工学的手法を用いた水使用合理化の考え方

大羽 修，杉本和明 OHBA Osamu, SUGIMOTO Kazuaki
財団法人 造水促進センター

1. はじめに

近年、用水の不足、用排水コストの上昇等から、生産量維持と生産コスト削減のため水使用量の適正化（削減）が一段と進められている。水使用量を削減すれば、用水コストの削減に加え、下水道などの排水コストの低減、さらに用水削減に伴う用水加熱蒸気減少による省エネルギーにつながり、工場での用水削減のメリットは大きい。

従来は特定の工程や設備単独での水使用合理化が行われてきたが、最近では複数の工程間での検討を可能とするため、工程や設備ごとの用排水状況の数値的把握と、水ピンチテクノロジー等工学的手法を使用した水使用合理化方法が適用されるようになってきた。これらの手法は、工場全体での水使用方法が検討できると同時に用水削減の理論的限界を明らかにすることができ、水使用合理化実施のための有効なツールとして利用できる。また、工場での水使用状況を含めた工程管理を、あらかじめ数値で予測・確認しながら進めることは改善検討を進める上で非常に重要であり、工学的手法は合理的改善を行うための基本的な手法であると考えられる。

（財）造水促進センターでは、以前より水使用合理化検討に取り組んでおり、さらに平成15年度より経済産業省からの請負事業として工学的手法を取り入れた水使用合理化+ α （省エネルギー化、コスト削減や物質の有効利用等）を「次世代型工業用水最適利用システム」と位置づけて検討を続けている。

表1 水使用合理化のためのプロセス変更例

No	プロセス変更内容
1	洗浄段数の増加
2	冷却塔の設置
3	冷却塔、ボイラブローダウン水の減少
4	蒸気使用量減少によるボイラ用水および用水処理排水削減
5	高圧水洗による洗浄効果の改善
6	蒸気ドレンの回収
7	生産工程へのコンピュータ導入による効率化
8	単効用を多重効用蒸発機へ

2. 水使用合理化の方法

2.1 個別工程、設備の水使用合理化

工程、設備を対象としたプロセス変更による節水は、従来から採られている方法で、その効果も大きい。プロセスの操作条件および設備変更の例を表1に示す。

これらの方法を含め、その効果を予測し、バランスのとれた全体的な改善に結びつけるためには定量的裏付けが重要であり、そのための方法として工学的手法がある。ここでは、工学的検討のまず第一として、物質収支等装置設計時に使われる理論式を利用した洗浄効果の推定と削減方法の検討例を取り上げる。

水を使う典型的な洗浄方法として、①オーバーフロー洗浄、②バッチ洗浄、③多段洗浄、④多段向流洗浄等が挙げられるが、理論式を使いそれぞれの洗浄効果を知ることができる。それぞれの洗浄方法の洗浄水量と洗浄効果を表す理論式を表2に示す。

それぞれの洗浄方法による効果の対比結果を以下に示す。

(1) バッチ洗浄とオーバーフロー洗浄

同量の洗浄水を使用した場合のバッチ洗浄とオーバーフロー洗浄の洗浄効果について、理論式を使用して比較した結果を表3に示す。

バッチ洗浄1回目とオーバーフロー洗浄の初期 ($t=0$) の洗浄効果は同じとなる。バッチ洗浄2回目の排水不純物濃度は1回目の10%になり、一方、同量の洗浄水を使用したオーバーフロー洗浄の排水不純物濃度は初期の41%となる。さらに3回目ではバッチ洗浄では1%、オーバーフロー洗浄では17%となり、バッチ洗浄の方が洗浄効果が高いことが判る。

(2) 多段洗浄と多段向流洗浄

表2の理論式に基づき多段洗浄と多段向流洗浄とを比較した。縦軸に洗浄効果 (C_n/C_0)、横軸に洗浄水量 (R, r) をとり、洗浄段数ごとにグラフにプロットすると図1（多段洗浄）、図2（多段向流洗浄）となる。

