

[第3グループ]
「人工システム内での移行と制御、
環境回復」

WG3 大迫政浩(国立環境研究所)

グループへの参加者リスト、 関連する主要機関、学会名リスト

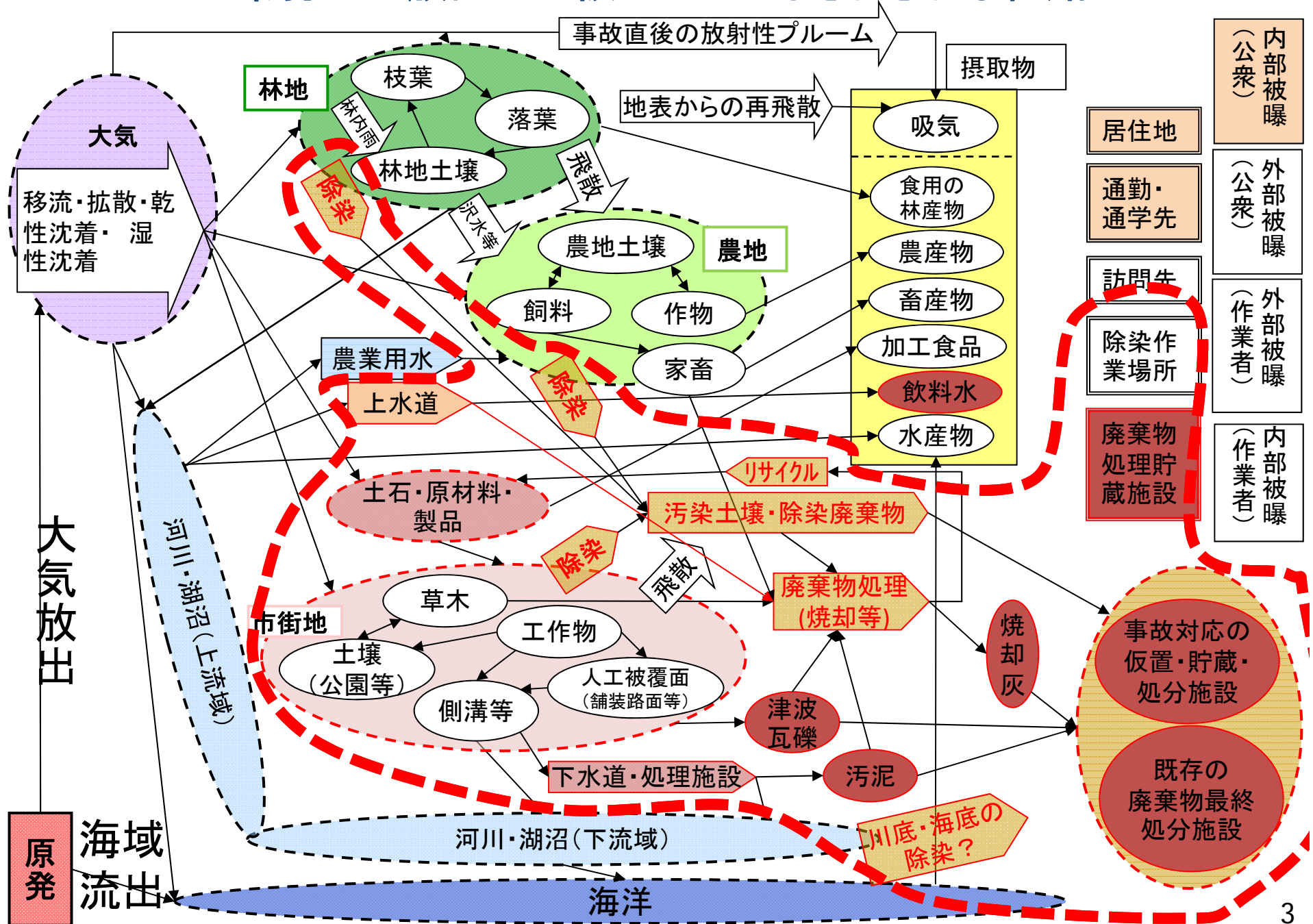
メンバー

- 佐藤 努(北海道大学・環境地質学)
- 大迫政浩(国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター)
- 保高徹生(産業技術総合研究所・地圏環境リスク研究グループ)
- 山田一夫(国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター)
- 倉持秀敏(国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター)
- 横尾善之(福島大学・共生システム理工学類)
- 細見正明(東京農工大学大学院・工学研究院)
- 大野浩一(国立保健医療科学院・生活環境研究部)
- 米田 稔(京都大学・都市環境工学)
- 矢板 毅(日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門)
- 大越 実(日本原子力研究開発機構・福島技術本部)
- 武部慎一(日本原子力研究開発機構・バックエンド推進室)
- 井上 正(電力中央研究所)
- 山田裕久(物質・材料研究機構・環境再生材料ユニット)
- 万福裕造(国際農林水産業研究センター)

