

**平成 1 3 年度環境調和型事業活動導入促進調査
(環境調和型製品設計)報告書**

別 冊

- 資源生産性 -

平成 1 4 年 3 月

社団法人産業環境管理協会

環境調和型事業活動導入促進調査 DfE（資源生産性）分科会委員名簿（順不同敬称略）

	氏名	所属・役職
委員長	山本 良一	東京大学国際・産学共同研究センター長
副委員長	稲葉 敦	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター長
副委員長	水谷 広	日本大学生物資源科学部教授
委員	浅野 闘一	三菱マテリアル（株）環境管理部長
"	乙間 未広	独立行政法人国立環境研究所環境計画研究室長
"	河野 正男	横浜国立大学大学院国際社会科学部研究科教授
"	木俣 信行	鳥取環境大学環境情報学部教授
"	古賀 剛志	富士通（株）環境本部本部長代理
"	斎藤 義夫	東京工業大学大学院理工学研究科教授
"	下田 孝	太平洋セメント（株）中央研究所長
"	高橋 徹也	三菱電機株式会社環境保護推進部企画グループ
"	田原 聖隆	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター
"	長野 浩司	（財）電力中央研究所経済社会研究所主任研究員
"	八木田浩史	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター
"	山田 一郎	N T T生活環境研究所長
"	横山 宏	（株）日立製作所環境本部主管技師長
"	依田 直也	立正大学経営学部教授
"	和田 安彦	関西大学工学部教授

環境調和型事業活動導入促進調査 DfE（資源生産性）WG 1 委員名簿（順不同敬称略）

	氏名	所属・役職
委員長	水谷 広	日本大学生物資源科学部教授
委員	八木田浩史	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター
"	浅野 闘一	三菱マテリアル（株）環境管理部長
"	木俣 信行	鳥取環境大学環境情報学部教授
"	古賀 剛志	富士通（株）環境本部本部長代理
"	斎藤 義夫	東京工業大学大学院理工学研究科教授
"	下田 孝	太平洋セメント（株）中央研究所長
"	田原 聖隆	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター
"	野村 侃滋	日本ペイント(株)環境品質本部製品安全部長
"	山田 一郎	N T T 生活環境研究所長
"	横山 宏	（株）日立製作所環境本部主管技師長
"	依田 直也	立正大学経営学部教授
"	和田 喜彦	札幌大学大学院経済学研究科助教授

環境調和型事業活動導入促進調査 DfE（資源生産性）WG 2 委員名簿（順不同敬称略）

	氏名	所属・役職
委員長	稲葉 敦	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター長
委員	田原 聖隆	独立行政法人産業技術総合研究所 ライフサイクルアセスメント研究センター
"	乙間 未広	独立行政法人国立環境研究所環境計画研究室長
"	河野 正男	横浜国立大学大学院国際社会科学研究所教授
"	斎藤 義夫	東京工業大学大学院理工学研究科教授
"	長野 浩司	（財）電力中央研究所経済社会研究所主任研究員
"	和田 安彦	関西大学工学部教授

目次

委員会名簿

目次

第1章 平成13年度資源生産性調査の目的・概要	1
1.1 調査の目的及び範囲	1
1.2 経緯	2
1.3 資源生産性，エコエフィシェンシー，ファクターについての基本概念	3
第2章 産業別調査	5
2.1 調査の概要	5
2.1.1 資源生産性・環境効率・グリーン度	5
2.1.2 資源生産性と環境効率の特質	6
2.1.3 WG1の本年度スタディ	7
2.1.4 資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクター算出ガイド	7
2.2 企業・産業の事例調査	15
2.2.1 事例研究概観	15
2.2.2 産業部門のマクロなファクター変化	17
2.2.3 TV、洗濯機、パソコン、冷蔵庫	22
2.2.4 パソコン	24
2.2.5 セメント	37
2.2.6 塗料	44
2.2.7 ペットボトル	57
2.2.8 銅	68
2.2.9 TV会議	77
2.3 ファクターに関する一考察	82
2.3.1 工作機械	82
2.3.2 都市	88
2.4 指標変化の要因，手法上の問題点	92
2.5 まとめ	111
第3章 資源生産性・環境効率手法の検討	114
3.1 資源生産性，環境効率の概念整理	114
3.1.1 検討の枠組み	114

3.1.2	指標の考え方	116
3.1.3	LCA 思考に基づく産業部門別の環境効率	121
3.1.4	企業・産業・国民経済を通じた資源生産性と環境効率	124
3.1.5	エコエフィシェンシーの考え方、評価因子について	127
3.1.6	資源生産性・環境効率手法	134
3.1.7	資源生産性の考え方の整理・試論	138
3.1.8	生産財としての工作機械の資源生産性・環境効率について	144
3.2	まとめ	150
第4章 概念・手法比較調査		154
4.1	海外調査の概念整理	154
4.1.1	WBCSD	157
4.1.2	EEA	160
4.1.3	Pre Consultant	168
4.2	国内調査の概念整理	175
4.2.1	三菱電機株式会社	175
第5章 平成13年度調査の成果と平成14年度調査の課題		182

第 1 章 平成 13 年度資源生産性調査の目的・概要

1.1 調査の目的及び範囲

地球環境・資源諸問題は重大な関心事であり、脱物質化を図って地球環境問題を解決し、持続可能な経済社会を構築していくことの必要性が強く求められている。持続可能な経済社会発展には、資源エネルギー消費量を削減しながら、生活やサービスの質・量を向上させるという技術開発の基本的拠り所を、資本(労働)生産性から資源生産性(資源効率)や環境効率の向上にシフトさせ、その変化を支援する社会システムを整備していくことが不可欠である。既に社会システムを整備し、持続的発展を促進する手法・技法として LCA、環境会計、DfE や環境ラベル等の研究や開発が精力的に行われている。

しかし、これらの手法類は環境負荷を定量化し企業の環境マネジメントの向上を促すことを目的としており、技術・製品の選択や産業全体や国政レベルでの活用には適したものにはなっていない。循環型経済社会システム構築を目的とするには、環境を統合した高度技術(エコハイテクノロジー)の積極的選択や企業レベルに止まらず社会システムの変革を促すことに適した、新しい環境効率指標やマクロ評価指標の開発と実用化が不可欠である。

FACTOR10 等で表現される環境効率や資源生産性の概念と手法は、上述の既存手法と整合し、これらを統合化したものであり、資源を基準物差しとして環境会計の成果と効果的に結びついた評価尺度となるものである。

国際的にも、計測・評価尺度として FACTOR10、FACTOR4、環境効率等の概念・手法が注目を浴びており、International FACTOR10 クラブの結成や、ドイツにおけるプロダクティビティー登録センター設立提案等、国際団体や主要国でのこの概念の研究調査が進められている。我が国においても、日本学会会議より資源生産性研究センター設立構想が提案されている。

以上から、我が国においても各産業セクターにおける環境効率、資源生産性向上の歴史的推移や今後の可能性、今後 10 年間に於ける飛躍的向上を図るために必要な技術開発課題や政策課題、技術や製品のグリーン調達を行うためのポジティブスクリーニング基準及びその標準化のための課題等についてシステムティックな調査研究が必要である。

上記の目的を達成するため、本調査では次の項目を検討する。

- (1) 国・産業レベルの戦略的政策のための資源生産性、環境効率の指標及びその評価単位を開発する。
- (2) 製品からサービスへのビジネスの形態変化などによる環境負荷の低減と資源生産性向上の事例調査と今後の発展の可能性を調査する。
- (3) 企業経営戦略のための資源生産性の指標化ガイドラインを作成する。

(4) 開発した評価の普及プログラム及び普及策の策定を行う。

平成13年度は本調査の初年度に当たる。これらの調査検討を推進するに当たり委員会を設置し、前段的調査として、本調査全体管理と調査項目についての検討を行った。そのために、具体的には以下のとおり検討の基礎となる情報収集調査を行うとともに、調査研究活動策定及び評価指標検討のWGを設置して詳細な検討を行った。

- (1) 資源生産性、環境効率及びその向上の度合いを評価するための概念整理をする。
- (2) 我が国の産業別に資源生産性を高めた製品製造等の技術・サービスの事例及び向上の歴史的推移を調査し、現状を把握する。
- (3) 我が国の産業別資源生産性向上の今後の可能性、また、そのための技術開発課題及び政策課題を調査する。

本書はこれらの調査結果をまとめ上げたものである。

1.2 経緯

「ファクター」の概念の発展についてその経緯を簡単に記す。

1987年、国際連合開発環境委員会はブラントランド・レポート“我々の共通の将来”に持続的発展の概念を打ち出した。持続的発展を支持する考えが受け入れられる契機となったものである。

1990年代初、ドイツ・ブッパタール研究所ワイツゼッカー博士は「ファクター4」を提唱した。「ファクター」とは資源生産性の向上を測るヤードスティックである。当時のEC内の平均的生活標準を2倍にするのに1/2の資源で達成し、「ファクター4」で持続的発展を可能にしようというものである。

さらに同研究所シュミット・ブレーク博士により「ファクター10」が提唱された。この概念の背景には、東欧及び発展途上国が環境問題対策に関し、従前の方法による対処では先進国に追いつけないであろうことへの懸念があった。それまで先進国はエンドオブパイプ型の技術に多額の投資を行い、環境問題を解決してきたが、途上国は深刻な資金不足問題を抱えており、解決の難航が予想された。そこで従来型の解決方法に代わる革新的解決方法を摸索したのである。

1992年、シュミット・ブレーク博士は「ファクター10」及びMIPS(Material Input Per Service unit)を提案し、地球上の資源の流れを半分に減らすことが持続可能な経済を実現する手段であると説いた。すなわち、世界の人口の1/5である西欧の生活を途上国も達成するためには、資源消費量を1/2に削減するとしてファクター10が必要というものである。

その後、この概念は国際的に認識されはじめ、世界各地で会議が開催されることとなり、議論が活発化していった。1994年にはWBCSD(持続可能な発展のための世界経済人会議)とUNEP(国際環境計画)は先進国のファクター20の脱物質化を提案した。

1994年にはインターナショナル・ファクター10クラブが結成された。フランス/カルヌール村で欧米、インド、日本からの著名な環境問題研究者、国際機関の幹部、政治家、ジャーナリスト、経営者20数名が参加して結成されたものである。そこでは、地球の破局を回避するために今後30年から50年の間に先進国の資源生産性を10倍に引き上げることを提言するカルヌール宣言が発表された。

1996年、OECD(経済協力開発機構)はエコエフィシエンシー(経済・環境効率)について検討を開始した。より多くの福祉(welfare)をより少ない資源消費で達成するという基本的考え方はファクターの概念と類似している。ただしOECDでは、環境効率の指標作り、現在及び将来の環境負荷の解析、情報交換と研究の必要性を説くに留まっている。ここでは環境効率を“生態資源が人間の要求に合うよう使用される効率”すなわち、“企業、業種あるいは経済単位で生産される製品やサービスの価値をそこで生まれる環境負荷の合計で割った”ものと定義されている。

以後、ヨーロッパを中心にファクターに関する研究が続けられている。

1.3 資源生産性、エコエフィシエンシー(経済・環境効率)、ファクター

各用語の基本概念をここで明確にしておく。

* エコエフィシエンシー(eco-efficiency)

エコエフィシエンシーの概念はWBCSDによって開発された。1992年のリオ・サミットに先駆けて提言した「Changing Course(持続可能な発展のための企業経営の改革)」の中で触れられ、その内容は高い評価を得た。その後WBCSDはエコエフィシエンシーを「資源消費及び環境負荷を最小化し、サービスを最大化させること(Achieving more from less is possible through delinking goods and services from the use of nature)」とし、次のように詳細に定義付けている。

“エコエフィシエンシーの状態とは、生態系への影響や資源集約度を漸進的に減少させながら、人間の要求を充たし、生活の質を向上させることのできる価格競争力をもつ製品・サービスを供給することにより達成される。製品・サービスの供給はライフサイクルの視点から考慮されるべきである。その影響度は少なくとも地球の推定容量のレベルまで引き下げられなければならない。”

OECD「Eco-Efficiency」(1998年)では若干異なる定義を与えている。“エコエフィシエンシーとは、人間の必要を満たすための環境資源利用の効率で、アウトプットをインプ

ットで割ったものである。ここで「アウトプット」とは1企業、1業種あるいは組織全体で生産される製品やサービスの価値、「インプット」とは1企業、1業種あるいは組織全体で発生する環境負荷の合計をいう」と定義している。

*ファクターX (資源生産性X)

ファクターXは、代表する指標として資源消費を用いてエコエフィシシー(経済・環境効率)を代替評価しようというものである。

ファクター4 (factor 4)

ファクター4では平均的生活標準を2倍にするのに1/2の資源消費で達成することを目標としている。ここでは比率が着目され、資源消費の絶対量は問題とされない。時間軸においてのゴールは示されていない。

ファクター10 (factor10)

世界の人口の1/5である西欧の生活を途上国も達成するためには、資源消費量を1/2に削減したとしてファクター10が必要であるという考え方である。この概念の基礎として、「ファクター10」は資源消費の絶対的総量に着目するものである。また、天然資源消費もしくは使用が、地球上の全ての人に行き届くことを想定している。この点がファクター4とは異なる。達成時期は一世代以内、おおよそ25年とされている。

現在、ファクターやエコエフィシエンシー(経済・環境効率)の詳細な解釈については多くの機関・研究所で各々行われている。したがって、概念を明確にし、共通の理解と認識を持つことが今後ますます望まれる。

第2章 産業別調査

2.1 調査の概要

既に述べたように、本年度のWG1調査作業の主要な目的は次のようであり、その結果は2.2以降に詳しい報告がある。

産業別資源生産性向上事例調査

技術革新可能性と技術課題調査

政策課題抽出

以上の主目的を達成するに先立ってWG1では、資源生産性と環境効率の具体化とその解釈に関する次の事項を検討した。すなわち、各セクターの製品の単位あたり機能は何か、資源生産性・環境効率の式 分母・分子は何か、資源生産性・環境効率から何が分かるのか、資源生産性・環境効率が向上した技術的ポイントは何か、の4点である。

2.1.1 資源生産性・環境効率・グリーン度

資源生産性とは、資源の消費が一体どれくらいのニーズを満たしてくれるのかを示す。ファクター4やファクター10は、この資源生産性を先進工業国が率先して現在の4倍なり10倍なりに高めるべきであるという主張である。このような考えは、特にヨーロッパで盛んであり、スウェーデンで行われた専門家に対する産業別の聞き取り調査では、食品、半導体、エネルギーの各分野で資源生産性を10倍高めることが充分可能だと報告されている。

ところで実は、生産性を高めるだけでは片手落ちである。ここで重要になるのが、環境への負荷が一体どれ程のニーズを満たしているのかを示す環境効率という考えである。環境負荷は地球の限界（環境容量）と、ニーズ充足度は人間の幸福観と、密接に係わっている。

資源生産性と環境効率とを繋ぐものがグリーン度である。グリーン度は資源消費量を環境負荷で割ったものであり、科学技術の環境指向の程度を表わす指標である。それが高ければ高いほど、同じ資源消費に対して環境負荷が小さいことを示す。この時、環境効率は資源生産性とグリーン度との積となる。したがって、資源生産性が高ければ高いほど、科学技術のグリーン度が高ければ高いほど、環境効率がよいことになる。

多くの製品や材料では、それが提供するサービスは1つとは限らない。そこで、資源生産性や環境効率を個々の製品・材料について求めるときには、その製造に要する資源消費量を発生する環境負荷で割ったものを、その生産プロセスのグリーン度という意味で特にプロセス・グリーン度と呼ぶ。

2.1.2 資源生産性と環境効率の特質

資源生産性と環境効率、グリーン度についての以上の議論から、資源生産性と環境効率について次の特質が挙げられる。

(a) 境界設定が重要

資源生産性・環境効率は、本来、ライフサイクル全体にわたる総合指標であり、工程、製品、会社、社会、国、人類圏、それぞれの階層を境界とすると異なる値になる。例えば、アルミニウムボディの車は、製造時は環境負荷が高いが、使用時の低環境負荷による効果は製造時のマイナス要因を上回って大きいと期待される。したがって、境界をアルミニウムボディ車の利用にまで拡張すると、アルミニウム材料製造に限った場合に較べて、アルミニウム素材の環境効率が向上する可能性がある。また、リターナブル瓶は、回収システムが整備されていればワンウェイよりも環境負荷が低いが、回収システムがない場合には環境負荷が高くなる。このように、社会システムをどのように設定するかも資源生産性や環境効率は異なる。

(b) 資源生産性と環境効率は異なる概念

資源生産性(RP: Resource Productivity)と環境効率(EE: Eco-Efficiency)は異なる指標であり、次のように区別される。すなわち、本来(ライフサイクルにわたる)の資源生産性は、資源消費(RC: Resource Consumption)当たりのニーズ充足度(S: Sufficiency)、すなわち $RP=S/RC$ 、で定義される。一方、環境効率は環境負荷(EL: Environmental Load)当たりのニーズ充足度、すなわち $EE=S/EL$ 、で定義され、この両者を結ぶのがグリーン度(G: Greenity)、 $G=RC/EL$ 、である。

ここでニーズ充足度は、そのニーズを満たすサービスあるいは製品の量で代替することも許される。また、資源消費と環境負荷についても、それぞれ適切な定量的パラメーターをもって代替可能である。そこで例えば工程レベルでは、資源生産性は使用材料当たりの製品数(従来の材料効率に同じ)環境効率は二酸化炭素排出量当たりの走行距離などとすることができる。ここで、この両者を結ぶグリーン度はプロセス特異的であることから特にプロセスグリーン度(PG: Process Greenity)、 $PG=PRC/PEL$ 、と呼ばれる(PRC: Process Resource Consumption; PEL: Process Environmental Load)。

(c) 使い易く産業ごとの主張を出せるものを工夫

資源生産性と環境効率は、(a)と(b)に述べられている総合システム指標としての正しさを損なわない中で、産業や製品ごとの事情や相違を取り込むことが可能なものを工夫することが重要である。これには、企業にとって直接管理可能なデータに主として依拠した指標であり、製品・材料レベルでも求めることができるものともなるような指標を工夫することとなる。

これらの特質を踏まえつつ、異なる産業や製品への資源生産性・環境効率・グリーン度の具体的適用を吟味し、更にそれらのファクターを算出することとした。

2.1.3 WG1 の本年度スタディ

本 WG の本年度のスタディ内容として 1 つは、都市計画・建築分野並びに工作機械分野における一層の概念整理を行うこととした。これらの考察の結果は本報告 2.3 に述べられている。一方、具体的ケーススタディは 2.2 に述べられる。ここでは、産業部門全般ならびに発電、運輸を対象とした 2.2.2 と個別アウトプットを対象とした 2.2.3 以降の記述とに分かれている。

このケーススタディを行うに当たっては、資源生産性と環境効率の利用可能性を 2.1.2 の (c) で述べた考えを生かして (a) や (b)、すなわち境界設定並びに資源生産性と環境効率の分母と分子の選択は対象となるケースごとに自由に選択することとした。

次の 2.1.4 で述べる算出ガイドの役割は、したがって、いったん境界や分母・分子の選択がなされた後、それぞれの値を求める統一した手続きを定めることにある。

個別アウトプット対象としてどのようなケースを選択するかについては、次に示す産業や製品の特徴を考慮した。すなわち、素材と製品とでは境界設定などについて相当な違いがあると思われた。そこで、素材として銅並びにセメントを選択した。また、製品とサービスとでも将来それらが融合すべきとしても現状では大きな違いが予想されたため、サービスとして TV 会議を選択した。次に製品の中でも拡散製品か非拡散製品かという点が環境側面から大きな違いをもたらすことから、拡散製品として塗料を選択した。さらに、製品が成熟しているか成長途上にあるかも考慮すべきと考え、成長途上にある製品としてパソコンを取り上げた。以上の特徴あるアウトプットに対しいわばリファレンスとなる製品として TV・洗濯機・冷蔵庫を選択した。

2.1.4 資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクター算出ガイド

WG1 内での事前検討を踏まえて、以下のような内容の資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクター算出ガイドを作成し、これを共通の指針としてケーススタディを実行した。

(a) 一般認識

i. 普遍的解は存在しない

共通の課題はあるが、資源生産性や環境効率の計算法に関する普遍的方法論はない。

ii. ファクター算出における基盤概念

環境効率、資源生産性の本来的リファレンスポイントは現実世界である。地球システムがフローもストックも共に有限であることから、人間による資源消費や環境負荷がその絶

対的な地球限界内であることが求められる。ここにファクターの目標値を定める本質的意義がある。したがって、資源生産性や環境効率がいくら向上しても全体として資源消費や環境負荷が増加しては何にもならない。むしろ逆に、実態と離れたバーチャルな資源生産性の向上は自己欺瞞に陥る危険さもある。持続的発展を促進するには、先進国における現状からのトータルとしての資源消費の削減、すなわち熱物縮を最終目標として達成しなくてはならない。

熱物縮とは、物質使用量の削減 and/or 熱（エネルギー）の削減が行われることである。本来、熱物縮はマクロに実現されなくてはならないが、その前提として製品やサービス当たりでも達成されなくてはならない。この時、生産方式 から生産方式 への技術進歩等により、エネルギー及び（あるいは）モノの消費量に削減が起きれば、この方式によって生産される製品・サービスに関して熱物縮があったこととなる。これには、例えば、生産に要するエネルギー消費量の減少や製品の軽量化による物質消費量の削減が相当する。

ファクターは、熱物縮の程度を表わす指標と言える。ファクター8とは、注目している資源・エネルギー消費が八分の一に熱物縮したことを示す。

以上の議論から、製品・サービスのファクター向上にとどまらず、現実に社会に対して熱物縮をもたらしたか否かも考慮しなくてはならない。すなわち、ある技術開発により、社会全体での物質・エネルギー消費量が削減されたか否かを問う必要がある。

本調査で求める資源生産性・環境効率・ファクターは、そのための前段階として、計算値から得られる定量化し易い実務的指標を求めていることを忘れてはならない。

iii. 資源生産性のマクロ観

本 WG の八木田委員による検討では、産業部門の GDP / エネルギー消費の値が過去 30 年で数十%から数倍向上している。この例外が旅客輸送部門であり、そこでは半減している。マクロなレベルでの資源生産性の変化は、これでほぼ示されていると考えられ、資源生産性の表現法として分子に GDP、分母にエネルギー消費を採用したものを更にマクロ指標候補として検討する。

iv. エネルギー消費と二酸化炭素発生量の普遍性

資源生産性の分母にエネルギー消費、環境効率の分母に二酸化炭素発生量を用いるのは、各委員による個別アウトプットの予備検討においても多く用いられており、今回のケーススタディにおいても有効であると思われる。

(b) 資源生産性、環境効率、グリーン度、ファクターの計算（一般論）

i. 単位は工程とする。ライフサイクルは考えなくても良い。

資源生産性や環境効率を算出する単位は工程である。これは、LCA とは大いに異なるの

で注意を要する。境界の中に複数の工程が入っても良いが、ライフサイクルを考える必要はない。

ii. エネルギーと二酸化炭素を共通項に

エネルギー消費ないし二酸化炭素発生量は多くのケースに共通する因子であるので、これを分母とした指標も算出する（資源生産性ならエネルギー消費を分母にしたもの、環境効率なら二酸化炭素発生量を分母にしたもの）。各自、独自の項目を分母・分子に用いてよいが、合わせて可能な限りエネルギー消費及び二酸化炭素発生量を用いた指標も算出する。

iii. データ採用の優先順位

データ採用の優先順位は次の通りとする：

フォアグラウンドデータ > バックグラウンドデータ

個別データ > 平均値

当時の生データ > 当時の推定データ > 現在のデータ

現地のデータ > (現地を含む) 広域データ > 他所のデータ

iv. 廃棄関連データの扱い

取り上げた製品・サービスが、設定した境界内で廃棄物の処理を伴う場合には、廃棄物処理における資源消費、環境負荷発生についても（データが存在する限り）後に示される図 2.1.4.1、2.1.4.2 中の Ri、Li としてそれぞれカウントする。一方、廃棄物や廃熱の処理をせずに境界の外に排出するのであれば、廃棄物・廃熱はアウトプットとして計上する。

廃棄されずにそのままリサイクルされる場合には、廃棄に伴う資源消費・環境負荷はゼロとなる。ただし、リサイクルのために廃棄物に加工・輸送などが行われる場合には、その結果による環境負荷は計上する。この原則が守れない場合には、それを理由と共に明記する。また、廃棄物処理の方法が変わっており過去のデータがないなどの場合は上記のデータ採用の優先順位に準じて他のデータを使ってよい。この場合もその旨を明記する。

v. 資源生産性と環境効率の区別

「エネルギー消費」は資源消費である。したがって、これが分母であれば資源生産性となる。「二酸化炭素発生量」は環境負荷である。これが分母であれば環境効率となる。ただし、炭素単体および炭素化合物の消費形態がエネルギー源としての用途以外のものを含むなど多様であり、排出された総炭素量換算で炭素単体及び炭素化合物の消費が表現される場合などでは、これを資源消費とみなしてよい。

vi. エネルギー消費と物質使用の区別

エネルギー消費と物質使用は別に扱う。合算しない。

(c) 資源生産性、環境効率、グリーン度、ファクターの計算（具体論）

i. ファクター算出法

ファクターの算出は次の手順で行う。すなわち、まず取り上げた製品あるいはサービスを特定し境界を明示する。次に、資源生産性ないし環境効率の計算法を示す。こうして資源生産性あるいは環境効率について、それぞれ工程別、新旧別などで求め、その比を取り、ファクターとする。ファクターは比率量であり、無次元数となる。

例えば、 α という生産方式と β という生産方式との間の資源生産性のファクターは図 2.1.4.1、2.1.4.2 にある P_j (P: Product)、 R_i (R: Resource)、 L_i (L: Load)を用いて：

$$\left[\frac{P_j}{R_i} \right]_{\beta} / \left[\frac{P_j}{R_i} \right]_{\alpha} \quad \text{で与えられる。}$$

一方、例えば 2000 年の生産方式と 1950 年の生産方式との間の環境効率のファクターは：

$$\left[\frac{P_j}{L_i} \right]_{2000} / \left[\frac{P_j}{L_i} \right]_{1950} \quad \text{で与えられる。}$$

ファクターも i と j の組み合わせで多数得られるが、通常、この中で向上主張に値するものは少数に限られる。これらの複数のファクターについて本年度のケーススタディにおいては特段の総合化は考えない。

ii. 資源生産性、環境効率の算出法具体例

図 2.1.4.1 に、境界内に工程が 1 つだけ (A) あり、その工程に 5 つのインプット (R_i , $i=1 \sim 5$ 、物質あるいはエネルギーを示す)、8 つのアウトプットがある場合を示す [内、2 が製品あるいはサービス (P_i , $i=1 \sim 2$)、6 つが環境負荷 (L_i , $i=1 \sim 6$ 、物質あるいはエネルギーを示す)]

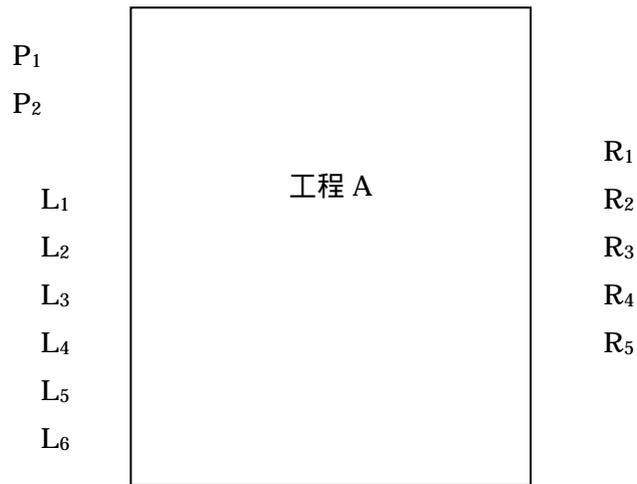


図 2.1.4.1

この時、製品 P_j の資源生産性は P_j / R_i 、環境効率は P_j / L_i で表される。したがって、製品 P_1 について 5 つの資源生産性、6 つの環境効率が求められる。同じく、製品 P_2 についても 5 つの資源生産性、6 つの環境効率が求められる。この場合、総計 10 の資源生産性、12 の環境効率が求まるが、通常、この中で向上を主張する意味があるものは多くとも数個になると思われる。

これらの複数の資源生産性や環境効率について当面は総合化は考えない。

ある $R (R_k)$ で資源生産性の向上がありながら、他の $R (R_i)$ で大幅な資源生産性の低下がみられる場合もあり得る。この場合、資源 R_k の資源生産性の向上を主張するのであれば、例えば R_i の絶対量が他の R の絶対量に比べて充分小さいなど、 R_i ベースで求められた資源生産性の低下が重大でないことを確認することが望ましい。

工程 A だけでは資源生産性あるいは環境効率の向上がみられないが、工程 A で作られた製品が工程 B の資源生産性あるいは環境効率の向上に資する場合には、工程 A の資源生産性低下を正当化するため、工程 B も境界内に含ませることができる。これを図 2.1.4.2 に示す。

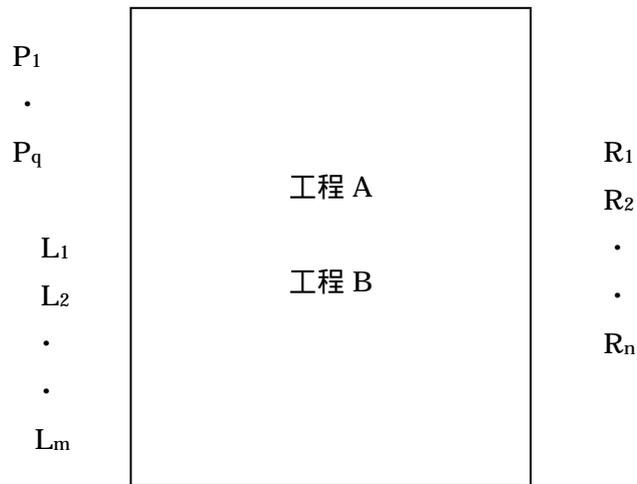


図 2.1.4.2

以下、同様にして、資源生産性あるいは環境効率の向上がみられるような範囲まで境界を拡張する（境界内の工程を増やす）ことができる。

iii. グリーン度の算出

同一の P について資源生産性と環境効率の両方が求められた場合には、グリーン度（＝環境効率 / 資源生産性）も求める。

(d) 資源生産性、環境効率、グリーン度、ファクターの計算における個別留意事項

i. 環境特性と他の特性との区別

「環境に良いこと」を他の製品特性と混同しない。例えば、「美観の付与」はアメニティの点から「環境に良いこと」と思われなくもないが、これは資源生産性や環境効率の対象とする環境とは異なる。したがって、「美観の付与」そのものをカウントはしない。今仮に、「美観の付与」が製品への愛着となり長期間使われることになるのであれば、「長寿命による単位時間当たりの環境負荷発生の低減」を定量しカウントすることはできる。すなわち、他の製品特性が事実環境にプラスであるのならば、環境側面に翻訳してカウントする。

ii. 解釈やデータの巾が狭い条件設定

曖昧さや多様な解釈をできるだけ排除するため、解釈やデータの幅が狭いところまで境界や分母・分子項目を絞ることが望ましい。これによって、可能な限り定量的かつ再現性のある結果を得ることを狙う。このために、対象とするサービス・製品を絞ることも必要となる。例えば、プラスチックで括るのではなく、家庭用ラップにするなどである。工作機械や塗料のように多種の製品ないしサービスを提供するものについても、代表的な製品

或いはサービスに絞って、その提供に要する資源消費あるいは環境負荷を求める。例えば、ペンキであれば特定自動車用に目的を限定し、壁・床・その他等と対象を拡げない。この趣旨は、本年度の調査は予備的なケーススタディであることから、複雑な対象を最初から扱うことによって問題の本質を見失ってしまうことがないようにするためである。したがって、本格的な調査においては、このような複雑なものも調査の対象となる。

iii.境界の厳守

境界は任意に設定できるが、いったん設定した境界は厳守する。すなわち、境界外から投入される資源・エネルギーの製造における資源生産性・環境効率は考えない。同様に、対象とする製品が他の製品製造工程の効率ないし生産性の改善に使われることも、それが境界外である限りカウントしてはならない。製品自体がエネルギー源となる場合であっても、その分を製造に要するエネルギー消費から控除しない。さもないとダブルカウントになるからである。これは特に、対象とする製品が素材である場合に注意を要する。分母には、その素材当たりの環境負荷や資源消費を考える。素材がアウトプット P であるとしたならば、その素材が使われている最終製品が果たすサービスは分子にはカウントしない。

