

循環型社会の構築と企業経営

第3部会員 貫 隆夫

はじめに

資源枯渇と環境汚染に起因する人類社会の危機に対処するために"循環型社会"の構築が求められている。我々は市場経済(資本主義的市場経済)として特質づけられる世界に住んでおり、したがって市場経済のもとで循環型社会を構築するためにどうすればよいのかということが問題になるが、市場経済を構成する主体は企業、家計、政府の3者、あるいはこれにNPOを加えた4者であり、ここではこれらの主体の中でもっとも主要な役割を果たす企業が循環型社会の構築に向けてどのような経営を行いつつあるのか、また行うべきであるのか、という観点から考えて見ることにする。

資源・環境問題は我々の生活を支える財貨やサービスの供給のあり方、あるいは消費のあり方、要するに経済活動を原因として生じた問題であるので、解決策を考える前に、現行の市場経済のどのような特質が資源・環境問題を生起させたのかを簡単に見ておくことにしよう。

1、資源・環境問題の経済的原因

(1) 無限大という前提

資本主義を肯定する立場からは「競争を通じて生産力を発展させることで社会はますます豊かになれる」と信じてきたし、社会主義を肯定する立場からは「計画を通じて生産力を発展させることで社会はますます豊かになれる」と信じてきた。どちらも、資源と環境との制約を考慮しなかったという点で、したがって資源と環境のキャパシティを無限大と見なした事において変わりはない、ということになる。ただし、地球レベルでの環境制約への認識が生まれたのはまだ近年のことであるのに対し、資源供給の制約については、耕作適地の有限性をはじめ、環境制約に比べるとずっと早くから認識されていたと見ることも出来る。しかし、その場合でも、「必要は発明の母」という諺に示されるように、特定の資源が枯渇しても、人類の叡智を動員すれば代替資源の開発が可能であるはずだ、という楽観が支配していた(いる)という点で、基本的に無限大仮説のもとにあった。また、環境制約についても、必要に応じて「環境に優しい」製品や生産工程の開発が行われるから大丈夫、という楽観は働いている。この場合、環境のキャパシティが無限大というのではなく、環境負荷を削減する人間側の能力が無限大である、ということである。

(2) 市場メカニズムのタイムスパン

「必要は発明の母」、すなわち技術開発力に代表される人間のイノベーション能力(創造力)は

無限であるから、資源や環境に問題が生じてもやがては克服されるはずだ、という楽観ぬきには現実の経済の姿を説明することは出来ない。このような楽観の存在を証明することは簡単であって、我々の生活を支える資源がいずれは枯渇するものであるなら、枯渇することを認識した時点で、その資源の価格はなんらかの方法で再生産するためのコストを含むものになり、例えば石油資源の枯渇が認識された時点で石油価格は人造石油の生産コストを基礎に設定されるはずである。現実には石油ショック以後も石油価格はそのようなレベルに上昇することもなく、石油価格は採掘権利料、採掘コスト、精製コスト、物流コスト、販売コスト、採掘から販売に至る関連業者の利益額、などを含みはしても、石油残存量をこれ以上減らさないための石油そのものの再生産コストを含んではいない。だからこそ、枯渇性資源ではないミネラルウォーターの価格とガソリン価格にほとんど差がないという、信じられないことが当たり前のように起こる。

もし、代替資源の見通しがすでに確実についているというのなら話しは別であるが、現状はエネルギー源としても生産原料としても石油資源に替わる資源の見通しがついていない。石油資源の余命はあと45年前後という見通しではほぼ一致しており、しかも45年以内の代替資源開発が保証されているわけでは決してないのに石油価格の暴騰も起こらず、石油消費量の激減も起こらない。一世代30年より先のことは価格メカニズムに反映されないようである。要するに、市場で成立する取引価格が想定しているタイムスパンは本質的に短期指向であり、資源枯渇や環境汚染という長期スパンの対応を必要とする物事に対してはほとんど機能しない。

地球を一つの家庭とみなし、“地球家政学”を考えるとすれば、健全な家庭であれば、収入が確定して後、あるいは少なくとも確実な収入の見通しが立ってからはじめて消費を行うはずである。「必要は発明の母」であるとしても“必要”は発明の充分条件ではないから、発明の成果が確定されるまでは枯渇性資源の消費を節減すべきであるが、燃費の節約など単位当り使用効率の向上は見られるとしても総量としての消費量は増大を続けている。“必要”はすでにあるのに発明はまだ生まれぬ。現状は、将来の発明を当てにして発明の成果を先取りしつつ、これまで通りの大量消費を続けている浪費癖の止まない家庭、と見る事が出来る。喧伝される「多品種少量生産」とは品種当りの生産量の少量化ではあっても、企業単位あたりの生産量の少量化を意味するものではないし、人口規模の増大と生活水準の上昇を考慮すると、地球レベルでの工業生産は今後も総量としての大量生産を宿命づけられており、地球家政学的には資産の食いつぶしで家計はますます悪化の一途を辿っているのである。

(3) 環境の外部性

環境問題の原因としては、環境負荷の増大を“外部不経済”として市場の外に放り出してしまふ市場経済の不完全性(「市場の失敗」)がとくに周知である。エネルギー多消費型のアメリカ的なライフスタイルで環境に負荷を与えても貨幣的ペナルティがなく、森林を伐採せず環境に貢献し

ても別に収入が得られるわけではない。収入を得るためには森林を伐採してコーヒーやカカオなど換金作物を栽培するほかない。炭素税の導入や排出権取引など外部不経済の内部化の試みがさまざまな形で為されるのはこのためである。(1)に挙げた資源・環境キャパシティの無限大仮説、および、(2)に挙げたタイムスパンの短期性という問題は、いずれもここで述べた外部性の克服によって解消する問題であり、したがって解決の方途は資源・環境をいかに市場経済において内部化するかという問題として認識される。

以下において資源・環境を内部化する諸方策について述べる。

2、資源・環境の内部化のための諸方策

(1) 消費者意識の向上による内部化

環境負荷が自然の浄化力を超えて環境問題が発生し、その深刻さが消費者にも意識されるようになると、購買行動において消費者は環境負荷の低い商品を優先するようになる。そこで、企業としても自社の生産工程や製品が「環境に優しい」ものであることを消費者にアピールすることがマーケティングの上からも必要あるいは有効になる。グリーン・マーケティングというコンセプトは環境への配慮を消費者に訴求することをマーケティング戦略の中心に据える考え方であるが、アサヒビールの「廃棄物再資源化 100%宣言」に見られるように、環境問題への配慮が売れ行きに好影響をもたらすようになると、企業は競って環境対策を講じるようになる。いわば市場の力が環境対策を求め、企業としてはそれに応えざるを得ない状況が生まれる。

こうして消費者の意識が変われば、環境対策は市場原理によっても推進される動因を持っているのであるが、市場原理の範囲で環境問題が解決されるほどに事は簡単ではない。環境対策はそれが資源消費量の節約を伴う場合は採算性からしても企業にとってメリットがあり、さらにたとえ環境対策の結果コストアップになったとしても、環境対策が消費者によって評価され販売増につながるか、販売増につながらないまでもコストアップ分を上乗せした価格でこれまでの販売量を確保できるのであれば、環境対策と採算性は対立しない。しかし、環境対策のためのコストアップ分を価格に上乗せできない、あるいは上乗せすれば販売量の減少につながる場合には、その環境対策は採算性の減少すなわち利益率の低下を伴うことになる。企業の立場からすればそれ以上の環境対策を講じるためには利益が犠牲になってしまうという均衡点が存在することになる。消費者が「環境に優しい」という理由でどこまで価格が割高であっても買ってくれるかという限界は国によって、つまり国民の環境意識のあり方によって異なるが、「ドイツでは2割高くらいまでが許容され、日本では1割、他のアジア諸国ではゼロ」と言われるように、これにも一定の限界がある。

もちろん、企業の採算性からする環境対策の限界をどのレベルで設定するかということは、環境問題がもたらす市場の変化を個別の企業がどのようなタイムスパンで考えるかによっても異なってくる。長期的な動向に留意して、短期的には企業収益を圧迫するとしても市場の変化を先取りする形で環境対策を講じるという戦略は、トヨタのハイブリッドカー「プリウス」に見られるように、当然考えられる。

(2) 生産者意識の向上による内部化

消費者意識の変化に対応して企業の意識も変わる。技術力・資金力に余裕のある企業、環境問題への全力対応を企業理念として持つ企業、さらには環境対策の先進性をアピールして企業イメージを高めることで業績の拡大を意図する企業等々は、自発的に資源・環境問題への対応を図る。法律の定める基準を超えて、より高いレベルで環境対策を実施しようとする場合は、企業倫理に基づく環境対策として一括することができよう。要するに、法的規制によって強制されている以上の環境対策を自らの意志で行うとき、それは企業倫理による環境対応である。近年、企業倫理をめぐる議論が活発になっているが、この動きは旧共産圏を含めて市場経済が地球規模で拡大している状況の下で、従来の市場メカニズムによるだけでは環境問題の克服が困難であること(「市場の失敗」)、法的規制によるだけでは環境対策が十分なレベルで実施され得ない(「政府の失敗」)、という事情を反映しており、企業自らの自発的意志による最大限の環境対応が推進されない限り環境問題克服の展望が拓けてこないことを含意している。

問題はこのような企業倫理に基づく環境対策がどれほど広範に行われるかということであり、また、最低基準を超える環境対策がどこまで最低基準を超えることができるかということである。つまり、1)企業倫理に基づいて環境対策を行う企業が世界の企業全体に占める比重と、2)企業倫理によって行われる環境対策がどの程度のレベルで法的規制が求めるものを超えているか、という2つの変数によって企業倫理の効果は影響を受ける。環境対策がコストを要するものである以上、そして消費者による購買選択の判断基準において製品価格の占める比重が依然として高い以上、企業倫理による環境対応には競争力確保の観点から制約を受けざるを得ない。企業倫理の高さは企業の環境対策のレベルを高めるものではあるが、どれほど強い倫理観を持つとしてもそれによってその企業が環境に排出する環境負荷をゼロにすることを保証するものではない。一般に投入効果/投入費用の比率は逡減するから、あるレベルを超えて環境負荷を削減しようとするにそれによする投入費用は逡増する。したがって、企業倫理すなわち法的規制を超える環境対策(規制値よりも少ない負荷量)を規制値からの乖離の程度に応じて計数化するとすれば、"企業倫理単位当り"のコストは逡増すると見なければならない。我々は企業倫理の持つ重要性を十分に評価するとともに、その限界をも認識する必要がある、過大な期待を企業倫理に求めることはできない。

(3) 課税と助成(「市場の修正」)による内部化

環境負荷を与える製品やサービスの生産や消費に対して課徴金ないし税の徴収を行うことによって、市場における費用・価格の水準を直接的に修正し、生産・消費に対して環境を配慮した行動を促すことができる。排出課徴金、使用者課徴金、環境税、デポジット制などがその例である。

また、環境負荷を減らす技術の開発や生産設備に対して、助成金、低利融資、特別償却等の方法でインセンティブを与え、間接的に費用・価格水準を修正することが出来る。

これらの方法の限界は、行政コストの問題を別にしても、課税や課徴金のレベルを高くすることによる競争力の低下、あるいは製品価格上昇による生活レベルの低下、などに対する反発を考慮せざるを得ない事である。

(4) 取引権創設(「市場の創設」)による内部化

天然資源保護のための採取上限や環境負荷の許容量を設定し、その上限の範囲内で許可証を発行し、許可証が割り当てられた後は、その売買を認めることで採取権ないし汚染権に取引可能性を付与し、資源や環境に市場を創設する。この方法は上限の設定が妥当である限りは総量規制の手段となり得るし、汚染削減を効率的に行う自信のない企業が生産量を増やそうとすれば、お金を払って許可証を買わざるをえず、結果的に汚染削減を促進する効果をもつ。

この方法が環境負荷の削減に効果を持つためには、前提として、初期割当量がすでに発生している汚染量よりも少ないか、割当量が時間の経過と共に削減されるということである。

(5) 直接規制の強化による内部化

消費者や企業の意識変化だけでは環境対策のレベルに限界があり、課税や取引権という経済的インセンティブは当事者間で合意が成立することが前提となる。環境負荷の削減を市場取引を介さず実現しようとするれば、法的規制のもつ拘束力によって環境対策のレベルを引き上げることになる。容器包装リサイクル法や家電リサイクル法などわが国の法規制もドイツなどを追隨する形で相次いで強化されているが、ISO14000 シリーズなどの認証取得が取引条件として実質的に義務付けられる場合には、それが法的規制ではなくともデファクトの規制と考えられる。

法的規制は市場メカニズムの限界を法律の持つ強制力によって突破しようとするものであるが、しかし、これにも自ずから限界がある。あまり厳しい規制ではそれを遵守するためのコストが掛かりすぎて規制がより緩やかな地域との競争力の差を生んでしまうし、資金的・技術的な理由で規制を守れない企業の撤退が多すぎると雇用面での問題が生じよう。

法的規制はその本質からして、業界の大部分の企業がある程度努力すれば到達可能なレベルに設定せざるを得ないという意味で、現実との妥協の産物であり、したがって、その規制の効果は

それによって環境問題が解決されるというより、問題の深刻化にある程度歯止めを掛けるという緩和策としての意義を持つものである。たとえば自動車の排出ガス規制に見られる様に、個別の自動車としての排出を規制するとしてもそれは排出ガスをゼロにするものではないし、また総量としての排出ガスを規制するものでもない。自動車の保有台数が増えれば総量としての排出ガス量は増加するし、全世界的に統一した規制が適用されるわけでもないので、グローバルにみると排出ガス量は規制の強化にもかかわらず増大し続けるという現実がみられる。

法的規制の問題は国家ないし自治体の強制力を以って適用されるものであるから、グローバルな環境問題に対処するためには国家間の合意によって地球的な規模で適用されないことには実効を挙げるのが難しい。しかし、主として化石燃料の利用を原因とする二酸化炭素の排出規制について典型的に見られる様に、協定に至るまでに先進国間(日欧対アメリカ)で対立があっただけでなく、すでにある程度経済成長を遂げた先進国とこれから成長軌道に入りたい途上国との南北対立が厳しい。国際協定による環境規制は各国の利害が錯綜して国内法による規制よりもさらに妥協の産物とならざるを得ない。

かくして、市場や規制による対策に一定の限界があるとすれば、資源と環境の無限大仮説が成り立たなくなった現在、無限大仮説を充たし得る唯一の要因は人間の知能が生み出す技術に求めざるを得ない。

