事業所排水処理における水質自動計測*

砂 原 広 志

1. 結 論

環境水域における水質データが毎年公表されている。人の健康に係わる水質項目のデータに関しては、環境基準を超えた割合はわずか0.05%である。特に有機リン、6価クロム、アルキル水銀は0%となっている。一方、生活環境に係わる水質項目データに関しては、特に閉鎖的水域においての達成率はあまり高くなく、河川、湖沼と海域を合わせた平均値は66%である。上記の結果から、水質汚濁防止法が施行されて各事業所の排水処理施設の整備と管理は、満足すべき状態と理解されるかもしれない。しかし、上記は環境基準の達成率からみた結果であり、各事業所からの排水について、排水基準値を超えた排水を放流した事業所の数はこの2、3年少しずつではあるが増加している。昭和46年以降、特定施設を有する各事業所の排水処理施設の整備が進み、現在はその設備の更新、拡張、処理技術の変更等が実施されているが、処理工程の適正管理技術に、さほど新しい技術や方法は採用されていない。元来処理施設そのものが生産設備でないところから、ややもするとその管理に現場の感覚による、「なれ」が生じているのではないであろうか。事業所における生産管理と同様に、処理水の放流は排水基準値のみによって規制されており、当然処理工程と同時に放流水質までを管理すべきである。すなわち、生産工程と処理工程は一体化されてはじめて安全な生産操業と考えるべきであろう。特にCOD総量規制の指定地域に関連のある事業所は処理工程の管理が適正でないと、そ

のCOD総量を超えることがある。さらに閉鎖的水域における窒素やリンの削減も考えられる。将来において、既設の処理設備に脱窒、脱リンの処理装置を連結する場合を考えると、処理工程の管理技術はますます重要となってくる。

2. 排水処理工程情報とその意義

排水処理工学は物理的単位プロセス、化学的単位プロセスおよび生物的単位プロセスを組み合わせたもので、気液、および固液分離を目的とするプロセス系として取り扱われている。その最終の目的は水質汚濁防止法に定められている排水基準値以内の水質の処理水を得ることである。排出規制は濃度規制と総量規制の2種類の考えにより規制されてきた。既知のごとく、有害項目としては、Cd、CN、Pb、Cr³⁺、As、Hgおよびアルキル水銀、およびこれらの化合物、有機リン、PCBの排出濃度が設定され、一般項目としては、pH、BOD、COD、SS、n-Hex抽出物、フェノール類、Zn、Cu、総クロム、溶解性の鉄とマンガン、フッ素、大腸菌の13項目の排出濃度が設定されている。総量規制としては、指定地域として東京湾、伊勢湾、瀬戸内海に関連する地域でCOD総量の削減目標量があり、業種ごとに汚濁負荷量が設定されている。

上記したごとく、単位操作と単位プロセスの組み合わせによるプロセス系において、目的水質が決定しており、当然のことながらこのプロセス系をある適正な範囲に管理することが重要である。一般的なプロセス系の管理においては、プロセス流れについてのプロセス情報が必要であり、この情報に基づいて最適制御操作が採用される。このプロセス情報は次のように区分される。

- (1) プロセス流の流入情報
- (2) プロセスのステップ反応情報
- (3) プロセス流の流出情報

生産ラインにおけるプロセス最適化のための情報区分と同じ考え方で排水処理工程の操作が実施されるべきであるが、実情はコストの面から考えて(3)の流出情報のみで判断された管理法、すなわち排水基準値内にあればよいとされている。しかしながら排水基準値を超えた場合には、流入情報およびステップ反応情報が

Hiroshi Sunahara

昭和28年 広島文理科大学化学科卒業
同年 同大学教養部、理学部勤務
35年 工業技術院名古屋工業技術試験所
52年 広島大学工学部教授
理学博士 第2回環境賞
〔趣味〕 音楽 読書

* Automatic Instruments for Water Quality in Treatment Process of Industrial Wastewaters, 昭和60年1月10日受理

