

論 説

## ゼロエミッション

— サステナブルコミュニティのための物質循環プロセス —

Zero Emissions

—Material Cycle Processes for Sustainable Community—

迫田章義\*・鈴木基之\*

Akiyoshi SAKODA and Motoyuki SUZUKI

### 1. はじめに

ゼロエミッションとは、ある生産プロセスで商品価値のある製品とならなかった未利用物質を別の生産プロセスの原材料として循環利用すれば、いわゆる「廃棄物ゼロ」が実現できると国連大学が5年前に提唱した産業システムの理念・哲学で、本小特集のテーマである持続可能な発展を続けるためには必要不可欠であることには疑問を挟む余地はないようだ。しかしながら、農業等を産業基盤とする発展途上国等とは異なり、我国のように工業国としての産業構造が既に出来上がっている場合には、ゼロエミッション社会への移行は容易ではない。また、工業国におけるゼロエミッションのあり方そのものが議論されている現状において、マスコミ等で「ゼロエミッション」という言葉が一人歩きしている感もあろう。ここでは、我国におけるゼロエミッションについての筆者らの考え方と研究例を紹介する。

### 2. 工業化社会におけるゼロエミッション

#### 2.1 物質循環の必要性

我国は主に輸入された資源・エネルギーを利用して工業製品を製造し、これを輸出して得た外貨でさらに資源・エネルギーおよび食糧を輸入している。輸入された原材料の全てを商品価値のある製品に転換することは不可能であるから、このような状況では工業製品の製造量に比例して「廃棄物」の発生量が増加することになる。加えて、我国は国土面積が狭い上に、利用可能な国土面積の割合も小さい。欧米諸国では山間部や内水面などを除く国土の利用可能面積は全国土の50～60%に達するが、我国では20%程度にすぎない。すなわち、狭い利用可能な土地に多量の資源・エネルギーを持ち込んで多量の工業製品を製造している、利用可能な土地面積当たりの「廃棄物」発生量は欧米諸国をはるかに凌いでいる。すなわち、製品当たりの廃

\*東京大学生産技術研究所 第4部

棄物発生量である廃棄物発生原単位は欧米諸国と同じであっても、我国では利用可能な土地面積当たりの廃棄物発生密度が大きくなり、大きな環境負荷となる。一般的な排水や排ガスによる環境汚染も、現在注目されているダイオキシンや内分泌攪乱物質（いわゆる環境ホルモン）というような個別の有害物質の排出についても、すべてこのような現状に起因していると言えよう。この事実から、欧米諸国と同じような環境施策と環境技術では、環境問題の解決に至ることがたいへん困難であると考えられ、我国固有の施策や技術が必要であると言えよう。

排水、排ガス、廃棄物に代表される地域の環境問題を回避するためには、廃棄物の減容化や排水、排ガス等に含まれて水圏、気圏、地圏へ移動する汚染物質を分離除去、すなわち処理することになるが、これらを実施するために施設設備の建設や運転に多量の資源・エネルギーを必要とするので、形を変えた環境問題を新たに引き起こすこともある。地域および地球規模での環境問題が深刻化することを避けるためには、排出された廃棄物や汚染物質を処理するのではなく、生産プロセス内、工場内、地域内など様々な規模・範囲において物質の循環利用が必要であろう。具体的には、生産プロセスにおける発生源対策、一生産プロセスでは完全利用できない未利用物質のネットワーク化による他プロセスあるいは他産業での原材料化、物質およびエネルギーの共役化による生産プロセスの高効率化などによっての物質循環システムが維持されなければならない。さらに、循環型社会に向けたライフスタイルや社会システムの導入も不可欠である。

#### 2.2 ゼロエミッションの特徴

生産プロセスは原材料を加工して経済的価値のある製品を生み出す仕組みであるが、目的とする製品以外にも副産物が生成するのが一般的である。そのような副産物の中で経済的価値のない物質がいわゆる「廃棄物」となり、基本的には生産プロセスの外に排出される。このことが今日の廃棄物問題の根源であることは言うまでもない。過去の産

