

土壌汚染対策のための技術開発  
事後評価報告書  
(案)

平成28年1月

産業構造審議会産業技術環境分科会

研究開発・イノベーション小委員会評価ワーキンググループ

# 事後評価報告書概要

## 事後評価報告書概要

プロジェクト名	土壌汚染対策のための技術開発			
上位施策名	環境安心イノベーションプログラム			
事業担当課	商務情報政策局生物化学産業課 産業技術環境局環境指導室			
<p><b>プロジェクトの目的・概要</b></p> <p>本技術開発は工場・事業場の操業中からの自主的な土壌汚染対策を促進するため、原位置で行う回収・浄化機能等を有する低コストの土壌汚染対策技術（共通基盤的評価技術を含む）として、重金属等の原位置処理土壌汚染対策及びVOCの微生物を利用した環境汚染物質の浄化技術を開発することを目的としている。また、バイオレメディエーションで利用する微生物の安全性を評価する手法や環境中に存在する微生物群を包括的にモニタリングするための手法を開発し、それらの成果をバイオレメディエーション利用指針に反映し、微生物を利用したバイオレメディエーションの普及促進を図ることを目指す。</p>				
予算額等（委託 or 補助（補助率：2／3）） <span style="float: right;">（単位：千円）</span>				
開始年度	終了年度	中間評価時期	事後評価時期	事業実施主体
平成22年度 （※平成22年度は、NEDO事業で実施）	平成26年度	平成24年度	平成27年度	新日鉄住金エンジニアリング（株）、大阪ガス（株）、（株）不動テトラ、土壌修復ラジアルウエル技術研究組合、（株）島津製作所、長岡技術科学大学、東京大学、岐阜大学
H24FY 予算額	H25FY 予算額	H26FY 予算額	総予算額	総執行額
190,000	179,275	146,495	905,768	771,764
* 予算額の欄には、直近3年間の予算額、平成22～26年度の総予算額及び総執行額を記載。				

目標・指標及び成果・達成度

(1) 全体目標に対する成果・達成度

個別要素技術	目標・指標	成果	達成度
シアン汚染土壌の飽和・不飽和層原位置バイオレメディエーションの研究開発			
シアン汚染サイトのあらゆる土質・地層に適したバイオ技術による浄化工法の開発	1) 現状対策費の1/2のコスト達成 2) あらゆる地盤・地層に対応した技術開発	1) 実証試験において土質に応じた工法適用により、掘削除去のコスト1/2を達成。 ・砂質土：注入工法 ・粘性土：混練工法 2) 実証試験において土質に応じた工法適用により浄化を確認。 ・砂質土：注入工法 ・シルト・粘土：混練工法、 ・砂質・シルト・粘土の互層：混練・注入工法	達成
全シアン含有量分析方法	いかなる土壌においても全シアンを90%以上回収可能な分析技術の開発	土壌中の全シアン含有量の分析精度（添加・回収率）が95%以上となる分析技術（NSOF法）を確立した。	達成
シアン分解微生物	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ スティミュレーションの研究</li> <li>原地盤の在来菌によるシアン分解の確認</li> <li>➢ オープメンテーションの研究</li> <li>培養したシアン分解菌投入によるシアン分解の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ スティミュレーションの研究</li> <li>実証試験において在来菌によるシアン分解を確認した。</li> <li>➢ オープメンテーションの研究</li> <li>実証試験において対象地の地下水を揚水して集積培養した微生物を対象地に投入することでシアン分解を確認した。</li> </ul>	達成
土質・地層に応じた工法	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 混練の仕様の決定</li> <li>➢ 混練性能の評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 地盤改良機を用いた混練試験により、混練の仕様を確認した。</li> <li>➢ 地中に混練した栄養剤濃度をTOCとHPLCにより定量して混練性能を評価した。</li> </ul>	達成
ラジアルウェルを活用したパッシブな新規土壌修復技術の研究開発			
基盤技術（全体目標）	従来の掘削除去方式の約半分のコストで、水溶性かつ移動性の有害重金属等を3年以内に原位置で回収・浄化する。また、狭隘な場所にも適用可能とする。	実証試験に用いた高濃度鉛汚染土壌に関しては、従来方式の半分以上のコストで処理できることを確認・実証できた。また、3種類の室内カラム試験結果から、洗浄プロセス（工程）全体をシミュレートする手法を開発した。	達成
配水循環システムに関する研究開発	狭隘な場所に適用可能となる直径2m程度までの立坑を施工可能とし、サイト全体をくまなく浄化する集配水システムを構築する。	直径2mの立坑での施工方法を見出した。実証試験を通じ、サイト全体を均一にくまなく配水浄化する手法を実証した。	達成

