

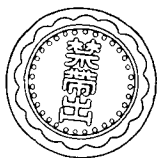


—土木研究所資料—
1030号

地下水の使用合理化についての調査報告書

昭和50年4月

建設省土木研究所



序

本報告書は地盤沈下現象の進行を停止又は緩和させる方法として**地下水の使用合理化**が有効であるかどうかを調査した結果をまとめたものである。

地下水は貴重な水資源であると同時に我々の経済・生活によって立つ地盤の重要な構成要素である事はよく知られている。しかしながら地下水の過剰揚水は地盤沈下現象、酸欠現象等の大きな公害を現出させている。現在地盤沈下によって生じたゼロメートル地帯に住む人の数は東京50万人、大阪34万人、名古屋16万人、尼ヶ崎12万人にものぼっているのである。

最近公共の観点に立って地下水を適正に管理しようとする努力が世論の支持を受けて着々と進められているのは大変喜ばしいが、その際に多少奇異に感じられるのは「転換用の水源がなければ地下水揚水を停止又は削減することは出来ない」という認識が、十分に検討されないままに広く信じられていることである。

水の問題は需要と供給の両面から接近して行く必要がある。これまで我々はどちらかと言うと供給の拡大に力点をおいた考え方に慣れて来たが今後は需要の内容の分析にも一層の努力を払う必要がある。とくに地下水は人体にたとえれば血液にも相当する大切な資源であって、これを使用するときは一滴も無駄にしない位の気持で合理化について充分配慮することが望まれるのである。

以下に簡単に内容を紹介する。

I 三次処理と水使用合理化の評価 においては表流水転換以外の地盤沈下対策として①**下水の処理水の再利用** ②**各事業所の工程毎の水使用合理化** の二つの方法を取りあげて、これらに関する既往の研究を整理している。

その結果①下水処理水の再利用はこれを全面的に採用するには三次処理技術に未解決の点があり、今日の技術段階では再利用の範囲が限定されること、又経費的にも一般に言われているよりもかなり高くなることが指摘されている。

これに反して各事業所の工程毎の水使用合理化については冷却水の節約を中心にして既に確立している技術を用いてかなり大量に節約できることを明らかにしている。

II 工業用地下水使用の現状と問題点 においては石油精製及び石油化学工業を例にとって工程毎に水使用の合理化の方法を検討する。

その結果、冷却水の循環使用によって用水量を大巾に減少させることが出来るが、この他に石油精製排水（サワーウォーター）の脱塩洗浄水への利用、エチレン希釈スチーム排水の再使用等によってプロセス水も大巾に節約できることが明らかにされる。

III 工場における地下水使用合理化例 においては地下水を使用している機械工場、表面処理工場、プラスチック加工工場、精密機械工場の4例について使用合理化の方法、節約量、経費、問題点を調査した。

その結果、いずれの工場も地下水使用量を節約前の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ まで減少させていることがわかった。又、経費については節約 1 m^3 あたり1円～29円であって、上水道を代替水源とすることとくらべればかなり格安であり、工業用水道を代替水源とすることと比較しても決して高くないことが明らかにになった。

以上Ⅰ～Ⅲの調査を通じて一般に信じられている「地盤沈下の進行をとめるためには代替水源が不可欠である」という考えは正しいものではなく、実際には代替水源がなくても使用の合理化によって地下水揚水量をかなり大巾に減少させることが可能であることを明らかにし得たと考える。

Ⅳ 地下水使用の最適化について においては、地下水を表流水と一体的に管理することによって地下水域から得られる純価値を最大化しようとする米国 Jacob の D. P. 模型が紹介される。

又今回の調査ではⅤ農業における地下水使用についても調査が行なわれたが都合によりこの報告書には収めていない。

この調査は財団法人水利科学研究所に委託して行なわれたものであり報告書は下記の方々が分担執筆されている。

調査の内容は、比較的新しい研究分野であるため、いまだ定説とは言えないものも含まれると思われるが、大方の参考に供するためそのまま印刷に付した。

報告書の執筆者は以下の通りである。

Ⅰ 島 津 暉 之 (東京都公害局)

Ⅱ 飯 島 孝 (日本揮発油株式会社)

Ⅲ " (")

Ⅳ 有 水 疆 (農林省林業試験場)

ご協力を頂いた水利科学研究所武藤博忠理事長、高見寛調査部長及上記執筆者各位に厚くお礼申し上げます。

昭和50年4月

建設省土木研究所赤羽支所

支所長 川 越 達 雄

目 次

I 三次処理と水使用合理化の評価

(既存調査報告書の批判的検討) (島津暉之)

1. 序 論	3
1-1 地盤沈下の進行と許容揚水量	3
1-2 水源転換のゆき詰り	4
1-3 地盤沈下対策の新しい方向	5
2. 三次処理による下水処理水の再利用及び産業排水の循環利用	6
2-1 既存の調査研究	6
2-2 下水・排水再利用の実用性と問題点の検討	8
(1) 三次処理技術の安定性	8
① 三次処理の前提	8
② 各プロセスの安定性	9
(2) 三次処理のコスト	10
① 各報告書におけるコストの試算	11
② コスト試算の前提の再検討	13
(3) 三次処理水の利用用途	13
① 各報告書における利用不能用途	13
② 凝沈・過水又は活性炭処理水の利用用途	14
③ 脱塩処理水の利用用途	16
(4) 除去された物質の行方	16
(5) ま と め	17
3. 水使用合理化	19
3-1 既存の調査研究	19
3-2 冷却用水の節約	20
3-3 洗浄用水の節約	22
3-4 工場以外の事業所における各種用途の水節約	24
3-5 ま と め	24

II 工業用地下水使用の現状と問題点

石油精製・石油化学工業における節水 (飯島 孝)

1. はしがき	29
2. コンビナートの「水」	30
3. 石油精製・石油化学工業の用水	33
3-1 用水区分	33
3-2 水の特性と用途区分	34

3-3	用水の性質	35
3-4	用水量	36
4	石油精製と石油化学工業の排水	38
4-1	用水と排水	38
4-2	排水処理技術	39
5	石油精製・石油化学工業における節水	44
5-1	節水の方法	44
5-2	節水の実例	44
5-3	節水の問題点	51
6	むすび	54
III 工場における地下水使用の合理化例 (飯島 孝)		
1	タキロン東京第二工場(茨城県千代田村)	63
2	日立建機(土浦市)	66
3	A社(横浜市)	68
4	B社()	69
5	工場調査のまとめ	71
IV 地下水使用の最適化について		
Jacob 模型による「連結した漏水のある二つの滞水層の最適利用」 についての論文紹介 (有水 彊)		
1	はしがき	75
2	Jacob 模型	76
3	Roswell 盆地の地勢と地質	77
4	DPの定式化	79
5	時間の関数としての定式化	80
6	空間の関数の定式化	81
7	模型の解	83
8	模型への投入量	83
9	結果	87
10	結果の判定	88
11	結果の利用の仕方	89
12	結果の制約	89
13	結果の応用	89
14	要約と結語	91
15	参考文献	92
16	追記	94

I 三次処理と水使用合理化の評価
(既存調査報告書の批判的検討)

島 津 暉 之

三次処理と水使用合理化の評価

— 既存調査報告書の批判的検討 —

1. 序 論

1-1 地盤沈下の進行と許容揚水量

地下水の汲み上げに起因する地盤沈下は全国いたる所で社会問題として取り上げられている。たとえば、東京、千葉、埼玉、神奈川の南関東の水準測量実施地域における沈下量 5 cm/年以上の合計面積は昭和 46 年に約 500 km²、47 年に約 320 km² で地盤沈下が非常に広範囲に広がっている。そして、これを沈下体積でみると、46 年には 7300 万 m³、47 年には 5,500 万 m³ であり、毎年、霞ヶ関ビル (52 万 m³) の 106 ~ 140 倍に相当する土地が失われている。このような広域且つ急速な地盤沈下は住民の生活にいくつかの影響を与えている。その一つは水道管、ガス管等の地下埋設物の破損や建造物の損傷といった日常的な被害であるが、もっと深刻な影響は低地部におけるゼロメートル地帯の形成である。たとえば、東京における 47 年末の満潮位海面下のゼロメートル地帯は 124 km² に達しているが、それらの地帯は堤防のさか上げ等の防災対策事業によって、とりあえずの安全性が保たれているとはいえ、地震によってひとたび堤防が決壊すれば、海面下に沈み、致命的な被害を受けることが恐れられる。この低地部と同様、台地部においても地盤沈下が進行しているが、台地部の場合、少々の沈下では海面下になることがないため、沈下の問題が比較的軽視されやすい。しかし、実際には地盤沈下はあくまで不等沈下であるため、台地部といえども、大雨が降る度に湛水浸水に悩まされる排水不良地域が形成される。現に、埼玉県南部では常時 80 cm も湛水している水田地帯がある。

以上のように、地盤沈下は地域住民に様々な被害を及ぼしてきており、沈下を抑止し得る対策を早急に講じなければならない。この沈下対策の基本はその原因となっている地下水汲み上げ量を減少することにあるが、沈下対策を進める場合に常に問題となるのはこの地下水汲み上げ量をどこまで減らせば、沈下が停止するかである。この問題については数年前から、コンピューターを使った地下水収支のシミュレーションが行なわれ、揚水量と地下水位、沈下量の関係にメスが入れられてきている。しかし、現在のシミュレーションは地下水や地層の実態を適切に表現したものとはいえず、予測の手段としてはまだまだ多くの問題点を内包している。すなわち、現在は、揚水量と水位、沈下の定量的な関係が科学的に解明されるところまで至っていない。それ故、現時点においては他の公害対策と同様、安全側を考えて、沈下を完全に抑止するための許容揚水量をとりあえずゼロと設定する必要がある。もちろん、それは単に理念だけから得られる答ではなく、次の二つの事実認識にも基づいている。

まず第一に、利用対策となっている被圧地下水への自然涵養量が現在の揚水量に比べてはるかに小さく、揚水量をその小さな涵養量まで落さないと、地下水位の低下を防ぐことができない。そして第二に、地層の収縮（地盤沈下）は過去の地下水位の低下による部分が多いため、現在の水位を維持するだけでは地層の収縮は止まらず、その収縮をなるべく早く停止させるためには、揚水量を涵養量より十分に小さくして、水位の上昇をはかる必要がある。

1-2 水源転換の行き詰り

以上の如く、沈下を抑止するための許容揚水量をゼロと設定した場合、揚水量をゼロに近付けることはどのような手段によって可能となるのであろうか。最も簡単な考え方は水資源開発を盛んに行なって、地下水から河川水への転換を進めていくことである。これは今まで行なわれてきた地盤沈下対策でもあるが、水需給が逼迫している現状においては厚い壁にぶつかり、身動きのできない状態になっている。関東地域を例にとって考えてみよう。表1は南関東地域における地下水揚水量の県別用途別内訳、表2は関東地域における将来の需要水量の推計例である。表1から明らかなように、南関東地域では現在、合計約400万 m^3 /日の地下水が汲み上げられ、その半分近くが工業用に使用されている。従って、河川水への転換のみを進める従来の地盤沈下対策を踏襲すれば、この400万 m^3 /日の代替水を河川の開発によって生み出さなければならない。しかし、表2の推計例をみると、関東地

表1 南関東地域の地下水揚水量（昭和47年）

	工業用	建築物用	上水道用	農業用	計
埼玉県	458千 m^3 /日		680千 m^3 /日	79千 m^3 /日	1,217千 m^3 /日
千葉県	419千 m^3 /日	77千 m^3 /日	253千 m^3 /日	94千 m^3 /日	843千 m^3 /日
東京都	429千 m^3 /日	259千 m^3 /日	588千 m^3 /日	1千 m^3 /日	1,277千 m^3 /日
神奈川県	553千 m^3 /日	13千 m^3 /日	174千 m^3 /日	3千 m^3 /日	743千 m^3 /日
計	1,859千 m^3 /日	349千 m^3 /日	1,695千 m^3 /日	177千 m^3 /日	4,080千 m^3 /日

注： 建築物用とは工場以外の事業所の揚水量を意味する。埼玉県及び千葉、神奈川県の一部ではこの建築物用地下水の把握が行なわれていない。

表2 関東地域の需要水量の推計例

	生活用水	工業用水	計
昭和45年	1,095万 m^3 /日	906万 m^3 /日	2,001万 m^3 /日
昭和60年	1,958万 m^3 /日	1,827万 m^3 /日	3,785万 m^3 /日

45年から60年にかけての河川水新規供給可能見込量は1,926万 m^3 /日

（建設省：広域利水調査第二次報告書（48年6月）による）

域全体の需要水量は45年から60年にかけて倍増することになっているが、それに対して河川の開発による新規供給可能見込量はその増加分を埋めるだけで精一杯であり、400万 m^3 /日の地下水揚水量の代替水を生き出す余裕は全くない。そして、更に重大なことはこの肝心の河川の開発が計画より大幅に遅れていることである。現在、建設がほとんど完了しているか、又は建設の見込みのあるのは草木ダム（渡良瀬川）と川治ダム（鬼怒川）等の一部のダムだけで、それらのダムによる新規供給量は、60年までの需要増加量の $\frac{1}{5}$ にも満たない。それら以外のダム開発地点である南摩、ハッ場等では、地元住民の反対でダム建設の目途が立っていないし、又、霞ヶ浦を本格的な調整池に変える計画も沿岸漁民達の反対で足ぶみの状態となっている。前者の反対の主な理由はダム建設に伴って、住み慣れた土地、そして長年の営為によってつくりあげた農地から立退かねばならないことであるが、この水没地区住民の生活破壊は補償方式の改善だけで解決することが困難のように思われる。後者の反対の理由は調整池化に伴う湖の汚染の進行と自然そのものの致命的な破壊が予想されることである。これらの反対運動の理由には考慮すべき点が多くあり、水資源開発は水不足の観点のみに基いて安易に進めるべきものではない。

しかし、このように河川の新規開発によって生み出される水量が今後の需要水量の増加分をはるかに下回ることになれば、地下水の代替水を河川水の方で確保することは全く不可能となる。すなわち、地下水を河川水に転換していくという今までの方針を受け継ぐ限り、地盤沈下対策はほとんど現状のまま停滞せざるを得ないのである。

1-3 地盤沈下対策の新しい方向

以上の如く、表流水への転換を望むことができないとすれば、今後の地盤沈下対策は新しい方向に活路を見出さなければならない。国や自治体はこの新しい方向を模索し、種々の手法の検討を進めてきているが、それらは大体次の四点に整理できる。

- ① 下水処理水の再利用
- ② 各事業所での排水の循環利用
- ③ 各事業所での水使用合理化
- ④ 人工涵養

以上の四点のうち①～③は地盤沈下そのものよりむしろ水不足の問題を解決する手段として調査研究が行なわれている。まず①は最近、技術進歩が著しい三次処理によって下水を高度に処理して工業用水道や雑用水道の形で処理水を工場やビルに供給しようというものである。②は同じく、この三次処理で事業所の排水を処理して事業所での排水の循環利用を進めるものである。これに対して③は三次処理に頼らずに、事業所における水利用個所一つ一つについて水利用方式の改善を行なうものである。④は①～③と目的が異なる。これは地下水汲み上げの停止ではなく、揚水の存続を可能にするために、使用後の地下水や下水処理水、表流水を地下に注入しようというものである。仮に揚水量に見合う水

量を人工注入することが可能であるならば、前述の揚水停止と同じ効果を持つという主張に基づいている。

以上四つが地盤沈下対策として考えられている新しい手法であるが、今までそれらの手法について国、自治体が数多くの調査研究を進め、その調査結果を発表してきている。そこで今回の研究では今まで発表されているこれらの調査研究報告書を素材として、①～④の手法が地盤沈下対策としてどの程度の有効性を持っているか、或いは有効性を持つためにはどのような課題が解決されなければならないかを検討することにする。

しかし、単なる文献調査のような形で、既存の調査研究報告書の内容を整理し、引用するだけでは各手法の有効度を明らかにしたことにはならない。というのは、今までの調査研究に一種の偏重があるため、その調査報告書の多くを批判的に取り扱わねばならないからである。すなわち、一般の人々の関心を引きやすく、予算を獲得しやすい新しい技術については数多い調査研究が行なわれ、マイナス面に目をつぶったまま、肯定的な報告が行なわれている。この新しい技術とは①と②に共通する三次処理と④の人工涵養のことであるが、①、②、④に関する国や自治体の報告書は、これらの新技術の発展によって水問題及び地盤沈下問題の根本的な解決が近い将来に可能となるという印象を与えるものとなっている。これに比べて、③の水使用合理化は手法が比較的地味であり、又、工場の生産工程内部とのかかわりを要するため、国や自治体がこの問題に対して取り組む姿勢は消極的である。そのため、その報告書の数も三次処理よりずっと少なく、又、その内容もあいまいなものとなっている。

それ故、既存の報告書の抄録という形で今回の研究を進めるならば、三次処理と人工涵養についての積極的評価と水使用合理化についてあいまいな評価に終わってしまうであろう。そこで、ここではできる限り既存の報告書に対して批判的な立場から、①～④の有効性と限界、そして今後の課題を検討することにする。

以下、①と②の検討結果を第2節で、③を第3節で、④を第4節（別冊に収録）で報告する。

2. 三次処理による下水処理水の再利用及び産業排水の循環利用

2-1 既存の調査研究

下水処理水の再利用又は産業排水の循環利用を目的とした三次処理については前述の如く、国及び自治体から数多くの報告書が出されている。ここではそのうち、次に示す通産省、建設省、東京都、大阪府の調査報告書を取り上げることにする。

A 三次処理の実験を主体にしたもの

A1. 産業排水再生利用調査報告

〔日本工業用水協会（通産省）〕

(中間報告 昭和46年3月, 47年3月, 48年3月, 最終報告 49年3月)

- B ビル, 団地における下水再利用の技術的及び経済的可能性を検討したもの
- B1 水の循環利用適合性予備調査報告書
〔東京都首都整備局〕
(昭和48年3月, 49年3月)
- B2 水の循環利用実用化調査報告書
〔東京都首都整備局〕
(昭和48年3月, 49年3月)
- B3 上水道用水利用動向調査報告書
〔建設省関東地方建設局〕
(昭和48年3月)
- B4 水高度利用計画調査報告書
〔建設省近畿地方建設局〕
(昭和47年3月) (工場についての検討を含む)
- C 工場における下水又は排水再利用の技術的及び経済的可能性を検討したもの
- C1 下水処理水利用調査報告書
〔大阪府企画部〕
(昭和46年3月)
- C2 コンビナート用水システム合理化調査報告書
〔日本工業用水協会(通産省)〕
(昭和47年3月, 48年3月)

上記の報告書はいずれも昭和46年以降のものであり, 下水及び産業排水の再利用がここ4~5年前から国, 自治体で主要な検討課題として一斉に取り上げられてきたことがわかる。調査研究の状況を概観すると, まず, 三次処理の実験を行なったA1は通産省と各自治体の合同調査で, 実験にとり上げた処理方法の種類, 実験規模, 実験期間からいってその他の三次処理実験をはるかに凌駕するものであり, 処理技術としての三次処理の実用性はほとんどこの調査報告書から読み取ることができる。ビル, 団地の下水再利用の可能性に関する報告書の検討内容は再利用可能な用途と再利用するためのコストの2点につ着くが, これらについてかなり大規模に調査を進めたのがB1とB2(東京都)である。B1とB2はペアの調査で, B1が再利用可能な用途を, B2が再利用するためのコストを取り扱っている。特にB2は具体的な地区及びビルを対象として給配水管や処理設備の設計も行なっている。それに対してB3とB4(建設省)は調査規模の面では落ちるが, 上記の2点について一通りの検討を加えている。しかし, B1~B4とも基本的な問題の検討が欠落している。これらについては後で詳述する。ビル, 団地に比べて工場についての検討例は少ない。C1(大阪府)は最新の三次

処理がまだ一般的になっていない頃の報告書であるので、三次処理としては凝集沈澱、急速滷過だけしか取り上げていない。C2（通産省）は検討対象を石油化学コンビナートに限定して、循環利用の可能性を検討したものである。C1、C2ともBと同じく再利用可能な用途と処理コストの検討を行っているが、やはり基本的な問題の見落としがある。次にこれらの報告書を素材にして、下水及び産業排水の再利用がどの程度可能であり、又、どのような問題点を内包しているかをみていくことにしよう。

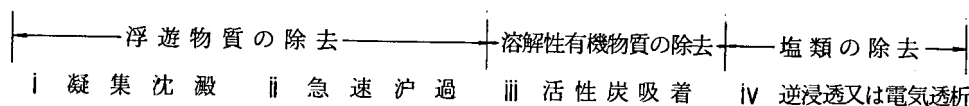
2-2 下水・排水再利用の実用性と問題点の検討

ここでは下水排水再利用の実用性と問題点の検討を、三次処理技術の安定性、処理コスト、処理水再利用の対象用途、二次公害、代替手段との比較の5点に分けて進めることにする。

(1) 三次処理技術の安定性

① 三次処理の前提

活性汚泥処理後の下水又は有機性産業排水を再利用するためのオーソドックスな処理プロセスとしては次の4段階がある。



処理水を再利用する対象用途の種類によっては処理をⅡ又はⅢでとどめることがある。この三次処理プロセスについてはまず注意しなければならないことは三次処理にける前の排水又は下水がきちんと処理しなければ三次処理が有効に働かないことである。このことについては一般に多くの誤解がある。三次処理というと、どんなに汚ない排水でも立ち所にきれいになると思われがちであるが、実際にはそうではない。二次処理が十分に行なわれていなければ、三次処理を行なっても清浄な水は得られない。

この点で現在の下水処理場からの放流水や工場排水はこの条件を満たしていないことがしばしばある。ところが、前述の調査研究の多くは、このような工場排水や下水処理水の現状についての検討を欠いたまま、三次処理の有効性を論じている。下水処理場はどこでも通常の排水基準（BOD20ppm）に適合する水を放流していると考えられがちであるが、実際には排水基準をオーバーしている処理場が少なくない。近藤準子の報告⁽¹⁾によれば、東京都小台処理場の放流水はBOD62ppm（46年2月）を記録している。なお、この下水処理についての問題点を付け加えると、下水道からの放流水はこの二次処理水だけではない。この他に未処理の常時排水と降雨時の雨水排水がある。ほとんどの下水

処理場では流入量が処理能力をオーバーしているため、下水の一部は処理されないまま、又は沈澱池をざーっと通過しただけで放流されている。例えば、名古屋市岩塚地区ではこの簡易処理水が常時排水の16%も占めている⁽²⁾。又、現在の下水道の大半は雨水と汚水を同じ管渠に通す合流式であるが、

(東京区部の場合は90%以上が合流式)、この合流式下水道の場合、雨水排出時において処理場の受入れ能力を超えた分は雨水吐き室から放流される。今まで、この排出の際の汚水は雨水によって十分に希釈されるため、汚染物濃度は低く、そのまま放流しても問題はないと考えられていたが、実際には晴天時に下水管渠の中に沈澱した浮遊性の有機物、重金属が降雨時にどっと流れ出し、降雨時の汚染物濃度は晴天時とあまり変わらないものとなる(BOD60~160 ppm)⁽²⁾。この二つの問題はともかくとして、前述のように二次処理後の放流水が基準を大幅に上回ることがしばしばあるが、この原因の一つは上述の処理能力オーバーであり、もう一つは工場排水受入れによる処理機能の低下である。

一方の工場排水についても同様の問題がある。まず、工場排水に対する規制値として今だにBOD 120 ppm (例えば荒川流域の既設工場)という値が罷り通っている。この値は通常の工場排水ならば、単純沈澱池を通すだけで得られる値であり、通常は二次処理を必要としない。又、BOD 20 ppm という基準が適用される工場にしても常に基準をパスしているわけではない。多摩川上流の某牛乳工場の排水はBODが30~50 ppm に上昇し、基準をオーバーしていることが度々ある。⁽³⁾そして、BOD又はCOD 20 ppmという濃度を冷却排水による希釈でようやく維持している工場も少なくない。特に、石油化学コンビナートでは冷却に用いた大量の海水で汚水を希釈している化学工場を多くみつけることができる。⁽⁴⁾

さてこのように良好でない工場排水や下水を三次処理にかけた場合、その処理水の水質がどの程度悪化するかについては、A1の報告書から窺い知ることができる。A1の主実験は比較的良く処理されている下水処理水を対象にしているため、必ずしも明確な答を引き出すことはできないが、実験期間中、二次処理水のCODが30~40 ppmに上った時は凝集沈澱、急速濾過後の処理水は25 ppmまで上昇し、更に、活性炭処理水の水質も急速濾過水の水質に比例して変化している。⁽³⁾通常、二次処理水がBOD 20 ppm程度ならば、活性炭吸着までの処理でBOD 5 ppm位まで下がるものがあるが、二次処理水がBOD 30~50 ppm以上になれば、活性炭処理水も10~20 ppm以上になることが予想される。

このように、三次処理を導入するためには、まず、二次処理がきちんと行なわれて、常にBOD 20 ppm以下の処理水が得られることが前提条件であるが、実際にはその前提条件が満たされていないことが少なくない。三次処理に関する数多い調査研究はこのような現実を忘れたまま、仮定の条件に基づいて議論を進めている。

② 各プロセスの安定性

上述の各プロセス、つまり凝集沈澱、砂濾過、活性炭吸着、逆浸透(又は電気透析)のうち、前三

者は処理技術としてすでに確立されているものと考えてよい。凝集沈殿、砂濾過は上水道の浄水技術の長い歴史において、多くの研究が積み重ねられているので、凝集剤によるフロック形成の失敗のような事故を除けば、比較的安定した処理効率を得ることができる。活性炭吸着は食品工場での製品の脱色、上水道の浄水場でのABSの除去（粉末活性炭として使用）などの用途に対しては随分以前から利用されてきた技術であるが、下水、工場排水への応用例は数年前までほとんどなかった。この活性炭吸着をはじめて実物大での実験で下水処理に用いたのがA1（通産省）の調査研究であるが、実験結果はかなり良好であった。この結果をみれば、活性炭吸着は下水・排水再利用技術として十分に応用可能であると考えられる。ただし、A1の中でも述べられているように、活性炭吸着によって除去される有機物は主として分子量1500以下のものであり、それ以上の大きさの有機物は凝集沈殿、砂濾過で十分に除去されていなければならない。

活性炭吸着等と比べて、逆浸透や電気透析は処理技術としてまだ不安定な要素を含んでいる。A1の調査研究は活性炭吸着についてはかなり突っこんだ実験がされているが、逆浸透や電気透析の方は実物大の実験設備を数ヶ月間動かしてみることしか行なわれず、又、解析も表面的なものにとどまっている。それ故、A1の報告書を読んでも、逆浸透や電気透析が下水再利用技術としてどの程度使えるものであるかを知ることにはできない。報告書中の解析には頼らず、実験データを丹念にみて処理技術としての実用性を読みとることが必要である。まず、逆浸透については膜の劣化による生産水量の減少を読みとることができる。160日の連続運転で、生産水量は当初の20～60%、設計能力の60～70%まで低下している。⁽³⁾ メーカー側の話では、逆浸透膜の耐用年数は3～10年ということになっているが、下水や工場排水を対象とする場合は半年～1年で膜を全面交換しなければならない事態が予想される。一方の電気透析については生産水量の長期的な低下傾向ではなく、生産水量の大きな変動、つまり4倍の変動がみられる。このような生産水量の大きな変動は実用化する際の致命的な弱点になると思われる。そして、電気透析はこの他に実験データの断続が非常に多い。実験担当者の話によれば、2ヶ月に一度は浮遊物質の侵入によって膜の目詰りが生じ、装置を解体して透析膜一枚一枚の点検に約10日を要したということである。この浮遊物質の中には、2価の鉄が酸化されて生成される非溶解性の3価の鉄も含まれており、前処理としての濾過の強化だけではこの問題を解決することができない。

以上のように、凝集沈殿、砂濾過、活性炭吸着に関しては下水・排水再利用技術としての安定性がみられるが、逆浸透、電気透析の脱塩技術を下水排水の処理に用いても故障や生産水量の低下に悩まされる可能性が強い。ところが前出の報告書のうち、脱塩処理を取り上げているA1、B3、C2はいずれも脱塩処理の安定性を暗黙の前提としている。

(2) 三次処理のコスト

① 各報告書におけるコストの試算

B2, C1を除く前出の報告書はいずれも三次処理のコストの試算を行なっている。しかし、その算出根拠を明示しているのは割合に少ない。その中で建設費と維持管理費を示しているものを取り上げて、プロットしたのが図1～図4である。図1と図3がそれぞれ凝集沈澱・急速滷過・活性炭吸着設備の建設費と維持管理費（人件費を除く）