業公害の苦い経験を踏まえて、これらの廃棄物の中の少なくとも生態系や人体に影響を与える可能性のある化学物質等を環境中に排出させないようにする施策や技術はすでに多く開発され実用化されている。それらは排水や固体廃棄物が生成することは仕方ないと認識した上で排出口のところで適切に処理しようとする、いわゆる end-of-pipe 処理技術である (図 1-a)。ここで言う適切な処理とは、種々の規制をクリアーするための処理と言っても過言ではないであろう。これに対して、排出量そのものを低減化させるために生産プロセスを改良しようとするクリーナープロダクションという考え方がある (図 1-b)。この方法はパイプの太さを細くしようとする end-of-pipe 処理技術と言えなくもない。

これら 2つの方法は有害物質の排出量を最小限にしようとする意味で環境保全施策・技術としては有効である。これに対して、ゼロエミッションは、あるプロセスから排出される物質について、その量を減らそうとは考えず、そのかわりに適切な物質変換技術によって、より価値の高い物

質に変換した上で他の生産プロセスの原料・材料として利用するという考え方である。このように生産プロセスを次々にリンクして生産プロセスのネットワークを構築することによって、別の言い方をすると産業ネットワークとか産業クラスターを形成することによって生産系外への物質の排出を限りなくゼロに近づけようとする考え方である (図 1-c)。すなわち、ゼロエミッションの基本的な考え方の要点は以下のように整理される。

- 1) 「廃棄物」という概念を払拭し、同じ物でもそれらを「未利用物質」(あるいは、「未利用物」「未利用素材」など)ととらえる。現状においては、主として経済的に成り立たないがゆえに廃棄されているものも、物質として見れば十分に他の生産の原材料になる可能性を有している。廃棄されるべきものは何もなく、たまたま未利用のままになっているという理解である。
- 2) 次に、その未利用物質を排出源とは異なる業種において原材料とするという物質のフロー、すなわち産業ネットワークがなくてはならない。この産業ネットワークは自然生態系のような円滑な物質循環をめざして、思いつきでなく合理的な根拠に基づいて設計されなくてはならないであろう。
- 3) そして、このような業種を超えた未利用物質—原材料という物質循環を可能にするために、「ゼロエミッション技術」とでも言うべき物質変換技術が介在しなくてはならない。この技術はいわゆる最新のテクノロジーを駆使した技術である必要は必ずしもなく、従来からの技術やそれらを改良したものなどでも十分機能する。また、このような技術の必要性は新しい産業を創生することにもつながる。

### 3. ゼロエミッションをめざした研究

#### 3.1 萌芽期から育成期へ

ゼロエミッションが自然生態系のような円滑な物質循環をめざすのであれば、本来めざすべきゼロエミッション生産システム、すなわち十分に成熟したゼロエミッション生産システムとは、図 2 に示したようになる。すなわち、複数の業種から排出される未利用物質が、それぞれ別々の物質変換技術を介してある業種の原材料となり、またある業種から排出される種々の未利用物質も各々別々の物質変換技術を介して複数の業種で原材料として利用される。さらに、既存の業種の枠組みが撤廃され、現在の業種区分では最終的な Output でない物質を、敢えて他の業種の現在では Input でないところに流用することをも行って、産業構造全体が融合したひとつの生産ユニットになる。このためには、現在の生産プロセスの中味にまで立ち入った、より細かな生産プロセスの連関を理解することが必要とな