3、技術水準の向上による環境負荷の削減

経済成長率をゼロあるいはマイナスにすることによって環境負荷量の発生を削減することは「環境独裁」とも言うべき政治体制が選択されない限り不可能と考えられるので、現実的には環境負荷を自然浄化力の範囲内にまで削減することを究極の目標とする技術の開発が指向される。地下資源を高温高压で加工する現在の生産技術からの脱却の方向は生物資源を中心とする地上資源の常温常圧加工ということになるが、廃水処理技術の確立、解体・分別しやすい製品設計、代替原料の開発など、この分野の開発テーマはほとんど無限である。

生産技術の発達には産業革命以降その多くが機械化・自動化によって労働力を節約すること、つまり省力化を指向する方向で発達してきた。それは、労働力の利用に対して人件費を払わなければならないという資本主義経済の性格がもたらす必然的な方向性であったと見ることができるが、他方で環境負荷はいわゆる外部不経済の問題であり、企業の収益計算の枠外であるために、負荷発生量の削減を目指す方向での技術開発はそれが原材料消費の削減を通してコスト節減に貢献するものでない限り永きに渡って放置されてきたと言えよう。

こうして、技術の発達は資本主義経済の市場原理に規定されてその方向性とレベルが決まるものであり、また、法的規制や企業倫理のあり方によっても影響を受けるから、独立変数と見るわけには行かない。それでもなお、技術の有り方によって環境に要するコストが変化し、またコス

ト競争力のある代替資源が実用化されれば、法的規制や企業倫理の応援を借りなくとも環境対策が自発的に取られることになるので、ここでは環境負荷の削減に貢献する以下のような技術領域を、その限界と共に、見ておくことにする。

- 1) 盗源探査・採掘技術の向上を図る。
- 2) 燃費改善や歩留まり向上など資源利用効率の向上を図る。
- 3) 太陽エネルギーや海水など無尽蔵資源の活用を図る。
- 4) 再生産可能資源である生物資源の活用を図る。
- 5) 枯渇性資源の循環利用を図る。(リユースとリサイクル)
- 6) 製品耐用年数の増大を図る。(高耐久化)

1) 資源探査・採掘技術

探査や採掘技術の発達は枯渇の時期を先延ばしすることは出来ても、枯渇そのものを回避することは出来ない。したがって、探査・採掘技術の発達は資源・環境問題への抜本策ではあり得ないのであるが、これまで人工衛星からの情報解析による新油田の発見やより深部からの採掘を可能にする採掘技術の発達で可採埋蔵量が増大したことなど、省エネ技術の発達とあいまって、「あと40年」と言われた石油残存年数が何時まで経っても減らない、むしろ「あと45年」という具合に若干延長の傾向にあるということも事実である。この意味で探査・採掘技術の向上は代替資源の開発までの時間稼ぎの方法として重要なのであるが、枯渇性資源という言葉が示すように、存在量が無限ではない以上、探査・採掘技術の発達による対応には原理的限界がある。

2) 利用効率向上

有限の資源であってもその利用効率を向上させることで利用可能期間を増大させることが出来る。資源枯渇の時期を先延ばしできるという意味では、省エネに代表される利用効率の向上は探査・採掘技術の向上と同様の効果を持つが、同じ生産量であってもそこで消費される資源量が少なければ環境負荷の排出量もそのぶん少ないから、環境的には利用効率の向上は探査・採掘技術の向上による対応よりも望ましい。

しかし、たとえばガソリンエンジンとしての燃費向上や家電製品の省エネ技術もほぼ限界に近づいており、大幅な向上を期待することはできない(だからこそ、京都議定書に計画された二酸化炭素排出量削減案の実行が各国とも困難となっている)。また、単体としての効率向上はあり得ても、台数の増加によって総量としての消費量は増えており、グローバルなモータリゼーションの進行は燃費効率の著しい向上にもかかわらず世界全体としての石油消費量を増大させている。

3) 無尽蔵資源

資源枯渇を抜本的に解決する方法は、利用資源を枯渇性資源ではなく無尽蔵資源によって賄うことである。太陽エネルギーや風力、潮力などをエネルギー源として利用し、土砂や岩石などを原材料として製品生産を行えば、資源の枯渇を心配する必要はなくなる。

しかし、たとえば太陽エネルギーなど無尽蔵といわれるものは極めて分散的なエネルギーであり、エネルギー源として利用するためにはエネルギーの生産と配送のための施設が必要になる。そして、温水器がアルミで作られ、アルミの生産プロセスである電解工程への電力供給が大部分、石油や原子力など枯渇性資源依存型の電力によって賄われているように、その施設自体と施設生産工程は枯渇性資源への依存度が高い。

4) 生物資源

生物資源は種子から育てることで資源を得ることが出来るという意味で再生産可能資源であり、資源枯渇問題への対策としては無尽蔵資源の利用と並んで抜本的対策である。さらに、太陽エネルギー利用による発電の際にアルミ滓など枯渇性資源との抱き合わせ利用が必要になると異なり、生物資源の利用は、エネルギー源としての薪の利用やサトウキビから作るアルコール燃料の利用に見られるように、枯渇性資源との抱き合わせ利用の必要度が相対的に小さい。この点からも、生物資源の利用には大きな期待が寄せられている。

しかし、生物資源の生産は耕地など土地スペースを必要とする。人口増加に伴って食料増産のために必要な耕地面積は今後も不足が危惧されており、生物資源の供給増大を図るとすれば、土地利用のあり方をめぐって優先度の高い食糧生産との衝突が起こる。

5) 循環利用(リサイクル)

資源・環境問題への対応として近年もっとも注目を集めているのは廃棄物の再利用という意味での資源の循環利用すなわちリサイクルということである。平成12年(2000年)に公布された「循環型社会形成推進基本法」における「循環型社会」の英訳は"recycling-based society"となっており、循環型社会のキー・コンセプトがリサイクルであるという印象を受ける。

しかし、リサイクルのためには廃棄された資源の回収、分解、再加工などの工程が必要であり、そのためには新たなエネルギーの追加投入が必要となる。武田邦彦氏はその著『リサイクル幻想』において、ペットボトルやプラスチック部品などの回収によって節約される石油資源量よりも回収・再生のために消費される石油資源量の方がはるかに大きく(約4倍)、エコバランスとしてはマイナスになると指摘している。つまり、リサイクルはリサイクルによる質の劣化という問題の他に、はたしてリサイクルが本当に資源節約効果を持つのかどうかという点で、大きな疑問がある。武田邦彦氏の結論は、アルミなどの金属資源の一部を除いてマテリアルリサイクルには資源

節約効果がなく、特にプラスチック類は回収した後は燃やして、その熱の有効利用を考える方が合理的である、というものである。

6). 高耐久化

リサイクルのためには資源の追加投入が不可欠だから、もっとも望ましいのは資源の追加投入を必要としない耐用年数の増大である。たとえば自動車を10回リサイクルするよりも自動車の耐用年数を10倍にする方がはるかに資源節約的である。耐久性がマイナス効果を持つのは、高耐久化のために耐用年数の増加率を上回る資源投入率の増大(コスト増大)が必要になる場合と、耐用年数が経過する間に製品(たとえば冷蔵庫)の省エネ技術が進歩し、製品廃棄にともなうリサイクルコストよりも残存耐用年数における(新製品に買い替えた場合の)省エネ効果の方が大きくなる場合、の二つのケースである。この二つに該当しない限り、高耐久化こそ、資源・環境問題の抜本的解決策である。

高耐久化を実現するにはそれだけの技術的革新が必要であり、年月の経過に伴う質的劣化を抑えて長期にわたる耐用年数を確保することは容易なことではないが、高耐久化については既存の技術によっても可能なものも少なくない。たとえば、武田邦彦氏の試算によると、プラスチック素材と耐用年数との関係は次のようになっている。

プラスチックの種類	耐用年数	価格/kg
汎用プラスチック	数年	100 - 150円
ポリエチレン		
ポリプロピレン		
エンジニアリング・プラスチック	数百年	200 - 300円
ポリカーボネート		
スーパー・エンジニアリング・プラスチック	数十万年	1000 - 1500円
ポリアイミド		
ポリエーテルエーテルケトン		

(武田邦彦『リサイクル幻想』文春新書 151～153頁より作成)

表1より明らかなように、コストを耐用年数で割って得られる1年間当たりコストは汎用プラスチックとエンジニアリング・プラスチックとを比較した場合、コストを2倍にするだけで耐用年数は約100倍になるわけだから、エンジニアリング・プラスチックを使った方が年間当たり素材コストは圧倒的に節約できる。換言すれば、年間当たり素材消費量はエンジニアリング・プラスチッ

クを使った方がはるかに節約的である。スーパー・エンジニアリング・プラスチックを使えば汎用プラスチックの約10倍のコストを掛けるだけで耐用年数は約10000倍になり、コスト・パフォーマンスはさらに向上する。

このように耐用年数1年間当り素材コストについてエンジニアリング・プラスチックやスーパー・エンジニアリング・プラスチックを使った方がはるかにコスト節約的ないし素材節約的であるにもかかわらず、実際には汎用プラスチックが素材として使用されることが多い理由として、製品自体にそもそも数百年という耐用年数が必要でないということのほか、たとえ数年以上にわたる耐用年数が望ましい場合でも耐用年数の増大に比例する価格引き上げが期待できない場合は、年間当り買い替え需要の減少をおそれて耐久素材の使用が見送られる、という状況も十分に想定可能である。すなわち、高耐久化実現の困難は技術的困難だけではない。高耐久化には、市場経済のなかに置かれている企業にとって、そもそもそれを目指す経営上のインセンティブがない。高耐久化についてインセンティブが存在するとすれば、先に挙げた、耐用年数の増大に比例する価格上昇が期待できる、高耐久性があることで「あのメーカーの製品は他社より長持ちする」という評価を得て当該メーカーの市場シェアが増大し、買い替えサイクルの長期化にもかかわらず年間売上高の上昇が期待できる、という2つの場合であろう。高耐久化を市場経済の条件下で実現する方法について、以下さらに考えてみる。

4、高耐久化を実現する経営的条件

高耐久化を経営的に可能にするためには、耐久性の向上と採算性の確保が両立しなければならない。耐久性と採算性の両立の方途として以下に示す6つが考えられる。

1) 本物指向

すでに触れたように、耐久性の向上に見合った価格上昇を実現できれば、年間当り売上収入の水準を維持することができる。ニーズが満たされた「市場の成熟」という条件の下では、人々の指向は自己のウォンツを満たすものに向かう。洗剤やトイレトペーパーなどの消耗品を除いて、自分の身につけたり、身の回りに置いたりするモノについては、低価格であることよりも、自分がそれを欲しいと思うか否か、自分の感性に適合するものであるかどうか、要するに自分にとって本物であるかどうか、購買行動を決定する要因になる。特に、家具や時計など、すでに機能的にこれ以上進歩する必要のない商品、いわゆる機能成熟商品については何時まで使っても飽きの来ない、使うことに誇りを感じることでできる本物としての要件を備えているかどうかが決定的に重要であり、その場合、本物としての特性は、(1)基本的な機能において優れていること、(2)デザインが美しく独創的であること、(3)作り手の熟練と真心が体化された風格と温もりを具えていること、に加えて、(4)製品の作りが堅牢であり十分な耐久性があること、が挙げられる。神社のご神木に見られるように、数百年を経た大木は若い木にくらべてたんなる(幹

の)直径の違いを超えた神聖さを我々に感じさせる。耐久性のある製品に我々が感じる一種畏敬の思いも、これからその製品が経過するであろう時間の重みが、限られた時間を生きる我々に迫ってくるからである。

本物としての要件を具え、それを消費者に訴求する適切なマーケティングと組み合わせることに成功すれば、その商品はブランド品として非ブランド品にくらべて格段に高価な価格設定が可能になり、耐用年数の増大による買い替えサイクルの長期化をカバーすることが可能になる。

2) 部品交換による機能向上

製品機能が発展途上にある機能未成熟商品(たとえばパソコンや自動車)については、機能をバージョンアップあるいはグレードアップするための部品交換を行い、売上収入を部品交換サービスによって確保することができる。個々の部品の耐用年数を高めて製品全体の耐用性を高めつつ、機能向上に必要な部品のみ取り替えを行うという事業のあり方は、製品のまるごとの買い替えに比べ売上金額の減少は免れないから、そのような事業スタイルが消費者に評価され、市場シェアが拡大するという意味での消費者からのサポートが必要になる。また、部品のインターフェースを規格化して取り替え可能な設計にするという技術的要件はもちろん必要であるが、取り替え部品の素材としてのリサイクル性も十分考慮した設計がなされねばならない。

3) メンテナンス・サービス

耐久性を高めたとしても、部品ごとに耐用年数は異なるから、諸他の部品が十分使用可能であるにもかかわらず、ある部品の耐用年数が尽きてしまう、あるいは故障するという状況が生じる。その場合、当該部品の修理や交換のみで対処すれば、製品まるごと廃棄して買い替えるよりはずっと資源節約的である。部品交換を可能にするためにはそれぞれの型式ごとに構成部品を長期にわたって在庫することが必要であり、修理サービスや交換サービスに対する正当な料金体系が用意されねばならない。さらには、予防保全のための定期診断など、総じてメンテナンス・サービスのノウハウと仕組みがより高度に用意される必要がある。

4) 中古品市場の整備

まだ十分に耐用年数が残されている場合でも、好みが変わったり、家族構成の変化などで、製品を手放したくなることは当然考えられる。その場合、中古市場がなければ廃棄物にするほかにないが、中古市場の存在によってそれは中古品として市場価値を持ち、新たな買い手に引き取られて、流通可能になる。高耐久化はこのような中古市場の存在、すなわち使用に耐える限りそれが有価値物として市場で流通することが出来てはじめて資源節約効果を発揮できる。

かって、中古市場は宝石・貴金属・カメラ・高級時計など再生費用がほとんどかからず、新品価

格が高い製品を中心とするものであり、それに書籍など新品では手に入らないものなど、限られた品目が付け加わるのみであった。しかし、近年は自動車、CD やゴルフ用品、パソコン、ブランド衣類、家具、など従来中古市場が存在しなかったか、極めて小規模であったもので急速に市場規模が拡大している事例が多く見られる。書籍についても、“book off”店のように新たなビジネスモデルで多店舗展開しているものも見受けられ、古物屋からリサイクルショップに名前が変わっただけではなく、中古市場の存在が全体としてプレゼンスを増している。

