

中間報告書
(2013～2020 年)

国際原子力機関と福島県との間の協
カプロジェクト

放射線モニタリング及び除染

最終版
(日本語仮訳)

ウィーン／福島県
2020 年 12 月

目次

1.	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	協力の目的と範囲	1
1.3	協力のテーマ	1
1.4	支援の提供と本報告書の構成	2
2.	森林における放射性物質の長期モニタリングとその対策	3
2.1	背景及び目的	3
2.2	モニタリング手法	4
2.2.1	空間線量率	4
2.2.2	森林における放射性セシウムの分布	6
2.2.3	森林内の木における放射性セシウム	7
2.3	具体的研究	8
2.3.1	キノコへの放射性セシウム移行	8
2.3.2	タケノコの放射性セシウム	9
2.3.3	淡水魚の放射性セシウム	9
2.3.4	森林における対策の有効性	10
2.3.5	林業の管理	12
2.3.6	林業従事者の放射線被ばく防護	13
2.3.7	森林火災	13
2.4	里山再生モデル事業	15
2.5	野生の食物の管理	16
2.6	まとめ	17
3.	陸域及び水域における放射性物質のモニタリング及び環境修復と除染	20
3.1	背景及び目的	20
3.2	陸水生態系における放射性セシウムの動態	21
3.2.1	自然環境における放射性セシウムに関する国際的な知見	21
3.2.2	県環境下における放射性セシウムの動態	21
3.2.3	河川集水域における移行プロセス	22
3.3	モニタリングプログラム結果の分析	24
3.3.1	水や堆積物中の放射性セシウムのモニタリング	24
3.3.2	県内河川における ¹³⁷ CSの実効半減期	27
3.3.3	植物プランクトン及び動物プランクトン中の放射性セシウム	28
3.3.4	放射性セシウム含有放射性微粒子の特性と発生	29
3.3.5	集水域における放射性セシウムの再配分	30
3.4	シミュレーションモデルの適用	32
3.5	河川や湖における環境回復及び除染の知見	34
3.5.1	国際的な知見	34
3.5.2	ため池中の放射性セシウム対策	35

3.5.3	県内河川敷における除染対策	35
3.6	住宅地域における環境回復と除染の知見	40
3.7	まとめ	41
4.	除染活動から生じた廃棄物の管理	43
4.1	背景及び目的	43
4.2	仮置場	43
4.3	仮置場に関する技術指針の策定	45
4.4	仮置場の安全性評価の実施	46
4.4.1	安全性評価枠組みソフトウェアツール	47
4.4.2	福島県の仮置場安全性評価実施能力の構築	48
4.4.3	モデル仮置場の安全性評価	48
4.4.4	県内の実際の仮置場の試験的安全性評価	51
4.4.5	県内の複数の代表的仮置場の安全性評価	52
4.5	仮置場に保管されている廃棄物の搬出戦略と仮置場所の廃止措置	52
4.6	まとめ	54
5.	無人航空機を用いた環境マッピング技術の適用	56
5.1	背景及び目的	56
5.2	UAV システムの開発と提供	56
5.3	機器の現場較正及び手法の検証	57
5.4	仮置場での試験測定	58
5.5	まとめ	59
6.	県民への情報発信	60
6.1	背景及び目的	60
6.2	ウェブサイトの改訂 2013～2016 年	60
6.2.1	マッピングに関する一般的な考慮事項	61
6.2.2	ホームページ開発に関する考察	61
6.2.3	ホームページ最終デザイン	62
6.3	福島復興ステーションホームページ	64
6.4	情報発信	65
6.4.1	アウトリーチ（啓発）資料	66
6.4.2	情報発信セミナー	67
6.5	まとめ	68
7.	報告書の総括	70
7.1	森林内の放射性物質の長期モニタリング及び関連する対策	70
7.2	陸域及び水域における放射性物質のモニタリング及び環境修復と除染	71
7.3	除染活動から生じた廃棄物の管理	72
7.4	県民への情報発信	73

1. はじめに

1.1 背景

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震とそれに続く津波及び東京電力(株)福島第一原子力発電所事故（以下「福島第一原子力発電所事故」という。）により、福島県（以下「県」という。）を含めた日本の各地において、放射性物質による汚染が生じた。その後、県とIAEAは協力の覚書を交わし、協力分野として放射線モニタリング、除染及び人の健康が選定された。IAEAと県は、具体的なプロジェクト及び実施の方法や手段について協議した。

県とIAEAは、「放射線モニタリング及び除染の分野における協力に関する福島県とIAEAとの間の実施取決め」（以下「実施取決め」という。）に合意、2012年12月に署名された。これには、将来的な協力の目的と範囲について詳細に述べられているが、有効期間は署名後5年間であり、2016年4月及び2017年12月の両者の合意により延長及び変更されており、2022年末までの継続が予定されている。

プロジェクトの実施におけるIAEAの主な役割は、国際的知見と成功事例に基づき、効果的な技術支援を県へ提供することである。

1.2 協力の目的と範囲

実施取決めは2012年12月に、また実施取決めの第1回修正は2016年4月に、そして第2回修正は2017年12月に、県とIAEAの代表により署名された。実施取決めの目的は、IAEAと県との間の協力の枠組みを定め、福島第一原子力発電所事故由来の電離放射線から人々と環境を継続的に保護するための、放射線モニタリング及び除染に関連した分野における広範囲な支援を提供することである。

1.3 協力のテーマ

2016年に修正した実施取決め第2節は、次の分野及び活動について協力すると定めている。

- 放射線モニタリングに関する調査研究（無人航空機（UAV）による環境マッピング技術の活用、森林における放射性物質の長期モニタリングとその対策、公表マップ作成のための放射線モニタリングデータ活用上のIAEAの支援など）
- オフサイト除染に関する調査研究（環境モニタリング結果の分析、被ばくを軽減又は回避するための被ばく経路調査におけるIAEAによる支援など）
- 放射性廃棄物管理に関する調査研究（上記除染活動から発生した低レベル放射性廃棄物の管理方法に関する研究におけるIAEAによる支援など）

これが2017年にさらに修正され、協力を要するさらなる分野と活動が特定された。

- 県内における環境の除染に関する調査・研究
- 除染活動から生じた放射性廃棄物の管理に関する調査・研究
- 無人航空機を使用した環境マッピング技術の適用、森林地域の放射性物質の長期モニタリング、関連対策など

情報発信は、実施取決めに基づく協力及び活動領域すべてと関連するものである。情報発信の取り組みを強化するために、IAEA と県は、各協力項目の範囲内での活動の在り方を再検討したが、これは、放射線の影響について一般市民に情報を発信する際の国際的な成功事例に基づいたものである。

実施取決めに基づく協力の目的は、日本の既存の活動を補足し、県の住民及び訪問者に直接的な利益をもたらす迅速な援助及び支援を提供することである。

1.4 支援の提供と本報告書の構成

実施取決めの署名後、協力プロジェクトに関する活動が、主に一連の両者間会合（福島で年2回、ウィーンで年1回）を通じて進められた。各会合において、県の代表担当者、国内機関の専門家、IAEA が指名した海外専門家及び IAEA 職員（以下「IAEA チーム」という。）は、実施取決めの研究テーマに関する議論を行った。IAEA チームは、IAEA 安全基準及び国際的な良好事例に基づいて県が実施した活動の結果について技術的助言を行った。福島県への複数回にわたる会合の間、仮置場、水域におけるモニタリング、森林におけるモニタリング等に関して様々な現地視察が実施された。さらに、県が放射性廃棄物仮置場の安全性を評価する際に使用できるように、IAEA が開発したソフトウェアの改良が行われた。

この中間報告書は、実施取決めに基づいて 2013～2020 年春まで実施された活動の状況及び進捗をまとめたものである。これは、2013 年～2017 年までに実施された活動の進捗状況を要約した最終報告書（以下、「前プロジェクトの最終報告書」と言う。）を更新したものである。本報告書は、2016 年に修正した実施取決め第 2 節の要点に対応する 5 つの節からなる。そのうち、第 2、5、6 節は上記 1.3 に示す 1 つ目の分野における活動を、第 3 節は 2 つ目の分野における活動を、第 4 節は 3 つ目の分野における活動について記載している。2017 年に実施取決めの第 2 回修正で特定されたさらなる分野と活動については、本報告書の各節で説明している。

2. 森林における放射性物質の長期モニタリングとその対策

2.1 背景及び目的

県の森林面積は、県土の約 7 割を占める。針葉樹林の例を図 2.1 に示す。森林はレクリエーション活動に利用されるほか、住宅建築用木材の生産林として経済的な重要性も高い。また、森林は土砂流出、地滑り、その他の自然災害を防止する上でも役立っている。日本では、森林の中あるいはごく近辺に住んでいる人々が少なからず存在している。そのため、ガンマ線による外部線量率（以下、「空間線量率」という。）を減らすための対策に関して問題が生じる。福島県と欧州では、年間降水量、気温、地形等の違いから、森林の様相も異なる。そのような相違があるため、欧州の森林と比較して県の落葉落枝層（リター層）は薄く分解は速い。しかしながら栄養素と放射性核種の全般的な移行については、欧州と日本の森林は類似していると想定される。

日本では、木イチゴ類、キノコ及び野生動物は欧州ほど幅広く消費されていないが、一部の森林は「山菜」の産地であり、それらは食用として採取されている。

チェルノブイリ事故後に行われた調査から、森林はあらゆる大気中汚染物質の捕集能力が高いことが明らかになっている。2012 年に実施取決めが交わされた頃から、人々の最も重要な被ばく経路は、セシウム 137 (^{137}Cs) とセシウム 134 (^{134}Cs)（放射性セシウムと総称する。）から放出される放射線であり、陸域と水域の双方に存在している。 ^{134}Cs の半減期は約 2 年、 ^{137}Cs は崩壊速度が遅く半減期は約 30 年である。福島第一原子力発電所事故では、 ^{137}Cs と ^{134}Cs の環境への放出量はほぼ等しかった。 ^{137}Cs は、1950 年代～1960 年代に行われた地上核実験でも環境中に放出された。 ^{137}Cs は ^{134}Cs と比べて半減期がかなり長いため、2017 年 12 月時点における $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ 比は約 8 : 1 であり、これは 2019 年 12 月までに、16 : 1 に増加した。放射性セシウムの放射性崩壊による自然減衰、風化作用による地表面からの放射性セシウム除去ならびに土壌及び堆積物中の垂直方向の移行の結果、人的介入がなくても、環境中の放射性セシウムレベル及びそれによる人々の被ばく線量は低下することが予想される。放射性セシウムは、ひとたび森林内で沈着すると、森林生態系内に留まり再循環する。林床、植生及び生物といった諸要素内における放射性セシウム分布状況は時と共に変化する。

実施取決めにより、IAEA チームは、森林内の放射性セシウムの長期モニタリング及び関連する対策について県と国際的な知見を共有することができるようになった。2012 年以来議論されてきた問題として、森林生態系の様々な構成要素における放射性セシウムの分布と長期的な動態のキャラクタリゼーション、効果的な放射線モニタリングプログラムの策定、対策の有効性の検討、里山再生モデル事業の評価などがある。その他の課題として、林業従事者の放射線被ばくの低減対策や、森林火災の放射線影響評価が検討された。野生の食物由来の放射線量の管理における国際的な知見が紹介され、詳細に議論された。



図 2.1 田村市常葉地区の針葉樹林（提供：福島県）

2.2 モニタリング手法

放射性セシウム由来の空間線量率の減少率を調査するため、また森林内の様々な要素間における放射性セシウムの移行を把握するため、森林の長期モニタリング手法が策定された。ここでは、木々の様々な構成部分（樹体、樹皮及び葉）中の放射性セシウム分布及び経時変化も評価している。

2.2.1 空間線量率

森林内の空間線量率のモニタリング地点は、事故後、毎年追加され、2017 年末の段階で合計 1,300 地点となった（表 2.1.）。空間線量率はすべてのモニタリング地点で測定され、その内 81 ヲ所で、土壌と立木（樹幹、樹皮、枝葉）のサンプリングが毎年実施されている。モニタリングは、福島県内の民有林で実施された。

表 2.1 県による森林モニタリング地点

年	追加されたモニタリング地点数	モニタリング地点数（合計）
2011		362
2012	563	925
2013	81	1,006
2014	187	1,193
2015	37	1,230
2016	20	1,250
2017	50	1,300
2018	-	1,300
2019	-	1,300

森林の空間線量率は、放射性セシウムの物理的半減期にしたがい下がり続けている。最初の年に設けられた 362 ヲ所のモニタリング地点のみを考慮すると、平均線量率は 2011 年 8 月の $0.91 \mu\text{Sv/h}$ から 2019 年末には $0.20 \mu\text{Sv/h}$ に、自然なプロセスのみによって 78% の減少が見られた（図 2.2）。

2011年3月の ^{137}Cs と ^{134}Cs の比率は1:1だったが、2019年12月までに約16:1に変化した。その原因は主に ^{134}Cs の放射性崩壊であり、 ^{134}Cs の半減期は2.06年であるのに対し、 ^{137}Cs の半減期は30.07年とはるかに長い。これは、自然のプロセスによる空間線量率の減少率が将来的に著しく低下し、年々の減少を定量化することがさらに困難になることを意味する。

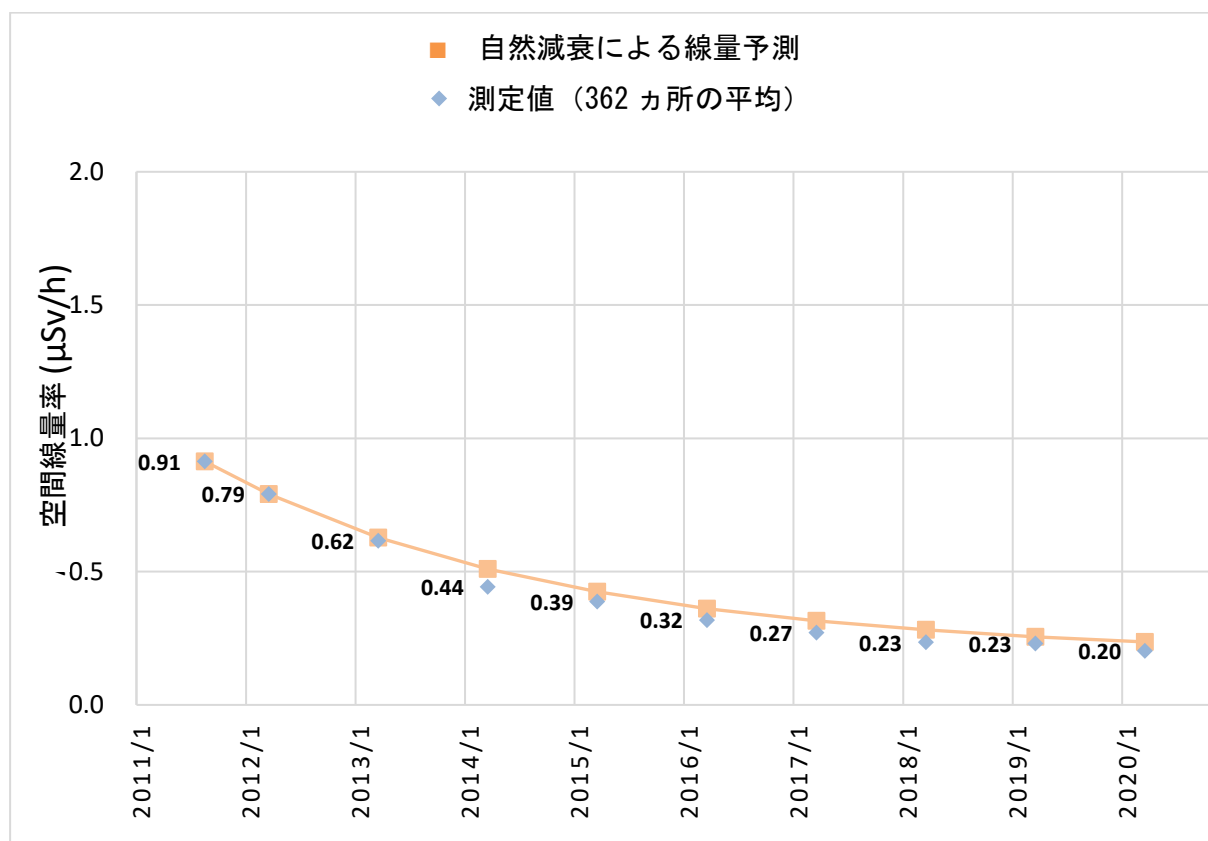


図 2.2 県内の森林における 362 カ所のモニタリング地点の空間線量率及び放射性セシウムの放射性崩壊に基づく空間線量率の予測（提供：福島県）

山岳地形と降雨により、物理化学的及び機械的のいずれにおいても放射性核種は地形的な下方に移行する。これに応じ、今後の放射線モニタリング活動を調整する必要がある。

環境中の放射性核種の移行に影響を及ぼすプロセスは、福島第一事故後の数年間は比較的急速に進んだが、時間の経過とともに減速した。モニタリングプログラムは少なくとも安定状態に達するまで継続すべきであるが、その時期を予測するのは困難である。チェルノブイリ事故後に設置された観測地点の一部では、現在もモニタリングが続けられており、重要な新情報をもたらし続けている。IAEA チームは、「空間線量率低下が鈍化することが予想されるため、特に海岸から最も遠方の内陸のサイトでモニタリング頻度を 2 年、3 年、または 5 年ごとに減らすことは技術的な観点から正当化できる」とし、「毎年すべてのモニタリング箇所を測定するのではなく、各自治体で測定が行われるようにモニタリングプログラムを計画することができるだろう」と助言した。

2.2.2 森林における放射性セシウムの分布

針葉樹林及び落葉樹林内の放射性セシウムは、おおむね土壌、落葉落枝層（リター層）及び樹木内に分布している。森林内における生態学的物質循環を通じて、放射性セシウムの分布に変化が生じており、2016年には、県内の森林内における放射性セシウムの約97%が、土壌及びリター層（針葉樹・広葉樹の落葉落枝層）に存在し、残る3%が樹体内に存在していた（図2.3）。この観察結果は2019年末についても当てはまる。下層植生、キノコ及び野生動物体内の放射性セシウムは合計1%に満たない。したがって、空間線量率低減対策は土壌の管理に焦点を当てるのが最善である。さらに、立木伐採が空間線量率の低減に及ぼす影響は小さいと考えられる。大規模な表土除去は森林の全体的な生産性を低下させ、概してマイナスの影響を引き起こす可能性があり、管理が必要な廃棄物のさらなる増加につながる。

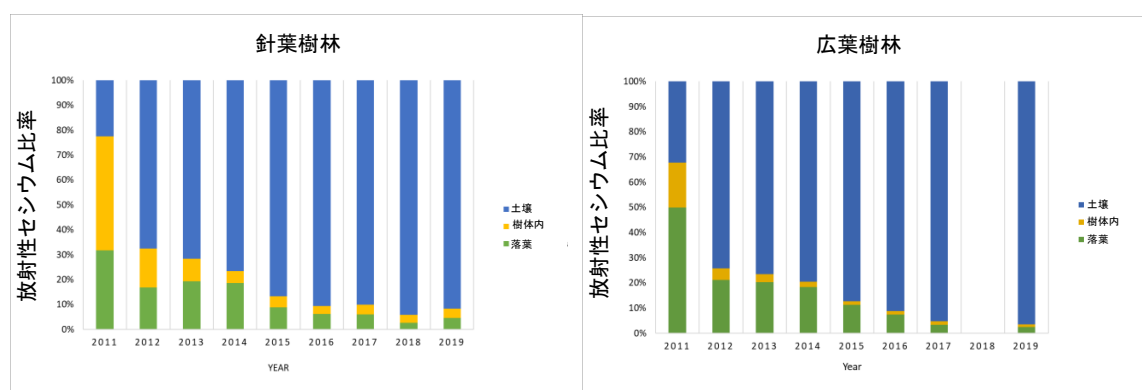


図 2.3 2011～2019 年にわたる県の針葉樹林及び落葉樹林における放射性セシウム分布の変化（農林水産省及び福島県林業研究センターの協力を得て作成）

県内の森林で行われた土壌調査では、全ての採取試料にイライト及びバーミキュライトの存在が認められた。イライト、バーミキュライトは共に、放射性セシウムを不可逆的に結合する能力が高いことで知られる粘土鉱物である。この調査結果は、土壌から森林内の動植物への放射性セシウムの移行が比較的少ないことを意味する。しかしながら、県内の一部にこれらの粘土鉱物が存在しないと仮定した場合、その一帯においては移行係数が高くなり、結果として立木、下層植生、動物における放射性セシウム濃度も上昇すると考えられる。

県の試験では、放射性セシウムは森林生態系内で循環しており、放射性セシウムの損失率は年に1%の数分の1であることが判明している。都市部を集水域とする貯水池へ流入する水に含まれる放射性セシウム量は、森林を集水域とする場合の4倍の高濃度であったという測定結果が得られている。

一部では、放射性セシウムが付着した粘土鉱物を含む堆積物の流出が生じている（堆積物の流出を含む環境中の放射性セシウムの動態に関する詳細は、第3.2及び3.3節参照）。植被率が高いほど堆積物の流出は少ないという研究結果が得られている。この結果は、森林管理の重要性を強く示唆するものであり、定期的な間伐により下層植生の成長を促すことが、土砂流出や地滑りの可能性を低減することにつながる。

2.2.3 森林内の木における放射性セシウム

立木中のサンプリングプログラムでは、樹皮、辺材、心材、葉（新・旧葉）の部位別の放射性セシウム測定も行われた。多数のサイトで土壌も採取し、放射性セシウム濃度を測定した。図 2.4 に分析対象の木材サンプル収集例を示す。

針葉樹林と落葉樹林で数種の樹木を測定したが、放射性セシウム濃度が一番高い部位は樹皮で、次いで木材と枝/葉が高かった。種類によっては、心材よりも辺材が高く、その逆の種類もある（杉など）。この違いは、カリウムの摂取と、樹木内での配分または再配分プロセスに関連していると考えられている。

時間の経過とともに、古い葉に付着した放射性セシウムは、木からの落葉により、徐々に林床に移行する。放射性セシウム濃度が8,000Bq/kgを超える立木においては、森林の空間線量率を推定した。¹

この方法から得られた地上高 1m における空間線量率は $1.57 \mu\text{Sv/h}$ であった。このような推定値には有意な不確実性があるものの、材木の伐採・収穫の可能性の判断においては有益かつ迅速な手段である。これについては、第 2.3.5 節で詳しく述べる。



図 2.4 分析用の木材サンプル収集（提供：福島県）

2013 年に植え付けされた苗木の放射性セシウム濃度について調査が行われた。苗木の植え付け深さは、地中約 10cm であった。2015 年まで、樹体内の放射性セシウム濃度と植樹された一帯の空間線量率との間に相関は認められなかった。今後は、根系の発達に伴い、将来的に放射性セシウムの樹体内への移行は増加する可能性があり、この調査は継続する必要がある。放射性セシウムの大部分は土中の粘土鉱物に付着すると考えられているが、一部は樹体内に取り込まれる可能性がある（環境中の放射性セシウムの移行に関する詳細は、第 3.2 節参照）。

¹ 放射性セシウム濃度 8,000Bq/kg を超える物質は「指定廃棄物」とみなされ、全て放射性廃棄物として管理することが法律で義務付けられている。指定廃棄物に関する域値が 8,000Bq/kg に設定されたことに関する詳細、及び放射性セシウム濃度を基準とした理由については、「事故由来放射性物質により汚染された廃棄物の処理等に関するガイドライン」（環境省 2013 年）に記されている。

2.3 具体的研究

2.3.1 キノコへの放射性セシウム移行

福島県は、日本国内におけるシイタケ及びナメコの主要な生産地である。これらのキノコは腐朽した木材で生育するため、林床土壌に生育するキノコに比べて放射性セシウム濃度は低い傾向がある。

シイタケ

現在、県内で出荷が制限されている市町村は、原木シイタケの場合 17 市町村、タケノコ 27 市町村、野生キノコは 55 市町村である。

2011 年以前、県はシイタケ、その他の種類のキノコの栽培用のナラ材の主な生産地だった。多くの主要な生産地域のが福島第一原子力発電所の近傍にあり、ナラ材に高濃度の放射性セシウムが付着したため、放射性セシウムが市販食品中の基準値 100 Bq/kg に達したキノコに出荷制限がかかり、育てることができなくなった。

市場シェアを取り戻すために、土壌中の交換性カリウムまたは若葉や若枝の放射性セシウム濃度を測定することにより、木幹部の放射能濃度を予測する研究が行われた。いずれのアプローチも有望ではあったが、カリウムとセシウムに関する科学的知見のほとんどは、植物や農作物から得られており、森林におけるデータはかなり少ない。IAEA の専門家らは、様々な状況下で両者の関係を適切に定量化するため、さらに調査を行うことを推奨した。

IAEA の専門家らはまた、面移動係数が有用な予測ツールになるかどうかについての調査を提案した。専門家らは、会津地方の広い地域が材木の生産に適しているかもしれないと示唆した。木材中の放射能と木材で栽培されたキノコの放射能の比率が 1:1 であるという文献があることも言及された。したがって、キノコの生産を目的とするナラ材における放射性セシウムの国内規制値 50Bq/kg は、保守的であると思われる。

森林のキノコ

福島第一原子力発電所事故の前にも、森林のキノコは収集され、地元の市場や露店で販売されており、特にこの地元食材を購入するために県を訪れる人々もいた。2019 年末の時点では、59 の自治体の内 55 で森林のキノコの「出荷」（販売を含む）はいまだに完全に制限されている。3 つの自治体では森林のキノコの収集を禁止しているが、個人による収集、消費を許可しながらも友人や家族と分け合うことを禁止している自治体もある。

