活断層・活褶曲については、廃棄体に影響を及ぼしうる活構造の影響範囲や影響程度の認定が大きな課題として残されていたことから、活褶曲・活撓曲、および活断層帯の発達過程やメカニズムを考慮した影響範囲、影響程度の認定方法に関する検討を進めてきた。

以下に、地質環境長期安定性評価技術に関わるこれらの3項目の代表的な研究成果を紹介する。

2-1-1 隆起・侵食評価技術

2000年時点で、海成段丘から見積られた第四紀後期の隆起量データが網羅的に集積されていたが¹⁾、内陸部の研究は遅れていた。内陸部の隆起量については、河成段丘を用いて見積る手法²⁾が知られていたが、隆起量

の指標となる河成段丘の対比・編年の信頼性向上と、この手法の検証が課題であった。そこで、当研究所では、段丘対比・編年手法の高度化を進めつつ、河成段丘を用いた手法を検証するとともに、隆起・沈降運動様式を把握し、地域スケール（数km～数10km）での隆起・沈降特性を評価する手法の開発を進めてきた。

(1) 段丘対比・編年技術

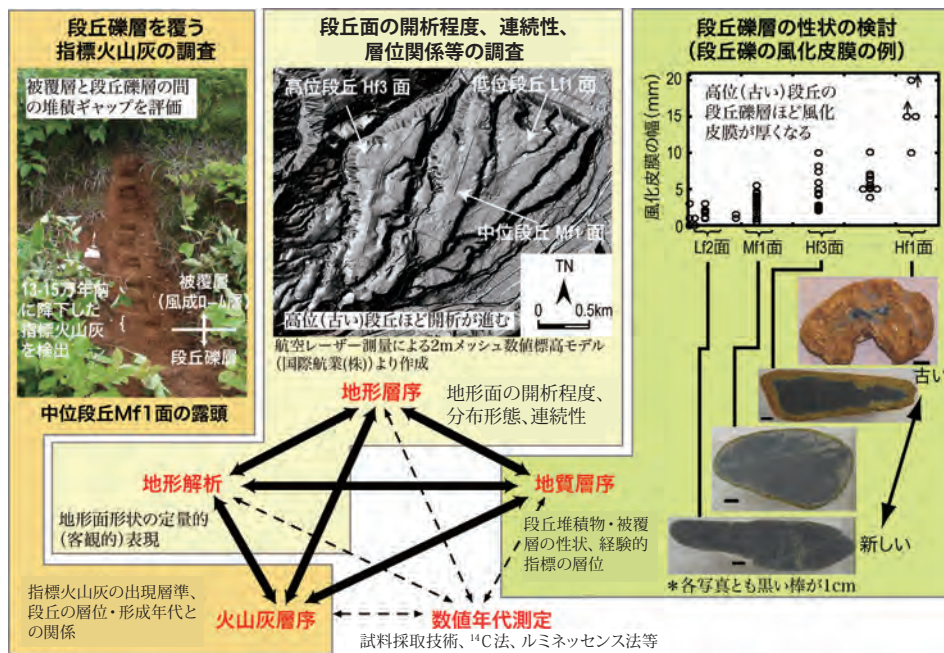
段丘の対比・編年技術は、余裕深度処分事業や原子力発電事業における地質調査でも必要とされる基礎技術である。幡谷ほか³⁾、幡谷^{4,5)}は、地質年代データの解釈を誤って段丘の形成年代を若く見積り過ぎてしまうという、段丘対比・編年における基本的問題を取り上げ、地形層序と地質層序のバランスを重視した総合的な段丘対比・編年への回帰の必要性を論じた。

続いて、幡谷ほか⁶⁾、幡谷・濱田⁷⁾は、詳細な火山灰分析手法⁸⁾を使って、幡谷^{4,5)}の段丘対比・編年戦略の妥当性を実証した。山本ほか⁹⁾は、数値標高モデル（DEM）を用いた段丘面形状の定量化手法を提案し、空中写真判読による段丘面の形態認識の妥当性と対比の根拠を示した。濱田・幡谷¹⁰⁻¹²⁾は、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を行った。これらの成果は、段丘面の開析の程度、段丘を構成する地質の風化といった経験的指標の有効性を客観的に示すものとなり、段丘対比・編年技術の高度化（図2-1-1）に貢献し、特に、内陸部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）に形成された段丘の同定の信頼性を向上させた。

(2) 河成段丘を用いた隆起量評価手法

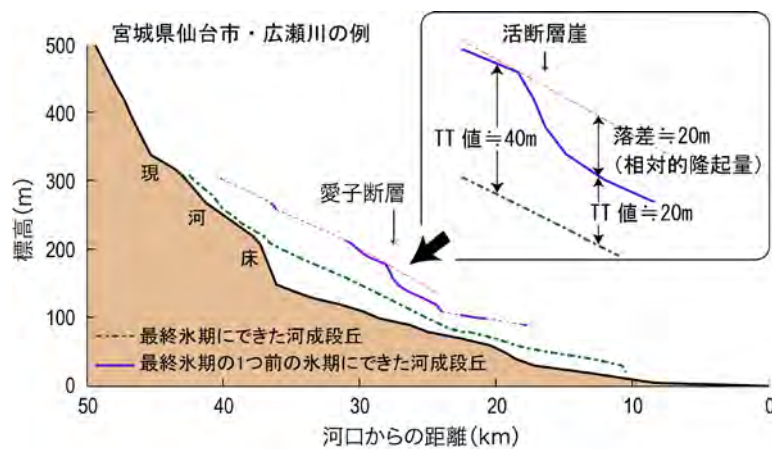
幡谷¹³⁾は、活断層の両側で河成段丘を使った手法²⁾から求められる隆起量の差と断層落差の比較から、手法の妥当性を検証した。さらに、隆起・沈降量（速度）の調査を、海岸域から内陸部まで展開することなどにより、第四紀後期の隆起・沈降運動の特性評価（活構造の検出、広域的な傾動の把握）へ応用した^{13,14)}。

幡谷ほか⁶⁾、幡谷・濱田⁷⁾は、河成段丘の発達がよい新潟県中越地方を研究対象として、内陸部隆起量評価手法の高度化を図り（図2-1-2）、活構造（活断層、活褶曲、活撓曲など）の検出、隆起・沈降様式の把握に、河成段丘の比高のみならず、段丘の分布情報そのものも活用す



段丘対比・編年は、隆起量評価や活構造評価において最も基礎的な情報である。地形層序・地質層序の対応関係（バランス）を重視し、段丘対比・編年において火山灰層序・数値年代データを論理的に解釈するための基本的考え方に則り、多角的に検討し、段丘対比・編年の信頼性の向上を図った。

図 2-1-1 総合的段丘対比・編年の実践^{3-7,9,10)}



断層の落差は、相対的隆起量である。河成段丘の比高から見積られた断層崖の両側の隆起量（TT 値）の差がこれにほぼ等しいことから、河成段丘を用いた隆起量の見積りは妥当と考えられる。

図 2-1-2 河成段丘を用いた隆起量の見積りの検証（宮城県仙台市広瀬川の河床縦断面図）¹³⁾

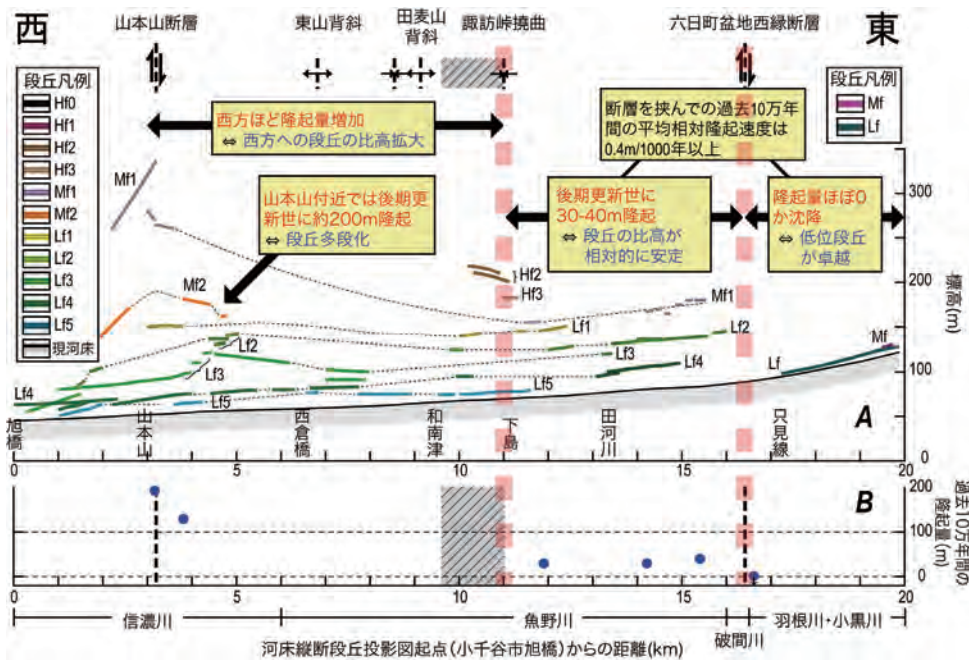
ることを提案した（図 2-1-3）。

ここで述べる内容のうち、山本ほか⁹⁾は、NUMO 受託研究「概要調査における地質環境の長期安定性（火山、隆起、浸食）の調査技術・評価手法の高度化」の成果の一部をとりまとめたものである。

(3) 侵食量評価に向けた検討

隆起・沈降特性評価の研究に比べ、侵食量評価は遅れているので、侵食量評価に向けた基礎的な研究を実施した。

山本ほか⁹⁾は、空中写真判読における段丘面の開析の程度が段丘対比の指標になるという経験則を定量的に



幡谷・濱田⁷⁾に基づき作成。A：新潟県中越地方の魚沼丘陵を東西に横断する魚野川沿いの基線に河成段丘の分布標高を投影したもの（河床縦断段丘投影図）。B：河成段丘から見積った過去10万年間の隆起量。赤破線は主要な隆起・沈降変動境界（活構造）で、これらを境に隆起量、河成段丘の分布（段丘面の段数や比高の分布（変化）など）が異なる。

図 2-1-3 河成段丘の分布、隆起量の見積りと活構造⁷⁾を改変

裏付けたが、これは同時に、年代ごとの侵食の状態を客観的に表現したことになる。ここで得られた地形面の形成年代と侵食量の指標の関係は、今後、数値シミュレーションなどの地形変化予測手法を検証する鍵となることが期待される。

(4) 今後の展開

段丘対比・編年手法については、特に、中期更新世の段丘に重点を置いて、今後も継続的に研究を進める。また、段丘を用いた隆起量評価／隆起特性評価については、隆起・沈降運動を地質構造発達史の中で位置づけることにより、さらに高度化を図る。一方で、隆起特性評価の観点に基づいた活断層評価事例を蓄積する。

2-1-2 火成活動評価技術

高レベル放射性廃棄物処分地の選定調査の場合、特に、文献調査により既存の第四紀火山周辺の明らかに適さない地域が除外された後の概要調査では、処分候補地に対して、次の2つの場合に分けて、将来的にマグマが処分場へ移動・到達しえないことを評価しておく必要があ

る^{15, 16)}。

- ・ 既存の火山（マグマ供給系）からのマグマの移動：既存火山評価（個々の火山スケール）
- ・ 対象地域での新たな火山の発生：新規火山評価（火山同士の時空間スケール）

当研究所では、この2つの異なる時空間スケールにおける評価の項目、必要な情報、調査・評価の手順を明確化するために、既存火山におけるマグマの移動特性に関する検討を進めるとともに、過去の火山活動の時空分布の特徴（偏在・集中傾向）に対し、関連する現象の重ね合わせによる新規火山評価の考え方の構築を進めてきた。

(1) 既存火山評価

地下施設に対するマグマの移動・到達の観点からは、個々のマグマ供給系において、その寿命の範囲内で、マグマの移動を支配する要因を理解するとともに、マグマが地下で側方にどこまで拡がりうるかを把握することが基本的に重要である。この評価のためには、①個々の第四紀火山の活動特性と形成発達史（特に、マグマ活動の位置、様式、貫入・噴出量の時間変化）、②火山体地下のマグマ供給系の構造、③マグマの性質とその進化、④

マグマの移動プロセスと活動範囲に関し、地質学的・岩石学的手法、および地球物理学的・測地学的手法を通じて得られる広範なデータを組み合わせることで検討を行うことが必要と考えられる¹⁶⁾。

特に、火山におけるマグマの側方への移動に対する支配要因として重要な要素は、広域応力場と火山体近傍の局所的応力場の組合せ、あるいはそれらに起因する断裂系である^{17, 18)}。国内の情報の豊富な活火山の火口（噴火位置）の移動に関する事例調査結果¹⁹⁾に基づけば、マグマの移動しやすい範囲や方位を把握するためには、応力場の基本的性質（圧縮・引張）、水平差応力の大きさ、局所応力場の範囲との関係に着目する必要がある。

(2) 新規火山評価

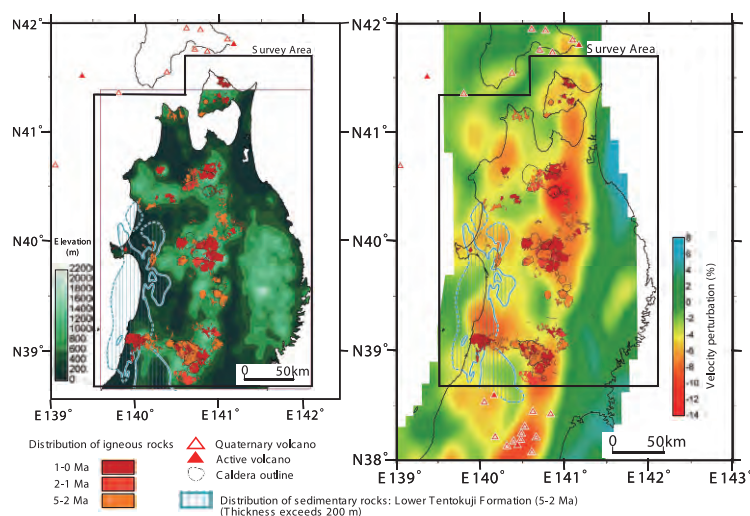
処分場選定調査の対象地域での新たな火山の発生可能性については、既存のマグマ供給系の評価とは別に、火山同士の時空間スケールの観点から、将来的な火山の発生場所と規模・活動様式に関する評価が必要である。その評価のためには、日本列島のような沈み込み帯の場合、沈み込みの条件が一定の下での火山の集中・偏在傾向の持続性に着目することが重要である。新規火山の発生場所については、それらの現象を最もよく説明する地質学的なモデルをもとに、過去数100万年オーダーで認定しうる火山活動の規則性・偏在性を将来に外挿することにより、また、新規火山の規模・活動様式については、既

