

1. はじめに

本稿は昨年度発表した「真空ポンプを活用した VOCs 汚染土壌の原位置浄化について¹⁾」の続編である。前回の発表では、本工法による浄化開始後およそ1年間のモニタリング結果を紹介した。対象地では継続して運転しており良好な浄化状況を示している。ここでは新たなモニタリング結果を示すとともに本工法の運転方法について考察する。なお、続編であるため昨年度の発表と一部重複があることを記しておく。

2. 本工法の概要

本工法のもとになっているスーパーウェルポイント工法（以下、SWP 工法）は地下水位低下工法として多くの実績を持つ。この工法は、真空ポンプを利用して地下水に大きな負圧を与えることを特徴とするが、その負圧を維持するため井戸管（SWP 井戸）に工夫を凝らしている。それは、上蓋に空気を吸引する孔と底部に通水口があるだけの閉じた構造をしており、通水口の周囲をスクリーン（分離型）で取り囲んでいることである。この構造により周辺からの地下空気を吸い込みにくくしており、それが井戸管内の真空度を低下させず、地下水に負圧を与え続けるものとなっている（図 - 1 参照）。

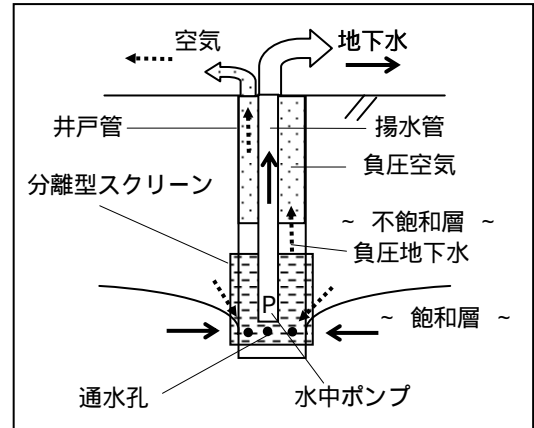


図 - 1 SWP 井戸模式図

3. 対象地の概要

1) 平面図

対象地の平面図を図 - 2 に示す。図 - 2 には後述する SWP 井戸、揚水井戸および観測井戸を含む。

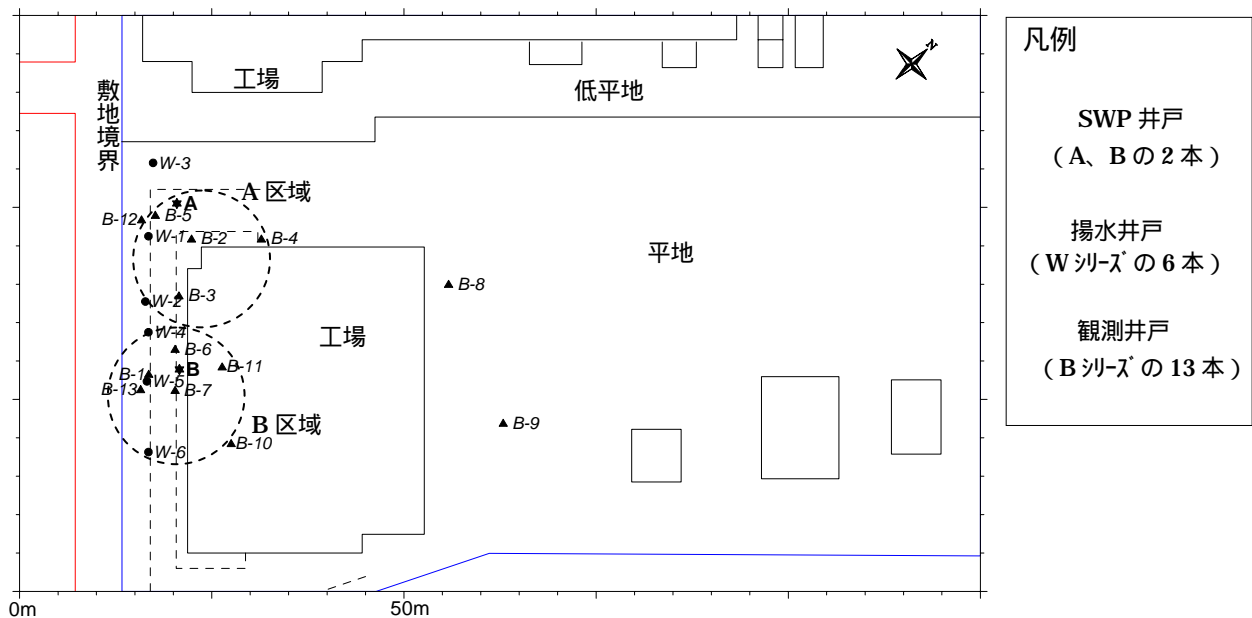


図 - 2 対象地の平面図

A progress report for in-situ remediation of VOCs contaminated soil using vacuum pump

Toshiaki Shirakawa¹, Daisuke Yamauchi¹, Eiichi Komiyama², Tetsuji Ozaki¹

(¹KOKUSAI KOGYO CO., LTD., ²RICOH ELEMEX CORP.)

連絡先：〒102-0085 東京都千代田区六番町 2 番地 国際航業(株)地盤環境エンジニアリング事業部 尾崎哲二

TEL 03-3288-5722 FAX 03-3288-9380 E-mail tetsuji_ozaki@kkc.co.jp

2) 対象地の水理地質状況

対象地の地質は花崗岩を基盤とし砂層主体の洪積層および表層部の盛土により構成される。地下水は花崗岩上部の風化部および洪積層に存在し、これらは一体となって帯水層を形成する。地下水面は地表から 8m 付近にあり、基盤面の傾斜に沿って北東から南西に向かって流れている。汚染の存在する洪積層は細粒土の混入が多くやや難透水性を示す。

