

代表機関名		技術の名称	
アサヒ地水探査株式会社 日立プラント建設サービス株式会社 三菱商事株式会社		短期原位置微生物活性化型のバイオレメディエーション (EDC工法)	
技術の概要			
調査/対策	対策技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
対策	原位置浄化	テトラクロロエチレン トリクロロエチレン シス-1,2-ジクロロエチレン	汚染サイト
<p>本技術は、土壌・地下水へのEDC（エレクトロン・ドナー・コンパウンド）の注入により、嫌気性雰囲気や早期に醸成し、EDCが電子供与体として浄化場所に生息している微生物の増殖・活性化に働き、テトラクロロエチレン（PCE）などの有機塩素化合物の還元脱塩化を促進し浄化する技術である。なお、本技術は飽和帯水層を対象とすることが多いが、本実証試験は不飽和帯を対象に実施したものである。</p>			
技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方			
<p>EDC工法は、浄化場所に生息する微生物を利用するものであるため、エネルギー投入量が理論的に少なく、かつ、本来的に周辺環境にやさしい技術である。これらの特徴を踏まえ、低コスト化及び周辺環境・地球環境への負荷低減を図る。</p>			
調査結果の概要			
<p>1. 実証調査の概要</p> <p>(1) 調査サイトの概要</p> <p>試験地はクリーニング工場の敷地内で、PCEの使用履歴があり現在も操業中である。 地層構成はGL-1m程度まで埋土、GL-2m程度まで旧表土（黒ボク）、GL-3m程度まで粘土質ローム、GL-9m程度まで凝灰質粘土・シルト、以深は砂礫である。 宙水（溜まり水）はGL-3m～-4m付近にあり、帯水層（砂礫）の水位はGL-12m付近にある。</p> <p>(2) 実証試験の規模</p> <p>浄化対象領域：18m×9.2mの方形領域（シートで被覆→空気層吸引→活性炭吸着処理） 浄化対象深度：GL0～GL-3mまで[周囲に鋼矢板打設]（不飽和域、難透水性の深度まで） 注入井戸：深度3m（ストレーナーは1.5m～3m）、3mピッチ、18本 観測井戸（対策範囲内）：深度3m（ストレーナーは1.5m～3m）、5ヶ所 観測井戸（対策範囲外）：深度6m～8m（ストレーナーは3m～6m、8m）、四方4ヶ所 EDC注入方法：EDCを水道水で100～300倍に溶解し、流量調節器を経て注入井戸へ EDC量：0.44kg/m³ 設備設置面積：約50m²（10m³溶解タンク、EDC流量調節器等） 浄化期間：注入開始から3ヶ月程度を予定</p> <p>(3) 汚染の濃度</p> <p>(土壌溶出量) PCE:<0.001～0.94mg/L、TCE:<0.003～0.73mg/L、シス-1,2-DCE:<0.004～0.94mg/L (周囲地下水濃度) PCE:0.0011～1.1mg/L、TCE:<0.003～2.4mg/L、シス-1,2-DCE:0.32～32mg/L (G-5地点溶出) [深度1m] PCE:0.72mg/L、TCE:0.26mg/L、シス-1,2-DCE:0.07mg/L [深度3m] PCE:0.76mg/L、TCE:0.73mg/L、シス-1,2-DCE:0.94mg/L</p> <p>2. 実証調査考察</p> <p>(1) 浄化効果についての考察</p> <p>浄化効果は注入開始後40日目に5地点で土壌コアを採取して、土壌溶出量を分析し確認した。 溶出値から換算した初期の対象物質総量は平均で30μmol/kgであり、平均除去量はその28%にあたる8.4μmol/kgであった。対象物質の除去量・除去率を求めて浄化状況を検討した結果、湛水し嫌気状態下において、EDCが量的・時間的に十分接触した範囲では(R-3地点を除く深度3m地点)、PCEとTCEの分解除去率は90～100%で、環境基準値以下まで浄化された。シス-1,2-DCEについては、初期値が環境基準値を超過している地点G-5、R-5地点では、確認時に40%程度以上分解除去されている。</p> <p>(2) 経済性についての考察</p> <p>本試験を参考に浄化面積400m²、体積1,200m³、PCE土壌溶出値3mg/Lの試算モデルを設定し、不飽和帯でのコストの試算を行った結果、2.2万円/m³であった(矢板なしの場合：1.4万円/m³)。比較対象として掘削除去工法を用いた場合は6.8万円/m³と試算された。 なお、PCE土壌溶出値を30mg/Lとした場合の本工法コストは、2.6万円/m³と算定された。</p>			

(3) 周辺環境への負荷度についての考察

- ・臭気は何の臭いか分からない程度で異常な臭いはなかった。地盤は数mm程度の沈下が生じた。
- ・敷地境界における騒音レベルは溶解作業時に59～61dB(A)、振動レベルは38～46dBであった。
- ・大気の敷地境界における対象物質の濃度は、最大でPCEが0.088mg/m³、TCEが0.004mg/m³であり、活性炭吸着装置排気口では、PCEが<0.001mg/m³、TCEが<0.001mg/m³であった。
- ・廃棄物として、ボーリング、井戸設置やモニタリング等に伴って泥水が9m³発生した。
- ・エネルギー使用量、水道使用量から求めた炭酸ガス排出量は、対象土壌1m³当り、本技術で5.8kg、比較対照の掘削置換では51kg と試算した。

