

『循環型技術』の体系化への試み

片山 裕之¹⁾・北村 寿宏²⁾

¹⁾島根大学総合理工学部材料プロセス工学科

²⁾島根大学地域共同研究センター

An Essay on Systematization of Technologies link to Sustainable Development

H. KATAYAMA and T. KITAMURA

Abstract

The technologies for circulation, which links to the sustainable development was investigated comprehensively; social demands for the development of technologies for circulation in Japan and in Shimane prefecture, conception of circulation, examples of circulative society in Edo-era, recent policy on environmental conservation of Sweden, examples of Japanese projects (Inverse manufacturing, Eco-material & Zero-emission), trial for systematization of technologies and proporsal of research project.

1. はじめに

日本の産業技術は、西洋流の『分割⇒部分最適化』の思想の上に『スケールアップによる効率化』を組み合わせることによって、20世紀後半に大きく発展してきたが、その結果として、資源枯渇や廃棄物問題、および人心の『もの離れ』という壁にぶつかっているのが現状である。21世紀は、20世紀の延長の上に開けないということがこの数年の間に急に共通認識になってきているが、21世紀のあるべき姿は、『共生』、『循環型』、『持続性』などの言葉で抽象的に表されているものの、その具体的なイメージは、必ずしも明確になってきていない。

本稿では、『循環』をキーワードに、『循環型社会』を作るための『循環型技術』についてマクロ的に把握し、今後の研究の方向を考える。

2. 『循環型社会』、『循環型技術』に対する社会的要望

21世紀に向けての産学官共同プロジェクトの具体的テーマの方向として、産業界の要望を集約したものが経済団体連合会から1999年7月6日付けで出されている。それは図1に示すように

(I) デジタル・ニューデール構想 —— 知識社会の構築 ——

(II) ヘルシー&セーフソサイエティ構想 —— 活力ある長寿命化の実現 ——

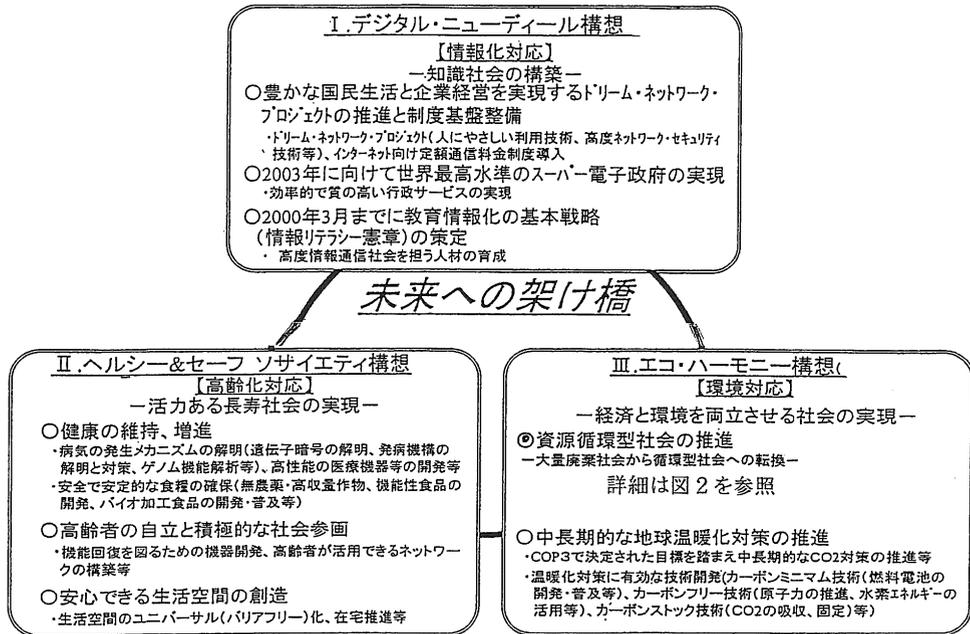


図1 経団連から出された産学官共同プロジェクト構想

(Ⅲ) エコ・ハーモニー構想 —— 経済と環境を両立させる社会の実現
の3本柱からなる。このうち、(Ⅲ)エコ・ハーモニー構想の内容を図2に示す。

これに先立って、島根県は、平成11年3月に科学技術振興指針の基本理念とし『人と自然が共生した21世紀型ハイクオリティライフの実現』を掲げ、また重点分野として

- ・環境に優しい循環型社会の実現を支援する分野
- ・健康でゆとりのある生活の実現を支援する分野

の2つを打ち出した。そして、その実現促進のための研究開発の拠点として、松江市内にソフトビジネスパーク島根の建設に着手している。

両者の提案は下記のように対応しており、特に後者では、いずれも『循環型社会』の実現を目標としている。

【島根の科学技術指針】

【経団連提言】

健康でゆとりのある生活の実現 ⇔ ヘルシー & セーフソサイエティ構想
環境環境に優しい循環型社会 ⇔ エコ・ハーモニー構想

本稿で検討の対象とする『循環型技術』は、直接的には、『(Ⅲ)エコ・ハーモニー構想の(1)資源循環型社会の推進』あるいは『環境に優しい循環型社会の実現を支援する技術』に関す

