

東京電力(福島)第1原子力発電所で3月12から15日の間に1～4号機が相次いで爆発を起こしました。これにより発生した放射能雲(ブルーム)が気流に乗って移動中に降雨があり、雨水に溶けた放射性沈降物(フォールアウト)が下界に降り注ぎ、広範囲にわたり土壌や植物が汚染されました。放射能雲は上空2000m以上を漂っているのも山岳地帯や樹林帯といえども汚染とは無縁とは考えにくいのです。そこで2010年にまとめられたIAEAの報告書(Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments)を参考にして、森林の放射能汚染の特徴をまとめてみました。

1 フォールアウトで放出された放射性核種の種類と特性

今回の原子力発電所事故で環境中に放出され広範囲に拡散した主な放射性核種はヨウ素(^{131}I)、セシウム(^{134}Cs 、 ^{137}Cs)です。チェルノブイリではストロンチウム(^{90}Sr)も飛散していますが、今回も中通りで検出されています。放射性核種は放射線を放出しながら放射能を放出しない別の物質に変化するため、時間とともに減少していきます。これを物理的半減期といいます。物理的半減期は放射性核種によって異なります。ヨウ素は8日、セシウムは2種類有りますが ^{134}Cs は約2年、 ^{137}Cs は約30年です。ストロンチウムは約29年です。放出される放射線はヨウ素とセシウムは β 線と γ 線ですが、ストロンチウムは β 線のみです。森林の放射能汚染の影響は長期間に亘って残りますが、その原因物質は半減期の長さから ^{137}Cs と ^{90}Sr が中心となります。

2 森林における放射性核種の沈積

土壌や植物のセシウムやストロンチウムの放射能汚染は雨水によるもので気流では定着しません。森林に雨や雪が降ると、放射性核種は樹(樹冠)や草、コケなどの森林植物(生物)と土壌に沈着します。植物体内へは葉と土壌から放射性核種が移行します。セシウムは葉から吸収されやすく、ストロンチウムは葉からは吸収されにくいのですが根を介して土壌から吸収されやすい性質があります。

表1 樹林のタイプによる樹冠の放射性物質補足率

森林のタイプ	汚染の原因	補足率(%)
マツ林(6-10年生)	^{89}Sr 水溶液の人工的散布	90-100
マツ林(60年生)	50 μm 以下の放射性粒子の散布	80-100
マツ林(25年生)	100 μm 以下の放射性粒子の散布	70-90
マツ林(30年生)	放射性粒子懸濁液の散布	40-60
カンバ林(35-40年生:冬)	放射性粒子懸濁液の散布	20-25
カンバ林(35-40年生:夏)	フォールアウト	20-60
マツ林(50-60年生)	フォールアウト	50-90
熱帯雨林	フォールアウト	100

降った量に対して樹冠でとらえられた放射性核種の割合(補足率)は針葉樹類が高く、広葉樹はこれよりは低い値を示します(表1)。残りは土壌に沈着します。チェルノブイリ事故では事故後2、3日でフォールアウトの70～80%が森林樹木の幹や葉、枝などの地上部に沈着しました。沈着量は、針葉樹林は落葉樹林の2、3倍、河辺や泥炭地の7～10倍に達しました。

3 森林における放射性核種の樹体の葉、木部および果実への移行と循環

森林土壌からの放射性核種の植物への移行を評価する際の手掛かりとして凝集移行係数(Tag)と言う指標が使われます。凝集移行係数とは汚染された土壌面積(m^2)あたりの放射総量に対する植物体(または可食部)中の放射性核種濃度を示すものです。凝集移行係数は放射性核種によって異なります。

凝集移行係数($\text{Tag}; \text{m}^2/\text{kg}$)=植物体中の放射性核種濃度(Bq/kg 乾物)/感染土壌面積当たりの放射性核種量(Bq/m^2)

ここで、Bqは、ベクレルの略記号で放射能の量を表す単位です。1秒間に1つの原子核が崩壊して放射線を放つ放射能の量を1Bqとして表します。

セシウムの凝集移行係数はキノコ類、コケ類が高く、次いでキイチゴ類(表2)で、これらの植物と比較しますと樹木類は低いようです。樹木の中ではマツ類が高く、カバノキやブナの仲間は低くなっています(表3、4)。樹木の部位では、木部より葉に多く集積します。葉に吸収されたセシウムは落葉により土壌に還元され、循環を繰り返します。この放射性核種の循環は植物と土壌間に留まりません。森林で生活する土壌生物、蝶などの昆虫、鳥類、ネズミ、リスなどの小動物からサルやカモシカなどの大動物にいたる生物すべてにおいて展開されます。

なお、キノコ類のセシウム凝集移行係数は種類により1000～10000倍の格差があります。またクリは果実の放射性核種の移行係数が極めて高いので、放射能汚染が確認されている樹林帯では、キノコ類と併せてヤマグリの利用

表2 キイチゴ類の凝集移行係数($\text{Tag}; \text{m}^2/\text{kg}$ 乾物重)

キイチゴの種類	調査数	平均	範囲
コケモモ(<i>Vaccinium myrtillus</i>)	952	0.05	0.002-0.3
コケモモ(<i>Vaccinium vitis-idaea</i>)	170	0.03	0.005-0.1
ツルコケモモ (<i>Vaccinium oxycoccus</i>)	65	0.12	0.003-0.2
ホロムイイチゴ(<i>Rubus chamaemorus</i>)	45	0.1	0.008-0.15
キイチゴ(<i>Rubus idaeus</i>)	241	0.03	0.005-0.1
クロイチゴ(<i>Rubus fruticosus</i>)	686	0.02	0.005-0.07
野イチゴ(<i>Fragaria vesca</i>)	466	0.004	0.002-0.007

