

資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築

総論 (1) 温室効果ガス発生と対策の基本原則

酒井 伸一 京都高度技術研究所副所長・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。



はじめに

—「JW センター情報」誌への連載記事にあたって

この度、日本産業廃棄物処理振興センターの機関誌「JW センター情報」の連載記事執筆にお付き合いさせていただくことになりました。貴センターの関壮一郎理事長には、環境省廃棄物リサイクル部での政策展開を中心に、国立環境研究所や京都大学での研究活動の延長とともに考えさせてもらう場を用意いただいたご縁で、さまざまな議論をさせていただきました。そうした経験を振り返りつつ、現時点の政策と研究の接点にある話題についての解説を試みたいと思います。

現時点の大きな社会課題になっている脱炭素化、カーボンニュートラルに関する話題として、「資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築」と称しての連載を試みます。温室効果ガス対策の観点からは、2020年10月の日本政府の2050年脱炭素宣言で、より深く考えねばならないことになったことはご存知のとおりです。2022年4月に施行されるプラスチック資源循環促進法は、海洋プラスチック対策とともに、温室効果ガス対策の観点からみても総合的政策となっていることもあり、この連載では脱炭素化の前提となる温室効果ガス (GHG) インベントリについての整理から始めることにします。第1回「総論 (1) 温室効果ガス発生と対策の基本原則」、第2回「総論 (2) 資源循環廃棄物分野の脱炭素対策」、第

3回「各論 (1) 有機性廃棄物」、第4回「各論 (2) プラスチック素材」を建て、論じてみるつもりです。ただ、この関係の社会や制度に関する動きは思いのほか早いので、1年間の間の執筆時点で微修正を掛けねばならないことがあるかもしれませんので、その際はご理解いただければ幸いです。

1. 脱炭素化の前提となる温室効果ガス (GHG) インベントリ

2021年8月に気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第6次評価第1作業部会報告が公表された¹⁾。人間の影響が大气、海洋および陸域を温暖化させてきたことには疑う余地がないと結論付け、広範囲にわたる急速な変化が、大气、海洋、雪氷圏、生物圏に起きていると警鐘を鳴らした報告として広く伝えられたことは記憶に新しい。とくに累積炭素排出量と気候応答の間には、ほぼ線形のあるとして、 $0.27\sim 0.63^{\circ}\text{C}/1000\text{ GtCO}_2$ が示され、カーボンバジェット (炭素予算) が明示されたことには注意を要する。つまり、1850～2019年の人為起源排出 CO_2 を約 $2390\pm 240\text{ GtCO}_2$ と算出、 1.5°C 目標に抑えるための残余カーボンバジェットは、約 500 GtCO_2 と推定された。2019年の世界の排出量は約 43 GtCO_2 なので、約12年分になる。こうした緊急性のあるメッセージが発出されているのである。

さて、各国の温室効果ガス排出量は、排出・吸収

1) IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

部門ごとに排出目録（インベントリ）にまとめられて条約事務局に定期的に報告されている²⁾、³⁾。そのインベントリに廃棄物部門があり、次の4分類—A. Solid Waste Disposal on Land（固形廃棄物の埋立処分）、B. Waste Water Handling（排水処理）、C. Waste Incineration（廃棄物焼却）、D. Other（その他）に沿って計上する。廃棄物分野では焼却過程からの炭酸ガスの発生量が量的にも多く、なかでもプラスチック類と廃油が多い。加えて、合成繊維くずや感染性廃棄物などの特別管理廃棄物からの発生もある。また、プラスチック類、廃油、廃タイヤ、ごみ固形燃料が産業プロセスの原燃料として使用されるケースが増えているが、この工程からの温室効果ガスを計上、評価することとなっている。この産業プロセスでの廃棄物の原燃料利用を産業分野で計上するか、廃棄物分野で計上するか、についてはさまざまな考え方があがるが、日本では廃棄物分野で計上している。また、埋立処分過程や排水処理過程からのメタンや亜酸化窒素、下水汚泥や有機性汚泥などの廃棄物の利用過程、たとえばコンポスト工程からのメタンと亜酸化窒素も算定対象とされている。