存火山評価を通じて得られる第四紀火山の規模・活動様式からの類推により、評価を行うことが可能である¹⁶⁾。

各時代で火山が分布する海溝側の境界を火山フロントとすれば、日本列島における中新世後期以降の火山フロントの移動速度は、数km/100万年程度以下であり、10万年程度の将来において、現在の火山フロントの海溝側での新たな火成活動の発生は考えられない²⁰⁾。一方、火山フロントの背弧側における新規火山の発生可能性評価については、近年、火山の時空間分布の規則性・偏在性が明らかにされ²¹⁻²³⁾、なおかつそれと地形学的・地質学的・地球物理学的諸現象^{24, 25)}との対応関係が明らかにされてきたことから、これらの現象の重ね合せによる評価の考え方の構築が急務となっていた。

これを受け、Kondo¹⁶⁾は、沈み込み帯における火山分布の規則性・偏在性と関連する現象との対応関係において典型例といえる東北日本を対象としたケーススタディーを通じ、新規火山評価の項目・手順、必要な情報などを明確化した（図2-1-4、図2-1-5）。

処分候補地が火山フロントの近傍ないしは背弧側に位置する場合には、この新規火山評価のための検討が必要となる。まず、沈み込みの条件の継続性の観点から、対象とする時代範囲を設定し（東北の場合、約1,000万年程度）、過去の火山活動の時空間分布における規則性・偏在性を認定する（東北の場合、火山集中域の島弧伸長方向の規則的な配列）。さらに、この規則性・偏在性と関



5Ma（500 万年前）以降の火成岩類の分布との重ね合せ図、左は地形データに基づく接峰面図、右は地震波トモグラフィーデータ（Hasegawa et al., 2005）²⁵⁾に基づくマンテルウェッジ内のS波速度分布図

図 2-1-4 火山活動の時空間分布の規則性・偏在性と関連する現象との対応関係（東北日本の例）¹⁶⁾

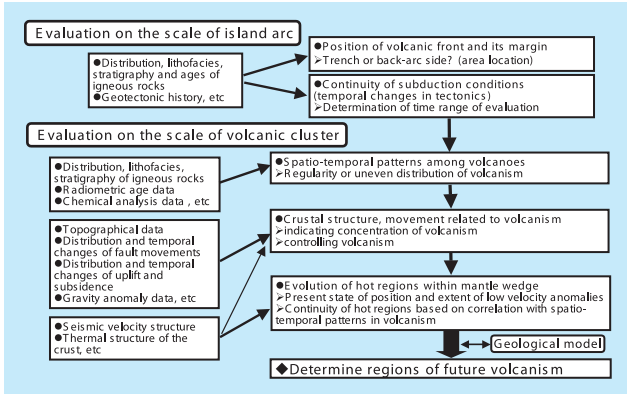


図 2-1-5 新規火山評価（新規火山の発生場所の評価）の手順を示すフローチャート¹⁶⁾

連する地殻構造・変動（東北の場合、脊梁山脈から東西に伸びる曲隆山地の分布）との対応、およびマントル内の高温領域の分布・持続性（東北の場合、地震波トモグラフィでイメージングされるマントル内の低速度異常域）との対応に関し、現象を最もよく説明するモデルを描くとともに、地域レベルの詳細検討により、現象の重ね合せから、将来的に火山活動が起こりうる領域を特定する¹⁴⁾。

2-1-3 活断層周辺地盤の変形評価技術

放射性廃棄物処分場の立地・設計に際して、活断層の変位に伴う周辺地盤の変形の範囲とその程度を予測する手法の構築は、重要な課題となっている。この手法の確立のためには、我が国に卓越する横ずれ断層系および逆断層系の発達過程と、周辺地盤の変形過程を解明する必要がある。そこで横ずれ断層・逆断層系を対象とした断層変位実験を実施し、実験結果と実地盤との比較・検討を行い、活断層周辺地盤の変形を評価する上での留意点を提示した。

(1) 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の変形

豊浦標準砂、石膏、水を混合して作成した模擬岩盤（長さ 860 mm、幅 310 mm、厚さ 18 ~ 30 mm）に横ずれ断層変位を与え、模擬岩盤の変形過程を、ヘリカル X 線 CT スキャナー（図 2-1-6）を用いて 3 次元的に解析した²⁴⁾。

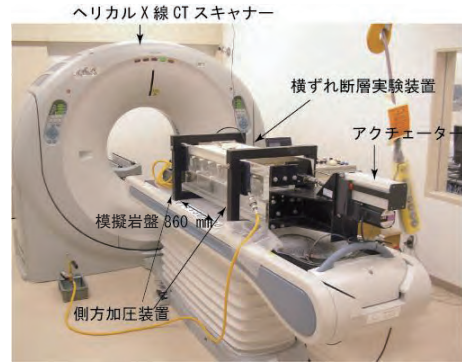
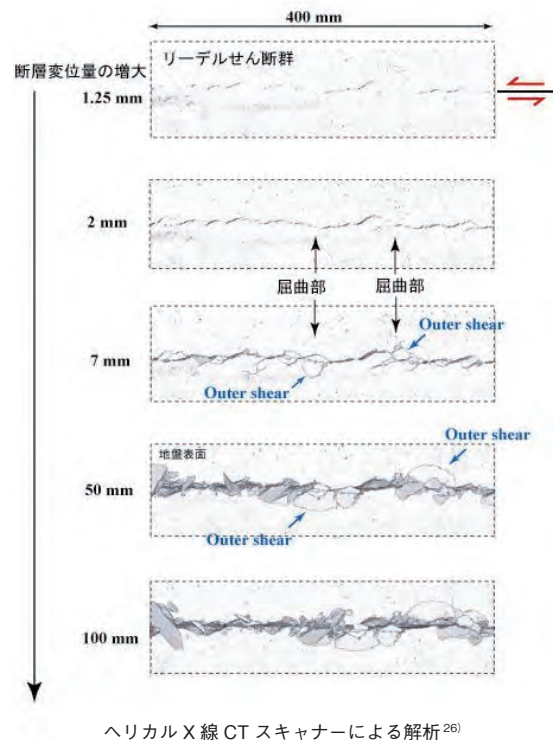


図 2-1-6 医療用ヘリカル X 線 CT スキャナーおよび横ずれ断層実験装置（電力中央研究所所有）



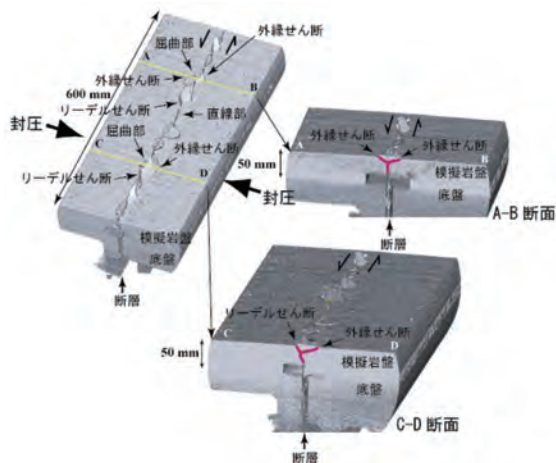
ヘリカル X 線 CT スキャナーによる解析²⁶⁾

図 2-1-7 模擬岩盤表面のフラクチャーの発達過程

(a) 横ずれ断層の変位に伴う岩盤の 3 次元変形過程

断層変位量の増大に伴う模擬岩盤の変形過程は次のとおりである（図 2-1-7）。

- ・リーデルセン断に相当する雁行状のフラクチャー群が発達する。
- ・リーデルセン断群は連結し、屈曲部を有する一連の主断層が形成される。
- ・曲部において、逆断層変位成分を有する新たなフラクチャー（外縁せん断（Outer-shear））が分岐・発生し、リーデルセン断分布域の外側へ伸展するため、岩盤浅



ヘリカルX線CTスキャナーによる解析(鳥瞰図)
 基底の断層変位量: 7mm、赤線がフラクチャーの鉛直断面²⁶⁾

図 2-1-8 フラクチャーの形態

部におけるフラクチャーゾーンの幅が急速に広がる。一方、屈曲部における岩盤深部では、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(図 2-1-8)。

- (b) 断層変位に伴う岩盤の変形を評価する上での留意点
 岩盤において対象となる断層の形態と活動性を各種調査で正確に把握し、断層系の成長過程(成熟度)と岩盤の物性・応力状態を考慮し評価を行うことが重要と考えられる。特に、断層の屈曲部では、地表付近においてフラクチャーゾーンの幅が広いものの、地下深部へ向かい、その幅が減少すると考えられる。

(2) 逆断層の発達過程

逆断層模型実験では、高さ 2,000 mm、幅 400 mm、長さ 3,325 mm の土槽などを用い、基底の断層傾斜角(15 ~ 90°)、模型地盤の層厚(25 ~ 2,000 mm)および地盤材料(豊浦標準砂、相馬珪砂 3号、7号、8号)を変え、各ケースにおいて模型地盤の変形状況を解析した²⁷⁾。

その結果、基底の断層傾斜角が 45 ~ 90° のケースでは、断層変位量の増大に伴い、断層の地盤表面到達位置が上盤側へ移動する過程が観察された(図 2-1-9)。一方、基底の断層傾斜角が 15°、30° のケースでは、断層変位量の増大に伴い、断層の地盤表面到達位置が下盤側へ移動する過程が観察されるとともに、主断層の上盤側にお

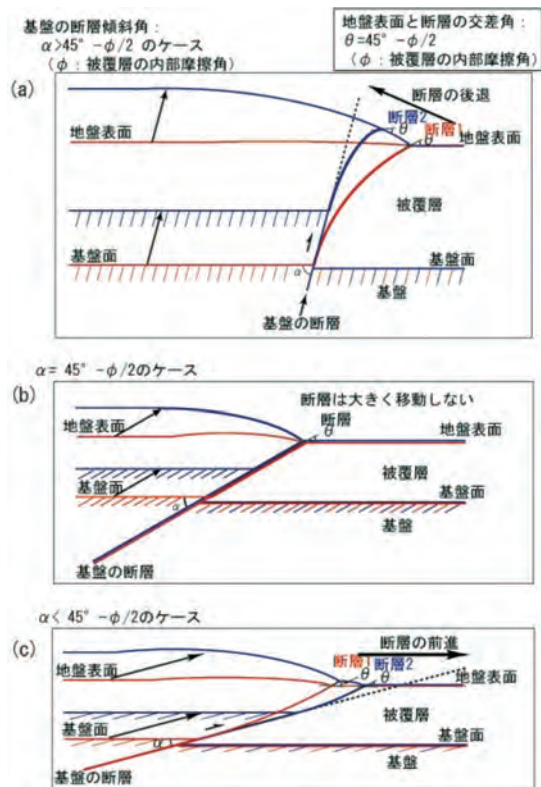


図 2-1-9 基底の逆断層傾斜角の違いによる断層の移動方向の変化²⁷⁾

いて、副断層(バックスラスト)の形成が認められた。このような基底の断層傾斜角による断層の発達過程の違いは、モール-クーロンの破壊基準により、地盤の物性との関係から説明することが可能である。

以上から、基底の逆断層が高角度の場合、断層変位量の増大に伴い、逆断層の地表到達位置が山地側(隆起側)へ後退するのに対し、基底の逆断層が低角度の場合は、主断層が平野側(沈降側)へ前進するとともに、バックスラストの形成の伴い、変形帯の幅が広がる可能性が指摘される。

2-2 地質地下水特性調査評価技術

2-2-1 コントロールボーリング掘削・調査技術

(1) 目的

高レベル放射性廃棄物処分などの地下利用に際しては、ボーリング調査が一般的に適用される。沿岸海底下などの条件では、掘削の方位や傾斜を制御可能なボーリング掘削が有用である。このような観点から、概要調査に必

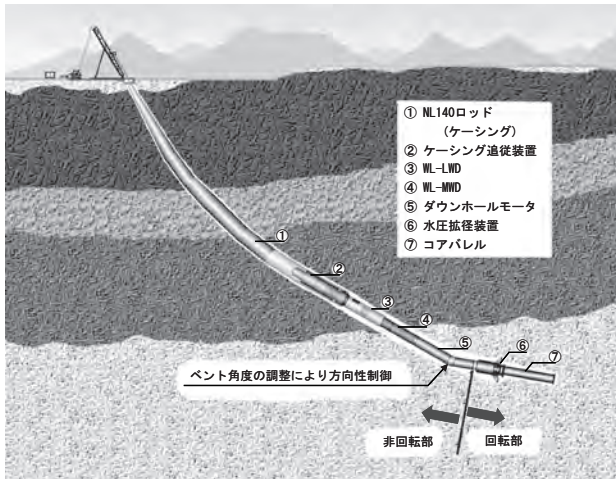


図 2-2-1 コントロールボーリングによる掘削概念²⁾

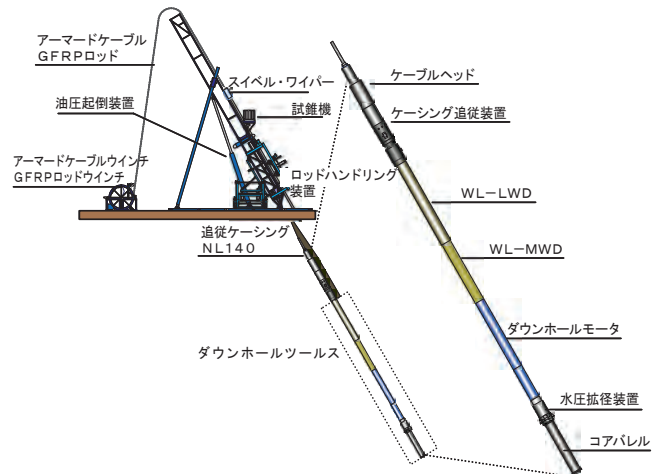


図 2-2-2 掘削編成概念図²⁾

要な地質環境特性に関する情報が取得可能な、コントロールボーリング掘削・調査技術（図 2-2-1）を開発する。

(2) コントロールボーリングシステムの概要

コントロールボーリングシステムは、掘削した孔壁を保孔するためのケーシング、掘削や先端探知を行うためのダウンホールツール、ダウンホールツールを上げ下げするためのワイヤラインから構成される。

ダウンホールツールは、下部よりコア採取のためのコアビットおよびコアバレル、拡径のためのウイングビット、掘削の動力のためのダウンホールモータ（以下、DHM）、先端の位置や掘削情報を得るための WL-MWD（Wire Line - Measurement While Drilling）、孔底における地質情報を得るための WL-LWD（Wire Line - Logging While Drilling）より構成される（図 2-2-2）。