検討会概評

汚染現場に微生物の栄養物質を添加し、土壌中の揮発性有機塩素化合物分解活性を高めて浄化する原位置バイオレメディエーション技術である。本技術は、嫌気性微生物の有する脱ハロゲン能を活用するものであり、地下水・土壌汚染の浄化を目的とした技術である。今回は、不飽和土壌への適応性の評価を目的としたため、対象範囲を嫌気的環境にするために、汚染土壌区域を矢板で囲い、水道水と栄養剤を注入し、嫌気環境を作成し浄化効果を調べた。テトラクロロエチレン (PCE) 及びトリクロロエチレン (TCE) に対する浄化効果は、嫌気性が確保できた汚染箇所では本技術は有効であると判断された、しかしながら、本技術では、中間物質としてシス-1,2-ジクロロエチレン (DCE) が生成されるが、矢板を打つ工事が伴ったため、浄化試験期間を十分に確保することができなく、DCE に対する分解効果を明確に判断することはできなかった。

(課題等)

注入栄養剤の毒性はなくまた分解性も良好と考えられるが、浄化中は嫌気状態となるため、浄化期間中の栄養剤のモニタリングが必要である。また、土壌中に水を注入するため、土壌中から大気へVOCがもれることのない施工をする必要がある。本技術は比較的簡便で、環境負荷は低いと考えられるが、不飽和土壌を対象とする場合遮水工事が必要で、水位の監視と制御が必要である。

別紙(EDC 注入)

I 費用の比較

1. 実証対象技術のコストについて

コスト計算に当たっては、実証地とは別に以下のような条件の土地を前提として計算を行っている。

汚染土壌の存在する面積	400m ²
浄化対象となる汚染土壌の量	1,200m ³ (GL0~-3m)
汚染濃度 (PCE土壌溶出量)	3mg/L
浄化対象物質総量	50kg

地質:ローム質地盤(透水係数 5×10^{-4} cm/s)

対象物質は PCE、TCE およびシス-1,2-DCE であり、シス-1,2-DCE の分解に最も時間を要する。シス-1,2-DCE の分解速度・期間について実証試験では浄化完了までの日数について確認できていないため正確な日数を予測することは困難であるが、浄化期間を約 165 日と予測した。

・汚染濃度(PCE 溶出値:3mg/L)の場合(鋼矢板仕切工法)

総費用	2,670 万円
単位土量あたり費用	22,000 円/m ³

・汚染濃度(PCE 溶出値:3mg/L)の場合(汚染層が飽和層でかつ周囲への拡散が無い場合鋼矢板仕切なし)

総費用	1,640 万円
単位土量あたり費用	14,000 円/m ³

・汚染濃度(PCE 溶出値 30mg/L)の場合(鋼矢板仕切工法)

総費用	3,140 万円
単位土量あたり費用	26,000 円/m ³

2. 比較対象技術のコストについて

比較対象技術として、掘削除去工法を選定している。当該技術により、1. と同じ土地について掘削除去した場合の浄化期間、費用及び費用増原因は以下のとおりである。

(掘削除去工法)

浄化期間	約 1.5 ヶ月
総費用	8,100 万円
単位土量あたり費用	68,000 円/m ³

※費用増加の原因:汚染土壌の運搬 150km・処分・清浄土埋戻し費の増加を見込んでいる。

II CO₂の排出量の比較

1. 実証対象技術の炭酸ガス排出量について

炭酸ガス排出量計算に当たっては以下のような条件の土地を前提として計算を行っている。

浄化対象となる汚染土壌の量	1,200m ³
浄化日数	165日

対象物質は PCE、TCE およびシス-1,2-DCE であり、シス-1,2-DCE の分解に最も時間を要するため、シス-1,2-DCE の分解除去速度・期間について検討し、試験での浄化期間を約 165 日と予測した。

総排出量	6,982kg
単位土量あたり排出量	約 5.8kg/m ³

2. 比較対象技術の炭酸ガス排出量について

比較対象技術として、上記費用の比較と同じ技術を選定している。当該技術により、1. と同じ土地を浄化対象とした場合の炭酸ガス排出量及び排出量増原因は以下のとおりである。

(掘削除去工法:6m 鋼矢板止水、バックホウ掘削)