るものであるが、間接的には『(II)ヘルシー&セーフソサイエティ構想』あるいは『健康でゆとりのある生活の実現を支援する技術』にも関連する。

3. これまでの技術と社会の問題点

20世紀、とくにその後半は、大量生産・大量消費・大量廃棄の時代であった。そのために生活の利便さは著しく進んだが、その反面、資源・エネルギーの使用量が指数関数的に増加して、地球上の限りある利用可能な資源の残存量が心配になり始めた。また、廃棄物によって自然環境の汚染が進み、人類の生存の基本条件である空気、水、食物の安全性が脅かされるようになってきた。これは製造から廃棄への一方方向の技術であることが起因ということで、『リサイクル』ということが強く叫ばれるようになった。しかし、そのリサイクルも技術的には可能であっても、社会システムとしては十分には働いていないのが現状である。

このまま進めば、数10年後には必要資源の枯渇と、人間の生活に悪影響を及ぼすような環境の悪化が確実に予測されるようになった。一方、世界的には人口の上昇が続き、また、南北対立によって各国の歩調が合わず、懸念される状況の到来は、もっと加速されるおそれも出てきた。このような状況の中で、出されたのが『持続性のある発展』というスローガンであり、それに向けての方法の概念が『循環型社会』、それに関連する技術が『循環型技術』

(1) 資源循環型社会の推進

〔課題①〕製品ライフサイクル全体にわたる廃棄物、有害物質の最小化

◆研究開発:製品ライフサイクル全体に係る廃棄物、有害物質の最小化のための設計・生産プロセスの開発および製品開発、リサイクルが容易な材料の開発等

◇インフラ整備等:インバースマニュファクチャリング関連技術の開発・設備の整備などへのインセンティブの付与、公共調達の拡充等

〔課題②〕使用済み製品の回収・リサイクルの促進とそのため環境整備

◆研究開発:リサイクル製品の用途拡大のための技術、素材毎に廃棄物を自動識別・分別するための技術、業際間連携による副産物の原料化のための技術

◇インフラ整備等:廃棄物処理業の許可ならびに施設設置に係る許可の緩和、広域処理の促進、ストックヤードの整備、情報ネットワーク、物流・輸送施設の整備、公共調達の促進等

〔課題③〕廃棄物処理施設の整備

◆研究開発:廃棄物再資源化技術、エネルギー高効率回収技術の開発

◇インフラ整備等:一般廃棄物と産業廃棄物の混合処理の容認、PFI手法等の活用による高度な無害化処理および効率的なエネルギー回収を行うことができる先駆的廃棄物リサイクル処理施設(ガス化溶融炉等)の整備等

〔課題④〕化学物質の自主管理の推進

◆研究開発:バイオ活用型素材、環境調和型プロセス技術の開発、活用、バイオレメディエーション技術、化学物質の測定・管理技術の開発等

◇インフラ整備等:化学物質の安全性基準等の明確化および測定方法の確立とデータベース構築(リスク評価の充実、有害性データの整備)等

図2 図1・Ⅲの『資源循環型社会の推進』の内容

である。

4. 『循環』とは

まず、本質的な『循環』について考える¹⁻²⁾。

地球上で起こっている循環のもっともいい例は、自然界の水の循環である。水は、空中の水蒸気が凝縮して雨となって降り、地上では高いところから重力によって下の方に流れ、いろいろの成分を溶かし込み、川から海に流れ込む。それまでの段階では、いろいろの成分を溶かし込むとともに、位置のエネルギーが低下しているが、海からの蒸発の時に、溶解していた成分を分離し、水蒸気となって、サイクルの最初に戻る。この場合は、ほぼ完全な循環が実現されている。

生物・食物の場合には、植物が太陽エネルギーを受けて炭酸同化作用で作った栄養分が、他の動物に食べられて炭酸ガスと糞として排出され、糞は肥料として次ぎの植物に使われるという循環（連鎖）を行う。この場合にも、太陽からのエネルギーの供給が重要な働きをしている。なお、動物や鳥が植物を食べた所より上の方に行って糞をする場合以外は、固体は自然には下の方に移動して、物質の偏在が進んでゆくので、水の場合よりも循環は不完全である。

熱力学の第2法則（エントロピーの法則）で、自然界で起こる反応は、系全体で見れば乱雑さが増える方向にしか起こらないこと、すなわち、完全にはもとの状態に戻ることはないことが示されている。これに対して、水が地球上では完全な循環を示しているのは、エネルギーを与えてくれる太陽と、廃熱を受け取ってくれる宇宙空間が存在するからである。すなわち、宇宙全体をみれば、『初めがあれば終わりがある』というのは事実であり（キリスト教的思想）完全な循環はないが、地球上では、太陽からのエネルギー供給の範囲内では、うまくやれば、循環の状態、すなわち、実質的な『永遠』（仏教的思想）が実現できる可能性があるということである。

