

森口 祐一

1. はじめに

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故は、大量の放射性物質の環境中への放出という事態を引き起こした。大気中に放出された放射性物質は、地表面に降下して飲料水や農作物へも移行し、さらに廃棄物や下水汚泥の汚染など多岐にわたる問題を引き起こしている。また、大気中へ放出された放射性物質は海へも降下し、原発から海に直接流出した物質や、陸上に降下した後に河川を流下した物質とともに、海洋中に拡散し、水産物の汚染につながっている。すなわち、事故由来の放射性物質は、環境科学が研究対象としてきた大気圏、水圏、土壌圏、生物圏、人間生活圏にまたがる汚染を引き起こしている。ここでは、シンポジウムでの報告内容のうち、本学会に特に関わりの深い考える事項を中心に、報告以降に得られた情報も交えて、さまざまな環境媒体の放射性物質汚染の状況について概観する。

2. 環境媒体中での放射性物質検出の主な経過

2.1 事故直後に生じた象徴的な事象 —水道水の例—

原発事故後、福島県内外で環境中の空間線量の上昇が計測され、放射性物質汚染の空間分布が次第に明らかにされていった。その経過と、これをめぐる情報集約、情報公開の課題については、別報²⁾で報告している。現時点までの報告から判断すると、環境中の放射性物質汚染にとってとくに重要な事象は、2011年3月15日前後と21日前後に生じている。

事故の影響が東日本の広範囲にわたっていることを実感する象徴的な事象として、東京都金町浄水場において、水道水から210kg/Lの放射性ヨウ素が検出され、乳幼児の摂取制限措置がとられたことがあげられる。この検出値は3月22日の採水によるもので、前日に降雨があったことから、雨で放射性物質が地表面に大量に降下（湿性沈着）し、事故後この降雨までの間に飛来して地表に乾性沈着していた放射性物質もあわせて雨水とともに河川に

流出したと推定されている。筆者も参画した厚生労働省の検討会報告³⁾において、事故発生直後の影響メカニズム、放射性物質放出の減少以降の影響メカニズムが、各々3枚の図解で示されているが、これは2011年6月時点での知見によるもので、事故発生直後の事象の説明については多少の修正が必要であろう。すなわち、図解の1枚目では、比較的短期間に放射性物質が大気中に大量放出され、風で拡散、福島県内や関東地方に飛来し、拡散した一部が地面に降下（乾性沈着）したことを説明しており、これは3月15日前後の事象である。次いで、2枚目で、前述の降雨、湿性沈着、河川への流出について図解しており、3月21日前後の事象に相当するが、この図には1枚目に描かれていた原発からの放出が表現されていない。しかし、その後の大原⁴⁾による大気拡散シミュレーションの知見に基づけば、金町浄水場の水道水のヨウ素汚染や、後述する茨城県南部から千葉県東葛地方におけるホットスポット形成は、15日に大量放出されたものが大気中に滞留して湿性沈着したことが主因ではなく、21日の湿性沈着の時期に原発から放射性物質の放出が続いており、それが北～北北東風で新たに飛来して関東地方での降雨と重なったことが主因と考えられる。

2.2 放射線、放射能、放射性物質への理解

事故直後の報道では、時間あたりの放射線量率と被ばく量としての放射線量の区別や、放射線、放射能、放射性物質の三者の関係について、必ずしも正確に伝えられていなかった感がある。事故の直後には、避難区域が同心円状に設定され、放射線の強さと距離の関係についても説明がなされたが、施設からの放射線が直接届くのはその近傍に限られる。一般公衆への被ばく源として注意すべき対象は、施設からの直接の放射線ではなく、原発から環境中へ放出され、大気中を移流、拡散し、降雨・降雪とあいまった土地への沈着や水圏への移行を経てさまざまな環境媒体を汚染する放射性物質である。報道において違和感を覚えたのは、事故から時間が経過した後も、各地の空間線量率の測定値が「大気中の線量」と表現される場合が少なくなかったことであ

