

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

福島県と IAEA との間の 協力プロジェクト

最終報告書

(2013 年～2017 年)

【福島県提案プロジェクト】

概要版

2018 年 3 月

福島県

1. FIP1 河川等における放射性核種の動態調査

1.1. 目的

2011年の東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により、県土は広く放射性物質により汚染された。河川水は上水道や農業用水などに広く利用されていることから、河川における放射性物質の動態を解明し、河川水を安全に利用するための情報提供を行うことは重要である。また、放射性セシウムが河川を懸濁態として流下する場合には、出水等のイベント後の再堆積による周囲の空間線量率への影響が懸念されるが、溶存態として流下する場合には生態系を介した移行についても考慮する必要があることから、存在形態別に放射性セシウムの動態を把握することが必要である。そこで、福島県内を流れる河川を研究対象とし、河川を通じての放射性物質の動態を解明するとともに、得られた観測データをもとにモデル計算による検証を行った。

1.2. 実施内容

広瀬川流域(図1(a))における調査では、2013年度から広瀬川とその支流に観測点を設け調査を行った。広域を対象とした調査は、阿武隈川水系及び浜通りの8水系を対象に、多地点で調査を行った(図1(b))。各観測点では、濁度、水位の連続観測及び浮遊砂サンプラーによる浮遊砂試料の採取を行った。

1.3. 結果

広瀬川流域において、データ収集のための観測網を整備した。また、IAEAより、放射性物質動態を予測することができるTODAMモデルの提供を受けた。2016年度までに取得した観測結果を基に、TODAMモデルにより河川の流下に伴う溶存態、懸濁態放射性セシウム濃度の変化を計算した。計算において、平水時の水位・流量を条件として与え、広瀬川本流の上流端及び主な支流から流入する放射性セシウム濃度の実測値を境界条件として与えた。広瀬川の本川中に設置した5つの観測点における溶存態、懸濁態放射性セシウ

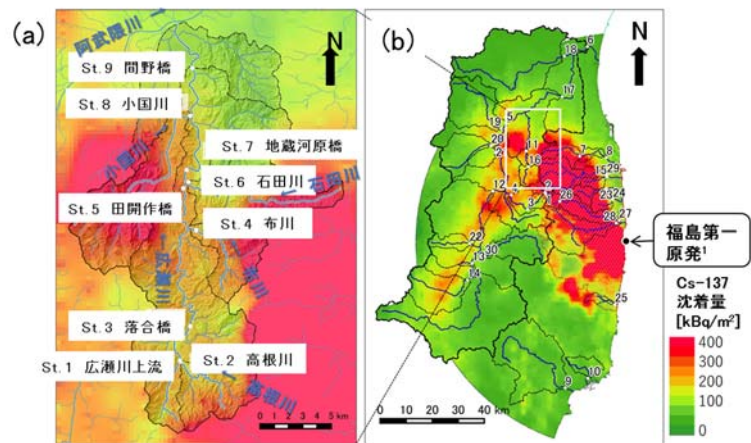


図1 調査地点の位置と放射性セシウムの地表面への沈着量(2011/7/2時点)

(a) 広瀬川流域調査。(b) 広域多地点調査

* 出典：文部科学省による第3次航空機モニタリングの測定結果について、文部科学省(2011)

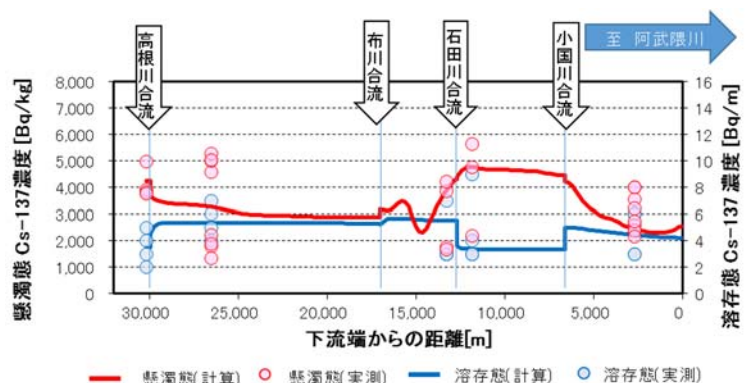


図2 TODAMモデルによる溶存態・懸濁態のセシウム-137濃度の実測値と計算値の比較

¹ 2016年4月1日から東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所に移行した(以下同じ。)