洗浄操作では、洗浄水量を増やせば洗浄率を上げることができ、洗浄段数を増やせば節水の効果が上がることが図より一目瞭然である。また、向流洗浄にすればさら

表2 洗浄理論式の例

洗浄方式	理論式	備 考
オーバーフロー洗浄	$C_t = C_0 / \exp (t / \tau)$	C_t : t分後の洗浄槽不純物濃度, (mg / L) C_0 : 初期の洗浄槽不純物濃度, (mg / L) t : 洗浄時間, (min) $\tau (=V/W)$: 洗浄水の槽内滞留時間, (min) V : 槽容量, (m ³) W : 洗浄水流量, (m ³ /min)
バッチ洗浄	$C_n = C_1 X^{n-1}$	C_n : n 回洗浄後の排水不純物濃度, (mg / L) C_1 : 1回洗浄後の排水不純物濃度, (mg / L) X : 槽容量に対する製品付着水分＝排水後の槽内残留液量の割合 n : 洗浄回数
多段洗浄	$W_n = nW$ $= n\{(C_0 / C_n)^{1/n} - 1\} w$ $W / w = r$ とおくと $C_n / C_0 = 1 / (r + 1)^n$ $= 1 / (R + 1)^n$	W_n : n段洗浄に必要な洗浄水量, (kg / kg - 製品) n : 洗浄段数 W : 一段の洗浄水量, (kg - 水 / kg - 製品) C_0 : 洗浄前の製品中の不純物量, (kg / kg - 製品) C_n : n段洗浄後の製品中の不純物量, (kg / kg - 製品) w : 製品中の水分, (kg / kg - 製品) r : 1段の洗浄水量と製品水分比, (W / w) R : n段総洗浄水量と製品水分比, ($W_n / w = r \times n$)
多段向流洗浄	$C_n / C_0 = (r - 1) / (r^{n+1} - 1)$	n : 洗浄段数 W : n段目の洗浄水量, (kg / kg - 製品) C_0 : 洗浄前の製品中の不純物量, (kg / kg - 製品) C_n : n段洗浄後の製品中の不純物量, (kg / kg - 製品) w : 製品中の水分, (kg / kg - 製品) r : 洗浄水と製品水分比, (W / w)

表3 バッチ洗浄とオーバーフロー洗浄の洗浄効果

洗浄水量 (積算値)	バッチ洗浄 (C_n / C_1) = X^{n-1}	オーバーフロー洗浄 (C_t / C_0) = $1 / \exp (t / \tau)$	備考
0.9V	1.0	1.0	n=1, t=0
0.9V × 2	0.10	0.41	n=2, t/τ=0.9
0.9V × 3	0.01	0.17	n=3, t/τ=0.9×2

洗浄条件：槽容量V、槽容量に対する製品付着水分割合X＝0.1、バッチ洗浄水量0.9V/回

に効率を上げることが可能であることがわかる。一方で、ある洗浄水量、段数以上ではさほど節水効果が上がらず、適正な値があることが読みとれる。

2.2 水ピンチテクノロジーによる用排水の削減

用排水削減のための設計手法である水ピンチテクノロジーは、熱ピンチテクノロジーを発展させたもので、マンチェスター大学のロビン・スミス (R. Smith) 教授らにより開発され、例えば、リンhofマーチ社がコンピューターソフト (WaterPinchTM) として商品化している。

水ピンチテクノロジーは、複数の工程を対象に各工程の排水を他工程の用水として再利用するなど、水を最適に使用するネットワークを理論的に見出す方法である。水ピンチテクノロジーは工場用の排水に関連する全工程を対象として水使用合理化を図る。これはピンチ解析により改善後の必要水使用量の理論値と、コスト削減の可能性を明らかにする手法で、改善による最小用水使用量の目標値と最初に着手すべき改善点を知ることができる。