制限は全種類の野生キノコに適用されている。特定の自治体で 1 種類に対する出荷制限を解除するためには、季節の始めにその自治体内で 60 サンプルを収集し、全てのサンプルの出荷制限の基準値は 100Bq/kg 未満である必要がある。種類によっては、1 サンプルにつき

1 本以上のキノコを必要とする。1 種類のキノコの制限が解除されると、次の季節の始め及びそれ以後の全ての季節に 3 つのサンプルを収集し、すべて放射能濃度が 100Bq/kg 未満である必要がある。1 つでも 100Bq/kg を超えると、その自治体のすべてのキノコに再度制限が課される。

現在、森林のキノコの放射性セシウム濃度は、生重量で 10~82,000Bq/kg であり、菌根菌種が最も高く、海岸から離れて内陸に向かい減少するが、近くでも大きなばらつきが見られる。これまでに分析されたサンプルは地元住民によって提供されたものであり、したがって最も一般的な食用キノコである。IAEA チームは、野生動物の食料となる可能性のある（人間には）有毒種ほど、高濃度汚染が検出されることが多く、一部の腐生種も非常に濃度が高いことを指摘した。

過去 3 年間、森林のキノコ中の ^{137}Cs 濃度の低下は観察されていない。IAEA チームは、チェルノブイリ事故後の最初の 8 年間は、森林キノコの濃度がある程度一定であった国もあったが、その後 6~8 年の実効半減期に減少したと指摘した。このため、モニタリングプログラムを維持することが重要である。森林の土壌とキノコの種類は欧州と日本では異なるため、欧州での観察が日本にも適用するとは想定できず、IAEA チームは同種のキノコに関する比較研究を推奨した。

県の現在の方針では、種類ベース及び自治体ベースで「出荷」（販売を含む）の制限を解除している。一部の自治体は、特定種のキノコに対しては、制限が長年にわたる可能性が高いことに同意している。IAEA チームは、県全体の様々なキノコの放射性セシウム濃度について、一般市民への助言と情報提供の重要性を強調した。

2.3.2 タケノコの放射性セシウム

タケノコの放射性セシウム濃度は、年々低下しているが、この低下について土壌中の放射能濃度との関連性は認められない。

IAEA チームは、成長した竹は根が張っているため、土壌の放射性セシウム濃度が低い場所に分布していると指摘した。竹の放射性セシウム濃度は、放射性セシウムの根部域への拡散に伴い上昇する可能性があるが、粘土鉱物による化学的固定の作用も考慮する必要がある。懸念すべき長期的問題を特定するには、ある程度の調査や実証実験が有用である。

2.3.3 淡水魚の放射性セシウム

大部分の河川系では、魚の放射性セシウム濃度は 100Bq/kg 未満である。ほとんどの制限がすでに解除されているか、又は近い将来に解除されることが予想される。2018 年末（プロジェクトで本テーマが最後に検討された時点）には、まだ 8 つの区域で、コイ、フナ、モクズガニ、ウナギ、イワナ、ウグイ、ヤマメといった 7 種類の淡水魚に制限があった。

浜通り地域の特定の河川系では、いまだに非常に高い濃度を示す魚がいる。たとえば、福島第一原子力発電所北西の阿武隈川水系の鱒では、最大 16,000Bq/kg の ^{137}Cs 濃度が測定された。魚体が大きくなるほど放射能濃度も高くなるという傾向が示された。

県実施のウグイの室内実験により、 ^{137}Cs の水から魚への移行の濃度比（CR 値）は <10 であると特定された。それとは対照的に、自然界で観察された CR 値は 1,240~12,900 であり、水中の ^{137}Cs は魚肉中 ^{137}Cs の源ではないことを明確に示した。捕獲された野生の魚は、腸内容物の分析により、陸生昆虫と水生昆虫の両方を補食していることが判明された。さらに調査すると、森林の昆虫に含まれる ^{137}Cs の濃度の方がはるかに高く、森林の小川に生息する魚の肉に含まれる ^{137}Cs もはるかに高いことと関係があることがわかった。これらの昆虫が、森のゴミやキノコを食べることはわかっている。

昆虫ではなく藻を餌としている魚もいる。藻類の ^{137}Cs の濃度は森林の昆虫と同様だが、藻類を大量に消費する魚の肉の ^{137}Cs の濃度ははるかに低い。これは、藻類の ^{137}Cs は昆虫から摂取した ^{137}Cs よりも体内吸収量が非常に少ないためであり、ひいては魚の腸から肉への移行が少ないためである。

県はまだ残っている制限をできるだけ早く解除したい意向を示しているが、現在入手可能な情報では、数年あるいは数十年にわたって制限を維持する必要があるかもしれないことを示唆している。IAEA チームが提供したウクライナの淡水魚の状況に関する情報によると、チェルノブイリ事故の結果、ウクライナでは一部の水域や多くの魚種で ^{137}Cs とストロンチウム 90 の濃度が依然として非常に高い。

また IAEA チームは、米国の一部では水銀汚染への懸念から漁業が制限されているという情報も提供している。それらの地域では釣りは許可されているが、釣った魚の消費は禁止されているものの、漁師が制限についての考え方に理解し当該制限は受け入れられた。しかし、商業目的の漁業の場合、制限による経済的影響が継続することになる。

県では、淡水魚の大規模な養殖業（養魚業）を行っている。放射性セシウムの出荷制限基準値である 100Bq/kg を確実に遵守するために、魚飼料に含む放射性セシウム濃度は、最大 40Bq/kg までと設けられている。飼料中の放射能濃度と魚の可食部の放射能濃度を関連付けるこの値は、日本政府の研究機関での研究に基づいて策定された。

2.3.4 森林における対策の有効性

森林で講じられた放射性セシウムによる被ばくを低減するための様々な対策について、対策の有効性及び適用可能性を判定するための検証が行われ、次の結果が得られた。

- (1) 2011 年に実施した針葉樹の間伐により、空間線量率は 9~12% 低下した。
- (2) 下層植生の再生を促すため 2012 年に実施した落葉樹の伐採により、空間線量率は 11~21% 低下した。

(3) 厚さ 3cm の汚染していない土壌または木材チップを敷設することにより、24 ヶ月後に空間線量率は約 20%低下した。木材チップの上にさらに木材チップを 3cm の厚さで覆ったが、効果はごくわずかだった。

(4) 落葉の除去により、空間線量率は 10%程度減少したが、侵食による悪影響があった。

対策(1)と(2)は、一般的な森林管理方法である。間伐により林床に到達する日射量が増大し、下層植生の生育が促進される。その結果として、土壌が固定し、土壌侵食を防ぐ。堆積した放射性セシウムの相当分がまだ立木中に存在していた 2011 年から 2012 年にかけて、これらの対策は空間線量率の低減に大きな効果を発揮した。その翌年以降に、森林内の放射性セシウムの大半が土壌や落葉落枝層中に移行したため、この対策による空間線量率の低減効果は低下した。



図 2.5 森林の空間線量率の低減対策としての木材チップの敷設（提供：福島県）

対策(3)は最初の 2 年間が経過した後も続けられ、空間線量率が毎年測定された。2019 年末に県は、最初の空間線量率の低下が 5 年連続で維持されたと報告した。とはいえ IAEA チームは、各測定点における測定の不確実性により、何らかの効果があるとは断定できないとした。また IAEA チームは、5 年間にわたって毎年木材チップの上に落ち葉が蓄積しても線量率増加への明らかな寄与因子とならなかったことについても疑問視した。最後に IAEA チームは、5 年間にわたって動物による何らかのかく乱または木材チップの分解も期待できると指摘した。

県は、客土吹付または木材チップの追加を含む対策の実施は費用がかかり、広範な適用において正当性が低いと結論付けた。ただし、空間線量率が高い小さな区域、特に居住地に近い区域に対しての適用であれば現実的であるが、現在これらの対策は定期的に行われてはいない。

県は、間伐の前、間及び間伐後の森林生態系からの放射性セシウムの移行を調査している。全体的な流出は低いと考えられているが、地元の農家は依然として放射性セシウムが農地や水田に移行することを懸念している。県はまた、堆積速度と生態系からの放射性セシウムの流出を低減する上での丸太筋工と土嚢の有効性を調査している。予備的な調査結果によると、そのような対策は特に地形の傾斜が30度以上である場合に上記の方策は土壌の浸食と流出の防止に効果的であるという結果となった。堆積の過程で放射性セシウムは移行プロセスから除外されるが、土壌中の粘土鉱物と関連している可能性が高いため、そのような土壌は農業土壌としては利用できない可能性がある。同時に、堆積物の蓄積した一帯では空間線量率が上昇する可能性がある。

住宅地近隣の空間線量率の低減は、落葉除去や枝払い、表土剥ぎ取り等を組み合わせた対策によって可能になる。土壌侵食及び付随する除染地域の再汚染防止のため、山地に木柵を設置する方策が優先的対策となっている。

2.3.5 林業の管理

放射性濃度が 8,000Bq/kg を超える物質は、放射性廃棄物として管理すべきことが法律で規定されており、森林管理における懸念事項の一つとなっている。伐採木の処理の第一段階は、一般的に肥料やバイオマスプラントの燃料として使用されている樹皮の剥ぎ取りである。木材は住宅建築資材、窓枠、家具等に使用される重要な経済資源であるため、林業の効果的な管理を確実に行うことが重要である。

空間線量率と樹皮中の放射能濃度を関連付けるために測定が実施された。予想通りに測定結果にのぼらつきが大きく、樹皮中の放射性セシウム濃度 8,000Bq/kg に対応する空間線量率は平均 $1.57 \mu\text{Sv/h}$ であるが、測定値の範囲は $1.47 \sim 3.30 \mu\text{Sv/h}$ であった。県は、空間線量率が $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 未満の地域では 伐採や加工に制限を課さないという基準を採用した。当該基準を超える空間線量率の地域では、樹皮試料を採取・分析し、放射性セシウム濃度を測定しなければならない。これは安全側に立ったアプローチであり、良好な判断基準であると思われる。

また、焼却灰の放射性核種濃度は 8,000Bq/kg を超えない様に、薪の放射性セシウム濃度を 40Bq/kg に制限するという追加基準が策定された。薪と灰の濃度係数は通常 100 Bq/kg 以下である。したがって、この基準も比較的安全側に立ったアプローチとなっている。

植樹後間もない樹木については、放射性セシウムの吸収は、既存の立木を上回ると予想された。しかしながら、県の専門家は、植樹後間もない幼木の放射性セシウム濃度は僅か数百 Bq/kg 程度にすぎないことを示す実験結果を発表した。成木になるまでの期間は約 50 年であり、吸収が増大する可能性はあるものの、50 年間にわたる放射性崩壊による放射性セシウム濃度低下により、吸収分は十分に相殺されると考えられる。

これまで測定された中で、木材中の放射性セシウムの最高濃度は 5,500Bq/kg である。IAEA TECDOC-1376「木材及び木材製品中の放射性核種による一般市民線量の評価」

(Assessing radiation doses to the public from radionuclides in timber and wood products) の方法論を適用すると、このレベルの放射性セシウム濃度の木材が住宅建築に使用された場合の居住者の年間被ばく線量は、約 0.132mSv と推定される。スケールアップして 8,000Bq/kg と仮定すると、年間被ばく線量は約 0.2mSv となる。使用したモデルは安全側に立ったアプローチに従っているため、日本の家屋設計の相違が原因でそれらの推定線量が大きく増大することはないと予想される。したがって、現段階では、県内の森林からの住宅建設用木材の生産に対して、追加的制限措置は必要ではないと考えられる。

現在、木材中の放射性セシウム濃度は低く、国際基準を十分に満たしているものの、既に始まっている立木内の放射性セシウムの移行及び新規植栽された幼木への移行に関する調査研究を今後も継続する必要がある。

2.3.6 林業従事者の放射線被ばく防護

林業従事者は、放射線の被ばくリスクにさらされている。現在、林業従事者の被ばくを最小限に抑えられるよう、手袋やマスクが支給されている。林業従事者は、放射線業務従事者には分類されておらず、業務は空間線量率が $2.5\mu\text{Sv/h}$ を超えない地域に制限されている。このレベルは年間被ばく線量 5mSv 相当であり、県はこれを林業従事者の保護のための基準としている。なお、放射線業務従事者に関する年間被ばく線量限度は 20mSv である。

林業従事者の被ばく低減のため、人力に代わる伐採機械が導入されている。オペレーターは地上から高い位置で作業し、機械がオペレーターを放射線からさらに遮蔽するようになっている。さらに、一部の林業機械の操作室は遮蔽スペースとなっており、作業員の被ばく線量は約 35~40%低減される。

2.3.7 森林火災

IAEA-TECDOC-1240「チェルノブイリ事故の現在及び今後の環境影響」(*Present and future environmental impact of the Chernobyl accident*) は、「森林火災の結果として放射性核種が近隣域へ飛散するリスクがあるという考えがある。しかしながら、森林火災中の放射性核種の移行に関する既存データは、この考えとは合致しない」と述べている。さらに、「森林火災の主要問題は、汚染灰の大気中への再飛散である」とも述べている。

放射線レベルの増大は、森林火災の可能性を増大させるものではないが、森林管理活動の低下につながる場合が多く、定期的な間伐が行われなくなる結果として、燃えやすい物質の量が増える。火災が発生すると、放射性物質の付着した灰が大気中に拡散されることにより、放射性核種は数百 km の遠方まで運ばれる可能性がある。被ばく経路は、外部放射線及び煙霧吸入（消防士及び一般市民）、堆積した放射性核種由来の外部被ばく（一般市民）、汚染された食品の摂取（一般市民）、並びに森林火災サイトでの再飛散灰中の放射性核種の吸入（林業従事者及び一般市民）である。

森林火災によって移行する放射性核種は比較的少量である。実験的研究から、森林火災時に移行する放射性セシウムは、落葉落枝層中のわずかなパーセントであることが明らかになっている。2016年現在、県内の森林において落葉落枝層中に存在する放射性セシウムが7%程度に過ぎないことを考慮すると、森林火災に際して移行する放射性セシウムは、総貯留量のごくわずかな割合にすぎないと予想される。例えば、植生と落葉落枝層のみが燃える火災の場合、移行する放射性核種の比率は燃焼物中に存在する放射性核種の約0.1~0.5%である。しかしながら、樹冠まで燃えるような火災（樹冠火災）の場合には、移行する比率は10%まで増大する可能性がある。移行する放射性セシウムのほとんどは、火災現場から数百m以内の圏内で沈着すると予想される。したがって、火災現場から遠方においては空間線量率の増加はないと予想される。森林火災では大量の放射性核種の飛散は発生しないが、森林の土壌保持能力を損なうことで、浸食による土壌流出や、下層植生の消失により落葉が水に流されやすくなる等の可能性が生じる。

森林火災による気温の上昇は放射性セシウムの一部蒸発と、大気中への移行を引き起こす可能性がある。残留放射性セシウムは灰中に保持される。河川や水路内に沈着した場合の放射性セシウムは、短時間のうちに固体に吸着し、生物相への影響は最小限に留まると思われる。森林火災の影響については、通常、モデル化による評価が行われている。これは一つには、森林火災に付きまとう危険性や予測不能な性質のため、リアルタイムでのデータ収集が難しいことが理由である。森林火災の影響評価のため、多種類のモデルが確立されている。IAEA チームは、大半のモデルが森林火災の実際の影響を過大に推定していることから、パラメータや関連想定を変化させて感度分析を実行することが重要であると指摘している。土質や地形の差異が原因で、県内の森林火災は、チェルノブイリ事故の被災地域での火災よりも、放射線の影響は小さくなる可能性があることが指摘された。

2011年以来、県内では多数の森林火災が発生しており、県民に不安を引き起こした。県は、2016年及び2017年に発生した3件の森林火災に関する情報を発表した（（1）2016年3月30日~4月1日に伊達市で発生し約38haが燃えた火災。（2）2016年4月3日~4日に南相馬市で発生し約32haが燃えた火災。（3）2017年4月29日~5月10日に浪江町及び双葉町の避難指示区域内で発生し約75haが燃えた火災）。

上記(1)の放射線影響を調べるため、県はモニタリングプログラムを策定し、地表及び水域の空間線量率と放射性セシウム濃度を測定した。その結果、空間線量率の増加は認められなかった。上記(2)では地表において微量の放射性セシウムが検出されたが、火災現場の下流の水域からは放射性セシウムは検出されなかった。延焼箇所からの地表堆積物の流出量は、非延焼箇所における流出量の3~5倍であった。上記(3)については、2017年7月現在、調査結果の暫定的評価によると火災による大きな放射線影響はなく、測定点近傍における軽微な空間線量率の増大にとどまったことが示唆されている。また、灰が延焼箇所の近くを流下する河川に流入し、放射性セシウムが下流に運ばれる可能性に関する調査が計画された。

IAEA チームは、これらの火災が福島第一原子力発電所事故の直後すなわち放射性セシウムの大部分が落葉落枝層中に存在していた時期に発生していたと仮定した場合、更に大量の放射性セシウムが再配分された可能性があったことを指摘した。

2.4 里山再生モデル事業

里山は、山の丘陵地と耕作可能地との間の境界領域又は地域であり、大抵は森林、草地、水田等で構成される。里山周辺の住民は、しばしば食料自給による生活を営み、林内でキノコ栽培に従事していることもある。2016年に始まった里山再生モデル事業は、福島第一原子力発電所事故以前のように人々が里山に帰還し生活することを目的としている。2016年9月～12月にかけて、避難区域内及び隣接する市町村からプロジェクトに参加するサイトを選定した。この時点で、人々は指定された自治体への帰還を開始または検討していた。これは、多くの地方自治体と政府の間の共同プロジェクトであり、浜通り及び中通り地域の17のうち14の自治体に参加している。

本事業は、森林の維持管理及び除染、線量マップの作成及び個人線量調査の実施、並びに情報公開の実施の3つの主要項目から構成されている。このプロジェクトは、主に一般市民の安心のために推進され、完了後はすべての結果を地域社会と共有することとされている。

2017年に修正された実施取決めにおいて、以下の活動におけるIAEAの支援が含まれることとなった。

- 放射線量マップの作成;
- 日常的に使用される森林及び周辺地域の除染;
- 森林地帯の保全（主に広葉樹林と竹林）;
- バイオマスボイラーの中央設置;
- ケースバイケースでのその他の取り組み

協定の修正ののち県から上記プロジェクトについての説明を受け、IAEA チームは、作業の詳細に注意が払われていることに感銘し、費用対効果を検討する上で必要な情報がすべて揃っていると述べた。例えば、林業従事者が受けた放射線量は記録されており、放射性崩壊だけによる低減も考慮されたものであった。また、IAEA チームは、選択された地域での対策の効果は限定的である可能性にも言及し、プロジェクトの成功をどのように評価するかを定義することを検討する必要があることも指摘した。

IAEA チームが現場の環境や除染作業の内容を理解できるように、2019年7月に飯館村、2020年2月に大熊町と川内村への現場視察が実施された。

大熊町、川内村ともに、間伐や樹木の選択的な伐採が行われている。線量率が比較的高い（最大 $2\mu\text{Sv/h}$ ）大熊町では、観測された線量率の減少は、放射性崩壊によるものよりも平均8%上回っていた。年間線量率がバックグラウンドレベルをわずかに上回っている川内

村では、放射性崩壊による減少以上の減少は観察されなかった。図 2.6 は、川内村と大熊町の自然歩道整備結果を示している。川内村では、線量率が $0.24\mu\text{Sv/h}$ （「目標」値 $0.23\mu\text{Sv/h}$ を若干上回る）であり、9cm の落葉層と表土が除去され、線量率が $0.19\mu\text{Sv}$ に減少した。専門家は、数か月以内に線量率がいずれの場合も $0.23\mu\text{Sv/h}$ に低下するだろうと指摘し、この作業が放射線防護の観点から正当化されうるかを疑問視した。

IAEA チームは、元避難者らにプロジェクトの結果に関する情報を提供することによって帰還の判断を手助けすることの重要性を強調した。



図 2.6 里山再生モデル事業における川内村（上）と大熊町（下）の環境修復作業例
（提供：福島県）

2.5 野生の食物の管理

IAEA チームは、チェルノブイリ事故後のベラルーシ、チェコ共和国、ノルウェー、スウェーデンの農業及び野生の食物における放射性セシウムを制限を設定する際の手法と方針に関する情報を提供した。すべての場合において、野生の食物には、農業の食品と比較してかなり高い制限が適用された。これは、野生の食物は通常、比較的少量しか消費されず、放射能濃度は農作物よりもはるかに高くても、消費者が受ける放射線量は高くないためである。そのため、国のは、野生の食物の消費を厳しく制限する必要はなく、よって制限を課することで人々の生活様式が混乱させることは無いと結論付けた。

県からは、市場に販売されている野生の食物中の放射性セシウムの現在の制限である100Bq/kgは、次の2つの主な理由で修正される可能性は低いと説明している。第一に、それは県ではなく国の設定した制限であり、第二に、事故後何年間もの制限の強化はおそらく公衆に受け入れられないであろうということである。さらに重要なことは、現在適用されている制限は販売される食品にのみ適用されるということである。自ら消費することに対してはその限りではないようである。

100Bq/kgの出荷制限が少なくとも予見可能な将来にわたって野生の食物に適用され続ける可能性が高いことを考えて、IAEAチームは、野生の食物を調達する人々への線量を減らすことにさらに焦点を当てる必要があると助言した。イノシシ、キノコ、山菜、淡水魚といった自家消費には出荷制限は適用されない。放射性セシウムの測定は、穀物や野菜などの地元産の農産物をチェックするために使用されるが、野生の食物にもこのような測定を使うように奨励する必要がある。イノシシなど野生動物の肉に対しては、IAEAチームはチェルノブイリ事故後に広く使用されている“in vivo”技術の開発を提案した。この方法は、肉の放射性セシウム含有量を迅速な推定し、狩猟者が獲物を消費するかどうか決定を行うことを可能にする技術である。

IAEAチームは、長年または数十年にわたって県の一部の地域の特定の野生の食物に対する制限が必要になる可能性が高いことで合意した。それには、モニタリング手法を維持する必要がある、また、森で食料を調達する狩猟者その他の人々に対して放射性セシウム濃度の長期的なトレンドや費用効果の高い対策はないことへの理解醸成が不可欠である。IAEAチームはまた、その他の林産物に対する制限の開始及び解除の方法には違いがあることにも言及した。制限は解除することは非常に難しく、再び制限を課すことは容易である。

2.6 まとめ

県は森林における放射性セシウムの動態について理解を深め、追跡するため、大規模なモニタリング及び調査プログラムを実施してきた。栄養素と放射性核種の双方の再循環の一般的なメカニズムは、チェルノブイリ事故後の状況と類似していると予想される。しかしながら、福島県と欧州では森林の様相（年間降水量、気温、地形及び土壌特性）が異なり、この相違は放射性セシウムの移行と循環に大きく影響することが明らかになっている。

主な結論を以下に示す。

放射性セシウムの移行と循環

1. 県内の森林に沈着した放射性核種は、生態系内に保持され、農地への移行の可能性は低いと思われる。
2. 森林整備は、浸食及び土壌流出の防止につながるほか、放射性セシウムを森林内で保持することにも極めて効果的である。

- 3.放射性セシウムは森林土壌中に含まれる粘土鉱物と化学的に結合するため、植生への移行は限定的である。その結果、沈着量が同程度であれば、県内の森林における動植物中の放射性セシウム濃度は、チェルノブイリ原子力発電所事故後のヨーロッパの森林に比べて、相当に低い。
- 4.チェルノブイリ原子力発電所事故の被災地域における放射線モニタリングの知見に基づき、森林における放射線モニタリングは長期的に継続する必要がある、空間線量率モニタリング及び立木中の放射性物質濃度の測定方法は、環境中の放射性セシウムの移行や植物による吸収量が多くなる浸水地域での堆積等が変化し続ける状況を踏まえて調整していく必要がある。
- 5.森林生態系のすべての構成要素は相互に依存している。森林の昆虫はキノコを食べ、イノシシや淡水魚に食べられる。本報告書では言及していないが、イノシシはキノコを直接食べると信じられている。費用対効果が高く、環境に損害を与えることなく適用できる現実的な環境修復の方策はない。入手したデータは、特定の食品について長年、おそらく数十年間、県の一部で制限が継続することを示唆している。その間、コストが高いモニタリング手法が必要になる。
- 6.将来の線量率の低下は ^{137}Cs の放射性崩壊によって支配されるため、毎年1年間での低下量は小さいが、状況はより安定していると考えられることができる。このような状況では、技術的な観点から、モニタリングの頻度を減らすことも可能である。

考えられる対策

- 7.2012年以降、最初に森林内へ沈着した放射性セシウムの大半は、立木から土壌及び落葉層に移行した。しかしながら、空間線量率低減のために大量の表土を剥ぎ取ることは、現実的ではない。この対策はコストが高く、管理が必要な廃棄物を新たに生み出し、さらに森林生産性の低下を引き起こす可能性がある。
- 8.放射性セシウムを含まない土やウッドチップによる林床被覆は、空間線量率の低減のため有効な手段であるが、これらの対策の長期的な有効性については多くの疑問が残っている。これに対し、県はすでにその高額な費用のため、居住地域に近く高線量率の高い地域でのみ有効的と結論付けている。
- 9.現段階では、森林での木材生産及び利用を制限する必要はないと思われる。しかしながら、特に放射性セシウム濃度が高い地域における活動が開始されることから、木材のモニタリングは継続すべきである。

作業員の保護

10.伐採機械の導入や作業時間の制限等の、林業従事者の放射線被ばく低減のための対策が講じられている。全体として、安全側に立った取組みが実施されている。

森林火災

11.県による森林火災の調査では、放射線影響はほとんど認められていない。ただし、仮に、森林火災が福島第一原子力発電所事故の直後に発生していた場合、落葉層中の放射性セシウム含有量が高く、森林火災により再拡散し、放射線影響はより増大した可能性がある。

