

明日へ向けて

私たちの取り組み



No.4

2015年2月

日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門

「技術と人材と設備を駆使し、廃炉を完了させる」 福島廃止措置技術開発センター 武田センター長に聞く

燃料デブリの特性をとらえ、将来の取り出しをめざす

―福島廃止措置技術開発センターがめざすものは何でしょう？

福島では今も10万人以上の方々が、避難生活を送っています。その方々が元のような暮らしに戻るためには、放射能で汚染された環境の回復と、東京電力福島第一原子力発電所（1F）そのものが抱えるリスクをすみやかに低減し、廃止措置を完了させることが重要だと思っています。

1Fの廃止措置は、通常の原子炉の廃止措置とは大きく異なります。一般的な廃止措置の場合だと、使用済み燃料を取り出した後に原子炉の解体に取りかかるのですが、1Fの場合には核燃料が燃料被覆管から露出して溶け出し、被覆管の材料や原子炉の中にある構造材と混ざり合って燃料デブリを作り、それが原子炉の圧力容器から格納容器に漏れ出していると推定されています。

燃料デブリは放射線量が高く、量も少なくありません。さらには炉内がどうなっているかを、今も十分には見ることはできません。これらの点が、1Fの廃止措置を難しくさせています。

原子力機構の福島廃止措置技術開発センターは、このように困難が予想される1Fの廃炉作業を進めるために、これまでに培ってきた技術や人材、設備を駆使して、様々な技術的な課題を克服し、廃止措置のゴールに導くために貢献していくことが使命だと考えています。



―福島廃止措置技術開発センターではどんな研究開発を行っているのですか。

廃止措置に関する技術開発は長期的に取り組まなければならないものがたくさんあります。このため国は2011年12月に中長期ロードマップを策定し、オールジャパン体制で進めていくことを決めました。現在は廃炉・汚染水対策関係閣僚等会議の下で原子力損害賠償・廃炉等支援機構（NDF）、国際廃炉研究開発機構（IRID）、東京電力、原子力機構などがロードマップに沿って、それぞれが連携しながら技術開発を進めています。

この中で原子力機構は、燃料デブリの取り出しと放射性廃棄物の処理処分の技術開発に重点的に取り組んでいます。このほかに燃料デブリの計量管理や、プールの中に残っている使用済み燃料の安全評価とその処置方法についての研究にも取り組んでいます。

―具体的には。

事故から4年が過ぎ、1Fへの対応は緊急時の短期的なものから、今は30～40年間を見据えた中長期的な対応を行う段階にあります。福島廃止措置技術開発センターで実施している研究開発については、それぞれの状況は異なりますが、一定の成果が出つつあります。

燃料デブリについては取り出す前に、その特性をしっかりと把握することが必要です。そのためにサンプルを取って分析できればよいのですが、なかなかそう簡単ではありません。そのため1979年に米国のスリーマイルアイランド（TMI）で起きた事故から得られたデータなどをもとに、評価や類推をして、その特性を推定しています。また、当機構の実験室ではTMI事故の際採取されたデブリを用いて、実際に分析も行っています。さらにウランとジルコニウムを混ぜて融かすなどして模擬の燃料デブリを作り、それを評価することにより1Fの燃料デブリを推定することも進めています。これらの成果が、燃料デブリを取り出すための重要な情報になります。なおTMIの場合は、原子炉の中に水を貯めることで放射線を遮へいする冠水方式を採用し、上からマジックハンドのようなもので核燃料を取り出しました。しかし1Fの場合、同様の方式を採用しようとする、今のままでは水が漏れてしまうので、原子炉に水が溜まるように、漏れている所をふさがなければなりません。その前に、どこから漏れているのか、その箇所を探さなければなりません。そこが現場での一番の課題ではないかと思います。

さらに燃料デブリはどこにどんなものが、どれくらい溜まっているのかを、立体的に把握することが大きな課題になります。取り出した後はその燃料デブリを安全に保管し、最終的には廃棄物として処分

人材を育成し、長期的に取り組んでいく

できる状態まで持っていくようにしなければなりません。これらの取組についても、我々が大きな役割を果たさなければならぬと考えています。

もう一つの大きな柱が、汚染水の問題です。1Fでは今も炉心に水を入れて冷やしていますが、そこから漏れ出た水が膨大な量の汚染水となっています。このため、それを処理して放射性物質を取り除き、もう一度炉の中に戻すことをやっているのですが、その過程で、放射性物質を吸着させた材料が放射性廃棄物となります。これが、かなりの量になっています。

また、爆発の時に吹き飛んだコンクリートのがれきや、サイト内でタンクを置くために伐採した立木など、それらが放射性廃棄物になっています。原子炉そのものを解体撤去していく分を含めると、膨大な量になります。廃止措置を完了させるためには、それらの処分まできちんとする必要があります。これらの放射性廃棄物はどんな材質からなるのか、そこにはどんな放射性核種がどのくらい含まれているかを大まかに把握する。その結果をもとに、どう処分していけばよいのかを考えなければなりません。そのためにコンクリートの塊や水をサンプルとして入手し、当機構の原子力科学研究所、核燃料サイクル工学研究所や大洗研究開発センターの実験室で分析し、どのように処理処分をやっていけばいいのかという研究開発を進めています。

なお、これらの研究開発は、国内外のさまざまな機関との協力の下で進めています。米国のアイダホ国立研究所（INL）とはTMIの経験に基づく技術を今回の場合に活用しようと連携しており、フランスのフランス原子力庁（CEA）との間には協定を結び、CEAが手がけてきたシビアアクシデントの研究過程で出てきた模擬燃料デブリを精査する作業を行っています。そのほか英国、ドイツ、ロシアなどとも情報交換を行っています。

