

岩手・青森県境廃棄物不法投棄現場

第8回汚染土壌対策技術検討委員会

2009年2月12日

～目次～

1.土壌・地下水汚染調査結果	1
1.1 調査概要	1
1.2 土壌汚染調査	1
1.3 地下水汚染調査	2
1.4 結果	2
2.地盤調査結果	3
2.1 地盤調査概要	3
2.2 地質構造	3
2.3 標準貫入試験	4
2.4 室内土質試験	4
2.5 孔内流向流速	5
2.6 現場透水試験	6
3.現場適応性試験結果	7
3.1 加圧注入・揚水バッキ	7
3.2 バイオレメディエーション	9

<Appendix>

---

- 1.分析結果一覧表
- 2.土壌汚染3次元コンター図
- 3.地下水汚染コンター図
- 4.地質想定断面図

## 1. 土壤・地下水汚染調査

### 1.1 調査概要

調査は油圧式ロータリーボーリングマシンを用い、孔径φ66mmで打撃貫入法によるオールコアボーリングを行った。コアの採取はビニールパック内蔵のオープンチューブサンプラーを使用し、孔壁崩壊の防止及び汚染地下水の拡散防止のためφ86mmのケーシングパイプを逐次挿入した。

採取したコアは、土壤汚染調査のため現場において簡易分析により第一種特定有害物質の測定を行った。

また、合わせて適宜、環告18号による公定法分析を行い汚染深度の確定を行った。

地下水についてはボーリング調査後、井戸仕上げを行いモニタリング井戸を設置し、定期的に地下水質を測定し、地下水汚染の状況を把握した。

図-1.1 にボーリング調査位置図及びモニタリング井戸の設置状況を示す。

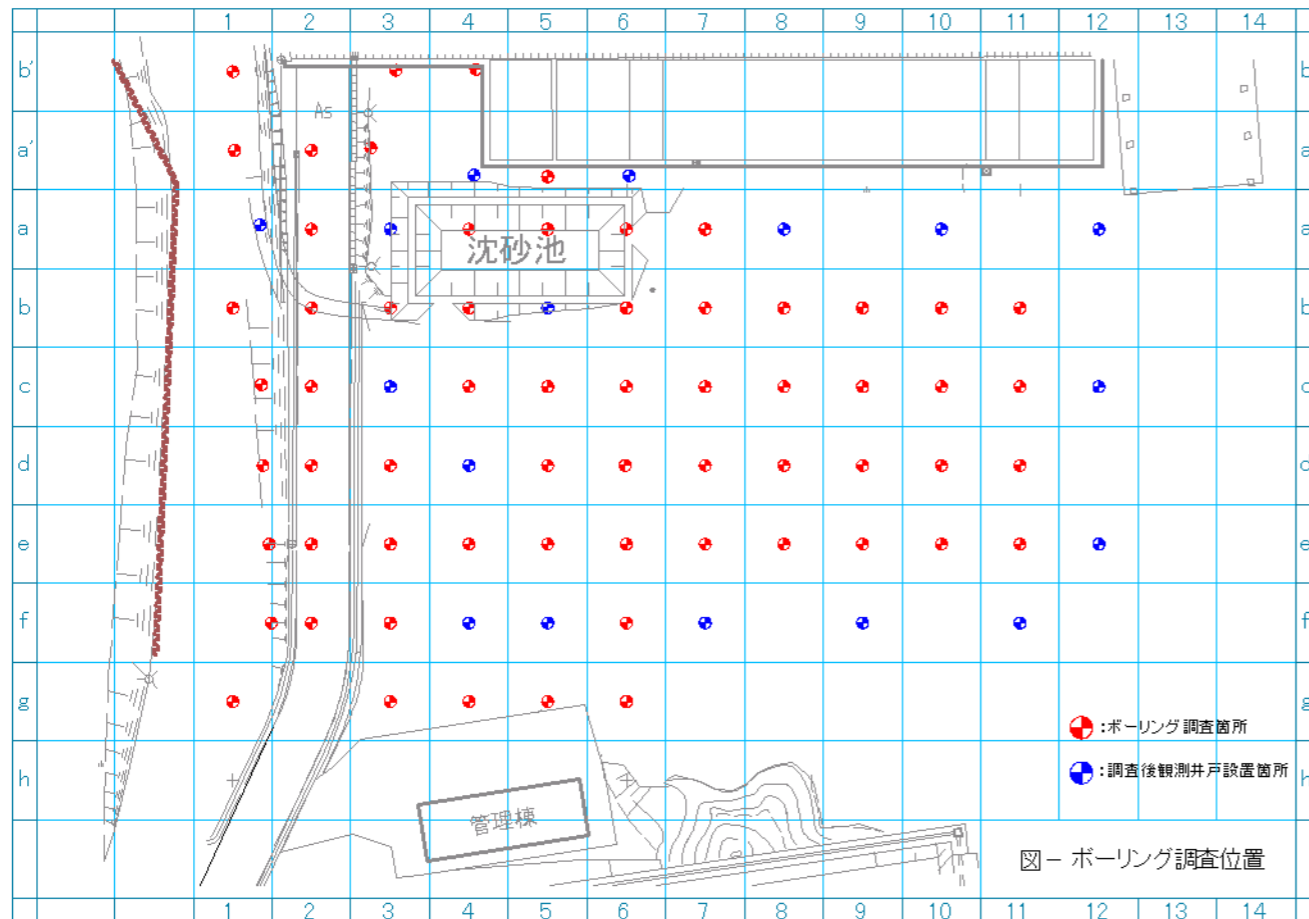


図-1.1 ボーリング調査位置図

### 1.2 土壤汚染調査

図-1.2 に簡易分析結果に基づいた汚染の広がりを表す土壤汚染マップを示す。

調査より、汚染の広がりはおもとより、深度方向における結果より、当サイトにおける汚染の3次元的の広がりを把握することが出来た。

詳細については、下記の資料を参照されたい。

<参照資料>

Appendix.1 分析結果一覧表

Appendix.2 土壤汚染3次元コンター図

Appendix.4 地質想定断面図

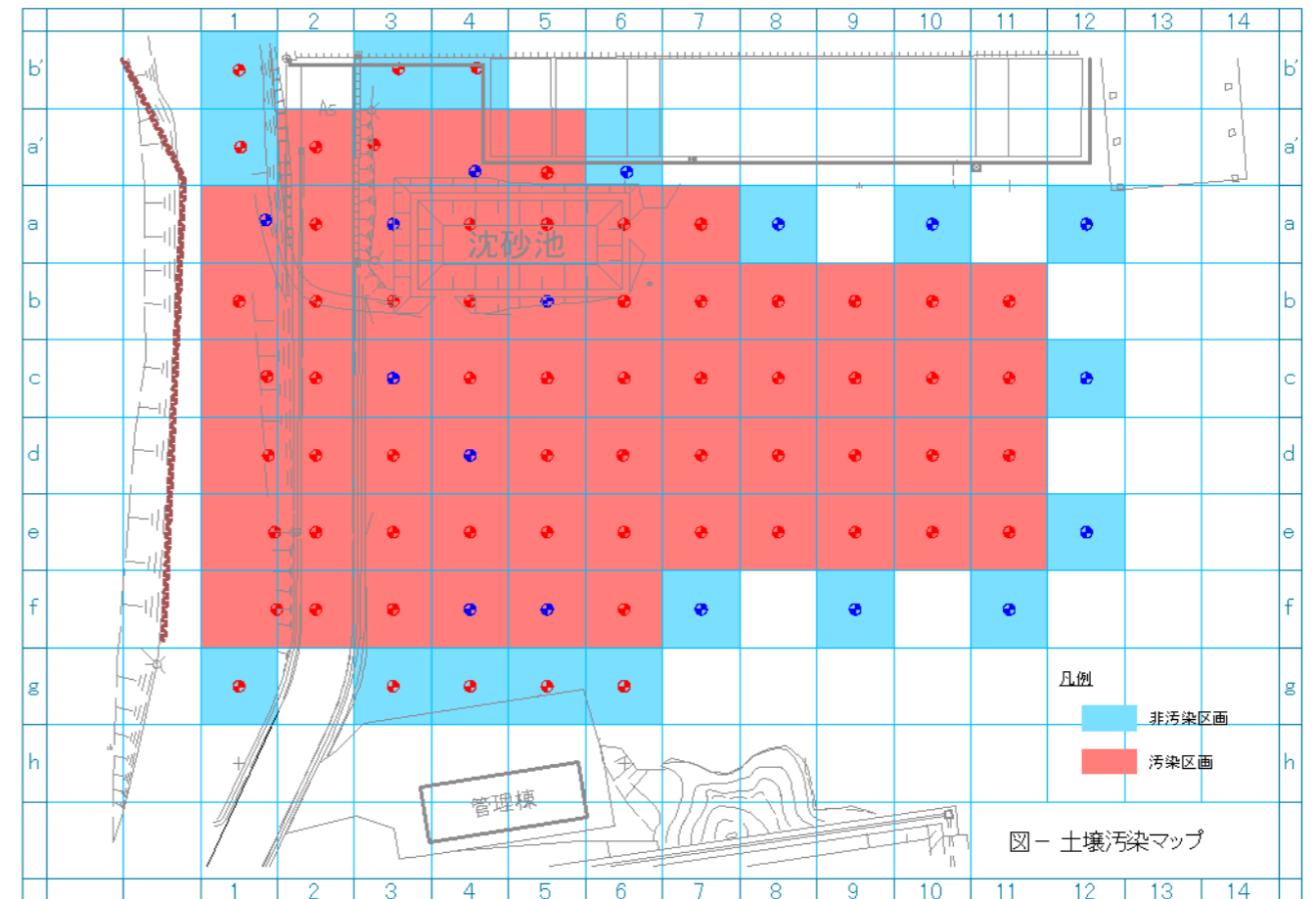


図-1.2 土壤汚染マップ

### 1.3 地下水汚染調査

図-1.3に各モニタリング井戸における地下水質の簡易分析結果より得られた、地下水汚染マップを示す。  
結果より、地下水汚染の範囲(調査単位区画)は土壤汚染の範囲よりも広い可能性があることが示唆された。今後、浄化対策に伴いさらに範囲を限定するための調査が必要と思われる。  
詳細については、下記の資料を参照されたい。

