

4. 揚水完璧遮水工法による実証試験成功の報告と実施計画案

完璧遮水とは、地下水が遮水施設より下流に完璧に流れないことを意味する。そして、揚水完璧遮水工法は、その事実を完璧に実証することである。また、一般の良識ある国民が理解でき、国民が検証できることである。この実証試験は、揚水井戸群と揚水・注入・観測バリアーの揚水井群による揚水で、 Cl^- を含む地下水の流れを完璧に阻止し、流下した Cl^- を含む地下水を揚水・注入・地下水水質観測井へ淡水を注入し浄化する。

揚水井戸群の揚水による完璧遮水の試験結果を報告する。

実証試験条件

Cl^- 漏洩地層単元

実証試験地における地相の地層単元と透水性の地層単元は、ほぼ同一として使用可能である。

また、 Cl^- 漏洩地層単元は、透水層とみて良いので、この地域の透水性の地層単元は下位（①→⑥）より以下のようなものである。

- ① 第1大塚山難透水層（常に低い透水性を示す地層単元）
- ② Kd38 透水層（火山灰層は比較的高い透水性を示す地層単元）
- ③ 第2大塚山難透水層（非常に低い透水性を示す地層単元）
- ④ 下部透水層（火山灰層は比較的高い透水性を示す地層単元）
- ⑤ 第3大塚山難透水層（非常に低い透水性を示す地層単元）
- ⑥ 上部透水層（火山灰層は比較的高い透水性を示す地層単元）

試験用揚水井群および揚水・注入・地下水水質観測井群

各揚水井の井戸間隔は2 mであ（図 4—1）。同じく、各揚水・注入・地下水水質観測井の井戸間隔は2 mである。そして、揚水井列と揚水・注入・地下水水質観測井列との間隔は4 mである。

揚水井群は、全ての井戸のスクリーンが、Kd38 透水層に設置されている。各揚水・注入・地下水水質観測井のスクリーン位置は、それぞれ異なる。

揚水井群と揚水・注入・地下水水質観測井群の井戸径の詳細は、図 4—1・4—2に示してある。

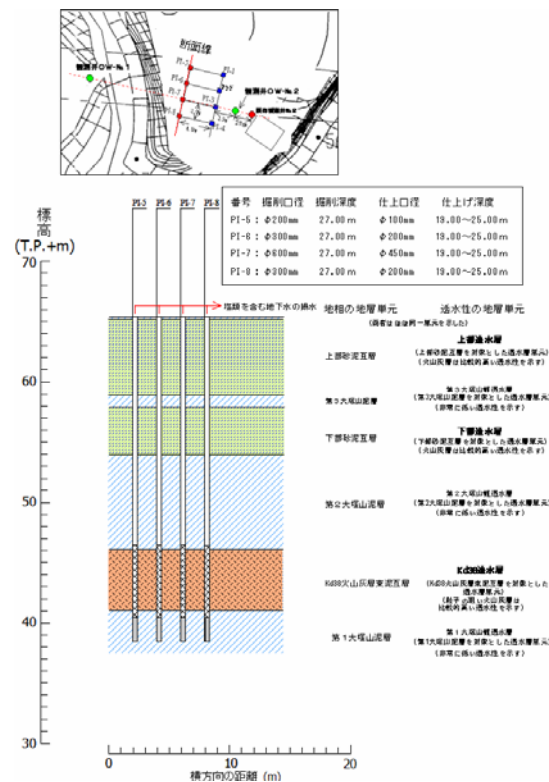


図 4—1 揚水井群の井戸構造

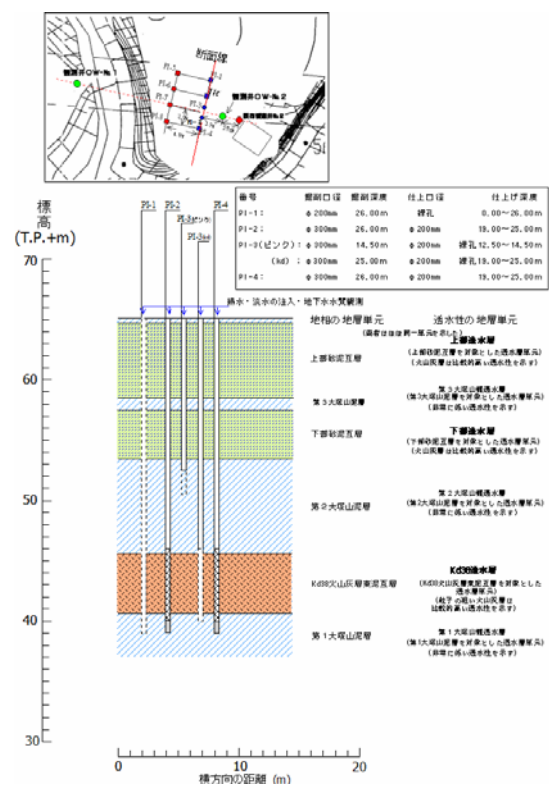


図 4—2 揚水・注入・地下水水質観測井群の井戸構造

なお、揚水井列と揚水・注入・地下水水質観測井列の横断面と新規適正観測地点 (OW- No. 2) ・既存観測井 No. 2 の配置の詳細は、図 4—3 に示した。

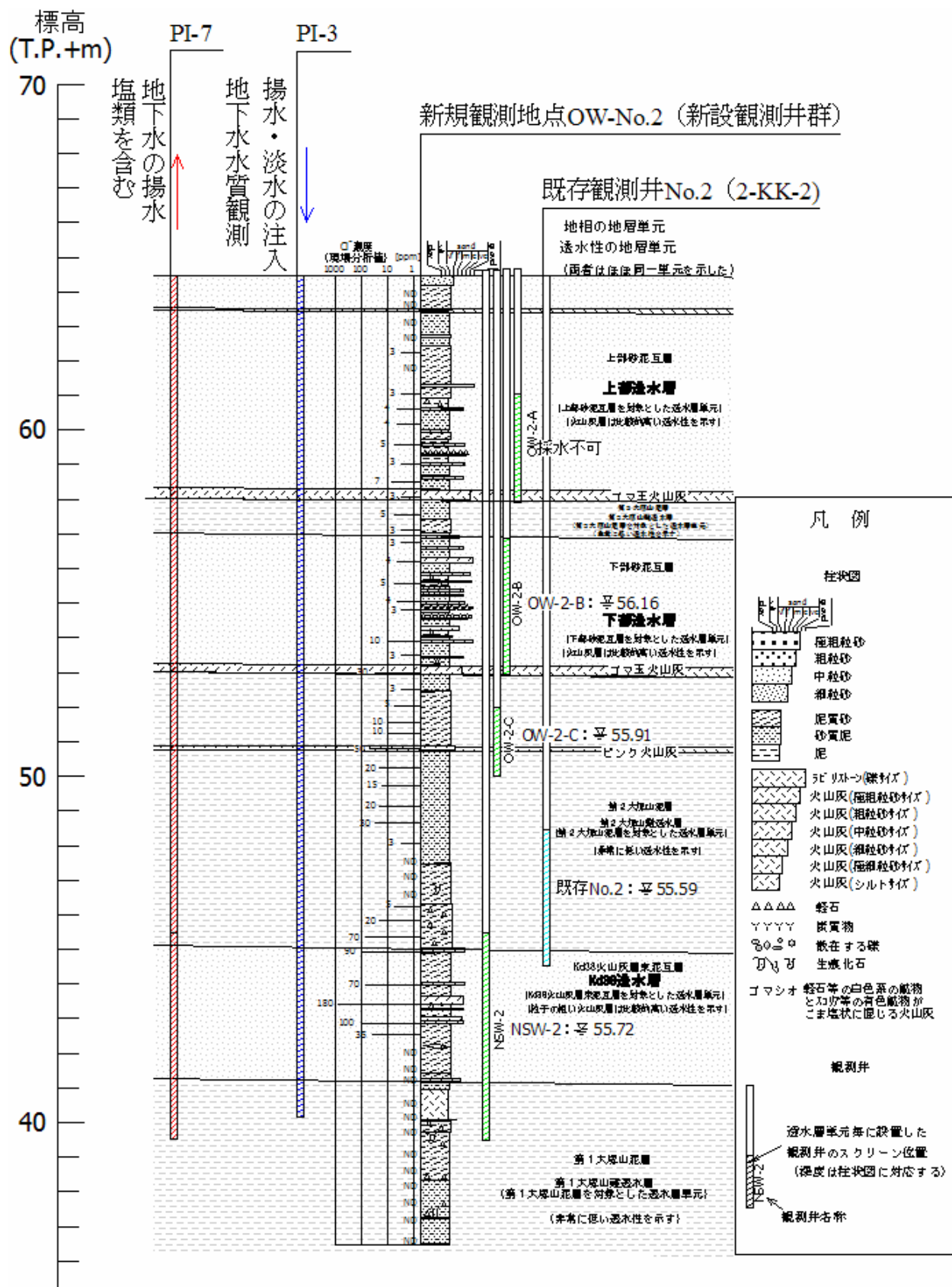


図 4—3 揚水井列と揚水・注入・地下水水質観測井列の横断面と新規適正観測地点 (OW-No2) ・既存観測井 No. 2 の配置

第1回実証試験

2006年12月5日～8日にかけて、図 4—1・2に示す井戸群で揚水試験を行った。揚水井 PI-7（口径：φ450mm）における揚水降下時の揚水量は $2.7\text{ m}^3/\text{h}$ である。60分前後でG.L. から14mの水位となる。その後、断続的定常揚水量（定水位揚水のため断続的揚水となる）は、ほぼ $7.3\text{ m}^3/\text{day}$ である。