掘削時のダウンホールツールは、ラッチシステムによりケーシングシュー（ケーシング先端）に固定される。ケーシング内に圧入された泥水は WL-LWD および WL-MWD の内部を通過し DHM に回転力を与え、さらに一部がコアビットに供給される。これらの泥水は、孔壁とケーシングの隙間（アニュラス）から地表に戻る。

コアバレルにコアが充填した時点で、コアを回収するためにダウンホールツールをワイヤラインにより引き上げる。孔井が最終的に水平孔になるため、泥水の圧入によりダウンホールツールを押し込むことができるポンピングシステムを採用した。また、ダウンホールツ

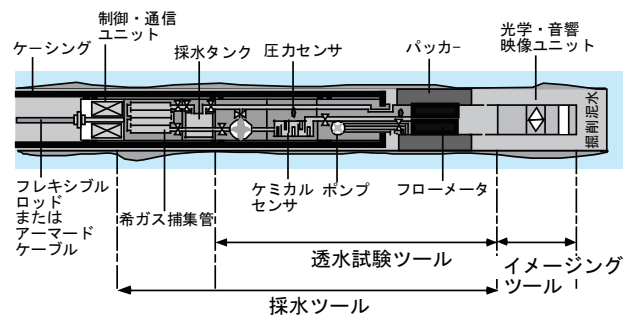


図 2-2-3 透水・採水・イメージング編成²⁾

ルスからの情報の伝送、ダウンホールツールへの電力の供給のために、ワイヤライン内部に電源線や光ファイバーなどが内蔵される。

採取されたコアの状況や WL-LWD の情報をもとに、孔底の裸孔部において各種の測定が必要と判断された際には、掘削編成に替えて、各種の試験、測定用の編成をワイヤラインにより降下させて、調査を実施する。試験、測定項目は、透水試験、現位置地下水採取、孔内载荷試験、孔内応力測定である。

(3) 掘削・調査システムの現地適用性検討

開発・試作したコントロールボーリング掘削、調査システムの現地での適用性を検討する目的で、北海道幌延地点において、核燃料サイクル開発機構（現 JAEA）幌延深地層研究センターとの共同研究で 2003 年度より掘削、調査を開始した。北進地区において、一般的な新第三紀の堆積軟岩を掘削しその性能確認および課題抽出をするとともに¹⁾、その後さらに掘削の困難が予想される

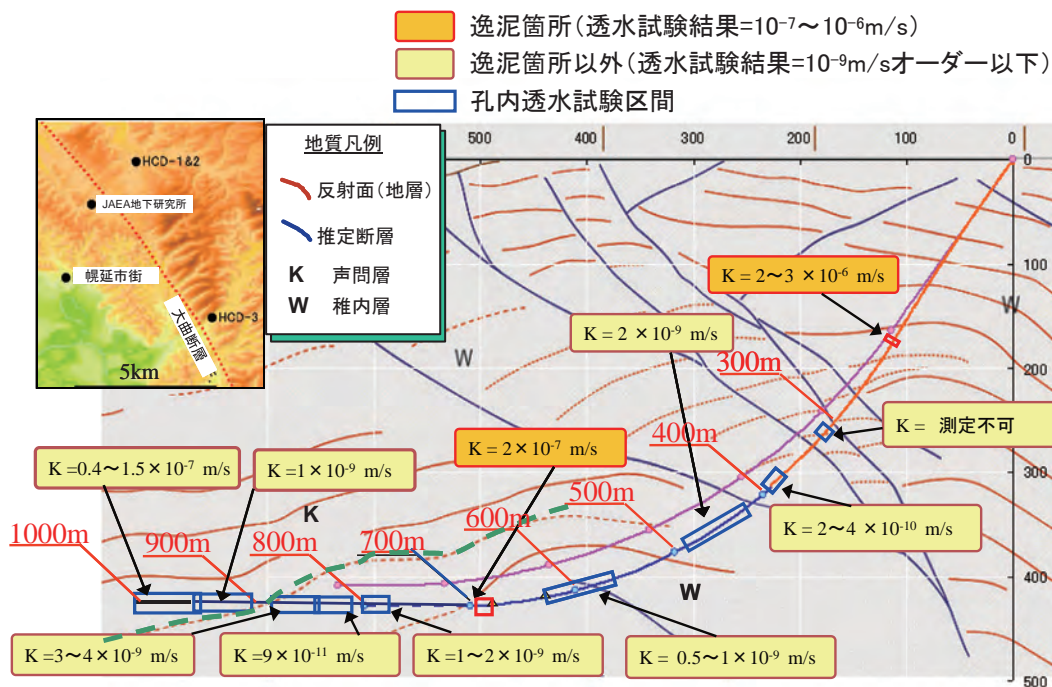


図 2-2-4 HCD-3 孔井の掘削実績と透水試験結果

大曲断層の掘削に 2006 年度より着手した²⁾。

- ・ 反射法地震探査などにより、大曲断層の地下構造を推定し、掘削孔跡を決定した。計画孔跡に沿って 2011 年度までに掘削長 1000m の HCD-3 孔を掘削し、特に掘削長 720m 以深はほぼ水平に掘削した。断層帯を掘削したにも拘らずコア採取率は 99.8%であった (図 2-2-4)。
- ・ コアから 31 条の小断層帯が確認でき、反射法から推定された断層帯の分布と整合的であること、孔内、コアを用いた試験により大曲断層とその周辺の透水性や地下水水質が明らかにすることができた。

以上により、掘削、調査システムの断層への適用性を確認することができた。

なお、本研究は経産省受託研究「ボーリング技術高度化調査 (開発)」として実施した。また、現地適用性検討は JAEA 幌延深地層研究センターとの共同研究として実施した。

2-2-2 地下水年代測定技術

当研究所では、非常に遅い地下水の流速を評価するために、自然に存在する放射性物質を用いた地下水の滞留

性 (地下水年代) を測定する技術の開発を実施している。これは、放射性廃棄物処分の安全評価において、漏出した核種の主要な輸送媒体が地下水となる可能性が高く、地下水の流動性の評価が重要なためである。また、放射性廃棄物処分の対象となるような地下深部の地層では、地下水流速は、年間数ミリの非常に遅いと想定されるため、直接計測することは困難である。このため、特に遅い地下水流速の評価において、地下水年代測定技術が有望と考えられる。

地下水年代測定技術については、図 2-2-5 に示すように多数の方法があるが、当研究所では特に数万年～百万

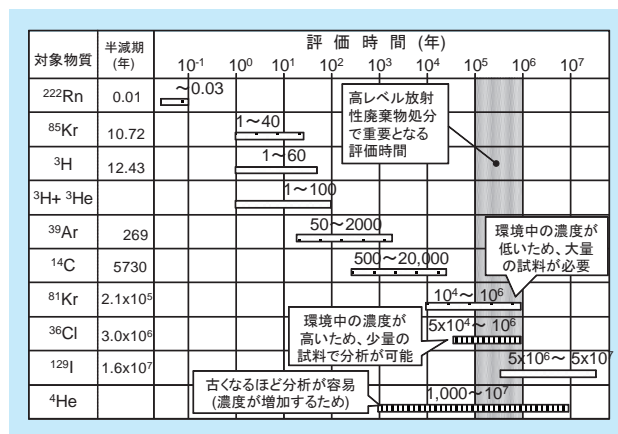


図 2-2-5 地下水年代測定法と評価可能時間範囲³⁾

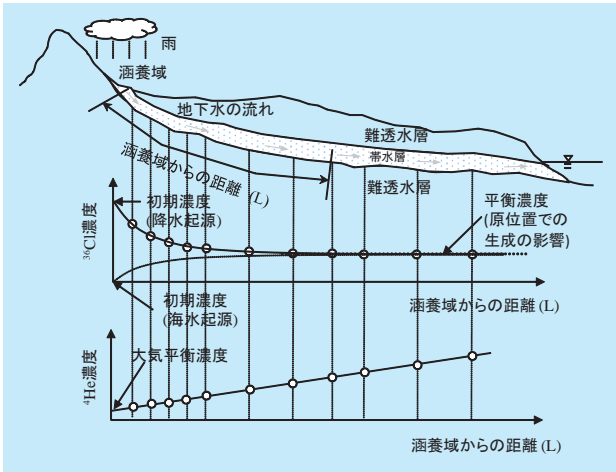


図 2-2-6 ^{36}Cl と ^4He による地下水年代測定概念図³⁾

年を評価可能な方法に関する研究開発を実施している³⁾。

特に、 ^4He 蓄積法と ^{36}Cl 法は、古い年代の評価に有効であると考えられる。図 2-2-6 に示すように、 ^4He 蓄積法は、地盤内に存在するウラン・トリウムなど放射性物質が放射壊変する際に発生する ^4He が蓄積することに着目した評価法であり、地下水への蓄積量を蓄積速度で割ることにより年代が評価できる。 ^{36}Cl 法は、 ^{36}Cl が半減期 30.1 万年で放射壊変することに着目した評価法であり、初期濃度から観測された濃度になるために必要な時間を半減期から評価することにより年代が評価できる。

これらの ^4He 蓄積法、 ^{36}Cl 法について、オーストラリ

ア大鑽井盆地において調査を実施した。この結果、図 2-2-7 に示すように、涵養域から流出域に向けて ^4He の蓄積による増加と、 ^{36}Cl の放射壊変による減少が確認された。これらの ^4He 年代と ^{36}Cl 年代との妥当性を、両者の相互比較から示すとともに³⁾、地盤の透水性などの水理的情報から確認した⁴⁾。

また、対象とする地層の透水係数が非常に低く採水による調査が困難な場合についても対応可能なように、岩石コアから ^4He を拡散させて ^4He 蓄積量を評価する方法、岩石コアを圧縮し間隙水を絞り出して ^{36}Cl 法を適用する方法などについて研究開発を実施した⁵⁻⁹⁾。

これらの難透水層からの採水技術の妥当性を検証するために、オーストラリア大鑽井盆地の難透水層においてボーリング孔を掘削し、コアを採取して調査を行った。

この結果、図 2-2-8 に示す線形的な ^4He 濃度の分布から、難透水層内では拡散が支配となっていることを示すことができ、開発してきた岩石コアに ^4He 蓄積法を適用する方法の妥当性を確認することができた⁷⁾。また、 ^{36}Cl の分布についても、図 2-2-9 に示すように難透水層内では拡散による輸送が支配的であることが確認できた。また、近似線の傾きから推定される原位置での Cl の拡散係数と室内試験での拡散係数とが一致することも確認できた。これらのことから、岩石コアから間隙水を採取する方法の妥当性と、 ^{36}Cl 法の難透水層への適用性を確認することができた¹⁰⁾。

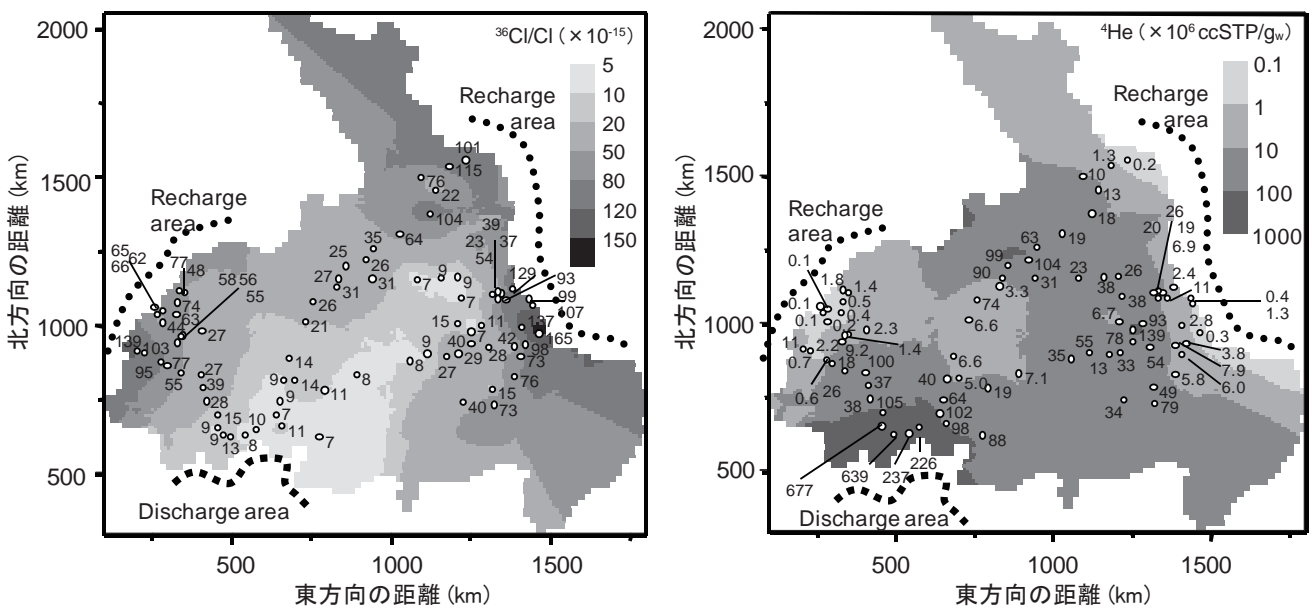


図 2-2-7 オーストラリア大鑽井盆地での地下水年代調査結果³⁾

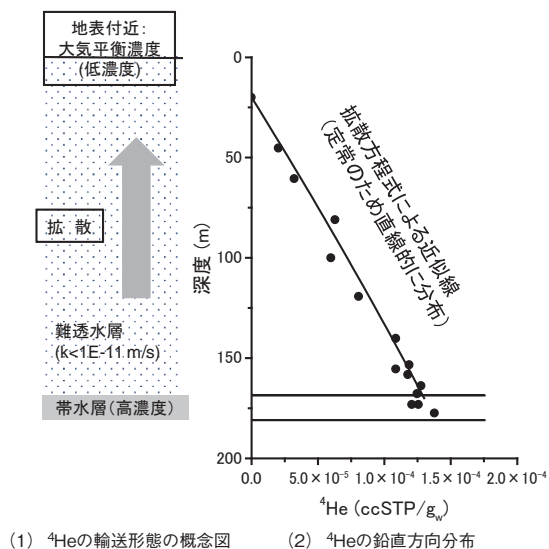


図 2-2-8 難透水層内での ⁴He 分布と輸送の概念図⁷⁾

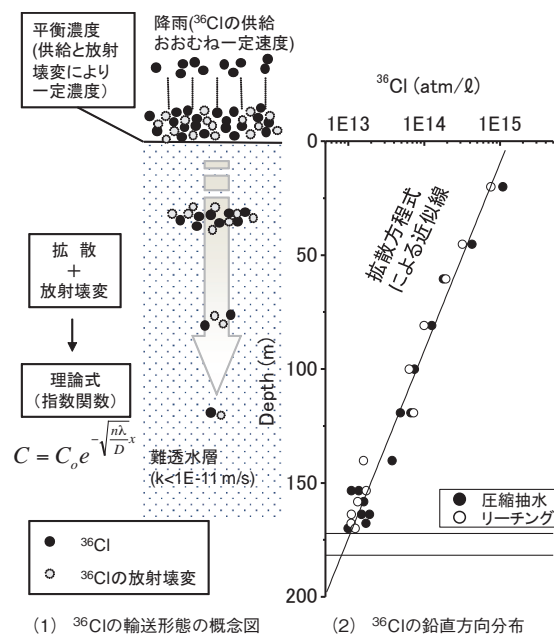


図 2-2-9 難透水層内での ³⁶Cl 分布と輸送の概念図¹⁰⁾

また、開発した手法の国内での適用性の確認と適用性の向上を図るために、JAEA との共同研究として、国内の代表的な花崗岩の瑞浪と、堆積岩である幌延において、原位置調査を実施している。

