

## 科学的なコントロールによるカーディフ下水処理場の曝気最適化

Bodington, V.<sup>1</sup>, Langford, A.<sup>1\*</sup>, Dooley, M.<sup>2</sup>, Diamond, K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kelda Water Services (Wales), <sup>2</sup>Strathkelvin Instruments Ltd

\*E. anna.langford@dwrcomru.com

### 要約

間欠サイクル曝気システムで運転している16槽の逐次回分式活性汚泥法プラントにおける曝気最適化が、操作項目を従来の溶存酸素制御法から微生物の呼吸計測を行う科学的な方法に変えることにより実施された。資化性バクテリアと硝化菌にとって最適な酸素濃度を測定し、これを現場での酸素摂取速度測定と結びつけることこそ、流入水のBODとアンモニアを分解するために必要な時間だけ適正濃度で酸素を供給することの基本となるのである。この方法によって、処理がいつ完結するかを知ることができるので、曝気供給必要量に見合うように現場のエネルギー必要量を調整することができる。

この結果、曝気によるエネルギー消費を20%以上削減し、規制に適合しつつ二酸化炭素排出量を減じることができた。

### キーワード

曝気、AS Bioscope、エネルギー、酸素、呼吸計測、Strathkelvin、地球にやさしい、摂取

### はじめに

本文は、多数の装置、カーディフ下水処理場およびアファン下水処理場の活性汚泥処理プラントの曝気プロセスを最適化するための科学者の専門知識とコンサルタントの援助、及び、これ以外のエネルギー消費の大きい現場の初期調査を組み合わせた全体的なプロダクトモデルについて記述する。

これは、ギガWatt・Hourのエネルギーを削減する革新的で先進的な技術の採用により達成されたものであり、二酸化炭素排出量削減においては、Dwr Cymru Welsh Water (DCWW)社とKelda Water Services (Wales) (KWS(W))社の協力を仰いだ。このプロジェクトに使用された理化学機器はストラスケルビンインスツルメンツ社から提供され、また節減を実現するためのKWS(W)社のオペレーションと科学プロジェクトチームの協力を得て、ストラスケルビンインスツルメンツ社はコンサルタントサポートも行った。供給と需要をバランスすること、および地球にやさしい手法を確かなものにするのは我々の環境の将来にとって必要不可欠なことである。

水処理会社が排水を処理する手法は様々である。その方法の一つが活性汚泥処理法であるが、この方法は大型のプロワで処理プロセスに空気を送り込むので大量のエネルギーを必要とする。排水というものは全て酸素を消費するものであり、この酸素要求量こそが我々が求めたい酸素供給量である。この処理プロセスはバクテリアを使用する。バクテリアが流入する排水を餌として生物分解し、有機炭素とアンモニアを排水から除去する。重要なのはバクテリアが酸素の供給を受けるとのこと、それがなければ呼吸ができないで死んでしまうこと、そしてその結果として未処理の排水が環境へ流出することである。それ故、処理を完全にするために、過剰な量の空気が工程に送られており、これは従来の溶存酸素制御方法ではとても非効率でコストがかかるものである。電力料金の増加、炭素排出量削減の重要性を念頭に置くと、この問題に対して環境を壊さずに利用可能な解決策を見いださなければならない。

## プロダクトモデル

プロダクトモデルが対象にしたものは、基準線となる結果を測定することに対する科学的な手法、境界、及びプラントの通常運転状態を理解することによる最適化に対する変化の範囲であった。これら項目が定義されるとすぐに、安全マージンを組み込んだ最適化計画が始められ、その中でこれら運転条件の変更が行われた。このモデルによりは法令遵守へのリスク管理に即応してリアルタイムに変更を行い、迅速にフィードバックを行うことが可能である。

