

平成21年度低コスト・低負荷型土壤汚染調査・対策技術検討調査 及びダイオキシン類土壤浄化技術等確立調査結果

代表機関名		技術の名称	
大成建設株式会社		嫌気ベンゼン分解菌 DN11 株を用いる 帯水層のバイオレメディエーション	
技術の概要			
調査／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	原位置分解	ベンゼン	原位置

(技術の原理)

本技術は、ベンゼンで汚染された帯水層に対して、ベンゼン分解菌 DN11 株と電子受容体となる硝酸性窒素を含む菌体懸濁液を帯水層に注入し、酸素の供給を行わずにベンゼンを浄化する原位置浄化技術（バイオオグメンテーション）である。DN11 株は通性嫌気性細菌であり、ベンゼンを好気環境下だけでなく嫌気環境下でも分解できることが確認されている。本菌株を用いる浄化事業計画については、経済産業省及び環境省から告示されている「微生物によるバイオレメディエーション利用指針」に基づく浄化技術の安全性の確認を受けている。

浄化作業は、菌体懸濁液を注入井戸から所定量注入後、ベンゼン濃度、DN11 株菌数、硝酸性窒素濃度について一定期間モニタリングを実施し、ベンゼン濃度が環境基準値まで低下していない場合には菌体懸濁液を再注入する。ベンゼン濃度が環境基準値以下まで低下した後、DN11 株菌数及び硝酸性窒素濃度が浄化実施時より減少していることを確認して浄化を完了する。

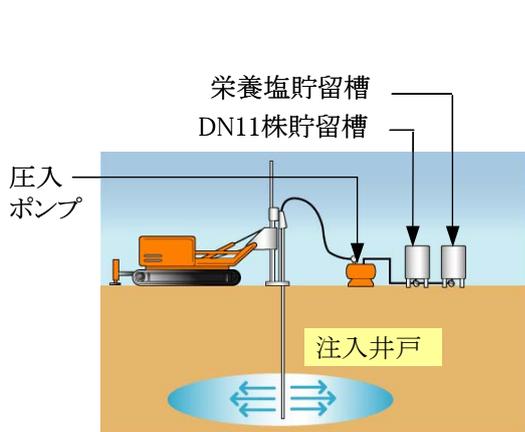


図1 浄化工法の模式図

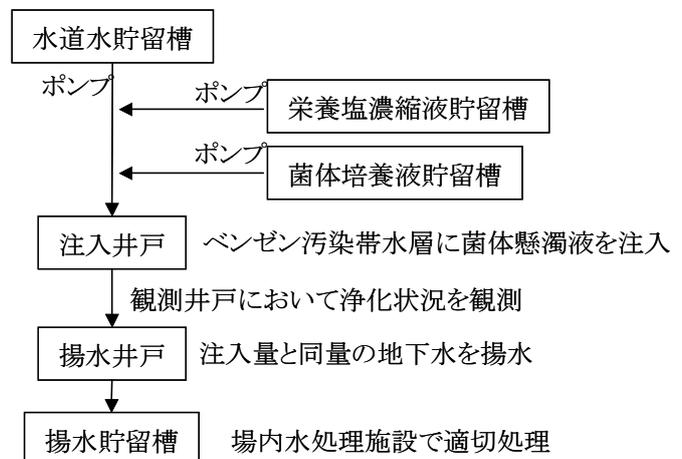


図2 実施フロー図

技術保有会社のコスト・環境負荷低減の考え方

これまで実用化されたベンゼンの原位置浄化は、主に好気性細菌を利用しているが、地盤内を強制的に好気環境にするため多大なエネルギーが必要である。これに対し、本技術では DN11 菌株を用いることにより、従来では微生物浄化を行うことが難しい嫌気環境下でもベンゼンのバイオレメディエーションを実施することが可能である。帯水層の酸化・還元ポテンシャルを強制的に変化させることなく、菌体とその増殖に必要な栄養塩のみを汚染帯水層に導入することで浄化を促進することが可能であるため、エネルギー使用量と浄化の過程に生じる二次生成物質を最小限に抑えることが可能な低負荷型の原位置浄化技術である。