中古市場の発展のためには、製品の機能状態を的確に判断できる高度な検査・再生技術、中古品の収集ノウハウの確立、価格設定(値決め)の透明性、保証制度の充実など、幾つかの条件が満たされなければならないが、このような条件が満たされる限り、製品耐用年数の増大によって新たな中古市場が形成される余地はまだ多くの製品種類についてあり得よう。

5) リユース

廃品とされた製品を分解して、再使用(リユース)可能な部品を選別し、必要な洗浄、修理、調整を行って、構成部品として再使用し、あるいは機能アップした部品と取り替えることによって、部品も製品もその耐用年数を最大化することが出来る。リユースは廃棄された製品を分解、洗浄、加熱処理などによって再び素材として利用(再利用)するリサイクルと比較して、素材として再生する工程と素材を部品に加工する工程とを省略できるからエネルギーと原材料の両面ではるかに資源節約的・環境負荷節約的である。この意味で、リサイクルを標榜する企業よりも、リユースに真剣に取り組む企業の方がはるかに環境意識が高いと評価できる。

製品カテゴリー

中古品	ユーザーや流通業者が独自に整備して再使用
再生品	一部の部品交換により機能アップした製品
再製造品	相当数のリユース部品を使用
新造品	全て新品部品を使用

ちなみに、環境先進企業として評価の高い(株)リコーでは部品のリユースに力を入れており、同社ではその製品を次の4つのカテゴリーに分類しているが、全売上高に占める再生品および再製造品のウェイトは漸増傾向にある。

6) リース

以上、高耐久化を促進しつつ企業として売上収入を確保する方途を幾つか述べたが、市場経済という条件の下で高耐久化の技術的可能性を最大限に実現するためには、所有権の販売を中心と

する現行のシステムを利用権(使用权)のリースを中心とするシステムへ転換する必要がある。リースであれば耐用年数が長いほど減価償却後のリース期間が長くなり、メーカーとしても採算的に有利になるからである。この転換が商品生産のどれだけの部分をカバーしてなされるかが、環境負荷の最小化による持続性の確保という点でもっともクリティカルであると思われる。製品の売切りによる販売収入に依存する収益構造では、買い替えサイクルは短い方が望ましいから、資源節約的な高耐久化技術の開発・導入にインセンティブが働かないだけでなく、モデルチェンジや流行の演出など、機能的進歩を伴わない現行モデルの廃棄に傾く弊害を持つ。

売切り販売からリース料による収益構造へ転換することこそ、高耐久性実現の強力な推進力を提供するものである。

産業のできるだけ広い範囲をカバーして売切りからリースへ転換するためには、所有は製品機能を楽しむための方法の一つに過ぎず、リースによっても機能の享受が可能であることを認識し、所有を超越する意識変革を消費者が行うことが必要になる。また、メーカー自身もメンテナンスやリースなどのサービスへシフトすることは、資源・環境問題への対処として重要であるだけでなく、内需指向型の産業構造を形成して雇用機会を確保する手段でもあることを認識しなければならない。すなわち、“製品の生産から機能の提供へ”という意識変革がメーカーにとっては必要である。

結び

資源・環境問題の深刻化とともに、競争のあり方も従来型の QCD(品質、コスト、納期)に加えて、環境配慮のレベルを競うものに進化しつつある。とりわけ、機能的に成熟した商品はデザインや耐久性に裏付けられたブランド力の優劣に依存する割合が高くなると共に、環境配慮の優劣が厳しく問われることになる。やがては、環境配慮のあり方如何が、品質と並んで、ブランド力を規定する主要な要因になるものと考えられる。また、パソコンや自動車など機能的進歩の途上にあるものも、例えばパソコンのように CPU など基幹部品をインテルなどの標準品で抑えられている業界では機能面での差別化を図ることが現実には困難であり、環境配慮の優劣の方が差別化戦略としての重要性を増しつつある。自動車についても、トヨタのプリウス車に見られるようにブランドイメージの根幹を価格から環境にシフトさせる傾向が顕著であり、自動車業界の再編成そのものも次世代自動車としての電気自動車の開発をめぐる競争が契機となっている。

こうして、企業経営における環境問題の比重はますます大きくなることが予測されるが、企業によってなされる環境マネジメントの進化過程は、汚染物質の工場排出量の削減を図る工程レベルのものから、省エネ製品に代表される製品レベルの環境マネジメント、さらに進んで、製品の耐久性を保証するメンテナンス体制の整備というサービスレベルの環境マネジメントに進化しつつあり、現代は、このようなサービス経営化へのトレンドを十分に踏まえて環境の持続可能性

(sustainability)に配慮することなくして、企業経営の持続可能性もまたあり得ない時代となっている。

(以上)

循環型社会に対する防災科学からの視点

第4部会員 入倉孝次郎

本報告は循環型社会特別委員会の提案する「真の循環型社会を求めて」について防災科学の視点からの考えをまとめたものである。

自然災害の発生状況

20世紀の科学・技術の発展は、生活を豊かにし福祉を増進させるなどの正の遺産と同時に、化石エネルギーの過度の使用によるCO₂の増加による温暖化の進展、都市への人口集中など大量廃棄物の発生など、自然の物質循環が地域的にも地球規模でもバランスを喪失し環境破壊が深刻化するという負の遺産を残した。地震・火山などの地変や台風など異常気象によって引き起こされる自然災害も図1に示されるように20世の後半増加の一途をたどっている。特に1990年代に入ってから増加が急激となっている。自然災害の発生件数は90年代には60年代の3.2倍、総経済損失は90年代に60年代の8.6倍にもなっている。このような自然災害の増加傾向は災害に脆弱な地域に人口や資産が集中していることを示す⁽¹⁾。

このことは図2に示される1950年代以降の世界の主な自然災害(死者1000名以上)の分布⁽¹⁾からも理解される。日本を含め都市への人口集中地域に大規模な自然災害は集中している。特に、開発途上地域では、都市化が進む一方で、遅れた基盤整備が災害の脆弱性を高めている⁽¹⁾。

国際防災10年の取り組み

20世紀の人類の課題の1つである自然災害の軽減のため、国連を中心として20世紀の最後の10年を「国際防災の10年」と定め国際的な災害軽減の取り組みが行われた。この活動は、自然災害の影響評価、事前予測、早期警戒システムの設立、防災知識の普及、そのための国際的技術援助・移転、教育訓練、など多岐にわたる取り組みがなされた。日本ではアジア地域の多国間防災協力を推進するためアジア防災センター(1998年神戸)が設立され、現在も活発に活動を継続している。国連のプログラムは1999年末に終了し、国連の事務総長報告で、本活動が極めて有効かつ先駆的であったと評価する一方、自然災害による犠牲者が減少していないこと、継承する活動の必要性が強調された。それを受けて国連は国際防災の10年を継承する「国際防災戦略(ISDR)活動の実施を決めた。このプログラムでは、世界的防災戦略として、自然災害に対して事後の応急対応だけでなく事前の予防の重要性に重点移している⁽²⁾。

この「国際防災の10年」成果として、自然災害の発生原因は人類の社会経済活動に密接に関連しており、自然災害軽減の取り組みは短期的には効果的ではないが、持続可能な社会の構築と

という観点からの継続した取り組みが必要である、との認識が国際的に広まったことがあげられる。

阪神・淡路大震災

日本における自然災害は戦後の1945年から1960年の間1948年福井地震や1959年伊勢湾台風など5000人規模の死者・行方不明者を巨大災害をはじめとして、1000人を以上の死者の災害が11回も起きている。しかしその後台風などによる風水害や地震などによる災害は毎年起ってはいるが1000人を越える死者の災害は1995年阪神大震災までは一度も起こらなかった。そのため、1995年までは日本は世界の防災に関する最先進国という考えが信じられていた⁽³⁾。

阪神・淡路大震災は死者6400名を越える戦後最大の災害となった。被害額は直接被害のみで10兆円に達する。阪神・淡路大震災において極めて多数の死傷者は建物の倒壊によるものである。死者の約83%は建物倒壊による圧死で、火事による焼死者が約13%で、これも住宅密集地に起こった建物倒壊により避難できなかったため、建物倒壊を原因とする死者は合わせて実に96%にも及ぶ。倒壊した建物の多くは1981年の建築基準法の改正以前に建設されたいわゆる既存不適格の住宅であった⁽⁴⁾。

災害の拡大の要因として、地震災害発生直後の情報伝達の困難、交通施設の損壊による極度の交通渋滞、避難、救急救命、消火、緊急輸送など復旧活動の困難さがあった。これらは災害に対する都市の脆弱さを露見するものであった。

循環型社会と防災

20世紀の科学技術の発展のひずみとして、人口の増加とそれによる化石エネルギーの過度の使用などにより自然の物質循環のバランスが地域的にまた地球規模でも失われたこと、さらに巨大都市の出現とそれに伴う都市の災害に対する脆弱化したこと、などが指摘される。それらの結果として引き起こされている大きな環境問題および災害多発問題の解決の有力な方策の1つは「循環型社会」と考えられる。本特別委員会で「循環型社会」とは、「物質・エネルギーへの過度に依存する生活様式、社会組織を改め、それらの利用を最小限にとどめ循環型とし、持続可能な発展をする社会」と考えられている。

この視点からの真の循環型社会は災害の観点からも災害軽減にもっとも効率的社会となるものと考えられる。特別委員会でまとめられた「真の循環型社会」の提言についてここで防災科学からの視点を以下にまとめる。

循環型社会のための都市的システムの改善の方向は、大量生産・大量消費・大量廃棄の「都市的システム」を循環型に改善し環境に負荷を与えない社会の構築にある。これは、住宅密集、道路交通の集中などによる都市のもつ過度の負荷が、都市の脆弱性として大災害の時に最も顕著に現われる、総合防災学の視点と共通する⁽⁵⁾。特別委員会では、解決の方策として、廃棄物の抑

制,製品を循環資源とし,結果として天然資源の消費を抑制する,ことを指摘する.この視点は,地球温暖化の防止だけでなく,自然災害の発生時に災害の拡大の抑止に有効となる.

エネルギー問題に関して,化石エネルギーの供給比率を下げ,再生可能エネルギーへの転換が必要であるが,経済性のみではエネルギー転換は困難となっている.そのため,京都議定書の遵守を考慮すると,短期的には原子力発電の力が必要とされている.このことは,原子力発電所関連設備・施設についてその安全性の国民的合意を得るための地震力など自然災害の力源の予測評価の精度向上と関連する耐震指針など法的整備が重要な要素となる.

工業製品や施設・設備に関して,耐久性の向上により長寿命化をはかり,無駄な人工物を作らない,という考えは単に製品だけの問題ではなく都市施設にも当てはめて考える必要がある.土木・建築構造物の長寿命化は重要課題となる.しかし,現在の多くの構造物は30年程度の寿命を考慮して設計されている.たとえば,耐震性について建築構造物は30年度程度を供用期間として設計がなされている.一方土木構造物の多くは再現期間50年程度と考慮して地震危険度解析がなされている.ただし,建築構造物については1981年の建築基準法の改正で2段階設計の考えを取り入れている.1段階は供用期間に数回程度経験する地震の時に建物損傷が発生しないように許容応力度に基づく弾性設計とする.2段階目で,許容期間中には発生しないが発生可能性のある地震動にたいして多少の損傷はやむをえないが人命に影響を及ぼすような建物倒壊や大きな損傷は起こらないようにする.土木構造物に対しても,1995年阪神大震災以降おなじような2段階設計の考え方が取り入れられ,レベル1,レベル2地震動で,供用期間中には来ない可能性が高い地震力が来ても倒壊はしない工夫がなされている.しかしながら,これまでの設計の考え方では30~50年を供用期間とした設計しかなされていないため,長寿命化を図るには基本的考え方の検討が必要となるであろう.

巨大都市を循環型に改造する方向性の1つとして巨大都市のコンパクト化は災害発生時の避難路の確保,交通システム,情報伝達システムの効率化を可能とするもので被害の拡大の軽減のためにも重要な考えかたである.

おわりに

日本は,アジア地域と共通してアジアモンスーン地帯に位置し,急峻な地形,降雨に恵まれるなど風光明媚な自然的条件をもつが,一方で地震,台風,豪雨,火山噴火などによる災害が発生しやすい国土となっている.その中で,日本は高度の教育力を背景として,科学技術水準の向上に成功し,かつ災害にも強い都市づくりも行ってきた,1990年代の前半までは信じられてきた.しかしながら,1995年阪神・淡路大震災に露見したように災害に対する脆弱性も持っている.

