

福島県阿武隈山地の山地森林における林床状況に関連した放射性セシウム流出量

Radiocesium outflow related to the forest floor conditions in mountainous forest of the Abukuma Mountains, Fukushima

*新里 忠史¹、佐々木 祥人¹、三田地 勝昭¹

*Tadafumi Niizato¹, Yoshito Sasaki¹, Katsuaki Mitachi¹

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、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をモニタリングし、その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、住居等の近隣の森林や森林内で日常的に人が立ち入る場所での除染等とともに、森林整備と放射性物質対策の総合的な取り組みが進められている[1]。本論では、山地森林におけるCs-137の流出特性に林床状況が及ぼす影響について、福島県の阿武隈山地に分布するアカマツ-コナラ林での調査結果を報告する。

調査地と手法

森林域に降下した放射性セシウムは、降雨を起点とする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、林床から土壌流出及び表面流に伴い林外へ移動すると考えられる。土壌流出によるCs-137流出は表面流の100倍程度[2]であり、前者に伴う流出がより重要と考えられる。本論では、土壌流出の最初の段階である降雨による土壌粒子の飛散（雨滴侵食）を対象として、斜面下方への放射性セシウム流出量と林床状況の関連を考察する。

観測領域は阿武隈山地に分布するアカマツ-コナラ林の西向き斜面であり、面積は約10 m四方である。観測領域にアカマツはなく、平均樹高8 mのミズナラを主体とした落葉広葉樹が分布する。観測領域の斜面上部は下草が繁茂し落葉落枝等のリターが堆積する。斜面下部は、下草が除去されリターの堆積した北側及びリターが除去され裸地状態の南側に分けられる。斜面の傾斜は27~28度の範囲にある。林床状況が異なる以上の3領域において、雨滴侵食で飛散する土壌粒子を回収するためのスプラッシュカップを各領域に5台ずつ設置し、約1ヶ月間の観測を実施した。スプラッシュカップは直径30 cmあり、カップ内側の中央に林床表面が露出した直径10 cmの孔（内部孔）があげられている。内部孔の林床に雨滴があたり土壌粒子が飛散すると、内部孔を円形に取り囲み配置された高さ10 cmのトレイに土壌粒子が回収される。回収トレイは、内部の仕切り板により斜面上方と下方へ飛散する土壌粒子を取り分けられる。スプラッシュカップ外側の林床から土壌粒子が混入することを防ぐため、同カップの周囲約1 m四方に麻布を敷く対策を施した。落葉落枝等のリターによる林床の被覆率は、スプラッシュカップの内部孔における林床表面で計測した。土壌粒子の粒径はレーザー回折式粒径分布測定器により測定した。

同カップで回収した土壌は105°Cで24時間の乾燥後、Cs-137濃度を測定した。Cs-137流出量は、スプラッシュカップ内部孔の面積、斜面下方へ移動した土壌の重量とCs-137濃度から算出した。Cs-137流出率は、観測領域の近傍における深度20 cmまでの土壌試料の分析値から単位面積あたりのCs-137蓄積量を算出し、その蓄積量に対するCs-137流出量の百分率とした。

結果

各観測領域における落葉落枝等のリターによる被覆率は、斜面上部で95.4%、斜面下部の北側で48.2%、斜面下部の南側で5.1%であった。これに伴い1 m²あたりの斜面下方への土壌移動量も異なり、斜面上部で8.5 g、斜面下部の北側で11.3 g、斜面下部の南側で21.2 gであった。移動土壌の粒径分布は、観測領域における林床0-1 cmの土壌粒子と比較し、淘汰が非常に悪くほぼ対称の歪度を示し、粒径に依存した選択的な土壌粒子

の移動は確認できなかった。また、土壌のCs-137濃度から求めた1 m²あたりのCs-137流出量は、斜面上部で523 Bq, 斜面下部の北側で295 Bq, 斜面下部の南側で710 Bqとなった。ここで、斜面上部と斜面下部における1m²あたりのCs-137蓄積量(上部33 kBq, 下部101 kBq)との比較からCs-137流出率を算出すると、下草が繁茂しリターが堆積する斜面上部では0.5%, 下草がなくリターの堆積した斜面下部の北側で0.9%, 下草とリターがなく裸地状態である斜面下部の南側では2.1%となった。

以上の結果は、林床の被覆状況が森林域の放射性セシウム流出に関して重要な環境条件であることを示している。また、林床の下草や落葉落枝等のリター除去を行うような森林域での除染活動においては、除染後に下草が繁茂し落葉落枝等が堆積するような環境整備を合わせて実施することが、放射性セシウム移動抑制対策につながることを示すと考えられる。

[1]環境省, 森林の除染等について. <http://josen.env.go.jp/about/efforts/forest.html>

[2]Niizato et al., 2016, J. Environ. Radiact. 161, 11-21.

キーワード：放射性セシウム、山地森林、東京電力福島第一原子力発電所事故

Keywords: radiocesium, mountainous forest, TEPCO' Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident

アンモニウム型モンモリロナイトの膨張・変質挙動

Expansion and alteration behaviors of NH_4 -montmorillonite

*川喜田 竜平¹、齋藤 彬人¹、佐久間 博²、安楽 総太郎³、小田 治恵³、三原 守弘³、佐藤 努⁴

*Ryohei Kawakita¹, Akito Saito¹, Hiroshi Sakuma², Sohtarō Anraku³, Chie Oda³, Morihiro Mihara³, Tsutomu Sato⁴

1. 北海道大学大学院工学院、2. 物質・材料研究機構、3. 日本原子力研究開発機構、4. 北海道大学大学院工学研究院

1. Graduate school of engineering, Hokkaido University, 2. National Institute for Material Science, 3. Japan Atomic Energy Agency, 4. Faculty of engineering, Hokkaido University

Bentonite will be used as a buffer material in the geological disposal of radioactive waste due to the high swelling and cation exchange capacity of the main bentonite constituent Na-montmorillonite (Na-MMT). Replacement of the interlayer Na by other cationic species, however, can cause a significant reduction in the swelling behavior of MMT. Nitrate salts found in transuranic wastes can be reduced to form NH_4^+ in deep underground conditions. NH_4^+ ions could replace the interlayer Na cations of Na-MMT to form NH_4 -MMT, but the swelling behavior of NH_4 -MMT is not well known.

To improve understanding of the swelling behavior of NH_4 -MMT, the expandability of a suite of homoionic MMT, including Na-MMT, K-MMT, Cs-MMT, and NH_4 -MMT were investigated by XRD under controlled relative humidity (RH) conditions and supported by molecular dynamics (MD) calculations.

Differences in the swelling behavior of the suite of homoionic MMT were observed by XRD and could be largely explained in terms of the valence, the radius and the hydration energy of the interlayer cations. All these properties, however, are very similar for K^+ and NH_4^+ and so could not be used to explain the reduced swelling of K-MMT compared to NH_4 -MMT under low RH conditions. Although it has been well known that K-MMT lost expandability by dehydration, it has not been well known whether this process would occur on NH_4 -MMT or not.

First-principles MD calculations were conducted in a previous study (Shi et al., 2013) for NH_4 -MMT containing only a small number of water molecules (less than 1.25 molecules per NH_4 -MMT half unit cell). The hydrogen bonding and the network between the surface oxygen, interlayer NH_4^+ ion and water were reported to be increased by adding more water molecules to the interlayer. The basal spacing measured by XRD under controlled RH in the current study are consistent with the interlayer containing less than one layer of water, although the interlayer charge may be different between samples. It is also difficult to make direct comparisons with Shi et al.'s calculations and experimental results because the number of water molecules in the interlayer cannot be precisely controlled experimentally.