重金属の土壌からの脱着法の研究開発	全ての重金属類に対する効果的な脱着手法と抽出剤を見出す。	鉛に関しては、チオ硫酸による脱着工程と、電気分解を利用する洗浄工程を併用する方式が有効であることが、実証できた。	達成
土壌から脱着した重金属等の吸着処理の研究開発	短期間でサイトからの重金属の回収・浄化を可能にする、効率的な水処理システムを開発する。	鉛に対しチオ硫酸を使用する方式では、パイライトが有効であることが実証できた。別途、無機ポリマー質鉛吸着剤を新規に開発・実用化した。	達成
原位置モニタリング技術に関する研究開発	修復中の洗浄状況をリアルタイムで把握・確認できる3次元モニタリングシステムを構築する。	細径鋼管打設工法を応用し、φ25の井戸を安価に施工する新工法を開発し、実証試験でその有効性が確認・検証できた。	達成
遮水壁に関する研究開発	狭隘な場所にも適用可能で閉鎖系を実現する遮水壁とその工法を開発する。	ベントナイト100%砕石を使用する地中鉛直連続遮水壁を考案し、継手・隅角部を含む部分地中実証実験を行い、施工性並びに遮水性等の性能を別途確認・実証した。但し、狭隘な場所への適用は、シートパイル等との併用で対応する。	達成
低コスト原位置電気修復技術の研究開発			
模擬汚染土壌を対象とした電力量を最小化する土壌pH、電解液ECの最適化	模擬汚染土壌を対象として、電力量を最小化する土壌pH、電解液ECの最適化を行う。	鉛、六価クロムを汚染物質とした砂、マサ土、笠岡粘土の模擬汚染土壌において、電力消費量2,250kWh/m <sup>3</sup> 以下で浄化できる土壌pH、電解液ECの最適条件を導出した。	達成
実汚染土壌を対象とした電力量を最小化する土壌pH、電解液ECの最適化	実汚染土壌を対象とした電力量を最小化する土壌pH、電解液ECの最適化を行う。	鉛実汚染土壌（粘土混じり砂）及び六価クロム実汚染土壌（砂混じり粘土）について、電力消費量2,250kWh/m <sup>3</sup> 以下で浄化できる土壌pH、電解液ECの最適条件を導出した。	達成
汚染土壌の物理化学的特性解析と浄化効率への影響評価	汚染土壌の物理化学的特性解析と浄化効率への影響評価を行う。	鉛を対象汚染物質とした模擬汚染土壌について、環境負荷の低い電解質（塩）を使った電解水による溶出試験を実施し、pH3～pH4の電解水で、鉛の溶出量が著しく増加することがわかり、電気修復浄化への適用可能性を見出した。	達成
電気修復法における浄化メカニズムと浄化効率向上に関する研究	電気修復法における浄化メカニズムと浄化効率向上に関する研究を行う。	鉛を対象汚染物質とした模擬汚染土壌について、土壌pHが6以下でなければ鉛は溶出せず浄化が困難なことを実験的に確認した。	達成
印加電圧パルス化による浄化効率の向上に関する研究	印加電圧パルス化による浄化効率の向上のための検討を行う。	鉛模擬汚染土壌、六価クロム模擬汚染土壌のいずれにおいても浄化効率の向上が認められた。	達成