ないためにどのような対策をとったらよいかの適正な判断を得にくい状況にある。

事業所の規模にもよるが、事業所排水処理は生産ラインと密接な関係があるところから、生産ラインと処理ラインが一体化しており、広義にはこれらを含めての1つのラインとして取り扱うことが必要であろう。すなわち、生産ラインにおける原料の種類、反応系における条件等の変更にもともなう排水の質の変化が、処理ラインに影響をおよぼすことが容易に考えられるからである。さらに生産ラインから排出された排水の質や量の変動が不明のまま、十分に対応しうる処理ラインを設計し、設置する方がより高いコストにつながるのではないだろうか。すなわち、事業所排水処理については、生産プロセスと密接な関係にあることから、安全、円滑に処理プロセスを運転管理するためにはプロセス情報が必要である。プロセス情報は次のように区分される。

- (1) 生産プロセスよりの排水情報
- (2) 処理プロセスにおける流入情報
- (3) 処理プロセスにおける反応情報
- (4) 処理プロセスにおける流出情報

これらの情報は、一般的な生産プロセス情報と同じく、処理プロセスにおいてもプロセスレベルの確認情報とプロセス最適化のための制御情報に区分することができる。特に処理プロセスにおいては通常、次のように区分している。

- (1) 物理情報：流量、温度、圧力、液レベル等
- (2) 化学情報：pH、ORP、SS、COD、その他化学成分
- (3) 生物情報：BOD、MLSS、SV、その他生物単位プロセスに必要な情報

これらの各情報を得るために計測手法が必要であり、これは物理量、化学量および生物単位プロセスに関連する生物量を電気量に変換する計測技術が基本となる。たとえば、水質化学計測は、水質に関連する主として化学量を電気量に変換して情報化することであり、多くの種類の計測装置が発表され、実用化されている。

3. 水質自動計測法の現状

水質に関連する化学的成分を何らかの方法により電気的信号に変換する水質化学計測法は、各種の機器分析及び化学的手法を基本にしたものである。本稿での水質自動計測法はこの水質化学計測法を自動化したもので、試料水採取から水質データの処理までを含むものとしたい。水質自動計測法は次のように大別して理解されているのが通常である。

(1) 浸漬型水質自動計測法

本法の目的は検出端（センサー）を直接試料水に浸漬して水質情報を時間経過と共に得ることにあり、自動連続的に時間経過にもともなう水質変化が理解できる特徴がある。これらの方法に属する水質項目としては次のようなものがある。pH、ORP（酸化還元電位、混合系における酸化還元電位であって、排水の状態や処理工程における主成分が酸化性か還元性の状態にあることを意味する）、COND（導電率）、WTM（水温、化学的単位プロセスや生物的単位プロセスによる処理工程に必要な）、TB（濁度）、SS（懸濁物質）、CL（塩化物イオン、共存する塩濃度が一定範囲内である場合のみ正確である）、DO（溶存酸素）。

イオン選択電極による計測は、共存する他の塩の濃度が一定範囲にない場合は目的とするイオンの計測が不正確となり、試料水に直接浸漬して自動連続的にデータを得ることは困難である。また、生物的単位プロセスの代表的な活性汚泥法の処理工程管理に使用されているMLSS（混合液の懸濁物、活性汚泥量に相当する）は光学系を用いる浸漬型センサーが実用化されている。

(2) 流通型水質自動計測法

排水処理工程水を単管に導入し、センサーを流通管に何らかの方法で設置し、試料水の通水時に水質を自動的に計測する方法であり、上記した(1)のセンサーを用いてもよい。たとえば、流通型自動計測法としては活性汚泥法に用いられる超音波吸収を原理とする返送汚泥濃度の計測がある。その他、濁度、SS、供給酸素濃度、発生炭酸ガス濃度、紫外線吸光度の自動計測が可能である。

(3) 試料水採取型自動計測法

水質自動計測法のみならず、他の生産プロセスにおいても、センサーを試料水に浸漬するだけで目的の化学成分が電気量に変換されて信号化されることが理想的である。しかし、現在のところ、発表されている化学センサーの多くが研究開発の段階で、完全に実用化されるまでには適用試験研究のデータが不足なものが多い。したがって確実に計測するためには、化学分析法や他の機器分析法で認められている分析法を自動化した方がよく、試料水採取型の自動分析計が開発され、適用されている。