持続可能な人類社会の発展のためには,循環型社会の形成が必須条件であり,そのためには高度の科学技術,産業の発達が必要になる.この循環型社会構築の考えは災害に強い都市づくりの

考えと多くの部分で共通している。日本が自然災害に対する脆弱性を克服するには循環型社会と歩調を合わせた都市の改善が必要とされる。

循環型社会に有効な産業技術の構築と同時に災害に強い街づくりのための科学技術の高度化を行い、その技術情報をアジア地域、さらに世界の各地域に伝達することは科学技術先進国としての日本の責任と考える。

参考文献

- (1) 京都大学防災研究所：「21世紀の災害とその研究」，2001年4月
- (2) 内閣府編：平成14年防災白書，2002年6月
- (3) 京都大学防災研究所：防災学ハンドブック，2001年4月
- (4) 内閣府ホームページ：中央防災会議「第7回東南海・南海地震に関する専門調査会」資料、2002年12月24日。
- (5) 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会：防災に関する研究開発の推進ほうさくについて，2003年3月。

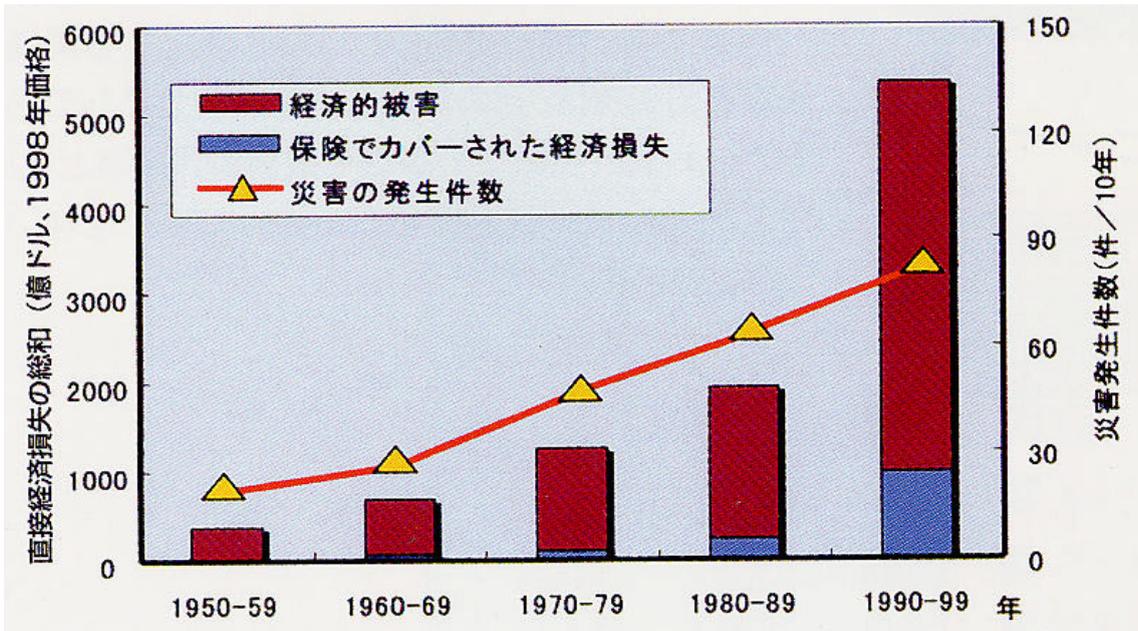


図1. 自然災害の発生件数と経済損失の変化（世界総計）

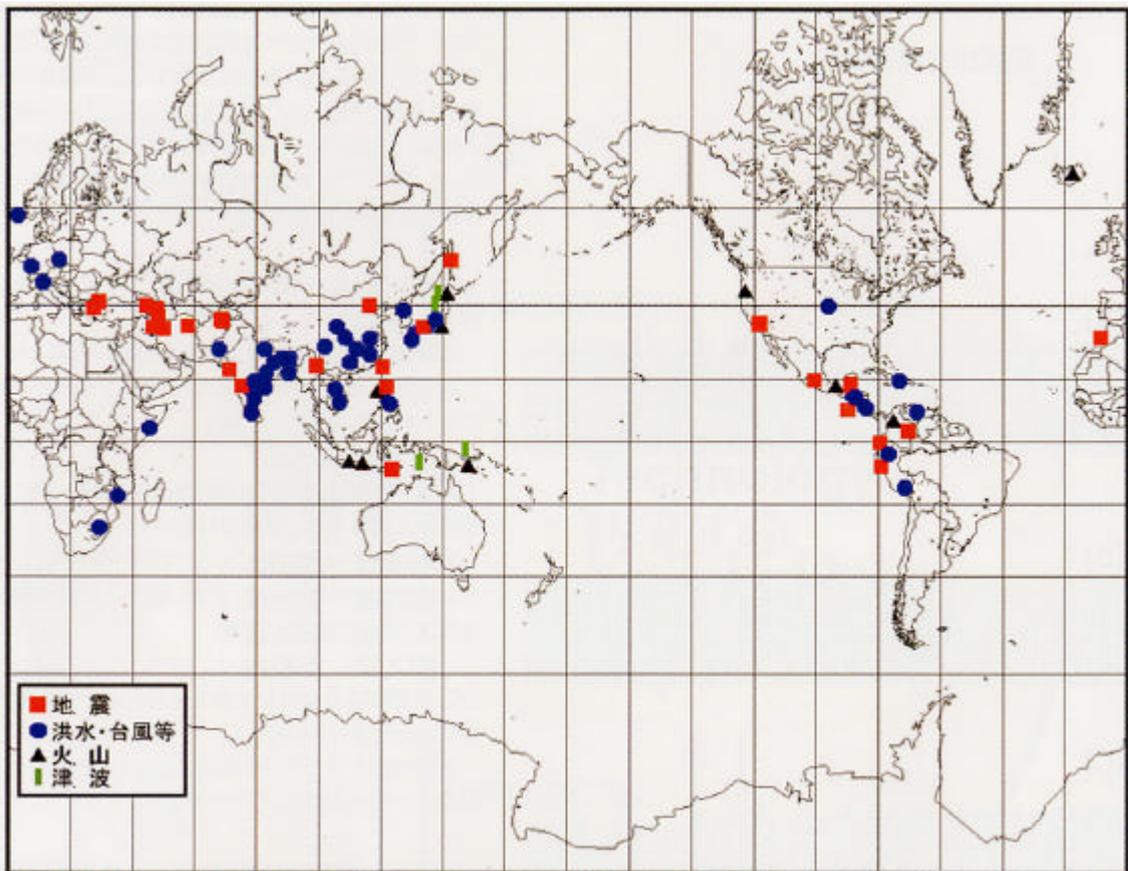


図2. 1950年以降の死者・行方不明者1000人以上の大規模な自然災害

循環型社会とグリーンケミストリー

第4部会員 村橋 俊一

1. はじめに

世界の人口は1950年には25億人であったが、2000年には60億人を超えており、従来の拡大・発展を前提としたエネルギーや資源を大量に消費する社会の仕組みでは、地球の資源の供給能力と環境処理能力の両方で破綻に近づいている。そのような事態の中で我々は人間の活動と地球の能力とのバランスの上に立った持続可能な循環型社会を構築しなければならないが、その重要な鍵となるものづくり、機能づくりにどう取り組むべきかについて、グリーンケミストリーの観点から検討してみたい。

化学および化学工業はこれまで食糧確保のための肥料や農薬の供給を始めとして、合成樹脂、合成繊維、合成ゴム、医薬品など多くの物質を安定的に供給して人間生活を豊かにしてきたが、これからはCO₂の排出量を指標としてエネルギー資源を使用するとともに、資源の有効利用と再使用を包括した理想に近い循環型社会を実現してゆくために環境にやさしいものづくり、機能づくりを推進することが求められる。

2. グリーンケミストリーの考え方

各国ではこれまで環境に対する種々の取り組みが行われてきたが、その戦略は大きく変化してきている。例えば、米国では1970年から1990年にかけて、環境汚染物質の排出規制と廃棄物処理を行うことに主眼を置き、法律の数を3倍に増やして『環境保全』(Protection)を目的とした政策を行った。産業界もこれに応じて1000-1500億ドル/年を支出したが、環境の改善には繋がらなかった。そこで1990年、危険性と有害性がより低い製品や化学プロセスの開発を推奨する『環境汚染防止』(Prevention)を行う政策に転換し、産学官の連携がすすめられた。グリーンケミストリー(GC)の概念はこうした背景のもとに生まれた。

米国の環境保護局(EPA)によれば、『GCとは化学品の設計・製造から廃棄・リサイクルまで全サイクルにわたって、人間の健康や環境に害を与える原料、反応剤、反応、溶媒、製品をより安全で環境に影響を与えないものへの変換を推進し、変換収率、選択性の高い触媒プロセスの開発によって廃棄物の少ないシステムを構築すること』とし、クリントン大統領は、化学品のライフサイクルで発生する環境汚染をグリーンケミストリーによって元から断ち環境保全(Protection)に消費される社会資源を減少させる事を目標として、環境汚染の防止(Prevention)を優先させる政策を推進した。

わが国でもグリーン・サステイナブルケミストリーネットワークが2000年に産学官の協力により発足し、『合成、使用、廃棄、リサイクルの全過程にわたり、環境リスクを最小にするための活動』が始まっている。化学産業界ではこれより先1995年から世界的な化学産業の動きと連動して、レスポンシブルケア(RC)活動を行っている。この運動は化学物質の開発から廃棄にいたる全ての課程において、1)環境保護 2)保安防災 3)労働安全衛生 4)化学品安全を目指す企業の自主活動として行われている。

3. グリーンケミストリーの目指すもの

GCは化学品の設計・製造から廃棄・リサイクルまで全サイクルにわたって、安全で環境に影響を与えないものへの変換を推進し、廃棄物の少ないシステムを構築することを目標としている。

米国の環境省のAnastasの提唱しているGCの12原則は 1)廃棄物は生成してから処理するのではなく、生成しないようにする 2)合成は使った原料をできるだけ製品の中に取り込むように設計・合成する 3)人の健康や環境に対して毒性が少ない物質を使い、また、有毒物質が生成しないよう設計・合成する 4)化学製品はその機能・効用を損なわず、毒性を下げるようにする 5)溶媒、分離剤などの反応補助物質はできる限り使わないか、もし使っても無害なものを使う 6)エネルギー消費は環境や経済への影響を考えて最少にする 7)原料物質は技術的、経済的に実行可能な限り、枯渇性ではなく再生可能なものを使う 8)合成中不要な修飾は可能な限り避ける 9)できるだけ選択的な触媒反応を開発して用いる 10)化学製品は使用后、環境中に残留せず無害物質に分解するようにする 11)進んだ計測技術によりプロセスの計測を行い、有害物質の生成を抑制する 12)化学物質の排出、爆発、火災などの化学事故の可能性を最少にするよう選択する であり、これらの条件をできるだけ多く満たして新しい機能を創出するべきであるというものである。

その結果として化学プロセスおよび化学品がもたらす環境負荷が大幅に低減し、経済性、効率が向上する。自由経済の社会ではインセンティブが働く事が重要であり、環境負荷が小さく機能の優れた製品を安くつくり、速く届けることにより、経済性、そして結果的には競争力を持つ事になる。さらに大変重要なことであるが、GCは化学と社会の信頼関係を築くことに大きな役割を果たすであろう。

4. グリーンケミストリーの実践

持続可能な社会をつくるためにはGCの視点に立った新しい技術を創出し、現存の製品、あるいは製法を常に積極的により良いものに取り替えてゆこうと行動する事が重要である。ここでは、a)環境負荷の小さい安全な製品を創製して環境負荷が大きい製品と置き換える b)環境に調和したグリーンな物質変換プロセスを創製する c)コンビナトリアルケミストリー、マイク

ロリアクター、ロボット合成など、総合的・革新的技術を創出する について触れることとする。

a) 環境負荷の小さい安全な物質の創製

環境によりやさしい化合物を創出し、これに転換することが最も基本的な方法である。ここではいくつか例を挙げてみたい。殺虫剤の DDT は第二次大戦後大量に使用され、伝染病の防止に一定の役割を果たしたといわれているが、生体への蓄積、鳥類やほ乳類へ与える毒性が強いことが明らかとなり、現在では除虫菊の有効成分の構造から推定して創製された無害な殺虫剤が代替品として使われている。船底に牡蠣などの貝類が付着して船舶の運航速度を減速させるのを防ぐために、これまで有機スズ化合物が使われていたが、これが巻貝などの生態系に有害であることから、新しいより無害な有機物質が開発され、これに代替されている。また南極圏の上空のオゾンホール拡大により皮膚癌にかかる人が増加しており、オゾンホールの縮小化が重要な環境の課題となっている。以前はフロンが冷媒や電子部品などの洗浄剤に用いられていたが、フロンの分子が大変安定であるという特性が問題となった。すなわちフロンは成層圏まで分解されずに上昇し、強力な紫外線により分解して塩素原子を放出し、連鎖反応によりオゾン分解する。そこで水素原子を 1 個含む代替フロンを用いれば、その分子はそれほど安定ではないため、成層圏にたどり着くまでに分解してなくなるので、オゾンの分解が起こりにくくなる。このような代替フロンに置き換えることにより、2020 年にはオゾンホールを元の状態に戻せるのではないかといわれている。上記の三つの例の基本的な概念は、必要な機能を持たせる共に、その役割を終えた後はすぐに分解し、循環系に戻すことができるという事である。堆肥中で生分解する生分解性ポリマーも同じような発想に基づくものである。ポリ乳酸、ポリβ-ヒドロキシ酸、ヒドロキシ吉草酸などの脂肪酸のポリエステル合成されているが、このような生分解性ポリマーはグリーンな素材として社会に受け入れられ、世界の消費量は 1996 年の 14 万トンから 2001 年には 68 万トンに増大している。

一方、耐久性の高い物質を合成し、その機能を安定的に長寿命化するという考え方も循環型社会の構築には重要である。汎用性のあるプラスチックのポリスチレンは安価であるため大量に消費され、破棄されているのに対し、電子材料となるエンジニアリングプラスチックのポリイミドは長期間厳しい条件下でも高機能性を発揮するので、高価であるにもかかわらず用いられている。短小軽量で高い機能を持つ材料を生み出すナノテクノロジーを推進する事は循環型社会を構築しようとするグリーンケミストリーの柱である。

このように常により安全で高機能物質を創製し、新しい技術によって少しでも良い環境をつくり出してゆくことが重要である。

循環型社会構築のキーワードに 5R (Reduce, Reuse, Recycle, Repair, Rental) がある。この 5R を実践するには目的に適した物質を設計する必要がある。Recycle は循環型社会構築の

鍵のように見えるが、化学製品のリサイクルは金属材料のように簡単ではない。プラスチックを例にあげると、高機能化するために添加物の付与が行なわれていること、資源の回収、分離、再加工などの工程で新たなエネルギーが必要であること、品質の劣化が起こることなど種々の問題がある。プラスチックのリサイクルを行うには単一の素材から多種の優れた機能を持つプラスチック製品を作らねばならないが、それには触媒反応の開発が必須であり、現在各国で精力的に研究されている。特定家庭用機器再商品化法に対応して、プラスチックの使用品種を1000種から5-6種に絞るなど、企業の戦略もこの方向に進んでいる。プラスチックの再商品化はまだ手つかずに近い分野である。Reduce, Reuse, Repair, Rental を実行するためには耐久性を目的とした材料開発が鍵となる。

b) グリーン物質変換プロセスの開拓

GC の実現のためには、物質合成のクリーン度を評価する客観的な指標が必要である。これには E ファクター、原子効率 (Atom efficiency) あるいは原子経済 (Atom economy) という、反応に関与するすべての物質を考慮した定量的な指標が提唱されている。E ファクターは 1 kg の生成物を得るのに何 kg の廃棄物が生じるかの指標であり、 $E = (\text{副生成物の総重量}) / (\text{目的生成物の重量})$ で計算できる。一方、原子効率は $(\text{生成物の分子量}) / (\text{原料や反応剤の分子量の総和})$ であらわし、個々の反応の評価に適している。理想的な物質変換プロセスでは $E=0$ 、原子効率=1 となる。例えば、石油化学工業のプロセスの生産量は極めて大きい ($10^6 - 10^8$ トン/年)、行程が簡単な化学反応のために副生物は少ないのでその E-ファクターは小さい ($E = 0.1$)。一方、医薬品の製造では生産量は少ない ($10 - 10^3$ トン)、目的物を合成する段階数が多く、また化学反応が複雑なので副生物の量は飛躍的に増大する ($E=25 - 100$)。