調査結果の概要

(1) 実証調査方法

① 実証調査条件

本試験ではベンゼン分解菌 DN11 株の汚染帯水層への導入による浄化効果を確認することを目的とする。

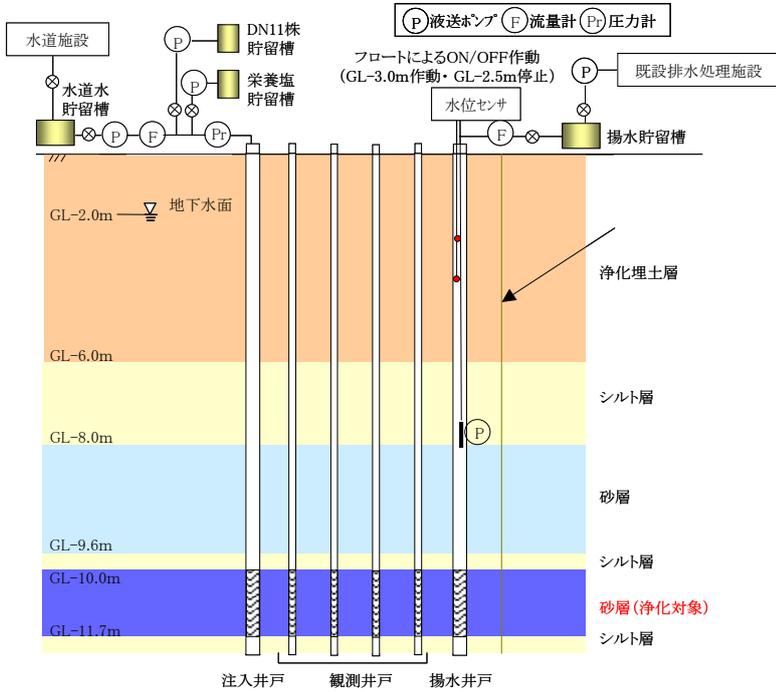


図3 実証試験装置の断面図

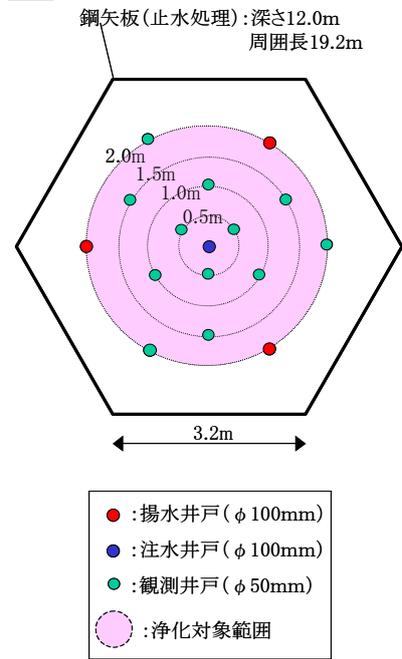


図4 実証試験装置の平面図

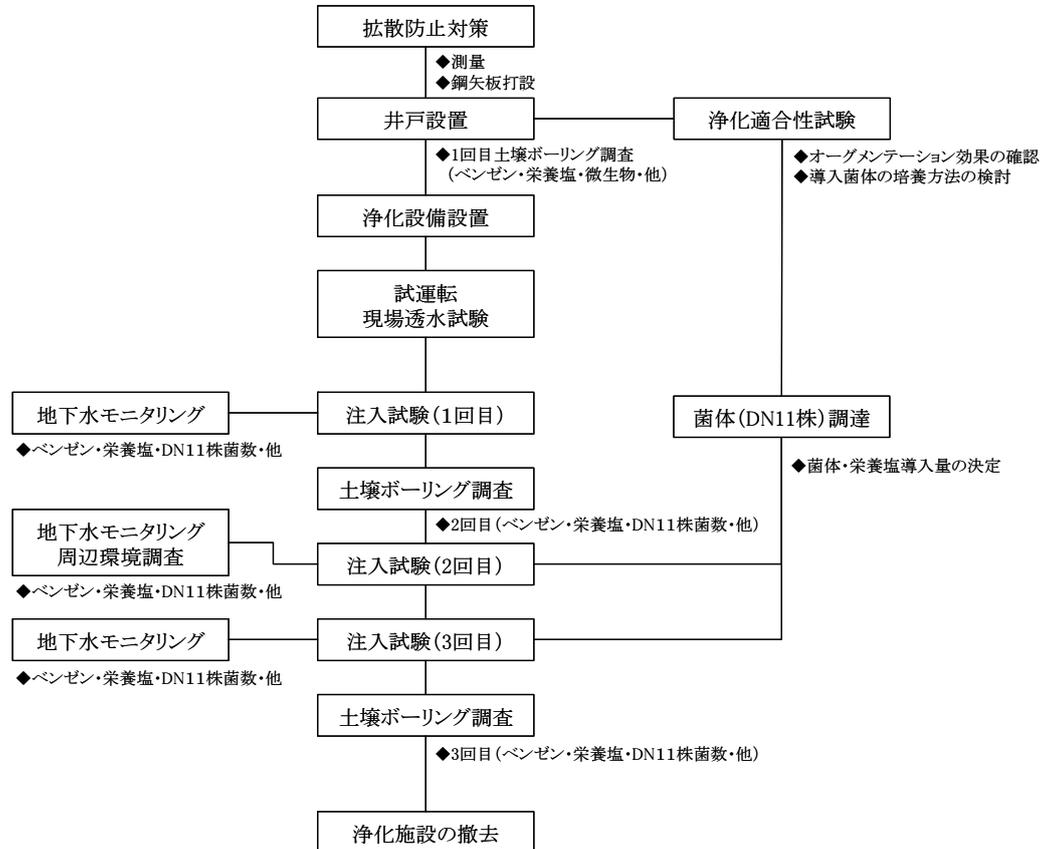


図5 実証調査のフロー

②モニタリング方法

表1 モニタリング方法

測定対象	サンプリングポイント	測定・分析項目	測定・分析方法	頻度	実施箇所	試料数			
水試料	注入水	注入地点 モニタリング孔	水温	JIS K 0102 7.2	15回	1箇所	15		
			pH	JIS K 0102 12.1			15		
			DO	JIS K 0102 32.3			15		
			ORP	酸化還元測定装置			15		
			EC	JIS K 0102 13			15		
			TOC, IC	JIS K 0102 22.1			15		
			よう化物イオン濃度	JIS K 0102 36.2	5回		5		
			臭化物イオン濃度	JIS K 0102 37.2			5		
			硝酸性窒素	JIS K 0102 43.2.5	15回		15		
			亜硝酸性窒素	JIS K 0102 43.1.2			15		
			アンモニア性窒素	JIS K 0102 37.2			15		
			オルトリン酸リン	JIS K 0102 46.1			15		
			全菌数	アクリジンオレンジ法	10回		15		
			DN11株全菌数	リアルタイムPCR			10		
	DN11株生菌数	MPN-PCR法		10					
	地下水	観測井戸	地下水位	地下水位計	24回	12箇所	288		
			水温	JIS K 0102 7.2			288		
