

## プラスチックリサイクル化学の理解を深めるための有機化学講座- II

### —リサイクル化学技術を社会で正しくつかう—

奥 彬

#### 2.1 緒言

2017年のG7イタリアサミットは「保護主義との闘い」を宣言に盛り込み、日欧の経済政策が自由市場を維持する決意を示すことでパリ協定を離脱した米国政権に抗議しました。とはいえこの宣言を資源環境の問題点から分析してみると、世界の政治家は未だに近視眼的展望しか語っておらず、近い将来、経済活動の加速的拡大によって受ける環境変動と資源枯渇の災難には触れていません。

それと並行して、国際政治とは距離を置く国連(UN)は、持続可能な地球社会の形成(sustainable development)を目指して2030年を期限とするsustainable development goals 行動目標(SDGsと略記)を2015年に打ち上げました。しかし、持続可能な社会(sustainable society、SSと略記)の目標は経済活動の拡大成長と同期しているため、その開発的発展(development)にはおのずと限界があります。なぜかというところ、SDGsには経済活動の総量限界も持続可能な発展速度も、地球の物理的有限量の内数として示されていないからです。SDGsは掲げたleave no one behindのスローガンとともに、経済活動が有限の壁 limitation に囲まれていることを強く訴えるべきです。もし2030年までは大丈夫と思っているのであれば、そのモラトリアム感覚が危険です。

地球の物理量すべては有限ですから人間の欲望膨張が無限のままですむはずがありません。この視点から見ると、上述したG7サミット宣言には経済的利権を競うエゴが覗き見られ、UNのSDGsにもその気配がないわけではありません。

ところで、皆さんはSDGsが掲げる17項目の内容を読んだことがありますか？そこには地球が有限であることへの憂慮がかなり薄いと筆者は感じました。あるいは、資源枯渇によって起こる環境破壊、資源紛争、人心消耗への対策をSDGs達成後の課題とでも考えているのでしょうか、リサイクル技術研究者の最大関心事である資源再生産性の向上やリサイクルがSDGsへ貢献できるという文言が見られないのです。すなわち、リサイクル社会が将来のSS社会の産業経済と人々のライフスタイル改革に貢献することが述べられていないことに非力感を覚えます。

**保護主義と自由市場主義：** この二つの主義が偏ると、SSを目指す気候変動防止やプラスチックリサイクルなどの資源有効利用の活動にとって障害になりかねません。そもそも社会と経済は卵と鶏の関係にありますからSSを目指す活動にはこの二つの協調と調和が欠かせません。ところが現在の地球規模問題の多くは、そのうちの経済活動だけを突出させて差別と欲望を量的に満たそうとすることから起きているのです。

そもそも地球環境は地域ごとに気候、土壌、文化、歴史が異なり、固有のライフスタイルを生んできました。ところが非保護主義はこの固有性を生かさないでコストパフォーマンス(cost performance, CPと略記)つまり投入した資本の効率的回収という基準で世界を地なら

しするのです。ここでの資本とは金銭のことであり人間や地球環境のことではありませんから、CP 偏重の経済活動では固有の生活スタイルを樹立している地域の生産環境は荒廃しやすくなり、CP 基準を満たす地域では過剰生産が土壌・水資源等の環境を破壊します。だから地球規模の生産物移動には fair trade メカニズムの適用が必要なのです。

**廃プラのリサイクルでも同じこと：** プラスチックの消費地は同時にその素材を必要とする化学品市場でもあり、使用済み化学材料から元の材料を再生産する当事者責任（CSR：ここでは corporate's と consumer's の二つの social responsibility）を消費地の受益者が背負うと考えなければなりません。この CSR 意識を持てばリサイクル・ネットワーク回路は形成でき、その回路の CP に国際標準との差が生じてもそれは地域個性の数値として尊重し、その差を生産者と消費者の両受益者が分担するように仕向けるのが政治の役割であり、この地域個性を生かした資源・生産物の循環回路は形成可能です。

ところが世界の化学材料市場は短期的ビジョンの CP に支配され、廃プラ取引の CSR 感覚が薄れて閉鎖型リサイクルの長期的ビジョンが形成できていません。つまり廃プラは SS における産業資源として認知されていないのです。ここに廃プラのリサイクル化学事業が成り立たなかった理由があり、廃プラが保持する素材価値を生かすリサイクル哲学が社会に広く受け入れられていない理由があります。

このように、市民には一見清潔に見える都市生活でもじつは“臭いものには蓋”をするメカニズムが動いているのです。例として家庭ごみの扱い方を見ても、自治体は使用済みプラを名目上は資源ゴミとして集めますが、じつは燃焼エネルギー回収をリサイクルと称して焼却処理しているのが現実です。つまり産業と行政は SDGs の長期展望を持たないで廃プラを視野から抹殺しているだけなのです。このように“悪貨は良貨を駆逐”して正しい資源環境意識を挫いてゆきます。

これが現実です。そこに廃プラを元の素材へ戻すのに必要な製品設計・流通と消費・リサイクル回路を一貫する思想は欠落し、同じ用途に不必要なほど多種類の素材や添加物や複合材料を使う製造者の独善が群がり、使用後にリサイクルを実践しようとする声は聞こえてきません。ですからリサイクル可能な素材への統一、添加物の削減と除去容易なものへの置換、さらに化学リサイクル回路の編成をいくら説いても、CP 偏重の産業や資源無尽蔵論が阻みます。消費社会のステークホルダーがわがままを捨て全員でプラスチックの物質生涯を設計し直さないと、SDGs は絵に描いた餅のままです。

