

廃棄物問題に適用可能な資源連鎖理論

深沢利元 (横浜国立大学大学院
環境情報学府 博士課程後期)

Resource Cascading Theory applicable to the waste issues

Toshimoto FUKAZAWA
(Post-graduate Course, GSEIS, YNU)

要約

本稿の目的は、カスケード・チェーン理論 (The Cascade Chain, Ted Sirkin & Maarten ten Houten, 1994) の資源連鎖概念を適用し、効率的な資源活用を通して資源循環に導く道筋を模索することにある。資源循環型社会の前提条件として、どのような基準に則ってリユースやリサイクルを実施することが適当なのかについて焦点を当てる。1章において、環境関連法規制の整備強化に伴い、企業経営における環境リスク要因としての産業廃棄物に注目し、循環型社会形成推進基本法の制定や各種リサイクル法の整備と一段の強化がされている状況を示す。2章では、資源連鎖理論としてカスケード・チェーン理論を取り上げ、資源を効率的に活用するための方法論の中核概念としてレビューする。この理論のコンセプトの要点は、資源経済性と持続可能性の実現を目的として資源資質の最適な消費を図り、使用済みの製品や物質から、残余の資源資質を連続的に再活用することによって、資源活用を最適化することにある。最後に、資源の経済効率並びに持続可能性を追求するための組織間システムをモデル化する必要性などに言及して、今後の課題となる研究の方向性を示す。

目次

第1章 企業の廃棄物問題
第2章 資源連鎖理論 (カスケード・チェーン・モデル)
第1節 資源経済性の4次元モデル
第2節 資源経済性の4原則
結語
図表編
註解
引用・参考文献一覧
謝辞

第1章 企業の廃棄物問題

近年、我が国においては、環境汚染、天然資源の枯渇、有害物質の発生とそれに伴う廃棄物の最終処分場の枯渇問題など、廃棄物問題の環境分野における位置付けは重要度を増している。廃棄物問題に関して、従来のような焼却処理や最終埋立処分に大きく依存する方法は、既に社会的行き詰まりをみせており、社会全体で廃棄物排出量の低減に向けた根本的な対策が必要となっている。

このような要請を受けて、物質循環を達成しなければ廃棄物が引き起こす諸問題の根本的な解決策とはならず、循環型社会を構築する必要性がでてきており、2000年には循環型社会形成推進法が制定された。その基本理念は、官民の各セクターの関係者の責務を明示し、公平な役割分担の下で、物質循環の促進が図られることを通じ、環境負荷が低減されることにより、持続的に発展可能な社会を構築することにある。それと前後して、個別法である改正廃棄物処理法や食品・建設リサイクル法、容器包装リサイクル法など各種リサイクル法が成立・施行された。

これらの廃棄物関連法規制は、汚染者負担の原則を一步進めて、製品・サービスの事後的な廃棄物対策責任をも、生産者・サービス提供者の側に課すという「拡大生産者責任」の考え方を導入している。このような法規制上の強化と性格の変化は、当然の事ながら、財・サービスを生産・提供する企業の対応の質・量の変化を促すことになる。従来の環境規制は、環境被害や事故発生後の事後処理的な対策の性格が強かったが、各種リサイクル法の制定・施行にみられるように、現行の規制は予防的性格の傾向を強めている。また、規制対象となる産業種の範囲と、その負うべき責任範囲も拡大されている。

最近、各地で頻発している廃棄物処理をめぐるトラブルや環境汚染事故は、企業に環境側面のリスクの増大を意識させ、環境問題による企業イメージの低下に

に対する懸念を深めさせている。また、廃棄物処分施設の不足と規制強化は、企業が排出する廃棄物処理コストを増大させ、このコスト側面の上昇圧力は、従来からの経営戦略の見直しを迫る大きな要因となっている。加えて、市場における取引条件の環境重視も挙げられる。大規模企業の系列や請負関係にある企業に対して、ISO14001といった国際規格の認証取得を取引の条件とする動き、グリーン調達動向など、取引条件に環境側面を付加する要求が強まるといった取引慣行の変化も、企業の環境対応を促進する要因となっている。また、環境に関する企業の取組が、「社会貢献の一つ」という位置付けから、「企業の今後の業績を左右する重要な要素」や「企業の最も重要な戦略の一つ」という意識や捉え方の変化となって現れている（環境白書、2001）。その意味では、環境対策は企業にとっても不可避の経営課題となっており、除々に企業の存続に関わる重要な経営課題になりつつある。

とはいえ、経営資源に一定の制約がある個別企業にとって、経営を維持しながら環境対策への取組を行い発展させるためには、克服しなければならない多くの課題がある。中でも、製造業者を中心とした産業の現場から排出される産業廃棄物をめぐる問題が注目されている。我が国の産業廃棄物の排出量は、1990年代に入ってから、年間4億トン前後で推移しているが、産業廃棄物の最終埋立処分場の立地が極めて困難になっている現状を踏まえると、減量化やリサイクルなどの資源の再活用を通じて、廃棄物にしない、あるいは出さない方策が各方面から検討されている。同時にそれは、有限な資源の有効活用を図ることにもなる。

ここで、循環型社会とはどのような社会なのか、そのイメージを捉えておこう。循環型社会形成推進基本法によると、循環型社会とは『①製品等が廃棄物等となることの抑制②循環資源が発生した場合におけるその適正な循環的な利用の促進③循環的な利用が行われない循環資源の適正な処分の確保という手段・方法によって実現される、天然資源の消費が抑制され、環境への負荷ができる限り低減される社会』と定義されている。また、『省資源・省エネルギー、低環境負荷の持続的発展が可能な循環型の経済活動、ライフスタイルが実現され、社会の構成員全員が公平に役割・費用分担すると共に、経済社会構造そのものが、社会の構成員に自覚を促す教育・啓発効果を持つような社会』（中條、2000）という見解もある。この循環型経済システムの構築に当たっては、『従来のリサイクル（再資源化）の取り組みのみならず、リデュース（廃棄物の発生抑制＝省資源化、長寿命化、リペア）、あるいは、リユース（再使用）といった手法を加えた、いわゆる3R（リデュース、リユース、リサイクル）を促進

し、合わせて、国民のライフスタイルを根本的に変革していくことが必要となる。その際、資源・エネルギー効率の社会全体での向上が一義的に重要であり、そのためには、製品特性等に応じて、3Rのうち最も適切な手法が選択されるべきである』（社団法人九州・山口経済連合会、2001）という指摘がある。いずれにしても、循環型社会を構築するためには、社会全体の参加と協力が不可欠であり、それを可能とする制度面の整備が必要となろう。さらに、資源循環を効果的に、かつ効率性を重視して実施する必要があるが、そのためには資源特性および製品特性を考慮した上で、最適な3Rを選択的に実施することが求められる。そのための判断基準を後述する2章において言及する。

今後は、循環型社会を目指すに相応しい経済社会システムが必要となる。『環境問題への対応に際しては、地域経済、国民経済のなかでの地域企業の新たな位置を確認しておく必要性が生じている。つまり、地域企業を、循環型経済社会システム構築の重要な担い手として認識し直す必要がある、ということである。国民経済の循環型社会への転換には、地域経済そのものの循環型社会化が不可欠であり、その地域経済の主要な担い手は地域企業なのである。』（井手、2000）と、循環型社会の形成を進めていくためには、地域経済社会の在り方、特に地域企業の果たす役割が大きい。また、地域社会とその立地する企業との関係性について、『企業にとって地域環境は活動の母胎である。すなわち、企業は地域においてある一定の具体的な空間を占めており、地域環境との健全で安定した関係が企業活動にとって常に重要な課題となってくる。さらに、企業活動を行うための立地条件としても地域は存在し、企業活動と地域社会が相互に影響を及ぼしあう総合的な存在として地域環境がある』（鈴木、1991）。その地域社会全体を一つのシステムとして捉えなければ、意味のあるシステムとして機能しないと指摘している。結局、資源循環を可能とする社会に導くためには、その社会の全セクターの関与とそれら主体間のパートナーシップの強化が不可欠な要件となる。

