

1.2 放射性物質による環境汚染とその除染

(1) 放射性物質による土壌環境と水環境の汚染

汚染の発生

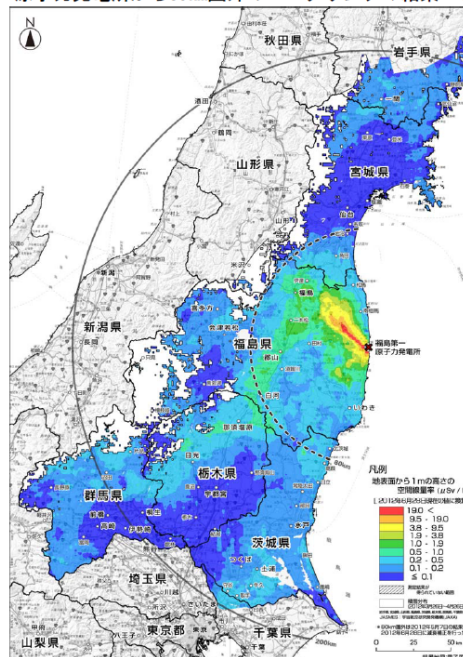
福島第一原子力発電所事故時の1号機から3号機のベント操作、1号機及び3号機の原子炉建屋の爆発、並びに2号機の格納容器の損傷によって多量の放射性ヨウ素やセシウムが環境中に放出され、福島県を主として東日本の広範囲に放射性物質による汚染が生じた。特に、3月15日から16日にかけての放射性物質の放出は最大であり、発電所の北西方向と福島県中通りに沿って比較的高い環境汚染をもたらした。また、一部は千葉県我孫子市、柏市、流山市などに到達し、これらの地域にホットスポット的な汚染域がモニタリング¹⁾で確認されている。図1.2-1に文科省により公表された地上1m高の空間線量率を示す。

汚染地域の特徴

福島県の汚染地域の面積を1986年4月に起きたチェルノブイリ発電所4号機爆発事故による面積と比較したものを図1.2-2に示す。

同縮尺のため比較は容易であるが、今回の事故による福島県の汚染地域と1986年4月に起こったチェルノブイリ発電所4号機爆発事故による汚染地域について、セシウム-137で汚染された面積を比較すると、今回の事故で生じた汚染地域はチェルノブイリ事故による汚染地域²⁾の数の一分の一の面積である。また、チェルノブイ

航空機モニタリングの結果（地表面から1m高さの空間線量率）
（平成24年6月28日時点）（第5次航空機モニタリングの結果に
福島第一原子力発電所から80km圏外のモニタリングの結果^{※1}を追加）



※1: 福島第一原子力発電所から80km圏外の測定結果は、第5次航空機モニタリングの測定結果の時点（平成24年6月28日時点）の値に減衰補正。風雨等の自然環境による放射性の移行の影響は考慮していない。
※2: 実線で囲われた白色の領域は積雪のあった箇所を表しており、当該地域及びその周辺における空間線量率は、雪の遮蔽により、雪が無い時と比べて減少している可能性がある。
※3: 本マップには天然核種による空間線量率が含まれていない。

図 1.2-1 航空機モニタリングによる地表面上
1mにおける空間線量率(2012年6月28日時点)