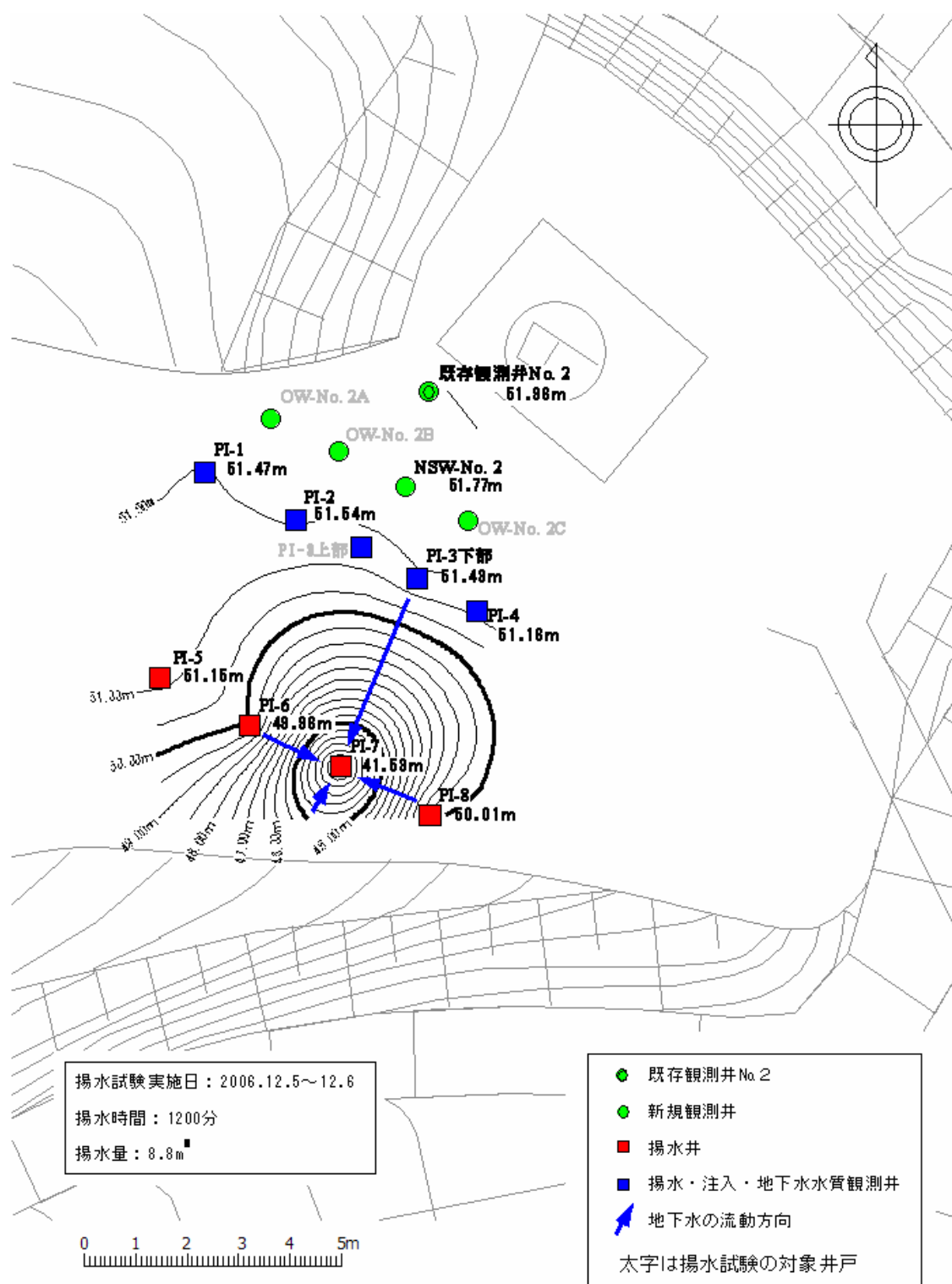
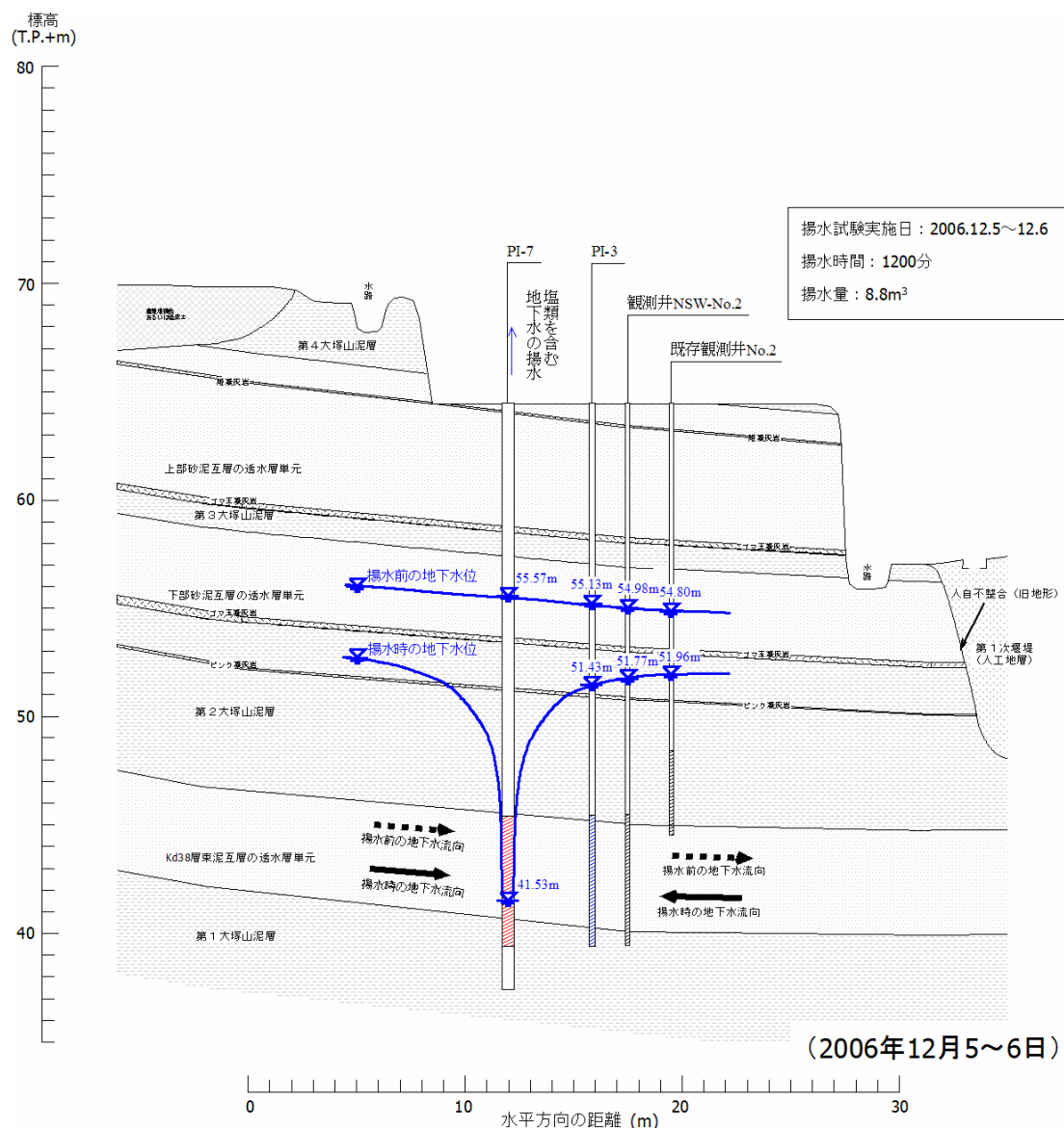
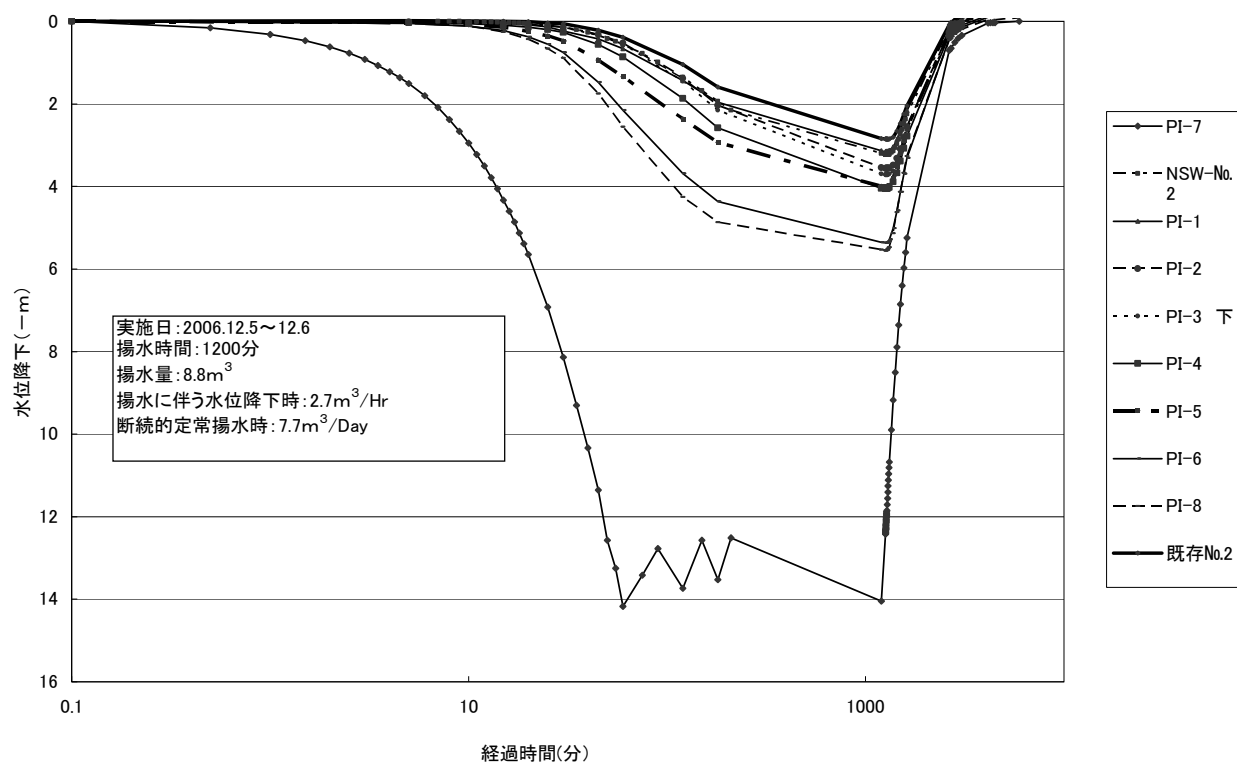


