

工業用・水資源の現状と処理技術の方向

Water Resources and Treatment Technology for Industrial Uses

鈴木基之*

Motoyuki SUZUKI

多用水型の工業について最近の用水源の変化を概括し、将来プロセス水の回収最利用が重要となることから、工程別排出水の処理に伴う諸問題を抽出し、処理技術の研究の方向について検討を加えた。

工業用水に関する資源的状況

わが国の降雨量は平均すると年間約 6 000 億 m³ であり、渇水年には約 3 300 億 m³ であるが、人間生活に利用される形態の水量は約 700 億 m³ に過ぎない。このうち工業用水の淡水補給水として使用される量は年間 150 億 m³**程度であり、長期見通し¹⁾ によると昭和 60 年度には 243 億 m³、65 年度には 274.4 億 m³ の需要を見込んでいる。最近 10 年間の工業の発展に伴う工業用水量の変化は図 1 に示すように、総量として約 2.5 倍に増加しているが、この増加はほとんど工場内での回収水の増加でまかなわれており、補給水としての使用量 4 000 万 m³ / 日はこの数年一定している。この補給水の内訳をみると井水（地下水）、地表水、伏流水が水源としてすでに限界に達し、また排出水による汚染や地盤沈下など種々の問題を生んでいることから頭打ちとなっているのに対し、工業用水道の増加が目立っている。

表 1 に産業別分類に従った多用水産業 7 種を選び業種による水源別および用途別の用水量（昭和 50 年度）を示

すが、業種間の差異がはっきりと出ており、歴史的な工場立地の事情にもよると思われるが、水源の面では、食

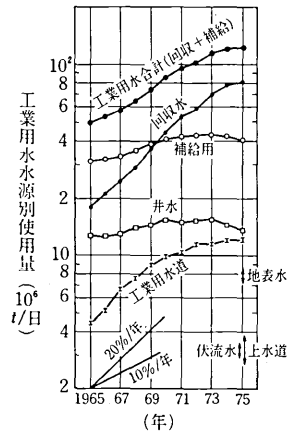


図 1 工業用水の水源別年次使用最変化 (通産省工業統計表より作成)

表 1 業種による水源用途別工業用水量 (昭和 50 年)

(括弧内は淡水計に占める割合(%))

分類	水 源								用 途 (淡 水)					用 途 (海 水)				
	工場排水	上水道	地表水	伏流水	井 水	その他	回収水	淡水計	海水	ボイラー	原料	処理・洗浄	冷 却	温 潤	原料	処理・洗浄	冷 却	温 潤
18, 19 食 料 品	549 (10.4)	568 (10.8)	884 (16.8)	121 (2.3)	1843 (35.0)	28	1271 (24.1)	5266 (100)	1807	231 (4.4)	317 (6.0)	1601 (30.4)	2529 (48.0)	299 (5.7)	4	38	1744	16
20 織 維	222 (4.9)	191 (4.2)	139 (3.1)	251 (5.5)	3022 (66.4)	28	699 (15.4)	4553 (100)	40	232 (5.1)		1354 (29.7)	226 (5.0)	2357 (51.8)				40
24 パルプ紙・加工	2113 (15.3)	56 (0.4)	3911 (28.2)	1523 (11.0)	2067 (14.9)	56	4124 (29.8)	13851 (100)	92	355 (2.6)		11375 (82.1)	1374 (9.9)	176 (1.3)			18	66
26 化学工業	4144 (9.7)	307 (0.7)	1765 (4.1)	722 (1.7)	2280 (5.3)	250	33156 (77.8)	42624 (100)	14738	643 (1.5)	14 (0.03)	2507 (5.9)	37204 (87.3)	1383 (3.2)	656	267	13554	119
27 石油・石炭製品	847 (16.0)	33 (0.6)	25 (0.5)	0	25 (0.4)	22	4326 (81.9)	5279 (100)	7344	208 (3.9)		148 (2.8)	4757 (90.1)	31 (0.6)		25	7288	
31 鉄 鋼	2948 (10.4)	255 (0.9)	581 (2.0)	110 (0.4)	517 (1.8)	70	24931 (84.8)	29411 (100)	15548	122 (0.4)		2873 (9.8)	25113 (85.4)	506 (1.7)		110	15367	3
36 輸 送 機 械	191 (2.9)	332 (5.1)	12 (0.2)	3	575 (8.8)	5	5403 (82.9)	6521 (100)	106	55 (0.8)		2764 (42.4)	2437 (37.4)	940 (14.4)		20	65	
合計 (その他を含む)	11945 (9.8)	3152 (2.6)	7921 (6.5)	2925 (2.4)	13622 (11.2)	628 (0.5)	81432 (67.0)	121625 (100)	45108	2225 (1.8)	425 (0.3)	25161 (20.7)	82232 (67.6)	6975 (5.7)	2368	516	41812	140

