

地下水人工涵養技術シリーズ (その2)

土研資料 第1498号

土 木 研 究 所 資 料

注入井による地下水の人工涵養

昭和54年 2 月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

は　じ　め　に

地下貯水池は流域の表流水、地下水を一体管理し、流地の水循環を人為的に操作して水資源開発を行なうシステムを意味するが、その建設に当ってはまだ解決されなければならない課題が山積している。その一つに、地下水涵養技術が挙げられる。河川水と地下水を一体とし、有効に水資源開発を行なう上では、表流水の地下水への人工涵養技術が不可欠である。

本書は地下水人工涵養技術の一般論に続き、注入井による地下水技術についてとりまとめたものである。注入井による地下水涵養技術において最も重要な課題として立ち塞がっているのが目づまりの問題である。目づまりの原因とその対策について、注入井による地下水涵養の実施例、現地実験および室内実験を基に解説する。まず、第一章においては、注入井による地下水涵養を実施する場合に、必要と思われる技術的知見を、現場の人々が応用できるように配慮した。第二章では、目づまりの発生機構の解明と目づまりの防止と回復を明らかにすることを目的として、既往現地実験の検討、室内実験を実施したので、この結果について解説する。

目 次

I. 井戸による地下水涵養	1
1. 井戸周辺の水理現象	1
2. 涵養井, 揚水井	4
3. 涵養による影響	6
3-1. 水質におよぼす影響	6
3-2. 地層におよぼす影響	8
3-3. その他の影響	8
4. 井戸による代表的な実施例	9
4-1. 外 国	9
4-2. 日 本	15
5. 浅層地下水への注入	19
5-1. 不圧地下水での井戸周辺の水理	19
5-2. 不圧地下水への注入による, 目詰りに伴う水理現象	19
6. 目詰りとその対策	21
6-1. 目詰りの原因	21
6-2. 目詰りに伴う比注入量の減少	22
6-3. 目詰りの防止と回復	23
7. 注入井の適用にあたって	25
II. 目詰りの原因と対策	29
1. 実施例から見た目詰りの原因とその現象	29
1-1. 実施例における目詰りの原因	29
1-2. 目詰りの現象	48
1-3. 現地実験にみられる注入量	50
2. 目詰りの原因	52
2-1. 注入水中の懸濁物による目詰り	52
2-2. 滞水層内の化学反応による目詰り	56
2-3. 井戸や滞水層での微生物の増殖による目詰り	56
2-4. 気泡による目詰り	58
2-5. 溶解鉄・マンガンおよびストレーナーの腐蝕による目詰り	60
2-6. 土粒子の配列変化による目詰り	63

3. 目詰りの防止	64
4. 目詰りの回復	72
4-1. 再揚水の効用	72
4-2. 再揚水の方法	72
4-3. 再揚水の効果	73
4-4. 現地にみられる再揚水による回復	77

I. 井戸による地下水涵養

地下水かん養を効率よく行い、かん養地下水を有効に利用するために、地下水の挙動を完全に把握すれば、かん養計画、利用計画の立案が容易にでき、地下水かん養の正否を判断できる。しかし、地下水挙動についていろいろの研究者によりある仮定のもとにおける理論式が出されているが、帯水層の広がり、形状、透水係数、地下水の利用状況等により地下水の挙動が異なるので、水理計算により推測することは難しい。

このような背景のため井戸の水理も理論的に現象を表現することは困難であるから、井戸の水理の問題点を主体に述べ、ついで涵養井・揚水井について注入による障害、あるいは井戸注入の実施例を述べるものとする。

1. 井戸周辺の水理現象

井戸周辺の水理現象は、帯水層の性状、地下水条件、自然涵養条件、周囲の揚水等による干渉条件、又目づまり現象等が複雑にからみ合い、一つの現象を引き起こしている。

一般に Darcy 則が成り立つ層流であるとして扱った井戸周辺の水理現象については、

- 定常運動及び非定常運動、理論

を始めとし、

- 自由地下水の場合、被圧地下水の場合

- 単井（完全井及び不完全井）の場合干渉井戸系の場合

- 帯水層が単一の場合、多累層の場合

- 水質拡散、熱拡散の問題

など、多くの浸透に関する理論解析がなされてきている。^{4) 5) 6) 7) 8) 9) 10) etc.}

また、現位置の面的な帯水層の厚さの分布、透水係数の違い、揚水実態、自然涵養量の分布等を考慮するため、平面二次元等のシミュレーションモデルを作成して予測を行った事例も多く見られる。^{6) 7) 8) 9) 11) 12) 13) 14) 15) etc.}

しかし、井戸近傍における水理現象には、生物、化学的現象を始め、井戸周辺の乱れの発生、粒子再配列、井壁損失等の影響から定量的に評価しにくい現象が出現する。生物・化学的目づまり現象については第Ⅳ章で記述する。

イ) 井戸周辺の乱れの発生

図 1-1 は、大阪市鶴見区鶴見緑地で行われた井戸による人工涵養の実験結果に Dupuit の理論式による同条件の水面勾配を示したものである。

縦軸に注・揚水井（注水と揚水を兼ねる）の水位変動量と観測井水位変動量の比を横軸に、中心井からの距離を取っている。図を見る限りでは、実験初期の段階揚水の際の井戸から 10 m 程度までの水面形は、理論式で比較的良く近似されているが、実験を重ねるにつれて、理論式との

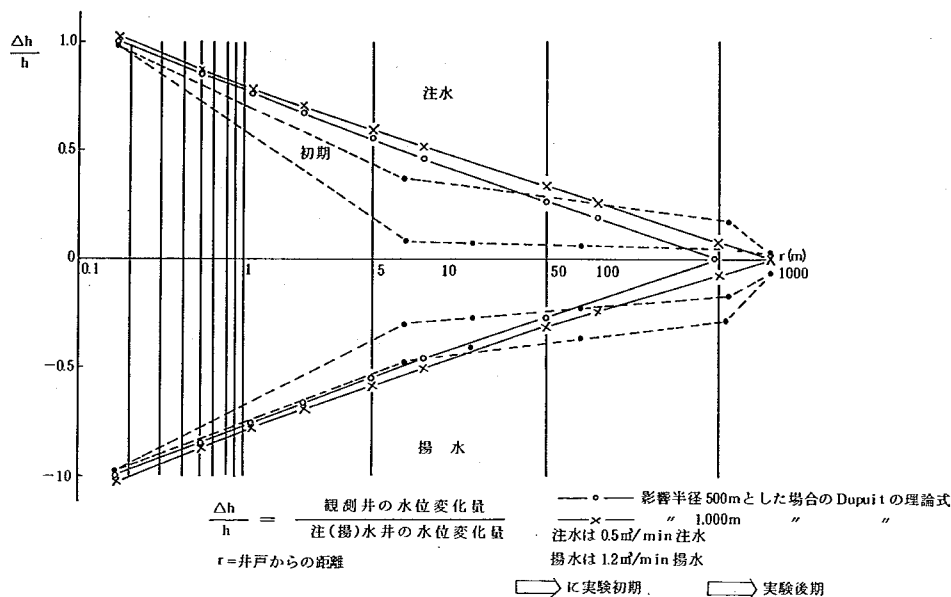


図 1-1 大阪における実測値と理論値の比較

差が大きくなってゆく。又、その差は揚水の場合より注水の場合の方が大きく、井戸近傍で急激な水位勾配をもたらす。

過去の報告を見ると、放射流では井戸付近と離れた点では流速が異なるために、各地点で Re 数の値が異なる。井戸周辺の流れは定常流において揚水の場合と注水の場合と低坑則が乱れの発生、消滅過程で異なり、流量と水位水頭が両者で異なる。

Diverging flow (注入に対応する) の場合は井戸近傍での損失水頭が大きく、これに対し Converging flow (揚水に対応する) の場合、ポテンシャル理論から求められる水頭分布とよく一致する。そして、通常言われている注水と揚水の関係式は、帯水層厚さに比べて井内水位の小さい場合に適用可能であるが、変動が大きい場合には乱れによる損失を考慮しなければならない。

乱れの発生と粒径という観点からは、通常乱流まで合む見掛けの流速 V と動水勾配 i の曲線は Dupuit-Forcheimer の式

$$i = a_1 V + a_2 V^2$$

(ここで a_1 , a_2 は多孔体と流体の性格で異なる定数で通常 $a_1 > a_2$)

の形をとるが、実験によると、粒径が小さい場合(標準砂程度)では第一項が支配的な Darcy 則に準ずる直線形を示すが、粒径が大きくなるにつれて二次曲線に近づくという報告がある。^{8) 16)}

しかし、いずれにしても、定量的な把握までは達していない。

ロ) 粒子の再配列

帯水層を構成している土粒子が、注水または揚水によりストレーナを通した流速が、一定流速以上(移動限界流速)になると、移動を起こし、既存の空隙をつめるような形で再配列をし、目づまりを起こす。

注水によって生じた再配列は、揚水により可逆性であるとは限らない。この移動限界流速は、土粒子に大きさ、骨格、質量によっても異なるが、一般的に図 1-2 に示すストレーナの開孔率と、帯水層土粒子の平均粒径の関係が言われている。これによって井戸一本当りの限界注入量、限界揚水量の一応の目安を立てることが出来る。

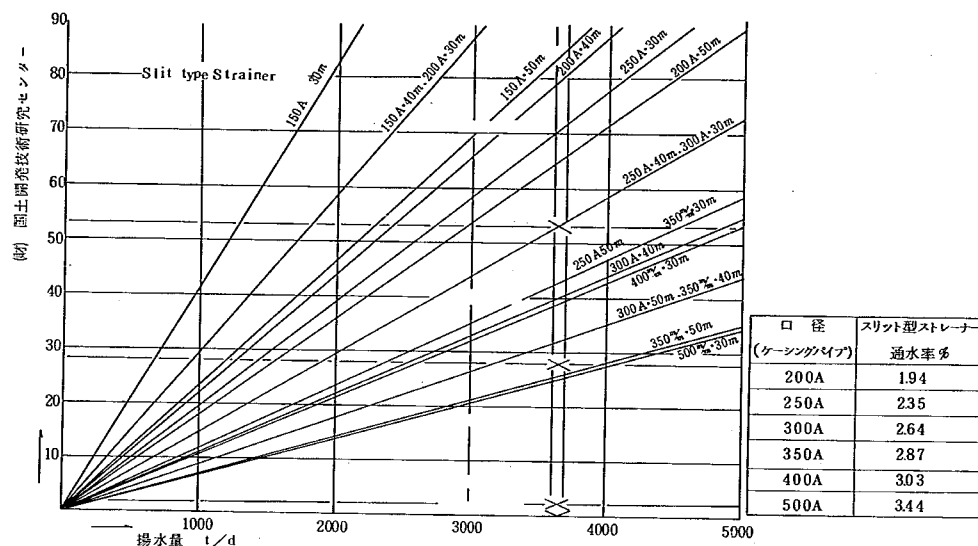


図 1-2 揚水量 — 砂粒流出限界 — Screen Pipe 関係グラフ

ハ) 井壁損失

ストレーナ及びグラベルバックキングによるエネルギー損失については、定量的な判断はない。ただ一般に注入・揚水・効率また浮遊物等の帯水層内への流入を出来るだけおさえるためグラベルバックキング層での捕捉、逆洗の効果等から、ストレーナの開孔率は 15~30% で、グラベル層は 75~100 程度あった方が良くと言われている。

これらの他にも生物化学的目づまり等地下水理論に定量的に反映することが困難な現象が、実地盤では生ずる。

いずれにしても、対象地域の水利・地質条件、地下水条件、涵養条件を十分に考慮し、理論式又は水利モデルに置かれている仮定を理解した上で、その適用・評価を考えてゆく必要がある。また、実際の運用に当っては、これら不確定量が観測できる様な観測体制（これは効果の確認のためにも重要である。）を施き、データの整理・解析を行うべきである。

2. 涵養井・揚水井

涵養方式と揚水方式を考える場合、環境へ与える影響を踏まえ、決定してゆかねばならない。この場合、適正注入量（揚水量）の問題、適正井戸配置計画の問題、注入水質等の問題が生じてくる。注入水質については別冊Ⅳで述べているが、ここでは効果的な注入井（揚水井）の設置について、一般的に言われていることについて触れる。

1) 掘さく工法

注入井の掘さく工法は、仕上げの効率を考慮し、深度が400 m以浅の場合はバーカッション式削井が望ましく、ロータリ式工法を採用する場合はできるだけベントナイト等粘性の高い泥水の使用を少なくして、仕上げを充分入念に行うべきである。

2) 井戸口径・深度

涵養効率をよくするため、注入管と逆洗用の水中モータポンプを別々に挿入する必要から、口径400 mm以上が必要とされ、管内外の水位観測の他に水質の観測も行えるよう大きい方が望ましい。又ストレーナ下部には長さ5～6 mの砂溜りを設け置く方が良い。

3) ストレーナ・ケーシング

ストレーナは線巻スクリーン、水平連続Vスロット、スリット型ストレーナ、グラベルスクリーン等があるが、一般に開孔率で15～30 %の大きいものが望ましい。材質はステンレスが良い。

ケーシングは鋼管の他、材質の許す限り合成樹脂管を用いても良いが、強度に注意を要する。また、ストレーナの上部は注入井が井戸の外側を上昇したり、汚水が上部より侵入しないよう完全な遮水を行うべきである。

4) 充填砂利（グラベルパッキング）

普通3～6 mm径の豆砂利を用いる。充填砂利の厚さは75～100 mmあった方が良い。

5) 注水揚水装置

注入方法には、自然流下注入法と加圧・注入法があるが、割れ目が多い岩石、又自噴水圧をもつ地層、天然ガス採取の場合等特殊な場合を除いて加圧注入は行わない。

自然注入法では、専用管によって注水を行う様にし、その際できるだけ空気が混入しない様に留意し、注入管の先端は井戸内の水面以下に入れる。また、注入条件を一定にするために注入水は、注入ポンプによって圧送した方が良い。

揚水装置は、注入管と別個に井戸内に設置し、水中モータポンプの場合は、その容量を注入量の2倍程度のものが良く、エア－リフト方式の場合は3倍程度の能力を有するものが望ましい。ちなみに注入適量は限界揚水量の約60 %程度が良いという報告もある。⁹⁾

これらを総合して、注・揚水装置の概念図を図1-3に示す。

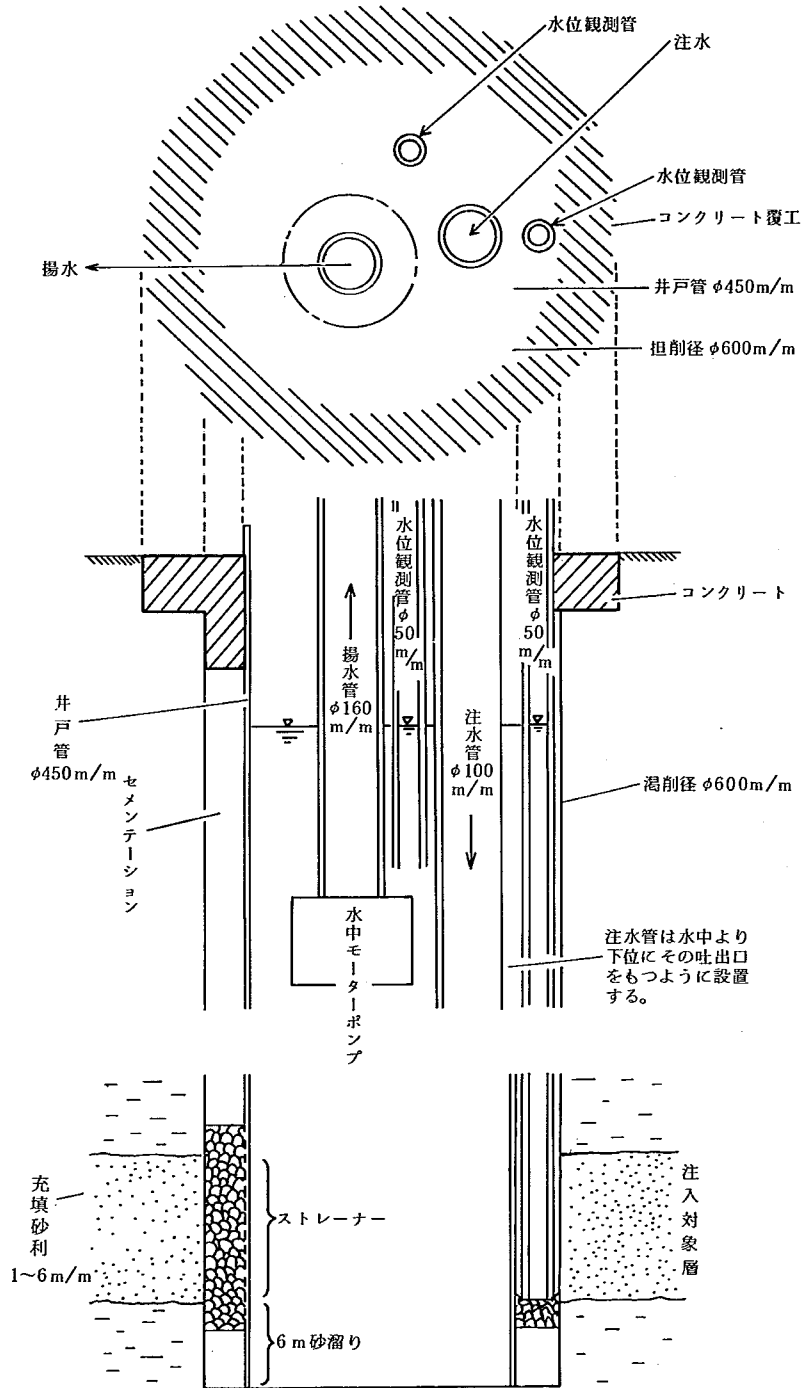


図 1 - 3 注入井戸構造図

3. 涵養による影響

3-1 水質におよぼす影響

注入井による地下水涵養を行なうと、注入水質と地下水質が異なることから、注入井の周りの地下水は注入水と混入し、注入水の影響をうけることになる。化学的な影響と生物学的な影響に大まかにはわけることができる。

化学的な影響による水質変化は、水理学的な移流分散、化学的な吸着、化学反応によって生じる。吸着および化学反応を伴わない。注入水中に含まれ溶解物質濃度変化は次式によって規定される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{q}{r} \frac{\partial c}{\partial r} = \alpha \frac{q}{r} \frac{\partial c}{\partial r^2} \quad q = \frac{Q}{2\pi n b} \quad D = \alpha q$$

ここに c はある物質濃度、 t は注入経過時間、 r は注入井中心からの距離、 Q は注入量、 n は間隙率、 b は帯水層の厚さ、 q は浸透速度、 α は長さの次元をもつ係数、 D は分散係数である。

上式の近似解として、分子拡散係数を考慮した場合について次式が得られている¹⁷⁾

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{r^2/2 - qt}{\sqrt{4/3 \cdot \alpha r^3 + (Dm/q) r^4}} \right)$$

ここに C_0 は注入水中のある溶解物の濃度、 Dm は分子拡散係数である。一般的に分子拡散は無視しえる。

人工かん養を行なうことによって地下水が汚染され、従来のままでは地下水の利用が不可能になることも考えられる。注入水中の細菌が距離とともにどのように移動するかについては米国カルフォルニアでの調査結果がある。この調査では清水に一次処理水を混合し、細菌数が $2.4 \times 10^6/100 \text{ ml}$ となっている注入水を連続注入しているが、観測井の細菌数を測定して表 I-1 のような結果を得ている。¹⁸⁾

この結果を見ると細菌汚染は注入初期に最大で、目詰りの進行に伴ない次第に減少している。汚染が現われる最大距離の観測井は南方向で 30 m 、他では 19.2 m であり、長時間注入しても細菌汚染の範目は 30 m 以上は広がらないと考えられる。

水質のうち、水温に与える影響は一般によく認められる。我が国における人工かん養の実施例では地下水の熱汚染を誘発している例が少なくなく、これが人工かん養の中止の原因ともなっている。熱汚染の多くは冷却排水をかん養水とした場合で、地下水温よりも $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 高い排水をそのまま井戸に注入した時に発生している。その汚染は自家構内の井戸だけでなく周囲の井戸群にもおよび地下水の流動方向や汲み上げ状態と関連してかなり広い範囲に影響がおよぶことになる。

地下水水温が変化した例としては山形での例がある。¹⁹⁾ このかん養は地下の蓄熱利用のために行なっているので、水温変化を有効に利用している例であるが、地下水の利用目的によっては汚染という表現にもなってくる。実験は 224 m 離れた注入井と揚水井を用いて行なっており、注入水温および揚水水温は図 I-4 に示すような結果となっている。すなわち、初期には 16°C 近かった地下水温が、低温の注入水を注入することによって 11°C 近くまで低下していることが判る。

表 I - 1 平均細菌数 $2.4 \times 10^6 / 100 \text{ ml}$ の注入水の時の各観測井での細菌数最頻値 (MPN)
 注入井からの距離 MPN (3日目) MPN (12日目) MPN (32日目)

TABLE 4
 MPN of Coliform Organisms in Observation Wells During Continuos
 Recharge with an Average of 2.4×10^6 Organisms per 100 ml

Distance from Recharge Well		MPN 3rd Day	MPN 12th Day	MPN 32nd Day
13 Feet	N	240	240,000	230
28 "	N	2,400	240	5
47 "	N	240	38	5
63 "	N	23	82	None
88 "	N	None	None	None
138 "	N	—	None	None
39 "	NE	2,400	240	88
45 "	NE	None	88	None
63 "	NE	None	38	None
106 "	NE	None	None	None
39 "	NW	2,400	240	2,300
45 "	NW	240	None	5
63 "	NW	None	22	88
13 "	E	24,000	24,000	88
50 "	E	240	5.0	None
13 "	W	23	None	2,300
50 "	W	23	240	22
13 "	S	95	2,400	230
63 "	S	None	None	9.4
100 "	S	23	5.0	None
188 "	S	None	None	None
192 "	S	None	None	None

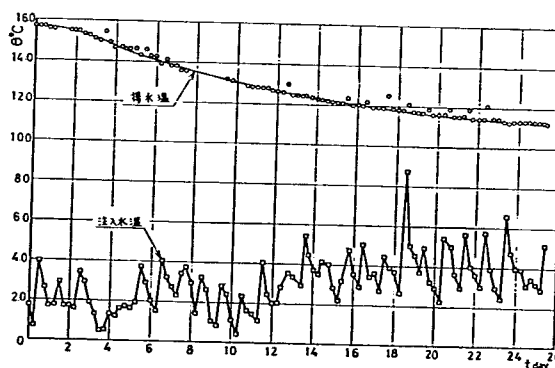


図 I - 4 注入による揚水温の変化

3-2 地層におよぼす影響

人工かん養によりうける地層の変化はごくかぎられた狭い部分であり、その程度も著しいものはない。

例えばイスラエルでは石灰岩の帯水層に井戸注入していたら、井戸の近傍が陥没したと報告されている。²⁰⁾この原因は井戸周辺の石灰岩が溶けて起ったものと考えられる。また井戸周辺の陥没としては井戸の目詰り回復のための再揚水時に砂をくみあげるので、ケーシングの不完全さといまって起ることも考えられる。

Ⅱ章で詳述する目詰りも一種の地層におよぼす影響である。

これら2つの影響は地層からみるとささいな変化であるが、井戸による涵養を考えた場合には大きな障害となる。

また例としてはまれであるが、深井戸に工場排水を注入して地震が発生することがあり、これも地層に対する影響の結果と考えられる。実例としては、1962年、米国コロラド州のデンバー市にある化学工場が、多量の排水を4,000 mの深井戸に注入したところ付近に小さな地震が連続して発生した。人体に感じられる群発地震におそれをなして注入を中止したら、地震の回数も減ったので、注入によって地震が発生したものと推定されている。²¹⁾

他に、かん養により地盤がゆるみ、地すべりを起すこともある。

3-3 その他の影響

その他の影響としては地下水上昇に伴う地表面の湿地化の問題がある。湿地化により、植生に影響があり、場合によっては土地の利用形態を変える必要も生ずることが考えられる。

地下水位の変動に伴って酸欠空気の噴出などが生ずることも考えられる。

4-1 外 国

1) Orange County Water District Water Factory²²⁾

(1) 背景

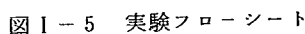
元来 California 州は気候温暖で一年中天氣がよく水さえあれば農業に最適の地方である。

そこで、もっぱら地下水を利用することになったが、人口の増加と産業の発展に伴って過剰汲上げが起り地下水位は1944～1954年の10年間に12 mも低下した。そのため海水の浸入を見る地方も現われた。

このような事情から下水の高度処理水を地下水涵養に用いようという考えが起った。そして、その水処理工場が Water Factory で、その技術は正に 21 世紀の技術であるというところから Water Factory 21 と呼んでいる。

(2) 水 量

(2) 水 量
現在の注入量は上述の如く約 $114,000 \text{ m}^3$ であるが、その内訳は次の通りである。



(3) 処理方式

処理方法中改善が行われた点は次の通りである。

- a) 最大の変更は海水脱塩を止めて逆浸透に変えた点であるが、これはエネルギー節約のための処置で国家政府が決定したものであるとのことである。

つまり、海水を蒸留法で淡水化するよりも、塩分の低い下水処理水を逆浸透にかける方がエネルギー節約の国策に沿うということである。

- b) アンモニアストリッピングは冬季低温時に能率が下ることと散水塔充てん材に炭酸カルシウムスケールがつくことが欠点であったが、何れも改善の効果が大きい。すなわち散水塔充てん材としてはプラスチック棒とし、スケールが付きにくくすると共に部分的に取出して掃除ができるようになった。

また、低温時は水温を上げて効率低下を防ぐようにしたため冬でも90%以上の除去率を得ている。

- c) 炭素添加 pH3 調整槽のところは完全には解決していない様子であった。すなわちここでは微細な炭酸カルシウムが出るため沈殿し切れず、汙過槽に流入して汙過時間を短くしている。またこの池に生ずるスケール物質は時々空にして掃除しているようである。

- d) 逆浸透装置の膜がどこまでもつかは不明であるが使用開始以来もっているもので、かなりもつものと考えられる。圧力は 12 kg/cm^2 が用いられている。

なお本法では蒸留法のように溶解物質が十分とれないで TDS 稀しく効果は小さい。

また、濃縮塩水は約30%でこれは下水放流水に混ぜて海に放流している。

(4) 水 質

下水処理水(2次処理)の水質はかなり悪い。例えば $\text{Cl} = 229 \text{ mg/l}$, $\text{E.C.} = 1843 \text{ } \mu\text{mho/cm}$, $\text{P} = 52$, $\text{Ca} = 104 \text{ mg/l}$, $\text{Na} = 207 \text{ mg/l}$, $\text{Sulfate} = 291 \text{ mg/l}$ これが石灰処理で、 Mg , $\text{Po}_4 - \text{P}$, 濁度は極めてよく除かれる。

ただし、アンモニアは6月頃の成績では50%程度しか除去できず、これを break point chlorination によって除くために130~100 ppmの塩素を注入したこともある。

(5) 地下注入

地下の4層に対し別々に注入している、注入圧は約 1 kg/cm^2 であるが必要があれば 7.0 kg/cm^2 まで注入できるようになっている。

10月より本格注入しているが未だにつまったものはない。ただし、運転の初期に23の井戸がつまったが、これは工事中にくずなどを不用意に落し込んだためで、これを取り除いた後は事故がない。

2) Bay Park (N.Y) 実験場²²⁾

(1) 背 景

Long Island は New York 市の東方に伸びる細長い島であるが、New York 市からの水道供給のあるのは隣接する Queen 及び Kings の2都だけで他はすべて地下水を水源とする小規模水道に依存している。

しかし、最近まで水不足等の問題がなかったのは、自然に recharge が行なわれ地下水バラン

スがとれていたからである。すなわち島内には何 1,000 という pond があり、各家庭下水は浄化槽で各個に浄化した上それぞれ地下に浸透していたのである。

前者の pond は実は drainage System がないため家屋や道路の浸水を防ぐ目的で自衛手段として設けたものが recharge の役目を果し雨水を浸透させ地下水を涵養することになっていたということである。