を、図2と図4がそれぞれ脱塩処理設備の建設費と維持管理費を示している。又、参考のため、筆者の試算による値を各図に示しておく。⁽³⁾ これらの費用を評価する際に注意を要するのは最近の諸材料費の値上りである。昭和48年3月から49年3月にかけて、諸材料、労賃は1.5～1.8倍に値上りしている。従って、48年3月時点の見積りによる建設費は少なくとも1.5倍して評価する必要がある。一方、維持管理費については49年3月は電力費の値上り以前であるので、見積り時点による差は考えなくてもよい。

さて、これらの図をみると、ほぼ同じ前提に基づく試算でありながら、報告書によって随分差があることがわかる。費用の値上り分の修正をしても、報告書によって2倍以上の差がみられる。このような違いが生まれたのは費用の中に算入する項目が報告書によって異なっているからであろうか、むしろ筆者はこれらの報告書のいずれもが本来算入すべき費用項目を一部落しているか、或いは諸材料の値上りを適切に評価していないと考えている。図に示した筆者の推定値はメーカーの協力を得て求めたものであるが、いずれも各報告書の試算値よりかなり大き目となっている。一般に凝沈から活性炭までの総合処理経費は20～30

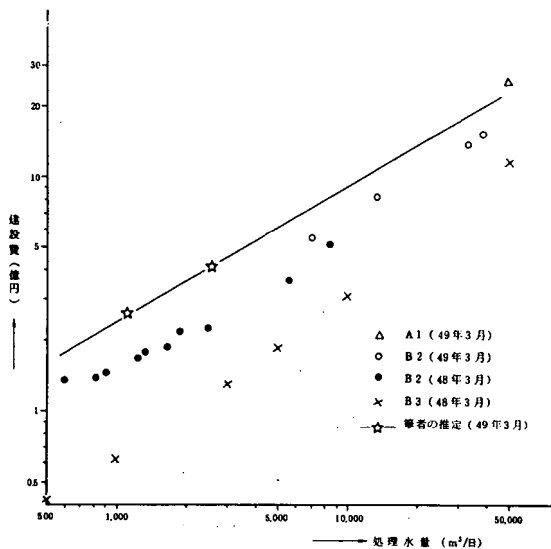


図1 凝集沈澱・急速滷過・活性炭吸着設備の建設費（BOD20 ppm 程度の水質を前提）

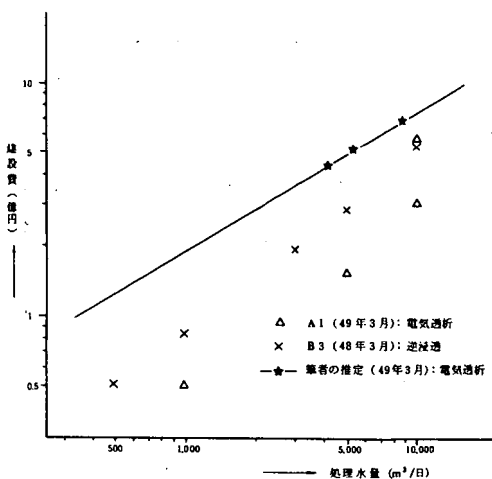


図2 脱塩処理設備の建設費

（塩類濃度 400～500 ppm を 150～200 ppm に下げを前提）

円/ m^3 , 脱塩まで行なうと, 50 ~ 60 円/ m^3 という話をよく耳にする。なるほど図に示した一部の報告書の試算値 (B_3) はそれに近いものとなっているけれども, 筆者の試算又は割合に正確な試算を行なっている一部の報告書によれば, 実際の処理費用はそれよりはるかに高い。例えば, 処理水量 1,000 $\text{m}^3/\text{日}$, 10,000 $\text{m}^3/\text{日}$ の場合を考えると, 活性炭までの処理設備の建設費はそれぞれ 2.5 億円, 9 億円, 又, 維持管理費は 20 円/ m^3 , 16 円/ m^3 である。減価償却費 + 利子を建設費の 15 % と仮定すると (約 15 年償却), 総合処理経費は各々約 130 円/ m^3 , 約 60 円/ m^3 である。つまり, 活性炭までの処理経費は事業所単位で循環利用する程度の規模であれば,

100 円/ m^3 以上, 下水処理水を再利用する程度の規模であれば, 50 円/ m^3 前後の大きさになることが多い。そして, 更に逆浸透による処理まで行なうと, 処理水量 1,000 $\text{m}^3/\text{日}$, 10,000 $\text{m}^3/\text{日}$ の建設費は 4.2 億円, 15 億円, 維持管理費は 40 円/ m^3 , 35 円/ m^3 であるので, 総合処理経費は約 210 円/ m^3 , 150 円/ m^3 となる。

以上のように費用を正確に試算し, 諸材料の値上りをきちんと考慮に入れば, 一般に言われ, 一部の報告書でも示されている 20 ~ 30 円/ m^3 といった三次処理コストがどんなに現実とかけ離れたものであるかが分かる。三次処理のコストは活性炭までで 50 ~ 100 円/ m^3 以上, 脱塩まで行なうと, 150 ~ 200 円/ m^3 以上となる。

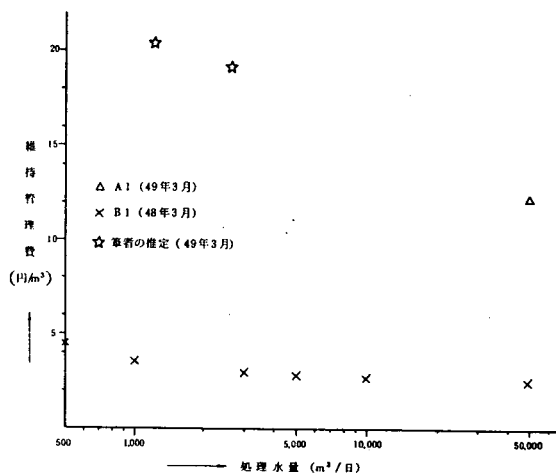


図3 凝集沈澱・急速濾過・活性炭吸着の維持管理費 ($\text{m}^3/\text{円}$) (人件費を除く)

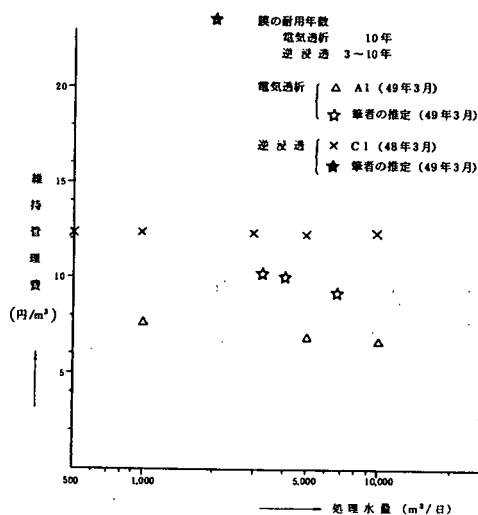


図4 脱塩処理の維持管理費 (円/ m^3) (人件費を除く)

② コスト試算の前提の再検討

しかし上述の各報告書そして筆者の試算も或る前提に基づいている。その前提の第一は設備が設計通りに動くこと、第二は二次公害を引起さないことである。脱塩処理に関してはこの第一の前提が満たされないことはすでに述べた。すなわち、逆浸透の場合は膜の劣化により半年か1年で半透膜の全面交換が必要となることが少なくない。それ故、膜の劣化が早ければ、前述の脱塩までの処理経費は、更に200～300円/m³の費用が加算されて、1m³あたり400～500円という、きわめて高いものとなる。

第二の前提に関しての二次公害の問題は(4)で詳述するが、活性炭吸着には活性炭再生時の重金属の放散、逆浸透、電気透析には濃縮水の排出という問題が伴っている。この濃縮水を完全に処理するには蒸発缶に入れて濃縮し、液量を激減した上で永久保存することが必要であるが、この方法をとった場合、蒸発缶の蒸気費用だけで生産水量1m³あたり400～500円の費用が追加されるであろう。そうなれば、逆浸透までの処理経費は1m³あたり1,000円近くになってしまう。

真の処理コストとはこのようなものであって、各報告書が示している処理経費は試算の仕方に多くの誤りがあるだけでなく、一定の枠内の数字しか表わしていないことに注意しなければならない。

(3) 三次処理水の利用用途

① 各報告書における利用可能用途

上述の報告書はいずれも下水、工場排水の各段階の三次処理水に対して利用可能用途を想定している。それを整理すると、次のようになる。

	ビ ル , 団 地	工 場
凝沈砂滷過水	水洗便所用水 (B1, B2, B3, B4)	冷却用水 (C1) 板紙の抄紙用水 (C1)
活性炭処理水	冷房用水 (B1, B2, B3) 散水・洗車用水 (B1, B2, B3, B4)	冷却用水 (A1, C2) ボイラ用水 (A1, ただし軟化が必要) 石油化学工場の洗浄用水 (A1) 食品工場の洗浄用水の一部 (A1)
脱塩処理水	風呂用水 (B4) 洗濯用水 (B4)	すべての用途 (B4, 2)

この表から明らかなように、既存の報告書によると、まずビル、団地において利用可能な用途は凝沈砂滷過水ならば、水洗便所だけであるが、凝集砂滷過に活性炭吸着を加えると、冷房や散水・洗車まで、更に脱塩処理を行なうと、風呂、洗濯まで再利用用途を拡大することができる。そして、工場に関しては凝沈砂滷過水又はこれを活性炭吸着に通した処理水の再利用先は冷却水、板紙の抄紙用水、ボイラ用水（軟化が前提）、石油化学工場や食品工場の洗浄用水の一部であり、更にこれに脱塩処理を加えると、ほとんどすべての用途に利用できることになっている。しかし、既存報告書が示している利

用可能用途は再利用に伴う問題点を十分に検討を行なってきめたものではない。その中には活性炭処理水を軟化だけでボイラー用水に用いるという技術的に基本的な間違いをしているものさえある。通常の河川水や地下水を用いる場合、低圧ボイラーに関しては軟化、高圧ボイラーに関しては純水化が行なわれるので、A1の報告書の著者は活性炭処理水を軟化だけで低圧ボイラーの補給水に使うことができると考えたものと思われる。しかし、軟化はあくまでスケールを発生しやすいCa、Mg塩をNa塩に変えるだけであり、全塩類濃度がかなり小さいことが軟化だけでボイラー用水に使うことの前提条件となっている。それ故、塩類濃度が通常の河川水の3～4倍以上もある下水処理水を軟化だけでボイラー用水に使用することは不可能といえる。既存の報告書ではこのように技術的に基本的な誤りが少なくないが、その原因は多くの委託研究機関がじっくりと時間をかけて技術的問題点を検討する態勢を作ることが出来ず、短期間のうちに報告書を作成することにあるといえる。

このような技術的な間違いはともかくとして、下水や工場排水の三次処理は上述の報告書が示しているほど、種々の用途に使えるものではない。凝沈・浮遊・活性炭処理水と脱塩水の二つに分けてこの問題を考察することにしてしよう。

② 凝沈・浮遊水又は活性炭処理水の利用用途

上述の各種用途のうち、実際に利用可能と思われるのは水洗便所用水と板紙の抄紙用水だけである。水洗便所用水への使用で検討を要するのは三次処理水が便器の着色や汚れを引き起さないかということであるが、この点については下水処理水水源の江東工業用水道普及地区において実施例がいくつかあり、そのような問題点がほとんど生じないことが実証されている。同様に板紙の抄紙用水についても江東地区で下水処理水を全面的に使用する板紙工場があることから再利用は可能と考えられる。

けれども、この他の用途に関してはいろいろな問題点が生じる。まず、散水、洗車用水については散水ホース又は洗車ホースを間違えて他の用途に、例えば飲料用等に使用する危険性が十分にある。ビルの従業員や団地の住民に処理水専用のホースであることをよく認識させても、事情の分らない外来者又は子供が夏場の暑い時に誤って飲んでしまうことは十分に予想される。次に、石油化学工場や食品工場の洗浄水については洗浄水と一口に言っても多くの種類があることに注意しなければならない。石油化学工場の洗浄水には反応タンクや浮遊機等の内部洗浄水、ポリマー溶液やポリプロピレン等の製品洗浄水、床や機械の外回りの洗浄水、排ガス洗浄水などがあり、一方、食品工場の洗浄水にもタンクやパイプの内部洗浄水などの種類がある。このうち、三次処理水を利用できるのは床・機械の外回りの洗浄水と排ガス洗浄水である。この他の用途については原則として三次処理水を使用することはむづかしい。三次処理水で洗浄すると、処理水に含まれる種々の不純物質が製品に混入するからである。特にきびしいのは食品工場での内部洗浄水である。活性炭処理まで行なえば、浮遊物質や有機物質はほとんど除去されているが、溶解塩類やアンモニアは除かれず、又、塩素滅菌してもウィルスは完全に死滅していない。石油化学、食品工場においては処理水の再利用がむづかしいこれらの

洗浄水が全洗浄水の大半を占めており、三次処理水を再利用することによる洗浄水節約の余地は小さい。

前出の報告書が最も強調しているのは全使用水量においてウェイトの高い冷却用水（冷房用水を含む）に三次処理水を使用することである。冷却用水は原則として製品や人間に直接ふれることがないため、三次処理水の利用は可能であり、又、江東地区の工場ではかなりの実績がある。しかし、利用はされていても、それに伴って重大な問題を生じていることを忘れてはならない。⁽³⁾ 第一の問題は腐食の進行とそれに対する重金属系防食剤の使用である。冷却水は通常、不十分であることが多いにせよ、冷却塔による循環が行なわれているが、この場合、大気との接触によって絶えず酸素が溶け込むため、腐食が進行しやすくなる。このため、熱交換器の腐食を特に問題とする化学工場では冷却水に防食剤が添加されることがあるが、通常の河川水や地下水を補給水に用いている場合は比較的害の無い有機系の防食剤で対応することができる。しかし、下水や工場排水の凝沈・過水又は活性炭処理水には高濃度の塩類とアンモニアが含まれているため、腐食速度が何倍も増大し、特に効力のある防食剤として重金属を含んだものが使用される。そして、化学工場だけでなく、通常は防食剤を用いることの少ない冷房用水（冷凍機の冷却水）にも重金属系の防食剤が必要になってくる。冷凍機の凝縮器は銅管でつくられているが、この銅管はアンモニアによって孔食を引き起すことが多いからである。この重金属系防食剤としてクロムや亜鉛系のものが使用されており、冷却塔からの排水及び飛散水（循環水量の0.2%）からクロム・亜鉛が外部に排出される。三次処理水を冷却塔の補給水に用いる場合は排水量を多くして塩類濃縮度（3節参照）を低く押えることが多いため、クロムや亜鉛の排出量はかなりの量になっている。

第二の問題は、三次処理水に含まれる種々の物質が飛散水によって大気中にばらまかれることである。上述の防食剤に起因する重金属以外にも三次処理水には工場排水から混入した重金属等の有害物質やウイルスなどが含まれており、これらが大気中に飛散する。飛散水は循環水のわずか0.2%とはいえ、大規模な冷却塔は循環水量が1時間あたり数万 m^3 というオーダーであるから、飛散水量は1日数百 m^3 以上の大きさになり、飛散水とともにばらまかれる各種有害物質を無視するわけにはいかない。又、三次処理水に含まれるアンモニアも半分以上が大気との接触によって大気中に放散される。冷却塔の構造はアンモニア放散塔とほとんど同じであるので、アンモニアの放散が促される。このような二次公害にも注意しなければならない。

第三の問題は水質汚染との関連である。これは工場だけに限られる問題であるが、現在の排水規制は水質濃度のみの規制であるため、排水量が多いほど、大量の汚染物質を排出することが可能となる。そのため現在の工場では冷却塔による冷却水の循環利用の徹底を行わず、その大量の冷却排水によって汚染排水を希釈して排水基準に適合していることが少なくない。そのような工場に対しては循環利用の徹底によって冷却排水を微少なものとして希釈を不可能にさせる必要がある。ところが、三次処理水を補給に用いると、もともと塩類濃度が高いため、冷却塔からの排出水量を多くとらざるをえ

ず、水質汚染対策改善の道が閉ざされてしまう。

③ 脱塩処理水の利用用途

脱塩処理技術として現在注目を集めているのは電気透析と逆浸透である。これらの脱塩処理を行なうと、前出の報告書では工場におけるすべての用途と団地の洗濯、風呂に使えることになっている。しかし、まず、電気透析は塩類濃度を例えば 600 mg/l から 200 mg/l まで下げるだけであり、アンモニアや重金属もその割合しか除去されない。⁽³⁾そして、活性炭で吸着されなかった有機物質やウイルス等はほとんどそのまま通過してしまう。従って、電気透析では飲料適の水は得ることはできず、食品工場のタンクや回収びんの内部洗浄水、そして団地の風呂、洗濯に用いることは危険である。利用可能なのは塩類濃度が低いことだけを必要とする表面処理関係の洗浄用水などに限られる。

一方の逆浸透の脱塩率は90%位に維持できるので、その脱塩水中に含まれる有害物質の濃度は電気透析の場合に比べてはるかに低い。又、その脱塩水は分子単位の物質を捕捉する半透膜を通過したものであるので、有機物質等もかなり除去されている。しかし、ウイルスがこの逆浸透によって十分に除去されるかどうかの実験は全く行なわれていない。その点で逆浸透による脱塩水は飲料並みの使用の可能性がかなりあるとはいえ、その実施にはまだまだ多くの実験が積み重ねられなければならない。アメリカでは三次処理技術の安定性の実験だけでなく、その処理水の安全性についての実験も同時に行われているが、日本で進められている実験は残念ながら、三次処理技術の開発ばかりでその安全性についての検討はほとんど行なわれていない。

(4) 除去された物質の行方

① 活性炭に吸着された物質

上述の報告書の多くは三次処理を行なえばあたかも水から除去された物質は分解して消えてしまうというような前提で、水をきれいにすることのみに関心を注いでいる（ただし、活性炭についてはA1の報告書における浦中の再生実験が高く評価される）。しかし、三次処理に限らず、一般に処理技術は水から除去した物質を消してしまうわけでない。例えば活性汚泥処理にしても有機物質の半分は余剰汚泥として引き出される。三次処理も同様で、凝集沈殿及び急速濾過で除去された物質は各々排泥水と逆洗水によって取り出される。通常の方式ではこれらの排泥水や逆洗排水は活性汚泥処理前の貯留槽にもどされ、活性汚泥からの余剰汚泥と一緒に引き出される。もともとの余剰汚泥に対して新たに加わる汚泥（その約半分は凝集剤）は $1/5$ 以下であるから、余剰汚泥の処理施設（脱水機等）が完備していれば、差し当っての問題は生じない（ただし、活性汚泥処理からの余剰汚泥に重金属が含まれている場合は問題は簡単ではない。焼却しても、重金属の一部が大気中に放散し、同時に重金属を含む灰の始末の問題が生じてくるからである）。

活性炭の場合は吸着物質で飽和した活性炭を再生炉に入れ、高温の水蒸気で吸着物質を追い出すこ

とによって再生が行なわれる。脱着された物質をそのまま大気中に放出するわけにはいかないので、再生炉にはアフターバーナーについている。アフターバーナーの設計がきちんと行なわれていれば、脱着された有機物質のほとんどはそこで燃焼してしまうと考えてよい。しかし、活性炭が吸着するのは有機物質だけではない。重金属の一部が活性炭に吸着されてしまう。その吸着された重金属のうち、亜鉛、鉛、カドミウム、クロム等は再生時に脱着し、アフターバーナーを通過してしまう⁽³⁾。この重金属を捕捉するためにアフターバーナーの後に排ガスワッシャーを取り付ける方法もあるが、下水処理場污泥焼却炉の排ガスワッシャーの例から考えて、通常の排ガスワッシャーは重金属のせいぜい $2/3$ 位を捕捉するにすぎない。以上のことから、重金属を多少でも含む工場排水或いはそれが混入した下水処理水を活性炭吸着によって処理することは危険である。活性炭吸着に通すのは団地排水のように工場排水を全く含まない下水処理水に限られる。

② 脱塩処理によって除かれた物質

逆浸透や電気透析によって除かれた物質は濃縮水の方に移行する。通常、この濃縮水の量は逆浸透の場合は原水の $1/4 \sim 1/2$ 、電気透析の場合は $1/10 \sim 1/4$ である。したがって、原水中の各種物質のうち、脱塩によって除去されたものは濃縮水に $2 \sim 10$ 倍に近い濃度で含まれている⁽³⁾。それ故、もし、 $0.1 \text{ mg}/\ell$ の6価クロムを含む水を濃縮水の割合 $1/10$ の電気透析にかけた場合、その濃縮水には $1 \text{ mg}/\ell$ の6価クロムが含まれ、排水基準にさえ不適合となる。このような有害物質をあまり含まない下水処理水であっても、濃縮水の割合が $1/10$ の場合はその濃縮水に塩類が $5,000 \text{ mg}/\ell$ 以上、アンモニウム性窒素が $100 \sim 200 \text{ mg}/\ell$ も含まれることになる。このような塩類高濃度排水が河川の上流、中流域に排出されれば、淡水魚に有害な作用を及ぼし、同時に農業用水への利用に悪影響を与えることが予想される。

以上のように、脱塩処理の濃縮水は条件によってはそのまま排出することがゆるされない場合がある。このことは脱塩処理を扱う上述の報告書のすべてが見落している点である。高濃度の塩類やアンモニアを含む濃縮水の排出が問題となる場合の根本的な対策は一つしかない。濃縮水を蒸発缶に入れて濃縮し、液量を十分に小さくした上で永久保存する方法である。この方法を採用すると、蒸気費用として、生産水 1 m^3 あたり $200 \sim 500$ 円の費用をかけなければならない。

(5) まとめ

以上、三次処理に関する既存の報告書の内容を検討して、多くの間違いと見落としがあることを指摘してきた。その考察の結果を整理すると、第一に、既存の報告書は工場排水や下水の二次処理がすでに十分に行なわれているという前提に立って、三次処理の可能性を論じているが、実際には二次処理さえ十分に行なわれていないのが現状であり、二次処理がきちんと行なわれていないまま、三次処理を導入しても三次処理が有効に機能することは少ない。第二に脱塩処理技術については不安定な要素が非常に多

いにもかかわらず、既存の報告書では脱塩技術がすでに確立されているという誤った前提のもとに下水排水再生利用の計画が検討されている。第三に、既存の報告書は三次処理のコストを実際よりかなり低目に見積っていることが多い。その理由は見積りの対象を狭い範囲に限定していることと、最近の材料費、工事費の大幅な値上りを考慮に入れていないことにある。第四に、三次処理水は既存の報告書が示すほど多くの用途に用いることはできない。凝沈・過水や活性炭処理水の用途は水洗便所、工場の床・機械の外回りの洗浄水や板紙の抄紙用水に限られる。一見利用可能な冷却水についても三次処理水を用いると二次公害が引き起される。そして、脱塩処理も電気透析の場合は食品工場での内部洗浄水に使うことは危険であるし、逆浸透についてもウイルス除去率の実験が積み重ねられなければならない。第五に、既存の報告書の多くは三次処理によって除去された物質の行方を見落している。活性炭は重金属を部分的に吸着し、その再生の際に吸着された重金属が大気中に放出される。したがって、重金属を少しでも含む排水、下水は活性炭に通すべきではない。又、脱塩に関しても除去された物質が濃縮水へ移行するため、濃縮水の処理が必要となることがあるが、きちんと処理するためにはかなりの費用をかけなければならない。

以上が考察の結果の要約であるが、それから明らかなように、現在行なうべきことは三次処理による下水や工場排水の再利用の安易な計画や実施を進めることではない。次に述べる二つの課題を解決することが先決である。

a 下水及び工場排水の二次処理をきちんと行なうこと。

まず、下水に関しては分流式にして雨水を別系統にするとともに、工場排水を処理系統に流入させることをやめ、工場ごとに十分な処理を行なわせて雨水系統へ排出させること、そして水需要を抑制して下水処理場への流入量を処理能力以下に抑えることが必要である。又、工場排水については排水濃度だけでなく、排水量にも規制して希釈によって排水基準に適合する逃げ道を閉ざすとともに、その少量の排水に対して十分な二次処理を行なわせることが必要である（工場排水の処理をきちんと行なうためには生産工程内部の水利用方式の改変が必要であるが、これについては3節で述べる）。このように二次処理が十分に行なわれないまま、三次処理を導入しても三次処理が有効に働くことが少ないだけでなく、二次公害等の問題を引起すことが予想される。

b 三次処理の安全性に関する研究を進めること。

三次処理技術の開発が盛んに行なわれているにもかかわらず、その処理水の安全性についての研究はほとんどなされていない。再利用の用途が水洗便所や床洗浄等に限られる凝沈・過水や活性炭処理水はともかく、飲料並みの利用が計画されている脱塩水についてはその安全性が十分に研究されなければならない。とりわけ、逆浸透がウイルスをどの程度除去できるかの研究が急がれている。

3. 水使用合理化

3-1 既存の調査研究

第1節で述べたように、水使用合理化に関する既存の報告書の数はいまだ多くない。収集できた報告書は次の通りである。

D 工場の水使用合理化を扱ったもの

D1 水使用合理化技術叢書

〔日本工業用水協会（通産省）〕

（昭和38年より現在まで業種別の技術叢書が十数冊発行されている）

D2 水資源開発基本計画調査報告書

——生産工程モデルによる工業用水収支調査——

〔経済企画庁総合開発局〕

（昭和46年3月）

D3 工業用水利用効率化および需要量推定基礎報告書

〔大阪府企画部〕

（昭和46年3月）

D4 工業用水利用実態調査報告書

〔建設省関東地方建設局〕

（昭和47年3月）

D5 工業用水使用合理化指針策定報告書 ——石油化学工業——

〔日本工業用水協会（通産省）〕

（昭和48年3月）

E ビル、団地等の水使用合理化を扱ったもの

E1 水需要推定及び合理化基礎調査報告書

〔大阪府企画部〕

（昭和48年3月）

E2 水経済調査報告書

〔大阪府企画部〕

（昭和48年3月）

まず、六つの報告書について若干の解説をしておく、D1は水使用合理化や再生利用の必要性が社会であり取り上げられない40年以前から発行されてきたもので、鉄鋼業、硫安工業、石油精製工業、毛紡績工業等の各種業種について技術叢書がつくられている。しかし、残念ながら、その内容は報告書の表題とは別に、水使用合理化そのものの扱った部分はきわめて少なく、大半は用水施設維持

管理の解説に終わっている。水の浪費を促す低料金の工業用水道政策を進めている通産省が本来の水使用合理化にどの程度の関心を払ってきたかを示す好例である。D 2は鉄鋼、石油化学、レーヨン等の11業種における各用水担当者を集めて水使用合理化の検討を行なったものである。この報告書は国の方で水使用合理化の可能性を調査した例としてよく引き合いに出されるが、その内容は芳しいものではない。というのはこの調査の趣旨はまずモデルプラントを設定して、次に、そのモデルプラントを対象に水使用合理化の可能性を検討することになっていたはずであるが、実際にはモデルプラントの設定だけに終わって真の水使用合理化の検討はほとんど行なわれていないからである。もともと、水を浪費している企業の担当者に水節約の可能性の検討を依頼すること自体が間違っている。D 3、D 4は同じ委託機関による報告書で（A 1とB 2の一部、B 3、B 4、C 1、E 1、E 2も同じ研究機関による）D 3では節約可能量の試算も行なっている。この研究機関の水問題に関する調査研究は、他の研究機関の仕事より論理展開がはるかに優れ、その報告書はかなりの説得力を持っている。しかし、その内容は後に述べるように技術的に基本的な誤りを含んでいる。D 5は通産省が工業用水使用適正化法（案）を制定するための予備調査である。適正化法案は工場の水使用合理化の促進を目指したものであるから、本来ならば、この報告書は現在の工場がどの程度水を浪費しているかの調査結果を含んでいて然るべきであるが、残念ながらすでに常識化している水使用合理化技術を羅列するだけに終わっている。この報告書からも通産省の水使用合理化に対する姿勢が窺われるといえよう。E 1とE 2の報告書は上述の如くD 3等と同じ研究機関によるもので水洗便所、風呂、洗濯、洗車の水使用合理化について検討を加えている。

