

六甲山岩盤地帯における地下水調査

神戸大学工学部 正会員 田 中 茂

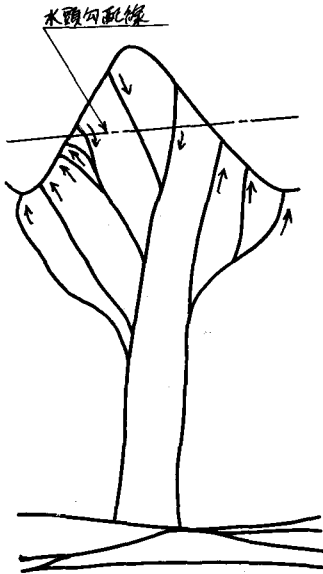
1. 緒 言

神戸市当局は岩石中の地中水を利用するための第一歩として同市水道局が中心となって地下水調査委員会を昭和 39 年初めに発足させ、六甲山の岩石中の地下水の調査と取水工法などの検討を行ってきた。この報告は同委員会が行なった調査結果の一部をとりまとめたものである。委員会は最初、六甲山系を中心とするかなり広範囲を対象として調査を行ない、調査の進行とともに次第にかなりの量の岩石中の地下水の存在を期待しうる地域に調査をしぼった。このようにして裏六甲地区にモデル地区を数カ所選択して地質の専門家にも現地調査を願って詳細に調査の結果、奥山川－有馬地区は大きい断層破砕帯が数本ほぼ東西に走っているが、これらの破砕帯の山側にかなりの量の地下水源が求められるということになり、また同時に地下水の集水区域は地形的集水区域とは必ずしも一致せず、条件によっては前者は後者の数倍もありうるということが結論せられた。つぎに委員会は地上防止コンサルタント中茂樹氏と同氏の提唱している「上昇水脈説」に関する討議を行なうと同時に、六甲山系の代表的水脈幹線を選んで自然湧水地点の調査、地質調査、予想取水量、取水工事の難易などの調査を現地立会いで行なうとともに種々討論を行なった。ついで委員会は中氏が過去において実施したり、当時に実施中であった「斜坑ボーリング工事」の現場視察および調査を行なった。すなわち、伊吹山、神戸市兵庫区永室町、兵庫県三原郡南淡町などの地内で施工せられたものを対象として湧水量、地質、坑の構造などを検討した。昭和 39 年 9 月末の委員会において種々討議の結果、六甲山上新池附近を選らび、花崗岩中の地下水の規模、湧水量、上昇水脈の存在の有無などを調査するために「横坑ボーリング」を行なうこと、並びにこれと併行して、水位測定、水質試験、水圧測定、トレーサー実験などを行なうことを決定した。これにより、神戸市水道局は調査ボーリング工事の契約を中氏と昭和 40 年 11 月末に結び工事に着手した。かくして、径 180 mm、延長 30 m、径 152 mm 延長 40 m、径 127 mm 延長 100 m、径 101 mm、延長 90 m、総延長 260 m の横坑が完成したのは昭和 40 年 6 月 10 日である。その間、ほぼ時を同じうして同氏が施工中であった兵庫県津名郡五色町地内の延長 170 m、当時湧水量 707 t/day の横坑の現場視察を行なった。委員会は上記の調査用ボーリング工事が完了した後 7 月から 10 月にかけて湧水の流路を追跡するためのトレーサー実験、湧水の水圧調査、その他を行なった。

