

～令和6年度 土壌汚染対策技術セミナー（録画配信）～

ベンゼンを対象とした原位置浄化技術 ～ドレーン工法を用いたLNAPL除去を中心に～



The diagram illustrates a remediation system for LNAPL (Leachate Non-Aqueous Phase Liquid) using a drain method. It shows a cross-section of the ground with three distinct layers: a top brown layer, a middle purple layer, and a bottom light blue layer. A horizontal drain pipe is installed in the middle purple layer, connected to a pump system on the surface. The pump system includes a motor, a pump unit, and a collection tank. A pressure gauge labeled 'P' is also visible. The drain pipe is shown with several vertical risers extending to the surface. The text '鹿島建設' (Kajima Construction) is overlaid on the diagram.

鹿島建設

技術研究所
地球環境・バイオグループ
河合 達司

2024年11月21日～2025年2月21日 録画配信セミナー

内容

1. ベンゼン汚染に関する概説

1-1 ベンゼンの特性

2-2 ベンゼン汚染の対策技術

2. LNAPLに関する概説

2-1 LNAPLの特性

2-2 LNAPLの調査法

3. ベンゼン汚染の原位置対策技術

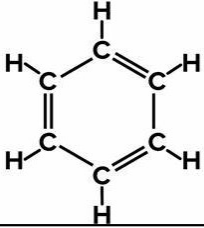
3-1 ドレーン工法を用いた
LNAPL除去

3-2 水平井を用いたバイオス
パーズィング

1. ベンゼン汚染に関する概説



1-1 ベンゼンの特性 – 基本物性

基本物性		
分類	第一種特定有害物質 有機化合物 - 油類	原液はNAPL（疎水性液体）
化学式	C ₆ H ₆ - 芳香族化合物	
モル質量	78.11 g/mol	
密度	0.8765 g/cm ³ (20℃)	LNAPL（水より軽い疎水性液体）
蒸気圧	95.2 mmHg (25℃)	揮発性の高い物質（1 mmHg～760mmHg）
水への溶解度	1,800 mg/L (25℃)	わずかな量だが水に溶解
ヘンリー定数	0.00548 atm・m ³ /mol (25℃)	気相-液相間で平衡、両相に存在。
有機炭素-水分配係数 k _{OC}	83.2	土壌中の有機物が多い場合、地下水中へ溶解している量よりも吸着している量が多い場合がある

1-1 ベンゼンの特性－製造・使用

ベンゼンの製造

石炭 <ul style="list-style-type: none"> 石炭乾留軽油 石炭タール 	<ul style="list-style-type: none"> 古くは石炭からベンゼンを製造
石油 <ul style="list-style-type: none"> ナフサ分解油 軽質改質油 	<ul style="list-style-type: none"> 現在、国内では100%石油から製造している。

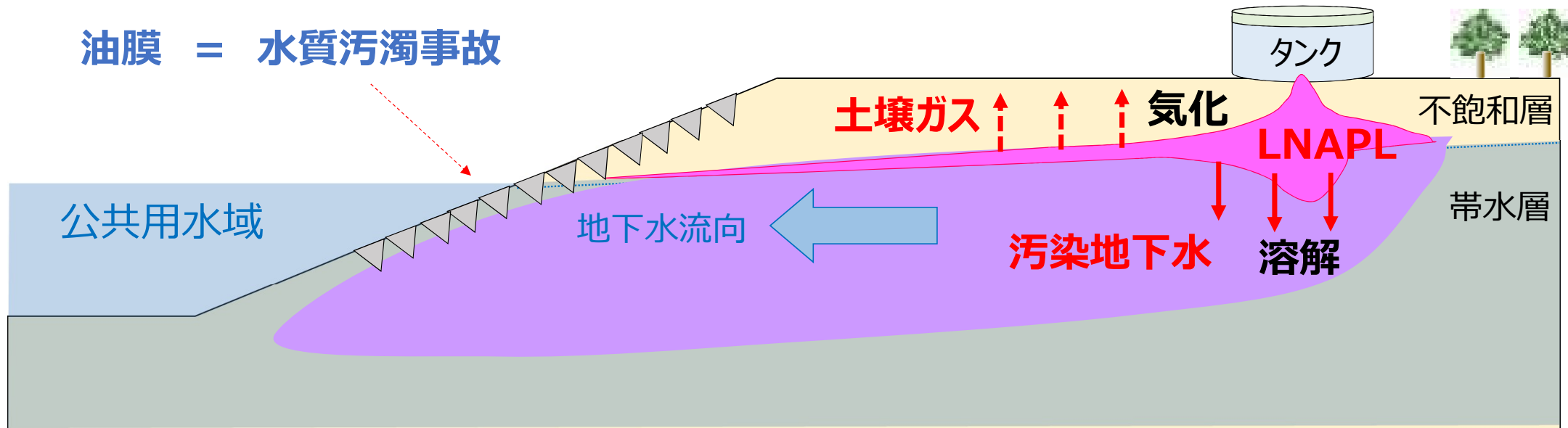
ベンゼンの使用・ベンゼンを含む製品

化学原料/溶媒 <ul style="list-style-type: none"> 純ベンゼン 溶媒級ベンゼン 	<ul style="list-style-type: none"> 合成樹脂、医薬品、農薬、香料などの原料 抽出剤、溶媒等
ガソリン	<ul style="list-style-type: none"> 1%未満（国内規格） 0.12～3.50%（U.S. Ca）※

- ベンゼン汚染の**汚染源**として、**純ベンゼン**以外に、**ベンゼンを含むガソリン**や**石炭タール**などの**油類**の可能性もある。
- 汚染源の可能性あるものの**ほとんどは**比重が1未満の**LNAPL**。**石炭タール**のみわずかに比重が1を超える**DNAPL**。

※ Leaking Underground Fuel Tank Field Manual, Academic Press, Oraland FL, 1987

1-1 ベンゼンの特性 – 土壌地下水汚染の特徴

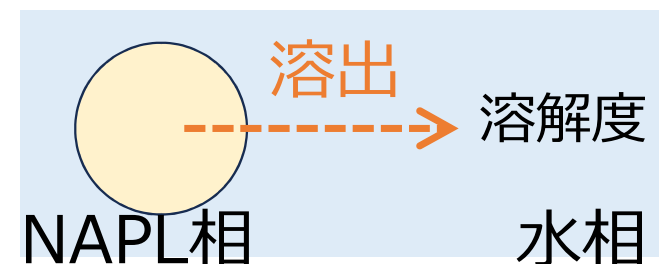


- ①地盤への漏洩し、重力により土壌の間隙を通して、不飽和層内を下へ浸透
- ②地下水面に到達すると、地下水面上にLNAPLが滞留
- ③LNAPLは地下水の流動に沿って、下流側へ移動
- ④不飽和層では、土壤ガスが気化
- ⑤帯水層では、地下水中にベンゼンなどが溶出

1-1 ベンゼンの特性 – 溶解度と地下水基準

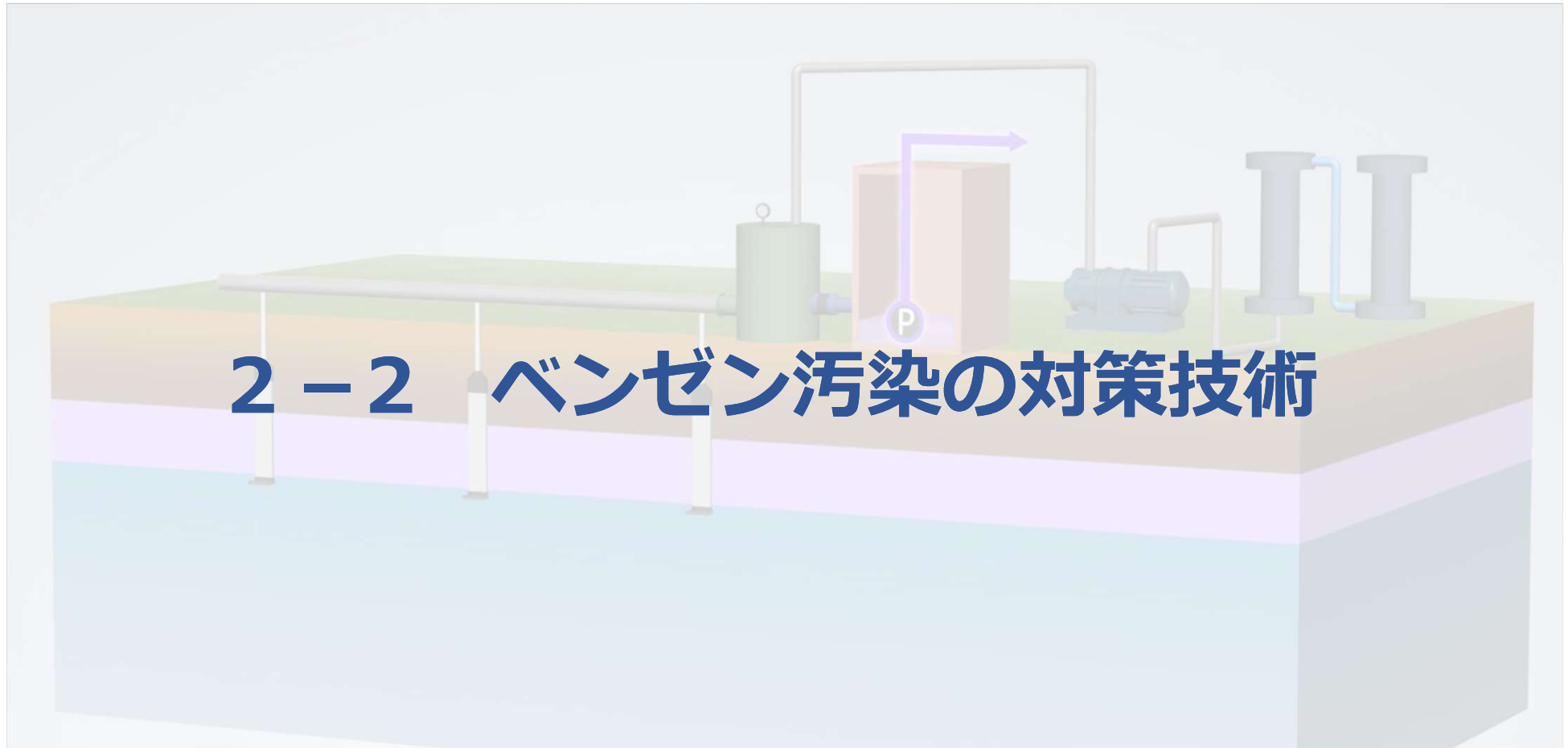
分類	物質名	溶解度@25℃ (mg/L)	地下水基準 (mg/L)	倍率
有機塩素系化合物	1,2-ジクロロエタン	8300	0.004	2,075,000
	1,3-ジクロロプロパン	2180	0.002	1,090,000
	1,1,2-トリクロロエタン	4500 @20℃	0.006	750,000
	ジクロロメタン	13000 @20℃	0.02	650,000
	クロロベンゼン	1100	0.002	550,000
	四塩化炭素	800 @20℃	0.002	400,000
	1,1-ジクロロエチレン	5000	0.02	250,000
	1,2-ジクロロエチレン	6300	0.04	157,500
	トリクロロエチレン	1100	0.01	110,000
	テトラクロロエチレン	150	0.01	15,000
	1,1,1-トリクロロエタン	950	1	950
油類	ベンゼン	1800	0.01	180,000

- NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid) : 疎水性液体



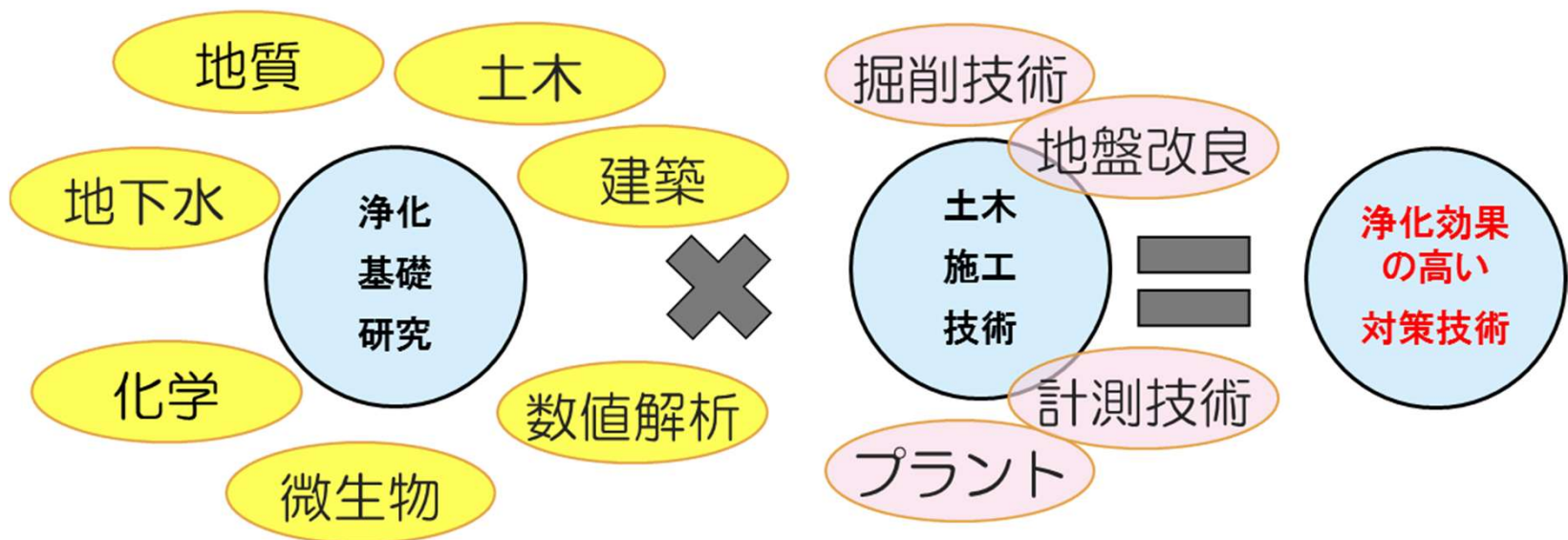
- 原液 (NAPL) が存在していると、基準適合のためには地下水濃度を1000~200万分の1に
 - 0.1~1%ベンゼン濃度のガソリンの場合、180~1800分の1に
- = **NAPL除去が重要**