ム濃度を概ね再現する事ができた（図2）。

広域を対象とした多地点調査において、2017年5月までに得られた河川における懸濁態セシウム-137濃度のデータを、阿武隈川水系、浜通りの河川に分けて図3に示す。流域により初期の沈着量が異なるため、値にばらつきがあるものの、いずれの地点でも、事故後1年程度は急激な濃度低下を示し、その後はやや速度が鈍化するものの、低下傾向が続いている。対象流域では面的除染が広く実施されたが、チェルノブイリ原発事故後の欧州の河川（面的除染は実施されていない）においても同じ傾向が観測されていることから、自然減衰が濃度低下の主な原因と考えられる。

さらに、本調査の観測点の中でも、流域全体が除染特別地域に含まれ面的除染の影響が現れやすいと考えられる2カ所の観測点（No.1 水境川、No.2 口太川上流）について、面的除染が懸濁態セシウム-137濃度に与えた影響を調査した。図4に、懸濁態セシウム-137濃度と当該地域の面的除染（農地）の進捗率を示す。当該地域では、2014年4月～2015年12月の間に、特に集中的な除染作業が実施され、懸濁態セシウム-137濃度も除染の進捗に合わせて急激な低下を示したことが分かる。

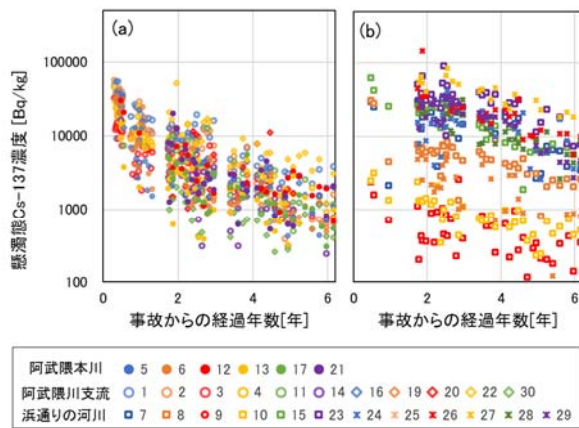


図3 懸濁態セシウム-137濃度の推移
(a) 阿武隈川水系 (b) 浜通りの河川

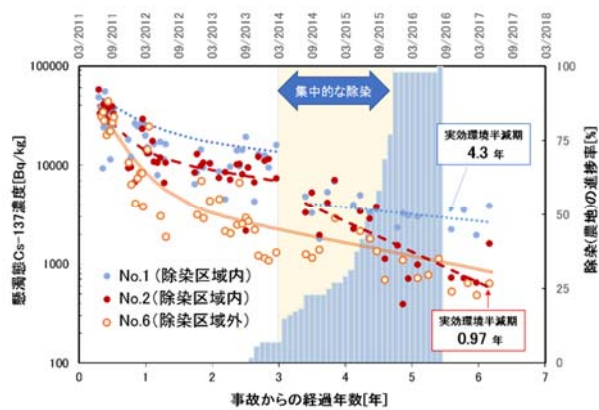


図4 水境川（No.1）・口太川上流（No.2）地点における懸濁態セシウム-137濃度
青棒：当該地域における面的除染（農地）の進捗率

1.4. まとめ

広瀬川流域においてデータの収集を行い、TODAMモデルでの放射性セシウム濃度の変化を計算した結果、広瀬川の流下に伴う放射性セシウム濃度の変化を概ね再現することができた。今後は、計算精度の向上に向けたデータ収集の継続及び流域内でも初期沈着量の多い小国川流域に着目した計算を進めることが重要である。

また、阿武隈川水系及び浜通りの主要な河川を対象に実施した広域多地点調査において、懸濁態放射性セシウム濃度は継続して低下傾向を示すことが明らかとなった。さらに、流域における面的除染が一部の河川観測点での放射性セシウム濃度に影響を及ぼすことが確認された。今後、植生の回復、営農再開等の土地利用の変化により濃度等に変化が生じる可能性があるため、引き続き観測を継続し、状況の把握を行うことが重要である。

2. FIP2 野生動物における放射性核種の動態調査

2.1. 目的

東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故により、自然環境に生息する多くの野生動物において放射性セシウムなどの放射性核種が検出されていることから、野生動物の出荷制限解除と県民の不安解消に資するため、生態系における放射性セシウムの動態解明についての調査・研究を行った。