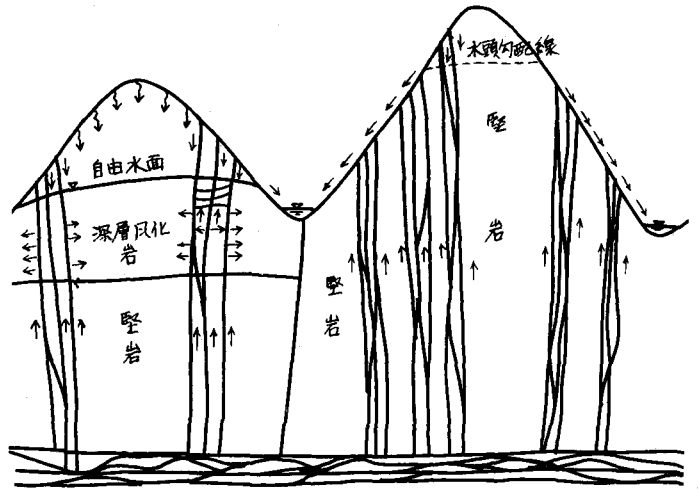
2. 上昇水脈説

中氏によれば造山運動の際に山を形造っている岩石が応力を受けて割れ目、断層を生じ、その著しいものは今日の峡谷生成のもとをなし、峡谷はその岩石が破砕せられた線に沿うものが多いものとしている。上記の割れ目や破砕帯は非常に地中深く貫入していてこれらが地下数キロもの所で横方向に走っている帯水層で互いに連絡しているものと考え、このような関係を図－1 に模型的に示している。これらの割れ目が比較的硬くて割れ目の少ない岩石が山の外被をなしているその内側の岩石中に発達していて、しかも割れ目は細粒に破砕されたもので閉塞されていない時に、それらの割れ目が地表に

開口していると、それらを通して下から上に向って地下水が高い高度の所までよく上昇するものと考えた。これに反し造山岩石が深



図一 山の岩石中の割れ目
(中山氏による)



図二 岩石内の自由水面と水頭勾配線のモデル

層風化を受けて多孔質となり内部の水圧が外に容易にぬける所では地下水の上昇は低い所にとどまるといふ。いずれにせよこのような地下水の上昇を生ぜしめる原動力に関しては同氏は連通管の原理を用いて説明している。以上の「上昇水脈説」は従来の定説と異なるところが多く今日ではほとんど受け入れられていないようである。夏期または冬期に1カ月以上も降雨をみない乾期をえらんで、まず溪流に沿って遡り、その地点から上手ではもはや全然流れをみないという流れの最上流端を求め、その地点の湧出量を簡易三角堰などにより計量する。それから溪流に沿って下り、適当な場所ごとに同様な方法で流量を測定し、測定場所ごとに集水面積を図上で測り、これらの面積の比とくらべて測定流量の比が急に大きくなっている区間を求める。その区間をさらに細分して上記の方法をくり返して湧出点を求めるのである。このようにして、溪流に沿って数個の湧出点を求めると、これらが前記上昇水脈の地表面への露頭であり、点ではなくて帯状の線が溪流を横切って走っているものであるという。

このような水脈の露頭は必ずしもはっきりと発見しうるとは限らぬ。岩盤が溪床に露出している場合は発見しやすいが、岩盤上に表土が堆積している上を溪流が流れている場合にはその発見は必ずしも容易ではない。図一に示した鎖線は水頭勾配線であって、これより高い所に降った雨水は岩の割れ目や空隙などを通して下方へ浸透する。問題はこの図で示した水頭勾配線よりも低い領域の山腹斜面からは至るところでしみ出しが見られる理屈であるが、実際には岩石が緻密で硬くてそれに破砕帯や割れ目が存在していることが多く、それらから相当量の湧水が見られるにすぎず、その他からは水のしみ出しはない。岩石が深層風化を受けていて全体的にみて多孔性となっている所では、低い場所で内部の水圧が外へぬけてしまつて、その時は圧力水頭線の形をとらず、図二に示すように自由水面のようなものが生じていると筆者は考える。

横坑ボーリング坑による地下水取水の原理について一言するとつぎのようである。図二に示すよ

うに硬岩中に存在している破碎帯または割れ目を通して地下水が地表へ湧出する時には、そのような水脈を通る際に、かなりの水頭損失を生ずるわけである。水脈を数本貫通して水平からの伏角を $18 \sim 35^\circ$ の適当なものを有する横坑を掘ると、横坑内を流れる水の損失水頭が横坑と水脈との交点から水脈を通して上の地表面に湧水が出ていた時にその間で失われたそれに比較して小さいものと考えられるから、横坑を掘らない時の地表面での自然湧出量に比すれば横坑を掘るとそれからの湧水量はかなり大きくなるものと考えられる。後者が前者の幾倍かというその倍率は上記の2つの損失水頭の大小によって定まるのである。中氏はこの値は普通 $5 \sim 10$ のことが大いという。これは坑の条件、地質条件、自然湧水の条件などによって大きく左右されることは明らかであるが、地下水利用の点から考えるとこの倍率が大きいことが有利なことはいうまでもない。

