

地下水汚染浄化実証試験の経過報告（概要）

1. 第 1 回委員会までの進捗概要

1.1 これまでの主な成果

- ・ 室内試験（バイオトリタビリティ試験）で促進剤 EDC を選定（平成 22 年 3 月 3 日終了）。
- ・ 促進剤 EDC を用いて、現地パイロット試験を実施（平成 22 年 10 月 26 日終了）。
- ・ 試験領域の一部範囲において、地下水汚染物質の分解状況を確認。
- ・ 試験期間の長期化により、汚染地下水の再流入及び促進剤の流出を確認。
- ・ 試験領域（10m×10m）での採用促進剤・工法による浄化効率等の算定は困難。

1.2 第 1 回委員会以降の検討方針

- ・ 採用促進剤・工法による『評価領域』を確定。
- ・ 上記範囲内にて、採用促進剤・工法に対する検証を行い、室内試験結果と比較。
- ・ 生態系等への影響について評価。
- ・ 本格浄化対策時の課題と留意点の抽出。

2. 検討成果の概要

2.1-1 評価対象井戸の選定

地下水流動状況及びトレーサー物質（臭素イオン）の挙動から、パイロット試験期間中に、促進剤が一定の濃度を保持していると考えられる範囲を評価対象域として選定した。

2.1-2 評価対象井戸の選定理由

計画当初に設定した 100 m²（10m×10m）の試験領域において、汚染地下水の再流入及び促進剤の流出状況が確認された。同領域内での各種物質の収支に乱れが生じたものと考え、浄化効率等の算定は困難であった。

そのため、試験期間中の地下水位分布及びトレーサー物質の濃度分布から、循環工程により整えられた水質が、試験期間を通して、維持されていたとみなせる地下水流向下流側に位置する井戸 N 及び NW を評価対象として選定した。

図 2 に試験領域周辺の地下水位分布状況とトレーサー物質の移流状況の整理図を示す。また、図 3 に評価対象井戸での地下水汚染浄化状況を示す。

選定した井戸 N 及び NW においては、1,2-ジクロロエチレン及び塩化ビニルは分解され、エチレンに変化し、完全浄化が図られた。

上記に加えて、試験終了後に、N 及び NW 井戸の中間地点で実施した、土壌汚染確認ボーリングにより、周辺部においては、地下水のみならず、土壌汚染についても良好な浄化傾向が確認された（図 4 参照）。

これらの結果から、両地点が採用促進剤・工法による浄化効率を検証するに適切な箇所であると判断した。

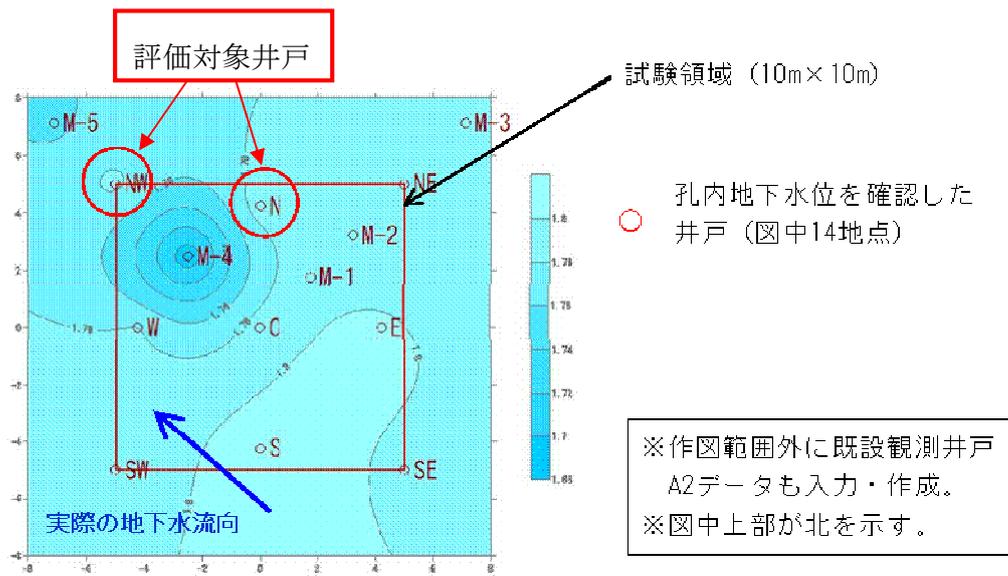


図1 評価対象井戸位置図

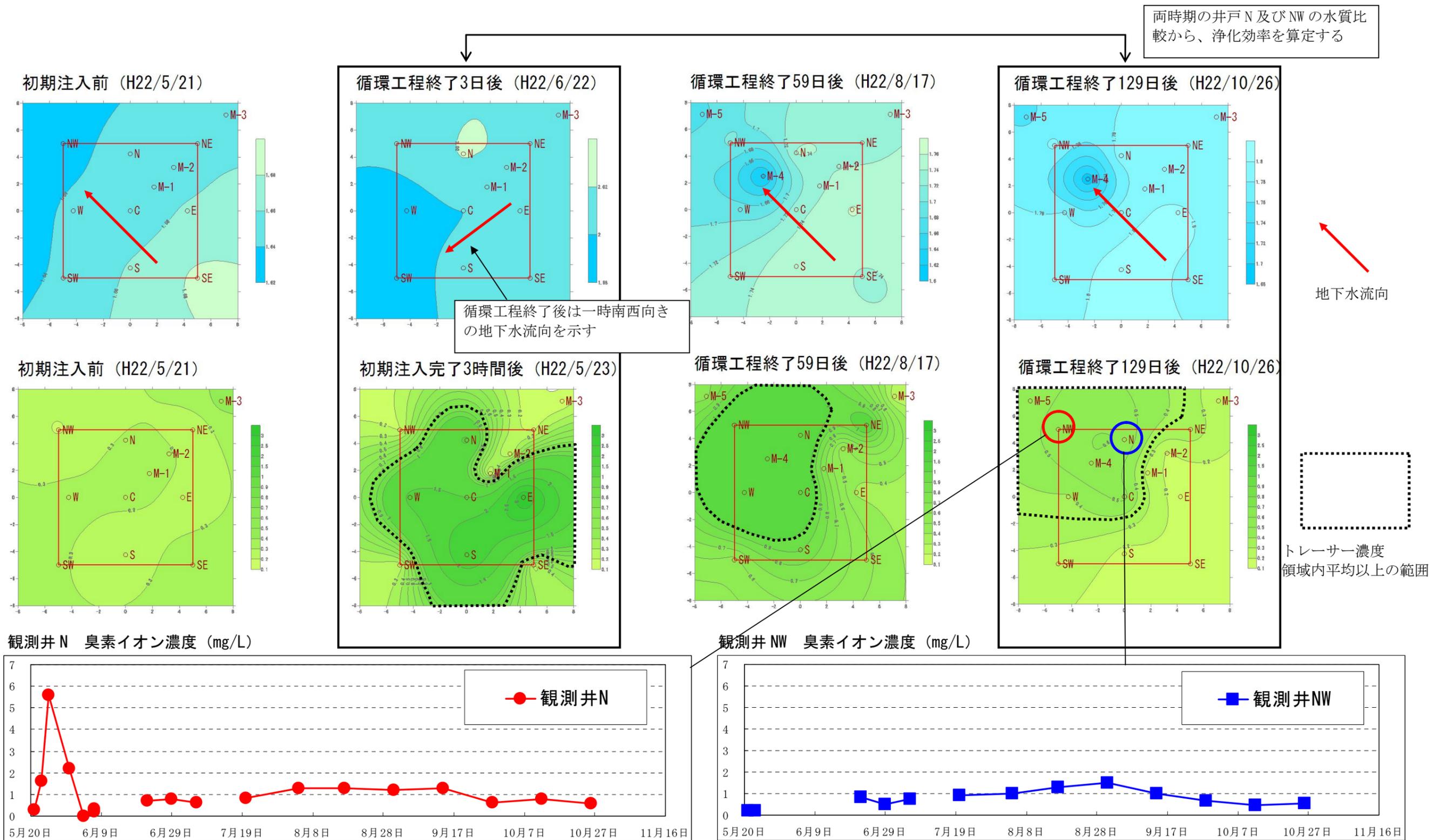
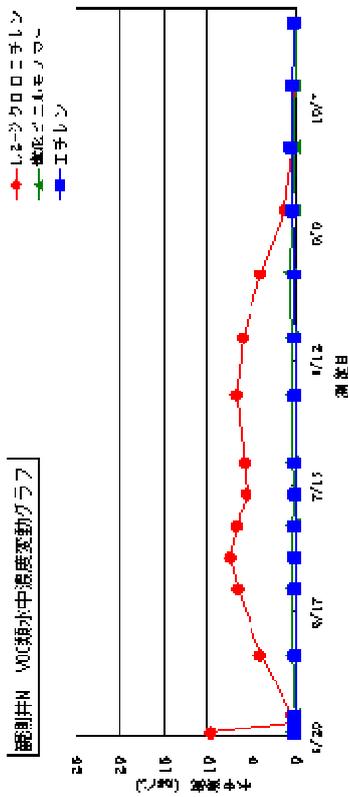


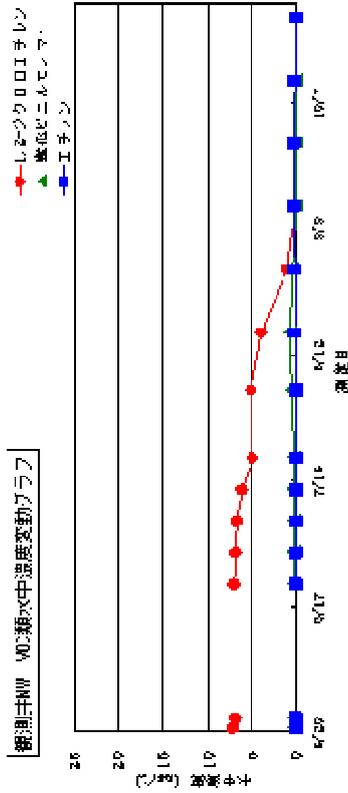
図2 試験領域周辺の地下水位分布状況とトレーサー物質の移流状況整理図

■ 地下水中濃度 (mg/L)

(1) 井戸N

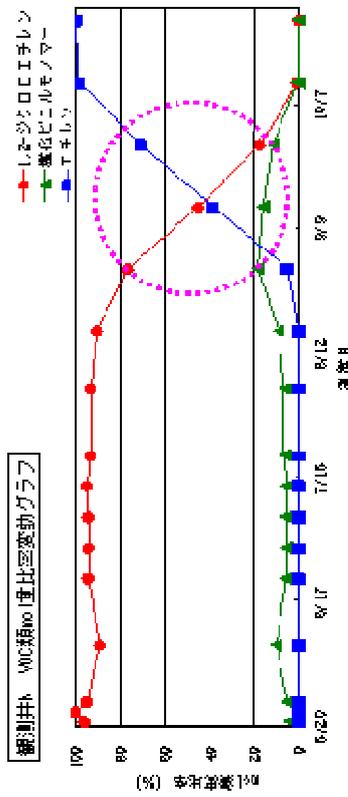


(2) 井戸NW

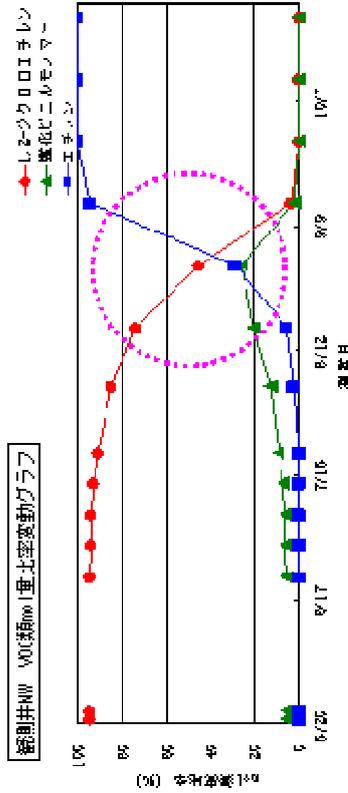


■ 上記データをmol濃度 ⇒ 3物質の比率 (%)