<参照資料>

Appendix.3 地下水汚染コンター図

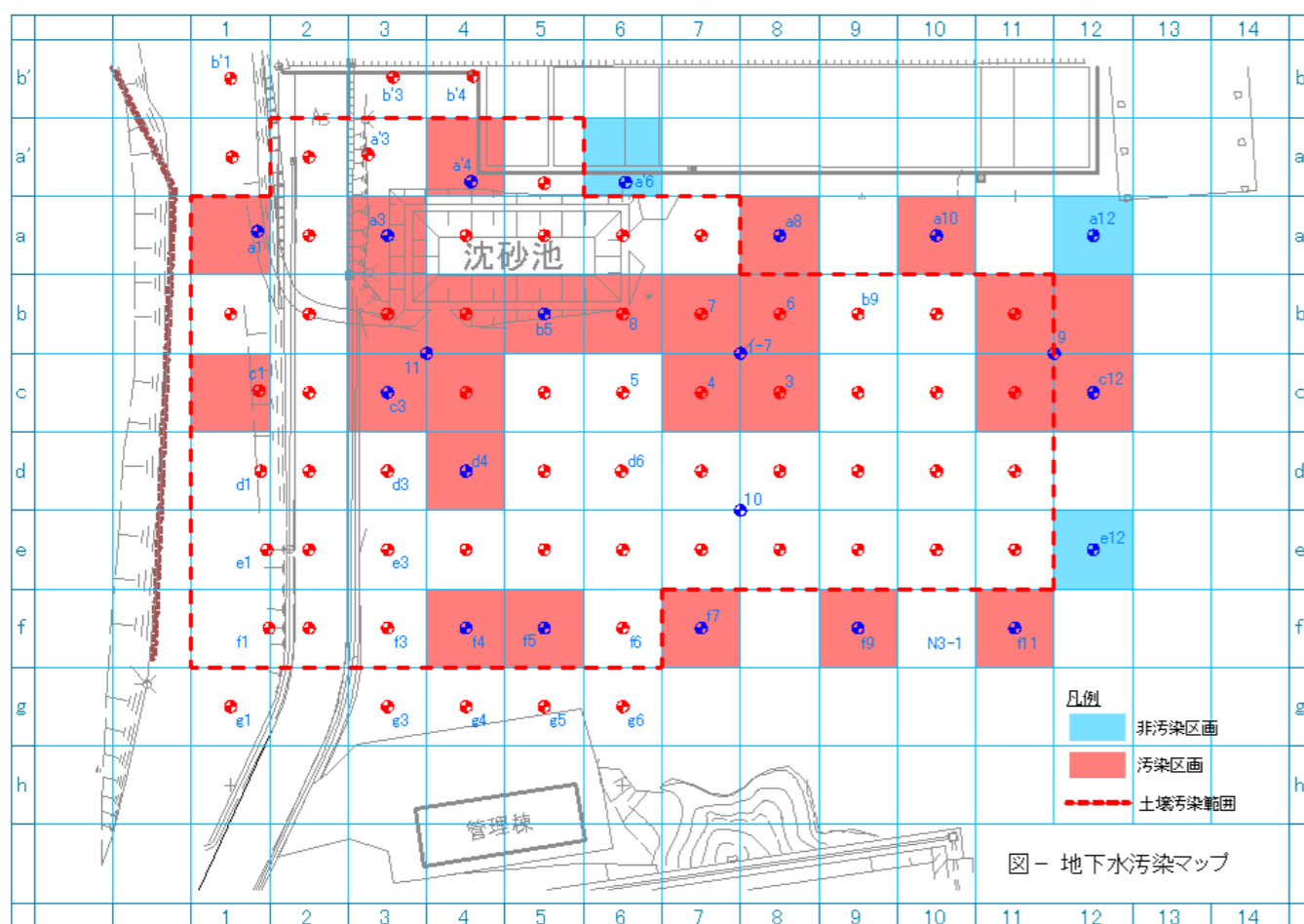


図-1.3 地下水汚染マップ

### 1.4 調査結果

調査結果を以下に示すと共に、図-1.4に当サイトにおける汚染の拡散の推定モデルを示す。

- ① 汚染源付近に位置する b-9 では、パミス層及び火山灰層を介して VOC が地下深部に浸透している。
- ② 飽和帯に達した VOC は、地下水の流動方向である南西方向に移動する。
- ③ b-9 から南西方向の d-6~f-4 方向に移動した VOC は、地形地質上の尾根にあたり、移動方向を地層の傾斜方向である北西方向に変える。
- ④ この後、VOC は d-3 を経由して県境の e-1 及び a-1 付近に達する。
- ⑤ 汚染源より北側に位置する a'-6~a-12 付近では VOC の拡散はほとんど認められない。
- ⑥ また、地形・地質上の尾根である c-12~f-7 ラインより南東側でもボーリングコアでは、ほとんど VOC の拡散は認められていない。
- ⑦ しかしながら、地下水中の VOC は上記の尾根を越えて検出されている。これは、N地区南部の地下水位低下部に向かって汚染地下水が流動しているためと考えられる。

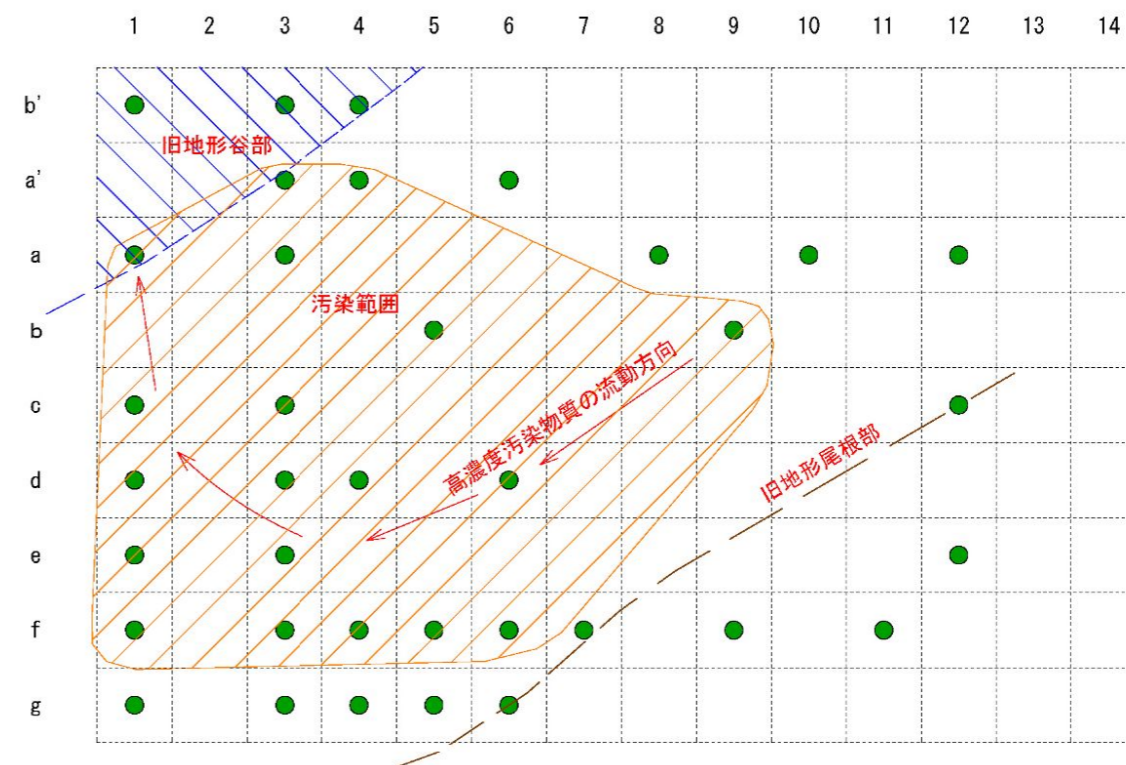


図-1.4 当サイトにおける汚染の拡散の推定モデル

## 2.地盤調査結果

### 2.1 地盤調査概要

土壌汚染のボーリング調査にて得られたコアの観察より、当サイトにおける地質構造を把握すると共に、下記に示す室内および現場試験により、詳細な地盤状況の把握を行った。

	試験項目	目的
室内試験	粒度試験 湿潤密度試験 一軸圧縮試験	物理特性、力学特性の把握
現場試験	標準貫入試験 現場透水試験 孔内流向流速試験	地盤の硬度の把握 各層における平均透水係数の把握 地下水の流向流速の把握

### 2.2 地質構造

表-2.1には、当サイトにおける地質構成を示すと共に、各層の性状と当サイトにおける地層区分別の汚染状況の概要を下表に示す。

表-2.1 当サイトにおける地質構成

地層区分	土質・岩相	記号	色分け	汚染状況概略	
第四紀	①覆土・盛土	b			
	廃棄物	wa			
	①埋土	f			
	河床堆積物	砂質土	S		
		粘性土	c		
	②降下火砕物1	ローム主体	af2		
	③降下火砕物2	a：パミス層	af1		
		b：火山砂			
		c：火山灰			
		d：ローム			
④角礫凝灰岩	e：強風化岩	Tb			
	f：軟岩				

(出典：「県境不法投棄現場西側県境部地下水対策調査業務報告書、平成19年3月」)

#### ①埋土 (b)

N地区の表層に分布する埋土である。旧地形を埋積した埋土であり、N地区北西部で厚く、層厚は最大で14mに達する。一方、南東部では薄く、層厚は0.5m以下となっている。

本層は、ローム、黒ボク、軽石、火山砂等の混合物からなる。これらは均質に混合している部分もあるが、不均質に混合している部分では層状に堆積しているように見える。コアは崩れ易く、コンクリート片、ビニール片等の人工物の他、φ30~100mm程度の礫を混入する。

#### ②降下火砕物2：ローム主体 (af2)

埋土の下位に分布する地山のロームである。層厚は2m前後であるが、N地区北側の旧谷地形部では欠除している。本層は比較的均質なロームであるが、有機物や軽石を混入する。また、本層下部ではφ2~5mm程度の礫が数多く認められる。この他、層厚10cm以下の火山砂の薄層がまれに認められる。

#### ③降下火砕物1 (高館火山灰層)

##### a：パミス層 (af1)

ローム (af2) の下位に分布する高館火山灰層に属する赤褐色のパミス層であり、N地区における明瞭な鍵層である。層厚は1~1.5m程度であるが、N地区北側の旧谷地形部では欠除している。

本層は高含水であるφ10~20mm程度の赤褐色軽石とφ2~5mm程度の黒色火山砂の集合体である。このため、コアは崩れ易くバラバラになりやすい。本層下部はやや細粒であり、黒色火山砂や乳白色火山灰の薄層を挟在する。

##### b：火山砂 (af1)

パミス層と火山灰との間に分布する火山砂である。層厚は0.2~0.3m程度であるが、一部0.8~0.9m程度の層厚を示す箇所や全く欠除している部分も認められる。

本層は上部の火山灰質粘性土と下部の黒色火山砂からなる。火山灰質粘性土は火山砂を多く含む他、φ2~4mm程度の火山礫や軽石を混入する。

##### c：火山灰 (af1)

ローム (af1) の直上に分布する乳白色の火山灰であり、N地区における明瞭な鍵層である。層厚は0.5~1m程度であるが、N地区北側の旧谷地形部では欠除している箇所も認められる。

本層は粘土化したφ5~10mm程度の乳白色軽石とφ1~2mm程度の黒色火山砂からなる。含水が多く粘土化が著しいため、コアはベトベトした状態となり、極めて軟く粘性も大きい。本層下部には黒色火山砂の薄層が認められる。

##### d：ローム (af1)

降下火砕物1 (af1) の最下部に分布するロームである。層厚は2~6m程度であるが、N地区西側で薄くなる傾向がみられる。本層は含水の少ない比較的均質なロームであり、粘性が強く所々、有機物を混入する。上位の火山灰との境界付近ではφ5~10mm程度の青灰色凝灰岩礫や軽石を混入する。

また、下位の強風化岩との境界部付近でも礫を混入する。礫混入が認められる下方部は、高含水状態になっており赤褐色を呈する。この箇所には、下方の透水性の低い強風化岩との透水性の相違によって帯水部となっていると考えられる。また、礫を混入していることから周囲に比べ比較的透水性が高いと推測される。加えて火山砂等の砂質土の薄層を挟在しており、含水も多く比較的良好的な帯水層と判断する。

#### ④角礫凝灰岩 (高館火山灰層)

##### e：強風化岩 (Tb)

岩盤上部の強風化岩であり、平均的な層厚は2~6m程度であるが、N地区南側では12~13m程度と厚くなっている。

本層は著しく風化粘土化した火山礫凝灰岩からなり、φ10～30mm程度の火山礫を多く含有する。この他、細粒凝灰岩や軽石凝灰岩を挟在する箇所も認められる。

また所々に硬質な未風化部が残存している。地層の傾斜は10～20°程度であり、上位のロームから漸移的に変化する。本層中には局部的に粗粒な部分が存在し、含水が多く軟質化しているため、ボーリング孔内では崩壊や押し出しが認められる。

f : 軟岩 (Tb)

強風化岩の下位に分布する軟岩層である。分布深度は15～20m以深であるが、N地区南東部では24m以深に確認されている。本層は、細粒凝灰岩、火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩、軽石凝灰岩等からなり、地層の傾斜は10～20°程度である。本層上部には粘性が強い灰白色細粒凝灰岩が分布する。比較的硬質で打撃貫入によるコアの採取はほとんど不能である。なお、河床堆積物等は本調査では未確認である。

