

生物応答による排水処理設備の省エネルギー，低コスト化

Saving Energy and Cost on Wastewater Treatment using Biological Response



藤原尚美*
Naomi Fujiwara



野中信一*
Shinichi Nonaka



三浦雅彦*
Masahiko Miura
農学博士



豊久志朗**
Shiro Toyohisa



平野 豊**
Yutaka Hirano



八木弓博**
Yumihiko Yagi

研究対象の産業廃棄物最終処分場は、埋立地がバイオリアクタとして準好気性埋立が機能するよう工夫し、埋立箇所でのガス発生状況の管理に加えて、機器分析による浸出水の各物質濃度を常に管理している。本研究では、さらなる環境保全を目指し、複数の化学物質の相互作用も配慮でき、かつ放流先への環境影響を評価し総合的な「安全性」として捉えることができる“生物応答試験”を各水処理工程に適用した。処理過程の処理水が生物に影響のある場合はその要因の推定と対策を実施した。その結果、安全安心な浸出水であることを確認できたとともに、過剰な処理工程を使用しないことや、水処理薬剤量の低減を検討することで、省エネルギー、低コスト化につながったのでここに紹介する。

At this industrial waste landfill site, we continuously manage the gas generation in each location and the substance concentration in leachate by instrumental analysis in order to demonstrate this semi-aerobic site's ability to function as a bioreactor for landfill. In this study, aiming at further environmental conservation, we did "biological response testing" in each water treatment process, as it can identify overall safety by evaluating the interaction of multiple chemicals and the environmental impact at the discharge point. When the treated water affects organisms, we have identified the cause of the toxicity and taken measures to eliminate it. As a result, we found that this leachate was safe and secure and this approach to maintenance using biological response testing can lead to energy-savings and lower costs by not using excessive treatment processing and reducing chemical dosing. This paper reports on this work of ours.

Key Words :

最終処分場	Landfill site
浸出水	Leachate
生物応答	Biological response
毒性削減評価	Toxicity Reduction Evaluation: TRE
毒性同定評価	Toxicity Identification Evaluation: TIE

【セールスポイント】

- ・生物応答試験を用いることは、排水中の化学物質の個々の物質管理ではなく、排水そのものの水生生物への影響を把握できる。さらに当社では、生物応答試験で生物への影響があった場合、その対応策として、影響要因の特定と改善技術いわゆる TRE/TIE の検討まで可能であり、生物応答試験と TRE/TIE 技術を組み合わせることで排水処理設備の新たな維持管理が可能である。

まえがき

我が国において、1960年代の高度成長期に水質汚濁が大きな社会問題となり、1970年に水質汚濁防止法が制定され、現在、排水規制として水質汚濁防止法に基づいて生活環境項目15項目と、健康項目28項目が規制対象となっている。このため、日々増続けている多様な化学物質への管理が難しい状態である。工場排水では、化学物質が単独に存在することはまれで、通常、複数のものが同時に存在する。そのため、化学物質どうしの相互作用により、毒性がどう変化するかは非常に重要な問題である。その作用は、相加的、相乗的あるいは拮抗的のいずれであるのか、また、その作用が、どの濃度で、どの混合割合で起こるかを知ることは、これらの物質の有害性を評価するためには必要であり、機器分析による濃度管理のみではこの評価は困難である。

この状況に対して、生物応答試験は排水を個別の「濃度」としてではなく総体的な「安全性」としてとらえることができるため、欧米をはじめ海外で広く採用されている。国内においてもこの試験をCSR等へ活用される事業者が増加しつつある。2016年からは環境省による生物を用いた水環境の評価・管理手法に関する検討会が進められ、14事業場の排水で生物応答試験が実施されている¹⁾。その結果、魚では良好な結果が得られているものの、ミジンコ、緑藻には影響が見られるケースもあり、生物応答試験で生物に影響が見られた場合の対応方法は重要な課題となっている。

これらの背景を踏まえ、我々は、産業廃棄物管理型最終処分場の浸出水を対象に生物応答試験と生物に影響のあった場合の改善手段であるTRE/TIE

(Toxicity Reduction Evaluation: 毒性削減評価 / Toxicity Identification Evaluation: 毒性同定評価)の検討を実施した。当該放流水ではミジンコ、魚および緑藻に影響がなかったことから、放流水の上流側の各処理水に対して生物応答試験を実施し、排水処理工程における水生生物への影響を把握した。