(1) 井戸N



(2) 井戸NW



1,2-DCE, VCの完全浄化を達成

図3 対象井戸での地下水汚染浄化状況

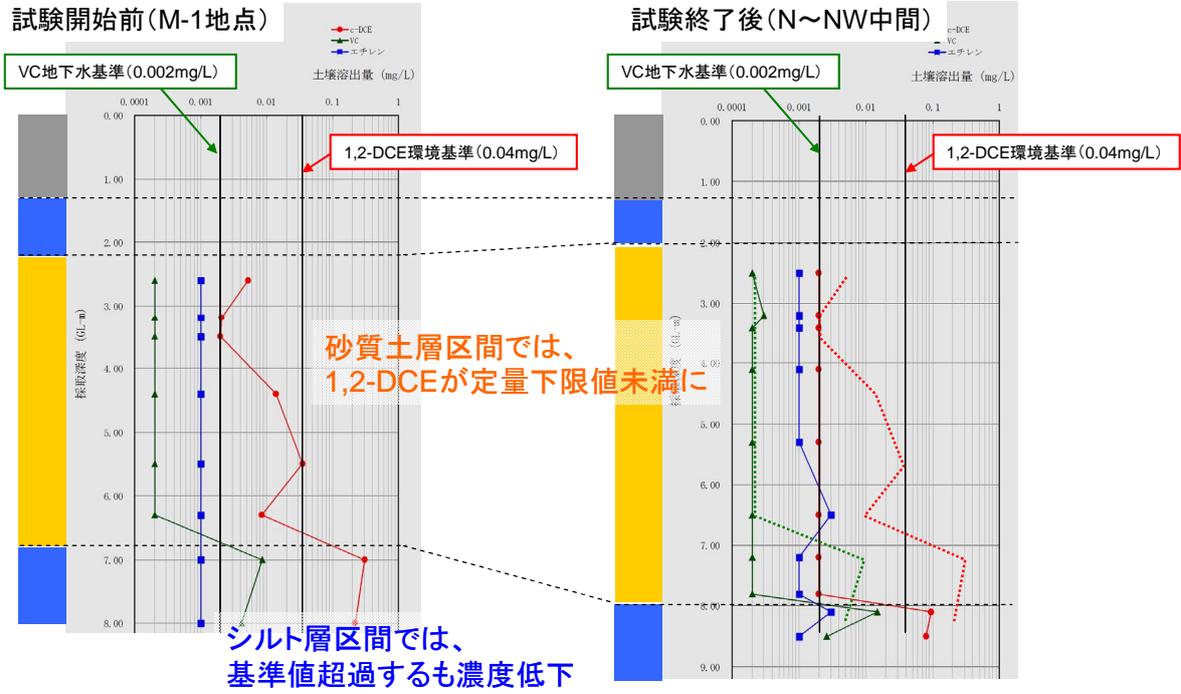
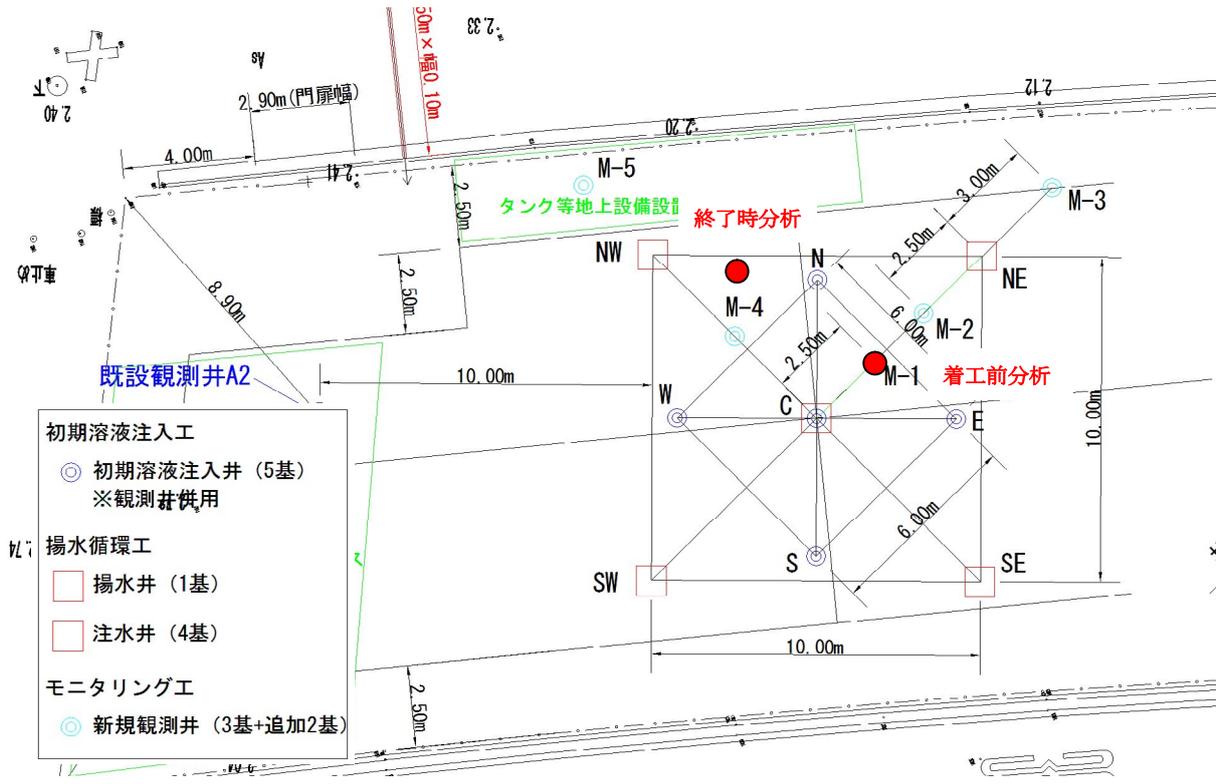


図4 試験前後の土壤汚染分布状況の整理図

2.2 現地パイロット試験と室内試験における浄化効率の比較検証

2.2-1 分解収率の定義

試験期間のうち、循環工程終了後3日目(6月22日)及び循環工程終了後129日目(10月26日)の間で確認された、促進剤の減少量とその間に減少した1,2-ジクロロエチレンの量との比により『分解収率』なる指標を定め、室内試験結果に対しても同値の算定を行い、浄化効果が確認された期間及び『分解収率』の比較検証を行った。

2.2-2 分解収率算定時の採用データ

分解収率算定に用いる現地パイロット試験及びバイオトリタビリティ試験(室内試験)のデータを、汚染分解に対する主たる阻害要因と見られる硫酸イオン濃度の経時変化と併せて、図5に整理した。

2.2-3 分解収率の比較検証

検証結果を以下に示す。また、算定過程は、図6に整理した。

(1) 浄化効果発現期間の比較

現地パイロット試験では、対象井戸において安定した浄化効果を確認するまでに、室内試験に対して、約2倍の期間(室内試験56日に比較して126日間)を要した。

上記の主たる理由としては、室内試験は密閉容器という環境下内で実施した閉鎖系試験であるのに対して、現地パイロット試験は、地下水を介在して、物質の出入りが生じる開放系試験であることが挙げられる。

当該地は、古神崎川の自然堤防や後背湿地であった箇所相当する。神崎川は感潮河川であり、NO_xやSo_xの分布状況が、南吹田地域内においても、場所ごと、地層ごとに異なる点が挙げられる。また、硫酸イオンの検出状況から、盛土由来と考えられる硫化物の影響が確認された。

(2) 分解収率の比較

現地パイロット試験では、分解収率0.0048を得た。一方、室内試験時の分解収率は0.048であった。

現地パイロット試験においては、1gの促進剤添加により分解された1,2-ジクロロエチレンは0.0048gであることが推定され、その収率は、室内試験結果に対して、約1/10に低減することが確認された。

この低減の要因としては、両条件下での有用微生物の活性状況、硫酸イオンをはじめとする阻害要因の有無、領域内地下水の入れ替わりや拡散の影響等が複合的に関連しているものと推察されるが、物質の反応形態に関わる情報が不足するため、各種の低減要因の影響の分離することはできなかった。

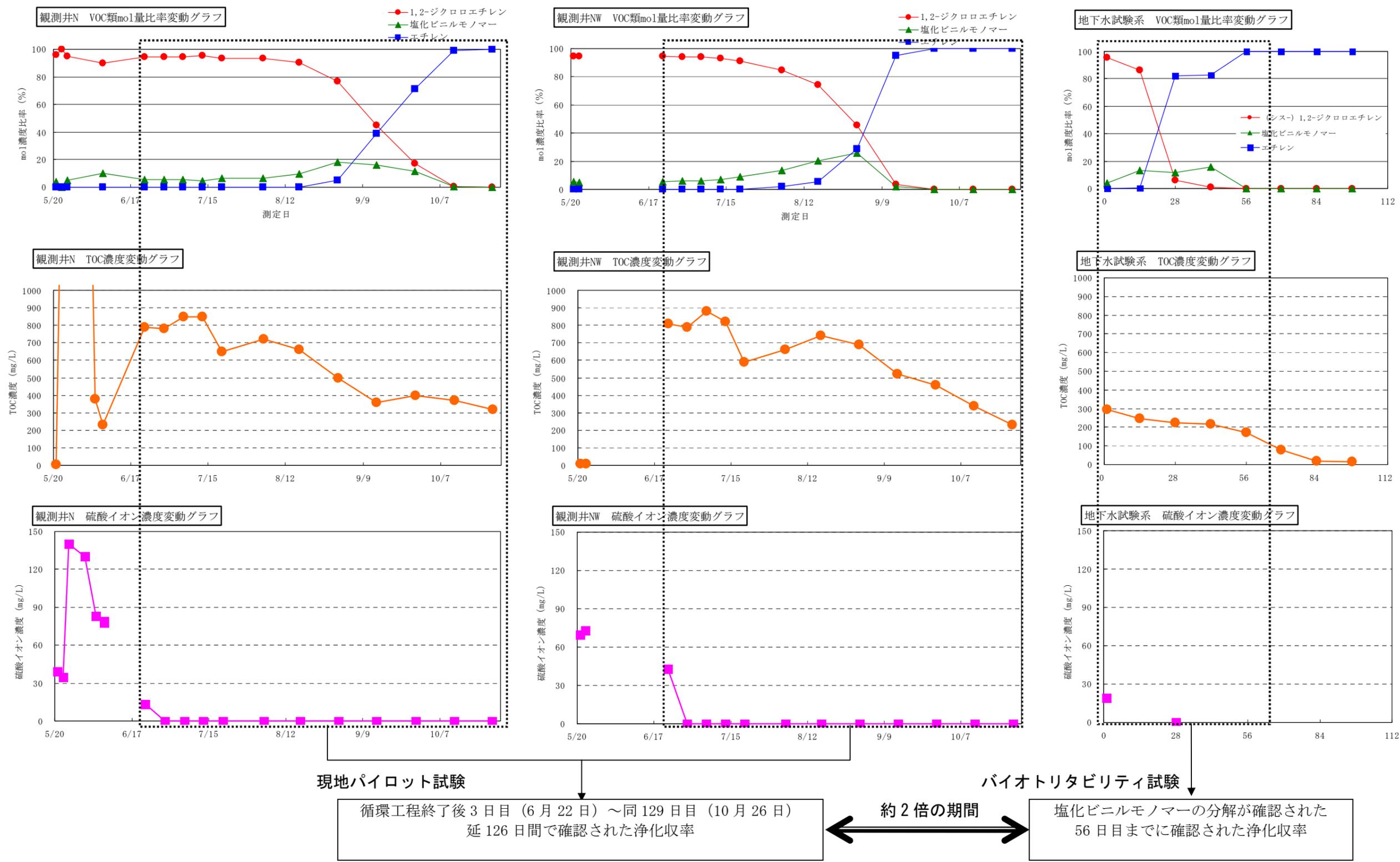


図5 分解収率算定の際に用いた各種データ整理図

◆現地パイロット試験

測定項目	3日目	129日目	減少量	2地点平均
1,2-DCE	6.5	<0.004	6.5	6.75
	7	<0.004	7	
TOC	790	320	470	525
	810	230	580	