以上述べたように、資源循環社会のシステム構造を支えるのは、地域社会であり、その地域に立地する企業ということを再確認した。つまり、社会システムに組み込まれているサブシステムともいえる地域が機能しなければ、システム全体が麻痺をしてしまうことを意味している。現在までの産業社会は、大量生産システムを前提にして財・サービスの供給を行い、その財・サービスが使用され、廃棄された後のこと、つまり静脈産業を充分考慮した動脈産業のシステムとなっていなかった。その資源循環型の社会システムを確立する上で、廃棄物問題は避けては通れない特に重要な

課題である。企業と廃棄物との関わりに注目すると、動脈経済と静脈経済を融合する社会システムおよび産業構造を形成することと共に、廃棄物を未利用資源として捉え直す視点が、効果的な廃棄物対策、ひいては循環型社会システムの構築にとって不可欠であろう。既にインバース・マニファクチャリング（図1を参照）という順工程と逆工程を統合化した製品のライフサイクル設計と管理の考え方が提唱されているところである。これは製品使用後の回収、再利用、再生資源化を組み入れた生産システムである。要するに、資源・エネルギーの使用量、廃棄物、環境負荷を製品ライフサイクル全体として最小化するよう、設計→開発→生産→回収→分解・分別→再利用（→生産→…）といった「閉じたループ」による循環型製品ライフサイクルを実現する生産システム概念である。

このような資源循環を目的にした生産・再生産システムを有効に機能させ、かつ資源・エネルギーの観点から効率的に運用するための、論理的な妥当性をアセスする一つ的手段として、次章でカスケード・チェーンという資源連鎖理論を紹介し、解説する。

第2章 資源連鎖理論（カスケード・チェーン・モデル）

第1節 資源経済性の4次元モデル

資源を効率的に活用するための方法論の中核概念として「カスケード・チェーン（Cascade Chain）」（Ted Sirkin、Maarten ten Houten, 1994）を取り上げる。これには「製品設計へ適用することによって、資源の持続可能性を達成するための理論と手段」という副題が与えられているが、この理論のコンセプトは、ある物質をある用途に使用した後に、次々に別の用途に再利用していく方法であり、ゼロ・エミッションの概念も、広義のカスケード理論に基づいている。カスケードの概念は、連続する段々状の台地を流れる河が作り出す、幾筋もの小さな滝のアナロジーから採られている。水の流れは一つの水準から、次の水準へと連続的に流れ落ち、カスケードの中でも最も低い水準のゼロとして定義される湖か海において、最終的に平衡になるまで続く（図2参照）。カスケード・チェーン・モデルは、このアナロジーを資源循環の基礎となる資源の連続的活用に適用する。以下、この章ではこの理論の要約を中心に展開し、資源循環の妥当性を判断する一定の基準を提出する。

カスケード・チェーンは、適切で効率的な資源消費をすることによって、資源の持続可能性を改善する理論モデルである。資源消耗と環境汚染が、不適切で非効率な資源消費によって引き起こされているという仮

説に、その出発点がある。カスケード・チェーンは、資源連鎖（resource cascading）という概念から開発されてきたものであり、使用済みの製品や物質から、残っている資源資質（resource quality）を連続して再利用することによって、資源活用を最適化するための手法である。カスケード・チェーンの概念は、相互に関係する2つの理論的実体、即ち「資源経済性に関する4次元モデル」（図5を参照）と、それを規定する「4原則」から構成される（表-1を参照）。

その4次元モデルは、「資源資質（resource quality）」（資源の潜在能力を表す。資源の構造組成と化学エネルギーと生産・再生産の投入努力の関数）、「活用時間（utilization time）」（資源が活用されてきた時間の長さ）、「消費率（consumption rate）」（資源のフローの量と割合。持続可能性＝次世代のための資源の安定性を考慮）、「回収性（salvageability）」（資源の回収可能性。資源資質が再循環できる度合い）として規定される。この資源経済性の4次元モデルを規定する4原則の詳細については、表-1にまとめる。

これら4原則のうち、「適切な適合（appropriate fit）」、「拡大（augmentation）」、「連続的な再連結（consecutive relinking）」の原則は、所与の資源量を最適に使用するための必要条件であり、「均衡した物質代謝（balancing resource metabolism）」は、資源の持続可能性の条件であると同時に、資源管理方針の倫理的な根拠を示す。カスケード・チェーンは、資源が最初から適切に消費されることと、どの消費の「実用効果（utility effect）」（註1）も最大化されることが、何よりも優先して必要となる。さらに、それは、物質連鎖が最適に活かされる中で、それぞれの活用を結ぶ環についての資源効率性を強調している。資源連鎖していく経路に沿って、資源資質の損失を減らすことと、資源資質を、その連鎖の他の水準に連結・再連結するために要する努力を最小化することは、資源効率を最大化するために必要となる2つの中心的な要因である。結局、持続可能性を達成するためには、総ての資源消費が、等価的な資源補充とバランスを取らなければならない。これらの「連結・再連結に要する努力」と「実用効果」については後述することにする。ここでカスケード・チェーン理論を、2次元モデルから4次元モデルに到る流れで説明する。

A：資源資質と活用時間の2次元モデル

カスケード・チェーンの基本形態は、資源寿命を延ばすための2次元モデルであり、平衡状態に向かって資源が流れていく経路上で、資源のもつ潜在能力を連続的に消費することによって、資源の経済性を達成する（図3を参照）。

縦軸の「資源資質」によって潜在的な資源有用性が

表されており、資源の潜在能力は、資源の資質が高くなればなるほど大きくなり、より高度な機能を果たす。資源資質は、個々の資源、原料、物質、製品が、規定されている工程の機能と、どの程度適合しているかを表す。それが問われるのは、与えられた目的に対する資源消費の適切さを評価する尺度としての機能である。資源資質が優れていればいるほど、一層多様な機能を果たす大きな能力があることになる。

横軸の「活用時間 (utilization time)」によって、資源が活用されてきた時間の長さを表している。これら2つの側面によって、どのような資源でも、その総ての有用性が決定する。この活用時間とは、時間あたりの資源の総有用性として定義される。また、活用時間には3つの規定があり、それは暦的時間、機能周期、作用時間である。活用時間はその資源が貢献した利用利益が、マン・アワー当たりの仕事量に換算してどの程度であるかを表す。

B：資源資質と活用時間と回収性の3次元モデル

資源経済性は、資源を回収し再循環することによって、連鎖の一層高い水準か、あるいは他の新しい物質循環に再び資源資質を戻すことができる。「回収性 (salvageability)」の側面は、物質、原料、生産物の資源資質がどの程度再循環できるかに関わってくる。この追加された側面のために、カスケード・チェーンと名付けられる循環になる (図4参照)。資源資質を取り戻すことは、主要なカスケード・チェーンの範囲に限定されず、図8に描かれるような派生的な、あるいは代替的なカスケード・チェーンに形を変える可能性もある。ここでいう回収性とは、資源経済性の側面であり、製品あるいは物質が、いかにすれば、他の資源循環に連結・再連結され得るかということを表している。このカスケード・チェーンの具体的な事例としては、「農作物の生産→流通→消費→食品残渣→回収→家畜飼料生産→堆肥化・施肥→農作物の生産…」という再循環経路が考えられる。

C：資源資質と活用時間と回収率と消費率の4次元モデル

以上の3つの側面で、持続可能性という意味での資源経済性を完全に扱える訳ではない。持続可能性は、次世代に対する資源の安定性に基いた資源経済性として定義される。資源の消費に、その補充が追い付かない場合、その資源消費は持続可能性の観点から経済的であるとはいえない。したがって、持続可能性をカスケード・チェーン・モデルに導入するためには、資源フローの量と割合に関するもう一つの側面を、モデルに追加することが必要となる。この側面を「消費率」という。この第4の次元を含むことによって、資源経済性のためのカスケード・チェーン・モデルは、図5に示

されるような概念となる。「資源資質」、「活用時間」、「消費率」の3つの側面は、X, Y, Z軸で表すことができ、「回収性」の側面を表すRは、これらの側面と相互に関係している。

