

地質学的に見たウラン資源の長期供給可能性に関する検討

Examination on geological potential for long-term supply of uranium resources

*笹尾 英嗣¹*Eiji Sasao¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター

1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

<はじめに>

平成27年7月に発表された「長期エネルギー需給見通し」では、2030年度における日本の電源構成に占める原子力の割合として、20~22%が示されている。原子力発電の燃料となるウランは、他の鉱物・エネルギー資源と同様に有限であることから、長期的な供給可能性を検討しておく必要がある。

ウラン資源に関しては、国際機関や各国の政府機関による報告が定期的になされている。例えば、OECD/NEA（経済協力開発機構原子力機関）とIAEA（国際原子力機関）は共同で各国からの報告に基づいて、2年ごとにUraniumという報告書（通称レッドブック）をまとめている（最新版は2014年版；OECD/NEA-IAEA, 2014）。そこで、本論では、主にレッドブックに基づいて、今後のウランの需給関係を整理する。その上で、今後の資源量増加の可能性について、主要なウラン生産国であるカナダとオーストラリアを対象に、地質学的見地から検討する。

<ウラン資源量と需要>

レッドブック2014年版によれば、260米ドル/1kgU（100米ドル/ポンドU₃O₈に相当）以下のコストで回収できる「既知資源」（確認資源と推定資源の合計）は、全世界で760万トンUとされる。2012年の年間ウラン必要量は61,600トンUと見積もられており、ウラン必要量が今後も変化しなければ、約120年分のウランが発見されることになる。2035年の年間ウラン必要量は72,205~122,110トンU/年と見込まれており、既知資源によってウランを供給できる年数は必要量に応じて変化（減少）することになる。

<ウラン鉱床の分類>

ウラン鉱床は、様々な時代、母岩、地質構造、鉱石鉱物、産状のものが知られている。OECD/NEA-IAEA（2014）は、地質学的産状の違いに基づいて、ほぼ経済性の高い順に、①砂岩型鉱床、②原生代不整合型鉱床、③多金属鉄酸化物角礫複合岩型鉱床、④石英中礫礫岩型鉱床、⑤花崗岩関連型鉱床、⑥変成岩型鉱床、⑦貫入岩型鉱床、⑧火山関連型鉱床、⑨交代岩型鉱床、⑩表成型鉱床、⑪炭酸塩型鉱床、⑫陥没角礫型鉱床、⑬燐灰土型鉱床、⑭亜炭・石炭型鉱床、⑮黑色頁岩型鉱床の15カテゴリーに分類している。

<「既知資源」増加の可能性>

カナダは2012年には約9千トンUを生産した。これは世界第2位の生産量（第1位はカザフスタン）であるが、2012年までの累積生産量は世界最大である。カナダでは、現在は全量が原生代不整合型鉱床から生産されている。原生代不整合型鉱床は他の鉱床タイプに比べて一般に高品位で1鉱床当たりの資源量が多い。例えば、現在の重要なウラン鉱山であるCigar Lake鉱床とMcArthur River鉱床は、いずれも資源量10万トンU以上で、品位約15%U₃O₈以上である。このため、平面的な広がり、McArthur River鉱床で延長方向1,700m、幅30m程度、Cigar Lake鉱床で延長方向1,950m、幅20~100m程度と小さい。これらの鉱床は地表下400m以深に存在する。

これらの鉱床周囲では、1960年代から盛んに探鉱が行われ、多くの原生代不整合型鉱床が発見されている。しかし、鉱床が地下深部に存在する場合、直接的な探査手法はボーリング調査に限られる。原生代不整合関連型鉱床は平面的な広がりが小さいことから、ボーリング調査が行われていない場所も多く、未だに探査余地が残されている。上記のMcArthur River鉱床の発見は1989年であるが、その後もMillennium鉱床（2000年発見）、Phoenix鉱床（2008年発見）などの優良な鉱床が発見されており、現在も鉱徴の発見が報告されている（Government of Saskatchewan, 2015）。このような点を考慮すると、今後も優良な鉱床が発見される可能性は高く、「既知資源」の増加に寄与するものと考えられる。

オーストラリアは2012年には約7千トンUを生産し、世界第3位の生産量であった。ウランは原生代不整合型鉱床、多金属鉄酸化物角礫複合岩型鉱床、砂岩型鉱床から生産されている。オーストラリアでは未開発の鉱床が

多数知られており、今後はそれらの開発が進められると思われる。一方で、過去のウラン鉱山政策の影響もあり、未だに十分な探鉱が行われていない場所が多いことから、探鉱活動の進捗に伴って、新規の鉱床が発見される可能性は高いと推察される。

文献

Government of Saskatchewan, 2015, Saskatchewan Exploration and Development Highlights 2015.

OECD/NEA-IAEA, 2014, Uranium 2014: Resources, Production and Demand.

キーワード：ウラン資源

Keywords: Uranium Resource

地質環境長期安定性評価確証技術開発

Geosphere Stability Project

*安江 健一¹、笹尾 英嗣¹、尾上 博則¹、岩月 輝希¹、加藤 智子¹、竹内 竜史¹、國分 陽子¹、浅森 浩一¹、梅田 浩司¹

*Ken-ichi Yasue¹, Eiji Sasao¹, HIRONORI ONOE¹, Teruki Iwatsuki¹, Tomoko Kato¹, Ryuji Takeuchi¹, Yoko Saito Kokubu¹, Koichi Asamori¹, Koji Umeda¹

1. 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに

わが国の高レベル放射性廃棄物の地層処分計画を円滑に進めていくためには、地層処分の技術的信頼性を更に高め、国民の理解と信頼を得ていくと同時に、処分事業や安全規制の基盤となる技術を整備・強化していくための研究開発を着実に進めていく必要がある。地層処分とは、人工バリアと天然の地層を適切に組み合わせた多重バリアシステムによって、数万年以上に及ぶ時間スケールの安全を確保するものである。このため、このシステムの長期的な変化をモデル計算によって予測・評価しつつ、その結果に基づいてシステムの性能や安全性の判断が行われる。こうした評価にあたっては、対象とする時間スケールに伴う不確実性に注意を払うことが必要である¹⁾。一方、日本列島は変動帯に位置していることから、諸外国に比べて地殻変動が活発である。そのため、将来のシステムに著しい影響を与える可能性がある自然現象を特定すると同時に、その現象に伴う地質環境の変動パターンやスケールを把握しておくことが重要となる。

数万年以上の時間スケールにおける予測の方法論については、外挿法、類推法、確率論、シミュレーション等が提案されている。また、地殻変動に支配される隆起・沈降やこれらに伴う侵食等は、緩やかかつ広域的な現象である。そのため、プレート運動の枠組みで生じる永続性がある現象の場合には、外挿法が特に有効な予測法と考えられる²⁾。実際の地質環境を構成する様々な要素の過去から現在までの変動履歴や現象プロセスを表現できる数値モデルを開発すると同時に、これらを用いた地質環境の変動の予測（外挿）によって、将来の地層処分システムの長期的な変化を検討していくことは、今後、地層処分の技術的信頼性を更に高めていく上でも有効となる。

このような背景から、原子力機構では、経済産業省委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」を平成25年度から開始し、第四紀の地殻変動とそれに伴う地質環境の変動を表現できる数値モデル（地質環境長期変動モデル）の開発とモデル構築に必要な個別の要素技術（革新的要素技術）の開発を進めている。

実施概要と主な成果

地質環境長期変動モデル

地質環境長期変動モデルの開発では、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例としてモデル構築手法を検討すると同時に、これまで個別に進められてきた地質環境の各分野のモデルを統合的に取り扱い、地質環境の長期的な変動を表現できる数値モデルの構築の方法論を整備する。また、モデルの妥当性の確認及び不確実性の評価のための方法論や、構築したモデルを効果的に表現する可視化技術の検討も進めている。

これまでに、山間部と平野部における個別モデルに影響を与える現象等の抽出と相互関係を整理し、長期変遷シナリオの整備を進めると同時に、統合モデルのイメージの構築及び統合モデルで考慮するイベントとプロセスの整理を実施した。また、地形・地質モデルと地表環境モデルの長期変動を考慮した水理モデルの感度解析結果を用いて、標準偏差と変動係数を評価指標とした地下水流動特性の不確実性の定量化手法を検討した。

革新的要素技術

長期的な時間スケールでのモデル化及びその解析評価に必要な技術として、山地や丘陵の形成過程を推定する後背地解析技術、過去の地下水涵養量を古気候や古地形の情報から推定する地下水涵養量推定技術、過去の地下水の化学的状態とその時代を推定する炭酸塩鉱物測定技術、過去から将来の地殻変動を数値シミュレーションから推定する地殻変動予測技術の開発を進めている。

これまでに、石英の物理化学特性等を指標とした堆積物の供給源を特定する手法、地形を考慮して河川流出量

を推定する手法、炭酸塩鉱物の放射年代測定法の開発、活断層の変位速度に基づく歪速度分布やプレート境界における運動学的モデル等の開発等を進めてきた。

今後の課題

今後は、地形・地質、地表環境、水理、地球化学の各モデルの統合化を図ると同時に、山間部と平野部の地質環境の違いに着目して、地形・地質モデルを作成する際の不確実性が地下水流動解析結果に及ぼす影響を分析する必要がある。また、引き続き要素技術の開発を行い、開発した技術をモデルへ反映する方法論を提示することも課題である。

引用文献

- 1) 地層処分基盤研究開発調整会議, 地層処分基盤研究開発に関する全体計画(平成25年度~平成29年度), 2013, 79p.
- 2) 日本地質学会編, 地質リーフレット4, 日本列島と地質環境の長期安定性, 2011.

キーワード: 地質環境長期安定性、地質環境長期変動モデル、革新的要素技術、高レベル放射性廃棄物、地層処分

Keywords: Long-term stability of the geological environments, Geological-Evolutionary Model, Innovative elemental techniques, High-level radioactive waste, Geological disposal

後期更新世以降の現海岸線付近での下刻

Downward erosion near the recent shoreline since Late Pleistocene

*幡谷 竜太¹、柳田 誠²、鳥越 祐司³、佐藤 賢²

*Ryuta Hataya¹, makoto yanagida², Yuji Torigoe³, Masaru Sato²

1.電力中央研究所、2.阪神コンサルタンツ、3.電力中央研究所（現・東北電力）

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Hanshin Consultants Co., Ltd., 3. Tohoku Electric Power Co., Inc.

我々は我が国の沖積層基底の深さを調べ、地層処分で求められる将来10万年後の下刻のリスク分析を行った。沖積層基底の深さは河川の営力と海水準低下によって引き起こされる下刻の良い指標である。このデータの分析から、隆起域における後期更新世以降現在までの氷期/間氷期1サイクルの間に生じた下刻量は、当該地点のその期間の隆起量に約100mを加えたものが最大であると考えられる。斉一観に基づき、この結果の時間軸を反転させて考えれば、将来予測を得る。沈降域の評価は今後の課題である。

【参考文献】幡谷竜太・柳田誠・鳥越祐司・佐藤賢, 応用地質, 第57巻, 1号, 2016.

キーワード：下刻、沖積層、リスク分析、地層処分

Keywords: downward erosion, alluvium, risk analysis, geological disposal

わが国の自然現象の地域的特徴の類型化に関する検討

Grouping of Japanese Islands based on spatial-temporal tendencies of natural phenomena

*後藤 淳一¹、吉村 公孝¹、守屋 俊文¹、西尾 光¹

*Junichi Goto¹, Kimitaka Yoshimura¹, Toshifumi Moriya¹, Hikaru Nishio¹

1.原子力発電環境整備機構

1.Nuclear Waste Management Organization of Japan

背景・目的

高レベル放射性廃棄物処分における閉鎖後長期の安全性の評価では、将来起こりうる現象の発生可能性や放射性核種の隔離・閉じ込め機能への影響を網羅的に記述したシナリオを構築し、被ばく線量の評価を行う。隔離・閉じ込め機能に影響を及ぼす地震等の自然現象の発生可能性は、主に過去の現象の変動傾向を将来に外挿することにより評価する¹⁾。外挿法は、将来の評価期間に対し過去の変動傾向の一樣継続性を前提としている¹⁾。わが国の過去から現在までの自然現象の履歴や変動の傾向は、地域により異なっている^{2), 3)}。現在、NUMOは包括的技術報告書の作成を進めており、地点を特定しない現段階のシナリオ構築に向けた情報を整備する必要がある。このため、最新の知見に基づきわが国の自然現象の変動傾向およびその継続性の地域的な特徴を類型化するための検討を進めている。

検討方法

対象とする自然現象は、隔離・閉じ込め機能への影響を考慮して火山・火成活動、地震・断層活動、隆起・沈降運動とした。対象期間は、日本周辺のプレートシステムの基本的枠組みの形成以後で、地域的なテクトニクスやそれに伴う自然現象の変遷に関する情報が比較的多い鮮新世以降を中心とした。情報の整理は、わが国の地質構造発達史や火山・地震活動の特徴を考慮した既存の地体構造区分のうち、より新しい知見が反映されている区分⁴⁾に準じて設定した地域ごとに行った。まず、最新の全国規模の情報⁵⁾⁻⁷⁾に基づき、第四紀火山（第四紀に活動した火山）および活断層（過去数十万年間繰り返し活動している断層）の分布、ならびに隆起・沈降速度の分布について整理した。次に、地方単位の解説書⁸⁾に基づき、鮮新世あるいはそれ以前からの自然現象の特徴や時空間的な変遷について整理した。

結果概要

火山・火成活動については、第四紀火山が分布しない前弧側と分布する背弧側の地域に区分される。さらに背弧側は、火山フロント寄りの密に分布する地域と遠方の分布が疎ら、あるいは分布しない地域に分類される。火山フロントの位置は、鮮新世、あるいはそれ以前から大きくは変化しておらず、背弧側ではその間に地域ごとに異なる活動様式や活動場の時空間的な変化が生じている。地震・断層活動については、活断層の分布には山地・丘陵/盆地・平野境界における偏在性が認められ、地域ごとの分布密度は高/中/低の三つに区分される。また、鮮新世以降の運動様式やそれらの継続性には地域性が認められる。隆起・沈降については、最近約10万年間の平均隆起速度の高い領域を含む地域と、隆起速度の低い領域あるいは沈降域を含む地域が認められる。より長期の第四紀以降においては、数十万年の時間スケールでの沈降から隆起への転換を示唆する地域が認められる。

以上の火山フロントとの位置関係の3区分、活断層の分布密度の3区分、さらに隆起・沈降運動の特徴に基づき、シナリオ構築に向けた情報を整理した。火山フロント前弧側は将来の火山活動の発生可能性を考慮する必要がない地域、背弧側は地域ごとの検討が必要な地域、その遠方はマグマの成因等も含めた検討が必要な地域と位置付けられる。また、活断層の分布密度が高いほど将来も著しい変動（影響）を受けやすいと仮定するならば、より高い地域ほど断層の分岐・伸展・連動などが生じる可能性について考慮が必要な地域と位置付けられる。また、第四紀に沈降から隆起への転換が生じた可能性のある地域は、最近約10万年間の隆起速度が低くてもそれに伴う影響の検討が必要な地域と位置付けられる。

このように地域ごとの自然現象の変動様式の時間変遷の特徴を整理することにより、わが国全体の中での相対的な位置づけを把握し、シナリオを構築上の自然現象の発生可能性を判断する際の参照情報を提供していく。

文献

1) NUMO (2011) : 地層処分事業の安全確保. 2) JNC(1999) : 第2次とりまとめ. 3) NUMO(2004) : 概要調査選定

上の考慮事項の背景と技術的根拠. 4) 垣見ほか(2003): 日本列島と周辺海域の地震地体構造区分. 5) 産総研(2013): 日本の火山(第3版)など. 6) 産総研ホームページ: 活断層データベースなど. 7) 日本地質学会(2011): 地質リーフレット4など. 8) 日本地質学会編(2006~): 日本地方地質誌, 朝倉書店など.

