

浄水・下水処理プロセス用の水質計測器 メンテナンス負荷低減に貢献する製品の紹介

Water Quality measuring Instruments for Water Purification and Sewage Treatment Processes
HORIBA Products that Contribute to reducing Maintenance Workload

小林 一星

Issei KOBAYASHI

浄水・下水処理プロセスでは多くの水質計測器が使用されているが、財政難や維持管理職員の減少を背景に保守作業負荷の低減が求められている。そのために保守周期の延長、保守時間の短縮、突発的な作業の削減を主要な課題とした製品開発が行われている。しかし製品が多岐にわたることもあり、個々の製品に適用されている技術について網羅的に示した報告は少ない。本稿では浄水処理および下水処理プロセスで使用される個々の製品について紹介すると共に、保守負荷を低減させるためにどのような技術が開発され、また応用されているかについて解説する。

A Lot of water quality measuring instrument is used in water purification and sewage treatment plants. Reduction of workload for the maintenance of these instruments is required because of financial difficulties and reduction of maintenance staff. In order to reduce the maintenance workload, product development has been carried out to achieve extension of maintenance intervals, reduction of maintenance time and accidental maintenance. In this paper, our products used for water purification and sewage treatment processes are introduced, and several technologies to reduce maintenance workload are explained.

はじめに

日本の年平均降水量は世界平均の約2倍であり、雨の多い地域と言えるが、人口密度が高いため、一人当たりの年降水総量は世界平均の約3分の1以下と少ない。このため水資源という観点から必ずしも恵まれているとは言えないが^[1]、日本のどこにいても安心・安全な水を利用できるのは、限られた水資源を有効活用するための上下水処理施設が充実しているからに他ならない。

一方、上下水道事業では、税収減等による厳しい予算面から、独立採算による効率的な運用が求められている。これらの施設においては、多くの水質計測機器が用いられているが、その計測器の維持管理に大きな負荷がかかる。例えば計測器が有機物や化学成分を含む溶液に長時間浸されると、測定部に汚れや欠損を生じる。このため日常的なメンテナンス作業の6割が測定部の洗浄やセンサの交換作業で占められており^[2]、このメンテナンス負荷を低減させるような製品が求められている。メンテナンス負荷を低減させるためには3つの要素が重要と考える。すなわちメンテナンス周期の延長、1回あたりのメンテナンス時間の短縮、そして突発的なメンテナンスを出来る限り無くすことであ

る。メンテナンス周期が伸びて、1回あたりのメンテナンス時間が短縮されれば、当然メンテナンス負荷は低減する。一方で、突発的なメンテナンスの削減の重要性は見過ごされることも多い。突発的なメンテナンスは時間的な負荷だけでなく心理的な負荷も大きく、少しでも事前に計画できれば負荷低減効果は大きい。以上から下記の3点をコンセプトとして上下水処理プロセス用計測器の製品開発を行っている。

Tough :

メンテナンス周期を延長させる機能・構造

例：センサ汚れ・センサ破損・試薬劣化に強い

Easy maintenance :

メンテナンス作業を容易にする機能・構造

例：廃液交換量低減、短時間校正、ワンタッチ交換

Intelligence :

メンテナンスの必要性を事前・異常発生直後に知らせる機能

例：試薬交換時期が事前に分かる、異常にすぐ気付く

本稿では、下水処理・浄水処理に使用される主要製品の特長をTough, Easy Maintenance, Intelligenceのコンセプトに沿って紹介する。

下水処理プロセス用の水質計測器

下水処理プロセスに必要な計測

我が国の社会情勢は少子高齢化社会、安定成長経済へと急速に変化しており、今後は管理運営費を抑制し、住民負担を極力軽減することが必要となる^[3]。さらに下水道に関する維持管理担当職員は平成8年度から平成23年度で約8%減少しており^[4]、水質の専門職員は特に減少率が高くなっている。このような財政・人材面での制約があるなか、下水処理施設の維持管理を効率的に実施する重要性が増している。計測機器にかかる維持管理についてもその負荷を低減することも重要である。この計測機器の使用用途としては、法令で計測器の設置が義務付けられているものと、プロセスの状態監視・制御を目的とするものに分けられる。

