

特集 循環型社会を支える分析化学

《特集》「循環型社会を支える分析化学」企画にあたって

昨今は“環境”と“分析”が並べば、放射能汚染の評価あるいは環境再生のための分析化学に、大きな関心が寄せられています。「ぶんせき」編集委員会では6号から、緊急連載『放射能・放射線を正しく理解する』を取り上げて、その中で大気モニタリングや土壌の放射性物質の計測などを紹介してきました。日本が震災の復興を緊急に進める一方で、長期的な視野から環境や経済を考えるグリーン・イノベーションの推進がさらに注目を集めております。そこで、グリーン・イノベーションに関して分析化学あるいは技術がどのように生かされているのか、循環型社会を支える分析化学に関する知識と理解を広く会員に紹介するために、今回の企画を行いました。会員諸兄の環境保全に対する取り組みは従来から推進されてきたことではありますが、グリーン・イノベーションの内容には、水資源の確保、バイオマス資源、都市鉱山、廃棄物利用・処理、太陽光利用等が含まれており、国民的な注目度の高い研究分野であることから、読者の皆様の参考になれば幸いに存じます。

「ぶんせき」編集委員会

総 論

安原 昭夫

1 生存の条件

私たち人類（ホモサピエンス）が誕生したのは約10数万年前といわれており、文明の発達と共に現在の社会を築き上げてきた。産業革命以後現在までの180年余りの急激な産業化社会を支えたのは科学技術の発達と豊富な資源・エネルギーの利用、それを支える経済活動である。地球上にある資源は有限であることを理解はしていても実感として感じることはあまりなかった。1972年にローマクラブが発表した「成長の限界」¹⁾は、地球の資源は有限であり、地球の自然がもつ浄化能にも限界があるので、人口増加や環境汚染、大量生産・大量消費の生活を続ければ、100年以内に人類の成長は限界を迎えると警告している。現実はどうであろうか。先進国では人口増加は抑制され、環境汚染防止の効果的対策も講じられつつあるが、開発途上国では人口増加は続いており、人口の増加以上にエネルギーの総消費量が増加している。つまり人類の活動が近年は質量ともに急速に拡大しているのである。先進国で見ると、過去20年間で人口は1.1倍程度の増加におさまっているが、省エネ家電が普及しているにもかかわらず家庭の総電力消費量は激増し、紙の消費量や携帯電話の製造台数は増え続け、資源・エネルギー多消費型の通信機器や精密電子機

器が拡大し続けているのである。このような社会はいつまで続くのであろうか。石油などの化石燃料、高機能製品に必須のレアメタル、農業生産に不可欠なリンなどの肥料が自由に入手できなくなりつつあり、私たちは改めて資源が有限であることを実感し始めている。ただ、ある日突然、資源の枯渇がくるということではなく、資源の減少に伴い価格が上昇するため、消費量が低下していくので、現在いわれているよりもかなり長く利用できることになる。しかし、入手するための費用は上昇し続けるので、資源の少ない国は苦しくなる。

「成長の限界」の発表から40年近くが経過した2010年に、公益財団法人旭硝子財団が「生存の条件」という報告書²⁾を発表した。日本の有識者が議論してまとめた報告書で、平易な文章でこれからの地球環境が人類の生存にとって危機的な状況になりつつあることを訴えている。この危機的状況を救うためには、自然と人間社会が共存する太陽エネルギー社会（持続可能社会）に移行することが不可欠であると述べている。

2 循環型社会と持続可能社会

循環型社会という言葉は、循環型社会形成推進基本法の第二条で「製品等が廃棄物等となることが抑制され、並びに製品等が循環資源となった場合においてはこれに

ついで適正に循環的な利用が行われることが促進され、及び循環的な利用が行われない循環資源については適正な処分が確保され、もって天然資源の消費を抑制し、環境への負荷ができる限り低減される社会」と定義されている。つまり、物質を廃棄物とすることなく循環的に利用することを目指す社会をさしている。人間以外の生物や古い人間社会では物質循環がほぼ達成されており、日本でも江戸時代は物質循環という点ではほぼ循環型社会を実現していたともいわれている³⁾。しかし、人類は物質循環をしないことで産業を発展させてきたのであり、昔の時代に戻ることは違う形の循環型社会を作る段階にきているのであろう。私たちが循環型社会という言葉で表そうとしている社会は、上記の基本法が規定する社会よりも幅広い持続可能社会であろうと考える。私たちにとって大事なことは、人類社会がこの地球上で他の生物群と共存しながら長く（持続的に）生き続けることであり、資源循環は持続可能社会を実現するための基本的な手段である。

