

(株)技術情報センター主催 セミナー

**放射性セシウム(Cs)の挙動・回収・除去と
汚染水・土壌・飛灰の減容化・除染技術**

II. 放射性セシウムによる汚染土壌の除染と 再汚染の防止のための技術

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門

長縄 弘親

講演の目次項目

1. 土壌除染の方法(全般)
2. 除染と再汚染の防止
3. 表層土壌処理法(ポリオン粘土法など)
4. 短期的な除染と長期的な除染
5. 山林への対策(受動的な除染)
6. 里山への対策
7. 農地への対策
8. 吸着材の誤った使用方法
9. 除去した土壌の減容方法
10. まとめ(総合的な対策)
11. 質疑応答

1. 土壤除染の方法(全般)

- ◆ 表層土壌(表土)のはぎ取り
- ◆ 天地返し(農地では反転耕)
- ◆ すき込み希釈(農地では耕起)
- ◆ 植物による除染(ファイトレメディエーション)
- ◆ 代かき・落水(土壌攪拌・水抜き)

表層土壌のはぎ取り

特徴： 表層に集まるセシウムに対して、最も一般的かつ有効な除染法



芝生では、巻き取りも可能



校庭、運動場などは重機ではぎ取り



固化剤を利用することで、安全かつ効率的にはぎ取り可能

長所： ◆最も効率的かつ確実な除染方法

短所： ▼大量の廃棄土壌が発生

天地返し、すき込み希釈（反転耕、耕起）

特徴： 汚染土壌を排除せず、廃棄土壌を発生させない除染法

反転耕



耕起



長所： ◆廃棄土壌を発生させることなく、被ばくを回避

短所： ▼その後、より徹底した除染（表土はぎ取り）を行うことができない

※ 反転耕では、水を保持する下層を破壊し、水田機能を損なわせる恐れあり
また、地下水の水位が高い場所では適用困難な場合あり

植物による除染(ファイトレメディエーション)

特徴: 自然の力(植物の力)を利用した環境にやさしい除染法



長所: ◆低コストで、自然(植物)の力にゆだねた環境負荷の小さい除染方法

短所: ▼除染に長い時間を要し、大きな効果は期待できない

※ 植物の力が有意に働く場面とその際の条件を見きわめる必要あり

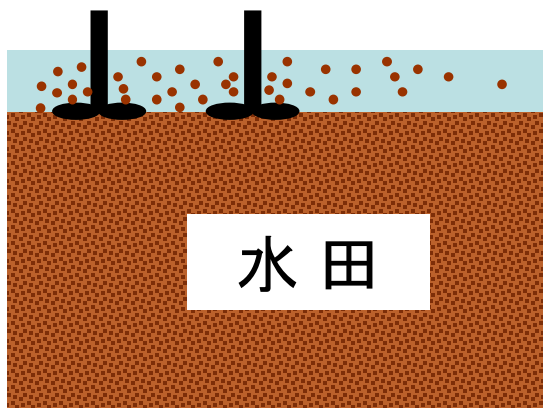
▼廃棄植物を処理・処分する方法がまだ開発されていない

※ 蒸発しやすいセシウム(沸点641℃)を含む植物は、高温で焼却処分できない

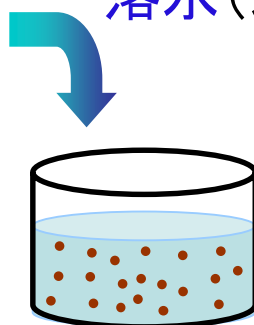
代かき・落水

特徴： 水田の持つ取水・排水の機能を利用した除染法

代かき（土壌攪拌）



落水（水抜き）



懸濁排水の回収



農機械での代かき



落水後の水田

長所： ◆水田の排水機能をそのまま利用できる

短所： ▼攪拌／排水のバランスの制御の難しさ

▼懸濁排水処理での2次汚染リスク

▼除染効率は高いとはいえない

農地土壌の放射性物質除去技術の推奨(農水省)



H23.9.14 農水省プレスリリース

10,000 Bq/kg以上の土壌

表土はぎ取りを推奨。25,000Bq/kg以上の土壌に対しては、作業時の粉塵飛散を防止する対策が必要。

5,000~10,000 Bq/kgの土壌

土壌の種類などに応じて、表土はぎ取り、代かき・落水、反転耕を使い分ける。ただし、30cm以上の反転耕は地下水の水位が高い場所には適用できない。

5,000 Bq/kg以下の土壌

反転耕、植物による除染(ファイトレメディエーション)が利用可能。ただし、植物による除染は、現時点では高吸収植物の候補が得られていないため、現場への普及の段階にはない。

2. 除染と再汚染の防止

除染よりも先に行うべきこと

福島第一原発事故当初に地上に落ちた放射性セシウムは、**いつまでも同じ場所にとどまてはいない**(風や雨の作用によって、徐々に移動)

粉塵として移動

表層泥水として流出

高汚染地域を放っておいて、ある程度の除染ですぐに居住できる**低汚染地域を優先して除染することはナンセンス!**

除染しても、すぐに再汚染

新たなホットスポット形成

一度に広大な地域が汚染された今回のケースでは、除染に先んじて、**放射性物質の封じ込め**(粉塵の飛散、表層泥水の発生抑制)および**放射性物質の移行経路の遮断**(森林からの山水、泥の流入の抑制など)を行うことが、きわめて重要!