2.2. 実施内容

(1) 野生動物における放射性核種の動態調査

イノシシ、ツキノワグマ等の野生動物の筋肉や、イノシシの胃内容物に含まれるセシウム-137の濃度測定を行い、解析を行った。

(2) 野生動物の行動圏調査

GPS首輪を用いてイノシシの行動を調査した。

2.3. 結果

(1) 野生動物における放射性核種の動態調査

ア 野生動物における放射性核種濃度の測定
イノシシとツキノワグマの筋肉に含まれるセシウム-137濃度の年次変化を調べたところ、イノシシでは個体間のばらつきが大きく、明瞭な傾向が認められなかったが、ツキノワグマでは減少傾向が見られるなど、野生動物の種により異なる傾向を示した(図1)。鳥類においても、ヤマドリの方がキジよりも筋肉に含まれるセシウム-137濃度が高いなど、種により異なる傾向が確認された。また、セシウム-137土壌沈着量の同じ場所で捕獲したイノシシとツキノワグマを比較した場合、イノシシの方が筋肉に含まれるセシウム-137濃度が高い傾向が認められた。さらに、両者には季節変動が認められた。

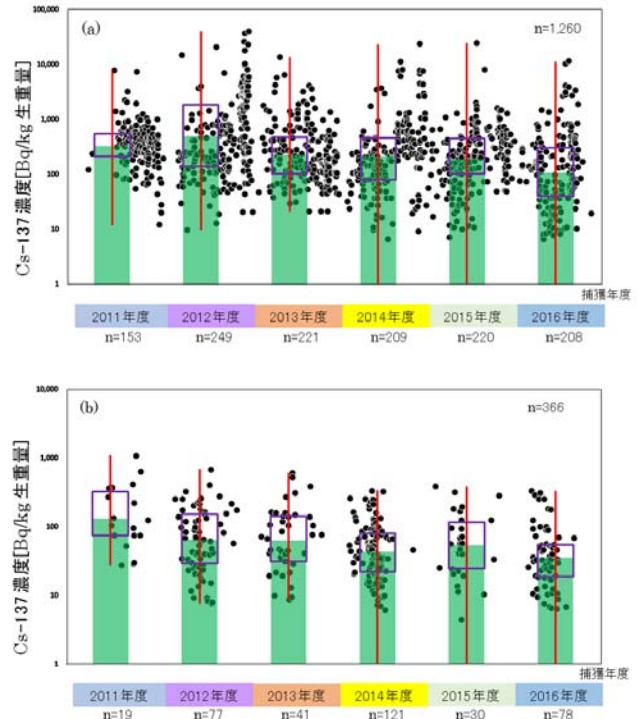


図1 (a)イノシシ及び(b)ツキノワグマの筋肉に含まれるセシウム-137濃度の年次変化(期間:2011年5月~2017年3月)

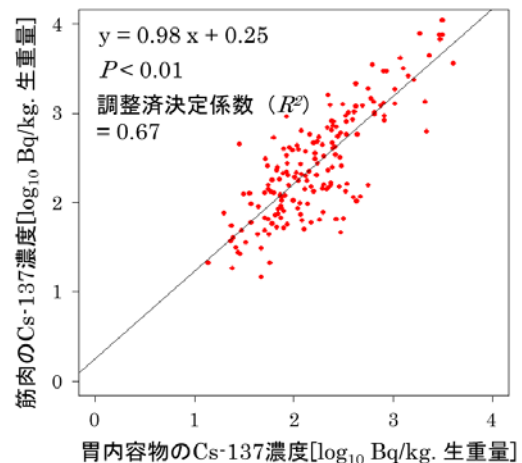


図2 イノシシの胃内容物と筋肉に含まれるセシウム-137濃度の関係

イ 環境中から野生動物への放射性核種の移行

イノシシの胃内容物と筋肉に含まれるセシウム-137 濃度の関係を調べたところ、胃内容物に含まれるセシウム-137 濃度が高い個体ほど筋肉に含まれるセシウム-137 濃度が高く、食物や土壌といった摂食物中のセシウム-137 の影響を強く受けていることが確認された(図 2)。

(2) 野生動物の行動圏調査

GPS 首輪を用いてイノシシの行動圏を調査したところ、避難指示区域外のイノシシに比べて、人的圧力が弱い避難指示区域内に生息するイノシシの方が行動圏は広い傾向が見られた(図 3)。

11~12 月(冬季)と 1~2 月(繁殖期)に 1 ヶ月以上データを取得できた 8 個体について比較すると、サンプル数は少ないが避難指示区域外より避難指示区域内の方が行動圏は大きい傾向が見られた(図 4)。また、各個体の行動圏内の土地利用をしてみると、避難指示区域内の個体では農地が占める面積が多くなり、農地に行動圏を広げる傾向が見られた(図 5)。

