

# 福島環境修復有識者検討委員会による除染技術等の調査検討

平成 23 年 10 月～平成 24 年 3 月

一般社団法人 日本原子力技術協会

## 1. 福島環境修復有識者検討委員会設置の目的と検討内容

この有識者検討委員会は、日本原子力技術協会が基礎調査として、平成 23 年度後半から平成 24 年度にかけて実施している「原子力発電所周辺の環境修復に関する調査」の成果として得られる国内外の土壤環境修復技術（除染、原位置固化、汚染土壤の除去或いは土壌入れ替えなど）について、福島汚染地域の浄化への適用性に関して、学識経験者等の参加協力を得て検討を進めるために設置したのである。

平成 23 年度の実施内容としては、米国エネルギー省の核関連施設周辺の汚染浄化事例及び我が国における重金属等の有害物汚染浄化事例などの技術情報に対して、専門的立場からレビューを行い、福島環境修復への適用性の観点から個々の技術を検討・評価した。

また、これらの技術情報を福島環境修復に携わる方々が参考にしやすいように、クリーンアップ分科会の EURANOS ハンドブックの除染情報と同様の形態でデータベース化を行っている。

## 2. 有識者検討委員会の構成と審議状況

### (1) 福島環境修復有識者検討委員会の構成メンバー

区分	名前	所属	原子力学会等委員活動
学識経験者	新堀 雄一	東北大学工学研究科量子エネルギー工学専攻 准教授	埋設後管理分科会主査、浅地中処分安全評価分科会副主査
学識経験者	宮脇健太郎	明星大学 理工学部 総合理工学科（環境・生態系）教授	埋設後管理分科会委員
学術研究機関	川上 泰	原子力安全研究協会 研究参与（兼務・原技協 TA）	浅地中処分安全評価分科会主査、埋設後管理分科会委員、クリーンアップ分科会委員
学術研究機関	河西 基	電中研 地球工学研究所バックエンド研究センター長	埋設後管理分科会委員、浅地中処分安全評価分科会委員
その他団体（非営利）	山本 正史	原子力環境整備促進・資金管理センター 基準・規格調査研究プロジェクト チーフ・プロジェクトマネージャー	埋設後管理分科会副主査 浅地中処分安全評価分科会幹事、クリーンアップ分科会委員
その他団体（非営利）	吉原 恒一	日本原子力技術協会 規格基準部 調査役	埋設後管理分科会幹事 浅地中処分安全評価分科会委員、クリーンアップ分科会委員
その他団体（非営利）	石倉 武	財団法人 エネルギー総合工学研究所 NUPEC(原子力工学センター 参事、(兼務・原技協 TA)	廃止措置分科会委員
民間会社	橋本 正憲	ランドソリューション(株) 社長付 技術主幹	
民間会社	沼田 守	日揮(株)技術研究所 所長	
民間会社	野上 義夫	日本エヌ・ユー・エス(株)環境事業部門 事業開発室 室長代理	埋設後管理分科会常時参加者
民間会社	関口 高志	戸田建設(株) 岩盤技術部 課長	土木学会・設計品証WG委員 浅地中処分安全評価分科会委員、クリーンアップ分科会委員

常時参加者等：エネ総研・木村公隆、電事連・山田基之（非公式参加）  
JANTI/仙波毅・池田整・安田裕二・初岡賢政

### (2) 平成 23 年度の審議状況

平成 23 年度は、3 回開催した。開催状況は以下のとおり。

第 1 回は H23 年 12 月に開催、11/11 名出席。第 2 回は H24 年 1 月に 2 度に分けて開催、2 回合わせて 11/11 名出席。第 3 回は H24 年 3 月 9 日開催、10/11 名出席。

第1回では、環境修復技術調査計画、成果の公表方法（原子力学会クリーンアップ分科会等を通じて公表し、国・福島県・市町村等の除染実施者への活用化を図る）等を決めた。

第2回、第3回では、DOEのサイト別調査結果、要素技術別の除染技術の検討結果、我が国の土壤環境汚染浄化技術の調査結果、及びそれらの福島への適用性について中間報告、本報告を行い、以下のような討議がなされた。

一般的にDOEの技術は設備等のハード面では使えるが、特殊な化学除染法や原位置ガラス固化のような高コスト修復技術は福島には不向き。

田畑の除染では、関東ローム層ではCsがかなり深く浸透する場合もあること、及び除染方法の最適化検討では、線量率の低減化に加え、農用地としての土壤の適性を考慮すべき。

米国EPAも放射能汚染サイトの修復を実施しているので、DOEの除染技術に加えて調査のこと。（第2回コメント⇒第3回で追加調査を報告）

土壤へのCsの吸着は強いが、焼却灰などからは溶出し易いことが環境省のガイドラインでも述べられており、留意する必要がある。

農地のカドミウム汚染では天地返し等の対策が取られているが、福島でこの方法を採用した場合、線量率低減化は図れるが、天地返しを行った農地では、下層部に汚染土壤が残留するので農耕の再開には不安あり。

⑤の解決策として表層汚染土の剥ぎ取り+他場所からの客土があるが、土質が変わると農作への悪影響が懸念される。これを解決するいいアイデアはないか。

### 3. 環境修復技術の調査結果と福島への適用性検討

#### 3.1 米国エネルギー省（DOE）環境修復技術に関する調査

##### 3.1.1 海外の環境修復技術の調査

注：3.12 我が国の土壤環境汚染浄化技術の調査は次回以降のCU分科会にて紹介の予定

##### （1）DOEサイト別の技術適用事例調査

米国エネルギー省（DOE）においてこれまでに環境修復プロジェクトで実施された修復技術について、代表的なサイトで適用された技術を調査した。

本調査においては、次のような項目の調査を実施した。

- － 各サイト名称、場所
- － サイト施設の使命
- － 汚染対象
- － 主要な汚染核種
- － 除染技術名称及び除染概念
- － 補足事項（除染効果）

また、代表的なDOEサイトについて概要を整理した。

ここでは、以下の項目を記載した。

- － サイトの特徴
- － 場所、供用期間、供用目的等

調査対象調査対象とした代表的なDOEサイトについて、そのサイトの概要を別紙3.1に示す。

また、DOEサイト別の環境修復技術の適用事例の調査結果を、「別紙3.2 DOE環境修復技術－サイト別技術適用調査」にまとめて示す。

なお、当初はDOEのサイト別に除染技術の整理をしたが、有識者検討委員会でのコメントを受けて、共通と考えられる技術は、技術の部分をまとめて記載する形式、すなわち要素別の整理に変更した。今回抽出した要素技術は、表1に示す約40種類である。

また、表2にサイト別技術適用事例の調査を実施した代表的なDOEのサイト名を示す。

表1 サイト別技術適用事例調査－抽出した要素技術一覧

<ul style="list-style-type: none"> <li>・地下水揚水処理</li> <li>・土壌洗浄</li> <li>・霧状固定化による固定</li> <li>・剥離性ペイント／コーティング</li> <li>・表面汚染固定化剤</li> <li>・真空引き <b>HEPA</b> フィルタ</li> <li>・高圧水洗浄</li> <li>・圧力水洗浄</li> <li>・ドライアイスブラスト</li> <li>・熱的破壊</li> <li>・蒸気加熱抽出</li> <li>・グリットブラスト</li> <li>・<b>Lasagna Technology</b> による原位置土壌修復</li> <li>・電気抵抗加熱 (<b>ERH</b>)</li> <li>・縦型冷凍土壌バリア</li> <li>・深部土壌混合 (深耕)</li> <li>・汚染物の <b>SEAMIST</b> を用いたモニタリング</li> <li>・スポンジブラスト</li> <li>・氷ジェット/氷ブラスト</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・泡・ゲル除染</li> <li>・イオン交換樹脂</li> <li>・化学除染</li> <li>・水中高圧水洗浄</li> <li>・原位置での土壌グラウティング</li> <li>・土壌の蒸気抽出／エアスパージ</li> <li>・透過性反応バリア</li> <li>・原位置生物的分解</li> <li>・中和処理</li> <li>・地下水ポリリン酸塩注入</li> <li>・原位置ガラス固化(<b>ISV</b>)</li> <li>・分別ゲートシステム (<b>SGS</b>)</li> <li>・井戸注入深度抽出(<b>WIDE</b>)</li> <li>・気中ラドン除去塔</li> <li>・汚染コーティング剥離</li> <li>・セシウム除去用イオン交換</li> <li>・スラッジ洗浄</li> <li>・仮処分場保管</li> <li>・土壌添加剤</li> <li>・土壌掘削</li> </ul>
---	---

表2 サイト別技術適用事例を調査した代表的なDOEサイト

<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <b>Hanford</b></li> <li>・ <b>Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL)</b></li> <li>・ <b>Rocky Flats Environmental Technology Site</b></li> <li>・ <b>Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL)</b></li> <li>・ <b>Paducah Gaseous Diffusion Plant</b></li> <li>・ <b>Los Alamos National Laboratory</b></li> <li>・ <b>Fernald Environmental Management Project (FEMP)</b></li> <li>・ <b>Portsmouth Gaseous Diffusion Plant</b></li> <li>・ <b>Savannah River Site (SRS)</b></li> <li>・ <b>Oak Ridge National Laboratory (ORNL)</b></li> </ul>
---

## (2) DOEの環境修復に係る要素技術調査

DOEにおける環境修復技術に関し、「サイト別技術適用事例調査」を参照し、福島発電所周辺の放射能汚染を浄化する観点から、土壌修復技術、表面除染技術、地下水修復技術について、適用性があると想定される要素技術について調査を行った。

検討に当たっては、少なくとも10種類程度の適用性があると想定される要素技術について次のような項目を調査した。

- － 個別技術の概要
- － 適用事例（適用先、設計例等）
- － 個別技術の性能（性能、二次廃棄物、適用上の留意事項等）

なお、整理の形式は、(財)原子力発電技術機構 廃止措置技術総合調査委員会に取り纏められた「廃止措置技術ハンドブック」（平成19年5月）の形式を参照した。

以上の調査結果を、「別紙3.3 DOE環境修復技術－要素技術調査」にまとめて示す。

また、今回の調査対象としたDOE要素技術の内、福島への適用可能性が想定される技術を表3に示す。

表3 DOE要素技術の中で福島への適用可能性が想定される技術

(土壌修復技術)
・ 土壌掘削
・ 仮処分場保管
・ 熱的脱着
・ 植物修復
・ 固化/安定化
・ 耕起
・ 土壌洗浄
・ 土壌フラッシングによる原位置除染
・ 土壌添加剤による農作物への放射性核種の吸収抑制
(構造物などの表面除染技術)
・ 剥離性塗料/除染ゲル
・ 泡除染
(地下水修復技術)
・ イオン交換（樹脂）
・ 透過性反応バリア
・ 分離
・ 地下水ポンプ輸送/ポンプ揚水処理

### (3) DOE環境修復技術の福島への適用性検討

(1)、(2)で述べたDOE環境修復技術調査で得られた技術を福島発電所周辺の放射能汚染（特に土壌汚染）を浄化する観点から、それぞれの技術の有効性等を調査し、福島への適用性の検討を行った。また、これらの検討から、環境修復技術のとりまとめとして、原子力学会クリーンアップ分科会が編集している除染技術カタログへ組み入れる候補となる要素技術を絞り込むための検討を行い、有識者検討委員会の審議に諮った。

以上の検討結果を、「別紙3.4 DOE環境修復技術－福島への適用性検討及び除染技術カタログ掲載候補の検討結果」、及び「別紙3.5 除染技術カタログ掲載候補技術のデータシート化」に示す。

除染技術の項目は、(1)、(2)の項目と同じとした。

福島への適用性については、以下の分類で示した

- ◎：適用性が高い。
- ：適用性あり。
- △：適用性は低い。

除染技術カタログへの追記候補技術の選定は以下の記号で分類した。なお、あわせて、考え方等も記載した。

- A:重要な参考にするべき内容あり。
- B:類例あり。
- C:既適用例がある。

## 別紙 3.1 主要な DOE サイトについて

### **Hanford – Richland, WA**

- －旧核兵器製造サイト、現在は修復が進行中
- －環境修復処分場の中心

Hanford は国有の原子力兵器製造用に 1942 年に設立され、原子燃料を製造し、9 基の原子炉と 5 基の化学分離施設を運転し、原子力兵器用のプルトニウムを製造した。長期間の間にサイトの任務は核物質の他の用途、研究技術開発、廃棄物管理及び環境修復を行った。1990 年代初頭から現在まで、Hanford の主要な任務は環境回復であった。原子炉施設は 1943 年から 1963 年の間に建設されたが、現在では、すべての原子炉は停止している。

### **Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) – Livermore, CA**

- －旧核兵器研究・設計研究所
  - －現在は、国家核兵器安全確保の使命の下、科学技術研究の中心
- LLNL の主要施設は、飛行訓練基地とエンジン解体施設として使用され、1950 年より原子力兵器研究に使われ始めた。サイト 300s は遠隔の高爆発性試験地区として使われた。これには高爆発性機器試験、計器火災区域、粒子加速器などを備えていた。

### **Rocky Flats Environmental Technology Site – NW of Denver, CO**

- －旧核兵器用起爆剤用プルトニウムの製造プラント
- －現在はサイトは環境修復（建屋は解体し、廃棄物は搬出）され、DOE のレガシ管理の長期モニタリングが行われている。

Rocky Flats サイトは 1952 年に設立され原子力兵器の起爆剤として使用するためのプルトニウムを製造し、また、他のウラニウム、ベリリウム、鋼材兵器装置を製造した。Rocky Flat プラントは使用済み核兵器部品、製造用スクラップ、残留物からプルトニウムを回収した。

### **Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (INEEL) – NW of Idaho Falls, ID**

- －現在は、DOE の原子力・エネルギー研究・科学・国家防衛という使命を支援する科学及び技術研究所
- －設立以来、50 以上の原子炉が建設され、開発が行われた。
- －TMI-2 事故の熔融燃料を貯蔵中。

INEEL の前身は米国原子力委員会 (AEC) が 1949 年代に国立原子炉試験所として米国海軍爆弾・砲弾射撃場を設立された。現在は、Idaho 国立技術・環境研究所(INEEL)である。1953-1992 年には、INNEEL でアイダホ化学処理プラントが海軍推力・試験・研究炉の使用済み燃料から濃縮ウランを原子炉兵器製造に再利用するために再処理した。Rocky Flats プラントからの大量の TRU 及び LLW が埋設及び貯蔵されている。

### **Paducah Gaseous Diffusion Plant – Paducah, KY**

- －米国で唯一、ウラニウム濃縮施設を操業（ニューメキシコでの Portmath のガス拡散プラントと URENCO プラントを除く）

このプラントは 1950 年代に建設され、当初は兵器製造用ウラニウム濃縮用に運営された。その後、濃縮ウランを海軍及び商業炉燃料を供給するようになった。1960 年代初頭までは、拡散プロセスに供給する UF<sub>6</sub> はこのサイトで製造されていた。1992 年のエネルギー政策法により、このサイトの拡散プロセスは 1993 年に国有の米国濃縮会社に貸し出されている。Paducah は現在も商用の顧客（主に原子力発電所）用に濃縮を継続している。

## Los Alamos National Laboratory – Los Alamos, NM

－旧原子力兵器研究・設計の研究所

－現在は、国家安全、宇宙開発、再生エネルギー、ナノ技術、スーパーコンピュータの分野で学際的な研究を実施

Los Alamos も 1943 年に、原子力兵器の設計、開発、試験のために設立され、少量のプルトニウム金属及び原子力兵器機器を製造した。このサイトは学術的及び産業用の研究に充填をおいた。

## Fernald Environmental Management Project (FEMP) – Fernald, OH

－旧ウラニウム処理施設（核兵器製造）

－現在はサイトは環境修復（建屋は解体し、廃棄物は搬出）され、DOE のレガシ管理の長期モニタリングが行われている。

－現在は自然保護区として、市民に開放されている。

FEMP は 1950 年代初頭に核物質製造センターとして設立され、ウラン鉱石からウラン金属に変換し、ウラン金属から標的を製造した。

## Portsmouth Gaseous Diffusion Plant – Portsmouth, OH

－旧濃縮ウラン製造（軍用高濃縮ウラン）した。そのプラントは停止し、廃止措置待機中

このプラントは 1950 年代初頭に設立され、当初は兵器用の高濃縮ウランを製造した。その後、拡散プラントの高濃縮部分は海軍推力・研究試験炉の高濃縮ウラン製造用に使用された。1992 年のエネルギー政策法で拡散プラントの低濃縮部分などが国有の米国濃縮会社に貸し出された。これらの施設は、商業用顧客（主に原子力発電所）のためにウランを濃縮する施設として稼働中である。

## Savannah River Site (SRS) – Aiken, SD

－旧原子力兵器製造の基盤材料（プルトニウム 239、トリチウム）製造施設

－現在は、修復が主要な業務、SRS は操業中であり、応用研究・開発

SRS サイトは主に核兵器用にプルトニウム、トリチウム、チタン及び同位元素を製造するために 1950 年に設立された。このサイトでは、燃料を製造し、5 基の原子炉と 2 基の化学分離プラントを運転し、また、研究開発も実施した。SRS はまた重水を製造し、トリチウム処理を行った。非軍事用の任務として熱電流発電機（thermoelectric generators）用のプルトニウム 238 を製造している。

## Oak Ridge National Laboratory (ORNL) - Oak Ridge, TN

－マンハッタン計画中は、ORNL は原子力兵器用のウラン、プルトニウムの分離・製造

－現在は、基礎及び応用の研究開発

ORNL は 1942 年にプルトニウムを最初に製造し、分離するための研究施設として設立された。それ以降、このサイトでは、主に非兵器計画、放射性同位元素の製造やその他の多様な分野の研究を支援している。ORNL は核兵器用の同位元素も製造している。

### 別紙3.2 DOE環境修復技術 サイト別技術適用調査

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
1	29 30	Fernald	Ohio (1993-現在)	ウラン生産	地下水	U	<b>地下水揚水 処理</b>	地下水面より下部にある地下水汚染に対し、揚水井戸を設置し、水中ポンプで地下水をくみ上げ、汚染対象に応じた処理装置により除去する。DOEのFernaldサイトでウラン濃度 50-60ppb を河川への放出前に 10ppb 以下とした。処理装置は 15m <sup>3</sup> /m(3900gpm)の井戸用ポンプ 5 系統。すべての系統でウラン除去用のイオン交換樹脂 Dowex 21K、16-30 メッシュ、強塩基、多孔質を使用。
2	27 28	Fernald	Ohio (1989-現在)	ウラン製造	土壌	U (17.6 pCi/g)	<b>土壌洗浄</b> プロセス水を再利用するための混合廃棄物とイオン交換樹脂をガラス固化、炭酸塩浸出によるウラン浸出	土壌を処理設備へ輸送し、浸出剤（酢酸、塩酸など）での処理、粒子サイズ分離する。ANLのパイロットプラントでの実証は成果としてまともではない。処理速度 11m <sup>3</sup> /hr (50 gal/m)、DF=3。原位置土壌洗浄の例もあり、汚染対策範囲に水等を注入し、土壌に含まれる汚染物を地下水に溶出させ、対象物に応じた処理装置により処理する。
3	1	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	建物の壁 /大型設備の割れ	Pu/Am	<b>霧状固定化による固定</b> 空気中の汚染を霧で除去し、解体前に表面上に固定	空媒汚染の問題などところに InstaCote™ が使用された。
4 13	1	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	建物の壁 /設備の表面	Pu/Am/U	<b>剥離性ペイント/コーティング</b> 掘削時や解体時に再浮遊や汚染の飛散を防止するための固定化剤。	材料の表面または割れの部分に、塗布または散布し、汚染物を封入し、乾燥後固形物として剥離し、回収する。DOE 施設のホットセルやグローブボックスで汚染物の除去に使用されている。EPA による Idaho 国立研究所の試験で、多孔質のコンクリート面において 2 回のでセシウムを 67%除去できた例。InstaCote™ 社の固定化剤 (CC Wet/CC Fix ほか) は建物の壁や設備の表面に適用されている。
	34	Savannah River	Aiken 原子炉施設、SC	Pu 製造炉、再処理施設、廃棄物の廃止措置	床や壁から移動可能な汚染	Cs トリチウム		
5 9 14	2	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	建物の壁 /設備の表面	Pu/Am/U	<b>表面汚染固定化剤</b>	InstaCote™ 社の固定化剤 (CC Wet/CC Fix ほか) は建物の壁や設備の表面に適用されている。
	2	Portsmouth ガス拡散プラント	Ohio (2006-2007)	ウラン濃縮	建物の壁及び設備表面	U	掘削時や解体時に再浮遊や汚染の飛散を防止するため	



参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
	34	Savannah River	Aiken 原子炉 施設、SC	Pu 製造炉、再 処理施設、廃 棄物の廃止措 置	床や壁から移動可能な汚 染	Cs トリチウム トリチウム TCE	の固定化剤.	
6	1	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	硬い表面/ 割れ/角 - 微粒 子状 汚染	Pu/Am/U	<b>真空引き HEPA フィル タ</b>	掘削や解体で気中に微粒子状の汚 染がある場合に適用。
7	1	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	放射性汚染表面の浄化	Pu/Am/U	<b>高圧水洗浄</b> 商品名：ハイドロレイジン グ、洗浄装置に廃棄物回収 装置付	高圧水ポンプを用い 30~300MPa の 水を汚染面に噴射する。モルタル を接合に用いた石造の壁には非常 に効果的。スラッジと水の回収装 置を装備し、除染対象面は乾燥状 態で清浄。
8	1	Rocky Flats (RFETS)	Colorado (1995-現在)	Pu 金属取扱い /Pu 再処理	建物の壁及び設備表面	Pu/Am/U	<b>圧力水洗浄</b>	汚染洗浄水の回収処理が必要。
10 15	31 32 33	多くのウラン鉱 山跡地の修復プ ロジェクト (UMTRA)	Grand Jun- ction, CO Monticello, UT Naturita, CO Rife, CO	私有地の浄化	建物、設備	U	<b>ドライアイス (CO2ペレ ット) ブラスト</b>	汚染物は対象物から熱拡散、ガス 膨張に結果として除去される。ド ライアイスが固体表面に衝突し昇 華し、汚染物のみ高効率フィルタ に廃棄物として捕獲される。
	34	Savannah River	Aiken 原子炉 施設、SC	Pu 製造炉、再 処理施設、廃 棄物の廃止措 置	中間的な研磨技術	Cs Th トリチウム TCE		
11	4	Savannah River	Aiken 原子炉 施設、SC	Pu 製造炉、再 処理施設、廃 棄物の廃止措 置	土壌及びコンクリーチ瓦 礫	トリチウム	<b>加熱脱着</b>	掘削した土壌などから気化温度の 比較的低い汚染物質をバーナなど により加熱し脱着する (300~ 800℃程度)。トリチウムの場合、 加熱処理中に無視できるレベルま で大気中に放出される。処理され た土壌は掘削した場所に戻され る。
12		Savannah River	Aiken 原子炉 施設、SC	Pu 製造炉、再 処理施設、廃 棄物の廃止措 置	床や壁から移動可能な汚 染	Cs Th トリチウム TCE(トリクロロ エチレン)	<b>加熱水研磨</b>	加熱水技術の1つで、蒸気流で洗 浄し真空システムで対象物の汚染 を吸収する。
16		Savannah River	Aiken 原子炉 施設、SC	Pu 製造炉、再 処理施設、廃 棄物の廃止措 置	強力な研磨除染技術	Cs Th トリチウム TCE	<b>グリットブラスト</b>	アルミナやステンレススチールグ リッドを用い、金属やコンクリー トの汚染を剥離する。グリットは 再使用可。