広報

12.里山再生モデル事業は 2019 年度に終了した。得られた結果を公表し、広く周知させることを目的としている。この情報は、元避難者が帰還するかどうかを決定する際に特に重要である。

13.野生の食物の 3 つのモニタリング手法には多くの類似点がある。相互依存関係は別として、森林のキノコ、淡水魚、野生動物のデータはすべて、高濃度の放射性セシウム、多くの異常値、及びレベルの極めてゆっくりとした低下を示している。これらの多くに含まれる放射能の濃度は、100Bq/kg の出荷制限をはるかに超えているが、これは商品として販売される食品にのみ適用される。

14.これらのすべての理由から、摂取する放射線量について、情報に基づいた選択を行えるように、個人消費のために野生の食物を採取する人々に、信頼できる情報をより多く提供することに継続的な注意を払う必要がある。

15.また、公開情報に関連して、時間の経過とともに、モニタリング手法の数値が「未満」または「検出不可能」となることが多くなる。これらは、制限が適用されたままであっても、状況が改善していることを示すための重要なコミュニケーションツールとなる。モニタリング手法には、標準的な手法が一様に適用される必要がある。

3. 陸域及び水域環境における放射性物質のモニタリング及び環境修復と除染

3.1 背景及び目的

県が収集したデータ及び実施した評価によると、最も重要な人の被ばく経路は、放射性セシウムから放出される外部放射線である（森林環境中の放射性セシウムについての詳細は第 2.1 節参照）。さらに県は、陸域及び水域における放射性セシウムレベルやそれに関連する一般市民の被ばく線量は除染、物理減衰、風化作用による地表の放射性セシウム除去（極端な気象事象などによる。第 3.5 節参照）及び土壌下や堆積物断面における垂直方向の移行によって低下したものと判断した。

環境回復や除染の必要性は、一般市民の被ばく線量の経時的な推移に大きく左右される。環境回復活動に関する意思決定は、現在の線量や、回復活動による達成が予想される将来の被ばく線量と人的介入を行わない場合の被ばく線量の比較を踏まえて行われる。したがって、人的介入の有無による空間線量率や住民被ばく線量の経時変化を予測することは有益である。

実施取決めでは、オフサイトにおける除染、環境モニタリング結果の分析、被ばく低減や回避を目的とした被ばく経路の調査等に関する課題に係る県への支援提供について言及している。具体的には、

- 福島第一原子力発電所事故の影響を受けた陸域及び水域の生態系（森林を除く）における放射性セシウムの動態。（第 2 節参照）。
- 水域生態系における環境回復対策及び除染対策の効果
- 環境媒体（土壌、水、堆積物）における放射性セシウム濃度の経時変化や傾向のためのモニタリング結果及び空間線量率の分析
- 適切で技術的に実施可能な環境修復活動を選択及びその活動によるデータの詳細化検討
- 水域における放射性セシウムの動態シミュレーションのためのモデルの適用
- 居住地域で実施された除染対策の有効性
- 台風などの過酷な気象事象による、淡水内の放射性セシウムの動態への影響
- 除染と修復の有効性、県内の一般市民の線量、モニタリング結果及び利害関係者の関与に係る情報発信（第 6 節参照）。

これらのテーマについては本報告書の以下の節で説明する。

3.2 陸水生態系における放射性セシウムの動態

3.2.1 自然環境における放射性セシウムに関する国際的な知見

放射性セシウムは大気圏内核実験、原子力施設の運転及び事故による放出によって自然環境に放出されてきた。一般的に陸域では放射性セシウムが土壌中の鉱物と強く結合するため、土壌からの移行が遅くなり、植物に吸収されにくい。土壌中の放射性セシウムは、土壌中の粘土粒子と徐々に結合する。この吸着は、可逆的であり交換性放射性セシウムのごく一部を構成する場合、または概ね不可逆的で固定画分を構成する場合がある。ただし、カリウム含有量が低い酸性の有機質土壌では、植物による放射性セシウムの取込みがはるかに多くなる。熱帯地方では、土壌が何千年にもわたり物理化学的な風化作用にさらされ、粘土鉱物の大部分が分解され、酸性状態下での浸出によってカリウムが枯渇するため、植物による吸収量がさらに多くなる場合がある。

淡水においては放射性セシウムは懸濁物質及び底質と強く結合するため、溶存態放射性セシウムの急速な減少を引き起こし、最終的には表流水中の底質に放射性セシウムを沈降させる。河川及び湖における放射性セシウムの移行は、概ね底質の再分配に起因する。淡水中の溶存カリウム濃度が上昇すると、これら 2 つの元素（セシウムとカリウム）の間で取込み競合が起きるため、淡水生物での放射性セシウムの蓄積量が減少する。さらに摂取後には、淡水生物からのセシウムとカリウムの相対流出率の差により、各栄養段階での放射性セシウム濃度を約 3~4 倍増加させる生物濃縮が生じる可能性がある。したがって、粒子の移行や放射性セシウムの動態に影響する水域の（pH、流域の地形、深度、懸濁物質濃度、カリウム濃度等）物理化学的条件及び水中食物連鎖の長さは、水中食物連鎖頂点における放射性セシウム濃度に影響する。野生魚の放射性セシウムモニタリングについては、第 2.3.3 節で詳しく説明する。

3.2.2 県環境下における放射性セシウムの動態

県内の環境条件下における放射性セシウムの動態は、2011 年以来多くの研究対象となってきた。それらの研究結果は国際的な知見と矛盾しておらず、土壌中で下方へ移行する放射性セシウム量や、作物を通じた土壌からの放射性セシウムの取込み量は、土壌による放射性セシウムの強い吸着により非常に小さい値となることを示している。

福島大学の実施研究によると、県内の土壌中の交換性放射性セシウムの割合と作物中の放射性セシウム濃度は、2011 年以降同時に減少している。県内の一般的な土壌型に対して、土壌が特定の放射性セシウムを吸収する能力指標である放射性セシウム捕捉ポテンシャル（RIP）が特定された。RIP の値が高い土壌や底質は放射性セシウムを強く吸着するため、土壌から作物への放射性セシウムの移行は小さくなる。チェルノブイリ事故以降、このコンセプトは、土壌のパラメータに基づき、作物による放射性セシウム吸収に予測を実施する際に広く用いられている。RIP 値が低い土壌では、作物へのセシウムの移行が低下するために、粘土質の利用が効果的であろう。

福島大学などの研究機関の調査では、福島第一原子力発電所事故で放出された⁹⁰Srの量は極めて限定的であり、福島第一原発のごく周辺を除いて、農耕地や作物中の⁹⁰Sr濃度は1960年代に行われた大気中核実験での降下物由来の値と同程度であったことが示唆されている。これらの研究は、福島市と伊達市内の農産物摂取による⁹⁰Srからの内部線量は年間数十μSv程度であり、人々の推定線量に大きな変化はもたらさないと推定した。

IAEA チームは、環境中の放射性セシウムの動態と環境回復プロジェクトに関する国際的な知見を提示した。それによると、チェルノブイリ事故や福島第一原子力発電所事故の後、環境中の放射能濃度は、自然減衰によって減少に寄与した。しかし、放射性セシウムの流出量は、以下の理由から、チェルノブイリ事故に影響を受けた地域よりも県内の方が高いことが判明した。

- 県内の方が台風による降水量が多く、気温も高い。
- 県内の方が生物活性が高い。
- チェルノブイリの方が凍結期間が長い。
- 県内の方が山腹の勾配が大きい。

これらの要因は放射性セシウムの移行プロセスに影響を与えている。

3.2.3 河川集水域における移行プロセス

図 3.1 に、河川や河川系を介した放射性セシウムの移行を示した。放射性セシウムは森林や農業地域、住宅地域に沈着したが、土壌の鉱物成分に強く吸着されるため、水の流れやそれに伴う堆積物の再分散により輸送される。陸域及び水域との相互作用や考えられる農作物への移行経路においては、以下のプロセスが重要である。

- 放射性セシウムは、流出により森林、住宅地域及び農業地域から除去されるが、この現象は降雨強度や地形の勾配、表面特性（植生、舗装、露出土壌）によって異なる。
- 河川水系は池や湖、貯水池やため池等につながっており、飲料水又は栽培期の灌漑用水として使用されることがある。
- 集中的な降雨又は極端な気象事象（台風など）による河川の氾濫や濁流は、堆積物と結合した放射性セシウムの動態に影響を与えうる。
- 放射性セシウムの一部は、海まで輸送される。

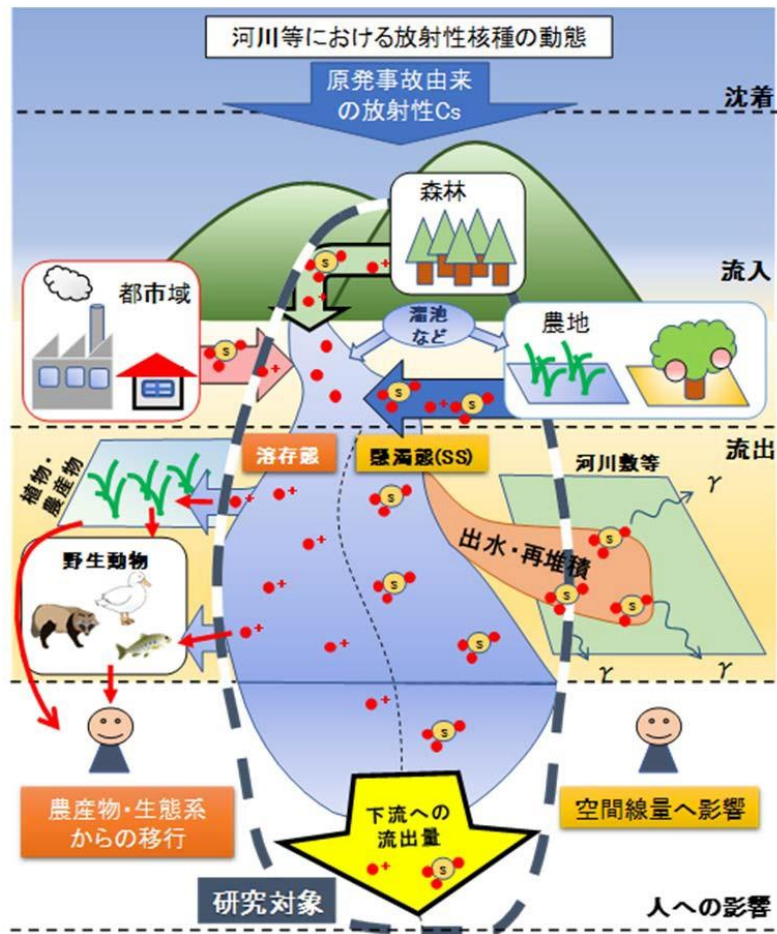


図 3.1 集水域を介した放射性セシウムの移行及び陸域との相互作用（提供：福島県）

3.3 モニタリングプログラム結果の分析

3.3.1 水や堆積物中の放射性セシウムモニタリング

県内では、都市部における消費や農業活動、その他の目的のための水源として、河川水が広く利用されている。そのため県は表流水中の放射性セシウム濃度のモニタリングを実施するための包括的なプログラムを策定し、福島県環境創造センターにおいて実施している（図 3.2 及び表 3.1）。

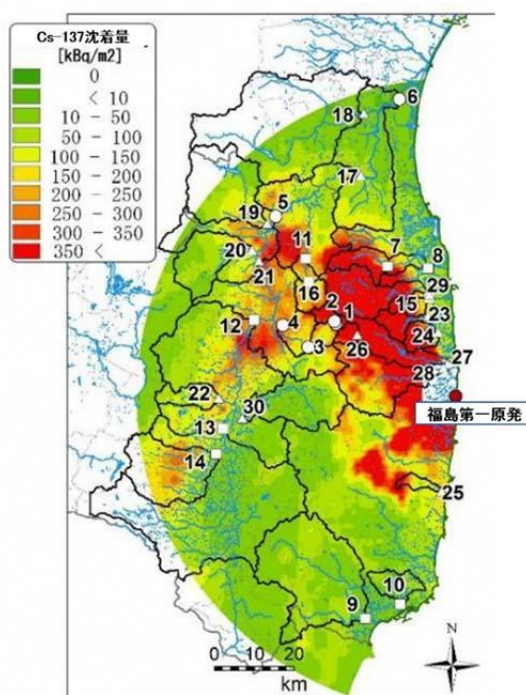


図 3.2 第 3 次航空機モニタリング調査で定量された県内の ^{137}Cs の沈着量分布（文部科学省、2011 年 7 月 2 日）

表 3.1 広域河川調査における集水域と平均¹³⁷Cs インベントリ (データ出典:

<https://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/191954.pdf>)

サイト No.	地点名	河川系	河川名	集水域(km ²)	平均 ¹³⁷ Cs インベントリ(kBq/m ²)
1	水境川	阿武隈川	口太川	8	587
2	口太川上流	阿武隈川	口太川	21	408
3	口太川中流	阿武隈川	口太川	63	304
4	口太川下流	阿武隈川	口太川	135	248
5	伏黒	阿武隈川	阿武隈川	3645	102
6	岩沼	阿武隈川	阿武隈川	5313	96
7	真野	真野川	真野川	76	521
8	小島田堰	真野川	真野川	111	418
9	松原	鮫川	鮫川	871	46
10	小名浜	藤原川	藤原川	70	45
11	月舘	阿武隈川	広瀬川	84	222
12	二本松	阿武隈川	阿武隈川	2380	88
13	御代田	阿武隈川	阿武隈川	1287	77
14	西川	阿武隈川	釈迦堂川	289	137
15	北町	新田川	水無川	36	537
16	川俣	阿武隈川	広瀬川	57	226
17	丸森	阿武隈川	阿武隈川	4124	113
18	船岡大橋	阿武隈川	白石川	775	27
19	瀬上	阿武隈川	摺上川	313	51
20	八木田	阿武隈川	荒川	185	63
21	黒岩	阿武隈川	阿武隈川	2921	109
22	富田	阿武隈川	逢瀬川	73	117
23	太田	太田川	太田川	50	1638
24	小高	小高川	小高川	50	750
25	浅見	浅見川	浅見川	26	197
26	津島	請戸川	請戸川	25	813
27	請戸	請戸川	請戸川	153	2329
28	高瀬	請戸川	高瀬川	264	696
29	原町	新田川	新田川	200	858
30	赤沼	阿武隈川	大滝根川	243	57
31	亘理	阿武隈川	阿武隈川	5313	96

*亘理地点 (31) は岩沼地点 (6) の対岸にあり、予備のモニタリング地点として設置。

モニタリングの項目には、水中の溶存態放射性セシウム及び川や湖の懸濁物質と結合している放射性セシウム濃度も含まれる。さらに、一部の試料では非常に濃縮された放射性セシウムを含む微粒子 (CsMPs) の有無を確認するためのスクリーニングも行われる (第 3.3.4 節参照)。

放射性セシウムの懸濁物質への強い吸着及び河底への堆積により、河川水中の放射性セシウム濃度レベルは経時的にかなり低下し、事故から7年以下の間に測定検出限界0.05Bq/L (安全な飲料水に対する水質基準をはるかに下回るレベル) に近いレベルまたはそれ以下となった。

特に、汚染された集水域の浸食が制限されている場合には、懸濁物質中の放射性セシウム濃度は明らかに低下した。一方、国際的な事例と矛盾することなく、堆積物中の放射性セシウム濃度は粒径の減少に伴って上昇する傾向を示した。

県のモニタリングプログラムは、県の集水域の放射性セシウムの長期的な動態、特に以下の3点に注目した。

- 洪水や極端な気象状況（台風など）の発生時に堆積物や氾濫原の土壌粒子と結合した放射性セシウムの堆積や除去を含む懸濁粒子とその放射性セシウムのレベルと動態、さらにそれに伴う空間線量率への影響
- 生態系を介した農産物、野生動物及び植物への溶存態の放射性セシウムの移行
- 集水域における懸濁態及び溶存態放射性セシウムの動態

水の物理化学的性質を特徴付けるため、水圏における放射性セシウムの動態に影響を及ぼす主要なイオン（カリウム、カルシウム、マグネシウム及びアンモニウム）の濃度も測定した（第3.2節参照）。県内の陸域集水域と表流水環境との間での放射性セシウムの移行をさらに理解するために、トレーサー技術を適用した（第3.3.5節参照）。

県では、 ^{137}Cs の沈着による影響を受けた流域での測定を重点的に実施した（図3.2及び表3.1参照）。これには、放射性セシウム濃度の時間空間的变化と放射性セシウムの動態に及ぼす流域特性の影響を把握するための複数の河川のモニタリング地点において実施した一般的な調査も含まれる。また、広瀬川と口太川流域で実施した詳細な調査を基に、放射性セシウム動態の推定及び実測値とシミュレーションモデルによる推定値との比較を行った（第3.4節参照）。調査は広瀬川流域に重点が置かれ、河川沿いにモニタリング地点を12ヵ所設置し、その中には高根川、布川、小国川等の支流も含まれている。測定項目には、表流水の物理化学的性質だけでなく、河川の流量、濁度及び懸濁物質濃度も含まれている。予想どおり、降雨イベント時には、ある程度の時間差はあったものの流量及び懸濁物質濃度が上昇していた。経時的なばらつきは大きいものの、2011年以降は溶存態と懸濁態の ^{137}Cs 濃度は引き続き低下している。浜通りと中通り地域の河川における放射性セシウム移行調査でも同様の傾向が見られた。図3.3に2011年以降の30ヵ所以上の測定地点での懸濁態 ^{137}Cs 濃度の測定結果を示す。2015年9月には、豪雨により放射性セシウム吸着力の低い砂質粒子が大量に供給されたことによる希釈効果により、懸濁態放射性セシウム濃度が低下した。

水圏の放射性セシウムの大半は河川水中の懸濁物質に吸着結合されているため、流量及び懸濁物質フラックスデータを併用することで、放射性セシウム濃度から2011年から2016年の期間に対象流域から太平洋への放射性セシウムフラックスの推定が可能となる。（「前プロジェクトの最終報告書」参照）。累積流出量（特定の期間中に太平洋へと輸送された放射性セシウムの量）の増加の程度は経時的に低下しており、これは、図3.4（パネルA及びD）に示したそれぞれの値の増加の程度が緩くなっている事からも分かる）。

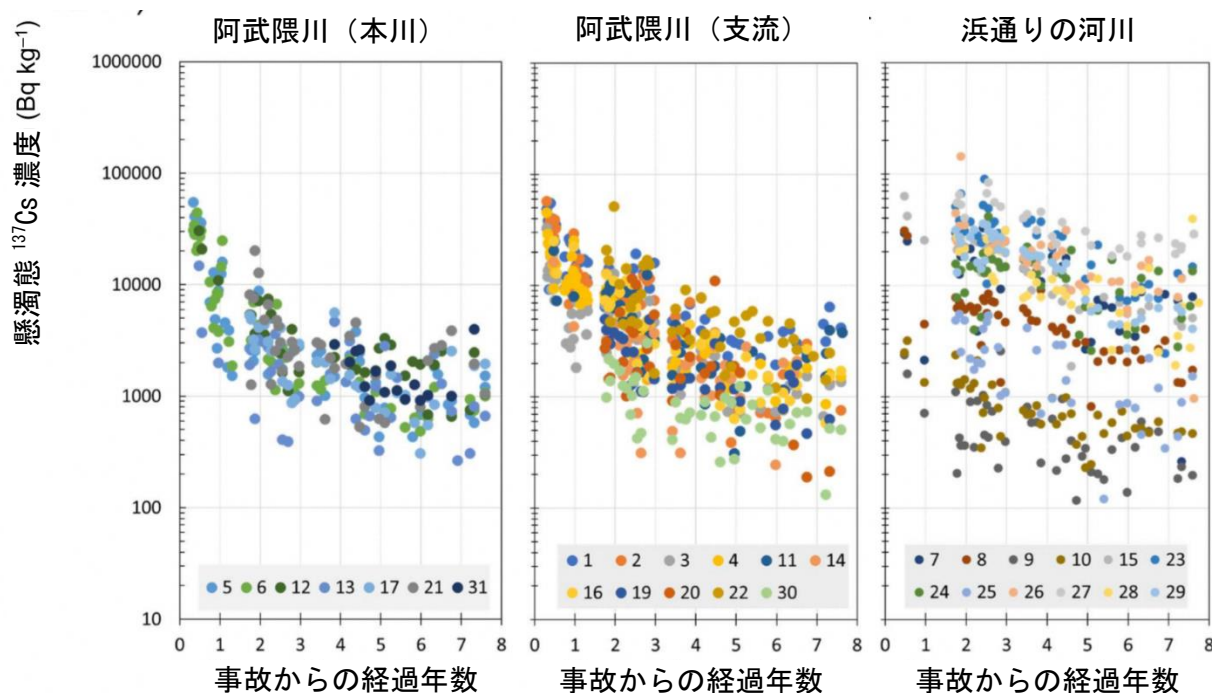


図 3.3 2011 年～2019 年にわたる県内河川の懸濁物質中 ^{137}Cs 濃度の低下（提供：福島県）

IAEA チームと県の専門家は、放射性セシウム動態評価モニタリングを実施する際は標準化されたサンプルの収集と保管手順の適用、及び必要に応じて水域生態系間の相互比較の容易化のため、モニタリング結果の標準的な表記が必要である、またそれにより国際的文献の比較が可能になるという点で意見が一致した。

3.3.2 県内河川における ^{137}Cs の実効半減期

懸濁態及び溶存態 ^{137}Cs の経時的なモニタリングによって得たデータを基に、各形態の ^{137}Cs 実効半減期 (T_{eff})² を推定した。2012 年から 2018 年の間に収集されたデータによると、県内の河川における ^{137}Cs の実効半減期は、溶存態放射性セシウムの場合の期間は 2.4～4.4 年、懸濁態の場合は 2.6～2.9 年であった。県内の河川において特定された実効半減期は、チェルノブイリ事故後の欧州の河川について報告されたデータと一致している。

ただし、放射性核種の実効半減期は経時的に変化し、それが流域内の粒子と放射性セシウム（ここでは ^{137}Cs ）の動態の変化に反映する点に留意する必要がある。たとえば、口太川流域内での懸濁物質中の ^{137}Cs の経時的なモニタリングによって、2014 年春に大規模な除染が行われた地域で懸濁物質中の ^{137}Cs 濃度が急速に低下したことが示されており、それに伴い実効半減期が減少した。

² 実効半減期 (T_{eff}) とは、特定量の放射性物質（ここでは懸濁態及び溶存態の ^{137}Cs ）の放射能が、放射性崩壊、その他の消失プロセスによって初期の放射能の半分まで減少するまでに要する時間である。

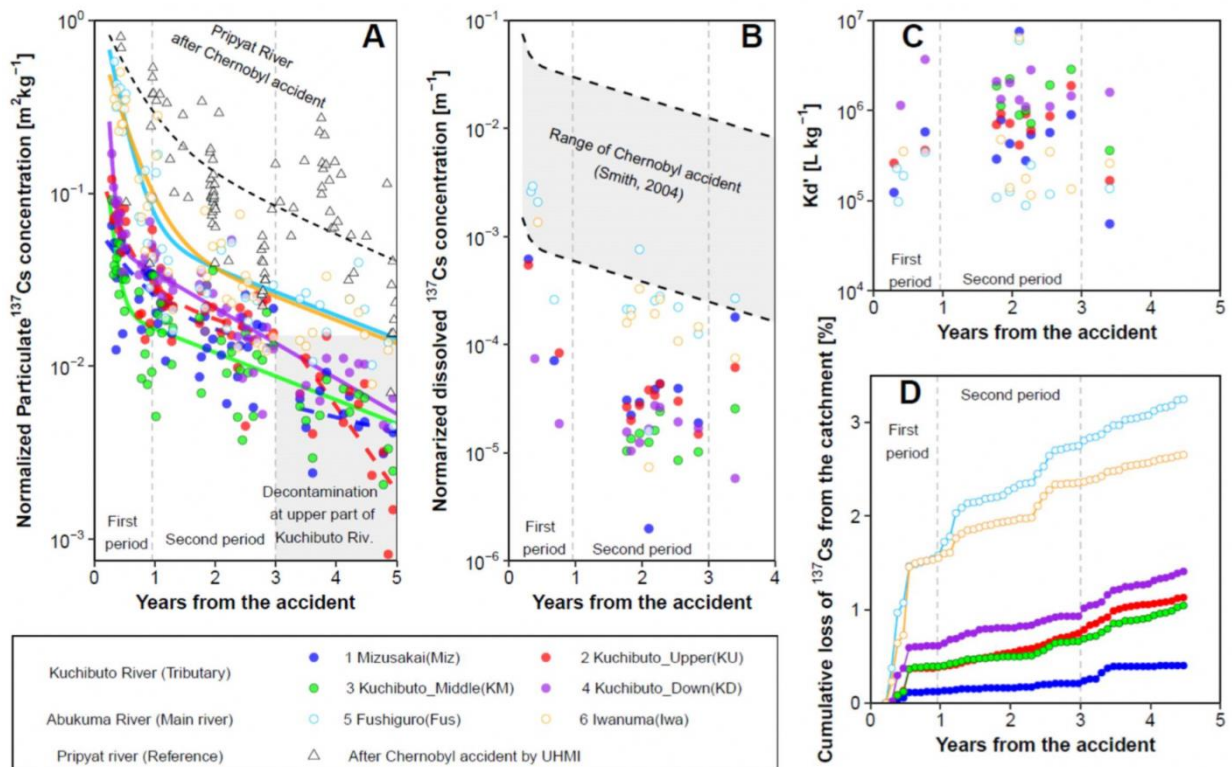


図 3.4 除染前、中、後（2011 年～2016 年）における県内河川の ^{137}Cs の経時変化

- 1) 正規化された懸濁態及び溶存態の ^{137}Cs の放射能濃度の低下（パネル A,B）
- 2) 分配係数 (K_d)（パネル C）
- 3) 2011 年 6 月から 2016 年までの県内の河川流域からの ^{137}Cs の累積流出量（パネル D）

