

バックエンド週末基礎講座

福島環境修復に伴って発生する廃棄物等の管理・取り扱いの現状と課題

吉原恒一*1

1 はじめに

2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所の事故では、放出された放射性物質が福島県を中心に近隣各地に拡散し、広範囲に及ぶ放射能汚染をもたらした。事故後2年半経過した現在も放射能汚染は残っており、住民の方々に大きな不安と不便を与えている。この環境汚染を迅速に修復し、住民の方々の安全・安心な生活を復元することは、事故終息に向けた重要課題の1つである。また、修復により発生する除染廃棄物等を最終処分するまでの期間、安全に保管すると同時にそれらの減容化を図ることも重要課題である。

原子力安全推進協会では、このような状況に鑑み、平成23年10月に「福島環境修復有識者検討委員会」を立ち上げ、福島への適用性の高い修復技術を見出すための調査検討を行い、国内外で実績のある土壌汚染修復技術の中から、土壌洗浄法等の除染技術および天地返しや非汚染土壌との交換等の除去土壌を発生させない環境修復技術が福島への適用性が高い技術と判断して抽出した。

平成24年度は、この検討結果を踏まえて、上記の修復技術について、修復後の安全性確保（公衆の被ばく線量の低減化）および修復に伴う除去土壌や除染廃棄物量の減容化（一時保管や処分のコスト低減化を含む）の観点から比較検討し、それらの技術を採用した場合の修復後の安全性を評価する方法についても検討し、公衆の被ばく線量を予測するための予察的な解析を実施した。以下にその成果[1]をとりまとめて報告する。

2 福島環境修復の現況

2.1 除染の進捗と空間線量率の低減

2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故から約2年半が経過したが、福島県および近隣地域の放射性物質による汚染は、図1に示すようにセシウム-134の減衰と除染の効果によりかなり低減しているとはいえ依然として残存している。そのため2013年9月時点では、福島県全体で14万7千人もの住民が避難生活を余儀なくさせられており、早期帰還を実現するための環境修復が喫緊の課題となっている。以下にこの放射能汚染地域における環境修復の現況と空間線量率の低減状況などについて述べる。

福島県および近隣地域の除染対象地域は、福島県において国が直轄で除染を実施する「除染特別地域」と福島県内・

県外の市町村が国の支援を受けて除染を実施する「汚染状況重点調査地域」とに分けられる。除染特別地域に該当する福島県11市町村の2013年末時点の除染実施状況は、田村市の一部（市の面積458km²の内、約5km²）が100%完了し、楡葉町（宅地58%、農地69%、生活圏森林70%）や川内村（宅地100%、農地10%、生活圏森林76%）などの除染は進んでいるが、他の町村ではあまり進展していない。汚染状況重点調査地域に該当する市町村は、北は岩手県から南は千葉県までの東北・関東8県に跨る86市町村に及ぶ。福島県にある38市町村については、2013年後半から除染が急ピッチで進められており、中でもホットスポット重点除染などの優れた除染政策を推し進めてきた伊達市では、2013年末時点で、宅地、農地、生活圏森林のいずれにおいても90%以上の達成率を得ている。伊達市に続いて、川内村、広野町、二本松市などが宅地および農地において約70%から90%以上の達成率となっているが、まだ50%の達成率に満たない市町村も多い。

汚染状況重点調査地域の空間線量率については、福一発電所から20km圏外にある飯館村、川俣村、福島市の大半の地域などでは、1μSv/h前後～0.1μSv/hまでに低下しており、国の基準の1mSv/y以下の除染目標に到達し、住民の帰還が始められているところもある。一方、20km圏内にある浪江町や大熊町の一部では、2013年10月時点で、10～30μSv/h（年間被ばく線量換算で43mSv/y～130mSv/y）とまだ高い値であり、福一発電所に近接している地域の除染の進捗が遅れていることを窺わせる。

2.2 除去土壌等の一時保管と中間貯蔵施設

除染の進捗が遅れている主な理由の1つに環境修復で発

80km圏内における空間線量率マップ
(平成25年9月28日時点)(事故後30か月後)