電解水添加による浄化効率の向上に関する研究	電解水添加による浄化効率向上のための検討を行う。	六価クロム模擬汚染土壌では目標を超える浄化効率の向上が認められた。	達成
原位置浄化試験による実証試験の浄化条件決定	原位置浄化試験による実証試験の浄化条件決定を行う。	土壌 pH-電解液 EC の最適化、印加電圧パルス化、電解水添加の 3 技術を適用することにより、いずれもそれぞれの目標電力消費量以内での浄化を達成した。	達成
電気修復法に使用する電極・井戸の最適化に関する評価検討	設備としての電極ならびに電極井戸の数と配置の最適化、電極材料ならびに井戸構造の最適化を行う。 電極形状（表面積など）をパラメータとして、浄化効率一定の条件下で有効使用電極の総重量を従来の 2/3 に低減する。	電極形状を変更し、電解液中での抵抗値を変えることなく、その総重量を目標である 2/3 以下に削減した。	達成
汚染現場における汚染分布領域の特定技術の確立	汚染現場における浄化対象領域の探索と特定、ならびに浄化過程における浄化進捗状況の把握のために、オンサイト簡易分析手法と迅速マッピング技術を開発する。	汚染分布領域を特定する目的で、携帯型蛍光 X 線分析装置の測定条件を確立した。また鉛を 450mg/kg 含有した汚染土壌を対象とした測定で、 $448 \pm 3 \text{mg/kg}$ の実測値を得ることができ、測定手法として十分な精度があることを確認した。	達成
低コスト電力（自然エネルギー等）の活用の検討	自然エネルギーによる電力の利活用を検討する。利用する電力の目標コストは、複数の使用電力料金の平均値として、1kWh あたり 10 円をめざす。	電力コスト低減を目的として、自然エネルギーである太陽光発電による電力利用について調査と試算を行った。現時点では平均的な産業用電力料金よりも高額になるが、技術的には適用可能であることが判った。また、太陽光パネル単価は今後ますます低価格化が進むとされており、産業用電力の利用できない汚染現場の浄化などの際には、電力を獲得する有効な代替手段として期待できることが判った。	達成
実証試験の実施と目標浄化コストの検証	研究成果をもとに浄化コストを算出し、実際の汚染サイトでの実証試験によって検証する。対象土壌 1m <sup>3</sup> あたり 1,500kWh の電力を使用して、対象重金属について土対法における含有量基準値の 3 倍濃度の汚染土壌、また溶出量基準値の 10 倍程度の汚染土壌について、それぞれを基準値以下に浄化する。処理コストは掘削除去による	実証試験の結果、鉛汚染について、目標値の 1,500kWh/m <sup>3</sup> での浄化を達成できた。これをもとに、単位電力料金を引用した浄化総コストは 1 m <sup>3</sup> あたり 25,165 円と換算され、当初目標の掘削除去コスト 50,000 円の半額に近い数値となることが示された。	達成

