

ISSN 0386—5878  
土研資料1402号

# 土木研究所資料

涵養井の目づまりについて

昭和53年10月

建設省土木研究所

## ま え が き

地下水の過剰揚水による地盤沈下等の地下水障害の深刻化によって、今まで地下水の利用に対して大きな反省がなされるとともに、水資源の逼迫の解決手方として、膨大な地下の貯留能を生かした地下貯水池の構想が注目を浴びている。この地下水障害の軽減および表流水と地下水の利用を一体化する地下貯水池による水質源逼迫の緩和、これらの実現に対して大いなる期待を抱かせる技術が地下水の人工涵養技術であろう。

涵養技術は地表面に水を張る拡水法と井戸から注入する注入法に大別される。地下水とは雨水等が長い時間を要し、そこにあるべく条件を満たしつつ浸透したものである。人工涵養とはいわば、この過程を省略し、表流水を直接的に地下水化するものであって、そこには地下水と帯水層が一体となった拒絶反応が予想される。これがいわゆる目づまり現象である。

注入井の目づまりは直接人間の触れられない所で発生するものであり、その究明には緻密なデータの集積とその繊細な洞察・解析が不可欠である。本報告書は、各地で実施されてきた注入井による涵養実験結果の内容を調査し、目づまりの実態とその対策の可能性を明らかにすることを目的としている。

本報告書を取りまとめたのは

研究員 北 川 明

である。この本報告書をまとめるに当ってご協力を頂いた方々に厚くお礼申し上げる。

昭和53年5月

水文研究室長 石 崎 勝 義

## 目 次

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1. はじめに .....                  | 1  |
| 2. 注入に伴う注入井の水位の変化について .....    | 1  |
| 2-1 比注入量が比揚水量に比較して減少すること ..... | 1  |
| 2-2 帯水層系の比定常に伴う注入井の水位変動 .....  | 2  |
| 3. 目づまりについて .....              | 6  |
| 4. まとめおよび目づまりの対策について .....     | 31 |
| 5. 参考文献 .....                  | 34 |
| 6. 参考資料 .....                  | 35 |

## 1. はじめに

地下水人工涵養の必要性が認識され、本邦においても各地で多くの現地実験が実施され、注入に伴う目づまりについて、かなりの知識が蓄積されてきた。しかしながら、それぞれの実験とその結果のとりまとめは、個々の実験ケースの域を出ず、個々の場所での注入実験に終わっているのが現状であろう。より汎用的な注入井による地下水の涵養技術を系統的に積み上げるためには、当然のことながら、今まで個々に行なわれてきた実験結果を有機的に結び合わせるが必要不可欠であろう。

本報告はこれまで行なわれた現地実験の中で、秦野<sup>1)</sup>、平塚<sup>2)</sup>、妻沼<sup>3)</sup>、大阪<sup>4)</sup>、大東市<sup>5)</sup>、佐賀白石<sup>6)</sup>、平野上越市<sup>7)</sup>、山形市<sup>8)</sup>の実験結果について、客観的に見つめなおし、普遍的な事実と考えられることがらを取り出し、注入に伴う目づまり発生機構とその対策について具体的に考察・検討を行なったものである。

## 2. 注入に伴う注入井の水位の変化について

注入に伴う目づまりを判断する最も簡単な方法は、注入井の水位を測定することであろう。一定圧で注入を行なう場合には、注入量の減少が目安となる。しかし、注入井の水位の変動が帯水層の目づまりによる透水性の減少に起因するものかどうかを明確にすることが重要であろう。ここでは注入井の水位の変化および変動に対して影響しうる次の二つのことについて簡単に説明したい。

### 2-1 比注入量が比揚水量に比較して減少すること

比注入量は一般的に比揚水量と比較するとその5割程度であると、今までの注入実験から判断されているものの、その具体的な理由はいまだ明確になされていない。

下記の表は、建設省が大阪市鶴見区で行なった実験結果であって、注入時と揚水時の井戸水位を比較したものである。

表-1 注入、揚水での井戸内の水位上昇、低下量

|           | 0.2m <sup>3</sup> /min | 0.3m <sup>3</sup> /min | 0.4m <sup>3</sup> /min | 0.5m <sup>3</sup> /min | 0.6m <sup>3</sup> /min |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 水位上昇量(注入) | 0.8m(24h後)             | 1.4m(24h後)             | 1.6m(24h後)             | 4.1m(24h後)             | 4.0m(1h後)              |
| 水位低下量(揚水) | 1.1m( " )              | 1.6m( " )              |                        |                        | 3.0m( " )              |

上記の例から、注入量が0.4m<sup>3</sup>/minぐらいまでは井戸水位変化量は揚水量のそれと同程度かむしろ小さくなっている。ところが注入量が0.6m<sup>3</sup>/minになると、注入時の水位上昇量が揚水時の低下量より大きくなっているのがわかるであろう。比注入量は注入量が大きくなれば、比揚水量より小さくなることが考えられる。この原因として、次のことがらが上げられるであろう。

i) 注入の場合ストレーナの付近での損失が大きくなること

上記の大阪の実験例で、注入量が  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$  の場合のレイノルズ数を考えてみると

$$R_e = \frac{u d m}{\nu} = 7 \sim 70$$

となる。ここで  $u$  ; 見かけの流速であって、ストレーナの開孔部での流速を考えている。 $\nu$  ; 動粘性係数である。 $d$  ; 帯水層材の平均粒径であって、 $0.1 \text{ cm} \sim 1 \text{ cm}$  と考えている。

浸透流における乱流へ移行する限界レイノルズ数は通常

$$R_{ec} = 1 \sim 10$$

といわれている。注入量が  $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$  の場合にはこの限界レイノルズ数を越え、ストレーナ付近では乱流となっているものと考えられる。ストレーナ付近での水頭の損失の差は、揚水時と注入時とでの乱流域の差として現われるものと考えられる。流速が最も大きくなるのは、ストレーナの開孔部であって、揚水時にこの部分で乱流になっても、井戸内へ流れ込むのみであって、ほぼ乱流による損失は無いものと考えられる。流入の場合について考えてみると、揚水量と同量を注入すれば、同様にストレーナの開孔部で乱流となる。注入の場合には、乱流のまま帯水層へ流出することになるから、乱流による損失が大きくなることが予想されるであろう。

ii) 乱流に伴う帯水層微細粒子の移動

この現象は、一般的に揚水井には砂だめといって、帯水層の微細粒子を揚水井中に留めるためのものを設置することが考えられるものである。揚水の場合には、帯水層の微細粒子は揚水井へ流入し、帯水層の透水性がよくなる方向へ働くものと考えられるが、注入の場合には、注入井から遠ざかる微細粒子は水流の勢が落ちた所で沈殿し、そこでの透水性の劣化をまねくこととなるであろう。注入量が多ければ多いほど顕著になると考えられる。

## 2-2 帯水層系の間隙圧の非定常応答に伴う注入井の水位変動

深層の帯水層は、一般に、上位、下位とも加圧粘土層にはさまれた被圧帯水層系である。このような帯水層での注入では、加圧層の非常にゆっくりした間隙圧の非定常応答（圧密による地盤沈下もその例である）のために、注入による注入井の水位が定常に達するまでに想像以上に長い時間を要し、その間の水位変動があたかも、目づまりによる透水性の減少と誤解されてしまうことがありうる。

図-1 は秦野での注入時の注入井に外接した観測井の水位と  $20 \text{ m}$  離れた観測井の水位を示した図である。注入に伴い No. 21 の水位は徐々に上昇し、注入開始後  $20$  日後にそこの水位が定常に達しているのが見られる。この時の注入量が  $0.64 \text{ m}^3/\text{min}$  である。目づまりによって水位上昇が発生するはずのない No. 21 の観測井での水位上昇はそこでの帯水層系の非定常応答のためであって、注入井の初期の水位上昇のかなりの部分が影響されていることが推定されるであろう。

図-2 は大阪で行なわれた長期注入実験結果を比注入量として整理したものである。注入量は  $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$

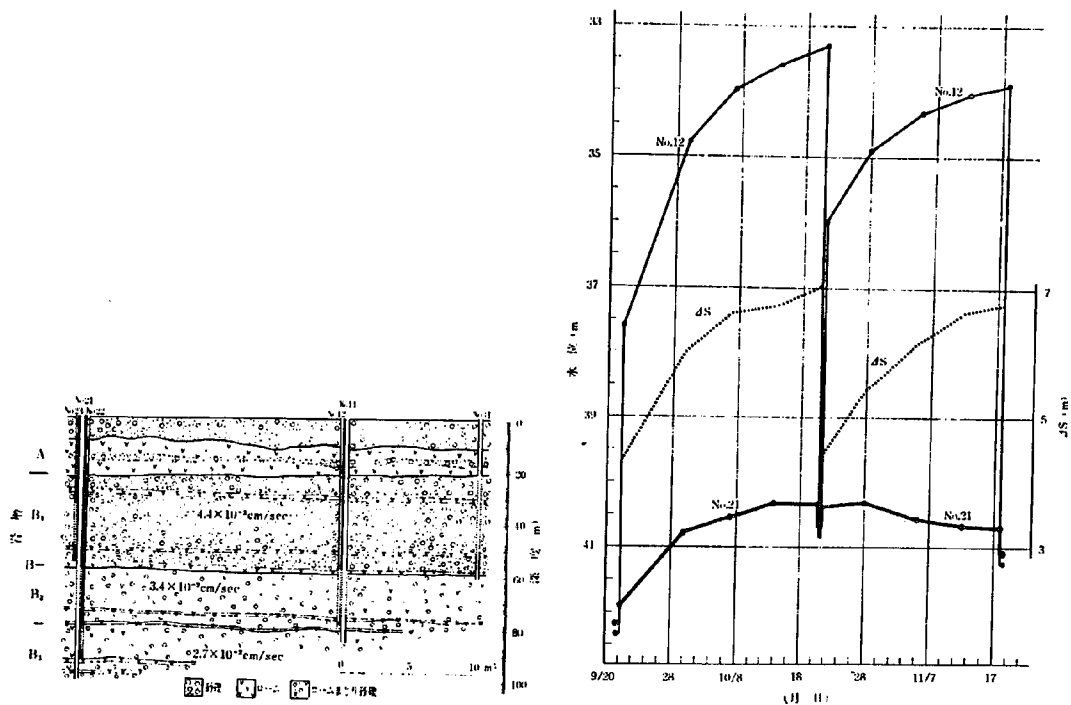


図-1 秦野における注入井と観測井および注入に伴う水位変動

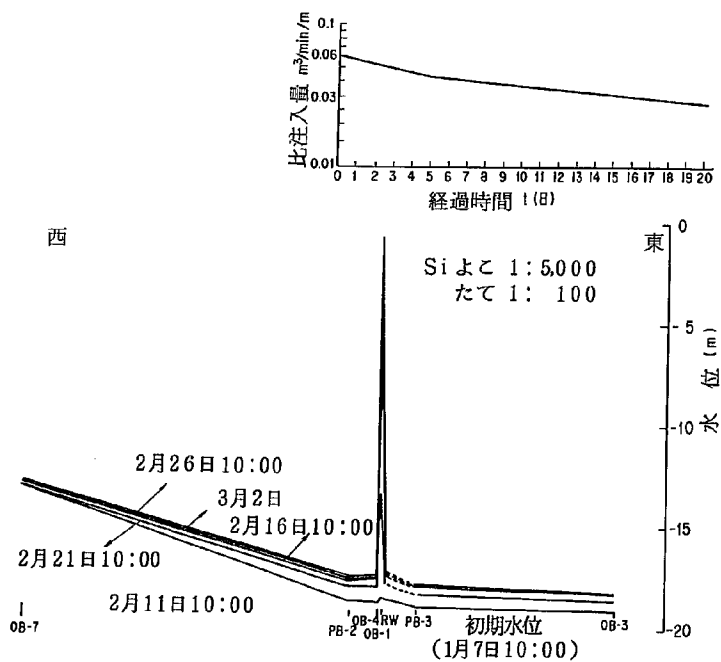


図 - 2

である。注入開始後5日までとそれ以降では比注入量の減少程度が明確に異っている。図-3は注入対象層と同帯水層にストレーナのきつてある観測井と上位にある加圧層での間隙圧を測定した結果である。帯水層では注入後5日目ではほぼ定常に達しているが、加圧層でそれ以上の日数が定常までに要することが示されている。比注入量の5日までの変化は、帯水層で定常に達する5日までの帯水層系の非定常応答によるものと推定される。

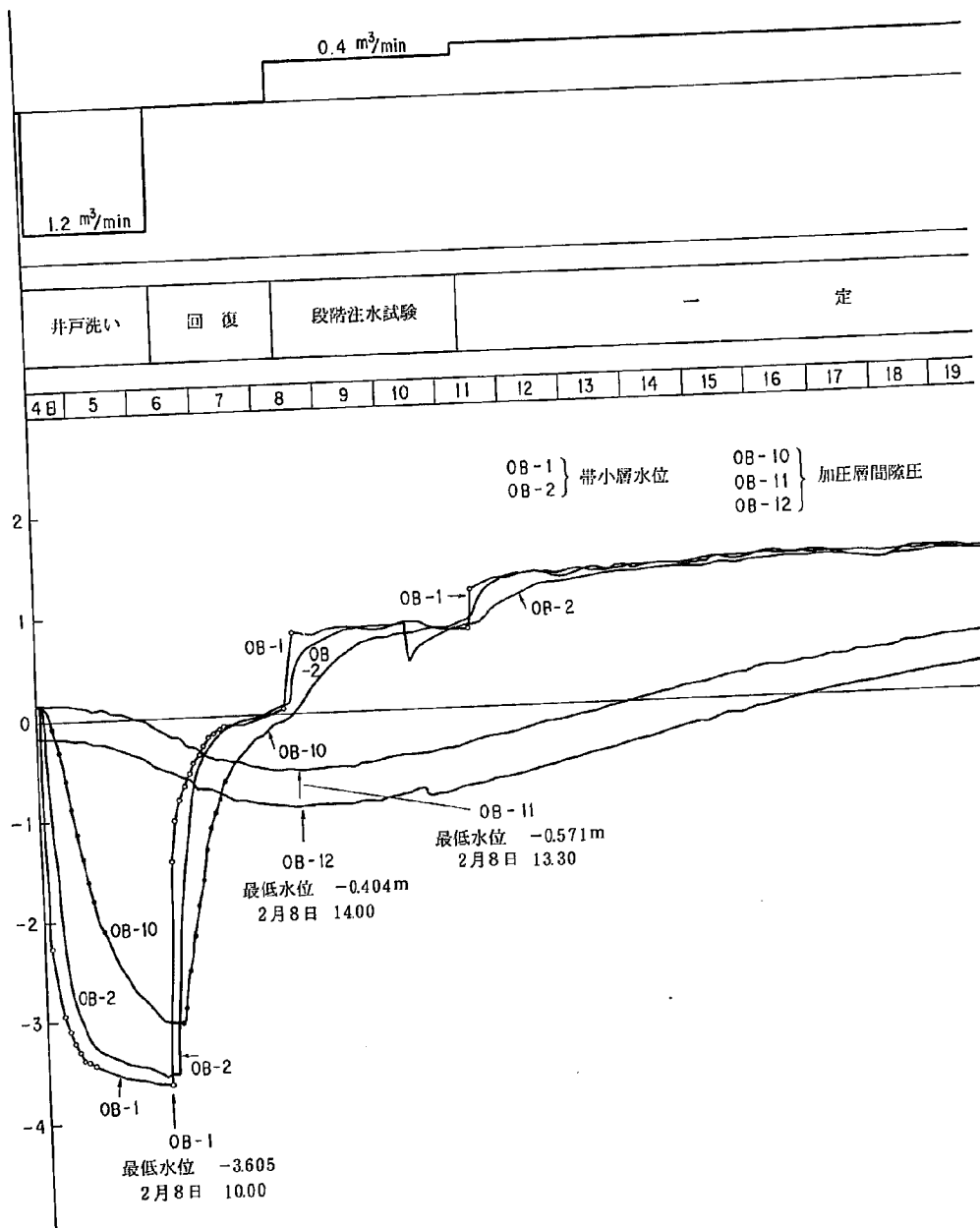


図-3 一定注水試験における帯水層水位、加圧層間隙圧の変化

### 3. 目づまりについて

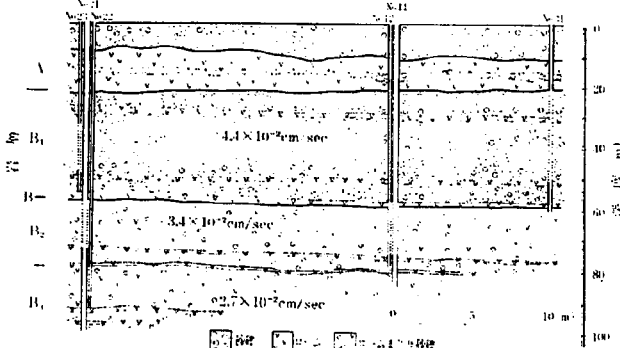
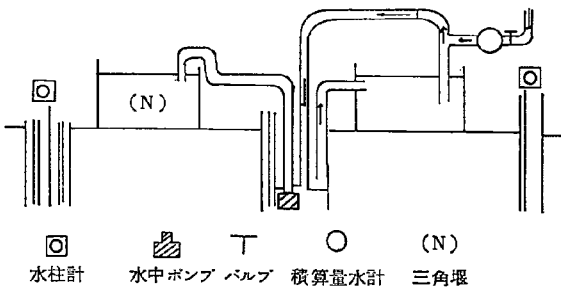
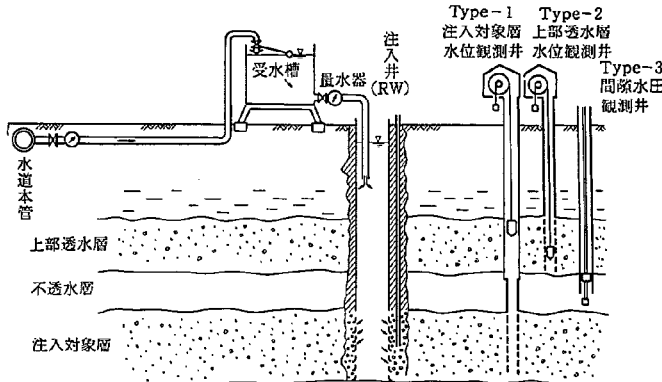
目づまりとは地層の空隙が減少しその結果として透水性の劣化を意味するものである。ここでは、秦野、大阪鶴見区、大東市、妻沼、平塚、佐賀白石平野、上越市、山形市の8地点での実験結果について、注入帯水層、注入井の構造、注入システム、注入水質、地下水質、注入に伴う目づまり状況、考えられる目づまりの原因、逆洗による注入効率の回復の6項目について、まとめ整理したのが表-2である。この表を見れば、各実験内容とその結果についての概略は把握することができるであろう。ここではこの表をもとに考察を加えていきたい。

注入帯水層の透水係数は、シルト分をいく分含む佐賀白石および山形市をのぞいて、ほぼ $10^{-2}$  cm/sec のオーダー以上であって、いわゆる砂礫層とよばれる良好な帯水層である。注入層として、透水性が良好なほど好ましいのは、空隙が大きく目づまりによってつまりにくいことから推定される。

注入水として水道水を用いているのが、秦野、大阪および大東市である。残りの妻沼、平塚、白石は近くの井戸水をまた上越市、山形市は表流水を利用している。上越は河川水を浄化しているのに、山形では粗大ゴミのみ除去してそのまま注入している。妻沼と平塚はすぐ近傍の同じ帯水層系で注入層の上位の帯水層水を注入水としている。妻沼での注入実験の目づまりの原因は注入水に含まれていた鉄、マンガンが酸化し、帯水層中に蓄積したものである。浅層の地下水は一般的に深層より水質的に悪く、この場合も浅層の地下水を注入水としており、3~5 ppm 鉄、マンガン、計 8 ppm 程度が含まれている。平塚の場合、注入水および帯水層水の水質が不明であるため、目づまりの原因がつかめないが、浅層の地下水を注入していることから、妻沼と同様な理由によるのかもしれない。佐賀白石では深井戸水を注入水として利用している。深井戸水質そのものは明らかでないが、水路で導水された後、水槽に貯られた注入水の水質分析によると、アンモニア性窒素、亜硝酸性窒素等の濃度はそれほどでないが、 $\text{P O}_4 - \text{P}$  濃度は富栄養化の制限濃度より1オーダー高くなっている。このような水質汚濁は水路による導水および貯水中に生じたものと考えられる。再揚水は黒濁し、有機物の破片が含まれ、明らかに生物的目づまりが伴っていることを示している。注入水がこのような水質を有する場合には、固形有機物はもちろんのこと、溶解性有機物、アンモニア性窒素、リン等の除去および注入水の滅菌が前処理として必要となるであろう。

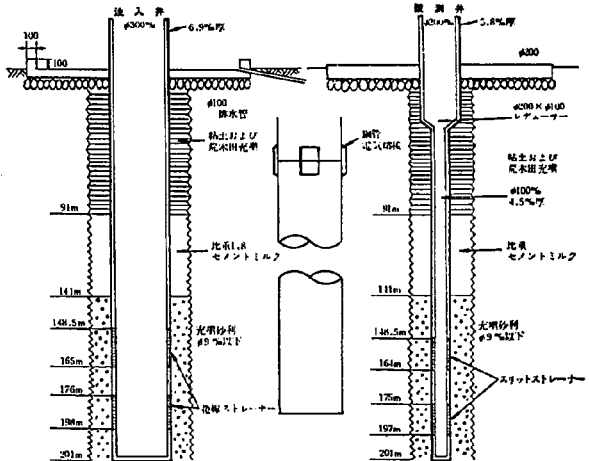
上越および山形市での注入水は表流水である。上越市では実験地すぐ脇の二級河川保倉川より取水し、凝集沈澱急速浄過を行い注入している。注入水は保倉川の水質が悪化したり、浄化がうまくいかなかったりした場合に、注入水の濁度が最大 5 ppm にまで達する。さらに濁度計では検知できないようなものも負荷されているようである。図-19は注入水の濁度と注入井での水位上昇とを図示したものである。注入開始より7日目からは注入水濁度が高くなり、注入井での水位上昇傾向も強くなっているようである。さらに注入休止後注入井内の水質検査によれば、G, L. より100m以深ではかなりの酸化鉄赤褐色沈澱物が含有されていて最深部で 1.2 ppm の濃度となっている。注入源水である保倉川にはほとんど鉄分は検出されないとのことであり、施設、特にケーシングの腐食による鉄分の析出と考えられこれは目づまりの一因となっているようである。再揚水すれば開始直後は赤濁しており、注入によって酸化鉄が注入井の近傍に蓄積されたことが

表 - 2

|            |                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>桑 野</p> | <p style="text-align: center;">注 入 帯 水 層</p> <p>盆地内を流れている河川によって搬出された砂礫<br/>透水係数 <math>3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}</math></p>  <p style="text-align: center;">堀山下注水実験場地質断面図</p> | <p style="text-align: center;">注入井構造, 注入システム</p> <p>深度 85 m, 口径 300 mm, ストレーナ長 18 m<br/>開孔率 40% (?), スパイラルストレーナ, フィルター材グラベル</p>  <p style="text-align: center;"> <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 水柱計            <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 10px; background-color: #cccccc; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 水中ポンプ            <span style="font-size: 1.2em; margin-right: 5px;">T</span> バルブ            <span style="display: inline-block; width: 10px; height: 10px; border: 1px solid black; border-radius: 50%; margin-right: 5px;"></span> 積算量水計            <span style="font-size: 1.2em; margin-right: 5px;">△</span> (N) 三角堰       </p> |
| <p>大 阪</p> | <p>砂礫混り, 微細粒子含む, 上層に 13 m の加圧層<br/>透水係数 <math>1 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}</math></p>                                                                                                                                                                       | <p>深度 51 m, 口径 300 mm, ストレーナ長 7.5 m, SKS ストレーナ<br/>開孔率 (?), フィルターオオ, 10 mm の礫石</p>  <p style="text-align: center;">         Type-1 注入対象層 水位観測井            Type-2 上部透水層 水位観測井            Type-3 間頭水圧 観測井       </p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

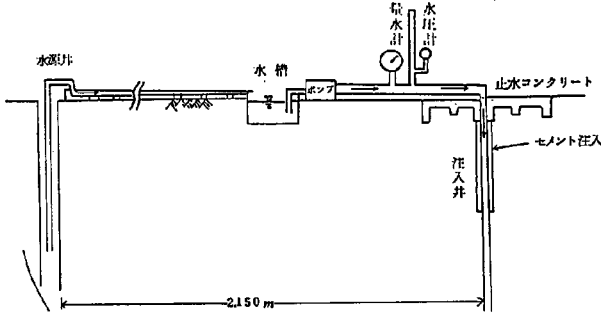
|     | 注 入 帯 水 層                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 注入井構造, 注入システム                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 秦 野 | <p>注入水水質, 地下水質<br/>           沢水を取水し, 水道水として浄化<br/> <math>F_e 0, M_n 0</math><br/>           蒸発残留物, 注入水 60.5ppm, 注入帯水層水 114.0ppm<br/>           注入水のその他の化学成分はほぼ地下水のそれと同程度。<br/>           注入水の方が, 注入帯水層水より水質的にすぐれている。</p>                                                                        | <p>注入に伴う目づまりの進行状況<br/>           比注入量は時間的に指数関数的に減少(図4~5)<br/>           注入量が大きくなると初期の比注入量はかなり小さくなる。(図-4)<br/>           比注入量半減注入量 <math>7.1 \times 10^4 \text{ m}^3</math> (注入量 <math>38.4 \text{ m}^3/\text{h}</math>)</p>                                                                     |
| 大 阪 | <p>淀川より取水され水直水として浄化, 水質の悪い所の水道水には通常<br/>           1ppmのSSが含まれているという。<br/> <math>F_e, M_n 0</math></p>                                                                                                                                                                                           | <p>目づまりの発生状況は図-7<br/>           注入井とそれに外接している観測孔との間(井戸のストレーナ)には特別な目づまりは発生してない。しかし, 注入井より7.7m離れた観測井水位の上昇はみられない。目づまりは, 注入井と7.7m離れた所の間で発生していることは明らかであるが, この中での目づまりの発生分布状況は明らかでない。<br/>           比注入量半減注入量 <math>1.7 \times 10^4 \text{ m}^3</math> (注入量 <math>30 \text{ m}^3/\text{h}</math>)</p> |
|     | 考えられる目づまりの原因                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 再揚水による比注入量の回復                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 秦 野 | <p>空気泡……わずかな再揚水(15分)で元の比注入量に回復(イタ図)<br/> <math>650 \text{ l}/\text{min}</math> (注入量)で井戸内下降平均流速は <math>15.3 \text{ cm}/\text{sec}</math>, 直径 <math>2 \text{ mm}</math> 以下の空気泡は水面まで達しえず, 理論的には <math>1,200 \text{ l}/\text{min}</math> ですべての気泡は上昇できない。<br/>           全体的には長期的な比注入量の減少傾向がみられる。</p> | <p>わずか15分の逆洗で元に回復(図-6を参照)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                   |

|                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                              |                                       |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|-----|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | 考えられる目づまりの原因                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 注入井構造, 注入システム                                                                                |                                       |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |
| 大 阪                                   | <p>注入水中のSSか, 溶存空気の気泡化が考えられる。</p> <p>空気の溶解度 (1気圧)</p> <table border="1"> <tr> <td>0℃</td> <td>5℃</td> <td>10℃</td> <td>15℃</td> </tr> <tr> <td>0.029cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></td> <td>0.027cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></td> <td>0.024cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></td> <td>0.019cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></td> </tr> </table> <p>15℃ (3気圧, 5℃1気圧に変換)</p> <p>0.059cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></p> <p>注入水が注入帯水層へ到達したとき2気圧が加圧されるから, 上記の数字からすれば, 帯水層では空気泡は発生しないことになる。</p> <p>SSを1ppmとすれば0.5m<sup>3</sup>/min 20日間注入すれば約14kgのSSが蓄積される。あるいは施設の鉄管のさびも一因と考えられる。</p> | 0℃                                                                                           | 5℃                                    | 10℃ | 15℃ | 0.029cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | 0.027cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | 0.024cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | 0.019cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | <p>逆洗による回復はそれほどよくない。注入量によっては, 比注入量がかなり小さく表われてしまうので, 再揚水 (量, スピード) による比注入量の回復は明確でない (図-9)。</p> <p>49年度の実験では, 注入, 再揚水を重ねるにつれて目づまりの程度がはよくなっている。(図-8)</p> |
| 0℃                                    | 5℃                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 10℃                                                                                          | 15℃                                   |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |
| 0.029cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> | 0.027cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 0.024cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>                                                        | 0.019cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |
|                                       | 注入帯水層                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 注入井構造, 注入システム                                                                                |                                       |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |
| 大東市                                   | <p>地層 不明</p> <p>透水係数 <math>1 \times 10^{-2}</math> cm/sec (推定)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <p>深度182m, 口径350mmの外管に内管250mm~200mmを挿入, スクリーン三ヶ所 合計37.5m, スクリーンの型, 開孔率不明</p> <p>鑿井集水孔位置図</p> |                                       |     |     |                                       |                                       |                                       |                                       |                                                                                                                                                       |

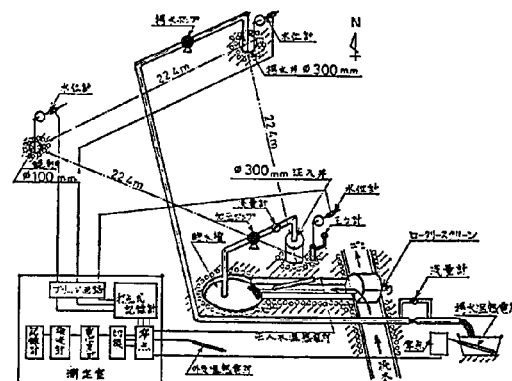
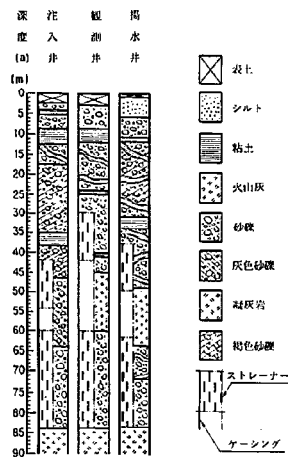
|                | 注 入 帯 水 層                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 注入井構造, 注入システム                                                                                                                                                                                                                                                                    |          |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------|------|----------------|----------|----------|----------|----------------|----------|---|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 妻 沼            | <p>地層 砂礫層(玉石含)</p> <p>透水係数 <math>3.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}</math> (推定)</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <p>A 注入井</p> <p>深度 200 m, 口径 300 mm, ストレーナ 148.5~165 m, 176 m~198 m<br/>計 39.5 m</p> <p>ストレーナ巻線型, 開孔率 14%, グラベルパッキング充填砂利 9 mm 以下</p> <p>B 注入井</p> <p>口径 400 mm, ストレーナ, クラベルパッキングは A 井と同じ</p>  |          |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |
|                | <p>注入水水质, 帯水層水质</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <p>注入に伴う目づまりの進行状況</p>                                                                                                                                                                                                                                                            |          |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |
| 大東市            | <p>1月5日~2月14日 地下水の浄水と府営水道の浄水の混合(約 3 : 7 )<br/>0.8 m<sup>3</sup>/min ( 1,152 m<sup>3</sup>/day )</p> <p>2月15日~6月17日 府営水道水<br/>1.3 m<sup>3</sup>/min ( 1,872 m<sup>3</sup>/day )</p> <p>水质</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>帯 水 層 水</th> <th>淀川浄水+深井戸水</th> <th>淀川浄水</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>F<sub>o</sub></td> <td>1.00 ppm</td> <td>0.01 ppm</td> <td>0.01 ppm</td> </tr> <tr> <td>M<sub>n</sub></td> <td>0.38 ppm</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> |                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 帯 水 層 水  | 淀川浄水+深井戸水 | 淀川浄水 | F <sub>o</sub> | 1.00 ppm | 0.01 ppm | 0.01 ppm | M <sub>n</sub> | 0.38 ppm | 0 | 0 | <p>比注入量は累加注入量の増加につれて, 指数関数的に減少(図-10参照)</p> <p>比注入量半減注入量 <math>1.08 \times 10^4 \text{ cm}</math> (注入量約 63 m<sup>3</sup>/sec)</p> |
|                | 帯 水 層 水                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 淀川浄水+深井戸水                                                                                                                                                                                                                                                                        | 淀川浄水     |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |
| F <sub>o</sub> | 1.00 ppm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0.01 ppm                                                                                                                                                                                                                                                                         | 0.01 ppm |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |
| M <sub>n</sub> | 0.38 ppm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 0                                                                                                                                                                                                                                                                                | 0        |           |      |                |          |          |          |                |          |   |   |                                                                                                                                  |

|     | 注入水水质，帯水層水质                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 注入に伴う目づまりの進行状況                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 妻 沼 | <p>注入井近くの井戸より取水，深度 15 m 井，45 m 井，90 m 井の三種</p> <p>A 注入井……15 m 井 <math>F_e^{2+}</math> 4.5 ppm, <math>M_n^{2+}</math> 2.27 ppm</p> <p>B 注入井……15 m 井 <math>F_e^{2+}</math> 3.88 ppm, <math>M_n^{2+}</math> 4.12 ppm</p> <p>45 m 井 “ 1.14 ppm, “ 0.64 ppm</p> <p>90 m 井 “ 0.14 ppm, “ 0.14 ppm</p> <p>注入帯水層水</p>                                                                                                     | <p>A 井については，指数関数的な比注入量の減少は顕著でない。逆洗の不十分さからか，注入を重ねるにつれて，比注入量の減少程度が大きくなっている。（図-11）</p> <p>B 井については，指数関数的な比注入量の減少が明らかである。<math>F_e</math>，<math>M_n</math> 濃度の高い，15 m 井水を注入した時が目づまりの発生程度がはるかに大きい。（図-12～図-13）</p> <p>目づまりは井戸のごく近くで発生，再揚水時注入井の容積分を揚水したときに最大濁度となる。</p> <p>比注入量半減注入量</p> <p>B 井 45 m 井 <math>2.02 \times 10^4 \text{ m}^3</math>（注入量 <math>60 \text{ m}^3/\text{h}</math>）</p> <p>B 井 15 m 井 <math>0.2 \times 10^4 \text{ m}^3</math>（注入量 <math>60 \text{ m}^3/\text{h}</math>）</p> <p>15 m 井は注入時間がわずか2日であるため，帯水層の応答が影響していることが考えられるため問題がのこる。</p> |
|     | 考えられる目づまりの原因                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 再揚水による比注入量の回復                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 大東市 | <p>帯水層水が鉄分，マンガンを含む，このことは帯水層に鉄鉱物が含まれることになる。溶存酸素の多い水（表流水はすべて）の注入によって帯水層内で酸化鉄（コロイド状 SS）が発生し，目づまりを引き起こす。ストレーナやケーシングパイプの腐蝕も考えられる。また注入水にもわずかな鉄分が含まれており，注入井の回りに蓄積したことも一因をなしているようである。</p> <p>注入鉄分量……2.7 Kg（<math>1,500 \text{ m}^3/\text{day} \times 180 \text{ day} \times 0.01 \text{ ppm}</math>）</p> <p>逆洗水には 10 ppm 以上の鉄分が検出されているが，総鉄分量は明らかでない。しかし，地下水中に含まれる鉄分，あるいは帯水層材中の鉄分等の酸化によって，注入鉄分以上の鉄分が逆洗時取り出されるものと考えられる。</p> | <p>逆洗開始時では高濃度の酸化鉄が検出され，5～6 日再揚水を続けると鉄分濃度は地下水のそれと近くなる。しかし揚水を 3～4 日休止し，その後再揚水を開始すれば，10 ppm 近くの鉄分濃度が検出された。このことは逆洗は断続的に行う方がはるかに効果的であることを示している。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

|    | 考えられる目づまりの原因                                                                                                                                                                                            | 再揚水にする比注入量の回復                                                                                                                                                  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 斐沼 | <p>注入水中の<math>F_e</math>, <math>M_n</math>が注入中に酸化され、ストレーナ、帯水層に蓄積。<br/>再揚水中に酸化鉄、酸化マンガンが含まれる。</p>                                                                                                         | <p>再揚水総量を多くすれば逆洗効果は上がる、しかし、揚水総量より揚水量<br/>(<math>m^3/sec</math>)が大きいくほど効果に対して影響が大きい。さらに断続揚水を行<br/>えば効果がある(図-14)。<br/>再揚水の間に注入をはさむと一そう逆洗効果が期待される。</p>            |
|    | 注入帯小層                                                                                                                                                                                                   | 注水井構造、注入システム                                                                                                                                                   |
| 平塚 | <p>地層……玉石混り砂利<br/>透水係数……<math>1.1 \times 10^{-1} cm/sec</math></p> <p>深度(m) 構造図 柱状図 比抵抗値(ohm-m)</p> <p> <math>\nabla</math> ……自然水位<br/> <math>\nabla</math> ……警戒水位<br/> <math>\nabla</math> ……停止水位 </p> | <p>深度80m, 口径300mm, ストレーナ50m~75m 計25m<br/>N. S. Tスクリーン, 開孔率(20~40%?), グラベルパッキング<br/>注入管に外接させて口径25mmの観測井</p> <p>注入システム</p> <p>逆洗用の揚水ポンプ設置 系統図は下記のとおり (自然流下法)</p> |

|            | 注 入 帯 水 層                                                                                                                                                                                                          | 注入井構造, 注入システム                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 佐賀<br>白石平野 | <p>地層……シルト, 砂礫混り<br/>(多層にわたって注入)<br/>透水係数……<math>2.83 \sim 6.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}</math></p>                                                                                                            | <p>深度165m, 口径0~31.5m, 150mm, 31.5~165m 75mm<br/>ストレナ, スリット型, 開孔率5%, 長さ合計67.5m, 加圧注入井</p>                                                                                                                           |
|            | 注入水水質・帯水層水質                                                                                                                                                                                                        | 注入に伴う目づまりの進行状況                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 平塚         | <p>近くの口径5m, 深度10mの浅井戸から取水, 空気に触れさせないように注入。<br/>水質は明らかでないが, 注入帯水層の上位の不圧地下水であって, 注入帯水層水より水質的におとることは十分 いうる。</p>                                                                                                       | <p>注入に伴って, 比注入量は指数関数的に減少(図-15)。<br/>注入水質が明らかでないので, 目づまりの原因ははっきりしない。<br/>目づまりの程度を次式に基づいて整理すると, 目づまりの大部分が井戸ロスで表わされる。しかし, 実際の観測では注入井と注入井のケーシングに近接した観測孔との水位差はそれほど大きくない。</p> $S/Q = a + bQ$ <p>S ; 注入井での平水位との水位差<br/>a ; 帯水層ロス<br/>b ; 井戸ロス</p> <p>比注入量半減注入量 <math>0.24 \times 10^4 \text{ m}^3</math></p> |
| 佐賀<br>白石平野 | <p>深度130mの深井戸水を開水路(1000m以上)で導水<br/>水質<br/><math>\text{NH}_4 - \text{N} \ 0.003 \sim 0.005 \text{ ppm}</math>, <math>\text{P}_4^0 - \text{P} \ 0.27 \sim 0.35 \text{ ppm}</math><br/>リン濃度が異常に高い(肥料等が混入しているのでは?)</p> | <p>一定圧注入で, 注入量の減少として目づまりが発生</p> $q_1 = q_2 e^{-at}$ <p><math>q_1</math> ; 初期注入量, a ; 定数, t ; 時間</p>                                                                                                                                                                                                   |

|           | 考えられる目づまりの原因                                                                                       | 再揚水による比注入量の回復                                                                                          |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 平塚        | 注入水質、帯水層水質が明らかでないで、目づまりの原因は明確でない。                                                                  | 総注入量と同等ぐらいの総揚水量でも全体としては、注入効率は減少済みである。(図-16)<br>再揚水量は注入量とほぼ同程であり、逆洗効果は注入量より大きな再揚水量でないとそれほど効果がないのかもしれない。 |
| 佐賀<br>白石  | 導水路中で発生したソウ類等によるSSおよび生物的な目づまりは、再揚水は黒色で、有機物の破片を含む。                                                  | 再揚水による逆洗については述べられていない。                                                                                 |
|           | 注 入 帯 水 層                                                                                          | 注入井、注入システム                                                                                             |
| 新潟<br>上越市 | 地層……均質な砂層 G <sub>4</sub> 層<br>透水係数…… $6.2 \times 10^{-2}$ cm/sec (透水量係数 2,480 m <sup>3</sup> /day) | 保倉川より取水→急速沈澱→急速ろ過→注入井<br>注入井口径上部53mmまで450mm, 下部300mm, 深度285m<br>ストレーナ長46m, 開孔率40% (NSTスクリーン)           |
| 山形市       | 地層……須川による堆積物と考えられる砂礫層(粘土混り)<br>透水係数…… $2.1 \times 10^{-3}$ cm/sec (透水量係数 65 m <sup>3</sup> /day)   | 側溝水を導水→スクリーンで粗大ゴミの除去→注入井<br>注入井口径 00mm, 深度84m, ストレーナ長36m, 開孔率(?)                                       |



|     | 注入水質・地下水質                                                                                                                                                                                                                                    | 注入に伴う目づまりの進行状況                                                                                                                                                                                                        |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 上越市 | <p>保倉川より取水</p> <p>濁度最大 5 ppm, 濁度計で検知されない薬等も混入</p> <p>地下水質</p> <p><math>F_e</math> 0.45 ppm</p>                                                                                                                                               | <p>比注入量は指数関数的に減少(図-17)</p> <p>比注入量半減 <math>4.5 \times 10^4 \text{ m}^3</math> (注入量約 <math>5.3 \text{ m}^3/\text{h}</math>)</p> <p>目づまりの進行が遅いのは、帯水層が均質な砂層であることと、ストレートの開孔率が高く、負荷物が帯水層全体にかたよりなく負荷されることにも一因があると考えられる。</p> |
| 山形市 | <p>側溝水であるが非常に清澄</p> <p>人為的な汚濁は見られないのはもちろん、全蒸発残留物は地下水より少ない。ただし、<math>F_e^{2+}, 3+</math> 0.44 ppm, <math>M_n^{2+}, 4+</math> 0.11 ppm 含む</p> <p>注入水全蒸発残留物 106 ppm</p> <p>地下水 " 240 ppm</p> <p><math>F_e^{2+}, 3+</math> 0.07 ppm マンガンは含まず</p> | <p>注入日数が十分でないが、ほぼ指数関数的に減少(図-18)</p> <p>比注入量半減総注入量 <math>1.22 \times 10^4 \text{ m}^3</math> (注入量 <math>4.2 \text{ m}^3/\text{h}</math>)</p> <p>注入水は側溝水ではあるが、非常に清澄であり、地下水より全蒸発残留物は少ない。</p>                             |
|     | 考えられる目づまりの原因                                                                                                                                                                                                                                 | 再揚水による比注入量の回復                                                                                                                                                                                                         |
| 上越市 | <p>再揚水が赤濁(酸化鉄)</p> <p>注入終了2時間後、注入井最深部 1.2 ppm の鉄分(100 m 以深赤色の酸化鉄)</p> <p>注入水濁度がしばしば 5 ppm に達し、濁度計にかからない水草等も混入。塩素滅菌は行っていないので生物的な目づまり、SS による目づまりも考えられる。</p>                                                                                    | <p><math>150 \text{ m}^3/\text{h}</math> 2 時間程度で元に回復、注入量の約 2.5 倍の再水量ですばやく逆洗。年に 1~2 回の逆洗。</p> <p>揚水量が多く、帯水層が均質な砂層で、目づまりしにくいとともに、洗浄も容易にいきたることも一因と考えられる。</p>                                                             |
| 山形市 | <p>再揚水がかっ色で酸化鉄が含まれる</p> <p>注入水中に鉄分 0.44 ppm が含まれる。DO の帯水層での消費はそれほど顕著でなく、帯水層での酸化鉄の生成は考えられない。</p>                                                                                                                                              | <p>再揚水による逆洗は述べられていない</p> <p>中断によった後の注入では回復しているように見えるが、帯水層系の応答によることも考えられ明らかでない。</p>                                                                                                                                    |