The classical MD simulations in the current study described the mixing enthalpy of MMT / water molecules system by including the number of interlayer water molecules as a variable. The potential functions and parameters of MMT and water molecules proposed by Nakano and Kawamura (2006) and Kawamura (2008) were employed in this study. Parameters on NH_4^+ are determined to reproduce NH_4Cl structure. The mixing enthalpy was used as an index to evaluate the swelling state stability. To consider the RH effect, the mixing enthalpy (H_{mix}) was calculated by: $H_{\text{mix}} = H_{(\text{MMT}+n\text{H}_2\text{O})} - (H_{\text{MMT}} + n\mu_{\text{H}_2\text{O}})$, where the chemical potential of water, $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$ includes the effect of RH by: $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = \mu^0 + RT \ln(P/P_0)$ (μ^0 : standard chemical potential, R : gas constant, T : temperature(K), P_0/P : partial pressure of water) The minimum of H_{mix} indicates the stable hydration state of the MMT. In this study, $n = 0$ to 20 water molecules were added to homoionic MMT to understand the different swelling behavior of K-MMT and NH_4 -MMT under each RH condition. It was found that the series of calculated mixing enthalpy was consistent with the XRD results under controlled RH. In the NH_4 -MMT system, the hydrogen bond between NH_4^+ and surface oxygen on clay was confirmed from the radial distribution function. These hydrogen bonds make large basal spacing

of NH_4 -MMT rather than that of K-MMT at 0%RH, which lead to hydration at low RH condition compare to K-MMT because the expansion of smectite occurs when hydration of interlayer cation exceeds the electrostatic attraction between silicate layer and cation. This result indicates that NH_4 -MMT is more difficult to become non-expandable or less expandable mineral than K-MMT.

This study was partly funded by the Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan through “The project for validating assessment methodology in geological disposal system” in JFY 2016.

キーワード：膨潤、変質、アンモニウム、カリウム、モンモリロナイト、分子動力学

Keywords: Expansion, Alteration, Ammonium, Potassium, Montmorillonite, Molecular Dynamics

高アルカリ環境におけるマグネシウムケイ酸塩鉱物の生成とその地球化学モデリング

Formation of magnesium silicates and its geochemical modeling at high alkaline conditions

*長谷 東子¹、佐藤 努²

*Haruko Hase¹, Tsutomu Sato²

1. 北海道大学大学院工学院、2. 北海道大学工学研究院

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

In geological disposal of waste generated from reprocessing of spent fuel, a large amount of cement material is used for vitrified waste and grout, and the disposal site is predicted to be a high alkaline environment over time. Therefore, it is urgent to understand radionuclides migration and alteration of the barrier materials under high alkaline environment. In general, most mineral surfaces are negatively charged under high alkaline conditions. Therefore, negatively charged anions are poorly adsorbed to the mineral surface. Although the nuclide is considered to be poorly adsorbed in the safety assessment, the nuclide would be delayed by the dynamic processes such as precipitation and solid solution formation without adsorption. For example, layered double hydroxides (LDH), calcium silicate hydrate (C-S-H) and magnesium silicate hydrate (M-S-H) with positively charged surface and a high anion exchange capacity even at a high alkaline environment (Goh, Lim, and Dong 2008)(Evans 2008). In this context, the objective in this study is to clarify the Mg-bearing phases produced by mixing the interstitial water of cement (high alkaline) and the groundwater of Mg-HCO₃ system in the geological disposal environment. For formation of LDHs, 50 mM of each of Mg ion solution (Mg(NO₃)₂ · 6H₂O), Al or Fe ion solution (Al(NO₃)₃ · 9H₂O or Fe(NO₃)₃ · 9H₂O), and silicate anion solution (Na₂SiO₃) as an initial solution was mixed with different ratios. After the mixing, these mixed solutions were adjusted to pH 9 or pH 12 and left at 25 °C for 24 hours. The reason for paying attention to silicate ions is that they are concerned about dissolution from cement materials and vitrified bodies used in waste disposal and considered to be analogues of ⁷⁹Se and ⁹⁹Tc.

In Mg-Al system, at pH 9, in the case of adding above 15 mM silicate ions, M-S-H and amorphous aluminium (with Al ion), or M-S-H and smectite (without Al ion) were precipitated. On the other hand, in the case of below 15 mM silicate ions, LDH (Mg/Al 0.5) and gibbsite or boehmite (Mg/Al 0.5) were precipitated. At pH 12, in the case without Al ion and with Mg ion, brucite was confirmed. Moreover, M-S-H (Mg/Al 0.1) or LDH (Mg/Al 0.3) instead of gibbsite and boehmite were generated. In other systems, no change was observed with the precipitates at pH 9.

In Mg-Fe system, formation of LDH was confirmed in a system containing less silicate ion and much Mg ion, but ferrihydrite or M-S-H was precipitated in other systems containing Fe ion.

In order to investigate these results thermodynamically, by calculating and incorporating M-S-H and LDH database based on previous study (Hase et al. 2017), we could represent thermodynamically precipitated mineral species.

キーワード：マグネシウムケイ酸塩、層状複水酸化物

Keywords: magnesium silicate, layered double hydroxide

Background of assessing geological materials for a potential low and intermediate level radioactive waste repository in Bangladesh

*Mohammad Rajib¹, Chiaki T. Oguchi², Md. Golam Rasul¹, Ratan Kumar Majumder¹, Md. Ibrahim Khalil¹, Mohammad Zafrul Kabir¹, Farah Deeba¹, Md. Moniruzzaman¹

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

Low and Intermediate level wastes (LILW) in Bangladesh are being generated from operation, repair and maintenance of 3MW TRIGA MARK-II research reactor (RR), 14 MeV Neutron Generator and research & commercial irradiators such as Co-60 and isotope production for medical purposes. The wastes arising from these sources are generally spent ion exchange resins, graphite, lead and polythene plugs, contaminated vials, hand gloves, plastic syringes, tissue papers, shoe-covers, protective cloths, plastic and metallic wares, spent and disused sources (SRS), activated carbon, gaseous discharges, etc. The radionuclides involved with these wastes are- Co-60, Cs- 134 & 137, Sr-90, Ir-192, Tc-99m, I-131, I-125, C-14, H-3, Ra-226, Am-Be neutron sources, Cm-244, Am-241, Cr-51, Mn-54, Zn-65, P-32, Sc-46, etc. Solid radioactive wastes are collected, segregated at the place of generation and stored in interim-storage rooms of the Central Radioactive Waste Processing and Storage Facility (CWPSF), developed by Bangladesh Atomic Energy Commission (BAEC) in cooperation with International Atomic Energy Agency (IAEA). Short lived radionuclides containing solid wastes are managed by delay-and-decay storage and released into the environment. Others are safely transported & stored in shielded enclosures within CWPSF. Besides, Bangladesh is implementing Nuclear Power Plant (NPP) projects by constructing two reactors of 1000 MW each. It is expected to have more LILW from this NPP which needs to be disposed safely. For safe disposal of LILW, a National Radioactive Waste Management Plan (NRWMP) has been formulated by BAEC where site investigations and processes for site selection for waste disposal facilities is one of the key issues.

For selecting a potential site for safe disposal of radioactive waste, Bangladesh have several apparently suitable geological formations, such as basement hard rock at more than 100 m depth and clay formations exposed at many locations to few meters only. The basement hard rocks of Bangladesh are tonalitic and granodioritic rocks, variously deformed to granitic gneiss and intruded by younger monzogranite having mineralogical composition of plagioclase, quartz and hornblende, with lesser amounts of biotite and potash feldspar and trace amounts of clinopyroxene, titanite and iron oxides. (Ameen et al., 2007). On the other hand, the tropical clays of the central part of the country, called Madhupur Clay Formations are typically highly weathered and reddish brown color. They are mainly composed of kaolinite, illite, chlorite and illite-smectite mixed layer minerals along with some non-clay minerals like quartz, cristobalite, orthoclase, microcline, plagioclase, calcite, siderite and dolomite and of intermediate to high plasticity inorganic clay (Haque et al., 2013; Hossain and Toll, 2006). Physical and engineering properties of these two types of geological materials have been studied by various researchers to some extent. However, their detail geochemical characteristics, specially the migration behavior for radionuclides and associated studies have yet to be investigated. The present study will review these two materials' properties for potentiality of hosting LILW repository with suggestions for future investigations.