我々が検討の対象にしている『循環型社会』や『循環型技術』は、せいぜい数100年の範囲のことである。しかし、人為的なリサイクルでは、例えば、紙は紙に再生することは技術的には可能であるが、エネルギー（運搬、機械運転、加熱など）が消費され、また、新たな廃棄物が生成することで、全体としては、乱雑さ（エントロピー）を増加させている。したがって、リサイクルを考えなければ、数十年で社会が行き詰まるからと言っても、人為的で下手なリサイクルを強行すると、エネルギー枯渇などの別問題を加速し、人類の猶予時間を延ばす効果が少ないことになる。

『持続可能な社会』での物質循環の理想の姿を模式的に図²⁾に示す。持続可能な社会は物質循環（C）の上に成り立つが、それは自然の循環（A）に統合された1部として働くものでなければならない。自然の循環の中にある再生可能資源（＝元本）の利息分（a）と、限りある地下資源（B）から節度を守って取り出された分（b）が、定常的な太陽光の入射から生じたエネルギーとともに社会の物質循環の中を周回する。社会の物質循環から漏出するもの（c）があっても、それは自然の循環が分解し、また、循環から漏れ出る物質の1部

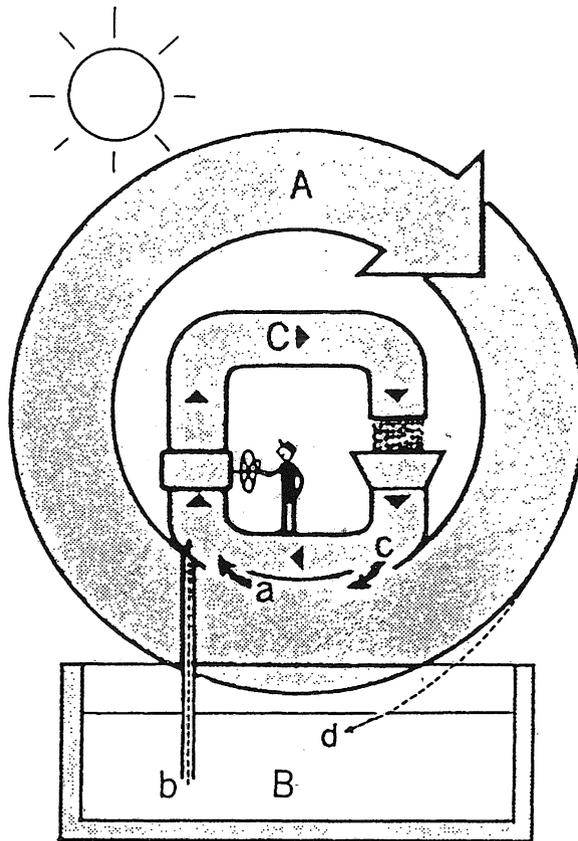


図3 持続可能な社会

(d)があっても、年月をかけて地下資源に変えられてゆくとすれば、元本の目減りがなく、人類は利息でくらすることになり持続可能性が実現できることになる。

5. 人口動態から予測される21世紀の姿

循環型技術のあり方を考えるにあたって、今後の人口動態をどのように想定するかが前提になる。まず、地球上の全人口は急速に増加し続けており、50年前は約25億人だったが、現在は約60億人に達し、50年後は100億人を越すことも予測されている。人口がこのままの増える続けるとすれば、どのような技術的対応を行ったとしても、限られた地球上で、上記のフローとしての太陽エネルギーの利用に限度がある中では、いずれ食料、資源、環境などで行き詰まることは明らかである。一方、日本については、少子化による高齢化が進行し、社会や経済の活性維持がむつかしくなるのではないかと懸念されている。これらは、『持続