る。空間線量として測定される放射線の大半が、実際には地面や建物、樹木などに付着した放射性物質から出ているにもかかわらず、放射性物質が大気中に漂っていると誤解されやすい表現と思われる。むしろ、再飛散を考慮すれば大気経由の内部被ばくは皆無ではないが、線量でみれば地表に沈着した放射性物質からの外部被ばくの寄与が大きいにもかかわらず、呼吸や飲食物摂取による内部被ばくにより高い関心が寄せられてきた感がある。

2.3 汚染の空間分布の把握

原子力施設の周辺には、放射線量の連続監視のためのモニタリングポストが設置されている。たとえば、東北電力女川原子力発電所周辺での監視データは、3月12日深夜から13日未明にかけての線量の急上昇をとらえていた。また、茨城県東海村付近には多くの原子力関連施設があり、茨城県放射線監視センターから、40地点以上の10分ごとの放射線の測定値が、各測定点での風向・風速、降水量とともに時々刻々と公開されていた。この茨城県の監視網は、原発から首都圏への北～北東風の通り道にあたり、3月15日早朝には、 $5\mu\text{Sv/h}$ 程度のピークをもつ放射性プルームの飛来と移動を明確にとらえていた。

しかし、こうした連続監視網は原子力施設の近傍のみに配置されており、平常時からの環境放射能水準調査は1都道府県に1カ所のみで行われてきたため、原発事故による汚染の空間分布の全容の把握には時間を要した。福島県内ではモニタリングカーや可搬型線量計などを用いた測定が順次拡大され、原発の北西方向を中心に、当初設定された避難区域の外側まで汚染が広がっていることが明らかにされた。また、福島県外での測定データは、当初は研究機関や大学などの専門機関に限られていたが、多くの地点での測定が行われるようになり、そうしたデータを有志がインターネット上にまとめて掲載する動きが見られた。

政府による「公式」の測定は当初は原発周辺に重点がおかれ、広域的な観測に威力を発揮する航空機モニタリングは80km圏から着手されて次第に拡大された。関東地方の中では北関東に相対的に線量の高い地域が広がっているが、群馬県の航空機モニタリング結果が公表されたのは9月下旬、ホットスポットとして非公式にその存在が知られていた東葛地方を含む千葉県の航空機モニタリング結果が公表されたのも9月下旬になってからである。しかし、こうした空間線量の測定結果を待つまでもなく、汚染のひろがりはいずれより早期からさまざまな媒体中で顕在化していた。食品の汚染はその一つである

が、ここではより直接的に筆者が関わってきた下水汚泥や廃棄物の問題を中心にとりあげる。

3. 環境媒体中の汚染の実態把握

3.1 下水汚泥

原発から環境中に放出された放射性物質が大気中を移流・拡散して地表に沈着し、とくに降水が地表への沈着に顕著な影響を与えることは、前述の水道水の例からも明らかである。事故後、空間線量率の上昇、農産物や水道水など生活に密着した媒体からの放射性物質の検出の報告が相次いだことを述べたが、放射能汚染のレベルと汚染された物の量の多さの両面で、深刻な問題として顕在化した典型例が下水汚泥である。とくに、雨水と生活排水などの汚水をあわせて処理する合流式下水道の処理施設には、地表に沈着した放射性物質が雨水とともに運ばれ、汚水処理過程で発生する汚泥に濃縮された。まず、福島県中浄化センター（郡山市）において、下水汚泥から $26,400\text{Bq/kg}$ 、溶融スラグから $334,000\text{Bq/kg}$ のセシウム検出が事故後1か月半余り経過した5月1日に公表された。なお、この時点では明らかではなかったが、溶融飛灰のセシウム濃度は247万 Bq/kg にも達していたことが後に公表された。また、5月8日には、福島市堀河町終末処理場の下水汚泥から、 $446,000\text{Bq/kg}$ のセシウム検出が公表された。汚泥中のセシウム濃度は降雨に伴って上昇し、その後低下するパターンが見られる。同処理場の場合、最近では1万 Bq/kg 前後まで濃度が低下しているものの、脱水汚泥をフレコンバックに詰め、使用していない半地下の曝気槽に一時保管する状況が続いている。また、福島県内だけでなく、関東地方においても、下水汚泥やその焼却灰からのセシウム検出が相次いだ。廃棄物としての処分量の低減のため、下水汚泥は肥料や建設原材料として利用されてきたが、放射性物質による汚染のため、この循環利用の輪が断ち切れ、多くの施設において、施設内での保管を余儀なくされることとなった。浄水過程で発生する浄水発生土についても同様の問題が生じてきた。

