

資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築

連載 (5) 循環経済展開とリサイクル・廃棄物管理

—社会のラストリゾート機能の必要性

酒井 伸一

京都高度技術研究所・京都大学名誉教授

SAKAI SHINICHI

専門は環境システム工学。2001年より国立環境研究所循環型社会形成推進・廃棄物研究センター長、2005年より京都大学教授、2021年より現職、および大阪工業大学客員教授。中央環境審議会循環型社会部会長。廃棄物資源循環学会2010～2012年会長。Journal of Material Cycle and Waste Management (JMCWM)、Springer編集担当。著書に『ゴミと化学物質』（岩波新書）、『循環型社会をつくる』（中央法規）など。



1. “3R プラス” や循環経済展開に必須となる

リサイクル・廃棄物管理

JW センター情報の連載講義に、「資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築」というテーマで2022年4月号から4回お付き合いさせていただいた¹⁾。引き続き、紙面を提供いただけるということで、研究や政策の直近の動きを意識しつつ、大きな変革期にある資源循環や廃棄物管理の動きを、科学や工学的視点と政策展開を紐付けた記事として準備していきたい。“3R プラス”展開については、JW センター情報連載の初回に紹介したところであるが、さまざまな政策展開で社会定着してきたとみている。つまり、プラスチック資源循環戦略やプラスチック資源循環法、脱炭素展開で再生可能性を意識した3R プラス展開（発生抑制、再使用、再生利用の3R 方策に加えて、再生可能性と回収を加えた概念）が廃棄物管理のみならず、資源循環やものづくりの基本となるべきことが認知されてきたと言っていい。加えて、循環経済展開の動きも主流化しつつある。この動きは、循環経済工程表を中心に、第3回連載でお知らせしているが、今後、循環基本計画改定やグリーントランスフォーメーション（GX）展開との関係で、より具体化されていくこととなる。こうした時期に触れておかねばならない観点に、廃棄物管理の位置付けがある。社会に必須の役割であり大切にしつつも、過度な廃棄物管理依存は良くないという主旨で再整理しておきたい。

「方舟さくら丸」²⁾は1984年に刊行された環境小説、ごみ小説とも呼ぶことのできる秀作であると思っている。地下採石場の跡地に核爆発から生き延びるための閉鎖系の世界を創った主人公・船長が、乗船切符を渡した「昆虫屋」「サクラとその相方」と共同生活を送ろうとすることから話ははじまる。そして、主人公自身が便器に足を吸い込まれることによって閉鎖空間の排泄系が破綻をきたすと同時に、問題が次々と起こってくるという滑稽で悲しい物語であり、現代社会の静脈系の不備を暗示している物語でもある。その中で語られる象徴として登場するものに、自分の糞を餌にして半永久的に生き続ける夢の虫『ユープケッチャ』、都市設計は大マンホールの建設からはじめなければならず、歴史上の遷都はその証しであるという『マンホール理論』など、環境論そのものといえるものもある。そして、最後に便器から足の抜けた主人公・船長のみが核シェルターから出て、一般社会に戻っていく経緯も意味深長である。なぜ1980年代半ばに安部公房氏がこうした著作を記したか、深い興味の湧くところで、21世紀に入って、刊行から四半世紀以上が経った2023年になった今、より切実感をもって、この物語を読まずにられない。より深刻な言い方をすれば、この「方舟さくら丸」が「方舟にほん丸」、そして地球の将来とダブって見えて仕方ない。

社会には環境保全のための最終的な受け皿機能が必要で、大気汚染制御装置や廃棄物処理施設などが、

1) 酒井伸一、資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築、JW センター情報、2022.4～2023.1

2) 安部公房：方舟さくら丸、新潮文庫、1990

その代表例である。廃棄物はある意味では循環フローの敗者であるが、環境的視点からは廃棄物を勝者としてはならないという意味で、社会各層が社会としての廃棄責任を果たすという意味になる。まさに社会の砦、ラストリゾートとなるべき機能で、循環フローの敗者たる廃棄物に対して社会・環境の側が勝者になる役割となる。これらは循環型社会の全体的枠組みとして、国レベルでも、地域的にもどうしても必要なものといえる。

2. 循環型社会形成に向けた

ラストリゾート機能としての廃棄物管理

ここで循環経済展開に向けた、また循環型社会形成に向けたラストリゾート機能としての廃棄物管理の重要な役割例を考えてみる。具体的には、感染対策としての滅菌機能、有害化学物質対策としての分解制御機能、脱炭素社会に向けた炭素貯留機能の3点を取り上げる。