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
17	3	Paducah	ガス拡散プラント (PGDP) Kentucky (1990s-現在)	廃止措置と修復	土壌修復	TCE	<b>電極誘導抽出</b> Lasagna Technology 社の技術による原位置土壌修復	不均質で低浸透性の土壌の汚染を浄化する技術に1つ。土壌中の汚染物に対し電流を用いて移動させ、汚染を有機系炭素の処理層に移動させる。TCEの除去には効果的。Paducahサイトで実績がある。Lasagna Technology社の製品がある。  土壌と地下水の処理。建物や公共施設を周辺部に適用されることが多い。ERHは揮発性汚染物の原位置での熱的処理として使われる。地表下は沸点まで加熱され汚染を放出させる。
18	5	Paducah  Hanford	ガス拡散プラント Kentucky  Washington 1993-現在	廃止措置と修復	土壌修復	TCE PCE 石油製品、オイル、潤滑油	<b>電気抵抗加熱 (ERH)</b> 揮発性汚染物の原位置での加熱脱着処理	土壌と地下水の処理。建物や公共施設を周辺部に適用されることが多い。ERHは揮発性汚染物の原位置での熱的処理として使われる。地表下は沸点まで加熱され汚染を放出させる。
19	6	Oakridge	Tennessee 濃縮施設からの廃棄物放出池	地下水及び表層水の処理	地下水	U	<b>縦型冷凍土壌バリア</b>	地下水の長期的または一時的な汚染に適用。冷凍用配管が地表面下30ftの深さに設置される。これにより、不透過性の冷凍表面バリアを作る。水理的に孤立した池に効果的。
20	7	Argonne 原子炉の周辺修復	1990s	土壌修復	土壌	無機組成物	<b>固化剤添加の深耕</b>	土壌をセメント状またはなどの固化剤と混合し、土壌を深く混合する。反応物は中空の回転子、底部に切断工具付きのクレーン棒で注入される。
21	8	Hanford, Los Alamos, Lawrence Livermore, Savannah River, Yucca Mt.	Washington New Mexico California South Carolina Nevada 1991-現在	土壌修復	深い土壌汚染	トリチウム CTC (Carbon Tetrachloride)	<b>汚染物の SEAMIST を用いたモニタリング</b>	ボアホールの内部に気密膜ライナーを張り付ける。ボアホールの健全性を維持し、同時に、地表面下からのサンプル収集ができるようにする。
22 23 24	35	INEEL	Idahoの研究炉及び試験炉	廃止措置	コンクリート及び金属表面	塩素化した溶媒 (爆発物/推進燃料)	<b>スポンジブラスト</b>	ブラスト材がソフトであり、家屋など対象物表面を傷めないで除染するのに適し、また、二次廃棄物を生成しない方法。Sponge-Jetting などとして市販されている。Idaho
	35	LANL	New Mexico 試験施設	施設の廃止措置	スクラップ金属	各種放射性核種		

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
	26	Fernald 建屋 1 A	Ohio 1996	ウラン取扱い 施設の廃止措 置	濃縮ウランプロセスの残 留物で汚染されたコンク リート基礎打ちタンクの 洗浄法として実証され た。	U		研究所などでの実績あり、汚染レ ベル 18,000 dpm/100 cm <sup>2</sup> から検出 下限までの汚染の低減した。
25	36	Hanford Nuclear Waste Treatment Plant Low Activity Waste Facility	Washington 2008-現在	高レベル廃棄 物の処理(ガラ ス化)	鋼製容器のふたの溶接 部、設備、工具及び部品 の洗浄(例えば、鉛遮蔽、 ドリル装置、実験室設 備、グローブボックス、 電気設備、換気ダクト、 建物部品、機械、マニピ ュレータ)	Pu U トリチウム Sr-90 I	氷ジェット/氷ブラ スト	水処理装置を備えた施設の除染に 適す。弁やポンプの除染に実績あ り。除染性能は乾式ブラストと同 等。
26 38 39	52	Idaho National 実験室規模試験	Idaho	施設床・壁の廃 止措置	多孔質コンクリート	Cs	泡・ゲル除染 剥離可能な膜を生成する泡 及びゲル	除染用ゲルや泡剤を施設の床や壁 に適用する。多孔性コンクリート に対して複数回の除染処理により 初期の Cs の 53-56% を除去。非多 孔性平面に対しては、1 回の処理 で 99% 除去可能。米国では DeconGel 社、Bartlett 社などで製 品化されている。 初期の段階で約 50% 除去。アルフ ァ及びベータ汚染に適用。通常の エリアでは除去性能は 90% 以上を 示した。床エリアも同様。
	20	Lawrence Livermore National Laboratory	California 2008	核物質取扱い ラボの廃止措 置	高汚染した環境中で高汚 染したグローブボックス: 鋳鋼、アルミニウム、 Lexan window, Hypalon gloves	Pu-238 Am		
	20	Oak Ridge National Laboratory Building 2026	2007 OakRidge, TN	廃止措置	建屋の壁、床	U Pu		
27 28	38 4	Oak Ridge, Hanford, West Valley, 実験室及 び工学規模試験	Tennessee Washington New York	プロセス水の 処理	汚染水	Cs	イオン交換樹脂	3 M 実験設備に入る Cs-137 濃度は 1,200 pCi/L 程度。出口 Cs-137 濃度 は 14 pCi/L 以下。
	39 38 4	Idaho National Laboratory 実証 試験	Idaho	プロセス水の 処理	汚染水	Cs, Sr		
29	9	Rocky Flats	Colorado	廃止措置	汚染表面(建屋の壁、床、 グローブボックス)	Pu	化学除染法	硝酸セリウムはプルトニウムの除 染に効果的。硝酸セリウムの水蒸 気注入または洗浄は Rocky Flats で 低濃度の汚染したステンレス鋼に 対し浄化基準以下に除染できた。 化学除染剤として硝酸セリウム は、海外でも適用され、我が国で も実証されている。

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
30	9	Hanford	Washington K east Basin	廃止措置	水深下 5.1m (17ft) の汚 染した盆状壁	トリチウム C-14 Sr-90 Pu-239/240 6 価クロム	<b>水中高圧水洗浄</b> (水中ハイドロレイジン グ)	水中ハイドロレイジングを用いた 水中の実条件下で実証し成功し た。適用の限界としては、角部に 厚く堆積したペンキ、壁のひび割 れ部、壁や床の穴状の汚染部分の 除去は通常の除染法と同様、除去 が難しい。乾式と湿式も同様。
31	10 11 12	INEEL 処理適用性試験  Hanford Feasibility Study	放射性廃棄 物管理施設 (RWMC), 2002  地表下処分 エリア (SDA) 2011	土地表面	土壌と混合した混合 TRU	Pu	<b>原位置での土壌グラウ テイング</b> グラウトを高圧で土壌中に 注入し固化する技術	高圧 (40MPa) 注入ジェットグラ ウテイングの特徴 - 小規模の汚染土壌の安定化及び ホットスポット除去に適す - 大容量の廃棄物に対して適さな い - 制約として、地表下の不均質性 (グラウトの分布に影響) に対 してはグラウト性能の確認・監視 は極めて難しい。
32	13	Brookhaven National Laboratory	OU I/IV VOC 1997-2001	地下水修復	地下水 - 汚染プルーム	Sr-90 (25 pCi/l)	<b>土壌の蒸気抽出/エア スパージ</b>	吸引井戸を設置し、土壌中に水蒸 気を注入して、有害物を抽出す る。Brookhaven 研究所で地下水の Sr-90 の数エーカーの汚染に対し適 用されたが、効果はなかった (濃 度は浄化基準以下には下がらな かった)。
33	14 17	Mortandad Canyon	Los Alamos, New Mexico 2003	地下水修復	地下水 - 多重汚染したプ ルーム	Pu-239/240 Am-241 Sr-90 亜硝酸塩 過塩化物	<b>透過性反応バリア</b> 原位置で地下に設置した透 過性バリアを通して、化学 的・物理的処理	汚染した地下水に対し、ファネル・ ゲイトバリア系統と併用する。バ リアは 4 つのセル【粗粒鉍砕(コロ イド除去用)、燐灰岩(金属及び放射 性核種用)、ペカン殻、綿の種】に より RCRA 有機物、硝化物、過塩 素酸塩を分解した例がある。  結果として、硝化物、過塩素酸 塩、プルトニウム、アメリシウ ム、Sr-90 の濃度は基準濃度以下に 低減でき、実験室の検出下限以下 に低減できた。この粒子状の多層 バリアは材料が高価ではなく、適 用可能。

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
34	15	Oak Ridge 野外 研究センター, 旧 "S3 Ponds"	Oak Ridge, Tennessee 2002	地下水修復	地下水	U (40 mg/L)	<b>原位置生物的分解</b> 汚染した地下水を微生物に より革新的な浄化法	汚染した地下の汚染に対し、注入 井戸を設置し、微生物の働きを活 性かささせる方法。Oak Ridge ではウ ランで汚染された地下水に適用し た。微生物処理後には土壤に吸着 したウランの 80%までは U(IV)に還 元され、非常に良好だった。
35	16	Savannah River Site (SRS), "F Area Seepage Basins"	South Carolina 2003	地下水修復	地下水	Sr-90 U Tc チタン	<b>中和処理</b> 専門施設での物理/化学処理	Savannah River 研究所では、対象地 下水にアルカリ性ファネル・ゲイト バリアシステムを用い、対象地下水の pH が 5.5 になると pH 10 の溶液を 注入した。下流の井戸による分析 により注入後の早い段階で Sr-90、 ウラン、トリチウムの濃度が飲料 水基準以下に下がっていることが 確認された。
36	18	Hanford 100 Areas	Washington state near the Columbia River	地下水修復	地下水	U	<b>地下水ポリリン酸塩注入</b> 有機物の生物的分解を促進 するために微生物の生育用 薬剤の注入、ポリリン酸はリン 酸塩鉱物からリン酸を加水分 解する作用を期待	Hanford サイトではウランで汚染さ れた地下水にポリリン酸塩を注入し たが鉱物状の析出が形成されず、 目標性能未達だった。現場での適 用時に不十分な結果となった主要 な要因は水理的・地質化学的な不 均質性であったと評価された。
37	19	Hanford /Oak Ridge National Laboratory /Idaho National Engineering Laboratory.	左記サイト 周辺の汚染 土壤	土壤修復法の 試験	各種汚染物で汚染された 土壤	各種無機化学物 質と放射性核種	<b>原位置ガラス固化 ISV</b>	電流を流して土壤を溶解固化する 技術で、放射性核種は熔融固化体 中に保持する。比較的均質な土壤 の場合、地下 6 m (19 ft)までは処理 可能である。処理可能な対象は一 定の均質性が必要である。帯水層 以下の汚染の処理には脱水が必要 である。
40 41 42	21	Tonapah Test Range, Clean Slate 2	Tonapah, Nevada 1999	サイト外処分 を要する放射 性土壤の減容	DOE 及び DoD の兵器テス ト施設 - 汚染土壤	Pu 1,100 pCi/g 程度	<b>分別ゲートシステム (SGS)</b> コンベイヤー、放射線検出 器、コンピュータの組合せ で汚染レベル別に廃棄物を 分別、大きい瓦礫や岩は事 前にふるい分別	SGS は Idaho 研究所及び Brookhaven 研究所で Cs-137 で汚染された土壤 に適用され、廃棄物の減容に実績 がある。 土壤汚染の限度を 400 pCi/g (1.5 万 Bq/kg) 以下にするための分離を行 い、体積減容率約 60%を達成し た。400 pCi/g 以上の土壤に対する 分離には SGS は適さないようであ る。
	22	Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Auxiliary Reactor Area 23	Idaho Falls, Idaho 1999	サイト外処分 を要する放射 性土壤の減容	INEEL の補助原子炉エリア 23 は 17 万 m <sup>2</sup> (41.8 エー カー) の CERCLA サイト で、風で運ばれた汚染。大 部分の汚染は SL-1 炉の 1961 年の事故による破壊 による。	Cs-137 45 pCi/g 以上		

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
	22	Brookhaven National Laboratory, Area of Concern 16,	Suffolk County, New York 2000	サイト外処分を要する放射性土壌の減容	23 のエリアで汚染が確認された。放射性物質の発生源は危険物廃棄物管理施設からの漏れによる。エリア 16 は Cs-137 で表面土壌が汚染されている。	Cs-137 バックグラウンド ~ 348 pCi/g 程度		レベル別分別装置は Eberline Segmented System として製品化。
43 44	23 24	Columbus 環境管理プロジェクト, West Jefferson Facility	2001	廃止措置、修復	土壌/地下水	Cs-137	<b>井戸注入深度抽出 (WIDE)</b> 垂直井戸を設置し、土壌フラッシングした水を真空引きで、地下水と土壌中の蒸気を抽出	セシウムを分離除去するために、クエン酸アンモニウムの塩基性溶液(特許)と選択性分離カートリッジが使われた。 - 多様な土壌の種類に対し適用性を広げるための条件(低いk値 10-3cm/s、高粘土比率への適用など) - 元のブルームを制御するため目標フラッシングエリア設定 - コスト効果のある短期間の設置資機材の準備 - 再利用可能でかつ可搬性設備
	23 24	Ashtabula 環境管理プロジェクト (AEMP) /Portsmouth [Ohio] ガス拡散プラント	Ohio	廃止措置、修復	土壌/地下水	トリクロロエチレン(TCE) U		
45	25 26	Fernald	Cincinnati Ohio 2002-2006	サイト修復、旧ウラン精錬施設の閉鎖	コンクリート廃棄物サイロ (核物質貯蔵装置) の先行例がない汚染	Rn 13-16E3Ci/L	<b>気中ラドン除去塔</b> ラドン含有の空気からラドンを除去するため、乾燥剤塔、活性炭塔、HEPA フィルターを用いる。	ラドンの気体濃度を 95%減少。 2000cfm まで運転 空気 15%相対湿度
46	39	Argonne CP-5 原子炉	Argonne IL	除染と廃止措置	汚染したエポキシ剤に 40 年被覆されたコンクリート床	多様な核種	<b>汚染コーティング剥離</b> 装置はタングステンカーバイトの細粒を吹付け、汚染したコーティング剤の剥離、真空装置による廃棄物の収集装置の組合せ	ROTO-PEEN Scaler 所定の性能を達成。
47	40	Hanford Site Oak Ridge	Richland Washington Ork Rige TE 1996-1997	実規模、ホットセル実証試験	Hanford Site や Oak Ridge に 38 万 m <sup>3</sup> (1 億ガロン) の放射性廃棄物を貯蔵したタンク	Cs-137	<b>セシウム除去用イオン交換</b> モジュール状、可搬型、小型処理装置 アルカリ性廃棄物からのセシウム吸収用溶媒として結晶性シリコチタネイトを用いる。	セシウム除去のため、有機イオン交換樹脂上に Ionsiv IE-911 を塗布することにより、溶媒使用量を低減 (1/300) した。
48	41 42	Hanford Site	Richland Washington	修復技術実証		高濃度の各種放射性核種	<b>スラッジ洗浄</b> 汚染土壌から水により物理的・化学的方法で汚染物を分離	揮発性有機化合物、殺虫剤、燃料、重金属、放射性物質の処理煮用いられた試験または実績あり。 Hanford サイトでは、テクネシウムとウラニウムの修復用に試験継続中。

参照 No	参考文献 No.	サイト名称	場所 (期間)	サイトの使命	汚染対象	主要汚染核種 (濃度)	除染技術	備考 (除染効果)
49	46 47	Hanford Site	Richland Washington	汚染土壌処分 と旧プルトニ ウム処理施設 修復	汚染土壌、解体建屋ガレ キ、埋設廃棄物	低レベル廃棄物	仮処分場保管	保管場所は拡散防止のため、浸出 液の回収、ライナー、被覆が必要 である。DOEの各サイトには、一 時的処分保管場所がある。
50	50 51	Marshall 諸島	1990年代－ 現在	兵器試験場の 汚染の浄化	汚染土壌	Cs-137	土壌添加剤 対象とする汚染物質の結 合、固定、または抽出を促 進	高濃度のカリウムの施肥は、植物 によるセシウム吸収を減少させる 効果がある。ビキニ環礁（マーシ ヤル諸島）での核兵器の大気実験 で農地はセシウムで汚染された。 カリウム肥料（KCl）によりココナ ツ果肉のセシウムが施肥前の5～ 10%に低減した。
51	44 45	Hanford Site	Richland Washington 2009-2011	汚染土壌処分 と旧プルトニ ウム処理施設 修復	汚染土壌	Pu	土壌掘削 汚染土壌を掘削機、プルト ーザ、グレーダー、スクレ ーパーなどにより処理処分 のための除去	サイト内のBC管理区域56.7万m <sup>2</sup> (140エーカー)から50万トンの 土壌を掘削した。掘削土壌は Hanfordサイト内の環境修復処分場 へ輸送した。
52	48 49	Oak Ridge National Laboratory Brookhaven National Laboratory	~1997  1996-1998	土壌修復法の 試験	Oak Ridge National Laboratory 及び Brookhaven National Laboratory の試験 区画	Cs-137 (Brookhavenで は275pCi/g)	ファイトレメディエー ション (植物修復) 土壌中の汚染は植物によっ て取込まれるか、汚染程度 を下げられる。	EPAとDOEはOak Ridgeにおいて各 種の草についてCs-137及びSr-90に 対する効果を試験した。収穫後、 全Cs-137はヒメモロコシ、bahia、 switchgrassに26.8-71.8%が取り込ま れた。

略号

DNAPL	Dense Nonaqueous Phase Liquid
ERH	Electrical Resistance Heating
FP	Fission Product
IX	Ion Exchange
LNAPL	Light Nonaqueous Phase Liquid
MAWS	Minimum Additive Waste Stabilization
P&T	Pump and Treat
RDS	Radiation Decontamination Solutions

## 参考文献リスト

1. <http://rockyflats.apps.em.doe.gov> Appendix 2 –“ Technology at Rocky Flats” Demonstration Summary Sheets
2. InstaCote paper - The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, September 4-8, 2005, Scottish Exhibition & Conference Centre, Glasgow, Scotland, ICEM05-1007, Contamination control methods & technologies for remediation, decontamination, and decommissioning activities at radiological & hazardous waste facilities
3. The Lasagna Technology for In situ Soil Remediation. 1. Small Field Test Environ. Sci. Technical 1999, Publication date: Feb 25, 1999, American Chemical Society
4. Groundwater and Soil Cleanup: Improving Management of Persistent Contaminants (1999) Commission on Geosciences, Environment and Resources, The National Academies Press
5. InSitu Thermal Remediation of DNAPL and LNAPL Using Electrical Resistance Heating , Gregory Beyke, David Fleming , Remediation Summer 2005, 2005 Wiley Periodicals Inc.
6. Evaluation of Vertical Frozen Soil Barrier at Oak Ridge National Lab. , Stanley W. Lynn, Steven Rock, Carl Rhodes , published online: 11 Jan 2007, 2000 Wiley Periodicals, Inc.
7. Deep Soil Mixing, Technology Overview, <http://www.deepsoilmixing.com/sites/deepsoilmixing/techoverview.aspx>
8. SEAMIST, Innovative Technology Summary Report, prepared for U>S> DOE, Office of Environmental management, Office of Technology Development, August 1995

9. ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council). 2008. *Decontamination and Decommissioning of Radiologically Contaminated Facilities*. RAD-5. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Radionuclides Team. [www.itrcweb.org](http://www.itrcweb.org).
10. OU 7-13/14 In Situ Grouting Project Grout Storage and Mixing <http://ar.inel.gov/images/pdf/200411/2004111500748KAH.pdf>
11. IN SITU GROUTING TREATABILITY STUDY FOR THE IDAHO NATIONAL ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL LABORATORY SUBSURFACE DISPOSAL AREA— TRANSURANIC PITS AND TRENCHES, <http://www.wmsym.org/archives/2002/Proceedings40/312.pdf>
12. Evaluation of In Situ Grouting as a Potential Remediation Method for the Hanford Central Plateau Deep Vadose Zone, Jan 2011. [http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical\\_reports/PNNL-20051.pdf](http://www.pnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-20051.pdf)
13. <http://www.em.doe.gov/Pages/groundwaterReport.aspx?plumeCode=179>
14. Multi-layered Permeable Reactive Barrier (PRB) at Mortandad Canyon in Los Alamos, New Mexico. [http://www.clu-in.org/products/demos/search/vendor\\_details.cfm?Project\\_ID=88](http://www.clu-in.org/products/demos/search/vendor_details.cfm?Project_ID=88)
15. Enhanced In Situ Bioremediation at Oak Ridge Field Research Center, former "S3 Ponds" site in Oak Ridge, Tennessee. [http://www.clu-in.org/products/demos/search/vendor\\_details.cfm?Project\\_ID=272](http://www.clu-in.org/products/demos/search/vendor_details.cfm?Project_ID=272)
16. Denham, Miles. January 2008. SRNL Evaluates Sustainable Remediation Strategies for Metals and Radionuclides. EPA - Technology News and Trends, Issue 34. <http://www.clu-in.org/download/newsletters/tmandt0108.pdf>
17. Treatability Study of Reactive Materials to Remediate Ground Water Contaminated with Radionuclides, Metals and Nitrates in a Four-Component Permeable Reactive Barrier.
18. SRNL-STI-2008-00424 Supplemental Columbia River Protection Activities at the Department of Energy Hanford Site: 2008 Technical Review
19. <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-8.html>
20. <http://decongel.com/ddsite.html>
21. Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 4. EPA 542-R-00-006, June 2000. Member Agencies of the Federal Remediation Technologies Roundtable
22. Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 5. 42-R-01-008, May 2001. Member Agencies of the Federal Remediation Technologies Roundtable
23. NETL's FY 2001 Program Accomplishments, National Nuclear Security (NS).
24. WM '02, Conference, February 24-28, 2002, Tucson, AZ. Demonstrating and Deploying Private Sector Technologies at DOE Sites – Issues to be Overcome. R. C. Bedick. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory.
25. Process Automation Case Study, Fluor, Fernald: <http://www.industry.usa.siemens.com/automation/us/en/automation-systems/process-control-system/case-studies/Documents/contpafi-00056-0107.pdf>.
26. FLUOR GOVERNMENT GROUP, Fluor Fernald, Inc., Project Management Institute, 2007 Project of the Year Submittal, FERNALD CLOSURE PROJECT: <http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:UQifZUF3eXk:www.pmi.org/About-Us/Our-Professional-Awards/-/media/PDF/Awards/Fernald%2520Project%2520of%2520the%2520Year%2520Nomination.ashx+Fernald+Silos+randon+control+facility&hl=en&gl=us&pid=bl&srcid=ADGEEsgfbO2XGgRAuxfxZ6sfMAJKO59GdyTDCqQ4yYCbZxs2KZTlIMEhxY1PRUnSraj8LE7RwbcJ9MxOYjVkiVJgeaGD6pQDqgJFV5EZGWtYAZ2GzOnusVHeATLwYBBNTiNOefwIA4GR&sig=AHIEtbQEextzpNJRAx0F2hsKltpQ6L9H2g>
27. Minimum Additive Waste Stabilization (MAWS) program Phase 1 Soil Washing Final Report ANL-95/46, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, August 1995
28. COMPARISON OF GLASSY SLAG WASTE FORMS PRODUCED IN LABORATORY, X.Feng, D. J. Wronkiewicz, N. R. Brown, and M. Gong, ARGONNE NATIONAL LABORATORY Chemical Technology Division and C. Whitworth, K Filius, and D. Battleson MSE, INC.
29. Representation of Rate-Limited Sorption in Model Simulation of Pump-and-Treat Remediation at the Fernald, Ohio DOE Site, Mark G. Shupe, Daniel K. Burnell, Thomas A. Schneider: [http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=shupe\\_burnell\\_and\\_schneider\\_2011\\_modflow\\_conference\\_paper&source=web&cd=1&ved=0CBOQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.geotransinc.com%2Fpublications%2FShupe\\_Burnell\\_and\\_Schneider\\_2011\\_MODFLOW\\_Conference\\_Paper.pdf&ei=IXXfTvaNPMMeA2AWFidmLBQ&usq=AFQjCNHkrb5UM3SRLJps5k-us8HHY1G76A&cad=rja](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=shupe_burnell_and_schneider_2011_modflow_conference_paper&source=web&cd=1&ved=0CBOQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.geotransinc.com%2Fpublications%2FShupe_Burnell_and_Schneider_2011_MODFLOW_Conference_Paper.pdf&ei=IXXfTvaNPMMeA2AWFidmLBQ&usq=AFQjCNHkrb5UM3SRLJps5k-us8HHY1G76A&cad=rja)
30. FEMP-2577 Ion Exchange Contaminated Technology in the Remediation Groundwater of Uranium at Fernald. Chris Sutton, Cathy Glassmeyer, and Steve Bozich. September 29, 2000 Fernald Fluor Fernald, Environmental. For Presentation Spectrum September Chattanooga, 2000 Conference: [http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:apk\\_KRouEIJ:www.osti.gov/bridge/servlets/purl/770689+Fernald+pump+and+treat+results&hl=en&gl=us&pid=bl&srcid=ADGEEsiY5u3T6gJlaOdV-zzsNyQOzImSKlwbkShuLEI- u\\_TY8xyg6TbSEn5twSSHPFmuAj0wUE7Dej11T8aKovJLe36H-hv1DG2ts0qIXk5nf0pv5h41DfJvGSVjC0bSF0gRXPk4Pe&sig=AHIEtbQDji1-Y3hfmHlqbsPhzM5NgACO-Q](http://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:apk_KRouEIJ:www.osti.gov/bridge/servlets/purl/770689+Fernald+pump+and+treat+results&hl=en&gl=us&pid=bl&srcid=ADGEEsiY5u3T6gJlaOdV-zzsNyQOzImSKlwbkShuLEI- u_TY8xyg6TbSEn5twSSHPFmuAj0wUE7Dej11T8aKovJLe36H-hv1DG2ts0qIXk5nf0pv5h41DfJvGSVjC0bSF0gRXPk4Pe&sig=AHIEtbQDji1-Y3hfmHlqbsPhzM5NgACO-Q)
31. Information on the range of options and techniques available for the management of decommissioning wastes and items Final report, December 2007. Enviro Consulting Ltd., prepared for SD:SPUR Learning Network: [www.sdspur.com/pdf/options\\_paper\\_12\\_07.pdf](http://www.sdspur.com/pdf/options_paper_12_07.pdf)
32. [www.icesolv.com/co2.asp](http://www.icesolv.com/co2.asp)
33. <http://www.lm.doe.gov/colorado/m> LM Sites Data and Fact Sheets
34. AN OVERVIEW OF THE SAVANNAH RIVER SITE (SRS) DECON FACILITY. Heatherly Hicks Dukes. Westinghouse Savannah River Company for WM'99 CONFERENCE, FEBRUARY 28 - MARCH 4, 1999: [www.wmsym.org/archives/1999/33/33-7.pdf](http://www.wmsym.org/archives/1999/33/33-7.pdf)
35. SpongeJet Small Nuclear Pack [www.spongejet.com/.../5.../Small%20Nuclear%20Info%20Pack.pdf](http://www.spongejet.com/.../5.../Small%20Nuclear%20Info%20Pack.pdf)
36. Ice Tech ([www.icetechworld.com](http://www.icetechworld.com)), Precision Iceblast Corporation (<http://precision-iceblast.com>), Cold Jet ([www.coldjet.com](http://www.coldjet.com)), Ice Solv ([www.icesolv.com](http://www.icesolv.com))
- 37.
38. Technology for Surface Preparation, Decontamination & Remote Operations <http://www.pentekusa.com/index.html>
39. INEEUXT-97-00825 Demonstration of Various Ion Exchange Sorbents for the Removal of Cesium and Strontium from TAN Groundwater. August 1997. T. G. Gam K. M. Brewer R. D. Tillotson T.A. Todd <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/565567-mUYSI4/webviewable/>
40. DOE/EM-0415 Innovative Technology Summary Report. Cesium Removal Using Crystalline Silicotitanate. Tanks Focus Area. May 1999: <http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=40.%09doe%2Fem-0415%20innovative%20technology%20summary%20report.%20cesium%20removal%20using%20crystalline%20silicotitanate&source=web&cd=1&ved=0CBOQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.p2pays.org%2Fref%2F13%2F12775.pdf&ei=FNftt2pBo202AW7xfWZBQ&usq=AFQjCNE2VhStS4WszIDG7MYnrFJUOE8EA&cad=rja>



41. Summaries of Four Innovative Tank Technologies. LA-UR-00-967 December 1999. Scott F. DeMuth, TSA-4, Janet Harry, EES-5, Anthony Nastasi, TSA-7, Edward M. Van Eeckhout, TSA-4 for Los Alamos National Laboratory.
42. PNNL-11432 UC-721 Bench-Scale Enhanced Sludge Washing and Gravity Settling of Hanford Tank C-106 Sludge. K. P. Brooks R. L. Myers K. G. Rappe. January 1997. Prepared for the U.S. Department of Energy
43. WSRC-MS-2003-00377 3m Emporea -Membrane Filter Technology: Cesium Removal From Fuel Storage Water Basin. L. N. Oji. Westinghouse Savannah River :[http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=department%20of%20energy%20%22decontamination%20factor%22&source=web&cd=21&ved=0CBsQFjAAOBQ&url=http%3A%2F%2Fsti.srs.gov%2Ffulltext%2Fms2003377%2Fms2003377.html&ei=LeTfTv\\_vNObs2qWs3umCBQ&usq=AFQjCNFFiQIOqCQr4qA2eyYOL6YBdAf9zQ&cad=rja](http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=department%20of%20energy%20%22decontamination%20factor%22&source=web&cd=21&ved=0CBsQFjAAOBQ&url=http%3A%2F%2Fsti.srs.gov%2Ffulltext%2Fms2003377%2Fms2003377.html&ei=LeTfTv_vNObs2qWs3umCBQ&usq=AFQjCNFFiQIOqCQr4qA2eyYOL6YBdAf9zQ&cad=rja)
44. U.S. Department of Energy, Hanford Site: <http://www.hanford.gov>.
45. U.S. Department of Energy, Richland Operations Office, News Release, August 11, 2011: <http://www.em.doe.gov/>.
46. ERDF Expansion and Upgrades: [http://www.hanford.gov/news.cfm/DOE/E1002033\\_1.pdf](http://www.hanford.gov/news.cfm/DOE/E1002033_1.pdf).
47. U.S. Department of Energy, Hanford Site, Environmental Restoration Disposal Facility: <http://www.hanford.gov/page.cfm/ERDF>.
48. Entry, JA, LS Watrud and M Reeves. "Accumulation of Cs-137 and Sr-90 from Contaminated Soil by Three Grass Species Inoculated with Mycorrhizal Fungi." 1999. Environmental Pollution 104: 449-457.
49. "Final Progress Report No. 2: Further Evaluations of Radionuclide Phytoextraction Feasibility using Soils from the U.S. Department of Energy Complex."
50. Marshall Islands Dose Assessment and Radioecology Program, Bikini Atoll: <https://marshallislands.llnl.gov/bikini.php>.
51. UCRL-LR-147596, "Effect of Potassium on Uptake of 137Cs in Food Crops Grown on Coral Soils: Annual Crops at Bikini Atoll."

### 別紙 3.3 DOE 環境修復技術－要素技術調査

#### 目的

米国エネルギー省 (DOE) における環境修復技術に関し、「(1) サイト別技術適用事例調査」を参照し、福島発電所周辺の放射能汚染を浄化する観点から、土壌修復技術、表面除染技術、地下水修復技術について、適用性があると想定される要素技術について調査を実施した。

#### 土壌修復技術

- 1 土壌掘削 (Soil Excavation)
- 2 仮処分場保管 (Temporary Disposal Repository)
- 3 熱的脱着 (Thermal Desorption (Soil Heating))
- 4 植物修復 (Phytoremediation)
- 5 固化/安定化 (S/S) (Solidification/Stabilization)
- 6 耕起 (Soil Tilling)
- 7 土壌洗浄 (Soil Washing)
- 8 土壌フラッシングによる原位置除染 (Soil Flushing)
- 9 土壌添加剤による農作物への放射性核種の吸収抑制 (Soil Additives)

#### 構造物などの表面除染技術

- 1 剥離性塗料/除染ゲル (Strippable Paint/Decontamination Gel)
- 2 泡除染 (Decontamination Foam)

#### 地下水修復技術

- 1 イオン交換 (樹脂) (Ion Exchange (Resins))
- 2 透過性反応バリア (Permeable Reactive Barriers (PRB))
- 3 分離 (Separation)
- 4 地下水ポンプ輸送/ポンプ揚水処理 (Ground Water Pumping/Pump and Treat)

・ 土壌修復技術

( -1)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	専門施設処理 (Ex Situ Treatment)
個別技術	土壌掘削 (Soil Excavation)
関連施設、対象	土壌、沈殿物、石

1. 個別技術概要

・ 敷地外での処分及び処理のために、計画された台数の掘削機、スクレイパー、ブルドーザー、運搬トラック等を使用して行う汚染土壌の除去。

2. 適用事例

(1) 適用先

・ Hanfordサイト（以前はプルトニウム生産プラント）は、米国で最も汚染された核施設であり、国の高レベル放射性廃棄物の容積の3分の2に相当する。

200,000 m<sup>3</sup> の高レベル放射性廃棄物

710,000 m<sup>3</sup> の固体放射性廃棄物

520 km<sup>2</sup> の汚染された地下水

(2) 設計例

・ 複数台のスクレイパーを使用し、小さい掘削深さに分けて掘削を行う。

各掘削深さの作業後、土壌の汚染状況を検査する。

過剰な掘削を排除する。

・ スクレイパーを使用し、輸送用に掘削物を山積み (stockpile) にする。

・ 輸送材料を採掘機やブルドーザーを用いて積む。

・ 掘削された材料を輸送する。

・ 廃棄物仮処分場

容量 予想される廃棄物量により決定される。

場所 有効輸送距離により決定される。

(3) 費用

・ 決定要因

- 汚染物質について

影響のある面積

地中の影響のある深さ

汚染レベル

- 掘削土壌の輸送について

輸送の総距離

輸送方法

鉄道 200マイル (約320km) 以上で費用効果がある。

トラック 長距離及び短距離

スクレイパー 1マイル (約1.6km) 以下の短距離



エレベーターティンク・スクレイパー (Elevating Scraper)  
 ~ \$175/hr (約14000円/時)  
 容量 26 m<sup>3</sup>

3. 個別技術の性能

(1) 性能

- ・性能は以下に基づく。
  - 重機の使用可能性及び大きさ
  - 土壌の特性
  - 掘削深さ
- (2) 二次廃棄物
  - ・重機の運転からの副産物
    - 排気
    - 使用済み油
    - タイヤ
- (3) 遠隔操作性
  - ・遠隔操作の重機は経済的選択ではない。
- (4) 適用上の留意事項
  - ・資源の使用可能性
  - ・現状の交通システムへのアクセス
  - ・すべての専門施設処理の選択肢の必要条件
  - ・実証され、適用されている技術

#### 4. 評価

- ・大量の廃棄物を速やかに除去するのに速く安価な解決策

#### 5. 参考文献

(1) Hanford Site ([http://en.wikipedia.org/wiki/Hanford\\_Site](http://en.wikipedia.org/wiki/Hanford_Site))

#### ( 2)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	専門施設処理/封じ込め (Ex Situ Treatment/Containment)
個別技術	仮処分場保管 (Temporary Disposal Repository)
関連施設	土壌、沈殿物、石、瓦礫

#### 1. 個別技術概要

- ・掘削土は処理エリアに置かれる。処理エリアには、汚染拡散防止のための、浸出液の回収、ライナー、被覆方法が含まれる。
- ・廃棄物の層は、高レベルの汚染物が低レベルの汚染物の下となるように配置される。

#### 2. 適用事例

##### (1) 適用先

- ・ERDF (環境修復処分施設、Environmental Restoration Disposal Facility) は世界最大の工学的低レベル廃棄物仮処分施設である。

1500万トンの容量

1日でトラック900台分の積み荷まで置くことが可能

多重バリアのライナーシステム

##### (2) 設計例

- ・ライナーシステム

一次と二次の封じ込めは、汚染物が土壌や地下水へ移動するのを防止するため、水分を保持し回収する。



• 廃棄物の配置

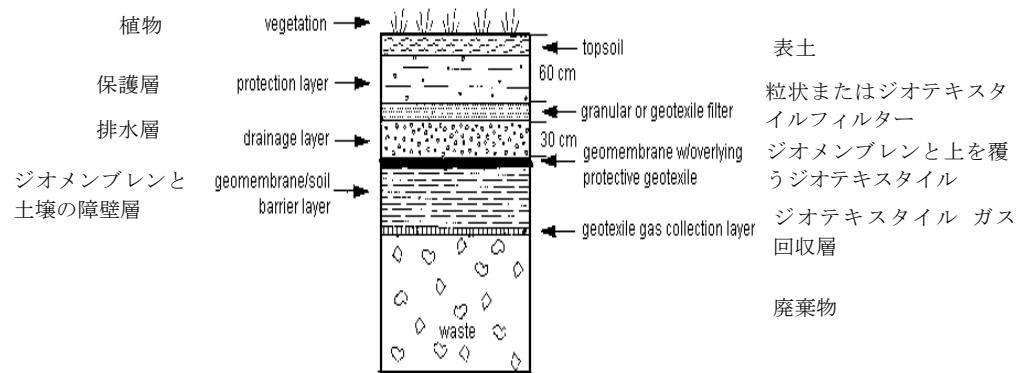
高レベル廃棄物は低レベル廃棄物の下に置かれる。

要求される回収性により配置を決定する。

• 被覆システム

汚染物の移動の防止

表面での被ばくの最小化



(ジオテキスタイル：透水性のある石油化学繊維)

(ジオメンブレン：透水性の極めて小さい膜状構造の製品)

• 回収システム

一時的処分保管場所からの浸出液の回収と処理

(3) 費用

• 保管場所の以下の条件により生じる重機及び労働のコストに依存する。

設計された容量

掘削深さ

設計要件

3. 個別技術の性能

(1) 性能

• 危険な廃棄物の毒性、容量は低減されない。

• 廃棄物の移動性を低減する。

(2) 二次廃棄物

• 浸出液

(3) 遠隔操作性

• 自動浸出液システム

• 地下水の自動監視

(4) 適用上の留意事項

- ・危険な廃棄物の毒性、容量は低減されない。
- ・廃棄物の移動性を低減する。

4. 評価

- ・仮処分場は、高レベル及び低レベルの廃棄物を安全に保持することが可能。
- ・予定された用途より長い存続期間に対して計画することが可能。
- ・実証され、適用されている技術

5. 参考文献

(1) <http://www.frtr.gov/>

(2) <http://www.hanford.gov/page.cfm/ERDF>

( 3)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	専門施設除染 (Ex Situ Decontamination)
個別技術	熱的脱着 (Thermal Desorption (Soil Heating))
関連施設	土壌、沈殿物、スラッジ

1. 個別技術概要

- ・汚染土壌に熱を加える処理方法
- ・300℃～800℃の温度範囲で土を過熱
- ・汚染物質から汚染されていない土を分離
- ・一連の濃縮器と濾過器を通して生成物を回収する。

2. 適用事例

(1) 適用先

・Land Clean社は、極度に汚染された物質の試作規模の処理試行を実施している。(メチルナフタレン、アセナフテン、アセナフチレン、アントラセン、フルオランテン、フルオレン、ナフタリン、フェナントレン、ピレン)

汚染物質は、PAH濃度で、初期濃度の1,000～10,000mg/kgから約1mg/kgに減少した。

(PAH：多環芳香族炭化水素、Polycyclic Aromatic Hydrocarbon)

・DOE Fernaldサイト：TD\*X社は、真空熱的離脱 (VTD) の試験施設を建設。

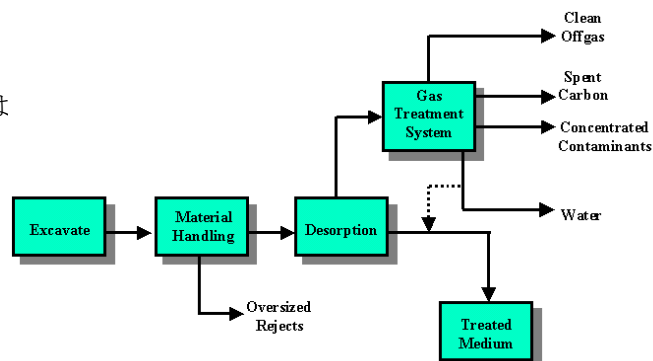
1日あたり、55ガロン(約200L)のドラム缶39個分の容量を実証。

処理できた汚染物：PCB、油分や水分のあるスラッジ、塗装廃棄物、溶剤と濾過材、引火性の液体タンクからのスラッジ

(2) 設計例

・特殊な運搬可能なプラントには

- 燃料供給ユニット
- 集塵機
- 濃縮器
- 空気濾過器
- 土壌改良剤



(3) 費用

・燃料費は主要な運転費用となる。処理速度が遅くなると、コストは高くなる。

3. 個別技術の性能

(1) 性能

・Land Clean社は、30ton/hrの容量を達成できるとしているが、汚染のレベルはシステムの生産性に影響するものと考えられる。

(2) 二次廃棄物

- ・バーナーの排気
- ・回収された生成物
- ・適切にろ過または処理された場合の清浄空気

(3) 遠隔操作性

・自動システムは、適切な確認及び警報装置で構成される。

(4) 適用上の留意事項

- ・実現可能な方法または経済的な方法としては実証されていない。
- ・セシウム汚染土壌に使用する経済的方法としては実証されていない。

4. 評価

・セシウムの処理のための経済的解決方策ではないと考えられる。

5. 参考文献

(1) Land Clean ([www.landclean.net](http://www.landclean.net))

(2) Takashi Sugimoto ([www.linkedin.com](http://www.linkedin.com))

(3) FRTR (<http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-26.html>)

(4) TD\*X; Fernald Site ([http://www.tdxassociates.com/PDF/VTD\\_PROJECT\\_PROFILE.pdf](http://www.tdxassociates.com/PDF/VTD_PROJECT_PROFILE.pdf))

( 4)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	現位置生物学的処理 (In Situ Biological Treatment)
個別技術	植物修復 (Phytoremediation)
関連施設	砂、土、スラッジ、地下水

1. 個別技術概要

・汚染物質を阻止するか、低下させるか、除去することができる植物により、汚染土壌の汚染物濃度を低減する。

・植物は焼却するか堆肥にすることにより処分される。

・土壌は、セシウム137に対する植物の生物学的利用能を増加させるために改良することが考えられる。

2. 適用事例

(1) 適用先

・ARS (農業研究所, Agricultural Research Service) による試験

アオビユと呼ばれるアカザを使用して、3か月の成長の時期の1回で、全セシウム量の3%が土壌から取り除かれた。

汚染された試験サイトを15年以内に処理することができた。

・米国環境保護局およびオークリッジ国立研究所は、アーバスキュラー菌根菌播種後の汚染土壌からセシウム137及びストロンチウム90の蓄積に対する、バヒア、ジョンソン、スイッチグラスの有効性について試験を行った。

バヒア、ジョンソン、スイッチグラスの地上のバイオマスには、3回の収穫後、セシウム137の総量の26.3%から71.7%が累積した。

#### (2) 設計例

・設計での判断基準：使用される植物のタイプ

植物を損なうことなしに、COC（関心のある汚染物質）を効果的に吸収する能力  
COCが存在する土壌のタイプ（植物は粘土から成分を吸収するのは効率的でない）  
原産でない植物の導入の環境に対する影響

・設計での判断基準：汚染された植物の処分

堆肥

焼却

#### (3) 費用

・時間と費用がかかる。



### 3. 個別技術の性能

#### (1) 性能

2. (1) に記載。

#### (2) 二次廃棄物

・汚染された生物学的な廃棄物

#### (3) 遠隔操作性

#### (4) 適用上の留意事項

・大部分のケースで、浅い土壌に限定される。

・高濃度の有害な物質は植物に有毒であり得る。

・汚染物質は土壌から空気への移動し得る。

・セシウムと粘土の結びつきは時間とともに強くなり、植物がセシウムを吸収することを困難にする。（一般に、セシウム137の根の吸収は葉の吸収より低い。）

・以下の条件による制限を受ける。

成長する時期

植物の吸収速度

根の深さ

### 4. 評価

・試験ではセシウムは植物に吸収されるとしているが、大きい規模の浄化の取組みは経済的または実践的な技術として正当化はされていない。

### 5. 参考文献

#### (1) Agricultural Research Service

<http://www.ars.usda.gov/is/AR/archive/jun00/soil0600.htm>

(2) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-3.html>



( 5)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	原位置または専門施設での封込め (In Situ/Ex Situ Containment)
個別技術	固化/安定化 (S/S) (Solidification/Stabilization)
関連施設	砂、土、スラッジ

1. 個別技術概要

- ・ 固化 (Solidification) は、安定したかたまりの中に汚染物質を物理的に結合する。
- ・ 安定化 (Stabilization) は、移動性を減少させるように汚染物質を化学的に誘導する。