一般的な下水処理プロセスの流れをFigure 1に示す。このような下水処理場の計器は一カ所にまとめて設置されていることもあるが、各処理プロセスに点々と設置されている場合が多い。点在する計器をメンテナンスして回るのは大きな負担であり、極力減らすことが望ましい。放流水のpH、SS、フッ化物イオン等の濃度は水質汚濁防止法に基づき排水基準が定められている。さらに閉鎖性水域(東京湾、伊勢湾、瀬戸内海)の富栄養化対策としてCOD、窒素、リンの総量規制が定められており、1日あたりの排水量が一定量以上の事業所に対してCOD、全窒素、全リンの測定が義務付けられている。法的な義務付けは無いものの、より効率的なプロセス管理・制御を行うための計測も行われる。例えば、下水処理場の電力使用量は大きく、このうち生物反応槽の送風機によって消費されている電力量は非常に大きい。そのため過剰な送風を防ぐことを目的に、溶存酸素(DO)濃度等を指標とした送付量の自動制御が行われている。ここでは、排水基準が定められているpH、COD (UV法を含む)、窒素、リン、および省エネルギーの指標となる溶存酸素の計測機器について紹介する。

自動全窒素全りん測定装置(TPNA-500)

- ・ Tough
温度影響に強い試薬組成で試薬寿命2倍(前機種比)
- ・ Easy maintenance
廃液交換量を約50%削減(前機種比)
- ・ Intelligence
試薬交換時期のお知らせ機能搭載

TPNAは主に総量規制に基づく放流水の監視のために使用されている。全窒素全りん測定においては、様々な分子構造で存在するリンと窒素を、紫外線照射下で酸化剤によってリン酸イオンと硝酸イオンに分解し、それぞれ特定波長での吸光度を測定する。TPNAが採用している紫外線酸化分解は、他の方式に比べて低温(100℃以下)・常圧下で反応させることができるため、部品の小型化、長寿命化が図れる。一方、従来機種TPNA-300は、酸化剤が使用中に自己分解してしまうため、短周期での試薬交換を必要としていた。

新型のTPNA-500では、酸化剤の組成を見直すことで自己分解に対する耐久性を向上させて試薬寿命2倍を実現した^[5]。さらに従来は、サンプルによっては計量管に汚れが付着し、液面検知用の光学センサが誤検知することがあった。この問題を解決するため新しく採用した計量方式をFigure 2に示す。サンプルを時間制御によって一定量吸引した後、陽圧にして必要量以外を吐き戻す方法である。必要量は計量管と計量用配管の空間によって決まる。光学センサを使用しないため、汚れに対する耐久性が向上し、同程度の汚れが付着した場合でも誤検知なく正確な計量を実現した。

これらの耐久性向上によって低減されたメンテナンス時間についてTable 1に示す。Table 1は、食品工場の排水サンプルを2か月間連続測定した際に、新旧機種の各種保守に費やした時間を示している。試薬交換や汚れ洗浄に費やす時間が大幅に低減され、従来は470分であった保守時間が

