

本論文の著作権は(社)日本治山治水協会に帰属する

『水利科学』別刷

No. 328 (第56巻第5号)

2012年12月



福島第一原子力発電所の事故により 放射能に汚染された森林の修復に向けて

橋 本 昌 司
金 子 真 司

目 次

- I. はじめに
- II. 森林の汚染の実態
- III. チェルノブイリの経験に基づいた森林の放射能汚染への対処
- IV. 福島の森林の修復に向けて
- V. おわりに

I. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した巨大な津波により、東京電力福島第一原子力発電所は冷却機能を失い水素爆発を起こした。その爆発等により、大量の放射性物質が原子力発電所から外部に漏れ出した。大気に放出された放射性物質は、原子力発電所を中心に東日本に広く降下したが、放出時の気象条件の影響を受け特に原子力発電所を中心に北西方向が高く汚染されることになった。その後の航空機モニタリングなどにより、汚染の分布状況の詳細が明らかとなってきている（文部科学省2011, 2012）。

特に広範囲に放出された代表的な放射性物質（核種）はヨウ素131 (^{131}I)、セシウム134 (^{134}Cs)、セシウム137 (^{137}Cs) の3種類であった。それぞれの半

（橋本：独立行政法人森林総合研究所 立地環境研究領域 土壌資源研究室主任研究員）
（金子：独立行政法人森林総合研究所 立地環境研究領域長）

減期は、8日、2年、30年である。事故直後は特に ^{131}I による広域汚染が問題となったが、現在ではその半減期の長さからセシウム、特に ^{137}Cs による汚染が問題視されている (Yoshida and Kanda 2012)。

日本の土地利用の67%は森林であり、福島県においても約71%が森林である。よって、今回の汚染地域の大部分は森林である。そしてその森林は農地や住宅地を取り囲むように分布している。事故から1年以上がたったが、汚染された森林を今後どうしていくのか、いまだ明確な方針はたてられていない。本報では、チェルノブイリ事故から得られている知見に加え、これまでの調査で明らかになってきた福島の森林汚染の実態を紹介し、さらに、今後の森林の修復に向けてどのように取り組めばよいのか解説を行う。

II. 森林の汚染の実態

1. チェルノブイリの経験からわかっている森林におけるセシウムの挙動

汚染された地域に多くの森林を含むという状況は1986年のチェルノブイリ事故でも同じであり、ヨーロッパの多くの国で研究が行われ、森林に降下したセシウムの挙動の概要がわかっている (IAEA 2006; 吉田 2012)。まず、そもそも森林は幹、枝、葉と地上に突き出し、表面積が大きいので、ほかの土地利用よりも大気中の放射性物質をトラップしやすいことが指摘されている (図 1a)。別の見方をすれば、農地などでは地表面に放射性物質が降下し土壤を汚染するが、森林では土壤だけでなく、幹、枝、葉なども汚染されるということになる。森林の各コンポーネントに付着したセシウムは、降水によって流されたり (恩田 2012)、枝葉の脱落に伴って、地表面へと移動していく (図 1b)。降下初期は、降水による移動が卓越することが考えられるが、徐々にその割合は低下すると考えられる。今回の事故のように、落葉樹林の落葉期であれば、地表面に直接降下する割合も多いと考えられる。森林に入ったセシウムは、落葉分解などによって土壤に移動して土壤中の粘土鉱物に固定されるが、一部は樹木に吸収され森林内の物質循環に組み込まれていく。最終的には、表層の堆積有機物層や土壤が森林内の大部分のセシウムを保持することになる (図 1c)。土壤中の粘土鉱物に固定されたセシウムの場合は水によって移動することもなくまた植物によって利用されることもないが、水溶性やイオン交換態と