2. 適用事例

(1) 適用先

- ・ Savannah River - 旧 F 地区 浸透池 (Seepage Basin)、 904-49G 建屋 - セシウム137の汚染に対し S/S (固化/安定化) を使用。
- ・ Idaho 国立工学研究所 - 反応度事故研究施設 - 1995年に セシウム137の S/S を完了
- ・ スーパーファンド地区での S/S プロジェクトで用いられた結合剤及び試薬 (セシウム137は処理された汚染物質の1%以下)

結合剤または試薬	プロジェクト数
セメント	47
登録商標をもつ試薬	22
リン酸塩	14
pH 制御	12
飛散灰 (Fly Ash)	10
石灰	10
硫黄	14
アスファルト	1

- ・ DOEの試作規模のポリエチレンカプセル化 (polyethylene encapsulation)  
放射性核種を含む汚染物質を対象とする (セシウム、ストロンチウム、コバルト等)
- ・ DOEのアーキ溶解装置ガラス固化 (arc melter vitrification) プロセス  
分割されたTRU廃棄物のスラグ相化  
生成物は、浸出性の減少を示す。

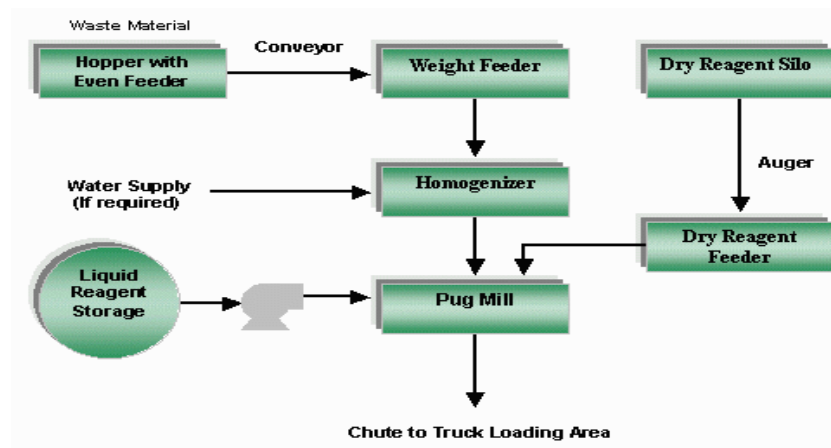
(2) 設計例

- ・ S/S プロセス
  - アスファルト固化： 溶融瀝青 (bitumen) は、廃棄物 (一般にスラリー状) と混合され、固体と瀝青の様な混合物を形成する。
  - 乳化アスファルト： 廃棄物固体の回りに疎水性アスファルトの連続的組織を形成する。
  - 改良硫黄セメント： 商業的に入手可能な熱可塑性セメントは、廃棄物と混合され、様な溶融した懸濁液を形成し、冷却、保管、処分用に容器に排出される。
  - ポリエチレン押出加工： ポリエチレンの結合剤と乾いた廃棄物を混ぜ、安定な様な混合物を製造する。
  - ポゾラン/ポルトランドセメント： ポゾランベースの材料からのケイ酸塩は、化学的に水と反

応し、固体のセメント状の組織を形成する。その組織により廃棄物の取扱い性と物理的特性は改善される。

- 放射性廃棄物固化： 固化添加剤（グラウト、セメント等）は、放射性廃棄物材料をカプセル化し一様で安定な組織を形成する。

- スラッジの安定化： 試薬（スラグまたはセメント材料）をスラッジに添加し、物質を移動しにくく、毒性が低い形態に変換する。



- 可溶性リン酸塩： 汚染物質を固化なしに固定するための、金属へのリン酸塩とアルカリの添加

- ガラス固化/熔融ガラス： 重金属及び放射性核種は、ガラス構造に組み入れられ、汚染物質の浸出に対する抵抗性が与えられる。

### (3) 費用

・ スーパーファンドサイトでのS/Sに対する平均費用

\$264/yd<sup>3</sup> (~\$200/m<sup>3</sup>) (約16,000円/m<sup>3</sup>)

・ コスト要因：

廃棄物のタイプ

スラッジの湿分は、固体に比較してコストを増加させる。

汚染物質の濃度とタイプは、加えられる試薬の量を決定する。

廃棄物処理量を扱う、可搬のS/Sシステムのサイズ

### 3. 個別技術の性能

#### (1) 性能

・ 使用される S/Sプロセスに依存する。

・ DOEの試作規模のポリエチレンカプセル化

試作規模からの規模の拡大により、約1t/hでの廃棄物の処理の実現可能性を示した。

数千ppmまでの有毒金属汚染物質を含んでいる廃棄物形態は、EPA（環境保護庁）のTCLP（毒性指標浸出法）を合格した。

#### (2) 二次廃棄物

#### (3) 遠隔操作性

#### (4) 適用上の留意事項

・ 現状の設計が十分でない場合のみ、高レベル廃棄物の追加的な封じ込めまたは固定が考慮され

るべきである。

#### 4. 評価

- ・高レベル廃棄物を固定または保護することに、最も経済的または効率的なプロセスを選択する。
- ・米国のスーパーファンド・サイトで、セシウム137を含む様々な廃棄物を取り扱うのに、20年間使用されている、確立されている技術
- ・環境条件は、汚染物質の長期的な固定に影響する可能性がある。
- ・いくつかのプロセスは、容積を、もとの体積の2倍まで増加させる可能性がある。
- ・有機物は、一般に固定されない。
- ・廃棄物により、異なるプロセスと互換性がない。

#### 5. 参考文献

- (1) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-21.html>
- (2) [http://www.clu-in.org/download/remed/ss\\_sfund.pdf](http://www.clu-in.org/download/remed/ss_sfund.pdf)

#### ( 6)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	原位置準備作業/ 専門施設処理 (In Situ Prep Work/Ex Situ Treatment)
個別技術	耕起 (Soil Tilling)
関連施設	砂、土壌、スラッジ

##### 1. 個別技術概要

- ・土壌中の汚染レベルを効果的に低減させ、対象とする汚染物質の回収可能性を上げるのに有効な薬剤は、汚染土壌を耕す前に、表土上に用いられる。
- ・汚染の後でかつ植える前に、土を耕すことにより、セシウム137は根のレベルまで下がり、そこでの吸収は表面より低くなる。
- ・土壌表面の汚染物質からの被曝を減少させたり、作物による汚染物質の吸収を減少させるために用いられる。
- ・標準的な耕起は、約15cmの深さまでである。

##### 2. 適用事例

###### (1) 適用先

- ・チェルノブイル事故後に使用された。
- ・日本の農業

水で満たされた水田は、汚染土壌まで耕され、かき回され、排水された。セシウムは36%減少したとの報告があった。

###### (2) 設計例

- ・標準的な農機具で実施可能 (トラクター、耕運機)



(3) 費用

- ・比較的安価。費用は以下を含む。

- 耕作器具

- 可能であれば、ほこりの抑制のための水または給水車

3. 個別技術の性能

(1) 性能

- ・チェルノブイリ事故の後で、植える前に耕起された土の上で育てられた穀草類は、一般に汚染が低レベルであった。

(2) 二次廃棄物

(3) 遠隔操作性

(4) 適用上の留意事項

- ・耕地では、放射性核種は、耕された層の全体的な深さまで、かなり一様に分布し得る。
- ・耕起の繰り返しにより、より多くの汚染物質が土表面へ戻る場合がある。
- ・耕起は、汚染物質が地下水に移動する可能性に影響する可能性がある。
- ・(農業目的のためのような) 土壌へのアクセスが、短期的には要求されない場所において、植物修復と併せて、使用され得る。
- ・汚染物質は浮遊する可能性があるため、作業者が吸入しないように保護を考慮することが望ましい。(例えば、粉塵抑制方法、防塵マスク)

4. 評価

- ・耕起は、大規模のセシウム汚染土壌の経済的または実行可能な解決策としては、実証されていない。

5. 参考文献

(1) <http://ajw.asahi.com/article/0311disaster/fukushima/AJ2011091710916>

(2) Waltner-Toews, D. Food safety in a nuclear crisis: The role of the veterinarian. Can Vet J Vol. 31, p.361-366, May 1990.

( 7)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	専門施設修復 (Ex Situ Remediation)
個別技術	土壌洗浄 (Soil Washing)
関連施設	土壌、沈殿物、スラッジ

1. 個別技術概要

- ・物理的及び化学的またはいずれかにより、土から汚染物質を分離する技術を使用するプロセス。
- ・洗浄溶液中で、溶けているか浮遊している汚染物質により、プロセスは機能する

2. 適用事例

(1) 適用先

- ・Fort Polk: 2つの試験規模
  - 酢酸および塩酸を浸出材として使用
  - 初期の鉛の含有量は 3500 mg/kg

塩酸洗浄により、最終的な鉛の含有量は 200 mg/kg

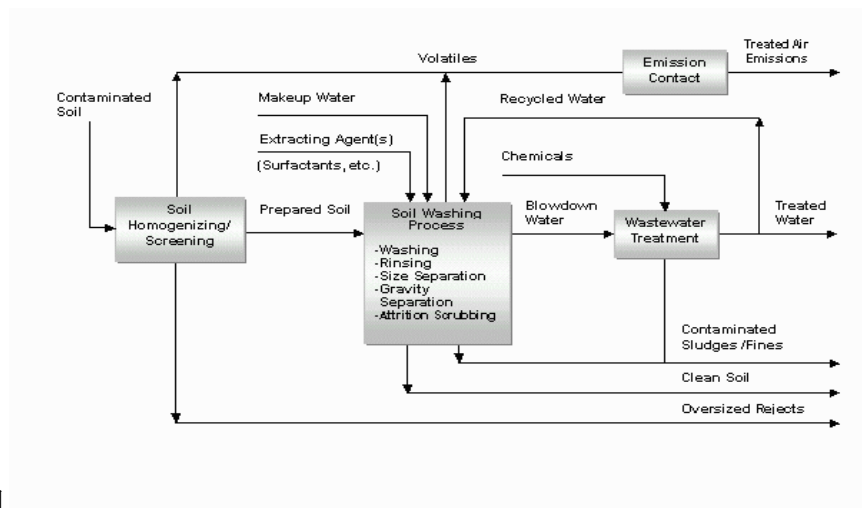
(2) 設計例

- ・ 廃棄物の土壌洗浄施設への輸送
- ・ 土壌洗浄施設

粒子サイズ分離の利用による土壌汚染物質の削減

洗浄された土壌のサイトへの返還

汚染された土壌の処分または追加処理のための輸送



(3) 費用

- ・ 主要なコスト要因

規模の経済性    サイトが大きくなると、単位体積当たりの処理費用は下がる。

プロセスの速度

3. 個別技術の性能

(1) 性能

- ・ Fort Polkでの試験規模

~5.8t/h

- ・ 土壌洗浄で対象とする汚染物

SVOC (準揮発性有機化合物、Semi Volatile Organic Compounds)

殺虫剤

燃料 (fuel)

重金属

- ・ 以下の条件に依存

洗浄設備のサイズ

汚染土壌の洗浄設備までの輸送距離

汚染物質が付着する土

汚染濃度

(2) 二次廃棄物

- ・ 汚染された副産物

水

備品

分離した廃棄物

(3) 遠隔操作性

(4) 適用上の留意事項

- ・セシウムと粘土の間の結合は、時間とともに強くなる。

#### 4. 評価

- ・土壌洗浄は、分離により汚染物質を集める。
- ・汚染物質を破壊したり固定したりするものではない。
- ・結果として生じる、集められた土及び水は処分される必要がある。
- ・適用性と有効性を制限する要素
  - 複雑な廃棄物の混合物
  - 土壌中の高い腐植質の含有量
  - 粘土サイズの粒子に吸着された有機物の除去

#### 5. 参考文献

(1) <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/soilwash.htm>

(2) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html>

( 8)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	原位置物理的及び化学的処理 (In Situ Physical/Chemical Treatment)
個別技術	土壌フラッシングによる原位置除染 (Soil Flushing)
関連施設	土壌、沈殿物、スラッジ

#### 1. 個別技術概要

- ・土壌に水を供給することにより、土壌から汚染物質を抽出するのに使用される。
- ・水への添加物は、汚染物質が地下水へ浸出する前に、汚染物質の可溶性を高くする。その場所で、抽出され処理される。
- ・フラッシング溶液は地下水に直接注入されることも可能である。 地下水面のすぐ上の毛管帯 (capillary fringe) まで地下水面を効果的に上昇させ、そこで汚染物質が見出される。

#### 2. 適用事例

(1) 適用先

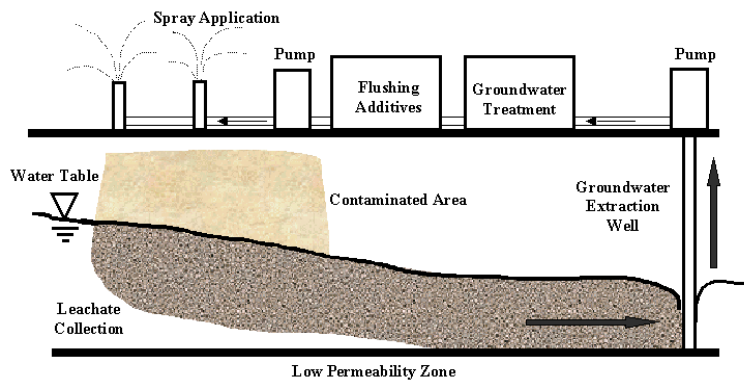
・土壌フラッシングは、テクネチウムとウラニウムの修復のため、ハンフォード中央高原の地下水面の領域から汚染物質を除去する可能性のある技術として、実験室での試験により検討された。実地試験は、現在ハンフォードで進行中である。浸出液はウラニウムをフラッシングするために必要であった。

(2) 設計例

- ・典型的な土壌フラッシングシステム

水は、添加剤が含まれることもあるが、注入または浸透のプロセスを用いて、原位置の汚染土壌に通される。

処理または処分される場所の帯水層から取出された流体は、再生される。



### (3) 費用

#### ・コスト要因

土壌の浸透性が主要なコスト要因

浸透性の低い土壌は、修復の時間と費用が増加する。

地下水までの深さ

地下水面が深くなると、費用が増加する。

再生された流体に対する地上での分離と処理のコストは、プロセスの経済性に影響する。

### 3. 個別技術の性能

#### (1) 性能

#### ・対象とする汚染物

無機物

放射性汚染物

VOC (揮発性有機化合物、Volatile Organic Compounds)

SVOC (準揮発性有機化合物、Semi Volatile Organic Compounds)

燃料 (fuel)

殺虫剤

#### (2) 二次廃棄物

#### (3) 遠隔操作性

#### (4) 適用上の留意事項

・フラッシング溶液は、土壌系の物理的または化学的特性を変える可能性がある。

#### ・制限

低い浸透性または不均質土壌は取扱いが困難である。

界面活性剤は土壌の浸透性を低減する可能性がある。

フラッシング流体は汚染物質の移動性を低減する可能性がある。

### 4. 評価

・土壌フラッシングは、土壌中のセシウムの修復には経済的、実際的な方法ではない。

### 5. 参考文献

(1) <http://www.cpeo.org/techtree/ttdescript/soilflus.htm>

( 9)

技術分野大分類	土壌修復技術
技術分野中小分類	原位置化学処理 (In Situ Chemical Treatment)
個別技術	土壌添加剤による農作物への放射線核種の吸収抑制 (Soil Additives)
関連施設	原位置汚染土壌

### 1. 個別技術概要

- ・化学的または物理的な添加物は、対象とする汚染物質の結合、固定、または抽出を促進するために、汚染物質を含む土壌に用いられる。
- ・高レベルのカリウム施肥は、植物によるセシウム吸収を減少させる。石灰の散布は、ストロンチウムの吸収を減少させる。
- ・作物が栽培または消費される場所に対して考慮される可能性は高いと考えられている。

### 2. 適用事例

#### (1) 適用先

- ・マーシャル諸島（ビキニ環礁）の核兵器の大気圏内実験により、農地はセシウム137で広範囲が汚染された。島の自然な土壌にカリウムが不足していることにより、作物による、より多くのセシウムの吸収に至ることが発見された。1980年代の試験の結果、カリウム肥料 (KCl) の添加により吸収が低減することが発見された。

大規模実験の結果、1ヘクタール当たり2000kgのカリウムを単独使用することにより、ココナツの果肉（及びジュース）のセシウム137吸収を、処理前レベルの5%~10%に減らすことが発見された。カリウム使用(ビキニ環礁に特有)の最適レベルのデータは、これらの研究から利用可能である。

#### (2) 設計例

- ・肥料は大型の（農業用の）肥料散布機を使用して散布することができる。



#### (3) 費用

- ・考慮するもの

大型の肥料散布機とそれに関連した消耗品（例えば燃料）

KCl肥料の現状価格     \$445/t （換算：約36,000円/t）

### 3. 個別技術の性能

#### (1) 性能

#### 2. (1) 参照



(2) 二次廃棄物

(3) 遠隔操作性

(4) 適用上の留意事項

- ・添加物（例えばカリウム）の過剰な添加により、作物を傷つける可能性がある。
- ・本技術の有効性は、土壌のタイプ、ミネラル含有量（例えばカリウム）、作物のタイプなどに依存する。

4. 評価

- ・セシウム汚染土壌の修復を促進する可能性のある添加剤はまだ調査されている段階である。

5. 参考文献

(1) <https://marshallislands.llnl.gov/bikini>

(2) UCRL LR -147596, Effect of Potassium on Uptake of 137Cs in Food Crops Grown on Coral Soils: Annual Crops at Bikini

・ 構造物などの表面除染技術

( -1)

技術分野大分類	物質除去 (Material Removal)
技術分野中小分類	硬い表面からの除去 (Removal from hard surfaces)
個別技術	剥離性塗料/除染ゲル (Strippable Paint/Decontamination Gel)
関連施設	汚染表面/構造物 (壁/床/建物) (Contaminated surfaces/structures (walls/floors/ceilings/buildings))

1. 個別技術概要

- ・除染ゲルは、汚染された表面に、塗布 (spread) または散布 (spray) され、汚染物質を封入しつつ乾燥することが可能である。

2. 適用事例

(1) 適用先

- ・Cellular Bioengineering 社は、セシウム除去への効果を向上させるために、添加剤を含有する、試作品の製法の試験を行った (DeconGel 1108 (塗布用)、DeconGel 1128 (散布用))。

-EPA (環境保護庁、Environmental Protection Agency) の 国土安全保障研究センター (National Homeland Security Research Center) の指導で、Idaho 国立研究所において、2011年8月試験が行われた。

2回の適用の後で、多孔コンクリート上のセシウムは、67%除去された。

- DeconGel 1101/1121 は、最近、日本で、学校と他の公共建物の除染に使用された。

石鹼と水を用いて洗浄した後に残った汚染物質は、最大25,000dpmまでのセシウム134、セシウム137、コバルト60であった。DeconGel の使用により、55~99% 除去される結果となった (洗浄後の除去率)。

- DeconGel 1101/1121 は、最近、日本の自衛隊の装備を除染するのに使用された。

汚染は事前に高圧水で除去された。最大15,000dpmまでのセシウム134、セシウム137、コバルト60が残留した。DeconGel は、金属、塗装された金属、ゴム、ガラスの表面に使用され、60%~98% 除去される結果となった。

- DeconGelは、Sandia 国立研究所で、試験片による試験が行われた。
  - コンクリート上のセシウム137は、15%~17%の汚染除去。(1回の適用)
  - 炭素鋼、ステンレス鋼、プレキシガラス上のセシウム137は、96%~99%の汚染除去。
- 適用例
  - DOE 廃止措置サイト
    - ホットセル、グローブボックス、放射性廃液の流出、建屋の廃止措置 (Savannah River, Rocky Flats) からの汚染物質の除去
  - 原子力発電所
    - 燃料交換備品の除染、漏洩の洗浄
  - 原子力医学研究所 (Nuclear medicine and research laboratory) の環境
  - 有害な化学製品や材料の洗浄

## (2) 設計例

- 工業用のエアレススプレー、塗料ローラ、またはブラシによる適用がある。4~12時間で乾燥し、適用した表面から剥される。
- 放射性廃棄物として処分されるか、焼却される。

表面から Bartlett社の Stripcoatの除去の例



カナダの原子力発電所のコンクリート床からのDeconGelの剥離の例



## (3) 費用

- Bartlett社の Stripcoatの場合
  - 1ガロン (約3.8L) で50平方フィート (約4.6m<sup>2</sup>) まで塗ることができる。

## 3. 個別技術の性能

### (1) 性能

- Cellular Bioengineering 社のDeconGelの結果について以下にまとめる。

ゲル	汚染物質	表面のタイプ	除去率
DeconGel 1108/1128	セシウム	コンクリート	67% (2回の適用)
DeconGel 1101/1121	セシウム、コバルト	コンクリート、 塗装コンクリート、鋼材、塗装鋼材、木材、タイル	55-99%
DeconGel 1101/1121	セシウム、コバルト	金属、塗装金属、ゴム、ガラス	60-98%

(2) 二次廃棄物

- ・乾燥した除染ゲルは（一般に低レベル廃棄物として）処分されるか、焼却される必要がある。

(3) 遠隔操作性

- ・非適用

(4) 適用上の留意事項

- ・乾燥した除染ゲルに関連した二次廃棄物はいくらか生じるが、付加的な廃棄物はない。
- ・ゲルまたは塗料は、除去する前に、数時間乾燥させる必要がある。

4. 評価

- ・実証された技術。
- ・いくつかの製造会社（Cellular Bioengineering 社のような）では、セシウムの除染の特化した製法の開発を行っている。

5. 参考文献

- (1) [www.decongel.com](http://www.decongel.com)
- (2) [www.bartlett-nuclear.com](http://www.bartlett-nuclear.com)

( 2)

技術分野大分類	物質除去 (Material Removal)
技術分野中小分類	硬い表面からの除去 (Removal from hard surfaces)
個別技術	泡除染 (Decontamination Foam)
関連施設	汚染された表面、構造物または設備 (Contaminated surfaces/structures/equipment)

1. 個別技術概要

- ・汚染された表面は、表面活性剤または発泡剤を含む溶液（泡状または液状であり得る）で覆われる。汚染物は、引き付けられるか溶液中に浮遊する。溶液は、洗い落とされるか拭き取られるかされ、処分のために集められる
- ・泡は多くの場合、垂直面の接触時間を増加させるため増粘剤を含む。
- ・溶液は一般に、特定の化学グループに対して調合される。（すなわち、ハロゲン、遷移金属、またはアクチノイドの汚染物質に対して）

・溶液は、金属、カーペット、ゴム、タイル、ガラス、ニス塗の木材への使用に対し、一般的に安全である。

## 2. 適用事例

### (1) 適用先

・RDS (Radiation Decontamination Solutions)社では、3種の除染泡（ハロゲン、遷移金属、またはアクチニド汚染物質）を製造する。RDS社の遷移金属泡（Transition Metalfoam）は、いくつかの原子力発電所で、停止中の作業のために、汚染と線量率を低減することを目的として使用された。