キーワード: 地層処分、火山、断層、隆起・沈降、発生可能性、シナリオ

Keywords: geological disposal, volcano, fault, uplift/subsidence, likelihood, scenario

断層の遮水効果に関する解析的検討

Groundwater flow simulation related to flow barrier fault for geological disposal

*竹内 真司¹、土橋 沙紀¹*Shinji Takeuchi¹, Saki Tsuchihashi¹

1. 日本大学文理学部地球システム科学科

1. Department of Geosystem Sciences, College of Humanities & Sciences, Nihon University

はじめに

変動帯に位置する日本列島には多くの断層が存在する（産総研 地質図navi）。このうち、比較的規模の大きな（トレース長の長い）断層については、粘土等の細粒物質からなる断層ガウジあるいは断層粘土などと呼ばれる、断層運動により粉碎され細粒化した断層コア部とその周辺に亀裂を伴うダメージゾーンが発達することが各地で報告されている（吉田ほか2009など）。このような断層は地層処分場の領域内でも出現することを想定しておくことが必要と考える。断層コア部はダメージゾーンに比べて透水性が低いため、その直交方向の地下水流動には遮水構造として機能すると考えられる（Evans et al.1997）。仮に低透水性の断層コア部を有する断層で四方を囲まれた領域（以下、断層ブロック）が存在する場合、この断層ブロック内部で立坑掘削などにより地下水を揚水すると、水位低下領域は主としてブロックの内側に限定され、その外側での水位低下量は小さくなることが予想される。また水位回復過程では、外部からの地下水の供給が制限されることから、周辺からの地下水供給が少ない場合には、回復速度は遅く不飽和な期間が長期に継続すると考えられる。筆者らはこれまでに、①断層ブロック内部での排水時（立坑掘削時）の地下水水位低下挙動に関する簡易解析、②我が国の断層ブロックの分布特性、③トレース長と断層コア部の厚さの関係などについて検討を行ってきた。その結果、①については、母岩と断層の透水係数に4桁程度の差を設けた簡易的な解析により、断層ブロック内部と外部で水位低下量に大きな差が生じる結果を得た。特に外部では水位低下はほとんど生じない結果となった。②については、シームレス地質図をベースに日本列島に分布する断層ブロックの面積は、日本列島全体の約2%であり、このうちの90%以上は、先新第三紀の堆積岩類あるいは深成岩類で、いわゆる亀裂性岩盤であることが分かった（竹内ほか2015）。さらに、抽出された断層ブロックの面積のヒストグラムは、ほとんどの地域で、現在想定されている地層処分場の面積（NUMO, 2010など）と同等の面積を有する断層ブロックが卓越することが分かった（竹内ほか、2015）。原子力機構が瑞浪の深地層の研究施設設計画で実施している調査研究結果（JAEA, 2007など）では、地質図に表現されていないような、断層コア部を有する断層破碎帯や断層ブロックが確認されていることから、実際の断層ブロックの割合は上記よりも多いと考えられる。さらに③に関しては、既存資料に基づいて断層コア部の厚さとトレース長の概略的な関係を見出し、断層のトレース長が数百メートル以上では断層コア部の厚さが20cm程度と頭打ちになる傾向を有する可能性があることを示した（竹内ほか、1995）。

これまでの検討では、断層の透水係数とコア部の厚さの関係については詳細な検討がなされていなかったことから、今回、断層の透水係数と厚さをそれぞれ変更し、断層ブロック内で立坑掘削による揚水を行った場合の断層ブロック内外の水位低下量等がどのように変化するかについて解析的な検討を行った。

解析モデル

4km×4km×1.2km（深さ方向）の領域内のほぼ中央部に3.2km×3.2km×1.2km（深さ方向）の断層ブロックを設定した。領域の側方境界条件は、固定水頭境界、下面境界条件は不透水境界とした。また、断層の透水係数を1E-10(m/s)、1E-11(m/s)、1E-12(m/s)に設定し、それぞれのケースで断層の厚さを50m、80m、100mとして解析を行った。なお、断層以外の母岩の透水係数は、1E-5(m/s)とした。解析は、断層ブロック中心部に設けた深度300mの立坑から揚水した際の断層ブロック内外の水頭値を定常解析により求めた。

解析結果

断層の透水係数が1E-10(m/s)のケースでは、断層の厚さが50mの時は深度約155mまで、80mと100mでは約250m

でブロック内の水位がほぼ一様に低下した。また、透水係数が $1E-11(m/s)$ のケースでは、断層の厚さに関わらず全てのケースで約355mの深度まで一様に水位低下した。さらに、 $1E-12(m/s)$ のケースでは、断層の厚さが50mと80mの場合はそれぞれ約355m、100mの場合は約455mまで一様に水位低下した。なお、いずれの場合も、断層ブロック外側の母岩の水位はほとんど低下しなかった。

まとめ

以上のことから、断層ブロックの遮水特性は、ブロックを構成する断層の透水係数と断層の厚さによって変化することが明らかとなった。また、ケースによっては立坑深度よりも深くまで水位低下する可能性が示唆された。今後は、回復過程での地下水挙動や、野外において規模の大きい断層を対象に、断層コア部の厚さや透水係数など断層の特性を詳細に検討する予定である。

キーワード：断層コア部、遮水効果、断層ブロック、地下水流動、地層処分

Keywords: Fault Core, Flow Barrier Effect, Fault Block, Groundwater flow, Geological Disposal

瑞浪超深地層研究所深度500mステージにおける小規模断層およびその周辺の変質履歴解析
Alteration process along a small-scale fault at the depth of -500m in the MIU site

*松本 孟紘¹、吉田 英一²

*Takehiro Matsumoto¹, Hidekazu Yoshida²

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.名古屋大学博物館

1.Nagoya University Graduate School of Environmental Studies, 2.Nagoya University Museum

サイト選定及びサイト特定調査段階において、活断層ならびに地表で確認された断層は排除可能であるものの、地下処分場建設時に小規模な断層に遭遇する可能性は排除できない。したがって、それらの形成・発達過程をナチュラルアナログ的に理解し、過去から将来への変化の状態を推定することが重要となる(例えば、長友・吉田,2009)。しかしながら、地表調査では風化のため詳細な分析が困難である。よって、本研究では瑞浪超深地層研究所の深度500mステージにおいて、ほぼ水平に掘削された小規模断層を含む花崗岩ボーリングコアを用い、断層およびその周辺の変質履歴の解析を行うことにより、地下環境における小規模断層の機能について検討した。

調査を行った12MI33号孔は、地下500mの調査坑道から、ほぼ水平に107m掘削したものである。本研究では肉眼によるコア観察の後、コア全体の構造把握のためにRQDと割れ目頻度を測定した。その後、偏光顕微鏡観察、XRD分析、XRF分析、SXAMによる元素マッピングを行った。また、ボーリング掘削時に実施された電磁フロー検層の結果(露口ほか,2014)も考察に用いた。観察及び分析は断層周辺のみならず、断層から離れた新鮮部も含め、ボーリングコア全体で行った。

観察・分析の結果、断層近傍に発達する割れ目の充填鉱物は、イライト、緑泥石、スメクタイト、方解石、石英片などで構成されることが判明した。電磁フロー検層では、断層周辺の一部で地下水流入が認められたものの、断層部分では地下水流入は認められなかったとともに、断層周辺でも地下水流入が認められない区間があった。これは、断層ガウジや割れ目充填鉱物が水みちをシーリングした可能性を示す。これらのことから小規模断層およびその周辺は、1) 花崗岩体の貫入・冷却固化、2) 小規模断層と周辺の割れ目の形成、3) 熱水の流入による変質、4) 天水の流入に伴う方解石とスメクタイトによる充填、という履歴を経たと考えられる。

断層およびその周辺は、構造や変質プロセスが複雑に絡み合い、その履歴の理解が困難である場合が多い。しかし、その組織や充填鉱物の詳細観察は、岩石-水反応履歴や水理学的履歴を解析する上で有効であると考えられる。

文献

露口ほか,2014, JAEA-Technology, 2013-044.

長友・吉田,2009,地質学雑誌,115(10),512-527.

キーワード：断層、土岐花崗岩、変質

Keywords: fault, Toki Granite, alteration

孔内長期モニタリング技術の開発と現地適用

Development of Technology on Long Term Monitoring in the Borehole and it's Application

*木方 建造¹、司代 明¹、富岡 祐一¹、松村 修治²、齋藤 康二³、加藤 雅士⁴

*Kenzo Kihō¹, Akira Shidai¹, Yuichi Tomioka¹, Shuji Matsumura², Yasuji Saito³, Masashi Kato⁴

1.電力中央研究所、2.熊谷組、3.東電設計、4.地熱技術開発

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. KUMAGAI GUMI, 3. Tokyo Electric Power Services, 4. Geothermal Energy Research & Development

はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、地下調査施設などの建設（精密調査段階）による地質環境への影響を把握するため、また閉鎖措置の確認の際に初期状態を参照するなどのために、モニタリングにより初期ベースラインを把握することが必要である。なお、初期ベースラインとは地下調査施設の建設以降の事業による擾乱を受ける前の地質環境、周辺環境、放射線の状態推移と定義されている。このような観点から、精密調査の前段階である概要調査における調査ボーリングの孔内において、地下水水圧や水質をモニタリングすることが必要となる。

電中研では、2006年度より北海道幌延町上幌延サイトにおいて、コントロール掘削と孔内での各種調査技術を実証してきた。2013年度末には掘削と孔内調査を終了し、孔内3区間にモニタリング装置を設置して間隙水圧測定を開始するとともに、2015年度からは地下水水質ならびに地下水年代を評価するため原位置地下水の採取・分析を行っている。

モニタリング技術の開発

堆積性軟岩における孔内長期モニタリングでは、孔壁保護の観点からケーシングで保孔し、アニュラス部をセメント充填し、その後モニタリング設定区間をパーフォレーションにより穿孔し、それぞれの区間にパッカーを設置して区間設定し、モニタリング装置により計測をするのが一般的である。

これに対して、電中研ではコントロール掘削した孔井が比較的安定していること、さらには地下水水質のセメント影響を無視できることから、モニタリング区間のみを裸孔にする技術開発を実施し、上幌延サイトで現地適用した。また、傾斜孔井への設置という比較的困難な条件での適用実績を有すること、モニタリング時の維持管理が比較的容易であることを考慮し、SPMP（スタンドパイプマルチパッカー）タイプのモニタリング装置を採用し、加工したケーシングに対応させるため一部改良した。さらに、内径21mmのスタンドパイプ内で原位置地下水（溶存ガス含む）を採取するための地下水サンプラーを考案、製作した。

区間設定およびモニタリング装置の設置

コントロール掘削孔に3区間、すなわち区間1（249.45～257.45m）、区間2（210.95～215.95m）および区間3（208.45～209.95m）を設定し、モニタリング装置を設置した。区間3では掘削中に逸泥を確認しており、その後の透水試験でも透水係数で 2×10^{-6} m/sと周囲に比べて3～4オーダー透水性が高い。掘削中に実施した透水試験時の間隙水圧計測の結果、上述の3区間では被圧していることから、スタンドパイプからの地下水湧出を防ぐため、地表より10m下部のスタンドパイプ内にミニパッカーを設置し、その直下に水圧計を設置して圧力を計測することとした。

間隙水圧データ取得

SPMPを設置した2013年2月22日より、3区間の間隙水圧の計測を開始した。地上のボーリング設備の撤去期間および区間3における地下水採取時の計測中断、さらにミニパッカーの不具合により、全期間でのデータの品質が確保できなかったが、区間3の間隙水圧がそれ以外の区間の水圧に比べて高い。

地下水の採取・分析

区間3の地下水を採取するために、スタンドパイプのミニパッカーを外し、ダブルバルブポンプにより区間内の地下水を揚水し、孔口において採水した。その後、スタンドパイプ内に原位置サンプラーを投下し、銅管内に封じ込めた地下水中の希ガス測定を行い、地下水年代を測定した。これまでの結果からは、既存の孔内水の影響により地下水水質を評価することは困難であるが、その影響が徐々に少なくなっている傾向が認められる。

長期モニタリング無人計測システムの設置運用

処分場選定のための調査の一環として実施が想定されるモニタリングは、電気、通信などのインフラが整備されていないサイトで行われる可能性があるため、①システムの省電力化、②現地の環境条件に応じた電源の確保、③通信による遠隔地へのデータ転送および遠隔地からの状態の確認、④周辺の他孔井との連携の観点から長期モニタリング無人計測システムの設計を行い、幌延サイトに実証システムを2015年度に設置し、システムの信頼性の評価を開始した。サイトは日本の最北端に位置しており、冬季には外気温がマイナス20度以下となる厳しい環境におけるシステム運用を通して、システム制御コンピュータのタイマーと各機器間の同期のずれ、通信接続が途切れがちとなる通信衛星の想定以上の電力消費など、各種の改善点が明らかとなった。なお、本研究は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「ボーリング技術高度化開発」及び「岩盤中地下水移行評価確証技術開発」において実施したものである。また、現地適用性検討は日本原子力研究開発機構（JAEA）幌延深地層研究センターとの共同研究の一部として実施した。

キーワード：間隙水圧、水質、無人計測システム

Keywords: Pore Water Pressure, Water Chemistry, Stand-alone Data Acquisition System

花崗岩を対象とした原位置トレーサー試験

In-situ tracer experiments for granitic rock mass

*田中 靖治¹、野原 慎太郎¹、長谷川 琢磨¹、矢田 浩太郎¹、八木 啓介²

*Yasuharu Tanaka¹, Shintaro Nohara¹, Takuma Hasegawa¹, Kotaro Yata¹, Keisuke Yagi²