(単位：mg/L)

$$\text{分解収率} = \frac{\Delta 1,2\text{-DCE}}{\Delta \text{TOC}} = 0.013 \rightarrow \frac{\Delta 1,2\text{-DCE}}{\Delta \text{EDC}} = \boxed{0.0048}$$

◆バイオトリタビリティ試験（地下水試験系）

測定項目	1日目	56日目	減少量	2サンプル平均
1,2-DCE	17	<0.02	17	16
	15	<0.02	15	
TOC	300	180	120	125
	290	160	130	

(単位：mg/L)

$$\text{分解収率} = \frac{\Delta 1,2\text{-DCE}}{\Delta \text{TOC}} = 0.13 \rightarrow \frac{\Delta 1,2\text{-DCE}}{\Delta \text{EDC}} = \boxed{0.048}$$

約1/10に低減

◆今回の促進剤設計値

EDC投入量	1125 kg
溶液量	39.4 m ³
TOC換算濃度（理論値）	10600 mg/L
TOC→EDC換算係数	0.37
今回EDC投入量に対する 1,2-DCE浄化可能量（推定）	5.4 kg

◆一般的な設計値

安全率 × 1.5	現地土質・汚染状況踏まえた 標準的なEDC設計投入量	750 kg
	設計当初見込んだ 1,2-DCE領域内存在量（推定）	3.0 kg
	上記分解収率	0.0040

図6 分解収率の算定過程詳細

2.3 生態系等への影響評価

2.3-1 生態系等への影響の評価方法

「微生物によるバイオレメディエーション利用指針（環境省・経産省、H17）」を準用し、生態系等への影響評価を実施した。

本指針は、バイオレメディエーション事業の実施における、市民生活や生態系等への影響に対する各種リスクを抽出し、適正な対処を考察する評価を行うための指針である。

2.3-2 生態系等への影響評価項目

前述の指針に即した評価を行うための項目としては、以下のような項目が挙げられ、それらの情報をもって、“生態系等への影響の総合評価”を実施する。

① 利用微生物の情報

利用微生物の分類／歴史／生理・生態学的性質（生育条件有害物質産生等）／検出法等

② 浄化技術の情報

技術概要／分解生成物／微生物特性（生残・拡散・病原性）

栄養物質特性（性状・目的・導入法・法規制）

③ 作業区域及びその周辺の情報

作業域特徴（汚染原因／水文地質特性／生態情報）

浄化対象物質／汚染状況

2.3-3 生態系等への影響評価結果

生態系等への影響としての懸念事項を以下に示す。

① 病原性微生物の一次的増加に対する懸念

⇒ 事業開始初期に病原微生物の増大が観察された。

② 有害ガスの発生に対する懸念

⇒ 事業を通じてメタン・硫化水素の発生が見られた。

③ 添加資材の混合や拡散に対する管理への懸念

⇒ 対象の汚染物質の移動性が高い。

⇒ 地下での汚染物質と添加資材の混合が困難である。

⇒ 地下水流向が一定でない（局所流の存在）。

2.3-4 懸念事項への具体的対処①

① 病原性微生物の一次的増加に対する懸念への対処

⇒ 増加時は関係指針に準じた対処を徹底する。

例：作業員の手袋等の着用

消毒の徹底

作業範囲のシート養生等を実施し、地上での拡散の最少化

⇒ 通常的环境レベル濃度への収束を確認後に事業を終了する。

2.3-5 懸念事項への具体的対処②

② 有害ガスの発生に対する懸念への対処

⇒ 設計／モニタリング等の予見予防措置を適切に実施する。

例：地中と地上を導通する電柱や地下室等の構造物の位置確認

上記構造物存在部での実施制限

床下や地中の有害ガス管理

⇒ 必要に応じて適切な除害措置を講ずる。

例：滞留防止措置として床下換気やガス吸引の実施等

2.3-6 懸念事項への具体的対処③

③ 添加資材の混合や拡散に対する管理への懸念

⇒ 設計／モニタリング等の予見予防措置を適切に実施する。

例：汚染と添加資材の混合に関する設計時の詳細検討の実施

敷地境界等での適切なモニタリング／揚水対策の実施等

2.3-7 その他の留意事項

以上に述べた懸念事項及び対処を踏まえ、事前に適切な事業計画を構築し、事前に周辺住民或いは従業員等、関係市民に対する説明と理解を取得（公衆受容の取得）した上で、事業を遂行する。

2.4 試験施工時の課題と本施工時の留意点

詳細は、現在策定中の全体浄化対策案と併せて示すが、現地パイロット試験時に判明した課題と本施工時の留意点を以下に示す。

① 生態系等への影響把握・低減

今回の試験成果に加えて、2.3 で示した懸念事項及び対処を踏まえ、実施体制及び実施の際のモニタリング項目等を再考する必要がある。

② 井戸の目詰まりや水みち形成への対処

本試験においては、初期溶液注入時には、φ100 仕上げの注入井戸 5 箇所に対し、1 箇所当たり 3～7L/min を自然注入（重力注入）したが、経時的に水位上昇が生じ、一部圧力注入となった。循環注入工法時も同様の現象が生じた。

本格浄化対策工法で強制的な注入を長時間に亘って継続すると、水みち部が生じ、促進剤の効率的な均質化の形成が困難となる可能性が高い。

この原因は、細粒土分による井戸周辺の目詰まりや高濃度促進剤による透水性低下に伴う井戸能力の低下が考えられた。本試験では観測井戸の場合であるが、フィルター材（けい砂）を 2 号から 3 号に変更することで井戸内への流入土砂を抑えることを確認しており、本施工時には促進剤注入量に対応した井戸仕様（掘削径、仕上げ井戸径、スリット幅・間隔とフィルター材仕様等）を決定することが必要である。

③ 地盤沈下や騒音・振動に関する検討・調査

本施工時には、①に示した生態系等への影響のみならず、他の大規模な建設事業同様、社会基盤、住民の生活環境に大きな影響を及ぼす可能性がある。そのため、その浄化事業の性質に即した、環境測定項目を検討し、事前～事後の調査を行う必要がある。

【参考資料 1】 地下水流動状況の整理

1. 地下水流動状況

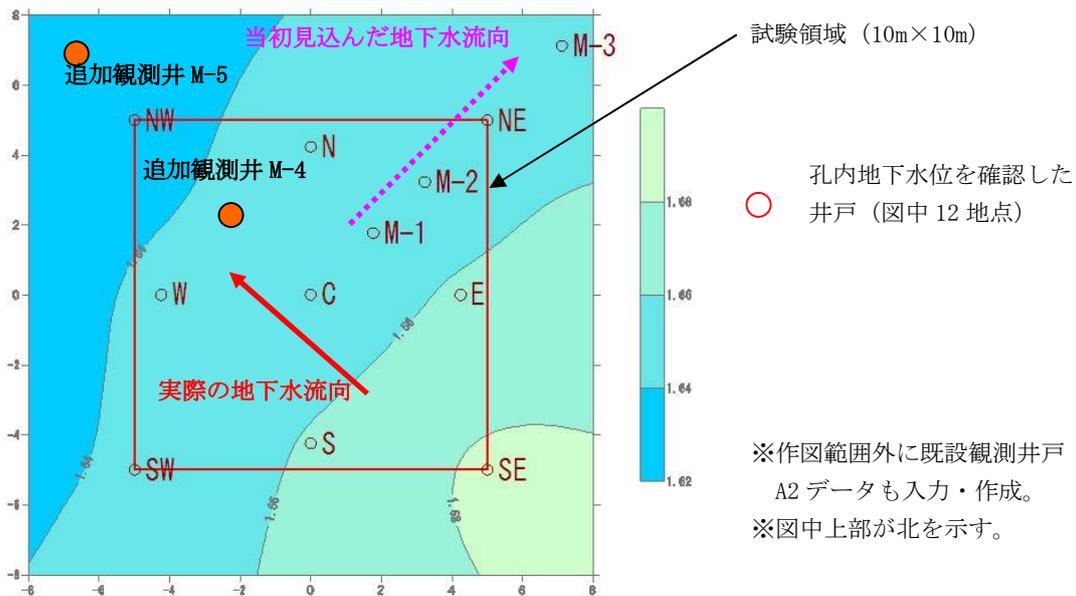
(1) 試験開始前の地下水流向

5月21日に当初計画した注入・揚水・観測井戸等計13基すべての井戸設置が完了した。13基の井戸及び既設観測井戸A2における孔内地下水位を確認した結果、試験領域周辺においては、その地下水位分布から北西流となる地下水流向が確認された（参考図1-1参照）。

平成20年度報告の既往調査によって得られた、南吹田地域広域の地下水位分布状況から推定されていた地下水流向が概ね北東流であったのに対して、おおよそ90度程度西側に向いた方向であった。

このことから、当初計画の初期促進剤溶液の各井戸への注入量及び揚・注水による地下水循環工程の際の再注入量を、地下水流動にあわせて変更した。

また、地下水経過分析期間の移流・拡散等の影響を確認するため、試験領域中央から地下水下流方向に向かう軸線状に観測井M-4及びM-5を追加設置し（7月1、2日）、当初設置した井戸と併せた観測体制とした。



参考図 1-1 試験開始前の地下水位分布状況（5月21日）

(2) 水質経過分析期間中の地下水流向

地下水位観測の結果から得られた地下水位分布の状況を、参考図1-2に地下水位の平面分布図（コンター図）として時系列的に整理した。また、各井戸の孔内地下水位の経時変化と周辺地域の降水量を参考図1-3に示す。

