

土壌の放射能汚染をどう考えるか

—— 現場での対応を中心に

◎編集部

(森 敏「WINEPブログ」よりとりまとめ)

はじめに

東日本大震災の災害のひとつに、福島第一原発事故による放射能の土壌汚染や農作物汚染、さらには海洋汚染がある。本稿は、震災直後からこれらの問題について積極的に発言されてきた森敏氏(東京大学名誉教授)のブログ「WINEPブログ」(<http://moribin.blog114.fc2.com/>)での記事をもとに、編集部でとりまとめたものである。放射性物質の基本的な性質とそれを理解したうえでの対応の考え方について参考にしていただきたい。なお森氏には、編集部でとりまとめた原稿をお読みいただいたのち修正・加筆していただいた。ブログからの転載了解とあわせて感謝申し上げたい。

1 土壌の放射能汚染についておさえておくべきこと

1) 放射性物質の種類と性質

①ヨウ素

放射性ヨウ素¹³¹(I-131)は陰イオンであり土壌吸着が比較的少なく、雨が降るたびに土壌下方に移行する。原発が放射能を漏出し続ければ、雨が降るたびに土壌の全縦方向にわたって深部まで放射能が分布することになる。これにより人参、大根、ゴボウなどの根菜類も生食部位が汚染されることになる。

しかし、放射性ヨウ素の半減期は8日なので、時を待てば減衰する(1カ月で30分の1、3カ月で4,000分の1になる)。したがってこの核種による

根菜類の汚染は、原発からの放射能の漏出が止まればという条件付きではあるが、あまり問題にする必要がない。

②セシウム

除染対策が厄介な放射性物質がセシウム(半減期はCs-137で30.17年、Cs-134で2.06年)とストロンチウム(Sr-90、半減期28.9年)である。

放射性セシウム¹³⁴(Cs-134)や¹³⁷(Cs-137)は一価カチオン(陽イオン)であるが、これらは最終的には土壌の雲母などと特異的に非可逆的に固着して溶出しがたくなることが知られている。そのため雨が降ってもあまり土壌の下方に洗い流されなくて土壌表層にとどまって動かない。

セシウムは周期律表では1族のカリウム(K)やナトリウム(Na)の系列であり、植物に吸収されるときは、細胞膜のカリウム輸送体(トランスポーター)や未知の輸送体を通して根や葉から吸収されると考えられる。土壌に降下した放射性セシウムの元素濃度自体はほかの元素と比べればケタ違いに低いので、植物による土壌からのセシウム収奪のためには、セシウムを高親和性のカリウムトランスポーターで吸収させる必要がある。

植物をカリウム欠乏にすれば、このカリウムトランスポーターの遺伝子が誘導され、トランスポーター蛋白が増加してトランスポーター活性が増加することが期待される。この考え方は、後述するファイトメディエーション(植物による土壌修復)にも応用が可能である。

ビキニの水爆実験やチェルノイブイリ原発事故のころは、まだ植物分子生物学が発展していなかったため、セシウムイオンのトランスポーター研究はまったくなされていない。しかし現在では植物の各種の主要な必須元素の吸収輸送体の研究ばかりでなくセシウムイオンのトランスポーター研究も急速に展開し、以上のような類推(アナロジー)からの提案が可能になってきたのである。

③ストロンチウム

一方、放射性ストロンチウム90(Sr-90)は周期律表では2族のマグネシウム(Mg)やカルシウム(Ca)の系列に属するので、根の細胞膜にあるこの二つのいずれかの元素のトランスポーターを通して間違えて吸収されると考えられる。ストロンチウムは二価の陽イオンだが、セシウムと異なり、ほとんどが粘土鉱物とイオン結合しているため、雨が降ると雨水の水素イオンとストロンチウムが交換して、フリーになったストロンチウムイオンが徐々に下方移行する。

2) セシウムと施肥との関係

天正ら(1961)の論文には、アンモニア系肥料(硫酸安、塩安、硝安)が、植物体へのセシウム吸収を3~5倍に促進すること、カリウム系の肥料(塩化カリ、硫酸カリ)が植物体へのセシウム吸収を26~41%に抑制することが示されている。

アンモニア系肥料(硫酸安、塩安、硝安)が植物体へのセシウム吸収を3~5倍に促進するのは、土壤中でセシウムが粘土鉱物と吸着しているのを、アンモニウムイオンがセシウムイオンとイオン半径が似ているために、まだ緩く粘土鉱物とイオン結合したり雲母と吸着したりしているセシウムイオンを溶出させるため、セシウムが植物根から吸収されやすくなることによると考えられている。