本法は試料水の採取、計量、試料水の前処理、試薬溶液の計量、送液、反応、定量、洗浄という各工程が自動化され、最後の水質データ表示およびデータ伝送も自動化されている分析計である。いわば手分析操作が自動化されている装置であり、高価であるが人間による分析コスト、精度を考えると必ずしも高価とは考

えられない時代となってきた。この方法による分析項目は、COD(わが国は KMnO_4 法での自動化であるが、英国、スウェーデンは $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 法のCODが自動化されている)、TOC、TOD、TP(全リン)、TN(全窒素)、 CR_6 (CrO_4^{2-})、OIL(油分で、 n -Hexane抽出物に相当する)、CN(シアン化物イオン)、 NH_4 (アンモニウムイオン)、 NO_3 (硝酸イオン)、PNL(フェノール類)、SF(硫化物イオン)、THG(総水銀)、SS(懸濁物質)等である。活性汚泥法においてはSVI(汚泥容量指標)、呼吸速度計が実用化されている。

4. 排水処理工程の自動管理システム

排水処理工程を円滑、安全に、最適の状況で運転してこそ安心して生産ラインに取りくむことができるものである。COD総量削減のために汚濁負荷量を自動計測した事業所では、1年間を通じて同じ生産状況でも、処理工程より排出される汚濁負荷量変動していることを理解されたことと思う。特に活性汚泥法を採用している有機系排水処理工程においては、上述した処理プロセスにおける流出情報を得て、これにより反応プロセスの適正管理をいかにしたらよいかを考える必要があることを理解されたことと思う。

排水処理工程の最適管理のためには、上述したごとく生産プロセスからの排出情報のほかに、処理プロセスの流入、反応、流出情報が必要であり、特にある程度の自動制御を適用した反応系、すなわち処理反応の最適化が必要である。このためには前述した水質自動計測技術を用い、水質レベルの確認情報のための計測及び処理工程の最適制御のための計測が必要である。これら自動計測制御法を用いて処理工程を最適に管理する方法を処理工程の自動管理システムといえることができる。そこで、処理工程を物理化学的および生物学的処理工程に分けて自動計測制御方式を用いた自動管理システムの実例について述べる。

(1)排水貯留槽の計測制御方法

通常、生産ラインより排出される排水については、排出量が大体わかっているので計測する必要はないのであるが、pHが3以下および10以上の場合には、送液配管の損傷が考えられるために排出時にpHを5～9までに調節して貯留槽に送液するpH制御が採用されている。貯留槽の目的は、これからの処理工程に導入される前に排水の水質を一定範囲に調節、平均化することで、スクリーンによる浮遊物や懸濁物、浮上油の除去が行われる。通常は曝気かくはんで均一化するが、夏場における食品系排水などは滞留時間と共に嫌気状態に移行するため、OPRでモニターすることが必要となる。

(2)物理化学的処理工程の計測制御法

シアン排水処理における酸化分解工程、クロム酸排水処理における還元工程、一般的なpH調節はすでに自動計測制御が実施されている。酸化還元電位およびpH測定におけるセンサーでは、指示電極の白金および金合金電極は高濃度浮遊物や微細な懸濁物に対しても問題が少なくなっている。しかしながら参照電極については、従来のスリープ型よりも、セラミック型の通電方式が多くなっているため、微細な懸濁物の詰まりから通電が不十分になり正確な指示電位を得られなくなる場合が多い。さらに参照電極の内部極が $\text{Ag}-\text{AgCl}$ 、内部電解液が3.5MKClのものが一般であり、長時間の使用に耐えられないことが多い。特に自動制御の指示電極は安定でないと大きな誤操作を自動的に遂行することになるので、参照電極の安定性に注意することが重要である。10年前に米国ベックマン社から発表されたラザラン電極はシンターテフロン製の飽和カロメル電極であり、破損して水銀がもれることもないことから米国のプロセス分析用として使用されている。わが国でも同じ型のものが製作されており、次第にプロセス分析用として使用されている。指示電極の自動洗浄も超音波方式、ジェット水流方式、化学的洗浄方式等が使用可能になっている。