1. (一財) 電力中央研究所、2. 大成建設 (株)

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Taisei Corporation

高レベル放射性廃棄物を地層処分する際の天然バリアの性能評価においては、処分施設周辺岩盤の地下水溶質の移行特性を精度良く把握する必要がある。そのため、著者らは、岩盤中での地下水溶質の移行特性を直接的に測定する手法である原位置トレーサー試験技術について、主に岩盤割れ目を対象に収着性トレーサーも使用可能な原位置試験装置や、トレーサー試験の結果から溶質移行パラメータを評価する手法の開発を進めている。その一環として、開発した試験装置を用いて花崗岩が分布する国内の試験場において、単孔トレーサー試験や孔間トレーサー試験を実施した。

試験場は、日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度300 mボーリング横坑である。トレーサー試験には、坑壁から掘削された2本のボーリング孔12MI31号孔と13MI37号孔を用いた。12MI31号孔と21.90 mabh (meter along the borehole) で交差する割れ目と13MI37号孔と23.14 mabhで交差する割れ目は、ポアホールTVを用いた孔壁観察結果、13MI37号孔掘削時や透水試験時の12MI31号孔の間隙水圧の応答などから、同一の割れ目である可能性が高く、この割れ目を対象としてトレーサー試験を実施した。孔間の直線距離は2.95 mである。事前の単孔水理試験により得られた対象割れ目の透水量係数は、12MI31号孔で $6.9 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{sec}$ 、13MI37号孔で $1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ であった。また、ボーリング掘削により採取した岩石コアよりこの割れ目を観察したところ、緑泥石、粘土、黄鉄鉱が充填しており、割れ目周辺の岩盤にも緑泥石化等の変質が見られた。

単孔トレーサー試験は、単一の試験孔の同一区間でトレーサーの注入、回収を行う試験である。まず、原位置でサンプリングした地下水を定流量で注入し、岩盤内の地下水流れ場が定常に達した後に定流量で一定時間トレーサーを注入する。さらに、地下水を定流量で一定時間チェーサーとして注入した後、定流量で揚水を行いトレーサーを回収する。

孔間トレーサー試験としては、ダイポール試験を実施した。まず、1つの孔から原位置でサンプリングした地下水を注入し、同時に別の孔で揚水を行う。岩盤内の地下水流れ場が定常に達した後に、注入水をトレーサー溶液に切り換え、揚水孔でトレーサーを回収する。高い回収率を得るために、注水流量を揚水流量の1/5あるいは1/10に設定した。

トレーサー物質としては、非収着性の蛍光染料であるウラニンとアミノG酸、同じく非収着性の重水素とヨウ素、収着性のルビジウムとバリウムを用い、これら6種類のトレーサー物質を原位置でサンプリングした地下水を溶媒として混合しトレーサー溶液とした。試験では揚水からフラクションコレクターによりサンプリングを行い、サンプリング試料中の濃度を室内で分析した。ウラニンは蛍光濃度センサーによりオンラインでも濃度を計測した。

単孔トレーサー試験では、チェーサーの投入終了直後に揚水を開始した場合には、揚水開始後2時間で非収着性トレーサーで80~90%程度、収着性トレーサーでも70~80%の高い回収率が得られた。一方、チェーサーの投入から揚水開始までに待機時間を設けた場合には、バックグラウンドの地下水流れの影響により回収率の低下が見られた。また、いずれの場合でも、収着性トレーサーの投入濃度に対する回収濃度の比のピーク値は、非収着性トレーサーに比べて低かった。

孔間トレーサー試験では、非収着性トレーサーの回収率は、試験開始後10時間で54~63%であり、やはりバックグラウンドの地下水流れの影響がみられた。ルビジウムの回収率は試験開始後30時間でも24~25%であり、非収着性トレーサーに比べて濃度ピークの低減や時間遅れがあり、岩盤への収着の影響が見られた。収着性がさらに強いバリウムでは、30時間後の回収率は約5%であり、回収濃度は試験を通じてバックグラウンドの濃度に近く有意な破過曲線を得ることができなかった。

今回の試験の結果、開発した試験装置は国内に分布する花崗岩に対しても適用できる見通しを得ることができ

た。今後は、トレーサー試験の結果から、数値シミュレーションにより、割れ目の開口幅、分散長、岩石マトリクスへの分配係数を推定する予定である。

なお、本稿の内容は、経済産業省資源エネルギー庁より(一財)電力中央研究所が受託し実施した「岩盤中地下水移行評価確証技術開発」の成果の一部である。また、試験に関しては、(国研)日本原子力研究開発機構との共同研究として実施した。

キーワード：トレーサー試験、花崗岩、割れ目

Keywords: tracer test, granite, fracture

花崗岩における断層および熱水変質がマトリクス拡散に与える影響

Influences of faulting and hydrothermal alteration on matrix diffusion in granitic rocks

*石橋 正祐¹、岩崎 理代¹、濱 克宏¹*Masayuki Ishibashi¹, Riyo Iwasaki¹, Hama Katsuhiro¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. Japan atomic energy agency

花崗岩などの結晶質岩では、物質の選択的な移動経路周辺の母岩への元素の拡散（マトリクス拡散）現象や収着現象が、物質の希釈や移動の遅延に効果がある。そのため、高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価を行う上で母岩中のマトリクス拡散現象の理解は重要となる。物質が拡散する速度（実効拡散係数；De）と岩石の空隙率との間には相関性があり、岩石中の微小空隙構造がマトリクス拡散の経路であることが知られている。花崗岩において微小空隙構造が発達する要因は、断層の形成による微小な亀裂（微小亀裂）の形成や熱水変質による鉱物の溶脱・形成が考えられる。地質学的変動帯に位置する日本列島に分布する花崗岩では、欧州など安定陸塊に分布する花崗岩と比較して断層が多いことから、微小亀裂も多い可能性が高い。また、健岩な部分でも熱水変質による二次鉱物の生成が認められ、微小な空隙が多い可能性がある。そのため国内の花崗岩におけるマトリクス拡散現象の理解を深める上では、断層の分布や熱水変質の影響を考慮することが必要であると考えられる。そこで、国内の花崗岩の特徴である断層や熱水変質に着目して、微小空隙構造の分布と量やマトリクス拡散現象との関係を把握することを目的とした研究を実施した。

本研究では、岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所の深度300mから採取した断層近傍の試料（3試料；断層近傍試料）と断層から離れた試料（3試料；健岩試料）を使用した。これらの岩石試料に対し、薄片観察、走査型X線分析顕微鏡（SXAM）分析、実体蛍光顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、非収着性のウランをトレーサー物質とした透過拡散試験を実施し、各試料の鉱物組成・分布、微小空隙構造の分布と空隙率およびDeを測定した。なお、微小空隙構造の分布や空隙率は、蛍光染料を含む接着剤を用いて作成した岩石薄片の実体蛍光顕微鏡観察から把握した。

目視観察の結果、断層近傍試料は、全ての試料が熱水変質を被っており、健岩試料は変質を被っていない。顕微鏡観察およびSXAM分析の結果、断層近傍試料には二次生成鉱物として緑泥石、イライト、方解石が全体の7~12%、健岩試料には約3~4%の二次生成鉱物が認められる。二次生成鉱物であるイライトや方解石は主に長石中に分布し、微小亀裂中にも認められる。微小空隙構造として、断層近傍試料、健岩試料いずれも微小亀裂に加えて、長石中に多数の微小空隙が認められる。断層近傍試料では、微小空隙構造は主に二次生成鉱物が認められない個所に分布する。空隙率は、断層近傍試料で2.3~4.2%、健岩試料で約0.7~1.9%と断層近傍試料で高い。断層近傍試料では、二次生成鉱物の割合が増加するにしたがって特に長石中の空隙率が減少する傾向が認められるが、健岩試料では二次生成鉱物の割合と空隙率に相関性は認められない。Deは、断層近傍試料で高く、健岩試料で低い傾向が認められる。また、Deと空隙率には正の相関があり、相関係数は0.92である。断層周辺では、断層の形成に伴う物理的なダメージゾーンとして目視スケールの亀裂に加えて微小亀裂も増加することが知られている。本試料でも断層近傍試料では健岩試料に比較して微小空隙構造が多く認められており、これらは断層形成に伴うものである可能性がある。また、断層近傍試料では二次生成鉱物の割合が増えると長石中の空隙率が減少する傾向がある。すなわち、二次生成鉱物の割合を熱水変質の影響の程度の差と考えると、断層近傍試料では熱水変質の程度が強いと、長石の溶脱と二次鉱物の形成が同時に発生し、長石中の空隙率が低下すると考えられる。Deは単純に微小空隙構造の割合と同様に増減するが、本研究では、透過拡散試験のトレーサー物質として非収着性のウランを用いていることから、このDeの変化はマトリクス拡散経路の増減を表現していると考えられる。これらをあわせて考えると、断層近傍の領域では、健岩部に比較して微小空隙構造が多いためマトリクス拡散経路が増加するが、熱水変質を強く被るとその経路（微小空隙構造）が二次生成鉱物により充填または閉塞されることが推定される。

以上より、断層近傍では健岩部に比較して断層形成に伴いマトリクス拡散経路が増加するが、その増加した経路は、熱水変質を強く受けることで減少または閉塞される可能性が示唆された。しかし、イライト等の二次生成鉱物は、収着能があることが知られていることから、吸着性物質のDeは変わる可能性がある。また、本研究

で用いた断層近傍試料は断層運動と熱水変質の両者の影響を受けている試料である。そのため、今後は吸着性物質を用いた検討を行うと共に、異なる産状（断層近傍の未変質試料や断層遠方の変質試料など）の試料での検討を進めていきたいと考える。

キーワード：マトリクス拡散、断層、熱水変質、花崗岩

Keywords: matrix diffusion, fault, hydrothermal alteration, granitic rocks

原位置パーミアータ測定で明らかとなった断層周辺岩盤の浸透率の空間分布特性
Spatial characterization of permeability distribution around faults through in-situ
permeameter measurements

*柏谷 公希¹、久保 大樹¹、佐藤 開²、松田 典大¹、小池 克明¹

*Koki Kashiwaya¹, Taiki Kubo¹, Kai Sato², Norihiro Matsuda¹, Katsuaki Koike¹

1.京都大学大学院工学研究科、2.京都大学工学部

1.Graduate School of Engineering, Kyoto University, 2.Faculty of Engineering, Kyoto University

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価では、埋設された廃棄体に含まれる放射性核種が地下水により生物圏まで移行する過程が検討される(例えば、核燃料サイクル開発機構, 1999)。そのため、処分サイト周辺の地下水流動特性を把握することが求められる。断層はその内部構造に応じて流体のconduitやbarrier, 複合的なconduit-barrierシステムとして働くことが知られており(Caine et al., 1996), 地下水流動や物質移行における主要な移行経路となりうることから、その水理特性の理解が重要となる。しかしながら、断層周辺において岩石の浸透率はどれほど不均質であり、その空間分布が地下水流動や物質移行にどのような影響を及ぼしているのかについては十分に明らかとなっていない。そこで本研究では、断層周辺に分布する岩盤の浸透率の変化を高い空間分解能で明らかにし、断層周辺の水理地質モデルに反映させることを目的として、断層周辺の岩盤を対象とした浸透率測定を行った。研究サイトは岐阜県瑞浪市に位置する日本原子力研究開発機構の瑞浪深地層研究所の研究坑道である。深度300mでほぼ鉛直傾斜(鶴田ほか, 2010)の主立坑断層が主立坑近傍に分布しており、主立坑から複数の深度で水平坑道が伸びている。そのため、断層からの距離に応じた浸透率の変化を検討する上で好都合である。深度200m, 300m, 500mの水平坑道の壁面に露出する土岐花崗岩を対象に、窒素ガス圧入式パーミアータ(TEMCO社製Mini-Permeameter MP-401)を用いて浸透率を測定した。発表では、測定結果に基づく断層周辺の浸透率の空間分布を特徴付けるとともに、このような空間分布が生じたメカニズムについて議論する。

なお、本研究は経済産業省の委託事業「平成26年度放射性廃棄物重要基礎技術研究調査」の成果の一部である。ここに記して関係各位に感謝の意を表す。

核燃料サイクル開発機構, JNC TN1400 99-023, 1999.

鶴田ほか, JAEA-Research 2008-098.

Caine et al., *Geology*, 24, 1025-1028, 1996.

キーワード：断層、浸透率、空間分布、地下水、水理地質モデル

Keywords: Fault, Permeability, Spatial distribution, Groundwater, Hydrogeological model

土岐花崗岩の浸透率と岩石物性・化学組成との関連に関する実験的検討

Experimental study on correlation of permeability with physical and chemical properties using Toki granite samples

*久保 大樹¹、松田 典大¹、柏谷 公希¹、小池 克明¹

*Taiki Kubo¹, Norihiro Matsuda¹, Koki Kashiwaya¹, Katsuaki Koike¹

1.京都大学大学院工学研究科

1.Graduate School of Engineering, Kyoto University

浸透率は地下水流動を支配する岩石の重要な水理物性であるが、原位置で多くのデータを取得するのは困難である。高レベル放射性廃棄物の地層処分では超長期スケールでの地下水流動状態の考慮が不可欠となり、岩体の浸透率を高い空間分解能で明らかにする必要がある。そのためには、浸透率を支配する因子を特定するとともに、測定しやすい他の岩石物性から浸透率を精度良く推定できることが重要となる。これら2点を本研究の目的におき、土岐花崗岩を試料に用いて、多くの浸透率データを取得し、岩石の諸物性との関連性を評価した。測定試料は、(独)日本原子力研究開発機構により岐阜県瑞浪市において掘削された3本のボーリングから取得した計48個の岩石コアである。本地域は土岐花崗岩を基盤岩としている。はじめに、窒素ガス圧入式パーミアメータ(TEMCO社製Mini-Permeameter MP-401)を用いて、試料の浸透率を求めた。さらに、弾性波(P波)速度、マイクロクラックの分布特性および化学組成の測定を行った。

測定結果より、浸透率はマイクロクラックの累積長さとの強い正の相関をもち、P波速度とは負の相関をもつことがわかった。一方、マイクロクラックとP波速度の相関性は比較的低い結果となった。これらは、浸透率とP波速度が、いずれもマイクロクラックによって形成される空隙部分の影響を表していることを示す。一方で、P波速度にはマイクロクラックや空隙のみでなく、岩石基質部の影響も含まれていると考えられる。

岩石サンプルは、元素分析で得られたMn/Fe比に注目すると2つのグループに分類できた。Mn/Fe比は岩相の違いを反映すると考えられ、Mn/Fe比とP波速度の変化には関連性がみられた。分類された各グループにおいて浸透率とP波速度の相関性を求めたところ、すべてのサンプルをまとめた場合よりも高い相関性が得られた。

