

植物を用いた放射性セシウムの除去： 可能性と問題点

長谷川 博
生物資源管理学科

筆者は1998年夏にデンマークで開催された Sixth International Symposium on Genetics and Molecular Biology of Plant Nutrition というシンポジウムでセシウム (Cs) がイネの生育に及ぼす影響とその遺伝変異に関する講演を行った。当時は1986年のチェルノブイリ原子力発電所爆発による放射能汚染に関して、ヨーロッパ諸国における汚染状況の調査報告や放射性セシウムの環境中の挙動に関する基礎研究の成果報告が多くなされていた時期である。質疑応答において「日本で Cs の環境への影響に関する研究を行うのは、日本の原子力発電所は危険であるからか？」という質問を受けた。「安全と信じているが、日本は地震が多いので事故が生じる可能性はあるだろう」と答えたが、このやりとりの内容が10数年後に現実の出来事となってしまった。

植物は根だけでなく葉からも栄養イオンを吸収して利用しているが、その際に栄養イオンと性質の似た他のイオンも吸収される。この性質を利用して、土壌や水圏、さらに大気中の有害物質を除去する方法が提案されている。このような植物を用いた環境浄化技術はファイトレメディエーションと呼ばれており、チェルノブイリ事故により拡散した放射性の Cs やストロンチウム (Sr) の除去にも試されている。今回の福島第一原子力発電所 (以下、福島原発) の事故後にも、ファイトレメディエーションを用いた放射性物質の除去は注目を浴び、マスコミで大きく報じられた。植物を用いた放射性核種の除去に関して筆者にも複数の問い合わせがあったが、それに対応するたびにファイトレメディエーションの有効性について一般市民には誤解されているところが多いと感じた。そこで本稿では放射性 Cs を例にとって、植物を用いた放射性核種の除去の可能性と問題点を明らかにしてみたい。

Csには多くの同位体が存在するが、自然条件下の同位体比は安定同位体の ^{133}Cs が100%である。したがって、環境中に存在する ^{134}Cs や ^{137}Cs のような放射性同位体は核実験か原子炉の事故から生じたものであると断言できる。Csの放射性同位体の中では ^{134}Cs と ^{137}Cs が放射線影響上問題である。ことに ^{137}Cs は半減期が約30年と長いので (^{134}Cs は約2年) 放出された場合に長期間の深刻な環境汚染を引

き起こす。 ^{137}Cs は β 崩壊を生じて半減期約30年で $^{137\text{m}}\text{Ba}$ に変換され、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ はさらに半減期2.05分で安定な ^{137}Ba となる。この過程で β 線だけでなく γ 線も放出されるので、 ^{137}Cs は内部被曝だけでなく外部被曝にも注意しなければならない放射性核種である。環境中に放出された放射性 Cs は土壌に吸着されるが、Cs⁺ は水との親和性が低いため表面から50cmまでの浅いところに留まっている (一方、 ^{90}Sr はより深くまで浸透する)。

Csは植物の3大栄養元素のひとつであるカリウム (K) と同じアルカリ金属元素であり、根から吸収されて植物体全体に分配される。Cs⁺ は、K⁺ と拮抗的に作用して細胞膜電位やタンパク質合成に影響を与えるため、K⁺ や他の栄養イオンの吸収を阻害する植物にとって有害元素である。といっても原発事故で放出され各地で検出されている ^{137}Cs は植物に影響を及ぼす濃度よりきわめて低いものであり、環境に及ぼす ^{137}Cs の影響はすべて放出される放射線によるものと考えてよい。

根から吸収された Cs は植物体全体に転流されるが、主に成長中の器官に分布する。刈り取り時において、イネが全生育期間を通じて吸収し蓄積した Cs の73%は茎 (稈) と葉に存在すること、種子には24%が蓄積しているが精米された米には全体の7%であることが報告されている。放射性同位体の ^{137}Cs と安定同位体の ^{133}Cs の間には植物体内での挙動に関する差異がないようである。トマトでも根から吸収された Cs は主に茎葉部に蓄積し、果実はその半分以下の量であるという報告がある。イネとトマトとも根の Cs 含量は低く、吸収された Cs は効率的に地上部へ転流されている。さらに ^{137}Cs は葉からも吸収されることが明らかになっている。以上の事実は放射性 Cs の除去にファイトレメディエーションが有効な手法であることを示唆している。

葉へ転流された Cs の一部は葉から排出され、雨が降れば土壌中に戻る。また、高木の葉に蓄積された Cs は枯葉となって風により拡散が拡大することも考えられる。もし高濃度の放射性 Cs 汚染が生じたときには、植物を介した2次汚染の可能性も考慮しなければならない。

^{134}Cs と ^{137}Cs の吸収と蓄積に関して、栽培植物だけでなく野草から森林の樹木までを対象に多くの報

告がなされている。25種の栽培植物の幼植物を用いて¹³⁴Csの吸収能を比較した報告によると、もっとも吸収能が高かったのはアカザ科の作物（テンサイなど）である。ヒマワリは同報告には記載がないが、他の文献をみてもヒマワリがCsの超集積植物であるという報告はない。ファイトレメディエーションを実用化するためには、面積あたりで成熟期までの放射性Csの蓄積量を評価する必要があるが、このような研究報告を筆者は入手していない。

K⁺とCs⁺が拮抗的に働くことから、KはCsの吸収を抑制する。農地でK施肥量を増やせば放射性Csの蓄積が少なくなるはずであり、このことはコムギを用いた実験で確かめられている。2011年に収穫された米について基準値以上の¹³⁷Csが検出されたことが報道されているが、同じ地域内において米穀中の¹³⁷Cs含量は水田により差があるようである。この理由として、土壤中のK含量などの環境要因がイネの¹³⁷Cs含量に影響を及ぼしたことは十分考えられる。