つまりこの地区では雨水も使用済みの下水も効率よく地下に還元していたために長年地下水を使っけていても支障が起きなかったのである。ところが近年次第に下水道が敷設されるようになり、集めた下水は海に放流することになった。そこで地下水収支にアンバランスが起き一部地区では海水の浸入を見るようになった。

Bay Park はその障害が最も早くあらわれた所の一つで、そこで USGS が地下注入の実験を行うことになった。地層断面は図 I-6 に示したとおりである。

実験は約 10 年間に渡って行なわれたが、後述するように、その実用性が乏しいことが判って現在は中止している。今後は、浸透池の実験を行う様である。

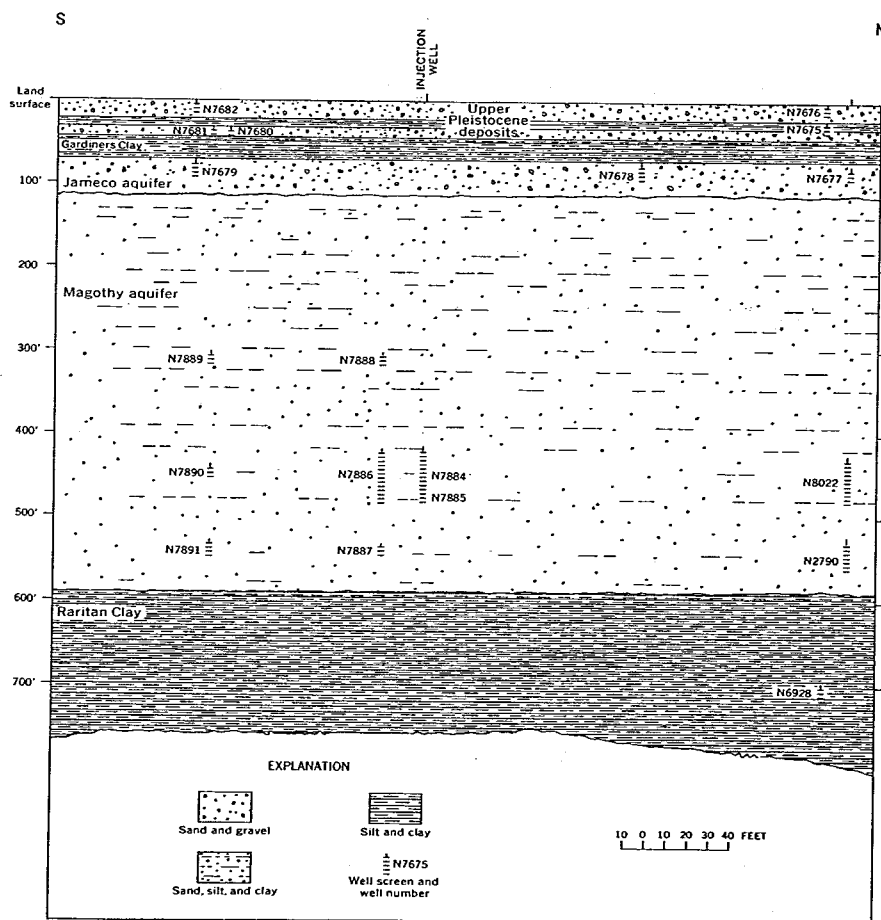


図 I-6 ロングアイランドの地質図

(2) 実験方法及び施設

実験方法及び施設は特に変わったところはないがしいてあげれば次の点であろう。

- a) 高度処理水といっても Orange County W. D. のように徹底した処理ではなく、凝集沈でん砂ろ過→活性炭ろ過→塩素処理で、脱 N、脱 P は行っていない。
- b) 注入前に脱気処理を行っているのは特徴といえよう。但し実験条件によってはこれを省いて bypass させることもある。
- c) カラム実験において、カラム内の質量変化（気泡の発生）を自動的に放射線測定していた。装置が行々しく如何にも高級実験の観を呈したが、実効は如何であろうか。
- d) シミュレーションによって地下水位予測を行っていた。

(3) 実験結果

実験結果のうち注目すべきことは、脱気しても、SS を取っても上記処理水では 1 週間位で目づまりを起す。

これを逆洗 (pump up) すると硫化水素を含む黒い水が大量に出てくる。

但し同じ処理水でも塩素消毒（残留 free cl₂ 2.5 ppm）すると 2～3 週間注入できる。2 の場合でも汲み出すと上記の如き黒い水が出る。

注入地層が fine sand and silt であるからかもしれないともいつていた。

尚、閉塞後は注入期間の 2 倍程度汲み出し地下の汚染を防ぐとともに次回実験のための条件一定化をはかったという。

原因に浸透係数小さく注入水の拡がりがないので実用性なしとして実験を中止している。

将来は浸透池（表層へ入れる）の研究をする旨述べていた。

1)、2) の 2ヶ所の涵養の諸元及び特徴をまとめると表 1-2 となる。

3) イスラエル

(1) 背景

イスラエルは雨期と乾気が明確であり、10 月から翌年の 4 月に全部降って夏は全くの乾燥状態である。雨量は地域的にも片寄っており、北部では年 1,000 mm 位であるが、中部では 500 mm、南部では 30 mm 程度に過ぎない。その上に、耕地の 3 分の 2 は南部にあり、非常にアンバランスとなっている。

建国以来地下水を過度に汲み上げたために、中南部の井戸が枯れてしまった。そこで北部に片寄っている水資源を中南部へ輸送させるために、国営送水管網が計画され、1964 年に完成している。この計画に用いられる水源は主にキネレット湖の水である。この水源を用いて中南部で人工涵養を行っており、その目的は①表流水を高度利用するために地下に貯留する。②地下水の過剰揚水により地下水が低下するのを防止する。③海岸地帯の塩水化防止、④下水放流水や汚濁表流水の浄化、⑤地下水および移入水の水質改良、等である。送水管網と涵養地は図 1-7 に示すとおりである。

(2) 涵養水源

イスラエルにおける涵養水源は表流水、洪水、再生下水等である。人工涵養は中南部で井戸が 1,300 本、涵養池が 7ヶ所で行なわれていたが、国営送水管網が完成してから急激に増え、1973 年には 1.5 億 m³ を示して全水資源の 10 % を占めるまでになっている。

表 I - 2 アメリカにおける地下水涵養例の調査結果の要約

(1) さく井による注入例

場 所	実施機関	実 施 年	注入の目的	注 入 井 の 諸 元								
				注入井の深 度	対象層の深 度	井 戸 数	孔 径	ストレーナ-の種類	開 孔 率	ストレーナ-の長さ	遮水方法	フィルター
Fountain Valley, Orange County California	Orange County Water District	試運転 1974~ 実用運転 1975~	海水浸入を防止することにより地下水涵養	100 } 107 m	次の4層を対象 25~30 m 40~55 m 60~90 m 100~107 m	23個 各井戸は4本の深度別ケーシングを含む他、揚水用7+5あり	φ760 mm中に 100~150 mm ケーシング 4本を含む多重ケーシング			各 種	セメントグラウト	砕石層
Bay Park, Nassau County New York	United States Geological Survey	1968年より始めたが実際に注入実験を行ったのは4年	海水浸入防止及び地下水涵養	150m	130m } 150m	1個	φ450 mm	スリット型 (隙巾1.5 mm) FRP及びステンレススチール		19m	セメントグラウト	粗砂71% 細砂28% 厚さ約25 cm

注 入 水 の 水 質 (mg/L)	注 入 システム	注入パターン	注 入 層 の 特 性			観 測 体 制	実 験 結 果 の 要 約
			透水係数	地下水位	地 質 構 造		
Cl ⁻ 230 ~ 260 COD 50 ~ 20 E. C. 2,000 ~ 1,500 TOC 7 ~ 15 Turb 2 ~ 3	ポンプによる圧入 (約1 Kg/cm ²)	174より深層地下水を約37,900 m ³ /D '75年10月より再生水・地下水混合11.4 万 m ³ /D		海面より -0.5m	表層=粘土まじり砂層 中層=洪積世の砂礫層 下部=第3紀の砂岩層	遠隔観測により水圧、水量、水質を自記、コントロールする。	1977年10月以来連続注入しているが現在まで閉塞は起っていない。
Cl ⁻ 86 ~ 63 COD 13 ~ 2 TDS 418 ~ 259 Tot-Hard 106 ~ 54 NH ₄ -N 30 ~ 22	ポンプによる圧入	1,440~5,450 m ³ /D を1~2週当圧入、つまと2~4週当くみ上げる。これを繰返し実験		地表面より -1.5m	表層=洪積世の砂礫粘土層 中層=砂シルト粘土層 下部=シルト粘土層	18本の観測井により圧力水質・水量を自記している。	注入層が細砂層のため注入水が拡らず、したがって本地区の海水浸入を防ぐには数100本の井戸を必要とする。実用性が乏しいので現在注入実験をstop

水源のうちではキネレット湖が大部分を占め、この湖水は藻類を含むが浮遊物濃度は低く、細菌類もほとんど検出されない。

ヨルダン川以外の河川は乾期には干上るので、雨期の洪水を利用することが検討されている。これはアースダム等の貯水池で固形物を沈殿させた後に涵養池に送水し、さらに100～500 m 離れた井戸から取水して送水管網に送る計画になっている。

(3) 井戸の諸元

涵養は井戸と涵養池の二通りがあるが、井戸については次のとおりである。

深 度	海岸地帯	100 m
	内 陸 部	800 m
対象地層	砂岩層、石灰岩層	
	透水係数	$2.3 \sim 6.9 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$
口 径	300～500 mm, 1,300 mm	
注入速度	砂岸地帯	50～400 m ³ /hr
	石灰岩地帯	1,000 m ³ /hr

(4) 注入効果

比注入量が小さくなったら注入を休止したり、再揚水を行なうことによって二重目的井戸では注入量の減少が25%を越えるものは少ない。

注入目的のうち、貯留については大体成功したと言ってよい。たとえば、1973年にはキネレット湖の水位が最低を示したが、過去の涵養水の利用で水供給を行なうことができた。

今後の技術的な問題としては次のようなことが考えられる。まず、井戸の目詰りは滞水層や水質によって異なっており、この目詰りを再揚水によって回復させる場合の効率がどの程度期待できるのか。また、藻類を含む原水を注入すると多少の汚染を生じたが、水質と汚染の問題も解決する必要がある。さらに、石灰岩層においては井戸周囲が陥没する例もあり、これらの対策も必要であろう。

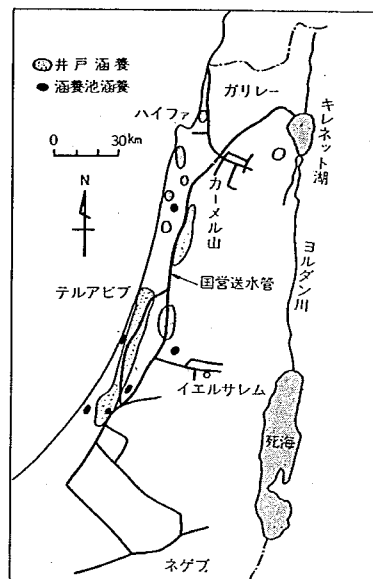


図 I-7 人工涵養地域と主要国営送水管網

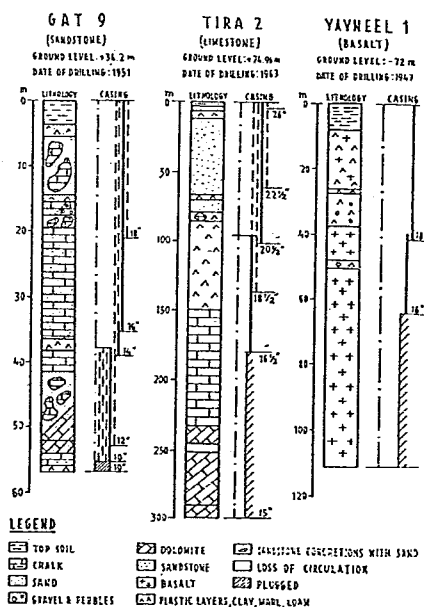


図 I-8 地質柱状図

4-2 日 本

国内において井戸を用いて人工かん養を行なっている例はないが、そのうちから代表的な例について説明を加えておく。国内の例については1章で詳細を述べるので、ここでは概要だけを示しておく。

1) 神奈川県秦野市²³⁾

a) 場所：神奈川県秦野市

実施機関：神奈川県温泉研究所，秦野市

期 間：昭和47年以降継続中

b) 目 的

上水道および工業用水源の確保

c) 注入井の諸元

深 度：85 m

対象地層：59~76 m (B₂層)，透水係数 $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

口 径：300 mm

注入速度：54.4 m³/日 (井戸壁面積当り) 650 l/min

d) 注入水

水道水

e) 注入結果

注入水は井戸内水面上から落下させているために、気泡による目詰りが生じていると考えられる。しかしながら、650 l/min で20~30日間注入して目詰りを生じて、15分間の揚水でほぼ回復している。47年以降、50年6月までに約300,000 m³ 人工かん養

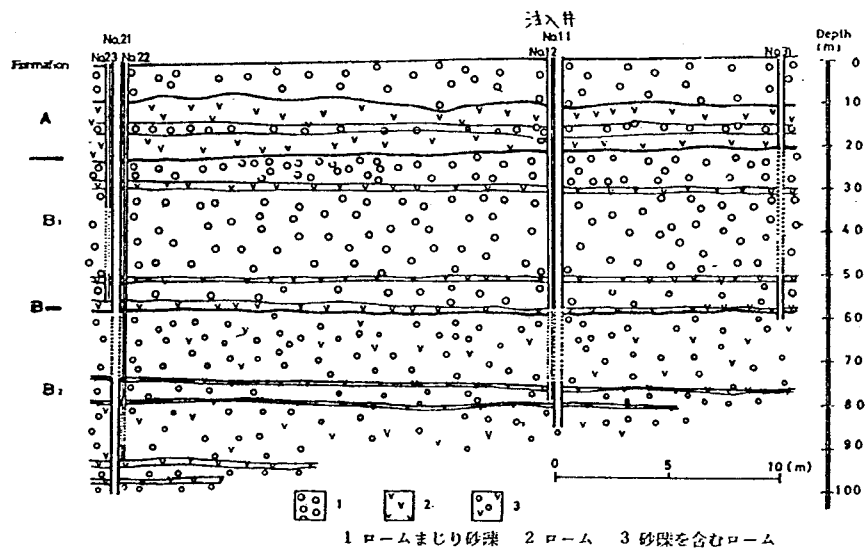


図1-9 実験場の地質断面

を行っており、B₂層全体で貯留されると仮定するならば水位を8cm上昇させたことになる。

2) 新潟県上越地区²⁴⁾

a) 場 所：新潟県中頸城郡頸城村
実施機関：新潟県生活環境公害規制課
期 間：昭和47年以降

b) 目 的
地盤沈下防止対策

c) 注入井の諸元

深 度：285m

対象地層：233~285m, G₄層,

透水係数 $6.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

口 径：0~53m 450mm

53~285m 300mm

注入速度：29.0m/日, 65m³/hr

d) 注入水

保倉川表流水を凝集沈殿、ろ過を行なったもの

e) 注入結果

65m³/hr で注入し、流入水SSが1ppm以下の場合は連続して200,000~300,000m³(4~6ヶ月)の注入が可能であり、150m³/hr前後で約2時間揚水するとほぼ目詰りは回復する。

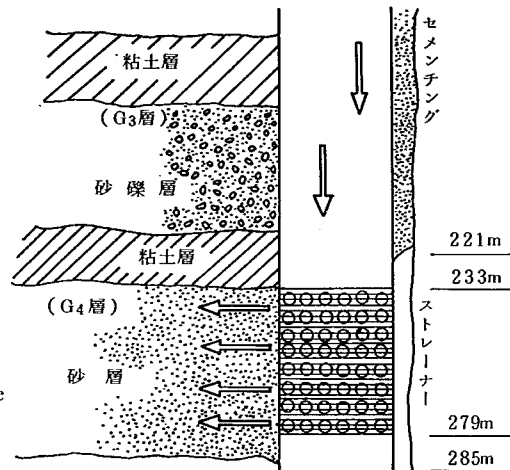


図1-10 地質図

3) 山形県山形市¹⁹⁾

a) 場 所：山形県山形市
実施機関：山形大学、日本地下開発
期 間：昭和48年以降

b) 目 的
地下蓄熱の利用

c) 注入井の諸元

深 度：90m

対象地層：38~84m,

透水係数 $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$

口 径：300mm

注入速度：29.7m/日, 0.7m³/min

d) 注入水

表流水の粗大ゴミを除いたもの

e) 注入結果

0.7m³/min の注入速度で注入すると10数日後には効率が70%にまで低下したが、注入を

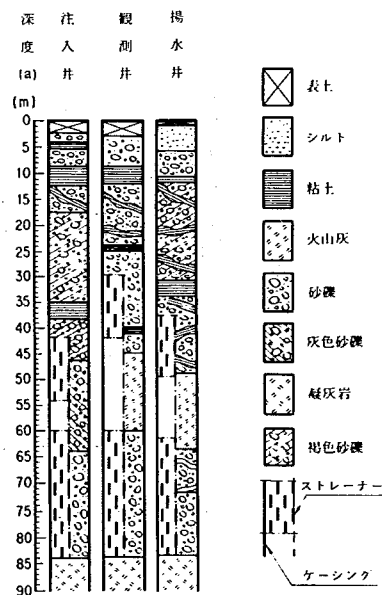


図1-11 地質柱状図

中断して再開するとほとんど元に回復している。再開後は再び効率が 80 % 近くに低下しているが、 $24,000 \text{ m}^3$ を注入する間（約 24 日間）ほとんど目詰りを生じていない。

4) 大阪市鶴見区²⁵⁾

a) 場 所：大阪市鶴見区鶴

見公園内

実施機関：建設省近畿地方

建設局淀川工事

事務所

期 間：昭和 49 年～

51 年

b) 目 的

地下水かん養技術上の諸問

題の究明

c) 注入井の諸元

深 度：51 m

対象地層：43～51 m，透水係数 $1 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$

口 径：300 mm

注入速度：102 m/日， $0.5 \text{ m}^3/\text{min}$

d) 注入水

水道水

e) 注入結果

$0.5 \text{ m}^3/\text{min}$ で 20 日間連続注入を行なったところ，水位は時間とともに上昇し，20 日後には 178 m 上昇した。目詰りの生じた段階で $1.2 \text{ m}^3/\text{min}$ で 1～2 日連続揚水を行なうと，水位上昇量は洗浄前の半分に減ったが，洗浄効果は長期的には持続せず，5 日以降ではその効果が消滅した。

5) 神奈川県平塚市²²⁾

a) 場 所：神奈川県平塚市宮大神作業場

実施機関：平塚市

期 間：昭和 48 年

b) 目 的

地盤沈下防止のための人工地下水かん養実験

c) 注入井の諸元

深 度：80 m

対象地層：50～75 m，透水係数 $1.1 \times 10^{-1} \text{ cm/sec}$

口 径：300 mm

流入速度：61.1 m/日， $160 \text{ m}^3/\text{hr}$

d) 注入水

地下水

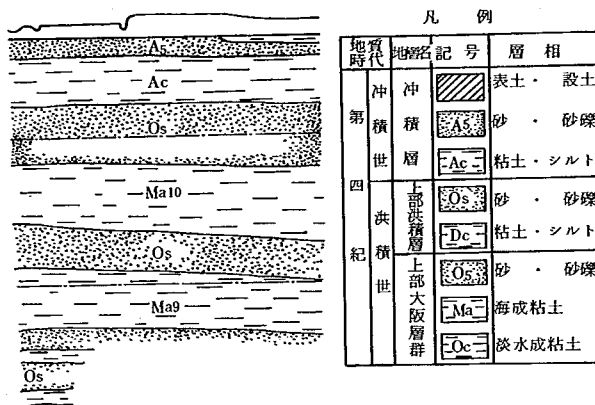


図 1-12 地質柱状図

e) 注入結果

断続揚水を行なうと1日毎の水位はほとんど差がないが、注入の場合は図を重ねるごとに指數的に上昇する。断続的に注入しても注入効果の回復はなく、清掃効果は3～4日で効力を失なう。

比湧出量は $0.4 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ が平均であつてあまり変動しないが、比注入量は $0.5 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ が $0.05 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}$ に減少している。

6) 佐賀県白石平野²²⁾

- a) 場 所：佐賀県白石平野
 実施機関：農林省九州農政局
 期 間：昭和39年～42年
- b) 目 的
 農業用水の不足解決と塩水化防止のため
- c) 注入井の諸元

深 度：165 m

対象地層：23.45～31 m

40 ～ 45 m

47.95 ～ 56.3 m

79.8 ～ 95.4 m

100.6 ～ 132.4 m

150.0 ～ 165.0 m

透水係数

$2.83 \sim 6.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$

口 径：0 ～ 31.5 m …… 150 畝

31.5 ～ 165 m …… 75 畝

注入速度：165～373 m/日（圧入法）

d) 注入水

2 Km離れた井戸水

e) 注入結果

注入効率は1日10時間注入で、10日間注入すると約半減する。

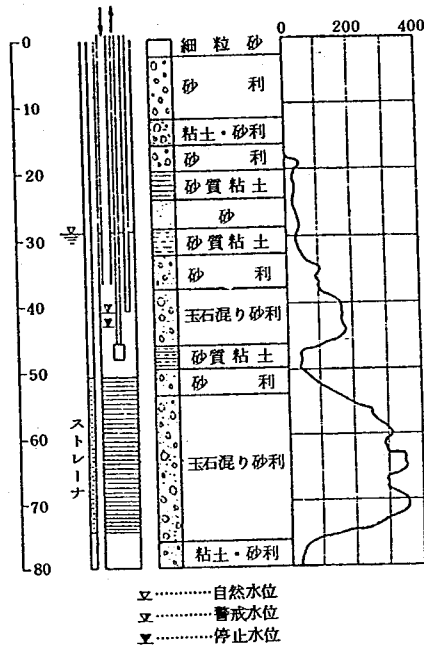


図 I - 13 地質柱状図

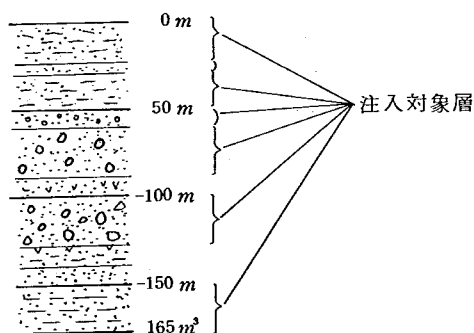


図 I - 14 地質図

5. 浅層地下水への注入

5-1 不圧地下水での井戸周辺の水理

不圧地下水での井戸周辺の水理は、被圧地下水でのそれとは、注入と揚水での流れが理論的に対称にならないという点で異なる。被圧地下水における注入・揚水に伴う水理現象は理論で述べられているような対称な現象とならないことを実際のデータが示していることと、またその原因として考えられるいくつかの項目を挙げ説明した。その項目というのは、井戸周辺の乱れの発生、粒子の再配列、井戸壁損失である。それらは注入・揚水で異なった結果として表われる。不圧地下水は理論的にも流積が異なるのでさらに複雑な現象となり、定かでないが、逆に理論に近いような流れとなることが予想される。不圧地下水への注入は井戸周辺で、揚水の場合より流積増加するため、乱れの発生、砂粒子の再配列、ストレーナーでの損失も発生しにくくなるからである。よって、定常的な流れでは、Dupuit の仮定に基づく、基本式の適用がある程度可能と考えられる。しかし、不圧地下水への注入に伴う地下水の挙動に関するデータが得られていないので、実証的な研究調査の積み重ねが必要である。

5-2 不圧地下水への注入による目づまりに伴う水理現象

前にも述べたように、不圧地下水での流れは、流積が定まらず流動量によって異なってくる。注入によって注入井近傍の透水性が悪化すると、それに伴ない流積が変化する。これは一定量注入と一定水位注入でもその変化は違ってくる。

一定量注入の場合には、目づまりの発生とともに、注入井内の水位は上昇するが、この上昇程度は被圧地下水の場合と異なる。注入井内の水位の上昇に伴ない、流積が増大し、目づまりの原因となる抑留物の抑留される所も増大するからである。よって比注入量の減少程度は被圧地下水での注入の場合より小さくなる。

一定水位注入の場合には常に注入井内水位が一定であり、目づまりの発生に伴ない注入量が減少していくが、水位一定であるから、一定量注入のように抑留物が抑留される所が増大することはないと一定と考えてよい。ただ注入に伴ない、注入量が減少するから注入井近傍で水面勾配が大きくなり、注入井から離れた所では流積が減少することになる。よって一定水位の場合の比注入量の

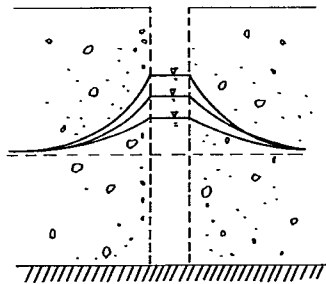


図 I - 15 一定量注入の場合

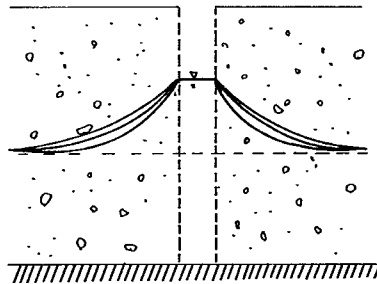


図 I - 16 一定水位注入の場合

減少は、被圧地下水の場合とほぼ同程度かいく分大きめになることが考えられる。よって、まず一定量注入を行ない、水位が所定の所まで上昇したら一定水位注入に切り換えることになるであろう。

回復のために再揚水を行なうと、注入井内の水位が低下するから、注入によって帯水層内に抑留された抑留物の除去は少なくとも静水位上面では不可能となる。できるだけ効果的に回復を行なうためには、連続揚でなく、水位の回復をまって断続的に行なう必要がある。微生物・有機性 SS による目づまりであれば、そのまま放置しておけば、静水位上面では自然分解して、目づまりが自然解消することもありえる。しかし、無機

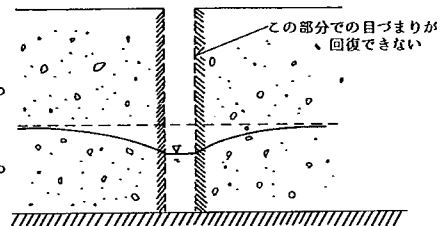


図 1-17 再揚水による回復

SS による目づまりであれば、注入を行なえば行なうほど目づまりが重大となり、回復のきかない静水面上面では透水性がなくなってしまうことになりかねない。不圧地下水での注入は被圧地下水以上に困難な面を有するといえる。

6. 目づまりとその対策

6-1 目づまりの原因

注入井による地下水涵養を行なう場合、技術的に立ちはだかるのが、注入に伴う目づまりの発生である。地下水は雨水等がそこにあるべき条件を満たしつつ、浸透したものである。人工涵養といわば表流水を直接地下水化するものであり、そこには当然地下水と地層とが一体となった拒絶反応が見られる。これが目づまりである。

目づまりの原因として一般的に懸濁物・微生物の増殖、化学反応による沈殿物の生成、空気泡、土粒子の再配列が考えられる。懸濁物による目づまりは、長時間にわたって注入がなされると、注入水中の懸濁物が注入井近傍に蓄積し、そこでの透水性が減少することによって生ずる。注入井による涵養は狭い井戸壁を通じて長時間にわたってなされるから、懸濁物濃度がわずかであっても、負荷量としてはかなりな量となり、目づまりの重要な因子となるのである。イスラエルで冬期の非灌漑期に注入がなされる。注入水としては水道水と同等で SS としては 1 ppm 程度であるが、負荷量は注入井 1 本当たり 200kg にも達するとのことである。懸濁物には注入水に含まれていたものと、注入時に付加されるものが考えられる。注入時に付加されるものとは、注入井のケーシング、ストレーナーの酸化腐食によって生じた酸化鉄である。表流水は一般的に地下水と異なっており、飽和に近い溶存酸素を含んでいて、ケーシングとかストレーナーは錆だめのコーティングはなされていない場合がほとんどであるからである。注入実験後の再揚水には、抑留されていた酸化鉄のため赤濁しており、酸化鉄が目づまりの一因となっていることがわかる。

