第5回水質自動制御計測国際ワークショップより~~~~~〈横浜セッションキーノートレポート〉

ICA in the UK water industry : The state of the art (1)

Prof. Ronald BRIGGS *

【概要】 この論文は、英国の水処理分野における計装、制御ならびに自動化（ICA）の発展の過程を述べたものである。また、最近の法令に関する事項、特に1989年におこなわれた10の地域水処理組合（Regional Water Authority）の民営化、および、同時に設立された全国河川組合（National River Authority : NRA）の与えた影響、ならびに1992年から施行されるEC（ヨーロッパ共同体）としての規制が与えると思われる影響等についても、詳細に述べている。一方、センサーならびに周辺機器の開発状況や、水処理システムの制御におけるコンピュータによるエキスパートシステムの進展状況についても解説し、さらに、河川水質ならびに水・廃水処理設備等の遠隔監視のための遠隔測定システムについても詳しく述べている。

【キーワード】 ICA, 法令, 遠隔測定, センサー, エキスパートシステム。

は じ め に

最近の英国の水処理分野では、多くの処理プラントの運転に、以前にも増して計装システムを用いることの必要性が強調されている。これは、処理プラントの運転効率を向上させることにより、より高い経済効果を目指すものであるが、この傾向は、水処理産業界が1989年に民営化されて以来一層強くなっている。また、より正確なプロセス制御の必要性ならびに無人プラントの遠隔監視の必要性が増大したのみではなく、全国河川組合の設置に伴い、処理水質ならびに河川水質をモニタリングするための、設置型、ポータブル型、あるいは場合によっては、水没型などの信頼性の高い計装機器に対する必要性も増大している。

全体として見た場合、ICA機器の性能、中でもフロントエンドのセンサーの性能は、多くの適用例、特

に水処理分野での適用例において、満足できるものとは見なされてこなかった。このような問題の原因の一端は、機器側の技術的な欠陥にもあるが、一方では、これらの機器を使用し、また保守する人間の側にも問題がある。さらに、ユーザー側の望む仕様を機器製造業界に反映させることのできる機構が欠けていたことも、ユーザー側が不満を訴える主な原因のひとつであったことも明らかになってきた。

これを受けて水処理産業界全体は、DOE/NWCの水処理分野における制御システムに関する作業部会の提出したレポート（DOE/NWC 1981）に示された勧告の実現化に続き、水処理研究センター（Water Research Centre : WRC）を中心として、必要な仕様の決定、ならびに2カ所の中心的な評価・実証施設（Evaluation and Demonstration Facilities : EDF S）の設立および活用を図るために多大な資金ならびに努力を傾注してるところである。これらの分野における、現在までの進展状況に関する詳細については、報文（Elvidge 1989）を参照されたい。また、WRCならびにその他の機関により、水処理産業界ならびに水を利用する分野の人々が必要としていることの把握、およびセンサーやシステム技術の最近の発展状況の調査にも努力が払われている（Briggs and Grat-tan 1990）。

水処理産業界ならびに関連産業界のニーズ

(a) 測定すべき項目

測定すべき項目については、環境局（the Department of Environment）ならびにWelsh Officeの共同文書（1982）に詳しく述べられている。なお、本文書は人が消費するための水質に関するECの指導書（80/778/EEC）を参照したもので、ECの指導書を引用するとともに、イングランドならびにウェールズ地方に指導書の内容をどのようにして実現するべき

* Measurement and Instrumentation Centre
City university, London

かのガイドラインを示したものである。本文書では、必要な要素項目を、以下の4つに分類している。

- －官能項目 (Organoleptic)
- －物理化学的項目 (Physiochemical)
- －毒性物質 (Toxic substances)
- －微生物学的項目 (Microbiological)