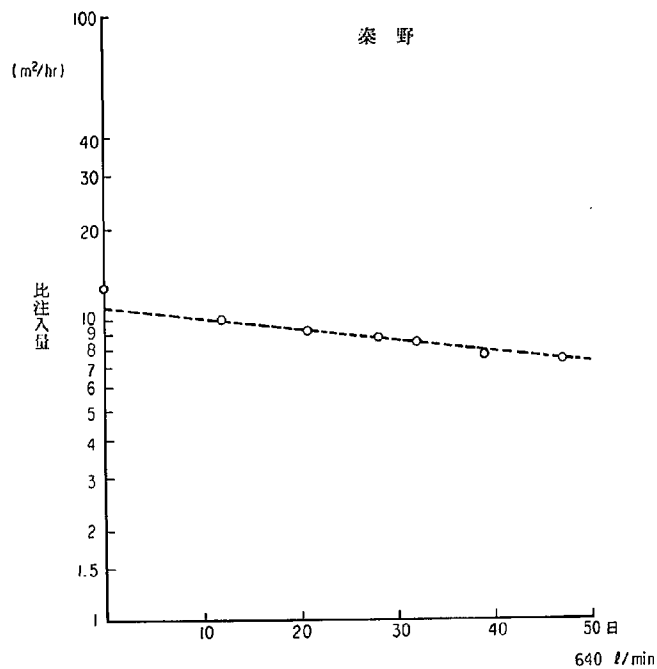


図 4 長期注入による比注入量の減少

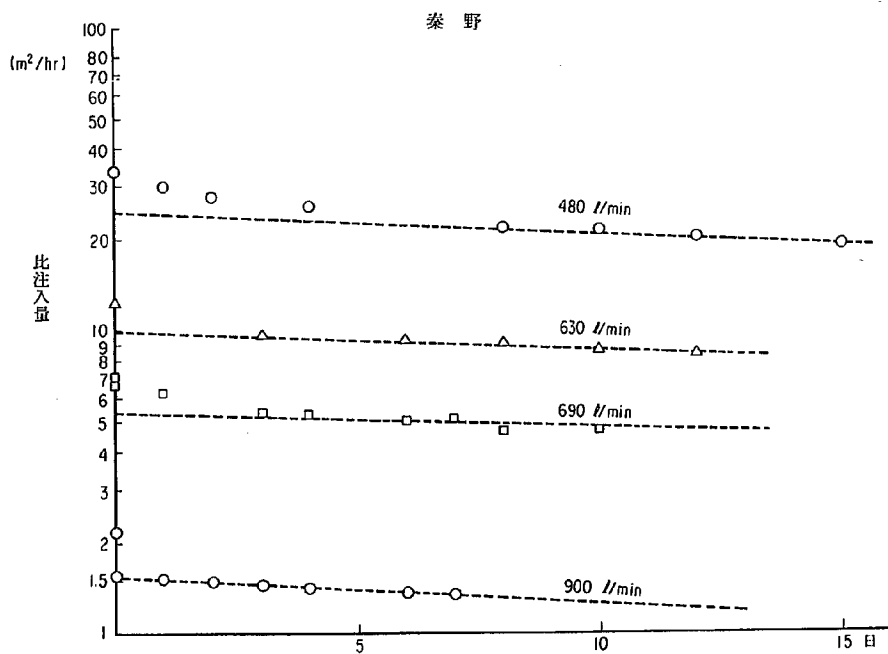


図 5 注入量による比注入量の違い

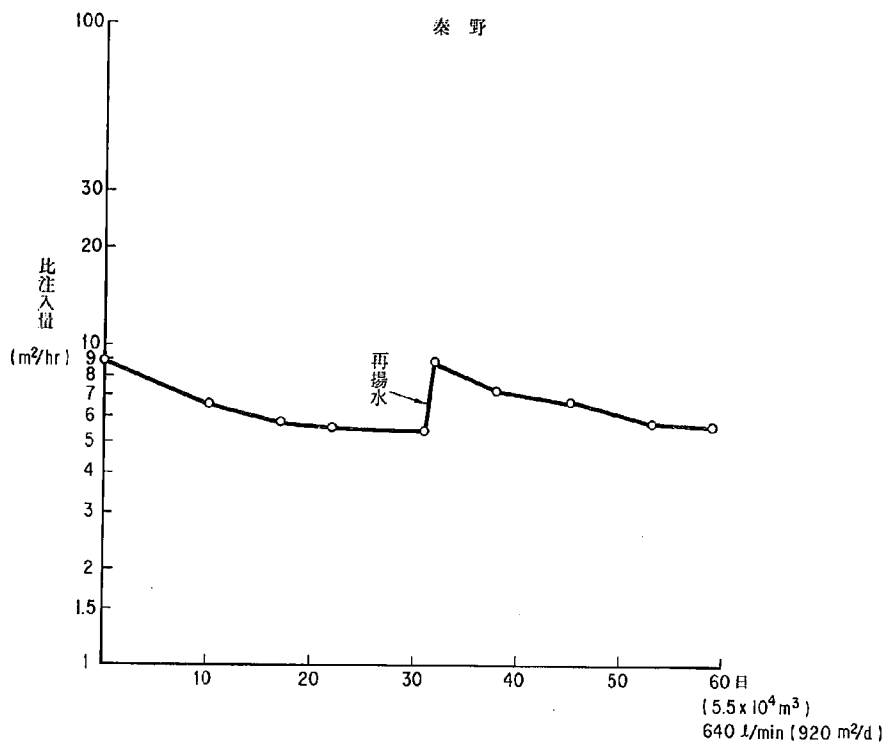


図 6 再揚水による比注入量の回復

大阪 (50年度)

一定量注入

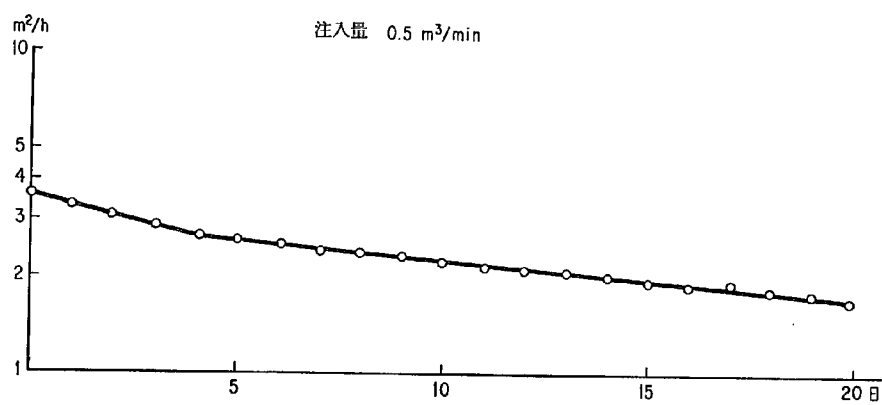


図 7 長期注入による比注入量の減少

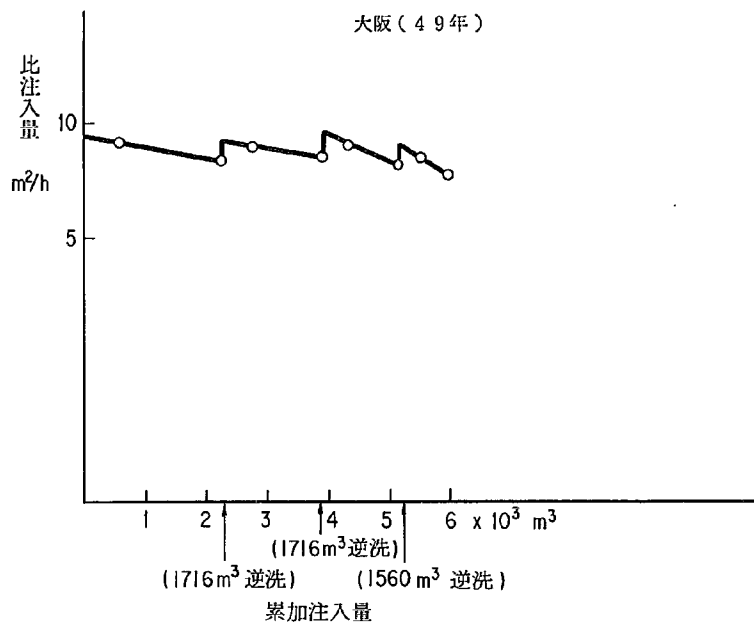


図8 再揚水による比注入量の回復

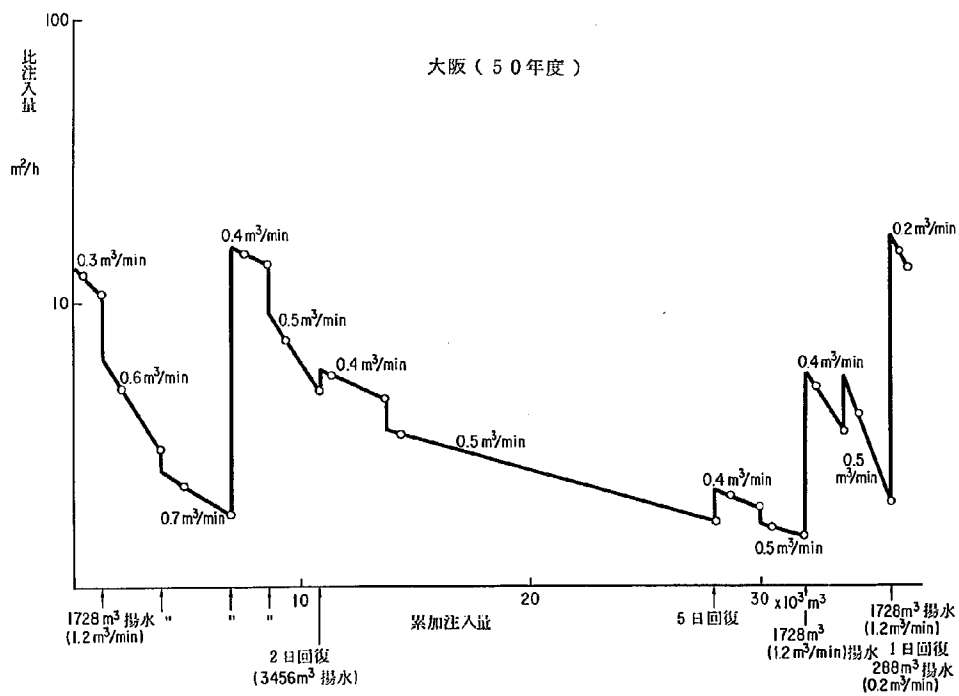


図9 再揚水による比注入量の回復

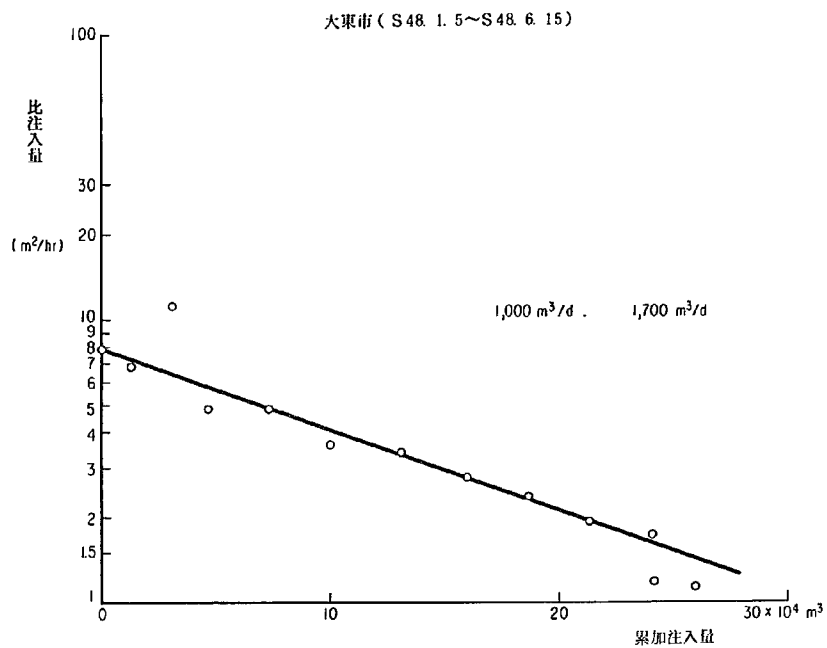


図 1 0 長期連続注入に伴う比注入量の減少

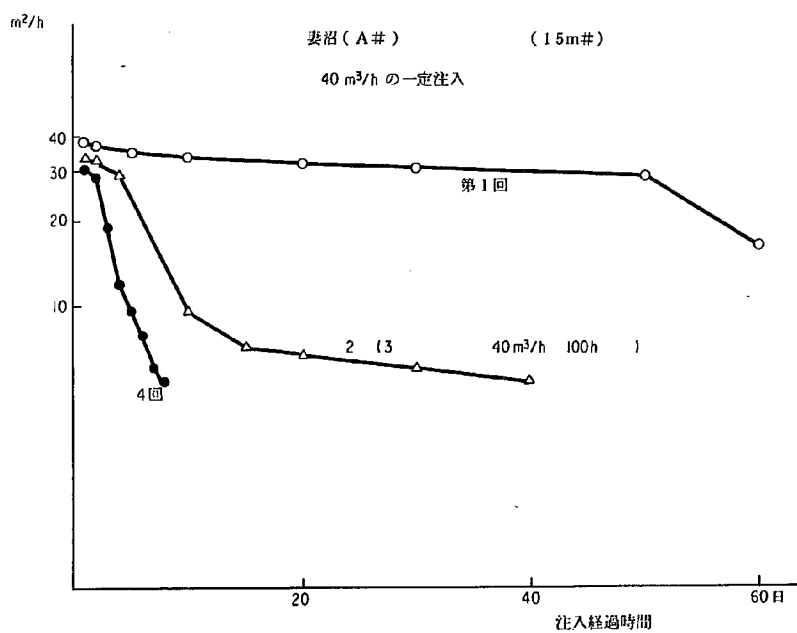


図 1 1 長期注入による比注入量の減少

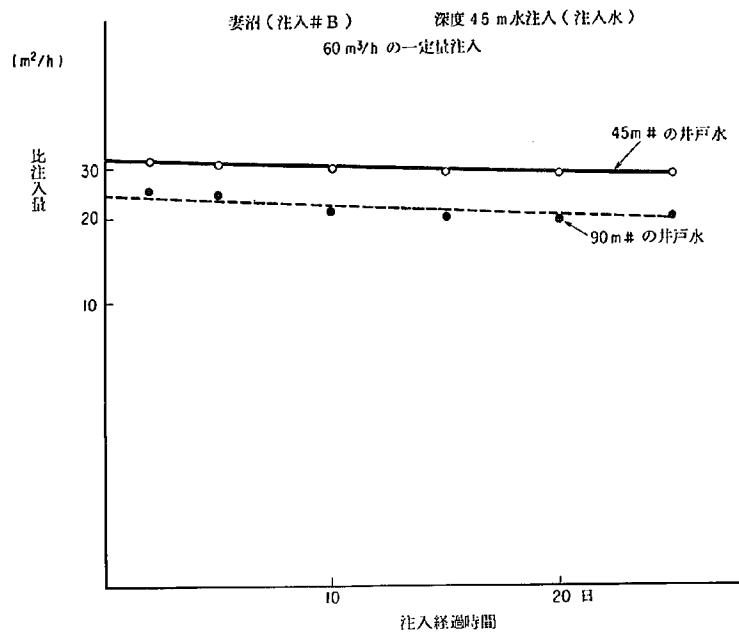


図 1 2 一定注入による比注入量の減少

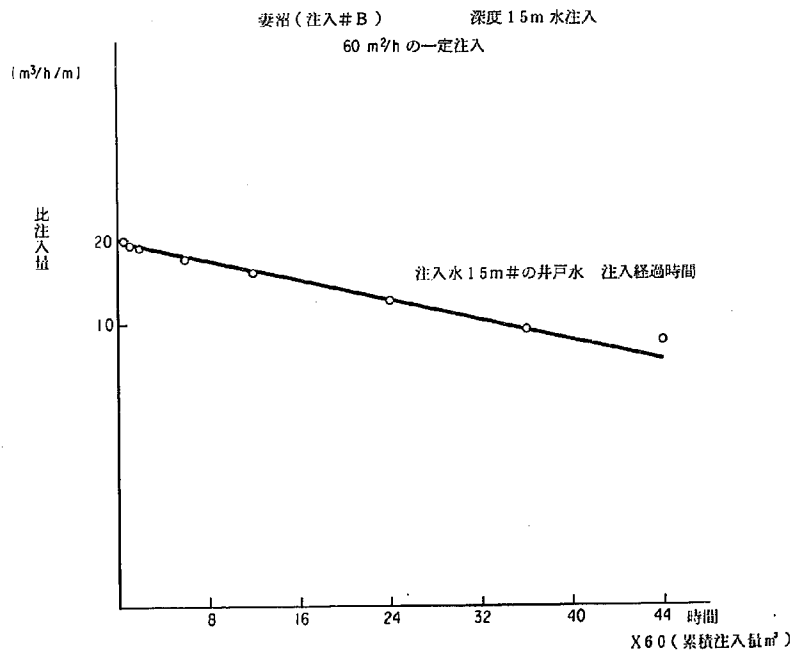


図 1 3 一定注入による比注入量の減少

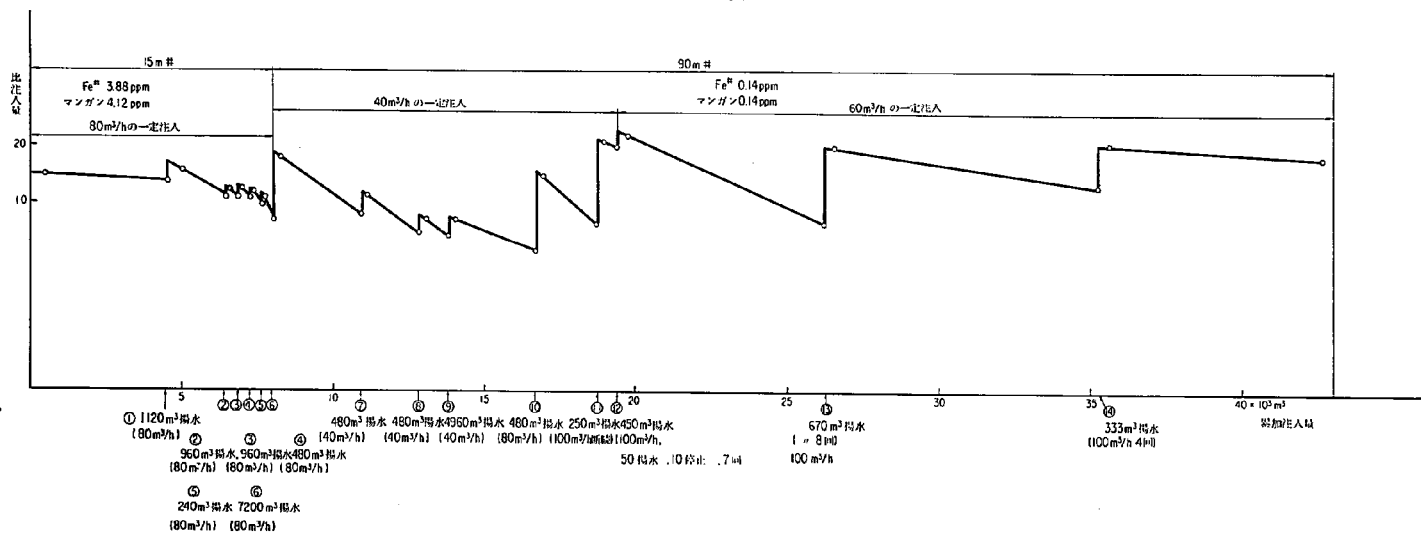


図 14 再揚水における比注入量の回復

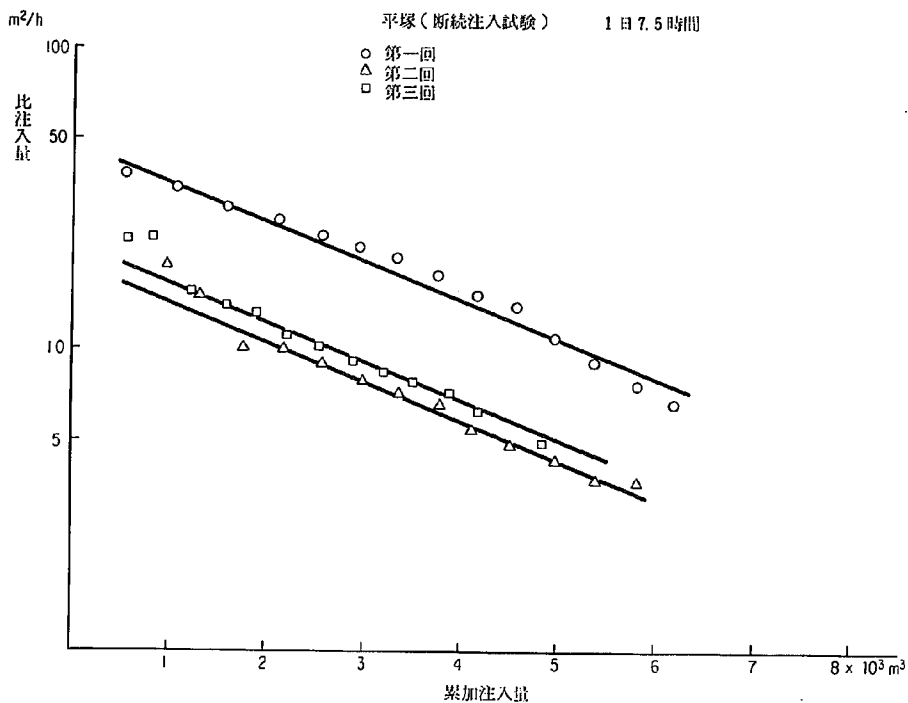


図 15 断続注入による比注入量の減少

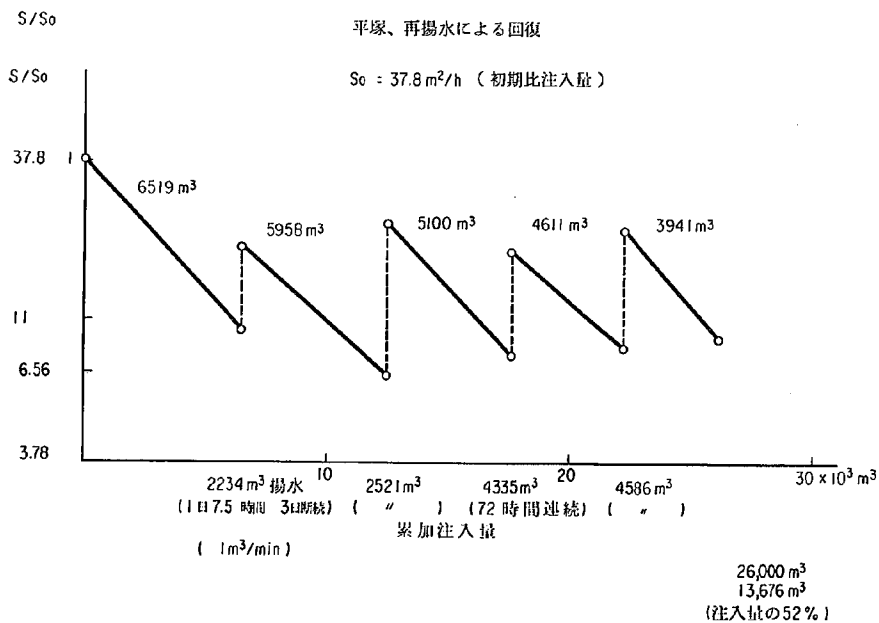


図 16 再揚水による比注入量の回復

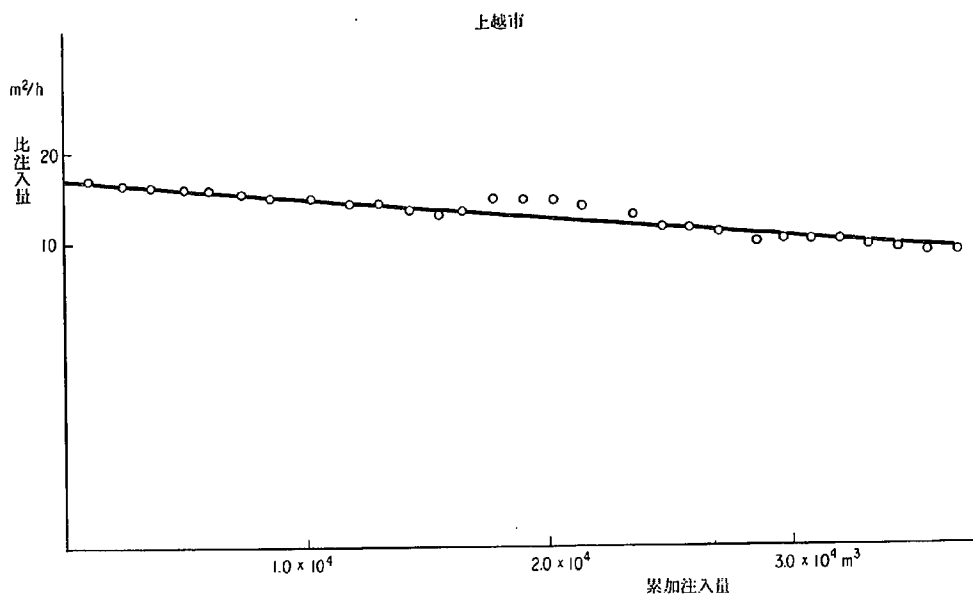


図 1 7 注入に伴う比注入量の減少

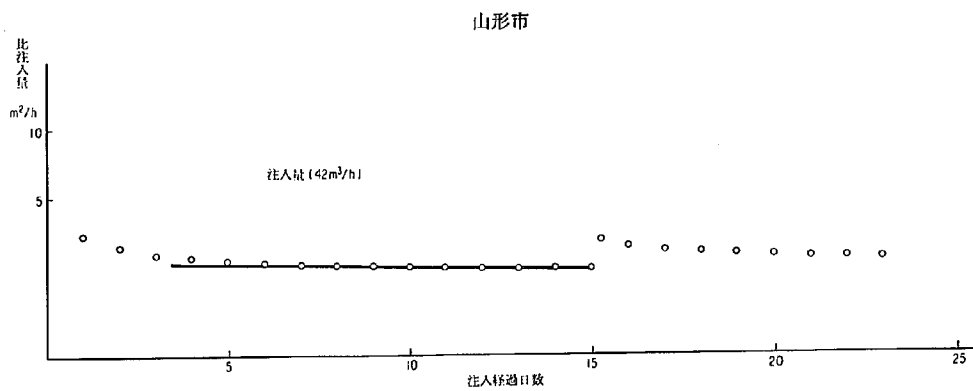
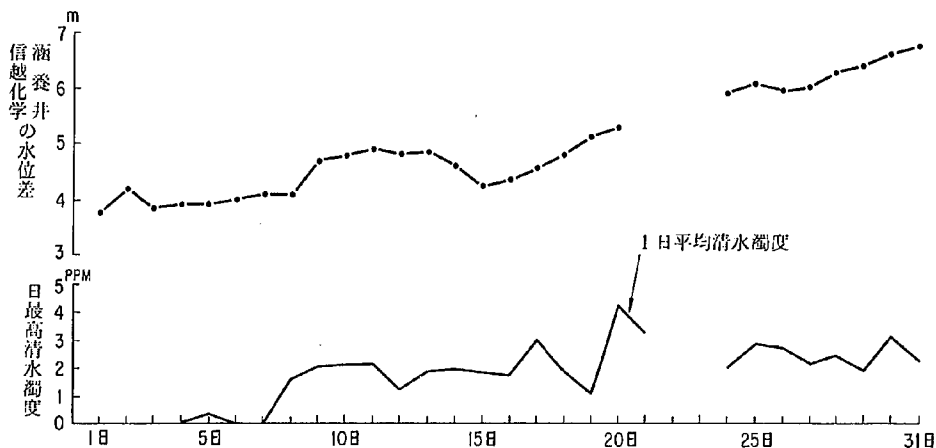


図 1 8 注入に伴う比注入量の減少



(注) 信越化学・涵養井の地下水位差は、信越化学と涵養井の動水位の1日平均地下水位の差  
清水濁度は1日1時間以上持続した最高濁度

図-19 清水濁度と目づまりの関係

示されている。同様DOの調査によると注入休止2時間後、注入水井に8.3ppm含まれていたDOは注入休止後2時間たつと3.3ppm ストレーナ付近で5.6ppmまで低下している。DOの減少の理由としては好気的微生物によるDOの消費および化学的反応による消費の2つが考えられる。注入水に8.6ppmのDOがわずか2時間で3.3ppmに減少するほどの有機物が含まれているとは考えられないから、残された原因、化学反応すなわち、ケーシングの酸化腐食しか考えられない。注入井表層水のDOがストレーナ付近のそれより小さくなっているのはその付近においてよい腐食が活発であるということであろうが、その理由は明らかでない。

山形市での注入実験は側溝水を粗大ゴミをスクリーンで取り除くのみでそのまま注入しているものの顕著な目づまりは発生していない。注入水の蒸発残留物は揚水井のそれより少なく非

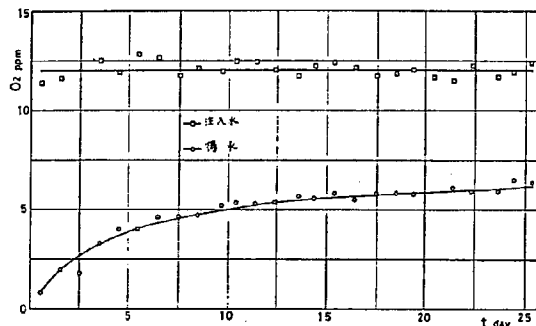


図-20 溶存酸素の変化

常に清いものである。ただ注入水には平均で約0.44ppmの全鉄が含まれこれが注入井の近傍に蓄積し目づまりの原因となっている。図-20は注入水のDOと揚水のDOの注入、揚水に伴う変化である。注入しながら揚水を行っているため、注入水と地下水が混合されて取水されることになる。注入水のDOが12ppmで、揚水中には半分くらい6ppmが含まれ、ほぼ帯水層の中でDOの消費は行われておらず帯水層での酸化鉄の生成はないものと考えられる。図-21には同様に注入水の鉄イオン濃度と揚水イオン濃度の時間変化が示されている。これによると、揚水中のDOは注入水のその約半分程度までに達するのに比較し、揚水

中の鉄イオン濃度は、ごくわずかなものであって、注入水に含まれている鉄はほぼ帯水層中に蓄積されたことになり、目づまりの原因となっていることが示される。さらに逆流水は黒みがかったもので酸化鉄等が含まれたものであったという。

水道水を注入水として利用しているのは大阪、秦野、大東市での涵養実験である。秦野の場合には注入管が注入井水面より上で開き、自然落下で注入されているため注入井内で空気泡が発生し、空気泡による目づまりが一時的に発生していると報告されている。さらに、空気泡の上昇速度と注入井内の平均降下速度との関係が述べられている。報告にあるように650ℓ/minで注入した場合、注入井内の平均降下速度は15.3mm/secとなり直径2mm以下の気泡は水面に達し得ないとされている。しかし実際には注入井内では当然ながら速度分布が存在するから、2mm以上の空気泡も降下しうることにも上昇しうることにもなる。また、ストレーナ部までで達したら、ストレーナから帯水層への流出があるため、そこでの降下速度は遅くなるとともに、空気泡はさらに降下速度のおそい井戸壁に接近するようになるため、空気泡の上昇速度が上まわることもありえる。さらにスクリーンに近づくにつれて水圧が増加するから、空气の溶解度の増加などから、注入井内での空気泡の挙動は実に複雑なものであろう。わずか15分の短い逆洗で、注入効率がほぼ元どおりに回復していることから、空気泡による目づまりの発生も否定はできない。しかし、注入実験の長い経過に伴って、徐々に注入効率が悪くなっているような傾向も見られる、注入井内での空気泡の発生は曝気の効果があり、注入水が注入井内でかなりの溶存酸素を含むことになろう。よって、後に述べるように、注入水によるケーシング、ストレーナの腐食による酸化鉄が発生し、長い期間にわたって、徐々に注入井の近傍の帯水層に蓄積することも考えられなくはないであろう。やはり逆洗時に赤濁色の再揚水が見られるとのことであるが、はたして揚水管のさびであるか帯水層内での蓄積物かどうか定かでない。注入水を自然落下させて注入することは、空気泡が発生し目づまりの原因となるばかりでなく、さらにケーシングおよびストレーナの酸化腐食によって、目づまりをいっそう助長することにもなりかねない。注入水は注入井水面下で静かに注入すべきであろう。大阪での原因は、水道水といえどもわずかに含まれる浮遊物あるいは施設の鉄サビの帯水層内での蓄積によるものと考えられる。表-2で示されているように水温・圧力の関係から、帯水層内での空気泡の発生は考えられない。通常、水道水においてもSSが1ppmほど含まれていることもあるといわれており、大阪の場合SSがもし1ppm含まれるとすれば、20日間の連続注入で総計約14kgのSSが井戸壁を通過したことになる。大東市の注入帯水層水に1ppmの鉄分とわずかながらマンガが含まれている。このことは帯水層が鉄分を含む材質で構成されていることを示す。一般的に、表流水は地下水と異なって、溶存酸素量は飽和に近い状態である。溶存酸素濃度の高い注入水が帯水層の空隙を流動すれば、帯水層材に含まれる鉄分が酸化されコロイド状の酸化鉄が生成され帯水層内での蓄積が予想され

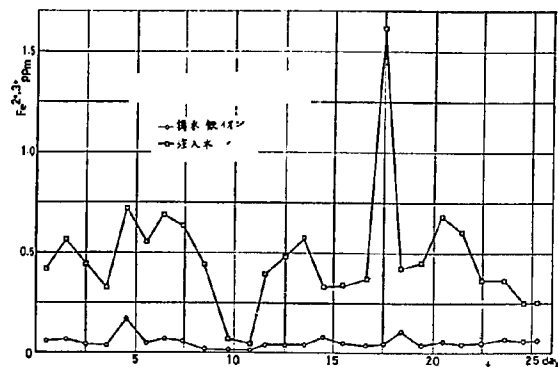


図-2 1 全鉄イオンの濃度変化

図-2 1 全鉄イオンの濃度変化

る。しかし、注入水によって酸化されて帯水層内で発生したものであれば帯水層に広く分布するはずである。再揚水にすれば集中的に大量の酸化鉄が排水されることから、酸化鉄は井戸のごく近傍に蓄積されたものと考えられる。山形市の例で明らかにされているように帯水層内では注入水中の溶存酸素は特に目だつほどの消費はなされていないから、地下水中の鉄の酸化沈殿ではなく注入水に元々含まれていた酸化鉄の蓄積によって主に目づまりが発生したものと考えるべきであろう。ただ、注入水の水質検査では鉄濃度は0.02ppmしか検出されておらず非常にわずかである。ところが、上越市の例では注入水の原水となっている保倉川ではほとんど鉄分は検出されないにもかかわらず注入井の水質検査では、注入休止2時間後ストレーナ付近で、注入井内水は赤みがかかり鉄分濃度で1.2ppmまで達している。注入水は水道水であろうと地下水と異って、一般に溶存酸素量が多く、施設鋼管、井戸ケーシングおよびストレーナを腐食し、かなりの酸化鉄を井戸壁近傍に蓄積させる可能性は十分であろう。

以下は上記の推測の可能性を検討したものである。図-22は溶存酸素量と炭素鋼の浸食度の関係を表わしたものである。山形市の実験例で、注入水である側溝水の溶存酸素量を10ppm、水温を15℃と仮定して、1ℓ中の空気量を求めると、約7.4cc/ℓとなる。図-22から100日間での浸食速度を読みとると0.023cmである。ここで、一例として、径300mm、長さ100mのケーシングで、注入量60m<sup>3</sup>/hの場合について、鉄分濃度を試算してみると、1.2ppmとなる。この濃度は上越での注入中止後2時間後に注入井深部で得られた鉄濃度とほぼ同程度である。また、この現地実験において、注入井の深部ほど鉄濃度が高いことが明らかにされており、このこともこのような推定の可能性を裏付けるものであろう。一般的に見られる酸化鉄の化学組成は $F_eO \cdot 1.7F_{e2}O_3 \cdot 2.0H_2O$ （橋梁におけるさびの例）、 $F_eO \cdot 5F_{e2}O_3 \cdot 1.0H_2O$ （水槽におけるさびの例）であって、酸化鉄濃度は前者で1.67倍後者で1.73倍であり、実際には鉄濃度の約1.6～1.7倍が目づまりを発生すべく作用することになる。さらに、酸化鉄の帯水層内での挙動は明らかでなく、他のSSと比較して、目づまりに対する影響の程度がいかにどうか興味のあるところである。

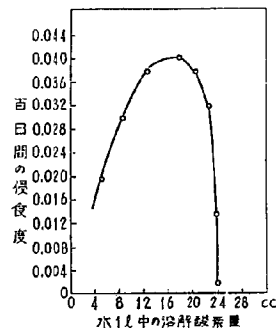


図-22 軟鋼の腐食に及ぼす水中の溶解酸素量の影響

目づまりの進行状況は、比注入量の型で整理すると、それがほぼ指数関数的に減少していくことが、どの実験結果からも示されていて興味深い。

表-3は目づまりの進行について関係の深いものを特に取り出し、表にまとめたものである。帯水層が厚いかあるいは注入井の径が大きいと、ストレーナ常位面積当りの目づまりの原因となる負荷量が小さくなるので、ここでは目づまりの進行状況と判定する最も基本的な物理量として、ストレーナ単位面積当り比注入量半減総注入量（比注入量半減注入高と呼ぶことにする）を用いるのが妥当であろう。この表によれば、比注入量半減注入高が異常に小さいのは、妻沼の15m井を注入水として実験した場合と、平塚での実験例である妻沼の場合には鉄・マンガン合せて8ppmが注入水に含有されており、これらが注入井の近傍に蓄積したことが原因であることは明白である。比注入量半減注入高は45m井水を注入した場合の約100分の1で

表 - 3

| 実験地名    | 透 水 係 数                                       | 透水量係数(ストレーナ長)                               | 井戸壁単位面積当り注入量<br>(注入速度) | 比注入量半減総注入量<br>(半減注入高)                                                                             | 注 入 水                                           |
|---------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 奏 野     | $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$           | $530 \text{ m}^3/\text{day}$ (18m)          | 54.4 m/day             | $7.1 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(4687m)                                                          | 水道水                                             |
| 大 阪     | $1 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$      | $65 \sim 324 \text{ m}^3/\text{day}$ (7.5m) | 102 m/day              | $1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(2406m)                                                          | "                                               |
| 大 東 市   | $1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ (推定)        | $324 \text{ m}^3/\text{day}$ (37.5m)        | 51.4 m/day             | $10.8 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(4586m)                                                         | "                                               |
| 妻 沼     | $3.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$           | $1058 \text{ m}^3/\text{day}$ (39.5m)       | 29.0 m/day             | $20.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ (45m#)<br>(4072m)<br>$0.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ (15m#)<br>(40m) | 地下水<br>Fe+Mn 1.78ppm<br>" (浅層)<br>Fe+Mn 8.0 ppm |
| 平 塚     | $1.1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$           | $2376 \text{ m}^3/\text{day}$ (25m)         | 61.1 m/day             | $0.24 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(102m)                                                          | " (浅層)                                          |
| 佐 賀 白 石 | $2.83 \sim 6.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ | $165 \sim 373 \text{ m}^3/\text{day}$       |                        |                                                                                                   | 一定圧注入                                           |
| 上 越     | $6.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$           | $2496 \text{ m}^3/\text{day}$ (46.6m)       | 29.0 m/day             | $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(1025m)                                                          | 表流水浄化水<br>(SS 最大 5ppm)                          |
| 山 形     | $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$           | $65 \text{ m}^3/\text{day}$ (36m)           | 29.7 m/day             | $12.2 \times 10^4 \text{ m}^3$<br>(3598m)                                                         | 側溝表流水                                           |

あり、このように高濃度の目づまり発生源を含むことは注入にとって非常に不利であることは言うまでもないことであろう。平塚の場合は目づまりの原因が明確でないが、ほぼ妻沼の場合と同様な理由によるものと推測される。

上越の例では、保倉川の河川水を凝集沈澱急速濾過を行っても、最大で濁度が 5 ppm に達することもあり、さらに注入井での酸化鉄での発生もあってか、この比注入量半減注入高は他の例と比較すると小さい方である。濁度と SS の換算計数（室内涵養実験での換算係数は約 1.5 である。濁度が 1 ppm とすれば SS は 1.5 ppm となる）が明らかでないけれど、かなりの SS 量になると思われ、さらに酸化鉄も混入することで、かなりの負荷量になるであろう。このような注入水質を考慮すれば、むしろ地層は均質であるし、スクリーンの開孔率も高いことなどの工夫より目づまりはむしろ緩和されているとも考えられる。

水道水を注入水にしたり、地下水でも注入帯水層水質に近いものを注入水とすれば、比注入量半減注入高は、 $4 \times 10^3 \text{ m}^3$  以上となり良好な注入結果となっている。大阪の場合は  $2.4 \times 10^3 \text{ m}^3$  であってほぼその 5 ～ 6 割程度となっている。これは透水係数は  $10^{-2} \text{ cm/sec}$  のオーダーであるが、帯水層材にはかなりの細かい粘土質のものもかなり含まれることと、ストレーナの開孔率が小さく、水道水としては水質はいい方ではないことなどが原因をなしているのではないかと考えられる。

山形市の実験例では表流水を浄化もなくそのまま注入し、しかも透水係数も  $10^{-3} \text{ cm/sec}$  のオーダーであって、けして良好な帯水層とはいえない。しかしながら注入量半減注入高は約  $3.6 \times 10^3 \text{ m}^3$  と大きい。鉄・マンガンがわずかに含まれるものの、注入水は非常に清澄であって、蒸発残留量は注入帯水層水より少なくなっている。

一般に透水係数が大きいことは、地層の空隙が多く、目づまりの発生しにくいことが予想されるが、事実室内実験においては透水係数が大きいと、目づまりの発生はおそくなっている。しかし、現地実験での比注入量半減注入高と透水係数との関係は明確でなく、むしろ、ストレーナの開孔率ともからんでいてか、相関は見られないようである。注入量半減注入高を大きくするには、目づまりの原因となる、酸化鉄等の SS を含まないこと、つまり清澄な注入水を注入して、ストレーナの開孔率を大きくすることである。水道水程度の注入水であれば比注入量半減注入高は  $4.0 \times 10^3 \text{ m}^3$  強程度になることが実例から明らかである。上越での例で示されたように、注入水の濁度が最高で 5 ppm、平均すれば 2 ppm 程度、さらに 1 ppm 程度の鉄分が含まれているにもかかわらず、帯水層が均質で、ストレーナの開孔率が 40% と高いことも相まって、比注入量半減注入高は  $1.2 \times 10^3 \text{ m}^3$  ほどまで達している。このことから、注入水を水道水ほど浄化させなくても、SS が 2 ～ 3 ppm ほどであれば、ストレーナを切るべき帯水層が厚かったり、井戸径を大きく、ストレーナの開孔率を高くするなどの工夫をすれば十分比注入量半減総注入量を多くすることも可能であろう。注入を経続するには逆洗によって回復が容易に行われることが前提となることは言うまでもない。次に逆洗による回復について述べてみたい。

目づまりの発生した注入井の注入効率の回復を図るための再揚水の回復効果とその最も効率的な再揚水のやりかたを明らかにすることは、注入井による地下水涵養技術を確立する上で最も重要な項目の一つであろう。

再揚水が逆洗効果についての現地実験結果はそれほど多くないが、ここでは平塚、上越、大東市、妻沼それぞれの実験例から逆洗のための再揚水のやり方について考察してみたい。