1. ベンゼン汚染に関する概説



1-2 ベンゼン汚染の対策技術 – 対策法選定の考え方

浄化原理（ソフト） × 施工法（ハード） = 対策法



浄化条件の最適化
・対象物質は、どのような浄化条件で除去（抽出・分解）されるか

最適な施工技術の選択
・地盤内で最適な浄化条件を実現するには、どのような施工法が適しているか

1-2 ベンゼン汚染の対策技術－イメージのスケール

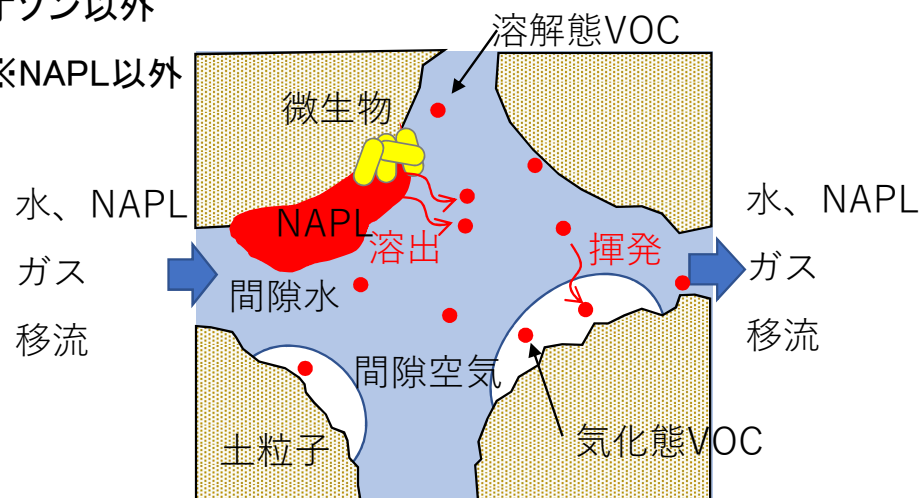
1) 浄化原理 ⇒ ミクロのイメージ

- ・三相（固相、液相、気相）間の分配平衡

	固相	液相	気相
存在形態	土粒子等に吸着	溶解態	気化態
移流	×	○	○
分解※	×	○**	×

※オゾン以外

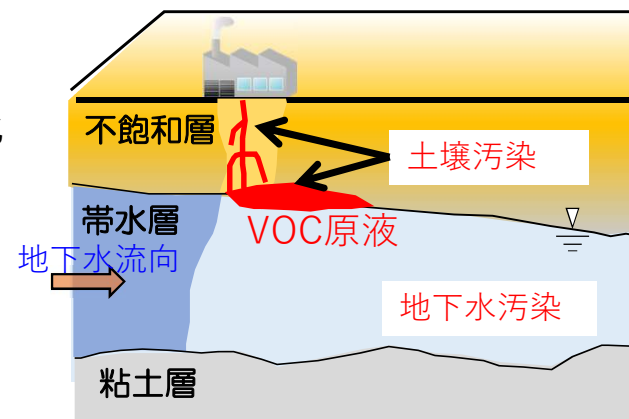
※※NAPL以外



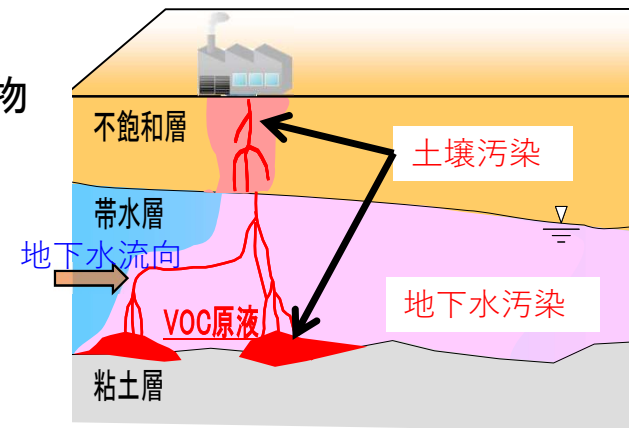
2) 施工法 ⇒ マクロのイメージ

- ・サイト概念モデル

- ・ベンゼンなど比重1未満



- ・有機塩素化合物など比重1以上



1-2 ベンゼン汚染の対策技術 – 主な原位置浄化法

対策分類	原理	適用対象	対策工法例	対象
物理的除去	汚染土壌を切削除去して取り除く	全深度	ウォータージェット工法	・粘性土汚染
	LNAPLを吸引等して取り除く	地下水面付近	LNAPL回収（ドレーン工法）	・LNAPL
揮発回収	吸引・送気・加熱などによりベンゼンを気化させ、ガスとして回収	不飽和層	土壌ガス吸引法	・高濃度 ・荒取り
		帯水層	エアースパーキング法	
酸化分解	酸化剤を注入し、ベンゼンを酸化分解する	帯水層	フェントン法、過硫酸法等	・高濃度 ・複合汚染
生物分解	酸素と栄養塩を供給し、土中の微生物を利用して、生分解する	不飽和層	バイオベンティング法	・低濃度
		帯水層	バイオスパーキング法	
揚水/注水	汚染地下水を揚水等により回収	帯水層	揚水対策 原位置土壌洗浄	・低濃度 ・応急対策

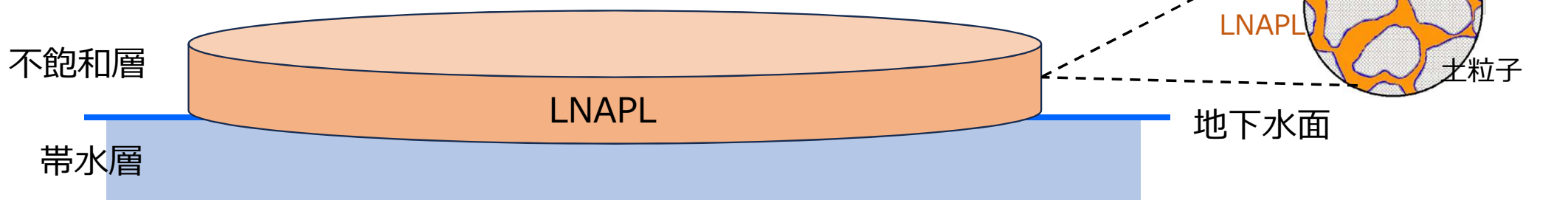
2. LNAPLに関する概説



2-1 LNAPLの特性 – 地盤内での挙動

■ LNAPLの一般的なイメージ – パンケーキモデル

フライパンの上にパンケーキが広がるように、
地下水面上にLNAPLが広がっている

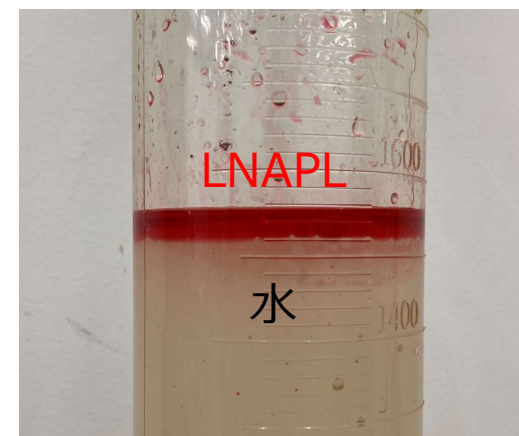


問題点① 水の上に浮かんだLNAPLは水と一緒に動く と誤解

問題点② 土壌間隙はすべてLNAPLで埋まっている

⇒ 実際よりもLNAPLの量を過大に見積もる

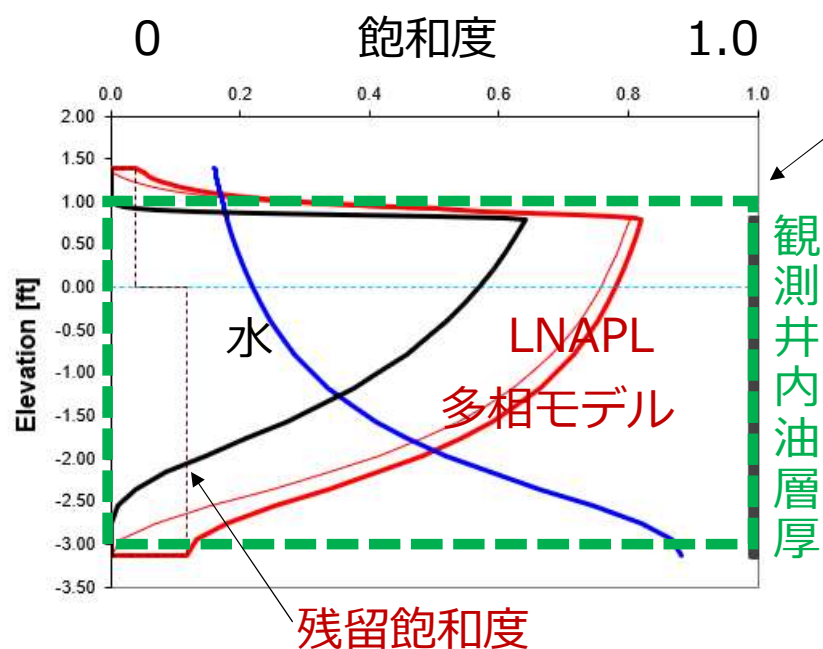
● 油、水に対する 土粒子の影響が考慮されていない



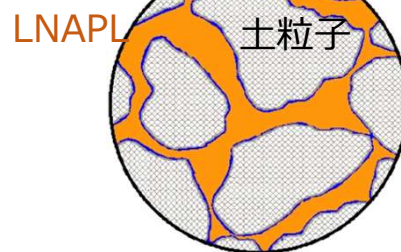
2-1 LNAPLの特性 – 地盤内での挙動

■ 実際の地盤内でのLNAPLの存在モデル – 多相(multiphase)モデル

- ① LNAPLの土壌間隙中に占める割合（飽和度）は一律100%でない
- ② 動く油（飽和度が高く連続）と動けない油（飽和度が低く分断）がある
- ③ 不飽和層内のLNAPLの残留飽和度は帯水層内の残留飽和度より小さい

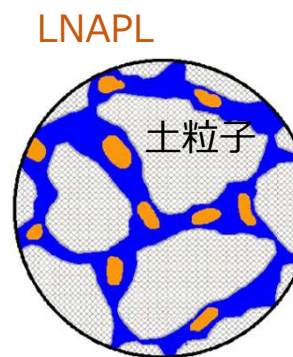


LNAPL
パンケーキモデル



動く油

(飽和度が高く連続)



動けない油

(飽和度が低く分断)