図 4—4 第1回揚水試験時の水位等高線図



この揚水試験開始 60 分後から 1200 分までの断続的定常揚水で揚水井戸群と揚水・注入・地下水水質観測井群の各井戸、および新規観測井 (OW-No. 2)・既存観測井 No. 2 の地下水は全て低下している。揚水井から遠くの観測井にかけて時間遅れをともなって低下し、また低下量も遠方の観測井で小さい。遠方の新規観測井 (NSW-No. 2) や既存観測井 No-2 での、それぞれの水位は、揚水開始時の初期値に比較して約 3 m 低下している。後者の既存観測井までの距離は約 7.5m である。試験結果は図 4—5・6 に示した。

この実証試験でみられた完璧遮水効果をアニメーションで示した。ダウン・ロードし、START をクリックしてください。日本地質汚染審査機構のマスコット「モグちゃん」が、跳んできて試験をしてくれます。

<http--homepage1.nifty.com-npo-geopol-auditor-otuka120.html.url>

第2回実証試験

同一揚水井PI-7を使用して、断続的定常時揚水量を $7.27 \text{ m}^3/\text{day}$ にして長時間揚水を行った (4080分)。その理由は、主体となる泥岩の貯留係数が小さく、薄い軽石層の透水係数は比較的大きい (図 4—7・8)。したがって、処分場をはじめとした背後地で降雨浸透量が、実証試験地の地下水位の変動を左右する。この長時間実証試験の結果、降雨量での変動は、揚水完璧遮水工法に全く問題ないことも明らかになった (図 4—9)。

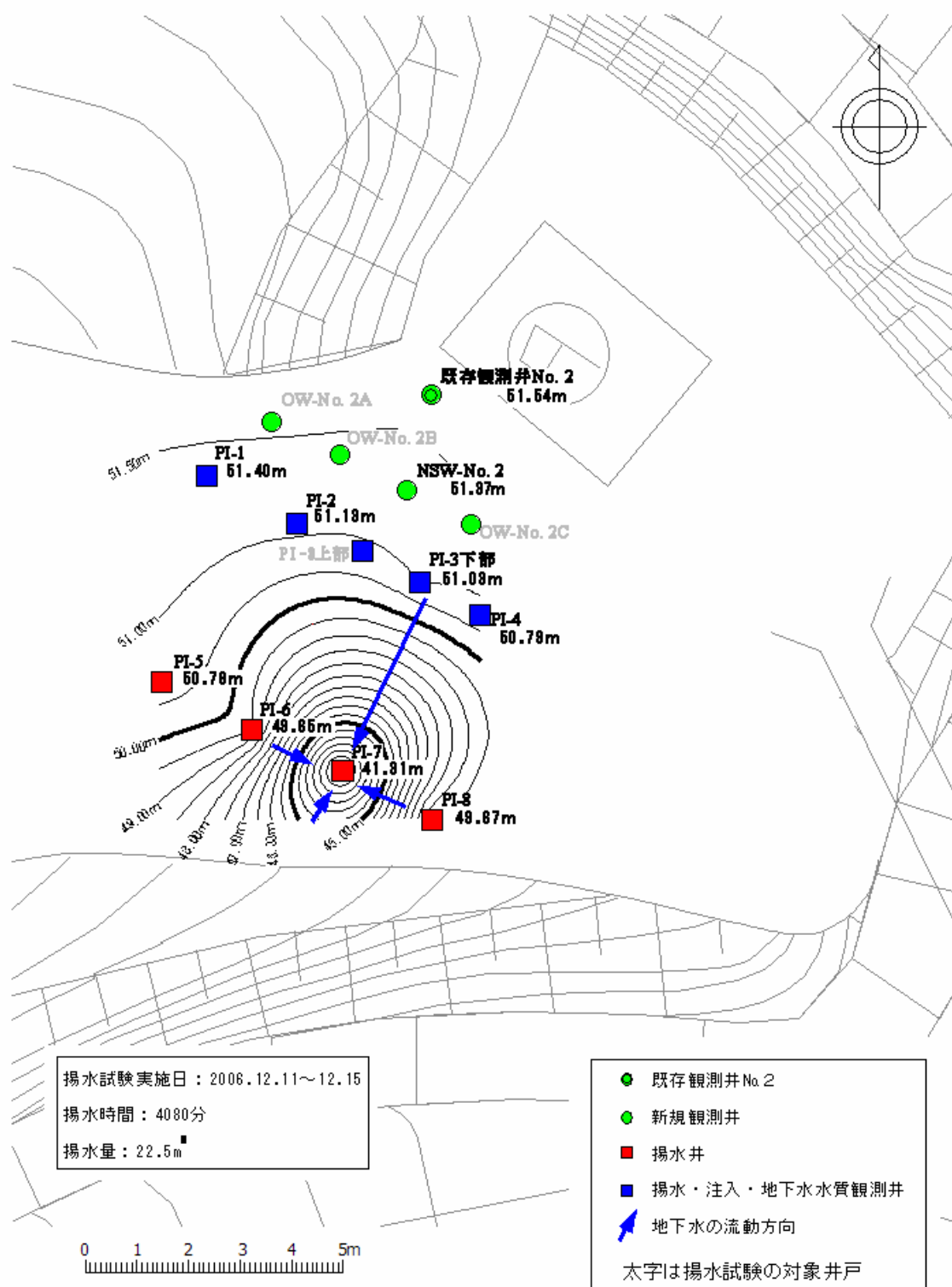
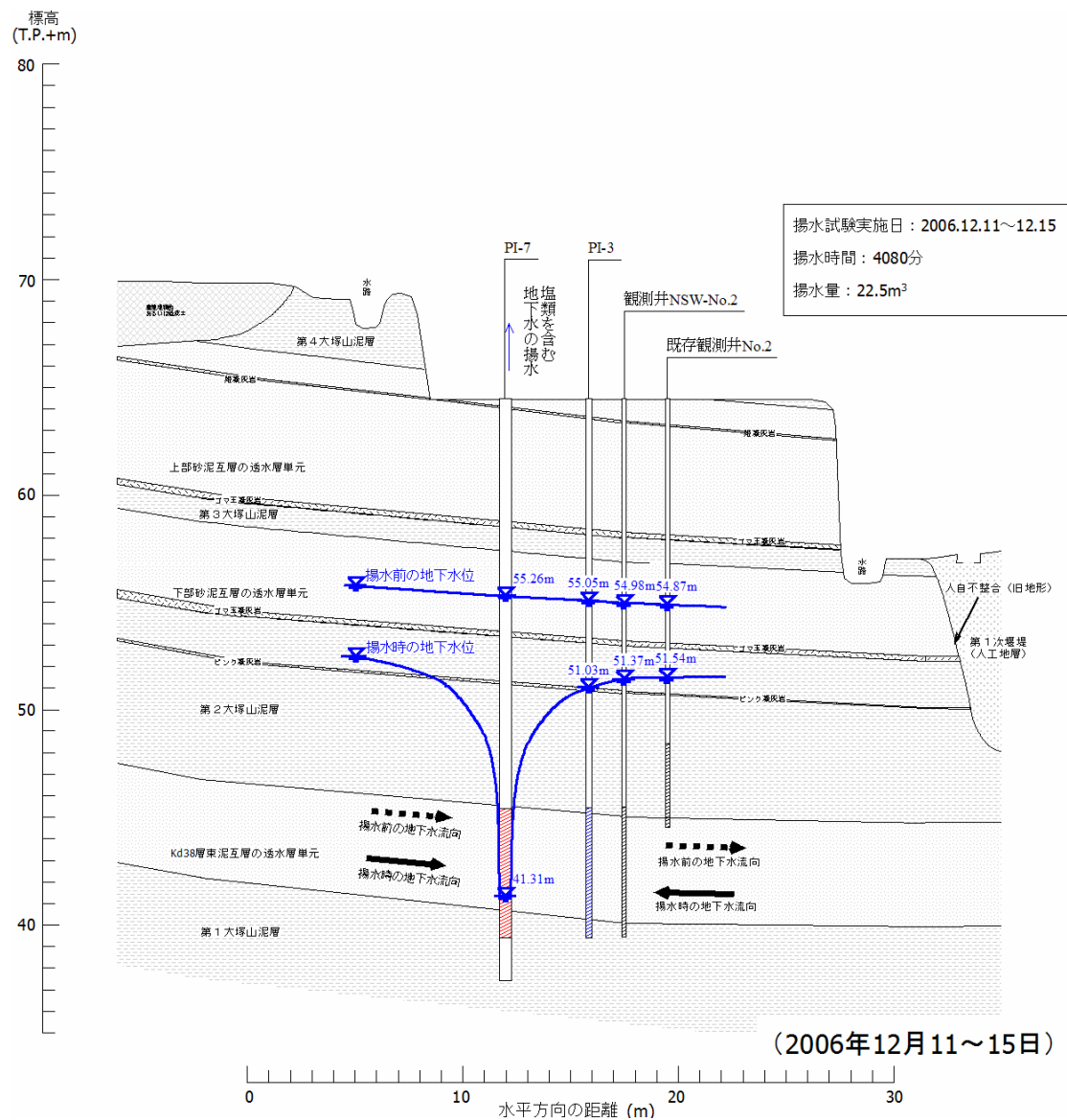
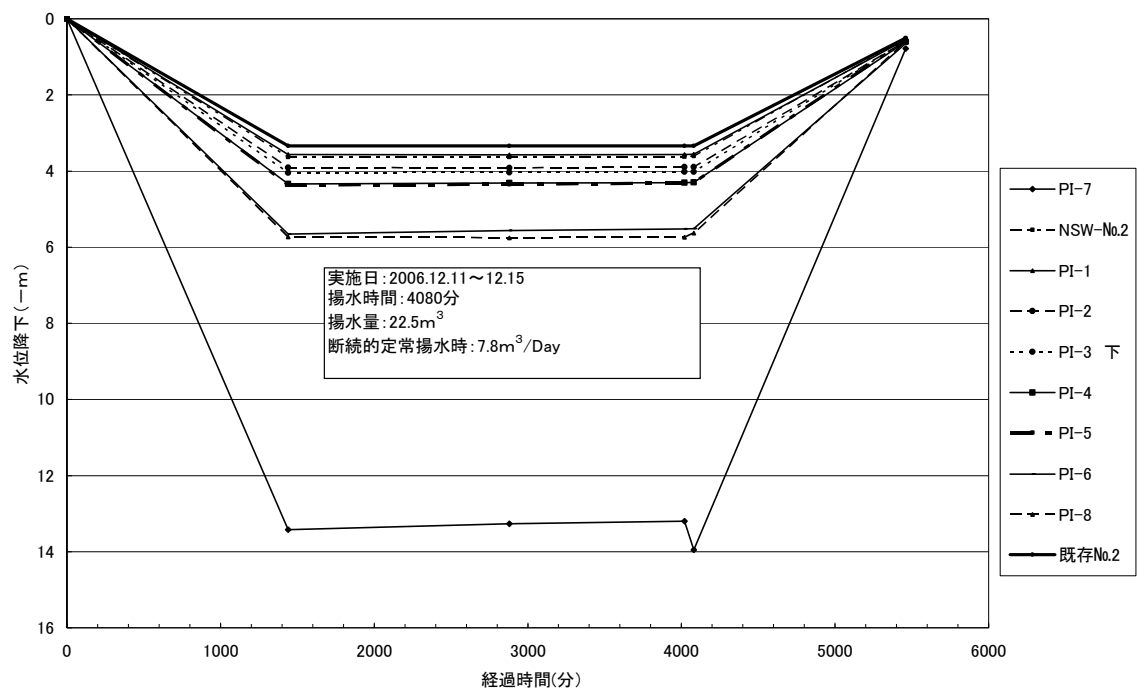


