

**最終報告書**  
**(2013年～2017年)**

**東京電力(株)福島第一原子力発電所事故後の  
放射線モニタリングと除染の分野における**

**IAEA と福島県との間の  
協カプロジェクト**

**【福島県協カプロジェクト】  
(日本語仮訳)**

**(2018年5月30日)**

**2018年  
ウィーン／福島県**



# 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.	無人航空機（UAV）と歩行サーベイにより収集されたデータに対する環境マッピング技術の活用	2
3.	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
3.1.	背景及び目的	3
3.2.	モニタリング手法	4
3.2.1.	空間線量率	4
3.2.2.	森林樹の放射性セシウム	6
3.3.	森林における放射性セシウムの分布	6
3.4.	森林における放射性物質対策の有効性	8
3.5.	里山再生モデル事業	9
3.6.	林業の管理	9
3.7.	林業従事者の放射線被ばく防護	10
3.8.	森林火災	10
3.9.	森林におけるキノコ及びタケノコへの放射性セシウムの移行	12
3.10.	まとめ	12
4.	分かりやすいマップ作成のための放射線モニタリングデータの活用	13
4.1.	背景及び目的	13
4.2.	改訂版 HP の作成	15
4.3.	最終的なホームページデザイン	17
4.4.	まとめ	19
5.	オフサイト除染と環境モニタリング	19
5.1.	背景と目的	19
5.2.	自然環境における放射性セシウムの挙動	21
5.3.	モニタリングプログラムの結果	22
5.4.	シミュレーションモデルの適用	27
5.5.	河川や湖沼における環境回復の経験	28
5.6.	住宅地域における環境回復と除染の経験	31
5.7.	まとめ	33

6. 除染活動から生じた放射性廃棄物の管理 .....	34
6.1. 背景及び目的 .....	34
6.2. 仮置場 .....	35
6.3. 仮置場等技術指針の策定 .....	37
6.4. 仮置場に関する安全性評価の策定 .....	38
6.4.1. 安全性評価のフレームワーク・ソフトウェアツール .....	39
6.4.2. 仮置場に関する安全性評価の実施による福島県の能力向上 .....	40
6.4.3. モデル仮置場における安全性評価 .....	40
6.4.4. 既存の仮置場についての試験的な安全性評価 .....	43
6.4.5. 9か所の代表的な仮置場に関する安全性評価 .....	43
6.5. 仮置場に保管された廃棄物の搬出方法と仮置場の廃止措置 .....	44
6.6. まとめ .....	45
7. 報告書総括 .....	46

## 注意

この資料は、原文「SUMMARY REPORT (2013 - 2017) Cooperation between the International Atomic Energy Agency and Fukushima Prefecture And Activities undertaken By Fukushima Prefecture Radiation Monitoring and Remediation Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident」について、福島県で把握し、仮訳出したものであります。翻訳にあたっては、原文を用いて日本語に仮訳しました。ここに掲載している日本語訳文は、読者の参考に供するための仮訳であります。正確な内容については、原文による正式の文言をご確認願います。この資料の利用により生じた損害について、福島県は一切の責任を負いません。また、この資料の全ての内容について、事前の書面による承諾なしに転載することを禁じます。

福島県

# 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、放射性物質の沈着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・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。）に合意した。これには、協力の目的と将来的な協力の範囲について詳細に述べられている。実施取決めは2012年12月に署名された。有効期間は署名後5年間であり、両者相互の合意により延長が可能とされた。

プロジェクトの実施におけるIAEAの主な役割は、世界的知見と成功事例に基づき、効果のある専門的支援を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月及び5月に、それぞれ県と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

実施取決め（2016年修正）の第2章は、次の分野及び活動について協力すると定めた。

- 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、及び分かりやすい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の支援を含む。）
- オフサイト除染に関する調査研究（環境モニタリングの結果の分析、及び被ばくを軽減又は回避するための被ばく経路の調査におけるIAEAの支援を含む。）
- 放射性廃棄物管理に関する調査研究（上記の除染活動から発生した低レベルの放射性廃棄物の管理方法に関する研究におけるIAEAの支援を含む。）

実施取決めに基づく協力は、日本の既存の活動を補完し、県民及び来県者にとって直接的な利益となる即時的な支援を提供するためのものである。

## 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調査研究が、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職員は、実施取決めの研究テーマに関する議論を行った。海外専門家とIAEA職員（以下「IAEAチーム」という。）は、IAEA安全基準及び世界的な成功事例に基づき、計画、実施及び県が実施した活動結果の評価に関する専門的な助言を行った。福島会合では、仮置場、淡水系の除染プロジェクト及び森林モニタリング・管理プロジェクト等に関して様々な現地視察が実施された。さらに、放射性廃棄物の仮置場の安全性に関する評価のため、IAEAが開発したソフトウェアを県が使用できるように修正された。

この5年間の最終報告書は、実施取決めに基づいて、2013年～2017年に実施された活動の成果及び現況をまとめている。本報告書は、実施取決め第2章の協力の範囲に対応する5つの主要セクションから構成されている。

## 2. 無人航空機（UAV）と歩行サーベイにより収集されたデータ に対する環境マッピング技術の活用

県は、車載サーベイ等での測定ができない地域においても、放射線モニタリングを実施する必要があると判断したので、県は、歩行サーベイによる測定方法を開発した。また、徒歩によるアクセスができない地域や放射能濃度が高い場所でのモニタリングのため、UAVによる測定方法を開発した。IAEAは県に対して、この両方のプロジェクトに関する効果的な助言を行った。この活動は、IAEA原子力応用局が担当した別のIAEA協力プロジェクト「UAVによる迅速な環境マッピング」の下で実施されており、放射線測定が可能なUAVの提供を含んでいる。

歩行サーベイにより収集されたモニタリングデータの活用及びUAVの使用については、このプロジェクトでの議論の一部ではあるが、歩行サーベイとUAVの仕様に関する設計・開発については、このプロジェクトの範囲外であるため、本報告書では対象外である。

## 3. 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

### 3.1. 背景及び目的

県の森林面積は、県土の約7割を占める。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、森林は土砂流出や地滑りの防止等の山地災害防止機能も有している。ヨーロッパとは対照的に、林内やその周辺に居住する人々も多く、このことが空間放射線による外部放射線量率（以下「空間線量率」という。）の低減対策において特有の課題となっている。福島県とヨーロッパでは、年間降水量、気温、地形等の違いから、森林の様相も異なる。県では落葉等の分解が早く、腐葉土層はヨーロッパの森林に比べて薄い。栄養素と放射性核種の全般的な動態は、ヨーロッパも日本もほぼ類似していると想定される。

日本では、食糧源としてのベリー類、キノコ、野生動物等の消費量はヨーロッパに比べて少ないが、一部の森林では「山菜」が採取され、人々に摂取されている。

チェルノブイリ原子力発電所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年に実施取決めが締結された時点から、県内に生活する住民にとって最も重要な放射線リスクは、陸上と水圏の双方の生態系に存在するセシウム-137及びセシウム-134（以下、併せて「放射性セシウム」という。）由来の外部放射線である。セシウム-134の半減期は約2年、セシウム-137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、セシウム-137とセシウム-134の環境への放出量はほぼ等しい。セシウム-137は、1950年代～1960年代に行われた大気中核実験でも環境中に放出された。セシウム-137は半減期がセシウム-134に比して大幅に長い。2017年12月時点におけるセシウム-137/セシウム-134比は約8:1であった。環境中における放射性セシウム濃度とそれに関連する住民への被ばく線量は、放射性セシウムの自然減衰や、ウェザリング効果による地表面からの除去及び土壌又は堆積物中への鉛直移動により、人為的な介入がなくても低下し続ける。森林内に堆積した放射性セシウムは、森林生態系の内部に保持され、循環する。林床、植生及び生物といった諸要素の放射性セシウム分布状況は時と共に変化する。

この協力の範囲内における実施取決めは、無人航空機の使用による環境マッピング技術の活用、森林領域での放射性物質の長期モニタリングとそれに関連する対策、及び一般利用に供するマップを作成するための放射線モニタリングデータの活用におけるIAEAの支援を含む、放射線モニタリングに関する調査研究が焦点となった。

協力の一環として、IAEAは、県に対して、森林における放射性セシウムの長期モニタリングについて、そして、県が実行したそれに関連する対策についての助言も提供した。それらは、放射性セシウムの分布の特性化、放射線モニタリングプログラムの確立、対策の有効性の検討、里山再生モデル事業への助言の提供、林業従事者の放射線被ばく低減対策の対応、森林火災の放射性物質の影響の評価、及び森林内のキノコやタケノコへの放射性セシウムの移行の影響についての評価に関係していた。





図 3.1 常葉地区の針葉樹林（提供：福島県）

## 3.2. 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、また森林内の異なる構成要素間における放射性セシウムの動態を把握するため、森林における長期モニタリング手法が確立された。さらに、立木における部位別（樹幹、樹皮、枝葉）放射性セシウム分布、及び経時変化も評価対象に組み込まれた。

### 3.2.1. 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 3.1 参照）。モニタリング地点は県有林及び民有林を含む福島県内の森林である。

表 3.1 福島県内の森林におけるモニタリング地点数（福島県提供）

年	追加モニタリング地点数	合計モニタリング地点数
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

基準日（2017 年 3 月 1 日）における空間線量率は、全調査点平均で  $0.42\mu\text{Sv/h}$  となっている。最高は  $4.59\mu\text{Sv/h}$ 、最低は  $0.03\mu\text{Sv/h}$  であった。2011 年 8 月との比較では、空間線量率は全体で約 70% 減少した。2011 年設置の最初のモニタリング地点 362 か所のみをみると、2011 年 8 月～2017 年 3 月の間に測定値が  $0.23\mu\text{Sv/h}$  未満となった地点は 42 か所から 309 か所に増加し、 $1\mu\text{Sv/h}$  超の地点は、127 か所から 61 か所に減少した。この結果は、放射性セシウムの自然減衰による放射線量の低下とおおよそ合致す



る。図 3.2 は、県内の森林における 362 か所のモニタリング地点での実測線量率、放射性セシウム其自然減衰に基づく推定線量率、及び将来の予想線量率である。図から、実測値は、自然減衰に基づく推定線量率よりも速く減少していることが分かる。

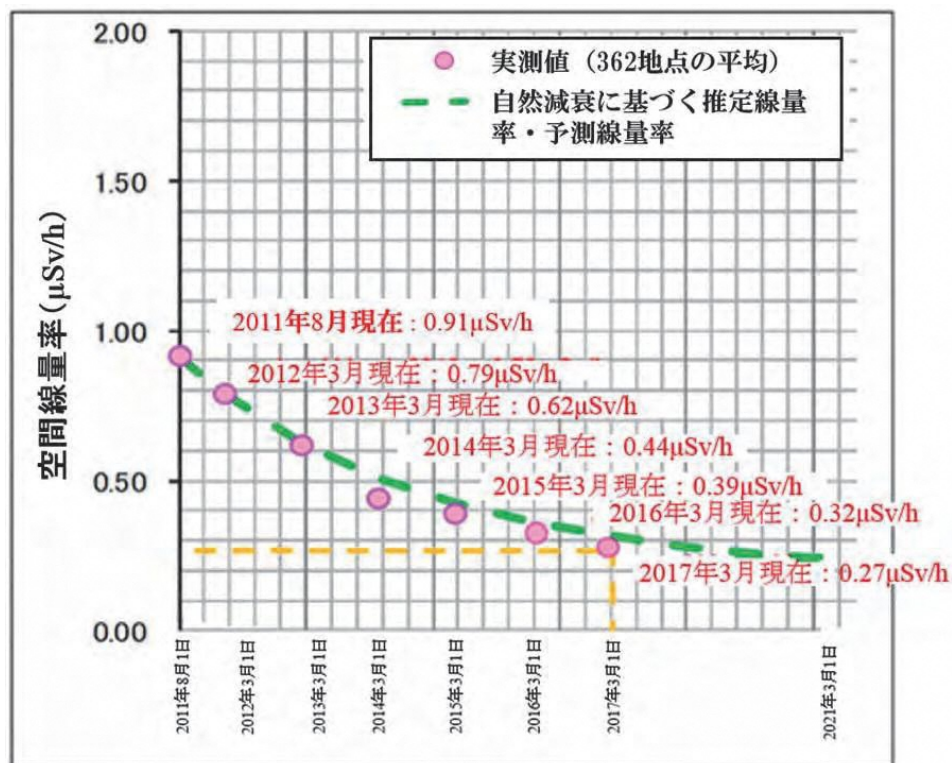


図 3.2 県内の森林における 362 か所のモニタリング地点での空間線量率実測値と放射性セシウムの自然減衰に基づく推定線量率及び将来予測線量率（福島県作成）

これらのデータを用いて、将来の空間線量率を予測可能である。空間線量率は放射性セシウムの自然減衰に従って低下する。除染を行わないと仮定すると、避難区域外の大半のモニタリング地点では事故から 20 年後の 2031 年 3 月までには線量率は  $0.23\mu\text{Sv/h}^1$  を下回ると予想される。

山地地形と降水量を複合すると、放射性核種の移動性が増大する傾向がある。すなわち、（物理化学的及び機械的の両面で）急速に変化するため、将来の放射線モニタリング活動においては、この変化を加味する必要がある。

環境中の放射性核種の移動に影響を及ぼす動態変化は、福島第一原子力発電所事故の直後 1～2 年は相当に急速に進んだが、時間経過とともに速度は鈍化する。モニタリングは、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。チェルノブイリ原子力発電所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

<sup>1</sup> 線量率  $0.23\mu\text{Sv/h}$  は、年間追加被ばく線量  $1\text{mSv}$  に相当する。

が続けられており、新たに重要な情報が得られている。モニタリング頻度は時間の経過とともに少なくしていくことは可能であるが、データ収集は長期間続けるべきである。

### 3.2.2. 森林樹の放射性セシウム

県が行う立木中の放射性セシウムに関するサンプリングでは、樹皮、辺材、心材、葉（新・旧葉）の部位別測定も行われた。多数の地点で土壌も採取し、放射性セシウム濃度を測定した。スギ（Japanese cedar）の放射性セシウム濃度は、辺材よりも心材において比較的高い結果を得た。時間の経過とともに、旧葉に付着した放射性セシウムは、落葉に伴い徐々に林床へと移動する。多様な樹種について、樹皮の放射性セシウム濃度が 8,000Bq/kg を超える立木由来の空間線量率を推定した<sup>2</sup>。この方法から得られた地上高 1m における空間線量率は 1.33 $\mu$ Sv/h であった。このような推定値には相当のばらつきがあるものの、木材の伐採・収穫が可能かどうかの判断をするためには有益かつ迅速な手段である。このことについては、第3.6節「林業の管理」で詳しく述べる。



図 3.3 分析用試料の採集（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動態に関する詳細は、本報告書第5.2節を参照）。

## 3.3. 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、落葉層、樹体内に分布している。これらの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変化が生じる。2016年には、県内の森林における放射性セシウムの約97%は、土壌及び落葉

<sup>2</sup> 放射性セシウム濃度 8,000Bq/kg 超の物質は「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）に記されている。

(針葉樹・広葉樹の落葉)層に存在し、残る3%が樹体内に存在していた(図3.4を参照)。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、空間線量率の低減対策は、土壤に焦点を当てる必要がある。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る。それだけではなく、管理が必要な廃棄物をさらに増やすことにつながる。