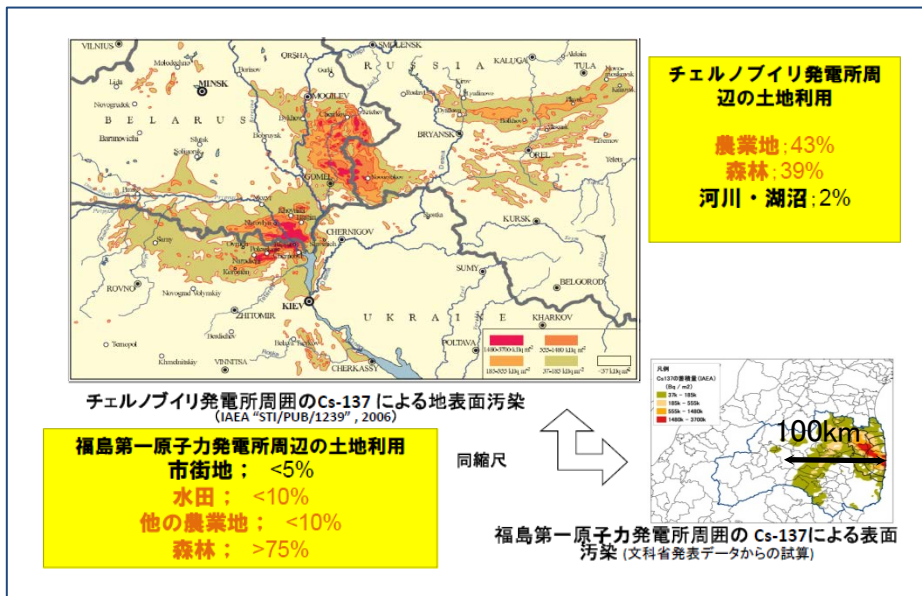


図 1.2-2 チェルノブイリ発電所事故と福島第一原子力発電所事故による汚染地域の比較

リ事故では炉心の爆発が生じたため炉心内に存在するプルトニウムなどの核燃料物質を含む放射性核種が広く飛散したが、今回の事故では、炉心は高温になり溶融したものの炉心自体の爆発を免れたため、比較的揮発しやすいセシウムやヨウ素の放射性核種がその大部分を占める。その他放射性核種について、ストロンチウム-90などが今回の事故による汚染地域で確認されている³⁾が、測定されたストロンチウム-90の濃度はセシウムに比較して数桁低いことから、空間線量率の低減に当たってはセシウムの除去が基本となる。また、同図にはチェルノブイリ近郊の土地利用の状況を示したが、チェルノブイリでは森林面積が39%であるのに対し、福島県では70%以上が山林で占められており⁴⁾、この点で汚染状況は異なっている。

除染範囲の推定

これらの汚染に対し政府は、空間線量率の低減に当たっては、モニタリング結果に基づいて年間追加被ばく線量を長期的には1 mSvまで低減することを目標としている。環境省環境回復検討会に提出された資料⁵⁾によれば、年間追加被ばく線量が5 mSv以上の地域を面的除染及び1~5 mSvの地域をスポット除染（森林を除く）するときの除染対象面積の推定結果として、面的除染を必要とする建物用地51 km²、幹線交通用地13 km²、農地349 km²及びその他用地23 km²、並びにスポット除染を必要とする面積642 km²と示されている。また、5 mSvを超える森林について10%から100%を面的除染したケースの面積が試算されており、例えば、森林を100%除染した場合には上記面積と合わせ2419 km²と推定されている。

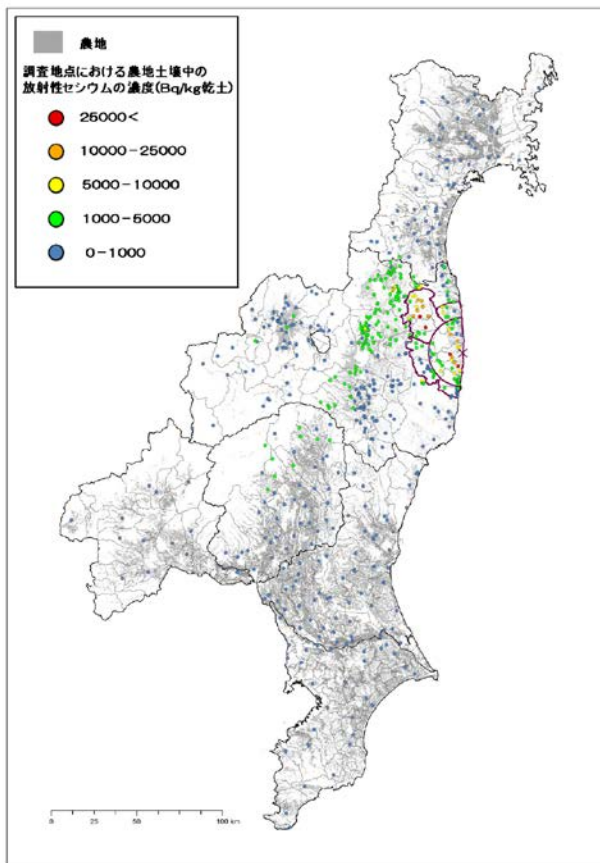


図1-2 農地土壌の放射性セシウム濃度分布図（調査地全域）

のセシウム-134 とセシウム-137 の沈着量の合計

土壌汚染

土壌の汚染についてもモニタリング⁶⁾が実施されており、空間線量率に比例した土壌汚染が確認されている。図1.2-3に2012年6月28日時点での地表面へのセシウム-134とセシウム-137の沈着量の合計を示す。また、表1.2-1には福島県におけるセシウム濃度区分ごとの水田、畑地の面積を示す。この表より1000Bq/kg以上の水田と畑地の合計は62129ha（約621km²）、5000Bq/kg以上は8307ha（約83km²）に及んでいると試算されている。また、沈着したセシウムはこれまで多くの測定がなされているが、未耕地の場合、深さ5cmまでの表面層に90%以上（参考図1.2-1）がとどまっている⁷⁾ことがわかっている。

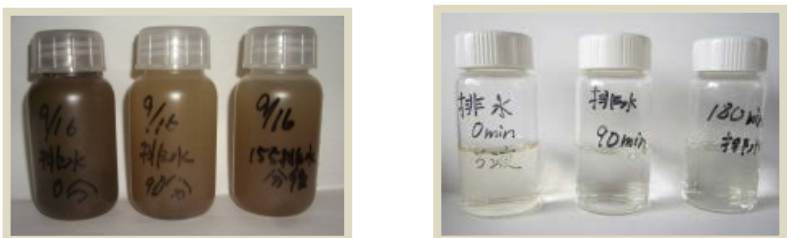
また、これまでの試験からセシウムは土壌中の粘土粒子に固着しており、土壌中に含まる水分には極めて溶解しにくいことが分かっている。図1.2-4には原子力学会クリーンアップ分科会が実施した水田の代かき除染試験^{8), 9), 10)}の成果の一部を示す。ここでは、