懐の深い次世代責任を持った産業消費社会が日本に生まれるチャンスはありました。環境基本法を成立させた頃の熱意です。しかし産業行政の支援が育ちませんでした。プラスチックリサイクル化学への取り組みも化学リサイクルの容易な PET から始まり、大型廃プラ資源の PE、PP へと広がる気配がありましたがその後は遅々として進んでいません。産業行政が SDGs へ吹く風を起こせないのはさびしい限りです。

## 2.2 2030 年ゴールの国連 SDGs アジェンダとプラスチック

加速する世界経済がかえって国々に貧富の差を拡大させ地球環境破壊と国際紛争の原因になっていることを憂慮して、UN は世界に訴えるのはいまが最後のチャンスであると 17 項

目の SDGs 目標を公表したのでした (2.1 参照)。それが 2000 年の GC (global compact) に続く 2015 年の SDGs です (図 2.1)。



図 2.1 国連が 2030 年を目標とする SDGs アジェンダ 17 項目

紛争と経済覇権争いに明け暮れる世界に SDGs 目標がどこまで達成できるのか。日本では外務、環境、経産省を中心に全政府機関で本気で取り組まないとこの壁は越えられません。なにしろ地球の有限性の壁は、たとえ書き換えられることがあっても間近に迫っているのは事実であり、争奪戦はすでに始まっているのですから。この社会でいまや金属と同等以上の必須材料になったプラスチックは、社会のライフスタイルを決めるまでに消費量を増大させています。ところがそのリサイクルの難度は金属に比べて本質的に異なるのです。だから日本をはじめとする UN 加盟国は、廃プラスチック問題を SDGs の添え物としない覚悟で取り組む必要があります。

### 2.3 化学物質のリサイクル回路は社会の大義<sup>[1]</sup>

**リサイクルのコスト (CP) をプラスチック製品に転化する：** プラスチックは 1 種または複数の高分子素材から作られた有機材料であり、多くは添加物質と混合、積層、着色されています。それを化学リサイクルで化学原料へ戻して元と同じ市場需要に応えるためには、添加物と汚染を除く必要があります。よって添加物には除去しやすいものが望まれます。でもこれまでの製造・加工業の関心は 1 次製品の性能がすべて。添加物がどれだけリサイクルに負荷を与えているのか無関心でした。このままならリサイクルの CP 負荷を 1 次製品価格へ転嫁しなければ不公平です。

**リサイクルと高分子合成反応：** 高分子合成は有機合成と同様にこれまで復路を持たない一方通行の仕事でした。小さな分子や原子から反応を大工道具に触媒を職人に使って、狙ったとおりの構造と機能を持つ高分子化合物を組み立てていました。でも、高分子から低分子原料へ化学反応を使って戻す高分子結合の切断反応には無関心でした。なぜなら高分子の製

造だけでビジネスが成り立ってきたからです。ところが作るだけの一方通行の袋小路に奥が見えてきました。

ほとんどのプラスチックは石油資源から作られ、その石油は主要エネルギー資源として供給が国策で保障されています。それとは対照的に、同じくプラスチックの原料である廃プラは供給が保障されていません。ですから廃プラと石油から製造した同じプラスチックを同じ組板の上で値踏みするのは不条理といえます。この不条理はリサイクルを忌避したい産業社会の CSR 欠如が生み出したものであり、同等以上の能力を持つ人間を出自で差別する社会構造と同じです。

グリーンケミストリーで馴染みの原子利用効率とは、消費する原料が目的生成物の中にどれだけ無駄なく取り込まれるかを反応式から割り出す数字です。したがって、廃プラの原子利用効率はリサイクルなしで 0%、リサイクル一回で 100%、二回で 200%まで増殖します。つまりプラスチックは量論的にリサイクルするのが正しいのです。それと同時に、プラスチックモノマーを化学資源からつくる時、注入した物質エネルギーと製造エネルギーとが廃プラに蓄えられていることを忘れてはいけません。このエネルギーは廃プラを燃焼処理すると失われて無駄になることを関係者は知っています(図 2.2、前号図 1 と同じ)。それを知りながら産業と自治体はリサイクル化学に背を向けるのですから浅慮短観と言わざるを得ません。この CSR を欠く産業界に SDGs 達成を期待してよいのでしょうか。

**プラスチック資源としての石油と廃プラの比較：** プラスチックの製造に石油または植物資源を使うか、それとも廃プラを使うか、その有利さを消費するエネルギーと材料物質で比較するため図 2.2 を再掲します<sup>[2,3]</sup>。

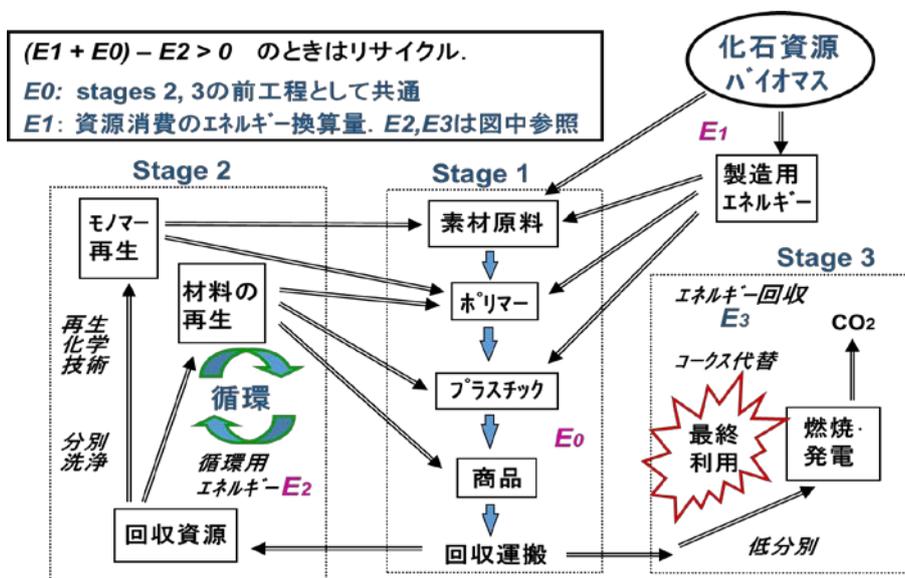


図 2.2 リサイクル vs. 石油からの 1 次製造。エネルギーの比較

この図を見ながら廃プラの化学リサイクルと燃料化を資源負荷の面で概略比較してみましょう。はじめに、プラスチックの製造に原料物質用と製造エネルギー用の石油 (E1) が必