浄化期間	約 1.5 ヶ月
総排出量	61,542kg
単位土量あたり排出量	約 51kg/m ³

排出量増加の原因:汚染土壌の運搬及び埋戻し土の運搬等での排出量の増加を見込んでいる。

- ・土運搬に関わる CO₂ 排出量 43.3kg/m³
- ・掘削機械の稼働・運搬に関わる CO₂ 排出量 8.0kg/m³

代表機関名		技術の名称	
大成建設株式会社		ふっ素吸着材料を用いた原位置浄化技術	
技術の概要			
調査/対策	対策技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
対策	原位置不溶化	ふっ素	汚染サイト
<p>帯水層にスラリー状のふっ素吸着剤を注入することにより、地下水中のふっ素イオンを吸着剤の水和およびイオン交換作用で固定化する不溶化技術。土壌から溶出するものも含め、地下水中のふっ素イオンを吸着・固定化して、下流への汚染負荷を低減させることができる。</p>			
技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方			
<p>ふっ素吸着剤の注入に高圧噴射攪拌工法を採用することにより、掘削置換と異なり上部の非汚染土及び汚染土を掘削することなく、対象とする汚染帯水層に特定して不溶化剤を分散させることで対策コストおよび環境負荷の低減を図る。</p>			
調査結果の概要			
1. 実証調査の概要			
(1) 調査サイトの概要			
<p>電子機器工場敷地内のふっ素化水素使用施設跡地。 土質はGL-4mまでの埋土（非汚染土）、GL-4～-7mまで砂礫、それ以深は細砂層が堆積する。 地下水位はGL-4m、不飽和部分も当初は汚染されていたが、既に掘削置換を完了し、非汚染土で埋め戻されている。地下水の流れは東南東方向で、透水係数は1×10^{-2} cm/s程度と高いが、ダルシー流速は2.5cm/日と緩やかである。</p>			
(2) 実証試験の規模			
<p>実証試験作業スペース：10m×25m 吸着剤注入対策範囲領域：9.2m³（面積1.84m²×深さ5.0m〔対象深度GL-4m～-9m〕（9.2m³） （想定噴射攪拌範囲直径60cm） 吸着剤：酸化マグネシウム系吸着剤とハイドロタルサイト様吸着剤の混合物（スラリー状） 吸着剤注入孔：7本（深さ9m）、吸着剤スラリー噴射圧力：2～17MPa 吸着剤計画配合率：5%（室内試験のバッチ試験結果より設定） 吸着剤スラリー注入量：2m³L/本（吸着剤濃度140kg/m³） 設備設置面積：57m²（タンク、ミキサー、ポンプ、発電機） 対策期間：ふっ素吸着剤の注入工に4日</p>			
(3) 汚染の濃度			
<p>土壌含有量：（ふっ素） <100mg/kg～270mg/kg 土壌溶出量：（ふっ素） 0.19mg/L～8.6mg/L（2地点の平均値2.8mg/L） 地下水濃度：（ふっ素） 1mg/L～4mg/L</p>			
2. 実証調査考察			
(1) 浄化効果についての考察			
<p>浄化剤注入約10日後のチェックボーリング4試料（C1-2, C2-2, C3-1, C4地点）の分析結果では、吸着剤が注入域全層に混入していない地点での土壌溶出量の変化は少ないが、注入孔から30cmのC1-2地点では、ほぼ全層に吸着剤が混入（吸着剤平均含有率4.9%）しており、土壌溶出量は最大1.0mg/L、平均0.3mg/Lとなっている。土壌溶出量の最大値は土壌環境基準を超過しているが、同地点を観測井とした地下水濃度では注入後2ヶ月の時点では0.7mg/Lを示し、環境基準以下となっている。</p>			
(2) 経済性についての考察			
<p>対象面積200m²、対象深度GL-4～-9m、ふっ素溶出量6～8mg/L、の飽和砂礫層を対象とした場合、コストは、対象土壌1m³当り本技術は5.4万円（吸着剤配合率5%）、比較対照の掘削置換技術（汚染土量1,000m³、掘削量1,800m³、排土量1,200m³）は5.7万円と試算している。 なお、ふっ素溶出濃度が8～10mg/Lと高くなると、本技術は吸着剤費の増加（吸着剤配合率7.5%）により6.0万円/m³となり、掘削置換よりもコスト高となる。また、本技術のふっ素濃度に関する適用上限としては、吸着剤の注入量に限りがあるため、溶出値で10mg/L程度までとしている。</p>			
(3) 周辺環境への負荷度についての考察			
<ul style="list-style-type: none"> ・浄化剤注入による周辺地下水質にいくらか変化が見られるものの、注入期間の一時的なものであった。 ・騒音・振動レベルは掘削機から1mで82dB(A)・69dB、高圧ポンプから2.2mで84dB(A)・55dBであった。 ・地下水から基準値を下回る濃度のトリクロロエチレン（TCE）が確認されていることから、掘削作 			

業環境における空気中のTCE濃度を測定したが、最大で0.002mg/m³で環境基準を大きく下回っていた。

- ・臭気については、対象地盤及び使用材料に臭気を発するものがないため測定を実施していない。
- ・排土・排泥水量は、ボーリング工時に401L、吸着剤注入工時に5,440Lを排出した。これらは、一般の地盤改良と異なり、二次汚染の無いように処理に留意する必要がある。
- ・エネルギー使用量、水道使用量から求めた炭酸ガス排出量は、(2)の条件で対象土壌1m³当り、本技術で57kg、比較対照の掘削置換では60kgと試算した。

検討会概評

水中のふっ素の固定化法にはカルシウムと反応させる方法が一般的であるが、ふっ化カルシウムは水溶解度が水質環境基準をほぼ同じで、この方法を汚染土壌や地下水に適用しても環境基準を満たすまでふっ素を安定化することが難しい。本技術は、酸化マグネシウム系とハイドロタルサイト様吸着剤を配合したふっ素吸着剤を現場の汚染土壌に注入し、土壌から溶出するふっ素を2種類の吸着剤の働きで安定化させ、下流への流出を防止する技術である。

実証試験の結果を見ると、吸着剤が混入している土壌では溶出量が低下し、周辺地下水中のふっ素濃度も環境基準以下に低下しており、本技術はふっ素の安定化に一定の効果を発揮すると考えられる。コスト試算では掘削除去と違いがなく、掘削除去に比べて効果が表れるまでに時間がかかると考えられる。しかし、本技術は土壌のみならず、地下水に溶けだしているふっ素も固定化できる点が有利と考えられる。環境影響としては、土壌を固化することになるため、地下水流動への影響が懸念される。実証試験では汚染土壌の一部に施工しただけであったので、地下水流動への影響は見られなかったが、施工範囲が広くなると施工方法によっては地下水流動に影響が出ることが懸念される。このことなどから、ふっ素溶出量が10mg/Lを超える場合には適用が難しいとされている。