初期注入完了3時間後（5月23日）では井戸E付近で地下水頭コンターが密になっており、促進剤溶液の流入にかなりムラができていた状況が推察される。

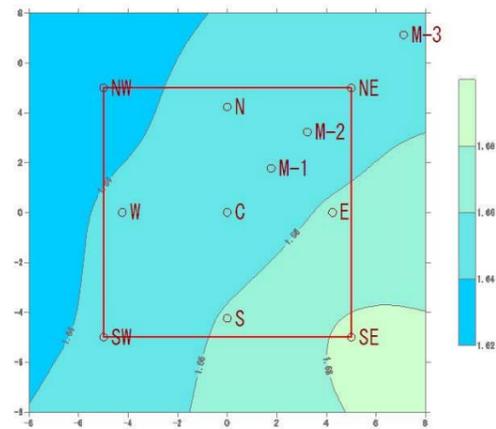
地下水位観測の結果、循環工程終了3日後（6月22日）には、地下水位は試験領域内にお

いては南西部が落ち込む状況を示していたが、それ以降の期間については、地下水面が一定となり、試験終了にあたる循環工程終了 129 日目（10 月 26 日）まで概ね北西流を示す地下水分布状況が確認された。経過観測期間中は、追加設置した観測井付近で地下水位の落ち込みが見られ、この付近は調査区画の中で透水性がよいなどの要因が考えられる。

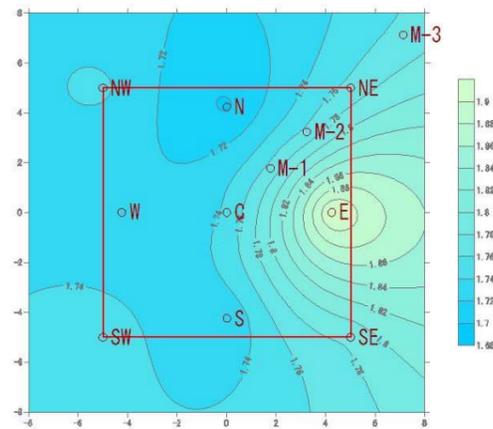
参考図 1-3 に示した各井戸の孔内地下水位と周辺地区の日降水量の経時変化グラフについては、循環工程時は、揚・注水の影響が各井戸の孔内地下水位に生じているため、詳細な状況の検証は困難であるが、循環工程終了後の試験期間のうち、主にまとまった降水が確認されている 3 期については、1 期目に近接する 2 期目はやや不明瞭であるが、いずれの期間についても各井戸で降水に対応する孔内地下水位の上昇が確認された。

これより、降雨及びそれに伴う表層部からの雨水浸透による局部的あるいは局時的な変動があったと推定されるものの、循環工程終了後、試験領域周辺の地下水流動に大きな乱れはなく、地下水流向は概ね北西流であったことが推定される。

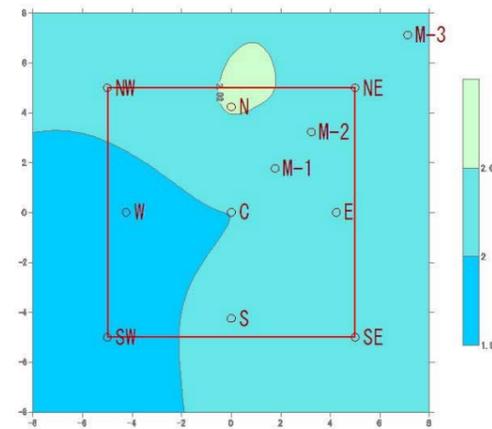
初期注入前 (H22/5/21)



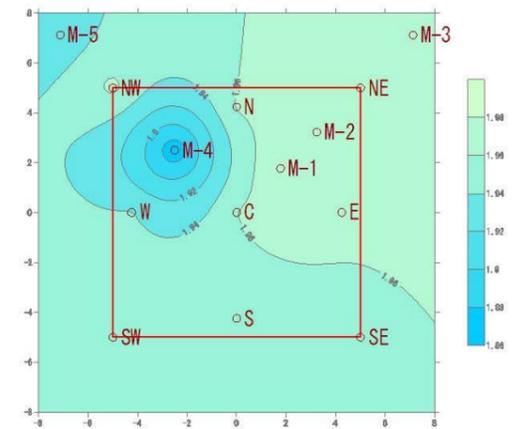
初期注入完了3時間後 (H22/5/23)



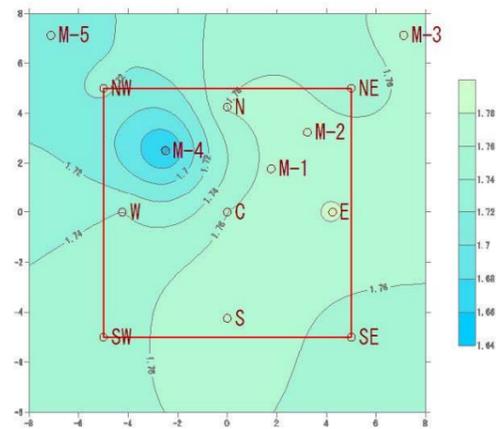
循環工程終了3日後 (H22/6/22)



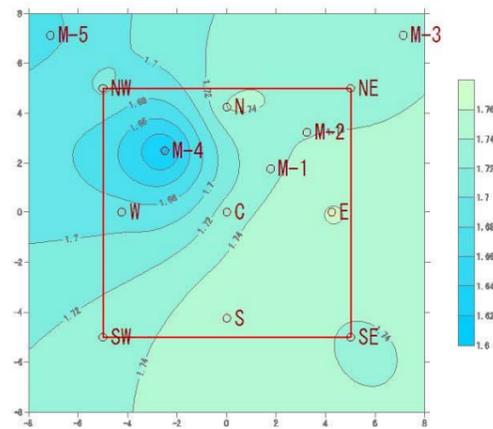
循環工程終了31日後 (H22/7/20)



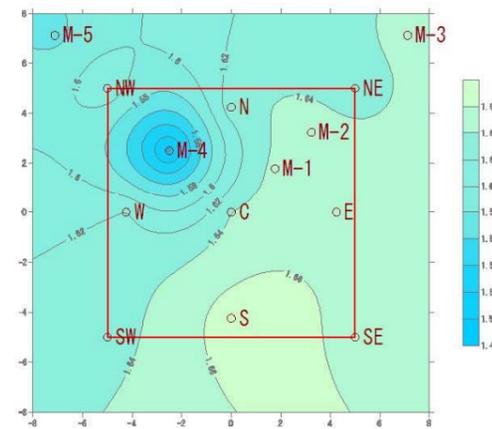
循環工程終了46日後 (H22/8/4)



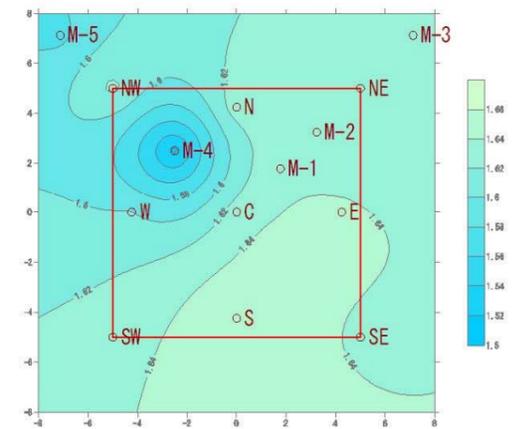
循環工程終了59日後 (H22/8/17)



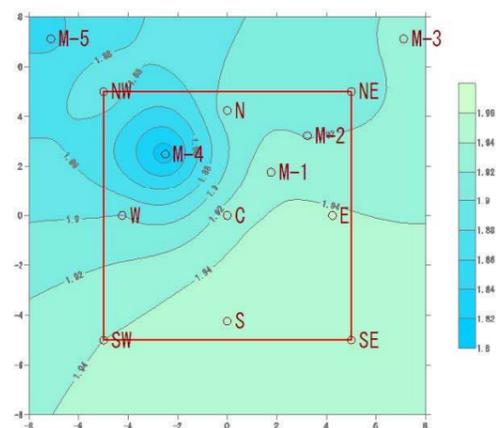
循環工程終了73日後 (H22/8/31)



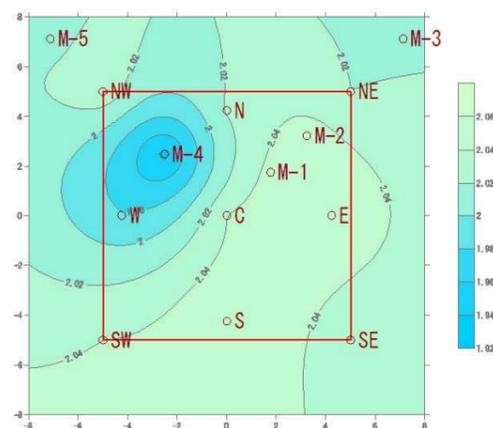
循環工程終了87日後 (H22/9/14)



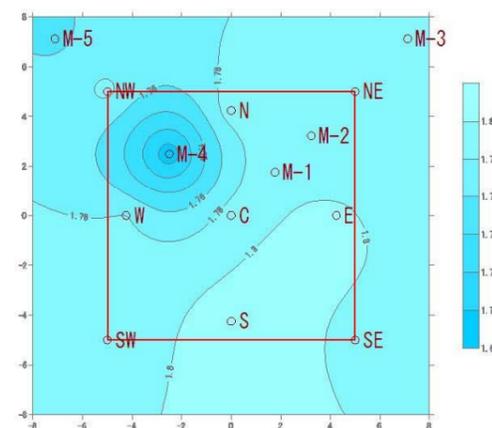
循環工程終了101日後 (H22/9/28)



循環工程終了115日後 (H22/10/12)