次に、以上の報告書を素材にして、水使用合理化が社会でどのように評価されているか、又、その評価がどのような点で誤っているかをみていくことにしよう。

3-2 冷却水の節約

まず、工場の冷却用水を取り上げる。冷却用水については冷却塔による循環利用が常識となっており、既存の報告書はいずれも冷却塔による循環利用の必要性を主張している。しかし、冷却塔によって冷却水使用量をどこまで減らすことができるかについて誤った考えが流布している。各報告書で述べられている冷却水節約の限界を整理すると次のようになる。

D 2の別冊とD 3：冷却水の使用回数20回。

ただしその回数の計算は $\frac{1}{1 - \frac{\text{回収水} + \text{海水}}{\text{冷却水} + \text{温調水}}}$ によって行なっている。

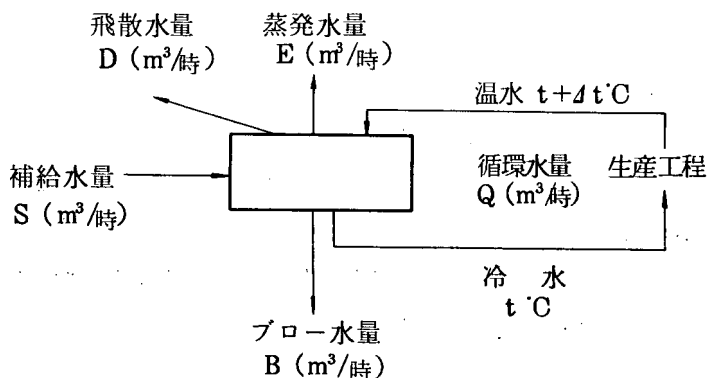
D 4：冷却水の使用回数45回（冷却塔の出入口温度差10°Cの場合で、循環水の濃縮倍数5.0）。

ただし、補給水に純水又は軟水を用いてブローカット（排水ゼロ）運転を行ない、クロム系防食剤を用いた場合

D 5：循環水の濃縮倍数2倍以上

D 2 と D 3 では冷却水の節約程度を示す指標として使用回数という用語が用いられている。この使用回数やこの逆数である回収率は工場の水節約程度を示す指標としてよく使用される。すなわち、同じ水を何回繰り返して使用しているかによって節約程度を評価するわけで、工場でもこれらの指標がよく用いる。しかし、使用回数や回収率という指標は冷却水の節約程度を表現するものとして不適切であることに注意しなければならない。というのは例えば 10 回も同じ水を繰り返して使用しているといえ、一般の人は随分水の節約に努力していると受け取るであろう。D 2 の一部や D 3 もこのような見地から冷却水の節約限界を 20 回としているようである。しかし、冷却塔を使えば、20 回程度の循環利用は非常に簡単なことなのであって、条件によっては 50 回から 100 回までの循環利用が可能である。

これをもう少し詳しく述べると、冷却水の節約限界は使用回数や回収率ではなく、濃縮倍数によってきまる。冷却水は下図に示すように生産工程から送られてきた温水を冷やして工程へもどす



が、この冷却の際に循環水の一部が蒸発する。この蒸発水量は冷却塔の出入口温度差に比例する。式で表現すると、 $E \text{ (m}^3/\text{時)} = \Delta t \text{ (}^\circ\text{C)} \times Q \text{ (m}^3/\text{時)} / 600 \text{ (} 10^3 \text{ kcal/m}^3 \text{)}$ となる（ただし、 $600 \text{ (} 10^3 \text{ kcal)}$ は水 1 m^3 の蒸発潜熱）。水だけが蒸発していくと、その水に含まれていた塩類が循環水に取り残され、循環水の塩類濃度が上昇していく。塩類濃度があまり上昇すると、腐食やスケール析出の問題が生じるので、循環水の一部を排出する。これがブロー水量 B である。この他に、空気に随伴して運び去られる飛散水量 D があるが、これは循環水量の 0.2 % 以下でほとんど一定である。したがって、補給水量 S は $E + D + B$ で表わされる。この（循環水の塩類濃度） / （補給水の塩類濃度）を濃縮倍数とよんでいるが、この濃縮倍数を大きくとった方がブロー水量 B を小さくすることができる。濃縮倍数を n とすると、塩類の収支から、補給水量 S は $\frac{n}{n-1} E$ で表わされる。この濃縮倍数の限界は補給水の水質によって左右されるが、通常の河川水や地下水の水質ならば、防食剤無添加又はりん酸系防食剤の添加で 2 ~ 4 倍、有機系防食剤で 5 倍以上の濃縮倍数を維持することは可能で

ある。そして、望ましい方法ではないが、補給水を軟化装置や純水化装置に通してから、クロム系の防食剤を用いれば10倍前後の濃縮倍数を保つことができる。このように防食剤の種類によって限界濃縮倍数が異なってくるが、比較的無害と思われる有機系防食剤を用いるとすれば、一般には5倍まで濃縮倍数を高めることは可能と考えられる。

今、冷却塔の出入口温度差を 10°C とすれば、濃縮倍数5倍の場合、補給水量は循環水量の2.1%となり、前出の使用回数という表現を仮に用いるとすれば、48回の循環使用ということになる。そして、出入口温度差 5°C の場合を考えると、濃縮倍数5倍で補給水量は循環水量の1.05%となり、使用回数は96回となる。これらの数字をみると、D2、D3、D5の報告書の想定値がどんなに控え目であるかが分るであろう。本当の限界値の2～5倍の数字を限界としているからである。なお、D2、D3では使用回数の計算に海水も含めているが、これは説明するまでもなく全くの間違いである。上述の報告書のうち、D4は使用回数という不適切な指標を用いているとはいえ、一応、濃縮倍数5から計算しているので、正しい数字に近い値となっている。ただし、この報告書についてもブローカット運転を行なった場合の濃縮倍数は正しくは9倍であり、使用回数も54倍となることの間違いは指摘しておく必要がある。

さて、このように冷却塔による循環利用を徹底することによって、現実の冷却水の使用量をどの程度減らすことができるのだろうか。D2とD3は誤った指標を用いているため、随分控え目の節約可能量を算出している。例えば、D3の報告書によれば、全国の上位25工場の鉄鋼業の節約可能率は30%となっているが、実際の節約可能率はこの程度にとどまるものではない。筆者の今までの調査結果を紹介すると、東京の地下水大量使用工場（揚水量 $1000\text{m}^3/\text{日}$ 以上）の冷却水使用量約10万 $\text{m}^3/\text{日}$ はその $1/10$ の1万 $\text{m}^3/\text{日}$ まで減らすことができる⁽³⁾、又、市原市の石油コンビナード28工場の冷却水使用量28万 $\text{m}^3/\text{日}$ はその $1/4$ の7万 $\text{m}^3/\text{日}$ まで減少することが可能である⁽⁴⁾。冷却塔による循環利用はすでに一般の常識になっていることから、冷却水の節約可能量は過小評価されがちである。しかし、現実の工場では使い捨ての冷却水や冷却塔を設置しても不十分な循環にとどまっている冷却水が少なくなく、今後、この循環利用の徹底によって、使用水量の大幅な減少を期待することができる。技術的に多くの問題を内蔵している三次処理による排水の再利用よりも、冷却水の節約の徹底を進めるべきである。

3-3 洗浄用水の節約

工場では冷却、洗浄、ボイラー、原料、雑用等の種々の用途に水が使用されるが、使用水量のほとんどを占めるのが冷却用水と洗浄用水である。しかし、この洗浄用水に関しては冷却用水と違って水使用合理化の可能性を検討した報告書が非常に少ない。前出の報告書で取り扱っている洗浄水の節約は次のようなものだけである。

D2の別冊とD3：抄紙用水の限界使用回数を平均2回と仮定して、節約水量を計算する。

D 4 : 某洋紙製造工場における工程間排水再利用計画の紹介

このように洗浄用水の節約についての検討例がきわめて少ないのは洗浄用水の性格に基づいている。というのは洗浄用水は業種ごとに特色があるだけでなく、一つの業種でもいくつかの洗浄用途があり、更に、その利用方式が生産工程内部のあり方と密接に結びついているからである。すなわち、洗浄用水の節約を検討するためには各業種の生産工程内部のあり方を一つ一つチェックする非常に面倒な作業が必要である。そのために若干の検討を行なっているD 2 ~ D 4 にしても、その検討の内容は排水の工程間再利用や循環使用だけに終わっている。

一般に生産工程内部の問題は工場側しか知らぬことであり、更にそこでの洗浄用水の利用は生産管理の面から合理的に行なわれているから、洗浄用水の節約を工程内部で検討する余地はないと考えられがちである。しかし、一たび生産工程内部に立入り、そこでの水利用方式を細かに観察し、同業種の工場を比較すれば、そこでの水利用方式の改善によって使用水量を大幅に節減できる道があることが分る、筆者は主に東京都内の工場を対象として洗浄用水節約の可能性の検討を進め、多くの洗浄用水の使用量を $1/2 \sim 1/10$ まで減少できることを明らかにしてきている⁽⁵⁾。今までの検討で水使用合理化の方法と可能性がかなり明らかになった用途は次の通りである。

- a. メッキ及び表面処理洗浄水
- b. 現像処理洗浄水
- c. 塗装関係洗浄水（電着塗装洗浄水、水研ぎ用水等）
- d. 排ガス洗浄水
- e. びん洗浄水
- f. タンク、パイプ、床等の間欠洗浄水

この他に次の用途についても水使用合理化の方法が明らかになりつつある。

- g. 染色整理用水
- h. 抄紙用水

これらの各種用途の洗浄用水は各々特色をもっているが、しかし、それらの水使用合理化方法を整理すると、共通の原則を見出すことができる。筆者は洗浄用水の節約は次の四原則に整理できると考えている。

- I. 洗浄対象物の減少
- II. 給水量の適正化（不要水のカット）
- III. 向流多段洗浄の導入
- IV. 単一用途の排水の循環利用

この四原則を簡単に解説すると、I の洗浄対象物は洗い落す物質、例えばメッキする品物に付着しているメッキ液のことを意味しているが、水洗工程になるべく洗浄対象物を持ち込まないようにすることが水節約の第一歩である。第二に、必要としない時の給水をストップするとか、又は少ない水量

でより大きな洗浄効果が得られるような洗浄方式を選択することが必要である。そして、第三に、比較的清浄な排水を順繰りにその前段の洗浄に再使用していく方式をとれば、使用水量を大幅に減らすことができる。これがⅢの向流多段洗浄の導入であるが、ここでいう向流とは品物と逆方向に水を流すことを意味する。Ⅳの単一用途の排水の循環利用は第2節で述べた三次処理による工場排水の循環利用とは根本的に異なる。後者は種々の排水をごたぜにした総合排水を処理技術に頼って浄化しようというわけであるから、無駄なエネルギーを必要とするが、それに比べて前者の排水に含まれる物質が限られたものであるため、その再利用は比較的容易である。

これらの四原則からみれば、前述のD2～D4が述べている抄紙用水の使用合理化方法は非常に部分的なものであることが分かる。今後はこれらの四原則に基づいて、上述のa～h以外の用途についても水使用合理化の方法と可能性の検討を進めていくことが必要である。今後、検討を進めなければならない洗浄用水として、石油化学工場におけるガス吸収水、ポリマー溶液等の溶液物質の洗浄水、ポリプロピレン、ゴム等の固形物質の洗浄水などを上げることができる。

3-4 工場以外の事業所における各種用途の水節約

ビル、団地等における水利用用途、つまり水洗便所用水、洗濯用水、洗車用水の節約方法についてはE1とE2、とりわけE1が比較的良好に検討を加えている。工場と違って、水利用の用途が一般的で、取り組みやすいからであろう。ただし、この4用途のうち、使用水量が最も大きい水洗便所用水についてはもっと突っ込んだ検討を加えるべきであろう。すなわち、水洗便所用水の中でいつも問題となるのは高置水槽式(サイホン)男子便所用水における夜間の放流などの無駄な水使用であるが、この無駄な水消費をなくすためにはどのような改善を行なうべきであるが、そしてその各種改善方法の費用はどれ位で、その改善によって都市用水の何%をカットできるかの調査検討がなされるべきであろう。

この問題はともかくとして工場以外の事業所における水利用用途はこの4用途に限られるのではない。特に地下水使用事業所に注目すると、し尿処理場、公園、動物園、学校、研究所等の事業所があり、それぞれし尿処理希釈水、池プール維持用水、研究実験用水等に大量の水を使用しており、全地下水揚水量に占める割合は決して小さくない。そして、これらの事業所に対する筆者の若干の調査によれば、これらの用途についても使用水量を大幅に節減できる可能性が強い。今後は水洗便所用水等の一般用途だけでなく、これらの特殊な用途についても水使用合理化の方法と可能性の検討を進めていくことが必要である。

3-5 ま と め

以上の考察の結果を次の3点に整理することができる。第一に既存の報告書は冷却水の節約限界についての誤りが多い。その節約限界は使用回数や回収率ではなく、濃縮倍数によってきまる。通常は濃縮倍数を5倍まで高めることができるので、その条件で試算すると、工場の冷却水を大幅に、すな

わち $1/10 \sim 1/4$ まで節減できることが多い。第二に洗浄水の節約は既存報告書ではほとんど扱われていないが、生産工程内部に立入って水利用方式の改善を行なえば、使用水量を大幅に減らすことが可能である。その節約の方法は向流多段洗浄の導入等の四原則に整理することができる。ただし、石油化学工場の各種洗浄用水など、水使用合理化の方法が未だに明らかになっていない用途がいくつか残されている。今後の検討課題である。第三に工場以外の事業所、団地の水利用用途についても使用水量を減少できる余地が少なくない。そのうち、水洗便所用水等の一般用途の水使用合理化に関しては既存の報告書が比較的良好に検討しているが、節約水量の試算などの具体的な作業を今後進めていく必要がある。そしてそれと同時に、し尿処理希釈水等の特殊用途について水使用合理化の可能性の本格的な検討を進めていくことも必要である。

総じて言えることは水使用合理化は細かい調査と対策を必要とするため、三次処理に比べてはるかに地味であり、それだけ、その可能性を本格的に検討した調査はきわめて数が少ない。しかし、実際の有効性から比較すると、多くの問題点を指摘できる三次処理に比べて水使用合理化はすでに確立された技術を用いるだけに現実性があり、更に水質汚染対策などでプラスとなる面が多い。いわば、すべての公害対策の基本が発生源対策であるように、工場等からでてきた総合排水や下水を三次処理で浄化して再利用することよりも、水を使用する根元で使用水量を減らすよう適切な対策を講じることがまず考えるべきである。

参 考 文 献

- (1) 近藤準子他(1972.5): 下水処理場の機能解析, 科学, p 271 ~ 278
- (2) 榊原敏範他(1974): 合流式下水道の現状, 公害研究 Vol 3, No 4, p 44 ~ 52.
- (3) 東京都公害局: 工業用水使用合理化基礎調査報告書 (I)
- (4) 樞根勇編(1973.11): 地下水資源の開発と保全, p 317 ~ 364.
- (5) 東京都公害局(1974.12): 水使用合理化検討資料集 (未公表)

Ⅱ 工業用地下水使用の現状と問題点

飯 島 孝

工業用地下水使用の現状と問題点

1. はしがき

地下水を工場の用水に使用しないためには、地下水に代替される水源—淡水、河川等をとるか、あるいは、節水の方法をとるかのいずれかである。^①

工場における節水の方法、調査については、水使用の合理化の観点から、すでに、いくつかの報告がなされている。^②

ここで、とくに、コンビナート—石油精製、石油化学工業の水における節水の可能性と実際を、石油精製、石油化学技術の面から、用水と排水とを関連づけて述べることにしたい。^③

註① 表1に示すように、地下水が工業用水の水源に占める割合は35.6%である。

1-1表 工業用水(淡水)の水源(単位千 m^3 /日)

年度	工業用水道	上水道	井戸水 (地下水)	その他 (河川水など)	新規給水計	回収水	合計
33	1,380 (7.4) (5.9)	1,486 (8.0) (6.4)	7,768 (41.5) (33.4)	8,055 (43.1) (34.7)	18,689 (100.0) —	4,554 — (19.6)	23,243 — (100.0)
46	10,395 (24.8) (11.5)	3,876 (9.2) (4.1)	14,915 (35.6) (15.7)	12,751 (30.4) (12.7)	41,937 (100.0) —	53,310 — (56.0)	95,247 — (100.0)
60	50,700 (59.1) (17.7)	5,700 (6.6) (2.0)	16,100 (18.8) (5.6)	13,300 (15.5) (4.7)	85,800 (100.0) —	200,200 — (70.0)	286,000 — (100.0)

注 ただし、30人以上の事業所のみの数字である。
()内はパーセント。

出所 井上源之助「空気調和、衛生工学」Vol. 48, No. 8 (1974)

② 日本工業用水協会：工業用水収支調査(1970年)及び、通産省：コンビナート用水システム合理化調査報告書(1972年)

水の原単位、工場内の水収支をとるという考えにはみるべきものがある。

が、工場内にて水がどのように、なぜ使われているかが解明されていない。そのため、とくに石油化学工業の原単位、水収支は正確でない。

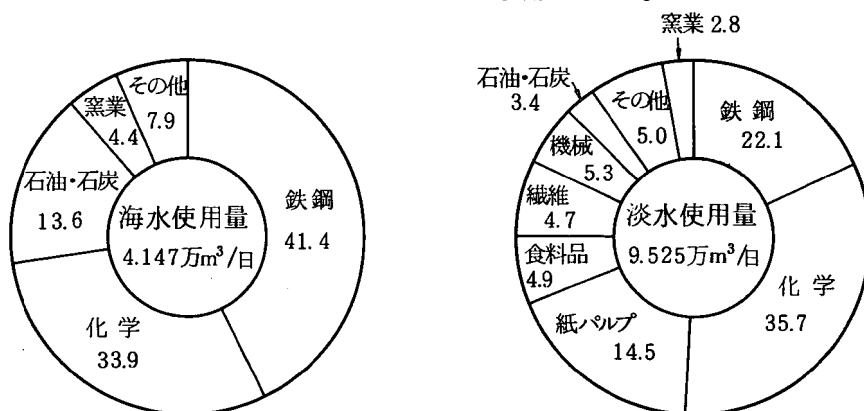
節水の観点から石油精製、石油化学工業の用水、排水についてはつぎの著書が参考になる。権根勇編、「地下水の開発と保全」水利科学研究所(1973年)星野芳郎編「公害発生源」勁草書房(1974年)

その他の参考文献は後章に記す。とくに、メッキ、機械工業の水の再使用の文献はいくつかみるこ

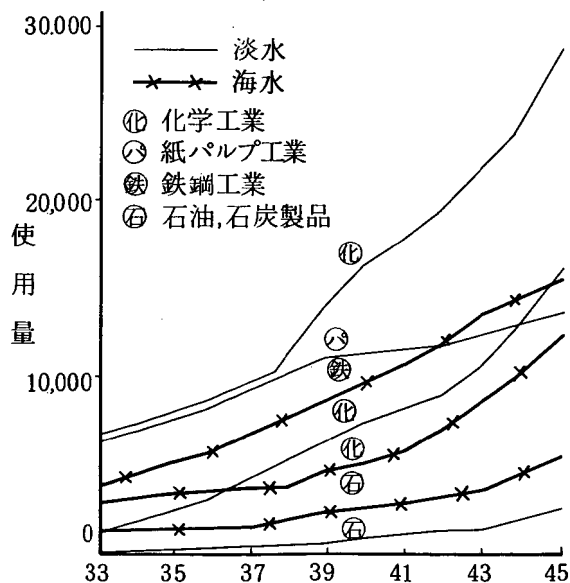
とができるが石油精製，石油化学についての，この種の文献は少い。多分，排水に各種の汚染物質を含有しているため，その除去が困難で，実例がないのであろう。

2. コンビナートの「水」

わが国において，最も工業用水を使用している業種は，統計上，化学工業である。1図のように，化学工業においては，淡水の35.7%，海水の33.9%を使用している。



第2-1図 業種別工業用水使用量のシェア（昭和46年，単位%）



第2-2図 淡水，海水別業種別工業用水推移（単位 1,000 m³/日）

出 所 通産省工業統計より作成

しかも、その使用量は年度毎に増大している。その推移は、2図のように示すことができる。この図が示すように、化学工業における水の使用量の増大は、他の業種に比較して急激であり、その時期はわが国の石油化学工業のコンビナートが相次いで各地につくられ、成長した時期と一致している。

化学工業の水の消費は、石油化学コンビナートが形成されると、局所的にコンビナート地域に集中する。コンビナートの規模が大型化し、しかも水を多消費する化学工業が一箇所に集中するから、その地域で水不足の現象が起きる。また、石油化学コンビナートに消費された水の排水は、他の業種に比較して多様な汚染物質によって汚染されている特徴を持っている。

ここで、石油化学コンビナートとは、いかなるものであるかの説明を二、三加えたい。

石油化学コンビナートといわれるものは、石油精製の製油所と石油化学工場が地域的に結合した形態をさしている。

わが国の石油化学工業は、石油留分の一成分であるナフサを原料としているために、製油所が近くにあるほうが利点となる。

製油所は、原油からLPG、ナフサ、ガソリン、灯油、軽油、重油等の燃料油を製造する型が一般的である。燃料油製造のために、原油を蒸留によってあらわけする常圧蒸留装置、オクタン価の高いガソリンを製造するための接触解質・接触分解装置、灯油、軽油、重油中の硫黄分等を除去する水添脱硫装置、LPG等のガス回収装置が、たいてい一式そろっている。

製油所の規模は、原油の処理能力、つまり常圧蒸留装置によって代表されると考えてよい。わが国の製油所は、大型のものでは20～30万バレル/日（1バレル＝160ℓ）規模である。製油所には、一般に、さきに述べたような装置が一式そろっているため、常圧蒸留装置の規模によって、製油所全体の水の消費量もほぼ決まる。

石油精製の技術は蒸留であるといっても過言ではない。石油－原油は、各種の炭化水素の混合物であり、それらの炭化水素の沸点差を熱エネルギーによって分離するのが蒸留である。つまり、蒸留塔では塔底が加熱され、塔頂が冷却されて各種の油が分離される。冷却水を多消費する理由は、ここにある。

石油化学工業とは、エチレン製造とエチレン製造時の副生物の利用の化学工業であるといっていよい。そしてまた、石油化学コンビナートの規模は、エチレンの生産規模によって決まる。後に述べるように、副生物の利用、すなわち、コンビナートはそれ相応の誘導品の製造装置を、一式そろえているからである。

エチレンの製造は、ナフサを外部から約850℃加熱した反応管に通し、分解し生成する分解ガスにも約30%のエチレンと、エチレン以外、プロピレン、ブタジエン、ベンゼン等の各種の成分を副生する。たとえば、分解ガス中に約10%含有しているプロピレンをポリプロピレン、アクリルニトリルに利用しないかぎり、燃料にするか焼却するほかに使い途がない。このような副生物の炭化水素を原料とし、これによって合成される誘導品のネットワークが石油化学コンビナートである。少量の

副生物、たとえば、 C_4 留分といわれるエチレン製造時の反応ガスには、この中にブタジエンが約3～4%含まれている。このブタジエンを抽出して合成ゴムの原料にするには、エチレン製造装置の規模も大型化しなければブタジエンが集荷されず、合成ゴム工場は経済規模とはならない。

このように、副生物の相互利用のため、物質と熱の流れのネットワーク、つまり、石油化学工業はコンビナート形態をとり、それぞれの製造装置が集中化する。しかも、集積の効果をあげるために大型化する必然性を持っている。

このように大型化する石油化学工業に使用される水は、石油精製に使用される水と同様に、冷却水が多い。その理由は、石油精製と同様に、石油化学工業のプロセスには蒸留による分離操作が行われるためである。それは、石油化学工業では合成や重合が純粋な物質同志で行われるために、ppmオーダーまでの不純物の除去、すなわち、精密蒸留による分離がなされるからである。このような精密蒸留を行うと、通常の蒸留よりさらに冷却水を消費する。また、石油化学工業の冷却水は、蒸留ばかりではなく、反応熱の除去と反応ガスの急冷に用いられる。重合、酸化、水添等の石油化学工業に用いられる化学反応は、発熱反応であるため、この反応の暴走を防ぎ、制御するには冷却水を必要とする。例をあげると、ナフサのEDC（二塩化エチレン）等の、高温の熱分解後に分解ガスを急冷するために、やはり冷却水を必要とする。ナフサからエチレンを製造する場合を例にすると、分解ガスを高温（800～900℃）から急冷し、さらに分解ガスからエチレン等を分離するため低温（-100℃）にするように、温度差が大きいのので冷却水を多量に消費している。この場合、エチレン1トンを製造するために約500 m³の冷却水を必要としている。

石油化学工業には、冷却水ばかりではなく、プロセス用に水が使用されるが、各プロセスの化学反応に使用されるために水質の制約を受けることが多い。そこから排出される排水はまた、さきに述べたように、多様な物質によって汚染される。石油化学コンビナートの排水が多様な汚染物質で汚染される理由は、石油化学工業では、多様な物質が合成され、石油化学製品が製造されることに付随し、さらにその何十倍もの少量の副生物ができるために、それが汚染源となる可能性がある。

石油化学工業がコンビナート形態をとり、大型化するには、技術的な面ばかりではなく、経済的な面からも必然性を持っている。それは、基礎原料のエチレンの製造から一連の誘導品を製造し、そして、それを日常生活品にまで仕上げ、販売するには資本を要するからである。いうまでもなく、巨額な資本によって石油化学コンビナートを形成し、運営できる企業は少数に限られている。逆に、限られた少数の企業であればこそ、エチレンからの誘導品のコンビナートが形成できる。

石油化学コンビナートは現代の化学工業、あるいは技術の特徴を明白に示しているものはない。くり返すまでもなく、第一に、コンビナートが集積の利益を求めることが、巨大な汚染源の集積となる。コンビナートの水汚染は、従来の化学工業を発生源とする公害とは量的にも異っている。次に、巨大コンビナートによる水の多量消費である。その結果、コンビナート周辺地域の水不足と水の収奪をみる。

(石油化学コンビナートの製品と用水量、水源、用途は補注として2-3図と2-1表に示した)

補 註

石油化学工業、石油精製業と鉄鋼業、パルプ・紙工業の水源と用途を比較すると2-1表のようになる。

水源では石油精製が工業用水道に依存する割合が多く、従来の化学工業より石油化学工業のほうがまたその依存率が高い。すなわち、工業用水道はコンビナートのために役立っていることを示唆する。

水の用途と関連するが、パルプ・紙工業は海水の使用割合が少なく、他の工業において海水が使用されているのは、冷却用水のためである。

パルプ・紙工業の水の用途は、洗浄水84%であり、逆に他の工業では80~90%が冷却水である。

石油化学工業と一般の化学工業を比較すると、石油化学工業では淡水が冷却水に使用する割合が多く、洗浄水、原料水の割合が少ないのは石油化学工業が蒸留による分離等の特徴をもっているためと考えられる。また、石油化学工業のほうが回収率75.8%と一般の化学工業の30.4%より大きいのは、冷却水を再循環使用しているためとみられる。

最も一般的な50万トンのエチレンセンターにおける石油化学コンビナートの製品と用水量と排水量を推算すると2-3図のようになる。

年産50万トンのエチレンを製造するには、約195万トンの原料ナフサを必要とし、約25%のエチレンの他にプロピレン、C₄留分等をうる。「原料ナフサは原油中25Vol%含有し、そのナフサの約半分を通常は石油化学の原料に使用されている。したがって、50万トンエチレンセンターにナフサを供給する製油所は約40万バレル/日(約64,000Kl/日)を必要とする。」この製油所ではもちろんナフサ以外にガソリン、灯油、重油等の石油製品が製造され、そのために十数種の装置群を必要とする。

図でもわかるように、巨大な石油化学コンビナート装置群が必要とする用水量は、プロセス用水のみで約6万トン/日、冷却水(この場合、海水を使用せずに、空冷熱交、冷水塔を使用する)の量は使用量の3%の補給量のみでも約12万トン/日を必要とする。もし、冷水を再循環せずに一過性を使用すると約400万トン/日の冷却水が必要となる。冷却水以外のプロセス排水量は約5万トンである。

いずれにせよ、巨大コンビナートの局所的な水の必要性と汚染された水を排出していることは理解できると思う。全国には、ほぼ30~50万トンエチレンセンターは16ヶ所あり、東京湾だけでも約50万トンのものが4ヶ所ある。