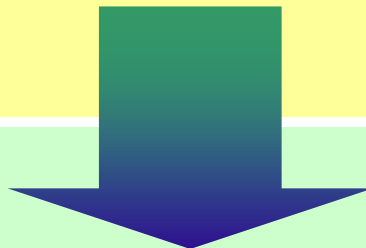
再汚染を防止するための対策（その1）



放射性物質の封じ込め： 粉塵の飛散、表層泥水の発生の抑制

放射性セシウムを濃縮した粘土の微細粒子は、
どのようにして環境中を移行するのか？

- 乾燥時には、風により粉塵として飛散
- 降雨によって、表層泥水として流出



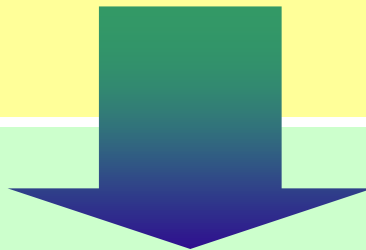
放射性セシウムを移行させないように封じ込めるには？

- 表層土壌処理を行う

放射性物質の移行経路の遮断： 森林からの山水、泥の流入抑制など

放射性セシウムの森林から生活圏への流入は、
どのような経路で起こるか？

- 山水として、水田、農業用水などに流入
- 土砂・泥流として、水田、農業用水などに流入



放射性セシウムの移行経路を遮断するには？

- 人工的なホットスポットを設置する

行うべき除染とは？

除染は、再汚染への対策と一体化して行うべき！

さもなくば、……

費用、時間、労力を費やすばかりで、事実上、除染は進まない！

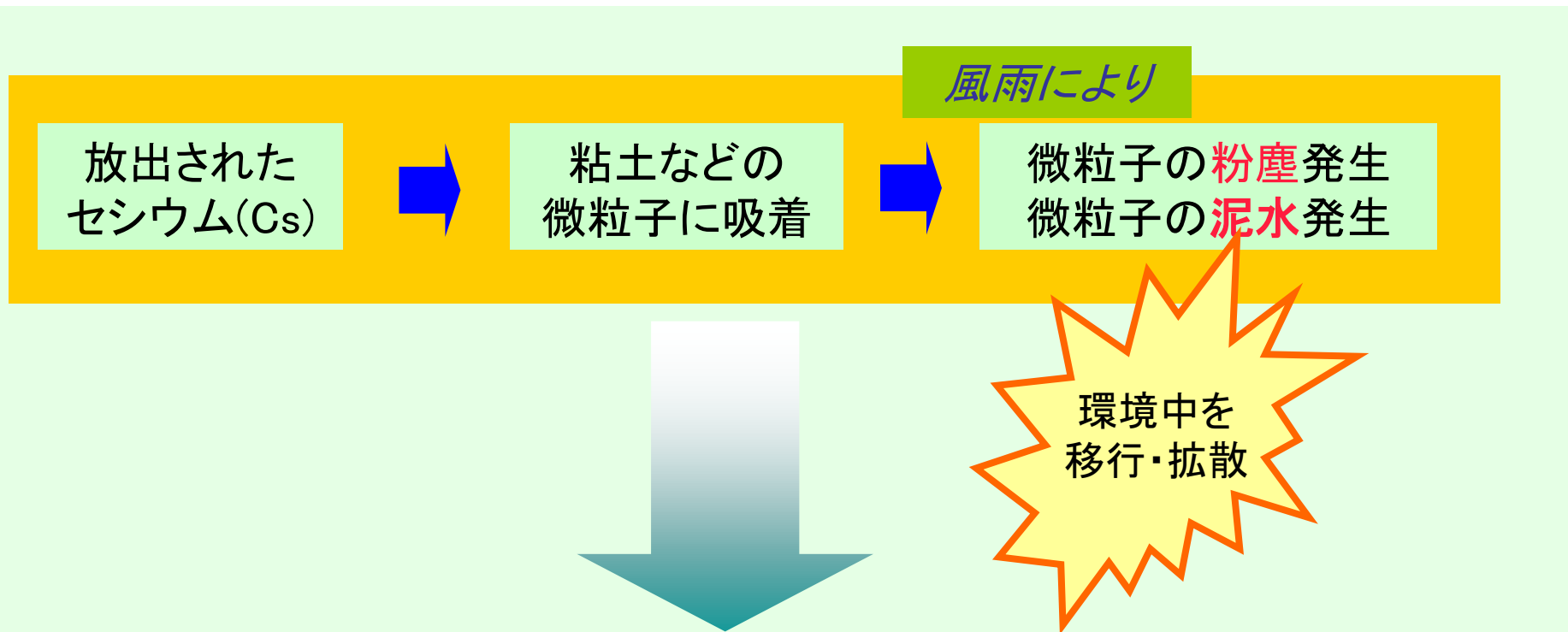
加えて、何度も除染を行えない場所では、致命的！

再汚染対策なくして、除染は無意味

3. 表層土壌処理法 **(ポリイオン粘土法など)**

表層土壌処理の目的 (その1)

放射性物質 (Cs-137, Cs-134) の封じ込めのため



粉塵、泥水の発生を抑制し、表層にあるCsを封じ込めなければならない！

※ とくに、汚染度の高い場所において重要

表層土壌処理の目的 (その2)

除染を効果的かつ安全に行うため

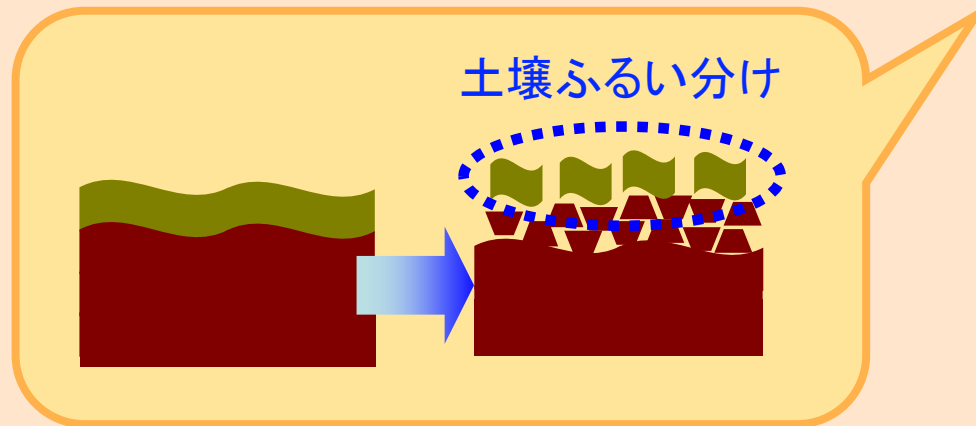
表層にとどまるセシウムの最も効果的な除染方法は、**表層土壌の剥ぎ取り**

安全に作業を行うため

粉塵、泥水
の発生防止

効率的に除染を行うため

表層のみ
の**固化**



1) 散布しやすい(施工しやすい)

2) 安全(毒性がない)、安価、大量調達が可能

◆ 3) はぎ取りやすい(適度な固化)

