

〈特集〉

海外における水環境管理への WET 手法活用事例

山本裕史¹⁾, 新野竜大²⁾¹⁾ 国立大学法人徳島大学総合科学部

(〒770-8502 徳島市南常三島町1-1 E-mail: hiroshi.yamamoto@tokushima-u.ac.jp)

²⁾ ㈱LSI メディエンス 環境リスク評価センター

(〒227-0033 神奈川県横浜市青葉区鴨志田町1000 E-mail: Niino.Tatsuhiko@mp.medience.co.jp)

概要

わが国でも、環境省が2009年から米国の Whole Effluent Toxicity (WET) を参考にして、生物応答を用いた排水・環境水の評価・管理システムの導入を検討しているが、海外では欧米をはじめ韓国や台湾で法管理として導入されている。本稿では、米国の WET をはじめカナダの Environmental Effect Monitoring (EEM)、ドイツの排水課金制度、英国の Direct Toxicity Assessment (DTA) などの欧米だけでなく、韓国や台湾における生物応答を用いた排水と放流先水域などの管理手法について紹介することによって、国内の有効な法規制の早期導入に向けた契機となることを期待する。

キーワード：バイオアッセイ、事業所排水、化学物質管理、全排水毒性、直接毒性評価

原稿受付 2015.5.1

EICA: 20(1) 5-9

1. はじめに

排水中に含まれる多種多様な化学物質群による総合的な生物影響を管理するには、単独の化学物質の濃度を把握するだけでは不十分であることから、海外において1950年台からバイオアッセイが広く利用され、1980年台以降には積極的に排水や水環境管理手法として利用されてきた。これは、排水の放流先の水環境において必要とされる水質要件（水質基準値や生物相など）を満たすための Best Available Technology (BAT: 利用可能な最善の手法) として、バイオアッセイを用いた評価が有効となるケースが多いからである。

しかしながら、わが国ではその流れに大きく遅れ、排水や水環境管理は一貫して個別の化学物質の濃度での評価・管理にとどまってきた。日本の環境省は平成21年(2009年)度に米国の Whole Effluent Toxicity (WET: 全排水毒性) を参考にして、バイオアッセイによる排水・環境水の評価・管理を実施する手法の導入に向けた調査・研究および法運用の検討を開始し¹⁾、2010年2月には米国から EPA (環境保護庁) や州行政、民間環境コンサル会社より4名の専門家を招聘して「米国における WET システムに関するセミナー」²⁾を開催している。その後、2012年1月には、米国だけでなく、カナダや韓国から法制度運用や関連課題研究に従事している専門家を招き、「諸外国における生物応答を用いた排水管理手法に関するセミナー」³⁾を開催して議論を深め、2013年3月には国立

環境研究所が環境省請負事業にて作成した「生物応答を用いた試験法(検討案)」⁴⁾が公表されている。

最近になってこのようなバイオアッセイによる水環境管理の機運が高まった原因の1つは、隣国の韓国における水質生態系保全法運用の中での韓国版 WET の導入であり、既に2011年には運用が開始している。また、台湾においても水污染防治法の中で2013年よりバイオアッセイによる管理が導入された。ところが、国内では差し当たり排水規制値を導入することを断念し、水質汚濁防止法に測定項目として盛り込むものの、自主管理制度での導入を進める動き⁵⁾が見られる。

そこで本稿では、最初に参考とされた米国の WET やカナダの Environmental Effect Monitoring (EEM: 環境影響モニタリング) に代表される北米での事例にはじまり、ドイツやフランス、英国といった EU 諸国での活用事例、韓国版 WET の概要など様々な海外の排水・環境水管理へのバイオアッセイの活用事例についてまとめ、今後のわが国における「日本版 WET」の制度設計についての展望を示す。

2. 北米の事例

2.1 米国

米国では、1950~60年台の深刻な水質汚濁の問題を経て、1969年には油汚染が深刻なオハイオ州クリーブランド市のカイヤホガ川からの発火による火災などをきっかけに EPA (環境保護庁) が発足した。

