

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14277

研究課題名(和文)亀裂性岩盤を通過する地下水中のセシウムの移行挙動の解明

研究課題名(英文)Understanding the cesium migration in groundwater through the fractured rock

研究代表者

竹内 真司 (TAKEUCHI, Shinji)

日本大学・文理学部・教授

研究者番号：90421677

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：東京電力福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性セシウム(以下、Cs)の花崗岩類や堆積岩類中の移動の様子の把握と将来の影響予測を目的に、福島県の阿武隈山地から海側の領域を対象として地表水や井戸水、湧水を採取し、主要溶存成分、微量元素分析、年代測定、Cs濃度分析などに基づく総合的な評価を実施した。

その結果、採水地点の地質や採水深度などによって水質の分類が可能なこと、地下水年代やCs濃度の分析結果からは、起源の異なる地下水の存在が示唆された。以上の結果は、帰還を検討する住民の判断材料として重要な基礎資料となるとともに、Cs濃度等の継続的なモニタリングの重要性を示している。

研究成果の概要(英文)：For the purpose of predicting migration of the radioactive cesium (Cs) in the granitic rocks and sedimentary formations released by the Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and predicting the future effects due to the released Cs, comprehensive evaluation based on major and trace elements analysis, groundwater dating, Cs concentration, etc. in the surface, well and spring waters have been carried out at the area from Abukuma mountains to the Pacific ocean in Fukushima Prefecture. As a result, it is possible to classify the water quality according to the geology of the water sampling point and the sampling depth, and the analysis results of groundwater age and Cs concentration suggested existence of groundwater of different origins. The above results are important information on the decision of the residents who are considering the return on the disaster area and show the importance of continuous monitoring of Cs concentration.

研究分野：環境地質学

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 物質移行 地球化学的性状 地下水流動 花崗岩 堆積岩 断層

1. 研究開始当初の背景

東京電力福島第一原子力発電所事故（以下、1F事故）により放出された放射性物質は、福島県東部の浜通りおよび阿武隈山地に広く分布した（原子力規制庁, 2013）。比較的高濃度の放射性セシウム（以下、Cs）分布域のうち、花崗岩類分布域が占める割合は約7割に達する。当初、Csの多くは土壤に吸着しているとされていたが（文科省, 2012）、当該地域では花崗岩が露出あるいは地表付近に分布する地域が多い。花崗岩類の風化部や亀裂部は、透水性が高いことが知られており、花崗岩類中に到達したCsは、これらの高透水部を介して速やかに地下水を移行することが予想される。Csのうち、¹³⁷Csは半減期が約30年であることを考慮すると、流出域の湧水や井戸水中の放射能濃度は時間の経過とともに増加することが想定され、これを利用する住民等に影響が出ることが懸念される。しかしこれまで、花崗岩類を含め、亀裂性岩盤中でのCsの移行についての検討事例は皆無である。

2. 研究の目的

1F事故により放出されたCsの地下水での移動が生活圏へ与える影響を予測する手法を開発することを最終的な目的とする。本件では、今後の住民帰還の判断に資する基盤情報として、これまで検討事例が皆無であった亀裂性岩盤中でのCsの移動の挙動を明らかにすることを目標とする。

3. 研究の方法

調査地域は福島県南相馬市の南部地域である。現地調査として、阿武隈山地に露出する花崗岩類および海側低地に分布する堆積岩類の地質調査と表流水、井戸水、湧水を採取した。採取した水は、現地において一般水質分析（pH、電気伝導度、酸化還元電位）を実施した。また室内において主要溶存成分、微量元素の分析、Cs濃度の分析、地下水年代測定などを実施した。調査地域における試料採取地点を図1に示す。

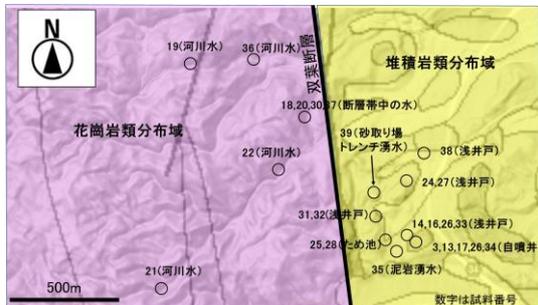


図1 調査地域の主な地質と試料採取地点

4. 研究成果

(1) 地質調査

調査地域の地質は、主に阿武隈山地を形成する花崗岩類が西側に分布し、中新世～更新世の堆積岩類が東側に分布することが確認

された。両者の境界には双葉断層が分布しており（図1）、調査地域内の石切り場露頭においてマイロナイトが確認されたことから、地下10数kmで形成されたものが上昇してきたものであることを示している。また、マイロナイトの母岩は花崗岩系の岩石であり、双葉断層が阿武隈山地の花崗岩類中に形成されたものであることを示唆している。