1. 研究対象処分場の概要

当該最終処分場では、“準好気性埋立方式”を採用し²⁾、埋立箇所でのガス発生状況の管理に加えて浸出水原水水質を常に管理している。浸出水処理設備フローは図1に示すとおりで、処理規模は180 m³/dであり、凝集沈殿設備では水処理薬剤（ポリ塩化アルミニウム：PAC）を注入し、膜処理設備として1段目ROと2段目ROを採用している。

2. 実験方法

2.1 各処理工程の機器分析

浸出水処理設備の流入水、調整槽、砂ろ過水、1段目ROおよび2段目ROの各処理水について、廃掃法で定められた処理水の毎月の測定5項目（pH、BOD、COD、SSおよび窒素）の機器分析を実施し、各工程の処理状況を確認した。

2.2 生物応答試験

生物応答試験は、生物応答を用いた排水試験法（検討案³⁾）に準じて、ミジンコ繁殖試験、魚類胚・仔魚期短期慢性毒性試験、藻類生長阻害試験を行った。それぞれの試験に用いたニセネコゼミジンコ（*Ceriodaphnia dubia*）、ゼブラフィッシュ（*Danio rerio*）、ムレミカヅキモ（*Pseudokirchnerie subcapitata*）は、国立研究開発法人国立環境研究所より分譲された生物を親として、当社の飼育水で継代飼育した生物を用いた。