懸濁物には有機性と無機性とがあり、洪水時の河川水には高濃度の SS が含有されるが、平水時には有機 SS がより多く含まれることが多い。ダム放流水中にはダム貯水池で繁殖したらん藻類が多分に含まれる。有機性 SS が帯水層中に抑留されると、そこに微生物が繁殖する。微生物は粘着性の分泌物を分泌するため、懸濁物がより抑留されやすくなり、そのため目づまりがいつそう助長される。また微生物によって無機栄養塩や溶解性有機物が微生物として固定化されることになり目づまりがさらに深刻な状態となる。注入水の有機物の負荷量で繁殖する微生物は異なってくる。有機物の負荷量が多いと、目づまりがいつそうひどくなるような微生物の増殖が生じてくることも考えられる。いづれにせよ、汚濁水を SS のみの処理で注入しようとしてもかならず微生物による目づまりが生じることになる。

空気泡による目づまりは二通り考えられる。溶存空気が帯水層内で気泡化するものと、注入水中の水気泡が帯水層の間隙を塞ぐものである。溶存空気の気泡化は水圧と水温が関係してくる。冬期に注入されると帯水層の温度が高いため、気泡化が心配されるが、実際には水圧によって飽和溶存容量が増加する場合が多いので気泡化の可能性は少ない。ただし、不圧地下水への注入は地下水面付近で気泡化の可能性が残っているが、再揚水によって簡単に回復が可能であろう。注入水中に小気泡が発生する場合は、注入管が水面より上で開いている場合であり、このような構造にしないように注意すればよい。

注入水と地下水の混合による沈殿物の生成物はアルカリ土類金属 (Ca, Mg, δr 等) の比較的溶解しにくい炭酸塩、硫酸塩、井化物の結晶体および鉄、アルミニウム、マンガン、クロム、

鉛、カドニウム、炭酸塩、水酸化物、磷酸塩、そして配位還元反応に伴う生成物である。最も目づまりの原因として考えられるのは鉄、マンガン、アルミニウムの水酸化物あるいは酸化物のコロイド状のものである。しかし、目づまりは懸濁物等が井戸、壁近くに集中的に抑留されることによって発生するものであるが、化学沈殿物は拡がる注入水と地下水の混合面で生じ、一か所に集中することはありえない。また室内実験によっても化学反応による目づまりは無視しえることが明らかにされている。化学反応による目づまりについては無視して考えてよいであろう。

砂粒子の再配列に関して物理的具体的な説明はいまだなされていないが、注入・再揚水に伴う帯水層微細粒子の移動もその一つと考えられる。揚水の場合には、微細粒子は井戸内に流入し、帯水層内の透水性がよくなることも考えられるが、注入の場合には、微細粒子が流体力の弱まった所で沈殿し、そこでの透水性を悪くする。注入・揚水とも適正量内で行なわなければならない。

以上、目づまりの原因について説明したが、表流水を注入する場合には懸濁物と微生物による目づまりが最も発生しやすいと考えられる。

6-2 目づまりに伴う比注入量の減少

目づまりの発生にしたがって、一定注入量の場合には注入井水位の上昇、一定水位（一定圧）注入の場合には注入量が減少する。目づまりによる透水性の悪化の程度を比注入量で表わすとわかりやすい。ここで比注入量とは、

$$\text{比注入量} = \frac{\text{注入量} (m^3/\text{sec})}{\text{注入井内水位上昇量} (m)}$$

図 I-18 はわが国における既往現地実験結果を累加注入量に対する比注入量の変化を表わしたものである。累加注入量の増加にしたがって比注入量は指数関数的に減少することが示されている。比注入量が当初の値の半になるまでの総注入量是一本の井戸で注入しうる量を

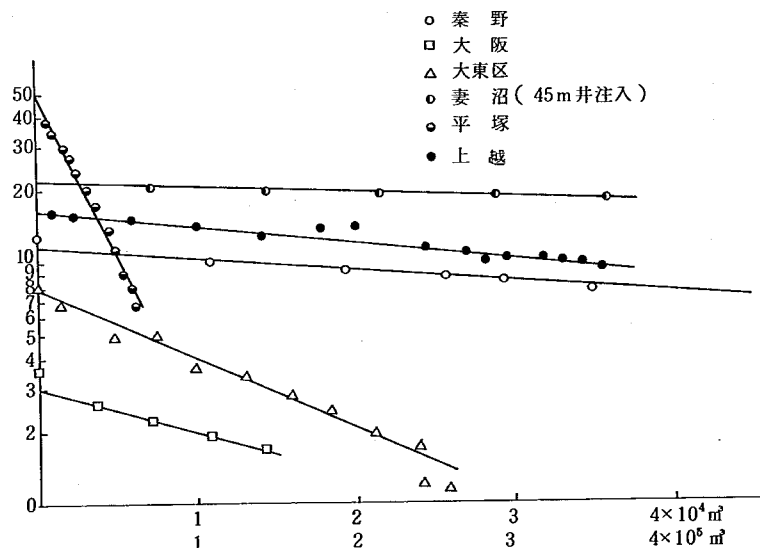


図 I-18 注入に伴う比注入量の減少

推定する上で、重要なバロメータとなる。ただし、目づまりの発生程度を比較するなら、この値をストレーナー面積に割った、比注入量半減注入高で表わす方がよい。表 I-3 にこの値を含めて、既往現地実験での成果をとりまとめている。注入水が水道水のように水質的にすぐれたものであれば比注入量半減注入高は $4.0 \times 10^3 m$ 程度で、表流水を処理した濁度が 2~3 ppm のものであれば、 $1.0 \times 10^3 m$ 程度となっている。よほど条件のよい所でないと良質の注入水が得られることはないから、上越の場合のように濁度が 2~3 ppm の注入水が今後の注入の場合の一応の目安を与える。比注入量半減注入高が小さくても、注入井半径を大きくしたりストレーナーを長くすることによって、比注入量半減総注入量は大きくすることが可能である。

表 I-3 既往涵養実験における目づまり調査

地名	透水係数	注 入 水	注入井構造 ①深度 ②径 ③ストレーナ長	比注入量半減注入高 (注入量)	考えられる目 づまりの原因
秦 野	$3.4 \times 10^{-2} cm/sec$	水道水	①85m ②300mm ③18m	$4.2 \times 10^3 m (38 m^2/h)$	空気泡, 酸化鉄
大 阪	$1 \sim 5 \times 10^{-2}$	"	51m 300mm 75m	$2.4 \times 10^3 m (30 m^2/h)$	水道SS, 酸化鉄
大東市	1×10^{-2} (推定)	"	182m 250mm 37.5m	$4.6 \times 10^3 m (63 m^2/h)$	酸化鉄
妻 沼	3.1×10^{-2}	地下水 A 45m井 Fe+Mn 1.78ppm B 15m井 " 8.0 ppm	200m 400mm 39.5m	A $4.1 \times 10^3 m (60 m^2/h)$ B $0.04 \times 10^3 m$	酸化鉄, 酸化マンガン
平 塚	1.1×10^{-1}	浅井戸水	80m 300mm 25m	$0.1 \times 10^3 m (60 m^2/h)$	?
佐 賀 石	$283 \sim 6.4 \times 10^{-3}$	深井戸水	165m 150~75mm 67.5m	- (定圧注入)	SS, 微生物, 酸化鉄
上 越	6.2×10^{-2}	表流水浄化(凝集沈殿・急速濾過) 濁度 2~3 ppm	285m 300mm 47m	$1.0 \times 10^3 m (53 m^2/h)$	SS, 酸化鉄, 微生物
山 形	2.1×10^{-3}	表流水(粗大のみ除去, 清澄) Fe 0.4 ppm	84m 300mm 36m	$3.6 \times 10^3 m (42 m^2/h)$	酸化鉄

6-3 目づまりの防止と回復

注入井による涵養は狭い井戸壁を通じて長時間にわたってなされるから、注入水のわずかな悪化は重大な目づまりの発生を見るばかりでなく、再揚水による回復に当たってもその影響は無視することはできない。ゆえに、注入水は前処理によって重大な目づまりが発生し、回復が不可能とならないように浄化されねばならない。しかし、いくら処理されても完全に目づまりを取り除くことは非常に困難であり、目づまりによって劣化した透水位は再揚水という方法で回復をはからなければならない。

再揚水の効果は、再揚水総量を多くした場合より、再揚水量を大きくした方がよい。さらに単調な連続揚水より、断続的また注入と交互に行なう方が効果はよい。また微生物による目づまりが顕著な場合には再揚水前に塩素を注入すれば、微生物が弱まって再揚水による効果が高上する。

再揚水の効果は目づまりの程度によって異なる。高濃度の懸濁物による目づまりが顕著な場合には再揚水の効果は小さい。微生物による目づまりについてもそれが言える。よって注入水質は目づまりの発生のみばかりでなく再揚水による回復まで考慮しなければならない。懸濁物として

は室内実験，現地既往実験等から，濁度で2～3 ppm，有機物は BODで 1 ppm以下が望ましい。

再揚水後の比注入量がどこまで回復するかは注入井で涵養を長期にわたって続ける場合に非常に重要である。イスラエルの実施例においては，第 1 回目の再揚水後の比注入量は初期のそれより小さいが，以後の再揚水後の比注入量の低下は見られないとのことである。イスラエルと日本では状況が異なるので定かでないが現地で予備実験で大まかな傾向をつかむことが望ましい。

7. 注入井の適用に当って

注入に伴う目づまりの程度は帯水層の透水係数が 10^{-2} cm/sec のオーダーであればほぼ注入水質によって主に左右されるが、帯水層の透水性がそれ以上になってくると、砂礫の粒土分布によっても目づまりの発生状況は異なってくると考えられる。例えば、岩壁の裂け目の帯水層の場合には目づまりが発生しないことが報告されている。また、帯水層が粗粒の砂礫のみによって形成されている場合には、雨水時の濁水をのみこむことも知られている。このような広範囲にわたる帯水層の性状を室内実験に再現することは不可能である。地層は場所場所により異なり、その場での特性は目づまりの発生状況にかなりの影響を与える可能性が強いと言わなければならない。このような現地での特性は現地でしか把握しえないため、注入実験を前もって実施し、そこでの目づまりの発生状況等について明らかにする方が望ましい。

図 I-19 に予備注入実験を行なうに当たっての調査項目について概略図示する。注入井には涵養を行なう場合を、最も重要なものの一つとして前処理施設があり、注入の技術的、経済的な成否に大きな関りを有するものである。前処理方式の決定に至っては、注入原水の水質、帯水層の透水性を把握する。注入原水については原水の平均 SS 濃度とその変動幅特に洪水時の浮遊土砂濃度、BOD とその変動幅、BOD が高いと生物酸化等の有機物分解のための処理装置が必要となる。また、塩素を添加して微生物の目づまりをおさえる場合に必要となる $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度についても明らかにする。SS については無機性 SS、有機性 SS 剤に明らかにする方が望ましい。上流

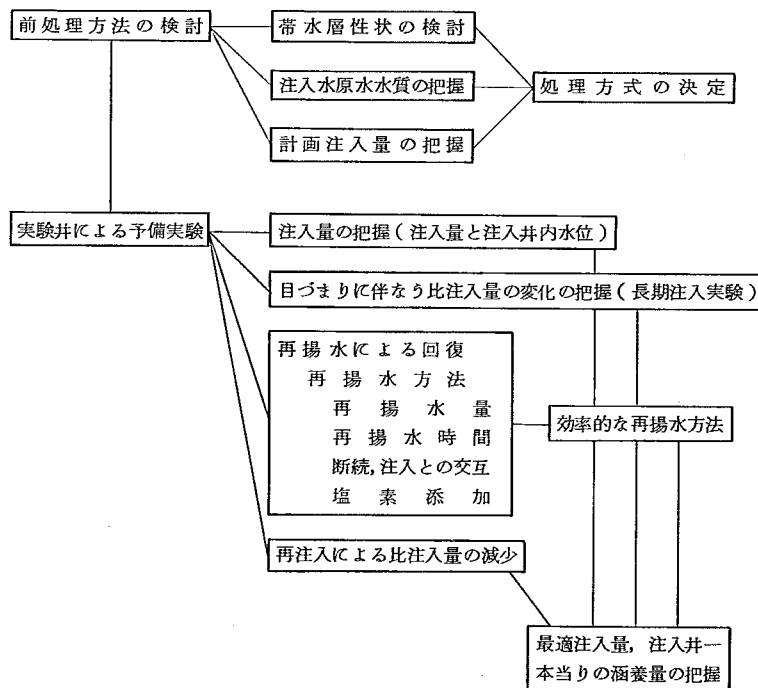


図 I-19

ダムからの放流水にはらん藻類がよく含まれており、これらが注入されて微生物の目づまりの原因となるからである。前処理方式は、浄化のためにそれぞれ考えられた装置を用いて組み立てる方が経済的と考えられるから、処理水の水質は原水の水質が明らかになれば、ほぼ推定されうる。前処理施設の検討項目としては、どのような装置の組み合わせにするかということと、注入量に対応した規模、処理装置の逆洗水処理等が挙げられるであろう。

前処理が決定し、注入井の設置を持って予備注入実験を行なう。揚水試験による帯水層の透水係数と帯水層微粒子が移動しない適正揚水量を把握する。また段階注入試験を行ない注入量と注入井内の水位上昇量の関係について調査し、急激な注入井内水位の上昇をおこさない適正注入量の範囲も明らかにする。適切な基本注入量を選定して、長期注入実験を開始する。基本注入量は注入水質、注入井構造と注入井内自然水位から、目づまりに伴う注入井内水位上昇程度を考えて決定するのが望ましい。目づまりによって注入井内の水位が所定の水位に達したら再揚水による回復実験を行なう。再揚水量は適正揚水量内におさえるが、再揚水方法、再揚水時間の効果について検討する。再揚水の方法としては、連続、断続、短時間の注入と交互に再揚水を行なう方法、また微生物による目づまりが顕著な場合には再揚水前に塩素を注入し、塩素注入の効果を明らかにする。再揚水後の比注入量の回復と再注入時の比注入量の減少程度について明らかにし、注入水質と再揚水方法から最も効率的な注入量について検討する。

以上注入井による地下水涵養を行なうに当っての予備実験について説明した。注入井による地下水涵養技術には、現地の特性から生ずる現象は現地でしか解決できない側面が含まれており、予備実験の必要性がつきまとうのである。注入水は狭い注入井壁を通じ、長時間にわたって帯水層内へ流入するもので、前処理によってある程度良質な注入水を得る必要があつて、注入井による地下水の涵養はかならずしも経済的であるとはいえない。また目づまりした帯水層に直接手を加えて回復を図る方法がなく、ゆとりのある涵養方法ともいいがたい。地下貯水池の地下水涵養施設して注入井を利用する場合には、経済性および地下貯水池の運用に伴う地下水位の変化と注入井の運用等は今後検討されるべき問題として残されている。

どのような地下水涵養手法を採用するかは、涵養の目的、現地の条件等で異なる。拡水法は手法によっては涵養のためにある程度の専用土地面積が必要となるが、目づまりが発生しても確実に処理することが可能であり、目づまりに伴う涵養量の変化の予測も比較的把握しやすく、工学的に確実な涵養手法といえることができる。地下ドレンチ法あるいは水田拡水法は土地利用とも競合せず、今後の研究が期待される。地下貯水池の適切な涵養手法の選定は、土地利用、おのこの涵養手法の得失と明らかにした上でなされなければならない。拡水法による涵養技術の開発研究と供にさらに注入井の経済性についても具体的に明らかにして行かなければならない。

参 考 文 献

- 1) 地下水調査及び観測指針(案) 昭和53年9月 建設省河川局監修
- 2) 改訂建設省河川砂防技術基準(案) 調査編 建設省河川局監修(社)日本河川協会編
- 3) 最新地下水学 — 調査と実務のガイドライン — 山本荘毅, 榎根勇監修 建設省水文研

究グループ編

- 4) 地下水の力学 ベ・ベ・クリメントフ, ゲ・ベ・ズイハチエフ, ラティス刊
- 5) 水理公式集 昭和46年度改訂版 土木学会編
- 6) 地下水資源の開発と保全 榎根 勇編
- 7) 地下水資源学 水収支研究グループ
- 8) 地下ダムの貯留機能と制御・管理システムの研究報告書 文部省特定研究 昭和51・52年度 佐藤邦明
- 9) 施工技術 Vol. 9, № 7 Jul 1976 日刊工業新聞社
特集 地下水の人工涵養 — 望ましい効果的実施のために —
- 10) 山 形
- 11) 地下水盆の管理「理論と実際」 水収支研究グループ
- 12) 地下水涵養技術および利用計画検討業務 昭和52年3月 近畿地方建設局淀川工事々務所
- 13) 奈良盆地水管理計画調査報告書 昭和53年3月 奈良県
- 14) 長岡地区地下水調査報告書 昭和53年3月 北陸地方建設局長岡工事々務所
- 15) 奈良盆地地下水の水収支シミュレーション 神奈川県温泉研究所
- 16) 土木技術資料第19巻9月号「地下水利用」特集
- 17) Hoopes, J.A. and Harleman, D.R.F. : Waste water Recharge and Dispersion in porous Media MIT. Hydrodynamics Lab. Rep. 74. June 1965.
- 18) 千葉県公害対策局, 人工地下水計画基礎調査報告書 — 地下水人工かん養の現状と問題点, 昭和48年5月
- 19) 横山孝男, 梅宮弘道, 人工かん養法による滞水層の蓄熱利用, 日本地下水学会誌, 第17巻, 第2号, p 1~3 (1975).
- 20) 瀬戸充, 武田宏, イスラエルの地下水人工かん養, 施工技術, 第9巻, 第7号, p 42~47 (1976).
- 21) 柴崎達雄, 人工地下水, 地下水と井戸とポンプ, 昭和50年6月, p 9~14.
- 22) 建設省土木研究所, 地下水かん養技術の開発, 昭和52年3月
- 23) 長瀬和雄, 熊沢武雄, 秦野盆地における地下水の人工かん養, 工業用水 第205号, p 65~72 (昭和50年)
- 24) 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 — G4層 地下かん養中間報告書, 昭和51年10月
- 25) 近畿地方建設局淀川工事々務所, 地下水かん養技術および利用計画検討業務報告書, 昭和52年3月
- 26) 吉永長栄, わが国の水井戸さく井技術の現況, 地学雑誌, Vol. 81, №5, p 58~62 (1972)
- 27) 酒井軍治郎, 適正揚水量と井戸損失, 地下水と井戸とポンプ, 1972年4月 p 2~8.
- 28) M. J. ヨーノス, 地下水の人工かん養理論に関する数学的考察, 工業用水, №191, p 19~28 (昭和49年)
- 29) 山本荘毅, 榎根勇, 青木滋, M. J. ヨーノス, 地下水人工かん養の実例, 水処理技術, Vol.

13, № 12, p 81 ~ 92 (1972).

30) 福川豊, 深井戸の適正揚水量と水位低下, 地下水と井戸とポンプ, 1975年6月, p 19 ~ 23.

Ⅱ. 目詰りの原因と対策

1. 実施例からみた目詰りの原因とその現象

1-1 実施例における目詰りの原因

目詰りとは地層の間隙が減少しその結果として透水性の劣化を意味する。ここでは、秦野¹⁾、大阪鶴見区²⁾、大東市³⁾、妻沼⁴⁾、平塚⁵⁾、佐賀白石平野⁶⁾、上越市⁷⁾、山形市⁸⁾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、注入に伴う目詰りの状況、考えられる目詰りの原因、再揚水による比注入量の回復の6項目についてまとめ整理したのが表Ⅱ-1である。この表を見れば、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案を加えていきたい。

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。注入量として透水性が良好なほど好ましいのは、間隙が大きく目詰りが発生し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、佐賀白石は近くの地下水をまた上越市、山形市では表流水が利用されている。上越では処理されているが、山形では粗大ゴミの除去のみでおわっている。

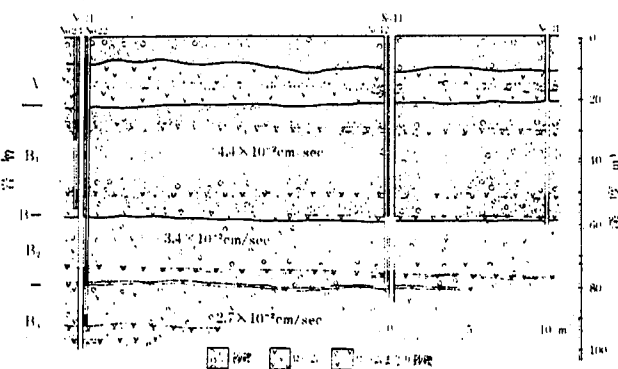
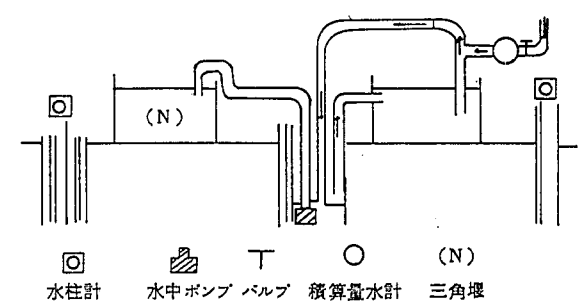
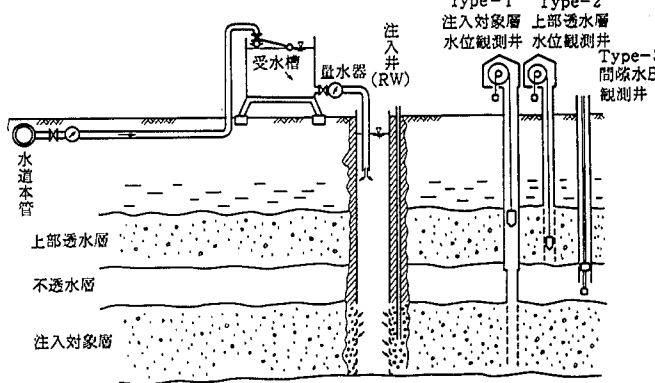
妻沼での注入実験の目詰りの原因は注入水に含まれていた鉄、マンガンが酸化し帯水層中に蓄積したものである。浅層の地下水は一般的に深層のそれより水質的に悪く、3~5 ppmの鉄と3~5 ppmのマンガン、計約8 ppm程度が含まれている。

平塚の場合、注入水と帯水層の水質が不明であるため、目詰りの原因が明らかでないが、浅層の地下水が注入されているため妻沼と同様な原因によるのかもしれない。

佐賀白石では深井戸水が注入水として利用されている。深井戸水そのものの水質は明らかでないが、水路で導水された後の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、亜硝酸性窒素の濃度はそれほどでないが、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 濃度は富栄養化の限界濃度より1オーダー高くなっている。再揚水は黒濁し、有機物の破片が含まれ、明らかに生物的な目詰りを伴っていることが示されている。注入水がこのような水質を有する場合には、アンモニア性窒素、溶解性リン等の除去と注入水の滅菌が必要になるかもしれない。

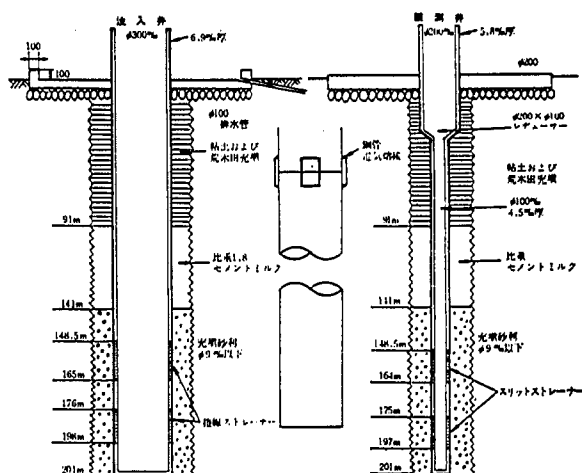
上越市では実験地脇の二級河川保倉川より取水し、凝集沈殿急速ろ過を行なった上で注入している。保倉川の水質が悪化した場合には、注入水の濁度が5 ppmにまで達する。図Ⅱ-16⁷⁾は注入水の濁度と注入井内の水位上昇とを図示したものである。注入開始より7日目から注入水濁度が高くなり、注入水での水位上昇傾向も強くなっているようで、懸濁物による目詰りが発生していることが推測される。さらに、注入休止後注入井内の水質検査によれば、G.L-100 m以深ではかなりの酸化鉄赤褐色沈殿物が含有されていて、最深部で1.2 ppmの濃度となっている。注水水源である保倉川にはほとんど鉄分は検出されないとのことで、施設特にケーシング、ストレーナーの酸化腐食による鉄分の析出と考えられ、目詰りの一因となっている。再揚水すれば開始直後は赤濁し、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示されている。同様に

表II-1 現 地 で の 実 施 例

秦 野	注 入 帯 水 層 盆地内を流れている河川によって搬出された砂礫 透水係数 $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$  堀山下注水実験場地质断面図	注入井構造, 注入システム 深度 85 m, 口径 300 mm, ストレーナ長 18 m 開孔率 40%(?), スパイラルストレーナ, フィルター材グラベル  水柱計 水中ポンプ バルブ 積算量水計 三角堰
大 阪	砂礫混り, 微細粒子含む, 上層に13 mの加圧層 透水係数 $1 \sim 5 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$	深度 51 m, 口径 300 mm, ストレーナ長 7.5 m, SKS ストレーナ 開孔率(?), フィルターオオ, 10 mmの礫石  水道本管 受水槽 量水器 注入井 (RW) 上部透水層 不透水層 注入対象層 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 間隙水圧 観測井

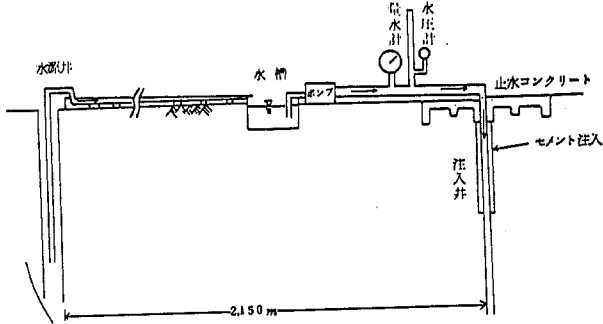
	注 入 帯 水 層	注入井構造, 注入システム
秦 野	注入水水質, 地下水質 沢水を取水し, 水道水として浄化 $F_e 0, M_n 0$ 蒸発残留物, 注入水 6.05ppm, 注入帯水層水 114.0ppm 注入水のその他の化学成分はほぼ地下水のそれと同程度。 注入水の方が, 注入帯水層水より水質的にすぐれている。	注入に伴う目づまりの進行状況 比注入量は時間的に指数関数的に減少 (図Ⅱ-1 ~ Ⅱ-2) 注入量が大きくなると初期の比注入量はかなり小さくなる。(図Ⅱ-2) 比注入量半減注入量 $7.1 \times 10^4 \text{ m}^3$ (注入量 $38.4 \text{ m}^3/\text{h}$)
大 阪	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 1 ppm の SS が含まれているという。 $F_e, M_n 0$	目づまりの発生状況は 図Ⅱ-4 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いない。しかし, 注入井より 7.7 m 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 7.7 m 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。 比注入量半減注入量 $1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ (注入量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$)
	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	空気泡……わずかな再揚水 (15 分) で元の比注入量に回復 (図Ⅱ-3) $650 \text{ l}/\text{min}$ (注入量) で井戸内下降平均流速は $15.3 \text{ cm}/\text{sec}$, 直径 2 mm 以下の空気泡は水面まで達しえず, 理論的には $1,200 \text{ l}/\text{min}$ ですべての気泡は上昇できない。 全体的には長期的な比注入量の減少傾向がみられる。	わずか 15 分の逆洗で元に回復 (図Ⅱ-3 を参照)

