

深井戸を使用した地下水強化と問題点

村下 敏夫

昭和50年代は 深刻な水不足の時代になるといわれている。各都市にある水道の取水施設は ほとんどのところで 50年までの水需要に対処できるだけの能力をもち合わせていないようだ。

水道の水源は おもに河川水と地下水である。河川水を増加させるには ダムによって洪水時の水を貯留しなければならないが ダムを築造して豊富に貯水できるような地形・地質のところは すでに開発されているからこれから造るとなると 水価の高いものになる可能性がある。また 地下水の利用は 人口密度の高い都市では過剰汲み上げの状態にあって 地盤の沈下や海水の侵入の原因となっているので 地下水使用が むしろ積極的に制限される情勢にある。大都市周辺では 地下水が人工的に汚染を受けていて 地下水使用が危険な状態にある地区もあらわれてきている。このような事情の下での新たな水源は わが国の周囲に豊富にある海水であることは 周知のことである。淡水を海水から造水する技術は 東京工業試験所をはじめとして民間で研究されている。しかし 現在実用化されているのは 水価の面で 特殊な水事情にあるところに限られている。そして 将来においても 原料となるきれいな海水の確保と造水基地から需要先までの距離などの経済性—終局においては水価に戻るであろう—が 新たな障害となりそうである。

また ある識者は 水コストの面から 海水の淡水化よりも下水の再利用の方が海水の淡水化に先行して実行されるのではないかと述べている。この方法ならば水を必要とする都市やその近くで 下水が手やすくえられる利点がある。

さて 本文でいう 「深井戸を使用した地下水強化」とは 地表にある水を井戸を通して地下の大きなタンクの中に注入して 減少していく地下水の量を増加させようという方法である。

わが国の地下水は

- 1) 良質である
- 2) 低温で安定している
- 3) 自分の土地で自由に使用できる
- 4) 水道料金に比較して安い

などの利点をもっているのに 至るところで使用されている。用途は 家庭用のほかに 都市水道・かんがい・工業・冷房・消雪・養魚などの多方面にわたっている。これらの用途に使用される地下水の量は 推定で日量約 2,000万 m^3 である。この水量は わが国の降水量の約 1%に相当する。また 地下水を大量に汲み上げる季節は 水道・かんがい・工業・冷房の使用量が最も多い夏季である。しかし 最近北陸地方では 冬季の地下水使用量が急に多くなってきた。この地下水は消雪用のもので 降雪時に 水温を利用して道路・鉄道・屋根の雪を融かしてしまおうというものである。この方法は 経済的にすぐれており 冬季の輸送路を確保するのに 大いに貢献している。ところで わが国の冬季は 地下水の補給がにぶく また従来は地下水の使用量が少ない季節でもあったので この間に地下水の回復が徐々に進み 次の夏季の汲み上げに対処できたのであるが この季節での地下水消費は 地下水の消耗を一層はげしいものにし 水源の枯渇・地盤の沈下など新たな社会問題を起こしつつある。地下水は 水価の安いすぐれた資源であるから 狭い敷地内で 大量に汲み上げられている。そのために 地下水の水位が低下して 揚水量の減少や 広い地域にわたって発生する地盤の沈下や海水の侵入などの主原因となるのである。

水位の低下は 汲み上げ量がその土地に集まってくる地下水量を上回るから起こる。地盤の沈下も海水の侵入も 自然的原因によって発生するが その度合は人為的な原因に比較して はるかに小さい。

地下水の汲み上げによっておこる水位の低下を防止するには いろいろな方法がある。工業用水・建築物用地下水については法律により また法律が適用されていない地域の地下水については条例により 汲み上げを制限する施策がすでに講じられている。別の案としては 地下水を人工的に増加させ 水位の低下を防ごうという考え方である。これには種々の手法があり また天然に地表水が浸透して地下水となる機構を 人為的に行なおうとする方法であるだけに 技術的・経済的に多くの難問をかかえている。

水位が低下して消耗しつつある地下水を強化する目的で 人為的に水を地下に浸透させる方法に 地表散水法

と地下注水法とがある。

地表散水法というのは 地表に水を張って 地下に浸透させる方法で わが国では水稲かんがいがその好例である。水田を通して地下に浸透した水が 地下水の増加に大いに貢献していることは 周知の事実である。

地下注水法というのは 井戸を通して 地下に水を直接浸透させる方法である。井戸には 地下水面まで達していないものと達しているものがある。水面に達しているものの中には 自由水面を有するものと圧力水面を有するものがある。