【理由】

土粒子への濡れ性の違い

水 > 油

2. LNAPLに関する概説



2-2 LANPLの調査法 – 現状技術

1) 油含有土壌の調査方法 油汚染対策ガイドラインの方法

(1)地歴、油臭、表層土壌TPH で調査位置絞り込み

(2)1m間隔での試料採取、**地下水面直上付近に1点**

■ 課題 「LNAPLの特定を目的とした調査ではない」

・LNAPLの存在可能性の高い位置の絞り込みではない

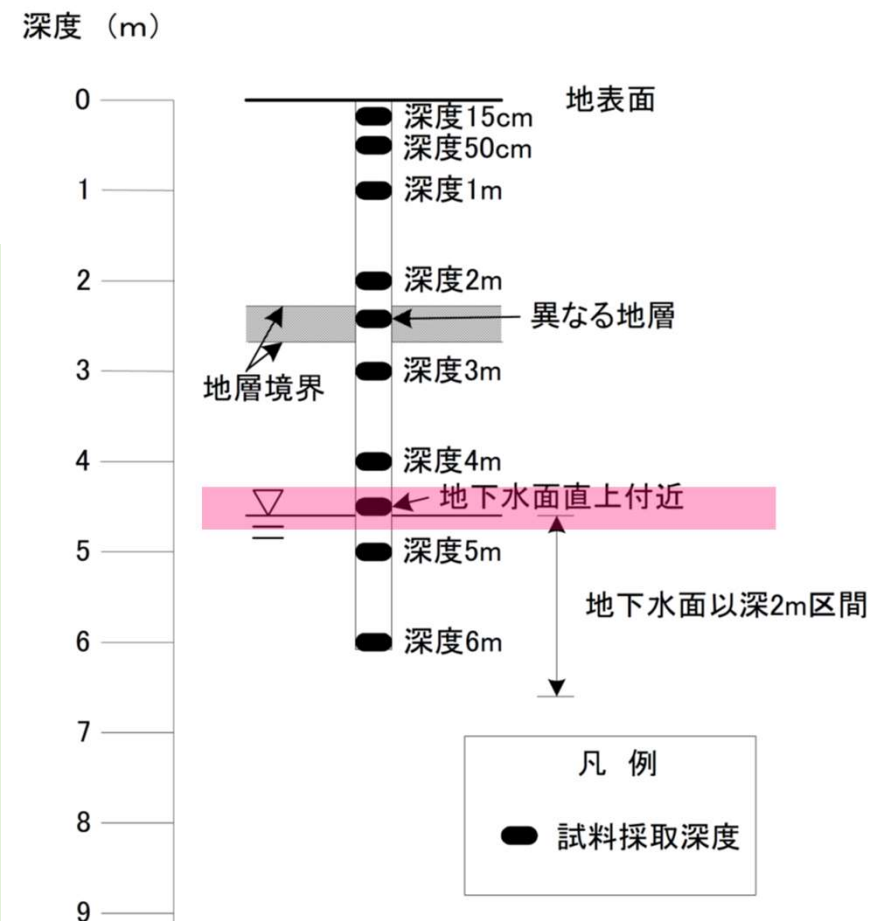
= **油の浸透地点の推定** ⇒下に油含有土壌はあるが

LNAPLが移動した場合、見落としのおそれ

⇒**広範囲で迅速/安価な多点調査**

・数10cmの層厚の見落としの恐れ

⇒**連続深度での調査**



2-2 LANPLの調査法

① 土壌ガス調査

LNAPL位置特定調査フロー

① 土壌ガス調査

▼ 平面分布の絞り込み

② ガイロセンシング調査

▼ 連続深度調査

③ 土壌ボーリング調査

▼ 位置の確認

④ 観測井モニタリング

LNAPL層厚の長期変動

① 土壌ガス調査

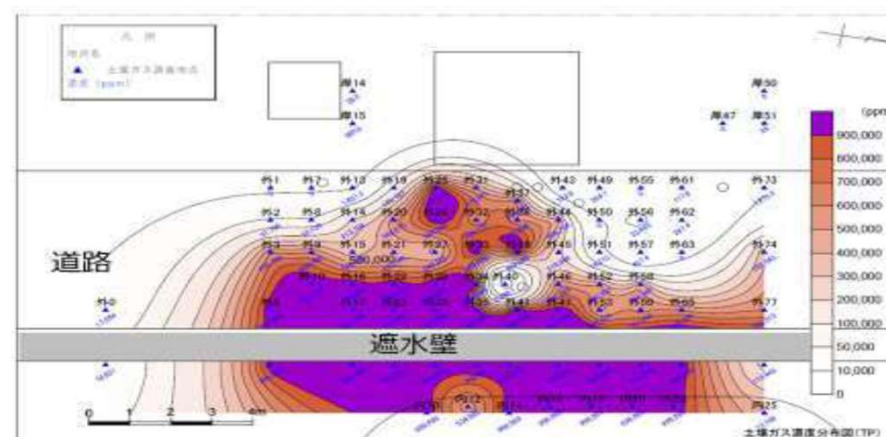
目的：平面分布の把握

深度方向調査地点の絞り込み

方法：GL-0.8~1mに調査孔を

1m~数mピッチで設置

土壌ガス中に揮発したベンゼンや
油分をガス分析機で測定



・調査結果イメージ

2-2 LANPLの調査法 – ②ダイレクトセンシング調査

油層位置特定調査フロー

① 土壌ガス調査

油層の平面分布の絞込み

② ダイレクトセンシング調査

油層の連続深度調査

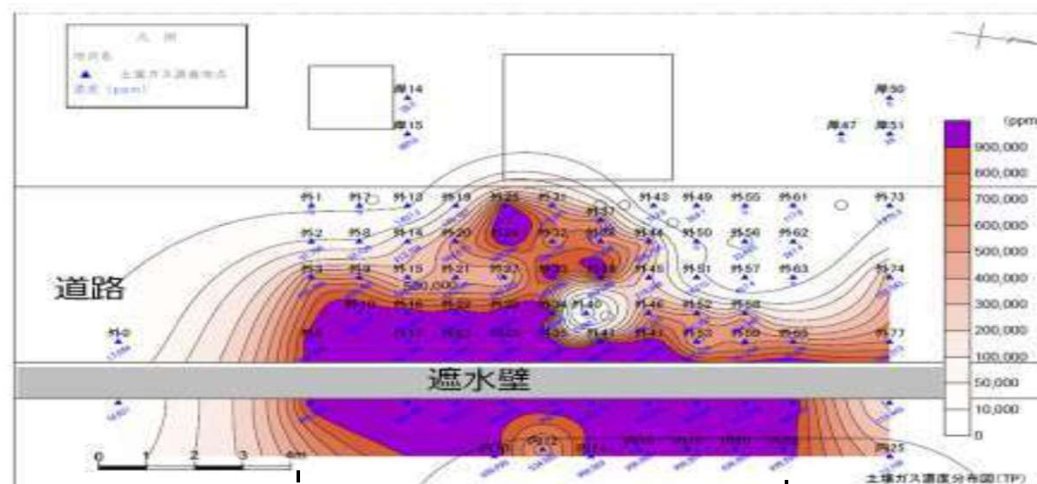
③ 土壌ボーリング調査

油層位置の確認

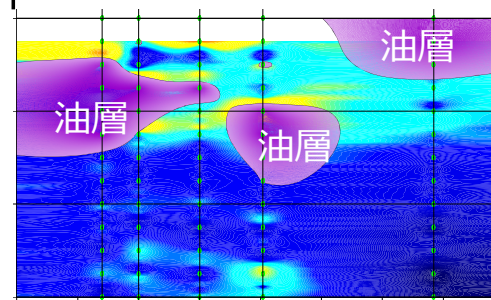
④ 観測井モニタリング

油層厚の長期変動

・土壌ガスの平面コンタ図



・ダイレクトセンシングによる
断面油分コンタ図



2-2 LANPLの調査法 – ②ダイレクトセンシング調査

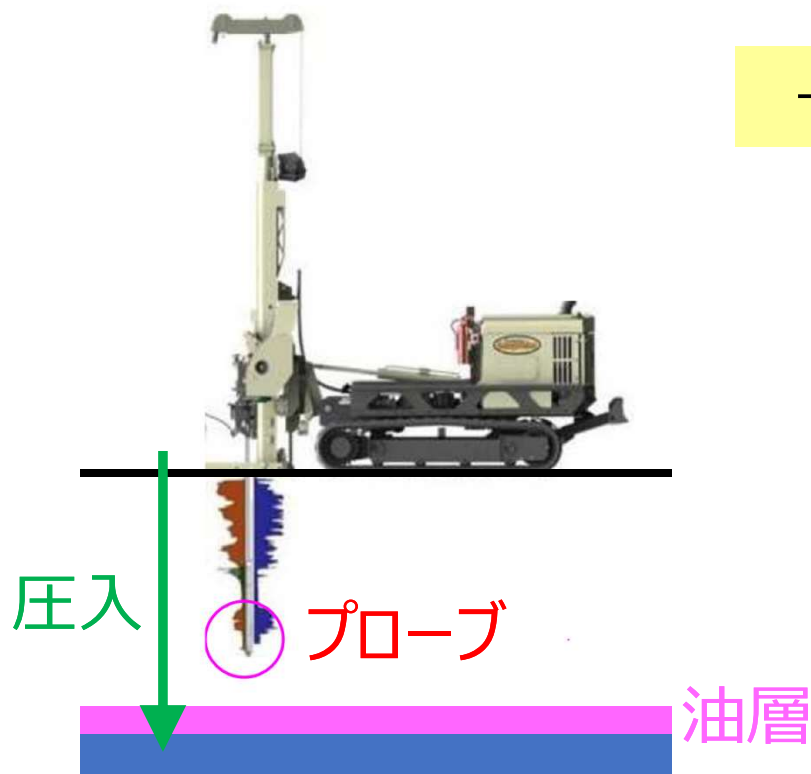
■ダイレクトセンシング調査：深度方向に連続的な油調査手法

- ・油を検知するプローブを地盤に**圧入**し、**連続深度**で油の存在量を評価

→ 油層の**厚さ**と**深度**を**リアルタイム**に推定

- ・2種類のプローブを測定対象に応じて選択

- ①MIP (Membrane Interface Probe)
- ②OIP (Optical Imaging Profiler)

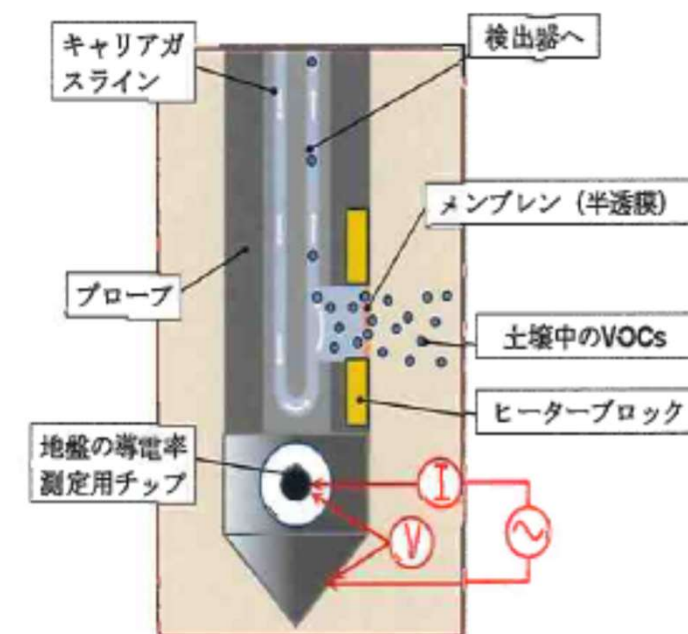
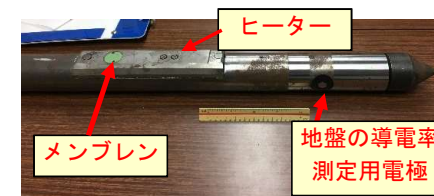


2-2 LANPLの調査法 – ②ダイレクトセンシング調査(MIP)

①MIPプローブ法

(Membrane Interface Probe)

- ベンゼンなどの揮発成分 (VOC) が対象
- VOCを透過する膜を有する**プローブ**
- 地盤を加熱してVOCを気化
- 膜を透過したVOCを地上でPID (光イオン化検出器) によりガス測定
- 導電率の測定により、地下水面の深度や地層を推定
- データを連続的にリアルタイムで把握



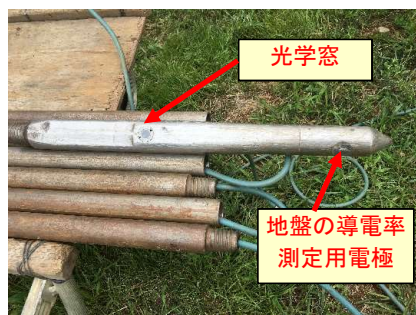
MIPプローブ

2-2 LANPLの調査法 – ②ダイレクトセンシング調査(OIP)

②OIPプローブ法

(Optical Imaging Profiler)

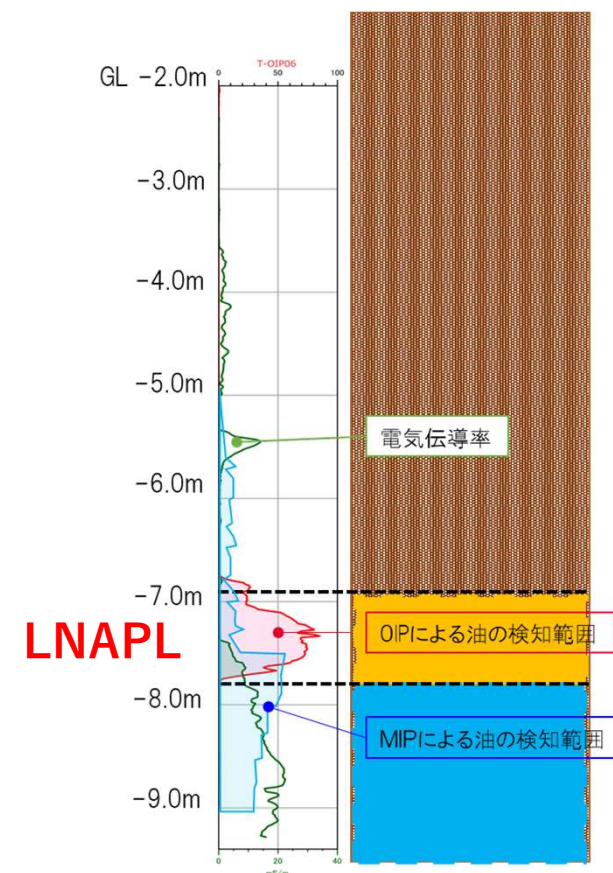
- ・揮発しにくい油成分が対象
- ・紫外線光源による油の蛍光反応を利用
- ・プローブに装着したカメラで可視画像と蛍光画像撮影
- ・光学画像処理によりLNAPLの存在を評価するシステム
- ・MIPと同じく、プローブに導電率用電極