持続可能社会という概念は、1987年に環境と開発に関する世界委員会（WCED）が公表したブルントラント報告書「われら共有の未来」⁴⁾で示されたもので、1992年にリオデジャネイロで開催された国連環境開発会議（地球サミット、UNCED）の場で議論され、世界各国が同意した。リオ宣言の第1条は「持続可能な開発に関する問題の中心に人類が位置する。人類は自然と調和した、健康で生産的な生活を送る権利を有する」と述べており、21世紀に向けての行動計画「アジェンダ21」が採択され、さらにアジェンダ21が着実に実行されることを監視・推進するための持続可能な開発委員会（CSD）が設置された。歴史的な経緯と議論の詳細は他の書籍⁵⁾を参照していただくこととして、次に持続可能社会における化学物質管理を述べる。

3 持続可能社会における化学物質管理

上述のアジェンダ21では、持続可能社会における重要な問題として化学物質をいかに安全に管理するかということが述べられており、従来のハザードによる管理からリスクに基づく管理に移行することを目標としている。日本においてもこの目標を実現するために、環境基本計画（2000年）で「化学物質による環境リスクを科学的に正しく、可能な限り定量的に評価するとともに、社会的に合意形成をはかりながら、多様な手法による環境リスクの管理の推進を図ることにより、持続可能な社会の構築の観点から許容しえない環境リスクを回避する」と策定している。また、2002年にヨハネスブルクで開催された「持続可能な開発に関する世界首脳会議」（環境・開発サミット）では化学物質に関するリスク評価・管理システムを2020年までに各国で完成させて、化学物質による人の健康と環境への悪影響を最小化する

ことが合意された。

化学物質が製造され、使用された後に廃棄される各ステージにおける問題点を考えてみる。化学物質の製造・使用においては、過去にいろいろな工場が数多くの公害を引き起こした経験を踏まえ、各種の法令で厳しい規制が実施されている。特に化学産業においては、①資源・エネルギーの制約から大量生産・大量消費社会の継続が不可能、②化学物質は有用であると同時に有害性を持つために安全管理が不可欠、という状況を踏まえてグリーンケミストリー（green chemistryあるいはgreen sustainable chemistry）という考えが普及しており、化学物質の総合的リスク管理が始まっている。グリーンケミストリーとは環境への負荷を少なくした製造工程ともいえる。世界的には製品に含まれている化学物質を開示する方向に進んでおり、生産者から消費者までのサプライチェーン全体で化学物質情報を共有する動きが進んでいる。この情報の中には廃棄処理で発生する可能性のある有害性の問題や環境への影響なども含まれており、環境分析に従事するものにとっては目が離せない。

日本における廃棄物管理の基本は優先順に①排出削減（reduce）、②再使用（reuse）、③リサイクル（recycle）④熱回収（焼却）、⑤適正処分（埋立）となっている。最初の三つは英語の頭文字にRがつくために3Rとも呼ばれている。理想的な資源循環は廃棄物すべてをリサイクルすることと考えると、現在の大量生産・大量消費の結果として生じる大量廃棄物をリサイクルすることになる。しかし、リサイクルには多量のエネルギーが必要であり、また水や空気という環境資源にも大きな負荷をかけることとなる。資源・エネルギーの枯渇が見えてきた現在においては大量リサイクルという形の資源循環は難しく、太陽エネルギーの利用可能な範囲での物質循環を目指すしかないのである。

リサイクルにおける化学物質の挙動が大きな課題である。分解しにくく有害な化学物質が混入した廃棄物をリサイクルすると、再生品がその化学物質で汚染されてしまうこととなる。1999年にベルギーで発生した、鶏肉のポリ塩化ビフェニル（PCBs）とダイオキシンによる汚染事件⁶⁾が有名である。微量のダイオキシンが混入したPCBsで汚染された再生飼料を鶏の餌に使用したことが原因であった。類似の事例が多く報告されている。このような事態を防止するにはリサイクル用の廃棄物の品質を確実に監視するための効果的な分析法（スクリーニング）が必要である。

リサイクルにおける有害性は化学物質の毒性以外に火災危険性も視野に入れなければならない。廃棄物処理における発火事故は産業界の平均よりも多い傾向がずっと続いている。最近の大きな事故としては2003年に三重県で起こったごみ固形燃料（RDF）貯蔵施設の発火爆発事故⁷⁾が有名である。事故原因はいろいろと考察され

ているが、筆者らは製造工程中に生じた過酸化物の分解による自然発火の可能性を化学発光の測定に基づいて指摘した⁸⁾。また、簡便な方法でRDFの自然発火性を明らかにした⁹⁾。発火危険性の予測では従来の化学物質の分析とは異なった手法による計測技術が必要であり、今後発展させていくべき部分である。