図 4—7 第2回揚水試験時の水位等高線図



第3回実証試験

第1回・第2回の実証試験の時より口径が細いPI-5（口径：100mm）を揚水井として、2007年1月5日～13日にかけて揚水試験を行った。降下時の揚水量は $2.7\text{ m}^3/\text{h}$ である。4分前後でG.L. から14mの水位となる。その後の断続的定常揚水量（定水位揚水のため断続的揚水となる）は、ほぼ $6.8\text{ m}^3/\text{day}$ である。そして、6700分後の揚水井の水位は、地表面（G.L.）から、ほぼ14mのところにある（図 4—11）。

さらに、最も遠い新規観測井 NSW—No. 2 や既存観測井 No. 2（揚水井から7.5m 離れている）では、揚水開始時の地下水位より4m低下している結果が得られている（図 4—10・12）。つまり、口径100mmの揚水井（PI-5）でも口径 $\phi 450\text{mm}$ の揚水井（PI-7）でも水位降下に大きな差は見られなく、いずれでも完璧遮水が可能であることが実証された。

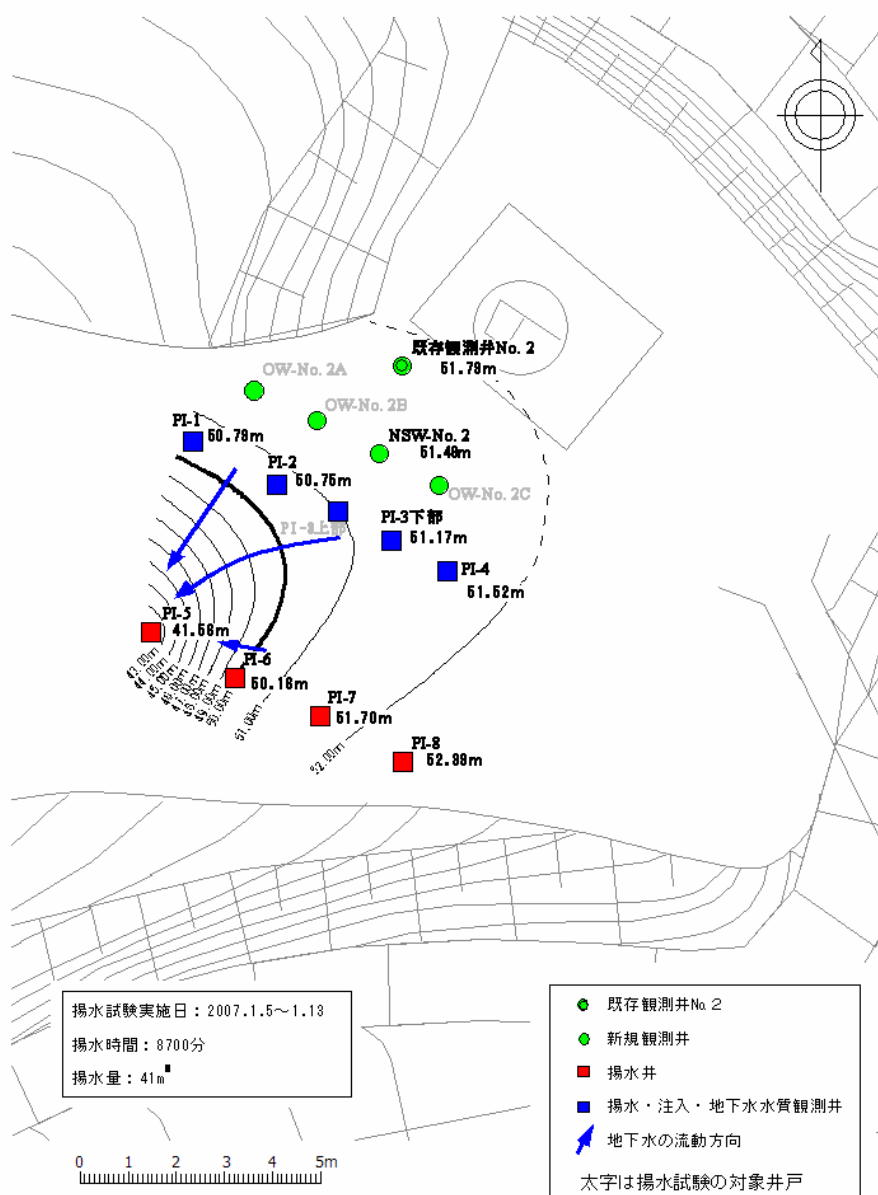


図 4—10 第3回揚水試験時の水位等高線図

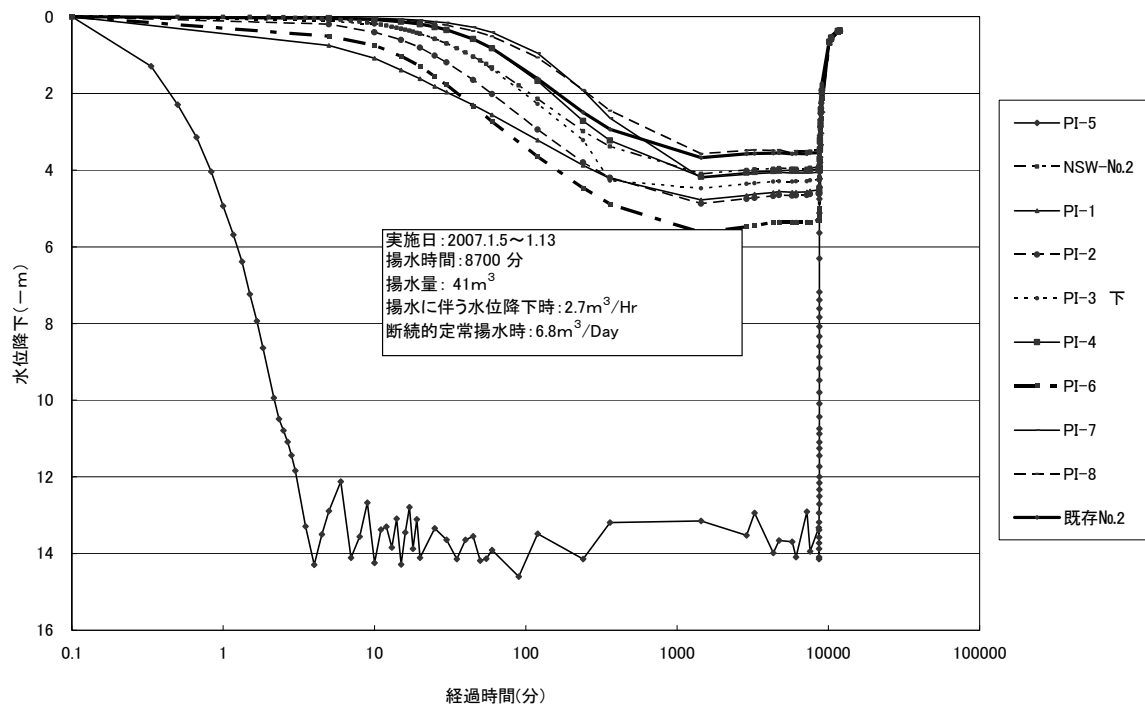


図 4—1 1 揚水試験時の水位降下経時変化（揚水開始から 8700 分後）

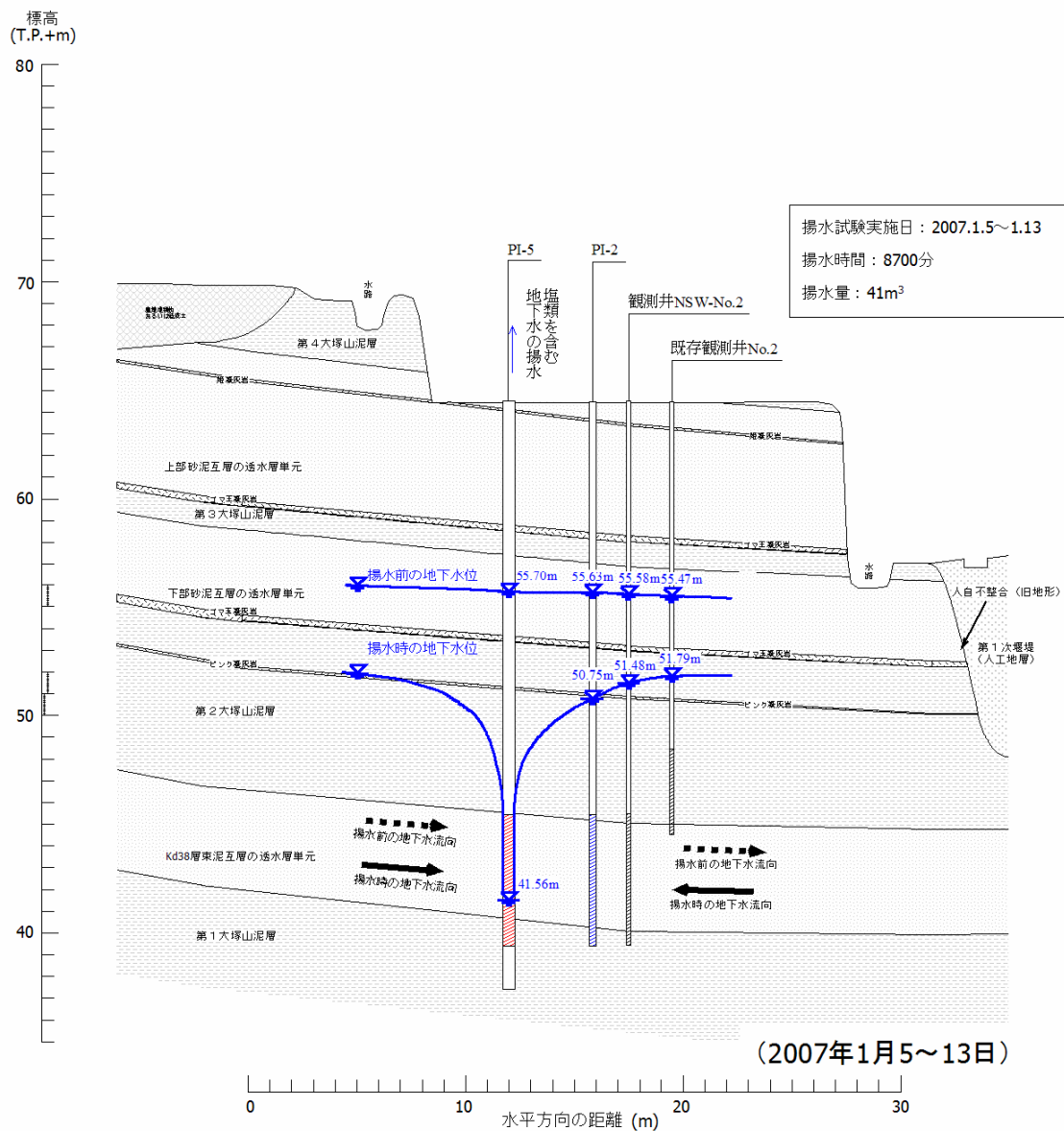


図 4—1 2 第3回揚水試験時の形成された揚水完璧遮水壁

何故効果が上がるのか。

海や湖から水をくみ上げても、潮位や湖水の水位は変化しない。しかし、井戸の水をくみ上げると、井戸管内の地下水位は低下する。しかし、水を多く含む地層にスクリーンを置く井戸の地下水位は、それほど変化しない。しかし、あまり水を含んでない地層から地下水を汲み上げると急激に地下水は降下する。

では、大塚山廃棄物処分場のように、水を含む割合が非常に小さい厚い泥岩層の中に、水を含む割合は小さいが比較的水を透しやすい薄い軽石層が数枚挟在されている地質環境から、地下水を揚水した場合の地下水位はどのようなになるのであろうか。