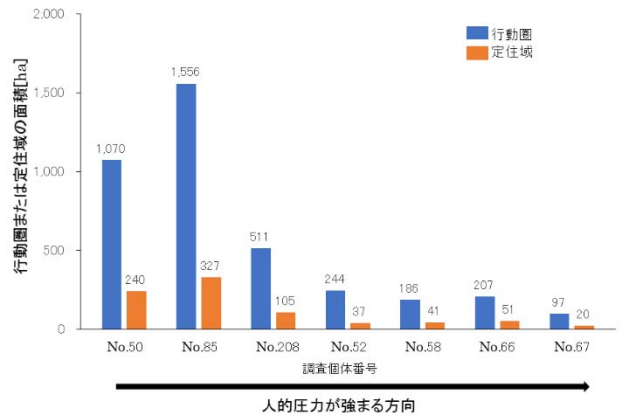


図 3 行動圏と定住域の面積の比較

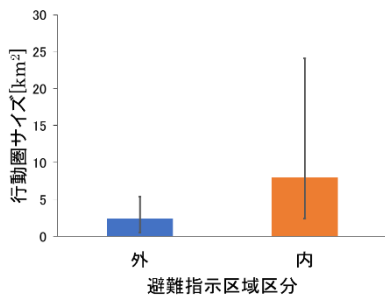


図 4 避難指示区域内外におけるイノシシの行動圏サイズの平均(エラーバーは最小値と最大値を示す)

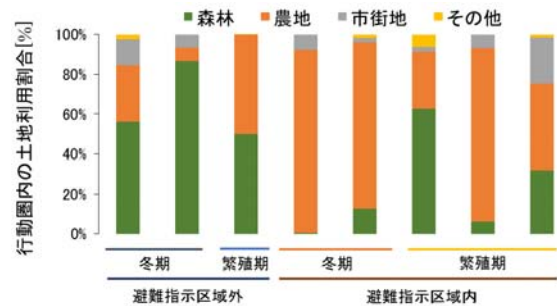


図 5 避難指示区域内外におけるイノシシの行動圏内の土地利用割合(各バーは個体ごとの値を示す)

2.4. まとめ

- (1) イノシシ及びツキノワグマの筋肉に含まれるセシウム-137 の濃度を比較した場合、イノシシの方が高いなど、種により異なる傾向を示した。
- (2) イノシシの筋肉に含まれるセシウム-137 の濃度は、食物の影響を強く受けていることが確認された。また、パターンは異なるが、イノシシもツキノワグマも冬季に筋肉に含まれるセシウム-137 の濃度が高くなる季節変動が認められた。
- (3) 避難指示区域外のイノシシに比べて、避難指示区域内に生息するイノシシは行動圏が広く、また、農地にシフトする傾向が見られた。

現在、イノシシの筋肉に含まれるセシウム-137 濃度が高い原因を究明するため、ツキノワグマ等と比較しながら、カメラや胃内容物の DNA 分析による詳細な食性等について調べている。今後、イノシシ等の筋肉に含まれる放射性セシウム濃度の推移を継続してモニタリングし、今後の傾向を予測することが必要と考える。

3. FIP3 河川・湖沼等における放射性物質対策

3.1. 目的

東京電力㈱福島第一原子力発電所の事故による放射性セシウムの拡散によって、河川・湖沼等の利用や管理に障害および不安が生じているため、その対策を既往の知見と実地調査により考察した。

3.2. 実施内容

- (1) 本県に適用可能と考えられる放射性セシウム対策の抽出
- (2) 河畔の除染試験とその効果の持続性の確認
- (3) 河川公園の汚染状況の調査と対策法の検討
- (4) 水環境に対する課題の抽出とその傾向の調査

3.3. 結果

- (1) 本県に適用可能と考えられる放射性セシウム対策の抽出

課題	関連する媒体	対策
飲用による内部被ばく	河川・湖沼	水源の切り替え
灌漑水からの農作物への移行 と農作業時の外部被ばく	河川・湖沼	汚濁防止膜を用いた土砂流入の軽減 ダムによる堆砂機能の活用
	ため池	汚濁防止膜を用いた土砂の流出抑制、底質除染
	作物	吸収抑制のためのカリウム施肥
水産物摂取による内部被ばく	河川・湖沼	出荷規制 カリウムの投入（閉鎖性湖沼に限る）
水辺利用による外部被ばく （公園、道路、居住など）	河川・湖沼	利用の制限、露出土壤の除染 河床の堆砂除去により、河畔への土砂堆積を軽減 堤防設置による氾濫の制御
	ため池（水抜時）	利用の制限、露出土壤の除染・覆土
全課題に共通		発生源の除染や土砂流出防止 利用への不安に対するリスクコミュニケーション