- Comanche Peak発電所では、2号機の原子炉容器の谷部（trough）の除染に泡を用いた。

（2回の適用の後。達成した目標は、100k dpm/100cm<sup>2</sup> である）

・泡除染は、施設と設備の除染のため、Savannah River研究所において研究された。

### (2) 設計例

・泡除染剤が使用される場所の廻りは、二次廃棄物を集めるために、ブラダーバーム（bladder berm、周囲に堰のあるライナー状のもの）またはビニールシートで保護される。

・散布機器は、背負って使用する小さい機材から、通常の圧力洗浄及び大規模の除染システムまでのサイズの範囲のものがある。

・溶液は、一般にガロン単位または濃縮物で販売される。Allen Vanguard社は、粉末にされた濃縮物として、溶液の活性成分を包装した商品にしており、保存可能期間は混合前で5年と長い。

・泡または溶液が一度適用されると、少しの間（例えば、10～30分）汚染された表面に留まることが可能である。

・泡は、表面から、濯がれるか、拭き取られるか、または吸引される。

- 液状の溶液に関して、イオン交換フィルターを組み込んだ水吸引装置は、使用した溶液を集め、再利用するのに使用される。

- Allen Vanguard社は、泡を除去し扱いやすい液体とする、特別の消泡装置を提供している。



除染泡の車両への適用。泡は車両下のビニールの小段（berm）で集められる。  
(Allen Vanguard社)



車両下（または他の設備）の噴霧システムは設置可能である (Allen Vanguard 社)



除染泡は、離れたところから適用することが可能である。(Allen Vanguard 社)

### (3) 費用

#### 溶剤

- ・ RDS液体遷移金属溶液 (泡立てられ得る)
- ・ RDS濃縮遷移金属溶液 (泡立てられ得ない)

#### ○範囲

- ・ Allen Vanguard社の SDF (Surface Decontamination Foam、表面除染泡 )  
400 ft<sup>2</sup>/gal (約37 m<sup>2</sup>/L)

・ Allen Vanguard 社の CASCAD (Canadian Aqueous System for Chemical/Biological Agent Decontamination )

#### 散布装置

- ・ Allen Vanguard 社の Dual Tank Backpack system

(140 ft<sup>2</sup> (約13m<sup>2</sup>) の範囲、12 ft (約3.7 m)までの距離の放出、19 21 gal (約72~79 L) の泡生成)

- ・Allen Vanguard 社の Air Foam Dolly system (可搬性ある内蔵型のユニット)

(1,200 ft<sup>2</sup> (約110 m<sup>2</sup>) の範囲)

- ・薬品または洗浄液の噴射機能を持つ一般の高圧水洗浄機も液状の溶液の散布に使用可能である。

\$300 \$2,600 (約2.4万~約21万円)

### 3. 個別技術の性能

#### (1) 性能

・ RDS社(Radiation Decontamination Solutions社)は、アイダホ国立研究所(Idaho National Laboratory)と、RDS社の遷移金属溶液が多孔コンクリートから放射性セシウムを除去する能力の試験を行っている。その製品は、複数回の適用後、初期のセシウムの53~56%を除去した。

・非多孔性の表面に対して、RDS社は、1回の適用で99%の汚染を除去するとしている。除染係数(初期/処理後)を、いくつかの遷移金属について以下に示す。

核種	除染係数(DF)
Co -60	103
Co -58	394
Zn -65	76
Mn -54	120

・ Comanche Peak 発電所では、ステンレス製の燃料取扱機荷重ガイド組立品の除染へのRDS溶液の有効性に関する試験が行われた。RDS溶液は、2回の使用で、200k dpm/100cm<sup>2</sup> から 15~20k dpm/100cm<sup>2</sup>に汚染を減少させた。

- ・ Allen Vanguard のCASCAD/SDF 製品(液体または泡の形態で同じ除染剤)は、サイトの修復と軍用車の洗浄のため、核粒子除去の試験が行われた。いくつかの試験結果を以下の表に示す。

作用剤	有効性
La -140 (アクチニド)	>93% (塗装された壁板) >90% (装甲車両、80分)
Eu -152 (アクチニド)	93% (レンガ) >97% (コンクリート) >97% (セラミックタイル)
Na -24 (遷移金属)	10% (レンガ) >45% (コンクリート) >15% (セラミックタイル)

## (2) 二次廃棄物

- ・使用された溶液、場合により水。
- ・もし表面がこすって除去されたならば、使用されたぼろ切れは汚染を含む。
- ・大きいプロジェクトにおいては、溶液は除染と再使用のため樹脂床を通る。しかし、RDS社によれば、溶液が薄められた時は機能しない。

## (3) 遠隔操作性

### (4) 適用上の留意事項

- ・作業者は、泡中の汚染物質から保護するため、個人用保護具 (PEE (Personal Protective Equipment)) を身に着ける必要がある。

-RDS社の溶液は、食品医薬品局によると、人間の肌には安全である。(人間の除染にも使用可能である。)

- ・溶液は、薄められなければ(たとえば泡の適用に関しては)、除染と再使用のため樹脂床を通る。多孔性の表面では、液体の溶液(泡に対し)の有効性は、同じ表面への2、3回の使用後に頭打ちとなる。

- ・複数回の適用は必要と考えられる。

-例えば、多孔性の表面に対しては、RDS社は、ハロゲンに対するハロゲン溶液に続いて、(セシウム除去に対して) 遷移金属溶液を使用すること、または、単に遷移金属溶液の複数回適用することを推奨している。

- ・RDS社の遷移金属溶液は、垂直表面での接触時間を長くするため、メチルセルロースを増粘剤として含有している。全有機炭素が関心の対象であるならば、この会社は、増粘剤を含有しない溶液を製造することができる。

- ・泡(特にAllen-Vanguard社のSDFとCASCAD)は、柔らかい表面被膜を、少し傷つける可能性がある。(SDFとCASCADは、塗料、ゴム、ポリカーボネイト、アクリル、エナメル、被覆金属、コンクリートまたはアスファルトでの使用は安全と宣伝されている。)

## 4. 評価

- ・除染泡は、下地に損傷を与えない点、柔らかい表面(例えば木材)へ使用するのに十分穏やかである点で有利である。しかし、泡は再使用または再利用できず、処理された表面の二次すすぎが必要とされる。

## 5. 参考文献

(1) Radiation Decontamination Solutions, LLC ([www.raddecon.com](http://www.raddecon.com))

(2) Allen-Vanguard ([www.allenvanguard.com](http://www.allenvanguard.com))

． 地下水修復技術

( -1)

技術分野大分類	専門施設処理 (Ex Situ Treatment)
技術分野中小分類	化学プロセス (Chemical Processes)
個別技術	イオン交換 (樹脂) (Ion Exchange (Resins))
関連施設	汚染水 (Contaminated water)

1. 個別技術概要

- ・溶液中のイオンは、反対の電荷をもつ固体の吸着剤の上の位置 (結合位置) に引き付けられる。特別なイオンへの高い親和性をもった吸着剤は、そのイオンに対して選択的が強いと言われる。汚染された溶液が吸着剤と接した時、親和性の低いイオンは親和性の高いイオンと交換される。
- ・以下は、セシウムで試験されたイオン交換媒体のタイプのいくつかの例である。

化合物 (Compound)	商業的に購入できる製品	説明 (Description)
ゼオライト (無機アルミノケイ酸塩材料)	Chabazite zeolite (Kurion) IONSIV IE 96 (UOP)	Cs と Sr は、ゼオライトの分子ふるい (sieve) で優先的に交換される。
フェノールホルムアルデヒド (Phenol Formaldehyde)		
レゾルシノールホルムアルデヒド (Resorcinol Formaldehyde)		
カリウムコバルトヘキサシアノ鉄酸塩 (Potassium Cobalt Hexacyanoferrate) (KCoCF)		放射性廃棄物から、Cs、Sr、超ウラン元素、場合により Tc の除去に有効性を示す。
モリブドリン酸アンモニウム (Ammonium molybdophosphate)		PUREX溶液からのCs除去に用いられた。酸性の溶液内での使用に対してのみである。
結晶性シリコチタネート (Crystalline Silicotitanate)	IONSIV IE 911 (UOP)	この吸着剤は、アルカリ性の廃棄物からセシウムを除去するのに高い能力を持つ。
柱状粘土 (Pillared Clay)		
埋込式膜技術 (Embedded Membrane Technology)	(3M)	3Mのエムポア (Empore) 膜フィルターは、イオン交換材料が装填される。

・ほとんどの場合、廃棄物が高レベル廃棄物として扱われる必要がないように、廃棄物からセシウムを除去するのに使用されるよう、これらの樹脂は、DOEサイトでDOEによって試験される。

- これらの試験により、無機の樹脂はセシウムの選択性が強い傾向にあることが分かった。

・樹脂は、ペレット状、ビーズ状、顆粒状または粉末状の形で入手可能である。

## 2. 適用事例

### (1) 適用先

・菱沸石 (chabazite) (ハーシェル沸石 (herschelite) をベースとした一種のゼオライト) は、福島県の冷却水システムからセシウムを除去するのに用いられた。これは、Kurion社により開発された、セシウムに特有のイオン交換媒体である。

・DOEは、廃棄物からセシウム137を除去する様々な吸収性物質の有効性を評価するために、DOEサイトで多数の実験室規模と工学規模の試験を行なった。(セシウムが除去されると、多くの廃棄物は、高レベル廃棄物ではなく、低レベルとして処理、処分されることが可能となる。)

- Melton Valley 貯蔵タンクからの廃棄物処理するために、Oak Ridgeでセシウム除去システムの実証試験が行われた。

- Hanfordの廃棄物に対するセシウム吸着剤のために、試作規模の実証試験が行われた。

・ニューヨーク州のWest Valleyサイトにおいて、無機ゼオライトイオン交換樹脂を用いて、セシウムは廃棄物から除去された。使用されたゼオライトは高レベル廃棄物スラッジとともにガラス固化された。

・INL (アイダホ国立研究所) において、DOEは、地下水からセシウムとストロンチウムを除去するための種々のイオン交換吸着剤の有効性を実証した。

- INLは、3M社の埋込式膜技術 (embedded filter technology) を試験する時に、約41,635Lの地下水の処理を行った。セシウム137の濃度は、試験前1,200pCi/L (約44Bq/L) であった。試験後のセシウム137の濃度は14pCi/L (約0.52Bq/L) であり、サイトの最大汚染制限の119 pCi/L (約4.4Bq/L) 以下であった。

・充填塔内の、カリウムコバルトヘキサシアノ鉄酸塩 (Potassium Cobalt Hexacyanoferrate) は、原子炉の運転により生じた廃棄物溶液からセシウムを除去するために、フィンランドでプラント規模で使用され、成功している。

- Loviisa 原子力発電所では、無機のヘキサシアノ鉄酸基のイオン交換材料は、セシウム134とセシウム137を液体廃棄物から除去するのに使用された。廃棄物からのセシウムに対する除染係数は、約2000であった。

・合成のゼオライトとイオン交換樹脂は、TMIで、川に放水できるように、汚染された建屋からの放射性の汚染水を処理するために用いられた。

・3Mエムポア (Empore) 膜フィルターは、カリウムコバルトヘキサシアノ鉄酸塩が入っており、Savannah River サイトの R解体窪地 (Disassembly Basin) で、セシウム除去の性能が試験された。55,500ガロン (約211m<sup>3</sup>) を超える水が装置で処理され、放射性セシウムが検出可能量以下の処理水となった。

### (2) 設計例

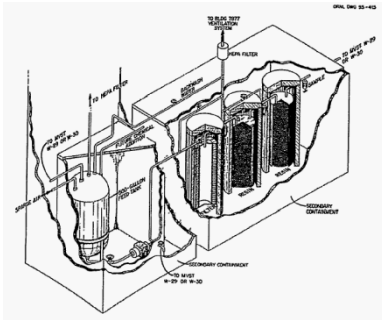
・汚染された液体は、汚染物質を選択的に吸着し、他の物質を通過させる固形物が充填された塔を通過して流れる。(一連の分子ふるい (sieve))

・基本的なイオン交換システムは、吸着剤の供給タンク、一連のイオン交換塔、及び廃棄物輸送システムからなる。



・いくつかの吸着剤は、吸着剤と異なるpHの溶液と接触させることにより、再生が可能である。しかし、いくつかの吸着剤は、あるイオンと強く結合するので、非再生である。(一般的には、無機の樹脂は再生できない。)

Oak Ridge の Melton Valley 貯蔵タンクのセシウム除去システムの模式図 (左下)  
(結晶性シリコチタネート(crystalline silicotitanate)) (DOE)



ゼオライトのサンプル (IE-911) (UOP)

(3) 費用

(注) ここでの費用はイオン交換媒体に対するものであり、イオン交換システムに対するものではない。

・ゼオライト

UOP IONSIV IE-95 or IE-96 (アルカリ金属アルミノケイ酸塩)

\$10~\$20/lb. (約1,800~3,600円/kg)

・結晶性シリコチタネート(crystalline silicotitanate)

UOP IONSIV IE-911 (セシウムに対し高い選択性、ナトリウムを含む廃棄物または水に対しても機能する。)

\$200~\$300/lb (約36,000~54,000円/kg)

・KCoCF (カリウムコバルトヘキサシアノ鉄酸塩)

(フィンランドのIVO International社からのKCoCFを取扱った報告書に基づいて推定)

~\$2,200/lb (~約400,000円/kg)

3. 個別技術の性能

(1) 性能

・2. (1) 参照

(2) 二次廃棄物

- ・再生されない樹脂は、放射性廃棄物の要求に応じて処分される必要がある。
- ・樹脂が再生される場合は、洗浄溶剤は、処理または処分される必要がある。

(3) 遠隔操作性

・一度確立されると、システムの遠隔操作は可能である。

(4) 適用上の留意事項

- ・いくつかの吸着剤は容易に再生することができるが、一方、それ以外の物はそうではない。これは、必要とされる吸着剤の総量と廃棄処理費用に影響する。
- ・適用方法によって、イオン交換システムは、放射線被曝を制御するために、外部遮蔽を必要と

するかもしれない。

・最終処分場の廃棄物の受入基準に依存するが、樹脂が容量一杯になる前に、樹脂への負荷を中止する必要がある可能性がある。

・セシウムを吸着した材料の中間貯蔵と輸送のための施設が必要とされる。

・いくつかの吸着剤は、付加的な核種汚染物質の処理にも好結果を出している。(例えば、IE-911はストロンチウムも除去することができる。) 付加的な汚染物質が存在する場合、付加的な吸収材または添加物が考慮されるべきである。

・処理される媒体の酸性度も考慮すべき点である。いくつかの吸収剤は、高い酸性環境では性能を発揮できない。

#### 4. 評価

・イオン交換処理は、実績のある、また多くの場合経済的な、汚染水処理方法である。

#### 5. 参考文献

(1) U.S. Department of Energy

(2) UOP LLC (www.uop.com)

( 2)

技術分野大分類	原位置処理 (In-Situ Treatment)
技術分野中小分類	地下水 (Groundwater)
個別技術	透過性反応バリア (Permeable Reactive Barriers (PRBs))
関連施設	汚染地下水 (Contaminated Groundwater)

#### 1. 個別技術概要

・地下水中の対象とする化学物質が通過する透過性反応バリア (PRB) において、汚染物質は、危険性の少ない化合物に分解されるか、または反応物質に固定される。

#### 2. 適用事例

##### (1) 適用先

・DOE : Monticello 製錬所尾鉱サイト (Monticello Mill Tailings Site)

- 汚染地下水は、浅い沖積土の滞水層を流れる。滞水層の下には、4~8mの深さの不浸透性の基岩がある。

- 地下水は、150m以下の幅の領域を、自然に狭くなるように流れる。

- 主要な汚染物質：ウラニウム、バナジウム、ヒ素、セレン、マンガン、鉛。

- ゼロ価鉄 (ZVI) は特定の汚染物質を除去するのに最も有効な反応物質であることが分かった。

- PRBの有効性を以下に示す。

地下水中の平均汚染濃度

汚染物質	初期濃度	PRB通過後の濃度
ウラニウム	700 µg/L	<0.41 µg/L
バナジウム	400 µg/L	<0.77 µg/L
ヒ素	10 µg/L	<0.2 µg/L
セレン	40 µg/L	<2.0 µg/L

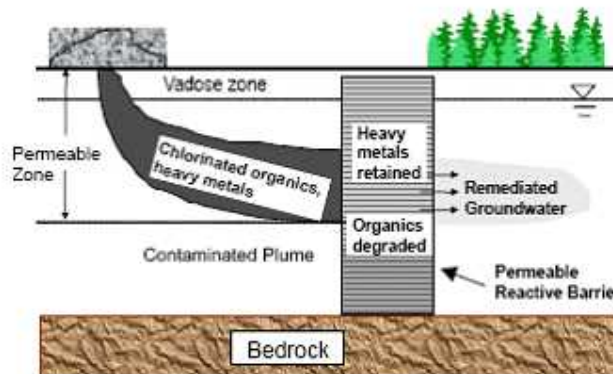
## (2) 設計例

### ・ PRB

- 透過性反応バリア (PRB) は、汚染されたプルームの流れを横切るように建設される。PRBは、水が受動的にバリアを通ることを許容する。

- 選定された薬剤の使用により、汚染物質はPRBを通るのを妨げられる。

基本的な透過性反応バリアの設計と配置

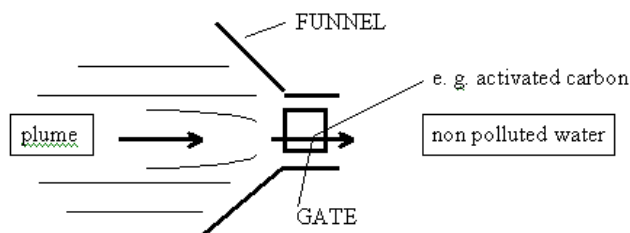


### ・ ファネルアンドゲートシステム (Funnel and Gate System)

- 基本的なPRBに少し変更を加えたもの。

- 地下水は、流れを誘導するファネル (止水壁) に沿って、原位置の反応領域 (すなわち処理領域) を含むゲートに流れる。ゲートを通り過ぎた地下水は除染されている。

- 基本的なファネルアンドゲートシステムの模式図を以下に示す。



## (3) 費用

### ・ Monticello ~\$1,000,000 (約8千万円)

- 長さ31.5m、幅2mのPRBの両側に、30mと73mのスラリー壁、深さは3.5 ~ 7 m。

- 汚染物質：ウラニウム、バナジウム、ヒ素、鉛210、セレン、マンガン

・ 処理媒体の容量コストは、コスト上昇要因である。

## 3. 個別技術の性能

### (1) 性能

#### ・ 2.(1)参照

### (2) 二次廃棄物

・ 汚染物質が含まれ処理されていない場合、PRBに付着した残留廃棄物。

### (3) 遠隔操作性

### (4) 適用上の留意事項

・ 高濃度の移動性のある汚染物質に対して有効である。

- ・PRBは、反応の容量がなくなり、媒体を交換する必要性が生じることがある。
- ・バリアの深さと幅で制限される。
- ・生物学的反応と化学的沈殿は、バリアの浸透性に影響する可能性がある。

#### 4. 評価

- ・広い領域に対しては、大きいバリア壁が必要となるので、効率的ではない。
- ・セシウムは地下水中での移動性が低いため、セシウムに対しては必ずしも有効な修復技術ではないと考えられる。

#### 5. 参考文献

- (1) <http://epppublications.com/Documents/08-2-4.pdf>
- (2) [http://costperformance.org/pdf/Monticello\\_PeRTWall.pdf](http://costperformance.org/pdf/Monticello_PeRTWall.pdf)
- (3) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-41.html>

( 3)

技術分野大分類	専門施設処理 (Ex Situ Treatment)
技術分野中小分類	地下水 (Groundwater)
個別技術	分離 (Separation)
関連施設	汚染地下水 (Contaminated Groundwater)

#### 1. 個別技術概要

- ・物理的及び化学的技術を用いて汚染水を濃縮する。

#### 2. 適用事例

##### (1) 適用先

以下の例は、分離がセシウム汚染液体の処理に使用された場合を示す。逆浸透は、小規模でセシウム除去に有効であることを示した。

- ・コロイド水化学研究所 (Institute of Colloid and Water Chemistry) は、セシウム137で汚染された水の処理に逆浸透の利用を調査した。

- 塩化ナトリウムは無機添加剤として使用された。

薄膜の影響を悪化させた。

- ポリアクリルアミドは有機的な添加物として使用された。

OFAM膜の有効性を増加させた。

- OFAM合成逆浸透膜は処理に使用された。

- ・逆浸透は、地下水の処理のために、Hanford サイトで試験された。

- セシウムは、99.1%除去 (即ち、膜を通過しなかった)。

- ストロンチウムは、99.9%除去。

##### (2) 設計例

「分離」は、いくつかの異なる技術を包含する。これらは以下を含む。

- ・蒸留

液体中の異なる蒸気圧の成分を分離するための、気化と凝縮に係る化学的分離プロセス

- ・濾過/限外濾過 (Ultrafiltration) /精密濾過 (Microfiltration)

粒径に基づいた分離の物理的過程

・凍結結晶化 (Freeze Crystallization)

溶液からの純化された溶剤を、凍結された結晶として除去する。

・薄膜浸透気化法 (Pervaporation)

汚染水から優先的にVOCを吸着する透析膜

・逆浸透

汚染されていない水を通し、かつ処理するための汚染水を再度循環させる状態とする膜を、水は加圧下で通される。

(3) 費用

・濾過の典型的なコストは、1,000リットルの処理当たり、0.36ドルから1.20ドルまでの範囲である。(約30円~100円/1000L)

・凍結結晶化の典型的なコストは、1分当たり40ガロン (約150L) の施設で、1ガロン (約3.8L) 当たり0.03ドルであると推定される。(約0.63円/L)

3. 個別技術の性能

(1) 性能

2. (1) を参照

(2) 二次廃棄物

・二次廃棄物のタイプは、選定した処理方法に依存する。以下に例を示す。

逆浸透の場合：いくらかの汚染水が残留する。

濾過の場合：フィルタや濾過媒体

(3) 遠隔操作性

(4) 適用上の留意事項

・汚染物質の物理的および化学的特性は、適切な分離方法に影響を与えると考えられる。

4. 評価

・いくつかの分離プロセス(例えば逆浸透)は、セシウム汚染除去に有効であることが、小規模では実証された。これは有望な技術であり得るが、より大規模な適用に関する情報は限定されている。

5. 参考文献

(1) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-51.html>

(2) Institute of Colloid and Water Chemistry, National Academy of Sciences. Water Deactivation by Reverse Osmosis. Antonina P. Kryvoruchko. Dec. 02.