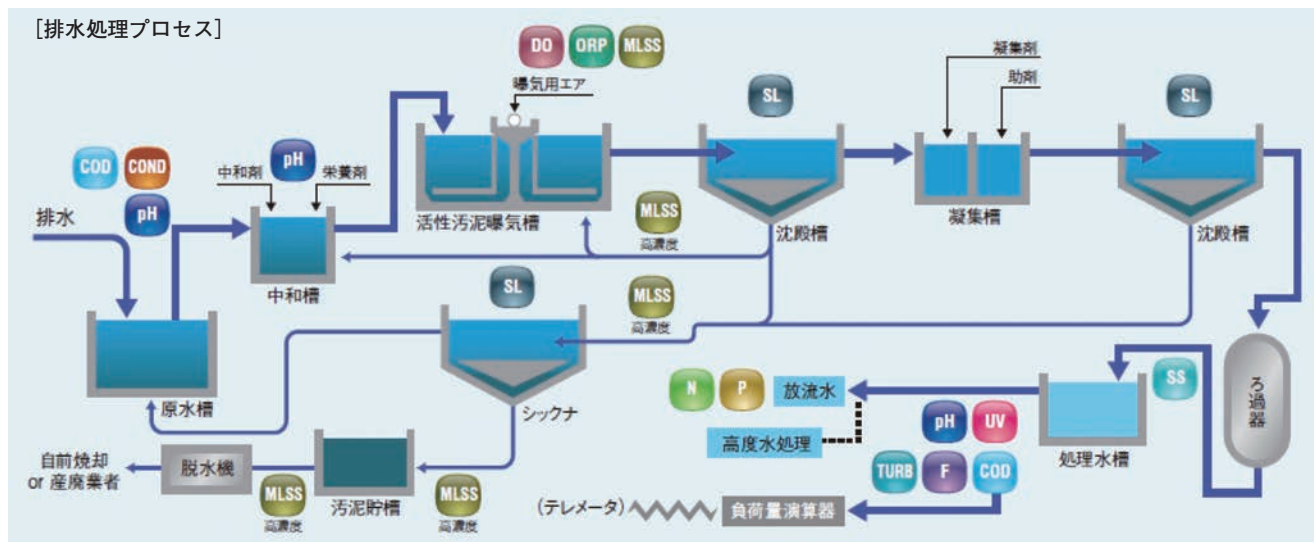


Figure 1 下水処理プロセスの流れ

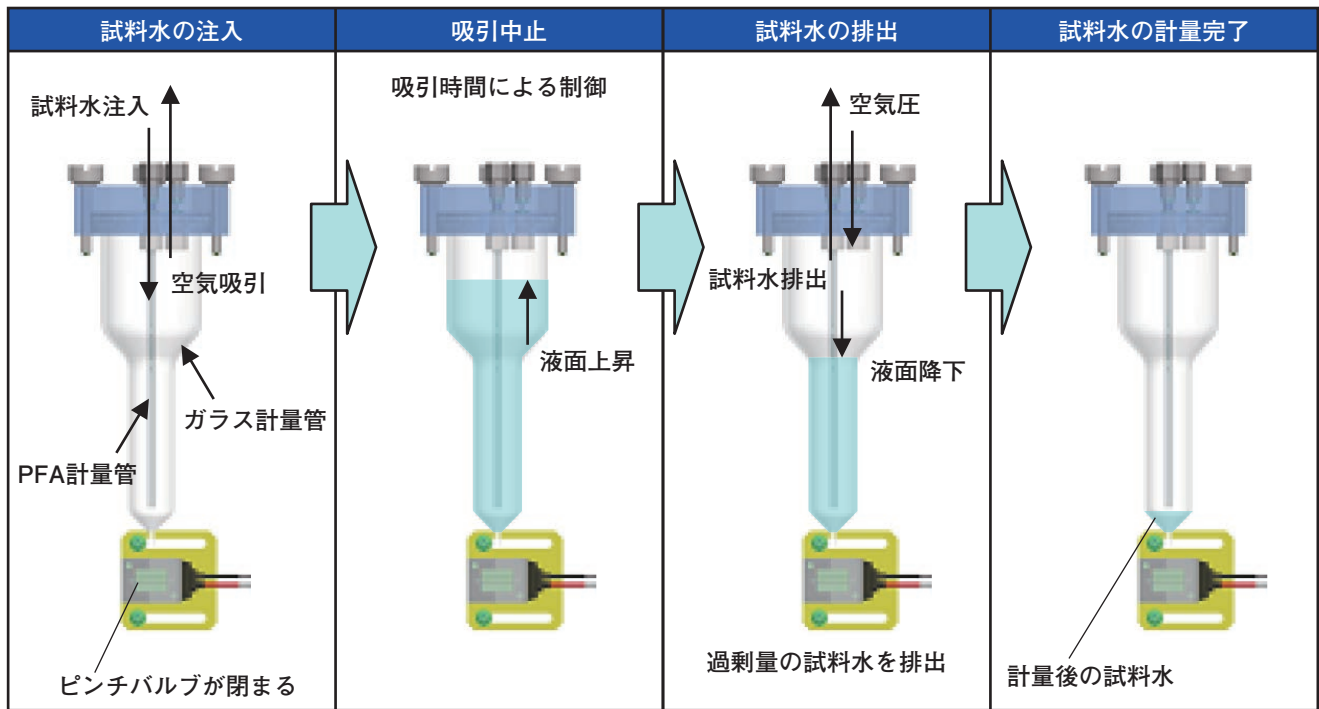


Figure 2 自動全窒素全りん測定装置 (TPNA-500) のサンプル水計量方式

70分にまで削減された^[5]。製品を購入してから廃棄するまでに必要な費用 (Life Cycle Cost : LCC) を新旧機種のそれぞれで算出した結果、LCCが30%削減されると試算された (社内試算結果)。TPNAのように複雑な作業を自動化した装置は試薬や部品数も多く、メンテナンスに比較的多くの時間を要するため、LCC低減率が非常に大きな意味を持つ。

自動COD測定装置 (CODA-500)

- ・ Tough
電極機構の化学的強度の向上
- ・ Easy maintenance
試薬交換量を18 L容器から1 L試薬ボトルへ
- ・ Intelligence
試薬交換時期のお知らせ機能搭載

自動COD測定装置は主に総量規制に基づいた放流水監視等の用途に使用されるほか、流入時の有機汚濁物質が処理能力を超えていないか監視するためなどに用いられる。COD測定では、試料中の有機物を硫酸酸性条件下で過剰量の酸化剤によって加熱分解する。その後、逆滴定によって酸化分解に必要な酸素量を算出する。CODAは手分析測定

Table 1 TPNA-300とTPNA-500のメンテナンス時間 (2か月間)

メンテナンス項目	TPNA-300	TPNA-500
廃液処理	20分	10分
配管洗浄	360分	0分
オーバーフロー槽洗浄	30分	30分
試薬交換	60分	30分
合計	470分	70分