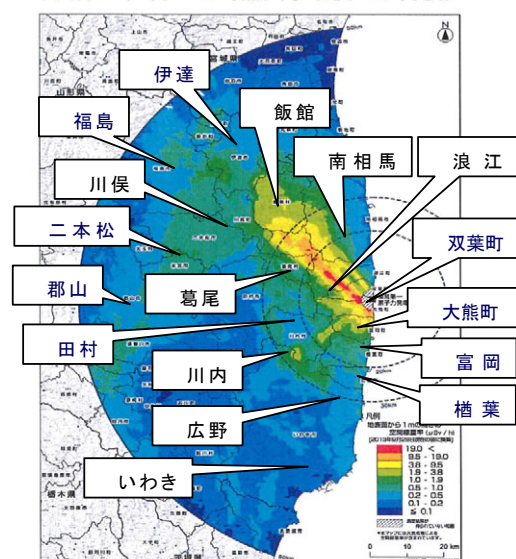
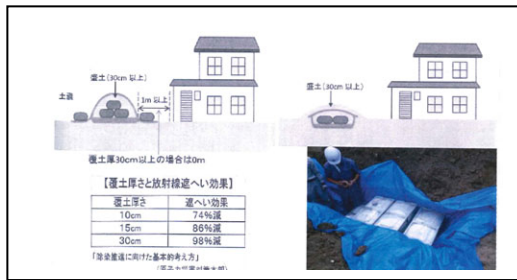


図1 事故後2年半経過時の空間線量率マップ[2]

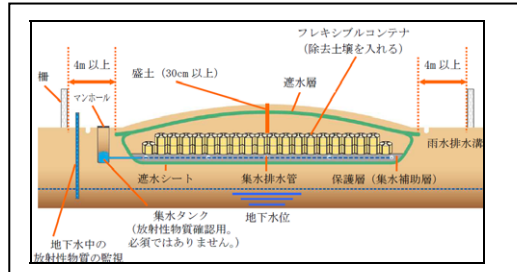
The present condition and the subject of management for the wastes generated by the environmental restoration in Fukushima by Kouichi YOSHIHARA (yoshihara.kouichi@genanshin.jp)

*1 一般社団法人原子力安全推進協会技術支援部放射線・廃棄物グループ Radiation・Waste Group, Technical Support Division, Japan Nuclear Safety Institute

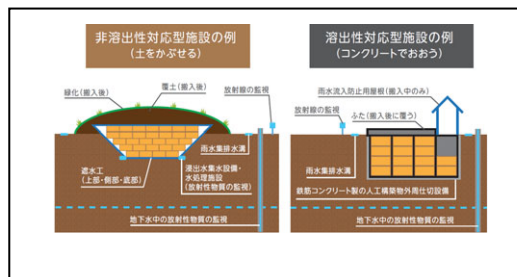
〒108-0014 東京都港区芝5-36-7 三田ベルジュビル 14 階



現場保管の例（宅地など）[3]



地下設置仮置き場の例[3]



検討中の中間貯蔵施設の概念[4]

図2 除染廃棄物等の3つの保管形態

生じた除去土壌など除染廃棄物を一時的に保管する仮置き場の確保が難航していることが挙げられる。これらの廃棄物には、大きな割合を占めるものとして、農地、公共施設や一般住宅、生活圏森林などの除染作業に伴って発生する除去土壌、草木類、がれきなどがある。また、これらの内の可燃物を焼却処分した焼却灰などがある。さらに福島県に加え、東北・関東の広範囲な地域の下水処理場から発生する下水汚泥や汚泥焼却灰などもある。これらの除染廃棄物等は、国の方針に基づき、最終的に処分するまでの約30年間において、図2に示すように現場保管、仮置き場保管および中間貯蔵施設の3つの方法によって保管されることになっている。

福島県および広範囲な周辺地域の除染を円滑かつ迅速に進めるためには、除染廃棄物等の行き先となるこれらの保管施設の設置が不可欠であり、国は福島県内に複数の中間貯蔵施設の候補地を指定し、地元との協議を始めているが、まだ設置場所の決定には至っていない。一方、福島県の各市町村においても、仮置き場の立地に鋭意取り組んでいるが、周辺住民の理解を得ることに時間を要し、仮置き場の設置が遅れている自治体もあり、環境修復を促進するためには、周辺住民の理解と協力を得ることが非常に重要な課題となっている。