瑞浪においては、花崗岩から採水を実施し、⁴He 年代、無機 ¹⁴C 年代、有機 ¹⁴C 年代の比較から、各方法の適用性を検討している¹¹⁾。

幌延においては、岩石コアを用いて、⁴He 蓄積法や

³⁶Cl 法を適用している。幌延の深部の稚内層における地下水は、⁴He 蓄積量が原位置生成の数百万年分に相当することから、数百万年間滞留していること、³⁶Cl が原位置の放射平衡に達していることから、百万年以上の年代を有していることが明らかになり、堆積時からほとんど動いていないと推測された¹²⁾。

また、⁴He 蓄積法と ³⁶Cl 法を組み合わせ、地下水の滞留時間をより精度よく評価する方法の開発¹³⁾ や、化石海水を同定するための技術の開発を実施している¹⁴⁾。今後、地下水年代の信頼性向上を図るために、複数の地下水年代測定法と、水理的な評価方法などを整備していく予定である。

本研究の一部は経産省からの受託研究「地下水年代測定技術調査」として実施したものである。また、幌延および瑞浪での調査は JAEA との共同研究として実施した。

2-2-3 地下水流動解析技術

放射性廃棄物処分の天然バリアの性能評価においては、地下水の流動や岩盤中での核種の移行を精度よく推定・予測する技術が不可欠であり、当研究所では、岩盤中地下水流動・核種移行解析コード FEGM の開発を進めてきた。そして、同解析コードを原位置でのさまざまな水理・溶質移行試験などに適用し検証を行うとともに、コードの改良を行ってきた。以下に、SKB が主宰するエスポ国際共同研究の一部として行われている地下水流動と溶質移行に関するモデリングタスクフォースの対象課題に、解析コード FEGM を適用した事例について紹介する。

(1) 地下研究施設建設時の地下水流動への適用

エスポ地下研究施設は、バルト海に面した主に花崗岩からなるエスポ島に建設された地下施設で、全長 3,600m、最深部 450m のトンネル、立坑からなる。同施設建設前後の調査結果に基づいて地下水流動解析モデルを構築し、施設建設に伴い生じた水圧や水質の変化を数値解析で再現することを試みた¹⁵⁾。

施設建設時の地下水流動変化は、施設を構成するトンネルや立坑が破碎帯を通過する際の湧水によって主に引

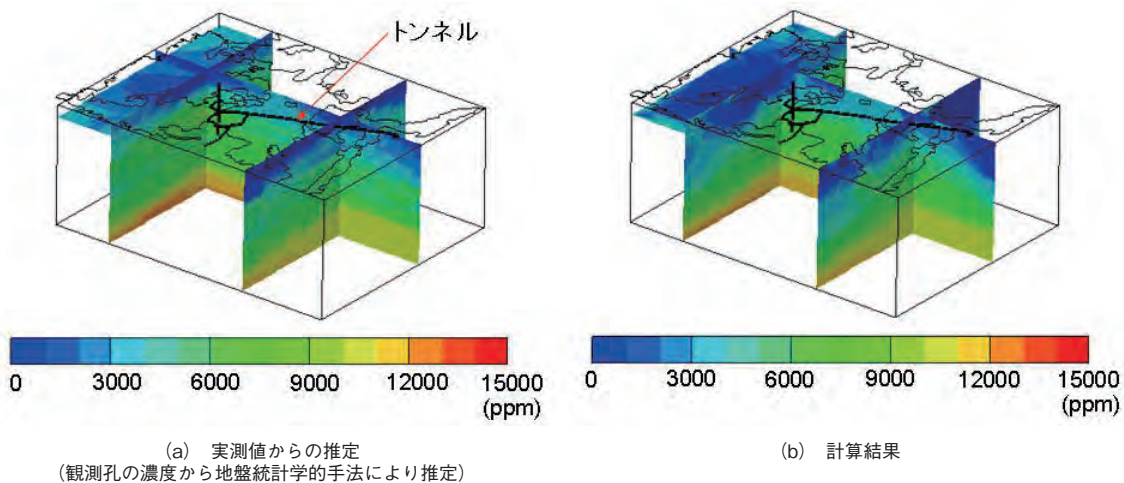


図 2-2-10 地下研究施設建設後の塩化物イオン濃度分布

き起こされている。破碎帯やトンネル・立坑をモデルで表現し、掘削の進捗に伴う湧水量の変化をトンネル・立坑の境界条件として考慮した非定常解析を行うことで、観測孔での複雑な水圧の変化を再現できた。

また、施設建設によりバルト海の海水が浸入し、エスポ島地下の水質は著しく変化した。バルト海や島の領域を詳細にモデル化し、塩化物イオンの移行解析を行うことにより、浅部で発生するバルト海からの海水の浸入を再現することができた (図 2-2-10)。

(2) 原位置トレーサ試験への適用

エスポ地下研究施設で実施された移行距離数十 m の原位置トレーサ試験の再現解析を試みた¹⁶⁾。解析対象領域には、地質調査により直接確認された割れ目に加えて、それらの統計量をもとに割れ目を発生させ、約 5,700 条の割れ目を設定した。

これら多数の割れ目のすべてを忠実にモデル化し、割れ目周辺の岩石基質の影響も考慮した解析を行うことは、現実的ではない。そのため、まず割れ目の交差判定を行い、トレーサの移行に関与しない割れ目を除いた。続いて、割れ目内での移流分散のみを考慮したトレーサ移行解析を実施し、トレーサの主要な移行経路となる割れ目を特定した。最後に、これらの支配的な割れ目について、周辺の岩石基質への拡散・収着も考慮した移行解析を実施し、回収孔でのトレーサ濃度の破過曲線を再現することに成功した (図 2-2-11)。

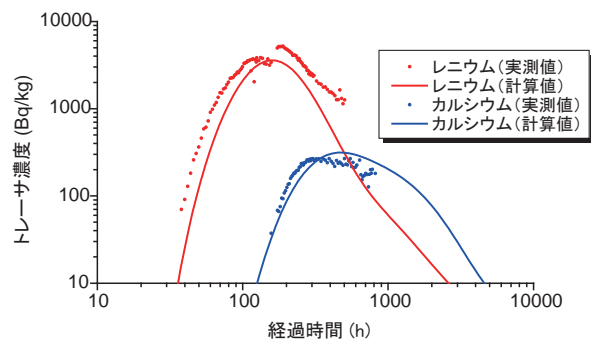


図 2-2-11 回収孔におけるトレーサ濃度の破過曲線

(3) 大規模揚水試験への適用¹⁷⁾

対象となる揚水試験は、フィンランドの使用済み燃料の処分サイト Olkiluoto で実施された。Olkiluoto はバルチック海に面した約 10 km² の大きさの島であり、主に片麻岩から成り、一部に石英閃緑岩や花崗岩の貫入が見られる。

解析では、島全体を解析領域とし、島の地下水流動を支配すると見られる 13 の大規模な割れ目帯と、地下 80 m 以浅の岩盤のみをモデル化した。解析により、揚水に伴う観測孔での水位低下を比較的良好に再現することができた (図 2-2-12)。また、この揚水試験では観測孔への地下水流入量の孔に沿った分布が計測されており、この分布についても解析により傾向を再現することができた。従来、地下水流動解析結果の妥当性は、観測された水圧との比較により確認するのが一般的であったが、孔内への地下水流入量についても指標となりうることが示唆された。

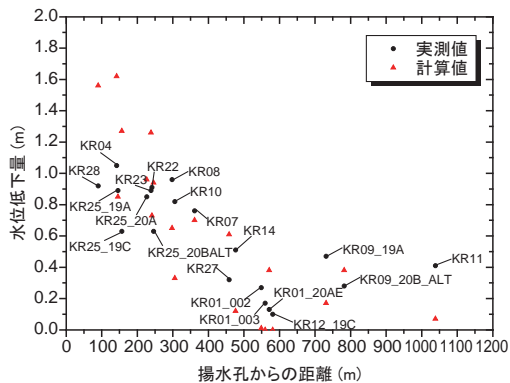


図2-2-12 観測孔の水位低下量と揚水孔からの距離の関係

表 2-2-1 岩石物理学による解析技術の概要

	長所	短所
①クロスプロットによる方法	手軽で簡便	Dataが少ない場合、精度・信頼性が低下 汎用性がない
②経験式による方法	多くのdataに基づいており、信頼性も高く適用例も多い 物理的な意味も理解できる	原則的には対象とする限られた岩石や条件でしか適用できない
③岩石物理学モデルによる方法	変換式の物理的な意味が明瞭 汎用的で地域に関わらず適用できる	堆積岩を中心とした単純なモデルが中心

2-2-4 物理特性情報の変換解析技術

(1) 目的

岩盤の透水性、力学強度特性は、原位置試験や岩石コア試料を使用した室内試験では、コスト的にボーリング孔全体の情報を連続的に得ることは困難である。そこで、物理検層による物性値と透水性および力学強度との相関性に基づき、ボーリング孔全体の連続的な透水係数あるいは力学強度特性のプロファイルを算出する手法（以後、変換解析）を実用化することが望まれる（図 2-2-13、表 2-2-1）。本手法は、透水性や力学特性が割れ目に依存する硬質な岩盤には適用が困難と考えられるが、割れ目の少ない堆積軟岩には適用できると考えられる。頁岩質砂岩（石油貯留層）を対象とし、複数の物理検層データより透水係数プロファイルを算出（変換解析）できる研究例が報告されている¹⁸⁾。本節では、岩石コア試料

を用いた室内試験により物理特性（弾性波速度と空隙率・力学強度など）の相関性を解明し、現地物理検層データ（電気・音波・中性子・ γ 線検層）に変換解析法¹⁹⁾を適用し、透水係数あるいは力学強度のプロファイルを算出した結果を紹介する。

(2) コア試料による試験結果

ボーリングコア試料を円柱形の供試体に整形して室内試験を行った。図 2-2-14 (a) は P 波速度と S 波速度の関係を示す。両者には正の相関が見られ、点線で示す範囲の堆積軟岩試料の動ポアソン比は 0.35 ~ 0.45 の範囲を示す。本試料に対する S 波速度およびせん断弾性係数と一軸圧縮強度との関係を図 2-2-14 (b)、(c) に示す。せん断弾性係数の方が、一軸圧縮強度との相関係数がわずかながら大きいことから、物理検層結果から一軸圧縮強度 σ_c へのクロスプロット法に基づく変換式として、せん断弾性係数と σ_c との相関式（図 2-2-14 (c)）を使用することにした。

(3) 物理検層データの変換解析結果

JAEA 幌延深地層研究センターで得られた物理検層データ²⁰⁾から、一軸圧縮強度および透水係数プロファイルに変換した結果を図 2-2-15 に示す。透水係数の変換値は、声間層で $10^9 \sim 10^8$ m/s、稚内層で $10^{10} \sim 10^9$ m/s を示し、相対的な大小関係は整合しているが室内透水試験結果より 2 オーダー大きい。一方、原位置透水試験結果²⁰⁾より 1 ~ 2 オーダー小さい。これより、変換解析の結果は、割れ目の影響を受けない室内透水試験と、割れ目の影響を大きく受ける原位置透水試験結果との中間的な値を示すものと考えられる。