1972年には連邦水質汚染防止法（1977年には Clean Water Act : CWA に改称）が改正され、全国汚染物質排出削減システム（NPDES）が発足した。このNPDESでは、CWAの目標である Fishable and Swimmable（魚釣りができて、泳ぐことができる）水域の実現のため、事業所からの有害汚染物質の排出認可制度を設けており、認可がないとそれらの物質を公共用水域へ排出できないことになっている²⁾。このような有害汚染物質の排出を評価・管理する手法としてEPAは有害物質管理のための技術指針文書（TSD）⁶⁾を作成して、Table 1のような個別化学物質の分析（ケミカルアッセイ）、WET試験（バイオアッセイ）、生物相調査の3つからなる「有害物質制御のための統合的アプローチ」を提案している。

州レベルでは、排水モニタリングの手法としてバイオアッセイが1950年台頃から利用されてきたが、連邦レベルでは1970年台に入り、地区事務所などで急性毒性（生物の生死を評価）試験法が開始され、1980年台には短期慢性毒性（生物の成長、繁殖性を評価）試験も加わり、詳細な検討が実施された。さらに1995年にWET試験法が公布（2002年に修正版⁷⁾が公布）され、2000年には詳細なリングテストが実施されている⁸⁾。このような実績を踏まえ、現在ではWET手法が広く水質基準やNPDES認可に活用されている（歴史的経緯については、より詳細な文献^{1,8,9)}を参照されたい）。なお、試験法としては、魚類、甲殻類、藻類など合計16種の試験法が承認されており、研究レベルでもこれらを活用して環境水中の水生生物（ニセネコゼミジンコなど）の毒性物質の同定に活用されてきた実績^{2,10,11)}が数多くあるほか、有害影響が確認された際に必要とされるTRE（Toxicity Reduction Evaluation : 毒性削減評価）やTIE（Toxicity Identification Evalu-

ation : 毒性同定評価）の事例集¹²⁾も発行され、民間環境コンサルティング会社を中心に民間事業場での対策に応用され、大きなビジネスとなっている。

米国では、多くの州でNPDESプログラムが承認されており、それに基づき、州毎に独自のWETクライテリア（急性と慢性の両方）が設定されている。州の大半は3ヵ月ごとに急性または慢性毒性のモニタリングを実施したり、NPDES認可にWET制限値を盛り込んだりしている。また、TSDにおいて急性および慢性毒性の両方について水質クライテリアが推奨されており、急性は1時間平均値のCMC（Criteria Maximum Concentration）が0.3TUa、慢性は4日間平均値のCCC（Criteria Continuous Concentration）が1.0TUCに設定されている²⁾。ここで、これらの値はミキシングゾーンの境界線上の値であり、TUはToxicity Unitは毒性値の逆数に100を乗じたものである。つまり、CMCは急性毒性（50%致死または影響）の濃度が試料の約3.3倍の状態、CCCはそのままの試料を用いて慢性影響が認められない状態を表す。しかしながら、ミキシングゾーンの考え方は非常に抽象的であり、排水の日間・季節変動や河川の流量変動によって大きく左右されるため、実際のところは事業所の最終排水口で採取して、上記の様々な状況を考慮して希釈倍率を推定してクライテリアを設定している（特徴については韓国との比較としてTable 2に示す）。

2.2 カナダ

カナダでは、建国（1867年）当時からある漁業法において、魚類やその生息地ならびにその利用に関して有害な影響がないことが要件として含まれており、カナダ環境保護法が1985年に制定されるまでは非常に有効な規制であり、EEM（環境影響評価モニタリ

Table 1 Components of an Integrated Approach to Water Quality-based Toxics Control⁶⁾