3 環境修復時に発生する廃棄物の抑制方策

3.1 除染廃棄物等の発生量予測と最終処分に至るフロー

福島県内の環境修復活動に伴って発生する特定廃棄物と除染に伴う土壌・廃棄物の処理処分フローを図3に示す。特定廃棄物には、約50万tの対策地域内廃棄物と指定廃棄物がある。特定廃棄物のうち放射能が8,000Bq/kgを超える指定廃棄物は、発生量が約6万t/年と推定され、可燃物は焼却され、その焼却灰と不燃物は、さらに10万Bq/kgで区分され、以下のものは管理型処分場にて処分できるが、超えるものは福島県内の中間貯蔵施設へ送られ、約30年の中間貯蔵の期間に減容化等の処理を行い、最終処分される。

特定廃棄物のうち発生量が約50万tと推定される対策地域内廃棄物は、8,000Bq/kg以下と8,000Bq/kg超に分けられ、前者は対策地域外の廃棄物と同等の処理、後者は指定廃棄物と同等の処理が行われる。

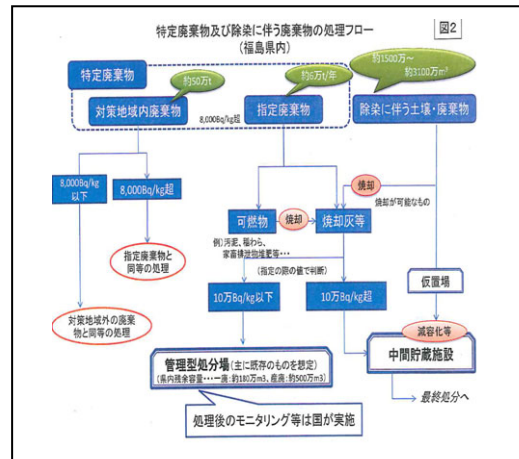


図3 福島県の除染廃棄物等の処理フロー

除染に伴う土壌・廃棄物の発生量は非常に多く、1,500万m³~3,100万m³(可燃性廃棄物の焼却後は約2,800万m³)と推定され、それらのうち可燃物は焼却され、焼却灰は指定廃棄物の焼却灰と同等の処理が行われる。除去土壌等の不燃物は仮置き場で一時保管された後、10万Bq/kgを超える焼却灰などと合わせて、中間貯蔵施設で約30年保管された後、最終処分される。最終処分する廃棄物等の容量をできるだけ軽減するために、中間貯蔵施設への搬入時あるいは中間貯蔵期間中に減容化を図ることが検討されている。

福島県以外の各都道府県内の除染活動およびその他の環境修復活動に伴って発生する除染廃棄物については、特定廃棄物が約8万t/年、除染に伴う土壌・廃棄物が約140万m³~1,300万m³の発生量が見込まれ、福島県内の廃棄物と同様に可燃物は焼却され、その焼却灰と不燃物は、10万Bq/kgで区分され、以下のものは管理型処分場で、超えるものは遮断型処分場で処分される予定である。

3.2 環境修復廃棄物の発生量抑制方策

前節で述べたように環境修復に伴って発生する廃棄物の量が膨大なものになると予想され、今後、一時保管、中間貯蔵および最終処分などの処理・処分方策を進める上で大

きな課題となっている。環境修復廃棄物の発生量ひいては最終処分量を抑制する有効な方策として、最も廃棄物の発生量が大きい除去土壌等を例にとって考えてみると次の5つの方策が挙げられる。

- ① 住民の被ばく防護の観点から不必要と判断できる除染は極力実施しない。
- ② 住民の被ばく防護の観点から必要と判断される場合においても廃棄物を発生させない修復法、たとえば天地返しなどの環境修復法の適用をまず検討する。除染を実施する場合には、所定の被ばく低減の目標を達成できることを条件として極力廃棄物の発生量が少ない除染法を採用する。
- ③ 比較的空間線量率の低い汚染地域の除染で発生した低濃度の放射性物質を含む除去土壌等は、必ずしも仮置き場経由で中間貯蔵施設へ持ち込む必要はないので、上部に覆土を施工する簡易な埋め立て方式などの現場保管を採用する。
- ④ 除染で発生した廃棄物の内、草木類などは、焼却や圧縮などの減容化を行った後に仮置き場あるいは中間貯蔵施設へ搬入する。
- ⑤ 中間貯蔵施設には、廃棄物処理設備を設け、受け入れ時あるいは貯蔵期間中に減容化・放射性物質除去回収などの処理を行い、廃棄物量を減じるとともに放射能レベルが基準以下に低下したものは極力再利用を図ることとし、最終処分量を可能な限り軽減する。