(1) 感染対策としての滅菌機能

2020年からの感染拡大で世界各地で対応に苦慮した新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、一時は外出や経済活動の自粛が求められる緊急事態宣言が発せられる時期もあった。COVID-19はコロナウイルスの一つであるが、コロナウイルスには一般の風邪の原因となるウイルスの他、「重症急性呼吸器症候群（SARS）」ウイルスも含まれる。こうした背景でウイルスを含めた感染媒体を有する廃棄物処理は国民の生活や経済の安定確保に不可欠な業務であるため、緊急事態宣言時においても感染拡大防止策を講じたうえで事業を継続することが求められた。そのため、排出時の感染防止策や適正な処理のために講ずべき対策、処理体制の維持のためにとるべき措置を含めた「廃棄物に関する新型コロナウイルス感染症対策ガイドライン」が2020年9月に定められた³⁾。廃棄物処理に関係の深いウイルスの特性としては、自身で増殖することはないが、宿主となる生物の粘膜などの細胞表面に付着して、そ

の細胞内に入り込んで増殖することができること、生体以外の物の表面に付いた新型コロナウイルスは時間がたてば壊れてしまうが、付着する物の種類によっては24~72時間は生存し感染する力をもつことが念頭におかれた。このCOVID-19に関連して発生した廃棄物を含めて、感染性廃棄物を適正に処理することは、健全な社会を維持する上で必須の機能である。感染性廃棄物とは、医療関係機関等から発生し、人が感染し、又は感染するおそれのある病原体が含まれ、若しくは付着している廃棄物又はこれらのおそれのある廃棄物とされている。その処理方法としては、焼却、熔融、高圧蒸気滅菌（オートクレーブ）、乾熱滅菌などがある⁴⁾。感染媒体の適切な制御機能が社会に必須であることは、今回のCOVID-19で改めて強く認識され、加えて感染性廃棄物を適正に処理できることは社会に必須の機能として維持されねばならず、3R対策で完結できるものではない。

(2) 有害化学物質対策としての分解制御機能

感染媒体制御とともに重要な廃棄物管理機能として、有害化学物質対策としての分解制御機能がある。ポリ塩化ビフェニル（PCB）やアスベストなど、ヒトの健康に重篤な影響をもたらす物質を含む廃棄物を適切に分解することや制御することのできるシステムが社会に用意され、適切に運用されねばならない。PCBは、国内では1954年から生産・使用が開始され、主要用途としてトランスやコンデンサの絶縁油、工場での熱媒体、感圧紙、建築用シーラントなどに用いられてきた。しかし、1968年に明らかとなったカネミ油症事件を契機に、日本のみならず世界でPCBの有害性が認識され、日本では1973年以降は新規の生産・使用が禁止された。このPCBを含む廃棄物を分解する事業は、PCB生産企業であった鐘淵化学工業(株)により1980年代に高温熱分解法により進められ、その後、国策事業として中間貯蔵・環境安全事業(株)（JESCO）による分解事業が進められている。この分解処理や保管対策による

3) 環境省：廃棄物に関する新型コロナウイルス感染症対策ガイドライン、2020

4) 高月紘、酒井伸一：有害廃棄物、中央法規、1993

環境保全効果を小柴らが定量的に推算している⁵⁾。PCB ストックそのものを削減する分解対策では即座に排出量が減少するとともに将来の排出リスクも減少することが示されている一方、廃棄物保管は環境排出を抑制できるもののストックが維持されることで、将来的に排出量が増加するリスクを伴い、紛失率の増加を仮定したシナリオでは排出量が増加すると推定されている。実際、PCB が管理されずに食品リサイクル工程に PCB が混入した汚染事例が、21 世紀初頭にベルギーで発生し、世界の乳製品供給が大混乱する事件が発生した⁶⁾。循環経済社会の適切なラストリゾート機能として、廃棄物の的確な管理が必要となる事例の一つである。

