

福島原発事故収束に向けたバックエンド領域の取り組み（実践編） 「環境修復に関する取り組み」

長岡亨*1

福島原発事故に伴い環境中に放出された放射性核種の移行挙動評価に資するため、核種移行に及ぼす微生物影響について、いくつかの研究例を紹介する。また、内閣府および文部科学省傘下にて実施した、「警戒区域および計画的避難区域における詳細モニタリング」のうち、基礎データ収集モニタリング結果について紹介する。

Keywords: 放射性核種、微生物、移行、環境修復、放射線量、モニタリング、警戒区域、福島第一原子力発電所

Microbiological aspect on the radionuclide migration in the environment has been showed for the prediction of migration behavior of the radionuclides, Cs-134 and -137 especially, contaminated by the accident at Fukushima Daiichi NPP. In addition, the measurements of radiation doses with a 100m grid in the 2km-square areas near Namie and Tomioka JR station within the restricted area have been showed.

Keywords: radionuclide, microorganism, migration, remediation, radiation dose, monitoring, restricted area, Fukushima Daiichi NPP

1 はじめに

福島第一原子力発電所事故に伴い、環境中には放射性核種が放出され、広域に渡って土壌など地表に沈着した。これら放射性核種の環境動態を予測評価することは、環境修復計画の策定などにおいて重要である。バックエンド領域では、これまで長年にわたり地下水における核種移行評価研究を行ってきており、核種移行に及ぼす影響の一つの要因として微生物の影響も認識されており[例ええば1,2]、核種が沈着した地表土壌中にも数多くの微生物が生息していることから、今回の事故により汚染された土壌中における放射性核種の環境動態を理解する上で、バックエンド領域における微生物影響研究の知見が活かせると考える。そのため、これまでの当所における微生物影響研究の検討例を紹介する。また、環境修復の策定にあたり、汚染状況を把握することは不可欠である。ここでは内閣府および文科省の傘下にて、東京電力と共同にて実施した「警戒区域および計画的避難区域における詳細モニタリング」のうち、基礎データ収集モニタリング結果について紹介する。

2 放射性廃棄物処分における微生物影響 —放射性核種と微生物の相互作用を中心に—

深部地下環境における微生物の存在が認識されるようになり、放射性廃棄物処分における微生物影響について盛んに議論がされるようになってきた。微生物は放射性核種と種々の相互作用をすることが明らかとなっており(Fig.1)、処分環境に生息する微生物が核種の化学形態を変化させ、核種の移行挙動に影響を及ぼす可能性がある。

当所では、地下水における核種移行に及ぼす微生物影

An approach from the view point of nuclear fuel and environment (NUCE-AESJ) on remediation of the contaminated areas off-site the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant -Microbiological aspect on the radionuclide migration in the environment and environmental radioactivity monitoring within the restricted area- by Toru Nagaoka (nagaoka@criepi.denken.or.jp)
本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第27回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

*1 (財)電力中央研究所 環境科学研究所 バイオテクノロジー領域
Biotechnology Sector, Environmental Science Research Laboratory,
Central Research Institute of Electric Power Industry
〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646

(Received and accepted 20 November 2011)

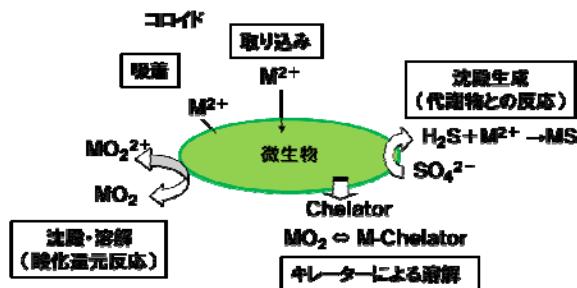


Fig.1 Radionuclide-microbe interactions

響に注目して研究を進めてきており、以下に3つの研究例を紹介する。

(1) 微生物は核種移行を抑制させる

微生物のエネルギー獲得様式は、すべて酸化還元反応であり、多価数を有する放射性核種も微生物により代謝されると考えられる。Fig.2にNp-237の化学形態変化に及ぼす硫酸還元菌の影響を示す[3]。Np-237は大気雰囲気下の中性付近においては、 NpO_2^+ の陽イオンの状態で存在し、液相中に存在する。しかしながら、溶液を還元剤(Na_2S)を用いて化学的に還元雰囲気とすると、Np-237は経時的に不溶化する。さらに、硫酸還元菌の存在下では速度が増加する。この結果は、地下の微生物が直接的にNp-237を還元し、不溶態へと化学形態を変化させ、移行を抑制する可能性を示している。

