

資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築

総論 (2) 資源循環廃棄物分野の脱炭素対策

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. 第2回連載にあたって

「JW センター情報」の連載記事「資源循環・廃棄物管理と脱炭素社会構築」第1回では、日本の廃棄物分野の温室効果ガス (GHG) の排出目録 (排出インベントリ) の現状からプラスチック廃棄物や廃油の焼却に伴う GHG 排出が多いこと、資源循環・廃棄物管理の基本としての 3R プラス原則 (3R に再生可能性 (Renewable) と回収 (Recovery) を加えた基本的考え方) で臨むことができることを紹介した。加えて、世界のカーボンバジェット (炭素予算) からみると、1.5℃ 目標に抑えるための残余カーボンバジェットは約 500 GtCO₂ と推定されており、2019年排出量からすると、約12年分という厳しい現状であることも、お伝えした。日本の残余カーボンバジェットは、約 6.5 GtCO₂ で、2020年度の 1.1 GtCO₂ の年間排出量からみれば、わずか 6～7年分しか残されていないことも追加で指摘しておきたい。

第2回連載では、こうした GHG 排出の現状をふまえて、資源循環廃棄物管理がめざすべき日本の方向性として 2021年8月に打ち出された「2050年 GHG 排出実質ゼロに向けた廃棄物・資源循環分野の中長期シナリオ案 (以下、中長期シナリオと称する)」での対策の要点を紹介する。そのうえでリサイクルや炭素固定による GHG 発生のシステム的回避削減の考え方、そうした方向での資源循環方策のあり方について考えてみる。

2. 国レベルの資源循環分野の温室効果ガス削減シナリオ

資源循環分野の GHG 削減中長期シナリオ案

日本では、「2050年 GHG 排出実質ゼロに向けた資源循環分野の中長期シナリオ案」が、2021年8月の第38回中央環境審議会循環型社会部会において示された¹⁾。本シナリオ案は、廃棄物管理を中心とした資源循環分野における GHG 排出削減対策を、計画的かつ効果的に実行するための指針として位置付けられる。この脱炭素シナリオ案は、廃棄物分野から直接排出されている GHG を念頭に、その脱炭素化をめざすものである。すなわち、一定の廃棄物減量を見込みつつ、処理技術・リサイクル技術の高度化による脱炭素化や CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 炭素回収利用・貯留) による炭素の回収・利用と貯留をすることを中心に、資源循環廃棄物分野の GHG 排出を実質ゼロとすることが可能か、複数のシナリオを用いて検討が進められてきた。本試算では、7つのシナリオとして、2019年度前後の対策のままで推移する「BAU シナリオ」をベースに、重点対策を実現の程度に応じて積み上げた「拡大計画シナリオ」や「イノベーション発展シナリオ」といったシナリオから、実質排出ゼロを達成するために求められる CCUS を加味した「実質排出ゼロシナリオ」や「最大対策シナリオ」が設定された。各シナリオにおける排出源別の温室効果ガス排出量と対策別の温室効果ガス削減量

1) 中央環境審議会循環型社会部会：廃棄物・資源循環分野における温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ (案) について、2021年8月5日、http://www.env.go.jp/council/03recycle/post_217.html (2021年11月16日確認)

を表1に示す。2050年時点でのGHG排出量推計値を「BAUシナリオ」比でみると、「拡大計画シナリオ」では約35%減、「イノベーション発展シナリオ」では約82%減となる。「実質排出ゼロシナリオ」では「イノベーション発展シナリオ」における非エネルギー起源排出分を同じ量のCO₂をCCSで相殺することで実質ゼロをめざす計画となっている。

廃プラスチック対策の削減効果

対策別のGHG削減量をみれば、廃プラスチック対策の削減効果が大きいことが分かる。イノベーション発展シナリオの総削減量2780万トンCO₂のうち、約50%の1369万トンCO₂が廃プラスチック

対策による削減である。このプラスチック対策による削減の基本的考え方は、プラスチック資源循環戦略やプラスチック資源循環促進法により、廃プラスチックの発生抑制・再使用・分別回収を進めつつ、排出された廃プラスチックのマテリアルリサイクルや循環型ケミカルリサイクルで素材循環重視のリサイクルを行い、焼却処理される廃プラスチック量を削減することである。容器包装リサイクル法の政令改正によるプラスチック製買物袋有料化やプラスチック資源循環促進法による特定プラスチック使用製品指定（フォーク、ストローなど14品目）による発生抑制とそうした取り組みが他のプラスチック製