可視画像

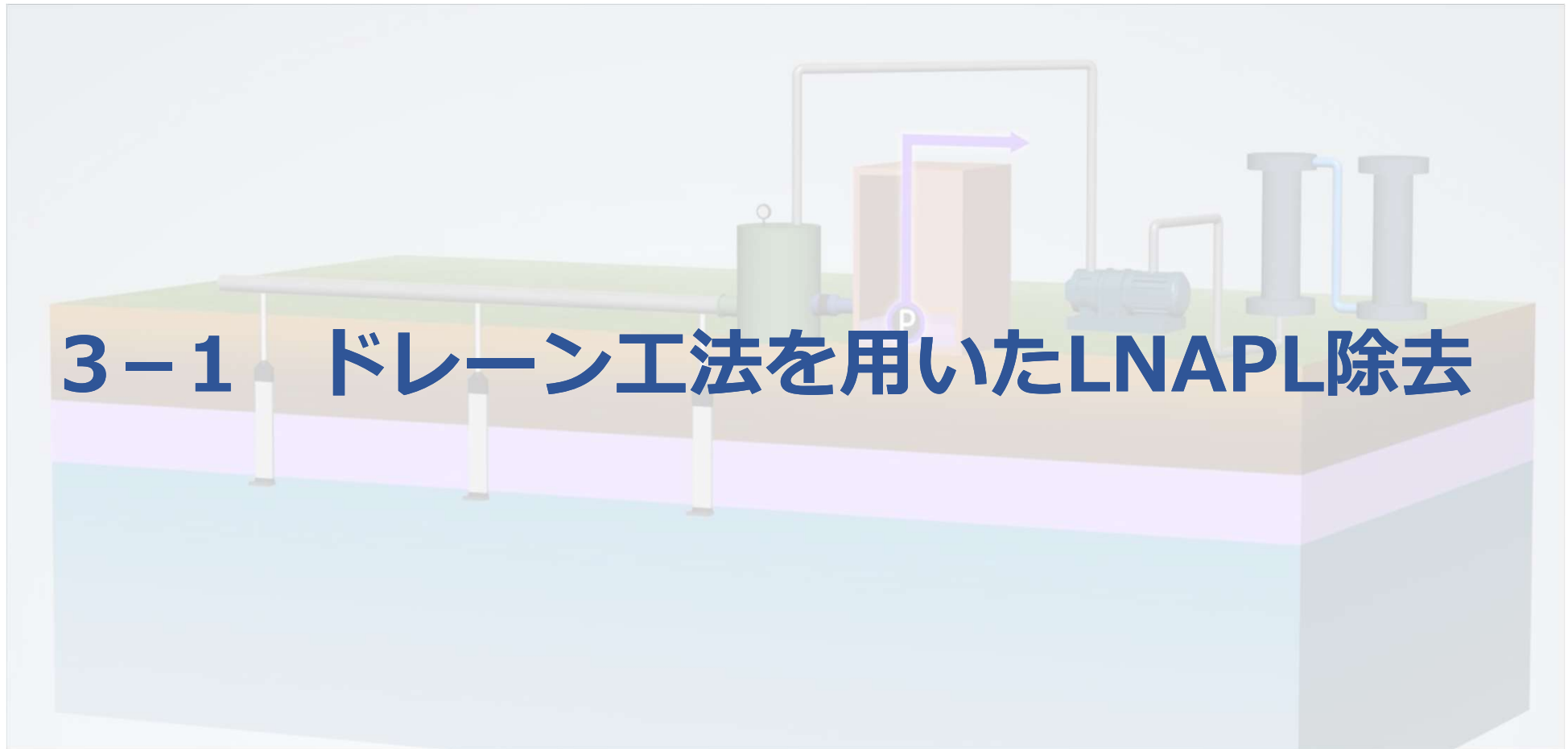


蛍光画像



ダイレクトセンシングの結果を土壤ボーリングの結果を統合した一例

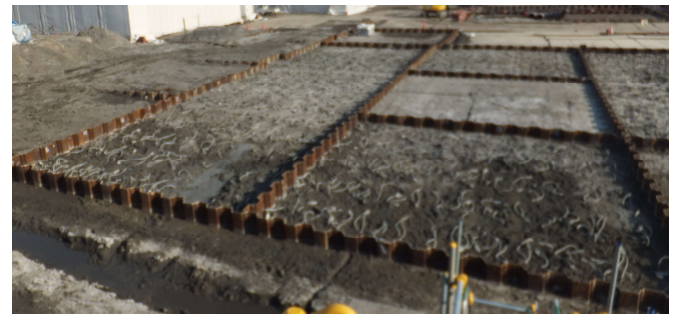
3. ベンゼン汚染の原位置対策技術



3-1 ドレイン工法を用いたLNAPL除去

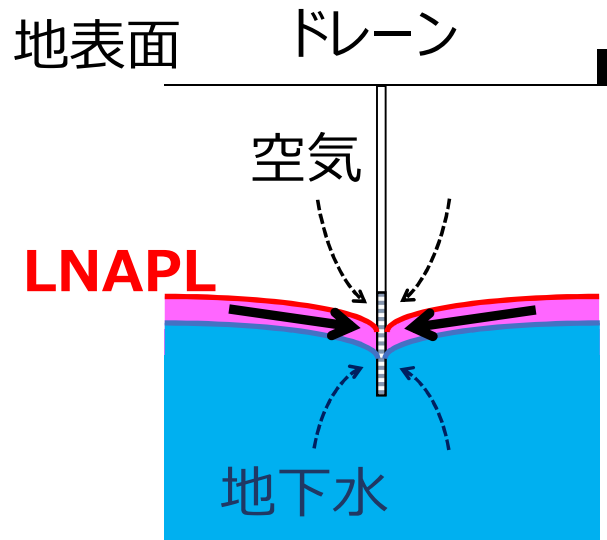
3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 - 背景

・ドレーン材を用いた
地下水浄化工法
(豊洲新市場浄化工事)



揚水・注水工法より高い効果

LNAPL
の回収に
適用
➔



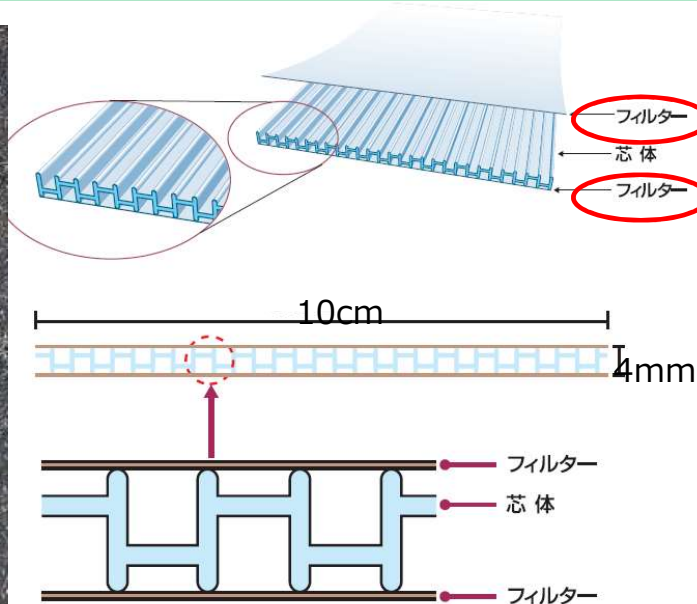
■原理
(多相抽出法)
・ドレーンに真空
圧をかけ、水、
LNAPL、空気を
同時に吸引

・地盤からの油の回収は、**水、LNAPL、空気の多相流**の現象
・土粒子表面への濡れやすさ = **水 > LNAPL > 空気**
→ **油を優先的に吸引する工夫が必要**

3-1 ドレーン工法LNAPL除去 - 高い親油性・撥水性を有する素材

ドレーン材

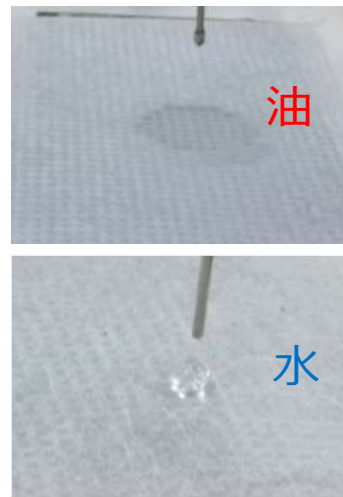
- 10cm幅のフィルターと4mm厚の芯材によるサンドイッチ構造
- “点”ではなく“面”的に吸引



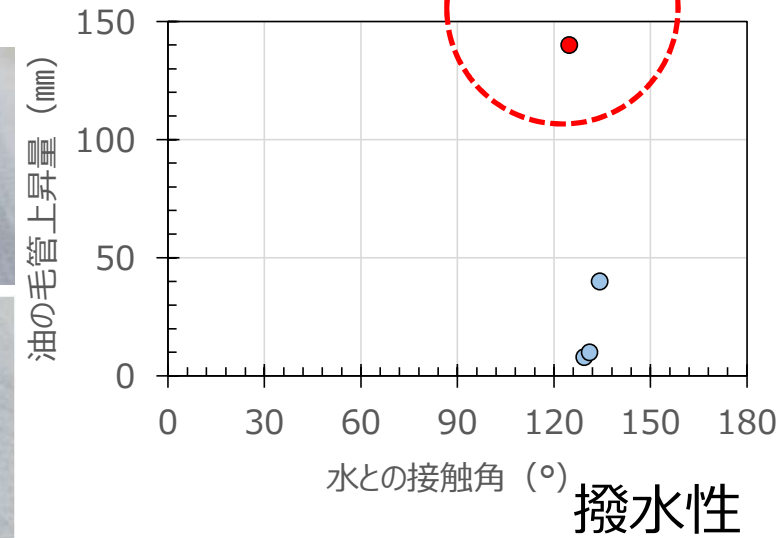
■開発のポイント（その1）

- **高い親油性と撥水性**を有するフィルター素材として、**ポリエチレンテレフタレート（PET）**を採用

親油性・
撥水性素材



親油性



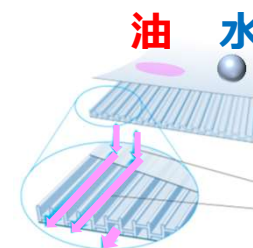
PET

3-1 ドレーン工法LNAPL除去 - 吸引効果の評価

効果：油層の減少時に水の減少がほぼない = 油を優先的に吸引



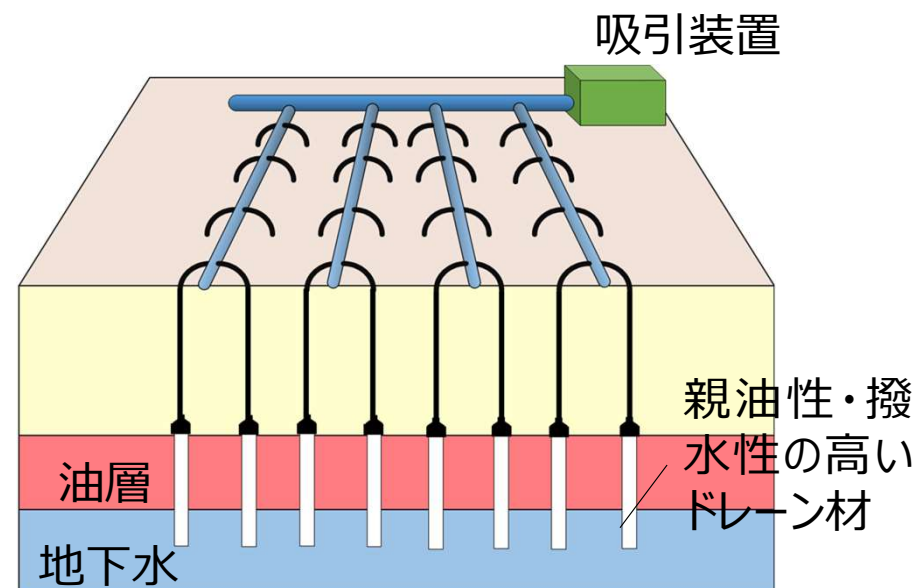
幅10cm
厚さ4mm



3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 - 特徴

- 油を優先的に吸引するためフィルター素材に**親油性&撥水性**を持つ「プラスチックボードドレーン」を考案し、**新規な地盤中の油の回収技術**を開発（特許技術）

特徴	利点
①揚水による油の回収に加え、水面上の油を 真空圧8m以上 の水頭差に相当)により直接吸引	①油を 真空圧 で直接吸引
②ドレーンの 打設期間 は圧倒的に 短く 、揚水井戸の 数十倍の本数 を密に打設	②吸引油の 移動距離が短い



➡ 揚水よりも**圧倒的に短期間、経済合理的に油を回収**

3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 -工事フロー-

(1) LNAPL位置特定調査



(2) 地盤中へのドレーンの打設



(3) 吸引設備を用いた油の吸引回収

3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 - 打設方法

■課題：N値20以上の固い地盤への打設方法がなかった。

【従来の打設法】



軟弱地盤対応
ドレーン打設機

【開発した打設法】



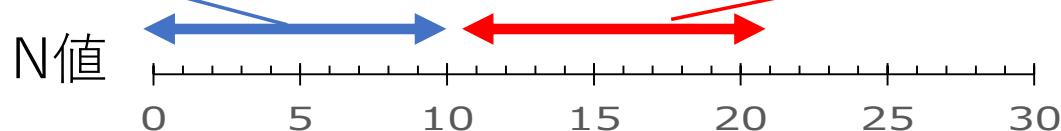
クレーン+
バイブロハンマ



バックホー+
バイブロハンマ



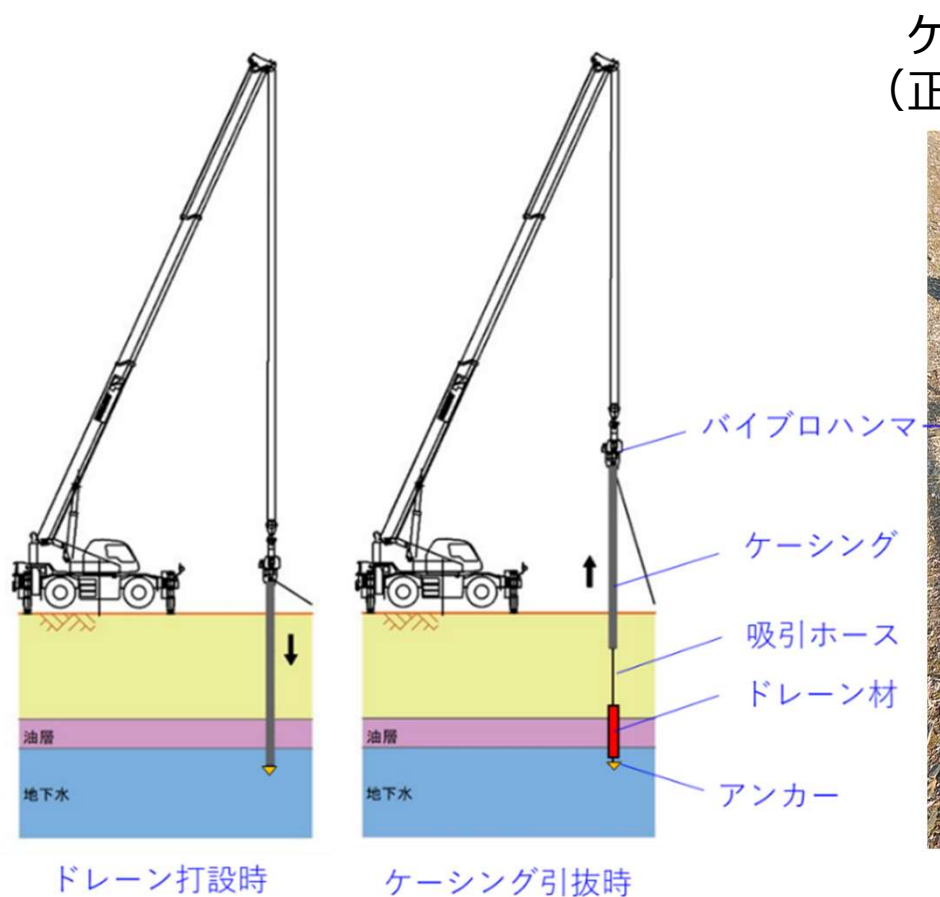
アースオーガ



■結果：バイブロハンマーやアースオーガ等を用いて、N値20以上の固い地盤に打設可能

3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 – 打設方法

■課題：ケーシング引き抜き時のドレーンの共上り



ケーシング
(正方形型)