( 4)

技術分野大分類	専門施設処理 (Ex situ treatment)
技術分野中小分類	地下水 (Groundwater)
個別技術	地下水ポンプ輸送/ポンプ揚水処理 (Ground Water Pumping/Pump and Treat)
関連施設	汚染地下水/浸出水 (Contaminated Groundwater/Leachate)

1. 個別技術概要

- ・地下水を、処理のための施設に送られる前に、抽出するための配列されたポンプのシステム。
- ・イオン交換に必要な技術。

## 2. 適用事例

### (1) 適用先

- ・イオン交換技術で使用される。

### (2) 設計例

- ・揚水及び処理システム

- 生物学的反応器 (Bioreactors)

汚染物質は抽出され、浮遊型生物学的反応器 (suspended growth biological reactors) において、微生物と接触する。

- 建設された湿地 (Constructed wetlands)

金属および他の汚染物質を集めて除去するために、人工湿地に固有な、自然地球化学及び生物学的過程を使用する。

- 吸着/吸収

溶質(例えば、粒状活性炭、吸着粘土、合成樹脂等)は、吸着剤の表面に集まり、液相中の汚染物質の濃度を低減する。

- 脱気 (Air Stripping)

揮発性有機物は、大気に露出された汚染水の表面積を増加させることにより、地下水から分割される。

- 粒状活性炭(GAC)/液相カーボン吸着

汚染された地下水は、一連の活性炭を通り、溶解した有機質は活性炭に吸着する。

- イオン交換

汚染物質からイオンを取り除くために、汚染物質と交換媒体の間の陽イオンまたは陰イオンの交換を使用する。

- 沈殿/凝固/凝集 (Precipitation/Coagulation/Flocculation)

溶解した汚染物質を不溶解性の固体の転換し、濾過または沈殿により取り除かれる。

- 分離

蒸留、濾過、凍結結晶、薄膜浸透気化 (membrane pervaporation)、逆浸透等により汚染物質を分離する。

- スプリンクラー灌漑 (Sprinkler Irrigation)

汚染水は、汚染物質を下げる微生物を含んでいる濾過床に分配される。

- ・サイト特性調査

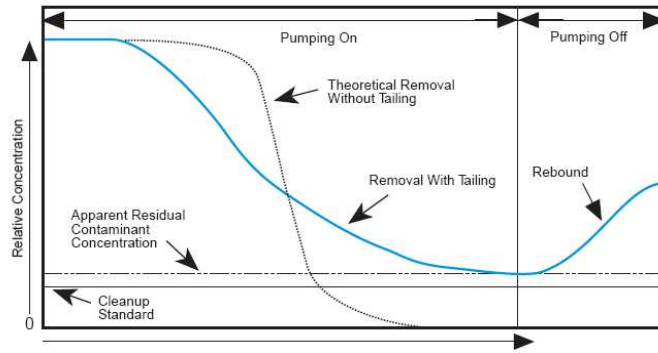
透水係数 (Hydraulic conductivity)

サイトの化学的特性

地表下の特性

生物学的及び化学的汚染物質特性

テイリング (tailing) 及びリバウンド (rebound) の効果を示す  
濃度とポンプ時間及び容量の関係



- ポンプ揚水処理は以下を要求する。  
     輸送する水の量  
     汚染物質の濃度

(3) 費用

- 異なるサイトの要求により異なる



3. 個別技術の性能

(1) 性能

- 揚水処理システムの性能は、流入し流出する汚染物質の通常のサンプリング及び分析によってモニターされる。

(2) 二次廃棄物

- 揚水処理の副産物  
     廃水  
     機械で生じる副産物

(3) 遠隔操作性

非適用

(4) 適用上の留意事項

- 透水係数  
     可能な修復の選択肢の範囲を決定する
- サイトとプルームの化学特性  
     汚染物質の輸送を特徴づける。  
     地下水汲み上げの実施可能性を評価する。
- 汚染物質  
     生物学的及び化学的汚染物質特性
- 地下水プルーム  
     地下水汚染の3次元的位置を特定する。  
     帯水層と土の特性を定める。

4. 評価

- 広く使用され、実証されている技術

5. 参考文献

- (1) <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-48.html>
- (2) <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/625r95005/625r95005.pdf>

別紙 3.4 DOE 環境修復技術—福島への適用性及び除染技術カタログ掲載候補の検討結果

I. 土壌修復技術

	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
2	土壌洗浄 プロセス水を再利用するための混合廃棄物とイオン交換樹脂をガラス固化、炭酸塩浸出によるウラン浸出	土壌を処理設備へ輸送し、浸出剤（酢酸、塩酸など）での処理、粒子サイズ分離する。ANLのパイロットプラントでの実証は成果としてまとまっていた。処理速度 11m <sup>3</sup> /hr (50 gal/m)、DF=3。 原位置土壌洗浄の例もあり、汚染対策範囲に水等を注入し、土壌に含まれる汚染物を地下水に溶出させ、対象物に応じた処理装置により処理する。	II-7 土壌洗浄		A セシウムのように汚染物が土壌の粒径により相違がある場合は有効。
11	加熱脱着	掘削した土壌などから気化温度の比較的低い汚染物質をバーナなどにより加熱し脱着する（300～800℃程度）。トリチウムの場合、加熱処理中に無視できるレベルまで大気中に放出される。処理された土壌は掘削した場所に戻される。	II-3 熱的脱着		C セシウムは加熱だけでは気化しにくい。加熱方法には特別な技術はない。
17	電極誘導抽出 Lasagna Technology 社の技術による原位置土壌修復	不均質で低浸透性の土壌の汚染を浄化する技術に1つ。土壌中の汚染物に対し電流を用いて移動させ、汚染を有機系炭素の処理層に移動させる。TCEの除去には効果的。Paducahサイトで実績がある。Lasagna Technology社の製品がある。  土壌と地下水の処理。建物や公共施設を周辺部に適用されることが多い。ERHは揮発性汚染物の原位置での熱的処理として使われる。地表下は沸点まで加熱され汚染を放出させる。	—		C 一般産業の揮発性有機化合物有害物の除去には実績がある。
18	電気抵抗加熱（ERH） 揮発性汚染物の原位置での加熱脱着処理	土壌と地下水の処理。建物や公共施設を周辺部に適用されることが多い。ERHは揮発性汚染物の原位置での熱的処理として使われる。地表下は沸点まで加熱され汚染を放出させる。	—		C 一般産業の揮発性有機化合物有害物の除去には実績があるが、高価。
20	固形化剤添加の深耕	土壌をセメント状または他の固形化剤と混合し、土壌を深く混合する。反応物は中空の回転子、底部に切断工具付きのクレーン棒で注入される。	II-6 耕起		C 我が国ではすでにJAEAの除染モデル実証試験において耕起、深耕として実施されている。
21	汚染物のSEAMISTを用いたモニタリング	ボアホール内部に気密膜ライナーを張り付ける。ボアホールの健全性を維持し、同時に、地表面下からのサンプル収集ができるようにする。			C 我が国ではすでにボアホールのモニタリングに対する必要性はない。
31	原位置での土壌グラウティング グラウトを高圧で土壌中に注入し固化する技術	高圧（40MPa）注入ジェットグラウティングの特徴 - 小規模の汚染土壌の安定化及びホットスポット除去に適す - 大容量の廃棄物に対して適さない - 制約として、地表下の不均質性（グラウトの分布に影響）に対してはグラウト性能の確認・監視は極めて難しい。	—		C 原位置で、グラウトを注入し、不溶化する技術は一般産業の不溶化技術として実績がある。
32	土壌の蒸気抽出／エアスパージ	吸引井戸を設置し、土壌中に水蒸気を注入して、有害物を抽出する。 Brookhaven研究所で地下水のSr-90の数エーカーの汚染に対し適用されたが、効果はなかった（濃度は浄化基準以下には下がらなかった）。	II-3 熱的脱着		C 効果的な除染方法としての実績は報告されていない。

凡例) ◎：適用性が高い、○：適用性あり、△：適用性は低い、A：重要な参考にするべき内容あり、B：類例あり、C：既適用例がある



	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
37	原位置ガラス固化 ISV	電流を流して土壌を溶解固化する技術で、放射性核種は熔融固化体中に保持する。比較的均質な土壌の場合、地下 6 m (19 ft) までは処理可能である。処理可能な対象は一定の均質性が必要である。帯水層以下の汚染の処理には脱水が必要である。	II-5 固化/安定化		C 現状では、地下に混合廃棄物や高レベルのセシウムなどによる汚染はないと想定されるので、適用可能性は想定されない。
40 41 42	分別ゲート系統 (SGS) コンベヤー、放射線検出器、コンピュータの組合せで汚染レベル別に廃棄物を分別、大きい瓦礫や岩は事前にふるい分別	SGS は Idaho 研究所及び Brookhaven 研究所で Cs-137 で汚染された土壌に適用され、廃棄物の減容に実績がある。 土壌汚染の限度を 400 pCi/g (1.5 万 Bq/kg) 以下にするための分離を行い、体積減容率約 60% を達成した。400 pCi/g 以上の土壌に対する分離には SGS は適さないようである。 レベル別分別装置は Eberline Segmented System として製品化。	—		C 現状では、セシウム汚染濃度の分別は国により異なり、また、分別装置は市販されている。
43 44	井戸注入深度抽出 (WIDE) 垂直井戸を設置し、土壌フラッシングした水を真空引きで、地下水と土壌中の蒸気を抽出	セシウムを分離除去するために、クエン酸アンモニウムの塩基性溶液 (特許) と選択性分離カートリッジが使われた。 - 多様な土壌の種類に対し適用性を広げるための条件 (低い k 値 10-3cm/s、高粘土比率への適用など) - 元のブルームを制御するため目標フラッシングエリア設定 - コスト効果のある短期間の設置資機材の準備 - 再利用可能でかつ可搬性設備	—		C 現状では、地下水へのセシウム汚染は課題でなく、適用は想定されない。
48	スラッジ洗浄 汚染土壌から水により物理的・化学的方法で汚染物を分離	揮発性有機化合物、殺虫剤、燃料、重金属、放射性物質の処理煮用いられた試験または実績あり。 Hanford サイトでは、テクネシウムとウラニウムの修復用に試験継続中。	II-7 土壌洗浄		C 我が国ではすでに JAEA の除染技術実証試験で核種の土壌洗浄法が取り上げられ、性能評価試験が行われている。
49	仮処分場保管	保管場所は拡散防止のため、浸出液の回収、ライナー、被覆が必要である。DOE の各サイトには、一時的処分保管場所がある。	II-2 仮処分場保管		A 我が国でも、仮置き、中間貯蔵など一時的貯蔵が現実化している。米国の事例は参考にすべき事項。
50	土壌添加剤 対象とする汚染物質の結合、固定、または抽出を促進	高濃度のカリウムの施肥は、植物によるセシウム吸収を減少させる効果がある。ビキニ環礁 (マーシャル諸島) での核兵器の大気実験で農地はセシウムで汚染された。カリウム肥料 (KCl) によりココナツ果肉のセシウムが施肥前の 5~10% に低減した。	II-9 土壌添加剤		A 土壌汚染は、本調査で重要な位置付けであり、米国の実績は参考にすべき事項
51	土壌掘削 汚染土壌を掘削機、ブルドーザー、グレーダー、スクレーパーなどにより処理処分のための除去	サイト内の BC 管理区域 56.7 万 m <sup>2</sup> (140 エーカー) から 50 万トンの土壌を掘削した。掘削土壌は Hanford サイト内の環境修復処分場へ輸送した。	II-1 土壌掘削		C 我が国ではすでに JAEA の除染技術実証試験ほかで土壌の除染法として取り上げられ、性能も確認されている。
52	植物修復 (ファイトレメディエーション) 土壌中の汚染は植物によって取込まれるか、汚染程度を下げられる。	EPA と DOE は Oak Ridge において各種の草について Cs-137 及び Sr-90 に対する効果を試験した。収穫後、全 Cs-137 はヒメモロコシ、bahia、switch grass に 26.8-71.8% が取り込まれた。	II-4 植物修復		C 我が国ではすでに、タンポポなどで試験され、性能も確認されている。

・ 構造物などの表面修復技術

	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
3	霧状固定化による固定 空気中の汚染を霧で除去し、解体前に表面上に固定	空媒汚染の問題などところに InstaCote™ が使用された。			C 汚染が比較的狭い空間に浮遊している場合に効果的。
4 13	剥離性ペイント／コーティング 掘削時や解体時に再浮遊や汚染の飛散を防止するための固定化剤。	材料の表面または割れの部分に、塗布または散布し、汚染物を封入し、乾燥後固形物として剥離し、回収する。DOE 施設のホットセルやグローブボックスで汚染物の除去に使用されている。EPA による Idaho 国立研究所の試験で、多孔質のコンクリート面において 2 回の適用で、セシウムを 67%除去できた例もある。 InstaCote™ 社の固定化剤（CC Wet/CC Fix ほか）は建物の壁や設備の表面に適用されている。	III-1 剥離性塗料。		C 我が国ではすでに JAEA の除染モデル実証試験において適用され、セメント瓦では 20～40%除去率。
5 9 14	表面汚染固定化剤 掘削時や解体時に再浮遊や汚染の飛散を防止するための固定化剤。	InstaCote™ 社の固定化剤（CC Wet/CC Fix ほか）は建物の壁や設備の表面に適用されている。	II-5 固化／安定化		C 我が国ではすでに JAEA の除染モデル実証試験において土壌剥ぎ取りの前処理として固型化剤が散布されている。
6	真空引き HEPA フィルタ	掘削や解体で空气中に微粒子状の汚染がある場合に適用。	IV-3 分離		C 我が国の原子力発電所の換気空調設備において、多くに実績がある。
7	高圧水洗浄 商品名：ハイドロレイジング、洗浄装置に廃棄物回収装置付	高圧水ポンプを用い 30～300MPa の水を汚染面に噴射する。モルタルを接合に用いた石造の壁には非常に効果的。スラッジと水の回収装置を装備し、除染対象面は乾燥状態で清浄。	—		C 米国で商品化された高圧水ジェット装置。
8	圧力水洗浄	汚染洗浄水の回収処理が必要。	—		C 比較的低い圧力も装置は市販されている。
10 15	ドライアイス（CO2 ペレット）ブラスト	汚染物は対象物から熱拡散、ガス膨張に結果として除去される。ドライアイスが固体表面に衝突し昇華し、汚染物のみ高効率フィルタに廃棄物として捕獲される。	—		C 我が国でも試験例があり、また、JAEA の除染モデル実証試験において適用され、除染低減割合は比較的小さい。他の除染装置に比べ、除染範囲は比較的狭い。
12	加熱水研磨	加熱水技術の 1 つで、蒸気流で洗浄し真空システムで対象物の汚染を吸収する。	II-3 熱的脱着		C セシウムは加熱だけでは気化しにくい。加熱方法には特別な技術はない。
16	グリットブラスト	アルミナやステンレススチールグリッドを用い、金属やコンクリートの汚染を剥離する。グリットは再使用可。	—		C 我が国ではすでに原子力発電所の除染技術として実証され、JAEA の除染モデル実証試験において適用されている、

	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
22 23 24	スポンジブラスト ウレタン製のスポンジ中に入れた硬質のブラスト材を用いる	ブラスト材がソフトであり、家屋など対象物表面を傷めないで除染するのに適し、また、二次廃棄物を生成しない方法。Sponge-Jetting などとして市販されている。Idaho 研究所などでの実績あり、汚染レベル 18,000 dpm/100 cm <sup>2</sup> から検出下限までの汚染の低減した。	—		C 我が国ではすでに市販されており、製品として紹介されている（清掃の用途で実績がある）。
25	氷ジェット/氷ブラスト	水処理装置を備えた施設の除染に適す。弁やポンプの除染に実績あり。除染性能は乾式ブラストと同等。	—		C 我が国ではすでに市販されており、JAEA の除染技術実証試験でも取り上げられ、性能評価試験が行われている。
26 38 39	泡・ゲル除染	除染用ゲルや泡剤を施設の床や壁に適用する。多孔性コンクリートに対して複数回の除染処理により初期の Cs の 53-56% を除去。非多孔性平面に対しては、1 回の処理で 99% 除去可能。米国では DeconGel 社、Bartlett 社などで製品化されている。	III-2 泡除染		B 原子力施設の壁や床の表面汚染を除去する方法として、実績があり、家屋などへの適用も期待できる。
29	化学除染法	硝酸セリウムはプルトニウムの除染に効果的。硝酸セリウムの水蒸気注入または洗浄は Rocky Flats で低濃度の汚染したステンレス鋼に対し浄化基準以下に除染できた。化学除染剤として硝酸セリウムは、海外でも適用され、我が国でも実証されている。	—		C 鋼材に対する化学除染法として実績がある。
30	水中高圧水洗浄 （水中ハイドロレイジング）	水中ハイドロレイジングを用いた水中の実条件下で実証し成功した。適用の限界としては、角部に厚く堆積したペンキ、壁のひび割れ部、壁や床の穴状の汚染部分の除去は通常の除染法と同様、除去が難しい。乾式と湿式も同様。	—		C 高圧水洗浄法の応用技術であり、水中での適用ニーズは低い。
46	汚染コーティング剥離 装置はタングステンカーバ イトの細粒を吹付け、汚染 したコーティング剤の剥 離、真空装置による廃棄物 の収集装置の組合せ	ROTO-PEEN Scaler 所定の性能を達成。	—		C 高レベルや大量の剥離性コーティングの適用を今回の調査では想定していない。

### III. 地下水修復技術

	除染技術	備考 (除染効果)	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
1	地下水揚水 処理	地下水面より下部にある地下水汚染に対し、揚水井戸を設置し、水中ポンプで地下水をくみ上げ、汚染対象に応じた処理装置により除去する。DOE の Fernald サイトでウラン濃度 50-60ppb を河川への放出前に 10ppb 以下とした。処理装置は 15m <sup>3</sup> /m(3900gpm)の井戸用ポンプ 5 系統。すべての系統でウラン除去用のイオン交換樹脂 Dowex 21K、16-30 メッシュ、強塩基、多孔質を使用。	IV-4 地下水揚水 処理  IV-1 イオン交換 樹脂		C セシウム除去用としては小規模試験のみ。再生や廃樹脂処理のため比較的高価。
19	縦型冷凍土壌バリア	地下水の長期的または一時的な汚染に適用。冷凍用配管が地表面下 30ft の深さに設置される。これにより、不透過性の冷凍表面バリアを作る。水理的に孤立した池に効果的。	—		C 通常の掘削技術が適用できない湿地帯の使用には有効であるが、広範囲で長期間にわたる使用には経済的な不適。
27 28	イオン交換樹脂	Idaho での 3M 実験設備に入る Cs-137 濃度は 1,200 pCi/L 程度。出口 Cs-137 濃度は 14 pCi/L 以下。	IV-1 イオン交換		C イオン交換樹脂すでに水処理を始め、多くの分野で使用実績がある。福島サイトでも Kurion 社の Chabasite が使用され、我が国で実績がまとめられている。
32	土壌の蒸気抽出/エア スパージ	吸引井戸を設置し、土壌中に水蒸気を注入して、有害物を抽出する。Brookhaven 研究所で地下水の Sr-90 の数エーカーの汚染に対し適用されたが、効果はなかった (濃度は浄化基準以下には下がらなかった)。	II-3 熱的脱着		C 効果的な除染方法としての実績は報告されていない。
33	透過性反応バリア 原位置で地下に設置した透 過性バリアを通して、化学 的・物理的処理	汚染した地下水に対し、ファネル・ゲイトバリア系統と併用する。バリアは 4 つのセル【粗粒鉍砕 (コロイド除去用)、燐灰岩 (金属及び放射性核種用)、ペカン殻、綿の種) により RCRA 有機物、硝化物、過塩素酸塩を分解した例がある。  結果として、硝化物、過塩素酸塩、プルトニウム、アメリカシウム、Sr-90 の濃度は基準濃度以下に低減でき、実験室の検出下限以下に低減できた。この粒子状の多層バリアは材料が高価ではなく、適用可能。	IV-2 透過反応バ リア		C 現状では、地下水へのセシウム汚染は課題ではなく、適用は想定されない。
34	原位置生物的分解 汚染した地下水を微生物に より革新的な浄化法	汚染した地下の汚染に対し、注入井戸を設置し、微生物の働きを活性化させる方法。Oak Ridge ではウランで汚染された地下水に適用した。微生物処理後には土壌に吸着したウランの 80%までは U(IV)に還元され、非常に良好だった。	—		C 現状では、地下水へのセシウム汚染は課題ではなく、適用は想定されない。
35	中和処理 専門施設での 物理/化学処理	Savannah River 研究所では、対象地下水にアルカリ性ファネル・ゲイトバリア系統を用い、対象地下水の pH が 5.5 になると pH 10 の溶液を注入した。下流の井戸による分析により注入後の早い段階で Sr-90、ウラン、トリチウムの濃度が飲料水基準以下に下がっていることが確認された。	II-9 土壌添加剤		C 現状では、地下水へのセシウム汚染は課題ではなく、適用は想定されない。
36	地下水ポリ 燐酸塩注入 有機物の生物的分解を促進 するために微生物の生育用 薬剤の注入、ポリ 燐酸は燐 酸塩鉍物から燐酸を加水分 解する作用を期待	Hanford サイトではウランで汚染された地下水にポリ 燐酸塩を注入したが鉍物状の析出が形成されず、目標性能未達だった。現場での適用時に不十分な結果となった主要な要因は水理的・地質化学的な不均質性であったと評価された。	—		C この方法は有機物汚染への対策であり、地下水のウラン低減に検討されたが効果的ではなかった。また、地下水へのセシウム汚染は想定されない。

	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
47	セシウム除去用イオン交換 モジュール状、可搬型、小型処理装置 アルカリ性廃棄物からのセシウム吸収用溶媒として結晶性シリコチタネイトを用いる。	セシウム除去のため、有機イオン交換樹脂上に Ionsiv IE-911 を塗布することにより、溶媒使用量を低減(1/300)した。	IV-1 イオン交換		C 現状では、高レベルや大量の液体への適用を想定していない。

#### IV. その他

	除染技術	備考（除染効果）	環境修復要素技術	福島への適用性	学会カタログの追加候補技術
45	気中ラドン除去塔 ラドン含有の空気からラドンを除去するため、乾燥剤塔、活性炭塔、HEPA フィルターを用いる。	ラドンの気体濃度を 95%減少。 2000cfm まで運転 空気 15%相対湿度	—		C 今回の調査では、ラドンは重要な対象ではない。