3) 汚染状況

図 - 1 に示す対象地では工場敷地の境界付近のおよそ東西約 40 m、南北約 15 m の範囲にトリクロロエチレン（以下、TCE）による汚染が確認されている。高濃度の箇所が 2 ヶ所あり、旧工場排水路からの漏洩ヶ所と推定される A 区域と、旧工場の汚染源からの拡散が及んでいると推定される B 区域である。

土壌調査の結果、A 区域の漏出地点近傍と推定される B-2 および B-5 では地表から深度 12 m までのほとんどの深度で土壌溶出量基準（0.03mg/L 以下、以降基準）を超え、深度 2 ~ 3m の浅い深度で高濃度を示す。最高濃度は B-5 の深度 1.5m で 100mg/L である。一方、近傍の B-3、B-4 の浅層部ではほとんど検出されず 5 m 以深で比較的高い濃度を示す。最高濃度は B-3 の深度 8m で 0.2mg/L である。地下水では B-2、B-3、B-4 において TCE およびシス 1,2 - ジクロロエチレン（以後、cis-1,2-DCE）が検出される。TCE 濃度はすべての孔で環境基準（0.03 mg/L 以下）を超え、最高濃度は B-3 の 9.6 mg/L である。しかし cis-1,2-DCE は、すべての孔で環境基準（0.04 mg/L 以下）を超えない。

B 区域では B-1、B-6 および B-7 と同様の汚染状況を示し、表層から深度 3 m まで TCE が検出されるが基準を超えない。しかし深度 4m から 10m までのほとんどの深度で基準を超え 7m で最高濃度を示し、それ以深では低下し深度 11m で基準未満となる。最高濃度は B-1 で 1.4 mg/L、B-6 で 0.382 mg/L そして B-7 で 0.227 mg/L である。地下水では B-1 において TCE および cis-1,2-DCE が検出され TCE の濃度は 15 mg/L と環境基準を超えるが、cis-1,2-DCE の濃度は環境基準を超えない。

両区域の東側の敷地境界付近ではすべての揚水井戸で TCE および cis-1,2-DCE が検出され、TCE 濃度は各井戸とも環境基準を超え最高濃度は W-2 の 19 mg/L である。

4. 浄化システム

対象地の浄化履歴および処理施設を表 - 1 に、井戸仕様を表 - 2 に示す。平成 11 年 12 月、汚染の敷地外への拡散防止を目的に 2 本の揚水井戸で地下水揚水を開始した。1 年後には 4 本追加し、約 3 年の運転のうち平成 15 年 12 月より本工法を開始し、現在（平成 18 年 3 月）に至っている。図 - 1 にこれらの井戸の設置位置を示す。