図1 洗浄水量と洗浄効果の関係

図2 洗浄水量と洗浄効果の関係（多段向流）

図3 工業用排水の削減方法

水ピンチテクノロジーで解析される用排水削減手順として、①排水再利用、②排水再生・再利用、③排水再生・循環 が挙げられる (図3)。

以下に水ピンチ解析の内容を R. Smith 等の資料に基づいて紹介する。

(1) 現状 (Base case) の確認

ここでは、モデルとして、4工程から成り、新水の補給量と除去すべき汚染物の量が図4に示される工場を想定した。

このとき、排水濃度は、例えばProcess-1では、新水 ($C = 0\text{ppm}$) を 20 t/h 用いて汚染物質を 2kg/h 除去するので、計算より $C1 = 100\text{ppm}$ となる。

(2) 最大許容水質の決定

再利用できる排水量をできるだけ多くするには、工程で使用される用水水質を最大許容値に近づける必要がある。また、流出水の濃度を最大にまで許容すれば、排水量を最少にできることから、流入および流出水の最大許容水質の設定は水使用合理化目標を決定するために最初に行われる。

洗浄における流入水および流出水の最大許容水質は、

洗浄のドライビングフォース、汚染物質の溶解度、付着、または腐食等の制約から決定される。

先に示した図4の4工程の排水の最大限許容される水質 ($C_{\text{out max}}$) をそれぞれ $100, 100, 800, 800\text{ppm}$ と仮定した場合、設定した除去量 (Contaminant mass load)、水量 (Limiting water flow rate) での流入水の許容最大濃度 ($C_{\text{in max}}$) は計算より求まり、表4のとおりとなる。

(3) 個別工程の水質管理と水量

横軸に除去汚染物質質量、縦軸に水質 (濃度) をとって図示すると図5となり、その傾きの逆数は必要水量を示している。

図より、各工程について新水を使用した場合と最大許容水質 (表4) の水を使用した場合での、必要水量を計算により求める (傾きの逆数) と表5となる。

単に工程ごとでの水使用量を考えた場合、各工程に新水を使用して排水水質を最大にすることにより使用水量は最少 (合計で 112.5t/h) にできる。また、同様に単に工程ごとでの水使用量を考えた場合、流入水濃度が高くなると、排水水質が決められているため、同量の汚染物

表4 プロセスの用排水データ

Process number	Contaminant mass load (kg/h)	C in max (ppm)	C out max (ppm)	Limiting water flow rate (t/h)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

図5 濃度管理による水使用量削減

表5 水質管理濃度と必要水量

工程	必要水量 (t/h)	
	新水の場合 (C in =0)	新水以外の場合 (C in = 許容濃度)
Process-1	20	20
Process-2	50	100
Process-3	37.5	40
Process-4	5	10
合計	112.5	170

質を除去するための使用水量は新水使用時よりも多くなる。

(4) 排水再利用によるトータル水量削減

単に工程ごとでの水使用ではなく、全工程で使用されるトータルの用水使用量の削減を検討するには、用水を使用している各工程の総合的解析が必要となる。そのため、コンポジットカーブを作成する。コンポジットカーブと供給水量の関係を図6に示す。

図6 (a) は表4のデータを同軸上にプロットしたもの

である。図6 (b) は、図6 (a) から個々の流体を入出の濃度ごとに結合、整理したもので、コンポジットカーブ（複合線図）という。この線図は4つの工程を1つの工程のように表している。

用水供給線は、コンポジットカーブと接するまで近づけることができる。図6 (c) は用水供給線の傾きが最も急な場合を示している。コンポジットカーブと用水供給線の接点をピンチポイントと呼ぶ。ピンチポイントで、物質移動のドライビングフォースが最小になり、限界となる。この用水供給線の傾きから供給水量を計算する（傾きの逆数）と、必要供給水量（90t/h）が求まる。

(5) 排水再生・再利用/循環による水量削減

これまでは、排水を直接再利用する方法で用水使用量の削減を検討してきた。排水を沈殿、ろ過等により汚染物を除去して再生すれば用水として広く使用することが可能となる。再生・再利用や再生・循環の操作条件を加味して夫々のコンポジットカーブを作成することで理論値を得ることができる。ここでは詳細を示さないが、例