### 別紙3.5 除染技術カタログ掲載候補技術のデータシート化

(1) 土壌洗浄, (2) 仮処分場保管, (3) 土壌添加剤の適用, (4) 泡除染の4件のデータシート化を行った。

#### (1) 土壌洗浄

(1) 土壌洗浄	
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 居住地域内の汚染土壌からの外部ガンマ（及び潜在的にベータ）放射線量を低減させること、及びこれらの地域から再浮遊した物質からの吸入線量を低減させることを目的とする。</li> </ul>
一般的な適用	
その他の利益	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌洗浄は、食用作物が成長する土の中の汚染物質を低減させ、それにより汚染の吸収を低減させるために、使用される可能性がある。</li> </ul>
対策の内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌洗浄及び粒径分離の使用を通じて土壌汚染を低減させる概念は、ほとんどの有機及び無機の汚染物質は、粘土、シルト、有機質土壌粒子に選択的に結合する傾向があるという研究結果に基づくものである。</li> <li>・ 洗浄過程では、微細粘土及びシルト粒子は、より粗い砂及びレキ土粒子から分離される。分離された細粒土及び汚染物質は、脱水され、敷地外処分に適した乾燥濾滓となる。</li> <li>・ 汚染物質を溶解し、脱着し、除去するために、界面活性剤やキレート化合物などが添加された酸性または塩基性の溶液は、抽出された物質に適用することができる。物理的な分離方法は、処理される物質の容量を低減するために、専門施設での洗浄に先立って使用されることがある。</li> <li>・ プロセス概要 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染土は標準的な重機で掘削され、土壌洗浄運転の供給場所に移動される。</li> <li>- 土は、大きい物質または有機物を除去するために、ふるいにかけてられる。</li> <li>- 抽出剤は、汚染物質と結合するため、または汚染物質を溶解するために、土に適用される。</li> <li>- 土は、浸出液及び汚染物質を除去するため、脱水される。</li> </ul> </li> <li>・ 土壌洗浄は、以下の技術のいずれの組合せも含まれる可能性がある。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 土壌分離</li> <li>- 密度分離(金属除去)</li> <li>- 摩擦洗浄 (Attrition scrubbing)</li> <li>- 浮遊 (PAH(多環芳香族炭化水素)、殺虫剤、ダイオキシンに有効)</li> <li>- 界面活性剤洗浄</li> <li>- 化学的抽出</li> </ul> </li> <li>・ 土壌洗浄は、一般に媒体移動技術と考えられる。すなわち、土壌洗浄により発生した汚染水は、汚染物質を除去するのに適した技術を使用して処理される。</li> <li>・ 一般に、技術が修復の解決策として適用される前に、試作規模の処理可能性検討が完了される。</li> </ul>
対象表面又は集団	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 空地（公園、競技場、庭、農業地域）の土量</li> </ul>
対象核種	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 様々な放射性核種は、土壌洗浄を使用して処理されることが可能である。処理法は、土壌のタイプ及び使用された浸出水溶液に依存する。</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌洗浄は、ラジウム、プルトニウム、トリウム、セシウムおよび他の放射性核種で汚染された土壌を修復するために、使用されてきている。</li> </ul>
適用規模	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大きな表面積の地域(例えば公園、野原)に適している。一般に、作業費用は、より大きいサイトに対して有利である。</li> </ul>
実施時期	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ この方法は、廃棄物として処理または処分される必要のある土量を削減するために、堆積後いつでも使用され得る。堆積からの時間の長さやサイトの特性は、汚染物質の移動性に影響を与え、従って処理のために掘削されるべき土の量に影響を与える。</li> </ul>
実施上の制約	
法令	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 所有権及び財産の利用</li> <li>・ 史跡上または保全地区での使用</li> <li>・ 財産に起こり得る損害への責任</li> </ul>
環境／技術	—
有効性	
除染係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ DF (除染係数) は、汚染物質の種類、土壌のタイプ、使用する洗浄剤に大きく依存する。</li> <li>・ ウラニウムで汚染されたサイトでは、除染係数として、3程度の値が得られている。(実績の欄を参照)</li> <li>・ この技術が大規模に適用されたサイトでは、廃棄物の容量の低減は一般に90%を超えるようである。(実績の欄を参照)</li> </ul>
表面線量率の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 外部線量率の低減は、作業の効率に依存する。</li> </ul>
再浮遊の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土から効果的に大部分の汚染を除去することにより、表面上の再浮遊物の大気中濃度を著しく低減することができる。</li> </ul>
回避線量 (一般)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 以下からの線量の低減 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染土壌からの外部線量</li> <li>- 再浮遊した汚染の吸入または汚染土壌の摂取からの潜在的な内部線量</li> </ul> </li> <li>・ 公衆の成員への線量低減に影響を及ぼす要因は、以下を含む。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 広い区域にわたった作業の有効性</li> <li>- 処理された区域で個人が過ごした時間</li> </ul> </li> </ul>
追加線量 (作業員)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 作業員は、以下の潜在的な経路により、被曝の可能性がある。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染土壌および汚染された設備からの外部被曝</li> <li>- 再浮遊の汚染の吸入、あるいは地面または他の地表からの吸入 (PPE (個人防護具) が使用されることは可能) <ul style="list-style-type: none"> <li>(労働者に対する、この原因の寄与の可能性は、作業の性質により、一般に対するそれよりおそらく大きいと思われる。)</li> </ul> </li> <li>- ほこりの摂取 (PPEが使用されることは可能) <ul style="list-style-type: none"> <li>(労働者に対する、この原因の寄与の可能性は、作業の性質により、一般に対するそれよりおそらく大きいと思われる。)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
作業の有効性への影響因子 (技術的)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処理性に影響する土壌のパラメータ <ul style="list-style-type: none"> <li>- 粒子径の分布 <ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; 2 mm 前処理が必要</li> <li>0.25 - 2 mm 土壌洗浄は有効(砂質土)</li> <li>0.063 - 0.25 mm 土壌洗浄は限定的</li> <li>&lt; 0.063 mm 土壌洗浄は困難 (粘土及びシルト)</li> </ul> </li> <li>- 含水率 <ul style="list-style-type: none"> <li>前処理と移動の必要条件に影響する。</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染物質の化学成分 炭酸塩の濾過液は、選択的にウラニウムを溶解する。</li> <li>- pH 前処理の必要条件および洗浄液との適合性に影響する。</li> <li>- このプロセスは、細粒土(400メッシュ(0.037mm)以下)の割合が25%以下の土壌及び堆積物に適する。</li> </ul>												
作業の有効性への影響因子(社会的)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理が終了するまで、一般者は処理区域外にとどまるべきである。</li> </ul>												
<b>要求事項</b>													
必要な装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削機</li> <li>・予備選別機器</li> <li>・洗浄システム</li> </ul>												
必要なユーティリティーとインフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水</li> </ul>												
必要な消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削機用の燃料及び油</li> <li>・浸出水溶液(再利用される可能性がある)</li> <li>・浸出水溶液を処理する樹脂または媒体(再利用される場合)</li> </ul>												
必要な技術	—												
必要な安全対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者に対し、外部の汚染の感応性を低減するため、PPE(個人防護具)が推奨される。</li> <li>・ほこりの多い条件下では、呼吸に対する保護が必要とされる(マスクまたは防塵マスク)。</li> </ul>												
<b>廃棄物</b>													
量と種類	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浸出水及び汚染物質の溶液(なお、汚染物は浸出水及び浸出水溶液から化学的に分離される可能性がある)</li> <li>・浸出水溶液の処理に使用した媒体(浸出水が再利用される場合)</li> </ul>												
二次廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工程用水(再利用される場合)</li> <li>・PPE</li> </ul>												
<b>コスト</b>													
装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・洗浄システム (コストは、多くの場合、より大きいサイトで低くなり得る)</li> <li>- 処理容量に対する推定コスト(参考文献[2])</li> </ul> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>容量 (t)</th> <th>推定容積 (m3)</th> <th>\$/t (1995年)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 4,000</td> <td>&lt; 2,000</td> <td>\$200 ~ \$250 (約16,000~20,000円)</td> </tr> <tr> <td>4,000 ~ 50,000</td> <td>2,000 ~ 25,500</td> <td>\$150 (約12,000円)</td> </tr> <tr> <td>&gt; 50,000</td> <td>&gt; 25,500</td> <td>\$100 ~ \$125 (約8,000~10,000円)</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 処理容量に対する推定コスト(参考文献[3]) (ここでの推定は、砂・シルト及び砂・粘土の混合物中のSVOC(揮発性有機化合物)の処理に対するものである。)</li> </ul>	容量 (t)	推定容積 (m3)	\$/t (1995年)	< 4,000	< 2,000	\$200 ~ \$250 (約16,000~20,000円)	4,000 ~ 50,000	2,000 ~ 25,500	\$150 (約12,000円)	> 50,000	> 25,500	\$100 ~ \$125 (約8,000~10,000円)
容量 (t)	推定容積 (m3)	\$/t (1995年)											
< 4,000	< 2,000	\$200 ~ \$250 (約16,000~20,000円)											
4,000 ~ 50,000	2,000 ~ 25,500	\$150 (約12,000円)											
> 50,000	> 25,500	\$100 ~ \$125 (約8,000~10,000円)											



	小さいサイト	大きいサイト
容積 (m3)	10,000	200,000
密度 (lbs./yd3)	2,600 (約1500kg/m3)	2,600 (約1500kg/m3)
プラントの大きさ (t/h)	50	100
コスト/m3	\$187 (約15,000円)	\$70 (約5,600円)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 一般に試作規模の試験は、大規模な適用の前に実施される。これらの試験の費用は以下のような範囲を取りうる。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 試験室規模予備試験： \$20,000 to \$50,000 (約1.6~4百万円)</li> <li>- 試作規模試験： \$70,000 to \$100,000 (約5.6~8百万円)</li> <li>- パイロット規模試験： \$750,000 to \$1,500,000 (約60~120百万円)</li> </ul> </li> </ul>	
消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水 <ul style="list-style-type: none"> <li>- プロセス水 (再利用される可能性がある)</li> <li>- 掘削のためのほこりの抑制</li> </ul> </li> </ul>	
作業時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 商業的なシステムでは、一般的なプロセスでの作業時間のオーダーは、小さいサイトで 15~40yd<sup>3</sup>/h (約11~31m<sup>3</sup>/h)、大きいサイトで 80yd<sup>3</sup>/h (約61m<sup>3</sup>/h) までである。</li> </ul>	
コストへの影響因子	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌のタイプ及び必要な前処理</li> <li>・ サイトの規模及び処理量</li> <li>・ 除染目標</li> <li>・ 二次処理または二次廃棄物</li> <li>・ 植物の量</li> <li>・ 気候</li> </ul>	
<b>副作用／影響</b>		
環境への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処理区域からの植物相または動物相の除去、及び植物または低木の喪失に対する容認性</li> <li>・ 土壌の栄養分または土壌肥沃度に影響する可能性</li> </ul>	
社会への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 土壌を、洗浄した土壌と取り替えることは、残留汚染に対する懸念から、公衆の成員から否定的に見られる可能性がある。</li> <li>・ 汚染土壌は、処分または追加的な処理のため、敷地外へ輸送される。処分場所に依存するが、輸送は、人々が居住する地域を通る可能性がある。</li> </ul>	
実績	<p>&lt;Fernald 環境管理プロジェクト&gt;</p> <p>FernaldのMAWS (Minimum Additive Waste Stabilization、最小付加廃棄物安定化) プログラムは、廃棄物容量の低減を達成するために、土壌洗浄、混合廃液のガラス固化、プロセス水の再利用及び修復のためのイオン交換を統合するものである。 Fernaldの第9プラントで土壌洗浄システムからの設備及び結果は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 汚染物質:ウラニウム</li> <li>・ 大部分の土は、325メッシュ (0.044mm) までの部分である。</li> <li>・ 適用</li> </ul>	

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染土壌をスラリーにし、小さなかたまりを壊し、石と有機物を分離するために、丈夫な攪拌機が使用される。</li> <li>- スラリーは、粗粒材料を除去するために、振動するふるいへ移動する。</li> <li>- フィルターを通過したスラリーは、濾過システムへポンプ輸送される。</li> </ul> <p style="margin-left: 40px;">ウラニウムを酸化させる過マンガン酸カリウム ウラニウムを溶かす炭酸ナトリウム 溶液中で溶かされたウラニウムを保持する重炭酸アンモニウム</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 土は脱水され、汚染除去された土は、汚染除去の目標値以下であることを確認される。</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 予想された容積減少：50～80%、実績：66.5%</li> <li>・ 初期の土の平均放射能：17.6 pCi/g(ウラニウム)。洗浄された土の放射能レベルは6 pCi/g程度まで低減。</li> <li>・ 除染係数 = 3</li> <li>・ 処理速度：0.25 yd<sup>3</sup>/時間 (約0.19 m<sup>3</sup>/時間)</li> <li>・ 土壌洗浄は、費用が高く、廃液が比較的多かったことから、サイトでは大規模には適用されなかった。</li> </ul> <p>&lt;Hanford 土壌洗浄実証&gt;</p> <p>二つの土壌洗浄パイロット試験は、土壌洗浄の能力と有効性を実証するために、Hanfordの複合施設で行われた。ART社からの移動可能な土壌洗浄ユニット（処理能力が10～15t/h）は、実証試験で用いられた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 金属、有機物、低レベルのウラニウムを含む300トンの土重量で、廃棄物の93%低減が達成された。</li> <li>・ 高いレベルの銅とウラニウムを含む80トンの土重量で、廃棄物の91%低減が達成された。</li> </ul>
参考文献	<p>[1] ANL 95/46, “Minimum Additive Waste Stabilization (MAWS), Phase I: Soil Washing Final Report” (1995)</p> <p>[2] WSRC-TR 95-0183, “Soil Washing Technology Evaluation” (1995)</p> <p>[3] Federal Remediation Technologies Roundtable, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, <a href="http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html">http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-19.html</a>.</p> <p>[4] ART Engineering, LLC, <a href="http://www.art-engineering.com">http://www.art-engineering.com</a>.</p>
連絡先情報	<p>ART Engineering, LLC +1 813 855 9852 <a href="http://www.art-engineering.com">http://www.art-engineering.com</a></p>

(2) 仮処分場保管

(2) 仮処分場保管	
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染した土壌、有機物、建物解体破片から公衆への外部ガンマ（及び潜在的にベータ）放射線量を低減させること、及び再浮遊した物質からの吸入線量を低減させることを目的とする。</li> </ul>
一般的な適用	
その他の利益	<ul style="list-style-type: none"> <li>・この施設は、あるタイプの廃棄物を、将来の処理のため、取出すことのできるように設計され得る。</li> </ul>
対策の内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削または処分された物質は、汚染の拡大を防止するため、ライナー、浸出水収集システム、及びカバーを含む、工学施設に置かれる。多くの保管場所システムは、多重障壁手法を使用しており、そこでは、廃棄物の形、設計された障壁、及びサイト自体がすべて環境から廃棄物を隔離することに貢献している。</li> <li>・処分施設は、予想使用期間より長い存続期間に対して設計されることがある。</li> <li>・これは実績があり、実施されている技術である。</li> </ul>
対象表面又は集団	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染された掘削土、有機物質、汚染液体、及び建物解体破片。</li> </ul>
対象核種	<ul style="list-style-type: none"> <li>・すべての放射線核種。</li> </ul>
適用規模	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大きい処分区域に適する。</li> </ul>
実施時期	<ul style="list-style-type: none"> <li>・保管場所は、堆積後はいつでも建設可能である。</li> </ul>
実施上の制約	
法令	<ul style="list-style-type: none"> <li>・場所の選定（史跡や保護地域の回避）</li> <li>・居住地域への近接及び人の健康への潜在的影響</li> <li>・潜在的な環境への影響</li> </ul>
環境／技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地表水の汚染を防止するために、以下の場所を避けることが望ましい。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 洪水を受けやすい場所</li> <li>- 津波を受ける可能性がある場所</li> <li>- 干満による洪水を受ける可能性がある場所</li> </ul> </li> <li>・汚染物質の予期しない放出を防止するために、以下の場所を避けることが望ましい。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 斜面崩壊を受ける土地の近く</li> <li>- 断崖、土手、砂丘、急斜面のような浸食を受ける特徴のあるものの近く</li> <li>- 永久凍土層や陥落孔のような地殻構造上の特徴のあるものの近く</li> <li>- 地殻構造の活動が顕著な断層の近く</li> <li>- 地下水の流れが比較的大きいという特徴を持つ地殻構造の近く</li> <li>- 損傷を受けやすい源水地域の近く</li> </ul> </li> <li>・過剰な浸出水の形成を防止するために、以下の場所を避けることが望ましい。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- いずれかの月の平均降水量が蒸発散量と地下水貯留量を合わせた容量より大きい場所</li> <li>- 平均的な年降水量がカバーを通した平均的な蒸発散量より多い場所</li> </ul> </li> </ul>

有効性	
除染係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>この方法は、毒性、可動性あるいは有害廃棄物の容積を低減するものではないが、一度集められると、廃棄物の可動性を減少させる。</li> </ul>
表面線量率の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>表面線量率の低減は、廃棄物を修復または収集するのに使用された技術に依存する。</li> </ul>
再浮遊の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>汚染物質の再浮遊の低減は、廃棄物を修復または収集するのに使用された技術に依存する。廃棄物保管場所は、一度収集された汚染物質を収容すると、再浮遊の可能性が低減される。</li> </ul>
回避線量（一般）	<ul style="list-style-type: none"> <li>公衆地域からの汚染物質の除去は、以下の可能性を低減する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>外部被曝</li> <li>再浮遊した汚染物質の吸入または汚染した土の摂取による内部被曝</li> </ul> </li> </ul>
追加線量（作業員）	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員は以下の潜在的な経路により被曝の可能性がある。 <ul style="list-style-type: none"> <li>汚染物質からの外部被曝</li> </ul> </li> </ul>
作業の有効性への影響因子（技術的）	(実施上の制約 環境／技術 の項を参照)
作業の有効性への影響因子（社会的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>保管場所の位置についての大衆の受容</li> <li>廃棄物運搬経路についての大衆の受容</li> </ul>
要求事項	
必要な装置	—
必要なユーティリティとインフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>水</li> <li>電気</li> <li>輸送経路の近くに位置すべきである。</li> </ul>
必要な消耗品	—
必要な技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>保険物理学管理</li> <li>環境監視作業を遂行する訓練された職員</li> </ul>
必要な安全対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>作業員に対する線量は、年間の限度を超えないよう監視されるべきである。</li> </ul>
廃棄物	
量と種類	—
二次廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>浸出水</li> </ul>
コスト	
装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯蔵場所のコストは、地質学上及び環境の特性、詳細設計と設計要求に大きく依存することから、ここでは、低レベルの施設の建設と操業の総費用の例を示す。</li> <li>&lt;Centre de l'Aube (フランス)&gt; <ul style="list-style-type: none"> <li>サイトに関して <ul style="list-style-type: none"> <li>廃棄物の種類：短寿命、低及び中レベルの廃棄物</li> <li>容量：1,000,000 m<sup>3</sup></li> <li>地上施設</li> <li>回収可能性の要求なし。</li> <li>地質学的特徴：粘土障壁の上に重なる浸透性の砂質の構成。処分構造物は地下水より上に建設される。 <ul style="list-style-type: none"> <li>1日当たりの受入容量 約 300 m<sup>3</sup>。1年で約 35,000 m<sup>3</sup>。</li> <li>保管場所の地表面積：0.3 km<sup>2</sup></li> <li>区画の数：総数 420。1999年での使用数：概略 39</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>費用 <ul style="list-style-type: none"> <li>計画：\$24 million (約 19 億円)</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 許認可：\$3 million（約 2.4 億円）</li> <li>- 建設 <ul style="list-style-type: none"> <li>稼働前：\$192 million（約 154 億円）</li> <li>操業中：\$173 million（約 138 億円）</li> </ul> </li> <li>- 操業：1 年当たり \$36 million（約 29 億円）</li> </ul> <p>&lt;Morsleben 保管場所（閉鎖）（ドイツ）&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ サイトに関して <ul style="list-style-type: none"> <li>- 廃棄物の種類：短寿命、低及び中レベルの低濃度のアルファ放射体を含む廃棄物。</li> <li>- 地質学的特徴：堆積岩塩の中の深い地層（放棄された岩塩坑）。深さは地上から約 500m。地下水位は約 500m。</li> <li>- 回収可能性の要求なし。</li> <li>- 容量：54,000 m<sup>3</sup></li> </ul> </li> <li>・ 費用 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 管理：\$2.3 million（約 1.8 億円）</li> <li>- 操作：\$700,000（約 0.6 億円）</li> <li>- その他：\$17 million（約 18 億円）</li> <li>- 放射能監視：\$500,000（約 0.4 億円）</li> <li>- 職員数：173 人</li> </ul> </li> </ul>
消耗品	—
作業時間	—
コストへの影響因子	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計画立案及び許認可 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 国の要求を満足することができる保管場所の概念の定義を許容するために、研究開発が必要とされる。</li> <li>- サイトの選別と評価</li> <li>- 許認可費用</li> </ul> </li> <li>・ 設計と建設 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 技術的容量</li> <li>- 掘削深さ</li> <li>- 最終的な被覆</li> </ul> </li> <li>・ 操業費用 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 廃棄物処理及び輸送物</li> <li>- 環境保護と処分システムの適切な性能を保証するための、地下水と空気の監視、及び放射線調査</li> </ul> </li> </ul>
副作用／影響	
環境への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 指定された保管場所は、長期間、土地の大きな区域の使用を要求する。</li> <li>・ 危険な廃棄物または放射性の廃棄物の保管場所は、しっかり設計建設され、定期的に検査されるが、周辺の環境や地下水への漏洩の可能性はある。</li> <li>・ 計画された低レベル廃棄物の埋立地は、環境監視計画を実行することが望ましい。環境評価の基準の値は、通常、許認可過程で設定される。環境監視計画は、以下を含む。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 物的移動</li> <li>- 浸出液</li> <li>- 漏洩</li> <li>- 地下水</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 地表水及び沈殿物</li> <li>- 大気放出</li> </ul>
社会への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大衆は保管場所の位置及び廃棄物の運搬経路を容認する必要がある。廃棄物の運搬経路は、できるだけ公衆への影響が小さくなるように選定されることが望ましい。</li> <li>・制度化した管理は、保管場所の閉鎖後、特に表面近くの設備に対し必要とされる。</li> </ul>
実績	<p>&lt;ERDF（環境修復処分施設）&gt;</p> <p>ERDF (Environmental Restoration Disposal Facility、環境修復処分施設) は世界最大の工学的低レベル廃棄物処分施設である。施設は、元プルトニウム処理プラントとその周りの地域の修復で生じた汚染した土壌と物質を処分するのに使用された。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・現在の容量は約 1640 万トン</li> <li>・毎日コンテナ 300 個分の廃棄物を受け入れる。それぞれのコンテナを平均すると約 20 トンの量となる。1 日にトラック貨物 900 台分までを置くことが可能</li> <li>・SCADA (System Control and Data Acquisition、システム制御及びデータ収集) システムは、以下を自動的に収集する。</li> </ul> <p>埋立操作データ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚水だめの中の水レベル</li> <li>- ポンプの流量</li> <li>- ポンプ輸送された浸出水の総量</li> <li>- 警報の識別</li> <li>- 許容漏洩率の計算</li> </ul>
参考文献	<p>[1] ERDF Expansion and upgrades:  <a href="http://www.hanford.gov/news/cfm/DOE/E1002033_1.pdf">http://www.hanford.gov/news/cfm/DOE/E1002033_1.pdf</a></p> <p>[2] U.S. Department of Energy, Hanford Site, Environmental Restoration Disposal Facility:  <a href="http://www.hanford.gov/page.cfm.ERDF">http://www.hanford.gov/page.cfm.ERDF</a></p> <p>[3] OECD/NEA, “Low Level Radioactive Waste Repositories: An Analysis of Costs” (1999)</p> <p>[4] Canadian Council of Ministers of the Environment, “National Guidelines for Hazardous Waste Landfills,” (2006)</p>
連絡先情報	<p>S.M. Stoller Corporation  +1 303 546 4300  <a href="http://www.stoller.com">http://www.stoller.com</a></p> <p>Konrad  +49 (0) 53 41 867 30 99  <a href="http://www.endlager-konrad.de">http://www.endlager-konrad.de</a></p>