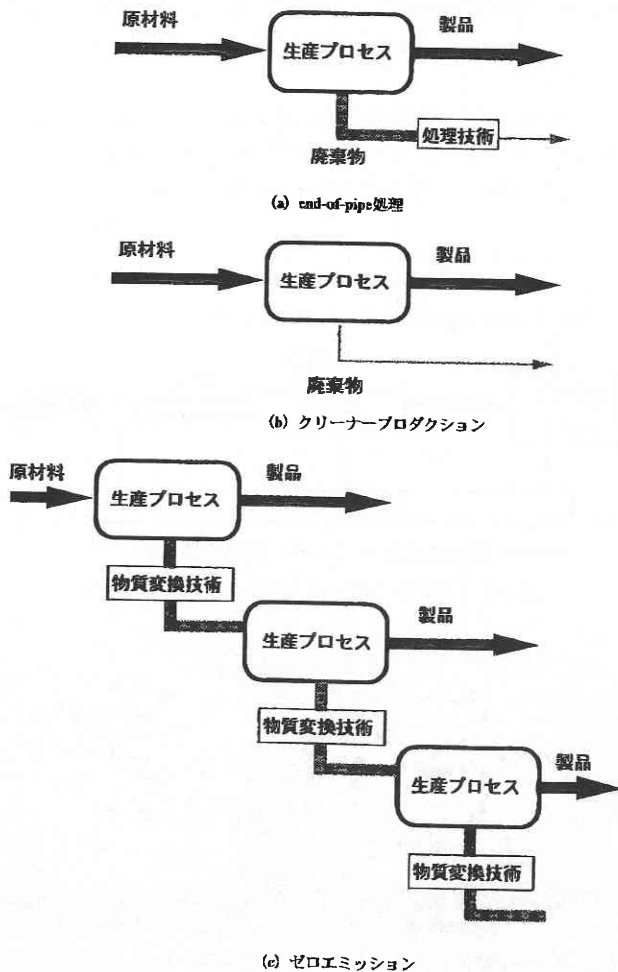


図1 ゼロエミッションの特徴

る。  
 しかしながら、これは最終的にめざす姿であって、いきなり大人で生まれることはありえない。現実の移行を考えた場合、第一歩は図3に示すような「1業種対1業種」がひとつの物質変換技術を介してリンクする産業ネットワークであろう。つまり、現在の業種区分を維持したままで適切な物質変換技術を介在させることによって、比較的小規模の地域内において物質の供給量と受領量が良く一致する組合せからスタートするべきで、このような例はすでに幾つか見られる。要するに今なすべきことは、図2と図3、すなわち「めざすべき理想」と「現実を直視した当面の目標」の差異を十分に念頭にいた上で、図3の設計法と具体例をより多くかたちにすることが肝要であろう。

このように、ゼロエミッション社会の実現に向けては、産業ネットワークの設計・構築と物質変換技術の開発が鍵になるわけで、今まさに大学、企業、自治体など様々な機関でゼロエミッション生産システムの典型例の研究開発が萌芽し育とうとしている段階であると言えよう。例えば、大学関係者を中心とした研究として文部省科研費特定領域研究292「ゼロエミッションをめざした物質循環プロセスの構築」(領域代表：鈴木基之、国際連合大学副学長、東京大学生産技術研究所教授)が平成9年度から平成12年度までの予定で活動しており(<http://envchem.iis.u-tokyo.ac.jp/ZeroEm/>)、その最終成果が期待される。また、産学連携研究の場として、日本学術振興会産学協力研究委