本発表では、以上の結果を統合して土岐花崗岩の浸透率と諸物性の変化の関係性について議論し、岩石の透水特性を推定するための手法について提案する。

謝辞：解析のためのデータをはじめ、解析方法と結果に関して種々ご教示・討議いただいた(独)日本原子力研究開発機構の研究者諸氏に深甚の謝意を表したい。

キーワード：化学組成、マイクロクラック、浸透率、P波速度、土岐花崗岩

Keywords: Chemical composition, Micro crack, Permeability, P-wave velocity, Toki granite

福島県阿武隈山地の山地森林における放射性セシウム流出特性の経年変化

Temporal changes of radiocesium outflow in mountainous forest of the Abukuma Mountains, Fukushima

*新里 忠史¹、阿部 寛信¹、三田地 勝昭¹、石井 康雄¹、佐々木 祥人¹、渡辺 貴善¹、北村 哲浩¹、山口 正秋¹
 *Tadafumi Niizato¹, Hironobu Abe¹, Katsuaki Mitachi¹, Yasuo Ishii¹, Yoshito Sasaki¹, Takayoshi Watanabe¹, Akihiro Kitamura¹, Masaaki Yamaguchi¹

1. 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故に由来する放射性物質のうち、放射性セシウム137（以下Cs-137）は半減期が約30年と長く、今後長期にわたり分布状況の変化をモニタリングし、影響を注視していく必要がある。福島県の約7割を占める森林域については、住居等近隣の森林や日常的に立ち入る森林での除染が進められるとともに、福島の森林・林業の再生に係る統合的な取組みが検討されている[1]。本報告では、山地森林におけるCs-137の流出特性及び森林土壌におけるCs-137深度分布と流出率の経年変化を考察する。

調査地と手法

事故により放出されたCs-137は、樹木への沈着後、降雨に伴う林内雨や樹幹流及びリターフォールにより林床へ移動し、林床から土砂流亡及び表面流により林外へ移動すると考えられる。これら経路を通じた移動量を把握するために、福島県阿武隈山地北部と中部において、落葉広葉樹林の急傾斜地と尾根付近の緩傾斜地及びスギ林の急傾斜地に50-60 m²の観測区画を設定し、2013年4月から2014年12月の約2年間にわたり林内雨量、樹幹流下量、リターフォール、土砂流亡量及び表面流量を観測するとともに、概ね1ヶ月間隔の試料採取とCs-137濃度分析を実施した。

森林土壌のCs-137深度分布は、観測区画を設置した小水系の尾根、斜面及び谷底において、2012年12月-2013年1月及び2014年9-10月に調査を実施した。鉬質土壌の露出深度を0 cmとして深度1 cm間隔で土壌を採取し、105℃で24時間乾燥後、Cs-137濃度を測定した。土壌に沈着したCs-137の深度分布は、最小二乗法を用いて指数関数によりフィッティングし形状を示す係数(α値)を求めた。各深度のCs-137沈着量は、Cs-137濃度、土壌密度及び採取土壌厚から算出した。Cs-137の流出解析はSACTモデル[2]を使用した。

結果

落葉広葉樹林に設置した観測区画における約2年間の林床へのCs-137沈着量は、林内雨で約1×10² Bq m⁻²、樹幹流で3×10¹~2×10² Bq m⁻²及びリターフォールで7×10² ~3×10³ Bq m⁻²であり、尾根付近の緩傾斜地で比較的高い傾向にあった。林床からのCs-137流出量は、表面流で約1×10¹ Bq m⁻²、土砂流亡で8×10¹ ~2×10² Bq m⁻²であり、急傾斜地で比較的高い傾向にあった。一方、スギ林における同時期での林床へのCs-137沈着量は、林内雨と樹幹流でそれぞれ約1×10² Bq m⁻²及びリターフォールで約9×10² Bq m⁻²であり、落葉広葉樹林と大きな差異は認められなかった。林床からのCs-137流出量は、表面流で約1×10¹ Bq m⁻²、土砂流亡で約1×10² Bq m⁻²であり、落葉広葉樹林の急傾斜地での観測と同一オーダーであった。以上を整理すると、各観測区画における2013年4月~2014年12月の約2年間にわたり林床へのCs-137沈着量は1×10³~3×10³ Bq m⁻²、流出量は1×10²~2×10² Bq m⁻²となり、林床へのCs-137沈着量が流出量を上回る結果となった。

森林土壌におけるCs-137深度分布の経年変化は、尾根や谷底で地表面付近のCs-137沈着量が減少し、2014年9-10月における深度1 cmまでの沈着量は、2012年12月-2013年1月の約50-60%に減少していた。これとともに深度方向へCs-137が浸透する傾向が認められるが、深度5 cmまでの沈着量は全沈着量の84-92%であり、地表面付近に大部分が存在していた。斜面域のCs-137沈着量は増加及び減少の双方が認められ、土砂の運搬と堆積に伴うCs-137の移動現象が不均質に生じていると考えられる。ここで、スギ林の観測区画を包含する流域において深度分布の異なる解析ケースでSACTモデルによりCs-137流出率を求めると、α値0.5で流出率0.14%、α値1.2で流出率0.31%となり、Cs-137の深度方向への浸透により流出率が低下する可能性が示された。

以上から、過去2年間にわたりCs-137流出特性は林床への沈着量が流出を上回り、森林土壌におけるCs-137深度分布の経年変化によると流出量はさらに低下すると見込まれる。このため、森林域は放射性セシウムのシンク

として振る舞う傾向にあると考えられる。

[1]復興庁, 福島森林・林業の再生のための関係省庁プロジェクトチーム第1回(平成28年2月5日). <http://www.reconstruction.go.jp>

[2]Yamaguchi, M., et al., 2014, Jour.Environ.Radiact.135, 135-146.

キーワード：東京電力福島第一原子力発電所事故、放射性セシウム、山地森林

Keywords: Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, radiocesium, mountainous forest

Comparison of sorption coefficients between powder and intact solid phase: Case study with ^{133}Cs and ^{87}Sr on pumice tuff

*Mohammad Rajib¹, Chiaki T. Oguchi²

1. Graduate School of Science and Engineering, Saitama University/ Bangladesh Atomic Energy Commission, 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Saitama University

Adsorption experiment was carried out with both powdered and block pumice tuff to compare the distribution coefficient (K_d) values of stable cesium (^{133}Cs) and strontium (^{87}Sr) under variety of geochemical conditions. The main objective was to infer the K_d difference in laboratory and field condition. Cs and Sr were selected as two important nuclides from low and intermediate level radioactive waste, and pumice tuff as one of the host rocks of such waste repositories. Pumice tuff blocks were prepared for this study expecting that the block sample is nearly the 'natural condition', like what is found in the field- compact with intact pores. Considering minimum dependency of ionic strength, initial nuclide concentration and pH, 10^{-4} mol/l Cs and Sr concentration was selected as initial experimental concentration (Rajib *et al.*, 2015, 2016) where 4, 8 and 12 were chosen as low, neutral and high pH conditions. Since ionic strength significantly influences K_d at less than 1.0 mol/l on pumice tuff (Rajib *et al.*, 2011, 2016), relatively high ionic strength of 1.0 and 3.0 mol/l was adopted. To keep the effect of particle size at minimum, homogenous grain size of 150-300 μm was used for the powdered materials, whereas blocks were prepared at an equal size of 1 cm^3 . Conventional batch technique was carried out with a solid-solution ratio of 1:10. However, as the ratio cannot be kept fixed for block samples (the weight varied from 1.090 to 1.456 g), adjustment to 1:10 ratio was necessary to recalculate K_d values. After reaching equilibrium pH at the contact time of 14 weeks, Cs and Sr concentrations were measured by ICP-MS, and the K_d values were determined considering the natural dissolution of Cs and Sr during aging period (Rajib *et al.*, 2015). Pumice tuff samples were collected from below 50-100 m at subsurface where water-rock interaction occurred and a redox zone has been formed. Hence, both fresh and oxidized pumice tuffs were possible to use to observe any oxidation effect. To investigate surface area properties of pumice tuff, mercury intrusion porosimetry (MIP) and observation through scanning electron microscope (SEM) was conducted.

The results show that K_d values for block samples are considerably lower than powdered samples for both Cs and Sr. Almost all the samples showed similar tendency with the average lower values of 8.79% for Cs and 4.94% for Sr in block samples of fresh tuff. In oxidized tuff, block samples showed 14.58% and 13.65% lower values for Cs and Sr, respectively. The lower K_d values on block samples might be due to the use of lower surface area as sorption sites since many closed pores exist in intact solid which cannot be accessed. The destruction of smaller pores in oxidized tuff due to oxidation phenomena might be the cause of higher reducing K_d values. However, use of pumice tuff blocks for comparable batch adsorption experiment is possible due to its highly porous nature where much amount of surface area can be accessed. The K_d difference between block and powder samples is expected to be caused mainly by the effect of diffusion, taking very long equilibrium period, and the physical and mechanical properties of pores and fractures during experiment.

References:

1. Rajib, M., Kobayashi, T. Oguchi C. T. and Sasaki T. (2016), *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 4.
2. Rajib, M., Oguchi C. T., Sasaki T. and Kobayashi, T. (2015), *Geochemical Journal*, 49(5), 539-548.
3. Rajib, M., Sasaki, T., Kobayashi, T., Myaguchi, Y., Takagi, I. and Moriyama, H. (2011),

Journal of Nuclear Science and Technology, 48(6), 950-957.

Keywords: Distribution coefficient, Powder and block samples, Oxidation, Pumice tuff, Radioactive waste repository

Behavior of co-precipitated Se (IV) during the transformation of Fe-oxides at alkaline conditions

*Paul Clarence Francisco¹, Tsutomu Sato², Tsubasa Otake²

1.Graduate School of Engineering, Hokkaido University, 2.Faculty of Engineering, Hokkaido University

⁷⁹Se is a radionuclide present in high-level nuclear wastes and is of particular environmental interest due to its long half-life. Degradation of waste repositories over time may lead to its release into the wider environment in the form of Se (IV). While Se is an essential element for flora and fauna, it is known to be toxic when present at high concentrations. One of the best-known mechanisms that immobilize Se and limit its mobility in the wider environment is by sorption to iron oxides / hydroxides. These phases may be formed from the corrosion of metal canisters used to contain waste forms under alkaline conditions, providing suitable sinks for Se. Most studies have focused on poorly crystalline ferrihydrite or hydrous goethite (e.g. Hayes et al, 1987; Manceau and Charlet, 1994; Das et al, 2013) due to their high surface areas and reactivity. However, since these phases are metastable with respect to other stable Fe-oxides phases (e.g. hematite, magnetite, maghemite), it is possible that these phases will eventually transform to more stable phases which may result in either the release or retention of previously uptaken Se. There is very limited information on the fate of Se during this transformation process. Thus, it is the objective of this study to clarify the behavior of Se during transformation of poorly crystalline Fe-hydroxides to crystalline Fe-oxides.

Se (IV) was co-precipitated with ferrihydrite by adding base to a solution containing both Fe and Se to raise the pH to 10. The resulting slurries were then aged at 80°C for 4 days to induce transformation. Solids and liquids were then separated by centrifugation and filtration. Solution samples were analyzed for Se concentrations while solids were characterized using x-ray diffraction (XRD), infrared (IR) spectroscopy and x-ray absorption spectroscopy (XAS). Results of solution analyses show that co-precipitation sequesters approximately 90% of Se from the solution. Transformation of the ferrihydrite to crystalline hematite and goethite phases at alkaline conditions results in the release of a fraction of the initially sequestered Se, such that only approximately 50% of the original Se is retained by the solids. Spectroscopic studies of the solids suggest that Se is sequestered from solution by sorption on ferrihydrite and not by the formation of an independent Fe-Se phase. During ferrihydrite transformation to crystalline hematite and goethite, Se is similarly retained by sorption on the crystalline phases. The release of Se during transformation may thus be attributed to the lower sorption capacity of crystalline Fe-oxides for Se. The results of this study thus show that post-uptake behavior of hazardous elements must be considered during long-term assessments of high-level waste repository conditions.

Keywords: Selenium behavior, iron oxide transformation, nuclear waste disposal

人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価手法の構築にむけて

For development of evaluation technique for long term behavior between engineered barrier and host rock in near field

*西本 壮志¹、新 孝一¹、澤田 昌孝¹、岡田 哲実¹、渡邊 保貴¹、渡辺 高志²、弘中 秀至²、中島 雅之³、納谷 朋広³、荒牧 雄馬³、辻野 敏文³、荒井 郁岳⁴、橋爪 秀夫⁴、窪田 健二¹、司代 明¹、宮川 公雄¹、小林 正人⁵
 *Soshi Nishimoto¹, Koich Shin¹, Masataka Sawada¹, Tetsuji Okada¹, Yasutaka Watanabe¹, Takashi Watanabe², Shuji Hironaka², Masayuki Nakajima³, Tomohiro Naya³, Yuma Aramaki³, Toshifumi Tsujino³, Fumitaka Arai⁴, Hideo Hashizume⁴, Kenji Kubota¹, Akira Shidai¹, Kimio Miyakawa¹, Masato Kobayashi⁵

1. (一財) 電力中央研究所、2. (株) 構造計画研究所、3. (株) ダイヤコンサルタント、4. (株) ジオデザイン、5. (公財) 原子力環境整備促進・資金管理センター

1. Central Research Institute of Electric Power Industry, 2. Kozo Keikaku Engineering Inc., 3. Dia Consultants Co., Ltd, 4. Geodesign Co., Ltd., 5. Radioactive Waste Management Funding and Research Center

高レベル放射性廃棄物処分において、オーバーパック及び緩衝材の製作・施工技術に対して深部地下環境を考慮した長期健全性の観点から工学的信頼性の向上を図るため、種々の判断指標の提示に向けた品質に係わる知見の拡充、および健全性評価技術の構築に係わる検討が実施されている。この中で人工バリア材料であるオーバーパックや緩衝材の品質に係る実験、調査、検討が実施されているが、実処分環境を考慮するためには人工バリア周辺の岩盤も対象に含めていく必要がある。また、人工バリアの長期挙動を評価する手法として、実験による現象理解、モデル化、数値解析などが挙げられる。実験的手法では、実際に生じた現象を評価することが可能である一方で、数十～数百年といった長期の現象を直接評価することが困難である。そのため長期挙動評価はモデル化や数値解析が必要であるが、解析による長期挙動評価の信頼性の向上には、解析手法を検証する実験的な裏付けが必要である。このような背景を受け、本研究では人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価の検証手法の構築を目的とする。