以上を要するに、いったん境界を設定したならば、その境界を通した物質とエネルギーの出入りだけに着目すればよく、境界外のことは無視できる。このことは翻って、取り上げた製品に関する資源生産性向上が境界への出入りだけで示すことができるということでもあり、それが可能となる境界の設定が肝心要となる。

iv.再生可能資源並びにリサイクル材における資源消費あるいは環境負荷

再生可能資源であっても、資源消費あるいは環境負荷を再生不能資源と同様カウントする。すなわち再生可能資源がインプットである場合には、 R_i としてカウントされる。リサイクル材についても同様である。再生可能資源あるいは廃棄タイヤや廃棄プラスチックなどがエネルギー源として境界内で利用され二酸化炭素を発生する場合も、その二酸化炭素が境界を越えて排出されるならば、アウトプット L_i としてカウントされる。

なお、言うまでもないが、リサイクル材とバージン材を別の R_i とすることは許される。

(e) 報告が目指すもの

i.産業や各アウトプット毎の事情に沿った指標作成

資源生産性や環境効率は全人間活動に適用される一般性が高い指標として開発される必要がある。また一方で、個別産業やアウトプットには多様な側面があり、一概に論ずることは的外れとなりかねない。今回、予備的に取り上げたアウトプットも、そのような多様性を反映したものであることは、既に 2.1.3 で述べたとおりである。

ここでポイントとなることは、このように多様である対象に対して共通の方法論を達成

しつつ、個別の事情を反映し得る指標の開発が最大限どこまで可能かを確認することにある。境界の設定から、分母・分子並びに時間の選択などを各委員の裁量に任せたのは、そのためである。最初から枠を限定するのではなく、各主体が資源生産性・環境効率の大枠は守りつつ、それぞれに合った選択をして主張する中から共通点を見出すことがどこまで可能かを検討するのが本年度に目指すものである。

ii. 課題等の積極的明示的指摘

ケーススタディ結果の報告に当たっては、その基礎となる数値データに加えて、指標算出の過程で問題・課題・難題と思われたものも列挙するように努める。その際には、その理由も併記する。さらに、得られた指標からも問題・課題・難題を明示する。これは例えば、過去30年で旅客輸送の資源生産性が半減しているとした時、それが自動車利用の増大であるならば、都市計画レベルでの対応が必要という課題等が抽出されるであろう。ここからさらに進めて、このような指標の変化をもたらした（あるいは妨げていた）技術的・政策的ポイントを抽出、指摘し、今後の指標向上に資する技術的・政策的ポイントも指摘することとなる。

iii. 資源生産性・環境効率・ファクター算出方法論の改善

ケーススタディを実施し報告する中で、この「2.1.4 資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクター算出ガイド」についても問題点の指摘などを積極的に行う。

(f) ケーススタディでの検討・報告項目

ケーススタディでは、以下の点について明示的に検討する。

選定した製品あるいはサービスと選定理由

算出した指標（資源生産性、環境効率、グリーン度）

指標の定義（計算式）と設定理由

仮定した階層・境界と設定理由

計算に用いたデータ（バックデータ）

計算結果（時系列・製品別・プロセス別などのファクター、熱物縮の有無、を含む）

技術的課題（例：原料純度の現場測定と調整、各生産工程の時間差調整）

政策的課題（例：規制の撤廃）

指標変化に影響を及ぼした技術（例：正確な位置決め技術の開発、精製法の工夫、コロンブスの卵的発想に基づく技術革新）

指標変化に影響を及ぼした社会的要因（政策例：国家プロジェクトによるブレークスルー、研究助成・免税；市場動向例：消費者の嗜好変化・多様化）

指標変化が及ぼした技術的波及効果（例：他の製品製造の環境効率向上に寄与）

指標変化が及ぼした社会的影響（例：大量普及による市場拡大）

指標変化が現実に熱物縮をもたらしたか（もたらした場合、ファクターに較べてどれくらいか。もたらさなかった場合あるいは却って増大した場合、その理由は。）

指標計算方法論上の課題

2.2 企業・産業の事例調査

2.2.1 事例研究概観

本報告書では、事例調査研究を各委員が行なったスタディごとに並べた。2.1 で述べたアウトプット（製品・サービス等）の特徴別にみた資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクターの特色については、工作機械と都市・建築における資源生産性等の考察への纏めとあわせて 2.5 に記載することとして、ここではそれぞれの事例研究から得られた結果への簡潔な解釈を述べる。

2.2.2 では、我が国の産業部門全般について、エネルギー消費を分母に GDP を分子にした資源生産性を過去 30 年にわたって求めた。その結果、ファクターとして 2.2 を得た。これは、1970 年の我が国の人口が 1 億 372 万に対し 1999 年で 1 億 2669 万であることを考えると、国民 1 人当たり実質で 1.8 のファクターとなる。

産業による資源生産性の違い、例えば鉄鋼と非鉄金属はエネルギー資源の生産性が低いのに対して食料品と繊維は高い（鉄鋼・非鉄金属と比べて約 8 倍）といった傾向は当然でありながら、おしなべてどの部門でも資源生産性の向上がみられた。

この一般的な傾向に顕著に反する結果が、運輸部門に見られた。輸送量を分子にした資源生産性でみると旅客輸送で 0.54、貨物輸送で 0.88 というファクターが過去 30 年の比較で得られている。これは鉄道による輸送から自動車による輸送へという変化が大きいと思われる。ここで、物流は他の産業にも密接に関係する産業分野であることから、輸送部門でのファクター低下をもたらした物流形態の変化が他の産業のファクター向上に寄与しているなどといった産業部門間でのファクター連関を今後明らかにする必要が明確になった。

同様のことは、発電部門にも言える。すなわち、発電量を分子にした資源生産性でみると、発電部門の資源生産性は 30 年間で 1.1 未満のファクターであった。技術的な制約から僅かな向上しかみられなかったとしても、電力は他のほとんどの産業での生産に係わっている。輸送や発電での相対的に低いパフォーマンスによって、他部門のファクターが実態以上に高くみえているということもあり得よう。

2.2.3 では、TV・洗濯機・パソコン・冷蔵庫について分母を重み付き環境負荷総量とし、分子を製品群ごとに異なる重み付き性能とした環境効率を求めた結果が述べられている。この中で、市場的には成熟商品であると思われる TV について 1994 年から 1999 年の 5 年間で 13 というファクターが得られているのは注目に値する。

ここで提起されるものに、製品が提供するサービス（性能）をどう把握するかがある。

本調査では、例えば冷蔵庫の性能について、全体を 10 とした場合、個別性能の寄与は質量で 0、内容積効率で 2、消費電力で 6、冷却スピード・製氷スピード・冷凍スピード・騒音それぞれで 0.5 とした。このような分配値の是非、また、そもそも異なる性能を全体として一定枠を設けることの是非も検討対象となろう。これについては、次の 2.2.4 で更に追求される。

2.2.4 では、パソコンに絞って資源生産性・環境効率・ファクターが検討される。パソコンは発展途上にある製品であり、その提供するサービスは未確定である。そこで、「ハードウェア性能によるサービス定量化」、「ハードウェア性能によるサービス毎の定量化」、「ハードウェア性能と OS ソフトウェア性能によるサービス定量化」の 3 つの方法を用いてノートパソコンとデスクトップパソコンのファクターを求めた。

その結果、どの方法においても、資源生産性と環境効率のどちらもが製品一台当たりで大幅な向上が示された。今後は、OS ソフトウェア機能の適切な表現法の工夫とファクター算出時の比較基準を統一することが課題である。

2.2.5 では、ポルトランドセメントという基幹的無機材料の製造について、エネルギー消費を分母に、クリンカ生産量を分子にした資源生産性を求めた。その結果、過去 50 年の間におよそ 3 というファクターが得られた。長年にわたって使用されている基礎素材であっても、これだけのファクターが得られていることは注目に値する。そして、その向上に資した技術並びに政策についても詳述されている。

2.2.6 では自動車用・船舶用の塗料について環境負荷を EPS 値で表現したものを分母に、生産量を分子にとった環境効率を溶剤系・水系・粉体で比較した。その結果、溶剤から水系への移行では 10 の 4 乗オーダー、溶剤から粉体では 10 の 7 乗オーダーのファクターが得られた。また、計算上ではあるが、熱物縮も、これに応じた大きな効果が得られた。

塗料は環境中で用いられ、その製品寿命中に環境に拡散していくことが前提となっている拡散製品である。極めて大きなファクターが得られた理由は、事実、有機溶剤が大きな環境負荷の要素となっていることがあるが、同時に、塗料が環境との係わりが強いことから環境影響指標として EPS を採用したことに一因があり、その更なる原因には塗料がそもそも拡散前提の製品であることがある。

塗料はまた、他の物質の表面を覆うことによってその保護と美観の付与という役割を担っており、塗料単体として消費されることはない。この点では、2.4.1 で資源生産性と環境効率計算の方法論を考察する工作機械と同様の位置にある。このことがもたらす資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクターを求める上での課題は本論に詳しい。

2.2.7 では、容器包装として近年急速に普及している PET ボトルについて、ボトル当たりのエネルギー消費を分母にした資源生産性と、二酸化炭素・NO_x・SO_x 発生量を分母とした環境効率とを求めた。PET ボトルでは、ボトル当たりの材料使用量が低減したことによる熱物縮効果で、グリーン度に大きな変化がないにも拘わらず、資源生産性と環境効率が共にファクターで過去 5 年の間に 4 程度向上していた。さらにリサイクルの効果を取り

入れれば一層の向上が見込まれる。

2.2.8 では、排ガス処理工程も含めたアノード銅の熔錬生産における資源生産性を、アノード銅生産量を分子とし、炭素排出量を資源消費量とみなして分母としたものを用いて表現した。銅は、ポルトランドセメントと同様に人間活動の基盤的素材であり、長期にわたって利用されてきた金属である。近年、その鉱石品位が低下しており、資源枯渇が心配されているが、過去 15 年にわたる今回の調査では、どの熔錬方式でも資源生産性は向上していた。中でも、自溶炉方式の熔錬では、酸素の利用による排ガス発生量の低減に基づく炉の集約により大きな向上を果たしている。また、1985 年時点での製錬方式の違いによる資源生産性のファクターは連続製銅炉方式が反射炉方式に対して 2.0 であったことが明らかになった。

長年に亘って利用されている基礎素材の資源生産性が向上していることはポルトランドセメントでも見られたが、銅では過去 15 年の間で実現していることは興味深い。その向上に資した技術ならびに今後の向上に資する政策課題が本論で詳述されている。

2.2.9 では、TV 会議という IT を活用したサービス提供について、それが代替し得るであろう出張会議との比較で資源生産性と環境効率のファクターを求めた。資源生産性ではエネルギー消費を分母とし、環境効率では二酸化炭素発生量を分母とした。

1999 年度の NTT 本社と研究所における TV 会議の実績データに基づいて計算した結果、環境効率でファクター 6.8、資源生産性でファクター 3.9 を得た。また、TV 会議の資源生産性や環境効率が出張会議のそれらを上回る分岐点として出張による移動距離があり、それが数十 km を超えてくると TV 会議が優位となることも示された。

2.2.2 産業部門のマクロなファクター変化

ファクターの指標定義として、資源投入量当たりの財・サービス生産量ととり、産業部門、運輸部門、発電部門について、1970～1999 年の 30 年間のマクロなファクターの変化を整理した。各部門の指標としては、産業部門は GDP/エネルギー消費、運輸部門は輸送量/エネルギー消費、発電部門は発電効率とした。

(1) 日本全体に関する検討

図 2.2.2.1 は、1990 年基準の実質国内総生産 (GDP) 及び産業部門の GDP を示している。図 2.2.2.2 は、国内エネルギー消費の推移を示している。産業部門のエネルギー消費は、1970～1999 年の長期についてみるとほぼ一定であり、1980 年以後、若干の増加傾向にある。最終エネルギー消費に占める産業部門のエネルギー消費の比率は年々低下している。図 2.2.2.3 は、GDP/Energy の推移を、図 2.2.2.4 は 1970 年を基準としたファクターの推移を示している。1970 年からの 30 年間で、国内全体の GDP/Energy はファクター 1.5 を達成しており、産業部門の GDP/Energy はファクター 2.2 を達成している。

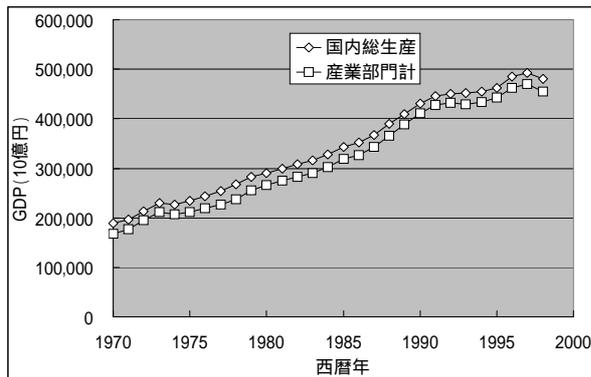


図 2.2.2.1 国内総生産(GDP)及び産業部門 GDP

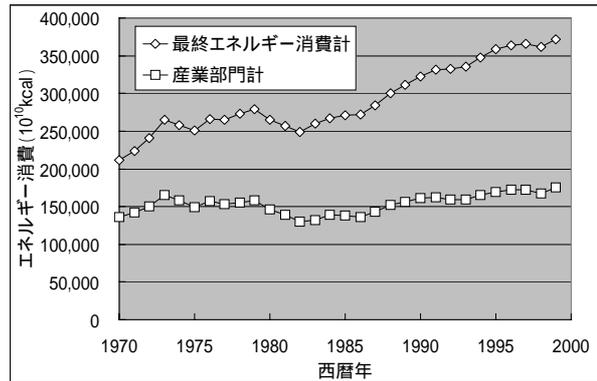


図 2.2.2.2 国内エネルギー消費

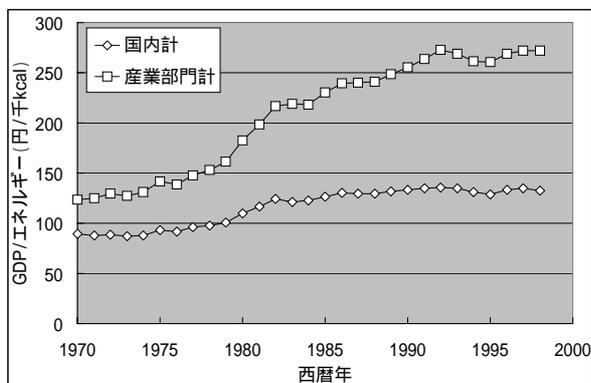


図 2.2.2.3 国内及び産業部門 GDP/Energy

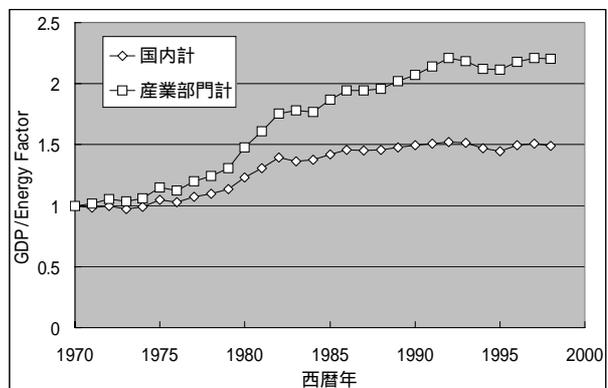


図 2.2.2.4 国内及び産業部門 GDP/Energy
ファクター

(2) 産業部門に関する検討

図 2.2.2.5 は、産業部門の部門別 GDP を示している。製造業と建設業については GDP が増加しているが、農林水産業と鉱業については、横ばい傾向である。図 2.2.2.6 は、産業部門の部門別エネルギー消費を示している。製造業及び鉱業のエネルギー消費は 1970 年時点から横ばい傾向であるのに対して、農林水産業、建設業は一貫して増加傾向にある。図 2.2.2.7 は、GDP/Energy を、図 2.2.2.8 は 1970 年を基準としたファクターを示している。30 年間のファクター変化をみると、農林水産業は 0.56、鉱業は 0.95、建設業は 1.2、製造業は 2.2 であり、先述した日本全体および産業部門のファクター改善は、製造業部門の改善による部分が大きいことが分かる。

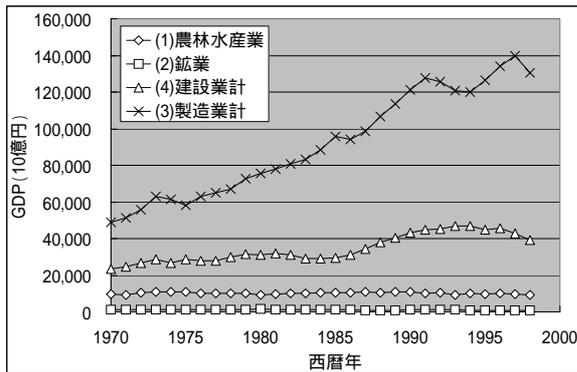


図 2.2.2.5 産業部門の GDP

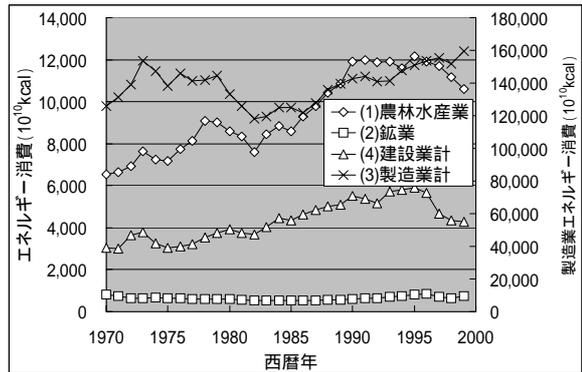


図 2.2.2.6 産業部門のエネルギー消費

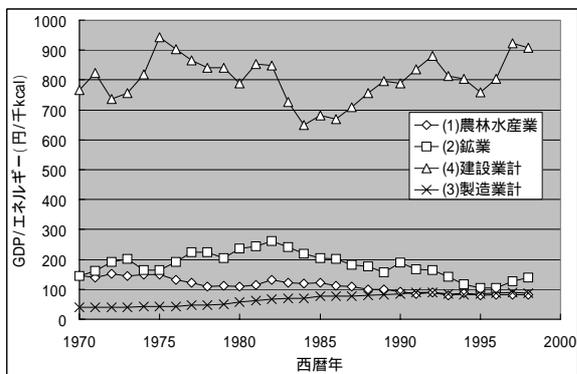


図 2.2.2.7 産業部門の GDP/energy

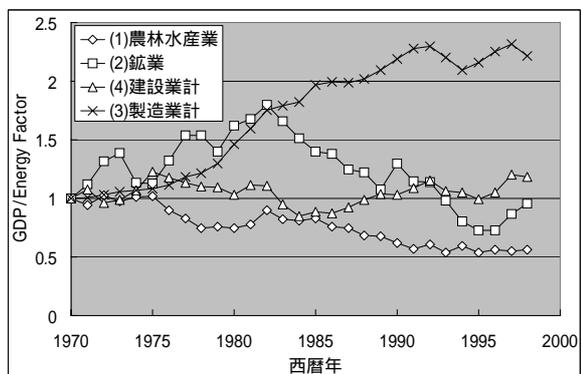


図 2.2.2.8 産業部門の GDP/energy Factor

(3) 製造業に関する検討する検討

図 2.2.2.9 は各製造業部門の GDP を、図 2.2.2.10 はエネルギー消費をそれぞれ示している。これらの GDP 及びエネルギー消費を基に、各製造業部門の GDP/energy について、1970 年を基準年としたファクター変化をプロットしたものが図 2.2.2.11 である。1970 年からの 30 年間に於いて、食品は 1.1、繊維は 1.3、紙パルプは 2.0、化学工業は 7.2、窯業・土石は 1.5、鉄鋼は 1.8、非鉄金属は 2.5、金属機械は 2.7 と、各製造業部門ともファクター改善がなされている。なおその他の製造業についてはファクターが 0.61 と低下している。

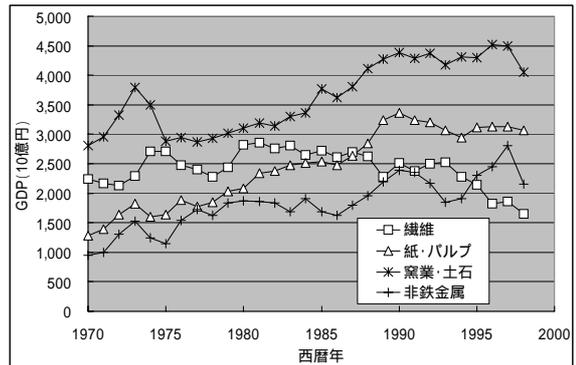
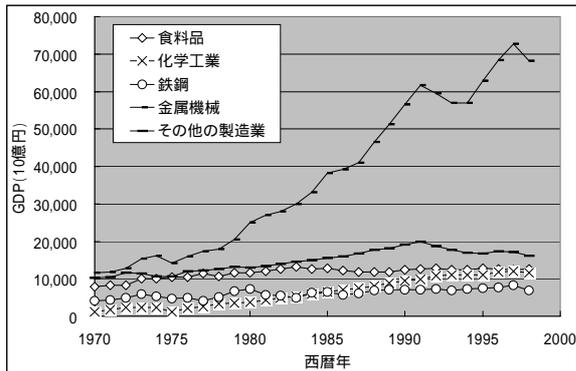


図 2.2.2.9 製造業の GDP

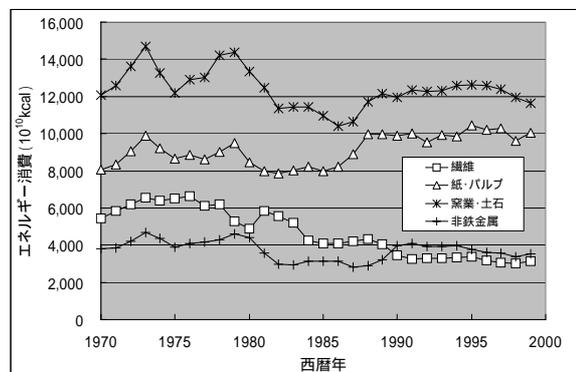
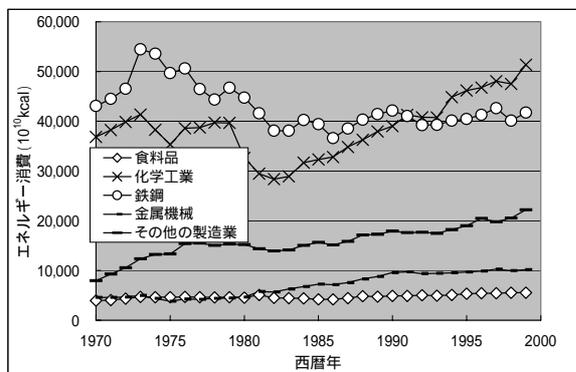


図 2.2.2.10 製造業のエネルギー消費

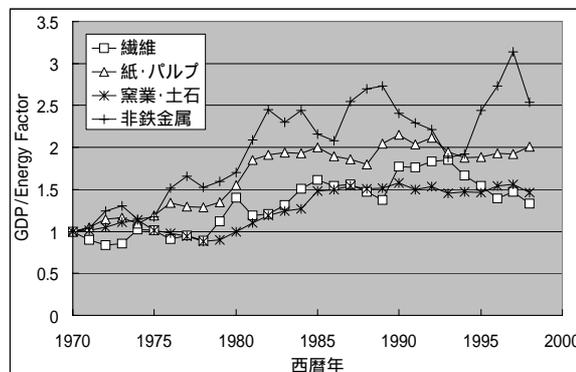
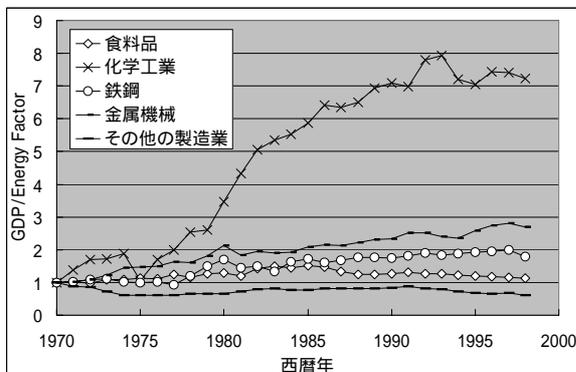


図 2.2.2.11 製造業の GDP/Energy ファクター

(4) 運輸部門に関する検討

図 2.2.2.12 は旅客（人キロ）及び貨物輸送量（トンキロ）を、図 2.2.2.13 は運輸部門エネルギー消費量の推移をそれぞれ示している。輸送量、エネルギー消費共に年々増加傾向にあり、特に旅客輸送の伸びが大きい。図 2.2.2.14 は、旅客輸送及び貨物輸送におけるエネルギー消費当たり輸送量を示している。図 2.2.2.15 は、輸送量/エネルギー消費について 1970 年を基準とした変化を示している。貨物輸送についての効率は若干低下しているがほぼ一定であるのに対して、旅客輸送についての効率は低下傾向にあり、30 年間のファクタ

-は 0.54 である。これは自動車輸送の伸びが大きいため、人 km 基準の整理としたことによる影響が大きいと考えられる。

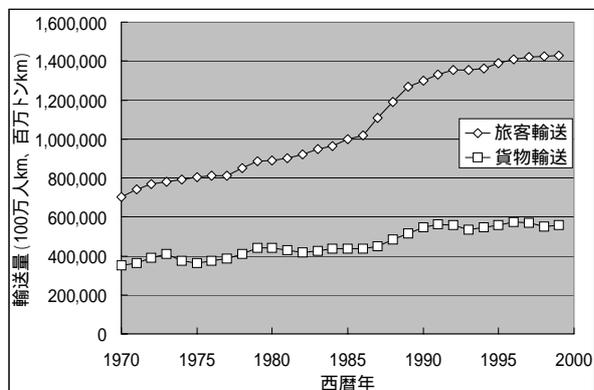


図 2.2.2.12 旅客及び貨物輸送量

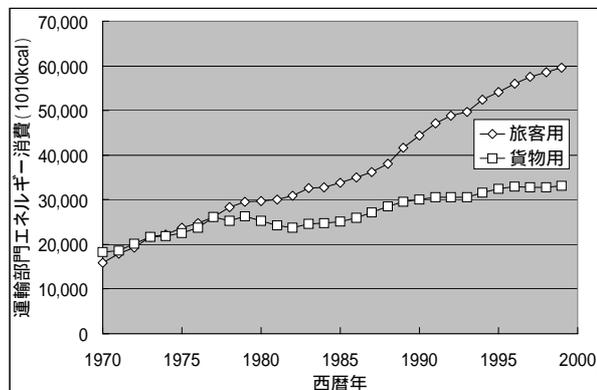


図 2.2.2.13 運輸部門エネルギー消費

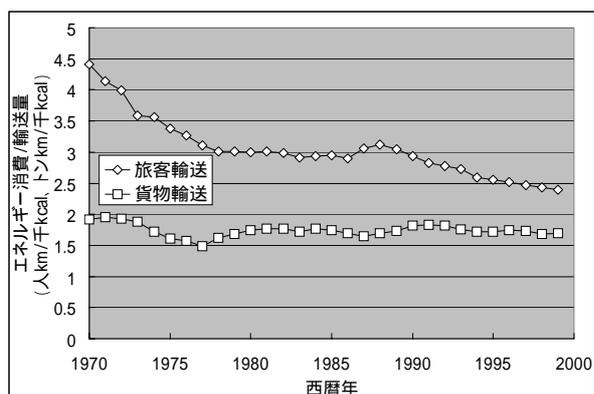


図 2.2.2.14 輸送量あたりのエネルギー消費

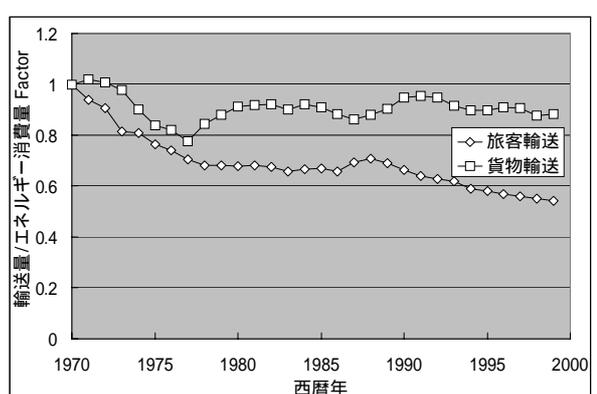


図 2.2.2.15 輸送量/エネルギー消費
ファクター

(5) 火力発電の効率に関する検討

図 2.2.2.16 は火力発電所の発電効率の推移を示している。図 2.2.2.17 は 1970 年を基準とした発電効率に関するファクターの推移を示している。30 年間で、発電端で 8%、送電端で 7%のファクター改善している。

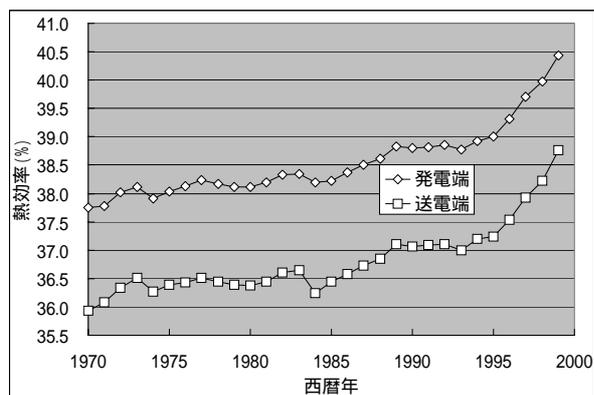


図 2.2.2.16 火力発電所の発電効率の推移

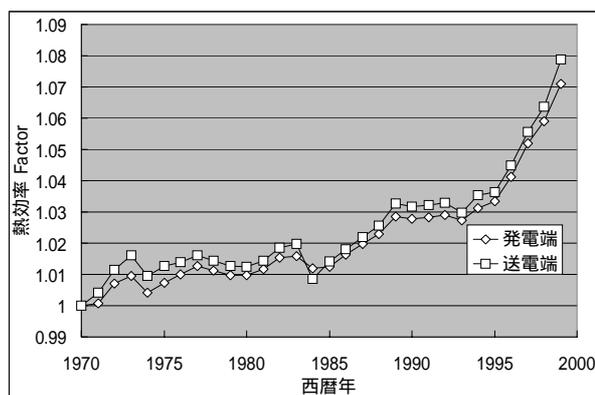


図 2.2.2.17 火力発電所の発電効率 ファクター

(6) まとめ

1970 年からの 30 年間に於いてエネルギー消費当たりのサービス供給について産業部門レベル程度の単位でマクロにとらえた場合、個別の部門の効率に関してファクターの改善が認められるが、熱物縮という観点ではエネルギー消費の削減までは至っていない。しかしながら製造業部門レベルをみると、エネルギー消費はほぼ横ばいでありながら、部門 GDP が増加しているなど、今後の効率改善いかんでは熱縮に至る可能性はある。

2.2.3 TV、洗濯機、パソコン、冷蔵庫

テレビ、洗濯機、パソコン、冷蔵庫の環境効率・ファクタを算出した結果を表にまとめた。資源生産性を考慮して、LCA は資源枯渇量を環境負荷とした。

表 2.2.3.1 環境効率・ファクタの算出結果

1. 製品	T V	洗濯機	P C	冷蔵庫
2. 算出指標 3. 指標の定義 E=P/I E:環境効率 P:性能の重み付け総和 I:環境負荷の重み付け総和 F = Enew / Eold	資源枯渇量 消費電力 待機電力 走査線数/インチ	資源枯渇量 消費電力 単位洗濯量 (容量/時間)	資源枯渇量 I補正消費効率 (省エネ法の定義)	資源枯渇量 質量 内容積効率 消費電力 冷却スピード 製氷スピード 冷凍スピード 騒音
4. 階層、境界と設定理由	製品性能のみ 生産工程データなし	同左	同左	同左
5. パッケージデータ OLD NEW	1994 WE-40 1999 WE-50	1994 NW6ORS 1999 NW8PAM	1995 H-BIRD 1999 220-FX	1991 R-45XT 1999R-K46EPAM
6. 計算結果 ファクタ値(年数)	13(5年間)	6(5年間)	8(4年間)	6(8年間)
7. 技術課題	高精細化 プラズマTVの省エネ 塩ビ廃止 鉛フリーはんだ	静音 振動防止 同左	プラ 金属化 難燃性基板 同左	省エネ HFC化 同左
8. 政策的課題	家電リサイクル法	同左	改正リサイクル法	家電リサイクル法 フロン回収法
9. 指標変化に影響を及ぼした技術	材料グレード統合 TFT化	材料 (プラスチック槽)	材料 低消費電力 ノート化	断熱材 冷媒 低消費電力 (インバータ台数制御)
11. 技術の波及効果				温暖化防止
12. 社会的影響	家電リサイクル法	同左	改正リサイクル法 小型化 軽量化 リサイクルマーケット	家電リサイクル法
13. 熱物縮	製品：あり	製品：あり	海外生産 90%:なし 国内生産 10%:あり	製品：あり 社会：あり
14. 指標計算方法論上の課題	L C Aの活用	同左	同左	同左 算出指標の重み付け例： 質量 0 内容積効率 2 消費電力 6 冷却スピード 0.5 製氷スピード 0.5 冷凍スピード 0.5 騒音 0.5