石油精製		石油化学工業		生産量 万t/年	用 水						排水(プロセス)	
					プロセス用水		冷 却 用 水					
					m ³ /日	m ³ /t	m ³ /日(満)	m ³ /t	m ³ /日(満)	m ³ /日	m ³ /t	
原油	①	ナフサ		195 (40万BSD)	4,500	0.07	42,200	0.6	1,400,000	4,120	0.07	
	②	ガソリン		50	8,000	5.3	21,000	13.9	700,000	3,750	2.5	
		灯油										
		軽油										
		重油										
		アスファルト										
		潤滑油										
		エチレン										
		③塩ビモノマー		15	1,000	2.2	4,500	9.9	150,000	750	1.7	
		④塩ビポリマー		15	3,000	6.4	1,800	4.0	60,000	1,500	3.3	
		⑤高圧ポリエチレン		7.5	200	0.8	1,400	6.0	45,000	200	0.8	
		⑥中低圧ポリエチレン		7.5	1,000	4.4	1,500	3.0	50,000	900	4.3	
		⑦スチレンモノマー		7.5	1,300	5.0	1,300	1.8	38,000	210	0.8	
		⑧ポリスチレン		5	1,650	4.4	230	1.5	7,500	730	3.2	
		⑨ABS樹脂		3	2,100	23.0	120	1.3	3,600	500	2.2	
		⑩エチレンオキシド		4						1,000	6.5	
		⑪エチレングリコール		3	1,300	6.1	2,100	9.0	70,000	1,760	7.0	
		⑫アセトアルデヒド		6	600	3.3	1,800	10.0	60,000	290	1.6	
		⑬酢酸		3.5	500	4.7	750	7.0	25,000	20	0.2	
		⑭酢ビモノマー		5	500	3.3	1,050	6.9	35,000	50	0.3	
		⑮エタノール		2.5	1,500	19.3	1,100	10.0	37,000	1,500	6.6	
		プロピレン										
		⑯ポリプロピレン		8	2,000	8.3	2,500	10.5	85,000	6,000	2.5	
		⑰プロピレンオキシド		5	1,200	7.8	2,400	15.7	80,000	500	3.2	
		⑱アクリロニトリル		7.5	1,000	4.4	3,400	15.0	115,000	1,000	4.4	
		⑲クメン		7	750	3.5	350	4.7	12,000	550	2.6	
		⑳フエノール		5						400	1.6	
		㉑アセトン		3	1,500	6.2	1,000	4.1	33,000	4,500		
		㉒メチルメタクリレート		2.5	6,000	71.7	1,050	6.2	35,000	12,000	71.8	
		㉓オタノール		4	1,500	12.4	6,000	5.0	200,000	500	4.2	
		O ₂ 留分										
		㉔ブタジエン		15	1,000	2.2	400	0.9	12,000	40	0.09	
		㉕SBR(合成ゴム)		10	5,000	16.5	2,000	6.6	65,000	3,000	9.8	
		㉖BR(合成ゴム)		5	3,500	23.1	1,200	7.9	40,000	3,500	23.1	
		O ₂ 留分、分解油										
		㉗イソブレン		2.5	500	6.7	900	12.0	30,000	500	6.6	
		㉘ポリイソブレン		2.5	1,000	13.2	450	5.9	15,000	480	6.3	
		㉙芳香族		42.5	1,000	0.78	4,800	3.7	160,000	500	0.39	
		㉚アルキルベンゼン		2.5	500	5.0						
		㉛無水フタル酸		3	1,000	11.0	750	8.2	25,000	220	2.4	
		㉜テレフタル酸		3	1,000	11.0	1,500	16.5	50,000	60	0.7	
		㉝DMT		10	1,500	5.0	1,500	5.0	50,000	1,440	4.8	
		ドライガス										
		㉞アンモニヤ		20	4,850	8.0	4,200	6.9	140,000	600	1.0	
		㉟メタノール		10	2,000	6.7	1,500	5.0	50,000	60	0.2	
計					62,950	-	116,850	-	3,878,100	48,670	-	

2-3 図 石油化学コンビナートの製品の流れと用水量, 排水量

註

1) 原料または製品名

◇ 装置を示す

①は原油からナフサ、重油等の石油製品を製造する石油精製装置であり、つぎのような装置群からなっている。常圧蒸留装置、ナフサ、灯油、軽油、水素化装置、接触改質装置、流動接触分解装置、減圧軽油水素化分解装置、常圧残油水素化脱硫装置、水素発生装置である。

したがって用水量、排水量はこの装置群を一括し、ナフサの欄に記した。

②はナフサからエチレン、プロピレン等を製造する装置、エチレン製造装置である。

2) 用水の欄の(補)は補修水量(循)は冷水塔の循環水量、排水はプロセス用水の排水、排水量の()は活性汚泥処理による稀釈水。

2-1表 工業用水の水源及び用途

業 種	水 源 万 m ³ / 日									用 途 万 m ³ / 日						
	淡 水								海 水	ボイラ 用 水	原 料 用 水	製 品 処 理 用 水		冷 却 水		温 調 用 水
	公 共 水 道		地 表 水	伏 流 水	井 戸 水	そ の 他	回 収 水	合 計				洗 浄 水				
	工 業 用 水 道	上 水 道										淡 水	海 水			
石 油 精 製 業	67.2 (23.7)	2.1 (0.8)	1.4 (0.5)	—	4.2 (1.5)	0.7 (0.2)	207.5 (73.3)	283.2 (100) 〈37〉	480.9 〈63〉	12.9 (4.6)	0.03 (0.01)	2.0 (0.7)	0.8 (0.2)	260.2 (94.3)	479.9 (99.8)	0.7 (0.2)
石 油 化 学 工 業	283.6 (10.9)	1.7 (0.6)	81.7 (3.2)	58.9 (2.3)	102.5 (3.9)	59.1 (2.2)	1969.8 (75.8)	2596.2 (100) 〈72〉	1003.5 〈28〉	50.0 (2.0)	2.1 (0.08)	104.8 (4.1)	17.2 (1.6)	2288.2 (88.1)	963.5 (97.4)	86.2 (0.3)
化 学 工 業 (石油化学工業 を除く)	91.9 (7.1)	48.7 (3.8)	118.4 (9.2)	21.8 (1.7)	150.8 (11.7)	11.3 (0.9)	392.5 (30.4)	1293 (100) 〈76〉	402.1 〈24〉	21.0 (1.6)	1.7 (0.13)	146.3 (1.3)	12.6 (1.0)	572.6 (44.2)	350.4 (87.2)	42.7 (3.2)
鉄 鋼 業	275.8 (13.1)	46.9 (2.2)	56.7 (2.7)	13.2 (0.6)	67.5 (3.3)	16.7 (0.8)	1625.8 (77.3)	2103.0 (100) 〈55〉	1714.6 〈45〉	14.7 (0.7)	— —	133.0 (6.4)	47.1 (2.7)	1847.1 (87.9)	1639.8 (95.6)	24.1 (1.2)
パ ル プ , 紙 紙 加 工 業	160.6 (11.6)	9.1 (0.7)	393.8 (28.6)	156.1 (11.3)	263.8 (19.1)	12.0 (0.9)	382.4 (27.8)	1378.1 (100) 〈99.4〉	8.9 〈0.6〉	32.2 (3.3)	— —	1170.6 (84.9)	1.7 (20.0)	97.1 (7.0)	6.3 (71.9)	11.3 (0.6)

- 註 1) 出所, 昭和46年度通産省「工業統計表」用地, 用水編より作成
 2) () 内数字はパーセント, 水源では淡水のみを示す。用途の場合は夫々淡水と海水に対する割合
 3) < > 内数字は淡水と海水の使用割合のパーセント
 4) 石油化学工業は統計表のうち, 「アンモニヤ系肥料製造業」「石油化学基製品製造業」「脂肪族系中間物製造業」
 「環式中間物, 合成染料, 有機顔料製造業」「プラスチック製造業」「合成ゴム製造業」「合成繊維製造業」の
 項を集計した。
 5) 原料用水は化学工業では, 淡水の他に海水が 27.6 万 m³ / 日 (6.7) である。

3. 石油精製と石油化学工業の用水

3-1 用途区分

石油精製や石油化学工業では、どのように水が使われているか、工業用水といわれているものを用途区分すると、一般に、次のように大別される。1) 冷却水 2) ボイラ用水 3) 洗浄水 4) プロセス水、洗浄水はプロセス水ともいっている。

これらの使用先をそれぞれ記す。

1) 冷却水

- 重合、酸化や水素添加のような有機合成反応時の発熱を除去し、反応を制御する場合に使用される。たとえば、ゴムや塩ビ等のポリマーを重合する場合の重合槽のまわりをジャケット、あるいは重合槽内にパイプを入れ、これに冷却水を通す。
- 蒸留塔のコンデンサー、製品の冷却の場合。蒸留塔の塔頂の蒸気を凝縮し、塔頂に還流する場合、コンデンサーや製品の冷却は一般に多管式の熱反応器を使用、これに冷却水を通す。
- クエンチ（急冷用） エチレンを製造するためナフサを熱分解した反応ガス、ホルムアルデヒドをメタノールから製造する時の反応ガス等は、反応ガス中の副生物の生成を制御するため、冷却水を直接吹きこみ急冷する。しかし、排水処理を容易にするために間接的に急冷する場合もある。
- ポンプ、コンプレッサー等の軸受部、ケースの冷却水に使用される。

2) ボイラ用水

自家発電用あるいはスチーム用のボイラ用水に使用される。スチームは、加熱、加温に使用され、たとえば、蒸留塔リボイラの熱源、反応器の熱源、配管等の加温のためのスチームトレース、また、水蒸気蒸留（スチームストリッピング）に使用される。その他、スチームは重油燃焼用バーナーのアトマイジング用、消火のためのスナッフイングスチーム（加熱炉用）、ページ用スチーム（蒸留塔、吸収塔、槽類の可燃物のページ用）、クリーニング用等の雑用スチームが主な使用先である。

3) 洗浄水

製品ガス中に副生する塩化水素、硫化水素、アンモニア、あるいは、ダスト、ミスト、ヒューム等の除去をするために、洗浄塔、吸収塔においてこれらガスを水と接触させる。塩化水素等の酸性ガスの除去にはアルカリ水を使用することが多い。液中の塩、酸類を除去する場合に、これらを水に溶解させることがある。

例をあげると、排煙中の亜硫酸ガス、硫化水素の除去、塩ビの原料になる二塩化エチレンの合成

時のオフガス中の塩化水素の除去にはアルカリ水が使用されている。また、原油中の塩類を除去するためには、原油と水を接触させるディソルター、EDC合成後の粗EDC中の副生塩酸の除去のためのアルカリ水の洗浄等は、油を水によって洗浄する例である。石油精製において、油中の塩化アンモン等の塩によって熱交換器のパイプ、配管が閉塞するために、配管中に水を注入して塩化アンモン等の塩を溶解させて除去するものも水洗浄の例である。このような製油所から排出する洗浄水の排水をサワーウォーターといっている。

4) プロセス水

一般に、石油化学工業の原料、反応媒体に使用される水をプロセス水という。ブタン、ナフサ等からスチームリホーミングによって水素を製造する時のスチームは、水が原料になる例である。エチレンからナフサを製造する時、生成するエチレン1トンに対し、2～3 m³のスチームを反応管に送入し、管内の炭素が析出を防止し、エチレンの収率をあげる。この場合、スチームは、管内では質的な変化を受けず一種の媒体の役割を果たし、生成ガスを急冷する時にそのまま凝縮する。その他、水が反応時の媒体となる例では、ポリマー製造時のエマルジョン、サスペンション重合の用水がある。これは、重合槽にてモノマーを乳化剤、触媒等といっしょに水中にエマルジョン、あるいはサスペンションにし、重合する方法である。この方法によって、重合反応が制御しやすく、生成するポリマーの品質もよくなる。この場合の水は反応の媒体の働きをなし、使用される水の量が排水となる。したがって、排水にはモノマー、乳化剤が含まれている。用水量は、塩化ビニール製造の場合、塩ビ1トン製造するのに約2.5～3.0 m³必要とされている。実際には、塩ビポリマー製造時、この他も合わせて約10 m³は使用される。それは、重合槽の内面にスケール（塩ビ重合物の付着）がつき、これを洗浄する水と、重合槽から塩ビモノマーをスラリー状にて送るために水が余分に必要とするためである。

3-2 水の特性と用途区分

さきに用途区分したコンビナートの水と水の特性を関連させると、次のような特徴によっている。

1) 熱容量が大

水は熱容量が大きいので、高温の物体から多量の熱を吸収する。すなわち、高温の物体の冷却水になる。また、熱を多量に吸収した水—熱水、スチームは低温の物体に熱を運搬する役割を果たす。つまり、水は冷却と加熱の媒体となる。

次に、水は多量の熱を温度一定のまま吸収し、蒸気になる。その蒸気は凝縮する時に多量の熱を温度一定のまま放出する。すなわち、水は蒸気になり、それが凝縮する時に等温度変化することができるために、多量の熱エネルギーを仕事のエネルギーに変える媒介の役割—作業流体になる。スチームタービン、スチームエジェクターのスチームがその作業流体の例である。

2) 溶解性

水は、いかなる物質でも、ごく少量は溶解する。水の物質をよく溶解する性質は溶媒として使用される。物質によっては溶解度に差があるため、よく溶解する物質だけを水に溶解させて分解除去する。すなわち、水は、洗浄、抽出用の溶媒になる。また、エマルジョン重合、サスペンション重合の溶媒として反応に使用、ホルマリン、アルコール、塗料等の溶媒として原料用水になる。

3) 化学的な特性

水は強酸化剤の酸素と強還元剤の水素からなっていることから、化学的に両方の働きをする。水性ガス反応などはその一例であり、この反応を利用してナフサ等から水素が製造される。このような水の化学的特性はプロセス水として使用される。

3-3 用水の性質

石油精製、石油化学工業の用水は、さきに述べた用水区分によって、一般に、同じ水質や水温が要求されているわけではない。節水、再利用を考慮すれば、それぞれの用水の性質は、水の性質に従って検討する必要がある。

1) 冷却水

冷却水は、高温の物体より熱を吸収する役割を果たすため、水質より水温が必要条件である。したがって、冷却水には、取水が容易で安価なため淡水ではなく海水が使用されている例が多い。海水を冷却水に用いる場合の問題点は、冷却器の材質にある。炭素鋼を使用した場合、海水出口温度が50℃を越えると、冷却器の腐蝕が著しくなる。そのために冷却水の出口温度を下げるか、冷却器の材質を銅・アルミニウム合金にする。冷却水出口温度を低くすると、海水の使用量が多くなる。また、近年、海水の汚れがひどくなり、遠方から取水しなければならなくなって費用がかかるようになって、海水を冷却水に使用するメリットが失われてきた。しかし、2-1図と2-2図に示すように、石油精製と石油化学工業に海水の使用量の多いのは、冷却水として使用するためである。

冷却水に地下水を使用する場合のメリットは、低温である点と冷却器の材質が安価になることの二点である。後者の、材質が安価になる点は、通常の工業用水（淡水）でも同様である。

地下水、工業用水（淡水）を冷却水に使用する場合、その水質によって冷却器の伝熱管が汚れ、伝熱管に余裕をとる必要がある。しかし、実際には、伝熱管の余裕すなわち冷却水による汚れ係数、（他の係数と総括伝熱係数にくくられている）は、温度差に比べて、冷却器の伝熱管の算出に影響は少ない。

2) ボイラ用水

ボイラ用水は、スチームの圧力、温度は、ボイラの形式によって決まる。直接には用水の性質とスチームは関係がない。しかし、ボイラ用水には、PH、硬度等によってボイラの腐蝕、スケール生成のために水質の制約がある。ボイラ用水の水質の標準値は、3-1表に示すことができる。高

3-1 表 ボイラ用水の水質

項目 用途	濁度 〔mg/ℓ〕	色度 〔度〕	pH	KMnO ₄ 消費量 〔mg/ℓ〕	蒸発残 留物 〔mg/ℓ〕	全硬度 〔mg/ℓ〕	鉄 〔mg/ℓ〕	マンガン 〔mg/ℓ〕	塩素 〔mg/ℓ〕
ボイラ補給用水	0.5	—	—	—	—	5.0	—	—	25.0
	1.0	2.0	~11.5	3.0	(500)	1.0	0.5	—	—

出 所 用水排水使質 p 65

庄のスチームを発するボイラは、とくにスケールの発生を防止するために水処理（イオン交換による純水製造）を行う。

3) 洗浄水

洗浄水は、水の溶解性を利用しているので、溶解する物質の濃度差があれば、使用する水質に制約はないことになる。たとえば排ガスの塩酸ガスを洗浄し、その塩酸を廃酸とするようなときには、他の物質（鉄分等）が洗浄水に含まれていても、塩酸を溶解させるうえにはさしつかえない。しかし、塩酸を回収再利用するときには、洗浄水中の他の物質（鉄分等）が回収塩酸の品質（着色）を低下させるために、水質の制約がある。一般に、石油精製、石油化学工業に使用される洗浄水の水質は、プロセスの使用先によって異なる。

4) プロセス水

プロセス水は、一般に、製品原料になったり、原料、製品に接するために、水の不純物が製品に影響するので水質には制約がある。たとえば、ポリマーのサスペンション、またはエマルジョン重合のプロセス水は、生成するポリマーが水中のppmの不純物によって着色したり、あるいは重合が阻害されるために、工業用水をイオン交換樹脂によって脱イオン処理された水が使用される。必ずしもプロセス水の水質は純水でなくてもよい。たとえば、さきにあげたエチレン製造の熱分解反応に使用するプロセス水（希釈スチーム）は少量のフェノール、ガソリン等の軽質油を含有したような水でもよい。つまり、熱分解に使用されるプロセス水の水質にあまり制約がないから排水を再循環使用することができる。

このように、プロセス水の水質も各プロセスによって、水質は一定ではない。が、一般には水質の制約がある。通常の工業用水要望標準水質は、3-2表に示される。

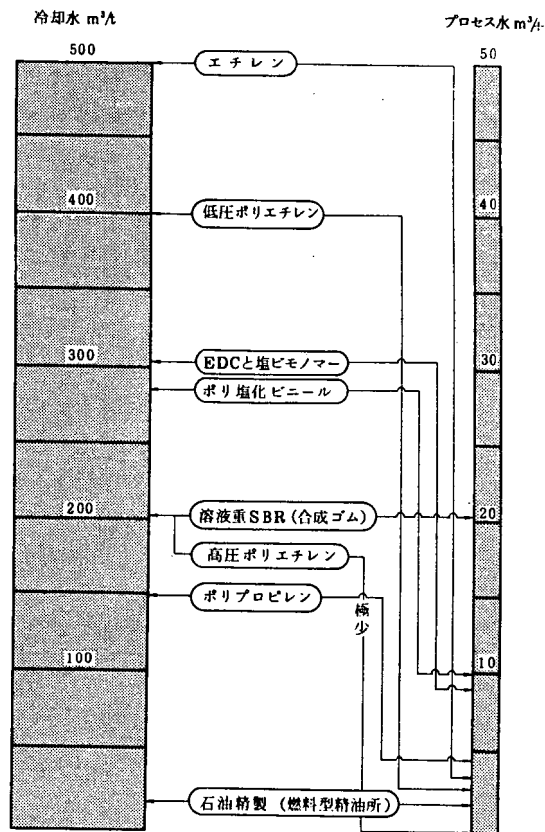
3-4 用 水 量

石油精製、石油化学工業の主な製造プロセスの製品トンあたりの冷却水とプロセス水とスチーム量を記すと3-1図のように示すことができる。プロセス水は、冷却水の $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ である。プロセス水は、さきのエチレン製造の例のように、スチームの形態をとっている場合もある。コンビナート全体の排水量は2-3図に示した。

3-2表 業種別、用途別工業用水要望標準水質

業 種	用 途 別	濁度 ppm	pH -log H	アルカリ度 CaCO ₃ ppm	硬 度 CaCO ₃ ppm	蒸発残留物 ppm	塩素イオン Cl ⁻ ppm	鉄 Fe ppm	マンガン Mn ppm
化 学 工 業	冷 却 用	20	7	50	50	200	80	0.1	0.05
	洗 浄 用	10	7	50	50	80	20	0.1	0.05
	原 料 用	10	7	40	40	70	10	0.1	0.05
	温湿調整用	15	7	70	60	130	20	0.1	0.05
	製品処理用	10	7	50	50	100	15	0.1	0.05
石油製品、石 炭製品製増業	冷 却 用	30	7	40	50	200	10	0.1	0.05
	洗 浄 用	6	7	40	50	200	5	0.05	0.01
	原 料 用	6	7	40	50	150	5	0.05	0.01
	温湿調整用	6	7	90	80	200	5	0.1	0.01
	製品処理用	1	7	50	50	100	5	0.05	0.01

出 所 井上源之助 前掲誌



3-1図 用水量
生産量(+)あたりの冷却水、プロセス水の用水量 (m³)

4. 石油精製と石油化学工業における排水

4-1 用水と排水

石油精製，石油化学工業における用水がどのような過程を経て排水に変化するか，排水の性状はいかになっているかを，ここで述べたい。排水を再利用できるかどうかを検討するためにも，排水が，いかなる物質によって汚染されているかを知る必要があろう。

<冷却水>

石油精製，石油化学工業からの冷却水は，通常，40～50℃の温水となって排出される。汚染物質がその中に混入することはない。なぜならば，通常，多管式の冷却器が使用されていて，冷却水と冷却する物質が直接に触れることがないからである。しかし，このような間接方式の冷却器であっても，冷却器の管が損傷して，そこから冷却水に冷却すべき物質が混入することがある。

ガスなどを冷却するために，直接ガス中に水を噴霧するような場合がある。当然，ガス中の可溶性の酸，アンモニア，シアン，ミスト状の油，タール，カーボン等が排水に混入する。高温のガスを急冷（クエンチ）する場合も同様である。

エジェクターの作動用のスチームの凝縮器は，冷却水と直接に接触する方式の場合，スチームに伴伴するミスト，揮発性分が冷却水に混入する。石油精製の減圧蒸留装置における「白水」といわれる排水は，エジェクターの凝縮器からの排水であって，スチーム中の油分がエマルジョン化し，白濁しているためにこのような名称で呼ばれている。

ポンプ，コンプレッサー，攪拌機等の冷却水には，たいてい，ポンプ内の流体，あるいは潤滑油によって汚染される。

冷却塔に使用される冷却水は，約2～3%のブロー排水がある。これには一般に，水処理剤の6価のクロームが混入している。

<ボイラの用水>

ボイラ用水のブロー水は，さきの図に示された性状である。汚染されていない。

<洗浄水とプロセス水>

洗浄水及びプロセス水は，水の溶解性を利用しているから，当然，使用光の物質をも溶解している。石油精製，石油化学工業の排水は，とくに油分・炭化水素，有機物質を溶解している。しかも，排水に可溶している有機物は，BOD値が低くCOD値高い場合が多い。BOD値が低いのは，排水中には生物に分解されない物質が含まれていることであり，石油精製や石油化学工業の排水中に有機物が可溶していないことではない。たとえば，有機化学ではごくありふれた物質のベンゼン，トルエンは，生物では分解されずBOD値によってはほとんど標示できないほどの小さな値を示す。また，化学的に安定な物質で，COD値に標示できない物質，たとえば，塩ビモノマーなどが存在する。しかも，これらの物質は排水中に意外に溶解している。たとえば，ベンゼン，トルエン類は，

常温で平衡溶度が約 2,000 ppm である。用水と排水を水の特性にて関連づけると 4-1 表にまとめることができる。

4-1 表 水の特性と用水、排水（石油精製、石油化学工業）

水の特性	水の役割と操作	用水の区分と使用例	用水の水質と水温	排水の状態
熱容量大	冷却媒体	冷却水（多管式熱交換器、ジャケット、サーフェスコンデンサー、ポンプ、コンプレッサー等の軸受冷却、クエンチ塔、冷水塔	水質より水温に制約あり。	温度が上昇汚染の例は4-2表を参照のこと。
	加熱媒体	温水 加熱用スチーム	ボイラ用水は水質に制約あり。	
	作業流体	ボイラ用水（発電タービンスチームエジェクター）		
溶解性大	溶媒（洗浄水排出）	洗浄水 プロセス水 （スチーム蒸留、エマルジョン重合等）	水質は使用目的によって異なる。 洗浄水は水質にはじがある。	
化学的特性	原料水、加水分解	原料（水性ガス等） プロセス水	水質の制約がある。	

4-2 排水処理技術

石油精製、石油化学工業からの排水は、工場に入ってきた時と同じ状態までに汚染物質が除去されるならば、排水は放流せずに再び使用できる。

しかし、現状の排水処理は水質基準まで処理し、放流している。排水中の汚染物質の除去は、技術的な可否よりも処理コストと水質基準の規制値によって、汚染物質の除去の限度は決められている。

排水の水質基準は、環境基準に定められた数値にさらに住民との協定による数値に従う例が多い。

汚染防止の技術を表記すると 4-4 表に示すことができる。ここで、石油精製、石油化学工業における、一般的な排水処理法について述べよう。

まず、排水中の s s 分、油分の除去には、油水分離、浮上分離、砂ろ過が用いられる。

油水分離は排水中の油と水を比重差にて分離する方法であり、分離槽の中に排水を一定時間静置滞留させ、油を水面上に浮上させる。この方法によると、排水中の 100～200 ppm の油分を 10～15 ppm まで除去できる。もちろん、エマルジョン化した油、水に溶解した油は除去できない。

浮上分離法は、導管の排水に加圧した空気を吹きこみ、これを分離槽に導き排水中に気泡を発生させる。この気泡に、排水中の油分、s s 分を付着、浮上させる。除去される油分、s s 分、その他可溶性の有機物をフロック化させることが多い。排水中の油分、s s 分は 5～8 ppm まで除去できる。

高速砂ろ過は、ろ過槽に比重の異なる砂プラスチックろ材を充填して、ss分を除去する。排水の入側上部のろ材の砂径は大きくしてあり、ss分の目づまりを防止している。さらに、ろ材に付着したss分の除去のために逆洗しても比重の違いによって径の大きな砂はろ過層の上部にくるようにしてある。

油水分離、浮上分離、高速砂ろ過だけで石油精製、石油化学工業の排水が処理されている例が、まだ多い。が、規制によっては、次に述べる生物処理、活性炭処理を採用する工場の例が次第に多くなっている。

排水の生物処理は、主にBOD除去、活性炭処理は、主にCOD除去、活性炭処理は、主にCOD除去に有効である。しかし、排水中のBOD、CODが減少しても、排水の溶存有機物が必ずしも除去されているわけではない。前述したように、有機塩素化合物のようにBOD、CODによつての標示が困難な物質が、石油化学工業の排水には含有していることがあるためである。もちろん、生物処理、活性炭処理によって石油精製、石油化学工業からの排水中の汚染物のすべてが除去されることはない。が、さきに述べた油水分離、浮上分離、凝集分離、高速砂ろ過によって、排水を前処理し、生物処理→活性炭処理を行うとBODを10 ppm、CODを10 ppm以下にすることができる。

石油精製、石油化学工業の排水の生物処理は、排水中の溶存有機物を微生物によって炭酸ガスと水等に分解させる方法である。散布ろ床と活性汚泥処理法があるが、石油精製、石油化学工業の排水処理には、活性汚泥処理の方法が一般に採用されている。活性汚泥法は、排水を曝気槽に入れ、そこに空気を吹きこみ（酸素の場合もある）、好気性のバクテリア等の微生物を繁殖させ、これによって溶存有機物質を分解させる。この時、生じた活性汚泥のフロックには一部の排水中の油分、溶存有機物質が付着分離する。フロックは濃縮槽に送られて沈降し、処理水と分解される。

活性汚泥法によって処理できる排水は、BOD値が1,000 ppm以下、通常はBOD値が、200 ~ 300 ppm、COD_{cr} 値30 ~ 50 ppm であることが好ましい。処理の対称になる石油化学工業の排水は、BOD、COD値が2,000 ~ 10,000 ppm と高く、COD値はBOD値より高いことが多い。

（石油精製の排水はBOD値が50 ~ 80、COD_{cr} 値が40 ~ 60である）そして、排水中には、微生物に毒性のあるシアン、フェノール、微生物の働きによって分解し、その働きを阻害する物質、たとえば、ニトリルからのアンモニア、アルデヒドからの酸が生ずる。また、ベンゼン、トルエン、有機塩化物のように、微生物では分解の困難な物質も排水に含有することが多い。したがって、高濃度のBOD、CODの排水微生物の毒物、阻害物を含有する排水を活性汚泥にて処理するには、排水を低濃度にし、活性汚泥生物にて処理すること。すなわち、希釈する必要がある。冷却水の排水によって3 ~ 8 倍に、石油化学工業のプロセス排水を希釈する例はよくある。つまり、排水処理に活性汚泥法を採用すると、その排水処理のために水が必要になる。排水の水質が濃度規制であるために、排水口にて冷却水により希釈するばかりか、排水処理の希釈にも使用されていることを注意しておきたい。

