

福島第一原子力発電所事故5年後の里山の現状と課題

千葉大学大学院園芸学研究科教授 小林 達明

1. 避難解除後の課題——現存被ばく状況における対策

2011年3月11日の地震と津波、それに引き続く福島第一原子力発電所の事故から、この春で5年が経過する。著者らが継続的に調査に入っている福島県伊達郡川俣町山木屋地区では、政府が2016年度中の避難解除を計画中と聞く。川俣町が計画的避難区域に組み入れられてからすでに5年経過しており、「緊急時被ばく状況」が長く続いたことになる(写真1)。

緊急時被ばく状況とは、事故による線源の制御の喪失や悪意による環境へ



写真1 除染が進む里地の状況(2015年10月、川俣町山木屋地区)

の汚染がもたらす被ばくで緊急の対策を必要とする状況のことを指す。緊急時には、健康に関する確定的影響を回避するために、あらゆる実行可能な努力を払う必要があるとともに、確率的影響をもたらす被ばくに対しては、全体として最適な防護措置が取られる必要があるとされている。

ここで、放射線による生物への確定的影響とは、脱毛や白内障等、どの個体も一様に起き、一定のしきい値があるものである。例えば、人体の一次的脱毛のしきい値は短期間の被ばくで4グレイとされ、目の白内障のしきい値は数年の被ばくで1.5グレイとされている。一方、確率的影響は、がんや突然変異等、集団や細胞群の一部で起き、その発生に特定の閾値を持たないものである。例えば、被ばくに敏感な植物のムラサキツユクサの雄しべの毛などで観察される形質変異は、低線量でも線量に比例して認められる。そのため、突然変異等に関しては、どんなに線量が小さくても一定のリスクを仮定しなければならない。

福島第一原発事故の「緊急時」に取られた放射線防護対策は、避難と除染であった。チェルノブイリ事故後のヨーロッパの対策が避難と部分的な除染に限られていたのと異なり、わが国では、除染によってふるさとを可能な限り取り戻すことが追求された。年間の追加被ばく線量が20mSvを超えると推定される地域を対象に計画的避難区域が設定され、「当該地域を段階的かつ迅速に縮小することを目指す」よう、国による除染事業が進められた。

除染の手法としては、人の健康の保護の観点から必要である地域について優先的に行うこと、農用地については農業生産を再開できる条件を回復させること、森林については住居等近隣における措置を最優先に行うことが定められた。これ以降、森林に対して、林縁20mに限った除染対策が行われることになった。

避難解除され、住民が帰還すると、地域で生活しながら復興に取り組むことになる。ICRP2007年勧告では、「緊急事態のあとの長期被ばくなど、すでに存在している線源がもたらす被ばくで管理についての決定をしなければならない状況」を現存被ばく状況と呼んでいるが、避難解除後はその状況に相当する。避難解除は年間20mSvの追加被ばく線量を基準に行われているが、地域全体が完全に安心できる状態に戻っているわけではない。

現存被ばく状況では、被ばくレベルは個人の行動によって左右されるので、

自分で目標を立てて行動し、被ばくを管理することになる。里山地域では、生活圏に除染されていない森林があり、それを全く避けて生活することなどできない。地域内に汚染状況の異なる区域が混在する中で、一定のリスクを客観的に管理しながら生活設計し、行動を選択する必要がある。

地域の放射線量に関する情報の開示は、住民の自助努力による放射線防護対策のために欠かせない。公共施設や住居周辺の情報は蓄積されているが、農地では必ずしもそうでないし、除染対象でなく線量の高い森林に至っては実態が把握されていない。除染後の地域生活圏の放射線環境はモザイク状であり、放射線防護を考えた生活パターンの検討のためには、その実情が分かるマップの作成が望まれる（図1）。

里山の生活では、内部被ばくの管理も重要になる。食品については、食品衛生法による厳しい基準値が定められ、生産地では細かいチェックが継続的になされており、市場を流通する食品は全く問題ないと言ってよい。しかし、