計算の結果、下記の点が今後の課題である

- (1) 冷蔵庫の特定フロン廃止は省エネに逆行した時期がある。代替フロンの冷蔵庫は電力消費が若干増加したためである。その後インバータ制御により省エネが一層進んだという歴史がある。いわゆるトレードオフの関係であるが、ファクタの基準値を特定フロン冷蔵庫の以前にとるか、以後にとるかで評価が異なってくる。基準年の議論が必要である。
- (2) 電力エネルギーを CO₂ に換算する際の係数が全電源平均、火力、コジェネ使用、などで異なってくるので、常に全電源平均で評価したい。
- (3) 資源生産性を材料ごとに算出する場合、金属 プラスチックなどの材料変換をどう扱うか。リサイクル率向上との関係を組み込んだ評価が必要である。

2.2.4 パソコン

パソコンは、1990年代に官公庁や企業で最も多く使用されていたが、高性能化、低価格化により、この1、2年の間に一般家庭にまで広く普及し使用されるようになった。近年のIT化の促進によるパソコン台数の大幅な増加から、パソコンによる環境影響は、かなり大きくなっていることが予測される。

パソコンのサービスには、「情報処理サービス」、「情報伝達サービス」、「管理サービス」の3つが代表的なものとして考えられるが、最近ではユーザーによるパソコンの使われ方が多様化しているため、この3つのサービスに限定することは難しい。しかし、資源生産性や環境効率のファクター算出には、パソコンのサービスに対して実用的な定量化の方法を検討することが必要である。

そこで、パソコンのサービスに対する定量化の方法として、

ハードウェア性能による定量化

サービスごとのハードウェア性能による定量化

ハードウェア性能と OS ソフトウェア性能による定量化

の3つを検討した。これにより、「ノートパソコン」と「デスクトップパソコン」を選定し、「資源生産性」と「環境効率」のファクター算出を行ったので、以下に報告する。

(1) パソコンのサービス定量化の検討

1) ハードウェア性能によるサービス定量化の検討

パソコンのハードウェア性能が向上すると、情報処理速度、通信速度などが増加するため、サービスも向上する。パソコンは、ハードウェア性能値として、「CPU 処理能力」、「メインメモリ容量」、「HDD 容量」などがあり、これらの数値を適用することで、サービスの定量化が可能となる。

以上から、同じ系列の新旧パソコンにおいて、ハードウェア性能値を調査し、ファクタ

一の算出を試みた。

2) ハードウェア性能によるサービスごとの定量化の検討

パソコンのサービスは、「情報処理サービス」、「情報伝達サービス」、「管理サービス」の3つが代表的なものとして考えられる。さらに、それらのサービスの主要な機能として、情報処理サービスでは、例えば「計算」(予算の計算など)、情報伝達サービスでは、例えば「大容量・高速通信」(Eメールなど)、また管理サービスでは、例えば「オフィスオートメーション」(出退勤の管理など) が考えられる。

それぞれのサービスに対して、必要とするハードウェア性能が異なるため、各サービスで使用するハードウェア性能値を選定し、そのサービス寄与比率を表 2.2.4.1 のように定義した。

以上から、同じ系列の新旧パソコンにおいて、各サービスにおけるハードウェア性能値の調査、及び表 2.2.4.1 に基づくサービス寄与比率の数値化から、ファクターの算出を試みた。

表 2.2.4.1 各サービスで使用するハードウェア性能とそのサービス寄与比率の定義

サービス種類	使用するハードウェア性能とサービス寄与比率の定義
情報処理サービス	CPU 処理能力 (SP1)、メインメモリ容量 (SP2) 《サービス寄与比率の定義》 $SP1 + SP2 = 1$
情報伝達サービス	CPU 処理能力 (SP1)、メインメモリ容量 (SP2)、 HDD 容量 (SP3)、モデム速度 (SP4) 《サービス寄与比率の定義》 $SP4 > SP1 > SP2, SP3$ $SP1 + SP2 + SP3 + SP4 = 1$
管理サービス	CPU 処理能力 (SP1)、メインメモリ容量 (SP2)、 HDD 容量 (SP3) 《サービス寄与比率の定義》 $SP1 > SP2, SP3$ $SP1 + SP2 + SP3 = 1$

3) ハードウェア性能と OS ソフトウェア性能によるサービス定量化の検討

パソコンのサービスは多様化しているため、本来 1 つ 1 つのサービスを想定し、その定量化を行うべきであるが、これは実際不可能である。よって、多様化しているサービスを、1 つのサービスとして定量化できることが望ましい。

この方法を検討した結果、多様化しているサービス全てを向上させる共通要素は、ハードウェア性能と OS ソフトウェア性能の両者の向上であるという結論に達した(図 2.2.4.1)。

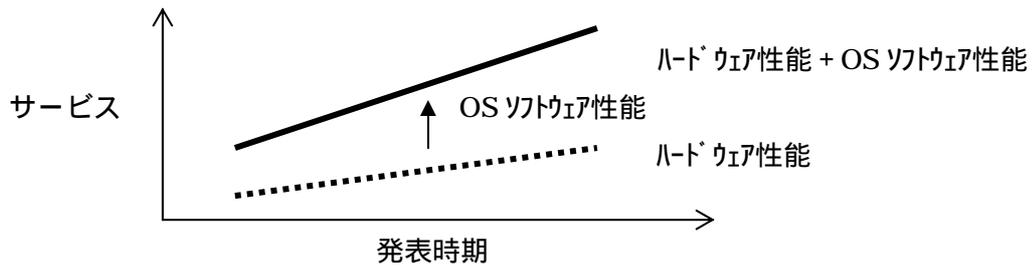


図 2.2.4.1 パソコンのサービス向上

ハードウェア性能としては、「CPU 処理能力」を選定した。その理由は、ハードウェア性能を決める他のパラメータには、メイン RAM 容量、HDD 容量、モデム速度などが挙げられるが、CPU の処理能力はサービスを左右するハードウェアの主要な機能であり、その性能向上に合わせて、他の性能向上も必要になるためである。

また、OS ソフトウェア性能としては、「ディスク使用容量」を選定した。その理由は、OS ソフトウェア性能を決める他のパラメータには、プログラム機能数、プログラムステップ数、プログラム本数などが挙げられるが、新機能の追加や機能の向上を定量化するには、「ディスク使用容量」が容易かつ適切なためである。

以上から、パソコンの多様化したサービスに対して、ハードウェアの「CPU 処理能力」と OS ソフトウェアの「ディスク使用容量」を調査し、ファクター算出を試みた。

(2) ファクター算出におけるサービス以外のパラメータの検討

資源生産性と環境効率のファクターを算出するためには、サービスの他に、「資源の投入」と「環境負荷の排出」に対するパラメータを設定することが必要である。

本パソコンでは、資源生産性のファクター算出における「資源の投入」パラメータとして、「製品質量」と「電力」を選定した。また、環境効率のファクター算出における「環境負荷の排出」パラメータとして、「ライフサイクル全体の CO₂ 排出量（以下、CO₂ 排出量という）」を選定した。

(3) ファクター算出に使用したパソコンのデータ

ファクター算出に使用したパソコンのデータとして、表 2.2.4.2 はノートパソコン（最上位機種）のデータを示す。また、表 2.2.4.3 にデスクトップパソコン（普及機種）のデータを示す。

表 2.2.4.2 ノートパソコン（最上位機種）のデータ

発表時期	サービス定量化パラメータ						資源の投入 パラメータ		環境負荷 の排出パ ラメータ
	ハードウェア性能					ソフトウ ェア性能	製品質量 (kg)	電力 (W)	
	CPU 処理能力 (MTOPs)	メインメ モリ容量 (MB)	HDD 容量 (GB)	モデム 速度 (kb/s)	LCD サイズ (ｲﾝﾁ)	ディスク 使用容量 (MB)			CO2 排出量 (kg)
1998年	350	32	3.2	56	14.1	837	3.7	67	357
1999年	1167	64	6	56	15	837	3.4	60	322
2000年	1750	64	6	56	15	837	3.4	60	322
2001年	1983	64	10	56	15	994	3.4	58	314

表 2.2.4.3 デスクトップパソコン（普及機種）のデータ

発表時期	サービス定量化パラメータ						資源の投入 パラメータ		環境負荷 の排出パ ラメータ
	ハードウェア性能					ソフトウ ェア性能	製品質量 (kg)	電力 (W)	
	CPU 処理能力 (MTOPs)	メインメ モリ容量 (MB)	HDD 容量 (GB)	モデム 速度 (kb/s)	ディスク 使用容量 (MB)	CO2 排出量 (kg)			
1997年	167	32	2.6	33.6	422	4.5	64	326	
1998年	311	32	3.2	56	422	6.8	115	571	
1999年	1283	64	10.2	56	837	6.7	75	401	
2000年	2177	64	20.4	56	837	6.5	111	551	
2001年	2333	128	60	56	994	8.0	145	713	

(4) ファクター計算結果

ノートとデスクトップの2種類のパソコンを選定し、資源生産性と環境効率のファクター算出を行なった。これらのファクター算出には、パソコンによるサービスを定量化することが必要となるため、その定量化の方法を次のように検討した。

当初、ハードウェア性能だけで簡単にサービスを定量化できると考えた（方法1）。ハードウェア性能だけでファクターを算出した場合、非常に大きな数値になることが分かった。そこで、検討を進めるに従い、サービスの違いでハードウェア性能の使用される部分が異なるという見解に達したため、各ハードウェア性能にサービス寄与比率を設定した（方法2）。

サービスごとの定量化の場合には、サービスを想定し寄与比率を設定する必要があり、多様化するサービスの1つ1つを定量化することは非常に難しいことが分かった。更に検討を重ねた結果、多様なサービスは、ハードウェア性能だけでなく、OSソフトウェア性能

が必要であるという結論に達した（方法 3）。これにより、複数のサービスを 1 つのサービスとして容易に定量化することが可能となった。

このような 3 つの方法でサービス定量化の検討を行い、パソコンのファクターを算出した結果、以下の数値となった。

（方法 1）「ハードウェア性能によるサービス定量化」に基づくファクター

【ノートパソコン】

- ・サービス定量化パラメータ（ハードウェア性能）
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量、LCD サイズ
- ・資源の投入パラメータ
製品質量、電力
- ・ファクター計算式（資源生産性による）

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の積}}{\text{各資源の投入パラメータ数値に対する新旧の比の積}}$$

- ・ファクター計算結果（1998 年発表の製品を基準）

発表時期	1999 年	2000 年	2001 年
資源生産性ファクター	16.2	24.2	47.4

【デスクトップパソコン】

- ・サービス定量化パラメータ（ハードウェア性能）
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量
- ・資源の投入パラメータ
製品質量、電力
- ・ファクター計算式（資源生産性による）

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の積}}{\text{各資源の投入パラメータ数値に対する新旧の比の積}}$$

- ・ファクター計算結果（1997 年発表の製品を基準）

発表時期	1998 年	1999 年	2000 年	2001 年
資源生産性ファクター	0.8	34.5	81.7	320.2

(方法2)「ハードウェア性能によるサービス毎の定量化」に基づくファクター

【ノートパソコン】

a)情報処理サービス

- ・サービス定量化パラメータ(ハードウェア性能)
CPU 処理能力、メインメモリ容量
- ・資源の投入パラメータ
製品質量
- ・環境負荷の排出パラメータ
CO₂ 排出量
- ・サービス寄与比率
CPU 処理能力(0.5) メインメモリ容量(0.5)
- ・ファクター計算式

〔資源生産性による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

製品質量に対する新旧の比

〔環境効率による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

CO₂ 排出量に対する新旧の比

- ・ファクター計算結果(1998年発表の製品を基準)

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	2.9	3.8	4.2
環境効率ファクター	3.0	3.9	4.4

b)情報伝達サービス

- ・サービス定量化パラメータ(ハードウェア性能)
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量、モデム速度
- ・資源の投入パラメータ
製品質量
- ・環境負荷の排出パラメータ
CO₂ 排出量

- ・ サービス寄与比率
CPU 処理能力 (0.3)、メインメモリ容量 (0)、HDD 容量 (0)、モデム速度 (0.7)
- ・ ファクター計算式

〔資源生産性による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

製品質量に対する新旧の比

〔環境効率による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

CO₂ 排出量に対する新旧の比

- ・ ファクター計算結果 (1998 年発表の製品を基準)

発表時期	1999 年	2000 年	2001 年
資源生産性ファクター	1.8	2.4	2.6
環境効率ファクター	1.9	2.4	2.7

c) 管理サービス

- ・ サービス定量化パラメータ (ハードウェア性能)
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量
- ・ 資源の投入パラメータ
製品質量
- ・ 環境負荷の排出パラメータ
CO₂ 排出量
- ・ サービス寄与比率
CPU 処理能力 (0.6)、メインメモリ容量 (0.2)、
HDD 容量 (0.2)
- ・ ファクター計算式

〔資源生産性による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

製品質量に対する新旧の比

〔環境効率による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

CO₂ 排出量に対する新旧の比

・ファクター計算結果（1998年発表の製品を基準）

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	3.0	4.1	4.8
環境効率ファクター	3.1	4.2	5.0

【デスクトップパソコン】

a) 情報処理サービス

・サービス定量化パラメータ（ハードウェア性能）

CPU 処理能力、メインメモリ容量

・資源の投入パラメータ

製品質量

・環境負荷の排出パラメータ

CO₂ 排出量

・サービス寄与比率

CPU 処理能力（0.5）、メインメモリ容量（0.5）

・ファクター計算式

〔資源生産性による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

製品質量に対する新旧の比

〔環境効率による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

CO₂ 排出量に対する新旧の比

・ファクター計算結果（1997年発表の製品を基準）

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	0.9	3.2	5.2	5.0
環境効率ファクター	0.8	3.9	4.4	4.1

b)情報伝達サービス

- ・ サービス定量化パラメータ（ハードウェア性能）
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量、モデム速度
- ・ 資源の投入パラメータ
製品質量
- ・ 環境負荷の排出パラメータ
CO₂ 排出量
- ・ サービス寄与比率
CPU 処理能力（0.3）、メインメモリ容量（0）、HDD 容量（0）、モデム速度（0.7）

・ ファクター計算式

〔資源生産性による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

製品質量に対する新旧の比

〔環境効率による〕

各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和

CO₂ 排出量に対する新旧の比

・ ファクター計算結果（1997年発表の製品を基準）

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.1	2.3	3.5	3.0
環境効率ファクター	1.0	2.8	3.0	2.4

c)管理サービス

- ・ サービス定量化パラメータ（ハードウェア性能）
CPU 処理能力、メインメモリ容量、HDD 容量
- ・ 資源の投入パラメータ
製品質量
- ・ 環境負荷の排出パラメータ
CO₂ 排出量
- ・ サービス寄与比率
CPU 処理能力（0.6）、メインメモリ容量（0.2）、
HDD 容量（0.2）

・ファクター計算式

〔資源生産性による〕

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和}}{\text{製品質量に対する新旧の比}}$$

〔環境効率による〕

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する
新旧の比と各サービス寄与比率の積の総和}}{\text{CO}_2\text{ 排出量に対する新旧の比}}$$

・ファクター計算結果（1997年発表の製品を基準）

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.0	3.9	6.8	7.8
環境効率ファクター	0.9	4.7	5.8	6.3

（方法3）「ハードウェア性能とOSソフトウェア性能によるサービス定量化」に基づく
ファクター

【ノートパソコン】

・サービス定量化パラメータ

CPU処理能力（ハードウェア性能）、ディスク使用容量（OSソフトウェア性能）

・資源の投入パラメータ

製品質量

・環境負荷の排出パラメータ

CO₂排出量

・ファクター計算式

〔資源生産性による〕

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の総和}}{\text{製品質量に対する新旧の比の積}}$$

〔環境効率による〕

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の総和}}{\text{CO}_2\text{ 排出量に対する新旧の比の積}}$$

- ・ファクター計算結果（1998年発表の製品を基準）

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	4.7	6.5	7.5
環境効率ファクター	4.8	6.7	7.8

【デスクトップパソコン】

- ・サービス定量化パラメータ
CPU処理能力（ハードウェア性能）、ディスク使用容量（OSソフトウェア性能）
- ・資源の投入パラメータ
製品質量
- ・環境負荷の排出パラメータ
CO₂排出量
- ・ファクター計算式
〔資源生産性による〕
$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の総和}}{\text{製品質量に対する新旧の比の積}}$$

〔環境効率による〕

$$\frac{\text{各サービス定量化パラメータ数値に対する新旧の比の総和}}{\text{CO}_2\text{排出量に対する新旧の比の積}}$$

- ・ファクター計算結果（1997年発表の製品を基準）

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.9	6.5	10.0	9.2
環境効率ファクター	1.6	7.9	8.9	7.5

(5) まとめ

今回、ノートとデスクトップの2種類のパソコンを選定し、資源生産性と環境効率のファクター算出を行った。これらのファクター算出には、サービスを定量化することが必要となるため、その定量化の方法を重点的に検討した。

当初、ハードウェア性能（CPU処理能力、メインメモリ容量、HDD容量など）だけで簡単にサービスを定量化できると考えた。しかし、検討を進めるに従い、サービスの違いで、ハードウェア性能の使用される部分が異なるという見解に達したため、各ハードウェア性能にサービス寄与比率（情報伝達サービスの例：CPU処理能力〔0.3〕、モデム速度〔0.7〕）を設定した。更に検討を重ねた結果、多様なサービスは、ハードウェア性能（CPU処理能

力)だけでなく、OSソフトウェア性能(ディスク使用容量)が必要であるという結論に達した。

このような過程によりサービス定量化の検討を行い、パソコンのファクターを算出した結果、以下の数値となった。

ハードウェア性能によるサービス毎の定量化

ノートパソコン

a)情報処理サービス

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	2.9	3.8	4.2
環境効率ファクター	3.0	3.9	4.4

b)情報伝達サービス

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.8	2.4	2.6
環境効率ファクター	1.9	2.4	2.7

c)管理サービス

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	3.0	4.1	4.8
環境効率ファクター	3.0	4.2	5.0

デスクトップパソコン

a)情報処理サービス

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	0.9	3.2	5.2	5.0
環境効率ファクター	0.8	3.9	4.4	4.1

b)情報伝達サービス

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.1	2.3	3.5	3.0
環境効率ファクター	1.0	2.8	3.0	2.4

c)管理サービス

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.0	3.9	6.8	7.8
環境効率ファクター	0.9	4.7	5.8	6.3

ハードウェア性能とOSソフトウェア性能によるサービス定量化

ノートパソコン

発表時期	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	4.7	6.5	7.5
環境効率ファクター	4.8	6.7	7.8

デスクトップパソコン

発表時期	1998年	1999年	2000年	2001年
資源生産性ファクター	1.9	6.5	10.0	9.2
環境効率ファクター	1.6	7.9	8.9	7.5

(6) 考察

このようなファクター増加に影響を及ぼした技術としては、ハードウェアでは、「高電子移動度半導体の開発」、「超微細半導体プロセス技術の開発」、「磁気媒体の高密度化技術の開発」、「電子部品の高集積実装技術の開発」、「低消費電力駆動の電子部品の開発」、「小型軽量機構部品の開発」があり、ソフトウェアでは、「機能の向上」があると考えられる。

社会的な要因としては、Eコマースの導入によるビジネス形態の変化やホームバンキング、株の取引、チケット購入、ホテル予約などの生活形態の変化が考えられる。

技術的波及効果としては、情報配信技術（画像／音声の圧縮技術）の向上、そして社会的な影響としては、マルチメディアの進展が考えられる。

(7) 課題

OSソフトウェア機能の調査とその重み付け

OSソフトウェアには、通信機能、安定性向上のための機能など、数多くの機能が存在するため、各機能に対する重み付け（サービス寄与比率の設定）が本来必要と思われる。また、その各機能に対する性能の定量化の方法として、「ディスク使用容量」を使用することが適切であると考えられる。しかし、今回の検討ではその機能の種類とサービス寄与比率の調査に限界があり、OSソフトウェア全体のディスク使用容量をファクター算出に適用した。

ファクター算出における比較の基準の設定

今回のファクター算出では、比較の基準（旧製品）を同シリーズの初期の製品に設定した。しかし、比較の基準は、「パソコンの誕生前」、「初代の電子計算機」、「同シリーズで前回発売したパソコン」などのように色々と設定することができる。目的により比較の基準が異なるのは当然であるが、ファクター算出結果を比較できるものにするには、比較の基準を統一する検討を進めることが必要である。

2.2.5 セメント

(1) 選定した製品：ポルトランドセメント

セメントの製造は、主に「原料工程」「焼成工程」「仕上げ工程」と3段階の工程を経て行われる(図2.2.5.1)。ポルトランドセメントは、石灰石、粘土、珪石等を適切な比率で混合・粉砕した後、焼成炉(ロータリーキルン)にて約1450℃で焼成して製造されたクリンカに少量のせっこう・混合材を添加して微粉砕したものである。また、高炉セメントに代表される混合セメントは、上記ポルトランドセメントに鉄鋼産業から副産物として発生した高炉スラグを適量混合して製造される。したがって、セメント製造の主たる活動はポルトランドセメントの製造が占める。また、図2.2.5.1に示すとおりポルトランドセメントは、国内セメント総生産量の約80%を占める¹⁾。これらのことを勘案して、本中間報告ではポルトランドセメントを検討対象として選定した。

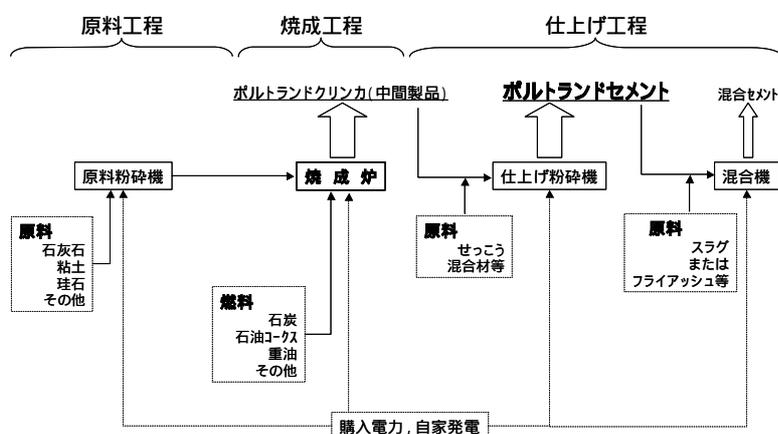


図 2.2.5.1 セメント製造工程の概略

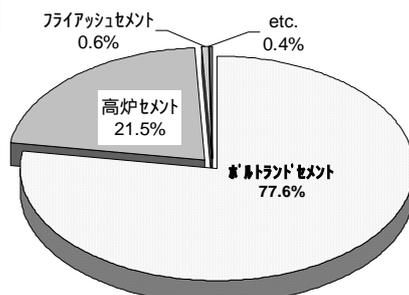


図 2.2.5.2 国内総生産に占める各セメントの割合(1999年度)

(2) 算出した指標 資源生産性及びファクター

(3) 指標の定義

：ポルトランドセメントの資源生産性 (M_i) = $P_i / (R_{ij} \times H_{ij})$ [kg/MJ]

P_i : i 年度のクリンカ生産量

R_{ij} : i 年度の化石燃料使用量 (焼成工程)

H_{ij} : 各燃料の発熱量

：ファクター (F_i) = M_i / M_{1950}

ポルトランドセメントはクリンカに少量のせっこうと混合材を加えて粉砕したものである。ポルトランドセメントに占めるこれらの割合は数%であることから、本評価ではポルトランドセメント クリンカと考え上式を定義した。

セメント製造時に利用する主燃料は、様々な社会情勢を反映して石炭 重油 石炭と変化してきた²⁾。また、1980年代に入ると廃棄物として発生した廃タイヤや廃プラスチック等が積極的に活用され始め、現在では10数種類がクリンカ焼成時の天然化石燃料代替として利用されている¹⁾。LCA 的考え方に則れば廃棄物の利用はそれ自身を処分する（焼却や埋立処分等）際のエネルギーが削減されることになる。したがって、本報告では天然化石燃料使用量のみ考慮した。

(4) 仮定した階層・境界

：焼成工程

セメント製造時に使用するエネルギーの約80%は焼成工程(クリンカ製造)で投入されることから(図2.2.5.3)¹⁾、省エネルギー対策の対象として主に焼成エネルギーの削減に取り組んできた。したがって、本評価ではクリンカ製造時に投入された天然化石燃料量からポルトランドセメントの資源生産性を評価した。

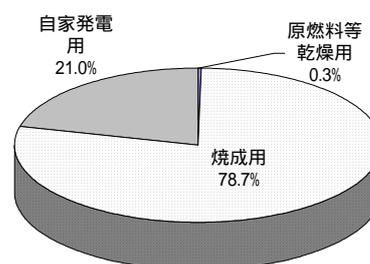


図 2.2.5.3 燃料用途別消費量構成比(1999年度)

(5) 計算に用いたデータ

：国内セメント産業年間燃料使用量およびクリンカ生産量（実績）

資源生産性の算出には、焼成用燃料使用量およびクリンカ生産量（いずれも会計年度）のデータ（(社)セメント協会提供）を使用した。代表的データとして、1950、1975、2000年度の燃料使用量およびクリンカ生産量を表2.2.5.1に示す。

表2.2.5.1 燃料使用量とクリンカ生産量

	クリンカ生産量 (t/年)	焼成燃料使用量(* /年)		
		石炭(t)	石油コークス (t)	重油(kℓ)
1950年度	4,805,353	1,482,050	0	0
1975年度	63,925,982	264,768	0	5,757,556
2000年度	74,542,196	6,869,335	889,201	45,328

(6) 計算結果

図2.2.5.4に1950年度から2000年度までの資源生産性の推移を示す。また、同図内に1950年度を基準とした1975年度、2000年度の資源生産性及びファクタを示す。

ポルトランドセメントの資源生産性は年を経るごとに上昇し、その傾向は1990年まで続いた。その結果、1950年度と比較して1975年度で2倍、2000年度で資源生産性が約3倍向上した。

その推移を詳しくみると、

1950年から1955年までの上昇は、戦後の原燃料不足状況下における無理な操業から安定操業への移行に伴って資源生産性が向上したものと推察される。また、朝鮮動乱期の特需による生産量増大も資源生産性向上に寄与したと思われる²⁾。

1955年頃から1980年までの上昇は、主に焼成炉様式の変更によるものである¹⁾³⁾。

その後の1980年度から1990年度の上昇は、各種省エネルギー技術（主燃料を重油石炭、及びそれに伴う高効率微粉炭バーナーの開発等）の活用により達成されている。

一方1990年度以降はそれ以前のような急激な資源生産性向上はみられない。これは実用化が可能な各種省エネルギー技術の採用がほぼ完遂し、廃棄物の利用に移行してきたことによる。

なお、その後も幾つかの省エネ技術は開発されているもののセメント市場価格の下落等により、投資に見合った効果が見込めないことから積極的に採用する動きは少ない。現在では前述のとおり、各種廃棄物・副産物の活用を進めており、これらの前処理技術等の開発に注力している傾向にある。

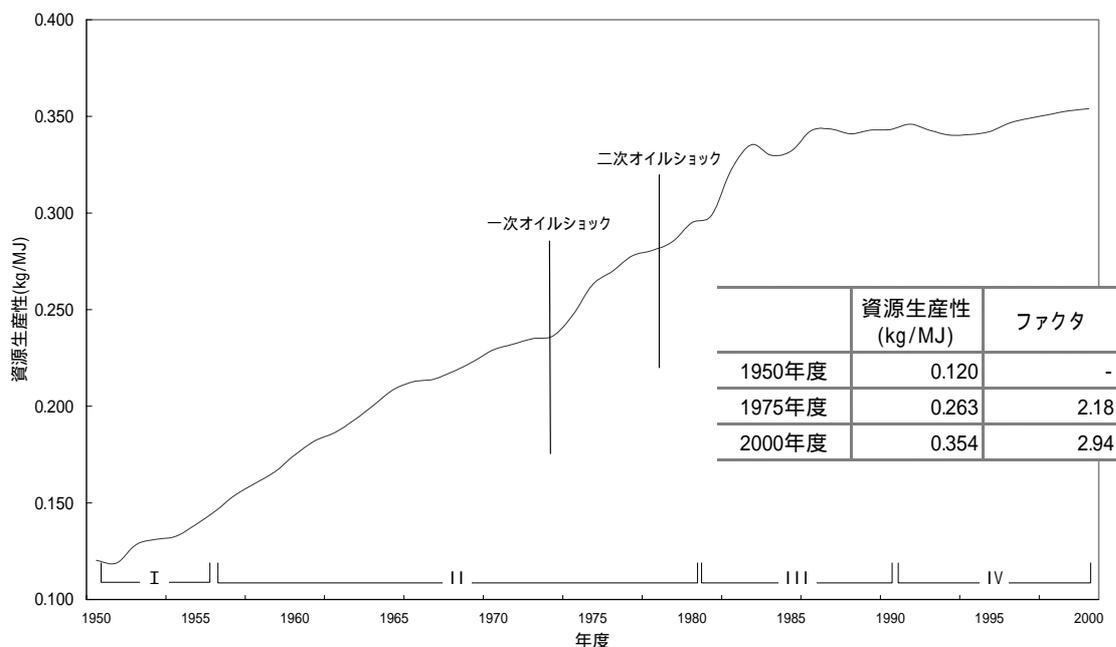


図 2.2.5.4 セメント製造(焼成工程)における資源生産性の推移

(7) 技術的課題

表 2.2.5.2 に現在までの資源生産性向上に果たした主な技術的背景と今後の課題を示す。

表 2.2.5.2 資源生産性向上に果たした技術的背景と今後の課題	
これまでの向上	今後の向上
品質管理の自動化 日常管理 TPM 活動	廃棄物利用技術 廃棄物前処理技術 品質・工程管理の強化 等

セメントの資源生産性が向上した背景には、各種省エネルギー技術の採用の他に日々のきめ細やかな管理と不具合の是正等が大きく影響している。例えば、品質管理の一部を自動化したことにより操業条件の調整がきめ細やかに行われるようになった。また、TPM活動等の日常の設備管理改善活動が故障の予防につながったことにより長期運転が可能になりエネルギーロスの低減等となったものと考えられる。

一方、今後の資源生産性向上への技術的課題は、今後ますますセメント産業に期待されるであろう廃棄物を安全に再資源化する技術を開発することと考えられる。一部の廃棄物（都市ごみ焼却灰や産廃系廃プラ等）については既に再資源化技術が確立しつつあるものの、今後ますます多様化する各種廃棄物の活用技術の開発が必要となろう。また、それに伴って更なる品質管理体制や工程管理の改善等が必要不可欠になると考えられる。その際今回のような焼成工程のみの評価ではなく、前処理工程（原料工程）も含めた評価が必要であろう。例えば、塩素を多く含む一般廃棄物系のプラスチック（容器包装プラ）を高炉還元材代替として活用する際、莫大なエネルギーを投入して脱塩していると言われている。

(8) 政策的課題

表 2.2.5.3 に現在までの資源生産性向上に果たした主な施策²⁾と今後の向上に有効と思われる施策等の変更を示す。

表 2.2.5.3 資源生産性向上に果たした施策と今後の課題

これまでの向上	今後の向上
JIS 規格制定 設備投資時税等免除や燃料電力の特配 各種特別臨時措置法	JIS 規格塩素規制緩和 各種許認可の簡素化 サーマルリサイクルへの理解 等

現在までの資源生産性向上は、主に以下のような政策等の変更が牽引役となったと考えられる。

- ・セメントの各種 JIS 規格制定（1950 年以降）
- ・セメント製造用重要機械類の輸入税免除（1953 年）
- ・企業合理化促進法の指定業種となる（1953 年）
- ・セメントの生産に要する石油、電力の必要量につき通商産業省より特配を受ける（1974 年）
- ・特定産業構造改善臨時措置法（1984～1987 年）
- ・産業構造転換円滑化臨時措置法（1987～1991 年）