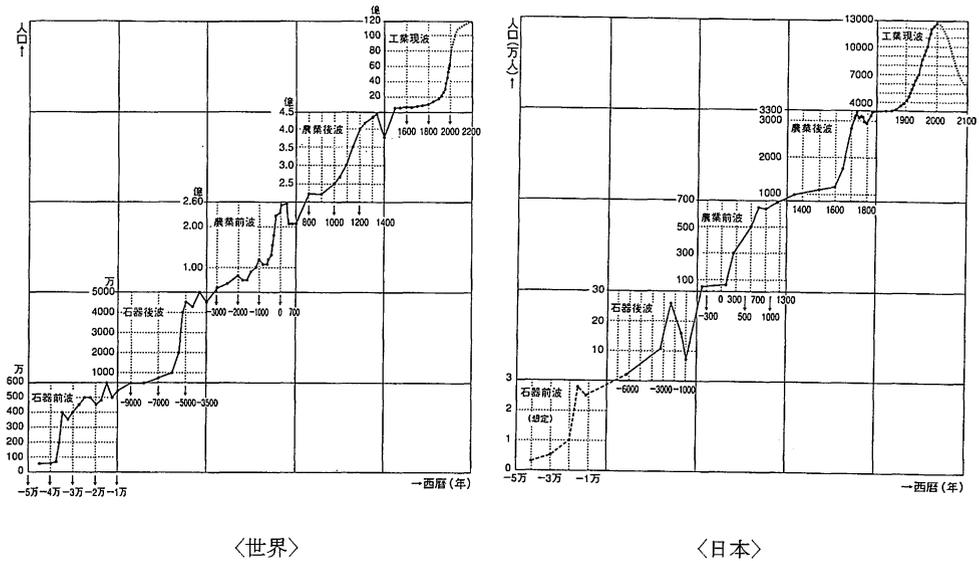


図4 人口波動の推移³⁾

のある発展』を目標に技術を考えようとしても、その前に、無力感を感じさせるものであった。

これについて、最近出された古田の説³⁾は、明快で説得力があり共感できるものであるの
で、それを以下に紹介する

(1) これまでの歴史で人口は単調に増加したのではなく、細かくみると波動が繰り返されてきた。世界、日本とも、図4に示すように5つの波動が見られる。この現象は、人口は人間が生存しうる容量（人口容量＝自然環境×文明）に支配されること、また、この値が飽和期に達すると、種々の『人口抑制装置』（出生を抑えることに結び付く、高ストレス、食料不足、環境悪化に対応する生理的要因、あるいは意志的、制度的、文化的要因など）が働くということで統一的に説明される。現在日本においては、すでにこの『人口抑制装置』が動き始めていると言える社会風潮である。

(2) この考え方によると、日本の人口は2005年頃（約1.3億人）をピークとして減少に転じ、2050年に1億人を割ると予測される。西欧や北欧は日本の先を進んでおり、すでに人口減少期に入っている。世界全体としては、しばらくは人口は増え続けるが、やがてそれぞれ『人口抑制装置』が働いて、2020年以降には80億人程度に落ち着くだろうと考えられる。

すなわち、これからの技術として検討の対象にする時代は、人口が増えてゆくことと組合わさった従来の成長期ではなく、人口が減少してゆく時期（『凝縮期』）ということである。この時期を衰退期にしないための、社会および技術のあり方を考えるのは我々に取って容易ではないが、参考例を次の2つに求めることができる。

(a) 日本におけるもう1つ前の波動は、江戸時代に起こった。その時代に当時の人々

はどのように対応したか。(6を参照)

- (b) 世界の国の中で、今後の日本を考える上で参考にすべきであるのは、まだ人口の増え続けているアメリカではなく、すでに減少に転じている西欧、北欧である。その中でとくにスウェーデンの動きが注目される。(7を参照)

6. 江戸時代に見られる循環型社会⁴⁾

江戸時代初期の人口は約1200万人であったが、農業生産の向上を背景に約100年間に3000万人を越えたが(最高3300万人)、次の約100年の間に2700万人まで低下した。増加期の後半が元禄時代(1688~1703年)で、現代と対比すると先般のバブル期に対応する。経済が曲がり角にさしかかってきた現在以降に対応するのは、江戸中~後期、すなわち、享保の改革期(1716~1745年)、田沼時代(1767~88年)、寛政の改革期(1788~93年)、文化文政期(1804~37年)、天保の改革期(1841~43年)であろう。その時代の政治・経済は、緊縮と放漫の政治がくりかえし行われてきた。このようなくりかえしは、成長を続けることができなくなってから別の安定期に移るまでの典型的な過渡現象と考えることができる。最近の政治・経済の動きも、そのように考えると理解できる気がする。また、消費に対する人々の考え方も、節約と放漫をくりかえしながら変化してゆくのではないかと予想される。

江戸中~後期には、見事な循環型社会が作り上げられていた。下肥を始め、あらゆるものがリサイクルできる社会システム(肥汲み、ごみ取り、灰買い、紙くず・くず鉄拾い、紙くず買いなど)や、修理・再生システム(鋳かけ、瀬戸もの焼き接ぎなど)が完成していたことはよく知られていることであるが、以下のように、生活のほとんどすべてが太陽エネルギーで作った植物の徹底的な利用の上になりたっていたことが注目される。たとえば

- 照明；ごま、えごま、椿、菜種、綿などから絞った植物油、ハゼから作った木蠟
- わらじ、蓑 屋根材、むしろなど；稲藁の利用
- 包装材；竹皮の利用
- 衣類；絹 木綿
- アルカリ性の化学薬品相当；灰の利用
- 動力；水車の利用 などである。

鎖国という状態のもとで太陽エネルギーだけで日本列島の中でどこまでやれるという壮大な実験が行われその時期は、200年以上かけて、当時の技術で太陽エネルギーを利用するだけで、『3000万人が、壊さず、減らさず、汚さずに生きてゆけること(見事な持続性社会!)]を実証したと言える。それを成功させた要因は、自然の大きなサイクルと、その1部としての人間の小さいサイクルの組合せがうまく作動していたからである。と言っても、今日の我々の目から言えば、耐えられそうにない不便な生活であったと思われる。しかし、今日の『蓄積を食いつぶしながら目先の利便性を追及している虚飾の生活』に比べて、長期的にみてどちらが正しいかと問われると、江戸時代の方が正解に近いと答えざるを得ない。