この実証試験の場合の Kd38 透水層は、水を含む割合が低く透水性の低い幾つかの泥岩層と比較的透水性の高い数枚の軽石層からなる。この地層単元での揚水試験では、水を含む割合が低いために、水位降下が大きい。そして、比較的透水性の高い軽石の薄層内の水位も低下する。そして、泥岩層などからの地下水の供給がないために、軽石薄層を通じて遠方からも集水するようになる。つまり、この薄層内における水位降下の影響圏は大きくなる。したがって、揚水量が少なくても、地水位の降下が大きく、水位降下の影響圏も大きい。つまり、川の下流の水を上流へ逆流させるのと同じく、またその遡上範囲が大きいことを意味する。揚水量が少なく影響圏が大きいことは、この工法が、この地域の地層に最も適し、また安価な工法であることを示している。そして、完璧遮水である。

実施計画

C1 地下水の漏洩の最も顕著な Kd38 火山灰層束泥互層の透水層単元を中心とした完璧遮水工法の実証試験を、条件を変えて3回行った。第1回実証試験・第2回実証試験・第3回実証試験の結果から、次の結論は得られる。

下部透水層（下部砂泥互層）が欠落しているが、存在しても地下水が存在していない場合もある。つまり、地下水が存在していても Kd38 透水層ほど地下水が豊富でない。この傾向は、上部透水層（上部砂泥互層）では、さらに強くなる。

したがって、揚水対策井は、Kd38 透水層を中心にスクリーンを設置し、透水性の良い井戸裏側充填材（珪砂）を井戸孔口近くまで充填し、下部透水層と上部透水層の地下水を Kd38 透水層に、充填材を通して落下させる構造にする（図 4—13）。

揚水井の配置は、3回の実証試験の結果から8m間隔とし、これとチドリ配置に揚水・注入・地下水

水質観測井を同じく 8 m 間隔で設置する（図 4－1 4）。

今回は、揚水井群を持って揚水完璧遮水を行い、補足的に揚水・注入・地下水水質観測井で揚水する場合もある。そのために、揚水井 2 3 本と揚水・注入・地下水水質観測井 2 2 本をチドリ配置に設置する。この配置と揚水で第 2 処分場からの Cl⁻ 地下水の漏洩を完璧に遮水できる見通しができた。