表1 廃棄物・資源循環分野の中長期シナリオにおける2050年の温室効果ガス排出量と削減量¹⁾
(循環型社会部会資料を著者が再構成)

排出源別のGHG排出量

(ktCO ₂)		シナリオ					
		BAU	拡大計画	イノベーション実現	イノベーション発展	実質排出ゼロ	最大対策
排出源	埋立	1,350	898	851	834	834	834
	生物処理	377	377	377	377	377	377
	焼却	11,172	4,299	3,167	2,126	2,126	2,126
	原燃料利用	16,703	14,696	4,636	2,827	2,827	2,827
	エネ起CO ₂	4,367	1,911	1,468	0	0	0
	CCUS	0	0	0	0	-6,164	-16,138
	合計	33,968	22,180	10,499	6,164	0	-9,975

対策別のGHG削減効果

(ktCO ₂)		シナリオ					
		BAU	拡大計画	イノベーション実現	イノベーション発展	実質排出ゼロ	最大対策
GHG削減対策	廃プラスチック対策	0	7,983	12,406	13,690	13,690	13,690
	廃油対策	0	408	4,777	5,838	5,838	5,838
	紙くず対策	0	0	638	865	865	865
	紙おむつ対策	0	0	820	820	820	820
	合成繊維くず対策	0	0	458	601	601	601
	廃タイヤ対策	0	0	403	504	504	504
	その他の対策	0	941	1,068	1,119	1,119	1,119
	エネ起CO ₂ 対策	0	2,456	2,898	4,367	4,367	4,367
	CCUS	0	0	0	0	6,164	16,138
	合計	0	11,788	23,469	27,805	27,805	43,943

品使用により一般化することで、2050年には発生抑制率25%を見込んでいる。プラスチックリサイクルとしては、従来のマテリアルリサイクルの推進とともに、循環型ケミカルリサイクルの推進を念頭においている。循環型ケミカルリサイクルとは、日本化学工業協会が「廃プラスチックのケミカルリサイクルに対する化学産業のあるべき姿²⁾」において推進を宣言しているモノマー化、ガス化、油化等による化学原料化システムであり、原料レベルで同一性能を維持しつつ、新たな製品として循環ラインに戻すことを想定している。このケミカルリサイクル収率を、2050年には70%から90%にまで向上させることをシナリオ別に想定している。

ドイツのVolkらは、メカニカルリサイクルで一次生産の70%程度の温室効果ガスに抑制できること、ケミカルリサイクルが有する温室効果ガス削減はメカニカルリサイクルと同レベルか、少ないこと、軽量混合プラスチックに対するメカニカルとケミカルの統合リサイクルでの抑制効果は、温室効果ガスで0.48 kgCO₂e/kg input、総エネルギー消費で13.32 MJ/kg input、コストで0.14 EURO/kg inputであることを報告している³⁾。ドイツでは、年間520万トンの使用済みプラスチックが発生しているが、統合リサイクルで250~280万トンのリサイクルが可能で、100~200万トンのプラスチック焼却が回避でき、回避されたプラスチックを経済システムにおくことができるとしている。ケミカルリサイクルが社会実装され、こうした効果確認が各方面でおこなわれていくことが期待される今一つのプラスチック対策に、再生可能資源利用を進めるバイオマスプラスチックの普及があり、イノベーション発展シナリオ以上のシナリオでは、2050年において250万トン程度のバイオマスプラスチックの導入を想定している。

削減が期待される廃油対策

削減量として、次に大きな量が期待されているのが廃油対策である。イノベーション発展シナリオで

584万トンCO₂の削減で削減量全体の20%を占める。その際の削減対策としては、2050年には焼却されている廃油のマテリアルリサイクルを50%、燃料化対象の廃油のマテリアルリサイクルを80%、そして、焼却せざるを得ない年間10万トンの油をバイオマス化することとしている。拡大計画シナリオでは40万トンCO₂の削減量（焼却対象の廃溶媒の30%をマテリアルリサイクル）と試算されており、その10倍以上の削減は容易でないであろうが、溶媒再生によるアップサイクルやマテリアルリサイクルへの取り組みは日本では始まったばかりである。