地下水揚水法では家庭用ポンプ（浅深両用ポンプ）として利用される簡易式真空汲み上げポンプにより揚水し、曝気式の水処理施設で処理した。処理水は下水道へ排水した。本工法では 2 本の SWP 井戸から地下水および地下空気を回収し、水処理施設および活性炭によるガス処理施設で処理している。処理ガスは大気へ排出している。なお、水処理施設では揚水井戸（6 本）からの揚水も同時に処理している。真空ポンプはウェルポイント工法でよく使用される規模のポンプが 1 台設置され、SWP 井戸 A、B の 2 つの井戸管から吸引している。水中ポンプは土木工事で使用されるディープウェル用高揚程のものを使用している。

表 - 1 浄化履歴および処理施設

時期	工法	井戸本数	井戸名	水処理施設	ガス処理施設
平成 11 年 12 月 ~ (約 1 年間)	地下水揚水法	2 本	W-1, W-2	回転噴霧式 曝気処理プラント (33 L/min)	-
平成 12 年 12 月 ~ (約 3 年間)		6 本(4 本追加)	W-1, W-2, W-3, W-4, W-5, W-6		-
平成 15 年 12 月 ~ 18 年 3 月現在 (約 2 年間)	本工法 + 地下水揚水法	8 本(2 本追加)	A, B, W-1, W-2, W-3, W-4, W-5, W-6		活性炭処理 (ト 缶利用)

表 - 2 井戸仕様

井戸	井戸構造		スクリーン設置深度	揚水ポンプ	真空ポンプ
A	掘削径 550mm 管径 400mm	深度 15m	5 ~ 13m	水中ポンプ、11KW、全揚程 35m、吐出量 1 m ³ / min	5.3m ³ min × 3mmHg ~ 600mmHg × 6P×11kw
B		深度 14m			
W-1 ~ W-6	口径 100mm	深度 4 ~ (10 ~ 12) m	最下部に 吸込口	簡易式真空汲上げポンプ（地上 式浅深両用ポンプの利用）	-

5. モニタリングデータ

地下水揚水法による浄化開始時から現在に至るまでのデータを整理した。ただし、地下水位については昨年度の発表で示しており、その後も同様の水位低下を示していると述べるにとどめる。

1) 揚水量および TCE 回収量

(1) 揚水量

地下水の揚水を開始した平成 11 年 12 月からの月別の揚水量および累積量を図 - 3 に示す。図 - 3 より当初の 2 本の揚水井戸による揚水量がおよそ $50\text{m}^3/\text{月} \sim 100\text{m}^3/\text{月}$ の範囲にあり、揚水井戸が 6 本になった平成 12 年 11 月からは平均的にそれまでの 2 倍以上のおよそ $200\text{m}^3/\text{月}$ の揚水量となっている。さらに本工法となった平成 15 年 12 月からの増加は顕著であり $400\text{m}^3 \sim 500\text{m}^3/\text{月}$ の揚水量である。ただし、最近の 1 年間ではやや減少傾向がみられる。これは降水量が少なくなったことやメンテナンス回数が多く停止した期間が長かったことによるものと考えられる。なお、平成 16 年 4 月および平成 17 年 7 月の揚水量が多いのは、前者は降水量が多い月であったためであり、後者は実験的に試みた過飽和酸素水の注入が原因と考えられる。

(2) TCE 回収量

TCE の回収量を図 - 4 に示す。地下水揚水による TCE 回収量は揚水量に TCE 濃度 (原水濃度) を乗じて、空気吸引による回収量は回収する空気量に空気中の TCE 濃度 (原ガス濃度) を乗じて求めた。

図 - 4 より、地下水揚水法による対策期間中の TCE の累積回収量は地下水の揚水量と比例した状況を示す。これは揚水した地下水に含まれる TCE 量がほぼ同じ濃度であることを示す。

本工法を開始した平成 15 年 12 月から TCE の回収量は急激に増加し、それまでの回収量に比べ全体では 5 倍程度の増加である。ただし、地下水の揚水による回収量が以前に比べやや低下している。これは本工法が井戸管内において地下水中の TCE が相当量、空気へ移行しているためであると考えられる。