(2) 微生物は核種移行を促進する

Fig.1に示すとおり、微生物の生育に必須である不溶性元素などが枯渢した際に、菌体からキレーターを生成し、不溶性元素を溶解させ、利用することが知られている。アルカリ土壌などの鉄欠乏状態においては、シデロフォアなどの鉄キレーターを放出する。Pu-240を吸着させたベントナイト懸濁液にシデロフォアを添加すると、シデロフォア濃度の増大に伴い、Pu-240の吸着量は減少した(Fig.3)[4]。この結果は、微生物が不溶態であったPu-240を生成したキレーターによって、溶存態へと変化させ、移行を促進させる可能性を示している。

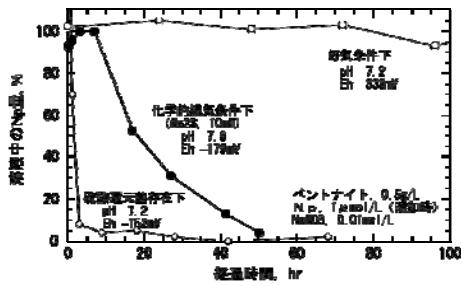


Fig.2 Microbial mediated removal of Np

(3) 微生物は処分環境の酸化還元状態形成を担う

前述のように、微生物は生育環境中で代謝可能な酸化還元反応を利用してエネルギーを獲得している。そのため、処分環境の酸化還元状態形成の一端を微生物が担っている可能性がある。日本原子力研究開発機構の幌延深地層研究センターの地下研究坑道より採取した堆積岩および地下水を用いて、処分場の酸化還元変化（坑道掘削による地表からの大気流入による地下環境の酸化および埋め戻しによる還元環境への回復）を想定した酸化還元模擬試験を実施したところ、微生物作用により、岩石-地下水懸濁液（土着微生物含む）の酸化還元電位は、著しく低下することが明らかとなった[5]。この試験は、微生物反応を加速させるため、電子供与体として乳酸イオンを添加している。そのため、現在、より実地下環境に近い条件を目指して電子供与体の種類や量に関する検討を行っている。また、日本原子力研究機構と共同で、PHREEQC-2 を用いた微生物影響評価モデルの構築を目指している[6, 7]。

また、核種移行に及ぼす微生物影響として、他にも核種を菌体内に取り込んで菌体自身がコロイドとして移行する場合なども考えられる。

以上のように、放射性核種と微生物は様々な形で相互作用をしており、環境中における放射性核種の挙動の一端を、微生物が担っていると考えられる。

3 放射性セシウムの環境動態に及ぼす微生物影響

今回の福島原発事故に伴いオフサイトに放出された放射性核種のうち、重要と考えられているのは放射性セシウム（Cs-134, Cs-137）である。

既往の研究により、セシウムを濃縮する種々の微生物が報告されている[8]。それら微生物は *Pseudomonas* 属や *Rodococcus* 属の細菌や微細藻類、酵母やカビなど多岐にわたり、数時間から数日間にて、セシウム含有溶液中から菌体内に数百～数千倍にまで濃縮するとの報告がある[8]。菌体内へのセシウムの取り込みは、カリウムなどの拮抗的な代謝機構に基づいており、カリウム濃度が高くなると、セシウムの取り込み量が低下する傾向にある。

また、土壤微生物の中には、植物の根に共生し、植物から有機養分を得る代わりに、無機養分を植物に供給する

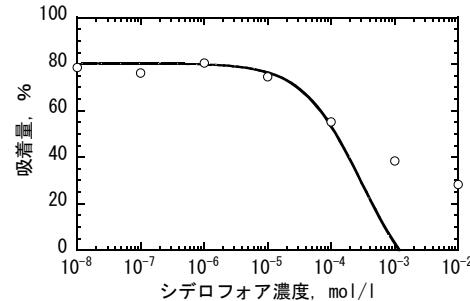


Fig.3 Concentration effect of microbially produced chelator, i.e., siderophore, on adsorption of Pu onto bentonite.

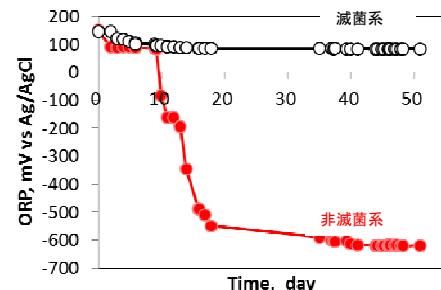


Fig.4 Laboratory simulation of microbially mediated redox changes with Horonobe rock and groundwater.