①の方策については、国の定めた住民の年間被ばく限度の目標値 1mSv/y を達成する必要があるが、それにこだわって、不必要な場所まで全面的に土壌を剥ぎ取るような除染法は得策ではなく、伊達市が採用して成果を上げているホットスポット重点除染のような除染法の採用が有効であると考えられる。

②の方策も廃棄物の発生を抑制できる有効な修復法であり、放射性物質を含まない上部の土壌層あるいは覆土の厚さが 30cm 程度あれば安全なレベルに空間線量率を下げる事ができる。ただし、修復地の直上付近で居住、農耕、牧畜などが営まれる場合は、所定の制度的管理、たとえば井戸水利用の制限や一定期間は長根作物の栽培の見合わせなどを行うことが望ましい。同時にそのような制度的管理を前提においた修復地において、安全性の評価（長期の被ばく線量評価）を実施し、その結果を周辺住民に十分に説明しておく必要もある。

③の方策を採用する場合も②と同様に生活圏の近くに放射性物質を含む廃棄物が残留する（図2の上段の図参照）ことになるので、安全性の評価とその結果の住民説明は必ずやっておく必要がある。

④の方策は、現在も可能な限り実施されているが、可燃物の発生量は、土壌に比べて少ないので、全体的には大きな減容効果が得られにくいことに加えて、焼却処理時の放射性物質の再飛散や高濃度の放射性物質を含む焼却灰の安全な処理・処分などの課題を解決する必要がある。

⑤の方策は、最終処分量を軽減するために中間貯蔵施設内で実施する廃棄物の処理方策であるが、中間貯蔵の形態は図2の下段に示したように非溶出型と溶出型のどちらに

ついても地下に埋設する方式が採られる予定であるので、できる限り搬入時に減容化処理を行い、地下施設への埋設を行う前に廃棄物量を減じておくことが得策である。

このような汚染土壌の減容化方策としては、国がさまざまな技術について除染モデル事業の中で比較検討しているが、扱う物量が膨大なことを考えると化学処理的な技術よりは、土木・鉱山分野で採用されている技術の方が減容化効果を高める期待が持てると考えられる。図4に金属鉱山の選鉱工場でよく用いられているサイクロン分級とフローテーション（浮遊選別法）を組み合わせた除去土壌等を減容化する実証試験の事例を示す。この除染技術は、土壌洗浄法の一つで、ハイドロサイクロン分級法、擦りもみ洗浄法およびフローテーションの多段処理により、除去土壌等の減容化処理を行い、量的には約1/3～1/5程度にまで減容化した濃縮残渣中に放射性セシウムの約90%を捕集させて回収除去するものである。

以上述べた①～⑤の廃棄物減容化方策を採用した場合に、図3の除染廃棄物などの処理フローで示した物量がどのように改善され、最終処分量をどこまで低減できるについて、有識者検討委員会で試算した結果を表1に示す。この検討で設定した条件限りではあるが、適切な減容化方策の採用により福島県内の廃棄物は、2,800万m³の発生量予測が最終処分時には、150万m³に減容される可能性があること、および福島県外の廃棄物も量的には大半を占める除去土壌等の廃棄物は、焼却灰などの放射能濃度が10万Bq/kgを超えるもの（遮断型処分場に処分）を除いて、大半が管理型処分場への処分あるいは再利用化できる可能性があることを予見する試算結果が得られた。