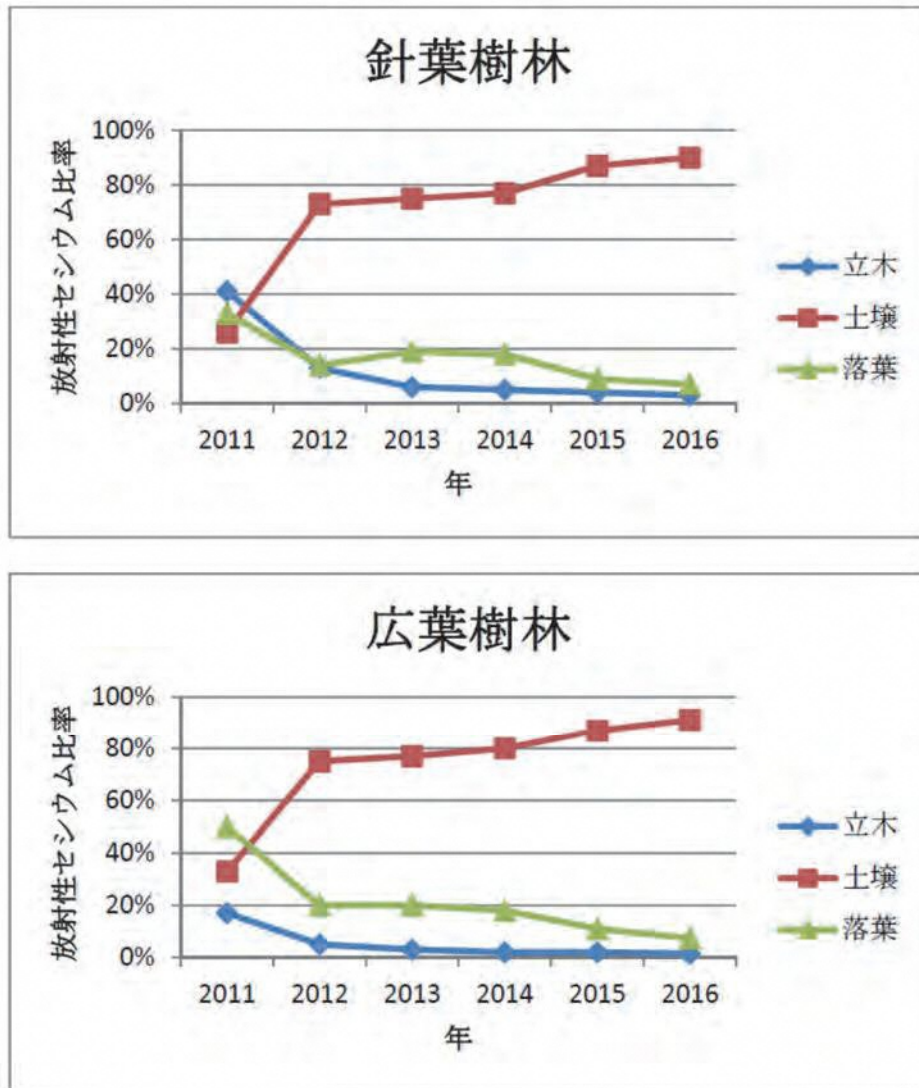


図 3.4 2011 年から 2016 年における県内の針葉樹林及び広葉樹林における放射性セシウム分布の変化 (農林水産省、福島県林業研究センターの協力による)

県内の森林で行われた土壤調査では、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。イライトもバーミキュライトも、放射性セシウムを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、土壤から森林内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。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、動物中の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%の数分の一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挙動に関する詳細は、第5.2、5.3、5.4節を参照）。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、土砂流出や地滑り等に関連する堆積物流出の可能性を低減することにつながる。

### 3.4. 森林における放射性物質対策の有効性

森林で講じられた放射性物質に関する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更新伐により、空間線量率は11～21%低下した。
- (3) 客土吹付又はウッドチップを3cm厚に敷設し、実施後24ヶ月の時点で、空間線量率は約20%の低下が認められた。ウッドチップの上にさらにウッドチップを3cm厚被覆したが、追加的効果は限られていた。
- (4) 落葉除去により空間線量率は10%低下した。

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、土壌緊縛力が増加し土壌侵食が防止される。沈着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。その後、森林内の放射性セシウムの大半は土壌や落葉層中に移動したため、この対策による直接的な空間線量率の低減効果は減少している。



図 3.5 森林の空間線量率の低減対策としてのウッドチップの敷設（提供：福島県）

県の調査結果によれば、客土吹付又はウッドチップの敷設対策には高額のコストを要し、大規模に実施することは困難である。しかしながら、線量率の高い小面積の一角への適用は、特に住宅地に近い場合は現実に即した対策となる。

県は、間伐の実施前・実施中・実施後の森林生態系からの放射性セシウム流出について調査した。総流出量は少ないと考えられるが、地域の農家は今もなお農地や水田への放射性セシウムの流入に不安を抱いている。また、県は生態系からの放射性セシウム流出及び堆積率を引き下げするため、丸太柵工や土嚢積み工の有効性についても調査した。暫定的な結果として、これらの対策は、特に勾配 30 度を超える地形において、土壌侵食及び流出の防止に有効であることが示唆されている。流出する放射性セシウムは粘土鉱物に付着している可能性があり、農地に流入するおそれは少ないと考えられる。同時に、堆積物の蓄積した一角では空間線量率の上昇の可能性がある。

住宅地付近の空間線量率の低減には、落葉除去や枝払い、表土剥ぎ取り等を組み合わせた対策が可能である。客土吹付やウッドチップの敷設は効果的であることが実証されているものの、現時点では一般的な対策とはなっていない。土壌侵食及び付随する除染地域の再汚染防止のため、法面上部に柵を設置する方策が優先的対策となっている。

### 3.5. 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可能とすることを狙いとしている。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 10 市町村を対象として選定した。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。IAEA チームは、選定されたエリア内の対策の有効性は限定的である可能性があること、また、事業の成果に関する評価方法の定義を検討すべきであることを指摘している。2017 年現在、本事業は初期実施段階にある。

### 3.6. 林業の管理

放射性セシウム濃度が 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である。伐採木の処理の第一段階は樹皮剥ぎであり、樹皮は通常、肥料やバイオマスプラントの燃料として使用される。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り、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性物質濃度の測定結果から、その相関性を調査した。測定結果はばらつきが大きく、樹皮中 8,000Bq/kg に対応する空間線量率は平均 1.33 $\mu$ Sv/h であるが、測定値の範囲は 0.65～4.59 $\mu$ Sv/h であった。県は、空間線量率が 0.5 $\mu$ Sv/h 以下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択した。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、実際の放射性セシウム濃度を把握する。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。

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。この

基準により、焼却灰の放射性核種濃度は 8,000Bq/kg を超えないことが保証されるであろう。薪と灰の濃度係数は通常 100 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 年間のうちに自然減衰による放射性セシウムの濃度低下により、吸収分は十分に相殺されると考えられる。

森林内の土壌及び落葉層中の放射性セシウムは地中深くに移動し、立木の根部域に達するであろうが、土壌中で放射性セシウムは粘土鉱物と結合すると予想される。この鉛直移動の結果、取り組み／移行係数が変化するが、現段階では変化の開始時期や持続期間について具体的な数字を挙げることは難しい。

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 「*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、日本特有の家屋設計に起因する差異により、前述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十分に低く国際基準を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動態及び新規植栽された幼木への移動に関する調査研究は、今後も継続される必要がある。

### 3.7. 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、手袋やマスクの使用等による被ばく軽減対策が推進されている。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 $\mu$ Sv/h を超えないエリアに制限されている。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、人力作業による伐採に代わる伐採機械が導入されている。オペレーター・シートは地上から高い位置にあり、また機械は保護シールドを装備している。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。

### 3.8. 森林火災

IAEA-TECDOC-1240 「*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動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、このレポートは『森林火災による



主要課題は、『汚染灰の大気中への再飛散である』とも述べている。

森林火災の発生は、放射線レベルを必ずしも増大させるものではない。しかしながら、森林の整備が見送られ、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 の遠方まで輸送される可能性がある。被ばく経路は、外部放射線及び煙霧吸入（消防士及び一般公衆）、沈着した放射性核種由来の外部被ばく（一般公衆）、汚染された食品の摂取（一般公衆）、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公衆）である。

森林火災の結果として運ばれる放射性核種は比較的少量である。実験的研究から、森林火災時に可動化される放射性セシウムは、落葉層中のわずか数%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層中に存在する放射性セシウムが 7%程度であることを考慮すると、森林火災に際して可動化され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、植生と落葉層のみが燃えた火災の場合、可動化され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の場合には、可動化される比率は 10%まで増大する可能性がある。可動化される放射性セシウムのほとんどは、火災現場から数百 m 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。

森林火災による高温は、一部の放射性セシウムの蒸発と、大気中への移動を引き起こす可能性がある。残留分は灰中に保持されるであろう。河川や水路内に沈降した場合は、短時間のうちに固体に付着し、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、大半のモデルは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。土種や地形の差異から、県内の森林火災は、チェルノブイリ原子力発電所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ている。

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ている。

- (1) 2016 年 3 月 30 日～4 月 1 日に伊達市近くで発生し、約 38ha が燃えた火災。
- (2) 2016 年 4 月 3 日～4 日に南相馬市近くで発生し、約 32ha が燃えた火災。
- (3) 2017 年 4 月 29 日～5 月 10 日に浪江町に近い帰還困難区域で発生し、約 75ha が燃えた火災。

2016 年の 2 件の火災の放射線影響を調べるため、県はモニタリング調査を実施し、空間線量率、地表水系及び溪流の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。南相馬地方の地表水系では微量の放射性セシウムが検出されたが、火災現場の下流の溪流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。

2017 年 7 月現在、浪江町火災に関する調査結果の暫定的評価から、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輸送される可能性に関する調査が計画された。

IAEA チームは、2016 年及び 2017 年の火災は、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、放射性セシウムの飛散量は増加する可能性があったことを指摘した。

### 3.9. 森林におけるキノコ及びタケノコへの放射性セシウムの移行

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。これらのキノコは木材を腐朽して発生するため、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。

現在、県においては、原木シイタケは 17 市町村、タケノコは 27 市町村、野生キノコは 55 市町村で出荷が制限されている。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性物質濃度との関連性は認められない。

年数を経た竹は根部が地中深く—すなわち放射性セシウム濃度が低い場所—に広がっている。竹の放射性物質濃度は、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に入れる必要がある。この問題の長期的影響については、いくつかの試験研究や実証実験が参考になるとと思われる。

県の森林内の原木の生産及び使用、並びにホダギのナラ材から県の森林の重要な経済的産物であるシイタケへの放射性セシウムの移行に関する予測が、将来的に考慮すべき問題である。

### 3.10. まとめ

森林における放射性セシウムの挙動について理解を深めるため、大規模な調査が実施されている。栄養素と放射性核種の双方の再循環は、チェルノブイリ原子力発電所事故後の状況とほぼ類似していると予想される。しかしながら、福島県とヨーロッパでは森林の様相—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動と循環に大きく影響することが明らかになっている。

現段階における主要な結論は以下のとおり。

- 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、農地への移動の可能性は低いと思われる。
- 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。
- 放射性セシウムは森林土壌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、沈積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。
- 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

セシウムの移動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ことが必要である。

- 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動した。空間線量率低減のために大量の表土を剥ぎ取ることは、実用性を欠く。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。
- 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。ただし、高額な費用が必要であり、長期的有効性については今後の評価に委ねる必要があるものの、空間線量率の高い地域への適用は、特に住宅地に近い場合には現実に即した対策となりうる。
- 里山再生モデル事業の初期段階にあたっては、放射性廃棄物の発生、対策の有効性、事業の成功に関する評価方法等の様々な課題の解決が必要であった。
- 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ろう。
- 林業従事者の放射線被ばくを制限するための対策が講じられている。例えば、伐採機械の導入、作業時間の制限等である。全体として、個人レベルの放射線量低減のために、安全側に立った取組みが実施されている。
- 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する可能性があったことから、放射線影響はより増大した可能性がある。

森林における放射性セシウムの動態についての予期せぬ変化を速やかに確認するために、継続的なモニタリング調査が重要である。時間の経過に伴い空間線量率が比較的安定していることを示す調査データを得ることができれば、採集試料数やモニタリング地点を減らす正当な理由になるかも知れない。

## 4. 分かりやすいマップ作成のための放射線モニタリングデータの活用

### 4.1. 背景及び目的

この協力の範囲内での実施取決めは、分かりやすいマップを作成するための放射線モニタリングデータの活用におけるIAEAの支援が焦点となった。

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ホームページを開設済みであった。県のホームページでは、下記を含めて、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閲覧可能であった。

- 3,500超の定点モニタリング地点（事故前は24地点のみであった）
- 走行サーベイ
- 食品、飲料水及びその他の環境媒体に関する放射性核種データ

2014年時点で、サイト訪問者数は一月あたり2万～5万件であった。これらのユーザーからは、彼らが必要とする情報に対処するためのホームページの改善方法について、様々な提言があった。県は、ホームページの改良方法に関する調査を実施し、県民の意見を求めた。簡素で、分かりやすい情報、モバイルテクノロジーとの互換性及び健康リスク情報等が要望事項として寄せられた。

IAEA チームは、各国で開発されたウェブ・マップに関する情報を提供した。また、放射線モニタリングデータのマッピング及び情報の一般公開に関する専門的助言を提供した。

## 4.2. 改訂版 HP の作成

### マップ作成に関する全般的事項

多くの事例では、同一地点において、別個の調査で様々な装置により収集されたデータが利用可能となっている。しかし、モニタリング方法が異なることから、同一地点で行われた測定でもばらつきがあるため、一般公開される情報においては、これらの相違に配慮することが重要である。利用可能なデータセットを統合する場合、調査方法の異なるデータに対して補正係数を適用する必要がある点を明記する必要がある。さらに、空間線量率の季節変動（積雪影響等）の大きさや、調査方法の違いによる空間線量率データの差異、さらに同一地点であっても路上測定と路上外測定での差異等、様々な要因が調査結果における見かけの差異を引き起こす点も考慮する必要がある。したがって、空間線量率の調査方法による差異は、測定の経験的誤差の範囲内となる可能性がある。これらの差異については、分析画像により説明可能となると考えられた。また、ホームページ上のデータの更新頻度についても決定する必要があると指摘された。

2015年12月、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）は、IAEA チームと県の合同会合において、マッピングプロジェクトを提示した。複数機関のデータの標準化及び統合により、環境モニタリングデータベースが開発された。2015年現在、データベースには空間線量率、土壌（放射能濃度及び沈着量）、塵芥、水及び陸生・海洋性食品に関する4億以上のデータポイントが収録されている。

### ホームページ作成に関するディスカッション

IAEA チームは、オーストリア、ベラルーシ、カナダ、EU、フランス、ドイツ、香港、ロシア、トルコ、ウクライナにおいてウェブ・マップを提供している。各国のマップのほとんどは、定点モニタリングデータに基づいている。歩行サーベイが実施されている場合もあるが、通常は小さい範囲についての詳細モニタリングのための使用にとどまっている。これらのマップは通常ウェブサイトでの公開は行われておらず、他のデータセットとの統合もなされていない。このような状況に鑑みると、県の活動は極めてユニークである。ディスカッションでは次の主要事項が詳細に論じられた。

- 2件の開発プロジェクトについて考慮すべきである。適切なマッピングツールが必要であり、それは改訂されたホームページで使用されるべきである。これらの要素は必要とされるスキルが異なるため、個別に認識することが重要である。
- ホームページは、情報源であると同時に遂行中の活動を促進するツールとして捉えるべきである。
- 必要な変更を検討するにあたり、県は、ホームページの使い勝手を高めること、及びマップと分析画像により情報を提供することを重視している。全体的なコミュニケーション戦略の一環として、ホームページの広報宣伝の役割も重要である。
- ホームページとマップは、直観的に分かるシンプルなものとするのが望ましい。放射線防護に関する用語や概念を熟知している人は少なく、一般の人々にとっては数値よりもメッセージが重要である。ホームページをシンプルにするためには、マップの値は他県の空間線量率データを含めた値とすべきである。さらに、県内の地方行政区分をマップに組み込むべきであろう。
- 測定単位や放射線リスク等の詳細情報を求めるユーザーに対しては、別リンクを設定するか、注釈図を使用することが可能であろう。