水田の除染のため代かき試験で排水した水（水と同時に土壌粒子も排出したため濁水となっている）を、一定時間静置した後に、そのろ水の放射能濃度を測定した結果、水分中の放射能濃度は検出限界以下であった。このようなことから、土壌除染の基本としては、放射性物質を吸着している微細な粒子自体の除去が効果的であることが分かる。

表 1.2-1 福島県の農地土壌中の放射性セシウム濃度区分ごとの面積（推定値）

放射性セシウム濃度 (Bq/kg)	水田 (ha)	畑 (ha)
0～1000	59942	22022
1000～5000	39164	14658
5000～10000	1958	796
10000～25000	2575	751
25000～	1646	581

出典：農林水産省農林水産技術会議事務局，「農地土壌の放射性物質濃度分布マップ関連調査研究報告書（第3編）」（2012年3月）



排水ろ過前 排水ろ過後

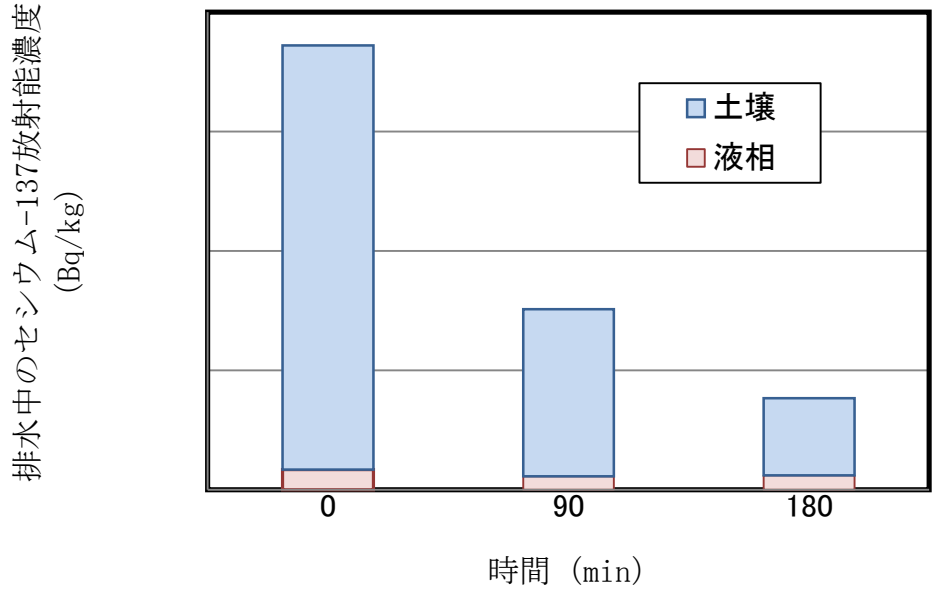


図 1.2-4 代かき試験排水中の放射性セシウムの測定試験

水環境汚染

広域的な水環境として、人間社会環境における水道、下水道等、自然環境における河川・湖沼等での汚染が想定され、国、地方自治体等により定期的に水や底土等の放射線モニタリングが実施された。事故後の初期には水道水等からヨウ素-131が検出され、緊急時における水道水中放射性物質の濃度目安値として、原子力安全委員会から「飲食物摂取制限の指標及び食品衛生法上の暫定規制値」（2011年3月19日、3月21日）が示された。地方自治体ではペットボトルの飲料水配布や水道水の摂取制限等が実施され、事故から数か月余りで、これらの摂取制限等は解除されたが、暫定値設定に関する説明不足から不信感、不安感が残され、環境水等のモニタリングを継続する必要性が示された。

厚生労働省は、同年6月に「今後、再び東電福島第一原発から大気中への放射性物質の大量放出がない限り、放射性物質の影響により、水道水の摂取制限等の対応が必要となる蓋然性は低い」との報告をまとめ（厚生科学審議会生活環境水道部会了承）、食品中の放射性物質の新たな基準値が示された（2012年4月1日施行：規制対象核種は、原発事故により放出されたと想定される核種のうち半減期1年以上の全ての核種を考慮、許容年間線量5 mSv/yを1 mSv/yに引き下げて試算）。事故後数か月で、放射性ヨウ素は環境水、底土ともに減衰、希釈効果によりほぼ不検出となった。放射性セシウムは、環境水からはほとんどの地点で不検出となり、底土あるいは懸濁物質等に高濃度のセシウムの存在が確認され、水中に懸濁している微細粒子を1ミクロン程度のフィルターでろ過することにより、放射性セシウムはほぼ除去されることが分かった。今後、湖沼、河川等の底地土等への沈着、移動挙動等、その周辺にける植物・生物等への移行・濃縮等も含めて、適切な監視を継続して行くことが必要と推察される（参考図1.2-2及び1.2-3に河川等の空間線量率の分布状況を示す）。