—長い取組みになります。

これらの取組は、一つの世代だけでは終わりません。そのためには優れた研究者や技術者な人を確保して育て、バトンをつなげていくことが重要です。原子力機構の取組には研究開発はもちろん、設計や製作、保守管理などさまざまな分野の人が関わっており、原子力機構はそれらの人たちの技術を磨く、いわば人材育成のためのプラットホームの役割も担うことになると思っています。若い人たちにお伝えしたいことは、我々が今やっていることは1Fの廃止措置への貢献はもちろんのこと、取組を通じて達成感があること、若い人にとって技術的に興味深いテーマであること、魅力あるものであるということです。学生の人たちと話をすると、使命感を持って福島のために役立ちたいという高いモチベーションを持っている人が多い。そういう人をきちんと育てていきたいと思っています。

原子力機構は「我が国における唯一の総合的原子力研究開発機関」であり、それはきわめて広い技術領域をカバーしていることを意味します。炉物理や炉工学、核物理、核工学、放射化学、核燃料工学など特に1Fの廃止措置を進めるうえで必要になると考えられる技術や人材が、当機構にはあります。

さらに、小さな実験室レベルのものから再処理施設のような規模の大きなプラントまで様々な形で、放射性物質を取り扱ってきた経験と設備があります。これも原子力機構の大きな強みだと思います。

廃止措置は総合科学であり、これから原子力への道を志す学生の皆さんが力を発揮できるような仕事がたくさんあります。それらをどう統合していくかが原子力機構の重要な仕事です。その過程を通して、皆さんの技術力の向上ができるのではないかと考えています。

—事故当初、そして事故直後は何をされていました？

私は再処理やMOX燃料製造、廃棄物の処理処分など、核燃料サイクルのさまざまな業務に携わってきました。事故直後からは緊急的な応援として、現地の放射線モニタリングや現地の除染支援等の調整に携わりました。

それからしばらくすると、1Fの廃止措置をどうするかというテーマが重要になってきました。このため、これまで経験や実績があった技術をベースに燃料デブリの特性把握や廃棄物処理について社内提案し、実行に移しました。その取組はやがて中長期のロードマップに反映され、オールジャパン体制で組織的な活動が始まりました。2012年4月には原科研、サイクル研と大洗研に福島技術開発特別チームが発足し、そこが1Fの廃止措置の研究開発の中心的な役割を担うことになりました。私はその中のサイクル研のチームリーダーとして2年間、この研究開発に本格的に取り組んできました。また、昨年4月に福島廃止措置技術開発センターが発足した後は、その責任者として1Fの廃止措置に関わる研究開発に取り組んでいます。

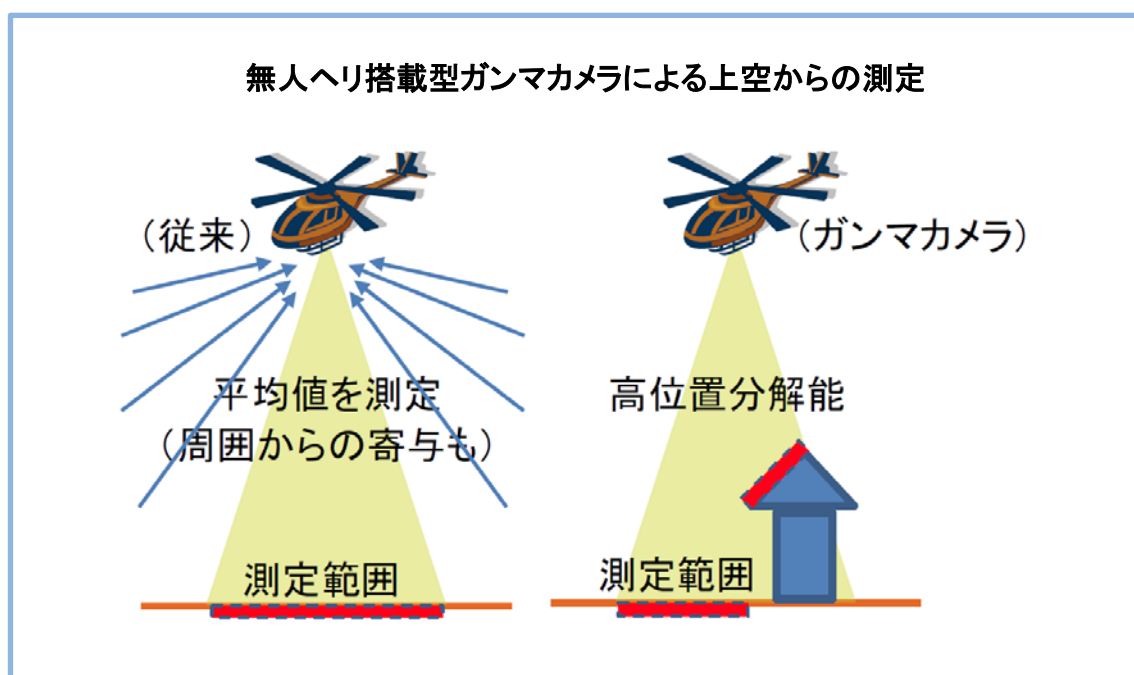
—これからの廃止措置にかける思いは？

この取組は、とても長い期間にわたります。廃止措置という大きな目標に向かって着実に、怠ることなく進めていくとともに、その過程で1Fが抱えているリスクを確実に減らすような取組を進めていくことが大事です。そして最終的には、皆さんが安心できるような状態にすること、それへ向けた廃止措置が少しでも早く進むよう日々の研究開発にあたっていきたいと思っています。

上空からセシウムの分布を調べる 直径10mの範囲まで詳細な測定が可能に

原子力機構は、上空から地上の放射性セシウムの分布をより詳しく調べる方法を開発した。無人ヘリコプターに搭載する測定装置の性能を向上させることで、これまで直径数十～百数十メートルの範囲の平均として調べていたものを、直径十メートルの範囲の平均としてより細かい分布を調べることを可能にした。これにより、人間が立ち入ることが難しい場所の放射線量を、これまでより精細にマッピングすることができ、除染箇所の特特定や除染効果の確認の効率化に寄与することが期待される。