再揚水の逆洗効果の判定規準として考えられるのは、比注入量の回復率と次の注入での比注入率の減少勾配であろう。平塚の場合は図-16を見ればわかるように、注入量も揚水量は同じであり、かつ、ステップごとの総揚水量は累加注入量と同程度に達している。それにもかかわらず、初期の注入効率にまで回復しておらず、むしろ減少傾向を示している。逆洗後の新たな注入時の比注入量の減少傾向については、それほど顕著な変化はみられず、逆洗後の比注入量の減少が早くなるということは見られないようである。しかし、再揚水量が注入量と同程度でありながら、期待するほど、逆洗効果は上がっていない。

この平塚の実験例と顕著な対比を見せるのが上越で行われた再揚水による逆洗である。昭和48年5月に始まったこの注入実験において、51年までに逆洗のために行われた再揚水は数えるほどであり、特に昭和50年および51年にはそれぞれ一度づつしか再揚水されていない。しかも、一回の再揚水での総揚水量は300 $\text{m}^3$ 前後である。平塚の場合とは目づまりの原因が異なっているかもしれないので厳密な比較は困難ではあるが平塚と上越での再揚水の根本的な違いは平塚では注入と再揚水が60 $\text{m}^3/\text{h}$ で行われたのに対し、上越では注入が約60 $\text{m}^3/\text{h}$ で再揚水は150 $\text{m}^3/\text{h}$ で約2.5倍の割合で行われたということである。このことから注入量が大きければ大きいほど、目づまり発生負荷物が帯水層内へより流入するのであるが、注入量と同程度の揚水量では帯水層へ流入し負荷物を十分に洗い出せなく2.5倍ぐらいでの揚水を行えばほぼ元どおりの帯水層の透水性を回復させることができそうである。

大東市においては、逆洗という観点から再揚水は行われていないので、再揚水による比注入量の回復等は明らかでないが、再揚水に伴う再揚水中に含まれる鉄濃度変化が示されている。先に述べたように、大東市における目づまりの原因が酸化鉄であるから、再揚水中の鉄濃度変化はそのまま逆洗状況を示すことになる。注入終了後直ちに5～6日間連続で再揚水が行われると当初は12.4ppmの鉄を含んだ赤色の濁水が揚水されるが濁度は次第に取れ地下水のそれに近づく。ところが3～4日ほど休止をおき、揚水を再び開始すると鉄濃度はふたたび8.96ppmまで達する。連続的に再揚水を続けても十分には洗浄できなくて、断続的に揚水した方が逆洗効率がよいことが明らかであろう。

妻沼での再揚水による逆洗効果に関する実験は平塚、上越、大東市での実験をすべて包含するような形でなされていて注目に値する。図-14はB注入井での注入・揚水のくり返しによる注入効率の減少および回復を示した図である。初めから、6段階までは、注入水として深度15mの井戸水であり、注入量・再揚水量とも80 $\text{m}^3/\text{h}$ である。1回ごとの再揚水総量は960 $\text{m}^3$ から240 $\text{m}^3$ まで半減されている。それに従って、回復率も悪くなり、比注入率の減少傾向も強くなっている。⑥では7,200 $\text{m}^3$ の多大の再揚水が行われたところ、著しい比注入量の回復がみられている。

再揚水総量が大きければ大きいほど注入効率の回復がよいのは当然であろう。7段階目から注入水が深度90mの井戸水に変わる。マンガンおよび鉄分の濃度はかなり低くなっている。12段階までは注入量は40 $\text{m}^3/\text{h}$ でそれ以降は60 $\text{m}^3/\text{min}$ である。再揚水量が40 $\text{m}^3/\text{h}$ の場合、注入効率の回復もまた、次ステップでの比注入量の減少傾向も悪化している。⑨で4,960 $\text{m}^3$ もの揚水が行われたにもかかわらず、何ら回復率

の向上は見られない。次の段階の総揚水量が  $480\text{ m}^3$  ながらも、揚水量  $80\text{ m}^3/\text{h}$  の場合の注入効率の回復と比較すると非常に対症的である。また再揚水量の同じ6段階目までの比注入率の回復とも較べると、それよりも大きくなっている。この理由としては6段階までの注入水が  $15\text{ m}$  井水で水質がわるいためより多くの負荷物が注入されたことと、注入量が  $80\text{ m}^3/\text{h}$  であって、5回の注入量の2倍であり、負荷物が帯水層のより奥まで進入し、洗浄されにくくなっていたためであろう。

7段階目から12段階までの実験結果から次のことが明らかである。逆洗効果は総揚水量 ( $\text{m}^3$ ) より揚水量 (あるいは揚水率) ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) の方を大きくした方が、より効果的である。13段階からは注入量は  $60\text{ m}^3/\text{h}$  で、再揚水量は  $100\text{ m}^3/\text{h}$  であり、断続揚水によって逆洗が行われている。⑫, ⑬, ⑭とも、総揚水量は  $250\text{ m}^3 \sim 670\text{ m}^3$  程度で、

わずかながら、すばらしい比注入量の回復がみられている。また、比注入量の減少程度も小さくなっているようである。さらに、一連の妻沼の実験の中で、再揚水の間に短い注入をはさんだ逆洗効果が、断続揚水による逆洗効果と比較されている。この結果を示した図が図-23である。この図には、逆洗の効果として、再揚水中の酸化鉄の濁度と同量を揚水するときの井戸水位で表わしたものである。断続揚水より、揚水の間に注入をはさむ方が逆洗効果がすぐれていることが明らかである。

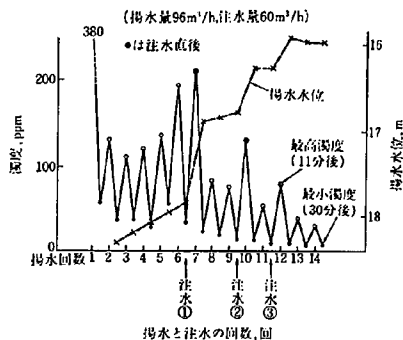


図-23 注水井戸Bにおける逆洗効果を示す図 (  $15\text{ m}$  井戸の水を注水した後 )

#### 4. まとめおよび目づまりの対策について

本節では、今までの事項についてとりまとめを行うと同時に、目づまりの防止、緩和対策および回復のための手法について考察を加えるものである。

比注入量が比揚水量として比較して、減少することは、ストレーナから帯水層への流れが乱流に遷移し、ストレーナの近くで損失が大きくなることが1つの原因となっていると考えられそうである。ストレーナの開孔率はできるだけ大きくし、流出損失の小さいものとすべきであろう。

深層の帯水層系は加圧層の粘土層と互層となっているのが一般的である。このような帯水層系への注入を行うと、加圧層の非定常応答によって、予想以上の長期にわたって、比注入量に影響をうける、注入に伴う目づまりの発生状況を把握するためには、長時間にわたる連続注入実験が必要であろう。

目づまりの原因として、次の5項目が上げられている。

- ① 注入水中に含まれるSSの蓄積
- ② 帯水層内での微生物の発生
- ③ 空気泡
- ④ 帯水層水と注入水の化学反応による沈澱物の生成
- ⑤ 砂粒子の再配列

一応、8ヶ所の実験例を再検討することによって、注入に伴い実際に発生した目づまりの機構とその対策のための基礎データの整理および今後の目づまりの研究の方向を明らかにすることを目的としたものであって、上記した5の原因ごとに定量的に発生機構を割り出すところまでは実験例やデータの不十分さのためできていないが、ここに上記の5つの目づまりの原因ごとに成果をとりまとめることにしたい。

一般的に注入水は上水道水あるいは注入井近傍の地下水を取水したもので、ほとんどが注入帯水層水と比較し水質的にそれほど劣るものではない。上越および妻沼の15 m井での実験例を除くと、注入水中わずかに元来含まれていたSSが目づまりをおこしたかどうかは明確でないが、水道中といえどSSが1 ppm程度含まれることもありうるということであるから、一概に否定はできないであろう。上越ではSSが濁度で平均約2 ppm、妻沼では鉄・マンガン合計8 ppmが含まれていて、目づまりの原因となっていることは違いない。比注入量半減注入高で目づまりの進捗状況を判断することが可能であって、この両者においてはこの値は他の上水道水を注入水にした場合と比較すると小さくなっていて、目づまり程度が大きいことを示している。注入水にSSとして目づまり発生源として元来含まれているからである。

さらに本調査で明らかになったことは、注入水中に含まれてなかったものが、井戸のストレーナから流出する段階になってSSとして負荷されるものがあるらしいということである。注入井にかかわらず揚水井のケーシングおよびストレーナは炭素鋼であって、何らサビ止めのコーティングはなされていない。注入水は上水道水、表流水であって常に空気と接触しており、溶存酸素量は飽和に近いものであり、地下水と比較にならないほど酸化能力を有している。上越の例では、注入井中の溶存酸素が急激に減少し、酸化鉄の生成を示している。注入井のケーシング等の腐食によるSSの付加は、上水道水、表流水を注入しているすべての

実験において考えられるものである。特に大東市の例は代表的なものであろう。

微生物による目づまりは有機性 SS 等が微生物的な作用を受けるとき発生するものであるから、それのみを抽出することは室内実験でも困難と考えられ、微生物による目づまりが関与しているはずであると考えられる例においても微生物による目づまりの特性は明確に顕れていない。佐賀白石では再揚水が黒濁し、有機物の破片さえ見られ微生物による目づまりは疑いないのであるが、目づまりの進行状況での SS によるものと比較して特異的なものは見られない。植物片等による SS による目づまりが顕著か微生物による目づまりが顕著かどうかははっきりしない。上越によっても注入水の滅菌は行われておらず微生物が帯水層内で繁殖し、目づまりに関与しているはずであるが SS による目づまりの方が大きく注入井内の水位上昇が生ずるほどには顕れていない。上越での注入水程度であれば微生物による目づまりは無視しうるものなのであろう。

空気泡による目づまりについては、溶存空気が帯水層中で気泡化するものと元々注入水中含まれている気泡によるものの二つが考えられる。溶存空気の気泡化は、注入水が帯水層水との混合に伴い、温度が上昇し、飽和溶存空気量の減少によって生ずるものであろう。飽和溶存空気量は圧力によっても大きく変化するものであって、注入井のスクリーンから帯水層へ流出する段階では水圧によってかなり圧力が増加する。最大圧力の小さいと思われる大阪での実験例で、溶存空気の気泡化を検討した所、圧力増加のため飽和溶存空気量が逆に大きくなり、気泡化は、起りえないことが明らかとなった。地下水自然水位下 20 m 以深での注入であれば溶存酸素の気泡化はまずおこりえないであろう。注入水中に含まれる気泡による目づまりとして報告されているのは秦野の例である。注入水が注入水面上で放流されているため注入井内で空気泡の発生するためである。注入井内の平均降下速度と空気泡の径による空気泡の上昇速度の関係で論じられているが、実際に空気泡の注入井での挙動は、注入井内で下降流での速度分布、ストレーナから流出することによる下降流速の減少、圧力の増加等を考えれば単一的なものではない。秦野においては空気泡による目づまりとされているがどの程度まで目づまりとして関与しているかさだかでない。というのは、ここでも酸化鉄が生成し、目づまりの原因となっている可能性がありうるからである。とにかく、注入水の放流管注入水水位より低くすればこのような問題は起らないはずである。

帯水層水も注入水の化学反応による沈殿物の生成は注入井からの注入水の流動を考えると帯水層全体にはほぼ一様に起こるものであろう。目づまりは注入井のごく近傍に限られた所に発生するから抵抗が大きくなり注入にししょうをきたすものである。沈殿物が発生したとしても、沈殿物生成成分の濃度もしれていることから、それほど流動抵抗が増すとは考えられない。大東市では帯水層水に鉄約 1 ppm が含まれていて、飽和にちかい溶存酸素量を含む注入水と混合すれば酸化鉄の生成が考えられるが、目づまりへの影響は無視してさしつかえないであろう。

砂並子の再配列というのは目づまりの原因としては物理的に具体性をかくが、可能性としては注入量が大きく、ストレーナで乱流となる場合に帯水層材を移動させたりすることによって生ずるものであろう、揚水量を大きくした時に揚水が不可能となった例は聞かれる。揚水の場合にはストレーナを帯水層材がふさぐのであろう。注入の場合はふさがれるところが同じ帯水層であるだけで同様な現象なのであろう。

調査したどの実例においても、帯水層材を動かしかえるほどの流速で注入していないので、この目づまりは

発生していないと考えてもよいであろう。

こうやって考えてみると、ほとんどの目づまりが SS によるものであり、微生物の目づまりがいくらか推測される程度である。

SS には注入水に元々含まれるものもあるが、新しくストレーナを通過するまでに酸化鉄の SS が付加される。注入水にほとんど SS が含まれていない水道水程度のものを注入水とするなら比注入量半減注入高は  $4.0 \times 10 \text{ m}^3$  以上となる。酸化鉄が発生しないように工夫すればさらにその値は大きくなるであろう。注入水に SS が 2 ppm ほど含まれていても、比注入量半減注入高は  $1.0 \times 10 \text{ m}^3$  程度であり、逆洗が十分うまく行えるなら、ストレーナを長く、井戸径を大きく、ストレーナ開孔率を高くしたりすればかなりの注入量で涵養が期得しうるのである。

比注入量半減注入高を大きくするには、ストレーナの長さは帯水層圧として自然条件で決定されるから、注入井の径を大きくするか、注入井内で酸化鉄の発生をケーシングのコーティング等で防ぐことが必要である。さらに、ストレーナの開孔率を高くし目づまり負荷物を注入井の近傍に集中させないようなグラベルパッキングを行うことも効果的であると考えられる。これは今後、室内実験で、その効果を確かめることが必要であろう。注入井による地下水の涵養を長く継続させるには、再揚水によって逆洗を行うことが不可欠である。逆洗効率がよくしかもできるだけ短い期間に簡単なシステムで行うものほどよい。再揚水による逆洗は総揚水量が多ければ多いほどよいが、総揚水量を多くすることは、せっかくの涵養がその分だけ減少することになるので、むやみに多くすることは好ましくない。総揚水量より揚水量を大きくする方がはるかに逆洗効果が高い。注入量の 2～3 倍程度の揚水量が必要である。このために大きな揚水量にたえられるような注入井にすることが必要であって、この点についてもグラベル・パッキングの具体的な検討がなされる。実例で示されるように、単純に揚水を継続するより、このような逆洗を行えば定常的なパターンで涵養を続けることができるものと考えられる。結論的に述べるならば目づまりは SS によって発生するものと考えてよく、実例からして SS が 2～3 ppm 程度の河川中流部の濾過水位程度なら、これまで述べてきた対策、工夫によって十分満足でき経済的にも負担のかからない地下水の涵養が遂行できるものと考えられる。

## 5. 参 考 文 献

- 建設省近畿地建淀川工事事務所：地下水涵養技術および利用計画検討業務報告書 昭和52年3月
- 永井茂，村下敏夫：人工地下水における注入井戸の目づまりと井戸能力の回復 — 斐沼実験地の例 — ，工業用水，昭和47年11月
- 横山孝男他：人工涵養に伴う熱汚染 — 注入揚水同量同時の場合 — ，日本地下水学会誌，第17巻3号，1975
- 紫崎達雄他：汲み上げた地下水はもどせるのか，施工技術
- 小西泰次郎：小資源としての人工地下水
- 清水一夫，門井守夫：金属材料腐食データ，日本防錆技術協会出版局
- 土木研究所：昭和51年度建設省総合技術開発プロジェクト，地下水涵養技術の開発
- 本田利男：大東市における地下水涵養実験について，天の水・地の水，昭和49年秋季号，第30号
- 新潟県生活環境部公害規制課：上越地区地盤沈下防止対策事業，G<sub>4</sub>層地下水涵養中間報告書，昭和52年10月
- 横山孝男他：人工涵養による帯水層の蓄熱利用，日本地下水学会誌；第17巻第2号，1975
- 長瀬和雄他：秦野盆地における人工涵養，工業用水，昭和50年10月，第205号

## 6. 参 考 資 料

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 1. 秦野盆地における地下水の人工涵養 .....           | 37  |
| 2. 上越地区地盤沈下防止対策事業 .....             | 47  |
| 3. 人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復 ..... | 69  |
| 4. 水資源としての人工地下水 .....               | 79  |
| 5. 人工地下水注入井の基本的問題 .....             | 93  |
| 6. 人工涵養法による帯水層の蓄熱利用 .....           | 105 |
| 7. (2-7) 人工地下水実験の中間報告 .....         | 121 |

# 1. 秦野盆地における地下水の人工涵養

長瀬和雄  
熊沢武雄

## 秦野盆地における地下水の人工涵養

長瀬 和雄\* 熊沢 武雄\*\*

### 1. 秦野盆地の地下水

秦野盆地は関東地方南西部に広がる丹沢山地の南麓に位置している。

秦野盆地内の地下水は現在、日量約43,000 m<sup>3</sup> 揚水されている。このうち30,000 m<sup>3</sup> は水道用水として使用され、残りの13,000 m<sup>3</sup> が工業用水その他に利用されている。秦野市水道局の給水量は48,000 m<sup>3</sup> であるので、地下水はその63%を占めている。また、工業用水はすべて地下水を用いているので、盆地内全体の水需要の70%以上が地下水で賄われていることになる。まさに地下水はここに生活する市民及びここで事業を営む工場等にとって、かけがえのない命の糧である。

あった盆地内の深井戸は、44年には26本、46年には39本にも達している。

栗原藤次秦野市長は秦野盆地の地下水の実態を科学的手段を使って把握する方針をたて、その調査を大木清衛神奈川県温泉研究所長に依頼した。

神奈川県温泉研究所は昭和45年より秦野盆地の地下水に関し水文地質学、水収支、そして最終的には人工涵養にいたる研究を五カ年計画で行ってきた。昭和46年には盆地内地下水面の著しい水位低下が起こり、井戸の揚水量が減ったり、潤湿した井戸が生じた。昭和47年には盆地内の地下水位は回復の方向にむかい、曾屋水源の湧水量もかなり回復したが、昭和48年の降水量不足により再び昭和48年から49年にかけて地下水位低下



図一 曾屋水源の湧出量の経年変動と降水量

この地下水が潤渴への途の危機にさらされたことがある。図一は秦野市の水道水源の一つである曾屋水源における湧出量の変動を示している（綾部ほか1973）。砂礫層に掘られた隧道への湧水である。図から分かるように昭和38年以降では湧出量の年間最小値は4,000 m<sup>3</sup>/日を割るようになり最大値も6,000 m<sup>3</sup>/日を越えることが少なくなった。更に40年以降では、1年間の湧水量の最大値と最小値の差が大きくなっている。この原因として昭和39年、42年、46年は降水量の少ない渇水年であったことを考慮する必要があるが、この最大の原因は高度経済成長の余波を受けて昭和43年以降秦野市にも起こった都市化による人口の増加と、多くの工業の進出とによる水需要の増加である。昭和42年まで約16本で

が起こった。ところが昭和49年には梅雨期及び台風期に記録的豪雨があって、地下水位は回復した。このように秦野盆地に生活する住民の生活用水、事業のための工業用水を担う地下水は、天候に大きく脅かされている。

他方、秦野市の都市化は今後もさらに進み、昭和50年に10万人を突破した当市は、市当局によると昭和60年には15～16万人に達すると予想されている。そのため水道水の水需要は現在の48,000 m<sup>3</sup>/日から昭和60年には111,000 m<sup>3</sup>/日に増加し、63,000 m<sup>3</sup>/日が不足するとみこまれている。この不足分はもはや地下水に頼ることはできず、秦野市水道局としては盆地外の水を購入する計画を立てている。この補給源は神奈川県広域水道企業団が現在開発整備をすすめている酒匂川水系の水31,000 m<sup>3</sup>/日と新しく建設が予定されているという宮ヶ瀬ダムの水32,000 m<sup>3</sup>/日である。

\* 神奈川県温泉研究所

\*\* 秦野市水道局

しかし、宮ヶ瀬ダムの建設には多くの困難な問題があると伝えられており、仮にこのダムが完成しても、その水の単価は  $1 \text{ m}^3$  当り百数十円と現在の盆地内の水の 4~5 倍の高価なものになると言われている。このような状況のもとで、秦野市水道局にかぎらず、秦野市民は盆地内の地下水を少しでも有効に活用する必要にせまられているといえる。

神奈川県温泉研究所は、ここ数年来、秦野盆地の地下水に関する多くの水文学的、地質学的資料を秦野市に提供してきた。また、秦野市当局はこれを十分行政に反映させ、昭和 48 年 12 月には秦野市環境保全条例を施行し、この中で地下水の保護が強くうたがれた。更に昭和 50 年 4 月には秦野市地下水の保全及び利用の適正化に関する要項を施行した。

## 2. 水文地質

秦野盆地は北方には新生代第三紀の丹沢層群と呼ばれる凝灰岩そのほかの固結した岩石からなる丹沢山地がある。ここから南下する尾根によって盆地の東側と西側が区切られている。また盆地の南側には大磯丘陵が広がっており、地形的には典型的な盆地である。

盆地内ではこれまで掘さくされた最も深い井戸は

100 m に達しており、深度 80 m 前後の井戸は多数あるが、どれも基盤の丹沢層群には達していない。電気探査、重力探査、弾性波探査の結果（平賀ほか、1972 長瀬ほか、1972）から盆地中央部において基盤の丹沢層群までの深さは約 200 m と推定される。この約 200 m の厚さに達する堆積物の大部分は、第四紀中期以降の箱根火山の火山灰及び軽石流堆積物と、その時代に盆地内を流れた河川が丹沢山地より搬出した砂礫との互層である。この上を富士山起源の火山灰が厚くおおっている。

この富士山の火山灰を A 層、その下位の箱根火山噴出物と砂礫層の互層を B 層と名付ける。A 層の中にもところにより砂礫が挟まれ、小規模な帯水層を形成している。盆地内にはこの帯水層まで手掘りて掘った浅井戸が所々に見られる。（大木靖衛ほか 1971 長瀬和雄ほか 1972）。

水文地質学の上で特徴の一つは盆地に流入する河川流域に対し、盆地から流出する河川流量がかなり多いことである。このことは、金目川水系と四十八瀬川水系の両方についていえる。

金目川水系（図-2）は北方の丹沢山地から盆地内に流れ込んだ金目川、葛葉川、水無川が盆地内を南東に向かって流れ、盆地の南東端で合流して金目川となっている。金目川、葛葉川、水無川が盆地内に流れ込む付近の

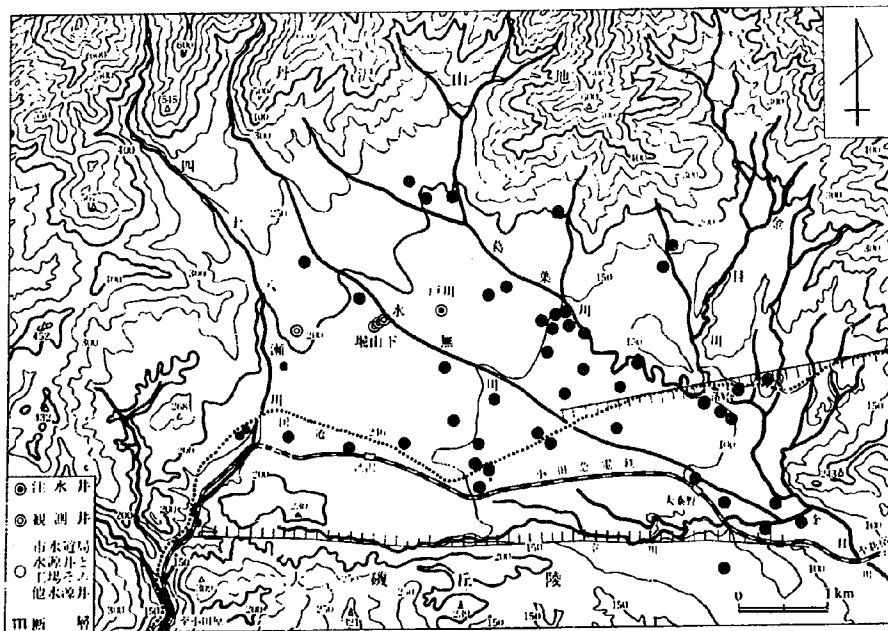


図-2 秦野盆地地形図

流量はそれぞれ約6,600 m<sup>3</sup>/日、2,600 m<sup>3</sup>/日、8,100 m<sup>3</sup>/日計約17,300 m<sup>3</sup>/日である。これらの河川が合流して盆地の外に流れ出す大槻付近ではその流量は120,000 m<sup>3</sup>/日となっている。なお水無川は金目川に合流する直前に室川と合流している。室川は盆地の南端で主に大磯丘陵側からの湧水を集めて東から西へ流れ、水無川への合流点付近では盆地内側からの湧水が加わって、合流点付近の流量は16,600 m<sup>3</sup>/日となっている。

四十八瀬川水系では盆地に流入する河川は四十八瀬川で盆地へ入るところでは流量が約5,800 m<sup>3</sup>/日で盆地南西端で盆地を出る地点に近いところの河川水の流量は7,700 m<sup>3</sup>/日である(1971年12月の調査横山ほか1972)。

このように盆地内の河川水とくに金目川水系の流量は流入地点と流出地点に大きな差異がある。その原因は盆地内の地下水が加わることによる。すなわち盆地南部での地下水の湧水、家庭、工場で利用している地下水の排水が原因である。

次に秦野盆地の水文地質を知る上で重要な一つのポイントとなると思われる曾屋水源の地質について述べる。金目川と葛葉川が合流する落合付近には第四紀末の断層が東西に走り、断層の北側が隆起していることが指摘されている(藤本1928)。そのため断層の北側の第四系中を流れる葛葉川は著しく蛇行しながら深く谷を刻んでいる。この谷壁にはB層の上部に相当する箱根火山のローム層と砂礫層が互層をなしているのが見られる。河床付近からこのローム層に横穴を掘って、湧水を取水しているのが曾屋水源で、その歴史は享保8年(1723年)まで溯ることができる。曾屋水源で取水している帯水層は盆地内に多数存在する深井戸の上部の帯水層に対比されるから盆地内の深井戸の水位低下はとりもなおさずこの水源の涸渇につながっている。

盆地内の主要な容水地盤であるB層はその中に挟まれる連続性のあるローム層の存在によっていくつかに細分できるはずである。

B層は扇状地性の堆積物であるため、区分が難かしく、この細分は未だ不十分であるが、ローム層の中にはかなり広い範囲に分布するものもあって、そのようなローム層は下位の帯水層の地下水に被圧水の性格を与えたりしている。

盆地の中央部において、B層の上部は不圧地下水を保有し、下部は被圧地下水を保有するが、盆地の南部ではB層の地下水は被圧状態となり、とくに南東部ではB層まで井戸を掘ると自噴する地区がある。

なお地下水の利用可能量は温泉研究所の水収支シミュレーションによると(横山ほか1972~1974)今の状態を維持しながら揚水利用するには、現在の43,000 m<sup>3</sup>/日は揚水過剰で雨量の少ない年には水位は着しく低下することになる。

### 3. 深井戸による地下水涵養

#### 堀山下注水実験場

地下水資源の有効利用を目的として温泉研究所は秦野盆地において昭和47年より深井戸を使って地下水の人工涵養の実験を行っている(長瀬ほか1973~1975)。昭和47年は観測井(口径150 mm 深度100 m)に水道水を180 l/min づつ3日間連続注入する実験と180 l/min づつ1日7時間づつ7日間断続注入する実験を行った。この実験はかなり良好な結果をもたらし、井戸による地下水の涵養が可能であるみとおしが得られたので、昭和48年には堀山下の水無川の沖積氾濫原に注水井(口径300 mm、深度85 m)を掘さくし本格的な注水実験にとりかかった。この実験は現在も継続中であるが、その地下水涵養量は総量が約30万 m<sup>3</sup>に達している。

堀山下実験場には中央に注水井(No. 11)があり、これから20 m及びその反対側に10 m離れた位置に観測井 No. 21、と No. 31がある。注水井(No. 11)のケーシングの外側にはNo. 11と同じ層準にストレーナを付した径25 mmの鉄管が挿入してあり、これに観測孔 No. 12と名付けた。No. 11に注水しているときはNo. 12でその水位を測定している。観測井 No. 21のケーシングの外側にはやはり径25 mmの2本の塩ビ管が挿入してあり、それ

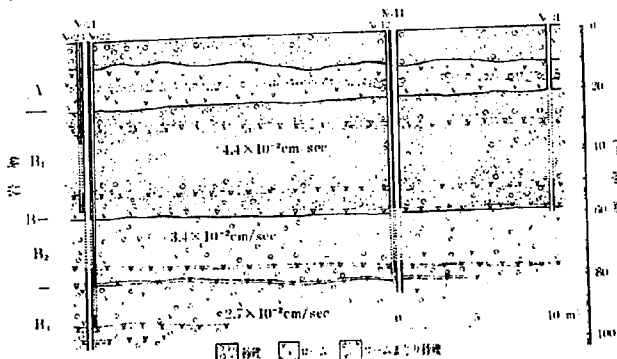


図-3 堀山下注水実験場地質断面図

それ深度 32~48.5 m と 80~88 m の位置にストレーナを付してある。これらの観測孔をそれぞれ No. 23, No. 22 と呼ぶ。

実験場の地質断面を図-3 に示す。ここでの A 層は地表から深度約 20 m までで、それ以下は B 層である。B 層は堀山下では水文地質学的性質により B<sub>1</sub> 層、B<sub>2</sub> 層、B<sub>3</sub> 層と区分する。B<sub>1</sub> 層は深度 22~57 m, B<sub>2</sub> 層 57~80 m, B<sub>3</sub> 層は 80 m は以深である。B<sub>1</sub> 層の大部分は透水性の良い礫層で透水係数は  $4.4 \times 10^{-2}$  cm/sec である。同じく、B<sub>2</sub> 層は  $3.4 \times 10^{-2}$  cm/sec, B<sub>3</sub> 層は  $2.7 \times 10^{-2}$  cm/sec である。

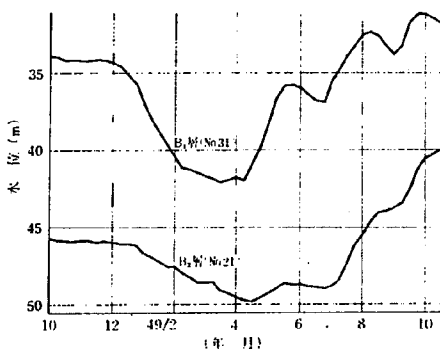


図-4 堀山下実験場水位変動

B<sub>1</sub> 層の地下水位は観測井 No. 31 と観測孔 No. 23 で B<sub>2</sub> 層は注水井 No. 11 と観測井 No. 21 及び観測孔 No. 12 で、B<sub>3</sub> 層は観測孔 No. 22 でそれぞれ測定できる。

B<sub>1</sub> 層の地下水は不圧地下水で水面は年間で大略深度 31~42 m の間を変動する。B<sub>2</sub> 層、B<sub>3</sub> 層の地下水は被圧水で水面は両者ともほぼ等しく、年間を通じ深度 40~50 m の間を変動する。しかし B<sub>2</sub> 層 (No. 21) と B<sub>3</sub> 層 (No. 22) の水位変動を細かく検討すると、水位の高い季節には B<sub>2</sub> 層の水位は B<sub>3</sub> 層より 30~40 cm ほど高いが、水位が低下してくるとその差は次第に小さくなり、水位が低い季節には逆に B<sub>3</sub> 層の水位の方が高くなる。つまり水位が低下する 4~5 月頃には、B<sub>3</sub> 層は B<sub>2</sub> 層から地下水が供給される状態になる。栗野盆地内

の深井戸はこの B<sub>1</sub> 層、B<sub>2</sub> 層に対比される帯水層から揚水しているから、したがって水位低下期の盆地内の深井戸による揚水は、複合扇状地の扇頂~扇尖部にある堀山下の B<sub>3</sub> 層 (深度 80 m 以深) に貯留される地下水の補充を受けて賄なわれているといえる。

#### 注水実験

注水実験では注水井 (No. 11) により B<sub>2</sub> 層に注入した。

注入水には水無川の上流の猿渡堰堤付近で取水し、堀山下浄水場で浄化した水道水を使用している。注入水及び B<sub>2</sub> 層の注水前の地下水の水質を表-1 に示す。

注水実験の実施状況は図-5 に示すとおりである。注水井への注入開始当初は適切な注入量を決めるため単位時間の注入量をいろいろ変えた実験を行った。第 1 回は単位時間の注水量 480 l/min で 15 日間 10,000 m<sup>3</sup> の注入を行い、第 2 回は同様に 630 l/min で 12 日間 10,000 m<sup>3</sup>、第 3 回は 690 l/min で 10 日間 10,000 m<sup>3</sup>、第 4 回は 700 l/min で 10 日間 10,000 m<sup>3</sup>、第 5 回は 900 l/min で 7 日間 10,000 m<sup>3</sup> の注入を行った。

この 5 回にわたる注水実験の結果、後で述べるように主に空気泡により注水の効率を低下させるような現象が生じ、700 l/min 以上の注水はこの注水井では適当でないことが判明したので、それ以後は単位時間の注水量を、650 l/min 前後に固定し、20 日間、あるいは 30 日間の連続注水をくりかえした。注入総量は、昭和 50 年 6 月現在約 300,000 m<sup>3</sup> に達した。この量は B<sub>2</sub> 層が盆地の地下全域に広がっていて、注水した水がすべてここに貯留されたと仮定すると、その水位を 8 cm 上昇させたことになる。

300,000 m<sup>3</sup> の注入を行った現時点では、注水井に今後注入を行うのが困難となるような目づまりは起こっていない。

#### 空気泡による注水効率の低下とその解消

注水井の注水効率の低下を表現する手段として比注水量の表示方法もあるが、ここでは注水井観測孔 No. 12 と観測井 No. 21 の注水時の水位上昇の差 ΔS の増加を注水効率低下の目安とする。平衡式あるいはヤコブの式によるとこの ΔS は注水位とそれから 20 m 離れた観測井 No. 21 の間で、B<sub>2</sub> 層の地下水を流動させる力の要素と解釈できる。

表-1 水 質 分 析 表

(pH 以外の分析値の単位は ppm)

| 試 料                 | 採水日          | 水 温<br>(°C) | pH   | 蒸留<br>残物 | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>++</sup> | Mg <sup>++</sup> | Fe | Mn <sup>++</sup> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | CO <sub>2</sub> | 総 計   |
|---------------------|--------------|-------------|------|----------|----------------|-----------------|------------------|------------------|----|------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------|-------|
| 注 入 水               | 1973<br>12.4 | 11.0        | 7.48 | 60.5     | 0.23           | 2.37            | 11.3             | 2.79             | 0  | 0                | 2.52            | 6.29                          | 43.5                          |                              | 16.0                            | 16.8            | 86.9  |
| B <sub>2</sub> 層地下水 | 1973<br>11.5 | 16.3        | 7.37 | 114      | 0.53           | 4.29            | 20.0             | 6.12             | 0  | 0                | 4.63            | 12.3                          | 72.5                          | n.d.                         | 25.2                            | 3.78            | 149.4 |

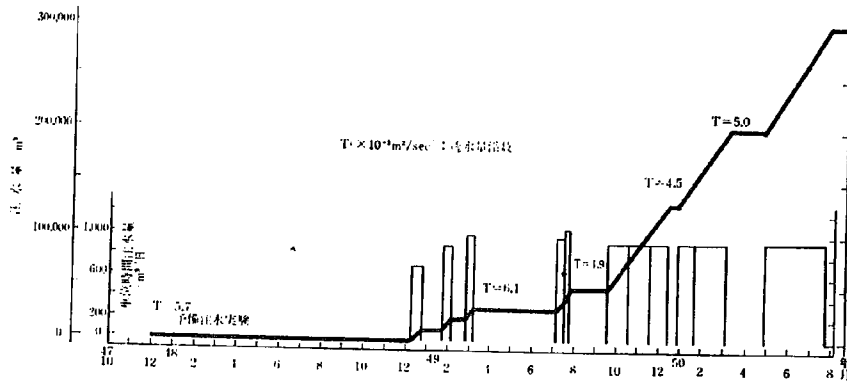


図-5 注水実験実施状況

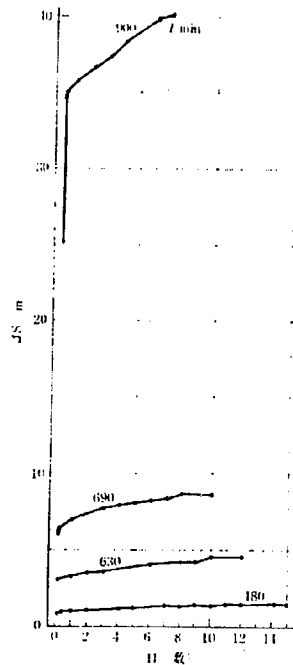


図-6 注水による $\Delta S$ の変化

図-6 は注水量 480 l/min で 15 日間、630 l/min で 12 日間、900 l/min で 7 日間それぞれ 10,000 m³ の注入をしたときの  $\Delta S$  の変化である。このように注水量が多くなると  $\Delta S$  は初めから大きな値を持つとともにその時間経過に伴う変化も大きい。つまり、単位時間の注水量を増加させていくと注水効率

は低下していき、そして単位時間の注水量が大きい時には、時間経過にともなう注水効率の低下も大きい。

この注水効率の低下の主な原因は、後で述べるように注入水中に含まれる空気泡の作用である。

アメリカ合衆国地質調査所によると注水井の目づまりの原因には

- 1 注入水中の懸濁物
  - 2 帯水層内での化学反応
  - 3 井戸又は帯水層内での微生物の増加
  - 4 注入水中の空気
  - 5 帯水層に水が流入するときにおこる土粒子配列の変化
  - 6 注水井の酸化、腐食
- などをあげている。

4に「注入水中の空気」をあげているが、冷たい地表水中に溶存していた空気が、地下で暖められ、帯水層内で空気泡として生じ、これが目づまりの原因になると説明している。注入水中の空気泡についても触れていたが、その性状について十分科学的に解明されていなかった。しかし堀山下注水実験場における注水実験により、静水中の空気泡の運動の理論(宮城 1925)を応用し、注水井中で生ずる空気泡の運動とその作用を明解にすることができた。(長瀬ほか、1975)。

堀山下注水実験場の注水井には2年間で 300,000 m³ の注入をおこなったが、この空気泡による注入効率の低下以外には目づまり現象は起こっていない。後で述べるようにこの空気泡の影響は短時間の揚水によって取り除くことができるが、そのまま放置すると「6注水井の酸化腐食を起こしたり」、「2帯水層内で溶存物質を酸化して沈殿させたり」して、目づまりの原因となる。

静水中を空気泡が上昇する実験によると、上昇する空

気泡は短時間で終速度と呼ばれるほぼ一定の速度に達する。この終速度は空気泡の直径が 3.3 mm のとき最大で 27.8 cm/sec、これより小さい空気泡はその径に比例して終速度も小さくなり、これより大きい空気泡は大きさを増すとともに終速度が 23.0 cm/sec に近づくような放物線を描いて減少するという。

いま堀山下注水実験場において直径 300 mm の注水井に 650 l/min (約 940 m<sup>3</sup>/日) の注入を行うと井戸の内では 15.3 cm/sec の下降水流が生じていることになる。このとき、理論的に考えて直径 2.0 mm 以下の空気泡は下降水流に逆って水面に達することができず、水流に乗って流下し、やがてストレーナから帯水層内にと運ばれることになる。帯水層内に入ると注入水は四方に広がり急に流速を減じるためその流速によって決まる気泡のみ運ばれ、大きな気泡はそこに残り残される。注水量を増加させて、約 1,000 l/min (約 1,500 m<sup>3</sup>/日) 以上にすると直径が大きい方の空気泡も帯水層内に送り込まれるようになり、理論的には注水量が約 1,200 l/min (1,730 m<sup>3</sup>/日) を超えるとすべての空気泡が帯水層へ運び込まれることになる。

以上井戸内の水の流れを一樣として論じてきたが実際には井戸壁の摩擦もあるので、井戸の中心付近の流速はもっと大きく、空気泡を運び易い状態にあるものと考えられる。

いずれにしても注水を長時間続けると注入水の流速が

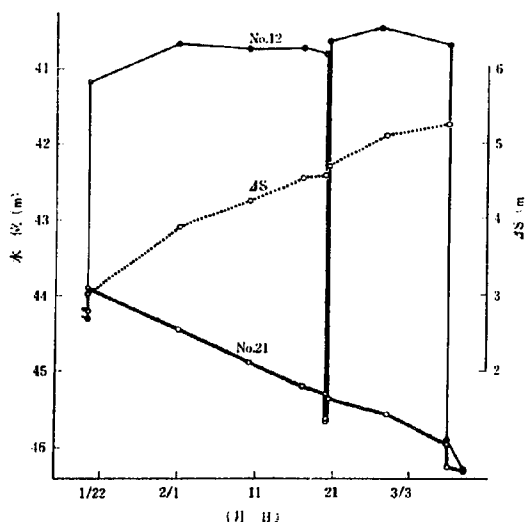


図-7 注水時の水位変動  
(2月20日注水を停止3時間後に再び注入した)

急に減少するストレーナの外側に多数の空気泡が集積し、注水効率が低下する。この空気泡は後で述べのように短時間の揚水で取り除くことができる。

図-7 は注水量約 640 l/min で1月20日から3月8日まで注水を行った時の No. 12 及び No. 21 の水位の変動及び  $\Delta S$  の変化である。この間2月20日に注水を3時間止めた。この注水の休止にもかかわらず  $\Delta S$  はほとんど連続的に増加の傾向を示している。

図-8 は9月20日から11月18日まで注水量約 640 l/min で注水を行った実験結果である。この間10月21日に約3時間ほど注水を停止し、15分間ほど注水井に設置してある水中ポンプを動作させて揚水を行った。この短時間の揚水により、その後注水を開始したときに示した  $\Delta S$  の変化は、9月20日に注水を開始したときの変化と同じような傾向を示した。15分間の揚水により注水効率を低下させた原因——ストレーナのまわりの空気泡は取り除かれた訳である。

堀山下注水実験場の実験結果から、ここの注水井には空気泡による注水効率の低下はおこったが、300,000 m<sup>3</sup> の注水を行った時点で他の多くの研究者が指摘しているような永久目づまりは起こっていない。寒野盆地において深井戸を使つての地下水の人口涵養は技術的には可能であるが、新しく注水井を掘き出す時には次の点を留意する必要がある。

#### (1) 掘きく口径を大きくする。

すくなくとも、地下水面付近では、ケーシングの口径は 450 mm 以上あることが望ましい。

#### (2) ストレーナに閉止め加工をしたものを使用する。

ストレーナのまわりに空気泡が集積しやすいので、それによる酸化腐食を防ぐ。

### 4. 地下水の保護

地下水は自然のサイクルの中で、四季をとわず安くてしかも良質のうまい水を提供してくれる。寒野市においても需要量の 70% 以上をこの地下水に依存しており、市民生活を支える最も重要な水資源であると同時に、社会的、経済的、諸活動を支える上でも必要不可欠な資源の一つである。しかしながら、この地下水も地域の開発整備が進むにつれて、自然涵養源が破壊され地下水量は逐年減少の一途をたどりつつある。これに引き替え、地下水の需要は都市化による急激な人口増加、生活環境の向上、産業活動の拡大等の相剋作用により、ますます多様