(2) 主要溶存成分分析

①採取地点におけるヘキサダイアグラムを図2に示す。同じ地点で複数回採取した地点については、代表的な結果を掲載した。花崗岩類分布域ではCa・Na-HCO₃型を、双葉断層の湧水（図2の18,20,30,37）はCa-HCO₃型を呈した。一方、堆積岩地域の湧水（同3,13,17,26,34,35）ならびに地下水（井戸水、同3,13,14,16,31,32,38）は、主にCa・Na-HCO₃型、Ca-SO₄型およびNa-SO₄型を呈した。また、SO₄²⁻濃度の高い湧水・地下水（同3,13,17,24,26,27,34,35）は、相対的にFe、Mn濃度や微量元素濃度も高い傾向にあり、より還元的な雰囲気であることを示唆する。また双葉断層の湧水、表流水や堆積岩類分布域の湧水は、花崗岩類分布域の湧水や表流水よりも溶存成分量が多い傾向にある。



図2 ヘキサダイアグラム

②トリリニアダイアグラムを図3に示す。採取地点の地質や採水深度の違いなどによってグルーピングされることが分かる。また比較的近傍に位置する浅井戸の地下水は二つの異なる領域に分かれた分布を示した。両者の違いは主にSO₄²⁻やNO₃の組成比に起因していると考えられる。さらに、トレンチ湧水（試料採取番号39）は花崗岩域河川水と同様の領域にプロットされた。

③主要溶存成分を用いた主成分分析

主成分分析で得られた主成分得点プロットを図4に示す。因子負荷量分析結果から、同図の横軸の第3主成分は生活排水等の人為影響を、縦軸の第2主成分は水質組成の違いを反映したものと推定される。トリリニアダイアグラムと同様に地質（花崗岩類、双葉断層湧水）や採水深度（自噴井、浅井戸）によって異なる領域に分布した。また、図3と同様に堆積岩類分布域の浅井戸は2カ所に分かれて分布した。

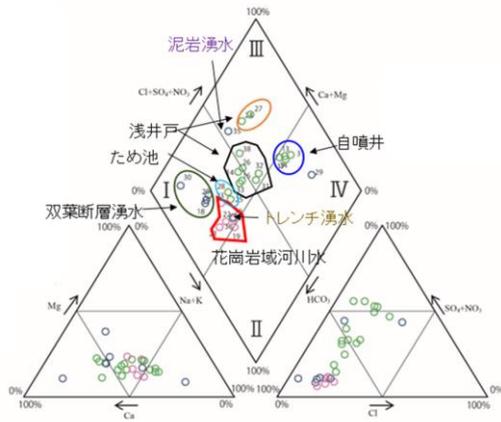


図3 トリリニアダイアグラム

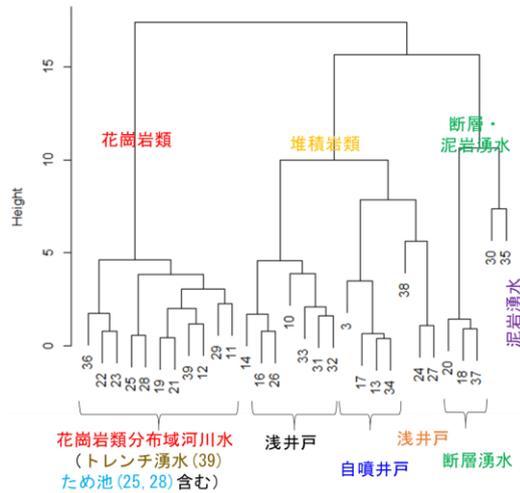


図5 クラスタ分析結果 (Ward法)