7. スウェーデンの動き

7.1 環境団体『ナチュラル・ステップ』の考え方

スウェーデンは、環境対応において日本よりも20年先を進んでいると言われており、多くの活動が行われているが、その中で、『循環社会の構築を成し遂げられる可能性がどの国よりも高いユニークな国はスウェーデンである。スウェーデンを環境モデル国にして、国際的合意のための道筋を示そう』というスローガンを掲げているナチュラル・ステップの考え方を紹介する²⁾。

ナチュラル・ステップは、環境問題は複雑現象であるので、どう対応するかについての得た議論を進めにくいという問題があることを認めた上で、問題を全体的に捉らえてシステム的に思考すること、具体的には図1に基づいて、次の4つのシステム条件を同時に満足していることをチェックすることを提唱している。

システム条件1；地殻に由来する物質の濃度が自然界において十分に低い濃度で安定させることができるか

限りある地下資源は取り出せば枯渇が進むとともに、そこに含まれていたものは使用された後、『分子ごみ』となって自然界に戻ることを忘れてはならない。その量が、自然界がゆっくりしたプロセスで鉱床に戻せる能力(図1のd)を越えていると、自然界の汚染を進めることになり好ましくない。

(具体例) 循環の流れの中にあるエネルギーや原材料の使用に転換してゆく。

システム条件2；社会の生産活動に由来する物質の濃度を自然界で十分に低い値に保てるか

これは、社会でのある物資の生産が、その物質が自然界に蓄積を招くような形態と規模で行われてはならない(図1のc)ことを意味する。具体的には、複合材料や自然界にとって未知の長寿命物質が問題になる。

(具体例) 自然界での寿命が短い、化学的に分解しやすい物質への転換

システム条件3；自然の循環と多様性を支える物理的基盤を守ることを可能にしているか

自然界の物質循環(図1のA)に人類の生産活動と未来がかかっているので、自然の循環の侵害につながるような開発や、近視眼的な治水、そのほか自然界に対する物理的圧迫は停止する必要がある。

システム条件4；効率的な資源と公正な資源分配が行われているか

- 修理の効く耐久性のある製品への切り替え
- より効率的にすぐれた技術, 素材, エネルギー, 輸送システムの採用
- リサイクル促進など。

また、環境効率のアップ⁵⁾, すなわち

- ① 資源の使用効率を増やすことにより、より少ないエネルギー・原材料のインプットで、より多くの効果を得ることを指向すること
- ② 環境影響を横ばいしないし減少させながら消費者への付加価値を高める新製品、サービスの開発を進めること

も志向されている。

7.2 持続可能社会の実現を目指すスウェーデンの行動計画

1992年6月の地球サミット後、スウェーデンでは、循環政策案が国会で承認され、循環可能な社会の実現に向けての第1歩が踏み出された。それに含まれている項目は以下の通りである⁶⁾。

① 気候変動（温暖化）への対処

新二酸化炭素税システムのもとで、効率のよいエネルギー使用、自然エネルギー（風力発電、太陽エネルギー、バイオ燃料など）の使用推進など

② オゾン層の保護

フロン製造、使用、再利用禁止。結果として、冷蔵庫の冷媒には自然界に存在するイソブタンを使用に置き換え。

③ クリーンな生産工程

環境に汚染物質を排出する行為（ほとんどすべての産業が含まれる）に、その時点で最良のしかも経済性を伴う技術（Best Available Technology）を用いて環境への人為的負荷を最小限に抑えることを要求。

④ クリーンな製品

- 生産工程からの有害廃棄物の段階的削減あるいは除去

どのような物質が有害物質として規制の対象になるかを早い時期に公表して、企業に代替品を自発的に見つけだし、考慮する機会を与える。まず、13種の有害物質（メチレン・クロライド、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、鉛、有機錫化合物、クロロパラフィン、ノエル・フェノール・エトキシレート、フタレート、ヒ素、クレオソート、カドミウム、水銀、臭素化難燃焼剤）を指定し、このうち、水銀、鉛、カドミウムは次のように段階的に禁止する。

水銀 2010年までに75%削減する。（目標は全廃）

1992年から水銀体温計を禁止、1993年から水銀含有温度計を禁止

蛍光灯などランプ類に含まれる水銀を段階的に廃止。

実験室での水銀の使用を情報の配布により制限。

歯科診療所から出るアマルガムの段階的廃止を検討する。

鉛 加鉛ガソリンと無鉛ガソリンに税制上の差を付ける。

1995年までに鉛被覆した地下ケーブルの使用禁止

来世紀早々に鉛の散弾を環境にやさしい散弾に置き換えることを目指す。

ヒ素とクロム化合物

木材防腐処理用のヒ素とクロム化合物を厳しく削減する。

カドミウム

肥料中のカドミウムを現在可能な技術により、厳しく制限する。

1994年より固定使用の充電可能なニッケル・カドミウム電池を禁止する。ニッケル・カドミウム乾電池については回収のためのインセンティブを導入する（環

境上の課徴金など)。

•『概念設計から再生まで』を対象にした製品の環境への影響度の定量化

二酸化炭素や硫黄や窒素の酸化物の発生量などを、現在のプロセスを対象にして計算することはLCA（ライフサイクルアセスメント）で行えるが、スウェーデンではそれを進めたものとして、環境優先戦略システム（ESP）がスウェーデン産業連盟、スウェーデン環境研究所および自動車メーカーボルボが共同で開発され、ボルボ社、テトラパック社（飲料用紙容器）を始めとする12社で使われている。