グリーンな物質変換法の開拓の鍵は、新しいクリーンな触媒反応の開拓である。例えば物質変換の基本反応に酸化があるが、従来大量の有害なクロムやマンガン化合物などが用いられていた。しかし最近では生体における酵素の代謝機能をシミュレートして酸素により触媒的に酸化できるようになっている。これらの反応は生体内の反応同様温和な条件下で進行し無害である。また、化学工業の廃棄物の中で最も多いのが塩で、この塩の処理が重要課題であるが、酸あるいは塩基にかわる新しい中性な触媒が開発されている。従来、酸や塩基を使用したあと、中和により多量の塩が生じていたが、新しい方法を用いると物質変換が塩の生成を伴わずに触媒的に進めるようになる。

新しい反応メディアの開発も GC の課題の一つである。通常の有機物の物質変換には有機溶媒が反応メディアとして用いられている。しかし環境への負荷が大きいため新しいメディアを用いる方法が開発されている。分離操作が容易な反応メディアとして超臨界流体、イオン溶液、フッ素溶媒などが用いられている。例えば、二酸化炭素は 31、73 気圧以上で超臨界流体になり、人体や環境への害がほとんど無く、反応終了後常圧に戻すことで気体として直ちに除去で

きるために単離操作を必要としない。その他、安定で分離しやすいフッ素溶媒やイオン溶液を用いる反応系が開発されている。また、有機物の反応を有機溶媒の代わりに水中で行う方法はGCの有力な手法の一つとなるが、このための必須となる水中で使える触媒の開発が行われている。

c) 総合的・革新的技術

従来の大量消費型の研究開発に代わる、省エネルギー省資源型の環境にやさしい総合的・革新的技術を開拓する必要がある。コンビナトリアルケミストリーは、複数の基質や反応条件（触媒、温度、溶媒等）を考えられる全ての組み合わせで反応させ、同時に多数の化合物を合成したり、反応条件の最適化を一気に行える手法である。コンビナトリアルケミストリーでは微量の反応を行い、処理、分析することができる特徴がある。このような手法を用いれば、何千種類もの化合物の合成を極めて短時間に行うことができる。この手法は医薬品の基本となる化合物の探索や薬剤の有効性のスクリーニングにも用いることができるし、膨大な種類の触媒の探索を効率よくおこなうことも出来る。

環境に対して量としてはほとんど負荷をかけない化学反応をおこなう方法も極めて重要である。反応容器が μl 程度（1 mm 立方の容器）の微小反応工場とも言えるマイクロリアクター（microreactor）が開発され、実用化されている。さらにこれをマイクロ集積することによって、マイクロチップ（IC回路のチップに対応）の中で反応させようとする研究も注目されている。

d) グリーン度の評価

グリーン度を評価する事は重要であるが、これは極めて難しい課題である。前述の原子経済やE-ファクターは狭義の指標であり、広い視点から評価するライフサイクルアセスメント(LCA)が必要である。LCAとは、人間の活動に伴う入出力量を定量的に把握し、この減少を目的とした方法論である。国際標準化機構が環境管理、監査に関してISO14000シリーズをもうけているが、LCAはその中に含まれ、比較的容易に使用できる評価尺度になりつつある。環境負荷による影響を定量的に表現することは難しいが、今後持続可能な循環型社会を構築するためには、このような方法論を確立する必要がある。

6. エコマテリアルを育てる社会的背景

循環型社会構築の目標は材料の機能を高度化するとともに、そのライフサイクル全体にわたって環境影響を最小にすることであるが、従来の製品に比べて環境効率が飛躍的に向上した材料はエコマテリアルと呼ばれている。エコマテリアルを社会に普及させるためにはいろいろな方法が提唱されている。まず、i) エコマテリアルのコスト競争力を強化するために環境影響の低減化に対する評価を行い、収益増加に結び付けられる社会システムを整備する。その実施にあたっては政府のグリーン購入、大企業のiso14001によるグリーン調達、EUで行われているよう

にエコ製品に対する付加価値減税を行い競合製品より優遇する。また Green Consumer Guide (英国) のような民間団体のグリーンコンシューマー16原則をすすめる。 ii) ライフサイクルの負荷の増大に対して対価を支払う社会システムを構築する。加工、組み立て産業に対して拡大生産者責任を負わせること、さらに素材産業が単に材料を販売するのではなく、レンタ・メタルあるいはレンタ・モレキュールのようなレンタル、リースを柱とするビジネスモデルへの変革、さらには製品の機能を販売するという価値観への転換をはかる必要がある。 iii) 一般消費者の自発的意志によるグリーン購入を行うために、グリーンケミストリーやエコマテリアルについての学校教育や社会人教育を精力的に行うことは、また大変重要なことである。

7. 化石資源と循環社会

太陽光や風力、また光合成により炭酸ガスから生じる再生可能資源であるバイオ資源を最大限に活用し、化石資源を持続させて使用する必要がある。化石資源のうち石油は44年、天然ガスは62年、石炭は230年で枯渇すると言われている。従って石油はエネルギー源としてはできるだけ使用せずに、炭化水素資源として用いてその機能を終えてからエネルギー源として使用することを基本的に考えるべきであろう。最も大切な資源はエネルギーおよび物質を含めた循環型社会の構築の鍵を握る水素である。水素は燃料電池自動車のエネルギー源として使用されているが、副生物として水しか生じないクリーンなエネルギーである。物質のエネルギーを水素に換算して考えれば、エネルギー資源も含めたマテリアルバランスの全体を解くことができる。

水素の製造、貯蔵、輸送および関連インフラの開発、燃料電池などの開発研究など、GCと密接に関連する基礎的分野の材料創製、技術開発は重要でありその推進が必須である。技術的な問題で手が付けられていない未利用資源は大量に存在する。メタンハイドレードは遠い将来の有力資源である。石炭は生物体が炭化して生成したとされているが、その前駆体であるオイルシェールやタールサンドなど膨大な資源が存在する。これらには多量の窒素と硫黄が含まれているので、これを除かない限りNO_xやSO₂などが発生しエネルギー源としても使用できない。水素で還元して炭化水素とアンモニアと硫黄に変換する技術を確立すれば、これらも有力な資源となる。かつて硫黄鉱山から採掘していた硫黄は今日では脱離技術により副生物として得られる硫黄で賄われている。このように生体の構成要素でもある窒素資源や硫黄資源も炭素資源と同様に循環させることが課題である。

太陽光を活用する機能材料の開発、水素をメタンや種々の未利用の資源から製造する技術など、未来に向けて循環型社会を築くための基礎的なGCの役割は大きい。

参考文献

御園生 誠、村橋 俊一 編、グリーンケミストリー、講談社サイエンティフィック、（2001）

循環型社会と材料

第5部会員 富浦 梓

1. 文明と材料

人類は天然の素材をより便利なものへ加工し使用する、あるいは天然に存在しない素材を作りだしこれを加工し使用することを発見した。これによって人類は原始的生活から開放され文明社会を形成する。人類が最初に利用した材料は石や土、木であり、また獣皮や動物・植物繊維など天然に存在するものであった。ついで、金属の発見と利用につながり、18世紀にいたって有機合成材料など、天然に存在しない材料の製造・利用が始まる。

金属は多くの場合原料である鉱石から精錬を経て実用に供される。記録によると古くから使用された金属材料は鉄、銅（青銅）であり、ピラミッドの建設に青銅や鉄が使用されていたことは明かである⁽¹⁾。旧約聖書イザヤ書に記述されている「かくて彼らはその剣を打ちかえして鋤となしその槍を打ちかえして鎌となし国は国に向かいて剣をあげず戦闘のことを再び学ばざるべし」はあまりにも有名な一節であるが⁽²⁾、この頃から鉄が武器や農具、工具として一般的であったことを物語っている。

金属の製造には高い温度が必要である。鉄を精錬するために多くの木材が利用され、森林地帯の砂漠化に拍車をかけた。トルコのヒッタイト遺跡から発見された粘土板には鉄の受注書があり、ヒッタイトは鉄を交易品として製造していた⁽³⁾。荒涼たるトルコ高原が往時緑に覆われていたことを想像することは難しい。

鉄の用途を一変させたのは産業革命である。蒸気機関や電気の発明によって牧歌的「もの」づくりは消え去り、動力による「もの」の大量生産が一般化する。機械の発達には輸送手段の革命をもたらし、また鉄とセメントによる高層構築物の完成は人の都市への集中を可能とした。これらによって人の生活や国家のあり方は決定的に変化する。

産業革命と前後して生命体でなければ生産できないと考えられていた尿素を無機物から合成したヴェーラーの偉業は当時の人々に大きな衝撃を与えた。ヴェーラーの成功に刺激されたホフマンは石炭乾留の副産物であるタールからインディゴを合成することに成功し、IG Farbenを初めとする化学産業の勃興を促す⁽⁴⁾。20世紀になって有機合成化学は急速な進歩を遂げる。第2次世界戦争後、原料は石炭から石油に移り、続々と発見される有機物質は産業のみならず農業、医療、をはじめ人の生活の隅々にまで浸透し、また、生命科学の扉を開いた。この科学技術文明はわれわれにはかり知れない利便を与えたが、一方では、失われたものも数知れない。

人は一旦獲得した利便に執着し、長期的不安は黙殺しがちである。20世紀に頂点に達した科学技術文明の終点は、現代を象徴する大量生産・大量消費・大量廃棄システム社会につながって

くる。簡単に「すてる」ことによって、新しい「もの」を手に入れる行為の繰り返しは、人の「ところ」にも大きな変化をもたらしている。最近問題になっている「ところ」の荒廃は、どこかで、簡単に「もの」を捨て去る風潮と結びついていることに留意しなければならない。

第17期日本学術会議教育・環境特別委員会報告では、われわれの価値観を「物質・エネルギー志向」から脱「物質・エネルギー志向」へ切り替えなければならないとし、この社会の実現を図るには、物質・エネルギーに過度に依存する生活様式や社会構造の変革を行い、この変革を可能とする価値観の醸成を図る必要があると力説している⁽⁵⁾。この変革は短時日で出来るものではない。とくに、ここでいう価値観とはたんに個人の価値観ではなく、また、特定地域の人々の価値観でもない。まさに、全人類に共通した価値観であり、これを変えることは簡単なことではない。たとえば、われわれは材料の持つ物理・化学的特性、経済的特性に注目し社会的特性を過小評価してきた。その結果多くの問題を招来したことを反省して、今後は材料特性を科学者・技術者のみの判断ではなく、社会や多くの人達の多様な価値観に基づいて決定しなければならない。

これに関連して、近代科学の幕開けとなった17世紀後半から18世紀にかけて多くの素人学者が職業的科学家と拮抗して科学の発展に寄与したことは興味深い。経験を主たる根拠とする技術者と論理を主たる根拠とする科学者が協業することにより工学が進歩してきたことを考えてみると、市民を含めた素人学者と職業的科学家の協業が現代の科学技術文明を望ましい方向に進めるために不可欠ではないかと思われる。しかしながら、新しく生まれてくる技術のもたらす社会的影響を類推するには過去の経験は有効ではない。つまり技術と工学の協業による成功とは異なった方法論を見出さねばならず、科学的に確認されていない事象に対する法的な規制や人々の合意形成をはかることも必要となる。市民による注目の喚起、法による規制、それらに科学的論拠を与える科学者の研究・広報活動が相互に連動して新しい方法論が形成されることになる。日本学術会議が主催した「先端科学技術と法」にかかわるシンポジウムはこの点に関して多くの示唆を与え、循環型社会特別委員会活動報告もこのような視点からまとめられなければならない。

2. 循環型社会と材料

最近3Rという言葉がよく語られる。Reduce Re-use Recycleの頭文字である。循環型社会の標語といってよい。まず、Re-use, Recycleの意味について考えてみたい。

「もの」を作り、使用し、廃棄して、廃棄物を「もの」の原料にリサイクルする3過程で消費されるエネルギーを、それぞれ、 E_p 、 E_c 、 E_r とすると、全消費エネルギー E_t は次ぎの式となる。

$$E_t = E_p + E_c + E_r$$

「もの」を使用するために必要なエネルギー E_c が「もの」の使用とともに増大する製品を考えてみる。例えば、家電製品、自動車などがこれに該当する。この製品を使用し、1年後のエネルギー消費量 E_p, E_c, E_r の比が1:1:1であったとする。2年後には E_c のみが増大して「もの」の

生産に必要なエネルギー E_p と「もの」のリサイクルに必要なエネルギー E_r は変化しないから、エネルギー消費量比は1 : 2 : 1、3年後には1 : 3 : 1となり、 E_c の比率のみが増大する。燃料を大量に消費する自動車の例では、1年間利用した場合と10年使用した場合とでは、全消費エネルギー量 E_t に占める燃料消費比率 E_c は、それぞれ約40%、約90%となっている⁽⁶⁾。したがって、使用することによってエネルギーを消費する耐久消費財は、省エネ型、長寿命型製品でなければならない。

一方、「もの」を製造するために必要なエネルギー E_p と「もの」をリサイクルするエネルギー E_r が「もの」を使用するために必要なエネルギー E_c に対して非常に大きい場合、たとえば、橋梁とか建築物のような資本財では、長期間使用するほど使用期間当たりの E_p 、 E_r は減少する。それゆえ、長期間使用に耐える設計や構造を採用すること、中間補修によって使用期間（寿命）を延長することが重要である。

ところで、 E_r は「もの」をリサイクルするために必要なエネルギーであるが、再生された原料は当然のことながらエネルギーを持っている。したがって、真の全消費エネルギー E_t' は次式となる。

$$E_t' = E_p + E_c + E_r - rE_p$$

リサイクル原料を使用すると、非リサイクル原料による「もの」の生産より多くのエネルギーを必要とする場合がある。そこで、再生された原料が元の「もの」作りに利用されるときに必要なエネルギーを考慮した修正係数（1）を乗じなければならない。 r は回収率である。この式から分かるとおり、リサイクルはできるだけリサイクル原料使用に伴うエネルギー増をもたらさないこと（を大きくすること）ならびに極力回収率をあげること（ r を大きくすること）に配慮して行わなければならない。回収物を利用しないで放置していたのでは、リサイクルとはいえない。