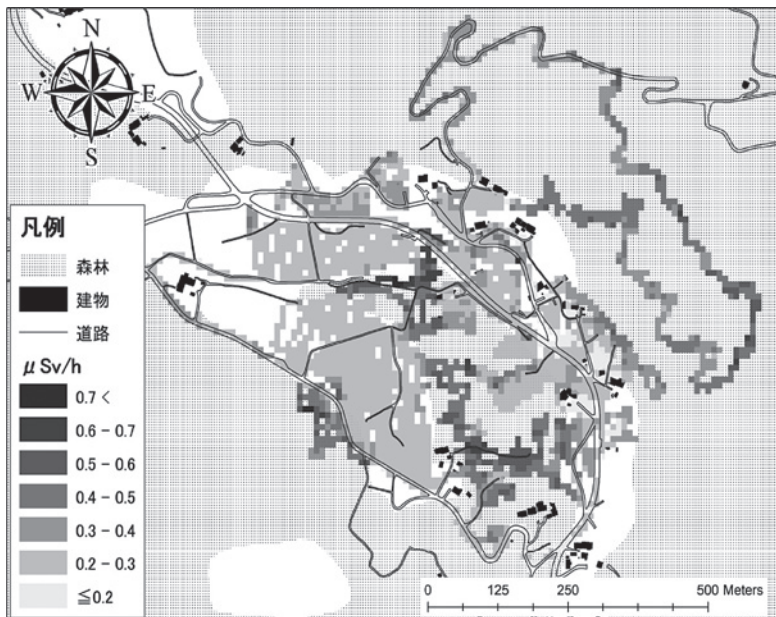


図1 福島県広野町北大迫地区における除染実施後の地域の空間線量分布の状況（濱ら、未発表）

自家消費用の作物や山菜には、そのようなチェックが入らないため、別の考え方が必要である。チェルノブイリ事故後定められたベラルーシとロシアとウクライナの食品基準は、食品の種類によって基準値が異なっている。日頃欠かさず摂取する水やパンの基準はもっとも厳しく、乳児の食品基準値も低い。一方、摂取量は少ないが、住民の大きな楽しみになっている山菜類の基準値は高く設定されている。また、基準値は国によって異なっており、それは国特有の生活習慣の違いによっているという。里山域に帰還後の生活では、このような柔軟な考えも現実的に必要になるのではないか。

内部被ばく管理のためには、食品等の汚染状況の把握が必要になる。現在では、非破壊式の放射能測定器が自治体に普及しつつあり、測定器を設置した施設に持ち込めば、採ってきた山菜の放射能を、調理前に簡単に測定できるようになった。精度や測定法には課題が残っているが、大まかな数値を知るには便利である。

最終的には、内部被ばくはホールボディカウンターによる計測で管理する。甲状腺に集積するヨウ素、骨に集積するストロンチウムと違って、セシウムは筋肉細胞を中心として体内に広く分散するので、被ばくの把握は全身でよいとされている。

2. 森林から田畑への放射性セシウムの流出実態

前節までは、事故後の社会対応の変遷について述べたが、その間、森林の放射性物質の状態はどのように変化したのだろうか？

私たち千葉大学のチームは、事故後、学生のインターンシップ先として交流があった福島県川俣町山木屋地区に入り、地元農業団体と協力して、事故後の対策にあたることにした。山木屋地区はたおやかな阿武隈山地に開けた盆地で、丘陵と平地が細かく入り組んだ地形の中に、集落とそれを取り巻く二次林、それらと混在する農地、ため池、草原などが配置され、生業が展開されてきた典型的な里地里山地域だった。

文字通り、生物多様性が生かされた現役の里山がそこにはあった。その根幹を支えているのは、さまざまな生物と水や土によって成り立つエネルギーや物質の循環、すなわち生態系である。その生態系に、自然界にはない放

放射性核種が大量に紛れ込んだ。それまでずっと里山と共生してきた人々は、2011年の私たちの最初の訪問の時から次のように訴えていた。「農地のことはある程度予想がつく。山のことが一番心配だ。」

そのような声を聞いて、私たちは、次のような方針で研究を行うことにした。第一に、除染対象とならない丘陵の森林を源とした田畑の二次汚染が起きないか検証すること。第二に、里山の産物の汚染状況を明らかにし対策について検討すること。第三に、森林生態系内の放射性物質の動きを把握し里山の今後について予測を行うこと。三番目の目標は、チェルノブイリ事故後のウクライナの森林の継続測定結果では、事故後10年以上たっても材の汚染が進行しており、福島においても森林における二次汚染の長期継続が危惧されたからである。