詳細については、下記の資料を参照されたい。

<参照資料>

Appendix.4 地質想定断面図

2.3 標準貫入試験

標準貫入試験はa-10孔で実施した。以下に、標準貫入試験結果の概要を記す。

①埋土

測定N値はN=0(モンケン自沈)～5が得られている。粘性土としては、“非常に軟らかい”～“中位の”硬さの地層と判断される。

②ローム

測定N値はN=3～5が得られている。粘性土としては、“軟らかい”～“中位の”硬さの地層と判断される。

③軽石

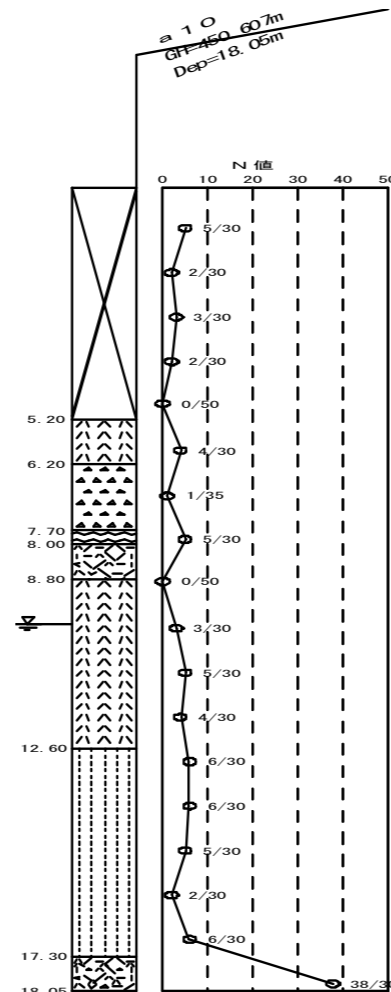
測定N値はN=1が得られている。粘性土としては、“非常に軟らかい”地層と判断される。

④火山灰

測定N値はN=0(モンケン自沈)が得られている。粘性土としては、“非常に軟らかい”地層と判断される。

⑤風化岩

測定N値はN=2～6が得られている。粘性土としては、“軟らかい”～“中位の”硬さの地層と判断される。⑥凝灰岩 測定N値はN=38が得られている。粘性土としては、“固結した”地層と判断される。



2.4 室内土質試験

当サイトに分布する軽石、ローム、風化岩、凝灰岩の物理特性及び力学特性を把握するため、不攪乱試料及び攪乱試料を用いて室内土質試験を行った。表-2.2に土質試験結果を、表-2.3にクレーガーによるD<sub>20</sub>と透水係数の関係式より推定される各土質の透水係数の一覧を示す。

表-2.2 土質試験結果

孔番号	a-10	a-10	a-10	a-10	a-12	a-12	f-4	f-4	f-4
地質名	ローム	ローム	風化岩	凝灰岩	軽石	風化岩	ローム	風化岩	凝灰岩
記号	af2	af1	Tb	Tb	af1	Tb	af1	Tb	Tb
一般	湿潤密度 ρ <sub>t</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.520				1.207	1.510		
	土粒子の密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )		2.868	2.739	2.643			2.666	2.697
	自然含水比 ω <sub>n</sub> (%)		72.3	100.9	48.1			86.8	92.1
粒度	礫分(2~75mm)(%)		0.0	0.2	4.4			0.3	2.7
	砂分(0.075~2mm)(%)		38.3	46.2	34.5			37.1	37.7
	シルト分(0.005~0.075mm)(%)		37.5	32.3	38.0			34.5	36.3
	粘土分(0.005mm未満)(%)		24.2	21.3	23.1			28.1	23.3
	最大粒径(mm)		2	4.75	19			4.75	19
	均等係数 U <sub>c</sub>		*	87.50	*			*	*
分類	50%粒径 D <sub>50</sub> (mm)		0.0378	0.0612	0.0417			0.0368	0.0378
	地盤材料の分類名		砂質粘性土	砂質粘性土	砂質粘性土			砂質粘性土	砂質粘性土
	分類記号		(CsS)	(CsS)	(CsS)			(CsS)	(CsS)
一軸圧縮	一軸圧縮強さ q <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	89.2				48.6	25.8		
	被壊ひずみ ε <sub>f</sub> (%)	3.53				2.68	5.08		
	変形係数 E <sub>50</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	2.95				1.85	0.50		

表-2.3 クレーガーによる透水係数の推定結果

孔番号	試験深度(m)	土質名	20%粒径 D <sub>20</sub> (mm)	透水係数 k (cm/sec)	
				推定値	実測値(地層毎の平均値)
f-4	9.60~9.80	ローム(af1)	0.0015	<3.00×10 <sup>-6</sup>	2.53×10 <sup>-3</sup>
f-4	16.00~16.25	風化岩(Tb)	0.0037	<3.00×10 <sup>-6</sup>	2.20×10 <sup>-4</sup>
f-4	18.00~18.25	凝灰岩(Tb)	—	—	6.30×10 <sup>-7</sup>
a-10	5.15~12.05	ローム(af1)	0.0035	<3.00×10 <sup>-6</sup>	2.53×10 <sup>-3</sup>
a-10	16.15~17.05	風化岩(Tb)	0.0044	<3.00×10 <sup>-6</sup>	2.20×10 <sup>-4</sup>
a-10	17.75~18.05	凝灰岩(Tb)	0.0036	<3.00×10 <sup>-6</sup>	6.30×10 <sup>-7</sup>

## 2.5 孔内流向流速

当サイトにおける地下水の流向流速の測定を、熱の拡散を応用した流向流速計「GFD-3」を用いて行った。測定器の構造を図-2.1に示す。また、表-2.4および図-2.2に測定結果を示す。

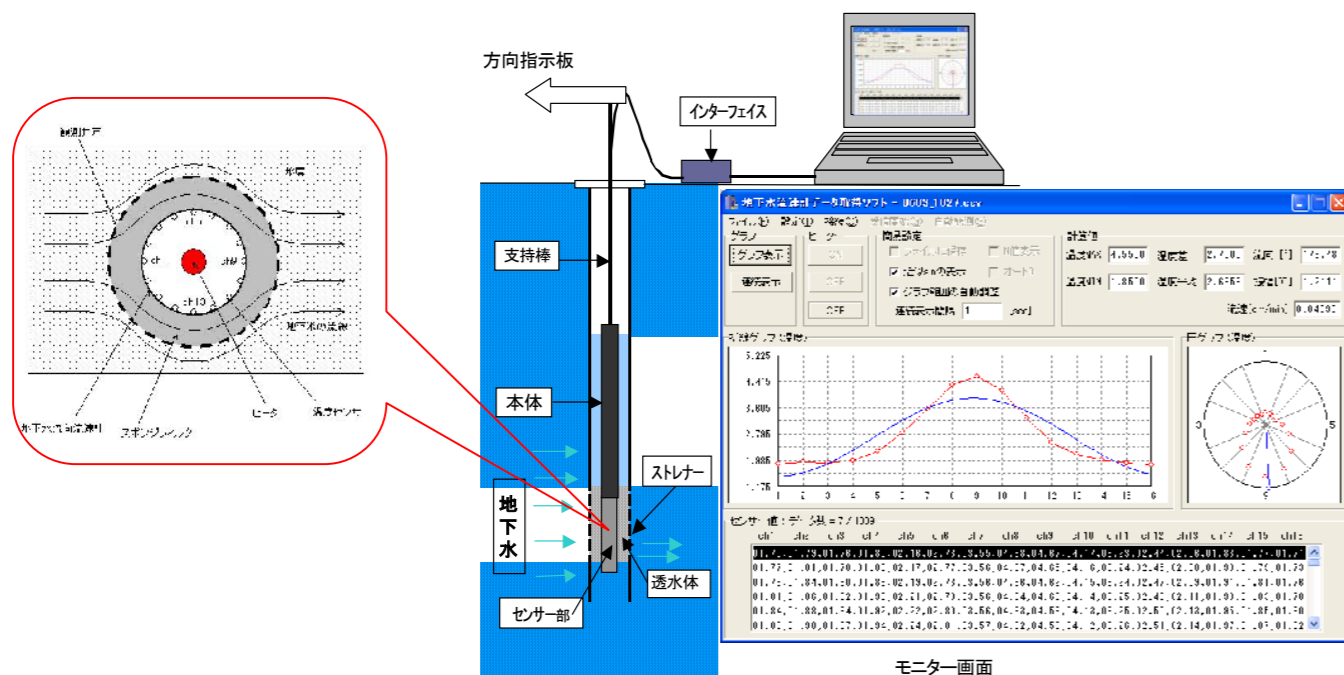


図-2.1 流向流速計「GFD-3」測定器の構造図

表-2.4 流向流速測定結果

観測井No.	測定深度 (G. L. -m)	土質名	流速 (cm/min)	流 向
a-8	11.5	ローム	0.012	北西 (311.5°)
c-3	13.5	風化岩	0.011	南 (169.5°)
c-12	12.0	風化岩	0.046	北北東 (19°)
e-12	10.5	ローム	0.03	北東 (58.4°)
f-5	14.0	風化岩	0.032	西 (260.9°)
f-7	19.5	風化岩	0.08	北西 (304.5°)
f-9	21.0	風化岩	0.08	南 (175.1°)