(2) 除染

①除染の実施制度と体制

1.2(1)に記載したとおり、政府は年間追加被ばく線量を長期的には1 mSvまで低減することを目標としており、また食品中の放射性物質の新基準値として2012年4月1日から一般食品については100 Bq/kgと設定している（詳細は1.1項参照）。このためには、宅地、農地ばかりでなく広域的な生活圏等（公共施設、道路、森林の一部等）の除染が必要となる。2011年に内閣府が主体となって除染モデル事業を推進し、宅地等における除染技術の評価を日本原子力研究開発機構に委託して実施した。また、「平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境汚染への対処に関する特別措置法」（2011年8月30日法律第110号）（以下「特措法」という。）を施行し、除染や福島第一原子力発電所事故に起因する放射性物質で汚染した廃棄物の取扱いに関する制度や基準等を制定した。そこでは除染特別地域（旧、警戒区域と計画的避難区域）と汚染状況重点調査区域を指定した。前者は国直轄で除染を行い、後方で年間追加被ばく線量が1 mSvを超えるところは市町村が除染を行うこととされた（但し、「国、都道府県、市町村及び環境省令で定める者が管理する土地並びにこれに存する工作物等にあつては、国、都道府県、市町村及び環境省令で定める者が除染等の措置等を行う、また農地は市町村の要請により都道府県が除染等の措置等を行うことができる」としている）。

このため、環境省は2012年1月1日に環境省福島環境再生事務所を設置して、国直轄地の除染計

画の策定と除染事業，市町村の除染計画の作成等への協力を行っている。また，環境省は新たな避難指示区域ごとの除染工程表を策定して，2012年第1四半期から避難指示解除準備区域における宅地の本格的な除染を実施，あるいは計画している（学校，役場等公共施設では除染をモデル事業として実施しているケースが多い）。一方，市町村においても，特措法に基づき各地域の実情を踏まえ，優先順位や実現可能性を考慮した除染計画を策定するとともに，それに基づいた除染実施計画を策定している。この除染実施計画を実施する場合には，環境省が2011年12月に公表した除染関係ガイドラインに沿って，そこに記載された除染方法から適切な方法を選定することになっている。当該ガイドラインには，汚染箇所の調査（測定点の決定及び測定）や建物など工作物の除染等の措置について，屋根，雨樋・側溝，外壁，庭木，柵・塀，ベンチや遊具等を対象として具体的な方法が記載されている。また，道路の除染等の措置について，側溝，舗装面，未舗装の道路等の除染方法について記載されている。さらに，土壌の除染等の措置について，校庭や園庭，公園，農用地の除染方法について記載されているとともに，草木の除染等の措置について，芝地，街路樹など生活圏の樹木，森林等の除染についても具体的な方法が記載されている。

②除染技術

除染技術についてはチェルノブイリ発電所事故で採用された除染技術などを参考に，2011年から2012年にわたって内閣府が日本原子力研究開発機構に委託して，年間20 mSv以上の高線量地域

**表 1.2-2 内閣府のモデル事業で実施された除染技術の効果と
チェルノブイリ発電所事故で適用された除染技術の比較**

(IAEA STP/PUB/1239 (2006))

除染対象	除染技術	線量低減係数
窓	洗浄	10
壁	サンドブラスト	10 - 100
屋根	ホース洗浄／サンドブラスト	1 - 100
庭	天地返し	6
庭	表土除去	4 - 10
樹木・植え込み	刈り込み／伐採	～ 10
街路	掃き掃除／真空吸引	1 - 50
街路(アスファルト)	アスファルト上張り	> 100

家屋(屋根)
 ・ブラシ掛け、ふき取り：0-70%
 ・高圧洗浄：10-30%

家屋(雨樋)
 ・拭き取り：30-90%
 ・高圧洗浄：60%程度

屋外(庭)
 ・苔/雑草/表土すきとり：60%程度以上
 ・土壌剥き取り：60-90%程度

屋外(芝)
 ・大型芝剥き機：50-80%程度
 植栽、道路、運動場などの結果有

にある宅地や宅地周りの森林などを対象にモデル事業⁶⁾を実施した。このモデル事業では，市町村をグループA（南相馬市，川俣町，浪江町，飯舘村），グループB（田村市，双葉町，富岡町，葛尾村），グループC（広野

町，大熊町，楡葉町，川内村）に分けて除染技術の実証を行った。また，チェルノブイリ事故の汚染除去で実施した除染の効果などのデータも整理されている。表1.2-2にはチェルノブイリ事故と今回モデル試験で実施された除染技術の効果例を示す。このように表面汚染密度の低減効果は，同じ対象物でもその効果は大きく異なっており，その材質，表面状況や付着状況等に大きく依存するものと考えられる。また，いずれの場合も高い除染率が得られないのは，対象となるセシウムのγ線の影響は線源から数十メートルに及ぶためその場所のみの除染では効果が限られるからであり，効果的な除染を行うには，そのポイントだけでなく面的に広く除染することが必要であることを示している。また，同じ除染技術を適用してもその効果が大きく異なるため，除染技術の選定にあたっては，場所，対象物の特徴に応じて個別に判断して，除染方法，除染箇所等を決めることが重要であることが分かる。