Keywords: Basement hard rock, Madhupur Clay, Radioactive waste repository, Bangladesh

再冠水試験に伴う埋め戻し試験 (2)坑道埋め戻し材の水理学的挙動の重要因子の推定

Backfilling test in the groundwater recovery experiment (2) Effective factors on saturation of backfilling material

*尾崎 裕介¹、尾上 博則¹、高山 裕介¹、高安 健太郎¹、竹内 竜史¹

*Yusuke Ozaki¹, Hironori Onoe¹, Yusuke Takayama¹, Kentaro Takayasu¹, Ryuji Takeuchi¹

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

日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として、岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所において、結晶質岩（花崗岩）を主な対象として深地層の科学的研究（地層科学研究）を進めている。現在、瑞浪超深地層研究所の深度500mに掘削した水平坑道を利用した研究開発として、①地下坑道における工学的対策技術の開発、②物質移動モデル化技術の開発、③坑道埋め戻し技術の開発の3つの課題を設定し進めている。

これらの研究開発課題のうち③坑道埋め戻し技術の開発の一環として、瑞浪超深地層研究所の深度500mの坑道内に止水壁を設置することで坑道の一部（以下、冠水坑道）を地下水で満たし、再冠水に伴う地質環境特性の回復過程を把握する再冠水試験を実施している。この試験の一部として、坑道内のボーリングピットを利用して、坑道冠水時の埋め戻し材（ベントナイト、砂、礫）の透水性や膨潤圧などの物性評価手法の構築を目的とした埋め戻し試験を実施している。

埋め戻し材には砂や礫とベントナイトの混合物を用いている。ピットの埋め戻し材内部には水圧計、土圧計及び土壌水分計を配置し、坑道の冠水に伴う埋め戻し材内部の水圧や飽和度の変化データを取得している。取得したデータからは、埋め戻し後約1ヶ月程度で、埋め戻し材内部が飽和していることが示唆されている。他方、高山ほか(2015)による埋め戻し材の物性をベントナイト100%と仮定した予察解析では、冠水後約1年でピット全域の飽和度が90%以上に達する結果であった。このことから埋め戻し材のベントナイトの含有量が飽和挙動に影響することが示唆されたものの、ベントナイトを含む埋め戻し材の飽和挙動に影響を与える要因は特定されていない。

上記の結果を踏まえ、本研究では、定常状態における埋め戻し材内部の飽和度変化に影響を与える要因を特定することを目的として、固相/液相/気相連成有限要素解析コードDAC SAR-MP（金澤ほか、2012）を用いた解析を実施した。解析では、埋め戻し材の膨潤変形による間隙率変化が飽和度変化に与える影響、埋め戻し材内部の透水性および侵入する地下水の流量と飽和度変化の関係、埋め戻し材の吸水能力と飽和度変化の關係に着目し、①埋め戻し材の膨潤変形、②埋め戻し材の透水性、③埋め戻し材の不飽和特性を感度パラメータとした感度解析を実施した。

埋め戻し材の膨潤変形に着目した感度解析の結果、膨潤変形の有無で定常状態に至るまでの飽和度の時間変化に若干の違いが認められたものの、定常状態に至るまで約250日を要した。また、定常状態における飽和度分布は膨潤変形を考慮した場合とほぼ同様になることを確認した。埋め戻し材の透水性に関する感度解析では、ベントナイト100%の場合の透水性よりも100倍高い場合を想定した解析結果においても定常状態に至るまで約200日を要し、ピット内中心付近では完全には飽和しないことが確認された。これに対し、不飽和特性に関する感度解析では、粒径の大きさと関連のあるモーレム定数を大きくした場合に約10日で埋め戻し材の全域がほぼ飽和した。

これらの結果は、埋め戻し材の不飽和特性が埋め戻し材内部の飽和度変化に影響を与える重要なパラメータであり、特に埋め戻し材の平均的な粒径が関連している可能性を示唆している。さらに、埋め戻し材の飽和度変化を精度よく推定するためには、不飽和特性に関するデータを取得することの必要性が示された。

キーワード：埋め戻し材、飽和挙動、シミュレーション

Keywords: Backfill material, Saturation process, Numerical simulation

地下水の地球化学分析と物質移行解析による断層の水理特性の把握

Estimation of hydrogeological properties of a fault by geochemical analysis of groundwater and mass transport analysis

*岡嶋 純也¹、柏谷 公希¹、多田 洋平¹、小池 克明¹

*Junya Okajima¹, Koki Kashiwaya¹, Yohei Tada¹, Katsuaki Koike¹

1. 京都大学

1. Kyoto University

高レベル放射性廃棄物の処分方法として、日本をはじめ世界各国で検討されている地層処分では、処分した廃棄物に含まれる放射性核種が地下水の作用で溶け出した場合でも、生物圏に影響を及ぼさないことが求められる。そのため、処分場周辺の地下水の流動状態を把握する必要があるが、その内部構造に応じて地下水流動のパスとしても、バリアとしても働く断層の水理特性の理解は十分でない。そこで本研究では、地下水のサンプリングおよび分析と既存資料から断層周辺における地下水の環境トレーサー濃度の空間分布や時間変化を把握し、三次元水理地質モデルを用いた地下水流動解析および物質移行解析の結果と比較することで、断層周辺の地下水流動状態および物質移行状態を推定した。

本研究の対象地域は日本原子力研究開発機構（JAEA）瑞浪超深地層研究所の周辺地域である。研究所の地下坑道内には、北西-南東走向で深度500mに達する主立坑に沿ってほぼ鉛直傾斜の主立坑断層が分布しており、その両側に位置するボーリング孔5箇所、計12区間で地下水試料を採取した。主要溶存イオン、アルカリ度、水素・酸素同位体、六フッ化硫黄、トリチウムの5項目を分析し、JAEAにより公開されている過去の地下水の地球化学モニタリングデータ（齋ほか、2011；新宮ほか、2011；新宮ほか、2012；大森ほか、2013a；大森ほか、2013b；大森ほか、2014）と合わせて各種特性の空間分布や時間変化を把握した。また、研究所周辺を含む三次元水理地質モデルを作成し、まず広域での地下水流動解析を行った。得られた結果を境界条件として、断層周辺をマルチグリッド化したモデルを用いて地下水流動解析および物質移行解析を行い、分析で得られた実測値と比較した。

分析の結果、カルシウムイオン、塩化物イオン、臭化物イオンの各濃度、水素・酸素同位体比、さらにトリチウム濃度について断層両側で空間分布の特徴が異なることが明らかとなった。上述のイオン濃度には高い相関が認められ、断層南西側でのみ時間とともに濃度が低下する傾向が見られた。断層周辺での立坑掘削の影響を考慮した塩化物イオンの物質移行解析の結果では、分析結果と同様に断層南西側でのみ濃度変化が見られた。地下水流動解析の結果でも断層両側で水頭差が確認されたため、主立坑断層は遮水性の構造であることが確かめられた。また、トリチウムを対象とした物質移行解析の結果からは、断層両側のダメージゾーンに沿った、トリチウムを含む若い地下水の流入が確認でき、その流速は断層南西側の方が大きいことが示唆された。これは分析の結果と一致しており、主立坑断層における地下水流れのパスとしての機能が明らかになった。

今後は今回使用した以外の成分についても分析を実施するとともに、水-岩石反応を考慮し、断層周辺での水質の空間分布や時間変化を推定する予定である。

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。

引用文献

齋正貴・新宮信也・萩原大樹・水野崇（2011）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2008年度），JAEA-Data/Code 2011-003.

新宮信也・齋正貴・萩原大樹・水野崇（2011）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2009年度），JAEA-Data/Code

2011-004.

新宮信也・萩原大樹・増田薫・飯塚正俊・乾道春・水野崇（2012）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2010年度），JAEA-Data/Code 2012-003.

大森一秋・新宮信也・萩原大樹・増田薫・飯塚正俊・乾道春・岩月輝希（2013）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2011年度），JAEA-Data/Code 2013-001.

大森一秋・新宮信也・増田薫・青才大介・乾道春・岩月輝希（2013）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2012年度），JAEA-Data/Code 2013-024.

大森一秋・長谷川隆・宗本隆志・増田薫・青才大介・乾道春・岩月輝希（2014）超深地層研究所計画における地下水の地球化学に関する調査研究—瑞浪層群・土岐花崗岩の地下水の地球化学特性データ集—（2013年度），JAEA-Data/Code 2014-019.