◆ 4) 減容のための分級・洗浄に影響しない

◆ 除染に用いる場合に必要な項目

ポリイオン粘土法

- ◆ ポリイオン粘土法とは、表層土壌処理のための方法の1つ。表層土壌処理剤としてポリイオンを用い、放射性セシウムの移行抑制のために粘土を用いる方法。
- ◆ ポリイオン複合体(ゲル状の物質)の作用により土壌粒子どうしを粘着・固化し、粘土の作用により放射性セシウムを吸着・固定する。なお、粘土の微細粒子は、土壌粒子とともにポリイオン複合体によって粘着・固化される。
- ◆ ポリイオンは、ポリカチオン、ポリアニオン、および塩を含む水溶液(無色透明でほとんど無臭)として散布して、土壌中でポリイオン複合体(ゲル)を生成させる。粘土は微細粒子の懸濁液として散布する。

※ ポリカチオン水溶液とポリアニオン水溶液を混合すると即座にポリイオン複合体のゲルが生成してしまうが、あらかじめ塩を加えておくと、その静電的な緩衝効果により、複合体(ゲル)が生成しない。

※ 塩としては、NaCl、 K_2SO_4 などがある。塩害を起こさない K_2SO_4 は農地に適している。

ポリイオンとは？

- ◆ イオン性のポリマー(高分子)の総称
- ◆ ポリカチオン(陽イオン)とポリアニオン(陰イオン)がある
- ◆ ポリカチオンとポリアニオンを混合すると、ゲル状のポリイオン複合体が生じる。塩を加えると、水溶液の状態を保持
- ◆ ゲル状のポリイオン複合体は、乾燥すると縮んで硬くなり、水によって膨潤して軟らかくなる
- ◆ 安価で、大量調達ができ、チェルノブイリで用いられた実績がある

ポリイオンは安全なのか？ 毒性はないか？

ポリイオンは、天然でも合成でも、食品等に使われる安全なもの
(アイスクリーム、めん類などの増粘剤、安定剤) である

以下、ポリイオンの種類とそれぞれの種類での例を示す

	陽イオン	陰イオン
天然ポリイオン	カチオン化セルロース 木材の繊維から作られる成分で、 頭髪のコンディショナー等に利用される (毛髪に付着して薄膜を作り髪を保護する)	カルボキシメチルセルロース 食品分野でよく利用されている物質で、 増粘剤、安定剤として、アイスクリーム、 シャーベット、めん類、ソース等に添加される
合成ポリイオン	ポリジアリルジメチルアンモニウムクロライド (poly-DADMAC) 一般に安全と認められる(GRAS)食品添加物に 登録されており、飲料水の処理剤としても、 大量に使われている	ポリアクリル酸ナトリウム塩 食品分野での増粘剤、安定剤として利用され、 高吸水性高分子として、紙おむつ、ローション等に 利用される

※ いずれの物質も、化学物質排出把握管理促進法、労働安全衛生法、毒物及び劇物取締法、消防法等に該当せず、化審法における特定化学物質・監視化学物質に該当しない

- ◆ 水溶液なので 容易に土壌に浸透し、散布するだけで、施工が簡単
- ◆ ゲルの粘着力によって、土壌粒子の 粉塵を抑制する
- ◆ ゲルの柔軟性により、固化土壌が 崩れにくい
- ◆ 膨潤ゲルの 高粘性で土壌粒子を包み、水に溶出させない (泥水の抑制)
- ◆ 静電力により、イオンに対する親和力がある
(ストロンチウム等の価数の大きいイオンに対しては固定効果あり)
- ◆ 環境中で、長い年月にわたり効果を維持 (環境中での長期耐性)

ポリオン複合体による土壌の固化(乾燥時)