廃棄物の焼却に伴う炭酸ガス排出量を正確に推定するためには、廃棄物に含まれる化石資源由来炭素と生物由来炭素とを区別して把握することが重要である。廃棄物中の化石資源由来炭素としては、従来、廃プラスチックおよび廃油のみを対象としてきたが、2006年のインベントリから、合成繊維くず・廃タイヤ・RPFも算定の対象とされている。石油化学

工業製品は多岐にわたり、「紙」おむつに使われている高分子吸収剤、「木製」家具に使われるパーティクルボード中の接着剤などは化石資源由来である。こうした分野からのGHGも計上することとなっている。一方、プラスチックの全てが化石資源由来とは限らないことには注意を要し、ポリ乳酸やPHA系など植物を原料としたプラスチック利用ではGHG計上から控除されることとなる。

2. 廃棄物・資源循環分野から排出される温室効果ガス

2019年度の廃棄物・資源循環分野全体のGHG排出量は、表1のとおり、2019年度で3,967万トンCO₂であり、日本全体のGHG排出量12.1億トンの約3.3%を占める⁴⁾。2005年度比で比べると本分野の削減割合は約10%減であるが、2013年度比では1.2%減と少なく、1990年度比では大きな変化はない。2019年度の本分野の非エネルギー起源GHG排出量、約4000万トンの約81%を廃棄物の焼却に伴うCO₂排出（原燃料利用分を含む）が占める。うち、プラスチックからのCO₂排出が約1,460万トン、廃油からのCO₂排出が約980万トンとその多くを占める（図1）。廃棄物分野からの温室効果ガス排出の相当量がプラスチック焼却に由来するが、1460万トンのプラスチック焼却からのGHG排出のうち、一般廃棄物は680万トン、産業廃棄物は740万トンとほぼ同量となっており、特別管理産業廃棄物（感染性廃棄物中のプラスチック）は47万トンとなっ

表1 1990～2019年度の廃棄物・資源循環分野のGHG排出量

(単位: ktCO ₂ eq)	1990	2005	2013	2019
最終処分 (5A)	9,605	6,130	3,881	2,811
生物処理 (5B)	235	414	435	383
焼却 (5C)	13,714	16,147	13,739	12,976
原燃料利用 (1A)	11,115	17,793	17,581	19,298
排水処理 (5D)	5,329	4,560	3,893	3,615
その他 (5E)	703	507	605	582
合計	40,700	45,550	40,135	39,666

国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス、日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2019年度）

2) 環境省令和2年度温室効果ガス排出量算定方法検討会：廃棄物分野における排出量の算定方法について、www.env.go.jp/earth/ondanka/ghg-mrv/committee/r02-agenda1.html

3) 酒井伸一、平井康宏：廃棄物分野からの温室効果ガス排出について、都市清掃60 [278], 332-338 (2007)

4) 国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィス、日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2019年度）

ている。産業廃棄物については、セメント業や鉄鋼業での利用やガス化利用等の原燃料利用が進んでおり、利用先での化石燃料由来のCO₂削減に貢献しているが、廃棄物を起源とするGHG排出であるため、廃棄物・資源循環分野のカーボンニュートラルの観点からの削減方策を検討していかねばならない。こうしたプラスチック素材の生産利用から廃棄過程のGHG対策の詳細については、稿を改めて詳述したい。RDF・RPF及び廃タイヤは原燃料としての利用に伴う排出であり、両者を合わせると約280万トンCO₂の排出となる。合成繊維くず、紙くず、紙おむつの焼却に伴うCO₂排出は約300万トンであり、今後、人口の減少により排出削減が見込まれるものの、実質ゼロ化に向けては原料のバイオマス化などの素材転換やリサイクル促進による焼却回避、さらにはエネルギー回収利用による化石エネルギー削減などが必要となる。

廃棄物部門からの温室効果ガス発生量の見積もりは相当程度に精緻化されてきた。その一方、課題もあり、第一には算定に使用した排出係数を実績ベースで確認、更新していくこと、第二には統計量をより正確にしていくこと、廃棄物部門の世界共通の課題ともいえる。また、統計値の取り纏めまでのタ