平成 17 年に入る頃から空気吸引による回収量が大きく減少している。これは地盤中の浄化が進み、後述するように地下水および地下空気中の TCE の濃度が低下したためであると推察される。

2) 地下水および地下空気の TCE 濃度

(1) 地下水の TCE 濃度

地下水中の TCE 濃度の変化について、A 区域にある B-2、B-3 および W-3 のデータを図 - 5 に、B 区域の B-6、B-10 および W-5 のデータを図 - 6 に示す。

図 - 5 より、B-2 は当初 5mg/L 程度の、B-3 は 10mg/L を越える濃度であったが地下水揚水により 2mg/L 近くまで低下している。本工法を開始してからの低下傾向は顕著で、およそ 2 年後の平成 18 年 3 月には B-2 は環境基準 (0.03mg/L) を下回るまで、B-3 は 0.1mg/L 近くまで低下している。一方、W-3 は当初 $0.2\text{mg/L} \sim 1\text{mg/L}$ を推移するが、本工法開始後は低下傾向が著しく、ほとんどのデータで基準を下回っている。

図 - 6 より、B-6 では当初 10mg/L を越えるが、本工法開始後減少を示し約 2 年後の平成 17 年 9 月には基準を下回るレベルに達する。B-10 は当初 $0.1\text{mg/L} \sim 1\text{mg/L}$ であったが本工法開始後は低下し平成 18 年 3 月には 0.04mg/L 前後である。W-5 は当初 10mg/L 前後であり、地下水揚水よって 5mg/L 近くまで低下している。本工法開始直後には低下傾向が見られないが、1 年ほど経過したのち低下傾向となり、平成 18 年 3 月には 0.1mg/L 近くまで低下している。

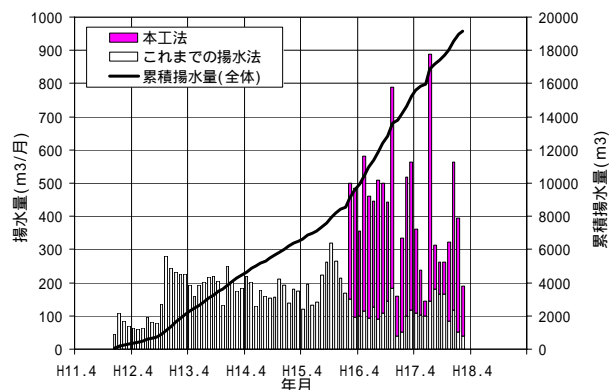


図 - 3 地下水揚水量

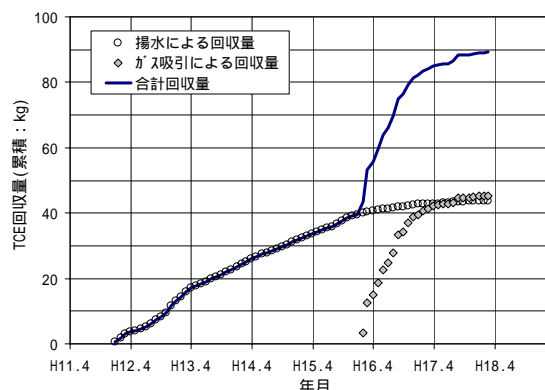


図 - 4 TCE 回収量

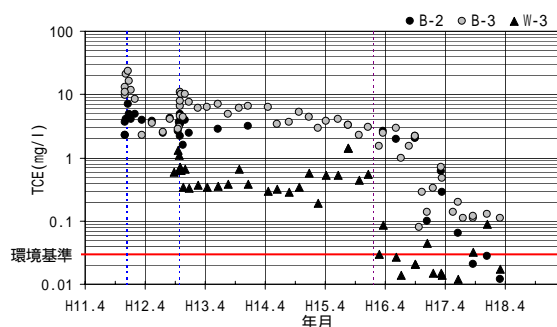


図 - 5 地下水の TCE 濃度 (1)