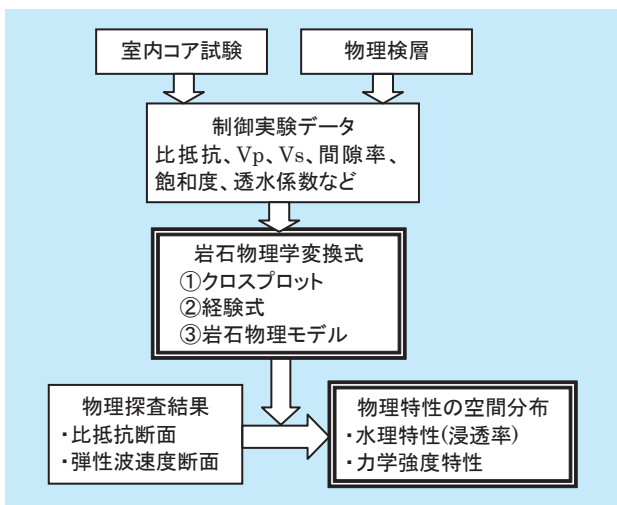


図 2-2-13 岩石物理学による変換解析の考え方

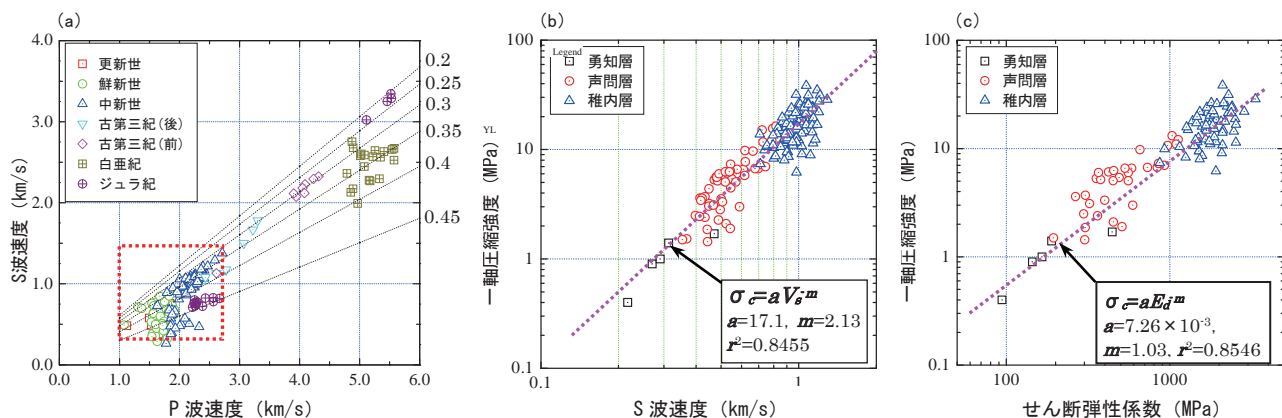
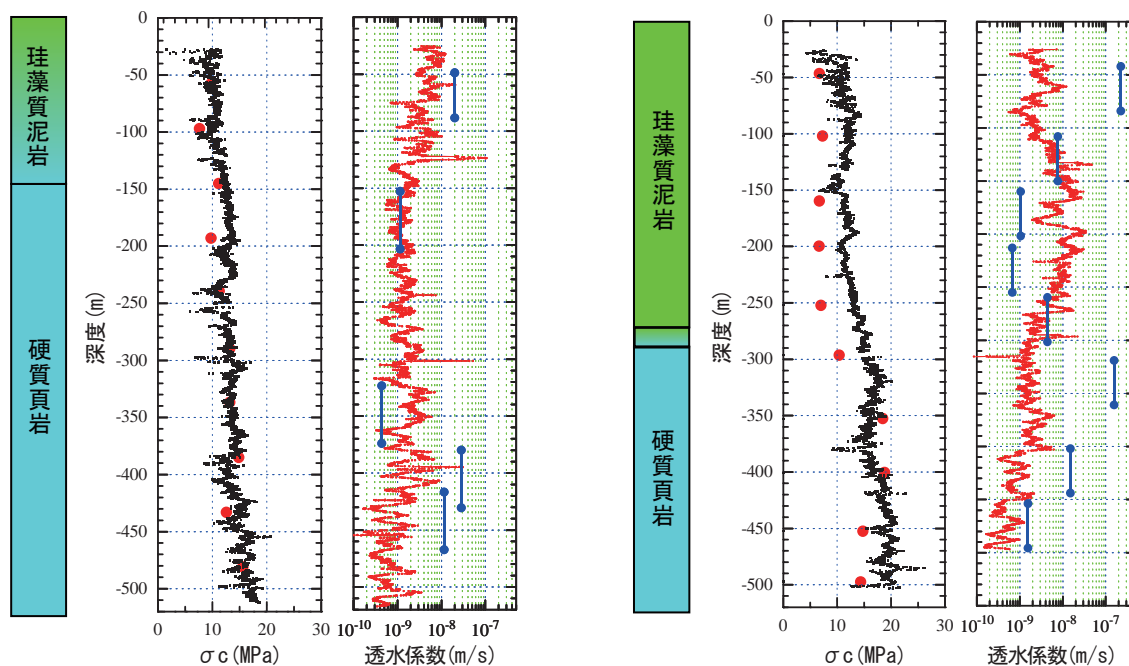


図2-2-14 岩石試料による物理特性の相関性



横軸の“ σ_c ”および“透水性係数”は、変換解析により算出された一軸圧縮強度および透水性係数を示す。赤丸はコア試料による試験結果、青線は原位置透水試験結果 (JAEA幌延深地層研究センター、2005) を示す。

図 2-2-15 物理検層データによる変換解析結果 (左: HDB-9 孔、右: HDB-10 孔) ²⁰⁾

変換解析による一軸圧縮強度は、コア試料と比較的よく整合しており、声間層で5～10MPa、稚内層で10～20MPaを示す。両者が整合していない箇所の要因として、試料に潜在する亀裂あるいはマイクロクラックは力学試験には影響するのに対し、物理検層の精度では閉じた亀裂を検知できないことによると考えられる。

(4) まとめ

物理検層データより変換した透水性係数は、コア試料による室内試験結果とほぼ整合した。また、原位置透水試験結果とは割れ目のない区間で整合したが、割れ目帯では整合しておらず本手法では適用が難しいと思われる。物理検層データより変換した一軸圧縮試験は、コア試料による試験結果とほぼ整合した。

2-3 ニアフィールドの地質・地下水・溶質移行特性の調査技術

2-3-1 坑道掘削影響領域評価技術

堆積岩には結晶質岩と異なり、急速に劣化する特徴を持つものがしばしば認められる。これは必ずしも膨潤性鉱物の有無とは関係せず、それまで接していた地下水とは異なる地下水と接触することで起こると考えられる。岩盤の劣化は主に化学反応の促進により生じるものと考えられ、岩盤性状へ影響を与えるには非常に長い期間を要すると考えられてきた。しかしながら、日本の古第三系の泥質砂岩、さらには、スイスモンテリサイトのジュラ紀の頁岩や台湾における新第三系の泥岩の調査を行ったところ、これらの堆積岩の劣化が接触する地下水の組成によっては、わずか数十分で起きることが明らかになった。

(1) 不飽和帯の調査法

堆積岩に坑道を掘削する場合、硫化鉄の酸化やメタンの発生などに起因して、窒息やその他災害が起こらないように坑内の通気、換気が行われる。地下深部の堆積岩は地下水の流速が遅いため、岩盤坑壁表面から間隙水の蒸発が起こり、坑道周辺に不飽和帯が形成される。また、坑道周辺では掘削に伴い間隙水圧が低下し、間隙水中に含まれる炭化水素や炭酸ガスの脱ガスが起こり、不飽和箇所が形成されると予想される。このような不飽和帯や不飽和箇所は、廃棄体から発せられる熱により廃棄体周辺の地下水が蒸発することでも生成すると予想される。また、不飽和帯が形成されないまでも、坑道周辺では脱ガスによる pH の増加、方解石の沈殿や微生物から排出される二酸化炭素による間隙水の pH の低下なども予想される。

当研究所における不飽和帯調査方法はこれまで、コア含水率調査、比抵抗調査・音響調査などの物理探査法、透気試験の実施のほか、ガス分布測定や蒸発量試験などの試みが、海底下で岩盤を掘削している炭鉱坑道において実施されてきた¹⁾。

(2) 急速スレーキング

不飽和帯の形成が岩盤に与える影響には、急速スレー

キング現象がある²⁾。急速スレーキングとは、堆積岩が乾燥とその後の地下水、特にイオン濃度の小さい地下水と接触した場合に起こる形態変化（数十分で砂、泥状になる現象、あるいは割れ目が形成される現象）のことを指す。通常のスレーキングは、乾湿の繰り返しによりひび割れなどを起こす現象である。

このような堆積岩の特徴として、間隙率が 15vol% 前後で間隙水が塩水であることが挙げられる。乾燥させた岩石片をエタノールに浸した場合には、急速スレーキングは認められず、塩分濃度の高い水に浸水させた場合でも、多くの場合は急速スレーキングは起こらない。このことは、不飽和帯においては、新たに接触する地下水の組成によっては鉱物粒子表面の電荷の引力と斥力のバランスが変化し、砂、泥状への形態変化が起こることを示している。坑道坑壁岩盤が安定に形状を保つためには、乾燥させないこと、乾燥してもイオン濃度の薄い地下水と接触させないことが重要であることを示す。

塩水環境下の堆積岩坑道近傍では、不飽和帯が形成された後に周辺の割れ目を伝い陸水・地下水が侵入（冠水）することにより、急速スレーキングが起こると予想される³⁾。このような急速スレーキングによる岩盤の劣化は、施工後岩盤が乾燥する前に坑壁を保護することで軽減されると考えられる。

2-3-2 原位置トレーサ試験による溶質移行特性評価技術

岩盤中での地下水流動に伴う放射性核種の移行挙動を精度よく予測するためには、対象岩盤の地下水溶質移行特性を正確に把握することが重要となる。トレーサ試験は、原位置での溶質の移行を直接測定できるという点で、岩盤の溶質移行特性を把握する上で、非常に有力な手法である。

(1) 原位置トレーサ試験装置の開発

割れ目を有する岩盤では、核種は岩石基質よりも地下水流速の速い割れ目中を主に移行する。我が国においては、従来、原位置の岩盤を対象としてトレーサ試験を実施する場合、非取着性トレーサを使用することがほとんどであった。しかし、放射性核種の多くは、岩盤に対して取着性を有する。そのため、当研究所では、主に割れ

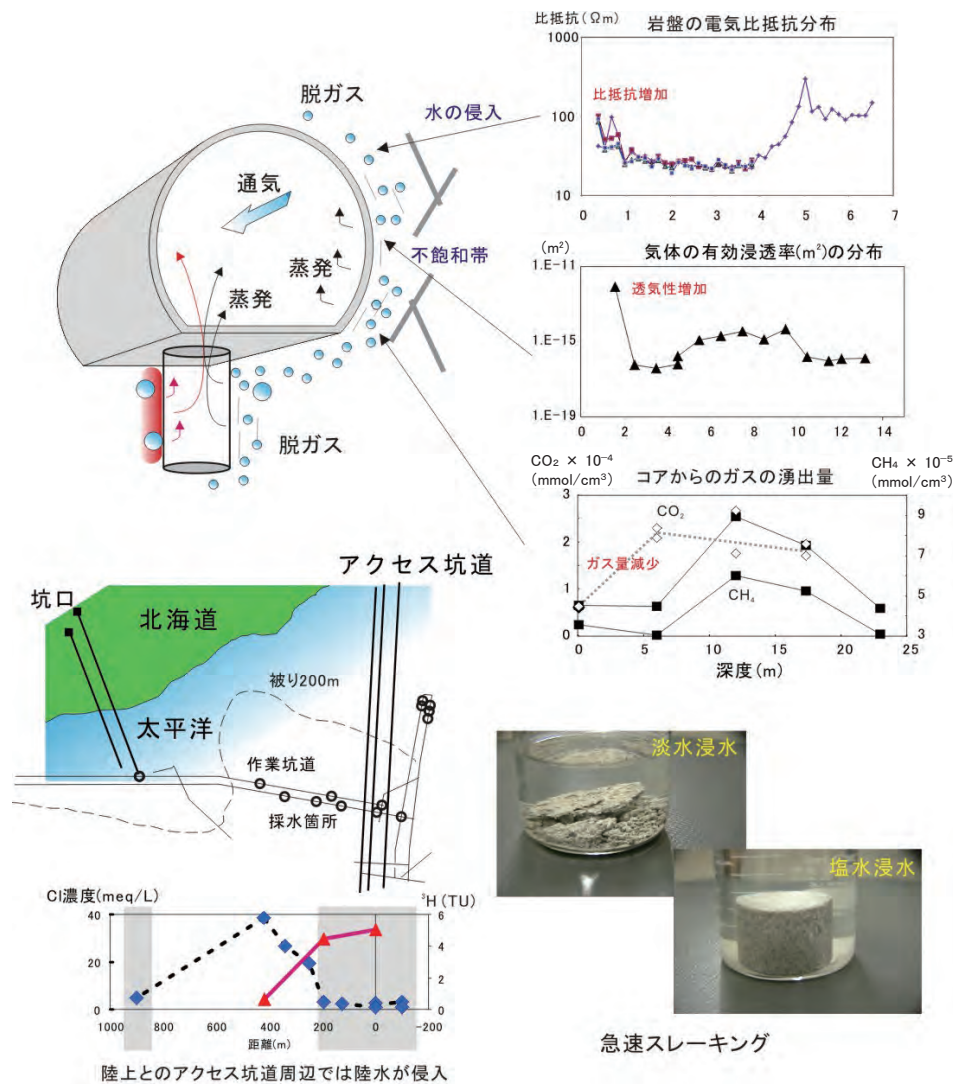


図 2-3-1 不飽和箇所への淡水の浸入による岩盤の変化

目を有する岩盤を対象とし、収着性物質の使用も可能な原位置トレーサ試験装置の開発を行ってきた。

開発した装置は、以下の特徴を有する。

- ・ 特定の割れ目に対する試験を可能にし、トレーサ投入孔の孔壁と孔内装置との隙間容積を極力小さくし投入区間のトレーサ濃度に偏りが生じないようにするため、投入区間長を 155 mm と短くした。より長い区間での試験には、拡張ブロックを装着することにより対処可能である。また、孔内装置の外径も、試験孔の想定孔径である 86 mm に近い 79 mm とした。
- ・ 投入区間のトレーサ濃度の偏りを防ぐため、孔内装置に注水ポートと揚水ポートをそれぞれ 2 個ずつ設け、投入区間内でトレーサ溶液を強制的に循環させる機能を付加した (図 2-3-2)。

- ・ 投入区間内でのトレーサ濃度を正確に把握するため、蛍光染料濃度計測部を孔内装置に組み込み、蛍光トレーサの濃度計測を孔内で行うことを可能にした。
- ・ トレーサが試験装置に収着し試験結果に影響を与えることを防ぐため、あらかじめ室内で部材への収着試験を実施し、収着しにくい部材を使用して試験装置を製作した。
- ・ 無脈動ポンプの採用により、安定した流量でのトレーサの投入や回収孔での揚水が可能である。

(2) 試験結果評価手法の開発

原位置トレーサ試験では、試験により得られる回収孔でのトレーサの破過曲線から、逆解析により岩盤の溶質移行特性を推定することになる。当研究所では、バック

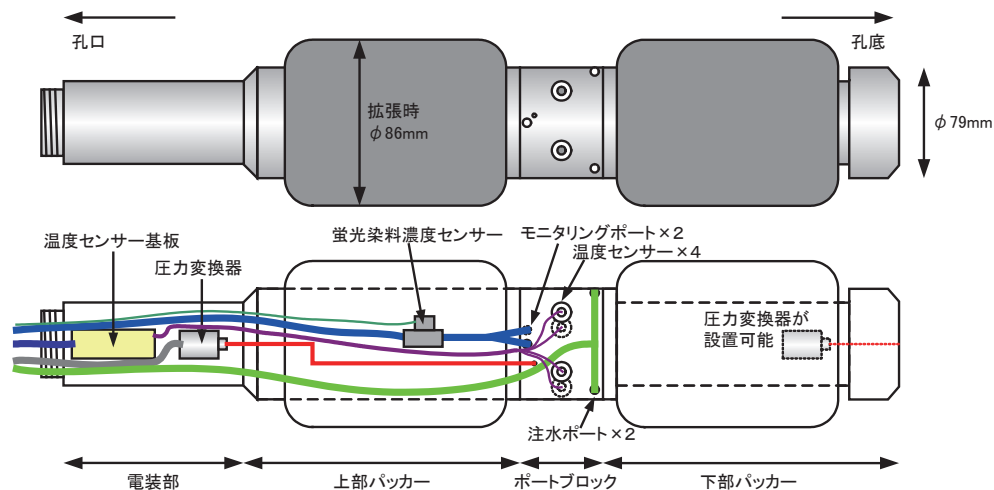


図 2-3-2 トレーサ試験孔内装置の概念図

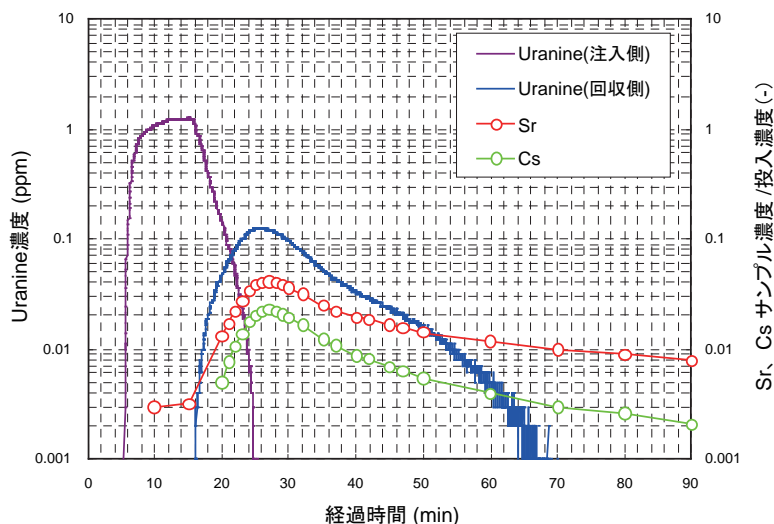


図 2-3-3 スイス Grimsel Test Site での原位置トレーサ試験結果の例

プロパゲーション法に基づくニューラルネットワーク⁴⁾による逆解析手法を開発し、トレーサの破過曲線から、割れ目の開口幅、割れ目内での地下水溶質の分散長、岩石基質への地下水溶質の収着特性などを精度よく同定することを可能にした。