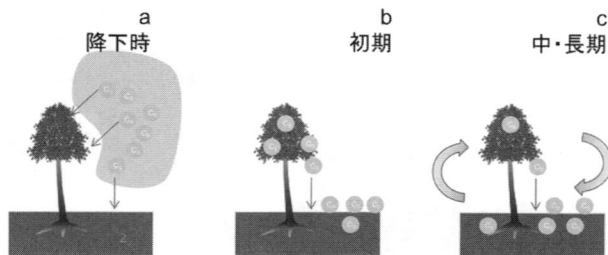


図1 森林におけるセシウムの挙動の概念図

して土壌に存在するセシウムは、植物によって吸収され植物体に入っていくことになる（山口ら 2012）。植物体に入ったセシウムはやがて植物部位の枯死脱落によって、堆積有機物層や土壌へと戻ってくることとなる（図1c）。

チェルノブイリの経験から、大きくみれば森林は内部でセシウムを循環させながらしっかりと保持し、系外へセシウムをほとんど出さないことがわかっている。ただし、小さなスケールでみれば落葉や土砂の流出等により系外へセシウムが出ることもあり得るし、山火事などを通じてセシウムが再拡散する可能性もある。日本の場合、森林は急峻な斜面にあり、また降水量も多く降雨強度も強いいため、局所的には森林のセシウムが森林外に流れ出ることも考えられる。

2. 福島における森林汚染の状況

2.1) 森林内部におけるセシウムの分布状況

では、現在の福島の森林の汚染はどのような状況なのであろうか？ 森林総合研究所では、2011年から福島県内の3カ所の森林に調査プロットを設定して観測を開始した（森林総合研究所 2011；金子 2012；写真1）。2011年の8、9月の調査から、表層の堆積有機物層（落葉層）と葉が約80%と大部分のセシウムを保持しており、残りの約20%は土壌に保持されていることが明らかになった（図2）。堆積有機物層と葉の保持の比率は森林タイプによって異なり、常緑樹であるスギ林では、葉が40%近いセシウムを保持し堆積有機物層は30%程度であるのに対し、落葉広葉樹においてはすでに堆積有機物層が50%以上のセシウムを保持しており、葉には10%程度のセシウムしか存在しなかった。この違いは、放射性物質の大半が降下した2011年3月に、落葉広葉樹林は展葉し



写真1 福島での調査風景

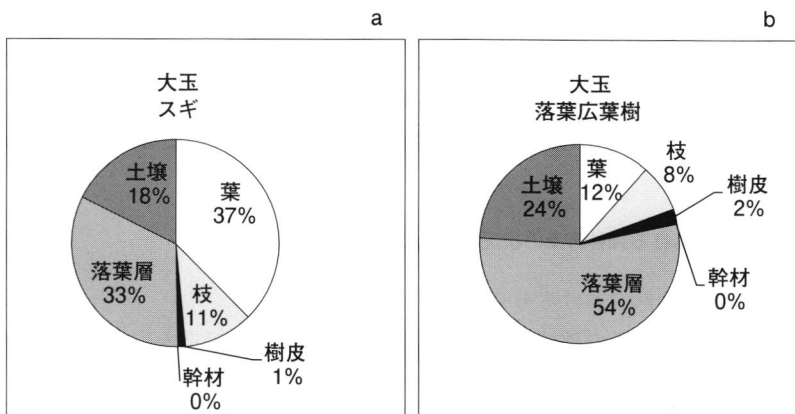


図2 2011年8、9月に行われた森林中のセシウム分布状況の調査結果の一例
(森林総合研究所 2011; 金子 2012)

ておらず多くの放射性物質が直接林床に降下したのに対し、スギ林では葉があったため、葉が多くの放射性物質をトラップしたと推測される。いずれにしても、降水や落葉落枝を通じて、堆積有機物層へセシウムが供給され、また同じく降水や堆積有機物層の分解により、土壌へとセシウムが移行していくことが予想される。また、現在の樹木に分布するセシウムは主に降下したものが直接

付着したものが主であるが、今後は根から植物が吸収したセシウムが植物体内で転流されていくと考えられる。2012年も調査が行われており、1年で森林内のセシウムがどのように動いたのかが明らかにされると期待している。今後も注意深くモニタリングを継続していくことは不可欠である。