の作業を自動化した装置である。従来機種CODA-200の終点検知にはセラミック液絡を用いた電極を使用しており、定期的な液絡部のメンテナンスが必要であった。一方、最新型式のCODA-500ではセラミック液絡が不要な電極を開発したことで液絡部のメンテナンス作業が必要なくなった。さらに従来は試薬使用量が多く、試薬の交換に手間を低減することが課題であったが、試薬の計量方法に工夫を施し、少量 (0.5 ml~2 ml) の試薬を正確に計量することを可能にした。その結果、従来と比較して試薬使用量1/10を実現させた。試薬使用量を削減したことで、装置内に補填する試薬量も18 L容器から1 Lの試薬ボトルを交換するだけで済むようになった。これらの性能向上により、従来機種と比較してLCCが30%低減されると試算された (社内試算結果)^[6]。

光学式溶存酸素計 (HD-200FL)

- ・ Tough
硬質膜により隔膜破れ無し
- ・ Easy maintenance
応答速度アップで短時間校正
- ・ Intelligence
膜異常・光源異常事前アラーム機能搭載

溶存酸素計は前述のように生物反応槽の送風機の制御等に使われている。従来は測定方式にガルバニ電池方式やポーラログラフ方式が用いられてきたが、これらのセンサは電気化学反応を利用する方式のため流速による測定への影響があった。また、内部液が必要であるうえに、薄い隔膜 (50 μm~100 μm) も必要である。この薄い隔膜は破損のリスクがありセンサの交換又は再生が必要であった。最新の



超音波洗浄の効果（3ヵ月後）

Figure 3 光学式溶存酸素計(HD-200FL)と超音波洗浄器

HD-200FLではこれらの問題が発生しない光学方式を採用した。特殊な蛍光物質を装着した酸素検知膜に励起光を照射すると、蛍光や燐光を発光する。この発光時間が酸素濃度と逆相関関係になることを利用して溶存酸素濃度を演算することができる。この光学方式の採用により流速等の影響を受けず、膜破れによる膜交換や内部液の交換も不要となった^[7]。さらに超音波洗浄器により、汚れによるメンテナンス周期を大幅に延長することができる。超音波洗浄器は、超音波の作用により発生する真空の泡が押しつぶされることで生じる、強力な衝撃波を利用している。この衝撃波により汚れを直接破壊し洗浄することができる。新型超音波洗浄器は、超音波振動を間欠的に動作させるバースト発振方式により、従来の連続発振方式に比べて定在波が生じ難く、広範囲で高い洗浄能力を持つ特長がある。3ヶ月間の連続測定後のセンサの汚れの付着具合をFigure 3に示す。プローブ側面には汚れが付着しているものの、センサ部には汚れは付着していない。溶存酸素計が使用されるのは処理プロセスのなかでも汚れ影響を受けやすい生物反応槽である。このため、洗浄器による汚れ防止対策はメンテナンス周期を延長させると共に、長期に渡り正しい測定結果を得るために非常に重要なツールであり、溶存酸素計のみならずpH計など他の計測器でも活用されている。

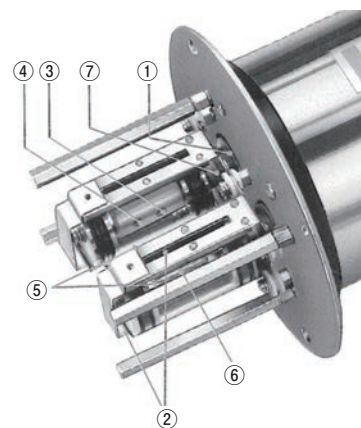
UV計(OPSA-150)

- ・ Tough
セル汚れに強いワイパー式洗浄機構採用
- ・ Easy maintenance
直感的に簡単操作できる液晶タッチパネル採用
- ・ Intelligence
サンプル断水時のアラーム機能搭載

UV計は有機物の紫外線吸光度からCOD値を算出する装置である。このため下水処理プロセスにおいて放流水の有機物濃度モニターとして使用される。UV計は試薬を用いずメンテナンスが容易という利点がある一方で、連続測定により測定セルの光透過窓に汚れが付着し、指示誤差となるゼロドリフトを起しやす。UV計OPSAシリーズは、Figure 4に示す回転セル長変調方式という独自技術により、この欠点を解決している。連続したセル長可変とワイパー洗浄を同時に行うことで、汚れ影響を受けることなく長期間連続して安定したデータを得ることができる^[8]。また

回転セルをワイパーで挟む構造

- ①シーリング
- ②ワイパー
- ③可視光検出器 (546 nm)
- ④紫外光検出器 (254 nm)
- ⑤円筒セル(石英)
- ⑥水銀ランプ
- ⑦回転軸