	平均的な処理コスト（50,000円/m <sup>3</sup> ）の半額程度（約25,000円/m <sup>3</sup> ）とする。		
バイオレメディエーションのための標準微生物の確立			
1. 微生物の安全性評価のための情報基盤の開発			
要素技術	目標・指標	成果	達成度
有害菌のドラフトゲノム解析と指標遺伝子の特定	バイレメに関連する(環境有害菌)属種の細菌50株以上について、判別指標となる遺伝子を特定する。	新たに51株についてドラフトゲノム解析を実施し、指標遺伝子を特定した。	達成
指標遺伝子を利用した有害性判定手法の開発	バイレメに関連する属種の細菌50株以上について、指標遺伝子を用いた判別手法を開発する。	バイレメに関連する7属群について、指標遺伝子を新たに特定した51株と多数の既往ゲノム解析株をMLSA法で解析する判別手法を開発した。	達成
有害菌データベースの作製	既知有害菌に関する情報を収集・整備し、微生物の安全評価を一元的に実施できる体制を整備する。	様々な機関の既知有害菌に関する情報を収集・一元化し、データベースを作成して公開した。	達成
バイオレメディエーションのための標準微生物の確立			
2. 標準微生物の確立(バイオオーグメンテーション実施環境の整備)			
要素技術	目標・指標	成果	達成度
好気性塩素化エチレン類分解菌(群)の収集、培養、同定、保存	分解菌の集積・純化、選抜分解菌の分離・解析、保管	収集株122株について、分解活性を確認し13株を選抜して同定し、保存した。	達成
嫌気性塩素化エチレン類分解菌(群)の収集、培養、同定、保存	分解菌の集積・純化、選抜分解菌の分離・解析、保管	我が国で初めて嫌気性脱塩素菌単離に成功し、共培養で活性化する菌株も選抜して同定し、保存した。	達成
バイレメ指針適合株の開発(分解菌の指針適合確認)	指針適合に必要な情報を整備、バイレメ指針適合の確認(3株以上)、頒布体制の確立	3株(RHA1株、UCH007、UCH004)について、指針適合確認の審査を受けた。RHA1株について確認済み。	一部達成
バイオレメディエーションのための標準微生物の確立			
3. 「多種微生物群の包括的解析技術の開発」			
要素技術	目標・指標	成果	達成度
2-a) 実験室レベルでのバイレメ実験	実験室レベルでのバイレメ試験系を確立し、バイレメの有効性と生態系への影響を評価する。	好氣的分解菌RHA1株および20B株を用いて試験系を確立し、効果を確認した。同時に微生物群集の変化を評価した。	達成

2-b) 実汚染現場におけるバイレメ実験	複数の実環境においてバイオスティミュレーション浄化を実施し、生態系影響のための試料を提供する。	操業中の工場敷地内 3 地点において浄化試験を実施し、試料を提供した。	達成
2-c) 次世代シーケンサーによる網羅的な微生物叢解析	次世代シーケンサーを用いた網羅的な菌叢解析手法を確立し、バイオスティミュレーションサイトにおける生態系影響評価を実施。	3 地点の試験サイトにおいて、新型シーケンサーを用いた網羅的な菌叢解析による生態系影響評価を実施した。	達成
2-d) 超並列塩基配列解析による指標微生物の特定	ヒト病原菌検出系および病原菌等の特定による生態系影響評価手法の確立	指標微生物としてヒト病原菌を検出する系を確立した。	達成
2-e) 環境メタトランスクリプトーム解析	環境試料からの RNA 抽出・配列解析手法の確立、RNA を指標とした網羅的な菌叢解析手法の開発と生態系影響評価。	環境試料からの RNA 抽出・配列解析手法を確立し、生態系影響評価を実施した。	達成
2-f) 指標微生物群の定量的モニタリング手法の開発	指標候補微生物群の検出 PCR プライマーの開発と指標微生物候補に対する定量的モニタリング技術の確立。	細菌、古細菌それぞれに特異的な PCR プライマー設計し、内部標準を用いた定量性測定技術を確立した。	達成
2-g) 生態系影響評価標準的プロトコルの作成	標準的なプロトコルの作成。	標準的なプロトコルを作成した。	達成
2-h) プロトコール実施のための核酸標準物質の整備	プロトコールを実施するための核酸標準物質の頒布体制の整備。	プロトコールを実施するための核酸標準物質の頒布体制を整えた。	達成
バイオレメディエーションのための標準微生物の確立			
4. 「生態系への総合的影響評価手法の開発(実証実験)」			
要素技術	目標・指標	成果	達成度
導入菌株のモニタリング（長岡技大、産総研）	指針適合株のバイオオーグメンテーションにおける動態と効果を評価する。	指針適合株をバイオオーグメンテーションに使用し、動態と効果を評価した。	達成
生態系影響評価手法の確立（東大、産総研、製品評価機構）	開発した生態系影響評価手法を確立する。 バイオオーグメンテーションにおける生態系への影響を評価する。	バイオオーグメンテーション試験で取得したサンプルについて生態系への影響を評価した。	達成
標準株の維持管理（製品評価機構）	バイレメ指針適合株の頒布体制を整える。	バイレメ指針適合株の頒布体制を整えた。	達成