上記のうち、JIS 規格制定以外はセメント製造事業を行う際の合理化やそれに付随した生産効率向上等の環境整備的役割を担い資源生産性向上に寄与したものと考えられる。

一方 JIS 規格の制定は、規格を遵守するための品質管理や工程管理を行うことで結果的に資源生産性が向上したものと思われる。しかし将来の資源生産性向上を目指す場合、逆

に JIS 規格が足かせになるケースが顕在化している。例えばセメント産業は他ではリサイクルが困難な廃棄物も多く受け入れているが、塩素含有量の高いものは使用に制約がある。技術的には処理する能力はあるものの JIS 規格によりセメント中の塩素量が 200ppm と規定されているため、これを遵守しようとする塩素含有量の高い廃棄物の利用は控えざるを得ない。また、塩素量を遵守するための必要以上の工程管理によりエネルギーロスも問題になる可能性がある。今後このような状況に対応した新たな技術を開発する努力も必要となるが、共に品質に問題のない範囲で規制の緩和が望まれる。また、それと共にリサイクル活動を積極的に行えるような周辺環境の整備（例えば塩素を多く含む一般廃棄物系廃プラのサーマルリサイクルへの理解や効率的収集体制の構築等）が必要不可欠になる。

(9) 指標変化に及ぼした技術

表 2.2.5.4 に様式別ロータリーキルンの平均的な焼成熱量原単位³⁾を、図 2.2.5.5 に様式別生産能力構成比の推移¹⁾を示す。セメント産業は、生産効率を向上させるため焼成熱量が低く、生産能力が高いロータリーキルンを積極的に導入してきた。これらは海外で開発されたものが多いが、現在国内で主流の NSP は日本で開発された技術である。NSP 開発の元となった SP 方式は石灰石の脱炭酸の約 40%を予め余熱装置（プレヒータ）で行わせ、キルンでの熱効率を高めたものである。NSP は余熱装置とキルンの間に仮焼炉を設置し脱炭酸を 80%以上にすることでクリンカ焼成熱量を大幅に削減することができる。こうした技術開発は前述の細やかな設備改善活動や省エネルギーに向けた日々の努力によりなされたものである。

表 2.2.5.4 様式別キルン能力の一例

製造様式		焼成熱量原単位 (kcal/kg-クリンカ)	生産能力 (t/日)
(注)NSP 乾式	ボイラ付 (DB)	1,520	3,300
	レボル (L)	850	2,800
	NSP = (New Suspension Preheater)	890	260
	石灰焼成法 (NCB)	450	2,600
	サスペンションプレヒータ付 (SP)	760	5,300
	新サスペンションプレヒータ付 (NSP)	710	8,000
湿式	フィルタボイラ付 (WFB)	1,520	740
	ロング (W)	1,240	2,200
	レボル (WL)	920	850
	フィルタ付 (WF)	1,390	860

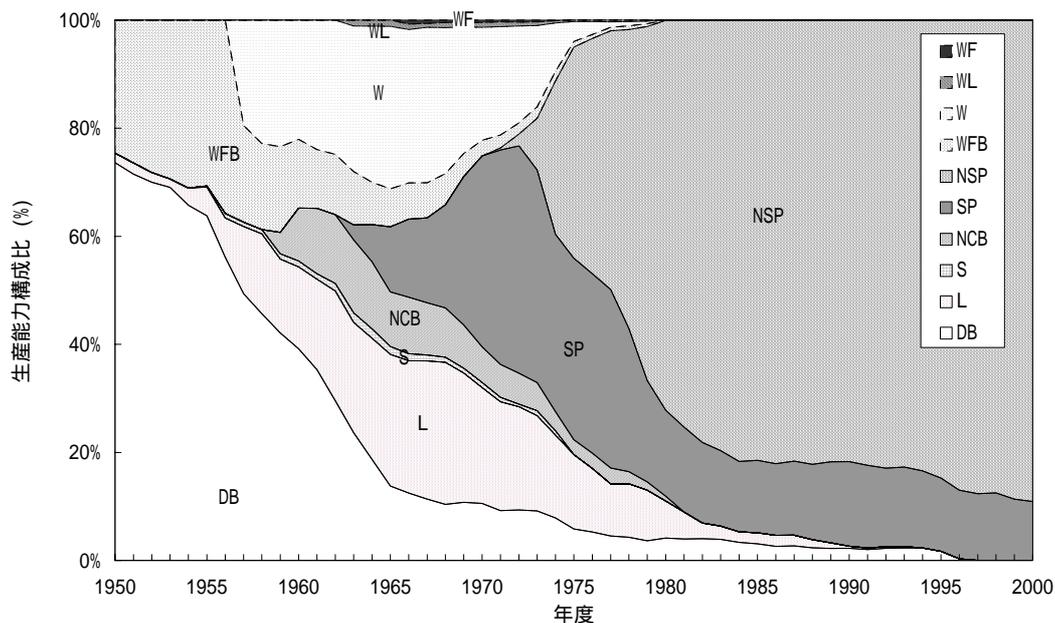


図 2.2.5.5 製造様式別生産能力構成比の推移

(10) 指標変化に及ぼした社会的要因

セメントが基盤材料としてこれほど社会に広く浸透したのは、性能が安定していることに加えて大量供給が可能で安価であることが要因と考えられる。上述のとおりセメント産業は生産効率の高い製造技術を積極的に導入し、需要を満たすべく大量生産されるようになった。よって景気の影響に極めて敏感になり、需要が減少すると生産効率が悪化し、それと共に資源生産性も低下する。1990年度以降の資源生産性の鈍化は、上記省エネ対策の限界に加えて景気悪化による生産量減少（それに伴う生産効率の悪化）も影響していると推察される。

一方、1990年度までの資源生産性向上に及ぼした社会的要因は、であげた政策の他に2度にわたるオイルショックが大きく影響している。それまで重油だった主燃料を石炭に転換したのもこの時期で、生産効率が高いNSP方式への移行が急速に進んだのもこの時期以降である。

(11) 指標変化が及ぼした技術的波及効果

資源生産性の向上につながる各種省エネ技術の採用は、当時の最新技術導入も意味しており、少なからずセメントの品質にも影響を及ぼしてきたと考えられる。品質・工程管理の強化は、当然よりセメントに最適な組成での製造も目指しており、第二次世界大戦期を除いてJISモルタルの28日圧縮強さは右肩上がりの傾向を示している⁴⁾。ただし、必ずしもセメントの性能向上がコンクリート構造物の性能向上に寄与するとは限らない。鉄筋コンクリート等構造物の性能は、セメントの性能の他にコンクリートの配合や構造設計及び施工等の様々な要因が影響する。ただし、セメント産業では施工欠陥の防止等につながる

耐久性照査型のセメントを開発しており、一部では構造物の耐久性向上（それに伴う資源生産性向上）に影響していると思われる。なお、現在セメントの資源生産性向上技術は、主にアジア等へ技術移転しており当地の資源生産性向上に寄与している。

(12) 指標変化が及ぼした社会的影響

セメントの資源生産性向上は、大量生産による生産効率の向上の結果もたらされた面があるが、それと共に安価な建設材料を大量に供給することを可能にした。したがって間接的ではあるものの、資源生産性向上によりセメントを社会に必要不可欠な建設材料として認知させたとも言える。

(13) 指標変化が現実に熱物縮をもたらしたか

図 2.2.5.6 に 1 年間に焼成工程で消費されたエネルギー量及びクリンカ生産量の推移を示す。前述のとおりセメントの資源生産性は向上したが、それと共にセメント（クリンカ）生産量は飛躍的に増大している。したがって、年間エネルギー消費量も増大しており、1950 年度と比較すると過去 50 年間の年間エネルギー消費量の削減（熱縮）は行われていない。ただし、生産量が 2000 年度とほぼ同等の年と比較した場合（図 2.2.5.6 内表）、先述の省エネルギー効果等により最大 34%の熱縮が行われている。

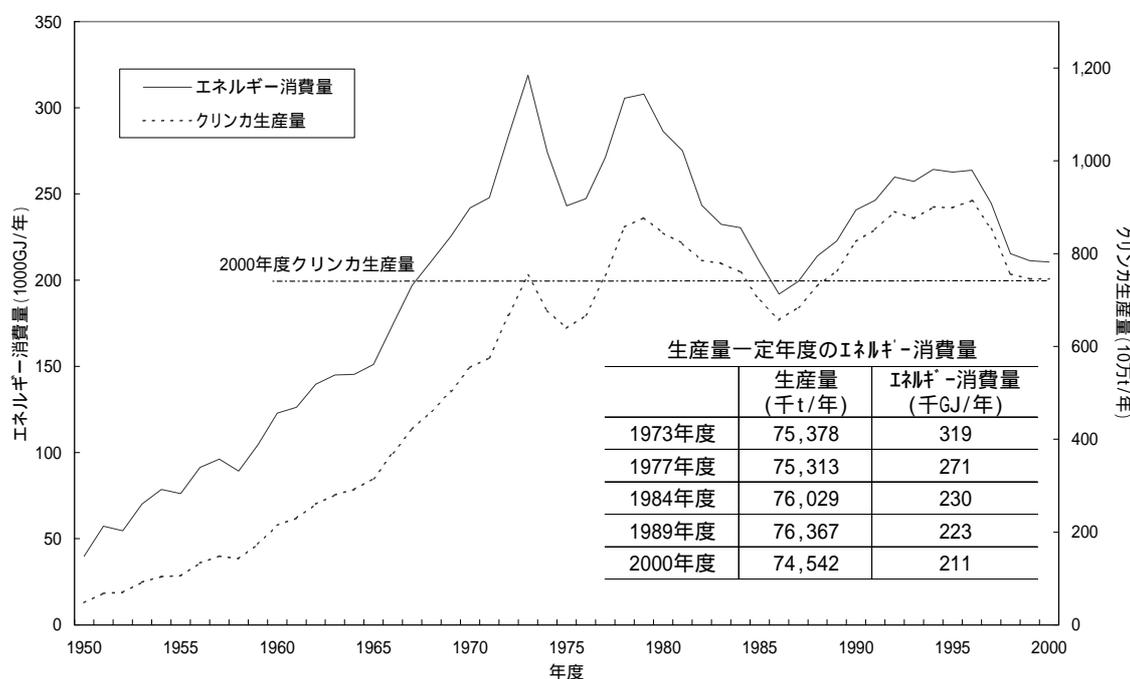


図 2.2.5.6 焼成工程における年間エネルギー消費量およびクリンカ生産量

(14) 指標計算方法論上の課題

・静脈産業としての役割を担いつつあるセメント産業の資源生産性を評価する場合、本評価のセメント生産という観点に加えて廃棄物リサイクルの効果も加える必要がある。今後、廃棄物削減に伴う社会的なエネルギー削減、環境負荷低減を適正に考慮しながら資源生産性を評価する手法を検討する必要がある。

・セメント産業の場合、環境効率を CO₂ で求めようとするプロセス起源（原料である石灰石の脱炭酸に伴う CO₂）も含む必要がある。つまりセメントの CO₂ 排出量には、今回検討した化石燃料の他に購入電力と原料（鉱物資源）消費量が関わってくる。最終的にグリーン度を定量化するのが目標と考えられるが、その際は鉱物資源消費の面も考慮する必要がある。したがって資源生産性算出には、化石燃料と鉱物資源の統合化を行わざるを得ない。こうした問題は、同じようにプロセスから CO₂ が発生する鉄鋼・ガラス産業にも言えよう。また、火力発電での脱硫材として石灰石を使用している電力産業も同様である。

【参考資料】

- 1) (社)セメント協会：セメントハンドブック
- 2) (社)セメント協会：セメント協会 30 年の歩み(1978)
- 3)セメント新聞編集部：セメント産業年報アプローチ
- 4)市川牧彦：石灰石フィラーセメント，粉体と鉱業，Vol. 33, No.9, p45(2001)

2.2.6 塗料

(1) 選定した製品

家電製品用 「溶剤型塗料」「水性塗料」「粉体塗料」を取り上げ、塗料の歴史において環境負荷を低減してきた代表的な同機能の製品間比較を試みた。

塗料は、人間社会で有用な製品の仕上げ材として、「防食」と「美観付与」の二つの機能を目的として使用されている。そして、塗料の持つ「流動性」からどんな形状でもたやすくかつ安価に適用でき、素材の保護を行うとともに任意の色相を造ることができるため、「環境調和」「人間の美追及本能」を満たす特徴を持っている。特に「鉄製品」の成長とともに発展を遂げ、適用製品の機能維持を図ることは勿論、適用手法の変革（塗料配合の変更）により適用製品の製造工程の変革に寄与してきた。

溶剤型塗料は、保護のための各種（一般的に生態系に有害）の「防錆顔料」や「防汚剤」などと美観のための「着色顔料」を使用し、これらを保持する「樹脂」、そして流動性を付与する「溶剤」と適用性付与の「添加剤」から成るのが一般的である。これらの成分は、適用される製品の発展とともに変遷してきた。しかし、機能発揮に不必要な「溶剤」を初め、有害性を有する「顔料」類を有するが故、塗料は「環境負荷」の代表として糾弾されてきた。

このため、塗料業界では「脱溶剤」や「有害物質フリー」の塗料開発が行われている。その代表例が媒体を溶剤から水に換えた「水性塗料」、媒体に溶剤を使わず空気にした「粉体塗料」が開発されてきた。これら環境負荷低減塗料は、使用原料である「樹脂」が特殊であるとか塗料製造にエネルギーをより多く必要とするなど、塗料のライフサイクルでの環境負荷（LCA）を算出するとかえって大きい数値のLCAとなり矛盾が出てくる。

一般的な溶剤系塗料（水性系は媒体が溶剤から水に変わったもので製造工程は同じ）と粉体塗料の製造工程を記す。

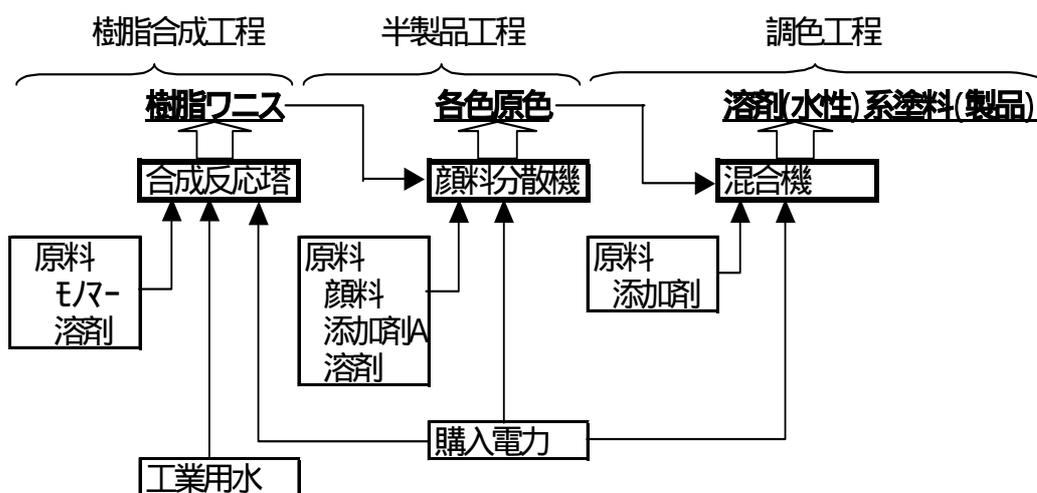


図 2.2.6.1 溶剤系、水性系塗料の製造工程

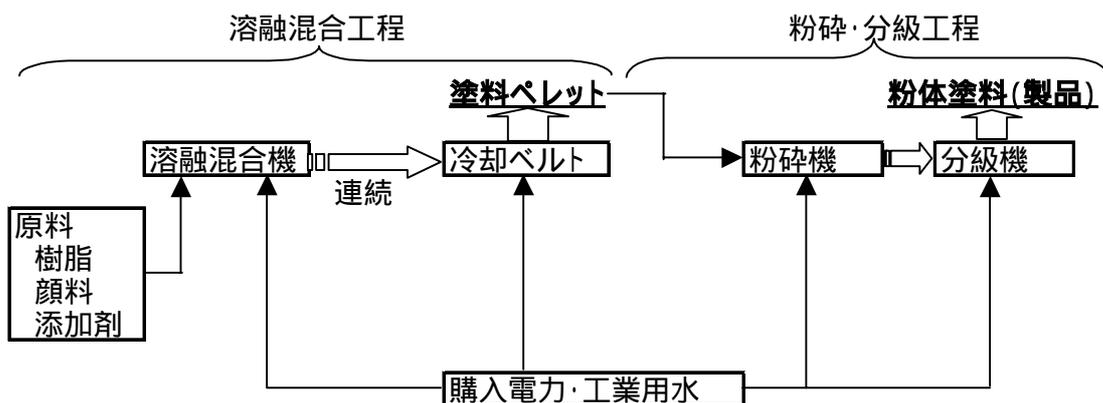


図 2.2.6.2 粉体系塗料の製造工程

これら塗料の発展が環境効率によりの確に表せるかを調査するためこの3種を選定した。資料として「資料 1、塗料の変遷」「資料 2、自動車、船舶用途塗料の付加価値」を添付している。

(2) 算出した指標

環境効率

(3) 指標の定義（計算式）及び設定理由

環境効率 = 年間生産量 / 環境負荷（EPS）

* インベントリ項目

CO₂, CH₄, HFC, PFC, N₂O, SF₆, NO_x, SO_x

* インパクトカテゴリー

資源の消費、地球温暖化、オゾン層破壊、酸性化、湖沼の富栄養化、光化学オキシダント（POCP）、人間への毒性（HCA,HCW）、生態系への毒性（ECA）

エネルギー消費、固形排出量

* 保護対象（EPS: Environment Priority Strategies for Product Design）

人への健康、生態系への健全性、資源枯渇

設定理由

計算式の分母となる環境負荷値は、塗料の機能発揮からは無視されてきた要素であるが、環境影響面に考慮をした塗料形状（水性、粉体）変革での最大のポイント項目となるものである。今回は、環境付加価値として、生産に要した年間エネルギーと年間環境負荷量を金額換算した EPS で表示したものをを用いた。

分子であるサービス値としては、社会の生活標準の向上へ貢献できればその分社会が多く使用してくれるとの判断から「生産量」を用いた。今回はデータの利用制約から生産量を採用したが、分母の環境負荷を金額換算である「EPS」を用いており、本来は「販売金額」が妥当と考える。

(4) 仮定した階層・境界と設定理由

仮定した境界は、図 2.2.6.3 に示すような「塗料製造工程」とする。但し、溶剤系及び水性系塗料では原料となる樹脂は社内で合成をしているので、樹脂合成工程を含んだ範疇としている。

各製造工程を(1)項で示したが、現実には室内温度調節などでの重油やガスをエネルギーとして使用しており、これらの実績を全てデータとして採用した。

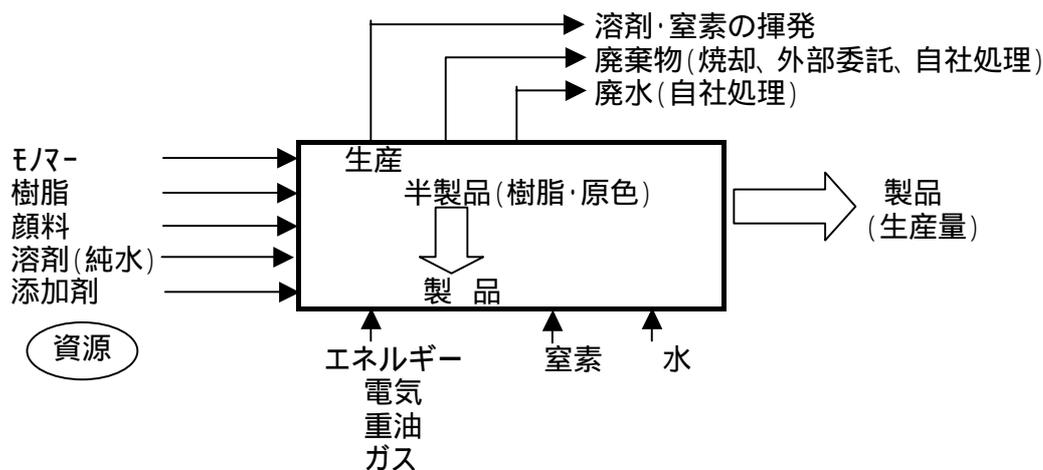


図 2.2.6.3 塗料の製造工程

- * リサイクルはゼロとした。(現実には樹脂合成での溶剤の一部がリサイクルされている。)
- * サービス(製品の付加価値)は、製品の生産量とした。
- * 資源としての水は、自社での純水化工程を経ている。

(5) 計算に用いたデータ(N社の一工場での1998年度製造インベントリを用いた)

- 1) 資源 ; 各原料のインベントリデータ(各種公表データ)
- 2) エネルギー; 直接ラインと複数にまたがる動力、熱源など
- 3) 排出量 ; 物質ごとの量

それぞれのデータを EPS 値へ転換した。

98年度実績		サービス 生産量 kg	環境負荷(EPS値)		
種類	商品略号		資源	電力	排出まとめ
溶剤系	OG65	50800	2.34E+07	6.38E-03	1.32E-02
水性系	AST50	44931	2.75E+02	5.03E-03	1.42E-02
粉体	BIRU	157000	1.02E+00	4.92E-02	1.40E-02

4) 指標

		指標=生産量/環境負荷(EPS)
溶剤系	OG65	50800 / 2.34E + 07
水性系	AST50	44931 / 2.75E + 02
粉体	EIRU	157000 / 1.08E + 00

(6) 計算結果（塗料変遷歴史でのエポックである製品でのファクター）

（溶剤系から水系及び粉体への移行ファクター）

$$F(\text{溶剤 水}) = (44,931/2.75E+02) / (50,800/2.34E+07) \\ = 7.5E+04$$

$$F(\text{溶剤 粉体}) = (157,000/1.08E+00) / (50,800/2.34E+07) \\ = 6.7E+07$$

計算の結果として、溶剤系から水性系や粉体系への移行の指標は十分現れている。媒体が大きく変化した塗料形態故、大きな環境効率値として出てきたと考えられる。

(7) 技術的課題

今回、取り上げた製品の溶剤系、水性系、粉体系塗料は、計算上共通の用途に使用されている家電製品向けを取り上げた。取り扱ったこの粉体塗料品種は、一部自動車用途へ販売されているが無視できる程度である。製品の性能（保護機能と美観機能）と価格で使用分野が決まるが、取り上げた三つの製品で共通に使用されている分野は、いまだ家電製品向けのみである。性能と価格の一般的な比較結果は次の表になる。

表 2.2.6.1 塗料間の性能・価格比較

	価格	保護機能	美観機能	塗装作業安易
溶剤型塗料	100	100	100	100
水性塗料	130	80	90	200
粉体塗料	150	130	90	150

（注）・項目ごとに溶剤型塗料を標準とした相対評価とした。

・塗装作業の安易性は、温度や湿度制御および塗装装置関係の相対比較である。

上記各要素の比較の結果、各塗料の使用される分野は概略次表のようになる。

表 2.2.6.2 各塗料の主要使用分野

	自動車	建築	橋梁	家電	建築資材	船舶	重車両
溶剤型塗料							
水性塗料			×			×	×
粉体塗料		×	×			×	×

（注）・○は適、 はやや適、 ×は不適を示す

使用塗料が選択される判断基準は、適用（塗装）される商品の機能（商品寿命、美観など）がまず維持されることであろう。次いで価格になる。

環境効率の良いといえる水性塗料、粉体塗料が世の中に認知され多く使用されるには、

まだまだその保護機能と美観機能が溶剤型塗料並みの水準が達成される必要がある。そのためには、採用する樹脂の開発が第一である。もちろん、顔料類の配合技術の向上も必要である。さらに、塗料の特徴である「どんな形状の物でも簡単に被覆できる」ことが重要なファクターで、塗装の安易性すなわち塗料および造膜過程でのレオロジー（流動学）の解析手法と最適配合技術の開発が必要である。

(8) 政策的課題

日本での水性塗料、粉体塗料の全塗料の生産量(1,868 千 t)に対する割合は、1999 年度でそれぞれ 1.4% (26 千 t) と 20% (374 千 t) である。最近の年度毎の伸び率は溶剤型塗料に比べると大きいが、環境配慮が叫ばれている昨今、欧米に比べても余りにも少ないと言える。

環境基本法の下で、リサイクル法やグリーン調達法などが施行されたが、グリーン調達はまだ公共工事の部分にしか適用されてない。現在はリサイクルを中心に法律が整備され、世論も盛り上がっているが、リデュース、リユースの部分の法律をより強化する必要がある。

欧米に比べ、水性塗料、粉体塗料の割合が少ない原因として、日本人の考え方の特徴がある。「わずかな傷」とか「少し艶がない」とか「表面のスムーズさがなく」とか、使用する商品の機能と同じレベルでの美観、更には溶剤型塗料と同じ価格を要求する傾向にあり、どうしても環境配慮型塗料は採用されがたい。水性塗料、粉体塗料の日米欧の 1996 年の使用割合を次のグラフに示す。(出典：Modern Paint Coatings,30(Oct.1997))

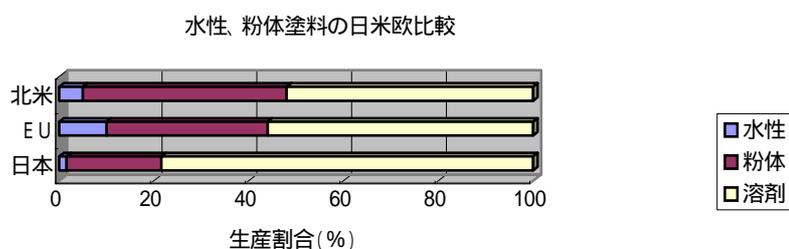


図 2.2.6.4 水性、粉体塗料の日米欧比較

その後の日本の水性塗料、粉体塗料の使用割合は増加していない。日本塗料工業会資料の 2000 年度の数字は、減少気味ながらそれぞれ 1.4%、20%と 1996 年の水準と変わっていない。

環境配慮型商品の販売・使用の促進には、消費税の減税とか優遇政策が必要である。当然、日本市場の要求する性能なり機能、価格、特徴をクリアすべきであろうが、一朝一夕では解決困難なバリエーションが存在するのも事実である。欧米のように「使用に問題ない」との考えを植え付けないと、資源生産性（環境効率）の高い製品の普及は遅々なるスピー

ドに終わるのであろう。グズ減税だけでなくバズ増税など総合的な税制度が必要である。

さらに環境配慮型商品の定義を整備する必要がある。環境負荷評価だけの LCA でなくサービス価値のプラス評価を加えた「資源生産性（環境効率）」の導入も必須である。

(9) 指標変化に影響を及ぼした技術

- (1) 媒体が水、空気での塗料状態として適合できる樹脂及び合成技術。
- (2) 水性塗料、粉体塗料における造膜過程におけるレオロジー解析と適応技術。
- (3) 保護機能を担う水性、粉体塗料用「防錆顔料」の開発と塗料化技術。

塗料は、「樹脂」「顔料」「添加剤」と媒体である「溶剤」又は「水」からなる混合物であるが、有機物、無機物など基本的には相溶しない物質から成るため、単純に混合するだけでは「塗料」として成り立たない。古くからの溶剤型塗料で培った混合安定性技術は、当然水性系では通用しない。現実に達成できた要素には、ベースとなる樹脂設計から組み合わせる顔料（媒体、樹脂に適合する表面コーティングをしている）設計及び混合安定性や、塗装作業性を向上させる添加剤の使い方技術の革新があった故である。

(10) 指標変化に影響を及ぼした社会的要因

公害対策基本法などの制定からの環境問題の高まりと、有機溶剤中毒予防規則など化学物質管理に関する法規制が要因である。

(11) 指標変化が及ぼした技術的波及効果

塗料用樹脂設計技術と樹脂組成の複雑化による塗料の長寿命化が進んできた。塗料メーカーからの要望で樹脂モノマーの多様化が進んできたが、果たして「資源生産性」からはプラスの方向なのかは今後の検討が必要であろう。

塗料の「混合安定性」とか「塗装スプレー性や造膜過程でのレオロジー測定技術と応用した塗料設計技術」あるいは「防錆効果のメカニズム解析」などの理論構築に寄与している。

(12) 指標変化が及ぼした社会的影響

環境配慮型塗料への認識の高まりが出てきた。広がりとしては水性塗料の伸びは今ひとつだが、全体の伸びが2%くらいに比べ、粉体塗料の伸びは10%程度毎年伸びており実績としても着実に市民権を得てきている。

(13) 指標変化が現実に熱物縮をもたらしたか

検討した塗料それぞれの製造工程インベントリを計算してみると下記の結果となり、溶剤系から水性系へと、溶剤系から粉体系への移行時には熱物縮が起こっている。

$$\text{熱物縮 (溶剤 水)} = 2.75E+02 / 2.34E+07 = 1.17E-05$$

$$\text{熱物縮 (溶剤 粉)} = 1.08E+00 / 2.34E+07 = 4.61E-06$$

塗料の媒体変化での熱物縮が起こった理由としては、塗料製造工程でのインベントリの詳細をみると、「資源」による数値が圧倒的に大きい。したがって、環境負荷の大きい溶剤を使用しないことが最大の要因である。水性系はそれに使用する樹脂のところのインベントリが大きく粉体系との差が現れている。(5)項の計算に用いたデータのインベントリ表を参照。)

(14) 指標計算方法論上の課題

サービス評価はその製品の開発段階で客観性が持てるようにする。

使用される姿(ここでは塗装系)での環境負荷なりサービス評価とする。

環境負荷、サービスとも正当な金額換算ができるようにする。

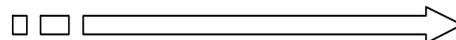
1) 今回取り上げた塗料での環境効率の向上、熱物縮の効果は、塗料の環境へのインベントリ寄与、原料すなわち資源のインベントリの寄与が大きい。原料として溶剤を使用しない系への移行塗料間での比較となったため、溶剤系から水性系、溶剤系から粉体系への環境配慮効果が評価できた。塗料の機能を考えると「保護」と「美観」が挙げられる。そして複数の機能及び顧客要求を満足させるため、複数の塗料を塗り重ねて使用するケースが多い。その事例として自動車塗装系を取り上げ、塗装系でのインベントリ(ここではCO₂換算での環境負荷数値)を計算してみた。まず、自動車塗装系の変遷をまとめた。

自動車メタリック塗装系の変遷

	初期	水性系	粉体系
プライマー	電着塗料	電着塗料	電着塗料
中塗り	溶剤型	溶剤型	溶剤系
ベースコート	溶剤型	水性系	水性系
クリアーコート	溶剤型	溶剤型	粉体系

比較

ソリッド
溶剤型
溶剤型
溶剤型
—



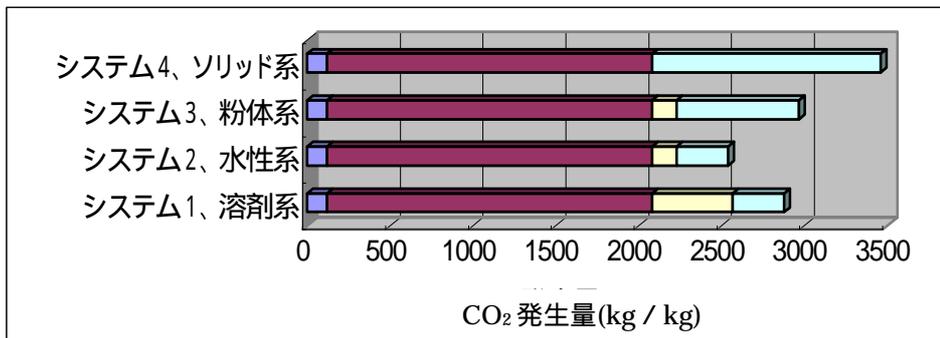


図2.2.6.5 自動車塗装系でのCO₂発生量

表2.2.6.3 自動車塗装系でのCO₂発生量(CO₂ Kg / 塗料 Kg)

	プライマー	中塗り	ベース	クリアー
システム1、溶剤系	122	1960	484	312
システム2、水性系	122	1960	148	312
システム3、粉体系	122	1960	148	736

塗料製造までの環境負荷インベントリをみると、システム1からベースコートを手性型に変えたシステム2は明らかに低下しているが、塗料形態としては更に環境配慮した粉体型にクリアーコートを変えると逆に大きくなっている。ちなみにシステム4はメタリック塗装でなく白色塗装であり、3回の塗装にもかかわらず大きい数値となった。これは原料である酸化チタンの資源インベントリが他の資源材料に比べ非常に大きいからである。