以下の2節で表-1に示したカスケード・チェーンの4原則の鍵となる概念について解説する。

第2節 資源経済性の4原則

A：「適切な適合」原則の鍵となる概念

資源資質がどの程度の価値を持っているのかを評価するための基準を明確にする必要があるが、ここでは従来示されてきた様々な価値基準についてその妥当性を検討した上で、「代替等価物 (replacement equivalency)」(註2) の概念が提示される。

資源資質は、4原則の中の「適切な適合」原則の鍵となる概念である。Sirkin等は、市場メカニズムに基いて値付けされる「市場価値」は、特定の時代、社会、歴史的背景に左右される価値指標であり、その意味では市場価値は一時性に支配されており、常に不確実性が付きまとうものであると指摘し、資源資質を適切に評価する基準にはなり得ないとする。また、その資源の持つ特性に注目し、人がその資源を利用できる活用方法の価値判断によって、その資源の価値を規定する「活用価値」も、その資源の活用価値を下す時代や社会の制約がある以上、人間の主観的な価値観の違いや、現在時点では知られていない資源特性を持っている可能性があることを指摘し、その価値基準の限界を示している。次いで、資源そのものが有している「エネルギー含有量」は、資源資質を評価する一つの基準となり得、その物質の化学結合エネルギーは実証的に計算することができる一方で、さまざまな有機資料が有するエネルギーの仕事量は、ほぼ同程度であること (例えば、石油とワラ) を指摘した上で、そのワラと石油の含有する不燃性物質の単位あたりの含有量が大きく異なるという事実を挙げて、その原因による利用利便性の違いに注目し、必要となる総労力は2つの物質で異なるため、単純にエネルギー含有量という指標だけで資源資質を規定することはできないとする。

次に、エクセルギー (Exergy) による価値基準の妥当性についても触れられているが、ここで簡単にエクセルギーの概念について説明する。エネルギーの形態には一般に、熱エネルギー、力学的エネルギー、電気的エネルギー、化学的エネルギーに区分されるが、【エネルギー保存の法則 (熱力学第一法則)】では、これらすべての種類のエネルギーを、相互に変換しても全体として増えも減りもしないという量的な意味として用いられる。例えば、300℃ (573K) の水蒸気のもつ1kJの熱エネルギーも、40℃の温水のもつ1kJの熱

エネルギーも同じ1kJのエネルギーとみなす。ところが、「仕事をする能力」という本来のエネルギーの意味からすると、300℃の水蒸気はタービンを回して仕事を取り出せるが、40℃のお湯では給湯に用いる程度で、ほとんど仕事を取り出せない。現在使われているエネルギーの概念では、この区別ができず、工学的にエネルギーの有効利用を考える場合には適当ではない。そこで、本来の仕事の能力の意味を考察する中で、「エクセルギーの概念が生まれた」(亀山秀雄、1999)。また、エネルギーは④他のエネルギー形態(仕事)に変わり得る部分”変わり得ない部分とがあり、①をエクセルギー(有効エネルギー)②をanergie(無効エネルギー)と呼び、エネルギーとエクセルギーの関係が規定されている。

即ちenergy = exergie (有効エネルギー) + anergie (無効エネルギー) は保存される(熱力学第一法則)が、有効エネルギーはエネルギー変換の過程で保存されず、次第に無効エネルギーに変化していく(熱力学第二法則)。このエネルギーとエクセルギーの概念の違いを対比してまとめると、次のようになる。

エネルギー：①系のパラメータにのみ依存し、外界(周囲媒体)のパラメータに依存しない
②絶対値はゼロとならない。③いかなる場合も保存則に従い、消滅することはない。

エクセルギー：①系のパラメータ以外に周囲媒体のパラメータにも依存する。②ゼロとなる(系が最初から周囲媒体と完全に平衡な場合)。③可逆プロセスにおいてのみ保存則に従う。現実の非可逆プロセスでは一部または全部が消滅する。(亀山、1999)

このように、エネルギー研究の分野では、エクセルギーの概念は、所与の資源が発揮するエネルギーの仕事量として「エネルギー資質」を定義している。しかし、Sirkin等は以下のように主張する。資源資質に関して、このエクセルギー概念にからめて説明することができるが、エクセルギーの概念だけでは、資源資質を十分に説明したとはいえない。例えば、エクセルギーの計算においては、多様な有機資料の資質評価値がほとんど同じ程度であることが知られている。しかし、実用的な燃料資源として、石油と藁の資質を比較すると、以下のような理由により、石油は相当に高い資源資質を持っているといえる。

先ず、藁(ワラ)は水、窒素、硫黄、その他のミネラルのような不燃性物質をかなり含んでおり、それらは燃焼性能を低下させる。それによって、1キログラム当たりの藁の資質を減じている。燃料が持続する限

り、熱量数値を決定するのは炭水化物の濃度である。焼却する前に資料を乾燥し、嫌気性同化反応のような変換過程を通して、可燃物から不燃性物質を分離すれば、その資質を改善できる。しかし、それに要する労力は、最終的な資源評価で考慮されなければならない。次に、藁は燃焼施設へ輸送するために、一層の労力を要する。大きな燃焼炉も必要となり、膨大な処理が必要となるということである。また、原油資源から石油を精製するためには、1キログラム当たりで一層のエネルギー(太陽や地球物理的な)が必要となるものの、藁が石油と代替するためには一層の努力が必要となることを意味している。したがって、エクセルギーも資源価値の評価基準として適当とはいえないと主張している。

さらに、「投入された労力」という指標を取り上げ、生産工程において投入されたエネルギーと資源の総量が、その物質の資質と価値の双方の蓄積を表示していることを示し、それが資源資質の価値基準を構成することを、 $労力 = エネルギー消費量 + 労働力消費量 + 資源消費量$ という等式で示している。しかし、実際には生産工程などで消費された燃料の資源価値を軽視する傾向が強く、人的労力を含めたその工程に要する直接的・間接的な労力を正確に算出することは困難である。例えば原油の場合、原油採掘井戸の掘削から始まり、油田からの汲み上げや、原油精製の工程などの石油生産に費消された労力量だけでなく、原油自体が生成される時の太陽光エネルギーを含めたエネルギー総量を計算に入れなければならないと指摘する。

以上、多様な観点から、資源の持つ潜在能力についての精査によって資源価値を定める代わりに、資源資質が費消によって失われた後に、その再生に要する労力の合計を評価する基準様式を提案している。「代替等価物」と名付けられたその努力量には、資源や製品に費消された労働力、燃料、資源消費が含まれている。代替等価物とは、資源価値を評価するための基準として提案された概念であり、ある資源の代替等価物は、前提となる資源量と置換するために必要となる労力の合計を意味する。この評価基準を導入することによって、その資源の次世代における価値も、現世代にとっての現在価値も、実際の代替に必要な総努力量に換算することによって表すことができると提唱する。それによれば、その資源が再生可能なのか、あるいは他の資源物質で代替することが可能なのかどうか、さらに可能だとしても、代替が容易なのか困難なのかは、代替等価物基準(replacement equivalency criterion)を用いることによって説明できるとする。この代替等価物基準は、資源の稀少性についても、他の物質で代替することの難しさを示すことにより説明可能であ

り、太陽光エネルギーに関しても、その単位量・単位時間当たりの価値等価物を検討することによって可能だと主張する。ただし、化石燃料、生物資源および人的労働力の代替物の計算は比較的容易としながらも、鉱石資源の代替等価物を想定し、評価することには困難が伴うことを認めている。確かに、稀少物質の代替性の困難さを示す際にも、他の物質では代替できないような物質特性がある場合には、代替等物基準によっても検証しようとする資源の本当の資質を的確に評価することは難しいのではないかという問題が生じる。例えば、放射性物質の放射能という固有の特性を考えてみても、その放射性物質を活用して引き出そうとするある機能を、放射性を持たない他の資源を代わりに使用して、同様な機能を果たせ得たとしても、放射能という特有の性質がもたらす別の重要な機能を、非放射性物質で代替することは不可能である。精査の結果、他の資源の効能では、等価な物質が存在しない程、貴重かつ稀少な資源という結論も出てくる可能性がある。