試験地は山木屋地区の農家の畑に隣接する丘陵地南東向き斜面のコナラ・ミズナラ混交林に設定した。標高580～600m、平均傾斜31°であり、土壌は褐色森林土、斜面上部にはアカマツが混交している。事故以前はタバコ栽培に用いる腐葉土の原料採取等に利用されており、優占する広葉樹の樹高は20m弱である。2015年11月末時点の住居周辺・農地の空間線量率は除染により $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 以下に低下しているが、森林では $0.5 \sim 1.5 \mu\text{Sv/h}$ である。

森林から農地への放射性物質の流出を調べるために、2013年初夏に、凹凸の少ない様な斜面を選び、丘陵地斜面の上端から下部までをほぼカバーするような幅9m、斜面長35mの形状の試験区を設けた。試験区の下端には、透水マット付きの人工編柵と180cmの雨樋を設置して、固体で森林外に移動しようとする物質と液体で流出しようとする物質を把握できるようにした。

その結果、8月から11月の4カ月間で、斜面から森林外に流出しようとした ^{137}Cs の総量は、斜面面積あたり 417Bq/m^2 だった。林床有機物層・土壌層の ^{137}Cs 集積量は 464kBq/m^2 だったので、この4カ月間の流出率は0.09%と低かった。この期間は落葉期を含み、降水量も多かったため、1年を通したとしても、流出率は0.2%を超えないのではないかとと思われる。森林からの放射性セシウムの流出率が1%以下と低いことは、チェルノブイリ事故後のヨーロッパの森林でも、福島第一原発事故後のスギ林でも報告されており、落葉広葉樹林でも同様の結果が得られたことになる。

流出しようとした ^{137}Cs のうち、57%は落葉落枝の移動によるもので、落

ち葉の飛散が森林外への¹³⁷Cs 移行の中心であることが明らかになった。土砂や細粒有機物の形態の移行量は全体の36%だった。液体での森林外流出は7%で、うち植物に容易に吸収される形態の溶存態のものは全体の3%と限られていた。

これらの結果からは、森林の放射性セシウム保全効果は高く、森林に蓄積した放射性物質による農地や住宅地への二次汚染の危険性は低いと言える。

3. 山菜と木材の汚染実態

里山の植物やキノコの汚染状況はどのようなものか？2014年と2015年には、山木屋地区の山菜の汚染状況を調査した。厚生労働省が今回の事故を受けて改訂した食品の安全基準は、生重量あたり放射性セシウム100Bq/kgである。除染が入り、住民による清掃が日常的に行われる住居周辺に生育するアサツキ、ヨモギ、ギョウジャニンニク、クリ、ミツバ、ショウブ、ウド、ツクシ、フキ、ミョウガ、セリ、サンショウの実、ウメの実、クワの実、ミツバアケビの実は基準をクリアしていた。そのほか湿性環境のクサソテツ、イタドリ、カンゾウ、ウバミソウも乾重量あたり（以下、同様）200Bq/kg以下で低めの値だった。

若芽を食べる山菜は、いずれも200Bq/kg以上とやや高く、摂取を勧められる値ではなかった。フキノトウ、タラの芽、オヤマボクチ、ワラビ、コバギボウシ、ヤブレガサ、モウソウチクの筍などである。コシアブラは最も放射能が高く、測定個体のすべてで4000Bq/kg以上だった。林内に生育する植物は、とくに高い傾向があった。

キノコでは、有機物の少ない地下の土壌母材層に生育し、マメダンゴと愛称さるショウロだけは100Bq/kg以下だったが、ほとんどのキノコは200Bq/kg以上だった。その中で、木材腐朽菌のナラタケとシャカシメジは2000Bq/kg以下でやや低い傾向があった。そのほかの森林生キノコであるコウタケ、タマゴタケ、ウラベニホテイシメジ、ムレオオフウセンタケ、ヤマドリホテイシメジ、ハツタケ、シロハツはいずれも2000Bq/kg以上で、チチタケはとくに高かった。コウタケはイノハナと呼ばれ、季節になれば関係の深い家々の間で交換され、地域社会にとって特別な意味のある存在だっ

ただに、とくに残念である。

木材ではどうか？椎茸原木の乾重量あたり放射線セシウム基準は50Bq/kg、菌床用培地で200Bq/kg、薪で40Bq/kg、木炭で280Bq/kgとされている。

私たちは、森林除染による、木材放射能の低減効果についても試験した。すでに述べた森林流出水の試験区に並列して、熊手を用いて落葉落枝層を除去した試験区と、熊手除去に加えて鋤簾じょれんで有機物層すべてを剥ぎ取った試験区を2013年6月末に設定した。翌年8月に、それぞれの試験区に生育するコナラ属樹木（コナラとミズナラ）の各8本（計24本）の木材を幹中心まで成長錐と呼ばれる器具によって採取し、全体の放射能を測定した。