廃棄物処理過程の中で、焼却や埋立過程は大きな温室効果ガス発生のあるプロセスである。分解可能な有機物を埋立処分すればメタンガスが発生し、そのメタンは大きな温室効果係数を有する。有機性廃棄物の最終埋立処分量は減少してきており、温室効果ガスとしてのメタン排出は、1990年度の960万トンCO₂から2019年度には280万トンCO₂に減少している。ただし、有機性廃棄物からは埋立開始から数十年にわたってメタンガスが排出されるため、仮りに2022年度から有機性廃棄物の埋立を全廃したとしても2050年時点で約83万トンCO₂相当のメタンが排出される見通しとなっている。イノベーション発展シナリオ以降の排出見通しが、この数値である。

焼却施設からの温室効果ガス対策

焼却施設からの温室効果ガス対策として、大規模施設に集約化することとメタン発酵の導入によって削減することを想定している。イノベーション発展シナリオの2030年代以降は、焼却の新規整備は300t/日以上に集約化した施設のみとし、焼却施設の更新時にはメタン発酵導入とセットにすることとしている。合わせて、毎年1施設程度、産業熱需要へ蒸気を外部供給する施設を整備、その蒸気活用でGHG削減につなげる。廃棄物発電・熱利用は、当面拡充していくと想定しているが、他分野における脱炭素化の進展に伴いGHG削減効果は減少してい

2) 一般社団法人日本化学工業協会：廃プラスチックのケミカルリサイクルに対する化学産業のあるべき姿（2020）<https://www.nikkakyo.org/news/page/8613>（2021年11月16日確認）

3) R. Volk, C. Stallkamp, J. J. Steins, S. P. Yogish, R. C. Muller, D. Stapf, F. Schultmann: Techno-economic assessment and comparison of different plastic recycling pathways, J Industrial Ecology, 2021, 25, 1318-1337

くため、今回の試算では削減効果を見込んでいない。そして、廃棄物分野の実質排出ゼロ化のために、必要量の CCUS 導入を 2040 年代に開始することを想定している。2050 年で、CCUS により 600 万トン CO₂ 抑制を達成することで実質排出ゼロを達成し、さらに既存施設を含む全施設で排ガス全量を対象とする CCUS を導入すれば、最大対策シナリオで示されている 1600 万トン CO₂ が抑制できる見通しとなっている。以上の試算における廃棄物処理施設（焼却施設・バイオガス化施設等）の CCUS としては、バイオマスを起源として発生した CO₂ を対象とした CCS によるネガティブエミッション技術を活用すると設定したが、CCS については貯留先の見込みまでは検討対象としていないこと、CCUS については関連する技術開発やコスト低減、取扱いルールに関する議論等が必要であり、これらの進捗に応じて試算は適宜見直すこととされている。

廃棄物焼却施設への CCS 技術導入の利点

この CCS 技術を廃棄物焼却施設に導入することの利点としては、廃棄物中の化石由来 CO₂ の大気排出を削減できること、そしてバイオマス由来 CO₂ を分離・貯留できることにある。廃棄物焼却施設に CCS や CCU を導入したライフサイクル分析研究はデンマーク工科大学の Christensen らの研究グループから数報報告されている。2025 年に本格稼働をめざすコペンハーゲンの CCS を伴う焼却施設を例にした LCA 研究⁴⁾ では、廃棄物の発生から焼却、CO₂ の分離回収と移送、貯留までを範囲としたライフサイクルで焼却ごみ量当たり約 0.85 t-CO₂eq/t の削減効果と試算している。また、排ガス処理設備や CCS の有無で条件の異なる焼却処理施設 9 施設（CCS なし 5 施設、CCS あり 4 施設）を想定した解析⁵⁾ では、CCS の導入によっておよそ 0.7 t-CO₂eq/t の削減効果と試算し、CO₂ 分離効率の感度がとくに大きいこと、エネルギー（電熱）供給システムが

低炭素化するほど CCS の GHG 削減効果が大きくなることが報告されている。さらに、廃棄物焼却施設に CCU 技術を導入したライフサイクル分析⁶⁾ では、CCU なしの焼却施設と比べた削減効果として、植物栽培への CO₂ 富化、藻類培養、セメント利用などの地域利用によって約 0.7 t-CO₂eq/t と試算されている。さらに、化学原料やメタン、ジメチルエーテル（DME）などの燃料化などの工業利用では約 2.0 t-CO₂eq/t の削減となり、より大きな削減効果が期待されることが報告されている。