通常のLCAに対してESPの特徴は、環境への排出量の大きさを数字だけで表すのではなく、『美的価値』、『生物多様性』、『人の健康』、『財産』および『生産』の5分野で環境への影響を評価する点にある。ただし、ESPは、環境付加を低減するためにたえず改良が加えられてゆくものである。最終的に完成するという性格のものではないことが認識されている。

⑤ 廃棄物の管理

1990年に国会で承認された『1990年代の廃棄物政策』のポイントは次の4点である。

- (1) 生産者は、その商業活動に起因する廃棄物すべてに責任を負い、処分のコスト、およびクリーンで環境効率が良い製品の開発コストを負担する。
- (2) 『リサイクル可能な物質』、『再生利用可能な物質』の量を増やすことによって廃棄物の減容を進める。
- (3) 廃棄物の中の危険要因を可能な限り減らす。

例えば、電子機器スクラップには、鉛、水銀、カドミウムのほかに次のような有害物質が含まれており（臭素系難燃剤、クロロパラフィン、ベリリウム、PCB）、それを無害なものに置き換えてゆく。

- (4) 環境に安全な処理技術およびシステム、リサイクリング、最終処分技術およびシステムの開発を進める。
- ⑥ クリーンな交通システム
- 二酸化炭素排出量の少ない公共輸送、新車の燃費改善、高速道路の平均速度の低減、ハイブリッド・バスの導入など
- ⑦ クリーンなエネルギーシステム
- エネルギー体系を、可能ならば、『原発に依存しない、環境にやさしい、持続可能なエネルギー体系』に変えてゆく。
- 当面の目標—電気の合理的利用、省電力および省エネルギー
 - 今後の目指す方向—『集中型エネルギー供給システム』から『分散型エネルギー供給システム』へ転換

⑧ 持続可能な農業および林業

- 殺虫剤、人口肥料への環境税の導入、および削減方法の検討など
- 動物は本来持っている自然行動を考慮した環境で飼育させること
- 家畜に異変をおこさせるおそれがある遺伝子工学の応用、成長ホルモンの使用を禁止できる権限を政府に与えること

- 自然林の保護面積の増加，商業林を多様性を持つ植生に転換するプログラムの実施など。

8. 日本での循環型技術研究の例

8.1 インバース・マニファクチャリング

吉川前東京大学総長によって提唱されたもので，資源・エネルギーの使用量，廃棄物，および環境負荷を，全体として最少化するような循環型製品ライフサイクル・システムを，以下のような考え方で実現することを目指している⁷⁾。

① 閉じたループによる循環型製品ライフサイクルの実現

製品の設計段階から，易分解性，易分離性⁸⁻¹⁰⁾，構造の単純化，部品数削減，軽量化，易リサイクル材料の使用，規格，標準化，高互換性を考慮する。

② リサイクルだけでなく

- 製品を長寿命化するメンテナンス
- 補修・部品交換などへの製品の再生
- 部品の別の製品へのリユースを中心として，できるだけ小さい閉ループの実現する。

③ 製品の量によるのではなく，製品機能による社会的要求を充足する『量的充実から質的充実への転換（これを dematerialization という）』を図る。

④ 社会ストックとして足りない人工物だけを，適量生産する。

これまでの成果の具体例として，レンズ付きフィルム『写るんです』のリサイクル化，コピー機の部品再利用システムなどが挙げられている⁷⁾。ただしこれらの成功は，

- 設計時に徹底して材料種類，グレードを統一したこと
- 確立している回収チャンネル（写真屋のような）を利用できること

のような特殊事情に負う所が大きかったことが指摘されている。

8.2 エコマテリアル研究会

各種の産業製品を環境によく適合するものに変え，それを普及し，全体として環境負荷を小さくしてゆくために，その戦略は次の3つの組み合わせからなる^{11,12)}。

① エコデザイン；製品の設計段階から，材料の選択，生産方法，使用状態でのエネルギー効率，廃棄物処理工程などについて，環境への影響を十分に考慮する。

具体的には，LCA（ライフサイクルアセスメント）を使った環境負荷の定量化¹³⁻¹⁵⁾を武器にする。

② エコプロセッシングでエコプロダクトを生産する

③ エコラベル（環境への影響度を表示）やグリーン購入（環境のことを考えた製品を購入の対象にするような制度）によって普及する

その成果は『エコマテリアル事典』¹⁶⁾などにまとめられている。その技術の深化と，実用拡大をめざして，1998年11月より新エコマテリアル研究会に改組されて活動が続けられて