また、本研究で開発したトレーサ試験装置においても、トレーサの投入初期や投入終了時には、投入区間の隙間部分でのトレーサ濃度の偏りを完全には防ぐことができない。この濃度の不均一性は、割れ目へ放出されるトレーサ濃度に影響を与え、その結果、溶質移行特性の同定結果に誤差が生じることになる。そのため、当研究所では、トレーサ投入孔と孔内装置、および周囲の割れ目をモデル化した3次元流体解析により、トレーサの投入

初期や投入終了時においても、割れ目へ放出されるトレーサ濃度を正確に推定できる手法を開発した。

(3) 原位置実証試験

スイスの Grimsel Test Site において、開発したトレーサ試験装置の適用性試験を実施した。トレーサとしては、非収着性の蛍光染料である Uranine と、我が国では放射性トレーサが使用できないことを想定して、収着性トレーサとしては Sr や Cs の非放射性同位体を使用した。

試験結果の一例を図 2-3-3 に示す。孔間距離が 1.67 m と短く、短時間の試験ではあったが、Uranine に対し Sr や Cs の移行の遅れを確認することができた。また、

試験結果をもとに、試験対象割れ目の開口幅や分散長、岩盤への収着特性などを同定することができた。

今後は、原位置トレーサ試験装置や試験結果評価手法の改良を図るとともに、より長時間での試験や、国内での適用性試験を実施する予定である。

なお、本研究は経済産業省受託研究「岩盤中地下水移行評価技術高度化開発」として実施した。

2-4 天然バリア中の地化学・微生物影響調査評価技術

高レベル放射性廃棄物の地層処分や低レベル放射性廃棄物の余裕深度処分など、放射性廃棄物処分において、処分環境の酸化還元状態は、放射性核種の溶解度やバリア材の劣化など、処分システム性能に影響を及ぼすと考えられている^{1,2)}。

図2-4-1に、地層処分などにおいて想定される処分環境変化を示す。地層処分の場合、処分施設は300m以深の深部地下に建設されるため、坑道掘削前は還元状態であると考えられる。しかし、坑道の掘削、廃棄体の搬入などにより酸素を含む大気が浸入し、坑道周辺は坑壁内部への酸素拡散により酸化されることが想定される。特に、掘削影響領域（EDZ領域：Excavation Disturbed Zone）において不飽和領域が形成されると、大気浸入による酸化の影響は大きくなると考えられる。また、降雨などによって酸化された掘削土によって坑道内が埋め戻された場合、廃棄体近傍の処分環境は酸化状態になると考えられる。さらに、坑道掘削に伴う地下水面の低下

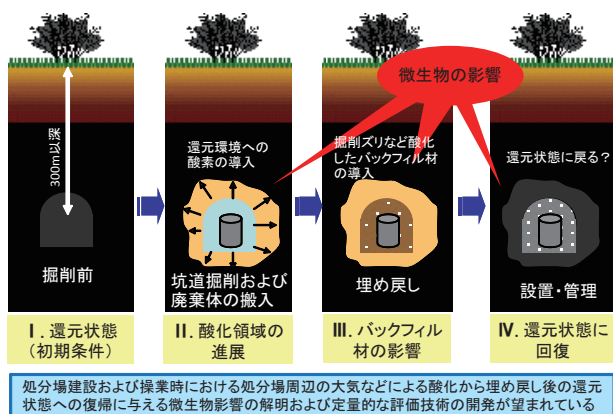


図2-4-1 地層処分などにおいて想定される処分環境変化

など地下水流動の変動により、処分施設周辺の酸化還元状態は変化する可能性がある。

以上のように、処分環境は、施設の建設・操業に伴い変化することが予想される。処分環境は、岩石-地下水反応に加え、微生物反応が相補的に作用して変化すると考えられている。そのため、岩石-地下水-微生物反応を考慮し、処分環境変化を精度よく予測する技術開発が望まれている^{3,5)}。

2-4-1 地下岩盤の地化学環境調査技術

地下岩盤の地化学環境について、処分施設の建設や操業に伴う変化や埋め戻し後の長期の変化を予測するための基本情報として、岩盤掘削前の初期状態を明らかにしておくことが重要である。本研究では、トンネル掘削時に地下の岩石や地下水を採取できる機会を利用して、岩盤の酸化還元状態の初期状態を調査し、天然の風化現象で生じた酸化フロント^{注1)}の形成メカニズムを明らかにするとともに、この酸化フロントの長期間の移動速度について検討した。

(1) 原位置の酸化還元状態の調査

新第三紀の火山砕屑岩（軽石凝灰岩など）の分布する地域の地下空洞を利用して、酸化フロントを横断する坑道からボーリング孔を掘削し、その孔からの湧水の水質調査とトンネル掘削時の岩石試料の鉱物化学分析を行った。その結果、水質（酸化還元電位、溶存酸素、電気伝導度、pH）と岩石の鉱物・化学組成の値は、岩盤の風化分帯に対応して明瞭な変化が認められ、酸化フロントでは主に黄鉄鉱や有機物の酸化が生じていることが明らかとなった（図2-4-2）⁶⁾。

(2) 酸化フロントの移動速度

前項の地点において、酸化フロントの上下の岩石に含まれる黄鉄鉱などの酸素消費成分の変化と、地下水の溶存酸素の供給量をもとに、地下水流速（0.1m/y）を一定と仮定してマスバランスの試算をすると、酸化フロントの移動速度は、約0.2mm/yと推定された。これより、

注1) 岩石が風化などにより酸化して酸化帯が形成されたとき、その下底部の新鮮な岩石との境界を酸化フロントと呼ぶ。一般の風化現象では、岩石が褐色化したゾーンの下端面にあたる。

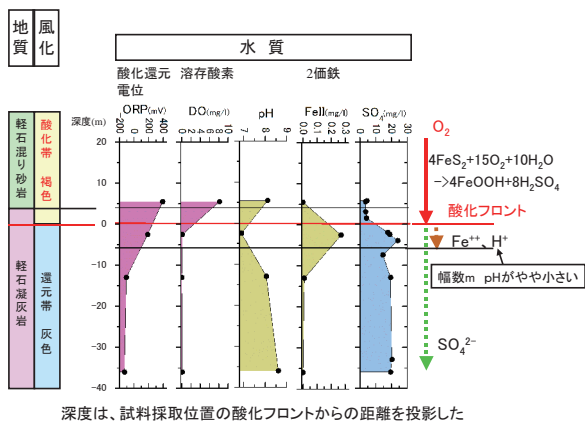


図 2-4-2 酸化フロント周辺の地化学環境

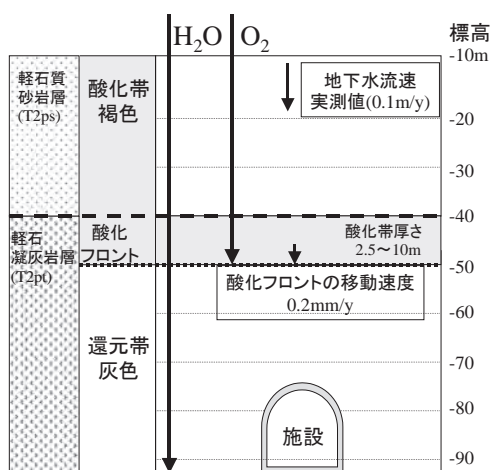


図 2-4-3 酸化フロントの移動速度

現在観察される酸化帯（厚さ 2.5 ~ 10m）の形成には、水理場が一定の場合、約 1 万 ~ 5 万年必要と推定された（図 2-4-3）¹⁾。

2-4-2 処分環境における微生物影響評価技術

近年の地下微生物生態研究の進展によって、地下深部においても微生物が棲息していることが明らかとなった⁷⁻⁹⁾。そのため、処分システムの性能に対して微生物が影響を及ぼすと考えられ、さまざまな研究が行われてきた¹⁰⁻¹⁴⁾。中でも、前述のように処分環境変化に及ぼす微生物影響に関する関心が高まってきている。

地下環境においては、炭素（無機物、有機物）、窒素（硝酸イオン、アンモニアなど）、酸素（溶存酸素）、鉄（酸化鉄、硫化鉄）、マンガン（酸化マンガンなど）、硫黄（硫酸イオン、硫化物など）など、地下環境において

含有量が高く、多価数を有する元素のイオン種が地下水中の酸化還元状態の形成に寄与していると考えられている。地下環境中に棲息している微生物は、これら元素を利用した酸化還元反応により生育に必要なエネルギーを獲得しているため、酸化還元状態の形成に影響を及ぼしていると考えられる。例えば、乳酸イオンのような微生物が利用しやすい有機物が豊富な自然環境では、酸素が枯渇すると、続いて硝酸イオン→酸化マンガン→酸化鉄→有機物（発酵）→硫酸イオン→二酸化炭素（メタン生成）が逐次的に利用されていくと考えられている。ここで利用される酸化体の化学物質（酸素、硝酸イオン、酸化鉄、硫酸イオンなど）は、電子受容体である。この電子受容体の逐次的反応の推移は、好気性従属栄養細菌→硝酸還元菌→鉄マンガン還元菌→発酵細菌→硫酸還元菌→メタン生成菌といったような微生物種の遷移に対応していると考えられている。この微生物が媒介する生化学反応は、最終電子受容体の逐次的反応プロセス（TEAPs 反応：Terminal Electron Accepting Processes）と呼ばれている（図 2-4-4）。

当研究所では、多種多様な微生物が棲息する湖沼底泥堆積物試料の懸濁液を曝気することにより酸化させ、その後、大気と遮断することで、酸化還元状態の変化と水質変化（酸化還元電位、溶存イオンなど）および微生物群集変化の関連性について検討を行った²⁾。

その結果、

- ・ 底泥懸濁液の酸化還元電位は、曝気停止後にいったん +300mV まで上昇したあと、-430mV まで急激に低下し、その後一定となった。一方、懸濁液を滅菌した場合、酸化還元電位は +150mV で一定であった。このことから、酸化還元電位の変化は、微生物の動きに起因すると考えられた（図 2-4-5）。
- ・ 溶存イオン種の経時変化を分析した結果、酸化還元電位の低下に伴い、微生物による好気呼吸（酸素消費）→硝酸還元反応（NO₃⁻ 減少）→鉄還元反応（Fe（III）→Fe（II））→発酵（有機物利用）→硫酸還元反応（SO₄²⁻ 減少）→メタン生成反応が逐次的に起きていることが明らかとなった（図 2-4-6）。

底泥懸濁液中の菌叢解析の結果、硝酸還元反応が起きている時期では、硝酸還元能を有する菌（*Pseudomonas* sp.）が出現し、硫酸還元反応が起きている時期では硫酸還元能を有する菌（*Desulfovibrio* sp.）が出現している

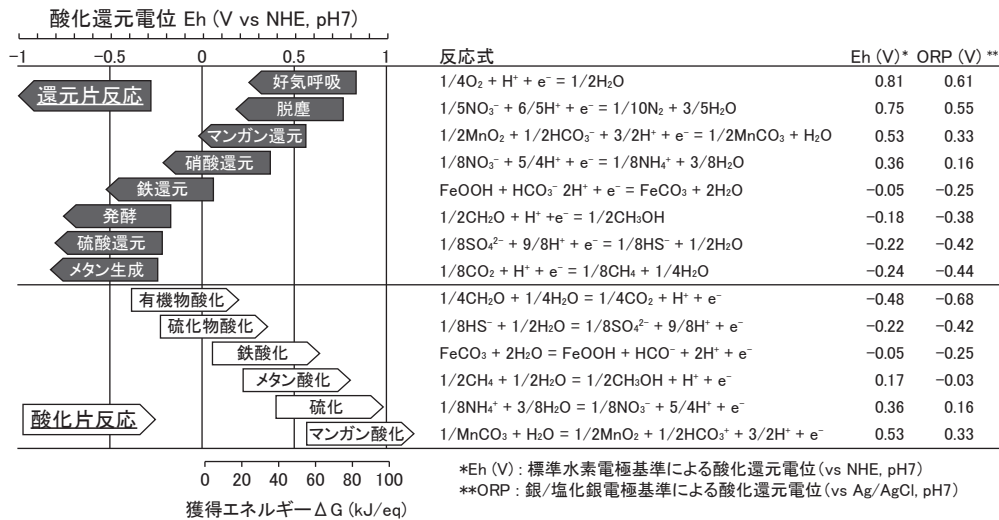


図 2-4-4 微生物が媒介する逐次的な酸化還元反応プロセス

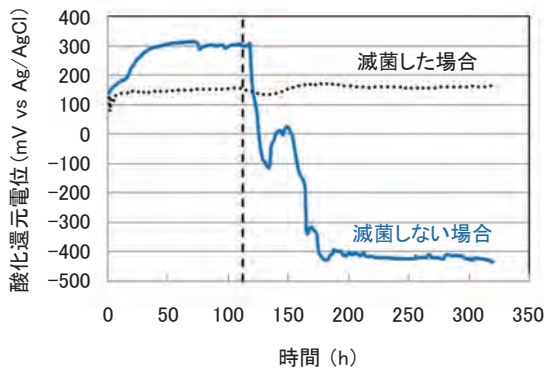


図 2-4-5 酸化還元電位に及ぼす微生物影響

ことが明らかとなった²⁾。

以上より、一度酸化した底泥懸濁液は、微生物の働きにより酸化状態から還元状態に速やかに推移すること、その推移には、微生物による逐次的な反応が関与していることが明らかとなった。このことから、大気流入などにより酸化状態となった地下環境においても、微生物による類似の反応により、還元状態へと移行すると予想される。