本研究では、長期挙動評価技術（数値解析手法など）の妥当性や検証手法の構築のために、以下の着眼点で実施している。

- ①人工バリアの長期健全性に影響をおよぼす環境因子（熱、力学、水理等）を整理する。
- ②数値解析コードは熱－水理－力学（THM）現象が連成可能なものを使用する。
- ③長期挙動相当のデータは、人工バリアの定置後に曝される多様な環境条件を考慮し、遠心力場の相似則に基づき時間加速実験が可能な遠心力模型実験を実施して得る。
- ④閉鎖後の再冠水により廃棄体周辺が飽和に向かう数十年程度の期間において力学的挙動が最も大きく生じると考えられる。このため遠心力模型実験における評価期間は、飽和後の挙動もある程度示せる期間とする。
- ⑤数値解析の入力値の不確実性の低減のため、模型実験に使用する材料のデータを要素実験で取得し、数値解析に入力する。
- ⑥数値解析コードのパラメーターの感度解析を実施し、パラメーターの感度を明らかにする。
- ⑦数値解析と遠心力模型実験の結果を比較し解析コードを高度化し、長期挙動評価技術の検証に資する。

本研究は経済産業省の委託により実施した平成27年度地層処分技術調査等事業 処分システム工学確証技術開発の成果の一部である。

キーワード：地層処分、長期挙動評価、遠心力模型実験、連成解析

Keywords: Geological disposal, Long term behavior evaluation, Centrifuge model test, Coupled analysis

緩衝材中のオーバーパックスの沈下を引き起こす未検討のメカニズム

A mechanism of container sinking in bentonite buffer hitherto not considered

*新 孝一¹

*Koichi Shin¹

1.一般財団法人 電力中央研究所

1. Central Research Institute of electric power industry

放射性廃棄物の地層処分の方法として、深部岩盤内に化学的に安定で透水性の低いベントナイトなどからなる緩衝材中に、廃棄体容器を埋設する概念が検討されている。廃棄体の平均的な比重は6~7程度で緩衝材よりかなり重いため、沈下して緩衝材の機能を損ねるシナリオに対し検討が行われている。既往の沈下の評価では、廃棄体容器の沈下を緩衝材の力学的な変形の観点から検討している。

本発表では、地層処分技術の分野でこれまで検討されていない緩衝材の化学的な変形による沈下の概念を提起する。ここで化学的な変形とは、緩衝材を構成する鉱物の圧力溶解と拡散による物質移動、沈殿を通じた変形である。このような化学的な変形は、地殻において様々なスケールで生じている現象であることを既往研究をレビューして示す。また、地層処分の深度領域においても生じる現象であることを既往研究のレビューを通じて示す。

100万年にもわたる将来を評価する必要がある地層処分においては、廃棄体容器の沈下についてこの化学的な変形の観点からも検討する必要がある。

キーワード：オーバーパックス沈下、化学的な変形、ベントナイト、圧力溶解、人工バリア、放射性廃棄物地層処分

Keywords: Canister sinking, Chemical deformation, Bentonite, Pressure solution, Engineered barrier, Radioactive waste disposal

高アルカリ条件におけるスメクタイトの安定性に関するナチュラルアナログ研究

- フィリピン パラワン島 Narra地区でのアクティブサイトの探索 -

Natural analogue study on the stability of smectite under hyper-alkaline conditions

- Exploration of active sites at Narra in Palawan Island, Philippines -

*Shimbashi Misato¹、佐藤 努¹、大竹 翼¹、藤井 直樹²、山川 稔²、西村 政展³、三好 悟³、Alexander Russell⁴、Arcilla Caloy⁵*Misato Shimbashi¹, Tsutomu Sato¹, Tsubasa Otake¹, Naoki Fujii², Minoru Yamakawa², Masanobu Nishimura³, Satoru Miyoshi³, Russell Alexander⁴, Caloy Arcilla⁵

1.北海道大学工学院、2.原子力環境整備促進・資金管理センター、3.大林組、4.Bedrock

Geosciences、5.National Institute of Geological Sciences, University of the Philippines

1.Graduate School of Engineering, Hokkaido University, 2.RWMC, 3.Obayashi Corporation, 4.Bedrock

Geosciences, 5.National Institute of Geological Sciences, University of the Philippines

原子力発電に伴い発生する放射性廃棄物は地層処分されることが考えられており、廃棄物を長期間、安全に隔離するために人工バリアが設置される。スメクタイト族の粘土鉱物は、低い透水性や高い陽イオン交換容量といった物性を持ち、それらの特有な物性を活かして、スメクタイトは人工バリアとして機能することが期待されている。しかし、周囲にあるセメント系材料から将来溶出してくる高アルカリ間隙水とスメクタイトが反応し、スメクタイトが人工バリアとしての機能を十分に長期間、果たせないことが懸念されている。その為、高アルカリ条件におけるスメクタイトの安定性を評価するために数々の室内実験が行われているが、室内実験で観測している反応と実際の処分環境で起こる反応には大きな隔たりがあるため、室内実験の結果のみから評価をすることには不確実性が残る。そこで、実際の処分環境で起こり得る反応に類似(アナログ)した反応が起きている天然のサイトを調べることによって、高アルカリ条件におけるスメクタイトの安定性評価に繋げるナチュラルアナログ研究が必要となる。特に、観測したい反応が今もなお続いているアクティブサイトでの研究が求められるが、スメクタイトと高アルカリ水に関するアクティブサイトでのナチュラルアナログ研究は数少ない。そこで本研究では、処分環境にアナログした適当なサイトを発見し、そこで起こっているスメクタイト-高アルカリ水相互作用を理解することを目的とした。

アクティブサイトの探索のために、フィリピン パラワン島 Narra地区でトレンチ調査を行った。トレンチサイトの地下を流れていた水試料の分析から、蛇紋岩化作用によって生成された高アルカリ水が流れていたことがわかった。トレンチの土試料のXRD分析より、スメクタイト族の3八面体型のFeスメクタイトの存在が確認された。SEM観察から、高アルカリ水からの沈殿物であるCSHの存在が認められた。これは、スメクタイトと高アルカリ水が共存していることの証拠となり、スメクタイトと高アルカリ水に関するアクティブサイトの発見を強く支持した。SEMを用いたFe型スメクタイトの産状観察と地球化学モデリングを用いた熱力学的考察から、本調査地に認められたFe型スメクタイトは高アルカリ水によって超塩基性の一次鉱物に変質し、生成されたものであることが考えられた。したがって本調査地で認められる反応は、人工バリアからFeが溶出してくることが考えられる処分環境において、セメントからの高アルカリ水が作用するとFe型スメクタイトが生成されるという反応とのアナログ性を持っていることがわかった。また、Fe型スメクタイトが認められた層の上層である、表層水からの沈殿物であるカルサイトから成る層で発見した木片の年代測定をしたところ、約4500年前のものであることがわかった。これは、地質学的タイムスケールにおいて、そのぐらいの時期に高アルカリ水の湧出が始動したことがわかり、処分環境で比較的早い時期にFe型スメクタイトが生成され得ることが示唆された。

本研究は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である地層処分技術調査等事業のナチュラルアナログ調査の成果の一部である。

キーワード：ナチュラルアナログ研究、Fe型スメクタイト、地層処分、アクティブサイト、高アルカリ水

Keywords: Natural analogue study, Fe-smectite, geological disposal, active site, hyper-alkaline fluids

花崗岩中の破砕帯の活動性評価 - 高速増殖原型炉もんじゅ敷地内破砕帯調査を例として -
Activity evaluation of fracture zone in granitic rock -Case study on the survey of
fracture zones at the "Monju" site

*石丸 恒存¹、島田 耕史¹、末岡 茂¹、安江 健一¹、丹羽 正和¹、梅田 浩司¹

*tsuneari ishmaru¹, Koji Shimada¹, Shigeru Sueoka¹, Ken-ichi Yasue¹, Masakazu Niwa¹, Koji Umeda¹

1. 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

背景：日本原子力研究開発機構の高速増殖原型炉もんじゅ（以下、「もんじゅ」）においては、原子力規制委員会（以下、「規制委員会」）からの指示を受け、もんじゅ敷地内破砕帯の活動性に関する調査を進めてきた。平成26年3月末に「全体とりまとめ報告」を規制委員会に提出した以降も調査を継続して追加データを補強し、もんじゅ敷地内破砕帯に活動的であることを示す証拠は認められないことを示した。

調査概要：もんじゅ敷地のある敦賀半島北部の基盤岩類は白亜紀後期～古第三紀の江若（こうじゃく）花崗岩より構成される。江若花崗岩の年代としては、ジルコンU-Pb年代で 68.5 ± 0.7 Maの値を得ている。敷地内破砕帯の活動性に関する調査では、原子炉建物基礎岩盤部の破砕帯で最長だった α 破砕帯の北方延長方向において剥ぎ取り調査を実施し、そこで確認された複数の破砕帯の切断関係や変位量、破砕帯構造の特徴等を把握した。もんじゅは建設時に地山を削っているため、敷地内破砕帯の活動性評価では、上載地層法が適用できない状況であり、確立された方法論が無いなかで構造地質学や地球年代学等の手法を組み合わせることで調査を進めた。

破砕帯の活動性評価：剥ぎ取り箇所においては、ENE-WSW系とNNE-SSW系の2系統（それぞれ α 系、 β 系と呼ぶ）の破砕帯を認定し、それらの切断関係から、 β 系よりも α 系が相対的に新しい構造であることを確認した。 α 系破砕帯は、全体としては左横ずれセンスの幅数cmの粘土脈で、幅は不規則に変化し、粘土細脈が網目状に発達し、延性的に変形している部分が観察される。 α 系破砕帯に着目して切断関係を精査した結果、約10cmの右ずれ変位を伴う幅1cm程度以下の破砕帯（ α -3a1と呼ぶ）を最後に動いた面（最新面）と特定した。この α -3a1破砕帯の変形構造を研磨片や薄片で観察した結果、葉片状カタクレサイトを構成する黒雲母の塑性的な変形が確認できた。黒雲母の塑性変形は150～250℃程度以上で生じるとされ（Stesky, 1978; Lin, 1999など）、剥ぎ取り箇所に見られる最新面以外の α 系、 β 系の破砕帯中にも黒雲母の塑性的な変形が普遍的に観察できる。このことから、敷地内破砕帯は地下数kmの深部高温環境下で形成された古い時代の小規模な地質構造と推定され、最近の地表付近の環境下で活動した痕跡はないと言える。

また、剥ぎ取り箇所では、玄武岩の貫入が見られK-Ar年代で約19Maを示す。玄武岩岩脈の一部は、花崗岩との接触境界のチルドマージンの分布状況等から、既に存在していた α 系破砕帯を弱面として部分的に破砕帯に沿って、これを押し開いて貫入したと考えられる。玄武岩岩脈中には、不規則で連続性に乏しい局所的な変形構造が観察でき、複数回の方解石脈の発達が見られる。方解石脈は破砕帯に沿う玄武岩と花崗岩との境界に平行に発達する場合もある。境界部の方解石脈中には高温（150～300℃）での変形を示す変形双晶

（type II ;Burkhard, 1993）が普遍的に鏡下観察でき、方解石脈自体にはせん断による大きな破壊を受けた痕跡はない。このことから、方解石脈が高温環境下で形成された以降に、破砕帯に沿う玄武岩と花崗岩との境界は動いていないと言える。玄武岩岩脈中の局所的な変形構造や方解石脈の発達は、玄武岩が貫入してから十分に冷えて固まるまでの過程で生じたものである可能性が考えられる。

破砕帯の活動性評価においては、上載する地層から最新の活動年代を押さえ評価することが一般的である。しかし、上記のように、破砕帯の構造や構成鉱物あるいは破砕帯に沿うまたは横断するような鉱物脈や粘土脈の特徴を詳細に調査し、破砕帯の形成環境（温度条件等）を把握することで、地表付近で繰り返し活動したか否かについて推定が可能な場合がある。今回の敷地内破砕帯調査は、上載地層法が適用できない花崗岩中の破砕帯においても活動性評価が可能なことを示した例と考える。

【引用文献】Stesky, R.M. (1978), Canadian Journal of Earth Sciences, 15, 361-375 ; Lin, A. (1999), Tectonophysics, 304, 257-273 ; Burkhard, M. (1993), Journal of Structural Geology, 15, 351-368

キーワード：高速増殖原型炉もんじゅ、破碎帯調査、江若花崗岩

Keywords: fast breeder reactor "Monju", survey of fracture zone, Kojyaku granite

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (1)地質環境長期変動モデル (東濃地域)

Geosphere Stability Project (1) Development of Geological-Evolutionary Model in the Tono area

*尾上 博則¹、小松 哲也¹、安江 健一¹、岩月 輝希¹、竹内 竜史¹、加藤 智子¹、笹尾 英嗣¹、梅田 浩司¹

*HIRONORI ONOE¹, TETSUYA KOMATSU¹, KEN-ICHI YASUE¹, TERUKI IWATSUKI¹, RYUJI Takeuchi¹, TOMOKO KATO¹, EIJI Sasao¹, KOJI UMEDA¹

1.国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

1.Japan Atomic Energy Agency

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、処分施設閉鎖後、数万年以上に及び時間スケールを対象とした安全評価が実施される。この安全評価では、将来の自然現象に伴う地質環境特性の長期安定性の評価が重要であり、そのためには超長期の地質環境の変動を考慮できる数値モデル（以下、地質環境長期変動モデル）を構築することが必要である。

日本原子力研究開発機構では、地質環境長期変動モデルの構築技術の開発を目的として、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例とした研究を実施しており、これまでに地形・地質、水理、地球化学、地表環境の分野ごとに地質環境長期変動モデルに対する影響因子（FEP; Features, Events and Processes）を抽出するとともに、影響因子の相互関係を整理し、長期変遷シナリオの整備を進めてきた。また、地形・地質及び地表環境の長期変遷シナリオを考慮した水理モデルを構築し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価や地下水流動特性評価における重要な影響因子の抽出を目的とした検討を実施した。

本稿では、山間部として岐阜県南東部の東濃地域を事例とした地質環境長期変動モデルの技術開発に関するこれまでの取り組み及び成果の概要を紹介する。

実施概要及び主な成果

東濃地域を事例とした地質環境長期変動モデルの開発は、土岐市西方の渓谷部より上流部に位置する約20 km四方の土岐川流域（以下、モデル化領域）を対象として実施した。これまでに整理されたモデル化領域周辺における過去百万年から現在までの地形・地質発達史に基づき、現在及び過去の特徴的な4つのステージ（300万年前、100万年前、45万年前、14万年前）を設定した。各ステージの地形・地質モデルは、地形・地質発達史から「古地形面の復元」、「断層山地の隆起」、「濃尾傾動運動による地域全体の隆起」、「地形の開析」の4点を考慮しつつ、既存情報及び地理情報システムを活用して構築した。