(課題等)

実証試験期間中には土壌溶出量が完全には環境基準以下にならなかったことやふっ素が土壌中に残留することから、安定化の効果が長期的に発揮されるかどうかの問題となる。吸着剤への取り込みの機構を考えて効果は継続されると思われるが、地下水のモニタリングを継続して、長期的な効果の継続を確認する必要がある。また、施工方法によっては地下水の流動を妨げるおそれがある。一方、注入剤が混入されない部分では土壌溶出量の抑制が見られない。この相反する問題を解決できるような施工方法の開発が必要となり、これらの点から本技術を適用できる条件を明確にすることが必要となる。

別紙(ふっ素浄化)

I 費用の比較

1. 実証対象技術のコストについて

コスト計算に当たっては、実証地とは別に以下のような条件の土地を前提に計算を行っている。

汚染土壌の存在する面積	200m ²
注入範囲	5m(GL-4~-9m)
1本当たりの注入範囲	半径0.4m
浄化対象となる汚染土壌の量	1,000m ³
注入本数	501本
汚染物質含有量	130mg/kg
浄化対象物質総量	234kg
ふっ素溶出量	6~8mg/L
土質	砂礫層(GL-4~-9m)

施工費の算出

①注入工費：注入本数(実証試験結果より算出)×1本あたりの経費

②吸着剤注入量：注入本数×スラリー量 2m³×吸着剤配合濃度 140kg/m³(基準:吸着剤混合率 5%)

③その他の費用：分析費、人件費、排泥処理費等

上記を基に、本実証試験で得られたデータを勘案すると以下のように算定された。

※ふっ素溶出量(6~8mg/L)の場合

総費用	5,377 万円
単位土量あたり費用	53,769 円/m ³

※ふっ素溶出量(8~10mg/L)の場合(吸着剤混合率 7.5%)

総費用	5,979 万円
単位土量あたり費用	59,789 円/m ³

2. 比較対象技術のコストについて

比較対象技術として、掘削除去工法を選定している。当該技術により、1. と同じ土地を浄化対象とした場合の浄化期間、費用及び費用増原因は以下のとおりである。

- 掘削土は全量で 1,800m³、この内汚染土の置換対象土量は(GL-4~-9m)は 1,000m³ と設定。
- 掘削工法:10m の鋼矢板による山留め工(切梁を設置)、バックホウ掘削
- 掘削除去工法(管理型処分場搬出)

総費用	5,666 万円
単位土量あたり費用	56,660 円/m ³

費用増加の原因：汚染土壌の運搬 150km、処分による増加を見込んでいる。

II CO₂の排出量の比較

1. 実証対象技術の炭酸ガス排出量について

- ふっ素吸着剤注入工法

本実証試験において使用した燃料等の実績から算出した。

総排出量	57,451kg
単位土量あたり排出量	約 57kg/m ³

2. 比較対象技術の炭酸ガス排出量について

比較対象技術として、掘削除去の排出量及び排出量増原因は以下のとおりである。

- 掘削除去工法

総排出量	59,641kg
単位土量あたり排出量	約 60kg/m ³

排出量増加の原因：汚染土・泥水及び良質土の運搬による排出量の増加を見込んでいる。
(非汚染土上部の土は、そのまま埋め戻しに使用。)