微生物も存在しており、植物へのセシウムの取り込み機構にも微生物が関与している可能性がある。

以上のように、放射性セシウムの土壤環境における動態には微生物が関与している可能性があり、今後、セシウムの環境動態を詳細に把握する上で、微生物作用も考慮した環境動態予測が重要となると考える。また、汚染土壤からの効率的なセシウム回収技術に微生物作用を適用できる可能性もあると考える。

4 「警戒区域および計画的避難区域における詳細モニタリング」のうち、基礎データ収集モニタリング結果

本モニタリング計画は、警戒区域および計画的避難区域について、「環境モニタリング強化計画」の一環として、2km メッシュで実施する土壤調査と整合性を図り、これを補完するために実施するものである[9]。本計画は以下の3つの実施項目からなる。

(1) 基礎データ収集モニタリング

本モニタリングは、浪江町および富岡町の2地点において、2km 四方の区画を選定し、区画内を 100m メッシュで空間線量率（地上高さ 1cm および 1m）を網羅的に計測するものである（1 地点当たりの測定点は 400 点）。

(2) 広域モニタリング

本モニタリングは、警戒区域と計画的避難区域を 2km メッシュにした各メッシュを約 500m メッシュとして、2km メッシュあたり 20 点程度を計測するものである（総

計測点は、約 4340 点；217 メッシュ（警戒区域と計画的避難区域内の総 2km メッシュ数） $\times 20$ 点）。

(3) 個別詳細モニタリング

本モニタリングは、道路や住宅、田畠や校庭、河川水・底泥、貯水池など、個別対象毎に、詳細に汚染状況をモニタリング（空間線量率および表面線量率）するものである。また、モニタリングカーを用いた空間線量率のサーベイについても実施するものである。

ここでは、測定が完了（講演日 8月 5 日時点）している、(1)基礎データ収集モニタリング結果について紹介する。

浪江町および富岡町における計測区域（2km 四方）の選定では、土地の利用形態による傾向を把握するため、建物、道路、田畠、林など種々の土地利用形態全てが一つのパッケージとして含んでいる地点を選定した。

浪江町の浪江駅付近のモニタリング結果（地上高さ 1m）を Fig.5 に示す。図のように 2km メッシュ内においても空

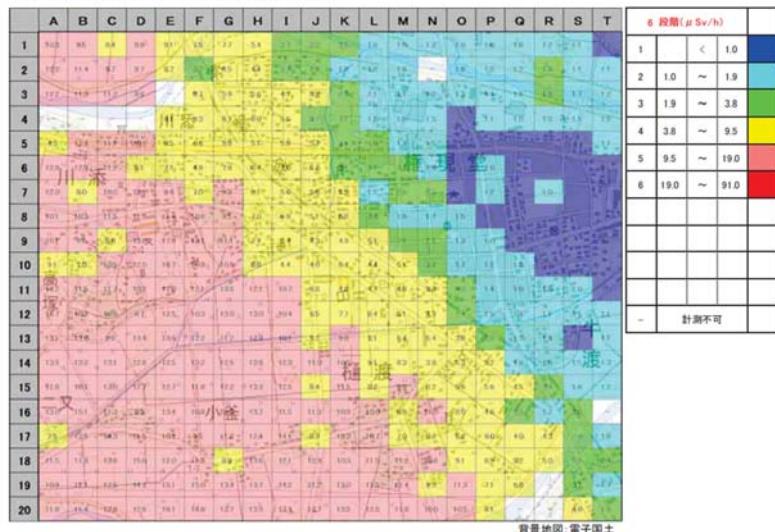
間線量率にバラツキがあり、0.5~17.9 $\mu\text{Sv/h}$ （地上 1m 高）0.5~25.4 $\mu\text{Sv/h}$ （地上 1cm 高）の幅があった。

富岡町の富岡駅付近のモニタリング結果（地上高さ 1m）を Fig.5 に示す。浪江駅付近と同様に、空間線量率にバラツキがあり、0.2~14.7 $\mu\text{Sv/h}$ （地上 1m 高）0.5~39.1 $\mu\text{Sv/h}$ （地上 1cm 高）の幅があった。

文科省及び米国 DOE による航空機モニタリング結果と比較すると、浪江駅付近の場合には、ほぼ同様の傾向を示した。一方、富岡駅付近の場合には、本測定結果が線量率に濃淡があるにも関わらず、航空機モニタリング結果では、ほぼ一様の線量率を示しており、双方の測定結果は異なる傾向を示した。航空機モニタリングの分解能の影響であると推察される。