世界的にみた資源循環分野の GHG 削減計画

日本の資源循環廃棄物分野の GHG 削減に向けた中長期シナリオの具体的な削減内容とその見通しを紹介してきたが、世界的にも類似の計画が立てられつつある。英国の資源循環廃棄物分野の GHG 削減計画では、2050 年の GHG 排出実質ゼロまでの道筋を示されている。Sixth Carbon Budget Report⁷⁾ の 5 シナリオのうち、より実現性が高いとされる均衡ネットゼロシナリオ（Balanced Net Zero Pathway）の廃棄物分野の対策メニューでは、2050 年は約 780 万 t-CO₂eq の排出量となり、廃棄物分野単独で排出ゼロは実現しないものの、ベースラインシナリオの 3130 万 t-CO₂eq から約 75% の削減を達成する見込みである。とくに効果が大きい対策は埋立禁止で 810 万 t-CO₂eq、廃棄物エネルギー回収で 610 万 t-CO₂eq、そして廃棄物施設への CCS 導入で 710 万 t-CO₂eq（2040 年初期から導入開始）が見積もられている。人口規模が 6700 万人と、日本の約 2 分の 1 であることや、廃棄物処理処分が埋立中心で進められてきたことなど、背景や経緯が異なる両国ではあるが、強力に減量やリサイクルを推進していることなど類似の対策のベクトルにある。2021 年にパリ協定に復帰した米国は、2030 年までに GHG 排出量を 50-52% 削減（2005 年比）する目標を掲げるとともに 2050 年 GHG 排出実質ゼロの

4) V. Bisinella, J. Nedenskov, C. Riber, T. Hulgaard, T. H. Christensen: Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage, Waste Management and Research, Online available, <https://doi.org/10.1177/0734242X211048125>

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

6) T. H. Christensen, V. Bisinella: Climate change impacts of introducing carbon capture and utilization (CCU) in waste incineration, Waste Management, Vol. 126, pp. 754-770 (2021)

7) Climate Change Committee: The Sixth Carbon Budget. The UK's path to Net Zero, <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/>（閲覧日：2021-12-30）（2020）

長期戦略を策定した⁸⁾。埋立回避や、埋立地あるいは有機性廃棄物由来のメタン回収・燃焼、廃水処理のメタン、亜酸化窒素削減、畜産廃棄物由来の亜酸化窒素対策などを挙げており、メタンをはじめとする二酸化炭素以外の温室効果ガス削減の重要性が指摘されている。

3. 資源循環による温室効果ガス発生回避への寄与 資源循環、循環経済の推進の効果

日本の中長期シナリオは、廃棄物分野における温室効果ガスの直接排出インベントリへの対策を中心とした戦略である。その一方、資源循環や循環経済の推進などにより、①原材料など資源消費の適正化、②生産過程の効率性向上、③消費過程での効率性向上といった側面からライフサイクル全体における温室効果ガスの低減に貢献することができる。すでに実現できている資源循環で、その循環がなされていない場合に比べて相当の減量が図られているはずである。日本の温室効果ガスインベントリをベースに分析した結果では、日本全体における全排出量のうち資源循環が貢献できる余地がある割合としては約36%という試算が報告されている⁹⁾。また、グローバルにみたときの循環経済による脱炭素効果も報告されている。Circular Economyの試算として報告されたCircularity Gap Reportでは、パリ協定参加国の国別削減目標を達成した場合でも、年間の世界のGHG排出量は約560億t-CO₂eq程度までの抑制にとどまるが、同機関が提唱する21の循環経済促進策（住宅、栄養、移動、通信、消費、医療、サービスの7分野における物質循環を中心とした対策）を適用することで、世界規模での削減量を試算している¹⁰⁾。7分野においては、具体的で大きな効果が期待できる循環経済的な対策として、資源効率的な住宅や建設、住宅の長寿命化、過剰な食品消費の削減、移動車両の循環利用、消費材の循環利用、効果

的なICT利用によるサービスなどが取り上げられている。こうした効果的な循環経済促進策によって、約330億t-CO₂eqまで低減可能と試算されている¹⁰⁾。すなわち、約230億t-CO₂eqの削減（2019年GHG排出量の39%に相当）が可能と試算されており、循環経済の効果の大きさがうかがえる。