それぞれの目標値達成の証明は、多くの場合、計画的なサンプリングとそれに続く実験室での分析によってなされるが、現在では参照法による分析をおこなうための機器が多数存在しているように思われる。しかし、水処理組合の化学者の大半は、将来的には、特に毒性物質の分析法に関してさらに検出限界を低くする(検出感度を高くする)ことが必要になると予想している。また、例えば溶存酸素、硝酸性窒素、アンモニア性窒素などの微生物学的な項目など、要素項目によっては現場で測定する方が望ましい場合もある。さらに、場合によっては吸水口などにおける連続モニタリングが必要とされることもあり、これは頑丈で信頼性の高い計装機器ならびに遠隔測定装置がなければ、現場常駐の作業員が必要であることを意味している。

(b) 運転上のニーズ

水処理組合、電力供給事業体などの公益事業体などの国の機関は、その大半が環境保全のために改良・改善の努力を継続して払うことをポリシーとしているが、これはとりもなおさずより優れたプロセス制御が必要とされ、結局、信頼性の高いプロセス制御機器に対する要求が高くなっていくことを示唆している。

上記の意味で最も重要な指標を、優先順位によって並べたリストは、プロセスのための計装の仕様と評価グループ (Process Instrumentation Specification and Evaluation Group: P I S E G) によって作成されている。また、水処理組合協会 (Association of Water Authorities) の I C A ポリシーグループならびにそのエンジニア等の成果は、WRCによりユーザーの必要とする仕様の作成に活かされてきた。しかし、施行が間近に迫っている E C の規則のため、表 1 に示すようにこのリストは健康に影響を及ぼす可能性があると思われる重金属および微量有機物質を含むように拡張されている。

(c) 計装機器ならびにシステムの必要性

現代では、既存あるいは開発中の遠隔測定システムとのインターフェイスが可能な、完全な計装システム(場合によっては、バッテリーによる操作が可能なポータブル型システム)が必要であることは明かである。

表 1 最も重要な水質等の指標 (拡張版)

水処理及び配水	下水処理	汚泥処分	水源及び処理水の放流水域
残留塩素 色度 濁度 有機物 pH オゾン アルミ 鉄 マンガン	溶存酸素 浮遊物質 污泥固形分 有機物 アンモニア 硝酸性窒素 リン酸 毒性 処理性 B O D T O C 紫外線吸収度	重金属 病原菌	溶存酸素 浮遊物質 有機物 硝酸イオン アンモニア リン酸 微量有機物 pH 藻類 重金属 電気伝導度 油脂類 総汚染度

各欄の指標は、優先度順に表示。

これらのシステムは、以下の要素から構成されていないなければならない。

- (i) 大半の適用例において、試料の前調整ユニット。
- (ii) 頑丈で、信頼性が高く、かつ比較的廉価なセンサーシステム。
- (iii) センサーならびに試料の前調整ユニットの操作およびコントロールの可能な、マイクロプロセッサを用いた電子システムで、さらにその他の制御信号の出力や、アラームシステム、あるいは他の遠隔測定システムへのデータの出力が可能なユニット (例えば、RS232等)。

河川管理者のための、バッテリー駆動型ポータブルシステムに関する仕様は、最近 N R A によって制定されている。また、このようなポータブルシステムは、特に英国では水源の約30%を低地を流れる河川から得ているため、取水水質を管理するためにも非常に有効だと思われる。なお、英国におけるその他の主要な上水水源は、地下水および貯水池であるが、これらの水源に比べると、低地を流れる河川は、水源として比較的安価に利用できるものの、より汚染を受けやすい水源であると言える。

主要取水口の約半数は、ショートサーキットがないものとして1日から10日間の滞留時間に相当する容積の貯水施設を堤防脇に有している。しかし、残りの取水口には一切の貯水施設は設けられていず、取水された水は通常約4時間で浄水設備を経て配水システムに送られる。したがって、低濃度の有害金属、油分およびその他の炭化水素、殺虫剤、除草剤、ならびにその他の発ガン物質等を十分に高感度で検出できる、信頼性の高いセンサーが必要とされていると思われる。