またカリウム系の肥料(塩化カリ、硫酸カリ)が植物体へのセシウム吸収を26~41%に抑制するのは、今日の植物分子生物学の知見では次のように推定される。カリウムは稲の根で吸収されてから、導管に放出されて地上部に移行するときにカ

リウムイオンのトランスポーターを使う。そのため、根にカリウムがたくさん吸収されると、この膜輸送の時にカリウムがセシウムと拮抗して、セシウムの根から地上部への移行が阻害される。ただしこれは現段階ではあくまで推定である。

したがって、放射性セシウム(Cs-137、Cs-134)による土壤汚染に関しては、セシウムイオンとほかのイオンとの相互作用に関する以下の①、②の基本常識を忘れてはならない。

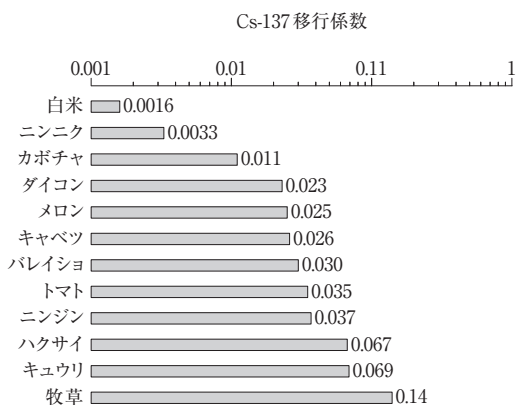
- ① アンモニウムイオン(NH₄⁺)はCs-137(やCs-134)イオンの土壤吸着を抑える(土壤からの分離を促す)。
- ② カリウムイオン(K⁺)は植物へのCs-137(やCs-134)イオンの吸収を抑える。逆にカリ欠乏で植物の地上部への移行は促進される。

3) 作目で異なる移行係数

「移行係数(TF:Transfer Factor)」とは、放射性物質が土壤から作物可食部にどれくらい吸収されるかを示す数値である。

TF = 農作物(可食部)中の放射性核種濃度(Bq/kg乾物重) / 土壤中の放射性核種濃度(Bq/kg乾燥重) * Bq = ベクレル

財・環境科学研究所の塚田(2006)は、各種作物における放射性セシウム(Cs-137)の移行係数について図①のように示している。



① 各種農作物における放射性セシウム(Cs-137)の移行係数(幾何平均値)(塚田、2006)

土壤汚染の放射能計測値にこの移行係数を掛けることで、その土地で作付けされた場合、作物がどの程度汚染されるかがシミュレーションされる。たとえば5,000Bq/kgの土壤でつくった米(白米)に含まれる放射性セシウムは、 $5,000 \times 0.0016 = 8.0\text{Bq/kg}$ と計算される(お米と野菜の暫定規制値は食品安全委員会によって500Bq/kgと設定された)。

2 放射能による土壤汚染への対応

1) 放射能汚染から土壤を守る基本

放射能汚染から土壤を守るためには、まず、放射性降下物をできるだけ地上部にとどめ、土中に移行させないことである。野菜農家で栽培している野菜が畑にある場合はそれを引き抜かないで放置し、畝などをマルチする。果樹農家であれば下草を刈って敷草にし、さらにその上を稲わらなどで樹冠下の全域をマルチする。いずれの場合も雑草は抜かない。こうすることで、放射性降下物のかなりの部分が雑草や敷草に吸着し地上部にとどまることになる。

放射能汚染から土壤を守る基本の第二は、放射性降下物を土中深くに移行させないことである。

販売できなくなった野菜や肥料などを鋤き込んだりすると、表土上部に分布しているセシウムがより深い位置に移動することになる。これはファイトレメディエーション(後述)を難しくするだけでなく、将来の客土や天地返しを困難にする。

葉や茎への吸着あるいは根からの吸収によって放射性物質に汚染された植物体は枯れる寸前に根から土付きで掘り起こす。土はビニールシートなどに丁寧にふり落として隔離し、植物体は発酵させて体積を減らしてから土中に埋める(行政が引き受けられればよいが現状では困難である)。穴を掘りビニールを敷いてから植物体を堆積し、その上にさらにビニールをかけて発酵させるとよいだろう。地上部への放射線漏れを防ぐためには、埋める深さは50cm以上が好ましい。焼