- 大きな縮尺の概略マップ及び局地的／詳細情報を示すマップの重要性について協議した。マップ上の地点をクリックして拡大し、段階的に詳細表示することが可能な「クリックで操作ができる」マップが提案された。格子サイズの拡張性については要検討である。
- 最重要情報が利用に供されることが重要である。通常は、最新情報がそれにあたる。
- 2011年3月からの放射線量の低減状況を明らかにする既存データは重要である。可能な限り、既存データを維持し使用するべきである。特に、福島第一原子力発電所事故以前の空間線量率を提示するべきである。
- 県内の現在の空間線量率との比較ができるため、世界各地の「バックグラウンドレベルが高い」地域のデータを提示することは有用であろう。
- ホームページ上に「重要メッセージ」を提示するというコンセプトは有益であると思われる。また、定期的アップデートが必要である。
- 現在使用されている Google アプリケーション・プログラム・インタフェース (API) は柔軟性が不十分であるため、他の API ( java script 、 ESRI (Environmental Systems Research Institute) 又はオープンレイヤー) を検討すべきである。
- 全てのマップは、データ概要、色分け、範囲等の点で一貫性が必要である。また、可能な限り、定量下限値はバックグラウンドレベルに近似すべきである。
- 空間線量率の経時的低下を明らかにするために、タイムスライダーは非常に有用であり、マップに組み込むことを検討すべきである。
- ソーシャルメディアとのリンクにより、一般の人々と双方向での情報伝達が促進される。
- 概略マップの作成では、データセット個別の重み付けを考慮することが重要である。
- アクセス地点を明らかにする GPS 位置への自動アクセスを確保することが望ましい。すなわち、ユーザーは現在地点における正確な放射線状況を知ることができる。
- 空間線量率の検索パラメータの追加を検討すべきである。
- 将来的には、県土の 7 割の面積を占める森林における空間線量率マップの作成が望まれる。森林内には常設の定点モニタリング地点は設置されていないが、林業組合の設置した観測点ネットワークのデータが利用可能である。
- 県内には、土壤中トリウム濃度が比較的高いエリアが多数存在する。結果として、バックグラウンド空間線量率は県内ではばらつきが大きい可能性があり、全ての空間線量率グラフに関する標準値は正確に解釈されない恐れがある。カリウム、ウラン、トリウムの土壤中濃度は、日本地理学会ホームページから入手可能であり、多様な地点における実際の空間線量率の計算が可能になる。
- マップの正しい理解と解釈をサポートするため、十分な背景情報の提供が不可欠である。
- JAEA と県のデータセットは、個別に (別のマップとして) 使用可能である。直接の統合が可能であるほか、生データを統合して新しいマップを作成することも可能である。JAEA マップと県マップは、縮尺と色分けが異なるため、情報の統合及び新しいマップの作成が望ましい点で合意されている。
- 県は、県の新しいホームページで一般利用に供する情報を決定する必要がある。すなわち、既存マップのダウンロードのみ可能とするか、ユーザーが個々に独自のマップを作成可能となるよう生データも提供可能とするか。この点の決定にあたっては、透明性による便益とデータ乱用リスクのバランス調整が重要である。IAEA チームは、経験上、データが故意に乱用される可能性は小さいものの、誤用



や解釈の誤りを引き起こす可能性を考慮して最終決定にあたるべきであると助言した。

### 4.3. 最終的なホームページデザイン

ホームページの改訂に続き、2016年6、7月のIAEAチームとの合同会合では、県が実施した活動についてプレゼンテーションを行った。IAEAチームの助言の多くを踏まえて、新しいホームページのデザインと機能の開発が進められた。県は、走行サーベイによる調査で収集されたモニタリングデータが、屋外・地表1m高さにおけるデータとして標準化されたことを確認した。新しいホームページは、一層使いやすくなり、反応速度も向上し、パソコンのほかスマートフォンからのアクセスも可能となった。ホームページの改訂により、特定地点での関連データの閲覧が容易になり、関心のあるデータの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にアクセス可能となっている（図4.1）。空間線量率及び環境試料の測定結果も、マップ上に表示される。空間線量率の経時変化も、「タイムルーラー」により直観的に把握可能である（図4.2）。さらに、新しいホームページでは、空間線量率の経時変化グラフも作成可能である（図4.3）。ホームページは日本語に加えて英語、中国語、韓国語にも対応している。新ホームページの英語版ポータルサイトは、次のURLからアクセス可能である。（<http://fukushima-radioactivity.jp/>）



図 4.1 クリックによる操作が可能である「福島県放射能測定マップ」（福島県ホームページ）



図 4.2 「福島県放射能測定マップ」のタイムルーラー（福島県ホームページ）

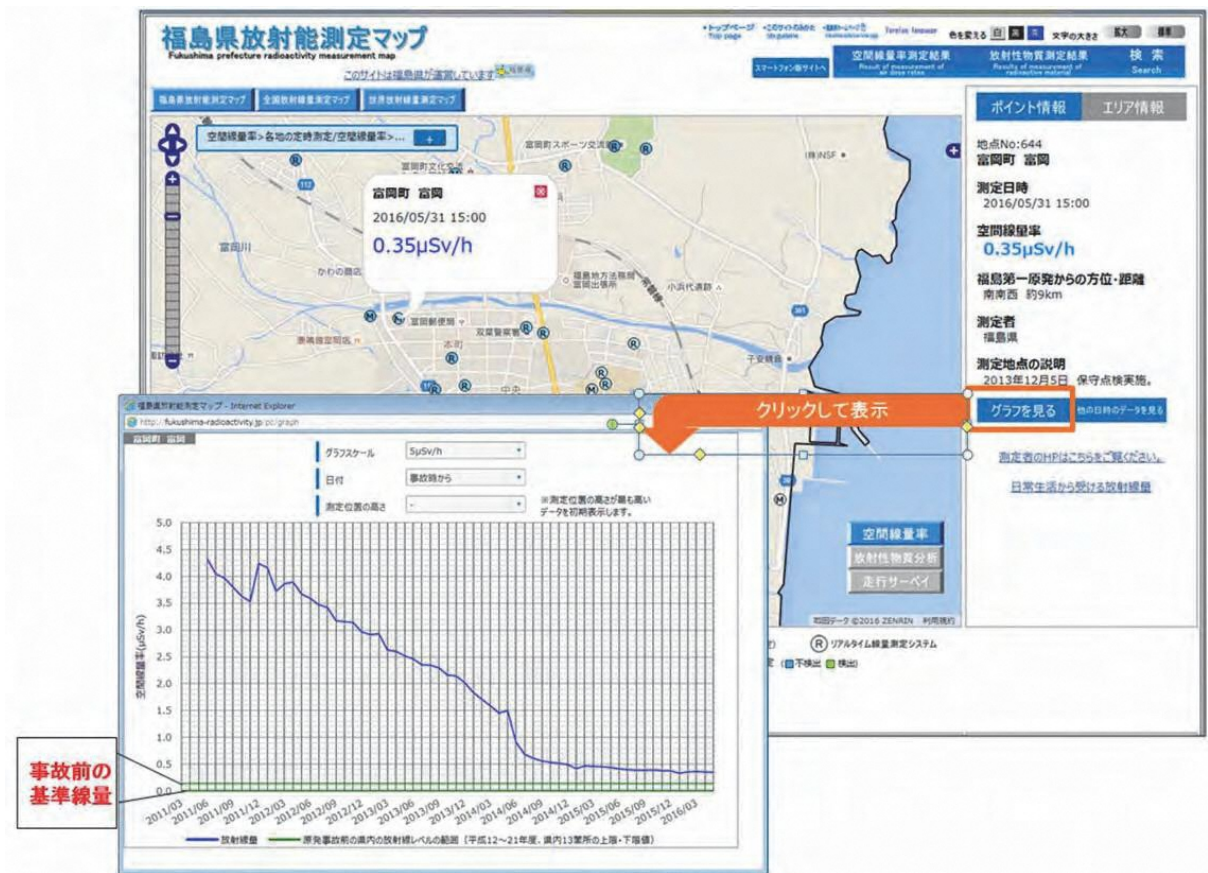


図 4.3 「福島県放射能測定マップ」の特定時間枠における特定地点での測定データのグラフ（福島県ホームページ）



## 4.4. 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なことは、県民と県外からの来県者の両方にとって重要である。概略マップは空間線量率が経時的に減少していることを示す全般的情報を提供するが、人々は自分たちの生活や仕事の場、あるいは訪問先についてのピンポイントな情報も要求する。2016年に最終的なデザインが完成した新しいホームページでは、分かりやすい形でピンポイントな情報を閲覧可能である。最新データが優先的に表示されるが、既存データも閲覧可能である。

放射線データは、多様な測定方法論に基づく様々な方法で収集されている。県内全域の定点観測所 3,000 超のモニタリング地点から連続的に供給されるデータは、走行サーベイ（放射線測定器を車両に固定し、県内道路を走行して調査する）で収集されたデータにより増補される。

収集されたデータは、その収集条件に大きく左右されるため、これらの多種多様なデータセット間での整合性を確保することは大きな困難が伴う。例えば、路上の空間線量率は付近の歩道の空間線量率と異なる可能性があり、冬季は積雪により空間線量率は低下し、雪解けとともに上昇する。測定が行われた地上高や定点観測と比べた場合の測定車両の走行速度も考慮する必要がある。

一般ユーザーが県ホームページの放射線モニタリング情報に体系的で分かりやすい方法でアクセス可能となるには、いくつかの段階を踏む必要がある（大量の利用可能データの標準化、多様な詳細さレベルで放射線の状況を正確に提示可能なマップの開発、これらを含めた各種データにアクセス可能となるようなホームページのアップグレード）。

これらの問題は全て、IAEA チームと県の IT、広報戦略及び放射線測定の各分野の担当課との間で詳細に議論された。

ウェブサイトを通じた情報提供は、コミュニケーション戦略の一つの構成要素でしかない。帰還の可能性がある避難者に対して、時間の経過と共に予測される空間線量率の減少及びその健康リスクに関するの情報と助言を提供することについて、県への要望が高まっている。このことについては、放射性セシウムの物理的半減期による減少と、実施された対策の有効性による減少を考慮する必要がある。その計算は地点特異的であり、将来の状況の評価には不確かさがあることも、併せて提供されなければならない。ウェブサイトを通じて簡単に提供される類の情報ではないため、県はこれらの要求に対する最善の方法をより一層検討する必要がある。

## 5. オフサイト除染と環境モニタリング

### 5.1. 背景と目的

収集されたデータと県の評価によると、福島第一原子力発電所事故により、大量の放射性降下物が県内、特に発電所の北西域に沈着した。実施取決めの下での活動が行われた時点から将来にわたり、住民にとって最も懸念されるものは放射性セシウムから放出される放射線による被ばくである（環境中の放射性セシウムについての詳細は 3.1 章も参照）。収集されたデータを基に、県は水圏及び陸域の生態系における放射性セシウム濃度やそれに関連す

る住民の被ばく線量は、除染、自然減衰、ウェザリングによる地表からの放射性セシウムの除去及び土壌又は堆積物中への鉛直移動によって低下することを明らかにした。図 5.1 は、2011年8月28日（事故後5ヶ月）及び2016年11月18日（事故後5年8ヶ月）における県内の地表1m高さでの空間線量率を示したものである。この値は、航空機モニタリングによって得られた結果から計算された。空間線量率の大幅な減少が認められるが、これは除染をはじめとして、自然減衰や自然プロセスによる放射性セシウムの除去・移動による結果と考えられる。

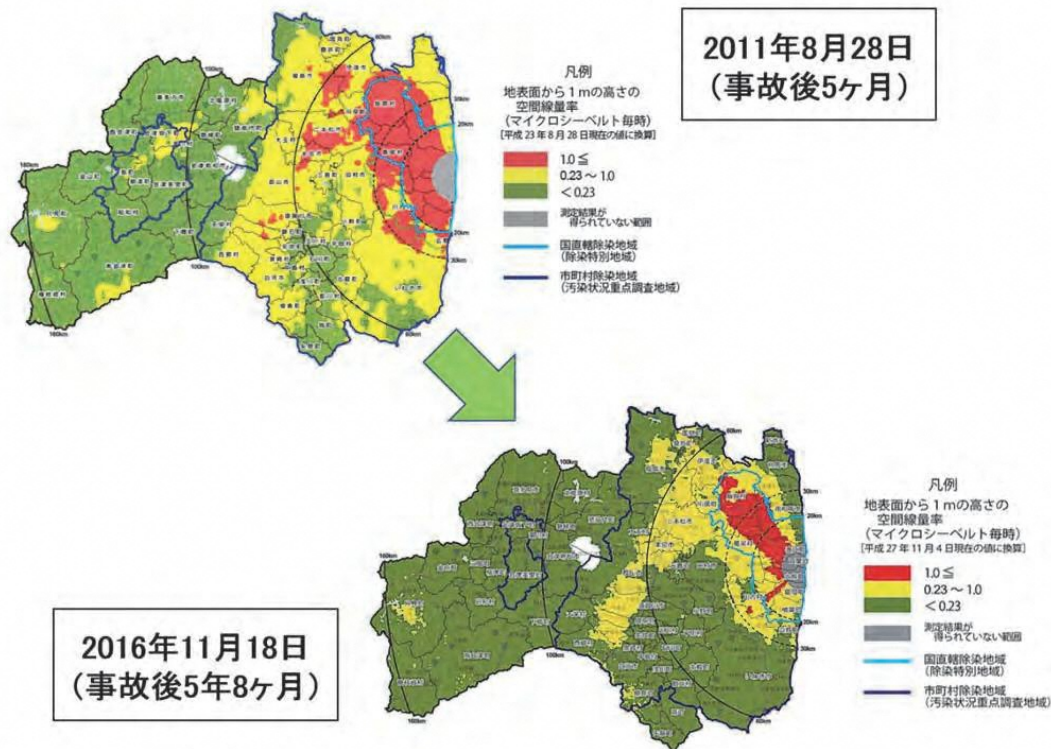


図 5.1 2011年8月28日及び2016年11月18日における地表1m高さでの県内の空間線量率（福島県作成）

環境回復や除染の必要性は、時間の経過に伴う住民の被ばく線量の時間的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、環境回復活動により低減されると予想される将来の被ばく線量と、環境回復活動を行わない場合の被ばく線量の比較結果を踏まえて行われる。そのため、空間線量率や住民の被ばく線量の経時変化を予測することは有益である。

実施取決めの第2章では、オフサイト除染、環境モニタリング結果の分析、被ばくの低減や回避のための被ばく経路の調査等に関する課題について、県に支援を提供することに言及している。実施取決めでは、特に以下の項目に焦点をあてている。

- 福島第一原子力発電所事故の影響を受けた県内の陸域及び水圏の生態系における放射性セシウムの挙動
- 水圏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）の放射性セシウム濃度及び大気中の空間線量率の経時変化を把握するためのモニタリング結果の解析

- 技術的に実施可能で適切な環境回復活動を選択するための厳密な条件を導き出すための環境回復活動から得られた経験の分析
- 水圏生態系における放射性セシウムの流出量を予測する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