と r がいずれも1である、つまり、100%回収され、まったく増加エネルギーを必要としないで、そっくりそのまま元の「もの」に再利用される場合、例えば、自動車のバンパーで試みられているが、 E_t' は E_c と E_r の和となり、一見もっともよい方法のように見える。ただし、この場合、リサイクルに必要なエネルギー E_r が「もの」を作るために必要なエネルギー E_p より2倍以上大きければ、新たに「もの」を作ったほうがよいことになる。つまり、いったん使用した「もの」をできるだけ少ないエネルギー消費で回収し、そっくりそのまま再利用することが Re-use であり、それが可能となるような設計、製品、部品を開発することが重要である。

「もの」を使うエネルギー E_c とリサイクルに必要なエネルギー E_r が「もの」を作るエネルギー E_p に比較して大きくないが、回収物がそっくりそのまま元の「もの」に再使用できず、しかも「もの」の使用期間が短い場合、例えば、食品・飲料容器がこれに該当するが、回収率を上げること、少ないエネルギー消費で「もの」に再生が可能となるような製品設計、材料選択をす

ることが必要である⁽⁷⁾。

廃棄された「もの」をリサイクルしようとしても、混入した不純物が除去不可能であり、元の「もの」に再利用できる状態にならない場合がある。たとえば、銅、ニッケルなどが混入した鉄、金属類が混入したアルミニウム、着色ガラスが混入した透明ガラス、各種の樹脂から構成されるプラスチック製品・部品等はいずれも元の鉄、アルミニウム、透明ガラス、樹脂には戻らない。また、廃棄物の処理そのものが危険である、有害物質を発生する廃棄物などもある。この結果、回収された「もの」は再利用ができない、あるいは、燃料を含む低級な「もの」に再利用されることになる。これを避けるには、不純物が混入しない材料設計をする、有害物質発生の怖れがある材料を使用しない、安価な分別方法を開発する、経済性、エネルギー、環境などを総合的に考慮して、適切な再利用を考えるなどの対策が必要となる。

このように、リサイクルといっても極めて多様であり、適切なリサイクルを考えないと、経済的に成立せず、エネルギー消費が増大し、環境に悪影響を与えるなどの問題を発生することになる。

「もの」の循環が進み、「もの」の使用期間がどんどん延びたらどうなるのか。家庭で長く使用されている家電製品は冷蔵庫、テレビ、洗濯機、電子レンジ、エアコンの順番であるとのテレビ報道がある。しかも、テレビが不調になる理由の多くは内部の汚れで、洗剤で内部を清掃しほとんど新品同様に再生している回収業者がいる。我が家でも過去10年、回転制御が不調になった洗濯機以外は買いかえたことがない。また、平成12年10月時点で、国内新車販売は1.4%増加したが、平成11年度に廃車になった乗用車の平均使用期間は9.96年と前年度に比較して0.33年長期化し、今後もさらに長期化する傾向にあるとの新聞報道がある⁽⁸⁾。

今まで市場に存在しなかった画期的な新商品はさておき、耐久消費財の普及が進み、循環型社会が実現してくると、もはや、大量消費経済は期待できない。バブル期には消費意欲を刺激するために差別化商品が多く生産され、モデルチェンジも頻繁に行われた。しかし、消費者が賢明である証左はテレビや新聞で報道される通りである。それでは消費者が買いかえてみようと思う動機とはなにか。それは買いかえることによって明らかに利益がある、今までになかった利便が得られる、安心・安全・健康な生活が期待できる、環境にやさしい製品だから使うなどがある。たとえば、新しい機能を持つエレクトロニクス関連商品、法規制、社会的要求が新たに生じたために必要な安全装置・環境対策装置、エコロジーカーをはじめとする環境調和型商品、省エネ家電品、社会的弱者がより使いやすい製品・装置などがこれに該当する。

このような場合、商品をそっくり買いかえるのではなく、新規機能の部品を既存の商品に付け加える、あるいは取りかえることが考えられる。この技術は単純ではなく商品の設計段階からある程度の予測をしておかなければならない。修理をしたり新機能部品を付加、置換するよりは、

新品を買うほうが安いという風潮は早晩になくなる。アメリカでは安易に保険を利用して修繕すると保険料が高額になるため自ら修繕することが多いと聞いている。それゆえに、古い「もの」に新しい機能を付加する Retrofit technology の開発、メンテナンスの容易さを考慮した製品設計、部品の流通、消費者教育などが重要になってくる。

Reduce とは、廃棄する「もの」を減らすと同時に、市場に投入される「もの」も減少することを意味している。市場への投入の減少は「もの」の生産の減少を招き、経済的縮小均衡に陥り、商品開発意欲が減退すると考える必要はない。賢明な消費者によって選択される商品開発の可能性は高く、新たな需要を喚起する商品開発に成功した企業が勝ち残ることになる。

地下資源の利用から地表資源の利用に移行すべきであるという指摘がある。循環型社会のあるべき像であろう。これを阻害するものはなにか。材料循環の実態を具体的に見てみよう。供給された材料の存在形態は有効に使用されている、地表在庫の形で存在している、そのまま循環使用された、姿形を変えた形で循環使用された、のいずれかである。鉄を例にとると、鉄鋼製品の30%強がスクラップから生産されており、スクラップの再利用が相当に進んでいる。一方では、日本における鉄鋼蓄積量は10億トンを超えると推定され、年間の需要約70百万トンのうち約20百万トンがスクラップから生産されるとすると50年の需要に対応する鉄鋼が備蓄されていることになる。この50年間にさらに鉄が備蓄されることを考慮すると、鉄の地表資源は膨大な量であることがわかる⁽⁹⁾。アメリカにおける鉄鋼蓄積量は30億トンを超えると推定されている。この地表資源利用を促進するには循環利用の阻害要因を取り除かなければならない。

(註) 鉄鋼備蓄量とは各年の鉄鋼生産量から間接輸出・輸入量と国内スクラップ消費量を加減して年間備蓄量を算出し積算した量である。したがって、10億トンの中には現在使われている鉄(上記)が含まれており、10億トンの鉄全てが直ちに利用できるものではない。10億トンという量を定性的に認識するために50年の需要に対応すると計算したものである。

循環利用を阻害する要因は当然のことながら循環コストである。乗用車を解体して鉄を分離し良質な製品に再利用するコストが鉱石から鉄製品を作り出すコストより低ければ、廃棄車両の回収利用は一気に進むが、現実には鉱石から生産するほうが安価である。この較差を小さくし、再利用が利益につながるような技術を考えることが製造業者の責務となる。適切な廃棄料を使用者が負担する制度、2000年に発効した循環型社会形成推進基本法のような法規制も有効である。すでに指摘した不純物の混入も循環利用の阻害要因の一つであり、良質な鉄への循環を困難にする。いずれにせよ、循環コストを無視して再利用を促進するのではなく、合理的循環が可能となる技術・制度・習慣を形成することが必要であり、これらが整備されるまで使用された材料を地表資

源として備蓄しておくことも一つの戦略として考えられる。

循環コストが無視できる例として貴金属を見てみよう。2000年における世界の金供給約4千トンのうち約16%は再製金である。再製市場に出回らない退蔵金、宝飾金が需要の約85%を占めることを考慮すると、両者を除く金はほぼ完全に再生利用されていることが分かる⁽¹⁰⁾。金の価格は鉄の約10万倍であり、回収・再生に要するコストをおぎなうことができるから積極的に金の再生が行われる。利用、回収、再利用の環が閉じている材料は写真廃液からの銀、触媒、歯科合金などからの金、白金、パラジウム、ロジウム、電子製品からの金、パラジウムなどいずれも地金価格が高く、かつ存在量の少ない希少金属に限られている。参考までに、地金グラム当たり価格は金約1,300円、白金約2,300円、パラジウム約1,000円、ロジウム約4,000円、銀約18円となっているが、鉄はわずか1銭、アルミニウムは20銭程度に過ぎない、

有機材料の再生利用はさらに難しい。同質の材料への循環コストは高く、多くの場合低品位、たとえば燃料、への循環利用である。この場合でさえ処理費用を廃棄者に要求しているケースが多い。また循環過程で環境汚染を招く場合がある。いずれにせよ有機材料は循環コストが大きな障害となっており、生分解性有機材料など環境にやさしい材料の開発やグリーンケミストリーの進展が急がれると共に、過剰包装を排除する習慣、包装容器リサイクル法のような法規制が必要とされる。

このように考えてみると、われわれは科学・技術文明によって「ものを大切に長く使う」という昔ながらの美德を忘却してしまったことになる。循環型社会を実現するためには、物質・エネルギー志向社会から、脱物質エネルギー志向社会への切り替えが必要であり、そのためにわれわれのライフスタイルの変更が不可欠となる。人は変化に対して、そんなことは無理だと反発的に(repulsive)、とても難しいと守備的に(defensive)、誰かがやったからやるかと受容的に(receptive)、分かったと建設的に(constructive)、そして、もっと変わるだろうと予測的に(anticipative)行動する。先見性をもって行動しない限り、今日の勝者は明日の敗者になる危険性が高いことがこれからの時代の特徴になることは間違いない。

この転換を、夢と希望が持てると同時に、現実的、合理的なものとするには、新ライフスタイル産業を起す必要がある。これによって、エネルギー、環境問題に対処する時に避けられない負の効果を上回る社会的利益と、雇用の確保を図ることが可能となる。これを第4次産業と名づけた。この新産業の創出には、1次、2次、3次産業を横断した協力関係が必要である。この協力関係を強固にするのは情報技術であろう。たとえば、最適物流計画など時間と空間に束縛されない社会システムを可能とし、輸送部門を初めとするいろいろな部門でのエネルギー消費が大きく低下する可能性がある。さらに、行政を初めとする多くの社会システムも変化し、これを契機として多くの産業が創出されることが期待できる。

参考文献

- (1) Ludwig Beck , Geschichte des Eisens in technischer und kurturgeschichtlicher Beziehung, 1884, 中澤護人訳、鉄の歴史、たたら書房、
- (2) 旧約聖書、たとえば、イザヤ書2章4節、ヨエル書3章10節、サムエル書17章7節他
- (3) 大村幸弘、鉄を生み出した帝国 ヒットライト発掘、日本放送出版協会
- (4) Karl Aloys Schenzinger, ANIRIN Roman eines deutschen Farbestoffes, München-Wien Wilhelm Andermann Verlag
- (5) 日本学術会議第132回総会声明、「人間としての自覚」に基づく「教育」と「環境」両問題の統合的解決を目指して—新しい価値観に支えられた明るい未来の基盤形成—、平成12年7月、日本学術会議
- (6) Competition between Steel and Aluminum for the Passenger Car, International Iron and Steel Institute, Brussels, 1994, ISBN 2-930069-10-4
- (7) Tomiura, A., Paradigm Shift in the Steel Industry, The Steel Industry in the New Millennium, Vol.1: Technology and the Market, IOM Communications Ltd 1 Carlton House Terrace London SW1Y 5DB
- (8) 朝日新聞(夕刊) 2000年11月10日、経済気象台
- (9) 林誠一、転換点に立つ日本の鉄リサイクル、(株)日鉄技術情報センター
- (10) 資源エネルギー庁統計から合成

資源生産性を基にした近未来の循環型社会構築に向けて

リサイクル工学専門委員会委員長 中村 崇

1. 資源生産性とは

資源生産性向上は「循環型社会の構築」に向けて Schmidt-Bleek ら(1)によって提唱されたものである。それは資源の使い方についてのマクロ的な指標であり、別に「ファクター10、ファクター4」などの言葉でも表現されている。これまでの経済活動、産業社会を支えてきた資本生産性、労働生産性に替わる地球環境問題を解決するための基本概念として提案された。非常に大きな概念であり、方向性としてはすばらしいものであるが、その具体的達成法については、十分な検討は行われていない。本資料は資源生産性を向上させる具体的な活動についての考え方を示したものである。

21 世紀に入り地域的な格差は依然大きい、現在直面する環境問題は本質的に「人間の快適な生活のため生産活動が肥大化かつ多様化し、地球が本来もっていた環境補償能力以上の廃棄物が排出される」ことから生じているといえる。このことは、メドウズ(Meadows)らによる「成長の限界」ですでに指摘されていた(2)。彼らのシミュレーションは資源の枯渇性よりも活発な産業活動による有害物質の拡散により、世界人口が減少していくと指摘し、大きな衝撃を与えた。発表された当時はその指摘があまりに遠い将来と考えられ、必ずしもその指摘に対し、十分な対応が取られなかったが、現在は有害物質の拡散による影響が具体的に見られるようになり、多くの人々が問題意識を持つようになった。つまり大きくなった生産活動ならびに豊かになった生活により、ある程度自然の中で循環もしくは対応できていた廃棄物(化石燃料使用による二酸化炭素排出も含む)が処理できなくなり、地球規模で我々の生活環境に歪みが生じ、種々の危険が顕在化した。そこで、廃棄物に対し十分な処理を行い、その有害性を除くか、除けない場合は十分に管理した状態におくことが必要となっている。しかしながら、非常に多岐にわたる地球の環境補償能力自体を正確に評価することは困難である。一方、人類が現在の産業システムを大きく急激に変換し、「生産活動を抑制する」には、これまでとはまったく異なった哲学ならびに社会システムが必要であり、近い将来実現できるとは考えにくい。したがって「持続可能な社会として」生産活動を大きく抑制することなく、廃棄物の無害化と排出量の抑制が望まれている。このことは、表現を換えれば、産業社会として過剰生産、過剰廃棄システムがもはや維持できないこと、従来各国、産業、個人で行なわれてきた個別最適化社会(シグマベスト社会)では対応できないことを意味している。

ところで20世紀後半から地球環境問題が議論されているが、多くは高度産業社会を形成している国での議論である。環境問題の地域格差は大きく、各国によりその捉え方は大きく異なる。も

ちろんその違いは各国の地球地理的な成り立ちとそれによって生じた歴史に依存するが、非常に大きく捉えるとOECD加盟国（先進国）と非加盟国（発展途上国）の違いに帰着する。非常に粗いが、図1にその捉え方の違いを示す。このような簡単な図式では表せない部分も多いが、たとえば国連気候変動枠組条約での議論もこの点が大きく影響しているといえる。バブル崩壊後日本の工業生産に大きな伸びは見られないが、人類の生産活動を歴史的に見ると工業生産はいまだ増加傾向にあるのは間違いなく、ここしばらくはもっとも活動的な時代が続くと考えられる。100人の地球村の指摘を受けるまでも無く、現在約60億を超えた人口の内、高度な産業社会の恩恵を受け、経済的に豊かな生活を行っている割合は20%未満である。最近この経済的な格差は開く傾向を見せているが、基本的には多くの人間が豊かな生活を享受することが人類全体の大きな目的としてあることを考えると、当然工業生産の伸びは続くと考えられる。したがって、これから高度産業社会は地球に生存する人類に対し、最低限の物質的豊かさを供給し、かつ地球環境の保持、さらには一部劣化した環境の回復を行わなくてはならない。資源生産性を高めるのはそのための重要な手法といえる。最近高度な情報社会を確立しつつある国々では脱物質社会のあり方が提案されているが、それは基本的にそのレベルまで物質的な満足度が達成されていることを意味している。

