

特集 東日本大震災後の環境変化の評価と分析技術の進展

《特集》「東日本大震災後の環境変化の評価と分析技術の進展」企画にあたって

日本中を震撼させた2011年3月11日の東日本大震災からはや3年以上が経過しましたが、福島第一原子力発電所事故や津波被害に伴う放射性物質や有害化学物質の環境への漏洩は（当初の想定以上に）すさまじく、今もなお被災地の人々や私たちの生活を脅かし続けています。その一方で、漏洩物質に対する広範囲・長期間のモニタリングや被害状況の解析が、現在もなお精力的に進められています。このような解析や評価を行う上で「分析技術」の担う役割はきわめて大きく、大震災後の環境変化について分析的な観点から総括し、今後の傾向や方向性の一端を示すことは、本学会が貢献できることの一つであると考えます。

そこで「ぶんせき」編集委員会では、2014年の特集として標記のテーマを取り上げることにしました。分析対象物質を「放射性物質」と「化学物質」に分類し、大震災後の大気・海洋・土壌・動植物などの環境中における動態評価や関連する分析技術の進展状況、及び今後の展望などについて掲載しました。本分野に精通された方のみならず、専門でない人にも容易に理解できるよう平易な表現で解説されていますので、ぜひ一読ください。

「ぶんせき」編集委員会

特集 「東日本大震災後の環境変化の評価と分析技術の進展」

—放射性物質—

環境放射能汚染の現状と今後の見通し	山崎秀夫
放射性セシウムの環境挙動	内田滋夫・田上恵子
福島県沖合を中心とした太平洋側海域での海水中の ⁹⁰ Sr及び ¹³⁷ Csの濃度変遷	及川真司・高田兵衛
極微量分析技術を用いた北太平洋での放射性セシウムの分布	青山道夫・濱島靖典
大気エアロゾル中の放射性物質の挙動	関根嘉香
高周波誘導結合プラズマ質量分析法による東京電力福島第一原子力発電所事故にかかわる環境試料中の ⁹⁰ Sr分析	高貝慶隆・古川 真
宮城県内における東日本大震災津波堆積物の放射能測定	井上千弘・趙 成珍
陸域での放射性セシウムおよび放射性ヨウ素の動態と存在状態	高橋嘉夫・ファン チャオファイ・東郷洋子
放射性物質の環境での分布と生態系での移行	村松康行・大野 剛
一般家屋内の放射線計測と評価	高田真志

—化学物質—

津波堆積物中の残留性有機汚染物質の詳細解析	高菅卓三
津波堆積物の海水溶出試験とヒ素の分析	土屋範芳・山崎慎一・渡邊隆弘
沿岸生物における多環芳香族炭化水素類の濃度分布と経年変化	中田晴彦・宮崎康平・仲井邦彦
東日本大震災巨大津波によるペルフルオロオクタンスルホン酸関連化合物の海洋汚染現象の解析	山下信義・宮澤泰正・山崎絵理子・谷保佐知

環境放射能汚染の現状と今後の見通し

山崎 秀夫

1 はじめに

2011年3月11日に起きた“東北地方太平洋沖地震(M9.0)”の地震と津波によって、東日本の太平洋岸に設置された多くの原子力発電所が被災した。東京電力福島第一原子力発電所(1~6号機)の1~3号炉は通常運転中であったが、制御棒が自動挿入されて原子炉は正常に停止した。しかし、地震後に来襲した津波による電源喪失によって、炉心冷却系が制御不能に陥った。原子炉は、停止した後でも、運転中に蓄積した核分裂生成物の崩壊熱が発生し続けている。崩壊熱の大きさは、原子炉の運転履歴によって異なるが、停止直後で原子炉出力の10%、1時間後で1%、1日後で0.5%、100日後で0.2%、1000日後で0.1%程度である。1~3号炉の熱出力は合計614万kWであるので、事故から3年半が経過した現在でも、3基で約0.6万kWの熱を放出し続けていることになる。