学会名リスト



土木学会、日本粘土学会、地盤工学会、環境放射能除染学会、日本原子力学会、日本水環境学会、廃棄物資源循環学会、日本リスク研究学会

環境への放出から被ばくに至るさまざまな経路



領域間の放射性物質移行研究(現在までの主な研究主体) IRSNの枠組みをもとに作成

時計回りに
関りを記述

 発生源	放出・拡散 原子力機構 国環研、気象研、電中研、JAMSTEC、大学	汚染水の浸透 原子力機構	放出・拡散 原子力機構 JAMSTEC 気象研、電中研	not important	not important	not important	not important	作業員の被曝 放医研
not important	大気 	沈着	沈着 原子力機構 JAMSTEC 気象研、電中研	沈着 文科省(規制庁) 農研機構、農環研 原子力機構 大学、福島県	沈着 文科省(規制庁) 農研機構、農環研 森林総研 大学(筑波大他) 福島県	沈着 文科省(規制庁)	沈着 農環研 農研機構 福島県	呼吸・外被ばく 放医研 国環研
not important	再浮遊(飛散)	河川・湖沼・地下水 	漏洩・移行・蓄積 地下水漏洩 東京電力 原子力機構 大学(筑波大他) 環境省	灌漑 農研機構 農環研 大学(筑波大他)	not important	not important	移行・蓄積 福島県 放医研 国立保健医療科学院 大学(筑波大他)	飲用・外被ばく (含レジャー&作業環境) 福島県、文科省(規制庁) 放医研
not important	再浮遊(飛散)	汽水・海水混入 文科省(規制庁) 環境省	海洋 	not important	not important	not important	移行・蓄積 水産研 福島県 放医研 大学(海洋大他)	呼吸・外被ばく・飲用 (含レジャー&作業環境) 放医研
not important	再浮遊 (飛散、燃焼、花粉) 原子力機構 森林総研 文科省(規制庁) 気象研、大学	侵食・流出 文科省(規制庁) 大学(筑波大他) 環境省、 原子力機構 国環研、農環研	not important	陸上環境 (動・植物・農地・牧草地) 	not important	除染・廃棄 環境省 国環研	移行・蓄積 農研機構、農環研 福島県 大学(筑波大他) 放医研	呼吸・外被ばく (含レジャー&作業環境) 放医研 国環研
not important	再浮遊 (飛散、燃焼、花粉) 文科省(規制庁) 大学(茨城大・東工大等)	侵食・流出 文科省(規制庁) 大学(筑波大他)、 国環研	not important	Not important	陸上環境 (森林) 	除染・廃棄 国環研 環境省	移行・蓄積 大学(筑波大他) 森林総研、福島県 放医研	呼吸・外被ばく (レジャー、作業環境) 放医研 国環研
not important	再浮遊 (飛散、燃焼) 国環研	流出 環境省	流出 環境省	not important	not important	陸上環境 (市街地、処理施設、 上下水道等のインフラ) 	not important	呼吸・外被ばく (含通勤・通学先)
not important	再浮遊(燃焼) 国環研	not important	not important	給餌・廃棄 農環研 福島県 国環研	not important	廃棄 国環研	食品・餌・飲料水 	食事 放医研 国環研 国立保健医療科学院 国立医薬品食品衛生 研究所
not important	not important	not important	not important	not important	not important	not important	not important	人の被ばく 

10大イシューリスト(解決されたものを含む)

1.プロセス内現象の科学的な解明

- 1.土壌/廃棄物等の放射性Csの存在形態/吸・脱着/溶出の解明:
- 2.可燃物の焼却減容化プロセスにおける挙動と存在形態の解明
- 3.長期隔離からみた廃棄物等の特性評価と施設機能要件
- 4.人工システム内のサブスタンスフローと環境リスクの評価