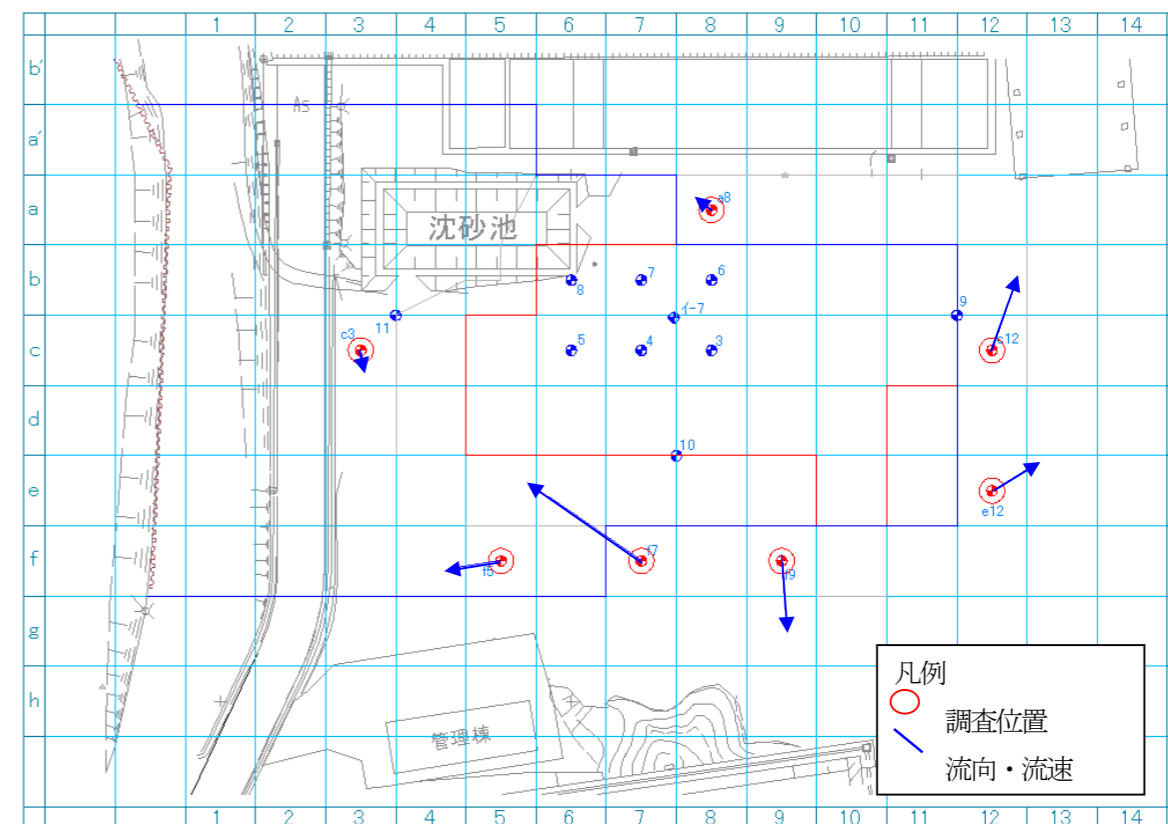
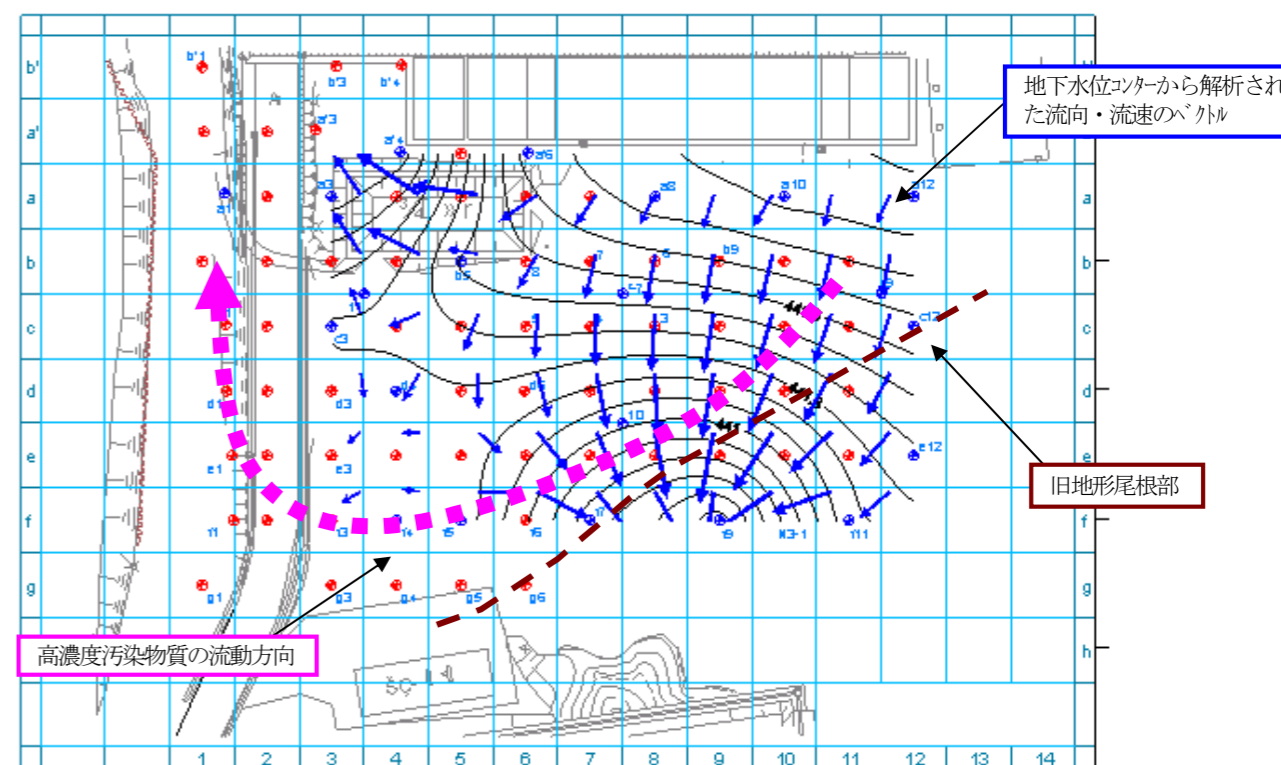


図-2.2 流向流速測定結果



2.6 現場透水試験

地盤の透水性を把握する目的でケーシング法により実施した。表2-6-1にまとめて示す。なお、非定常法による試験が困難な場合は定常法により実施した。

表-2.5 現場透水試験結果一覧表

孔番号	試験深度(m)	土質名	透水係数 K (cm/sec)			平衡水位 (m)
			回復法	注水法	定常法	
a-1	9.00~9.70	軽石混り砂 (f)	—	—	$5.50 \times 10^{-3}$	7.25
a-8	10.00~11.00	ローム (af1)	$4.42 \times 10^{-4}$	$1.91 \times 10^{-4}$	—	9.30
a-8	15.00~16.00	風化岩 (Tb)	$1.89 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-5}$	—	9.30
b-5	8.80~9.80	ローム (af1)	$7.42 \times 10^{-3}$	$1.80 \times 10^{-3}$	—	8.32
b-5	12.80~13.80	風化岩 (Tb)	$1.36 \times 10^{-3}$	$2.83 \times 10^{-4}$	—	8.32
b-9	13.00~14.00	風化岩 (Tb)	$2.42 \times 10^{-5}$	—	—	9.20
b-9	15.60~16.10	凝灰岩 (Tb)	$6.30 \times 10^{-7}$	—	—	9.40
c-3	7.80~8.50	軽石・火山灰 (af1)	$3.69 \times 10^{-3}$	$6.30 \times 10^{-4}$	—	7.55
c-3	10.00~10.80	ローム (af1)	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.28 \times 10^{-3}$	—	7.58
c-12	11.00~12.00	風化岩 (Tb)	$4.22 \times 10^{-5}$	$1.81 \times 10^{-5}$	—	9.10
d-6	10.00~11.00	ローム (af1)	$3.74 \times 10^{-4}$	$1.74 \times 10^{-5}$	—	9.35
d-6	14.00~15.00	風化岩 (Tb)	$6.27 \times 10^{-6}$	$9.13 \times 10^{-7}$	—	13.15
f-7	10.50~11.50	風化岩 (Tb)	$3.08 \times 10^{-5}$	$1.99 \times 10^{-5}$	—	9.20
f-7	22.00~23.00	風化岩 (Tb)	$5.58 \times 10^{-5}$	$2.34 \times 10^{-5}$	—	17.15

表-2.6 表-2.5 より評価した当現場地層の透水性の評価。

土質名	評価
軽石・火山灰 (af1)	「中位」
ローム (af1)	「低い」～「中位」
風化岩 (Tb)	「非常に低い」～「中位」
凝灰岩 (Tb)	「非常に低い」

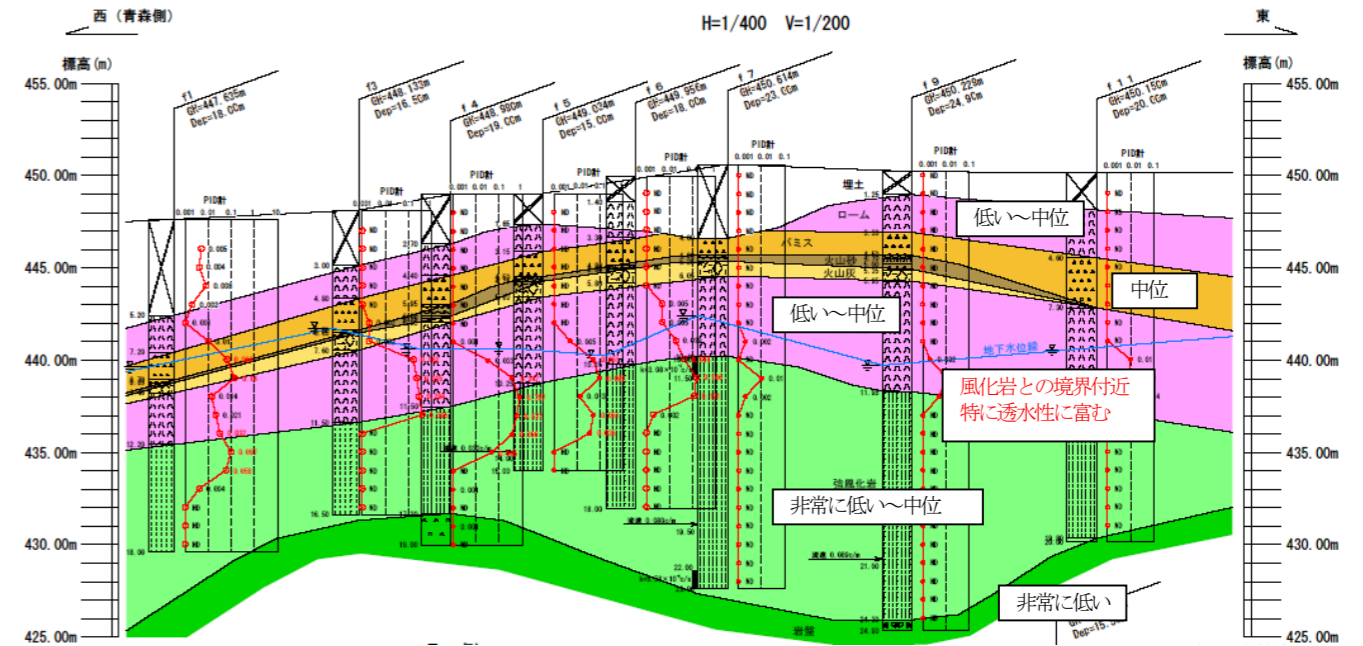
表-2.7 透水性と土質区分

透水係数 K(cm/s)	$10^{-9}$	$10^{-8}$	$10^{-7}$	$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	$10^0$	$10^{+1}$	$10^{+2}$
透水性	実質上不透水		非常に低い	低い	中位	高い						
対応する土の種類	粘性土 {C}		微細砂、シルト、砂-シルト-粘土混合土 {SF} {S-F} {M}		砂および礫 (GW) (GP) (SW) (SP) (G-M)		清浄な礫 (GW) (GP)					
透水係数を直接測定する方法	特殊な変水位透水試験	変水位透水試験			定水位透水試験		特殊な変水位透水試験					
透水係数を間接的に推定する方法	圧密試験結果から計算		なし			清浄な砂と礫は粒度と間隙比から計算						

「地盤調査法」(社)地盤工学会

地層断面と透水性の関連性

地層想定断面図 (f 断面)



各地層と透水性の一覧

地層区分	土質・岩相	記号	色分け	透水性の評価
第四紀	①覆土・盛土	b	斜線	透水性の評価
	廃棄物	wa	青	
	①埋土	f	白	
	河床堆積物	砂質土	S	
	粘性土	c	青	
第四紀	②降下火砕物1	ローム主体	紫	「低い」～「中位」
	③降下火砕物2	a: パミス層	黄	「低い」～「中位」
		b: 火山砂	紫	「中位」
		c: 火山灰	黄	「中位」
	d: ローム	赤	「低い」～「中位」	
④角礫凝灰岩	e: 強風化岩	Tb	緑	「非常に低い」～「中位」
	f: 軟岩		黄	「非常に低い」



### 3. 現場適応性試験結果

#### 3.1 揚水バッキ

揚水バッキによる浄化概念

##### 1) 浄化概念

注入孔より汚染エリアの地中内に注水を行い、VOC 汚染部の浸透溶出を促進させ、揚水井よりその水を揚水することにより地下汚染を水により回収し浄化を行う。

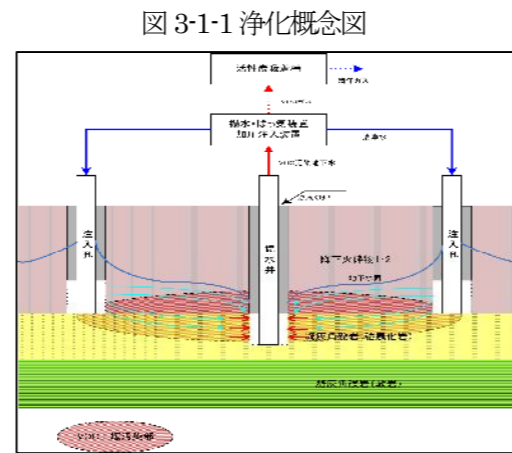
図3-1-1に浄化概念図を示す。

##### 2) 試験概要

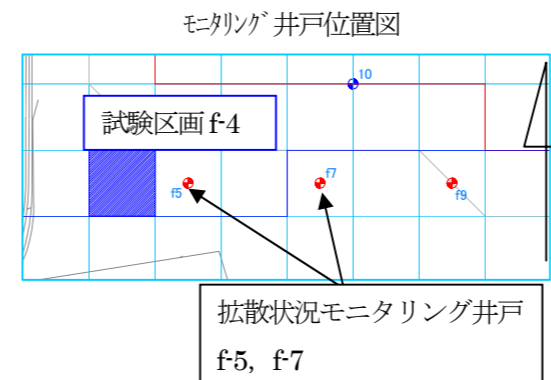
試験箇所 浄化対象エリア内 f4 区画

##### 3) 井戸配置図

注入孔の間隔を2mと4mとし、それぞれの中央に揚水井を配置した。なお、2m間隔の注入井配置を「Aパターン」、4m間隔の注入井配置を「Bパターン」とした。図3-1-2に試験工平面図、図3-1-3井戸配置図を示す。