- (2) 河畔の除染試験とその効果の持続性の確認

住宅地や農地と異なり、放射性セシウムを含む土砂が部分的に厚く堆積している河畔では、その分布に応じた堆積物除去が有効であることが示された。除染後の洪水による再汚染は現状軽微であった。しかし、植物群落の回復などの条件次第では再汚染が生じる可能性があるため、今後その対策方法を検討する必要がある。

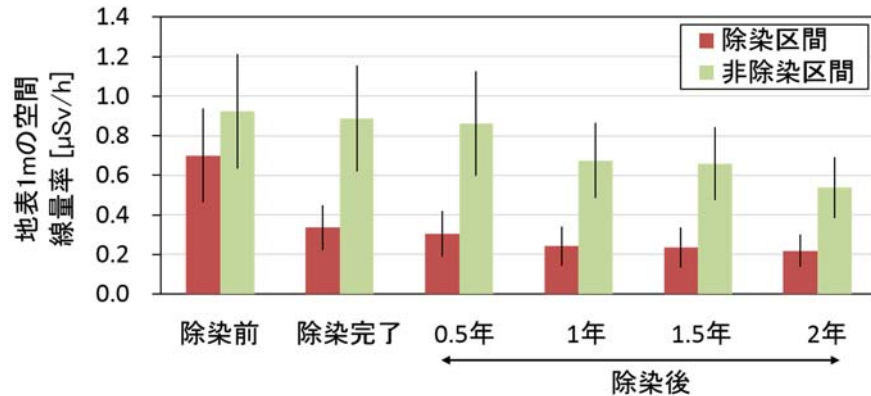


図1 除染前から除染2年後までの地表1mの空間線量率分布
(阿武隈川水系上小国川)

(3) 河川公園の汚染状況調査と対策法の検討

上流域の汚染が著しい浜通り地方の主要河川の1つ、新田川の河川公園を調査した結果、河畔では単位面積当たりの放射性セシウム量が周囲より10倍近く多く、空間線量率も2~3倍高い値が示された。しかし、大規模な洪水によって、浸食と放射性セシウム濃度の低い土砂の堆積が生じ、空間線量率は大きく減少した。公園の利用に伴う追加外部被ばく線量は年間0.1mSv未満と見積もられたことから、現状のままでも利用に問題はないと考えられた。

(4) 水環境に対する課題の抽出とその傾向の調査

原発事故後、福島県が水環境に対して抱える課題の抽出とその傾向を調査した。事故後5年を経過した中で、福島県の行政機関における水環境に関して抱えている放射性物質などによる課題は、「事故前に行っていた活動の支障」、「放射性物質による将来的な影響」、「事故以降の対策の継続・維持」であることが分かった。また、福島県民の水や大気環境への安全観の回復には地域差があり、会津に比べて、中通り、浜通りで回復が遅い傾向にあった。また、放射線リスク認知との関連性が見られることが分かった。

3.4. まとめ

水利用に関わる放射性セシウム対策を目的別に整理し、実施例の少ない河川について外部被ばく低減を目的とした除染試験を行った。公園の汚染状況と併せて考えると、対策方針は放射性セシウムの空間分布と時間変化、被ばく線量、利用者が不安を抱いている点などを総合的に検証した上で判断することが望ましい。

4. FIP4 GPS 歩行サーベイによる環境マッピング技術の開発

4.1. 目的

福島県では、東京電力(株)福島第一原子力発電所の事故後の県内の空間放射線量率（以下「線量率」という。）の把握のため、様々な手法で線量率測定を実施し、ホームページなどで情報提供を行っている。

しかし、住宅地周辺の路地、公園、森林等では定点測定や走行サーベイの実施が難しいため、これらのモニタリングを補完する目的で GPS 歩行サーベイ（以下「歩行サーベイ」という。）による環境マッピング技術の開発を行った。