ケーシング
(シートパイル型)



アンカー

■開発のポイント

- ・特殊形状のアンカーやケーシングを採用し、ケーシング引き抜き時のドレーンの**共上り**を防止

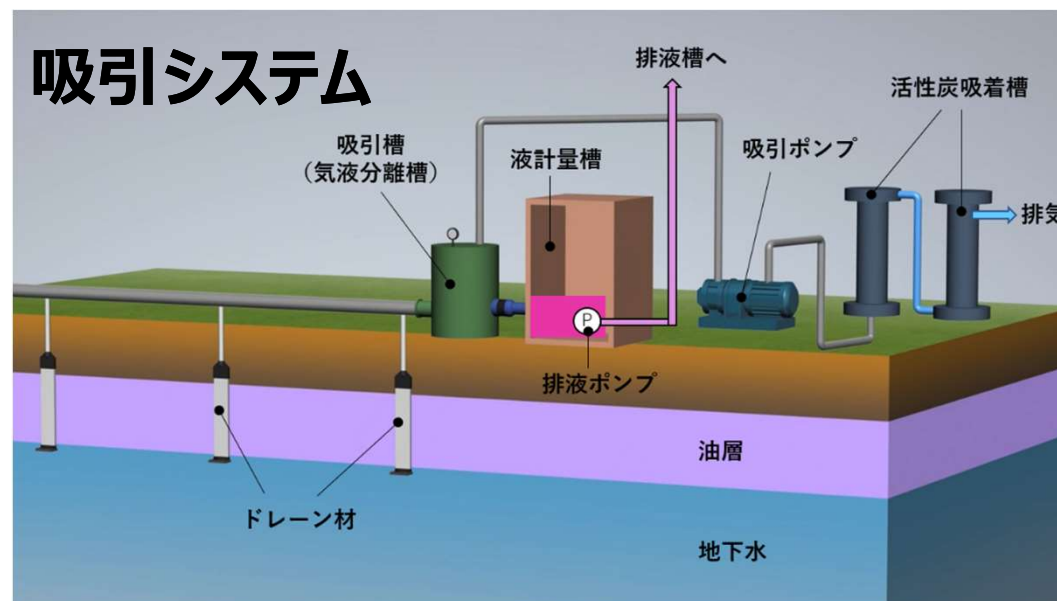
→正確な深度にドレーンを設置

= 安定した油回収効果

3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 – 実適用事例

■適用サイト概要

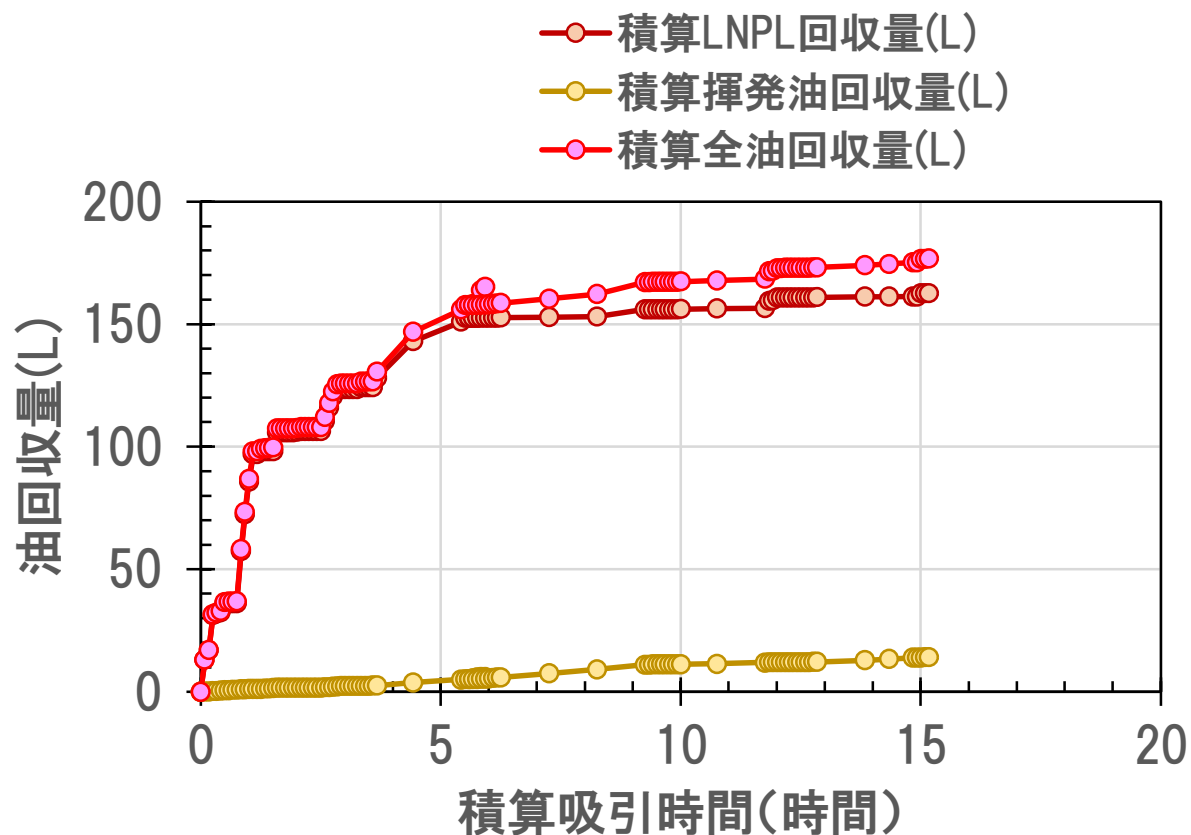
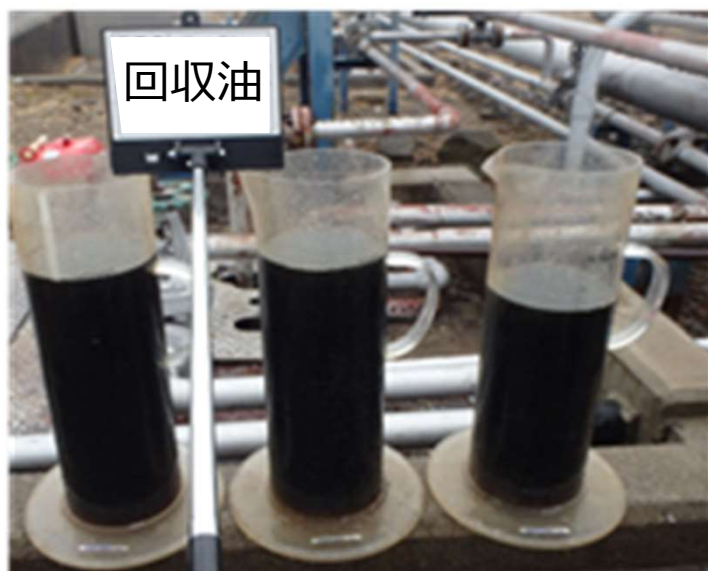
- ・ガソリン成分を主体とした油
- ・LNAPLは、表層より1mほどの深度、層厚は、最大で1mを超える
- ・地盤はシルト分を含む細砂が主体
- ・約2m間隔でドレーンを数10本設置