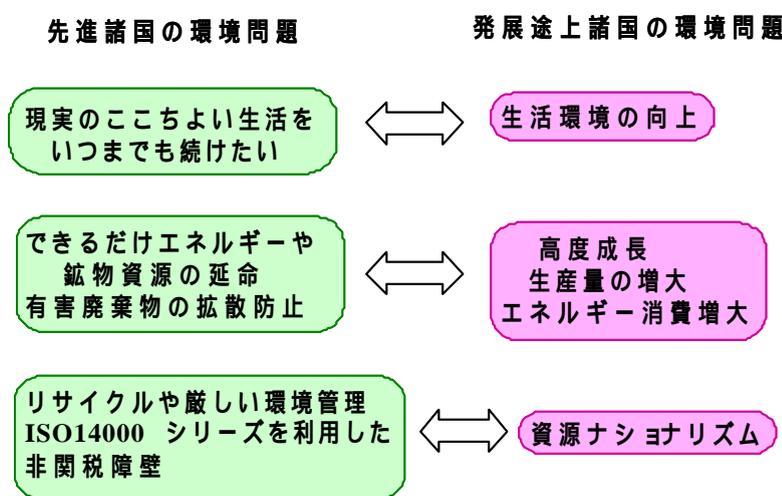


図1 OECD加盟国（先進国）と非加盟国（発展途上国）の環境問題の捉え方の違い

このような問題を解決するためにこれまで「ゼロエミッション」（3）「インパスマニファクチャリング」（4）などの「持続可能な発展」「循環型社会構築」を考える上で重要なキーワードが多く提案されている。これらのコンセプトを実現するために種々の活動が行われているが、実現にはかなりハードルが高いといわざるを得ない。例えば、産業活動を行えば当然エネルギー

消費が生じ、エネルギー消費によるエミッションが発生する。そのためにゼロエミッションは固体エミッションに目が向けられがちとなり、廃棄物処理とほぼ同義語となる。もちろん現在の日本で近々の課題はまさに廃棄物処理であることを考えると非常に重要な働きをしたともいえる。またインバースマニファクチャリングはエコデザインなどへ発展し、これからの工業製品あり方に大きな影響を与えたが、具体的な循環型社会システムの中に組み入れられるにはさらに新しい製品廃棄後の取り組みが必要である。

ところでこれまでリサイクルの必要性が叫ばれ、この数年間で各種リサイクル法が整備された。しかしながら、これらのリサイクルは廃棄物の減容化が第一義とされており、場合によっては真の環境適応行動にならない場合もある(5)。いわゆるリデュース、リユース、リサイクルの3Rも単に目の前で廃棄物が無くなり、処理されればいいわけではなく、本質的に資源生産性を向上させるものでなくてはならない。本来廃棄物処理とリサイクルは異なるものであった。歴史的には廃棄物処理は有償であり、リサイクルは従来を経済原則の上に成立するものであった。廃棄物処理にはエネルギーが必要であり、無害化とエネルギー使用量はTrade offの関係が見られる場合がある。特に有害廃棄物の場合はその傾向が顕著になる。現在の地球環境問題の大きな要素は温暖化防止であるため、処理のために必要なエネルギーによる環境インパクトが問題とされ、この矛盾を解決しなければ具体的な改善は行われぬ。そのためには、資源循環も含め資源生産性の立場から考える必要がある。また、リサイクルの質に関する検討も重要である。これまでのわが国の工業生産システムでは素材メーカーが高純度の素材を供給し、それを基に高度な材料供給がなされ、高品質な製品が製造された。しかしながら現状の素材リサイクルは必ずしもクローズドループの中になく、カスケードリサイクルが主体である。カスケードリサイクルはそれなりに重要であるが、長い目で見た場合のそれらの影響も十分考慮する必要がある。

一方地下資源に乏しい我が国においては石油、石炭などのエネルギー資源はもとより鉱物資源においてもほとんど輸入に頼っている。これらの資源のいくつかは数十年で枯渇するともいわれている。わずかに、産出国の政治情勢に鑑みレアメタルが備蓄されているが、このまま資源の消費を続ければ我が国の持続的な経済発展が望めないだけでなく、地球規模で混乱をもたらすことは避けられない。ここにおいて天然資源小国である我が国が率先して新しい工業社会のあり方を示すことは、我が国の持続的な発展のみならず世界の治安維持と経済発展に大きく貢献することは間違いがない。

我々が提言している資源生産性向上の総合的な概念図を図2に示す。大きく「国際的マテリアルリース社会」、「産業間フージョン」、「ソリューション指向材料システム」の3つの柱からなっている。詳細な説明は次章に譲るが、それぞれは互いに独立した概念ではなく、互いに連携しつつ資源生産性を向上させるキーコンセプトである。

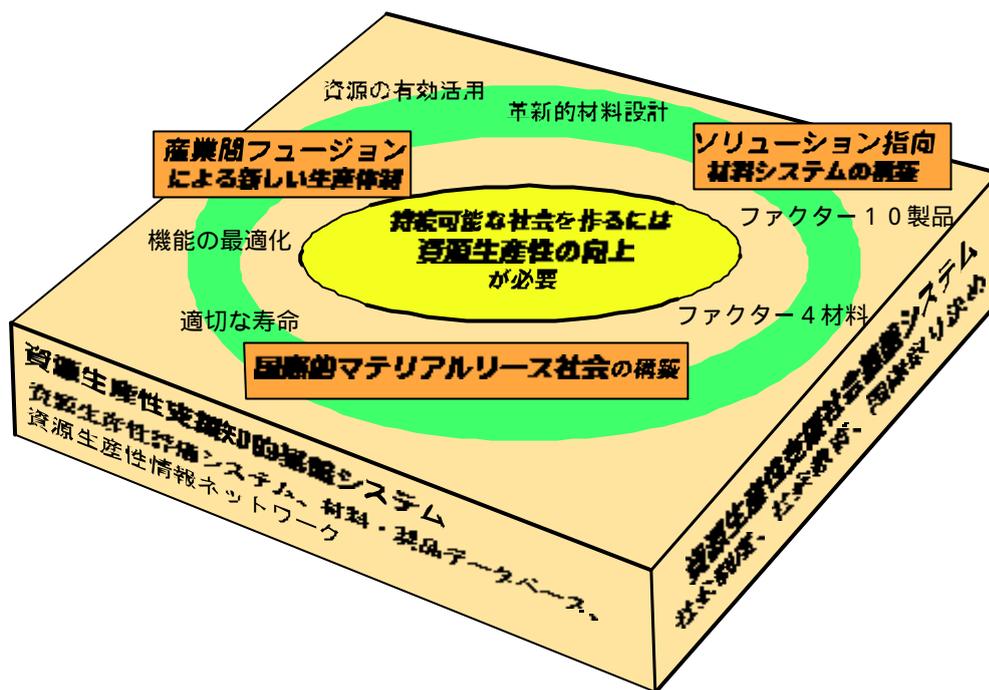


図2 資源生産性向上に関する提言の概略図

2. 資源生産性向上のための新しいシステムの提案

2-1 国際的マテリアルリース社会

我々の提案は世界的レベルで資源循環型社会を作り、それをもとに資源生産性の向上を目指すものである。真の循環型社会を達成するための基本概念として国際マテリアルリース社会を提案する。ただしここで検討した循環すべき“もの”は主に人工物であり、地球上で自然に循環している物質は含まない。表現を換えれば現状の問題点はこれまで自然に行われてきた物質循環に乗らないほど現在の人類は人工物を作り、使用・廃棄しているのであり、人工物の循環をこれまでの自然の物質循環に影響が無いように乗せることが目的とも言える。

マテリアルリース社会の内容は「効率的な資源循環型社会を構築するために材料資源を消費者にリースするシステムを有する社会。国内システムのみならず、国際的企業間ネットワークで、輸出入をも含むマテリアルリース・システムが可能となる社会の構築。これができれば必然的に資源は製造者の元にもどり効率的なリサイクルや適切な処分が可能になるだけでなく、製造段階から循環型に適する寿命、機能を設計できる。」と定義した。ここでいうマテリアルは、エネルギーを除く人間生活に利用するすべての素材・物質を対象として考え、マテリアルリースとは、かならずしも明示的なリースの形態をとる必要はなく、素材・物質の生産者が最終管理責任の所在を経済行為の中に含んで素材・物質を提供するシステムである。この社会システムが構築される

ことにより、従来行なわれてきたカスケード型の物質循環でなく、真の物質循環システムを可能となる。

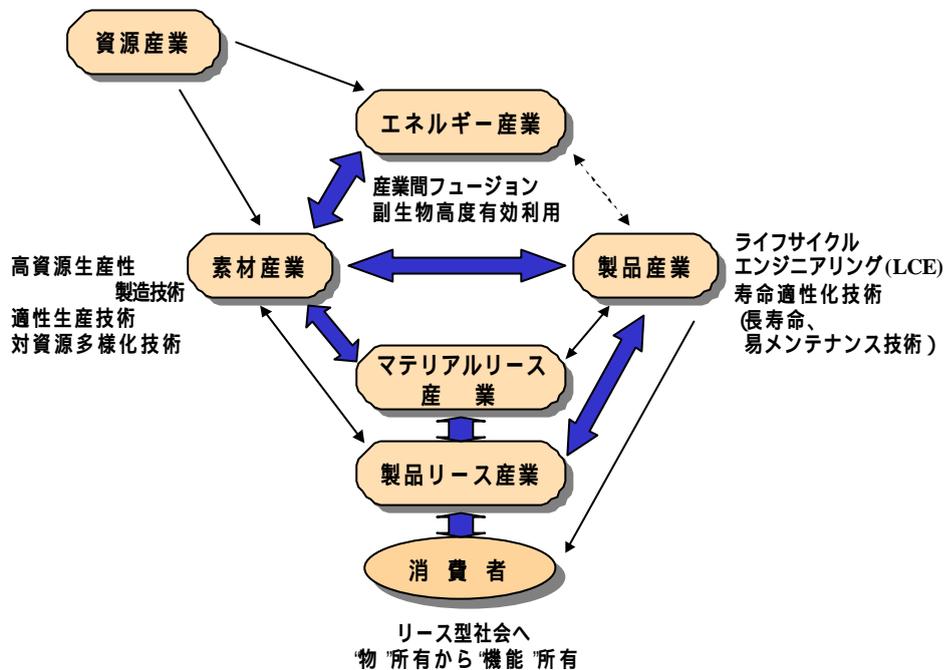


図3 マテリアルリース社会の概念の一例

換言すればマテリアルリースは拡大生産者責任の拡大版（循環に対する提供者責任）に対する付加価値を付与する制度の確立である。真の循環型にするには本質的にリサイクル後、従来の一次原料から生産される素材と同様なレベルの素材に再生されなくてはならない。もちろんそのようなことは現在の経済原理では非現実的な提案である。詳細な説明は省くが、本来素材のリサイクル率はある経済レベル以下では非常に高い。高度の工業社会を作り上げ、労働生産性が上昇すると低下するのが当然で、日本の歴史はまさにそれを物語っている。自由経済の下で高度経済成長を遂げた地域で循環型社会を実現するにはそこに従来の経済活動では考えなくてよかった強制力が必要とされる。そこで本提案では素材メーカーにより広い拡大生産者責任とそのために発生する経済負担をカバーする付加価値（場合によっては負の付加価値を認め、それを公的に保障する）を付与するシステムを導入しようとしている。

背景には処分場の逼迫という実経済の圧力があったためであるが、例えば現在の容器包装リサイクル法は従来まったくの負価値しか持たず、埋立てに回っていた廃プラスチックに負の付加価値を認め、有償で処理されている。このように法律でリサイクルを行うのは従来の経済原則では再生されないからであるが、本委員会の立場はできるだけ従来の自由経済の下で資源生産性を向上

する循環型社会を作り出そうとするものであり、そのためのシステム提案をするのが我々の立場である。したがって、具合的なシステム提案は必ずしも一つである必要は無い。現実のマテリアルフローは国内で閉じていないので、当然国際的に考慮する必要がある。ただ国際的な働きを呼びかけるにしても具体的な提案が必要である。現在まだ詳細なシステム提案までに至っていないが、現段階における一つの提案を図3に示す。

現状の多くの工業製品製造における材料の流れは次のようである。資源産業からエネルギー産業と素材産業に流れ、そこで素材と動力（電気や燃料）を製造・供給し、それらを基に製品産業群で最終製品とし、流通業を経て消費者へ届けられ、消費され廃棄される。現在、各産業群で排出される廃棄物の利用は進み、かなりの副産物は製品化されつつある。その理由はある程度その廃棄物の内容と量が判明しているため、努力は必要であるが他の製造業（主に素材産業）で利用可能である場合がある。その詳細は次節で行うが、このような他産業同士で従来の廃棄物を有効利用しようとする試みはプロセス間リンクと呼ばれ、実施されつつある（6）。その廃棄物の質と量の把握を一般消費者に渡った後の廃棄物まで広げようとするのがマテリアルリースシステムで、その活動は従来の製品リース産業と強く結びつけて行われるとする。製品リースとマテリアルリースが強く結びつき、製品リース企業が一般消費者への製品の供給と回収を一括して行うことにより、その製品の寿命管理や修理がスムーズに進み、しいては部品のリユースと補修、交換が適正に進む。マテリアルリース産業はそれを受けた形で修理不能製品の解体を合理的に行い、解体された部品の確認を行った後、適正処理し、素材の内容がわかる形で従来の素材産業群に資源として送る。これらのシステムはそれほど新しいものではなく、一部このようなシステムが採用されている製品もある。その典型はコピーであり、多少形態は異なるがレンズ付きフィルムである。