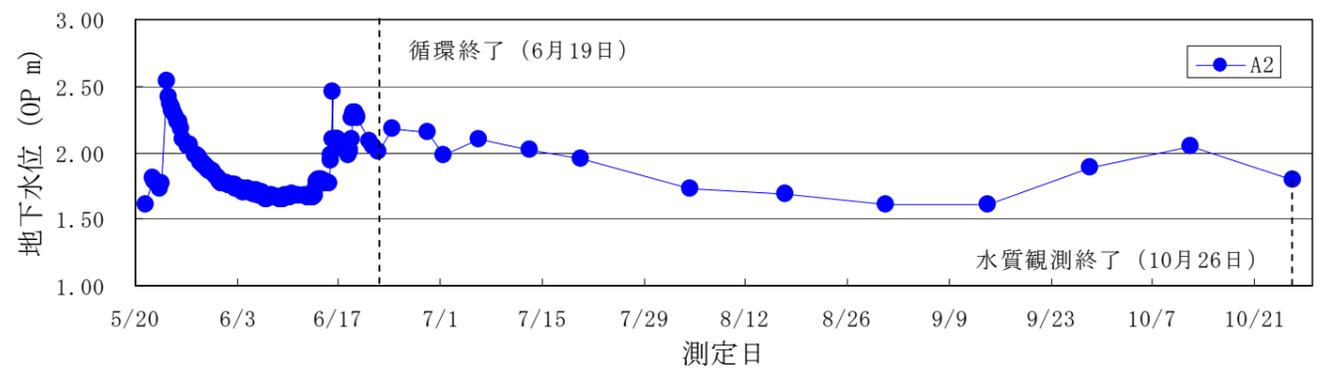
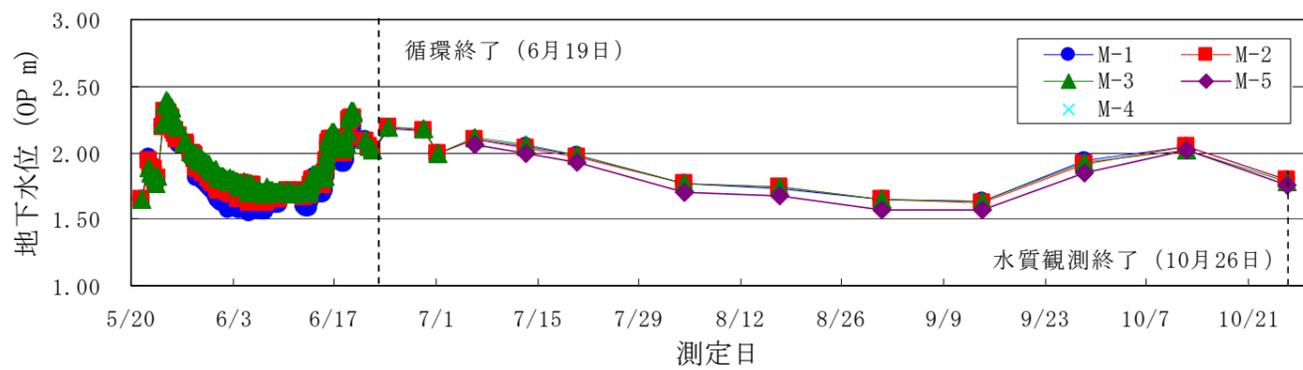
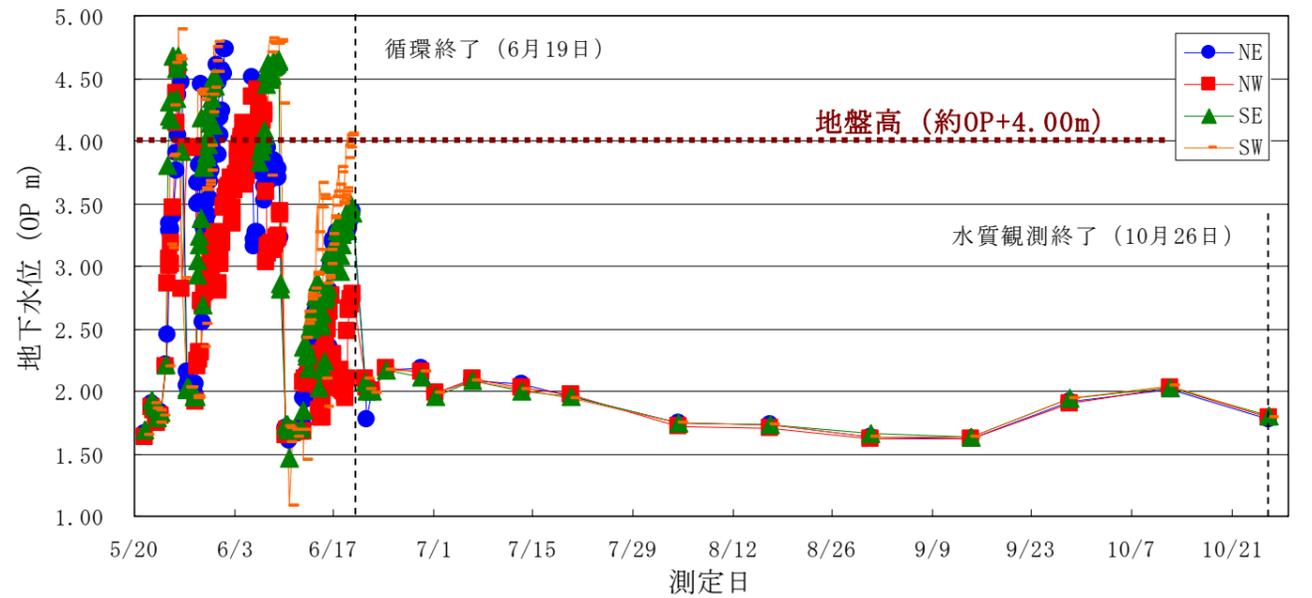
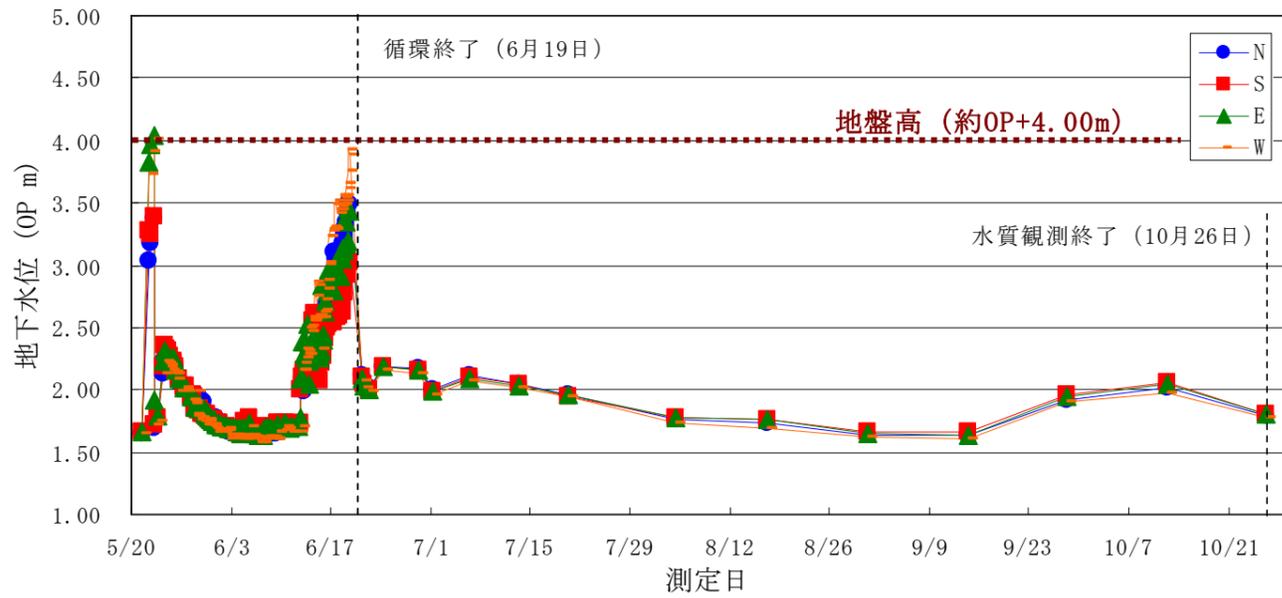
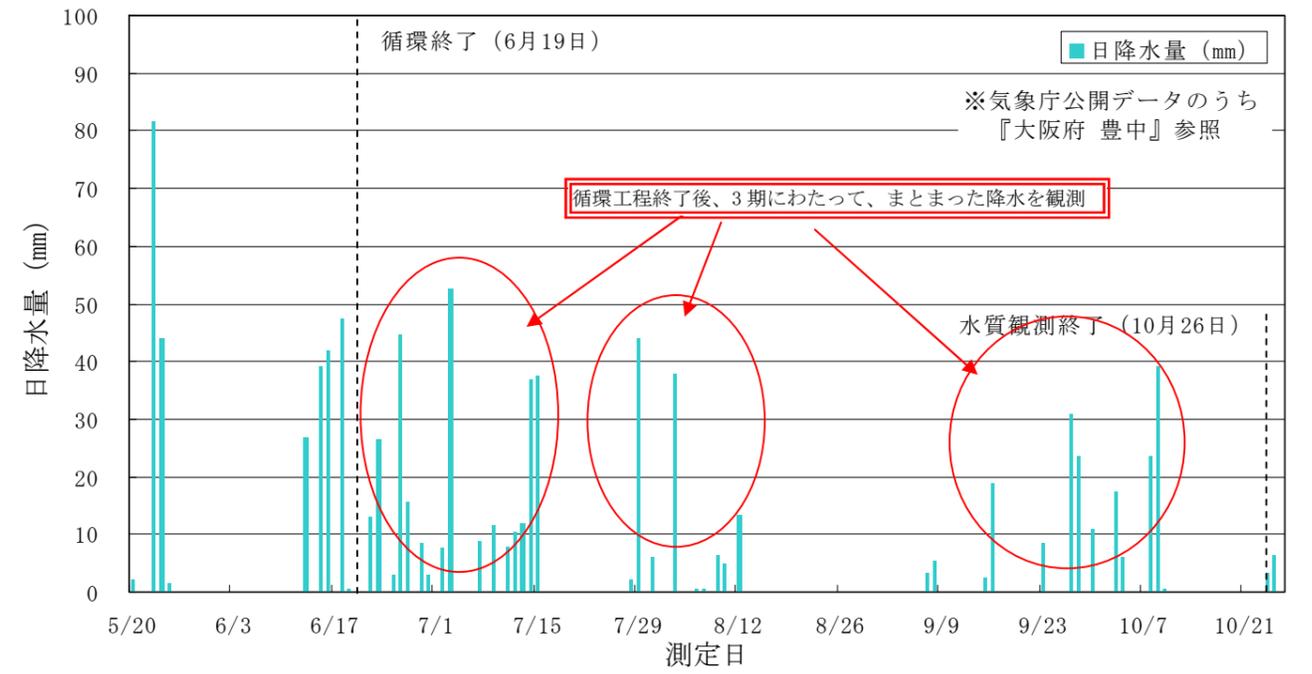
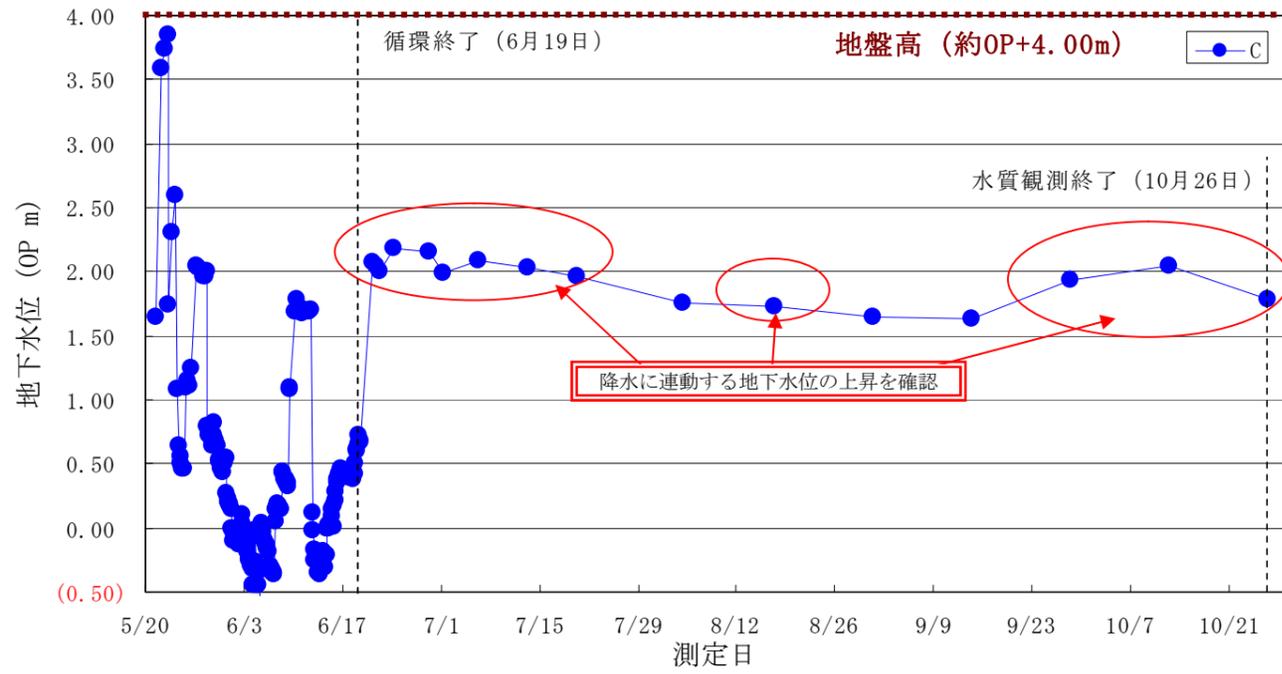