#### 4) 試験時における汚染拡散状況結果

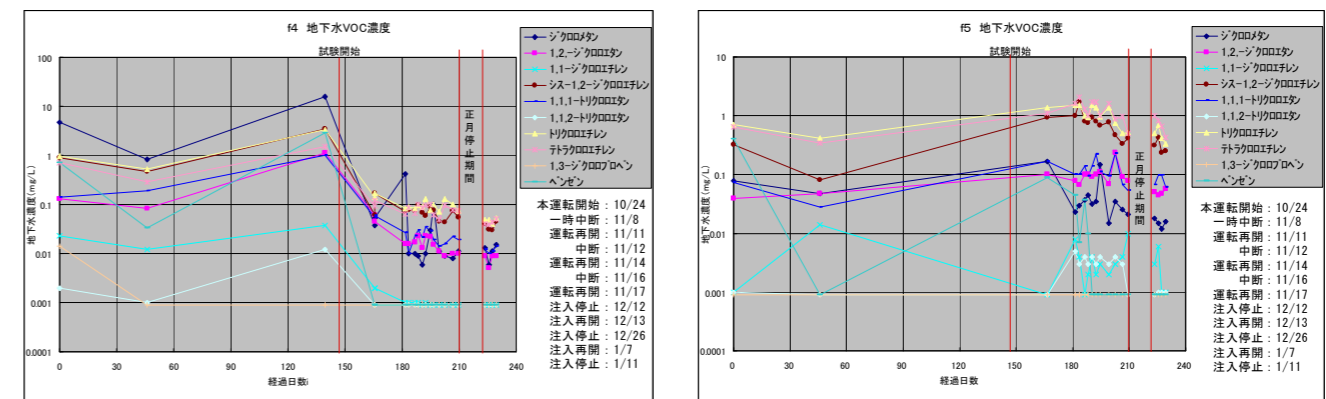


注水により汚染を拡散させることのないよう以下のモニタリング井戸にて、採水モニタリングを実施した。

A・B両パターン付近にある周辺観測井の地下水中 VOC 濃度について見ると、両パターンの中間程度に位置する f4 孔では試験前よりも濃度が 1/10~1/1000 に低下しているが、Bパターンのみに隣接する f5 孔では低下気味ではあるが明瞭な低減傾向は認められない。また、試験の影響を受けない f5 孔より 20m 東に位置する f7 孔においても同様な低下気味な傾向が見られる。これは本試験工において注水量と揚水量のバランスを取りながら実施

したことから、対象範囲以外には大きな影響を与えていないことを示唆するものと判断される。図3-1-3にf4孔、f5孔での採水 VOC 濃度変化図を示す。

図3-1-4 f4孔、f5孔 採水モニタリング VOC 濃度変化



#### 5) 地下水中の VOC 濃度変化

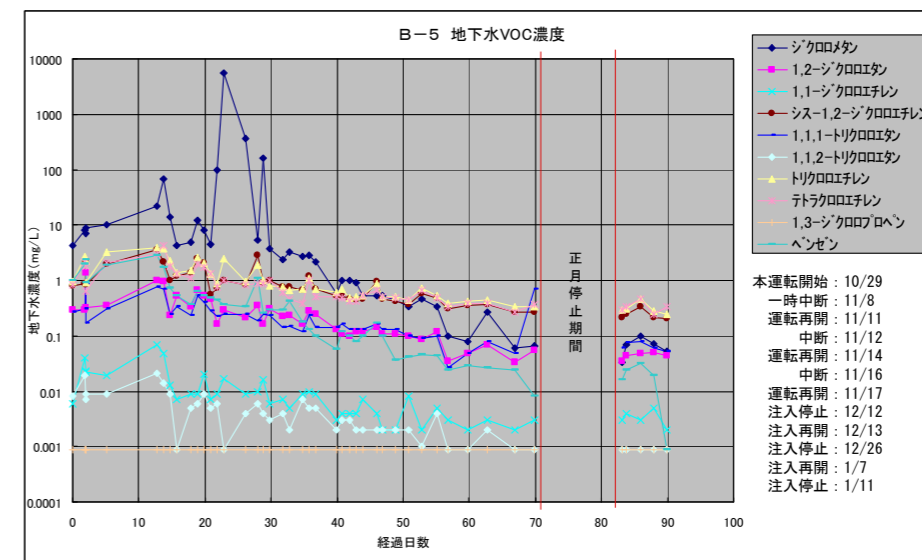
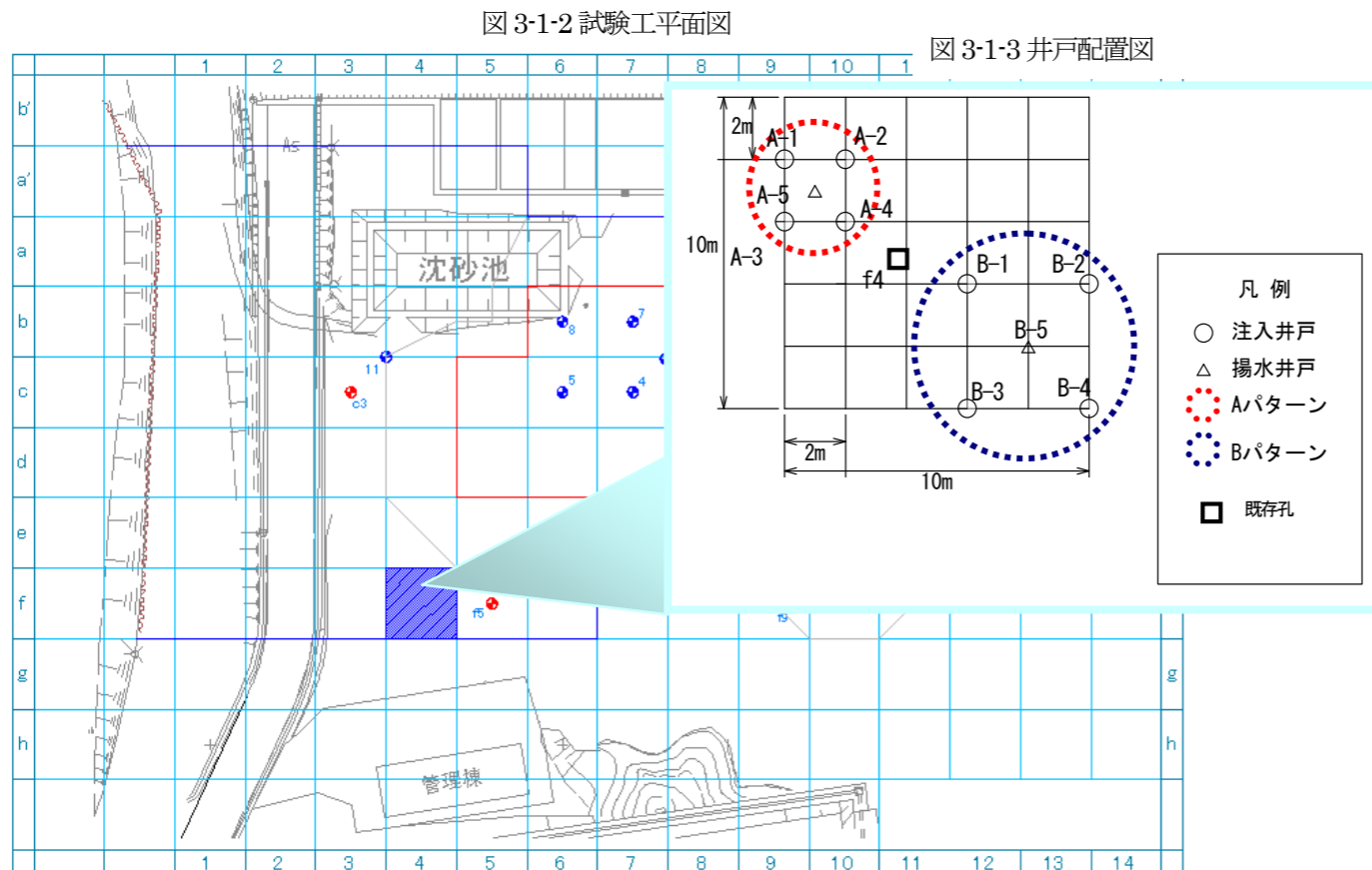


図3-1-5 Bパターン揚水井の地下水 VOC 濃度経時グラフ



既存地質調査結果から、比較的透水性が良好と考えられる強風化岩とローム層との地層境界付近を対象として、揚水井は地層境界以深にストレーナを設置し、注入孔は境界以浅のローム層にストレーナを設置した。

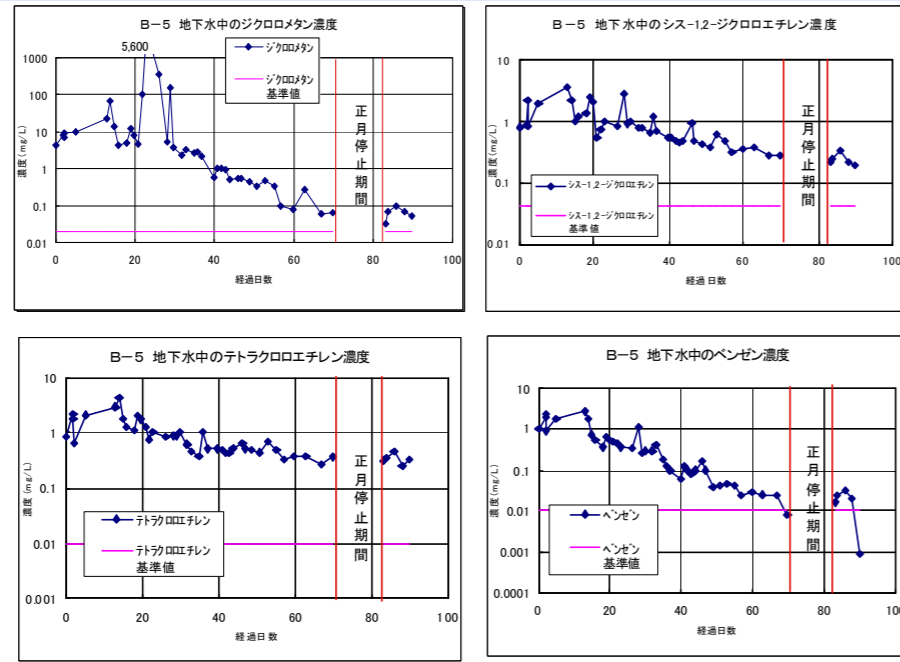


図3-1-6 Bパターンでの各 VOC 濃度経時グラフ (相対的に高濃度汚染物質)

試験開始前に実施した汚染調査濃度と効果確認ボーリングの濃度差比較をおこなったところ (表3-1-1 参照)、基準値達成がAパターンでは14項目・深度、Bパターンでは10項目・深度と注入井の間隔が2mと狭いほうが基準値達成数も多くなっている。しかし、超過したまま基準値達成には至っていないが、Bパターンでも濃度が低下した数が7項目・深度とAパターンの2項目・深度を上回っている (表3-1-2 参照)。これは注入孔の間隔が広い場合、効果が現れるのに時間がかかるためと考えられる。