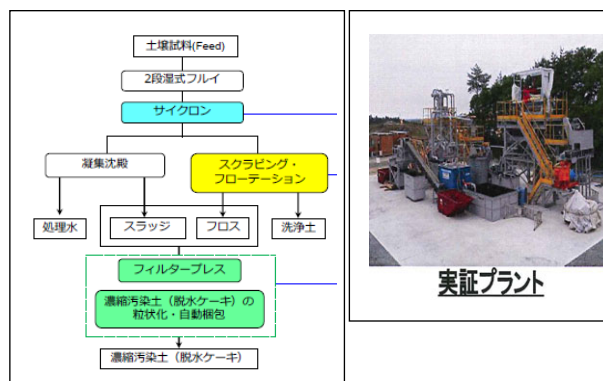


図4 除染技術実証事業の試験プラント（福島県広野町）における汚染土壌の洗浄処理[5]

表1 除去土壌の減容化による最終処分量の抑制効果[1]

除去土壌の汚染度による区分	①汚染度が低い除去土壌	②汚染度がやや低い除去土壌	③汚染度がやや高い除去土壌	④汚染度が高い除去土壌
時間軸	特措法施行時 (H24.1.1) の濃度 ～8千Bq/kg	～3千Bq/kg	8千Bq/kg ～10万Bq/kg	3万Bq/kg ～10万Bq/kg
	中間貯蔵の開始から30年後 (H57.1.1) の濃度 ～3千Bq/kg	～8千Bq/kg	3千Bq/kg ～8千Bq/kg	8千Bq/kg ～3万Bq/kg
減容化の対象土量	1,300万m ³	～	～	～
減容化の技術	除染での除去土壌の発生量を低減	天地返し、土壌の入れ替え	時間経過に伴う濃度の減衰を管理	分級・洗浄法 熱・化学処理法
対象土量	福島県外 800万m ³	～	250万m ³	250万m ³
減容化の対象土量	可能な範囲	～	全量を対象	～
減容化後の最終処分の対象土量	福島県外は少量の管理型処分 福島県内は少量	～	90万m ³ (内、減容化後の高濃度残渣40万m ³)	60万m ³ (内、減容化後の高濃度残渣10万m ³)
課題	除去しない場合の安全性の確認とその説明	～	減容後の低濃度土壌の扱い	減容化後の低濃度土壌の扱い 高濃度残渣の扱い 残された150万m ³ のさらなる低減

4 合理的な環境修復法の安全性評価方法の検討

4.1 評価方法の検討

(1) 安全評価手法と評価シナリオの選定

廃棄物の発生量を抑制する合理的な環境修復法を行った場合には、汚染した場所の修復後の状態としては、汚染土壌等が元の場所に残留する場合と一時保管場所や仮置き場へ移動され、元の場所に汚染土壌が残留しない場合のケースがある。ここでは、前者のケースを想定して環境修復地の安全性を評価する方法について述べる。

環境修復を行った際に、その場所の近傍に放射性物質の一部または全部が残留するケースとしては、以下のような5つの状態が想定される。

- ・元の自然状態（参照条件として修復前の放射性セシウムによる汚染がある状態を想定したもの）
- ・汚染地の表土剥ぎ取り除去等（汚染土壌の大部分を除去した後に、その一部が元の場所に残留している状態）
- ・天地返し（表面の汚染土壌を深部の未汚染土壌と入れ替えた状態）
- ・深耕（深部まで耕気、攪拌して放射性物質の平均濃度を低減させた状態）
- ・地下への埋設（トレンチ等を掘削して埋設し、その上を覆土した状態）

上記の5つの環境修復地の状態は、いずれも共通して放射性物質が生活環境に近い地表および浅地中に存在する状態であり、このような状態における安全性の評価、すなわち、その付近に居住し、農耕等を営み、農産物等を摂取する住民の被ばく線量評価を行うには、浅地中トレンチ処分などの安全評価手法[6]、災害廃棄物の処理処分における評価シナリオ[7]などの評価手法が適用できると考えられる。これらの評価手法を検討し、ここでは福島における浅地中への埋設などの簡易な環境修復と類似性が高い浅地中トレンチ処分の安全評価手法を参考にし、居住シナリオ、農耕シナリオ、農畜産物摂取シナリオ、井戸・河川水飲用シナリオなどを適用して安全性の評価を行うこととした。