却するとセシウムの一部が揮散するので開放系で燃やしてはいけない。

ともかく、降下した放射性物質を拡散させないことがポイントである。

2) 放射性セシウムによる弱汚染地帯の場合

弱汚染地帯(たとえば水田で5,000Bq/kg以下)の場合、低放射能含有作物を目指して、極力放射性セシウムを吸収させない農法を行なう。その場合、先にふれたセシウムイオンとほかのイオンとの相互作用に関する基本常識をふまえたうえで、以下の2点に留意する。

①アンモニアは、セシウムの土壤吸着を弱めるので、植物によるセシウム吸収を促進する。したがって、窒素肥料としては硝酸系肥料を用いる。

②カリウムは、植物根からのセシウムの吸収を抑制し、地上部への移行を(おそらく拮抗的に)阻害するので、通常より多量に使用したほうがよい。

3) 放射性セシウムによる濃厚汚染地帯の場合

濃厚汚染地帯(たとえば水田で5,000Bq/kg以上)の場合、土地の農用地としての早期の再生を目指して、次に示したような方法で放射能の除染を目的とした対策を行なう。

①客土

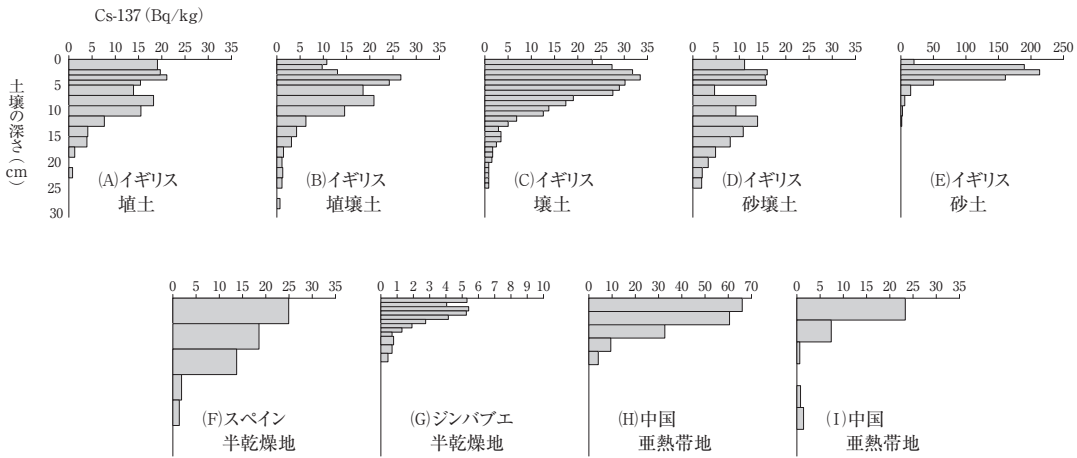
汚染された表土を削り取り、汚染されていない山の崖などの土を用いて客土する。ただし客土にはいくつもの問題がある。農地の表土を薄く均一に削ること自体がたいへんな作業であるし、汚染土壤の捨て場の問題もある。客土の入手をどうするか、あるいは、いまだに原発による放射能排出が続いているなか、いつ行なうのか。もちろん、個人や自治体、国がどこまで費用をかけられるのかという問題もある。

②天地返し

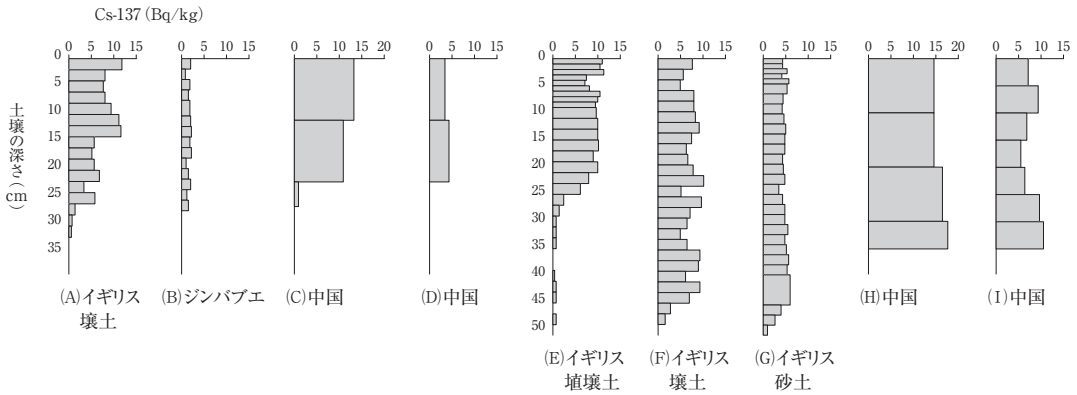
セシウムは降雨がいくらあっても、またいくら湛水して掛け流ししても下方に実にゆっくりにしか移行しない。②は、1955年から1975年まで原水爆実験が行なわれ世界の土壤がセシウムによって汚染されたが、その後耕作し続けた土壤でも表土