2-5 概要調査における調査・評価手法の体系化

2-5-1 概要調査の調査・評価フローの構築

高レベル放射性廃棄物処分事業の実施主体である NUMO は、処分場建設までの処分地選定を以下の3つの段階を踏んで実施する計画である。

- ① 概要調査地区の選定
- ② 精密調査地区の選定
- ③ 処分施設建設地の選定

当研究所では、文献調査に基づいて概要調査地区が選定された後、精密調査地区選定のための概要調査に役立つために、概要調査の総合調査・評価フローを構築し、これに沿った調査により考慮すべき事項への適合性が判断できることを確認した。

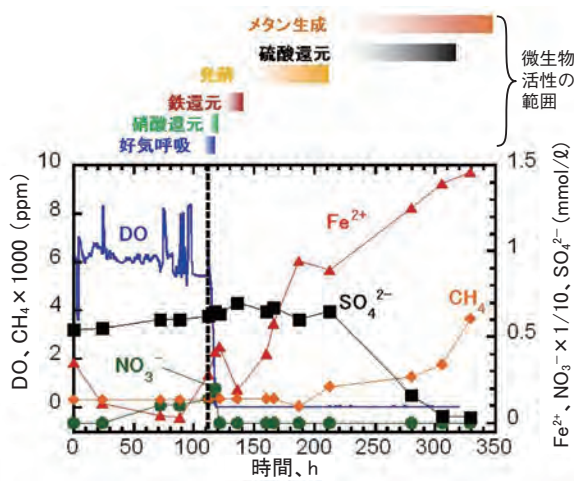


図 2-4-6 酸化還元電位に及ぼす微生物反応

(1) 総合的な調査・評価フローの構築¹⁾

(a) 概要調査の基本概念的検討

最終処分法²⁾における概要調査地区選定段階および精密調査地区選定段階の、考慮すべき環境要件などの既存資料に基づき、概要調査の目標を特性項目ごとに設定し、今後の詳細調査フロー作成時に必要な地質環境パターンを、調査手法の共通性や地質環境特性の共通性を考慮して、地質学的条件5区分、地理・地形的条件2区分の組み合わせ計10パターンに分類した。また、概要調査の基本的な前提条件（調査範囲など）を設定した。

(b) 概要調査の考慮すべき事項の設定

概要調査の目標設定の検討結果に基づき、地質環境の長期安定性、および工学特性に関する主要特性項目について、概要調査における調査・評価に基づく判断指標を施設設計・性能評価の観点も考慮し、“考慮すべき事項（除外要件および好ましい条件）”として設定した。

(c) 概要調査の模擬検討

日本列島における地質環境パターン分類をもとに、代表的な地質環境パターンを2種類抽出して（花崗岩－内陸環境、堆積岩－沿岸環境）、各々に仮想調査サイトを設定し、概要調査の模擬検討を行うためのデータセットを既往調査事例に基づき作成した。

さらに、仮想調査サイトに対し模擬設計・性能評価を実施した（図2-5-1）。そして、調査の進展に伴い、データのばらつきに起因する不確実性が低減する効果に関して検討した。一方、地質環境長期安定性（隆起・侵食、火成活動、活断層・活褶曲）に関しては、事例研究をもとに、概要調査の効率的な手順を検討した。

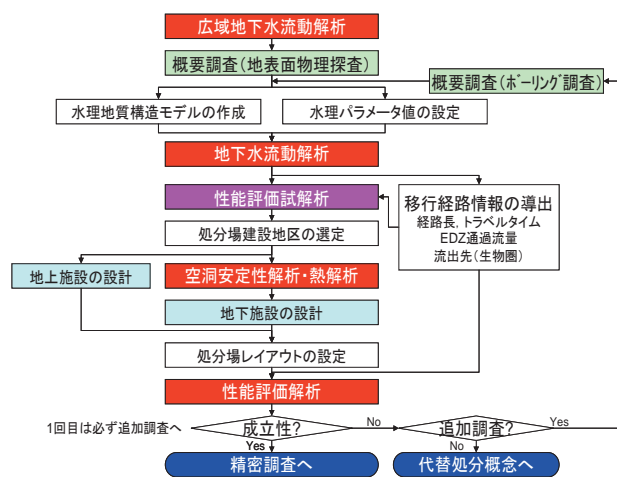


図2-5-1 処分施設の模擬的な設計・性能評価のフロー

(d) 概要調査の総合調査・評価フローの構築

机上での模擬検討により構築された工学特性に関する概要調査の個別調査・評価フローを統合化することにより「工学特性に関する標準的な調査・評価フロー」を構築した。また、各地質環境パターンでの調査手法の有効性や適用性を加味することにより、日本の地質環境に即した「工学特性に関する統合調査・評価フロー」を構築した。地質環境の長期安定性に関わる調査・評価フローについては、これまで各地質事象について構築した標準的な調査・評価フローを体系的にまとめて「地質環境の長期安定性に関する統合調査・評価フロー」を構築した。これら構築した各統合調査・評価フローを時空間的な関係を考慮して「概要調査の総合的な調査・評価フロー」を構築した（図2-5-2）。

(e) 考慮すべき事項の設定と妥当性検討

代表的な地質環境パターンで仮想的に調査を実施し、検討項目ごとに考慮すべき事項を評価するのに十分な調査データが取得できるか否かを検討した。その結果、概要調査により、基本的に今回設定した考慮すべき事項を判断するのに必要な調査データを取得できる見通しを得た。

なお、本研究は、NUMO 受託研究「地質環境評価に係わる精密調査地区選定のための調査・評価手法の体系化に関する検討」の成果を骨子に、その後の当研究所の研究成果を加えたものである。

(2) 地質環境の調査技術・評価手法の実証^{3,4)}

当研究所横須賀地区の敷地を対象に、処分地の選定調査で実施すると想定される一連の調査技術、評価手法の適用性実証試験を実施した。その結果、概要調査における調査・評価フローとして、既存の検討結果に基づき計画された調査・評価体系の有効性を確認することができた。特に、ボーリング調査法に関し、具体的な掘削、孔内調査・試験および評価の手順などを構築した（図2-5-3）。

(a) 調査段階ごとのモデルの変遷と比較

横須賀地区における一連の調査・試験によって得られた地質環境に関する情報を、既存情報調査（処分地選定プロセスの「文献調査」に相当）、地表調査（「概要調査」のうちの地表調査に相当）、ボーリング調査（「概要調査」のうちのボーリング調査に相当）の3つの段階ご

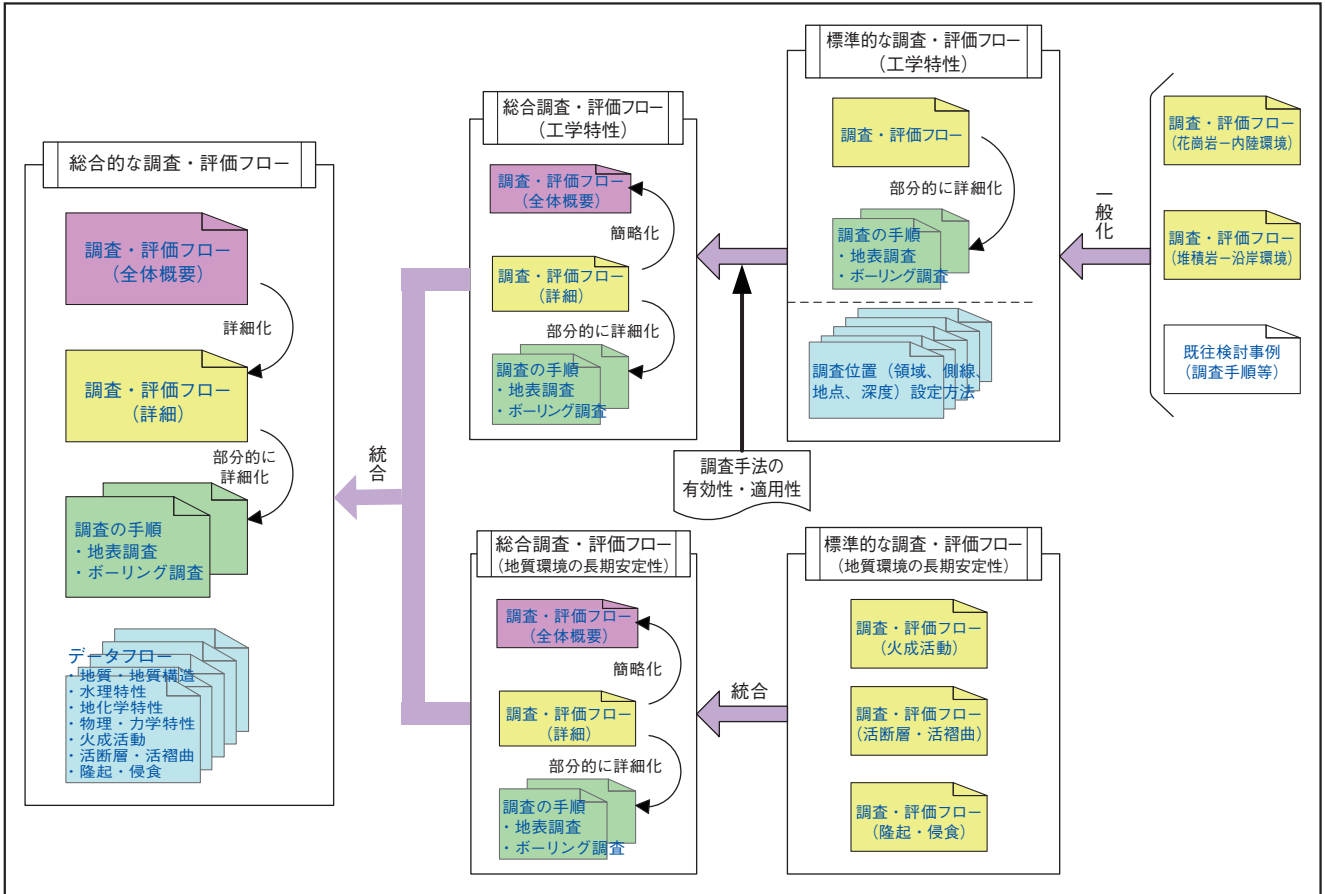


図 2-5-2 概要調査の総合的な調査・評価フローの全体構成

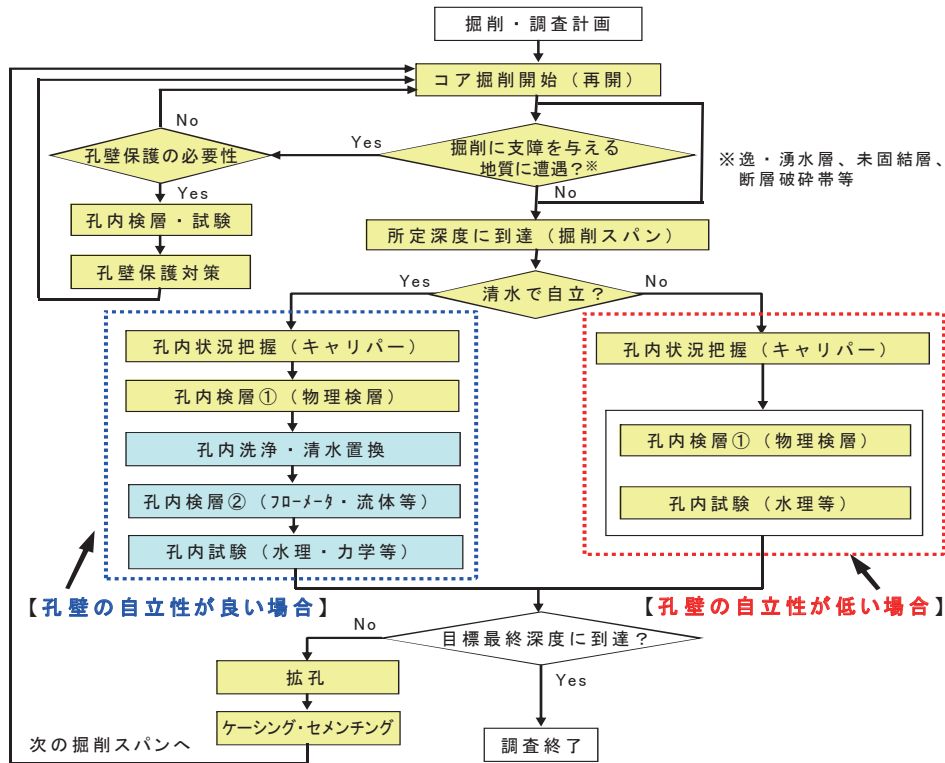


図 2-5-3 概要調査におけるボーリング調査法の実証試験実施手順

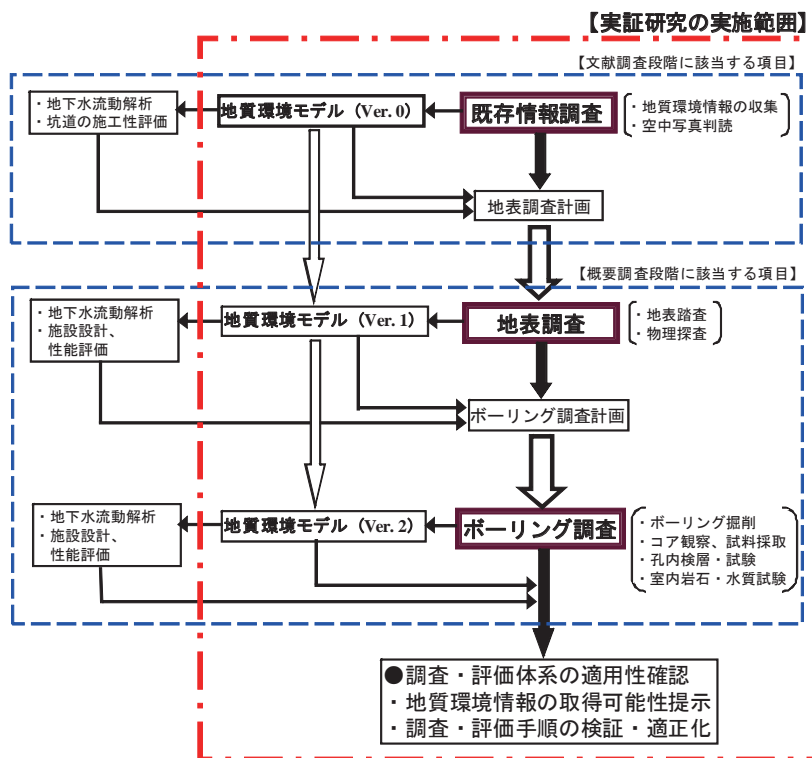


図 2-5-4 地質・岩盤性状の違いに応じた掘削・調査手順

とに整理した(図 2-5-4)。また、それぞれの段階での水理地質構造特性などに関する地質環境モデルを修正、構築し、その結果を踏まえて全体の調査・評価体系の妥当性を検討し、さらに各段階での地質環境モデルの修正、構築に有効な調査技術や試験手法を確認した。