このように代替等価物という資源資質を測る評価基準も一定の限界があるとは言え、前述したような従来示されてきた資源価値評価の基準と比較すると、その資源物質が持っている資質という潜在能力を、より近似値的には正確に示し得る価値基準といえよう。

B: 「拡大」の原則に関する鍵となる概念

次の論点に移る。資源が十分に活用されれば、資源の経済性は高まることになる。資源の活用時間を増やすことによって資源資質の利用を増大させることは、資源経済性を考慮するならば、不可欠な要素である。資源有用性の大きさを表すものを「実用効果」と呼ぶ。実用効果は、資源資質がどの程度適切な適合状態で利用され、その状態で利用するためにはどのくらいの費用がかかるかということに関係する。この実用効果は、4原則の中の「拡大」原則を規定する概念であり、「拡大」原則は、実質実用効果の効率と、資源あるいは資源資質の活用効率を最大化することを意図した原則でもある。ここで、実用効果の概念を図6に示す。

図6は、縦軸に資源資質を、横軸に活用時間を表した座標上に、資源資質の減少曲線を描くことによって、資源が活用される時間、つまり実用効果はこの曲線の下範囲として規定できる。資質減少曲線の下範囲が増加すれば、さらに効率的にその資源は消費されることになる。また、追加的なエネルギーや資源が、全体の実用効果を改善し、維持するために消費されるならば、これらの消費は、最終的な実用効果を決定する計算に入れなければならない。実質実用効果は、総実用効果とその総実用効果を達成するために費やされた努力との差で示される(図7参照)。この図7でいう努

力とは、生産・再生産・再循環などの資源と資源資質の再利用に関する作業と工程に要する資源消費および総合エネルギー量を表す。

多くの物質、副産物、廃棄物、排出物は、環境に対して有害な影響あるいは汚染効果があり、これらの負の効果を中和し、無害化するために要する努力は、消費からもたらされる本来の利益を上回ることも多い。この場合、その実質実用効果はマイナスと評価される。DDT、PCB、自動車燃料に使用される鉛は、そのような事例である。負の実用効果は以下の二つの方法で評価される。

1. 負の効果は、負の実用効果を持つ物質が作り出す環境被害を修復するために必要な努力の総量によって評価される。
2. 負の効果は、負の実用効果を持つ物質を中和し、あるいは生産的な物質循環に戻すために要する、努力の総量との関係において評価される。

ここで、「拡大の原則」に関係するもう一つの重要な概念である「資源効率」について述べる。資源消費についての資源効率は、二つの評価の関係として表すことができる。第一は、消費に要する総合努力の評価である。その総合努力には、消費に伴う副産物や廃棄物、排出物も加えた努力需要が含まれている。第二として、先に論じたような資源消費の実質実用効果に関する評価である。資源効率は、個々の活用の実質実用効果とその活用に必要な総合的努力の間に存在する、以下の関係として表される。

資源効率=消費の実質実用効果/消費の総合努力需要量
資源効率の評価は、資源利用の主要な実用効果だけではなく、資源利用に伴う、総ての副産物の効果も計算に入れなければならない。それには、副産物のプラスの実用効果はもちろん、マイナスの実用効果に伴う廃棄物や排出物、汚染物質などの望ましくない実用効果も含まれる。総合的な資源効率を正確に評価するためには、実用効果と努力需要量の評価がどの程度正確かによる。また、資源効率は、カスケード・チェーン、あるいは再連結などの選択される資源経路に適用される評価である。

C: 「連続的再連結」の原則に関する鍵となる概念

最初の「適切な適合の原則」と「拡大の原則」の二つは、資源連鎖経路に沿って、資源の所与の有用性を最大化することを扱う。しかし、その二つの原則だけで資源経済性の全範囲を網羅できるわけではない。例えば、メッキ鏡に用いられる水銀は、高度に付加された消費であり、その意味では資源資質の適切な適合であるといえる。しかし、壊れて捨てられた鏡から、水銀を再生利用することがほとんど不可能である限り、化学的に稀少な物質に関して持続可能とはいえない。

「連続的再連結」の原則はこの問題について言及する。この原則は資源資質の回収、つまり第3の側面である資源経済性に関係する。「再連結」という用語は、資源連鎖の低い水準から、より高い水準までの再生利用と資源資質の再循環について、あるいは他の物質循環まで言及する(図8を参照)。また、この再連結は、同じカスケード(資源連鎖)のより高いレベルに、あるいは新たな物質循環に資源資質を変換することである。

カスケード・チェーンは、数多くの実行可能な再連結経路から選択することができる。図8は、ある物質連鎖における最低レベルから、その連鎖を超えた他の連鎖レベルまで、一つの資源を再連結する多様な経路を示している。もう一つの再連結のタイプは、様々な異なるレベルから排出される諸物質が、図9で示される単一レベルに資源連鎖されるといふものである。このタイプの再連結の事例は、カスケード・チェーンの中で分解された製品から出る使い古しのネジやボルトを回収し溶解することである。

ある資源資質にとって、理想的なカスケード・チェーンはただ一つのステップから成り、最も早く実行できる再連結が最も効率的である。他方、ある資源資質は、可能な限り、多くの小さなステップに絶えず資源連鎖することによって、最善に活用される場合もある。異なる分類がされた物質は、異なる種類の再連結経路を必要とすることも、ここで指摘される。例えば有機原料の場合は、他のどのような水準からも、固有の資質水準に再連結が可能な金属や無機資源と同様な方法で再連結されることはできない。

ここで、カスケード・チェーン内部の物質に対して、最適な再利用経路を決定することが重要な論点となる。図8に示したようなカスケード・チェーンの最下部へと資源資質を与えることが、必ずしも資源経済性にとっての最善の選択であるとは限らない。最適性の決定の際、最も効率的な経路は、どの資源連鎖レベルにおける資源資質も評価を必要とする。連続的再連結は、総ての資源連鎖レベルの各々における再連結の選択の有益性が、連続して評価されるといふことを意味している。カスケード・チェーンのそれぞれの段階においても、あるいはどのような資源利用の後も、物質が資源資質を残していることについて、以下に示す3つの選択との関係で評価されなければならない。図10にその評価基準のモデルを示す。

1. 同一の資源連鎖において、より高い有用水準への上方「再連結(relinking)」、あるいは新たな物質循環への上方「再連結」。この再連結とは、同じカスケードの中の、より高いレベルか、または新たな物質循環に資源資質を上方変換する

ことである。

2. 同一の有用水準上における資源資質の「維持(maintaining)」。ここでいう資源資質の維持は、例えば修復、補充、より資源資質を高めるといった諸工程を通して、同じ機能レベルに資源資質を固定することを意味する。
3. そのカスケード内で、次の水準への下方「連鎖(cascading)」。カスケード・チェーンの意味は、そのカスケード・チェーンの中のより低いレベルに、資源資質を下方変換することである。

カスケード・チェーンにおける、再連結と資源連鎖の選択の違いは、資源資質を表す軸上の上方への変化、あるいは下方への変化の違いとして捉えられる。それを、図10において資源資質のプラス、あるいはマイナスの変化($\pm\Delta Q$)として表している。また、補修の選択は、資源資質の変化を含んでいないが、維持や修復、あるいは資質の向上に要する、エネルギー消費量と追加的な資源を含んでいる。追加的に必要となる努力量の比較に基づく評価にとっては、これら3つの選択枝のエネルギーと労力と資源という3項目の必要量の総和による比較が、最適かつ最効率な再利用経路を決定するために不可欠な要件となる。

この評価にあたり特に考慮を要するのは、企業の生産工程から排出される廃棄物の資源連鎖については、技術的制約やエネルギー、資源および労働力の追加的な投入など、最終的にはコスト増加につながる選択は困難であるということである。その意味では、1の「上方再連結」は当然検討に値するものの、極めて希少性が体高い資源で、かつ再連結にかかるコストが相対的に低い場合を除いて、現実的には下方「連鎖」の選択がなされるケースが多いのではないかと推測できる。