事故の経緯を改めて振り返ると、12日の午後に1号炉の核燃料溶融が始まり、燃料被覆管のジルコニウムと冷却水が高温で反応し、生成した水素ガスによって15時半過ぎに最初の水素爆発が発生した。翌13日には3号炉の核燃料も溶融し、14日11時頃に水素爆発した。2号炉は14日に冷却機能を喪失したが、1、3号炉のように水素爆発は起きなかった。しかし、圧力容器や圧力抑制プールが大きく破損したために、3基の中では2号炉が最も大量に放射性物質を環境に放出した¹⁾。溶融した核燃料が冷却水中に落下して、水蒸気爆発を起こした可能性も指摘されている。2号炉が破損した15日午前以降、各地の放射線モニタリング線量がそれまで以上に急上昇しているため、2号炉から放出された放射性核種が、環境放射能汚染に最も影響を与えていると考えられる。福島第一原発事故の経緯や初期の状況については、いくつかの報告書が公表されている^{2)~6)}。4~6号炉は定期点検中で運転していなかったが、4号炉は隣接する3号炉から漏洩してきた水素ガスによる爆発で建屋が破損し、核燃料が保管されていた貯蔵プールも被害を受けた。プールに保管中の使用済み核燃料が冷却水から露出すると、開放系で溶融、破損が起きることになるので、大量の核分裂生成物が環境に飛散する可能性が危惧されていた。

福島第一原発事故では、地震による停電や測定機器類

の損傷のために、事故初期の放射線データが欠落している。特に、原発から放出された放射性核種の種類や量、その時系列変化など、環境放射能汚染を評価するために必要な実測データはほとんど残っていない。筆者の知る限り、最初のデータは、米国エネルギー省国家核安全保障局(NNSA)のホームページに記載されており⁷⁾、2011年3月12日16時(測定日時が現地時間か米国標準時かは不明)に福島第一原発北西120マイルにいた空母ロナルド・レーガンで測定された0.3 mR/hである。この線量は45分後に北西139マイルで0.9 mR/hに上昇している。このホームページには福島第一原発を中心に、東日本各地の放射線量や土壌中の放射性核種濃度の測定結果が時系列に沿って示されている。米国エネルギー省の別のホームページには航空機モニタリングの結果(最も早いものは3月17~19日に測定)がpdfファイルで図示されている⁸⁾。大地震の被災で東日本一帯のインフラが一時的に機能不全に陥っていたとはいえ、事故初期の汚染データが米国によってしか測定されていなかったことは、原子力災害時におけるわが国の危機対応システムの構築が不十分であったことの表れであり、残念に感じている。

2 福島第一原発事故による環境放射能汚染の特徴

環境放射能汚染の動態を解析することの最終的な目的は、ヒトの放射線被曝^{ひばく}とそのリスク評価にある。福島第一原発事故の直後に、Science誌が過去の原子力事故と放射線リスクの関係について、概要を解説している⁹⁾。1945年の広島・長崎原爆で被曝した生存者94600人では、白血病と固形癌^{がん}がそれぞれ45%、11%増加した。1950年代に行われたネバダの核実験では、米国人1億6千万人が被曝し、恐らく甲状腺癌が増加した。1948~1972年の旧ソ連マヤーク核施設では、従業員21000人と住民30000人がプルトニウムで被曝した。TMI(Three Mile Island)原発事故(1979年)では、周辺の住民200万人が被曝したが直接的な影響は認められなかった。チェルノブイリ事故(1986年)では、500万人が直接的に被曝し、汚染したミルクの飲用で6000人以上が甲状腺癌を発症している。これらの事故のほかにも、英国のウインズケール(後にセラフィールドと改称)で1957年に起きた原子炉火災事故や米国ハンフォード

核施設からの放射性物質の漏洩などによって大規模な環境放射能汚染が起き、いずれの場合も作業員だけでなく施設周辺の住民が環境放射能汚染の影響を受け、発癌率が増加する等の健康被害が出ている。原子力施設から漏洩した放射性物質は、地下水や河川を通して施設周辺を汚染するだけでなく、大気や海洋を経由して全地球規模で拡散し、生態系に放射線被曝の影響を与える。第二次大戦後の米ソを中心とした大気圏内核実験では大量の核分裂生成核種が大気中に飛散し、現在でもそれが環境のバックグラウンド放射能レベルを押し上げている。