表3-1-2 揚水バッキ試験工の達成度

パターン	注入孔の配置	基準値達成	新たに超過	変わらず超過	
A	2m間隔	14項目・深度	4項目・深度	5項目・深度	
				濃度減	濃度増
				2項目・深度	3項目・深度
B	4m間隔	10項目・深度	5項目・深度	11項目・深度	
				濃度減	濃度増
				7項目・深度	4項目・深度

7) 結果と考察

各パターンともチェックボーリングは注入孔と揚水井の中間地点とした。両パターンともに透水性が比較的良好と予想したローム層と風化岩層の境界 (標高 438m 付近) 以浅で VOC 濃度が低減していた。地層境界以深でも VOC 濃度の低減が認められるが、基準値未滿には至っていない。図3-1-7の表や左辺のグラフを見ると深部方向で濃度の上昇が見えるが、これは浅部の高濃度部が低減したため相対的に深部が目立っていることと、揚水井のストレーナーを風化岩層とし、井戸ピッチを4.0m以下まで狭くしたことにより低透水地層であっても少しずつではあるが地下水を移動させることが可能であったと示唆される。濃度の差はあるが井戸間隔4.0mで行ったBパターンにおいても濃度の低下は十分に実証された。よって、本施工での注入孔の設置間隔は、今回試験をおこなった2パターンのうちの **4m間隔を採用し施工を実施致したい。**

A・B両パターンとも濃度差があるが、ほとんどの項目の地下水濃度が1/10~1/100に減少している。ただし、環境基準値付近への低下は認められるものの、基準値未滿まで低下している項目は少なく、両パターンの1,1-ジクロロエチレンと1,1,2-トリクロロエタン、Bパターンのベンゼンである。また、濃度低下に従い低下傾向が緩やかになっている。これは濃度が低下するに従い、単位あたりの注水量で洗い出せる (もしくは揚水量で排水可能な) VOC 量も相対的に低下するためと考えられる。

6) 土壌の VOC 濃度変化

図3-1-7 土壌中の VOC 濃度変化

**B-5 孔と BCH 孔の比較表 (値は濃度差)**  
(下表の数値=B-5 孔の濃度-BCH 孔の濃度)

深度 (m)	標高 (m)	ジクロロメタン	四塩化炭素	1,2-ジクロロエチレン	1,1-ジクロロエチレン	1,1,1-トリクロロエタン	1,1,2-トリクロロエタン	トリクロロエチレン	テトラクロロエチレン	1,3-ジクロロプロパン	ベンゼン
441.2 ~ 441.0	441.2 ~ 441.0	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0	0.002	0.002	0
440.2 ~ 440.0	440.2 ~ 440.0	0.001	0	3	0	0.003	0.003	0	0.013	8	0.005
439.2 ~ 439.0	439.2 ~ 439.0	1	0.098	4	0.001	0.035	0.01	0	0.044	0.037	9
438.2 ~ 438.0	438.2 ~ 438.0	2	0.031	0	0.017	5	0.023	0.022	0.075	0.056	10
437.2 ~ 437.0	437.2 ~ 437.0	0.003	0	1	0.007	2	0.019	0.006	0.009	0.011	0.005
436.2 ~ 436.0	436.2 ~ 436.0	0.005	0	0.001	0	0.024	0.005	0	0.016	0.022	0.008
435.2 ~ 435.0	435.2 ~ 435.0	0.003	0	0.001	0	0.015	0.004	3	0.051	4	5
434.2 ~ 434.0	434.2 ~ 434.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
433.2 ~ 433.0	433.2 ~ 433.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

※太枠: B-5 孔で基準超過 (揚水ばっ気工前)、黄色ハッチ: BCH 孔で基準超過  
※青字: BCH 孔の濃度低下分、赤字: BCH 孔の上昇分 (基準値超過とは限らない)

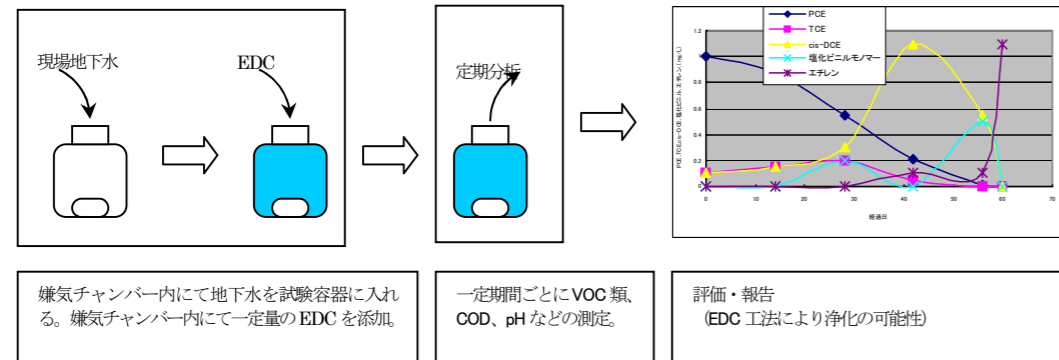
表3-1-1 揚水井と効果確認ボーリングとの VOC 濃度比較表

### 3.2 バイオレメディエーション

#### I. 室内トリータビリティ試験

EDCによる室内トリータビリティ試験は、地下水のみを対象とし実施した。現地より採取した汚染地下水を使用しEDCによる有機塩素化合物の浄化効果を確認する目的でおこなった。なお、汚染の濃度による浄化傾向に違い現れるか確認するため汚染濃度の違う2地点の地下水により試験をおこなうものである。また低濃度地下水試験としたc-3区画の地下水を使用し2種類の水温9℃と25℃の分解状況を確認するために比較試験を実施した。

##### 1) 試験概要



##### 2) 採水位置図

試験に使用した地下水の採水位置を右図3-2-1に示す。

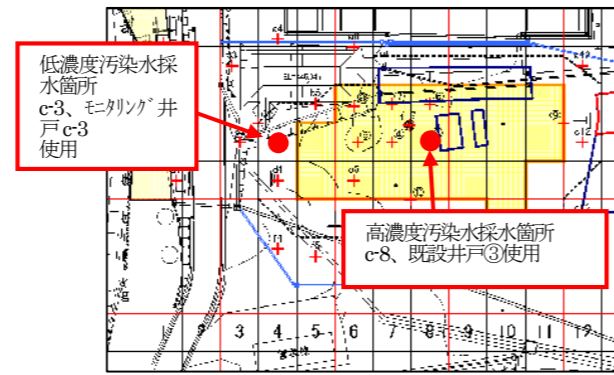


図 3-2-1 試験工平面図

##### 3) 試験条件

試験条件を表3-2-1に示す。

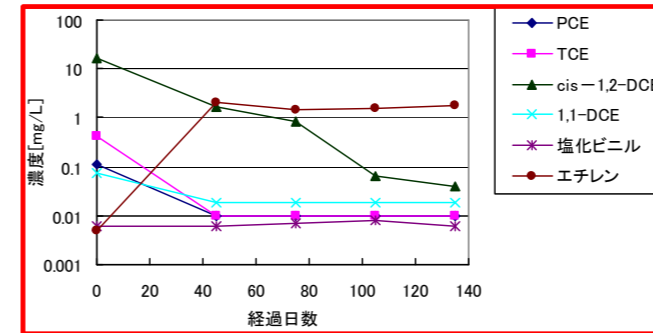
表 3-2-1 試験工平面図

試験条件	初期 EDC 量	初期 pH 調整剤量	養生温度	分析項目
低濃度地下水	0.75g/L	0.23g/L	25℃	PCE(テトラクロロエチレン), TCE(トリクロロエチレン), cis-1,2-DCE(シスクロロエチレン), 1,1-DCE, 1,1,1-TCA(トリクロロエタン), 1,1,2-TCA, CT(四塩化炭素), CF(クロロホルム), DCM(ジクロロメタン), 1,1-DCA(シスクロロエタン), 1,2-DCA, VC(塩化ビニル), CA(クロロエタン), CM(クロロメタン), ベンゼン, エチレン, エタン, メタン, ORP, pH, TOC, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (イオン分析は低濃度、高濃度試験のみ)
高濃度地下水	0.75g/L	0.23g/L	25℃	
低温地下水	0.75g/L	0.23g/L	9℃	
常温地下水	0.75g/L	0.23g/L	25℃	

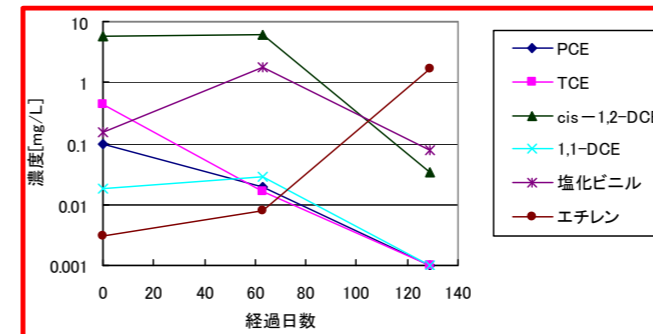
#### 4) 試験結果

##### エチレン系 グラフ

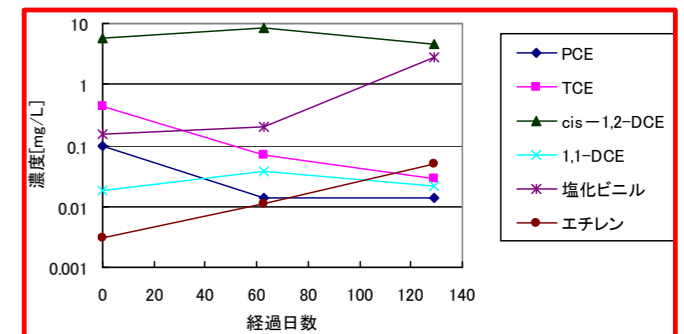
濃度別試験時の低濃度地下水(水温25℃)



水温別試験時の水温25℃ (低濃度地下水)

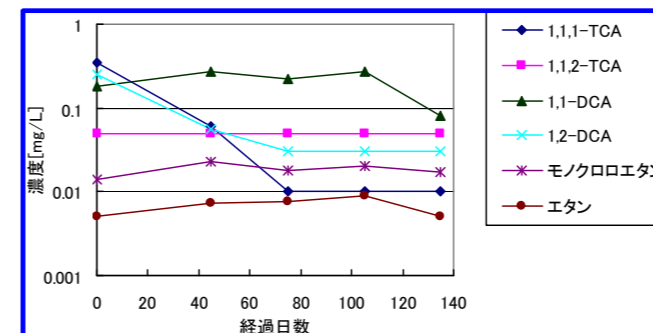


水温別試験時の水温9℃ (低濃度地下水)

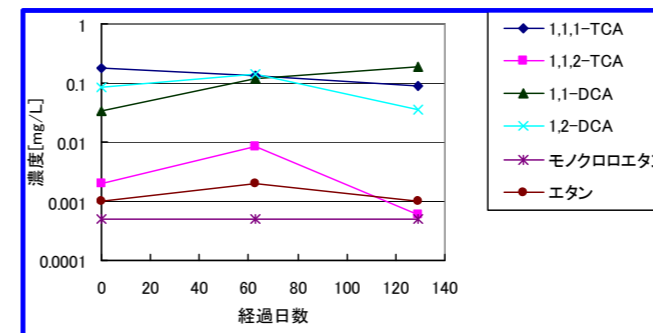


##### エタン系 グラフ

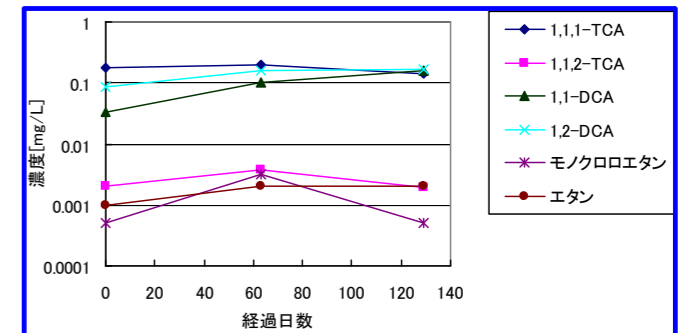
濃度別試験時の低濃度地下水(水温25℃)