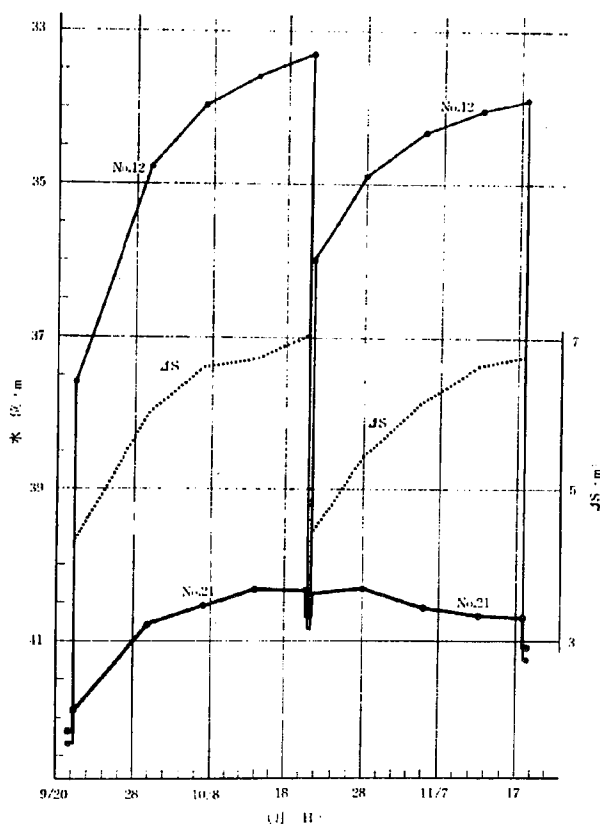


図-8 注水時の水位変動  
(10月21日約3時間ほど注水を停止し、その間に15分間ほど揚水した)

化し、好むと好まざるにかかわらず急速に増大しており、地下水を取りまく水収支は極めて不安定な状態となっている。ちなみに本流域における地下水の使用状況をみると、水道用水として約30,000 m<sup>3</sup>/日、工業等の自家用水(工業用水)として約13,000 m<sup>3</sup>/日(各事業所の届出による)、その他で3~4,000 m<sup>3</sup>/日位とみこまれ、計約46,000 m<sup>3</sup>/日が汲みあげられていることになるが、神奈川県温泉研究所の調査報告によると、30,000 m<sup>3</sup>/日位が揚水許容量とされている。したがって現在の揚水量を上限値として、これ以上の揚水は水収支を保つうえでも問題があり、今後みこまれる需要量は、市域外からの導水(神奈川県広域水道企業団、官ヶ瀬ダム)に求め必要水量の確保を図るものとしているが、いずれにせよ、このままの状態では放置しておく、ますます水収支のバラ

ンスを失い将来揚水規制はもとより、地下水の枯渇を招くとともに、地盤沈下等二次災害を誘発する恐れがあるものと憂慮される。

そして秦野市では、このような地下水の実態を重視し、地下水の涵養源となる砂礫層の確保のため、神奈川県当局と協議のうえ、いち早く砂利採取規制を実施し、これにみあい一部補償を行うほか、造林事業の助成、荒地地の緑地化、及び秦野市環境保全条例(昭和48年12月1日施行)に基づく地下水の利用制限、並びに循環利用の義務づけを行う等、積極的な地下水資源の保全に努めているが、昭和50年度からは長期的な展望にたち、神奈川県温泉研究所が調査研究した成果を行政に反映させ、更に強力に推進させるべく、昭和50年度は約1,700万円の事業費を当初予算に計上し、深井戸による人工涵養(計画注入量1,000 m<sup>3</sup>/日を本格的に実施するほか、農閑期の水田(5 ha)や、素堀水路を利用して灌水を行い、減少していく自然涵養源の補強を図るとともに、水位観測等による地下水位の動向を調査し、今後の地下水位対策に備えていくものとし、今後は涵養水路への導水や、大堀を利用したかん養池等を築造するなど抜本的な地下水資源の保護保全策を実施していく所存

である。また一方においては、総合的な地下水資源の保全と秩序ある利用を図ることを目的に自家用水として、一日当たり20 m<sup>3</sup>以上の地下水を採取し、業務の用に供する関係事業所を対象に、市域に貯留する地下水は市民の共有にして有限な資源であるとの考えに立脚して、「秦野市地下水の保全及び利用の適正化に関する要綱(昭和50年4月1日施行)」を制定し、これに基づき地下水利用者には一定の義務を求め、本年度はとりあえず採取量1 m<sup>3</sup>につき5円を地下水保全費の協力金として納入願うことで話し合いがまとまり、約1,300万円(届出水量により積算)相当額がみこまれる。

いずれにしても現行法の中では、非常に難しい問題が山積しているが限りある地下水資源であることは事実であり、同じ地下水盆を利用する地下水利用者が一体と

なって、保護保全に努め、所期の目的を達成し、地下水の恒久的安定利用を図る必要がある。

### 5. 今後の問題

秦野盆地の地下水の涵養域である複合扇状地の扇頂部、扇尖部は従来煙草畑や麦畑として利用されていた。この地域は富士山起源の火山灰、火山砂に厚くおおわれている。以前は豪雨の後など農道には 30~40 cm もの深さの溝が生じ車の通行が不可能となることがしばしばあった。しかしここ数年畑は宅地や工場にかわり、道路は舗装化がすすみ排水設備も整備された。降った雨は短時間に排水路を通して河川まで運ばれてしまう。今後盆地内の開発がすすめばこの傾向はさらに進み地下水の涵養量は減少の一途をたどるであろう。神奈川県温泉研究所による堀山下注水実験所の実験の成果を取り入れて、秦野市水道局は昭和 50 年度中に堀山下とは水無川をはさんで反対側の戸川に注水井を掘さくする。ここでも堀山下の注水井と同様水道水の余剰水を用いて地下水の人口涵養を行う。

今後はこのような深井戸による地下水の涵養のほか、留池や堀などに雨水を溜め、地下への浸透を助ける方法も考えねばならない。このことについて秦野市水道局は昭和 50 年度はとりあえず農閑期の水田に農業用水をはることなどを予定している。

盆地の中央には普段は水のない幅 5 m 深さ 4 m にも達する堀が幾筋もあり、現在は、ごみの捨場などに使われているが、将来はここに堰堤を設け、雨水を溜め地下への浸透を図るとともに、その付近に注水井を掘さくしてその水を注入するなど地下水の人工涵養に大きな夢を持っている。

### 6. 謝 辞

栗原隆次秦野市長は秦野盆地における地下水の調査に全面的に協力をしてくださるとともに、研究の精果をいち早く行政に反映されている。大木靖衛温泉研究所長からは終始貴重なご意見をいただいた。渡部景隆東京教育大学教授には本稿をまとめるにあたり、いろいろ御指導

を受けた。また地質調査所村下敏夫氏には注水実験に関する文献をお送りいただいた。ここに諸先生及び関係者の方々に厚く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) Miyagi (1925), The Motion of An Air Bubble Rising in Water, 日本機械学会誌 XXVIII, 95.
- 2) 藤本治義 (1928), 秦野盆地付近の地形と地質, 東京高師博物学雑誌, No. 36.
- 3) 佐賀里農林 (1967), 白河平野の地下注水実験.
- 4) 柴崎達雄・熊井久雄 (1968), 鞍馬地下水盆の水収支, 地質学雑誌第 74 巻第 3 号
- 5) 小西泰次郎 (1968), 冷却排水の地下への還元再使用, 工業用水, No. 118 号
- 6) 高橋宏光・大木靖衛・小沢清・横山尚秀 (1970) 秦野市水無川の地質構造と揚水資料, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 1, No. 12.
- 7) 大木靖衛・小澤清・横山尚秀・長瀬和雄 (1971), 秦野盆地の水文地質, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 2 No. 2.
- 8) 長瀬和雄・大木靖衛・荻野喜作・横山尚秀・小沢清 (1978) 秦野盆地の地質, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 3, No. 2
- 9) 横山尚秀・荻野喜作・大木靖衛・長瀬和雄・小沢清 (1972), 秦野盆地地下水の水文学的研究, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 3, No. 2.
- 10) 平賀士郎・小澤清・広田茂・大山正雄・伊東博, 秦野盆地における弾性波探査, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 3, No. 2.
- 11) 水井茂・村下敏夫 (1972), 人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復, 工業用水, 第 170 号
- 12) 柴崎達雄 (1973), 地下水資源学, 共立出版
- 13) 長瀬和雄・大木靖衛・荻野喜作 (1973), 秦野盆地における観測井のさく井資料, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 4, No. 3
- 14) 横山尚秀・荻野喜作・長瀬和雄 (1973), 秦野盆地の深層地下水について, 秦野温泉研究報告, Vol. 4, No. 3.
- 15) 長瀬和雄・荻野喜作・横山尚秀・小沢清 (1974), 秦野盆地における深井戸による人工涵養実験(Ⅰ), 神奈川県温泉研究報告, Vol. 5, No. 3.
- 16) 横山尚秀・大木靖衛・荻野喜作・長瀬和雄 (1974), 秦野盆地地下水の水収支シミュレーション, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 5, No. 3.
- 17) 横山尚秀・横山尚秀 (1974), 秦野市曾屋水源の湧水記録, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 5, No. 3.
- 18) ヨーノス・M. T. (1974), 人工かん養井戸の目づまり, 工業用水, No. 195 号
- 19) 長瀬和雄・荻野喜作・横山尚秀 (1975), 秦野盆地における深井戸による地下水の人工涵養実験(Ⅱ)―目づまりの目づまり現象について―, 神奈川県温泉研究報告, Vol. 6, No. 3.

## 2. 上越地区地盤沈下防止対策事業

### G<sub>4</sub> 層地下涵養中間報告書

昭和51年10月

新潟県生活環境部公害規制課

## 1. 地盤沈下の経過

上越地区における地下水の開発は古く、大正11年に上越市（旧高田市）が上水道水源として、深井戸にその水源を求めたことに始まり、その後、工業用水として小規模に利用しているに過ぎなかった。

戦後、工業の発達には、大量の工業用水を必要とする一方、鑿井技術の向上、水中ポンプの開発は大量の地下水を安易に取水することが可能になった。

工業用水、水道用水を始めとして、冷房、暖房、消雪、養魚及び雑用水等多方面に利用され、重要な地下資源として見直されるに至った。

このように地下水が多方面にかつ、大量に揚水するに及んで地下水位の低下が問題化し、社会問題としてジャーナリズムに取上げられ、一般住民が地下水を身近な問題として論議するところとなった。

上越地区においても、昭和37年頃から地下水位の低下が問題となり、地下水利用者は、水中ポンプを深い位置に設置変更する等で切り抜けていた。

しかし、高田平野の地下には軟弱な粘土層が発達しているため、新潟地区と同様、地下水の過剰揚水により地盤沈下の発生が危惧されるに至った。

## 2. 観測体制の拡充と沈下の状況

地盤沈下の発生が予想されたことから、県では、地盤沈下の有無を究明するため、昭和39年度事業として、地盤沈下観測井（深度240m）を、上越市（旧直江津市）下門前の県立直江津工業高校の一隅に設置した。

その結果、地盤沈下現象が認められたため、下記のごとく、漸次観測井を増設した。（表-1参照）

一方、水準測量については、昭和43年58点の水準点を設置するとともに建設省国土地理院の協力を得て、14.9Kmの水準測量を実施した。

水準測量の結果、高田平野のほぼ全域に地盤変動が認められ、特に、上越市千原附近では、昭和44年9月～45年9月までの1年間で最大64mmの沈下量を示した。

地盤沈下の原因については、これまでの種々の資料を検討した結果、揚水量の増大に伴う地下水位の低下及び地下水位の急激な変化等が収縮量と密接な相関関係があることから「地下水の急激かつ大量揚水」が地盤沈下の主要原因と考えられる。（表-2、図-1・2・3参照）

表-1 観測井一覧表

| No | 観測井名称               | 所在地               | 所属          | 深度                 | 収縮 | 地下水位 | 観測開始年月  |
|----|---------------------|-------------------|-------------|--------------------|----|------|---------|
| 1  | 新道 G <sub>2</sub> 層 | 上越市<br>中々村新田      | 建設省<br>北陸地建 | 110.7 <sup>m</sup> | ○  | ○    | 昭 50・10 |
| 2  | 頸城 G <sub>4</sub> 層 | 中頸城郡<br>頸城村大字松橋   | 新潟県         | 277                | ○  | ○    | 42・4    |
| 3  | 高田 "                | 上越市<br>上真砂諏訪小学校   | "           | 300                | ○  | ○    | 42・5    |
| 4  | 上越 "                | 上越市下門前<br>直江津工業高校 | "           | 243                | ○  | ○    | 40・4    |
| 5  | " G <sub>3</sub> 層  | "                 | "           | 200                | ○  | ○    | 41・11   |
| 6  | 頸城 "                | 中頸城郡<br>頸城村大字松橋   | "           | 180                | ○  | ○    | 43・12   |
| 7  | 高田 G <sub>2</sub> 層 | 上越市<br>栄町城北中学校    | "           | 136                | ○  | ○    | 48・2    |
| 8  | 千原 G <sub>2</sub> 層 | 上越市上千原<br>北諏訪小学校  | "           | 162                | ○  | ○    | 49・12   |
| 9  | 中部簡水                | 上越市大字三橋           | "           | 298                |    | ○    | 47・11   |
| 10 | 東部簡水                | " 大字東中島           | "           | 306                |    | ○    | 49・7    |
| 11 | 信越 G <sub>4</sub> 層 | 頸城村大字下三分          | "           | 296                |    | ○    | 47・11   |

(注) 中部及び東部簡水井については、上越市から井戸を借用している。

信越G<sub>4</sub>層については、信越化学株式会社直江津工場から井戸を借用している。

表-2 沈下面積

| 年         | 沈下区分               |                     |                     |                     |                     |                     |                    | 沈下面積            |
|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
|           | 0~10 <sup>mm</sup> | 10~20 <sup>mm</sup> | 20~30 <sup>mm</sup> | 30~40 <sup>mm</sup> | 40~50 <sup>mm</sup> | 50~60 <sup>mm</sup> | 60以上 <sup>mm</sup> |                 |
| 昭         | km <sup>2</sup>    | km <sup>2</sup>     | km <sup>2</sup>     | km <sup>2</sup>     | km <sup>2</sup>     | km <sup>2</sup>     | km <sup>2</sup>    | km <sup>2</sup> |
| 43.9~44.9 | 74.27              | 44.73               | 50.87               | 10.01               |                     |                     |                    | 180.88          |
| 44.9~45.9 | 51.53              | 42.10               | 66.66               | 28.00               | 3.20                | 0.72                | 0.08               | 192.29          |
| 45.9~46.9 | 107.24             | 92.78               | 12.63               | 0.69                | 0.60                |                     |                    | 213.94          |
| 46.9~47.9 | 103.75             | 7.37                | 1.00                |                     |                     |                     |                    | 112.12          |
| 47.9~48.9 | 70.70              | 78.20               | 22.10               | 0.25                |                     |                     |                    | 171.25          |
| 48.9~49.9 | 76.95              | 34.50               |                     |                     |                     |                     |                    | 110.00          |
| 49.9~50.9 | 42.98              | 2.90                |                     |                     |                     |                     |                    | 45.88           |

観測井及び注入井位置図



### 3. 防 止 対 策

観測井及び水準測量の調査等から、地盤沈下が急速に拡大する恐れがあり、地下水の規制をする必要にせまられた。

#### (1) 地下水の自主規制

国、県、市町村及び関係事業所をもって組織している「上越水資源開発利用協議会」では、工業用水を、昭和45年の揚水実績にもとづき、昭和47、48年に各10%ずつ自主規制した。

#### (2) 新潟県公害防止条例

昭和49年8月新潟県公害防止条例により地下水規制を実施した。

#### (3) 人工地下涵養

高田平野では、地下水に替る表流水が早急に手当することができないことから、県では沈下の大きい区域(目玉)の加速を防止することを目的に、大量に揚水しているG<sub>4</sub>層(深度150～300m)に人工地下水を涵養することとした。

しかし、直ちに実用化するためには、学問的に未解決の項目が多く、企業あるいは公共団体に行わせるには、リスクを伴うので、県の立場で実験することとした。

なお、実験期間は昭和48年度～50年度までの3年間とし、昭和51年度からは地盤沈下防止対策事業として地下涵養を継続している。

#### 涵養施設の概要

##### (1) 工事費 約3,3000千円

###### 内 訳

###### ○ 井戸、土木工事等 12,600千円

涵養井戸、揚水試験、水中ポンプ、取水施設工事  
排水工事、水処理装置の基礎工事、排泥池工事  
道路工事、建屋工事

###### ○ 水処理装置及び配管工事 15,330千円

急速沈澱装置、急速濾過装置、原水槽、清水槽  
取水ポンプ、排泥ポンプ、移送ポンプ、圧入ポンプ、  
自動給水ポンプ、凝集槽、助剤槽及び計器盤

###### ○ 計装及び電気配線工事 4,050千円

水位計、注入水量計、逆洗水量計、原水pH計  
原水濁度計、清水濁度計、水質記録計(c1<sup>〃</sup>)  
計装盤及び電気工事

##### (2) 場 所

地下涵養地点は、沈下の目玉から離れないこと、また、電源の引込み、道路及び河川からの取水等を

考慮して、中頸城郡頸城村大字下三分とした。

(3) 注入原水

高田平野の河川には、農業用水の水利権が随所に設定されているため、当初の水源候補として農業用水、工場排水を予定したがいずれも一長一短があり、最終的に保倉川の表流水となった。

(4) 涵養方法

自然注入とポンプ圧入の2方式

涵養は自然注入が理想的であることは、これまでの学説となっていたが、計画涵養量の  $60\text{ m}^3/\text{H}$  が不能のことも考えられたため、ポンプで圧入する装置もセットした。

(5) 計画涵養量

$60\text{ m}^3/\text{H}$  (約  $1500\text{ m}^3/\text{D}$ )

昭和46年の地下還元の計画時には高田平野において地盤沈下観測井が5坑あり、これらの収縮量をみると沈下は毎日起きているのではなく、地下水を大量に揚水する夏期に集中して起きていることが判る。

従って沈下が±0の時の揚水量であれば地盤沈下を引起すことなく継続して地下水を利用できることになり、これらを考慮して算出した結果、昭和45年の揚水の  $1/3$  を削減すると沈下は±0になることが判明した。その結果沈下の目玉周辺の揚水量が  $4000 \sim 6000\text{ m}^3/\text{D}$  であることから、その  $1/3$  即ち約  $1500\text{ m}^3/\text{D}$  を計画涵養水量に決定したものである。

(6) 涵養水質

水道水質基準に適合する水質

(7) 地上施設

(図-4参照)

(8) 涵養井戸

井戸の口径は、上部5.3mまで450mm(18吋)でそれより下部は300mm(12吋)とし、深度は28.5mとした。

井戸設計にあたり、これまでの涵養記録を種々検討したが特に注目することはなく、揚水井戸と同じ構造のものだけであった。

そのため、県独自の構造の井戸を設計することになり、下記事項を重点にして設計した。

ア. 涵養時の管内流速をできる限り遅くする。(  $23.6\text{ mm}/\text{sec}$  )

イ. ストレーナーから地層に流出する流速をできる限り遅くするためストレーナーの孔明率を高める。

(ストレーナーからの流出速度約  $0.98\text{ mm}/\text{sec}$ , 孔明率40%)

ウ. これまでの学説では、溶存酸素(DO)が目づまりの主原因の一つとされているため、脱酸素装置を取付けた。(窒素ガスによるバブリング)

エ. 人件費を節約する。(自動化)

(9) 経 費

| 年 度   | 予 算                 | 備 考                 |
|-------|---------------------|---------------------|
| 昭和47年 | 33,000 <sup>千</sup> | 工 事 費               |
| " 48年 | 2,706               | 人件費, 旅費, 需要費, 土地借上等 |
| " 49年 | 3,651               | "                   |
| " 50年 | 5,842               | " 修繕                |
| " 51年 | 6,093               | " (1/3地元負担)         |

4. 地 下 涵 養

(1) 経 過

ア. 注入実験にさきだち, 取水施設, 浄化装置, 計装器及び井戸等の補正ならびに調整等を昭和48年4月上旬～5月31日まで行い, 本実験は5月14日より実施した。

イ. 涵養水量を最初から計画水量約1,500<sup>m</sup>³/D注入すると, 帯水層の目づまり現象を早めるだけでなく, 破壊することも考えられたため, 720<sup>m</sup>³/D(30<sup>m</sup>³/H)から注入を開始し, 漸次水量を増して, 7月27日までに1000～1,320<sup>m</sup>³/Dまで注入した。

これまでの実験結果では良好の成績が得られたため, 8月上旬から, 計画水量を涵養することになっていた。

ウ. 7月28日17時ころ, 例年より早く涵養原水である保倉川に塩水化現象が発生し, 8月30日までの33日間涵養実験を中止せざるを得なかった。

エ. 塩水化現象は, 8月30日夜半の降雨により消滅したので, 本格的な涵養に備え, 井戸の逆洗及び計器の点検を行い9月3日から注入を開始した。

オ. その後, 順調に地下涵養を行っていたが, 昭和49年1月真空ポンプが故障し約1カ月間注入を停止した。

カ. その後, 取水ポンプの取替, 排泥パイプの取付等小規模の増改修工事を行っている。

キ. 昭和51年3月末日まで地下還元水量は, 約114万<sup>m</sup>³に達し, 稼動日数が約864日であることから, 1日平均地下涵養量は約1,320<sup>m</sup>³/Dになった。

ク. 涵養実験は, 当初の計画のとおり順調に稼動していることから, 地盤沈下防止対策事業として地下涵養を継続することとし, 昭和51年度から実施した。

なお, この事業費については, 地下水利用関係者が, 経費の1/3を負担することとした。

(2) 成 果

ア. 本涵養井の適正と思われる涵養量は, 65<sup>m</sup>³/H程度で清水が1.0ppm以下の場合は連続200,000

～300,000 m<sup>3</sup>地下涵養が可能である。

- イ. 涵養井の地下水位は、年間約3 m～4 m変動するがそのため、地下涵養に影響を及ぼすことはない。
- ウ. 濁度は、1 ppm以下にして涵養しておれば(ア)のとおり相当量涵養できるが、2 ppm以上になると徐々に目づまり現象が発生する。
- エ. 溶存酸素は、これまでの説のとおり少ない程よい事は否定できないが、原水の水質が良好の場合は大きな障害とならない。
- オ. 水温については、夏期約30℃、冬期約2℃の水を涵養しているが、約1.5 Km離れて移動している井戸の水温は変化していない。
- カ. 涵養水の水質は、化学的見地からみると、水温よりも有機物の有無が重要な要素となっているが、地質的見地からみると化学的なこととは逆の現象が重要な要素となっている。
- キ. 涵養層のG<sub>4</sub>層地下水層は、酸欠状態の地下水となっているが、涵養水は年間をとおして飽和に近い状態の水を涵養しているにもかかわらず、G<sub>4</sub>層は酸欠状態が維持されている。

このことは、逆洗時の溶存酸素の測定では握している。

- ク. したがって、逆洗も長時間行う必要がなく、井戸内をクリーニングする程度でよい。当井でも2時間(約300 m<sup>3</sup>)程度の逆洗で、約30万m<sup>3</sup>涵養が可能になっていることが証明している。
- ケ. 涵養計画時、沈下の目玉は年間3～4 cmであったものが、揚水量の減少により全般的に沈下も縮小しているが、昭和49年9月～50年9月までの水準測量(図-3参照)によれば、沈下の目玉は、西方の国道18号線石橋地区に変動しているのが注目される。
- コ. 昭和50年8月19日の溶存酸素(DO)調査によれば、清水槽で8.3ppmあったものが約2時間後の井戸の表層水で3.3ppmと急減しており深部になるにつれて漸増し、深度260 mで5.6ppmとなっていた。これは当初の推測とは全く正反対であった。

なお、新潟地区の地盤沈下観測井でも同様な傾向が認められ、この原因追究が今後の課題になっている。

また酸可溶性鉄は最深部で1.2ppmと最大になっているが、100 m以深の水はかなりの量の赤褐色沈澱物を含有していたことから、鉄サビが地下水に混入して、酸可溶性鉄が増加しているものと思われる。

一方細菌学的試験結果によれば、ブイヨン(総ての生菌数)とTEP(嫌気性菌)の培地の生菌数では、清水は両者に大差がないが、井戸の表層水と深度50 mでは両者とも増大しているが深度100 mと200 mでは清水とほぼ同じ生菌数にもどっているが、最深部の深度260 mでは再び生菌数が増加していた。

このことは、有機物等とともに目づまりを起こして菌の増殖しやすい条件があったものと考えられる。

また、生菌数がほぼ同じ値を示していることから、ストレーナーより外部(帯水層)は殆んど嫌気性菌と推測されることから、G<sub>4</sub>層には殆んど汚水は流出していないものと思われる。

この調査は地下涵養停止後2時間経過しての観察であることを留意しなければならない。

サ. 地下涵養は、計画のとおり順調に稼動しており、昭和51年8月末現在までの地下涵養水量は、約132万 $m^3$ に達している。

稼動日数が約993日であることから1日平均約1,330 $m^3$ となっている。

現在までの地下涵養の成績は、表-3のとおりである。

表 - 3 人工涵養実績表

| 年  | 月  | 日  |              | 注入水量<br>$m^3$ | 逆洗<br>水量<br>$m^3$ | 地下涵養<br>水 量<br>$m^3$ | 累 計<br>涵養水量<br>$m^3$ | 逆洗<br>時間<br>H | 1時間当り<br>涵養水量<br>$m^3/H$ | 年間涵養量<br>$m^3$  |
|----|----|----|--------------|---------------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------|--------------------------|-----------------|
|    |    | 延  | 注 入          |               |                   |                      |                      |               |                          |                 |
| 48 | 5  | 19 | D.H<br>16.10 | 17,199        | 2,023             | 15,176               | 15,176               | 13.0          | 38.5                     |                 |
|    | 6  | 30 | 14.17        | 17,046        |                   | 17,046               | 32,222               |               | 48.3                     |                 |
|    | 7  | 31 | 24.15        | 27,353        |                   | 27,353               | 59,575               |               | 46.3                     |                 |
|    | 8  | 31 | 0            | 0             | 240               | ⊖ 240                | 59,335               | 1.5           | 0                        | 186,124         |
|    | 9  | 30 | 22.22        | 26,796        |                   | 26,796               | 86,131               |               | 48.7                     | (50.8 $m^3/H$ ) |
|    | 10 | 31 | 28.13        | 38,051        |                   | 38,051               | 124,182              |               | 55.5                     |                 |
|    | 11 | 30 | 24.20        | 31,641        |                   | 31,641               | 155,823              |               | 53.1                     |                 |
|    | 12 | 31 | 20.18        | 30,621        | 320               | 30,301               | 186,124              | 2.0           | 60.8                     |                 |
| 49 | 1  | 31 | 2.11         | 3,465         |                   | 3,465                | 189,589              |               | 58.7                     |                 |
|    | 2  | 28 | 27.03        | 36,958        |                   | 36,958               | 226,546              |               | 56.8                     |                 |
|    | 3  | 31 | 26.02        | 34,824        | 1,902             | 32,922               | 259,468              |               | 52.6                     |                 |
|    | 4  | 30 | 21.06        | 24,778        | 1,244             | 23,534               | 283,002              | 8.0           | 46.2                     |                 |
|    | 5  | 31 | 29.10        | 38,143        | 3,716             | 34,427               | 317,429              | 23.0          | 48.9                     |                 |
|    | 6  | 30 | 29.23        | 34,840        |                   | 34,840               | 352,269              |               | 48.5                     | 356,390         |
|    | 7  | 31 | 26.10        | 33,897        |                   | 33,897               | 386,166              |               | 53.5                     | (49.5 $m^3/H$ ) |
|    | 8  | 31 | 30.22        | 27,524        |                   | 27,524               | 413,690              |               | 37.1                     |                 |
|    | 9  | 30 | 25.17        | 23,367        |                   | 23,367               | 437,057              |               | 37.9                     |                 |
|    | 10 | 31 | 30.08        | 42,041        |                   | 42,041               | 479,098              |               | 57.7                     |                 |
|    | 11 | 30 | 20.18        | 26,688        |                   | 26,688               | 505,786              |               | 53.6                     |                 |
|    | 12 | 31 | 29.08        | 39,252        | 2,524             | 36,728               | 542,514              | 19.0          | 52.2                     |                 |

| 年  | 月  | 日  |              | 注入水量<br>m <sup>3</sup> | 逆洗<br>水量<br>m <sup>3</sup> | 地下涵養<br>水 量<br>m <sup>3</sup> | 累 計<br>涵養水量<br>m <sup>3</sup> | 逆洗<br>時間<br>H | 1時間当り<br>涵養水量<br>m <sup>3</sup> /H | 年間涵養量<br>m <sup>3</sup> |
|----|----|----|--------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|------------------------------------|-------------------------|
|    |    | 延  | 注 入          |                        |                            |                               |                               |               |                                    |                         |
|    | 1  | 31 | D.H<br>29.08 | 37,552                 |                            | 37,552                        | 580,070                       |               | 53.3                               |                         |
|    | 2  | 28 | 26.12        | 36,652                 |                            | 36,652                        | 616,722                       |               | 57.6                               |                         |
|    | 3  | 31 | 29.22        | 42,771                 |                            | 42,771                        | 659,493                       |               | 59.6                               |                         |
|    | 4  | 30 | 25.06        | 34,565                 |                            | 34,565                        | 694,058                       |               | 57.0                               |                         |
|    | 5  | 31 | 29.06        | 41,551                 |                            | 41,551                        | 735,609                       |               | 59.2                               |                         |
| 50 | 6  | 30 | 27.07        | 40,487                 |                            | 40,487                        | 776,096                       |               | 61.8                               | 489,730                 |
|    | 7  | 31 | 26.04        | 39,141                 |                            | 39,141                        | 815,237                       |               | 62.3                               | (60.5m <sup>3</sup> /H) |
|    | 8  | 31 | 27.11        | 40,800                 | 299                        | 40,501                        | 855,738                       | 2.0           | 61.5                               |                         |
|    | 9  | 30 | 29.18        | 44,195                 |                            | 44,195                        | 899,933                       |               | 61.9                               |                         |
|    | 10 | 31 | 25.15        | 38,456                 |                            | 38,456                        | 938,389                       |               | 62.5                               |                         |
|    | 11 | 30 | 29.22        | 46,286                 |                            | 46,286                        | 984,675                       |               | 64.5                               |                         |
|    | 12 | 31 | 30.23        | 47,569                 |                            | 47,569                        | 1,032,244                     |               | 64.0                               |                         |
| 51 | 1  | 31 | 18.03        | 26,537                 |                            | 26,537                        | 1,058,781                     |               | 61.0                               |                         |
|    | 2  | 29 | 22.06        | 32,320                 |                            | 32,320                        | 1,091,101                     |               | 60.5                               |                         |
|    | 3  | 31 | 30.10        | 45,065                 |                            | 45,065                        | 1,136,166                     |               | 61.7                               |                         |
|    | 4  | 30 | 20.10        | 28,321                 | 323                        | 27,998                        | 1,164,164                     | 2.0           | 57.8                               | 289,789                 |
|    | 5  | 31 | 30.07        | 44,017                 |                            | 44,017                        | 1,208,181                     |               | 60.5                               | (59.4m <sup>3</sup> /H) |
|    | 6  | 30 | 28.07        | 40,249                 |                            | 40,249                        | 1,248,430                     |               | 59.3                               |                         |
|    | 7  | 31 | 27.06        | 37,944                 |                            | 37,944                        | 1,286,374                     |               | 58.0                               |                         |
|    | 8  | 31 | 26.06        | 35,657                 |                            | 35,657                        | 1,322,031                     |               | 56.6                               |                         |
|    | 9  |    |              |                        |                            |                               |                               |               |                                    |                         |
|    | 10 |    |              |                        |                            |                               |                               |               |                                    |                         |
|    | 11 |    |              |                        |                            |                               |                               |               |                                    |                         |
|    | 12 |    |              |                        |                            |                               |                               |               |                                    |                         |

## 5. 主な留意事項

- (1) 地下に水を涵養する場合原水は一般的に河川水、湖沼水及び農業用水等表流水を対象にしている。特殊の場合として工場及び生活排水等を対象にすることもあるが、地下水汚染や土壌汚染の恐れがあるため、水処理に多額の経費を必要とするので涵養源水には十分の注意が必要である。

当涵養井は、沈下の目玉附近に限定されたために、保倉川の表流水になったが保倉川は降雨時、濁度が2,000ppm以上の泥川になるため、水処理の薬品代がかさみ、最近では涵養を停止している。

- (2) 一般的に井戸は鉄管を使用しているが、そのため、腐食をおこすため、地下涵養の場合は、材質を検討しなければならない。

- (3) 濁度計については、水アカ、鉄サビ及び微粒砂等については検出できない。

清水を見ていると、濁度計は±0になっているにもかかわらず上記の異物が相当量涵養井に入っており、この除去についても検討する必要がある。

- (4) 冬期、夜半に水が凍ることがあり、凍結防止に十分の注意が必要である。

- (5) 配管はできる限り鉄製品を使用しないで、ビニールホース等とし、地下埋設はさけるべきである。

- (6) ポンプについては、計画水量の1.5倍程度の余裕をもたせないと水量不足を来す。

また、使用頻度の激しいものについては、予備を備えておく心構えが必要である。

観測井観測記録

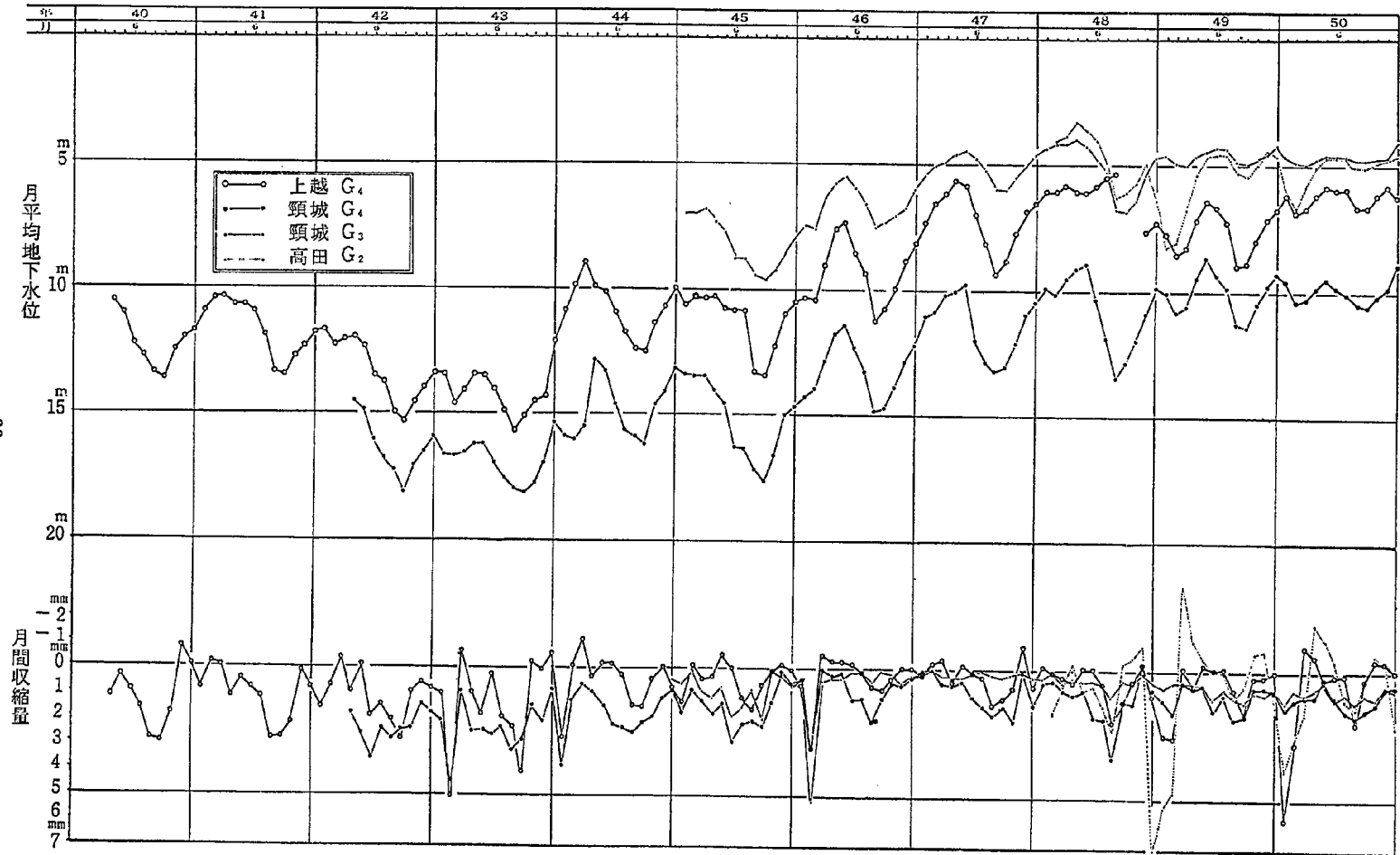


図 - 1 観測井観測記録

図 - 2      地盤変動図    単位   mm  
 (    自 昭和43年9月1日      7カ年 )  
   至 昭和50年9月1日



図 - 3 地盤変動図 単位 mm  
 (自 昭和49年9月1日 1カ年)  
 至 昭和50年9月1日



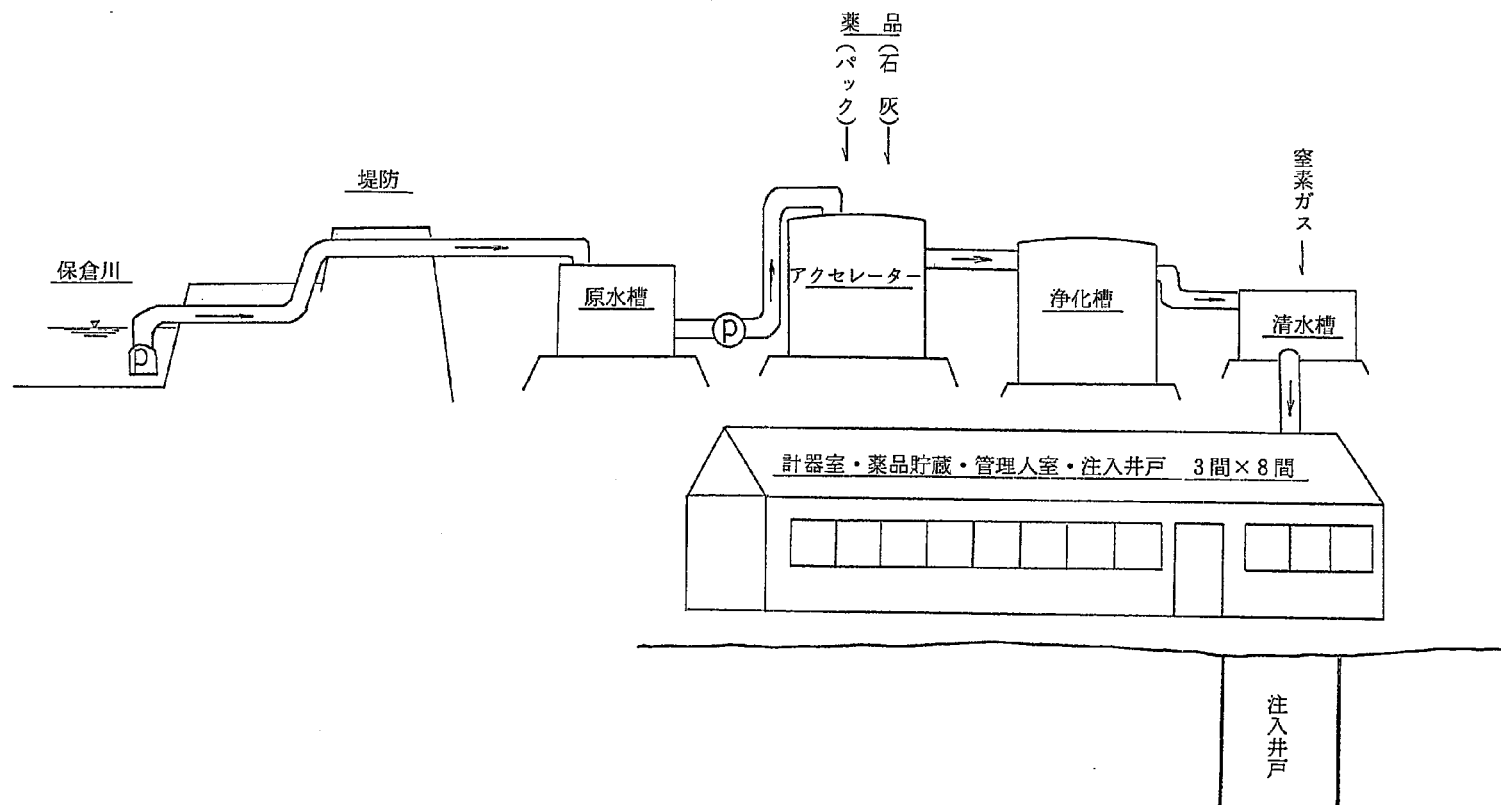


図 - 4 注入施設（地上）略図

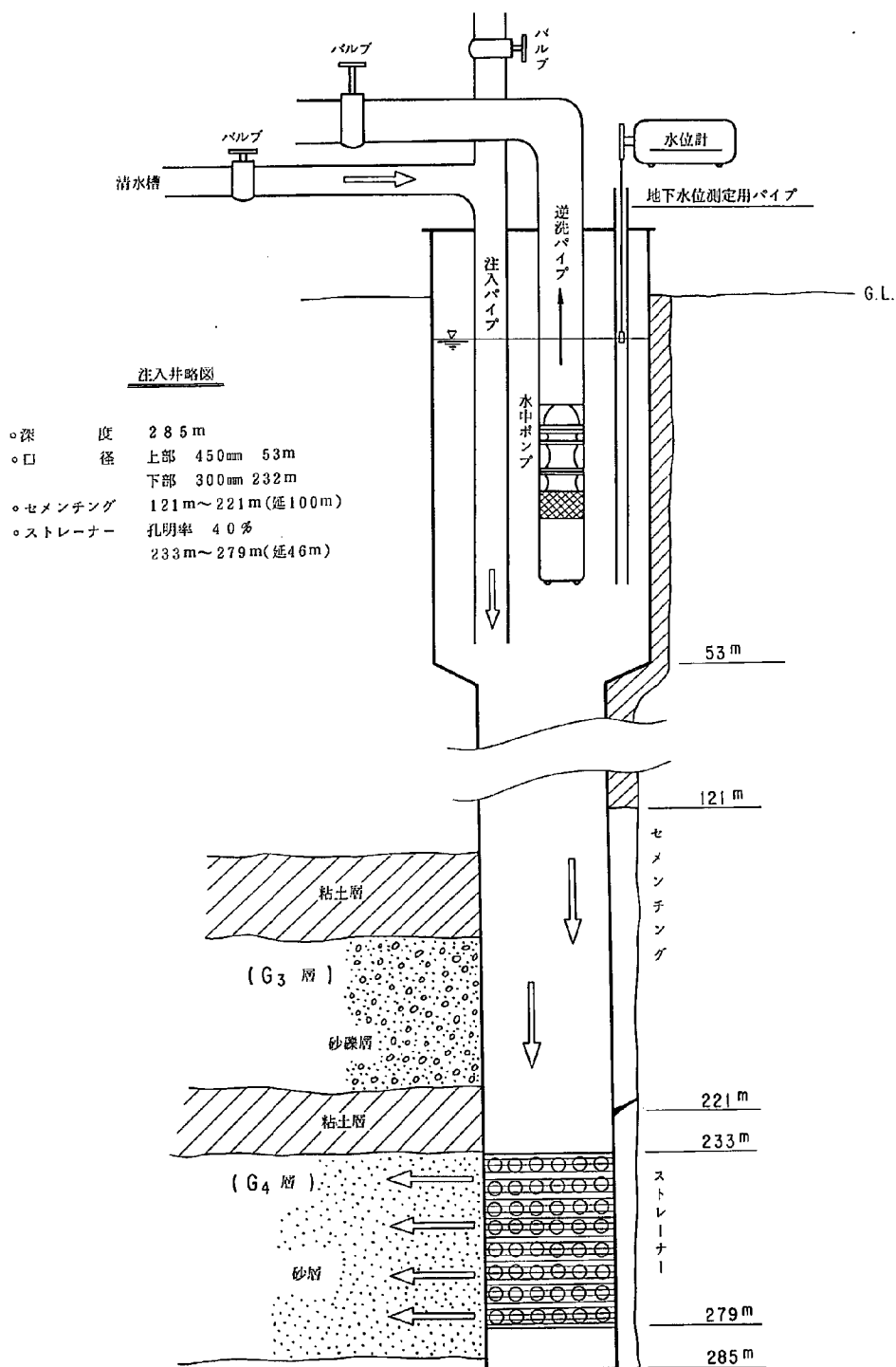


図 - 5 注入井略図

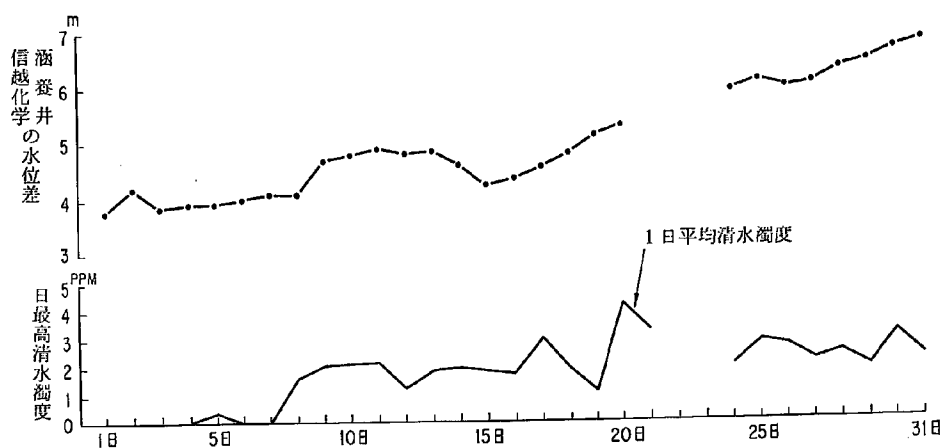
図-6は、昭和50年1月分の地下涵養と観測井の観測記録である。

この表の地下水位のなかで、涵養井の地下水位が大きな変動を示しているが、これは、動水位（涵養中の水位）と静水位（涵養停止中の水位）を示しているためである。静水位は隣接（約550m）する信越化学観測井とほぼ同水位で変動しているが、動水位は日があつにつれて水位差が生じていることが判る。これが涵養井戸の目づまり現象である。