(2) 目標及び計画の変更の有無

なし

<共通指標>

要素技術	論文数	論文の 被引用度数	講演・発 表数	特許等件数 (出願を含む)
シアン汚染土壌の飽和・不飽和層原位置 バイオレメディエーションの研究開発	6	1	0	13
ラジアルウェルを活用したパッシブな新規 土壌修復技術の研究開発	0	0	12	0
低コスト原位置電気修復技術の研究開発	3	0	11	0
次世代バイオレメディエーション普及のた めのセーフバイオシステムの研究開発	8	12	90	1
計	17	13	113	14

評価概要

1. 事業の目的・政策的位置付けの妥当性

本事業は、技術戦略マップの導入シナリオにおいて位置づけられており、土壌汚染対策法の一部改正に伴う附帯決議を踏まえて実施するものであることから、政策的意義は明確である。また、使用される微生物の安全性評価手法の開発が急がれていることから、国が積極的に支援することは極めて妥当であったと判断される。

本事業は、土壌汚染対策を目的としており、汚染対策などの環境関連の研究開発は、生来が市場性から民間主体で進めるのが難しい面を抱えていることから、国として積極的に関与すべき分野である。

なお、本事業では、必ずしも原位置土壌浄化の重要な課題の全てをカバーできているといえず、より広範な技術開発の支援をするべきである。

2. 研究開発等の目標の妥当性

要素技術ごとに挑戦的でかつ具体的な目標および目標水準が設定されている。また目標達成度を測定判断するための指標が適切に設定されている。

「原位置処理重金属等土壌汚染対策技術開発」では既存掘削除去費用の1/2以内という数値目標を設定している。また、「VOCの微生物等を利用した環境汚染物質浄化技術開発」では導入微生物の合理的な安全評価手法と標準的な生態系影響評価手法の確立を目標としており、いずれも明確な目標設定と認められる。

なお、目標に対する成果が、設定条件により変わることから、その部分の説明はより積極的に行われることが望ましい。また、単純な目標設定になっている印象を受けたことから、市場を詳細に調査し、複数の技術や条件との比較から目標を設定する方が望ましい。

### 3. 成果、目標の達成度の妥当性

各要素技術の開発において実証試験レベルでの検討を行った上で数年以内の実用化が可能な技術を確立しており、目標値のレベルに到達している。また、バイレメ普及に資する安全性評価手法と生態系影響評価手法の確立という目標も達成されている。

学術論文の公表、成果の学会発表、特許の出願等が相当数行われるなどの成果も見られ、事業全体で見ると設定された目標は達成され想定を上回る成果が得られたと判断する。

目標の達成度に関して、どの程度の達成度合かが分かるようできるだけ数値化し、必要に応じて図絵化を図るなどして示していくことが望ましいものがある。

一部の技術開発において、当初計画に比べると限定した範囲の検討にとどまっているものが見受けられる。

### 4. 事業化、波及効果についての妥当性

各要素技術において数年以内での実用化の方向性は示されており、中にはすでに実質的に実用段階に到達しているものもある。また、当初想定しなかった汚染物質への適用性の確認、要素技術を構成する個別技術での適用性などの波及効果が明らかになっている。

web を利用した情報発信により、相当数の技術相談がなされるといった成果も得られている。

土壌浄化事業は、浄化技術の採用にあたりこれまでの実績が重要視されるため、新規に開発された技術が実用化されるまでには継続的な実証試験が求められる。したがって今回の事業終了後も、実施企業に対して何らかのフォローアップを行う枠組みが作られることで、実用化が促進されるのではないと思われる。