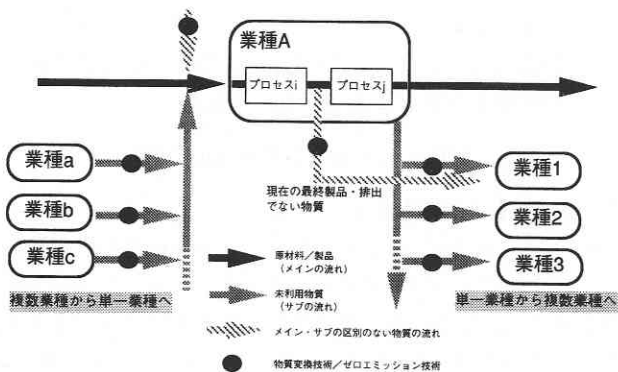


図2 成熟したゼロエミッション生産システム

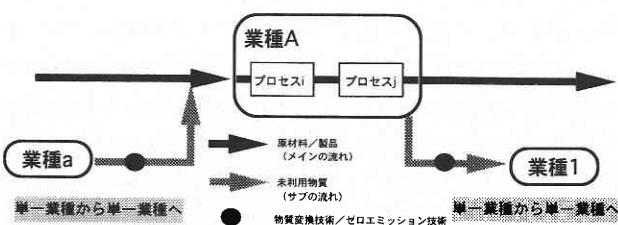


図3 初期のゼロエミッション生産システム

員会「ゼロエミッション」第168委員会の活動も注目されている。個々の研究の内容については上記のホームページをご参照頂き、以下には筆者らの研究の概略を紹介する。

### 3.2 産業連関表による未利用物質排出量の推算

#### 一産業ネットワークの研究例として一

筆者らは、産業連関表を活用して産業系における物質の移動、蓄積、排出等をデータベース化し、それに基づいて我国からの総エミッションをどこまで削減できるかの可能性と限界を明かにしたうえで、地域単位で産業ネットワークを設計することを行っている<sup>1)</sup>。このデータベース化は、まず産業連関表のCash Flow(=お金の流れ)から物流量、さらに物流量から炭素、窒素といった物質の流れを順に推算してゆくものである。すると、ある業種の炭素、窒素などの物質収支を計算することによって、その業種からのCash Flowを伴わない排出(=いわゆる廃棄されている物量)と地域全体としての排出のおおよその量を見積ることができる(図4)。この方法は基本的に産業連関表にのみ基づいているので、都道府県レベルの地域に限定したりアジア圏等へと拡大したりすることが可能であり、また、有害性や希少性等の観点から塩素等や特定の金属等の物質収支についても含有原単位を変えることで比較的容易に対応できる。