			pH	JIS K 0102 12.1			288		
			DO	JIS K 0102 32.3			288		
			ORP	酸化還元測定装置			288		
EC			JIS K 0102 13	288					
BTEX			JIS K 0125 5.2	288					
TOC, IC			JIS K 0102 22.1	288					
よう化物イオン濃度			JIS K 0102 36.2	8回			96		
臭化物イオン濃度			JIS K 0102 37.2				96		
硝酸性窒素			JIS K 0102 42.5	24回			288		
亜硝酸性窒素			JIS K 0102 43.2.5				288		
アンモニア性窒素			JIS K 0102 43.1.2		288				
オルトリン酸リン			JIS K 0102 46.1		288				
全菌数			アクリジンオレンジ法	16回	288				
DN11株全菌数			リアルタイムPCR		192				
DN11株生菌数			MPN-PCR法		48				
揚水排水			揚水貯留槽	DN11株全菌数	リアルタイムPCR		2回	1箇所	2
土壌ガス			観測井戸	亜酸化窒素	GC-TCD法		6回	3箇所	18
土壌試料			観測井戸設置位置 (2回目、3回目は 観測井戸の近傍)	BTEX含有量	JIS K 0125 5.2		1回	12箇所 ×4深度 =48箇所	12
	BTEX溶出量	JIS K 0125 5.2		3回	144				
	n-ヘキサン抽出物質	JIS K 0102 28.1			144				
	含水率	JIS A 1203			144				
	強熱減量	JIS A 1226			144				
	よう化物イオン濃度	JIS K 0102 36.2			144				
	臭化物イオン濃度	JIS K 0102 37.2			144				
	DN11株全菌数	リアルタイムPCR			144				
	全菌数(バクテリア)	リアルタイムPCR			144				