センサーのロジスティックス

工業廃水、家庭廃水、あるいは様々なプロセスから排出される処理水にセンサーを長期間用いる場合、そのセンサーの性能や信頼性が劣化することを避けることはできない。これは、機器にとってより好ましい環境である実験室において、同種あるいは似通った指標の測定に用いられている機器を基に開発されたセンサーの場合に特に顕著である。このようなセンサーは、天候に対する考慮が十分に払われていないような設置環境においては、センサー部に汚れや生物膜、あるいはスライム層が発生しやすく、また熟練者による管理が得にくい状況にあるため、往々にして信頼性が欠けてしまう。

このような状況への対策には様々なものがあるが、これらは一般的に計装のための経費ならびにシステムの複雑さを増大してしまう傾向がある。対策法の一つとして二重センサーシステムを挙げることができるが、このシステムは、元々最大限の信頼性が要求される浄水システムへの取水水質を保護するために開発されたものである (Briggs 1981)。このシステムでは同一のセンサーを二つ用い、一方は取水される水中に設置され、他方のセンサーは、微生物の繁殖を防ぐ薬剤を混入した校正溶液中でスタンバイの状態で保持されている。

このシステムでは、ある一定の期間毎の定期的な二つのセンサーの置き換え、ならびに、片方のセンサーの測定値がそれまでの傾向から著しく異なって示された場合の二つのセンサーの置き換えを自動的におこなうことにより、試料水質の急な変化とセンサーの故障を共に検出することができるものである。

センサー技術の最近の発達

環境中やプロセスにおける流体の状態のモニタリングには、非接触型のセンサー、あるいは、光ファイバーを用いたセンサーのように、本質的に安全な設計のなされている装置が必要である場合が多い。

しかし、例えばある種の水質の測定、あるいは、発酵、薬品および医学的な分野において必要である処理性や毒性といった項目、および、栄養素、基質、重金属ならびに微量有機物などの濃度を測定するための非接触型のセンサーは、まだ実用化されているとは言えない。これらの分野において、最新の半導体テクノロジーに基づいた安価な種々のセンサーの開発の正否が大きな影響を与えることは明らかである。

(a) 特定の汚染物質をモニタリングするためのセンサー

以下に、半導体センサーおよび電気光学テクノロジーに基づいた測定システムの概要について述べる。これらのシステムは、原則的には製造ならびに設置が低コストで済み、かつ、他の一般的なセンサーに比べより効果的であり、また応用範囲の広いものである。

半導体センサー

現在最も魅力的に思える可能性の一つは、重金属イオン濃度や微量有機物濃度を測定するために、これらに敏感に反応する物質を金属酸化物半導体型電界効果トランジスター (MOSFETs) のゲートの列の上に付着させたものを、マイクロプロセッサと一体化して一つのチップとしたものである。このセンサーシステムの利点は、十分大きな市場があれば大量生産による低コスト化が可能で、小型化できること、多重センサーシステム化が容易なこと、したがって信頼性の向上が図れ、場合によっては現場における洗浄、校正も可能であることなどである。なお、単に比率測定で目的の達成が充分可能な場合、このような半導体センサーは特に有効なシステムである。

重金属濃度測定センサー開発の好例に、ハーロウのスタンダードテレフォン研究所 (Standard Telephone Laboratories at Harlow) が研究開発の先駆者となった技術がある。これは、MOSFET のゲートの列の上に、金属酸化物を含む可溶性リン酸ガラスまたはホウ酸ガラス、あるいはその両方を付着させたもので、半導体イオン選択電極の列を構成した形になっている。このゲートの中の一つを、指標としては余り重要でなくかつ保存性のあるイオンに対して感度を有するようになれば、このゲートの出力との比として他のゲートの出力を測定することができ、外部比較電極が不要となる。さらに、相対的な濃度の変化傾向のみが必要である場合、試料中の対照イオンの活量を一定に保持する必要もなくなり、各ゲートの電位とイオン活量の関係を現すネルンスト型の連立方程式を解くためのマイクロプロセッサと MOSFET のゲートの列を一体化したセンサーを用いることによって、多種類のイオンを同時に測定することが可能となる。このようなセンサーの実現化には、各ゲートが特定のイオンに対してのみ高い感度を示す必要があることは明かである。これまでの研究結果によれば、鉛、銅、水銀、カドミウム、亜鉛、ならびに、鉄、そして、恐らくアルミニウムとマンガン、については、この方法で濃度を測定できそうである。ただし、感度が十分に高いとは言えない