Control Approach	Capabilities (可能性)	Limitations (限界)
Chemical-Specific (個別化学物質の分析)	Human health protection Complete toxicology Straightforward treatability Fate understood Less expensive testing if only a few toxicants are present Prevents impacts	Does not consider all toxics present Bioavailability not measured Interactions of mixtures (e. g., additivity) unaccounted for Complete testing can be expensive Direct biological impairment not measured
Whole effluent toxicity (WET 試験)	Aggregate toxicity Unknown toxicants addressed Bioavailability measured Accurate toxicology Prevents impacts	No direct human health protection Incomplete toxicology (few species may be tested) No direct treatment No persistency or sediment coverage Conditions in ambient may be different
Bioassessments (生物相調査)	Measures actual receiving water effects Historical trend analysis Assesses quality above standards Total effect of all sources, including unknown sources	Critical flow effects not always assessed Difficult to interpret impacts Cause of impact not identified No differentiation of sources Impact has already occurred No direct human health protection

Table 2 Components of WET system application in the US and South Korea²⁵⁾

	米 国	韓 国	
規 制	法運用	連邦政府が運用、水浄化法 (CWA)、全国汚染物質排出削減システム (NPDES)	環境部が運用、水質生態系保全法、水質環境保全法施行規則
	実施	州政府	市・道
	対象	州ごとに管理方法が異なる (NPDES 対象は 17 万事業所)、採水はミキシングゾーン端	約 1,400 事業所 (約 24,000 事業所に拡大予定)、採水は End of Pipe
バイオアッセイ	試験	急性、慢性、合計 16 種類 (州ごとに異なる)	急性 (ミジンコのみ)
	実施	WET 試験機関 (民間中心)、州ごとの認定制度	市・道 (証明書発行)、民間認定機関 (自主管理)
	展開	生態リスク評価への応用研究が拡大	藻類、ミジンコ慢性、魚、細菌への拡大を検討
TRE/TIE	実施	環境コンサルタント、段階的削減計画	環境公団、民間試験機関、段階的削減計画
	専門性	排水処理技術、生態毒性、環境コンサルタント	排水処理技術、生態毒性

ング) プログラムもこの法律の下に置かれている³⁾。EEM の特徴は、金属採鉱業の排水規制 (MMER) とパルプ・製紙工業の排水規制 (PPER) にて排水放流認可に課せられた排水規制であること、2~6 年のサイクルで実施されること、排出者は使用物に関する情報も開示しないとイケないこと、そして水質調査や使用物質の特性把握、毒性試験 (主として急性試験) だけでなく排水放流先環境における詳細な生物学的モニタリング調査 (主として魚類) や主要な化学物質濃度モニタリングが含まれることである。

この EEM では複数の事例が報告されている。1992 年当時には、カナダのパルプ・製紙工場の約 50% の最終排水がニジマスに急性致死の影響を示していた³⁾が、1996 年からの EEM プログラム (2016 年 4 月にサイクル 7 が終了予定) により、有害物質の削減に大きく寄与するなどパルプ・製紙工業界の EEM は大きな成功をおさめている¹³⁾。また、近年は亜致死の影響として、ニセネコゼミジンコを用いた繁殖試験のデータ収集も行われ、モニタリングの地点などの手法改善に活用されている³⁾。また、1988 年からカナダ政府がケベック州と実施しているセントローレンス行動計画 (SLAP) では、事業所などの努力によって 1995 年までに特定の事業所排水の毒性を 96% 削減するなど、有害物質の排出を 90% 削減することに成功している¹⁴⁾。

3. 欧州の事例

欧州諸国では、1996 年の統合的汚染防止および管理指令 (IPPC)¹⁵⁾ や 2000 年の EU 水枠組み指令 (WFD)¹⁶⁾ などを満たすため、各国で排水の管理にバイオアッセイが活用されている。より詳細は Power と Boumphrey の総説¹⁷⁾ や、英国に関する Whitehouse らの総説¹⁸⁾ などを参照されたい。ここでは、紙面の制限からそれらの内容に最新の状況などを加えて簡潔にまとめる。