検討で採用した家電用粉体塗料とこの自動車用粉体塗料とでは原料が異なり、そのインベントリの差がそのまま表れた。原料を変えざるを得ない理由は自動車の求める「美観」を達成するためである。重要なことは、塗料の開発は「トータルシステム」で行うことであり、実際使用される塗装システム全体で論議することが重要だと考える。ただ、今回はデータとして生産工場が異なることでの単純なインベントリ比較ができないこともあり、CO₂換算だけの比較とした。プラスのサービスを考慮した環境効率の面でも、今回採用した「生産量」なり「販売量」では、まだシステム3での実績が低いから、効率を下げた数値になることは明らかである。

2) このデータが示す問題点としては、2つある。1つは、塗料の製造工程での環境負荷は資源(原料)インベントリの寄与が圧倒的である状況の中で、人間の本能である「美的欲望」を満足させるための資源(原料)を使わざるを得ない「企業目的(利益追求)」活動の開発段階での評価をどうするかである。2番目は、塗料は要求される複数の機能に対して機能分担した複数の塗料を塗り重ねる塗装系で世の中に出る製品の付加価値を向上させているため、一つひとつの塗料では「開発した塗料の本当のサービス価値」が正当に評価されない

おそれがあることである。

資源生産性（環境効率）の導入は存在している製品の評価をするだけではない。むしろ開発段階での「事前評価」に取り入れ、開発をすべきかどうかの判断に使用されねば「持続的社会の発展」に役立たない。ただしサービスとしての生産量（あるいは販売金額）は開発からある程度実績がでてからの結果論であり、開発段階で資源生産性を考えての採用可否の判断に使いにくいところがある。また開発段階で見込み販売金額での資源生産性（環境効率）を評価すると、開発者の独断と偏見の数値になるおそれがある。さらに、物的機能追求での予測は比較的客観的にできるが美観機能ではそれが困難であり、塗料のような主観的機能を持つ製品の場合も困難性を伴う。

塗料のサービスとは「機能ある塗料」を提供するのではなく「複数の機能を発揮する塗装系」を提供することである。上記の自動車塗装系のインベントリデータは「それぞれの塗料 1 kg 当たり製造する時の CO₂ 発生量（換算値）」であるが、この塗装系はそれぞれの最適膜厚からなる複合塗膜であり、その複合塗膜で本来のサービスを提供している。今回はそこまで計算できなかったが、開発目的の塗装系としてのインベントリ評価をするのが妥当と考える。

3) サービスとして今回は「生産量」を取り上げたが、理想としては「販売金額」のほうがよいと考える。基本的考えは「生活向上に役立った商品はそれだけ売れる」との考えでどちらでも意味と結果は同じである。一方で、環境経営として「環境会計」が作られてきているが収支としては成り立たないのが現状であり、環境省の指針もそれをうたっている。理想としては企業活動のすべてが組み込まれたバランスシートができるメジャーが望まれており、そのような趣旨を考えると環境負荷もサービスも金額換算がよいと考える。

<資料2>表2.2.6.5 船舶用途における塗料の付加価値

船底塗料の場合	初期(1900年頃)	成長期(1955年頃)	質向上期(1970年頃)	技術革新期(1990年頃)				
塗料主配合 Pr	ボイル油 鉛丹 ジंकロ タルク	45 35 10 10	プチラール ジंकロ リン酸 IPA	10 13 2 75	9 1 65 25	シリケート 亜鉛粉末 耐熱顔料 溶剤	32 9 11 48	
AC	ボイル油 酸化鉄 タルク	60 18 22	塩ビ アルミ紛 可塑剤 溶剤	20 20 5 55	エポキシ タール ポリアミド タルク 溶剤	37 18 3 18 25	エポキシ 石油樹脂 ポリアミド タルク 溶剤	20 10 2 45 23
AF	ボイル油 亜酸化銅 タルク	45 45 10	塩ビ 亜酸化銅 トリフェニルスズ タルク 溶剤	22 35 3 20 20	塩ビ 亜酸化銅 タルク 溶剤	22 38 20 20	銅キレート樹脂 亜酸化銅 溶剤	20 55 35
塗装系 回数・乾燥など	Pr +AC +AF 15 μ * 1 + 20 μ * 2 + 25 μ * 3	Pr + AC + AF 15 μ * 1 + 25 μ * 4 + 25 μ * 2	Pr + AC + AF 15 μ * 1 + 125 μ * 2 + 100 μ * 2	Pr + AC + AF 15 μ * 1 + 125 μ * 2 + 100 μ * 2	Pr + AC + AF 15 μ * 1 + 125 μ * 2 + 100 μ * 2			
塗装日数	45日	7日	5日	4日				
トータル膜厚	140 μ	165 μ	465 μ	465 μ				
塗料値段		Prはプレコート	Prはプレコート	Prはプレコート AFはW/W				
塗装値段								
塗り替え時期	6~12ヶ月	1年	3年	3年				
燃費	—			燃料8%節約				
造船技術			ブロック建造が可能となった					
その他	固練り塗料	石化溶剤が高くても使用されだした 防汚剤として「砒素化合物」も使用						

* 各塗装系でのLCAなり塗料のLCIを計算していく。
* 仮説に基づいた評価を試みる。

<資料3>表2.2.6.6 自動車用途における塗料の付加価値

自動車塗料の場合	初期(1940年頃)	1955年頃	成長期(1970年頃)	技術革新期(1990年頃)
塗料種配合	ラッカー	Pr エポキシエステル S メラミン・アルキッド T 熱可塑アクリル	Pr アニオンED S メラミン・アルキッド T メラミン・アクリル	Pr カチオンED S 新硬化系樹脂 T 水性アクリル系樹脂
膜厚		Pr + S + T 15 μ + 30 μ + 35 μ トータル 80 μ	Pr + S + T 15 μ + 30 μ + 35 μ トータル 80 μ	Pr+S+T 20 μ + 30 μ + 40 μ トータル 90 μ
塗装回数・焼付け		3C・3B	3C・3B	3C・3B
塗装方法	エアースプレー	エアースプレー 塗着効率 45%	静電塗装 塗着効率 70%	静電塗装 塗着効率 70%
耐久年数 美観を損ねるまで		4年	5年	5年 耐酸性雨性付与
その他			鮮映性 静電による廃塗料量削減	意匠性顔料採用 マイカ 金蒸着ガラス片 水性化による廃水処理費用 VOC削減

2.2.7 ペットボトル

(1) 選定した製品

4種のPET ボトル

- ・炭酸用 1500ml
- ・炭酸用 500ml
- ・耐熱用 1500ml
- ・耐熱用 500ml

(2) 調査の背景と経緯

近年、化学産業の裾野が拡大し、汎用品からスペシャルティ製品にまでわたる広範な品目が市場に供給されている。石油化学から有機・無機製品、プラスチック材料と成型品、化粧品、及びバイオ関連産業の医薬、農薬製品などを含み、年間売上高約 35 兆円、わが国 GDP の 7% 規模に達している。

我が国化学工業界において、地球環境保護、省資源・省エネルギー - の経営戦略の認識も高まり、環境循環型社会のモデルとして化学製品の地球環境問題への対応が重視されている。一方、米国化学産業のプロジェクト活動に呼応して、(社)日本化学工業協会でのレスポンシブルケア調査が実施されている。これらプロジェクトには各企業が参加し、具体的データ蓄積、調査などに関して、業界全体に関心が高まっている。

今回、一般家庭製品として実績が上がっているプラスチック成型品としての PET ボトルの資源生産性・環境効率、ファクター調査を実施した。

暖かい飲料を入れる耐熱性 PET ボトル向けのポリエチレン・テレフタレート (PET) 樹脂の需要が大幅に拡大している。これまでホット飲料品の主流の容器は缶容器であったが、PET ボトルの方が手に熱さを感じにくく、中身が冷めにくいので、消費者に評価されている。また、陳列用加温機の PET ボトルの収納本数も増加している。耐熱性 PET ボトル向けの PET 樹脂の出荷量は、前年比、3~4 倍の勢いで伸びている。

このように、PET 樹脂の分野は日本経済再生の視点から、雇用対策として新規雇用を受け入れる余力のある成長産業になるとものと見ることができよう。したがって、社会経済のインフラ構造改革、省資源・省エネルギー対策と共に、リサイクルの徹底などの環境対策の重要度がますます増加している。

我が国では 1971 年に民間企業のプラスチック研究所において PET ボトルの実用化技術の開発と共に、市場開発を手がけてきた。既に 30 年前にボトルメーカーとの共同研究を開始し、事業化に踏み切った。こうして工業化した PET ボトルを今回の調査テーマに取り上げることにした。

近年、資源生産性、環境効率の算出に必要なとされる国内における地球環境負荷に関連した客観的基礎データが徐々に整備されてきているが、今後は、国際比較評価に耐える調査データをまとめていく必要がある。

化学産業の分野においても、逐次、資源生産性やファクターなどの環境効率の視点を取り入れ、最終化学製品について、例えば、市民生活に密着した各種食品容器などの事例を取り上げる必要がある。なかでも食品容器材料として、(a)無機材料(ガラス類)、(b)金属材料(アルミニウム)、(c)有機材料(紙製品、プラスチック容器、PET ボトル、レトルト食品用フィルムなど)の相互比較データを揃えること、更に PET ボトルの環境効率の追跡調査が必要である。

そこで、食品容器の歴史的変遷をみると、材料科学の 3 分野である無機材料(ガラス類)、金属材料(アルミニウム)、ならびに、最近十数年の有機材料(紙製品、プラスチック容器、PET ボトル)の市場導入と実用化には目覚ましい進展がみられている。化学産業の資源生産性の視点にたち、従来からプラスチックボトル材としての塩化ビニル、ポリアクリロニトリルの研究が 1960 年代から行われてきた。

だが、塩素など食品安全面での有害性の懸念から清涼飲料用ボトルや醤油びんへの実用化は困難であった。1970 年代に入り、世界ではじめて PET 樹脂の食品ボトルへの採用市場に着目し、これまで高性能繊維(“テロン”)や、磁気テープフィルム(“ルミラー”)など、高付加価値分野のみに使用されていたポリエチレンテレフタレート(PET)の容器包装分野への実用化研究に着手した。

PET ボトルの実用化研究は、食品容器の軽量化と、輸送時の破損防止、省資源・省エネルギーなど地球環境問題への対応など、生活環境と社会性の改善のために、欧米に先駆けて押し進められてきており、その結果わが国の基本特許出願がタイミングよく実施され、いち早く製造基本特許を成立させて、知的所有権の取得につながった。

一方、1970 年当初は、ポリエステル重合技術ならびに触媒の研究開発につづき、市場調査の目標をガラス瓶のみしか使用されなかった目薬ビンと醤油ビンに目標を絞った。特にユーザー調査と厚生省に対する食品衛生協議会の設置提案を実施した。1978 年から試験生産に入り、本格的に各社の企業化が実施され始めたのは 1985 年以降である。我が国の PET ボトルの生産量は、2000 年には年間 36 万トンに達している。PET ボトル向け PET 樹脂の国内需要も大きな伸びを示し、2001 年には前年比 12%増の 426 千トンに達した。市場見通しでは、2002 年も前年比 2 ケタの伸びで、2001 年比で数万トンの新規需要増が見込まれている

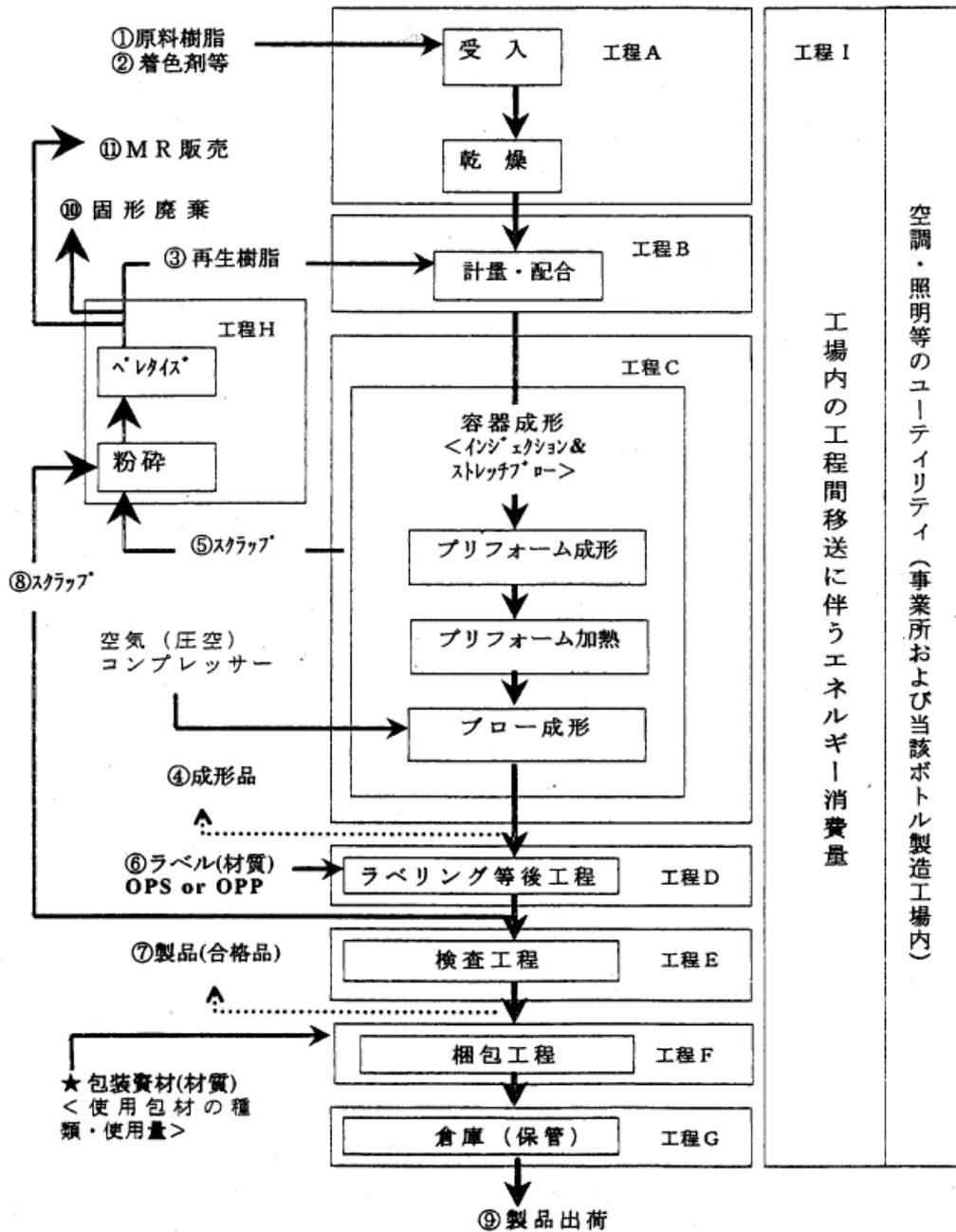


図 2.2.7.1 PET ボトル環境効率算出のためのシステムバウンダリ
(PET ボトル協議会技術委員会報告書(2000年)により作成)

当初から推進してきた我が国の PET ボトル回収率は、1980 年代の企業化当初はコスト高の要因もあり数パーセント台に低迷していた。

ところが、循環型社会の到来に対応して、約 15 年経過した 2000 年には回収率が 34% 台まで上昇した。現在では、市町村の 70 地域社会、51 社の協力等もあり、2003 年には回収率が初めて 50 パーセントを超えるものと期待されている。

さらに、我が国を環境クロード・システムに近づけるために、PET ボトルリサイクル比率の 75～80% 水準達成にむけて、業界、地方団体と各家庭の完全分別回収への目標達成のための努力を期待したい。

(3) 資源生産性・環境効率・ファクターの算出

本調査では、(社)日本化学工業協会、(社)日本石油化学協会、(社)化学技術戦略推進機構などが各組織内に保有する、わが国におけるデータ・ベースを中心に前述の特定製品を選び、資源生産性の計算に係わる公知情報とデータについてヒアリング調査した。PET ボトル 4 種を中心に、PET ボトル企業化(1978 年)以降特に過去 5 年間(1995～2000 年)における資源生産性と環境効率の向上傾向と、効率向上の技術的進歩のポイントを調査した。

(1) 資源生産性： $X_{ij} = \Sigma P_i$ ；生産量 / ΣR_j ；燃料エネルギー使用量 × H 発熱量

(2) 環境効率： $Y_{ij} = \Sigma P_i$ ；生産量 / ΣL_j ；環境負荷（CO₂, NO_x, SO_x 発生量）

(3) グリーン度の算出 = 環境効率 / 資源生産性

(4) 我が国化学産業における課題抽出

(4) 指標の定義(計算式)と設定理由、及び算出した指標と結果

炭酸用 1500ml、炭酸用 500ml、耐熱用 1500ml、耐熱用 500ml 用の 4 種の PET ボトルについて、1995 年並びに 2000 年の基礎データを取り上げて調査検討した。

- 1) PET ボトル協議会技術委員会調査報告によるデータの収集対象としたシステムバウンダリを図 2.2.7.1 に、PET ボトル製造に係る消費エネルギー・環境負荷量に関するデータ内容の概要を表 2.2.7.1～2 にまとめて示した。

表 2.2.7.1 資源生産性 (Xij) 計算基礎データ

(単位 ; Kcal/本)

		炭酸用PETボトル				耐熱用PETボトル			
		1500ml		500ml		1500ml		500ml	
		1995年	2000年	1995年	2000年	1995年	2000年	1995年	2000年
ボ ト ル 本 体 (Pi)	精製工程		36		23		43		23
	樹脂製造		275		174		327		174
	成形加工		305		147		449		191
	(FSE)		(427)		(270)		(508)		(270)
	計	1,234	617	682	344	1,638	819	766	388
	(計 : 含FSE)		(1,044)		(614)		(1,327)		(658)
消 費 エ ネ ル ギ ー (Rj)	工程投入		688		391		868		430
	FSEボトル		427		270		508		270
	FSEバル		35		15		12		8
	FSEキャップ		35		35		35		35
	計	9,480	1,185	5,688	711	11,392	1,424	5,944	743

(出所)「PETボトルの LCI データ報告書 : PET ボトル協議会 . 2000.2

表 2.2.7.2 環境効率 (Yij) 計算基礎データ

(単位 ; Kcal,g/本)

		炭酸用PETボトル				耐熱用PETボトル			
		1500ml		500ml		1500ml		500ml	
		1995年	2000年	1995年	2000年	1995年	2000年	1995年	2000年
ボ ト ル 本 体 (Pi)	精製工程		36		23		43		23
	樹脂製造		275		174		327		174
	成形加工		305		147		449		191
	(FSE)		(427)		(270)		(508)		(270)
	計	1,234	617	682	344	1,638	819	766	388
	(計 : 含FSE)		(1,044)		(614)		(1,327)		(658)
環 境 負 荷 加 算 (Lj)	CO2		149		86		187		94
	No x		0.210		0.126		0.257		0.134
	So x		0.241		0.146		0.291		0.153
	HC		0.0005		0.013		0.018		0.086
	計	1,195.6	149.45	690.2	86.28	1,498.5	187.56	753.9	94.37

(出所)「PETボトルの LCI データ報告書 : PET ボトル協議会 . 2000.2

2) 技術革新による PET ボトルのファクターの向上

本報告書記載の基礎計算のベースとなるわが国におけるボトル用 PET 樹脂の市場別需要動向と生産動向を表 2.2.7.3 と表 2.2.7.4 に掲げた。表 2.2.7.3 では 1995 年-2001 年のボトル用 PET 樹脂の需要実績と予測がまとめられている。表 2.2.7.4 には PET ボトル用の生産量と分別収集量の実績と予測値を紹介している。

現在、PET ボトル生産量は、表 2.2.7.3 に示すように 1995 年の 142,110 トンから、2000 年の実績値は 254%増の 361,994 トンへと飛躍的増加を記録した。また、表 2.2.7.2 に見るように、1995 年から 2000 年の 5 年間における環境対策による環境負荷低減の実績

も著しい。

表 2.2.7.3 PET ボトルリサイクル率の予測

(単位：トン・暦年)

年		1995年	1996年	1997年	1998年	1999年	2000年	2001年 (予測)
食 品 用	しょうゆ	13,491	13,581	13,222	12,900	12,501	12,829	12,900
	しょうゆをのぞく調味料	9,674	11,031	10,565	11,489	14,267	13,653	13,100
	食用油	1,373	1,160	1,041	1,511	2,079	2,487	2,000
	酒 類	9,788	10,233	10,836	10,234	11,479	10,461	11,000
	清涼飲料	118,831	149,088	194,748	258,793	308,222	338,654	365,000
	食品用 計	153,157	185,093	230,832	294,927	348,548	378,084	404,000
非 食 品 用	洗剤・シャンプー	14,472	12,052	12,807	10,657	9,630	9,443	9,000
	化粧品	3,354	3,020	3,590	4,787	6,149	6,524	6,000
	医薬品その他	1,847	3,258	4,500	3,528	6,159	7,345	7,000
	非食品用 計	19,673	18,330	20,897	18,972	21,938	23,312	22,000
総 計		172,830	203,423	251,729	313,899	370,486	401,396	426,000
第二種指定製品 合計		142,110	172,902	218,806	281,927	332,202	361,944	388,900

(出所) PET ボトル協議会(2000年3月)

- (注) 1. 2000年までは樹脂の輸入品を含む実績。2001年は予測。
2. 第二種指定製品とはしょうゆ、酒類、清涼飲料をいう。

表 2.2.7.4 PET ボトルリサイクル率の予測

(単位：千トン)

項 目	1998年	1999年	2000年	2001年	2002年	2003年	2004年
分別収集量	48	76	125	173	199	217	231
生産量	282	332	362	389	427	440	452
リサイクル率(%)	16.9	22.8	34.5	44.5	46.6	49.3	51.1
分別市町村数	1011	1214	2340	2692	2814	2947	2978

(出所) PET ボトル協議会

(注) 1. 2000年までは実績値

2. 2001年以降は市町村の分別収集計画数量(2000年12月厚生省)

今回の調査によって、PET 製造技術と PET ボトルの技術革新による原単位削減と、資源生産性、環境効率及びファクターの算出に当たり、各工程ごとに下記項目を確認した。

3) PET 重合技術の原単位削減

A. PET 重合技術が、メタノールによる DMT エステル交換反応から TPA 直接重合プロセスの開発により、大幅なエネルギー原単位向上に寄与した。

B. 塊状重合から連続重合への切り替えにより、収率向上とエネルギー低減、ファクター向上に直接貢献した。

- C. ボトル用 PET は、通常の繊維用 PET より高分子量が要請されている。原単位低減とエネルギーの重合触媒の開発と、ペレット固相連続重合など、省エネルギープロセスが開発された。
- D. PET ボトルのパリソン成形技術の革新により、一体成形の収率向上に寄与した。さらに、付属部品のキャップ、ラベル製造、加工技術の改善により、省資源、省エネルギーの環境効率の向上に貢献した。

4) 加工プロセスと回収率向上による原単位削減

- A. 社会による分別回収の実施地域の拡大向上が目ざましく、1980 年代の PET ボトル回収率は、わずか 3～5% 程度であったものが 1990 年～2000 年の 10 年間に約十数倍(ファクター 16) 向上している。現在、我が国のリサイクリング、再生品企業は 51 社、70 施設にのぼり、地方施設も順次整備されている。
- B. 従来の社会システムでは、現在の 2 万トン程度の回収に留まっており、現在の 40 万トンの需要レベルに換算すると、実に約 38 万トンが、焼却炉により CO₂、NO_x、SO_x などの排気ガスの発生源になっていることになる。
- C. 2000 年現在、PET ボトルのリサイクル再利用率は 34% 程度であり、早急に 80%(回収量現在の水準では、32 万トン)まで向上すべきであろう。
一方、1999 年実績として、欧州諸国のなかでは既にスウェーデンでは 62%、スイスでは 70.2% の回収率を達成している。
- D. そこで、我が国の 2000 年現在の回収率は 34% 程度で低迷しているが、今後回収率を 2 倍以上の 66～80% まで向上できれば、今後の新しい技術革新を考慮し、更なる環境効率改善とファクター 5～10 以上の向上実現に貢献するであろう。
- E. その目標達成のために、我が国でも分別回収と、フレーク処理工場への資金援助とともに、環境政策として、地方財政を活性化して、地域社会の設備改善と、今後、さらに LCA による環境システムの効率向上が重要である。

5) 算出データの総括表

A. 資源生産性： $A_{ij} = \Sigma P_i$ ；生産量 / ΣR_j ；燃料エネルギー使用量 × H 発熱量
(2000 年)

- ・炭酸飲料 1500ml
P1；本体 617kcal / R1； 工程消費エネルギー 1,185kcal
- ・炭酸飲料 500ml
P2；本体 344kcal / R2； 工程消費エネルギー 711kcal
- ・耐熱用ボトル 1500ml
P3；本体 819kcal / R3； 工程消費エネルギー 1,424kcal
- ・耐熱用ボトル 500ml

P4 ; 本体	388kcal	/	R4 ; 工程消費エネルギー	743kcal
資源生産性(Xij)	A11=52.1			
	A22=48.4			
	A33=57.5			
	A44=52.2			
合計	$\Sigma A_{ij}=210.2(2000)$			

B . 環境効率 : $B_{ij}=\Sigma P_i$; 生産量/ ΣL_{ij} ; 環境負荷 (CO₂,NO_x,SO_x 発生量)
(2000年)

・炭酸飲料	1500ml			
P1 ; 本体	617kcal	/	L1 ; 環境負荷 (CO ₂ ほか)	149.45g
・炭酸飲料	500ml			
P2 ; 本体	344kcal	/	L2 ; 環境負荷 (CO ₂ ほか)	86.28g
・耐熱用ボトル	1500ml			
P3 ; 本体	819kcal	/	L3 ; 環境負荷 (CO ₂ ほか)	187.56g
・耐熱用ボトル	500ml			
P4 ; 本体	388kcal	/	L4 ; 環境負荷 (CO ₂ ほか)	94.37g
環境効率	B11=	4.13		
	B22=	3.98		
	B33=	4.37		
	B44=	4.11		
合計	$\Sigma B_{ij}=16.59(2000)$			

C . 資源生産性 : $C_{ij}=\Sigma P_i$; 生産量 / ΣR_j ; (燃料エネルギー使用量 × H 発熱量)
(1995年)

1995年に比べて2000年には、高分子量PETの適用による機械強度向上により、ボトルの肉厚を50%減少させ、原料樹脂使用量50%減によるエネルギー原単位減少率50%、さらにボトル成形加工工程の合理化により、使用エネルギー原単位50%減を適用している。

また、環境負荷データは、5年間での重量減に加えて、40万トン連続重合等の設備合理化により、エネルギー原単位50%の改善を達成した。なお、PETボトル回収向上の効果については、計算上割愛している。

・炭酸飲料	1500ml			
P1 ; 本体	1234kcal	/	R1 ; 工程消費エネルギー	9,480kcal
・炭酸飲料	500ml			

P2 ; 本体	682kcal	/	R2 ;	工程消費エネルギー	5,688kcal
・耐熱用ボトル	1500ml				
P3 ; 本体	1638kcal	/	R3 ;	工程消費エネルギー	11,392kcal
・耐熱用ボトル	500ml				
P4 ; 本体	766kcal	/	R4 ;	工程消費エネルギー	5,944kcal
資源生産性	C11=	13.02			
	C22=	11.99			
	C33=	14.38			
	C44=	13.06			
合 計	ΣC_{ij}	=52.45(1995)			

D . 環境効率 : $D_{ij} = \Sigma P_i$; 生産量 / ΣL_{ij} ; 環境負荷 (CO_2, NO_x, SO_x 発生量)
(1995 年)

・炭酸飲料	1500ml				
P1 ; 本体	1234kcal	/	L1 ;	環境負荷 (CO_2 ほか)	1,195.6g
・炭酸飲料	500ml				
P2 ; 本体	682kcal	/	L2 ;	環境負荷 (CO_2 ほか)	690.2g
・耐熱用ボトル	1500ml				
P3 ; 本体	1638kcal	/	L3 ;	環境負荷 (CO_2 ほか)	1,498.5g
・耐熱用ボトル	500ml				
P4 ; 本体	766kcal	/	L4 ;	環境負荷 (CO_2 ほか)	735.9g
資源生産性	D11=	1.03			
	D22=	0.99			
	D33=	1.09			
	D44=	1.02			
合 計	ΣD_{ij}	=4.13(1995)			

(5) ファクター算出結果

資源生産性 : $X_{ij} = A_{ij}$ (= ΣP_i ; 生産量 / ΣR_j ; 燃料エネルギー使用量) (2000)
/ C_{ij} (= ΣP_i ; 生産量 / ΣR_j ; 燃料エネルギー使用量) (1995)

$X_1 = A_1(2000)/C_1(1995)$	=	4.00
$X_2 = A_2(2000)/C_2(1995)$	=	4.04
$X_3 = A_3(2000)/C_3(1995)$	=	4.00
$X_4 = A_4(2000)/C_4(1995)$	=	4.00
合 計	ΣX_{ij}	= 16.04
平均値	X_{ij}	= 4.01

環境効率： $Y_{ij}=B_{ij} (= \Sigma P_i ; \text{生産量} / \Sigma L_j ; \text{環境負荷}(\text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_x \text{ 発生量}) (2000))$
 $/D_{ij} (\Sigma P_j ; \text{生産量} / \Sigma L_j ; \text{環境負荷} (\text{CO}_2, \text{NO}_x, \text{SO}_x \text{ 発生量}) (1995))$

$$Y1 = B1(2000)/D1(1995) = 4.01$$

$$Y2 = B2(2000)/D2(1995) = 4.02$$

$$Y3 = B3(2000)/D3(1995) = 4.01$$

$$Y4 = B4(2000)/D4(1995) = 4.03$$

$$\text{合計} \quad \Sigma Y_{ij} = 16.07$$

$$\text{平均値} \quad Y_{ij} = 4.02$$

グリーン度の算出:

$$G_{ij} = Y_{ij}(\text{環境効率})/X_{ij}(\text{資源生産性})$$

(単位消費エネルギー当りの環境負荷量 { g/Kcal })

$$G1=Y/X = 4.01/4.00 = 1.00$$

$$G2=Y/X = 3.99/4.04 = 1.00$$

$$G3=Y/X = 4.01/4.00 = 1.00$$

$$G4=Y/X = 4.04/4.00 = 1.01$$

$$\text{合計} \quad \Sigma G_{ij} = 4.01$$

$$\text{平均値} \quad G_{ij} = 1.00$$

今後、PET ボトルの分別回収率の増加により、使用済み PET ボトルの焼却率を大幅に低減すれば、焼却ガス (CO₂、NO_x、SO_x) の低減によりファクター向上に大きく貢献できるであろう。

(6) 我が国の化学産業における課題抽出

前述のように、特に地球環境負荷低減のため、資源生産性、環境効率の算出の要請を受けて、近年、客観的基礎データの整備が進められている。そこで、化学産業の分野で新しいファクター調査の視点から、LCA のデータとドッキングさせて、リサイクル性や経済面も考慮し、最終製品としてのメリット、デメリットを比較する必要がある。

今後、国際比較の視点から、(a)無機材料(ガラス類)、(b)金属材料(アルミニウム)、(c)有機材料(紙製品、プラスチック容器、PET ボトル)の資源生産性、環境効率や、ファクターを比較し、国際比較評価を含めた PET ボトルの有効性などの追跡調査を行う必要がある。

(7) 今後の資源生産性調査の課題

本年 2002 年を迎え、我が国でもいよいよ PET ボトル事業の 50 万トン体制の実現が、その射程距離に入ってきた。今後、技術革新が期待される分野であり、特に社会インフラストラクチャーの整備と市・町・村における分別回収によるリサイクル循環社会システムの構築、並びに省資源・省エネルギー対策によって、21 世紀におけるファクター10に向けて

その実現が十分に期待できる。

したがって、2002～2003年には、欧米のみならず発展途上国、ことに中国市場の比較検討がぜひ必要となるであろう。

一方、1970年と2000年について、食品容器として、既に業界にはデータもそろっていると考えられるので、回収率、LCAを考慮し、ガラス瓶(しょうゆ、清涼飲料)、アルミニウム缶(清涼飲料)、紙容器(牛乳、ミルク)の資源生産性・環境効率やファクターを調査し、これらについての総合比較を行う必要がある。

(8) 資源生産性調査の検討事項

わが国と欧米諸国において、多種多様にわたるスペシャルティ化学製品を選定し、化粧品、医薬、農薬、合成繊維など、個別商品、分野別にきめ細かく分類した上でのファクター調査をする必要がある。