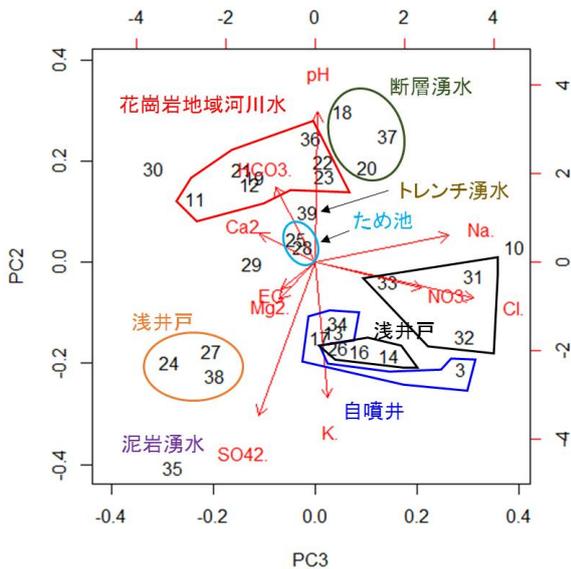


図4 主成分分析結果

④主要溶存成分を用いたクラスター分析
 クラスタ分析は主要溶存成分 (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻) と pH および電気伝導度 (EC) の 10 項目を用い、各成分を標準化した上で ward 法による解析を行った。得られた結果を図5に示す。ここでも地質の違いによる分類がなされている。また、上述と同様に浅井戸は異なる2カ所に分布した。さらに、花崗岩類分布域のグループの中には、堆積岩分布域のトレンチ湧水 (堆積岩を10m程度掘削したトレンチ最下部の砂岩層からの湧水 (39)) も含まれる。このことは当該地点の地下水が花崗岩類分布域から流動した地下水である可能性を示唆するものと考えられる。

(3)微量元素分析

微量元素分析の結果に基づき、希土類元素 (REE) パターンを検討した。検討では、希土類元素をコンドライトで規格化したもの

を用いて、調査地域の代表的な水質を示す浅井戸、自噴井、泥岩湧水、花崗岩類分布域の河川水、双葉断層湧水、トレンチ湧水を対象に実施した (図6)。浅井戸については、地点の異なる複数の井戸を対象とした。Ceが浅井戸、自噴井、花崗岩類分布域の河川水で負の異常を示すことや、Euが全ての試料で正の異常を示すことが特徴である。Ceの負の異常については、浅層の酸化的な雰囲気の影響を受けた地下水が存在することを示唆し、全ての試料でEuが正の異常を示すことは、還元的な雰囲気の影響を受けた地下水が存在することを示唆していると考えられる。

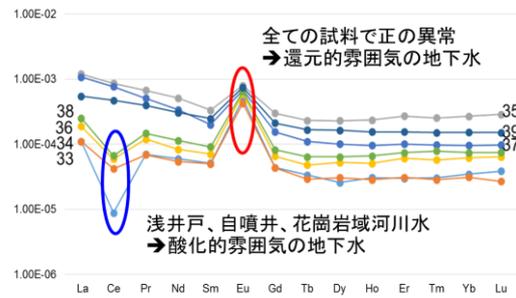


図6 希土類元素パターン

(4)地下水年代

調査地域の中で自噴井と双葉断層において湧水を採取し、放射性炭素 (¹⁴C) を用いて地下水年代 (滞留年代) を算出した。またフロン類 (CFCs) や六フッ化イオン (SF₆)、およびトリチウム (³H) を用いた年代測定を上記地点および浅井戸などの地下水を採取して実施した。結果を図7に示す。双葉断層では約700年 (¹⁴C) および25~30年 (CFCs, SF₆) の値が得られた。また、自噴井では約300年 (¹⁴C)、40~50年 (³H) および25~30年 (CFCs, SF₆) が得られ、各地点で新旧の地下水が混在していることが推定された。

(5)放射性セシウム濃度

自噴井、浅井戸からの湧水や地下水中の ^{137}Cs の濃度を測定した(図7)。測定は、カートリッジにより水中の溶存態と懸濁態をそれぞれ回収する方法により採取し、これをゲルマニウム半導体検出器で測定した。

自噴井では溶存態、懸濁態とも検出限界以下であった。一方、浅井戸では極微量な濃度が検出された。

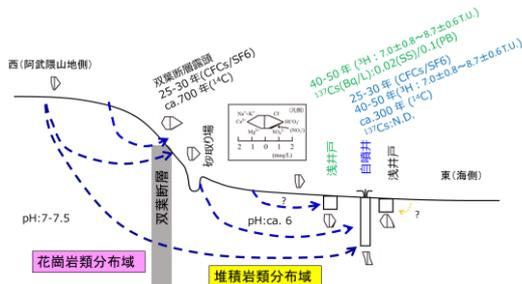


図7 地下水年代および ^{137}Cs の濃度

(7)まとめ

花崗岩類と堆積岩類分布域の境界部に断層が存在する地域において表流水、地下水、湧水を採取し、水質分析(主要溶存成分、微量元素)や多変量解析、REEパターンの検討を行った。さらに地下水等の年代測定と ^{137}Cs の濃度測定を実施した。