場合もある。

他の研究開発の例としては、カルコゲナイドガラスを用いたもので、元々は医療分野における、pH、ナトリウム、カリウムならびに塩素の測定に適用するために研究開発が始められたものである。このタイプのセンサーの研究開発は、エジンバラ大学（Edinburgh University）のオーエン（Owen）、ニューキャッスル・アポン・タイン大学（University of Newcastle-upon-Tyne）のコピングトンおよびドブソン（Covington, Dobson）等によって始められたものである。このテクノロジーは基本的には上に記した方法と同じであり、ゲート上に付着される感度物質が違ふという点で異なっているだけである。この例で開発研究当初から解決されなければならなかった最大の問題はゲートに付着される感度物質の選択ではなく、MOSFET全体の防水であった。酸化珪素の代わりに窒化珪素を基盤の材料として用いることによりこの問題はある程度改善されたが、実際に要求されるような長期間に渡る安定性を達成するためには依然シールの問題が解決されなければならない。

微量有機物の測定のため酵素をMOSFETのゲート上へ固定化する技術に関する研究開発は、ケース・ウェストン大学（Case Weston University）ならびにアルター（Ultar）において始められている。また、これに関連する技術の研究開発も英国国内の数多くの研究所等でおこなわれているが、その中でも特にソーン・EMI社（Thorn-EMI）の中央研究所（Central Research Laboratories）、UMIST、およびインペリアル大学（Imperial College）等が中心となっている。

酵素を利用するもう一つの技術の研究開発については、モสบachおよびダニエルソンによって述べられている（Mosbach & Danielson, 1981）。彼らの方法は酵素をサーミスター上に固定するものであるが、サーミスター以外にも集積回路の一部を反応熱を感度よく測定できるように構成することができるはずであり、上に述べたものと同様な一体化構造をとることが可能である。したがって、このテクノロジーによっても、多重センサーシステムとデータプロセッシングユニットを一体化したプローブを作成することが可能である。

光学的な測定手法

電気光学的な手法と光ファイバー技術をマイクロプロセッサーと組み合わせて利用することは、水処理産

業界における多くの問題の解決法として有望視されているが、これは抜本的な安全性への配慮が重視されなければならない危険区域における水質等の測定、あるいは、危険区域から信号の伝達が必要な場合等に特に適した技術と考えられる。さらに、複数の光ファイバー／光学センサーシステムをパターン認識技術と組み合わせたシステムは、プラント全体や機器の状態をモニタリングするのに特に有効である。これらの技術に関する詳細はブリッグスとグラッタン論文を参照されたい（Briggs & Grattan 1990）。

光学センサーを端的に表現すれば、赤外線、可視光線、あるいは紫外線の発光を利用し、測定対象とする変数の変化を検出するものと言うことができる。なお、この場合、発光現象と測定対象の間にどのような種類の相互関係があるかは問わない。現在は測定の容易さ等の理由から光ファイバーのセンサーへの応用に重点が置かれているが、放散された光線の“外気中（Open-air）”すなわち自由空間内での伝播も同様に重要な問題である。また、いわゆるハイブリッド型の機器や、光学的に電力が供給される構造の電気的センサーの例に見られるように、場合によっては測定対象とセンサー間の1次相互作用が光学的な相互作用である必要は必ずしもない。しかし、この場合センサーからの信号は、信号変換により光学的な信号として出力されなければならない。