② 放射性セシウム (Cs-137) の分布例 (Walling and Quine, 1992)

《未耕地土壌》



《耕地土壌》



50cm以下までセシウム汚染しているところがないことを示している。したがって、表土を10cmほど削り、50cm以上掘って、天地返すことは、放射能汚染を人間環境から完全に隔離するという点からは、技術的にはベストな方法である。

問題は客土同様、原発からの放射能漏れの推移を見極めつつ、手間と金をどこまでかけられるかである。また、不注意な天地返しは放射能汚染を拡散させる恐れがあることも注意しなくてはならない。

③ ファイトレメディエーション

ファイトレメディエーションとは、セシウムやストロンチウムの集積能力が高いヒマワリなどの作物を連作あるいは輪作して土壌のセシウムを早期

に植物体に収奪する方法である。

ヒマワリは浅根性で根が土壌に浅く広く分布するので、土壌の表面に集積して動かないセシウムをよく吸収し、土壌から収奪する。種子も比較的に入手しやすく、栽培すると個体が2m以上にもなる。セシウムとともにストロンチウムもよく吸収するようなので、放射能による汚染土壌の浄化用植物としてはたいへん適している。

ファイトレメディエーションとして植物を利用する場合、無カリ肥料で育てたほうがよい。前述のようにカリ欠乏は植物によるセシウムの吸収を促進すると同時に地上部への移行も促進するからである。日本の土壌はカリ欠乏が起りにくいので、無カリにして生育させても、生育の極端な阻

害は起こらない。もちろん収穫物は、食用には供しない。

4) 品種による対応

土壌に蓄積した放射性物質のイネへの影響を調べるため、東京大学などのグループが福島県内で100種類のイネを育てて比較する計画を進めている。

この試験目的の一つである放射性セシウムを白米にまったく転流しないイネが選抜されたら画期的だろう。水稻白米の移行係数を用いた試算では、現在最も強く放射性セシウム汚染されている土壌で普通に育てても、出荷規制値である白米500Bq/kgを軽くクリアできる可能性が高い。そのうえ根からのセシウムの吸収力が弱かったり、道管への放出力が弱かったりする品種が見つければ、その特性分だけ白米へのセシウムの移行量が少なくなる。さらに後述するセシウム吸収抑止栽培法とむすびつけば、高濃度セシウム汚染土壌でも白米への移行をかなり抑制できる可能性が高い。問題はその時に、消費者が理解を示して、そのお米を食べてくれるかどうかであるが。

5) 野菜・果樹について

現時点では、作付制限はコメに限定され、野菜や果樹など他の作物については生産された段階で暫定規制値を調査し、出荷制限するかどうか判断することになっている。土壌の汚染の基準が示されていないので、土壌経由の根からのセシウム吸収汚染を警戒しなければならない。

マルチをして放射性降下物の飛散を防ぐ。土壌を鋤込まないようにする。セシウムの吸収を抑制させる施肥を行なう。濃厚汚染地の場合には天地返しが最も有効であるが、実際にはむずかしい。その場合ファイトメディエーションを検討する、などは先述のとおりである。

3 現場で何をすべきか

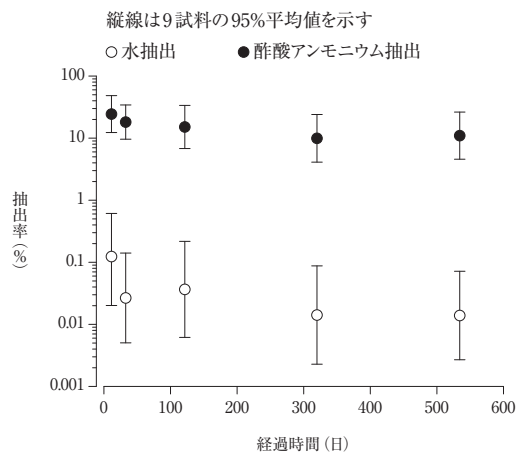
1) イネの作付制限は農学的基準からの判断ではない
福島原発事故の放射能放出によって汚染された