- ・土・泥水運搬に関わる CO₂ 排出量 39.8kg/m³
- ・掘削機械の稼働に関わる CO₂ 排出量 20.2kg/m³

代表機関名		技術の名称	
株式会社 竹中工務店		地下水の有効利用を考慮したナノアイロンの注入技術	
技術の概要			
調査/対策	対策技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
対策	原位置浄化	有機塩素系のVOC	汚染サイト
脱塩素機能のある α -Feとこれを水中で反応させた Fe_3O_4 から構成される α -Fe \cdot Fe $_3$ O $_4$ のナノサイズの複合粒子を主成分とする薬剤(ナノアイロン)を帯水層中に注入する技術である。注入工法として、二重管ダブルパッカー工法を用い、透水性の高い土質を適用対象として想定している。			
技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方			
本技術に用いられるナノアイロンは通常用いられる金属系還元剤と比較して浸透性と分解性に優れている。従来技術よりも注入井の本数を少なくし、浄化期間を短縮し、二酸化炭素排出量を削減して汚染浄化にかかわるコストと環境負荷の低減を図る。			
調査結果の概要			
1. 調査結果の概要			
(1) 調査サイトの概要			
未舗装の市道で、地下水の汚染を確認している。対象とする地域には精密機械工場が多く、長年にわたって多量の有機溶剤が使用されてきたと推測され、汚染要因とされている。			
この地域には複数の汚染源があると言われており、汚染は数km ² オーダー、深度的にも70~100mの深さの地下水まで汚染されている。本試験地周辺はこのエリア内に位置する。土質は深さ2mまでは埋土、5.0mまでは砂礫、5.5mまでは腐植土、17mまではシルト混じり砂礫(粘土質シルト挟む)、以降は粘性土の堆積が確認される。地下水位は2.0~3.5mの位置に確認され、透水係数は $4.3 \times 10^{-3} \sim 9.5 \times 10^{-3}$ cm/sであった。地下水は勾配18/1,000おおむね南へ移動している。			
(2) 実証試験の規模			
浄化剤：ナノアイロン高浸透タイプ(鉄含有量20[重量%]、分散剤含む)			
浄化剤注入想定範囲：本注入孔浸透半径1.2m \times 5本(試験注入孔1.5m、1本)			
浄化対象深度：GL-6~-17m(範囲11m)			
浄化剤注入速度：10L/min(試験注入時は15L/min)			
浄化剤注入量：平均1.67(kg/m ³) \times 5本(本注入)			
設備設置面積：約150m ² 浄化期間：約1ヶ月(ナノアイロン本注入工)			
(3) 汚染の濃度			
TCE地下水濃度：最大0.17mg/L			
TCE土壌溶出量：<0.0002~0.0070mg/L(深度別平均値の最大値GL-14m~-15mTCE0.0063mg/L)			
2. 実証調査考察			
(1) 浄化効果についての考察			
現地での実証試験において、周囲をナノアイロン注入エリアに囲まれたY-1揚水井戸の地下水濃度の低減(環境基準の約4~6倍程度 \rightarrow 基準以下)が確認されている。施工前TCE平均土壌溶出量が0.0063mg/LであったGL-14~-15mでは、注入後24日~26日で0.0002~0.001mg/Lとなった。			
また、現地土壌の汚染濃度が基準値を下回っていたため、室内実験において、ナノアイロン注入後にチェックボーリングにより採取した土壌試料に、初期溶出濃度が0.005mg/Lから最大で土壌環境基準の330倍の10mg/LとなるようにTCEを添加し、みかけの分解速度定数を求めた結果、下記の実験式が算出された。			
分解速度定数(1/hr)=0.0009 \times ナノアイロン濃度(kg/m ³) -0.0002			
(2) 経済性についての考察			
汚染土量：10m \times 10m \times 深さ20m(2,000m ³ 一様に分布)、汚染物質：トリクロロエチレン(TCE)			
土壌溶出濃度：高濃度1.5mg/L、低濃度0.15mg/L、地盤の状況：シルト混じりの砂層			
透水係数 8×10^{-3} cm/sの汚染土壌に対して工事費を比較した。浄化期間や目標濃度により算出される分解速度定数から必要なナノアイロン濃度を算出した。本技術による対策コストは対象土1m ³ あたり、高濃度汚染で2.28万円、低濃度汚染で1.81万円であった。比較対象として掘削・管理型処分場搬出では高・低濃度とも5.88万円であった。また、ナノアイロン原位置攪拌では、高濃度で2.44万円、低濃度で1.97万円、揚水曝気では2.49万円であった。なお、非常に高濃度溶出値10mg/Lの土壌では、本技術と揚水曝気のコスト比が1:0.93になると算定され、ナノアイロンの浸透範囲を0.8m(TCE1.5mg/L)と設定した計算では、本技術と揚水曝気のコスト比が1:0.86と算定された。			

(3) 周辺環境への負荷度についての考察

- ・ 注入孔削孔時の敷地境界(5m地点)での騒音レベルは88dB、振動レベルは48dBであった。
- ・ 施工中のVOC濃度大気モニタリング結果では、削孔機の排気ガスの影響を除くと施工前と変わらないレベルであった。
- ・ 臭気については、測定を実施していない。
- ・ 井戸の揚水排水については、VOC処理後に放流した。なお、注入孔削孔時に発生した泥水(廃棄物)の量は計5.5m³であった。
- ・ エネルギー使用量から求めた対象土1m³あたりの二酸化炭素排出量を算出した結果、本技術は11.9kg/m³であるのに対し、掘削後に管理型処分場搬出を行なうケースでは50.3kg/m³、ナノアイロンを原位置攪拌するケースでは15.7kg/m³、揚水曝気では30.2kg/m³であった。

検討会概評

ナノサイズの α -Fe \cdot Fe₃O₄の粒子と分散材を主成分とする薬剤(ナノアイロン)を帯水層(透水性が高い土壌)中に注入し、帯水層中の土壌および地下水を無害化する技術である。これまで各種鉄粉が開発されてきたが、対象となる土壌層に均一および確実に注入する技術が確立されていない。本技術で使用するナノアイロンは粒子径が小さいことから比表面積が相対的に大きく反応性が高まる利点の他に、帯水層に注入する際にスラリー化して流動性を高められる特徴を有し、帯水層のような比較的透水性の高い土壌への注入が適切に実施されるものと期待される。今回の実証試験では、ナノアイロンの注入範囲をモニタリングする技術が検討され、概ね実用可能なレベルにあると考えられるが、注入深さや土壌種の違いによりさらなる精度が要求される場合もあると予想される。また、ナノアイロン注入濃度と低濃度汚染域における分解速度定数との関係を示すことができ、技術の有効性は認められたが、今後その適用範囲を広げるため(高濃度汚染土壌を含む帯水層にも適用するため)の試験データを積み上げていく必要がある。また本技術が掘削除去対策や揚水処理対策と比べ、優位になる汚染レベルや適用可能な土壌地盤に関する情報が得られた点は評価できる。

(課題等)

現地実証箇所での土壌汚染レベルが低かったため、高濃度汚染箇所でのナノアイロン注入技術の実証が必要である。しかし、本実証試験では、ナノアイロンが注入された現地土壌を用いて、トリクロロエチレン濃度を変えた分解試験では、比較的高濃度箇所にも適用できる可能性はある。大きな課題としては、地下水の移動による考慮をしても、現地試験での分解速度定数と室内試験での分解速度定数が大きく異なっており、その原因究明が必要である。一つの可能性として、ナノアイロンの効率性は示されているが、その持続性について、実証する必要がある。