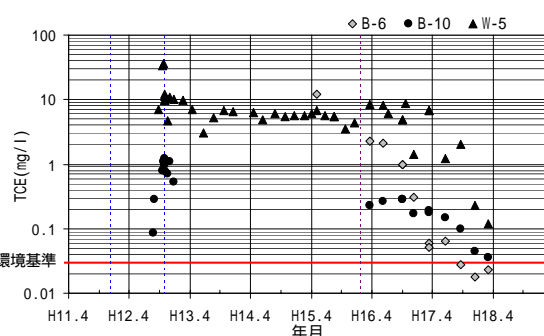


図 - 6 地下水の TCE 濃度 (2)

(2) 地下空気の TCE 濃度

観測井戸および揚水井戸の内部地下空気の TCE 濃度を検知管により測定した。A 区域の B-2、B-5 および W-3 のデータを図 - 7 に、B 区域の B-1、B-6 および B-10 のデータを図 - 8 に示す。

図 - 7 より、B-2 では 1000ppm レベルであった濃度が本工法の開始後に低下して 10ppm 前後で推移し、平成 18 年 3 月には 0.2ppm に達している。B-5 でも数百 ppm レベルであった濃度は低下し、1 年後には検知管の検出限界の 0.1ppm 以下になっている。W-3 においても同様の傾向を示し 200ppm を超える濃度は低下し、半年後には検出限界以下になっている。

図 - 8 より、本工法の開始前には B-1 の濃度は 1000 ppm を超えるレベルで、B-6 は 400 ppm、B-10 は 50 ppm レベルであったが、開始後はそれぞれ低下し B-1 は検出限界の 0.1ppm 以下に、B-6 は 0.2mg/L に、B-10 は 0.3mg/L に達している。

3) 地下空気圧の分布

本工法の運転中の観測井戸の地下空気圧を測定した。平成 11 年 4 月に実施したデータを図 - 9 に示す。この測定時の井戸 A の井戸管内部の地下空気圧（負圧）は 44000Pa 程度、B では 32000Pa 程度であった。

図 - 9 より SWP 井戸から 50m の距離においても 100Pa の負圧を示し、広範囲に地下空気を吸引していることが確認できる。また、地下空気圧の等高線は井戸 B を中心に形成され、井戸 A の影響が小さい。

この等高線形状は対象地では恒常的なもので、これを井戸管内の地下空気圧と比較すれば、負圧が大きい（真空度が高い）井戸 A では周辺の負圧が小さく、負圧の小さい（真空度が低い）井戸 B では周辺の負圧が大きい結果となっている。一方、揚水量の状況は井戸 A の揚水量は井戸 B に比べ多かった。これらは、井戸 A では地下空気の浸入が小さく地下水の負圧が保たれるため揚水には効果的だが周辺の地下空気の吸引が少なく、井戸 B では反対に地下空気の浸入が大きく周辺の地下空気圧の低下は大きい、地下水の負圧が小さいため揚水量が少ない状況を示している。

次に SWP 井戸である井戸 B と観測井戸の距離と、その観測井戸の地下空気圧との関係を図 - 10 に示した。図 - 10 より、井戸 B から離れるほど地下空気圧（負圧）が減じていることがわかる。この状況からも地盤中の地下空気が井戸 B に向かって流れていることが確認できる。また、このグラフからは、井戸 B と 100m 離れた場所においても地下空気吸引の影響が及んでいることが推察できる。