3. 新池ボーリングによる調査

(1) ボーリング工事の概要

図-3には神戸市水道局が今回行った新池ボーリング工事に関する平面図と縦断面図とを示す。図の第一ないし第三水脈の水を採取しようとする意図である。縦断面図でははっきりしないが、岩盤は地表面に露出せず、かなりの厚さの表土でおおわれ、上記水脈の露頭は地上でみとめ難い。

(2) 地質と掘さく速度

調査試験ボーリング工事により求められた地質柱状図を図-4に示す。

図面の縮尺が小さいので岩石の名称、硬岩、軟岩、破碎帯、粘土化層などの区別を示すことを省略してあるのでよくわからないが、硬軟両岩、破碎帯、などが互層をなしている。最初に予想した水脈の位置と実際のそれとはほぼ一致している。図には湧水量、掘進速度、コア採取率などを示してある。粘土化層や水脈の外側の岩からの湧水量は0である。

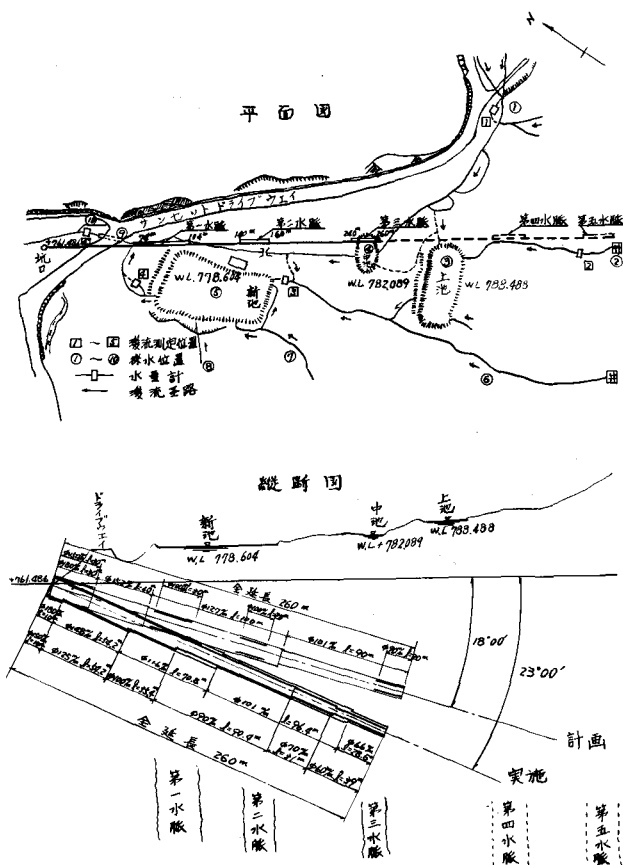
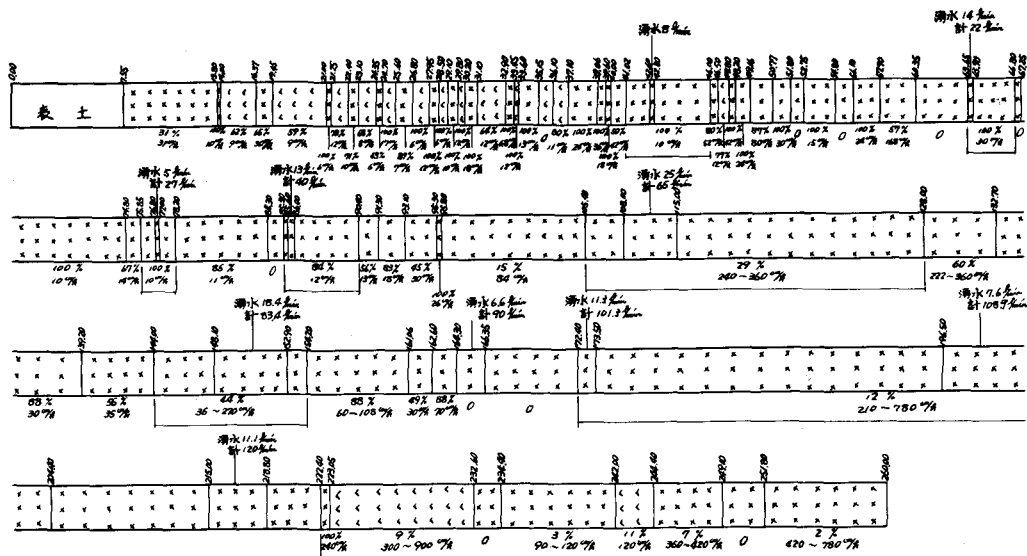