本報告書の以下の節で、これらのトピックについて検討する。

## 5.2. 自然環境における放射性セシウムの挙動

### 自然環境における放射性セシウムの挙動に関する世界的知見

自然環境における放射性セシウムの挙動に関する研究が数十年にわたり行われてきた。大気中核実験、核施設の運転、事故の結果等により放射性セシウムは自然環境に放出された。一般的に陸域生態系では、放射性セシウムが鉱質土壌成分と強く結びつくため、土壌中での移動が遅くなり、植物に吸収されにくい。しかし、カリウム含有量が少ない酸性の有機質土壌では、植物による放射性セシウムの吸収量のはるかに多くなる。熱帯では、土壌が何千年もの間、物理的・化学的な風化作用にさらされ、酸性状態で浸出するカリウムと共に粘土鉱物の大部分が分解されて十分な量が存在しないこともあるため、植物による吸収量がさらに多くなる場合がある。

淡水生態系では放射性セシウムは懸濁物質と強く結びついて河床等に沈降しているため、溶存態放射性セシウム濃度は急激に低下する。河川や湖沼における放射性セシウムの移動はほとんどが土砂の移動によって生じる。溶存態放射性セシウムは淡水生物相に吸収されやすく、また粒子や懸濁物質にも吸収されやすいため、淡水系に存在する放射性セシウムの量は吸着や堆積、生物相による吸収によって左右される。

### 県内の環境条件下でのセシウムの挙動

2011 年以降に実施された数多くの研究は、県内の環境条件下での放射性セシウムの挙動解明をテーマとしている。これらの研究は、作物による吸収や土壌内での下方浸透を含む、放射性セシウムの土壌内での長期間の移動特性の把握に取り組んでいる。世界的知見と同様に、土壌が有する放射性セシウムの強い吸着性により、放射性セシウムの土壌内での下方浸透と作物への吸収はいずれも非常に限定的である。土壌内の放射性セシウムは、特に粘土鉱物と徐々に結びついていく。この吸着は、可逆的で交換態の放射性セシウムを構成する場合もあれば、不可逆的で固定態を構成する場合もある。

福島大学による調査から、土壌中放射性セシウムの交換態の割合が経時的に連続的に減少していると報告されている。同時に、作物中の放射性セシウムレベルも 2011 年以後減少していることが示されている。県内に広く見られる土壌型に対して、放射性セシウムの選択的吸着能力の指標である放射性セシウム捕捉ポテンシャル (RIP) が決定された。RIP が高い値を持つ土壌や堆積物であれば放射性セシウムを強く吸着するため、作物への移行が小さくなる。チェルノブイリ原子力発電所事故後、作物による放射性セシウムの吸収を土壌のパラメータに基づいて予測するために広く用いられている。RIP が低い値を示す土壌では、作物への移行低減のために、粘土質の利用が効果的であろう。

福島大学等の研究機関による調査では、福島第一原子力発電所事故で放出された  $^{90}\text{Sr}$  量は極めて限定されており、原発のごく周辺を除いて、農耕地や作物中の  $^{90}\text{Sr}$  濃度は 1960 年代に行われた大気中核実験による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。

福島大学等の調査では、福島市や伊達市で生産された農作物を摂取することによる内部被ばく線量を推定した結果、内部被ばく量は年間数十  $\mu\text{Sv}$  であり、住民の被ばく推定値に大きな修正をもたらすようなものではないことが報告されている。

IAEA チームは、環境中でのセシウム-137 の挙動と環境回復プロジェクトに関する世界的な知見を提供した。チェルノブイリ原子力発電所事故や福島第一原子力発電所事故の後、放射線量の低減や環境媒体中の放射能濃度の減少に自然減衰プロセスが寄与することが観測された。しかし、放射性セシウムの流出は、以下の理由から、チェルノブイリ原子力発電所事故の影響を受けた地域よりも県内の方が多いたことが観測された。

- 台風に伴う降水量が多く、温度も高い。
- 生物活性が高い。
- チェルノブイリでは凍結期間が長い。
- 山腹の勾配が大きい。

これら全ての要因は、県内の汚染流域からのセシウム-137 の流出に大きな影響を与えた。

### 5.3. モニタリングプログラムの結果

#### 運搬プロセス

図 5.2 は、河川や河川集水域を介して放射性セシウムが運搬される様子を図示したものである。放射性セシウムは森林や農業地域、住宅地域に堆積する。放射性セシウムは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移動により運搬される。図には、陸域生態系と水圏生態系との相互作用や考えられる農作物への移動経路を示している。以下のプロセスが重要である。

- 放射性セシウムは、流出により森林や住宅地域、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、露出土壤）により異なる。
- 河川水系は池や湖、貯水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。
- 集中的な降雨による河川の氾濫や濁流は、堆積物と結び付いた放射性セシウムの過去の蓄積に影響を与えうる。
- 放射線セシウムの一部は、海まで運搬されるものがある。



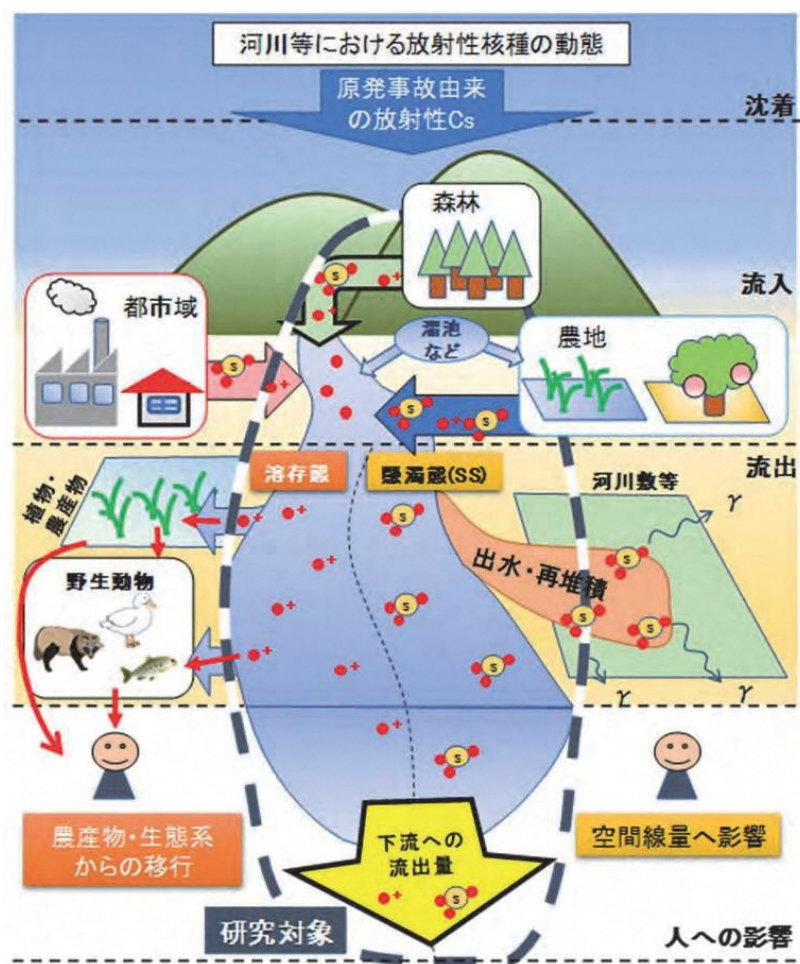


図 5.2 集水域や陸域生態系との相互作用を介して放射性セシウムが運搬される様子  
(福島県作成)

## 水や堆積物中のセシウム

県内では、水道水や農業活動、その他の目的のための水源として、河川水が広く使用されている。そのため、淡水域における放射性セシウムをモニタリングするための包括的なプログラムを県が作成し、福島県環境創造センターで実施している。

この調査プログラムには、溶存態の放射性セシウム及び河川及び湖の浮遊物質に吸着された放射性セシウムの測定が含まれている。放射性セシウムが浮遊物質に強く吸着されたり、底質の堆積物の上に沈降したりするため、河川水中の放射性セシウムレベルは時間とともにかなり低下し、飲料水としての使用が許されるレベルと比べても十分に低い。

このモニタリングプログラムは、水中の放射性セシウムレベルの一般的な調査の他に、県内の集水域における放射性セシウムの長期的挙動の研究、特に以下の 2 つに焦点をあてている。

- 懸濁態放射性セシウムのレベルと挙動。洪水時に堆積物や氾濫原土砂に吸着された放射性セシウムの再堆積又は除去、及びそれによる周囲の空間線量率への影響が含まれる。

— 溶存態放射性セシウム、すなわち、生態系を介しての植物、農産物及び野生動物への移行。懸濁態放射性セシウムと溶存態放射性セシウムの動態をより深く理解するためにさらなる調査を行う。

水の物理的・化学的性質を把握するため、水や堆積物中の放射性セシウム濃度に加えて、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）濃度の測定も行った。

測定はセシウム-137 の沈着の影響を受けた流域に集中して行われた（図 5.3 参照）。特に 広瀬川流域に注目して、モニタリング地点を 11 か所設定した。モニタリング地点は広瀬川沿い、高根川、布川及び小国川等の支流に設けられた。測定項目には、上述のパラメータの他、河川の流量、濁度及び懸濁物質の定量が含まれている。予測していたとおり、ある程度の時間差はあるが、降水の後に、河川流量及び浮遊物質濃度が上昇していた。かなりの変動はあるものの、2011 年以降にセシウム-137 濃度は時間の経過とともに減少し続けている。

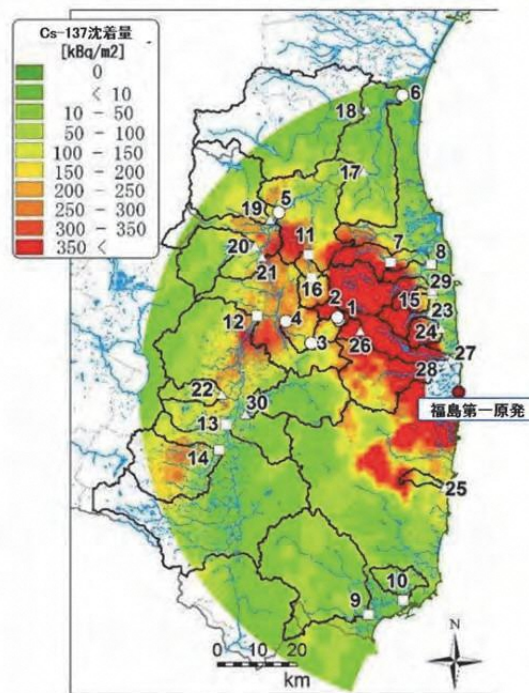


図 5.3 第 3 次航空機モニタリング調査で定量された県内のセシウム-137 の沈着量分布（文部科学省、2011 年 7 月 3 日）

一方、事故から 6 年以上経過した現在、溶存態放射性セシウム濃度は定量限界に近いが、それを下回っている。これは、放射性セシウムが堆積物に強く吸着されていることで説明でき、堆積物ではそれよりも高い放射性セシウム濃度が観測されている。汚染された集水域の浸食が限定的である場合には特に、浮遊物質の放射性セシウム濃度もはっきりと低下している。堆積物の放射性セシウム濃度は、粒子のサイズが小さくなると上昇する傾向がある。

河川水及び懸濁物質の放射能濃度の低下は、阿武隈川及びその支流でも観測された。県内の河川における放射性セシウムの移動に関する調査は、浜通り地域及び中通り地域でも行わ

れた。測定は 30 地点以上で実施された。2011 年以降の懸濁態セシウム-137 濃度の測定結果を図 5.4 に示す。この図では、懸濁態放射性セシウム濃度の低下は、2011 年以降継続して観測されている。2015 年 9 月の大雨時には、懸濁態放射性セシウム濃度は低下したが、河川水中を輸送される堆積物の中に、吸着能力の低い砂粒子が大量に発生したことによる希釈の結果である。

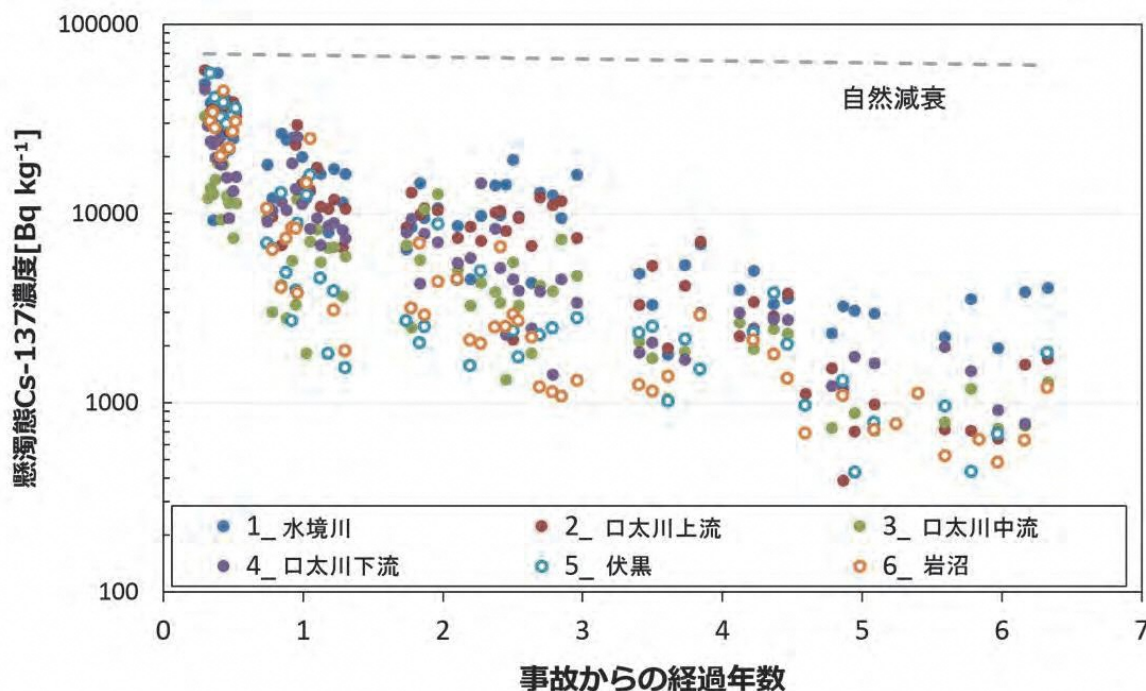


図 5.4 2011 年～2017 年における県内河川の懸濁物質中のセシウム-137 濃度の低下 (福島県作成)

水圏の放射性セシウムのほとんどが河川水中の懸濁物質に吸着されているため、流量データ及び堆積物の移動データと組み合わせて、測定値から 2011 年～2015 年の間に集水域から太平洋に流出した放射性セシウムの全流出量を推定することができる。積算流出量 (すなわち、ある期間中に太平洋に運搬された放射性セシウムの量) の変化速度は時間とともにより低下しており、これは、図 5.5 に示した各ラインの傾きが小さくなることとして現れている。この図では、口太川及びその支流のモニタリング結果が色付きの丸印で、阿武隈川及びその支流のモニタリング結果が白抜き丸印で示されている。

県が実施した解析により、2011 年以降の阿武隈川及びその支流の口太川の集水域の初期沈着量に対して、流出した積算セシウム-137 量はそれぞれ約 2.7% (2.5～3.0%) 及び 1% (0.5～1.5%) であった。これらの割合が小さいということは、自然環境における放射性セシウム濃度の低下は主に放射性セシウムの自然減衰によるものであること、また、放射性セシウムの流出は (集水域での汚染土壌のごく表層のみの洗い流しや浸食の影響によって、) 集水域における放射性セシウム全量の減少にほんのわずかしき寄与しないことを示している。また、これらの結果は、地形における異なる要素間での放射性セシウムの移行が限られたものであることも示している。