田んぼでのイネの作付制限地域が政府により設定された。作付制限面積は約10,000haで農家は約7,000戸である。

これらの作付制限地域は、政府によって急遽定められた「警戒区域」・「計画的避難区域」・「緊急時避難準備区域」という、主として、人がそこに入って手作業し続けると年間20ミリシーベルト以上被曝することになるので健康に悪いという、空間放射線量からくる政治的判断によるものである。したがってこの線引きはその水田土壌が確実に放射線セシウム汚染されているのかどうか、また水田として修復不可能かどうかという農業技術的判断によるものではない。

2) 何もしなければセシウムは急速に土壌に固着する

今後のことを考えれば、降下した放射性セシウムが土壌と徐々に反応して、水不溶性になっていく速度がどれくらいかということが問題である。財・環境科学技術研究所の塚田ら(2010)の実験によれば(③)、水で抽出される土壌中のセシウムの割合は添加後わずか10日で0.1%にまで低下する。その後は2年間で0.02%ぐらいまで低下する。つまり、土壌とセシウムイオンの初期反応は非常に速いがその後の固定化反応はきわめて遅い。水で抽出されやすいセシウムという意味は、



③ 添加Cs-137抽出率(幾何平均値)の経時変化(塚田ら、2010)

植物によって吸われやすいセシウムの状態を示している。このような状態にあるセシウムは、前述のように、アンモニア系肥料の施肥によって植物への吸収が促進される。

一方で土壌から酢酸アンモニウムで抽出される放射性セシウムは添加後10日目の26%からその後は1年間で11%まで徐々に減少する(図では縦軸が対数目盛であることに注意)。酢酸アンモニウムで抽出されるセシウムは、粘土鉱物や有機物とイオン結合しているイオン交換性のものと考えられる。こちらもアンモニア系肥料を施肥し、アンモニウムイオンなどと置換させれば植物に吸収されやすい。

つまり放射性降下物であるセシウムに対して、人が何もしないでいると、セシウムはどんどん土壌と反応して、植物に吸われ難い状態になってしまうのである。

したがって、放射性セシウムで濃厚汚染した土壌からセシウムを早期に収奪して土壌をクリーンアップ(浄化)したいと思うならば、くりかえしになるが早期にクリーンアップ植物を植えることである。

駒村ら(2006)によれば、「 ^{90}Sr と ^{137}Cs の水田および畑作土内における滞留半減時間を試算したところ、水田作土では ^{90}Sr :6~13年、 ^{137}Cs :9~24年、畑作土では ^{90}Sr :6~15年、 ^{137}Cs :8~26年の範囲である」とある。これは、普通に作物を作り続けた場合の数値であるが、その場合、一度放射能汚染した土壌の放射能が半減するのに最短で6年かかることを意味する。同時に、汚染初期に土壌の積極的なクリーンアップをすることで、何もしない場合はもちろんのこと普通に栽培を続ける場合よりも、放射能の残留期間を大幅に短くできる可能性があることを意味する。

3) セシウム汚染土壌の修復に有効な植物

セシウム汚染土壌の植物による修復に関しては、いくつかの作物や雑草が、世界中で研究されている。この点では財・環境科学技術研究所の山上の研究がすぐれている(山上、2010)。

山上によれば、栽培植物ではタチスベリヒユ、ヒマワリ、アマランサスが、野生種ではアオゲイトウ、オオイヌタデが有力なようである。栽植密度や、施肥条件などは、地域の気象条件や土壌によって工夫する必要がある。

4) イネをどうつくるか

当面なにをすべきであろうか? 繰り返しになるが、5,000Bq/kg以下で耕作可と認定された水田でも、全部の田んぼを一枚ずつ放射能値が測定されたわけではないので、農家は安心してはいけな。できれば所有する田んぼすべてのセシウム値を測定してもらうべきである。それが間に合わなくても、積極的にセシウムをイネに吸収させない農法を採用すべきであろう。高カリウム施肥を行ない、アンモニア系肥料をやめて窒素(N)とリン酸(P)は緩効性の被覆肥料で苗床一発施肥、などを励行すべきであろう。