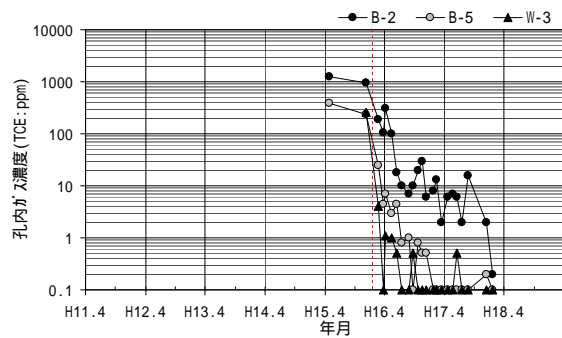


図 - 7 地下空気の TCE 濃度

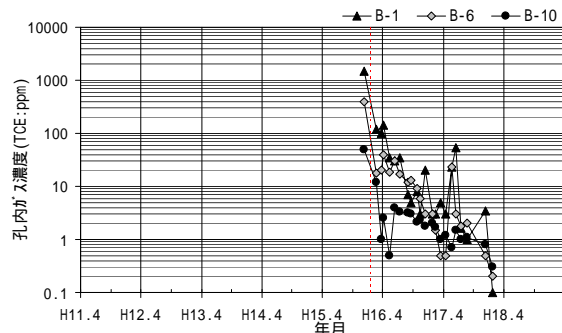


図 - 8 地下空気の TCE 濃度

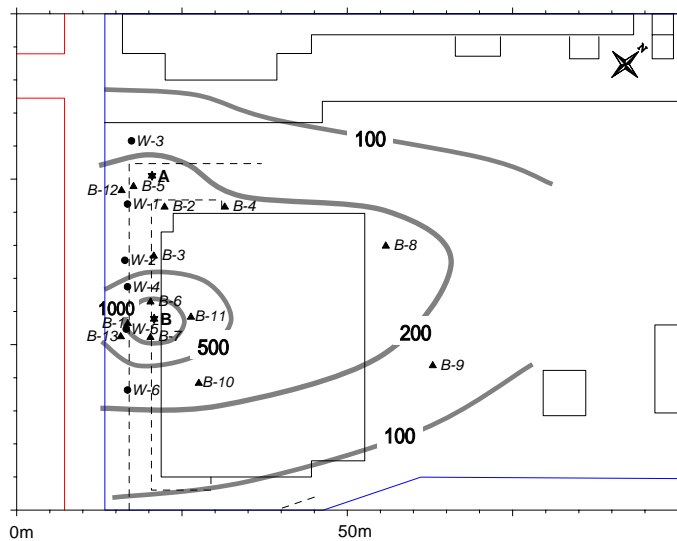


図 - 9 地下空気圧の分布（負圧）

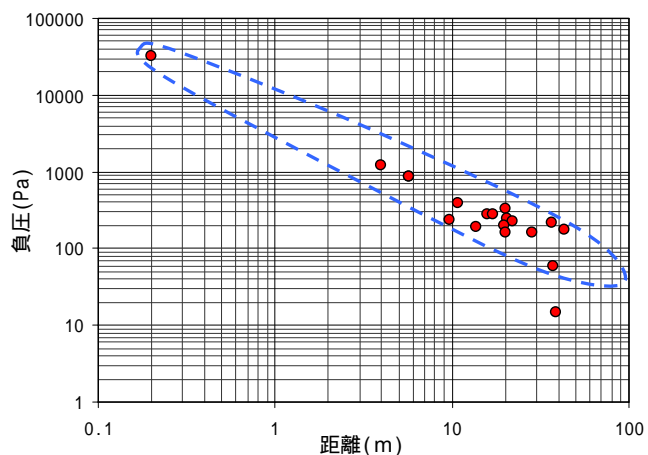


図 - 10 井戸 B との距離 - 地下空気圧（負圧）

6. 運転管理

1) 本工法のメカニズム

本工法は、既存技術である地下水揚水と地下空気吸引（土壌ガス吸引）を一つの井戸でおこなう技術であると言ってよい。本工法のメカニズムは、井戸管内が真空ポンプで吸引するため真空度の高い空気圧（負圧）となり、管内の地下水面は空気圧と同じ圧力となるため地下水のピエゾ水頭が低下する。これにより周辺地下水との動水勾配が大きくなり、多量の地下水が集水され地下水位が大きく低下するのである。さらに、周辺からの地下空気も積極的に吸引する仕組みとしてある。もともと本工法は地下空気の井戸管内への浸入を防ぐことを目的に開発された技術であるが、地下空気を全く吸引しないわけではなく、浸入する地下空気量が真空ポンプの吸引能力の範囲内であれば井戸管内の真空度は大きく低下しないのであり、本工法はこの仕組みを利用している。本工法の安定的な運転状態は、井戸管内の真空度が変化せず、地下水が一定の水位と負圧下にある状態であると考えられる。しかし、このような状態が継続することは少なく、実際には真空ポンプ、水中ポンプおよび水処理施設の運転状況、さらには降水による周辺の地下水位の影響を受けて変化する。

