

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、断層運動により粉砕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 $1\text{E-}11(\text{m/s})$ 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、 $1\text{E-}12(\text{m/s})$ 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と考えら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

原位置パーミアメ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メータ(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