本来製品リースは新製品の効率的な普及に適している。旧来の大型家電や車などの製品をLCA評価すると使用中に消費するエネルギーがもっとも環境負荷が大きい部分であるといわれている。このような製品は新しく開発された高性能品（エネルギー消費が少ない）を使用することが省エネルギー的に望ましいといえる。しかしながら従来の購入型のシステムでは簡単に買い替えを行うわけには行かない。また最近では人口の流動性が高まっているが、購入システムではその移動が大変であるが、リースシステムだとその点も楽となる。このように高度な経済社会で脱物質化が進み、その製品がもたらす機能を買う発想になれば製品リースが進む。製品リースが進めば、さらに一歩進んでマテリアルリースまで可能となる。逆に言えば、資源生産性を高めるにはマテリアルリース社会を構築しなくてはならず、資源生産性の高いマテリアルリース社会を作るためには製品リースが必要であるとの観点から製品リース促進のキャンペーンを張ることも可能である。現在多くの製品でリースの方が高くとつといわれている。その原因の一つは製品リースが普及していないためにシステムが十分に整っておらず、そのための経費がかかっているためと考

えられる。ひとつの製品に対し、多くの部分がリースで動くようになれば、経済的な面でも合理性が生ずる可能性もある。いずれにしてもマテリアルリースと製品リースの強い連携が重要である。

もちろんすべての製品がこのシステムに適しているわけではなく、このような考え方に適するものに対してのみ行われるべきである。現在このシステムがもっとも効果的であると考えられるのは車であり、そのためのケーススタディを行っている(7)。

2 2 産業間フュージョン

産業間フュージョンの定義は「これまでの産業は特定の製品を生産するために最適な生産活動を行ってきたため、他産業で生かせる副生成物に対して注目していなかったが、産業間の連携をとることにより国際的に最も資源生産性の高い生産活動を行うことができる。」とした。

前節でも説明したが、資源生産性の高い循環型社会を構築するには、従来の廃棄物を資源化することが重要である。ところで本来生産とは原料を分離・精製し、不要物を除去、さらに有用物を付加し、再構築するものであるため、そこには必ず不要物が発生する。これが廃棄物となる。多くの国が非常に高い工業的な高度成長を遂げる際にはこの廃棄物を単に廃棄するだけで済ませてきた。その問題が現在顕在化し、廃棄物処理としての循環型社会のあり方が検討されている。生産すれば必ず不要物は発生する。その不要物を利用し、有用物に変えることは、その不要物を発生させる工程では無理である。したがって、従来は同一工場内もしくは企業内の別のプロセスが利用されてきた。その方法は古くから取られてきたが、それも限界に近づき、次のステップとして産業間のプロセス間リンクが行われた。例えば、セメント産業は廃タイヤを初め多くの他の産業から発生する副産物を原料として用いている。

この考えを金属素材産業でもっと広げて活動しようとした一つが TEMCOS プロジェクトであった(6)。TEMCOS とは Total Energy and Materials Control System の頭文字をとったもので、各産業間の連携を深め、従来の産業を越えたプロセス間リンクを行い、それぞれの原料・排出物の物質およびプロセスで使用されるエネルギーを総合的に制御することでエネルギーの超高効率利用、すべての排出物の最少化を実現する循環型の産業構造を構築しようとするものである。更に地域と融合する技術へと展開することにより、循環型・地域融合型産業への構築を目指すものであり、21世紀の持続可能な発展には欠かせない考え方といえる。その産業間プロセスリンクの可能性を図4に示す。これからわかるように多くの産業と副産物や廃棄物を介してリンクすることが可能である。特に最近では廃棄物処理の立場からの動きがあり、容器包装リサイクル法で収集される廃プラスチックの高炉への還元剤としての使用や同じくコークス炉での原料化が脚光を浴びている。

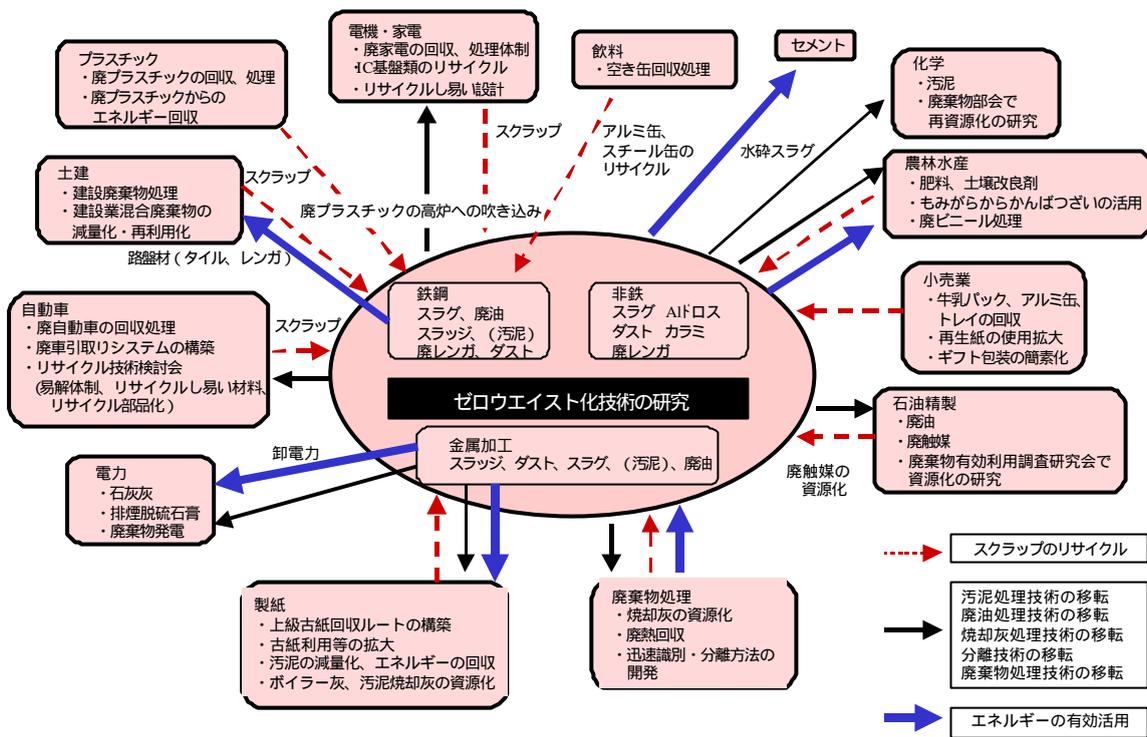


図4 産業間プロセスリンクの可能性

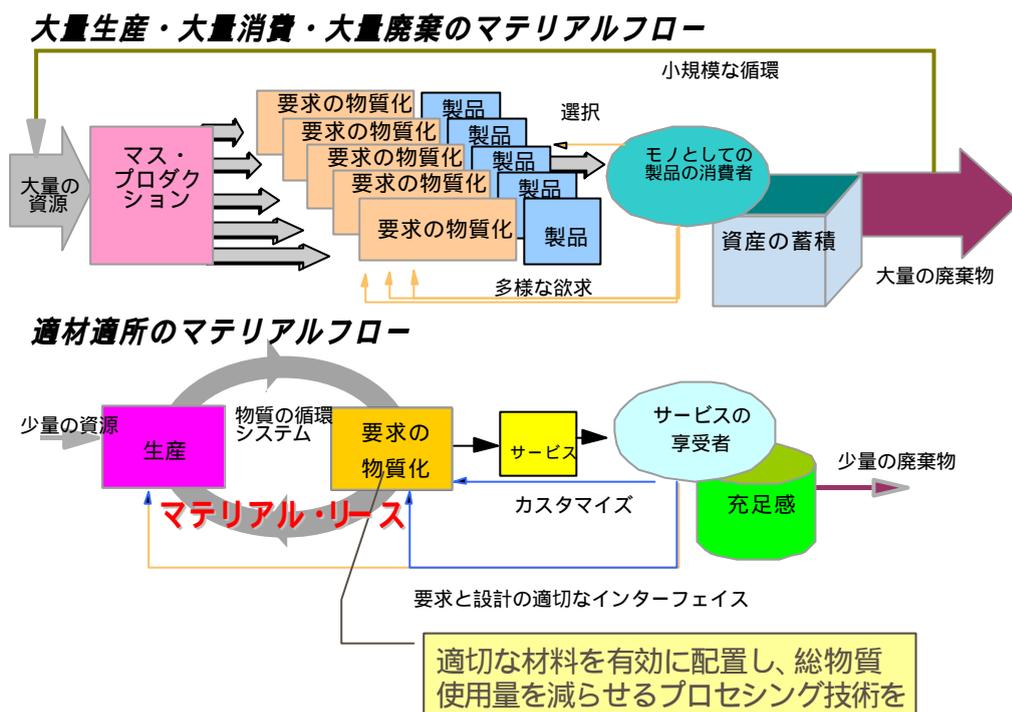
金属素材産業が中心になっているとは言え、考え方はすべての産業に共通できる。この概念をさらに一歩進めたのが産業間フュージョンでこうなると従来の企業や業種が循環型社会構築を目指して再編され、新産業を造ることとなる。図3に示したように特にエネルギーの有効利用でエネルギー産業と素材産業が循環型システムを目指して製品産業と素材産業の一部が産業間フュージョンを起こす可能性が高い。

鉄鋼業と非鉄製錬業の技術フュージョンによる環境事業の進化や素材産業での廃熱を利用したバイオマス産業などこれから新しく産業化する分野がここから出てくるとされる。最終的には理想的産業連携フュージョンによるスーパーコンビナートを実現が望まれる。

2 3ソリューション指向材料システム

真の循環型社会とは、資源生産性の評価に従って製品 消費（リース） 廃棄 製品と効率よく循環することである。もちろんこれまでの説明でわかるように決して単なる素材リサイクルを目指すものでなく、途中で製品・部品のリユースを行い、トータルとして資源生産性の向上を図る。そのためのもう一つの手法としてソリューション指向材料システムの採用がある。その定義は

「特定の問題を解決するために最適な材料設計を行うシステム。ライフサイクル資源投入量を材料生産段階で 1/4 にするファクター 4 材料や、製品として 1/10 にするファクター 10 製品など、従来の材料設計思想では作製できにくい材料、製品を可能とする柔軟な材料設計、生産システム。」と表現される。簡略して言えば、エコデザイン対応の適材適所の材料開発と使用を行うことを目指す。



多くの地球環境問題は、大量生産・大量消費・大量廃棄から使用している物質の総量を削減することが重要

図5 マテリアルリースを基にしたソリューション指向材料システムの考え方

基本的には脱物質社会の工業製品製造原理である。そのための発想としては最終製品の徹底的な機能達成指向のデザイン、特に軽量化と易解体性を保障するエコデザイン化、そのための過剰品質にならない材料提供である。これまで材料開発はややもすれば単にある特定分野での高性能を目指して開発され、そのための複合化が促進されてきた。もちろん複合化により大きな性能向上が図られ、その結果として多くの場合省エネルギーが実現された。そのことは評価しながらもこれからはその製品の製造 - 使用 - 廃棄 - 再生までを考慮した材料供給システムが製品開発と一体化して行われなくてはならない。極端に言えば、製品の寿命を予め予想し、その寿命に適応した設計を部品と共に行うこととなる。その場合すべての材料の劣化を検討し、トータルとして寿命を一致させるかもししくはそのようなことができない場合は部品交換の際に修理頻度が高いも

のは交換しやすくするのは当然である。この場合は信頼性の確保が重要な点であり、そのための寿命判断技術と製品としてのリスク管理思想が重要な要素となる。この場合も製品リースとそれに対応するマテリアルリースシステムは非常に有効である。図5にこれまでのマテリアルフローとソリューション指向材料システムとマテリアルリースを組み合わせたこれからの資源循環のあり方を簡略して示す。

3. 具体的な対応

以上資源生産性の向上を図るため3つの概念の他にそれらを支える基盤システムが必要である。それらは、資源生産性支援知的基盤システムと資源生産性支援社会基盤システムでそれぞれ下記のような内容を持つ。

3.1 資源生産性支援知的基盤システム

資源生産性の評価法の構築、オブジェクト指向型データベース(材料循環、移動データと監視システムを含む)の構築、資源生産性情報ネットワークの構築。長期的資源生産性研究機関の設立。まずこの中でもっとも重要なものは資源生産性の評価法の構築である。まだ具体的に評価システムは決定していないが、本委員会は資源生産性の向上を目指すものであるから当然その活動の推進の判断基準は資源生産性である。もちろん基本的な考え方はSchmidt-Bleekらによって提案されているが、かれらの提案はたぶん概念的で具体的な指標とはなっていない。したがって、早急にこの指標の確立を進める。

それとともに主要な元素もしくは製品のマテリアルフローの確立とデータベース化、これらのデータを利用できるようにする機関とそれを中心としたネットワークの構築が必要である。現在廃棄物ベースのマテリアルフローは多少調査・公開されているがこれが元素もしくは製品のマテリアルフローとなるとそのデータ収集は十分でない。これらのデータ収集の実施は民間でもかまわないがその情報に関する公開責任は公的機関で行うべきである。

3.2 資源生産性支援社会基盤システム

国際的マテリアルリース社会や産業間フュージョンなどを実現するためには様々な要素技術の開発が必要であるがそれらを円滑に実現するためには社会基盤の整備が必要であり、新しい社会システム受容のための教育システム、さらに価値観や文化、国際関係など総合的に考慮する必要がある。

このシステムは上記の基盤システムと異なり、漠然としている。これまで提案してきた内容は単に技術で解決できるものではない。マテリアルリースなどの合意は広く社会的認知が必要であり、また当然国際的に行わなくてはならない。このようなシステムを導入するにはもちろん法律的な裏づけが必要であるが、これらのコンセプトが広く受容されるための地道な活動が欠かせない。国や地方自治体としての広報のみならず、NPO などとも連携した教育・広報活動も必要である。

なおこれらのシステムを確立するために資源生産性向上機構となる独立行政法人（公的機関）の設立が望まれる。

参考文献

- (1)F.Schmidt-Bleek: Wieviel Umwelt Braucht der Mensch? MIPS – des Ma ökologisches Wirtschaftem. Basel/Berlin, Birkhäuser (1994)
- (2) D.H. Meadows, D.L. Meadows, Jorgen Randers and W.W. Behrens III, The Limites to growth (A report for The Club Rome's project on the predicament of mankind), Universe Books, New York, (1972)
- (3)R.Kehr and M.Suzuki: Integrative approaches towards sustainability, Proceedoings of German-Japanese Workshop(UNU,Zero Emission Forum,Tokyo),2000
- (4)吉川弘之：精密機械、49 [1],78, (1994)
- (5)武田邦彦：Boundary, 15 ,[6],3, (1999),
- (6)林 明夫：ふえらむ、2 [4], 21 (1997)
- (7)原田幸明：マテリアルリースシステム構築のための総合研究、
文部科学省 社会技術推進事業 循環型社会 プロジェクト(2002)