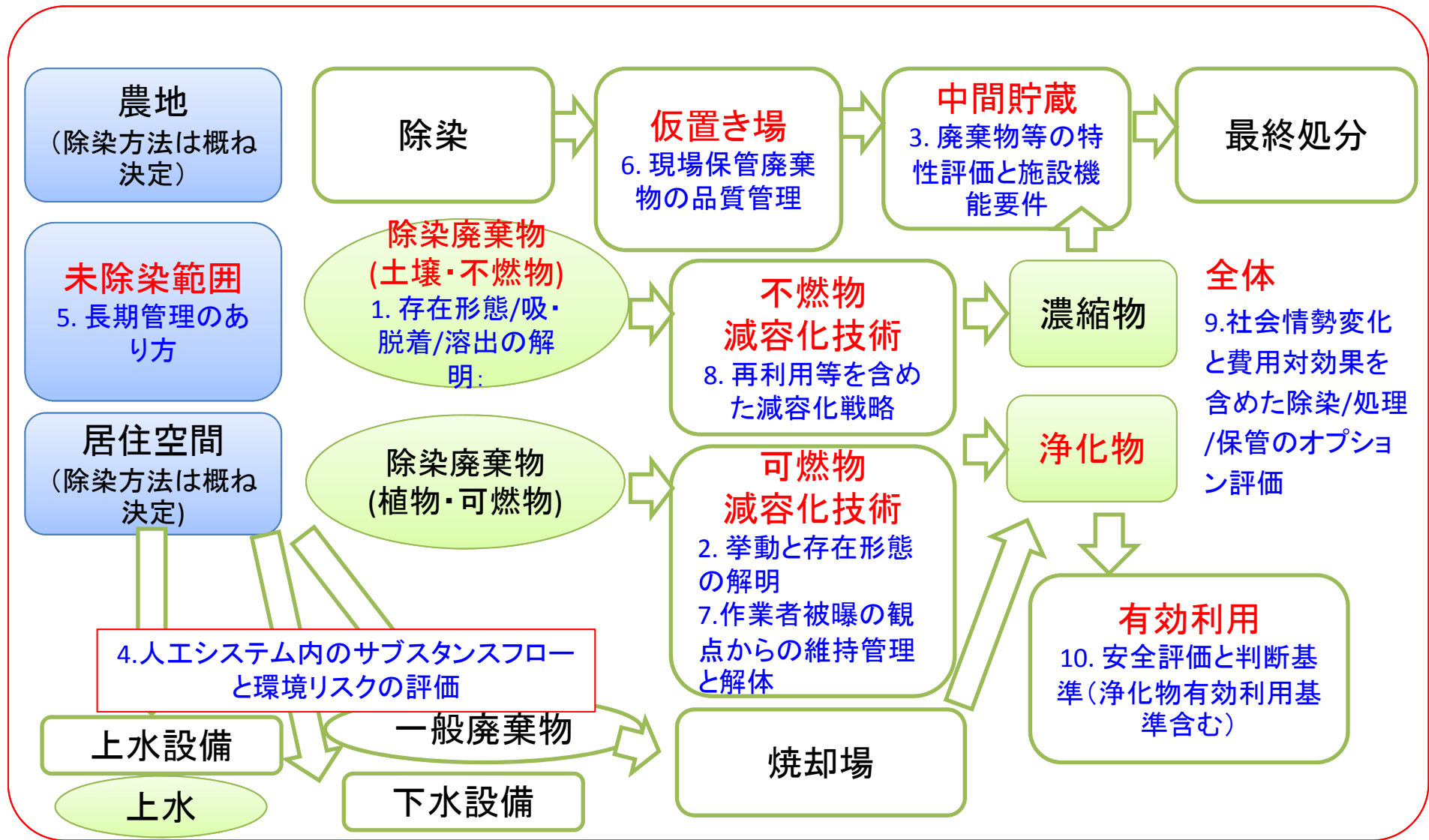
2.現実問題解決のための技術/プロセス

- 5.未除染部(森林、河床、ため池等)の長期管理のあり方
- 6.除染廃棄物の中間貯蔵に向けた仮置き・現場保管廃棄物の品質管理
- 7.作業員被曝の観点からの焼却減容化施設の維持管理と解体
- 8.除去土壌やその他不燃系廃棄物の再利用等を含めた減容化戦略

3.社会としての技術/管理システムの選択

- 9.社会情勢変化と費用対効果を含めた除染/処理/保管のオプション評価
- 10.除去土壌/廃棄物等処理対策の安全評価と判断基準(浄化物有効利用基準含む)

10大イシューリスト(人工システム内の関連図)

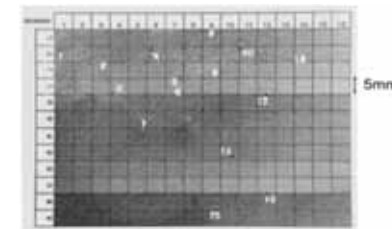
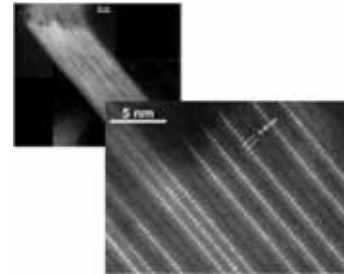


Issue 1. 土壌/廃棄物等の放射性Csの存在形態/吸・脱着/溶出の解明

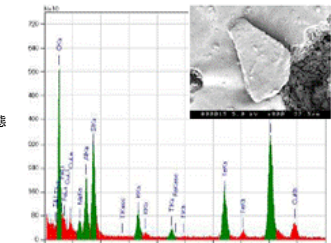
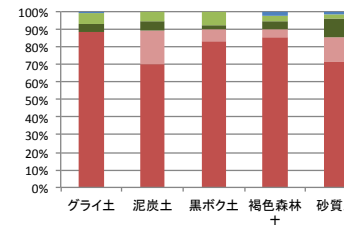
土壌中/廃棄物等の放射性Csの存在形態に関する知見は多くの情報が蓄積しつつある。しかしながら、今後の特殊環境における長期保管時の安定性/減容化技術の高度化の観点からも、さらなる知見の収集が必要である。

これまでの知見

- 土壌中の細粒分に吸着しやすいものの、粗粒分においても吸着している形態もある。
- 放射性Csの吸着している粒子の数は、非常に僅か
- 放射性Csは、細粒分である粘土鉱物に強固に吸着
- 特に黒雲母の風化物であるバーミキュライトが重要
- セシウムは、細粒分である粘土鉱物に強固に吸着
- セシウムの土壌への吸着形態は、非可逆的が多い
- 土壌中の放射性Csの水への溶出は、通常的环境下ではほとんど認められない。一方、特殊な環境(高濃度NH₄⁺共存下)では溶出が促進されるケースも有る。
- 飛灰中の放射性Csの溶出率は極めて高いが、主灰の溶出率は低い。



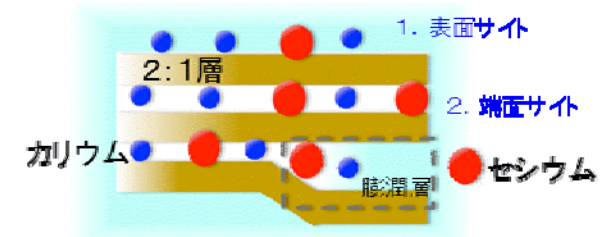
画像解析したIP
* 約20,000粒以上の土壌中放射性セシウムを捕捉しているのは“15粒”。



存在形態の分析と推定

今後必要な知見

- 多種多様な土壌中Csの存在形態の解明
- 減容化に際しての科学的裏付けとしての重要性
- 環境中の長期安定性評価においては、複雑系としての評価
- 従来型の吸着平衡モデルから選択的吸着モデルへの移行
- 焼却処理に伴う主灰等のCsの存在形態の解明
- 中間貯蔵施設を想定した条件での安定性の解明
- 他の長期安定核種の溶出影響の知見の蓄積が必要



存在形態と吸脱着のメカニズム

参考情報源: NIMS、JAEA、国立環境研究所、産業技術総合研究所、環境省

Issue2.可燃物の焼却減容化プロセスにおける挙動と存在形態の解明

焼却処理の安全性に対する住民の不安感解消には、焼却処理時のCs挙動の科学的な知見が必要
大量に発生する可燃性除染廃棄物を減容安定化に向け、放射能レベル、性状等に応じた焼却処理技術の確立が必要