また、5,000Bq/kg以上に放射性セシウム汚染された田んぼの土壌をイネで積極的にクリーンアップしたければ、通常よりもアンモニア系肥料を多量に施肥し、湛水して還元条件を恒常的に確保する。こうして、アンモニアイオンが安定的に供給できるようにし、土壌と結合したセシウムイオンをイオン交換で追い出して、積極的にイネに吸収させるべきである。カリウム系肥料は施肥しない。これは、セシウムイオンを吸収させるためにカリウムイオンのトランスポーターをイネで強く遺伝子発現させるためである。そのためにお米の収量が落ちて我慢する。お米はおいしくないかもしれないが多分500Bq/kg以下だと思うので、禁止されている以上は売ってはいけなが家族で食べる分には問題がないだろう。

5) 硫安大量散布プラス湛水や

タチスベリヒユの播種も有効か

何も植える余裕がない場合には、硫安を田んぼに10a当たり100kgほど大量に散布して、湛水条件を維持し続ければ、アンモニアイオンの効果で放射能降下量の25%ぐらいはセシウムの土壌への

吸着を阻止することができる可能性がある。もちろん効果の程度は土壌の性質にもよる(土壌の雲母含量が大きく効いてくると思われる)。

田植えすることが無駄だと考えるならば、そのまま水を張って(できれば硫酸を入れて)雑草をはやしておけばよい。多少とも雑草による土壌からのセシウム収奪が進むだろう。大きくなった雑草は次々と抜き取る。

可能ならばタチスベリヒユの種子を大量に散布する。先に述べたようにこの雑草は、山上陸氏の研究では最もセシウムを収奪する植物である。水田の強害草であるが、いざというときは除草剤で簡単に駆除できるので、問題はない。

6) ヒマワリや牧草を播こう

「耕作を禁止されている田には用水を供給しない」という農業水利組合の申し合わせができていない場合は仕方がないので、ヒマワリや牧草によるファイトメディエーションを行なう。作付禁止を言い渡されている放射能汚染田や放射能汚染畑地でも、何も作付けしないことは、農家の心理的にはきわめて良くないので、ヒマワリや牧草の種でも播いて、放射性セシウムを積極的に浄化することを勧めたい。施肥条件は無カリ(K)でアンモニア系肥料(硫酸、塩安)がよい。

捨てづくりなのだからヒマワリは土に縦横10cm間隔に穴を開けて今から種子を直接播いて

よいだろう。高さが50cmぐらいになったらまたその株間に次のヒマワリの種を植えれば、秋が終わるころまでには二作は取れるだろう。種子だけ収穫して、最終的には根ごと、全体を収穫し、畑の一角に山積みにして腐らせればよいだろう(収穫時に土を“はたく”と放射能を吸い込むから、厳重にマスクをして吸い込まないようにして作業する)。

ヒマワリの種からバイオディーゼル用の油をとることは、別途考える。ヒマワリの皮付き種子へのTF値(移行係数)は0.007以下であるので、種子から搾る油には放射性セシウムはほとんど検出されないのではないだろうか。したがってバイオディーゼルに使っても、環境汚染はほとんどないだろう。

牧草は土から葉へのTF値が0.14と高いので、30～40cmぐらいになったら刈り取ることを3～4回繰り返して、最後には土ごと引き抜いて畑の一角に山積るといい。そしてまたすぐに、播種を繰り返す。牧草は低温に強いので、一年中作付けできる利点がある。場合によっては、一年中ヒマワリと牧草の輪作をすれば、収奪の速度が高まるだろう。

現在、ヒマワリ作戦がいろいろのアマチュア団体から推奨されているようだが、できればヒマワリ栽培の実績がある団体のマニュアルを教えてもらって、実践されることを勧めたい。

文献

- 天正清・葉可霖・三井進午、1961、水稻による特異的セシウムの吸収機構、土肥誌、32巻4号、139-144
- 塚田祥文、2006、各種農作物における土壌-植物間の¹³⁷Cs移行係数、2006年秋 原子力学会要旨、604
- Walling, D. E. and T. A. Quine. 1992. The use of caesium-137 measurements in soil erosion surveys. Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins (Proceedings of the Oslo Symposium, August 1992). IAHS Publ. no. 210.
- 塚田祥文・武田晃・久松俊一、2010、土壌に添加した¹³⁷Csとフォールアウト¹³⁷Csの経時的な抽出率の変化、2010年春 原子力学会要旨
- 駒村美佐子・津村昭人・山口紀子・藤原栄司・木方展治・小平潔、2006、我が国の米、小麦および土壌における⁹⁰Srと¹³⁷Cs濃度の長期モニタリングと変動解析、農環研報、24、1-21
- 山上陸、2010、植物を使った環境浄化の道を開く、環境科学技術研究所平成22年度調査報告会冊子