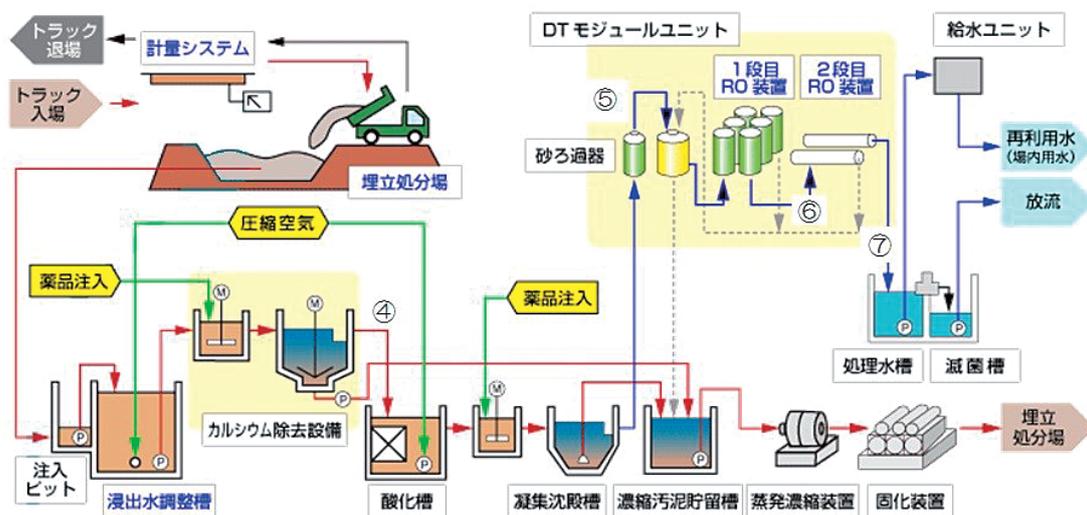


図1 浸出水処理設備フロー

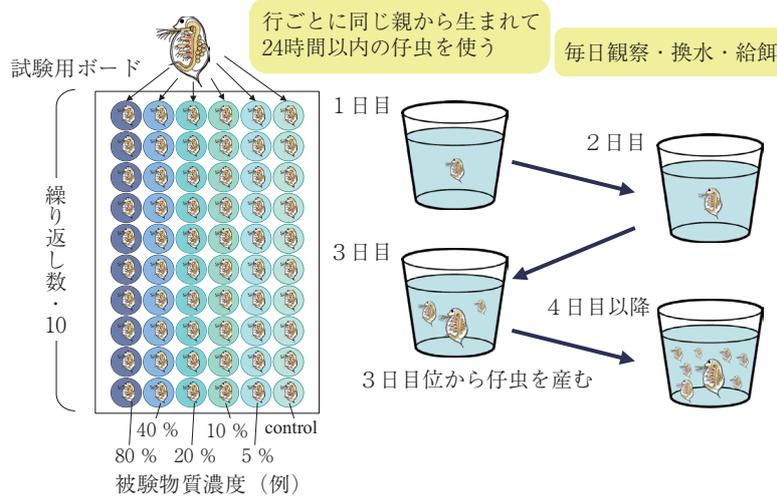


図2 ミジンコ繁殖試験

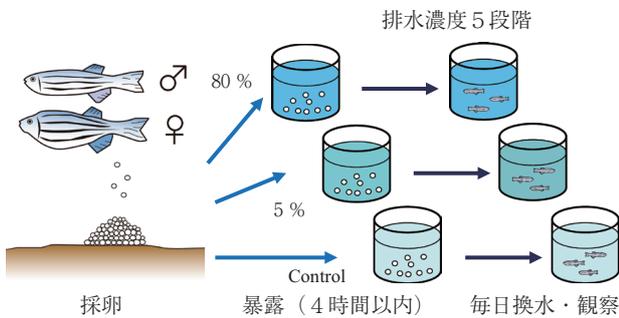


図3 魚類胚・仔魚期短期慢性毒性試験

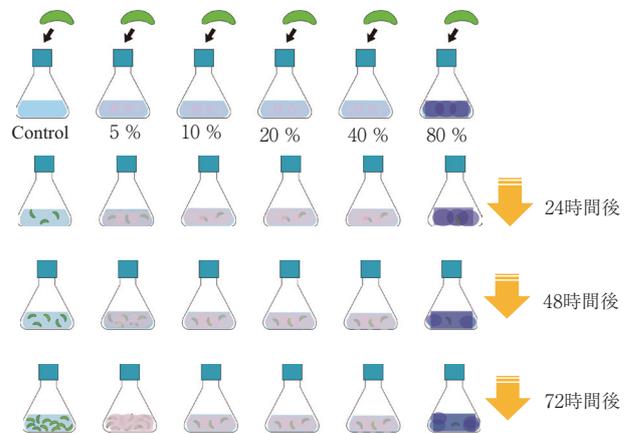


図4 藻類生長阻害試験

(1) ミジンコ繁殖試験

対象排水を含まない飼育水を対照区として、対象排水を5%、10%、20%、40%、80%添加した希釈排水を各10個ずつ作成（繰返し数（n数）10）し、生後24時間以内の仔虫を各希釈排水に1個体ずつ配置して、暴露し、毎日、生死観察と生まれた仔虫の計数を行った。試験は対照区の試験個体の60%以上が3回目の出産をした時点で終了とし、最長でも試験期間は8日間とした。

(2) 魚類胚・仔魚期短期慢性毒性試験

前述の希釈排水を各4個ずつ作成し（繰返し数（n数）4）し、受精後4時間以内の胚を15粒ずつ配置して、暴露し、毎日、胚発生異常（発生停止、眼球形成不全、血管形成不全）の有無および死亡数を調べた。孵化後、8日目まで暴露を継続し、形成異常（遊泳不能）、死亡について観察した。

(3) 藻類生長阻害試験

前述の希釈排水を各3個ずつ作成（繰返し数（n数）3）し、前培養したムレミカツキモの初期生物量が 5×10^3 cells/mLとなるように調整して、暴露し、24、36、72時間後の生物量を測定した。

(4) 統計処理と生物への影響判断

統計解析は、統計解析は元大分大学の吉岡によって開発された日本環境毒性学会のEcoTox-Statistics⁴⁾を用いた。各試験区間の有意差の判定は、Bartlett検定で等分散性が認められた場合は、パラメトリック手法による一元配置分散分析（ANOVA）により、等分散性が認められない場合は、ノンパラメトリック手法により有意差があるかを判定した。有意差が認められた場合はDunnett多重比較検定にて、危険率5%未満を有意として、NOEC（No Observed Effect Concentration: 無影響濃度）を推定した。有意差が認められなかった場合、NOECは最高濃度区以上とした。

生物への影響については、このNOECで判断した。生物への影響が見られないときの対象排水の混合割合（生物の飼育水で希釈した割合）を示すものであり、現在の生物への影響が無いとする暫定的な基準は、NOEC 10%以上である。