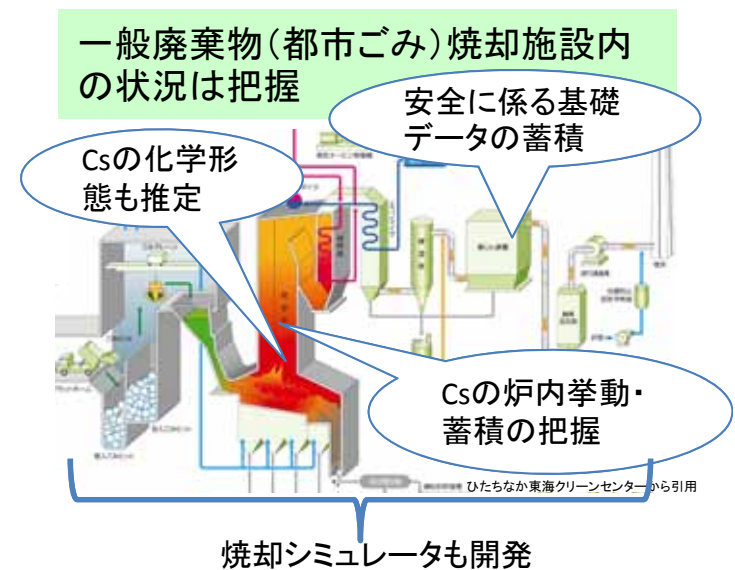
これまでの知見

- バグフィルタによる排ガス処理により、排ガス中のCsは適切に除去されており、焼却処理に伴う周辺環境への影響は小さく、焼却処理の安全性が確保されていることを確認
- 焼却処理時のCsの挙動、焼却残さ中のCsの化学形態、焼却残さからのCsの溶出性等に影響を与える主要因子に関する知見を把握
- JAEA、国環研で燃焼処理時のCs挙動を評価するための焼却シミュレータを開発
- 焼却技術以外にも熔融、熱分解ガス等の減容化技術を開発中

今後必要な知見

- 除染廃棄物の焼却におけるCsの挙動と制御性、更に、安定運転阻害因子の抽出と課題対応(クリンカ発生etc)
- 高濃度汚染廃棄物の安全な処理のための運転条件、特に、仮設焼却施設の特性の把握、排ガス処理の安全性の確認
- 放射能濃度の高い焼却残さについては、安定化のための処理方法、処分方法について、更なる検討が必要

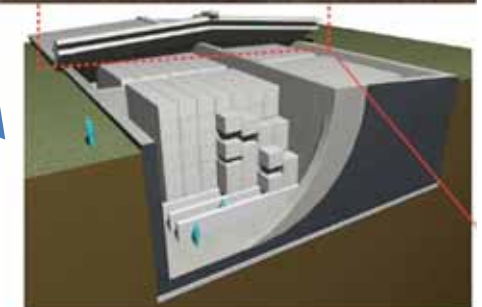
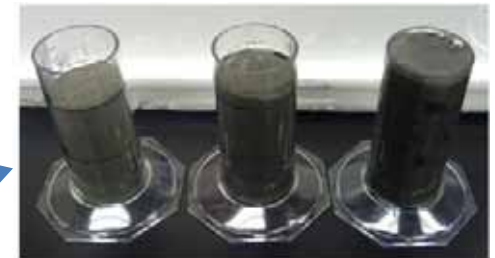
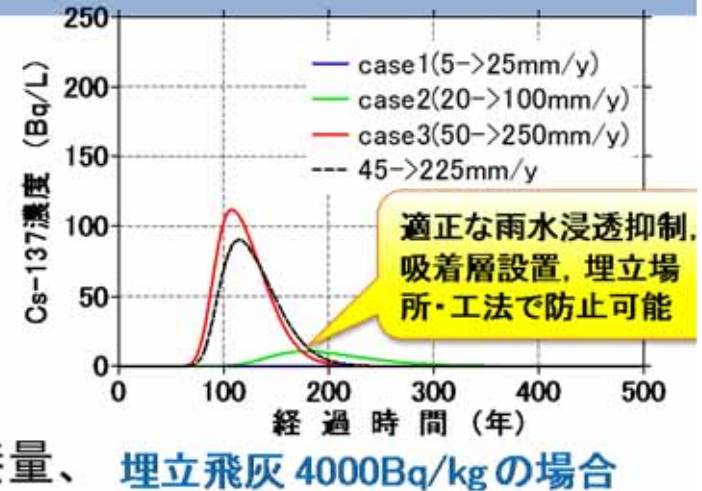
参考情報源： 倉持、安全工学(2013), 他



Issue3. 長期隔離からみた廃棄物等の特性評価と施設機能要件 — 除去土壌/焼却灰の安全な処分(放射性Csの漏出制御) —

これまでの知見

- 土壌: Csは強固に吸着し溶出しにくい。
- 焼却灰: 主灰—Cs溶出限定的、
飛灰—多くが溶出＝安全な処分がより複雑
- 中間貯蔵施設および管理型処分場の設計(Cs溶出)
 - 可溶性成分の土壌の分配係数への影響
 - 土壌タイプI,II、管理型処分場の安全性評価: 構造、涵養量、土壌吸着、灰の特性(可溶性分量、放射性Csの量と溶出率)などを考慮 ⇒排水基準 $^{137}\text{Cs} < 90\text{Bq/L}$ +排水管理
 - セメント固型化の効果(溶出速度低減、不溶化剤)
- 遮断型相当の処分場の設計(指定廃棄物としての飛灰)
 - 飛灰の特性(吸湿・高アルカリ性の可溶性塩多量含有)
 - CaCl_2 によるコンクリートの各種劣化対策必要
 - 考え方: 設計対応事項と漏水事故時マネジメントの区分
 - 対策: ひび割れ制御コンクリートやコンクリート容器の活用



今後の課題

- 処分の安全評価期間の設定: モニタリング期間、放射性を加味した廃止基準(廃掃法考慮)、中間貯蔵30年との整合性
- 焼却灰の特性のばらつき評価
- 実工事を考えたコスト合理性の検討