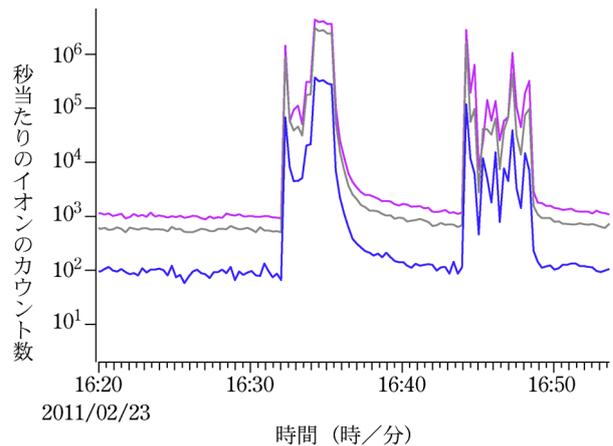
4 化学物質の環境動態と分析化学の役割

製品の製造で使われた化学物質は環境中でいろいろに変化して最終的には無機物にまで分解されるが、途中の段階でどのような変化が起こっているのか、という情報を把握することは重要である。分解過程で有毒な物質が生成する場合などは、環境影響を最小にするような工夫が必要である。典型的な例はダイオキシン類である。塩化ビニル樹脂などの有機塩素化合物などを高温の焼却炉以外で燃やすと猛毒のダイオキシン類がかなり生成するので、廃棄物処理は慎重でなければならない。

欧州連合（EU）では廃棄物リサイクルされる電子機器製品には鉛、水銀やカドミウムなどの6種類の化学物質群が含有されてはならないというRoHS指令が2006年から実施されており、日本でも対応する分析技術が確立されている。日本ではほぼ無害と判断された内分泌かく乱化学物質が、EUのREACH規制（化学物質の総合管理規制。2007年から実施）では高懸念化学物質の一群にリストされており、欧米においては内分泌かく乱化学物質に関する研究の動向が注目されている¹⁰⁾¹¹⁾。各種の製品に対応する分析技術の確立が必要とされており、分析化学の役割は大きい。

循環型社会における化学物質問題に対処するには分析化学的手法が不可欠である。法規制に関係する部分が多いため、各省庁の枠を超えた統一的な分析方法が確立されることが望ましい。また、分析の信頼性確保も重要であり、精度管理を組み込んだ分析法が必要である。省エネ・省資源の時代であることから、分析においてもエネルギー使用量や試薬の使用量が少ない方法、さらには環境への負荷が少なく、廃棄物処理が容易な方法が好まれる¹²⁾。また、経済的なコストの観点も避けては通れない。

ここではリスク管理の観点から話を進めてきたが、人間社会に事故はつきものであり、事故時対応の分析化学（広い意味では計測科学）も大きな課題である。筆者は大学における化学物質の安全管理を仕事としているが、しばしば化学物質が関係する事故が発生する。実験室で使用されている薬品が誤って排水に混入したり、建物内に異臭が漂うなどが多い事例である。このようなときは実験排水や建物内の空気を化学分析で調べることになる。しかし、排水に流入したり、空気中に揮散したりするのは多くの場合、短時間であるため、分析試料を的確にサンプリングできないことが多い。また分析操作（前



選択イオン検出（SIM）による設定質量数は上段から 83、85、87 である。
（図は三友プラントサービス（株）からの提供）

図1 ビンの開閉によって空気中に揮散したクロロホルムの検出例

処理も含む）に時間がかかる場合は適切な対処が間に合わない。このような状況に対処するには高感度で迅速にモニタリングすることが必要であり、場合によってはリアルタイムでのモニタリングが要求される。

簡単な方法で、かつ迅速に有機化合物をモニタリングできる方法の一つとして、プロトン転移反応質量分析計（PTR-MS）を使ってリアルタイムで化合物を検知・同定した例を図1に示した。化学イオン化法を利用した質量分析法で実験室内の空気をリアルタイムで連続モニタリングしたチャートである。実験台の上でクロロホルムのビンの蓋を開け閉めしたとき、クロロホルムの蒸気が空気中に漂う状況がリアルタイムで検出されているのが分かる。

総論ということで分析化学的な内容から少し外れた内容となったが、詳細な分析化学的内容は各論を参照してほしい。

文 献

- 1) ドラネ・H・メドウズ、デニス・L・メドウズ、ジャーガン・ランダズ、ウィリアム・W・ベアランズ三世著、大来佐武郎監訳：“成長の限界”，p. 203 (1972)，（ダイヤモンド社）。
- 2) 公益財団法人旭硝子財団編：“生存の条件”，p. 135 (2010)，（信山社）。
- 3) 内藤 耕，石川英輔，吉田太郎，岸上祐子，枝廣淳子：“江戸・キューバに学ぶ“真”の持続型社会”，p. 188 (2009)，（日刊工業新聞社）。
- 4) 環境と開発に関する世界委員会編：“地球の未来を守るために”，p. 440 (1987)，（福武書店）。
- 5) 内藤正明，加藤三郎，金子熊夫，加藤久和，竹本和彦，森口祐一，松下和夫：“持続可能な社会システム”（地球環境学10），p. 228 (1998)，（岩波書店）。
- 6) A. Covaci, S. Voorspoels, P. Schepens, P. Jorns, R. Blust, H. Neels: *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, **25**, 164 (2008)。