物理化学的処理工程でよく用いられているのが、凝集である。第一凝集における適正pHの調節、無機凝集剤の添加かくはん及び高分子凝集剤の添加かくはんの工程において、スラッジの量をなるべく少なくするため、さらにスラッジの脱水性を高めるため、さらに高分子凝集剤の適正量の添加のために、これら凝集工程の自動制御法が必要である。しかし今のところ基礎的研究はあっても実用性にいたらず、大規模工場排水処理の凝集剤の使用量と金額は無視できない状態になっている。凝集沈殿法においても、処理水の濁度をモニターして確認情報とする程度であり、凝集化プロセスの自動計測制御法の実用的研究開発がのぞまれている。

有機系排水の加圧浮上法による処理においては、処理水のCODやTOCを測定して次の生物的単位プロセスへの流入情報とする場合が多い。また加圧浮上法の効果を上げるために加圧水の圧力が自動制御され、従来よりもかなり浮上スカムを多く得て処理効率を上げている。これは圧力センサーの実用化が可能になったためである。

シックナーにおけるスラッジレベル計も次第に使用され、スラッジ引き抜き制御に使用されている。スラッジレベルの制御は殆どが3位置制御であり、常時の引き抜きポンプに制御用引き抜きポンプが設置されてい

る。上記の具体例を図1に示した。通常法の凝集化工程とシックナーを合わせた処理プロセスであるが、INFのpHは通常5～9の間がよい。しかし流入水中の共存塩の種類と濃度が変動している場合は、変動と同時に緩衝容量の変動も測定してpH自動制御を駆動せねばならず、かなり複雑な工程となる。高分子系凝集剤添加工程によるTBの測定はあまりなされていないが、TBで被凝集性懸濁物の変動状態、フロックの不安定がわかり、またTBはSLCとも関連する。ただし、上述した凝集剤添加制御方式が実用化されていれば必要ない。SLCは脱水工程が円滑でないとかえって排汚泥が多くなって気にかかるところである。シックナーは汚泥濃縮工程とはいえ、やはり処理水を円滑に

図1 凝集沈殿処理工程の自動計測制御

INF	流入水	C ₁	無機凝集剤
EFF	流出水	C ₂	高分子凝集剤
AC	酸	P ₁	常時排泥ポンプ
AK	アルカリ	P ₂	制御用排泥ポンプ
PHC	pH制御	COD	化学的酸素消費量
SLC	スラッジレベル制御	COND	導電率
TB	濁度		

排出するのに必要である。流出水の水質についてはTB、COND、pHの測定が処理効率と処理工程の安定性をモニターするために必要であり、有機系排水の場合にはCOD情報が次の処理工程への情報として利用できる。

加圧浮上法についても同じ水質計測項目が使用されるが、現在は圧力センサーの普及で加圧水の自動制御が可能となり、流入水フロック濃度の変動による加圧水の適正圧力の自動制御方式が利用されつつある。

通水塔方式の単位操作の代表的な砂濾過と活性炭吸着においては、通常TBによるモニターが使用され、砂濾過塔内差圧は、殆ど差圧計か圧力センサーを用いる逆洗工程制御が採用されている。活性炭吸着塔における破過状態のモニターは、吸着効果を常時測定する必要がないから、流入水の有機汚濁指標としてUVA（紫外吸光度、COD等と相関性のある場合のみ有効）、COD計等が用いられている場合がある。

(3)生物的处理工程の計測制御法

好気性微生物を利用する処理法が多く実用化されているが、ここではその代表例として押し出し流れ式活性汚泥法についての計測制御法について述べてみる。図2に処理工程と計測制御システムの例を示す。活性汚泥法における処理工程の適正化のための情報は次のように区分される。