要です。廃プラの回収と輸送のエネルギー(Stage 1) ( $E_0$ ) は、発電燃料用途(Stage 3)とリサイクル用途(Stage 2)でほぼ同じですがそのあとが違います。Stage 2 のポリマー再生用エネルギー ( $E_2$ ) が  $E_1$  よりも小さければリサイクルは有利となり、 $E_2$  と  $E_1$  が同じでも原料分が節約できます。さらに  $E_1 - E_3 > 0$  なら当然リサイクルのほうが有利となり、廃プラのほとんどはこの要件を満たしています。対照的に Stage 3 では、発電から得られるエネルギー ( $E_3$ ) の低さだけでなく、廃プラが保有している  $E_1$  と材料物性が利用されずに失われてしまいます。このように廃プラは材料およびプラスチック原料としてリサイクルされつくされたあとで燃料に最終利用すべきことが図示されています。

しかし産業界は、このリサイクル工程(とくに Stage 2)は理屈であり、産業と市場の現状を踏まえていないと批判し、それに加えて“集められた廃プラは複雑すぎる”と責任を回避します。いったいだれがこの複雑さのタネを播いてきたのですか。複雑な組成を持つ原油には優れたリファイナー設備を作った頭脳集団が、廁を持たない台所だけの社会を恣意的につくってきたのです。裏の休耕地を耕して食糧生産するのを忘れ、大隅教授がノーベル賞を受賞されても社会にオートファジー回路が必須なことをまだわかっていません。

消費者は、汎用プラスチックの受益面すべてを供給者から提供される立場にあります。同様に廃プラ起因の環境・資源負荷も供給側の仕掛けに依存しますから、産業責任は重いのです。わがままを乗り越えて積み残した改革に取り組めるはずです。具体的には、リサイクルの円滑な推進のために、自由奔放な材料設計をやめて素材を統一し、添加物の削減と代替を行い、製品差別化だけの不要な性能賦与とデザインをせず、回収とリサイクルを管理できるプラスチックの総量管理責任を導入すること(2.4 に後述)、などが挙げられます。リサイクル困難な機能性材料にはリサイクル回路を妨げないように機能相応のコスト負担を義務化し、それと併せて動脈・静脈産業を融合すれば問題は緩和できます<sup>[3]</sup>。

## 2.4 プラスチックの生産と消費をリサイクルで管理する

環境に有害な化学物質は PRTR 法 (pollutant release and transfer register) が製造から廃棄まで移動を含めて量的に記録管理しています。ところが、環境毒性がないとされるプラスチックにはどれだけ大量に製造されようと量的管理義務が課されていません。つまり、生産と廃棄量が一定の限界を超え、“量の多さ”に起因する“環境・社会毒性”が地球に拡散し、近い未来の資源枯渇が見通せても、法的規制がないのです。だから野放図な生産と廃棄、焼却処理が行われているのです。私たちが空気も水も管理される世の中を作ってしまったのに、プラスチックはこのままでよいのですか？

筆者は化学物質のプラスチックも量的に管理記録されるべきであると提起しています<sup>[4]</sup>。その管理方法として例えば次のようなものが考えられます。

(1) **PR3 法**：正しいリサイクルの普及効果は、1. 有機資源の保全、2. 有機資源の増殖、3. 化学物質の管理、と同等であり、4. 地球環境の正しい保持、5. 持続可能な生活スタイルの育成、6. 捨てずに拾う行動、を育てます。すなわち、プラスチックの大量消費が引き起こす社会毒性を解毒するためには、PRTR 法と同様にプラスチックの製造から回収と再生循環・最終始末までの量的管理 PR3 (plastic recycle rate and register)を産業責任で行う法令です。

(2) **AILS 評価**： いかなる法令であれ、生産・消費の節度ある量的膨張を制御できてはじめて持続可能な社会に近づくことができます。そこでのリサイクル促進は、良義の資源保護の名を借りた生産・消費社会の体質改革であり、量から質への改革であり、成果を社会の皆で共有する挑戦といえます。同時にモノとエネルギーに集中してきた供給スタイルと消費スタイルの二つの歯車を同調させて改革するのです。そこには LCA (life cycle assessment) とは違う未来展望軸を持った LSA (life style assessment) あるいは AILS (assessment of impact on life style) のような評価尺度が必要であると筆者は提唱してきました<sup>[4]</sup>。たとえば、プラスチックの物質生涯を通して製品設計・製造からリサイクル再生利用までが消費生活スタイルに与える効果を、資源・環境負荷と SDGs を合わせて評価するのです。ここでは a) 生産者理念と生産物の使い方との整合性、b) 生産物消費が地球有限量へ与える負荷への軽減効果、c) 生産物の必要性と量的管理、d) 材料寿命と製品寿命の一致度、e) リサイクルシステムの整備と社会支援体制、などが評価対象になります。

## 2.5 プラスチックリサイクルは社会へ資源を蓄積<sup>[4]</sup>

シェール系、海底系などの新資源開発が進んでも、地球資源としての採掘可能埋蔵量は減り続けて大気中 CO<sub>2</sub> は増加します。地球の生誕以来、数十億年かけて大気中の高濃度 CO<sub>2</sub> が化石資源などの形で地下封入され、代って酸素が産出した環境下に人類が出現できたことを人々はどれだけ認識しているのでしょうか。