水理モデルでは、地形・地質モデルをベースとして空間的に離散化することで構築した各ステージの三次元水理地質構造モデルを用いて定常状態の地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、東濃地域の地下水流動特性に関わるFEPの相関等を参考に、地下水流動特性に大きな影響を及ぼす可能性がある影響因子として「地形変化」、「涵養量の変化」及び「断層の透水性」を抽出し、これらの影響因子が地下水流動特性の長期変動に及ぼす影響の評価を目的とした感度解析を実施した。なお、涵養量の変化については、地表環境条件に基づき推定した過去（氷期・間氷期）の涵養量を感度パラメータとして適用した。これらの影響因子に起因する地下水流動特性の長期変動については、感度解析結果に基づく統計解析で評価し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定を試みるとともに、東濃地域の地下水流動特性評価における重要因子の抽出などを検討した。さらに、地球化学的な観点から地下水流動解析結果を整理した。上記の検討で得られた主な成果を以下に示す。

・地形・地質モデル、水理モデル及び地表環境モデルとの統合を図りつつ、山間部を対象とした場合の過去百万年以上の時間スケールにおける古地形の復元及び地形・地質モデル及び水理モデルの構築、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価、ならびに地下水流動特性評価における重要因子の抽出のためのアプローチを具体例として示した。

・地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定にあたっては、地下水の移行時間が有効な評価指標であり、影響因子による地下水流動特性の影響度及び変化量の定量的な評価が可能であることを示した。

・山間部である東濃地域での長期変遷の地下水流動特性評価における重要因子として、地形変化が抽出され

た。

・地下水流動解析結果と地下水の地球化学特性（化学組成、pH・酸化還元電位）分布との定性的な比較検討の結果、水理学的及び地球化学的な観点の両面から数千年～数万年の時間スケールの地下水の滞留領域が存在することを明らかにした。

今後の課題

今後は、これまでの検討結果を踏まえて、各地質環境長期変動モデルの構築に関する情報、ノウハウ及び各モデルが有する不確実性を整理するとともに、各地質環境長期変動モデルの統合化を図る。さらに、平野部（幌延地域）における検討結果と比較しつつ、山間部における地質環境特性の変動を理解するための調査からモデル化解析・評価に至る一連の方法論の体系化を進める。

「本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。」

キーワード：地質環境長期安定性、地質環境長期変動モデル、高レベル放射性廃棄物、地層処分、東濃地域、山間部

Keywords: Long-term stability of the geological environments, Geological-Evolutionary Model, High-level radioactive waste, Geological disposal, Tono area, Mountain area

地質環境長期安定性評価確証技術開発

(2)地質環境長期変動モデル(幌延地域)

Geosphere Stability Project

(2) Development of Geological-Evolutionary Model in the Horonobe area

*松岡 稔幸¹、小松 哲也¹、安江 健一¹、尾上 博則¹、大山 卓也¹、岩月 輝希¹、笹尾 英嗣¹、梅田 浩司¹*Toshiyuki MATSUOKA¹, Tetsuya KOMATSU¹, Ken-ichi YASUE¹, Hironori ONOE¹, Takuya OHYAMA¹, Teruki IWATSUKI¹, Eiji SASAO¹, Koji UMEDA¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、処分施設閉鎖後、数万年以上に及ぶ時間スケールを対象とした安全評価が実施される。この安全評価では、将来の自然現象に伴う地質環境特性の長期安定性の評価が重要であり、そのためには超長期の地質環境の変動を考慮できる数値モデル(以下、地質環境長期変動モデル)を構築することが必要である。

日本原子力研究開発機構では、地質環境長期変動モデルの構築技術の開発を目的として、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例とした研究を実施しており、これまでに地形・地質、水理、地球化学、地表環境の分野ごとに地質環境長期変動モデルに対する影響因子(FEP; Features, Events and Processes)を抽出するとともに、影響因子の相互関係を整理し、長期変遷シナリオの整備を進めてきた。また、地形・地質及び地表環境の長期変遷シナリオを考慮した水理モデルを構築し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価や地下水流動特性評価における重要な影響因子の抽出を目的とした検討を実施した。

本稿では、平野部として北海道北部の幌延地域を事例とした地質環境長期変動モデルの技術開発に関するこれまでの取り組み及び成果の概要を紹介する。

実施概要及び主な成果

幌延地域を事例とした地質環境長期変動モデルの開発は、海水準変動による海岸線の移動や地形・地質の変化などを考慮して、海域(大陸棚外縁~汀線)と陸域(平野及び丘陵)を含む、東西約90km、南北約30kmの領域(以下、モデル化領域)を対象として実施した。これまでに整理されたモデル化領域周辺の過去数百万年から現在までの地形・地質発達史に基づき、現在及び過去の特徴的な2つのステージ(モデル化領域東部の宗谷丘陵が陸化:約1Ma、宗谷丘陵の西方が陸化:約330ka)を設定した。両ステージの地形・地質モデルは、地形・地質発達史から約2.3Ma以降の東西圧縮応力場に伴う地形・地質の変化(断層・褶曲運動と隆起・侵食、沈降・堆積、割れ目の形成発達など)を考慮し、既存情報及び地理情報システムを活用して構築した。

水理モデルでは、地形・地質モデルをベースに構築した三次元水理地質構造モデルを用いて定常状態の地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、地下水流動特性に関わるFEPの相関等を参考に、地下水流動特性に大きな影響を及ぼす可能性がある影響因子として「地形変化」、「気候変動(涵養量及び海水準変動)」、「断層分布」、「断層や地層の透水性」及び「氷期における不連続永久凍土の形成」を抽出し、これらが地下水流動特性に及ぼす長期変動の評価を目的とした感度解析を実施した。なお、不連続永久凍土については、現在の湖や河川部などにタリク(未凍結部)を設定し、その影響を検討した。長期変遷に伴う地下水流動特性の変化は、感度解析結果に基づく統計解析で評価し、地下水流動特性評価における重要因子の抽出などの検討を行うとともに、地球化学的な観点から地下水流動解析結果を整理した。主な成果を以下に示す。

- ・平野部を対象とした過去百万年の時間スケールにおける古地形及び地質構造の復元、地形・地質モデル及び水理モデルの構築、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価、ならびに地下水流動特性評価における重要因子の抽出のためのアプローチの具体例を示した。

- ・地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定には、地下水の移行時間が有効な評価指標であり、影響因子による地下水流動特性の影響度及び変化量の定量的な評価が可能であることを示した。

- ・平野部である幌延地域での長期変遷の地下水流動特性評価における重要因子として地形変化と気候変動が抽

出された。また、氷期における不連続永久凍土の影響は、気候変動の影響と比べて2オーダー程度小さいことが確認できた。

- ・平野部は山間部と比較して地下水流動は緩慢であるものの、自然現象の変化による影響を受けやすい特徴があることを定量的に示した。
- ・地下水流動解析結果と地下水の地球化学特性（化学組成とpH・酸化還元電位）分布との定性的な比較検討の結果、水理的及び地球化学的な観点の両面から数十万年～百万年の時間スケールの地下水の滞留領域を示した。

今後の課題

今後は、これまでの検討結果を踏まえて、各地質環境長期変動モデルの構築に関する情報、ノウハウ及び各モデルが有する不確実性を整理するとともに、各地質環境長期変動モデルの統合化を図る。また、山間部（東濃地域）における検討結果と比較しつつ、平野部における地質環境特性の変動を理解するための調査からモデル化解析・評価に至る一連の方法論の体系化を進める。

「本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。」

キーワード：地質環境長期安定性、地質環境長期変動モデル、高レベル放射性廃棄物、地層処分、幌延地域、平野部

Keywords: Geosphere stability, Geological-evolutionary model, High-level radioactive waste, Geological disposal, Horonobe area, Plain area

地質環境長期安定性評価確証技術開発（3）後背地解析技術
Geosphere Stability Project (3) Provenance analysis techniques

*徳安 佳代子¹、安江 健一¹、小松 哲也¹、田村 糸子¹、堀内 泰治¹

*Kayoko Tokuyasu¹, Kenichi Yasue¹, Tetsuya Komatsu¹, Itoko Tamura¹, Yasuharu Horiuchi¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

日本の山地では一般的に、隆起に伴う高度の増大と同時に、侵食速度が増大する傾向がある。侵食速度が隆起速度と動的平衡状態にある山地では、時間が経っても平均高度が一定に保たれるため、山地から平野に至るスケールでの地下水の流れには時間経過による大きな変化が生じないと考えられる。一方、隆起開始から時間が十分に経過しておらず動的平衡状態に至っていない山地は、今後ある期間で高度の増大に伴って、地下水の流れに変化が生じる可能性がある。放射性廃棄物の地層処分においては、このような地形変化に伴う地下水の流れなどの地質環境の把握が重要である。そのため、本技術開発では、山地の形成過程を把握するための後背地解析技術として、堆積物中の石英粒子の電子スピン共鳴（以下、ESR）の信号特性を用いた手法の開発を進めている。

この手法開発は、東濃地域に分布する堆積物を事例に実施した。東濃地域には、中新世の瑞浪層群と中新～更新世の東海層群（ここでは下位の土岐口陶土層と上位の土岐砂礫層に区分される）が広く分布しており、その基盤は北部～北東部では主に美濃帯の堆積岩と濃飛流紋岩、山陽帯の花崗岩であり、南部では主に領家帯の花崗岩類である。このような地質的な特徴から、堆積物の供給源を特定することが可能な地域であり、これまでに土岐砂礫層の礫などを用いた山地形成に関する研究が行われてきた（例えば、森山，1990）。

ESR測定に用いた試料は、木曾川の支流である付知川と阿寺断層の間に位置する採石場に露出する土岐砂礫層中の砂層（8試料）及び、東濃地域とその周辺に分布する基盤岩（濃飛流紋岩（3試料）、山陽帯及び領家帯の花崗岩類（7試料））である。採石場では、濃飛流紋岩を層厚約30mの土岐砂礫層が覆っている。この砂礫層に含まれる礫種は、下部が濃飛流紋岩の礫だけであるのに対し、上部が濃飛流紋岩・花崗岩・玄武岩の複数の礫である。このことから、砂礫層の下部と上部では後背地が異なることが想定される。

砂層と基盤岩から石英粒子を抽出し、ESR測定（Al、Ti-Li、E₁'中心信号の測定）を行った。その結果、下部の砂層の信号強度は濃飛流紋岩の値に近く、上部の砂層の信号強度は、山陽帯花崗岩に近い値を示した。この結果と堆積時期に関する情報を踏まえると、下部の堆積時（約3.9～2.0Ma）には流域に花崗岩が露出しておらず、上部の堆積時（約2.0Ma以降）に花崗岩が露出した可能性が推定でき、ESR信号特性を用いることで堆積物の供給源の変化を推定できる可能性が見出された。今後、地球化学分析や古流向解析などの他の手法と組み合わせることで、より詳しい後背地解析が実現できると考えられる。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

キーワード：地質環境長期安定性、後背地解析技術、電子スピン共鳴法、高レベル放射性廃棄物、地層処分

Keywords: Geosphere stability, Provenance analysis techniques, Electron Spin Resonance method, High-level radioactive waste, Geological disposal

地質環境長期安定性評価確証技術開発(4) 地殻変動予測技術

Geosphere Stability Project (4) Numerical modeling techniques for crustal movement

*渡部 豪¹、奥山 哲²、浅森 浩一¹、梅田 浩司³*Tsuayoshi Watanabe¹, Satoshi Okuyama², Koichi Asamori¹, Koji Umeda³

1.日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、2.気象庁 気象研究所、3.弘前大学大学院 理工学研究科

1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, 2.Meteorological Research Institute,

3.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

高レベル放射性廃棄物の地層処分における数万～数十万年の長期間の地質環境のモデル化は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来への外挿が基本となる。しかし、地形・地質学的に推測される過去のイベントや変動パターンは、年代や地域によって識別できる分解能が異なり、将来の変化に対する外挿結果に纏わる不確かさも様々である。日本列島について、この手法の適応性について考えてみると、日本列島は、プレート沈み込みにより長期にわたって短縮変形を受け、複雑な地形・地質構造を形成している。これは、時間スケールの異なる変動の重ね合わせであり、長期間の変動を推定する際、可能な限り個々の変動の時間変化を考慮する必要がある。ただ、全ての変動について時間変化を追うことは現実的に不可能である。したがって、より現実的にプレート間相互作用をモデル化し、長期間の地殻変動を推定できる手法を構築できれば、外挿による地殻変動予測に対する不確かさの軽減に繋がると考えられる。そこで本研究では、地質学的データから推定されるひずみ速度分布より、長期間のプレート間相互作用をモデル化し、地球物理学的観測から推定される地殻の粘弾性不均質を考慮した数値シミュレーションに応用することで、長期間の地殻変動を推定する手法を構築する。このうち本報告では、(1)活断層データを用いた地質学的ひずみ速度の推定及び(2)粘弾性不均質を考慮したシミュレーションについて報告する。

(1) 活断層データを用いた地質学的ひずみ速度の推定

産業技術総合研究所活断層データベースに掲載される活断層のうち418セグメントを対象とし、断層パラメータより1000年間の地震モーメント・モーメントテンソル密度を求め、Kostrov (1974)^[1]の定式に従い、概ね80x80 km、深さ15 kmの領域に対して、水平方向のひずみ速度を推定した。

その結果、日本列島における大局的なひずみ速度の特徴として、太平洋・フィリピン海プレートの沈み込み方向への短縮が卓越することが明らかになった。中部日本を含む西南日本においては、概ね南北～北東-南西方向の伸長が、北陸～中部地方内陸部では、新潟-神戸歪集中帯付近で大きなひずみ速度が推定され、牛首、跡津川、高山・大原断層帯を含む領域では、短縮のみでなく顕著な伸長(N96.8～97.4°E方向に $3.0\sim 5.2\times 10^{-8}$ /yrの短縮、N6.8～7.4°E方向に $1.5\sim 2.6\times 10^{-8}$ /yrの伸長)も認められた。四国地方では、N108.0～124.7°E方向に $1.5\sim 2.7\times 10^{-8}$ /yrの短縮、N18.0～34.7°E方向に $1.5\sim 2.6\times 10^{-8}$ /yrの伸長が示された。九州地方では、九州北部と島原-別府地溝帯の東部と西部に活断層が分布するが、平均変位速度が小さいために大きなひずみ速度は得られていないものの、島原-別府地溝帯内の領域で、N4.5～9.6°E方向に $9.6\times 10^{-9}\sim 1.4\times 10^{-8}$ /yrの伸長ひずみ速度が得られた。

以上の結果は、長期間のプレート間相互作用に起因すると考えられ、数万年以上の時間スケールを対象とした地殻変動シミュレーションを行う場合、これらの地域性を考慮することが重要であると考えられる。

(2) 粘弾性不均質を考慮したシミュレーション

2011年東北地方太平洋沖地震(東北地震)の発生後、茨城・福島県境付近の地殻浅部において、正断層型の群発地震活動が活発化した。東北地震前の応力テンソルインバージョンでは、深さ15 km以浅で正断層型、それ以上で逆断層型を示し、浅部では東北地震前から伸張場であった(Yoshida et al., 2015^[2])。また、この領域では局所的な隆起も報告されており、特異なテクトニクスであることを示唆している。これに関し、地震波トモグラフィーやMT法の結果、群発地震震源域下に流体の存在を示唆する低地震波速度・低比抵抗域が推定されており(Umeda et al., 2015^[3])、この地域の地殻変動との関連性が示唆される。ここでは、地殻変動への地殻流体の寄与について検討するため、低比抵抗域(流体分布域)をMaxwell粘弾性体として表現した二次元有限要素法による地殻変動シミュレーションを実施した。

得られた100年後の鉛直変位では、流体分布域の上部で隆起が生じ、測地的に観測された鉛直変位パターン

(Suwa et al., 2006^[4]) と調和的な傾向を示す。また、水平応力は流体分布域の直上で圧縮、それ以浅では伸張応力を示し、Yoshida et al. (2015)^[2] の結果と調和的であった。これらは、流体分布域の変形が周囲より大きく、その上部にある地殻のみで圧縮応力を支えた結果、その部分で座屈が生じることに起因すると考えられる。以上の結果は、地殻流体が周辺の地殻変動に密接に関与しており、シミュレーションにおいて地殻の粘弾性不均質を考慮することが重要であることを示唆する。

[1] Kostrov (1974): Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol.1, 1974, pp.23-40.