原子力機構は東京電力福島第一原子力発電所事故以降、環境に放出された放射性セシウムの分布状況を広範囲に調べるとともに、除染を効率よく進めるために、放射線検出器を無人ヘリに搭載して上空から測定する技術の研究開発を行ってきた。とくに山林や河川、建物の屋根など、人間が立ち入ることが難しい場所についてはヘリコプターを使って上空から放射線量を測定してきた。しかし、これまでの測定方法では位置分解能が大きいため、細かい範囲ごとに測定することができない難点があった。

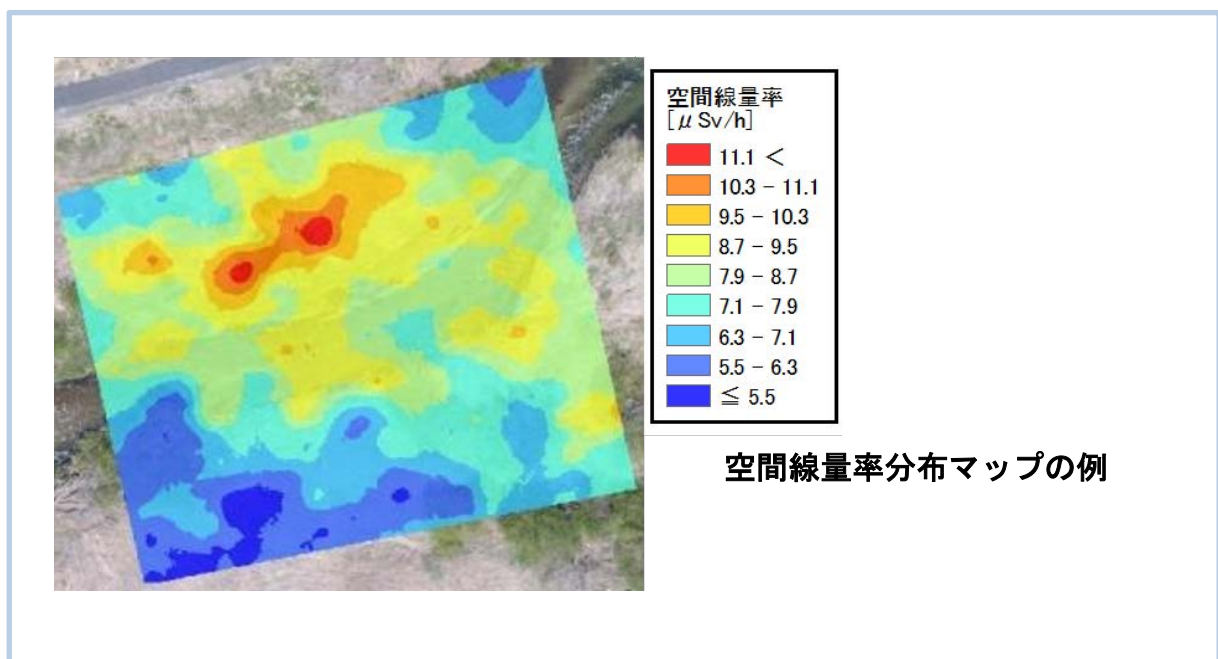
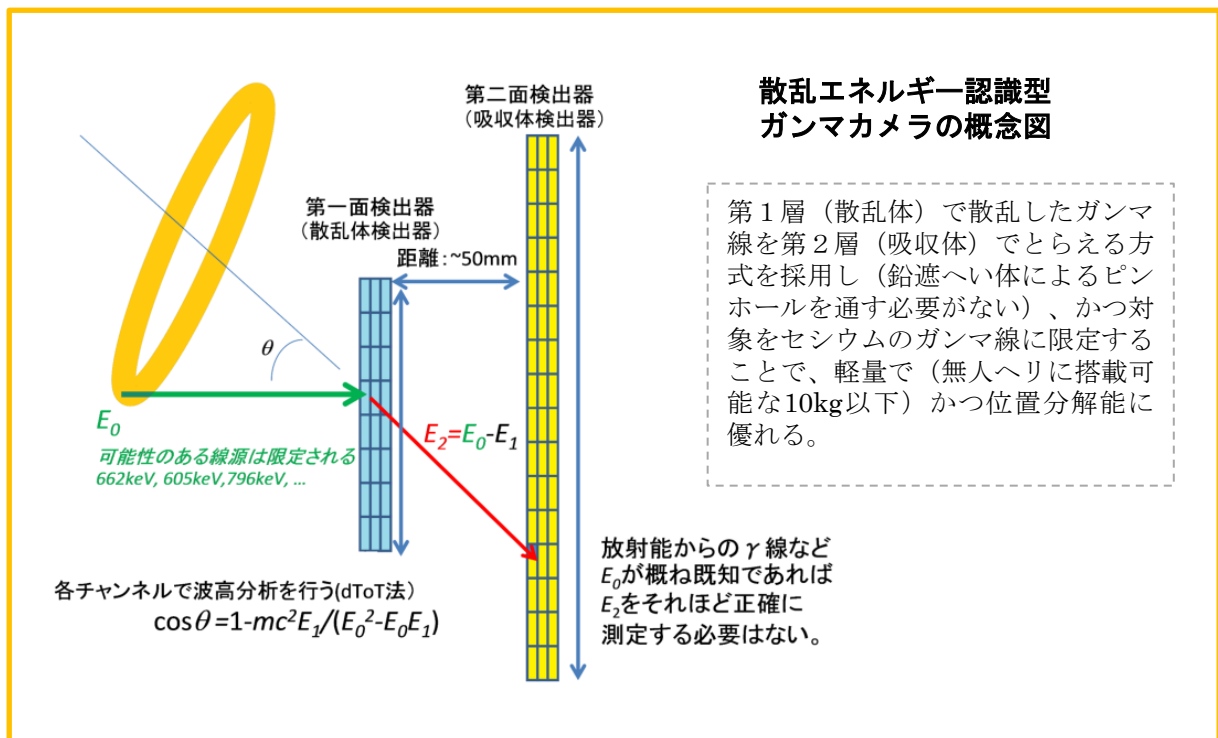