キーワード：地下水、環境トレーサー、物質移行解析

Keywords: groundwater, environmental tracer, mass transport analysis

RQDに基づく割れ目頻度の推定方法の検討

Estimation of fracture frequency on the basis of Rock Quality Designation

*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>

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、日本学術会議（2014）は、「放射性核種が地下水によって人間環境に運ばれるかも知れないことは大きな不安要因であることから、「割れ目の少ない岩盤を処分場候補地とすることが望まし」く、それには「地質履歴から割れ目の少ない岩盤を探す論理立てを確立することが必須である」としている。このためには、まずは国内の岩盤（岩体）での割れ目の分布状態を知る必要があるが、割れ目の分布を調査した事例は限られている。そこで、本検討では、割れ目を評価するための代替情報として、一般的なボーリング調査で広く取得されているRQD（Rock Quality Designation）に着目した。ただし、RQDは割れ目の数が同じでも、割れ目間隔によって数値が変わりうるため、岩体スケールの割れ目頻度の多寡を1mごとに求められるRQDに基づいて直接的に評価することは困難である可能性が考えられる。このため、本検討では、これまでに数多くの深層ボーリングが行われている土岐花崗岩を対象として、ボーリング孔ごとにRQDの平均値を計算し、割れ目頻度と比較した。

<方法>

RQDは一般には回収されたコア観察に基づいて計算される。しかし、この方法では、コアロスの発生や掘削・回収時の割れ目の形成によって、RQDが適切に見積もられない可能性がある。一方で、掘削後にボアホールテレビ（BTV）を用いた孔壁観察によって適切に割れ目の状態を捉えることができ、孔壁観察の結果からRQDを計算した方が岩盤特性をより適切に評価できるとされている（鈴木・梶原，1997）。

そこで、本検討では、瑞浪超深地層研究所周辺の地表から掘削したボーリング19孔（鉛直孔17孔、傾斜孔2孔）と、研究所の研究坑道から掘削したボーリング5孔（鉛直孔1孔、水平孔4孔）において、BTVを用いた孔壁観察で確認された割れ目データ（石橋・笹尾，2015，2016）に基づいてRQDを計算した。対象としたボーリングの花崗岩中の総掘削長は16,180mであり、確認された割れ目は合計43,658本である（なお、割れ目のうち、孔壁画像上で破断面の形状、連続性ともに極めて明瞭な割れ目（明瞭割れ目）は24,737本であった）。

本検討では、各割れ目の交差深度（傾斜している場合には、中間の深度を使用）を抽出し、2つの割れ目の交差深度が10cm以上の区間長を掘削長1mごとに求めることによりRQDを計算し、それをボーリング孔ごとに平均した。

<結果と考察>

地表からのボーリングと研究坑道内からのボーリングのBTV調査で得られた割れ目データに基づく、ボーリング孔ごとのRQDの平均（以下、BH平均RQDと呼ぶ）は79.9～98.6、割れ目頻度（1m当たりの割れ目の数）の平均（以下、BH平均割れ目頻度と呼ぶ）は0.7～6.6本/mであった（明瞭割れ目のみでは、BH平均RQDは89.5～99.1、BH平均割れ目頻度は0.5～3.8本/m）。BH平均RQDとBH平均割れ目頻度の間には明瞭な相関があり、BH平均RQDの平均値が大きいほどBH平均割れ目頻度が低く、BH平均RQDが小さいほどBH平均割れ目頻度が高いことが明らかになった。

本検討で使用したボーリングの花崗岩中の掘削長は、地表からのもので329～1,185m、坑内からの鉛直孔で331m、水平孔で30～106mであり、BH平均RQDとBH平均割れ目頻度の関係はボーリング孔の傾斜角や掘

削長には影響を受けないと推定される。そこで、検討に使用したボーリング孔ごとのデータを、掘削の傾斜角に関係なく、掘削長100mごとに分割し、RQDの平均と割れ目頻度の平均を比較した。その結果、掘削長100mごとのRQDの平均は68.0~100.0（平均92.9）、1m当たりの割れ目頻度の平均は0~9.2本/m（平均2.8本/m）であった。このRQDと割れ目頻度を比較した結果、BH平均RQDとBH平均割れ目頻度との関係に比べてばらつきが若干大きくなるものの、両者には相関が認められた。

この結果から、1mごとに得られるRQDを適当な長さで平均することによって、割れ目の多寡の評価に活用できると考えられる。今後は、どの程度以上の区間長であれば割れ目頻度を適切に評価できるかを検討するとともに、他岩体のデータも加味した検討が必要である。

文献

石橋・笹尾（2015, 2016）日本原子力研究開発機構研究開発報告書類, JAEA-Data/Code 2015-004, 8p. および2016-009, 10p.

日本学術会議 高レベル放射性廃棄物の処分に関するフォローアップ検討委員会 暫定保管に関する技術的検討分科会（2014）報告 高レベル放射性廃棄物の暫定保管に関する技術的検討, 65p.

鈴木・梶原（1997）応用地質技術年報, No.19.61-70.

キーワード：割れ目頻度、RQD、土岐花崗岩

Keywords: fracture frequency, Rock Quality Designation, Toki granite

放射性廃棄物処分における沿岸部の下刻侵食のリスクマネジメント

Risk management of downward erosion in the coastal area for disposal of radioactive waste

*幡谷 竜太¹

*Ryuta Hataya¹

1. 一般財団法人 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

1. はじめに

HLW処分場の科学的有望地選定に係わる中間整理[1]において、沿岸部がより適性の高い地域とされた。これを受けて設置された沿岸海底下等における地層処分の技術的課題に関する研究会では、隆起・侵食に係る調査・評価技術の高度化の必要性が取り上げられた。一方、中深度処分の規制の審議でも、少なくとも10万年間は著しい侵食作用の影響を回避し、侵食作用を考慮しても離隔に必要な深度を確保することが議論されている[2]。これらを踏まえ、本発表では、沿岸部の河川下刻のリスクアセスメントの知見[3など]に基づき、沿岸部の隆起・侵食に関わるリスクマネジメントの枠組み、リスクに関わる意思決定の在り方について議論し、マネジメントの観点から解決すべき課題を抽出する。

なお、本研究では議論を単純化するため、議論の範囲を隆起地域に限定、断層等の影響はない、との前提を置いて、海水準変動1サイクル後の約10万年間を議論する。

2. 下刻侵食のリスクマネジメントの概要

一般的なリスクマネジメントの流れに沿って、リスク対応方針の決定、リスクアセスメント、リスクトリートメントを考える。

(1) リスクマネジメント方針

最終処分法では、著しい侵食の影響を避けるとされているが、この具体化として、少なくとも10万年間は地表露出させない、少なくとも10万年間は一定深度を確保するといった考え方がある[2, 4など]。いずれにせよ、下刻が着目される。

(2) リスクアセスメント

沿岸部における河川下刻のリスク分析については、1つには、中間整理[1]などで述べられた、「過去10万年程度の間の海水準の最大低下量と隆起量の和」を最大下刻量とする考え方がある。一方、「我が国の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する見解もある[3]。さらに、「過去に実際に起こった下刻量を以て、これを将来の下刻量と評価する」という考え方もあろう。

以上のようなアセスメントの結果を以て、リスク基準との比較を行う（リスク評価）。リスク基準については、次章で詳述する。

(3) リスクトリートメント

一般に、リスクへの対応は、回避、低減、分散、保有の4つに区分される。前3者は、それぞれ、サイトから除外する、埋設深度を深くする、複数地点を選定・開発すると言える。

3. 放射性廃棄物処分サイトの選定に際しての河川下刻のリスク基準の考察

意思決定をスムーズに行うための知恵として、我々は予めリスク基準を決め、それと調査・評価の結果を比較することをやってきた。前章では、3つの河川下刻のリスクアセスメントの考え方を紹介したが、これらのことから、将来約10万年後の下刻に対して、以下の3つのリスク基準を考えることができる。

[A]最大海面低下： 隆起量+最大海水準低下量

[B]後期更新世以降の海面低下に対する下刻の最大値：隆起量+100m（隆起域）

[C]後期更新世以降の海面低下に対する下刻の実績値：隆起量+沖積層基底深度

Aは海水準変動の不確実性の影響を容認する。即ち、想定よりも海水準最大低下量が大きければ下刻は深くなるし、小さければ浅くなる。Bは海水準変動に加えて、沖積層基底の深度分布の不確実性の影響を保有する。つまり、反証があるかないかである。Cは海水準変動に加えて、地形・地質調査の不確実性の影響を保有する。なお、どこが下刻されるかわからない、河川の流路が特定できない前提では、AとBは採用できるが、Cはできない。