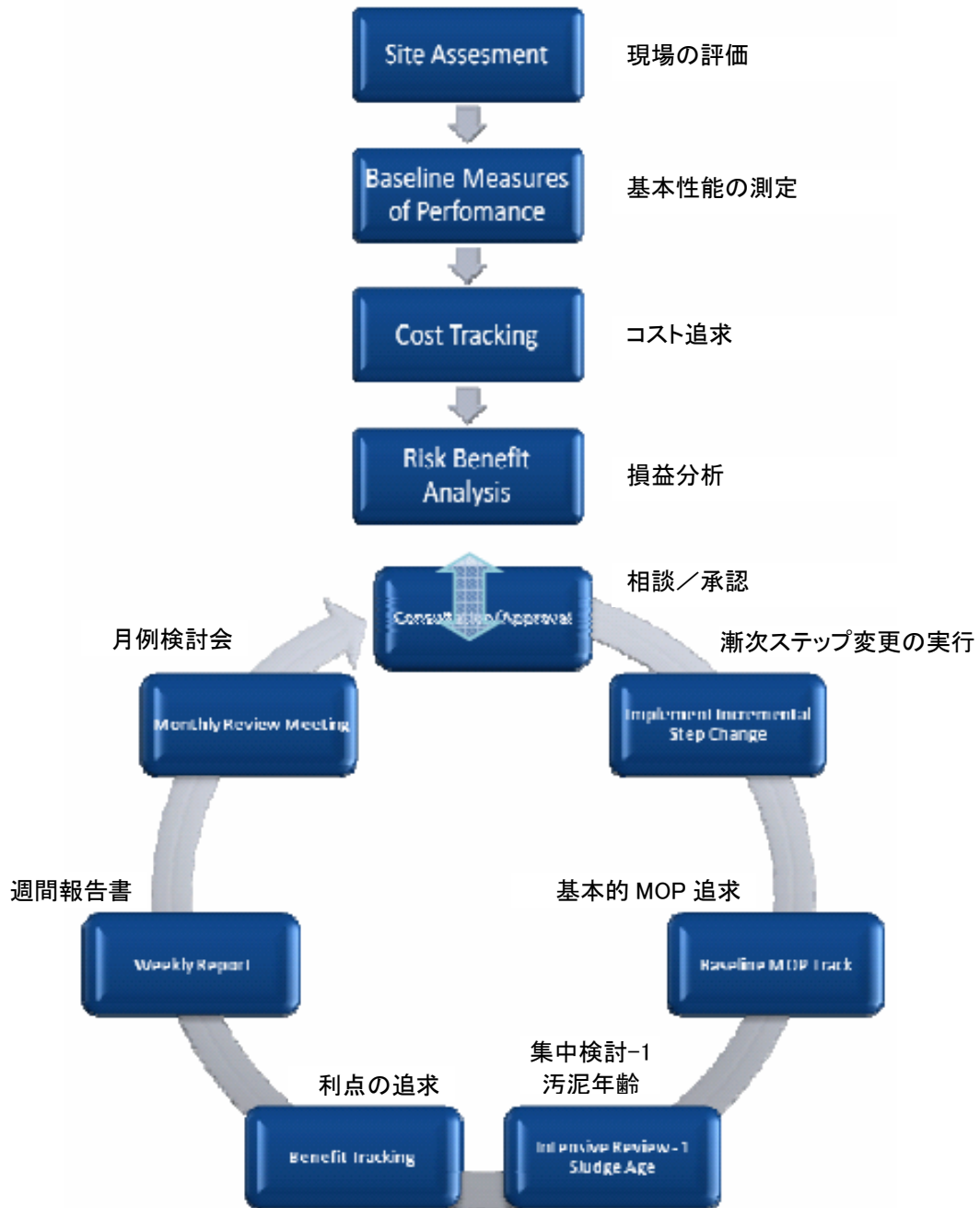


図1. カーディフ下水処理場における最適化プロセス構築においてとられた方法を示すプロダクトモデル

試験機関中およびプロダクトモデルを実行中にストラストックスとASバイオスコープが主装置として使用された。ストラストックスはラボ使用を前提としており、活性汚泥試料により温度調整された様々な試験を行うのに使用できるので、処理工程条件をそっくり模倣できる。また可搬型であるため、別の処理場現場でそれぞれの処理工程の特性を決定するのに使用できる。

ASバイオスコープは活性汚泥プラントの現場で使用される。負荷や温度のような現場条件を様々に変化させながら酸素摂取速度(OUR)と溶存酸素(DO)を測定することができる。



図2. ASバイオスコープの写真



図3. ストラストックスの写真

ASバイオスコープとストラストックスを連携して使用することにより、下記の重要な情報が最適化プロセス開始前に得られる。

- 酸素濃度試験—最小必要なDOレベル
- 呼吸率 — 微生物分解の酸素消費率
- 酸素摂取率 — 実酸素消費
- BOD(短時間)— 処理レベル
- 資化阻害/硝化阻害 — 毒性測定
- %硝化率 — 分解できるアンモニア量
- バクテリア健康度試験 — バクテリア集団の質

これらの試験機能により、プロセスを維持するために必要な酸素濃度についての情報と、無駄に捨てられている酸素量を測定するために必要な情報が得られる。ストラストックスとASバイオスコープは、資化性バクテリアと硝化バクテリアがそれぞれ使用する酸素濃度の割合等、プラントの実項目を測定する機能を有している。

このプロジェクトは30%の曝気コスト削減を見込んで開始した。カーディフ下水処理場にとっては30万ポンド(約¥4200万)に相当する。このコスト削減により運転コストとCO2排出量が下がり、DCWW顧客にとって価値があることである。プロダクトモデルの重要な特徴は、ストラスケルビン社とKWS(W)社の相談スタッフ間で知識の移転ができたことである。

## 試験と最適化プロセス

この試験は初期評価で始まり、続いて2008年6月から3ヶ月間の試験運用計画をカーディフ処理場の16槽の逐次回分式活性汚泥槽(SBR)の2カ所で行い、その後2009年3月までに本格的運用を開始した。試験はストラスケルビン社の知識とアプリケーションを共有するためのチームを作ることで達成できた。KWS(W)社の処理プラントの運転知識で的確な最適化プロセスをもたらすことができた。6月の試験運転前に初期試験を行ったが、カーディフの現

場で最適化が可能であることが示された。そこで16箇所の槽の内2槽での試験期間中、プロダクトモデルはステップ変化プログラムを導入しながら行われた。ステップ変化プログラムの鍵は資化性バクテリア (BOD) と硝化バクテリア (アンモニア) の両方にとっての限界酸素濃度を計算することであり、それによって実行プロセスの最適化の境界を導くことである。図4は最適化が実行できる前に検討された全要素を示すが、重要なことは、最適化は既設の処理プラントの設計上の制約範囲内でのみ可能であるということである。いかなる点も現場の法令遵守維持および最適化プロセスの理解という点で重要である。