このため原子力機構と古河機械金属株式会社、東京大学、東北大学の共同研究グループは、無人ヘリコプターに搭載して放射線を測定する装置に、散乱エネルギー認識型ガンマカメラを採用。線源を放射性セシウムに限定することでシステムを簡略化した。また、散乱体シンチレータのエネルギー選択により、樹木や山の斜面などの周辺からの影響を大きく受けることなく、知りたい真下方向の情報に限定した測定が可能となった。これにGPS・地図情報を組み合わせることで、可視的かつ精度の高い放射線量マップを作成することができるようにした。

今回のガンマカメラの開発により、高精度の放射線量マップの作成が可能となり、広い範囲にわたる除染箇所の特特定除染効果の確認作業の効率化に向けて大きく前進する。

今後は検出素子を増やすことによって感度と位置分解能の向上を実現し、さらに計測回路の高集積化、検出素子の高精細化を図ることにより、位置分解能1m以内をめざす。

なお本研究開発は、科学技術振興機構の先端計測分析技術・機器開発プログラム「無人ヘリ搭載用散乱エネルギー認識型高位置分解能ガンマカメラの実用化開発」の開発課題として行われた。



バーミキュライトや風化黒雲母にセシウムが吸着 そのようすとメカニズムを解明

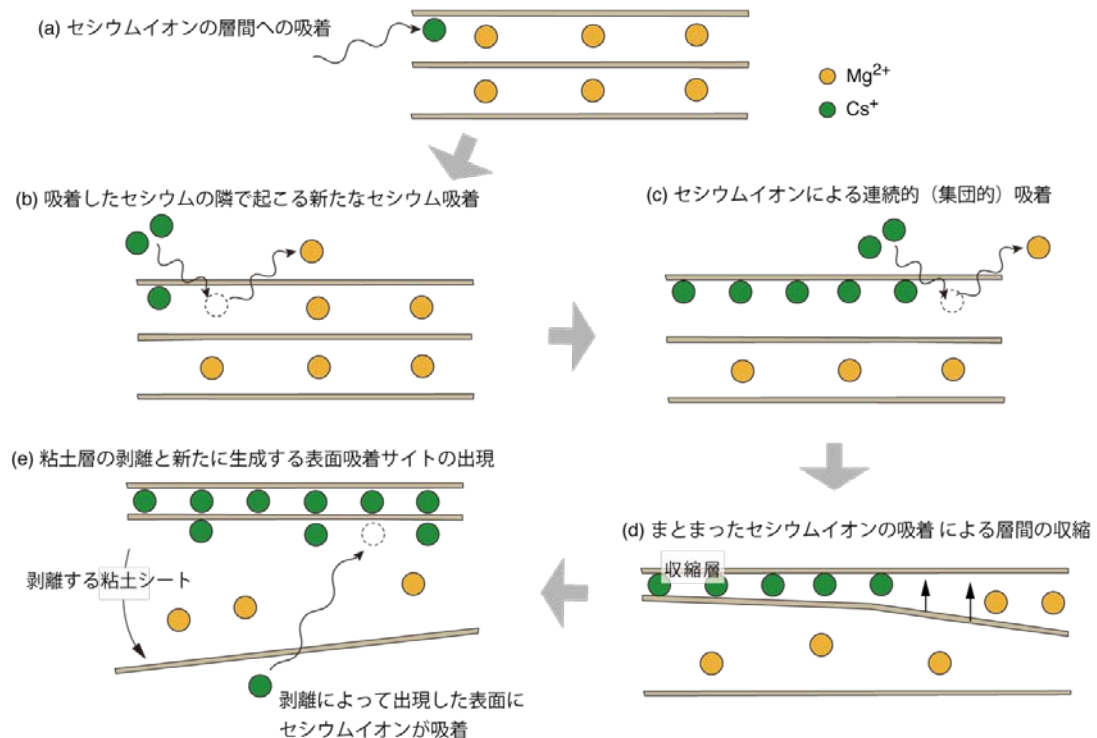
日本原子力研究開発機構などの研究グループは、バーミキュライト（＝写真右）に放射性セシウムが吸着しやすいことを突き止めた。バーミキュライトは福島県内で広くみられる粘土鉱物のひとつで、園芸用の改良土としても利用されている。これからセシウムを除去する方法が見つければ、汚染土壌の浄化や減容化へつながることが期待できる。

バーミキュライトが多量のセシウムイオンを取り込むメカニズムを解明したのは、原子力機構の元川竜平研究副主幹、矢板毅ユニット長、高エネルギー加速器研究機構

（KEK）の遠藤仁准教授、電力中央研究所の横山信吾主任研究員、山形大学工学部の西辻祥太郎助教らによる共同研究グループ。同グループはバーミキュライトにセシウムイオンが吸着するメカニズムを原子レベルで観察した結果、バーミキュライトのある場所に放射性セシウムイオンが1個だけ吸着すると、その隣にもセシウムや化学的性質の類似したイオンが吸着しやすくなるため、その粘土層に多くのセシウムイオンが取り込まれることを明らかにした。さらに、粘土層に入ったセシウムは、粘土の酸素と直接結合し、層の反対面では、負の電荷が弱まることから剥離が生じやすくなる。このことにより二つの粘土層がはがれ、それぞれの粘土層の表面にもセシウムが吸着しやすくなり、バーミキュライトに対してドミノ倒しのよう、次々とセシウムイオンが吸着していくことを解明した。



ドミノ倒しの様に吸着するセシウムイオンとバーミキュライトの構造変化



このメカニズムを原子・分子レベルで観察するために、研究グループではX線を物質に照射した際に散乱されるX線を計測することで物質の構造を調べるX線小角散乱法を採用。この方法でナノメートル（1メートルの10億分の1）レベルでパーミキュライトの構造変化を調べたところ、前ページの図のように変化していることがわかった。