3.2 廃棄物

一方、廃棄物と放射性物質汚染との関連については、津波等によって生じた膨大な量の瓦礫が屋外に放置されていて放射性物質の付着が想定されたため、当初は福島県沿岸部の災害廃棄物処理の安全性の検討に主眼がおかれた。そのための基準づくりが進められ、下水汚泥と同様、 $8,000\text{Bq/kg}$ 以下の廃棄物について埋立可能との判断が示された。

しかし、廃棄物の汚染は福島県内にとどまること

はなく、6月末に東京23区清掃一部事務組合が公表した測定結果では、飛灰（ばいじん）から、最大で9,740Bq/kgという上記の基準値を上回る濃度が報告された。これを受けて16都県の一般廃棄物焼却処理施設において測定が行われ、8月末時点の集計では、岩手、福島、茨城、栃木、群馬、千葉、東京の7都県延べ42施設の焼却灰から8,000Bq/kgを上回る放射性セシウムが検出された⁵⁾。

このため、廃棄物焼却灰についても、首都圏を含めたより広い地域で一時保管などの対応が必要となった。一般廃棄物の焼却灰へのセシウムの濃縮は、家庭ごみとして出される剪定枝や雑草に起因すると考えられている。実際、冬季には低下していた焼却灰中のセシウム濃度が、2012年春から初夏にかけて、多くの地域で再び上昇しており、いわゆるホットスポットの自治体では、草木を可燃ごみとは分別して収集する動きもみられる。

なお、岩手県、宮城県沿岸部の津波被災地で生じた災害廃棄物の早期処理のため、県外での広域処理が計画されてきたが、放射性物質による汚染への懸念から受け入れが進んでいない。津波被災地の放射性物質汚染は一部を除いて関東地方よりもむしろ軽微であり、被ばくによるリスクは十分に小さいと考えられるが、放射性物質の拡散を防ぐ観点から、事故の直接影響の極めて軽微な西日本を含めた全国にまで処理を拡げることの妥当性は、より慎重に議論すべきであろう⁶⁾。

3.3 都市濃縮

下水道による水処理や廃棄物の焼却処理における上記の問題は、人工化されたシステム内部で生じる放射性物質の濃縮であるが、都市化した環境中では、より自然現象に近い形態での濃縮も生じている。2011年10月には、千葉県柏市の市有地で、57.5 μ Sv/hの空間線量が観測され、土壌中セシウム濃度276,000Bq/kgが検出された。筆者も参加して行った環境省の調査の最終報告では、土壌中のセシウム濃度は最大で450,000Bq/kgで、セシウム134とセシウム137との濃度比や土壌の性状から、不法投棄などではなく、原発事故由来のものが現地で濃縮されたものと推定されている。この側溝に通じる集水域には、大面積の屋根を持つ建物があり、その雨水が側溝の破損箇所から土壌に浸透したために起きた現象である。側溝の破損はこの事例の特殊事情であるが、雨水の排除経路における濃縮はどこでも起こりうる。この事例で、集水域の雨水拵中に堆積した泥のセシウム濃度は650,000Bq/kgとさらに高かった。航空機モニタリングによるこの地域のセシウム沈着量の観測値60,000～100,000Bq/m²を

もとに推定すると、地表5cm深さでみた土壌中のセシウム濃度は1,000～1,500Bq/kg程度と考えられるので、雨水の流路中の土や泥のセシウム濃度はその数百倍にも達していたことになる。