人類は有機資源の燃焼からエネルギーを得る術を知り、つぎにエネルギー源を植物から化石資源に代えて人口を増やし、CO<sub>2</sub> 排出を急増させ、それによる気候変動がもう元には戻せない危機的段階まで進んでいると 2013 年の IPCC 報告は警告しています。すなわち大気は太古へ戻りはじめた…自業自得でしょう。

たとえ CO<sub>2</sub> の増大に気候変動以外の要因が関わっていても、たとえエネルギーが再生可能なものへ置き換わっても、エネルギー消費のあるところ必ず人間の欲望と地球資源の消費があります。なかでもプラスチックの生産には当分のあいだ化石資源が欠かせません。さらに再生可能な植物資源の利用を叫んでも、それに必要な時間、生態系、農産・工業エネルギーは有限であり、いまのままで世界が求める膨大な資源需要は到底賄えません。プラスチックの生産と物量管理を改革しても、脱炭素社会を実現させても地球は瘠せてゆきますから、SDGs 推進に貢献できるリサイクルのありかたも深く考えてみる必要があります。負の変化を実感してからでは遅いのです。肝心なのは脱炭素社会シフトよりも資源を大切に、作りすぎない、使いすぎない、捨てない、地球上を無益に動き回らない、争わないこと……。これらを実践することで気候変動が防止でき、資源を延命でき、世界に公平でコンパクトな生活スタイルを広めて SDGs に近づき……。そうしながらも有限な地球の枠内で人々はいのちを謳歌する。そう、好むと好まざるとにかかわらずその時代が始まったのだと思います。

**動脈と静脈の融合した産業社会が資源を蓄積できる**： リサイクルの本髄は“エネルギーを物質に変えて蓄積できること”と“物質やエネルギーを同じ用途に繰り返し利用できること”にあります。しかし日本の産業行政は“リサイクルとは国境なき協働作業”であると恣

意に解釈して貴重な廃プラを輸出し、国内ではゴミ同然に焼却処理して“エネルギーリサイクル”とうそぶき、社会的責任（CSR）を放棄して石油からの1次プラスチックの製造だけが続いています。日本は石油輸入国なのになぜ廃プラの閉鎖型リサイクル回路を形成しないのか、きっと皆が取り組むべきSDGsと次世代責任とは何かを理解していないのでしょうか。

この無責任な感覚はどこから生まれたのか、その主因の一つはプラスチックの物質循環における“動脈産業と静脈産業の分業”にあると筆者は指摘してきました<sup>14)</sup>。血液循環系に例えるなら、動脈は毛細血管網を介して静脈とつながり血流を心臓へ戻す仕組みを持っていますが、プラスチックの社会循環系では、毛細血管網相当の消費社会はかろうじて動脈系とは別の神経系を通して静脈とつながっています。つまり、いまの資本主義社会の心臓である産業は、送り出した動脈血相当の生産物を循環回路の後半で静脈血として心臓へ戻すしくみを持っていない重度障害児なのです。その結果、消費社会の出口で廃プラの流れが滞り、うっ血し、多くの環境社会問題を発症しています。このように、一体であるべき循環系の動脈と静脈を切り離して経営すればどうなるかその結果はわかりきったこと。燃焼処理型の腎透析が登場し、自治体は一安心できてその陰で地球環境と社会は蝕まれ、やがて全身から出血発症します。その時代をはやく終焉させて“産業の動脈と静脈が表裏一体化”した産業社会をつくらないとたいへんです。

**廃プラスチックは全て汎用化学原料へリサイクル：** 長くて深い展望を持たないまま持続可能な社会への行動に参加するのは危険でもあります。とくに商業目的の動きには注意が欠かせません。それは、これまでの社会発展が①エネルギー、②物質生産、③消費と廃棄、の三つに依存して過度の利益追求を許してきた片道旅行だったからです。それに加えて経済至上主義を生み出し、物質的欲望の充足を幸福と呼ばせ、地球に量的限界があることを知っても性癖を改めないからです。

江戸時代にはすでに物財を大切にする儉約・節約の思想が育ち、貧困であったとはいえリサイクルの概念や石田梅岩のような商業倫理も生まれました。当時は地球の有限性を問題にするほど経済規模は大きくなくCPを追う時代でもありませんでした。ところが停滞のない頭脳と欲望は、科学技術と産業に姿を変えて膨らみ、環境と資源の有限枠を越えて地球から懲らしめを受けるところまできました。古代バビロニアの人々は膨張した都市国家を捨てることができましたが、いまの私たちに地球を捨てることは不可能です。それでも人間は科学技術と経済マジックを使ってこの枠を乗り越えようとしているようです。科学技術の展開もJAXA 宇宙開発も一定の枠内にとどめないと地球は遅かれ早かれ人間の劣性と欲望に飲み込まれるでしょう。

## 2.6 再生可能資源も石油資源もプラスチックになれば同じ

ここまで、産業社会のわがままがいかにプラスチックの循環を妨げ、肥大化した経済社会の知性は生態系と代謝循環系に比べると幼児期に留まったままであることを述べてきました。もう一つの例が植物由来プラスチック（bio-based plastic, BBP と略記）を売り込む行政と産業界に見られます。