そのほかに、石油精製、石油化学工業への活性汚泥法の問題点は、排水のBOD値がCOD値より低いために、メタノール、エステル類を補給してBOD値を高め、しかも栄養バランス（ $BOD=N=P=150\sim200=5=6$ と微量無機塩）を保つこと、排水量の変化、毒物等の濃度変化を一定にすることが管理上重要である。

活性炭による排水処理は、活性炭の細孔に排水中の溶存有機物を物理吸着させるのである。飽和吸着した活性炭、つまり細孔を閉塞させている有機物等は、再生炉で熱分解して除去する。すなわち、活性炭を再生して再び使用する。活性炭によって排水を処理するには、吸着塔と再生炉と、吸着塔に排水を通水する前に、排水中のコロイド状物、ss分等を除去する前処理が必要である。前処理は、前述した油水分離、浮上分離、高速砂ろ過が用いられる。

排水中の、極性のあるカーボン数の小さな有機物—ピリジン、メタノール、アミン等は、活性炭に吸着しづらい。排水の性状によっては活性炭による排水処理が不適当な場合がある。

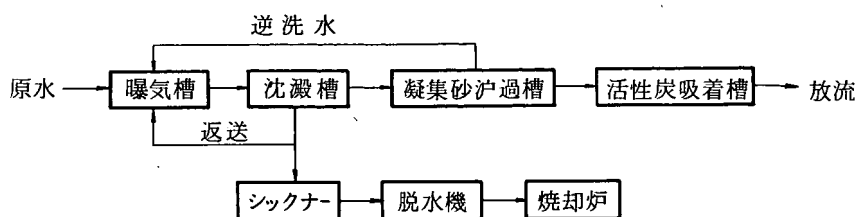
飽和吸着した活性炭は、さきに述べたように、再生炉にて加熱（約 $900\sim1,000^{\circ}\text{C}$ ）し、細孔に吸着した有機物を熱分解、ガス化して除去する。そして再び活性炭は使用する。

活性炭に吸着しづらいメタノール、グリコール等は、活性汚泥法による生物的分解が容易である。すなわち、石油化学工業の排水中の溶存有機物は、活性炭と活性汚泥法による処理のしやすさに逆な場合がある。したがって、石油化学工業の排水は、活性汚泥法によって処理し、さらに活性炭によって処理する。この両方を併用するほうがよい。

4-3表と4-1図は、石油化学工業の排水に、活性汚泥法と活性炭を適用した例である。

4-2表 石油精製、石油化学工業の排水

工場の操作	汚 染 の 例
冷却水 (冷却媒体)	○ 分解ガスの直接冷却、クエンチ素、シアン等も含有 ○ 間接冷却器のチューブの破損、チューブ内の液による汚染 ○ ポンプ等の冷却水油等の混入 排水中に、ガス中のタールダスト、硫化水
ボイラー用水 (加熱媒体、作業流体)	○ スチームエジェクターエジェクターのスチームの凝縮水に揮発性の炭化水素が混入
洗浄水 (溶媒)	○ ガス中の硫化水素、塩酸等の洗浄 ○ 液中の塩酸等の水洗、デソルター排水、サクウオーター ○ 集じん水
プロセス水 原料水 (化学反応 溶媒、電気 分解)	○ サスペンション、エマルジョン重合の溶媒 触媒、乳化剤、プラスチックモノマー等を混入 ○ スチームストリッピングのスチームの凝縮水 炭化水素類を溶解 ○ ナフサ熱分解時の希釈スチームの凝縮水 カーボン、フェノール、炭化水素を含有
漏れ (損失)	○ ポンプ、攪拌機の軸、バルブのスラム、フランジから漏洩 ○ 操作ミス



4-1 図 エチレン製造工場の排水処理例

4-3 表 原水および処理水水質

	原 水	処 理 水
COD (ppm)	80	< 10
フェノール "	5	< 0.5
油 分 "	6	< 1
SS "	30	< 5
温 度 °C	20 ~ 30	常 温
pH	6 ~ 8	6 ~ 8

出 所 沼崎浩一

合成化学協会誌 32 巻 12 号 (1974)

上記のエチレン製造工場 (B T X 抽あり)
の排水処理の例では排水処理のコストはつぎ
のようになる (排水量 50 m³/時の規模)

活性汚泥処理 60 ¥ ~ 80 ¥ / m³

活性炭処理 (再生を含む) 100 ¥ ~ 120 ¥ / m³

160 ¥ ~ 200 ¥ / m³

以上述べてきた、石油精製と石油化学工業の排水の処理法は、それぞれの排水に、それぞれの方法が組合せられて一つの水処理のシステムが行われる。上記の例に示されるように処理費用が多くかかり、複雑な物質を含有するプロセス水を再び使用できるまでには経済的に困難である。

石油化学工業からの排水による汚染防止には、排水を排出しないようにする汚染物を抑制する技術がある。汚染防止の技を表記すると 4-4 表に示すことができる。水処理技術のわが国の普及状況は 4-5 表に示す。

4-4 表 汚染源と汚染防止技術

汚 染 源 の 工 場 操 作	汚 染 防 止 技 術	
	汚 染 物 質 の 抑 制	汚 染 物 質 の 処 理
冷 却 水	○ 直接冷却 → 間接冷却 ○ 冷水塔、空冷熱交の使用	○ ポンプ冷却水等の汚染冷却水の分別 ○ 冷却塔循環水中の水処理剤をイオン交換にて除去
ボイラ用水	○ スチームのコンデンセートの回収 - 節水	ボイラ用水処理装置から酸性液の中和
洗 浄 水 プロセス水	○ 水を使用しないプロセス ○ 排水の再循環、再使用 ○ 有害物を使用しない。 ○ 排出物中の汚染物質を処理しやすい形態にする	○ プロセスによって処理法は異なる高濃度の汚染物質の処理は、燃焼・湿式酸化。蒸留、抽出による流回収、蒸発による固体塩の回収 ○ 低濃度の汚染物質処理はオゾン酸化。沉降分離等の一次処理後、生物処理、活性炭吸着によって汚染物を除去

4-5 表 水処理装置の普及状況（カッコ内は普及率％）

	回答事業所	凝集沈殿	活性汚泥	ろ 過	固液分離	油水分離	沈 殿 槽	沈 殿 池	逆浸透析	電気透析	オゾン処理
食料品	184	19 (12.8)	66 (44.6)	65 (43.9)	31 (20.9)	16 (10.8)	15 (10.1)	28 (18.9)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
織 維	257	53 (20.6)	17 (6.6)	50 (19.5)	32 (12.5)	3 (1.2)	9 (3.5)	15 (5.8)	0 (-)	0 (-)	1 (0.4)
パルプ・紙・紙加工	215	157 (73.0)	12 (5.6)	77 (35.8)	48 (22.3)	0 (-)	19 (8.8)	76 (35.3)	1 (0.5)	0 (-)	0 (-)
化 学	348	120 (34.5)	112 (32.2)	146 (41.9)	99 (28.4)	86 (24.7)	51 (14.7)	23 (6.6)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
石油・石炭製品	49	18 (36.7)	17 (34.7)	27 (55.1)	7 (14.3)	125 (255.1)	1 (2.0)	16 (32.7)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
ゴム製品	20	4 (20.0)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	11 (55.0)	2 (10.0)	1 (5.0)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
窯業・土石製品	70	23 (32.9)	1 (1.4)	18 (25.7)	11 (15.7)	8 (11.4)	24 (34.3)	5 (7.1)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
鉄 鋼	124	106 (85.0)	6 (4.8)	8 (6.4)	31 (25.0)	23 (18.5)	63 (50.8)	8 (6.4)	1 (0.1)	1 (0.1)	0 (-)
非鉄金属	70	25 (35.7)	6 (8.6)	26 (37.1)	18 (25.7)	19 (27.1)	2 (2.9)	5 (7.1)	2 (2.9)	0 (-)	0 (-)
金属製品	22	16 (72.7)	0 (-)	6 (27.3)	6 (27.3)	4 (18.2)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
一般機械器具	29	23 (79.3)	1 (3.5)	9 (31.0)	8 (27.6)	9 (31.0)	1 (3.5)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
電気機器	60	57 (95.0)	8 (13.3)	32 (53.3)	25 (41.6)	8 (13.3)	8 (13.3)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)
輸送機器	60	64 (95.5)	27 (40.3)	40 (59.7)	14 (20.9)	17 (25.4)	6 (9.0)	0 (-)	0 (-)	0 (-)	0 (-)

出 所 日経産業新聞 7/18 '74

通産省が1日当たり水使用量3,000トン以上の事業所2,285を工業用水の循環使用を促進するために調査を行った。そのうち、回答があったのは66.7%である。

5. 石油精製，石油化学工業における節水

5-1 節水の方法

石油精製，石油化学工業の水不足に対処する方法に節水がある。節水の方法は，次の二つの方法がとられる。

- 1) 水を使用しないプロセスの採用，操作上の用水を減少させる。^①
- 2) 排水の再利用。

まず第一の方法から説明しよう。

冷却水に水を使用しない方法は，管内の流体に外部からファンで空気を送風して冷却する。流体の出口温度と空気との温度差が小さいと設備費が大きくなる。したがって，油蒸気のコンデンサーのように流体の出口温度が70～80℃でよい時，常温の空気との温度差があるため，空冷熱交が使用される。もし，常温まで冷却する場合は，空冷熱交の次に，冷却水による冷却器を必要とする。^②

ボイラ用水，洗浄水に水を使用しないことは実際上ありえない。が，ボイラ用水でスチームトラップをつけ，ドレンを回収する。^③ 排水ガスを洗浄水にて洗浄する時，ガスの出口側の段を新鮮な水で洗浄し，ガスの入口側の段はその水を循環使用するという節水の方法がとられる。

プロセス水を使用しない例としては，たとえば，塩ビのサスペンション重合では，サスペンションするために水がどうしても必要であるが，塊状重合ならば水を必要としない。すでにフランスのサンゴバン社では，この方法によって塩ビが重合されている。

次に，第二の節水の方法として，排水の再利用を述べる。再利用の方法には，リサイクル方式とカスケード方式がある。リサイクル方式とは，装置にそれぞれの目的に使用された排水をまた，その目的に添うように再生装置処理し，5-2図のようなリサイクルの回路をとる方式である。カスケード方式は，Aなる装置で使用した排水をBなる装置の用水に転用する方式である。

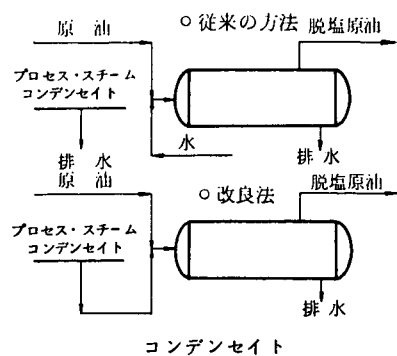
5-2図でも示されたように，用水が装置を経る過程において，プロセス水，洗浄水では汚染物質が，冷却水では熱が負荷されて排水となる。したがって，排水をリサイクルする再生装置は，負荷された汚染物質を除去する排水処理装置と熱を除去する冷水塔を意味する。排水をカスケード方式に転用する場合も，やはり，A装置にて負荷された排水中の汚染物を除去し，B装置に転用するための排水処理装置を要することもある。

用水を減少させるには，用水の用途を考慮してリサイクル，カスケードの再使用の方式を組合せ，初め15単位使用していた水を1単位にすることが可能であるとの報告がある。5-3図は，それを示す。

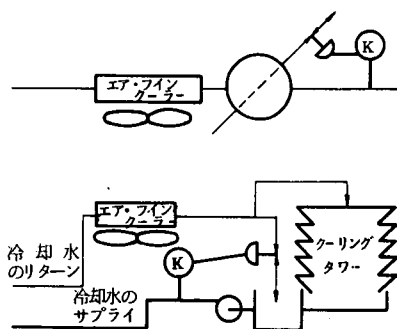
5-2 節水の実例

石油精製，石油化学工業において，前述した排水のリサイクルとカスケード方式による節水の方法

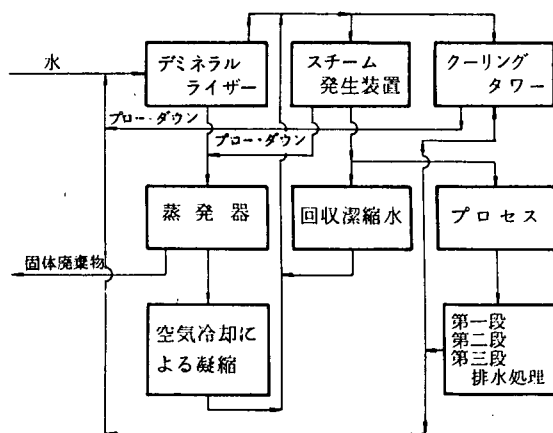
5-1 図は製油所における排水を少なくすることによる節水の例である。



装置内掃除法



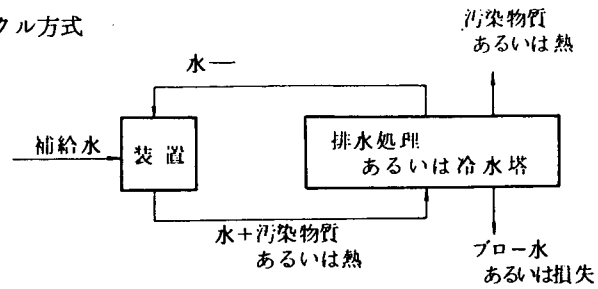
クーリングタワー



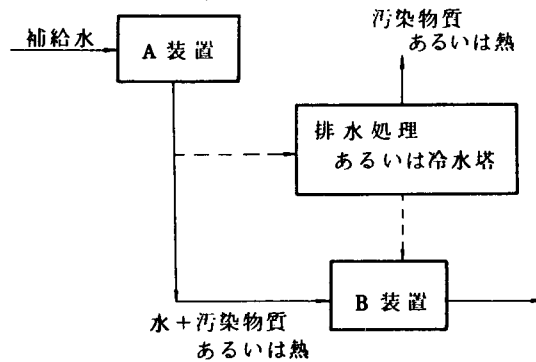
将来の排水システム

5-1 図 製油所の排水を少なくする方法 (節水)

① リサイクル方式

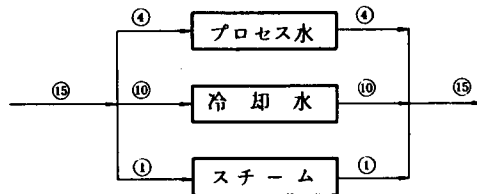


② カスケード方式

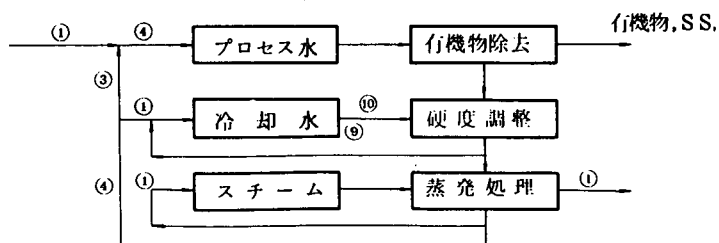


5 - 2 図 節 水 の 方 式

a. 一過年の用水



b. 循環使用



5 - 3 図

○は水量を示す

が、いかに実施されているかを述べる。

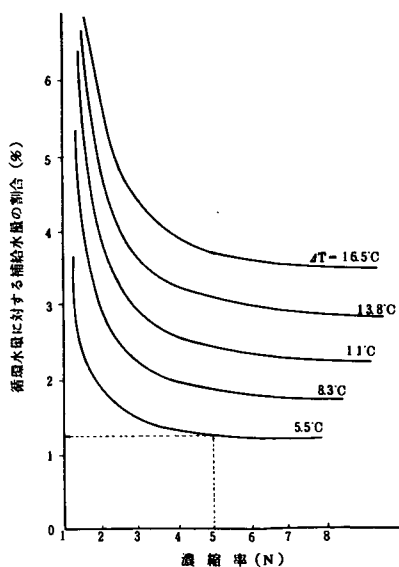
1) 冷却水の再使用

冷却器（コンデンサー、熱交換器等）から排出する冷却水を使用するには、負荷された熱を冷水塔にて除去し、再循環する。冷水塔では、加温された冷却水を空気と接触させ、その時、水を蒸発させ、蒸発潜熱によって熱の除去、すなわち、冷却される（水から空気への顕熱の移動による冷却もある）。したがって、冷却塔にて水の温度が低下すると、その分だけ水は大気に蒸発される。約 5.5℃ の低下によって、約 1% の水が大気に蒸発する。

また、冷水塔にて水と空気を接触させる時に、水が飛散する（飛散損失という）。その量は、冷水塔の構造で異なる。通常の強制通風型の冷水塔では、循環水の 0.1%～3%、自然通風型では 0.3%～1%、スプレーポンドでは 1～5% である。

冷水塔の循環水は蒸発すると、循環水中の不溶性の塩類が濃縮し、それによって冷却器のスケール障害、腐蝕の原因をつくる。また、水の栄養分が高くなって、循環水に細菌、藻などの繁殖によるスライムが発生する。このようなことを防止するために、重クロム酸、磷酸などの処理薬剤を投入する。循環水の濃縮を防止するため、その一部をブローする。ブロー水の量は、循環水の濃縮率によって決まる。通常の循環水の濃縮率は 2～3 であり、薬剤等を入れて 5～8 の高濃縮運転も行われる。（濃縮率は、循環水の固形溶解分に対する補給水の溶解固形分の比、濃縮率 = N 、 E = 冷水塔の蒸発損失 $[\text{m}^3/\text{H}]$ 、循環水量に対する%) B = 飛散損失 + ブロー水 $[\text{m}^3/\text{H}]$ 、または%) とする $N = \frac{E+B}{B}$ になる) ブロー水量は、濃縮率 5 の時循環水の 0.3%～0.5% である。

蒸発損失を温度 5.5℃ の時 1%、飛散損失量 0.2% とした場合、濃縮率と循環水量と補給水量の割合は 5-4 図に示される。濃縮率を 5、温度差を約 10℃ とした時、5-4 図からわかるように 2.5% となる。一般に、石油精製、石油化学工業に使用されている冷水塔の補給水量は、循環水 2～5% である。つまり、冷却器に冷却水を一過式（一回限りの使用）に通水する場合に比較して、必要とする冷却水（補給水）は 2～5% 減少する。また、冷水塔を使用した時の排水量は、一過式の排水量の 0.3～0.5% 減少する。この排水をさらにスライム、その他の ss 分をろ過してクローム等をイオン交換等によって除去すると、冷却水の補給水として使用することが可能である。このようにす



5-4 図 冷水塔の補給水と濃縮率
(蒸発損失 1%, 温度差 5.5℃)
(飛散損失 0.2%)

れば全体の補給水量は、さらに減少する。

40万トンエチレン製造装置の冷却水に、冷却塔を使用した時の水収支を5-5図に示す。一過式では59~60万 $\text{m}^3/\text{日}$ を必要とした冷却水が1.6~3.3万 m^3 に減少する。

2) 洗浄排水、プロセス排水の再使用

前述したように、洗浄水とプロセス水は、水質に制約があるが、使用先によってある

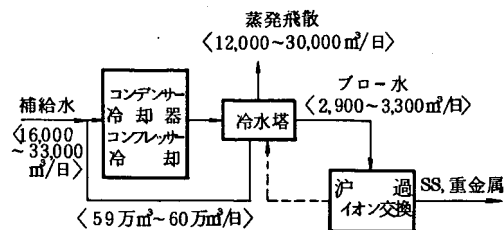
程度の許容される範囲がある。また、これらの排水は、一般に、各種の汚染物を溶解し、これを除去するための排水処理技術は、現状では、溶存している汚染物質のすべてを除去するのが困難である。したがって、洗浄水、プロセス水の排水を再使用するには、用水の水質の制約と排水処理技術の限界によって、排水を再使用できる範囲がおのずと限られてくる。次に示される例のように、主として水の溶解性を利用した洗浄水に使用され、しかも、再使用の方式はカスケードのパターンになる。

3) 石油精製排水（サワーウォーター）の再使用

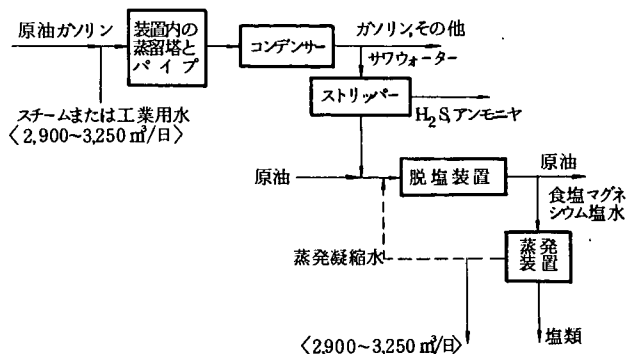
さきの排水の項で説明したように、石油精製の常圧蒸留、水添脱硫装置から、サワーウォーターといわれる洗浄水が排出する。サワーウォーターは、10~50 ppmの油分と、300~25,000 ppmのアンモニア、硫化水素を含有している。排水中のアンモニア、硫化水素は蒸留塔にて、塔頂から追い出し、20~30 ppmのアンモニア、硫化水素の排出として塔底から抜き出す。この排水を、一般には、活性汚泥法、活性炭処理を行い放流する。この処理をせずに、脱塩装置の洗浄水に再使用することは可能である。

脱塩装置とは、常圧蒸留装置に供給する原油中の食塩や塩化マグネシウム等の塩類を除去するために、原油中に水を混入させて塩類を溶解させる。これを高圧電場中にて静置し、エマルジョン化した油水を分離するプロセスである。脱塩用の洗浄水は、原油中の塩類が溶解すればよいのであるから、アンモニア、硫化水素が少々残っていてもかまわない。

サワーウォーターと脱塩のための用水量は、前者が、水添装置等にて処理する油の量の3~5%であり、後者は、原油処理量の5~10%であるから、その量はほぼ同じである。30万バレル/日の燃料油型の精油所を例にとって、サワーウォーターを再使用する水収支をとると、5-6図のように示すことができる。この方式をとると、製油所に使用されるプロセス水は半分に減少する。もちろん、排水量も半分となる。脱塩装置からの排水には、油分と塩類が含有されており、塩類の除去は、活性汚泥、活性炭によっては除去できないので、水を蒸発させて塩を析出する方法をとると、排水は再び使用できる回路がとれる。すると、用水量はさらに減少するので、損失分だけの水を補給すればよい。^④



5-5図 冷却水冷却塔使用の例
<> 40万トンエチレンの場合



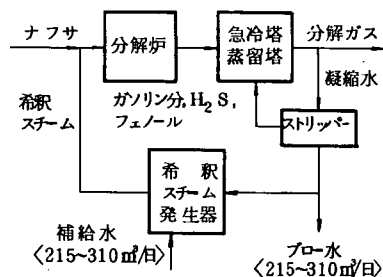
5-6 図 石油精製におけるサワーウォーターの再利用
 < > 30 万バレル / 日の場合

4) エチレン希釈スチーム排水の再利用

ナフサを分解してエチレンを製造する時の反応管に、ナフサとほぼ同量のスチームを吹きこむ。このスチームが生成ガスを分離後、凝縮水になることは前述した。この凝縮水には、生成ガス中のガソリン等の油分 (10~300 ppm), フェノール (1~50 ppm), ss 分 (5~100 ppm) を含有し、これを排水処理設備において処理していた。しかし、この排水を蒸留塔 (ストリッパー) にて排水中のガソリン分、フェノール等を追い出し (フェノールはナフサを排水に混入して抽出する方法もとられる) て、これを加熱してスチームを反応管に送る。希釈スチームの排水には、5-7 図に示すようになりサイクルの回路ができる。排水を循環すると、排水中の塩類、カーボン等の ss 分が濃縮する。それを防止するために、循環水の約 8~10% はブローする。この方式によると、エチレン製造に必要なプロセス水は、従来法の 10% に減少する。^⑤

反応に必要なスチームの凝縮排水を、このように循環使用する例は、エチルベンゼンを脱水素してスチレンモノマーを製造する場合にも見ることができる。エチルベンゼンの脱水素する反応塔に吹きこむスチーム

は、凝縮排水をストリッパーにて軽質油分を追い出し、スチーム発生器に送って再使用する。^⑥



5-7 図 ナフサ熱分解希釈スチームの例 — < > 40 万バレルの場合

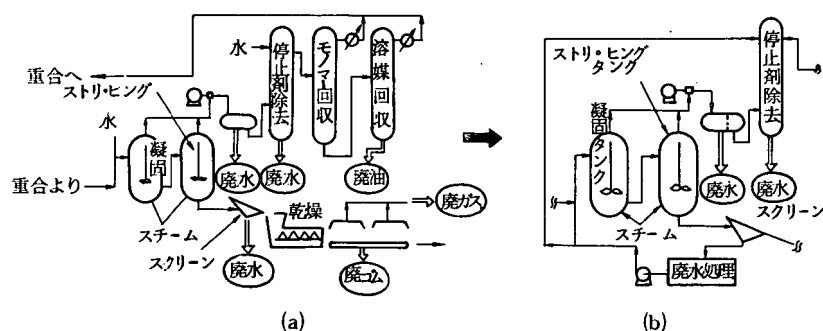
5) ポリマー製造のプロセス排水の再利用

ポリマー製造プロセスからの排水を再利用した実例が報告されている。

その報告によれば、「モノマーを液重合するポリマー製造装置からの排水」としてある。具体的には、合成ゴムの製造と考えられるので、合成ゴムの重合プロセスとして説明する。

ブタジンを触媒とともにベンゼンの溶媒の中で重合させると粘稠な溶液ができる。この溶液を、

スチームが吹きこまれている温水の中に注入すると、ゴムの小片が凝固する。その時、未反応のブタジェンとベンゼンは、急激に蒸発し、吹きこまれるスチームによって追い出される（ストリップングする）。排水は、ブタジェンとベンゼンがストリップングする時に同伴するスチームの凝縮水、低沸点のアルコールの重合防止剤を除去する洗浄排水、凝固したゴムを分離した凝固用水の排水、乾燥工程、触媒洗浄の排水である。これらの排水は、5-8図の(a)のように示される。同図の(b)はこの排水を浮上分離等の簡単な装置を取り付けて、再び凝固用、重合停止剤の除去の洗浄水にリサイクル使用した例を示す。^⑦



5-8図 ポリマー工場のプロセス排水の再利用

この方法によって、日本ゼオン徳山工場では、ポリマー1トンあたりの排水量を31.2 m³から0.2 m³まで減少しえたことを5-1表は示している。このような例は、当然、用水量の減少をも意味する。

5-1表 ポリマーのプロセス排水量の減少例

対 策 (年 月)	初 期 (1965. 1)	対 策 A (1973. 1)	対 策 B (1973.11)	対 策 C (1974. 2)
排水量 m ³ /t	36.2	17.0	8.8	0.2

A：主としてポリマーの生産性アップ

B：主として凝固用排水の循環利用

C：主として触媒洗浄排水の循環利用および乾燥工程排水の循環利用

6) エチレン製造、石油精製の用水と排水量・過年と再循環の場合の比較

5-2表はエチレン製造、石油精製の用水と再使用の用水量を示す。

5-2表 エチレン製造、石油精製の用水と排水量と再使用の場合

	用水の 区分	用水（一過式）	用水（再循環使用）	排水 （再循環使用の場合）	
エチレン 製造装置	冷却水	480～540 m ³ 〔59万 m ³ ～66万 m ³ /日〕	13～27 m ³ 〔1万6千～3万3千 m ³ /日〕	1.5～2.7 m ³ 〔2,900 m ³ ～3,300 m ³ /日〕	エチレン1 トンあたり の用水また は排水量 〔 〕は40万 /年の1日 の用水、ま たは排水量
	洗浄水・製品 処理水 （希釈スチ ーム） （洗浄水）	1.6～2.3 m ³ 〔2,150～3,100 m ³ /日〕 0.06～0.1 m ³ 〔72～120 m ³ /日〕	0.16～0.23 m ³ 〔215～310 m ³ /日〕	〔215～310 m ³ /日〕	
	ボイラ用水 （スチーム用）	0.8～1.0 〔950 m ³ ～1,200 m ³ /日〕	0.4～0.5 〔480～600 m ³ /日〕		
石油 精製装置	冷却水	10～12 m ³ 〔48万 m ³ ～62万 m ³ /日〕	0.30～0.48 m ³ 〔1万4千～2万2千 m ³ /日〕	0.03～0.06 m ³ 〔1,420～2,850 m ³ /日〕	石油精製 （各種プロ セスを含ん だ燃料型精 油所）プロ セスにおけ る石油1 kl 処理の用水 と排水量 〔 〕は30万 バレル/ 日の用水と 排水量
	洗浄水・製品 処理水 （洗浄水）	0.13～0.15 m ³ 〔6,200～7,200 m ³ /日〕	0.06～0.07 m ³ 〔2,900～3,250 m ³ /日〕	0.06～0.07 m ³ 〔2,900～3,250 m ³ /日〕	
	ボイラ用水 （スチーム用）	0.03～0.1 m ³ 〔1,400～4,200 m ³ /日〕			