本図では、阿武隈川及びその支流である口太川のモニタリング結果が色付きの丸印で、阿武隈川のモニタリング結果が白抜き丸印で示されている。

3.3.3 植物プランクトン及び動物プランクトン中の放射性セシウム

県内の研究機関による浜通り及び中通り地域の植物及び動物プランクトン個体群の放射性セシウムレベルの測定については、「前プロジェクトの最終報告書」に記載されている。プランクトンの密度は非常に低く、時間的及び空間的にばらついていていた。横川ダムでは、水中の植物プランクトンの密度は 0.1mg/L 程度であると判断された。動物プランクトンの密度はその約 10 分の 1 であった。植物プランクトン及び動物プランクトンの放射性セシウムの総放射能は、所定の水域に存在する放射性セシウム放射能のごく一部にすぎなかった。

3.3.4 放射性セシウム含有放射性微粒子の特性と発生

2018年10月のモニタリングにおいて、県内の浜通り地域の川で懸濁物質の一つの試料に高い ^{137}Cs 放射能濃度が検出された(図3.5参照)。不溶性の高濃縮放射性セシウム(Cs)を含む微粒子(CsMPs)が、当該サンプルに混入していたと思われる。この評価を通じて、2種類のCsMPが見つかった。タイプA粒子の直径は一般的に $1\sim 2\mu\text{m}$ で、一般的に $1\sim 2\text{Bq}$ の ^{137}Cs を含有していた。タイプBの粒子は、一般的に直径が $5\sim 250\mu\text{m}$ で、 $5\sim 100\text{Bq}$ の ^{137}Cs を含有していた。

IAEA チームから、放射性セシウムを含有する放射性粒子、それらの発生及び特性評価に関する国際的な知見が提示された。IAEA チームとの協議の間、CsMPs が一般市民の被ばくや線量への有意に寄与する可能性は低いと想定されたが、既存のモニタリングプログラムの一環としてそのような粒子のスクリーニングは適切な配慮という観点から重要であると認識された。さらに、IAEA チームは、CsMPs 発生源の特徴、組成、粒径分布、密度、風化速度及び流動性をリスク評価の観点で評価することを今後の研究課題として提言した。IAEA チームは県の専門家に対し、CsMPs を環境トレーサーとして適用することを提案した。

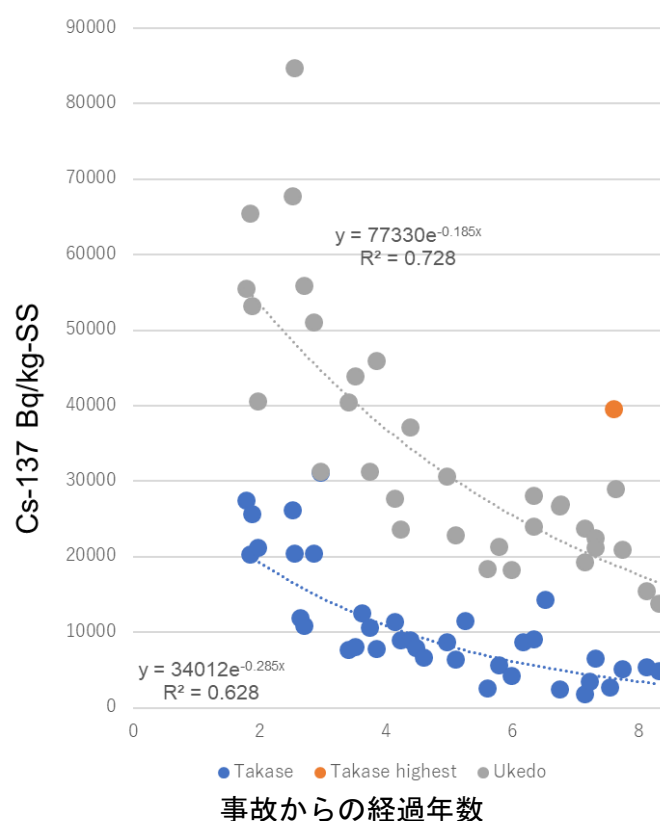


図 3.5 福島県浜通り地域の河川から採取した懸濁物質 (SS) サンプル中の ^{137}Cs 放射能濃度の経時変化 (提供：福島県)

3.3.5 集水域における放射性セシウムの再配分

放射性セシウムは、集水域において粒子や放射性セシウムの移行に影響を与える自然プロセス（降雨事象、融雪、嵐、台風などの典型的な又は極端な気象事象を含む）及び人為的攪乱により再配分される可能性がある。このような事象は、下流への表層水の流出、洪水、放射性セシウムの流出、浸食などの増加を引き起こす可能性がある。その結果、放射性セシウムが結合している土壌や底質粒子の再配分、植生の枯死及びそれに続く植物組織に蓄積した放射性セシウムの分解と再移行などの移行プロセスにつながる可能性がある。人為的な活動として、集水域内の物理的攪乱につながる活動があり、それらによって被ばく経路が変化、また、流出、浸食、決壊などのプロセスを介して放射性セシウムが再移行しやすくなる（図 3.1 参照）。

そのような事象や攪乱が発生した場合に懸濁物質などの物質の発生源及び再配分、放射性セシウムの動態については被ばくに及ぼす影響を理解することが重要である。IAEA チームは安定同位体などの環境トレーサーの適用を検討した。環境トレーサーは、懸濁物質（有機物と無機物を含む）の発生源や、森林集水域と表流水との間における放射性セシウムの動態などに関する重要な知見をもたらす。たとえば、安定炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）は、さまざまな種類の植物だけでなく、さまざまな環境媒体においても極めて特徴的である。したがって、 ^{137}Cs 濃度に加えて $\delta^{13}\text{C}$ は、集水域の放射性セシウムの動態をよりよく理解するためのツールとして役立つ可能性がある。

県が実施した解析によると、2011～2016 年に集水域から阿武隈川及びその支流である口太川を介して流出した ^{137}Cs の初期沈着量に対する累積流出率は、それぞれ約 2.7%（2.5～3.0%）及び 1%（0.5～1.5%）であった（前プロジェクトの最終報告書）。これらの小さな値は、自然環境における放射性セシウムレベルの低下が主に物理的壊変によるものであり、これらの集水域からの流出は全体のインベントリの減少に対して小さな因子に過ぎないことを示している（理由としては、流出や侵食プロセスは集水域の汚染土壌の最上層に影響を及ぼすに過ぎないため）。また、これらの結果は、地形における様々な要素間での放射性セシウムの移行は限定されたものであることも示している。

阿武隈川を介した懸濁態及び溶存態 ^{137}Cs 流出量に関する相対的な評価では、福島第一原子力発電所事故後の 5 年間においてはその 96.5%が懸濁態であった（「前プロジェクトの最終報告書」）。懸濁態 ^{137}Cs 濃度及びフラックスと土地被覆率との関係を、さまざまな土地利用について評価した。放射能濃度と流出率の低下率は森林地域では低いが、生活圏（水田、農地、都市部など）では高いという結論が得られた（図 3.6 参照）。生活圏からの流出は、流域全体からの ^{137}Cs フラックス 12TBq の 85%を占め、森林地域からは、残りの 15%が流

出していた。これらの結果は、Environmental Science and Technology に査読付科学論文として出版された³。

横川ダムの溶存態及び懸濁態放射性セシウムは、2014年に県内の研究所によって測定された。貯水池からの放流水と、貯水池への流入水中の溶存態放射性セシウム濃度を比較すると非常に類似していた。ただし、懸濁態放射性セシウムは、貯水池や湖の場合と同様に、流速が非常に遅い水中で沈殿するため、放流時の懸濁態放射性セシウム量は、流入時よりもはるかに少なかった。このように、貯水池は一種のセディメントトラップとして機能する。

懸濁物質への放射性セシウムの吸着プロセスは、自然環境での放射性セシウムの動態において重要な役割を果たす。そのため県は、土壌や堆積物への放射性セシウムの吸着の強さの定量化を目的とした調査を実施した。これは通常、溶存態に対する懸濁態放射性セシウム濃度から算出される分配係数 (K_d) として定義されることが多い。調査した河川水においては、 K_d 値は $10^5 \sim 10^7$ L/kg の範囲に存在していたことから、懸濁物質に対する放射性セシウム吸着の影響が強いことを反映している⁴ (図 3.4、パネル C)。国際的知見に基づいて予想した通り、 K_d 値は粒径の減少とともに増加した。懸濁物質中の ^{137}Cs 濃度と同様に、溶存態 ^{137}Cs 濃度も経時的に低下した。福島における K_d 値 (図 3.4、パネル C) にも表れている様に、溶存態 ^{137}Cs 濃度 (図 3.4、パネル B) は、チェルノブイリ事故後に測定された値より少なくとも 1 桁低い³。

炭素の安定同位体を用いた手法を使用し、広瀬川とその支流での関連パラメータ (懸濁物質中の ^{137}Cs 濃度、全炭素濃度 (TC)、懸濁物質濃度など) の測定によって、平水時と出水時における懸濁物質負荷源とそれらの集水域内の ^{137}Cs の移行への影響を比較した。進行中の調査の結果は、2020年2月のIAEA会合において県の専門家によって発表された。出水時の期間と比較して、季節毎の平水時と出水中の河川水では、ほとんどの場合において出水時の懸濁物質濃度が高かったことが示されている。懸濁物質は主に無機物で構成されていたが、懸濁物質濃度の上昇に伴い、河川水中の全炭素濃度も増加した。これは、出水に伴い時に、おそらく周囲の環境から河川へと有機物が流入したことを示唆している。

³ TANIGUCHI, K., Y. ONDA, H.G. SMITH, W. BLAKE, K. YOSHIMURA, Y. YAMASHIKI, T. KURAMOTO, K. SAITO, 2019. 福島県における放射性降下物中の放射性セシウムの河川を介した移行と再配分 *ENVIRON. SCI. TECHNOL.* 2019, 53, 21, 12339–12347 [HTTPS://PUBS.ACS.ORG/DOI/10.1021/ACS.EST.9B02890](https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.9b02890)

⁴ 例えば 1,000,000 L / kg という分配係数 (K_d) は、懸濁物質中の濃度が水中の 1,000,000 倍であることを意味する。これは、セシウムの非常に強い吸着と、放射性セシウムインベントリの大部分が堆積物と結合していることを意味する。

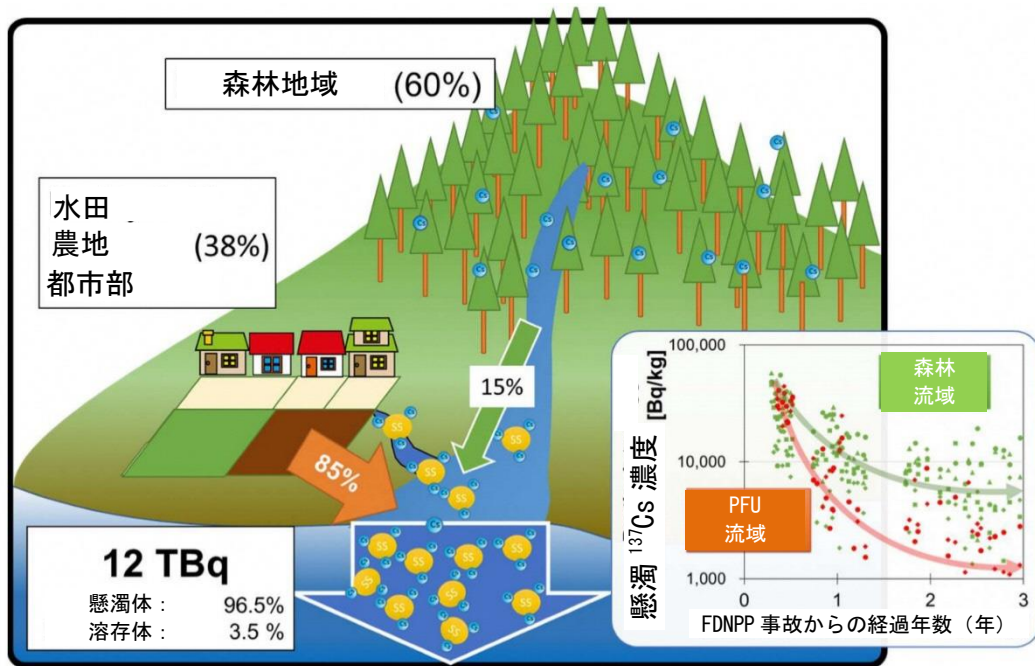


図 3.6 福島第一原子力発電所事故後 5 年間の人的活動領域（水田、農地及び都市部（PFU））と比較した森林地域からの相対的な ^{137}Cs 流出（脚注 3 参照）

さらに、懸濁物質の濃度の上昇に伴い、安定炭素同位体組成 ($\delta^{13}\text{C}$) は低下する傾向にあり、平水時に広瀬川及びその支流の懸濁物質で測定された $\delta^{13}\text{C}$ よりも低かった。比較すると、高水時の懸濁物質中の $\delta^{13}\text{C}$ は周囲の集水域の土壌で測定された結果と一致しており、これは、河床堆積物よりも $\delta^{13}\text{C}$ の低い土壌が周囲の集水域から広瀬川とその支流に流入した可能性を示唆している。平水時と高水時における懸濁物質中の ^{137}Cs 放射能濃度を比較すると、平水時の ^{137}Cs レベルの方が高かった。これは県内で実施された調査結果と一致しており、2015 年 9 月の豪雨中に県内河川で大量の砂質粒子が浮遊し、上記の通り懸濁物質中の ^{137}Cs 放射能濃度が減少した。

その他の利用可能な環境トレーサー及び上記の状況への適用については、県の専門家と IAEA チームが協議し、継続的な協力を要すると認識された。

3.4 シミュレーションモデルの適用

モニタリング結果の解釈を深めるために、モデルを適用して、集水域から河川を介した太平洋までの放射性セシウムの輸送をシミュレーションした。そのために、TODAM モデル（時間依存的かつ 1 次元的な分解・移行モデル）⁵ を用いて、請戸川から高瀬川及び大柿ダムへの ^{137}Cs フラックスをシミュレーションした。

⁵ Onishi et al. (低レベル放射性廃棄物管理に関するマルチメディア放射性核種被ばく評価手法の開発 PNL-3370, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, USA (1983))

このモデルは、これまで世界中の複数の様々な規模の河川に適用されており、チェルノブイリ事故や、マヤック（ロシア連邦）、ハンフォード及びサバンナリバー（米国）の核施設から環境に放出された放射性核種の移行の評価や分析に利用されている。

TODAM モデルでは、流量、地形、土地利用状況、その他の要因が与える潜在的な影響を考慮に入れた上で、河川での懸濁態及び溶存態 ^{137}Cs 動態を予測することが出来る。例えば以下の評価において TODAM モデルを使用することができる。

- 地域住民の生活及び農業用水としての水の利用可能性
- 政策決定において河川へ適用する環境修復対策の有効性
- 環境修復対策の持続性を評価する上で不可欠な再汚染による影響
- 集水域から海洋までの ^{137}Cs フラックス

日本原子力研究開発機構（JAEA）は、TODAMモデルの適用によって、大柿ダムでの ^{137}Cs 移行をシミュレーションし、放射性セシウムの輸送動態におけるダムの役割を調査した。その結果、ダム湖は懸濁態放射性セシウムの約 90% を保持できることが判明した。これは、横川ダムでの観測結果と類似している。これらのダム湖の様子、流速が非常に遅い場所では懸濁物質の沈殿を促されている。さらに、広瀬川流域に対して TODAM モデルを適用し、平水及び出水条件下で得られた ^{137}Cs 濃度の実測値と計算値とを比較した（図 3.7 参照）ところ、実測値と計算値との間には一貫性がみられた。

これまでの会合では、IAEA、県及び国内・国外の専門家が参加し、水域に対して適用された様々なタイプの予測モデルの結果等について議論を行ってきた。

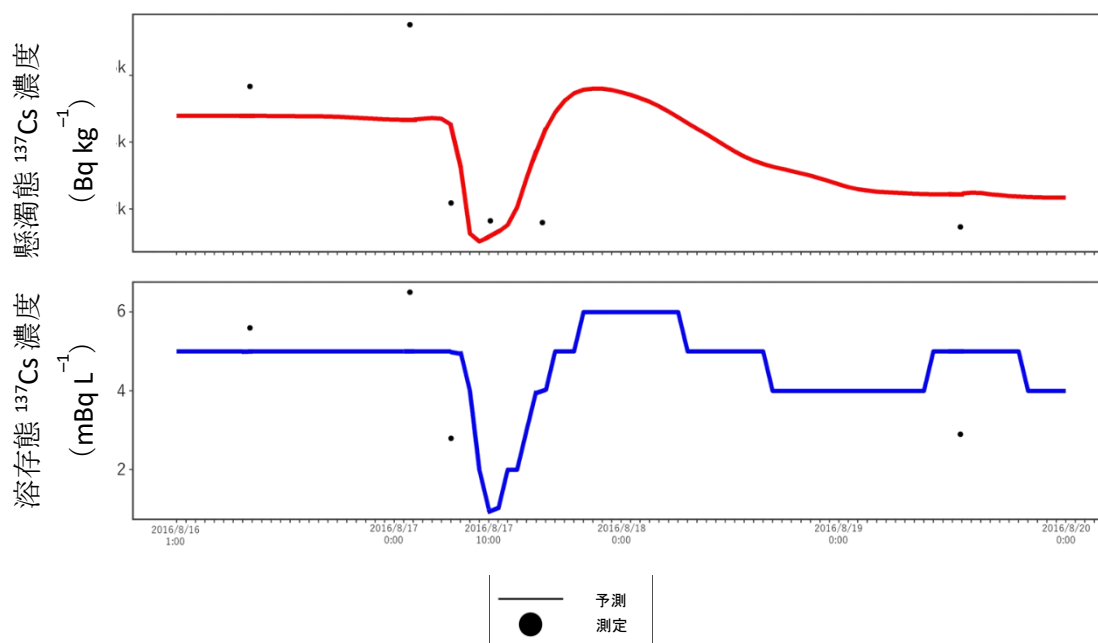


図 3.7 出水時における懸濁態及び溶存態 ^{137}Cs 濃度の実測値と TODAM モデルによる計算値との比較。広瀬川下流端での観測地点における経時変化（提供：福島県）

3.5 河川や湖における環境回復及び除染の知見

3.5.1 国際的な知見

ここ数十年、世界中の多くの地域が放射性核種の沈着による影響を受けてきた。多くの場合、淡水生態系が影響を受けてきた。その事例として、チェルノブイリ事故や、マヤック（ロシア連邦）、サバンナリバー及びハンフォード（米国）の核施設からの放射性核種の放出が挙げられる。

これらの国際的な知見について、IAEA チームが提示したが、すべて特異なもので、影響を受けた地域、汚染レベル、地域住民の様々な被ばく経路（水圏経路を含む）、住民の線量及び放射線、社会的影響緩和のための対策は異なっている。汚染放出後に、IAEA チームが特定した以下の2種類の対策が適用された。

1. 技術的対策：
 - － 汚染された水域での堆積物の除去
 - － 水域からの放射性核種のさらなる拡散を減らすためのダム建設
 - － 生体内蓄積量削減のため水域の pH を上げる物質の適用
 - － 放射性核種の付着した粒子の堆積加速のためのセディメントトラップ構築
2. 汚染地域への立ち入り制限、漁業の制限、飲用水や灌漑用水の供給制限などの行政措置、及び一般市民への指導。

過去に得られた教訓の1つに、技術的対策は水域における放射性核種の拡散制御策としての効果が限られており、水生生物生息地に深刻な悪影響を及ぼす可能性があることが挙げられる。淡水系は、多くの場合、流量、混合及び水位の時間依存性が顕著であり、これは流速の大きな変動と関連し、放射性核種の移行は主に一時的な高水時の期間に発生し、それに伴い汚染された堆積物の再浮遊、移動及び再堆積が生じるのが一般的である。このようなプロセスの制御が困難であり、したがって、技術的対策の持続可能性は限定的となる場合が多い。

立ち入り制限や指導実施などの行政措置による、河川や湖利用による一般市民の被ばくの管理は、それほど複雑なものではない。そのような対策は比較的簡単に実施でき効果があることが証明されているが、その成功する実施には、明確な指示と指導が必要である。一般市民への施行中の行政措置の周知の必要性は、これまでの知見が示している。

淡水系の活発な自然のため、放射性汚染がひとたび発生した場合は、放射性核種のモニタリングを以下の目的のために長期的に実施する必要がある。

- (1) 水、堆積物及び関連生物相における放射性セシウムの時間的傾向の特定
- (2) 高水時及び洪水時の物質や堆積物の移動によってもたらされる可能性がある新たな汚染パターンの特定
- (3) 適用した除染対策の有効性の検証

3.5.2 ため池中の放射性セシウム対策

県は、2014年に避難指示区域内外の約3,000のため池の水と堆積物中の放射性セシウム放射能濃度を測定した（前プロジェクトの最終報告書参照）。放射性セシウムと粘土粒子は強く結合するため、ため池の水中の溶存態放射性セシウムの放射能濃度は、堆積物中のものよりも桁違いに低い。この結果は、県が川や湖で実施した結果とかなり一致している。ため池から採取した水サンプルの1%においては、溶存態の放射性セシウムの放射能濃度は1Bq/L以上で、これらのため池は主に避難指示区域内にある。溶存態放射性セシウムが1Bq/L以上のため池の数は、2013年から2014年の間に減少した。

県は、ため池の溶存態放射性セシウム濃度の低減のために、様々な技術を試した。2014年及び2015年に公募により選ばれた技術は以下のとおりである。

- 水中装置による砂、砂利及び粘土分の分離。この装置は、砂や砂利の粒子の放射性セシウム濃度が粘土鉱物中のそれよりも低い特性を利用するものである。砂や砂利はため池に残るが、粘土分は除去される。
- ため池の堆積物を除去し、廃棄物バッグに保管。堆積物から水分を取り除くため、廃棄物としての体積は粘土分の堆積より減少する。
- ため池にシルトフェンスを設置する。シルトフェンスはため池内の流速を低減し、沈殿を促す。この方法は、ため池からの放射性セシウム流出を防止する。
- ため池から水を除去し、セメントを加え堆積物を固定する。これによって堆積物を結合させ、放射性セシウムの流出を防止する。

日本政府は、これらの試験結果を踏まえて、対策手法マニュアルを作成した。県では、このマニュアルに従って対策を実施している。

3.5.3 県内河川敷における除染対策

県は、空間線量率の低下のため、3つの河川敷で試験した除染対策の調査を発表した。

懸濁粒子中の¹³⁷Cs 除染効果の評価

口太川流域において、除染特別地域内に位置する「上流地点」（¹³⁷Cs濃度が比較的高い）、「中流地点」及び「下流地点」において、河川水中の懸濁態¹³⁷Cs濃度に対する除染の影響を評価した。懸濁態¹³⁷Cs濃度の測定結果を解析した期間は以下の通り（図3.8参照）。

- ✓ 2013年2月までの「除染前」
- ✓ 2013年3月から2014年3月までの「除染中①」
- ✓ 2014年4月から2015年12月までの「除染中②」
- ✓ 2016年1月以降の「除染後」

この解析から、上流と中流の双方においては除染中に懸濁物質中の ^{137}Cs 濃度低下率は上昇したが、下流では変化がなかった。これは、河川の単位流量あたりの土砂フラックスが増加したことで、下流域の懸濁態 ^{137}Cs フラックスは低下しなかったためと結論づけられた。

上小国川における実証試験

上小国川岸の一部（距離約 200m）は子ども達の通学路や地域レクリエーション活動で利用されている。除染前の 2014 年の 8 月と 9 月に、県はこの地域で大規模なモニタリングを実施し、河床堆積物内の空間線量率や放射性セシウム放射能濃度を測定した。2014 年の秋に、低い川床での除草、堆積物の除去、堤防の植物や土壌の除去等の除染対策が実施された（図 3.9 参照）。除染対策の実施前後に収集されたモニタリングデータでは、空間線量率が約 50%削減された（図 3.10 参照）。この地域は 2015 年 9 月に洪水の影響を受け、懸濁粒子と結合した放射性セシウムの集中的な再懸濁、移行及び沈殿が生じた。河川内の堆積物や植物の除去後に、物質（主に粗粒物質や石）が新たに堆積した。洪水後に県が実施した空間線量率測定（図 3.10 参照）では、洪水に伴う空間線量率に大きな変化は認められなかった。