原則的に、資源資質の上方へのシフトは、最も多大な努力を必要とする選択であり、最も多くのエネルギーの投入と、最も大きな追加的な資源の消費の両方か、少なくともどちらかが必要となるということの意味する。維持も資質低下の影響を防ぐために、相当な努力を必要とする。どのような水準においても、資源資質を維持するための努力必要量は、時間と共に増加する傾向がある。したがって基本的には、製品に関する資源は、必然的に再連結かカスケード連鎖のどちらかでなければならない。原則的に、カスケード連鎖を選択した場合は、新たな出費は最少で済む。したがって、仮に連鎖が生産計画に依存しているとしても、最小限の努力で済むことになる。再連結、維持、カスケード資源連鎖に要する努力は、以下のaとbの2つのケースに分類される。

- a. 再連結のためのエネルギーと労働の需要

どのような再利用の経路が選択されたとしても、労働か燃料のどちらかの追加的なエネルギー消費は、多くの物質からなる集合物から、一物質か一部品を分離することを求められる。実際、分離に必要なエネルギーの総消費量は、修復と維持のどちらを採るのかを決定する決定要因であり、同時にそれによって製品がどの水準に再連結するのか、あるいは資源連鎖されるのかが決まる。多くの生産技術と組立て技術の両方も、あるいはそのどちらか一方は、基本物質に再連結させることが事実上不可能である。例えば、多種多様な合金は分離できない元素を含んでおり、元の物質と一緒に再熔融された時の資質を低下させる。逆説的ではあるが、ある原料の組み合わせで複合素材を作る以上は、それぞれの有用性に向けて、個々の製品の資質を改善する目的を持っているということである。再利用する純物質を回収できる可能性は、それによって少なくなるか失われる。基本的な元素に分離することが困難な製品や物質を作り出すことは、再連結するのに必要な努力を増加させるのである。

次に再連結の工程は、多種多様な空間的な分布に分散した原料を回収することも含んでいる。写真から銀を、バッテリーからカドミウムを回収することは、それによってエネルギー消費が妥当な範囲内に収まり得る事例である。それとは対称的に、自動車の廃棄物から鉛を回収するために要するエネルギーの需要量は、その鉛を利用する再連結を不可能なものにする。

最後に資質の再生産について解説する。どのような再連結経路でも、再生産、再加工、他の水準への経路の再設定のために、エネルギーの注入を必要とする。再連結することは、再融解、破碎、熔解、あるいは資源資質の再生や、より高水準に資源資質を変質させるために必要な他の工程を含んでいる。原則として、再連結は、資源資質の維持やカスケード資源連鎖という、他の2つの選択肢よりも多くの努力を要する。

b. 物質の再連結の必要条件

通常、化石燃料の消費は単にエネルギー消費として計算される。しかし、同時に化石燃料から抽出されたエネルギーは、再生不可能な資源の減耗を意味する。このようなエネルギー生産に用いる化石燃料の使用は、努力評価において2回計算されることになる。生産工程と、利用による消耗に負う2つの損失は、新たな同量の資源で補給されなければならない。また、未利用資源の追加的利用は、総合評価に含まれなければならない。再利用の経路は、「実用効果」を増大させるための派生的な資源の利用を含む。あるいは、再連結やカスケード資源連鎖に関して、求められる水準に到達するための特別な設備を含む。これらの追加的な資源の需要は、総合評価に不可欠である。

結論として、持続可能性を考慮に入れた「連続的な再連結」の原則は、資源有用性の評価から始まり、カスケード資源連鎖による諸々な有用性の段階への連結を評価することに至るまで、資源保全に対する注意を向けている。物質の再利用（Reuse）や再生利用（Recycle）において、ある水準から他の水準に、資源資質を連結するために要する総合的努力を考察することは不可欠である。最少の努力で済む連結関係が、最も効率的であると考えられる。

効率的な再連結は、持続可能性を達成するために必須の条件の一つであるが、始めから持続不可能な資源消費が、効率的な再連結の長所だけで持続可能になることはできない。そのような場合において、効率的な再連結は、未使用原料の消費率を下げることに役立つかもしれないが、持続不可能な状態を改善することはできない。本当の意味の持続可能性は、もし未利用資源の消費割合が、補充され補償されることができると均衡する場合にだけ達成できる。したがって、持続可能性を確保するためには、最初の3原則（適切な適合、拡大、連続的な再連結）だけでは充分ではない。資源代謝の規則に関する第4の原則を必要とする。

D: 「資源代謝均衡」の原則に関する鍵となる概念

以上に述べた3原則の適用は、社会制度を通して資源量を最大限に活かすことに役立つ。しかし、資源の消費率が、資源資質の損失に対する補充や補償の割合を超えるならば、資源ストックは一層消耗する。したがって、持続可能性の意味での適切な資源消費理論は、散逸した資源の資源資質を生じさせる能力と共に、資源消費率を均衡させる指針を含まなければならない。それを規定するのが「資源代謝均衡」の原則である。資源の物質代謝率は、資源ストックを減少させ、汚染を発生させる主要な決定要因であることから特に重要である。

資源蓄積率と資源消費率を均衡させる必要性が、ここでの議論の焦点である。原料と資源資質の損失は、資源消費に対して支払われるべき当然の代償であるが、この指摘は、多くの稀少な鉱物資源と同様、絶滅が危惧される生物種由来の資源のためにも極めて重要である。現世代の利便性のために、これらの有限な資源ストックを浪費することは、それが僅かに超過しただけで、次世代にとってかけ替えのない資源資質の実質損失を招くことになる。

資源の効率的な再生利用は持続可能性を目標としているが、100%の効率性を達成するのは不可能であり、常に物質の目減りを伴う。例えば、現在リサイクルされる金属の割合は約30%であるとの指摘もある。また、大幅に改善されたりサイクル率が大幅に改善されたとしても、何回も再生された後に利用できる原料の総量

は、急速に減少することもあるだろう。このことは、以下の方程式によって示すことができる。方程式中のMは、数多くの循環後に残される原料量をキログラムで表している。nは循環回数であり、M合計はキログラム表示の原料の総量である。

M合計

= M利用可能 + M廃棄物

$$= X^{(n-1)} M利用可能 + \{ (X^n - 1) / (X - 1) \} M廃棄物$$

M廃棄物はn回の循環後の廃棄物総量、M利用可能はn回の循環後の利用可能な原料の量であり、Xはn回総ての循環の回収率定数(0.00から1.00まで)である。10回の回収・循環した後の0.99以上の非常に高い回収率だけが、高い水準で資源の有用性を維持することを、この方程式から導くことができる(表-2を参照)。

さらに、リサイクルした場合、原材料本来の資質に再処理することが、常にできると考えるのは誤解である。例えば、プラスチックを再処理するとき、再利用される度に資質低下することが知られているし、合金の多くは分割できない元素を含んでおり、合金として再融解されると、資質水準は低下する。また仮に、原料を本来の形態と資質に再処理する科学技術があつたとしても、余分なエネルギー消費が含まれている限り、そのように再処理する努力を必ずしも正当化するものではない。

このことは、持続可能性にとって、2つの否定的な結果をもたらす。第一に、多大なエネルギー注入をしなければ、その資源の純粋な形態に再処理されることができない可能性がある。第二に、耐久性を改善するために使用される希少な物質はさらに希少になり、それゆえに再連結の過程を通して、一層不足する可能性がある。どちらの場合の結果も、再生不可能な資源ストックの消耗は増加するだろう。結局、耐久性を確保する手法は「資源効率」の観点から判断されなければならない。

一般的に、汚染は環境への無制御な原材料の損失のせいだとされるが、これは環境問題の一部にすぎない。資源と物質の循環を保つためには、追加的なエネルギーの消費に加えて、回収、輸送、回収資源の再処理に用いる原料消費が必要となる。たとえ原料の損失がなくても、高い物質代謝率を維持するためのエネルギー消費は汚染の原因になる。さらに、仮に、再連結あるいは再処理に必要なエネルギー消費が、太陽による資源や風力などのクリーン・エネルギー以外のもの(例えば、原子力)に由来するならば、そのときの資源の再循環は、汚染の増大という形として現れる。