大局的には、A、B、Cの順に地表接近に関わる裕度が大きくなり、処分場建設可能範囲が広がると考えられ、また、経済的にも有利と考えられる。

4. まとめ

本稿はどのリスク基準の妥当かを述べるものではない。ここで訴えたい点は、将来予測を受入れること、リスク対応方針、リスク基準、リスク対応を決めることは、背後にあるリスクを保有するという当たり前のことである。そして、長期の将来を見通すことが求められる放射性廃棄物処分事業では、リスクマネジメントの枠組みを示し、殆どが個々に実施されているリスク分析の研究をこの中で具体的に表現すること、保有するリスクを説明することが、意思決定の際の効果的な情報提供となると考える。

引用文献

[1]地層処分技術WG（2015）科学的有望地の要件・基準に関する地層処分技術WGにおける中間整理，[2]原子力規制委員会（2016）炉内等廃棄物の埋設に係る規制の考え方について（案），[3]幡谷ほか（2016）応用地質，57，15-26.，[4]NUMO（2009）概要調査地区選定上の考慮事項。

キーワード：地層処分、沿岸部、侵食、リスクマネジメント

Keywords: geological disposal, coastal area, erosion, risk management

Assessing the probability of concealed active faults existing through Bayesian analysis of known active faults, historical seismicity and helium isotopes

*Andrew Martin¹, Koichi Asamori², Tsuneari Ishimaru²

1. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, 2. Japan Atomic Energy Agency

Assessing the stability of the geological environment including the spatio-temporal distribution of active faulting is of particular concern in the context of site selection of critical facilities such as nuclear power plants, spent fuel reprocessing facilities as well as geological repositories or surface storage facilities of radioactive waste etc. Understanding the spatial distribution of active faulting is one of the challenges facing geologists in that not all active faults have surface expressions. This is especially so for active faults that initiated within the last 0.5 Ma due to their smaller cumulative displacements compared with older and more mature active faults (e.g. faults that have been active for 1 –2 Ma or longer) (Doke et al., 2012).

The western Tottori regions is an area where two recent earthquakes occurred along two separate unknown faults; the 2000 Tottori earthquake (6 October 2000; Mw 6.6) and the 2016 Tottori Earthquake (21st October 2016; Mw 6.2).

We present here a probabilistic approach based on Bayesian statistics that can be used to combine multiple datasets (in this case historic seismic data and helium isotopes sampled from wells) to produce hazard maps showing the likelihood of active faults existing or not.

In order to assess the spatio-temporal distribution of active faults, we start by looking at mapped active faults to estimate spatial frequencies and orientations. This data is sporadic as active faults listed in current databases do not necessarily represent all active faulting, as not all active faults have a surface evidence and their existence might be unknown. In this case, additional datasets are needed that may imply the existence of active faulting. Datasets such as high He-3/He-4 ratios which tend to be found in volcanic regions have been attributed to degassing from the mantle. Studies carried out in the western Tottori district have shown the potential of using He-3/He-4 ratios as a means of providing indirect evidence of the existence of source fault(s) that caused the 2000 and 2016 Tottori earthquakes (e.g., Umeda and Ninomiya, 2009).

We applied our Bayesian model in the Tottori district as a case study. In the first step, present known active faults are divided into equal fault segments. 2-D prior probability distributions are calculated using probability density functions (PDFs) centered over the fault segments with varying values of standard deviation depending on the degree of conservatism required. A non-conservative PDF is assigned in the first step so that probability is never zero. In the second step, statistical tests are used to remap additional datasets, here He-3/He-4 and estimated historic seismic source zones into a likelihood PDF. The prior PDF from the first step above is then combined with the likelihood PDF using Bayes' rule to produce a posterior PDF. The posterior PDF is then evaluated using recent seismic activity.

References

Doke, R., Tanikawa, S., Yasue, K., Nakayasu, A., Niizato, T., Umeda, K. and Tanaka, T. (2012), Spatial patterns of initiation ages of active faulting in the Japanese Islands (in Japanese with English abstract). *Active Fault Research*, 37, 1 –15.

Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.

Keywords: Active Fault , Bayesian, Probability

高速増殖原型炉もんじゅ敷地の花崗岩に見られる非活動的な破碎帯の小規模構造

Meso and microstructures of non-active crush zone in granite at the Monju site

*島田 耕史¹、末岡 茂¹、照沢 秀司¹

*Koji Shimada¹, Shigeru Sueoka¹, Shuji Terusawa¹

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：破碎帯の活動性評価を進める際に、活動的ではないことが既知である破碎帯の小規模構造との比較は有用である。重要施設の立地に関連して活動性評価が求められるのは、しばしば、小規模な破碎帯であるが、それらの変形構造に焦点を当てた研究例はあまり多くない。そこで本報告では花崗岩中に発達する非活動的な破碎帯の小規模構造について紹介する。試料は、福井県敦賀半島北部のもんじゅ敷地の花崗岩中にみられる破碎帯から得られたもので、この破碎帯には約19Maの玄武岩岩脈貫入以降の活動は認められない (Sueoka et al., submitted)。

延性的な小規模変形構造：破碎帯は主すべり層に沿って約10cmの右ずれを示す。この主すべり層の外側では、変位マーカー（古い破碎帯）が引きずられたせん断変形がみられる。この外側部分のひずみ測定を、単純せん断を仮定して計測したところ、厚さ9.3mmの部分の平均せん断ひずみは1.6と計算された。このような外側部分のせん断ひずみが肉眼的にわかる形で保存されるためには、変形は延性的である必要がある。

準脆性流動を示す変形微小構造：主すべり層の端部付近の最新活動を示す変形微小構造は、厚さ約1cmのカタクレサイトからなるひずみ集中帯中にみられる。構成鉱物は、主に石英、斜長石、カリ長石、黒雲母である。斜長石の変質による粘土鉱物の生成がみられるが、全体的に偏光顕微鏡下で透明感があり、粘土鉱物の量は少ない。石英の再結晶組織は認められない。母岩との境界は凹凸があり、mm規模で遷移する。母岩に向かって、鉱物粒子を横切る割れ目の数が減少していく。カタクレサイト中の石英、長石の破碎された粒子は、0.5-1mm程度の粒径が目立つ。黒雲母は引き伸ばされ、面構造を規定し、非対称紡錘形の粒子が右ずれセンスを示す。結晶内塑性変形を示す黒雲母と、破碎変形を示す石英、長石類の共存は、破碎帯が準脆性流動を生じつつ形成されたことを示しており、最新活動時期の変形環境は高温であり、活断層ではないことを示している。

Sueoka et al., Fission-track dating of faulting events accommodating plastic deformation of biotites. JGR-SE submitted.

キーワード：破碎帯、もんじゅ、花崗岩

Keywords: crush zone, Monju, granite

森林除染による土砂の流出を観測するための観測装置の設置

Installation of observation device for soil loss in a decontaminated forest

*渡辺 貴善¹、石井 康雄¹、新里 忠史¹、佐々木 祥人¹、三田地 勝昭¹

*Takayoshi Watanabe¹, Yasuo Ishii¹, Tadafumi Niizato¹, Yoshito Sasaki¹, Katsuaki Mitachi¹

1. 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

(背景)

東京電力福島第一原子力発電所の事故により環境中へ放出された放射性セシウムは、東日本の広い範囲に沈着した。環境省、地方自治体により人の生活圏の除染が実施されている。そのなかで、落葉広葉樹林に対する除染について「落葉等を除去することによって高い除染効果が得られることが見込まれ」、「森林周辺の居住者の生活環境における放射線量を低減する観点から、林縁から20m程度の範囲をめやすに行うことが効果的・効率的」（環境省除染関係ガイドライン平成25年5月第2版）とされている。除染作業で落葉が除去されることにより地面が露出され、除染前とは降雨での地面の侵食に変化が見られると考えられる。本件では、除染が行われた森林において土砂流出を観測するための土砂受けを設置し、土砂の移動を観測した結果を報告する。