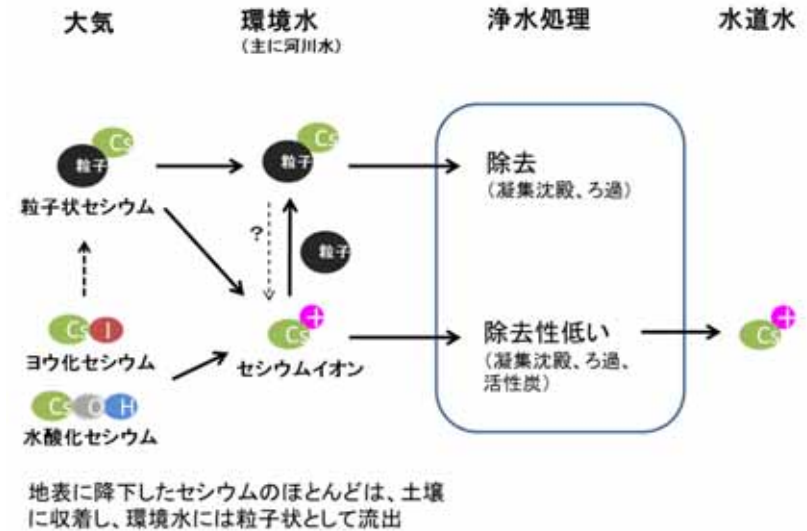
参考情報源: 環境省、国立環境研究所

Issue4: 人工システム内の動態とリスク評価 (G2境界領域)

現状認識: 人の生活や都市活動に伴う放射性Csの移動や蓄積等の動態の解明と将来予測、被ばくリスクの評価による適切な対処策の在り方の議論が必要

これまでの知見

- ・生活エリアでの濃縮挙動やホットスポットの存在の理解と効率的な除染への活用
- ・廃棄物処理や上・下水道システムへの移行特性の明確化、都市インフラへの移行量は全体降下量に対して極めて少ない。
- ・システム内での挙動・除去性能の適切な評価による安全性確認

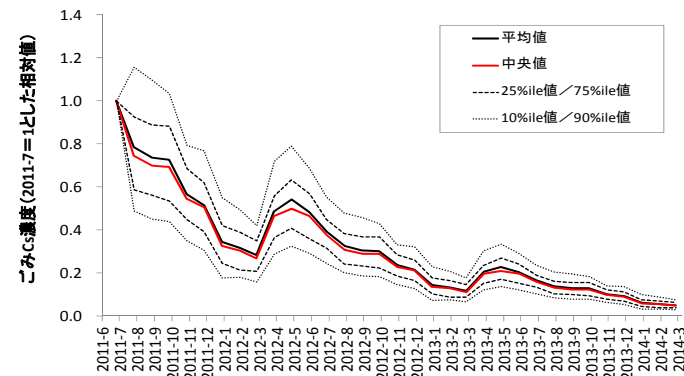


今後の課題

- ・特措法範疇外の廃棄物・リサイクル物の移動と放射性Csのフロー・ストックの把握
- ・将来被ばくリスクの可能性評価と効果的対策立案
- ・人工システムへの移入による再汚染
- ・住民行動特性等を踏まえた被ばく評価手法

参考情報源: 環境省、国交省、厚労省、国立保健医療科学院、国立環境研究所、国土技術政策総合研究所、福島大学等

浄水システム内の放射性Cs除去メカニズム



都市ごみ中の放射性Cs濃度の推移

Issue5.未除染部(森林、河床、ため池等)の長期管理のあり方

森林等の未除染部のアクティブな除染は、現状では放射性物質の拡散防止の観点から効果が低いが、今後は森林作業時を含めて未除染部からの拡散防止等や二次汚染の実態解明と効果的なパッシブ除染法の開発が必要

現存の知見

- 森林からの土砂流出は平均0.1-0.3%/年であり、懸濁態のセシウムは森林にとどまる割合が多い。
- 森林の効果的除染方法は確立されていない。
- 現状の森林除染を行うと、土砂流出を加速し、河床やため池にホットスポットを形成するため、林業再生のための森林管理の際には土砂流出対策が必要不可欠。
- 居住者の線量低減の観点から、林縁部以外の除染効果が低いが、林業従事者/里山利用者への配慮が必要。
- 現状で考えられている森林除染は、期間や費用対効果や土砂流出の観点から、消極的にならざるを得ない。

今後の課題(グループ2と連携)

- 未除染部からの放射性セシウムの拡散防止(固定、捕捉、集積)等の技術の検討・開発
- 森林管理と拡散防止やパッシブ除染の共存のための方策の検討。
- 河床やため池等の二次的にホットスポットとなる場所については、濃度の推定法の確立や、除染の必要性および除染法の検討・開発が必要。