この原因は、清水濁度と密接な関係があり、詳細に解析したのが図-7である。

この表では、清水濁度は7日まで順調であったが、8日から濁度が高くなっている。清水濁度が順調であった7日頃までは4m前後の水位差が濁度が高くなると急速に上昇し、月末には7m近くになっている。

このことから、地下に水を涵養する場合は、清水濁度については最善の努力をして涵養しなければならない。



（注） 信越化学・涵養井の地下水位差は、信越化学と涵養井の動水位の1日平均地下水位の差。  
清水濁度は1日1時間以上持続した最高濁度。

図-7 清水濁度と目づまりの関係

### 3. 人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復

— 妻沼実験地の例 —

永 井 茂  
村 下 敏 夫

# 人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復\*

## — 妻沼実験地の例 —

永井 茂\*\* 村下 敏夫\*\*

### 緒 論

井戸を使用して行なう人工地下水の方法は、直接法の一つである。この方法で避けられない重要な問題の一つは、注水井戸の目づまりによる注水能力の低下である。この問題については、アメリカやイスラエルなどで行なった人工地下水の実験や経験に関する諸報告に詳細に紹介されているが、わが国ではまだない。

本報文は、地質調査所が昭和 42 年度から 46 年度までの 5 年間にわたって、埼玉県大里郡妻沼町において特別研究として行なった人工地下水の研究の中で、とくに注水によって生じる井戸の目づまりについてまとめたものである。

地下水強化を目的とした直接法は、地下水が枯渇しつつある現在ではきわめて関心の深い課題であるが、その計画に際して十分に検討されなければならないのが、井戸の目づまりであろう。目づまりの度合によっては、注水量の早期減少、注水井戸の増加、水コストの増大など一連の諸問題が誘発し、終局においては直接法そのものの評価につながるからである。

この報文は、特定条件のもとでの一例にすぎない恐れは十分に考えられるが、将来この種の実験・事業が行なわれるときの参考となれば幸いである。

### 目 づ ま り

水井戸を使用して行なう人工地下水の方法は、直接法の一つである。注水に使用する井戸は、原則として浅井戸または深井戸で、注入水は地表水または一たん使用した地下水である。井戸を通じて上記の水を地下に注入する過程において、定水量で注水を継続すると井戸内の水位の上昇が、また定水頭で注水を継続すると注水量の減少が徐々にあるいは急速におこる。このように、注水によって井戸の能力が低減する現象を注水井戸の目づまり (Clogging) と一般には呼んでいる。

\* Clogging and Renovation of Artificial Recharge Waterwell

\*\* Shigeru Nagai; Toshio Murashita. 工業技術院地質調査所

目づまり現象がみとめられたときには、注水を停止し、逆にポンプによって井戸の揚水を断続または継続して行なうと、目づまりを解消し、もとの井戸能力に回復させることができる。すなわち、ポンプ揚水すると、懸濁物を多量に含む濁度の高い水が排出され、やがて濁度の減少とともに揚水水位が浅くなり、井戸の竣工当時の揚水水位に戻るかあるいは近づく。

アメリカの地質調査所は、過去に組織的な人工地下水の研究を行なった。それらの研究報告のなかで Price ら<sup>1)</sup> は、注水井戸あるいは井戸周辺の帯水層内で発生する目づまりは、

- 1) 注入水中の懸濁物
- 2) 帯水層内での化学反応
- 3) 井戸または帯水層での微生物の増加
- 4) 注入水中の空気
- 5) 帯水層に水が流入するときにおこる土粒子配列の変化

に起因したと述べている。さらに説明を加えると、

1) は、注入原水に含まれるものまたは気ばくの結果生成される注入水中の鉄イオンの沈でんなど、

2) は、帯水層中の粘土コロイドの増加とそれに起因するイオン交換反応、注入水と鉄バクテリアあるいは硫黄バクテリアを含有する地下水との間でおこる生物化学的变化など、

3) は、注入水に含まれている微生物によっておこる帯水層の汚染、あるいは注入水によって助長される帯水層内での微生物の増加、

4) は、注入水に溶存または注水の過程において混入する空気、

などであって、これらが目づまりの一因をなすと考えられている。なお、2)~4) は化学的・生物化学的目づまり・5) は物理的目づまりと呼ぶことができよう。

なお、筆者ら<sup>2)</sup> は井戸を使用して行なった人工地下水の実験の結果、注水井戸および井戸周辺の帯水層内でおこる目づまりを分類して、次の二つに分けた。すなわち、

- 1) 一時目づまり 注入水中の懸濁物・空気・ガスによる物理的・化学的目づまり、注入水と地下水との化

学反応、微生物による汚染やその増加などによる生物化学反応に起因する目づまりであって、この種の目づまりはポンプ揚水という機械的手段によって解消し井戸能力の回復を図ることができる。

2) 永久目づまり 目づまり解消のために行なう揚水の繰り返しあるいは注水によって、帯水層土粒子や井戸ケーシングの外側にある充填砂利の配列に変化が生じて、透水性が減少するという目づまり現象である。この種の目づまりを解消して、井戸を本来の水理状態に戻すことは困難である。

前記のように、注水によって井戸の能力が減退する現象を目づまりと概念的に呼んでいるが、井戸の能力は透水性と関係があるので、“目づまりとは注水によって井戸もしくはその周辺の帯水層の透水性が一時あるいは永久に低減する現象”であると考えることができる。

#### 設備と実験

婁沼実験地は、埼玉県大里郡婁沼町の利根川寄りにあり、AとBの2カ所からなる。A実験地とB実験地との距離は約250mである。

##### 1) 施設

##### A実験地

- (1) 注水井戸A 口径300mm、ストレーナーの位置148.5~164mと176.0~198.0m、揚水ポンプを設置。
- (2) 観測井戸 水位および水質の変動を観測する目的でA井戸の中心から5mと15mの位置にある。ストレーナーはA井戸と同一帯水層にある。

5m離れた観測井戸には小型の水中ポンプが設備され、試験中は連続揚水を行なって水質を観測した。

- (3) 注入水 深度15mの井戸水。

##### B実験地

- (1) 注水井戸B 注水井戸Aから250mの距離にあり、Aと同一帯水層にストレーナーがある。
- (2) 観測井戸 なし。
- (3) 注入水 深度15mの井戸2眼、45mの井戸1眼、90mの井戸1眼の合計4眼の井戸水。

##### 2) 観測方法

- (1) 水位は、注水井戸・観測井戸に設置した触針水位計によって自記記録した。
- (2) 水質分析は、注水井戸・観測井戸・注入水用井戸について、 $\text{pH}$ ・ $\text{Fe}^{2+}$ ・ $\text{Cl}^-$ ・ $\text{Ca}^{2+}$ ・ $\text{Mg}^{2+}$ ・アルカリ度・濁度は現地で、 $\text{Mn}^{2+}$ ・ $\text{SO}_4^{2-}$ ・ $\text{Na}^+$ ・ $\text{K}^+$ などは実験室に持ちかえて行なった。

##### 3) 注水実験

A実験地では注水を40 $\text{m}^3/\text{h}$ の割合で行ない、水位変動と水質変化について観測を行なった。B実験地では注水を60 $\text{m}^3/\text{h}$ の割合で行ない、注入水の水質の相違による注水効果について実験を繰り返した。

##### 4) 注水帯水層と注入水の水質

本実験に用いた注水帯水層と注入水の水質は、表-1に示してある。注水井戸の水質はA・Bともに同じで、鉄・マンガン含有量は非常に少なく、いわゆる良質の類であった。

注入水の水質は、帯水層の深度によって非常に相違している。深度90mの井戸水の水質は注水井戸の水質とほぼ同じであり、深度45mの井戸水は溶存鉄・マンガンの含有量はかなり高いがその他の成分は注水井戸に近い水質であった。しかし、深度15mの井戸水は鉄・マンガンの含有量が極度に高く、またその他の成分もナトリウム・カリウムを除いて非常に多い、いわゆる悪水の類であった。

本実験では、注水帯水層と同一水質の水を注入した場合と異質の水を注入した場合における注水効果の測定も研究目的の一つであった。しかし、鉄・マンガニオンは空気酸化によって水酸化物となって沈んで、これが帯水層の粒子間隙を塞いで目づまりの原因となることを考慮

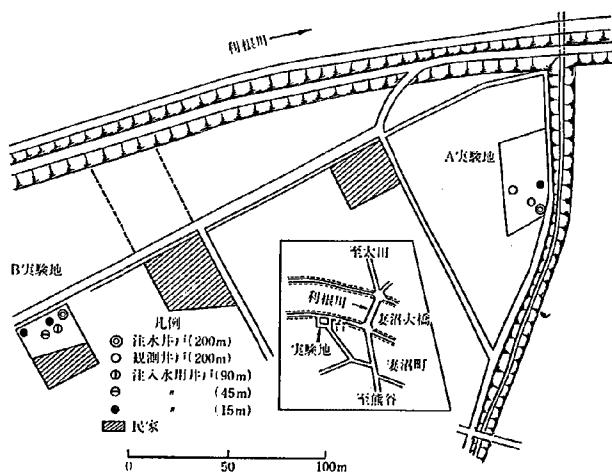


図-1 実験地の略図

表-1 注水帯水層と注入水の水質

|          |                  | pH  | アルカリ度<br>CaCO <sub>3</sub> ppm | Cl <sup>-</sup> ppm | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ppm | Ca <sup>2+</sup> ppm | Mg <sup>2+</sup> ppm | Na <sup>+</sup> ppm | K <sup>+</sup> ppm | Mn <sup>2+</sup> ppm | Fe <sup>2+</sup> ppm |
|----------|------------------|-----|--------------------------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| A<br>実験地 | 注水帯水層<br>(200 m) | 7.8 | 95.0                           | 14.2                | 2.8                               | 20.3                 | 6.1                  | 17.5                | 2.1                | 0.08                 | 0.08                 |
|          | 注 入 水<br>(15 m)  | 6.9 | 148.5                          | 22.0                | 35.3                              | 41.6                 | 14.4                 | 18.1                | 2.9                | 2.27                 | 4.54                 |
| B<br>実験地 | 注水帯水層<br>(200 m) | 7.7 | 99.0                           | 13.6                | 1.6                               | 22.3                 | 5.6                  | 17.3                | 2.8                | 0.13                 | 0.16                 |
|          | 注 入 水<br>(15 m)  | 6.7 | 111.0                          | 36.3                | 164.8                             | 69.5                 | 23.8                 | 21.4                | 5.0                | 4.12                 | 3.88                 |
|          | 注水帯水層<br>(45 m)  | 7.3 | 85.0                           | 9.0                 | 8.1                               | 22.1                 | 6.0                  | 10.6                | 2.4                | 0.64                 | 1.14                 |
|          | 注 入 水<br>(90 m)  | 7.7 | 87.0                           | 10.8                | 2.0                               | 18.1                 | 5.8                  | 14.1                | 2.4                | 0.14                 | 0.14                 |

して、注水井戸内では注水管を水面以下に挿入して注入水が空気と直接接しないようにし、注入水用井戸から注水井戸までの管路では空気が管内に入らないよう、極力努めた。

### 注水の結果と考察

#### 1) 水質のわるい水注入したときの目づまりと水質変化

##### (1) 目づまり

注水井戸の目づまりは、異常な水位上昇という形であられる。井戸に注水すると一般的な傾向として、水位は注水開始直後には急上昇するが、ある時間経過するとほぼ平衡状態に達し、その後はわずかな上昇を続ける。このような水位変動は、ちょうど揚水中の井戸を停止した後の水位上昇に似ている。注水開始後の水位と経過時間の値を片対数グラフに図示すると、両者の関係はゆるやかな勾配をもつ直線になる。目づまりの発生はこの直線が曲線となり、勾配が著しく増大することによって知ることができる。

また、目づまりの度合を計る尺度として、比注水量 (Specific Injection Rate) が用いられる。これは注水井戸内の水位を 1 m 上昇させるのに必要な注水量で、次の式によって計算される。なお、井戸の湧水能力を示す比湧水 (出) 量とは、水理学では同一とみなされている。

$$\text{比注水量 (m}^3/\text{h/m)} = \frac{\text{注水量 (m}^3/\text{h)}}{\text{上昇水位 (m)}}$$

図-2 は、注水井戸 A で行なった 4 回の注水試験における水位変動を示したものである。この図で分かるように、水位は注水開始後 30 分間ぐらひは急上昇し、以後はほぼ平衡状態を保つ。そして、井戸に目づまりが発生したことを暗示する水位上昇の変移点があらわれ、ふたたび水位は急勾配で上昇する。変移点があらわれる時間は、注水試験を繰り返すごとに短くなっている。すなわち、その時間は 1 回目に約 50 日、2 回目に 4 日、3 回目に 3 日、4 回目に 2 日となっている。また、比注水

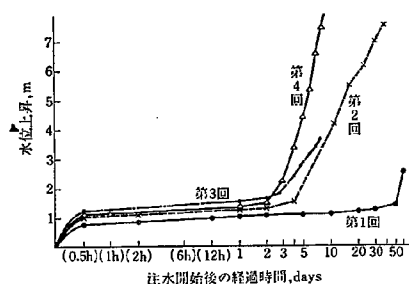


図-2 注水井戸 A の注水試験における時間水位上昇曲線図

量で注水能力の低下で示すと、表-2 のようになる。注水終了時の値は、注水時間がそれぞれ異なるので厳密な意味では比較の対象にはならないと考えられるが、7 日後の値は注水井戸の目づまり状態をよく示している。

##### (2) 水質変化

A 実験地において悪水質の地下水を注入することによって起こる帯水層中の水質変化を、注水井戸 A から 5 m の距離にあり、注水井戸 A と同一位置にストレーナーをもつ観測井戸によって観測した。分析結果のうち、Ca<sup>2+</sup>・Cl<sup>-</sup>・Fe<sup>2+</sup>・Mn<sup>2+</sup> の 4 成分のみについて、時間的変化を図-3 に示した。なおここには省略したが、アルカリ度は Ca<sup>2+</sup> と、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> は Cl<sup>-</sup> と全く同じ変化を示している。

注水帯水層の水質と注入水である深度 15 m 井戸水の水質は、表-1 に示したように非常に相違している。注入水は各成分とも注水帯水層に比べ溶存量が非常に多い

表-2 注水井戸 A に 40 m<sup>3</sup>/h の割合で注水したときの比注水量の変化

|         | 1 時間後 | 7 日 後 | 注水終了時        |
|---------|-------|-------|--------------|
| 第 1 回試験 | 47.1  | 36.4  | 18.2 (61 日後) |
| 第 2 回   | 36.4  | 12.5  | 6.3 (34 日)   |
| 第 3 回   | 32.6  | 11.1  | 11.1 (7 日)   |
| 第 4 回   | 36.4  | 5.6   | 5.1 (8 日)    |

備考 井戸完成直後 1 時間後の比注水量は 50.6 m<sup>3</sup>/h/m

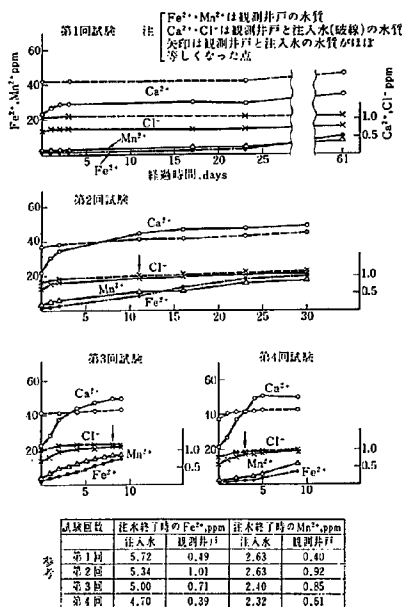


図3 A実験地での注水による水質の変化を示す図

ため、観測井戸の水質は注水によって各成分とも増加している。各成分の増加の時間的変化をみると、観測井戸における水質変化は注水開始後約 17 時間を経過して起こり始める。

第1回注水試験では、 $\text{Ca}^{2+} \cdot \text{Cl}^-$ とも注水開始後3日間は増加したが、その後50日までほとんど変化しなかった。そして両成分とも注水終了時まで、注水井戸と15m井戸の中間的な値であった。このことは、第1回注水試験では、注入水が注水帯水層内において非常によく希釈・拡散された結果と考えられる。しかし  $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{Mn}^{2+}$  は本図で読みとれるようにほとんど増加しなかった。このことは、これらの成分の大部分が帯水層内もしくは井戸ケーシングの周囲に沈んで失われたことを意味している。本注水試験における注水量から、両成分の沈でん量を計算してみると、注水量が総計 62,000  $\text{m}^3/\text{d}$  であったから、鉄は平均 5 ppm として約 300 kg、マンガンは平均 2 ppm として約 120 kg が沈でんしたことになる。

第2回注水試験は、前回試験終了後約1年を経過して行なわれ、本試験に先立って、注水井戸は毎時 40  $\text{m}^3$  の割合で 100 時間揚水した。本試験では各成分とも著しく増加し、 $\text{Ca}^{2+}$  は注水開始後 6 日、 $\text{Cl}^-$  は 11 日後にそれぞれ注入水とほぼ同じ値となった。そして  $\text{Cl}^-$  はそ

の後はほぼ注入水と一致した値を維持したが、 $\text{Ca}^{2+}$  は注入水を大幅に上回る値となった。一方、 $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{Mn}^{2+}$  は前回に比べて増加しているが、注水の最終時でも 1 ppm に達せず、大部分は沈でんしたと考えられる。また、 $\text{Cl}^-$  はほとんど変化しない成分であり、これが注水開始後注入水と同一量になったことは、注入水が希釈されずにそのまま観測井戸で揚水されたと解釈される。さらに、 $\text{Ca}^{2+}$  の増加については、アルカリ度（大部分が  $\text{HCO}_3^-$ ）が全く同じ変化を示しており、前回の試験で注水された注入水中の  $\text{Ca}^{2+}$  が、pH の上昇、 $\text{CO}_2$  の減少などによって炭酸カルシウム ( $\text{CaCO}_3$ ) として沈でんし、これが本試験での注水によって、逆に pH の低下、 $\text{CO}_2$  の増加などから再溶解されたために生じたと考えられる。

第3回注水試験は、前回と同様に 40  $\text{m}^3/\text{h}$  の割合で注水井戸を揚水したあとに行なった。注水による水質変化の動向は第2回の試験時とまったく同じで、観測井戸の水質が注入水の水質と同じになる ( $\text{Cl}^-$  の値が同じになる) のは、注水開始後 7 日で、前回よりも早くなっている。

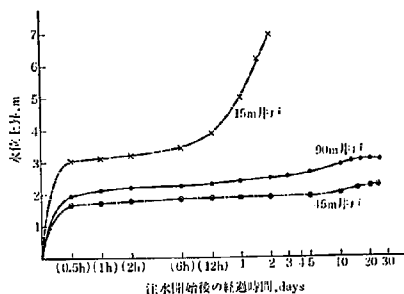
第4回注水試験においても、観測井戸の水質変化は前図と全く同様で、観測井戸の水質が注入水の水質と同じになるのが注水開始後 5 日とさらに早まっている。

以上のように、水質変化の傾向は第1回注水試験時を除いては第2回から第4回までほぼ同一で、かつ観測井戸の水質が注入水と同じになる時間が注水試験の回数を重ねるたびに早まってきた。この原因は、第1回において、 $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{Mn}^{2+}$  が帯水層および注水井戸の周辺に沈でんして目づまりを生じたことにあると考えられる。それ以後の試験時においては、事前の揚水によっていくらかの沈でん物を除去したものの完全には排除できなかったもので、注入水が帯水層内で十分に希釈・拡散されず、さらに試験を重ねるたびに沈でん物が帯水層内に蓄積して、注入水は質的变化をしないでそのまま帯水層内を通過するようになったのであろう。

なお、本文においては A 実験地における実験例として、水質のわるい 15 m 井戸水を使用した時の水質変化について記述した。B 実験地においても悪水質の 15 m 井戸水を使用して同様の実験を試みたが、ここには観測井がないので、水質の変化は観測できなかった。しかし、比注水量の変動は A 実験地の場合と同じ傾向を示した。

## 2) 水質のよい水注入したときの目づまり

前項では  $\text{Fe}^{2+} \cdot \text{Mn}^{2+}$  の多い水注入したときにおける帯水層内での水質変化と目づまりとが関係あることを述べたが、B 実験地には水質の異なる 3 種類の注入水があるので、水質の相違が目づまりにどのように影響する



図—4 水質の相違による注水井戸Bの時間水位上昇曲線図

かについて記述する。

図—4 は、水質の異なる 15 m、45 m、90 m の井戸水をそれぞれ 60 m<sup>3</sup>/h の割合で注入した場合の水位上昇を示した図である。ただし、注水前における井戸の状態—たとえば目づまりの程度、静水位、付辺の井戸の汲み上げによる干渉の度合などが同一ではないから、厳密な比較にはならないが、注入水の水質によって目づまりの発生が異なる傾向は明瞭にあらわれている。

深度 90 m の注入水は、水質が注水井戸の水質とほとんど同じでかつ  $\text{Fe}^{2+}$ ・ $\text{Mn}^{2+}$  の含有量も少ない。この水を注入すると、約 5 日後に水位が若干上昇するが 13 日後からふたたび安定状態を保ち、注水実験の 25 日間を通じて目立った水位上昇はなかった。

深度 45 m の注入水の水質は、主成分が注水井戸と類似しているが、pH がやや低いことと  $\text{Fe}^{2+}$ ・ $\text{Mn}^{2+}$  がいくぶん多いことが相違している。この水を注入した結果、注水開始後 10 日間は水位の平衡状態がつづき、10 日後からわずかに水位の上昇が認められた。

深度 15 m の注入水の水質は  $\text{Fe}^{2+}$ ・ $\text{Mn}^{2+}$  に富み、遊離ガス\* を伴い、注水井戸の水質とはまったく異なっている。この水を注入した結果、注水開始後約 6 時間を経過して水位が上昇をはじめ、12 時間後には急激に上昇した。

このように、注入水の水質によって注水井戸の目づまりの起こり方が相違しており、本実験に関するかぎりでは、目づまり 発生の主原因は  $\text{Fe}^{2+}$  および  $\text{Mn}^{2+}$  であることが考察される。

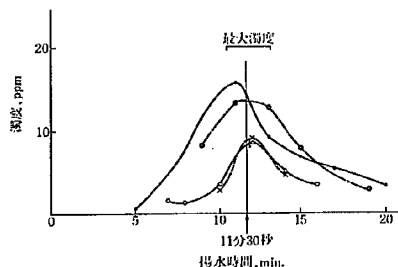
### 3) 鉄・マンガンの沈殿

注水試験に先だって注水井戸の揚水を行なうと、ある時間経過して濁度の高い水が排出される。たとえば注水井戸 A について 67 m<sup>3</sup>/h の割合で揚水すると、揚水開

始後 9 分経過すると濁水が出はじめ、10~12 分後には濁度が最大となり、以後濁りは急激に減少する。濁度の高い水に塩酸を加え加熱すると大部分は溶解し、黒色の沈でんがわずかに残る。前者は鉄の沈でん、後者はマンガンの沈でんであるから、濁りの主成分は鉄・マンガンの沈でん物であると解することができる。

注入水中の鉄は、二価イオンの形で存在している。二価鉄が沈でんするには酸素の供給が必要である。本実験地における注水井戸の水には、溶存酸素がほとんどなく、また注入水である深度 15 m の井戸水にも溶存酸素はほとんど含まれていない。設備の項で説明したように 15 m 井戸から注水井戸までの管路や注水井戸では注水管を水面下に入れるなどして、極力空気の混入を遮断した。しかしながら、A 実験地での観測井戸の水質分析によると鉄の大部分が沈でんしており、注水実験に先だって行なわれた注水井戸の揚水でえられた沈でん物は鉄・マンガンであることを考えると、15 m 井戸から注水井戸までの間で、管内に空気が混入していたとみるのが妥当であろう。また、B 実験地では、管路を通じて入る空気以外に注入水にも多量の遊離ガスが含まれていたもので、その中の酸素も鉄・マンガンの酸化沈でんに役立っていたのであろう。

つぎに鉄・マンガンの沈でん物が存在している箇所について検討する。図—5 は、注水井戸 B における揚水時間と濁度との関係を示したものである。揚水量 96 m<sup>3</sup>/h の割合で注水井戸 B を揚水すると、約 10~13 分後に濁度が最大となる。この時間は、井戸内の水量 (18.4 m<sup>3</sup>) を 96 m<sup>3</sup>/h (1.6 m<sup>3</sup>/min) の割合で汲み出して井戸を空にするのに要する時間 11 分 30 秒に相当する。すなわち、注水井戸内の水がなくなったときに濁度が最大となっている。これらのことを考え合わせると、鉄・マンガンの沈でん物は井戸のストレーナーの近くに集積していると推測される。注水井戸 A について行なった濁度の時間的変化の測定でも注水井戸 B と同じ結果がえられた。

図—5 注水井戸Bにおける揚水時間と濁度の関係を示す図 (揚水量 96 m<sup>3</sup>/h)

| * 井戸番号 | ガス量(l/m <sup>3</sup> ) | 組成(%) | O <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |
|--------|------------------------|-------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1号井    | 6.2                    |       | 17.72          | 70.35          | 11.93           | tr              |
| 2号井    | 2.5                    |       | 2.84           | 82.06          | 15.01           | tr              |

#### 4) 目づまりを起こした井戸の能力回復

注水井戸の能力が初期の頃の能力以下に低下したときには、能力を回復することが必要である。井戸の周辺に集積した沈でん物を除去して能力を回復する方法には、いくつかある。すなわち、一つは注水を短時間・長時間中断する、一つは短時間のポンプ揚水によって逆洗する、一つは長時間にわたって連続揚水する、といった機械的処置方法である。本実験においても、注水井戸が目づまりを起こした段階で行なった井戸能力の回復の方法は、揚水による逆洗の方法であった。上記の諸方法を参考にし、かつ揚水量・揚水時間・回数などの手法について繰り返し実験・考察を行なった結果、最初の段階では次のような手法が効果的であると考えられた。

- イ、揚水量は多いほどよい。
- ロ、連続揚水よりも断続揚水の方がすぐれている。
- ハ、断続揚水の時間は井戸内に溜っている水量の約2倍の水を汲み上げる時間でよい。
- ニ、断続揚水の回数は多いほどよい。
- ホ、揚水中断の時間は長いほどよい。
- ヘ、揚水の前に注水するとより一層効果的のようである。

この中で、とくに「ヘ」の手法は筆者の一人永井の発案によるもので、従来の断続揚水の繰り返しの間にわずかの注水を行なうことによって逆洗効果が極端に高められることが実験で証明できたことは、その後の注水実験に多大の貢献をもたらした。

図-6 は、注水井戸Bにおいて水質の悪い 15 m 井戸の水を注入したために生じた目づまりの解消に、「ヘ」の方法を用いて行なった結果を示したものである。ここでは、逆洗は 96 m<sup>3</sup>/h の割合で 30 分間の揚水を 14 回、注水は 60 m<sup>3</sup>/h の割合で 30 分間 3 回行なった。揚水 6 回目までの逆洗効果は毎回 12~13 cm の水位上昇で

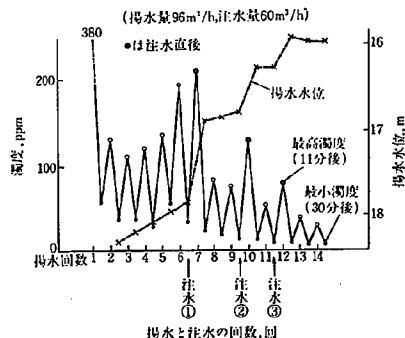


図-6 注水井戸Bにおける逆洗効果を示す図  
(15 m 井戸の水を注水した後)

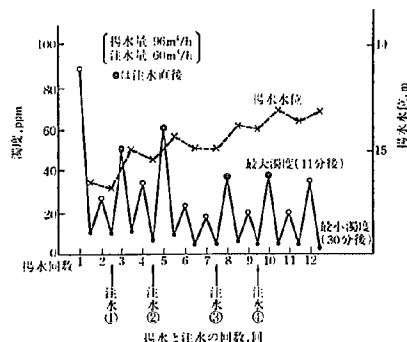


図-7 注水井戸Bにおける逆洗効果を示す図  
(45 m 井戸の水を注水した後)

あらわれたが、注水を加えた7回目の揚水では水位が一挙に 94 cm も上昇した。次の2回の揚水逆洗では水位上昇は合わせて 12 cm に止まったが、2回目の注水を行なった結果では 50 cm の上昇、また3回目の注水では 36 cm の水位上昇がみられた。

図-7 は、比較的水質のよい 45 m 井戸の水を注入した実験後の逆洗結果を示したものである。揚水量と注水量の割合および揚・注水時間は、前図の例と同様である。この図からも判読できるように、断続揚水だけでは水位の上昇は少なく、注水を加えると逆洗効果が大きい。なお、本図と前図とを比較すると、水質が相違すると発生する目づまりの度合いが異なることが理解できる。

図-8 は、注水井戸Aにおける逆洗の一例である。前例と異なる点は、揚・注水の時間・間隔・水量を変えてより効果的な逆洗の手法を見出そうとした点である。逆洗を開始する以前の注水井戸の状態は、60 m<sup>3</sup>/h の割合で計 5,000 m<sup>3</sup> を注水した結果ほとんど管頭まで井戸内水位が上昇していた。逆洗のための揚水は、13 回目までは 67 m<sup>3</sup>/h の割合で 20 分間、14 回以降は 15 分間、注水は 60 m<sup>3</sup>/h の割合で 12 回目までは 5 分間それ以

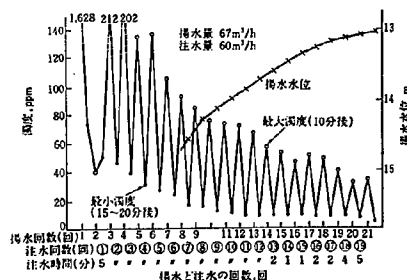


図-8 注水井戸Aにおける逆洗効果を示す図

降は 17 回目まで 1~2 分であった。揚水と注水の間隔は 5 分としたが、13~18 回はほぼ瞬間的に切り換えた。逆洗の効果は図から読みとれるように、断続揚水（初回および第 2 回）のみでは少なく、揚水・注水の繰り返しがすぐれている。この実験での揚水量は計 430 m<sup>3</sup>、注水量は 74 m<sup>3</sup>、所要時間は正味 12 時間であった。注水量に対して、目づまり解消のための汲み上げ量が多くては注水——人工地下水としての効果がうすらぐが、上記の例では 5,000 m<sup>3</sup> の注水量に対して差引き 7.1% 強の揚水量になっている。

これと同様の実験は、注水井戸 B についても行った。これらの実験結果をとりまとめると、揚・注水の組み合わせによる目づまり解消では、

イ、注水時間が 2 分間でも効果がある。

ロ、注水量が多いほど濁りがとれる。

ハ、揚・注水の間隔は短くても効果は変わらない。

ニ、揚水時間は目づまりの度合とも関係するが、さらに短縮することが可能である。

などの諸事項が明らかにされた。

以上の実験結果を考察すると、注水井戸の目づまりと井戸能力の回復は、次のように整理することができる。

イ、注水井戸の目づまりの主原因は、注入水に溶存する鉄・マンガン沈でんである。

ロ、上記の沈でん物は、井戸ストレーナーの周辺に多く集積している。

ハ、目づまりの原因は化学反応によって生じるが、井戸能力の回復は逆洗という機械的方法で処理できる。

ニ、逆洗は揚水と注水の組み合わせによって効果を高めることができる。

ホ、揚・注水の間隔は、瞬間的であっても効果に変わ

りがない。

ヘ、揚水量は多いほどよく、揚水時間は井戸内の水量の 2 倍程度の水量が排出される時間とするのが適当であろう。

ト、逆洗効果は、揚水々位の上昇で判定するのが妥当であろうが、濁度の測定も効果判定の一つに用いることができる。

チ、目づまりの原因には炭酸カルシウムの沈でんでも考えられたが、それを明らかにすることはできなかった。

## 結 論

人工地下水を直接法で行なう場合に避けられない「注水井戸の目づまり」の一つである注入水の化学成分によって発生する一時目づまりについて、妻沼実験地の例で述べた。そして、この実験地においては、目づまりは溶存鉄とマンガンの量が大きな影響をもっていること、また目づまりを解消して井戸能力を回復するには注水井戸について揚・注水の組み合わせによる機械的な手法がもっとも効果的であるとの結論をえた。

しかし、このほかの目づまりの原因、たとえば注入水に含まれる遊離ガス・注水管路を通して注入水とともに井戸内に運びこまれる空気の影響、揚・注水の繰り返しによっておこる永久目づまり等についても注目すべき結果をえている。これらについては、機会をえて発表する予定である。

## 参 考 文 献

- 1) Price, Don, Hart, D.H., and Foxworthy, B.L. (1965), Artificial recharge in Oregon and Washington, 1962: U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1594-C.
- 2) 村下敏夫・永井茂 (1972), 人工地下水用井戸の目づまり 日本地下水学会誌 14-2

#### 4. 水 資 源 と し て の 人 工 地 下 水

小 西 泰 次 郎

## 水資源としての人工地下水

小西泰次郎\*

### はじめに

人工地下水が日本に輸入されてからもうかなりの歳月を経ているが、これが一向に日本の土地に定着しえない理由は、結局のところ日本においては、つい先頃まで本当に水に困ることがなく、特に地下水については、揚水量が次第に多くなってそのための地下水位の低下による地盤沈下とか臨海部の地下水に海水が浸入してくる、といったような現象があらわれることが、諸外国に較べるとはるかに遅れていたということがおもな理由であるが、戦後しばらくしてから後の急激な経済生長に伴って大量の工業用水を地下水に依存したため、水の需給バランスが崩れて、地下水の汲上げ量はその補給量をはるかに上回るようになった結果、地下水収支のバランスが崩れて地下水による公害といわれるものが増えてきたが、その対策はいたづらに地下水の揚水規制にのみ走っている。人工地下水が地下水問題を考える柱の一つとしてそれらに結びつくにはまだ相当な時間がかかりそうである。

地質調査所において“人工地下水に関する研究”という名称で通産省工業技術院の特別研究として取り上げられたのは昭和42年度からであるが、それ以前に、昭和33年度から“地下還流試験研究”という名でこの問題に取り組んでいたもので、地質調査所としては、この前後二つの研究を通じて人工地下水の問題に関して、第一段階の研究を一応終了したといえることができる。

この人工地下水の研究は埼玉県の北部、熊谷市の北方に当る妻沼町地内の研究地において昭和42年度から昭和46年度まで5箇年間同一研究地において研究を継続してきたものであるが、一部巷間においては、妻沼における研究成果について誤り伝えられているようでもあるが、その地における研究は、私達この研究にたずさわってきた者としては、この段階における研究としての成果は、いささか自画自讃のようにもとれるが、まことに輝かしい成功の記録を得たと思っている。もちろんさきに

述べたように、ここで行なわれた実験研究は第一段階のものであり、これで十分とも、またこれで研究のすべてを終了したとも考えてはいない。たとえば、この種研究として最も重要な事項の一つである注入水の問題にしても、最も一般的な河川水を注入水源とした研究は行なわれなかった。場所的にいえば、この研究地は利根川にかかる刀水橋の傍に位置しており、利根川右岸の堤防からはわずかに50mの距離にあり、当然注入水は利根川の水が最も近くかつ潤沢にあるわけであるが、しかし日本における河川行政の面倒さはそれにたずさわった方ならおわかりのように、利根川の表流水を、しかも堤防を越えて取水することは至難のわざなのである。それゆえ注入水は、水を注入する帯水層とは全く関係のない自由面地下水を、別の浅井戸から汲上げてこれを注入水とせざるをえなかったのである。また予算面での制約も大きく、ために施設にもまた観測にも不十分な面が多分にあったことはやむをえないことで、この研究に要した5箇年間の総予算額はわずか4,150万円、このうち実際に投入した額は3千数百万円に止まっているということなどを勘案すれば、私達はこの研究は成功裡に終了したと思うのである。

人工地下水にはいろいろの目的がある。さきにあげた地盤沈下、地下水の塩水下の予防およびその対策の一つとして一般的には考えられているし、またこのほかに地下水の補給という面などもあるが、ここでもう一つ提案したいのは“水資源としての人工地下水”である。水資源としてはいろいろの種類の水源が考えられるが、人工地下水はその一つとして将来は日本においても地下水による公害の防除とか、減っていく地下水の単なる補給とかに止まることなく、もっと積極的に水源の一つとしてクローズアップされるべきときであると考えられるので、本文では人工地下水および妻沼人工地下水研究地における概要などを紹介しつつ、水資源としての人工地下水について述べてご批判を仰ぎたいと考える。

\* 通産省・地質調査所・水資源課長・理博

## 人工地下水とは

人工地下水という言葉は、人工降雨、人工淡水に対応する言葉で、私はこの三者を新しい水資源のホープと考えてきた。このうち人工淡水は一般に 海水淡水化とか塩水淡水化とかいう名称で呼ばれているもので、これは周知のようにすでに実験研究の段階を終り今や完全に実用化の域に入っているということができ、今後わが国においてはますます発展していくものと思われる。一方、人工降雨の方は、まだまだ実験研究の段階をはず、その前途はなかなか予測し難いものがあるが、研究は着々と進んでいるようである。

人工地下水の進捗はちょうどこの両者の中間をいく段階にさしかかっているとみなすことができる。すなわち、実験研究が行なわれている一方、すでに小規模ながら実施にも移されているが、しかしいまだ実用の域には達しておらず、またいろいろの点において一部には人工地下水そのものに疑問をさしはさむ人さえいる。たとえば、なかには人工注入は地震の起こる原因になりはしないであろうかと心配する人もいるが、地震のエネルギーを左右するような人工地下水が行なわれるようなら、むしろ問題はあまりないとも考えられる。

人工地下水とは Artificial Recharge または Artificial Replenishment に相当する日本語を地質調査所で人工地下水というように使ったということで、他に人工涵養、人工補給ともいっているが、以下本文では Artificial Recharge に対応する日本語として 養沼研究地において研究開始に当たって用いた人工地下水という語を用いることにする。

人工地下水には二種類あり、一つは計画的な人工地下水で、いま一つは計画されざる、いうなれば計画外人工地下水または不計画人工地下水で、ここで取上げようとする人工地下水はもちろん計画的な人工地下水で、単に人工地下水といえ、これを指すものであるが、しかし計画されざる人工地下水というものの持つ意義は大きく、またこれは単にあらかじめ計画的に行なったものではないにもかかわらず、かなりの影響を地下水に与えているもので、自然に対して人為が加わる場合には、知らず知らずのうちにその影響が他に及ぶということの一つであり、また当然これとは逆に、計画外のマイナス効果があることも考えられるわけである。

人工地下水とは要するに何らかの方法を用いて水を地下の帯水層に送り込めばよいわけであるが、その帯水層にも、1) 浅い深い 2) それを構成する粒子などの種類、配列および諸性質など 3) 拡がりの具合、その連続および厚さ 4) そこに含まれている地下水の流動状

況および水質などの性状がいろいろ違う一方では、そこへの水の送り込み方も、また量も水質も違うので、したがって人工地下水の手法も違ってくる。

人工地下水の手法を大別すると次のようになる。

### 1 地表法 (拡水法)

- 1) 洪水法 (Flood method)
- 2) 溜池法 (Basin method)
- 3) 溝渠法 (Ditch or Furrow method)
- 4) 穴式法 (Pit method)

### 2 井戸法

- 1) 乾式井戸法 (Dry type well method)
- 2) 湿式井戸法 (Wet type well method)

なお、このほかこれらの中間のものも、またこれらを併用したものなどもあるが、大体以上のようにわけられ、これらについては、字句により諒解できると思われるので詳細については省略する。

## 工業用水と人工地下水

水の利用を大別すれば、上水道用水、農業用水および工業用水およびその他用水にわけられるが、上水道は民生上欠くことのできないものとして水取得の環境からいえば、絶対安全圏内にいるということが出来る。また農業用水は古来からの慣行水利権に守られ、また広大な農地から地下水を自由に汲み上げているが、しかし水の取得に最後にのり出した工業用水は、その立地上の制約などもあるために限られた地域内で水の取得に当らなければならない。地下水についてみれば、特定な地域で集中的に揚水を続けた結果、汲みすぎに起因する地盤沈下および臨海部の地下水に海水が浸入するといった事態を招いている。近年工業用水道の普及に伴って地下水の揚水が規制されているところもあるが、しかし全国的にみればこれも特に大規模な地盤沈下を起こしている地域に限られ、まだまだ工業用水を地下水でまかなっているところも多い。このような地域に対する人工地下水の役割は、この標題の水資源としての人工地下水というよりむしろ地下還流的な人工地下水としての役割を果たしているものである。すなわち、この場合は、地下水の水温の回収であり、また工場敷地内の限られた場所における水位の維持と回復を大きなねらいにしているわけである。それゆえ工業地帯における水の地下注入は、単に地下水の現状維持または地盤沈下や地下水の塩水化の防除の域を出ることはむずかしく、少なくとも水資源と称せられるようになるためには、人工地下水は工場地帯を離れて行なわなければならない、その真価を発揮することはむずかしいことになる。水資源としての人工地下水は、その用途はたとえ何になるにせよ同じことであるが、そこには水としての

価格の問題が生じてくる。工業用水は水単価の安いものしか使えないというような固定した考えをもっては——徐々にではあるが、こうした考えは多少変わってきているが、まだまだこのように考えている人の方が多い——人工地下水の水はコストの面でとうてい実用に供するには至らないであろう。

# 関東平野における人工地下水の可能性について —妻沼研究地における地質調査所の実験研究—

埼玉県大里郡妻沼町において地質調査所が行なった人工地下水に関する研究は、別に関東平野における人工地下水の可能性について研究したわけではなく、たまたま研究地が工場地帯を離れた関東平野の北部において行なわれたというだけであるが、水の注入実験に用いた帯水層は、関東平野の代表的な帯水層の一つでもあるので、はからずも関東平野における人工地下水の可能性について若干の知見をえたということである。