これまで、セシウムイオンの吸着による粘土鉱物の構造変化を定量的に明らかにした報告は例がなく、今回の解明は福島県の環境回復問題に有用な知見を与えることが期待される。また、粘土鉱物の構造を分析するための定量的な理論モデルを独自に構築することに成功したことにより、原子力分野のみならず、環境科学、分析化学、材料科学、ナノ構造科学など、様々な研究分野への応用も期待される。

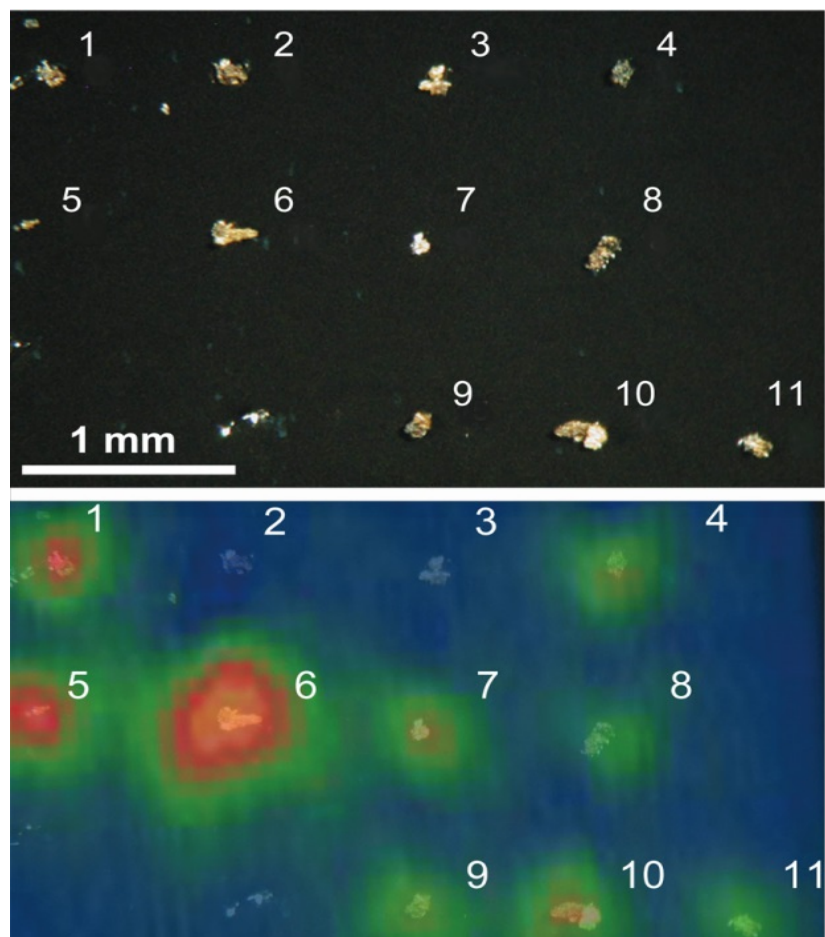
一方、東京大学の小暮敏博准教授と原子力機構の矢板毅ユニット長らの研究グループは放射線記録媒体や電子顕微鏡を使って、実土壤中で放射性セシウムがどのような鉱物粒子に吸着しているかを明らかにした。

研究グループはまず、福島県飯舘村で放射能に汚染されている土壌を採取。その土壌粒子をイメージングプレート（IP）と呼ばれる放射線記録媒体の上に乗せて、各粒子から発せられる放射線を記録した。右図がそれで、赤や緑が強い放射線を示し、放射能を持つ微粒子とそうでないものが判別できる。これによってIPを感光させた放射性微粒子を特定し、これを電子顕微鏡内に移動させてその形態や化学組成を調べることにより、放射性微粒子をいくつかの種類に分類した。

さらにその微粒子を切断して薄片にし、より高解像度の電子顕微鏡によって微粒子内の構造を詳細に解析した。

その結果、放射性セシウムは風化黒雲母に多く固定されており、さらに福島の土壌では、室内実験で提案されたような雲母微粒子の表面や端面への凝集をそれほど起こしておらず、セシウムはこの鉱物中にかなり均一に分布していることが明らかになった。なお、この風化黒雲母は、福島県東部の地質である花崗岩体の長年の風化によって、そこでの土壌に大量に含まれており、森林や水田などの土壌中の放射性セシウムのかなりの量は、この鉱物に強く固定されている可能性が高い。

今後、研究グループでは、福島県の他の地方の土壌についても同様に放射性微粒子を特定するとともに、採集した放射性微粒子を用いてセシウムの存在状態やその安定性、化学的理による脱理の可能性などを調べていく。



帰還へ向けて何をすべきか 内外の専門家が福島での今後の対策について議論



イギリスやスイスなど6か国とわが国の研究者が今年10月に福島市内で会合を開き、福島の実環境回復の現状や避難者の早期帰還へ向けた課題などについて議論した。国際セシウムワークショップと名付けられたこの会合は、福島県内で放射性物質による環境への影響を科学的に分析するとともに、除去土壌についての今後の対応やリスクコミュニケーションのあり方について検討するために開かれたもの。昨年に続き2回目の開催で、イギリス、スイス、米国、イタリア、ロシア、ウクライナの13人と国内52人の研究者が参加した。