図4. カーディフ下水処理場の運転最適化ファクター

プラントは人口88万を対象としてITTにより設計された。EA規制条件はSS 250 mg/Lを上限として、BOD 50 mg/L、アンモニア 20 mg/Lである。都市排水条件により、カーディフ処理場ではBOD規制上限 25 mg/L、COD規制上限 125 mg/Lが適用される。最大処理水量は523,584 立方メートル/日である。流入下水は4つの流入スクリーンを通過し、回分式活性汚泥処理SBR(Sequenced Butch Reactor)工程に入り、分配システムを経由し、処理工程に入っていく。プラントには16槽があり2段階に均等にわかれて、流入下水を一定時間曝気し、ついで沈殿工程に移り、最後に清浄な上澄み水を分離して、4.5km沖合のブリストル湾へ排水される。いずれの曝気槽においても、サイクルタイムの50%が曝気時間、25%が沈殿時間、25%が清澄水分離時間である。

### 考察

図5は、資化と硝化における限界酸素濃度の違いを示す。従来の活性汚泥処理の運転パラメータとしては、プラントは酸素濃度を通常1mg/lと2mg/lに制御するように設定される。カーディフ下水処理場における資化バクテリア

にとっての限界酸素濃度は0.8mg/l、また硝化バクテリアのそれは3.5mg/lと求めた(図5参照)。処理工程への供給空気量が多くなると、溶存酸素は資化バクテリアまたは消化バクテリアのいずれかにとって限界酸素濃度以上となり、下水処理に必要な空気量を供給するために過剰のエネルギーが使われることになる(図中に無駄なエネルギーとして表示)。図5は、処理工程に供給されている空気量がある一定レベル以下に減少すると、バクテリアのストレスを引き起こし、それによって処理工程が影響され、規制不適合のリスクが高まることも示している。従って、図4で示した最適化のための項目につながる限界酸素濃度を求めることにより、プロダクトモデルの境界がわかり、処理槽への空気量を制御することで環境にやさしい曝気最適化の方法が得られるのである。

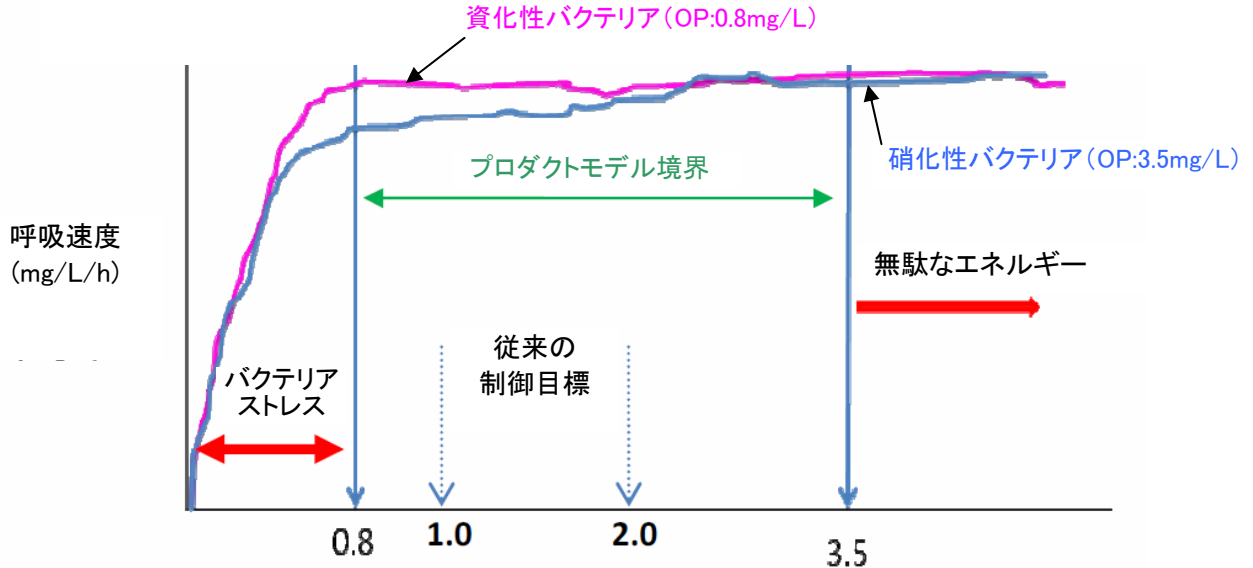


図5. カーディフ処理場の呼吸速度と限界酸素濃度を示すDOとの関係

限界酸素濃度はバクテリアが摂食、呼吸、成長、分裂するために必要な最小レベルの溶存酸素濃度である。従って処理槽に適量の空気が届けられることが重要である。酸素量が限界酸素濃度を下回ると、バクテリアは阻害された状態になり、成長が出来なくなる。そうすると処理能力と水質への規制適合能力が完全に損なわれてしまう。試験実施中、限界酸素濃度を資化バクテリアおよび硝化バクテリアの両方に対して求めた。このことは非常に重要である。というのは、資化バクテリアはBODを先に分解するからである。これは、BOD成分は分子量がより小さく、分解が容易で迅速に行われ、より少ない酸素量で作業を完了するからである。