外因的な（Extrinsic）ファイバーセンサーでは、ファイバーは主に光源からの光を測定部位に導くために用いられ、測定部位において測定対象との相互作用によって生じる偏光、波長の変化、相の変化あるいは強度の変化は信号の変換をおこなう受光部で検出される。この範疇に属するシステムには、複数の信号を少しずつずれた短い時間間隔でサンプリングし一度に送信するタイプの多重送信式センサー（time-division multiplexed sensor）、光線符号化式センサー（shaft-encoded sensor）、および、異なった波長帯を用いて複数の信号を同時に送信するタイプの多重送信式センサー（“frequency-out” sensor, frequency-division multiplexed sensor）等のシステム例を挙げることができるが、これらはいずれも光線の強度には依存しない方式の信号伝達系である。一方、内因的な（Intrinsic）ファイバーセンサーでは、ファイバー内の光線の伝播が検出可能な形で錯乱を受けることによってファイバー自体がセンサーとして機能する。このため、分散型および準分散型のセンサーシステムは、こ

の範疇のセンサーとして特に重要なものである。後者の範疇に属するセンサーを化学的な変数の測定に適用した例はまだ非常に限られており、現在、研究ならびに開発が進められている最中である。

物理的、あるいは化学的な指標を測定することに利用できる光学的な現象は数多く存在している。この分野における課題の多くについての研究は世界中で進められているが、その中には光ファイバーを用いた、信頼性が高く、かつ設置ならびに保守の容易なデータ通信システムとしての利用法も含まれている。光ファイ

バーテクノロジーの利点ならびに適用の可能性は、以下のようにまとめることができる。すなわち、本質的に、電氣的に安全であり、また、電磁氣的なノイズに無縁であること、さらに光ファイバーは軽量、小型であり、また、多くの場合、混信もおこらない。壊れやすい現在のレーザーや電球に代わる強力な半導体レーザーや検出器の開発にともない、コストの低減ならびにコンパクト化への大いなる可能性が存在している。(次号へつづく)

第19回 日本水質汚濁研究協会セミナーのご案内

「水質予測モデルの基礎と実際」

主催：(社)水質汚濁研究協会

水質予測に関する調査・研究の分野では、コンピュータの普及とともにモデルの開発が盛んに行われてきました。近年、湖沼水質保全特別措置法が制定され、これに伴う湖沼水質保全計画が策定される等、水質予測の重要性が年々増しております。そこで、今回は、水質予測に初めて取り組もうとしている方々並びに現場実務者を対象に、水質予測モデルの作成とコンピュータを用いた計算手法、予測値と実測値との検証と評価並びにモデルの現場への適用方法等について理解を得ることを目的に、平易でわかりやすいセミナーを企画いたしました。多数の皆様の御参加をお待ちしております。

期 日：1991年8月20日(火)～8月21日(水)
場 所：北とぴあ(東京都北区王子1-11-1)
(TEL 03-5390-1100)

参 加 費：会員15,000円、非会員25,000円

申 込 先：(社)日本水質汚濁研究協会 セミナー係
〒160 東京都新宿区本塩町12番地
四谷ニューマンション307号
TEL 03-3351-2272

申込み方法：ハガキに①参加者氏名、②会員・非会員の別(公益会員または賛助会員の場合は団体名または会社名を添記)、③連絡先(住所および電話番号)をご記入のうえ、お申込み下さい。

プログラム

第1日目(8月20日(火))

- 9:30～9:40 開会挨拶
- 9:40～10:30 湖沼水質保全計画の見直の方向性について
環境庁水質保全局水質管理課
- 10:30～12:00 水質予測手法の概論(1)
—水理モデルによる水質予測の意義と限界—
東京農工大 岡田光正
- 12:00～13:00 休 息
- 13:00～14:00 水質予測手法の概論(2)
—水質予測の手順と利用例—
東京農工大 岡田光正
- 14:00～14:10 休 息
- 14:10～17:00 パソコンをもちいた簡単な生態系モデルの構築
琵琶湖研究所 大西行雄

第2日目(8月21日(水))

- 9:30～12:30 拡散モデルの河川、沿岸海域への適用事例
日本データサービス(株) 三船修司
- 12:30～13:30 休 息
- 13:30～16:30 有限要素法による流体解析の基礎
中央大学理工学部 川原睦人
- 16:30～16:40 閉会挨拶