ちなみに、揚水・注入・地下水水質観測井列の各孔からのグラウチング（コンクリート遮水）も考えられるが、現実的でない。

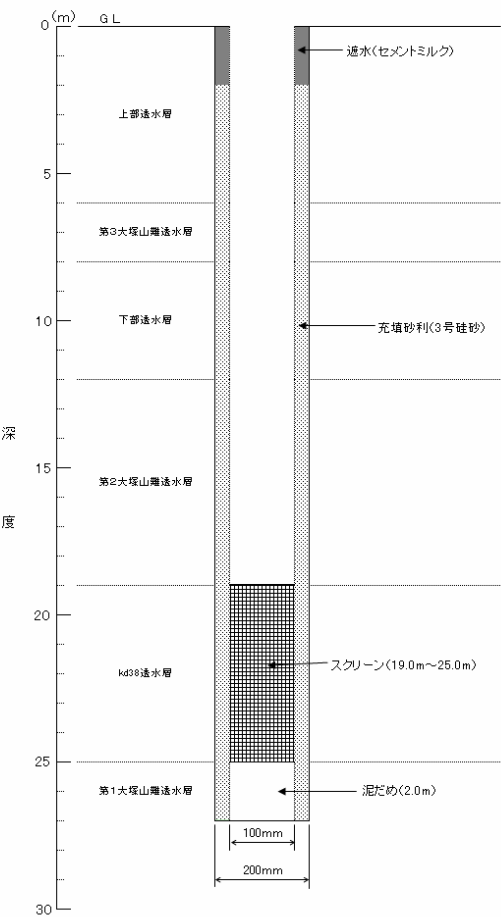


図 4－1 3 対策井仕上図

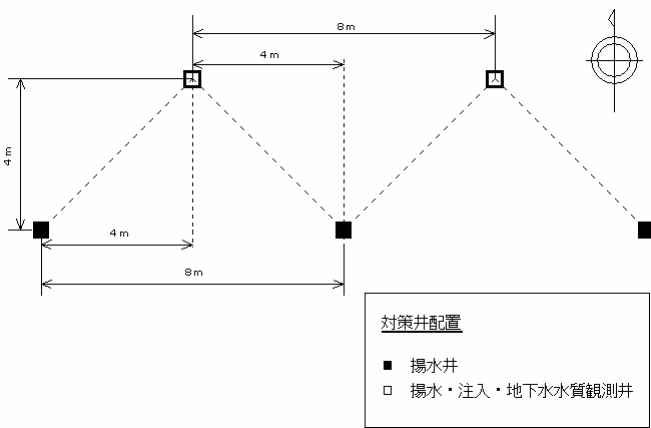


図 4－1 4 対策井配置概念図

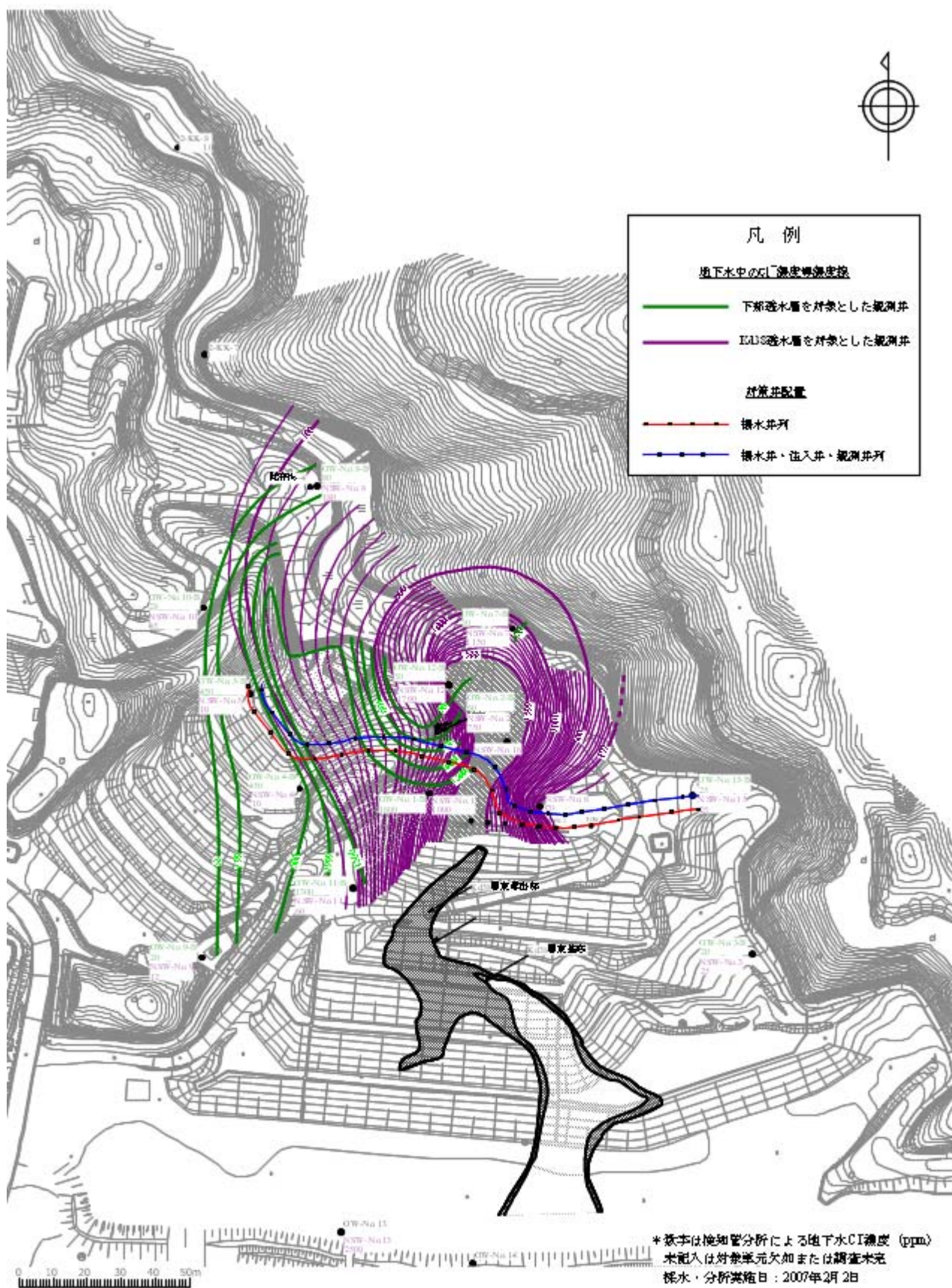


図4-15 各透水層における塩素イオン (Cl^-) 地下水塊

5. 揚水完璧遮水工法の工法効果確認の地下水数値シミュレーション

5-1 シミュレーションの目的

本調査は、地質ボーリング・観測井設置業務で得られたデータをもとに、大塚山第二処分場下流域を中心とした地下水流動および塩分移動を数値モデルで再現し、地下水流動系と塩分移動機構を定量化するとともに、対策井戸群による揚水（注入）の効果を予測することを目的とする。

5-2 地層単位と水文地質区分

第二処分場周辺の透水層単元の内、Kd-38 火山灰層束泥互層を対象とした。

5-3 数値モデル

地下水流動については、ダルシーの法則と物質保存則から導かれるつぎの地下水流の基本式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - q = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 K_x, K_y, K_z ：それぞれ x, y, z 方向の透水係数、 S_s ：比貯留量、 h ：地下水頭、 q ：揚水量またはかん養量、 t ：時間である。

また、塩分の移動については、次の移流・分散方程式を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (C u_x) - \frac{\partial}{\partial y} (C u_y) - \frac{\partial}{\partial z} (C u_z) - W = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

ここで、 C ：塩分濃度、 D_x, D_y, D_z ：それぞれ x, y, z 方向の分散係数、 U_x, U_y, U_z ：それぞれ x, y, z 方向の平均間隙流速、 W ：塩分投入量あるいは化学反応などによる変化量である。

(2) 式を差分法で数値近似した。(3) 式は特性曲線法を適用して数値近似した。

5-4 解析範囲と差分メッシュ

解析範囲を 2m のメッシュで分割した。井戸は 0.2m のメッシュで表現した。

5-5 入力データの作成

地下水位については、現況の地下水位分布から下流側について T.P.53m の定水位条件とし、上流側について T.P.65.2m の定水位条件とした。 Cl^- については、Kd-38 火山灰層束泥互層が旧地形の谷部に露頭している部分がゴミ層に接しているものとして、現況 Cl^- 濃度分布から 2,500mg/L の定濃度条件を設定

定した。

透水係数と比貯留量は、 $5 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 及び $5 \times 10^{-4}/\text{m}$ とした（透水係数はモデルの検定の過程で修正した）。有効間隙率は層相から 0.2 とした。分散能係数については縦方向分散能係数を 2m、縦方向と横方向の比率を 1/10 とした。

5－6 現況の地下水流動系・汚染プルームの再現

現況の地下水位分布を定常状態と仮定して再現した。また、塩分濃度分布をモデルで再現した。いずれも、観測井の地下水位・塩分濃度とほぼ一致している。

5－7 対策井戸群の揚水（注水）による地下水流動系・汚染プルーム変化予測

対策井戸群で揚水・注水した場合の地下水位分布、塩分濃度分布の変化を予測した。対策井戸群で揚水すると、井戸群の北側では現況の地下水の流れが逆転する。揚水の効果は1年目で顕著に現われ、2年目には井戸群の北側には 500mg/L 以上の範囲がわずかに残るだけとなる。3年目には、100mg/L 以上の範囲はなくなる。予測4年目には 50mg/L 以上の範囲もごく小さくなり、6年目には無くなってしまう。