硝化バクテリアは流入下水に含まれているアンモニアを吸収し、これを酸化して成長に必要なエネルギーを放出する。このプロセスは硝化として知られている。このプロセスは2種類の異なるバクテリア種により実行される。一つはニトロソモナスというアンモニアを亜硝酸に酸化する菌、2つ目はニトロバクターという亜硝酸を硝酸に酸化する菌である。このアンモニア酸化プロセスは多くの酸素を必要とする。というのはこのプロセスは比較的非効率な化学酸化であり、それ故により多くの酸素を必要とし、より高い限界酸素濃度になるからである。この段階が完了するとただちにアンモニア濃度曲線と短時間BOD曲線を求める試験が2つの試験槽において実行された。これはICEAS(間欠サイクル延長曝気システム)連続供給モードで運転しているので、槽に沿って未処理排水の分布を知るためである。生物分解速度の解析は連続的な流量記録やSBRの時間基準で運転されているプラントで通常行われることである。しかし、ICEASモードにおけるSBR運転は連続流量記録と時間基準の両方に対する評価を必要とする。さらにその活性汚泥槽は、未処理の流入水がどの程度槽内に侵入しているかを求めるために、沈殿中および上澄み液排出中に評価することが必要である。

最もうまくいっている活性汚泥槽(6a)と最も良くない活性汚泥槽(2a)に於いて、槽の流れ方向に沿ってデータサンプリングが必要であることが決定された。沈殿および上澄み液排出のサイクル中に、活性汚泥槽の流れ方向に沿って数カ所で一定時間ごとにサンプル水を取った。これらのサンプル水は試験室へ送り、Nレベルのアンモニア濃度とBODレベルを、内生呼吸状態に安定させた活性汚泥を使うストラストックスシステムの短時間BODプロトコルにより求めた。これによって曝気が行われていないサイクル間に未処理排水負荷が槽内にどの程度侵入していったかの指標とすることができる。データは曝気、沈殿、上澄み液処理サイクル中に採取され、未曝気サイクル中にBOD負荷がほとんど変化していないことが確認された。このデータは、流入水がサイクルタイムのこの時間帯に槽底部にそって層流になっており、サイクルタイム内でこの時間帯を長くできる可能性があるという考え方を裏付けるものである。

図6は、曝気時間108分、冬季通常流れに於ける2008年10月23日、カーディフ下水処理場の5a槽の生物分解パターンの一例である。酸素摂取速度OUR(赤線)が平たくなったとき処理が完全であることが分かる。このポイントは黒縦点線でグラフ上に示されている(図7&8も同様)。あらゆる条件について試験するために種々の場所において曝気サイクルを変えてみたが、この生物分解パターンが繰り返された。

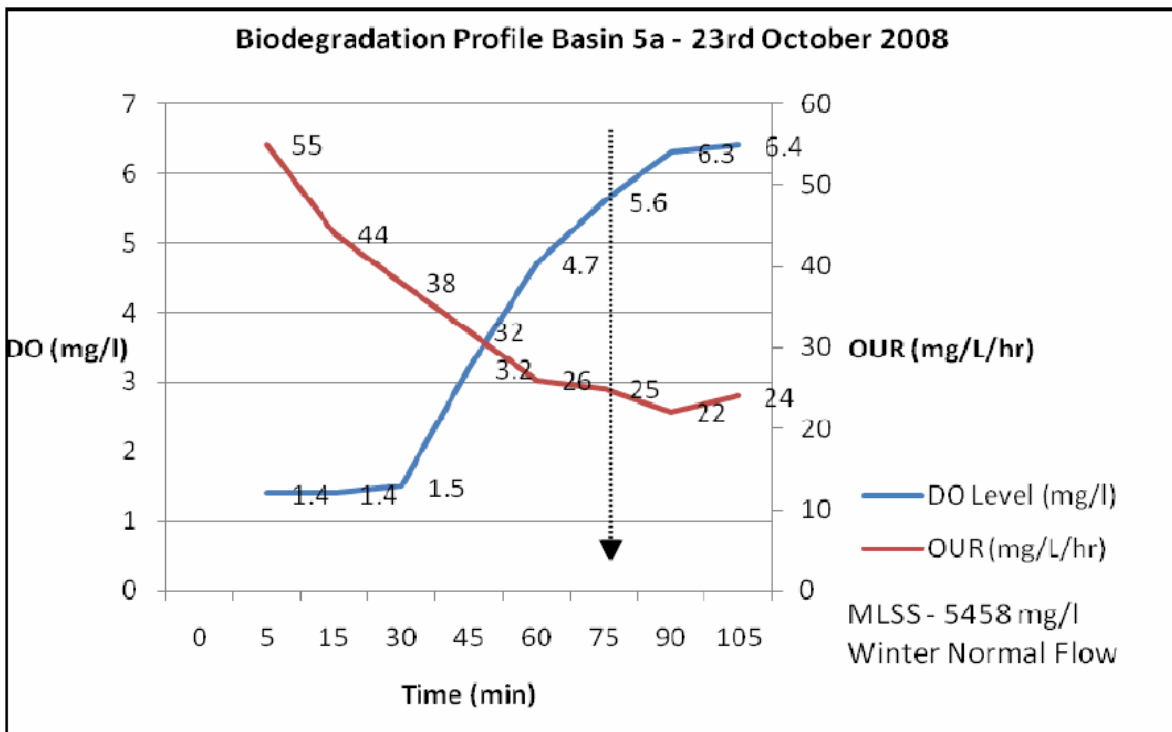


図6: 冬季フローにおける生物分解パターンの例

図9のグラフは曝気サイクル中のアンモニア濃度の減少を示す。処理場の活性汚泥槽への流入アンモニアレベルは12mg/Lであり、活性汚泥槽の排水口で取った試料水のアンモニアは4mg/Lであった。槽2aにおいて、曝気サイクルの45分後、75分後、105分後の槽入り口、中間点および出口近辺におけるアンモニア濃度の変化が示されている。槽入り口部・中間点では 曝気105分後に3.5mg/L、出口部では2.2mg/Lになっている。これは、活性汚泥槽全体平均での排水口に於ける濃度4mg/Lよりも低く、槽2aの運転が全体平均よりも良好であることを示している。