いる。なお、著者は、新エコマテリアル研究会のエコデザイン&アプリケーション専門部会の主査として、上記①、②の具体化について検討を進めている。

8.3 ゼロエミッション

ある産業分野からの排出物は、他の産業分野では原料として有効に用いられる可能性がある。対象産業を広めて考えると、全体として排出物を少なくできるというのが基本的な考え方である。国連大学によって提唱され、科研費重点領域（A）で研究が進められている。具体的には、食品加工廃棄物（ビールや焼酎の絞りかすなど）の有効利用（例えば魚の養殖に利用する）など。また、異産業間の物質のやりとりを容易にするためのゼロエミッション工業団地の構想もある。

9. 循環型技術の体系化に向けて

これまでの技術は、資源・エネルギーを使って人間が要求する「もの」を、量と質および競争力のある価格の点で満足するように製造することを目的とした一方向性のものであった。それは精密さの点では高度であっても、対象として考える時間は主として現在に限定し、また、考える範囲も製造から販売までの把握可能な部分に限定し、また、解の数が1つあるいは少数に限られるという点では勝ち負けがはっきりした敵しいが考えやすく、わかりやすいものであった。

それに対して、この一方向の技術が行き詰まりを見せてきた現在、『持続性のある発展』を目指して求められている循環型技術は、対象とする時間も数年先から永遠に広がり、また、範囲も考えれば考えるほどひろがって行くので、対象として掴まえにくいものである。したがって、これまで学問としてはほとんど体系化されていない。技術の面では、一方向技術から循環型技術への過渡期として、この十数年来、一方向型技術で生じた問題点を解決するという、対症療法の開発が行われてきた（例；リサイクルの方法¹⁷⁻¹⁹）、リサイクルに伴う排ガス²⁰、排水処理などの問題の解決、使用が禁止された物質の代替品の開発など）。しかし、そのような部分技術の積み重ねだけでは、全体として、持続性ある社会に向けて、環境負荷の総和を下げるのにどれだけの効果があるのか疑問であるという反省が、今日、循環型技術という考え直す起点である。

いろいろな考え方があるが、本稿でベースにしたいのは、4で述べた循環の考え方（大きな『自然の循環』と、その中での『人為的循環』のマッチング）および7.1で紹介したスウェーデンのナチュラルステップの考え方（『単純化しないシンプル主義』²）である。

まず、図3に示した持続可能な社会のモデルに基づいて考えると、関連する学問・技術は次のように整理できる。

- 自然の循環 ; 地球環境学, 生物学など²¹⁻²³
- 自然の循環と人為的循環のミックス ; 農学
- 人為的循環 ; 工学, 経済学, 社会学²⁴⁻²⁶

したがって、循環型技術は、工学のみでなく、地球環境学や生物学、農学、経済学、社会

学などの連携が必要である。

つぎに、工学は、1つや2つの限定された特性値に対しては高い値をもつ人工物を製造することを可能にしているが、『生命』をもった生物の有する柔軟性、適応性、自律性などの点が欠けている。生物から学び、情報工学などを組み合わせて人工物にそれらの能力を持たせることが、循環型技術の展望を開く鍵の1つになるといわれる²⁷⁾。

また、新技術の人間に対する報復作用が問題にされ始めている（遺伝子操作食品、コンピューター化したオフィスの健康や生産性への悪影響など²⁸⁾。一方で、伝統技術の価値が、新しい発想のヒントとして、伝統技術が見直されている²⁹⁾。『時を経た、時の試練に耐えた』技術の価値である。とくに循環型技術を発想するために、ヒントが多く隠されているように思われる。

さらに、環境問題に対応するには、東洋の知恵に学ぶということが言われている。4で述べた循環の基本思想は『太陽の恵みのもとでの、万物の共生と循環（輪廻）』という仏教の思想そのものである。もっと具体的なことにも示唆するものがあると思われる³⁰⁾。

循環型技術は、

- 上で述べたように従来の学問領域の枠を越えた大きな体系の上に打ち立てられるべきものであること、また、
 - スウェーデンのナチュラルステップが目標としているように、ある規模以上でシステムとして実証しなければインパクトを持たないものであること
- の2つの性格を持っていることに着眼して、島根大学で取り組むとすれば、

具体的なテーマの例としては

- 生ごみのリサイクル；生ゴミから肥料への循環、臭いの問題の解決、社会システム作りなど
- 木のサイクル；間伐材や廃木材の利用（炭³¹⁾、木搾液³²⁾、灰の利用³³⁾、水浄化、空気浄化などを含め）、社会システム作りなど

などが考えられる。

また、そのような考え方の延長上に、ソフトビネスパークしまねの研究の柱の1つを作ってゆきたいと考えている。

11. ま と め

(1) 『人間は動物である。ある範囲の温度と湿度の下で、光を浴び、空気を吸い、水を飲み、動植物しか食べられない。』——これが人間の生存の基本条件である⁶⁾。20世紀の人間に利便性を与えるという視点から発展してきた一方向の技術がこのまま進むと、副作用として21世紀には上記の生存基本条件が脅かされるおそれが出て来た。そのために要求されているのが循環型技術である。

(2) 地球上での真の『循環』とは、エネルギーを与えてくれる太陽と、廃熱を受け取ってくれる宇宙空間が存在するという条件に上で成り立つ大きな自然の循環を意味し、人為的な循環はそれとマッチングしていることが必要である。これまでのリサイクルのような単なる