水温別試験時の水温25℃ (低濃度地下水)

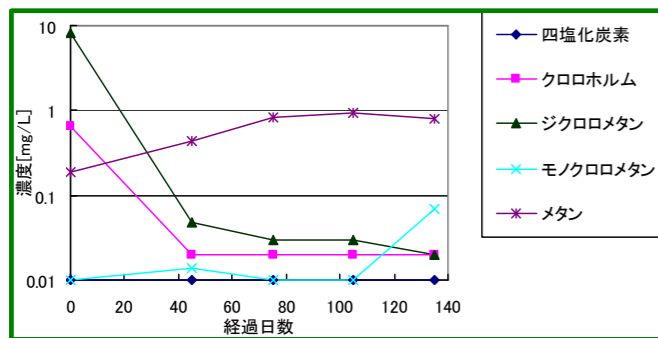


水温別試験時の水温9℃ (低濃度地下水)

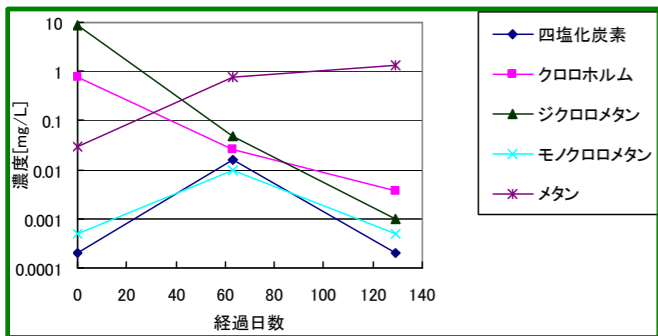


メタン系 グラフ

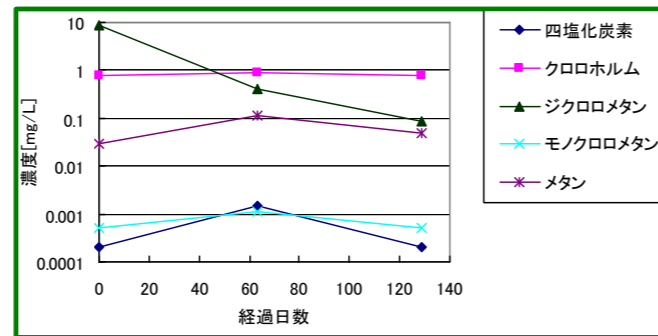
濃度別試験時の低濃度地下水(水温 25°C)



水温別試験時の水温 25°C (低濃度地下水)



水温別試験時の水温 9°C (低濃度地下水)



濃度別試験時の低濃度地下水でエチレン系は、PCE、TCE、および分解生成物である cis-1,2-DCE、1,1-DCE も環境基準値を下回った。エタン系は、1,1,1-TCA が早期に分解し、定量下限値を下回った。分解生成物の 1,1-DCA は一時増加が見られたが、135 日目には減少傾向となっている。1,2-DCA は定量下限値を下回った。メタン系は、早期にクロロホルム、ジクロロメタンの分解が確認でき、また分解生成物のモノクロロメタンが増加し、順調に分解が進んでいる。ベンゼンはやや減少しているが、高い濃度で残っている。また、水温別試験時の水温 25°C水は濃度の差はあるが同様に分解傾向が確認された。

一方、水温 9°C地下水ではエチレン系の PCE、TCE は減少しているが、cis-1,2-DCE、1,1-DCE の大きな変化は見られない。エタン系の 1,1,1-TCA、1,1,2-TCA は減少している。分解生成物の 1,1-DCA、1,2-DCA は増加傾向であり分解生成物の分解までは至っていない。メタン系のクロロホルムは減少し、分解生成物のジクロロメタンは増加傾向が見られる。ベンゼンは大きな変化がなく、高い濃度で残っている。

5) 室内トリータビリティ試験考察

低濃度地下水においては、EDC により VOC 分解菌を活性化させ VOC を分解できることが示唆された。しかしながら、ベンゼンについては、分解が確認できなかったためベンゼンに対する EDC での浄化は困難と思われる。また 25°C地下水と比較し 9°C地下水の分解速度は遅い傾向にある。地下水温が低温では EDC を添加しても微生物の活動が常温に比べて遅くなると思われる。

同時に試験を実施した高濃度地下水においては、エチレン系、エタン系、メタン系のそれぞれの親 VOC である PCE、TCE、1,1,1-TCA、1,1,2-TCA、クロロホルムは減少が見られ、緩やかながら分解が進んでいるが、分解生成物である cis-1,2-DCE (エチレン系)、ジクロロメタン (メタン系) は高濃度で残っていることから、EDC による迅速

な VOC の分解は難しいことが示唆された。また、ベンゼンの分解についても同様に確認できなかった。

ベンゼンの汚染に対しては EDC バイオ以外の方法が効率的であると判断される。

外部影響のない室内試験ではあるが、低濃度地下水に対しては EDC により浄化を促進させることが可能であることがわかった。

II. フィールド実証試験

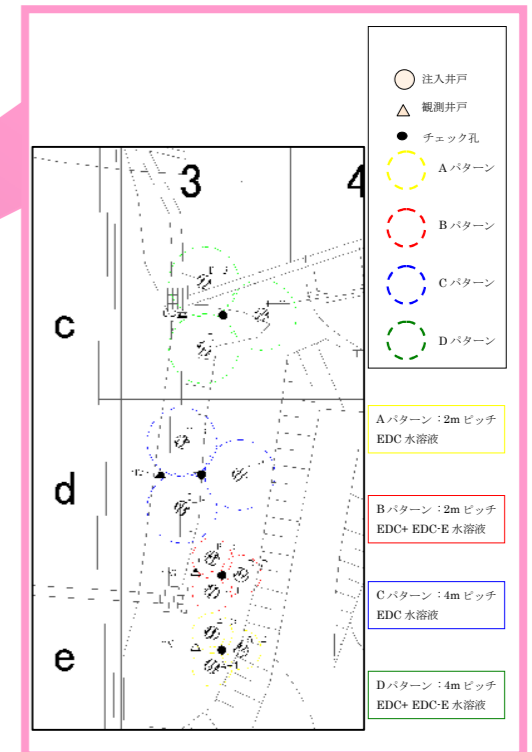
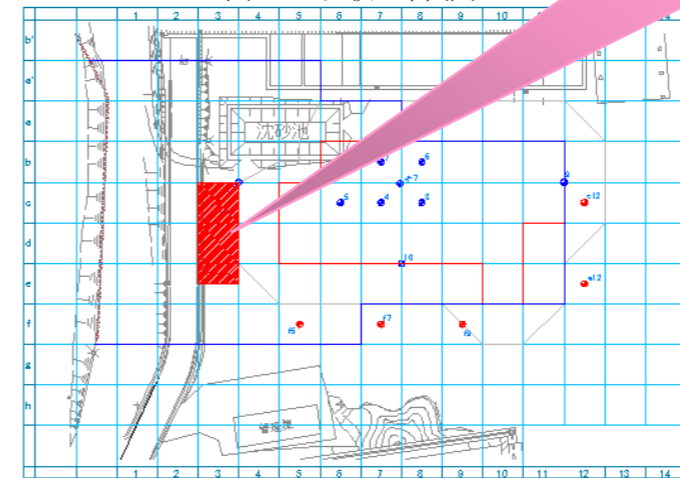
1) 試験概要

汚染エリア区画を使用し井戸間隔 2 パターン×注入材 2 種の計 4 パターンのバイオ注入をおこない、浄化効果を比較し当サイトでのバイオ注入工法の適用可否を判断する。

2) 試験施工位置

対象エリア : C-3,D-3E-3 区画

図 3-2-2 試験工平面図



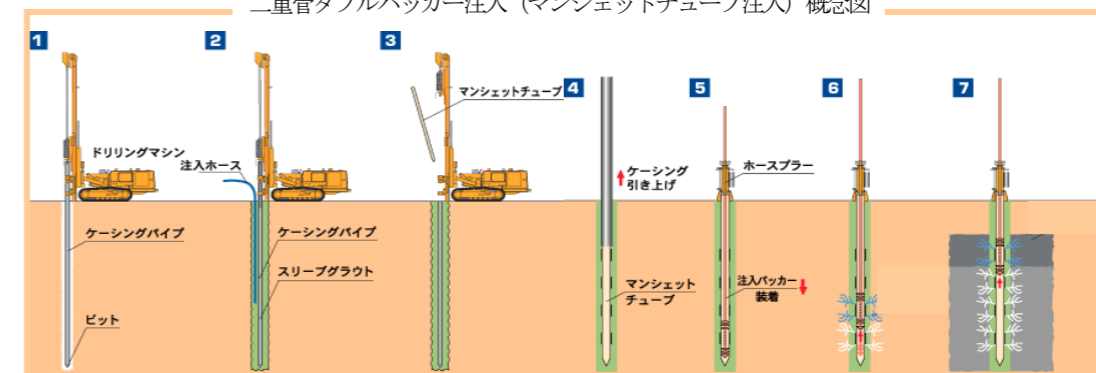
3) 試験施工対象深度

試験対象深度 : 深度 9.0m ~ 14.0m

4) 注入方法、井戸仕様

注入方法は、低透水のローム層及び風化岩が対象となることより、通常の加圧注入では地盤の透水性の差による注入剤が偏りが懸念されたため、注入管 (二重管ダブルパッカー) を使用し、0.33m の深度ピッチごとに加圧注入を行える仕様とした。

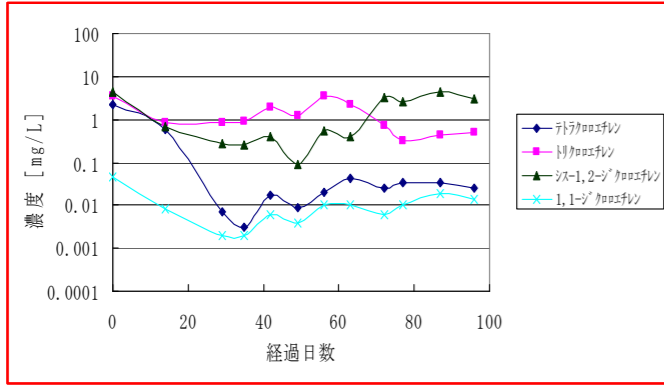
二重管ダブルパッカー注入 (マンシエツチューブ注入) 概念図



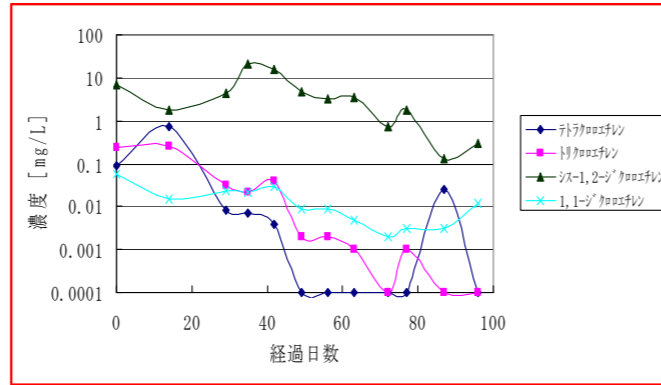
5) 地下水中のVOC濃度変化

Bパターン (EDC-E 2.0m)