3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 – 実適用事例

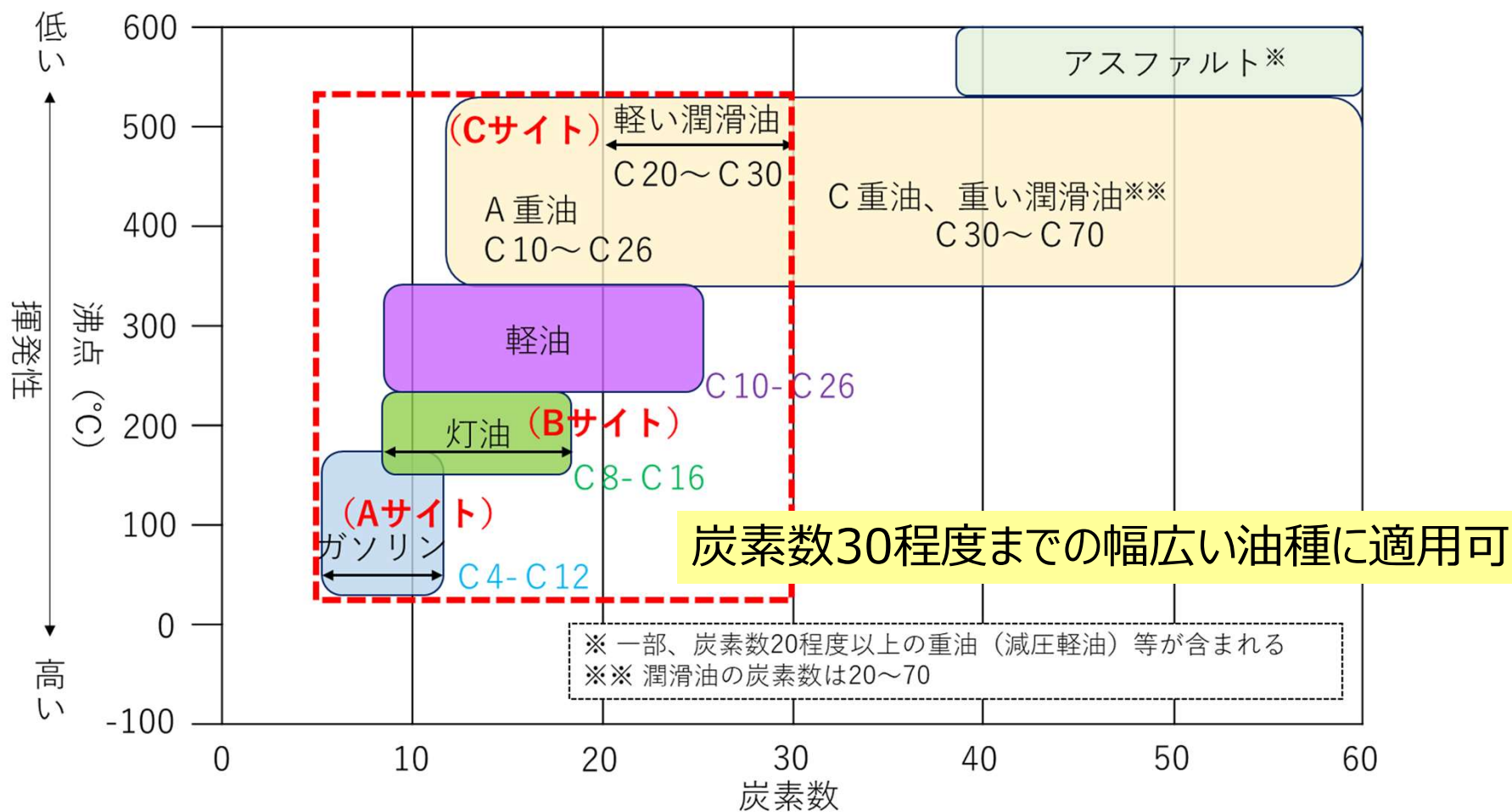
吸引試験

- ・10分程度の吸引時間でバッチ吸引
- ・1回あたり数L程度の回収の繰り返し



結果 ・積算吸引時間15時間、油160L回収

3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 – 適用範囲

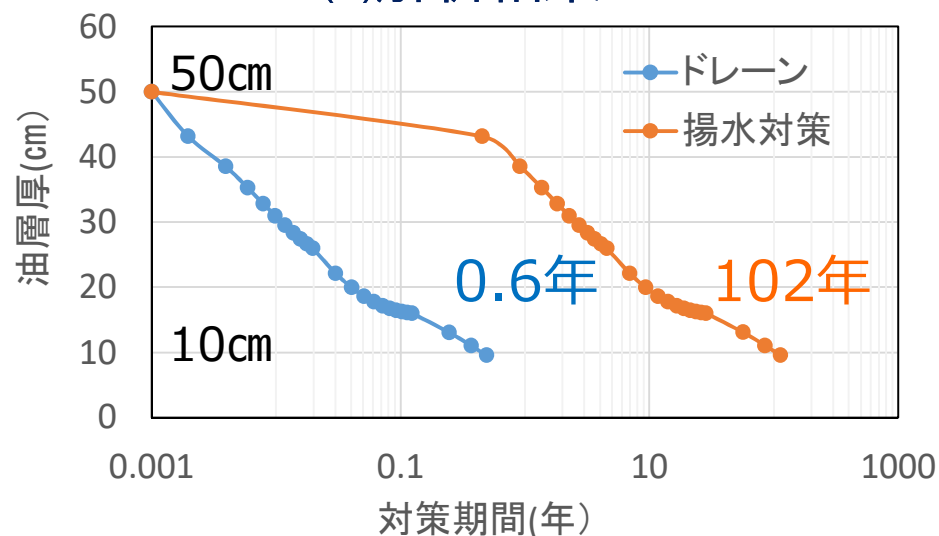


3-1 ドレーン工法を用いたLNAPL除去 - コスト試算事例

(1)解析条件

土質	砂、砂礫
透水係数	5.3×10^{-5} m/sec
油種	軽油
油層厚	50 cm
対象面積	2827 m ²

(2)解析結果

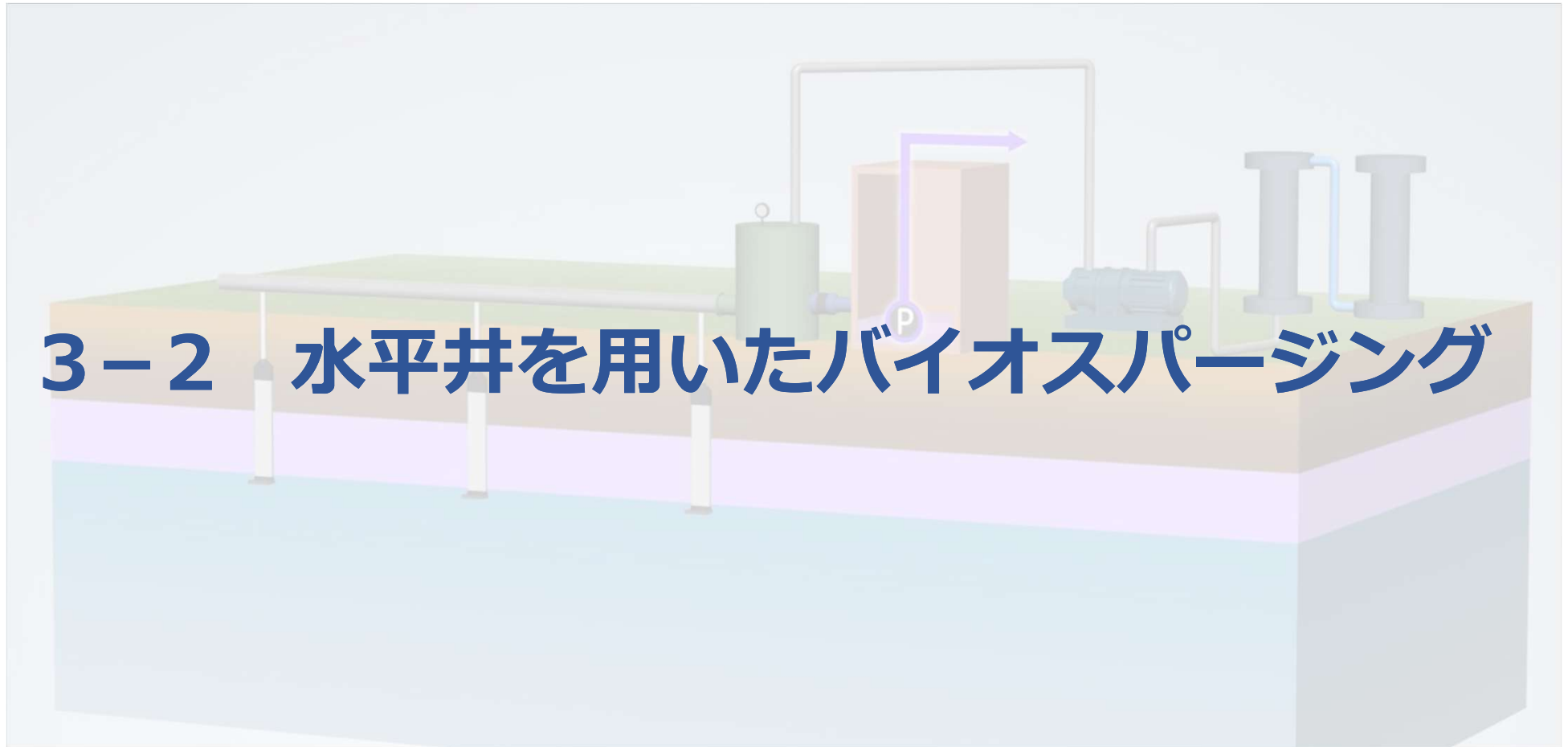


試算条件：揚水量とすべてのドレーンの揚水量の合計が同じになるようにドレーンの本数を設定

(3)試算結果

- ・ **イニシャルコスト** は揚水対策の **3倍強**
- ・ **ランニングコスト** が揚水対策の **1/7**
- ・ **総コスト** は揚水対策の **1/6** に大幅にコストダウン

3. ベンゼン汚染の原位置対策技術

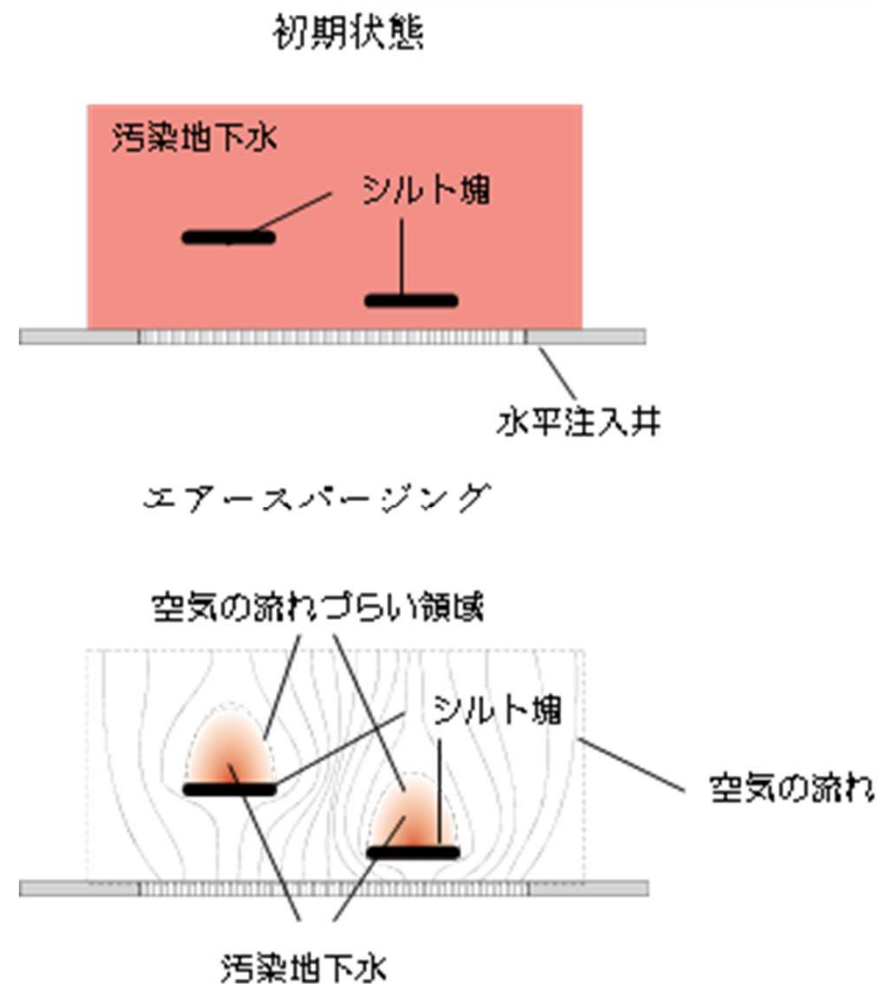
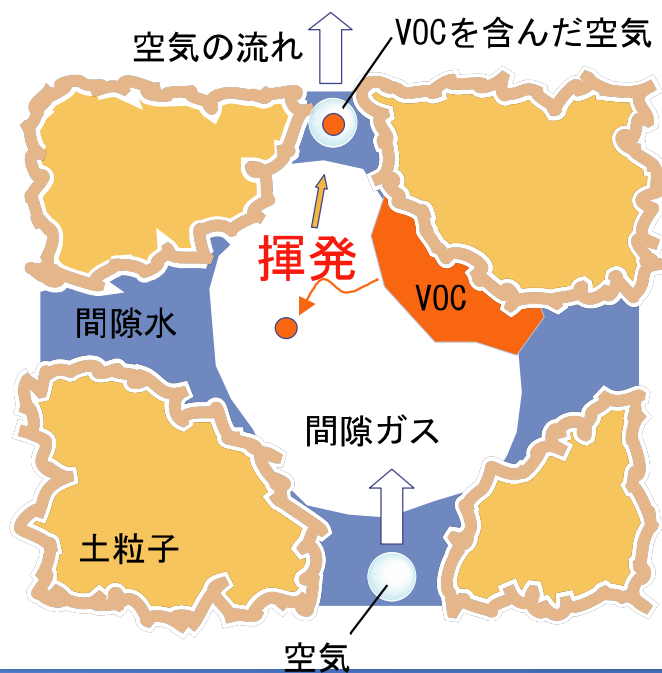


3-2 水平井を用いたバイオスパーキング

3-2 水平井バイオスパーキング - エアースパーキング

1) エアースパーキング工法

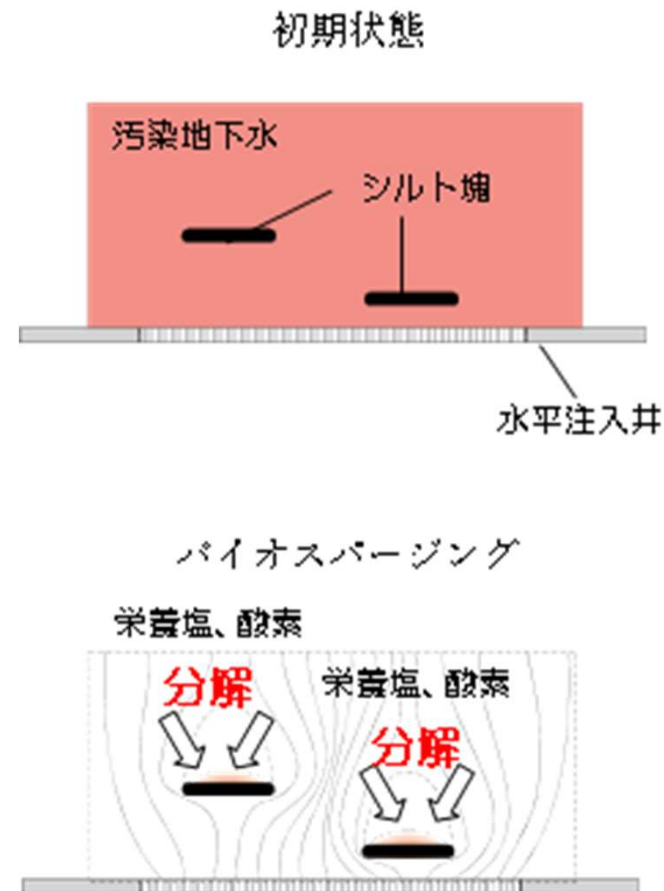
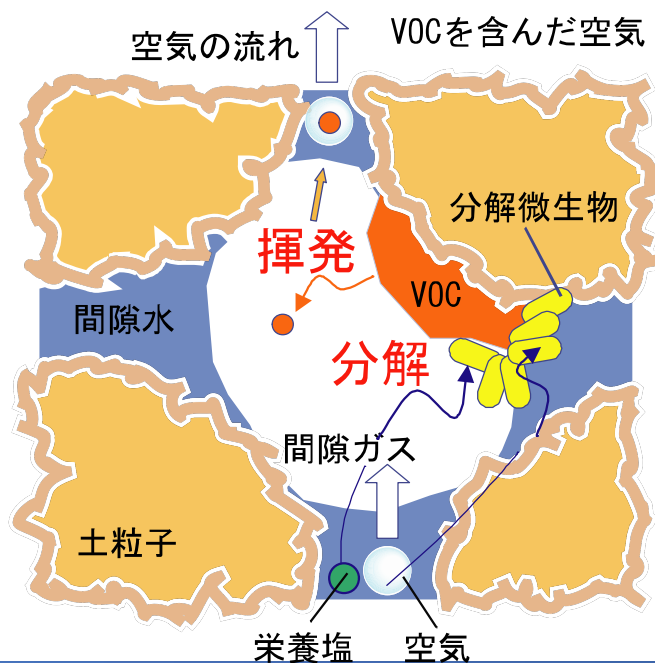
VOCに汚染された地盤に**空気**を注入することで、VOCの**気化除去**効果により浄化する工法