農水省では、2011年度に農地における除染技術、放射性セシウムの土壌からの分離・除去技術及び汚染された稲わらや牧草等の減容化技術、並びに放射性セシウムの移行抑制技術の3分野について「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」及び「森林・農地周辺施設等の放射性物質の除去・低減技術の開発」を実施した。表1.2-3にそれら3分野の具体的実施項目を示す。また、2012年度にも除染、減容関連課題について実証試験を継続あるいは新規課題として実施した。また、同省林野庁所管の

表 1.2-3 2011 年度農水省が実施した農地除染，移行抑制技術等の開発課題

農地における除染技術	ブラウによる反転耕のすき込み精度の向上と影響評価
	既耕耘農地の放射線量低減のための低コスト客土及び土壌攪拌技術の高度化
	農業用施設、畦畔、農道等の除染技術の開発
	放射能汚染地域内水田等における除染作業用トラクタおよび作業機の開発
	圃場での雑草等の処理にともなう放射性セシウムの飛散防止技術の開発
放射性セシウムの土壌からの分離・除去技術及び汚染された稲わら、牧草等の減容化技術	放射セシウムで汚染された土壌の洗浄と環境改善
	蒸煮・爆砕反応を利用する農地土壌から放射性セシウムの分離・除去技術の実証研究
	移動型常圧過熱水蒸気による稲わらの炭化減容化とセシウム除去システム
放射性セシウムの移行制御技術など	麦類、ナタネ及び秋冬野菜における放射性セシウムの移行制御技術の開発
	茶・果樹の放射性セシウム濃度低減技術の開発
	食肉用家畜の放射性セシウムと畜前推定技術の開発と体内動態解析
	植物から農畜産物への放射性物質移行低減技術の開発 (1)畜産
	植物から農畜産物への放射性物質移行低減技術の開発 (2)きのこ
	水産生物が取り込んだ放射性セシウムの排出を早める畜養技術の開発

た、2012年度にも除染、減容関連課題について実証試験を継続あるいは新規課題として実施した。また、同省林野庁所管の

(独) 森林総合研究所では、2011年度に「針葉樹林と落葉広葉樹林において、下草と落葉の除去による森林の除染実証試験」を実施し、いずれ

の森林でも下草と落葉を除去することで空間線量率は除去前の約6割から7割まで低減するという結果が示された。また、特に森林が70%を超える福島では、表土のはつり等の除染が表土流出を招く恐れがあり、森林の保全のための措置も含めて、総合的な対応が必要である。このほか、除染に関する新技術について、2011年度には内閣府（日本原子力研究開発機構に委託）が公募事業¹¹として、除染作業効率化技術、土壌等除染除去物減容化技術、除去物の運搬や一時保管等関連技術及び除染支援等関連技術について計25課題を選定し、それら技術の有効性を試験している。さらに、福島県では、2011年に福島県除染技術実証事業（公募事業）¹²として、構造物（屋根・屋上・壁面・底面等）等の除染技術及び土壌（農地を除く）の減容化技術の2分野について、合計19課題について技術の効果を試験している。2012年度も新規の課題を募集して当該事業は継続されている。これらの課題の中には、現地での除染技術だけでなく、現在までの除染の進展によって明らかになってきたことであるが、除染により発生する汚染土壌や草木などの多量に発生する有機系廃棄物の取扱いに関する問題も含まれている。つまり、除染による放射性物質濃度の低減や有機物などの焼却による減容化も近い将来重要な課題となることが明らかであり、それらの対策に有効な技術についてもこれらの課題の中では探索されている。また、ここに記した以外にも大学、研究機関、民間会社も含めた各種の団体などでも除染技術や減容化技術の開発や実証が行われている。

③今後の課題

2012年1月1日に福島市に、政府が一元的に除染を実施するために環境省福島環境再生事務所を設置した。そこには各省庁を横断的に統括して効率的な除染の推進を図ることが求められている。

しかし、地域の総合的な除染が効果的であるが、これまでのところ学校、役場等の公共施設、宅地、農地、道路などと夫々別の事業として実施時期もそれぞれに独立に実施されており、また施設、道路等の所管により国、地方自治体と除染実施者が異なっていることから、今後は福島環境再生事務所等が統括してより一層の一元化が求められる。

また、除染の方法が除染ガイドラインに具体的に記されており、実施に当たってはそれに沿った除染が求められている。しかし、1.2(2)に記載したとおり、同じ除染方法であっても除染技術の効果は広くバラついていることや、地形や土地利用状況などが個々の土地で様々であることから、効率的な除染を行うためにはその地域の特性に応じた除染法が求められる。このため、実施にあたる市町村の意思などが適切に反映できるよう一層柔軟なガイドラインの適用あるいは必要に応じて適切な時期における見直しなどが求められる。

また、除染のモデル事業や実証試験、新技術開発などが関係各省庁、研究機関等で個別に実施されているが、それらの試験、技術開発の全体を俯瞰的に評価して、今後の除染事業に反映する仕組みの構築が求められる。

除染の進展が進まない理由として、汚染除去物の仮置き場の設置に地域住民の理解とコンセンサスが得られないケースが多く見受けられる。除染を進めるには汚染物の保管場所の確保が重要であり、仮置き場が決まらない場合でも、現場保管など柔軟に対応できる方法も採用することが必要である。この保管場所に対する地域住民の理解とコンセンサスの獲得にあたっては、政府、関係市町村などが法制的な面（保管廃棄物の将来の処置等の方策）とともに安全確保に関する科学的根拠などを誠実に説明するなど最大限の努力を払うべきである。