技術、コスト、体制等多面的な検証の実施により、事業化や波及効果の見通しについてさらに計画性のあるものにしていく余地が残されている。

### 5. 研究開発マネジメント・体制等の妥当性

全体としては大きな計画変更がなく目標達成に至っており、研究計画は適切であった。また、事業の実施者はいずれも実績と実力のある企業／大学で構成されており、適切な選考が行われたと評価できる。

各研究開発について、経済産業省や技術検討委員会が適確なコメントや指示を出すことによって柔軟な事業運営がなされたものと評価できる。

### 6. 費用対効果の妥当性

土壌汚染対策の市場規模は約 1,000 億円／年で推移しており、その大部分が掘削除去であるため、掘削除去の 1/2 で対策が可能となる本事業の成果は、大きな対策費用削減効果が得られるポテンシャルを有する。また、掘削除去された汚染土壌の処分場の残容量に限りがあり、新規造成も困難なことから、社会的効果も大きい。

計画に見合った原寸大の成果にあるが、それを超えるものまでには至っていない。

成果を普及させるためには、低コストの原位置浄化技術を開発・提供するだけでなく、組織的なアウトリーチ活動が望まれる。

## 7. 総合評価

現在の我が国における土壤汚染対策の抱える問題点を解決するためにはバイオレメディエーション等の低コスト・低環境負荷技術の開発は必要不可欠であり、国が積極的に支援することは極めて妥当であった。

事業化については全体として受注には至っていないものの複数の引き合いがあり、実施が期待できる。

バイオレメディエーション微生物評価技術については、環境中に存在する有害菌解析手法を開発したほか、好気性塩素化エチレン分解菌 1 株についてバイレメ指針適合が確認されたことは評価できる。

原位置土壤浄化の幾つかの有望な新技術やその支援基盤が確立されており、今後の実用化への展開が期待できる成果が得られたことは高く評価できる。

各開発技術について、詳細な解析による市場の見積が十分になされているとはいえ、事業の産業上の価値を定量的に評価することを望む。

バイオレメディエーションの普及においては、実施する事業者の裾野を拡大することも重要であるが、今後、市民の理解を得る配慮や工夫も必要である。

## 8. 今後の研究開発の方向等に関する提言

バイレメ等の浄化技術の本格的な事業化に向けては実証試験を積み重ねてデータを蓄積していくことが必要である。実証試験の実施を企業のみで担うのは容易ではなく、国の継続的な支援が望まれる。実証試験は小規模の現場試験とその結果に基づいたシミュレーションでも構わない。

各要素技術の組み合わせを行うことにより新たな展開も生まれると考えられる。担当者間でとりあえず机上検討だけでも行うことが望まれる。

バイレメの普及に資する安全評価手法と生態系影響評価手法については、本研究開発で確立された手法を安価で提供できる事業者の育成が望まれる。

掘削除去に対する優位性を考えると、コスト並びに修復期間の削減が必要となり、今後は、バイオと物理・化学処理との組み合わせについての検討が望まれる。

## 評点結果

評点法による評点結果  
(土壌汚染対策のための技術開発プロジェクト)

	評点	A委員	B委員	C委員	D委員
1. 事業の目的・政策的位置づけの妥当性	2.50	3	2	3	2
2. 研究開発等の目標の妥当性	1.75	2	2	2	1
3. 成果、目標の達成度の妥当性	1.75	3	1	2	1
4. 事業化、波及効果についての妥当性	1.50	2	1	2	1
5. 研究開発の実施・マネジメント体制等の妥当性	2.00	3	1	2	2
6. 費用対効果の妥当性	1.50	2	1	2	1
7. 総合評価	2.00	2	2	2	2