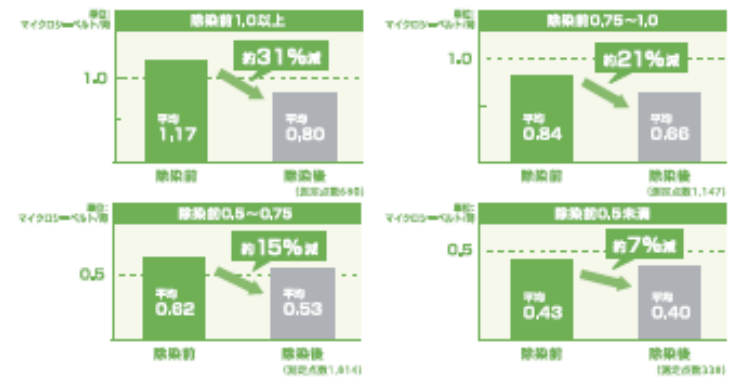
参考: 引用情報

<http://www.maff.go.jp/j/kanbo/joho/saigai/pdf/tyukan.pdf>

<http://www.kakoki.co.jp/news/pdf/p121029.pdf>

http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=20719&hou_id=15731

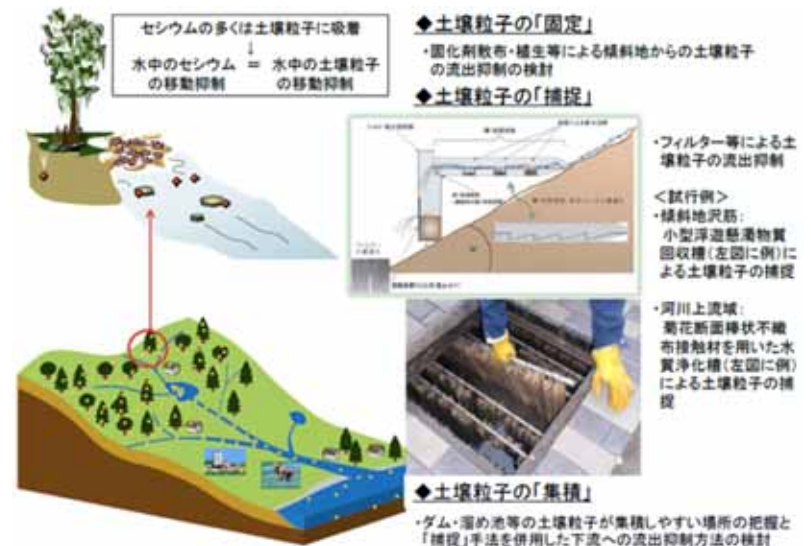
【除染前後の空間線量率】(1m高さ)



※空間線量は、除染作業の前後で測定したものであり、その後の自然減衰などは含まれておりません。
・除染測定期間:平成24年7月25日～平成25年5月23日 ・除染後測定期間:平成24年8月7日～平成25年5月30日

図 森林の除染の効果の一例(環境省HPより引用)

http://josen.env.go.jp/material/pdf/shinrin_20130114.pdf



http://josen.env.go.jp/material/pdf/shinrin_20130114.pdf

<http://josen.env.go.jp/about/efforts/forest.html>

Issue6.除染廃棄物の中間貯蔵に向けた仮置き・現場保管廃棄物の品質管理

【現状認識】

- ❖ 仮置場の設置場所が一様では無いため、排水不良などによるフレコンの浸水、腐食・腐敗が進んでいる。
- ❖ 有機物等を封入したフレコンは液化、ガス化が進み、再運搬の支障となる恐れ。
- ❖ 段積みされたフレコン土壌は、想像以上に圧密固化している。



フレコン内で圧密固化

【現在の知見】

- ❖ 直轄除染区域におけるフレコン内容物/汚染濃度の管理体制の確立
- ❖ 除染工事では有機物の乾燥保管が義務化される見通し
- ❖ 除染により発生する雑草、枝葉(心材も破砕し投入可能)、農作物残渣、牧草、堆肥などを乾燥圧縮し、ペレット化して安定的に保管
- ❖ 粉碎、乾燥圧縮により20～4%まで減容化
- ❖ バイオマス燃料として保管することができ、焼却施設等での助燃剤として利用可能。



有機物を封入したフレコンの液化

【今後の課題】

- ❖ 各地に点在するフレコンの運搬方法/移動経路の確保(中間貯蔵に関する運搬委員会でも議論)。
- ❖ 情報管理: 非直轄の未分類フレコンの内容物と汚染レベルの確認と、直轄除染区域の整合性の確保。
- ❖ フレコン開封技術の確立と、時間経過した汚染物(土壌、液化有機物)を安定保管するための技術開発。
- ❖ 仮置場跡地の現状復旧等。



ペレットのかさ密度は500～700kg/m³

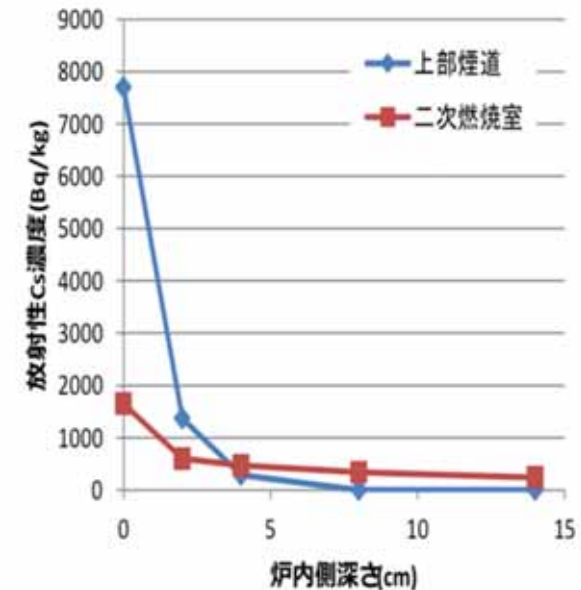
- ・稲わら・雑草類は約1/10に減容化
- ・枝葉は1/5～1/10に減容化
- ・落葉類は約1/20に減容化

Issue7. 作業員被曝の観点からの焼却減容化施設の維持管理と解体

除染廃棄物などの処分に従事する労働者の放射線障害防止対策についてはガイドラインなどが策定されているが、今後も焼却減容化施設等の作業員の安全管理を徹底するとともに、解体時の安全な作業工程を確立していくことが必要である。