処理試験をしていない林では、コナラ・ミズナラの幹材の¹³⁷Cs濃度は低いものでも347Bq/kgあり、上記の基準をいずれもオーバーしていた。ナラ類の材の汚染は樹液が通水する辺材全体に及ぶが、心材の放射能は低いことがわかっているので、辺材部に限ると¹³⁷Cs濃度はさらに高いと考えられる。現在放射能濃度が高い樹皮を取り除いても、椎茸ほだ木としては適切でない値である。

森林除染は幹材の放射能低減に確かに効果があった。除染を行っていない林の¹³⁷Cs濃度平均値は502Bq/kgだったが、落葉落枝層除去処理で32%、有機物層除去処理で37%の放射能削減効果があった。しかし、平均値ではいずれの処理によっても、上記の諸基準をクリアできていなかった。

これらの結果から、避難区域になっている地域における森林の山菜利用と広葉樹木材の産業利用は、いずれも厳しい状況にある。なお、スギやアカマツなどの針葉樹材の汚染状況は、広葉樹に比べると軽微という報告がある。

4. 今後の森林汚染の変化について

チェルノブイリ事故後の森林の放射性セシウムの動きの変遷は次のように整理されている。

最初、大気中の放射性物質フォールアウトが森林に降下沈着する間、常緑針葉樹が主体の森林では、乾性あるいは湿性遮断によって樹冠は汚染される。続いて、葉の表面から枝などへの転流が起きる。時間を追って、風雨による洗脱や落葉が起き、樹冠の外側表面の除染が進む。こうした樹冠のプロセス

に引き続いて、根による吸収が始まるが、それは長い間蓄積される樹木の汚染の支配的な経路になる。森林系の汚染は二つのステージに区別される。

- (1) 初期フェーズ：4～5年続き、樹木から土壤への放射性核種の移行による急速な再分布によって特徴づけられる。
- (2) 定常フェーズ：経根吸収が主体となり、放射性核種の植物への供給可能性のゆっくりとした変化によって特徴づけられる。

川俣町における私たちの試験地の結果から、落葉落枝層除去によって幹材の放射能が2014年に低下していることから、少なくともコナラやミズナラにあっては、樹皮や葉を通してだけでなく、経根吸収による材の汚染が、2014年には始まっていたと考えられる。

測定結果をまとめると、私たちの試験地には、トータルで498kBq/m²の¹³⁷Csが存在したが、2014年時点では、その94%が林床に、6%が植生に存在した。同年7月～11月の5カ月間の林冠から林床への¹³⁷Cs供給量は全集積量の0.9%だった。この間の林外への流出率は全集積量の0.06%だったから、林内の循環量の方が15倍も大きかった。放射性セシウムは、森林生態系の内部循環が大きく、外部流出は少ないことがわかる（図2）。

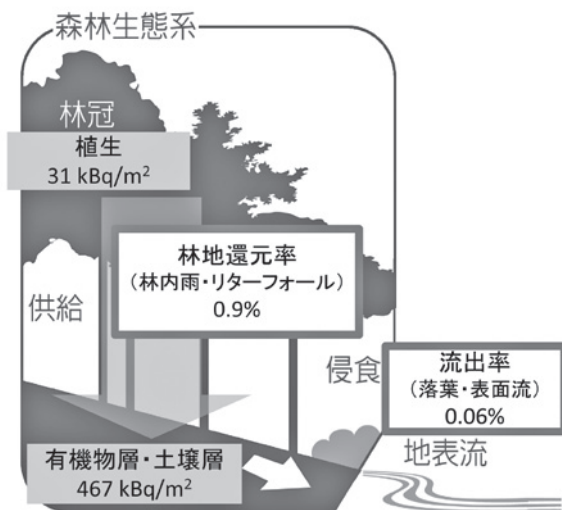


図2 里山の森林生態系をめぐる¹³⁷Csの動き
(2011年3月基準に半減期補正)

今後、樹木の汚染はどこまで進行するのだろうか？そのことを予測する鍵は、もっとも放射性セシウムが集積している林床の有機物と土壌のセシウムの形態にあると考え、分析を行った。