3.4 河川における放射性物質の流下

下水処理施設、側溝、雨水拵などにおけるこれらの問題は、都市化された環境中での雨水の流路で生じたものであるが、自然環境中においても、雨水の流下は放射性物質の移動に大きな影響を与えている。2011年夏季の豪雨期の前後における複数回の航空機モニタリングの結果から、河川中流域の中洲や河口部において、空間線量の上昇が観測されており、降水量の大きかった河川上流域からの放射性物質の流下が生じているとみられる。河川や湖沼のモニタリングは環境省によって行われており、河川水ではほとんどが不検出であるが、底質や河原の土砂からは、広範囲でセシウムの蓄積がみられる。関東地方の水源となる北関東のダム湖、千葉県東葛地域の河川や湖沼の底質中のセシウム濃度は数千Bq/kgに達している。河川を流下した放射性物質が海域、とくに河口部や内湾に与える影響は、今後監視すべき重要事項の一つであろう。なお、水道の蛇口水の高精度の測定において、1Lあたり10mBq程度のセシウムが検出されていることから、不検出とされている河川水についても、検出下限を下げれば、実態がより明らかになるだろう。

3.5 媒体間での放射性物質の移動と環境科学

このように、事故により放出された放射性物質は、自然環境、人工化されたシステムの双方の中を移動し、時としてその過程で滞留、蓄積しながら、より広い範囲への拡散と偏在化が進んでおり、事故当初に地表に放射性物質が降下した初期状態とは、空間分布はより複雑な様相を呈している。図1は、事故による放射性物質の環境への放出から被ばくに至る経路を、多角的・俯瞰的にとらえるための概念図として試作したものである。事故直後においては、放射性物質を含む空気塊（放射性プルーム）の通過経路における高線量の被ばくの回避が重要であるが、その後、放射性物質は、移流・拡散や降水などによって、より広い地域の森林、農地、市街地などに沈着し、さらに自然現象によって移動する。内部被ばくの観点から、食品には高い関心が寄せられているが、放射性物質が取り込まれる過程には、食物連鎖のほか、土壌圏や水圏における物質移動が深く係わる。さまざまな「圏域」にまたがる放射性物質汚染の問題は、環境科学が研究対象としてきた環境媒体間の物質移動の典型的な問題にほかならない。