図5は我が国の食品関連産業の炭素収支(左図)と窒素収支(右図)を示すもので、横軸が投入量、縦軸が産出量である。本図では食品関連産業を便宜的に農・畜産・漁業

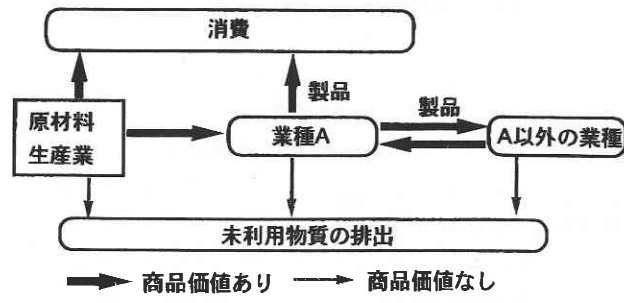


図4 産業連関表を用いた未利用物質排出量の推算

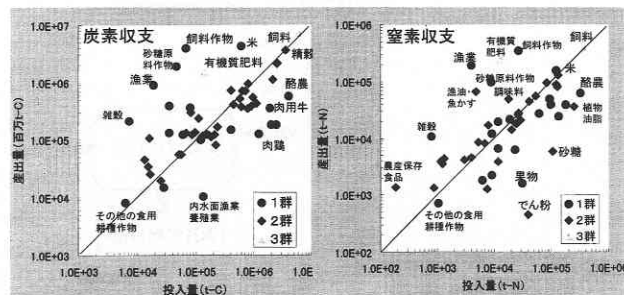


図5 産業連関表より推算した食品関連産業における炭素・窒素収支

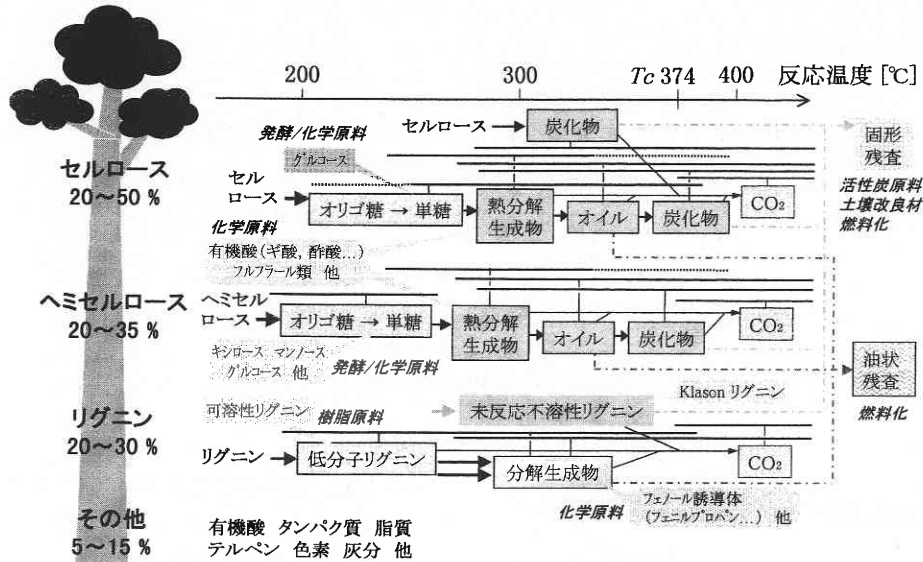


図6 高温高圧水による木質系素材の物質変換

(1群), 食品加工業 (2群), 飼料・有機質肥料 (3群) の3つの産業群に分類している. 図中央にある1:1の直線よりも下にプロットされている産業は投入が産出よりも大きな産業で, 逆に1:1の直線よりも上にプロットされている産業は産出が投入よりも大きな産業, そして1:1の直線付近の産業は投入と産出がほぼ同じ産業でということになる. 図によると農・漁業は1:1の直線よりも上にプロットされており, 産出が投入よりも大きく, この差はいわゆる「自然の恵み」である. また, 例えば畜産業は1:1の直線よりも下にプロットされており, 従来から言われているように家畜糞尿の排出量の膨大さが定量的に示されている. 食品加工業はほぼ1:1の直線付近にプロットされており, 投入と産出がほぼ同量であるものの, 比較的資源化が容易な排出が多いことも考えられ, さらに排出の形態や質に関する検討も必要である. このように, 各産業の物質収支をとることにより各産業の物質フローを把握することができる.

### 3.3 高温高圧水処理による植物バイオマスの有価物化—物質変換技術の研究例として—

高温高圧水は特異的な反応場となる. このことに着目して植物バイオマス系の未利用物質 (古紙, 廃木材, もみ殻, ビール等の絞り粕, など) を工業原料となる化学物質に変換するプロセスの開発を行っている<sup>2)</sup>. 植物バイオマス系素材は, 主にセルロース, ヘミセルロースおよびリグニンの3成分にて構成される. 高温高圧水処理を施すことで, 図6に示したようにセルロースやヘミセルロースからは加水分解により糖類が生成し, さらに糖類の二次分解でフルフラール類や有機酸などが生成する (図6). また, リグニンの一部は可溶性リグニンとして回収できる. これ

らの反応が起こる温度領域はそれぞれ異なっており (例えば, ヘミセルロースの加水分解は220°C, セルロースは250°C付近), 反応温度の工夫や分離操作の組み込みなどによって素材の大部分を有価物に変換することも可能であろう. また, このような処理は大量の未利用物質を対象とすることが前提となることから, 連続反応装置の設計・開発や蒸着爆砕法と呼ばれる既存技術との組合せなどの研究も並行して行っている. この高温高圧水処理などの物理化学的な変換技術のみでなく, 生物学的変換技術やこれら両者の融合プロセスも興味深い.

## 4. おわりに

ゼロエミッション社会の実現にむけて, いままさに大学, 企業, 自治体など様々な機関で研究, 開発, 調査などが活発化している. 既に, 小規模な産業ネットワークのモデルケースや物質変換技術の実例が世に出始めている. しかしながら, 完全循環型社会は, 化石資源ではなく再生可能資源 (=バイオマス資源) を基盤とすることで初めて可能になることも忘れてはなるまい. つまり, 今の「石油化学製品」で提供されている機能を, バイオマス資源から製造される「生物化学製品 (biobased products)」で提供することへの転換を明確に切り拓いておく必要がある. バイオマス資源を地域分散型で高度循環利用するゼロエミッション社会が, サステナブルコミュニティの具現化像に思える.

(1999年12月8日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 後藤尚弘, 迫田章義ら; 環境科学会誌, 投稿中.
- 2) Mochidzuki, K., A. Sakoda and M. Suzuki; *Thermochemica Acta*, 印刷中.