ドイツでは、1976 年という古くから、排水令 (2004 年改正¹⁹⁾) によってバイオアッセイが排水管理

に利用されてきた。米国などと同様に、基準値を超過する場合、排水許可が下りないなど強制力が強いのが特徴である。試験法には魚類 (動物愛護の観点から魚類胚試験に移行)、ミジンコ、緑藻の急性毒性試験、海洋発光細菌の発光阻害、変異原性試験 (umu-test) などが含まれている。また、1994 年に制定された排水課金法 (2005 年改正²⁰⁾) により、様々な水質項目や有害化学物質とともに、魚類胚への毒性試験結果が課金制度に活用されている。

フランスでは、排水の定期的なモニタリングや排出認可の発行時などに、魚類、ミジンコ、細菌、藻類などのバイオアッセイが活用されている。特にミジンコ急性毒性試験は、定期的モニタリングに加えて、排水課金の設定に活用されている。

スウェーデンにおいては、Whole Effluent Assessment (WEA) が規制に導入されており、排水認可の制度にも活用されている。急性・慢性の各種試験が利用されており²¹⁾、STORK プロジェクトにより化学工業を中心にデータが蓄積されているほか、強制力はなく各郡によって状況は異なるが、カナダと同様の EEM が導入されている²⁾。

英国では、IPPC や WFD を受けて Direct Toxicity Assessment (直接毒性評価: DTA) の制度の導入に向けて実証プログラムなどを大規模に実施してきた。その中で 2005 年 (最新の 13 版は 2011 年) には DTA の試験技術向上マニュアル²²⁾、2006 年にはガイダンス文書²³⁾ が公表されている。試験法は淡水・海水の合計 7 種のいずれも急性毒性試験法が公表されている。

ほかにも欧州では、北アイルランドやスペインなどで規制が実施されているが、Power と Boumphrey の総説の段階では検討中の国も多く、2007 年に公表された OSPAR の WEA のガイダンス文書²¹⁾ からもその詳細や進展状況が明らかでない国が多い。なお、研究レベルでは多く報告があり、たとえばイタリアなどでは 1990 年台初頭にミジンコの慢性試験を河川水に適用した報告²⁴⁾ がある。

4. 韓国, 台湾, オーストラリア等の事例

韓国の状況については、著者らが最新の状況について詳細な報告²⁵⁾をしているので、そちらを参照されたい。本稿では、その一部を簡潔にまとめる。また、オーストラリアなどについては、欧州同様に Power と Boumphrey の総説¹⁷⁾を参照されたい。

まず、韓国版 WET については、①個別化学物質による排水管理の限界、②COD などの一般水質項目と毒性との低い相関、③複合影響による未知の影響への懸念などの理由から 2002 年から米国の WET やドイツの排水課金制度を参考に検討を開始した。その後 2007 年にバイオアッセイ試験法（ミジンコの 24 時間の急性試験）が公布され、2011 年 1 月から水質生態系保全法の中で運用が開始された。対象は下水処理施設と一般事業所の両方を含み、試験結果が基準を超過する場合、改善命令が出され、TRE/TIE を実施することが求められる。Table 2 に示すように、韓国の WET の特徴は、米国では環境コンサルタントが担う TRE/TIE を技術的な行政組織である環境公団がサポートする点が挙げられる。2007 年～2011 年にかけては大手企業からの反発があったものの、基準や改善機関、行政処分対象外とする制度を導入している（原因が塩であることを証明する手続きが必要）。今後は、現在ミジンコの 24 時間での評価を 48 時間とし、業種の拡大や河川評価への応用が検討され、藻類や魚、ミジンコ慢性試験など試験種の拡大（2017 年を目途の導入）

も予定されている。

台湾では水污染防治法の下位法である水污染防治措施及検測申報管理辦法にて、2013 年よりバイオアッセイによる管理が導入されており、工業団地専用下水道システム、半導体製造業、光電材料（オプトエレクトロニクス）、電子（プリント）回路基板製造業、石油化学、化工、製紙などの業種の排水量が 20,000 m³/日以上となる場合、バイオアッセイ（急性試験：魚 1 種類、甲殻類 1 種類）が要求される。一方中国では、排水のバイオアッセイに関する国家規格（ミジンコ、ゼブラフィッシュ、発光バクテリア、それぞれの試験法）が 1990 年代に発布され、大学や公共の研究機関で利用されているが、現時点での強制的な基準は無い（化学物質の濃度規制が中心）。特記すべき内容としては、業種別の排水基準において、製薬工業の排水基準に急性毒性の項目が導入されており、発光バクテリアを用いた評価（塩化水銀に換算）が主に利用されている。