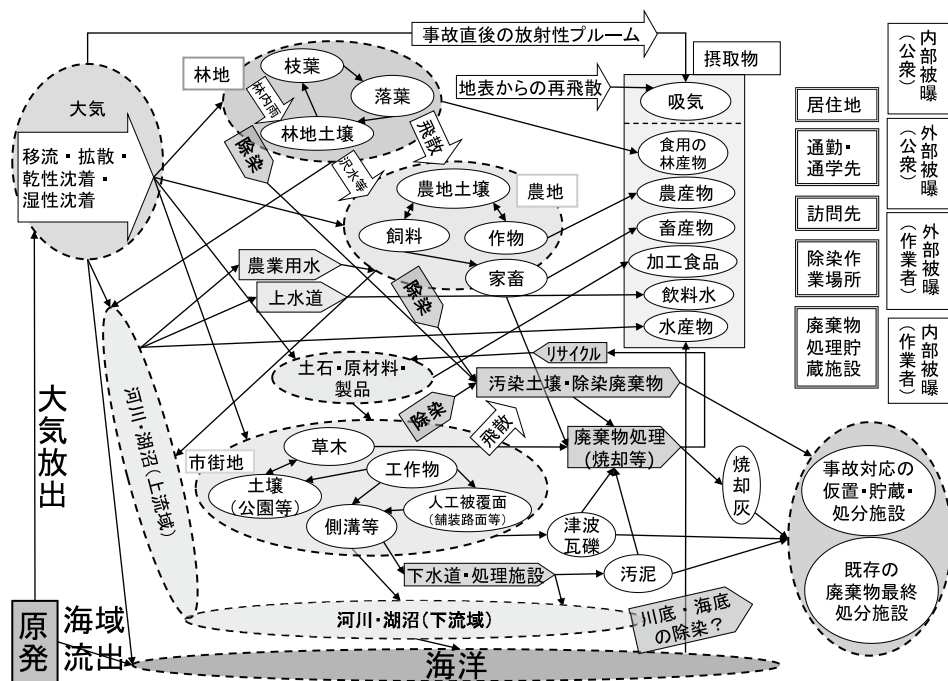


図1 環境への放出から被ばくに至るさまざまな経路のシステムの把握

4. 放射性物質による環境汚染についての現状認識

講演時に述べた、放射性物質による環境汚染についての現状認識は、以下のように要約される。

- ・事故から時間が経過し、大気中の放射性物質は主要な被ばく経路ではないと考えられているが、再飛散や除染活動等による人為的な二次放出の可能性まで考慮した状況把握のためには、大気から地表への降下物や大気中粉じんの採取による核種測定が有効である。
- ・河川や湖沼、人工的な排水経路の両面で、水の流路と土壌が接する場所に高濃度にセシウムが蓄積される事例が多く報告されており、今後とも監視が必要である。
- ・森林については、現時点では放射性物質は地上部への存在比が大きいですが、放置すれば土壌への移行や水系への流出が進む可能性が高い。但し、大規模な除染は森林の多面的な機能に悪影響を及ぼすおそれがあることに注意が必要である。
- ・農地については、土壌中の汚染分布、核種の移動の把握とともに、用水からの流入、作物への移行等について知見の集積が重要である。
- ・汚泥や廃棄物だけでなく、建設材料や堆肥などの有価物も含め、人為的な物質の移動を伴う放射性

物質の包括的な管理のスキームの導入を検討すべきである。

- ・「できる限り封じ込め、拡散させない」原則を極力尊重するのか、一定の許容被ばく線量の範囲内で合理的な対応を進めるのかについて、開かれた議論に基づいてコンセンサスを得ることが必要である。

5. おわりに ー環境科学に期待される役割ー

環境科学分野からの貢献が特に求められていると筆者が考える主なキーワードとして、

- ・現象把握：サンプリング手法、物理・化学分析手法を含むモニタリング手法
- ・現象解明：環境媒体間の物質移動の解明・モデリング
- ・影響評価：リスク評価（健康影響の評価、生態系への影響評価）
- ・対策技術：分離技術、環境修復技術
- ・総合的な対応：施設立地、計画・政策のアセスメント、リスク管理、リスクコミュニケーションを挙げておく。

事故から1年余りが経過し、散在しがちな多岐にわたる情報を繋げた総合的な理解の必要性、重要性への認識が深まっていることを痛感する。筆者が参

画の機会を得た日本学術会議東日本大震災復興支援委員会放射能対策分科会の提言⁷⁾には、そうした視点が強く反映されている。今回の事故によって、科学、技術、専門家に対する信頼が低下したことは否めず、科学的知見を的確な対応につなげていく努力を尽くしたい。

文 献

- 1) 森口祐一 (2011) 原発事故に関する情報をどう読み解くか～放射線、放射能のモニタリングデータを中心に～, 資源環境対策別冊 47 (10), 57-70.
- 2) 森口祐一 (2012) 放射性物質汚染の現状把握と除染, 環境情報科学, 41 (1), 43-49.
- 3) 厚生労働省水道水における放射性物質対策検討会 (2011) 水道水における放射性物質対策について (中間取りまとめ), 平成 23 年 6 月.
- 4) 大原利真 (2012) 放射性物質の大気輸送・拡散シミュレーションの現状と課題, 公開ワークショップ「福島第一原子力発電所事故による環境放出と拡散プロセスの再構築」発表資料
- 5) 森口祐一 (2012) 放射性物質と汚染された廃棄物の分布, 都市清掃, 65 (305), 17-22.
- 6) 森口祐一 (2012) 放射性物質で汚染された廃棄物への対処, 科学, 82 (4), 412-418.
- 7) 日本学術会議東日本大震災復興支援委員会放射能対策分科会 (2012) 提言「放射能対策の新たな一歩を踏み出すために一事実の科学的探索に基づく行動を一」, 平成 24 年 4 月 9 日.