(観測方法)

調査対象の森林は福島県内のコナラ等の落葉広葉樹林で、2014～2015年に林縁から20mの範囲で除染が行われた。除染により、林床では笹等の下草は刈り取られ、堆積有機物層（分解が進み、落ち葉が破片状になったF層・H層を含む）が除去され、鉾質土層が露出した状態となった。樹木の細根が地面に露出している箇所もあった。2016年3月に森林内の除染がなされた領域において、地表流等による土砂流出を観測するための装置を設置した。観測する領域として、斜面方向に長さ4m、等高線方向に幅2mのプロットを設定した。プロット斜面の傾斜は27°である。領域内外の地表流を区別するために、プロット斜面の上端と側辺にプラスチック板で区画した。下端には地表流による流出土砂を捕捉するための土砂受けとして大型の雨どいを設置した。プロット斜面下端にアクリル板を5cm程度地面に差し込むことでスロープをつくり、斜面を流れる地表流がアクリル板を伝い土砂捕捉用の雨どいへ流れるようにした。雨どいから下流に50Lのコンテナボックスを取り付け、貯留タンクとした。2016/3/16から観測を開始し、12/9までに6回の土砂を採取した。

(流出土砂量)

流出土砂を捕捉する雨どいにたまった土砂の量は、合計4,491gであった
(3/16-4/5 : 3.4g/day, 4/5-5/30 : 5.3g/day, 5/30-7/12 : 20.6g/day, 7/12-9/2 : 55.3g/day, 9/2-11/23 : 4.2g/day, 11/23-12/9 : 1.7g/day)。プロットの単位面積当たりでは、561g（平均侵食深0.5mm程度）であり、東京電力福島第一原子力発電所の事故以降林床に人の手が加わっていない同傾斜の斜面での観測値の1オーダー大きい値であった。特に、7/12-9/2の期間に流出土砂の64%が集中していた。調査対象の森林から直線距離で6kmにある気象庁アメダスの観測点での雨量では、日雨量で118.0mm, 75.5mm, 78.5mmの大雨が8月下旬に集中したためと考えられる。土砂を採取した期間ごとの、土砂流出量式であるUSLE (Wischmeier & Smith; 1978) の降雨係数の近似として友正ほか(1990)で提案されている1時間雨量の2乗の和と雨どいにたまった土砂の量に対して、良い相関が得られた。発表では採取した土砂の放射性セシウムの濃度や沈着している放射性セシウムに対する流出割合についても報告する。今後、落葉により斜面の土壌が次第に被覆され、降雨での侵食が抑制されていくと考えられることから観測を継続する予定である。

(文献)

環境省, 除染関係ガイドライン第2版, 平成25年5月

Wischmeier, W. H., Smith, D. D., Predicting rainfall erosion losses –a guide to conservation planning, Agriculture Handbook No. 537. (1978)

友正達美, 高木東, 中尾誠司, 土壌流亡量式USLEにおける降雨係数の近似計算法 (1990)

キーワード : 福島第一原子力発電所事故、森林除染

Keywords: accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, forest decontamination

レジン注入による割れ目可視化と岩石組織観察

Fracture visualization by resin injection and rock texture observation

*濱田 藍¹、宮川 公雄¹

*Ai Hamada¹, Kimio Miyakawa¹

1. 一般財団法人電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、放射性核種が地質環境中を移行する場合、地下の岩盤中に発達する割れ目が主要な移行経路となると考えられている。岩盤中の物質移行特性を直接的に評価する手法の一つとして、岩盤中の割れ目に蛍光剤を添加したレジン（樹脂）を注入し、レジン硬化後のボーリング掘削で得たコア試料に認められるレジン充填割れ目の幅を計測する方法がある。電中研ではスイスグリムゼル試験場においてこの手法を適用し、レジン充填割れ目の幅の評価を行った。この実績を生かし、国内の花崗岩などの結晶質岩に適用するため、割れ目の可視化技術の高度化を進めている。本稿では、可視化した割れ目の地質学的な特徴を把握するために、原位置レジン注入試験に使用予定のレジンを室内で注入したコア試料を用い、レジン充填割れ目とその周辺母岩を含む岩石薄片を製作し、偏光顕微鏡下における観察を行った。日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所の深度300m坑道において掘削したボーリングコアに黄色の蛍光剤を添加したエポキシ樹脂を注入し、レジン充填割れ目とその母岩を含んだ岩石薄片を製作し観察を行った。その結果、レジン充填割れ目の幅は平均0.17mm、割れ目表面には細粒の方解石（0.05mm前後）やより微細な方解石（0.005mm以下）の分布を確認した。前者の方解石中には不透明鉱物や破碎した斜長石も複数混在して認められ、レジン充填割れ目沿いに平行に発達する微細な割れ目にも充填している場合が多い。これに対し後者は方解石のみから成り比較的割れ目表面の最上位に産することが多い。このように異なる粒径の方解石とそれと共に産する鉱物、分布領域の違いにより、レジン充填割れ目に晶出した方解石の新旧関係を見出した。また薄片製作前の岩石チップに青色の顔料を添加したレジンを圧入（15~17MPa）することで、黄色の蛍光剤を添加したレジン注入時よりも大きな圧力下でレジンを注入した場合に可視化される割れ目幅を測定した。その結果、可視化された割れ目の幅は平均0.006mmであり、青色のレジンの方は鉱物粒界や石英中の割れ目に注入されていることが分かり、より微細な割れ目幅まで評価が可能であることが分かった。上記の方法で深度500mのコア試料についてもレジン注入および岩石薄片観察を行い、レジン注入により可視化された割れ目間隙の評価と割れ目周辺の岩石組織観察から割れ目形成と新旧関係について考察する予定である。なお、本研究の内容は、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、（国研）日本原子力研究開発機構との共同研究の一部として実施した。

キーワード：地層処分、レジン注入、割れ目可視化、結晶質岩、土岐花崗岩、瑞浪超深地層研究所

Keywords: geological repository, resin injection, fracture visualization, crystalline rocks, Toki granite, Mizunami URL

再冠水試験に伴う埋め戻し試験 (1)坑道埋め戻し材の浸潤・膨潤過程の観測

The backfilling test in the groundwater recovery experiment

(1)Observation of saturation and swelling process

*高安 健太郎¹、竹内 竜史¹、尾上 博則¹

*Kentaro Takayasu¹, Ryuji Takeuchi¹, Hironori Onoe¹

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

1. はじめに

日本原子力研究開発機構は、高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発の一環として、岐阜県瑞浪市に位置する瑞浪超深地層研究所において、結晶質岩（花崗岩）を主な対象として深地層の科学研究（地層科学研究）を進めている。現在、瑞浪超深地層研究所の深度500mに掘削した水平坑道を利用した研究開発として、①地下坑道における工学的対策技術の開発、②物質移動モデル化技術の開発、③坑道埋め戻し技術の開発の3つの課題を設定し進めている。

これらの研究開発課題のうち、③坑道埋め戻し技術の開発の一環として、瑞浪超深地層研究所の深度500mの坑道内に止水壁を設置することで坑道の一部（以下、冠水坑道：長さ40m×幅5m×高さ4.5m）を地下水で満たし、再冠水に伴う地質環境特性の回復過程を把握する再冠水試験を実施している。この試験の一部として、坑道冠水時の埋め戻し材（ベントナイト、砂、礫）の透水性や膨潤圧などの物性評価手法の構築を目的とした埋め戻し試験を実施している。本発表では、埋め戻し試験の概要とこれまでの観測結果を紹介する。

2. 埋め戻し試験の実施内容

埋め戻し試験は、冠水坑道の床盤に掘削したボーリングピット2ヶ所（長さ4m×幅3m×深さ1m）で実施している。埋め戻し材はベントナイトを配合して周辺地山と同等以上の低透水性をもたせることを想定し、透水係数 10^{-11} m/sオーダーの低透水性が期待できる混合率として、ピットA（ベントナイト15%、砂35%、礫50%）、ピットB（ベントナイト15%、砂85%）とした。埋め戻し施工における管理基準は、室内試験の結果等を参考に乾燥密度 $1.3\sim 1.5\text{g/cm}^3$ 、含水比11~15%とした。