プラスチックの1次資源に石油か植物かの違いはあっても社会の用途はほとんど同じです。

さらに出自の違いは製造技術が克服することです。SDGs が問題にするのは石油が有限でその消費は大気中 CO<sub>2</sub>を増加させるが、植物資源なら再生可能で CO<sub>2</sub>を増加させない(?) ことにあるようです。BBP は再生可能資源から作られるという重要性に異論はありませんが、生産製造エネルギーはむしろ植物系のほうに大きく CO<sub>2</sub>を増加させます。それは植物の育成に土地、年月、土壌と水、膨大な耕作エネルギーを必要とするからです(図 2.3)<sup>[1]</sup>。しかし産業側は、行政の手まで借りて、使用後に生分解できることをキャッチフレーズに販売促進を図り、供給の有限性、農耕エネルギー、捨てる行為の劣性助長などを無視した文言を流布しています。BBP は“環境にやさしい”、“ポイ捨てしても土壌が分解する”、“CO<sub>2</sub>を排出しない”など、プラスチック本来の目的から大きく外れて人間の怠け心を助長する言葉を流布してきました。人々は騙されて PE や PP まで分別せずにポイ捨てする始末です。だからリサイクルは不可能となり廃プラは焼却されるのです。このままでは SDGs に取り組む努力は水の泡と消えてしまう・・・だから筆者は黙しておれません。

ポリ乳酸 (PLLA または PLA と略記) は再生可能な植物からつくる BBP であり、エネルギーと人知を注入した工業製品です。これを使用後は PET ボトルと同じように正しく分別して化学リサイクルすれば再び同じプラスチックが製造できます。しかし考えを誤ると人心を欺き SDGs 目標から反れてしまいます。図 2.3 は PLA を化学リサイクルする理由がわかるように描かれています<sup>[2]</sup>。

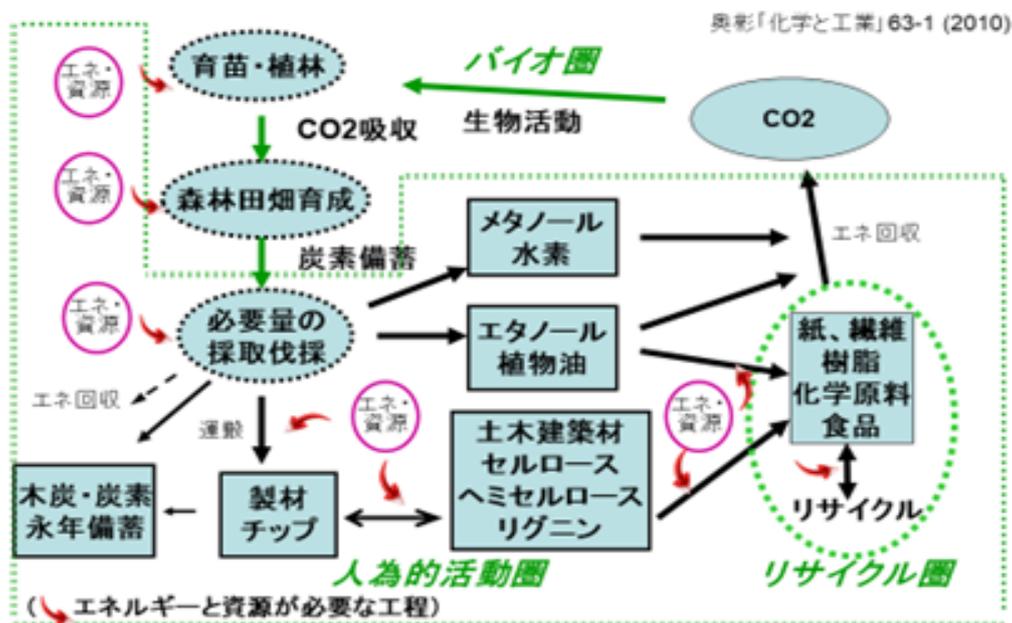


図 2.3 BBP の化学リサイクルはエネルギーと資源を大きく節約して社会に資源とエネルギーを蓄積できる

**量の多さ：** どのような科学技術も、その基礎となる科学、技術開発、生産と消費、資源と環境負荷、SDGs、正しいライフスタイルと調和させることが大切ですが容易ではありません。その理由は産業経済が陽の当たる面しか見ようとしないからです。社会の裏面にはこれまで産業と行政の都合で切り捨てられてきた負荷が蓄積していますから、そこに目を向けな

いと SDGs の課題は見えてきません。その最たるものが環境・資源負荷の主因である“量の多さ”です<sup>[4]</sup>。

作りすぎない、使いすぎない、廃棄しすぎない、と言うと必ず「言うのは容易だが」、「それで経済と景気は保てるの？」とお決まりの反論が噴出し、リサイクル活動や SDGs へのチャレンジを封じ込めます。“景気とはなにか”の議論はさておき、プラスチックが SDGs の社会づくりに貢献するには、植物系と石油系プラスチックが共存できるリサイクル系を産業社会内で編成し、それと同時に“量の多さ”から生じる問題の緩和に取り組まなければなりません。それは根気の要る大変な事業です。

**廃プラは国内の有機資源：** 本来、化学リサイクルとは石油系か植物系かに関係なくプラスチックから元の化学原料を再生して化学市場へ戻すことです。しかし国の行政はプラスチックの 1 次資源となる石油の輸入保障しながら、それより高付加価値の資源である廃プラを国産資源として位置付けず供給を保障していません。その結果、国費で育てたリサイクル化学産業が入札競争に敗れて資源を断たれ閉業せざるを得ませんでした。

優れた技術と目標があっても政策が貧しければ技術と国内資源は護れません。リサイクル化学を護れない主な理由は使用済みプラスチックを良質資源として生かす思想が貧弱だからです。この思想の欠落が 1 次プラスチックの設計段階で使用後のことを考えない産業体質とつながり、その材料生涯にオートファジー回路を組み込むことができません。その結果、廃プラは輸出され、あるいは強引にリサイクルの名をつけて火力発電燃料や鉄鉱石還元剤のような低質の終末利用に供され、長寿のはずの材料生涯を生かしきっていません。石油とナフサはそのぶん無駄に輸入されているのです。