	粒度分布	JIS A 1204		1回	1箇所 ×4深度 =4箇所	4			
周辺環境 モニタリング	試験サイト近傍 敷地境界	騒音	騒音規正法に準ずる	2回	2箇所	4			
		振動	振動規正法に準ずる			4			
		臭気(ベンゼン濃度)	JIS K 0123に準ずる			4			

DO: 溶存酸素濃度、ORP: 酸化還元電位、EC: 電気伝導度

TOC: 全有機炭素濃度、IC: 全無機炭素濃度

BTEX: ベンゼン、トルエン、エチルベンゼン、キシレン

(2) 土壌の処理量及び性状等 (浄化対象エリア)

- 1) 土質 : シルト層に挟まれた砂層
- 2) 性状等 : 帯水層 GL-10.0m~-11.7m、初期ベンゼン平均濃度 (地下水 0.97mg/L)
- 3) 処理量 : 約 21 m³ (約 40t)

(3) 有効性についての考察

①除去率等

本調査期間において、ベンゼンの土壌溶出量については、0.034mg/L から 0.005mg/L まで減少し、指定基準である 0.01mg/L 以下とすることができた。なお、土壌における濃度減少率は 85%であった。

また、地下水のベンゼン濃度は 0.97mg/L から 0.30mg/L まで減少したものの、地下水基準である 0.01mg/L 以下には達しなかった。なお、地下水における濃度減少率は 64%であった。

○水置換による除去率

浄化開始前に浄化対象エリア内に土壌含有量として 30g、地下水中に 6.2g、計 36 g のベンゼンが存在した。3回の注水を行い注水量の合計は 28kL であった。トレーサー物質の挙動に基づいて計算した浄化対象エリア内から揚水できた地下水量（有効置換水量）は 8.8kL（1回目 3.5kL、2回目 1.6kL、3回目 3.7kL）、注入前のベンゼン濃度は1回目 0.97mg/L、2回目 0.58mg/L、3回目 0.60mg/L であり、3回の物理的なベンゼン除去量は合計 6.5g（除去率：18%）であった。