各ピットの初期状態の把握として、ピットの形状計測、壁面観察、割れ目からの湧水量計測を実施しており、ピット壁面の割れ目密度には明瞭な粗密のコントラストがみられたが、湧水分布と割れ目密度に関連性は認められなかった。

埋め戻し方法、埋め戻し条件の確認及び計測機器の設置方法の確認を目的とした予備試験を地上で実施した後、2014年9月に冠水坑道のピットで埋め戻しを行った。ここでは厚さ約0.1mの締固めを繰り返し、高さが約0.7~0.8mとなるよう施工した。埋め戻し材への地下水の浸潤過程などを把握するため、ピット1ヶ所あたり水圧計6個、土壌水分計14個を埋め戻しピット中間深度の同一水平面上、土圧計6個をピットの中央・縁辺・上下端に配置した。埋め戻し完了後には、ピット上部に厚さ0.2~0.3mのコンクリート蓋を打設した。

ピット埋め戻し後、2015年9月10日から9月14日までと、2016年1月25日から2017年2月現在（継続中）までの2回にわたり冠水坑道を冠水させた。

3. 観測結果

ピット内の土壌水分は、両ピットとも、埋め戻し直後から湧水量の多い岩盤面近傍の地点で上昇する傾向が見られた。また、埋め戻しから約1週間後に冠水坑道全体が水深30cm程度湛水し、全28観測地点中26地点で飽和あるいは異常を示した。湛水した水の排水後、ピットAでは土壌水分計の出力はほぼ湛水前の値に回復した。その後のピットAの飽和状況は地点により異なり、ピット中央部で2週間程度、ピット外側部（岩盤との接触部）で数日から1ヶ月程度で飽和に達した。これらの結果は、ピットAでは、岩盤からの湧水により外側から

内側に向かって飽和領域が広がるものの、岩盤からの湧水量の違いや埋め戻し材の透水不均質性により外側部でも飽和までに時間を要する状況にあったことを示唆する。一方、ピットBでは排水後もほとんどの地点で飽和を示す値となった。この原因としては、ケーブルの浸水により出力上昇が生じたこと、ケーブル周縁の締固めが十分でなく水みちが形成されたことなどが考えられる。

第1回の冠水では、止水壁のバルブ閉栓直後から水圧が急激に上昇し、水圧・土圧ともに最大1.7 MPa程度を示した。9月14日以降は冠水坑道からの排水により水圧・土圧ともに急激に低下しほぼ0.0 MPaに戻った。

第2回の冠水では、止水壁のバルブ閉栓直後から水圧が急激に上昇し、水圧・土圧ともにバルブ閉栓18日後に3.1 MPa程度を示した。その後水圧は6ヶ月間低下し、さらにその後6ヶ月間2.4 MPa程度で定常状態となっている。この水圧・土圧の変化は冠水坑道の水圧変化とほぼ一致している。

観測された水圧と土圧から埋め戻し材の膨潤圧を求めたところ、ピットAで0.03~0.09 MPa、ピットBで0.05~0.08 MPaを示し、室内試験で得られたピットA材で0.03~0.04 MPa、ピットB材で0.04 MPaと比べやや大きい値を示した。

4. 今後の展開

今後もピット内部での観測を継続し、基礎データの取得及び観測機器の耐久性や設置法の確認を行う予定である。また、冠水坑道の排水後に、埋め戻しピットの状況やセンサーの設置状況を確認すると共にピット内の埋め戻し材を採取し、室内試験により実際の埋め戻し材の特性を確認する。

キーワード：再冠水試験、埋め戻し試験、埋め戻し材、ベントナイト

Keywords: Groundwater recovery experiment in tunnel, Backfilling test, Backfill material, Bentonite

花崗岩地域に建設した坑道の閉鎖に関わる地球化学解析

Geochemical analysis of groundwater chemistry after the drift closure in granite

*林田 一貴¹、加藤 利弘¹、久保田 満¹、岩月 輝希¹

*Kazuki Hayashida¹, Toshihiro Kato¹, 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

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業では、地上からの様々な調査によりその適性が確認された地質環境に地層処分場が建設される。一方で、その建設・操業時には坑道が大気環境になることや、長期にわたる地下水の排水、セメント材料の使用などの環境擾乱により、地下施設閉鎖後の化学環境が事前の調査により理解された状態と異なる可能性がある。そのため、地下施設閉鎖後の化学環境の形成プロセスを理解しておく必要がある。

本研究では、地下施設の建設・操業により乱された化学環境の確認とその形成プロセスの理解を目的として、岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所において、花崗岩の深度500mに建設された研究坑道の一部（幅5m、高さ4.5m、長さ約45m：総容量約900m³、以下、冠水坑道とする）を止水壁により閉鎖し、周辺の地下水によって冠水させた。その後、約1年間にわたり定期的に冠水坑道内の地下水を採取し、主要成分濃度、トレーサー（蛍光染料）濃度、pH、酸化還元電位などの観測を行った。また、地球化学計算コードPHREEQCにより主要な化学反応プロセスの解析を行った。

結果・考察

冠水坑道内のトレーサー濃度は、坑道が冠水した2016年1月25日から徐々に減少し、冠水から約180日後には初期値の約2割程度まで減少した。止水壁付近の湧水から冠水坑道の地下水と同等の濃度のトレーサーが検出され、冠水坑道内の地下水が冠水坑道外に浸み出していることが確認されたため、冠水坑道周りの地下水が冠水坑道内へ流入し、冠水坑道内の地下水と徐々に入れ替わっていると判断された。

冠水坑道内の地下水の酸化還元電位は、冠水から約20日を過ぎると大きく低下し始め、約120日後には冠水坑道掘削前の値（約-180mv）と同等まで回復した。冠水直後の地下水には酸素が5mg/L溶存していたが、約120日後には<0.02mg/Lまで減少した。また、硝酸イオン濃度が冠水直後に<0.05mg/Lまで減少し、それと共に亜硝酸イオン濃度が一時的に増加したが、すぐに<0.05mg/Lまで減少しており、硝酸イオンの還元反応が確認された。加えて冠水から約100日経過後、硫酸イオン濃度の減少が確認された。これらの一連の水質変化は、微生物による還元作用に特有の過程であり、まず溶存酸素が消費され、続いて硝酸イオン、硫酸イオンの順で還元されたと考えられる。

地下水のpHについては、冠水直後の約pH9から徐々に上昇し、約180日後にはpH10付近まで上昇した。溶存成分の測定結果から、冠水坑道壁面の支保に用いた吹付コンクリートに由来する可能性のあるSi, Al, Feの濃度が冠水後増加した。また、坑道に流入する地下水と接している吹付コンクリートを採取して観察したところ、地下水との反応により吹付コンクリートのセメント材料に含まれるポルトランドイト（Ca(OH)₂）が減少し、炭酸カルシウムが生成していた。このことから、pHの上昇は、吹付コンクリートの溶解によるものと推測された。この現象はセメント材料を使用した坑道内で普遍的に起こるものと考えられる。

冠水坑道内の水質変化を定量的に評価するため、PHREEQCにより冠水坑道内で想定し得る鉱物相と初期地下水の水-鉱物反応を想定して、その再現を試みた結果、冠水坑道周囲からの地下水との混合と、吹付けコンクリートの構成鉱物（ポルトランドイト、シリカ、エトリンサイトなど）、花崗岩中の粘土鉱物などとの水-鉱物反応を仮定することでほぼ再現できることが確認された。

今後、冠水坑道内の岩石や吹付けコンクリートを採取し、その変質状態の確認を行うとともに、PHREEQCによる解析の妥当性を確認していく予定である。

キーワード：地下水水質、花崗岩

Keywords: groundwater chemistry, granite

花崗岩地域における地下水の長期変遷に関わる地球化学解析

Geochemical Modeling of long-term evolution for granitic groundwater

*村上 裕晃¹、渡邊 隆広¹、岩月 輝希¹

*Hiroaki Murakami¹, Takahiro Watanabe¹, 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