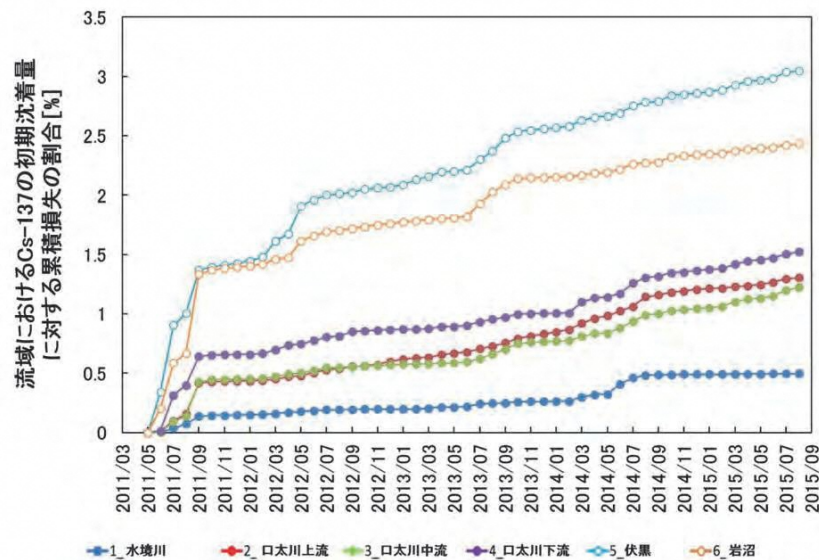


図 5.5 2011年6月～2015年8月における県内河川の集水域からのセシウム-137の累積損失の割合（福島県作成）

この県内の研究機関の調査には、貯水池での測定及び貯水池におけるセシウム-137収支バランスの調査が含まれている。横川ダム貯水池において、溶存態・懸濁態放射性セシウムの測定が2014年に行われたが、その結果、貯水池の流入及びダム放流水の溶存態放射性セシウム濃度はごく近い値であることが観測された。しかし、ダムから放流される懸濁態放射性セシウム量は流入量よりはるかに少ないものであった。これは、一般的な貯水池の場合と同じく、流速が非常に遅い場所では、懸濁態放射性セシウムが沈降・堆積してしまうためである。この例は、ダム湖がある種の貯留機能を果たすことを示している。この観測結果は、理論的には湖にも適用することができる。

懸濁物質へのセシウムの吸着は、自然環境における放射性セシウムの挙動において重要な役割を果たす。そのため、土壌や堆積物へのセシウムの吸着の強さを定量化することを目的として調査が行われた。これは通常、溶存態と懸濁態の放射性セシウムの測定値から導き出される分配係数 ( $K_d$ ) により特徴付けられる。調査した湖水では  $10^5 \sim 10^6$  L/kg の範囲の  $K_d$  値が測定された。これは、粒子状物質へのセシウムの吸着が強いことを反映したものである<sup>3</sup>。 $K_d$  値は粒子のサイズが小さくなるにつれて増大した。チェルノブイリ原子力発電所事故後にウクライナとロシア連邦が行った観測と比較して、県内で観測されたセシウムの  $K_d$  値は一般的に高いことが結論付けられた。

## 植物プランクトン及び動物プランクトン内の放射性セシウム

浜通り地域及び中通り地域の淡水域で行われた放射性セシウムの県内の研究機関による測定には、植物プランクトン及び動物プランクトンの測定、並びにそれらに含まれる放射性セシウム濃度の測定も行われた。動物プランクトン及び植物プランクトンの予測存

<sup>3</sup> 分配係数 ( $K_d$ ) は、例えば 1,000,000 L/kg であった場合は、堆積物中の濃度が水中よりも 1,000,000 倍高いことを意味する。これは、セシウムの吸着力が非常に強く、大半の放射性セシウムは堆積物に吸着されていることを意味している。

在量は非常に少ないものであった。水中のプランクトン量は時間的・空間的に変化する。横川ダム貯水池で定量された水中の植物プランクトン濃度は  $0.1 \text{ mg/L}$  のオーダーであり、動物プランクトン濃度はこれよりもほぼ一桁低いものであった。このため、植物プランクトンと動物プランクトンに取り込まれた放射性セシウム濃度は数十から数万  $\text{Bq/kg}$ （乾燥重量）の範囲であったが、水中の全放射性セシウム濃度に対するプランクトン含有量の寄与率は、1%未満にすぎないことが示された。

## 農業用ため池のセシウム

2014年に避難指示区域内外の約3,000か所の農業用ため池の水及び堆積物の放射性セシウム濃度の定量が行われた。

放射性セシウムは粘土粒子と強く結合するので、これら農業用ため池の水に溶解した放射性セシウム濃度は、堆積物の放射性セシウム濃度より何桁も低くなっている。この知見は、河川や湖で行われた観測結果とよく一致している。調査した農業用ため池で、溶存態放射性セシウム濃度が  $1\text{Bq/L}$  以上のため池の割合は1%であったが、これらは主として避難指示区域内の農業用ため池であった。溶存態放射性セシウム濃度が  $1\text{Bq/L}$  以上のため池の数は、2013年から2014年にかけて減少した。

県は、2014年度と2015年度に農業用ため池の放射性セシウム濃度を低減するため、以下の方法のような公募技術による実証試験を行った。

- 砂や礫のセシウムの放射能濃度が粘土よりはるかに低い特性を利用して、水中装置により砂、礫及び粘土を分離する。砂や礫分はため池に残る一方、粘土質分は除去される。
- 堆積物を池から除去して袋に貯蔵する。この場合、堆積物を脱水して、廃棄物の体積を小さくする。
- 池にシルトフェンスを設置することにより、農業用ため池内の流速を下げ、沈降を起しやすくする。この方法は、放射性セシウムの池からの流出を防止するものである。
- 池の水を除去して、セメントを加えて堆積物を所定の場所に固定する。セメントが堆積物と結合して、放射性セシウムの流出を防止する。

これらの結果等を踏まえて、国は対策技術のマニュアルを整備した。県内では、このマニュアルに従って農業用ため池の放射性物質対策が行われている。

## 5.4. シミュレーションモデルの適用

モニタリングの測定結果の理解を促進するために、モデルを適用して、集水域から河川水系を介して太平洋に至る放射性セシウムの運搬をシミュレーションした。そのために、大西康夫氏等（Development of a Multimedia Radionuclide Exposure Assessment Methodology for Low-Level Waste Management, PNL-3370, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington, USA (1983)）により開発された TODAM モデル（Time-dependent, One-dimensional Degradation And Migration）を適用して、請戸川～高瀬川及び大柿ダム貯水池におけるセシウム-137 輸送量をシミュレーションした。このモデルはこれまで、世界中の大・中・小の様々な河川に適用され、チェルノブイリ原子力発

電所事故、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）の核施設から環境中へと放出された放射性核種の移動の分析・評価に用いられてきた。

TODAM モデルは、河川の堆積物や水によるセシウム-137 の輸送量を推定するものである。水流の影響、地形、土地利用を考慮して、このモデルの結果が示される。このモデルは、以下の重要な情報を提供する。

- 生活用水及び農業用水への使用可能性。
- 河川に適用する環境回復対策の有効性の評価。これにより、政策決定を支援することができる。
- 河川の再汚染の影響。これは、環境回復対策の持続性を評価する上で重要である。
- 集水域から海洋までのセシウム-137 輸送量の推定。

TODAM モデルを適用して大柿ダム貯水池におけるセシウム-137 挙動をシミュレートし、放射性セシウムの流出に対するダムの役割を検討した。ダム貯水池は、懸濁態放射性セシウムの約 90%を貯留していることが分かった。この結果は、横川ダム貯水池での観測結果と類似している。非常に遅い流速が浮遊物質の沈降・堆積を促している。

IAEA と県との会合において、日本国内や国際機関の専門家は、水圏生態系での放射性セシウムの予測に関する異なる形式のモデルの使用についての知見を議論した。

## 5.5. 河川や湖沼における環境回復の経験

### 世界的な知見

ここ数十年、世界中の多くの地域が放射性核種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いる。原因となった例として、チェルノブイリ原子力発電所事故やマヤック（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。

これらの事例は全て各々に特異的なもので、影響を受けた面積、汚染のレベル、被ばく経路の関連性、住民の線量レベル、地域住民の水系被ばく経路との関連性が異なり、放射線影響や社会的影響を緩和するために取られた対策も異なる。これらの汚染事例において、2 種類の異なる対策がとられた。

- 技術的対策：例えば、
  - (1) 汚染された水系での堆積物の除去、
  - (2) 水による放射性核種の更なる拡散を抑制するためのダムの建設、
  - (3) 魚による吸収を低減するために、水系のpH値を上げる物質の適用、
  - (4) 粒子に結合した放射性核種の沈降・堆積を促進するための堆積物トラップの建設
- 行政措置：例えば、汚染された地域へのアクセスの制限、漁業の制限、飲用水や灌漑用水としての利用の制限

過去の事例の分析から得られた教訓は、水圏の放射性核種の拡散を技術的な対策により制御できる可能性は限られているということである。淡水系は、水の流量や水位の時間変動が

極めて大きいという特徴がある。放射性核種の移動は主に水の流量が多い一時的な期間に起こり、通常、汚染された堆積物の再浮遊、移動及び再堆積を伴う。このようなプロセスを制御することは難しいため、技術的対策の持続可能性はしばしば限られたものになる。

河川や湖沼の利用による住民の被ばくについて、アクセスを制限したり、勧告を発したりすることにより制御することはそれほど難しくはない。淡水系の利用に関するこのような措置は実施しやすく、水系を通じた被ばくの低減に効果的であることが証明されている。しかし、うまく実施するためには、分かりやすい指示や勧告を発する必要がある。経験上、住民には必ず、施行されている限り、そのような行政措置を知らせなければならないということが分かっている。

淡水系が持つ動的な性質のために、いったん放射能汚染が生じると、(1)水や堆積物、生物相の放射能レベルの時間的傾向を同定したり、(2)高水位時や洪水時に放射性物質や堆積物の移動により発生する新たな汚染パターンを特定したり、(3)対策を講じた場合にその成否を検証したりするために、放射性核種のモニタリングに長期間取り組む必要が生じる可能性がある。

## 福島県における河川敷での実証試験

県は、河川敷における空間線量率を低減するための実証試験をいくつかの試験地で実施した。この作業は今も続けられており、以下に詳しく記載する。

### 上小国川における実証試験

この川の片側の一部（距離約 200m）は子供たちが学校への通学路として利用したり、地域のレクリエーション活動で使用したりする。（除染前の）2014 年の 8 月と 9 月に、この地域で大規模なモニタリングが実施された。これには、河床の空間線量率や河床堆積物の放射性セシウム濃度の測定が含まれている。2014 年の秋に、除草、河床堆積物の除去、堤防の植物や土壌の除去等の除染対策が実施された（図 5.6 参照）。除染実証試験の前後に実施した空間線量率の測定結果を図 5.6 に示す。除染対策の前後に実施された測定結果を比較すると、空間線量率は約 50%低下している。



図 5.6 除染対策の実施前（左）・実施後（右）の河川敷（福島県提供）



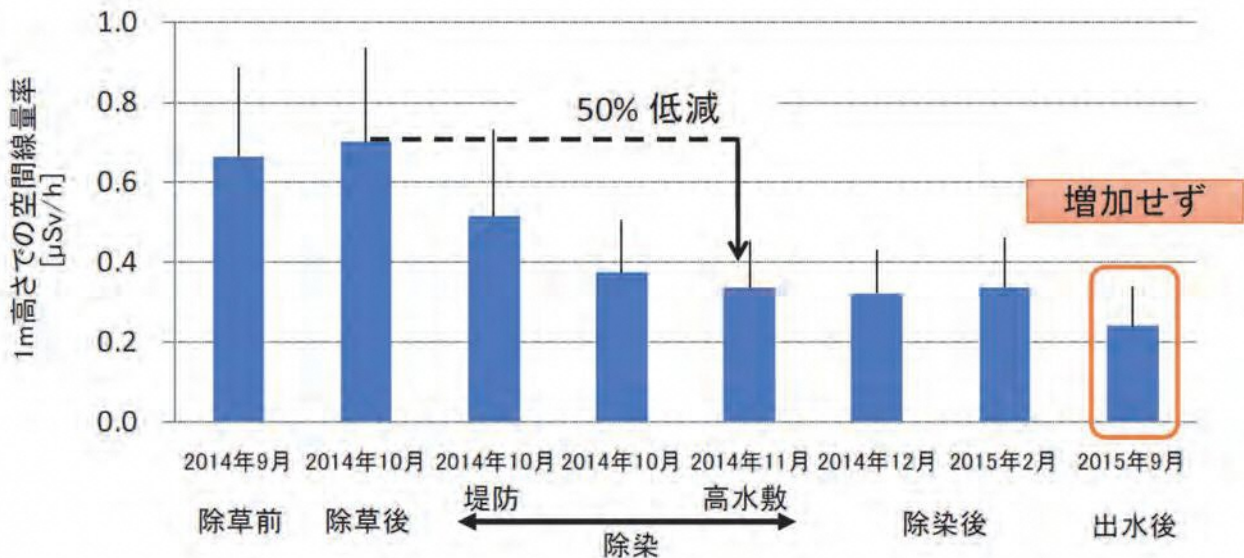


図 5.7 実証試験地における除染対策実施前・中・後の地表 1m 高さでの空間線量率

この地域は 2015 年 9 月に大洪水の影響を受け、懸濁粒子と結合した放射性セシウムの集中的な再浮遊、移動及び堆積が起こった。河川の堆積物や植物が除去され、粗粒物質や礫を含んだ新しい物質が堆積した。洪水後に実施した空間線量率の測定（図 5.7 参照）では、洪水に伴う空間線量率の有意な変化は認められなかった。

### 新田川の水辺公園

この公園は川に近く、レジャーやレクリエーションに利用されている。2015 年に測定された空間線量率は平均約  $0.6 \mu\text{Sv/h}$  であった。

この地域で実施されたモデルシミュレーションでは、除染対策により対象エリアの空間線量率が約 35% 低減できることが示された（表 5.1 参照）。除染対策を行わない場合には、自然減衰により空間線量率が 1 年で約 13% 減少すると見込まれる。

除染対策により予測される年間被ばく線量のさらなる低減について、散歩、清掃・美化活動、川の中や近傍での遊び等の様々な活動における滞在時間と地域の習慣を考慮して検証した。

除染対策により、年間の個人被ばく線量は  $0.001 \sim 0.015 \text{mSv}$  低減されることが計算で示された。新田川の当該部分の利用に関する個人被ばく線量の予測結果を表 5.1 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。

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り取られ、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。動的な運搬プロセスであることから、除染対策の持続性についての検証は非常に複雑になる。しかし、2015 年の洪水により河床の形状が影響されたとしても、除染活動の効果にはあまり大きな影響を及ぼしていなかったことが、洪水後に実施された測定から示された。この情報を考慮しても、近い将来また洪水が起こる可能性があるため、除染効果の持続性を引き続き確認すべきである。

表 5.1 除染実証試験地で低減される線量の推定（福島県作成）

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
追加被ばく線量 ( $\mu\text{Sv}/\text{h}$ ) (15 分間の空間線量測定値 から算出)	0.53	0.38	0.39	0.26
利用時間(年当たりの時間)	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)
年間追加被ばく線量 ( $\text{mSv}/\text{y}$ )				
- 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

## 5.6. 住宅地域における環境回復と除染の経験

県内では、福島第一原子力発電所事故由来の放射性物質による環境汚染からの影響を低減させるため、住宅、公共施設、農地、道路等の除染が行われた。県内で採用されている最も共通的な除染技術のいくつかを図5.8に示す。