3-2 水平井バイオスパーキング - バイオスパーキング

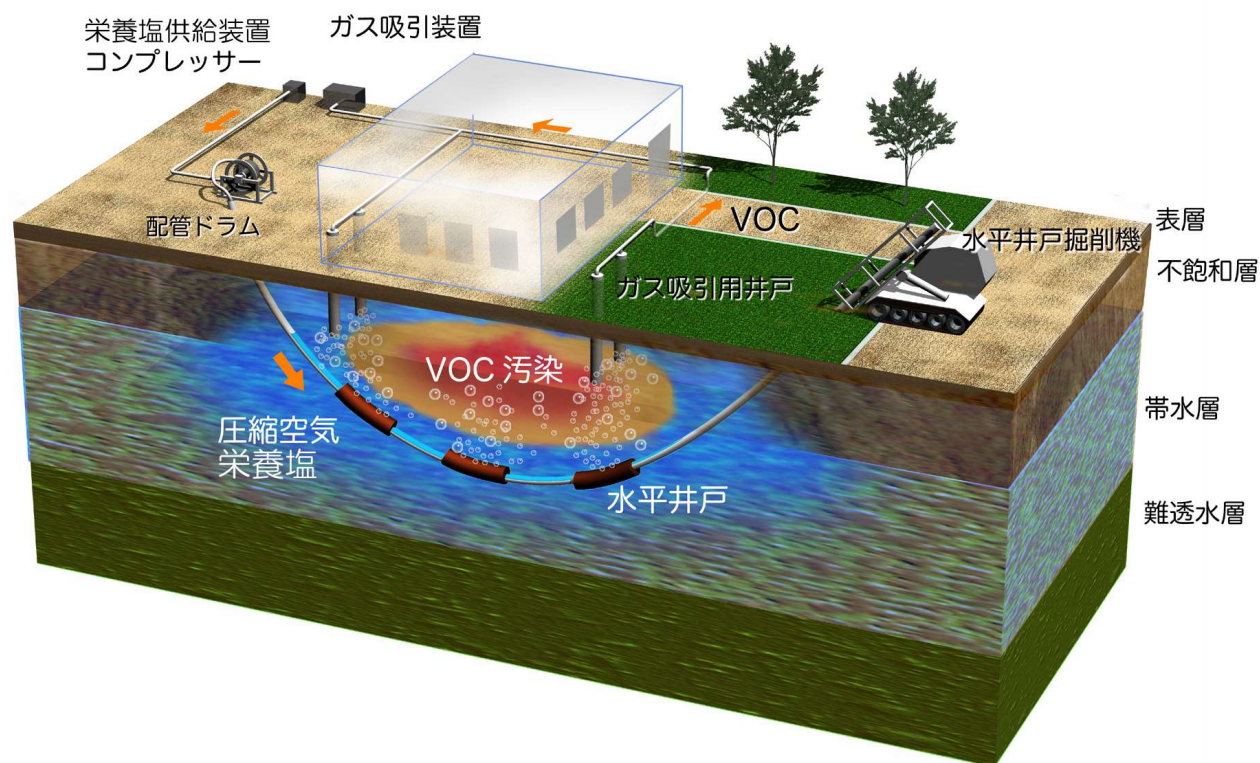
2) バイオスパーキング工法

VOCに汚染された地盤に**空気と栄養塩**を注入することで、VOCの**気化除去効果**と共に**微生物分解効果**により浄化する工法



3-2 水平井バイオスパーキング - 特徴

3) 水平井を用いたバイオスパーキング工法



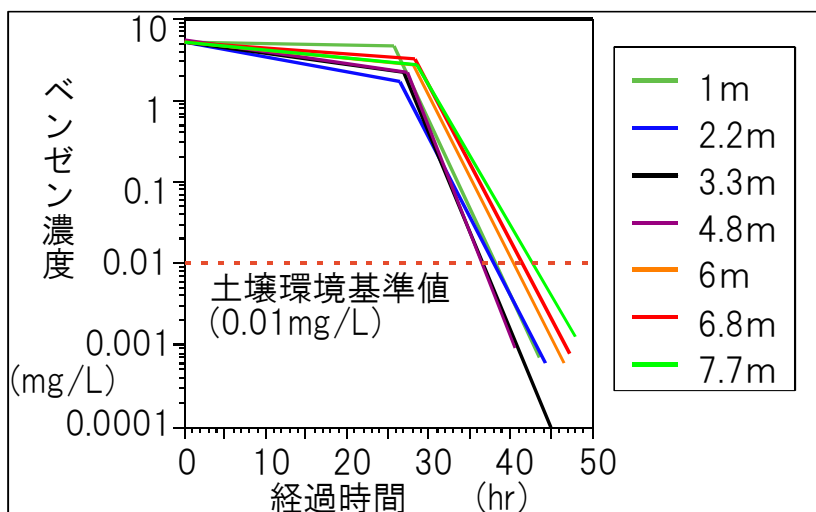
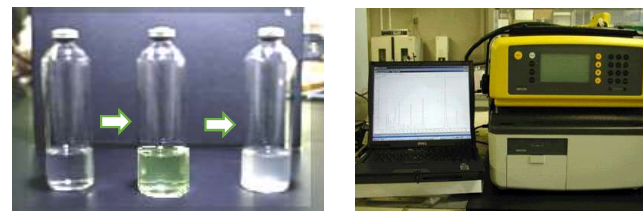
① 高いエア-供給能力
エア-の注入孔が水平方向に長いいため地盤内でエア-が拡散しやすい。鉛直井の数倍の範囲にエア-を供給できる

② 建屋下への適用
稼働中の工場下などへ適用可能

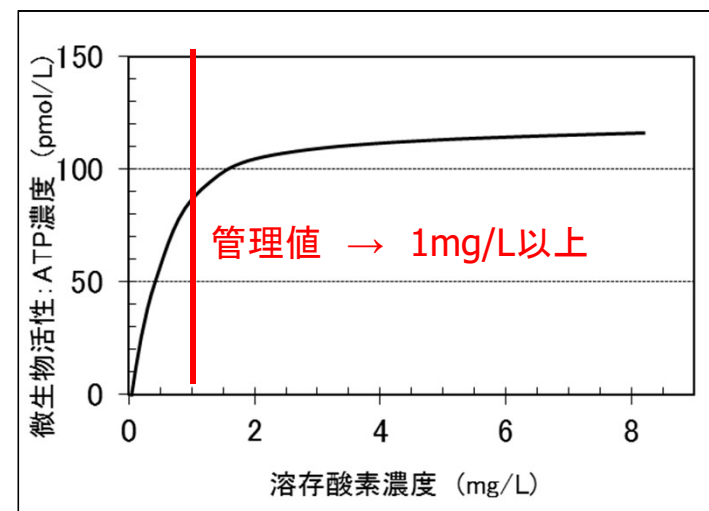
3-2 水平井バイオスパーキング - 適用可能性試験

■ 室内での適用可能性試験の事例

- ①対象サイトの土壌のベンゼン分解ポテンシャルを評価
(土着分解菌の有無)
- ②浄化管理値の設定、浄化条件の最適化

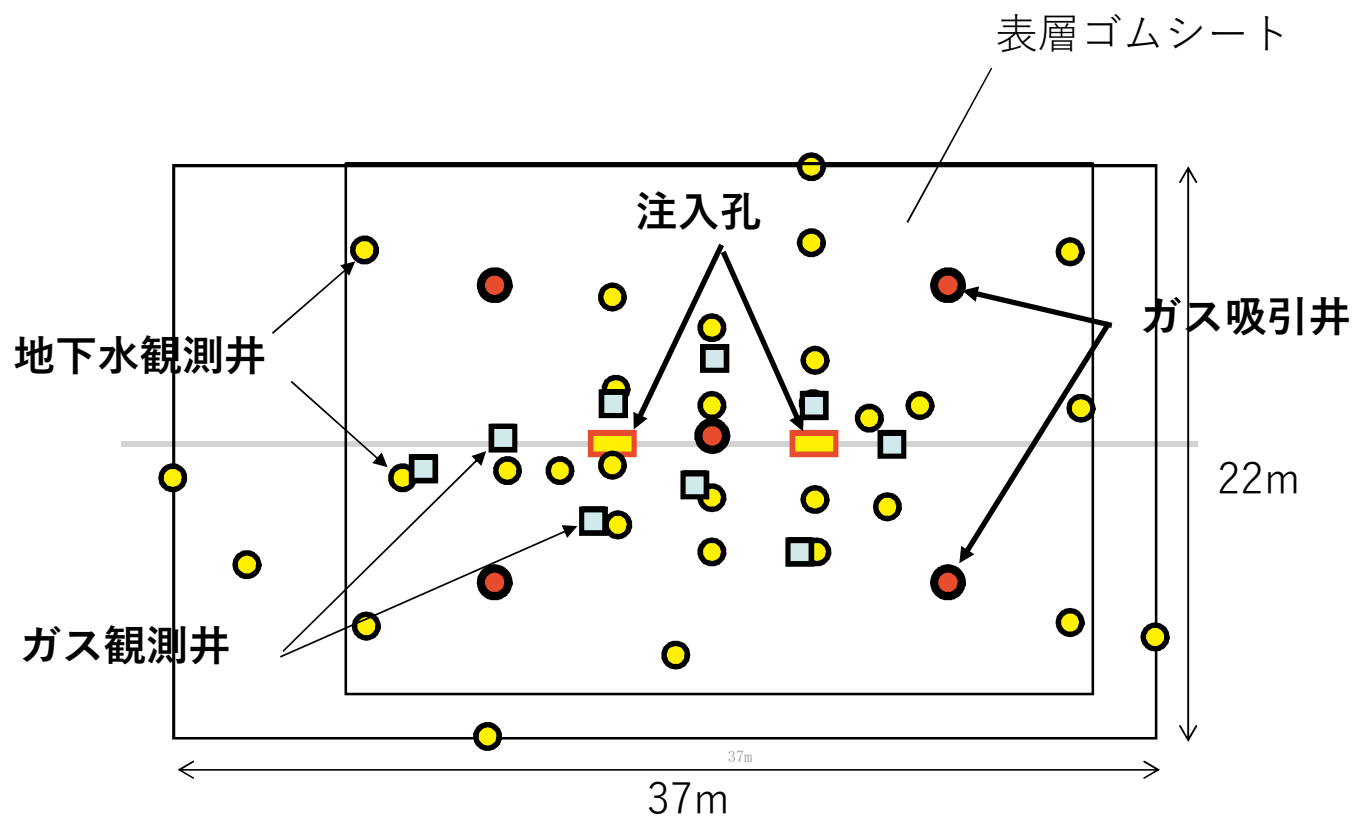






土着のベンゼン分解菌の存在の確認



溶存酸素濃度管理値 → 1mg/L

3-2 水平井バイオスパーキング – サイトの概要



- 水平井 1本
-  スパーキング孔 2カ所
(地下水面下4m)
- モニタリング地点
注入孔 2ヶ所
-  ガス吸引井 5ヶ所
-  地下水観測井 19ヶ所
-  ガス観測井 9ヶ所
- モニタリング頻度40回

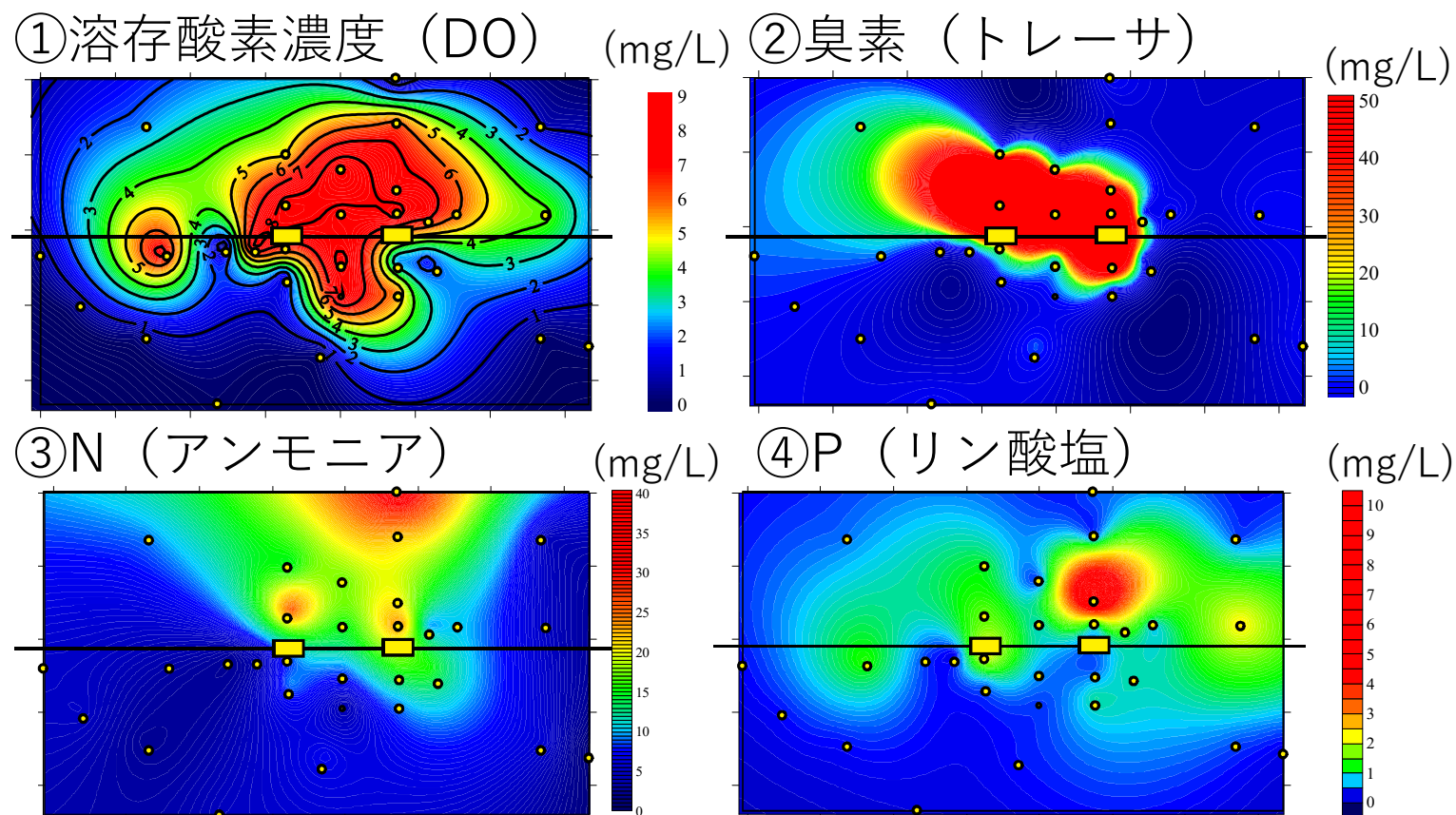
3-2 水平井バイオスパーキング – 運転条件

- 運転期間：100日中のべ86日間稼動
- 運転条件

	流 量	総 量
エアー注入	平均 374 L/min (187 L/m×2)	46,316 m ³
ガス吸引	平均 622 L/min	77,028 m ³
栄養塩溶液注入	平均 105 L/day	9 m ³
栄養塩注入	平均 0.2 kg/day	19 kg (N:4kg、P:14kg、他:1kg)

3-2 水平井バイオスパーキング – モニタリング結果

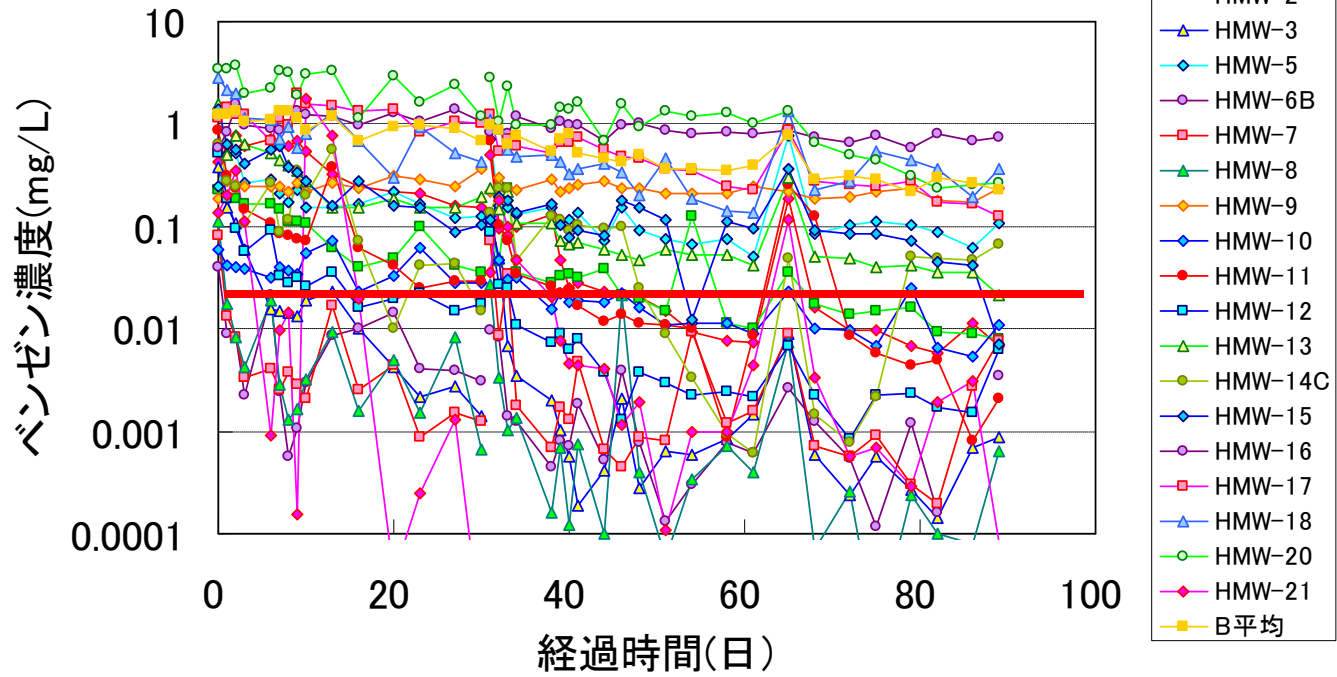
1) 微生物活性要因 (酸素、栄養塩) の分布状況(約2ヵ月後)