工業統計表 (昭和 50 年度)²⁾ より作成

* 東京大学生産技術研究所 第 4 部
** 実績値、第三次全国総合開発計画によると 172.9 億 m³、産業構造審議会工業用水基本政策部会中間答申によると、167 億 m³ が見込まれていた。

料品工業、繊維工業、パルプ紙工業の回収率が低く、特に前二者の井水への依存、パルプ紙工業の河川水への依存度が大きいことが見てとれる。昭和40年代初期に著しい発達を見せた工業用水道はこれに比し、化学工業、石油精製、鉄鋼業などにおいて利用されている。これらの業種に共通する特徴としては、埋立地に大型プラントを設置するなど、他の水源への依存が難しいことから工業用水道への依存が高く排水基準の強化が因となってプロセス内の用水システムが比較的合理化され、節水、高回収型の工場となっている例が多い。

用水の用途との関連で見ると、石油精製、化学工業、鉄鋼業は冷却水をほぼ完全に回収しており、輸送機械業では温調水、処理洗浄水も回収再利用されている。パルプ工業でも処理水の一部は回収される。

間接冷却水は使用後冷水塔においてその一部を蒸発させることにより自身が冷却され、容易に再び利用されるが、スライム防止等の目的で添加する薬塩の濃縮が生じるためその一部をブロー水として引き抜く。このブロー水量は循環水量の2%程度でありその総量は概算でボイラー用水量に匹敵すると思われ、量としても無視できず将来処理法の確立と共に再利用される方向にむかうものと思われるが、現在はここまで来ていない。

プロセスにおいて用いられる水は、原料、中間体、製品に対して洗浄剤、抽剤、反応その他の媒体などとして直接接し、したがって、原料や中間添加剤、反応副生物の一部をそれに伴って排出する。したがってプロセス水の取扱いは、個別のプロセスに特有な考え方の導入が必要となる⁴⁾。将来さらに工場内の水回収・再利用を考える上で重要となるのはこのプロセス水の処理であろう。次節以後でプロセスより排出される水の処理、再利用を目的として考えるべき事柄の概略を示したい。

プロセスよりの排水

生産プロセスの内容が決まると、プロセスからの廃棄物量はだいたい、生産原単位当りで決まる。すなわち精製工程においては原料中の不純物、単位反応における不要副生物の量は生産量に比例して決定される。したがって大量の水を用いれば排水中の着目廃棄物の濃度は当然低下する。過去の工場立地、操業においては、プロセスにおける使用水量は生産原単位として決定されるよりは、廉価に手に入るだけ使用する方式がとられたと言って過言ではない。一つの例として染色工場（浸染）の水使用量を加工量に対して示した調査結果を図2に記す⁵⁾が、化合機染色工場が、その立地のための必要条件として、比較的容易に伏流水、井水など多量の水を入手できることが主要となっていたため、このようにバラツキが大きく、逆に節水の余地が大きいことを意味している。比較的歴史が古く、水資源的に厳しい条件下で増産を繰