土地利用形態別に見ると、地表面が土などの場合、一般的に地表面に近いほど高い値を示し、道路や駐車場など広いアスファルト舗装面の場合周囲の線量率より低い値を示

浪江駅付近のモニタリング結果（地上 1m）



富岡駅付近のモニタリング結果（地上 1m）

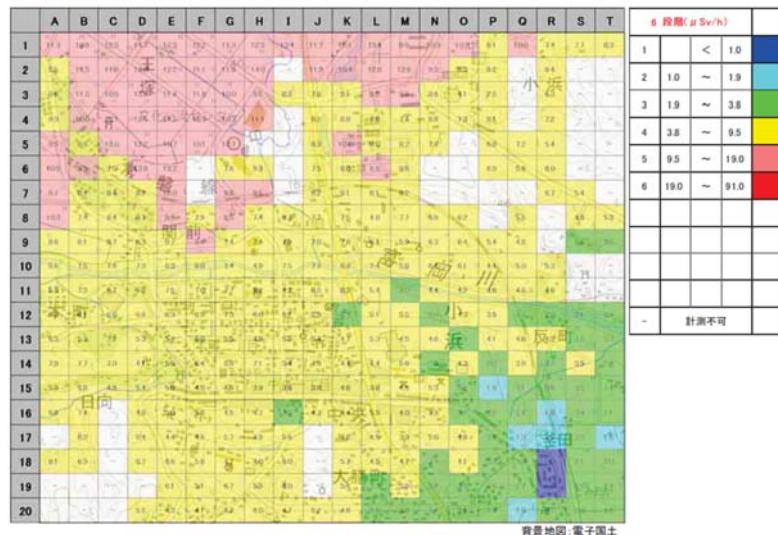


Fig.5 Radiation dose at the height of 1m in the 2km-square areas with a 100m grid near Namie(upper) and Tomioka(lower) station.

す傾向を示す傾向にあった。また、比較的大きな屋根（カーポートなど）の下の線量測定値は低い傾向を示し、住宅地に点在する林および草地や田畠では、周囲の線量率より高い傾向を示した。

なお、講演時には計測が終了していなかった、上記(2)広域モニタリング、および(3)個別詳細モニタリングの結果については、現在、既に終了しており、結果の詳細については、下記の文科省 HP を参照頂きたい。

(http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_collect_basic_data/)

5 おわりに

本稿では、福島第一原子力発電所事故により汚染したエリアの環境修復に資するため、著者がバックエンド領域にて実施してきた、放射性核種の移行挙動に及ぼす微生物影響に関して紹介した。また、内閣府および文科省傘下にて、東京電力と共同にて実施した、警戒区域及び計画的避難区域における詳細モニタリングのうち、基礎データ収集モニタリング結果について紹介した。本稿が汚染エリアの環境修復に向けて少しでもお役に立てば幸甚である。

参考文献

- [1] West, J. M., McKinley, I. G: Geomicrobiology of radioactive waste disposal, In: Encyclopedia of Environmental Microbiology (Gabriel Bitton ed.), John Wiley, New York, pp.2661-2674 (2002).
- [2] 大貫敏彦: 地層処分における微生物の影響－研究の現状と今後の課題－, 原子力バックエンド研究, **9**, 35-42 (2002).
- [3] Nagaoka, T.: Microbially Mediated Removal of Np(V) by *Desulfovibrio desulfuricans* -Implication of Microbial Immobilization at the Radioactive Waste Repository, Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, **6**(1), 85-86 (2005).
- [4] 長岡亨, 渡部良朋, Akira Kudo: 環境中における放射性核種の挙動に及ぼす微生物影響評価 (その1) 電力中央研究所, 研究報告, U01063 (2003).
- [5] 長岡亨, 中村孝道, 佐々木祥人, 浅野貴博, 伊藤剛志, 吉川英樹: 幌延原位置微生物による酸化還元影響の評価 (2) ジャーファーメンターを用いたバッチ試験, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 予稿集, (2010).
- [6] 吉川英樹, 佐々木祥人, 浅野貴博, 伊藤剛志, 長岡亨, 中村孝道: 幌延原位置微生物による酸化還元影響の評価 (1) PHREEQC-2 による解析, 日本原子力学会 2010 年秋の大会, 予稿集, (2010).
- [7] 日本原子力研究開発機構: 地層処分技術等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連「処分システム化学影響評価高度化開発」平成 20 年度報告書 (2009).
- [8] Simon V. Avery: Microbial Interactions with cesium-Implications for Biotechnology, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, **62**, 3-16 (1995).
- [9] 警戒区域および計画的避難区域における詳細モニタリング実施計画について (平成 23 年 6 月 13 日)
http://radioactivity.mext.go.jp/1000/2011/06/1304320_0613.pdf
- [10] 警戒区域および計画的避難区域における基礎データ収集モニタリング結果の公表について (平成 23 年 7 月 1 日)
http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_collect_basic_data/2011/07/1308047_0701_2.pdf