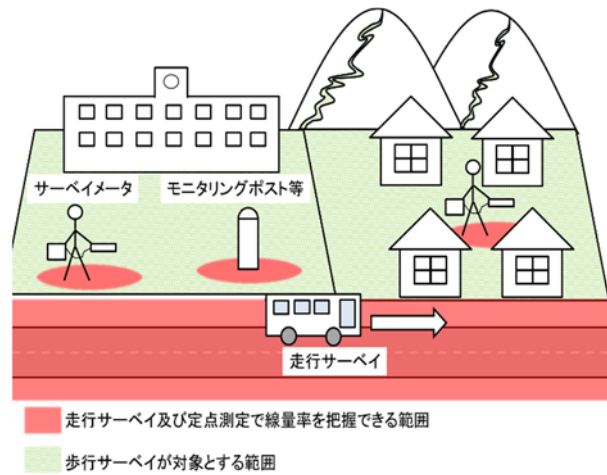


図1 歩行サーベイの測定範囲

4.2. 実施内容

(1) 機器等の整備

歩行サーベイには京都大学が開発した KURAMA-II を利用した。KURAMA-II は放射線の検出器及び GPS から得られたデータを組み合わせることにより、線量率のマッピングを行うシステムである。

ここでは高精度の GPS を搭載し、機材をバックパックに収納するなど、より歩行サーベイに適した構成とした。



写真1 歩行サーベイ風景

(2) 歩行サーベイに必要なパラメータの収集

歩行サーベイは、測定者自身による遮へい等により、方向によって放射線源からの寄与が異なるため、方向特性の確認を行った。

また、サーベイメータとの比較試験による補正係数の決定のため、トレーサビリティのある校正を実施した NaI (Tl) サーベイメータによる 1m 高さでの線量率を最も確からしい値として、歩行サーベイの測定値と比較した。

4.3. 結果

方向特性の確認の結果、方向特性による歩行サーベイの測定値への影響は小さいと考えられた。また、NaI (Tl) サーベイメータとの比較では毎時 $1\mu\text{Sv}$ を境として検出器を低線量率用と高線量率用で使い分ける必要があることが分かった。

このことを踏まえ、補正係数については低線量率用検出器を用いる場合は 1.3、高線量率用検

出器を用いる場合は 1.1 とした。

4.4. まとめ

2015 年度までに歩行サーベイの開発は一定の成果が得られ、歩行サーベイでの線量率測定が可能となった。

また、2016 年度からは、市町村等の求めに応じて、歩行サーベイを実施、又は貸し出しするなどして活用している。

5. FIP5 一般廃棄物焼却施設における放射性物質を含む廃棄物の適正な処理の検討

5.1. 目的

焼却灰の安全かつ適正な処分のため、焼却灰（主灰・飛灰）への放射性セシウムの移行挙動を把握し、これを制御する方法及び焼却灰中の放射性セシウムを除去又は難溶化する技術の有効性を、稼働中の焼却施設における実証試験等により確認した。

また、一般廃棄物焼却施設から発生するバグフィルター廃ろ布と一般廃棄物との混焼を行った際の放射性セシウムの主灰/飛灰間の分配挙動や焼却設備・環境への影響を、実証試験により確認した。