○微生物による分解率

注入試験（3回目）の結果、地下水中の平均温度 16℃、平均 pH9.0、DN11 株導入菌数 2.0×10^6 cells/mL、地下水中の初期ベンゼン濃度 0.47mg/L の条件で、浄化対象エリア内の地下水中のベンゼン濃度低下は 22 日間で 0.17mg/L となり、DN11 株による分解量は 0.06mg/L、DN11 株以外による濃度低下は 0.11mg/L と推定され、DN11 株の分解率は 35%と試算された。本調査から推定されるベンゼン分解量 2.2g のうち、DN11 株による分解量は、分解寄与率から 0.78g となり、1 μ g のベンゼンの分解に必要な DN11 株導入菌数は、 2.6×10^7 (cells/ μ g-ベンゼン) と試算された。

(4) 実用性についての考察

○安定性

DN11 株の注入は菌体懸濁液を注入するため注入効率が低下する懸念があったが、2回実施した注入試験の結果では目詰まり等の影響は見られなかった。

注入試験（2回目）において、pH が上昇したことにより DN11 株が効率的に分解を行うことができなかった。このため、本技術の施工に当たっては、pH に留意する必要がある。

○安全性

菌体液は、残液も含め完全に密閉された状態で浄化サイトに輸送しているため、地上環境中に放出されず安全である。

(5) 経済性についての考察

○効率性

実証調査における汚染土壌 1kg 当たりの投入エネルギー効率は約 0.57MJ/kg であった。実証調査における作業効率は、24kg/人・h であった。

○経済性

実証調査（40t）における汚染土壌 1t 当たりの処理費用は、470,000 円と試算された。10,000t を処理すると仮定した場合、処理費用は約 8,200 円/t と試算された。（別紙参照）

(6) 周辺環境への負荷

①環境大気

揚水の排水処理等は閉鎖的に行われているため、作業環境へのベンゼンガス等の大気放出はほとんどないものと考えられるが、大気環境基準を上回る数値が実証試験サイトで検出されているため、今後もベンゼンガスの発生については検討する必要があると考えられる。

②排水

揚水した汚染地下水は密閉貯留槽で保管し、DN11 株が存在しないことを確認した後、排水量（25.2kL）を工場内の水処理施設で処理した。排水中のベンゼン濃度は環境基準値以下であった。

③騒音・振動

騒音源は注入ポンプのみであり、敷地境界での騒音値は 58dB、振動値は 36dB（いずれもバックグラウンドレベル）であり、規制値超過は確認されなかった。

④二酸化炭素排出量

実証調査における二酸化炭素排出量は、42.4 kg-CO₂/t と試算された。10,000t を処理すると仮定して試算すると 6.44kg-CO₂/t となる。（別紙参照）

⑤その他

浄化後に残存した DN11 株培養液については、密閉したまま輸送して、滅菌処理後に廃棄した。

検討会概評

本技術は、通性嫌気性分解菌 DN11 株を用いたベンゼンのバイオレメディエーションであり、嫌気性下でも浄化を行えることから、通常の好気性バイオレメディエーションよりも低コストでの浄化を目指した技術である。

実証調査においては、ベンゼンの土壌溶出量を指定基準以下とすることができたが、地下水については環境基準以下とするまではいたらなかった。また、通常の好気性での分解と比べて DN11 株による嫌気性での分解が同等またはそれ以上とは認められなかった。

また、DN11 株を含む 3 回の注水による水置換における除去量は合計 6.5g (除去率 18%) と推定された。また、地下水における微生物による分解量は 2.2g と試算され、このうち DN11 株によるベンゼン分解量は 0.78g (除去率 35%) と推定された。

汚染土壌 10,000t を処理すると仮定した場合の処理コストは 8,200 円/t (18%削減)、二酸化炭素排出量は 6.4kg-CO₂/t (67%削減) と試算されたが、一層の改善が期待される。

本技術は、バイオオーグメンテーションであり、周辺への環境影響の有無についても確認する必要があるため、注入した DN11 株菌数は減少傾向にあるものの追跡調査が望まれる。