さらに、今後除染の進展に伴って汚染廃棄物が多量に発生し、それらの中間貯蔵施設への搬入を考慮すると今後減容化が重要となるため、土壌から放射性セシウムを洗浄などによって分離除去する技術開発が求められる。また有機廃棄物については腐敗による悪臭や出火の原因ともなりうることから焼却などの減容化とともに保管上の安定化を図ることも重要となる。

また、貯水池などへの放射性セシウムの蓄積やそこからの流出、また森林や河川などから農地、宅地林などへ放射性物質が移行することによって起こる二次汚染も地域住民の高い関心事となっており、常時監視体制の整備やデータの公開、さらには汚染が生じた場合への対処なども今後の重要な課題である。

以上、これまでの除染関連動向や情報をもとに汚染及び除染の状況などを概観してきたが、除染を効率的に進めるためには、地域住民の理解が不可欠であり、各界、各層で地域住民との対話が重要である。そのため、原子力、放射線関係に経験を有する原子力学会など原子力関連機関、団体には、なお一層の誠実な努力が求められる。

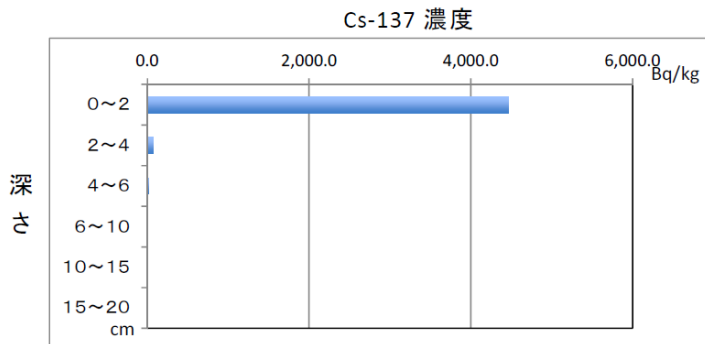


図 2-1 水田（郡山）における Cs-137 の深度分布（生重量）

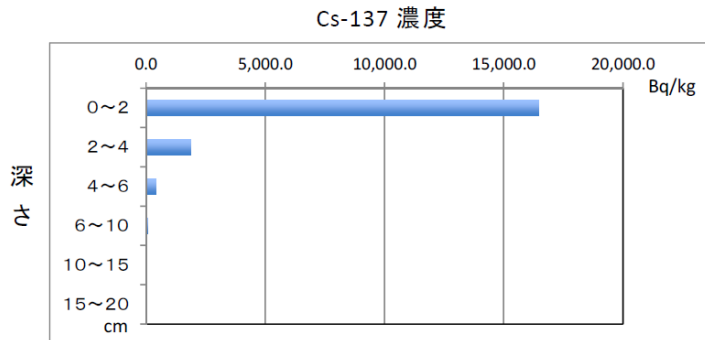


図 2-2 畑（郡山）における Cs-137 の深度分布（生重量）

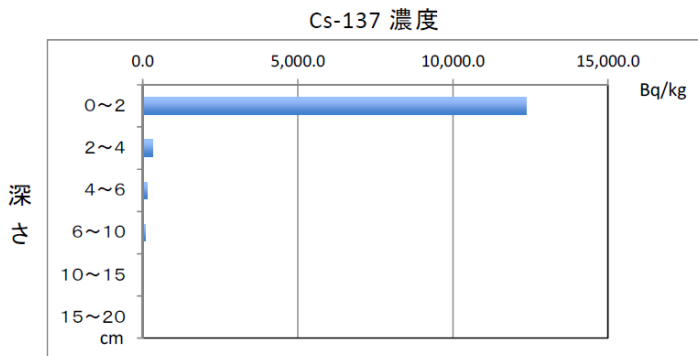


図 2-3 果樹園（郡山）における Cs-137 の深度分布（生重量）

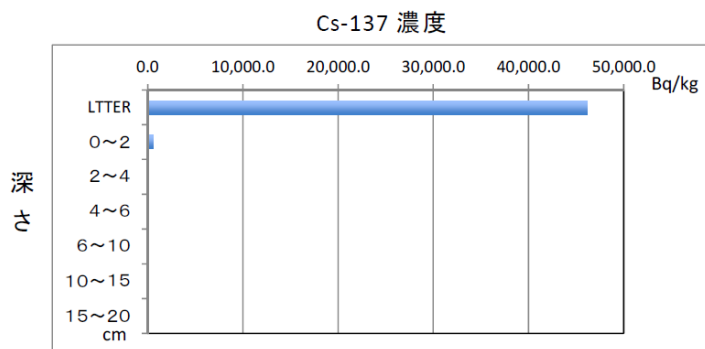
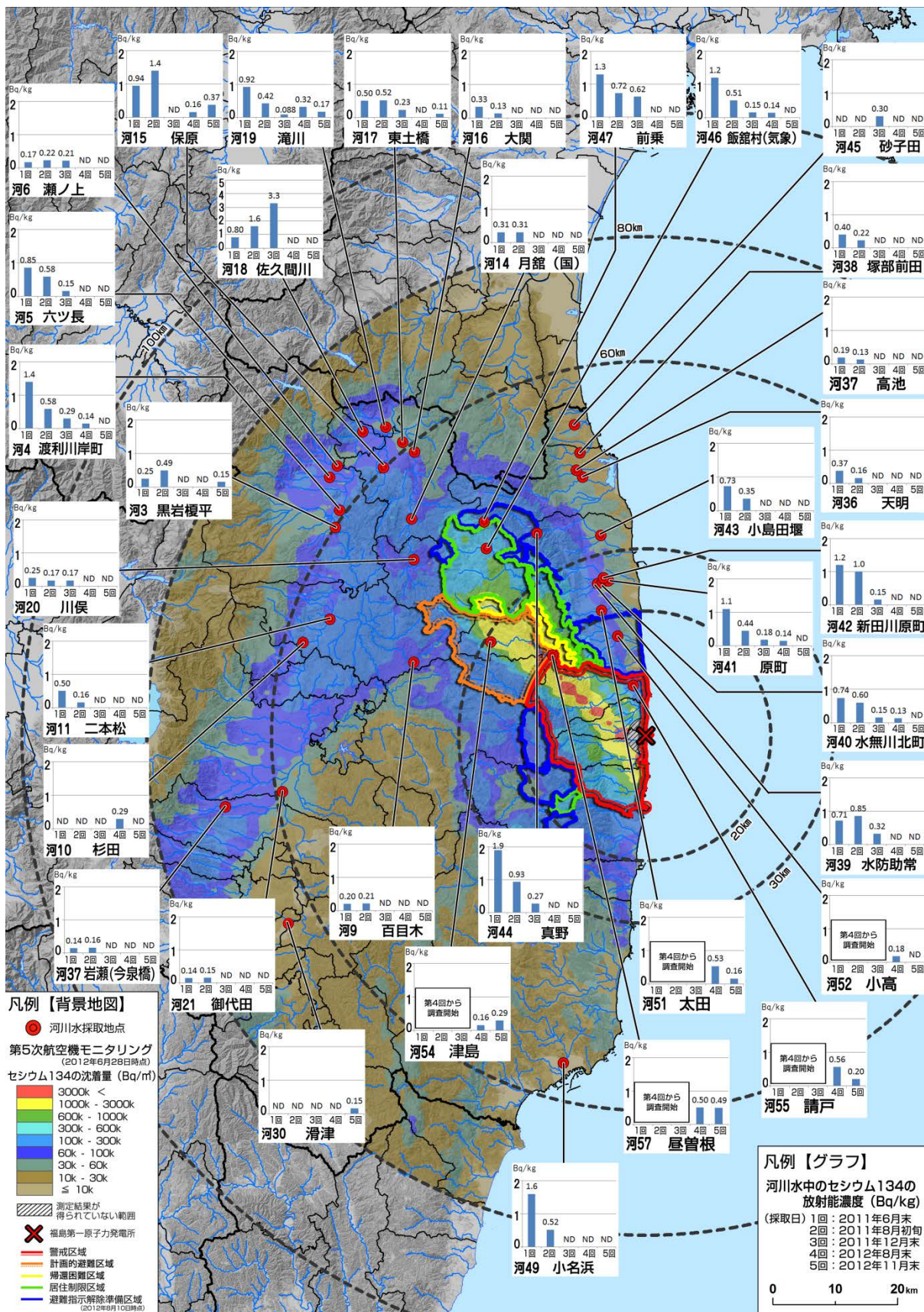