別紙(ナノアイロン注入)

I 費用の比較

1. 実証対象技術のコストについて

コスト計算に当たっては、実証地とは別に以下のような条件の土地を前提として計算を行っている。

汚染土壌の存在する面積	100m ²
浄化対象となる汚染土壌の量	表土はGL-1mまで 2,000m ³ (GL-1~-21m) 一様な汚染
汚染物質濃度 (土壌溶出量) TCE	高濃度1.5mg/L 低濃度0.15 mg/L
浄化対象物質総量	高濃度30kg , 低濃度3kg
土質・透水係数	シルト混じり砂礫層・8×10 ⁻³ cm/s
浄化期間	60日(土壌環境基準以下を目標)

※算出条件:揚水井戸設置費を含めない。

施工費の算出

①注入工費:注入本数(浸透範囲から算出)×1本あたりの経費

② ナノアイロン費:分解速度定数から地盤中に必要なナノアイロン量を算出する。

	高濃度(TCE)	低濃度
分解速度定数(1/hr)	0.0027	0.0011
最低ナノアイロン濃度(kg/m ³)	3.24	1.46

③その他の費用:分析費、現場管理費等

上記を基に、本実証試験で得られたデータを勘案すると以下のように算定された。

総費用	高濃度 4,568 万円	低濃度 3,628 万円
単位土量あたり費用	22,800 円/m ³	18,100 円/m ³

2. 比較対象技術のコストについて

比較対象技術として、掘削除去工法と揚水曝気工法を選定している。当該技術により、1.と同じ土地を浄化対象とした場合の浄化期間、費用及び費用増原因は以下のとおりである。

①掘削除去工法:管理型処分場搬出

浄化期間 約40日

総費用	11,754 万円
単位土量あたり費用	58,800 円/m ³ (高濃度・低濃度同額)

費用増加の原因:汚染土壌の運搬150km、処分、埋め戻し費による増加を見込んでいる。

②揚水曝気工法

浄化期間 約2ヶ年

総費用	4,983 万円
単位土量あたり費用	24,900 円/m ³ (高濃度・低濃度同額)

③ナノアイロン原位置攪拌工法では:高濃度(2.44万円/m³)、低濃度(1.97万円/m³)と算定。

(浄化期間:60日)

II CO₂の排出量の比較

1. 実証対象技術の炭酸ガス排出量について

・ナノアイロン注入工法

本実証試験において使用した燃料等の実績から算出した。

総排出量	23,734kg
単位土量あたり排出量	約11.9kg/m ³

(薬剤製造費含まず)