アンモニア及び短時間BOD試験から得られたデータを、ASバイオスコープを使用して得た生物分解パターンと関連づけることにより、曝気サイクルタイムを、安全率をもって16%まで短縮できることが分かった。

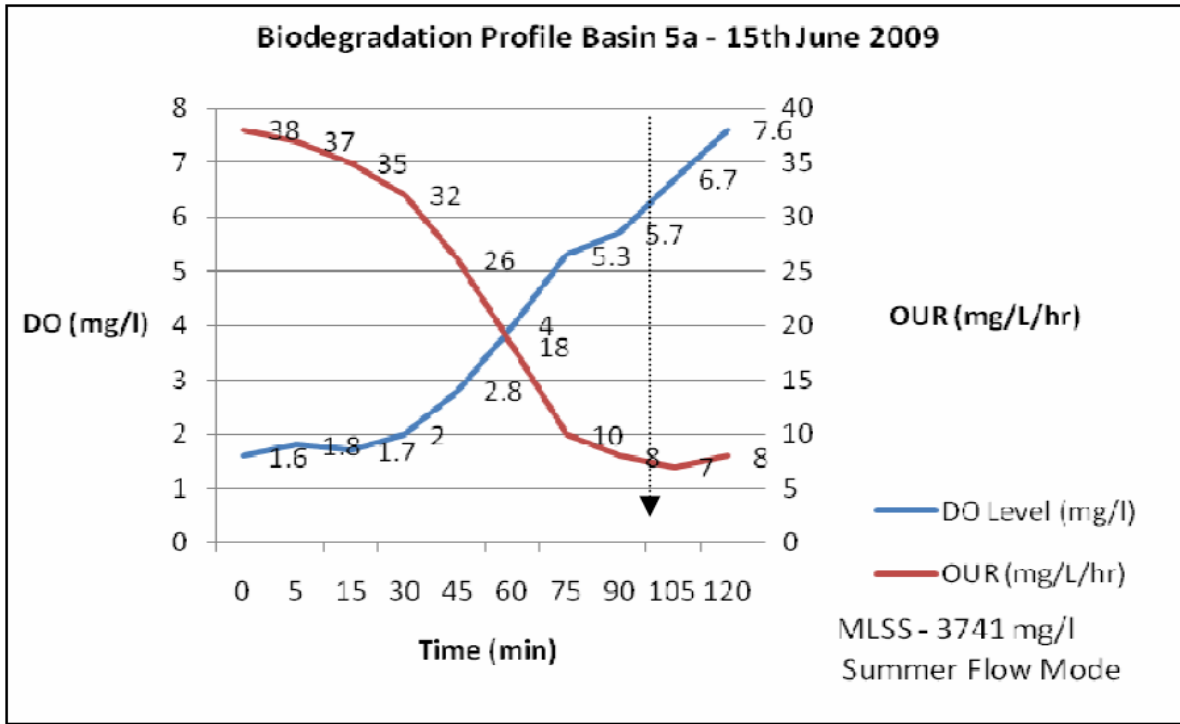


図7: 夏季フローにおける生物分解パターンの例

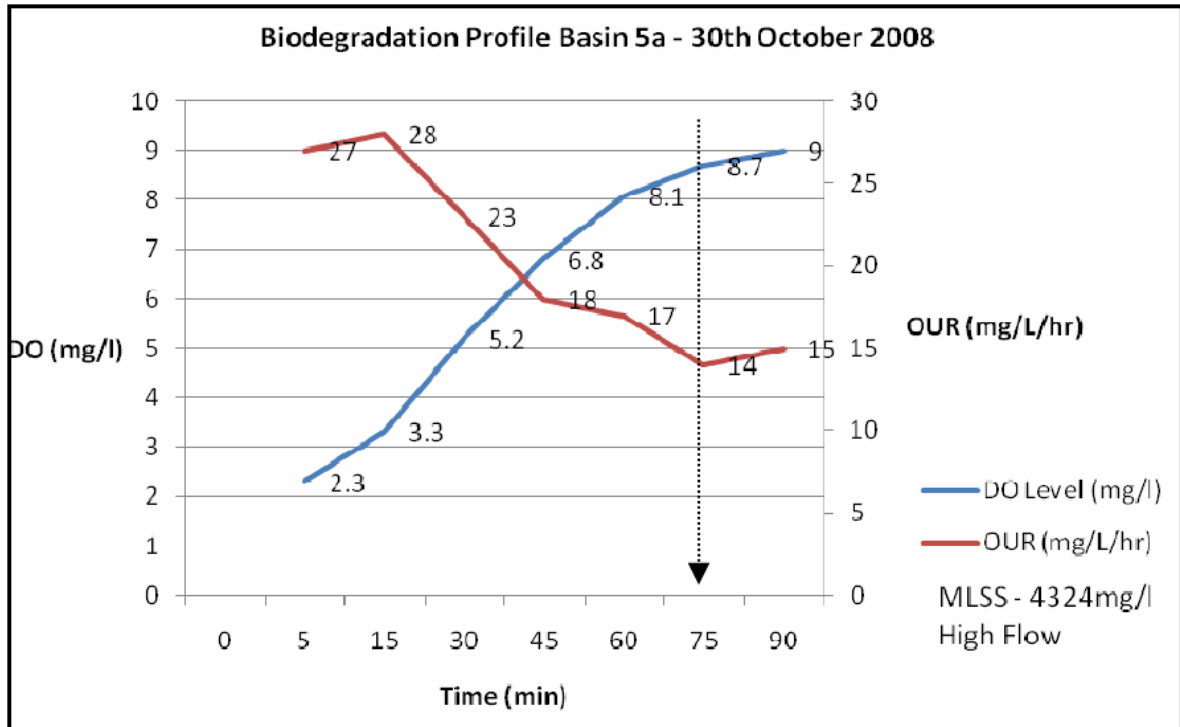


図8: 高流量モードにおける生物分解パターン例

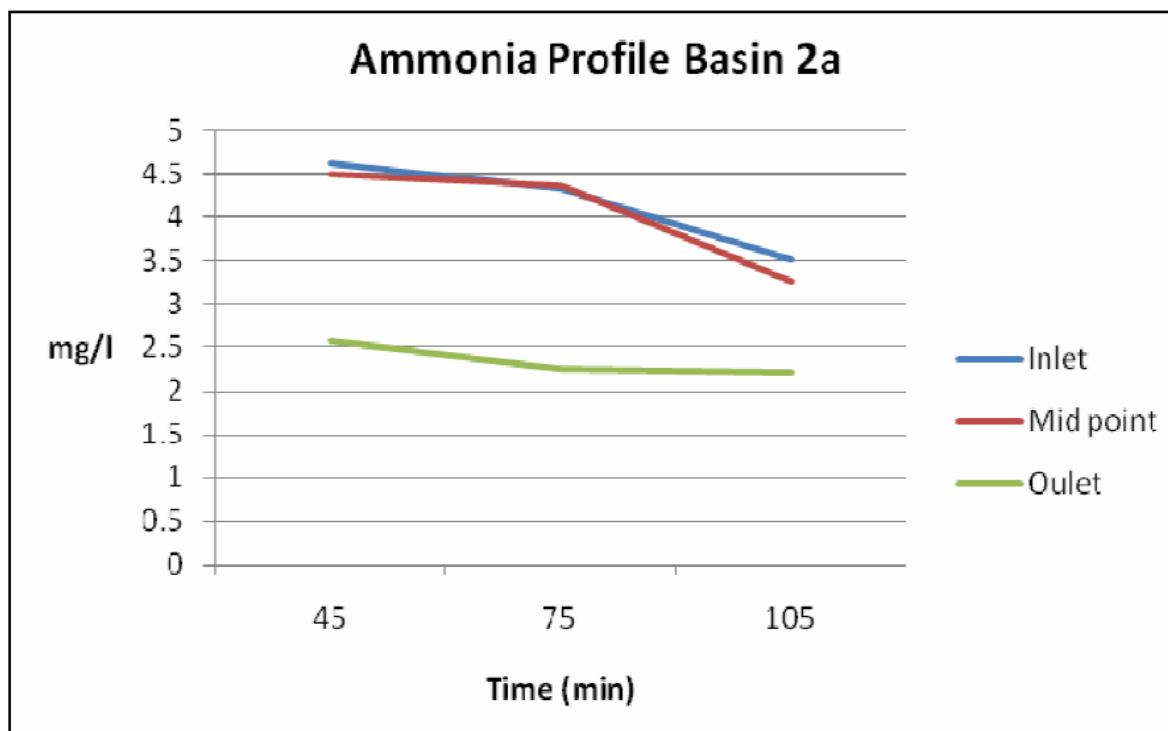


図9 曝気サイクル中の槽流れ方向でのアンモニア濃度の変化

バクテリアが必要としている酸素量に合わせることで、環境にやさしい曝気の運転制御方法を確立できた。結果として、運転コスト、エネルギー消費量、CO2排出量を削減できた。カーディフ下水処理場で呼吸計測による制御方法を導入して以後、高流量モード及び冬季運転モードにおける曝気サイクルタイムはそれぞれ15分と18分短縮できた。夏季運転モードでは20分短縮できる可能性がある。さらに夏季運転モードでは、2008年夏は天候状態が悪くなかったために評価を続けることが必要なことと、返送汚泥制御を考えればさらなる削減が予測できる。これによって槽容積をさらに10%使うことができるようになり、さらなる曝気削減ができるようになるからである。

## 利点と展開

この試験は2008年7月に開始、3ヶ月間行われた。2008年9月末からこのプロダクトモデルが残り14箇所のカーディフ下水処理場の活性汚泥槽に適用されていった。2008年12月末までに50%の現場がサイクルタイムを削減し、SCADAシステムに組み込まれた。これが2009年3月まで継続した。カーディフ下水処理場で上手くいったので、このプロダクトモデルは他の最もエネルギーを多用しているサイトにも適用され、最適化の可能性のあるかを調査した。これまでにアファン処理場において8つの活性汚泥槽のうち6までを最適化することができた。ASバイオスコープのユニークな特長はリアルタイムモニタリング採用し、サイト特有であること、ほんの数分間で処理工程中に微生物の酸素摂取速度を測定できることである。つまりどのような最適化プログラムもプロセス負荷条件を考慮したそのサイトに固有なものになるということである。ストラストックスはユニークなソフトウェアを搭載しており、最適化プログラムを構築する上で鍵となる限界酸素濃度を算出する。これによりバクテリアが何をしているか見える様になり、最適化から推測を取り除くのである。ASバイオスコープは市場に出たばかりであった。ストラスケルビン社は新たにこの技術とコンセプトを開発してい