福島第一原発事故の大きな特徴は、3基の発電用原子炉がほぼ同時にメルトダウンしたことである。チェルノブイリ事故のように、原子炉本体が壊滅的に破損しなかったため、不揮発性の核燃料や核分裂生成物の大部分は炉内に止まった。しかし、今でも炉心冷却が続いており、メルトダウンした核燃料（一部はメルトスルーしたと言われているが、炉内の状況は全く分かっていない）に接触した汚染冷却水が炉外に漏洩しているため、原発周辺では事故以来、放射能汚染が継続して起きていると考えるのが自然である。福島第一原発は地下水の豊富な沿岸部に設置されているため、海洋放射能汚染も持続している可能性が高い。

今回の原子炉事故は人口稠密な地域の近隣で発生し、東日本一帯の地方都市や首都圏が高度な環境放射能汚染に晒された。多くの住民が住む市街地が放射能汚染を受けたのは、世界の原子力災害でも初めての経験である。自然豊かな国土を持つわが国では、森林や山岳地帯の放射能汚染にも注意しなければならない。チェルノブイリ事故でも広範な森林が汚染したが、単調な平坦地形が多く、わが国のような地理的にも生態学的にも複雑な地勢を持つ地域における放射性物質の動態には未知の部分が多い。

3 環境放射能汚染の現況

福島第一原発事故で放出された放射性核種の環境中の挙動については、Yoshida and Kanda (2012) が簡潔に総括している¹⁰⁾。本稿では、新たに明らかになった事実なども交えて、改めて福島第一原発事故による環境放射能汚染の現況とその問題点について指摘する。

福島第一原発事故による環境放射能汚染の概要は、文部科学省（以下、文科省と略）の航空機モニタリングの結果から理解できる（現在は原子力規制委員会ホームページ¹¹⁾に記載）。しかし、このデータは直径300～600 mの円内の平均値であり、航空機の軌跡幅も3 kmであるため、地表における放射性物質の環境動態を評価するためには、地理的分解能が十分ではない。環境放射能汚染の動態解析のためには、現場で線量を測定し、試料を採取して放射性核種濃度を測定することが不可欠である。福島第一原発事故で放出された放射性核種の種類や

放出量、沈着量などについて、様々な観点からシミュレーションが行われ、その推定値が公表されている^{1),12)～19)}。しかし、その値は大きく異なっており、環境放射能汚染を定量的に議論するために必要な信頼度の高いデータが示されているとは言い難い。このような点からも、現場の実測値から環境放射能汚染を評価する手法の構築が必要である。

福島県では、2011年産のコメの多くが放射性セシウムで汚染した。グローバルフォールアウトがピークを迎えていた1950～1960年代にもコメの放射性セシウム汚染が問題となり、その吸収機構や防止策について多くの研究が行われた²⁰⁾。今回の事故では、過去の経験を踏まえた汚染防止策が議論され²¹⁾²²⁾、2012～2013年産のコメでは放射性セシウム汚染を抑制することに成功した。福島県は各年約1000万袋（30 kg入り）のコメを全量検査したが、食品規制値（100 Bq/kg）を越えたのは両年とも数十袋のみであった²³⁾。これは福島第一原発事故で、環境放射能汚染の影響を制御することができた数少ない成功例である。しかし、放射能除染作業などでは、期待されたほど効果が上がっていない場合も多く、放射性核種の環境動態をさらに詳細に解析しなければならない。