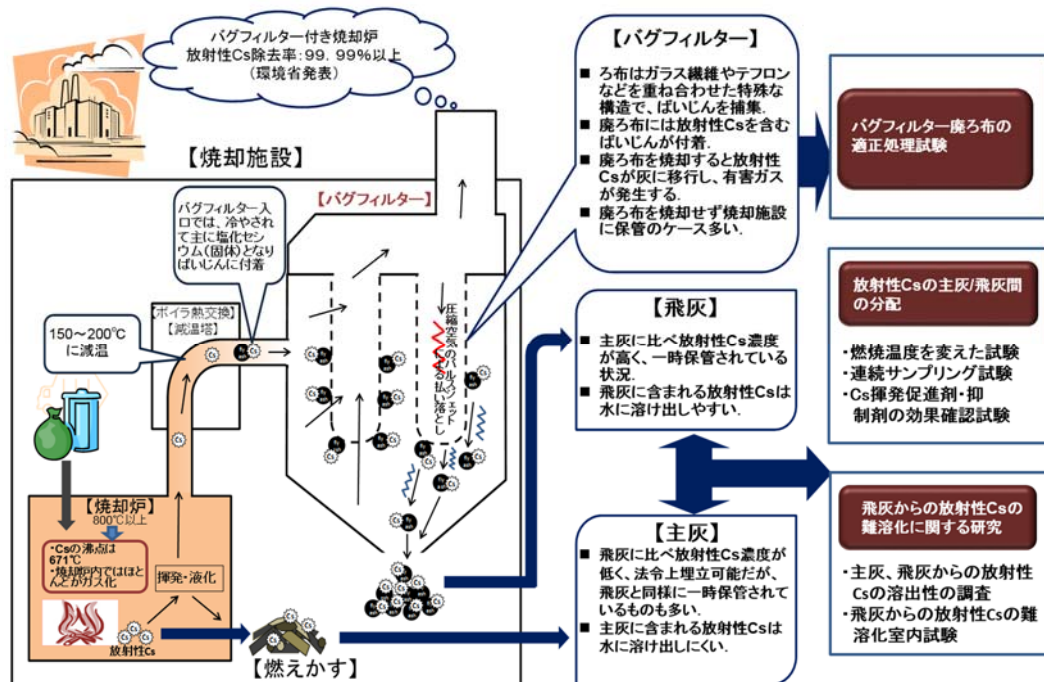


図1 廃棄物焼却過程と試験研究の課題

5.2. 実施内容

(1) 放射性セシウムの主灰/飛灰間の分配

ア 燃焼温度を変えた試験

燃焼室出口温度を50°C程度上下させたときの主灰、飛灰への放射性セシウムの分配を通常時と比較し、温度変化が移行挙動に与える影響を調査した。

イ 連続サンプリング試験

通常運転時主灰、飛灰を継続的に採取し、燃焼温度と放射性セシウムの主灰、飛灰への移行挙動を調査した。

ウ セシウム揮発促進剤・抑制剤の効果確認試験

セシウム揮発促進剤（消石灰）、抑制剤（ベントナイト）を焼却施設への一般廃棄物投入時に添加し、その効果について調査した。

(2) バグフィルター廃ろ布の適正処理試験

一般廃棄物焼却施設について、ろ布の素材が異なる2施設において、廃ろ布の投入割合、

投入時間間隔を変えた一般廃棄物との混焼試験を実施し、燃焼状況への影響等を調査した。

(3) 飛灰からの放射性セシウムの難溶化に関する研究

ア 主灰、飛灰からの放射性セシウムの溶出特性の調査

県内の一般廃棄物焼却施設の主灰や飛灰について、溶出試験を実施し、放射性セシウムの溶出特性を調査した。

イ 飛灰からの放射性セシウムの難溶化室内試験

ゼオライト等に期待される飛灰からの放射性セシウムの溶出を抑制する効果について検討した。

5.3. 結果

(1) 放射性セシウムの主灰/飛灰間の分配

揮発促進剤（消石灰）の添加によって、放射性セシウムの飛灰への移行がみられたが、再現性は確認できなかった。燃焼温度と放射性セシウムの挙動については、明瞭な関係を確認できなかった。

(2) バグフィルター廃ろ布の適正処理試験

混焼割合を適切に設定すれば、一般廃棄物焼却施設においてバグフィルター廃ろ布を混焼しても、排ガス中の有害物質や施設、ごみの燃焼状況への影響がないことを確認した。

(3) 飛灰からの放射性セシウムの難溶化に関する研究

ア 主灰、飛灰からの放射性セシウムの溶出特性の調査

福島県内の 15 の一般廃棄物焼却施設から採取した主灰や飛灰について、溶出試験を実施し、主灰からの溶出は限られている（1%未満～16%）が飛灰からは極めて高い割合（35%～94%）で溶出すること等を確認した。

イ 飛灰からの放射性セシウムの難溶化室内試験

主灰や飛灰にゼオライト、ベントナイト、下水汚泥を添加、混合し、放射性セシウムの溶出率の変化を調査した。ゼオライトの添加により顕著な放射性セシウムの難溶化（溶出率 79.1%→4.3%）の効果を確認した。

5.4. まとめ

燃焼温度の変化や薬剤の添加と、放射性セシウムの飛灰への移行挙動との関係性については、その再現性が確認できないなどの課題が明らかになった。今後、ごみ質の違いが添加薬剤のセシウム分配効果に及ぼす影響を把握するための室内試験を行う。

混焼割合を適切に設定することで、一般廃棄物焼却施設において、バグフィルター廃ろ布を混焼しても燃焼状況等への影響がないことを確認した。

飛灰からの放射性セシウムの難溶化の材料として、ゼオライトの添加混合が有効であることを確認した。今後、より効果的な添加混合の方法や、より難溶化能力の高い材料の探索を行う。