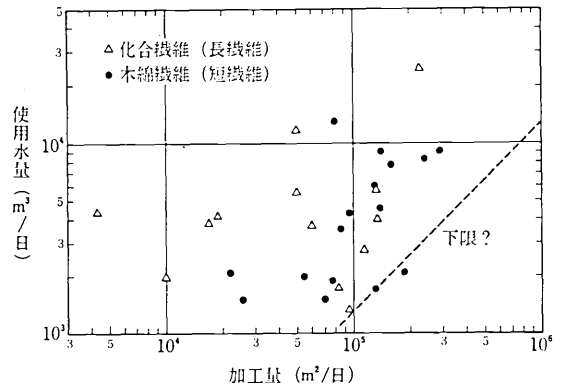


図2 浸染・染色加工工場における加工量と使用水量の関係
返してきた木綿染色（図中●）との比較およびプロセス内部における水の利用状況の検討から若干のプロセス改善により図中の点線くらいまでの水使用低減は可能であろうと判断される。

水量低減、高濃度処理の経済性

前述のようにプロセス排水中の処理すべき廃棄物量（汚染負荷）は生産原単位により決まってくる。一定の汚染負荷Pに対し水量Qを用いているとすると処理すべき水の濃度は $C = P / Q$ となる。ここで単位処理法についてその建設費が処理水量および濃度についてどのように変化するかの検討を試みよう。

濃度一定の水を処理するプラントの建設費Yは通常の化学プラントと同様に水量Qにより決まってくる^{4),5)}

$$Y (C: \text{一定}) \propto Q^\alpha \quad (1)$$

α の値としては

凝集沈澱装置	$\alpha = 0.66$
加圧浮上	$\alpha = 0.66$
活性汚泥処理	$\alpha = 0.75 \sim 0.78$
活性炭吸着	$\alpha = 0.57 \sim 0.94$

活性炭吸着処理に関し、米国環境保全局（EPA）の技術移転資料⁶⁾によると図3に示すように活性炭吸着プロセスの建設コストが処理水量の関数として試算されるが、本稿で問題とする水量範囲では $\alpha = 0.6$ 程度と考えてよからう。

一方処理水量を一定として処理水濃度Cが異なる場合の建設費に関しては同様に

$$Y (Q: \text{一定}) \propto C^\beta \quad (2)$$

とくと、この β は凝集沈澱、加圧浮上、活性汚泥処理装置については生成スラッジの処理部分、活性炭吸着については吸着塔について接触時間を一定として考えているため再生炉部分の大きさの変化がそれぞれ全建設費への寄与として効くこととなり、大略0.2~0.4と見るのが適当であろう。前例の活性炭吸着プロセスについてE P

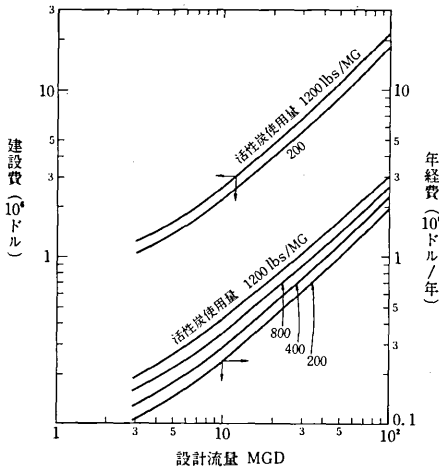


図3 活性炭吸着装置の建設費および運転経費の設計流量依存性, EPA 試算(再生含む) EPA・STP 指数=175.0

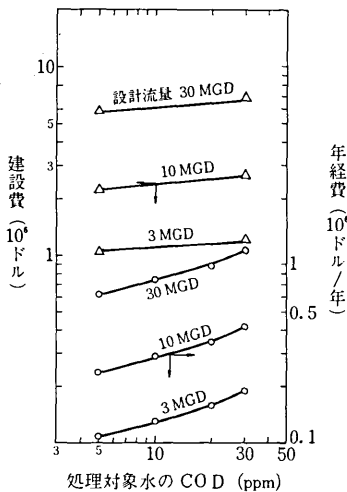


図4 活性炭吸着装置の建設費および運転経費の入口濃度依存性, EPA 試算をもとに作成
EPA STP INDEX = 175.0
1 MGD = $3.78 \times 10^3 \text{ m}^3 / \text{D}$