都市レベルのGHG削減効果の試算

このように資源循環や循環経済による脱炭素化貢献は小さくないという試算が各方面でなされている。都市レベルにおいても、廃棄物処理過程のエネルギー回収のみならず、リサイクルや炭素固定によるGHG排出の回避削減が期待できる研究報告がなされている。アメリカのボストンでは、2019年にZero Waste計画を策定するなかで、そのGHG削減効果を試算している¹¹⁾。表2にそのGHG排出量推定結果と各工程のGHG排出量と回避量を示した。GHGは廃棄物の焼却や埋立によって排出される「直接排出」と「回避削減」に分けて計上している。「回避削減」には、「エネルギー回収」、リサイクルによる「物質回収」、そして紙リサイクルによる木材や堆肥化利用の土壌の炭素ストックである「炭素貯留」に分類し計上している。

表2では、2050年の将来シナリオとして、2017年の延長線上にあるベースラインシナリオと、埋立や焼却から90%を物質回収等に転換するZero Wasteシナリオで推定している。この物質転換等への転換率（Diversion rate, 潜在的廃棄物発生量に対するリデュース量とリサイクル量合計の割合）は、現状（2017年）の25%から、とくに紙製品や食品廃棄物のリサイクルを進めることで2030年までに80%、2040年には90%まで転換が進み、その後2050年まで維持されると仮定している。試算結果をみると、まず直接排出は焼却過程からの排出が多く、2017年で39万トンCO₂の直接排出、エネルギー回収による17万トンCO₂の回避削減となってい

8) The United States Department of State and the United States Executive Office of the President: The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050, <https://unfccc.int/documents/308100> (閲覧日: 2021-12-30) (2021)

9) 中央環境審議会循環型社会部会: 第四次循環型社会形成推進基本計画の進捗状況の第2回点検結果(循環経済工程表) 2050年の循環型社会に向けて, 2022年5月23日

10) Circular Economy: The Circularity Gap Report 2021, <https://www.circularity-gap.world/2021> (閲覧日: 2021-12-30) (2021)

11) J. R. Castigliero, A. Pollack, C. J. Cleveland, M. J. Walsh: Evaluating emissions reductions from zero waste strategies under dynamic conditions: A case study from Boston, Waste Management, Vol. 126, pp. 170-179 (2021)

表2 ポストンの Zero Waste 計画における温室効果ガスの排出推定量（直接排出量と回避削減量⁹⁾）
 -Castriglieraら（2021）、単位：千トンCO₂

		直接排出量	削減回避量	削減回避量の内訳		
				エネルギー回収	マテリアル回収	炭素貯留
2017年	焼却	387.4	228.8	174.5	54.3	—
	リサイクル	—	420.7	—	116.4	304.3
	コンポスト	5.4	20.7	—	—	20.7
	合計	392.8	670.2	174.5	170.7	324.9
2050年 ベースライン シナリオ	焼却	440.8	107.8	46.1	61.7	—
	リサイクル	—	476.6	—	131.6	345
	コンポスト	6.1	23.5	—	—	23.5
	合計	446.9	608	46.1	193.3	386.5
2050年 Zero Waste シナリオ	焼却	63.4	23.4	6.1	17.3	—
	リサイクル	—	1206.2	—	328.8	877.4
	コンポスト	18.8	93.6	—	—	93.6
	合計	82.2	1323.3	6.1	346.1	971

る。2050年ベースラインシナリオでの焼却の直接排出は44万トンCO₂と2017年と同レベルの排出であるが、エネルギー回収での回避削減は4.6万トンCO₂と大幅に少なくなっている。これは電源構成の脱炭素化を反映して、エネルギー回収の発電代替効果が小さくなっていることを示している。そして、焼却対象量が大幅に減るZero Wasteシナリオでは、焼却からの直接排出はわずか6.3万トンCO₂となり、エネルギー回収による回避削減量も0.6万トンCO₂と大幅に減る見通しとなっている。コンポスト処理からは、直接排出量を大きく上回る炭素貯留による回避削減が期待できる。そして、リサイクルによるGHG削減効果が大きく、2017年時点でも焼却などによる直接排出量39万トンCO₂を上回る42万トンCO₂のリサイクル回避削減量となっている。焼却を中心とする廃棄物処理工程全体の排出量を上回るGHG削減量効果をマテリアル回収によるリサイクルから期待できるのである。そして、埋立や焼却から物質回収への転換を推進する2050年のZero Wasteシナリオでは、8.2万トンCO₂の直接排出に対し、さまざまな物質回収転換により132万トンCO₂と大幅な回避削減となっている。都市

レベルの計画においても、リサイクルや炭素固定による大きなGHG削減を期待できることが示されている。