- 7) 安原昭夫：安全工学, **45**, 117 (2006).
- 8) A. Matsunaga, A. Yasuhara, Y. Shimizu, M. Wakakura, T. Shibamoto: *Waste Manage. Res.*, **26**, 539 (2008).
- 9) A. Yasuhara, Y. Amano, T. Shibamoto: *Waste Manag.*, **30**, 1161 (2010).
- 10) T. J. Collins: *Environ. Sci. Technol.*, **42**, 7555 (2008).
- 11) S. A. Snyder, M. J. Benotti: *Water Sci. Technol.*, **61**, 145 (2010).
- 12) M. Tobiszewski, A. Mechlinska, J. Namiesnik: *Chem. Soc. Rev.*, **39**, 2869 (2010).



安原昭夫 (Akio YASUHARA)
 東京理科大学環境安全センター (〒162-0826 東京都新宿区市ヶ谷船河原町 12-1)。大阪大学大学院理学研究科有機化学専攻博士課程修了。理学博士。《現在の研究テーマ》実験排水, 実験室大気, 実験廃棄物中の有害化学物質の分析。《主な著書》“地球の環境と化学物質”(共著)(三共出版)。《趣味》サイクリング, 読書。
 E-mail: yasuhara_akio@admin.tus.ac.jp

新刊紹介

試料分析講座

創薬の分析化学

——開発タイムラインにそった全過程——

㈱日本分析化学会 編

本書は、日本分析化学会創立 60 周年記念として出版された『試料分析講座』のうちの一冊である。本書では、タイトルが示すとおり、医薬品創出の流れを、1. 探索研究段階、2. 開発研究段階及び 3. 臨床研究段階というステージに分け、それぞれのステージで実施される研究を合成研究、物性研究、薬効・薬理研究、薬物動態研究、安全性研究、製剤研究などに分類して、それぞれの研究に含まれる分析手法の意義と目的を解説している。また「その他の基盤研究における分析」という章を設け、1 細胞質量分析法による医薬品開発、マスマイミゼーション手法及び LC-NMR を用いた分析手法といった最先端の分析手法も解説している。さらに略号表や付録として医薬品承認申請のガイドラインの解説も充実しており、本書一冊で、まさに創薬の分析化学を理論と臨床医薬品開発の現場という視点から俯瞰することが可能である。本書の編集委員らは「はじめに」に、近年の薬系大学や製薬企業での分析化学の存在感が薄れていることを指摘しつつ、「分析化学の力量こそ、創薬研究の質であり、創薬研究力のバロメーターである」と記している。薬学系学生や若手創薬研究者の知的好奇心を刺激する一冊としてお勧めしたい。

(ISBN 978-4-621-08423-6・A5 判・309 ページ・4,800 円+税・
2011 年刊・丸善出版)

福島原発大事故 土壌と農作物の放射性核種汚染

浅見輝男 著

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所の事故では、大量の放射性核種、主に ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs が大気、土壌、海洋などの環境中に放出された。かつては米国等の大気圏内核爆発実験に起因する放射性核種が拡散し、日本の土壌や農作物も汚染されたが、今回の汚染の程度はその時の数千倍、数万倍であるという。著者は環境土壌学の第一人者で、放射性核種による土壌汚染問題に関する基本情報として、本書を緊急出版した。本書では、放射性セシウムによる福島県と周辺県の土壌汚染、ならびにヨウ素-131 と放射性セシウムによる農作物、牛乳、牛肉、魚等の汚染について、事故後 4 か月を経過した時点での実態を把握した結果を中心に解説している。章立ては、Ⅰ：福島第一原発大事故の経緯と放射性核種の排出（地震と津波の規模／福島第一原発大事故の状況ほか）、Ⅱ：大気圏内核爆発実験による日本の土壌・作物汚染（土壌と粘土鉱物および 2:1 型粘土鉱物によるセシウムイオンの固定／セシウム-137 とストロンチウム-90 の土壌中挙動ほか）、Ⅲ：チェルノブイリ原発事故の環境影響（チェルノブイリ原発事故の様相／チェルノブイリ原発事故後の農業生産への対策ほか）、といった構成である。本書は、関係省庁、自治体、研究機関等のホームページや新聞に掲載されているデータをまとめることで執筆されており、網羅的に基本情報を得ようとする際に参考となる一冊である。

(ISBN 978-4-901496-61-2・A5 判・127 ページ・2,000 円+税・
2011 年刊・アグネ技術センター)