当然、その資源の再循環は、消費される未利用資源量を減らすことによって、資源代謝率を低く制限することに役立つものの、資源の再循環、あるいは再連結の総ての形態は、実際には資源損失が避けられないという結果に終わる。これらは、本来有している資質が低下するという不可避なプロセスと、生産工程と消費の在り方によって被る損失のためである。これらの損失を同量の新たな資源によって補充することは、現状の生産と消費を維持するための基本的な要請である。再生不可能な資源がいかに慎重に扱われるとしても、あるいは、いかに効率的に再連結されているとしても、資源代謝率の増加は現存の資源ストックに追加的な圧力を加える。

持続可能性は、ただ単に生産を改善し、技術を再連結することだけでは達成することはできない。つまり、資源の更新、再生、補給、あるいは他の手段を用いることによって、補償率を超えないように資源消費率を調整するという問題は、科学技術的な方法では解決できない。再生不可能な資源はもちろん、再生可能な資源のためにも、資源代謝均衡、つまり消費と補給に関する明確な指針が、以下に示すように提案されている。

1. 資源消費量が、太陽資源による資源補給に対して、それ以下か同等であるとき、再生可能な資源の持続可能性は達成される。
2. 地球化学的に希少な鉱物資源の抽出は、可能な限りゼロに近くなくてはならない。
3. 新たに生産システムに投入される鉄、アルミニウム、珪土などのように豊富に存在するが、再生不可能な資源の量は極力少なくするべきであり、例えば太陽エネルギー化された工程を通して、廃棄物と低濃度の原材料の両方か、どちらか一方から回収される量と、ほぼ同量にするべきである。
4. 比較的豊富にある高資質の資源が、枯渇し始めたら必要となるはずの余分な資源消費を、次世代へ補償すること。この補償は、太陽エネルギー資源の蓄積と保管によって行われるべきである。

以上、カスケード・チェーンという資源連鎖理論の骨子について解説をした。そして、その物質の資源資質を無駄なく十二分に活用して、資源経済性と資源の持続可能性を達成するという考え方を確認した。しかし、その一方で、今後克服しなければならない課題も存在する。第一に、資源資質に関する問題として、これは製品の品質に深く関わっていることでもあるが、未利用資源と再生資源との資源資質の格差である。

未利用資源(地下資源)より、再生資源(地上資源)

の方が省エネルギーである。しかしその一方で、地上資源は未利用資源よりも劣化しやすく、特別の精度が求められる製品の素材には向かない、などの欠点も指摘されている。その技術上の課題が克服されなければならない。資源資質の観点からも、また素材の製造という製品品質の点からも、特に原材料の生産・供給を担う素材産業にとっては、バージン素材と再生素材の等価性を確立することが大きな課題である。これを克服しなければ、バージン素材とリサイクル素材を使い分けなければならない、より煩雑な社会システム上の手続きと体制整備が必要となる。この複雑さは、実際の資源活用場面において、そのシステムのハード面、ソフト面でエラーが生じるリスクを高め、誤用や不適切な適用など、そのシステムの実効性を減じる可能性がでてくる。したがって、そのようなリスクそのものを減らすため、またリスクが顕在化したとしても適切な対応を迅速に講じることが可能にするためにも、資源活用に関するシステムを、よりシンプルでスリムなものとする必要がある。そのための必要条件が、未利用素材と再生素材の等価性を確立することである。

次に、製品の製造に先立ち、製品設計の段階から長寿製品を心掛ける、再生品化しやすい素材を選ぶ、部品数を減らす、解体しやすい構造にするなどの、設計思想や設計技術のレベルが問われる。それは素材供給側の努力にも依存するが、製品寿命を延ばし、リサイクルし易い素材と構造を選択する企業努力と工夫は、資源経済性と持続可能性の観点から不可欠な要素となる。

資源の持つ資質を効率的に活用しつつ、持続性も確保しようとする努力は、以上に述べたように大きな困難を伴う。しかし、カスケード・チェーン・コンセプトに沿った資源循環を達成することを前提にして、インバース・マニュファクチャリングなどの生産・再生産システムおよび社会システムを設計し運用することが求められるものと考ええる。

結語

本稿の2章で、資源効率と持続可能性を前提条件とした資源循環型の社会システムの構築には、カスケード・チェーンのコンセプトを適用することが有効な道筋であることを提案した。そのカスケード・チェーン理論は、ゼロ・エミッション・コンセプトの理論上の基礎となる位置付けであることと、そのゼロ・エミッション・コンセプトを実現に導く生産・再生産システムとしてインバース・マニュファクチャリングがあるという論理構成にしたがって、論議を展開してきたつもりである。そして、この生産システムを運用する一

つの基準として、「代替等価物基準」を提出した。とはいえ、このコンセプトを実際に導入するにあたってはいくつかの課題も残されている。提案者であるSirkin等も企業が生産連鎖の全関係者と相互の協力関係を確立することが必要となり、共同生産や共同計画のような協力体制の実現性を研究する必要があることを強調している。筆者が本稿の1章で示唆したように、資源循環を効果的かつ効率よく進めていくためには、企業間の連携だけでなく、社会の各セクターが相互に連携した資源循環システムを構築する必要があると考える。

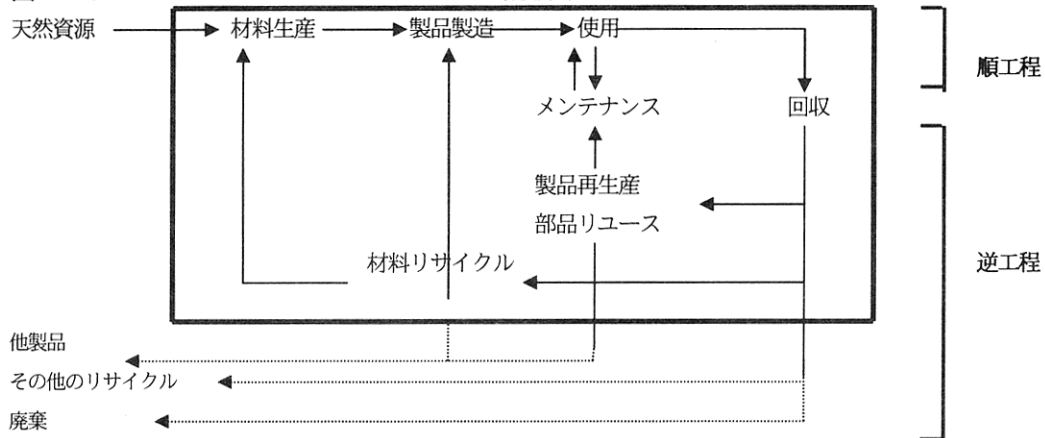
また、連鎖可能な製品を設計することは、製品開発に関するコストと開発リスクを増加させる可能性が高い。その影響は、デポジットか、あるいはその製品価格の上昇といった形で現れるであろう。現在、二次的に再生産された原材料の多くは、未使用・未加工原材料から造られた一次原料よりも高価であることが通常である。製品に価格競争が存在する以上、これらのコストが何らかの形態で補償される仕組みづくりが必要となる。さらに、再生品・再生原料などの品質面における技術的な課題も依然として残されている。

これらのことは、今後の筆者の研究課題として残るが、資源の持つ固有の資質を適切に使い尽くすことを通じて、有限な天然資源の浪費の回避と、それと関連する廃棄物の排出抑制に寄与するものとして、カスケード・チェーン理論の適用が一考の余地があり、資源循環型社会の実現のための一助となることを期待したい。