5-3 節水の問題点

石油精製や石油化学工業では、冷却水を冷水塔にて再循環使用する方式が一般化している。しかし、このような淡水を再循環使用する方式が、冷却水の節水を解決しているとはいいきれない。この方式が採用されるに至った事情を述べながら、冷却水の節水の問題点を指摘したい。

石油化学工業のコンビナートが各地につくられはじめた1960年ごろ、工業用水（淡水）不足が問題にされ、本格的に冷却水として海水を使用するための取水の方法、冷却器の防蝕、経済性の調査研究がなされた。^⑧ その結果は5-3表に示されて、これにもとずき臨海地のコンビナートでは、冷却水（淡水）に海水を代替するのに不都合がないとされた。その後、1960年の後半に、海水の冷却水より淡水の再循環による冷却方式が、装置全体の消費量、運転費などの点からも安価とされ、この方式を採用する工場が増加した。採用のきっかけは、ほとんど、工場の増設によって冷却水の使用量が増大し、それを割り当てられた工業用水（淡水）で対処するために冷却塔を使用した。このような措置では、生産量あたりの節水はなされても、絶対量の節水にはならない。工場では、冷却水に工業用水の割り当て範囲を冷水塔を用いることによって補い、それ以外の不足分を海水を併用するという例が多い。

いま、海水による冷却水を一過式に使用すると、海域の熱汚染、冷却器の破損による油等の汚染物による汚染を引き起すという理由で、海水の冷水塔を使用する製油所が出現している。この方式によると、淡水も使用せず、大量の冷却水の排水を工場からの汚染物の希釈に利用するようなこともない。

海水の冷水塔は、淡水の節水の新しい方向を示すものとして注目してよい。これを使用する場合、冷水塔からの海水の飛散による塩害が解決していることが前提である。（飛散量は、循環水0.1%以下-10~6に改良され、塩害は解決されているとの報告がある）^⑨

冷水塔使用の注意点を二、三あげると、循環冷却水が、もし冷却器の破損で汚染された場合、汚染物が大気に放出するため、循環水の管理を十分にすること、クローム等の水処理剤の汚染にも注意することである。

5-4, 5-5表, 2-1表の統計に示されるように、水の回収率は、石油精製が70%, 化学工業は65%と高く、終パルプは27%と低い。前二者の回収率が高い理由は、冷却水を循環して使用しているためであり、後者は、用水の大部分が洗浄水であるために循環使用ができないからである。この、水の回収率統計からもわかるように、水の再使用は、冷却水においては可能であり、その回収率は前述したように、濃縮率を5にとると、さらに高い95%以上の回収率になる。

冷却水が、淡水から海水へ、淡水使用の冷水塔に、さらに、海水使用の冷水塔が採用されるのは、冷却器の材質、冷水塔の進歩と代替を可能にする経済的な条件があった。しかし、洗浄水、プロセス水を再使用しうる技術的、経済的な条件はない。ただ、水質規制がきびしくなり、排水中の汚染物質をすべて除去しうる排水処理の方法がとられるならば、再使用はありうるだろう。

排水処理技術の現状は、すでに述べたように、BOD, CODに標示される有機物のみを水質規制値まで除去するだけである。微量の有機物、アンモニア、塩等は排水に残存しており、これを除去するための、逆浸透圧法、電気透析は、技術的、経済的に未完成である。洗浄水、プロセス水を排水処理後、再使用したり、あるいは下水を同様に処理して洗浄水やプロセス水に再使用するには、用水の条件と排水の処理技術から見て採用される見込みはない。

5-3表 製油所の冷却水に海水と淡水（冷水塔）を使用した場合の比較

使用材料および材質			伝熱面積		
	淡 水	海 水		淡 水	海 水
管材	25.4 OD×2.6 t× 5,000 ℓ STH-35	25.4 OD×BWG 14 t ×5,000 ℓ BaTF-2	入 口 温 度	88°F	82°F
管板	炭 素 鋼	ネーパルプラス	出 口 温 度	130°F	120°F
			冷 却 水 量	1,520 t/hr	1,790 t/hr
			伝 熱 面 積	3,830 m ²	4,500 m ²

5-3表 製油所の冷却水に海水と淡水（冷水塔）
を使用した場合の比較

投資額の比較

(単位：10 円)

運転費の比較（1 年）

(単位：10 円)

項 目	淡 水		海 水	
	容 量	価 格	容 量	価 格
熱 交 換 器	3,830 m ³	81.2	4,500 m ³	112.5
電 力	545kw	37.6	480kw	33.1
川 水 設 備				
ポンプ	1,596t/hr	2.03	1,790t/hr	2.21
冷却塔	1,520t/hr	31.9		
取水口	76t/hr	0.8	1,790t/hr	60.0
配 管		0.7		12.5
貯水槽	1,520t	10.0		
塩素注入器	1 ppm	1.0	2.5 ppm	1.5
油 分 離 槽		3.75		11.7
排 水 槽		3.4		17.0
計		175.38		250.51

項 目	淡 水		海 水	
	容 量	価 格	容 量	価 格
電 力	545kw	20.0	480kw	17.7
水	76 t/hr	2.74		
塩 素	1 ppm	0.45	2.5 ppm	1.34
保 護	防食剤	1.07	亜鉛板	2.25
保 全			エボキシ	(0.85)
冷 却 塔		1.05		
ポンプモーター		0.7		0.60
熱交クリーニング		2.64		3.1
金 利		15.96		22.80
減 価 償 却		15.94		22.77
税 金		2.46		3.51
計		63.01		74.13

海水の方が投資額が42.8%，運転費が17.7%高い

水の価格

淡水 海水

新 設 5.18円/+ 5.18円/+

既 設 2.38円/+ 1.70円/+

(償却終了)

出 所 広瀬宮雄

石油学会誌 6 巻 6 号

(1963)

5-4表 原単位、回収率

業 種 別	昭 和 4 5 年		
	出 荷 額 (円)	原 単 位 千 m ³ /d・億円	回 収 率 %
食 品	4,874	0.095	17
織 維	2,354	0.152	6
衣 服	431	0.010	0
木 材	838	0.016	17
家 具	426	0.014	5
パ ル プ ・ 紙	1,705	0.792	27
出 版 ・ 印 刷	1,320	0.016	39
化 学	5,093	0.521	65
石 油 ・ 石 炭	1,758	0.152	70
ゴ ム	585	0.166	27
皮 革	133	0.042	13
窯 業	1,621	0.168	48
鉄 鋼	5,545	0.309	75
非 鉄 金 属	2,292	0.132	57
金 属	2,172	0.029	5
一 般 機 械	5,658	0.016	19
電 気 機 械	6,695	0.020	26
輸 送 機 械	6,793	0.031	54
精 密 機 械	727	0.016	7
そ の 他	1,554	0.055	16
計	53,701	0.161	52

注) 1) 昭和 45 年出荷額と従業員 50 人以上のもの。2) 昭和 40 年価格による。

5-5表 工業用水の使用量と回収率(千 m^3/d)

工業別		上位 25 社	上位 26 ～ 50 社	上位 51 ～ 75 社	上位 76 ～ 100 社	上位 101 ～ 150 社	上位 151 ～ 200 社	上位 201 ～ 300 社
食 品	淡水使用量	1,229.0	348.2	200.9	147.5	222.9	171.6	267.5
	回 収 水	57.5	81.4	41.2	88.7	15.4	17.5	23.6
	回 収 率	(29.1)	(23.4)	(20.5)	(60.2)	(6.9)	(10.2)	(8.8)
織 維	淡水使用量	508.6	283.7	227.8	197.6	321.0	251.1	392.5
	回 収 水	69.5	4.1	18.4	6.9	20.2	7.2	14.7
	回 収 率	(13.7)	(1.5)	(8.1)	(3.5)	(66.3)	(2.9)	(3.7)
紙・パルプ	淡水使用量	6,033.3	1,759.8	986.0	575.4	733.1	470.3	393.9
	回 収 水	2,248.0	297.5	82.2	81.5	102.5	36.7	72.9
	回 収 率	(37.3)	(16.9)	(8.3)	(14.2)	(14.0)	(7.8)	(2.3)
化 学	淡水使用量	8,411.2	3,697.0	2,204.4	1,495.2	1,767.9	812.0	785.2
	回 収 水	6,342.8	1,968.6	1,007.5	754.4	674.9	285.9	170.4
	回 収 率	(75.4)	(53.2)	(45.7)	(50.5)	(38.2)	(35.2)	(21.7)
鉄 鋼	淡水使用量	7,026.0	1,055.4	391.8	210.7	220.1	126.4	125.3
	回 収 水	4,925.1	700.6	207.8	90.3	49.4	14.6	19.6
	回 収 率	(70.1)	(66.4)	(53.0)	(42.9)	(22.4)	(11.5)	(15.7)

注 科学技術庁資源調査会報告第 60 号 (将来の資源問題) より。

() はパーセント。

出 所 井上源之助 前掲誌より

6. む す び

コンビナートの水, すなわち, 石油精製, 石油化学工業用水の節水は可能である。

その用水の大部分を占める冷却水は, 空冷熱交, 冷水塔によって節水が可能であり, 実際に節水されている方法がある。が, 現状では, 洗浄水, プロセス水は, 排水を用水に再使用することは不可能に近い。部分的には個々のプロセスの用水と排水を細かく検討することによって再使用の可能性がある。また, その実例もある。

言われるように, すべてのコンビナートの排水を集め, 三次処理, 逆滲透圧等のクロードシステムという方法では, コンビナートの水不足には対処できない。

巨大コンビナートの水需要は巨大であり, コンビナートの節水はできても, 節水によって巨大化するコンビナートの水不足の解決は困難である。

コンビナートの水問題, すなわち, 水不足, 水汚染を取り上げ, これをコンビナートの工場内の水収支から, さらにコンビナート地域の水収支に演繹し, コンビナートによる水の収奪機構を解明したいと考えていた。が, それは果たせなかった。工場内の水収支を垣間見るにすぎなかった。

今後, さらに, 個々の工場の事例によって水収支をとり, より具体的な節水の可能性を求めたい。

註、文献

- ① S. J. Thowoon : Oil and gas Journal oil (1971) 非常に具体的に製油所の排水を減少させる方法（つまり用水の減少になる）が記述されている。著者はFlwor（エンジニアリング会社）の技術者、その図を5-1図に引用する。日本文、出光石油技術14巻3号より再引用。
- ② 製油所にて除去する熱量の40～50％は空冷熱交に変えることができる。
- ③ スチームドレンは通常50％は回収できる。
- ④ デソルター排水の脱塩は現在、行われていない。
- ⑤ S. K. Menchen : chemical engineering progress Vol. 63, No 10 (1967)
公害防止のために、汚染物質を減少させる方法を、とくにエチレン製造について述べている。著者はKellay（エンジニアリング会社）の技術者。稀釈スチームが $\frac{1}{10}$ に減少し、製造規模が2万トン/年かゆ40万トン/年にすなわち20倍になると、かりに、排水を再循環使用しても、用水量が増大することに注意しなければならない。
- ⑥ N. B. King U. S. Patent : 3.527. 699 (1970) Badger（エンジニアリング会社）が出願のもの。
- ⑦ 佐伯康治：化学製造4月号（1974）
Em-viroment science & Technology Vol. 6 No 13 (1972) に同様な例がアメリカのダルトンにあるダウ化学のラテックス工場（ゴム工場）にて、5年間にわたって完全に排水を循環使用したと報告されている。
- ⑧ 沢井鉄治：化学と工学16巻12号
工学用水5 ㍴ / m³に対し、海水は0.6～0.7 ㍴ / m³にて取水できるから、機器の材質を検討、海水を冷却に使用としている。
広瀬宮雄，石油学会誌6巻6号（1963）よりバーレルの製油所にて、海水と淡水（冷水塔）を使用した場合の比較。表に引用する。
- ⑨ 福田昭三他，三菱重工技報Vol. 11, No 2（1974）1200 m³ / 時の海水冷水塔の実績の報告。

Ⅲ 工場における地下水使用の合理化例

飯 島 孝

工場における地下水使用合理化例

地下水の節水の実例

主として地下水を使用している機械工学、表面処理工場、プラスチック加工工場における節水の実例を調査した 調査年月は下記の通りである。

横浜の場合 1974年7月25日 土浦の場合 1975年1月24日

1. タキロン東京第二工場の場合

1-1 タキロン東京第一、二工場

タキロン東京第二工場は、千代田神立工業地帯の茨城県新治郡出島村に昭和47年に新設された工場で、塩化ビニルの押出し成形品、発泡押出し成形品、被覆電線を生産している。工場用水として地下水を使用しており、大半が冷却水として使われている。操業開始時から工場全体の冷却水が循環再利用されており、節約が試みられている。現在220～270t/日の地下水を汲み上げ、循環再利用の補給水としている。

東京第一工場は、同じ千代田神立工業団地内の茨城県新治郡千代田村にあり、昭和39年から操業している。主要製品は、塩化ビニル製の並板、薄肉パイプ、発泡押出し成形、浄化槽などである。第二工場と同様に工場用水は全面的に地下水に依存しており、大半は冷却水として使用している。第二工場に続いて循環利用への移行をおこないつつあり、すでに一部再利用を実施している。昭和50年度中には全面実施する計画になっている。昭和50年1月現在の地下水使用量は2800t/日であるが、過去全面操時では3200t/日の使用量になっていた。

第一、二工場の生産量および従業員数は以下のとおりである。

	塩ビ製品生産量	従業員数
東京第一工場	2000 t/月	
東京第二工場	1260 t/月	40名

1-2 工場用水節約の動機

昭和47年、東京第二工場新設のとき、工場西側にある川に排水を流そうとしたところ、下流の住民から反対され、それではと東側に流そうとしたら、なぜ流す場所を変えるのかと、かえって住民の反発を買った。理由は、大量の排水を流されては出水の原因になり、住民が被害を受けるから、ということであった。工場新設にあたって工場は、村役場との了解をあらかじめ得ていたが、村役場と住民との間でコンセンサスの不一致があったものと思われる。その結果、住民が村役場を突き上げることにもなったのである。

用水の大半が冷却水であるから、公害問題としては何ら問題となることはないものと思われたが、大量の排水を出すことに問題があるとされたので、工場としては使用後の排水量をできる限り減らすことを考えざるをえなくなった。

もう一つ問題なのは、用水は地下200mから汲み上げているとというものの、大量使用を続けた

場合に、工場より低位置にある民家や農家にある井戸で、水位低下ひいては水涸れを起しはしないかという心配があったことである。もしそのようなことが起れば、工場としても地下水を利用することができなくなり、住民ばかりでなく工場にとってもマイナスである。

以上のようなことから、工場、住民、村役場の三者でできるだけ地下水汲上げ量および排水量を減らすことを検討した結果、300 t / 日くらいなら排水してもよろしい、という結論に達した。そこで工場は、操業開始時1500 t / 日、全面操業時2000～2500 t / 日の用水使用量（＝地下水汲上げ量）の予定であったものを、300 t / 日以下の排水量におさえるべく、循環再利用のための設計をおこなうことになった。

第二工場の経験によって用水節約に自信をもつことができることになったようで、第一工場においても地下水使用合理化に協力すべきであるとの、工場としての自主的判断をおこない、昭和49年工場内用排水施設等の検討が始められた。昭和49年中に冷却水の一部で循環再利用に切替えられ、全面的な循環再利用に向けて準備が進められている。

1-3 用水節約の方法およびその結果

東京第二工場で用水循環再利用システムを確立するためにまず手がけられたことは、排水路を種類別に分離し、排水系として整備することであった。排水路は、雨水排水系、生活排水系、工場排水系の三系列に整備され、工場排水系が再利用系列に組み込まれた。

雨水排水系—雨水が独立系として集められ、そのまま河川に放流される。

生活排水系—従業員40名の生活用水として20 t / 日の使用量を見込んで排水路を整備したが、実際の使用量は10 t / 日以下である。生活排水（し尿および雑排水）の処理方法として、まず自社技術を生かした浄化槽を通したのち、茨城県農事試験場の指導により、蒸発散処理式¹⁾を採用して処理することとした。このような処理方法を導入したのは、生活排水といえども排水量を少なくするための努力目標となり、また排水を流すとしても問題を起さないよう、処理したものとするためである。浄化槽は曝気式とし、蒸発散方式も材質、通水方法等改良を試みた結果、工場外へ排出する排水量をきわめて少なくすることができたし、またBODも10 ppm以下にすることができた。

工場排水系—排水路に集められた水は循環再利用系に回され、冷却水として再び使われる。

最初、循環再利用系を簡単に考え、単一系列のものとしたが、水の温度上昇が問題になってきた。そこで、常温のままではよいもの、クーリング・タワーで冷却を要するもの、冷凍器で冷却を要するものの三系統に分けて再利用している。この三系統のうち、後者二系統の水使用量がほとんど大半を占め、常温のままではよいものの占める割合はわずかである。冷凍器冷却を要する系統では、さらに冷凍器を冷却するための系統（クーリング・タワーで冷却を要する）が加えられている。東京第二工場における循環再利用系のフローシートを図1に示す。

注1 茨城県農業試験場昭和41年度報告

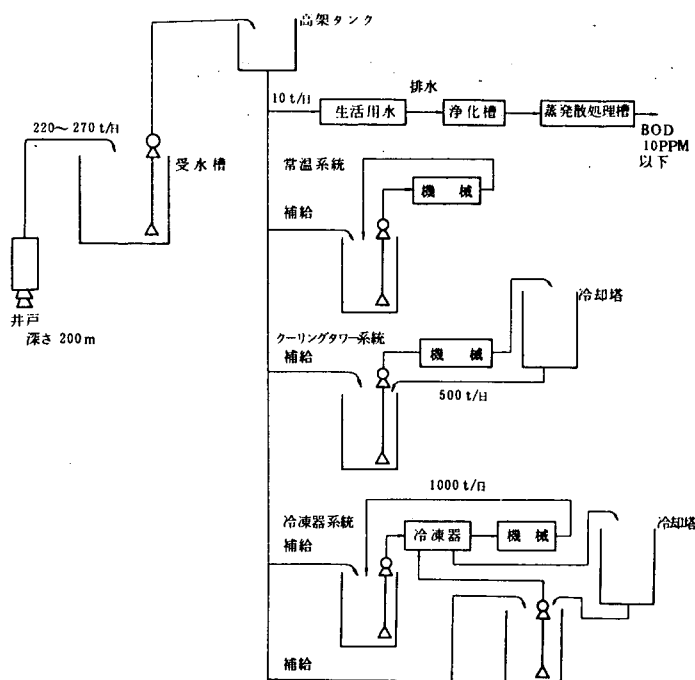


図1. 東京第二工場における用水節約システム

用水循環再利用のために要した費用について、用水節約を考えずに、使い捨てのままでよいとしたときの用排水設備費と比べてみると、約3倍の設備費がかかることが判った。用水節約のために必要な設備として、配管（社内製品）、クーリング・タワー、液面制御、バランスをとるための装置（バルブ、バイパス用配管など）、冷却ポンプ、循環ポンプ、冷凍器がある。東京第二工場は新設時に地下水使用合理化のための設備を設置したのであるが、全工場建設費（土地も含めて）約9億円のうち、用水節約のための諸施設を含めた配管関係の設備費が約1億円かかっている。これは企業努力によって十分可能な範囲にあるものと判断できるが、第一工場のような既設工場において、新たに用水節約のための設備を加える場合には、この費用はずっと多額になるものと思われる。これは、配管工事のやりなおし（系統別に分ける）が大がかりになるからである。

図2に示すように、東京第一工場では製品冷却の一部に循環再利用のための設備が導入されているが、既設の配管系統をどのように再整備し、全面循環再利用のために配管系を系統的に作り変えたらよいか、社内で検討中であるという。既設工場における用水循環再利用例として今後を注目したい。

用水循環再利用諸施設を運転した結果問題になった点とその改良法について次に記す。冷却水を再使用しても汚れが出ないものと考えていたが、実際に運転してみると、循環パイプやクーリング・タワー中の石槽板などに、青い藻が発生、とくに夏には大量に発生するので問題を起す。除藻剤を定期的（年に1回くらい）に使って除去しなければならないが、死滅後の藻は、茶色の汚泥となるので

フィルターで簡単に除去できるように設備を改良しなくてはならない。つぎに、用水の再利用のしかたについて、温度が低いところで冷却する必要がある場所で使用した水を、少し温度が上昇していてもよい個所で再利用できるようにする、といった、きめ細かな有効利用ができれば、さらに用水を節約することが可能になる。今後の課題として検討されるべきことであろう。

最後に、東京第二工場では地下水の管理に関して、以下のことがおこなわれていることを付記しておきたい。

地下水汲み上げ量を毎日記録すること。工場内に監視用井戸（深さ20m）を掘って、汲み上げにより地下水位が低下しないかどうか、毎日観測していること（ただし、本井戸は深さ200mで、90mより浅いところにストレーナはない）。

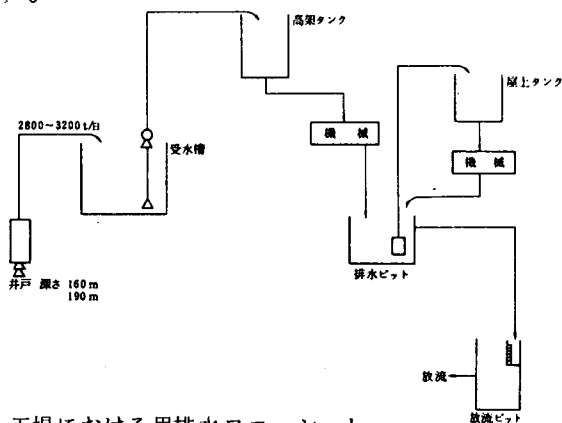


図2 東京第一工場における用排水フローシート

2. 日立建機株式会社土浦工場

2-1 工場の概要

この工場は、茨城県土浦市神立町に所在し、工場敷地面積12万坪を有し、従業員2,000名をもって、油圧ショベル、トラッククレーンなどの建設機械を製造し、その出荷額は月に約50億円である。この工場は、2年前までは、油圧ショベルの専門工場であったが、首都圏の工場移転の施策に応じて、東京都にあったクレーンなどの生産をも集約して、建設機械の総合工場となった。

2-2 地下水使用の状況

この工場では、水を必要とするのは、酸洗、塗装のための洗浄水、製品洗車のための洗車水、熱処理コンプレッサ・空調設備の冷却水、そして生活水である。

この工場は当初の規模で、地下水を月間60,000トン汲み上げて使用していたが、附近地の地下水枯渇が生じたため、土浦市より地下水汲み上げ規制によって、48年1月より日量2,086トンきり取水出来なくなったので、工場の集約を機にして、用水の循環使用にふみきり、現在では日量平均

1,600 トンの地下水汲み上げでまかなっている。上水道の使用は僅かである。

現在の使用状況は、図に示す通りである。実際には、排水処理の関係で、地下水の供給は、各系統ごとにバッチで行われるが、日量に換算すると、図に示す数値となる。即ち洗浄水 350 トン、洗車水 170 トン、冷却水 580 トン、生活水 500 トン。そして循環利用水は、洗浄水 3500 トン、洗車水 400 トン、冷却水 19,900 トンであるので、実使用量は莫大なものになる。また循環使用に伴う蒸発量は 200 トンである。

この地下水は、直径 300 ミリ深さ 160 メートル、直径 350 ミリ深さ 250 メートルの 2 本の井戸から汲み上げられ、一旦、受槽（容量 1430 トン）に入れられて、各系統に流される。

用水コストは、地下水トン当り 9 円、市上水道は 25 円である。また、循環使用のために投資した費用は 6 億円である。

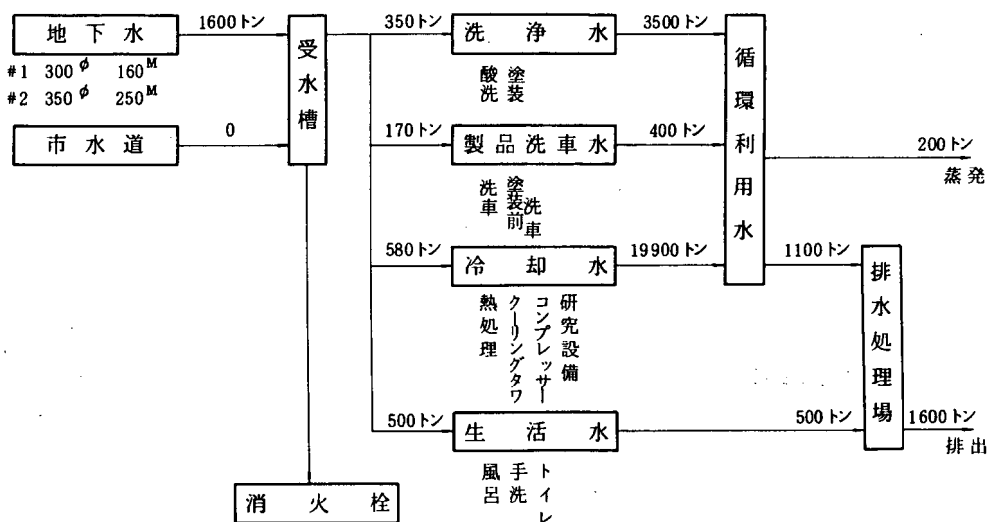


図 水使用系統

2-3 排水処理

循環使用のための処理として、その使用場所において、洗浄水・冷却水は油水分離、洗車水は泥の重力沈殿を行っている。

排水処理は、土浦市よりの規制値は、増設で COD 20 新設で COD 10 とされているが、この工場では、3 次処理までして、COD 5 にしている。現有処理能力は 24 時間運転で 1600 トンである。この処理コストはトン当り 50 円である。

雨水は、時間当り 68 ミリの降雨に耐える広大な溜池を通して、排水とは別に流出させている。

2-4 今後の水利用合理化

今後の改良計画は、3次処理を行い排水を排出せずに再使用すべく、現在の配管とは別系統の配管を計画中である。これは排水処理費用の有効化とともに、この地区に工業用水道が完成した時には、地下水汲み上げは150メートル以深の井戸で日量1248トンに規制されることの対策でもある。なお、この工業用水道は100,000トン供給の計画であるが、現在この地区の使用量が60,000トンなので未着工である。

小さな改良は、既に実施しているが、更に用水供給圧力を下げたい、バルブを締めたりして、節水を図っていく計画である。

3. A社横浜工場

3-1 業務内容と用水使用の特徴

この工場では、横浜市の北部にありマイクロウェーブ機器や衛星通信機等の、通信機器を製造し、工業出荷額は年間約360億円である。従業員は約3500人である。この工場の特徴としては工場全体が空調されており、かつ精密部品製造のため、恒温恒湿室が設けられており、この両方の空調のための冷却水量が大きいことおよび、メッキ工程を有していることである。

3-2 用水節約の動機

工場が設置されている地域は、地下水汲み上げのため、地盤沈下がひどく、自治体より地下水汲み上げ規制が要請された。また本地区には工業用水道が布設されておらず、高価な上水道を使わざるを得なかった。以上が用水節約の外因的動機であったまた内因的動機としては、メッキ廃水の量を減らし、処理設備費および運転費を節減することがあった。