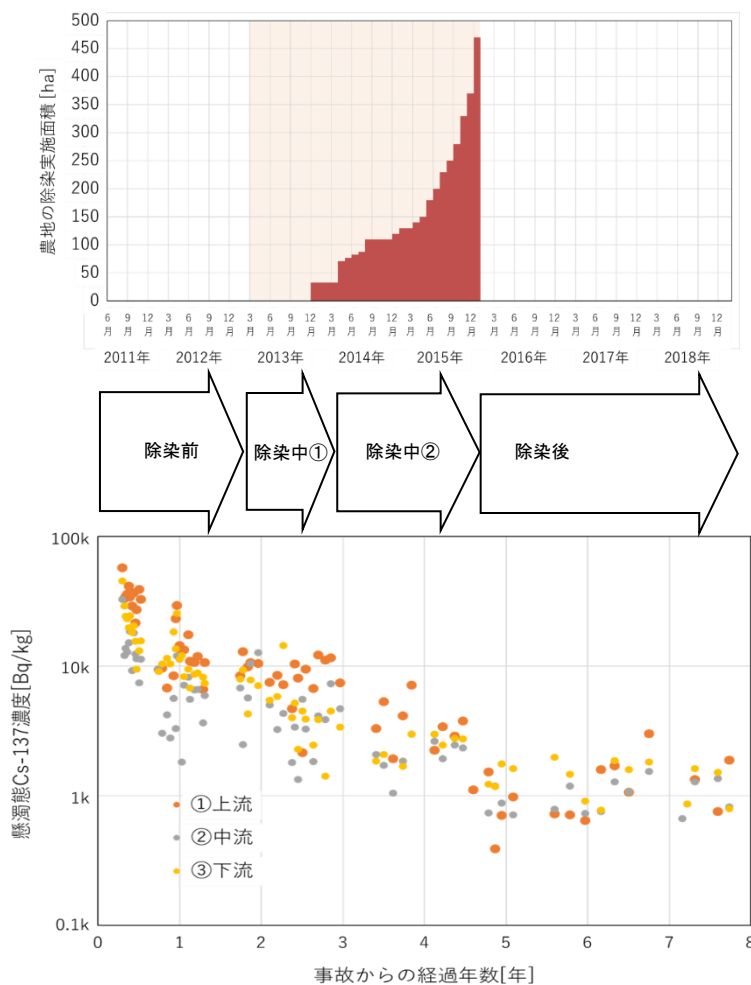


図.3.8 口太川流域における除染前、除染中①、除染中②及び除染後の各期間における懸濁物質中の ^{137}Cs 濃度の経時変化（提供：福島県）



図 3.9 上小国川における除染対策の実施前（左）及び実施後（右）の河川敷（提供：福島県 - 前プロジェクトの最終報告書より）

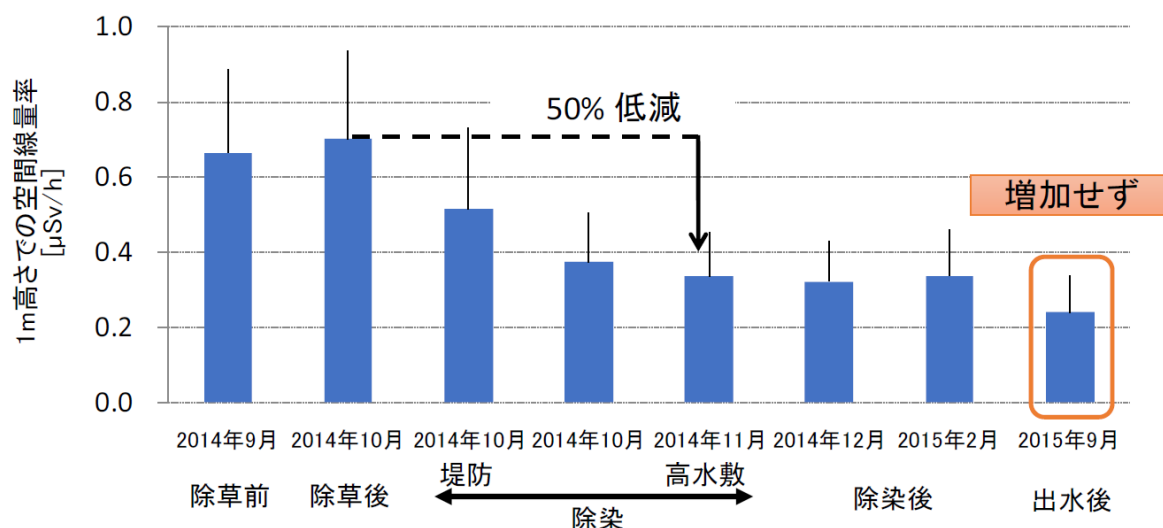


図 3.10 県内の河川における除染対策実施前、中、後の地表 1m 高さでの空間線量率（前プロジェクトの最終報告書より）（提供：福島県）

新田川の水辺公園

当水辺公園は、レジャー及びレクリエーション用で川の近くにある。2015年に県が測定した空間線量率は、平均約 0.6 $\mu\text{Sv/h}$ であった（「前プロジェクトの最終報告書」参照。ちなみに 2019年 10月中旬には、0.20 $\mu\text{Sv/h}$ という空間線量率と報告された）。

この地域で県が実施したモデルシミュレーションでは、除染対策によって空間線量率を約 35%に低減できることが示された（表 3.2 参照）。除染対策を行わない場合には、放射性崩壊によって 1年で空間線量率約 13%減少すると見込まれる。県は、除染対策から予測年間被ばく線量のさらなる低減及び散歩、清掃・美化活動、川の中や近くの遊び等の様々な活動における地域の習慣や滞在時間を考慮し検証した。

県実施の線量計算は、除染対策によって一人当たりの年間実効線量は1~15 μ Svに低減できることを示した。新田川での当該部分の利用に関する一人当たりの被ばく線量の予測結果を表3.2に示す。この分析結果は、この特定場所での活動に起因する線量が非常に低いものであることを示唆している。

表 3.2 除染実証試験地における線量低減の推定（福島県）（前プロジェクトの最終報告書）

項目	活動			
	レクリエーション	散歩	清掃・美化活動	水辺の活動
除染後の線量率（ μ Sv/h） （15分間の空間線量測定値から算出）	0.53	0.38	0.39	0.26
年間利用時間	16 (4時間/日× 4日/年)	111 (1時間/日× 111日/年)	48 (1時間/日× 48日/年)	9 (0.5時間/日× 9日/年)
年間追加線量（mSv/y）				
- 除染前	0.008	0.038	0.017	0.002
- 除染後	0.005	0.023	0.010	0.001
- 除染を実施せず1年が経過した場合	0.007	0.032	0.015	0.002

2015年の洪水は、河床の形状にかなりの影響を及ぼした。川の土手の一部が削剥され、洪水時の流速が減少する土手の高い部分では粗粒物質（主に砂）が大量に堆積した。動的な移行プロセスによって、除染対策の持続性の検証は非常に複雑になる。しかし、2015年の河床の形状が洪水による影響を受けていたとしても、除染活動の効果には大きな影響を及ぼしていなかったことが、洪水後の県実施の測定で示された。しかしながら、近い将来に再び洪水が起こる可能性があるため、引き続き除染効果のモニタリングを実施する必要がある。

上小国川への人為的攪乱と異常気象の影響

2019年に、上小国川は人為的攪乱及び自然攪乱の影響を受けた。人為的攪乱とは掘削作業の事であり、定期的なメンテナンスの一環として、堆積物の除去及び洪水時の流動能力向上を目的に実施された（図3.11参照）。

計画されたメンテナンス作業による人為的攪乱に加えて、上小国川は2019年10月12日から13日の間に日本に上陸した台風19号の影響を受け、河岸の崩壊、堆積物、丸石及び岩石の堆積並びに洪水が発生した（図3.11写真D,G参照）

台風19号通過後に収集されたモニタリングデータによると、台風の影響を受けた河岸の空間線量率は、台風前の値と比較すると減少しているか同じであることを示している（図3.12参照）。台風前（2018年1月31日）に上小国川の海岸線で測定された空間線量率（地上高1m）は、台風後（2019年10月17日）の0.18 μ Sv/hに対して0.34 μ S/hであった。



図 3.11 上小国川での掘削工事（2019 年 9 月）と台風 19 号（2019 年 10 月 12 日～13 日）の前後の写真。

写真 A は掘削前（2019 年 8 月 27 日）に撮影、写真 B は掘削後（2019 年 9 月 30 日）に撮影。写真 C（2019 年 9 月 30 日）は、掘削作業後及び台風 19 号の前に撮影。写真 D～G は、台風 19 号（2019 年 10 月 18 日）の後に撮影。写真 D は写真 C とほぼ同じ位置で撮影された（提供：福島県）。

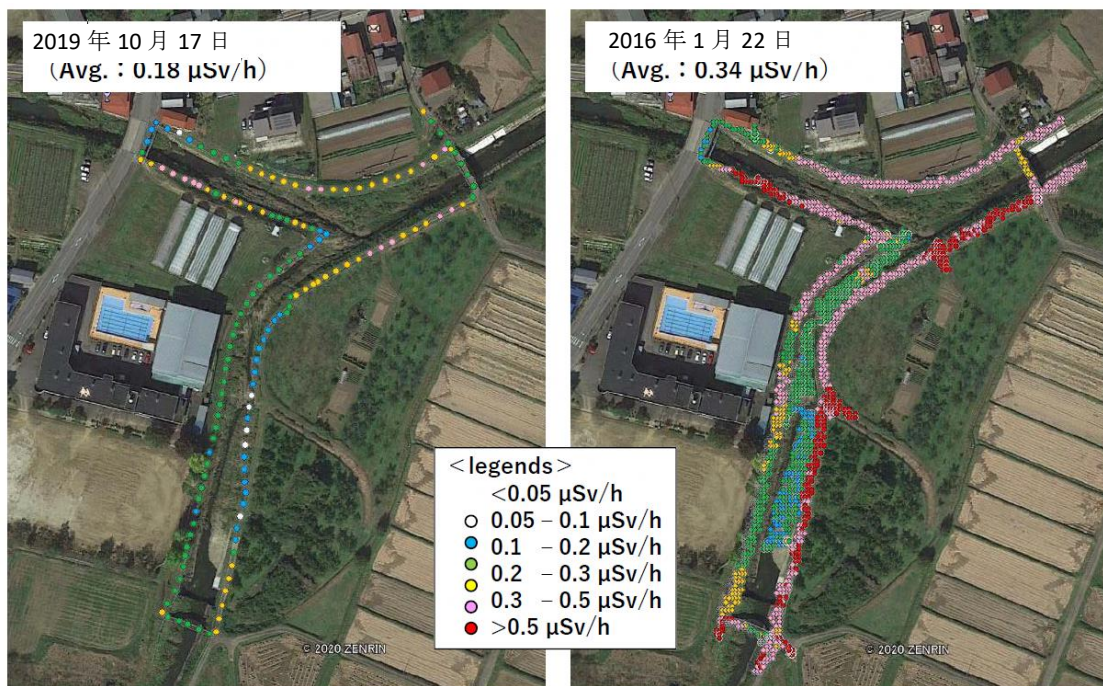


図 3.12 台風 19 号通過前後の地上高 1m の空間線量率（提供：福島県）

新田川公園（台風 19 号前 0.30 $\mu\text{Sv/h}$ 、後 0.20 $\mu\text{Sv/h}$ ）と水無川（台風 19 号前 0.214 $\mu\text{Sv/h}$ 、後 0.156 $\mu\text{Sv/h}$ ）の調査結果は類似していた。いずれの場合も、台風 19 号通過後に空間線量率の上昇は観察されなかった。これらのサイトでの線量と線量率の低減は自然過程による。現在、台風の影響を受けた地域の下流の懸濁堆積物と河川水に含まれる ^{137}Cs の分析のための作業が進められている。

3.6 住宅地域における環境回復と除染の知見

福島第一原子力発電所事故による汚染の低減のため、県内の住宅、公共施設、農地、道路の除染が実施された。県内で採用されている一般的な技術のいくつかを図 3.13 に示す。



図 3.13 主な除染技術（提供：福島県）

表 3.3 では、多様な種類の建物及び地域の除染活動の状況をまとめている。県内の浄化、除染活動は、子ども達が幼稚園や学校への通学に利用する道路などの公共地域やレクリエーション地域を重点的に実施された。2018 年 3 月に、計画に基づく面的除染が完了した。

表 3.3 県内で完了した除染（前プロジェクトの最終報告書）

カテゴリー	除染完了
住宅（家屋合計数）	418,579（418,897）
公共施設（合計数）	11,627（12,376）
道路（km）	17,701（20,476）
農地（ha）	31,196（31,061）
森林（生活圏内）（ha）	4,307（4,513）

住宅地域内の除染活動の有効性を評価するために、除染対策の実施前後の空間線量率の測定を実施した。その効果は、環境回復実施地域内の空間線量率の低減分として表された。

住宅地域、公共施設、道路、農地及び森林の各地域で環境回復活動が実施された。除染した地域のタイプによっては、空間線量率が約 20～50%低減した（表 3.4 参照）。これらの低減率は、チェルノブイリ事故の影響を受けた地域の環境回復対策で達成された数値と非常に近い。表 3.4 は、2012 年 3 月から 2013 年 10 月までの期間に実施された除染活動前後の測定値から得られた結果である。森林で実施された対策については、第 2 章参照のこと。

表 3.4 除染作業による空間線量率の低減率

カテゴリー	測定数	空間線量率の低減率 (%)
住宅地域	82,757	36
公共施設	32,311	45
道路	33,451	31
農地	20,147	29
森林	12,697	21

3.7 まとめ

ここ数十年間にわたり、生態系内での放射性セシウムの動態に関する研究が、実施されてきた。一般に、陸域では、放射性セシウムは粘土鉱物と強く結合するため、土壤中での移行が遅くなり、植物に吸収されにくい。淡水生態系では、放射性セシウムは懸濁物質と強く結びつき河床に沈降するため、水中の溶存態放射性セシウム濃度は急激に低下する。したがって、懸濁物質への吸着は環境中でのセシウムの動態において重要な役割を果たしている。

表流水中の物理化学的条件（pH、流域の地形、水深、懸濁物質及びカリウム濃度など）も、放射性セシウムと結合する粒子の移行や放射性セシウム動態に影響を及ぼす可能性がある。これらの条件により、チェルノブイリ事故後のウクライナやロシア連邦と比較して、県内で測定された土壌及び懸濁物質への強い放射性セシウムの吸着が説明できる可能性がある。

IAEA チームと県の専門家らは、時間空間的变化を評価するために、引き続き河川流域内の放射性セシウム濃度を定期的にモニタリングする必要があるという点で意見が一致した。モニタリングの対象には、水が集まる河川集水域や、集水域上流から下流の大きな河川に放射性セシウムを運ぶ支流を含む。時間空間的に放射性セシウム動態を評価することを目的にそのようなモニタリングを実施する際は、標準化されたサンプルの収集及び保存方法を適用することが重要であり、それに関連して結果を標準的な方法で表記することで、水域での国際的な知見との比較を可能にするという点で合意した。事故から 7 年未満の時点で、県内の淡水域内の溶存態放射性セシウム濃度は検出限界 0.05 Bq/L 程度または未満であり、飲料水の水質基準（10 Bq/L）をはるかに下回っている。これは、放射性セシウムが河床の堆積物に強く吸着されるためであり、河床では非常に高い放射性セシウム濃度が観察されている。懸濁物質中の放射性セシウム濃度も明らかに低下し続けている。

環境中の放射性セシウム濃度の低下は、主に物理的壊変によるものであり、また放射性セシウムの流出によってさらに低下している。2011年から2015年9月の間に、阿武隈川及びその支流である口太川の集水域から流出した¹³⁷Csの累積流出率は、それぞれ約3%（2.5～3.5%）及び約1%（0.7～1.5%）であった。

複数のため池内の放射性セシウム濃度を測定した結果、流出水中の懸濁態放射性セシウム量は流入水中の量よりもはるかに少ないことが分かった。これは、ため池が一種のセディメントトラップとして作用することを示している。

県内の淡水域中の植物プランクトン密度は極めて低かった。植物プランクトン及び動物プランクトンに取り込まれた放射性セシウム放射能の合計量は、調査水域に存在する放射性セシウムのごくわずかな割合に過ぎなかった。

モニタリング結果の解釈を深めるため、集水域から河川系経由で太平洋に移行される放射性セシウムのシミュレーションに複数のモデルを使用し、これらのモデルが適切な修復オプションの選択や河川に適用されている修復対策の有効性を評価する際にも非常に有効であることを認識した。さらに、シミュレーションモデルによって、河川の再汚染影響の評価が可能になった。

県は、2011年以降、民家、公共施設、道路、農地及び居住区近隣の森林の一部、特に子供達が幼稚園や学校への通学に利用する道路やレクリエーション地域などの公共地域の集中的な修復・除染作業を行ってきた。地域によっては、空間線量率が約20～50%減少したことを県は確認している。これはチェルノブイリ事故の影響を受けた地域復旧で達成された結果と類似している。県内の面的除染は2018年3月に完了した。

さらに県は、除染対策の有効性実証のため、淡水域内及び周辺で多数のプロジェクトを開始した。これらの対策によって、空間線量率が低下したことが判明している。IAEAチームは国際的な知見に基づき、淡水経由の被ばく低減を目的とした制限、指導などの行政措置は、堆積物の除去などの技術的対策に比べて比較的实施が容易であり、より大きな効果が期待されると指摘した。

4. 除染活動から生じた廃棄物の管理

4.1. 背景及び目的

IAEA の福島第一原子力発電所事故報告書（Fukushima Daiichi Accident Report）の技術資料 5、「事故後の復旧（Post-accident Recovery）」では次のように記載されている。「環境省策定の除染計画によると、県内の除染活動により生じた廃棄物は、除染活動の実施場所又はその近隣の仮置場に集められ、保管されることになっている。その後、それらの保管物は中間貯蔵施設で保管される。中間貯蔵後 30 年以内に県外で最終処分される」。中間貯蔵施設は、政府によって運用されることになっている。仮置場は、法律、政府のガイドラインに沿って、県内の市町村に設けられている。福島第一原子力発電所事故以降、県は、除染活動及び発生した廃棄物の管理において相当な取組みを行ってきた。

除染活動から発生した廃棄物は、緊急かつ安全で持続可能な管理を必要とした。IAEA チームは、該当する IAEA 安全基準の適用を助言した。2013 年に実施取決めに基づく活動が開始した当時、県は除染活動から発生した廃棄物保管のための仮置場の緊急不足に直面していた。さらに、既存の仮置場の安全性、及び進行中の除染活動によって発生した廃棄物が保管される予定の仮置場に対して、一般市民から疑問の声が上がった。その後、当初予定より長い期間にわたって廃棄物を仮置場に保管する必要が生じた。仮置場は、中間貯蔵施設への輸送前に 3 年間のみ廃棄物の保管を目的として設置されたが、中間貯蔵施設の設置が遅れたため、廃棄物は 3 年以上仮置場に保管されてきた。したがって、仮置場での 3 年以上の廃棄物保管における安全性は、それら施設の安全性の確保、及び一般市民の懸念への対応のためにも評価を要する問題である。

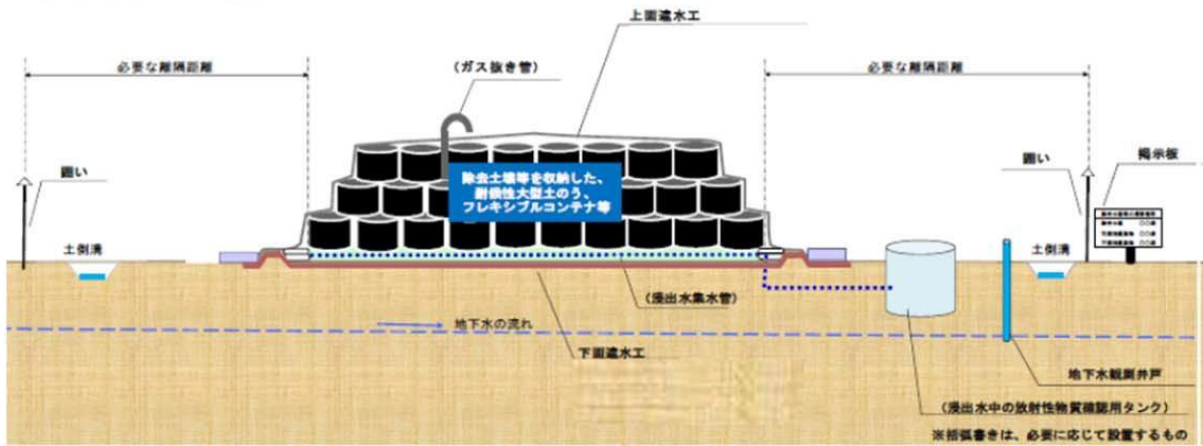
当初実施取決めに基づく除染活動から発生した廃棄物の管理活動は、仮置場等技術指針の取りまとめ及び仮置場の安全性の実証についての県支援に重点が置かれていた。時間経過とともに、支援内容は徐々に変化し、仮置場の長期運用の安全性、仮置場からの廃棄物搬出戦略、及び仮置場跡地の原状回復措置に重点が置かれるようになった。IAEA が提供する支援の重要側面の 1 つは、放射性廃棄物管理慣行に関する国外の専門知識と知見の共有である。

4.2 仮置場

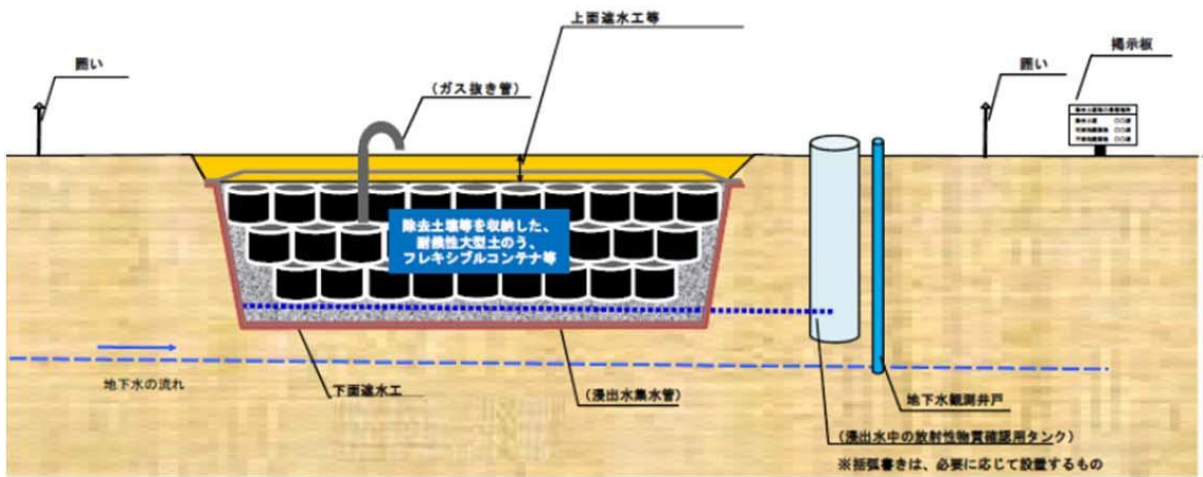
県内には、主に 3 種類の仮置場が設置された。種類は、地上保管型、半地下保管型及び地下保管型であり、建設の容易さ、中間貯蔵施設への輸送、安定性等において、それぞれ長短がある。図 4.1 は、3 種類の仮置場の概略図を示している。

2020 年 3 月時点で、619 ヶ所の仮置場が集中汚染調査地域内の市町村に残っている。図 4.2 に示すように、仮置場の数は 2013 年から 2014 年にかけて急速に増加し、2016 年にピークに達し、その後ゆっくりと減少している。

○地上保管型の例



○地下保管型の例



○半地下保管型の例

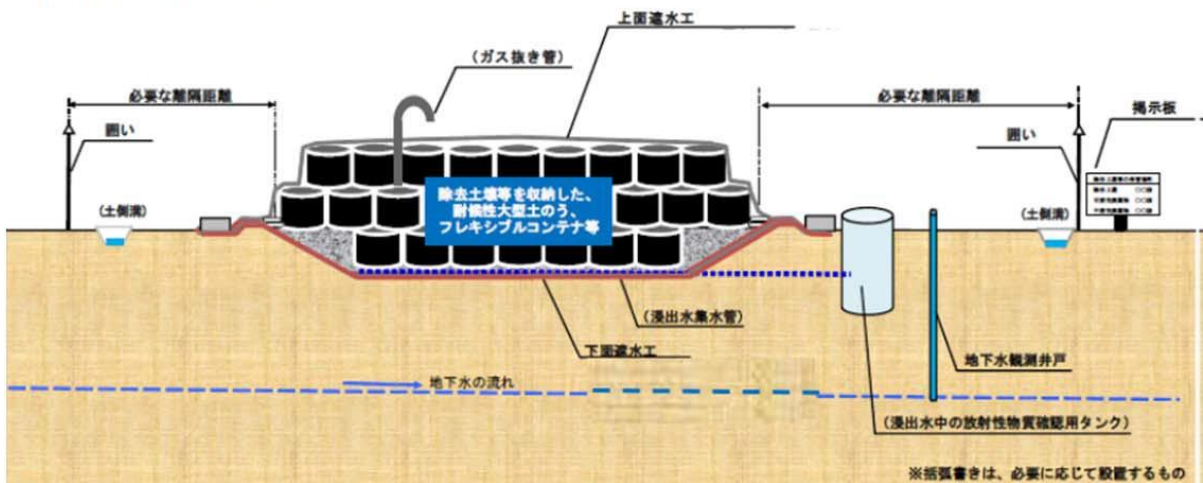


図 4.1 3種類の仮置場の概略図 (県の仮置場等技術指針を元に作成)