芝生下の砂シルト質の土壌



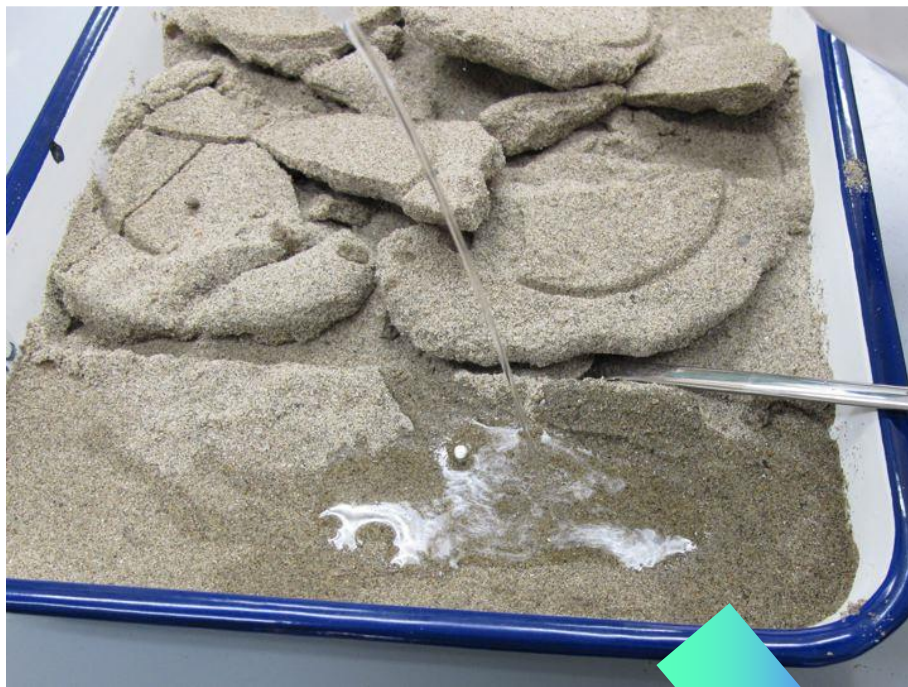
◆ 粉塵飛散の防止

◆ 表層土壌の精密なはぎ取り

花壇の粘土シルト質の土壌



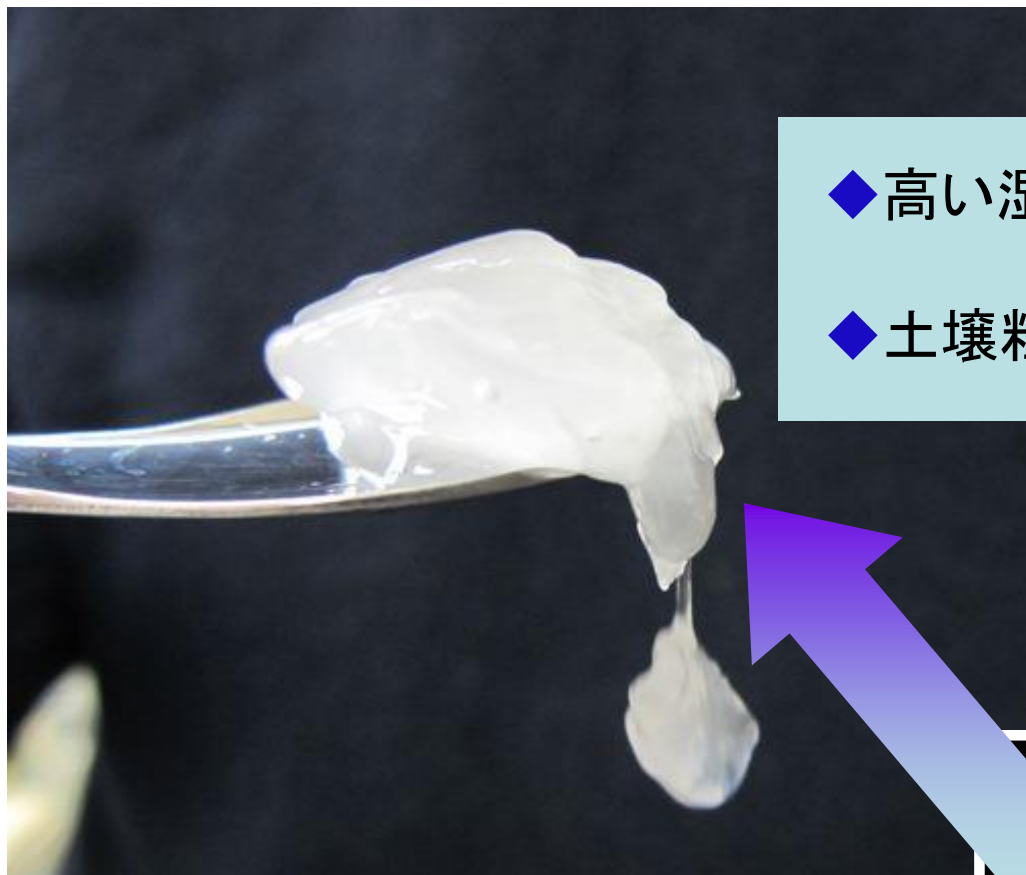
水によるポリイオン固化土壌の軟化



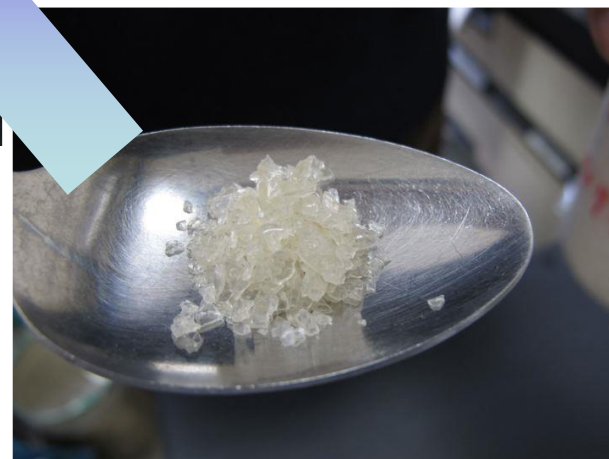
- ◆分級・洗浄が可能
- ◆固化物として劣化しない



ポリイオン複合体の水による膨潤



- ◆ 高い湿気を維持する
- ◆ 土壌粒子を包んで流出させない



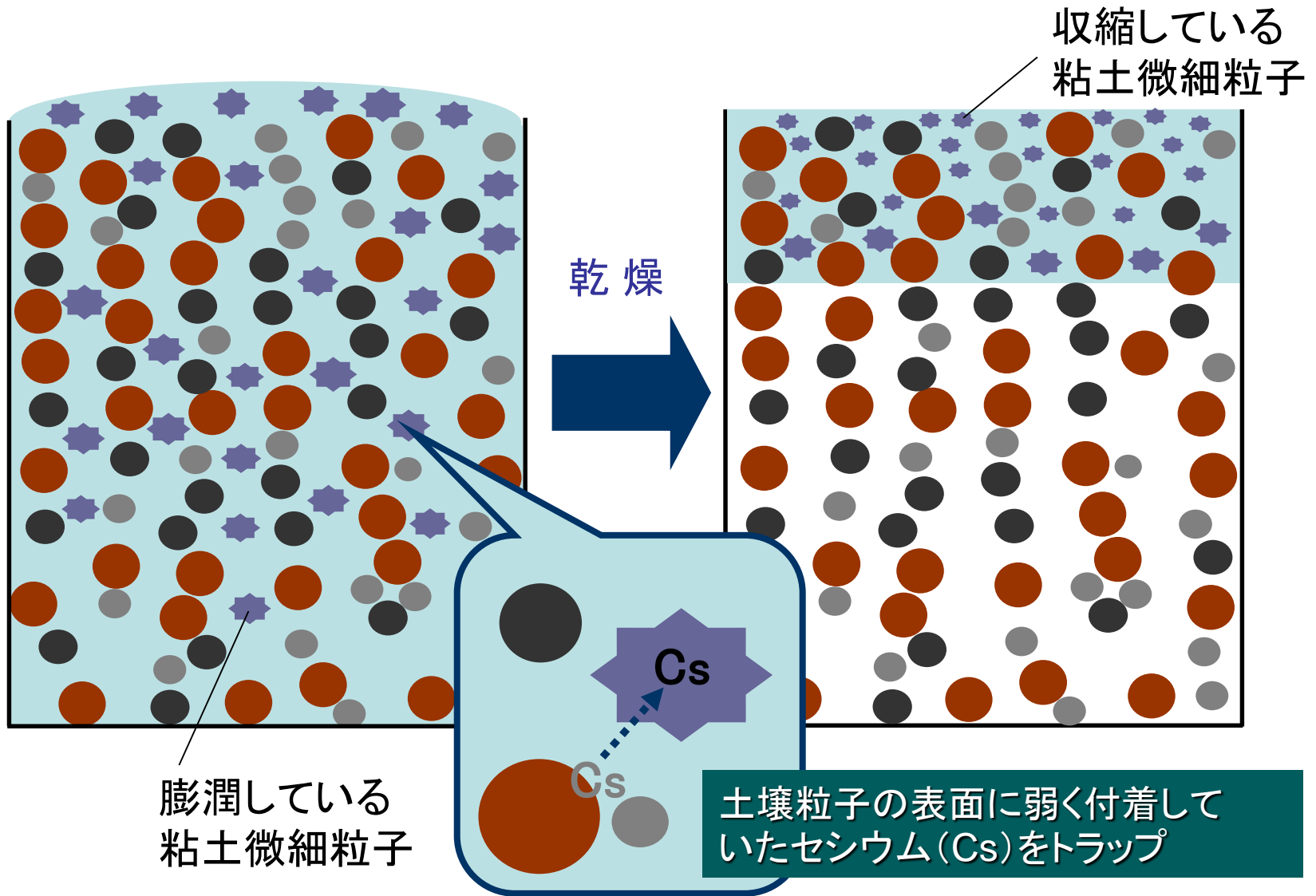
粘土で何ができるか？



- ◆ 土壌中Csを効果的に吸着・固定(サクシオンにより下層からも吸い上げ)
- ◆ 粘土の層間へのインターカレーションにより、迅速にCsを吸着できる
- ◆ 粘土質の少ない土壌を改質し、Csを保持しやすくできる
- ◆ 粘土微粒子の懸濁液を、液体として散布でき、塗料のように塗布できる
- ◆ 安価、無害で、大量調達でき、チェルノブイリでの実績がある

※ チェルノブイリでは、粘土は、土壌に対してよりも、建物などのコンクリートやレンガに対して、塗料のように懸濁液を塗り付けて用いた。

粘土による“サクシオン”とは？



粘土の懸濁液を土壤に適用すると



粘土の灰白色が、処理済みの
のマーカにもなる



ポリイオンと粘土を組み合わせると

ポリイオンも粘土粒子も、チェルノブイリで用いられた実績はあるが。。

ポリイオンは、粉塵・泥水の抑制はできても、十分にCsを固定できない。

粘土の懸濁液は、土壤中のCsを吸着・固定できるが、乾けば砕け飛散する。

ポリイオン粘土法

両者の利点を活かし、互いの欠点を解消する組み合わせ

粘土（ベントナイト）粒子の持つ効果的にCsを吸着・固定する能力

+

ポリイオンの持つ、Csを吸着した粘土粒子をゲルの中に保持し、飛散・流出を防ぐ能力

土壤中のCsを効果的に移行抑制しながら、Csの飛散・流出を防ぐことができる

福島県伊達市小国での除染試験



ポリイオン複合体により
固化した土壤片



総面積1,500m²に対してポリイオン水溶液
を散布し、2日後に表土を2cmはぎ取った
除染率85-90%

4. 短期的な除染 と 長期的な除染