## 技術論 II

### 2.7 酸・アルカリ分解

**2.7.1 一般論：** 第 1 章・技術論 I で解説した加溶媒分解反応 (solvolysis) とは、酸またはアルカリ触媒が溶媒分子またはポリマー分子を活性化したあと、活性化された溶媒分子またはポリマー分子が活性化されていないポリマー分子または溶媒を攻撃することでポリマー鎖が切断される反応、と説明しました。酸・アルカリ分解の機構もこれと似ています。この反応では溶媒分子は原則として反応試薬ではなく酸またはアルカリ試薬を溶解して活性化する働きをします。ここでの酸試薬はふつうプロトン ( $H^+$ ) またはルイス酸であり、アルカリ試薬はふつう水酸化物イオン ( $OH^-$ ) またはルイス塩基です。これらの反応試薬が化学量論的にポリマー分子を切断して試薬は生成物中に取り込まれます。その結果、酸分解生成物は酸性を、アルカリ分解生成物はアルカリ性を示すことが多く、分解後の中和操作が必要になることがあります。

**2.7.2 ポリエステルの酸・アルカリ分解：** 単量体エステルの酸分解とアルカリ分解を図 2.4 に模式を用いて示します。ポリエステルの酸・アルカリ分解型リサイクルにはこれを当てはめることができます。該当例として、エチレングリコール (EG) 中またはポリ (オキ

シエチレン)中に溶解させた水酸化ナトリウムを用いてPETをテレフタル酸ジナトリウムとEGへ分解する技術があります<sup>[5]</sup>。架橋ポリエステル系熱硬化樹脂をベンジルアルコール中でリン酸カリウムを用いて解重合し、複合材のガラス繊維を回収する反応はアルカリ分解ではなく加溶媒分解です<sup>[6]</sup>。



図 2.4 エステル結合の酸・アルカリ分解

**2.7.3 ポリシロキサン(シリコーン)のアルカリ分解：** 耐候性、撥水性、電気絶縁性に優れたシリコーン樹脂は屋外設備や電気事業に広く用いられているプラスチックです。そのポリマー分子鎖はケイ素-酸素結合(Si-O)で構成され、この結合は加熱には強い反面、塩基とは容易に反応して切断されるので化学リサイクルが容易です。そのアルカリ分解反応では、図 2.5(a)に示すようにもとのポリマー原料と同じ液体モノマーの環状シロキサン混合物が80%の収率で得られ、架橋された部分は除去されて充填剤のシリカゲルも定量的に回収されます<sup>[7]</sup>。この結果は、分別回収をしっかり行えば理想的な化学リサイクル系が編成できることを語っています。とはいえ筆者がこの研究を行っていた頃の産業界は、化学リサイクルを行わずに廃シリコーン樹脂を燃焼処分するか、あるいは熱分解で得られたシリコーンオイルを輸出していました。

このアルカリ分解反応の反応機構は、ケイ素原子が共有結合の4価に加えてルイス塩基を受け入

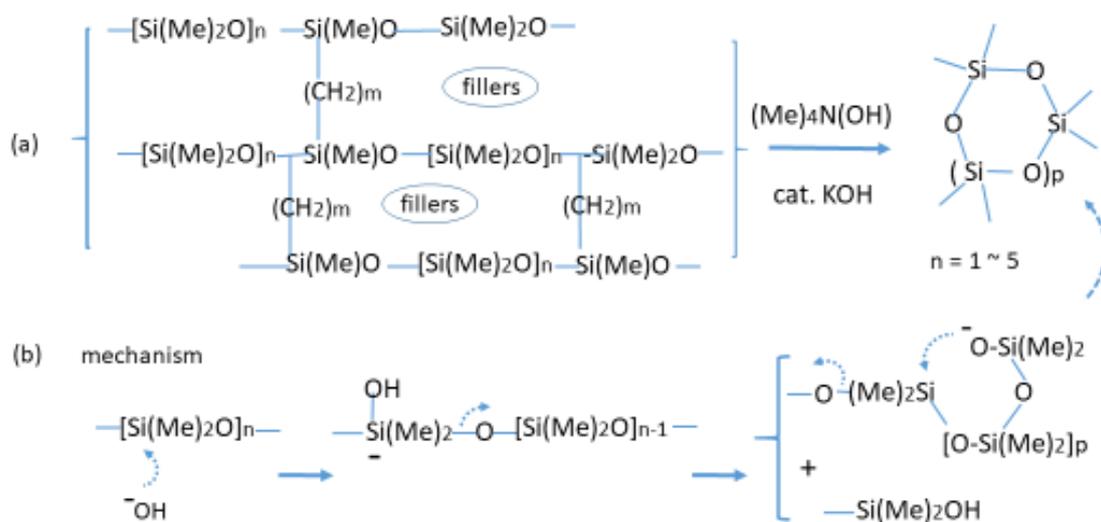


図 2.5 シリコーン(ポリシロキサン)樹脂のアルカリ分解と環状モノマーの生成

## 2.8 ポリオレフィンの熱分解・接触的分解ならびに生成物のリサイクル化学<sup>[8]</sup>

プラスチック素材であるポリマーの主鎖構造は主として炭素-炭素結合 (C-C) からできています。その他に炭素-酸素 (C-O)、炭素-窒素結合 (C-N)、炭素をケイ素 (Si) で置き換えたもの (Si-O, Si-C) があり、どれも主要な汎用プラスチックのポリマー主鎖を構成できるものです。なかでも PE, PP, PS, PVC, PVA, PMA, PMMA (いずれも略名)などは C=C 二重結合の連鎖成長重合反応 (1章 1.4.1.) で作られる C-C を主鎖とするビニル系ポリマーとして分類されます。その特徴は、高分子鎖の分極が低いのでイオンの切断反応が困難となり化学的に安定なことです。