妻沼研究地は、埼玉県北部の熊谷市の北方に当る妻沼町地内において、地質調査所が昭和 42 年度から昭和 46 年度までの 5 箇年間にわゆる人工地下水の研究を行なったものである。これは純然たる実験研究で、人工地下水が地盤沈下を与える効果などについての直接的な調査研究はもちろん行っていない。図-1 に関東平野に

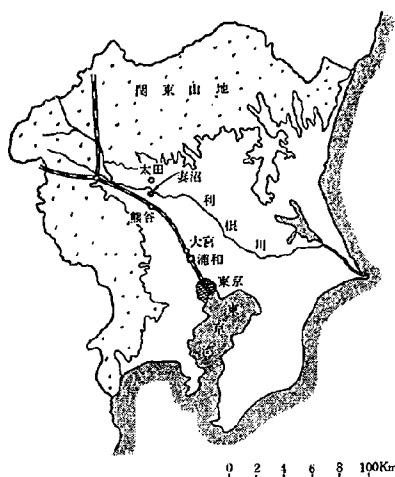


図-1 関東平野における妻沼研究地位置図

における位置図を、また図-2 および図-3 にそれぞれ A 地点および B 地点における注入井等の配置図を示し、図-4 に注入井および観測井の構造図を、また図-5 に注水観測系統図を示したので、これらによって実験方法等

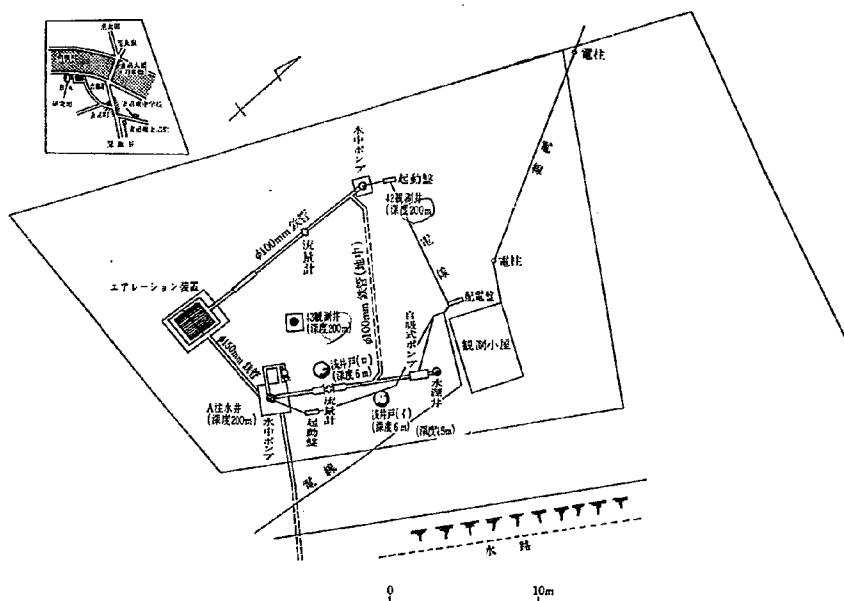


図-2 A 地点設備配置図

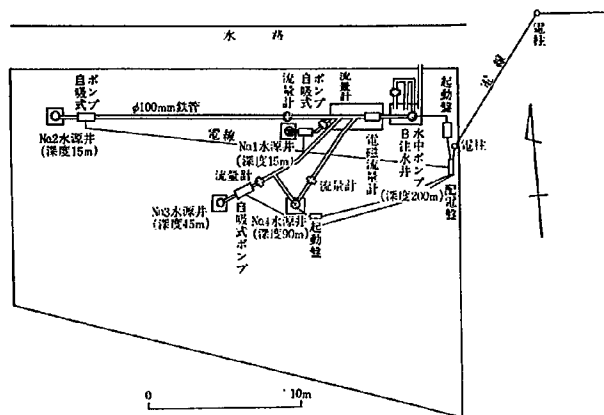


図-3 B 地点設備配置図

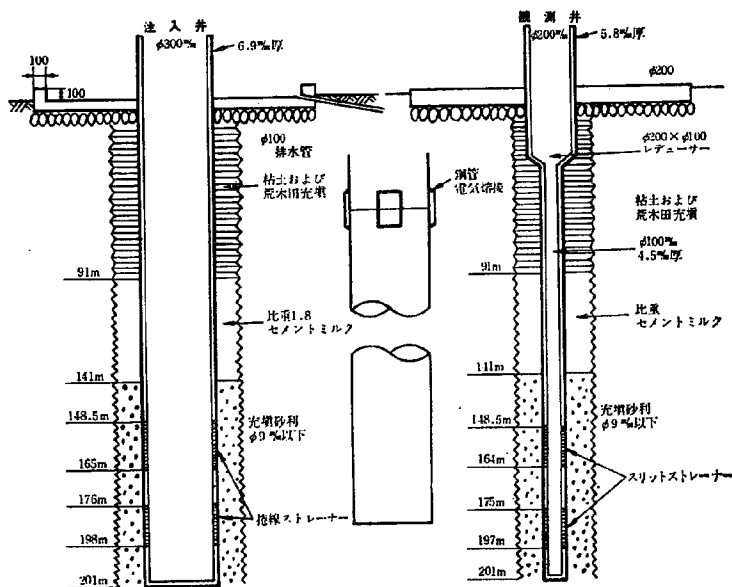


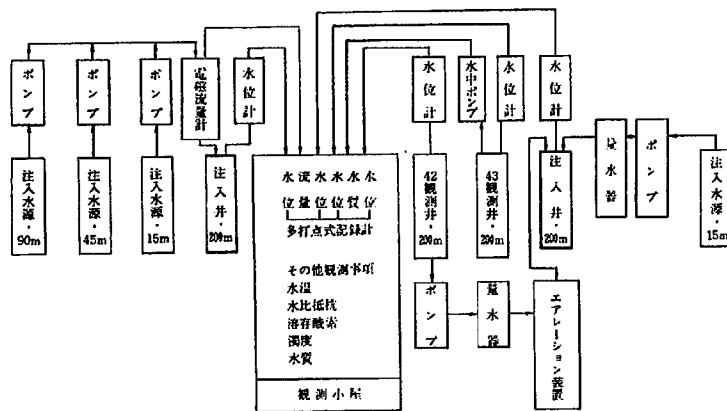
図-4 注入井および観測井構造図

の概略を諒解できると思う。

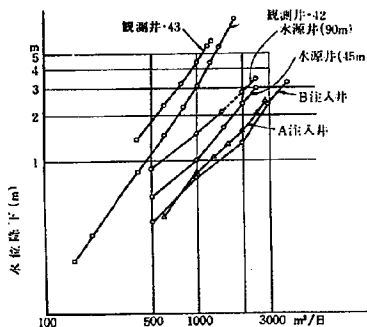
図-6 は各井戸の揚水試験による水位降下曲線で、この図によってもわかるように、同じ深度 200 m の井戸でも、わずかに離れた場所にもかわらず井戸構造などによって、揚水曲線にはかなりの差異が認められる。

A 地点における 3 回の注水試験結果は図-7 であるが、第 3 回の注水は長期連続注水としては初めてのもの

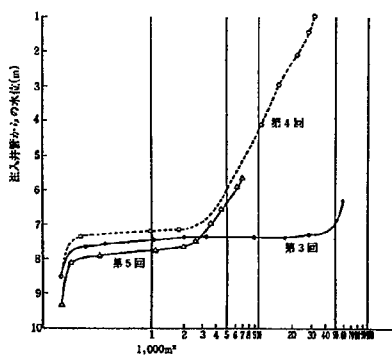
で、1 日 1,000 m<sup>3</sup> の割合で約 60 日間注水した結果、水位上昇の傾向がみられたが、事故のため注水を打ち切った。その後井戸回復のための逆流揚水を 1,000 m<sup>3</sup>/日の割合で実施して後に第 4 回の注水を行なったが、約 30 日で注水は管頭に達したので注水を停止した。次にまた 1,000 m<sup>3</sup>/日の逆流を行なって後、第 5 回の注水を行なったが、1 週間の注水で水位の急上昇をみている。この



図一五 妻沼研究地における注入および観測系統図



図一六 揚水量と水位降下曲線



図一七 A地点注入井における図一3, 4, 5, 注入時 (1,000 m³/日) の注水量と水位上昇との関係

実験において第5回注水時の静水位がかなり低下していることなどから考えて逆洗揚水が不完全であることがわかった。またこれはA地点ではないが、同じような条件にあるB地点において、B注入井へやはり深さ15mの浅井戸の水を注水したときのデータであるが、連続注水の結果目づまりを起こして水が管頭に達した後に逆洗揚水したときの、逆洗を開始してから経過時間による水質変化を表一1に示したが、鉄についてこれを見ると、B注入井のものと水質と同じになるには100時間を要している。各井戸の揚水試験を比較した図一6によれば、A・B両注入井の適当揚水量（いわゆる適正揚水量、正という字に若干疑問があり、適当とした）は2,000 m³/日前後であろうと予測されるので、その約1/2の1,000 m³/日程度の連続揚水によっては物理的な目づまりの解消と除去は、この水質分析の結果からみてもかなり長い時間をかけなければならないことは明らかで、もっと時間当りの揚水量を増さなければならないのであるが、A注入井については井戸口径とそれに入れるポンプとの関係で、これ以上に揚水量をあげることができなかったのも、これらの事情を勘案してB地点における注入井は容量の大きいポンプの口径に見合った井戸径とすることが必要であることがわかった。またこの地の浅層地下水は、鉄、硫酸等の溶存成分が非常に多く、注入水の水質としては初めから問題があった。鉄分の多い水を注水することは早期目づまりの最大の原因になるのではなからうかと懸念されたが、やはりその傾向は多分に認められたようであり、逆洗揚水時における濁度のほとんどは鉄分であることから、これは明らかであった。また表一2に第3回ないし第5回の試験時における水質の変化と

表-1 B注入井における15m水源井注水後揚水時の水質変化

| 項目 ppm | M-アルカリ度<br>CaCO <sub>3</sub> | Cl <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | 全 Fe | 全 Mn |
|--------|------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|------------------|-----------------|----------------|------|------|
| 揚水直後   | —                            | 15.0            | 48.9                          | 21.5             | 3.0              | 28.5            | 9.7            | 20.6 | 0.47 |
| 30分    | 92.5                         | 12.8            | 6.2                           | 22.7             | 6.7              | 16.2            | 3.2            | 2.64 | 0.41 |
| 1時間    | 92.5                         | 12.5            | 7.2                           | 23.0             | 6.5              | 15.2            | 3.1            | 1.78 | 0.41 |
| 3時間    | 93.5                         | 13.3            | 8.9                           | 23.3             | 7.0              | 15.5            | 3.2            | 0.67 | 0.41 |
| 10時間   | 96.5                         | 14.2            | 12.8                          | 24.8             | 7.5              | 16.3            | 3.2            | 0.27 | 0.47 |
| 100時間  | 98.0                         | 14.2            | 17.7                          | 27.7             | 8.1              | 17.2            | 3.3            | 0.14 | 0.51 |

\* 揚水は1,000 m<sup>3</sup>/日、時間は揚水開始後の経過時間、分析・地質調査所 永井 茂

表-2 A地点における注入水(15m水源井)の水質と観測井・43における注水前と注水終了時の水質変化

| 試験<br>月日<br>井戸<br>分析項目<br>単位 ppm | 第3回注水試験               |         |         | 第4回注水試験               |         |          | 第5回注水試験              |         |         |
|----------------------------------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|---------|----------|----------------------|---------|---------|
|                                  | 44・9・29               | 44・7・30 | 44・9・29 | 45・10・23              | 45・9・19 | 45・10・23 | 46・2・26              | 46・2・18 | 46・2・26 |
|                                  | 水源井                   | 観測井・43  | 注水終了時   | 水源井                   | 観測井・43  | 注水終了時    | 水源井                  | 観測井・43  | 注水終了時   |
| M-アルカリ度 CaCO <sub>3</sub>        | 149.0                 | 99.0    | 110.0   | 139.0                 | 97.5    | 141.5    | 150.0                | 100.0   | 150.5   |
| Cl <sup>-</sup>                  | 23.4                  | 13.6    | 12.8    | 22.7                  | 12.5    | 22.5     | 22.5                 | 14.2    | 21.7    |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>    | 52.0                  | 1.7     | 17.6    | 47.8                  | 3.5     | 47.6     | 44.3                 | 3.4     | 43.5    |
| Ca <sup>2+</sup>                 | 45.9                  | 23.7    | 34.3    | 45.2                  | 21.4    | 49.1     | 42.9                 | 22.5    | 49.1    |
| Mg <sup>2+</sup>                 | 15.7                  | 4.9     | 7.5     | 15.6                  | 6.9     | 15.7     | 16.0                 | 8.1     | 15.0    |
| Na <sup>+</sup>                  | 18.8                  | 15.3    | 16.1    | 17.3                  | 16.8    | 17.8     | 17.6                 | 17.7    | 19.4    |
| K <sup>+</sup>                   | 3.1                   | 2.5     | 2.6     | 3.2                   | 2.5     | 3.6      | 3.6                  | 2.8     | 3.9     |
| Fe <sup>2+</sup>                 | 5.72                  | 0.06    | 0.46    | 5.34                  | 0.09    | 1.01     | 5.04                 | 0.15    | 0.70    |
| Mn                               | 2.63                  | 0.09    | 0.23    | 2.63                  | 0.16    | 0.92     | 2.42                 | 0.16    | 0.82    |
| pH                               | —                     | 7.7     | 7.2     | —                     | 7.7     | 7.0      | —                    | 7.6     | 7.1     |
| 総注水量                             | 61,000 m <sup>3</sup> |         |         | 32,700 m <sup>3</sup> |         |          | 7,024 m <sup>3</sup> |         |         |

分析 地質調査所 永井 茂

して、注入水水源井の最終時の水質と、注入井から5m離れた観測井の中に小型ポンプを入れて揚水した水の水質を示したが、第5回注水時には、鉄およびマンガン成分を除いては、ほとんど注入水と同じ水質になっている。この表で左欄に水源井とあるのは深さ15mの浅井戸で、注水開始前と終了時には水質は変化していくが、ここには最終時のものをのせた。観測井については、注水前とあるものは150~200mの深い帯水層の水質を示すものであるが、それが水源井の水を注水したことによって水質が変化したことを示している。第4回、第5回の注水試験においては、観測井43の注水前における水質も第3回に比べて鉄分などはかなり高くなっていることがわかる。

特に第5回注水試験においては、鉄およびマンガンを除いては注入水と最終的な観測井の水との水質の違いはほとんどなくなっている。

B地点はA地点から直距離約250m離れた場所に設けられ、B注入井は口径400mm、逆洗揚水用の水中ポンプは19kWの大型のものが設置され、100m<sup>3</sup>/時の揚水を可能にした。また注水用水源も、15m井、45m

井および90m井とし、水質の違う水を注水できるように配慮した。昭和46年に行なった注水試験結果を表-3に、またB地点の各井戸の水質を表-4に示した。これら一連の試験により、この場所においては注水量は40m<sup>3</sup>/時では少なすぎ、また80m<sup>3</sup>/時はやや過大であると思われたので、その中間の60m<sup>3</sup>/時(約1,500m<sup>3</sup>/日)程度が適当であると判断した。これは、この井戸の適当揚水量に対して約2/3位に当り、1井当りの注水の一応のメドとしては、この位の水量がよいのではないかと考えられるが、地層の条件などによっても違ってくることはもちろんであるから、人工注入を行なうに当たって、すべての場所でこれが当てはまるとまではいかないものの、関東平野における被圧帯水層に対する一応の標準ともみることができないのではないかと考えている。

この表-3においては、昭和46年7月までのものをややくわしくのせてあり、その後のものについては都合により概略に止まっているが、その後も各種水源井を用いた注水と、逆洗揚水として100m<sup>3</sup>/時による断続揚水を行ない、またその時間を変えるなどして行なってきたが、さらに断続揚水の前に若干の注水を行なうことによ

表-3 B地点において昭和46年夏までに行なった注水試験

| 注水前の揚水                     |                                 |                           |                      | 注水試験 |                      |                            |                 |                           |                    |                                  |             | 比注水量 |      |           |  |
|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|----------------------|------|----------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------|------|------|-----------|--|
| 揚水量<br>(m <sup>3</sup> /h) | 揚水時間<br>(h)                     | 総揚水量<br>(m <sup>3</sup> ) | 揚水方法                 | 実施月日 | 注入水用<br>水源井の<br>深度   | 注水量<br>(m <sup>3</sup> /h) | 注水<br>時間<br>(h) | 総注水量<br>(m <sup>3</sup> ) | 注水前の<br>静水位<br>(m) | 注水に<br>よる注<br>入井の<br>水位上<br>昇(m) | 注水の1<br>時間後 | 3時間後 | 6時間後 | 注水終了<br>時 |  |
| 40                         | 100                             | 4,000                     | 連続揚水                 | 2月4日 | 15m井                 | 80                         | 57              | 4,550                     | 9.8                | 7.45                             | 16.3        | 15.1 | 14.1 | 13.1      |  |
| 80                         | 14                              | 1,120                     | do                   | 2・8  | do                   | 80                         | 24              | 1,920                     | 10.05              | 7.85                             | 16.8        | 15.9 | 14.8 | 10.2      |  |
| 80                         | 12                              | 960                       | do                   | 2・10 | do                   | 80                         | 6               | 400                       | 10.15              | 7.50                             | 11.8        | 11.3 | 10.7 | 10.7      |  |
| 80                         | 12                              | 960                       | do                   | 2・11 | do                   | 80                         | 6               | 400                       | 10.25              | 7.50                             | 11.9        | 11.3 | 10.7 | 10.7      |  |
| 80                         | 6                               | 480                       | do                   | 2・12 | do                   | 80                         | 6               | 400                       | 10.20              | 7.85                             | 11.6        | 11.0 | 10.2 | 10.2      |  |
| 80                         | 3                               | 240                       | do                   | 2・13 | do                   | 80                         | 6               | 400                       | 10.15              | 8.75                             | 10.7        | 10.0 | 8.2  | 8.2       |  |
| 80                         | 90                              | 7,200                     | do                   | 3.4  | 90m井                 | 40                         | 72              | 2,880                     | 10.06              | 4.55                             | 18.8        | 18.2 | 17.4 | 8.8       |  |
| 40                         | 12                              | 480                       | do                   | 3.8  | do                   | 40                         | 48              | 1,920                     | 9.95               | 5.75                             | 13.6        | 12.0 | 11.1 | 6.96      |  |
| 40                         | 12                              | 480                       | do                   | 3.11 | do                   | 40                         | 24              | 960                       | 9.90               | 5.20                             | 8.7         | 8.6  | 8.3  | 7.7       |  |
| 40                         | 124                             | 4,960                     | do                   | 3.18 | do                   | 40                         | 72              | 2,880                     | 10.10              | 7.10                             | 9.1         | 8.6  | 8.2  | 5.63      |  |
| 80                         | 6                               | 480                       | do                   | 3.22 | do                   | 40                         | 48              | 1,920                     | 10.25              | 5.05                             | 16.0        | 15.1 | 14.0 | 7.92      |  |
| 100                        | 2.5                             | 250                       | 断続                   | 3.24 | do                   | 40                         | 17              | 680                       | 10.40              | 2.00                             | 24.2        | 23.4 | 21.2 | 20.0      |  |
| 100                        | 4.5                             | 450                       | 50分揚水<br>10分停止<br>7回 | 6.18 | do                   | 60                         | 114             | 6,840                     | 10.64              | 7.50                             | 23.0        | 21.4 | 20.3 | 8.0       |  |
| 100                        | 6.6                             | 670                       | 8回                   | 6.30 | do                   | 60                         | 150             | 9,000                     | 10.92              | 4.80                             | 21.5        | 20.9 | 20.0 | 12.5      |  |
| 100                        | 3.3                             | 333                       | 4回                   | 7.11 | do                   | 60                         | 140             | 8,400                     | 10.92              | 3.4                              | 23.0        | 22.0 | 21.0 | 17.6      |  |
| 100                        | 3.3                             | 333                       | 4回                   | 7.20 | do                   | 60                         | 528+            | 31,680+                   | 10.92              | 3.1                              | 26.0        | 25.0 | 24.7 | —         |  |
| 100                        | 断続揚水、30分揚水、10分停止、揚水前に若干の注水を加える。 |                           |                      | 8月以降 | 90m井<br>45m井<br>15m井 | 60                         |                 |                           |                    |                                  |             |      |      |           |  |

表-4 菱沼研究地の地下水の水質 分析・地質調査所 永井 茂

| 地 点 別                                   | A 地 点          |                |                    | B 地 点                 |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------|----------------|----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 井 戸 種 類                                 | 注 入 井          | 観測井・43         | 水 源 井              | 注 入 井                 | 水 源 井                 | 水 源 井                 | 水 源 井                 | 水 源 井                 |
| 井戸別・深度 m                                | A 注入井<br>200 m | 観 測 井<br>200 m | 水 源 井<br>No.1・15 m | B 注入井<br>200 m        | 水 源 井<br>No.1・15 m    | 水 源 井<br>No.2・15 m    | 水 源 井<br>No.3・45 m    | 水 源 井<br>No.4・90 m    |
| 採水年月日                                   | 44.1.20        | 44.1.20        | 44.2.19            | 44.12.23              | 44.12.18              | 44.12.18              | 45.11.17              | 46.3.23               |
| 分析項目                                    |                |                |                    |                       |                       |                       |                       |                       |
| M アルカリ度 ppm                             | 96.0           | 96.5           | 136.6              | 99.0                  | 103.5                 | 110.0                 | 85.0                  | 87.0                  |
| 塩 素 イ オ ン Cl <sup>-</sup>               | 14.2           | 14.9           | 17.0               | 13.6                  | 36.3                  | 37.4                  | 9.0                   | 10.8                  |
| 硫 酸 イ オ ン SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 2.8            | 3.0            | 29.1               | 5.0                   | 152.5                 | 142.4                 | 8.1                   | 2.0                   |
| カルシウムイオン Ca <sup>2+</sup>               | 20.3           | 20.2           | 40.2               | 22.7                  | 68.6                  | 71.9                  | 22.1                  | 18.1                  |
| マグネシウムイオン Mg <sup>2+</sup>              | 6.1            | 6.0            | 12.9               | 5.3                   | 24.0                  | 24.2                  | 6.0                   | 5.8                   |
| ナトリウムイオン Na <sup>+</sup>                | 17.5           | 17.0           | 12.9               | 17.5                  | 20.6                  | 22.8                  | 10.6                  | 14.1                  |
| カリウムイオン K <sup>+</sup>                  | 2.1            | 2.2            | 4.2                | 2.4                   | 4.9                   | 5.1                   | 2.4                   | 2.4                   |
| 全 鉄 イ オ ン Fe                            | 0.08           | 0.07           | 3.40               | Fe <sup>2+</sup> 0.14 | Fe <sup>2+</sup> 3.52 | Fe <sup>2+</sup> 2.76 | Fe <sup>2+</sup> 1.14 | Fe <sup>2+</sup> 0.14 |
| マンガンイオン Mn <sup>2+</sup>                | 0.08           | 0.06           | 2.44               | 0.05                  | 4.00                  | 4.85                  | 0.64                  | 0.14                  |
| pH                                      | 7.8            | 7.6            | 6.9                | 7.7                   | 6.7                   | 6.7                   | 7.3                   | 7.7                   |

り、逆洗効果をより一層上げることができるとわかった。これらの方法を組合せて試験を行なったが、このように目づまり解消のための逆洗効果を高くしようとすれば必然的に帯水層の細砂をも揚げる こと にもなり、これらについては帯水層の状態を破壊しないように十分配慮しなければならないと考えている。

妻沼の研究地において最後に行なった試験は注入水に空気が混入する時の問題で、従来の試験は水源井から直接注入井に水を注入しているの、その間注入水はほとんど空気に接触しない状態を保ってきたものであるが、一般的な水としては空気にふれた。いわゆる溶存酸素を十分に含んだ水が注入水として考えられるので、そのために注水の途中において噴霧式のエアレーション装置を通して、溶存酸素を含んだ水を注水に用いた。この結果については、なお検討中で若干の影響はたしかに現われたようであるが、これが注水に対して決定的な否定的要素とはならないようである。

妻沼研究地における5箇年間の人工地下水の実験研究を省みて感ずることは、この研究は日本においてはやっと結についたばかりで、まだまだやるべき研究は多く残っており、一応の研究が終了した現在、今後どのようなことを如何にやるべきかということ整理している段階で、データの整理もまだ手をつけたばかりで、まとめの段階には達していないが、気がついたおもな事項を列記すると次のようになる。

1. 研究地の選定は相当慎重に行なったが、諸般の事情を勘案すれば、概ね満足すべきものであったと考える。

2. 注入井の構造は、ストレーナー部分に砂利充填を施し、それより上はセメントミルクで遮水したが、砂利充填の方法、効果等については、今回は A、B 井とも同一規格を用いたのでその可否および効果はわからないが、井戸側管近くの砂利を充填した部分において、目づまりのかなりの部分が起っているとみなされることから、砂利の粒子の大きさ、形状およびその配列について検討する必要がある。

3. ストレーナーは開孔率 14% の丸穴線巻のものをを用いたが、普通の短冊切のものより優れていると思われる、さらに大きな能率のよい特殊スクリーンを用いることも考えられる。また後々の維持、洗浄などを行なう関係もあり、ストレーナーについてはなお一層検討を要する。

4. 以上の2および3の検討のため、注入井側管の外壁に沿っておよび充填砂利の最も外側に注入井と同じ深さの水位観測の可能な管を布設することが望ましい。

5. 注入水については、注入する帯水層の地下水と同

じかまたは似たような性質の水を注入するときは目づまりも少なく、注水が順調に行なえるので、このような水が望ましく、水質的に非常にかけはなれた性質の水を注入することは、地層内におけるいわゆる拒絶反応の現象も考えられ、注水に当って注入水の水処理を行なって注入する場合には、特にこの点を配慮することが必要となろう。

6. 注入水の溶存酸素については、今回はあまりはつきりした結論は得られなかったが、空気の混入はできるだけさせた方がよく、特に気泡の混入は目づまりの原因になる。

7. 注入水の水温についても、注入帯水層原水の水温に近いものが望ましい。

8. 注入水の水量は、経済的な面からみると単位時間当たり多いほどよいわけで、この限度を決めることは最も重要なことの一つであるが、一般的にあてはまる一応のメドとして、注入井の揚水試験における適当揚水量のほぼ 2/3 位が限度で、それより多くなると注入水量としてはやや過大になり、いろいろの面で障害が起こるものと考えられるが、それらは比注水量などの試験を経て決定されるべきものとする。

9. 目づまりの原因はいろいろ考えられるが、実際的にはその機構は推測に止まり、むしろ目づまりを除去して井戸機能を回復させることが必要で、そのために逆洗揚水が行なわれる。

10. 井戸回復のための逆洗は、その揚水量としては少なくとも適当揚水量または若干それを上回る水量が必要で、揚水はたとえば 30 分揚水して 10 分停止というような断続揚水とし、その組合せを何回も行ない、揚水後の濁度の減少、静水位の回復などにより目づまりの解消の判定を行ない、また要すれば揚水の前に若干の注水を行なえば、さらに逆洗の効果を高めることができる。ただし、この際帯水層中の細砂などが一緒に上るので注意が必要である。

11. 目づまりの除去を化学的処理で行なうことも考えられるが、経済的にみて薬品代がかさみ、また帯水層中に特殊な薬品を注入することになるので問題があり、現時点では積極的にこれを用いられることはないようである。

ただし、ストレーナーの清掃にはしばしばある種の薬品が用いられるが、これは量が少ないので問題にならない。

12. 人工地下水の経済性については、妻沼の実験によっても結論づけられないが、上水道水のうちの単価の高いものをもって比較すれば、水の値段として十分競走に耐えるものとする。

13. 妻沼の実験における注入水は井戸水のみ用いたが、表流水などを処理し、その経済性の限度で処理水の水質、水量、費用などからきめる調査は今回行なうことができなかったが、次の機会には是非行なうべきものと考ええる。

#### 現段階における人工地下水

妻沼における人工地下水の研究を行なっていた段階で、日本における人工地下水はどのような位置にあるかと眺めてみたが、水資源に関するとり上げられ方は以前とはかなり変わってきたようであるが、依然としてすべての面において人々の関心は薄いことがわかった。とりわけ人工地下水などというものは散発的に取り上げられては、またいつの間にか消えてしまうのが現状である。たとえば、政府機関の調査研究にしても各省がバラバラの調査を実施し、その間には何の連繫も保たれていない。そしてそのまとまった成果でさえも、これにたずさわる人々の役に立つようにはなっていない。妻沼で行なった私達の実験研究も、やがては同じ運命をたどろうとしているので、関係者一同としては、少しでも人工地下水を大勢の人々に理解していただき、水資源のうちの占める割合はたとえ微少であろうとも、将来に望みを託してこれを盛上げていきたいと考えている。

欧米における人工地下水の状況はどうであろうか。

ヨーロッパの各地は、1900年代のはじめには、人工地下水が始まっているが、ここでは井戸を用いないで、地表面からの浸透を主にした、いわゆる鉱水法による地下水の人工的涵養補給が行なわれてきている。フランス、ドイツ、オランダあたりで盛んに用いられているのは主としてこの方法である。アメリカ合衆国では、面積の広大さから、かなり大規模な地表からの水補給を主とした鉱水法が行なわれているとともに、井戸を通じて行なう方法も広く実施されている。アメリカ東海岸のカリフォルニア州ロスアンジェルスでは、大規模な水の地下注入により地下水に海水の浸入するのを防止し、また西海岸のニューヨーク州ロングアイランドでは、井戸による注入と雨水を空壕に導入しての人工地下水を行なっている。またこれらの研究は、合衆国地質調査所水資源局が受持ち、各州と協同で調査研究を進めており、また内陸部においてもさまざまな実験地とともに人工注入の実施を義務づけなどしており、人工地下水は実験の段階ではなく、もはや常識化しつつある。

日本において過去にどの位の人工地下水が行なわれたかを知るために、おもな注入井の分布図を図-8にのせた。この図は昨年夏、国際水文地質学会アジア地域会議が東京で開催され、その中の重要議題の一つとして人工

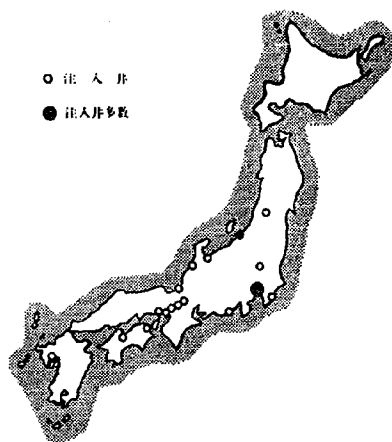


図-8 日本における注入井の分布図・(山本荘毅・IAH論文より)

地下水が取り上げられたとき、同会議の委員長山本荘毅博士がまとめられた図であるが、このなかには研究用およびごく小規模のものも含まれており、いわゆる人工地下水らしい人工地下水の施設は、日本においてはほとんどなかったといっても過言ではないので、それゆえにこそ今後は先進国に劣らない実績をあげていきたいと考えている。

#### 日本におけるこれからの人工地下水

それでは日本においてこれから人工地下水に関する問題をどのように考え、どのようにすべきかということについて検討してみる必要がある。

日本における地盤沈下は、東京、大阪をはじめ各地で起こっていて、目に見える地下水による公害として一般にもよく知られているが、一方地下において地下水が海水に浸入されているいわゆる塩水化の問題は、一般人には直接関係が少なく、たとえあったとしても少数の地下水を使っている人々が被害を受ける——少なくとも表面上は——に止まるために、今のところ一般的には大きな問題とはなっていない。日本において地下水が塩水化しているおもな地域の分布図は図-9であるが、このほかにも臨海地帯の地下水には程度の差こそあれ、塩水化の始まっている地域は各所にみられる。

このような地下水による公害地帯においては、ただ地下水の揚水を規制して水を汲み上げないということだけでは、それらの進行を食い止めるという現状の維持さえもむずかしく、将来はどうしても人工地下水の手法にまたなくては解決しえないであろう。



図一 日本における主な地下水の涵水化地域

これまで日本で行なわれた人工地下水は、このような事態に应付するような形で行なわれたものはほとんどなく、——地盤沈下防止のために企画されたものもあったが、実際に効果をあげることはできなかったものもある——もっぱら小規模の自社または工場内という程度の地下還流とも称すべき、いったん水を地下に注入してこれをまたいくらかも離れていない場所から汲み上げるといったもので、小範囲における地下水位の維持、地下水温の回復といった程度のものであった。そしてそこには、何の組織だった調査も研究もなく、またそれらの実施に当って反映するような国としての施策もとられていなかった。

農林省で行なった馬見ヶ崎や白石平野における実験も、また通産省で行なわれた地下還流や表流の研究も、実施の面においては全く国の施策として反映していない。

これは一つには、このような問題の究明に際して、金と時間をかけなかったことにもあると思われる。たとえば、アメリカ合衆国のアーカンサス州 Grand Prairie 地方で行なわれた人工地下水の研究は、1953 年（昭和 28 年）にアメリカ合衆国地質調査所により“帯水層に対する人工地下水の基礎的研究”として開始され、昭和 30 年から昭和 36 年までの 7 年間に 23 回のおもなテストと、その他これに付随したさまざまな研究も同時に行なっている。そしてこれらの研究は、米軍工兵隊、農業研究所、アーカンサス大学などとの共同研究で行なわれており、またアーカンサス州保健局、同地質調査所、同自然保護委員会そのほか団体および個人の有力な助力を得ている。したがって、これに投入した予算、組織、人員などはかなり膨大なものであったと想像される。

ひるがえって日本の現状を見れば、上水道は厚生省、農業用水は農林省、工業用水は通産省、下水は建設省と

いうようにおのおのその縄張りがあり、こと水に関する行政機構は全くばらばらであり、それらの横の連繫は全くとれておらず、その末端の研究機関である地質調査所をはじめ、このようなことを手にかけている各省の研究部門も、同じように横の連絡はとりにくく、わずかに研究機関に開いている科学技術庁の共同研究門はまことに狭き門であり、しかもまだこの問題については取上げられていない。

これからの日本における人工地下水は、どうしても横の大きな拡がりを持った、幅のある共同研究によって地下水問題を解決する一助にしていかなければならない。

当面する地下水公害問題の解決に当るものの一つとして人工地下水は、それに当らなければならないと考えるものであるが、それはそれとしてここにもう一つ、水資源としての人工地下水を考えてみたい。

#### 水資源としての人工地下水

表流における人工地下水の例などを述べたが、要は、関東平野に例をとるなら、ほんとうに地下の帯水層に水が入り、それが経済的にも十分耐えうるかどうかということになると思う。

水の  $1\text{ m}^3$  当りの単価はいくらになっているかというと、それは千差万別でなかなか握みにくい。工業用水道の基準料金は昭和 47 年度新規着工事業のうち、最も高い四大工業地帯をとっても  $9.5\text{ 円/m}^3$  に過ぎないし、また工場で汲み上げている地下水の単価は、これまた  $1\text{ m}^3$  数円という安価であって、水の原価としてはこれらは全く比較の基準にはならないものである。

上水道は一応独立採算制をとっており、また工業用水道の入っていない工場では、淡水としては表流水によるか地下水または上水道水を用いているが、前二者は水価としてはかなり安いのが普通で、人工地下水を水資源として比較する場合には、一応の目標として上水道の製造原価が問題になるものと思われる。

上水道の製造原価は、大正のはじめから上水道をひいているものもあり、その水価は一様ではないが平均製造原価として昭和 45 年度では六大都市のうち最高は  $47.75\text{ 円}$  であるが、六大都市は全国的にみてかなり安い方に入っており、製造費の全国平均は昭和 45 年に  $49.50\text{ 円}$ 、昭和 46 年に  $50.4\text{ 円}$  ともいわれているが、いずれにしても水の製造原価としては、高いものは  $60\sim 70\text{ 円}$  に達しているであろうことは容易に予想されることである。海水淡水化の造水原価が  $100\text{ 円/m}^3$  を割り、また高率の補助金のついた離島の小規模淡水化上水道が  $50\text{ 円/m}^3$  で配水されている現在、新規の水資源の製造原価は近く  $80\sim 100\text{ 円/m}^3$  に達することは間違

いないようである。

水資源としての人工地下水を取り扱う場合、コストの面からみて第一に問題になるのは連続的に長期間地下注入が可能であろうかということであろう。これは婁沼の研究地における実験の場合にも、最終的結論として求められるものであるが、これに対して私達人工地下水研究グループとしては「十分可能である」と答えるものである。ただし、これにはいくつかの条件がついての上であるが、要するに地下に水を注入すべき場所の選定を誤まらず、また注入する水を含めてその管理運営のよろしきを得れば、人工地下水は日本の平野においては十分可能なのである。婁沼の例を以てすれば、1井当り1日の注入量1,500 m<sup>3</sup>は十分可能で、場所によっては2,000 m<sup>3</sup>以上の可能性もあり、またその注入水の水質調整がよければ相当長期間の連続注入もできることがわかっている。

また連続注入による目づまりも、逆流揚水等の井戸回復の手段によって、わずかの費用で井戸をながもちさせて、井戸の老朽化ならびに目づまり除去に伴う費用を最少限度におさえることもできる。

人工地下水の手法を用いて新しい水資源とするために最も問題となるのは注入水の獲得であろう。この水の量と質が如何なるものになるかどうか、水資源としての人工地下水の成功への鍵をにぎっているということもできる。この水源として考えられるものには、1) 表流水 2) 貯水した水 3) 工場排水 4) 分流水等の雨水 5) 下水等処理水がある。

1) 表流水：表流水は水質が変化するし、特に降雨時には濁度が大きく大容量の水処理を行なう必要があり、また他の取水権との競合、農湯水の差が大きいなど種々な制約はあるが、これらをのり越えて表流水の余剰水は人工地下水の水源として積極的に活用されるべきである。

2) 貯水した水：ダムなどによる貯水した水は、地下注入に最も適した水源と思われる。常時注入水源とするとともに、特に豊水時には十分活用できる。

3) 工場排水：これによりまとまった多量の注入水用

の水を確保することは困難で、地下還流的な少量の場合とはともかく、多量の水質のよい水をまとめて取水しにくい欠点がある。

4) 分流水等の雨水：降水時の雨水を分流水または他の方法で注入することは、注入が降水時に限られるのが欠点で、また水量的に常時多量には期待できないが、注入水源として可能性がある。

5) 下水処理水：下水道の普及に伴い、かなり多量の下水処理水が発生し、また三次処理技術の発達と普及に伴い、この水を地下注入にも使える可能性もあるという段階に来ており、諸外国ではすでに実験研究的に注入を行なっているが、日本においてはまだその実験さえも行われていない状態で、早急にこの問題には手をつけていかなければならない。

結局のところ、地下注入の水源としては、貯水した水を用いることが最もよく、また妥当な方法と思われる。貯水した水は水質的にもある程度安定しており、また貯水をより有効に使う意味からもよいのではないかと考える。

しかし、必ずしも貯水された水にのみ依存することはできないので、表流水および雨水が注入水として使用できるときには、これらを注入水源とすることも考えられる。

水の問題は固定した考え方のみを以てしては問題は決して解決されない。この人工地下水の問題もその一つと考えている。注入水源のことにしても、水はまだどこかにあまっているはずで、これらを十二分に利用活用すべきで、従来の考え方から、表流水や貯水の水は手がつけられないと考えていたのでは到底問題は解決しない。考えは水の如く流動的にあらねばならない。

関東平野の北部地域に人工地下水用井戸群を掘さくして、これに表流水、貯水池からの水、さらに雨水などを注入して地下に十分貯溜するとともに、これを水資源として活用することができれば、人工地下水はこの第三の目的に対して十分その役割を果たすことができると考える。(47.6.30 稿)

## 5. 人工地下水注入井の基本的問題

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 紫 | 崎 | 達 | 雄 |
| 田 | 中 | 正 | 利 |
| 杉 | 山 |   | 明 |

# 人工地下水注入井の基本的問題

柴 崎 達 雄\*  
田 中 正 利\*\*  
杉 山 明\*\*\*

## 地下水を人工的につくる

地下水利用に伴う地盤沈下などの障害の発生の原因が、地下水の収支の赤字にあるとするならば、その解決策として、人工的に収支の赤字を解消させる方法も考えることができる。これは人工地下水強化策あるいは人工かん養法ともよばれているものである。

人工地下水強化策は、その目的として、かならずしも先に述べたような地下水障害対策だけが優先されてきたわけではない。つぎのような水資源の合理的利用の効果を期待して、行なわれてきたものである。

(i) 地下水量の増大……地下水盆の水の貯留量を増大させる。

(ii) 貯水……地表水と異なり、蒸発も少ないうえに流動速度も遅く、汚染される機会も少ないので、降水の多い時期に地下に貯水しておけば、ダムと同様な効果を期待できる。

(iii) 地下水温の調整……冬期に冷たい水を注入しておき、夏期に温水すれば、低温水を効果的に利用できる。

(iv) 水質の改良……水質の悪い潜水層の改良や、水質の不良な地表水を注入して地層でろ過させ、水質の改良を図ることができる。

(v) 海水侵入の防止……臨海部の地下水層の水圧を人為的にあげ、海水の侵入を防止する。

(vi) 地盤沈下の防止……潜水層の水圧を保持して、地盤沈下の進行を防止する。

(vii) 洪水調節……洪水の一部を地下に浸透させ、必要ときに揚水する。

これらの目的に応じて、具体的にはいろいろな方法がとられてきている。それらは大別して、地表からかん養を行なう「間接法」と、直接、水を地下水層中に注入する「直接法」とに分けられる。

人工地下水強化法は、1897年にスウェーデンのゲーテボルグで実用化されたものが最初といわれている。この方法は、河床や水河成の堆積層の上に溜池をつくり、地表水を地下水に転化させる、間接法に属する「溜池法」とよばれるものであった。

この種の発想は、古くから日本にもあり、「トシゴシの寒水は重たい」という<sup>ことわざ</sup>でも知られているように、寒中に長い時間をかけて溜池に貯めこんだ水は、池の周辺の地下に浸透して、予想外の水が灌漑期に引水できるといわれてきている。

この方法はその後、ドイツ、オランダ、フランス、アメリカなどに伝わり、1970年の調査によれば、32か国で人工地下水かん養法が実施または実験されている。とくにアメリカおよびイスラエルでは、大規模な人工地下水かん養システムが実用化されている。

日本では、1945年に京都大学農学部教授であった可知貫一氏によって、栃木県那須野ヶ原扇状地で間接法による地下水強化計画がたてられたことがあるが、実施までにはいたっていない。また、1939年には和達清夫氏らによって、地盤沈下対策の一つとして、地下水層へ水を人工的に導入し、水圧を保持する方法が提唱されたことがあるが、これも実現されたわけではない。

第二次大戦後、占領軍とともに来日したアメリカの地下

\* 東海大学海洋学部講師：静岡県清水市戸戸 1,000

\*\* 国際扶養株式会社地質海洋事業部：東京都目黒区旭ヶ丘 3-6-1

\*\*\* 株式会社アサノ建工名古屋支店：名古屋市中村区笹島町 1-222-1

水学者の指導によって、尾崎市の武庫川で、人工地下水注入井が実験的にさく井されて以来、各地で注入井が計画されてきている。しかし、表1にみられるように、いずれも小規模なもので、実験の範囲を出ていない。

わが国で、人工地下水かん養策として、直接法による注入井が試験的に採用されている理由は、一度汲上げた水を再度注入する還流方式がとられることと、地面に水をはって浸透を増進させる間接法を行なえるほど土地の余裕がないこと、間接法については、すでに水田がこの役割を果たしているからである。また、他水源水をわざわざ導水して注入するよりも、その水を直接利用したいという事情もあり、現状では還流方式による注入井法が採用されている。

地下水の汲上げ規制に比べて、人工地下水かん養は、水の高度利用という面で積極的な意義がある。しかし、この方法がわが国でまだ十分な実用の段階にいたっていない理由は、注入井についての技術的、経済的あるいは社会的な検討が、わが国の実情にそくして十分に行なわれていないにある。