図 5.8 主な除染技術（福島県提供）

表 5.2 は、様々なカテゴリの施設や地域での除染の取組状況をまとめたものである。住宅（家屋）の除染が最も進んでおり、2017 年 10 月末現在で、計画された活動の 99.9%が完了している。

表 5.2 市町村除染の進捗状況（2017 年 10 月末現在）

カテゴリ	計画	完了	完了率
住宅(家屋)	418,582	418,579	99.9
公共施設	11,653	11,627	99.8
道路(km)	18,785	17,701	94.2
農地(ha)	31,252	31,196	99.8
森林(生活圏内)(ha)	4,398	4,307	97.9

住宅地域で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における空間線量率の測定を行った。その効果は、環境回復が実施された地域における空間線量率の低減の観点から定量化された。

住宅地域、公共施設、道路、農地及び森林（生活圏内）のそれぞれで環境回復活動が実施された。除染したカテゴリによって、空間線量率は約 20～50%低減した（表 5.3 参照）。これらの低減率は、チェルノブイリ原子力発電所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 5.3 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（環境省実施）。

表 5.3 除染作業による空間線量率の低減率

カテゴリ	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(生活圏内)	12,697	21

## 5.7. まとめ

自然環境における放射性セシウムの挙動に関する研究が、ここ数十年間にわたり行われてきた。一般に、陸域生態系では、放射性セシウムが粘土鉱物と強く結びつくため、土壤中での移動が遅くなり、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いて河床へと沈降されるため、水中の溶存態放射性セシウム濃度は急激に低下する。

事故から 6 年以上が経過した現在、県内の淡水域では、溶存態放射性セシウム濃度は定量限界である 0.05Bq/L に近いが、これを下回っている。これは、放射性セシウムが河床の堆積物に強く吸着されていることで説明でき、堆積物中の放射性セシウム濃度は、河川水中の放射性セシウム濃度に比べはるかに高い値が観測されている。懸濁物質中の放射性セシウム濃度もはっきりと低下している。

環境中の放射性セシウム濃度の低下は、主に放射性セシウムの自然減衰によるものであり、また放射性セシウムの流出がこれをさらに促進する。2011 年から 2015 年 8 月までに、阿武隈川及びその支流の口太川の集水域における初期沈着量に対するセシウム-137 放射能の積算流出率は、それぞれ約 3% (2.5~3.5%) 及び約 1% (0.7~1.5%) であった。

貯水池の流入水及び流出水の放射性セシウムの測定から、流出水中の懸濁態放射性セシウム量は流入水中よりもはるかに少ないことが分かった。貯水池がある種の貯留機能を果たすことを示している。

懸濁物質による放射性セシウムの吸着は、環境中の放射性セシウムの挙動において重要な役割を果たす。土壌及び堆積物の放射性セシウムの吸着能を測定したところ、チェルノブイリ原子力発電所事故後にウクライナとロシア連邦で行われた結果と比較して、県内で測定された方が総じて強いことが示された。

測定から、動物プランクトンや植物プランクトンに取り込まれる放射性セシウムの量は非常に少ない。植物プランクトンと動物プランクトンの両方に取り込まれた放射性セシウムの濃度は、数十から数万 Bq/kg (乾燥重量) の範囲であった。このことから、水中の全放射性セシウム濃度に対するプランクトン含有量の寄与率は、1%未満にすぎないことが示された。

モニタリングによる測定結果の理解を促進するために、モデルを適用して、集水域から河川水系を介して太平洋に至る放射性セシウムの輸送をシミュレーションした。河川に適用された環境回復対策の有効性を検証する上でも、モデルは非常に有用であった。さらに、シミュレーションモデルを使用して、河川での再汚染の影響を評価することもできた。除染対策の必要がある場合には、このモデルを使用することにより、淡水生態系内で対策を講じる際の最適な場所を特定するのに役立つ。

福島第一原子力発電所事故以降、環境回復及び除染活動の対象として重点的に実施されてきたのは、子供たちが幼稚園や学校との往復で使う通学路及びレクリエーションエリア等の公共の場所であった。さらに、対策の有効性を実証するために、県は淡水系における多くの実証試験を実施し、空間線量率の減少を確認した。

淡水系の環境回復活動に関する世界的知見から、淡水系における放射性核種の移動を技術的対策で制御できる可能性は限られている。一方で、淡水域に沈着した放射性核種による住民の被ばくを低減するために、その淡水系における水利用に関する勧告や制限を行うことは比較的实施しやすく、技術的対策よりも被ばくの低減に有効である。

2011年以降、住宅、公共施設、道路、農地及び森林（生活圏内）で集中的な除染作業が行われている。住宅（家屋）の除染がもっとも進んでおり、2017年10月末現在で、計画された活動の99.9%が完了している。

住宅地域、公共施設、道路、農地及び森林（生活圏内）のそれぞれで環境回復活動が実施された。除染した土地の種類によって、空間線量率は約20～50%減少した。これらの減少率は、チェルノブイリ原子力発電所事故の影響を受けた地域における環境回復対策で達成された数値と非常に近い。

## 6. 除染活動から生じた放射性廃棄物の管理

### 6.1. 背景及び目的

IAEAの「*Fukushima Daiichi Accident*」の技術資料5「*Post-accident Recovery*」では次のように記載されている。『環境省が策定した除染実施方針によれば、福島県内の除染活動により生じた汚染土壌や廃棄物は、除染活動の実施場所又はその近傍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、これらは中間貯蔵施設に保管される。中間貯蔵施設での保管の後には、保管開始後30年以内の福島県外での最終処分を完了する』。中間貯蔵施設は、政府によって設置・運用がなされる。仮置場は、法律と政府のガイドラインに沿って、県内の市町村に整備される。福島第一原子力発電所の事故以降、除染活動から生じた除去土壌等の管理に関して、県は様々な業務を実施してきた。

除染活動から生じた除去土壌等の安全性を確保することは、緊急性を要する重大な課題となっており、また、IAEAの安全基準に則った持続可能な管理も必要とされている。2013年にこの活動が開始されたとき、県は、除染活動から生じた除去土壌等を保管する仮置場の不足という緊急事態に直面していた。さらに、既存の仮置場や、進行中の除染活動から生じる除去土壌等を収容するために設置が予定されている仮置場の安全性に関して、住民の懸念があった。仮置場は、除去土壌等を中間貯蔵施設に輸送するまでの3年間保管す

るという意図の下に設けられたが、中間貯蔵施設の設置が遅れたため、仮置場内の除去土壌等を当初の想定よりも長い期間保管する必要が生じてきた。その結果、3年を超えた除去土壌等の保管に関する安全性が課題となり、これらの施設の安全性を確保し、住民の懸念に応えるための評価が求められている。

実施取決めの第3項では、上述の除染活動によって発生した低レベル放射性廃棄物の管理方法についての調査に対するIAEAの支援を含め、放射性廃棄物の管理に関する研究と調査に言及している。

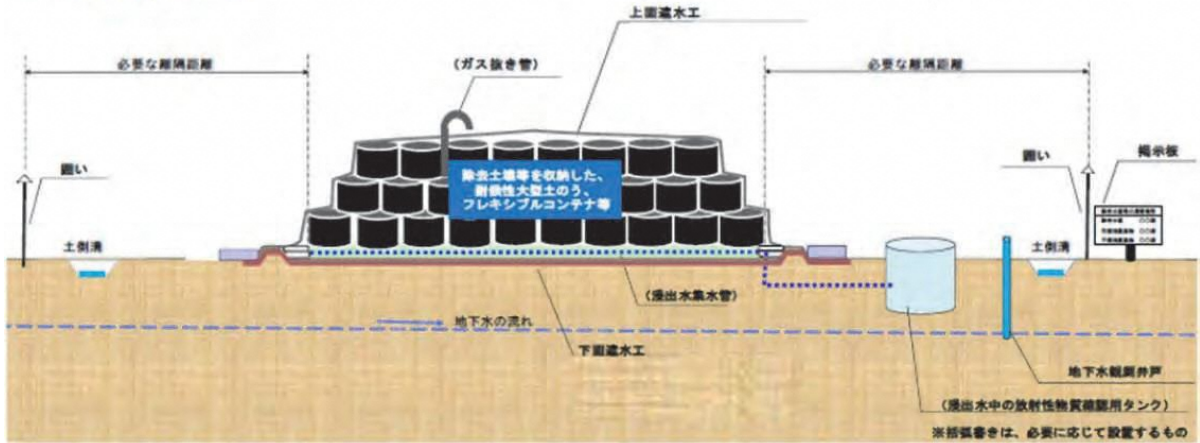
そのため、実施取決めに基づく環境回復によって発生する放射性廃棄物の管理に関する活動の焦点は、以下に関して福島県に技術的アドバイスを提供することであった。

- 仮置場等を設置するための技術指針の策定
- 仮置場設置の各段階における様々な状況に対しての安全性の説明
- 仮置場内に保管した除去土壌等の搬出方法

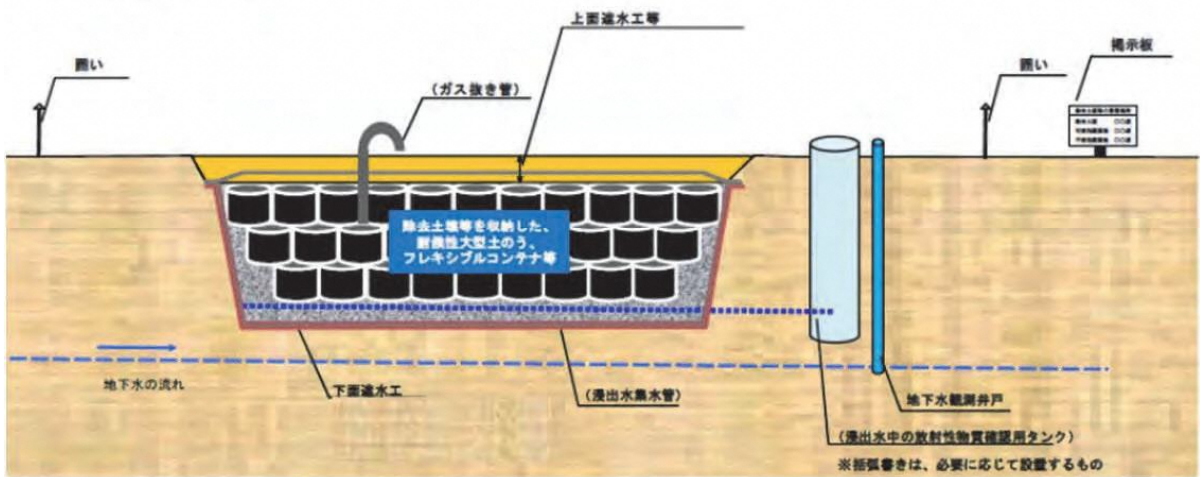
## 6.2. 仮置場

県において、3種類の主要な仮置場の構造が確立された。地上保管、半地下保管及び地下保管であり、建設のしやすさや中間貯蔵施設への輸送、安定性等の点に関して、それぞれに利点と欠点がある。しかし、汚染された廃棄物を保管するために県にとって望ましい選択肢は地上保管構造である。図6.1は、3種類の仮置場設計の概略図である。

○地上保管型の例



○地下保管型の例



○半地下保管型の例

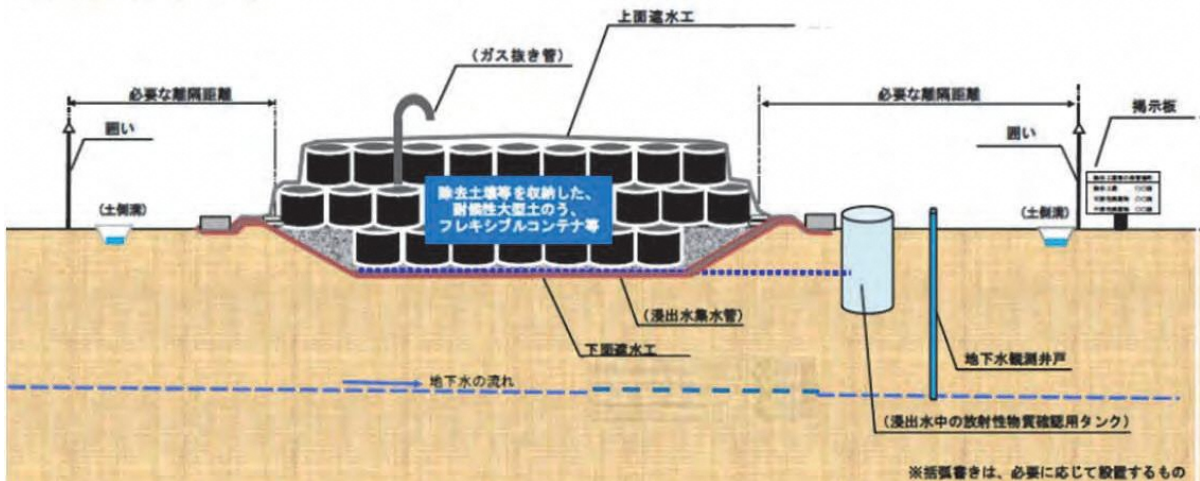


図 6.1 3種類の仮置場設計の概略図（県の仮置場等技術指針を基に作成）

2017年9月現在、汚染状況重点調査地域内の市町村において、設置または計画されている仮置場の合計は843か所である。図6.2に示すように、仮置場の数は2013年から2014年にかけて急激に増加し、2014年から2017年3月までは緩やかな増加に転じている。



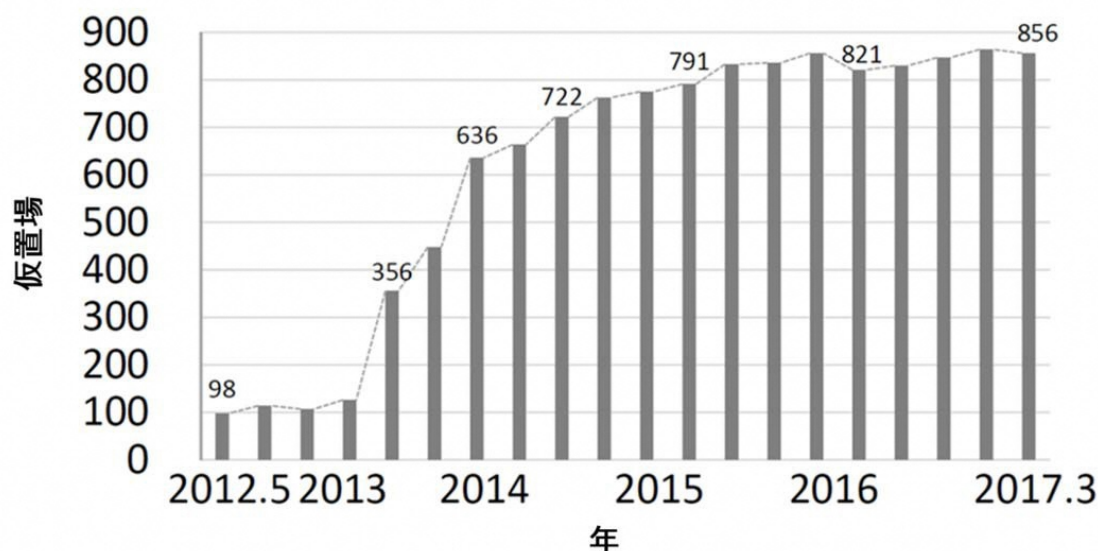


図 6.2 2012 年 5 月から 2017 年 3 月までの県内市町村における仮置場の数

除染活動から生じた除去土壌等を入れた保管容器を仮置場に保管して以降、様々な事象が確認されており、保管施設に関して以下の点に注意する必要がある。

- 積み上げることのできる袋の数の制限
- 保管容器の形態保持力の不足及び保管容器間の空隙に起因する、積み上げた保管容器の長期的な保全性と安定性への影響
- 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定さ
- 浸出現象の可能性
- 保管容器中の有機物質の分解と保管施設の完全性への影響の可能性
- 保管状況の変化に伴う上部シートの不陸の発生及び防水シートの機能低下による水の貯留
- 保管物の自然発火による火災の危険