2. 比較対象技術の炭酸ガス排出量について

比較対象技術として、掘削除去工法の排出量及び排出量増原因は以下のとおりである。

①掘削除去工法:オールケーシング掘削工

10t ダンプ使用, 搬出距離:片道75km, 燃費:2km/L

総排出量	100,496kg
単位土量あたり排出量	約50.3kg/m ³

排出量増加の原因:汚染土壌及び埋め戻し土の運搬等による排出量の増加を見込んでいる。

- ・土運搬に関わる CO₂ 排出量 46.8. kg/m³
- ・掘削機の稼働・運搬に関わる CO₂ 排出量 3.4kg/m³

②揚水曝気工法

総排出量	60,499kg
単位土量あたり排出量	約 30.2kg/m ³

③ナノアイロン原位置攪拌工法

総排出量	31,450kg
単位土量あたり排出量	約 15.7kg/m ³

代表機関名		技術の名称	
東和科学株式会社		比色式NAPL検出法	
技術の概要			
調査／対策	対策技術の区分	実証試験の対象物質	実証試験の場所
調査	NAPLの現場調査技術	NAPL (PCE, TCE, DCE, ベンゼン)	汚染サイト
<p>本技術は、現場でNon-Aqueous Phase Liquid（難水溶性液体 以下、NAPL）の有無を確認するための簡易調査法である。方法は、通常のボーリング孔に比色ツールを挿入し、NAPLの接触による変色を確認しNAPLの有無を調べる。簡便な構造であるため、設置、回収とも容易である。対象物質は、揮発性有機塩素化合物などの原液であり、媒体は、土壌・地下水のどちらにも対応可能である。</p>			
技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方			
<p>対策を長期化させる恐れのあるNAPLの位置を的確に判断し、浄化設備の仕様を最適化することで対策期間の短縮につながる。また、期間の短縮により浄化対策の低コスト化、低環境負荷を図る。</p>			
調査結果の概要			
1. 実証調査の概要			
<p>(1) 調査サイトの概要 汚染状況の異なる3サイトで実施。(事業場③は廃棄物埋立地跡地) 事業場①：愛知県名古屋市 地質層序：シルト質粘土, シルト混じり砂, 砂礫, 粘土 事業場②：愛知県豊田市 地質層序：シルト混じり砂礫, 粘土, 粘土混じり砂, 礫混じり砂, 粘土 事業場③：千葉県市原市 地質層序：砂, 廃棄物, 砂, 廃棄物, 砂, 廃棄物, シルト, 砂, 廃棄物, 砂</p>			
<p>(2) 実証試験の規模 事業場①：調査深度/7m、ボーリング調査/1地点、比色式NAPL検出法/6地点 事業場②：調査深度/8m、ボーリング調査/1地点、比色式NAPL検出法/5地点 事業場③：調査深度/5m、ボーリング調査/2地点、比色式NAPL検出法/10地点 設備設置面積：5m²（ボーリングマシン、送水装置、エアークンプレサー）</p>			
<p>(3) 汚染の濃度（比色式NAPL検出法・ボーリング調査・地下水調査結果 最高濃度のみ記載） 事業場①：（NAPL調査）リボンの変色なし （土壌溶出量）PCE：0.023mg/L、TCE：<0.002mg/L、cis-1,2-DCE：<0.004mg/L （地下水）PCE：<0.0005mg/L、TCE：0.004mg/L、cis-1,2-DCE：4.5mg/L 事業場②：（NAPL調査）リボンの変色なし （土壌溶出量）PCE：0.001mg/L、TCE：1.8mg/L、cis-1,2-DCE：0.17mg/L （地下水）PCE：0.087mg/L、TCE：2.6mg/L、cis-1,2-DCE：1.5mg/L 事業場③：（NAPL調査）全地点で変色（NAPL）を確認。確認された深度はGL-2m以深。 （土壌溶出量）TCE：7.5mg/L、cis-1,2-DCE：1.2mg/L、ベンゼン：6.8mg/L （地下水）TCE：4,200mg/L、cis-1,2-DCE：9.6mg/L、ベンゼン：230mg/L チェックボーリング地点A及びBから、TPHが高濃度に検出されている。 調査孔毎の変色域については散らばっており、NAPLの分布傾向は確認されなかった。</p>			
2. 実証調査考察			
<p>(1) 試験結果の考察 ボーリング調査と比色式NAPL検出法の調査結果を比較検討し、土壌サンプルの高濃度検出深度部分にリボンの変色がみられている。 なお、NAPLの飽和水溶液については、リボン染料が溶出せず変色が見られないことを確認した。</p>			
<p>(2) 経済性についての考察 対策を長期化させる恐れのあるNAPLの位置を的確に判断することで、浄化設備の仕様（井戸の配置、深さ、取水深度等）を最適化することが可能となり、回収率が向上し、汚染地層の帯水層全体を取水対象として浄化処理をするよりも浄化期間の短縮につながる。期間短縮により浄化コストを低減することが可能となる。</p>			
<p>(3) 周辺環境への負荷度についての考察 本技術で使用するマシンは一般の環境ボーリング調査用マシンであり、ノンコアボーリングで行う。ライナーを膨らませる水については、汚染物に接触しない工法であり使用後は回収して下水へ放流。 ・騒音・振動については、掘削マシンが主な発生源であり、マシンから1mで騒音が84～93dB(A) 振動が81～87dBを示しており、民家近くでの調査では対応を考慮する必要がある。</p>			

・廃棄物としては、調査後の廃リボンとライナー及びチューブがあり、調査深度7m分で約1.2kg/地点発生するが産業廃棄物として適切に処分する。

また、事前にNAPL調査を実施することで、浄化対策期間の削減を可能とする。この期間短縮により浄化装置の稼働期間等が削減されるため、浄化対策費及びCO₂ガスの排出量削減の可能性が考えられる。極単純化した条件での浄化に伴うCO₂排出量試算では、NAPL調査により最適化した場合0.73 kg/m³、NAPL調査なしで全帯水層を対象として揚水浄化を実施した場合1.3 kg/m³であった。

検討会の概評

原位置で NAPL（非水溶性液体）の有無を確認するために開発された簡易調査技術である。土壌分析ではある間隔でコアサンプルを採取分析することが多く、また砂礫などの地質ではコア自体の採取が難しく、NAPL が存在しても検出漏れのおそれがある。こうした土壌コア採取・分析に比較して、比色式検出法は鉛直方向に連続的に NAPL の存在を検出できる点で優れている。さらに原位置で NAPL 存在の位置情報を知ることができることは、汚染の恒久対策や事故時の緊急対策いずれの場合にも対策井の配置や深さなど浄化設備の最適化に役立てることができる。ただ効率的な浄化設備を設計するには、NAPL 存在の判別が容易で、個人差が出ないような調査法にまで高める必要がある。水より軽い油類の汚染では、地下水面を挟んで鉛直方向には比較的厚く NAPL の存在することが多く、本実証試験を実施した人工地層（廃棄物層）では地下水面を挟んだ上下 4m 区間で NAPL によるリボンの変色が確認された。ここでは地下水中のトリクロロエチレン濃度は水飽和溶解度 1,100mg/L を超える 4,200mg/L に上り、この影響もあったものと考えられる。

（課題等）

こうした実証試験より、NAPL が存在すれば確かにリボンの変色は確認できるが、目視で確実に判断できるまでに調査手法の確度を高める必要がある。また検出された NAPL がトリクロロエチレンなどの溶剤か油類か、物質を同定できる分析法との併用など、調査システムとして完成させる必要がある。現状では NAPL 反応リボンを通常のボーリング孔に挿入しているが、より効率的な調査に改善するには小型オーガを利用した調査手法などを開発実用化する必要があるだろう。

別紙(NAPL検出法)

I 費用の比較

実証試験では NAPL 調査を反映させた浄化対策を実施していないが、浄化対策の低コスト・低負荷に反映できるため、ここでは事前 NAPL 調査を実施した浄化対策について概念検討を行った。