ムラグを少なくするため、統計値集計の一層の迅速化が望まれている。

3. 再生可能資源利用原則

再生資源利用原則は、これからの資源や廃棄物を考えるうえで非常に大切な原則になりつつある。資源は、非枯渇性資源（再生可能資源）と枯渇性資源（再生不能資源）に分けて考えることができる（表2）。再生可能資源とは太陽光や太陽熱、風力、波力、生物といった再生産現象を利用した木材や魚などを指し、枯渇性資源とは、化石燃料や鉱物資源などで、再生可能性との関係で、英文ではそれぞれ“renewable”と“non-renewable”と表記することが多い。再生可能資源には、資源賦存量と使用量の関係から、使用量に無関係に枯渇はないと考えられる資源と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がある。前者には太陽光や太陽熱があり、後者にはバイオマスがある。バイオマスは、太陽エネルギーにより光合成により生成した植物体であり、再生産が可能な速度の範囲内で生物資源を用いるという条件での再生可能資源と考えられる。こうした再生可能資源を基盤とした社会を重視する方向が模索されつつある。この再生可能資源を考える際によ

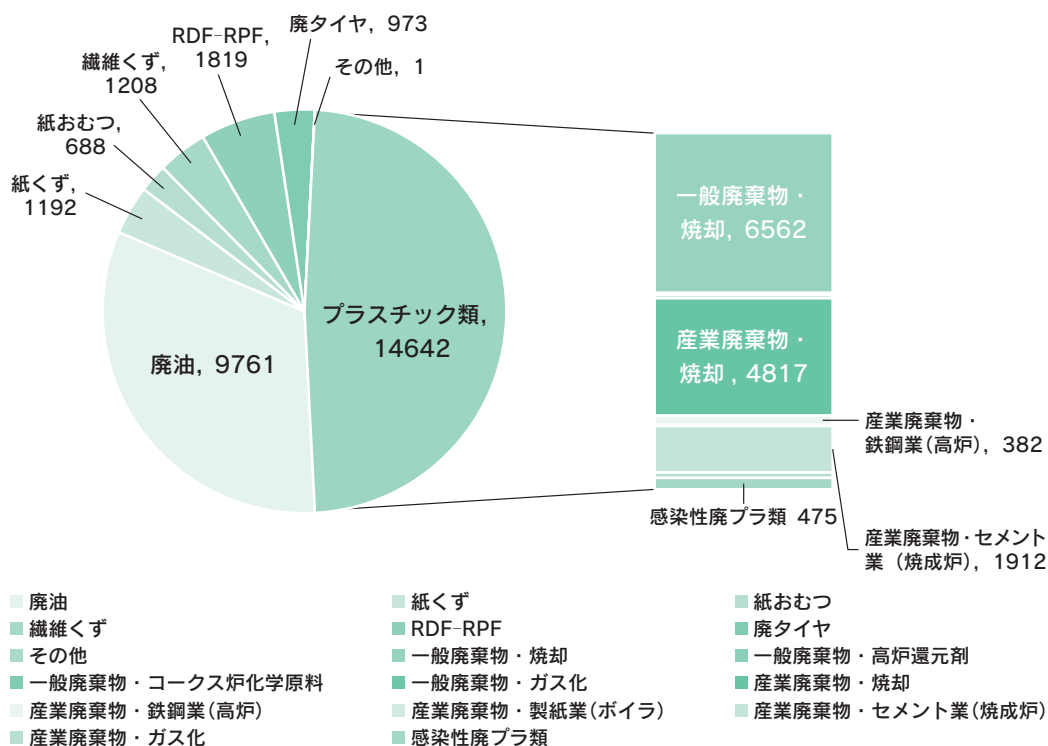


図1 廃棄物焼却に伴う温室効果ガス排出量（2019年，10³tonCO₂eq）

く登場するのが、ハーマン・デーリーの三原則である^{5)、6)}、再生可能資源の定義と3原則との関係を表2に併記した。資源利用のあり方について、(1) 再生可能な資源（土壌、水、森林、魚など）の消費ペースは、その再生ペースを上回ってはならない、(2) 再生不可能な資源（化石燃料、良質な鉱石、化石水など）の消費ペースは、それに代わり得る持続可能な再生可能資源が開発されるペースを上回ってはならない、(3) 汚染の排出量は、環境の吸収能力や浄化能力を上回ってはならない、を原則とすべきことが紹介されている。ヒトが安全・安心に暮らすには、ヒトの生命維持と基本的な生活の営みに不可欠な資源や環境の持続性維持と自然界と共生できる社会システムが必要との基本的認識の下で、さまざまな資源としての水資源、食料資源、エネルギー資源、鉱物資源、森林資源などの利用原則を示していると言える。