今後、中国など東アジア諸国への技術移転を含め、更に資源生産性、環境効率並びにファクターに関して、国際的比較検討を実施することが重要な問題である。今後、更なる調査研究の成果を期待したい。

〔引用文献〕

- 1) (社)日本化学工業協会 1970～2000 化学工業の消費エネルギー原単位報告書(2000年)。
- 2) 日本レスポンシブル・ケア協議会報告書(2000年)(p10～15)。
- 3) (社)日本化学工業協会インタビュー、調査資料。
- 4) (社)日本石油化学協会インタビュー、調査資料。
- 5) (社)化学技術戦略推進機構(JCII)インタビュー、調査資料。

2.2.8 銅

(1) 選定した工程

銅の製錬は図 2.2.8.1 に示すように、「銅熔錬工程」、「銅電解工程」に分けられ、「熔錬工程」で発生する亜硫酸ガスを含むガスから硫酸を製造する「排ガス処理工程」がある。銅鉱石の主成分はカルコパイライト(CuFeS_2)であり、硫黄を含んでいる。

銅鉱石は、熔錬炉で溶融、脱硫されて銅分 99%前後のアノード銅が製造される。この工程が「熔錬工程」である。

銅鉱石の脱硫により生成したガスは亜硫酸ガス(SO_2)を含んでおり、このガスを原料として硫酸を製造している。そして、 SO_2 を回収して硫酸を製造した後の排ガスや、熔錬炉からの漏煙中に含まれる亜硫酸ガスを回収・無害化して石膏を製造する工程が「排ガス処理工程」である。

熔錬工程で製造されたアノード銅中には不純物が含まれており、「銅電解工程」で、電解精製によって純度 99.99%以上の電気銅を製造している。

「排ガス処理工程」の操業は「熔錬工程」の操業と密接な関係があり、エネルギー使用量は「熔錬工程」の操業に左右される。そこで、「熔錬工程」と「排ガス処理工程」を合わせて「銅熔錬工程」とし、検討対象として選定した。

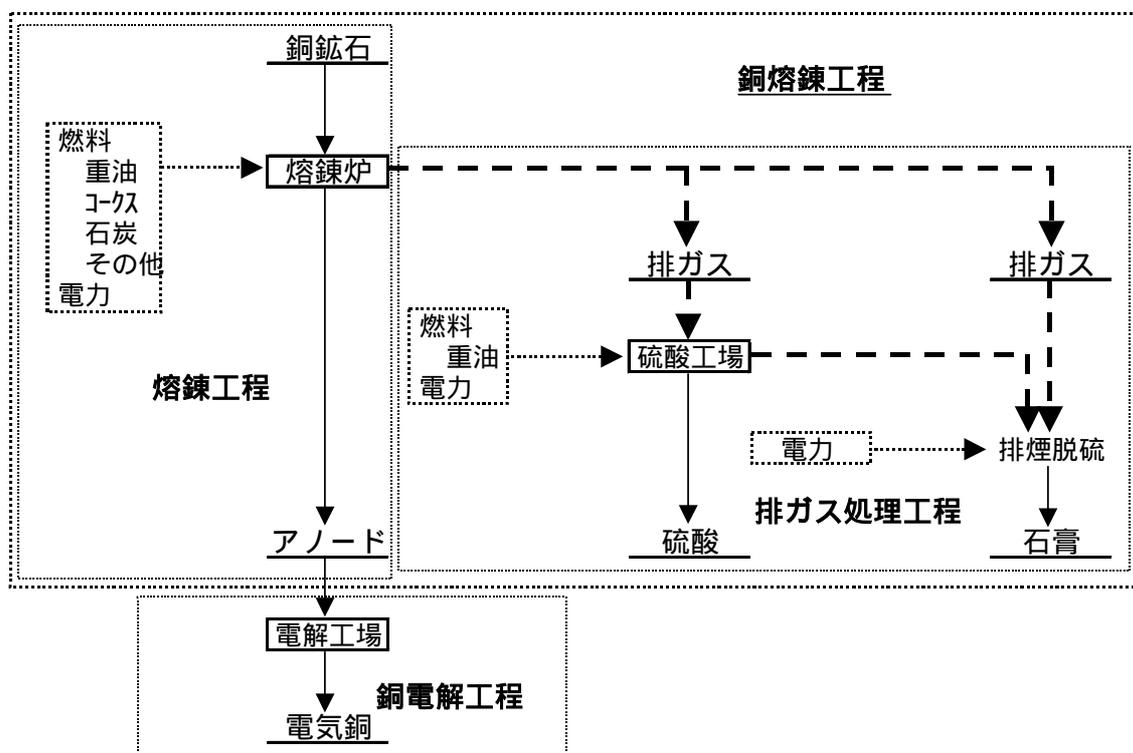


図 2.2.8.1 銅製錬フロー

(2) 算出した指標

資源生産性及びファクター

(3) 資源生産性の定義

資源生産性(M_i) = $P_i / (R_{ij})$

P_i : i 年度のアノード生産量、 R_{ij} : i 年度の C 排出量

ファクター、(F_i) = M_i / M_{1985} M_i : i 年度の資源生産性、 M_{1985} : 1985 年度の資源生産性

ファクター、(F) = M_y / M_z M_y : 新しい熔錬方式、 M_z : 1985 年度の反射炉方式

近代の銅熔錬方法は、熔鋳炉法、反射炉法に始まった。銅鋳石は硫黄を含むため、熔錬工程で亜硫酸ガスが発生する。亜硫酸ガス濃度の高い(約 4%程度以上)転炉で発生するガスは、硫酸製造に用いられていたが、熔鋳炉、反射炉から発生する排ガスは約 2%程度にしかないため硫酸回収ができずに大気放出されていた。亜硫酸ガスによる公害を防止するため、自溶炉法、連続製銅法が開発され、実用化が図られてきた。

自溶炉法、連続製銅法とも、熔錬工程で発生する亜硫酸ガスを効率よく捕集するために、外気の進入を遮断する対策が極限まで追求されている。このため、熱効率が向上し、燃料使用量が大幅に削減されている。即ち、地球温暖化防止の観点からは、CO₂ 排出原単位が大幅に減少している。銅熔錬には、鋳石中に含まれる硫黄の発熱を利用できるという大きな特徴がある。自溶炉法、連続製銅法とも、硫黄の発熱量が燃料や電力による熱量よりも格段に大きく、熔錬工場に投入される全熱量の 70~80%に達している。

一方、反射炉法(wet charge 方式)では、炉からの排ガスを排煙脱硫装置を設置して石膏として回収し、亜硫酸ガスによる公害防止対策を施すとともに、排ガスから蒸気として熱を回収して発電したり、工場で使用することによって熱効率を向上させている。また、反射炉法はどのようなものも処理できるという長所を活かし、銅や非鉄金属を含む可燃性廃棄物を処理することにより、最近問題が顕在化している廃棄物最終処分場の延命を図り、非鉄金属を回収するとともに、熱源として利用されている。この他、反射炉に装入する前工程として流動ばい焼炉を設け、硫黄分の一部を酸化・除去して高濃度の亜硫酸ガスを製造し、硫酸として回収する方法(dry charge 方式)も実用化されてきた。

したがって、本報告書では、新しい熔錬炉の導入による資源生産性及びファクターを求め、また、各製錬方式毎の資源生産性及びファクターを求めることにした。

(4) 仮定した階層・境界

銅製錬に使用されるエネルギーの約 75% (硫黄の発熱量を加えると約 90%) は、熔錬工程で使用される。このため、銅製錬では熔錬工程の省エネルギーに取り組んできており、本工程の資源生産性を評価した。また、熔錬方式の更新もあり、更新によるファクターも評価した。

(5) 計算に用いたデータ

資源生産性の算出には、(社)日本鋳業協会でまとめている「製錬操業成績」を使用した。各種燃料の炭素換算は「熱管理指定工場」の報告に用いる換算値を使用した。反射炉で処理している廃タイヤ、シュレッダーダストについては社内分析値を使用した。

表 2.2.8.1 及び図 2.2.8.2 にアノード銅生産量を、表 2.2.8.2 及び図 2.2.8.3 に廃棄物、電力を含めた熔錬工程での炭素排出量を示す。

表 2.2.8.1 アノード銅生産量

[単位：t/月]

年度	RF-W	RF-D	MI	FS-1	FS-2
1985	13,563	8,246	4,998	12,981	18,576
1986	13,994	6,721	5,838	14,300	19,804
1987	15,513	6,672	5,961	13,832	21,830
1988	16,253	6,089	7,832	15,607	21,926
1989	16,014	7,421	7,625	16,572	24,723
1990	15,465	9,247	7,550	17,000	25,373
1991	16,490	8,428	13,320	18,443	27,209
1992	18,120		16,717	19,396	27,826
1993	18,398		17,805	19,092	28,055
1994	17,367		18,319	18,299	23,939
1995	19,091		18,393	18,458	27,346
1996	19,423		16,881	19,591	29,043
1997	22,064		17,761	20,792	30,682
1998	20,511		18,470	20,767	31,259
1999	22,489		18,205	20,585	37,103

RF-W 反射炉方式(Wet Charge)
 RF-D 反射炉方式(Dry Charge)
 MI 連続製銅炉方式
 FS-1 自溶炉方式
 FS-2 自溶炉方式

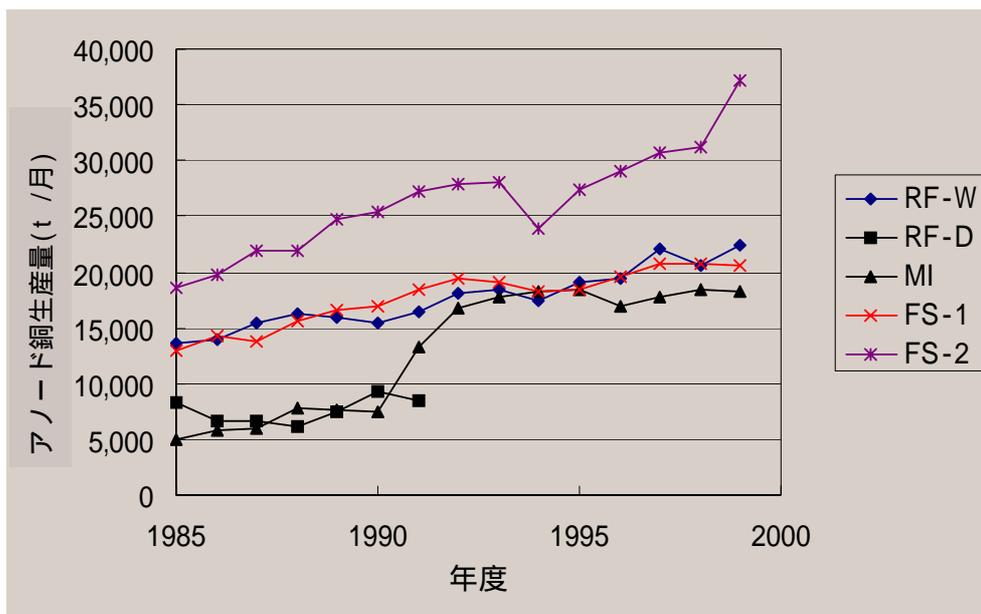


図 2.2.8.2 アノード銅生産量の推移

表 2.2.8.2 炭素排出量

[単位：t/月]

年度	RF-W	RF-D	MI	FS-1	FS-2
1985	9,590	4,944	1,793	4,420	5,569
1986	10,282	4,502	1,945	4,922	5,785
1987	10,084	4,786	1,773	4,638	6,764
1988	10,127	4,432	1,904	4,745	7,029
1989	10,602	5,223	2,336	4,611	7,961
1990	10,472	4,560	2,366	4,880	7,852
1991	10,304	4,781	6,584	5,080	8,311
1992	11,042		5,711	4,883	8,319
1993	10,571		6,870	5,034	8,247
1994	11,200		6,203	4,995	6,903
1995	11,347		6,396	4,909	9,178
1996	11,961		6,108	5,072	6,616
1997	11,680		6,041	5,161	6,296
1998	12,522		6,189	5,679	6,437
1999	12,836		5,993	5,518	6,993

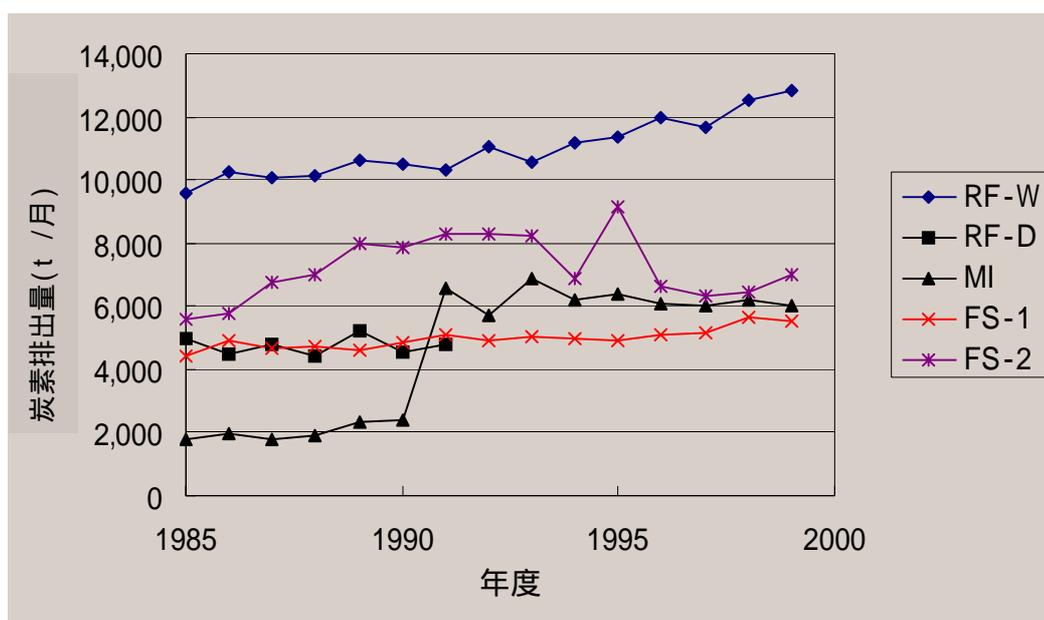


図 2.2.8.3 炭素排出量の推移

(6) 計算結果

表 2.2.8.3 及び図 2.2.8.4 に各銅熔錬方式の資源生産性(アノード銅生産量/炭素排出量)の推移を示す。

反射炉方式では、1985年の値は wet charge、dry charge 方式とも 1.5 程度であるのに対し、自溶炉、連続製銅炉方式では 3.0 程度になっている。製錬方式による資源生産性のファクターは 2.0 ということになる。

次に各溶錬方式毎に資源生産性の推移をみる。

Wet Charge 方式の反射炉(RF-W)の資源生産性は、1994年に排煙脱硫設備の増強に伴い、電力消費量が大幅に増加した部分を吸収し、1985年の1.4から1999年には1.75へと改善している。この間のファクターは1.25となる。

連続製銅方式(MI)は、1991年5月大型炉に更新し、これに伴い、Dry Charge 方式の反射炉(RF-D)を停止した。炉の立上げのため、1991年の資源生産性は大幅に低下している。この改造により、酸素工場の製造能力が不足したため、増強を行なったが、PSA(Pressure Swing Absorption : 圧力変動の吸着)方式の酸素工場の生産能力を無理に上げたため、酸素製造電力原単位が大きくなってしまった。2000年に深冷分離方式の酸素工場に更新したため、電力原単位が約20%程度低下しており、今後の生産性の向上が期待される。

自溶炉法式(FS-1)の資源生産性は、アノード銅生産量の伸びに伴い順調に向上している。1985年に2.9であったものが1999年には3.7へと改善している。この間のファクターは1.28となる。

自溶炉法式(FS-2)の資源生産性は、1985年の3.4からアノード銅生産量が増加したにもかかわらず1994年の3.5までほとんど変化なかったが、1995年にそれまで使用していた2基の自溶炉を、酸素を使用して排ガス発生量を減少させ、1基へと集約した。このため、資源生産性が大幅に改善された。1999年には5.3となっている。この間のファクターは1.51となる。

表 2.2.8.3 熔錬方式の資源生産性

年度	RF-W	RF-D	MI	FS-1	FS-2
1985	1.414	1.668	2.788	2.937	3.336
1986	1.361	1.493	3.002	2.906	3.423
1987	1.538	1.394	3.363	2.982	3.227
1988	1.605	1.374	4.114	3.289	3.119
1989	1.510	1.421	3.264	3.594	3.105
1990	1.477	2.028	3.191	3.484	3.231
1991	1.600	1.763	2.023	3.631	3.274
1992	1.641		2.927	3.972	3.345
1993	1.740		2.592	3.793	3.402
1994	1.551		2.953	3.664	3.468
1995	1.682		2.876	3.760	2.979
1996	1.624		2.764	3.863	4.390
1997	1.889		2.940	4.029	4.873
1998	1.638		2.984	3.657	4.856
1999	1.752		3.038	3.730	5.306

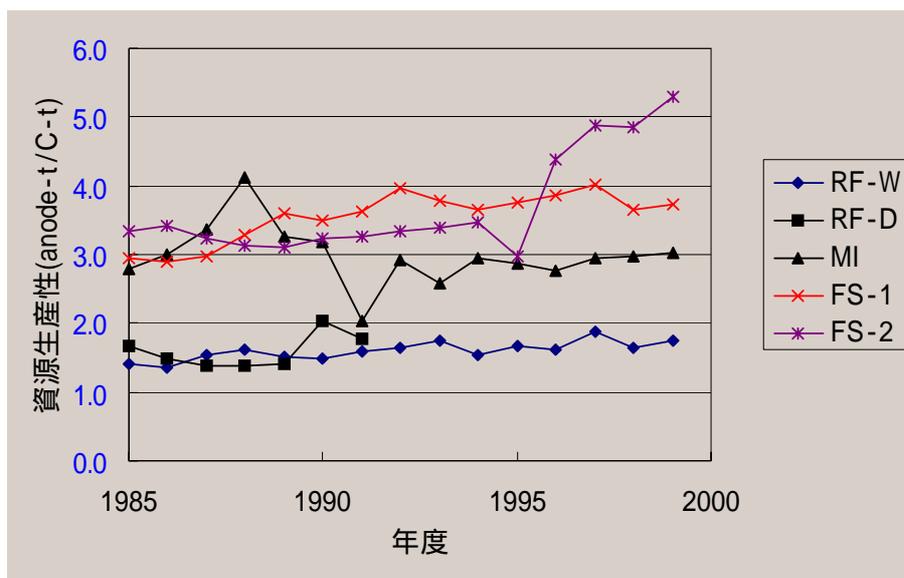


図 2.2.8.4 資源生産性の推移

(7) 技術的課題

銅熔錬の資源生産性が向上した背景には、亜硫酸ガスによる公害問題があった。亜硫酸ガスの放出量を削減するために新しい熔錬炉が開発・実用化されたのである。亜硫酸ガスの漏煙を防止するために外気との遮断が図られ、熱損失率が大幅に削減された。現在、酸素ガス利用による排ガスが持ち去る顕熱の削減対策が全ての製錬所で追求されている。製錬所の酸素使用量が増加すると、従来銅製錬所で酸素製造に用いられてきた小規模製造に適した PSA 方式では対応できなくなってくる。既に連続製銅炉では大規模製造に適した深冷法による酸素プラントの導入に踏み切り、酸素製造の電力原単位を約 20%近く削減している。また、自溶炉法、連続製銅法ともに炉の生産能力を完全には把握できておらず、現状の熔錬炉で、どこまで生産量を増加させることができるかが資源生産性向上の鍵となる。

自溶炉は、商業規模の炉を運転してから約 50 年経っており、生産能力をほぼつかんでいるが、連続製銅炉は商業規模の炉を運転してから約 20 年、大型炉化して約 10 年しか経っておらず、まだ生産能力の余裕をみており、生産能力を完全にはつかみきれていない。最初の商業炉は月産粗銅（アノード銅）4,000T で設計されていたが、大型炉に建て替える直前には、月当たり 8,000T 近くの生産量を記録しており、資源生産性も 4 を越えていた。大型炉を導入した後、資源生産性は 2 近くまで低下したが、炉の適正な操業条件を掴むにつれてこの値が上昇してきている。大型炉の設計能力は月産粗銅 18,000T であるが、各所に安全率をみている。銅熔錬の場合、鉍石の発熱量が大きく、同じ炉の生産量が増加すると、放散熱量等は大きく変わらないため燃料使用量はむしろ減少する傾向にある。連続製銅炉の生産能力を早期に把握する必要がある。

一方、反射炉法では、どのような原料でも処理できるという特徴を活かし、可燃物を含む廃棄物を処理し、熱回収及び非鉄金属回収に活路を見出している。近年、廃棄物最終処

分場の増設が困難になってきており、重金属の回収、無害化以外に最終処分場の延命という観点からも、反射炉には、重金属を含む廃棄物処理への期待が高まっている。

(8) 政策的課題

廃棄物処理行政とリサイクル事業との整合

銅の熔錬工程では、重油等の燃料を使用している。各工場等から発生する廃油は代替燃料として使用可能である。ところが、廃棄物の県境を越える移動を禁止している自治体が多い。社内で発生する廃油でさえ県境を越えることができない。高い処理費を払って熱回収を実施していない廃棄物焼却炉で処理されている。廃棄物行政が二酸化炭素放出量を増大させている。

(9) 指標変化に及ぼした技術

新しい銅熔錬方式(自溶炉法、連続製銅炉法)の導入が資源生産性の向上に大きく寄与している。現在はこれに加えて、酸素の利用による工程改善が検討されている。

(10) 指標変化に及ぼした社会的要因

1970年代前半に顕在化した公害問題(SO_xによる大気汚染)のためSO_x排出規制が強化された。排ガス拡散理論に基づくK値規制の強化、SO_x排出量の総量規制の導入等により、排煙脱硫装置の導入にとどまらず、熔錬方式の変更を含めた工程改善が必要となった。

(11) 指標変化が及ぼした技術的波及効果

新しい銅熔錬方式が海外に技術輸出され、現地の資源生産性の向上、亜硫酸ガスによる公害防止に寄与している。

(12) 指標変化が及ぼした社会的影響

特になし。

(13) 指標変化が現実に熱物縮をもたらしたか。

図 2.2.8.5 に熔錬工程に投入された熱量の推移を、図 2.2.8.6 に原単位の推移を示す。

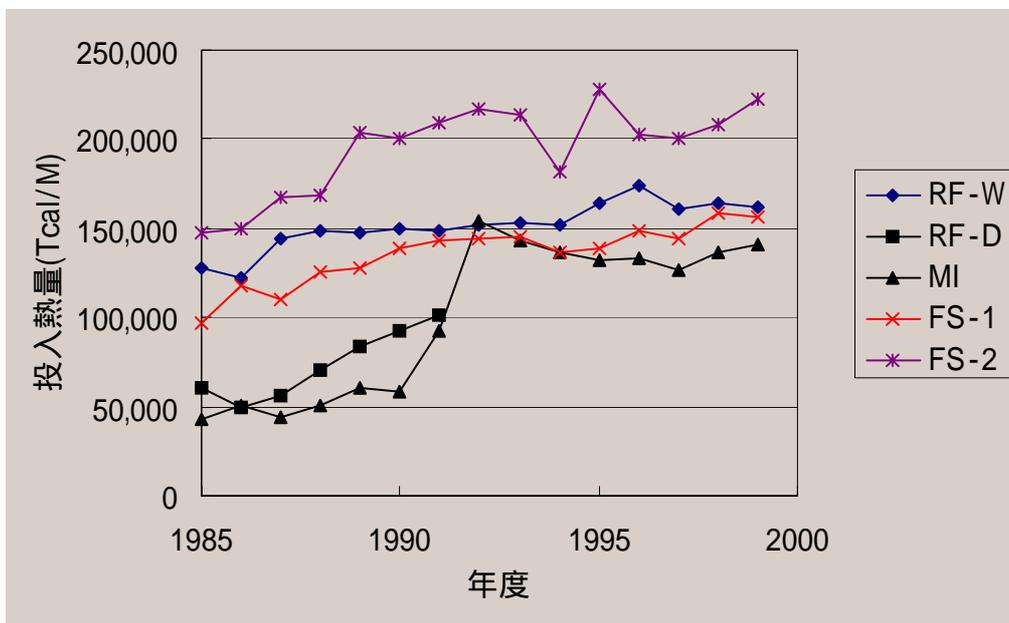


図 2.2.8.5 投入熱量の推移

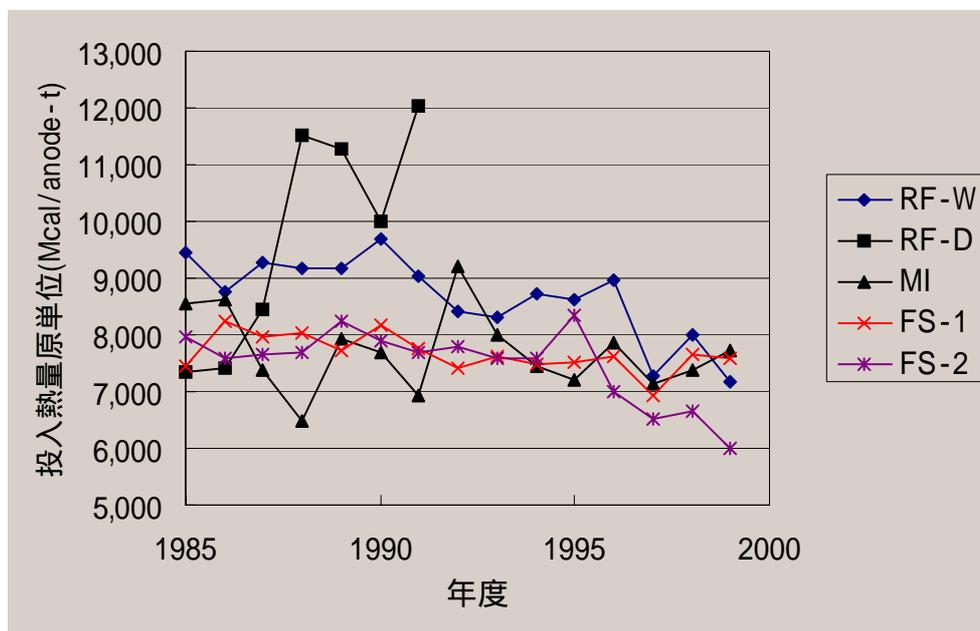


図 2.2.8.6 投入熱量原単位の推移

図 2.2.8.6 に示す通り、熱量原単位は低下したが、アノード銅生産量が増加したため、年間エネルギー消費量は増加している。新しい銅熔錬方法の導入が一段落した 1992 年以降では、アノード銅生産量が 20%増加したにもかかわらず、投入熱量は 2%しか増加していない。

(14) 指標計算方法論上の課題

1) 廃棄物処理の考え方

現在、銅熔錬方式は2つの方向に特化したものが存在している。1つは新しい銅熔錬方式に見られるように、銅鉱石処理に適した熔錬方式を志向した自溶炉と連続製銅炉であり、もう1つは、どのようなものでも溶解できることから、可燃物や銅を含んだ廃棄物処理を拡大してきた反射炉である。

今回の指標計算方法では、廃棄物処理を志向した反射炉方式は非常に評価結果が低くなっている。例えば、シュレッダーダストを反射炉で処理した場合は、シュレッダーダスト中に含まれるPVC等の樹脂類の発熱を利用でき、また、含有する銅も回収できる。反射炉では、燃焼雰囲気中に高濃度で存在するSO₂ガスがダイオキシン類生成の抑制物質として働きダイオキシン類の生成は無視できる。反射炉で処理しているもの以外は、埋立処理されているが、全国的に埋立処分場が逼迫してきていることから、焼却処分の動きがある。ところが、これを焼却処理した場合、有機物とPVC分解で生成するHClガス等との反応でダイオキシン類が生成する可能性が大きく、生成を防止するためには生成する廃ガスを200℃近くまで急速冷却する必要がある、熱回収は不可能と考えられる。

また、廃タイヤについても油化に必要なエネルギーを考えると、反射炉で燃焼させた方が熱効率は大きいと考えられる。

経済産業省管轄の「熱管理指定工場」のエネルギー使用量集計は、廃棄物を含んでいない。例えば、石油精製で発生する残滓（廃棄物）である石油コークス中の炭素は、石油製品中に、精製時に必要な炭素量として計上されている。これは、製品中には廃棄物中に含まれる炭素量を計上しているため、炭素排出量の二重計上を防ぐためである。こちらの考え方の方が合理的ではないだろうか。

2) SO_x対策

銅熔錬工程の資源生産性はSO_x排出量の削減対策を講じることにより向上した。各熔錬方式とも熔錬工程から外部に放出するSO_x量は大幅に削減された。しかし、作業環境では、連続精銅炉が熔体を固定式樋で移動させる構造のためSO_x吸引措置がなされたのに対し、レードルで銅鍍を運搬する他の製錬方式は、レードルから発生するガスの有効な対策がなされず、作業環境の改善が進んでいるとはいえない。また、溶融炉、転炉間の建屋の密閉化が進んでおり、外部への漏れがないようにしているが万全ではない。

建屋からのガス漏れを含めたSO_x排出量の評価をどう考えて指標に反映させたらよいか検討する必要がある。

2.2.9 TV 会議

(1) 情報通信サービスの資源生産性について (TV 会議の選定理由)

IT 社会の進展に伴って情報通信に必要とされるエネルギー消費は増加する傾向にあるが、一方で、IT の活用によって産業構造やライフスタイルが変化し、これによるエネルギー消費量の削減効果もかなり大きいと思われる。米国のシンクタンク CECS(Center for Energy and Climate Solution) が 1999 年に報告した「インターネットと地球温暖化」と称するレポートの中で、IT 活用によるエネルギー削減効果の大きな分野の一つとして、テレワーク・遠隔会議・遠隔管理を挙げている。IT 活用によるエネルギー削減効果は、人や物の移動(物流)を情報通信(情流)に置き換えることによって実現されるもので、情報通信産業が資源生産性向上に果たす効果を分析するためには、これらを定量的に評価することが重要である。

(2) 評価指標の定義と算出条件

ここでは TV 会議に着目して、環境効率と資源生産性の算出を試みた。具体的には、TV 会議の環境効率と資源生産性を、それぞれ、CO₂ 発生量とエネルギー使用量から算出した。環境効率および資源生産性の指標は以下で定義される。ここで、P は会議がもたらす付加価値またはプロダクトで、単位は任意である。

$$\text{環境効率} = P / \text{CO}_2 \text{ 発生量 (kg)}$$

$$\text{資源生産性} = P / \text{エネルギー使用量 (GJ)}$$

ファクターの計算に当たっては、同じ会議を電車やバス等の交通機関を利用し、人の移動を伴う出張会議で行った場合の CO₂ 発生量、エネルギー使用量を算定し、テレビ会議との比較を行った。このとき、会議が生み出す付加価値やプロダクトは、TV 会議と出張会議とでは同じであると仮定する。

実データに基づいた解析を行うため、TV 会議の使用状況は本社及び研究所のログデータを参照した。TV 会議及び出張会議についての算定条件を以下に示す。

(TV 会議についての算定条件)

- ・企業の TV 会議の予約データを利用した。(期間：1999 年 1 月～12 月、会議数：1657 (本社 97 研究所 1560))
- ・TV 会議による会議時間を 2 時間と仮定して、使用機器の消費電力量を求め、CO₂ 発生量およびエネルギー消費量を算出した。(インベントリ解析)
- ・通信回線の消費電力量は全体の使用量から按分し、CO₂ 発生量及びエネルギー消費量を算出した。
- ・使用機器の製造、廃棄にかかわる CO₂ 発生量、エネルギー使用量は除外した。

(出張会議についての算定条件)

- ・ 会議には、TV 会議に参加した各地点から 2 名が出席するものと仮定した。
- ・ 移動手段は移動時間が最も短い手段とした。
- ・ 交通機関別（バス、電車、飛行機）の単位料金当たりの CO₂ 発生量、エネルギー使用量を用いて、交通費から CO₂ 発生量、エネルギー使用量を算出した。