図6 コンポジットカーブと用水供給線

図7 KBC リンホフマーチのコンポジットカーブ (説明用)

例えば再生水の濃度を5ppm, ピンチポイントの濃度を100ppmとした場合, 許容水質内で新水供給量を46.2t/hまで削減することができる。

(6) 実用されるコンポジットカーブ

今までは, ピンチ解析の理解を容易にするためコンポジットカーブは横軸に物質量を縦軸に濃度を表示して作図した。実際のコンポジットカーブは用水側 (Sink) と排水側 (Source) のデータをコンピューターにインプットすることにより得られる。リンホフマーチのコンピューターソフトでは前に示したR. Smith等のコンポジットカーブを図7のように表す。この場合, 横軸は水量が, 縦軸は水の純度が表示されている。

SourceとSinkの線図を接触する点 (ピンチポイント) まで接近させたとき, その重なった範囲が再利用可能量を示している。

2.3 水再利用のデザイン

ピンチ解析結果を用排水の合理化に適用する場合, 現状と改善の用排水ネットワーク図を作成すると理解し易い。ピンチ解析結果から得られた最小用排水量をもとに水量削減のデザインが可能となる。許容される濃度条件

下で目標とする最小流量を達成するため, 異なった2つの方法を採用することが可能である。

(1) 濃度差ドライビングフォースの最大利用

デザインのひとつの方法は, ドライビングフォースを最大にするためできるだけ各工程の排水濃度を低くし, 図6 (c) におけるコンポジットカーブと用水供給線の濃度差をフルに活用する方法である。この場合のデザイン例を図8 (a) に示す。

(2) 水源数の最小化

図8 (a) は, プロセス-3 (P-3) を異なった水質を水源とする3つの部分に分割する再利用パターンを示している。プロセス-3が多段洗浄操作の場合は, 分割注水が可能である。しかし, このように工程を分割することは困難な場合が多いので, ほとんどの場合では各工程に同一水源を使用することが望ましい。この意図でデザインした例を図8 (b) に示す。

3. 用排水削減の課題

繊維・染色業を例にとると, 注入水は常に新水でなければならないといった固定観念があって, 使用済みの排

(a) 濃度差ドライビングフォースを最大限利用

(b) 各工程に同一水源を使用

図8 水再利用のデザイン

水の再利用では工業用水レベルまでへの浄化を必要としていた。しかも、染色整理業から出る各種排水は、加工品種によりその汚濁度が刻々と変化し水質許容濃度を設けてもその範囲内の排水が得られる保証は少ない。

水ピンチテクノロジーを工場に適用する場合、許容最大濃度の設定、循環による不純物の蓄積と製品品質や装置材質への影響等、事前に確認が必要な事項も多い。これらをクリアするには、生産技術、水処理技術、プロセス解析技術ならびにシミュレーション技術等各分野の技術者の連携による包括的検討と工夫が必要である。

4. おわりに

洗浄操作の変更、冷却塔のブロー量削減、排水のカスケード利用等、従前の改善方法が工場の水使用合理化に有効ではある。しかし、工場においてさらに用排水の削減を進めるにはトータルプロセスを対象とする必要があり、工学的解析は複数の工程における経済性も含めた最適解を得られる点で有効なツールとなり得る。この工学的検討の基本となるのは、実態を定量的に把握することであり、このことは単に水使用の合理化のみならず工程の管理にとっても重要である。

繊維・染色業においては洗浄に大量の用水が使われており、洗浄効果を増すためほとんどの場合温水が使われている。また、洗浄排水は汚染物質を含むため排水処理

が必要となる。すなわち、工業用水の使用量を削減することは、加熱用蒸気、排水処理量の減少につながり、結果として用水単価の何倍ものコスト削減効果が期待できるのでその意味は大きい。より一層の用排水削減には排水の再生が必要となるが、再生に伴う費用が発生する。これについては、その排水に最適な処理方法の選定、再生処理による既存排水処理施設への汚濁負荷量の削減、下水放流費用の削減等でこれら諸費用をベースに考えれば検討の価値はあるものと考えられる。

