２．原子力発電所の事故による農業被害への対応

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに引き続く津波により、壊滅的な被害を受けた東京電力福島第一原子力発電所は、発電所としての機能を失うのみならず、大きく損傷を受けました。その後数日間の間に 1、3、4 号機建屋が水素爆発により大きく破損して大量の放射性物質を東日本の広範な地域に降下させることにつながりました。この降下があった時期に植物体が露出していた茶や果樹、野菜類においては植物体が降下物によって直接汚染されたために、基準値超えの農産物が多数検出されて広範な地域で数多くの農産物が出荷停止となりました。

放射性物質による汚染を直接付着した場合と、土壌から移行する場合に大きく分けて対策が進められました。茶では遠く静岡県においても汚染が検出されたため多くの茶樹において中刈りが行われました。一方果樹でも土壌からの放射性セシウムの移行は限定的であり、樹皮に多くの放射性セシウムが付着していることが明らかとなり福島県が中心となり樹皮剥ぎ取りが進められました。農地土壌の汚染状況は継続的に観察が行われ、物理的減衰よりも早く減衰していることが明らかとなっています。農地の除染では震災初年度から実証試験を繰り返し、環境省の「除染ガイドライン」に農地除染の手法として取り入れられています。農地作業者の外部被ばくのみならず内部被爆低減のための方策も開発されました。除染後に発生するバイオマスの保管のための減容化施設は川俣町の協力により実際に様々なバイオマスのペレット化に活用されました。また汚染土壌の乾式熱処理技術は飯舘村の協力により村内に実機が導入され今後活用されます。このように減容・安定化技術を開発し、それらを社会実装するに至っています。また、放射性セシウムの土壌から植物への移行が土壌の交換性カリ含有率に強く依存していることが稲、大豆、そば、草地などで明らかにされ、それぞれの成果はマニュアルとして公表され、広く営農対策に活用されています。これらの技術導入により震災以降の基準値超えの発生事例は急速に低下し、玄米では平成 26 年では約 1,100 万袋のうちわずか 2 袋に抑えられており、27 年度産米も平成 27 年 12 月現在で約 1,000 万袋から基準値超えの報告はありません。同様のことは他の作目においても認められており、農地の物理的除染と降下物の除去、そしてカリ肥料を中心とした移行抑制対策が確実に農業の復興に貢献していることを示しています。ただし、震災から 4 年が経過しても頻度は極めて小さいのですが、基準値超えは皆無にはなっていません。平成 27 年度においてもソバ、タバコ、草地での報告があります。その要因としては降下物の影響、土壌中の有機物に取り込まれた高濃度の放射性セシウムの影響などが想定されるため、それぞれについて様々な方面からの解析を継続して進めています。

その一方で、このような抑制が大量のカリ肥料の作付け前の追加投入によって維持されていることも事実です。追加の施肥作業は生産者に労力とコスト(現

在は賠償によって賄われている）を強いるものであり、その意味では完全な復興には至っていません。実際、カリ肥料による移行抑制対策を取らなかった場合には基準値超えが発生することも明らかになっています。基準値超えを発生させない最適の土壌へのカリ投入量を正確に把握する必要があるため、新たな土壌のカリウム供給能評価手法の導入や地域資源を有効に活用したカリウム循環システムの構築などが急務です。さらに農地は水路や山林を通して周辺環境の放射性セシウム動態と密接に関係しています。農地の再汚染を防ぐことは長期的な農地の利用において食品への汚染のリスクを軽減し、対策の必要性を軽減するためには必須の技術となります。そのため流入防止策の開発が進められています。また食品への加工によって農産物に含まれる放射性セシウムの存在量、濃度は大きく変動するため、消費者へのそれらの情報を浸透させることによって、被災地域で生産された農産物への安心を増大させる必要があります。

放射性物質対策は一般論、平均値のみで対策を考えると例外が生じた場合に対応が困難となります。ある地域の一圃場で基準値超えが発生した場合の地域の農産物生産に与える影響は無視できません。そのため、例外が生じないように丁寧な技術開発と対策の徹底が求められています。

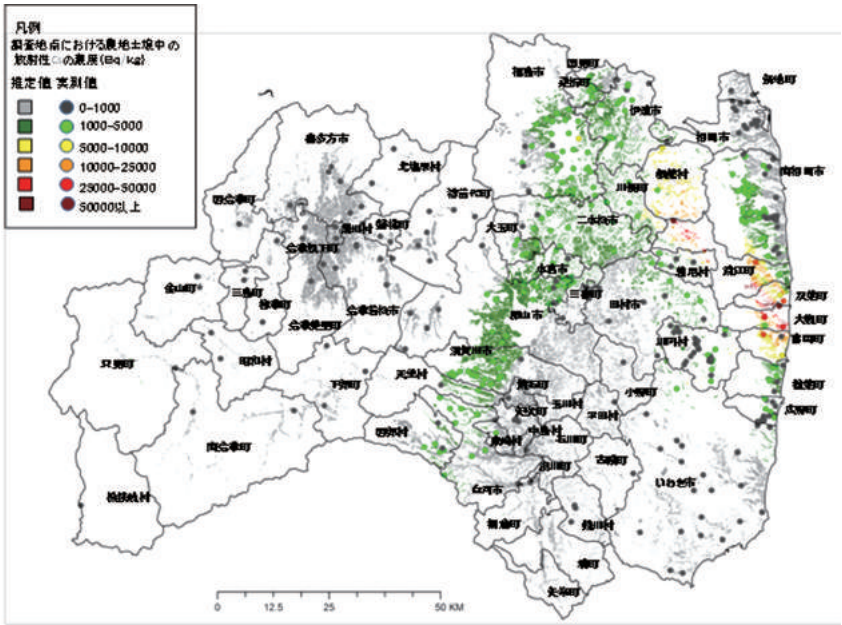
（１）放射性物質による農地汚染の実態把握と将来予測

農業環境技術研究所（農環研）では、事故直後から当研究所の圃場で栽培されていたホウレンソウとコマツナおよびその栽培土壌、また農研機構から提供された生乳の放射性物質濃度の分析を開始し、その結果を２～３日間隔で農林水産省へ報告しました。また、関東・東北各県の野菜類の放射性物質濃度の分析を行うとともに土壌中の放射性セシウム濃度を把握するため、関東および東北の水田土壌の放射性セシウム濃度などを測定し、これらの結果は各県のホームページ上に公開されました。

その後、土壌の放射性セシウム濃度の面的な分布を把握するため、宮城県から千葉県までの６県において、各県の農業関係試験研究機関の協力を得て農地582地点の空間線量率および作土層の放射性セシウム濃度の測定を行いました。この結果と航空機モニタリングによる空間線量率の分布図を用いて農地土壌中の放射性セシウム濃度を推定し、平成23年６月14日現在の放射性セシウム濃度分布図を作成しました。この分布図から市町村別の放射性セシウム濃度別農地面積の算定などが可能となり、除染や吸収抑制対策の策定に寄与しました。さらに、調査地域を岩手県から静岡県までの15都県に拡大するとともに、精度向上のために調査密度を増やして採取した農地3,423地点のデータを用いて平成23年11月５日現在の農地土壌の放射性セシウム濃度の分布図を作成しました。特に福島県では作成された市町村別の詳細分布図が、営農指導に活用されました。