(2) 評価モデルの設定と評価解析条件

合理的な環境修復を行った修復地の安全性を評価するモデルの事例として、今回は、農地（居住・農耕があるケース）を対象にして、廃棄物を発生させない環境修復法を採用した場合の以下の4つの修復地のモデルを想定し、予察的な被ばく線量評価解析を行った。

- ・環境修復前の農地のモデル（対照モデルとして設定）
- ・天地返し完了後の跡地のモデル
- ・反転耕完了跡の跡地のモデル
- ・深耕完了後の跡地のモデル

上記の修復地のモデルにおいて想定される被ばく経路としては、図5に示すように外部被ばく（地表数cmまたは地表15cmの土壌層に放射性物質が存在する場合の無限平板からの外部被ばく）、内部被ばく（ダスト浮遊時の吸入被ばく、農作物に経根吸収されたものを食用にした場合の経口摂取被ばく、近傍河川に放射性物質が流入した場合の河

川水飲用被ばくおよび水産物摂取被ばく）を想定した。また、この予察的な被ばく線量評価解析に用いた主な評価パラメータは以下のとおりである。

- ・修復対象地の規模：100m×100m×0.15m（放射性Csの分布深さ15cm）
- ・修復対象地での放射性Cs濃度：1,000Bq/kg（ただし、Cs-134/Cs-137=0.578）
- ・環境修復工：天地返しの深さ（覆土厚さ）：50cm
- ・環境修復工：深耕の深さ（掘削深さ）：50cm（修復工実施前、実施後ともに、Csは土壌内に均一に分れていると想定）、Csの放出率：0.01
- ・Csの土壌の分配係数：0.27m³/kg
- ・降雨浸透水量：0.4m³/m²/y、地下水流速：1m/day

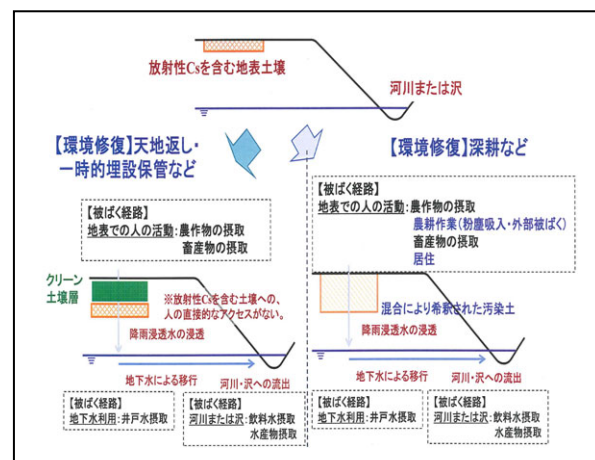


図5 合理的な修復法を採用した跡地の被ばく経路[1]

4.2 安全性の評価結果

農地を対象として、天地返し、反転耕および深耕の3つの合理的な環境修復法を採用した場合のそれぞれのモデルにおける予察的な被ばく線量評価結果を、表2に示す。表中の被ばく線量比の値は、修復を実施する前の各シナリオによる居住者等の被ばく線量を1とした場合の相対値である。

この予察的な被ばく線量評価解析結果を考察することにより合理的な環境修復法を採用した跡地（農地）の安全性に関して、以下に示すような知見が得られた。

- ・居住シナリオおよび農耕シナリオの解析結果からは、被ばく線量は外部被ばく線量が支配的であり、この外部被ばく線量は、放射性セシウム（とくにCs-134）の減衰により時間が経過するほど小さくなること、天地返しを採用した場合には地表土壌に放射性セシウムが存在しないことから吸入による被ばくは発生しないこと、反転耕では、地表に放射性セシウム濃度が低い土壌が存在するため被ばく線量が天地返しよりは高く深耕よりは低くなることなどがわかった。
- ・地下水移行シナリオをベースとする灌漑農作物摂取シナリオ、井戸水飲用シナリオおよび河川水産物摂取シナリオの解析結果から、地下水による放射性セシウム

移行が関与する被ばく経路では、被ばく線量は修復地での居住や農耕などによる被ばくと比較して十分に小さいこと、またこの解析では不飽和層の放射性セシウムの移行を保守的に評価しているため、修復工による被ばく線量の明確な違いは見られないことなどがわかった。