福島第一原発沖の魚介類の放射性セシウム濃度は、表層魚については事故が起きる前のレベルにまで低下した。しかし、事故後の魚類の放射能濃度の経時変化を見る限り²⁴⁾²⁵⁾、原発沖の魚類の放射能濃度は期待されるほど減少していない。これは、底魚の放射能汚染が続いているためである。筆者も2013年9月に福島第一原発沖で採取した魚類を測定したが、メバルなど底魚の放射性セシウム濃度は数100 Bq/kg程度であった。また、同じ場所のプランクトンも同程度の濃度を示した（未公表）。福島第一原発からは汚染冷却水の漏洩が続いているため、十分なモニタリング調査が必要である。淡水魚の汚染はさらに深刻である。環境省ホームページに公表されているデータを見ても、事故初期に汚染した河川や湖沼の魚介類の放射性セシウム濃度はあまり減少していない。筆者が観測を続けている宮城県湖沼の魚類も、2012年と2013年の放射性セシウム濃度はほとんど同じレベルであり、事故後に生まれた稚魚の汚染も進んでいる（未公表）。¹³⁴Csの物理的減衰を考慮すれば、時間の経過とともに放射性セシウムは魚類に濃縮される傾向を示しており、湖沼生態系における放射性セシウムのリサイクルが食物連鎖によって効果的に進行している可能性が高い。2013年春に江戸川水系で食品規制値を越えるウナギが捕獲されたのも、淡水生態系で放射性セシウムの濃縮機構が存在していることを示唆している。一方、チェルノブイリ事故ではわが国の状況と異なり、魚類の放射性セシウム濃度は時間とともに指数関数的に減衰している²⁶⁾²⁷⁾。

文科省航空機モニタリングでは、福島第一原発事故の初期に地表に降下した放射性セシウムの多くは福島県・栃木県・群馬県の森林・山岳地帯に沈着し、茨城県北部・南部、千葉県北部、東京都東部にも汚染地帯が存在する。これらの高濃度汚染地帯の放射性セシウム沈着量は、30～600 kBq/m²である。事故時の¹³⁴Csと¹³⁷Csの放出量はほぼ等しいので、事故から3年半が経過した時点では(2014年9月)、20～360 kBq/m²程度に減衰することになる。林野庁が2013年8～9月に福島県内で調査した結果では²⁸⁾、森林の放射性セシウム沈着量は20～138 kBq/m²であった。また、同じ地点で比較した結果を見ると、前年に比べて沈着量は87%に減少している。¹³⁴Csと¹³⁷Csの物理的半減期から期待される1年間の放射性セシウム減衰量は15%であるので、現在のところ、森林から放射性セシウムはほとんど移動していないことになる。森林の放射性セシウムは有機物の豊富な土壌や落葉が腐植化したリターに強く吸着、保持されている。しかし、時間の経過とともにリターの腐植化が進行すれば、その過程で放射性セシウムとフミン酸が錯形成して可溶化し²⁹⁾、雨水や地下水に流されて流域を再汚染する可能性も否定できない。さらに、有機物の豊富な森林土壌生態系では、食物連鎖により放射性セシウムが拡散する可能性も指摘されている³⁰⁾。

4 今後の見通し

福島県下では現在までに数十人が甲状腺癌の確定診断を受けて手術を受け、1名は良性であったが、他はすべて悪性腫瘍であった。国や県は、福島第一原発事故による放射能汚染の影響を受けていない地域と比較して罹患率に差がないとして、甲状腺癌の発症と福島第一原発事故の因果関係については否定的な見解を示している³¹⁾³²⁾。一方、チェルノブイリ事故では、現在までに約6000人が甲状腺癌に罹患し、さらに事故の当時に乳幼児であった世代が今でも甲状腺癌を発症していることが指摘されている⁹⁾²⁶⁾²⁷⁾。チェルノブイリ事故による環境放射能汚染のヒトに対する健康影響については、多くの論文が公表されている。近年、低レベル汚染地域の住民についても発癌率の有意な上昇が認められるとする報告もある³³⁾³⁴⁾。また、福島における放射線被曝のリスク評価も行われている³⁵⁾³⁶⁾。これらの論文に対しては反論もあるが、低レベル放射線被曝や内部被曝による健康影響については未知の部分が多く、その因果関係の早急な解明が求められる。

このように、環境放射能汚染はヒトの健康に直接影響を与える可能性があるため、定量的な議論を進める必要がある。筆者は、福島第一原発事故による環境放射能汚染に関して、以下のような項目について、より詳細な検討を行う必要があると考えている。(1)事故初期における放射性物質の放出挙動、特に、¹³¹Iの放出量と環境動