地下注水法は わが国では昭和20年台から試験的に始められ 自由水面をもつ浅井戸と圧力水面をもつ深井戸の方式が採用されている。地質調査所が昭和35年度から行なっている地下注水の実験では 深井戸方式が対象となり また民間が行なった注水もほとんどがこの方式であった。

井戸による地下水強化の手法は 目的によって異なる。たとえば 扇状地の地下水を増加させる目的であれば 注水地点は扇頂部で 井戸は浅井戸であろう。海水侵入地帯では 地下水面が海水準よりも低くなっているのであるから 地下水面が海水準より高くなるように 注水井戸を内陸に掘って注水するか または海岸線沿いに井戸を並べて注水し水の壁を作れば 海水侵入が防止できよう。また 地盤沈下地帯で沈下の抑制の目的であれば それに適合した手法が考えられよう。

地下注水法は 井戸を掘って水を注入する方法であるから 注水の目的は上記のように異なっても 井戸

の構造 注入水の水質 注水の方法 そしてそれに付随する問題点などは 基本的には同じであろう と考えられる。そこで過去に筆者を含む地質調査所の研究グループが 深井戸を使用して行なった地下注水実験と事業所が行なった実験の結果から 深井戸を使用した地下水強化を実施するに際しての技術と 将来この方法を応用するときに解決しておかなければならない問題点について 以下に紹介する。なお これらの実験の目的は 冷却用のために汲み上げる地下水量が多くて 水位の低下が大きい地帯で 井戸を使用しての地下水強化の可能性を見出すことにあった。

おもな実験施設・実験内容は 次のとおりであった。

注水井戸 新しく掘きくした井戸と汲み上げを休止している井戸を使用。

井戸の間隔 深井戸が密集している地帯であるから 注水井戸と揚水井戸との間隔は30~100m。

井戸の構造 口径は隣接の揚水井戸と同じ250~300mm。注水する帯水層は 新設井戸のときには揚水井戸と同じ帯水層であったが 休止井戸のときには揚水井戸と必ずしも同じではなかった。

砂利充填の効果をj知る目的で 充填砂利がある井戸とない井戸を使用した。充填砂利がある場合には 砂利の上面から地表面までの間に セメントグラウトを施した。

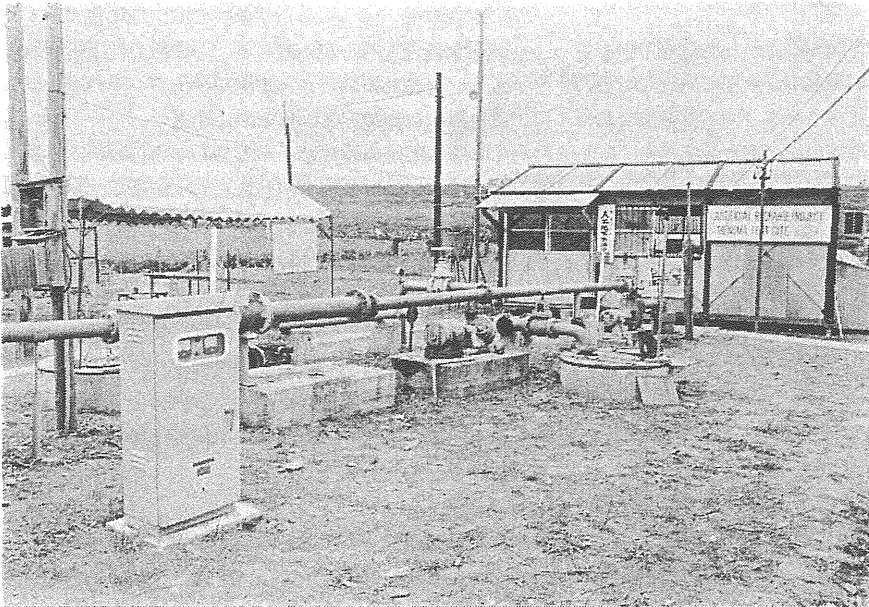


写真1
地質調査所の実験地
右の小屋は計器室
(埼玉県妻沼町)

一部の井戸の外周に 小口径のパイプを設けた。このパイプのストレーナは 注水井戸と同じ帯水層で同じ長さであった。この目的は パイプの中の水位の変動から 化学的現象と関係のある目づまりや 井戸のストレーナを通して充填砂利の中に水が流動するときにおこる水頭損失を知ることと もし目づまりが生じたときには このパイプを通して圧縮空気を送りこみ 注水井戸の外側から井戸掃除をしよう という試みであった。