A の試算を基に入口濃度に対する建設費の依存性を示すと図4 のようになる。この例では、 $\beta = 0.1$ 程度である。式(1)、(2)より

$$Y = Y_0 \cdot Q^\alpha \cdot C^\beta = (Y_0 \cdot P^\beta) \times Q^{\alpha-\beta} \quad (3)$$

すなわち汚染負荷 P が一定であれば、 $\alpha - \beta > 0$ であるので、水量 Q を小さく高濃度とした方が処理装置の建設コストのみをとってみても経済的となるのである。

以上は、いくつかの単位処理における建設費の水量依存性において成立することであるが、もちろんそれぞれの処理技術の適用は濃度範囲による一定の限界が存在しこのため既存技術の中には高濃度処理に適さないものも存在している。

さらに工程別に排出される物質が異なるときには、その物質に関して最も高濃度の処理を行うためには、工程別の排水の処理を念頭におくこととなり、工程別排水は通常の排水処理の対象となる総合的な排水とは著しく異なっているため、この特徴に見合った処理技術を用いる必要が生じることとなる。

工程別処理の満たすべき条件

工程別の排水の処理プロセスとして満たすべき条件に、つぎのような項目を掲げることができよう。

- (1) 高濃度の処理に適合すること
- (2) 工程排水が一般に時間的な水量変動、濃度変動を伴うため、これに耐えること
- (3) 着目特定成分を選択的に除去できること
- (4) 処理に当って外部から第三成分を導入しないこと

が要求され、さらに一般的に

- (5) スペースをとらぬこと
- (6) 省エネルギー型であること
- (7) 建設費ほか、経済性の要求を満たすこと
- (8) 処理プロセスからの二次的な汚染を出さぬこと
- (9) 分離された不用成分の処理が容易であること

条件(1)は前述のように工程用水の節減によって当然生じてくるわけであるが、例として染色工場の糊拔精練工程において、洗浄水を多段洗浄槽の温度勾配と逆向に流す並流・向流併用方式によって水量を約70%節減でき、COD 濃度3.4倍(1800ppm)の工程排水となることが示されている。³⁾ 高濃度排水の限界はむしろ含有されている物質の溶解度、管路内のスケール付着限界、輸送に伴う問題などによって決まってくると考えられる。

条件(2)は半連続または回分工程のみならず連続工程においても時折見られる点検時の休止、再開、操作条件の変動などを伴う変化で、特に総合排水の場合に比して工程別排水ではその変化巾は著しく大きい。

条件(3)は、工程よりの排水の特徴として内部に含まれる成分が比較的固定し易い少数成分であることに対応している。また、場合によってそのうち数成分は有用成分として経済的に回収の可能性を有する場合がある。食料品工業における最終洗浄水(たとえばポテトチップ製造業における洗浄漂白水)は往々にして不要成分である着色成分、懸濁固形物と共に多量の有用成分(たとえば澱粉、蛋白質成分等)を含有する。本来プロセスの目的とするところは前者の成分の除去であるが、澱粉等の存在のため、その排水は高 BOD となり処理に当って問題を提起することとなる。この例では、排水水中に含まれる不用成分のみを除去し、栄養成分を残したまま洗浄工程で循環利用することにより、有用成分の食品からの抽出を極小に抑制することが可能となり、節水と同時