3-3 用水節約の方法および結果

当初地下水の汲み上げ量は1日当り1000～2000トンであったが、昭和47年7月これを600トンまで減らし、48年10月・地下水の汲み上げを停止した。上水道の取水は以前日量2000トンであったが、現在は1000トンとなっている。以前の用水のマテリアルバランスを図1に、現在のそれを図2に示す。まず、空調と恒温室の冷凍機に使用する冷却用水は、以前一部を循環使用していたものを、全量循環再使用とした。このため、直径40mの噴水を設け、使用水を水の蒸発時の潜熱を利用し、冷却している。循環量は2000トン程度、夏季の冷却池入口温度は35℃、冷却池で5℃程度の温度降下がある。次にメッキ洗浄水の節約のため、それまで、開放しであったのを、ペダル方式やひざ押しボタン方式に変え、利用する時のみ水が出るようにした。またトイレ用水はそれまで水道

を使っていたものを冷却水のブローダウン水を使うようにし、かつ押しボタン方式に変え、節水を図った。以上の方法により、図1および図2に示すごとく、以前は日量3000トンの用水量が、現在は1000トンと $\frac{1}{3}$ に減少した。

水の節約に要した費用は、配管工事3500万円、冷却池噴水工事800万円、メッキ工場改造費700万円、トイレ改造費500万円、合計5500万円である。一方水の節約によって、上水道が1000トン節約できたが、現在の上水道料金は、トン当たり85円であるから、1日85,000円、1カ月稼働日数を25日とすると、1カ月2,125,000円、1ケ年25,500,000円となり、節約に要した費用は約2年強で回収できることになる。

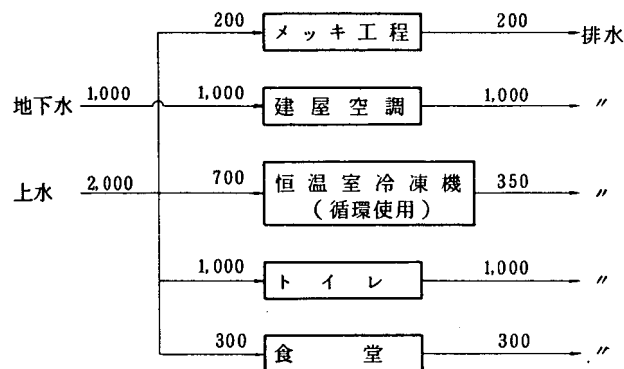


図1. A社横浜工場、節水を実施する前の用水バランス (単位トン/日)

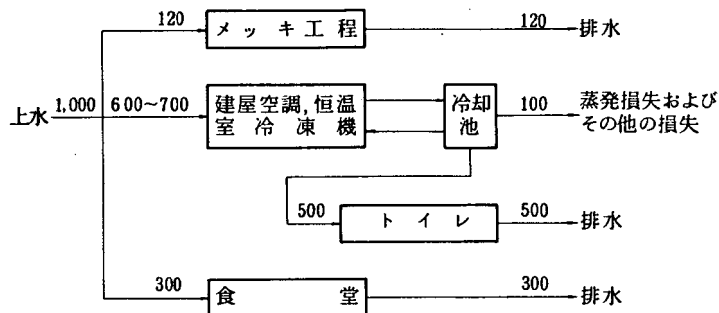


図2. A社横浜工場、節水実施後の用水バランス (単位トン/日)

4. B社横浜工場

4-1 業務内容と用水使用の特徴

B社はアルミサッシの陽極酸化を行っている。大企業の下請的中企業である。従業員は60人程

度であり、A社に隣接して立地している。陽極酸化工程における用水は、製品洗浄水と、電解液の液温を一定に保つための冷凍機冷却水の2つが主である。冷凍機の冷却水は、冷凍機の性能上、温度が年中はほぼ一定である地下水でなければならない。現在の製造工程および水のフローを図3に示す。

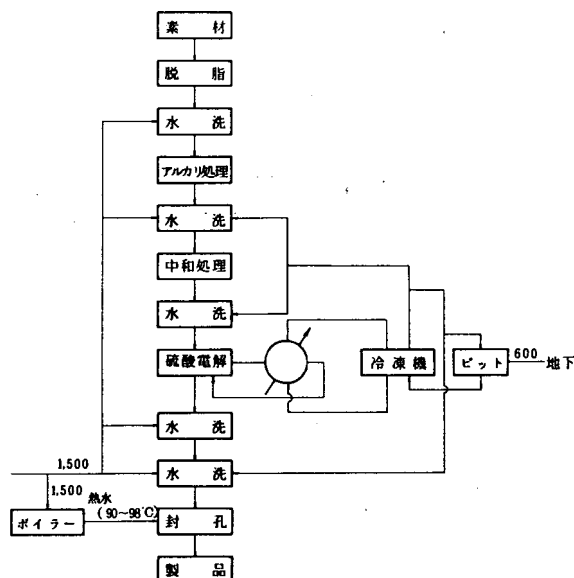


図3 陽極酸化の工程と用水バランス (単位トン/日)

4-2 用水節約の動機

A社と同様に、工場が立地している地区において地下水の汲み上げが規制された。42年当時の用水使用量は、地下水日量2200トン、上水10000トンであった。46年地下水汲み上げ量を1500トン、ついで500トンに減らすよう、自治体から要請された。また昭和48年年初のオイルショックで、電力および重油の高騰から、経営が悪化し、経費節減の一環として、上水の節減にふみ切った。

4-3 用水節約の方法および結果

冷凍機冷却水の節水のためには、まず電解液の冷却のための熱負荷をへらすため、電解槽を減らし、生産規模を60%まで落した。ついで、通常は $18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ でなければならない電解液を、 24°C でも操業可能のように液組成を変えて、冷凍機の熱負荷を減らした。また貯水ピットを設置し、冷却水の30%をこのピットにもどすことにより、冷却水量を減らした。

上水節約のためには、漏水防止のための配管の改善、水道の現場バルブ数の大幅な削減、および従業員教育を徹底して行なった。現在の水使用量は、地下水、日量600トン、上水3000トンとなっ

ており用水使用量は以前の約 $\frac{1}{4}$ となった。上水3000トンのうち1500トンはボイラー給水である。

節水に要した費用は、配管費など約100万円である。上水の節約量は日量7000トンとなり、上水料金の節約で、2カ月間で100万円が回収できた。

5. 工場調査のまとめ

表-1は各工場の水節約量と節約に用いた費用を整理したものである。各工場とも水を大巾に節約しており使用量は節約前の $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{5}$ の使用量になっている。

次に節約に要する費用は100万円～6億円、節約量 $1\text{ m}^3/\text{日}$ あたりに要する費用も $1 \sim 58\text{ 円}/\text{m}^3/\text{日}$ と変化が大きい。工場④はとくに経費が小さいが、これは経費をあまりかけない範囲で水の節約をはかりとしたためであって、いわゆる水使用合理化の中には、とくに装置の変更などをしなくても水使用を節約できる要素のあることを示唆しており興味深い。

使用合理化によって生じた水は、見方を変えれば新規に水を開発したと考えることも出来る。そのような意味で工業用水道のコストと比較してみる。

まず開発コストであるが、首都圏においては従来 1 m^3 あたり3円程度であったものが最近では8円程度（草木ダム）になっている。開発コストは今後河川利用率が高まるにつれて急速に大きくなっていくことが予想される*。

次に給水原価であるが、これは東京都で約30円（昭和46年度）茨城・埼玉・千葉の各県で5～22円（昭和45年）となっているが、給水単価は年々上昇しているので（東京都の場合昭和41年～46年で約1.7倍）現在では、これよりかなり高くなっていると思われる*。

以上を総合的に考えて見ると工場①の場合は節約コストと同程度又は多少高めであるかも知れないが、工場②、③、④の場合には、節約コストの方がかなり安くなっていると考えることが出来る。ただし工業用水道の料金は国等の補助によって給水コストそのままにはなっていないことに注意する必要がある。

以上に述べて来た如く水の使用合理化は経費の面では工業用水道と同程度か、場合によってはこれより小さくなることが予想される。

工場における水使用合理化は今回調査した範囲ではかなり順調に実施されている。トラブル等は発生していないようである。

水使用合理化の動機は工場①の場合は住民運動、工場②～④は市当局の要請によるものであるが、かなり円満に協議がすすめられたようである。

一般に地盤沈下の進行をとめるためには代替水源が不可欠であると信じている人も多いが、今回の調査により工業用水に関しては必ずしも代替水源がなくても、かなりの程度まで（数分之一）

を節約できる可能性を有していることを明らかにし得たと考える。

表-1 各工場の水節約量と経費

工場	節 約 量		経 費	1 m ³ /日 あ た り 節約費用	1 m ³ あ た り 費 用	比 較 1 m ³ あ た り
	比 較 方 法	節 約 量				
①	元設計 節約設計 1500 m ³ /日 → 300 m ³ /日 ($\frac{1}{5}$)	1,200 m ³ /日	約 7000万円	58	29 円/m ³	
②	じゅんかん量 じゅんかん補給水 23,800 m ³ /日 → 500 m ³ /日 ($\frac{1}{5}$)	22,300 m ³ /日	約 6 億円	28	14	地下水 9円 上水 25円
③	従 来 節約後 3000~4000 m ³ /日 → 1000 m ³ /日 ($\frac{1}{3}$)	2,500 m ³ /日	約 5500万円	22	11	上水 (排水費含) 85円
④	従 来 節約後 12,200 m ³ /日 → 3,600 m ³ /日 ($\frac{1}{4}$)	8,600 m ³ /日	約 100万円	1.2	0.6	上水 (排水費含) 85円

工場は300日操業と仮定
元利及償却は15%と見込む

* 東京都首都整備局「水のコスト分析Ⅱ」(昭和48年1月)

Ⅳ 地下水使用の最適化について

有 水 彊

地下水の使用の最適化について

Jacob 模型による「連結した漏水のある二つの滞水層の最適利用」に関しての論文紹介

1. はしがき

わが国の水資源開発では従来地下水資源は水資源の中に含まれていない。それは地下水資源に関する研究・調査が遅れていたことによると考えられる。

一方アメリカでは水資源開発の数学模型で表流水と帯水層とを総合して考ようとする行き方が早くから始まっていたが、その多くは後述するように甚々不完全なものであった。つまり地表の貯水池と帯水層とを別々に、あるいは両者を結合させてシステムの最適利用を考える試みが数人の人達によって試みられた〔Little, 1955; Moran, 1959; Mass et al., 1962; Buras, 1963; Burt, 1964; Young, 1967; Hall et al., 1968〕。Buras と Burt の調査は1つの貯水池と1つの帯水層の組合せを考えたものゝ、その研究は現実的なものではなく何れもある数学模型の定式化に止まり、特定の地域で応用されたことはなかった。その上地下水の揚水により生ずる揚水井での地下水面の低下から生ずる附加的な揚水費の増加をそれらの数学模型は考えていなかった。

しかし地下水資源開発として最も重要な問題は、地下水資源だけを取り出し孤立させることではなく、表流水との関連において考察することである。つまり地下水の合理的利用とは地下水だけの合理的利用であってはならないということである。それは表流水との関連において合理的な利用を考えるのであれば地下水の合理的利用は成立しないからである。その理由は従来の多くの接近において試みられたように、地下水帯水層を1つのものとして考えるのではなく、それを相互に関連のある2つ以上の帯水層に拡大し、1つの部分系としての表流水を含めて、相互に漏水のある総合的な系の最適利用を考えるのでなければ現在の問題に接近したことになるからである。そしてその数学模型の実用性を実地試験によって証明したものとなると、地下水学の創設者の一人である C. E. Jacob とその弟子 Z. A. Saleem との協同研究を措いて他にない。

ところでわが国での地下水の合理的利用を考えるとき、Jacob 模型の改良が考えられるのであるが、その場合地盤沈下対策を無視することは許されないであろう。また Jacob 模型のように水利用が農作物への灌漑だけに限定すべきものではなく、その他に生活用水および工業用水その他の種々の水利用を考察すべきであり、そうした各種の水利用から必然的に生ずる汚染水の水処理の問題も水質汚濁の関係から考察しなければならなくなる。その意味で水質汚濁防止の目的で汚染水の循環的再利用を考慮すべきものと考えられる。そうした現実的な要請を Jacob 模型に盛り込むとき、Jacob 模型が意外に強靱であり、上手くできていることに気が付くのである。つまり Jacob 模型はすべての水利用を前

提とした地下水の合理的利用の在り方を最も単純な型でわれわれに示している。そこでまづJacob模型の解説を試みることにしたい。

2. Jacob模型

この模型は表流水を部分系とし、2つの連結された漏水のある帯水層（つまり浅層不圧帯水層—以後Jacobに従い浅層帯水層と呼ぶことにする—、および深層被圧帯水層—以後被圧帯水層と呼ぶことにする）よりなる部分系から構成されている。これを図示すると1図の如く示される。2つの帯水層は1つの帯水層から他の帯水層への漏水を可能ならしめる半加圧層によって分けられている。漏水の方向は局地的により低い水頭をもった帯水層に向かって流れる。表流水は基底水位を通じて浅層帯水層と結びついている。

この系は農地の灌漑だけに水を利用しており、アルファ・アルファ（牧草）、綿花、トウモロコシ、雑穀の4種類の作物がその対象になっている。そして3つの水源の各々から灌漑される特定作物の灌

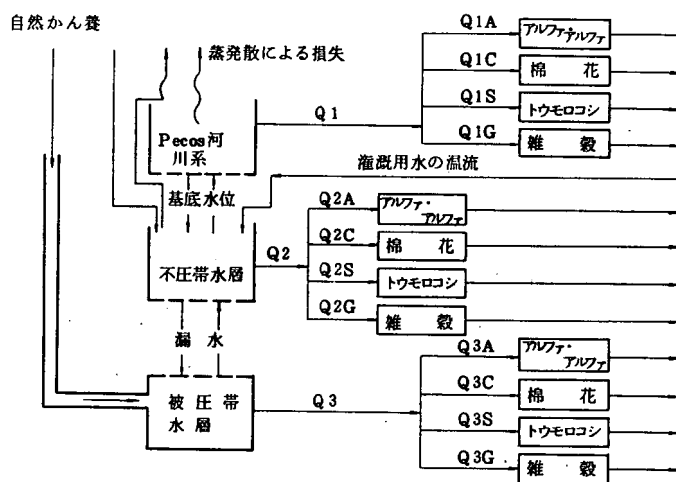


図1 Jacob模型

漑面積は既知とされている（つまり全部で12地区になる）。

浅層および主要被圧帯水層は降雨によって確率的な涵養をうける。更に浅層帯水層は漏水および灌漑からの浸透水という型で水の投入をうける。一方浅層帯水層は河川の自然流出という型でその水を失うこともあれば、自然流入によって水を得る場合もある。また河川は蒸発によって水を失う。このような地下水と表流水との浅層帯水層での関係、浅層帯水層と深層被圧帯水層との半加圧層を通じての関係については、わが国では実験も乏しく先駆的な調査・研究を行っていた極く少数の人達が気付いていたのにすぎない。このようなすべての関係を総合してJacob模型は水の合理的利用を表流水と地下水との複合系について主張している。そこで彼等の論文を紹介してみよう。

3. Roswell 盆地の地勢と地質

地下水の垂直運動を阻害あるいは遅れさせる沈澱物（流送土砂）により囲まれ、あるいは被圧されている帯水層は通常漏水する。ここでは1つの帯水層から他の帯水層に漏水し相互に関連のある帯水層の部分系の他に、表流水の部分系を加えて総合し、時間の関数としてある期間全体にわたりこの系全体が生産する価値の最大化を目的として、この系の最適利用を考えている。その場合逐次的意志決定のための接近法であるダイナミック・プログラミング（以下DPと略す。）が用いられている。ところで確率的なかん養量、基底流出量、自然流失量が帯水層間の漏水に加えて考察されている。この研究はニュー・メキシコのRoswell盆地での2つの帯水層の地下水の最適利用政策を求めるために行われたものであるが、そこでは系の物理的特性とこの系から供給される水によって灌漑を受ける面積の大きさも考慮されている。その結果として漏水により相互に関連のある帯水層は総合的に利用されることになった。

因みにRoswell盆地は後述されるところであるが、それはアメリカの地下水学研究のための共通の試験地であって、一流の地下水研究者はこの盆地でいずれもすぐれた試験研究を行い、その特性については非常によく知られている。したがってJacob模型はそれらのすべての研究の集大成ともいうべく、すべての研究者の承認をえていると見做してよい。しかし特に注意すべきことはそこでの平均年降雨量が297耗という低さであることで、したがってわが国の実状と異なる問題の発生はそのためであることが多い。

Roswell盆地はニュー・メキシコの東南部に位し、Pecos河の一部を形成する（図2参照）。その東部は高原で、南部はSeven河の傾斜台地、西部はハイ・Sacramento山脈で囲まれ、北は北緯34°の北の方まで延びている。盆地は半乾燥気候で、冬は充分寒いが乾燥しすぎているので積雪はない。夏は乾燥しており、時折雷雨がある位のものである。通常霜のない期間は4月11日から10月10日迄の間で、この間に年降雨量の75%が集中し、植物の成育期間と合致している。Roswellの年平均降雨量は11.7インチ（297耗）で、平均値よりの偏差は大きく、農業生産のためには盆地のすべての地域で灌漑は不可欠である。

DaneとBuchman〔1965〕の作った地質図の修正したものを図3に示してある。盆地の主要帯水層は浅層帯水層と主要被圧帯水層で両者の間に半加圧層がある。浅層帯水層は第3紀および第4紀の「峡谷埋積物」からできている。Roswellの近くでは二畳紀の下に重なったアルテシアン層群の上部が見られる。

帯水層は12から20哩の巾で、60から70哩の長さを持ちPecos河西部全域に発達している。その厚さは400フィートに及ぶものがある。地下水の30%はこの帯水層から揚水されている。主要被圧帯水層は全部第3紀のSan Andres石灰岩の中に発達しているが、例外は盆地の南側で、そこでは上に重なったアーテシアン層群の底辺がある。

主要被圧帯水層の最大深度はアーテシアンの近くで500フィートを越え、この盆地で利用される地

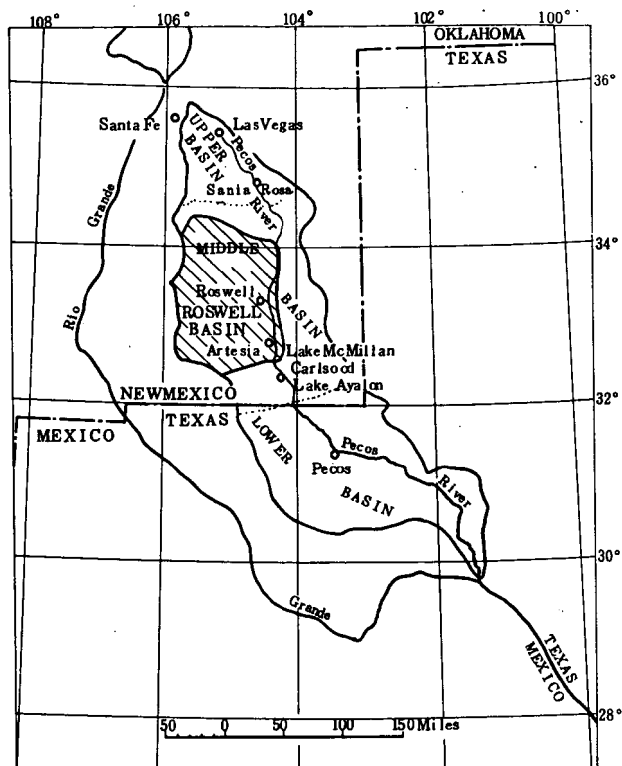


図2 New Mexico, Roswell 盆地の位置

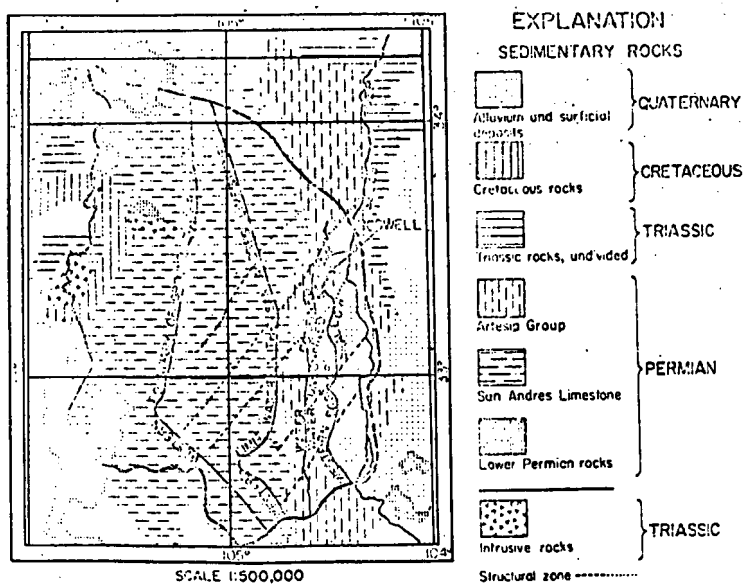


図3 Roswell 盆地の地質図

下水の60%はこの帯水層から揚水されている。この2つの帯水層を分ける半加圧層はアーテシアン層群の大部分を包含しているが地下水全体の7%がここから揚水されるのに止まる。

Roswell 盆地の主要被圧帯水層へのかん養は、San Andres 石灰岩の露頭地域に降った雨がその源泉になっている。浅層帯水層は地域的な降雨から平均年35,000 エーカー・フィートのかん養をえている。更に浅層地下水は灌漑水の浸透したものから還元をうけている。その水量は灌漑に利用された水量の30%に相当すると推定されている。この帯水層は主要被圧帯水層との漏水を通じて水の収支を行っている。浅層帯水層からの流出は年130,000 エーカー・フィートに達するものと推定され、Pecos 河への基底流出と蒸発散が決定的な要因になっている。

4. DPの定式化

ここでの系は2つの帯水層からの揚水と表流水を灌漑に用い、それらの1期間中に利用される水量が決定変数になっている。すべての決定変数は4つの成分をもち、それは1つ1つの作物に対応している。そこでまず記号の説明を試みる。

$1, 2, 3,$	の添字はそれぞれ表流水部分系、浅層帯水層および被圧帯水層を示している。
Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{3n}	計画期間の終りからn番目の期間中に揚水される水量
V_1, V_2, V_3	各期の始めの貯溜量
r_{1i}, r_{2j}, r_{3k}	計画期間の終りからn番目の期間中にかん養される確率的水量
p_{1i}, p_{2j}, p_{3k}	それぞれ r_{1i}, r_{2j} および r_{3k} の確率
E_n	計画期間の終りからn番目の期間中に表流水の部分系から蒸発した自然喪失水量。
D_n	計画期間の終りからn番目の期間中に浅層帯水層から流出した自然水量
L_n	計画期間の終りからn番目の期間中に生ずる漏水：浅層帯水層に向って流れるときは正值
u	将来便益を現在価値に換算させるための割引率
$B_n(Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{3n}, V_1, V_2, V_3)$	貯溜量がそれぞれ r_1, r_2, r_3 のとき Q_{1n}, Q_{2n} および Q_{3n} の水量の利用により計画期間の終りからn番目の期間中に盆地にもたらされる純利益
$f_n(V_1, V_2, V_3)$	系の3成分の水量として V_1, V_2, V_3 から出発して最適政策を用いるときn番目の期間に盆地にもたらされる期待利益

系の最適化のためには問題を最適化するための評価が必要になる。この評価は通常評価関数、利得関数あるいは目的関数と呼ばれている。通常目的は純便益の最大化、あるいは費用の最小化におかれる。それは決定変数と場合によっては状態変数（あるいは状態変数の関数）の関数（あるいは汎関

数)になっている。所与の状態に対する最大利得はその状態に対する最適純利得と呼ばれる。

この研究では地下水盆が長期間にわたり管理されるとき、地下水盆からえられる純価値を最大化する最適政策を求める。B は応答平面であって、B の最大値はそれらの変数の関数であって、その多次元空間の中に求められる。

最大値を求めるためにはDPを用いて接近する。灌漑面積を系のパラメーターとして取扱う。系の物理的次元は水理学の分析によって決められる。最適管理政策は有限期間にわたる系の管理から求めることができる。

最適化のためには2段階の手続を必要とする。それは時間の関数としての最適化と空間の関数としての最適化である。系の最適化を時間の関数として行うためには、まず系を空間について最適化することから始めなければならない。空間についての最適化の結果が動的模型の中に組み込まれば、系の制約条件の範囲内で全体の最適化を行うことができる。

5. 時間の関数としての定式化

2つの連結された帯水層と春流水の系よりなる問題を分析するために、集合Sと集合Pとをそれぞれ、すべての許容される状態と決定とがそれらに含まれると定義する。つまり $(V_1, V_2, V_3) \in S$ および $(Q_1, Q_2, Q_3) \in P$ である。

$$\text{集合 } f_0(V_1, V_2, V_3) = 0$$

であるから、

$$\begin{aligned} & f_1(V_1, V_2, V_3) \\ = & \text{Max} [B_1(Q_1, Q_2, Q_3, V_1, V_2, V_3)] \\ & (Q_1, Q_2, Q_3) \in P \end{aligned} \quad (1)$$

系の状態は変換Tによって変換される。ここで $T = (Q_1, Q_2, Q_3, r_1, r_2, r_3, D, E, L)$ 最適性の原理を用いると、価値評価額の期待値から利得を現在価値に換算すると、この系についてのDPの汎関数方程式をうる。

$$\begin{aligned} f_n(V_1, V_2, V_3) = & \text{Max} \left\{ B_n(Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{3n}) \right. \\ & (Q_1, Q_2, Q_3) \in P \\ & + (1+u)^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{n-1}(V_1 + r_1 - E_n \\ & \left. + D_n - Q_{1n}, V_2 + r_2 + c(Q_{1n} + Q_{2n} + Q_{3n}) \right. \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} &+ L_n - D_n - Q_{2n}, V_3 + r_3 - L_n - Q_{3n} \\ &\cdot h_1(r_1) h_2(r_2) h_3(r_3) dr_1 dr_2 dr_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで $h_1(r_1)$, $h_2(r_2)$, $h_3(r_3)$ はそれぞれ r_1, r_2, r_3 の確率密度関数であつて、 c は灌漑した水が浸透して浅層地下水帯水層に還元する割合をあらわす常数である。

n 個の期間に対する上記の関数方程式は、 n 番目の期間の間に揚水によって同期間中に発生する即時的な純価値に加うるに、残りの $(n-1)$ 期間を通じて最適政策を用いたとき、この $(n-1)$ 期間中に発生すると予想される将来純価値の現在価値を加算し、その総和の最大化を求めていると解釈できる。

方程式を解くために、すべての変数を離散的に取扱うと、この方程式はつぎの型をとる。

$$\begin{aligned} f_n(V_1, V_2, V_3) = & \text{Max} \left\{ B_n - Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{3n} \right. \\ & (Q_{1n}, Q_{2n}, Q_{3n}) \in P \\ & V_1, V_2, V_3 \\ & + (1+u)^{-1} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N p_{1i} \cdot p_{2j} \cdot p_{3k} \cdot f_{n-1} \\ & \cdot [V_1 + r_{1i} - E_n + D_n - Q_{1n}, \\ & V_2 + r_{2j} + (C Q_{1n} + Q_{2n} + Q_{3n}) \\ & \left. + L_n - D_n - Q_{2n}, V_3 + r_{3k} - L_n - Q_{3n} \right] \left. \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\text{ここで、} p_1, p_2, p_3 > 0, \sum_{i=1}^L p_{1i} = \sum_{j=1}^M p_{2j} = \sum_{k=1}^N p_{3k} = 1 \quad (4)$$

そして $r_{11}, r_{12}, r_{13}, \dots, r_{1L}$ は確率 $p_{11}, p_{12}, p_{13}, \dots, p_{1L}$ で表流水の系にかん養される確率的な水量であり、 $r_{21}, r_{22}, r_{23}, \dots, r_{2M}$ は確率 $p_{21}, p_{22}, p_{23}, \dots, p_{2M}$ で浅層帯水層にかん養される確率的水量、 $r_{31}, r_{32}, r_{33}, \dots, r_{3N}$ は確率 $p_{31}, p_{32}, p_{33}, \dots, p_{3N}$ でもって被圧帯水層にかん養される確率的水量である。

ここで決定変数と状態変数は非負で、決定変数の大きさは系のそれぞれの成分の貯留量を越えることができないので

$$0 \leq Q_j \leq V_j, \quad j = 1, 2, 3 \quad (5)$$

が成立する。この問題を離散的にすることにより、有限マルコフ決定過程に誘導できる。方程式(2)中の確率は遷移確率行列の型で表現できるが、この多次元行列は1つの状態からつぎの状態に移る確率を規定したものである。