したがって主鎖を切断するには一般に非イオンの手法が選ばれます。熱化学的な分解反応あるいは触媒 (金属酸化物を含んだ固体触媒が主なもので酸性点のあるものと無いものがある) を用いる接触的分解反応がそれです。熱的分解反応でポリマー主鎖のどこが切れやすいかは、C-H、C-C 共有結合の解離エネルギー (表 2.1 に一部を示す) からおよそ推定できます。理想的には、C-C 結合の位置選択的な開裂が主鎖を切断して生じる二つの炭素ラジカルが連鎖的な解重合を逐次的に起こすか、または C-H 結合の開裂で生じる炭素ラジカルが主鎖の切断を誘起して解重合へ進むことが期待されます。

しかし一般に切断の位置選択性は低く、これは高温を必要とする反応工学的手法の避けられない特徴です。すなわち、一般に高温の固体や触媒上でポリマー分子鎖が多点で接触すること、および生じたラジカルやカチオン活性種が連鎖移動反応を起こしやすいために、これらの副反応が非逐次的に進行して、モノマー単位の分子が主鎖から規則正しく逐次的に脱離しないからです。

表 2.1 化学結合の解離エネルギー

| 結合の種類                                | kcal/mol | ref | 結合の種類                            | kcal/mol         | ref |
|--------------------------------------|----------|-----|----------------------------------|------------------|-----|
| [C-H]結合                              | 105~85   |     | [C-C]結合                          | 84~90            | 3)  |
| CH <sub>3</sub> -H                   | 105      | 3)  | CH <sub>3</sub> -CH <sub>3</sub> | 88               | 3)  |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> -H     | 100      | 3)  | CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub> | 146 (σ 86, π 60) | 1)  |
| (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CH-H | 96       | 3)  | [C-O]結合                          | 85~91            | 2)  |
| CH <sub>2</sub> =CH-H                | 104      | 3)  | [C-N]結合                          | 69~75            | 2)  |
| PhCH <sub>2</sub> -H                 | 85       | 3)  |                                  |                  |     |
| Acetyl-H                             | 92       | 3)  |                                  |                  |     |

- 1) S. H. Pine, *Organic Chemistry*, 5<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill (1987). 2) M. Jones, Jr., *Organic Chemistry*, Norton (1997). 3) Hart, Craine, Hart, *Organic Chemistry, A Short Course*, 10<sup>th</sup> ed. Houghton-Mifflin (1999).

例外もあります。C-C または C-H 結合の切断で生成する中間体炭素ラジカルが隣接する置換基またはヘテロ原子と共鳴できるときは、その共鳴安定化が寄与する切断が有利になります。例としてポリスチレン (PS)、ポリメタクリル酸メチル (PMMA) のモノマー分解があり、加熱によって容易にモノマーへ解重合します。

しかし、これらの例外を除けば、主要な汎用プラスチックである PE, PP はモノマー分解を促進する置換基を持たないので、熱分解・接触分解法によるモノマー回収率は低く、モノマー以外に気体、液体の炭化水素混合物が生じやすくなります。これらの技術は廃プラ油化技術と呼ばれるリサイクル化学技術であり、廃プラは燃やしてしまえと唱える焼却関連産業や一部の大学研究者からこれまで冷ややかな視線を受けながら、また分別回収に必要な産業協力条件が悪いなかで、技術開発と実用化が進められています。そこには石油クラッキングの廃触媒を再利用する高ナフサ成分への油化など燃料用油化から進化した技術開発があります<sup>8)</sup>。しかし繰り返しますが、この技術の原料資源となる廃プラの分別回収と大量供給がいまの産業政策下では保障されていません。安直な焼却型最終利用法でしか廃プラ量の多さを克服できない産業社会の未来が心配です。

## 2.9 植物由来ポリエステルのリサイクル化学

BBP (2.6 参照) もまた石油系プラスチックと同様に化学技術で作られる材料です。その化学リサイクルに使われる解重合反応は石油系プラと同様ですが、反応機構的に特色あるものを挙げるとすれば、ポリ乳酸 (PLLA) の熱分解で乳酸モノマーの環状エステルであるラクチドに戻すもの(図 2.6)<sup>9)</sup>や、酵素を用いたポリエステルの解重合反応があります。後者はポリマー構造に依存する基質特異性を示します。それに関連して、かつて石油系ポリエステルの PET ボトルを土壌中で分解する菌を探索するという時代がありましたが、それはリサイクルの思想から反れたごみ処理の研究でした。一方、多様な BBP 系ポリマーの中には、使用量は少ないが医療用材料として使うと生体内で易分解機能を発揮するポリエステル、ポリアミドがあり、その機能性材料としての研究開発が進んでいます。とはいえ生体の外では正しく分別回収して、大量の汎用プラスチックのリサイクル回路をみだりに攪乱しないように取り扱う責任があります。

農業用 BBP には問題があります。BBP 自体は大切なプラスチックであっても研究者・製造者から消費者に至るまでの人間世界に問題があります。先号 1 章と本章 2.6 で述べたように“プラスチックを使ったあとの回収責任”を放棄する研究開発は行うべきではありません。農林生産物はいまや工業製品の性格を帯びている時代ですから、農業用にプラスチックを使うのであれば使用後に回収し、そのリサイクル負担を受益者全体がシェアすべきです。TPP など世界経済圏の国々のなかで化学リサイクルの足並みはなかなか揃いませんから、これに皆が取り組むまでは SDGs を後ろ盾にした化学リサイクルの保障が必要です。すなわち環境と資源と農林業の負担をステークホルダー全体が引き受ける時代なのです。幸か不幸か農林業での BBP 使用は伸びず材料寿命の長い PP, PE が主流であると聞こえてきます。