図-3 ボーリング工事概要図

掘さく速度は岩質の硬軟に左右されることは比較的少なく、断層および破碎帯において大きく左右される。口径による掘進能率の変化は径 148 mm までは比例的に大きく減少するが、それ以上の口径ではそれが少なくなる。深度による作業能率の変化は延長 150 m までは距離に比例して低下するが、150 m 以上になるとその変化は少なくなる。



下の数字はコア採取率および進行の割合を示す
(10分進捗を時間に通換)

図-4 柱状図

(3) 竣工時のボーリング工事

日 昭和39年11月25日
至 昭和40年6月10日

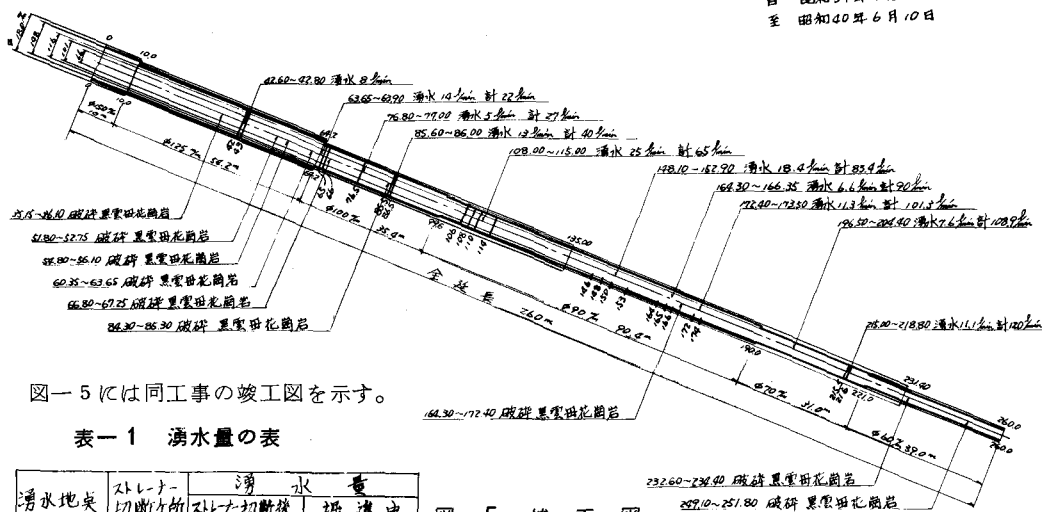


図-5には同工事の竣工図を示す。

表-1 湧水量の表

湧水地点	ストレーナー切斷箇所	ストレーナー切斷後	掘進中
ストレーナー切斷前の湧水量		32.4 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 46.7%	
42.60-42.80	2	0	8 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 11.5 $\frac{1}{2}$ %
63.65-63.90	2	0	14 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 20.2 $\frac{1}{2}$ %
76.60-77.00	1	0	5 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 7.2 $\frac{1}{2}$ %
85.60-86.00	2	0	13 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 18.8 $\frac{1}{2}$ %
108.00-115.00	4	31 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 45.4 $\frac{1}{2}$ %	25 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 36 $\frac{1}{2}$ %
143.10-152.90	4	67 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 9.65 $\frac{1}{2}$ %	184 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 26.5 $\frac{1}{2}$ %
164.30-166.35	3	0	66 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 9.5 $\frac{1}{2}$ %
172.60-173.50	2	31 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 44.7 $\frac{1}{2}$ %	113 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 16.3 $\frac{1}{2}$ %
196.50-204.60	0	0	76 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 11 $\frac{1}{2}$ %
215.00-219.90	2	10 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 14.4 $\frac{1}{2}$ %	11.1 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 16 $\frac{1}{2}$ %
計	22	93.5 $\frac{1}{2}$ 分 $\div$ 20.62 $\frac{1}{2}$ %	17.3 $\frac{1}{2}$ %

図-5 竣工図

(4) 湧水量

表-1にはボーリング坑の坑口から坑に沿うて測った距離で示した湧水地点について、ストレーナー切斷力所数、ストレーナー切斷後と掘進中とに分けた湧水量を示した。ストレーナー切斷後の湧水量が減少した理由は、湧水地点に隣接している粘土、細砂などのためにストレーナーが閉塞せられたこと、ケーシング挿入後にそれが