6. 空間の関数の定式化

ここでは3つの資源の1つから所与の水量を所与の地域で栽培される種々の作物に最適配分を行う問題を取扱う。

この問題への接近は時間についての最適化の場合と同じである。つまり時間に対しては人工的な要素が導入されたが、ここでは前節での段階の代りに4種類の作物を用いて、この問題をDPの関数方程式により定式化し、逐次分析によって解くのである。

この問題の定式化のために、いくつかの記号を定義する。

S_i は系の初期状態であって、考察の対象となっている系の成分中に貯留されている水の総量であり、種々の作物に配分するためその成分から揚水される。この系は3つの成分もっている。つまり表流水部分系、浅層帯水層と被圧帯水層とである。

Q_{ik} は k 番目の活動に配分される水量で、1期間中に系の i 番目の成分の水量 Q_i から配分される。

$G_k(Q_{ik}, Q_i, V_\ell)$ は系の3成分の中の任意の成分に貯留されている水量が V_ℓ のとき、その中から Q_i なる水量なる総水量を揚水するが、 k 番目の活動に水量 Q_{ik} を配分するとき発生する純価値である。

S_j は状態 S_i の変換から生ずる状態である。この変換は k 番目の活動に水量 Q_{ik} を配分することが原因となって生ずる。

最適性の原理を用い、前節と同様系の各成分からある水量を種々の作物に最適配分するときの関数方程式は

$$f_k(S_i) = \max_{Q_{ik} \in P_n} [G_k(Q_{ik}, Q_i, V_\ell) + f_{k-1}(S_j)] \quad (6)$$

$$S_i = (Q_i, V_\ell) \quad (7)$$

$$S_j = (Q_i - Q_{ik}, V_\ell - Q_{ik}) \quad (8)$$

であらわすことができる。

P_n はすべての許容決定を包含する集合である。系の成分の各々に対しては1つの集合があり、全体でそのような集合が3つある。つまり

$$f_0(S_i) = 0 \quad (9)$$

(6)式のような方程式が3つあって、その各は系の3成分の何れかに対応している。それぞれの方程式は異なる状態集合、異なる決定集合、および異なる G_k の集合をもっている。(6)式の解からえられる結果は全体としての最適化を求めるためにダイナミックな模型に投入される。

7. 模型の解

前節で展開した模型は Roswell 盆地で応用された。その模型は節節で示した方程式(3), (4)および(6)である。これらの方程式には一般解はない。解を求めるためには特定の場合に応じて数値解を求めるより他はない。模型は通常単純化されるので電子計算機で解くことができる。しかし余りにも単純化すると現実から離れる。Roswell 盆地のこの問題についての解は IBM 360, Model 44 計算機を用いて求めた。

8. 模型への投入量

便益関数

Dregre 等 [1967] は Roswell 盆地の作物別エーカー当純利益を求めた。D'Arge [1970] は土地と経営への純利益から盆地 1 エーカー当りの附加価値を計算した。そのすべての作物の便益関数は非線型である。2 次多項式で土地 1 エーカー当り附加価値を揚水量の関数としてつぎのように推定した。

$$v_a = -443.89 + 181.86x - 12.26x^2 \quad (10)$$

ここで v_a はエーカー当りのアルファ・アルファ (牧草) のドル表示附加価値で、 x は土地 1 エーカー当りの灌漑水量である。

$$V_c = -90.91 + 242.54y - 32.32y^2 \quad (11)$$

ここで V_c はエーカー当り綿花のドル表示附加価値で、 y は土地エーカー当りの灌漑水量である。揚水費は純利益の計算において深度により余り変化しないものと仮定されていたが、そうした関係は考慮されている。深度の関数としての揚水費は附加価値の計算では落されていたのである。

揚水費

1 単位の水量の揚水費は井戸の地下水面までの深さと井戸の特性、および盆地の帯水層毎に異っている。

盆地の 31 ケ所の異なる井戸での燃料費が集められた。天然ガスは 4 つの井戸で使われていた。これらの情報と 1969 年の年間の井戸別総水量から、エーカー・フィート当りの水量の燃料費が計算された。エーカー・フィートの水量を 1 フィート揚水するための費用は重みをつけた揚水距離の加重平均で計算した。これらの費用は表 1 に集計されている。その値は Long [1965] が Roswell 盆地について集めた値に可成り近い。

表1 エーカ・フィートの水量を1フィート揚水
するときの費用（1965年のドル表示）

平均燃料費			
帯水層	電 力	天然ガス*	加重平均†
浅層	0.039	0.017	0.036
主要被圧	0.030		0.028

* 浅層帯水層この比率を用いて計算

† 維持費，修繕費，給油および労賃を含む

貯溜量 — 深度の関係

浅層地下水帯水層および主要被圧帯水層での貯溜量と地下水面までの平均深度との関係は歴年の場合線型を仮定した。そのことは帯水層からの揚水が一様分布であることを意味している。

盆地の東西にわたる理水と地質との関係を示す平均断面が帯水層と半加圧層の等層厚線図から計算された。地下水面までの平均深度と浅層帯水層の貯溜量との関係が平均断面から求められた。最大許容平均揚水深度の145フィートと最小平均揚水深度の45フィートは浸透とその他の排水問題を含まないものと仮定しておく。その関係はつぎの通りである。

$$D = 145 - 2.50 V_1$$

ここでDはフィート表示の地下水面までの1月の平均深度であり， V_1 は百万エーカ・フィート表示の浅層帯水層の許容深度における貯溜量を示している。

同様な関係が主要被圧帯水層について求められた。この帯水層の被圧部分の貯溜性は水を取入れる地域の貯溜性と比較すると無視できる。この取入れ地域の井戸の1月の平均水面はこの帯水層の被圧部分について，アメリカ地質調査所（U. S. Geological Survey）の記録に示されているように，1月のポテンシオメトリックの表面と相関をもっている。盆地の平均断面からつぎの関係がえられた。

$$h = 150 - 27.273 V_2 \quad (13)$$

ここでhはフィート表示の主要被圧帯水層の平均1月の揚力量で， V_2 は百万エーカ・フィート表示による主要被圧帯水層の許容深度の範囲に貯溜されている水量である。

最大平均揚力量の150フィートは認められ平均貯溜性の0.03が取水地域で仮定された。被圧部分における貯溜は無視することにした。浅層帯水層と主要被圧帯水層の最大貯溜量はそれぞれ4.0および5.5百万エーカ・フィートであると許容深度範囲の中では推定されている。

井戸における水面低下

これまでの研究者 [Buras, 1963; Burt, 1964] は揚水井での自動的な水面低下に伴う揚水費の増加部分を便益関数から差引くことをしなかった。揚水が進行すれば、井戸の揚水量に幾分比例して揚水量は増加する。浅井戸と深井戸との水面低下は地層水頭損失係数 (formation loss coefficient) B と井戸水頭損失係数 C との平均値から、井戸からの流出量の関数として計算された。

浅層帯水層については B と C とに対する対数平均値はそれぞれ 8.37 ft / cfs および $2.98 \text{ ft / (cfs)}^2$ である。これらの値はステップ式揚水試験の分析からえられたもので、平均灌漑サイクル、井戸が使用される平均日数、2つの帯水層から取水する井戸の数等を考慮して調整された [Saleem and Jacob, 1970]

井水位降下量の関係は [Jacob, 1947]

$$S = BQ + CQ^2 \quad (14)$$

で、ここで Q は井戸の揚水量である。

井戸の附加的な揚力に基づく揚水費は貯溜—深度との関係から計算された揚力に関連した費用に加えて、附加価値から控除された。

漏水

帯水層間の漏水はつぎの関係から計算した。

$$L = K' A \Delta h / b' \quad (15)$$

ここで L は底面積 A の半加圧層の垂直な柱を通じて漏水が生ずるときの体積変化量、 Δh は A における2つの主要帯水層間の平均水頭間の差、 K' / b' は漏水係数で所与の地域での半加圧層の透水係数 K' とその厚さ b' との比である。漏水は2つの帯水層の平均水頭間の差の関数としてのみならず、漏水が生ずる難透水層の面積をも変数として与えて、計算された。

帯水層へのかん養

浅層帯水層と主要被圧帯水層への年間かん養量とその横型の数値解に用いる確率が Saleem と Jacob [1970] の方式によって計算された。2つの帯水層へのかん養の速度とその確率は表2に示されている。

表2 68年間の記録に基づくエーカ・フィート表示のかん養量とその確率

主要被圧帯水層		浅層帯水層	
かん養量	確 率	かん養量	確 率
150,000	0.10	20,260	0.30
184,000	0.20	35,000	0.40
246,000	0.40	49,600	0.30
291,000	0.20		
361,000	0.10		

自然流出量

この横型の数値解を求めるために浅層帯水層からの自然流出量の年間エーカ・フィートの平均値を130,000エーカ・フィートとし、この数字は基底流出その他の自然損失を含んでいる。

その他の投入量

将来附加価値を現在価値に換算するために5パーセントの自然利子率を用いた。この模型で仮定された作物のパターンは表3で示されており、盆地内で栽培されている作物の年収穫高の記録に基づき推定された。

表3 DP模型のための作物のパターン

	浅層帯水層	主要被圧帯水層	合 計
アルファ・アルファ	18	30	48
綿 花	14	22	36
トウモロコシ	4	8	12
雑 穀	6	12	18
合 計	42	72	114

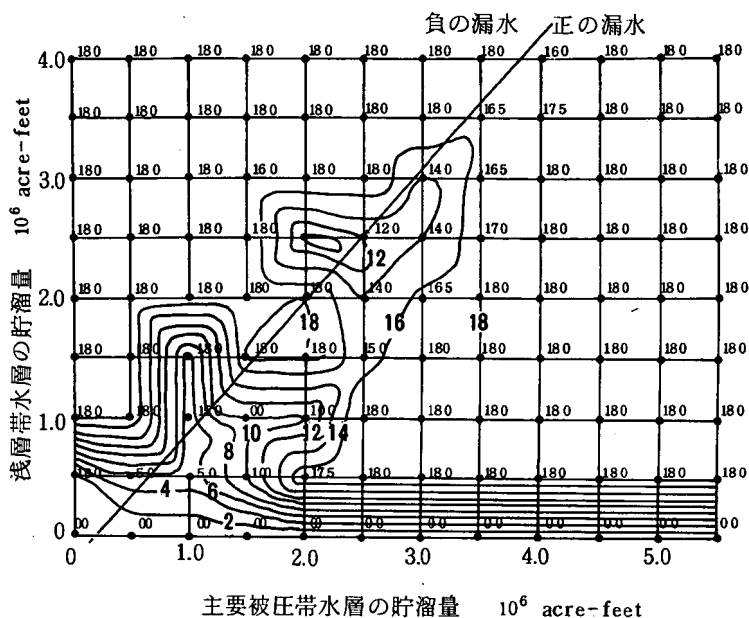
単位は1,000エーカ

灌漑に用いられた表流水は盆地内では総灌漑用水量の4パーセント以下である。したがって表流水は独立した状態を示すものとしてこのDP模型から除外されたが、そのために3次元の模型が2次元に単純化され、それによって可成りの計算時間が節約された。しかもそのために最適政策に与える誤差は無視できるものである。

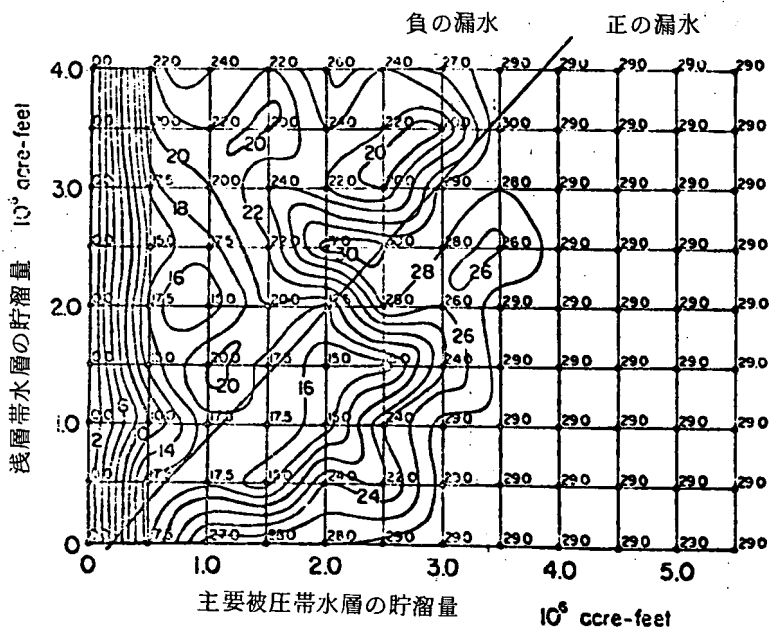
トウモロコシと雑穀の灌漑に対しては、それぞれエーカ当りの土地に3.00エーカ・フィートおよび2.25エーカ・フィートの水が揚水されるものとして仮定したが、それによりトウモロコシでは105.04ドル、雑穀に対しては66.15ドルの最大粗附加価値が発生することになっている。これらの作物を栽培することからえられる純附加価値は計算時間の節約のために便益関数に加えられた。このような単純化に生ずる誤差は、トウモロコシと雑穀により消費される水量が主要作物であるアルファ・アルファと綿花のそれに比較して少ないので、少ないものと考えられる。DPの関数方程式の数値解のフロー・チャートはいくかの出版物の中で示されている〔例えばBeliman, 1962, 有水・小田中共訳, 応用ダイナミック・プログラミング(日科技連), Newhauser, 1966〕

9. 結 果

浅層帯水層と主要被圧帯水層に対する最適管理政策の結果は第4図と第5図とに示されている。それらの政策はこれまで述べてきたように系の物理的、理水的特性に基づくものであって、便益関数は時間に関して不変、解は8期間で最適政策に収束している。



第4図 $n \geq 8$ に対し目的関数を最大化する浅層帯水層からの年揚水量



第5図 $n \geq 8$ に対し目的関数を最大化する主要被圧帯水層からの年揚水量

10. 結果の判定

第4図と第5図とに示されている最適政策を判定するためには、最適政策に影響を与える経済要因について考えなければならない〔Burt, 1966〕。帯水層の揚水政策を増加させる経済要因の1つは割引率で、それは将来の便益の影響を減少させ、現在の便益の影響力を大きくする傾向が生ずる。もう一つは1期間当りの水利用の水準を低くするときに生ずる限界収益の増加である。逆に最適政策を減少させる2つの経済的要因は政策の水準が既に高いときに生ずる限界収益の減少と、残りの計画期間に関連する期待揚水費用の増加である。これらの要因に加えて帯水層相互の干渉は2つの連結された帯水層系の最適政策に影響を与える。1つの帯水層から他の帯水層への漏水は1つの帯水層の最適管理を、その帯水層のみならず他の帯水層の貯溜量にも強く依存せざるをえない関係を作り出す。そこで最終的な最適揚水のためのルールはこれら5つの要因のすべての関数であって、それらの正と負の要因を適正に評価した結果として決定される。それ故最適政策の解釈の仕方は可成り複雑である。

電子計算機による計算結果は第4図と第5図の浅層帯水層と主要被圧帯水層に対する最適政策を示した等量線で描かれている。漏水量が零の線もそこに示されている。漏水は主要被圧帯水層から浅層帯水層に向う場合は正值であり、線の右側がそれに当たり、左側には負値の漏水が示されている。

第4図では浅層帯水層での最適揚水政策は浅層帯水層の貯溜量が著しく低い場合と、漏水が零の線の近傍を除いて、帯水層中のすべての貯溜量に対して同じである。最適揚水政策は帯水層間の相互的な関係にある漏水によって強く影響されるように思われる。この漏水は漏水零の線に並行した傾向を示す低い線によって示されている。第5図では漏水零線の左側にある2つの高い所に対応して、第4図では2つの低い所があり、それは恐らくこれらの貯溜量に漏水が生ずるために、浅層帯水層で水が失われることが原因になっていると考えられる。

主要被圧帯水層の最適揚水政策はこゝでも帯水層間の漏水の影響を受けるが、それは漏水零線の反対側に高い所と低い所とが一直線に並ぶことによって示される。2つの高い所は最適政策では漏水により被圧帯水層の水量がふえるので、その状態では主要被圧帯水層からより多くの水を揚水することになっている結果を示している。同様に2つの低い所は帯水層が水を失うので揚水量を減少させることを示している。第5図に示されている低い所は、浅層帯水層の貯溜量が約325万エーカー・フィートであるから、恐らく最適政策に影響を与える他の要因によって生じたものと思われる。

一般にこゝでえられた結果は直観的に考えられる結果によく合致している。つまり帯水層の最適揚水政策は帯水層の貯溜量の高いときには高い。そこで純産出量が正值の限界値を示さなくなった時点での水量を揚水政策が越えることは全くなかった。所与の貯溜量の値をもつ2つの帯水層の揚水政策の合計はまたよくこの関係に従い、漏水の影響は単一帯水層の場合ほど明瞭でない。

第4図と第5図に示されている揚水政策はアルファ・アルファと綿花栽培のための灌漑水量の場合だけであるが、この他トウモロコシや雑穀生産のために浅層帯水層や主要被圧帯水層からの揚水が必要なので、これら2つの作物の耕作面積は第3表に示されている。

11. 結果の利用の仕方

地下水面までの平均深度および浅層帯水層と主要被圧帯水層でのポテンシオメータによる表面は、それぞれ最適揚水を必要とする年の1月の地図から計算されている。各帯水層の貯溜量は貯溜-深度関係を用いて対象とする年次について計算される。2つの帯水層の貯溜量が明かになると、これらの帯水層から当該年次に揚水される最適水量は第4図および第5図から読み取ることができる。この揚水量はアルファ・アルファと綿花の栽培だけで、その耕作面積は第3表に記載されている。これらの揚水量にトウモロコシと雑穀の栽培に必要な地下水量が加算されなければならない。

12. 結果の制約

この論文から求められる最適揚水政策は模型に対する理水、経済その他の投入量に基づいて決められる。その結果の信頼性は模型の定式化および解の中に陽表的に記載され、あるいは仮定された種々の仮定の有効性によって決まる。誤差を生ぜしめる理水学的投入量は貯溜-深度の関係である。これらの関係は最大最小許容揚水深度、帯水層の平均理水パラメータおよび帯水層の面積をも示している。最適政策は目的関数により強い影響を受けるが、その目的関数は、異なる水量の灌漑により異なる作物に附加される価値と揚水費とからなっている。割引率もまた最適政策に影響を与える。模型を連続型から離散型に単純化するときを生ずる誤差は貯溜量と揚水量との間隔を小さくし、かん養と模型への投入に用いられる関連確率の数を大きくすることにより更に減少させることができる。結論として求められる最適政策は模型に加えられる限界と制約条件に関し最適になるということである。

13. 結果の応用

浅層帯水層の地下水面と主要被圧帯水層のポテンシオメータの水面への平均深度は異なる年の1月の Roswell 盆地の地下水面地図とポテンシオメータ水面図によって推定された。その結果は第4図に示されている。これらの揚水量はアルファ・アルファと綿花の栽培に用いられたもので、その耕作面積は第3表に示されている。これらの揚水量に加え、トウモロコシや雑穀に用いられる80,000 エーカー・フィートの水が加算される。第4表は地下水の総量と4つの作物の全部の灌漑のために用いられるエーカー当りの平均水量を示したものである。

揚水される平均最適水量はエーカー当り4.4から4.8エーカー・フィートの間にある。しかし最近 Roswell 盆地の灌漑率(1エーカーに対する)を配水中の損失に相当するエーカー当り6エーカー・インチにエーカー当り3エーカー・フィートを加えたものと裁判所は規定した〔State of New Mexico versus L.T. Lewis et al., 1970; State of New Mexico versus Hagerman Canal Company et al., 1970〕。しかしながら一部には歴史的に彼等は利益を更に上げられるように

第4表 New Mexics, Raswell 盆地の平均地下水面, 貯溜量,
2つの帯水層からの最適揚水量と最適水灌漑率

浅層帯水層				
年 次	平均地下水 深 度 (呎)	貯 溜 量 10 ⁶ acft	揚 水 量 10 ³ acft	
1926	3407	3.48	180	
1944	3467	3.48	180	
1954	3384	2.56	175	
1964	3374	2.16	165	
1969	3367	1.88	170	
平 均	3388	2.71	174	

主要被圧帯水層				
平均地下水 深 度	貯 溜 量 10 ⁶ acft	揚 水 量 10 ³ acft	4作物への 総揚水量 10 ³ acft	灌漑率の acft/ac
3451	4.99	290	550	4.8
3461	5.35	290	550	4.8
3417	3.74	275	530	4.6
3497	3.01	260	505	4.4
3403	3.23	265	515	4.5
3425	4.06	276	530	4.6

深度はフィート単位の高さで示されている。

エーカー当り4エーカー・フィートの水量を余計に割当てられてきたと報告している。エーカー当り平均最適揚水政策はいくつかの理由によって盆地内で記録されている実際の揚水量よりも大きな水量を揚水することになっている。まづ作物のパターンが変化すればそれにより最適揚水量が変る。またアルファ・アルファと綿花との附加価値は、決定模型への投入量として用いられるときには、エーカー当りそれぞれ7.33と3.75エーカー・フィートで最大産出量をもたらすことになっている。Roswell 盆地の現在の揚水量はアルファ・アルファに対しては5乃至6エーカー・フィートである。最適平均揚水量は耕作地1エーカー当りで求められているのに反し、ニューメキシコ州工務局は栽培面積のみならず休閑地を含めた水利権対象面積について算出している。したがってこの盆地では水利権対象面積の方が

耕作面積よりも広いわけであるから、州工務局の計算灌漑率は最適値より小さくなる。

Roswell 盆地では塩水が Roswell 市の東北および東部から主要被圧帯水層の上の市街地に迫っており〔Hood et al., 1960 ; Spiegel 1967〕, Roswell 地区からの純揚水量の増加に伴い、塩水の侵入速度は早くなっている。この制約条件は情報不足のためにこの決定模型には盛り込まれなかったが、この制約条件をこの模型に課するときには、帯水層の揚水政策は恐らく減少するであろう。

14. 要約と結語

2つの連結した漏水のある帯水層と表流水部分系に対する最適揚水の問題に対し、確率DPによる接近が試みられた。3次元のDP模型が表流水の系を独立した状態変数として模型に取入れないことにしたために、2次元に単純化された。この単純化はこの盆地で使用される表流水がこの盆地の総灌漑用水の4パーセント以下であることを考えあわせると妥当な処置といえよう。アルファ・アルファと綿花の2つの作物だけがこの模型では表立って取扱われた。

浅層帯水層と主要被圧帯水層に対する最適揚水政策は模型の解からえられる。そこでは帯水層間の相互の漏水、帯水層の確率のかん養、浅層帯水層からの自然流出のみならず、系の物理的特性、灌漑面積の範囲、井戸の自然水位低下に伴う追加的な揚水費が考察されている。その最適揚水政策は作物別の附加価値、帯水層中の貯溜量、割引率および帯水層間の相互的な漏水により影響を受けるように定式化されている。これらの要因の中には最適揚水政策を増加させるものもあれば、減少させるものもある。そして漏水はこれらの影響を変化させ、つまり帯水層の貯溜量に応じ揚水政策を増加あるいは減少させることになる。これらすべての要因の総合化が最終的な最適政策の決定につながる。その政策は模型に課せられた制限と制約条件に関し最適である。

1つの帯水層から他の帯水層への漏水は2つの帯水層の場合、最適政策に強い影響を与える。そして連結された漏水のある帯水層の場合に求められた最適政策は、1つの帯水層から他の帯水層への漏水を考えないときにはこの盆地に発生する収益の最大化を実現させることにならないであろう。つまり帯水層は連動するものとして取扱わなければならない。

15. 参考文献

REFERENCES

- Bellman, R., *Dynamic Programming*, 339 pp., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1957.
- Bellman, R., *Applied Dynamic Programming*, 363 pp., Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1962.
- Buras, N., Conjunctive operation of dams and aquifers, *Proc. Amer. Soc. Civil Eng.*, 89 (HY6), 111-131, 1963.
- Burt, O. R., The economics of conjunctive use of ground and surface water, *Hilgardia*, S6(2), 31-111, December 1964.
- Burt, O. R., Temporal allocation of groundwater, *Water Resour. Res.*, S(1), 45-56, 1966.
- Dane, C. H., and George O. Bachman, *Geologic map of New Mexico*, scale 1:500,000. U.S. Geological Survey, Washington, D.C., 1965.
- d'Arge, R. C., Quantitative water resource basin planning: An analysis of the Pecos River basin, New Mexico, N. Mex. Water Resour. Inst. Rep. 8, Las Cruces, 1970.
- Dregne, H. E., E. T. Garnett, and R. R. Lansford, The effect of soil and water quality and rate of irrigation application on farm income, New Mexico State University, Las Cruces, 1967.
- Hall, W. A., W. S. Butcher, and A. Esógbue, Optimization of the operation of a multiple-purpose reservoir by dynamic programming, *Water Resour. Res.*, 4(3), 471-178, 1968.
- Hantush, M. S., Preliminary quantitative study of the Roswell groundwater reservoir, New Mexico, 113 pp., Special report of the New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, 1955.
- Hood, J. W., R. W. Mower, and M. J. Grogan, The occurrence of saline ground water near Roswell, Chaves County, New Mexico, N. Mex. State Eng. Tech. Rep. 17, Santa Fe, 1960.
- Howard, R. A., *Dynamic Programming and Markov Processes*, 136 pp., M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1960.
- Jacob, C. E., Drawdown test to determine effective radius of artesian wells, *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, 112, 1047-1070, 1947.
- Little, J. D. C., The use of storage water in a hydroelectric system, *J. Oper. Res. Soc. Amer.*, 3, 187-197, 1955.
- Long, R. B., Cost of pumping irrigation water in ten New Mexico counties, N. Mex. State Univ. Bull. 490, Las Cruces, 1965.
- Maddox, G. E., Relation of the San Andres limestone to the 'carbonate aquifer' in the Roswell basin, New Mexico, pp. 32-36, in symposium on the San Andres limestone, N. Mex. Geol. Soc. Spec. Publ. 3.

- Socorro, 1969.
- Maass, A., et al., Design of Water-Resource Systems, 620 pp., Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1962.
- Moran, P. A. P., The Theory of Storage, 142 pp., John Wiley, New York, 1959.
- Nemhauser, George L., Introduction to Dynamic Programming, 256 pp., John Wiley, New York, 1966.
- Parker, D. S., and J. A. Crutchfield, Water quality management and the time profile of benefits and costs, Water Resour. Res., 4(2), 233-246, 1968.
- Saleem, Z. A., Optimal utilization of water resources of a complex overdrawn basin in a semiarid irrigated area, Ph.D. dissertation, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, 1969.
- Saleem, Z. A., and C. E. Jacob, Optimal utilization of coupled leaky-aquifer systems over time, paper presented at the 19th annual meeting of the American Geophysical Union, Washington, D. C., April 1968. Abstract in Trans. Amer. Geophys. Union, 49, 173, 1968.
- Saleem, Z. A., and C. E. Jacob, Dynamic programming model and quantitative analysis, Roswell basin. 180 pp., N. Mex. Water Resour. Inst. Rep. 10, January 1971.
- Spiegel, Z., Fundamental concepts of geohydrology applied to the Pecos valley and related aquifer systems, 47 pp., report for the N. M. Water Resources Research Institute, New Mexico State Engineer, Santa Fe, August 1967.
- State of New Mexico versus L. T. Lewis et al., amended decision of the court in the district court of Chaves County, State of New Mexico, No. 20294, 1970.
- State of New Mexico versus Hagerman Canal Company et al., Amended decision of the court, in the district court of Chaves County, State of New Mexico, No. 22600, 1970.
- Young, G. K., Finding reservoir operating rules, Proc. Amer. Soc. Civil Eng., 93(HY6), 297-321, 1967.

(Manuscript received July 28, 1970;
revised December 14, 1970)

16. 追 記

今迄の説明では連結された漏水のある滞水層での揚水の運動については何もふれていないが、Z. A. Saleem と C. E. Jacob は別の論文

1) Z. A. Saleem and C. E. Jacob, Drwdown Distribution Due to Well Fields in Coupled Leaky Aquifers 1. Infinite Aquifer Systems, Water Resources Research, vol 9, No 6 1667-1678, Dec. 1973.

2) 同 上

2. Finite Aquifer Systems, Water Resources Research, vol 10, No 2, 336-342, April 1974.

の中でこの問題についてふれているので、これらの論文を添附しておく。したがって Jacob 模型は連立偏微分方程式の極値問題になっていることが理解されよう。