曝気槽流入情報：汚泥負荷を一定範囲にするため、調整槽の水質情報が計測される。WTM、pH（6～8）のほかにORPが測定される。食品系排水等では冬場でも-50mV、夏場では-100～-200mVまででは嫌気化するので常時空気曝気している。-150mV以下になった場合には曝気槽内での空気供給を20%位増加させている。DOは3～5 mg/l、SSは前投処理しているので少ないのであるが、通常200mg/l以下がのぞまし

図2 活性汚泥法処理工程の自動計測制御

INF 流入水、ART 押し出し流れ式曝気槽、EFF 流出水、SQ 返送汚泥流量、SC 返送汚泥濃度、WQ 流入水量、AQ 空気流量、CV 空気流量制御器

い。COND は $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 以下では微生物活動が十分に行われないので、通常は $500\mu\text{S}/\text{cm}$ ～ $2,000\mu\text{S}/\text{cm}$ 位としている。 $2,000\mu\text{S}/\text{cm}$ から急に $5,000\mu\text{S}/\text{cm}$ になると処理効率に影響を及ぼす。TOD は塩類濃度が多い場合はBODとの相関が得られない。3時間に1回の測定で情報が得られる場合は COD_{cr} の分析計を使用できるが、残念なことにわが国では市場にない。TODは負荷情報になる有効な測定項目である。TOCとWQで負荷量計算を行い汚泥負荷を制御することもできる。返送汚泥系はSQとSCを計測し、曝気槽内へ返送する微生物量を推定する。送風空気量はAQと圧力で送気した酸素量を計算し、制御できる。

曝気槽反応情報：押し出し流れ式曝気槽内においては返送汚泥と流入水との混合点と十分に反応して内生呼吸状態にある流出点とで計測を行う。前者はDO 1～2 mg/l, pH 6～7, ORP -50～+50 mV, であり、後者においては、DOが3～5 mg/l, pHは窒素量が多く存在する場合には NO_3^- が生じるため低下し、pH 6以下となることがある。このため流入時においてpH6.5～7.5に自動制御する。DOが2 mg/l以下の場合は混合点において酸素不足であり空気量を制御する。ORPは十分な内生呼吸状態である場合+80～+150mVであるが、硝化反応が生じて NO_3^- が30mg/l位まで増加すると、ORPは+200～+300mVにまで増加する。SVIは1時間に1回測定し、SVI変動と負荷量およびDO制御との関連を求めるのに用いられる。

処理水質情報：流出水の水質計測により処理率、TPおよびTNにより流入水貯留槽内の窒素とリンの制御をすることができる。現在TPとTNは規制されていないが、リンと窒素が不足の場合、適正に添加する

ことのできる制御系が必要となってくる。BOD200～400mg/lの場合には処理効率90%以上で、流出水のTP, TNが適正なBOD:N:Pの場合でも、Pは1 mg/l以下、Nは7～8 mg/l位である。BODが500～1000mg/lの範囲の場合には適正な条件でもPは1～2 mg/l, Nは10～15mg/l位となり、将来の窒素とリンの規制に対応する制御系の研究がのぞまれる。

微生物法による脱リン脱窒処理工程においても当然自動計測制御法の適用が重要であり、大規模排水処理工程のみならず処理工程の円滑適正な管理のための自動計測制御システムの確立のための研究が進んでいる現状である。

5. 結 語

事業所排水処理工程も生産ラインの管理と一体に考え、法規制値以内の処理水を排出できるように自動計測制御法を用いる自動管理システムが必要であり、その一端を紹介した。排水および処理工程水に適用可能な多種類の自動計測装置が市販されている現状で、データ処理および工程プログラム制御も可能になっている今日、重要な制御しうる工程は重点的に計測制御すべきではないかと考えている。

参 考 資 料

- 1) R.M. Arthur (Ed.), "Application of On-line Analytical Instrumentation to Process Control", Arthur Technology and Ann Arbor Science, Wisconsin, U.S.A (1982)
- 2) D.A. Morley, "Mathematical Modelling in Water and Wastewater Treatment", Applied Sci. Publ. LTD. London (1979)