最短セル長をリファレンスとする

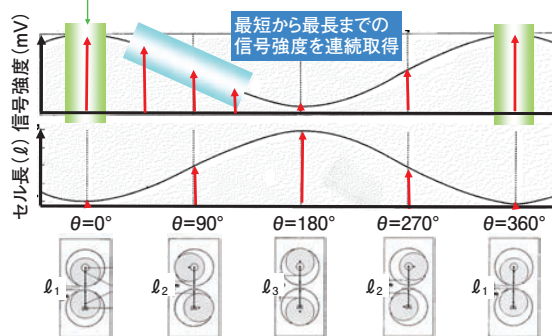


Figure 4 OPSA検出部外観と測定原理

従来は、変化する信号強度のうちセル長が最短と最長のときのみの信号強度差を基に吸光度を算出していたため、測定レンジは固定されてしまっていた。

最新型式のOPSA-150では電気的な改良を加えることで最短から最長までの信号強度を連続取得できるようになり、濃度に応じたセル長での測定が可能となった。その結果、従来よりも分解能が1桁向上するとともに測定上限値を2.5倍とすることに成功した。分解能向上と測定範囲拡大により原水の高濃度サンプルから放流水の低濃度サンプルまで安定的に測定することが可能となった。

自動校正機能付pH計(AH-151)

- ・ Tough
少量薬液でも汚れに強い噴霧式自動洗浄機能採用 (オプション)
- ・ Easy maintenance
滑らかな形状による洗浄性に優れたドーム型タフ電極
- ・ Intelligence
過去の感度・不斉電位トレンドから視覚的に交換予測が可能

pH計の使用用途は様々で、流入時のpHが許容限度内であるかの監視、生物反応槽での硝化作用の状態確認、凝集沈殿槽の中和反応の制御、放流水での監視等に使用されている。

自動校正機能付pH計は、自動的に標準液校正や電極の薬液洗浄ができる特長をもつ一方で、校正液・洗浄液の使用量

を低減することが従来機種TD-312の課題であった。Figure 5に最新のAH-151の構造を示す。校正液を噴霧化するノズルユニットを設け、試薬使用量を必要最小限に抑えることができた。洗浄時には電極がノズルユニット位置まで移動する機構になっている。さらに洗浄液使用量を汚れの状況に応じて選択可能とすることで、洗浄液の使用量も最適化できた。また、pH電極はガラスで構成されるため、サンプル中の砂利が衝突した場合や電極汚れの手洗浄作業によって破損する可能性がある。最新のドーム形タフ電極では、応答ガラスの厚みを増した状態でドーム形状に成形することを可能とした。従来のタフ電極と比べて全方向に対して衝撃強度増し、耐圧性能も0.6 MPaと増加したことで、衝撃に対する耐久性がさらに向上した^[2]。無人化運転においては、使用する電極に安定測定が求められるため、AH-151ではこのドーム形タフ電極を採用している。

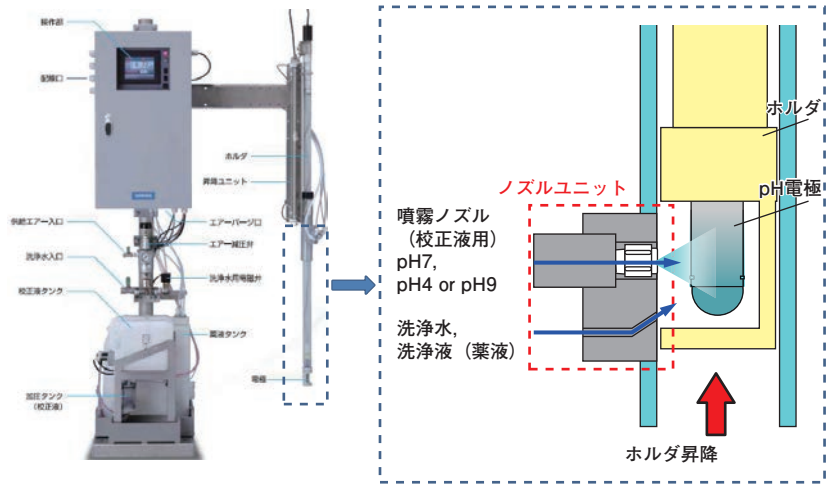


Figure 5 自動校正機能付pH計(AH-151) 昇降ユニット、ノズルユニットの構造

浄水処理プロセス用の水質計測器

浄水処理プロセスに必要な計測

一般的な浄水処理プロセスの流れをFigure 6に示す。浄水場にとって安心・安全な浄水を各家庭に供給することが重要な役目である。このため原水、凝集沈殿・ろ過プロセス、浄水・配水プロセスそれぞれで水質の監視が行われている^[1]。高度な浄水処理システムが確立されており蛇口からでてくる水をそのまま安心して使用できる。一方、近年では気候変動影響による原水悪化の影響が危惧されている。これはゲリラ豪雨の増加に伴い、通常時よりも高濃度の原水が流入する事例が増加しているためである。このため原