これまでの知見

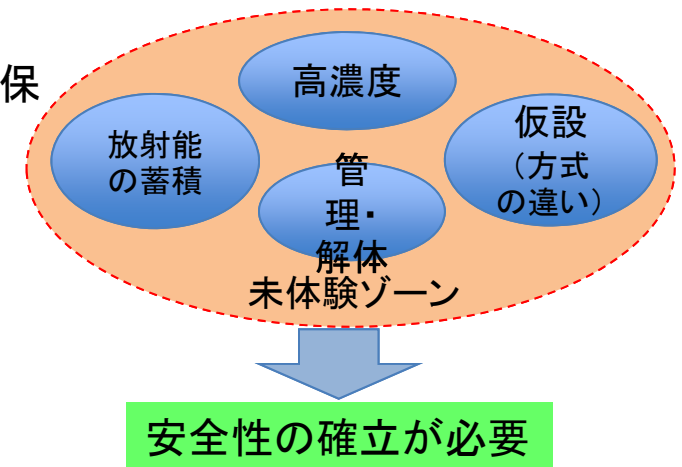
- 炉内の耐火物に放射性Csが蓄積、炉内の空間線量率が高い
- 蓄積形態は様々、耐火物組成や運転温度が影響
- 既存焼却施設内作業員の外部被曝：調査例からは作業場所による顕著な差は見られず、施設外の線量と比べ高くはないと推定されるが、より多くの作業所でのモニタリングが必要。
- 既存焼却施設内作業員の内部被曝：調査例での気中粒子状物質濃度からの試算値では極めて小さいと推定されるが、より多くの作業所でのモニタリングが必要。



炉内耐火物への放射性Csの浸透蓄積

今後必要な知見

- 仮設炉での高濃度汚染廃棄物焼却における作業員の安全性確保
- 耐火物への蓄積挙動の解明とクリーニング法の確立
- 仮設施設での外部被曝・内部被曝量評価
- 解体作業における安全な作業工程の確立と被曝量推定
- ヒューマンエラー防止策と安全作業マニュアル策定



参考情報源：倉持、安全工学(2013),
環境研究総合推進費(K122106)報告書(2014)

Issue8.除染土壌やその他不燃系廃棄物の再利用等を含めた減容化戦略

除染土壌や地震・津波で発生した不燃系廃棄物の減容化は、中間貯蔵施設の負荷量低減等の観点から極めて重要。土壌については湿式分級法、熱処理法、酸洗浄法等の技術が考案、実証。これら技術の適用においては、減容化率だけでなく、コスト、期間、浄化土の有効利用可能性、処理後の濃縮物の管理を含めた総合的な視点が必要。不燃系の災害廃棄物については所定のレベル以下のものについては遮蔽等施した上での再利用が考えられている。

これまでの知見

1. 除染土壌

- **湿式分級法**:放射性Cs濃度が高い細粒分を除去し、放射性Cs濃度が低い粗粒分を回収する方法。砂質土には高い減容化率を示すが、細粒分が多い土壌には適用できない。
- **熱処理法**:土壌を1300℃以上の温度にし、放射性Csを気化分離させ、バグフィルター等で回収する方法である。細粒分が多い土壌にも適用可能であり、放射性Cs除去率は高いが、コストが高い等の課題がある。
- **酸洗浄法**:土壌にシュウ酸等の酸、溶離促進剤を添加し、加熱をすることで土壌から放射性Csを分離する方法である。土壌種類により浄化効率が異なること、酸を使用したプラントの安全性確保が必要である。

2. 不燃系廃棄物:地震・津波で発生した不燃系廃棄物の分別・減容化技術は、実績がある技術が多数ある。

今後必要な知見

○除染土壌

- 1)より詳細な技術評価(減容化率・再資源化率・コスト等)
- 2)浄化土壌の有効利用先の確保
(性状、用途、法令、社会受容性)
- 3)濃縮物の性状評価(溶出特性、濃縮率)
- 4)減容化実施地点の検討(仮置き場/中間貯蔵施設)

○不燃性廃棄物

- 1)適用除外線量の明確化
- 2)再利用方策の検討(例えば、防波堤のコアとしての利用等)
- 3)再利用時の放射線影響の評価

以上、夫々について

上記を総合した減容化自体の必要性を含めた議論が必要である。

【課題4】 減容化の適用性・必要性の検討

図 除染土壌の減容化技術の適用課題
(地盤工学会資料より)

Issue 9.社会情勢変化と効果、費用を含めた除染/処理/保管のオプション評価

除染事業は、環境回復が第一目的である。除染効果やコストの実績値だけでなく、面的/個別の評価モデルの開発・適用例も増加した。震災から3年が経過し、社会情勢も変化しつつあるため、帰還等も見据えたオプションの再検討・提示が必要である。

現存の知見

- 除染効果に関する知見は集積され、確実に空間線量率は低減するが、その効率性は除染前の空間線量率や土地利用によって異なる。
- 除染を実施しても、直ちには元の環境に戻らないことは現場での実証やモデルからの推定で確認。
- 除染コストは、複数の試算例(産総研、原子力学会等)が出てきており、仮置き場・中間貯蔵施設のコストが大きいと推定
- 帰還後の市町村の人口・年齢構成は、避難前と大きく異なることが予測

今後の課題

- 現状線量等に応じた、段階的な除染方針・除染方法の改訂
- 除染方針の決定時、再除染の必要性の検討時、減容化の必要性等の検討時において、コストや効果も含めたオプションのトータル評価の実施
- 大規模な環境汚染が生じた際に、迅速な環境回復方法の意思決定が可能となるフレームワークの事前構築