問題を技術的な諸点にかぎってみても、注入効率をいかに持続させるか、あるいは注入に伴う地下水層の挙動はどうかなど、基本的な解明はけっして十分だとは思えない。また、技術的あるいは経済的にも実用性の高いと考えられる還流方式でも、冷却水を還流する場合、廃熱水をそのまま地下に注入すると、注入井の周辺の水温が上昇して

しまったり、冷却効果が減少したりする例が報告されている。

このような二次公害の発生を防止するためにも、また注入井の経済性に決定的な意味をもつ注入井の持続性を予測するためにも、注入井にまつ基本的な検討は軽視することはできない。さらに基礎的研究をぬきにして人工地下水かん養の効果だけを唱えることは、この方法のもつ積極的な意義を否定することにもなりかねない。

筆者らは、以上の考えにたつて10年ほど前から注入井の基礎的実験を進めてきている。ここでは、最近になって行なわれた人工地下水注入井についての基礎的実験の中から、いくつかの興味ある結果を取出して、関係者のご参考に供したい。なお、この研究は現在も多くの関係者とともに継続中のものであり、それらの資料を含めた最終的な結論は、いずれ別の機会に報告させていただく予定である。

#### 注入試験井の諸元

今回の試験に使用した注入試験井は、1973年2月、注入実験を目的に、神奈川県平塚市営大神作菜場に平塚市によって新設されたものである。井戸の仕様は口径 300mm、深度 80m、ストレーナ延長は 20m である。ストレーナ構造は N S T スクリーンを採用した。主注入層は、深度 50~75m の砂礫層であり、この地域での第 3 潜水層に対比される。この潜水層は平塚市街地では主要な採水層となつて

表 1 わが国における人工地下水強化の概要 (水収支研究グループ、地下水資源学による)

| 実施年   | 地 区 名        | 方 法      | 井 深*        | 径(本数)**       | 透 水 係 数                           | 平均かん養量                 | 注入水水源     | 対 策   | 実施地( )内は指導 |
|-------|--------------|----------|-------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|-----------|-------|------------|
| 1951  | 尾崎市武庫川左岸     | 井 戸 法    | 60m         | 500mm         | $3 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$ | 0.2m <sup>3</sup> /min | 表 流 水     | 地盤沈下  | 尾崎市(地調***) |
| 54~55 | 大阪市立大学       | 井 戸      | 35~40       | 150~350(4)    | —                                 | 0.04                   | 工業用水      | 大 阪 市 |            |
| 56    | 山形市          | 浸 透 池    | 10          | 1000          | —                                 | 1.2~1.4                | 農業用水      | 水位低下  | 山形県、山形市    |
| 59    | 赤城山砂川国有林     | 浸透池・井戸併用 | 12          | 2000          | —                                 | 0.3                    | 表 流 水     | 林 野 庁 |            |
| 60    | 新潟、帝石ガス井     | 井 戸      | 800         | 300           | $6.6 \sim 8.0 \times 10^{-1}$     | 1.4~2.5                | 還 元       | —     | 帝 石        |
| 60    | 東京、T B S ラジオ | 井 戸      | 90          | —             | —                                 | 0.7                    | —         | 地盤沈下  | (東京都)      |
| 60    | 東京、三友製薬      | 井 戸      | 60          | 300           | —                                 | 0.01                   | —         | 水位低下  | (地 調)      |
| 60    | 滋賀瀬田、東洋レーヨン  | 井 戸 (圧入) | 190         | 300           | —                                 | 1.8                    | —         | —     | —          |
| 60    | 大阪、武田薬品      | 井 戸      | 150         | 150(3)        | —                                 | 0.7                    | —         | —     | —          |
| 60    | 徳島、東邦レーヨン    | 井 戸      | 45          | 350           | —                                 | 1.0                    | —         | 温 水 化 | —          |
| 62    | 東京、保土ヶ谷化学    | 井 戸      | 100~220     | 250(2)        | —                                 | 0.4                    | —         | 水位低下  | —          |
| 62    | 新潟、直江津       | 井 戸      | 138         | —             | $3 \times 10^{-1}$                | 0.25~0.3               | —         | —     | —          |
|       | 新潟藤巻地区       | 井 戸 (圧入) | 271~620     | 150~225(6)    | —                                 | 1.0~2.0                | 表 流 水     | 地盤沈下  | —          |
| 60~66 | 佐賀、白石平野      | 井 戸 (圧入) | 155<br>70   | 150<br>100(2) | $1.5 \sim 2.5 \times 10^{-4}$     | 0.5<br>0.2             | 表 流 水 還 元 | —     | 農 林 省      |
| 63~64 | 山形、山形盆地      | 井 戸      | 60          | 200           | $4 \times 10^{-1}$                | 0.02                   | 農業用水      | 水位低下  | —          |
| 65    | 札幌、豊平川       | 井 戸 (圧入) | 100±        | 200(4)        | —                                 | 0.7                    | 還 元       | —     | 地 調        |
| 65~66 | 静岡、三保        | 井 戸 (圧入) | 45          | 200           | $2.5 \times 10^{-1}$              | 0.1                    | 工業用水      | 水位低下  | 農 林 省      |
| 65~66 | 香川、三豊        | 井 戸      | 30          | 400           | $4 \times 10^{-4}$                | 1.0                    | 工業用水      | 還 元   | —          |
|       | 山梨、塩山市       | 井 戸      | 1.6         | 1.5×10m       | —                                 | 0.1                    | 汚 井 戸 汚 水 | 水位低下  | —          |
| 66    | 静岡、大山河津      | 浸 透 池    | 10, 15, 200 | (3)           | —                                 | 0.3                    | 表 流 水     | 松 水   | 林 野 庁      |
| 66    | 大分、九重山       | 井 戸      | 1.0~1.8     | 1×20m         | —                                 | 0.1                    | —         | —     | —          |
| 66~67 | 京都西南部        | 井 戸      | 20<br>88    | 200<br>200    | 0.2~5×10 <sup>-1</sup>            | 0.5<br>0.1             | —         | —     | —          |
| 67    | 埼玉、妻沼        | 井 戸      | 15<br>90    | 300           | —                                 | 0.6~1.2                | 還 元       | 水位低下  | 地 調        |
| 68    | 東京、武蔵野       | 井 戸      | 68~11.0     | 600~800       | $2.5 \times 10^{-1}$              | 0.3                    | 水 道 水     | —     | —          |
| 69    | 新潟野々原        | 浸 井 戸    | 13          | 1500          | $5 \times 10^{-1}$                | 1.3                    | 表 流 水     | —     | 農 林 省      |
| 70~   | 福岡、教員、東洋紡    | 井 戸      | 90          | 300           | —                                 | 2.1                    | 還 元       | —     | 東洋紡・北園さく(京 |
| 71    | 金沢、紡績工場      | 井 戸      | 80          | 300           | —                                 | 1.0                    | —         | —     | 北園さく(京     |

\* 浸透池の場合は深さ \*\* 浸透池、溝渠法の場合は長さ×延長 \*\*\* 調査省地質調査所

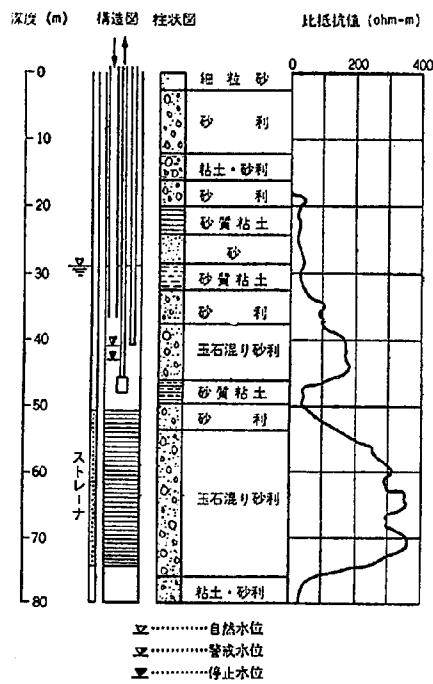


図 1 平塚市注入井戸の地質柱状図

いる。この主注入層の上下には砂質粘土および砂礫の互層が発達している。地表近くには、層厚 10m 程度の砂礫層がみられるが、この地層は不圧地下水を含む第 1 滞水層に對比される。

観測孔は、注入井側管の外壁に直接させて設置した。この観測孔は、注入井の内壁と外壁の水位を比較し、井戸損失を知るために設けたものである。

注入は自然注入とし、導入される注入水は直接空氣にふれさせることなく、同一滯水層に還流されるシステムを構成している。

図1は注入井の地質柱状図および注入井の構造を示したものである。

注入井の清掃と揚水試験のため、注入井の中に揚水ポンプを設置した。使用したポンプは、全揚程 50 m、揚水能力 1,000 l/min である。水位計は船針式水位計 (NA-R) を使用し、自記記録装置 (S-R-C) を観測小屋に設置した。注入試験井のすぐ近くにある既設の水源用浅井戸 (深度 5 m) にも水位計を設置し、深井戸と併せて浅井戸による注入試験も行なえるようなシステムとした。

これらの深井戸、浅井戸を組合わせていく通りの実験が行なえるようパルプを設置した。パルプの総数は9個、途中に量水計2個、水質試験用水サンプリング栓2個、圧

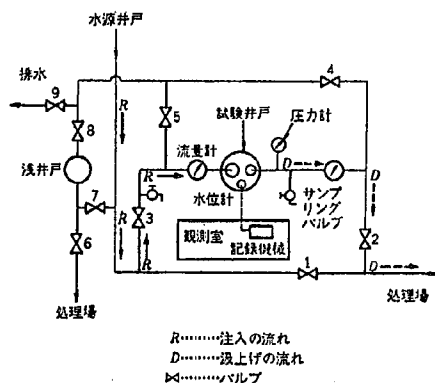


図 2 注入試験井戸のダイアグラム

力計、水温微変化センサー設置栓などを取付けた。図  
これらの配置を示したものである。

注入水源は約 170m 離れた既存の井戸の余水に求めた。揚水試験で汲上げた水は、作業場に導水し、処理用水として使用した。

今回の試験はあくまでも注入効果、注入の機構を調査するものであって、実際の焼熱処理の過程の実験は含まれていない。既存井戸の配置を極力利用して、実験に必要な費用を最小限に抑えた結果が、このような実験装置の配置となったものである。

## 試驗工程

注入試験の実施期間は、1973年6月から同年12月までである。次に示すものは、今回の試験で基本となった試験単位である。

- (1) 段階揚水試験 (step drawdown test, SDT)
- (2) 一定量揚水試験 (constant discharging test, CDT)
- (3) 段階注入試験 (step recharging test, SRT)
- (4) 一定量注入試験 (constant recharging test, CRT)

この4つのタイプを組合わせることで、いろいろな目的に応じた試験が行なえるようにした。図3はこの4タイプの基本パターンを図示したものである。

(1)のSDTは、90分5段階からなる段階揚水試験で、揚水による井戸効率を算定するためのものである。(2)のCDTは、井戸の清掃および一定揚水のもとの水位変化を、(3)のSRTは、90分5段階の注入試験で、注入による井戸効率の算定を、(4)のCRTは、一定量注入のもとの水位変化を調べるものである。

図3のそれぞれのパターンには、90分ごとの黒点が表示されているが、これは電気伝導度、水温を測定する時刻を示している。なお、揚水の場合は同時に地下水の化学分析と

ラドン濃度測定のためのサンプリングを行なった。

図4は、今回の試験に採用した試験工程の基本的組合せを明示したものである。Aセットとしたものは、1週間におよぶ揚水試験からなっている。一定量揚水試験(CDT)の前後に段階揚水試験(SDT)をもうけてある。この試験は、揚水による注入井の回復効果と非戸効率の変化を確認するために行なわれた。

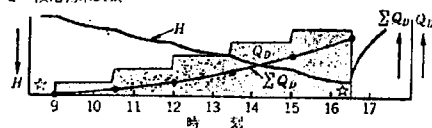
Bセットとしたものは、3週間におよぶ注入試験からなり、一定量注入試験(CRT)の前後に段階注入試験(SRT)をもうけてある。前後の段階注入試験は、注入を継続した場合の前後の非戸効率の変化を調べるために行なわれた。

これらA、Bセットを組合せた合計4週間の試験により第1回の調査が完了する。この調査の単位をユニットセット(unit set)とよぶことにした。上記の試験工程をもと

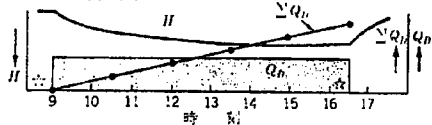
3回のユニットセットと、2回の連続揚水・連続注入試験を行なった。実施した試験の工程は次に示すとおりである。

- (1) 第1回ユニットセット 6月11日～7月6日
- (2) 第2回ユニットセット 7月10日～8月4日
- (3) 第3回ユニットセット 8月6日～9月8日
- (4) 第1回72時間連続一定量揚水試験

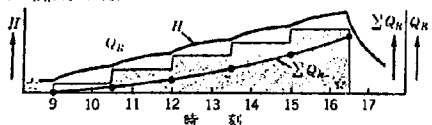
1 段階揚水試験



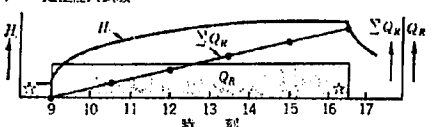
2 一定量揚水試験



3 段階注入試験



4 一定量注入試験



H.....水位  
 $Q_n$ .....流量  
 $\Sigma Q_n$ .....流量累計値  
 $\Sigma Q_R$ .....流量累計値  
 $Q_R$ .....注入量  
 $\Sigma Q_R$ .....注入累計値  
 ☆.....観測井戸調査  
 ●.....電気伝導度・水温調査

図3 揚水・注入試験の試験単位の基本系

10月11日～10月14日

(5) 第1回72時間連続一定量注入試験

10月15日～10月18日

(6) 第2回72時間連続一定量揚水試験

10月30日～11月2日

(7) 第2回102時間連続一定量注入試験

11月6日～11月10日

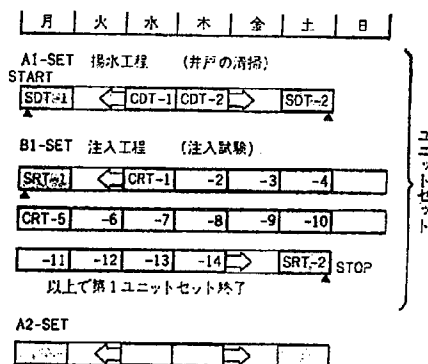
これにひきつづいて、浅井戸の揚水、注入の予備実験を行なったが、この結果については、今回の検討から除外してある。

### 断続揚水・断続注入試験の結果

図5は、試験結果の一部を示したものである。図中には毎分あたりの揚水・注入量( $Q$ )、累計揚水・注入量( $\Sigma Q$ )、井戸水位( $W_L$ )、比湧出(比注入)量( $S_c$ )をそれぞれ示してある。

比湧出量は、井戸水位を1m低下させた時の揚水量で、単位は  $m^3/min/m$  で表わす。比注入量は、井戸水位を1m上昇させた時の注入量で、単位は比湧出量と同じであるが符号は逆である。図5によれば、揚水の場合1日ごとの揚水始めと揚水終わりの水位は、ほとんど変動差を認めとることができない程度であるのに対し、注入の場合は、回を重ねるごとに注入終わり(1日あたり)の水位は指数曲線を描いて上昇することが読みとれる。1日7.5時間の断続注入で、16.5時間の夜間の中断時間をおいているにもかかわらず、その間の注入効果の回復はないことを示している。

揚水工程における水位変動値が毎回ともほぼ変わらない値を示すことは、揚水による清掃効果が働いていることを示すものの、この清掃効果は、注入を行なうと試験開始よりわずか3～4日でその効力を失うことが暗示される。



→ 以下繰返し

▲.....水質サンプリング

図4 注入試験のユニットセットのパターン

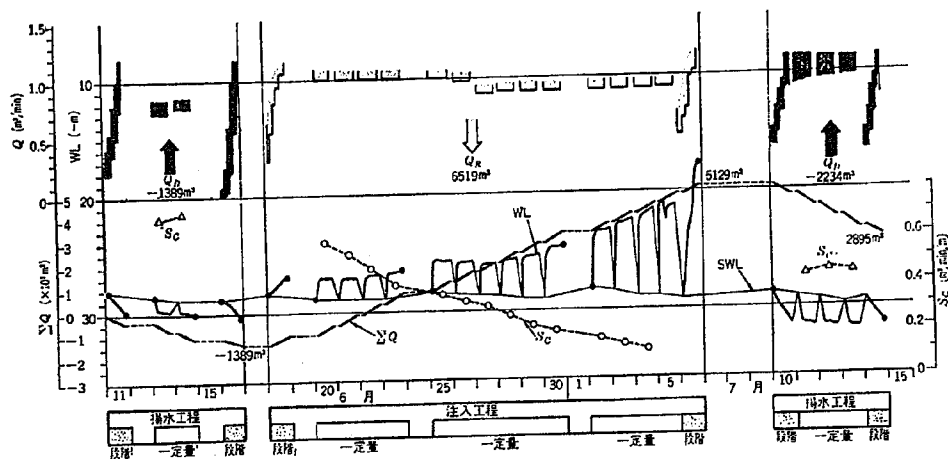


図5 第1回連続揚水・注入試験結果  
( $Q_p$ :揚水量,  $Q_i$ :注入量,  $S_c$ :比湧出量(比注入量), WL:水位, SWL:静水位)

比湧出量の変化をみると、3回の揚水工程とも比湧出量はほぼ同じ数値を示すか、むしろ良くなる傾向を示している。このことから、揚水の場合は清掃効果が上がっていることが理解されよう。

それに比べて比注入量は、水位上昇と反比例するように指数曲線状に低下していく。そして回を重ねるごとにその値は減少していく傾向にある。

比湧出量の場合には、平均して  $0.4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  であるのに対して、注入量では、 $0.5 \sim 0.05 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  に減少し、平均して  $0.1 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  である。これからみると、注入は揚水に比較して約  $1/4$  程度に効率が落ちることを示している。

#### 連続一定量揚水・注入試験の結果

連続一定揚水・注入試験は、前述の7.5時間ごとの断続試験では現れない現象をとらえるために、72時間および102時間にわたって連続して揚水・注入を行なったものである。

連続揚水の場合、水位は2.5mおよび2.6mで安定し、比湧出量は  $0.43 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  および  $0.38 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  で安定した値を示す。連続注入の場合は、試験開始と同時に水位は3m上昇し、時間がたつにつれて、水位上昇量は増大し、最終的には9mまで上昇するにいたる。

このときの注入井側管の外水位も同じような傾向を示し、注入井の管内と管外の水位差は、2m程度である。この現象は断続試験の場合にもみられることで、実際の非戸損失はあまり大きくないことを示している。

比注入量は、第1回の連続注入の場合が  $0.3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  から  $0.11 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  へと減少し、第2回目では、 $0.25 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  から  $0.09 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  にまで減少する。注入工

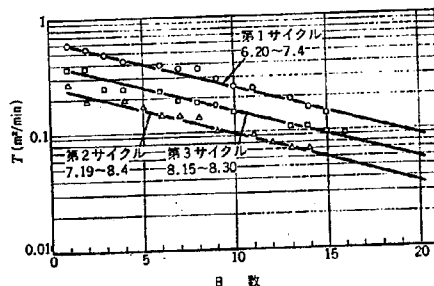


図6 一定量断続注入試験による透水係数Tの変化

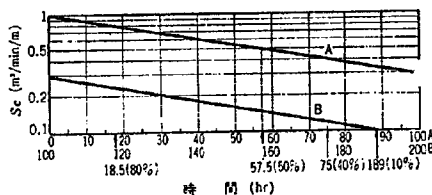


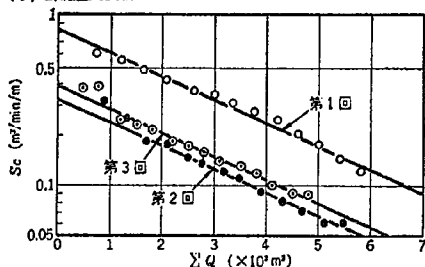
図7 注入時間と比注入量  $S_c$  との関係

程は、揚水工程に比べて  $0.3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$  ほど水量を少なくして注入しているにもかかわらず、比湧出量と比注入量との間に著しい差がみとめられる。注入量を大きくした場合は、両者の差はさらにひらいていくものと思われる。

#### 注入効率の経時的変化

一般に注入効率は指数曲線状に時間とともに減少していくことが知られている。非戸の揚水量 ( $Q$ ) と水位低下量 ( $s$ ) が求められれば、比湧出量 ( $S_c = Q/s$ ) と透水係数

(1) 断続注入試験



(2) 連続注入試験

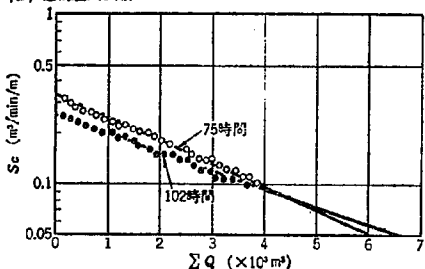


図8 注入累計量  $\Sigma Q$  と比注入量  $S_c$  との関係

(T) との関係は、経験的に

$$T \approx 1.22 S_c$$

として求めることが知られている。

図6は、一定量断続注入試験によって求められた毎日の透水量係数値の変化を片対数グラフに図示したものである。この図で注目すべき点は、減少率が第1回から第3回までの断続注入試験の工程とも一定であることである。これは、各直線が平行関係にあることで示されている。

この傾向は、72時間および102時間の連続注入試験の場合でも同様である。

これらの関係を整理してみると、図7に示されるように横軸に時間単位を、縦軸に比注入量を取り、初期の比注入量 ( $S_c$ ) を100%とすれば、各試験の減少曲線はほぼA、B曲線によって代表される。いま、A、B曲線に代表される減少曲線を式で表わしてみると、

$$S_{ct} = S_{c0} \cdot e^{-0.113t}$$

ここに、 $S_{ct}$ : t時間後の比注入量

$S_{c0}$ : 初期の注入量

t: 注入時間、連続、断続試験とも注入開始後の延べ時間

いま初期比注入量を100%とし、その値が50%になる時間を半減期とするならば、それは57.5時間となる。さらに初期値の10%にまで減少するには、189時間かかるということになる。つまり、注入後200時間以内で注入効果は10%以下になってしまう。

上述の経時変化は、注入量が一定であるかぎり、注入

総量を横軸にとると指数関係で示されることになる。図8は、注入総量と比注入量との関係を示したものである。これも明らかな指数曲線状の減少傾向を示している。そして減少率が各試験とも類似しているのが注目される。前記の経時曲線と同じように式をたててみると、

$$S_{ct} = S_{c0} \cdot e^{-2.21 \times 10^{-4} Q}$$

ここに、Q: 注入総量 ( $m^3$ )

$S_{ct}$  が50%になるのは、注入累計量が2,150  $m^3$  であり、比注入量が10%以下になるのは約7,200  $m^3$  注入した時である。

### 井戸効率の変化

揚水試験あるいは注入試験を行なった場合、そのいずれの場合においても井戸の全損失ということが問題になる。

全損失とは、揚水または注入する場合の抵抗によって生じる井戸水位の変化で、井戸外部の滯水層損失と井戸内部の井戸損失の合成量で示される。ローラボウによれば次の関係がなりたつとされている。

$$sw = BQ + CQ^n$$

ここに、sw: 井戸の全水位低下量 (全損失)

BQ: 滯水層損失

$CQ^n$ : 井戸損失

Q: 揚水量

B: 滯水層損失係数

C: 井戸損失係数

この基本となる考え方は、地下水層中の水の流動は層流でありダルシーの一次式に従い、一方井戸内に導入される水の流動は乱流となり多次式になる、という単純な考え方にたっている。

ヤコブは、 $n=2$  でも実際の適合は良いと指摘し、次のような式を提示している。

$$sw = BQ + CQ^2$$

今回の実験では、とりあえずヤコブの式を使用し、

$$sw/Q = B + CQ$$

という一次式になおして各係数を求めた。

図9は、今回の一連の揚水・注入試験の結果にもとづき、揚水、注入の場合とも同量の1  $m^3/min$  の水量を出入させた時の各損失を計算によって求め図示したものである。この図で各井戸の左側に記入したものが全損失 (sw) で、右側の2段に区分したものが各損失である。井戸内に縦線を記入した部分が、井戸損失を示している。図に示されるように、揚水と注入の場合を比較してみると、両者には大きな違いが認められる。揚水の場合の全損失は、注入の場合のそれよりもはるかに小さい。

また揚水工程の前後における試験結果では全損失に大きな変化は認められず、一般に揚水後の方が全損失が小さい。これは水の出がよくなっていることを示している。

注入の場合、注入工程前の全損失は、揚水工程の全損失

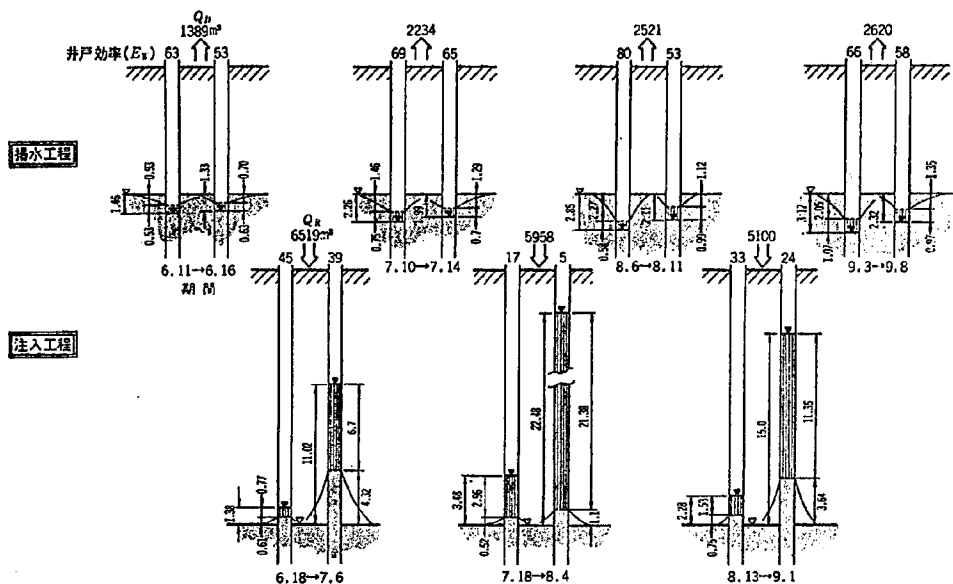


図9 井戸効率と滞水層損失の変化 (揚水量  $Q_p$  および注入量  $Q_i$  を  $1\text{ m}^3/\text{min}$  として計算したもの)

にきわめて近い値をとるが、注入工程後では、全損失は注入工程前の5～7倍となる。これは、注入工程前の揚水により井戸内清掃を行なった場合、一時的な回復があったとしても長時間注入を続ければ注入効果は減少の一途をたどることを示している。

#### 揚水、注入両過程における非可逆性

従来、地下水の揚水過程と注入過程とは、符号が逆になるだけで、その現象は可逆的であるといわれてきた。しかし、わが国で実際に注入を実験してきた経験では、まず可逆的と考えることはできず、むしろ非可逆的な現象とみるのが普通とされてきている。

今回の一連の試験結果でも、そのことは実証されてきている。つまり、揚水を基準に考えた場合、比湧出量と同等の比注入量を期待するのが間違っていることになる。そして、この非可逆性がなにに起因するのかを明確にすることが重要な課題と思われる。

先に示した井戸効率の変化についても明らかなように、揚水と注入との場合、各係数に大きな違いがみられる。また、透水層係数、比注入量は指数曲線状に減少していくことも明白である。これらの現象は、単なる井戸内部の目づまり現象という単純なことでは解決できないものと考えられる。

そこで、図10に示したものは、試験結果の解析にもとづき、片対数グラフの対数軸に時間を取り、真数軸に水位変

動をとったものの一例である。ただし、揚水工程と注入工程とは符号は逆になる。

この図をみて、揚水と注入の場合に興味ある相違点があることが判明した。まず、揚水の場合と注入の場合、符号が逆であっても、試験開始より400分までは、両工程とも同じような曲線を示すことである。しかし400分を過ぎると、揚水工程の場合は水位は安定方向 ( $s_{\text{max}}$  で示される) に向かうのに対して、注入工程の場合には、急激に水位は上昇していくことがわかる。また注入工程の場合、試験開始より2,000分を過ぎたあたりから、水位上昇はさらにその激しさを増していくことが認められた。つまり、注入工程の場合では、大きく分けて、Ⅰ・Ⅱ・Ⅲの3時刻、区分されることがわかる。その特徴を列記すればつぎのようになる。

(i) Ⅰ時相……注入開始より約300～400分までの時間。

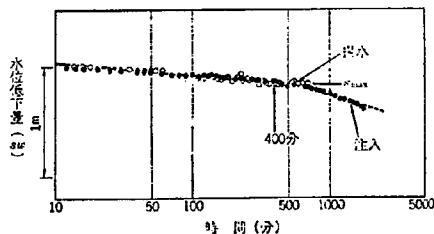


図10 揚水と注入の水位経時曲線の比較

注入・揚水の両過程とも類似した水位変動（符号は注入と揚水では逆）を示す。この時相は滞水層の反応は可逆的な挙動を示すものと考えられる。

(ii) II時相……注入開始400分以後2,000分までの時間。揚水の場合は水位は安定方向に向かい、ここで加圧層からの漏水、絞りし現象が現れてくるものと考えられる。注入の場合には、揚水過程における漏水、絞りし現象に対応する逆の現象が起こらず、粘土層を主体とする加圧層に水が入りこまないという圧密現象の非可逆性が表現されており、その分だけ水位上昇となって現れてくるものと考えられる。

(iii) III時相……注入過程の場合は、2,000分前後から水位の上昇が激しく、いわゆる目づまりという現象が現れてきているものと考えられる。

この3時相の区分については、さらに検討すべき内容をもっている。現在のところ、I時相からII時相までが主に滞水層損失に関係し、III時相以降に井戸損失の影響が加わってくるものと考えている。

表2に示した滞水層係数は、I時相からII時相までの揚水水位曲線を使用して、揚水時と注入時の滞水層係数を算出したものである。係数算出はハンタッシュ・ヤコブの標準曲線法によった。

ハンタッシュ・ヤコブは、非定常地下水流の解析に、漏水性滞水層系の井戸関数  $W(u, r/B)$  を導入し、水位低下を次式で表わした。

$$\begin{cases} s = \frac{Q}{4\pi T} \int_0^\infty \frac{1}{u} e^{-(u+r/B)^2} du = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \\ u = \frac{r^2 S}{4 T t} \end{cases}$$

ここに、 $s$ ：水位低下

$t$ ：時間

$r$ ：揚水井から観測井までの距離

$T$ ：透水量係数

$S$ ：貯留係数

$Q$ ：揚水量

$B$ ：漏水関数。遊走水層を通過する水理伝導性（透水係数）を  $k'$ 、遊走水層の厚さを  $b'$  として、

$$B = \sqrt{T/(k'b')}$$

つぎに、これを変形して

$$u = \left( \frac{s}{4T} \right) \times r^2 / t$$

とおけば、括弧の中は一定であることから、井戸関数  $W(u, r/B)$  と  $u$  との関係は、 $s$  と  $r^2/t$  との関係になる。つぎに両対数方眼紙の縦軸に  $1/t$ （または  $r^2/t$ ）、縦軸に  $s$  をとって、揚水試験の値をプロットし、マッチ・ポイントを決定すれば、その点における  $W(u)$ 、 $r/B$ 、 $1/u$ 、 $s$ 、 $t$  を読みとることができる。

このときの透水量係数 ( $T$ )、貯留係数 ( $S$ )、漏水係数

表2 揚水試験と注入試験における滞水層係数の相違

| (1) 揚水試験 |        |                        |       |                        |
|----------|--------|------------------------|-------|------------------------|
| 試験名      | 係数     | 透水量係数<br>( $m^2/min$ ) | 貯留係数  | 漏水係数<br>( $min^{-1}$ ) |
| 第1回      | 75時間連続 | 0.299                  | 0.052 | 0.012                  |
| 第2回      | 75時間連続 | 0.245                  | 0.043 | 0.011                  |
| 平均       |        | 0.272                  | 0.048 | 0.011                  |

| (2) 注入試験 |         |                        |       |                        |
|----------|---------|------------------------|-------|------------------------|
| 試験名      | 係数      | 透水量係数<br>( $m^2/min$ ) | 貯留係数  | 漏水係数<br>( $min^{-1}$ ) |
| 第1回      | 75時間連続  | 0.310                  | 0.027 | 0.000                  |
| 第2回      | 102時間連続 | 0.230                  | 0.012 | 0.000                  |
| 第1回      | 断続      | 0.391                  | 0.034 | 0.002                  |
| 第2回      | 断続      | 0.260                  | 0.018 | 0.000                  |
| 第3回      | 断続      | 0.400                  | 0.064 | 0.000                  |
| 平均       |         | 0.318                  | 0.031 | 0.000                  |

( $k'/b'$ )の式はつぎに示される。

$$T = \frac{0.0796 Q}{s} W(u, r/B)$$

$$S = \frac{4 T t}{r^2 (1/u)}$$

$$k'/b' = \frac{T(r/B)^2}{r^2}$$

さて上記の方法によって算出した表2の各滞水層係数から、透水量係数については揚水・注入両過程ともほぼ同値、貯留係数は注入の場合が小さく、漏水係数では注入の場合が著しく小さいという結果が求まる。この結果からみると、滞水層系の非可逆的な挙動を示す主な原因としては、

(1) 揚水時における加圧層からの漏水・絞りし現象とは逆の現象が、注入の場合にはほとんど起こりえないこと、つまり加圧層の粘土には水は入りこまない、という圧密現象の非可逆性が表現されていること、

(2) 滞水層自体の変形が貯留係数に示されるように、完全な弾性体ではないこと、の2点が主な意味をもっているように思える。

(1)の推測がなりたつならば、人為的に水位を上昇させても、一度圧密沈下した粘土性の地盤はもとにもどることはほとんどなく、また滞水層自体の変形も、(2)によって水圧を上昇させても完全にもとにもどらないということになり、注入によっても地盤沈下をもとにもどすことはできないことを示すことになる。

#### 注入井周辺の水文地質構造モデル

注入試験のI時相とII時相の段階をみてみると、初期の約400分が比較的逆的な滞水層系の物理的応答を示しているのに対して、II時相にいたると滞水層の上下にある加圧層からの補給かん養の発生とその非可逆性が注入試験と揚水試験の過程に表現されると考えざるをえない。

図1は、これらの現象を筆者らのグループで開発した垂直2次元滞水層モデル・ディジタル・シミュレーションの助けをかりて、モデル化したものである。Aモデル断面では、揚水も注入も行なわれない状態の水圧分布状況を示し

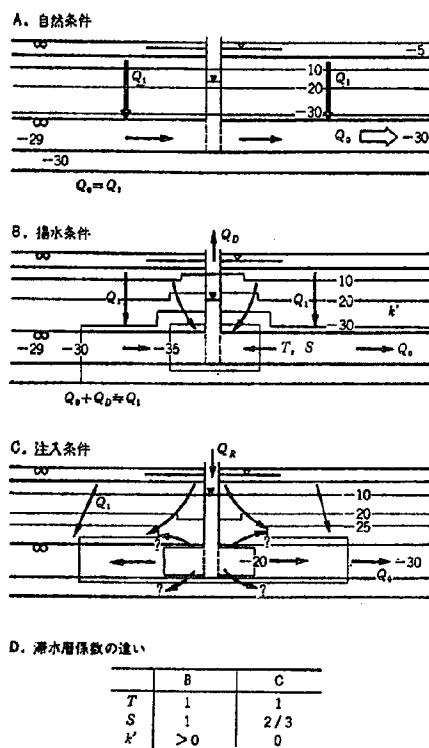


図 11 揚水・注入のシミュレーション・モデル

たもので、不圧地下水層から主被圧地下水層への漏水補給が行なわれていることが表わされている。Bモデル断面では、揚水による水圧低下が井戸周辺に起こり、滞水層に沿う水平補給と垂直補給がさらに加速されている状態を示している。Cモデル断面は、注入によって被圧地下水層の水圧は増大するものの、垂直流は周辺の粘土層におよばず、滞水層の水圧が増加する状況を表わしている。

この場合の滞水層係数の設定は、透水量係数は注入・揚水とも同値、貯留係数は注入の場合は揚水状態の 2/3、漏水係数は注入の場合 0 と仮定してある。地下での水の動きは、ほぼこれらのモデルで説明できるものと思われる。

### 終 わ り に

いままでの注入井についての技術的問題として、第一にあげられてきたことは、目づまりの問題であった。この解決には注入水の水質管理が最も重要であり、質的な変化を伴わない冷却用水に使用した地下水を再度地下に還流する方式がとられる主因ともなっていた。

しかし、今回の一連の試験結果では、目づまり以外にも、地下水層系自体の物性の非可逆過程によって注入効率

が落ちることも考えられるようになってきた。この現象は、すでに他のいくつかの注入井の試験にも共通してみられるものである。

これらの現象が、日本の地下地質によくみられる軟弱な粘土層などの難透水層を含む滞水層系について共通するものであるならば、この報告の題名として取上げた「汲上げた水は地下にもどせるか」という問いには、「否」としか答えられない。これからの地下水資源対策は、まずこの事実から発想されなければならないと思われる。

つまり、地下水資源の開発の反作用としての地盤沈下現象は、地下水汲上げを増大させるかぎり、程度の差こそあれかならず付随すること、そしてその現象は非可逆的なものであること、また地下水を人為的に注入する場合には、揚水過程と比較して本質的な相違がみられることである。

このような理由からみても、地下水の汲上げ規制に代わる代案として、ただちに人工地下水注入策が脚光をあびるものとは考えられない。むしろ地道な調査研究の積み重ねがあって初めて、異なった視点から人工地下水注入の道がひられてくるものと思われる。

最後に、注入井については経済的な問題、さらには地下水の所有権をめぐる法制的な問題が、技術的な問題以上に今後の課題となるものと思われることを付記する。

この実験を進めるにあたって、平塚市の関係者、地元の研究機関としての神奈川県温泉研究所、農林省農業土木試験場の方がたから、多大のご援助をいただいた。また、東海大学海洋学部資源学科の各位からは、この内容について検討をいただいた。同学科の久恒真基氏には実験を手伝っていただいた。併せて謝意を表する次第である。

### 引 用 文 献

- 1) IUGG: International Survey on Existing Water Recharge Facilities, 1970
- 2) 佐崎達雄: 地盤沈下, 三省堂新書, 1972
- 3) 特集「地盤沈下」: 施工技術 Vol.5, No.2, 1972
- 4) 施工技術振興部: 南関東における地盤沈下の現状, 施工技術, Vol.6, No.10, 1973
- 5) 東海大学海洋学部: 平塚市地下水調査報告書, 1974
- 6) 水資源研究グループ: 地下水資源学, 共立出版, 1973.

## 6. 人工涵養法による帯水層の蓄熱利用

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 横 | 山 | 孝 | 男 |
| 梅 | 宮 | 弘 | 道 |
| 安 | 彦 | 宏 | 人 |

## 人工涵養法による帯水層の蓄熱利用

横山 孝男\* 梅宮 弘道\*  
安彦 宏人\*\*

### Heat Exchange of Storage Type through Underground Strata by Artificial Recharge

Takao YOKOYAMA, Hiromichi UMEMIYA  
Hiroto ABIKO

#### Abstract

In the heavy snow fall area, Yonezawa, Nagaoka, etc., they have taken a good use of snow melting pipes. But these are not sufficiently familiar to that district, for the water supply is poor. And so we have had an idea of a use of a stratum for a regenerator by artificial recharge and a reuse of repumped water for snow melting pipes. Injecting cooling waste water has been investigated since before, but water surface up-lift effects when restoration of injection and quantitative analysis for heat storage are not successfully studied.

We have injected at rate of 0.7m<sup>3</sup>/min for a month, and examined (i) the reason why we could inject, (ii) the up-lift effect near wells, and (iii) the regenerating effect, from isotropy of the permeable, comparing the experimental piezometric surface with the ideal, and water quality and temperature change.

The experimental field is situated in a southern part in Yamagata basin. The aquifers are 40m and 80m in depth. The injection, the observation and the discharge wells are drilled at the corners of the 22.4m equilateral triangle.

In isotropic confined aquifers if the flow is subject to Darcy's law and the deficiency of the boreholes is negligible, the steady state piezometric surface is given by equation (4)

$$s = Q_0 / 4\pi T \cdot \ln(r^2/r'^2) = Q_0 / 4\pi T \cdot \ln\{[(x-a)^2 + y^2] / [(x+a)^2 + y^2]\} \dots \dots \dots (4)$$

where  $Q_0$  is the rate of both recharge and discharge,  $T$  is the coefficient of transmissibility, and  $2a$  is a distance between the injection well and the discharge one, and  $a$  is 11.2m.

As the results, we have reached the following conclusions.

(i) The effective path between the injection well and the discharge well cannot be formed, because transmissibilities near the wells are almost uniform during 20 days of successful pumping test. So we may say that water was injected in natural state.

(ii) The total amount of injected water in a month is  $2.4 \times 10^4 \text{m}^3$ , nevertheless we observed

\* 山形大学工学部

\*\* 日本地下水開発株式会社

(昭和49年11月18日受理・昭和50年3月9日再受理)

only the slight transient deficiency of the boreholes by precipitation of iron. Then at the injection well, the observed piezometric surface is higher than the theoretical value, but at the other wells the observed and the theoretical values are nearly equal. Similarly, judging from the change of water quality it is true that the equation (4) can show the piezometric surface in the case of simultaneous recharge and discharge.

(iii) Though we inject  $2.4 \times 10^4 \text{ m}^3$  water at  $3^\circ\text{C}$ , the discharge temperature is not lower than  $11^\circ\text{C}$ . It is revealed that the above-mentioned system can be sufficiently applied to the snow melting piped road of 6m in width and 100m in length through winter.