土壌中の放射性セシウム濃度は自然減衰、土壌侵食や浸透などにより減少する場合が多いことから、調査地点を選択して、毎年度農地土壌の放射性セシウ

ム濃度を測定して放射性セシウム濃度分布図を更新しており、農林水産省農林水産技術会議事務局のホームページで公表されています。また、将来の農地の放射性セシウム濃度や空間線量率の変化を予測するため、流域レベルでの農地における放射性セシウム動態のモデル化に取り組んでいます。



平成 26 年 11 月 7 日時点に換算して作成

福島県　農地土壌の放射性物質濃度推定図（平成 26 年度版）

（２）農地土壌における放射性物質の動態

原子力発電所事故由来の放射性セシウムは、福島県を中心とする広範囲の地域に降下後、土壌粒子に強く吸着された状態で、水田では代かきに伴う濁水、畑地では水食および風食などに伴う流出・飛散と堆積・沈着を繰り返しています。農地や作物の放射性セシウム濃度の将来予測および放射性セシウムの農地から生態系への影響評価を行うためには、農地や周辺環境において放射性セシウムの動態モニタリングを行うことが必要です。さらに、予測や評価を点から面へ拡張するには、モニタリングデータと動態に関与する地理情報やパラメータに基づいた放射性セシウム動態のモデル化が必須です。

このため、農環研は、福島県の水田 4 地点において、潅漑・排水の水量、懸濁物質濃度、懸濁態と溶存態の放射性セシウム濃度、作物の放射性セシウム吸収量、大気からの放射性セシウムの沈着量および土壌中の放射性セシウム濃度について、福島県農業総合センターの協力を得て測定を行ってきました。さらに、畑地、樹園地および草地についても放射性セシウムの動態を把握するモニタリングを行ってきました。また、流域レベルでの放射性セシウム動態をモニタリングするため、不作付け地域として福島県飯舘村比曽川流域および作付け地域として三春町樋渡川流域を対象に、河川の流量、懸濁物質濃度や放射性セシウム濃度の測定を行ってきました。

これらのモニタリングによる作物の放射性セシウム吸収に関与している水中の溶存態放射性セシウム濃度の実態把握から、水稲の放射性セシウムの潅漑水からの定量的な吸収実態が明らかにされました。また、モデル化に必要な土壌のパラメータの一つである土壌の放射性セシウム捕捉ポテンシャル（RIP）の分析を進め、福島県内の農耕地から採取した土壌500点以上のRIPと土壌特性の関係を評価しました。今後は、農地や作物の放射性セシウム濃度の将来予測のため、モデルパラメータのさらなる検討、観測データの長期的な蓄積などを行う予定です。

（３）農業関係除染技術の開発

農地除染は、外部被ばくを可能な限り引き下げ、農業生産を再開できる条件の回復及び安全な農作物の提供が目標（農林水産省）となっています。

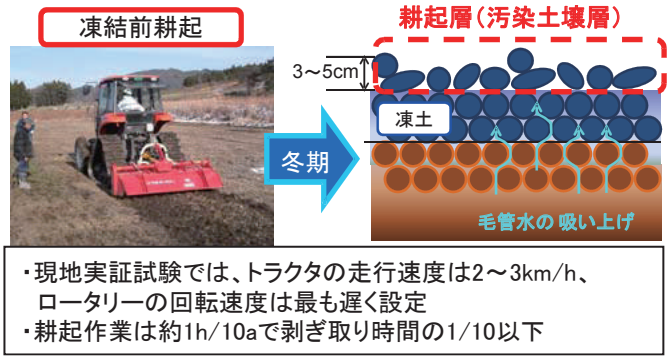
土壌からの農作物への放射性セシウムの移行低減のためには、土壌中の放射性セシウム濃度を可能な限り低下させることが必要です。東京電力福島第一原子力発電所の事故以降に耕起されていない農地では、降下した放射性セシウムの大部分は、農地の表面に留まっており、外部被ばくも大きくなります。一方、耕起された農地は、外部被ばくの影響は少なくなりますが、作土層の放射性セシウム平均濃度は同じなので、作物への移行を考えると除染が必要です。そこで、地目等の圃場状況、汚染程度、耕起の有無等様々な条件に適応することが可能な除染技術の開発を行ってきました。

未耕起の農地の場合は、表土削り取りによる除染効果が高くなります。農業機械を利用した除染作業では、パワーハロー、リヤブレード、フロントローダ等を利用し、表層の土壌を削り取る体系を開発しています。また、圃場内の平らな部分に加えて、圃場周辺の法面、農道、畦畔の削り取り用作業機、用排水路の土砂除去用のバックホー、作業者の被ばくを低減させるシールドキャビンや高機能フィルターを搭載したトラクタ、遠隔操縦および自律運転が可能なトラクタを開発し、福島県飯舘村等と連携して、現地実証試験を行ってきました。さらに、効率的に表土削り取りを進めるため、水田等の表土を幅2mで深さ8cm程度まで削り取りと同時に畝条に集積する、トラクタ装着式表土削り取り機を開発しています。本機は、建設用機械の自走式表土削り取り機（スキマー）やパワーショベル等と連動して効率的な作業を行うことができます。一方、マグネシア系等表面固化剤の使用、バックホーのバケットの新たな操作方法（ワイパー工法）やバケットに吸引ホースを接続して、効率的に表土除去を行う技術や冬期に凍土が形成されることを利用した、効率的な表土削り取り工法を開発しています。表土削り取りは、除染効果としては大きくなりますが、除去した土の置き場所の確保が必要です。1cmの厚さで10aの圃場の表土を削り取ると、約10㎥になります。そのため、先ほどの表土削り取り機は、精度良く表層土を剥ぎ取る構造となっています。

除染対応トラクタ

表土削り取り機

固化剤の吹きつけ作業



冬期除染工法

除染した土壌の置き場所を必要としない空間線量率を下げる方法としては、反転耕が効果的です。特に新たに開発した除染対応プラウは、上層の土を下層に確実に鋤込む構造となっています。しかし、放射性セシウムがなくなったわけではないので、地下水位の状況等を事前に把握しておく必要があります。

プラウによる反転耕技術

耕起をした水田の場合は、水による攪拌（代かき）後、放射性セシウム含有量の高い粘土を主体とする微細粒子を含む濁水を排出し、濁水を固液分離して

排出する方法が利用できます。この方法は、繰り返しの実施が可能です。さらに、代かき用ローターに吸引ホースを装着して濁水を排出する作業機の開発も行われています。さらに、高水深で土壌攪拌を行い、沈降を利用して土壌を粒径別に沈降分級する技術も開発されています。

表土削り取りではありませんが、傾斜牧草地の草地更新による除染技術として、転倒等の危険が少ない遠隔操縦のトラクタに装着できるロータリも開発されています。

傾斜草地の更新用作業機

これらの研究成果の多くは、農林水産省「農地土壌の放射性物質除去技術（除染技術）作業の手引き第１版」としてまとめられ、実際の除染作業にも活用されています。今後さらに、現地で積極的に利用していただけるような情報発進を行う必要があると考えています。