2) 装置の制御

使用する装置には次のような制御を設けてある。

水中ポンプの稼働制御

井戸管内に水位センサーを設置して高水位になった場合には水中ポンプを稼働させて地下水を揚水し、低水位になった場合には水中ポンプを停止するという制御である。これは低水位になった場合の水中ポンプの空運転を避けるためであり、ここではSWP井戸の通水孔から3mほどの高さに地下水位をコントロールした。この制御は、水中ポンプを使用する場合によく用いられる方法である。

真空ポンプの温度制御

補給水タンクの水温が40以上にならないようにしている。補給水とは真空ポンプの温度上昇を防ぎポンプ性能を維持するため、循環して真空ポンプを冷やす水のことであり、ここでは水道水を使った。これは、真空ポンプが40を超えると損傷する恐れがあるとしてメーカーの運転仕様に定められており、水温が上昇し40を超える場合には真空ポンプを停止した。この制御は水封式の真空ポンプであれば配慮せざるを得ないものである。

水処理装置の流入量制限

水処理装置の設計水量は33L/minであるが、揚水井戸6本の揚水量を同時に処理するため本工法による揚水量を25L/minに制限した。これは、水処理装置の設計水量が本工法を考慮したものではなかったための便宜的措置である。水処理装置に流入する揚水量がこの水量を超える場合、水中ポンプを停止した。また、水中ポンプが停止すると井戸管内の地下水位が上昇して管内の空気の真空度が高くなり、それに伴い真空ポンプの温度が上昇するため真空ポンプを停止することがあった。

装置の使用状況は次のようなものである。

水中ポンプは大気圧下での運転が条件であり、ここでの負圧下での使用は大きな負荷となり、1年ほどの使用で交換した。

真空ポンプが連続運転であったことや温度上昇にともなって発生するキャビテーションによる材料劣化があり、水中ポンプと同様に1年ほどの使用で交換した。

真空ポンプは水滴混じりの地下空気を吸引するため活性炭槽内に水滴が付着しVOCsの吸着量に影響した。

3) 地下空気吸引のポイント

これまでの運転から井戸管内あるいは周辺の地下水位が高い場合には地下空気を吸引しにくいことがわかっている。これは、井戸管の空気と周辺地盤の不飽和帯の地下空気のパスレンスが長くなれば地下空気が地下水中を通過しにくくなるものと考えられる。地下空気が吸引できない場合には、真空度が高くなって井戸管内の地下水位が高くなっていることが多く、このような場合には、真空ポンプの配管に取り付けたバルブから外気を取り入れて井戸管内の真空度を下げ、井戸管内の水位を下げて地下空気吸引量の増大を図った。

2006年2月24日、運転中の井戸Bおよび近傍の観測井戸B-1の管内の圧力ならびに真空ポンプの地下空気吸引量を測定した。地下空気吸引量は活性炭槽排出口の風量としてビニール袋を使用して測定した。結果について井戸Bの圧力と風量の関係を図-11に、B-1の圧力と風量の関係を図-12に示す。なお、測定中には井戸Bのほか井戸Aも同時に運転していた。したがって、真空ポンプの風量には井戸Aによる影響も考えられるが、前述したように井戸Bによる吸引量が支配的であったと考えている。

図-11より井戸Bの管内の真空度が増す（負圧が大きくなる）と風量が減じ、図-12よりB-1の負圧が

大きくなれば風量が増加している。これらの関係は風量が大きい時には井戸 B の負圧が小さく、B-1 の負圧が大きく、風量が小さい時にはこれらの関係が逆になっていることを示している。周辺の不飽和層で地下空気が井戸に向かってよく流れる場合には、その地下空気の負圧は大きくなっている。地下空気の吸引による浄化を進めるには風量を大きくすることが重要であり、風量を大きくするには井戸管の負圧を下げて、地下空気を吸引することがポイントであることを示している。

7. まとめ

本工法による浄化データを示した。本工法が地下水の揚水および地下空気の回収に優れており、上述した内容をまとめれば以下のとおりである。

本工法により TCE 回収は順調に進み、開始 2 年後の観測井戸の地下水の TCE 濃度は一部を除き基準レベルに達し、地下空気中の濃度も 1ppm 未満となっている。

この状況は累積の TEC 回収量でも確認でき、浄化が進むにしたがい累積回収量の増加率が少なくなっている。本工法による浄化効果の向上には SWP 井戸のコントロールが重要であり、安定した真空ポンプの運転においても地下水揚水量と地下空気吸引量のバランスを取ることがポイントである。