¹³⁷Cs汚染に関するマスコミ報道に正しく対処するためには環境で検出される自然放射能のレベルについて私たちは知識を持たなければならない。農業環境技術研究所（旧農業技術研究所時代を含む）は大気圏内核実験が行われていた1950年代後半から現在まで北海道から福岡県までのイネ、コムギおよび土壌の⁹⁰Srと¹³⁷Csのモニタリングを実施している。それによると米穀中の¹³⁷Csの平均値は1960年代初期には数Bq kg⁻¹であったが、21世紀当初には数10mBq kg⁻¹まで低下していた。コムギ穀粒中の¹³⁷Csの変化もほぼ同様の傾向を示しているが、1986年産だけは1960年代の水準まで戻っている。これは収穫期直前に生じたチェルノブイリ事故の影響によるものである。福島県内で2011年産の米穀から500Bq kg⁻¹以上の¹³⁷Csが検出されたとの報道がなされたが、この数値は事故前の水準に比べて著しく高いものであり、今回の事故の深刻さを示している。農地の土壌における¹³⁷Csの減少程度は農作物中より小さく、1960年代始めに約10 Bq kg⁻¹であったものが、2000年に約1 Bq kg⁻¹まで低下したに過ぎない。なお、土壌中の¹³⁷Csの放射能を単位面積当たりでも評価することができる。チェルノブイリ事故5年後の1991年にイングランドの農地では¹³⁷Csについて数Bq m⁻²であったという報告がある。福島原発事故については3か月後に原発から30km離れた地点で約1 MBq m⁻²という値が報告されている。以上のデータを見ると福島原発事故による周辺地域の放射性Csの汚染は深刻であり、住民の安

全な暮らしを取り戻すことだけでなく、日本の食糧確保という点からも汚染地の放射性核種の除去が必要なことが理解される。

大気・土壌には多くの自然の放射性核種が存在している。ことに土壌に含まれる⁴⁰Kの量は多く、農作物中でも1,000 Bq kg⁻¹以上になることもある。農産物や土壌における¹³⁷Cs汚染の報道には、事故前の¹³⁷Cs量だけでなく、現在の自然放射線量をも考慮した対応が求められる。自然放射能のレベルは、ごく少量の¹³⁷Csに対する過剰反応を防ぐためにも、一般市民が持たなければならない知識である。

放射性Csの除去にヒマワリを植える。このことは福島原発事故後に繰り返し報道されてきた。植物がCsを吸収することから、植物を用いて土壌中の放射性Csを除去できるはずである。しかしながら、放射性核種の除去は市民生活、国民の食糧確保という点から緊急を要する事業である以上、ファイトレメディエーションに用いる植物はCsをよく吸収し、蓄積できる植物でなければならない。単位面積当たりのバイオマス生産量が大きく、かつ単位重量当たりのCs含有率が高い植物を選択する必要がある。ヒマワリはバイオマスが大きく1個体あたりのCs吸収量は大きい、Csの超集積体ではない。しかも生育期間が春から夏に限られている。植物を用いた放射性Csの除去は短時間で行えるものではない。用いる植物は超集積体でなくても、Cs吸収が可能な生育期間が長いことが必要である。またCsは生育中の若い茎葉に蓄積することから、刈り取ったあとでも再生能力が高い植物が適している。イネ科の牧草類は幼植物期のCs吸収は小さいが、再生能力に優れているため¹³⁷Csの除去のために検討する必要がある。また、ヨシやセイタカアワダチソウという野生の栄養繁殖植物はバイオマスも比較的大きく、再生能力も大きいのでファイトレメディエーションによる放射性Csの除去に有望と思われる。

植物による放射性Csの除去の最大の問題点は、ファイトレメディエーションに用いる種を選択より、刈り取った後の植物体の処置にある。福島原発事故後に寄せられた植物による放射性Csの除去についての問い合わせに対して、筆者は刈り取った植物体の保管方法をはっきりさせてから実施すべきと回答した。野積みは2次汚染を引き起こす可能性が大きく、屋内に保存するのも大量の施設を建設して放射能レベルが基準値以下に下がるまで維持しなければならない。刈り取った植物体を閉鎖系で灰化し、それをまとめて放射線管理区域内で保管することが空間的コストを低く抑えられる方法である。すなわ

ち各地の放射性物質取扱事業所から出る使用済みの放射性物質の保管と同様の方法をとるのが現実的であろう。今回の福島原発の事故では、汚染地の面積が大きく、大量の放射性廃棄物が産出された。したがって、ここで提案した方法においても放射性 Cs を安全なレベルまで低下させるまで保管する施設の建設が必要である。

補足 1：ベクレル (Bq) は放射能の量の単位で、1 秒当たりの崩壊数で定義される。1 Bq kg⁻¹ の ¹³⁷Cs とは 1 kg のサンプルに 1 秒間に 1 回崩壊する ¹³⁷Cs が含まれていることを意味している。

補足 2：この短報は 2011 年 7 月に滋賀県立大学で開催された近畿作物・育種研究会の例会で筆者が講演した内容に基づいている。講演内容は総説「セシウムと高等植物」として 2012 年発行の同研究会の機関紙「作物研究第 57 号」に掲載される予定である。詳しい情報を知りたい人はこの総説と引用文献を読んでいただきたい。

連絡先：長谷川博 hasegawa@ses.usp.ac.jp