セシウムはほとんど動かない

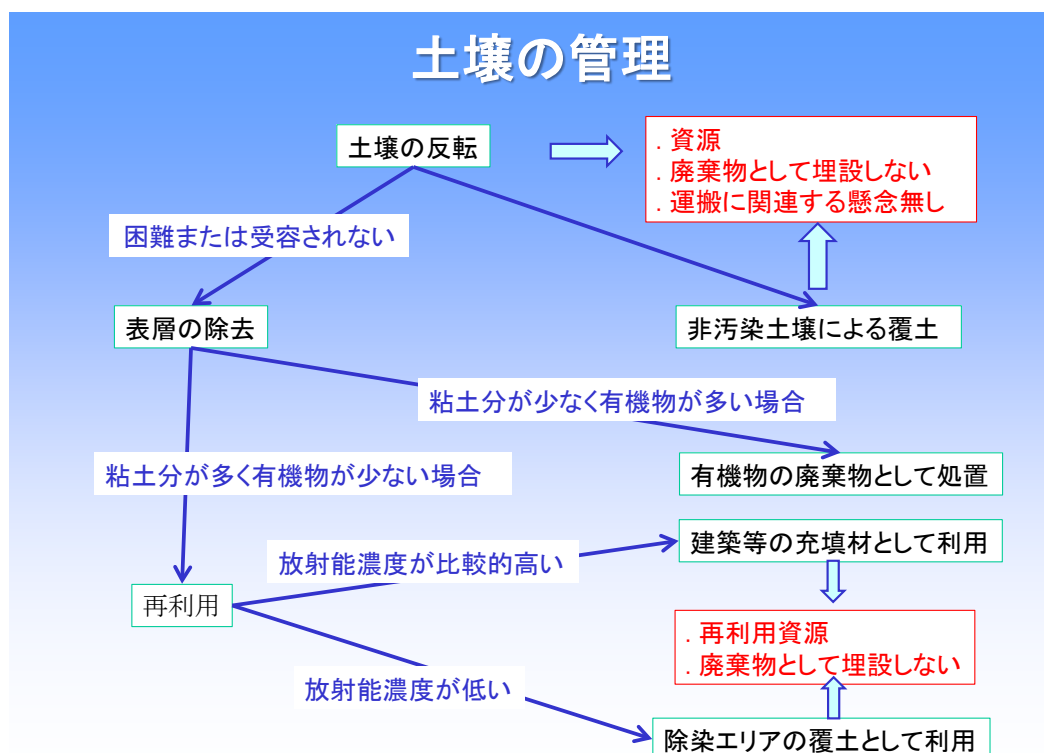
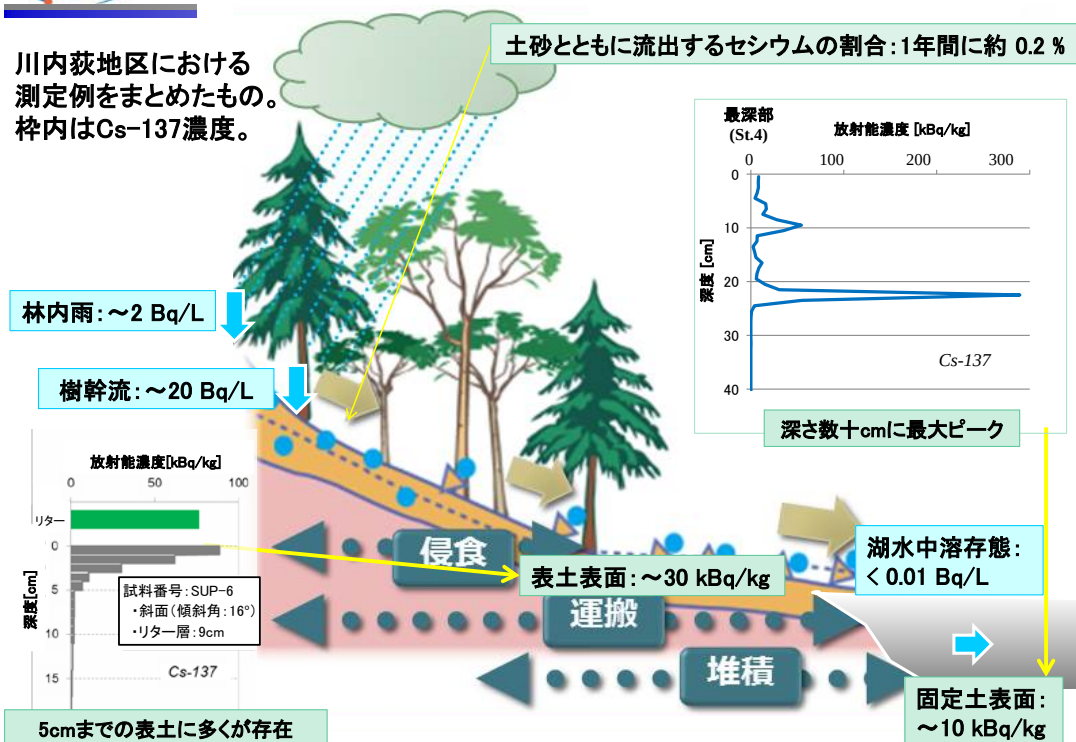
東京電力福島第一原子力発電所事故で飛散した放射性セシウムについてはこれまで、除染が相当程度行われてきたことや自然現象による浄化作用により、環境が回復されつつある。

除染されずに残る7割を占める森林などに今も残る放射性セシウムは、どの程度動くのか。それらももし動く場合には、どのように動くのか。この過程を調べるのが環境動態で、その調査や評価が進展してきている。例えば森林内の表層に放射性セシウムがある場合には、それらのほとんどは5cmまでの表土にとどまっている。土壌侵食によって放射性セシウムが移動することがあるものの、それは森林内に蓄積している全体の量の年間約0.2～0.5%でしかない。しかしながら、これらの放射性セシウムは大雨による洪水等で河川に流れ込み、湖沼等に再度蓄積されることから、これらの動きを注意深く観察していく必要がある。

このような研究結果をふまえ、会合では、短期的にはダム管理などの人為的な対策が環境回復を促すことに効果があるものの、長期的には自然減衰や環境浄化作用に期待することが妥当だということ、参加者の認識が共有された。