この PCB は、ヒトへの有害性ととも環境残留性のある有害化学物質であるが、類似の化学物質が多く存在することは、残留性有機汚染物質に関するストックホルム条約の規制対象物質が増えていることから明らかである。PFAS は、有機フッ素化合物のうちペルフルオロアルキル化合物及びポリフルオロアルキル化合物の総称であるが、約 4,700 物質が関係するとされており、その管理のあり方が強い関心を呼びつつある。有機フッ素化合物は、撥水・撥油性、熱・化学的安定性等の物性を示すことから、撥水撥油剤、界面活性剤、半導体用反射防止剤、金属メッキ処理剤、泡消火剤、殺虫剤、および調理器具のコーティング剤等の幅広い用途で使用されてきた。PFAS のなかで、PFOS（ペルフルオロオクタンスルホン酸）や PFOA（ペルフルオロオクタン酸）はすでに国内外で規制対象となっているが、PFAS の分析法の開発と含有製品の特特定、含有廃棄物・循環資源に関する実態把握、廃棄処理における分解挙動の把握などが求められることを梶原らが指摘している⁷⁾。PFAS の環境移動の過程に適切な制御機能を用意することができるか、的確な廃棄物管

理機能をどのように用意していくかなど、これからの重要な課題である。

(3) 脱炭素社会に向けた炭素貯留機能

脱炭素社会に向けた社会変革に世界が大きく舵を切っていることは周知のとおりであり、技術からシステムまで、エネルギーから産業技術、そして資源循環や廃棄物管理まで、幅広い分野の脱炭素展開が進められつつある。炭素回収利用・貯留（CCUS, Carbon capture utilization and storage）は、世界的にみても確立済みの技術になっているわけではなく、今後の技術実証やシステム改善を重ねていくことが求められる現状にある。都市ごみ焼却排ガスからの CO₂ を回収し、炭素回収貯留 CCS するシステムに関しては、Bisinella らが詳細のシステム解析結果を報告している⁸⁾。モノエタノールアミン（MEA, Monoethanolamine）を用いた複数の CCS システムに関する LCA（Life cycle assessment）から、ごみトンあたりで約 800 kg の CO₂ 回収が可能であり、CCS により気候変動影響を削減できることを示している。同著者のグループは、この CCS 構想をコペンハーゲンにある 60 万トン/年能力を有する Amager Bakke 焼却プラント改造として概念設計を行い、公表している⁹⁾。温室効果ガス削減効果として 850 kg CO₂-equivalent/ ton の効果があることを確認する一方、CO₂ 回収に必要な蒸気利用増で発電電力は 50% 減少すること、熱出力は 20% 増加となる見込みであることを報告している。同様の傾向は、ノルウェーの Waste-to-Energy プラントへの CCS 追加構想の LCA 研究でも確認されている¹⁰⁾。現存の焼却エネルギー回収の 17 プラントに MEA 回収による CCS 推進を図る場合、CCS 設置のない場合に比べてエネルギー回収量は減少するものの気候変動影響ポテンシャルへの貢献

5) 小柴絢一郎、平井康宏、酒井伸一：ポリ塩化ビフェニルの生産・使用規制および分解処理の効果検証、廃棄物資源循環学会論文誌、32、20-30、2021

6) Van Larebeke N., Hens L., Schepens P., Covaci A., Baeyens J., Everaert K., Bernheim J. L., Vlietinck R., De Poorter G., The Belgian PCB and dioxin incident of January-June 1999: Exposure data and potential impact on health, 2001, Environmental Health Perspectives, 109, 3, 265-273

7) 梶原夏子、松神秀徳：新規/候補 POPs (PCNs, HCB, HBCDD, PFAS) 含有廃棄物処理の現状と今後の課題、廃棄物資源循環学会誌、32 [1]、8-26、2021

8) Bisinella, V., Nedenskov, J., Riber, C., Hulgaard, T., Riber, C., Damgaard, A., Christensen, H., Environmental assessment of carbon capture and storage (CCS) as a post-treatment technology in waste incineration, Waste Management 128, 99-113 (2021)

9) Bisinella, V., Hulgaard, T., Riber, C., Hulgaard, T., Christensen, H., Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage, Waste Management & Research 40 (1) 79-95 (2022)

10) Lausset, C., Clerubini, F., Orreggioni, G., Serrano, G., Becidan, M., Hu, X., Rorstad, P. K., Stomman, A. H., Norwegian waste-to-energy: Climate change, circular economy and carbon capture and storage, Resources, Conservation & Recycling, 126, 50-61 (2017)

があることが示されている。一方、富栄養化ポテンシャルは CCS 推進の場合の負荷の方が大きいことをはじめ、他の環境影響への目配りが必要という指摘がなされていることには注意を要する。日本の佐賀市では、MEA 吸収液による CO₂ の分離回収装置 (CO₂ 回収量として 10 ton/日) を 2016 年より稼働させている¹¹⁾。回収 CO₂ を周辺の植物工場や藻類培養に利用する実証を継続しているところである。このように CO₂ の回収や炭素貯留は、脱炭素社会に向けて重要な技術となる可能性を秘めている。