短期的な除染と長期的な除染の考え方

短期的な除染

多くの人を利用する公共の場、住居の周辺など
除染を急ぐべき地域で、再汚染への対応も可能

周辺の「封じ込め」を行いながら、短時間で「除染」

除染で用いる薬剤

短期間で良いので、効果的に粉塵・泥水の発生を抑制し、短時間で乾燥・固化することができる薬剤

長期的な除染

田畑、里山など

人の出入りが比較的少なく広大な地域で、再汚染への対応が困難

「封じ込め」を優先し、その後、時間をかけて「除染」

除染で用いる薬剤

長期にわたって、効果的に粉塵・泥水の発生を抑制し、乾燥に時間をかけて良いので、適度に固化することができる薬剤

土壌処理剤の比較



	ポリオン	分子性ポリマー	自硬性セメント
◆適度な固化	◎適度な硬さ	◎適度な硬さ	△硬すぎる
▲吸湿性(粉塵抑制要素)	◎	○	○
▼速乾性	×短期除染不向き	○	○
▲風への長期耐性(粉塵抑制)	◎長期接着能維持	△年越え困難	△年越え困難
▲雨への長期耐性(泥水抑制)	◎長期粘性維持	△懸濁液流出	△年越え困難
▲凍結への耐性	○	○	△脆弱化
▲紫外線への耐性	○	△	◎
▲微生物分解への耐性	○	△	◎
▲劣化時の飛散耐性	○高粘性維持	×固化樹脂劣化	×セメント劣化
◆散布しやすさ	○	○	△要攪拌・難浸透
◆処理に要する費用	○ 150円/m ² 程度	○ 150円/m ² 程度	○ 150円/m ² 程度
◆分級洗浄の可否	◎効果向上!	○水で軟化可	×水で軟化せず

▼ : 短期的な除染向きの項目 ▲ : 長期的な除染向きの項目 ◆ : 共通項目

短期的な除染に適した処理剤

適度に固化し、速乾性に優れ、かつ散布しやすい**分子性ポリマー**が最も適切

長期的な除染に適した処理剤

風雨に対する長期耐性に優れ、速乾性以外には難点のない**ポリオン**が最も適切

土壌分級洗浄により廃棄土を減容する場合

- ◎ **ポリオン**の凝集効果により、分級洗浄効果が向上
- **分子性ポリマー**の粘着力により、洗浄時間が長くなる
- × **自硬性セメント**は水で軟化しないため、分級洗浄は不可能

※ 弱アルカリ性の**自硬性セメント**は、**受動的**な除染に適している

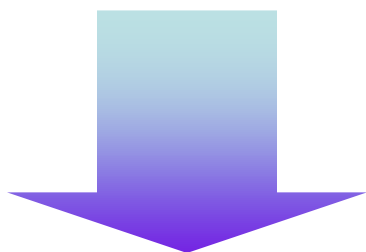
5. 山林への対策(受動的な除染)