注 入 水 注入に使用する水は 冷却後の排水と河川水であった。冷却排水には懸濁物質が少なかったが温度が高く40℃に近いものもあった。河川水は 前処理がなされた。一部の注入水については 塩素滅菌が行なわれた。

注 水 法 処理した河川水や冷却排水を水槽に一たん貯留してパイプで井戸まで導水する方式と 排水が直接空気にふれないように冷却箇所から井戸までパイプで導水する方式とが採用された。

注水井戸内では 注水管が常時水面上にあって 注入水が水面をたたくように落下する方式と 注水管が常時水面下にあるようにした方式とが採用された。

効果の測定 注水の効果は地下水位の上昇によって知ることができるので 隣接井戸（揚水または休止井戸）を観測井戸として使用した。また 注水によって生じる水温の上昇は 同じ井戸に 自動記録装置付きの温度計を挿入して 観測した。

上記の手法で行なった注水実験の結果と考察は 次のようにまとめられる。

1. 注水によっておこる水位の上昇は 注水井戸に近い揚水井戸で大きかった。
2. 注水量は 透水性がわるい 水位低下が小さい注水井戸で少なく また注入時の水位が自然水位よりも高くなると 極度に減少した。そして注入時の水位が地表面よりも高くなると 注水井戸の周囲に注入水が噴出し 地面に陥没が生じた。この現象は 注水する帯水層が浅い

（実例では30～50mの深度）ときにおこるのではないかと考えている。もし注水帯水層の上位にいく枚かの砂れき層があって透水性があれば 余剰の注入水はその中に逃げて 地表には噴出しなかつたかもしれない。

3. 注水井戸と揚水井戸の帯水層が同じで間隔がせまい場合には 水位の上昇や揚水量の測定から判断して、注水量の80～50%が回収された。
4. 注入水の温度が高いと 水圧の低下が著しい帯水層で 井戸間隔がせまいときには 温度の影響が揚水井戸に顕著にあらわれた。たとえば 透水係数 $1 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ の帯水層に 水温38℃の冷却排水を毎時36m³の割合で注水したら 24時間後に 30m 離れた井戸水の温度が19.8℃から25.9℃に上昇した。またある例では60m離れた井戸に継続して注水していたら 1ヵ月足らずの中に 揚水井の水温が注入水の温度とほぼ同じになった。
揚水井戸がストレーナの多い多層採水井戸である場合には 水温の上昇はわずかであり 注水の継続による温度上昇の割合も徐々であった。しかし 両井の帯水層が全く異なる場合には 注水効果はどの揚水井戸にもあらわれなかった。
5. 注水量は 注水時間が長くなると減少した。減少の割合は とくに注入水の水質と関係が深いようであった。たとえば 注入水に懸濁物質や空気含有量が多いと 短時間の中に井戸内の水位が上昇して注入量が減少したが 冷却行程や注水過程において 可能なかぎり水が空気にふれないようにすると 注水時間を長く保つことできた。注水量の減少の

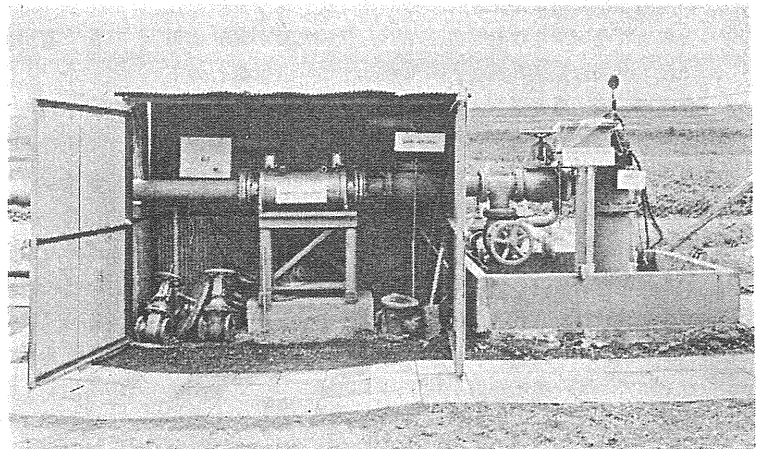


写真2 注水井戸(右)と流量計(左)