また、注入後の pH が分解効率に大きく影響を与えるため、施工に当たっては留意する必要がある。

実証試験の目標値及び評価

	評価項目	目標値	評価
浄化効果・コスト	土壌溶出量 (ベンゼン)	指定基準以下 (0.01mg/L)	ベンゼンの土壌溶出量が指定基準以下となり目標を達成したが、地下水については環境基準以下とするまではいたらなかったため、土壌・地下水における今後の濃度減少率等についての追跡調査が必要である。
	DN11 株菌数 (ベンゼン 1μg を分解するのに必要な菌数)	10 ⁷ (cells/μg-ベンゼン)以下	必要菌数が 10 ⁷ を超過し、目標は達成出来なかったため、DN11 株の生育が促進できる環境条件 (pH、温度等) を整える等、改善を図る必要がある。
	コスト	揚水処理から 30%削減 (7,000 円/t 以下)	揚水処理から 18%削減 (8,200 円/t) できているが、目標は達成できなかったため、DN11 株の生産効率を上げることによる低コスト化等、改善の余地がある。
環境負荷	二酸化炭素発生量	揚水処理から 80%削減 (3.9kg-CO ₂ /t 以下)	揚水処理から 67%削減 (6.4kg-CO ₂ /t) できているが、目標は達成できなかったため、DN11 株菌体濃度を高めることによる注入回数の削減や工期の短縮化等、改善の余地がある。
	排水 (ベンゼン)	排水基準以下	排水基準に適合したため、目標を達成。
	排水 (DN11 菌株)	未検出	排水において未検出であり、目標を達成。
	騒音	70dB 以下	騒音は 58dB であり、目標を達成
	振動	発生しない	振動は発生しなかったため、目標を達成。
	地下水 (硝酸性窒素)	地下水基準以下 (10mg/L)	地下水基準に適合したため、目標を達成。

別紙（嫌気ベンゼン分解菌 DN11 株を用いる帯水層のバイオレメディエーション）

1. 費用の算出

○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、以下の条件を前提として試算している。

1) 試算前提の主要諸元（ベンゼン汚染帯水層）

汚染土壌濃度（溶出量・含有量）	: 溶出量 0.1mg/L、含有量 1mg/kg
汚染地下水の濃度	: 0.5mg/L
目標処理濃度（溶出量）	: 溶出量 0.01mg/L 以下（環境基準値以下）
処理量（t [*] ）	: 10,000t（1000 m ² ×GL-5m～-10mの帯水層） ※単位体積重量(t/ m ³)を 2.0とした
運転時間（h）	: 8h/日
浄化期間（日）	: 20日×6回
観測期間（月）	: 注入期間を含めて4ヶ月×6回
処理条件	: 注水・揚水井戸 36本 帯水層の温度：20℃、地下水 pH7.0
工費の試算範囲内	: 浄化施設費、運転費、人件費、観測費
工費の試算範囲外	: 拡散防止対策費、運搬費

2) 処理費用の算出

上記を基に実証試験で得られたデータから経済性を試算すると以下の様に算定された。

総費用（10,000t 処理時）	82,000,000 円
処理単価	8,200 円/t

2. 二酸化炭素排出量の算出

○実証対象技術の炭酸ガス排出量について

二酸化炭素排出量の計算に当たっては、以下の前提として試算している。

※地球温暖化対策の推進に関する法律施行令第三条一のロ（平成 14 年 12 月 19 日一部改正）の排出係数一覧表の数値を用いて二酸化炭素排出量を算出した。

算出根拠

実規模プラントでの軽油使用量：216 L

実規模プラントでの揚水等に伴う電気使用量：115,000 kWh

算出式

軽油使用量（216 L）×排出係数（2.62 kg-CO₂/L）

+ 使用電気量（115,000 kWh）×排出係数（0.555 kg-CO₂/kWh）= 64,400 kg-CO₂

総排出量（10,000t 処理時）	64.4 t-CO ₂
排出原単位	6.44 kg-CO ₂ /t