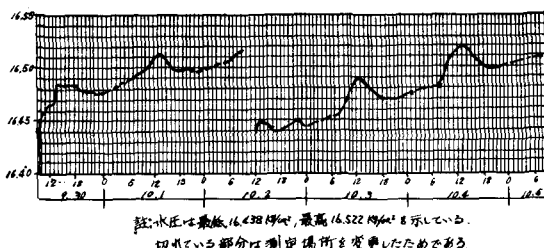
IV) 湧水量は最初の予想に反して意外に少なかった。この理由は地質柱状図で明らかなように、この坑の所の地質は粘土化、細粒化、細砂化したものが破碎帯につまっているが故に、破碎帯内の透水性がよくなく従って湧水量が少ない。また坑を掘ってもその周囲の砂粒や粘土が坑を閉塞する傾向が多分にあることもその理由として考えられる。さらに予備調査で新池付近の地表一帯が表土でおおわれていたので、自然湧水量を正しく把握し得なかったこともまた理由のひとつであろう。

昭和40年2月15日から同年10月27日までの間、溪流量の測定を三角堰に取付けた簡易自記水位計により越流水頭をおさえることにより行なった。測定位置は図-3に示す通りである。強雨による流量の大きい時は特にNo.5などでは堰の能力を上回る流量となり、計量不可能であったことは残念である。No.5地点の流量は昭和40年3月9日～15日に最小となり、128t/dであった。この流量は降雨の影響をほとんど受けておらず、地下水の湧水量とみなしても支障はない。同年8月のそれはこの量に比すれば約3倍もあった。前記最小流量には今回掘さくした横坑が関係すると考えられる三水脈からの自然湧水量も勿論含まれていると考えられる。流量表は紙面の都合で省略する。

水質は水の由来に大きな関係有するものである。従って、渓流水は10地点、湧水はボーリング坑口から87.7m、162mの両地点をえらんで採水したものの分析表を表-2にかかげる。これに関する考察は紙面の都合で省く。

检 查 项 目	表 流 水 探 取 地 点										湧 水 探 取 地 点	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	40.2.13 88.7号地点	40.5.10 162号地点
$P. H$	6.3	5.9	6.3	6.3	6.3	6.0	6.1	6.2	6.4	6.5	10.3	8.3
HCO_3^-	6.2	1.61	3.5	5.0	3.14	1.39	2.5	3.32	5.63	4.65		
cl^-	6.7	5.0	6.5	6.7	6.1	5.1	5.8	4.7	6.5	5.6	5.1	6.2
Ca^{+2}	3.9	1.1	2.8	3.8	3.1	1.8	2.2	1.8	3.2	3.2	27.7	14.7
SO_4^{2-}	5.5	5.5	5.5	5.5	6.0	5.5	15.5	5.5	5.5	5.5	5.0	4.5
SiO_2	14.0	14.0	12.0	12.0	11.0	14.0	15.0	13.0	11.0	14.0	20.0	16.0
Fe	0.3	0.04	0.16	0.29	0.4	0.02	0.06	0.4	0.06	0.06	0.08	0.09
$O_2 p, p, p_m$	10.37	9.73	10.06	10.33	11.06	10.57	10.24	11.03	10.63	10.97	4.94	2.93
Na^+	5.36	3.47	4.51	5.08	4.34	3.05	4.6	4.14	4.83	3.70	8.23	27.7

坑の掘さくが終了し、さらにケーシング挿入およびストレーナー切断などを完了した後において、坑口のケーシングに蓋をして、それに透明ビニールの可撓性チューブをつなぎ、それを高く設置し、そのなかの水頭を読むいわゆる manometer 直読式と、蓋に自記圧力計をとりつけて静水圧を自記



- 41 -

させる法とを併用した。前者の方法で昭和40年9月30日から10月5日までの間に1時間ごとに測定を行なった結果を図-6に示す。ある周期性で変動しているようである。後者の方法で同年10月7日から同30日まで測定を行なったが、水圧の大きな変動はなく最高で1.67kg/cm²、最低で1.5kg/cm²であった。

7. 湧水のトレーサー実験

上昇水脈が果して存在しているか否かを確かめることはこのような場合に極めて大切なことである。従って、7月13日から10月29日にかけて3回に亘り磷酸アンモニウム水溶液を坑内へ注入して坑口を閉じて、その溶液が坑の上方の地表流にどのようにあられるかの実験を行なった。第1回実験は液注入時の圧力、湧水の静水圧が計器故障のため