	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	注入水中のSSか, 溶存空気の気泡化が考えられる。 空気の溶解度(1気圧) <table><tr><td>0℃</td><td>5℃</td><td>10℃</td><td>15℃</td></tr><tr><td>0.029cm³/cm³</td><td>0.027cm³/cm³</td><td>0.024cm³/cm³</td><td>0.019cm³/cm³</td></tr></table> 15℃(3気圧, 5℃1気圧に変換) 0.059cm³/cm³ 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。 SSを1ppmとすれば0.5m³/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。	0℃	5℃	10℃	15℃	0.029cm ³ /cm ³	0.027cm ³ /cm ³	0.024cm ³ /cm ³	0.019cm ³ /cm ³	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Ⅱ-6)。 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Ⅱ-5)
0℃	5℃	10℃	15℃							
0.029cm ³ /cm ³	0.027cm ³ /cm ³	0.024cm ³ /cm ³	0.019cm ³ /cm ³							
	注入帯水層	注入井構造, 注入システム								
大東市	地層 不明 透水係数 1×10⁻²cm/sec(推定)	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 整井集水孔位置図								

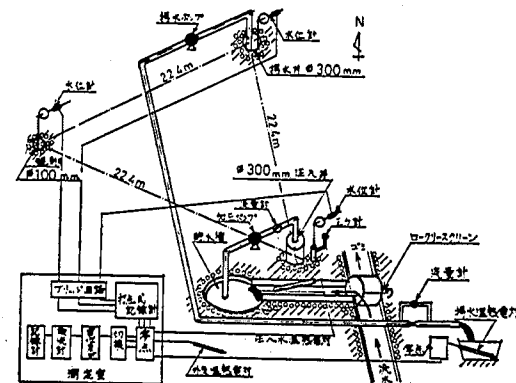
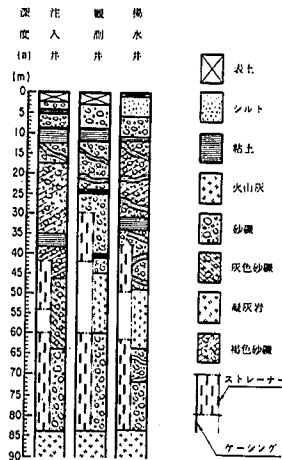
	注 入 帯 水 層	注入井構造, 注入システム												
妻 沼	地層 砂礫層(玉石含) 透水係数 $3.1 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ (推定)	A 注入井 深度 200 m, 口径 300 mm, ストレーナ 148.5~165 m, 176 m~198 m 計 39.5 m ストレーナ巻線型, 開孔率 14%, グラベルパッキング充填砂利 9 mm 以下 B 注入井 口径 400 mm, ストレーナ, クラベルパッキングは A 井と同じ 												
	注入水水质, 帯水層水质	注入に伴う目づまりの進行状況												
大東市	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) 0.8 m³/min (1,152 m³/day) 2月15日~6月17日 府営水道水 1.3 m³/min (1,872 m³/day) 水质 <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_o</td> <td>1.00 ppm</td> <td>0.01 ppm</td> <td>0.01 ppm</td> </tr> <tr> <td>M_n</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 _o	1.00 ppm	0.01 ppm	0.01 ppm	M _n	0.38 ppm	0	0	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Ⅱ-7 参照) 比注入量半減注入量 $10.8 \times 10^4 \text{ cm}$ (注入量約 63 m³/sec)
	帯 水 層 水	淀川浄水+深井戸水	淀川浄水											
F _o	1.00 ppm	0.01 ppm	0.01 ppm											
M _n	0.38 ppm	0	0											

	注入水水質, 帯水層水質	注入に伴う目づまりの進行状況
妻 沼	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 A 注入井……15 m井 F_e^{2+} 4.5 ppm, M_n^{2+} 2.27 ppm B 注入井……15 m井 F_e^{2+} 3.88 ppm, M_n^{2+} 4.12 ppm 45 m井 “ 1.14 ppm, “ 0.64 ppm 90 m井 “ 0.14 ppm, “ 0.14 ppm 注入帯水層水	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Ⅱ-8) 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。F_e, M_n 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Ⅱ-9～図Ⅱ-10) 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。 比注入量半減注入量 B 井45 m井 $2.02 \times 10^4 \text{ m}^3$ (注入量60 m³/h) B 井15 m井 $0.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ (注入量60 m³/h) 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。
	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	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, 目づまりを引きおこす。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であるが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。 注入鉄分量……2.7 Kg(1,500 m³/day × 180 day × 0.01 ppm) 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。	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。

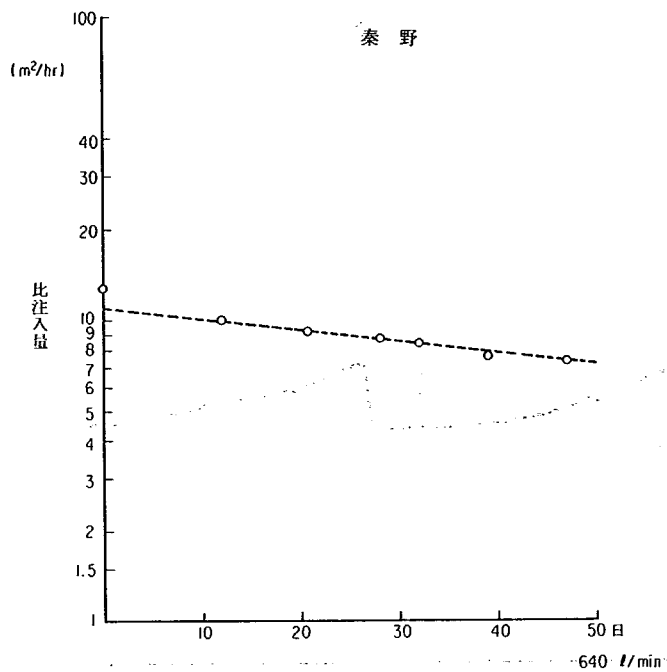
	考えられる目づまりの原因	再揚水にする比注入量の回復
妻 沼	注入水中のF_e, M_nが注入中に酸化され、ストレーナ、帯水層に蓄積。 再揚水中に酸化鉄、酸化マンガンが含まれる。	再揚水総量を多くすれば逆洗効果は上がる、しかし、揚水総量より揚水量 (m^3/sec)が大きいかほど効果に対して影響が大きい。さらに断続揚水を行 えば効果がある(図II-11)。 再揚水の間に注入をはさむと一そう逆洗効果が期待される。
	注入帯小図	注水井構造, 注入システム
平 塚	地層……玉石混り砂利 透水係数……$1.1 \times 10^{-1} cm/sec$ 深度(m) 構造図 柱状図 比抵抗値(ohm-m) Δ 自然水位 $\times$ 警戒水位 ∇ 停止水位	深度80m, 口径300mm, ストレーナ50m~75m 計25m N. S. Tスクリーン, 開孔率(20~40%?), グラベルパッキング 注入管に外接させて口径25mmの観測井 注入システム 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)

	注 入 帯 水 層	注入井構造、注入システム
佐賀 白石平野	地層……シルト、砂礫混り (多層にわたって注入) 透水係数……$2.83 \sim 6.4 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$	深度165m, 口径0~31.5m, 150mm, 31.5~165m 75mm ストレナ, スリット型, 開孔率5%, 長さ合計67.5m, 加圧注入井 
	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	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。 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しうる。	注入に伴って, 比注入量は指数関数的に減少(図Ⅱ-12)。 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。 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の形で表わされる。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。 $S/Q = a + bQ$ S ; 注入井での平水位との水位差 a ; 帯水層ロス b ; 井戸ロス 比注入量半減注入量 $0.24 \times 10^4 \text{ m}^3$
佐賀 白石平野	深度130mの深井戸水を開水路(1000m以上)で導水 水質 $\text{NH}_4\text{-N}$ 0.003~0.005ppm, $\text{P}_4^0\text{-P}$ 0.27~0.35ppm リン濃度が異常に高い(肥料等が混入しているのでは?)	一定圧注入で, 注入量の減少として目づまりが発生 $q_1 = q_2 e^{-at}$ q_1 ; 初期注入量, a ; 定数, t ; 時間

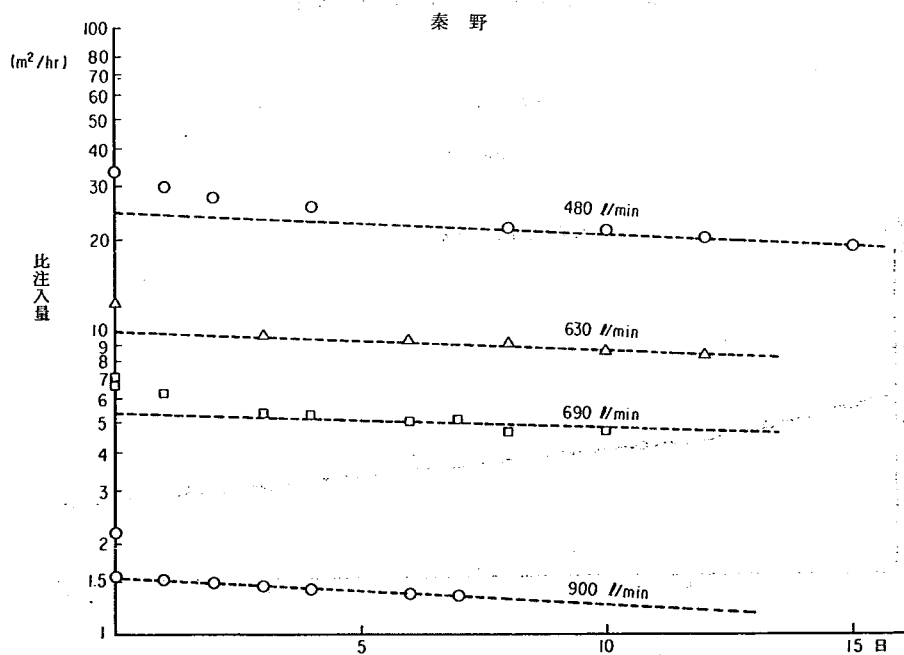
	考えられる目づまりの原因	再揚水による比注入量の回復
平塚	注入水質、帯水層水質が明らかでないで、目づまりの原因は明確でない。	総注入量と同等ぐらいの総揚水量でも全体としては、注入効率は減少きみである。(図Ⅱ-13)。 再揚水量は注入量とほぼ同程であり、逆洗効果は注入量より大きな再揚水量でないとそれほど効果がないのかもしれない。
佐賀 白石	導水路中で発生したソウ類等によるSSおよび生物的な目づまりは、再揚水は黒色で、有機物の破片を含む。	再揚水による逆洗については述べられていない。
	注 入 帯 水 層	注 入 井, 注 入 シ ス テ ム
新潟 上越市	地層……均質な砂層 G ₄ 層 透水係数…… $6.2 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ (透水量係数 $2,480 \text{ m}^3/\text{day}$)	保倉川より取水→急速沈澱→急速ろ過→注入井 注入井口径上部53 mまで450 mm, 下部300 mm, 深度285 m ストレーナ長46 m, 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) 透水係数…… $2.1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ (透水量係数 $65 \text{ m}^3/\text{day}$)	側溝水を導水→スクリーンで粗大ゴミの除去→注入井 注入井口径300 mm, 深度84 m, ストレーナ長36 m, 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	保倉川より取水 濁度最大 5 ppm、濁度計で検知されない藻等も混入 地下水質 F_e 0.45 ppm	比注入量は指数関数的に減少（図Ⅱ-14） 比注入量半減 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3$（注入量約 $53 \text{ m}^3/\text{h}$） 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、ストレーナの開孔率が高く、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。
山形市	側溝水であるが非常に清澄 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、F_e²⁺, ³⁺ 0.44 ppm, M_n²⁺, ⁴⁺ 0.11 ppm 含む 注入水全蒸発残留物 106 ppm 地下水 " 240 ppm F_e²⁺, ³⁺ 0.07 ppm マンガンは含まず	注入日数が十分でないが、ほぼ指数関数的に減少（図Ⅱ-15） 比注入量半減総注入量 $12.2 \times 10^4 \text{ m}^3$（注入量 $42 \text{ m}^3/\text{h}$） 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。
	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	再揚水が赤濁（酸化鉄） 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） 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。	$150 \text{ m}^3/\text{h}$ 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。 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、洗浄も容易にいきわたることも一因と考えられる。
山形市	再揚水がかっ色で酸化鉄が含まれる 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。	再揚水による逆洗は述べられていない 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。



図II-1 長期注入による比注入量の減少



図II-2 注入量による比注入量の違い

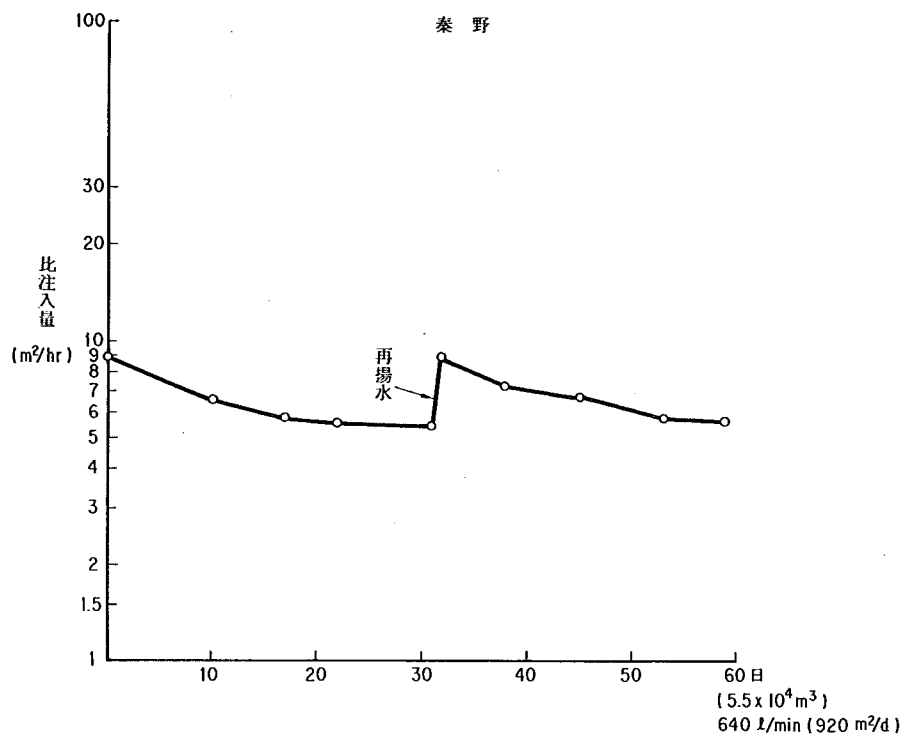


図 II - 3 再揚水による比注入量の回復

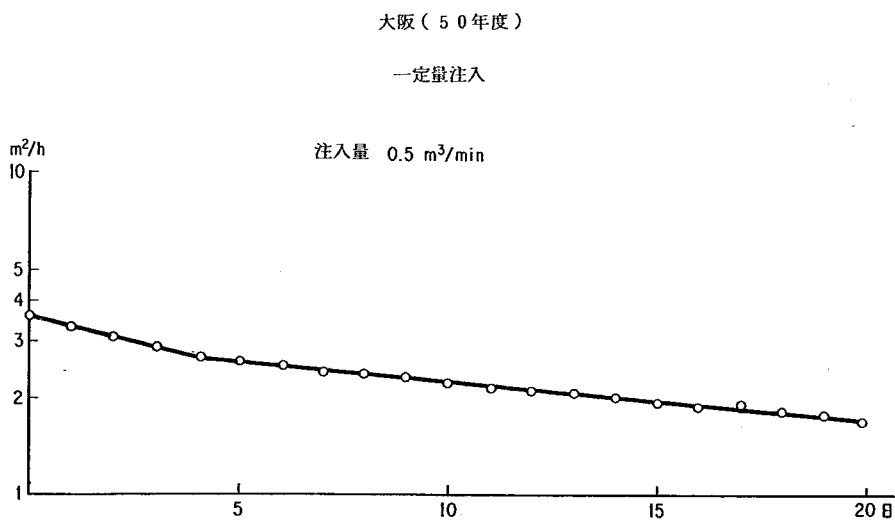
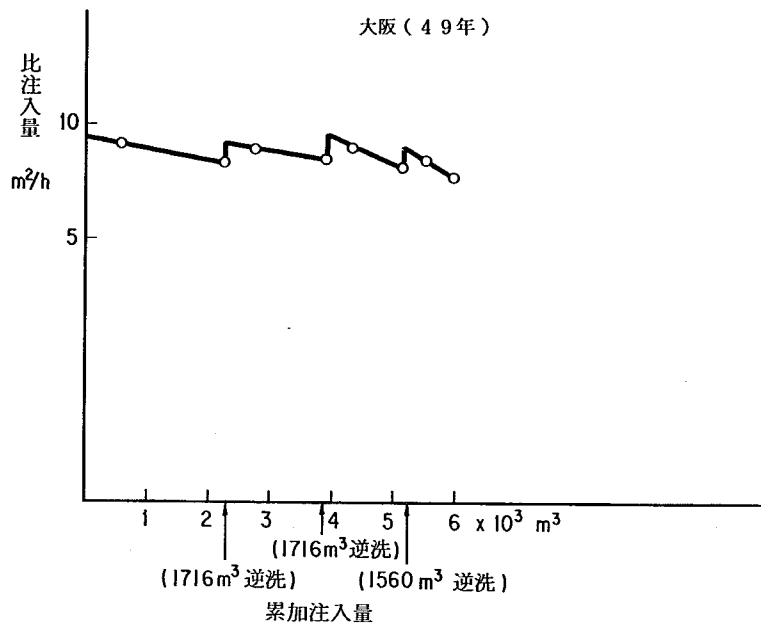
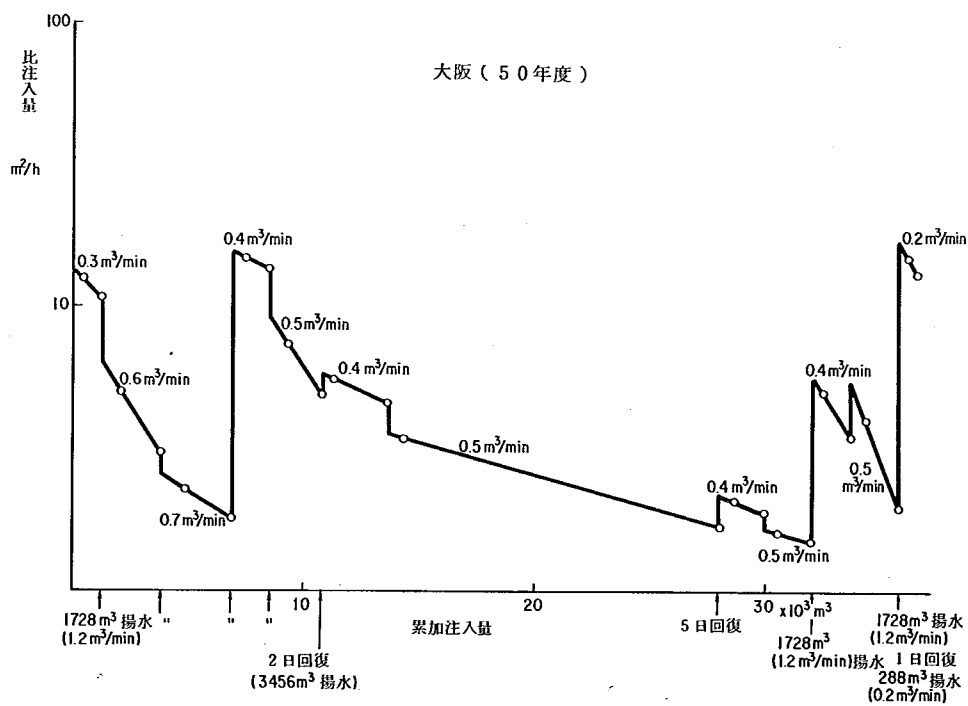