に有価物の浪費を防ぐ方策となる。⁹⁾

条件(4)は前項に例を上げた、工程内の水循環を前提とするときに必要条件となることはいうまでもない。

以上の条件のうち特に第1, 2, 4の条件から既存の溶存物質の処理技術を点検すると表2に示すように問題点が明らかとなる。

高濃度処理および負荷変動に耐えることの必要性から物理・化学的処理法が中心となることとなる。さらにまた高濃度処理に適した新しい技術が求められる。

一方現在汎用されている生物処理については、負荷変動に弱く、高密度な処理が難しいという点でも弱点を有しており、また無機の栄養塩等に関して栄養のバランスを考慮せねばならぬなど、以上述べた工程別排水の処理

には、ごく特殊なケースを除いて不適であると考えねばならず、さらに処理水の循環利用の観点からも問題点は数多い。反面生物処理の有する省エネルギー性、したがって維持管理費が低廉となる点は大きな利点であるため生物処理の有する上記の欠陥を何らかの方法により補なう技術が開発されることより、その適用対象水の範囲を拡大することも可能となるであろう。

著者らは活性汚泥処理法に対して活性炭を添加することにより、流入水質の変動に対する耐性が著しく向上すること⁷⁾、沈降性を向上することにより高負荷処理が可能となること⁸⁾を示した。この例は生物処理の適用できる水質の範囲あるいは運転、操作条件の範囲を拡大することに継り、また高密度処理が可能となることにより処理

表2 溶存物質処理技術に対する工程別排水処理の観点からの点検

処理方法	高濃度処理	負荷変動	第三成分の導入	問題点など(選択性)
物理的方法 { 限外ろ過 逆浸透法	△ △			ゲル化による問題 膜の選択、分極
物理化学的方法 { 電気透析 凝集沈殿・浮上 起泡沫分離 吸着 イオン交換 抽出	△ △ △ △	△	△ △	エネルギー消費大 凝集剤の導入 記泡剤の導入 高濃度における分配 イオン間の選択に難 抽剤の溶解
生物化学的方法 { 活性汚泥 生物膜法	△ △	△ △	△ △	} 難
化学反応 { 中和 湿式酸化・光酸化など			△ △	中和剤の導入、塩の処理 酸化剤の導入、不完全酸化
熱的方法 { 液中燃焼 相変化(蒸発・凍結)				} エネルギー消費大

△問題あり △難あり

表3 業種別・用途別工業用水要望標準水準⁹⁾

業種	用途別	濁度 (度)	pH	アルカリ度 (CaCO ₃) (ppm)	硬 (CaCO ₃) (ppm)	蒸発残留物 (ppm)	塩素イオン (ppm)	鉄 (ppm)	マンガン (ppm)
18.19 食料品製造業	洗浄用	5	7	35	50	80	20	0.1	0.1
	原料用	1	7	60	60	80	20	0.1	0.1
	製造処理用	1	7	40	30	80	10	0.1	0.1
20 繊維工業	洗浄用	20	7	50	50	200	20	0.1	0.1
	製造処理用	20	7	50	50	150	10	0.1	0.1
24 パルプ・紙・紙 加工品製造業	洗浄用	5	7.5	30	30	100	10	0.0	0.02
	原料用	5	7	50	80	80	30	0.0	0.02
	製造処理用	5	7.5	40	50	100	50	0.0	0.02
26 化学工業	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
27 石油製品石炭製品	製造処理用	10	7	50	50	100	15	0.1	0.05
	洗浄用	6	7	40	50	200	5	0.0	0.01
	原料用	6	7	40	50	150	5	0.0	0.01
31 鉄鋼業	製造処理用	1	7	50	50	100	5	0.0	0.01
	洗浄用	30	7	100	100	300	100		
36 輸送機械	製造処理用	20	7	100	100	300	50		
	洗浄用	20	7	40	50	300	10	0.1	0.1
(比較)対応する水道基準項目	製造処理用	20	7	40	50	300	10	0.1	0.1
	洗浄用	5	5.8 ~8.6		300	500	200	0.3	0.3