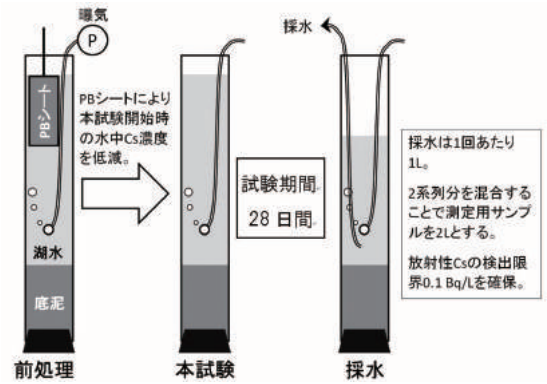
（４）農業用水管理に向けた対応

原子力発電所事故により福島県を中心とする地域に沈着した放射性セシウムは、森林や市街地、農地等を含む集水域からの流出に伴って、用水源となる農業用貯水池へ流入、堆積するとともに、農業用水路を通じて農地に流入することが懸念されました。そこで、農研機構では、東北農政局や本省防災課等の行政機関等と連携、協力して、実態調査や関連技術の開発に取り組んでいます。

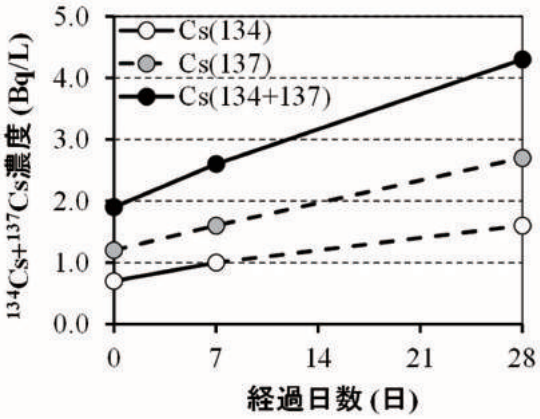
この中で、農業用貯水池を対象とした研究では、農工研では、農業用ため池の底質への放射性セシウムの堆積・分布状況の調査（平成 24 年）、底質からの溶出･回帰特性（平成 24 ～ 25 年）およびため池における放射性セシウムの流入･流出特性（平成 24 年～）の解明を進めてきました。また、技術開発の一環として、ため池底質中の放射性セシウムの鉛直分布を迅速に測定する手法の開発などを行っています。

平成 24 年度に実施したため池底質への放射性セシウムの堆積・分布状況の調査から、ため池底質中の放射性セシウム濃度は、水深が深い地点で高く、底質の表層において高濃度であることが分かりました。しかし、分布の傾向は地点毎に異なるなど、ため池によっては比較的複雑な堆積・分布状況を持つことが明らかになりました。

また、ため池底質からの放射性セシウムの回帰特性の検討では、福島県内の農業用ため池において採取された直径 10cm、長さ 30-40cm の不攪乱コアを用い、放射性セシウムが底質から水中に回帰する速度を 28 日間で評価する試験法を開発しました。ここで開発された手法は、ため池除染工法の検討時などで活用されています。



（ａ）開発された試験法

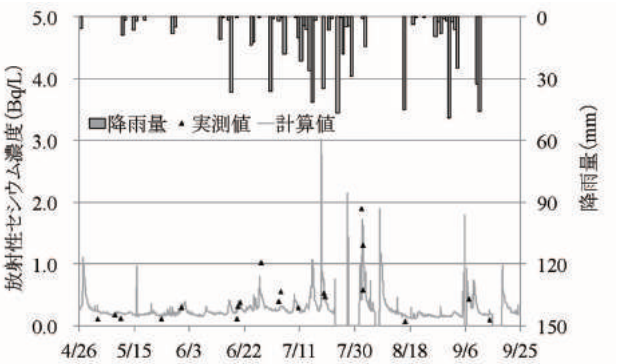


（ｂ）底質からの放射性 Cs の溶出

ため池底質からの放射性セシウムの回帰特性の評価

農業用水を対象とした研究では、東北農研福島拠点において、濁度観測を用いた放射性セシウム濃度のリアルタイムモニタリング技術が開発されました。水中の濁度と放射性セシウム濃度の相関関係を利用して、通常、モニタリングが困難な低濃度の水中の放射性セシウム濃度を 10 分毎に推定するものです。遠隔観測システムの利用により、警報メールを発信したり、水管理施設内の PC やスマートフォンを使って、管理者がその場にいなくても現況を確認したりできます。下図（ｂ）に、灌漑期を通じた農業用水中の放射性セシウム濃度の推定例を示します。

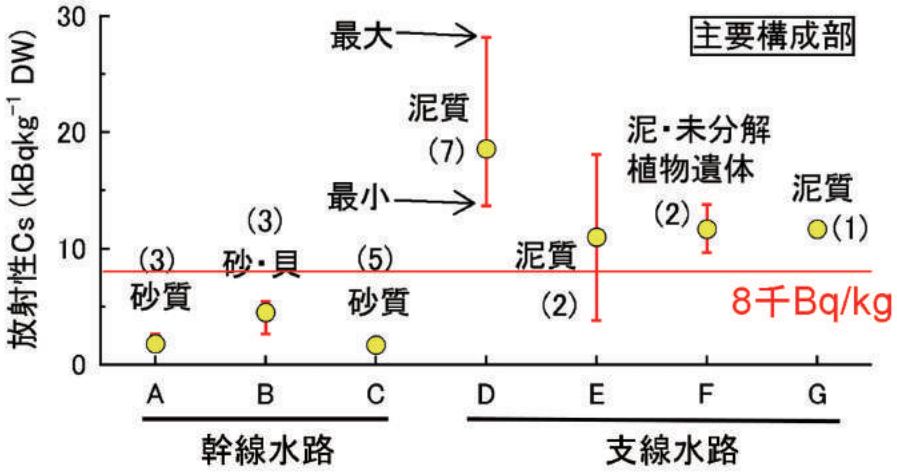
（ａ）モニタリングシステム



（ｂ）観測例

農業用水中に含まれる放射性セシウムのリアルタイムモニタリング技術

一方、農業用水路では、用水中に含まれる土砂が堆積することにより、一部で高い放射性セシウム濃度を持つ堆積物の発生とその管理が課題となる可能性があります。そこで、農工研では、平成24年に福島県県北地域の一つの農業用水路を対象として、上流から下流まで堆積物に含まれる放射性セシウムの濃度を調べ、どのようなところに高い放射性セシウム濃度を持つ堆積物が生じるかを検討しました。その結果、流速が速く堆積物が生じにくい幹線用水路と比べて、流速が低下し泥状の堆積物が生じやすい支線用水路において、指定廃棄物として扱う必要のある8千Bq/kgを超える放射性セシウム濃度を持つ堆積物が生じていることが分かりました。