受動的な除染の考え方 - 人工ホットスポット -

“除染”と“ホットスポット”の類似点

除染: 生活圏にある放射性物質をどこか安全な場所に**局在化**させるための作業

ホットスポット: 自然の作用により、放射性物質が**局在化**された部分的に放射線量が高い場所



自然がホットスポットを形成する原理を理解し、その原理に基づいて、管理された**人工的なホットスポット(人工池、溝)**を設置する。

人工池のイメージ



その後は、自然の作用にまかせて、人工ホットスポットに放射性セシウムが集積するのを待ち、回収する。除染を自然の作用にゆだねるため、“**受動的な除染**”と表現

人工ホットスポットを構築するための材料は、通常のセメントのような高pHの材料よりも、弱アルカリ性で使用後は土に帰することができる**自硬性セメント(マグネシウム系セメント剤)**が好ましい

“受動的な除染”では、除染の完了までに長い時間を要するが、放射性セシウムの移行経路の遮断が適切に行われていれば、**除染が未完了でも生活圏への影響は小さい**

6. 里山への対策

里山の除染 - 長期的な除染の対象 -



◆ 落ち葉の除去を行った後、表層土壌処理（ポリオン粘土法）

粉塵飛散、表層泥水発生抑制

深部へのセシウム移行の防止

◆ 傾斜地からの土砂の流入を防止するための土木工事

7. 農地への対策

農地汚染と作物へのセシウム吸収の関係



東京大学・農学部 根本圭介教授からの情報提供に基づく



福島県には粘土質の農地が多く、セシウムの大部分は粘土に吸着された状態（作物に吸収されない形態）で存在するため、農作物の汚染は比較的低いと推察されたが、・・・

山間地の水田の一部で高汚染のイネ発見

2つの特徴

- ◆ **有機物**が多く存在する山間地の水田
- ◆ **排水不良**の水田

山間地で、かつ排水不良の水田で、いったい何が？



東京大学・農学部 根本圭介教授からの情報提供に基づく

山間地の排水不良水田では、**夏期に成長する葉**に放射性セシウムが濃縮されている

夏期の高温により、セシウムを付着した有機物が分解し、遊離セシウムを放出

有機物の分解は排水良好な水田でも起こるが、
排水良好水田では、イネへのセシウム吸収は小さい、・・・なぜか？

排水不良の水田は、夏期も湛水している



“うわ根”からセシウム
が吸収された可能性

イネの**水耕栽培**では、
1Bq/kgの水での26日の
栽培で、**590倍**のセシウム
を濃縮(590Bq/kg乾物量)

懸濁態

無機懸濁態

非イオン交換態(固定態)

イオン交換態

有機懸濁態

非イオン交換態(固定態)

イオン交換態

溶存態

単独溶存態

結合溶存態

植物による除染(ファイトレメディエーション)

- ◆ 植物の品種改良よりも、ファイトレメディエーションが有意に働く場面とその際の条件を見きわめることが大切
- ◆ 粘土質の土壌で排水管理された条件下では、ファイトレメディエーションは無意味
- ◆ 溶存態が多い場合、有機懸濁態が多く分解されやすい条件にある場合、ファイトレメディエーションは効果的かも知れない

植物による農地保護・保全

- ◆ 雑草などによって農地を荒らさない方策として、バイオ燃料など、収入につながる植物を栽培する
- ◆ この場合、できるだけ植物がセシウムを吸収しない場面(粘土質が多く湛水しない圃場)で植物を栽培する
- ◆ 植物がセシウムを吸収しないことが担保されれば、製品(バイオ燃料)からセシウムを除去する必要がなく、コスト面で採算が合う可能性もあり
- ◆ ポリイオン複合体で表層土壌処理すれば粉塵飛散による内部被ばくを抑制しながら作業でき、ポリイオンの吸湿性は植物育成を促進する

作物のセシウム吸収に対しては、

◆ 夏期に湛水している(水が溜まっている)排水不良の山間地の水田に対して、用水路、排水土管などを設置し、排水の基盤整備を行う

◆ 水耕栽培に類似するような状況にならないように注意する

※ 根本教授らの実験によると、0.2Bq/kgの水を用いた水耕栽培と1,000Bq/kgの灰色低地土(粘土質の土壌)を用いた土耕栽培とでは、セシウムの吸収量は、ほぼ同程度であった

福島が汚染されて使えないのなら水耕栽培を行えば良いとの意見をしばしば耳にするが、**水耕栽培は土耕栽培よりもはるかに危険!**

再汚染に対しては、

◆ 人工ホットスポットの設置により、森林からの放射性セシウムの移行経路を遮断する

◆ 里山に対しては、粉塵飛散、泥水発生を防止するための表層土壌処理と傾斜地からの土砂流入を防ぐための土木工事

◆ 農地に対しては、上記の再汚染対策と一体化した長期的な除染を実施

※ ただし、原発事故後に耕してしまった避難区域ではない農地(低汚染)では、徹底したすき込み(繰り返し行う耕起)により対処

“ため池”と人工ホットスポットの類似点



ため池

山水が集まりやすい場所に“水がめ”として設置。台風などによる鉄砲水に対する洪水調整機能もあり

人工ホットスポット

放射性セシウムを運ぶ山水が集まりやすい場所に設置。鉄砲水によって、大量の有機懸濁態（有機物の分解によりセシウムを脱離しやすい形態）が土砂、泥水とともに水田、用水に流入するのを防ぐ役目もあり

8. 吸着材の誤った使用方法

すぐれた吸着材は諸刃の剣

すぐれた吸着材の微細な粒子の危険性

イネ等の作物へのセシウム吸収を防止する方策として、**吸着材をダイレクトに農地に散布する**方法が一部の自治体などで推奨されているが、...

多くの場合、田畑にはセシウムを吸着する粘土質が大量に存在する...



目に見える効果を得るために、**より高性能**な吸着材を、**より微細な粒子**として（比表面積をかせぐために）、**より大量**に散布する

大量に散布された**高性能**な吸着材の**微細**粒子は、**セシウムを高濃縮**

最悪のシナリオ！

セシウム高濃縮した微細粒子の粉塵を農作業者が吸引して、**長期にわたる深刻な内部被ばく**

環境中での長期安全性は大丈夫か？

プルシアンブルーの長期安全性

短期的には非常に安定で、シアン化合物でありながら毒性はきわめて低いが、...