2.2) 汚染の面的広がりと汚染された物質量の推定

先にも述べたが、福島の森林率はおおよそ7割であり、放射性物質の降下により汚染された地域のおおよそ7割が森林であることが推測される。我々は、特に汚染の高い放射性セシウムが1平方メートルあたり100万ベクレルを超える地域（2011年11月時点の ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計）を対象に、GISとデータベースを用いて解析を行った（Hashimoto et al. 2012）。この地域の総面積は646 km^2 であり、このうち森林は428 km^2 （66%）であった（表1；図3）。内訳としては落葉広葉樹林が210 km^2 、常緑針葉樹林が201 km^2 、落葉針葉樹林が17 km^2 であった（表1；図3）。汚染された森林の物質量を推定した結果（土壌は5cm深）、体積で33 Mm^3 （ $\times 10^6\text{m}^3$ ）（枝、葉、堆積有機物層は体積推定には含まれていない）、重量にして21Tg（ $\times 10^{12}\text{g}$ ）（乾燥重量）という膨大な量になった（図4）。単純にこの量がどれくらい膨大なのかを考えてみると、1m \times 1m \times

表1 特に汚染度の高い地域における森林と土壌タイプの分布

森林タイプ／土壌タイプ	面積 (km^2)
森林面積	428
森林タイプ	
落葉広葉樹林 (DBF)	210
常緑針葉樹林 (ENF)	201
落葉針葉樹林 (DNF)	17
土壌タイプ	
褐色森林土 (B)	293
黒色土 (Bl)	70
未熟土 (Im)	51
グライ土 (G)	5
岩石地 (RK)	5
その他 (NI)	4

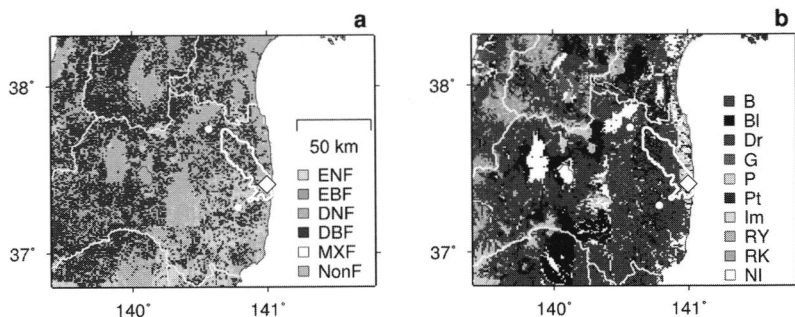


図3 森林と土壌タイプの分布（略名は表1を参照）（Hashimoto et al. 2012）。白い菱形が福島第一原子力発電所。白い線は県境を表す

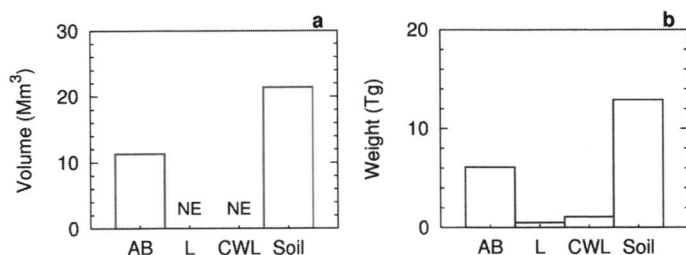


図4 推定された汚染物質の体積と重量（AB：地上部バイオマス，L：表層有機物，CWL：粗大有機物，Soil：土壌）（Hashimoto et al. 2012）

1 m の立方体ブロックであれば3,300万個（敷き詰めれば5 km × 6 km 強の面積になる）、もし5 m × 5 m × 5 m の立方体ブロックであれば26万4,000個（同様に1 km × 6 km 強）ということになる。この研究により、汚染された森林がいかに広大であるかが確認されると同時に、除去に必要な汚染された森林物質がどれほど膨大な量であるか具体的な推定値として明らかになった。

Ⅲ. チェルノブイリの経験に基づいた森林の放射能汚染への対処

IAEA（国際原子力機関）は、チェルノブイリの経験を取りまとめて作成したレポート（IAEA 2002）および、福島の事故を視察し提言をまとめたレポート（IAEA 2011）において、今回の事故のような大規模面積の汚染の場合、森林の除染については否定的な見解を述べている。