表 2 合理的な環境修復法を採用した場合の各シナリオにおける被ばく線量評価結果（予察的解析）[1]

被ばくシナリオ	修復による被ばく線量の低減 (修復実施前後の線量比)			
	修復前	天地返し	反転耕	深耕
居住(外)	1 (3.5E-1)	0.0066 (2.3E-3)	0.075 (2.6E-2)	0.37 (1.3E-1)
農耕(外)	1 (9.9E-2)	0.0066 (6.5E-4)	0.075 (7.4E-3)	0.37 (3.6E-2)
農作物摂取 (内)	1 (2.2E-1)	0.10 (2.2E-2)	0.13 (2.9E-2)	0.30 (6.6E-2)
畜産物摂取 (内)	1 (1.5E-1)	0.10 (1.5E-2)	0.13 (2.1E-2)	0.30 (4.6E-2)
灌漑農作物 摂取(内)	1 (1.6E-4)	1 (1.6E-4)	1 (1.6E-4)	1 (1.6E-4)
井戸水摂取 (内)	1 (2.4E-5)	1 (2.4E-5)	1 (2.4E-5)	1 (2.4E-5)
河川水産 物摂取(内)	1 (1.9E-8)	1 (1.9E-8)	1 (1.9E-8)	1 (1.9E-8)

注 (外)：外部被ばく、(内)：内部被ばく
(3.5E-1) = $3.5 \times 10^{-1} \text{mSv/y}$

5 まとめ

環境修復を迅速に進めるためには住民の方々の理解と協力が不可欠であり、そのためには科学的な裏づけのあるわかり易い説明資料を用いる対話活動が必要である。上記の対話の中には、仮置き場や中間貯蔵施設の必要性およびそれらが安全に運営されることを必ず含める必要がある。

環境修復によって発生する除去土壌等の廃棄物は膨大な量になり、無策のままでは大量の廃棄物を処分せざるを得なくなるので、安全かつ合理的な修復法や大量の土壌を効率よく減容化できる技術が求められる。比較的汚染地域の合理的な修復法として、環境省のガイドライン[3]でも推奨している天地返しや除去土壌の洗浄による減容化などの修復技術が、安全性の面でも福島への適用性の高いものであるが、修復を迅速に進めるためには、そのことをわかりやすく示すことが重要である。

合理的な修復法を採用した場合は、当該場所における安全性の確認を行い、住民の方々に説明する必要が生じるケースも考えられるが、その方法としては、放射性廃棄物の処分(トレンチ処分等)で使われる安全評価手法が有効である。このような安全評価手法を用いて、天地返しなどの環境修復を実施した修復地をモデル化して被ばく線量評価の試算解析を行った結果、今回想定したモデルと入力パラメータ限りであるが、適切な制度的管理を併用することにより修復後の安全性は確保できる見通しが得られた。

参考文献

- [1] 一般社団法人原子力安全推進協会：福島環境修復有識者検討委員会による除染技術等の調査検討(第3報)「安全かつ合理的な環境修復技術とその技術の安全性評価方法紹介」、2013年7月24日HP掲載(<http://www.genanshin.jp/>)
- [2] 原子力規制庁：東京電力福島第一原子力発電所事故から30か月後の航空機モニタリングによる空間線量率について、平成25年12月25日
- [3] 環境省：除染関係ガイドライン第4編 除去土壌の保管に係るガイドライン(第2版)、2013年5月(<http://josen.env.go.jp/material/index.html>)
- [4] 環境省：東京電力福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質による環境汚染の対処において必要な中間貯蔵施設等の基本的考え方について、2011年10月29日
- [5] 環境省：減容率の最適化および濃縮残渣処理の自動化を特徴とする土壌洗浄技術の実証(実施者：清水建設(株))、平成23年度除染技術実証事業概要書付録1、2012年8月
- [6] 社団法人日本原子力学会：“日本原子力学会標準 浅地中トレンチ処分の安全評価手法”，AESJ-SC-F024:2013(2014)
- [7] 環境省：指定廃棄物処分場に関する安全性の確保について、災害廃棄物安全評価検討会(第15回)、配布資料2-1、2012年12月