農業用水路の堆積物中の放射性セシウム濃度

（５）汚染物の減容化に向けた対応

除染に伴い発生する作物残さ・雑草、枝葉等は、そのままフレキシブルコンテナバッグ（以下フレコンバッグ）に保管すると、かさばるだけでなく、腐敗して崩れるため2段積みしかできず、広大な保管場所が必要になるなどの問題があります。このため、これらの放射性物質を含む作物等について、乾燥して円筒状のペレットに成型処理することにより減容化し、安定的に保管できる処理技術を開発し、運転条件、設計仕様を明らかにしました。

農作物の栽培が制限された地域に繁茂している雑草については、飼料用トウモロコシの収穫に用いるフォーレージハーベスタで細断収穫することにより、ペレット成型処理が可能です。写真はセイタカアワダチソウとススキが繁茂した雑草畑での収穫状況です。雑草は20%以下の水分でしたが、周辺部への粉塵発生量は0.1-0.7mg/Nm^{3}と低い値にとどまり、12月までの中水分時期に収穫できれば周辺環境への影響はごく低レベルに抑制できると推察されます。

放射性物質を含む稲わら等作物残さや、雑草、枝葉等は、荒破砕→乾燥→粉砕→混合→成型処理→仕上げ乾燥によって、15%以下の安定保管可能な水分で、かさ密度は500kg/m^{3}以上のペレットになり、元の容積の1/5-1/10に減容化します。

処理する材料は火力乾燥が必要なため、天日乾燥や堆肥発酵等により水分40%程度まで乾燥することが処理コスト低減のため重要です。

雑草の刈り取り状況

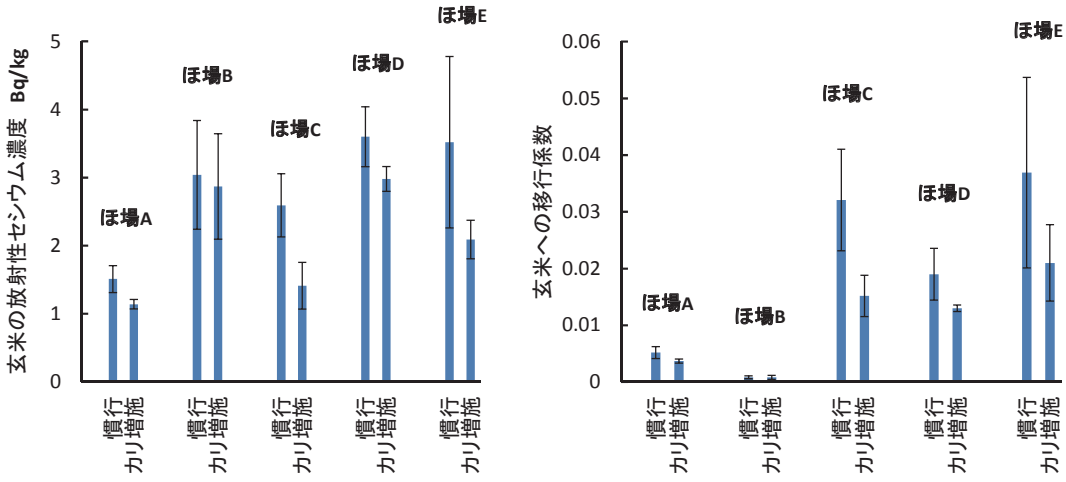
減容化設備全景（幅 7m、奥行 20m）
と製作したペレット（右）

（直径 8mm）

（６）作物への放射性セシウムの移行低減

①水稲への放射性セシウムの移行低減

農研機構では、原発事故直後の平成 23 年に農業環境技術研究所と福島県、茨城県、栃木県、群馬県の試験研究機関と連携して水稲のほ場試験を行い、カリウム施肥が放射性セシウムの土壌から玄米への移行に及ぼす影響を調査しました。その結果、カリウムを慣行施肥の 3 倍量施用すると、粘土鉱物としてバーミキュライトを多く含み放射性セシウムの固定化が大きく移行係数が低い土壌（下図のほ場 B）を除き、玄米の放射性セシウム濃度や移行係数（水分 15% 玄米の放射性セシウム濃度 Bq/kg ÷作土の放射性セシウム濃度 Bq/kg）が低下することを明らかにしました。



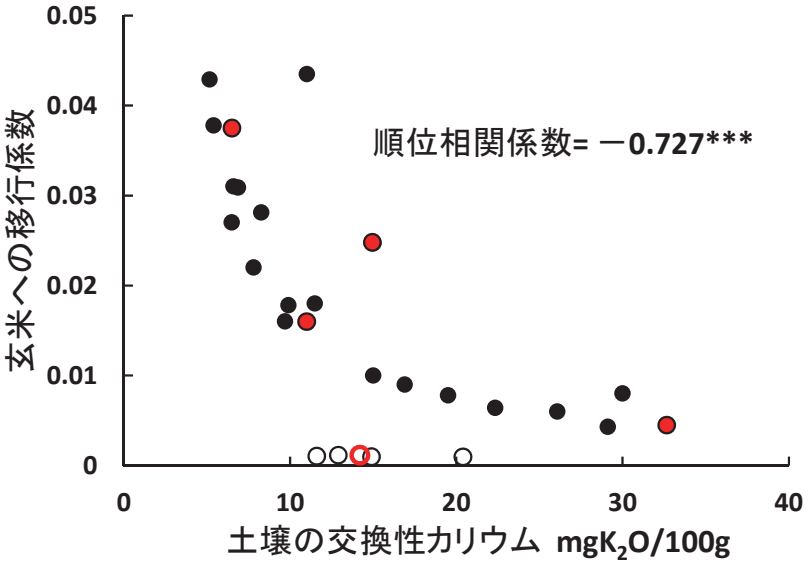
カリウム増施による放射性セシウムの吸収抑制

カリ増施は、カリウムの基肥と追肥がともに慣行の３倍量。ただし、ほ場Ｅは基肥のみ３倍量。ほ場Ａと Ｂ：灰色低地土、Ｃ：低地水田土（造成）、Ｄと Ｅ：多湿黒ボク土。土壌（栽培後）の放射性セシウム濃度（Bq/kg）：A;300、B;3680、C;90、D;210、E;100。品種はすべてコシヒカリ。エラーバーは標準偏差。圃場ごとでは慣行とカリ増施との間に有意差はなかったが、試験全体では玄米の放射性セシウム濃度、移行係数ともに１%水準で有意差有り。

また、化学肥料に加えて牛ふん堆肥を長期連用した土壌は、化学肥料のみを施用した土壌に比べて、交換性カリウムが高く、玄米の放射性セシウム濃度や移行係数が低くなりました。一方、長年にわたりカリウムを施用していない土壌では、施用した土壌に比べて玄米の放射性セシウム濃度や移行係数が高いことがわかりました。

ゼオライトやバーミキュライトなどの土壌改良資材を 0.5-1t/10a 施用すると、移行係数が低下する傾向が認められた場合もありましたが、統計的な有意差は得られませんでした。低下傾向が認められた事例では、交換性カリウムが増加しており、資材に含まれていたカリウムが吸収抑制に役立ったと考えられます。