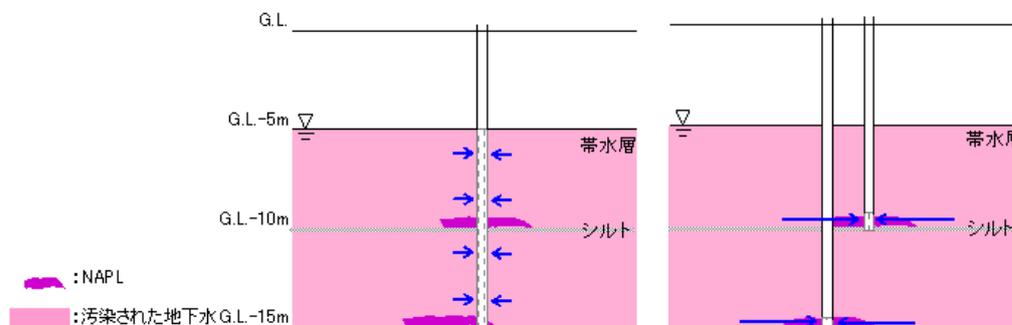


図 浄化モデル概念図

左：比較対象技術 I (NAPL 調査なし) 右：実証対象技術 II (NAPL 調査あり)

- ※ 浄化対策に先立ち NAPL 調査を行った場合、NAPL の存在を把握して浄化設備の仕様(井戸の配置、深さ、取水深度等)を最適化することが可能となるため、NAPL 調査を行わない場合と比較して、汚染物質(NAPL および地下水中の溶存物質)の回収効率を向上させ、浄化期間が短縮できる。
- ※ 同じ揚水量の場合、NAPL の回収時間はスクリーンの区間に依存する部分が大いと考えられる。帯水層全体を取水対象とした比較対象技術(スクリーン 10m)と NAPL 確認深度を取水対象とした実証対象技術(スクリーン 20cm×2)では、その回収時間の比は比較対象技術：実証対象技術=1000：40 となるとする。
- ※ 浄化日数の計算時は浄化対策モデル I (NAPL 調査なし)の場合、NAPL の回収が完了するまでは、NAPL からの汚染の溶け出しがあるため、低濃度で汚染が分布している部分については、汚染の状態はほとんど変化がないものとする。

1. 実証対象技術のコストについて(対策前の事前 NAPL 調査を実施した場合)

コスト計算に当たっては、以下のような条件の土地を前提として計算を行っている。

地下水 汚染	対象面積 (40m×40m)	1,600 m ²
	対象深度(厚さ)	10 m
	対象空間 (土量)	16,000 m ³
	間隙率	0.3
	汚染地下水量	4,800 m ³
	地下汚染濃度(平均)	1.0 mg/L
	溶存物質 (TCE)	5 kg
NAPL	NAPL面積(20m×20m)	400 m ²
	NAPL厚さ(20cm+20cm)	0.4 m
	比重 (TCE)	1.4
	NAPL体積	160 m ³
	NAPL重量	224 kg
浄化対象物質総量 (溶解物質+NAPL)		229 kg

前述した図表を基に、一般的な揚水処理装置の回収能力(30m³/日)を勘案すると、対策前の事前 NAPL 調査を実施した場合の浄化日数は 165 日(約 6 ヶ月)と想定される。この結果、費用等が以下のように算定された。

(NAPL 調査あり)

総費用	1,270 万円
単位土量あたり費用	約 790 円/m ³
単位地下水量あたり費用	約 2,650 円/m ³

2. 比較対象技術のコストについて

比較対象技術として、上記費用の比較と同じ技術を選定している。ただし、NAPL 調査を実施せず、帯水層全体を取水対象としている。当該技術により、1. と同じ土地を浄化対象とした場合の、調査時間、費用及び費用増原因は以下のとおりである。

(揚水処理法：NAPL 調査なし)

浄化期間 293 日 (約 10 ヶ月)

総費用	1,380 万円
単位土量あたり費用	約 860 円/m ³
単位地下水量あたり費用	約 2,870 円/m ³

費用増加の要因：浄化期間の長期化による電気代の増加と
人件費及び分析費の増加を見込んでいる。

II CO₂の排出量の比較

1. 実証対策技術の炭酸ガス排出量について

※前述同様、事前 NAPL 調査を実施した浄化対策について概念検討をおこなった。

炭酸ガス排出量計算に当たっては、以下のような条件の土地を前提条件として行っている。

浄化対象となる汚染土壌の量	16,000m ³
浄化日数	165 日 (約 6 ヶ月)

前述の図表を基に、一般的な揚水処理装置の回収能力 (30m³/日) を勘案すると、浄化日数は 165 日 (約 6 ヶ月) と想定される。この結果、炭酸ガス排出量が以下のように算定された。

(NAPL 調査あり)

総排出量	11,683 kg
単位土量あたり排出量	約 0.73kg
単位地下水量あたり排出量	約 2.4kg

2. 比較対象技術の炭酸ガス排出量について

比較対象技術として、上記費用の比較と同じ技術を選定している。ただし、NAPL 調査を実施せず、帯水層全体を取水対象としている。当該技術により、1. と同じ土地を浄化対象とした場合の炭酸ガス排出量及び排出量増原因は以下の通りである。

(揚水処理法：NAPL 調査なし)

浄化期間 293 日 (約 10 ヶ月)

総排出量	20,625kg
単位土量あたり排出量	約 1.3kg
単位地下水量あたり排出量	約 4.3kg

排出量増加の要因：浄化期間の長期化による消費電力の増加を見込んでいる。