(3) 土壌添加剤の適用

(3) 土壌添加剤	
目的	・汚染された食用作物からの内部被曝の可能性を低減すること。
一般的な適用	
その他の利益	—
対策の内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>・化学的または物理的添加剤は、対象とする汚染物質の結合、固定または抽出を助けるため、汚染された環境に導入される。</li> <li>・高水準のカリウム施肥は、植物によるセシウム吸収を減少させ得る。石灰の散布は、ストロンチウムの吸収を減少させ得る。</li> <li>・粘土材料は、セシウムを固定し、植物の吸収を低減するのに使用されてきた。一般に、土壌中に混合される。この方法は、土壌の上層が将来のある時点で削り取られること、汚染物質の大部分を捕えることを可能としている。</li> <li>・キレート剤は、セシウムをより深くに移動させるのに使用され得る。これは、生物学的利用能を除き、作業者を保護する。しかし、これは、地下水汚染に影響する可能性がある。</li> <li>・穀物が栽培される地域に対して考慮されることが考えられる。</li> <li>・添加剤は、肥料散布機を用いて適用されるか、標準的な農機具を用いて土中に混合される。</li> </ul>
対象表面又は集団	・農業空間での土量
対象核種	・この方法は、程度の差はあるが、ストロンチウムやセシウムのような核分裂生成物への有効性が見られてきている。
適用規模	・小さい規模または大きい規模への適用について、簡単に適合が可能である。
実施時期	・土中を容易に移動する汚染物質に対しては、この方法は、汚染が起こったすぐ後に適用した場合、効果的である。土中を容易に移動しない汚染物質に対しては、いつでも適用可能である。
実施上の制約	
法令	<ul style="list-style-type: none"> <li>・所有権及び財産の利用</li> <li>・財産に起こり得る損害への責任</li> </ul>
環境／技術	・カリウム肥料の添加は、カリウムが既に高水準である土壌に添加する場合は、セシウム摂取低減に顕著な影響は与えない。
有効性	
除染係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・この方法では汚染物質は除去されないため、技術的には、DF=0 である。</li> <li>・この方法の効果の水準は、土壌の条件と生育する作物に大きく依存する。</li> </ul>
表面線量率の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>・この方法は、セシウムが土の中に残るため、表面の線量率への影響はほとんどない。</li> <li>・土壌添加剤を適用する前に、汚染土壌を掘削または深耕する場合、表面線量率低減の実現可能性はある。</li> </ul>
再浮遊の低減	・この方法では汚染物質は除去されないため、土壌添加剤を適用する前に汚染土壌を掘削または深耕しない限りは、汚染物質の再浮遊を低減する効果はほとんどない。
回避線量（一般）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・以下からの線量の低減。</li> <li>- 汚染された食用作物の摂取による内部線量低減</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・公衆の成員への線量削減に影響する要素 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 特定のタイプの作物に対する処理の有効性</li> </ul> </li> <li>・修復後、畑で働く農民は、汚染は除去されていないことから、汚染土壌からいくらか被曝を受ける可能性がある。このような被曝の可能性は、土壌添加剤の適用の前に、深耕または土壌掘削により、低減され得る。</li> </ul>
追加線量（作業者）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者は、以下の潜在的な経路を通して被曝の可能性はある。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染した土壌からの外部被曝</li> <li>- 土壌からの再浮遊した汚染物質の吸入（汚染された地域を重機を操作した場合再浮遊する可能性がある）。PPE（個人防護具）及びほこりの抑制はこのリスクを低減するのに使用される。</li> <li>- 予期しないほこり（汚染の移動）の摂取。PPE 及びほこりの抑制はこのリスクを低減するのに使用される。</li> </ul> </li> </ul>
作業の有効性への影響因子（技術的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・汚染物質は土の中に残っているので、将来の耕起または土壌混合により、汚染物質を表面に持ってくることによる、外部被曝、吸入、不慮の摂取の可能性を高める可能性がある。</li> <li>・核分裂生成物の摂取の程度は、土壌のタイプに大きく依存する。以下に例を示す。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 土壌にカリウムを加えることにより、カリウムの少ない土壌では、植物に摂取されるセシウムを低減することが見られるが、セシウムが多く含まれている土壌からのセシウム摂取を低減するような評価可能な影響はない。</li> <li>・植物中の放射性核種の分布は、作物のタイプにより異なり、特徴を明らかにすることが望ましい。例えば、セシウムは、主に小麦の葉に集中するが、小麦の粒にはもっと少ない割合でしか集中しない。</li> </ul> </li> </ul>
作業の有効性への影響因子（社会的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・必ずしも汚染を除去しない線量低減技術の公衆の受容性</li> </ul>
<b>要求事項</b>	
必要な装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大型の肥料散布機器</li> <li>・耕起機器</li> </ul>
必要なユーティリティとインフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業中のほこりの抑制のために、水が必要となる可能性がある。</li> </ul>
必要な消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・肥料</li> <li>・大型の肥料散布機器用の燃料</li> </ul>
必要な技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・広い農地の修復に対しては、作業者は、農業用重機の操作方法を知る必要がある。</li> </ul>
必要な安全対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業者は、作業中、再浮遊した汚染物質の不慮の吸入や摂取を防止するため、PPE(個人防護具)を着用が必要となる可能性がある。このリスクを低減するため、ほこりの抑制用に水が使用される。</li> </ul>
<b>廃棄物</b>	
量と種類	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>
二次廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・なし</li> </ul>
<b>コスト</b>	
装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大型の肥料散布機器：\$ -- <ul style="list-style-type: none"> <li>- 散布する材料の要求量に依存する。</li> <li>- 手作業用の小さい装置またはトラックやトラクターに牽引される装置は、農業適用用に作られた装置と同等である。</li> </ul> </li> <li>・耕起機器：\$ --</li> </ul>



消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・肥料 <ul style="list-style-type: none"> <li>- カリウム肥料 (KCl 肥料) : \$600/トン (約 48,000 円/トン)</li> </ul> </li> <li>・燃料 : \$ --</li> </ul>
作業時間	—
コストへの影響因子	・肥料適用の費用に影響を与える要素はほとんどない。カリウム肥料の単価は年毎に変動する。
副作用／影響	
環境への影響	・いくつかの土壌添加剤の過剰な適用は、作物を損なう可能性がある。
社会への影響	・公衆は、汚染を物理的には除去しない技術に慎重である可能性がある。
実績	<p>&lt;マーシャル諸島 (ビキニ環礁) &gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・マーシャル諸島 (ビキニ環礁) における核兵器の大気圏内実験により、農地はセシウム 137 で広範囲汚染された。島の土壌に自然にカリウムが不足していることにより、より多くのセシウムが作物に吸収されるに到るとの知見が得られた。1980 年代の試験の結果、カリウム肥料の添加により吸収が低減するとの知見が得られた。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 大規模実験の結果、1ヘクタール当たり 2000kg のカリウムを使用することにより、ココナツの果肉及びジュースのセシウム 137 吸収が、処理前レベルの 5%~10%に低減したとの知見が得られた。</li> </ul> </li> </ul>
参考文献	<p>[1] <a href="https://marshallislands.llnl.gov/bikini">https://marshallislands.llnl.gov/bikini</a></p> <p>[2] UCRL LR -147596, “Effect of Potassium on Uptake of 137Cs in Food Crops Grown on Coral Soils: Annual Crops at Bikini Atoll” (2002)</p> <p>[3] Nishita, H. et. al. “Uptake of Radioactive Fission Products by Crop Plants” (1961)</p> <p>[4] Jones, J.B. and Haghiri, F. “Reducing the Uptake of Sr 90 by Plants on Contaminated Ohio Soils” (1962)</p> <p>[5] USDA Economic Research Service, “Average Farm Prices of Selected Fertilizers” :  <a href="http://ers.usda.gov/Data/FertilizerUse/Tables/Table7.xls">http://ers.usda.gov/Data/FertilizerUse/Tables/Table7.xls</a></p>
連絡先情報	—

(4) 泡除染

(4) 泡除染	
目的	・居住地区内の汚染表面からの外部ベータ及びガンマ線量を低減することを目的とする。
一般的な適用	
その他の利益	・表面汚染の除去は、移動した汚染物質からの、予期しない摂取の可能性を低減する。汚染物質の再浮遊の可能性を低減し、吸入摂取の可能性を下げる。
対策の内容	<p>・汚染された表面は、表面活性剤または発泡剤を含む溶液（泡状または液状であり得る）で覆われる。汚染物は、溶液に引きつけられ、溶液中に浮遊する。溶液は、表面から、洗い落とされるか、拭き取られるかされ、処分のために集められる</p> <p>・泡は、多くの場合、垂直面の接触時間を増加させるため増粘剤を含むことがある。</p> <p>・溶液は、金属、カーペット、ゴム、タイル、ガラス、ニス塗の木材への使用に対し、一般的に安全である。</p> <p>・基本的な工程は以下のようである。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 泡除染剤が使用される場所の廻りは、二次廃棄物を集めるために、ブラダーバーム (bladder berm) またはビニールシートで保護される。</li> <li>- 散布機器は、背負って使用する小さい機材から、通常の圧力洗浄及び大規模の除染システムまでのサイズの範囲がある。</li> <li>- 溶液は、一般にガロン単位または粉末の濃縮物として販売される。粉末の濃縮物は、混合前の保存可能期間が長い（約5年）。</li> <li>- 泡または溶液は、一度適用されると、少しの間（例えば、10～30分）汚染された表面に留まることが可能である。</li> <li>- 泡は、表面から、濯がれるか、拭き取られるか、または吸引される。</li> <li>- 液状の溶液に関して、イオン交換フィルターを組み込んだ水吸引装置は、使用した溶液を集め、再利用するのに使用される。</li> <li>- いくつかの製造業者は、泡を除去して取扱いやすい液状とする、特別の消泡装置を提供している。</li> </ul>
対象表面又は集団	・汚染された外表面（家、建物、車、舗装、アスファルト等）
対象核種	・溶液は一般に、特定の化学グループに対して調合される。（すなわち、ハロゲン、遷移金属、またはアクチニドの汚染物質に対して）。このため、放射性核種の広い範囲を対象とすることができる。
適用規模	・大きいまたは小さい表面領域に適する。
実施時期	・この方法は、表面の汚染を低減するために、付着後いつでも使用可能である。外表面については、汚染が多孔性の表面に入り込む前に、付着後すぐに適用することが効果的である。入り込んだ汚染物質は、表面の汚染を目標水準に低減する複数回の泡の適用を必要とする可能性がある。
実施上の制約	
法令	<ul style="list-style-type: none"> <li>・所有権及び財産の利用</li> <li>・財産に起こり得る損害への責任</li> <li>・史跡上または保全地区での使用</li> </ul>
環境／技術	・泡は、濯がれる前のある程度の時間（一般に10～30分程度）、汚染表面にとどまる必要があるため、過剰な湿分（雨または雪）はシステ

	ムの効果を低減する。																																										
有効性																																											
除染係数	<p>・DF は、汚染物質の種類と処理される表面の状況に依存して、変わってくる。いくつかの結果を、以下にまとめる。</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>表面</th> <th>汚染物質</th> <th>DF</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Porous concrete (INL)</td> <td>Cs -137</td> <td>~2</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">Stainless steel sink</td> <td>Co -60</td> <td>103</td> </tr> <tr> <td>Co -58</td> <td>394</td> </tr> <tr> <td>Zn -65</td> <td>76</td> </tr> <tr> <td>Mn -54</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>Stainless steel fuel handling load guide assembly (NPP)</td> <td>NA</td> <td>~10 -13 (after 2 applications)</td> </tr> <tr> <td>Painted vehicle panels</td> <td>La -140</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>Armored vehicle (80 minutes application time)</td> <td>La -140</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>Brick</td> <td>Eu -152 (actinide)</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>Concrete</td> <td>Eu -152</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>Ceramic tile</td> <td>Eu -152</td> <td>33</td> </tr> <tr> <td>Brick</td> <td>Na -24 (transition metal)</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>Concrete</td> <td>Na -24</td> <td>1.8</td> </tr> <tr> <td>Ceramic tile</td> <td>Na -24</td> <td>1.2</td> </tr> </tbody> </table>	表面	汚染物質	DF	Porous concrete (INL)	Cs -137	~2	Stainless steel sink	Co -60	103	Co -58	394	Zn -65	76	Mn -54	120	Stainless steel fuel handling load guide assembly (NPP)	NA	~10 -13 (after 2 applications)	Painted vehicle panels	La -140	14	Armored vehicle (80 minutes application time)	La -140	10	Brick	Eu -152 (actinide)	14	Concrete	Eu -152	33	Ceramic tile	Eu -152	33	Brick	Na -24 (transition metal)	1.1	Concrete	Na -24	1.8	Ceramic tile	Na -24	1.2
表面	汚染物質	DF																																									
Porous concrete (INL)	Cs -137	~2																																									
Stainless steel sink	Co -60	103																																									
	Co -58	394																																									
	Zn -65	76																																									
	Mn -54	120																																									
Stainless steel fuel handling load guide assembly (NPP)	NA	~10 -13 (after 2 applications)																																									
Painted vehicle panels	La -140	14																																									
Armored vehicle (80 minutes application time)	La -140	10																																									
Brick	Eu -152 (actinide)	14																																									
Concrete	Eu -152	33																																									
Ceramic tile	Eu -152	33																																									
Brick	Na -24 (transition metal)	1.1																																									
Concrete	Na -24	1.8																																									
Ceramic tile	Na -24	1.2																																									
表面線量率の低減	・表面の線量率の低減は、汚染物質の種類と処理される表面の状況に依存する。																																										
再浮遊の低減	・表面汚染の多くを効果的に除去することにより、再浮遊の可能性は顕著に低減される。泡の複数回の適用後に除去されない汚染物質は、深く入り込んでいて、再浮遊のリスクは高くはないと考えられる。																																										
回避線量（一般）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・以下からの線量の低減 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染表面からの外部線量</li> <li>- 移動汚染または再浮遊の汚染の摂取による潜在的な内部線量</li> </ul> </li> <li>・公衆の成員への線量低減へ影響する要素 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 処理される区域で個人が過ごした時間</li> <li>- 多孔性表面の処理の有効性</li> </ul> </li> </ul>																																										
追加線量（作業員）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・作業員は、以下の潜在的な経路により、被曝の可能性はある。 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 汚染された表面からの外部被曝</li> <li>- 移動した汚染からの皮膚の汚染（このタイプの被曝の可能性を低減するために、PPE（個人防護具）が装着されることは可能。）</li> <li>- 移動した汚染物質の不慮の摂取（このタイプの被曝の可能性を低減するために、PPE（個人防護具）が装着されることは可能。）</li> </ul> </li> </ul>																																										
作業の有効性への影響	・除染溶液が汚染表面に接触する時間の長さ																																										

因子（技術的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・適用の均一性（作業者の技能）</li> <li>・表面及び表面条件のタイプ <ul style="list-style-type: none"> <li>- 複数回の適用は必要な可能性がある</li> <li>- 複数のタイプの溶液は推奨される可能性がある。</li> <li>- 多孔性の表面に対しては、液体溶液の有効性は、同じ表面への2、3回の適用後に頭打ちとなる。</li> </ul> </li> <li>・表面をこすことは、いくつかの場合、泡の効果を高める。しかし、これを大規模に適用することは实际的でない。</li> </ul>
作業の有効性への影響因子（社会的）	<ul style="list-style-type: none"> <li>・処理が終了するまで、一般人は処理区域外にとどまるべきである。</li> </ul>
要求事項	
必要な装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・化学薬品または洗浄剤の注入できる能力を持った、標準の圧力洗浄機。</li> <li>・清浄水による濯ぎを適用するための、補助の圧力洗浄機</li> <li>・洗浄泡の製造業者から入手可能な適用システム</li> <li>・ブラダバーム (bladder berm) またはビニールシート</li> <li>・消泡ユニット（必要に応じて）</li> <li>・水吸引機（必要に応じて）、またはブラダバームからポンプ輸送された液体のための排水だめ</li> <li>・ブラシ、ぼろ切れ、モップ他（必要に応じて）</li> <li>・高いビルの除染用として、足場、ロープ、安全装具、ヘルメット</li> </ul>
必要なユーティリティとインフラ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・装備、材料、廃棄物の輸送用の道路</li> <li>・水の供給</li> </ul>
必要な消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・除染溶液（液状または泡状） <ul style="list-style-type: none"> <li>- 大きいプロジェクトにおいては、溶液は、除染と再使用のため樹脂床を通り得る。これは液体の溶液にのみ機能するが、溶液が薄められた時は機能しない。</li> </ul> </li> <li>・濯ぎ用の水</li> <li>・泡の溶液が再利用される場合にはイオン交換樹脂（または他の樹脂、汚染物質に依存する）</li> </ul>
必要な技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・職員は、発泡と濯ぎの機器を効果的に操作するために、訓練が必要である。</li> </ul>
必要な安全対策	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一部の泡はそれ自体では人間の皮膚に有害ではないが、泡中を浮遊する汚染物質からの保護のため、作業者は PPE を着用すべきである。</li> <li>・防水の衣類または PPE、及び保護眼鏡は、特に高い汚染区域で水噴霧から作業者を保護するために、推奨される</li> <li>・高層の建物では、足場、命綱、安全帽が必要となる。</li> </ul>
廃棄物	
量と種類	<ul style="list-style-type: none"> <li>・浮遊した汚染物質を含む、液状または泡状の溶液</li> <li>・溶液が再利用される場合、イオン交換樹脂</li> </ul>
二次廃棄物	<ul style="list-style-type: none"> <li>・濯ぎ用の水</li> <li>・表面をこす場合、ぼろ切れまたはモップ</li> </ul>
コスト	
装置	<ul style="list-style-type: none"> <li>・圧力洗浄機 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 1ユニットあたり\$300～\$2,600（約¥24,000～208,000） （中規模から頑丈な仕様まで）</li> <li>- ～\$1,000/psi（¥80,000/psi（1psi=約6.9kPa）） （工業グレードの圧力洗浄機）</li> </ul> </li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>・除染泡製造業者より入手可能な適用システム</li> <li>- 背中に担いで適用するシステム : \$NA</li> <li>- 台車移動式のシステム: \$NA</li> <li>・ブラダーバーム (bladder berm) \$534 (6ft×4ft×1ft; 154 ガロンの容量) ~\$5429 (66ft×15ft×1ft; 7,045 ガロンの容量) 約¥43,000 (約 1.8m×1.2m×0.3m、約 580L) ~約¥434,000 (約 20m×4.6m×0.3m、約 26,700L)</li> <li>・消泡ユニット \$NA</li> <li>・水吸入機 \$1,000~\$2,000 (約¥80,000~¥160,000)</li> </ul>
消耗品	<ul style="list-style-type: none"> <li>・液状または泡状の溶液 約 \$50/L (約¥4,000/L)</li> <li>-</li> <li>・イオン交換樹脂</li> <li>- ゼオライト \$10 -20/lb (約¥1,800~3,500/kg)</li> <li>- 結晶性シリコチタネート (crystalline silicotitanates) \$200 -\$300/lb (約¥35,000~53,000/kg)</li> </ul>
作業時間	<ul style="list-style-type: none"> <li>・概略 9m<sup>2</sup>/h</li> </ul>
コストへの影響因子	<ul style="list-style-type: none"> <li>・目標水準以下に汚染を低減するために必要な適用回数</li> <li>- 表面の多孔性、表面の条件</li> <li>- 溶液が汚染表面に接触する時間の総量</li> </ul>
<b>副作用／影響</b>	
環境への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・可能な範囲で、濯ぎの水と泡は回収されることが望ましい。汚染物質を含む濯ぎの水または溶液は、周囲の土壤に沈殿する可能性がある。</li> <li>・泡除染と濯ぎは、その地域での土壤掘削または修復の前に、建物に適用されることが望ましい。</li> <li>・いくつかの溶液は、垂直表面での接触時間を長くするため、増粘剤を含有している。もし、全有機炭素が関心の対象であるならば、溶液は増粘剤なしで製造されることが可能である。</li> </ul>
社会への影響	<ul style="list-style-type: none"> <li>・泡状溶液に続いての高圧濯ぎの適用は、地区を汚染除去されたように見せ、公衆にいくらかの安心を与える。</li> <li>・公衆は、汚染された濯ぎの水が土壤を汚染しないことの安心を必要とする可能性がある。</li> <li>・泡は一般的に多重表面に対し安全であるが、いくつかの泡は、非常に柔らかい表面に軽微な損傷を起こす可能性がある。</li> </ul>
実績	<p>&lt;アイダホ国立研究所&gt;</p> <p>RDS 社(Radiation Decontamination Solutions 社)は、アイダホ国立研究所(Idaho National Laboratory)と、RDS 社の遷移金属溶液が多孔コンクリートから放射性セシウムを除去する能力の試験を最近行った。その製品は、複数回の適用後、初期のセシウムの 53~56%を除去した。</p> <p>&lt;Savannah River サイト&gt;</p>

	Savannah River サイトにおいて、施設内の壁、天井、機器に適用された。使用された泡液体の処分の前に消泡機が使用された。
参考文献	<p>[1] Radiation Decontamination Solutions, LLC,  <a href="http://www.raddecon.com">http://www.raddecon.com</a></p> <p>[2] Allen Vanguard, <a href="http://www.allenvanguard.com">http://www.allenvanguard.com</a></p> <p>[3] U.S. EPA Technology Information Summary: Surface Decontamination Foam (2009)</p> <p>[4] EPA 600/R-11/086, U.S. EPA Technology Evaluation Report: Radiation Decontamination Solutions, LLC “Quick Decon” Solutions for Radiological Decontamination (2011)</p> <p>[5] WRSC-RP-89-77, “Foam and Gel Decontamination Techniques” (1989)</p>
連絡先情報	<p>Radiation Decontamination Solutions, LLC  +1 813 854 5100  +1 904 613 8033 (international sales)  <a href="http://www.raddecon.com">http://www.raddecon.com</a></p> <p>Allen Vanguard  +1 613 739 9646 (headquarters office - Canada)  +1 315 713 0130 (U.S.)  <a href="http://www.allenvanguard.com">http://www.allenvanguard.com</a></p>

以 上