玄米への移行係数は、粘土鉱物としてバーミキュライトを多く含む土壌を除き、土壌の交換性カリウムが高いほど低下しました。ただし、この低減効果は交換性カリウムが 25mgK_2O/100g 以上では小さくなりました。



土壌の交換性カリウムと玄米への移行係数の関係

白抜きプロット（○）は粘土鉱物としてバーミキュライトを多く含む土壌（前ページの図のほ場 B）。赤のプロットは土壌改良資材施用区。*** は 0.1% 水準で有意であることを示す。

以上の結果から、玄米中の放射性セシウム濃度の低減対策として、カリウム含量の低い水田では土壌の交換性カリウムが 25mgK_2O/100g 程度になるように土壌改良した上で、地域慣行の施肥を行なうことを推奨しました。

本成果に基づき、平成 25 年度には補助事業（東日本大震災農業生産対策交付金及び福島県営農再開支援事業）を活用して、福島県、栃木県、宮城県、群馬県内の計 8 万 4 千 ha の水稲作でカリウム資材の増施による放射性セシウムの吸収抑制対策が行なわれました。

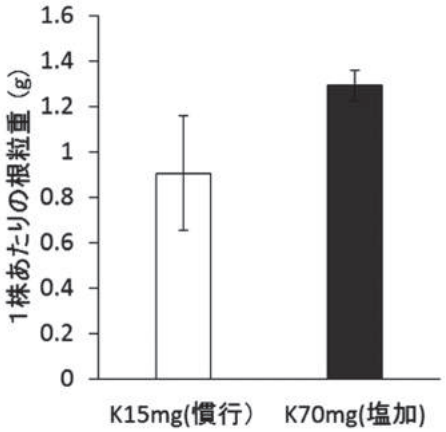
②畑作物への放射性セシウムの移行低減

大豆でも、水稲と同様に土壌のカリウム供給力が高いほど大豆の放射性セシウム濃度が低下することが明らかとなり、交換性カリ含量 25mgK_2O/100g を目標とした土壌改良を吸収抑制対策として示しました。

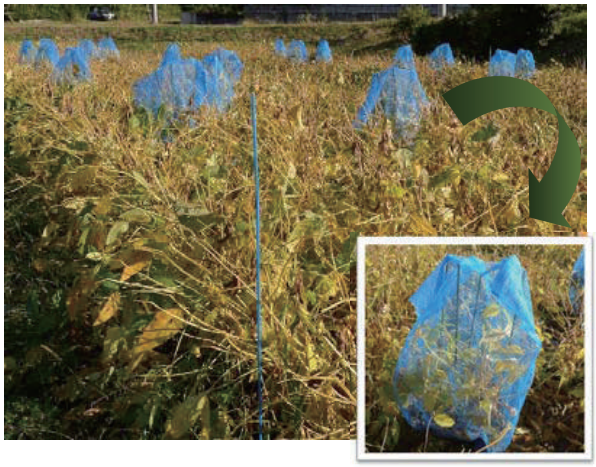
一方で大豆では塩化カリの施用は根粒の着生を阻害するという報告があることから、塩化カリの多施用が根粒着生に与える影響について調査を行いました。結果は根粒の着生が最も盛んな着莢期において慣行栽培と比較しても根粒着生の低下は示されませんでした。

また、カリを多施用しても大豆の生育や収量は低下しませんでした。また、窒素追肥が放射性セシウムの子実への移行係数を高める懸念もありましたが、カリウム供給が十分な条件下では移行係数を高めないことも示されました。

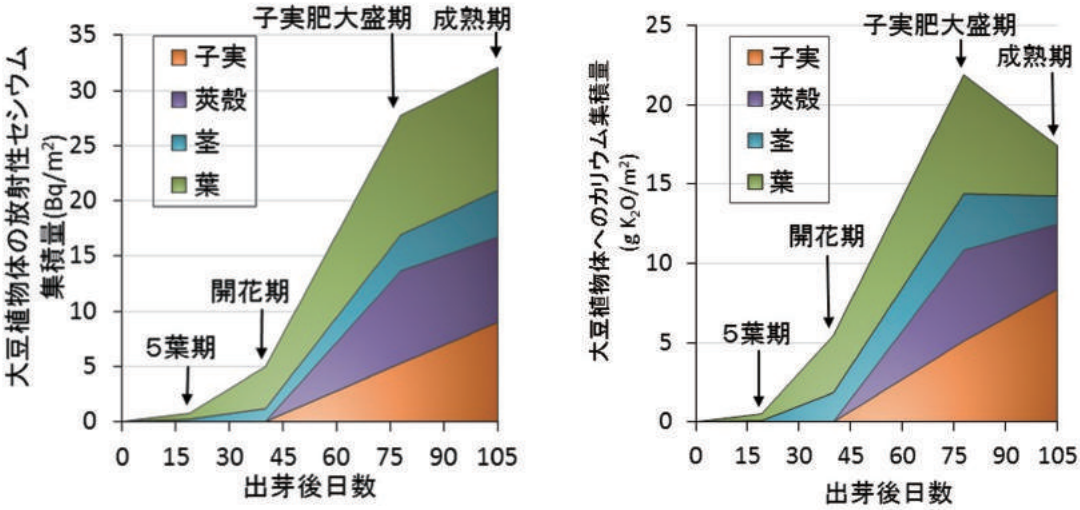
さらに、放射性セシウムとカリウムが大豆植物体の各器官にどのように分配されるのかを調査したところ、両者とも生育後半に子実への集積量が高まる傾向は類似していましたが、その地上部集積量に対する子実への分配率はカリウムと比較してセシウムのほうが低い傾向にあることがわかってきました。



塩化カリ多施用が根粒着生に及ぼす影響



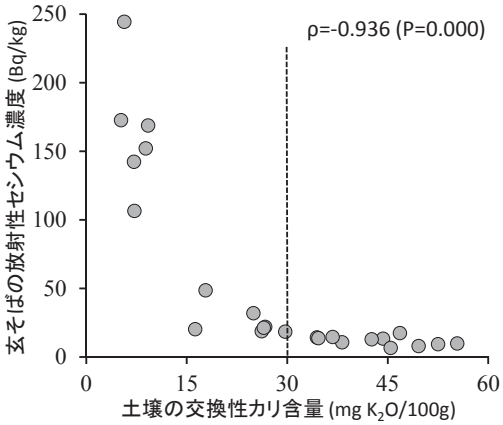
成熟期大豆圃場に設置した落葉トラップ



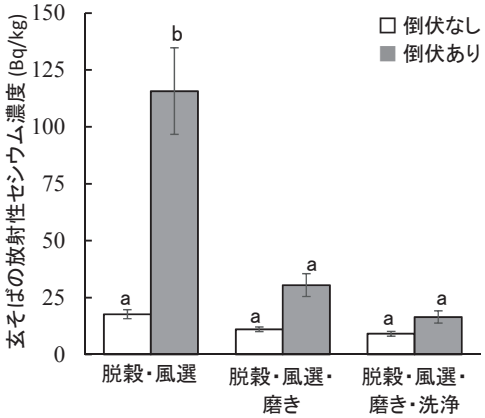
大豆植物体の放射性セシウムとカリウム集積量の推移

そばにおいては、土壌からの放射性セシウムの移行を十分に低減するには、速効性のカリ肥料により栽培前の作土の交換性カリ含量を乾土 100g あたり 30mgK_2O に土壌改良した上で、地域の施肥基準に応じた施肥を行うことが有効でした。大豆同様、カリ肥料の増施を行った場合も玄そばの収量に影響はありませんでした。