2.3 TRE/TIE (Toxicity Reduction Evaluation: 毒性削減評価 / Toxicity Identification Evaluation: 毒性同定評価) 手法

生物に影響のあった場合は、その要因の削減と同定の検討 (TRE/TIE) を実施し、改善を図った。TRE/TIE の内容説明については以下のとおり。

TRE とは、排水毒性の原因の特定、発生源の分離、毒性制御代替法の効率評価、排水毒性の削減効果の確認を目的として段階的に実施される発生源を対象とした一連の調査手法である⁵⁾。

TIE とは、排水に対して何らかの処理を行い、その処理後に生物応答試験を実施し、生物影響が削減されたならその処理によって削減された物質の中に毒性要因物質が含まれていたと考える方法である⁶⁾。

本研究では、水処理薬剤の影響に着目して、当該 TRE/TIE 手法を活用した。

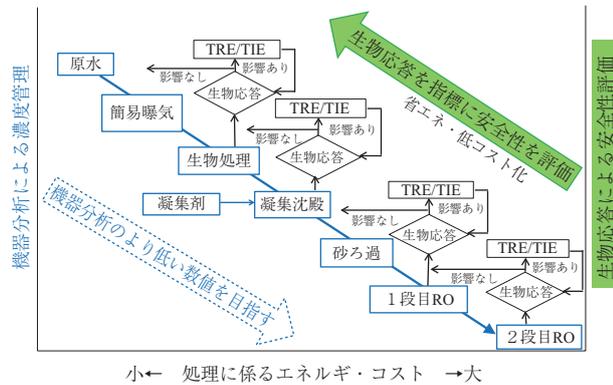


図5 排水処理設備に係るエネルギー・コストとの関係

2.4 新たな排水管理の維持管理手法

従来の機器分析による一律排水基準との比較を実施するとともに、処理設備最下流の排水から生物応答試験を実施し、生物に影響が無ければその上流側の排水の試験を実施し、生物に影響のあった場合は、その要因の削減と同定の検討 (TRE/TIE) を実施した。

機器分析による濃度管理と生物応答試験による安全性評価に対する排水処理設備のエネルギー・コストとの関係を図5に示す。従来の機器分析では、一律排水基準値以下であっても、より低い数値結果を目指す傾向があるが、生物応答では環境保全に十分な処理水質が提示されるので、処理に係るエネルギーいゆる化石燃料使用量も踏まえた最適な処理工程を検討することができる。

3. 実験結果および考察

3.1 各処理工程の機器分析

図6に1年間の各処理工程に対する毎月の機器分析結果の範囲を示す。流入部で放流水基準値 (窒素は最大值) を満足し、BOD, COD は工程が進むにつれて確実に低減、SS は調整槽で一旦上昇するがその後安定、窒素は膜処理で低減している。なお pH も流入部で基準値以内を確認している。1 段目, 2 段目 RO とともに、廃掃法の基準値を満足しており、当該最終処分場では、準好気性埋立が機能するように管理し、埋立地がバイオリアクタ機能を発揮できていることから、良好な浸出水原水が得られていると推定する。