- ◆ 水に不溶で安定な物質だが、アルカリ性条件下、還元雰囲気ですぐに分解
- ◆ 長い月日を経て分解し、水溶性の鉄シアノ錯体が遊離する(毒性は低い)
- ◆ 鉄シアノ錯体は光で容易に分解し、**猛毒のシアン酸、シアン化物イオン**が発生

環境中での長期安全性について、多くの研究者が危険を指摘

プルシアンブルーのもう1つの課題

環境の除染で生じたプルシアンブルー廃棄物(低レベル)を適切に処理・処分できるか？

- ◆ アルカリ性条件下で分解するため、**セメント固化処理(高pH)ができない**
- ◆ 低アルカリ性セメントには未解決課題が多く、実用には至っていない

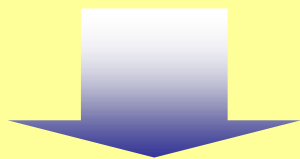
※ セメント固化は、低レベル放射性廃棄物の固化処理方法として、コスト面、安全面などから世界的に最も多く採用されている

プルシアンブルーを環境の『**除染**』に利用することは、長期安全性と処理・処分の観点から不適切といわざるを得ない。ただし、大量に使用することがない『**分析**』だけに用途を限れば、きわめて有用な吸着材。

9. 除去した土壌の減容方法

廃棄土壌の最も現実的な減容方法

表土のはぎ取りは、最も一般的で有効な除染方法だが、長期間（半減期の10倍）の遮蔽保管を要する膨大な量の廃棄土壌が発生する



廃棄土壌をいかにして減容するかが、除染を進めるうえでの鍵

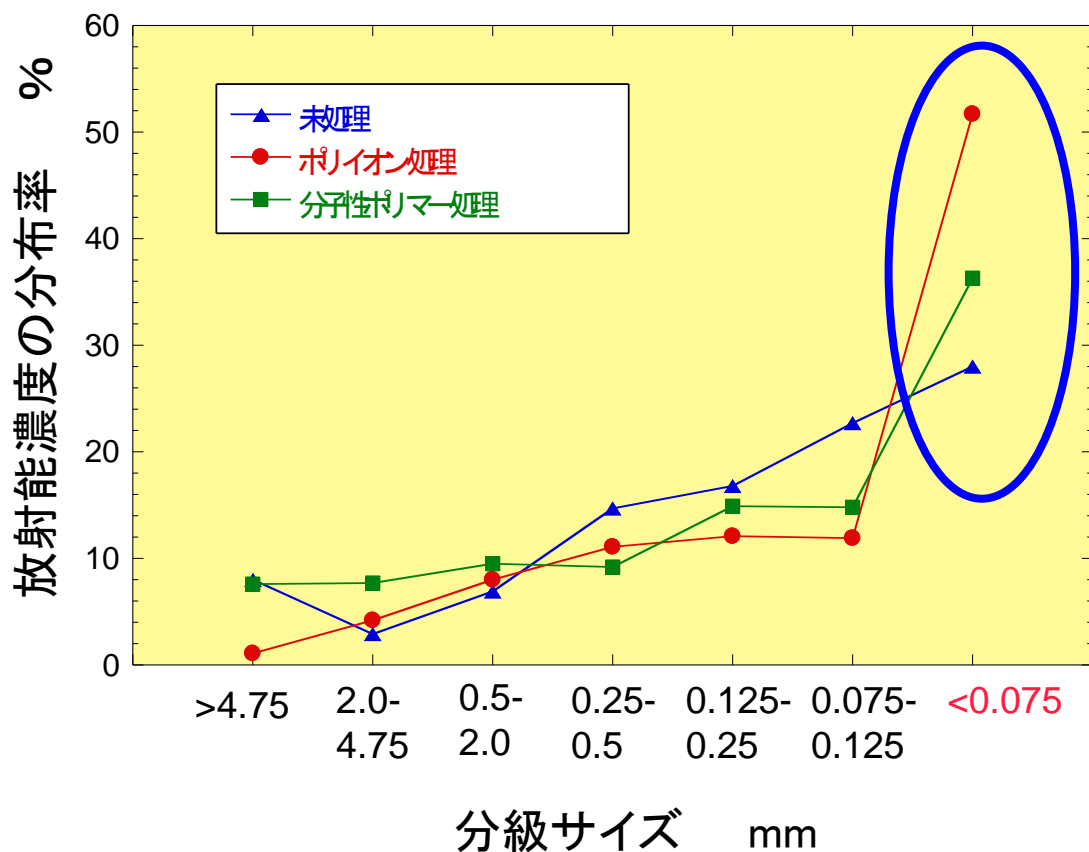
セシウムの大部分は粘土微細粒子に吸着・固定されているため、非粘土質の粗い粒子を洗浄しながら、**粘土微細粒子だけを集められれば**、大幅な減容になる

分級・洗浄法は、コスト、操作の簡便さ、環境負荷の小ささ、これまでの実績などから、最も現実的な廃棄土壌の減容方法

※ セシウムを粘土微細粒子から脱離することができる **酸抽出**、**土壌燃焼** をオプションに行って、更なる減容を図ることも可能

土壌処理剤が分級・洗浄に与える影響

- ポリイオン** : 洗浄時に容易に軟化、かつ分級・洗浄の効率が大きく向上
- 分子性ポリマー** : 洗浄時に浸漬すれば軟化、分級・洗浄の効率がやや向上
- 自硬性セメント** : 水によって軟化しない(分級・洗浄できない)