[2] Yoshida et al. (2015): Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations, *Tectonophysics*, vol.647-648, 2015, pp.63-72.

[3] Umeda et al. (2015): Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol.120, 2015, pp.2279-2291.

[4] Suwa et al. (2006): Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three dimensional displacement field, *Journal of Geophysical Research*, vol.111, 2006, doi:10.1029/2004JB003203.

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

キーワード：地層処分、長期間のプレート間相互作用、地質学的ひずみ速度、地殻変動シミュレーション、粘弾性不均質

Keywords: deep geological repository of high-level radioactive waste, plate interaction for a long time, geological strain rate, simulation of crustal deformation, visco-elastic heterogeneity

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (5)地下水涵養量推定技術

Geosphere Stability Project (5) Estimation of Groundwater Recharge Rate in Consideration of long-term Changes in Surface Hydrological Environment

*竹内 竜史¹、尾上 博則¹、安江 健一¹

*Ryuji Takeuchi¹, HIRONORI ONOE¹, Ken-ichi Yasue¹

1.日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分を考慮する数万年以上に及ぶ時間スケールでは、気候変動や隆起・侵食による地形変化などにより地表水文環境に変化が生じる。特に、降水量、蒸発散量、河川流量の変化は、地下深部の地下水流動の上部境界条件となる地下水涵養量を変化させるため、長期的な地表水文環境の変化を見込んだ地下水涵養量の推定が重要となる。本技術開発では、山間部を対象として、過去から現在における気候変動と地形変化を考慮した地下水涵養量の推定を実施した。

地下水涵養量の推定方法

地下水涵養量は水収支法により推定する。水収支法を用いるためには、地表水文要素である降水量、蒸発散量および河川流量の推定が必要となる。

既往研究で報告された既存の観測データを整理した結果から、降水量と蒸発散量は気温に対して概ね正の相関関係を示すことが確認されている¹⁾。したがって、過去の気候から気温を推定することにより、降水量と蒸発散量を算出することができる。河川流量については、流域の地形の特徴に基づいて算出される河川流量に関する指標（流出指標）と同流域の河川流量データ、流域の降水量データから、降水量に対する河川流量の割合（流出率）を算出する方法²⁾を適用する。

山間部における適用例

本手法の適用性を確認するため、中部地方南部の比較的低標高で小起伏な山地～丘陵を流域とする庄内川（流域面積約340km²）を例に、地下水涵養量を推定した。対象とする時間断面は、対象地域の地形モデルが作成されている100万年前、45万年前、14万年前および現在とし³⁾、各時間断面の地形及び気候条件（氷期と間氷期）を考慮した。

対象地域における過去30万年の気温は、寒冷な時期と温暖な時期で約8～10℃の気温差で推移しており⁴⁾、この結果を基に、現在の平均気温を基準として氷期、間氷期の気温を算出した。

推定された過去の気温に対し、降水量は、太平洋沿岸、北アジア、北ヨーロッパ、北アメリカの観測データ（気温と降水量）¹⁾から得られる相関式、蒸発散量は気温と実蒸発散量の関係¹⁾に東濃地域の観測結果⁵⁾を考慮した関係式を用いて推定した。

河川流量は、数値標高モデル（DEM）で表現される現在の地形と過去の地形に共通する流出指標を求め、現在の地形の流出指標と観測結果から得られる流出率との相関式に過去の地形の流出指標を代入し算出した。

これらの結果、観測データ等に基づく現在の地形で間氷期の気候条件での地下水涵養量118mm/年に対し、各時間断面の地下水涵養量は45万年前（氷期）118～172%、45万年前（間氷期）147～273%、14万年前（氷期）81～135%、14万年前（間氷期）88～196%と推定された。なお、現在の地形で氷期の気候条件下では58～72%となった。過去の氷期においては、現在の間氷期の気候条件よりも降水量や蒸発散量が減少するにもかかわらず、地下水涵養量は現在より増加する結果となった。これは、地形変化に伴う河川流量の変化が地下水涵養量の変化に大きな影響を与えることを示唆している。

一方で、起伏が乏しく平坦な地形が推定された100万年前については、地形の特徴に基づく河川流量の推定が困難であった。平坦な地形に対応した流域抽出手法の改良と平野部における本手法の適用性の確認が今後の課題である。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

引用文献

- 1) (独)日本原子力研究開発機構：平成25年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、経済産業省資源エネルギー庁、2014、pp.166-169.
- 2) (独)日本原子力研究開発機構：平成26年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、経済産業省資源エネルギー庁、2015、pp.160-177.
- 3) 尾上博則ほか：地質環境長期安定性評価確証技術開発 地質環境長期変動モデル（東濃地域）、日本地球惑星科学連合2016大会、2016年5月、千葉、2016.
- 4) 佐々木俊法ほか：東濃地方内陸小盆地堆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、vol.45、2006、pp.275-286.
- 5) 上野哲郎、竹内竜史：超深地層研究所計画における表層水理観測データ集－2014年度－、日本原子力研究開発機構、JAEA Data/Code2015-031、2016.

キーワード：高レベル放射性廃棄物、地層処分、地下水涵養量、気候変化、地形変化

Keywords: High-level radioactive waste, Geological disposal, Groundwater recharge rate, Change of climate in long-term, Change of landform in long-term

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (6)炭酸塩鉱物測定技術

Geosphere stability project (6) Chronological and chemical analyses of carbonate minerals

*渡邊 隆広¹、國分 陽子¹、村上 裕晃¹、横山 立憲¹、雨宮 浩樹¹、水野 崇¹、久保田 満¹、岩月 輝希¹*Takahiro Watanabe¹, Yoko Kokubu¹, Hiroaki Murakami¹, Tatsunori Yokoyama¹, Hiroki Amamiya¹, Takashi Mizuno¹, Mitsuru Kubota¹, Teruki Iwatsuki¹

1.国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに

地質環境の長期安定性を評価するためには、過去の地質環境の変動幅を把握し、その結果に基づいて将来の変動幅を推定するといった手法の構築が必要である。このためには、過去の地下水の流動特性や化学的条件（酸化還元電位やpH）を把握することが必要である¹⁾。これまでに地下水の化学組成に基づいて、地下水の滞留時間を評価する試みが行われてきたが²⁾、過去の地下水の化学的条件の変遷を連続的に把握することは困難であった。一方、地下水から沈殿した炭酸塩鉱物は、沈殿当時の年代と化学的狀態を示す成分（例えばウラン、鉛、鉄や希土類元素の相対量など）を保持している可能性が高い^{3)、4)}。加えて、炭酸塩鉱物は環境中に普遍的に存在していることから、汎用的な古環境指標として有効と考えられる。岩盤中の割れ目を充填する炭酸塩鉱物の年代測定と化学分析を実施することにより、化学的狀態の長期変遷を推定することが可能になると期待される。

炭酸塩鉱物のウラン-鉛（以下、U-Pb）年代測定や化学分析は、これまでに全岩溶液試料を対象とした測定が進められてきたが⁵⁾、炭酸塩鉱物の結晶成長を反映した累帯構造に着目し¹⁾、局所領域をターゲットとした分析手法を確立することにより、位置ごとの元素・同位体情報を得ることが可能となる。従って、炭酸塩鉱物を古環境指標として活用するためには、局所領域を数十マイクロメートル以下で分析可能なレーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計（LA-ICP質量分析計）が有効と考えられる。本技術開発においては、日本原子力研究開発機構 土岐地球年代学研究所に導入したLA-ICP質量分析計を用いて、炭酸塩鉱物の局所領域のU-Pb年代測定について技術基盤の構築を進めた。さらに、過去の化学的狀態を推定するため、炭酸塩鉱物と地下水間の鉄の分配係数をもとにした酸化還元電位推定手法の適用性を検討した。

技術開発概要とこれまでの主な成果

(1) LA-ICP質量分析法による年代測定技術の開発

炭酸塩鉱物の局所領域同位体分析においては、均質性の担保された炭酸塩鉱物から成る標準試料の選定や低濃度なU、Pbの元素比測定と高精度なPb同位体比測定が求められる。これらの課題に対応するため、本技術開発では天然の炭酸塩鉱物から標準試料候補の選定を開始した。また、均質性の確認と局所領域分析における分析点の選定には、2次元分布分析（イメージング）を採用した結果、視覚的にも元素・同位体分布を把握することが可能となった¹⁾。Pb同位体分析においては、存在度の低いPb同位体の検出にマルチイオンカウンティング方式と高増幅率アンプを備えたマルチファラデーカップ方式を採用し、高精度Pb同位体比測定を実現した¹⁾。

(2) 酸化還元電位推定技術の構築

これまでに、地下水から炭酸塩鉱物が沈殿する際に取り込まれる鉄の量から、過去の地下水の酸化還元電位を理論的に計算する試みが進められている^{3)、4)}。本技術開発ではICP質量分析計を用いて天然の炭酸塩鉱物中の鉄含有量を測定し、報告されている理論式³⁾から得られた計算値の妥当性を評価した。岐阜県東濃地域のボーリング試料（DH5、6、7、8、12）、島根県西部および山梨県東部の石灰華試料を用いた。DH6、7、8試料では鉄含有量から得られた酸化還元電位の計算値と、現場で実測した地下水の値がおおよそ一致した。DH7では、計算値が標準水素電極を基準とした $ORP_{S.H.E.}$ で約-450mV、実測値が約-400mVであった。しかし、DH5、12および石灰華試料では実測値よりも100mV以上異なる値を示した。計算値と実測値との差異については、酸化的な表層水の混入などによる影響が示唆される。従って、今後は理論式が適用可能な条件と、適用不可となる条件を明らかにすることが必要となる。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

引用文献

- 1) 日本原子力研究開発機構、平成26年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、2015、229p.
- 2) Iwatsuki et al., Appl. Geochem., vol.17、2002、1241-1257.
- 3) Arthur et al., Geochem. Explor. Environ. Anal., vol.6、2006、pp.33-48.
- 4) 水野・岩月、地球化学、vol.40、2006、pp.33-45.
- 5) Becker et al., Earth Planet. Sci. Lett., vol.203、2002、pp.681-689.

キーワード：炭酸塩鉱物、放射年代測定、酸化還元電位、LA-ICP質量分析計、地質環境長期安定性、地層処分
Keywords: carbonate minerals, radiometric dating, redox potential, LA-ICPMS, geosphere stability, geological disposal

放射性炭素 (^{14}C) 濃度に基づく深部地下水の流動状態の推定

Estimation of hydraulic conditions of groundwater using carbon isotope

*加藤 利弘¹、岩月 輝希¹、中田 弘太郎²、長谷川 琢磨²*toshihiro kato¹, Teruki Iwatuki¹, Kotaro Nakata², Takuma Hasegawa²

1.日本原子力研究開発機構、2.電力中央研究所

1.Japan Atomic Energy Agency, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry

はじめに

地下水流動は地下圏における物質循環を考察する上で欠くことのできない情報の一つであり、水理的な数値解析や化学的指標に基づく滞留時間の推定などの評価手法を併用することにより確度の高い評価が可能となる。日本原子力開発研究機構の瑞浪超深地層研究所においては、これまでに深度500 mまでの研究坑道の掘削を通して、地下水流動や地下水の化学特性を把握するとともに大規模地下施設が周辺の地下水に与える影響の評価を行ってきた。本研究では、新たに地下水中の ^{14}C 濃度に関わるデータを取得し、その深度分布や水理地質構造などとの関連を基に地下水の滞留状態について考察した。

方法

地上から深度約100~170 mの堆積岩中に掘削されたボーリング孔および深度200 m~500 mの研究坑道から花崗岩中に掘削されたボーリング孔において、各深度の地下水を大気に触れないように採取した。なお、花崗岩においては、比較的岩盤の透水性が高い領域と透水性の低い領域に掘削されたボーリング孔の地下水をそれぞれ採取した。採取試料の主要成分分析、物理化学パラメータ測定を行うとともに、溶存無機炭素を沈殿法またはガス化法により回収した。溶存無機炭素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) と ^{14}C 濃度を安定同位体比質量分析装置、加速器質量分析装置で測定した。

結果・考察

堆積岩、花崗岩の地下水中の ^{14}C 濃度を測定した結果、それぞれの値は3~100 pMC*、2~31 pMCと求められた。堆積岩直下の花崗岩中(深度約200 m)の地下水の ^{14}C 濃度は、堆積岩深部(深度140 m)の ^{14}C 濃度より高く、堆積岩深部の地下水に比べて若い年代の地下水が、堆積岩と花崗岩の不整合面に沿って流入している可能性が考えられた。花崗岩中の透水性が高い領域の ^{14}C 濃度はばらつきが大きく、深度200 m~400 mで約4~31 pMCであった。一方、花崗岩中の透水性が低い領域の ^{14}C 濃度は、深度300 mで約6~25 pMC、深度500 mで約2~16 pMCとなり、透水性が高い領域に比べ ^{14}C 濃度が低く年代が古い傾向を示した。透水性が高い領域では、研究坑道への地下水の引き込みにより鉛直方向の地下水流動が大きくなっていると推察された。また、透水性が低い領域では、地下水の流動性が小さく相対的に古い地下水が存在すると考えられた。