3.2 生物応答試験

図7に各工程の生物応答試験結果を示す。生物に

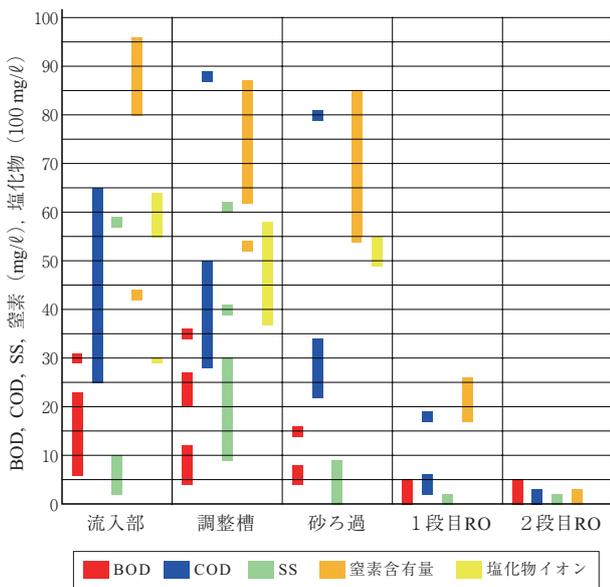


図6 各処理工程の機器分析結果

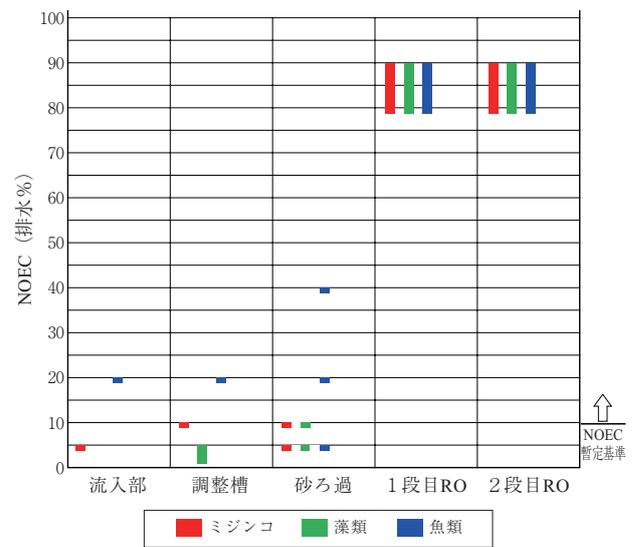


図7 各工程の生物応答試験結果

表1 水処理薬剤の機器分析と生物応答試験結果

凝集時設定 pH	PAC 注入率 mg/L	Al 注入量 mg/L	処理水 Al 濃度 mg/L	NOEC (排水濃度%)	
				ミジンコ	緑藻
4.0	200	10.6	6.5	5 未満	5 未満
4.5	200	10.6	4.0	—	—
6.5	200	10.6	0.22	10	10

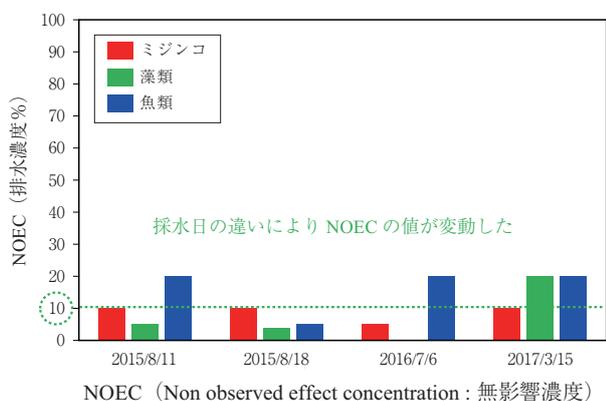


図8 砂ろ過水の生物応答試験結果

影響の無い管理目標値は、ミジンコ、魚、緑藻ともに NOEC は10 %以上とされている。1 段目と 2 段目 RO ともに、NOEC は80 %以上であり、水環境に影響はみられなかったことから、1 段目 RO 処理までで十分水質保全に寄与でき、2 段目 RO 処理を使用しなくてよい指標を得た。

砂ろ過水においては、NOEC は採水日によって管理目標値の10 %を下回る場合と、20 %以上の場合があり、数値の変動があったため、TRE/TIE にて要因を調査することとした。

3.3 TRE/TIE 手法

砂ろ過水の生物応答試験結果における NOEC 変動の要因を調査するために、砂ろ過水の生物応答試験の結果をまとめた。図8からミジンコ、緑藻が暫定基準を満足していない場合が多く、これらは金属の影響を受けやすい⁷⁾知見から前工程である凝集沈殿設備の水処理薬剤の Al の影響について、TRE/TIE (毒性削減/同定評価) 検討を行った。検討内容は、砂ろ過水の pH と水処理薬剤に含まれる Al に着目しビーカ試験を実施した。表1から砂ろ過水が pH6.5 の場合は、凝集処理後の処理水中の Al の残存率は1 %未満であったが、pH4.0では Al の残存率が約60 %であった。それぞれのミジンコの NOEC は10 %と5 %未満であった。この結果を実設備に反映し、水処理薬剤 (PAC) の注入時の pH 制御を留意することで管理目標値である NOEC 10 %以上