3. ラストリゾートの前の物質循環が基本

循環型社会形成に向けて、持続的な社会システムの維持に向けて必要となる廃棄物管理を中心としたラストリゾート機能の 3 事例を紹介してきた。ここで、あらためて資源循環のための 3R プラス原則における各方策の定義や考え方の概説を **表** に示した。本論でラストリゾート機能としての廃棄物管理と称しているのは、表中の処理処分や回収に関係が深い、上位の 3R 方策のみでは社会の製品やシステムが完結しない対象のための最後の拠り所的な機能ということになる。**図** のようなイメージで 3R 方策を支える下流側の社会システムが有効に機能するために必要で、社会に用意しておくべき頼られる存在ともいえる。

このラストリゾート機能の考え方は、欧州で Brunner らによって提唱された “Final Sink” 概念とも相通ずるところがある^{12,13)}。Final Sink とは「(対象とする) 物質が超長期間 (10000 年以上) の間移動することがないシンク」としているが、物質フロー的観点からは物質の生物地球化学的な性質に応じて決定づけられる利用可能性に応じた対応を求める概念となっている。つまり、物質フローと Final Sinks の利用可能性に基づいてプロセス・システムから発生する物質を、1) リサイクルに適した “クリーン” な循環資源、2) 世界の水や大気循環、

あるいは利用可能な Final Sinks の容量を超えない “持続可能な” 排出、3) 埋立時に最終的な貯蔵のための品質基準を満たしており長期間移動することがない廃棄物、に 3 分類している。そして、Brunner は適切な Final Sinks が見つからないような物質は使用を禁止し代替するべきであると主張してきた。筆者が主張してきた有害物質や有害廃棄物に対する「クリーン・サイクル・コントロール」概念¹⁴⁾ とも考え方のベクトルは合致する。「クリーン・サイクル・コントロール」とは、有害性のある化学物質の使用は回避 (クリーン) し、適切な代替物質がなく使用の効用に期待しなければならないときは循環 (サイクル) を使用の原則とし、環境との接点における排出を極力抑制し、過去の使用に伴う廃棄物は極力分解、安定化するという制御概念 (コントロール) で対処するとの考え方である。「クリーンサイクル」と「ラストリゾート」が機能する場やシステムを用意していくことで、循環型社会は真に機能するのである。こうした論考からの示唆としては、社会のメインフローは循環とすべきこと、そのフローを維持するためにはクリーンサイクルが必須となることが基本となる。この考え方を、プラスチック素材への考察¹⁵⁾ として深めているところであるが、プラスチック素材は、少なくとも海洋がプラスチック素材のファイナルシンクにはならないことが認識されつつある。現在のプラスチック素材利用の相当の減量を図ったとしても、素材の構成成分によっては循環で有害物質も同時に循環されることになる。これを回避したクリーンサイクルとするためには、有機系の有害物質には熱化学的なプロセスや生物学的なプロセスで分解する無機化の工程を用意しなければならない。無機系の有害物質には、物理化学的なプロセスを中心に分離や選別、安定化による制御が必要となる。このようにして循環経済社会をめざすためには、リサイクル物への有害物質混入を回避することが極めて重要であること、そのためには自

11) 佐賀市公式ホームページ：二酸化炭素分離回収事業について (2022) <https://www.city.saga.lg.jp/main/44494.html>, Accessed 22 January, 2023

12) Brunner PH (2004) Material flow analysis and the ultimate sink. *J Ind Ecol*, 8, 4-7

13) Kral U, Morf LS., Vyzinkarova D, Brunner PH (2019) Cycles and sinks: two key elements of a circular economy, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21 : 1-9

14) Sakai S (2000) Material cycles science concept. *Environ Sci Pollut Res Int* 7 (4) : 225-232. <https://doi.org/10.1007/BF02987353>