循環工程終了129日後 (H22/10/26)



地下水流向：北西流
(おおよそ図中SEからNWへの流れ)

参考図 1-2 代表測定日ごとの地下水位平面分布図



参考図 1-3 各井戸の孔内地下水位の経時変化と周辺地域の降水量

(3) 地下水流速

測定日ごとに地下水流向の流軸上に位置する井戸 NW 及び SE で観測された地下水位から推定した、試験領域内の平均的な動水勾配及び地下水流速を参考表 1-1 に整理した。

ここで、透水係数 k は、平成 20 年度調査結果のうち、観測井 No. 27 設置時に採取した砂質土試料の粒度試験結果から得られた、 2.75×10^{-3} (cm/sec) を代表値として採用した。間隙率は 0.40 と仮定した。

試算の結果、平成 20 年度調査結果を基に事前に見込んだ、北東へ 13.1m/年 (1.10m/月) という値に対して、試験期間中の平均的な地下水流速は北西へ約 4.8m/年 (0.40m/月) となり、その流速は緩やかであることが導かれた (地下水流向の逆向が確認された 7 月 20 日、10 月 12 日の測定結果は除外)。

① 動水勾配

$$\text{動水勾配 } i = \Delta H / L$$

ΔH : 流軸上最上流に位置する井戸 SE と最下流に位置する井戸 NW の孔内水位の差 (m)

L : 上記 2 基の井戸間距離 (m)

② 地下水流速

ダルシー法則から、以下のとおり求めた。

$$\text{地下水流速 } v = ki / n$$

k : 透水係数 (既往調査結果より、観測井 No. 27 砂質土の粒度試験結果より引用)

i : 動水勾配 (上記①に示したとおり)

n : 間隙率 (0.40 と仮定)

参考表 1-1 推定される試験領域内の動水勾配及び地下水流速

測定日	孔内地下水位 (OP m)		水位差 (m)	動水勾配	地下水流速 (m/年)	備考	
	SE	NW					
5月21日	初期注入直前	1.684	1.634	0.05	3.5E-03	7.7	
5月23日	初期注入直後	1.784	1.744	0.04	2.8E-03	6.1	
6月22日	循環完了3日後	2.006	2.005	0.00	7.1E-05	0.2	最小値
7月20日	循環完了31日後	1.956	1.965	-0.01	-6.4E-04	-1.4	除外
8月4日	循環完了46日後	1.746	1.725	0.02	1.5E-03	3.2	
8月17日	循環完了59日後	1.736	1.705	0.03	2.2E-03	4.8	
8月31日	循環完了73日後	1.656	1.615	0.04	2.9E-03	6.3	
9月14日	循環完了87日後	1.636	1.625	0.01	7.8E-04	1.7	
9月28日	循環完了101日後	1.946	1.895	0.05	3.6E-03	7.8	最大値
10月12日	循環完了115日後	2.026	2.035	-0.01	-6.4E-04	-1.4	除外
平均値 (5月21日～9月28日)					2.2E-03	4.7	
平均値 (8月17日～9月28日)					2.2E-03	4.8	

(4) 試験期間中に観測されたトレーサー物質の移流状況とモデル上での計算値の比較

(1) から (3) までの整理したとおり、試験領域周辺の地下水流動は、平成 20 年報告の既往調査によって得られた、南吹田地域広域の地下水位分布状況から推定されていた地下水流向が概ね北東流であったのに対して、おおよそ 90 度程度西側に傾く流向であった。加えて、計画当初想定した地下水流速 1m/月程度に比較して、各経過分析時実施時に確認された孔内水位から推定される地下水流速も、半分以下の 0.4m/月程度であった。

その一方で、試験期間（経過分析期間）が当初計画に対して長期化したこともあり、上記の推定地下水流速以上とも見てとれる、地下水上流側（南東側）から地下水再流入及び試験領域内地下水の地下水下流側（北西側）への流出と判断される現象が、トレーサー指標として採用した、地下水中の臭素イオン濃度の測定結果から確認された。

本試験に際しては、予め初期注入溶液中に臭素イオン濃度換算で 10mg/L となるように、臭化ナトリウムを添加した。循環工程終了後 3 日目（6 月 22 日）で試験領域内平均 0.84mg/L であった臭素イオン濃度は、循環工程終了後 129 日目（10 月 26 日）で同平均 0.35mg/L となった。さらに、参考図 1-4 に示す、代表測定日ごとの臭素イオン濃度平面分布図からは高濃度域が地下水下流方向に移動し、循環工程終了後 129 日目（10 月 26 日）では、試験領域内平均以上の範囲は、おおよそ井戸 C 近傍から地下水流向の下流域に分布していることが確認された。

ここで、3 次元移流拡散モデル内で再現を試みた試験期間中の促進剤移流拡散状況を参考図 1-5 に整理した。

観測井戸内水位及びトレーサー物質濃度について、それぞれ、参考図 1-6 から参考図 1-7 に実測値とモデル上での計算値の比較グラフを示す。これらの図から、局時的な乖離は見られるものの、試験期間、特に循環工程終了後の期間においては、周辺の地下水位変動及び促進剤の拡散状況について、実測値とモデル上での計算値が概ね調和的であることが確認された。

このことから、(3) で推定した地下水流速 (0.4m/月程度) が、試験期間中の長期的・平均的流速に対して、小さく見積もられている可能性があることが示唆される。これらの差異を生じさせる要因としては、以下に示すようなことが考えられる。

① 試験期間中の降水の影響による局時的な動水勾配の変化

試験期間中の降水量は、参考図 1-3 に示したとおりであるが、各井戸で確認された孔内地下水位と降雨との関係からは、全井戸ともに降雨の影響による地下水位の上昇に大きな差異は認められないが、試験領域近傍は舗装されておらず、周辺地域の表流水が集中しやすい状況にあると考えられる。そのため、周辺地域からの不均等な地下水浸透があった可能性も否定できず、その影響により局時的に試験領域近傍の動水勾配が大きくなり、結果として地下水流速が大きくなっていた可能性がある。

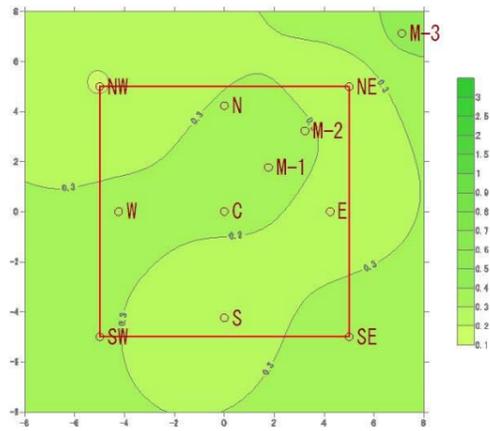
② 循環工程時に形成された水みちによる局地的な透水性の変化

今回実施した揚・注水による地下水循環時に生じる試験領域内の動水勾配は、定常時の動水勾配に比較し非常に大きなものである。そのため、循環工程期間中、試験領域周辺に水みちが形成された可能性が考えられる。結果として、土中の細粒分が洗い流され、自然状態に比較して、透水係数が大きくなり、局地的に地下水流速が大きくなった可能性がある。

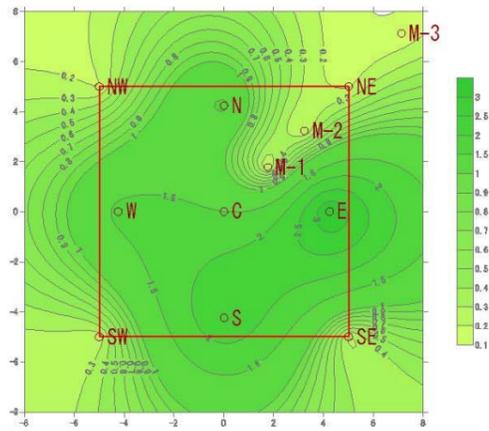
以上 2 項目に分けて挙げた、いずれの要因についても、局時的あるいは局地的なばらつきを伴う要素であり、これらの要因と実現象との整合を今回設定したモデル上で検証することは適わなかった。

ただし、先に述べたとおり、循環工程終了後の経過観測期間においては、周辺の地下水位変動及びトレーサーの拡散状況は、実測値と計算値が概ね調和的であった。そのため、今回、調整検討を行った地下水中物質の移流拡散に関わる各種パラメータは、既往調査により得られた当該地域全域の地盤・地下水流動状況に関わる情報等と併せて、同地域での本格的な浄化対策手法を計画・設計する際の有益な情報として位置づけられるものと考えられる。

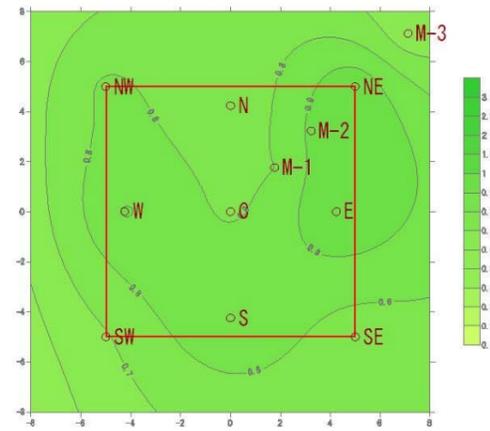
初期注入前 (H22/5/21)



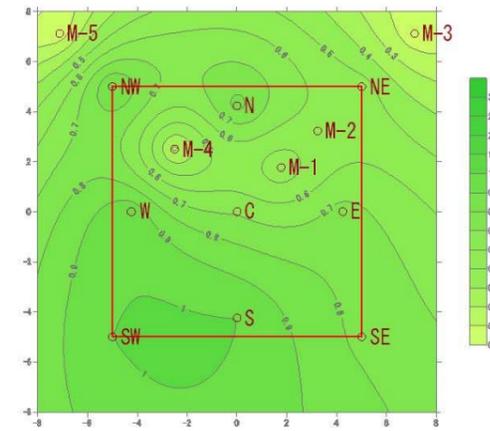
初期注入完了3時間後 (H22/5/23)



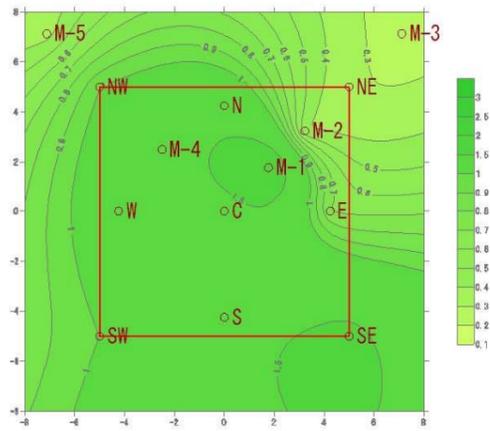
循環工程終了3日後 (H22/6/22)