以上

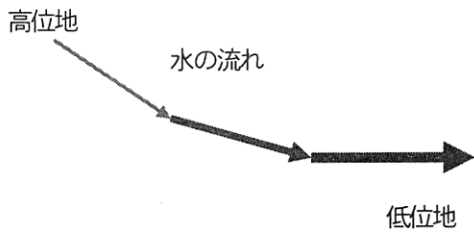
図表編

図1：インバース・マニュファクチャリングの概念図



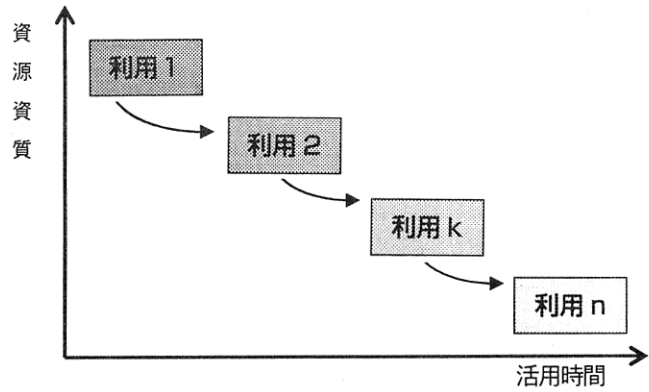
出典：経済企画庁リサイクルワーキング・グループ資料、1999

図2：カスケード・アナロジー



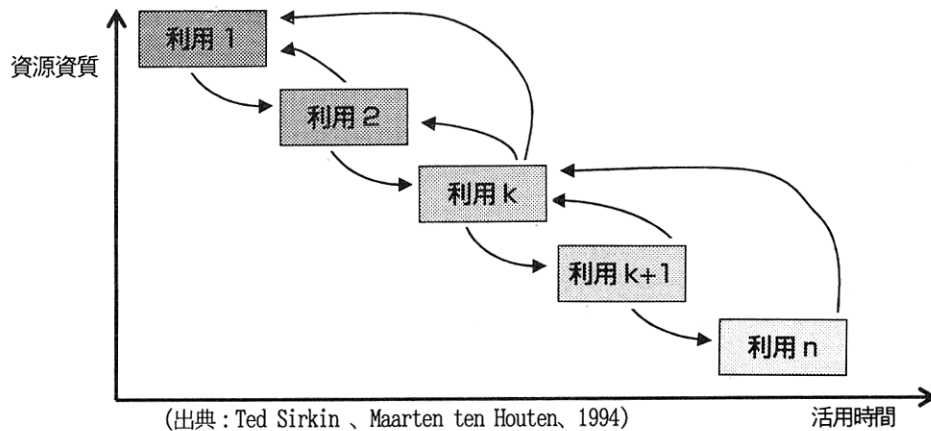
(出典：筆者作成)

図3：平衡方向へ向かう経路上での資源資質の反復消費



(出典：Ted Sirkin、Maarten ten Houten、1994)

図4：回収性の側面によって作動するカスケード・チェーン



(出典：Ted Sirkin、Maarten ten Houten、1994)