15) 酒井伸一：3R プラス原則とライフサイクル的観点からみたプラスチック素材、廃棄物資源循環学会誌, 30 [2], 131-140, 2019

自然界のシンクのみではなく、人間社会のシンクとして「無機化」「分離」「貯留」といった工程が必要となるのである。現在の多くの社会システムは、この

基本からは相当に遠い立ち位置にある。考えるべき対象や課題は多い。

表 3R プラス原則における各方策

3R プラス方策	各方策の概要と基本原則
再生可能資源利用 (Renewable)	使用量に無関係に枯渇はないと考えられる資源や、再生可能量と使用量の関係から枯渇はないと考えられる資源の利用を基本とする。再生可能資源を利用する速度は再生速度を上回ってはならず、再生不可能な資源の消費速度は、代替する再生可能資源の開発速度を上回ってはならない。
発生抑制減量 (Reduce)	不要物の発生量自体を減らすことで、発生抑制や原料といった用語が使われる。廃棄物対策を考える際、最も優先的に取り組むべきことが、このリデュースで、ごみを出さない、ごみを減らすという行動が廃棄物対策の基本となる。リデュースにもさまざまな方法があり、生産工程、流通過程、消費過程に分けて考えることができる。もちろん相互の関係は深い。
再使用 (Reuse)	一度使用された製品や部品を、そのままの形で再び使うこと、物理的な形態変化なしに製品や素材をその製品寿命の中で繰り返し使うことを意味する。加熱して溶かすなどして、原料まで戻す工程が入る「リサイクル」とは異なる。ものは必ずしも使えなくなった状態で捨てられるわけではなく、たとえば、流行遅れになったから、飽きたからなどの理由で捨てられる場合あり。このような場合に、リユースできる可能性がでてくる。
再生利用 (Recycle)	必ずしも元の形態である必要はないが、そのままでは廃棄物となる素材を用いて、物理的/化学的なプロセスにより製品製造すること。再使用工程は、通常、洗浄工程を中心とした比較的簡単なシステムで対処するのに対し、リサイクルは一次資源の元工程や場合によっては異なる技術の工程を含むこともある。一次資源を用いた多くの製造施設が比較的一定の品質の原料を使用するのに対し、二次資源の場合は原料品質が異なることを前提とする必要がある。
回収 (Recovery)	再使用や再生利用できない廃製品や残渣、廃棄物を、熱化学変換によりエネルギー回収し、無機化残渣を利用する方法。また、環境に排出されたり、残留する廃棄物を削減するために物質回収する方法も回収の一つで、海洋からプラスチック素材を回収する活動が該当する。
処理処分 (Disposal)	循環利用に伴って発生する残渣物や適正処分されなければならない廃棄物に対して、安定化や固化といった物理化学処理を行う。また、大気や水環境、ヒトの生活環境に悪影響を与えることなく、土や土壌微生物の働きを活かした土圏中での安定化による埋立管理がある。

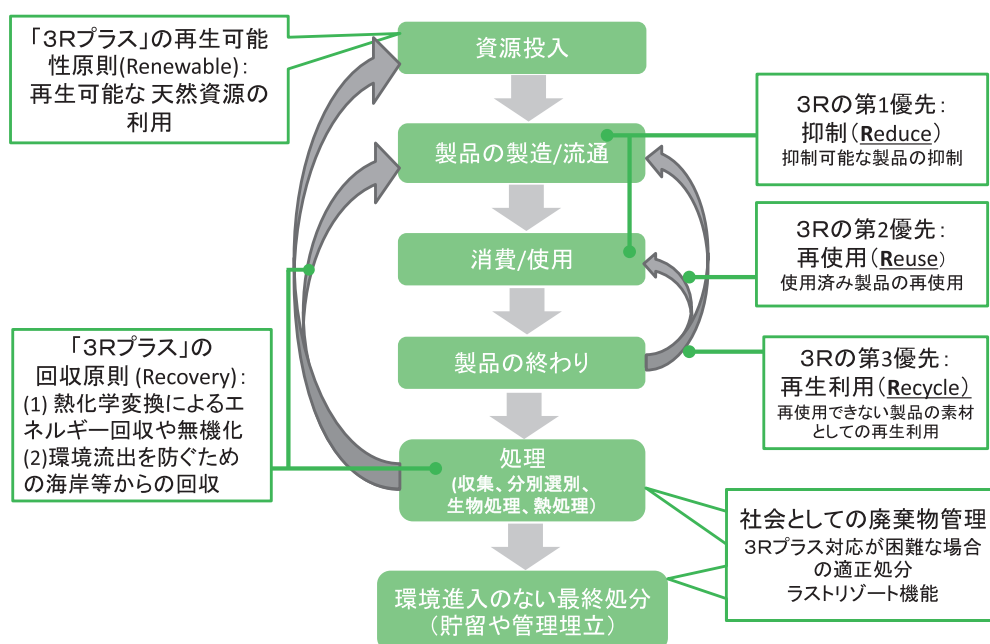


図 循環型社会に向けた 3R プラス概念と資源・循環フローのイメージ