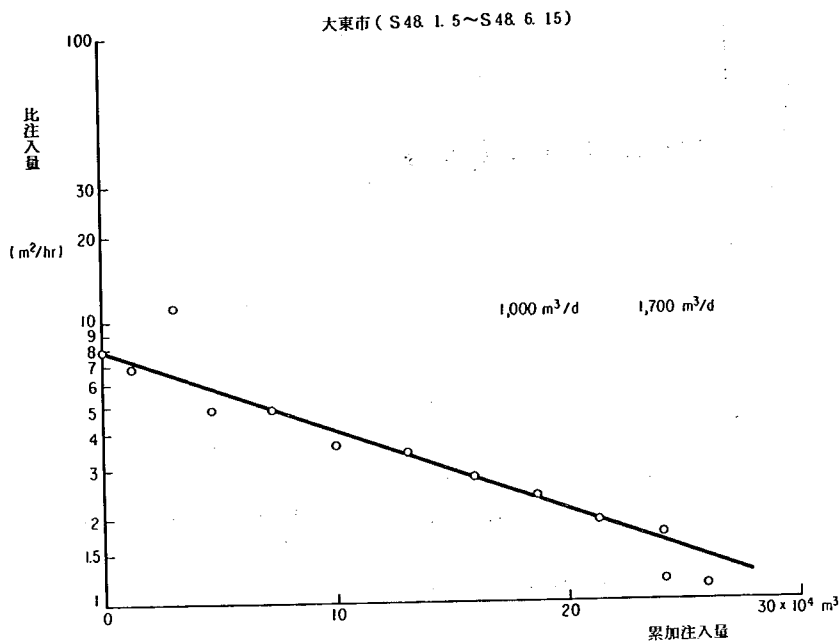
図 II - 4 長期注入による比注入量の減少



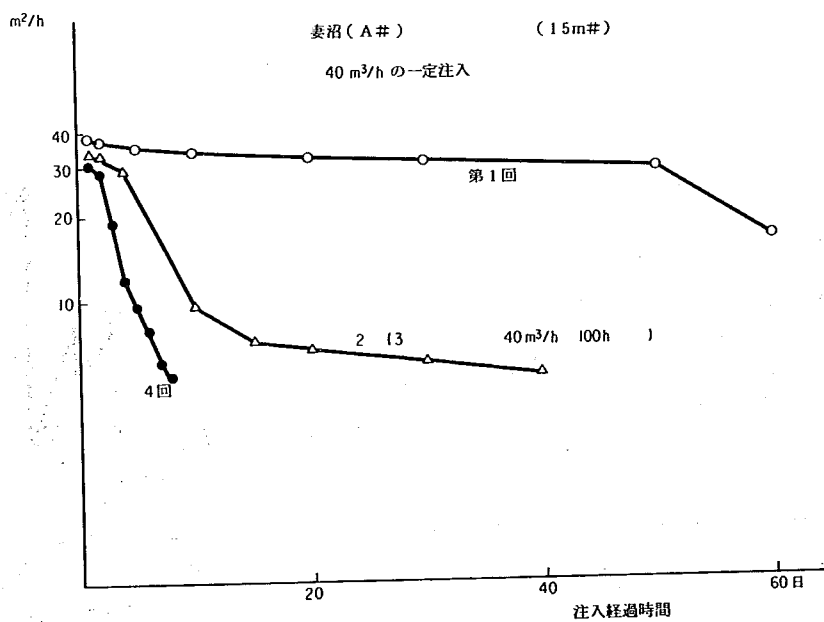
図Ⅱ-5 再揚水による比注入量の回復



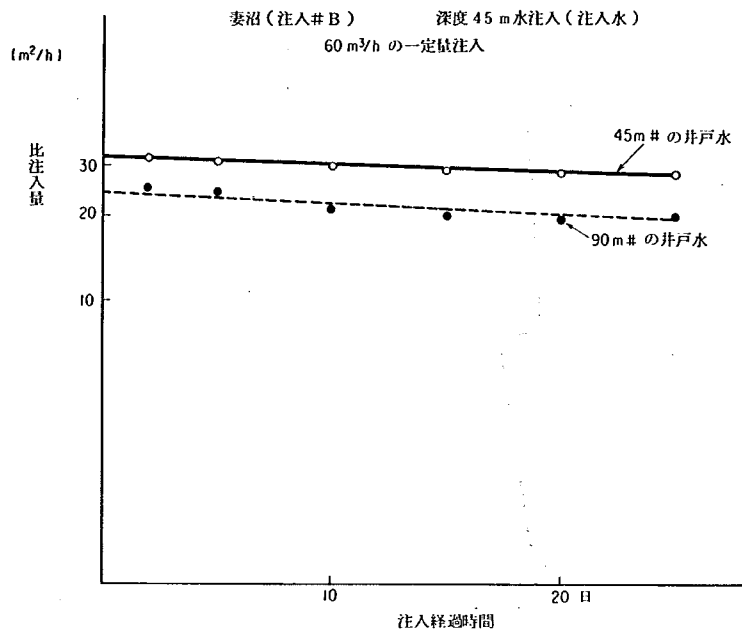
図Ⅱ-6 再揚水による比注入量の回復



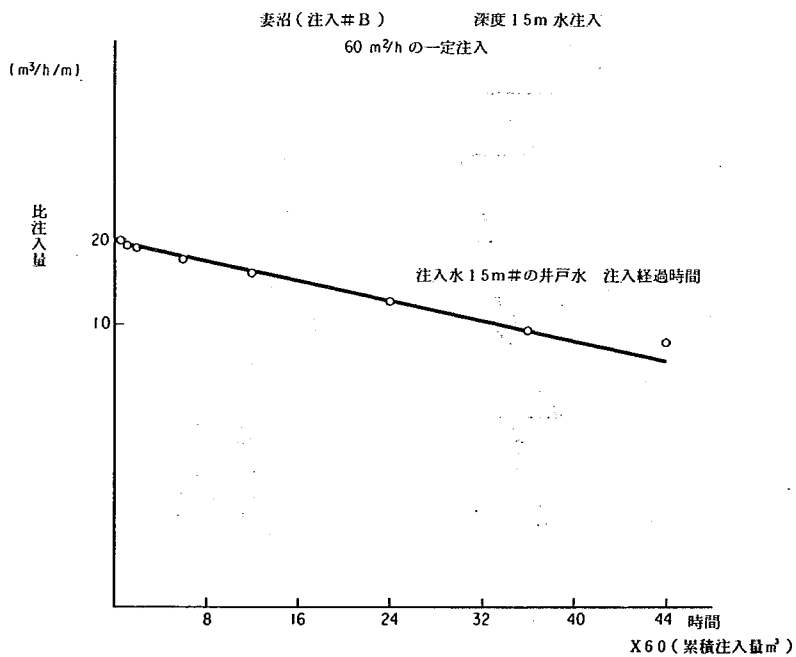
図II-7 長期連続注入に伴う比注入量の減少



図II-8 長期注入による比注入量の減少

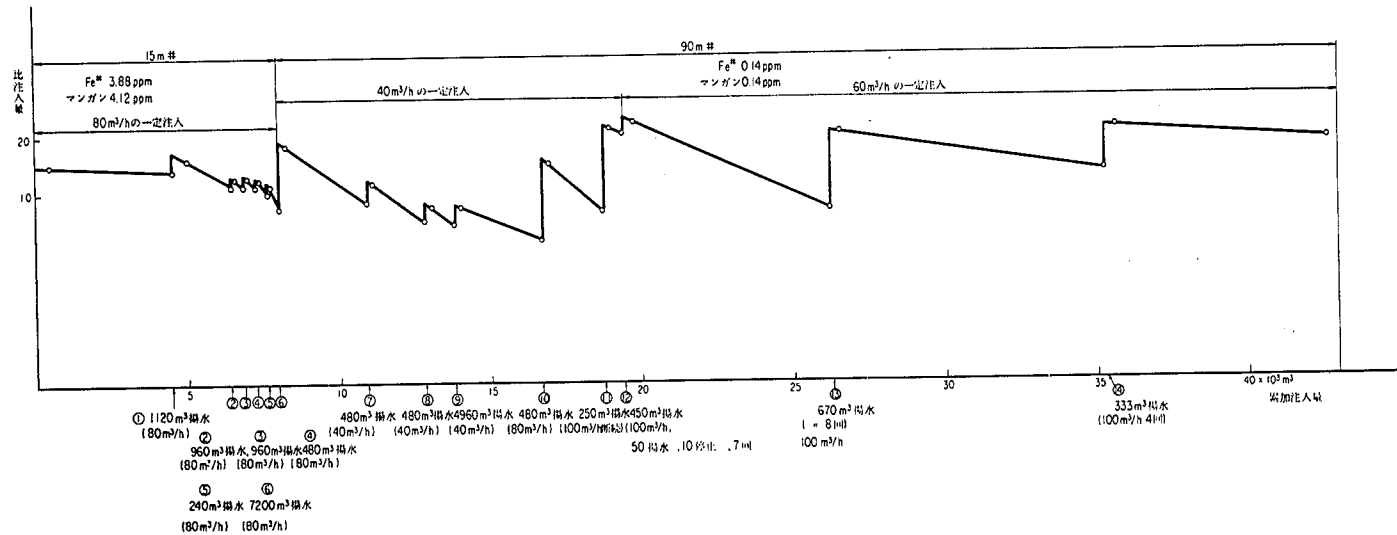


図Ⅱ-9 一定注入による比注入量の減少

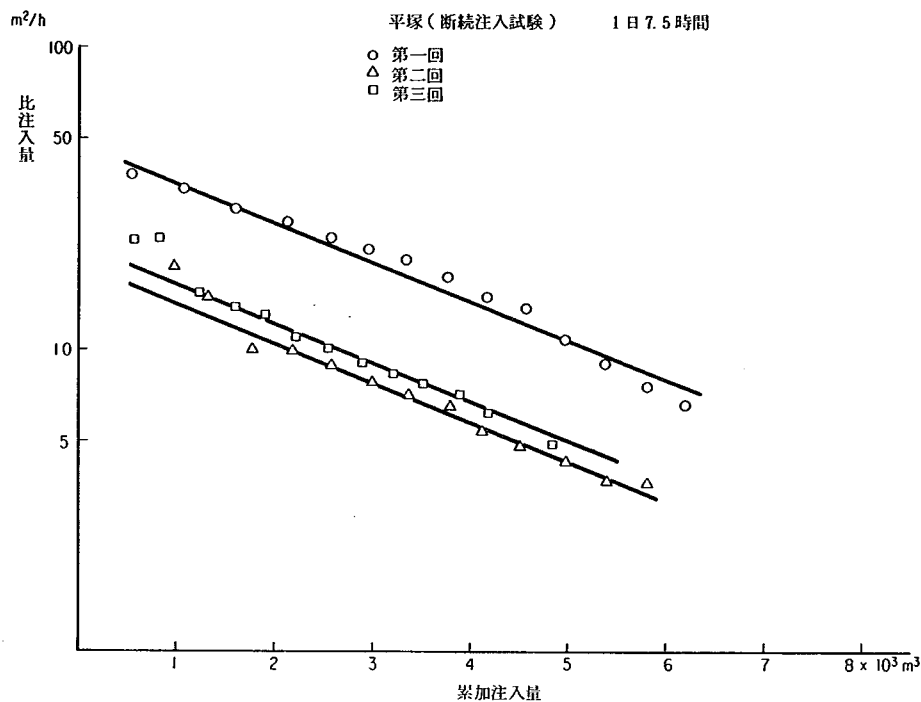


図Ⅱ-10 一定注入による比注入量の減少

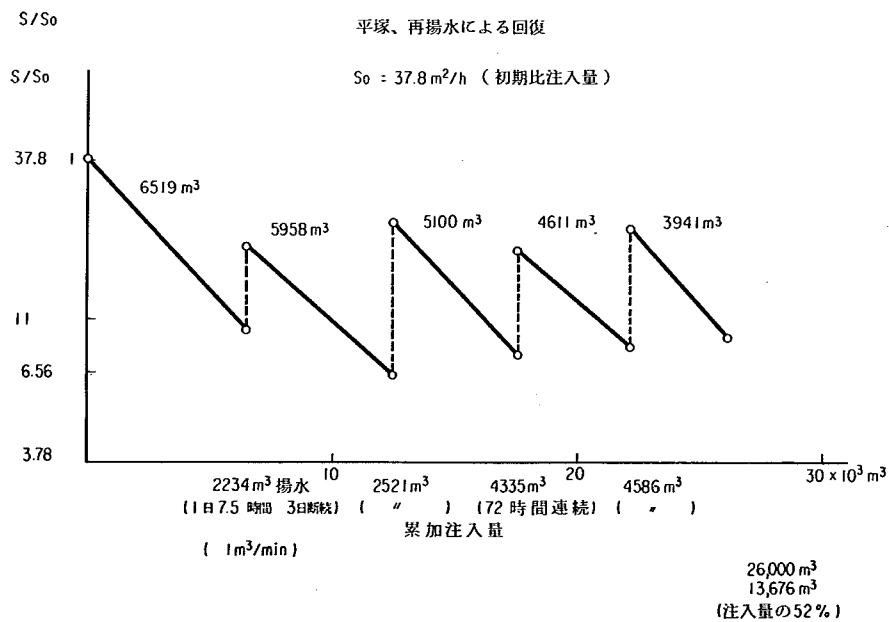
妻 沼



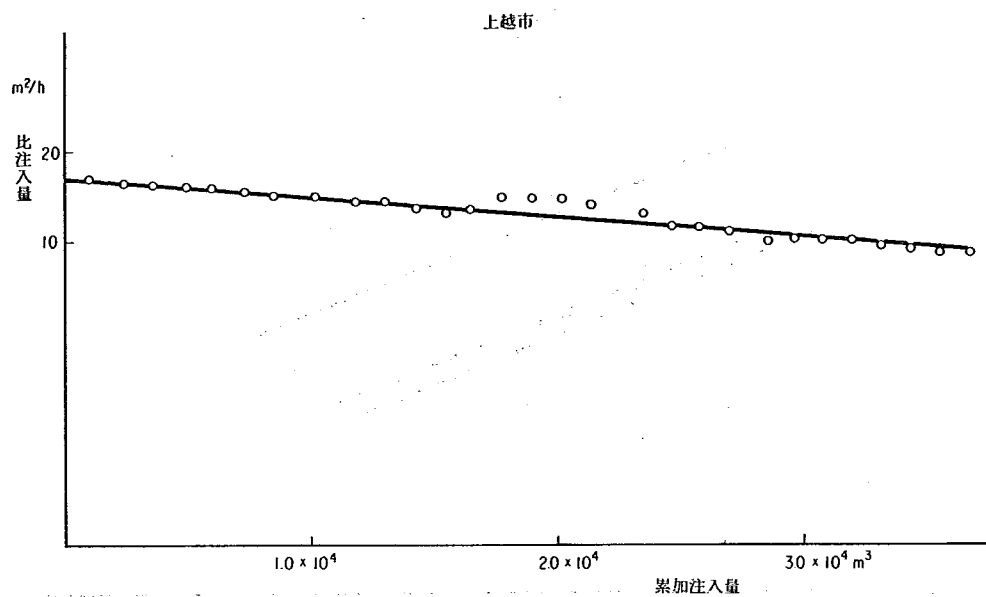
図Ⅱ-11 再揚水における比注入量の回復



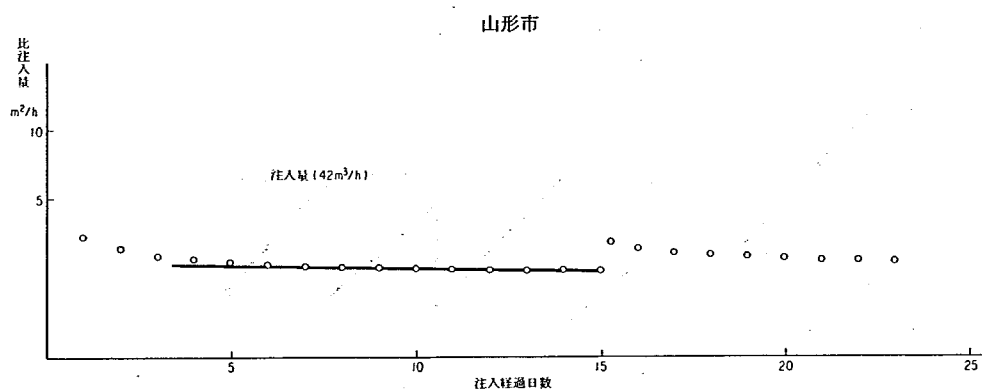
図Ⅱ-12 断続注入による比注入量の減少



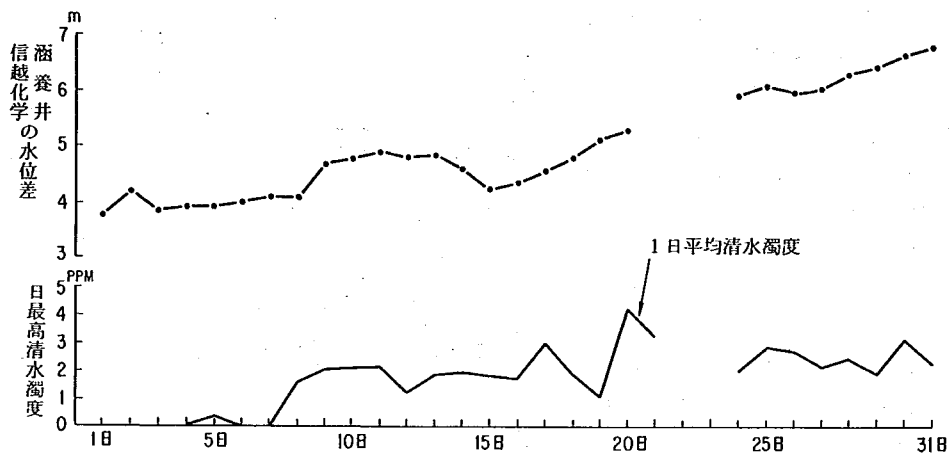
図Ⅱ-13 再揚水による比注入量の回復



図Ⅱ-14 注入に伴う注入量の減少



図Ⅱ-15 注入に伴う比注入量の減少



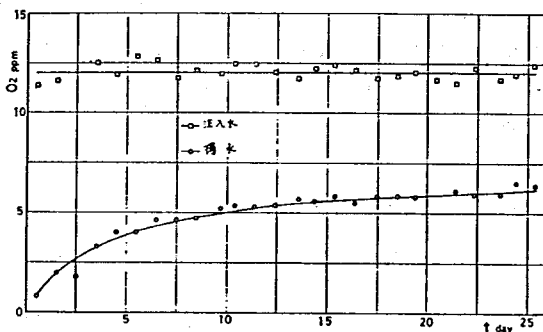
(注) 信越化学・涵養井の地下水位差は、信越化学と涵養井の動水位の1日平均地下水位の差
清水濁度は1日1時間以上持続した最高濁度

図Ⅱ-16 清水濁度と目づまりの関係

容存酸素 (DO) の検査によると注入休止2時間後、注入水中に8.3 ppm 含まれていたDOは3.3 ppm、ストレーナー付近で6.5 ppm まで低下している。このような急激なDOの消費はケーシングの酸化腐食しか考えられない。ストレーナー付近のDOの方が高くなっているがこの理由は明らかでない。

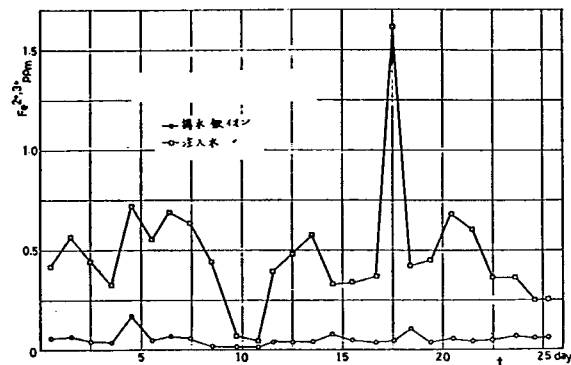
山形市での注入実験は側溝水を、粗大ゴミをスクリーンで取り除くのみで、そのまま注入しているが、顕著な目づまりは発生していない。注入水の蒸発残留物は揚水のそれより少なく、非常に良好である。ただし、注入水中には平均で約0.4 ppm の鉄が含まれこれが注入井の近傍に蓄積し、目づまりの原因となっている。図Ⅱ-17は注入水のDOと揚水のDOの注入・揚水に伴う変化である。注入しながら揚水を行なっているため、注入水と地下水が混合されることになる。注入水のDOが12 ppm で、揚水中には半分の6 ppm が含まれて、帯水層中でのDOの消費はほとんどなされてないものと考えられる。図Ⅱ-18には注入水と揚水中の鉄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は注入水の約半分にまで達するのに比較し、揚水中の鉄イオン濃度はごくわずかになっていて、注入水中の鉄はほぼ帯水層中に抑留されたことを示している。注入井で再揚水すれば、再揚水は黒ずんだ酸化鉄が含まれていて、目づまりの原因となっていることがわかる。

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、自然落下時に注入井内で空気泡が発生し、空気泡によ



図Ⅱ-17 溶存酸素の変化

る目づまりが一時的に発生していると報告されている。空気泡の上昇速度と注入水の平均降下速度の関係述べこれ、 650 l/min で注入された場合、注入井内の平均降下速度は 15.3 cm/sec となり直径 2 mm 以下の気泡は帯水層内へ持ち込まれてしまうとされている。しかし、注入井内には速度分布が存在するため、一概に論ずることはできない。またストレーナー部に達すると降下速度が減少することになり、空気泡は上昇しやすくなる。水圧の上昇にしたが



図Ⅱ-18 全鉄イオンの濃度変化

って溶存量も増加することになり、空気泡の挙動は極めて複雑である。わずか15分の短い再揚水で比注入量が回復することから、空気泡による目づまりの発生も否定できない。しかし、注入時間の経過に伴ない、徐々に比注入量が減少し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爆気の効果があり、注入井内の溶存酸気が増加することになり、ケーシング、ストレーナーの酸化腐食の原因とすることが考えられる。再揚水は赤濁していて、酸化鉄が含まれていて、揚水井のさびか帯水層内の蓄積物かどうか定かでない。

大阪での目づまりの原因は水道水といえどわずかに含まれるSSと施設の鉄さびの帯水層内での蓄積によるものと考えられる。表Ⅱ-1に示されているように、水道、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は1ppmほど含まれることもあると言われており、大阪の場合SSが1ppm含まれるとすれば20日間の連続注入で総計14kgのSSがストレーナーを通過したことになる。

大東市の注入帯水層水に1ppmの鉄とわずかなマンガンが含まれている。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間隙を流れ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るが、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、帯水層に広く分布し、注入井近傍に蓄積することは考えられない。再揚水を行えば集中的に大量の酸化鉄が排水されることから、酸化鉄はごく注入井の近傍に蓄積されたものとみなせる。よって注入水中に含まれていた酸化鉄が蓄積したことになる。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、上越と同様に、ストレーナー、ケーシングの酸化腐食によって大部分が生じたものと考えられる。

1-2 目づまりの現象

目づまりの進行状況は比注入量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興味深い。図Ⅱ-19に比注入量の累加注入量による変化を示す。

表Ⅱ-2は目づまりの進行に関係するものを表にとりまとめたものである。帯水層厚く、注入井の径が大きいと、ストレーナー単位面積当りの目づまり原因となる負荷量が小さくなるので、

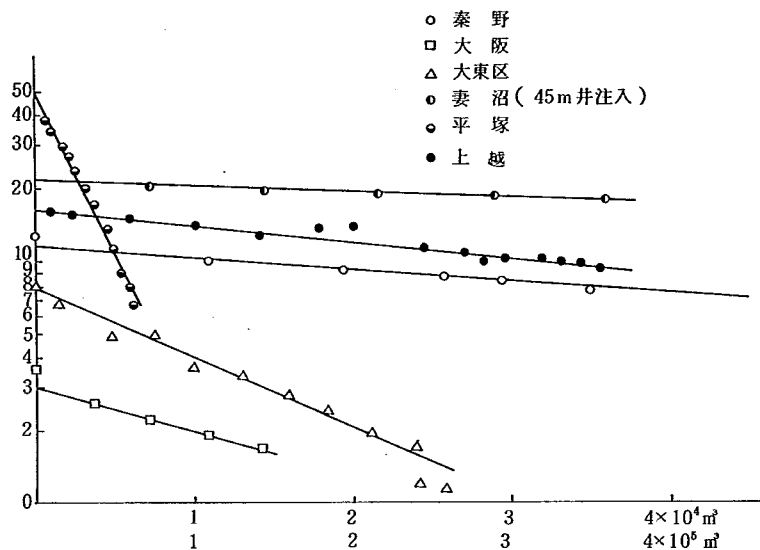


図 Ⅱ - 19 注入に伴う比注入量の減少

表 Ⅱ - 2 既往涵養実験における目づまり調査

地名	透水係数	注 入 水	注入井構造 ①深度 ②径 ④ストレーナ長	比注入量半減注入高 (注入量)	考えられる目 づまりの原因
秦 野	$3.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$	水道水	① 85m ② 300mm ③ 18m	$4.2 \times 10^3 \text{ m}$ ($38 \text{ m}^2/\text{h}$)	空気泡, 酸化鉄
大 阪	$1 \sim 5 \times 10^{-2}$	"	51m 300mm 75m	$2.4 \times 10^3 \text{ m}$ ($30 \text{ m}^2/\text{h}$)	水道SS, 酸化鉄
大東市	1×10^{-2} (推定)	"	182m 250mm 375m	$4.6 \times 10^3 \text{ m}$ ($63 \text{ m}^2/\text{h}$)	酸化鉄
妻 沼	3.1×10^{-2}	地下水A 5m井 Fe+Mn 1.78ppm B 5m井 " 80 ppm	200m 400mm 39.5m	A $4.1 \times 10^3 \text{ m}$ ($60 \text{ m}^2/\text{h}$) B $0.04 \times 10^3 \text{ m}$	酸化鉄, 液化マ ンガン
平 塚	1.1×10^{-1}	浅井戸水	80m 300mm 25m	$0.1 \times 10^3 \text{ m}$ ($60 \text{ m}^2/\text{h}$)	?
佐 賀 白 石	$283 - (4 \times 1)^{-3}$	深井戸水	165m 150~75mm 675m	— (定圧注入)	SS, 微生物, 酸化鉄
上 越	6.2×10^{-2}	表流水浄化 (凝集沈殿・急速経 過) 濁度 2~3 ppm	285m 300mm 47m	$10 \times 10^3 \text{ m}$ ($53 \text{ m}^2/\text{h}$)	SS, 酸化鉄, 熱生物
山 形	2.1×10^{-3}	表流水 (粗大のみ除去, 清澄) Fe 0.4 ppm	84m 300mm 36m	$3.6 \times 10^3 \text{ m}$ ($42 \text{ m}^2/\text{h}$)	酸化鉄

ここでは目づまりの進行状況を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た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となっていることは明白である。45m井を注入した場合の約100分の1の比注入量半減注入高である。

上越の例では、保倉川の河川水を凝集沈殿急速ろ過を行なっても最大で濁度が5 ppmに達することもあり、注入井での酸化鉄の発生もあってか、比注入量半減注入高は他の水道水を注入した例と比較すると小さくなっている。

水道水を注入水にしたり、地下水でも注入帯水層水に近いものであれば、比注入量半減注入高は $4 \times 10^3 m$ 以上となり良好な注入結果となっている。大阪の場合には $2.4 \times 10^3 m$ であって、上値の6割程度であるが、水道水といえど水質に差があること、また、単位ストレーナー面積当りの注入量が大きく、ストレーナーの開孔率が小さいことなどが原因をなしていると考えられる。

山形市の実験では表流水をそのまま注入しながら、比注入量半減注入高は約 $3.6 \times 10^3 m$ 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り、蒸発残留量は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、目づまりが発生しにくいことが予想されるが、現地実験での比注入量半減注入高と帯水層の透水係数との関係は明確でなく、ストレーナーの開孔率も関係していか、相関は見られない。比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を少なくし、ストレーナーの開孔率を大きくすることが望ましい。水道水程度の注入水であれば比注入量半減注入高は約 $4.0 \times 10^3 m$ になる。上越での例に示されているように、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ほどの鉄分が含まれるにもかかわらず、ストレーナーの開孔率が40%と高いこともあってか、比注入量半減注入高は $1.2 \times 10^3 m$ にまで達している。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、ストレーナーを切るべき帯水層が厚かったり、注入井の径を大きくし、ストレーナーの開孔率を大きくするなど工夫すれば十分比注入量半減総注入量を多くすることが可能となる。

1-3 現地実験にみられる注入量

注入井によって地下水涵養を行なう上で最も重要な項目の一つとして注入量がある。注入量は注入すべき帯水層の水理学的定数と地下水位の自然条件、注入井構造（ストレーナー開孔率、グラベル、注入井径）を考慮しなければならない。本格的な注入の前に、段階注入試験を行ない、注入量と注入井内水位上昇量との関係を明らかにし、可能な注入量の範囲について明らかにすることが望ましい。既往の現地実験での注入量を見てみるとだいたい $0.5 m^3/min \sim 1.0 m^3/min$ ⁹⁾の範囲にある。単位ストレーナー面積に換算すれば $30 m/日 \sim 100 m/日$ ¹⁰⁾である。いづれの実験においても目づまりに伴う注入井内の水位上昇を考慮してか、余裕ある注入量で注入がなされている。

目づまりに伴う比注入量の減少と比注入量の回復のための再揚水の必要性を考えれば、目づまりの発生による比注入量の減少率が小さい方が好ましいことになる。目づまりは注入量と注入水質に大きくかわるから、注入量については特に注入井の径、ストレーナーの長さや注入水質に留意が必要となる。

注入水質と目づまりの進行を示す比注入量半減注入高（比注入量が注入開始時の半分になるまでに注入した総量をストレーナー面積で割った値）は、現地実験結果を整理すると、

水道水…………… $4.0 \times 10^3 m$

河川水の処理水（濁度 2 ～ 3 ppm）…… $1.0 \times 10^8 m$

同じ注入井に、河川処理水と水道水を同量注入した場合には河川処理水の方が 4 倍目づまりによる水位上量が早くなり、回復のための再揚水がひんばんに必要となる。それゆえに、水質が悪くなるとそれだけ大きなストレーナー面積をもつ注入井が必要となる。ストレーナー面積が大きいと単位ストレーナー面積当りの負荷量が少ないし、目づまりの進行を遅くすることができるからである。よって、注入量を決める場合には、注入水質からだいたいの比注入量半減注入高を知り、再揚水の頻度を設定し、ストレーナー面積から所定の再揚水頻度になるようにすればよい。ただし、比注入量の回復が容易に可能であって、回復の手数をいとわないなら、地下水位から帯水層の微粒子に影響を与えない範囲で注入量を設定することが可能である。

短期間に多くの量を注入したい場合には、注入量を大きくする方が望ましく、帯水層の透水性、地下水位、注入井のストレーナー開孔率等の注入井構造から定められる。注入井に伴う目づまりの発生を考慮し、長期にわたって効率よく注入を実施する場合には、比注入量の回復のための再揚水の頻度を少なくすることが望ましいから、目づまりの発生域を大きくし、再揚水の効果が高まるように、ストレーナーの開孔率と注入井の径を大きくすることが好ましい。

2. 目づまりの原因

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、直接表流水を地下水位するものであって、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と考えられる。

目づまりとはその言葉が示す通り、地層の間隙が塞がれることを意味し、注入井による涵養の場合には、ストレーナーに面した帯水層の間隙の減少による透水性の劣化を示すことになる。注入井による注入は狭まいストレーナーを通して長時間にわたって行なわれることから、目づまりの発生がごく近傍の狭まい部分に限られることと、注入水の総負荷量的なものが目づまりに直接影響を与えると考えられるから、注入水質のわずかな悪化が目づまりを大きく進展させることが予想される。

注入井の目づまりとして、一般的に次の5項目が考えられている。

- ① 注入水中の懸濁物質
- ② 帯水層内の化学反応
- ③ 注入井や帯水層での微生物の増殖
- ④ 気泡
- ⑤ 土粒子の配列変化

ここでは、以上の目づまり原因の発生機構について説明するが、さらに、酸化鉄（ストレーナー、ケーシングの腐食も含む）による目づまりが一般的に発生しやすいことが明らかになったので、以上の5項目にその発生機構を加える。

2-1 注入水中の懸濁物質による目づまり

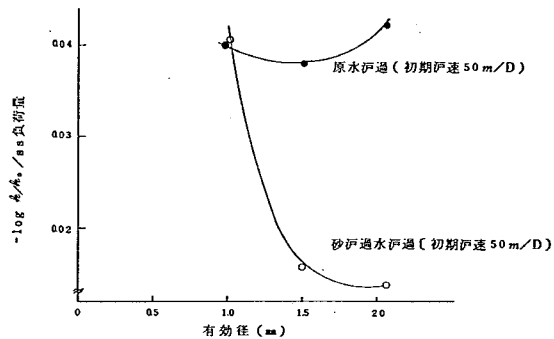
懸濁物質による目づまりの機構には数種の要因が示されている。大きくわけて次の2¹¹⁾つが考えられる。輸送機構と付着機構である。付着機構とは懸濁物質が帯水層材と接触したとき、懸濁物質を帯水層材と付着させる機構であって、化学的吸着、ファンデルワース力、動電学力（Electrokinetic force）、そして生物活動による粘着物とその生産による増殖が考えられる。輸送機構は懸濁物質が帯水層材に接触するまでに懸濁物質を輸送する機構すなわち帯水層の表面でなく遠くまで送る機構をいう。さえぎり、慣性力、重力沈殿、セン動流中での横方向の流体力、流れが速くなった場合での拡散、さらに機械的なふるい作用もこの機構の一つとして考えられている。

帯水層の目詰りは、2つの観点から考えられる一つは、出来るだけ、目詰りを長びかせる為のもので、これは帯水層の遠くまで均一に目詰りさせる事である。しかしこれは表面回復の難しさを増す。又他は、帯水層のごく表面で目詰まりさせることである。これはすぐ目詰りを起すことであるが、反面目詰りの回復のしやすさから見ると良い。

懸濁物による目づまりはそれが帯水層の間隙に抑留され、間隙を塞ぐことによって生ずるものであり、以上に述べた機構から、懸濁物による目づまりの程度を左右する要因としては、帯水層の粒子径、注入速度、懸濁物の性質、濃度に関係することが考えられる。

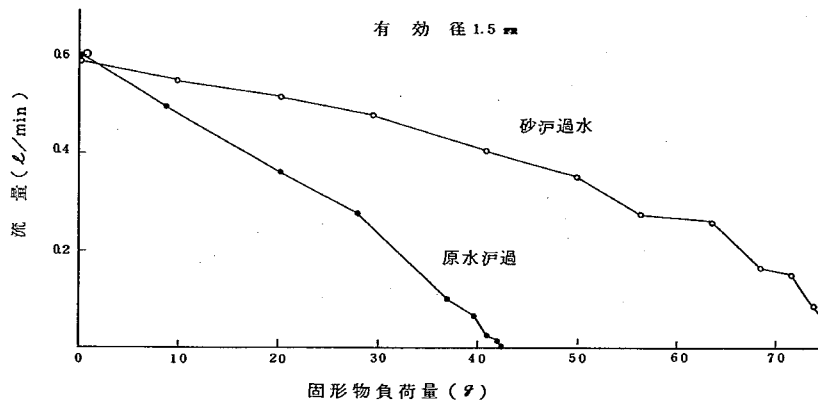
以下室内実験によって得られた知見を説明する。

12)
 図Ⅱ-20は帯水層材の¹²⁾の懸濁物質による目づまりの影響を示したものである。横軸は帯水層材の有効径、縦軸は片対数グラフにおける注入水SS負荷量に伴う透水係数の減少勾配を示す。懸濁物質の濃度の高い原水の場合には、帯水層材の有効径にかかわらず透水係数の減少勾配はほぼ同程度である。これは、懸濁物質の濃度が高いと、懸濁物質の径も大きく、帯水層の間隙の大小にあまり影響されないためと考えられる。砂ろ過を通した実験水は大きな径の懸濁物質が除去されているため、帯水層材の有効径によって、透水係数の減少勾配は大きく影響される。