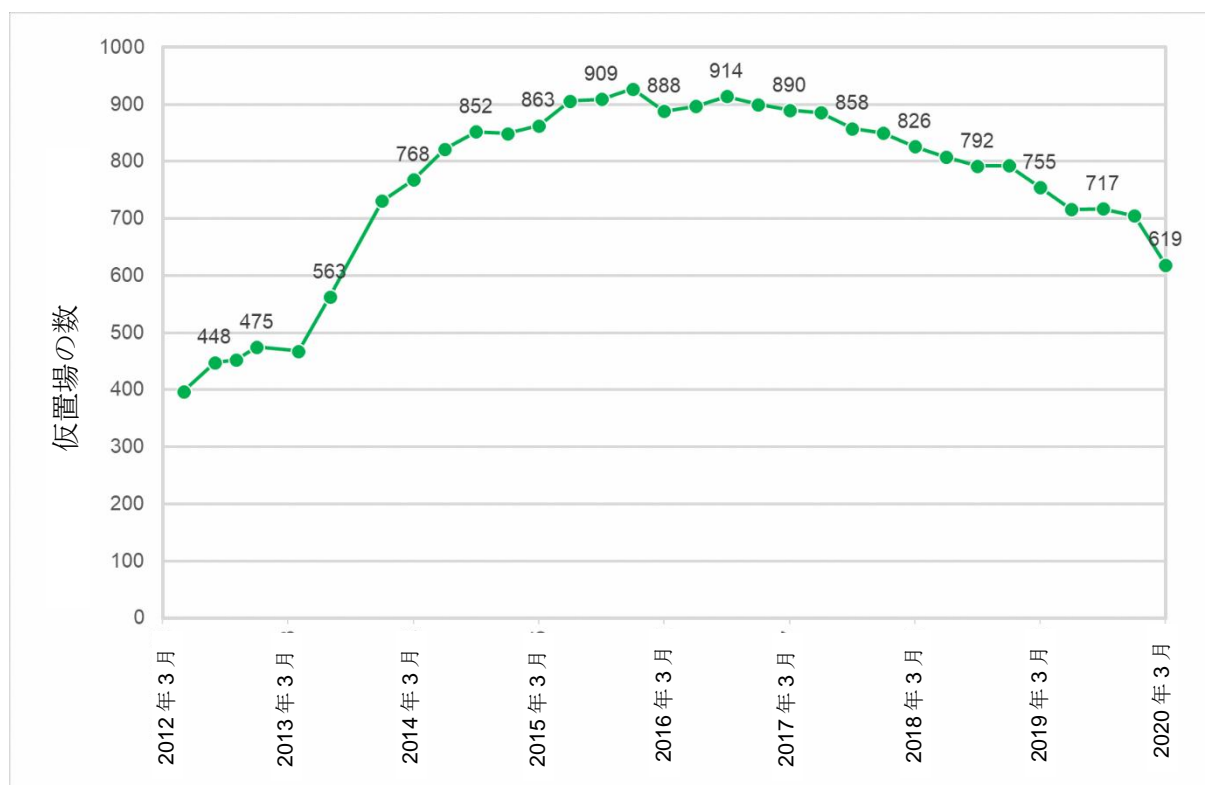


図 4.2 2012年3月から2020年3月の県内市町村内の仮置場数（提供：福島県）

除染活動で発生した廃棄物の保管容器を仮置場に搬入保管しているが、それ以降様々な現象が確認されており、保管施設について以下の懸念が示された。

- 廃棄物保管容器数の積み上げ限度数
- 保管された廃棄物保管容器が頑丈でなく、保管容器間に隙間が生じたために廃棄物保管容器の長期的安定性及び健全性に及ぼす影響
- 傾斜地に設けられた施設の長期的な安定性に関する不確実性
- 浸出水が発生する可能性
- 廃棄物保管容器内の有機物質分解と保管施設の健全性に対し影響を及ぼす可能性
- 廃棄物保管容器の陥没及び廃棄物保管容器被覆防水シートの陥没による水の蓄積
- 廃棄物保管容器の中身の自然発火による火災のリスク

4.3 仮置場に関する技術指針の策定

2013年に実施取決めの下で活動を開始した当時、県では集中的な除染活動が実施され、除染活動により発生した廃棄物の保管のために多数の仮置場が設置されていた。県は2013年には、仮置場の設置と運用に関する技術指針を作成していた。この時点でIAEAチームは、県に対し技術指針の改訂を進める一環として、仮置場の開発及び運用に関する資料を記録するよう促した。その結果、様々な市町村内での仮置場展開に関して実施されていた活動の分析が行われた。この分析の目的は、仮置場に影響を及ぼす主な問題や実施された取組み事例の特定、及び様々な市町村内の方針や実施内容の比較であった。こうしたアプローチは、県

内の仮置場の展開と運用、仮置場からの最終的な廃棄物除去及び跡地の原状回復における全般的に調和した戦略開発の基盤となった。

IAEA チームは県の専門家らに対して、仮置場等技術指針の作成について技術的な助言やフィードバックを提供し、県の案に対しコメントを行った。仮置場等技術指針の第 1 版は 2013 年 8 月に発表され、その後、2014 年 6 月に第 2 版、2015 年 3 月に第 3 版、2016 年 3 月に第 4 版、2017 年 8 月に第 5 版、2019 年 9 月に第 6 版が発表された。

仮置場等技術指針第 6 版は、2020 年 2 月 1～8 日に福島で実施された IAEA-県会合の際に議論された。IAEA チームから、第 6 版は全般的に妥当かつ実用的であり、廃棄物管理プロセスの最適化に役立つとのコメントが出されるとともに、以下の提案がなされた。

- 廃棄物保管容器から取り除いた水の処理手順の詳述を進める必要性
- 一部の仮置場で汚染水の収集に使用した地下タンクの安全性の地中確保、または地下タンクの除去問題対処を進める必要性
- 復旧したサイトの十分な浄化検証に使用した測定地点の数がサイト規模に適切かを確認する必要性
- 土地所有者への記録保持に関する指針及び仮置場跡地の返却における指針の検討を進める必要性

4.4 仮置場の安全性評価の実施

廃棄物を管理する場合、関連施設を含めた管理者は、施設や活動の安全性を実証する必要がある。「IAEA 安全基準にしたがうと、規制当局が仮置場の運用を認可する際にその判断材料として安全性実証の結果が示されるべきである」と IAEA は県に対し提案した。特に安全性実証の目的は、仮置場設置者において、施設または活動が安全に運用され、人々や環境が放射線の悪影響から保護されており、将来も保護されると確信を持てるように、サイト及び施設設計の様々な側面を提示することである。IAEA 安全基準に従って、通常の運営状態及び事故シナリオ下での施設または活動における放射線影響の定量的評価がなされるべきである。

仮置場による放射線影響が最小限である証拠を示すことにより、仮置場の安全性への信頼が高まる。安全性評価には、サイト特性、施設の安全設計特性、廃棄物及び廃棄物保管容器の特性など、安全に影響を及ぼしうるすべての特性、事象及びプロセスの特定、及び適切なパラメータ値とそれらの情報を使った、通常の運用状態と事故シナリオにおける保管する廃棄物の影響の定量的評価が含まれる。

実施取決めに基づく活動の開始前、県には IAEA 安全基準で義務付けられた安全性評価に係る知見がなかった。そのため、仮置場の安全性評価展開に関する訓練や支援が提供された。これは段階的に行われ、研修ののち次の段階で IAEA 安全評価枠組みソフトウェアツール (SAFRAN) が「モデル」サイトに適用され、次いで県内のサイトに試験的に適用され、さらに複数の仮置場に適用された。図 4.3 は安全評価実施プロセスを概略的に示している。



図 4.3 県内の仮置場の安全性評価活動の流れ

4.4.1 安全性評価枠組みソフトウェアツール

IAEA による放射性廃棄物処分前管理の安全性評価方法論は、安全指針 GSG-3 の「放射性廃棄物の処分前管理のセーフティケースと安全性評価」に示されている。GSG-3 は、GSR パート 5「放射性廃棄物の処分前管理」の安全要件を満たす推奨事項を示している。この手法の適用を促すために、ユーザー向けの放射性廃棄物の処分前管理用の施設と活動の体系的かつ計画的な安全性評価の指導用に安全性評価枠組みソフトウェアツール SAFRAN を開発した。したがって SAFRAN は、県内の仮置場の安全性評価の実施に適していると思われる。これは、サイト及び廃棄物の流れの特性、想定されるシナリオ、規制要件ならびに定量分析を実施するためのツールに関するさまざまなモジュールを備えており、さらには当該ソフトウェアには独自のデータベースがあり、入手可能なエビデンスやユーザーのニーズに応じて、データを追加して調整、強化ができるものである。

実施取決めの下で開発された仮置場の安全性の実証は、SAFRAN の使用によってサポートされた。場合によっては、IAEA がソフトウェア SAFRAN を調整し、特定の状況では県による SAFRAN の適用が可能になった。

4.4.2 福島県の仮置場安全性評価実施能力の構築

2014年にIAEAチームは県の専門家らに対して訓練セッションを実施し、安全性評価と、仮置場に対するSAFRANの使用について説明した。IAEA安全基準において規定されている、処分前放射性廃棄物の管理に関する安全性評価のためのIAEA手法に関する情報が県に対して提供され、IAEAチームと県の専門家らは仮置場の安全性評価に関する目的、範囲、アプローチ及び活動の評価項目を特定した。特定された安全性評価に関する規制枠組みの重要な要素は、通常の運用条件と事故シナリオの双方における、IAEA安全基準に準拠した個人の職業被ばく線量限度と一般市民の被ばく線量限度である。これらの数値はSAFRANに入力された。

SAFRANは、開放型仮置場の構造を考慮してIAEAが採用したものである。その構造は、除染活動から生じた廃棄物を収納した複数層の廃棄物保管容器、積み上げられた廃棄物保管容器の最上部及び底部に設けられたライナー（遮水シート）並びに様々な種類のカバー及び放射線遮へい物で構成される。

その後の期間すなわち2014年から2020年までに、安全性評価に関する更なる助言（規制基準、シナリオ、安全評価ツール、測定値を使用した安全評価結果の検証などに関する助言）が県の専門家らに対して提供され、また海外（ブラジル、スウェーデン、英国、ウクライナ、米国など）における知見が提示及び議論された。

さらには、仮置場における地下水に放射性セシウムが移行する可能性や、（IAEAが提案しているとおり）非常に低い放射能汚染レベルである場合は放射性廃棄物としては取り扱う必要がない事など、福島第一事故後の時間の経過に伴って重要性が高まっている特定の疑問に対処するために、ECOLEGOやNormalysaなどの更なる安全性評価ツールが提供されている。

仮置場の安全性評価の実施プロセスには、評価結果を住民などの利害関係者に共有・説明することも含まれなければならない。したがって、安全性評価の結果の説明と周知に関する助言についても県の専門家らに提供された。

4.4.3 モデル仮置場の安全性評価

県の専門家らに対する教育用ツールとして、またSAFRANの使用を含むIAEAの安全性評価方法の適用可能性を確認するために、IAEAの方法論は、まずは一般的でありながらも立地、施設及び廃棄物特性において保守的に見積もった「モデル」仮置場に対して適用された。保管廃棄物から線量評価地点までの距離を示した模式図を図4.4に示す。SAFRANを用いた安全性評価においては、廃棄物保管容器及びモデル仮置場に関する3つの一般的活動（据え付け、保管及び搬出）、通常の運用条件と事故シナリオを評価した。各活動について、通常の運用条件と事故シナリオを考慮しつつ個別的に分析することが必要である。

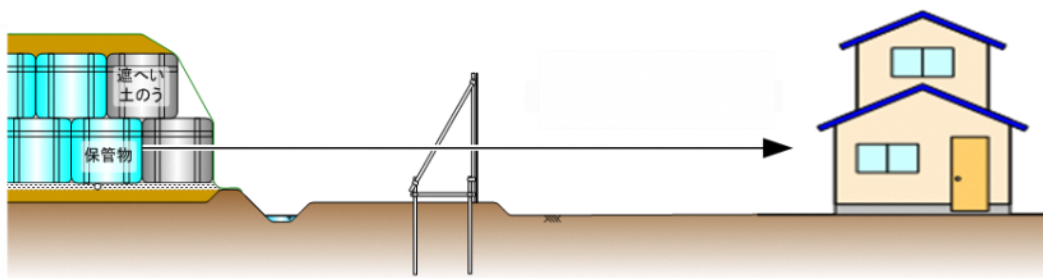


図 4.4 保管物からの距離に対する空間線量率の計算に用いる仮置場の典型的な配置
(提供：福島県)

モデル仮置場の安全性は、その他の構造施設と同様に、頑健かつ実証済みの設計及び構造によって確保される。最も重要なデザインの特徴は、作業員、一般市民または環境に不当なリスクを及ぼすことなく廃棄物の処理、保管、搬出ができるという必要な保障を提供するものである。現在及び将来における施設の安全性の評価を行う際は、詳細な施設設計とその基礎となる基本的な前提を理解する必要がある。仮置場は複雑な土木構造物ではないが、安全のための適切な定量化及び理解の必要があるいくつかの機能がある。したがって作業は、評価モデルで施設の運用条件の範囲を規定するパラメータの定義から始まった。

SAFRAN に入力すべきデータについて論議された。利用可能な場合、実測値が使用された。精度の高い設定ができなかったパラメータについては、県の専門家が保守的な文献値が採用された。このアプローチは、安全性評価の実施期間を通して使用された。

物理的、化学的、生物学的、放射線学的データや廃棄物保管容器に関する情報など保管廃棄物に関する情報（廃棄物を保管する廃棄物保管容器の特性）は収集が必要だった。SAFRAN での定量的評価に必要な保管量、処理能力、放射能を含む廃棄物の流れが推定された。また、周辺家屋、仮置場関連データ、工学的特徴など、安全性評価にとって重要なその他のパラメータが県の専門家らによって収集及び推定された。

ハザード分析を、モデル仮置場に関する廃棄物管理活動の詳細な分析に基づいて実施し、通常の運用条件下で発生及び事故に起因するハザードを考慮した。初期スクリーニングを実施し、モデル仮置場とは無関係なハザードは除外した。特定のシナリオに関する最終的なスクリーニングを、特定された事象が起こりうる可能性や、それにより想定される影響の有意性を定性的に評価した。このプロセスを通じて、廃棄物の据え付け、保管及び搬出時の広範なハザードは通常の運用条件及び事故シナリオを想定して分析された。

分析に必要なパラメータを定義した後、県内の既存の仮置場及び計画中の仮置場の設計要件を満たすために、SAFRAN の若干の調整が必要となった。大気及び地下水への放射性物質放出の分析のため、SAFRAN の一部が変更された。

また、利害関係者とは、安全性評価の結果に基づいて仮置場の安全性について意見交換をすべきであることが再認識された。県は、段階的なアプローチを通じて、各節目の決定点において一般市民との意思疎通を図るべきである。

通常の利用条件

モデル仮置場での通常利用の影響の評価では、職業従事者と施設近傍に居住する住民の双方の年間線量を見積もった。職業従事者は、廃棄物保管容器的設置や撤去など、さまざまな条件下で放射線量を受ける可能性がある。近傍の住民らは、設置や取替の作業中に直接被ばくする可能性もある。しかし通常の利用条件下であれば、これらの被ばくは非常に小さい。通常利用条件下の保管期間中に想定されるばくは、放射線量限度と比較してごくわずかに過ぎない。

すべての作業が計画どおりに遂行される通常の利用状況における線量を見積もり、その際に作業員らは放射線被ばくを伴う作業を平均的な時間で遂行するものと仮定し、作業中に予想される平均空間線量を見積もった。

SAFRAN を使用して、県内の既存及び計画中の 3 種類の規模の仮置場を評価した。それら 3 ヶ所のモデル施設では、土嚢の使用や施設上部の土壌散布など、さまざまな遮へい構造を評価した。仮置場から最も近い住宅までの距離を 1~100m の範囲で变化的に設定し、SAFRAN を使用して計算を行った。

人々の外部被ばくを、空間線量測定値及び平均滞在時間に基づいて、遮へい効果を考慮しつつ計算した。内部被ばくは、放射線核種依存的な放射能濃度、線量変換係数及び滞在時間に基づいて計算した。一般市民の総線量は、外部被ばく線量と内部被ばく線量を合計して求めた。

事故シナリオ

計画された通常の利用条件からの逸脱は、作業員や住民に計画外の被ばくをもたらす原因となる。したがって、モデル仮置場の安全性評価には、施設の稼働期間中の事故に起因する危険性の評価も含めた。

県の専門家らは、IAEA の方法論に従って、仮置場における事故の考えられる影響を包括的に分析した。事故による影響の評価には、起こり得る起因事象の詳細な検討と分析を必要とした。これらの事象を分析し、潜在的なシナリオのリストを作成した。予想通り、モデル仮置場の構造は比較的単純であるため、さらなる調査及び対策を要する可能性もシナリオに含めた。

ハザードスクリーニングプロセスでは、該当しない被ばく経路（発生率が非常に低い被ばく経路など）を除外した。

事故シナリオや仮置場のレイアウト及び構造を考慮して、廃棄物保管容器的の地上落下、高温、雪、強風などさまざまな原因による廃棄物保管容器的の損傷、地震や火災などによる施設の損傷など、さまざまなシナリオを検討した。

偶発的な大気への放出（施設の火災による放出等）により、現場の作業員や住民が被ばくする可能性がある。水に係る経路（河川、地下水等）への偶発的な放出は、作業員よりも住民が被ばくを被る可能性が高い。

モデル仮置場所への SAFRAN の適用に関する結論

モデル仮置場における廃棄物管理活動及び施設をモデル化する際の SAFRAN の使用は、いくつかの代表的な仮置場の安全性評価の基盤となった。

通常の運用条件を評価した結果、土嚢による防護壁といった形態の遮へいが近隣住民の放射線量を大幅に低減できることが明らかになった。施設の上部に土壌を追加すると、予測される放射線量がさらに 1 桁減少し、1mSv/年より大幅に低いレベルになる。作業中の放射線防護については、通常の運用条件における作業員の線量は、保守的に見積もっても職業被ばく放射線量限度を下回った。

県の専門家らが作成した入力データ及び SAFRAN を使用した様々な数値シミュレーションに基づき、通常運用条件を想定した場合のモデル仮置場は適切に設計されており、現場作業員や近隣住民に不当なリスクを及ぼす可能性はないと結論付けられた。事故を原因とする被ばく作業員の線量は、極端なシナリオを考慮しても概して 1mSv を超えることはない。

事故による一般市民の放射線量を検討した結果、ほとんどのシナリオにおいて予想される被ばく線量は線量限度と比較してわずかなものに過ぎなかった。ただし、分析した特定のシナリオでは一般市民の線量が 0.5mSv を超える可能性が示されたため、それらのシナリオを更に分析し、それらのシナリオにおける対策の実施が必要であることが示唆された。

実施した分析に基づいて、仮置場から地下水や河川に放射性物質が移行する可能性は極めて低く、したがって地下水への暴露や魚の摂取に起因する放射線量は非常に低い。

4.4.4 県内の実際の仮置場の試験的安全性評価

次に県の専門家らは、モデル仮置場への SAFRAN の適用を成功させた後、IAEA の安全性評価手法を県内の既存の仮置場に適用した。それは、得られる教訓や知見により、その他の仮置場の安全性評価は効率的に実施できるはずだからである。モデル施設の安全性評価と同様に、実際の仮置場の試験的安全性評価では、SAFRAN を使用して、通常の運用条件及び事故シナリオにおける仮置場に起因する作業員及び一般市民の推定線量を見積もった。

県の専門家らが実施した試験的安全性評価の結果はモデル仮置場の安全性評価結果と類似しており、安全性評価の実施プロセスに一貫性があること、安全性評価で用いた入力データは十分なものであること、検討した条件において安全上の大きな問題はないことが明らかになった。試験的な安全性評価においては更に現実的なデータを使用して安全性を評価したため、県の専門家らは安全性評価プロセスに対して自信を得ることができた。

4.4.5 県内の複数の代表的仮置場の安全性評価

県内の仮置場の特性を代表するものとして選定された 9 ヶ所の仮置場に対して、IAEA 安全性評価手法を適用した。それらのサイトの実際のデータを入手し、データが入手できない場合は、モデル仮置場の場合と同様に、保守的にデータを見積もった。

仮置場の安全性評価期間中に、それまで安全性評価で考慮していなかった起因事象を勘案することになった。それらの起因事象とは、洪水、仮置場からの廃棄物保管容器の搬出、廃棄物保管容器の搬送、廃棄物保管容器の経年劣化、運用が 3 年（仮置場の本来の保管期間）を超える場合の影響である。

9 ヶ所の代表的な仮置場の安全性評価結果は、追加的な起因事象を考慮してもモデル仮置場について得られた結果と類似していた。通常の運用条件における仮置場の安全性が実証されたが、火災等の大規模な事故に対する対策が必要と思われる。

当初の予定期間よりも長期にわたって廃棄物を仮置場で保管する場合は、廃棄物保管容器の経年劣化が施設の全般的な構造に及ぼす影響を考慮するために、安全性評価を修正する必要があることが認識された。廃棄物保管容器の製造業者によると、廃棄物保管容器の保証期間は約 3 年である。仮置場における保管期間がその期間を超えることが見込まれるため、安全性評価でこの問題に対処する必要性が認識された。

2019 年 1 月 26 日から 2 月 2 日の間に福島で実施された IAEA-県会合において、廃棄物保管容器の耐久性について県の専門家が実施した詳細な調査の初期結果が IAEA 側に提示され、議論された。その調査では、廃棄物保管容器の引張強度と劣化のメカニズムを調べた。IAEA との協議では廃棄物保管容器の劣化が議論され、仮置場から廃棄物保管容器を搬出する際にクレーンなどがバッグを吊り上げる能力や、廃棄物保管容器が落下するシナリオなど、廃棄物保管容器の劣化が及ぼす影響について話し合われた。

IAEA の支援期間を通して、安全性評価結果の文書化と周知について議論が交わされた。安全性評価実施プロセス及び結論については、県において実施した調査研究成果としてとりまとめが行われ、2020 年 3 月に県のホームページで配信がされた。この内容については、IAEA との議論はまだ行われていない。

4.5 仮置場に保管されている廃棄物の搬出戦略と仮置場所の廃止措置

実施取決めに基づく協力の後半の段階で、IAEA チームと県の専門家らは、仮置場に保管されている廃棄物の搬出、仮置場跡地の原状回復について話し合った。

第 4.4.5 節で説明したように、廃棄物保管容器は経年劣化するため、廃棄物保管容器の劣化によって仮置場から搬出することが困難になることが予想される。IAEA チームは、廃棄

物保管容器の耐久性に関する調査を継続すること、調査結果をデータベースに入力すること、調査結果を実用的に利用して廃棄物保管容器搬出の優先順序づけを行うことを提言した。安全性評価プロセスを通じて対処すべき重要な問題は、仮置場から他の保管施設（中間貯蔵施設など）への廃棄物保管容器の輸送である。輸送事故を管理するための手順がなければならぬ。安全性評価の結果を、輸送すべき特定の廃棄物保管容器の優先順位付けに役立てる必要がある。廃棄物保管容器の経年劣化や輸送問題の検討結果として新たな情報が得られた場合は、そのような情報を考慮しつつ安全評価及びその進め方を修正する必要がある。

IAEA チームはまた、放射線に係る安全性の観点から、市町村が運営する埋立処分場を使用して除染後の廃棄物を処分することは可能であるとの意見を述べた。2018年から2020年に実施された会合において、海外の国々における埋立処分場での放射性廃棄物処分事例が提示された。大量廃棄物の埋立処分に関する特定のクリアランスレベルの導出に関するIAEAプロジェクトに基づき、また放射線防護の原則に則り、最大濃度8,000Bq/kg以下の¹³⁷Cs含有廃棄物を埋立処分することに対して反対する根拠はないとの意見が出された。

全ての廃棄物が取り除かれた後の仮置場の原状回復は、IAEA安全基準に則って系統的に実施すべき大がかりな作業であることが指摘された。これについては、放射線の測定手順を含めた原状回復技術や、被ばく線量基準などの放射線防護目標の設定及び実施といった問題に対処する必要がある。

市町村にある仮置場の大部分が2019年から2021年の間に原状回復される予定である。

2020年2月に行われた会合で、仮置場跡地の原状回復は順調に進んでおり、2022年までに県内で稼働中の仮置場は無くなる見込みであり、2024年までに県内の全ての仮置場跡地が原状回復される予定であること、また、県内でこれ以上廃棄物が発生することは想定されていないことが県から示された。

仮置場の設置者（例えば、市町村）は、跡地の原状回復を計画し、その計画では跡地の原状回復後に仮置場設置直前の放射能レベル未満となるようにすることを計画している。土壌中の放射性核種濃度のさらなる測定に裏付けられ、主に空間線量率測定値を使用し、仮置場跡地の最終状態を検証するという環境省のガイドラインによるアプローチは適切と思われるが、十分な数の測定を実施することが重要である。仮置場跡地の原状回復のための安全性評価が進行中であるが、仮置場跡地が現在及び将来にわたって安全に使用できることを実証する必要がある。

IAEA安全基準と矛盾することなく、仮置場の運用、仮置場からの廃棄物の除去、中間貯蔵施設への廃棄物の輸送及び仮置場跡地の原状回復のために行われた安全評価作業については完全に文書化し、適切な審査を受けることが望ましい。仮置場の安全性評価の際に行った選択（シナリオ、汚染経路、パラメータなど）は、十分に正当化すべきである。更に議論を重ねることは、実施した作業内容を関係者らに正しく伝える上で有益である。IAEAは、必要に応じてこれらの課題に関する支援を提供し続ける。

4.6 まとめ

実施取決めに基づく除染活動から生じた廃棄物の管理に関する活動は当初、県による仮置場設置に関する技術指針の策定ならびに仮置場の安全性評価・実証に対する支援が中心だった。

仮置場設置者が廃棄物を管理する場合、施設や活動が安全であることを証明する必要がある。実施取決めに基づく活動の開始前における県の専門家らは、IAEA 安全基準が義務付けている安全評価の実施についての知見を十分有していなかったことから、仮置場の安全性評価の実施に関する訓練及び支援が提供された。そのなかで、教育段階から始まり、その後の段階では IAEA 安全評価ソフトウェアツール (SAFRAN) が適用された。