態、各個人に対する被曝線量の再評価。(2)今も福島第一原発から漏洩している放射性核種の海洋における挙動および海産生物への取り込み機構の解明。(3)地表に沈着した放射性セシウムの動態解析、放射性セシウムを吸着した微細土壌(粘土)粒子の地表や水圏での移行プロセスの解明。(4)森林のリターや有機物含量の高い土壌中の有機物に固定されている放射性セシウムの溶脱挙動の解明。(5)湖沼や河川など淡水生態系における放射性セシウムの輪廻・循環機構の解明。(6)放射性セシウムの取り込みが制御できたコメ以外の作物に対する放射性セシウムの吸収機構の解明とその抑制策の検討。(7)現状では状況が全く把握されていないデブリ(溶融した核燃料が再固化し、炉心の下に溜まっていると考えられている塊)と水との反応機構の解明。水に対する溶解度が極めて小さい酸化ウランや酸化プルトニウムがデブリ表面から微細粒子として剥離し、冷却水とともに環境に漏洩する可能性の評価。(8)物理的・化学的方法では簡単に分離できないトリチウムの処理の問題。このような課題を解決して、はじめて本格的な除染作業と廃炉作業を始めることができると考えている。

文 献

- 1) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に係る1号機、2号機及び3号機の炉心の状態に関する評価について：原子力安全・保安院(2011年6月6日)。
- 2) 福島原発事故独立検証委員会報告書：民間(2012年2月27日提出)。
- 3) 福島原子力事故調査委員会報告書：東京電力(2012年6月20日提出)。
- 4) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会報告書：国会(2012年7月5日提出)。
- 5) 東京電力福島原子力発電所における事故調査・検証委員会報告書：政府(2012年7月23日提出)。
- 6) 福島原発事故と4つの事故調査委員会、経済産業調査室・課、国立国会図書館：調査と情報、756(2012年8月23日)。
- 7) 米国エネルギー省国家核安全保障局：<https://explore.data.gov/catalog/raw?q=fukushima&sortBy=relevance>(2014年4月22日、筆者最終確認)。
- 8) 米国エネルギー省：<http://www.energy.gov/downloads/radiation-monitoring-data-fukushima-area-32511>(2014年4月22日、筆者最終確認)。
- 9) J. Kaiser : *Science*, **331**, 1504 (2011)。
- 10) N. Yoshida, J. Kanda : *Science*, **336**, 1115 (2012)。
- 11) 放射線モニタリング情報：原子力規制委員会 <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/191/list-1.html>(2014年4月22日、筆者最終確認)。
- 12) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所の事故に伴い放出された放射性物質の分布状況等に関する調査研究結果報告書：文科省(2012年3月13日)。
- 13) 福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について：東京電力(2012年3月)。
- 14) P. Bailly du Bois, P. Laguionie, D. Boust, I. Korsakissok, D. Didier, B. Fievet : *J. Environ. Radioact.*, **114**, 2 (2012)。
- 15) H. Dietze, I. Kriest : *Ocean Sci.*, **8**, 319 (2012)。