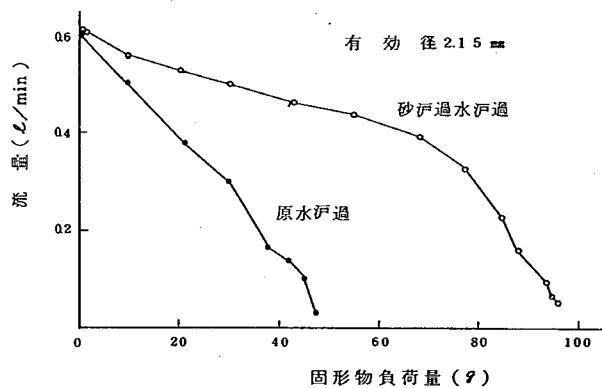
図Ⅱ-20 帯水層材の有効径の影響

12)
 12)
 図Ⅱ-21と図Ⅱ-22は定水位浸透における累加懸濁物質質量と浸透量の変化を見た図であり、



図Ⅱ-21 固形の負荷量と流量変化

懸濁物質濃度の低い方が同じ負荷量に対して、浸透量の減少が小さいことが示されている。これは、濃度の低い方の目づまりは帯水層の奥の方まで関与するが、濃度が高いとよりストレーナー近く¹²⁾に集中することが示される。図Ⅱ-23は初期浸透量と懸濁物質の負荷量から目づまりの発生程度を見た図である。初期浸透速度の大きい方が懸濁物質は層の奥まで運搬されるため目づまりの発

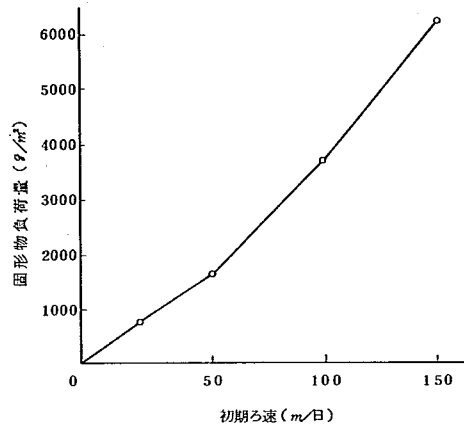


図Ⅱ-22 固形物負荷量と流量変化

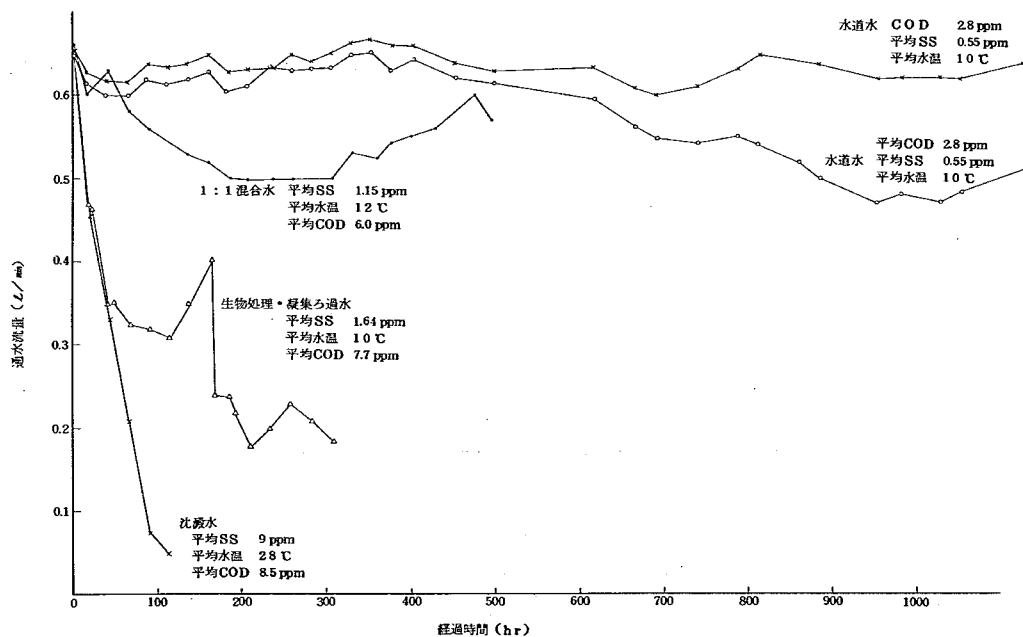
生程度は小さくなっている。

さらに図Ⅱ-24¹³⁾は最も基本的な懸濁物質濃度の違いによる目づまり発生程度の比較である。水道水と注入井での涵養原水として水質的に妥当なものを比較してある。濃度の低い方が目づまりは当然小さくなっている。

図Ⅱ-25¹⁴⁾は懸濁物質の性質の違いの目づまりの発生への影響を見たものである。懸濁物質濃度は小さいが、凝集剤を使用して前処理しており、懸濁物質が電位的により砂粒子に付着しやすくなっているため、懸濁物質濃度が約3倍のものと目づまりの発生程度は同等になっている。



図Ⅱ-23 流量が $\frac{1}{10}$ になるまでの負荷量

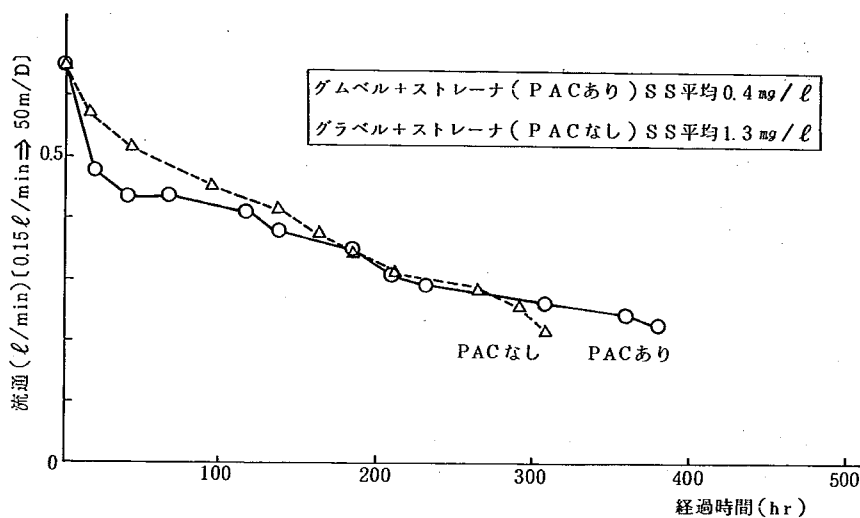


図Ⅱ-24 実験水の違いによる流量の変化

以上まとめると、濃度の低い方が目づまりの発生程度は小さくなるが、同じ負荷量に対しても小さくなる。これは浸透速度あるいは注入速度が大きい場合と同様に、懸濁物質がより帯水層の奥まで持ち込まれるためである。濃度が高かったり、注入速度が小さいと目づまりはより井戸壁近くに集中することになる。さらに懸濁物質の性質によっても目づまりは異なってくる。凝集剤で前処理された注入水は濃度が低い割には目づまりが、同じ懸濁濃度のものに対して速くなる。

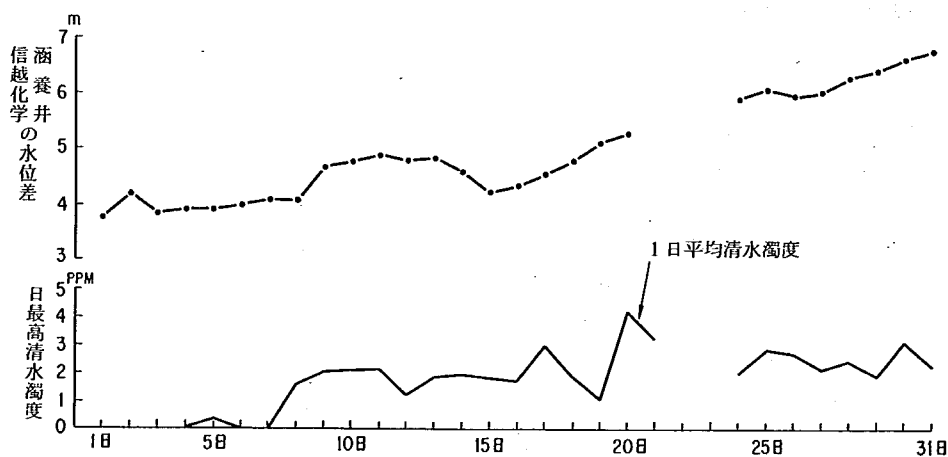
懸濁物質はいかなる清澄な水にも含まれるから、すべての現地実験において多少なりとも目づまりに関与しているものと考えられるが、ここでは上越における目づまりに伴う注入井水位の

上昇を図Ⅱ-26⁷⁾に示す。注入水の濁度が高いと注入井内水位の上昇が大きくなるような傾向が見られる。



図Ⅱ-25 直カラムによる目詰り実験・流量変動図(凝集剤の影響)

(注) 前処理, 砂ろ過, 凝集剤として PAC を使用したものと同じでないものを使用した。



(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Ⅱ-26 清水濁度と目づまりの関係

2-2 帯水層内の化学反応による目づまり

注入水と帯水層水が混合し、化学反応によって不溶性沈殿物が生成され、帯水層内の間隙が減少するために目づまりになる可能性があると考えられる。工業排水のように高濃度の化学物質¹⁵⁾が含まれている場合には次のような沈殿物の生成によって目づまりが発生すると指摘されている。

- ① アルカリ土類金属 (Ca, Mg, Sr 等) の比較的溶解しにくい炭酸塩、磷酸塩、硫酸塩、井化物、水酸化物
- ② 鉄、アルミニウム、マンガン、クロム、鉛、カドニウムの不溶性炭酸塩、重炭酸塩、水酸化物、磷酸塩、硫化物
- ③ 酸化～還元反応の生成物

カルシウム、マグネシウムは地下水および表流水にも豊富に溶解されているので注入水と帯水層水との混合によって、それらの沈殿物が生成することも十分考えられる。また溶解性第一鉄も地下水によくみられる成分であり、通常 10 ppm まで達するのはそうまれではなく、中には 50 ppm 以上の場合もありうるという。鉄の沈殿生成物としては、水酸化物、炭酸塩、硫化物および酸化の還元反応生成物が挙げられている。注入水が酸素あるいは塩素を含む場合帯水層水中の鉄が酸化され、酸化鉄あるいは水酸化鉄の沈殿物が生成されることになる。このような沈殿物による目づまりが一体どの程度であるかが問題であって、以下に室内実験結果について説明する。

まづ、バリウムあるいはカルシウムの沈殿物による透水係数の減少はほとんど見られなかった。塩化バリウムあるいは塩化カルシウムに硫酸塩の溶解液を押し込んだわけであるが、このような混合と反応には限度があって、生成される結晶性沈殿物による目づまりが顕著になるところまで至らないためと考えられる。細かな結晶体の沈殿物による目づまりより、コロイド状の鉄、マンガン、アルミニウムの酸化物あるいは水酸化物の目づまりの方が大きいと考えられる。そこで 26,000 mg/l の鉄の溶解液で満たされた砂層内に水酸化ナトリウムを注入したところ約 30 % の透水係数の減少が生じている。ところが、1,000 mg/l の鉄の溶解液で満たされた砂層に水酸化アンモニア液を注入した場合には透水係数の減少は生じなかった。以上の実験は自然の条件からかけはなれており、現実の注入において、化学反応によって生じた沈殿物による目づまりは問題としなくてもよいと言える。

一般に、注入井における目づまりは懸濁物質による目づまりで示されるように、抑留物が井戸の近くに集中することで顕著になるものであって、注入水と帯水層水の混合と、化学反応の結果で生ずる沈殿物は注入井近くに集中することではなく、混合に伴ない帯水層全体で沈殿物が生ずることになる。このことから、注入水中に含まれる物質と帯水層水に含まれている物質の化学反応による目づまりは考えづらい。

前節で述べたように、この原因による目づまりの発生は起こるとは考えられず、石油産出における水攻法においても、地下水涵養井においても、この原因による目づまりは報告されていない。

2-3 井戸や帯水層での微生物の増殖による目づまり

微生物の増殖による目づまりは懸濁物質による目づまりと関連が深い。一般的に懸濁物質には有機性のものと無機性のものがあり、有機性の懸濁物質が井戸壁、帯水層の砂粒子に抑留されると、有機性の懸濁物質を栄養源として微生物の増殖が始まる。微生物からの粘着質の分泌物によ

って注入水中の懸濁物がより補促されやすくなる。さらに、注入水中の溶解性有機物、栄養塩が微生物として固定化される。微生物はそのほとんどが水分であり、間隙を体積的に占める割合が高くなり顕著な目づまりが生起することになる。

微生物による目づまりは、微生物の増殖に関連した、注入水中の溶解性有機物濃度、栄養塩濃度、有機性懸濁物質の濃度、注入水温等に関係する。

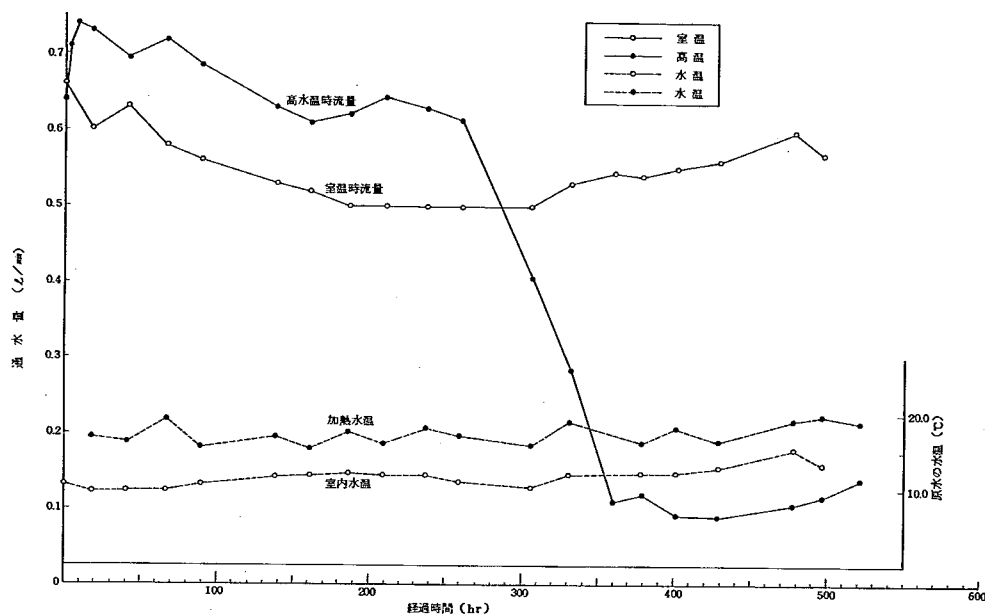


図 II-27 水温の差異による流量の変化（生物酸化砂ろ過水1に対して水道水1）

図 II-27¹³⁾ は注入水温による微生物の目づまりの違いを見たものである。定水位浸透で、浸透量の減少で目づまりの程度が判断される。注入水温が高いと微生物の増殖が速く、目づまりの発生の程度が大きく、速くなっている。

現地での実験で明確に微生物による目づまりと判断しうるものは見当たらないが、再揚水水の状況かつ微生物の存在が認められるものはある。佐賀白石における再揚水には有機物片が見られ、黒濁しており、明らかに微生物の介在が確かめられている。注入水原深井戸水であるが水原と注入井とはかなりの距離で導水中および貯留中に水質の変化を生じているもので、らん藻類の繁殖しやすくなっているものと考えられる。

アメリカのニューヨーク州ロングアイランド¹⁶⁾では下水の高次処理水（活性汚泥処理→凝集沈殿→二層ろ過→活性炭ろ過→塩素処理）を注入した。濁度は $0.6 \text{ mg/l} \sim 1.0 \text{ mg/l}$ (SiO_2 として) であるが、かなりのアンモニア性窒素が含まれていて、注入する段階では残留塩素は存在せず、すべて結合しているものと思われる。この実験においても、微生物による目づまりと理由づける直接的な根拠は得られなかったが、間接的には微生物による目づまりが関与していると思われる根拠が挙げられている。以下それらを列挙する。

- ① 注入水中に栄養物が豊富に含まれていること。

② 大腸菌の増殖が注入井の回りで見られたこと。

③ 高濃度の鉄、リン酸塩、有機物が注入井のすぐ近傍で観測されたこと。

④ 注入井内の水位上昇が注入水中の濃度（懸濁物質）による目づまりだけでは説明がつかないこと。

⑤ 有機体の増殖を制御する化学物で処理したところ、井戸の注入効率の回復が見られたこと。

注入水は下水処理水の高次処理がなされたものであるが、高次処理の主体は汜過であって、懸濁性の栄養物はかなり取り除かれているものの、溶解性の栄養物はそのまま帯水層内へ流入したとおもわれる。

一方西海岸カリフォルニア州オレンジ郡¹²⁾でも下水の高度処理水が注入されているが、ここではアンモニアストリッピング、ブレイクポイント法によるアンモニアの除去、石灰処理による、リン酸塩のリンの除去まで行なわれ、顕著な目づまりは発生していない。

イスラエル¹⁷⁾における注入は非灌漑期の余剰水を用いているが、水質的には都市用水（上水道水）とし用いられるものでせいぜい懸濁物質濃度は 1 mg/l で、ほとんどが有機性（プランクトン）である。注入に伴って、懸濁物質の抑留で比注入量は減少してゆく。注入段階においては、残留塩素のため抑留された懸濁物質が微生物の作用を受けることは考えられないが、注入停止後、残留塩素の殺菌効果がなくなれば、抑留された懸濁物質は微生物によって作用を受ける。注入停止後2日までの再揚水中には大腸菌の増殖は見られず、停止後2～50日経過すれば、再揚水中の大腸菌群数は増大し、明らかに微生物による変化がしらされていることから明らかである。さらに50日以上経た後の再揚水には大腸菌群数は急激に減少し、微生物の影響は消えている。注入停止後新たな栄養物の補給はないため、分解しつくされ、地下水の流れによって洗われたとも考えられる。このことがすべての場合について起こりえるかどうか疑問であるが、帯水層における微生物による変化の一面を示しており、微生物による目づまりが累積しない可能性を示していることになる。

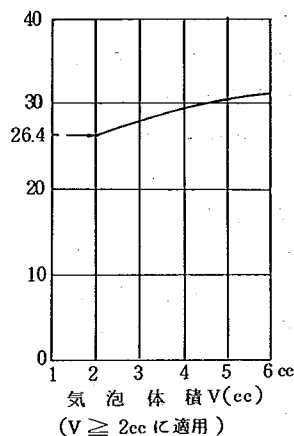
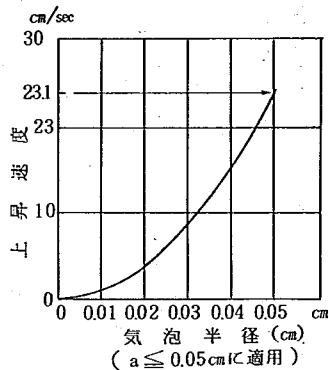
2-4 気泡による目づまり

気泡による目づまりは過飽和の溶存空気が析出し、気泡化するものと、気泡が直接混入し、帯水層の間隙を閉塞するもの、あるいは注入水中で化学反応が生じ、気泡を発生し、帯水層内に持ち込まれる場合も考えられる。

溶存空気の析出は、帯水層で水温が上昇する場合に発生すると考えられるが、通常の水温の上昇による飽和溶存量の減少より水圧上昇に伴う、飽和溶存量の増が圧倒的に大きいので、気泡の析出による目づまりは発生しないものと考えられる。

注入水を注入井内で放流するときに発生した気泡が帯水層内へ流入するかどうかは、気泡の径と、注入井内での下降流速との関係で決まる。気泡の上昇速度の気泡径あるいは気泡体積との関係は図Ⅱ-28²⁾に示す通りである。注入水が注入井内に流入する時（放流管が注入井内水面上で開いている場合、あるいは放流管内に空気が引き込まれ、空気が混入して注入される場合）には、注入量を少なくし、注入井内断面平均流速を小さくし、気泡による目づまりを起さないようにしなければならない。しかし、注入井内で気泡を生じさせないようにすることがより賢明であろう。

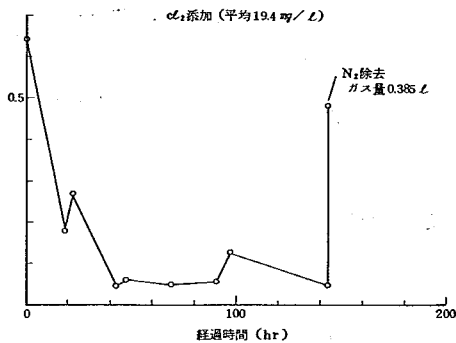
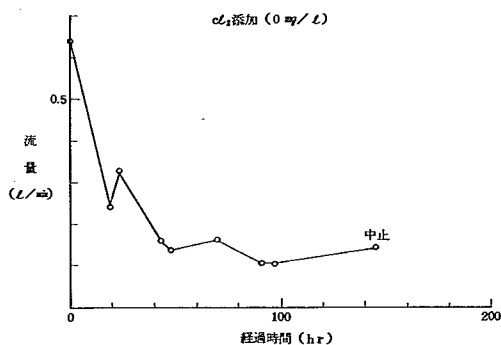
アンモニア性窒素を含む注入水に滅菌のため塩素（ Cl_2 ）を注入した場合、化学反応によって



図Ⅱ-28 気泡の上昇速度の気泡径あるいは気泡体積との関係

窒素ガス (N_2) が発生し、曝気しないで注入すれば、帯水層内で窒素ガスが発生し、気泡によって、帯水層内の間隙が塞かれ、目づまりを発生する。

図Ⅱ-29¹³⁾ はアンモニア性窒素を含む実験水に塩素を入れて浸透実験を行なった場合の浸透量の変化を示した図である。塩素を入れた方が浸透量の減少が速く、砂層内に飽和した窒素ガスを除去するとなんかの浸透量の回復が見られる。



図Ⅱ-29 注入水中にアンモニア性窒素を含む水に塩素を添加した場合の流量変動

注) ○ 注入水の平均塩素要求量 15.2 ppm

○ 0.1 ℓ/min まで減少する時間 Cl_2 添加 0 mg/ℓ 91時間

19.4 mg/ℓ 38時間

○ このようなアンモニア性窒素を多く含む水に Cl_2 を添加した場合に前曝気を行なえば発生は防ぐことが出来た。

図Ⅱ-30¹⁸⁾ は地層の空気含有量と透水係数との代表的な関係を示す。

秦野において、注入管が注入井水面上で開いているため、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たと報告されている。わずか 15 分の再揚水で目づまりが解消

したと報告がなされている。

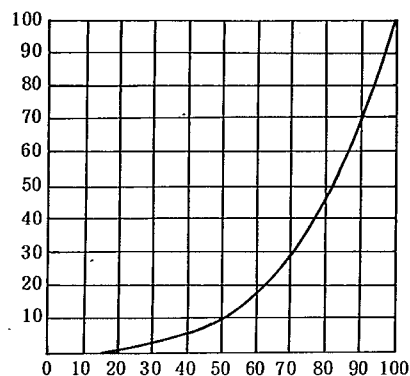
2-5 溶解鉄・マンガンおよびストレーナーの腐食による目づまり

注入水に含まれる溶解鉄・マンガンが酸化され、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 、 Fe_2O_3 、 Mn_2O_3 等の形で注入井の近傍に蓄積され目づまりとなる。浅層の地下水を注入源とする場合には Fe^{2+} 、 Mn^{2+} が溶解していることがあり、空気中の酸素に触れ酸化され、目づまりを発生させることになる。また、注入水が塩素処理されると、塩素によって Fe^{2+} 、 Mn^{2+} が酸化され、酸化鉄、酸化マンガンが析出し、目づまりを発生させることもありうる。図¹³⁾Ⅱ-31は塩素処理したものとそうでない

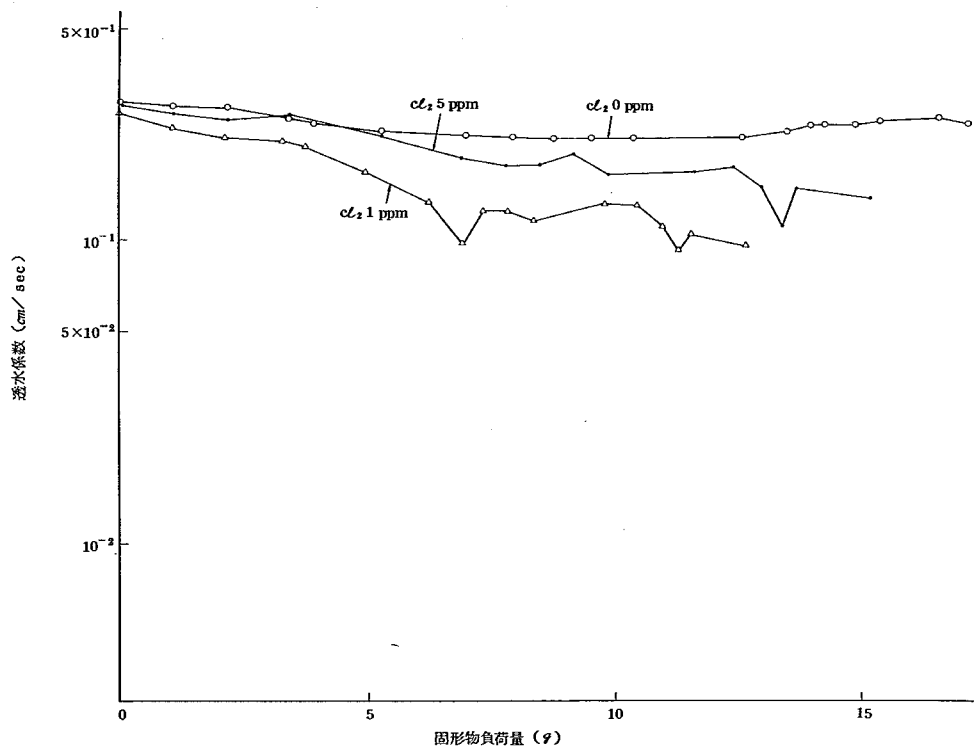
ものの透水係数を比較したものであり、塩素処理したものの方が透水係数の減少が早くみられる。

PERCENTAGE OF RELATIVE PERMEABILITY

$$\left[\frac{\text{PERMEABILITY AT GIVEN \% SATURATION}}{\text{PERMEABILITY AT 100 \% SATURATION}} \times 100 \right]$$



図Ⅱ-30 Atypical example of relative permeability curve



図Ⅱ-31 全層の透水係数の変化 実験水：混合水

さらに、図¹³⁾Ⅱ-32は、この場合における紙およびマンガンの砂層内抑留状況を示す。塩素処理

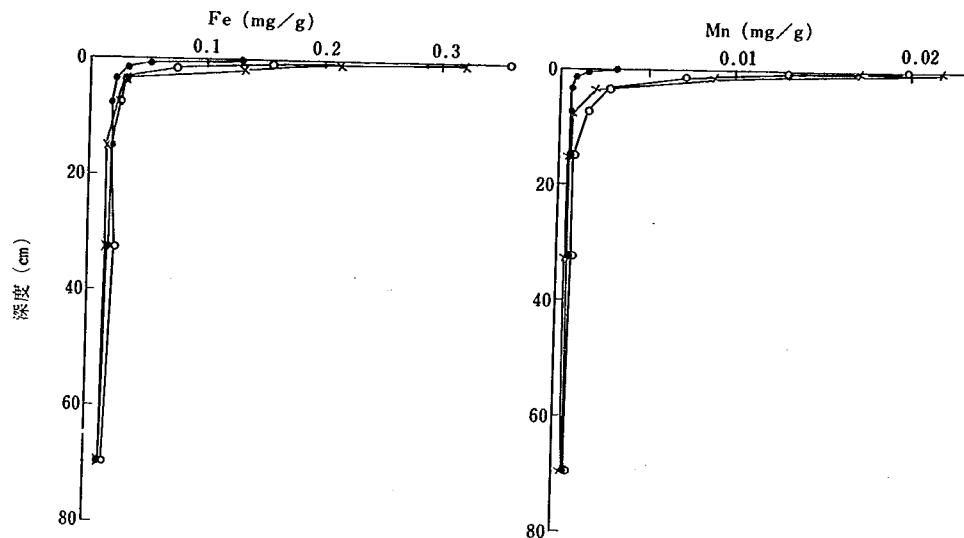
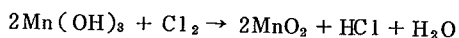
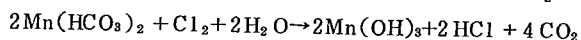
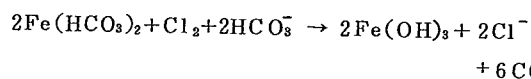