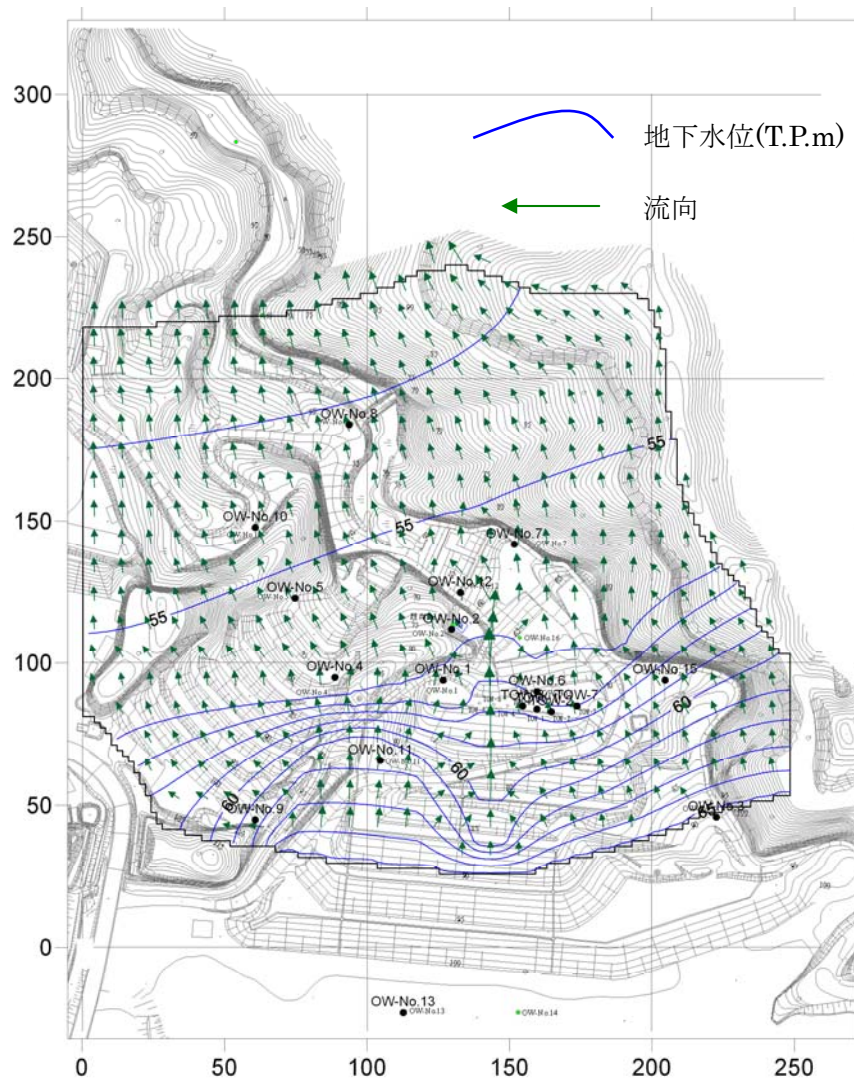


図 5 - 1 現況地下水位分布・流向

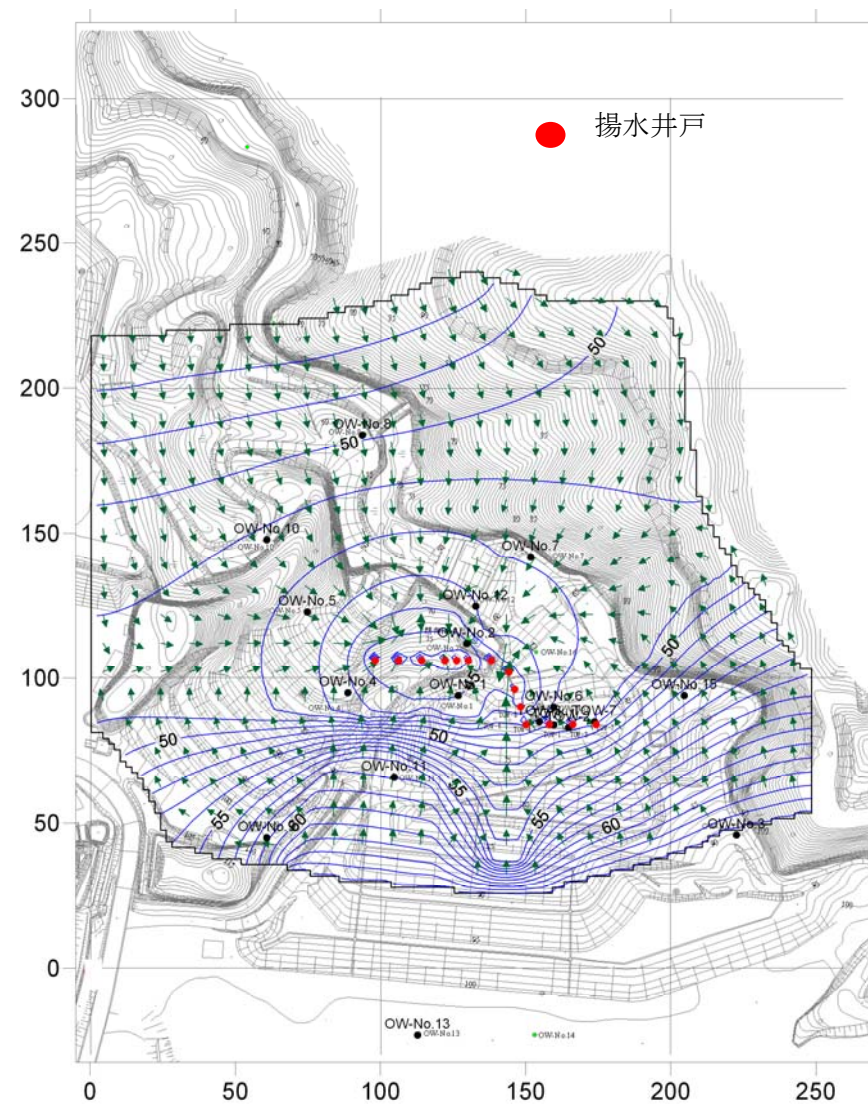


図 5 - 2 対策井 14 本（揚水量 1 日当り 20.8m³）稼働時地下水位分布・流向

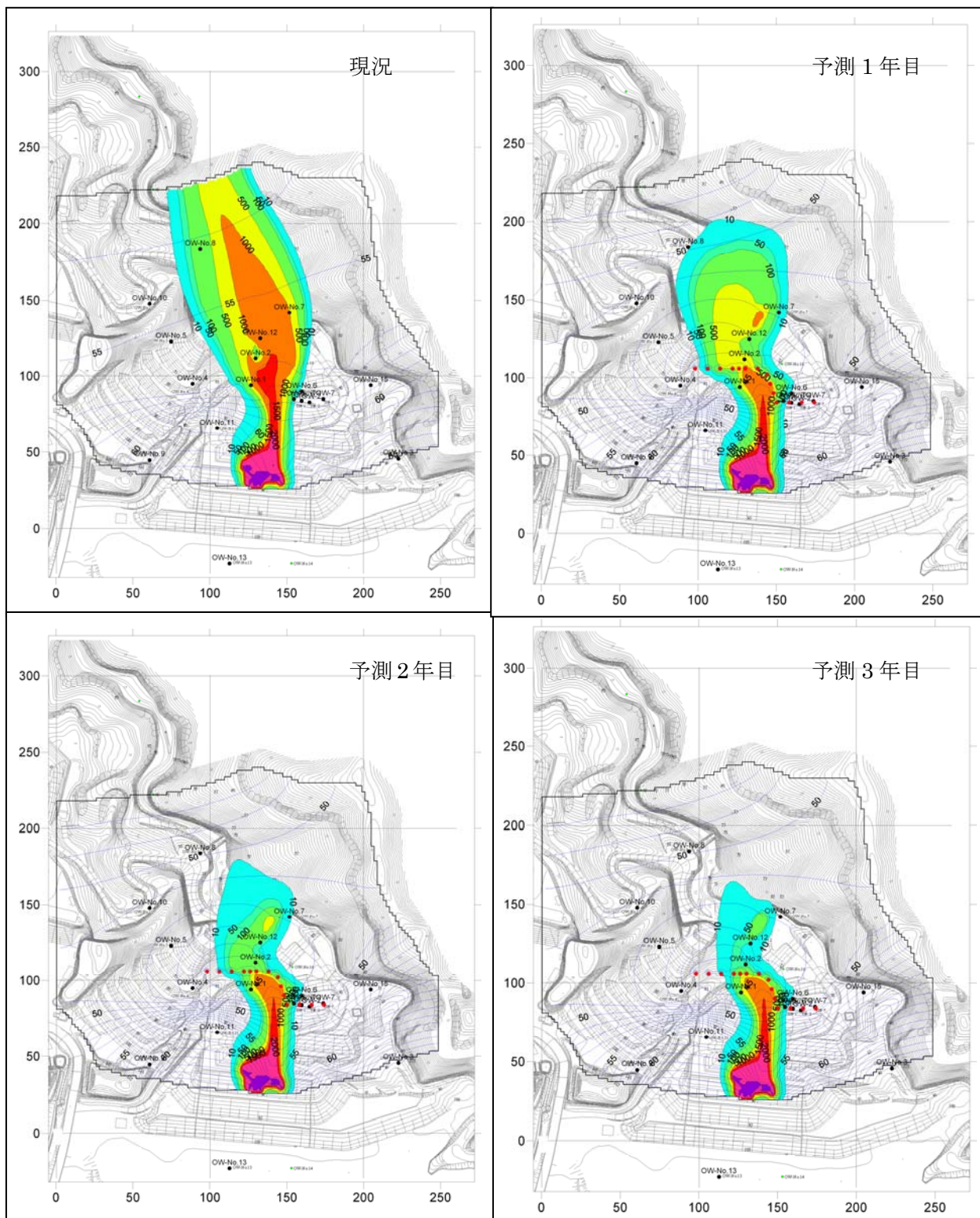


図 5-3 シミュレーション予測結果 (1)