ヘキサダイアグラムやトリリニアダイアグラム、多変量解析の結果から、花崗岩類分布域の表流水、双葉断層の湧水、堆積岩類分布域の地下水の水質組成の違いが明瞭に区分され、さらに堆積岩類分布域の浅井戸、自噴井、湧水の水質組成の差異が把握された。さらに、堆積岩類分布域のうち、トレンチ湧水の水質や多変量解析の結果、花崗岩類分布域の地表水との類似性が示唆された。また、REEパターンの検討結果から、堆積岩類分布域の浅井戸や自噴井と花崗岩類分布域の河川水については、地表付近の酸化性的な雰囲気地下水と、地下深部からの還元性的雰囲気の地下水の混合が示唆された。年代測定結果からは新旧の地下水混合を示唆する結果を得た。また ^{137}Cs の濃度測定結果からは、一部の浅井戸から微量な濃度を検出した。

以上のことから、調査地域の地下水は花崗岩類分布域から涵養し、その一部は双葉断層を通過して堆積岩類分布域に流動している可能性が考えられる。また、双葉断層や自噴井からの湧水は滞留時間が比較的長い地下水と短い地下水が混合しているものと考えられる。一方、浅井戸で検出された ^{137}Cs については井戸近傍から涵養した地下水が透水性の高い砂地盤に浸透し帯水層に到達したものと推定される。これまでの検討結果から想定される調査地域の地下水流動の概念モデルを図8に示す。

^{137}Cs の半減期は約30年であることから、地下水での移行経路が短い場合は当面の間、Csが検出される可能性は否定できない。

今後、帰還を検討している住民にとって、Cs濃度等の継続的なモニタリングと情報提供が必要不可欠である。なお花崗岩類分布域から浸透したCsについては、十分に長い移行時間がある場合、半減期に従って放射能濃度が減衰することから、流出域での濃度上昇は考えにくい。さらに堆積岩類分布域から浸透する場合には透水性の低い泥岩層の地下水流動に対するバリア機能により長い滞留時間を確保することが期待できる。ただし、泥岩層の透水性については不明のため、今後明らかにしていく必要がある。

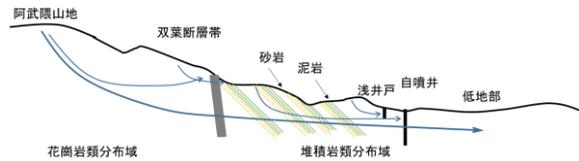


図8 調査地域の地下水流動の概念

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計5件)

1. 鈴木弘明、林 武司、藪崎志徳、竹内真司：花崗岩類 - 堆積岩類境界に断層が存在する地域における地下水流動について(その1) - 水理地質構造の特徴 -、日本地下水学会 2017年春季講演会、2017年5月20日、日本大学文理学部(東京都世田谷区)

2. 竹内真司、藪崎志徳、林 武司、鈴木弘明：花崗岩類 - 堆積岩類境界に断層が存在する地域における地下水流動について(その2) - 水質形成過程の検討 -、日本地下水学会 2017年春季講演会、2017年5月20日、日本大学文理学部(東京都世田谷区)

3. 竹内真司、林 武司、藪崎志徳、鈴木弘明：岩盤中の放射性セシウムの移行挙動に関する検討、日本地質学会第123年学術大会、2016年9月12日、日本大学文理学部(東京都世田谷区)

4. 竹内真司、林 武司、藪崎志徳、鈴木弘明、加藤ありさ、森谷健人：亀裂性岩盤を通過する地下水中の放射性セシウムの移行挙動について、日本地球惑星科学連合2016年大会、2016年5月23日、幕張メッセ(千葉県千葉市)

5. 竹内真司、林 武司、藪崎志徳、保高徹生、鈴木弘明：亀裂性岩盤を通過する地下水中のセシウムの移行挙動について、日本地下水学会2015年秋季講演会、2015年10月23日、多田記念大野有終会館(福井県大野市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 真司 (TAKEUCHI Shinji)
日本大学・文理学部・教授
研究者番号：90421677

(2) 研究分担者

林 武司 (HAYASHI Takeshi)
秋田大学・教育文化学部・教授
研究者番号：60431805

藪崎 志穂 (YABUSAKI Shiho)
総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・研究員
研究者番号：60447232

(3) 連携研究者

保高 徹生 (YASUTAKA Tetsuo)
産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・主任研究員
研究者番号：60610417

徳永 朋祥 (TOKUNAGA Tomochika)
東京大学・新領域創生科学研究科・教授
研究者番号：70237072

(4) 研究協力者

鈴木 弘明 (SUZUKI Hiroaki)