森林汚染への対処方法 (countermeasure) は大きく分けて、二つに分類される。Management based countermeasures (管理を通じた対策) と Technology based countermeasures (技術を適用しての対策) である。前者は、アクセスの制限、食物採取の制限 (ヨーロッパでは、狩猟、キノコ狩り、ベリーなどの採取が盛んである)、薪採取の制限、山火事の防止などである。後者は、間伐・皆伐後土壌を掘り返す、堆積有機物層や表層土壌の除去、植物のセシウム吸収を阻害するような肥料を投入する、などである。農地などに比べて、そもそも森林に対して実行可能性の高い Technology based countermeasures は限られている。IAEA の提言では、「森林の除染は非常に手間・お金・時間がかかる。特に面積が大きい場合はなおさらである。除染は、農地や住宅地の周りのみといった限られた地域のみ適用されるべきで、大規模面積には適用されるべきではない」と、考えている。そしてテストを行い、慎重に行うべきだと提言している。2011年10月に IAEA の国際専門家チームが福島に訪れ、作成したレポートでもこのことが強調されている。またそのレポートの中であげられている重要な指摘としては、中山間地域をみてわかるように、農地や住宅地と森林は接しており、また河川の上流が森林で下流には農地が広がるということがあるため、土地利用区分に区切られることなく汚染地域を広域的に一体的に取り扱うことが提言されている。また、廃棄物の貯蔵地・施設の確保が、汚染地域の修復の鍵を握る点も指摘されていた。

IV. 福島森林の修復に向けて

現実的には、汚染された森林への対処法は 1. アクセスの制限、と、2. 汚染された物質を除去するという二つに限られるとあって良い。そして大切なのは、どちらの方法もメリットとデメリットがあることをしっかり認識する事である。アクセス制限のメリットは、後者と比べて低コストであるという点である。一方、デメリットとしては、セシウム量・放射線量が低下するのに長い時間がかかる、そのため森林の管理の低下による森林劣化、森林が利用できないことによる経済的損失、長期にわたる生態系汚染、他の系への流出の可能性、地域住民の不安、などが考えられる。また、アクセスを制限するための費用と、長期にわたるモニタリング、山火事の防止などの課題も発生する。

一方、汚染物質を除去するのはどうだろうか？ メリットとしては、セシウ

ム量・放射線量の低下にかかる時間を短くできる、他の系への拡散が抑制できる、住民の安心、もし汚染物質を発電に利用できるならば発電エネルギーになる、などがある。デメリットとしては、なんといっても膨大な費用と保管場所の問題である。そのほか森林の伐採や地表面の除去は、表土流亡につながるおそれがあるためその防止のための費用が必要となり、生態系の多様性の低下も生じ、保水機能や養分に関して土壌劣化が起こることも考慮に入れる必要がある。また作業員自体の被ばくの問題もある。

もう一点考慮に入れるべき事は、現在の森林の汚染状況は土壌以外の部分にセシウムが多く分布しているという初期のステージにあるということである。先述の通り、今後徐々に表層の堆積有機物層、さらに土壌へとセシウムが移行していく。最終的には土壌への分布がもっとも大きくなるが、そのステージにおいて除染を行うのであれば土壌を取り除かなくてはならなくなる。また、この時点ではすでに植物の吸収により堆積有機物や土壌から植物体へ多くのセシウムが入り込んでしまう事にもなる (Linkov et al. 1997)。

このように、どのような対処をとったとしてもメリット・デメリットが存在しており、結局二つの対処法をおりませたゾーニングが現実的な解決法になると考えられる。しかし、ゾーニングの戦略策定は、上述の込み入ったメリット・デメリットに加え、どの地域までを除染対象にするのかの線引きも難しい(たとえば Brenner 2011)。