(3) TV 会議のファクター（評価指標の計算結果）

図 2.2.9.1 に 2 地点で会議をした場合の会議口ケ間の距離と一人当たりの CO₂ 発生量の関係を示した。TV 会議では CO₂ 発生量はほとんど変化しないのに比べて、出張会議では距離に比例して CO₂ 発生量が増加している。100km を超えると CO₂ 発生量の点で、TV 会議が優位である。図 2.2.9.2 に全会議における CO₂ 発生量の出張会議と TV 会議の比較を示した。全会議を見ると TV 会議を利用することにより、約 85% の CO₂ 発生量の削減効果がみられる。図 2.2.9.3 には 2 地点で会議をした場合の会議口ケ間の距離と一人当たりのエネルギー使用量との関係、図 2.2.9.4 には全会議におけるエネルギー使用量の出張会議と TV 会議の比較を示している。傾向は CO₂ 発生量とほぼ同じで、全体では約 74% のエネルギー使用量の削減となる。

TV 会議による 1 会議あたりの CO₂ 発生量、エネルギー使用量及びファクターを表 2.2.9.1 にまとめた。ファクターとしては、環境効率では 6.8 であり、資源生産性からは 3.9 が得られた。人や物の移動を情報通信に置き換えることの資源生産性向上に及ぼす効果は非常に大きなものであることが分かる。

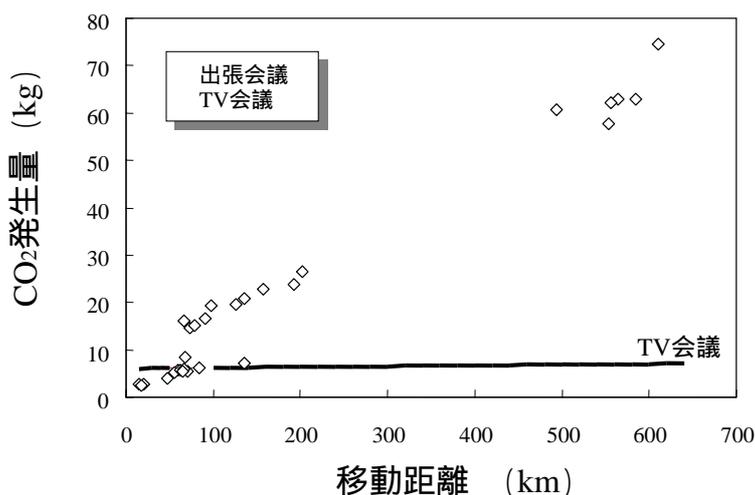


図 2.2.9.1 会議口ケ間の距離と一人当たりの CO₂ 発生量の関係（口ケ 2 地点の場合）

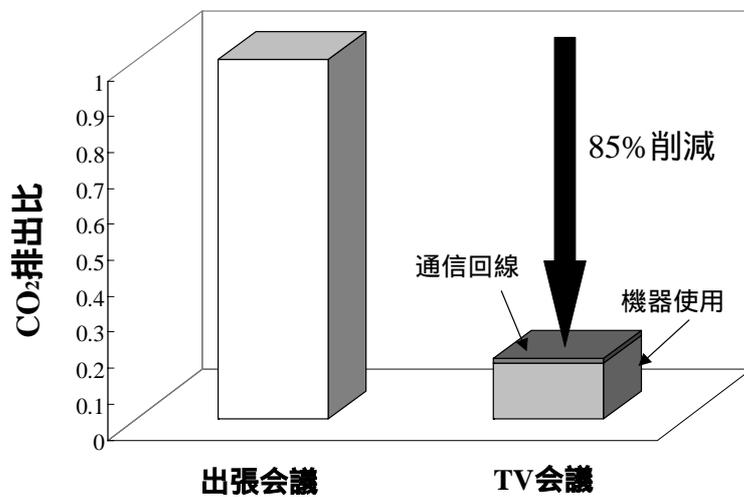


図 2.2.9.2 TV 会議による CO₂ 発生量削減効果

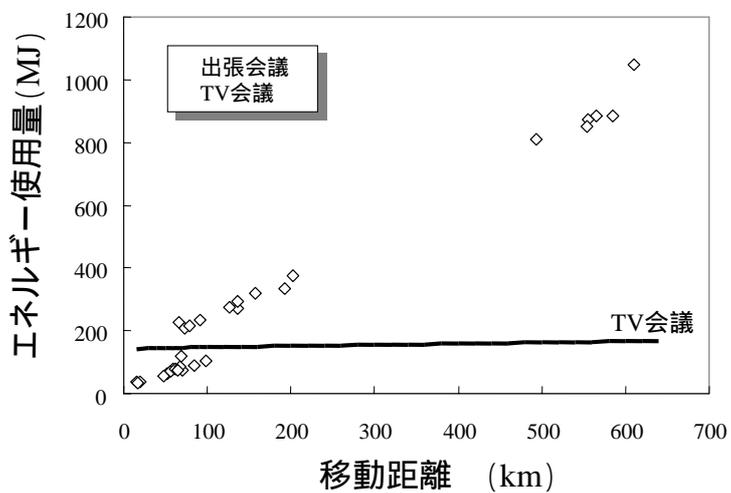


図 2.2.9.3 会議ロケ間の距離と一人当たりのエネルギー使用量の関係(ロケ2地点の場合)

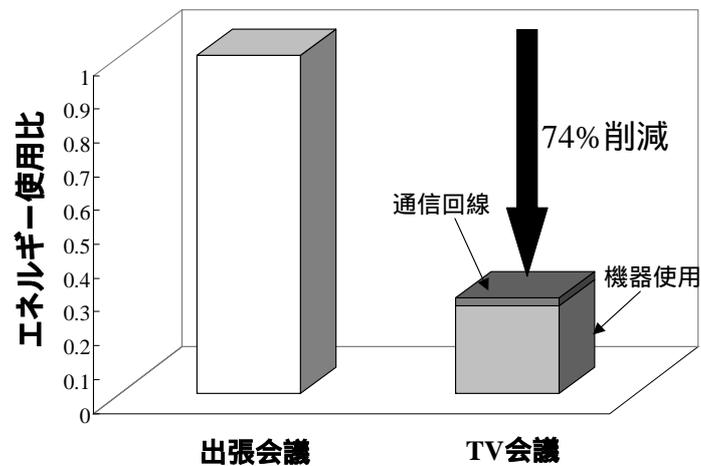


図 2.2.9.4 TV 会議によるエネルギー使用量削減効果

表 2.2.9.1 1 会議当たりの TV 会議、出張会議による CO2 発生量、
エネルギー使用量及びファクターの計算結果

会議の形態	CO ₂ 発生量 (環境効率)	エネルギー使用量 (資源生産性)	備考
TV会議	8.5kg (P/8.5)	200MJ (P/200)	1999年
出張会議	58kg(P/58)	770MJ (P/770)	1999年
ファクター	6.8	3.9	TV会議/出張会議

(注1) 1 会議あたりの平均の環境負荷。ただし、使用段階のみ。

(注2) P は会議がもたらすプロダクト

(4) 指標変化に 6 影響を及ぼした技術的、社会的要因

今回の計算結果は TV 会議の例であるが、人や物の移動（物流）を情報通信（情流）に置き換えることによって、大きな指標変化がもたらされる。物流から情流への変化を可能とし、テレワーク・遠隔会議・遠隔管理を実現した主な技術を以下に示す。

- ・画像などを電気信号に変換するとともに表示する入出力端末技術
- ・音、画像、データの蓄積、加工を可能とするデジタル信号処理技術
- ・動画像など多くの情報を遅延なく伝送する大容量通信技術

さらに、技術的な要因に加え社会的な要因も大きいと思われる。テレワーク・遠隔会議・遠隔管理を実現するために、テレワークに対する国家的研究プロジェクト、高速大容量通信ネットワークの利用に関する社会実験プロジェクトや研究助成が数多く行われた。また、全国の全ての小中学校にインターネットを普及するための助成なども効果を上げている。

(5) 指標変化が及ぼした技術的波及効果、社会的影響

テレワーク・遠隔会議・遠隔管理を実現するために、使用する書類や写真がデジタルデータとして用意されるなどあらゆるメディアのデジタル化が進んだ。「ピーニングデジタル」（MIT メディアラボ ネグロポンティ著）の中で述べているようにアトム（物）からビット（デジタル情報）への変化はテレワーク・遠隔会議・遠隔管理を実現する原動力であるが、逆に、IT の普及がメディアのデジタル化を一層進展させた。また、使用する入出力端末技術、ヒューマンインターフェイス技術の進展ももたらした。新たに資源生産性向上、環境保護の観点からもアトムからビットへの変化を加速することになる。

このほか、テレワーク・遠隔会議・遠隔管理の普及とともに、場所にこだわらないで仕事をするワークスタイルである SOHO(Small Office Home Office)が可能となり、家庭で仕事することなども可能となり、雇用機会の増加をもたらしつつある。

(6) 将来の可能性と課題

TV 会議を具体例として、IT 活用による移動の削減によって、エネルギー削減や資源節約が可能であることを定量的に示した。みなし効果の算出であって、まだ、具体的な熱物縮は現れていない（と思われる）が、IT の普及が進むことにより熱物縮も期待できる。

IT を活用したワークスタイルを更に普及させるためには、人と人との意思疎通に必要な雰囲気や感性が伝達できるような、更に、情報弱者が不公平（デジタルデバイド）を被らないような新しいコミュニケーション技術の開発が大きな技術的課題である。さらに、政策的課題として、ワークスタイルに変化をもたらす新しい雇用形態の創造や採用を促す優遇税制など制度的な変革も必要となる。

一方で、TV 会議などの新しい情報通信サービスの分野を、熱物縮への影響をも含めて、さらに詳しく評価するためには、TV 会議の利用実態など、普及度合の定量的調査が必須となる。また、TV 会議の利便さがもたらす会議の増加など、リバウンド効果のモデル化と定量化の研究も必要である。

2.3 ファクターに関する一考察

前節では実際のデータを用い、ファクターの算出を試みた。ファクターの概念は全ての製品・企業・産業に適用できることが理想的である。しかし実態的には概念の適用が容易でないものもある。ファクターの適用可能性の観点から導入すべき意義があるかどうか、意義があるとすればファクターで何ができるのかを検討することがまず求められる。本節では、工作機械と都市のケースを取り上げ、ファクター概念の適用の可能性を理論的に検討していくこととする。

2.3.1 工作機械

工作機械は、工業製品の製造工程において、ものを作る機械として重要な役割を果たしている。ものを創り出すという「生産財」としての特異性を有しており、自動車や家電製品のような消費財とは明らかに異なった性格を有している。そのため、工作機械のライフサイクルアセスメント（LCA）や環境負荷割合の指標作成に関しては、統計量として把握することが難しい点がある。

21世紀の生産技術として産業基盤を支える工作機械の環境性について、日本工作機械工業会では1995年より「工作機械環境安全対策調査研究」を、1998年からは「環境対応型工作機械調査研究」として調査研究を実施しており、報告書としてまとめられている^[1]。

これらの成果は、工作機械や生産設備のLCAあるいは環境負荷割合の定量的な評価に焦点が置かれたものであり、資源生産性・環境効率・ファクターという観点からの考察はあまり行われていない。そこで、本報告書では工業会の成果をもとに資源生産性、環境効率について検討を試みている。

(1) 資源生産性、環境効率に関する算出指標

工作機械の利用形態、稼働率は製造対象物で異なり、部品加工レベルでの統計量を求めることは困難である。工作機械の資源生産性・環境効率は以下の算式で計算される。

$$\text{資源生産性} : E_p = P_j / R_j$$

$$\text{環境効率} : E_e = P_j / L_j$$

工場の生産体制や生産量に存するため、機械加工工程の一部に限定し、考慮すべき項目を列挙する形で考えると、資源生産性、環境効率は以下のような指標を用いて算出できる。

1) インプット項目 R_i としては、

投入資源：素材、原料、治工具、切削油剤、資本金、生産設備（工場など建造物も含む）など

エネルギー：電力、空気源、油圧源、空調など作業環境維持にかかわるものなど

マンパワー：作業者（直接、間接、段取りなどの準備作業）、操作者（オペレータ、

プログラマ、工作機械の運転/管理) など

2) アウトプット項目 P_i としては、

性能：高速化、高精度化、高剛性化、高能率化

機能：高機能化、多機能化 短能化、複合化

サービス：生産性、経済性、コストパフォーマンス性能、機能など

シナリオ：ストーリー、システムバウンドダリ、二次的・波及的效果（影響）など

3) 環境負荷項目 L_i としては

製品：ストック、半製品、仕掛かり状態など（製品も不可としてみなす必要性あり）

廃棄物：不良品、切りくず、廃油、騒音、粉塵、ミスト、エミッションなど

非効率性：歩留まり、不良率、精度、性能、無駄、予備(効率性の逆の意味で重要) など

上記の要素を利用して、工作機械の資源生産性 E_p 及び環境効率 E_e についてそれぞれ前述の算式を用いて試算を試みている。

ただし、各要素に関する定量的なデータが十分整理されていないので、具体的な資源生産性、環境効率を求めることには無理がある。そこで、アウトプット項目 P_i については利用できるデータを基本とし、インプット項目 R_i については概算、予測をもとに試算する。

(2) 試算結果

工作機械技術は産業革命以降急速な進歩を遂げており、常に最先端技術と呼応して性能向上が達成されている。例えば、図 2.3.1.1 に示すように、工作機械の主軸は高速化の方向で技術開発が積極的に行われ、20 年前と比べると D_{mn} 値で 4 倍から 5 倍に向上している^[2]。これは回転体の直径と回転数の積の値であり、同じ大きさの主軸を比較すれば、回転数が約 5 倍になったことになる。このときの R_i や L_i の数値が正確にわかれば、ファクタとして値が求められるのであるが、 D_{mn} 値の向上にあわせ、図中に示すように潤滑方法も変遷しており、この潤滑方法の違いによる R_i 、 L_i の相違についてはあまり議論されていないのが実情である。

ここでは、 R_i 、 L_i が同じとして考えると、高速化という指標に関してはファクターが 5 といえる。機械加工においては、高速化が加工時間の短縮につながり、周辺機器の省エネルギーや生産性の増大に結びつくことになるので、高速化の効果は R_i 、 L_i の減少にも影響すると予測でき、5 以上のファクターになると考えられる。

工作機械の加工精度も常に進歩しているが、加工精度には、寸法精度、形状精度、表面粗度（あかさ）表面性状などがあり、対象加工物により重要度が異なるだけでなく、工作機械の機種、機能によっても異なる。現在では超精密加工機では表面あさがサブミクロン（ $0.1 \mu\text{m}$ ）が当然の時代であるが、30 年前には超精密加工機と比較できる工作機械はみられない状況であった。工作機械の移動精度に関しても同様に進歩しており、 0.01m 精度が NC 制御技術の発展により、 $0.1 \mu\text{m}$ の指令ができるようになっている。加工精度として

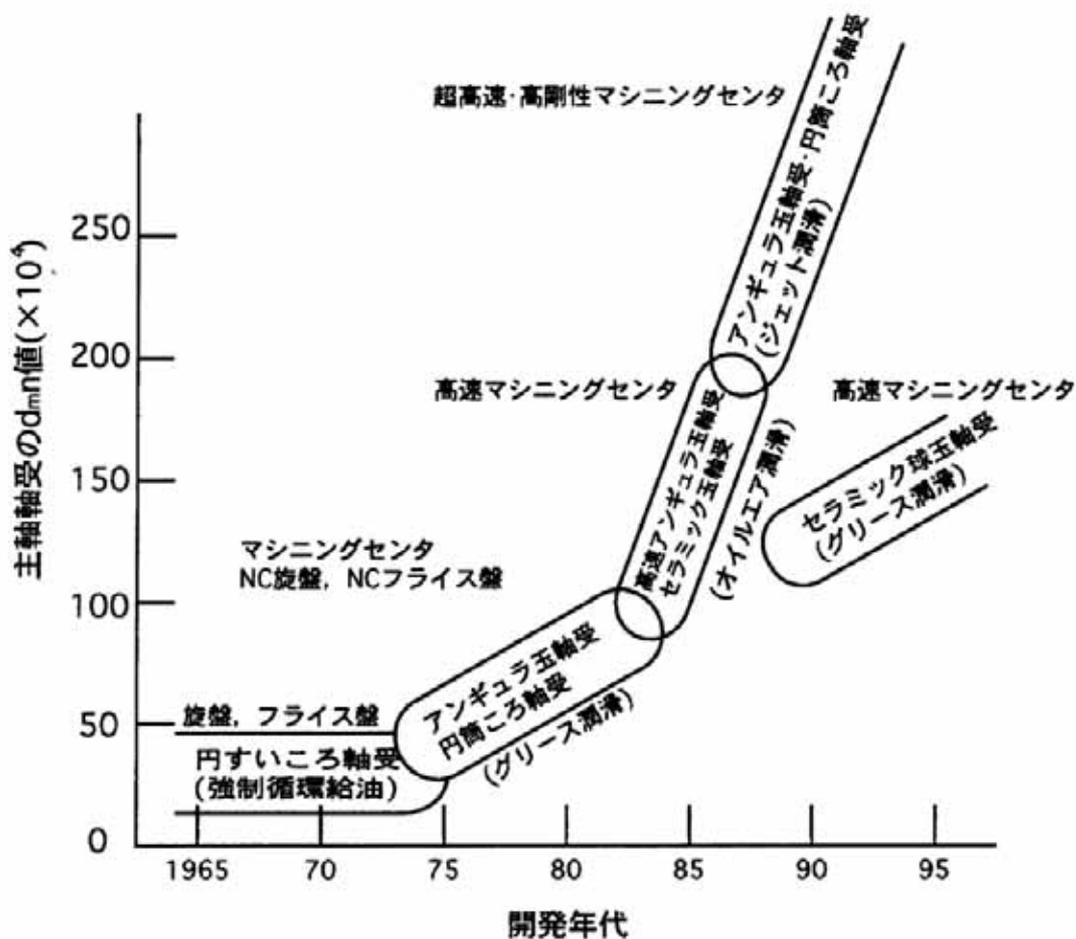


図 2.3.1.1 主軸の高速化〔2〕

概略的に捉えるならば、100 倍のファクターとみなせるが、工作機械の構造も仕様も加工対象物に応じて変化しているため、単純にファクターに置き換えることは難しい。

主軸回転数の高速化に関連して、テーブル送り速度も約 10 倍程度向上している。マシニングセンタなどでは多数の工具を自動で交換できるので融通性が増大している。この工具を交換するためにかかる時間も生産性の観点から短縮する努力が払われ、工具交換時間の短縮は約 1/5 程度になっている。

以上のように、工作機械はものづくりの基盤を支える生産設備であり、生産性向上の観点から性能、機能、サービスの向上が図られてきた。早く、安く、良いものを作ることが使命であったため、これまでは生産性優先、効率優先の開発が主であり、環境を配慮した評価はこれからの課題といえる。

(3) 指標、ファクターに関連した技術的課題

前述したように、主軸の高速化を支える技術として、主軸の潤滑方法が重要になる。図

2.3.1.1 に示すように、オイルエア潤滑、ジェット潤滑、オイルミスト潤滑などがブレークスルー技術として開発され、軸受の球もセラミック製が普及している。軽くて寿命の長い転動体の開発と潤滑技術が融合して高速化が達成された。次のブレークスルー技術を予測することは難しいが、ビルトインモータとの一体化による高速主軸が必要と考えられる。

送り系の高速化に関しては、リニアモータの適用が検討されており、既に実用化され始めている。また、切削油剤や作動油などの油の環境負荷が大きいことから、脱オイルの方向に進んでいる。切削加工や研削加工で大量に使われていた切削油剤や研削油剤を、全く使わないドライ加工、極力使用量を減らしたセミドライ加工や MQL 加工(最小量潤滑油供給)に関する研究が盛んになり、実際の生産ラインでの実用化が試されている。このドライ加工やセミドライ加工を実現するためには、工具のコーティング技術が必要不可欠になっている。

ここで、ドライ加工やセミドライ加工の資源生産性について検討してみる。油剤の効果を潤滑性、冷却性、切屑除去性の 3 点と考え、これらの効果を何らかの方法で得られるならば、ドライ加工、セミドライ加工は油剤という環境負荷の高い物質を極端に削減できるので、資源生産性、環境効率の向上につながる。ところが、機械加工の工程は単純に一つだけで済むことはなく、図 2.3.1.2 に示すように、生産ラインとして複数の工程から構成されることが一般的である。それぞれの工程は工程間で相互に関連があり、ドライ化を達成するために前後の工程の環境効率が増大する可能性もある。例えば、ライン A の工程 3 をドライ加工にしたために、ライン B の工程 3 の負荷が減少したとしても、ライン C の工程 2 で使用した油剤の洗浄が必要になるとか、あるいはドライ加工後の切屑除去が工程 4 で必要になるなど、加工精度の低下や、後工程の仕上げ加工の負荷が悪化する場合も生じる。工程の連鎖の中で評価しなければいけない点が重要な課題である。

Line A	E_{a1}	E_{a2}	E_{a3}	E_{a4}	E_{a5}	E_{ta}
Line B	E_{b1}	E_{b2}	E_{b3}	E_{b4}	E_{b5}	E_{tb}
Line C	E_{c1}	E_{c2}	E_{c3}	E_{c4}	E_{c5}	E_{tc}

図 2.3.1.2 工程連鎖における環境負荷

以上のように、資源生産性、環境効率の観点からの評価とそれに対応した技術課題の抽出が重視され始め、単純に生産性を上げるのではなく、エミッションを少なく物を作る技術の確立が望まれている。エミッションフリーマニュファクチャリングが 21 世紀の最優先課題との位置付けで、生産技術全般の見直しが検討されている^{〔3〕}。

(4) 指標、ファクターに関連した政策課題

大量生産・大量消費の時代を支えていた工作機械と生産技術も、景気後退時の新しい製造技術として、痛みを伴う改革が不可欠で、環境・省エネへの観点から脱皮を行う好機でもある。工作機械は設備投資として考えられているが、今後の資源生産性、環境効率の指標と関連して工作機械が具備すべき要素についての発展方向を展望すると、図 2.3.1.3 に示すような 3 点が挙げられる。

工作機械の完全循環化：21 世紀では環境優先が製造工場にも求められ、工作機械をフルにリユース、リサイクルすることが必然となる。

工作機械の短納期化：工業製品の多様化、ライフサイクルの短命化は、生産設備の頻繁な変更を余儀なくし、工作機械の納期短縮が必要不可欠になる。

工作機械の価格破壊：不況時に真っ先に削減される設備投資であるが、一般消費財と同様に生産財である工作機械の価格破壊が予想される。

以上の予測において、上記の 3 項目は相互に密接に関連している。工作機械の価格破壊は生産設備の導入経費の低減に結びつき、納期の短縮は設備変更に対する需要を喚起する可能性がある。設備導入時に古い工作機械を回収し、リユース化、リサイクル化を図れば、循環型システムの構築が実現でき、かつ工作機械の価格削減にも効果がある。



図 2.3.1.3 工作機械に関連する政策的課題

これまで、工作機械の需要サイクルは 10 年以上の寿命であるとみなされてきたため、更新には 10 年単位で検討されていたが、工作機械の更新需要が 2 年ごとと短くなれば、循環サイクルが短縮し、受注量、生産量が 5 倍に増えたことに相当する。生産量の増大とリサイクル化（再利用）は製造コストの削減に結びつき、価格破壊にも充分対応可能と考えられる。

図 2.3.1.3 に示すように、上記の 3 項目が達成されるためには、政策的な支援が必要不可欠である。生産基点を労働力の安い海外に移転する考え方は、環境問題を輸出しているのと同じであり、資源生産性、環境効率の向上の観点から新世紀では通用しない。生産設備は環境対応型でリサイクルしなければならないことを義務付ける、という法的な規制、及び環境対応型工作機械の導入に対する優遇税制が、技術課題と合わせて重要である。

〔参考文献〕

- 【1】 斎藤義夫他：先端技術動向調査報告書、日本工作機械工業会(2001.3)
- 【2】 中村晋也：転がり軸受を用いた工作機械主軸の高速化の現状と課題、N S K Technical Journal、663 (1997) 18-23
- 【3】 稲崎一郎他：エミッションフリーマニュファクチャリングの調査研究報告書、製造科学技術センター、(2000.3)

2.3.2 建築、都市

本節では、建築やこれの集合体としての都市の資源生産性・環境効率への適用、及びそれらの変化量としてのファクター概念の適用の可能性について検討する。

(1) 建築、都市のハードウェアに関する評価可能対象単位と評価の可能性

先ず、建築物は非常に多様な機能・性能を持つものであり、かつ極めて長期間（数十年から数百年）にわたり利用される（べき）ものであるということから、一般の消費財あるいは耐久消費財の評価の方法と異なった評価の背景があることを考慮する必要がある。

ここでは、建築物の評価に係わる留意点について概括する。

1) 部位・部品、機能空間、システム・レベルでの評価

建築物の構成は部位・部品というレベル、例えば扉、障子、照明器具、冷暖房機といった部品、天井、床、壁、天井、屋根、基礎といった部位があり、更にスケールを上げると個々の部屋や特定の機能を有する（「執務のための」といった）空間、あるいは電力設備、給水設備、空調設備、変電設備といったシステムからなる。そこで環境効率等の概念は、こうした部位・部品、空間、システムを 1 つの考察対象として適用することができるとも考えられる。こうした考え方は、建築物が社会において十分なストックとして確保された段階では、その変更が上記のような建築物の一部を対象として行われることになり（部分改修等の行為として）、いかなる変更の可能性があるかの判断、又は代替案間での優位性を比較検討する機会にあって通常とられるものである。

これら上記の評価単位は建築物の一部であり、建築物の中で特定の機能・性能を担っているものだけに、評価対象としての機能・性能を明確に定義しうるものが多い。

しかしながら、現実にはそうした部分については上位のシステム（単位空間や建築物総体）との関係で性能が影響されるケースも少なくない。例えば、窓という部位にあっては、その部位の性能である光の透過性、空気の遮断性、断熱性、遮音性などについて、窓単体の性能が明確に定義でき、かつ定量的に性能が把握できる。したがってそれらの機能・性能を効用群として分子に置き、分母にその部位の生産に要した資源種別、資源量、生産に要したエネルギー、これらから発生する環境負荷を対応させて、資源生産性・環境効率を算出することは可能である。ところがその窓部位が建築物の一部に組み込まれると、その窓の固有の機能・性能がそのままその建築物の機能・性能として発現するかというと、そうとは限らない。すなわち、その窓部位が建築物の中に設けられる位置、その建築物が運用される方法（例えば時間帯、冷暖房や照明の運転方法等）によって活かされたり、考えられていない状況の下に置かれて死んでしまったりする可能性は少なくない。

こうしたことから、部位・部品、機能空間、システム・レベルでの資源生産性・環境効率の評価は、あり得る設置条件を想定しながら行わないと、現実にそぐわないことになる危険性が高い。

2) 建築レベルでの評価

建築物単体の評価の問題点は、建築物の性能を表現することの難しさにある。建築物の性能は、大きくは居住性能（あるいは建築物の建設目的を達成するための機能・性能＝合目的性）と、社会的資産としての性能（立地特性との整合性、地域文化の継承性、社会資産としての持続性等）からなる。前者については建築物単体で独立して規定される特性であり比較的物理的に定義可能であるが、後者については社会的状況・時代によって変化していくものであり容易に定義できない、あるいは定義が変化していく可能性があるものである。

こうしたことを念頭に置きながら、資源生産性・環境効率概念の適用を考えると、そのための最も単純な総合的性能は空間の単位＝床面積がもっとも適当と考えられる。ただし、この場合も建築物の用途によって空間が果たしている機能・性能が異なるので、特定目的の空間の床面積と機能・性能を結合した分子を定義する必要もある。すなわち住宅用途の床面積と事務用途の床面積では、その背景となる建築物の機能・性能が異なるので、同一床面積性として扱えば、資源生産性・環境効率の分子が異なったパフォーマンスを持つもの同士の比較となり、比較の意味が失われる危険性が生じる。こうした問題点の克服には、異なった用途の建築物間の床面積を、その背景となる機能・性能を元にした補正値を乗ずることにより修正する、という方法が考えられるが、今後の研究課題である。当面の方法としては、建築物の用途を同じくした場合のみ、床面積を総合性能指標として分子とするものである。

建築物の資源生産性・環境効率による評価の難しさのもう 1 つの問題点として、耐用年数が挙げられる。現実の建築物の耐用年数は、基本的には社会的な要因によって決まる場合が多く、物理的な劣化等により耐用年数が決まる事例は、戦後半世紀の建築物に限って言うならば少ない。確かにこれまでの我が国の建築物は比較的短寿命で、全面的に建て替えられる傾向があり、その意味では定量的に耐用年数は測定し易いものであったが、建築物が本来の耐用年数、すなわち百年以上数百年を目指す場合、その間の維持保全については様々なシナリオが描けるので、公平・公正な評価のためには、維持保全シナリオの標準化が必要となる可能性がある。特に最近では建築物の主要構成部位（柱・床・屋根・外壁＝スケルトンと呼ぶことがある）とその二次構成部位（内部壁、仕上げ床・天井、開口・建具等、設備＝インフィルと呼ぶこともある）とを明確に分けて構成し、主要構成部位は数百年のスパンで利用し、二次構成部位はそれぞれに対するニーズの変化に応じて改修・交換していくという方法が採られ始めており、この場合は建築物の耐用年数をどう定義するかという問題に、建築物の用途自体が変る要素も加味されることになる。こうした場合、単純に床面積を分子として扱うだけでは、資源生産性・環境効率を正確に測ることはならない。

以上 2 点を勘案すると、建築物レベルの資源生産性・環境効率の評価は、主要構造部位と二次構成部位とに分離し、かつ二次構成部位については当該建築用途による想定利用期

間（減価償却期間とは異なる）を耐用年数として、資源消費量、環境負荷を算出する方向が考えられる。

3) 街区、都市レベルでの評価

特定の範囲の街区（再開発街区など）、あるいは1つの都市を評価単位として、資源生産性・環境効率を導くことについては、建築物と同様に検討すべき課題がある。

まずこの場合、分子としては街区や都市の効用は何かが問われる。基本的には街区や都市は生活の場であるとか、生産の場である。生活や生産のための人間の活動が円滑に展開できる場を提供するのが街区や都市の効用である。勿論この生活や生産の形態は様々であり、街区や都市毎にその在り様は異なり一様ではない。しかし、基本となるのは場＝空間である。如何なる空間がどれだけあるか、が基本となる。したがって、住戸数、用途別建築物床面積、街区種別面積、道路・公園・緑地・運動場等公共面積などによって効用の代用特性が示されよう。したがってこれらの空間が同じ程度確保されることが、等価の効用を有すると解釈する方法である。

また、このような物理的な面積＝空間の大きさを効用指標とする以外に、居住可能人口、収容可能昼間人口などを当てる方法も考えられる。ただこの場合、それらの人口にとって等価の効用を与える建築・都市環境を定義しなくてはならない。この他にも効用指標となるものがあると考えられるが、今後の研究を待ちたい。

ところで街区は別にして、都市の資源生産性・環境効率を考える上で評価の対象範囲から除けないのは、交通・運輸に係わる環境負荷である。都市構造によって、あるいは都市の交通・運輸システムによって、運輸部門のエネルギー消費量・環境負荷は大きく変化すると考えられるからである。したがって、都市の資源生産性・環境効率を評価する場合は、上記の空間関連の効用指標に加えて、域内の交通・運輸需要の充足状態が比較する場合の効用指標に組み込まれる必要がある。同一の交通・運輸需要を満たすことを条件とするということは、施設間の交通・運輸需要と置き換えることもできる。ただ施設の配置方法の違いは交通・運輸需要の内容を変える可能性がある。例えば、従来公共交通機関の利用で交通需要が満たされていたものが、施設間の距離が縮まれば歩行あるいは自転車での充足が可能になる可能性もあるのである。したがって、交通需要は交通手段との組み合わせで定義されるべきではなく、移動距離と移動重量・移動主体の特性などで定義されるべきであろう。

このような効用系の定義によるならば、街区、都市の場合に資源生産性・環境効率に係わる分母は、建築物や都市の社会インフラに投下される年間資源・エネルギー投下量、及び交通・運輸部門に投下される資源・エネルギー、あるいは一定期間の総資源・エネルギー投下量やこれに伴う環境負荷となる。