一方、再生不可能な資源の利用原則も唱えられている。持続性を維持できない再生不可能な資源は、その消費速度は再生可能な代替資源の生成速度の範囲で利用すべきこととなる。上述の三原則の(2)に相当する。時機的に持続可能資源で不足するときには依存させてもらう対象として考えることで、再生不可能な資源が利用できると思われる。再生不可

能な資源の採掘に伴う投資は、再生可能な代替物への投資に置き換えられねばならないのであろう。ある種のペアリング原則ともいえ、技術の観点からは、資源投入量増加のための技術よりは資源生産性向上のための技術、資源の単位量あたりにより多くを抽出できる価値のある技術を活用しつつ、規模の経済探求よりは、地域で運用可能なキャパシティ以内での利用とすることも必要となってくる。こうした論点を、デーリーは再生可能な資源と再生不可能な資源に対する利用原則として1990年前後に唱えたわけであるが、その基本は現在でも通用すると思われる。次節で述べる3Rプラスとの関係では、最上位概念である廃棄物の発生抑制や発生回避を模索し、社会の流通フロー量を一定程度まで削減すること、そして再生可能資源を基本として循環させること、どうしても発生する廃棄物を自然資本として管理できる範囲で取り扱うことが求められることになる。

4. 資源循環・廃棄物管理の基本原則としての3Rプラス

3R (Reduce, Reuse & Recycle) 方策は、抑制・リデュース (Reduce) を第1の優先方策とし、次が再使用・リユース (Reuse) で、再生利用・リサイクル (Recycle) は3番目におくとする考え方で、

表2 再生可能資源と非再生可能資源、その定義と原則

資源の種類	説明	具体例
非枯渇性資源 (renewable resources)	使用量に無関係に枯渇はないと考えられる資源	太陽光：太陽から地球に放射されるエネルギーは、数十億年以上とされる太陽の寿命のもとでは、非枯渇性と考えていい資源
	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	バイオマス：太陽エネルギーにより光合成にされて生成した植物体であり、再生産が可能な範囲で生物資源を用いるという範囲での非枯渇性資源
枯渇性資源 (non-renewable resources)	人類史の時間尺度では補充が不可能な資源	化石燃料：人類史の時間軸の中では、元の炭化水素には戻らないという意味での枯渇性資源 鉱物資源：現在の技術や経済水準では使用しえない状態になるという意味での枯渇性資源

ハーマン・デーリー第1原則：再生可能な資源（土壌、水、森林、魚など）の消費ペースは、その再生ペースを上回ってはならない

ハーマン・デーリー第2原則：再生不可能な資源（化石燃料、良質な鉱石など）の消費ペースは、それに代わり得る持続可能な再生可能資源が開発されるペースを上回ってはならない

ハーマン・デーリー第3原則：汚染の排出量は、環境の吸収能力や浄化能力を上回ってはならない

5) Daly, H. E. (1990) Toward some operation principles of sustainable development, Ecological Economics, 2, 1-6
 6) 酒井伸一、再生可能資源の利用原則と廃棄物の発生抑制、廃棄物資源循環学会誌 Vol27, No4, p. 290-299 (2016)

優先性を念頭においた廃棄物の階層対策として、1990年前後から社会展開がはじまった。リデュースは、不要物の発生量自体を減らすことで、ごみ減量方策として最も優先的に取り組むべきとされ、リユースによる再使用後にリサイクルで資源循環され、結果としてごみ減量がなされることとなる。リサイクルのうち、マテリアルリサイクルやケミカルリサイクルを再生利用と呼んでいる一方、エネルギーリサイクルやサーマルリサイクルという呼称は使用しないことになりつつある。エネルギー回収や熱回収として、再生利用の次の優先順位としてのリカバリー（回収）として位置づけられることとなる。プラスチック素材の海洋汚染問題、温室効果ガス影響を回避するためには、この考え方を発展させて再生可能性（Renewable）と回収（Recovery）を含めた3Rプラス原則の考え方^{7）、8）}を導入することとなってきた（図2）。