IAEA の提言は、今回のような緊急の広域放射能汚染問題に対して、人命を最優先にいかにか少ないコストで放射線被曝量を低下させるかという考え方であり、そしてこのような事態に際して起こりがちな過度に防衛的な、有効性の低い、パニック的対処を避けるために冷静で現実的な対応を促すものである。そのため、森林への対応の優先順位が低めに設定されているのも理解できる。しかし、ICRP (国際放射線防護委員会) の報告の中にこのような一節がある。「原子力事故や放射線緊急事態によって生じた被ばく状況に関する過去の経験から、汚染地域内では社会・経済活動とともに住民の日常生活のあらゆる側面が影響を受けることが明らかになっている。このような状況は放射線防護を考慮することのみで対処することができない複雑な状況であり、健康、環境、経済、社会、心理学、文化、倫理、政治などの関連するあらゆる側面について取り組まなければならないものである。」(日本アイソトープ協会 2012)。森林への対処も、まさにここに指摘されているように、経済性はもちろんそれ以外

の様々な条件を考慮に入れて決定されなければならない。森林の汚染の状況も社会における森林の位置づけもチェルノブイリの時とは異なるため、チェルノブイリの経験から得られたことを参考にしながらも、日本は日本で独自に汚染された森林への対処方法を決定していく必要がある。森林の放射能汚染の問題は、森林の研究者だけで解決できるものではなく、様々な分野の研究者が連携して学際的なアプローチで取り組む必要があるのみならず、研究者、地域住民 (stakeholder)、政治、行政、がしっかりと議論を行って現実的に問題を解決していく必要がある。

V. おわりに

美しい山村に突然降りかかった放射能汚染は、そこで静かに生きていた人々の生活を一変させてしまった。広域にわたる森林の放射能汚染への対処は、これまで述べてきたように簡単ではない。合理性だけを優先しすぎても、感情論だけにとらわれても現実的な解決は難しい。研究者、地域住民、政治、行政がしっかりと議論を行って現実的に問題を解決していく必要がある。また、今後世界のどこかで、同様の放射能汚染が発生することも否定はできない。そのような次の事故に対処する人々のためにも、福島のモニタリングの詳細な結果と、対処方法の決定過程は、今後しっかりと国際的に公表していく必要がある。

引用文献

- Brenner, D. J. (2011) We don't know enough about low-dose radiation risk. *Nature* doi: 10. 1038/news. 2011. 206.
- Hashimoto S., Ugawa, S., Nanko, K., Shichi, K. (2012) The total amounts of radioactively contaminated materials in forests in Fukushima, Japan. *Scientific Reports* 2: 416, doi: 10. 1038/srep00416.
- IAEA (2006) Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience.
http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1239_web.pdf
- IAEA (2011) Final Report of the IAEA mission on remediation of large contaminated areas off-site the Fukushima Dai-ichi NPP.
http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/final_report151111.pdf

- 金子真司 (2012) 森林における放射能汚染調査. 森林科学. 65 : 35-38.
- Linkov, I., Morel, B. Schell, W. R. (1997) Remediation policies in radiologically-contaminated forests: environmental consequences and risk assessment. *Risk Analysis* 17: 67-75.
- 文部科学省 (2011, 2012) 放射線量等分布マップ. <http://ramap.jaea.go.jp/map/>
- 日本アイントープ協会 (2012) 原子力事故または放射線緊急事態後の長期汚染地域に居住する人々の防護に対する委員会報告の適用 (ICPR publication 111).
<http://www.jrias.or.jp/public/icrp/20120502-152852.pdf>
- 恩田裕一 (2012) 森林から土壌・水圏への放射性物質の移行. 森林科学. 65 : 34-35.
- 森林総合研究所 (2011) 森林内の放射性物質の分布状況調査結果について (第二報) の公表. <http://www.ffpri.affrc.go.jp/press/2011/20111227/index-1.html>
- 山口ら (2012) 土壌—植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因. 農業環境技術研究所報告. 31 : 75-129.
- Yoshida, N., Kanda, J. (2012) Tracking the Fukushima Radionuclides. *Science* 336: 1115, doi: 10.1126/science.1219493.
- 吉田聡 (2012) 森林生態系での放射性物質の動態—過去の研究事例から予測される状況と課題—. 森林科学. 65 : 31-33.
- Zibitsev S., Kashparov, V., Yoschenko, V. (2012) チェルノブイリ原発災害後の汚染森林での25年間の放射線影響研究の概要. 森林科学. 65 : 27-30.

(原稿受付2012年 8月13日, 原稿受理2012年 8月19日)