- 16) R. B. Oza, S. P. Indumari, V. D. Puranik, D. N. Sharma, A. K. Ghosh : *Ann. Nucl. Ener.*, **58**, 95 (2013).
- 17) J. Kanda : *Biogeosci.*, **10**, 6107 (2013).
- 18) A. Stohl, P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhart, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, T. J. Yasunari : *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 2313 (2012).
- 19) T. Morino, T. Ohara, M. Watanabe, S. Hayashi, M. Nishizawa : *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 2341 (2013).
- 20) 例えば, 天正 清, 葉 可森, 三井進午: 土壤肥科学雑誌, **32**, 139 (1961).
- 21) 暫定規制値を超過した放射性セシウムを含む米が生産された要因の解析 (中間報告): 福島県・農水省 (2011年12月25日)。
- 22) 放射性セシウム濃度の高いコメが発生する要因とその対策について～要因解析調査と試験栽培棟の結果の取りまとめ～ (概要): 福島県・農水省 (2013年1月)。
- 23) 全量全袋検査の検査結果: 福島県 <http://www.pref.fukushima.lg.jp/sec/36035b/zenryouzenhukurokensa-mokuji.html> (2014年4月22日, 筆者最終確認)
- 24) K. O. Buesseler : *Science*, **338**, 480 (2012).
- 25) 高濃度に放射性セシウムで汚染された魚類の汚染源・汚染経路の解明のための緊急調査研究, 平成24年度科学技術戦略推進費「重要政策課題への機動的対応」に係るプロジェクト: 水産庁 (2013年6月)。
- 26) Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation : Twenty years of experience, Radio. Assess. Rep. Ser., IAEA (2006).
- 27) Chernobyl's Legacy : Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine, The Chernobyl Forum : 2003-2005, IAEA (2006).
- 28) 平成24年度森林内における放射性物質の分布状況調査結果について: プレスリリース添付資料, 林野庁 (2014年4月1日)。
- 29) A. A. Helal, H. A. Arida, H. E. Rizk, S. M. Khalifa : *Radiochem.*, **49**, 523 (2007).
- 30) M. Murakami, N. Ohte, T. Suzuki, N. Ishii, Y. Igarashi, K. Tanoi : *Sci. Rep.*, **4** : 3599. DOI : 10.1038/srep03599 (2014).
- 31) 最近の甲状腺検査を巡る報道について: 環境省総合環境政策局 (平成26年3月) http://www.env.go.jp/chemi/rhm/hodo_1403-1.html (2014年4月22日, 筆者最終確認)
- 32) ふくしま国際医療科学センター: 放射線医学県民健康管理センター <http://fukushima-mimamori.jp/> (2014年4月22日, 筆者最終確認)
- 33) M. Tondel, P. Hjalmarsson, L. Hardell, G. Carlsson, O. Axelson : *J. Epidem. Comm. Health*, **54**, 1011 (2004).
- 34) M. Tondel, P. Lindgrem, P. Hjalmarsson, L. Hardell, B. Persson : *Amer. J. Indus. Med.*, **49**, 159 (2006).
- 35) C. Busby : The health outcome of the Fukushima catastrophe? Initial analysis from risk model of the European Committee on Radiation Risk, ECRR, Green Audit, Aberystwyth UK, 30th March (2011).
- 36) N. S. Fisher, K. Beaugelin-Seiller, T. G. Hinton, Z. Baumann, D. J. Madigan, J. Garnier-Laplace : *PNAS*, **110**, 10670 (2013).

山崎秀夫 (Hideo YAMAZAKI)



近畿大学理工学部生命科学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)。近畿大学大学院化学研究科博士後期課程修了。理学博士。《現在の研究テーマ》水圏底質に記録された近世の環境変遷史の解説。《主な著書》“第5版実験化学講座・環境化学”(分担執筆), (丸善)。《趣味》クラシック音楽・映画 (SF)・読書 (エッセイ)。E-mail : yamazaki@life.kindai.ac.jp

新刊紹介

採択される科研費申請ノウハウ

——審査から見た申請書のポイント——

岡田益男 著

科研費申請の時期がやってきました。科研費は研究者が研究を行うための予算としてだけではなく、大学への間接経費としての寄与もあり、この時期は各大学とも科研費の獲得に向けて

様々な工夫をしていることと思われる。その一方で、毎年どのようにすれば科研費の助成を受けることができるのか悩んでいる先生も多いことと思う。本書は、題目の設定の仕方や審査委員が読もうという意欲が出る申請書の書き方を中心にアドバイスされており、基盤研究等の研究計画調書の各項目の書き方のポイントや教員、研究指導者のための特別研究員評価書や奨励研究推薦書の書き方も紹介されている。自分の申請書を客観的に見つめ直し、もう一段階上の説得力を持った申請書の作成に本書は役に立つことと思われる。また、特別研究員を目指す修士課程・博士課程の学生にもお勧めである。

(ISBN 978-4-901496-74-2・B5判・178ページ・3,800円+税・2014年刊・アグネ技術センター)