水に応じて後段水処理を適切かつ効率的に運転することが求められており、浄水場の入口である取水場の原水水質の監視が強化されている。凝集沈殿・ろ過プロセスにおいては、1995年に発生した耐塩素性病原虫クリプトスポリジウム菌の集団感染事故を契機に、ろ過水濁度を指標としたクリプトスポリジウム菌の監視が行われるようになった^[1]。浄水・配水プロセスにおいては塩素消毒が問題なく行われているかを確認するため、残留塩素濃度が常時監視されている。その他、水道法に基づき濁度、色度、残留塩素の3項目は毎日測定項目に定められている。

自治体の税収減や団塊世代のベテラン技術者の定年退職により維持管理者が減少していることも対処すべき重要な課題である^[9]。HORIBAグループでは浄水場が直面するこのような課題について計測機器の面からサポートできるような浄水場で使用される製品を網羅的にラインアップしている。ここでは浄水場で使用される計測器のうち残留塩素濃

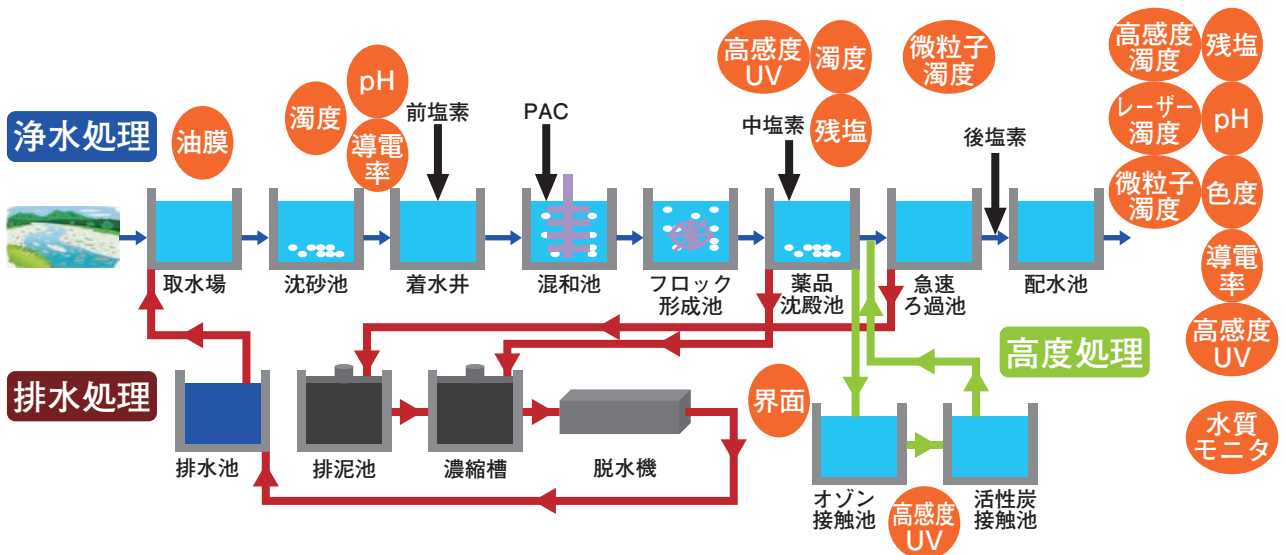


Figure 6 上水処理プロセスの流れ

度、自動水質測定装置、濁度計の特長を紹介する。

遊離残留塩素計(RA-30)

- ・Tough
センサ汚れに強いビーズ洗浄方式採用
- ・Easy maintenance
交換容易なチップ式カソード極の採用
- ・Intelligence
モーター停止検知・自動復帰機能搭載