原因は このほかに 注入水の水質が地下水の水質と著しく相違するときで 帯水層において 注入量が減少するような化学反応が生じることも考えられる。注水量の減少は 一般には「目づまり」という莫然とした用語で表現されているが 数量としては比注水量（水位上昇1mあたりの注水量）で表現をすることができる。

6. 目づまりが生じて 注水量が著しく減少した井戸を揚水すると 注水開始前の状態に回復させることができた。しかし 目づまりを除去するために行なう揚水を頻繁に繰り返すと すでに室内実験によって明らかにされているように 井戸に近い帯水層内で水とともに動く砂がストレーナの目を塞いだり 充填砂利の間隙率を減少させて 人為的に井戸の透水性をわるくすることがある。

7. 充填砂利の効果は 十分に知ることができなかつた。

注水実験の結果 注水効果は地下水位の低下がいちじらしいところで大きいことが 明らかとなった。地下水を冷却用水として多く使用している工業地帯において 冷却排水を地中に還元して 地下水の強化を実施する際の問題点は 次のように列挙できよう。

1. 注水量をあげるためと 注水によって生じる温度汚染を極力防止するのに必要な揚水井戸と注水井戸との間隔と注水帯水層の決定

注水量は 透水性がよくて 水位低下が大きい帯水層で井戸間隔がせまいほど多いが 注入水の温度が高いと地下水が枯渇に近い状態にある地帯では温度の伝導が速い。注入水が自家構内の深井戸によって100%回収されるのであれば 温度が上昇した地下水による被害は自分のところだけですむけれども 井戸の密度が高い地帯では 被害は周辺の深井戸にも波及する。低温の地下水とはいえ 冷却温度ぎりぎりの水温で製品が処理されている場合には わずかな水温上昇でも 製品の質が落ちる。これは 注水実験が失敗に終わる主要原因の一つにあげることができる。注入による地下水温の上昇を避けるために 排水の温度を人為的に下げる施設——たとえば冷却塔をつくることも必要であろう。ただし この場合には 目づまりの最大の原因となる注入水への空気の混入はさげられないであろう。帯水層が広がりをもっていて その水位が低下していれば 注入した水は必ず地下水となる。注入の対象となる砂れき層が数

多くある場合には どの層に注水したら最も効果的であるかを知ることが必要である。もし帯水層ごとに透水性がわかっているならば 透水性の大きいものを選択すればよいが それができている井戸の場合には 温度の高い水を井戸内に注入した後に深度別に水温を測定する便法もある。東京や新潟で古井戸を利用して行なった実験例では 透水性のよい帯水層の水温が透水性のわるい帯水層の水温よりも高い という結果がえられた。

2. 注水井戸における適正な注水量の維持

注水井戸の注水量を計算する理論式は 井戸の揚水公式と同じである といわれている。揚水公式に 平衡式と非平衡式とがあるように 注水公式にも二通りがあるろう。注水量が揚水量より少なくまた等しく維持されていけば 注水時の水位は安定するであろう。注水量の方が多ければ 注水水位は上昇するであろうが この場合に水位を一定にして注水しようとするならば 揚水井戸の定水頭試験と同様に 注水量は経過時間とともに減少する。

注水量が 実験の結果では揚水公式を使用して求めた計算値の50~20%程度であったから 注水は成功しなかつたと批判されることがある。しかし その批判の中には揚水井戸の実揚水量と理論量との差であるストレーナの水頭損失による水位降下の補正を 注水量の計算過程で忘れていること または定水頭注水であるという前提条件を無視した議論になっていることがある。

揚水井戸に ある揚水水位で定まる限界揚水量があると同様に 注水井戸にも注水量の限界があるように考えられる。この水量は周囲の揚水状態——地下水位の低下の状態により変動するかも知れないが もし維持することができれば 注水時間は長くなるであろう。

3. 目づまり除去のために行なう揚水の経済的評価

水位の上昇が著しくて 明らかに目づまりが生じたと判断されたときに揚水を行なえば 注水井戸の機能は再び回復するが このときの揚水には複雑な問題がある。

その一つは 目づまりがひどくて揚水量が注水量と同じになることである。同じくなれば 注水の意味はまったく失われてしまう。次は 目づまりが起る時間が速くて 揚水が頻繁になることである。揚水の繰り返しがはげしいと 井戸の注水能力が衰退する。前にも説明したように 充填砂利があるときには 揚水時に細砂がその砂利の中に侵入して砂利の間隙をうめ また