また、農地では農作物への放射性セシウムの移行抑制に生育初期のカリウムの堆肥が効果的であること、河川では淡水魚の放射性セシウム濃度が時間とともに低減していることが紹介された。なお、放射性セシウムの移動のモデル化についてはサンプリングに注意が必要であることと、実測データを活かしたシンプルなもの現象を適切に説明しやすいことが指摘された。さらに、そのモデルは河川敷などへの堆積挙動やそれに伴う被ばく評価にはきわめて有用であることも指摘された。

JAEA 山地森林～ダムにおける放射性セシウムの動き



森の木やきのこは継続して調査

前述のようにこれまで森林を調べた結果では、放射性セシウムのほとんどが森林内の表土にとどまっており、放射性セシウムが樹木内へ積極的に吸収される明確なデータは今のところない。しかしながらチェルノブイリの例では、事故後4～10年後に樹木内へ吸収された例が見られた。

このため会合では、それをふまえた調査をすることや、森林を保全するために行う間伐などの影響も含めた森林内の空間線量率を予測・評価して住民に伝える必要性が指摘された。また、森林の表層に留まる放射性セシウムを蓄積する性質があるきのこは、種類によって根の深さが異なるため、きのこを適切に分類して放射性セシウムの蓄積量を調査することが推奨された。

除染土壌の一部は再利用し減容化を

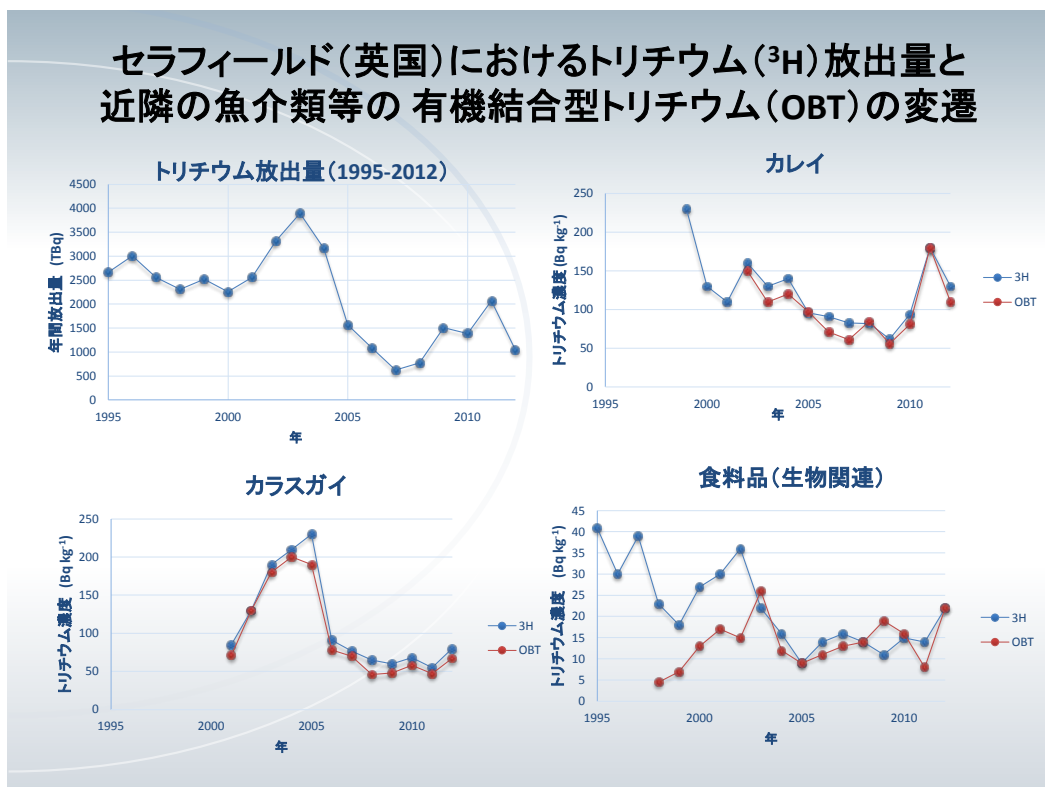
除染によって、除去土壌が発生する。この点について会合では、除染の際にできるだけ除去土壌を発生させない方法を選ぶとともに、除去土壌に含まれる粘土や有機物の含有量に応じて、処理や再利用の方法を考えることと、再利用のためには規制の変更も考慮し、住民の合意が必要であることが確認された。

トリチウム水は安全な管理の下で放出が可能

一方、福島第一原子力発電所の敷地内では、汚染水を処理した後のトリチウム水を納めるタンクの数が増大になりつつある。タンクの寿命などの問題もあり、これについては速やかな対応が求められている。この点について、イギリスでは福島の汚染水の全量を超える大量のトリチウム水が安全な管理の下、毎年沿岸に放出されてきた実績があり、それらの実績では健康へのリスクはないことがモニタリングにより立証されてきたことが報告された。これをふまえてトリチウムを含む処理水の対応については、科学的・技術的事実を住民の人たちや漁業関係者に知らせる努力をすべきであることが推奨された。

利点も欠点も過不足なく伝える

環境回復に関わる課題解決には、住民の人たちとのコミュニケーションが鍵を握る。このため、環境回復のためにどのような対策をとるかということについて、リスクとベネフィットを対で簡潔にわかりやすく住民や関係者に説明する努力を継続することが推奨された。とりわけ、わかりやすく説明する努力は除染と同じように重要であることが確認された。



海外への輸出品の線量を検査する 線量証明書を発行する検査員対象に研修を実施



原子力機構は、福島県産などの農作物や工業製品を輸出する際にその線量を測定する担当者向けに研修を行った。海外への輸出基地となっている横浜市と大阪市の港湾で働く担当者が対象。研修では原子力機構の職員3人が、放射線に関する基礎知識や検査の際の注意事項などについて説明した後、参加者と質疑を行った。