人為的な循環では、本来の目的を達成することはできない。

(3) 歴史的な人口の波動から将来の姿を予測することができる。日本での1つ前の波動における今日と対応するのは江戸時代の中～後期であるが、そこでは見事な太陽エネルギーと植物サイクを利用した循環型社会が成立していた。また、2005年以降、日本は人口が減って凝縮型社会に向かうとい予測されるが、その点で日本の先を走っているスウェーデンでは、環境モデル国を作る取り組みや、持続可能社会の実現を目指す政策的な取り組みが始まっている。

(4) 日本では、循環型技術の確立を目指して、工学を中心とした視点から、インバース・マニファクチャリング、エコマテリアル、ゼロエミッションなどの取り組み進められている。

(5) 循環型技術は、工学のみならず、自然の循環とのマッチングという観点からは地球環境学、生物学などと、また、人為的循環をうまく作動させるという点からは農学、経済学、社会学という関連する。人工物が循環に適するように、柔軟性、適応性、自律性などの機能を加えるために、生物から学び、情報工学などを組み合わせることも注目されている。

また『時を経た、時の試練に耐えた』技術という点で、循環型技術にヒントを与えるものとして伝統技術の価値が再発見されつつある。循環型技術は、これらの多くの学問領域と新たな関係を築き、具体的なテーマへの取り組みを通して体系化を進めてゆくことが望まれる。

参 考 文 献

- 1) 植田 敦;『エコロジー神話の功罪』(はたる出版)(1998).
- 2) カールヘンリックロベール;『ナチュラルステップ(スウェーデンにおける人と企業環境教育)』(新評論)(1996).
- 3) 古田隆彦;『日本はなぜ縮んでゆくか』(情報センター出版局)(1999).
- 4) 石川英輔;『大江戸リサイクル事情』(講談社)(1994).
- 5) 山本良一監訳;『エコ・エフェシインシーへの挑戦』(日科技連)(1998).
- 6) 小沢徳太郎;『21世紀も人間は動物である 持続可能な社会への挑戦 日本 vs スウェーデン』(新評論)(1998).
- 7) 梅田 靖;『インバース・マニファクチュリング(ライフサイクル戦略への挑戦)』(工業調査会)(1998).
- 8) 山際康之;『ライフサイクルデザインのための組立性・分解性工学』(工業調査会)(1997).
- 9) 山際康之;『リサイクルを助ける製品設計入門』(講談社)(1999).
- 10) 中村茂弘;『リサイクル設計の技術』(日本能率協会マネージメントセンター)(1996).
- 11) 山本良一;『地球を救うエコマテリアル革命』(徳間書店)(1995).
- 12) 環境新聞社編;『未来環境』(七賢出版)(1998).
- 13) 原田幸明;日本金属学会報, 31, 505 (1992).
- 14) 石川雅紀;実践 LCA ISO14030対応 (サイエンスフォーラム)(1999).
- 15) LCA 実務入門編集委員会編;『LCA 実務入門』(産業環境管理協会)(1999).
- 16) エコマテリアル研究会編集;『エコマテリアル事典』(サイエンスフォーラム)(1996).
- 17) 村田徳治;『リサイクル技術の実際』(オーム社)(1993).
- 18) 資源素材学会資源リサイクリング部門委員会編;『資源リサイクリング』(日刊工業新聞社)

- (1991).
- 19) 鈴木 伴編；『リサイクル工学』（資源・エネルギー学会）（1996）.
 - 20) 『燃焼生成物の発生と抑制技術』（テクノシステム）（1997）.
 - 21) 環境新聞社編；『未来環境』（七賢出版）（1997）.
 - 22) 高橋 裕・加藤三郎編；『現代科学技術と地球環境学』（岩波講座 地球環境学 1）（岩波書店）（1999）.
 - 23) 内藤正明・加藤三郎編；『持続可能な社会システム』（岩波講座 地球環境学10）（岩波書店）（1999）.
 - 24) 高橋 裕・武内和彦編；『地球システムを支える21世紀型科学技術』（岩波講座地球環境学 9）（岩波書店）（1999）.
 - 25) 丸尾直美；『エコサイクル社会』（有斐閣）（1997）.
 - 26) 生活者中心の社会を築くための福祉文化学会編『スウェーデンから何を学ぶか』（ドメス出版）（1998）.
 - 27) 上田完次；『自然・生物からの発想 生物指向型生産システム』（工業調査会）（1999）.
 - 28) エドワード・テナー；『逆襲するテクノロジー』（早川書房）（1999）.
 - 29) 赤池学；『ものづくりの方舟』（講談社）（1997）.
 - 30) 竹村征三；『東洋の知恵の環境学』（ビジネス社）（1998）.
 - 31) 北村寿宏，片山裕之；島根大学総合理工学部紀要 A 32（1998）193.
 - 32) 池嶋庸元；『竹炭，竹酢液の作り方，使い方』（農文協）（1994）.
 - 33) 岸本定吉監修；灰の神秘（デーテーエッチ）（1995）.