把握し得ず、従って途中で実験を中止した。第2回実験は7月27日～8月16日に亘って行なった。

この時はストレーナーは215.5m、216mの2カ所に切っており、湧水量は61.3t/d、磷酸アンモニウム粉末約10kgを約250lの水に溶かして6～8kg/cm²の圧力をかけて閉塞した孔口から貫入してある中空のロッドを通して約30分で注入して閉じた。注入後は4カ所から定時に採水して磷酸の濃度(p.p.m)の測定を行なった。No. 2地点で投入後8日目に1桁濃度の高いものが早朝に検測され始めたので、さらに30分間隔、10分間隔で午前中の採水を行ない分析をしたが、短時間にあらわれるにすぎなかった。8月16日にいたり、各

採水地点いずれもかなりの濃度が検出された。さらに1週間ばかり引続いて観測を行なえば興味ある結果を得られたことと思う。実験終了後、坑内磷酸アンモニウムの濃度測定を行なった。第3回実験は10月5日～29日にかけて行なった。この時は図に示すように多くのストレーナーを切っていた。注入圧力は3～6kg/cm²であった。磷酸アンモンの濃度分析結果は表-4に示す通りであり、この時は6日目にいっせいに短時間にかなりの濃度のものがみられた。

これらの結果からみて、疑問点はあるかトレーサーが上昇したことは確かである。

表-3 分析表

採水地点	(P.P.M)											
	No.1(260°附近)				No.2(新池上)				No.3(新池下埋地)			
	0.014				0.01				0.014			
原水	7	12	17	22	7	12	17	22	7	12	17	22
7.27				0.01				0.01				0.01
28	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.015
29	0.01	0.01	0.01	0.01	0.012	0.012	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01	0.015
30	0.01	0.012	0.01	0.012	0.012	0.01	0.01	0.01	0.012	0.01	0.012	0.01
31	0.01	0.01	0.012	0.01	0.012	0.01	0.017	0.01	0.012	0.012	0.012	0.012
8.1	0.01	0.015	0.017	0.012	0.012	0.012	0.012	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01
2	0.01	0.012	0.012	0.01	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.01	0.012
3	0.012	0.01	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01	0.01	0.012	0.01	0.01	0.01
4	0.017	0.01	0.012	0.01	0.012	0.012	0.01	0.01	0.012	0.012	0.012	0.012
5	0.015	0.012	0.012	0.012	0.011	0.012	0.012	0.01	0.012	0.012	0.012	0.012
6	0.012	0.012	0.01	0.01	0.012	0.012	0.01	0.01	0.012	0.01	0.012	0.01
7	0.01	0.015	0.015	0.015	0.01	0.01	0.012	0.01	0.012	0.01	0.015	0.012
8	0.015	0.017	0.01	0.015	0.01	0.017	0.017	0.015	0.012	0.012	0.012	0.015
9	0.015	0.017	0.012	0.01	0.017	0.015	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.01
10	0.017	0.017	0.017	0.01	0.012	0.017	0.01	0.01	0.017	0.017	0.017	0.012
11	0.017	0.017	0.017	0.017	0.012	0.012	0.012	0.01	0.017	0.017	0.017	0.012
12	0.01	0.01	0.017	0.017	0.017	0.01	0.012	0.01	0.017	0.017	0.017	0.012
13	0.017	0.017	0.017	0.017	0.014	0.017	0.01	0.01	0.017	0.017	0.017	0.012
14	0.017	0.012	0.015	0.01	0.012	0.017	0.01	0.017	0.012	0.012	0.012	0.01
15	0.017	0.012	0.012	0.012	0.017	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
16	0.015	1.2	0.015	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

表-4 分析表

採水地点	(p.p.m)											
	No.1(260°附近)				No.2(新池上)				No.3(新池下埋地)			
	0				0				0			
原水	7	10	13	16	19	22	7	10	13	16	19	22
44.10.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0.5	0.3	0.1	0	1.8	0.7	0.1	0	1.8	0.6	0.1
19	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.07	0.04	0	0.03	0	0.07	0.03
20	0.01	0.04	0.03	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
21	0	0.03	0.03	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
22	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
23	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
24	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
25	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0.03	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0
28	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0