浄水場では原水および配水の殺菌消毒を行うため着水井、薬品沈殿池、配水池前段で次亜塩素酸ナトリウムを投入している。塩素消毒が一定濃度維持され、消毒効果が保たれていることを確認するため、薬品沈殿池や配水池に残留塩素計が設置されている。遊離残留塩素計RA-30が採用するポーラログラフ式は無試薬で、連続測定が可能である点が強みである。RA-30は作用極、対極、参照極から構成され、サンプル中の次亜塩素酸(イオン)が作用極表面に到達し、電極との酸化還元反応により還元される。この時電極間に流れる電流量が濃度に比例することで、遊離塩素濃度を測定することができる。つまり、極表面に存在する測定対象物を消費することで電流を得ているため比較的大きな流量を確保しなければ測定できない。Figure 7に最新型式のRA-30の構造を示す。RA-30は作用極を回転させることで作用極付近の水の流れをつくり、少量の供給流量での測定を実現させた^[10]。セラミックビーズが作用極表面を研磨することで汚れの付着を防止するビーズ洗浄方式を採用している。回転式残留塩素計は回転が止まると、実際の濃度より低い値を表示するため、塩素の過剰注入が起こるリスクがある。そのため本計器では回転が停止したことを自動検知し、再起動を行なう機能を備えている。モーターが停止した場合には再起動を行い、再起動しない場合は、異常警報を発報する。これにより、モーターが回転しないような異常事態をいち早く知らせると共に、塩素試薬の過剰注入を防いでいる^[10]。この作用極には交換容易なチップ式カソード極を採用しているため、容易にメンテナンスを行うことができる。

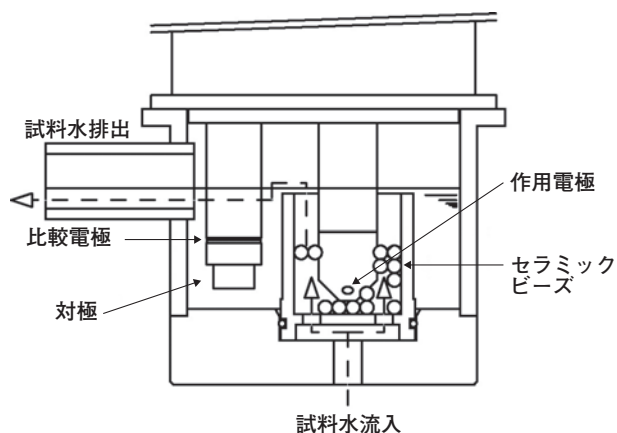


Figure 7 遊離残留塩素計RA-30の電極構造

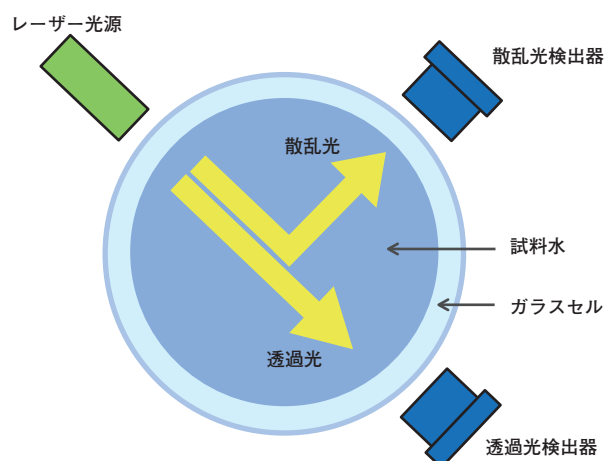


Figure 8 濁度計(HU-200TB-EH)の測定セルの模式図

濁度計(HU-200TB-EH)

- ・Tough
長寿命なLED・半導体レーザー光源採用
- ・Easy maintenance
測定セルの手動洗浄が簡単
- ・Intelligence
センサ異常等のアラーム機能搭載

浄水場では、沈砂池、薬品沈殿池、ろ過池、配水池に濁度計が設置されている。HORIBA Gr.では用途に応じた各種濁度計をラインアップしている。濁度を計測する方法として、一般に低濁度は散乱光法、高濁度は透過光法が用いられることが多いが、HORIBA Gr.の濁度計は両者の特長を兼ね備えた透過光散乱光法を採用している(Figure 8)。最新型式のHU-200TB-EHは、光源に半導体レーザーを使用することで、長寿命化(従来機種との比較)だけでなく最小分解能0.0001度と高感度測定を実現した。電動式ワイパー洗浄(オプション)によりセル窓の汚れの自動的な除去が可能であり、測定セルの手動洗浄を行う場合でも検出器の上部ふたを取り外すだけで円筒形ガラスセルが見えるので、簡単に洗浄できる構造になっている。なお近年問題視されている耐塩素性病原虫クリプトスポリジウム菌等の監視にも利用可能である。

自動水質測定装置(TW-100)

- ・Tough
セル汚れに強いワイパー式洗浄式の濁度計搭載
- ・Easy maintenance
着脱可能な専用セル採用で電極・消耗品交換に工具不要
- ・Intelligence
濃度異常発生時の自動採水機能搭載

水道水質に異常がないかを確認するため水道法によって毎日検査項目(色度、濁度、残留塩素濃度)と、毎日ではないが定期的に計測が必要な水質基準項目(色度、濁度、pHを含む51項目)が定められている。水道水質をリアルタイム