はしばらくの期間は避けた方が良くと考えられます。

4 年次経過による放射性核種の減衰効果

動物や植物の個体に1度だけ吸収された放射性核種の半量が排出される時間を生物学的半減期(biological half-life)といいます。つまり生物学的半減期が経過すると体内の放射性核種(たとえばセシウム)が吸収された時の半分になります。生理的に排出されやすい放射性核種の生物学的半減期は短くなりますが、体内に蓄積する傾向の大きい放射性核種の生物学的半減期は長くなります。例えば人体では、セシウムは70日。ストロンチウムは49.3年とされています。

しかし自然生態系の植物や動物での年次による放射性核種の減衰経過は生物学的半減期よりも緩慢

です。それは植物では土壌からの再吸収、動物では汚染された食物の再摂取など循環する環境要因の影響を受けるためです。このような生物の生活環境の影響をひとまとめにして評価した半減期は生態的半減期(ecological half-life)と呼ばれます。物理的半減期(T_p)に生態的半減期(T_{eco})を併せて評価したものは実効半減期(T^{eff} :effective half-life)と言います。これらは $1/T^{eff}=1/T_p+1/T_{eco}$ の関係にあります。

凝集移行係数の年次推移は生態的半減期の2つの指数関数、すなわち急速に減衰する段階とその後の長期間にわたってゆっくりと減衰する段階の和として表すことができます。つまり、森林が放射能に汚染されると長期的には2段階の過程に分けられます。最初の4、5年は急速に樹木と土壌に放射性核種が取り込まれます。次に土壌からそれぞれの樹木の生物学的利用度に応じて放射性核種が取り込まれ汚染レベルが安定します。

なお、所定の放射性核種が生態系や食物連鎖にどの程度の期間とどまるかを示す推定値を環境半減期(environmental half-life)と呼ぶことがあります。

樹木の成長活動期では生態的半減期は3週間から3カ月の開きがありますが、これは樹齢や樹木の種類に依存しています。休眠期に汚染された場合は4～6カ月です。コケ類、地衣類の生態的半減期は3～6年。キイチゴ類の半減期は10年程度です。しかし、キノコ類のセシウム濃度は年次による減衰効果は極めて緩慢で8年でも減衰はわずかです。なお、「地衣類(コケ)や一部のキノコは、地表面の水分に依存しているため、汚染された雨水の影響を受けやすく、さらに、地衣類の成長速度は非常に遅いため長期間にわたって放射性核種を濃縮する」とする学説も有ります。また、チェルノブイリ事故の調査では、自然生態系では泥炭(ピートモス)土壌を好むホロムイイチゴの果実中のセシウム濃度はフォールアウト翌年で高まっています。

カナダ極地の一部地域では、セシウムの環境半減期は推定10～12年とされてきましたが、チェルノブイリ原発施設隣接部での近年の研究では180～320年と算定されており、生態系における放射性核種の年次効果については不明な点が多いとした方が適切かもしれません。

5 まず、山岳の放射能汚染調査が必要

自然生態系では放射能核種は水の流れにしたがって集まり沈積します。チェルノブイリ事故では湿地や湖沼周辺の植物のセシウム濃度が高かったことが確認されています。当会が採取した吾妻・安達太良山系の雪からは最高で3000Bq/kgを超える放射性セシウムが検出されています。

今回の事故では、山岳や樹林帯の放射能汚染の情報は限られたものとなっています。夏山シーズンを前に、吾妻、安達太良、磐梯山の水場の調査は緊急性を要します。吾妻は百貫清水、吾妻小舎(桶沼)、浄土平レストハウス(鎌沼)、安達太良山は銀明水、金明水、金剛清水、磐梯山の弘法清水と黄金清水といった、すでに利用されている清水は早急に放射能汚染調査をする必要があります。次いで西吾妻、飯豊、朝日山塊の残雪の調査も計画的に実施する必要があると考えます。林野庁や環境省など関係する行政機関では早急に実態を把握し、国民に公表すべきと考えます。

表3 森林樹木のセシウム凝集移行係数(Tag:m²/kg, 乾物重)

樹種	調査数	木部		葉	
トウヒ類	7	2.8×10^{-4}	-3.9×10^{-3}	5.7×10^{-4}	-5.2×10^{-2}
マツ類	22	1.1×10^{-4}	-2.1×10^{-2}	2.4×10^{-4}	-9.2×10^{-2}
ナラ類	3	1.1×10^{-4}	-3.8×10^{-3}	1.1×10^{-2}	-1.2×10^{-2}
ブナ類	3	1.8×10^{-4}	-1.6×10^{-3}	2.3×10^{-3}	-2.7×10^{-3}
カンバ類	3	2.4×10^{-4}	-3.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}	-3.0×10^{-2}
ヤナギ類	4	1.0×10^{-5}	-6.8×10^{-5}	2×10^{-2}	

表4 森林樹木のストロンチウム凝集移行係数(Tag:m²/kg, 乾物重)

樹種	調査数	木部		葉	
ハンノキ類	1	9.5×10^{-4}		5.7×10^{-3}	
モミ類	1	4.4×10^{-3}		1.3×10^{-2}	
マツ類	5	5.7×10^{-4}	-1.0×10^{-2}	1.5×10^{-3}	-3.0×10^{-2}
ナラ類	3	4.7×10^{-4}	-2.8×10^{-3}	1.9×10^{-3}	-1.0×10^{-2}
ヤマナラシ類	1	2.1×10^{-3}		1.7×10^{-2}	
カンバ類	5	5.8×10^{-4}	-6.2×10^{-3}	4.3×10^{-3}	-7.8×10^{-2}