^{14}C 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ 値の関係をみると、 ^{14}C 濃度が小さくなるほど $\delta^{13}\text{C}$ 値が高くなる傾向を示した。地下水中の溶存無機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、岩石中の炭酸塩鉱物が地下水中に溶解し鉱物由来の無機炭素が加わるか、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の異なる地下水が混合することにより変化すると推察される。炭酸塩鉱物由来の無機炭素は通常、5万年以上経過して ^{14}C を含まない“デッドカーボン”であるため、鉱物由来の無機炭素が地下水に加わった場合はデッドカーボンの混入による ^{14}C 濃度の変化を補正する必要がある。炭酸塩鉱物の溶解については、各深度の地下水のpH、カルシウムイオン濃度、溶存無機炭酸濃度に基づいて、地下水に対する飽和指数を算出した結果、花崗岩領域の深度200 m~500 mの地下水は概ね炭酸塩鉱物に対し飽和~過飽和(炭酸カルシウムが溶解しない条件)にあると判断された。そのため、 ^{14}C 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ 値の相関は、それらの値の異なる地下水の混合を反映している可能性が考えられた。

今後は、これらの知見を勘案した上で、 ^{14}C 濃度を基に地下水の滞留時間を推定し、地下水流動解析に反映させていく。

* pMC: 現代の大気中の ^{14}C 濃度を基準として試料中の ^{14}C 濃度をパーセンテージで表した単位

キーワード: 炭素同位体、地下水、流動状態

Keywords: carbon isotope, groundwater, hydraulic condition

高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールドの長期力学的挙動評価のための遠心力模型実験手法の開発

Development of centrifuge model test for evaluation of long term geomechanical behavior in HLW near field

*西本 壮志¹

*Soshi Nishimoto¹

1. (一財) 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

高レベル放射性廃棄物処分場周辺（ニアフィールド）の人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に関する研究において、実規模実証試験や予測数値解析シミュレーションが実施されている。日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センターにおいて、現在国内唯一の実規模実証試験「人工バリア性能確認試験」が地下350mで実施されている。数値解析結果の妥当性検証のために実規模試験結果との比較・検討を行うことは数値解析モデルの高精度化のために有効な手段の一つである。しかし、実規模実証試験を実施できる期間は長くても現実的には十数年程度であり、その試験結果を用いて百年単位の長期挙動を予測するための数値解析モデルを高精度化するには限りがある。

遠心力場の相似則を利用した遠心力模型実験は、実物と縮尺模型の応力の対応が良く、力学的・水理的挙動も実物に近い。また遠心力場の相似則における時間加速の効果により、長時間の遠心力模型実験を行うことでニアフィールドの長期力学的挙動の推定に対して有利である。このため実物の長期力学的挙動をある程度推定できる可能性がある。

電力中央研究所ではこの点に着目し、最長6ヶ月の連続運転、最大1.5 tonの模型が搭載可能な遠心力載荷装置と、同装置を用いたニアフィールドの長期力学的挙動評価実験の開発を行ってきた。

本開発では、緩衝材と周辺岩盤の力学的相互作用をターゲットにし、周辺岩盤を含めたニアフィールド模型を作成、長期挙動実験を行ってきた。

まず、周辺岩盤を含めた処分孔1孔・廃棄体1体の領域を抽出し模型を作製した。岩盤は田下凝灰岩、緩衝材はクニゲルV1（100%）、模擬オーバーパックは所定の重量調整を行ったSUSである。模型サイズは遠心力30G場での実験を行うために1/30サイズとした。直径、高さ180mmの円柱岩盤供試体に処分孔を掘削、オーバーパックおよび緩衝材を封入した。実験は、現象理解のために、乾燥状態の模型に対して、深度をパラメータ（地圧に相当する拘束圧5~10MPa）にした等方応力を負荷し、模型下面より間隙水を注水し上面から排出する排水条件下の、水理-力学連成条件である。オーバーパックの温度と境界温度は実験を通じて25℃一定とした（以下、常温実験、と言う）。計測項目はオーバーパックの鉛直変位、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみである。実験は最長67日、約165年に相当するデータを得た。その結果、オーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧が拘束圧により変化し、かつ実験期間内において収束しないことが分かった。すなわち地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動とベントナイトの膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧に地圧依存性・時間依存性が生じることを実験的に初めて明らかにした。

次に、ヒーターを封入した加熱可能なオーバーパックの開発を行い、同様の模型に対して深度をパラメータにして、オーバーパックの温度を95℃一定、境界温度を平均的な地温勾配に則した温度（30~35℃）に設定し、最長212年（実験時間86日）に相当するデータを得た（以下、加熱実験、と言う）。その結果、加熱実験においても地圧依存性・拘束圧依存性が計測され、大局的に見れば常温実験と類似の傾向を示した。一方で、緩衝材が膨潤を開始したと思われる時点以降では、いずれの計測結果も常温実験とは明らかに異なる挙動が計測された。くわえて、実験中の間隙水の注入流量に着目すると、実験経過時間数百時間後、常温実験では計測されていない流量変化が生じていた。また、加熱実験終了後、模型のX線CT撮影を行い、オーバーパック周辺の緩衝材密度が常温実験より低く飽和密度に達していない結果が得られた。すなわち、高温の廃棄体が緩衝材中の間隙水分布に影響を与え緩衝材の密度が低下、これにより緩衝材の土圧と処分孔内の剛性が低下し、地圧一定条件であるために周辺岩盤のひずみと廃棄体の変位傾向に変化が生じたと考える。

キーワード：地層処分、長期挙動評価、遠心力模型実験、力学的相互作用

Keywords: Geological disposal , Long term behavior evaluation , Centrifuge model test ,
Geomechanical interaction

高速増殖原型炉もんじゅ付近の花崗岩に見られる並走粘土脈を含む小規模破碎帯の活動性評価例
An example of activity evaluation of a minor crush zone including subparallel clay veins in granite near the Monju site

*島田 耕史¹、石丸 恒存¹、末岡 茂¹、照沢 秀司¹、安江 健一¹、丹羽 正和¹、梅田 浩司¹

*Koji Shimada¹, Tsuneari Ishimaru¹, Shigeru Sueoka¹, Shuji Terusawa¹, Ken-ichi Yasue¹, Masakazu Niwa¹, Koji Umeda¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに：重要構造物付近の破碎帯の露出状況は多様であり，上載地層法が適用できない場合の活動性評価手法の整備が必要である。上載地層法は交差切りの法則を用いており（例えばMarshak, 2001），この法則に基づく基盤岩中の構造の切断関係による活動性評価手法は有望である。しかしながら，露出状況による制約や破碎帯自体の特徴として，切断関係が見られない小規模な破碎帯もある。ここでは，そのような事例として，一つの破碎帯露頭を取り上げ，活動性評価例を示す。

破碎帯露頭の概要：福井県敦賀半島北部のもんじゅの南西に位置する破碎帯露頭では，北西に流下する沢の滝の直下，左右両岸の花崗岩中に，走向傾斜N30E60E前後，幅数10cm，露頭延長20m弱の破碎帯が見られる。部分的に土被りで数m露出しない。破碎帯中に幅数cm以下で粘土化が進んだ複数のせん断面が見られ，一部並走している。これらを，左岸（南）側の長いものからb1-b3，右岸（北）側のb4とする。b1は比較的軟質な粘土脈が連続し，南で直線性が高く，北に向かって直線性を減じ，沢沿いで北北東走向から北北西走向へ大きく屈曲する。b2はb1の上盤側に位置し，b1と異なり沢沿いで直線性が高いが南で尖滅する。b3はb1の下盤側に位置し，連続性が悪く，露頭上部の東側が高い花崗岩の段差（以下「段差」という。）の一部を構成し，b1と共に厚い堆積層で覆われている。b1とb2，b1とb3は，互いに並走し，全体として右雁行状に配列しており，交差してどちらかに変位を与える様子は確認できない。破碎帯の上盤の花崗岩は高さ数mのオーバーハングした地形を作る硬い岩盤であるのに対し，下盤は角礫化し脆い。右岸側の露頭を横断するb4は複数の粘土脈薄層のうち連続性の良いものであり，部分的に軟質である。

検討方法と結果：方法1；地形地質的延長部の確認。変動地形は見られず，b4の北方の花崗岩の連続露頭に破碎帯の延長部は見られない。方法2；評価対象の選択と火山灰分析による堆積層の年代の推定。連続性を重視しb1を選択した。b1を覆う堆積層に変位変形は見られず，b1直上から火山ガラスは検出されないが，約20m離れた一連の堆積層からAT火山灰起源の粒子が産出する。方法3；露頭，研磨片，薄片観察による運動像の確認。b1，b2，b4はいずれも正断層（東側落ち）成分を含み，横ずれ成分は左右両方が見られる。b3は変位センズの指標が見られないが，b3と堆積層に挟まれた固結した葉片状粘土状破碎部にはいずれ正断層運動（東側落ち）を示す構造が見られる。b3付近の段差に沿った堆積層中の礫の定向配列は見られない。方法4；基盤岩の段差の類似例の調査。別の沢沿いの露頭で，花崗岩中の破碎帯の粘土化部が突出し，周囲の脆弱な角礫化部が削られ，差別侵食により局所的な段差を形成する現世の事例が見られる。方法5；活断層との粒径分布の比較。付近の白木－丹生断層（南北走向高角度東傾斜の逆断層）とb1の粘土の粒径（mode）は，白木－丹生断層では0.584 μ m，b1では3.91 μ mである（Niwa et al., submitted）。

破碎帯の活動性（解釈）：方法1から，破碎帯は変動地形を伴う活断層ではなく，分布が途切れる小規模破碎帯である。方法2から，堆積層は約3万年前以降に堆積しており，白木－丹生断層の最新活動時（約9,000年前以降）の付随的な運動の痕跡はない。方法3から，この破碎帯は現在の活断層と異なる運動像を伴う複数の活動時期を経験しており，堆積層との境界の段差はせん断で生じたものではない。方法4から，堆積層との境界の段差は花崗岩の角礫化部の侵食によって生じ，後に堆積層が埋積したと推定される。方法5から，b1は粉碎の程度が弱く，累積変位量が活断層に比べ小さく小規模な破碎帯であることが補強される。これらの情報は，この破碎帯が，起震断層の運動が直接地表に現れた活断層ではなく，活断層に付随してずれ動く弱面としても機能していないことを示す。ポスターでは，屈曲するb1と直線的なb2の構造的関係の検討結果も議論する。

【引用文献】 Marshak, S. (2001), Earth: portrait of a planet.

キーワード：破碎帯、高速増殖原型炉もんじゅ、花崗岩

Keywords: crush zone, fast breeder reactor "Monju", granite

3Dレーザースキャナーによる治山ダムの放射性セシウム堆積量の変化の推定

Estimate of variation of radioactive cesium sedimentation in a soil saving dam with the 3D laser scanner

*渡辺 貴善¹、大山 卓也¹、石井 康雄¹、新里 忠史¹、阿部 寛信¹、三田地 勝昭¹、佐々木 祥人¹

*Takayoshi Watanabe¹, Takuya ohyama¹, yasuo ishii¹, Tadafumi Niizato¹, hironobu abe¹, katsuki mitachi¹, yoshito sasaki¹

1.日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

東京電力福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性セシウムが沈着した森林の大部分は未除染のままであるため、森林から生活圏へ放射性セシウムが流出し、生活圏の再汚染の懸念がある。本報告では、森林から流出する放射性セシウム量を推定するために、土砂移動に伴う放射性セシウム流出量が最も高いと見込まれる地形の急峻な山地森林を対象として、土砂堆積量と土砂の放射性セシウム濃度を測定し放射性セシウム流出量を算出するとともに、日雨量との関係について考察した。

阿武隈山地に位置する治山ダムにおいて、ダム上流側を3Dレーザースキャナーで繰り返し計測することで堆積量の変化を調べた。3Dレーザースキャナーを用いた土砂移動の計測では、試験斜面枠のような常設の観測装置を必要とせず、数時間の作業で数百万点の座標が得られることで詳細な地表面モデルを作成することができる利点がある。調査対象の治山ダムは、治山ダムを流出口にもつ流域の面積は2.1 ha、第6次航空機モニタリング（2012年11月時点）によるCs-137の流域内における沈着量は約3000 kBq/m²であり、植生は広葉樹とスギの混交林である。また、ダム上流部分は、越流放水路の高さから1 m程度下までしか堆積しておらず、満砂状態でないことから、上流からの土砂は治山ダムによりすべて捕捉されていると考えられた。計測は2013/8/29、2014/12/3、2015/9/2及び2015/12/1に、同一領域を繰り返し測定した。

計測した点群データから樹木などの堆積物以外のものを除去したのち、計測範囲を5 cm 幅の角柱状に区分し、各領域の最低点を抽出することで、地表面の点群データセットを作成した（面積18 m²）。この点群からTINメッシュにより地表面モデルを作成した。4回の計測で得られた地表面モデルの差分から治山ダムに堆積した土砂量を求めた。

計算の結果、2013/8/29～2014/12/3（以下、期間①）に0.5 m³、2014/12/3～2015/9/2（以下、期間②）に0.1 m³、2015/9/2～2015/12/1（以下、期間③）に1.8 m³の土砂の増加が見られた。また、本調査地において円筒形土壌採取器を用いて採取した堆積土砂（5 cm 深度）の放射能濃度の平均は、Cs-137：300 kBq/kg であることから、堆積土砂の密度を1 g/cm³と仮定すると、2013年～2015年の27か月間に治山ダム内に堆積したCs-137は720 MBqと推定された。これは、流域に沈着している放射性セシウムの1%程度が27か月間に流域の森林から流出し、治山ダム内に堆積したことになる。とくに、そのうちの75%が、期間③に集中する結果となった。年間の土砂堆積量は1 m³程度であり、流域に沈着している放射性セシウムの0.5%が1年間に治山ダムへ流入したと見積もられた。

土砂流出はUSLEなどの雨量や土地の被覆などの関数としてモデルが作れている（Wischmeier & Smith; 1978, Hillel; 2004）。本調査の流域は保安林に指定されているものの、混交林に被覆されており、平時における森林からの土砂流出は少なく、大雨時の影響が大きいと考えられる。本調査地に最も近い気象庁アメダス観測点「津島」の観測データでは、日雨量が年平均雨量1350 mmの5%（67.5 mm）を超える日が期間①に6日、期間②に1日、期間③に3日あった。2013年の日雨量の最大は94mm、2014年は89.5mmであるのに対して、2015年9月に114 mmと171 mmの降雨があった。よって、対象の治山ダムでは、日雨量が年平均降水量の5%を超える雨により森林から治山ダムへ放射性セシウムの流入が増え、日雨量が100mmを超える雨の時に大きく増加することが考えられる。

気象庁ホームページ過去の気象データ・ダウンロード<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
Wischmeier, W. H., Smith, D. D., Predicting rainfall erosion losses -a guide to conservation planning., Agriculture Handbook No. 537. (1978)

Daniel Hillel, Introduction to Environmental Soil Physics, Elsevier(USA) (2004)

キーワード：福島第一原子力発電所事故、3Dレーザースキャナー

Keywords: accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 3D laser scanner