だが、KWS(W)社はこの製品を使用した最初の水処理会社である。KWS(W)社はストラストックスとASバイオスコープから得られるデータとこの会社の経験を結びつけ、プラント運転の最適化モデルを構築した。そのユニークな特長は、製品モデル全体が活性汚泥処理プロセスにとって新しい革新的な方法であることである。

この製品モデルがこのように上手くいっていること主な理由は、

- ・ 革新的な方法
- ・ 地球にやさしいエネルギー削減&節約を提供
- ・ 科学的方法に基づくプロセス最適化、導入後の変化に満足が得られる
- ・ 最終放流水基準に適合するように実酸素要求量を供給することによりプロセスのどのポイントにおいても規制適合管理を行える。
- ・ 活性汚泥処理プラントの処理性能を測定するより良きツールである

ビジネスに対するコスト面以外の主な利点は、バクテリアの要求に合わせて酸素供給を行うことで、現場の炭素排出量を削減したことである。

限界酸素濃度を算出し、酸素摂取速度を使用することで、処理プロセス管理のための地球にやさしい方法を得た。これによって、より少ない費用でより多くのことを提供でき、規制適合を確実にできた(図10参照)。

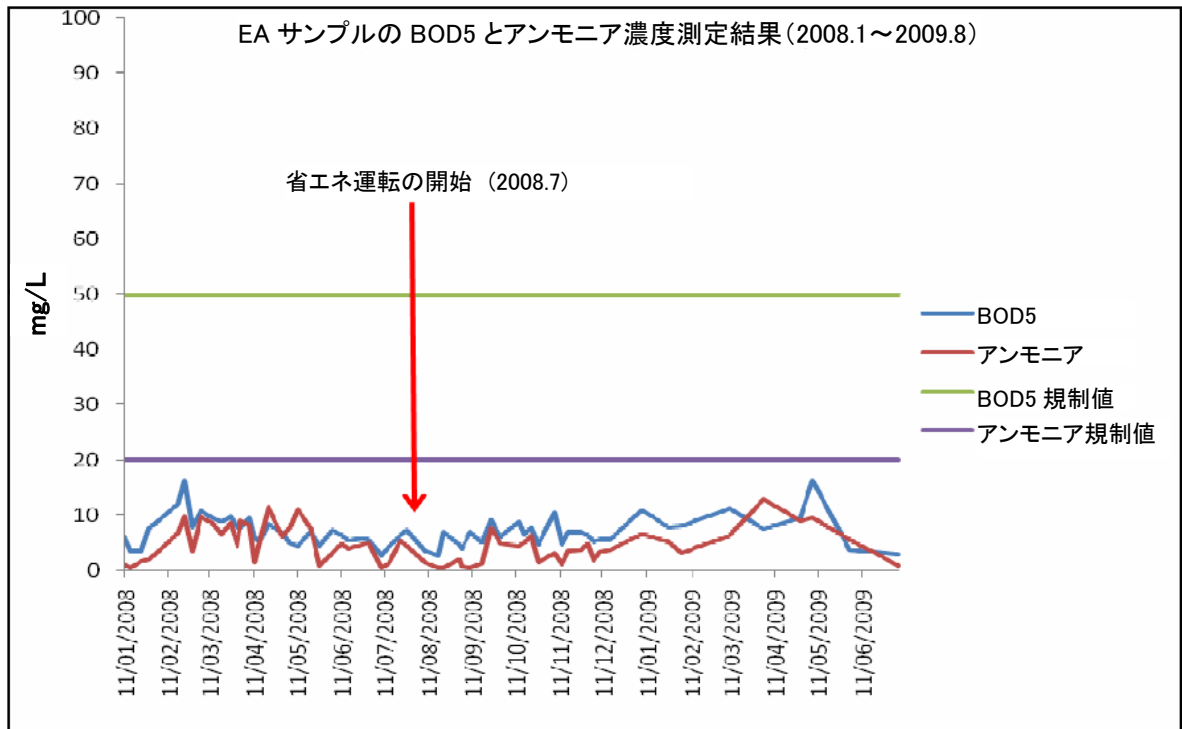


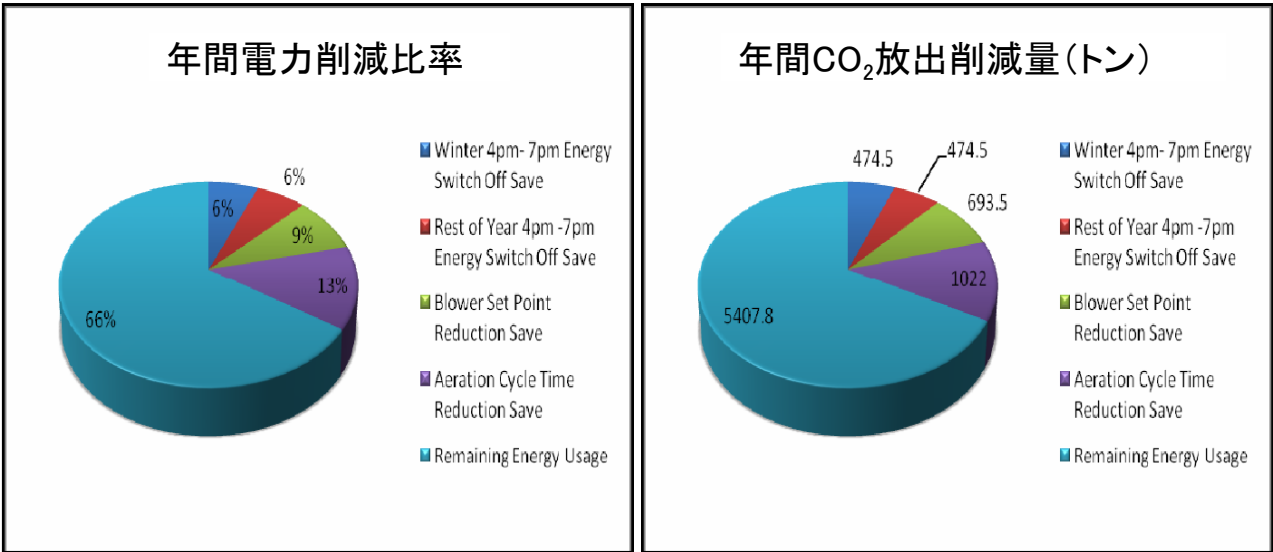
図10 カーディフ下水処理場EAサンプルの測定結果

呼吸計測制御を通して、曝気エネルギーコストは年間5.7ギガWh削減できた。これはカーディフ処理場とアファン処理場を合算したエネルギーの26%に相当する。カーディフ処理場単独では3.9ギガWhの削減であった。

全CO<sub>2</sub>排出量は年間あたり2994トン削減できた。これは車で1300回世界一周することに相当する。

このエネルギー節約に加え、サウスウェールズ周辺の他のKWS(W)現場へも適用していけば、Dwr Cymru Welsh Water(DCWW)社にも節減を明らかに提言できる。さらにDCWW社の初期投資は6ヶ月で回収できる。

図11はカーディフ下水処理場において最適化プログラムのうち、どの部分が3.9GWhのエネルギー節減に貢献したかということと、年間でのCO<sub>2</sub>ガス放出削減と残余の放出量を示している。



■ 冬季 pm4:00～pm7:00 電力オフ ■ その他季 pm4:00～pm7:00 電力オフ ■ ブロウ風量変更による削減  
■ 曝気サイクルタイム変更による削減 ■ 残りのエネルギー消費量 (CO<sub>2</sub> 放出量)

図11 年間電力削減比率と二酸化炭素放出削減量

KWS(W)社のスタッフが行った開発と同じように、プロダクトモデルを将来開発するための伝達知識が社内に残ったのも別の利点であった。知識の移転は他のプロジェクト開発やプロセスで使うために、より広範なKWS社の事業やUUOSと他のAMAパートナー間で共有されており、ストラストックスは、活性汚泥プロセスの最新の生物分解方法における濃度の影響を評価するために使用され、また第三者が介入してプラントが毒物に曝されることへの脅威の影響を評価するのに役立った。