ほかにもアジア太平洋地域では、オーストラリアやニュージーランドで既に導入が進んでいる。たとえば、オーストラリアではシドニー近郊などで場合によって認可に利用されているほか、TIE などの実施が求められるケースもある。なおその他のアジア諸国では、EU の REACH に相当する化学物質の入口規制が導入されている段階であり、排水のバイオアッセイについてはケーススタディのレベルにとどまっているケースが多い。

5. おわりに

上記にまとめたように（Table 3 に概要を示す）、

Table 3 Characteristics of bioassays used for effluent management and regulatory requirement

国	規制・制度名称	バイオアッセイ		法定要件	制度の概要
		急性	慢性		
北米	アメリカ	○	○	強制力有り 影響有の場合削減要求	WET として 1987 年より運用 州毎の基準が設定
	カナダ	○	○	強制力有り	1950 年代より運用 Environmental Effect Monitoring の実施
欧州	フランス	○	○	有り 影響有りで課徴金	生物種や評価軸を拡大中
	ドイツ	○	○	強制力の有り 影響有りで課徴金	産業毎の研究実施中
	スウェーデン	○	○	有り 段階的手順	化学産業排水に対し 3 段階の戦略作成
	北アイルランド	○	○	強制力有り	過大なコストのかからない最善技術に関するガイドライン有り
アジア	オーストラリア	○	○	強制力有り	排水規制は州や地域毎に有り
	韓国	○	検討中	強制力有り 影響有の場合削減要求	2011 年より運用 米国 WET を参照
	台湾	○	—	有り	2013 年より運用 一部業種に限る
	日本	—	○	—	運用の必要性を環境省中心に検討中、2013 年 3 月に試験法マニュアル（案）が開示されている

米国, カナダ, EU 諸国 (ドイツ, スウェーデン, スペインなど), 韓国, オーストラリアなどではすでにバイオアッセイによる排水や放流先の水環境の直接評価・管理 (それぞれ名前は異なるが米国などの「WET 手法」に相当) に利用されている。その一方で, 英国では導入が途上であるほか, 他の EU 諸国でも導入に至っていない国もあるが, WFD や IPPC の流れで, BAT としてバイオアッセイが活用される流れは徐々に進んできている。国内では, 2009 年の検討開始から約 6 年が経過したが, 各関連機関での検討課題が山積していることから, まずは水質汚濁防止法の自主管理項目としてスタートする可能性が高いとされる。前述したように韓国では 2002 年に検討が開始されて, 調整の結果としてアジアで最初となる 2011 年に韓国版 WET の運用が開始され, その改良に向けた議論が続けられている。わが国においても, 導入のための放流先河川の水生生物への有害影響のエビデンス探しに躍起になるだけでなく, 現時点で個別化学物質のケミカルアッセイを補完して未知の複合的影響を評価できる BAT としての管理を模索する議論が進むことが期待されるバイオアッセイ (WET 手法) が有効な一つの「モノサシ」となるとの世界的な流れに逆らうわけにはいかない。経済産業省や産業界, 下水道を管轄する国土交通省などとの協同により山積した検討課題の議論が推進され, 「優しい水を地球に還す」といった概念のわが国の長所を活かした有効な環境規制の導入が少しでも早まることを願う。また, 統合的な有害汚染物質の削減には, カナダなどで実施される生物相調査とも有機的に組み合わせた EEM の有効性は明らかであることから, 日本版 WET とその改良に引き続き日本版 EEM の導入検討が望まれる。