図5： カスケード・チェーン・モデルは4つの側面の資源経済性から構成される

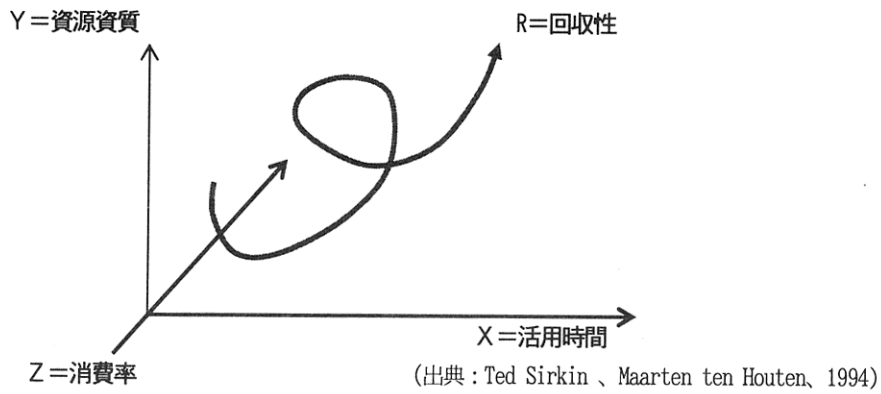


図6： 資質下降曲線によって示される実用効果

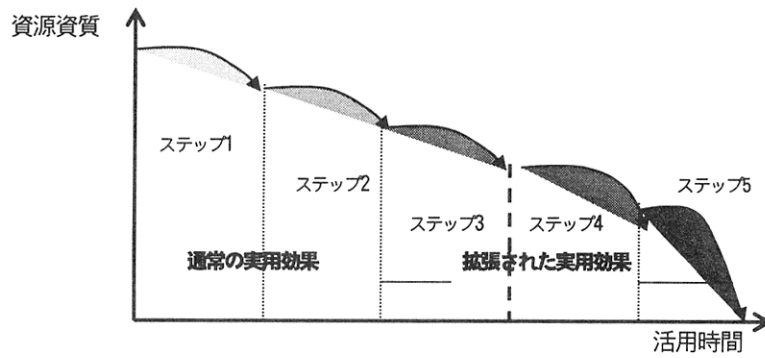


図7： 実用効果の維持、改善に要する諸資源やエネルギーが計算に加えられた、実質実用効果。

Fは要する努力であり、 $F = \text{エネルギー} + \text{資源消費}$ Fは→で示される

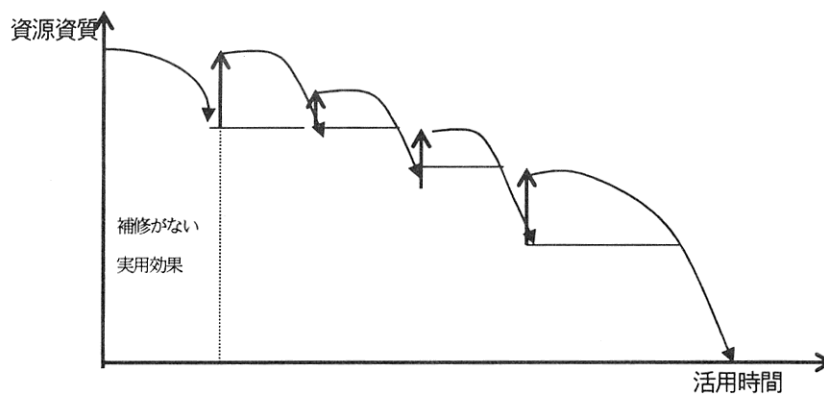


図8：一層高いカスケードレベル、もしくはカスケードした後に他の物質循環に資源資質を再連結する多用な経路

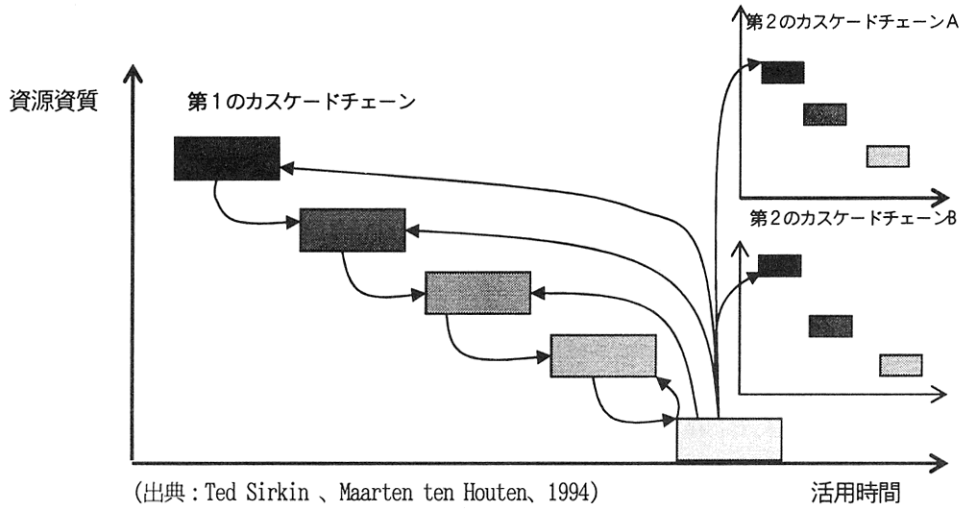


図9：多様なレベルから単一レベルへの再連結

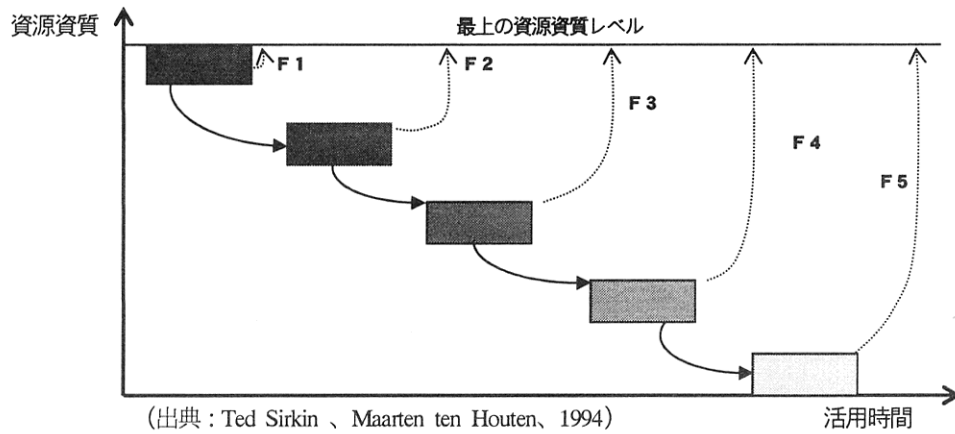


図10：連続的な再連結の3つの選択枝による効率性評価

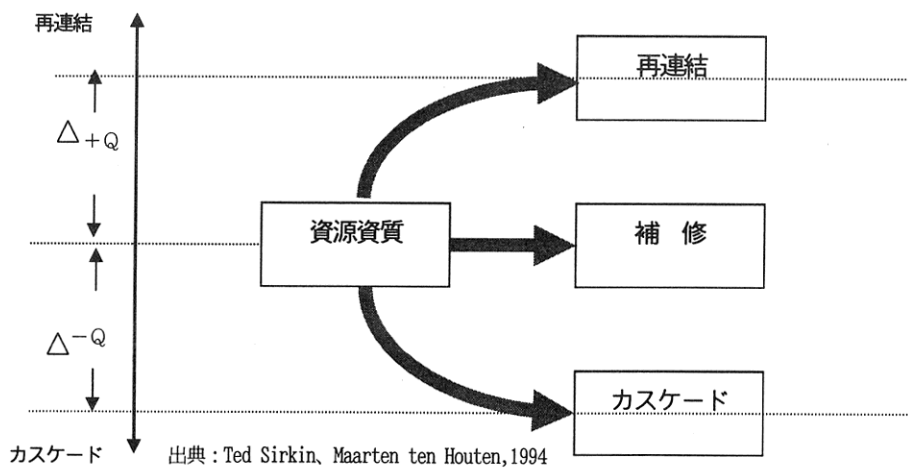


表-1: カスケード・チェーンの4原則

原則	解説
適切な適合	資源資質 (resource quality) と機能需要とを調和させる原則である。それは、諸機能を果たす高資質の資源を消費することは、不適當であり不經濟であるということの意味している。他の方法を用いれば、低資質の資源によって処理することができ、それは求められる機能よりも、さらに低資質な資源を消費することも適切ではないことを意味する。
拡大	資源資質の範囲と活用時間の範囲を相互に関係させる原則である。それは、有用性と資源消費の効率性を最大化することを扱う。一層長時間、充分に所与の資源が活用されれば、資源經濟性はますます高まることになる。資源活用の時間を増やすことによって、資源資質の利用を増大させることは、資源經濟性にとって欠くことができない。ここでいう「拡大」とは、資源資質が時間の経過と共に拡張することであり、それによって活用効果が増加することになる。
連続的な再連結	資源資質の回収と再循環に関する原則である。それは、物質連鎖における、資源の再利用効率を最適化する再循環経路を評価するためのプロセスを示す。「適切な適合の原則」と「拡大の原則」の二つは、資源連鎖経路に沿って、資源の所与量の有用性を最適化することを扱うが、その二つの原則だけで資源經濟性の全範囲を網羅するわけではない。例えば、メッキ鏡の水銀の使用は、高度に付加された消費に伴う資源資質の適切な適合であるといえるが、壊れた鏡から水銀を再生利用することがほとんど不可能である限り、稀少な物質に関して持続可能とはいえない。
調和した資源代謝	システムにおける資源消費量と、そのシステムを通して生じる資源再生との調和を要求する原則である。資源の消費率と再生産率との均衡を確立することを要求する。前述の3原則(適切な適合、拡大、連続的な再連結)の適用は、社会制度を通して、所与の資源量の供給を最大限に活かすことに役立つ。しかし資源のストックの消費率が、資源が供給する資源資質に関する損失に対して補充し、補償することができる割合を超えるならば、資源のストックは一層消耗させられる。したがって、持続可能性という意味では、適切な資源消費の理論は、失われた資源の資源資質を発生させる能力と共に、資源消費率を均衡させる指針を含まなければならない。資源の代謝率は、資源蓄積を減少させ、汚染を発生させることの主要な決定要因であることから特に重要である。

(出典: Ted Sirkin、Maarten ten Houten、1994)

表-2: 10回循環後の原料の残存量

回収率 (x)	10回循環後の利用可能なキログラム残量
0.75	0.08
0.80	0.13
0.90	0.39
0.95	0.63
0.99	0.91

(出典: Ted Sirkin、Maarten ten Houten、1994)

註解

1: 実用効果 (utility effect)

資源資質と活用時間の関数であり、所与の状況における資源有用性の大きさを表す。また、他に可能な使用に関連する特定の資源活用の相対的なメリットを評価することに用いる。

2: 代替等価物 (replacement equivalency)

ある資源の価値を評価する運用基準として提案された概念であり、ある資源の代替等価物は、所与の資源量の代わりにするために要する総努力の合計。

引用・参考文献一覧

- ・鈴木 邦雄、「エコマネジメント入門」、有斐閣、1991
- ・藤田 成吉、『ゼロ・エミッションと循環型社会の構築』、「産業と環境」第29巻5号、オートメレビュー社、2000。
- ・吉田 文和、「廃棄物と汚染の政治経済学」、岩波書店、1998
- ・細田 衛士、「グッズとバツズの経済学」、東洋経済新報社、1999
- ・山本 良一、「戦略環境経営 エコデザインベストプラクティス100」、ダイヤモンド社、1999
- ・亀山 秀雄、「エクセルギー工学 (理論と実践)」、吉田邦夫他、共立出版、1999
- ・中條 寛、『環境ビジネス展開の課題』、「環境情報科学」、29巻、1号、P27-31、2000
- ・井手 義則、『環境ビジネスと地域企業』、「環境情報科学」、29巻、1号、P15-20、2000
- ・「九州地域環境産業ビジョン」、社団法人九州・山口経済連合会、2001
- ・環境省、循環型社会白書 (平成13年版)、株式会社ぎょうせい、2001年
- ・環境省、環境白書 (平成13年版)、株式会社 ぎょうせい、2001年
- ・Capra, F & Pauli, G, "Steering Business Toward Sustainability", *the United Nations University Press*, 1995
(赤池 学訳『ゼロ・エミッション』、ダイヤモンド社、1996)
- ・Ted Sirkin & Maarten ten Houten, "The Cascade Chain" *Resources, Conservation and Recycling*, 1994

謝辞

本稿は、筆者が横浜国立大学大学院国際社会科学研究所に在籍したときに執筆した修士論文の骨子をまとめたものである。この研究を進めるにあたっては、指導教官である鈴木邦雄先生 (現、同大学院環境情報研究院) から多大な支援と激励を戴きました。特に、理論を実践に展開することの重要性をお導き戴いたことに、改めて深謝致します。同じく周佐喜和先生には、理論を適用する際のアプローチ方法について多くを学びました。併せて謝意を表します。また、早稲田大学大学院アジア太平洋研究科の白石昌也先生、横浜市立大学の影山摩子弥先生、デンマークAarhus大学のTed Sirkin博士を始め、さまざまなご指導およびご助言を賜った先生各位に謝意を捧げます。

以上