### 6.3. 仮置場等技術指針の策定

2013 年に実施取決めの下での活動が開始されたとき、県では集中的に除染活動が実施されていた。また、その結果生じた除去土壌等を保管するために、多くの新しい仮置場等が設置されつつあった。2013 年、県は、仮置場等の設置と管理に関する技術指針を作成した。この時点で、IAEA チームは、技術指針のさらなる改訂の一部として、仮置場等の設置及び管理に関する県の経験を記録しておくように県に促した。その結果、様々な市町村における仮置場等の設置について、これまでに実施された活動に関する分析がなされた。この分析は、実施された良い事例を明示し、様々な市町村で行った数々の仮置場等の設置方法を比較することによって、仮置場等に影響を及ぼす重要課題を明確にすることを狙ったものである。こうしたアプローチは、全体として調和のとれた県内の仮置場等の設置に関する施策の基礎として役立つものであり、既存の仮置場等に適用可能な改良措置や修正措置を特定するものとなる。

IAEA チームは県に対して、仮置場等に関する技術指針の策定について、草稿をレビューして内容にコメントする等の技術的な助言を行い、改善案を提示した。そして、仮置場

等技術指針の第1版が2013年8月に公表された。その後の改定版は、2014年6月（第2版）、2015年3月（第3版）、2016年3月（第4版）及び2017年8月（第5版）に公表された。第5版に言及されている主要な課題は、保管期間の延長、保管物の搬出及び仮置場等の原状回復である。第2版（2017年8月時点での最新の英語訳版）には以下の主要議題が掲載されている。

- 立地。これには以下を含む：設置場所の特性に関する情報、設置場所選択の判断基準、設置に関する関連法令
- 構造・設計。これには以下を含む：3種類の主要な構造についての長所と短所（地上保管、半地下保管及び地下保管）、施設の場所、保管物の配置、空間線量率を低減させるための遮へい体の使用、保管容器の様々な特性、保管施設全体が維持されるような保管容器の配置、腐敗性除染廃棄物の保管、仮置場等を構成する様々な要素についての仕様と情報（例えば、遮水シート、雨水集排水システム、浸出水集水システム及び集水タンク、ガス抜き管、地下水汚染に関する観測機器、補助装置、柵等の境界構造物、掲示板及びアクセス道路）
- 設置・維持管理。これには以下を含む：放射線モニタリング手順、雨水の浸透防止、記録、仮置場等の状態についての定期検査

技術指針は、除染活動を実施した場所に除去土壌等を現場保管することに関する情報も提供した。

## 6.4. 仮置場に関する安全性評価の策定

放射性物質により汚染された廃棄物を管理する場合、関連施設と運用の安全性に関する証明を、いわゆる運用者（オペレータ）が行わなければならない。これは規制機関による認可／承認のため、または自分自身における施設・運用の安全性に関する確信や、こうした施設・運用の安全性に関わる関係者の信頼構築のためである。安全性の証明は、施設や運用が安全に行われ、現在から施設廃止に至るまで、人々や環境が放射線の有害な影響から保護されていることを、規制機関が検証・保証できるよう、特にサイトの諸特性とその設計を表現することを目的としている。IAEAの安全基準に従えば、安全性の証明は、施設と運用に対して、通常の運用状況と、事故時のシナリオの両条件で放射線の影響の定量的な評価（安全性評価）を提示して行われなければならない。

仮置場の安全性に関する信頼性は、既存及び将来設置予定の仮置場による放射線の影響が最小限であることの証拠を示すことでも強化される。安全性評価の実施には、安全性に影響する全ての関連パラメータを特定することが含まれる。例えば、サイトの特性、サイトの安全配慮設計、除去土壌等の特性、保管容器の特性等である。これらは様々な期間と様々なシナリオ、特に通常の運用状況と事故時のシナリオの条件の下で、保管の影響を定量的に評価するためである。こうした評価は、県内の仮置場を包括するモデル的な仮置場について実施される。すなわち県内の既存及び設置予定の仮置場等の全てを代表するようなパラメータを持たせるような形で実施される。

実施取決めの下での活動を開始する以前、県ではIAEA安全基準と呼ばれる安全評価の実施について経験がなかった。このような状況の下、仮置場に対する安全性評価の策定が段階的に進められた。教育段階から始まり、その後の安全性評価フレームワーク・ソフトウェアツール(SAFRAN)（第6.4.1項参照）が最初の「モデル」仮置場に適用される段階

を経て、さらに既存の仮置場に試行的に適用され、最終的には県内の 12 か所の仮置場に適用された。安全評価の開発プロセスを図6.3に模式的に示す。



図 6.3 県内における仮置場の安全性評価実施作業の流れ

#### 6.4.1. 安全性評価のフレームワーク・ソフトウェアツール

IAEA による処分前放射性廃棄物の安全管理の方法論は、安全ガイド GSG-3、処分前放射性廃棄物の管理に関する安全事例と安全性評価（IAEA、2009 年）に収録されている。これは安全要件 GSR 第 5 部、放射性廃棄物の処分前管理（IAEA、2013 年）に記載された要件を満たすための勧告を示すものである。この方法論の適用を容易にするため、IAEA は SAFRAN を開発し、処分前放射性廃棄物の管理と廃棄に関連した施設や運用について、系統的かつ秩序だった安全性評価を実施するための手引とした。このように SAFRAN は、県における仮置場の安全性評価の実施にも用いることができる。SAFRAN には、定量的な分析を実行するためのツールとともに、立地、廃棄物の流れ、想定されるシナリオ及び法規制上の要件に関する多種多様なモジュールがある。ソフトウ



エアにはデータベースが備わっており、それは利用者のニーズに従って変更可能である。実施取決めの下での仮置場の安全性の証明は、SAFRAN を利用することにより支援された。また、場合によっては、県特有の条件にソフトウェアを適応させるため、IAEA が調整を行った。

#### 6.4.2. 仮置場に関する安全性評価の実施による福島県有能力向上

2014 年、IAEA チームは県に対して訓練セッションを実施し、安全性の証明（安全性評価）と、特に仮置場向けの SAFRAN の使用方法について説明した。IAEA 安全基準において確立されている、処分前放射性廃棄物の管理に関する安全性評価についての IAEA の方法論が県に対して提供された。IAEA チームと県は 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終着点を確認した。確認された安全性評価に関する規制の枠組みの中核的な要素は、通常の運用状況と事故時のシナリオの両条件における、IAEA 安全基準に準拠した個人の職業被ばくの線量限度と公衆の被ばく線量限度である。これらの値は、その後SAFRANに入力された。

SAFRAN は、地上型の仮置場の構造を検討するために 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除去土壌等を充填した保管容器の層と、積み上げた保管容器の上部及び底部に設けた遮水シート、並びに様々な種類のカバーと放射線遮へい物からなる。

仮置場の安全性評価の実施プロセスには、その評価結果を、例えば住民のような関心ある利害関係者に共有・説明することも含まれなければならない。このようにして、県に対して、安全性評価の結果の説明と周知についての支援を行った。

#### 6.4.3. モデル仮置場における安全性評価

県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の確認を行うため、IAEA の方法論は、一般的でありつつも、立地、施設、廃棄物特性が保守的に見積もられた「モデル」仮置場に対してまず適用された。保管物から被ばく線量の評価地点までの距離を示した模式図を図 6.4 に示す。SAFRAN を用いた安全性評価においては、除去土壌等とモデル仮置場に関する 3 つの全般的活動に取り組んだ。すなわち、設置、保管及び搬出である。これらの活動に対して、通常の運用状況と事故時のシナリオの下で評価がなされた。これらの活動のそれぞれについて、通常の運用状況と事故時のシナリオの下での固有の条件を入れた、各々の解析が必要となる。

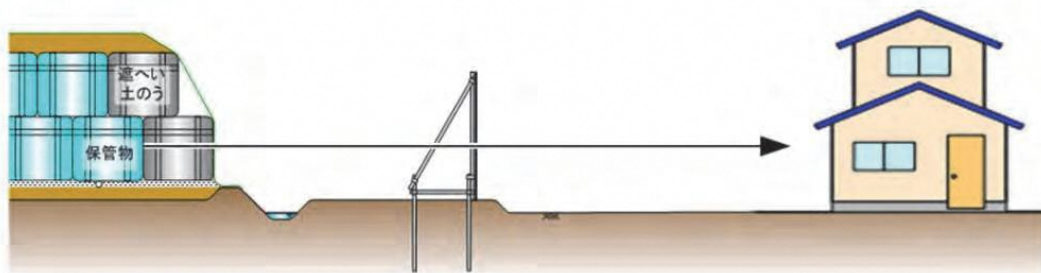


図 6.4 仮置場の代表的な配置。保管物からの距離に対して評価点における空間線量率が計算される。



モデル仮置場の安全性は、他の工学的施設と同様、頑丈で証明された設計及び建設であるかどうかにかかっている。最も重要な設計上の特徴は、作業員、住民及び環境に不適切な危険を及ぼすことなく除去土壌等を取り扱い、保管し、搬出する上で必要な保証を提供することにある。施設の詳細設計と、その設計が拠って立つ基本的な仮定について理解することは、現在及び将来にわたって施設の安全性を評価するために必要である。仮置場は土木工学的に単純な構造であるが、適切に定量化し理解しなければならない、いくつかの重要な安全上の特性も有している。したがって作業は、モデル仮置場の評価に用いる、施設の運用状況の範囲を示すパラメータを定義することから始まった。

SAFRAN に投入すべきデータに関して議論が行われた。可能な限り実データが用いられ、高精度に確立されていないパラメータについては、例えば安全側の情報推定が県によってなされた。このアプローチは安全性評価の実施の全過程で用いられた。

保管される除去土壌等に関する情報が集められなければならない。これには物理的データ、化学的データ、生物学的データ、放射線学的データ及びその他のデータ、さらに保管容器に関する情報、すなわち保管容器の特性が含まれる。SAFRAN での定量的評価に必要な保管数、処理能力、放射能濃度等を含む除去土壌等の流れが算定された。たとえば近隣の家屋、立地に関するデータ、工学的特徴等の安全性評価に関係するその他の重要なパラメータも、県によって収集かつ／または推定された。

モデル仮置場に関連した除去土壌等の管理活動の詳細な分析に基づき、危険分析が実施された。これは通常の運用状況で生じる危険と、事故の結果として生じる危険に対して取り組まれたものである。まず、最初に危険スクリーニングが実行され、モデル仮置場に関係のない危険については除外された。個別のシナリオの最終的なスクリーニングは、各事象の起こりやすさと生じうる影響を定性的に評価することで実行された。このプロセスを通じて、設置、保管、搬出の間に生じうる一連の様々な危険は、通常の運用状況と、事故時のシナリオの両条件で分析された。

分析に必要なパラメータを定義した後で、県における既存及び計画中の仮置場の設計上の特徴に合わせるべく、SAFRAN を微調整することが必要になった。SAFRAN に対する一つの特筆すべき変更は、放射性物質の大気中及び地下水への放出の分析を可能にしたことである。

得られた成果について、IAEA 県の共同での分析と議論がなされ、安全性評価の結果を、仮置場の安全性に関連する課題の利害関係者との意見交換に用いなければならないことが再度確認された。県は、一歩ずつのアプローチではあっても、各節目の決定点では利害関係者の意思疎通を図らなければならない。

## 通常の運用状況

モデル仮置場における通常の運用状況での影響評価は、職業被ばく者と、施設近傍に住む住民の両方に関する年間の被ばく線量の評価に基づいている。職業被ばくを受ける作業員は、様々な状況下で被ばくする。例えば、除去土壌等の設置又は搬出、すなわち復旧の過程において屋外で作業する場合等がある。近隣住民は、除去土壌等の設置／置換え作業の間に直接照射による被ばくを受けうる。しかしながら、通常の運用状況では、これらの被ばくは極めて小さい。保管期間における予測被ばく量は、通常の運用状況で許容される被ばく限度よりずっと下のレベルである。

通常の運用状況における被ばく線量は、全ての作業が計画通り実施された場合を想定して評価されている。この場合、個々の活動に関しては平均所要時間と、これらの活動の間に想定される平均的な空間線量率を仮定している。

被ばくの可能性は、除去土壌等の数やその保管面積に依存する。したがって、県内で既存及び計画中の仮置場を特徴づける 3 種類の仮置場について、評価がなされた。これら 3 つのモデル施設に関して、例えば土のうを利用したり、施設の上部を土で被覆したりといった様々な遮へい条件についても評価がなされた。

また、仮置場から最も近い住宅建屋までの距離を 1m から 100m まで変化させて、隣接住宅における空間線量率の変化を計算した。

空間線量率、居住期間及び遮へい効果に基づき、外部被ばく線量を計算した。核種ごとの放射能濃度、線量換算係数及び居住期間に基づき、内部被ばく線量を計算した。予測された外部被ばく及び内部被ばくの合計として、総被ばく線量を計算した。

## 事故時のシナリオ

計画された通常の運用状況からの逸脱は、作業員や住民に予期せぬ被ばくをもたらす場合がある。したがって、モデル仮置場の安全性評価には、施設の稼働期間内の事故に起因する危険性の評価も含まれる。

県は、IAEA の方法論を用いて、仮置場それぞれの安全状況と起こり得る影響についての包括的な分析を行った。事故による影響の評価は、発生する起因事象の詳細分析を必要とする。これらの事象は、分析され、その結果生じる可能性のあるシナリオのリストが作成された。予想されたとおり、仮置場の工学的構造が比較的単純であっても、さらなる検証や事故が生じた際の対策の検討が必要なシナリオは存在した。

危険のスクリーニングの過程で、無関係な被ばく経路（あるいは極端に発生確率の低い被ばく経路）については除外された。事故によって大気中に放射性物質が放出される場合（たとえば施設における火災）は、サイトの作業員及び/又は住民の被ばくを引き起こす場合がある。また、事故による水を介した放射性物質の放出は、住民に対してのみ関係するだろう。

大気中への放射性物質の放出に起因する被ばく線量は、例えば通過する汚染物質（プルーム）からの吸入、体内摂取及び外部被ばくといった様々な被ばく経路からの影響分を合計して計算される。

事故時のシナリオの選択に関しては、仮置場の配置や構造にも留意しつつ、さまざまなシナリオが考察された。例えば、落下、高温、雪、強風等の様々な原因による除去土壌等の保管容器の損壊、さらに、地震や火災等の様々な原因による施設の損壊等である。

## SAFRAN のモデル仮置場への適用に関する結論

SAFRAN において取り扱うモデル仮置場における、全ての除去土壌等の管理活動及びその施設について完全な説明がなされた。施設、活動、除去土壌等の流れ及び危険に関する完全な説明が、SAFRAN の適用を通じて分析された。これは 12 か所の代表的仮置場への適用に関する安全性評価を最終的に確定させる基礎となった。

通常の運用状況に対する予備的な分析によって、土のうにより防護壁の形で遮へいすることが近隣住民の被ばく線量を大きく低減させることが明らかになった。施設の上部を土壌で被覆すると、被ばく線量の予測値はさらに一桁低減され、近隣住民の年間被ばく線量は 1mSv/年よりはるかに低いレベルに低減される。放射線防護の運用に関して、通常の

運用状況での作業員に対する被ばく線量の予測値（施設の境界において）も評価されており、保守的な仮定の下でも職業被ばく線量限度を下回る。

県によって決定されたパラメータと、多様な数値シミュレーションを含む SAFRAN の使用に基づくと、通常の運用状況でのモデル仮置場は、現場作業員や近隣住民に対する不当な危険を及ぼさないよう適切に設計されてきたと結論付けることができた。