また、倒伏したそばから収穫された玄そばでは、土壌等の混入が放射性セシウム濃度を高める要因となることが明らかになりました。土壌が付着した玄そばに対しては、風選だけでなく磨きを丁寧に行うことで放射性セシウム濃度を低減できました。



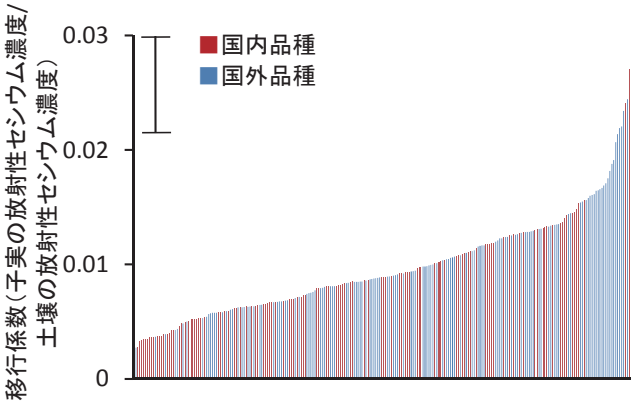
土壌の交換性カリ含量と玄そばの放射性セシウム濃度との関係



収穫後の調整作業が玄そばの放射性セシウム濃度に及ぼす影響

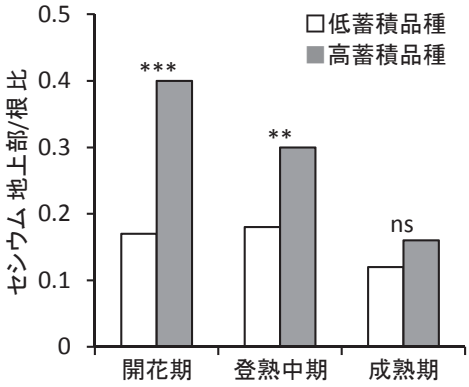
同一の英文字間には R-E-G-W 検定により 5% 水準で有意差がないことを示す。

小麦では、子実への放射性セシウムの移行係数に、品種間で約 10 倍の差があることが示されました。さらに、子実への移行性が高い品種と低い品種では、セシウムの根から地上部への移行性に違いがあることが、明らかになり、体内でのセシウムの移動の容易さも子実の放射性セシウム濃度を決定する重要な因子と考えられました。



小麦子実への放射性セシウムの移行係数の品種間差異

バーは最小有意差を示す。



小麦の根から地上部へのセシウムの移行性の品種間差異

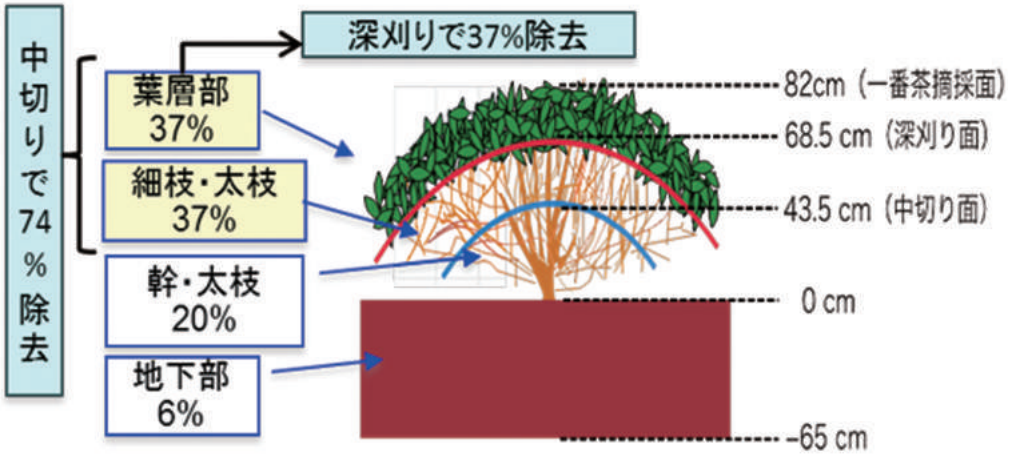
***、** はそれぞれ 0.1%、1% 水準で有意であることを、ns は有意差なしを示す。

③茶における放射性セシウムの移行低減

安定セシウムをトレーサーとして土壌あるいは茶樹の葉面に施用すると、施用から1ヶ月後の新芽へのセシウムの移行量は、葉面散布で多くなり、土壌からはほとんど移行しませんでした。つまり、東京電力福島第一原発の事故により平成23年度の一番茶で検出された放射性セシウム汚染の主な要因は、古葉や枝条から吸収されたものが新芽へ転流したことです。また、平成23年3～5月の放射性セシウムの積算降下量が約1,400Bq/m^2であった地域の茶園において、一番茶摘採後には、深刈り面より上に37%、中切り面より上に74%の放射性セシウムが存在していました。せん枝処理を行うことにより、それぞれのせん枝面よりも上に存在する放射性セシウムを樹体から取り除くことができます。これらのことから、せん枝処理を茶の放射性セシウム濃度低減技術として提示しました。

農研機構では関係県と協力して茶および茶園土壌における放射性セシウム濃度のモニタリングや移行係数の解明を続けてきました。せん枝により、それ以降の新芽中の放射性セシウム濃度がおよそ半減することが分かり、上記の放射性セシウム濃度低減技術が実証されました。また、この対策は茶産地で広く実施され、平成25年から基準値を超過する茶はなくなりました。土壌中の放射性セシウムは深さ0-5cmの濃度が最も高く、放射性セシウムの大半がこの層に集中しており、細根の多い深さ5cm以下の濃度は低いことが分かりましたが、その後、深さ5cm以下の層で放射性セシウム濃度がわずかに増加する傾向が認められています。移行係数についても継続して調査を進めているところですが、現時点では新芽中の放射性セシウム濃度上昇が心配されるような値は得られていません。

土壌中の放射性セシウムの動態や移行係数、刈り落とした枝葉に含まれる放射性セシウムの動態については今後も見守っていく必要があります。



中切りにより、翌年の一番茶新芽の放射性セシウム濃度が約50%低減します

せん枝による放射性セシウムの除去

④果樹園における放射性セシウムの蓄積と低減対策

原発事故発生年秋冬期の調査から、果樹園に降下した放射性セシウムは、その多くが土壌表面に降下しているものの、樹体にも付着していることが明らかになりました。事故発生時に落葉していた落葉果樹では枝や幹に、葉があったカンキツ類などの常緑果樹では主に葉に付着していました。ほとんどの果樹で放射性セシウムが直接付着した部位の放射性セシウム濃度は、事故後に発生した枝、葉より高く、果実の濃度はこれらの枝や葉より低いことが分かりました。加えて、根の放射性セシウム濃度も低いことも分かりました。