IAEA から受けた主な支援の内容

1. FIP1 河川等における放射性核種の動態調査

- ・河川に堆積する放射性核種の定量的な予測のためのTODAM モデルの提供。
- ・チェルノブイリやマヤック（1957年に爆発事故を起こした旧ソ連の核技術施設）等での先行研究を基に、観測地点の選定や観測項目等に関する技術指導や各観測地点でのモニタリング継続の重要性等に関する指摘。
- ・県が取得した観測データによる TODAM モデルの運用について、観測地点ごとのKd値（固液分配係数）や堆積物の粒径分布、河川水中のイオン濃度の測定が重要であること等の助言。
- ・河川における放射性物質の動態に関する研究を今後進める上で、広域モニタリングとモデルを組み合わせる有効性や小さな湖沼を研究対象に加える重要性に関する助言。
- ・除染の影響評価及び人為的な効果を除いたデータ解析を行う必要性に関する助言。
- ・ウクライナやドイツ、スロバキア等における、放射性核種のモニタリングに関する現地視察の実施。

2. FIP2 野生動物における放射性核種の動態調査

- ・チェルノブイリ原発事故によるヨーロッパ各地域のイノシシ、シカ等の野生動物への放射性核種の移行状況、サバンナリバー生態学研究所におけるアメリカバン、アメリカオシなどの鳥類の体内中の放射性セシウム濃度の変化など、野生動物と放射性核種の関係について記載された海外文献の提供。
- ・放射性セシウムの生体濃縮に関する最新の研究成果や生体内の放射性セシウム濃度の測定技術に関する知見の提供。
- ・ヨーロッパにおいては、イノシシの筋肉に含まれる放射性セシウム濃度が他の野生動物より高い原因はキノコ（Deer Truffle）の採食が他の野生動物より多いためとされている。そのため、福島県においてもイノシシの筋肉に含まれる放射セシウム濃度が他の野生動物より高い原因はキノコの採食である可能性など、調査結果の考察、データ解析の方法等に関する助言。
- ・チェルノブイリ原発周辺地域における野生動物個体群へのチェルノブイリ原発事故の影響、オオカミなどの野生動物の生態及びそれらを明らかにする調査方法に関する知見の提供。

3. FIP3 河川・湖沼等における放射性物質対策

- ・諸外国における河川・湖沼等中の放射性物質の環境動態に関する知見の提供。
- ・諸外国における河川・湖沼等中の放射性物質の除去等の環境修復措置事例に関する情報提供（チェルノブイリ原発近辺の高濃度に汚染された氾濫原からの放射性物質の流入対策、キエフ貯水池への放射性物質の流入抑制対策など）。
- ・チェルノブイリ原発事故地への現地視察の実施。
- ・河川敷を対象とした除染の実証試験に関する助言（地点の選定、事前シミュレーションの必要性、懸濁物質の粒度、堆積への植物繁茂の影響など）。
- ・河川公園における放射性セシウム対策の研究への助言（出水履歴の把握、再汚染を防ぐための浚渫や堤防の造成など）。
- ・水環境に対して福島県民が抱える不安や課題の要因に関する研究への助言（年齢、性別への

着目など)。

- ・成果物（論文等）の作成補助。

4. FIP4 GPS 歩行サーベイによる環境マッピング技術の開発

- ・局所での放射線量マッピングについて、アメリカ合衆国環境保護庁や同国のローレンス・バークレー国立研究所などの機関で行われている取組みに関する知見の提供。
- ・GIS（地理情報システム）を用いた歩行サーベイの内挿補間の手法としては KRIGING（地球統計学的手法）より IDW（Inverse Distance Weighting（逆距離加重法））の方が適切であること、建築物などの遮蔽の効果も考慮に入れる必要があること等の助言。
- ・歩行サーベイの測定条件は測定地点の状況により判断し、必ずしも画一的な測定条件を設定する必要はないこと等の助言。

5. FIP5 一般廃棄物焼却施設における放射性物質を含む廃棄物の適正な処理の検討

- ・諸外国における飛灰の処理方法（超圧縮、固形化等）、低レベル放射性廃棄物の処理方法（焼却、金属の熔融処理、プラズマ熔融）及びごみ中の放射性物質濃度測定器に関する知見の提供。
- ・一般廃棄物の焼却について、放射性セシウム収支の観点からの検討の必要性、実証試験の実データとモデル解析の結果との比較解析の重要性及び試験条件の同一化並びにごみ質把握の必要性等に関する技術的な助言。
- ・バグフィルター（テファイヤー®製）を混焼する際に発生するフッ化水素対策の重要性についての助言。
- ・施設労働者に対する安全性（被ばく防護、管理等）の確認の必要性に関する助言。
- ・飛灰からの放射性セシウムの溶出率を低減することは、飛灰の埋立処分の安全性を高めるという点で重要であるとの助言。