装置の小型化・集約化に結び付くこととなる。

工程別用水の必要水質

工程別に排出水を処理、循環するための一つの問題点は、各工程ごとに要求する用水の水質を明確にする必要があることであろう。工業用水の水質に関して、要望水質値としてまとめられた報告のうちからプロセス用水と考えられる洗浄用水、原料用水、製品処理用水について先に掲げた多用水産業からの要望水質値を表3に示す。

これらの水質値は同掲の水道水質基準をも越えるほどの理想的な値となっているが、現実には各工程別に要求される用水としては先述の食料品洗浄の例を掲げるまでもなく工程個別にかなり特殊なものと考えべきであるが業種ごとにまとめてしまったことにより、この点の特殊性がはっきりと現れていないのは残念である。個別のプロセスごとに、従来のように用水は水道水程度を想定し一過性で用いるのではなく、工程ごとの循環利用を前提とすることによって、水およびその処理に対する認識が大きく変わっていくこととなる。

処理の選択性

処理技術の有する特徴と、要求する処理の内容との組合せの探索は重要な課題である。工程ごとに循環する水の要求水質が定まったとして、不用成分のみを選択的に除くためには、処理プロセスの機能を十分に明確化する必要がある。従来のと看すると下水処理の延長上に考えられてきた排出水処理が一般と飛躍を求められている点もここにあると思われる。

たとえば有機物のみの処理を考える上でも、著者らは単なるCOD、BODという排水基準との関連で用いられる現象論的指標のみではなく、ある程度実体論に即しかつ過度に解析的にはならぬという意味で、含有される有機物の分子量分布と疎水・親水性を目途とすることを提唱し処理プロセスの機能を一定程度記述することができたが¹⁰⁻¹²⁾、さらに工程ごとの循環利用に際しては、特定物質の選択的除去に対する要求が高まってくることも想定される。

この点は将来の水処理技術の研究の上でも一つの重要な問題となってくるだろう。

おわりに

以上最近の多用水型の工業の展開に伴う工業用水量の伸びを基として将来の資源的緊縮性から、工業内における回収利用の伸びを概括した。また将来の方向としてプロセス用水の回収循環利用を想定し、さらに経済性の上から工程別の処理・再利用を行う必要性があり工程ごとの処理を行う上での重要な因子となる高濃度処理に適した処理法の開発、特定物の選択的除去プロセス、さらに工程ごとの真に必要とされる用水水質の明確化について述べた。

かって豊富と言われた水資源に関しても将来決して明るいものとは言えない我が国において産業の立地を画る上では水利用の巧みさがこれからの一つの必要条件となってゆくであろうことが明らかであり、この解決に向けて現在我々に課せられた問題の一部を本稿において取り上げたに過ぎない。

(1979年1月23日受理)

引用文献

- 1) 第三次全国総合開発計画(昭和52年11月、閣議決定)
- 2) 工業統計表：通産大臣官房調査統計局(昭和40年～50年)
- 3) 浅原、早野、鈴木：生産研究，27，2(1975)
- 4) 廃水処理技術指導書(石油化学工業，など)：通産省立地公害局(昭和51年)
- 5) EPA Technology Transfer, Carbon Adsorption (1973)
- 6) Gallop, R. A. et al: Fifth International Congress of Food Sci. & Tech, 1978 Sept., Kyoto.
- 7) 鈴木基之：工業用水，233，38(1978)
- 8) 鈴木基之：水質汚濁研究，1，85(1978)
- 9) 工業用水協会：工業用水水質基準制定についての報告書(1971)
- 10) 鈴木基之：PPM，1976，10月16
- 11) Suzuki, M., Y. Tada and K. Kawazoe: PACHEC, 2, 1322(1977)
- 12) 鈴木基之，多田敬幸：生産研究，29，101(1977)