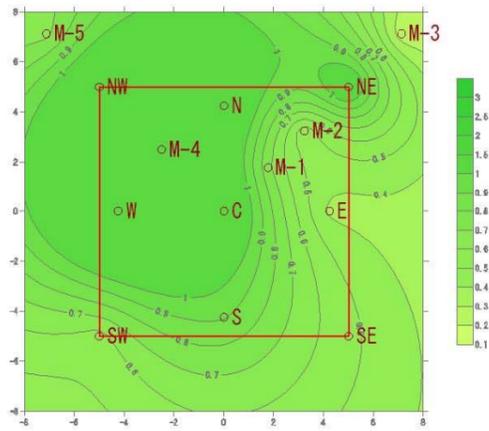
循環工程終了31日後 (H22/7/20)



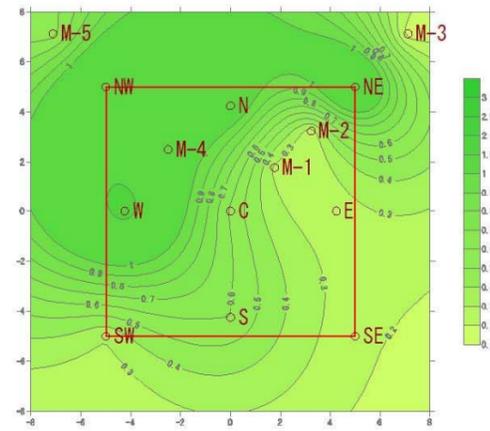
循環工程終了46日後 (H22/8/4)



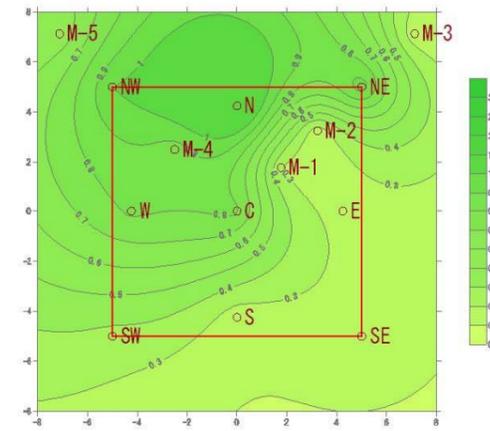
循環工程終了59日後 (H22/8/17)



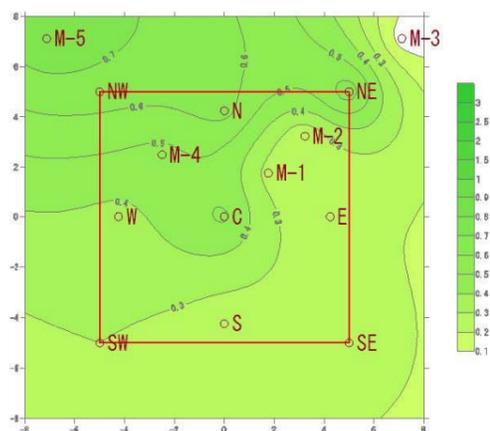
循環工程終了73日後 (H22/8/31)



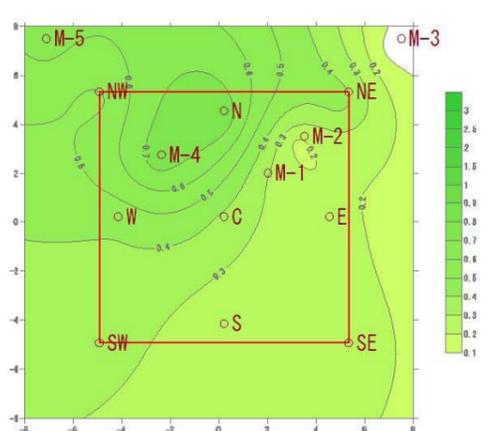
循環工程終了87日後 (H22/9/14)



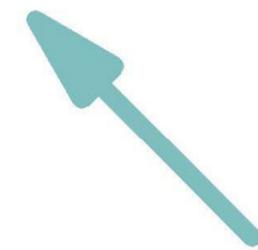
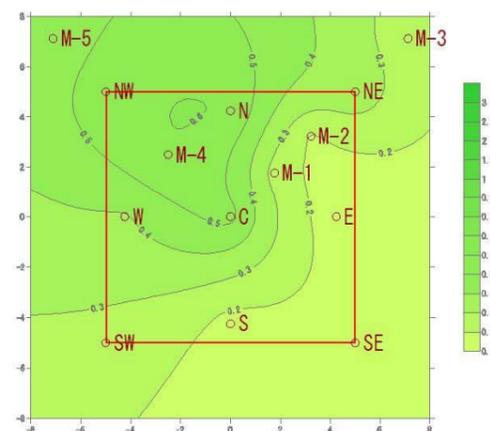
循環工程終了101日後 (H22/9/28)



循環工程終了115日後 (H22/10/12)

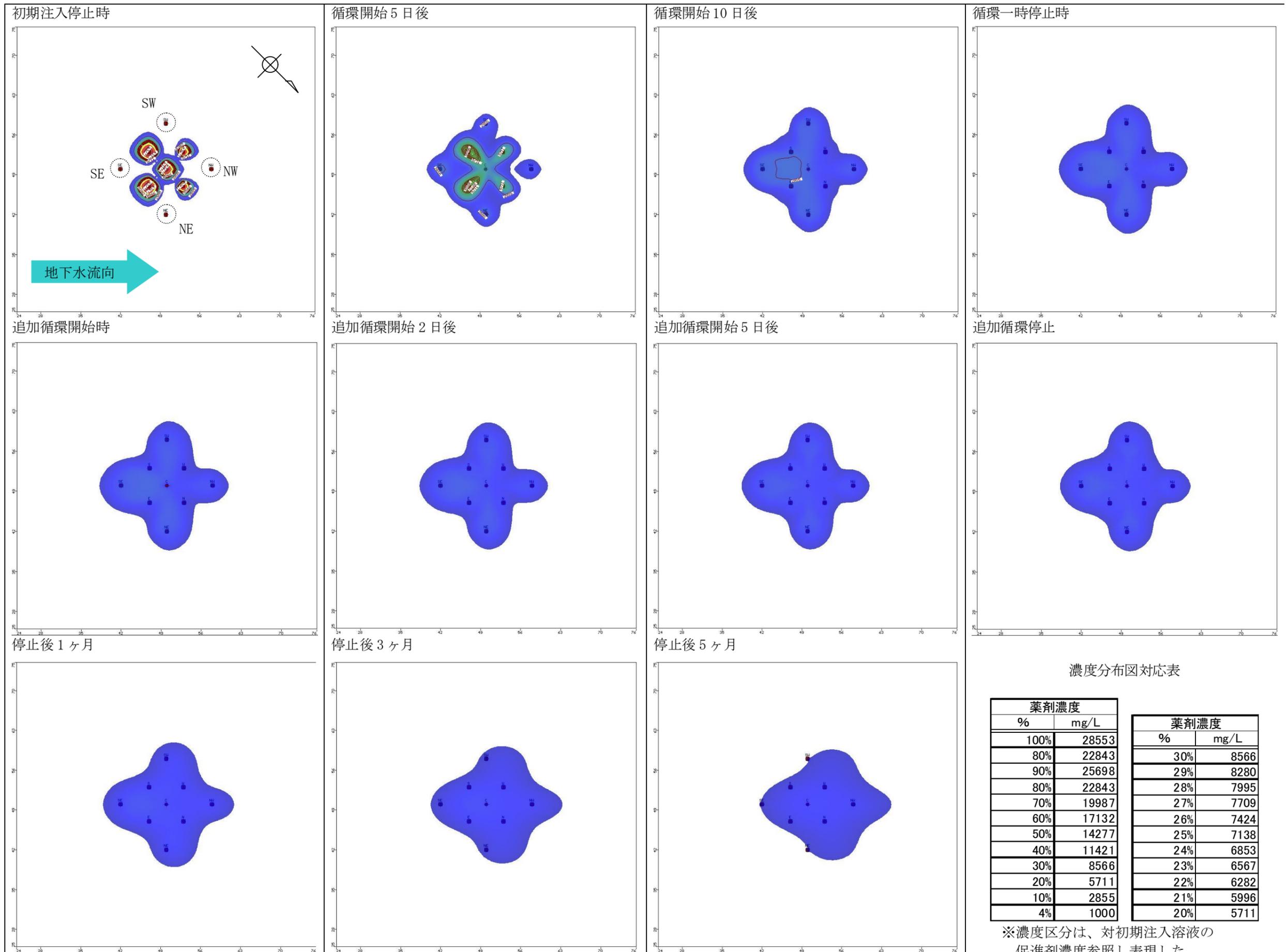


循環工程終了129日後 (H22/10/26)

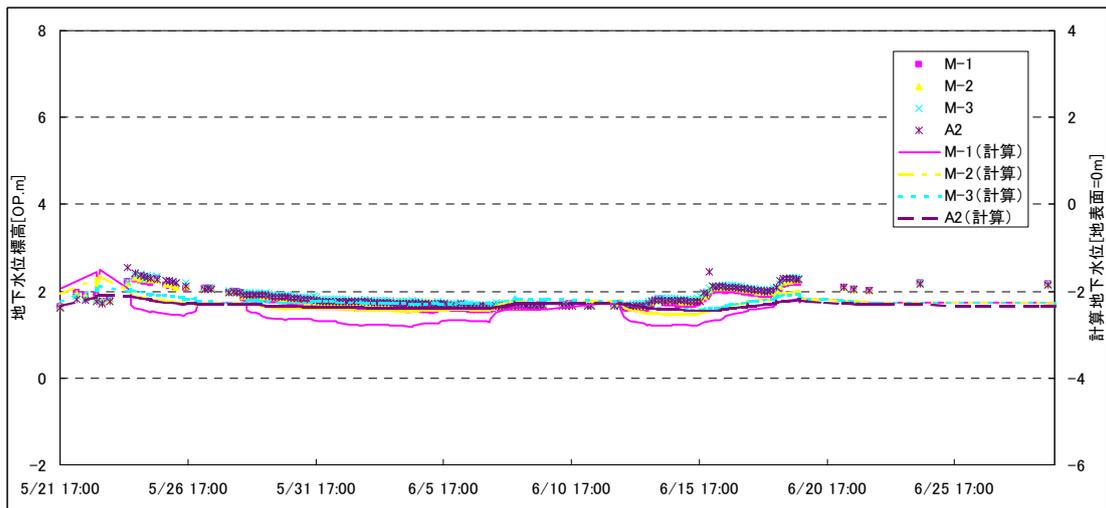
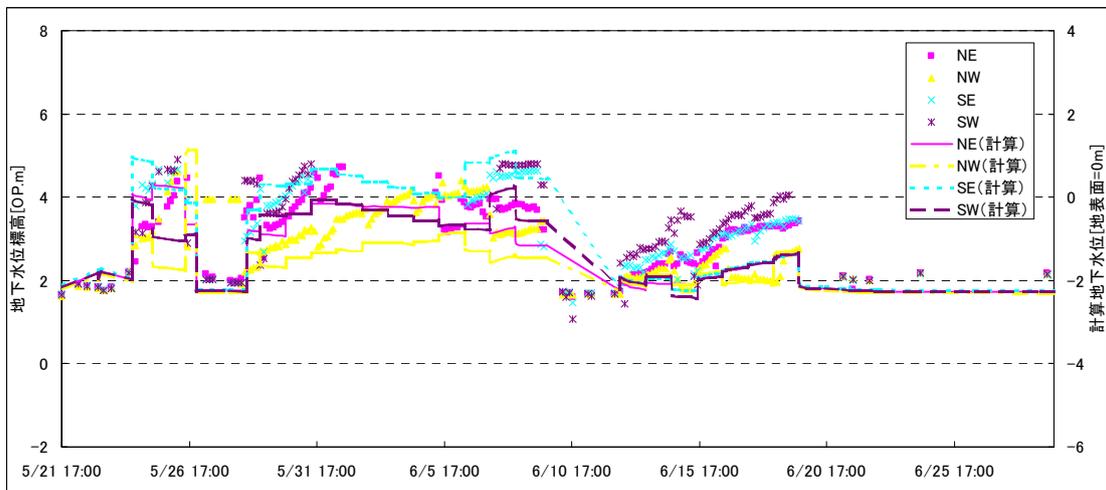
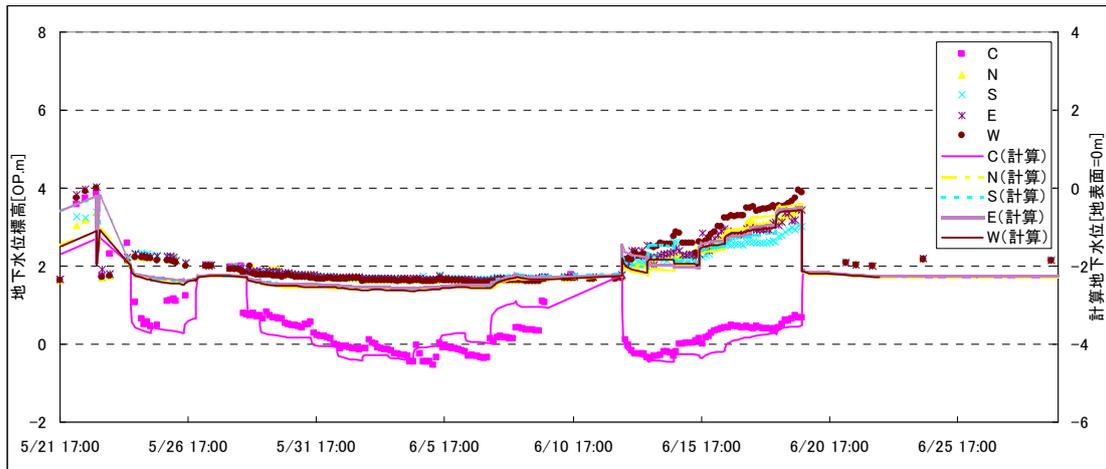