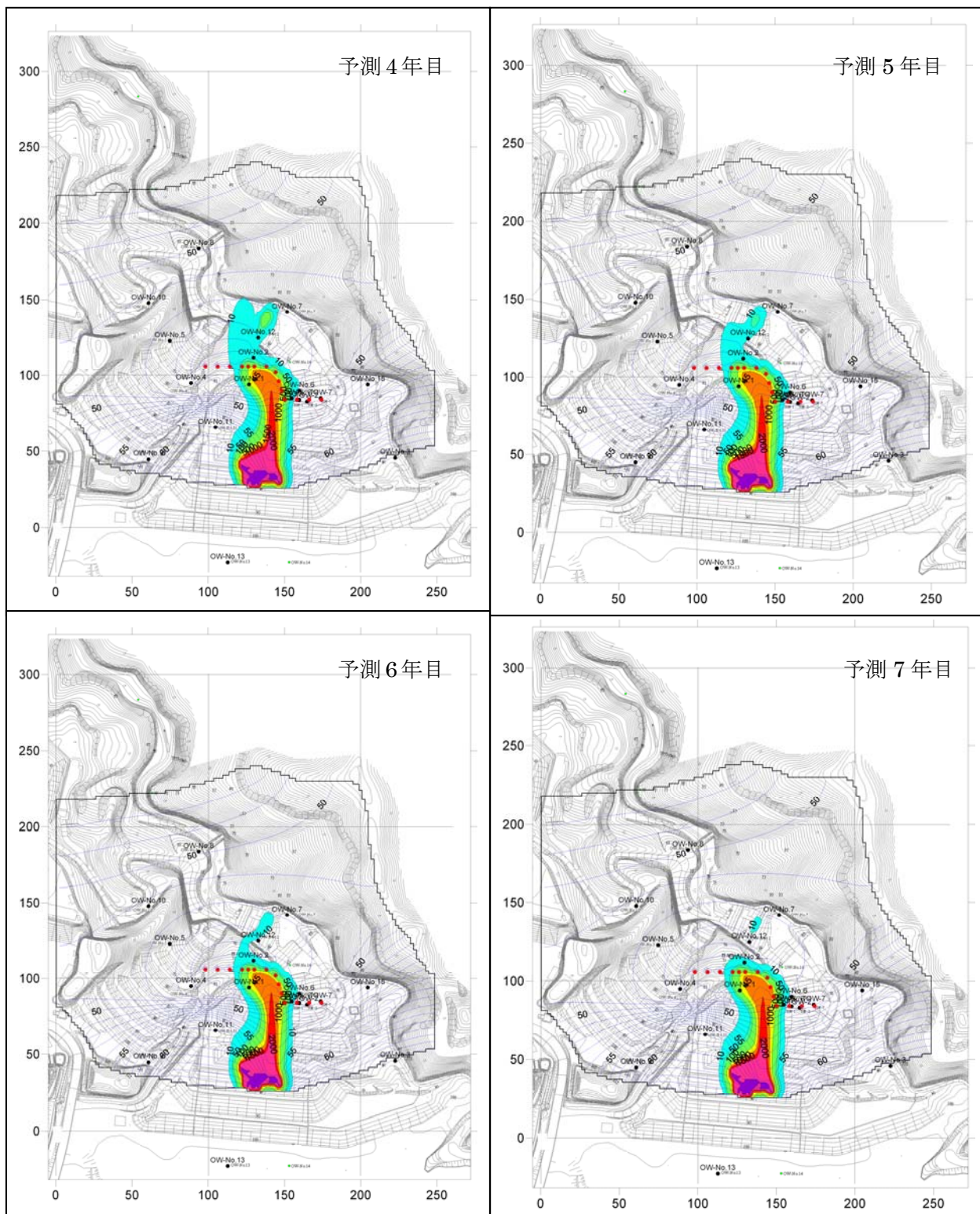


図 5-4 シミュレーション予測結果 (2)

6. まとめ

平成14年から平成18年にかけて、第2処分場外にある既存観測井 No2. の地下水の Cl^- 濃度が上昇した。その結果、第2処分場からの Cl^- 地下水の漏洩が指摘された。その機構解明調査を行うと同時に対策に関わる実証試験を行った。また、対策案の検証のためのシミュレーションも行ったので、それらをまとめて述べてみる。

高 Cl^- 濃度地下水塊の漏洩

- ① Cl^- 濃度の高い地下水塊 (Cl^- 地下水プルーム) は、Kd38 透水層单元中에서도透水性の高い数枚の軽石層 (この透水層单元中の軽石層の透水係数: 水平 $1.76\text{E}-03$ 、水平直角 $1.53\text{E}-03$) に形成されている。そして、この水塊は、第2処分場内の旧谷部の Kd38 透水層の露出部から第2処分場下部にあたる地形狭窄部 (旧河川) 直下、さらに下流部に延びている。しかし、水塊は第2処分場から、ほぼ 80m 以内の範囲に限られている。
- ② NSW-No. 13 と NSW-No. 14 の両地質柱状図にある各 Kd38 透水層を結び延長すると第2処分場内の廃棄物層に突き当たる。したがって、漏洩箇所は第2処分場内の廃棄物層と Kd38 透水層の露出部との接触部であると推定できる。この接触部は、第2処分場内の旧谷部に廣く分布し、この接触部から高 Cl^- 濃度地下水塊が形成されていると思われる。

廃棄物処分場からの漏洩対策の選定

- ① 段階的築造型廃棄物処分場で発生する地下水流動系は、貯水ダムのような条件付きの非定常流ではなく、地史的流動系 (historical flow) にあたる。つまり、理論的には、時間的な各段階的に形成される段階的築造型廃棄物処分場では、その形成段階に応じた地下水流動系が形成される。そして、形成された流動系の総体が現在の流動系ということになる。汚染物質が移動する場合には、地下水位の変化で地下水の流動方向が変化しても移動方向を直ぐに変えることはできない。つまり、地下水流動系の軌跡を汚染物質が描いているので、各段階の地下水流動系の軌跡である地史的流動系が、汚染物質を支配しているとも言える。

また、従来の遮水シート等の遮水工法には、廃棄物処分場の段階的築造過程に発生する地下水流動系の変遷に関わる概念 (地史的流動系) がなく、その段階の地下水流動系のための遮水対策である。

したがって、初期段階の低位処分場の流動系に対応する遮水対策が、最終段階の高位処分場で発生

する流動系には対応できない。初期段階から、処分場総体としての遮水対策を考慮した計画が行われることは稀であり、これまでの処分場の漏洩防止対策には問題が残っている。

- ② 第2処分場の漏洩防止対策としては、①の観点を考慮して揚水完璧遮水工法を選定した。大塚山の第2処分場は、段階的築造型廃棄物処分場である。そして、廃棄物層から漏洩している透水層中の幾つかの軽石薄層は、透水性は良いが、含水率は比較的低い。また、泥層は極端に透水性が低く、含水率も極端に低い。したがって、幾つかの軽石薄層では、一定の揚水量に対して地下水位降下量が極端に大きく、また影響圏も大きい。その結果、この現場での遮水対策は、揚水井戸による完璧遮水工法が最も適していると結論できた。米国環境省（EPA）では、従前から推奨している工法のひとつである。

揚水完璧遮水対策の実証試験結果

① 完璧遮水のための揚水井群

Kd38 透水層を対象とするスクリーンで、そして珪砂で裏込めした6本の揚水井群（2m間隔の揚水井列）と同じ構造をもつ揚水・注入・地下水水質観測井に可変可能な6本の井戸群（2m間隔の揚水井列）の2列を4m間隔で対置させ配列した。

この揚水井群で3回の実証試験を行った。その結果から、揚水井間隔を8mとし、これと4m間隔の対置関係で、チドリに配置した揚水・注入・地下水水質観測井を同じく8m間隔で設置し、揚水井群を持って揚水完璧遮水を行い、補足的に揚水・注入・地下水水質観測井で揚水する場合は、技術的にも最も効果が上がり、経済的でもあることの結論に達した（揚水井群の1本のみの揚水井で、6日間に41m³の持続揚水を行うと、影響圏は10m以上に及び、好成績を収めている。）。そして、現在第2処分場から発生しているCl⁻地下水の漏洩を完璧に遮水するには、揚水井23本の揚水井列と揚水・注入・地下水水質観測井22本とをチドリに配置し、前者の揚水井23本からの揚水で、Cl⁻地下水の漏洩を完璧に遮水できる見通しができた（揚水井23本の全稼働でも、1日200m³の揚水量でおさまる見通しである）。なお、このような2列の井戸群からなる遮水対策は、New Hampshire 州環境局などで実施されている。

② 揚水完璧遮水工法に関わる数値シミュレーションからの検討

対策井戸群で揚水した場合の地下水位分布、塩分濃度分布の変化を予測した。対策井戸群で揚水し、水位が定常状態に達すると日揚水量が20.8m³となり、井戸群の北側では現況の地下水の流れに逆

転現象が認められる。揚水の効果は1年目で顕著に現われ、2年目には井戸群の北側には500mg/L以上の範囲がわずかに残るだけとなる。3年目には、100 mg/L以上の範囲はなくなる。予測4年目には50 mg/L以上の範囲もごく小さくなり、6年目には無くなってしまう。

数値シミュレーションの結果は、実証試験結果より対策の効果が遅く現れていると思われるが、対策効果の有効性を裏打ちしていることは事実である。

岩層遮水と最終処分場の全域管理

① 岩盤（岩層）遮水の有効性

岩盤と呼ばれているが、実際は岩層である。透水性は極端に悪く、そして遮水性に富む地層が多い。したがって、一般的には岩層遮水が効果あることは事実である。しかし、岩盤といった概念のように均質な一枚岩の場合は、あまりない。透水性の高い薄層や亀裂が存在するのが地質環境の常である。したがって、漏洩防止と言った観点からは、その薄層や亀裂の遮水対策をすれば、砂層を主体とした洪積台地の谷間に構築された廃棄物処分場より、はるかに安全である。大塚山第2処分場での漏洩にともなうCl⁻地下水塊の拡大が、現在のところ80mの範囲に限定されていることは、その安全性を暗示しているものである。

② 大塚山処分場には、第2処分場のほかに、第1処分場・第3処分場が存在する。これらの処分場は、ほぼ同一地質環境である。したがって、漏洩に関わる最終処分場の全域環境管理は、漏洩の機構解明、揚水完璧遮水工法、モニタリング、そして数値シミュレーションの検討で、対策揚水量の少ない安価な管理が可能である。

以 上