図 II - 32 閉塞物の測定結果

された方が、鉄、マンガンをも酸化され砂層表面に抑留されていることが明らかである。

注入水に云々、 Fe^{2+} や Mn^{2+} が含まれていなくても、注入井のケーシングおよびストレーナが酸化され、酸化鉄を生じ、目づまりを発生することがある。一般に注入水は表流水を用いることが多く、表流水には飽和に近い溶存酸素が含まれることが多いからである。図 II - 33¹⁹⁾ は溶存酸素量と鉄の溶解度を示した図である。この図と元に溶存酸素 10 ppm の水が $60 \text{ m}^3/\text{hr}$ で 10 cm の 100 m の鋼管を流れると、鉄濃度は流土部で約 1 ppm と試算される。また図 II - 34¹⁴⁾ はコラム実験において、砂層の二に鉄製のストレーナを置いたものとそうでないものとでの、ストレーナの酸化による目づまりの発生程度を比較したものであり、ストレーナを置いた方が浸透量の減少が速く、目づまりの進行が速いことが知られる。表 II - 3 はこの場合の砂層における数の抑留状況を示している。抑留量もさることながら、表層への抑留も高まっていることもわかる。

鉄およびマンガンの塩素がある場合の酸化反応或は次のとおりである。



さらに砂層に抑留された鉄・マンガンの酸化物がどの程度の SS 量になるか、各々の酸化物の性状を表 II - 4³⁾ に示す。

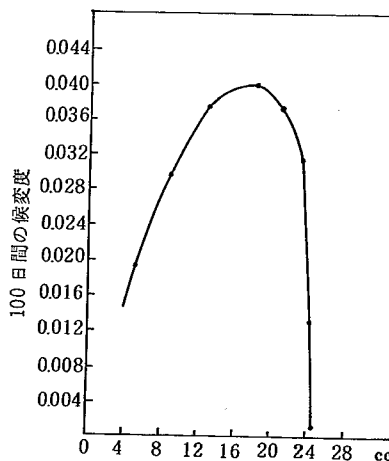


図 II - 33 軟鋼の腐食に及ぼす水中の溶解酸素量の影響

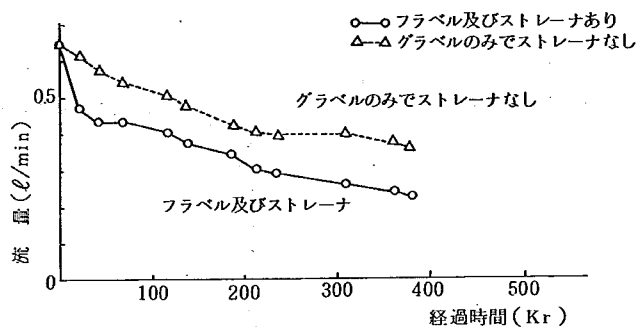


図 II - 34 直カラムによる目詰り実験・流量変動図
(ストレーナの腐蝕による影響)

表 II - 3 各条件における通水終了後の各々層の単位体積当り Fe 量

各層のかき取り範囲		グラベルのみでストレーナなし	グラベル及びストレーナあり
グベ ラル	0 ~ 1 cm	0.0052 mg/cm ³	0.2491 mg/cm ³
	1 ~ 5	0.0110	0.0458
砂 層	0 ~ 1	0.0539	0.1422
	1 ~ 2	0.0441	0.0359
	2 ~ 5	0.0453	0.0491
	5 ~ 10	0.0406	0.0492
	10 ~ 20	0.0383	0.0496
	20 ~ 36	0.0334	0.0454
計		54.5 mg	101.75 mg

注) 但し計の量は Fe の合計量を示す。

表 II - 4 酸化物の性状

成 分	式 量	Fe, Mn からみた比率	比 重 (g/ml)
Fe(OH) ₃	106.8	1.91	3.3~4.3
Fe ₂ O ₃	159.6	1.43	5.1~5.2
Fe ₂ O ₃ · H ₂ O	177.6	1.64	—
MnO ₂	87	1.58	5.0
MnO ₂ · H ₂ O	105	1.9	2.58

山形においては、20 m 離れて同時に同量の揚水、注入が行なわれた。図 II - 35 と図 II - 36 は注入水と揚水中の溶存酸素と鉄分濃度を示している。揚水中の溶存酸素量は時間の経過とともに注入水中のその約半分に近づいているのに比較して、注入水中の鉄分はほぼ帯水層内に抑留されることが示されている。

さらに妻沼においては、鉄・マンガンあわせて 8 ppm を含む浅層地下水を注入した場合、注入井内の水位上昇が激しく、目づまりの発生が明らかである。鉄・マンガン濃度の低い深層の地下

水を注入した場合には水位上昇がゆるやかであり、鉄・マンガンの氧化物の井戸近傍蓄積による目づまりであることが明らかである。もちろん再揚水には高濃度の酸化鉄および酸化マンガンが検出されている。

ストレーナーおよびケーシングの酸化腐食による目づまりは大東市³⁾の例にみることができる。注入水は表流水の浄化したものと地下水を混合した水道水である。注入水に含まれる鉄分はせいぜい 0.01 ppm のオーダーであり、非常にわずかである。再揚水時には十数 ppm の赤濁した酸化鉄が検出され、酸化鉄が注入井の近傍に蓄積されていたことが示されている。

2-6 土粒子の配列変化による目づまり

ルーズな帯水層においては、揚水・注入に伴い、細かい帯水層材の移動が考えられる。揚水の場合には井戸内への移動であるため、むしろ帯水層の透

水性を増加させる方向に作用することになる。注入の場合にはストレーナーの付近の近い帯水層材は流体力の減少とともに沈降し、そこでの透水性の減少をきたすことになる。このような現象は帯水層が一様な透水性を有していない水みち的なものである場合、水みちでの流速が大きくなり帯水層内の微砂を流動させて生ずると考えられる。

また、注入・揚水に伴なり、帯水層内における圧力変化が砂粒子の配列変化を起こすともいわれているが、物理的な説明はなされていず明らかでない。

揚水井において、揚水量を多くした時、ストレーナー等に砂粒子がつまって、揚水が不可能になった例は聞かれるが、注入井における具体的な例はみられていない。

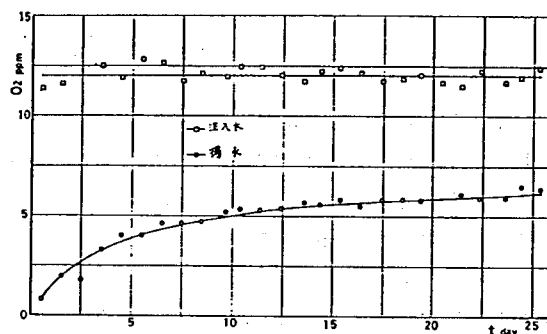


図 II-35 溶溶性量の変化

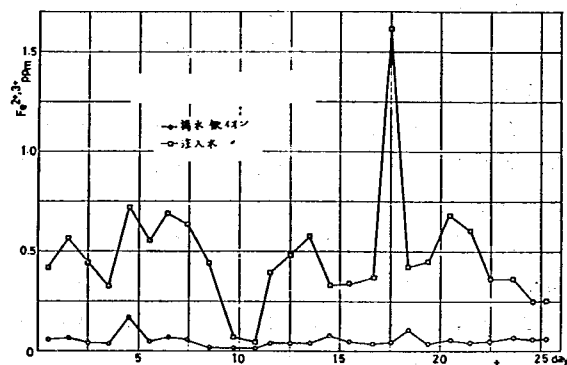


図 II-36 全鉄イオンの濃度変化

3. 目 詰 り 防 止

3-1 目詰り防止の考え方

井戸による注入で最大の問題は帯水層での目詰りであり、この原因は大別すると、注入水質に起因するものとして、懸濁物質によるもの、微生物の増殖によるもの、化学反応によるもの、気泡によるもの、Fe、Mn等によるものの5つがあり、帯水層の性状に起因するものとして、土粒子の配列変化によるものがある。この土粒子配列の変化にも関連するが、目詰りの起り易さは、帯水層の性状、例えば透水係数によって、大きく異なる。注入水質に起因する目詰りの発現の時間や程度は当然なことながら、帯水層の性状と密接な関連がある。

目詰りの防止を考えるには3つの考え方がある。1つは、注入水から、注入前に、目詰りの原因物質を除去することである。ついで、目詰りの起り難い帯水層すなわち透水係数ないし空隙率の大きい帯水層を選ぶことであり、最後に、目詰りの起りにくいように井戸の構造を工夫することである。

現在の水処理技術を用いて、注入対象水の水を処理し、目詰りの原因物質を除去するには、対象水の性状により処理方式は大きく異なる。また、現存の水処理技術では、すべての目詰り原因物質を除去することは、経費の点を考えなければ、可能であるが、あまり現実的でない。したがって、目詰りの原因物質の除去は、懸濁物質の除去・微生物の増殖に関する物質の除去、Fe、Mnの除去について検討するものとする。なお、現在の水処理技術を大別すると、上水道で行われている濁質除去と下水道で行われている人為汚濁物質の除去に分けられる。

目詰りの起り難い帯水層の選定はここではふれず、今後の研究をまっけて他の機会にゆずるものとする。

井戸の構造はグラベルバックキングのように、次節で述べる目詰りの回復に対して有効なものと、ストレーナーの材質によっては、腐蝕物質が生成され、それが目詰りの原因物質になるので、腐蝕程度の少い材質を選ぶこと等になる。

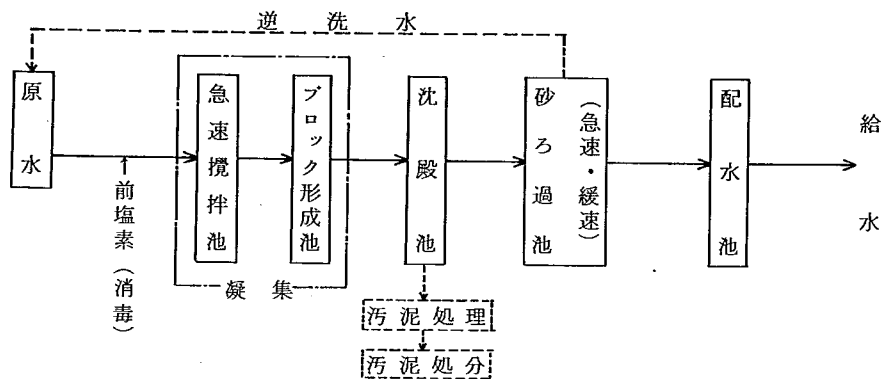
3-2 水処理による目詰り防止

1) 河 川 水

河川水は自然状態であれば、ほとんど水処理を考えることはないが、洪水時には自然状態でも高濁水となり、濁質除去を行わねばならない。日本の河川も中・下流域になると自然状態でなく、人為汚濁がかなり進行している地域が多い。そこで、この人為汚濁物質を除去することが必要となる。現存の水処理の技術を大きく分けると、濁質除去が上水道で、人為汚濁物質除去が下水道である。

まず、上水道の処理をみると一般に次のフローシートで行われている。

前塩素で消毒を行い、原水中の濁質は凝集剤に硫酸バンドかPACを用いて、できるだけ沈みやすいブロックにして、沈殿させる。沈殿しないものは砂ろ過により除去する。砂ろ過は有効径(小さい方から10%の粒径)が0.45~0.7mm、均等径数(小さい方から10%と60%の粒径の比)が1.70以下の砂を用いることになっている。このような砂ろ過すると目詰りが起るの



図Ⅱ-37 上水道の処理フローシート

で、平均的には2～3日に1回逆洗を行って目詰まりを解消している。このときの逆洗水の濁度は100度位であり、その水量は処理水量の数%である。これは原水にもどす。

沈殿池で捕促した汚泥はとり出して、含水率70～80%の泥まで脱水処理し、埋立て等に用いて処分することになる。この汚泥処分地の確保が難かしくなっている。

水道は水道水源の水質基準を表Ⅱ-5のように示しているが、現在は都市化の発達が著しく、この基準以下のものも、高度の技術を併用して処理している都市もある。

厚生省は水道水の水質基準を表Ⅱ-6のように示している。この水質をみると、人の飲料に供するため大変上質な水となっている。すなわち上水道と同じ処理をすることは最高の水質を得るので目詰り防止には大変よいが、高い処理費用・高度の維持管理技術者を要するので、実際的でない。

洪水時の高濁水は処理せず、平常のみ処理して、注入することも十分考えられる。費用が少なく、維持管理も容易となるし、洪水時には地表面全体から他のかん養法で自然的にかん養が行われるので、中止してもよいと考えることもできる。

洪水時の高濁水は処理せず、平常のみ処理して、注入することも十分考えられる。費用が少なく、維持管理も容易となるし、洪水時には地表面全体から他のかん養法で自然的にかん養されるので、中止してもよいと考えられる。ただし深い帯水層にはすぐ達しないので問題である。

高濁水ははずした処理方法としては以下のフローが考えられる。

いづれのフローを選定するかは、河川の水質を調べ、検討すべきであろう。

下水の処理は大別すると1次処理・2次処理・3次処理があり、これらの関係を図示すると図Ⅱ-39のようである。

汚濁された河川水はBODが5～10mg/l、NH₄-Nが数mg/l、SSが20～30mg/l位である。この程度のBOD、NH₄-N、SSを70%以上除去するには3次処理が必要となる。

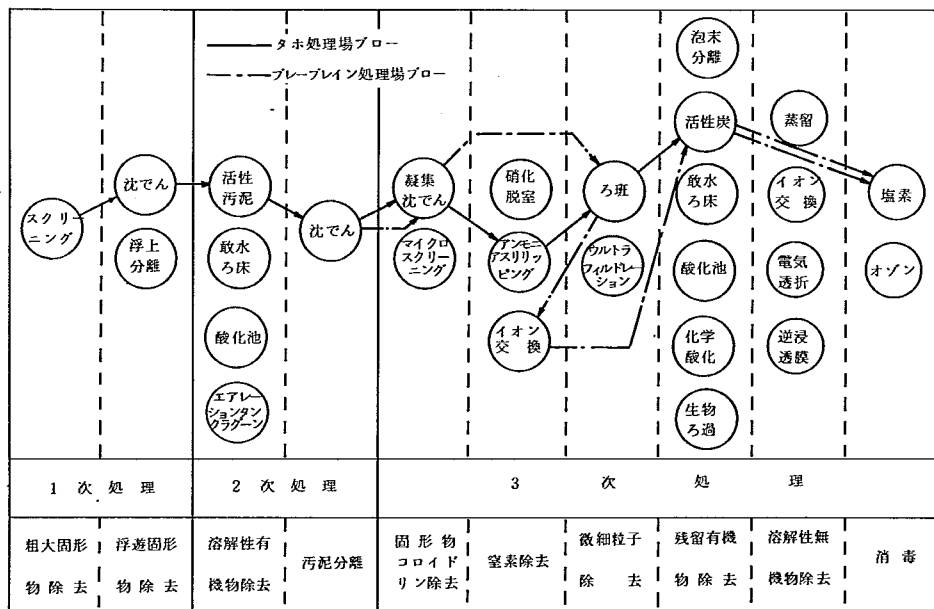
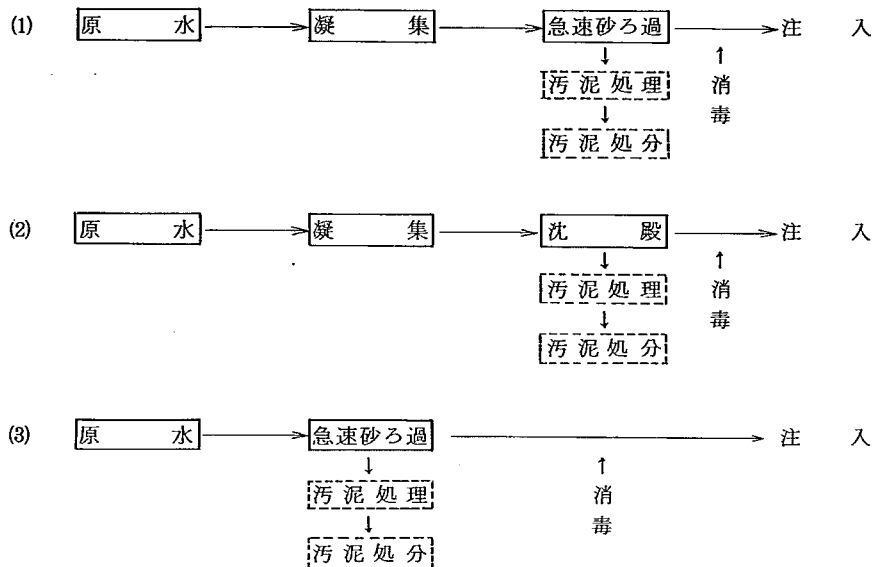
3次処理にはいろいろな方式があり、その方式と除去対象は図Ⅱ-39に示したようであるが、溶解性無機物除去に用いられる方式は建設費が高額になりかつ維持管理も大変難しいので実際的でなく、溶解性無機物による目詰りはSSによる目詰りや微生物による目詰りにくらべるとかなり程度が低いと考えられるので、ここでは生物によるBOD減少(NH₄-N→NO₃-Nにする

表Ⅱ-5 水 源 水 質 基 準

	水 質 項 目	基 準 値		
		1 類	2 類	3 類
A 群	シ ア ン イ オ ン	検出されないこと。		
	総 水 銀	検出されないこと。		
	有 機 水 . 銀	検出されないこと。		
	有 機 リ ン	検出されないこと。		
	カ ド ミ ウ ム (ppm)	0.01		
	鉛 (ppm)	0.1		
	ク ロ ム (ppm)	0.05		
	ヒ 素 (ppm)	0.05		
	弗 素 (ppm)	0.8		
	大腸菌群(MPN/100ml)	50	1,000	5,000
B 群	硝 酸 性 窒 素 (ppm)	9		
	濁 度 (度)	2	10 (豪雨時を除く)	(緩速ろ過) 30 (豪雨時を除く)
	角 染料以外(度)	5	5	10
	度 染 料 (刺激純度%)	1.5	1.5	1.5
	臭 気 (TO)	3	(緩速ろ過) 5 (急速ろ過) 3	(緩速ろ過) 5 (急速ろ過) 3
	味 (TT)	3	(緩速ろ過) 5 (急速ろ過) 3	(緩速ろ過) 5 (急速ろ過) 3
	水素イオン濃度 (pH値)		6.5 ~ 8.6	
	B O D (ppm)	1	2	3
	C O D (ppm)	1	2	3
	溶 解 性 物 質 (ppm)	—	—	400
	アンモニア性窒素 (ppm)	—	0.1	0.5
	塩 素 イ オ ン (ppm)	—	—	180
	総 硬 度 (ppm)	—	—	300
	鉄 (ppm)	(全Fe) 0.3	(Fe ¹⁺) 0.3	(Fe ¹⁺) 0.3
	マ ン ガ ン (ppm)	(全Mn) 0.05	(Mn ²⁺) 0.05	(Mn ²⁺) 0.05
	銅 (ppm)	1.0	(緩速ろ過) 0.1 (急速ろ過) 1.0	(緩速ろ過) 0.1 (急速ろ過) 1.0
		(全Cu)	(Cu ¹⁺)	(Cu ¹⁺)
	亜 鉛 (ppm)		1.0	
	フエノール類 (ppm)	—	—	0.005
	陰イオン活性剤 (ppm)	—	—	0.5

表Ⅱ-6 水質基準に関する省令

法第四条第一項第一号に掲げる要件	硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素 塩素イオン 有機物等（過マンガン酸カリウム消費量） 一般細菌 大腸菌群	一〇mg/l以下であること。 二〇〇mg/l以下であること。 一〇mg/l以下であること。 一mlの検水で形成される集落数が一〇〇以下であること。 検出されないこと。
法第四条第一項第二号に掲げる要件	シアンイオン 水銀 有機リン	検出されないこと。 検出されないこと。 検出されないこと。
法第四条第一項第三号に掲げる要件	銅 鉄 マンガン 亜鉛 鉛 六価クロム カドミウム ヒ素 フッ素 カルシウム、マグネシウム等（硬度） 蒸発残留物 フェノール類 陰イオン界面活性剤	一・〇mg/l以下であること。 〇・三mg/l以下であること。 〇・三mg/l以下であること。 一・〇mg/l以下であること。 〇・一mg/l以下であること。 〇・五mg/l以下であること。 〇・一mg/l以下であること。 〇・五mg/l以下であること。 〇・八mg/l以下であること。 三〇〇mg/l以下であること。 五〇〇mg/l以下であること。 フェノールとして〇・〇〇五mg/l以下であること。 〇・五mg/l以下であること。
法第四条第一項第四号に掲げる要件	pH値	五・八以上八・六以下であること。
法第四条第一項第五号に掲げる要件	臭気 味	異常でないこと。 異常でないこと。
法第四条第一項第六号に掲げる要件	色度 濁度	五度以下であること。 二度以下であること。
備考 シアンイオン、水銀及び有機リンについての「検出されないこと。」とは、別表に定める方法により測定した場合において、その結果が当該方法の定量限界を下回することをいう。		



硝化を含む)とろ過によるSS除去を目的とし、最後に微生物を殺すための塩素注入を行う3次処理を人工かん養の前処理とする。このフローを示すと次のようである。

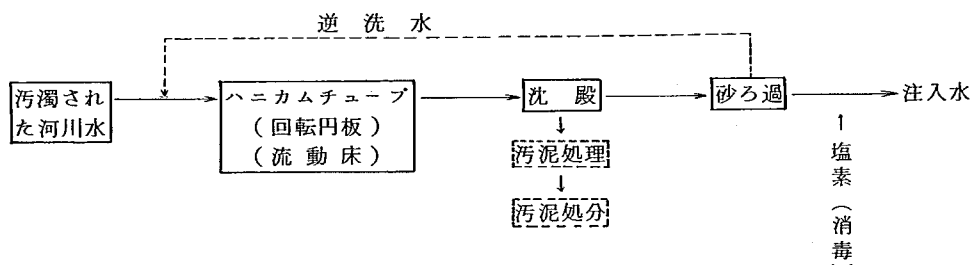


図 II-40 汚濁された河川水の処理フロー

汚濁の程度により、沈殿を除くことも可能である。

ハニカムチューブは正六角形の2cm径のプラスチックをろ材とし、その表面に生物を附着させ、この生物膜表面にふれるより、河川水を流動させるとBODの減少、アンモニアの硝酸化、沈殿しやすいSSの生成がなされる。沈殿しやすいSSを沈殿池で除去するが沈殿による除去は限界があるので残りを砂ろ過により捕促し、塩素により殺菌をして、微生物による目詰りをも防止して人工かん養を行うものとする。

この処理水はBOD $1 \sim 5 \text{ mg/l}$ 、SS $1 \sim 5 \text{ mg/l}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ $0.1 \sim 1 \text{ mg/l}$ の前後をいづれも示すと思える。

2) 処理水

処理水の代表的なものとしては下水(生活排水主体で一部事業排水と雨水を含む)処理場の処理水であり、他に工場廃水を主体とした事業所単独の処理水があるが、ここでは下水処理水について述べる。

下水の処理前の水質はSS 200 mg/l 前後、BOD 150 mg/l 前後でこれを2次処理してSS 70 mg/l 以下、BOD 20 mg/l 以下にして放流するよう定められている。しかし現状の2次処理放水はSS 26 mg/l 位、BOD 17 mg/l 位である。この水を直接人工かん養するとSSが高いため、SSによる目詰り、BODも高いので、微生物による目詰りの2つが最低起ることは間違いない。

そこで処理水でも下水の2次処理水でなく、もう一段きれいにした3次処理水を人工かん養に用いるべきである。3次処理は日本ではまだほとんど行われてないので、これを前処理とする。

3次処理の方法は図II-39に示したようにいろいろあるが、アメリカでの例をみると以下のようである。

(1) オレンジカウンティ⁷⁾

処理フローは以下のようであり、その時の2次処理と3次処理水のこの3次処理の水質は表II-7に示したようである。

この3次処理水を井戸に4～5ヶ月注入しているがまったく目詰まりが起っていないとのこ

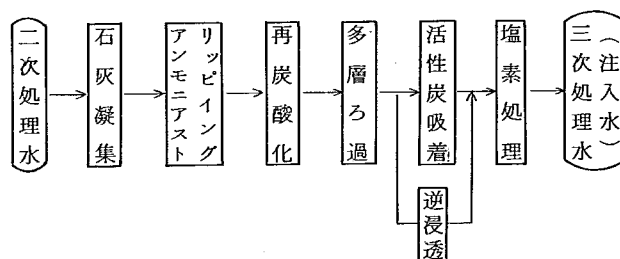


図 II-41 オレンジカウンティの注入水のための3次処理フロー

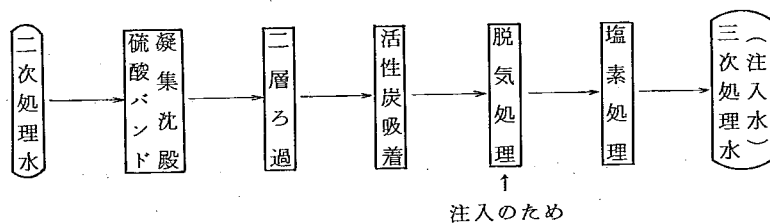
とである。

表Ⅱ-7 注入水源としての三次処理水質

項 目	流入水水質	処理水水質	項 目	流入水水質	処理水水質
カルシウム	90 mg/ℓ		pH	7.6	
マグネシウム	35 "		濁 度	23 mg/ℓ	
ナトリウム	250 "	250 mg/ℓ	C O D	95 "	8.0 mg/ℓ
カリウム	20 "		M B A S	1.2 "	0.05 "
重炭酸塩	380 "		全 硬 度	365	
塩 化 物	265 "	260 "	有機性窒素	3 mg/ℓ	
硫酸塩	340 "	375 "	アンモニア性窒素	45 "	16 "
リン酸塩	18 "	除去率 96~99%	シ リ カ	48 "	
T D S	1,200 "				
電気伝導率	2,150 $\mu\text{V}/\text{cm}$	2,070 $\mu\text{V}/\text{cm}$			

(2) ロングアイランド(パイパーク)²⁰⁾

3次処理のフローは以下のようであり、この時の処理水質は表Ⅱ-8に示した。



図Ⅱ-42 3次処理フローシート

この水質を井戸注入しても2~3週間で目詰りするため、実験を中止し、今後は浸透法を検討するとのことである。目詰りの原因としては帯水層の透水係数があまりに小さいからとされている。

3) 地下水

地下水を注入することは本来の地下水人工かんようからみれば、ほとんど意味をなされない。ただ、地下水の人工

表Ⅱ-8 ロングアイランドの注入用三次処理の水質²⁰⁾

項 目	濃 度	項 目	濃 度
SiO ₂	13 mg/ℓ	SO ₄	160 mg/ℓ
Fe (total)	0.41 "	Cl	99 "
Fe (溶存)	0.23 "	NH ₄ -N	30 "
Mn (total)	0.075 "	電気伝導度	786 $\mu\text{g}/\text{cm}$
Ca	20 "	pH	6.15
Mg	6.4 "	DO	4.5 mg/ℓ
Na	86 "	COD	9 "
K	13 "		
HCO ₃	59 "		