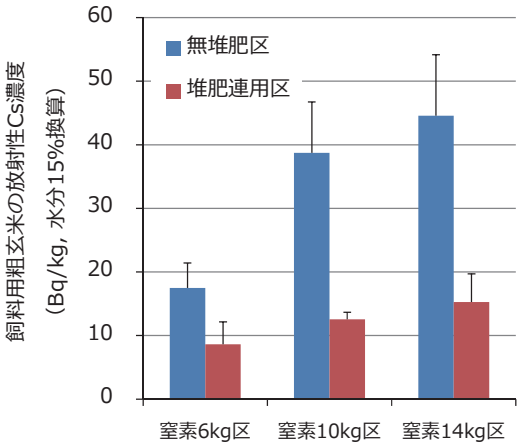
事故後4年間にわたる調査から、田畑のように耕うんされることが少ない果樹園土壌では、地表面の土壌表層に放射性セシウムが蓄積し、放射性セシウムの自然減衰と似た経年減少傾向を示すことが明らかになりました。しかし、果実の濃度は、土壌より速やかに低下しました。また、地表面の土壌を深さ5cm程耕うんすると、深さ5-15cm程度の放射性セシウム濃度が高まることが分かりました。このような場合でも果実の放射性セシウム濃度は、耕うんしない場合と同様、年とともに速やかに低下しました。これらのことから、果実に蓄積された放射性セシウムは、直接付着した枝や葉などの部位から移行したものが多く、汚染土壌から根が吸収して果実へ移行する放射性セシウムの量は、事故後4年間は無視できるほど小さいと考えられました。

さらに果実の放射性セシウム濃度の低減の促進を目指した取組が行われています。福島県では、事故発生年の秋冬期に落葉果樹の主幹や主枝を高圧水で洗浄することにより、翌年以降の果実の放射性セシウム濃度を低減できることを明らかにしました。さらに、放射性セシウムが付着した枝をせん定により大きく除去することで樹体あたりの放射性セシウム保有量を減らし、果実の放射性セシウム濃度をより早く低減できるか、調査を進めています。また、改植に際して、高濃度汚染地域では果実への放射性セシウムの根からの吸収・移行の影響が無視できない可能性があります。改植できる園地土壌の放射性セシウム濃度の目安を示すため、土壌から根が吸収して果実へ移行する放射性セシウム濃度の割合（移行係数）を明らかにしようとしています。

その他、福島県伊達地域特産のあんぽ柿は、加工工程における果実水分の減少により、収穫果実よりも放射性セシウムが数倍濃縮されるため、あんぽ柿の全量検査機によるスクリーニング検査を経て出荷されています。この検査機の精度を検証するために作製した参照試料は、現場で利用されています。また、樹園地土壌の除染や作業者の外部被曝を低減するため、歩行型トラクタをベースとした「果樹園用樹冠下表土剥土機」を開発しました。この機械は、大型機械が利用できない樹冠下土壌を手作業の4倍の作業効率で剥土できることから、果樹園から汚染された土壌を除去する際に利用されることが期待されています。

⑤飼料作物・牧草における放射性セシウムの移行低減

主要な単年生飼料作物である飼料用トウモロコシ、飼料用イネ、イタリアンライグラスについて、牛ふん堆肥の連用によってカリウム供給力が高まった土壌では放射性セシウムの移行が少ないことがわかりました。飼料用トウモロコシに堆肥を 1 作あたり 3t/10a 程度継続的に施用した場合、施用しない場合に比べ平成 23 年は約 40%、平成 24 年は約 30%移行を抑制しました。また、飼料用トウモロコシーイタリアンライグラス二毛作栽培体系おいて、牛ふん堆肥を連用した窒素単肥の栽培試験から、ミネラルバランスを悪化させずに放射性セシウムの移行を抑制できる栽培後土壌の交換性カリ含量は関東東海地域の飼料畑土壌診断基準の上限値である 30-50mgK_2O/100g 乾土程度であることを明らかにしました。多収を求める飼料用イネ栽培では水稲の 2 倍程度の窒素施用が推奨されていますが、土壌中の交換性カリ含量が低い条件では窒素肥料を多用すると放射性セシウム濃度を高める傾向がありました。飼料用イネの放射性セシウム濃度は株元に近いほど高く、刈り取り高さを 8cm から 16cm に高めると収量減少は 5%とわずかで、放射性セシウム濃度は 24%も減少させる効果がありました。また、飼料用イネのセシウム吸収は品種間差があり、地上部全体および粗玄米の濃度はインド型品種で高く、日本型品種では「ふくひびき」が低いことが明らかになりました。



飼料用玄米の放射性セシウム濃度に及ぼす堆肥および窒素単肥施用の影響
地上部を収穫、持ち出し、牛ふん堆肥 2t/10a 施用を 2006 年から継続した圃場の試験。

暫定許容値の 400Bq/kg を超える堆肥であっても、畜産農家が飼料を自給生産する草地・飼料畑に還元することは認められています。堆肥の施用が土壌中の交換性カリ含量を高め、飼料作物の放射性セシウム移行抑制に有効であっても、放射性セシウムを含む堆肥の施用には不安の声がありました。そこで、3,800Bq/kg の放射性セシウムを含む堆肥を 7t/10a 施用し、飼料用トウモロコシを栽培

したところ、放射性セシウム濃度の上昇は 3Bq/kg（水分 80％換算）とごくわずかであることを確認しました。

永年生牧草について、海外の報告で有効と言われている草地更新の除染効果を検証しました。草地表面の放射性セシウムを深く埋設させるプラウ耕を用いる完全更新法が草地の空間線量率や新播牧草の放射性セシウム低減に有効であること、プラウ耕が難しい石礫や作土層が浅い草地で実施されるディスク耕による簡易更新も完全更新に比べて効果は劣るものの低減効果があることを確認しました。しかし、平成 24 年の調査において草地更新を行った草地の 8% で牧草の放射性セシウム濃度が暫定許容値である 100Bq/kg（水分 80％換算）を超えたため､超過要因の調査を関係県と協力して実施しました。100g 乾土（0-15cm 深）中の交換性カリ含量が 20mg 以下になると牧草の放射性セシウム濃度は著しく高くなり、暫定許容値を超える割合も多くなりました。一方、30-40mg 以上ある場合では、超過する事例があるものの、移行係数は低く抑えられており、草地更新時の交換性カリ含量の目標値は 30-40mgK_2O/100g 乾土としました。平成 25 年の追加調査により、土壌中の交換性カリ含量が高くても超過する原因として、高濃度の放射性セシウムを含むリター・ルートマット塊が土中の浅いところに存在することが明らかになりました。草地の耕うんの状態も牧草の放射性セシウム濃度に影響し、耕深 13cm まででは耕深が深いほど、砕土率（2cm 以下の土塊の割合）が高いほど低減効果が高くなります。さらに、草地は通常の乗用トラクタで耕うん作業が困難な急傾斜に多く存在し、急傾斜草地の安全な除染法の開発が求められたことから、無線操作で 40°までの傾斜地の草刈り作業に利用されているクローラトラクタ（無線傾斜地トラクタ）に装着できるロータリを開発しました。開発したロータリは石礫などの衝撃に強く、砕土・撹拌性能が高く、25°の傾斜地においても等高線作業、上り作業、下り作業とも安定的な作業が可能です。耐久試験を経て市販化され、急傾斜草地の除染作業に用いられています。