このためには、地下水処理装置とガス処理装置の合理的な設計が必要であり、特にこれら装置の制御によって SWP 井戸の運転を制限しないことが重要である。

8. おわりに

SWP 工法は地下水位低下工法として利用されるほか、最近では粘性土層の圧密工法としても注目され大きな効果を持つことが確認されている。この圧密工法では本工法と同様に地下水位を大きく低下させ同時に空気を吸引しており、この空気吸引能力により粘性土中の移動し難い低ポテンシャルの水分をも回収していることが推定される。本工法では同様のメカニズムが働いて不飽和層中の VOCs の回収に効果を発揮しているものと考えている。

本工法が地下水および地下空気（土壌ガス）の回収に優れた工法であることは明らかである。これは真空“力”を地下空間に効果的に作用させているからである。特筆すべきことは地下水に大きな負圧を与え続けられることである。これは、これまでの地下水位低下工法ではできなかったことであり、強制的に動水勾配を大きくして地下水の多量な集水を可能にし、大きな地下水位の低下をもたらしているのである。

ここで、興味深い現象として挙げられるのは、飽和でありながら負圧の地下水を存在させていることである。自然状態の地下水は飽和では正圧（大気圧より大きい）であり、不飽和では負圧である。しかし、SWP 工法は人工の真空“力”により“飽和でありながら負圧”状態をつくり出しているのである²⁾。この現象は地下水に関わる新たな技術開発の可能性を示唆しているものと考えている。

謝辞

本工法の導入と開発にあたり種々のご指導を賜ったりコーエレメックス(株)品質管理本部の千葉政孝氏が、2006 年 4 月 2 日に亡くなられた。氏のご尽力がなければ本稿はなかったと言っても過言ではない。ここに謝意を表し、ご冥福をお祈りする。

参考文献

- 1) 山内大祐・千葉政孝・白川俊明・高橋茂吉・尾崎哲二：真空ポンプを活用した VOCs 汚染土壌の原位置浄化について、第 11 地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会要旨集・講演集、2005.6.
- 2) 中川啓・初井和朗・神野健二・和田信一郎・朴崎鎬・中山比佐雄・高橋茂吉：スーパーウェルポイント工法（SWP 工法）の地下水位低下に関する数値計算による検討、地下水学会 2006 年春季講演会、2006.5.

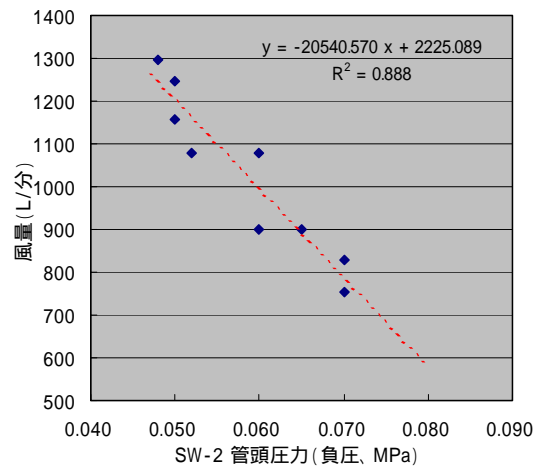


図 - 1 1 管内圧力 (井戸 B) - 風量

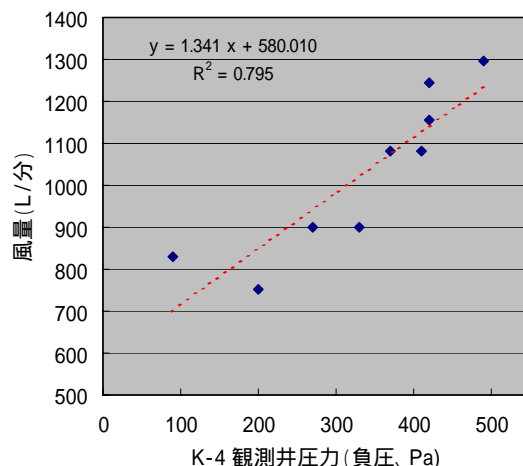


図 - 1 2 観測井圧力 (B-1) - 風量