(b) 調査・評価手順の有効性の確認

既存の情報や検討結果に基づき、概要調査の各段階で実施する調査・試験、および評価の手順を事前に作成し、横須賀地区における一連の調査・試験の実績に基づいてその有効性や限界などを確認した。特に、ボーリング掘削・調査に関しては対象となる地質状況の違い(孔壁の自立性)によるケーシングプログラムや孔内調査・試験手順の違い(図 2-5-3) またコア採取率向上手法などを示した⁵⁾。

なお、上記の研究成果は、NUMO との共同研究として 2006 年度～ 2009 年度に実施したものである。

参考文献

2-1

- 1) 小池一之、町田 洋編：日本の海成段丘アトラス、東京大学出版、p.106 および CD-ROM、2001 年。
- 2) 吉山 昭、柳田 誠：河成地形面の比高分布からみた地殻変動、地学雑誌、104、pp.809-826、1995 年。
- 3) 幡谷竜太、柳田 誠、佐藤 賢、佐々木俊法：宮城県陸前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、44、pp.155-167、2005 年
- 4) 幡谷竜太：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、電力中央研究所研究報告 N05005、p.28、2005 年 9 月。
- 5) 幡谷竜太：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、電力中央研究所研究報告 N05016、p.30、2006 年 4 月。
- 6) 幡谷竜太、柳田 誠、山本真哉、佐藤 賢、古澤 明：新潟県魚沼丘陵北部の河成段丘の層序、応用地質、47、pp.140-151、2006 年。
- 7) 幡谷竜太、濱田崇臣：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 -、電力中央研究所研究報告 N08044、p.33、2009 年 8 月。
- 8) 古澤 明：RIPL 法により由布岳火山周辺のテフリックレスから見出した火山活動、地質学雑誌、110、pp.19-37、2004 年。

- 9) 山本真哉、幡谷竜太、濱田崇臣：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、電力中央研究所研究報告 N07017、p.25、2008年2月。
 - 10) 濱田崇臣、幡谷竜太：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－、電力中央研究所研究報告 N08063、p.33、2009年8月。
 - 11) 濱田崇臣・幡谷竜太、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－、電力中央研究所研究報告、N10050、2011年7月。
 - 12) 濱田崇臣、段丘の対比・編年の信頼性向上のための風化指標の検討（その2）－段丘礫の風化状態の把握と対比指標の適用条件の提示－、電力中央研究所研究報告、N12007、2012年10月。
 - 13) 幡谷竜太：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た内陸部の地殻変動、電力中央研究所研究報告 N05017、p.21、2006年4月。
 - 14) Hataya R., Yanagida M. and Sato M. : Study on characterization of Quaternary tectonic movement by uplift estimation using fluvial terraces. In Stability and Buffering Capacity of the Geosphere for Long-term Isolation of Radioactive Waste: Application to Crystalline Rock, OECD/NEA No.6362, pp.217-225, 2009.
 - 15) 近藤浩文：火山活動の時空分布特性評価の現状と課題－東北日本を中心に－、月刊地球、26、pp.401-406、2004年。
 - 16) Kondo, H. : Regional-scale volcanology in support of site-specific investigations, In: Connor, C, N. Chapman and L. Connor (eds), Volcanic and Tectonic Assessment for Nuclear Facilities, Cambridge University Press, pp.307-325 (Chapter 12), 2009.
 - 17) Nakamura, K. : Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation -principle and proposal, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2, pp.1-16, 1977.
 - 18) 高橋正樹：日本列島第四紀島弧火山における地殻内浅部マグマ供給システムの構造、火山、42、S175-S187、1997年。
 - 19) 三浦大助、土志田潔、幡谷竜太、阿部信太郎：活火山の火口移動に関する検討－電力重要構造物の立地に関わる基本的留意点－、電力中央研究所研究報告、N05024、p.19、2006年5月。
 - 20) 土木学会 原子力土木委員会 地下環境部会：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、2001年。
 - 21) 核燃料サイクル開発機構：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、1999年。
 - 22) Kondo, H., Kaneko, K. and Tanaka, K. : Characterization of spatial and temporal distribution of volcanoes since 14 Ma in the Northeast Japan arc, Bulletin of the Volcanological Society of Japan, 43, pp.173-180, 1998.
 - 23) Kondo, H., Tanaka, K., Mizuochi, Y. and Ninomiya, A. : Long-term changes in distribution and chemistry of middle Miocene to Quaternary volcanism in the Chokai-Kurikoma area across the Northeast Japan Arc, The Island Arc, 13, pp.18-46, 2004.
 - 24) Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y. and Shukuno, H. : Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones, Earth and Planetary Science Letters, 197, pp.105-116, 2002.
 - 25) Hasegawa, A., Nakajima, J., Umino, N. and Miura, S. : Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity, Tectonophysics, 403, pp.59-75, 2005.
 - 26) 上田圭一：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－、電力中央研究所研究報告 N08039、p.22、2009年7月。
 - 27) 上田圭一、井上大栄、宮腰勝義、宮川公雄、三浦大助：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－、電力中央研究所研究報告 U03022、2003年11月。
- 2-2**
- 1) 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：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）、電力中央研究所総合報告 N01、p.114、2006年5月。
 - 2) 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：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－、電力中央研究所総合報告 N03、p 97、2009年8月。
 - 3) 長谷川琢磨、馬原保典、中田弘太郎、秦野輝儀：地下水年代測定評価技術の開発（その4）－ ^{36}Cl と ^4He による地下水年代測定法のオーストラリア大鑽井盆地における検証－、電力中央研究所研究報告 N05068、2006年8月。
 - 4) 長谷川琢磨、中田弘太郎：地下水年代測定評価技術の開発（その7）－大鑽井盆地の ^{36}Cl と ^4He による地下水年代測定結果の地下水流動解析による検証－、電力中央研究所研究報告 N07037、2008年7月。
 - 5) 馬原保典：岩石コアを用いた地下水年代測定の試み（その1）、電力中央研究所研究報告 U01035、2002年3月。
 - 6) 中田弘太郎、長谷川琢磨、東原知広：地下水年代測定評価技術の開発（その1）－地下水年代測定のためのコア間隙水中希ガス抽出技術の確立と適用－、電力中央研究所研究報告 N05065、2006年12月。

- 7) 中田弘太郎、長谷川琢磨、東原知広：地下水年代測定評価技術の開発（その2）－He濃度の深度方向分布を利用したオーストラリア大鑽井盆地におけるHeフラックスの評価－、電力中央研究所研究報告 N05066、2006年12月。
- 8) 中田弘太郎、長谷川琢磨、大山隆弘：地下水年代測定評価技術の開発（その5）－岩石間隙水における同位体比評価のための同位体交換法の開発－、電力中央研究所研究報告 N06034、2007年6月。
- 9) 中田弘太郎、大山隆弘、東原知広、長谷川琢磨、橘川貴史：地下水年代測定評価技術の開発（その6）－低透水性岩盤における地下水抽出法の提案－、電力中央研究所研究報告 N07012、2007年12月。
- 10) 長谷川琢磨、中田弘太郎、大山隆弘：地下水年代測定評価技術の開発（その8）－ ^{36}Cl による難透水層評価方法の検討－、電力中央研究所研究報告 N07038、2008年7月。
- 11) 富岡祐一、中田弘太郎、長谷川琢磨、後藤和幸：地下水年代測定評価技術の開発（その9）－溶存有機物を用いた ^{14}C 地下水年代測定方法の開発－、電力中央研究所研究報告 N07039、2008年7月。
- 12) 中田弘太郎、長谷川琢磨：地下水年代測定評価技術の開発（その10）－北海道幌延地区における ^4He ・ ^{36}Cl 法適用の試み－、電力中央研究所研究報告 N09027、2010年6月。
- 13) 馬原保典、長谷川琢磨：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究（その7）－溶存He濃度と放射性塩素同位体比($^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$)を組み合わせた地下水年代測定法の新たな提案－、電力中央研究所研究報告 U02040、2003年4月。
- 14) 馬原保典、中田英二：化石海水の同定手法の提案－太平洋炭鉱における地下水水質・同位体分布と ^{36}Cl 測定による地下水年代評価－、電力中央研究所研究報告 U03019、2003年11月。
- 15) 長谷川琢磨、田中靖治、馬原保典：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究（その6）－エスポHRL建設時の地下水挙動に着目した地下水流動解析モデルの検証－、電中研研究報告 U02039、2003年4月。
- 16) 田中靖治、長谷川琢磨：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル放射性廃棄物処分のための国際共同研究（その8）－割れ目ネットワークを対象とした原位置トレーサ試験の数値解析－、電中研研究報告 N06033、2007年6月。
- 17) 田中靖治：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル放射性廃棄物処分のための国際共同研究（その11）－結晶質岩地域における長期間揚水試験の数値解析－、電中研研究報告 N12009、2012年12月。
- 18) Lima O. A. L. : Water saturation and permeability from resistivity, dielectric, and porosity logs, *Geophysics*, 60, pp.1756-1764, 1995.
- 19) 鈴木浩一：物理探査法による地盤の工学的な地盤物性値の可視化について、*応用地質*、42、pp.342-350、2002年。
- 20) 核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター：幌延深地層研究計画平成16年度調査研究成果報告、JNC TN5400 2005-001、2005年。
- 2-3
- 1) 末永 弘、中田英二：沿岸海底下堆積岩における空洞掘削に伴う地下水理への影響、電力中央研究所研究報告 N07043、2008年6月。
- 2) 中田英二、小野雅弘、市原義久、飯島幸夫：地下水水質と堆積岩の急速スレーキング特性、*資源地質*、56、2006年。
- 3) Nakata, E., Mahara, Y., and Ichihara, Y. : Groundwater chemistry within a sub seafloor coal mine Hokkaido, *Proc. of 12th Water-Rock Interaction*, 2007.
- 4) ニューロンネットグループ、桐谷滋、飯沼一元：入門と実習ニューロコンピュータ、1989年。
- 2-4
- 1) 大山隆弘、猪原芳樹、長岡 亨：地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発－六ヶ所サイト試験空洞周辺岩盤の酸化還元状態と将来予測、電力中央研究所研究報告 N07001、2007年6月。
- 2) 長岡 亨、平野伸一、中村孝道：放射性廃棄物の地層処分における処分環境形成に及ぼす微生物影響評価－モデル実験系の構築－、電力中央研究所研究報告 V08034、2009年5月。
- 3) 大山隆弘、猪原芳樹、長岡亨、富岡祐一：地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発（その2）－六ヶ所サイトの岩石の地化学緩衝ポテンシャル－、電力中央研究所研究報告、N10048、2011年5月。
- 4) 窪田健二、猪原芳樹、大山隆弘：自然電位探査法による岩盤の酸化還元状態評価法の提案、電力中央研究所研究報告、N11017、2012年4月。
- 5) 大山隆弘、猪原芳樹、長岡亨、下島公紀：地下岩盤の地化学環境調査・評価技術の開発（その3）－六ヶ所サイト地下空洞周辺での地化学環境調査手法の適用性検討－、電力中央研究所研究報告、N11043、2012年4月。
- 6) 猪原芳樹、大山隆弘、窪田健二：pHと自然電位測定による還元環境調査手法の検討、*応用地質*、53、183-190、2012年。
- 7) S. Stores-Gascoyne, A.S chippers, B. Schwyn, S. Poulain, I C. Sergeant, and M. Simonoff, C. Le Marrec, S. Altmann, T. Nagaoka, L. Mauclair and J. McKenzie, S. Daumas, A. Vinsot, C. Beaucaire I and J.-M. Matray : Microbial Community Analysis of Opalinus Clay Drill Core Samples from the Mont Terri Underground Research Laboratory, Switzerland, *Geomicrobiology Journal*, 24:1-17, 2007.
- 8) Takamichi Nakamura, Toru Nagaoka, Shiro Tanaka, Takahiro Oyama, Shin-ichi Hirano, Ei-ichi Ishii, Teruki Iwatsuki, Naoya Ohmura and Kenzo Kiho : Indigenous microbial diversity and abundance in the undisturbed rock matrix from the Horonobe, northern Hokkaido, Japan, *Geomicrobiology Journal*, in preparation.
- 9) 吉田直樹、長岡 亨：低レベル放射性廃棄物の余裕深度

処分調査坑周辺における微生物群集解析、電力中央研究所研究報告 V06022、2007年5月。

- 10) 長岡 亨、渡部良朋、Akira Kudo：環境中における放射性核種の挙動に及ぼす微生物影響評価－プルトニウムとネプツニウムのベントナイトへの吸着挙動に及ぼす地下微生物の還元作用およびシデロフォアの影響、電力中央研究所研究報告 U01063、2002年4月。
- 11) 長岡 亨、渡部良朋：地下環境中における放射性核種の挙動に及ぼす微生物影響評価（その2）－浅地中における微生物作用を伴う難溶解性水酸化コバルトの溶解の可能性、電力中央研究所研究報告 U03030、2004年2月。
- 12) Toru Nagaoka: Microbially mediated removal of Np(V) by *Desulfovibrio desulfuricans*-Implication of microbial immobilization at the radioactive waste repository, *Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences*, 6(1), pp.85-86, 2005.
- 13) 長岡 亨：放射性廃棄物処分における微生物影響研究－現状と核種移行に及ぼす影響－、原子力バックエンド研究、14、pp.55-59、2007年。
- 14) 田中靖治、長谷川琢磨、澤田昌孝、長岡 亨、馬原保典：スウェーデン・ハードロック地下研究施設における高レベル廃棄物処分のための国際共同研究（1999-2008）－地下水環境評価法と性能評価手法の実証、電力中央研究所総合報告 N06、2009年8月。

2-5

- 1) 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：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－、電力中央研究所総合報告 N11、2010年5月。
- 2) 特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律、平成12年法律第117号、2000年、2007年3月改正。
- 3) 三和 公他：概要調査技術に係わる実証研究（その1）－実証研究の概要－、日本応用地質学会、平成21年度研究発表会講演論文集、pp.103-104、2009年。
- 4) 近藤浩文他：概要調査技術に係わる実証研究（その2）－地質・岩盤性状の違いを考慮した掘削・孔内調査・試験手順の検討－、日本応用地質学会、平成21年度研究発表会講演論文集、pp.105-106、2009年。
- 5) 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：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－、電力中央研究所総合報告 N15、2011年7月。