開発したロータリを装着した無線傾斜地トラクタによる急傾斜地草地の耕うん作業講習会

カリウム含量が高い飼料は牛のミネラルバランスを悪化させ、生産性を低下させたり病気や死亡事故を引き起こしたりすることがあります。そのため、草地のカリ施肥は抑制され、無施肥管理や窒素のみを施用する粗放的な管理を行う事例がよく見られます。除染として草地更新を行った採草地で、土壌中の交換性カリ含量低下による牧草の放射性セシウム濃度の上昇が懸念されたことから、除染を行った草地で施肥管理試験を継続しました。窒素単肥を行った草地の牧草は、草地の標準的な施肥（N-P_2O_5-K_2O　各 5kg/10a を年 3 回施用）に比べ高い放射性セシウム濃度となり、更新 3 年目に暫定許容値を超過することを認め、草地更新後もカリ施肥継続の重要性を示しました。これらの成果は農林水産省から出された「牧草地における放射性物質移行低減対策の手引き」に引用され、影響を受けた地域で活用されています。しかし、適正なカリ施肥量や耕起困難地の除染などの課題が残されており、現在取り組んでいるところです。

（７）農産物の加工・調理工程における放射性セシウムの動態

国内農産物に関する加工・調理過程での放射性セシウムの詳細な動態解析を行い、リスク評価・管理のための信頼できる科学データや、消費者への適切な調理法の提供ならびに食品製造でのリスク低減のための情報を提供しています。

小麦と大麦の玄麦から製粉工程において、小麦におけるふすまの加工係数（玄麦に対するふすまの放射性セシウム濃度）の平均値は 2.30、小麦粉の加工係数の平均値は 0.29、大麦における麦ぬかの加工係数の平均値は 2.20、精麦の加工係数の平均値は 0.57 でした。また、この工程で放射性セシウム量の分配としてみた場合、小麦におけるふすまへの分配は 0.80、小麦粉には 0.20 が分配されました。国産小麦の主要な用途としては、うどん等の麺類があります。小麦粉 100 に水 31 を加えてうどん生麺を製造すると、うどん生麺の加工係数は、濃度は水の追加による濃度の希釈が起こるため、おおよそ 0.7 となります。うどんをゆで調理すると、生麺に含まれる放射性セシウムは、ゆで湯へ 0.62-0.70、すすぎ水へ 0.02-0.08 が除去され、ゆで麺の加工係数は 0.04-0.06 と元の生麺より大きく放射性セシウム濃度が低下します。

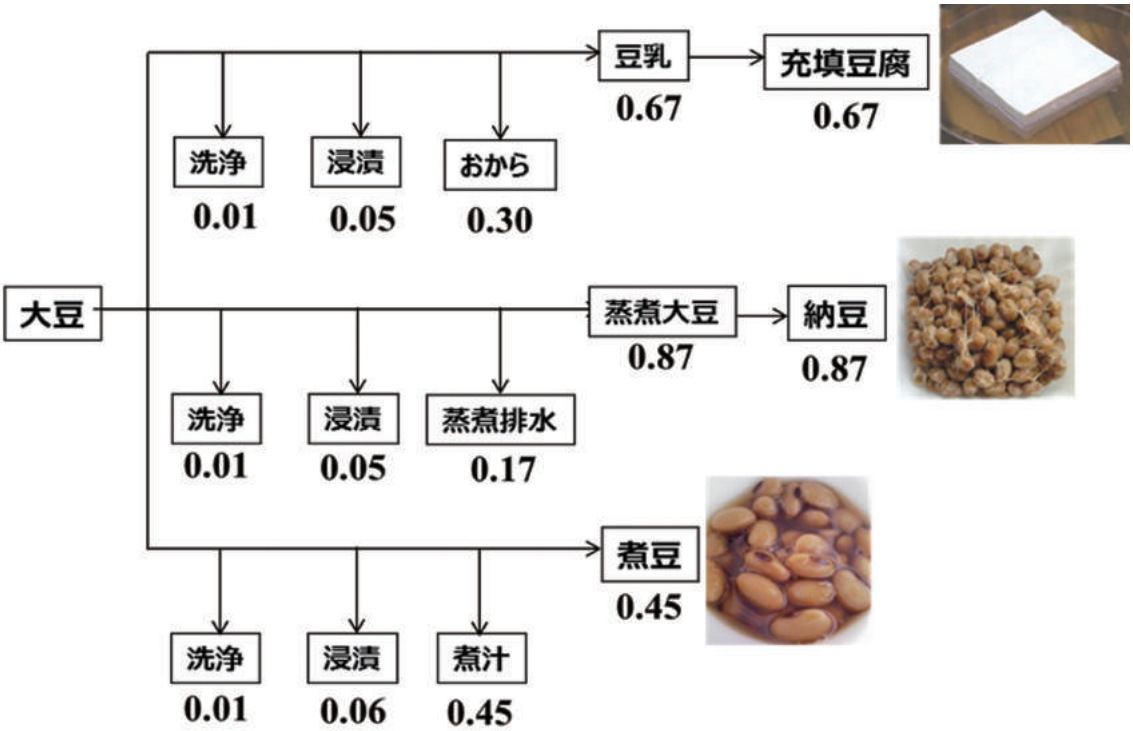
	玄麦	ふすま	小麦粉
分配割合	1.0	0.8	0.2

小麦製粉加工におけるふすまと小麦粉への放射性セシウムの分配

	小麦粉	生麺	茹で湯	すすぎ水	茹で麺
分配割合	**1.0**	**1.0**	**0.62～0.70**	**0.02～0.08**	**0.12～0.20**

うどん調理工程での放射性セシウムの分配

また国産大豆の主要な用途としては、豆腐や納豆、煮豆があります。乾燥大豆を加工・調理する場合は、最初に行う洗浄・浸漬処理において、大豆に含まれる放射性セシウムの 0.06-0.07 が洗浄水や浸漬水に除去されます。さらに浸漬した大豆から豆腐への加工工程においては、おからとして 0.30、納豆の蒸煮排水として 0.17、煮豆調理では煮汁として 0.45 の放射性セシウムが加工・調理品から除去されます。放射性セシウム濃度に注目すると、原料大豆からの加工係数として、豆腐 0.12、納豆 0.40、煮豆 0.20 となりました。つまり、原料大豆の放射性セシウム濃度が基準値以下であれば、豆腐、納豆、煮豆の安全性は確保されます。



豆腐・納豆・煮豆の加工・調理工程での放射性セシウムの分配