参考文献

- 1) 環境省: WET 手法を活用した排水規制手法検討調査, 平成 21 年度環境省予算 (案) 主要新規事項等の概要 (2009)
- 2) 環境省・国立環境研究所: 米国における WET システムに関するセミナープログラム・講演資料 (2010)
- 3) 環境省・国立環境研究所: 諸外国における生物応答を用いた排水管理手法に関するセミナー講演資料 (2012)
- 4) 国立環境研究所・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)
- 5) 環境新聞: 2014 年 7 月 9 日付。
- 6) USEPA: Technical Support Document for Water Quality-Based Toxics Control, EPA/505/2-90-001 (1991)
- 7) USEPA: Short-term Methods for Estimation the Chronic

- Toxicity of Effluents and Receiving Waters to Freshwater Organisms, Fourth Edition (2002)
- 8) J. Diamond: Whole Effluent Toxicity Testing in the US (日本語訳), 生物応答を用いた排水評価・管理手法の国内外最新動向 (鏑迫典久監修), NTS, pp. 7-33 (2014)
- 9) D. R. Grothe, K. L. Dickson, D. L. Reed-Judkins (eds): Whole Effluent Toxicity Testing, SETAC Press (1996)
- 10) V. de Vlaming, V. Connot, C. DiGiorgio, H. C. Bailey, L. A. Deanovic, and D. E. Hinton: Application of Whole Effluent Toxicity Test Procedures to Ambient Water Quality, Environ. Toxicol. Chem., 19, pp. 42-62 (2000)
- 11) B. S. Anderson, B. M. Phillips, J. W. Hunt, K. Worcester, M. Adams, N. Kapellas, R. S. Tieerema: Evidence of Pesticides Impact in the Santa Maria River Watershed, California, USA, Environ. Toxicol. Chem., 25, pp. 1160-1170 (2006)
- 12) T. J. Norberg-King, L. W. Ausley, D. T. Burton, W. L. Goodfellow, J. L. Miller, and W. T. Waller: Toxicity reduction and toxicity identification evaluations for effluents, ambient waters, and other aqueous media, SETAC Press (2005)
- 13) Environment Canada: Improving the Effectiveness and Efficiency of Pulp and Paper Environmental Effects Monitoring: A Smart Regulation Opportunity (December, 2005) (日本語訳), 生物応答を用いた排水評価・管理手法の国内外最新動向 (鏑迫典久監修), NTS, pp. 55-71 (2014)
- 14) Government of Canada/State of Québec: Five Year Report 1998-2003, St. Laurence Vision 2000 (2003)
- 15) European Commission: Integrated Pollution Prevention & Control (IPPC), (1996)
- 16) European Commission: Directive 2000/60/EC Water Framework Directive (2000)
- 17) E. A. Power, and R. S. Boumphrey: International trends in bioassay use for effluent management. Ecotoxicology, 13, 377-398 (2004)
- 18) P. Whitehouse, I. Johnson, D. M. Follow, and C. Chubb: A Regulatory Framework for Controlling Effluent Discharges Using Toxicity Testing in the UK. Ecotoxicology, 13, 399-411 (2004)
- 19) Federal Ministry for the Environment, Germany: Waste Water Ordinance (2004)
- 20) Federal Ministry for the Environment, Germany: Waste Water Charges Act (2005)
- 21) OSPAR Commission 2007: Practical Guidance Document for Whole Effluent Assessment (2007)
- 22) Environment Agency: Direct Toxicity Assessment Proficiency Scheme (DTAPS), Bristol, UK (2011)
- 23) Environment Agency: Guidance on the use of Direct Toxicity Assessment in PPC Impact Assessments (2006)
- 24) L. Vigano, A. Bassi, and A. Garino: Toxicity evaluation of waters from a tributary of the River Po using the 7-day *Ceriodaphnia dubia* test, Ecotox Environ Safe, 35, pp. 199-208 (1996)
- 25) 新野竜大: 韓国における生物応答を用いた排水管理の現状, 生物応答を用いた排水評価・管理手法の国内外最新動向 (鏑迫典久監修), NTS, pp. 87-93 (2014)