## 結論

カーディフ下水処理場において曝気制御の方法として呼吸計測の方法を取り入れたことは、水質規制に適合しつつ省エネ、運転コスト削減、さらに二酸化炭素放出の削減を実行し、KWS(W)社が新たな運転管理方式を構築する方法を提唱するものである。

初期投資を6ヶ月で回収できる計画遂行は会社の期待以上であり、現場での電力消費を削減することによりビジネスの3つの部分で利益をもたらすものである。すなわち、電力削減によりKWS(W)社は運転コストを削減し、これが同社の顧客であるDwr Oymur Welsh Water (DCWW)社のコストを削減し、次にDCWW社はその顧客に対してお金を有効に使っていることを示し、また省エネと炭酸ガス放出量削減により地球にやさしいビジネスに取り組んでいることを示すことができるのである。従って、このプロジェクトはDCWW社をして、曝気処理に必要な電力量の削減により会社方針の達成をサポートするものである。

生物処理プロセスの最適化における本方法は、カーディフ下水処理場における電力消費とコストを節減するだけでなく、既存設備であればその設計条件によって限定される部分はあるが、どのような活性汚泥処理方式であっても、その方式に合わせて適用または変更ができるものである。

## 謝辞

筆者らはKWS(W)社ノカーディフ流域オペレーションチーム、ME&Iチーム、およびエネルギーチームと共に作業し

たIan Parry, Eddie Morton, Jim Marsh, James Byrne, Terrence Bennett及びその他の人たちが全ての仕事を行ったことに感謝したい。本プロジェクトの種々の部分で助けられ、誰がいなくても本プロジェクトは上手くいかなかったであろう。また、ストラスケルビンインスツルメンツ社の技術チームに対して日頃からのご支援に感謝したい。

(原文: Cardiff WWTW Aeration Optimisation through Scientific Control, 3<sup>rd</sup> European Water and Wastewater Management Conference, 22<sup>nd</sup> – 23<sup>rd</sup> September 2009, 翻訳: セントラル科学株式会社 2010年11月)

**セントラル科学株式会社**

〒113-0033 東京都文京区本郷 3-23-14 ショウエイビル  
TEL 03-3812-9186 FAX 03-3814-7538  
Eメール: [central@aquackc.co.jp](mailto:central@aquackc.co.jp)



**セントラル科学株式会社**