かんようにより、良質の水質を得ることを目的とするならば、浅層の汚染された地下水を深層に注入し、注入点からはなれたところで揚水し、地層による浄化を期待するとすれば、地下水の注入もあり得る。又地下水の水温が15度前後であることを利用する場合も同様に考えられる。

この場合には、浅層地下水がどのような汚れ具合であるかにより、方法が異なるが基本的には前処理は必要ないと考えられる。ただ、Fe、等の析出しやすい物質がある時には除鉄等の処理が必要となり、ガスを大量に含んでいるときには脱気が必要がある。

鉄はすぐに鉄バクテリアの発生や析出をもたらすので、多い場合には砂礫で除鉄を行うことが必要になる。

4) 水道水

水道水は1) 河川水(表流水)で述べたと同様である。

5) 処理水

6) 雨水

雨水は水源水質で示したように、きれいな水であるため、特に前述までの前処理は必要ない。しかし留意しなければならないのは地表に落下させると洪水時の河川水と同様になるので、屋根等より直接集水することが大切となる。

4. 目 づ ま り の 回 復

4-1 再揚水の効用

注入に伴う目づまりの発生をできるだけ少なくする為には、注入水の前処理によって、目づまりの原因となるものを取り除かなければならない。しかし、目づまりを防止しうる程に処理する事は困難であり、できたとしても経済的にわり高になってしまい、実際的には採用しがたい形になりかねない。そこである程度の目づまりは許容し、目づまりによって減少した比注入量を何らかの方法で回復させることが不可欠である。

注入井における目づまりは、注入井のストレーナの近傍に発生するものであるから、浸透池における目づまりと異なり直接的に目づまり部分を除去する事は不可能である。よって再揚水を行なう事により目づまりの原因となっている抑留物を除去する事が一般的である。

再揚水は浄水場のろ過池における逆洗とは異なり、砂粒子を流体力で激しく攪乱し、ほとんどの抑留物をはく離させることは不可能であるから、再揚水によって、抑留物をどの程度除去可能で、その結果比注入量がどの程度回復するかは、注入井によって地下水涵養を行なう上で最も重要な項目の一つとなる。

4-2 再揚水の方法

再揚水は、再揚水時の注入井内の水位変化を把握しながら行なう。再揚水によって抑留物が除去されると、目づまりによって劣化していた帯水層の透水性が回復にすることによって、揚水に伴う損失量が減少して注入井内の水位が上昇してくるからである。再揚水時間の経過につれ、注入井内の水位上昇量は少なくなってくるから、上昇量の変化程度を見はからって再揚水を完了すればよいが、注入井内の水位の変化は再揚水の方法によって異なってくるのが考えられるので注意を要する。

再揚水の方法は主に連続的に行なうが、断続的に行なうか、さらに短い注入をはさみ交互に行なうかに分けられる。再揚水量はなるべく大きくする方が比注入量の回復からすれば望ましいと考えられるが、帯水層の土粒子が移動しない適正揚水量以内におさえるべきであって、注入前に揚水試験を行ない把握しておくことが必要である。再揚水時間（あるいは回数）については、注入井内の水位の変化で判断するが、断続揚水あるいは注入を交互に行なう方法においては、再揚水の濁度の変化を参考にすべきであろう。

微生物が主体の目づまりの場合には、再揚水前に塩素を注入し、微生物を弱め再揚水の効果を高める方法も考えられる。塩素の注入量、再揚水までの放置時間が重要となる。また注入を停止して、しばらく放置し注入井の近傍に繁殖した微生物への栄養補給をたち、微生物が死滅するのをまって、再揚水を行なうことも考えられる。どの程度放置すればよいかは、目づまりの程度、現地の条件で当然異なってくるので、ときどき再揚水して、回復程度を確かめることが望ましいであろう。

再揚水の方法は平均涵養量が最大になるように決定すべきである。平均涵養量とは、ある注入量での累加注入量から、回復のための総揚水量を引いた正味の総涵養量を時間的に平均したもの

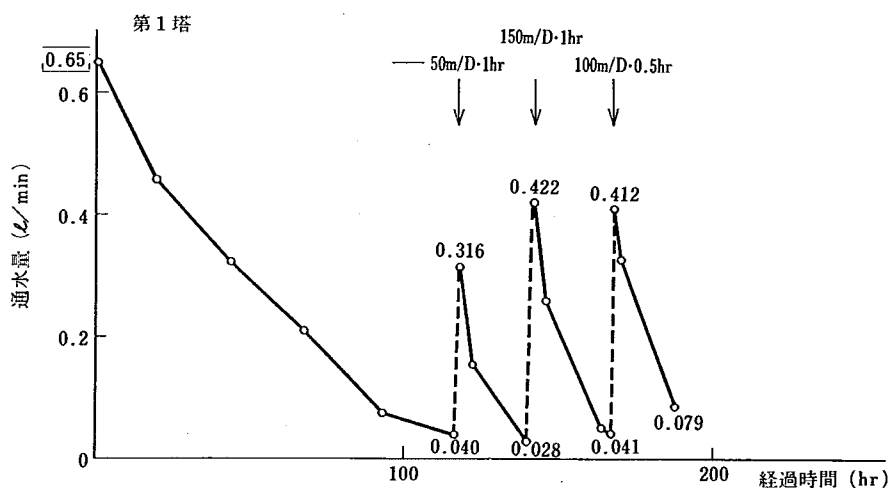
で表わすことができる。要するに、比注入量の回復のための再揚水の総量を少なくし、必要な時間を少なくし、比注入量の回復が大きい再揚水の方法を採用すればよいことになる。

4-3 再揚水の効果

再揚水による比注入量の回復の効果は、目づまりの原因と程度、注入井構造（ストレーナー構造、グラベル）、帯水層の物理的性質および再揚水の方法と密接な関係を有している。これらの中で最も重要な項目は、注入効率の因子でもある目づまりの原因と程度そして再揚水の方法と考えられる。

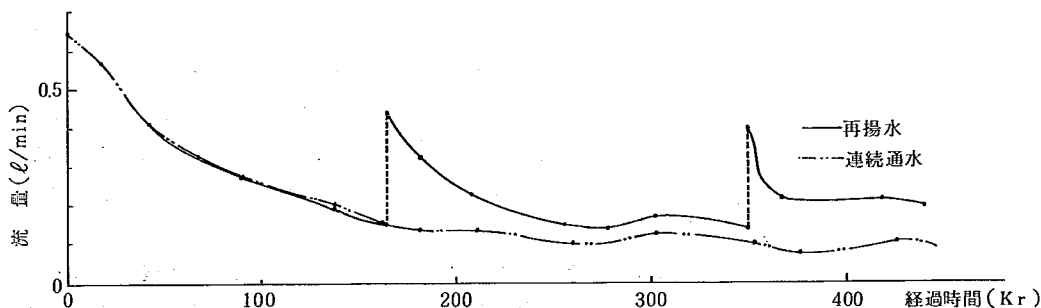
現地での注入井涵養での目づまりの発生状況と室内実験から考えて、表流水を原水として注入する場合、最も発生頻度の高い目づまり原因は懸濁物質と微生物であろう。懸濁物質としては有機物と無機物があり、無機物の中にはケーシング、ストレーナーの酸化腐食によって生じた酸化鉄も含まれる。酸化鉄の挙動は他の懸濁物と異なるかもしれないが、表流水を注入水源とする場合には、他の懸濁物と微生物による目づまりが主体となるから、再揚水の効果は懸濁物質と微生物による目づまりについて考えればよいであろう。

図Ⅱ-43¹²⁾は河川水をそのまま通水した場合の目づまりによる通水量の変化と再揚水による回復を示す。河川水のSSは平均6~7 ppmで、懸濁物による目づまりが発生している。再揚水は同図に示されている条件で行い、再揚水後の通水量は5割程となっている。しかし、再通水量の減少は再揚水前の通水量の減少より大きい。これは懸濁物質が砂層内に膜状に抑留されるため、再揚水によって十分抑留物が除去されることはなく、膜の一部がはがされる程度で、再揚水すればすぐ元の状態に復するものと考えられる。このように懸濁物質の濃度が高い表流水を注入すれば、再揚水による効果が表われにくくなる。



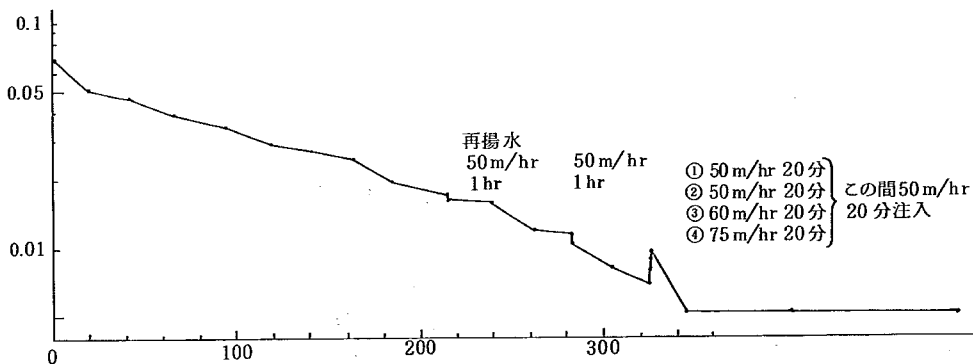
図Ⅱ-43 再揚水による流量変動

図Ⅱ-44¹⁴⁾は河川水を凝集ろ過してSSを平均0.3 ppm程度までおとし、実験水とし用いた結果である。SSが低いので目づまりの進行当然遅くなっている。再揚水による通水量の回復は5割程度前図とあまり変わらないが、再通水量の減少は再揚水前の通水量の減少とほぼ同程度であり、前回とは再揚水の効果が異なることがわかる。これは目づまりの状況が異なっているためであり、SS濃度が高いとSSの抑留が密な膜状となるために、再揚水の効果は表われにくい。また凝集剤で処理された注入水は、懸濁物が再揚水によって除去されやすい形で抑留することもある原因となっているようである。



図Ⅱ-44 再揚水による流量変動図

図Ⅱ-45¹⁴⁾は扇型実験装置(実際の注入井の一部と模型化)による一定量注入実験結果の一つであり、河川水を凝集ろ過しているが、BODは5~7 ppmもありかなりの有機物を含んだ実験水を注入したものである。さらに二価鉄が存在していたためか、鉄バクテリアの発生も見られた。



図Ⅱ-45 扇形比注入量変化図

図Ⅱ-46¹⁴⁾は同じ河川水を生物酸化後、凝集ろ過したものであって、SSは前実験水とほぼ同程度の0.3 ppmであるが、BODは1 ppm以下であり、有機物はほとんど除去されている。また生物酸化のため二価の鉄も酸化されているものと考えられる。

図Ⅱ-45においては再揚水を行なってもあまり回復は見られず再揚水後の比注入量の減少も早くなっている、再揚水の効果はほとんど表われていない。一方図Ⅱ-46においては、再揚水によって比注入量の回復がある程度見られ、再揚水後の比注入量の減少の程度も再揚水前のそれとほとんど変わらず、比注入量が減少したら再揚水を行なうことによって、長期にわたって注入

継続しうる希望をいだかせる。生物的な目づまりの程度によってもこのように再揚水の効果は明らかに異なってくる。

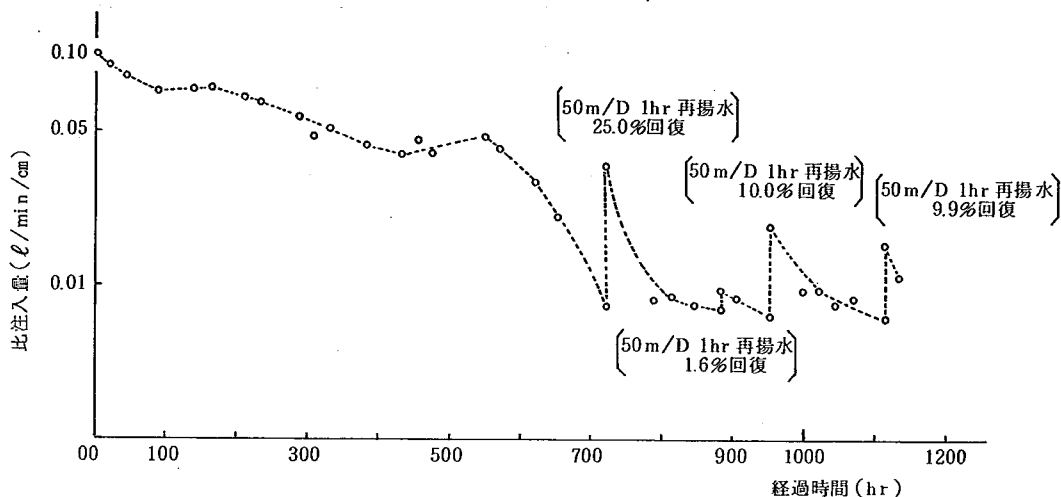


図 II-46 扇形地下水涵養実験装置における比注入量変動図

また図 II-47¹⁴⁾ は同じ注入水を用い、注入水温を変えて実験したもので、温度による微生物の回復への影響を見たものであり、温度の低い注入水の方が回復が大きくなっていて、微生物の影響が小さい方が回復しやすいことが知れる。

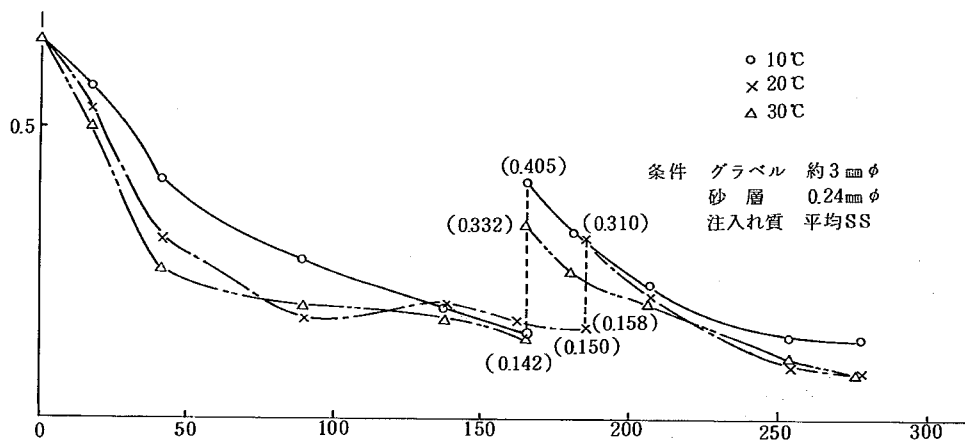


図 II-47 水温の差による再揚水時の回復率比較

懸濁物質による目づまりであれ、微生物による目づまりであれ、注入水質がわるいと、目づまりの進行がはやく比注入量の減少率が大きいばかりでなく、再揚水による回復の効果も表われにくくなることになる。

再揚水の方法によって回復がどのように異なるかを見たのが図 II-48¹⁴⁾ である。注入量は単位ストレーナー面積当り 50 m/日である。1回目の再揚水は 100 m/日であるがあまり比注入量の

回復は見られない。150 m/日で再揚水を行なった場合には、回復の効果は大きくなっている。総揚水量としては変わらないことに注意していただきたい。さらに同条件でくり返し再揚水を行なった結果、回数を重ねるにつれて、効果は悪くなるが、結果として3日の断続再揚水で、1回目で回復した比注入量より大きな比注入量となって回復している。再揚水による回復は抑留物が除去されることによってなされるわけであるが、除去されやすい抑留物はブロック状を呈しており、再揚水の初期にほとんど除去されることから、再揚水量を大きくし、断続的が短い注入とを間にはさんで再揚水した方がより効果的である。また最後の再揚水は再揚水前に塩素を注入し、再揚水を1時間後に行なったもので、新たな回復が見られている。滅菌剤として使用される塩素によって砂層内の微生物を弱めて、再揚水によって抑留物が除去されやすくすることを意図したものである。

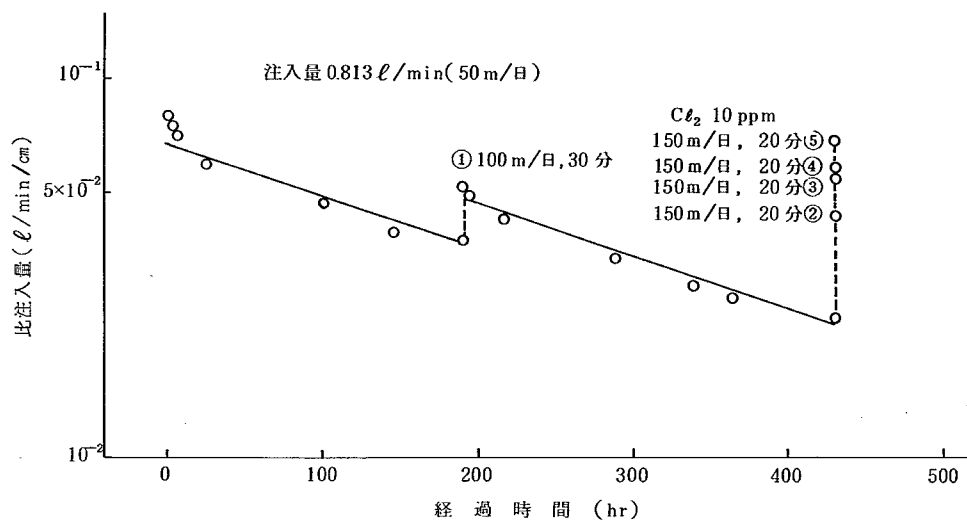


図 II - 48 再揚水と回復効果

図 II - 49¹⁴⁾ は一定水位による通水実験結果であって、再揚水時に振動与える方法と比較したものである。振動を与えて再揚水を行なったものは回復は塩素を注入して再揚水した回復とほとん

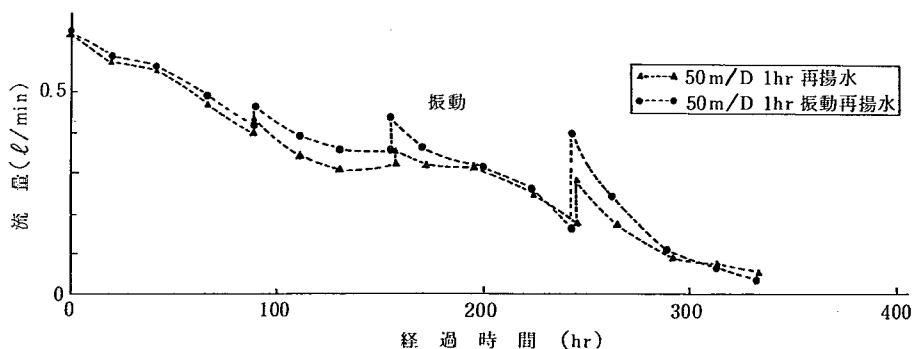


図 II - 49 流量変動図

と同じであって、再揚水は物理的なショックでさらに効果が増すことが知れる。実際具体的に、帯水層に衝撃を与えながら再揚水を行なうことは困難であって、実際の応用面としての問題は残るが、スワッピングが再揚水時に適用できればこれと同じ効果を得ることができるかもしれない。

再揚水によって比注入量は注入初期のそれまで回復することではなく、注入初期の比注入量の何割ぐらいまで回復するかは、目づまりの程度、帯水層の状況（一様か不均一か）また再揚水の方法で異なる。注入と回復のための再揚水の継続によって、比注入量が長期的にどのように変化するかは、わが国でのデータは存在しないため明らかでなく、今後室内実験、現地実験で検討していかなければならない。イスラエル¹⁷⁾においては、非灌漑期の注入、灌漑期の揚水というパターンで、長期にわたって続けられており、注入初期の比注入量までは回復することはないものの、再揚水後の比注入量は経済的にほとんど変化していないことが報告されている。

4-4 現池に見られる再揚水による回復

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⁵⁾、上越⁷⁾、大東市³⁾、妻沼⁴⁾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。

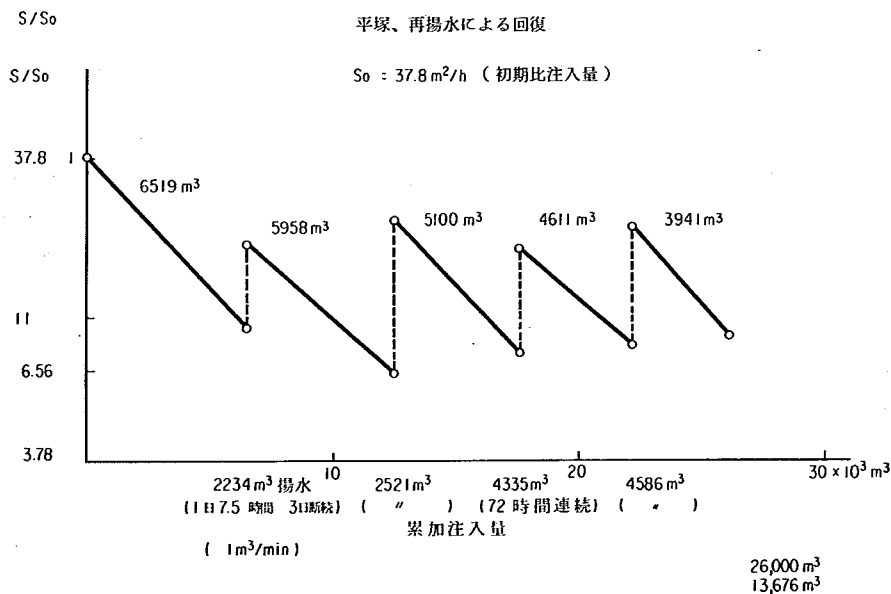
再揚水の逆洗効果の判定規準として考えられるのは、比注入量の回復率と次の注入での比注入量の減少勾配であろう。平塚の場合は図Ⅱ-47¹⁰⁾を見ればわかるように、注入量も揚水量は同じであり、かつ、ステップごとの総揚水量は累加注入量と同程度に達している。それにもかかわらず、初期の注入効率にまで回復しておらず、むしろ減少傾向を示している。逆洗後の新たな注入時の比注入量の減少傾向については、それほど顕著な変化はみられず、逆洗後の注入量の減少が早くなるということは見られないようである。しかし、再揚水量が注入量と同程度でありながら、期待しうるほど、逆洗効果は上がっていない。

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、一回の再揚水でも総揚水量は300 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 m^3/h で行われたのに対し、上越では注入が約60 m^3/h で再揚水は150 m^3/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124ppm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、揚水をおき、揚水を再び開始すると鉄濃度はふたたび896ppm

まで達する。連続的に再揚水が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Ⅱ-51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 m^3 ・ 240 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、著る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 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15m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(m^3)より揚水量(あるいは揚水率)(m^3/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、わずかながらも、すばらしい比注入量の回復がみられている。ま



図Ⅱ-50 再揚水による比注入量の回復 (注入量の52%)

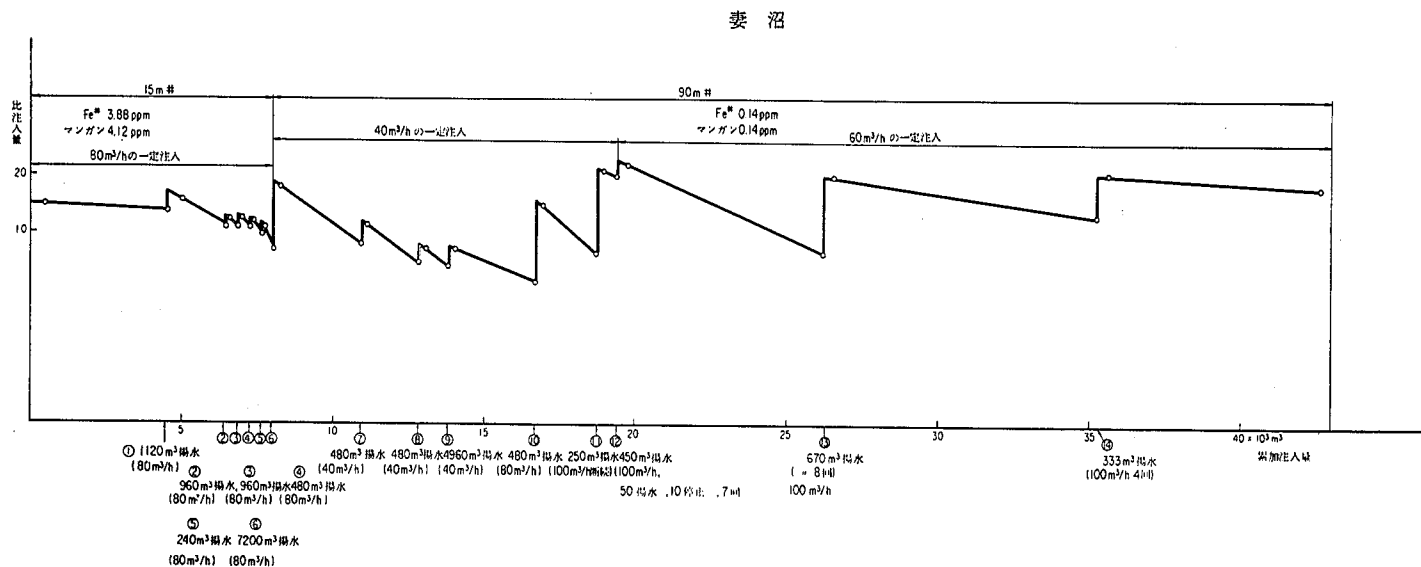


図 II - 51 再揚水における比注入量の回復

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Ⅱ-51⁴⁾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。

室内実験結果とほぼ同様な結果となっており、再揚水量を大きくし、再揚水を断続的にあるいは注入とすばやくくり返す方が効果が大きいことは明らかである。

一般的にみて、室内実験における回復より、現地における回復の方が早くて、大きいと考えられる。室内実験においては帯水層は均質砂によって一様な透水性を有し、流れもほぼむらのない一様な流れとなり、目づまりも一様に発生するが、現地帯水層では、帯水層が一様であることは考えにくく、不均一で透水性の高い水みち的な流れとなる。目づまりは流れの遅い方が抑留物が付着しやすく発生も早い。水みちの流れの速い所は目づまりも遅いが、目づまりを生じても再揚水を行なえば、そこでの流れは、他の部分がより大きな目づまりとなっていることもあって速くなり回復の効果も高いと考えられるからである。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 本田利男：大東市における地下水涵養実験について，その水，地の水，昭和49年秋季号，第30号
- 4) 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回復 — 妻沼実験地の例 — 工業用水，昭和47年11月
- 5) 紫崎達雄他：汲み上げた地下水はもどせるのか，施工技術
- 6) 九州農政局計画部：白石平野地区調査報告書，昭和40年3月
佐賀県農林部：白石平野の地下水と地下水注水試験，昭和42年
- 7) 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，G₄層地下水涵養中間報告書，昭和52年10月
- 8) 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
- 9) 石崎・北川：注入井における涵養に伴う目づまりについて，第33回年次学術講演会講演概要集，昭和53年9月
- 10) 土木研究所：涵養井の目づまりについて，土木研究所資料，53年10月
- 11) D.M. MINTZ : Modrn Theory of Felration.
- 12) 建設省土木研究所，財団法人国土開発技術センター，昭和51年度建設省総合技術開発プロジェクト，地下水涵養の技術開発
- 13) 同上52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
- 14) " 53年度 "
- 15) D.L. Warner and L.T. Doty : Chemical Reaction between Recharge Water and Aquifer Watec.
- 16) J.Vecchioli and Henry F.H.Ku : Preliminally Results of Industry Highly Treated Sewage-Plant Effluent into Deep Sand Aquifer at Bay Park, New York. Geological Survey Professional Paper 751-A
- 17) M.Rebhun and J.Schwarz : Clogging and Contamination Prolesses of Recharge Wells, Water Resources Research, Vol. 4, No. 6, 1968, 12
- 18) 日さく(株)：人工地下水計画基礎調査報告書—地下水人工かん養の現状と問題点—，昭和48年3月
- 19) 清水一夫，関井守夫：金属材料腐食データー 日本防錆技術協会出版会
- 20) 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 — ，見本