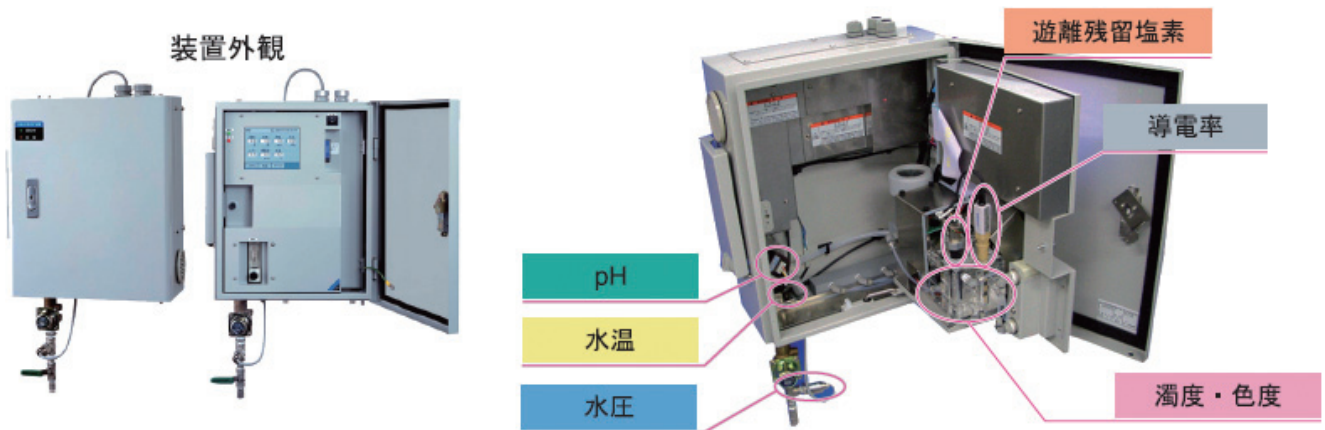


Figure 9 自動水質測定装置(TW-100)の装置構成

にモニタリングするために開発されたTW-100は浄水場・配水施設・給水管末で使用される自動水質測定装置である。Figure 9にTW-100の装置構成を示す。各種センサのコンパクト化を実現させたことで、標準搭載項目(遊離残留塩素濃度、濁度、色度、水圧)とオプション項目(pH、導電率、水温)の最大7成分を同時に連続測定が可能となった^[1]。さらに着脱可能な専用セルを採用しているため、メンテナンスしやすい構造になっている。また液晶タッチパネルにより直感的に簡単操作することが出来る。

おわりに

上下水処理場では様々な計測器が使用されている。各計測器について顧客の使用実態を的確に把握した上で、引き続きTough, Intelligence, Easy Maintenanceのコンセプトのもとに製品開発を行い、顧客のメンテナンス負荷の低減ひいては上下水処理プロセスの更なる発展につながるよう取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 実用 水の処理・活用大辞典 編集委員会編, “実用 水の処理・活用大辞典”
- [2] 山内進, “工業用水質計H-1シリーズの特長”, *Readout*, **37**, 88 (2010)
- [3] 斎藤豊, “下水処理場における維持管理コスト縮減について”, 日本水工設計株式会社, 第41回下水道研究発表会
- [4] 国土交通省新下水道ビジョン, “下水道事業の事業管理に関する現状分析と課題”, (<http://www.mlit.go.jp/common/001028150.pdf> : 2015/7/20)
- [5] 石井章夫, 河野忠司, “自動全窒素・全りん測定装置TPNA-500”, *Readout*, **42**, 125(2015)
- [6] 江原克信, “欠くことのできない水資源とHORIBAグループの水計測技術の歩み”, *Readout Special issue October*, 26(2013)
- [7] 山内進, “小冊子メンテナンスコストを削減する光学式溶存酸素計の紹介”, 日本工業出版(株)「環境浄化技術」, 平成23年3月号
- [8] 藤井洋, 小林剛士, “有機性汚濁物質測定装置OPSA-120”, *Readout*, **31**, 52(2005)
- [9] 厚生労働省 新水道ビジョンポータルサイト (http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/0_portal_site.htm : 2015/07/20)
- [10] 田中耕平, 入江和大, “回転式残留塩素計 HR-200RT RA-30”, *Readout*, **41**, 67(2013)
- [11] 小椋克昭, 山口真矢, 塚田徳昭, “自動水質測定装置TW-100と遠方監視システムによる水道水の連続監視”, *Readout*, **31**, 36 (2005)



小林 一星

Issei KOBAYASHI

株式会社 堀場製作所
開発本部 アプリケーション開発センター
液体計測開発部