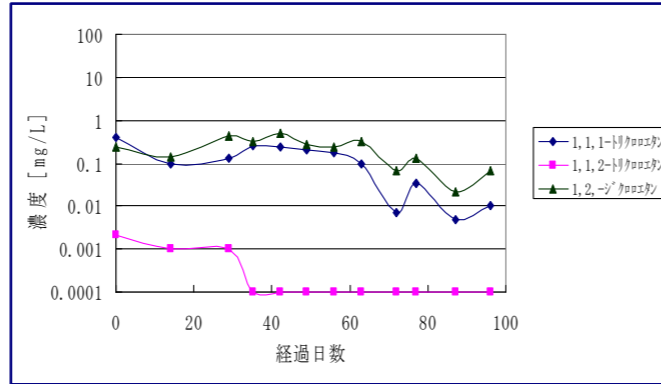
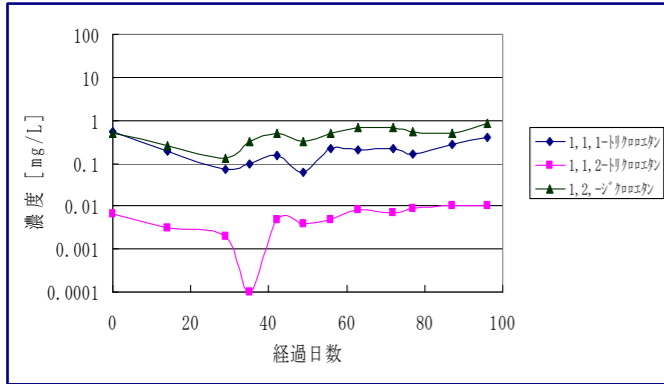
エタン系 グラフ



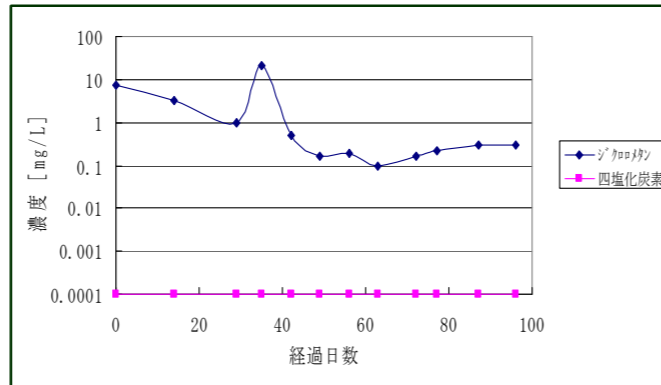
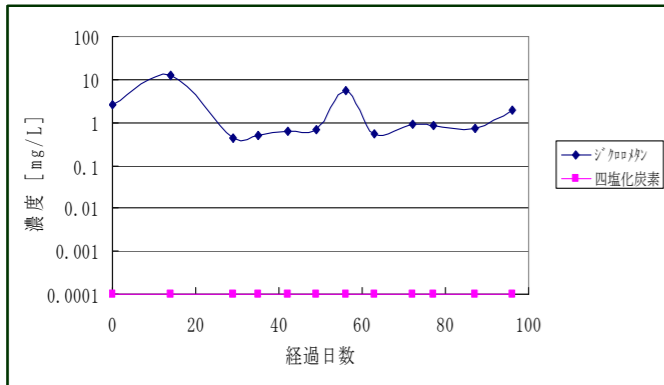
Dパターン (EDC-E 4.0m)



メタン系 グラフ



メタン系 グラフ



6) 土壌中のVOC濃度変化

効果確認ボーリング Bパターン土壌分析結果

濃度 (mg/L)	初期値相当分析項目VOC11成分 d-3地区(2008/7/11採取)Bパターン初期値相当					チェックボーリング分析項目VOC11成分 Bパターン(115日後)					環境基準値 (mg/L)	Bパターン低減率				
	434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m	434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m		434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m
DCM	0.052	4.1	2.9	2.8	4.1	<0.002	<0.002	0.003	0.002	0.434	0.02以下	96%	100%	100%	89%	
四塩化炭素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.02以下					
1,1-DCA						<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.02						
1,2-DCA	0.004	0.016	0.026	0.048	0.041	<0.0004	<0.0004	<0.0004	<0.0004	0.0225	0.004以下	90%	98%	98%	45%	
1,1-DCE	0.002	0.004	0.009	0.005	<0.001	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.02以下	0.02以下	0%	50%	78%	60%	
cis-1,2-DCE	0.004	0.12	0.11	0.22	0.24	<0.004	<0.004	<0.004	<0.004	0.187	0.04以下	0%	97%	96%	22%	
1,1,1-TCA	0.004	0.017	0.028	0.039	0.024	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0274	1以下	88%	97%	98%	99%	
1,1,2-TCA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.006以下	0.006以下					
TCE	0.054	0.15	0.1	0.2	0.21	<0.002	<0.002	<0.002	0.002	0.111	0.03以下	96%	99%	98%	47%	
PCE	0.045	0.083	0.096	0.085	0.042	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0045	0.062	0.01以下	99%	99%	99%	85%	
ベンゼン	0.023	0.13	0.15	0.34	0.41	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.147	0.01以下	96%	99%	99%	64%	

※太字は基準値超過

効果確認ボーリング Dパターン土壌分析結果

濃度 (mg/L)	初期値相当分析項目VOC11成分 Dパターン(114日後)					チェックボーリング分析項目VOC11成分 Dパターン(114日後)					環境基準値 (mg/L)	Dパターン低減率				
	434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m	434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m		434.0~434.2m	435.0~435.2m	436.0~436.2m	437.0~437.2m	438.0~438.2m
DCM	0.062	0.134	0.001	0.327	<0.001	0.085	0.004	<0.002	<0.002	<0.002	0.02以下					
四塩化炭素	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	0.02以下					
1,1-DCA						<0.001	0.002	0.001	0.001	0.001						
1,2-DCA	0.004	0.005	<0.001	0.007	0.003	0.0041	0.0011	0.0022	0.0037	0.0043	0.004以下		78%		47%	
1,1-DCE	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.02以下					
cis-1,2-DCE	0.082	0.063	0.023	0.035	0.01	0.025	0.010	0.054	0.084	0.111	0.04以下	70%	84%			
1,1,1-TCA	0.004	0.004	0.002	0.004	0.001	0.0013	0.0005	0.0021	0.0034	0.0048	1以下	68%	88%		15%	
1,1,2-TCA	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.006以下					
TCE	0.006	0.042	0.025	0.007	0.007	0.007	<0.002	<0.002	<0.002	0.017	0.03以下		95%		92%	
PCE	0.001	0.008	<0.001	0.008	0.003	0.0042	<0.0005	<0.0005	<0.0005	0.0060	0.01以下		94%		94%	
ベンゼン	0.039	0.051	0.009	<0.001	0.009	0.012	0.027	0.011	0.022	0.040	0.01以下	69%	47%		0%より小	

※太字は基準値超過

土壌濃度測定結果比較表

d-3とBパターンチェック孔の比較表(値は濃度差) (下表の数値=d-3の濃度-CH孔の濃度)											c-3とDパターンチェック孔の比較表(値は濃度差) (下表の数値=c-3の濃度-CH孔の濃度)													
深度 (m)	標高 (m)	ジクロロメタン	四塩化炭素	1,2-ジクロロエタン	1,1-ジクロロエタン	シス-1,2-ジクロロエタン	1,1,1-トリクロロエタン	1,1,2-トリクロロエタン	トリクロロエタン	テトラクロロエタン	ベンゼン	深度 (m)	標高 (m)	ジクロロメタン	四塩化炭素	1,2-ジクロロエタン	1,1-ジクロロエタン	シス-1,2-ジクロロエタン	1,1,1-トリクロロエタン	1,1,2-トリクロロエタン	トリクロロエタン	テトラクロロエタン	ベンゼン	
-8	4.10	3.666	0.000	0.019	0.000	0.053	0.003	0.000	0.099	0.036	0.263	438.2~438.0	-8	4.10	0.000	0.000	1.000	0.000	0.101	2.004	0.000	0.010	0.003	0.031
-9	2.80	1.2798	0.000	4.048	0.000	7.0220	0.039	0.000	10.198	14.081	18.340	437.2~437.0	-9	2.80	1.327	0.000	3.003	0.000	0.049	0.001	0.000	0.025	0.008	0.022
-10	2.90	2.2897	0.000	5.026	0.000	8.110	0.0280	0.000	11.100	15.096	19.150	436.2~436.0	-10	2.90	0.001	0.000	0.002	0.000	0.031	0.001	0.000	0.000	0.000	0.002
-11	4.10	3.4100	0.000	6.016	0.000	9.120	0.017	0.000	12.150	16.083	20.130	435.2~435.0	-11	4.10	0.130	0.000	4.004	0.000	0.053	0.004	0.000	0.042	0.008	0.024
-12	0.05	0.052	0.000	0.0040	0.000	0.004	0.004	0.000	13.054	17.045	21.023	434.2~434.0	-12	0.05	0.023	0.000	0.0001	0.000	0.057	0.003	0.000	0.001	0.003	0.027

※太字: 調査時基準超過(調査時)、黄色ハッチ: CH孔で基準超過  
※青字: CH孔の濃度低下分、赤字: CH孔の上昇分(基準値超過とは限らない)

表 3.2 フィールド試験工の達成度

パターン	注入孔の配置	基準値達成	新たに超過	変わらず超過	
A	2m間隔 EDC	1項目・深度	2項目・深度	12項目・深度	
				濃度減	濃度増
				10項目・深度	2項目・深度
B	2m間隔 EDC-E	21項目・深度	0項目・深度	6項目・深度	
				濃度減	濃度増
				6項目・深度	0項目・深度
C	4m間隔 EDC	14項目・深度	2項目・深度	14項目・深度	
				濃度減	濃度増
				13項目・深度	1項目・深度
D	4m間隔 EDC-E	9項目・深度	3項目・深度	2項目・深度	
				濃度減	濃度増
				0項目・深度	2項目・深度

7) 結果と考察

B、Dパターンの効果が良好だったのは、注入した EDC-E が EDC より徐放性が高く（分解が遅く）、より長期に残留して効果が持続したためと考えられる。特にBパターンは上部(標高 438.0~438.2m)を除いて環境基準値以下まで浄化されていた。Bパターンが特に良かったのは注入した地質の透水性によると思われる。

今回EDCを注入した部位はローム及び風化岩層層であり、水ミチができることによって土中の鉄分が酸化されて赤褐灰色になる。浄化の効果の顕著な場所はその傾向が強く水ミチを通してEDCがうまく浸透した効果と考えられる。従って、汚染濃度の濃淡、透水性のバラつきはあるものの、二重管ダブルパッカー工法による深度方向への33cmピッチでの複数回注入をすることにより EDC 及び EDC-E が土壌中のVOCに到達でき、かつ EDC-E の徐放性効果により嫌気性状態を保つことにより嫌気性微生物による浄化は可能であると判断できる。

地下水の浄化結果では4mピッチのDパターンが良い結果になっている。また、本試験で4mピッチでも土壌の浄化が確認できたことから、初回のEDC注入を4.0mピッチで施工してモニタリング管理を行い、濃度の低下効果の遅いエリアや低下傾向の現れないエリア（透水性の悪いと思われる）に対し2.0mピッチにて注入井戸の増し打ちをおこない追加注入を実施するのが効率的且つ経済的な手段であると考えられる。

よって、初回注入は今回試験をおこなった4パターンの中の井戸間隔4m、EDC-Eを採用し施工を実施致したい。

実際の運用では①バイオレメディエーション適応エリアの判断（高濃度 DCM の事前の低下）※②土中微生物の阻害要因の排除（又は、阻害要因のあるエリアに対しての別工法の採用）③低透水地層に対しての注入方法（モニタリング後の増し打ちおよび追加注入）④嫌気状態の維持（複数回の分割注入、追加注入等）を行うことにより土壌におけるBパターン、Dパターンのような浄化結果が得られると判断される。