ポリイオン処理土壌では、微細粒子の分画 (<0.075mm) への放射能濃度の分布率が大きく向上する

分子性ポリマー処理土壌でも、向上が見られる

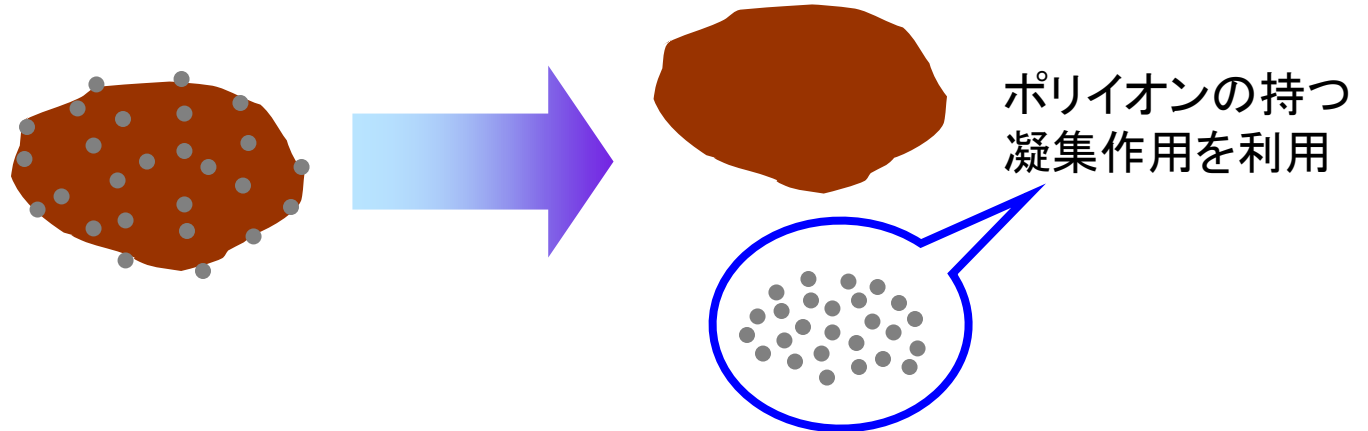
ポリイオン: カチオン化セルロース、カルボキシメチルセルロース

分子性ポリマー: ポリ酢酸ビニル

分級・洗浄を高い精度で行うには？

要点

粗い粒子の表面に付着した微細土壌粒子を、
いかにして排除するか



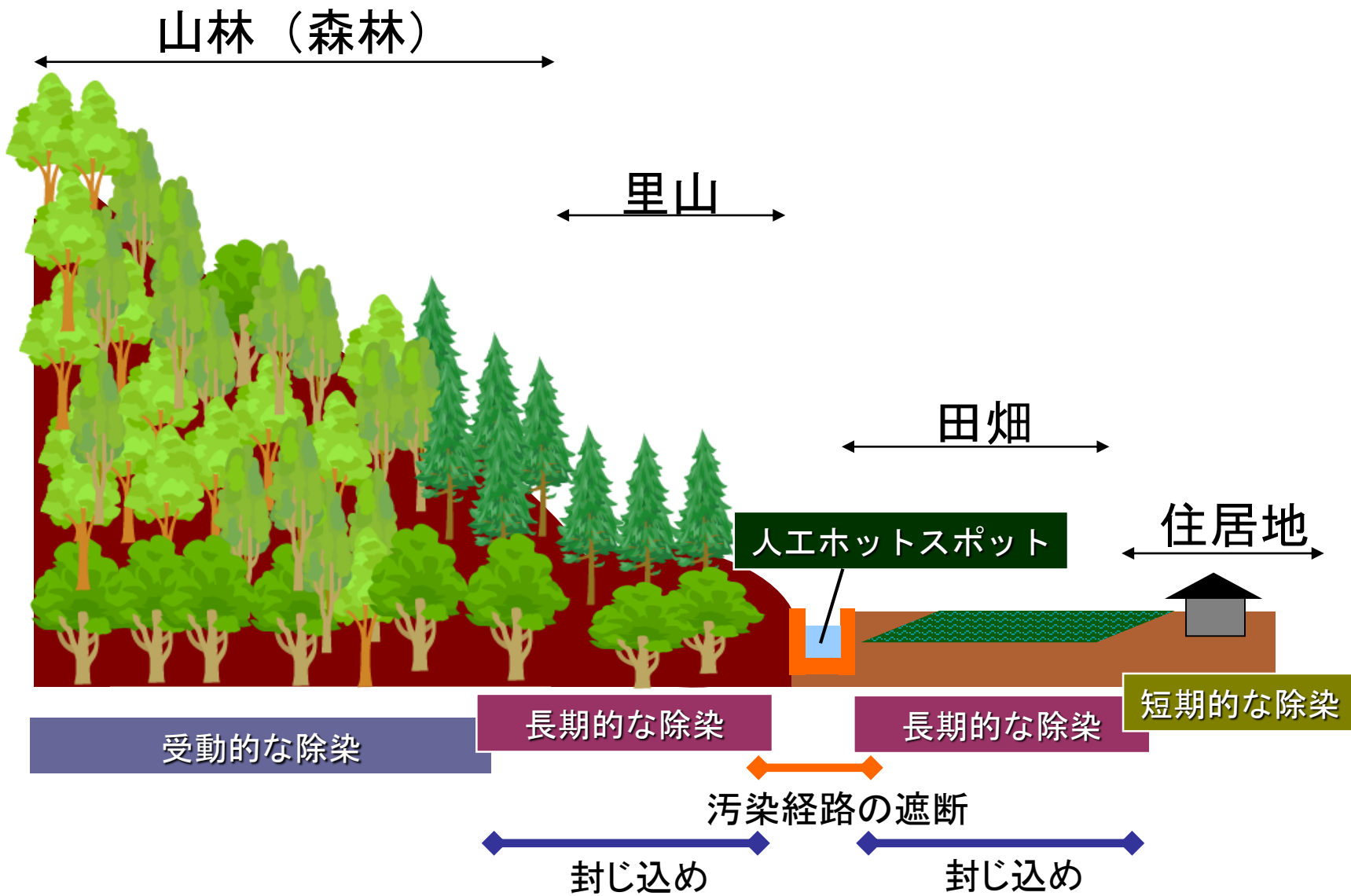
物理的な方法で、一時的に微細粒子を排除することができても、
それだけでは、微細粒子の再付着は防げない。

排除した微細粒子を凝集させれば、
粗い粒子への再付着を防げる

ポリイオンのような
イオン性のポリマー
は、強力な凝集剤！

10. まとめ(総合的な対策)

除染、再汚染防止のための総合的対策(案)



11. 質疑応答



お問い合わせ

独立行政法人 日本原子力研究開発機構
原子力基礎工学研究部門 原子力化学ユニット
環境化学研究グループ

研究主席・グループリーダー 長縄 弘親(ながなわ ひろちか)

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
E-mail naganawa.hirochika@jaea.go.jp
Tel 029-282-6615 Fax 029-282-6757