## 1. 緒 論

東北、北陸地方の豪雪地帯では表流水および地下水利用の消雪パイプが冬期交通確保に活躍している。しかし、都市化に伴う水需要増大のため、表流水は減少し地下水位は低下して、消雪パイプの普及が困難となっている。

水不足はむしろ全国的なものであり、特に工業地帯においては、過剰揚水にともなう塩水化および地盤沈下が広範囲にわたって発生している。したがって、これら工業用水の節約を計るため、再使用<sup>(1)</sup>や造水<sup>(2),(3)</sup>および帯水層での還元再使用<sup>(4)-(8)</sup>が研究・実施されてきた。これら深層地下水は、短期間では涵養されないため、揚水を抑えるか何らかの方法で涵養する必要があるが、実行されている例<sup>(9)</sup>は少ない。注入井による人工涵養については、多くの研究成果が得られたが、注入による還元効果の定量的把握および予想についてはまだ不十分である。地下水利用の利点は安価であること、汚染されていないこと、および地表との温度差が大きいことなどが挙げられる。したがって、人工涵養により過剰揚水にともなう諸弊害を回避すると同時に、熱および化学汚染についても注意せねばならない。蓄熱効果についてはこれまでも研究<sup>(9),(10)</sup>され、最近では秋林<sup>(11)</sup>が電算機でシミュレートを行った。しかしながら、理論と実験との比較検討は今後に残された課題であり、化学汚染と同様さらに追求する必要がある。

本研究は米沢市から委託を受け、冷水（或いは温水）を人工涵養し地下水盆を強化しつつ、一方で、温水（冷水）を得て消雪（冷却）用水として利用することを直接の目的として行なってきた。今回も  $0.7 \text{ m}^3/\text{min}$  の注入揚水実験を約 1 ヶ月間継続したが、

(i) 注入井の目づまりを避け得たのは注・揚水井間の水道形成による特殊な場合に過ぎないのか、

(ii) 注入による水位の還元効果は理論と一致するか、

(iii) 冷水注入により揚水温降下はどの程度であり消雪パイプ用温水源となり得るか  
を、透水性の異方性、水位、水質等から明らかにし、定量的蓄熱評価を行なう際の基礎データとする。

## 2. 記号表

|         |                                  |                       |
|---------|----------------------------------|-----------------------|
| $2a$    | ; 注入、揚水井間隔 ( $2a=22.4\text{m}$ ) | m                     |
| $r, r'$ | ; 揚水井、注入井からの距離                   | m                     |
| $R, R'$ | ; 揚水、注水時の影響半径                    | m                     |
| $Q_0$   | ; 揚水量、注入量                        | $\text{m}^3/\text{s}$ |
| $s$     | ; 静水位面からの水位（以下単に水位と呼ぶ）           | m                     |

|          |          |             |
|----------|----------|-------------|
| $S$      | ; 貯留係数   | $s$         |
| $t$      | ; 時間     | $m^2/s$     |
| $T$      | ; 透水量係数  | $m$         |
| $(x, y)$ | ; 水平空間座標 |             |
| $\eta$   | ; 井戸効率   | $^{\circ}C$ |
| $\theta$ | ; 温度     |             |

### 3. 理論解析

等方性水平無限被圧帯水層が漏水のない上下制限床で囲まれている時、物性値一定でのダルシー則にしたがえば地下水流動の基礎式は(1)式と求められる<sup>(12)</sup>。

$$\Delta^2 s = \partial^2 s / \partial x^2 + \partial^2 s / \partial y^2 = S/T \cdot \partial s / \partial t \quad \dots\dots\dots (1)$$

したがって、水位場が定常となれば(1)式はラプラスの式を満足する。例えば、図一1の揚水井により揚水をおこなう場合の定常解は、平衡説の Thiem の式(2)となり、 $R$ すなわち影響半径を50mと見れば、図一1の破線が(2)式で示される水位場である。

$$s = Q_0 / 2\pi T \cdot \ln(r/R) \quad \dots\dots\dots (2)$$

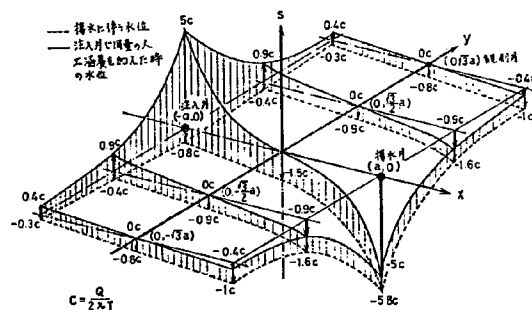
$$\text{但し } s|_{r=R}=0, \quad r^2 = (x-a)^2 + y^2$$

注入井による人工涵養の場合にもよく見られる目づまりによる透水性の劣化等が無視できて、流れは揚水と同様に物性値一定のダルシー則にしたがうとすれば、注入と揚水は本質的に同一<sup>(13)</sup>であり、(1)式は注入の場合にも成立する。注入と揚水の同一性については疑問<sup>(14)</sup>も持たれているが、著者らは同一性を仮定して解を求め、実験と比較する。したがって、図一1の注入井により人工涵養する場合の定常解は(3)式となる。

$$s = -Q_0 / 2\pi T \cdot \ln(r'/R') \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{但し } s|_{r'=R'}=0, \quad r'^2 = (x+a)^2 + y^2$$

以上から、注入井揚水井で注入揚水を同量同時に行い、注入と揚水の同一性が満足される時の定常解は、水位場が保存場となることから、(2)式と(3)式を加えればよい。両影響半径  $R, R'$  も同一性のもとでは等しいと考えられるので、結局求める解は(4)式となる。



図一1 人工涵養による還元効果

$$s = Q_0 / 4\pi T \cdot \ln(r^2/r^2) = Q_0 / 4\pi T \cdot \ln[(x-a)^2 + y^2] / [(x+a)^2 + y^2] \dots\dots\dots (4)$$

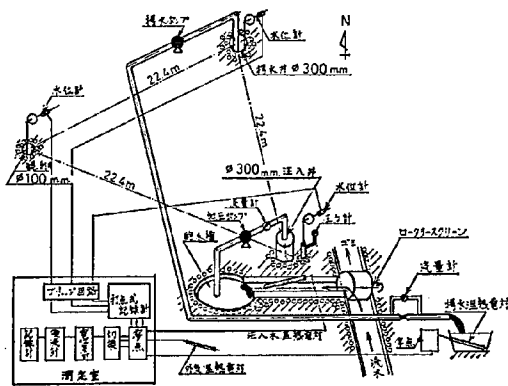
したがって、注入井により同量の人工涵養を行えば、水位場は図-1の実線の様に上昇し、水位の還元効果は図のハッチング部となる。例えば、 $y$  軸上の観測井では水位は降下せず、逆に $x$ の負の領域では、揚水しているにもかかわらず、水位は上昇することが期待できる。

#### 4. 実験施設

図一2に示した実験場は、山形盆地の南端、国鉄蔵王駅西方約200mに位置する。地質概要は、第三紀凝灰岩類の上に竜山火山の泥流が不整合に重なり、さらにその上に、沖積層が発達している。実験場には、注入井・観測井および揚水井が、一辺22.4mの正三角形各頂点に位置し、各井の地質柱状図を図3—1、—2、—3に示した。良好な帯水層が、60～80m付近と40m付近に存在する。両帯水層間には火山灰もしくは灰色砂礫を含み、層厚も一定していない。しかし、解析のほとんどが2次元水平帯水層として行なっていることと、3次元とすれば解析が困難なため、上部制限床を褐色粘土および粘土、下部制限床を凝灰岩とする被圧帯水層とし、スクリーンを図3のバツ印の所に切った。したがって、地下水は難透水層の火山灰もしくは灰色砂礫を避けて、おもに上・下帯水層に分かれて流れるが、(i)帯水層での垂直流は無視できるとすれば、上下帯水層が隣接し、しかも境界での流れの混合が近い場合と同等であり、(ii)両帯水層係数がほぼ同一と考えることにより、両帯水層厚さを合計して約40mの等価厚さを持つ一つの帯水層とみなせる。以上から、漏水無しの被圧水平帯水層として解析を行なう。

注入水は側溝より得て、スクリーンで粗大ゴミを除去後貯水槽に導き、自然流下式あるいは圧入式で注入される。そのため、側吹きのないように注入井上部はグラフトした。各井水位は、触針式水位計により、常時測定記録した。その他に、ブルドン圧力計でも測定した。注入揚水量は積算流量計で計った。

温度測定は 0.3mm 銅—コンスタンタン熱電対を用い、注入水温、湯水温および外気温を常時測定記録した。また湯水温の場合は測定室とセンサー部が離れたため、補償導線で結線した。



圖一-2 實驗場

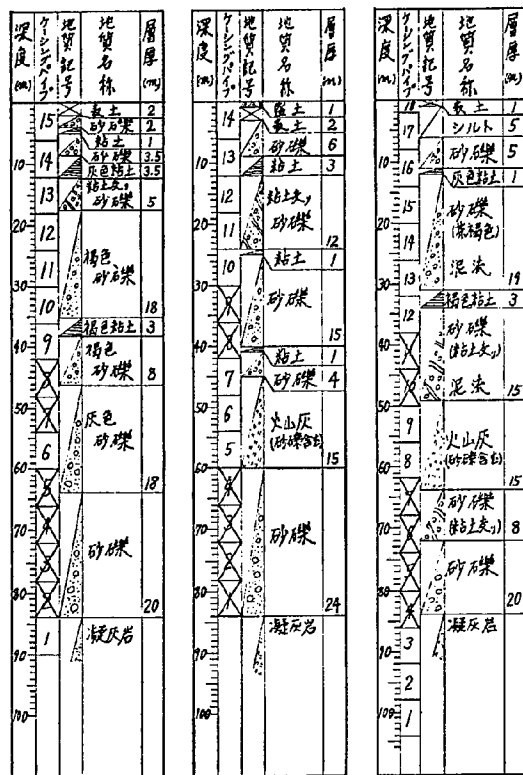


図3-1  
注入井地質柱状

図3-2  
観測井地質柱状

図3-3  
揚水井地質柱状

## 5. 揚水実験による、水道と実験条件の検討

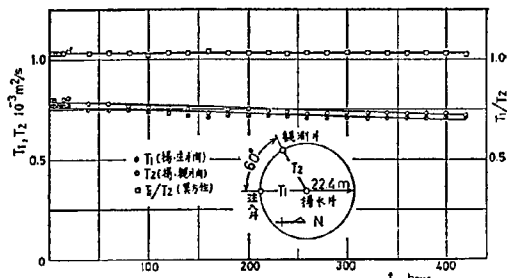
### 5-1. 水道の有無

当注入井は、注入量が累計で10数万  $m^3$  に達したにもかかわらず、その機能を停止しない。他の例では失敗することが多いため、当注入井が順調なのは、隣接する揚水井のため、両井間に水道が形成された特殊な場合にすぎないと思われる。もし水道が存在するなら、帯水層の蓄熱可能量は少く、人工涵養による還元効果も局所に限られるので、水道は無い方が望ましい。

水道とは、他に比べ著しく透水性が優れている場所のことである。そこで揚水実験を行って揚水井付近の方向による透水量係数の異方性を検討した。(2)式によれば、揚水にともなう水位は、透水量係数に異方性がない場合、揚水井からの距離が同じなら一定水位となる。逆に、同一円周上の任意点での水位と揚水位とから求めた透水量係数は、一定値を示すはずである。当実験場は揚水井を中心に同

表一 透水量係数の異方性

| 観測点                         | 5月    | 7月    | 12月   | 1975年1月 | 備考                                 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|---------|------------------------------------|
| $Q_0$ (m <sup>3</sup> /min) | 0.732 | 0.732 | 0.750 | 0.780   |                                    |
| 平衡時間                        | 5     | 45    | 4     | 425     |                                    |
| $T_1$ (揚水初期)                | 1.24  | 0.846 | 0.760 | 0.749   | $\times 10^{-3}$ m <sup>2</sup> /s |
| $T_2$ (揚水後期)                | 0.832 | 0.824 | 0.731 | 0.724   | 同上                                 |
| $T_1/T_2$                   | 1.48  | 1.02  | 1.03  | 1.03    |                                    |
| 水温 °C                       | 11.0  | 10.5  | 14.4  | 15.0    |                                    |



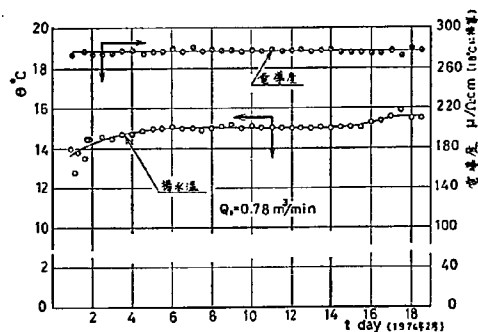
図一 透水量係数の時間的変化及び異方性

心円上に注入及び観測井が中心角  $60^\circ$  で掘削された。したがって、上記方法で透水量係数の異方性を検討して、表一および図一四の結果を得た。流量を大巾に変えた場合には、違った結果となることも考えられるが、当井の揚水適正量の  $0.7 \text{ m}^3/\text{min}$  程度では、当初いくらか異方性がみられたものの、追実験でさらに検討した結果、注・揚水井間透水量係数の顕著な優位性は認められず、揚水井・注入井間には水道のないことが確かめられた。さらに、図一四から一般的に知られた揚水にともなう目づまりも透水量係数の劣化として示される。

## 5・2. 実験条件の検討

上記の揚水実験の際、透水性の異方性の他に、大まかな水質変化と水温変化が見られるかどうかを調べるために、揚水の電気伝導度と水温の経時変化も測定した。

その結果、図一五に示すように、揚水するだけなら電気伝導度は一定であり、水温は多少変動するが、ほぼ一定であることが確かめられた。水質の異なる水が注入されれば、揚水の電導度、水温は取水層の値と異なってくると思われる。その注入実験は、この実験から約半月後に行なわれた。



図一五 揚水に伴う揚水温・電動度の経時変化

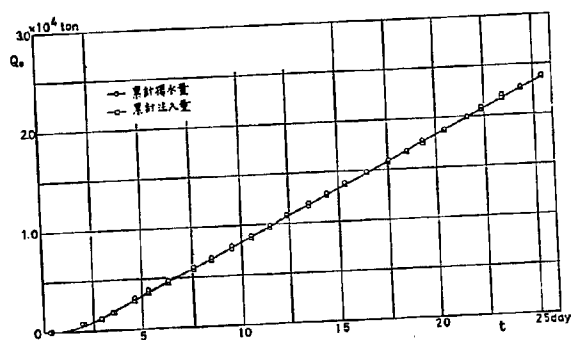
## 6. 注入揚水実験

### 6・1. 注入・揚水量

当初は慣らし運転のため注入、揚水量は少なく、また変動をともなったが、4日目以降から一定値0.70m<sup>3</sup>/minで実験を行なった。実験中小川流量が減少したり、停電のために中断することもあったが、全期間に比べると無視できる短時間なので、図一6に示すようにほぼ一定流量で注入揚水を行なうことができた。結局、目づまりがほとんど見られない状態で、2.4万m<sup>3</sup>の注入揚水を行なうことができた。

### 6・2. 注入による水質変化および目づまり

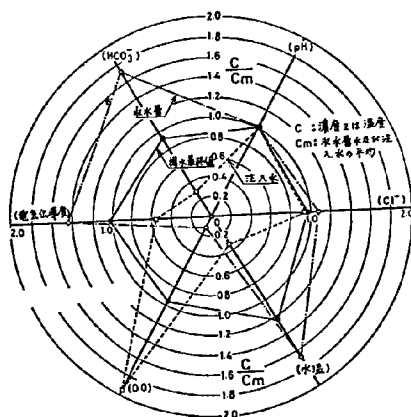
上水試験法により、1日1回の割合で水質変化を調べた。今回の注入実験に入る前の水質検査結果を表一2に、注入実験での経時変化を図一7に示す。主成分は、注入水と収水層水とで異なっている。



図一6 累計注入・揚水量

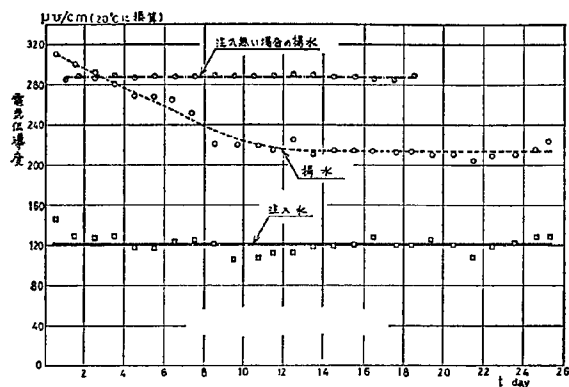
| 検査項目                             | 揚水井  | 注入井  | 注入側湧水 |
|----------------------------------|------|------|-------|
| アンモニウム性窒素                        | 検出せず | 検出せず | 検出せず  |
| 亜硝酸性窒素                           | 僅 微  | 僅 微  | 僅 微   |
| 硝酸性窒素                            | 1 以下 | 1 以下 | 5 以下  |
| Cl <sup>-</sup>                  | ppm  | 17.2 | 17.2  |
| KMnO <sub>4</sub> 消費量            | ppm  | 1.26 | 3.63  |
| Cu <sup>2+</sup>                 | ppm  | 検出せず | 検出せず  |
| Fe <sup>2+</sup> , <sup>3+</sup> | ppm  | 0.07 | 0.33  |
| Pb <sup>4+</sup>                 | ppm  | 検出せず | 検出せず  |
| Zn <sup>2+</sup>                 | ppm  | 検出せず | 検出せず  |
| Mn <sup>2+</sup> , <sup>4+</sup> | ppm  | 検出せず | 検出せず  |
| 硬質(CaCO <sub>3</sub> )           | ppm  | 75.5 | 82.6  |
| PH                               |      | 7.4  | 7.7   |
| MPHカリ度                           | ppm  | 74   | 84    |
| 臭 味                              | 異常なし | 異常なし | 異常なし  |
| 色 度                              | 無 色  | 無 色  | 無 色   |
| 濁 度                              | 透 明  | 透 明  | 透 明   |
| 全溶状炭素                            | ppm  | 240  | 258   |

表一2 地下水及び注入用側溝水質, 1973年12月

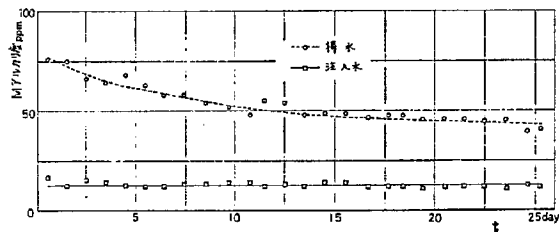


図一7 注入による水質変化

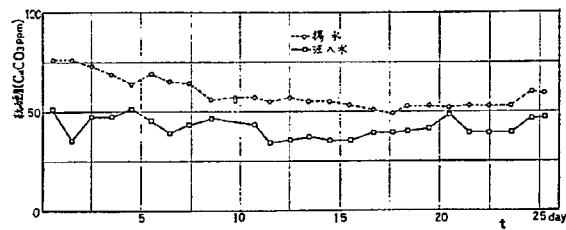
電気伝導度, Mアルカリ度, 総硬度および溶存酸素については, 注入水濃度が安定しているために, 注入による揚水濃度の変化が明らかに見られ, 揚水するだけなら, 図一5のように一定水質(電導度)であるのとは異なっている。すなわち, 図一8, 9, 10, 11に示されるように, 揚水濃度は, 注入経過と共に注入水濃度に近づき, 収水層水と注入水のほぼ平均濃度に落ち着いた。揚水温についても同様で, 以上をまとめたのが図一7での揚水最終値の六角形水質パターンである。このことは, 帯水層内での水質変化を考慮しなければならないが, (4)式から導入される揚水井における注入水と収水層水の混合の結果と考えられ, 注入水が還元され, 揚水井にまで到達していることは明らかであ



図一8 注入による電気伝導度の変化



図一9 Mアルカリ度の変化



図一10 総硬度の変化

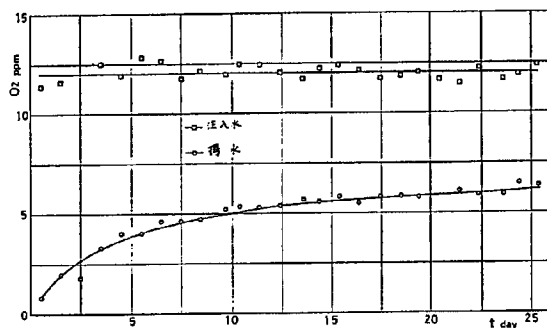


図-11 溶存酸素の変化

る。

一方、注入井の目づまりは、図-12に示すように、徐々に進行し、井戸効率は、一旦、70%に落ち着いた。また、実験中断により目づまりは解消<sup>(8),(15)</sup>され、再開後は、前と同様な目づまり進行となり、最終的には、井戸効率は80%にとどまった。したがって、ほとんど目づまりのない状態で実験を終了した。軽い一時目づまりの原因を考えるに、村下<sup>(8)</sup>を始め、多くの研究者は溶存酸素、鉄およびマンガン<sup>(8)</sup>の酸化沈澱、およびバクテリア繁殖としている。注入水温は平均して3℃なので、バクテリア繁殖は少ないと考えられるが、図-11、13に示すように、飽和状態の溶存酸素と比較的高濃度の全鉄イオンを含む注入水である。図-13に見られるように、揚水全鉄イオン濃度は前述したアルカリ度や溶存酸素等と異なり、注入水同濃度に近づくことがない。したがって、全鉄イオンのほとんどは帯水層でも注入井近辺に、あるいは注入井内部に、何らかの形で蓄積したと考えられる。このことは、表-2でも注入井全鉄イオンが、以前の注入の影響で高濃度であることと一致する。しかし、注入水は既に十分な溶存酸素を含んでおり、かつ、溶存酸素が帯水層において極端に消費された形跡がないことから、(i)帯水層内での第一鉄の酸化沈澱は少なく、(ii)注入水全鉄イオンの大部分は第二鉄で占められており、(iii)第二鉄自身の沈澱あるいは第二鉄の凝集沈澱作用によるフロッグ形成物の沈澱によって、注入井およびその周辺帯水層に軽い一時目づまりを発生させたと考えられる。

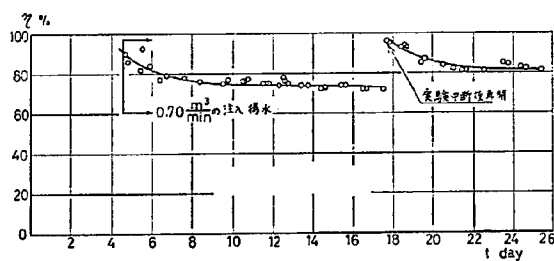


図-12 井戸効率の悪化

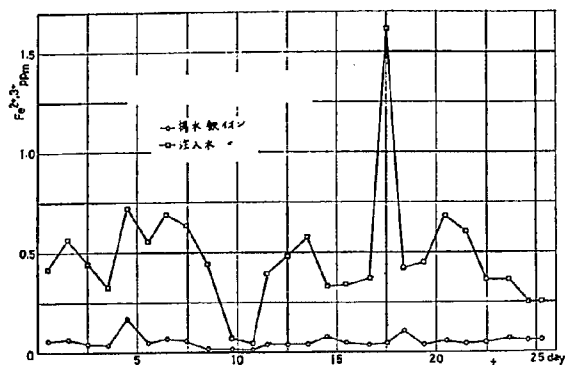


図-13 全鉄イオンの濃度変化

### 6・3. 注入による還元効果

注入と揚水が本質的に同一で、水道等による透水性の異方性も無視できる場合には、2次元水平被圧帯水層での注入・揚水が同量で行なわれる場合の水位場は(4)式で与えられることを示した。そこで  $0.70 \text{ m}^3/\text{min}$  で実験した時の注入・揚水および観測水位と(4)式による理論水位との比較を行なって、(4)式の妥当性を検討する。

図-14によれば、図3-1, 2, 3の地層に対する強引な水平被圧帯水層の仮定にもかかわらず、揚水・観測両水位は理論値とよく一致した。しかし、注入井水位は理論値より高い。これは、図-12で見た注入井近傍での軽い一時目づまりと思われ、流量測定誤差および水平被圧帯水層の仮定は大きな原因でない。また、揚水水位が理論値より幾分高いのは、揚水井付近の水位降下により上部制限床を通しての漏水が存在したためと推測される。以上から、注入による還元効果の予想は、注入と揚水が同一とした(4)式により、注入井近辺も含めおおよそ行なえることがわかった。

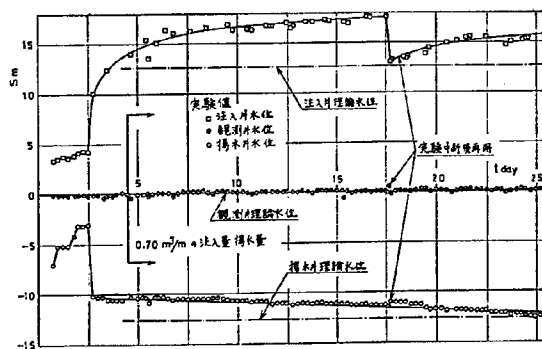
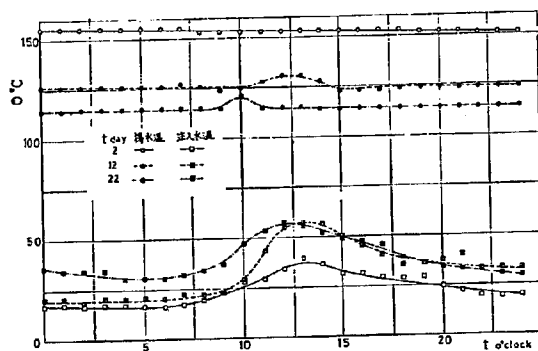


図-14 揚水井・観測井・注入井の水位変化

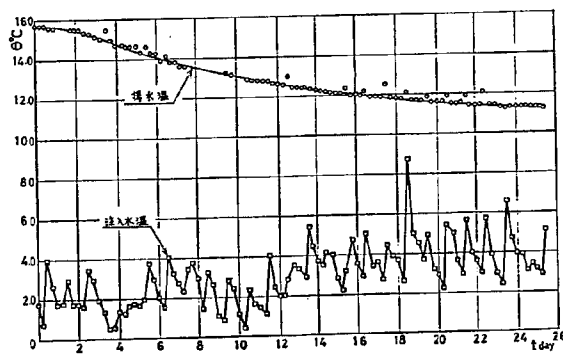
#### 6・4. 帯水層の蓄熱効果

注入水は図—15, 16に示すように、日変化をしながらしだいに上昇し、実験終了時には約4℃となった。一方揚水温も、図—15に示すように、日変化が見られたが、これは、揚水温熱電対センサー部の太陽光線遮断不完全に原因し、揚水温上昇部は除いて構わないことが判明した。したがって、図—16では、揚水温日変化部は除いて揚水温曲線とした。

図—15によると、当初は揚水・注入水温度差が大きいため、揚水温降下が顕著で、始めの10日間で3℃ほど降下した。しかし、注・揚水温度差が小さくなるにつれ揚水温は安定し、後の10日間では1℃降下しただけにとどまった。結局、冷水注入せずに揚水するだけなら、揚水温は図—5のように一定であるのに対して、約3℃、2万m<sup>3</sup>余の冷水注入による揚水温は、図—16のように約4℃降下して11℃強となった。すなわち、揚水温は、注入水温ともとからの収水層水温の平均値にほぼ落ち着いた。このことは、水質変化と同様に、注入と揚水は同一である場合の水位場の式(4)から導入される揚水井における注入水と、もとからの収水層との混合を意味している。



図—15 揚水温及び注入水温の日変化



図—16 注入による揚水温の変化

以上から、冷水注入により冷熱が蓄積され、かわりに温水が得られて蓄熱効果は確められ、今後定量的蓄熱評価を行なう際の、基礎となる実験データが得られた。

#### 6・5. 消雪パイプ用温水源としての評価

従来は、一方的に揚水するだけのため莫大な熱エネルギーを容易に得ていたが、消雪パイプの普及につれ、地下水不足を招き、十分な利用が計られなくなっている。そこで、消雪パイプ用水源を低エネルギーの表流水に換える研究<sup>(16)</sup>も行なわれている。しかし、河川水は低温なので使用水量が多くなる。

本実験では、揚水する一方で注入すれば、地下水強化を行ないつつ温水の得られることを確めた。そこで得られた実験から、その消雪パイプ用水源としての価値を評価してみる。本実験を巾6m、長さ100mの消雪パイプ道路にあてはめれば、 $1.2\text{l/m}^2/\text{min}$ の散水を1ヶ月間連続し融雪した水を再び涵養することができる。風速4m/s、気温 $-5^\circ\text{C}$ の気象条件で、少くとも $11^\circ\text{C}$ で $1.2\text{l/m}^2/\text{min}$ の散水で融雪し、熱損失を考慮して側溝に $3^\circ\text{C}$ で戻すとすれば、消雪に使用出来る熱エネルギーは斎藤<sup>(17)</sup>の計算に従って温度降下 $6^\circ\text{C}$ 分と求められる。したがって1日当りの消雪可能積雪は、

$$\frac{6\text{ cal/g} \times 10^3\text{ g/day}}{90\text{ kg/m}^3 \times 6 \times 10^2\text{ m}^2 \times 87\text{ cal/g}} = 1.3\text{ m/day} \dots\dots\dots (7)$$

と計算される。すなわち、1ヶ月で30m強の新積雪にも耐えることができる。米沢市の一冬の新積雪深度は10mに満たない<sup>(18)</sup>ので、断続的に使用したとしても十分と思われる。また長岡市での消雪パイプ標準使用量は $0.32\text{l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ <sup>(19)</sup>なので、 $2\text{万m}^3$ の温水量では、72日間消雪できる計算である。実際にはこれほど降ることはいない。以上から、当実験系は、 $6\text{m} \times 100\text{m}$ の道路散水消雪に一冬十分耐え得るものである。

### 7. 結 論

1. 1ヶ月で $2.4\text{万m}^3$ の冷水注入により冷熱を蓄熱し暖熱を回収して同量揚水することができた。
2. その際、注入・揚水井間に水道のないことを確めた。鉄イオンに起因する一時目づまりが注入井付近に生じ、理論値より幾分高い注入水位となった。しかし、観測水位および揚水位は、理論値とよい一致をみて、注入の場合も揚水と同様に扱うことにより還元効果の予想が可能であることを水質の面からも確めた。
3. 約 $3^\circ\text{C}$ の冷水を1ヶ月で $2\text{万m}^3$ 余注入したにもかかわらず、揚水温は $11^\circ\text{C}$ を下らなかった。このことは、付近の井戸枯れを避けつつ、長さ100m、巾6mの道路散水消雪にも一冬十分に耐え得る水源であることを示している。

しかしながら、上記結論は適正注入揚水量、 $0.7\text{m}^3/\text{min}$ についてであるため、異なる流量で確認する必要がある。また、多層構造を一層としたことの妥当性および実験データを基にした帯水層の熱解析は、今後に残された課題である。最後に、本研究を遂行するに当たり終始助言を頂いた本学部の井上和夫教授、並びに水質分析に協力、指導して頂いた山形県公害センター鈴木直樹氏に深謝する。

### 参 考 文 献

- 1) 内田駿一郎(1973): 水の循環使用について、地下水技術協会秋期講演会要旨, p. 53—58.
- 2) 石坂誠一(1973): 大形プロジェクトによる海水淡水化装置の開発、機械学会誌, Vol. 76, No. 659, p. 1259—1263.

- 3) 岩井重久, 他29名(1974): 再生水の造水と利用技術資料集大成, フジテクノシステム出版部.
- 4) 広瀬孝文郎 (1960): 人工地下水による工業用水循環使用, 用水と廃水, Vol. 2, No. 1, p. 25—29.
- 5) 蔵田延男 (1960): 冷却廃水の地下還流, 用水と廃水, Vol. 2, No. 8, p. 19—26.
- 6) 小西泰次郎 (1973): 人工地下水 (その2)—3, 地下水と井戸とポンプ, Vol. 15, No. 9, p. 6—12.
- 7) 山本, 榎根, 青木, T ヨーノス (1972): 地下水人工涵養の実例, 水処理技術, Vol. 13, No. 12, p. 81—92.
- 8) 永井, 村下 (1972): 人工地下水における注水井戸の目づまりと井戸能力の回復, 工業用水, No. 170, p. 48—54.
- 9) 本田利男 (1974): 人工地下水涵養実験の中間報告, 地下水学会昭和49年度春期講演会発表.
- 10) 岸 和男 (1963): 冷却廃水地下還流に関する調査報告3, 地質調査所月報, Vol. 14, No. 6.
- 11) 秋林 智 (1975): 数値モデルによる地下水の温度分布の予測, 地下水学会誌, Vol. 17, No. 1.
- 12) De Wiest (1969): Flow Through Porous Media. Academic Press, p. 10—19.
- 13) 山本荘毅 (1959): 人工地下水について—連載第2回, 水, No. 14.
- 14) 水収支グループ (1973): 地下水資源学, 共立出版, p. 366—370.
- 15) 小西泰次郎 (1973): 人工地下水, 地下水技術協会秋期講演会要旨, p. 2—10.
- 16) 斎藤博英 (1969): 低温水による道路の消雪, 克雪技術研究, No. 1, p. 99—109.
- 17) 斎藤博英 (1967): 地下水を利用する融雪の基礎理論, 雪害実験所報告, 551, 518, 462: 624, 144, 534: 625, 76.
- 18) 山形県行政総合対策室 (1973): 山形県の雪。

7. ( 2 - 7 ) 人工地下水実験の中間報告

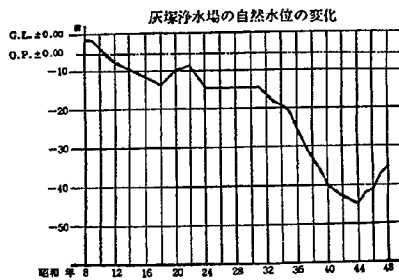
本 田 利 男  
南 勲 郎

## (2-7) 人工地下水実験の中間報告

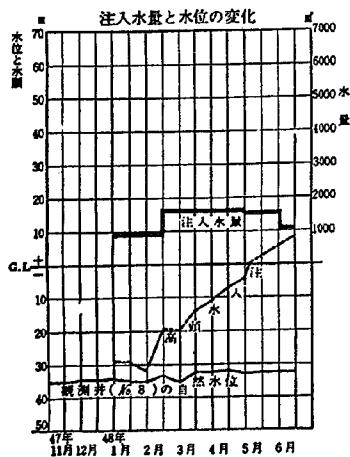
○本田 利男(大東市水道局) 南 魚郎(大東市水道局)

1、地下水位の低下による地盤沈下、地下水の渇竭による水源欠乏地域の続出、都市の地下構造物に起る積欠状態等は、地下水の自然涵養の遮断、過剰汲上げによる地下水位の低下が主因と言われている。

急速に進む開発は、遊水池の役割を果たしていた沼沢、水田、水路を減少させ、森林の伐採、河川の汚濁、工場、住宅の建設、下水道の整備、道路の舗装等都市構造の近代化は居住の基盤である大地の水を奪う状況促進している。これらは自然の摂理を遮断するもので、人工的にこれらの悪循環を改造し自然のサイクルを復活する方法としての人工地下水涵養を実現し、地盤沈下の防止、地下水位の回復を計るとともに、水資源の貯蔵、即ち地下水の増強を計る事を考えこの実験を行つた。



本市の水源は用水供給水道である大阪府営水道より75%、大阪市より4%、21%を地下水による自己水源でまかなひ、1日最大43,200m<sup>3</sup>/日を配水しているが、夏期ピークを除いて府営水道の受水量に余力があり、需用量は30%減少するのでその時期に自己水源の地下水を停止し、府営水道の水を、井戸を使って、逆に地下に注入する実験を昭和48年1月より、6月中旬まで164日間に亘つて行ひ、1本の

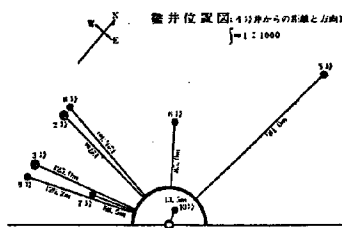
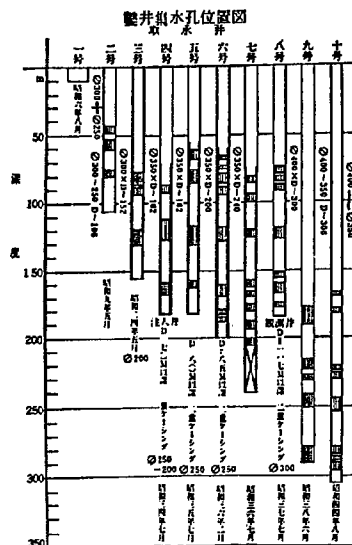


井戸に234,000m<sup>3</sup>の水を注入した。

2、注入施設は口径Φ350%、深度182mの廃井(昭和34年完成、41年迄使用)を内部にΦ200%のパイプを挿入し二重ケーシングを施して使用した。

注入水は浄水を使用する事が不可欠の条件と考え、1月5日より、2月14日までは地下水を浄化した浄水と、府営水道浄水(淀川水源)の混合水、後期は府営水道浄水のみによつた。

濾過法に緩速濾過と急速濾過がある。地下水涵養に於ても河川、湖沼等遊水池に類する不圧層の涵養は緩速濾過に当り、被圧層の涵養、即ち深層涵養は急速濾過法に相当するもので、深井戸による深層注入(成い



4号井の観測結果の表

| 観測日        | 547.6.23 | 547.7.25 | 547.8.25 |
|------------|----------|----------|----------|
| 観測時刻       | 15:10    | 9:30     | 6:40     |
| 水温 (℃)     | 21.0     | 21.0     | 21.0     |
| 水質 (℃)     | 20.5     | 21.0     | 20.5     |
| 湿度 (度)     | 8        | 0        | 0        |
| 色度 (度)     | 10       | 12       | 8        |
| pH         | 7.1      | 7.2      | 7.1      |
| アルカリ度 (度)  | 294      | 295      | 298      |
| 硬度 (度)     | 22       | 30       | 30       |
| 鉄 (ppm)    | 7.7      | 7.4      | 8.6      |
| マンガン (ppm) | 5.37     | 10.11    | 8.22     |
| 硫酸根 (ppm)  | 133      | 143      | 139      |
| 塩素 (ppm)   | 1.45     | 0.95     | 1.00     |
| マンガン (ppm) | 0.38     | 0.37     | 0.38     |

折角注入した水も他に流出してしまうと心配されるが、地下水の流速は1日1m或はそれ以下と言われる。注入時は落差が大きく、流速は早い、注入点を過ぎると流速は減少して散逸しない事は、アルカリ度を目安に回収水量を測定した結果、6井で4ヶ月間に約6万 $m^3$ が回収され、周辺の他の取水から混合揚水された水量を推定合計すれば、注入水量23万 $m^3$ の約48%11万 $m^3$ が回収された事になり、自然水位も前年に比べて1.5m上昇し

急激注入)は前処理が必要条件と考えられる。さもなければ永続性がない。小さいスクリーンと砂層のすき間を効率よく通過するためには清澄度の高い水でなければ忽ち目づまりを起す事は、濁度5度以下に処理された水でも濾過持続時間を10日間に延長する事は難しい事でも判る。

3、注入水を化学的に処理して拒絶反応を解消する方法も考えられるけれど、諸条件を考え水道水源で地表水を取水している場合等、オフ、ピークの余剰水を用いる方法は実施し易く、更に湖沼、河川水を涵養専用の浄水場によつて大規模に注入したら、利水率11%と言われる我国河川の利用率を大巾に引上げ、地中ダムの効果が期待されるのである。

4、注入井は6井、観測井は6井で、注入水は浄水場内の送水管から分岐し特別に加圧ポンプを設けなかつた。

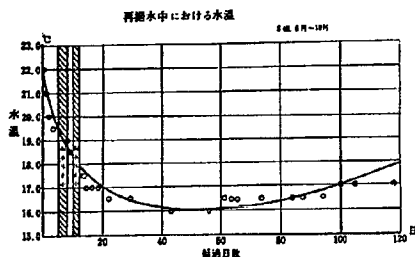
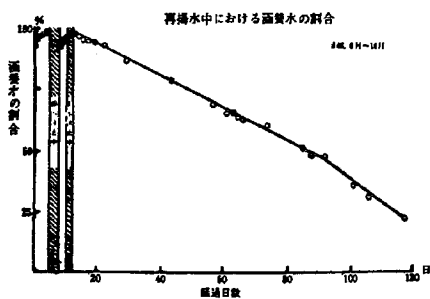
注入開始は、昭和48年1月5日、2月14日まで注入量を0.8 $m^3$ /分(1日1,152 $m^3$ )注入水頭高は自然水位+7m、後期2月15日より1.3 $m^3$ /分(1日1,872 $m^3$ )に増加、注入水頭高、自然水位+15m、4ヶ月後の5月末から6月中旬には0.1より7m上昇し、自然水位+39mになった。6月に入つて需用量の増で定額注入はできなかつた。164日間の注水継続で目づまりが徐々に増加し、注入抵抗が増えた。その主因は蒸発残留物と残留塩素による地中物質の酸化によると考えられる。

5、6月27日より注入井より揚水を行った。結果は注入した水が相当回収されたこと、水温は6井の従来の水質(固定水温)より揚水当初は高く、徐々に低下して固定水温より低くなった。これは揚水当初は後半注入した初夏の水が回収されて高く、後で冬期、1月~3月頃の冷たい水が回収されて来たためである。

折角注入した水も他に流出してしまうと心配されるが、地下水

| 測 水 日          | 戦前測水と戦時測水 |        |       |       | 戦 時 測 水 |       |       |       |
|----------------|-----------|--------|-------|-------|---------|-------|-------|-------|
|                | 54年-17    | 54年-18 | 54年-2 | 54年-6 | 54年-10  | 54年-5 | 54年-3 | 54年-3 |
| 測 水 用 川        | 11:00     | 10:20  | 10:40 | 10:20 | 10:10   | 15:10 | 15:20 |       |
| 矢 量 (T)        | 5.0       | 3.0    | 11.0  | 16.0  | 14.0    | 16.0  | 16.0  |       |
| 水 量 (C)        | 5.0       | 12.5   | 15.0  | 15.0  | 14.0    | 16.0  | 16.5  |       |
| 水 深 (C)        | 0         | 0      | 0     | 0     | 0       | 0     | 0     |       |
| 負 重 (度)        | 4         | 0      | 7     | 1     | 1       | 2     |       |       |
| 下 日            | 6.0       | 7.1    | 7.2   | 6.4   | 6.5     | 6.2   |       |       |
| アルカリ (度)       | 62        | 37     | 110   | 15    | 17      | 14    |       |       |
| 日 量 (度)        | 17        | 16     |       | 4     | 4       | 13    |       |       |
| 重量 (g) (PPM)   | —         | 1.15   | 0.40  | 戦前測水  | 戦前測水    | 戦前測水  | 戦前測水  |       |
| 酸素 (g/L)       | 33.0      | 33.0   | 72.0  | 14.7  | 12.1    | 16.0  | 16.0  |       |
| 塩素 (g/L) (PPM) | 5.37      | 6.32   | 6.00  | 2.21  | 5.10    | 5.10  | 5.10  |       |
| 鉄 (PPM)        | 07        | 03     | 118   | 27    | 33      | 37    |       |       |
| マンガン (PPM)     | 0.01      | 0.01   | 0.01  | 0.02  | 0.01    | 0.01  | 0.01  |       |
| マグネシウム (PPM)   | 戦前測水      | 戦前測水   | 0.03  | 戦前測水  | 戦前測水    | 戦前測水  | 戦前測水  |       |

| 期 日        | 6/15-17 | 6/19-7/1 | 6/23-7/13 | 6/27-6/28 | 6/30-7/28 | 6/29-7/29 |
|------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 経常収益額(百万円) | 0       | 9        | 16        | 42        | 82        | 141.0     |
| 売上 時価      | 18140   | 10130    | 15180     | 9110      | 10200     | 14110     |
| 売上 簿価      | 22.5    | 25.0     | 35.0      | 54.0      | 52.0      | 24.9      |
| 企画 簿価      | 32.0    | 15.5     | 12.0      | 16.0      | 16.8      | 16.5      |
| 経費(簿価)     | 200     | 160      | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 経費(時価)     | 300     | 40       | 0         | 0         | 0         | 0         |
| 利益(簿価)     | 0       | 5.50     | 5.75      | 5.5       | 5.6       | 5.9       |
| 利益(時価)     | 25      | 31       | 31        | 55        | 80        | 132       |
| 経費(簿価)     | 35      | 28       | 27        | 28        | 29        | 29        |
| 経費(時価)     | —       | 6.70     | —         | 6.00      | 5.1       | —         |
| 経費率(簿価)    | 24.1    | 16.9     | 16.5      | 17.0      | 18.9      | 18.9      |
| 経費率(時価)    | 31.6    | 17.00    | 4.16      | 5.16      | 5.73      | 6.06      |
| 経費率(簿価)    | 64      | 31       | 45        | 83        | 71        | 87        |
| 経費率(時価)    | 12.4    | 5.80     | 0.80      | 0.93      | 0.42      | 0.56      |
| 経費率(簿価)    | 60.0    | 3.30     | 6.32      | 10.0      | 11.0      | 22        |



6、今日まで地下水を利用し、水位が低下し、地盤沈下始め環境破壊を起している地帯は人工地下水涵養を行わねばならない地域であり又行ない易い処である。即ち水を求める「渴ける大地」なのである。

地下は膨大なダムであり、太陽熱によつて淡水化された自然水が安全に貯えられる金のかみらない器である。しかもその水は地殻を構成する重要な要素でもあるのだ。今日までその地下水を無秩序に使つて來たのであるが、これからは人間の工夫によつて、更に高度利用を計るようになさなければならない。

「入れただけ汲めば地盤は沈下しない。」  
「沈下ないように地下水を利用する方法。」  
それが人工地下水である。地下は汚染を受け  
ない安全な水を貯え、水資源開発の大きい偉  
力になるものと信じる。