時間の経過とともに、支援の内容は徐々に変化し、仮置場の長期運用の安全性、仮置場からの廃棄物搬出の戦略ならびに仮置場跡地の廃止措置及び原状回復に重点が置かれるようになった。提供された援助の主要な側面は、海外での放射性廃棄物管理の専門知識と知見の共有だった。

IAEA の SAFRAN を使うことによって、仮置場の安全性評価の反復的アプローチが可能となった。安全性評価は、処分前放射性廃棄物管理施設と活動の安全性を評価するための IAEA の方法論に従って、県の専門家らによって行われた。また SAFRAN は、安全性評価を数回実施する上で重要なステップを実行し、仮定を練り直し、要素を追加し、保守的なアプローチと現実的なアプローチのバランスを最適化する手段に係る知見も県に提供した。安全性評価は各ステップにおいて自動的に更新されるため、反復的アプローチが混乱、矛盾、重要な側面の見落としなどにつながるリスクは大幅に減少する。

処分前の放射性廃棄物管理施設と活動の安全性を評価するための IAEA の方法論を使用して県が実施した安全性評価は、IAEA の SAFRAN の適用可能性を含め、IAEA の方法論自体の十分な適用可能性を実証した。また、SAFRAN データベースを部分的に変更することによって、県内の仮置場の特定の条件に適合させることもできた。

SAFRAN をモデル仮置場及び県内の 9 ヶ所の仮置場に適用しつつ実施した安全性評価は、福島第一原子力発電所の事故後の環境修復活動により蓄積した大量の放射性廃棄物を保管する安全かつ信頼性の高い方法を確立する上で重要なステップである。

仮置場の安全性評価の実施中に、複数の技術的問題（仮置施設の様々な場所における水の蓄積、洪水、火災、仮置場から搬出された廃棄物保管容器の劣化、廃棄物保管容器の輸送、廃棄物パッケージの損傷等の問題）が特定され、それらの問題が安全性に及ぼす影響が評価された。安全への影響に関するこれらの評価に基づき、問題を修正及び防止するための技術的対策を確立し、その有効性を推定することができる。

安全性評価を通じて到達した結論のうちの幾つかは、さほど体系的ではないアプローチ（知見や良好事例に関する議論に基づく専門家の判断だけに依存するアプローチ等）でも得られた可能性がある。しかし、そのようなアプローチは、重要な問題を見落とす可能性がある

るため、必ずしも同じ結論が得られるとは限らない。SAFRAN を用いて実施した系統的プロセスは、想定し得るあらゆるハザード及び技術的問題の評価を可能にし、重要問題の見逃ごしはないという根拠と信頼性をもたらした。また、特定のシステムやプロセスが安全である理由や、特定の安全性改善策が必要な理由を説明できることにもつながった。

県内の仮置場の安全性評価実施において SAFRAN を使用して得られた結果は、適切な運用手順を踏襲し、適切な措置を講じている限り、保守的な数値を用いて計算した放射線量は例外なく規定の線量限度を十分に下回ることを明確に示唆した。あらゆる重要なハザードを体系的に分析することによって、必要に応じて人や環境への容認できない不当な影響を回避または大幅に削減する措置を講じる必要性の根拠を示すことも出来た。

IAEA チームと県の専門家らの間で、仮置場に s 保管されている廃棄物の搬出戦略に関する議論が、廃棄物保管容器の経年劣化を考慮した上で行われ、仮置場の安全性評価は、廃棄物保管容器の経年劣化への対策の結果として得られた新情報を考慮して修正する必要があることが指摘された。

全ての廃棄物を取り除かれた後の仮置場の原状回復措置は、体系的な方法で取り組む必要のある大がかりな作業であり、IAEA チームは、適用可能な IAEA 安全基準を使用するよう助言した。

IAEA 安全基準と矛盾することなく、仮置場の運用、仮置場からの廃棄物の搬出、中間貯蔵施設への廃棄物の輸送及び仮置場跡地の原状回復のために行われた安全評価作業については完全に文書化し、適切な審査を受けることが望ましい。仮置場の安全性評価の際に行った選択（シナリオ、汚染経路、パラメータなど）は、十分に正当化すべきである。更に議論を重ねることは、実施した作業内容を関係者らに首尾良く伝える上で有益であろう。IAEA は、要請があれば、これらの課題に関する支援を提供し続ける。

5. 無人航空機を用いた環境マッピング技術の適用

5.1 背景及び目的

県は、走行サーベイ等の方法では立ち入りができない地域で高放射線レベルが存在する可能性がある地域において放射線モニタリングを実施する必要性から、無人航空機（UAV）を使用する方法を開発した。2つの連続した協力プロジェクト「UAVを使用した迅速な環境マッピング」と「UAVを使用した迅速な環境マッピング：フェーズII：運用サポート」は、いずれも IAEA 原子力科学・応用局が県と行った協力プロジェクトであり、県に多大な支援を提供した。

5.2 UAV システムの開発と提供

最初のプロジェクト「UAV を使用した迅速な環境マッピング」の下で、完全な UAV ベースのシステムが県に納入された（図 5.1 参照）。この装置は、日本国内の空中放射線測定用に特別にカスタマイズされ、多用途検出システム、日本の規制に準拠したリモートコントロール、カーボンローターブレード、レーザー高度計、その他追加機能で構成されている。



図 5.1 県に納入された UAV ベースのシステムと計装機器（提供：IAEA）

このプロジェクトにおいては、UAV、計装機器及びデータの取得・分析のための関連ソフトウェアを県職員らが使用できるようにするための研修も行われ、その中で実験室や実際の条件下での現場飛行及び測定も実施した。

5.3 機器の現場較正及び手法の検証

最初のプロジェクトのフォローアップとなるプロジェクト「UAVを使用した迅速な環境マッピング：フェーズ II：運用サポート」では、他の方法で立ち入りができない、あるいは高い放射線レベルが存在する可能性がある地域での測定を行うにあたり事前に必要となる、機器の較正や測定の妥当性確認が行われた。

較正測定の実施においてガンマ線の線量率が異なる5つのサイトが選択された。各線量率は、 $0.1\mu\text{Sv/h}$ ～ $8\mu\text{Sv/h}$ であった。ガイガーミュラーカウンターを装備した UAV ベースのシステムを使用して、様々な高度の測定を行い、CsI 分光計を搭載したバックパックを使用して同じ領域の特徴付けを実施した。NaI 検出器を使用した基準測定も実施した。これらの測定活動の一例を図 5.2 に示す。

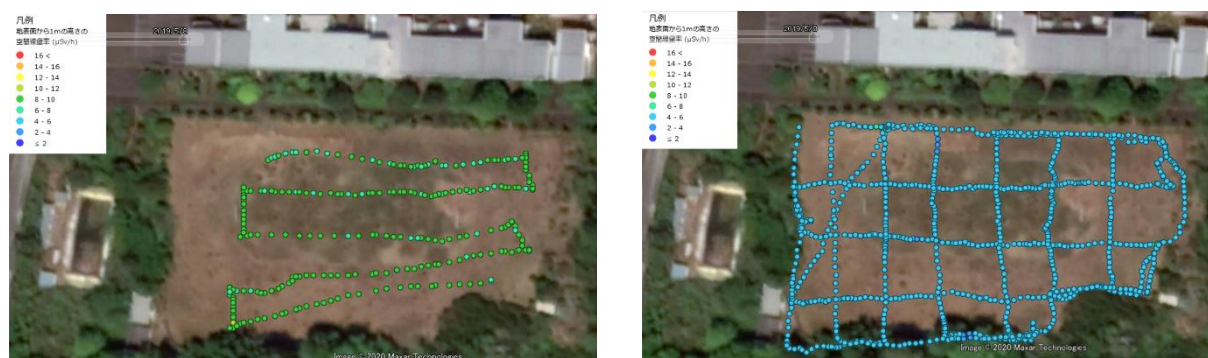


図5.2 バックパックとUAVの両方の手法を使って、立ち入り可能な地域で実施した現場測定（補正していない未加工データ）の例：高度10mで飛行するUAVシステム（ガイガーミュラーカウンター）を用いて得られたデータ地点（左側）。検出器が高度1mで設置した検出器で、地域全体を踏査するバックパックシステム（CsI分光計）を用いて得たデータ地点（右側）。提供：福島県。

これらの測定の結果、以下が体系的に確認された。

- UAVベースのシステムで実施した測定の高度依存性は指数法則に従っているため、ガンマ線量率を地上レベルの値に確実に外挿することができる（図5.3左図参照）。
- UAVベースのシステムで取得した地上における線量率は、NaIでの測定値よりも体系的に高くなっている。NaIでの測定が不可能な場合は補正率を適用する（図5.3右図参照）。

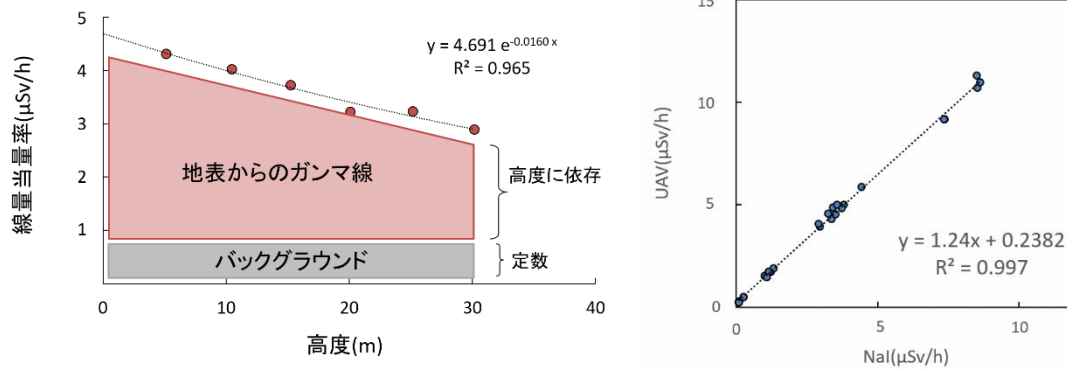


図 5.3 左側：UAV ベースのシステムを使用して測定し、高度の関数として表した線量当量率の指数関数的依存性。右側：基準 NaI データに対してガイガーミュラーカウンタで取得した UAV データの線形依存性の図（測定はいずれも高度 1m で実施、線量率は異なる）提供：福島県

測定方法と、感度分析を含む高度補正率については、高度なモンテカルロ法を使って再度確認した。様々な形状への依存性、線源が均質か不均質であるか、異なるガンマエネルギー放出、土壌タイプ、汚染深度プロファイル等について体系的に調査した。最後に、統計データ分析と内挿・外挿処理を展開し、R コードで UAV 測定に基づく詳細な 2D 放射線のマッピングを実施し、試験を行った。

5.4 仮置場での試験測定

測定方法の検証後、試験測定を開始した。図 5.4 は、UAV ベースのシステムを使用した測定の明確な利点を示している。この場合、放射線マッピングは福島県内にある仮置場で実施し、バックパック（CsI 分光計を搭載）と UAV を用いた測定を組み合わせた。後者は、地上仮置場の上空（高度 10m）を飛行し実施した。積み上げた廃棄物コンテナの上をバックパックを背負って測定する方法は、実用的でなく望ましいものでもない。

他の同様の仮置場においても、汚染土壌搬出の前後に測定が計画されている。UAV を用いた測定は、搬出中に土壌が散逸する可能性を考えあわせるとバックパックを用いた測定と比較して利点がある。迅速な UAV を用いた測定を実施することで、そのような状況下でも遠隔地から放射線レベルの判断ができる。

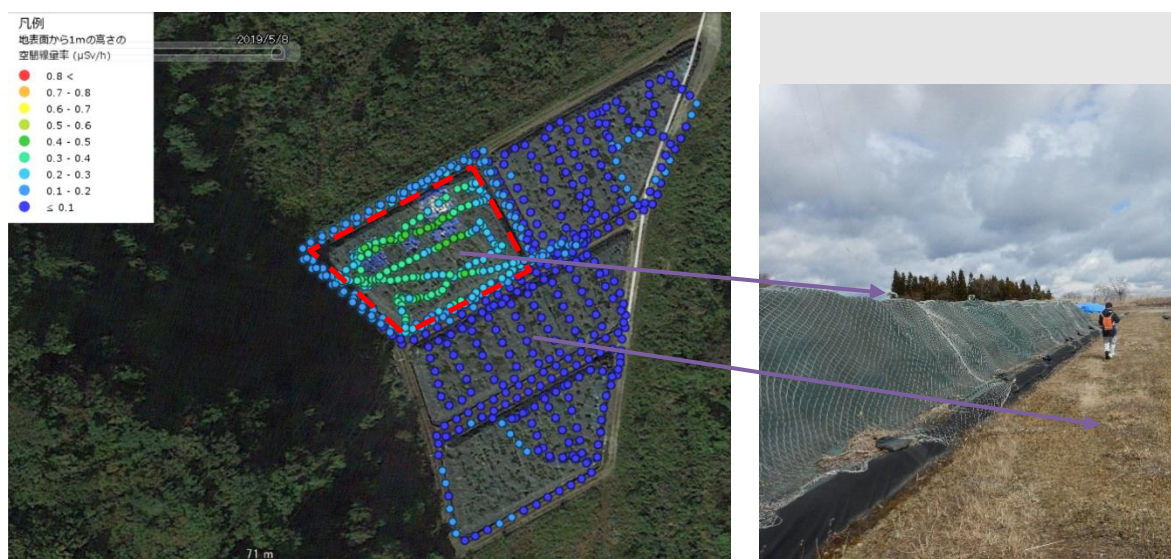


図.5.4 県内の仮置場における UAV（赤い枠内）とバックパックによる放射線マッピングの組み合わせ（提供：福島県）

5.5 まとめ

県は、徒歩では行けない地域や高い放射線レベルが存在する可能性がある地域での計装 UAV の使用方法を開発した。IAEA の原子力科学・応用局は、連続する協力プロジェクトを通じて放射線測定の実施が可能な完全 UAV ベースの計装システム並びに測定後の分析と解釈の手法の提供という多大なサポートを提供した。その中で、県職員に対する UAV や計装機器及びデータ取得と分析用の関連ソフトウェア使用に係る研修も実施した。

後者のプロジェクトのうち検証を目的とした第一段階では、機器の現場較正と測定手順の検証を実施した。両作業では、モンテカルロモデリングを組み合わせた基準 NaI 調査実験データと、UAV ベース測定の高度依存性特定、UAV と NaI の結果間の補正率特定、及び広範な感度分析を実行した。ほとんどの作業で、UAV ベースのデータと CsI 分光計を使用して得たバックパック・調査データの比較を実行した。

それに引き続く第二段階では、徒歩では行けない地域や高い放射線レベルが存在する可能性がある地域での使用を想定し測定を行った。この確立した手法は、原子力事故や採掘活動で汚染したサイトの放射線マッピングに対して、また廃止措置及び修復プロジェクトの一環として、拡張的に適用しうる可能性を有するものである。

6. 県民への情報発信

6.1 背景及び目的

県が実施した放射線モニタリングにより、県内において一般市民の生活圏の空間線量率は日本のバックグラウンドレベルの範囲内にあることが確認されている。実施取決めの下での協力を通じて、また世界中で同様の状況に対処してきた IAEA の国際的な知見に基づいて、これまでの結果と成果をタイムリーかつわかりやすい方法で一般市民に発信及び説明するためのサポートを、福島県は要請した。

IAEA 及び県は、情報発信への取り組みを強化するために、実施取決めに基づいて各テーマの範囲内でいくつかの活動を行った。

実施取決めに基づく活動が開始された 2013 年時点で、県は放射線モニタリングデータを一般利用に供するためのウェブサイトを開設済みであった。ここでは、下記を含む複数の情報源からの詳細な空間線量率や物質中の放射能濃度の測定結果が提供されていた。

1. 約 3,500 地点の定点モニタリング地点（事故前には 24 地点のみ）でのデータ
2. 走行サーベイでのデータ
3. 食品、飲料水、その他の環境媒体に関する放射性核種データ

福島県は、事故直後から放射線モニタリング結果、環境中の放射性セシウムレベル、除染、環境回復、廃棄物に関する情報を発信し、放射線の概念を一般市民、その他の関係者らに説明しており、そのためにウェブサイトと広報誌を主要な発信経路として使用してきた。

2014 年時点で、サイト訪問者数は 1 か月あたり 20,000～50,000 件だった。ユーザーが必要とする情報に対処するためのウェブサイトの改善方法について、ユーザーから様々な提言があった。県はウェブサイトの改善方法に関する調査を通じて、県民の意見を求めたところ、理解しやすい情報、モバイルテクノロジーとの互換性、放射線の説明等が要望事項として寄せられた。

6.2 ウェブサイトの改訂 2013～2016 年

2013 年から 2016 年にかけて、IAEA チームはウェブサイトの改訂において県をサポートした。IAEA チームは、多くの国で開発された Web マップに関する情報を提示し、放射線モニタリングデータのマッピングとそのような情報を一般に公開することに関する技術的な助言を行った。

6.2.1 マッピングに関する一般的な考慮事項

同一地点において調査を行ったとすると、用いた計装機器が異なると測定値がばらつく可能性があるため、一般市民への提供情報の際には考慮が必要である。入手したデータセットの統合には、異なる調査方法で得たデータに対して補正率を適用することが必要となる。さらに、季節間の空間線量率の変動（積雪影響等）や、同じ場所であっても路上と路上外での空間線量率の差異などの要因も、調査結果において見かけの差異を示す可能性がある。これらの調査方法による空間線量率の差異は、各測定の実験誤差範囲内となる可能性が高いが、その説明にはインフォグラフィックが有用であると考えられる。また、ホームページ上でのデータセットの更新頻度も決定する必要がある。

2015年12月のIAEAチームと県の専門家らの会合において、日本原子力研究開発機構（JAEA）は、マッピングプロジェクトを発表した。ここでは、複数の組織から集めたデータの標準化及び統合することによって、環境モニタリングデータベースが開発されたことが示された。当時のデータベースに含まれる情報は空間線量率、土壌（放射能濃度と沈着）、粉塵、水及び陸上及び海洋の食物を網羅する4億点以上の測定データである。

6.2.2 ホームページ開発に関する考察

IAEAチームから、オーストリア、ベラルーシ、カナダ、EU、フランス、ドイツ、香港特別自治区、ロシア、トルコ及びウクライナのWebマップに係る情報が提供された。それらのマップのほとんどが、専ら定点モニタリング位置のみに準拠している。現地立入調査の実施も可能であるが、通常はそうした調査は、小規模地域の詳細なモニタリングのみに実施されている。これらのマップは通常、一般公開のホームページでは公開されず、他のデータセットとも統合されていない。これら全てを反映し、県では独自のアプローチを行っている。

会合において議論した内容としては、例えば以下の点が挙げられる。

- ホームページには適切なマッピングツールが必要である。
- ホームページは、情報源かつ実施中の活動促進ツールとして捉えるべきである。
- 県は、ホームページを改訂するにあたっては、特に使い勝手の向上及びマップ、インフォグラフィックでの情報提供に重点を置いている。
- 示す情報はシンプルでわかりやすい方が良い。ユーザーは放射線防護の用語や概念を理解していないため、数字よりメッセージの方がわかりやすい。したがって、情報を説明し、わかりやすくするため十分な予備知識を提供することも必要である。
- 測定単位や放射線量等詳細な情報を検索するユーザー向けに、別リンクあるいは注釈図を使用出来るように設計する。
- まず最新情報と全体像の表示、同じく特定の地点の詳細な情報を表示する地図が必要である。
- 過去の（特に2011年3月以降の放射線量の減少過程における）データも重要であり、可能であれば、必要に応じ利用できることが望ましい。

- 将来的には、県土の7割の面積を占める森林内の空間線量率分布地図の作成が望まれる。そこでは、林業組合設置のモニタリングポストのデータが利用できる。
- 県内には、土壌中トリウム濃度が比較的高い地域が多数ある。結果として、県内ではバックグラウンド空間線量率のばらつきが大きくなりうるため、県全体に対し一般的なバックグラウンド値を一律に使用すれば誤解を招く可能性がある。土壌中のカリウム、ウラン、トリウム濃度は、日本地理学会ホームページで閲覧が出来るため、多様な地点での実際の空間線量率が計算できる。
- JAEA と県の地図では、縮尺と色分けが異なるため、統合した生データを使用して、新しい地図を作成することが望ましい。
- 県は新規ホームページにおいて、何の情報を公開するかを決定しなければならない（例えば、既存の地図のダウンロードのみ可能とするか、またユーザー自身によるマップ作成用の生データも提供するか）。これには、透明性の利点とデータ悪用のリスクの両者を考えあわせる必要がある。

6.2.3 ホームページ最終デザイン

ホームページの改訂に続き、2016年6～7月のIAEAチームとの会合で、県が完了した活動について報告した。それまでのIAEAチームからの多数の助言が新しいホームページのデザイン及び機能性の開発に役立てられており、走行サーベイの一環として収集されたモニタリングデータが、屋外の地上高1mにおけるデータとして標準化されていることが確認できた。新規ホームページは、以前のバージョンよりもさらに使いやすくなり、高速で、パソコン及びスマートフォンの双方に最適化されている。ホームページの改訂により、特定な場所でのデータ閲覧が容易になり、日付特定も可能となっている。クリック対応マップは、マップ上の特定地点のデータへのアクセスができ（図 6.1）、マップ上には空間線量率及び環境試料の測定結果も表示される。空間線量率の経時変化も、「タイムルーラー」の使用により直観的に把握できるようになっている（図 6.2）。さらに、空間線量率の経時変化をグラフで示すことができ（図 6.3）日本語に加えて英語、中国語及び韓国語にも対応している。改訂版ホームページの英語版ポータルは、次の URL でアクセス可能である。