事故に起因する職業被ばくを受ける作業員の被ばく線量予測値は、例えば倒木によって 20 個の廃棄物保管容器が破壊されるような極端な事象を考慮したとしても、一般に 1mSv を超えない。

事故の結果生じる住民への被ばく線量を考慮する場合、ほとんどのシナリオにおける分析により、適用される被ばく限度よりも十分に低い値にとどまることが予測された。しかし、あるシナリオの分析結果からは、住民が 0.5mSv を超える被ばくを受けうることが示された。したがって、これらのシナリオに対するさらなる分析を実施すべきであり、本状況下での対策の実施も考慮すべきである。

実施された分析に基づけば、仮置場から地下水や河川への放射性物質の漏洩は極めて限定的であり、結果として、地下水や魚の消費から予測される被ばく線量は極めて低い。

また、実施取決めの下で実施された分析は、結果として、処分前放射性廃棄物の安全性評価に関する SAFRAN の適用を含む IAEA 方法論が、仮置場に対して完全に適用可能であることを証明した。これは、仮置場の全運用期間を通じ、通常の運用状況と事故時のシナリオの両条件の下で、IAEA 方法論が作業員と住民への全ての被ばく経路に対して適用可能ということである。

#### 6.4.4. 既存の仮置場についての試験的な安全性評価

SAFRAN のモデル仮置場への適用の成功を受け、県は既存の仮置場に対して、IAEA の安全性評価方法を適用した。この活動を通じて得られた知識と経験は、他の仮置場の安全性評価の実施を促進することになった。モデル仮置場に対する安全性評価と同様に、通常の運用状況と事故時のシナリオの下で作業員及び住民が受ける仮置場からの被ばく線量を予測するため、SAFRAN を使用した試験的な安全性評価が行われた。

県によって実施された試験的な安全性評価の結果は、モデル仮置場の安全性評価の結果と類似している。このことは、以下のことを明確に意味している。すなわち、安全性評価の実施プロセスには一貫性があること、安全性評価のためのパラメータは適切なものであること、そして検討した諸条件の下では、重大な安全上の問題はなかったということである。試験的な安全性評価に関して、より現実的なデータを用いて安全性評価を確立するプロセスは、安全性評価プロセスにおける県の自信を高めるのに寄与することとなった。

#### 6.4.5. 9 か所の代表的な仮置場に関する安全性評価

仮置場の安全性評価を完成させるために、IAEA の安全性評価方法を県内の代表的な 9 か所の仮置場に対して適用することが決定された。選定された仮置場は、県内における既存及び将来設置予定の仮置場を代表する特性を有するものであった。これらについて実データが取得され、また、データが取得できない状況の下では、モデル仮置場の場合と同様に、



保守的にデータの推定が行われた。

仮置場向けのさらなる安全性評価の実施において、これまでの安全性評価には含まれていなかったさらなる起因事象も、進行中の安全性評価実施プロセスに組み込まれた。これには、洪水や仮置場からの除去土壌等の搬出、除去土壌等の輸送、保管容器の強度の経年的な変化、3年（当初想定した仮置場での保管期間）を超える施設の運用、といった事象の影響も含まれる。もし仮置場内の廃棄物が現在想定しているより長期間保管される場合は、保管容器や施設の全体構造の経年劣化の効果を考慮に入れて、安全性評価の改定をしなければならない。保管容器の製造者は、その耐用年数を数年と規定しており、仮置場内の保管容器を対応年数以上に使用する場合、安全性評価はこの問題に言及する必要があると考えられる。

県内9か所の代表的な仮置場に対する安全性評価の結果は、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。さらに、通常の運用状況での仮置場の安全性も証明された。ただし、火災のような大規模な事故に対しては、被ばく線量低減のための対策が必要になるかもしれない。

安全性評価の結果の文書化及び公表に関しても議論がなされた。その結果、2017年9月時点で、県は安全性評価の実施プロセスとその結果を記載する文書の草稿を作成した。

## 6.5. 仮置場に保管された廃棄物の搬出方法と仮置場の廃止措置

実施取決めに基づく協力の後期段階として、IAEA チームと県は、仮置場に保管された除去土壌等の搬出に関する戦略について議論した。第6.4.5項で議論したように、除去土壌等の保管容器の強度の経年的な変化は、仮置場からこれらの容器を取り出すことを困難にすると予想できる。IAEA チームは、保管容器の耐久性に関して、県が現在実行中の調査を続けるよう助言した。また、この調査の結果はデータベースに掲載すべきであること、この情報は除去土壌等の搬出に関する優先順位付けを周知するために用いるべきことも助言した。安全性評価プロセスの中で言及すべき重要な問題は、除去土壌等の仮置場から他の保管施設（例えば中間貯蔵施設）への輸送である。安全性評価の結果は、特に輸送の優先順位付けの策定結果を周知するものでなければならない。保管容器の経年変化に関する継続調査の結果や、輸送の問題についての考察から新たな情報が出てくれば、安全性評価はこれらの新しい情報を取り入れる形で改訂しなければならない。IAEA チームはまた、除染作業から生じた除去土壌等の処分に、もし市町村の処分場が使えるようになれば、除去土壌等の処分にに関する選択肢はかなり増えることも指摘した。IAEA チームによると、大量の廃棄物の埋立処分に関する個別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けば、放射線防護の原則に則り最大濃度 8,000Bq/kg 以下の濃度のセシウム 137 を含む除去土壌等を埋立処分することに対し、反対する根拠はない。

全ての除去土壌等が取り除かれたあとの仮置場の廃止措置は、IAEA の安全基準に則って系統的に行われるべき重大な事業であることを IAEA チームは注意喚起した。これに関しては様々な問題に言及する必要がある。例えば、放射線モニタリング手順を含む現場の原状回復に関する技術や、被ばく線量の基準を含む放射線防護目標の確立と実施等である。



## 6.6. まとめ

SAFRAN を用いることによって、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。それはまた、仮定を精査し、要素を追加し、評価が過度に安全側にならないように現実との調和を取るためのいくつかの重要なステップを通じて、安全性評価実施における手段を提供することにもなった。これらの各ステップの中で安全性評価は自動的に更新されていくため、こうした反復的アプローチが引き起こしうる、混乱や矛盾や重要側面での考慮の欠落 等といった過失の発生は大幅に低減された。

ソフトウェアの導入の際、SAFRAN のデータベースの一部は、県内の仮置場の個別条件に合わせるために変更された。

SAFRAN の適用を通じて、県内の仮置場、すなわちモデル仮置場、試験解析の対象とした既存の仮置場及び県内 9 か所の代表的な仮置場に関する安全性評価を実施することは福島第一原子力発電所事故の後の除染活動から生じた大量の除去土壌等を保管する安全かつ信頼性ある方法を確立するための重要なステップである。

仮置場の安全性評価の実施において、いくつかの技術的な問題点が認識され、その安全性に対する影響が評価された（例えば、一時保管の様々な場所における滞水、洪水、仮置場からの保管容器の搬出、除去土壌等の輸送、保管容器の強度の経年的な変化等）。これらに特化した安全性への影響についての評価に基づき、問題点を緩和・防止するための技術的な方策が確立され、その効果が評価できることとなった。

SAFRAN を用いて同時に実行された系統的プロセスは、論点と信頼性を提供し、重要課題が無視されることを防いだ。これは、なぜある種のシステムやプロセスが安全と考えられ、また、なぜある種の安全性改善と対策が必要なのかを説明する枠組みをも提供した。

県内の仮置場の安全性評価の実施に関し、SAFRAN の使用を通じて得られた結果は、（安全側の値を用いて計算された）全ての被ばく線量が、ほとんどの場合において規定された線量限度のはるか下にあることを明らかにした。

保管容器の強度の経年的な変化を考慮に入れた、仮置場等の保管容器の搬出方法についての議論が、IAEA チームと県との間で交わされた。仮置場等に関する安全性評価は、保管容器の強度の経年的な変化に関する継続調査の結果として得られる新しい情報を踏まえて改定していかなければならないことが留意事項とされた。

全ての除去土壌等が撤去された後の仮置場の廃止措置は、IAEA 安全基準に則って系統的に取り組んでいかなければならない重要な事業となるであろう。

## 7. 報告書総括

### 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

県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動態を把握する必要性は高い。1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故後、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、ヨーロッパと日本の森林の相違から、チェルノブイリ関連の調査結果を、日本の森林状況に直接適用することは難しい。このため、県内において大規模なモニタリングが計画された。

現在、既に、県内の森林土壌に含まれる粘土鉱物が、放射性セシウムの固定、下層植生や立木への吸収抑制に貢献していることが示唆されている。この結果として、森林内の放射性セシウムのうち、立木内の存在量はわずか0.2%に留まっている。現在までに伐採された樹木中の濃度に比べて低レベルであることは、県内の森林から産出される木材が、今後も引き続き、制限されることなく利用可能であることの有意な証拠となる。しかし、この傾向が今後も続くか否か、また新たに植栽された苗木における吸収の変化について調査することが重要である。時間の経過に伴い、自然減衰によって空間線量率が低下し、現在はアクセス不可能な森林域へのアクセスが可能となるであろう。このことは、木材の継続的利用及び林業従事者の被ばく管理という面で、新たな課題を提起する可能性がある。

別の重要事項として、事故直後に県内の森林に沈積した放射性セシウムの大部分は、現在までに、土壌や落葉層中に移行しているという観測結果が指摘される。これらの放射性セシウムは、今後も引き続き空間線量率に影響を及ぼす。当初蓄積した放射性セシウムの大半は森林内に保持され、現在に至るまでの森林生態系からの放射性セシウム流出量は少量に留まっていると思われる。このことは、近隣の農地の汚染の可能性は小さいことを示唆する（不測の壊滅的事態を除く）。同時に、森林における空間線量率の低下は、主としてセシウム-137の半減期が30年であることに支配されている。現在、一部の対策について長期的効果度の観点から評価されているが、高額な費用を要することから、大規模な適用は制限されるであろう。

植栽から伐採までの樹木のライフサイクルは、通常、数十年の時間である。福島第一原子力発電所事故の時点で、放射性物質の降下認められた森林のライフサイクル段階は、植栽後間もない幼齢林から伐採可能な高齢林まで千差万別であった。したがって、長期の循環メカニズムを十分に理解するためには、林床と植生の間の放射性セシウムの動態に関するモニタリングが必要である。モニタリングで得られた知識は、県民にとって利益となる方法で森林管理の一助となろう。

### 分かりやすいマップ作成のための放射線モニタリングデータ

県ホームページは、県民にとって確かな情報源として広く利用されている。ホームページユーザーの意見を踏まえて、必要とされる情報タイプの識別、及びニーズに応えるホームページの改良方法が模索された。県は、ホームページを通じて一般公衆に対して広く情報を提供する必要があることが浮かび上がった。この点で、帰還を希望する避難者の情報ニーズは特に重要である。

一般公衆への放射線データ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 専門家による検討が実施された。データ提示について、インタラクティブ・マップの使用を含めて多方面からの意見が考慮された。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、及び定点観測データと各種調査法によるデータの統合方法等、専門的な問題は複雑であり、多種のアプローチや解決策について協議が行われた。

IAEA チームの助言を踏まえて改訂された新しいホームページは、2016 年に完成した。以前に増して使いやすくなり、反応速度が向上した。また、パソコンだけでなくスマートフォンからのアクセスも可能となった。新しいホームページでは、特定の地点や時点のデータ閲覧が容易になっている。空間線量率の経時変化は、「タイムルーラー」でグラフ表示可能となっている。さらに、日本語のほか、英語、中国語、韓国語にも対応している。

## オフサイト除染と環境モニタリング

県の淡水系においては、事故から 6 年以上が経過した現在、水中の溶存態放射性セシウム濃度は定量下限値である 0.05Bq/L に近いが、これを下回っている。これは、放射性セシウムが河床堆積物に強く吸着されたためであり、堆積物中の放射性セシウム濃度は高い値が観測されている。懸濁物質中の放射性セシウム濃度には明らかな低下が認められている。

環境中の放射性セシウム濃度の低下は、主に放射性セシウムの自然減衰によるものであり、流出による放射性セシウムの物理的除去も寄与する。懸濁態放射性セシウムは、貯水池の堆積物に含まれる。貯水池は、ある種の貯留機能を果たす。

集水域から河川水系を介して太平洋に至る放射性セシウムの輸送に関する評価のために、シミュレーションモデルが適用された。その結果は、モニタリングによる測定結果の理解を促進した。さらに、対策の効果に関する検討において、モデルは貴重な情報を提供した。河川周辺のレクリエーション地域における空間線量率の低減措置に対する有効性を検証するため、多くの実証試験が開始された。

淡水系の環境修復活動に関する世界的知見から、淡水系の放射性核種の移動を技術的対策により制御できる可能性は限られている。一方で、淡水域に沈着した放射性核種による住民の被ばくを低減するために、その淡水域の利用に関する勧告や制限を行うことは比較的实施しやすく、技術的対策よりも被ばくの低減に有効である。

2011 年以降、住宅、公共施設、農地及び森林（生活圏内）において集中的な除染活動が実施されてきた。住宅（家屋）は最も除染が進んでおり、2017 年 10 月末現在、計画の 99.9%が完了している。除染が実施された土地の種類によって、空間線量率は約 20～50% 低減した。チェルノブイリ原子力発電所事故の影響を受けた地域における環境回復対策で達成された数値と非常に近い。

## 除染活動から生じた放射性廃棄物の管理

県内の仮置場等に関する安全性評価の開発にあたっては、IAEA の SAFRAN が用いられた。モデル仮置場、県内の既存の仮置場、そして県内 9 か所の主要な仮置場に対して SAFRAN を適用し、県内の除染活動から生じた大量の除去土壌等の保管のため、安全で信頼性の高い方法が確立された。県は、処分前放射性廃棄物の管理施設及び運用の安全性に関する IAEA の方法論に基づいて安全性評価を実施し、IAEA の方法論が十分に適用可能であることが実証された。IAEA が開発した SAFRAN を用いた実施プロ

セスの支援により、仮置場等の安全性評価に関する対話型アプローチが可能となった。同時に、県は、複数回にわたり、想定事項の改良、要素追加、安全主義と現実主義の均衡最適化等の安全関連の重要ステップの実施が可能となった。

SAFRAN ソフトウェアの適用では、SAFRAN データベースの一部について、県内の仮置場に固有の状況に適合させるための変更がされた。

体系的な評価プロセスは、必要に応じて、安全対策の追加実施を正当化する根拠を提供できるという重要な利点も併せ持っている。IAEA の SAFRAN を県内の仮置場に適用した結果、（安全側に立った値を用いて計算された）予測被ばく線量は全て、ほとんどの場合において基準値を下回ることを示した。関連するあらゆる危険についての系統的な分析から、住民や環境への悪影響を除去あるいは著しく低減させるために必要な対策を実施することの正当な根拠が得られた。

県内の仮置場の安全性評価の開発は重要であるが、除染活動から生じた大量の除去土壌等の安全かつ信頼性の高い保管方法の探索においては、まだ第一段階に過ぎない。IAEA チームと県との合同会合で、仮置場に保管された除去土壌等の搬出方法に関して議論され、除去土壌等を収容した保管容器の強度の経年的な変化について論じられた。仮置場の安全性評価は、保管容器の強度の経年的な変化に関する継続調査の結果として得られる新しい情報を踏まえて改定する必要がある。除去土壌等を全て撤去した後の仮置場の廃止措置は重大課題であり、IAEA の安全基準に従い、系統的に取り組む必要がある。