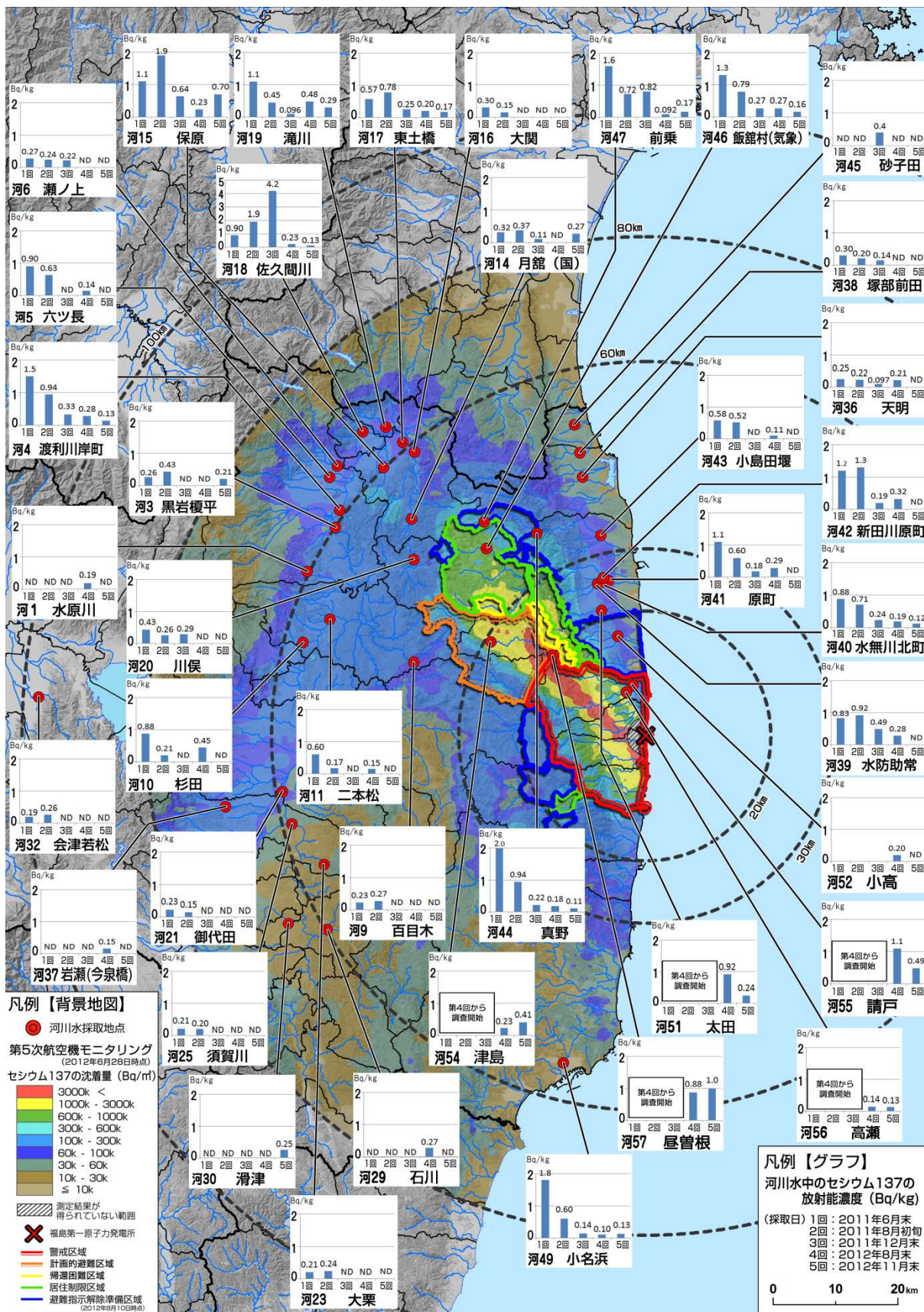
図 2-4 森林（郡山）における Cs-137 の深度分布（生重量）

参考図 1.2-1 セシウム-137 の表層からの深度分布の変化

http://www.s.affrc.go.jp/docs/nogyo_gizyutu/kinkyu_kenkyu_seika.htm



参考図 1.2-2 河川等の空間線量率の分布状況 (2012年6月28日時点) と河川水中セシウム-134の放射能濃度 (2012年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書)



参考図 1.2-3 河川等の空間線量率分布状況 (2012年6月28日時点) と河川水中セシウム-137の放射能濃度 (2012年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書)

-
- ¹ 文部科学省, 「第 5 次航空機モニタリングの測定結果, 及び②福島第一原子力発電所から 80km 圏外の航空機モニタリングの測定結果について」(2012 年 9 月 28 日) .
 - ² IAEA, “Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience”, STI/PUB/1239 (2006).
 - ³ 文部科学省, 「文部科学省による, ①ガンマ線放出核種の分析結果, 及び②ストロンチウム 89, 90 の分析結果(第 2 次分布状況調査)について」(2012 年 9 月 12 日) .
 - ⁴ 「福島県土地利用の現況」, 福島県 HP.
 - ⁵ 「除去等の措置等に伴って生じる土壌等の量の推定について」, 環境回復検討会(第 2 回) 配布資料 7 (2011 年 9 月 27 日) .
 - ⁶ 農林水産省農林水産技術会議事務局, 「農地土壌の放射性物質濃度分布マップ関連調査研究報告書(第 3 編)」(2012 年 3 月) .
 - ⁷ (独) 日本原子力研究開発機構, 「福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務報告書」(内閣府からの委託事業)(2012 年 6 月) .
 - ⁸ 佐藤修彰ら, 「水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 ; (1) 全体計画と現地の概要」, 033, 日本原子力学会 2012 年秋の大会(2012 年 9 月) .
 - ⁹ 三倉通孝ら, 「水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 ; (2) 放射線測定と汚染状況の評価」, 034, 日本原子力学会 2012 年秋の大会予稿(2012 年 9 月) .
 - ¹⁰ 神徳敬ら, 「水耕作業における放射性セシウムの挙動と除染に関する研究 ; (3) 荒かき作業と除染効果の評価」, 035, 日本原子力学会 2012 年秋の大会予稿(2012 年 9 月) .
 - ¹¹ (独) 日本原子力研究開発機構, 「平成 24 年度除染技術評価等業務報告書」(2012 年 10 月) .
 - ¹² 福島県生活環境部, 「平成 23 年度福島県除染技術実証事業実地試験結果」(2012 年 4 月) .