は砂利と帯水層との間に集積して見掛け上井戸の透水性が低減することがある。

実験の結果 充填砂利の効果が十分に解明できなかったのは 目づまりが以上のような物理的原因だけではなく 多分に化学的原因によっても生じるので その区別が判然となしえなかったからである。 いずれにしても注水井戸における砂利充填の意義については 本質的に検討する必要がある。

4. 注水に要する諸経費と水価

注水にあたっては 注水井戸・水処理・受水槽 配管動力などの施設が必要であり 注水中は水位・水質・水温の観測を継続しなければならない。 そのためには 配管・動力の設備に対してだけでも 100万円以上の経費が支出される。

注水の目的によっては 注入水は清潔な水で空気のないものでなくてはならないし また井戸の数・配管の長さも増加する。

これらの施設費と管理費を含めると 水 1m^3 あたりの値段は 都市水道の料金に近いあるいはそれ以上になるかも知れない。 われわれの実験が始まった当時 深井戸の水価は 1m^3 あたり2円内外であった。 しかし注水が 地下水強化以外の目的をもっていて その目的をも十分に果たすのであれば 水価が高いことは論外ということもありうるであろう。

地下水を多目的にかつ大量に使用している工業地帯において 井戸を使用した地下水の強化を行なう場合には上記のように 解決すべき問題が山積している。 その中でも 大きな問題は 繰り返し説明しているように 水価と汚染とである。

製紙廃水による港湾・海洋の汚染が目ざされている富士市が 地下水の大量汲み上げによる海水侵入の著しい地帯であることは 周知のことである。 海水侵入を防止する対策の一つとして 海岸線に注水井戸を配列して地下水の水位を高めようという提案が 当初にあった。 しかし 当地区では大量かつ良質の注入水が確保できるならば そのまま製紙用水として利用することが可能であり また万一注入水に汚濁水が混入すると 良質の地下水が汚染されて 飲料水に悪影響を及ぼす恐れが十分にあった。 そこで 現状では 地下水の汲み上げ量を大幅に制限し 工業用水道による供給が 水価の点で有利であると判断されて その方の施策が進められている。

冷却用水の水源を 地下水から地表水に切替えることは 技術革新によって比較的容易になってきた。 たと

えば 毎時 100m^3 程度の水は 冷却塔を使用することによって 新設井戸の場合と同程度の水価で生み出せる。 また 地下水源に乏しい地帯では 少量の原水を生産行程において 高度に再使用する工夫がなされるようになった。

注入水による地下水汚染には 化学的汚染のほかに温度汚染がある。 そして 冷却排水を使用しその地下水強化が失敗に終わったとよく結論づけられる実験の中には 温度上昇の予測が不十分であった例が意外と多い。 注水実験が成功している例は 冷却排水の温度が高くなくて 極力空気が注入水に混入しないような施設を通して 地下に戻している場合である。

井戸の密度が高い地帯では お互いが地下水を略奪している。 注水実験の例からも理解されるように 自家構内での揚水井による注水量の回収は 100%ではなく 残りは隣接工場の深井戸で回収されている。 したがって 汚染は恐ろしいのである。 とくに 井戸による地下水強化が実は毒水の処理であれば なおのことこの問題は深刻である(地質ニュース・No. 197 恐ろしい廃水の地下水汚染——新しい公害発生への警告参照)。

実験に先立って 水温変動の計算が行なわれる。 その計算過程においては 帯水層の容積が大きくかつ地下水の流速が小さいので 高い排水温も地温によって大きく低減されるであろう という常識的な考え方が支配的である。 しかし 現実には 地下水位が低下しておりかつ揚水によって地下水の流速が大きく 理論通りには地下水が帯水層内を一様に流れていない。 したがって注水の初期には排水の温度が低下しても 継続して注水している間に 帯水層の温度が上昇し 排水温が異常に高い場合には 使用に耐えない地下水に変化してしまうのである。

注水実験の段階において 汚染という思わぬ伏兵によって失敗した過去の例から 地下水位低下の著しい地帯でかつ地下水の用途がそれぞれ異なっている業種が隣り合っている地帯で 井戸による地下水強化を成功させるには 地下水利用者間相互の理解が 十分でなくてはならない。

外国においても 注水に係る問題には 井戸の目づまりや水価ということ以外に 注入水による地下水の汚染がある。 注水の目的がたとえ重大な意義をもっているとしても 注入水が毒水であるために良質の地下水が汚染されることは 水資源の保護の面から 絶対に許されるものではない。