落葉・落枝が分解・細分化された層(有機物層)、粘土鉱物が主体の土壌層(鉱質土層)それぞれの ^{137}Cs を、逐次抽出法という方法で、イオン態、交換態、有機態、その他の形態にわけて定量した。イオンは水で溶出する形態で、植物にもっとも吸収されやすい。交換態は酢酸アンモニウムによって抽出される形態で、普段は土壌の負電荷によって吸着されているが、アンモニウムイオン等が多い酸性環境では、陽イオンによって交換され溶出する形態である。有機態は有機物にとりこまれた形態で、私たちの実験では、30%過酸化水素水を加えて2時間震とうした液中から抽出されるものとした。その他の成分には、リグニンなど難分解性の有機物と結合したものと粘土鉱物に強く吸着固定されたものなどが含まれる。

とくに粘土鉱物に固定されたセシウムは、きわめて安定した状態であるため、植物に吸収されることはないとされる(図3)。空間放射線量を高め、外部被ばくの原因になることはあっても、生態系を循環して内部被ばくの原因になることはない。

分析の結果、イオン態 ^{137}Cs は有機物層でわずかに存在するものの、鉱質

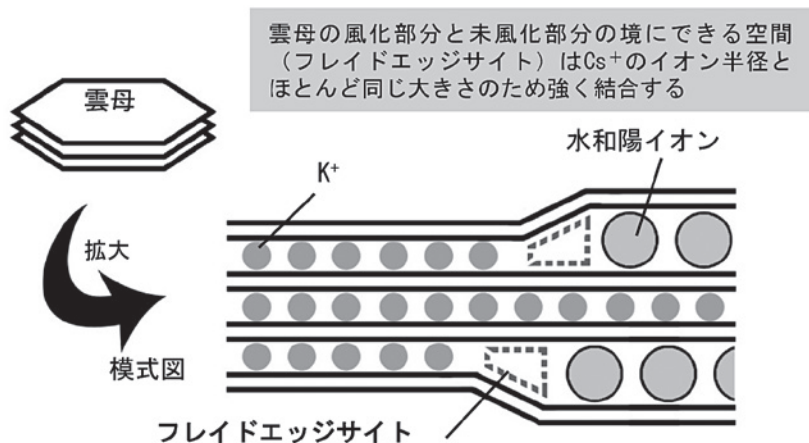


図3 粘土鉱物による放射性セシウムの固定状況

土層ではほとんど存在しなかった。交換態と有機態の ^{137}Cs は、有機物層で3%、鉍質土層表層で2%しかなかった。セシウムは粘土鉍物に固定されやすい性質を持ち、その形態ではもはや植物に吸収されない。鉍質土層で粘土割合が高いのはもちろんだが、有機物層にも灰分が3割強あり、粘土鉍物が少なからず含まれている。事故当初、大部分イオン態で存在していたと考えられる放射性セシウムだが、時間がたつにつれ次第にエイジングが進行し、有機物層でも固定化が進行したと考えられる。

トータルすると、植物に吸収される可能性のある ^{137}Cs の割合は、有機物層と鉍質土層全体の2.5%しかなかった。この数値はやや過小評価と考えられるが、植物に利用される可能性のある放射能セシウムは全体の一部に限られると考えられる。

こうした結果から、森林を汚染しているセシウムの循環経路は意外と窮屈で、植物に利用される形態のセシウムをうまく処理することができれば、植物体への汚染の進行を多少とも食い止めることが可能かもしれない。里山の利用は困難な状況にあるが、今後の見通しにはわずかな光明も見られた。これからも里山再生について取り組み、生態系の挙動を監視していきたい。

〔参考文献〕

- International Atomic Energy Agency (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience/ Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment', Vienna: IAEA, 165pp.
- 斎藤翔ほか (2015) 林床処理を行った二次林と耕作地の土壤中放射性セシウムの存在形態, 日本緑化工学会誌 41, 3-8.
- 山本理恵ほか (2014) 原発事故被災地の丘陵地広葉樹斜面林における林床放射能低減試験とその後の水土流出, 日本緑化工学会誌 40, 130-135.



小林 達明 (こばやし・たつあき)

千葉大学大学院園芸学研究科教授、同研究科長。京都大学大学院農学研究科博士課程中退、農学博士。専門は緑地環境学、再生生態学。社会と関わる生態学の立場から、里山の保全再生、砂漠化地域の再生などについて研究。著書に「生物多様性緑化ハンドブック」など。1959年生まれ