地下水流向：北西流
(おおよそ图中SEからNWへの流れ)

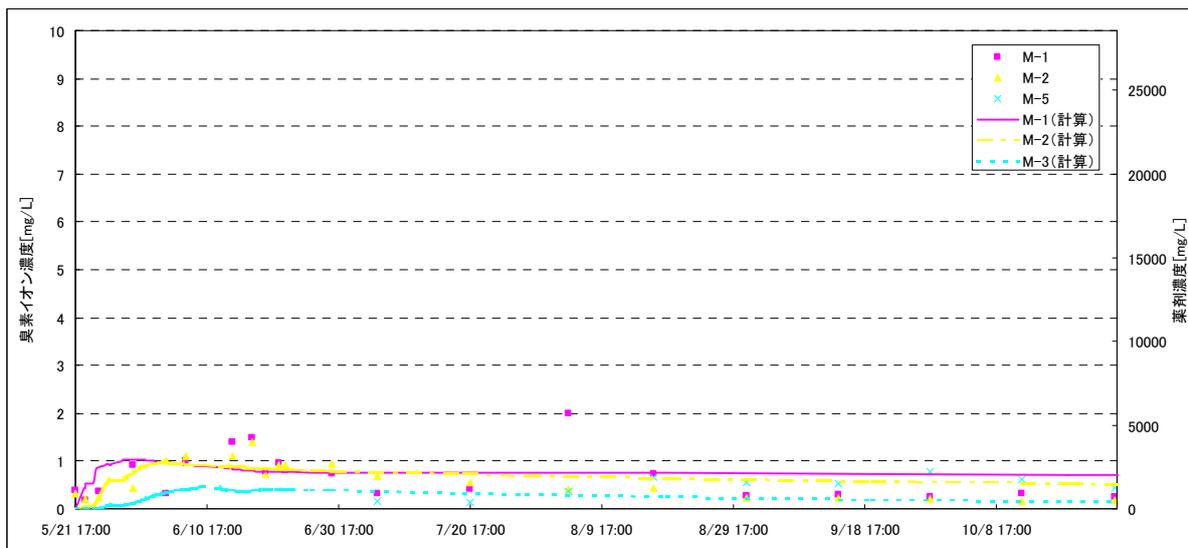
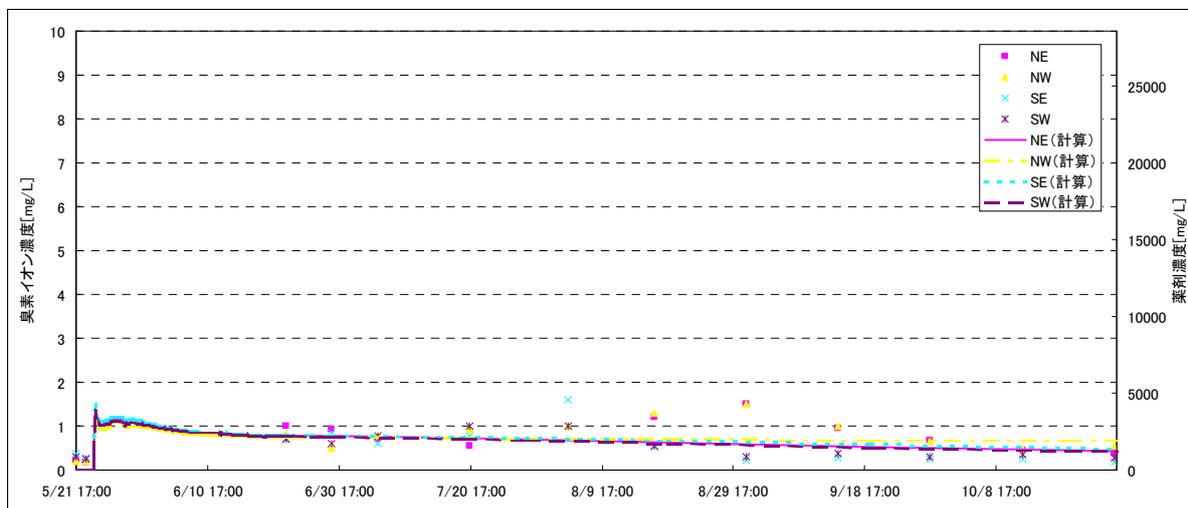
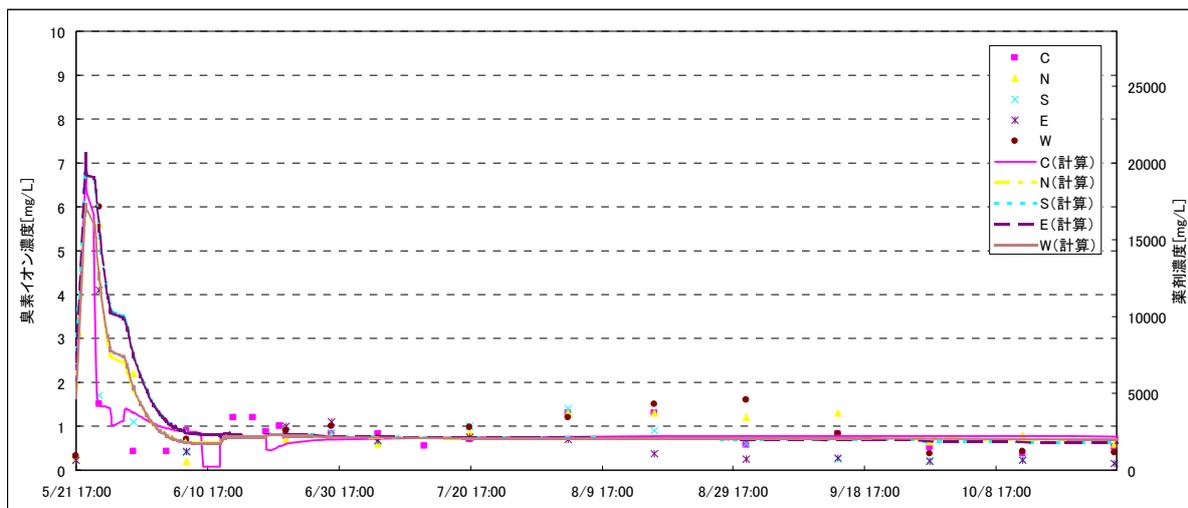
参考図 1-4 代表測定日ごとのトレーサー（臭素）濃度平面分布図



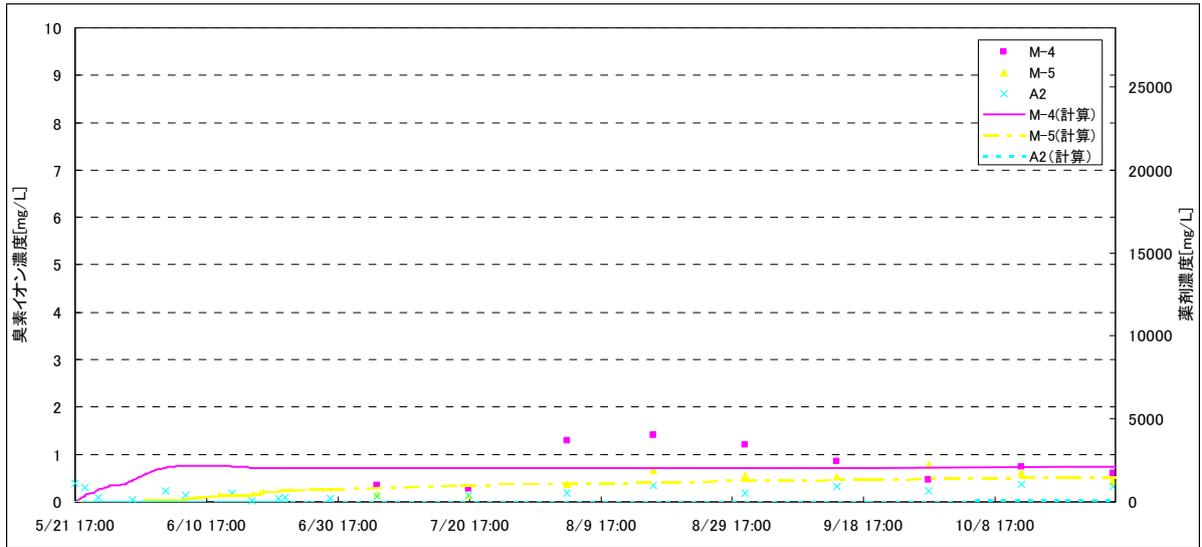
参考図 1-5 3次元移流拡散モデル内で再現される物質の移流状況



参考図 1-6 各井戸の孔内水位（実測値）とモデル上での計算値の比較



参考図 1-7 (1) 各井戸のトレーサー濃度 (実測値) と促進剤濃度 (計算値) の比較



参考図 1-7 (2) 各井戸のトレーサー濃度（実測値）と促進剤濃度（計算値）の比較