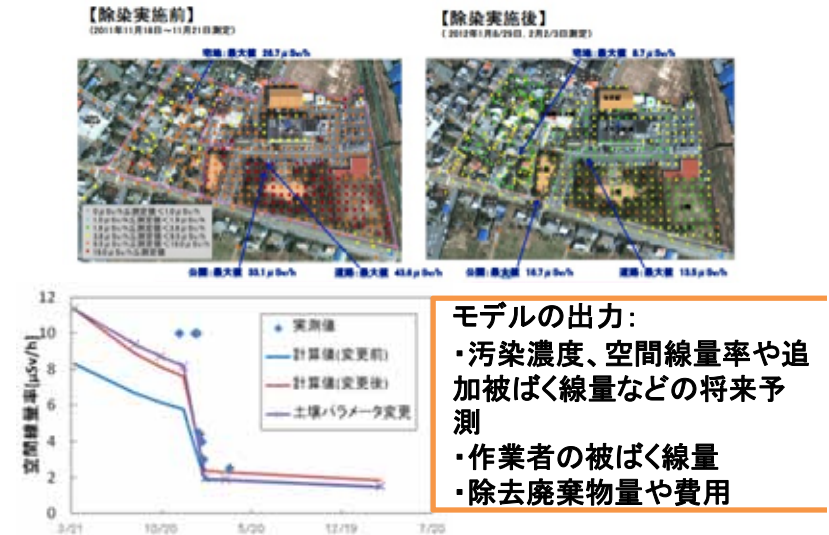


図 住居地域用モデル(ERMIN)による除染評価

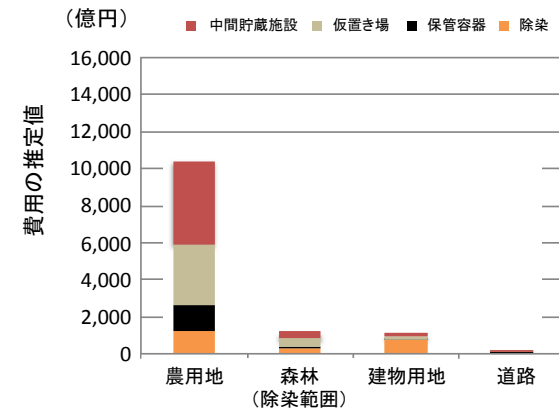


図 除染特別地域の費用推定の一例
(産総研試算より: 関係経費等含まず)

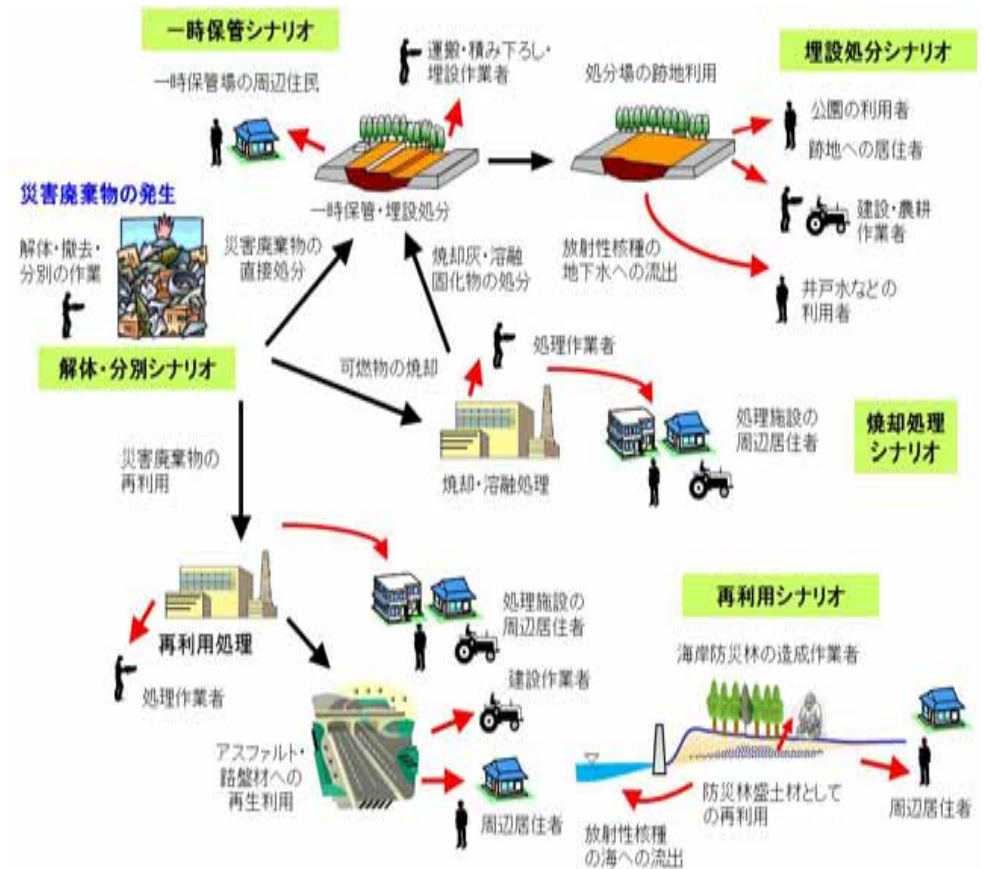
参考情報源: 東京農工大学、産業技術総合研究所、環境省HP、JAEA:HP

Issue 10. 除染土壤・廃棄物等処理対策の安全評価と判断基準

○これまでの状況：原子力災害で放射性Cs等が付着・混入したガレキ、下水汚泥、稲わら、除染土壤など多様な汚染物が生活環境・自然環境で発生した。一刻の猶予もない状況で、震災から早期復旧するため、汚染物の取扱いや処理処分の方法、基準などを迅速に策定が必要であった。

当時、放射線障害防止法でのクリアランスに係る安全評価が行われたシナリオを基本として、福島におけるサイト条件を基本に、汚染廃棄物の処分に係る安全評価が実施され、一般廃棄物と同様に処分可能な濃度基準(8000Bq/kg)が設定された。

また、災害廃棄物の再利用については30cm以上の遮へい(覆土)を行うことで被ばく線量 $10\mu\text{Sv/y}$ 以下とすることが可能であることが分かった。



○今後必要な知見： 主要な汚染物の再利用、埋設処分等に係る指針整備等に必要な安全評価など。また、濃度の高い汚染廃棄物の処分は検討中であり、低濃度の放射性廃棄物を参考に合理的な処分の検討を進めることが必要。可能であれば、全ての放射性核種に関して網をかけた整合性を図った法令整備が期待されるが、現行では、縦割りの規制の状況で合理的な処分システムの評価検討などが必要。

10大イシューリスト(人工システム内の関連図)