この3Rプラス原則の考え方は、プラスチック素材に対して2019年に定められたプラスチック資源循環戦略で採用され、同戦略では階層的廃棄物対策（3R）に再生可能資源利用が追加された。今後、プラスチック素材の生産は植物資源をはじめとする再生可能資源利用に徐々にシフトすることが望ましい、再生可能資源で製造したプラスチック製品の使用を増やしていく、そして再使用・再生利用に力を入れ

ることが求められていることを3Rプラス原則と表現したものとみることができる。その一方、現在ではプラスチック素材をはじめ多くの素材が石油などの化石資源に依存しているが、この使用を抑制、または回避することにより徐々に使用量を減らしていくことが求められ、また再使用・再生利用することにより一定量の資源循環が求められる。中長期的には、炭素循環技術の進展により、CO₂やメタノールなどからのプラスチック製造を行う方法も視野に入りつつある。回収には、熱化学変換により無機化をはかりエネルギー回収を進めること、海洋や陸域からのプラスチック回収の両方の意味がある。3Rプラス原則としては、とくに当面のリデュース方策が極めて重要であるが、加えて中長期的には再生可能資源利用を進めていかねばならない。

この3Rプラス原則は、温室効果ガス対策としてみたときにも基本的に有効である。例えば、廃油発生につながるさまざまな用途での鉱物油や有機溶剤は植物油など再生可能な材料に転換することや使用原単位を減らしていくこと、そして使用済み油のリサイクルを進めることで、脱炭素化への取組を進めていくことを考える方向にある。化石由来の素材全般に求められる原則として3Rプラス原則は有効と言える。

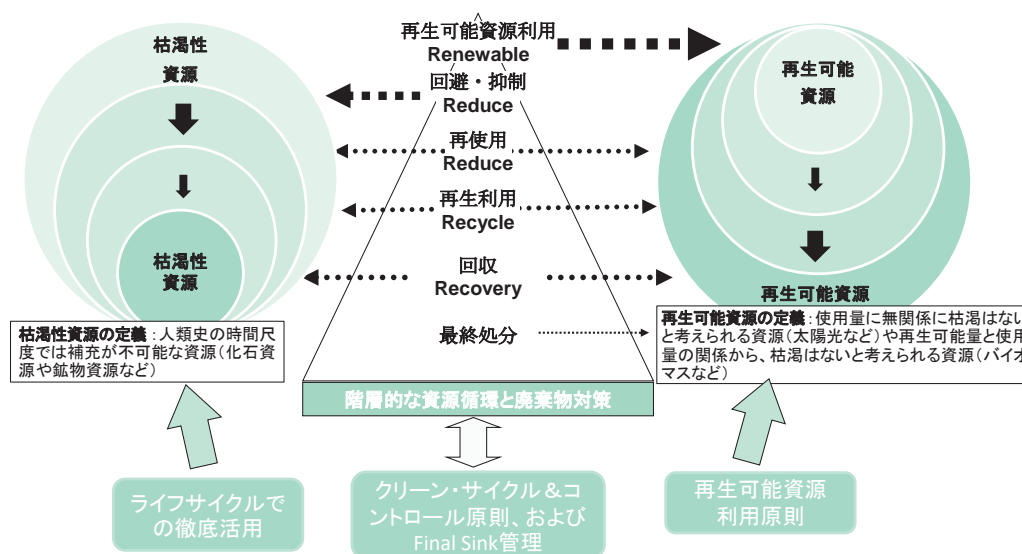


図2 3Rプラス原則と再生可能資源利用のイメージ

7) 酒井伸一：3Rプラス原則とライフサイクルの観点からみたプラスチック素材、廃棄物資源循環学会誌、第30巻、第2号、pp.131-140（2019）

8) 消費者庁、外務省、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省、環境省：プラスチック資源循環戦略、令和元年5月31日