国内の製造業では個別工程での合理化はいわば極限まで進められており、さらに節水等の合理化を図れば製品品質への影響、装置腐食等が懸念され運転管理をより厳しくする必要が生じる。個別工程にとどまらず工場のすべての工程を対象を広げ、排水の再生・再利用も含めた合理化をシステム的に進めれば、さらなる用排水の削減が可能となるはずである。一方、合理化の対象となる工程、設備が増えれば、合理化検討の複雑さが増し、手作業では対応できないこともある。この点ではデータ整理、解析に工学的手法、コンピューターソフトの適用が有効な手段となり得る。

しかし、工学的手法、コンピューターソフトの適用はあくまで合理化を進めるためのツールであり、最終的な改善実施に向けては、技術者と経営者の積極的判断が決め手となるものと考えられる。

参考文献

- Y. Wang, R. Smith : Wastewater Minimization, Chem. Eng. Sci. (1994)
 J. Kim, R. Smith: Design of cooling systems for effluent temperature reduction, Chem. Eng. Sci. (2000)
 L. Savulescu, J. Kim, R. Smith: Studies on simultaneous energy

- and water minimization, Chem. Eng. Sci. (2004)
 異 浩之, 松田一夫: ピンチテクノロジー (2002)
 (財) 造水促進センター: クリーナープロダクション技術利用水使用合理化計画調報告書 (2003)
 (財) 造水促進センター: 次世代型工業用水最適利用システム調査報告書 (2005, 2006)
 (財) 造水促進センター: 省エネルギー型工業用水合理化ネットワークの適用可能性調査報告書 (2005)

大羽 修 (おおば おさむ), 杉本和明 (すぎもと かずあき)

〔問い合わせ先〕

財団法人 造水促進センター

〒103-0003 東京都中央区日本橋横山町4-5, 福田ビル4階

TEL: 03-5644-7565 FAX: 03-5644-0686

海外資料研究会入会ご案内

世界各国の繊維技術情報を

より早く、より広く、より正確に把握するために

海外資料研究会へご入会下さい

本学会海外資料研究会におきましては、海外各国から、我が国にもたらされる、繊維に関する数多くの情報を逐一検討し、それらを工程別、分野別に分類、整理の上、速やかに訳出し、「海外繊維技術文献集」を通じて定期的におとどけています。

世界各国における研究状況、技術開発および市場動向等、いち早くその関連業界の流れを的確に把握するため、本研究会へのご入会をおすすめします。

事業内容

1. 海外文献、資料の蒐集整備

海外各国より毎月多数の文献、資料、所報、社報、カタログ等を入手しており、これらの整備充実をはかり、その内容を訳出して会員に紹介しています。

2. 海外繊維技術文献集（隔月刊）の刊行

毎月入手する多数の文献や資料等をそれぞれの分野の専門の委員によって、工程別に分類、整理の上、速やかに訳出して紹介する**海外繊維文献抄録**と、繊維並びに繊維機械に関する基礎的研究論文、実際研究および新製品や新しい技術の紹介等、比較的重要と思われるものについては全訳して紹介する**海外繊維技術文献集**を合冊して、機関誌として定期的におとどけます。編集、訳出、査読等は全国各大学、研究所並びに会社所属の専門の方々に依頼し、その正確流暢を期しています。

3. 海外文献紹介講演会、座談会の開催

海外文献に掲載されたもののうち注目すべきもの、あるいは海外で行われた講演会、シンポジウム並びに見本市等につき、随時紹介講演会、座談会を開催します。

4. 海外文献、資料の複写頒布

会員に限り、本会所有の文献、資料の複写頒布を行っています。

5. 申込方法

申込書をご請求下さい。見本誌を進呈しますので、ご希望の方はお申し出下さい。

部会費（割引購読料）年間 **12,600円**（消費税込み）

〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4（大阪化学技術センタービル）

日本繊維機械学会 海外資料研究会 TEL: 06-6443-4691, FAX: 06-6443-4694