代表的 BBP であるポリ乳酸 (PLLA または PLA) のリサイクル化学については西田らの研究が知られているので割愛します<sup>9)</sup>。PLLA 以外の主な BBP として炭水化物からエタノール経由で作られる PE があります。この PE は石油由来のものと同じですから使用後は分別回収しなければなりません。すなわち一歩社会に出たら BBP の肩書はかえって邪魔です。

BBP と聞いてポイ捨てるような消費社会を関係者の見識の低さが作ってきたからです。BBP は捨てるために開発されたのではないことを心すべきです。

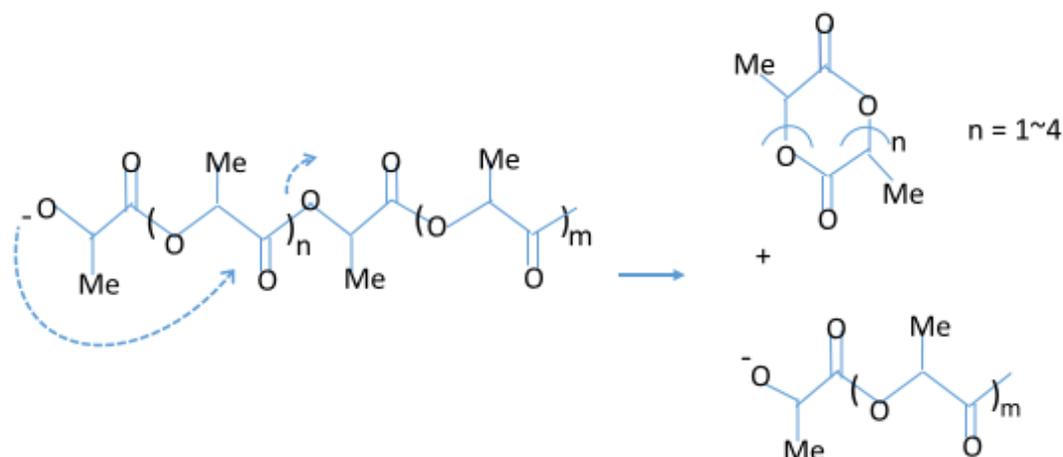


図 2.6 ポリ乳酸の熱分解反応による化学リサイクル

渦巻く人間の欲望を背景に多くの BBP が開発されてきました。とくにポリエステルの種類は多くポリアミドやポリカーボネートもあります。その多くは農林農耕物 (produce) を原料とする工業化学品からの 2 次 BBP ですが、微生物自体が作る高分子物質を使った 1 次 BBP もあります。どれも化学リサイクルは可能ですが 2.6 で取り上げた種類の多さは問題です。多種類少量生産になるほど管理と分別回収は難しく化学リサイクルは困難になり、開発製造者はリサイクルなど眼中に入れずに使用後は一廃または産廃として焼却処理するでしょう。ならばそれらの特殊機能価値に相応する環境維持コストを自身が負担して管理回収し、社会に満ちている大量の汎用プラスチックの回収リサイクル回路を攪乱するネズミにならない責任の自覚が必要です。

## 2.10 引用参考文献

- [1] a) 奥 “バイオマス・誤解と希望”、日本評論社 (2005). b) “限りある世界のものづくり—責任と感謝を心に欲望をダイエットする科学技術”、有機合成化学協会誌 **68**, 1071 (2010).
- [2] 奥 “バイオマス・資源と環境から見た現状と将来”、化学と工業 **63**, 12 (2010);
- [3] 奥 “グリーン化学製品—循環型炭素資源としてのプラスチック”、「グリーンケミストリー」3 章、講談社サイエンティフィク (2011), 同改訂版(2011).
- [4] a) 奥 “有限性のもとに無限に生きる. Up-Spiral Life のすすめ”、ACADEMIA **146**, 11-21 (2014). b) Oku, “Rekindle a true concept of the environment vs. chemical technology”, 日本化学会東北支部 70 年記念国際会議招待講演 29H (2013).
- [5] a) Oku, Hu, Yamada, “Alkali-decomposition of poly(ethylene terephthalate) in non-aqueous ethylene glycol”, *J. Appl. Polymer Science*, **63**, 595-601 (1997). b) *idem*, Yamada, Oku, “Alkali-decomposition of poly(ethylene terephthalate) in nonaqueous alcohols”, *Polymer Journal*, **29**, 708-712 (1997).

- [6] 柴田 “常圧溶解法による CFRP リサイクル技術”、プラスチックリサイクル化学研究会「CFRP のリサイクル技術の最前線」講演予稿集(東京)、pp.57-78 (2013).
- [7] a) Huang, Ikeda, Oku, “Recovery of monomers and fillers from high- temperature-vulcanized silicone rubbers. Combined effects of solvent, base and fillers”, *Polymer*, **41**, 7295-7300 (2002); b) Ikeda, Huang, Oku, “Recycling of monomers and fillers from high-temperature-vulcanized silicone rubber using tetramethylammonium hydroxide”, *Green Chemistry*, **5**, 508-511 (2003).
- [8] a) 阪田、立花、上道 “炭化水素化技術”、「プラスチックの化学再資源化技術」阪田祐作・プラスチック化学リサイクル研究会監修、pp.176-221, CMC 出版 (2005). b) 藤元 “廃プラスチック接触分解油化の技術と展望”プラスチックリサイクル化学研究会研究討論会(北九州)予稿集、pp.41-42 (2016).
- [9] 西田、白井 “植物由来プラスチックのケミカルリサイクル”、「植物由来プラスチックの高機能化とリサイクル技術」、pp.51-67, S&T 社 (2007).