の結果を再現することができた。

以上のことから砂ろ過水の低 NOEC の要因のひとつは、pH が低くなると水処理薬剤中の Al が溶解し、処理水中に残留したことでミジンコに影響を与えたと推定した。しかし、水中でのスペシエーションについては解明できていないため、ミジンコへの要因であるかは断定できなかった。

さらに、pH6.5に制御することで処理水中に Al が流出しないことから凝集効果が高まると判断し、実設備にて水処理薬剤の注入率を従来の1/2に低減し運用したところ、凝集沈殿の除去機能および砂ろ過水の SS の値は従来どおりを維持している。これにより排水処理設備の低コスト化を図ることができた。

3.4 新たな維持管理指標としての考察

従来の機器分析によれば、浸出水処理設備の1 段目 RO 処理水よりも2 段目 RO 処理水の方が低い数値が得られるため、2 段目 RO まで運転する方が良いと判断される。一方、生物応答試験では、1 段目と2 段目 RO ともに、NOEC は80 %以上であり、水環境に影響はみられなかったことから、1 段目 RO 処理までで十分水質保全に寄与でき、2 段目 RO 処理を使用しなくてよい指標を得ることができた。

水処理薬剤の影響について TRE/TIE 手法による検討を実施した結果、pH 制御の重要性を再認識することができた。一般的に、基準値をより安心に維持するため凝集剤は若干多めに注入しているが、必ずしも多めの凝集剤が安全ではなく、逆に生物に影響を与えることが判明した。これを実設備に反映し、水処理薬剤の注入率を従来の1/2に低減し運用し、凝集沈殿の除去機能および砂ろ過水の SS の値は従来どおりを維持していることから機器分析の個別管理では見えない、排水そのものの影響を生物応答試験にて見ることで低コスト化につながる排水処理設備の運転に活用できる知見を得た。

従来、水処理設備の維持管理では、機器分析による濃度を指標としていたが、今回、複数の化学物質の複合影響も評価できる生物応答試験を実施するこ

とで、安全安心な水であることを確認できるとともに、過剰な処理工程を使用しないことや、水処理薬剤量の低減を検討するドライビングフォースが働き、その結果省エネルギー、低コスト化につながった。

むすび

- (1) 当該処分場では、準好気性埋立が機能していることから、浸出水の水質が良好であった。
- (2) 浸出水処理設備の1段目ROよりも2段目ROの機器分析結果が良好であるが、生物応答試験ではその差異は見られないことから、現状では2段目RO処理を省略する指針が得られ、省エネルギー、低コスト化を図ることができた。
- (3) 砂ろ過水の生物応答試験を実施することで、機器分析のみでは気付かない水処理薬剤の過剰薬注の課題を生物応答試験により認識でき、凝集操作を工夫することで従来の薬注率を半減し低コスト化につながった。

今後とも、浸出水処理設備の管理に生物応答試験およびTRE/TIE手法を取入れて、さらなる知見を集め、水処理薬剤の使用量や処理設備運用の最適化を行い、浸出水が安全安心であり、かつ処理設備の

省エネルギー、低コスト化に寄与していきたい。

謝辞

本研究の実施において、愛媛大学の鑑迫先生のご指導を頂いた。ここに感謝申し上げます。

[参考文献]

- 1) 環境省：生物を用いた水環境の評価・管理手法に関する検討会（第5回）
- 2) 長野ら：準好気性埋立処分場の機能検査と評価事例（その2）、第37回全国都市清掃研究・事例発表会（2016）
- 3) 環境省：生物応答を用いた排水試験法（検討案）、排水（環境水）管理のバイオアッセイ技術検討分科会（2013）
- 4) 日本環境毒性学会：EcoTox-Statistics, <http://www.intio.or.jp/jset/ecotox.htm>
- 5) 鑑迫典久：水圏保全のための新たな排水管理ツール“WET”の最新事情、資源環境対策, Vol.47 No.5, pp.58-66 (2011)
- 6) 新野竜太：排水管理手法“WET”研究の最新事情－生物応答試験と毒性削減評価（TRE）／毒性同定評価（TIE）、資源環
- 7) 藤原ら：金属製品製造工場のWETを用いた排水中毒性要因の推定とその改善例、環境化学, 25, 35-42 (2015)