<http://fukushima-radioactivity.jp/>

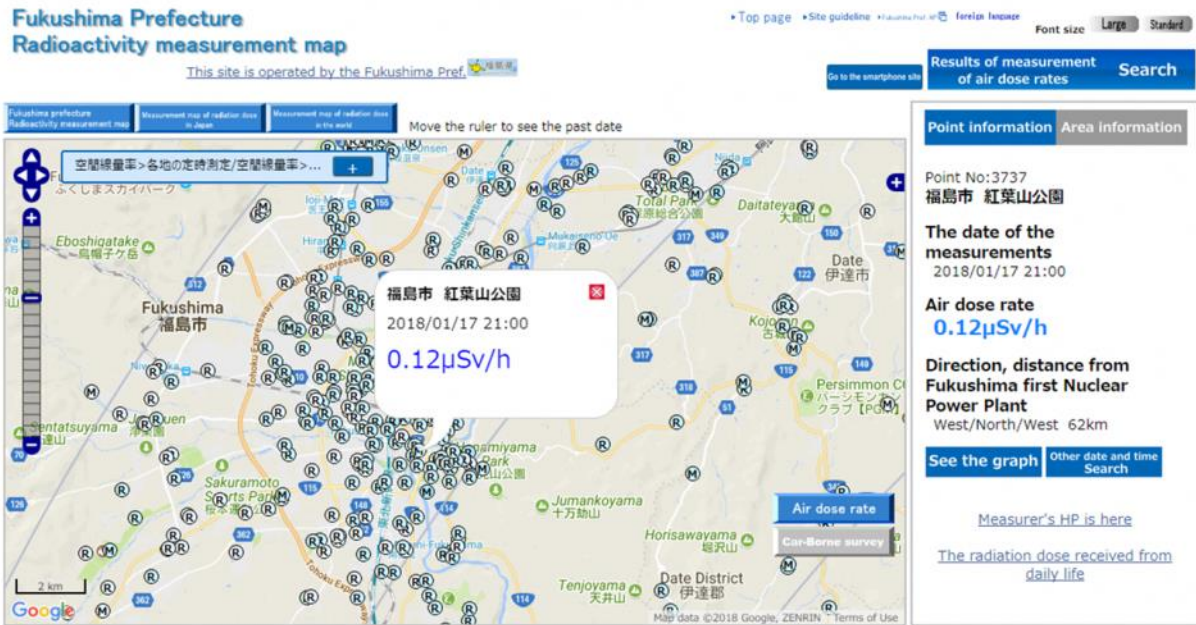


図 6.1 クリック可能な放射線測定マップ（福島県ホームページ）

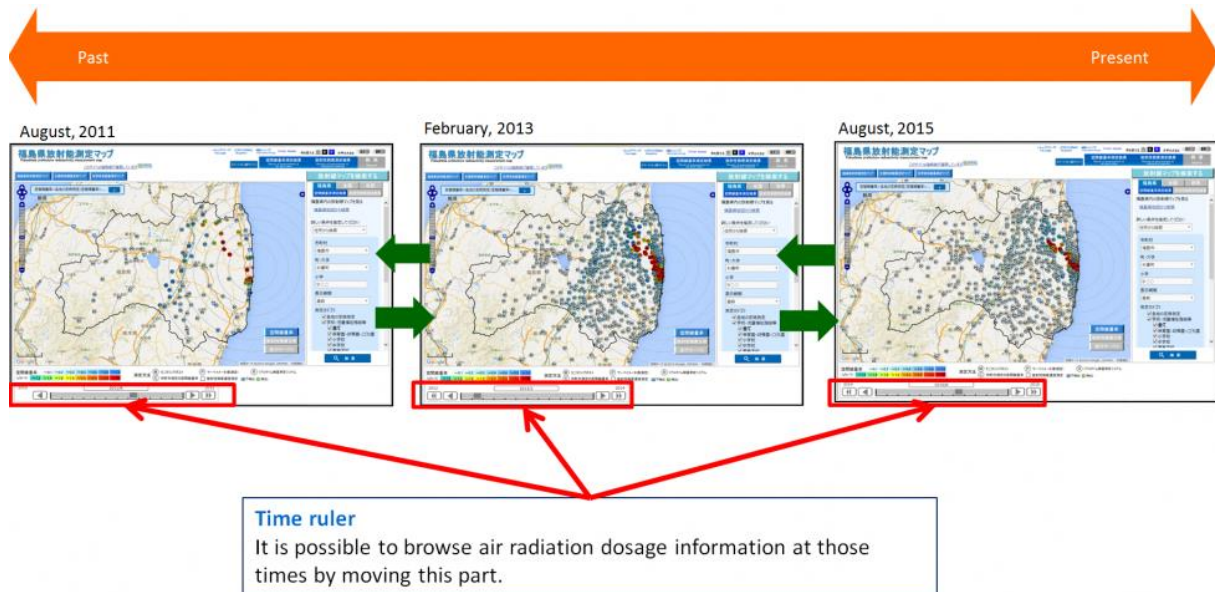


図 6.2 放射能測定マップのタイムルーラー（福島県ホームページ）

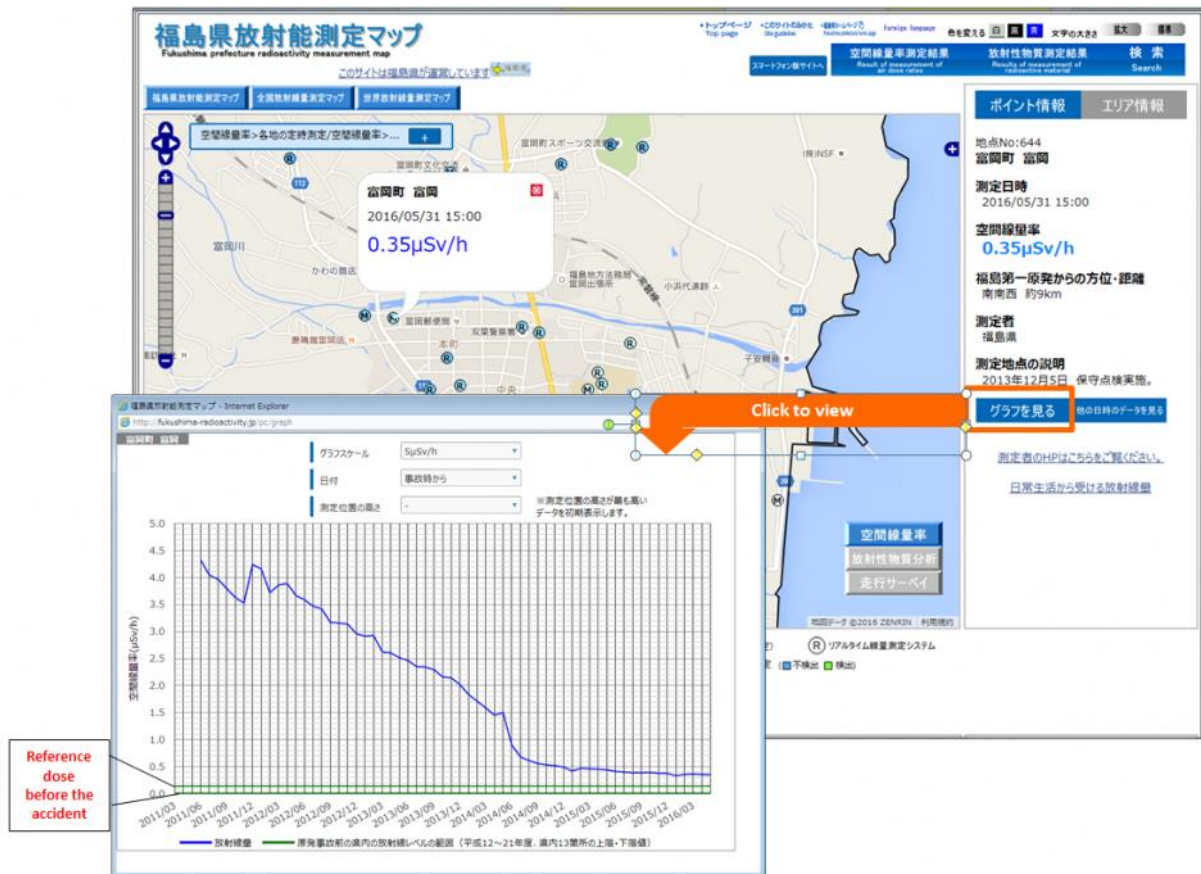


図 6.3 放射能測定マップに示される任意の時間における任意の地点の測定値
(福島県ホームページ)

6.3 福島復興ステーションホームページ

2015 年以来、県は福島復興ステーションのホームページを国内外の人々のための主要な情報源として運用している。当該ホームページは、県の復興活動に関する県訪問者及び県民向けの一般的な情報並びに空間線量率測定値や物質中の放射能濃度に関する情報を統合したものである。このホームページでは、一般公開モニタリングデータを表示する放射線モニタリング測定マップも閲覧できる。

IAEA チームは、県ホームページのメンテナンスと強化を支援するために、オンラインコミュニケーションを通じて、国際的な事例やベストプラクティスに関する講義や実習を提供した。

IAEA チームと県は、シンプルかつ構造化された Web コンテンツが重要であると結論付けた。ホームページは主要な地点と最新情報を含む必要があるが、サポートページでさらに詳細な内容を提示する必要がある。ソーシャルメディアやニュースレターを通じて情報を「プッシュ」することにより情報を積極的に探していない人々に情報を届けることは、一般市民を引きつけるもう一つの手段である。

県と IAEA チームはさらに、地図、アニメーション、インフォグラフィックなどの視覚化ツールを介してモニタリングデータを表示するという最近のコミュニケーション傾向について検討した。国際的な事例が示しているように、それらの視覚化ツールは放射線の懸念がある状況下でデータを分かりやすく伝達する上で効果的であることが証明されている。

福島復興ステーションは現在、10 言語（日本語、英語、中国語（簡体字及び繁体字）、韓国語、タイ語、ドイツ語、フランス語、イタリア語、スペイン語、ポルトガル語）で利用可能である。

Google Analytics などの分析ツールは、ウェブサイトの可視性や機能性を理解する上で役立つ。2019 年 4 月の結果は、外国語のウェブページのアクセス件数は合計件数の 4.8% を占めており、英語版のウェブページは外国人閲覧者によるアクセスの半分を占めている。最もアクセスが多いウェブページは「県内の放射線レベル」である。

県をさらに支援するために、IAEA チームは、福島復興ステーションを介して情報発信を最適化する方法に関する論文を作成した。この論文では、次の方法に関する情報を提示した。

- 閲覧者のニーズに合わせてウェブサイトのコンテンツとレイアウトを調整する。
- 閲覧者のニーズを調べるためにウェブサイトで調査を行う。
- 閲覧者が最も多い言語に重点を置く（英語、中国語、韓国語）。
- 日本のウェブサイトで閲覧可能なモニタリングに係るページを外国語に翻訳する。
- Google Analytics の結果を使用してウェブサイトを最適化する。
- ウェブサイトのすべてのページの安全性を確保する。
- 検索数ランキングを向上させるため、検索エンジンの最適化に取り組む。
- ウェブサイト公開ワークフローを改善し、調査研究を行う部門がより定期的にコンテンツを更新できるようにする。

6.4 情報発信

福島県は、一般市民に対して、放射線モニタリング結果、環境中の放射性セシウムレベル、地域の除染、環境回復、廃棄物関連活動に関する情報を発信しており、放射線の影響を説明している。そのために県は、専用のウェブサイト（第 6.2 及び 6.3 節参照）と広報誌を使用している。

県が実施した東京都民対象の 2017 年世論調査では、東京都民はいまだに福島県の現状を正しく理解していないことが示され、平均して東京都民の 3 分の 1 が、家族、子供、友人、外国人観光客などに対して福島県への訪問を勧めていない。この世論調査と県が提示したその他の情報は、放射線及び関連リスクを伝え、感覚的なリスクではなく実際のリスクを認識することが依然として課題であることを示している。

情報発信への取り組みを強化するために、実施取決めに基づくテーマに関する活動が2018年から2020年にかけて実施された。これらの活動は、一般市民に対する放射線影響に係る情報発信の海外での先行事例（ベストプラクティス）に基づいて行われた。

6.4.1 アウトリーチ（啓発）資料

IAEA チームと県は、放射線モニタリング、オフサイトの除染及び環境修復、放射性廃棄物管理という3つの主要なテーマを推進するために、一般市民向けのアウトリーチ資料を作成した。

アウトリーチのための資料は小冊子の形で作成され、以下を説明している。

- 現在の放射線の傾向と全体的な線量率
- 放射線モニタリング及びマッピング、除染及び環境修復、放射性廃棄物管理において県が実施した内容
- 一般市民への放射線影響（一般市民でない方への影響と比較して）
- 2013年から2017年までのIAEAと福島県との協力の結果

この小冊子には、本文や画像、必要に応じてモニタリングデータを明示するためのインフォグラフィック、注意を引くグラフやチャートなどが含まれていた。これらのデータの視覚化は、一般市民、その他の関係者が複雑な情報をわかりやすい言葉で理解するのに役立つものである。

本報告書の2～4章で説明した3つの各テーマについては、小冊子が作成された。それらの小冊子は、2018年2月に日本で開催されたサマリーワークショップで発表、議論され、その後配布を開始した。リンク先で英語版も閲覧可能である。(https://www.fukushima-kankyosozu.jp//lancelot/common_files/images/public/9_Leaflet(English).pdf)。

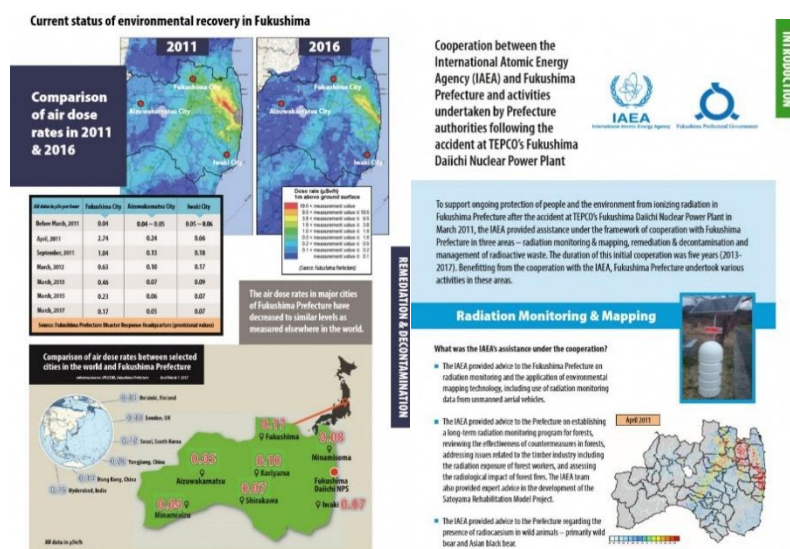


図 6.4 小冊子の表紙（右側）とページの一例（左側）（提供：福島県）

IAEA チームと県は、実務取決めの残りの期間中、アウトリーチ資料を継続的に作成することに合意した。

6.4.2 情報発信セミナー

2019年7月に日本で、アウトリーチや市民との関わりを担当する県職員を対象に、情報発信に係るセミナーを開催した。主要テーマは、県が実施した放射線モニタリングの結果、除染及び環境修復、放射性廃棄物管理に係る情報の発信であった。

目的は、効果的なコミュニケーション戦略とコミュニケーション手法におけるベストプラクティスについて、国際的な専門家らと知識や知見を交換し合うことであった。その2日半にわたるセミナーは、講義形式及び対話型セッションで構成され、このうち講義形式セッションでは県の代表者らが情報発信にどのように対処してきたか、またどのような課題に直面しているかを説明した。これに対しリスクコミュニケーションの知見を有するIAEAチームは、ケーススタディを行い、県の具体的な状況について助言した。一方で対話型セッションでは、ワーキンググループ（放射線モニタリング、除染及び環境修復、放射性廃棄物管理）ごとに、IAEAチームのコミュニケーション専門家が主導した。

1. 講義形式セッション

- 県職員らのコミュニケーション戦略の結果及びこれまでに直面した課題に関するプレゼンテーション
- 放射線に係る事故時の、一般の方々に対する事故の内容や放射線リスクの伝達に関する国際的なケーススタディ
- 県が提示した問題点の解決策及びIAEAチームからのフィードバック

2. 対話型セッション

- 上記の講義形式セッション中に提示された情報に基づく議論
- コミュニケーション方法の異なる3つのグループ（ウェブ形式、対面形式、イベント形式）ごとのグループ対話及びロールプレイングによる実践的な演習

線量と線量率を簡単な用語で伝達し、県のほとんどの地域の線量レベルが世界の他の地域の線量レベルと同程度であることを大局的に示すことが重要である。

IAEAチームは、福島県の美と多様性を観光客らに伝える際に、線量率が通常の範囲内にあり、観光客にリスクをもたらさないことを伝えることが重要であることを強調した。海外の人々に情報発信する際は、「福島」という言葉は福島第一原子力発電所を指す言葉ではなく県全体を指す言葉であることを明確にすることが重要である。

利害関係者らにメッセージを伝える最も効率的な方法は、一方向的な情報発信から双方向的な対話へと切り替えることである。線量率モニタリングに市民を参加させること（「市民科学」とも言えるのではないか）が提案された。コミュニティから尊敬され、親しまれて

いる人々を「コミュニティアンバサダー」として指定することにより、情報を直接的にコミュニティの住民らに提供することができる。利害関係者らを早期の段階から関与させることも、信頼を構築し、個人レベルで関係を築く上で重要である。

県のホームページもセミナーの議題となった。詳細は第 6.3 節参照のこと。

6.5 まとめ

県内の放射線の状況について正確な最新情報が利用可能であることは、県民及び来県者の双方にとって重要である。県のホームページで閲覧できる「福島県放射能測定マップ」(<http://fukushima-radioactivity.jp/pc/>)は、空間線量率が時間とともに減少していることを大まかに示しているが、人々は自分たちの生活や仕事の間、あるいは訪問先に関するピンポイントな情報も望んでいる。2016 年に完成した改訂版ホームページでは、分かりやすい形でピンポイントな情報を閲覧できるようになり、最新データを優先すると同時に、要望に応じて過去データも閲覧できるようになった。

放射線データの収集法は多数あり、各方法で異なる測定手法を使用している。県内の 3,000 を超えるモニタリングポストが継続的にデータを提供しており、それらのデータは、走行サーベイ（県内の道路を走行する車両に放射線モニターを搭載）によって収集されたデータによって補強されている。

一般市民が県のホームページによって体系的かつ分かりやすい放射線モニタリング情報にアクセスできるようにするには、いくつかの段階が必要だった（利用可能な大量の情報の標準化、様々な詳細レベルで放射線の状況を正確に提示できるマップの開発、並びにそれらのデータ及びその他のデータにアクセスできるようにするためのホームページの更新）。これらの問題は全て、IAEA チームと県の各担当部署の情報発信担当者や放射線測定の専門家らとの間で詳細に議論された。

ウェブサイトによる情報提供は、コミュニケーション戦略の一つの構成要素にすぎない。予想される空間線量率の経時的な低下について、県は県民及び国内外からの旅行者に情報や助言を提供する必要性が認識されている。これは、放射性セシウムの物理的半減期による自然な減少と、適用された対策の効果を考慮に入れなければならない。とはいえそれはそれぞれの測定点で異なるため、将来の状況を推定する際の不確実性も提示する必要がある。

IAEA との協力により得られた主要な結論は以下のとおりである。

- メッセージを伝える際に最も効率的な方法は、一方向の情報発信から双方向性の対話へと切り替えることである。
- 福島県だけでなく、日本及び海外における一般市民の信頼を高めるための重要課題の一つは、それらの人々が情報に基づく意見を形成できるようにすることである。これは、一般市民の活発な関与とわかりやすいコミュニケーションツールによって実現することができる。
- 海外に発信する際は、「福島」という言葉が福島第一原子力発電所ではなく県全体を指すことを明確にすることが重要である。
- 適切に構成されたウェブサイトなどの伝達経路は、情報提供対象者に対してタイムリーに発信する上で重要である。
- 日本、さらには福島県における従来のメディアの重要性に鑑みると、マスメディアによる情報伝達は非常に重要である。

これまでの活動の結果は、国際的な事例の共有の重要性と世界規模の支援の利点を再確認できるようなものであったと言える。

7. 報告書の総括

2012年に実施取決めが策定されて以来、人々の最も重要な被ばく経路は、陸域と水域の両方に存在する放射性セシウムから放出される外部放射線だった。放射性セシウムの放射性崩壊、風化による表面からの放射性セシウムの除去ならびに土壌及び堆積物を垂直方向へ移行することによる放射性セシウムの除去の結果として、環境中の放射性セシウムレベル及び人々の被ばく線量は人的介入がなくても減少する。さらに県は、陸域、水域いずれにおいても放射性セシウムレベルと被ばく線量が環境修復活動によって減少したと結論付けた。福島第一原子力発電所事故以来、県は、修復活動及びその結果として生じた放射性廃棄物の管理に対して相当な取り組みを行ってきた。この中間概要報告は、2013年から2020年初頭までの実施取決めの下で行われた作業の概要を示すものである。

7.1 森林内の放射性物質の長期モニタリング及び関連する対策

県の経済及び住民の生活における森林の重要性から、森林生態系内の放射性セシウムの移行及びの濃集メカニズムを把握する必要がある。1986年のチェルノブイリ事故後、数年間にわたり森林生態系に関する大規模な調査が実施されたが、欧州と日本の森林は異なっているため、過去の調査結果を県の状況に直接適用することは難しい。このため県は、大規模なモニタリング及び調査プログラムを策定した。

県内の森林土壌に存在する粘土鉱物が放射性セシウムを植生や樹木への取り込みを減らすような形で固定化していることは明らかである。その結果、樹木自体が含有している放射性セシウムは森林内の放射性セシウムの約0.2%に過ぎない。現在までに伐採された木材で測定された比較的低い濃度は、県内の森林からの木材を継続的かつ無制限に使用しても構わないことを裏付けている。ただし、この傾向が続く可能性や、新しく植えた苗木による吸収の違いを評価することも重要である。時間とともに、自然減衰による空間線量率の低下により、現在管理されていない森林地域への立ち入りが可能になるが、木材の継続的な使用と林業従事者の放射線被ばく管理という点で、新たな課題が生じる可能性がある。

重要なことは、県の森林に最初に沈着した放射性セシウムのほとんどが土壌と落葉落枝層（リター層）に移行し、空間線量率に寄与し続けていることである。それらのほとんどは森林内に保持されており、森林からその外部へ移行した放射性セシウムの量は少ないようである。これは、不測の壊滅的な事象が発生しない限り近隣の農地が継続的に汚染される可能性が低いことを示唆している。

森林は、キノコ、山菜、イノシシの肉などの重要な食料源でもある。さらに、淡水魚は川や小川で捕獲され、その一部は森林に位置している。これらは農産物と比較すると消費の規模は小さいものであるが、放射性セシウムは濃縮される傾向がある。多くの外れ値があり、放射性セシウムレベルの非常に緩やかな減少が今日まで観察されている。これらの野生の食物の多くの放射能濃度は、商業的に販売される食品の放射性セシウム限度100Bq/kgをはる

かに超えている。これらの理由により、個人消費のために野生の食物を採取する人々への測定データを含むより多くのより良い情報の提供の継続が必要である。

将来に目を向けると、森林内の空間線量率の低下は、 ^{137}Cs の 30 年という半減期によって決定付けられる。モニタリングプログラムを長年にわたって継続する必要があるが、初期に策定したモニタリングプログラムを定期的に見直すことによって、技術的な観点から、必要な情報を失うことなくモニタリングの頻度を減らすことができるかを判断すべきである。

得られた知識は、県民の利益のために森林を効果的に管理することを可能にする。この知識を広く発信することによって、一般市民が、被ばくする放射線のレベルを明確に理解できるようにすべきである。

7.2 陸域及び水域における放射性物質のモニタリング及び環境修復と除染

県内の淡水域では、水中の溶存放射性セシウム濃度が検出限界 (0.05 Bq/L) 程度またはそれ未満である。これは、非常に高い放射性セシウムレベルが観察される河床の堆積物による放射性セシウムの強い吸着によって説明できる。懸濁物質中の放射性セシウムの濃度も明らかに低下している。

環境中の放射性セシウムレベルの低下は、主に物理的壊変に起因するが、流出がさらに低下を促進する。貯水池やため池において懸濁態放射性セシウムが沈降するため、一種のセディメントトラップの役割を果たしている。

集水域から河川を介して太平洋に輸送される放射性セシウムの評価にシミュレーションモデルが使用されている。シミュレーション結果は、実測値の解釈を容易にし、一般市民の被ばく低減につながる可能性のある意思決定に役立つ。さらにシミュレーションモデルでは、適切な対策（除染と環境修復に関連する対策を含む）を特定し、その有効性を評価する際に貴重な情報を提供する。たとえば、河川近くのレクリエーション地域で空間線量率低下対策の有効性をテストするため、複数の実証プロジェクトが開始されている。

淡水系の環境修復に関する国際的な知見は、放射性核種の拡散を制御するにあたって技術的対策の効果は限定的に過ぎないことを示唆している。代わりに、淡水の使用制限などの行政措置は実施が比較的容易であり、淡水域における放射性核種による一般市民の被ばくを低減するのにより効果的である。

2011 年以降、民家、公共地域、農地及び居住区近傍の森林の一部で集中的な除染作業が行われている。住宅の除染は最も進んでおり、面的除染は 2018 年 3 月までに完了した。チェルノブイリ事故の影響を受けた地域の修復によって達成されたように、除染後において空間線量率は 20~50% 減少した。

県内の河川における溶存態及び懸濁態放射性セシウムのモニタリングが、トレーサー技術を適用する補足的な調査とともに、河川流域における移行プロセス及び自然及び人為的活動が被ばくに及ぼす影響をよりよく理解するために続けられている。このようなデータは、

地域社会からの疑問に答える際に使用でき、論文審査専門誌における調査結果の発表は、調査結果の第三者的な検証に役立つものであり、地域住民と国際社会に対して重要な情報発信であると言える。

7.3 除染活動から生じた廃棄物の管理

除染活動から生じた廃棄物管理に係る、実施取決めに基づく協力においては、当初、県が仮置場の設置に関する技術指針を策定するにあたっての支援及び県が仮置場の安全性を評価・実証する際の支援に重点が置かれた。

放射性廃棄物を管理する場合、関連する施設（仮置場など）やその運用者は、施設そのものやその運用が安全であることを証明する必要がある。実施取決めに基づく活動が開始するにあたり、県の専門家には IAEA 安全基準が義務付けている安全性評価に係る知見が乏しかった。したがって、IAEA から仮置場の安全性評価の実施に関する支援が提供された。これは段階的に行われ、教育から始まり、次の段階で IAEA 安全性評価枠組みソフトウェアツール（SAFRAN）が適用された。

時間の経過とともに、支援の対象としては、仮置場の長期運用の安全性、仮置場からの廃棄物の搬出戦略、及び仮置場跡地の原状回復措置に徐々に重点がシフトされるようになった。提供された支援の主要な側面は、海外における放射性廃棄物管理の専門知識と知見の共有だった。

県内の仮置場の安全性評価の実施は、福島第一事故後の除染活動により生じた大量の廃棄物を安全かつ確実に保管する方法を確立するための重要な手順である。

県内の仮置場の安全性評価の実施において SAFRAN を使用して得られた結果は、適切な運用手順に従い、適切な措置が講じられている限り、放射線量は線量限度を十分に下回ることを示している。関連するハザードの体系的な分析により、人々や環境への許容できない影響を回避または大幅に削減するために必要な対策を課すための正当性が得られた。

IAEA チームと県の専門家らは、仮置場に保管されている廃棄物保管容器の劣化を考慮した廃棄物搬出戦略について議論した。全ての廃棄物を除去した後の仮置場の原状回復は重要な作業であり、体系的に取り組むべきであり、IAEA チームは県に対し、該当する IAEA 安全基準を使用するよう助言した。

仮置場の運用、仮置場からの廃棄物の搬出、中間貯蔵施設への廃棄物の輸送等に対し行われた安全性評価を文書化することが望ましい。さらに議論を重ねることが、実施された作業を関係者らに対して首尾良く伝達する上で有益である。IAEA は、必要に応じてこれらのテーマに関連する支援を提供し続ける。

7.4 県民への情報発信

福島第一原子力発電所事故が発生して以来、県は、放射線モニタリングの結果、環境中の放射性セシウムレベル、除染、環境修復及び廃棄物関連の情報を一般市民及び関係者らに発信してきた。そのために、県は専用のホームページと広報誌を使用してきた。

一般市民への放射線データの提供に関する世界的知見について、放射線防護、広報及びITの専門家らが検討した。双方向的なマップ（インタラクティブマップ）の使用など、広範なデータ提示オプションが検討された。代表的なデータの提示方法、長期的な空間線量率の傾向の提示方法、定点モニタリングポストや様々な測定調査から得られたデータを統合する方法などの技術的課題は、単純なものではないため、様々なアプローチや実用的な解決策が議論された。

IAEAの助言を踏まえて改訂されたホームページは2016年に完成した。以前よりも使いやすくなり、速度が向上、パソコン及びスマートフォンからのアクセスが十分に可能となった。改訂されたホームページでは、ユーザーは任意の時点や地点のデータを容易に閲覧することができるようになった。

国際的知見に基づく助言が、IAEA-県会合において提供された。また、県のウェブサイト（ふくしま復興ステーション）を通じた情報発信についても提示され、線量測定に市民を参加させることの重要性が強調された。上記のふくしま復興ステーションを海外からの渡航者も含めた多くの閲覧者のニーズに合わせるための具体的な提言もあった。これらの実施や、ホームページへのアクセス数及びアクセス傾向の更なる分析への取り組みが続いている。