3-2 水平井バイオスパージング - ベンゼン濃度

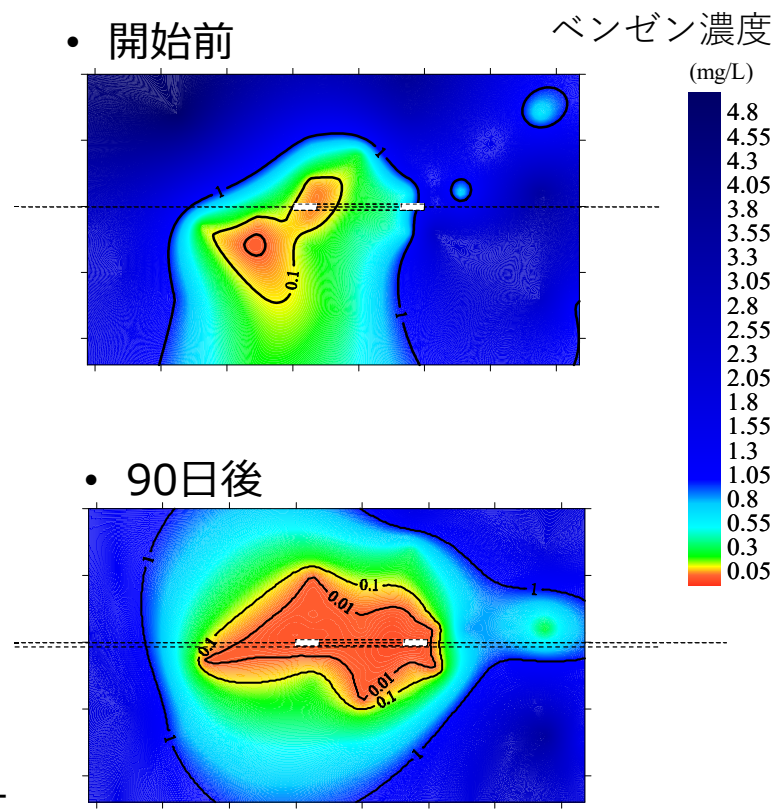
2) ベンゼン濃度

①観測井でのベンゼン濃度経時変化



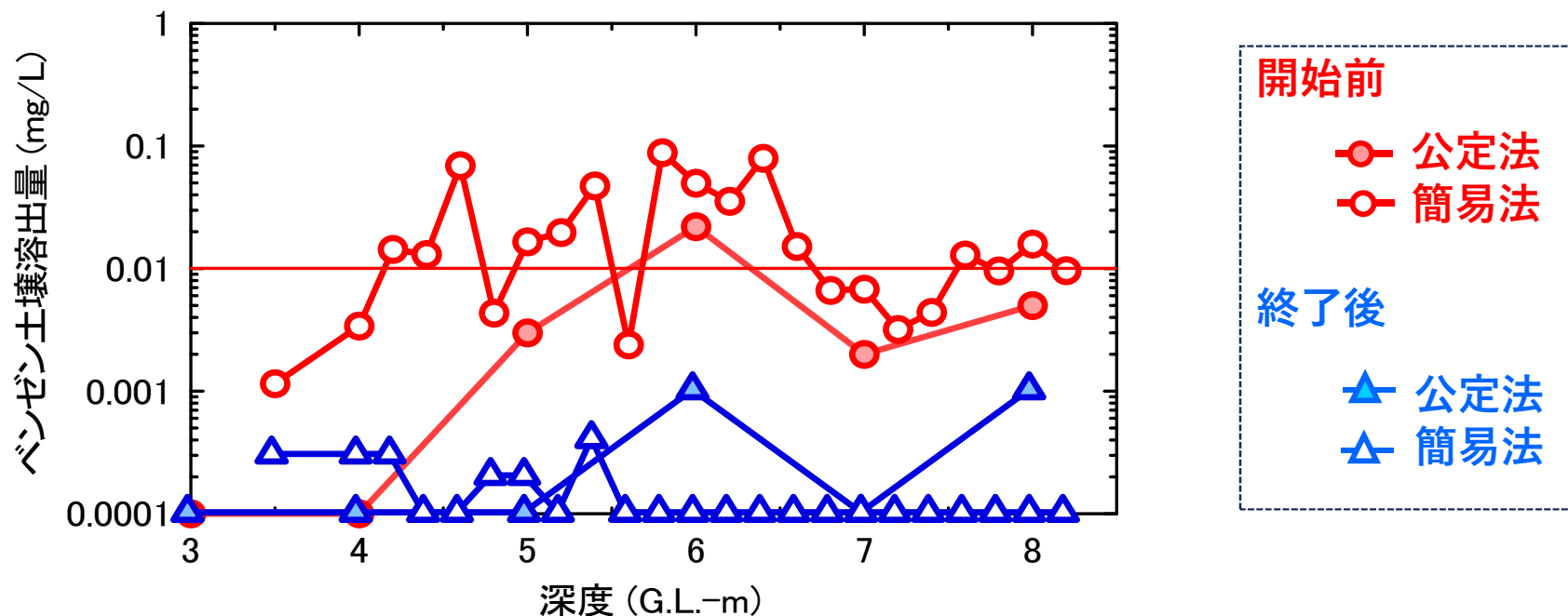
- 浄化効果は、注入井に近いほど高い。
- 3ヶ月間で、浄化範囲は50m²程度。経過時間と共に外側に拡大

②ベンゼン濃度コンターの变化



3-2 水平井バイオスパーキング – 土壌の浄化効果

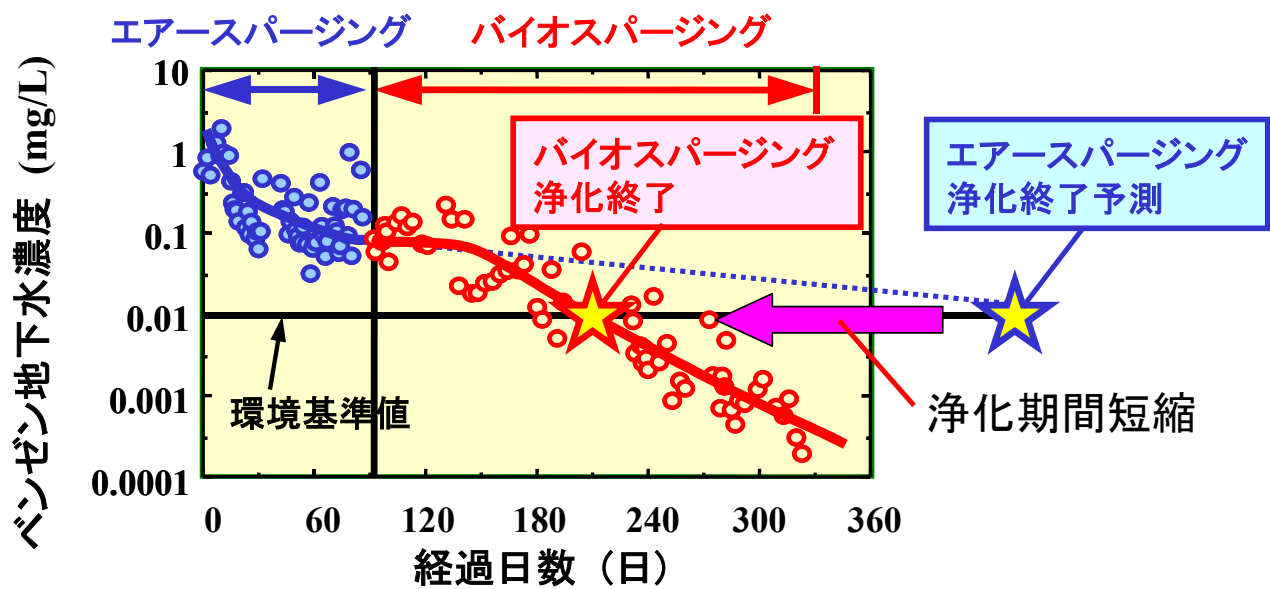
3) 土壌の浄化効果検証ボーリング



- 注入孔から1m離れの地点で土壌ボーリングを実施。
- 公定法と共に、20cm毎の現場簡易分析（PID-GC）により土壌溶出量を評価。
- 土壌溶出量は公定法、簡易法共に10分の1以下に低下し、土壌の基準適合を確認。

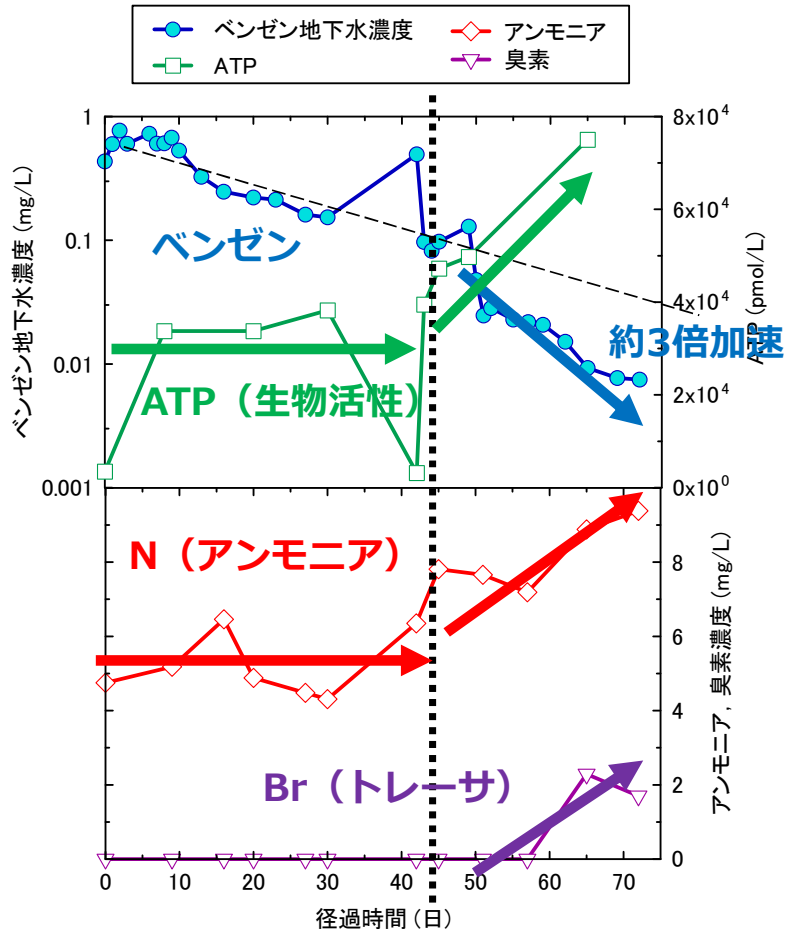
3-2 水平井バイオスパーキング - エアースパーキングとの比較

①同一サイトでのエアースパーキングとの比較



・エアースパーキングは、運転開始後1か月程度は、指数関数的に濃度低下したが、その後数か月は濃度低下が頭打ち

②5m離れた井戸への栄養塩の到達前後



3-2 水平井バイオスパーキング - 浄化効果比較 (コスト試算)

工法名	初期濃度の1/10に浄化		初期濃度の1/100浄化	
	期間	コスト比	期間	コスト比
水平井バイオスパーキング	65日	100%	391日	100%
水平井エアースパーキング	183日	107%	1095日	121%
鉛直井エアースパーキング	183日	128%	1095日	131%
揚水対策	1643日	136%	3322日	138%

【試算条件】50m×50mの敷地面積で、地下水面はGL-4mで5m厚の帯水層を浄化対象とする。土質は細砂層、透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm/sec}$ 、ベンゼンの遅延係数は3.0、自然地下水流速の影響はないものとする。揚水処理法は水の入れ替わりにより計算される日数を浄化期間とし、エアースパーキングやバイオスパーキングは試験結果に基づき浄化期間を算出した。なお、コスト算出に当たり、水平井スパーキング井は4本、鉛直スパーキング井は60本、揚水井は3本とし、観測井は含まれていない。揚水処理法は、活性炭で処理後、下水放流とし、スパーキング法では、排ガスを活性炭処理とした。いずれの工法もモニタリング費用は含まない。

おわりに

「～による土壌・地下水汚染」に対する**オールマイティーな対策法は存在しない**

土壌汚染対策技術は多種多様に存在 ⇒ 必然

理由：必要とされる要因が複合し、ニーズ自体がサイト毎に多種多様
(要因：①対象物質、②サイトの諸条件、③対策の目標、④経済合理性、
⑤対策期間、⑥法・行政の要求 等)

多種多様な対策技術をサイトの要因に合わせて技術的に整理し、サイト毎に最適解を見出すことが重要

～令和6年度土壤汚染対策技術セミナー（録画配信）～

ご清聴ありがとうございました

100年をつくる会社

in 鹿島

技術研究所
地球環境・バイオグループ
河合 達司