高レベル放射性廃棄物の地層処分に関わる安全評価では、地下水の塩濃度やpH及び酸化還元状態といった地球化学特性の長期的な変動幅に基づき放射性元素の挙動を推測する必要がある。地下水の地球化学特性は、地下水流動に伴う複数の水質の異なる地下水の混合や岩盤中での水-鉱物-微生物の相互反応などにより形成される。筆者らは、これまでに長期的な地球化学特性の推測手法の確度を向上させるために、岐阜県東濃地域の土岐花崗岩中の地下水を対象として、過去100万年間にわたる長期的な自然現象（気候変動に伴う涵養量変化や隆起・侵食に伴う地形変化など）を考慮した地下水流動特性の長期変動性解析や、地球化学特性の長期的な形成プロセスに関わる水-鉱物反応の熱力学的解析を行ってきた。本報告では後者の成果について報告する。

方法

地下水の滞留時間が異なる二つの領域を対象として、地球化学計算コードPHREEQC（熱力学データベース：PHREEQC.dat）により、主に地下水のpHと水質を理論的に再現することで、長期的な水質の形成に関わる主要なプロセスについて考察した。具体的には、起源となる表層水と花崗岩中の鉱物（斜長石（albite及びanorthite）、カリ長石（K-feldspar）、石英（quartz）、黒雲母（K-mica）、緑泥石（chlorite）、方解石（calcite）、イライト（illite）など）との水-鉱物反応の熱力学的解析を行った。

結果・考察

1) 相対的な地下水流動域

本研究地域においては、月吉断層の北側に滞留時間が数千年～1万数千年を示す地下水が分布している。当該領域の地下水に対する各鉱物の飽和指数を予備解析したところ、albite、anorthite、calcite及びquartzが地下水に対して未飽和～飽和平衡状態であると推定された。ただし、quartzは表層水に対しても飽和状態であったため、その溶解反応が地下水の水質形成に与える影響は相対的に小さいと推測される。そこで、実際の地下水の飽和指数と同等の飽和指数になるまで、表層水にalbite、anorthite及びcalciteを溶解させることで、地下水のpH及び溶存イオン濃度を再現できるか確認した。その結果、pHは8.2～9.3と算出され、対象領域に分布する地下水のpHの実測値（8.4～10.1）と概ね整合的な値を得た。Ca、Al、Siの各溶存イオン濃度については、地下水の実測データと概ね整合した。

2) 相対的な地下水滞留域

本研究地域においては、月吉断層の南側の地下深部に滞留時間が数万年以上を示す地下水が分布している。この領域の地下水は、主に塩濃度の異なる複数の地下水の混合によりその水質が形成されているため、水-鉱物反応プロセスの影響を受けやすい。そのため、混合プロセスの影響が小さいpHについてのみ解析した。滞留時間が相対的に長い当該領域の地下水は、albite、anorthite、calcite、quartzに加えてK-feldsparが未飽和～飽和平衡状態である。そこで、表層水に対して実際の地下水の飽和指数と同等の飽和指数になるまでこれらの鉱物を溶解させ、地下水のpHを熱力学解析により再現した。その結果、pHは8.2～9.3と算出され、対象領域に分布する地下水のpHの実測値（8.2～9.2）とよく一致した。

まとめ

土岐花崗岩の鉱物組み合わせ及び地下水の各鉱物に対する飽和指数を考慮し、地下水の滞留時間が数千年～1万数千年の地下水と数万年以上の地下水の地球化学特性を熱力学的に計算した。その結果、長期的な地下水のpHに関わる主要な水-鉱物反応を推定することができ、どちらの領域の地下水もpHがアルカリ性を示すことが明らかとなった。本解析で取り扱った鉱物は花崗岩を構成する代表的な鉱物であり、花崗岩地域において天水由来の表層水が地下に浸透して地下水が形成される場合、地下水のpHは普遍的にアルカリ性になるこ

とが示唆された。地下水の地球化学特性の長期的な変動幅を推測する際には、本研究で用いた手法が有効である。

謝辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である「平成28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）」の成果の一部である。

キーワード：花崗岩、地下水、地球化学解析

Keywords: granite, groundwater, geochemical modeling

日本列島における地質学的ひずみ速度の推定

Estimation of geological strain rates in the Japanese Islands

*渡部 豪¹、浅森 浩一¹

*Tsuyoshi Watanabe¹, Koichi Asamori¹

1. 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

日本列島は、プレートの沈み込みにより長期にわたって短縮変形を受け続けている。このような変形は、複雑な地形・地質構造で特徴付けられる日本列島の地質環境に影響を与えていると考えられる。日本列島における第四紀後期の地殻変動には、一様継続性と呼ばれる経験則（変位の方向の一様性や変位の等速性）が指摘されている（笠原・杉村, 1978; 松田, 1988）。しかし、日本列島における三辺・三角測量やGNSS観測に基づく測地学的ひずみ速度と活断層データ等から推定された地質学的ひずみ速度には、一桁に及ぶ顕著な食い違いが認められること（池田, 1996; 鷺谷, 2004; Shen-Tu et al., 1995）が知られている。地層処分における将来の地質環境の予測・評価は、過去数万年～数百万年における自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来へ外挿することが基本となる。そのため、特に外挿法による予測においては、対象とする領域における一様継続性の成立性を検討することも重要と考えられる。そこで本研究では、過去の地殻変動として、活断層の変位等の地形・地質学的な情報をディスロケーションモデルに適用することで地質学的ひずみ速度を推定し、現行の地殻変動を示す測地学的ひずみ速度との比較を行った。

本研究では、産業技術総合研究所の活断層データを利用し、日本列島の地質学的ひずみ速度の推定を行った。ここでは、半無限弾性体を仮定し、Okada (1985) のディスロケーションモデルに従って、443セグメントの内陸活断層の断層パラメータ（1,000年間の平均変位速度、断層の走向・傾斜・長さ・位置等）を用いて、断層運動に伴う地表面の変位速度を計算した。なお、地表面の変位速度の算出地点として、約1,200点のGEONET観測点の位置を採用している。続いて、Shen et al. (1996) の方法を用い、得られた変位速度に基づいて地質学的ひずみ速度を推定した。ここでは、緯度・経度方向に20 km毎に設定したグリッドに対し、直径40 km以内に含まれる変位速度を用いて、各グリッド近傍での平均的なひずみ速度を推定した。

以上の解析により推定した内陸活断層の運動に伴う地殻変動は、水平方向で最大4 mm/yr、上下方向では最大で1 mm/yrの沈降及び3 mm/yrの隆起を示す。このうち上下変動については、日本列島の多くの領域において0.3 mm/yr程度の隆起を示し、新潟―神戸ひずみ集中帯と東海地方（静岡県～愛知県）の太平洋側の領域では1 mm/yrの沈降を示す。また、GPS速度や水準測量による結果（村上・小沢, 2004）では、東北日本の太平洋側において5 mm/yr程度の沈降が示されており、東北地方の太平洋側では長期的に見て隆起、短期的には沈降という従来からの指摘については、本研究の結果においても同様に、地質学的な推定結果と測地学的な推定結果の違いが認められた。その一方で、ひずみ速度の主軸分布においては、新潟―神戸ひずみ集中帯での北西―南東方向の短縮、九州地方（島原―別府地溝帯）での南北伸長が認められ、測地学的ひずみ速度の主軸分布（例えば、Sagiya et al., 2000）と調和的な傾向を示すことが明らかになった。また、本手法には粘弾性の考慮等の課題があるが、このようなアプローチを用いることで一様継続性の検討において有用な情報を与えることができると考えられる。

引用文献：笠原・杉村 (1978): 岩波講座地球科学10, 296p. 松田 (1988): 地球, 10, 599-603. 池田 (1996): 活断層研究, 15, 93-99. 鷺谷 (2004): 地球, 46, 183-189. Shen-Tu et al. (1995): JGR, 100, 24275-24293. Okada (1985): BSSA, 75, 1135-1154. Shen et al. (1996): JGR, 101, 27957-27980. 村上・小沢 (2004): 地震2, 57, 209-231. Sagiya et al. (2000): Pageogh, 157, 2303-2322.

謝辞：本発表は、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。また解析には、産業技術総合研究所の活断層データを使用させて頂きました。記して感謝致します。

キーワード：活断層、地質学的ひずみ速度、ディスロケーション
Keywords: active fault, geological strain rate, dislocation