東京電力福島第一原子力発電所事故後、日本から食品や工業製品を輸出する際には、相手国が放射性物質に関する検査を求めるケースがある。このうち中東やアフリカ諸国は、福島県産の農作物や工業製品に対し、それらの放射線量率が国際安全基準や輸出国の放射線規制基準値以下であることを証明する線量証明書の発行を求めている。こうした状況をうけて、フランス政府から指定された国際船級協会連合※の一つで船舶の検査などを行っているビューローベリタスジャパン社は、日本からの輸出品を対象に線量を検査する業務を実施し、線量証明書を発行している。

今回の研修は同社からの要請をうけて、原子力機構が同社の検査担当者約100人を対象に行ったもの。研修では機構の職員が放射線基礎や放射線機器の取扱い、霧箱による放射線の飛跡観察、福島の実況、原子力機構の取組み状況について説明した。その後の質疑では放射性核種の違いと検査との関係や、基準値を超えた場合の対処などについて質問があった。

【質疑応答例】

○質問

Cs-137を対象としているが、他の放射性核種は考慮しなくて良いのか。

○回答

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故においては、原子炉の中で核分裂によって発生した様々な放射性核種が漏れ出した冷却水（水蒸気）と共に放出されていますが、主として水に溶けやすい性質のヨウ素やセシウムが広い範囲に飛散しました。飛散したヨウ素で量的に多かったI-131は半減期（放射能が半分になる期間）が約8日であり、事故後3ヶ月ほどで放射能が当初の1000分の1にまで減少しました。

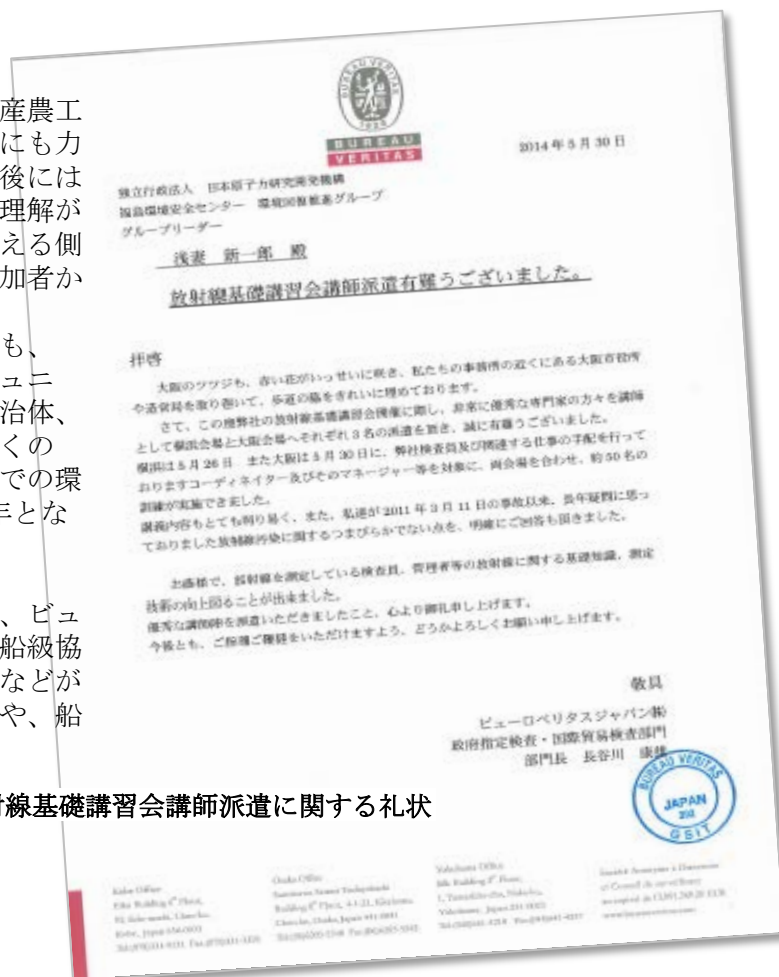
一方、セシウムについては、福島第一原子力発電所事故により放出された量が他の放射性核種に比べて多く、半減期も長いことから現在も存在しており、セシウムを評価することで他の放射性核種の存在も評価できることから、今回の原発事故に起因する汚染の検査対象として用いられています。

「正しい知識と正しい検査体制により、福島県産農工業製品の風評被害の払拭に貢献できれば」と講師にも力が入る。講習開始前には静かだった会場が、終了後には質疑応答でにぎわう。説明を受け知識が広がり、理解が深まることで、新たな疑問が生まれる。これは教える側の講師たちも同じで、いろいろな業種や分野の参加者から学ぶことも多く、新たな発見がある。

原子力機構では今後も、このような研修の他にも、「放射線に関するご質問に答える会」などのコミュニケーション活動を通して、企業や団体、学校や自治体、一般の方を含め、説明する機会を数多く設け、多くの方々の理解する手助けを行っていく。来年、福島での環境回復のための活動が5年目に入っていく節目の年となる。

*国際船級協会連合に加盟している船級協会には、ビューローベリタス（フランス船級協会）、アメリカ船級協会、イギリスのロイド船級協会、日本の海事協会などがあり、国際条約の統一解釈、各国統一規則の策定や、船舶に係る検査を行っている。

放射線基礎講習会講師派遣に関する礼状



contents

- 02 「技術と人材と設備を駆使し、廃炉を完了させる」ー 武田センター長に聞く
- 04 上空からセシウムの分布を調べる
- 06 バーミキュライトや風化黒雲母にセシウムが吸着
- 08 帰還へ向けて内外の専門家が対策について議論
- 11 輸出品の線量を検査員対象に研修

明日へ向けて

福島研究開発部門

〒100-8577 東京都千代田区内幸町2-2-2

TEL 03-3592-2111(代表)

福島事業管理部

〒960-8031 福島県福島市栄町6-6 NBFユニックスビル1階

TEL 024-524-1060 FAX 024-524-1073

独立行政法人 日本原子力研究開発機構

2015年2月 No.4

JAEA 福島
ホームページ



<http://fukushima.jaea.go.jp/>