(2) 建築や都市に係わる企業活動の評価

(1)では建築物や都市の、物を対象とする資源生産性・環境効率について述べてきたが、

ここではこれらを生み出す企業等、組織活動の主に建設サービスに係わる資源生産性・環境効率について考察する。

1) 建設業を評価する場合

建設活動のサービスの資源生産性・環境効率を評価する場合は、建築物や都市のハードウェアの評価とは異なって、企業活動によって形成される空間の大きさのみならず、建築物を形成する部材の質と量の大きさも効用と考えることができる。すなわち、ある規模の構築物がどの程度の投下資源で形成されるかが問われることになる。この場合、建築物や土木構築物の規模と投下資源量を総合的に効用として指標化する方法として最も考え易いのは、建設費である。建設費はほぼ構築物の規模と資源投下量によって決定されるからである。これに対して資源生産性・環境効率の分母側は、建設活動に投下するエネルギーや資源（建設資材）の総量であり、これらによる環境負荷を設定することが考えられる。前者は建設資材の工場からの運搬、現場搬入、養生（保管）、揚重、加工、据付、試運転・調整などの一連の生産活動と、このための土地の掘削・埋め戻し・土砂排出、仮設施設の建設と運用・補修、建設労働者の建設現場への交通等に伴って発生する資源需要であり、後者はこれらに伴って発生する環境負荷である。これらを総合化する指標としては経費となる。建設業の経費は一般に、現場での直接経費と営業所・支店・本店の諸間接経費とがあるが、基本的には全経費合計を分母とすることが、資源生産性・環境効率の評価構造に合うものと考えられる。

したがって建設業の評価は、総建設売上額を分子として、全経費でこれを除すこと、全経費に関連する環境負荷が環境効率の分母とすることになる。

2) 不動産業を評価する場合

不動産業にも色々あるが、賃貸事業を営む不動産業の資源生産性・環境効率を評価するとすると、分子としては、総賃貸住戸数、総賃貸床面積、あるいはこれらの総合指標としての賃貸収入が上げられる。これに対して分母としては、賃貸物件を整備し維持するのに必要な年間総投下資源・エネルギー量であり、これらによる環境負荷となる。この内、年間総投下資源・エネルギー量は賃貸事業の原価として総合指標を構成することが考えられる。

3) 不動産を有する企業を評価する場合

一方企業が事業を展開する上で利用している施設を資源生産性・環境効率の対象とすると、基本的な考え方は賃貸事業と同じような構造として考えられる。ただ、この場合は分子としては製品・サービスの出荷額、売上額とする方向も考えられる。

2.4 指標変化の要因、手法上の問題点（整理の概要）

本節では前節で取上げられた各事例から導き出された一般的事項について記す。

(1) 指標の定義

（ファクター算出のための評価項目）

ファクターによる評価は様々な項目を対象とすることができる。

当調査研究として、ファクター計算式の分母側の項目として、資源生産性の場合は「エネルギー消費量（熱量もしくは質量）」、環境効率の場合は「CO₂排出量（質量）」とすることで試算を試みた。

一方、分子側の項目として、物理量（体積・量、質量その他）、経済的価値（売上高等金銭価値）等、多岐にわたるケースを算出した。各事例の報告者は入手できるデータの適用可能性を鑑み、個々に項目を選択している。分子側項目としてその他、製品パフォーマンス（性能・機能）情報を評価項目として用い、その定量的情報を抽出し、指標として用いるケースもあった。あるいは、1つの項目のみを指標として適用するのではなく、重み付けを行い、複数の項目を統合化し、企業（製品）独自の評価指標項目を策定したケースもあった。

表 2.4.1 今回用いられた評価項目例

指標名称	分母（環境負荷）	分子（パフォーマンス・サービス）
資源生産性	エネルギー消費量 資源枯渇量 ^{注1}	物理量：生産量、面積、輸送量 経済価値：GDP
環境効率	CO ₂ 排出量 環境負荷（EPS） ^{注2}	機能：製品性能（処理容量他）

注1：資源枯渇量 = 資源使用量 / 資源可採量

注2：Environment Priority Strategies

（ファクター算出のための階層・境界）

指標を扱う際、対象とする「階層」を設定する必要がある。階層には、大別すると国単位、産業単位、企業単位、製品単位とがある。関係者は使用目的に応じ、階層を設定することとなる。

例えば、企業の製造管理者は生産量を維持しつつ産業廃棄物を何%削減できるか企業全体での指標に関心がある一方で、製品開発担当者は製品の消費電力を維持しつつ性能を何%向上できるか製品単位での把握を必要とする。関係者の関心事項次第で、ファクターのターゲットとすべき階層・項目が異なる。

さらに、製品を単位とする際、製品一個体を対象とする場合と生産量など総数を対象と

する場合とがある。一個体当たりの環境負荷低減に成功しても、片や個体総数が増え、社会全体の環境負荷総量が増加してしまう場合（リバウンド現象）がある。このため、リバウンド現象のような、製品の社会に与えるインパクトの全体像を掴むため、2つのアプローチによる評価手法を組合せて用いることはファクターの向上を評価するのにより効果的であると考えられる。

ファクター算出には階層の他、「境界」も明確にする必要がある。ここでいう境界とは、指標項目のデータを収集したライフサイクルステージを意味する。製造時あるいは使用時、ライフサイクルステージ全体での集計が考えられる。

環境負荷の把握には製造時、使用時のみならず廃棄時等も含めたライフサイクル全体の評価が望ましいが、データ集計の負担軽減、正確かつ客観的な定量的情報の得やすさ等実態的な取扱面を考慮すると製造時のみのデータで評価を行うことが考えられる。その際は、製造時に限定した旨の表示を明らかにすることが求められる。

使用時の環境負荷は、使用者の主観すなわち使用方法に影響され、定量的推定値が含まれ易いことを考慮しなければならない。

指標の境界範囲の設定は、使用目的への適合性を判断し、範囲とその設定理由を明記する必要がある。

当調査研究の検討においては「階層」として産業単位、製品単位の事例が主に報告された。「境界」については、製造時、使用時あるいはライフサイクル全体での評価が行われたが、データ入手の容易さ、公正さ等を勘案し、本事例では製造時に限定したデータが多く使われた。

（ファクター算出の比較方法・評価単位）

「比較方法」も評価項目、階層・境界と同様、事例ごとに任意に設定された。産業部門・製品の属性、関心事項の違いから、それらの比較方法は事例により異なる。比較方法は概ね次の2通りに分類される。

時系列比較：同型式（同種）の製品（産業）における時系列での比較

製品（システム）間比較：あるニーズを充たすために提供される、異なる種類の製品（サービス・システム）間の比較

の例は、自動車の1995年型式と1999年型式の比較のようなケースである。これは機能（サービス・パフォーマンス）もしくは環境負荷について、改善状況の経年評価を可能にする比較方法である。年月の経過に伴い、分母側の環境負荷排出量が改善（低減）されるか、分子側のパフォーマンス・サービスが向上するかにより、資源生産性・環境効率の改善がなされる。新タイプの製品は基準となる比較対象がないので、この手法の適用はできない。

時系列比較でいう「評価単位」とはここでは評価対象期間（年数）の設定を意味する。

適切な評価を行うためには環境負荷の排出に影響を及ぼす法規制等社会制度、経済情勢及び関連技術発達の影響度を勘案し、階層・境界との関連性に配慮しながら、期間を設定する必要がある。

例えば、エネルギー使用量削減をファクターの主な指標とし、その期間中に化学物質排出規制が強化されたとする。その結果、化学物質処理のエネルギー消費が増加する場合、他での努力にもかかわらず、ファクターが悪化してしまう可能性がある。あるいは、他部門の技術開発成果が予期せぬところで功を奏し、ファクターを改善し、その数値に好影響をもたらす場合もある。産業全般（製造・食品・化学他）、セメント産業、銅産業、パソコン他電化製品、ペットボトルなど多くの事例が時系列比較による方法で評価を実施したが、セメントや銅など素材製品は製品の特性に変化が少なく、評価対象期間を長くとることが可能であった。一方、パソコンなど家電製品は製品の耐用年数、市場サイクルが短いため評価単位期間が短くなる傾向があった。

の例としては、従来型ガソリン自動車と電気自動車あるいはハイブリッド自動車の比較のようなケースが挙げられる。これは、同程度の機能を備えた異なるタイプの製品が持つ環境配慮特性について、環境負荷を比較し、その製品の優位性を評価する方法である。

と異なり、新規に開発された環境配慮型製品の従来型製品との比較に適している。塗料の比較事例がこの方法に該当する。「塗る」という機能に着目して、異なる3種類の製品、溶剤、水系塗料、粉体塗料を比較している。

の製品（システム）間比較における「評価単位」とは、評価対象の機能単位適用の範囲を定める。適用範囲として2つ考えられる。1つは製品どうしを比較する場合、もう1つは製品の代替物として同機能のサービスを製品の比較対象として用いる場合である。製品の「評価単位」をサービス・システムとして広義に捉えるのである。

の後者の比較法に当てはまるのが、通勤を現行のまま個人所有の自動車で行った場合と、カーシェアリング制度を導入する場合の比較評価である。この場合、どちらのケースも通勤のための移動というニーズを充たしながらもアプローチが全く異なる。ニーズを充たすのは個人所有の製品である必要はないとの所有権の考え方を改めることで、ファクター向上の可能性に多様性を与えるものである。このような例として、出張を伴う会議に対し、出張を不要にするTV会議システムの比較評価がなされている。この場合のニーズは会議の成果である。会議を可能にするなら出張は必ずしも必要ないのである。

ただし、あるニーズ（サービス・機能）を想定する際、容易に定量可能な部分は一定レベルにおいて合意を得られるものの、質感、嗜好、満足度など定量的に示すことは困難なため、パフォーマンス・サービスの評価に一貫性を欠く場合がある。

いずれの比較方法においても、測定対象の捉え方あるいはパフォーマンス・サービスの特性に一貫性を保持することが求められる。

(2) ファクターの算出結果

各事例のファクター算出結果は表 2.4.2 の通りである。2.2.1 での説明通り、ファクターは比率を表す。したがって 1 以下の数値は悪化したことを示す。各事例における階層や境界さらには統計データの一貫性などが異なるため事例間の差異を論ずることはできないが、旅客輸送運輸を除き、改善効果が確認できた。詳細は各事例の記述及び総括表を参照されたい。

表 2.4.2 資源生産性ファクター（時系列）算出結果例

	製造業	旅客輸送	TV	洗濯機	パソコン	冷蔵庫	セメント	銅
ファクター	2.2	0.5	13.0	6.0	8.0	6.0	2.9	1.2
評価単位	30 年	30 年	5 年	5 年	4 年	8 年	50 年	14 年

ファクターは比率を用いるが、絶対値である分子・分母を個別に表現することの有用性についてここで述べておく。

解釈の目的に応じて、比率のみならず、環境負荷（分母）とパフォーマンス・サービス指標（分子）を個別に示した方が良い場合がある。比率を使うより理解し易いためである。分子・分母の各項目を確認することは、選択された指標項目の全体への影響を把握するのに有効である。また個別項目ごとの推移を示すことでデータの一貫性も確保される。

例えばファクターが向上した場合、分母側の環境負荷削減に成功したのか、あるいは分子側のサービス（機能）向上を達成できたのか、分子・分母の寄与度が明瞭になる。

一方、比率で表した資源生産性・環境効率の指標は、分子・分母を互いに関連付け、項目間の相関関係を分かり易くするのに有益である。

指標数値が与える情報の意味を的確に把握し、ファクターを効果的に用いることが求められる。

1 例としてパソコンを取り上げる。

図 2.4.1 はデスクトップパソコン 1 台当たりのサービス・パフォーマンス（ハードウェアの CPU 能力と OS ソフトウェアのディスク使用容量）とライフサイクル全体の CO₂ 排出量を時系列で示したものである。合わせて両者を関連付ける環境効率の推移を線グラフで示した。サービス・パフォーマンスが増大するほど、あるいは環境負荷の CO₂ が減少するほど環境効率の向上に有利である。1999 年から 2001 年にかけてのファクターは、2001 年の環境効率を基準時の 1997 年の環境効率で除す（2001 年 / 1997 年）ことにより計算される。5 年間のファクターは 3.7 となることが分かる。ただし、ファクターとしては 2000 年が最も高い値であった。

パソコン事例（2.2.4）で詳細に述べられているが、ファクターの低下はパソコンの定格電力増加による CO₂ 排出量の増加によるものである。したがって、2001 年は、機能が向上

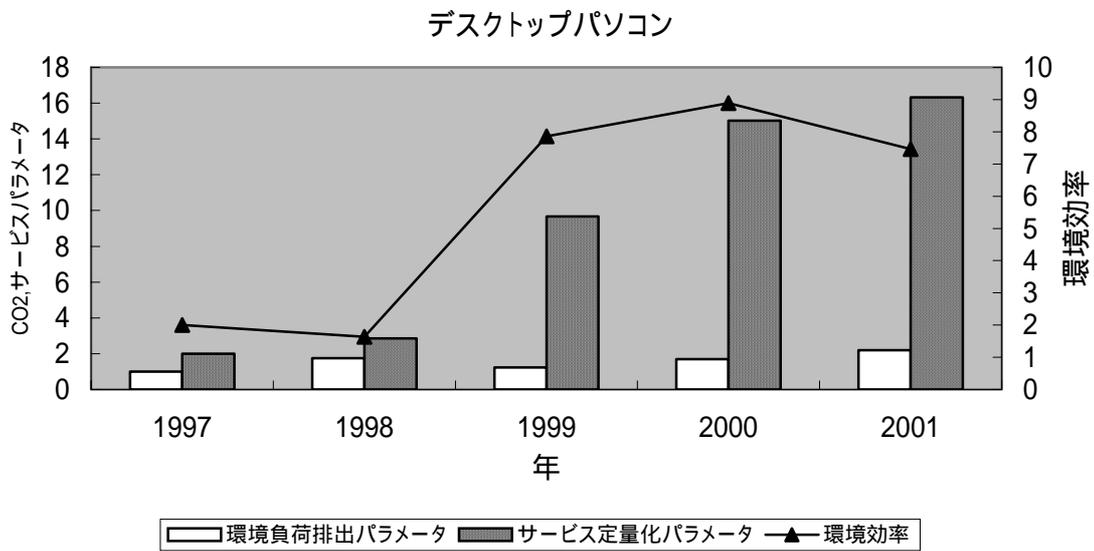


図 2.4.1 デスクトップパソコン環境効率推移

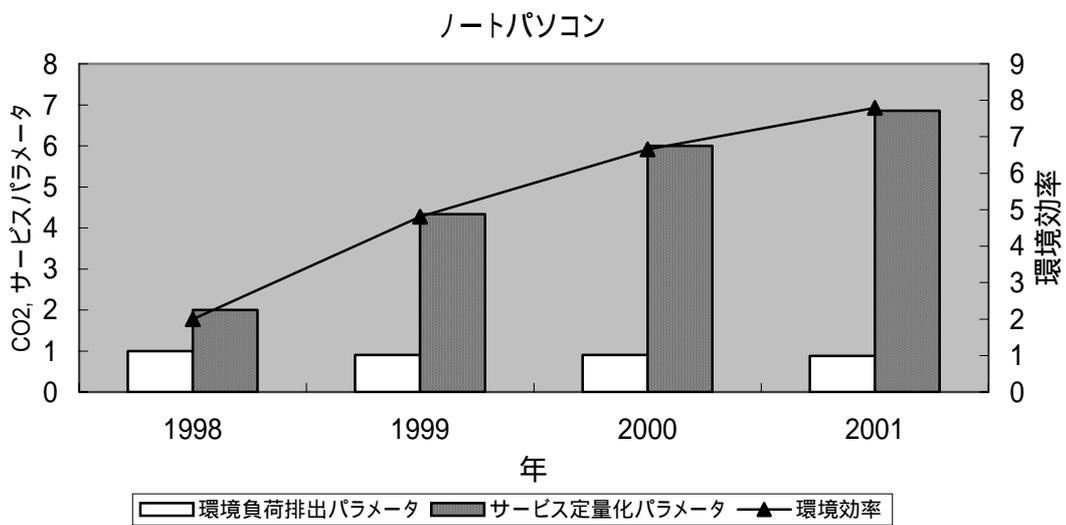


図 2.4.2 ノートブックパソコン環境効率推移

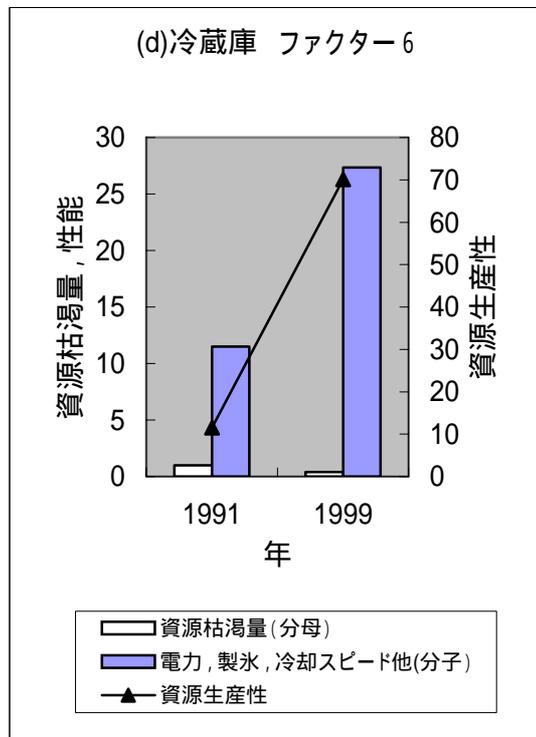
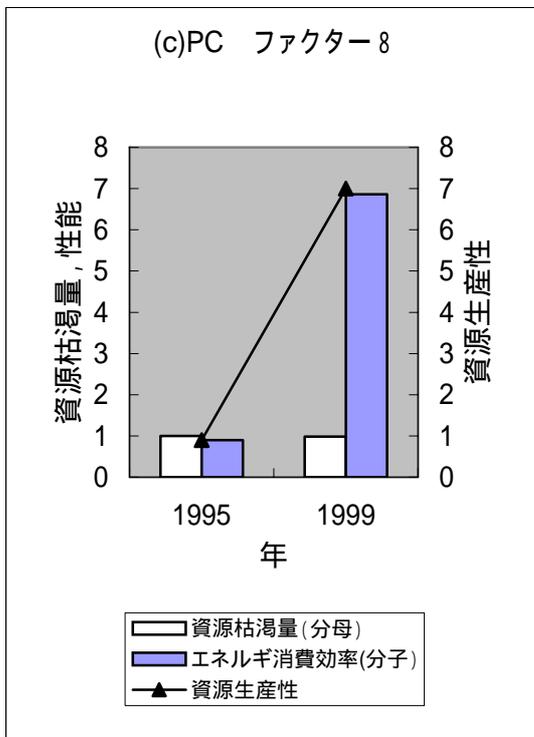
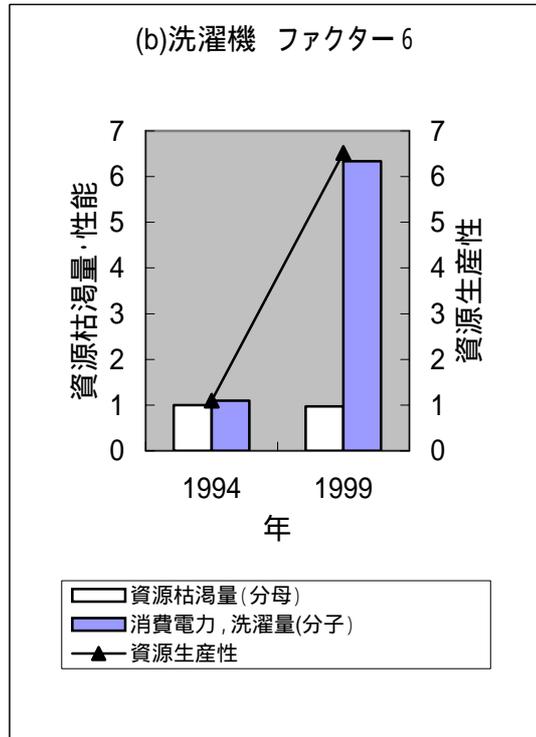
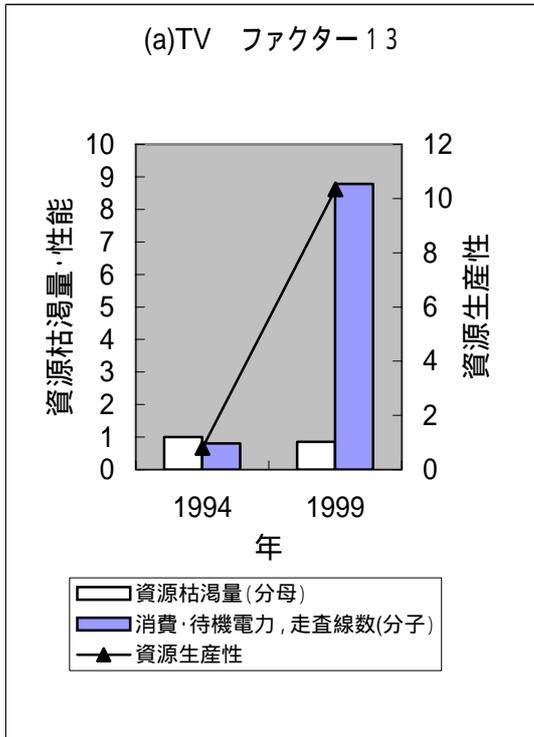


図 2.4.3 電気機器 4 種 資源生産性推移

しているものの、環境負荷の CO₂ 排出量も増大しているため、結果として環境効率は前回の 2000 年より低下している。

図 2.4.2 はノートブックパソコンの環境効率とその分子・分母項目を表している。サービス（機能）には CPU 処理能力（ハードウェア性能）とディスク使用容量（OS ソフトウェア性能）を含む。CO₂ の環境負荷（分母）がほぼ一定なのに対し、一貫してサービス・パフォーマンス（分子）が向上し続けているため、環境効率は右肩上がりでも向上し続けている。

図 2.4.3 の(a)から(d)は、H 社の 4 種類の製品について資源生産性を評価したものである。A 社は環境負荷として分母に「資源枯渇量」を採用した。ここでいう「資源枯渇量」とは資源使用量を資源可採量で除した値を示す。一方、分子のサービス・パフォーマンスには、製品毎に消費者の関心の高い機能を取り上げ、それらを係数化し統合化を行っている。

グラフから、(a)TV、(b)洗濯機、(c)パソコンは性能（分子）の拡張に成功していることが分かる。資源枯渇量レベルを僅かに低減させてはいるものの、性能の大幅アップが主となってファクターに好結果をもたらしている。一方、(d)冷蔵庫は、資源枯渇量レベルを低減させつつ、同時に機能を向上させることによりファクター6 という結果を得ている。

これまで製品単体のケースをみてきた。次に産業全体もしくは製品の総量ベースでの事例としてセメント産業のケースを紹介する。

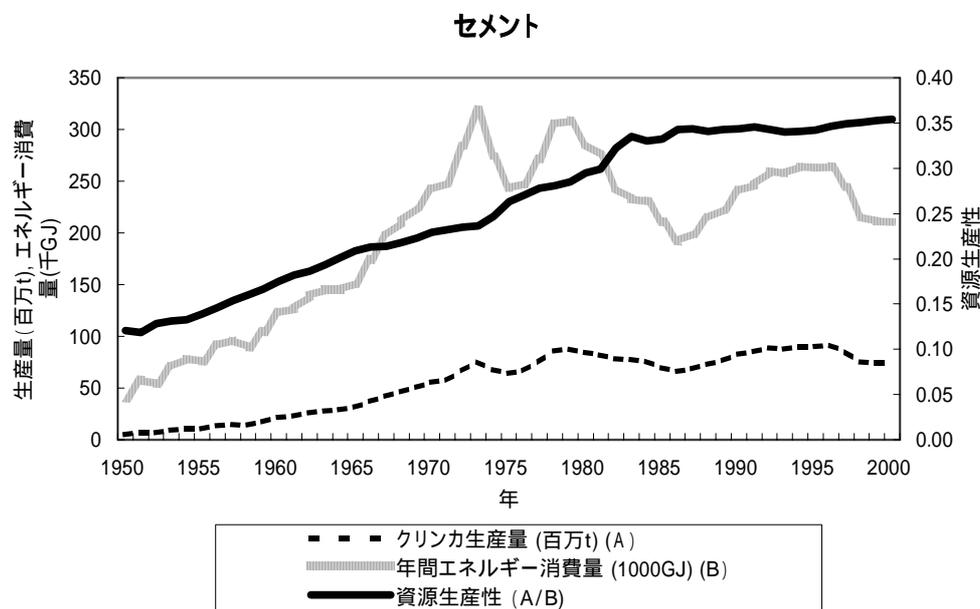


図 2.4.4 ポルトランドセメント資源生産性推移

図2.4.4に日本国内のクリンカ生産量とエネルギー使用量の関係を資源生産性の計算値と併せて示す。資源生産性すなわちエネルギー使用量とクリンカの生産量の相対的關係（比率）は増加の一途をたどっている。クリンカ生産量はこの50年間増加し続ける一方で、エネルギー使用量は1970年代後半から減少し始めていることが分かる。

資源生産性の推移と分子・分母各項目の絶対値の評価から次のことが確認できる。1950年代から1970年代前半にかけて資源生産性向上に寄与したのは、分子側つまり焼成炉様式の変更による生産効率性アップと生産量増大によるところが大きい。一方1980年代からは生産量の伸び率が鈍化したものの、各種省エネルギー技術の大幅な改善による資源消費削減、つまり分母側のエネルギー資源投入量低減に努めたことが、資源生産性を引き続き向上させる要因となっていることが分かる。

時系列評価の例を2つみてきた。製品（システム）間比較の例も同様に示す（図2.4.5）。製品（システム）間比較の場合はあるニーズを充たすために提供される、異なる種類の製品（サービス・システム）間の比較であるため、あらかじめ分子側は同一の値であることが条件である。

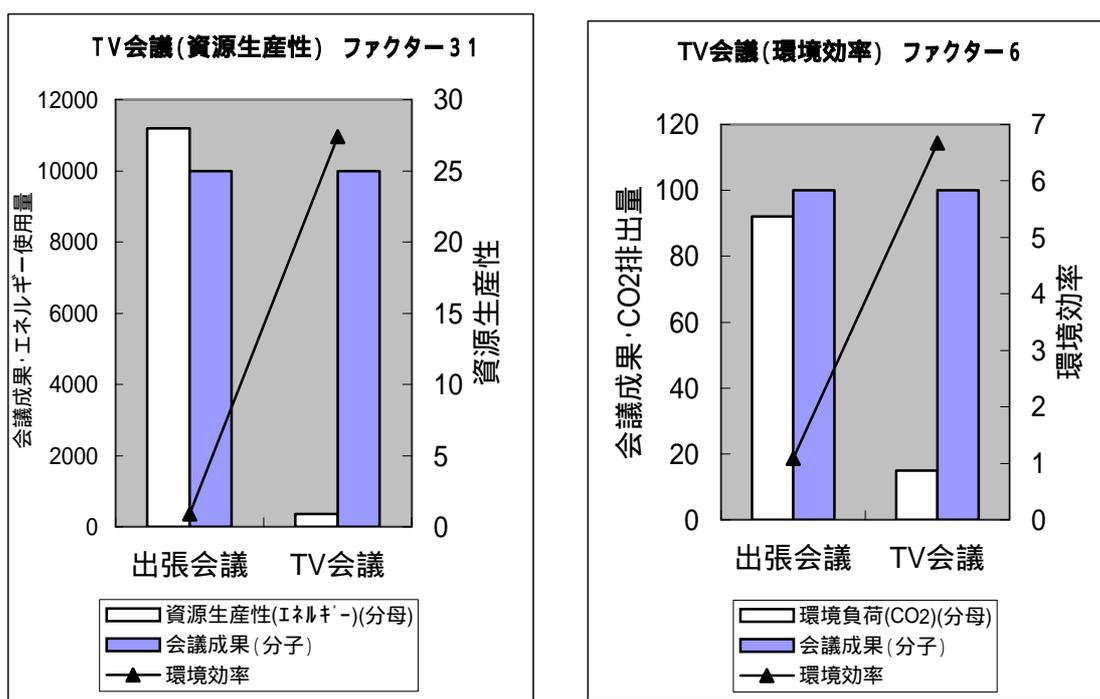


図 2.4.5 製品（サービス）間比較：資源生産性及び環境効率

この例で示されているTV会議のように、新たな技術・発想から創出されたサービスのファクターを算出することは、ビジネス/ライフスタイルにおけるサービス提供方法変更の可能性を探る上で今後より重要度を増してくるであろう。TV 会議が完全に出張会議の代替として機

能するかについて若干検討の余地はあるものの、絶対値において資源消費量・環境負荷を削減させる将来性に注目すべきである。

(3) 指標の変化の原因

1) 指標の変化の原因（技術的側面）

次に、指標変化に影響を及ぼした要因全般について考察する。

消費する天然資源もしくは環境負荷を低減しつつ、同等もしくはより多くの製品・サービスのアウトプットを出すことが資源生産性・環境効率の向上には必須である。この概念に基づく企業の持続可能な発展のための行動を取りまとめた WBCSD は環境経済効率指標（eco-efficiency indicators）を提唱した。その報告書によれば、次の 7 要素を環境経済効率（eco-efficiency）改善の評価項目としている。^[1]

製品及びサービスの物質集約度（使用材料）を低減させる

製品及びサービスのエネルギー集約度を低減させる（省エネルギー）

有害物質の拡散を低減させる

リサイクル率を改善する

再生品の使用を最大化させる

製品の耐久性を高める

製品とサービスのサービス集約度を増加させる（性能・質を向上させる）

各事例の資源生産性・環境効率ファクター向上に寄与した要因を、上記の項目に当てはめ、整理を行った結果を表 2.4.3 に示す。

表 2.4.3 ファクター向上の要因例（技術的側面）

大項目	項目	WG1 事例	
物質集約度の削減	材料種類の低減 材料変更、 製品小型化	電化製品 (TV、パソコン、 洗濯機)	材料グレード統合 プラ ステンレス 部品の小型軽量化
エネルギー消費の削減	製造過程の燃料消費削減 (燃費向上、燃料変更、製造技術革新他)	運輸部門 セメント ペットボトル	輸送機関エンジンの燃費向上 燃料変更(石油 石炭)に伴う燃焼設備の開発(微粉炭バーナ等) 重合新技術開発によるエネルギー削減
	使用過程のエネルギー低消費化	パソコン、冷蔵庫	低消費電力稼働部品の開発
	使用過程における熱放散防止	冷蔵庫	断熱材・冷媒技術開発
有害物質の拡散削減	製造(加工)過程での有害物質の削減	塗料 銅	媒体の変更(溶剤 水・空気) 樹脂・顔料設計、添加剤技術革新 新精錬法の導入、酸素の活用
	製品に含まれる有害物質の削減	電化製品	フロン廃止
リサイクル率改善	製品使用後のリサイクル率改善	ペットボトル	
再生品使用の拡大	廃棄物利用	セメント	各種廃棄物・副産物の利用
製品寿命の長期化	材料(素材・部品)の耐久性向上		
サービス集約度の増加	高度な製造技術開発による機能向上 処理速度・容量アップ 安定性、作業性アップ 保護機能アップ	パソコン 塗料 塗料	半導体・磁気媒体・電子部品技術開発 樹脂合成技術の開発 防錆顔料の開発

上記に挙げた項目はほんの 1 例に過ぎない。全ての製品・企業・産業に共通になり得る要因、あるいは一部の産業に固有の要因など様々なケースが想定される。変化を与える要因は、産業・製品の属性だけでなく、指標に用いられるライフサイクルステージの境界設定にも依存する。

さらに、ファクター向上の契機となる技術的要因は社会的要因と相互に密接な関係を持つ。例えばセメント産業のファクター改善はキルンの型式変更・燃料の変更(石油 石炭)という技術的側面の背景に政府の資金援助・特定産業への措置があったことにも留意せねばならない。

2) 指標の変化の原因（社会的側面）

指標変化に影響を及ぼした社会的要因としては次の項目が挙げられる。各分野の特異性があるものの、各事例から出された要因を整理すると、おおよそ2つの事項に集約される。

- ・ 政府による規制的措置・経済的手段・社会制度の整備
（技術開発支援、補助金、法制度・税制度他）
- ・ 社会意識の変化
（生活形態の変化）
（環境保全意識の高まり - 啓発活動による意識面での浸透）

2番目の「社会意識の変化」は、ファクターの直接的な改善要因にはならないかもしれないが軽視できない要因である。そしてその社会意識を支えるのが、1番目に挙げた政府の様々な方策システムである。産業・企業・個人消費者の行動をファクター改善の方向に導くインセンティブとして機能する。

さらにこれら政策の背景には、外部発生要因により政府が技術開発補助に踏み切り、それを契機としてファクターが向上する場合がある。例えばオイルショックにより燃料転換せざるを得なかった状況がこの例である。表 2.4.4 にファクター変化に影響すると考えられる社会的要因を示す。

これら諸施策のファクターへの影響は検証が困難であるが、ファクター向上に寄与することを示唆するものである。

指標変化の要因を論ずるには、技術的側面・社会的側面からのアプローチのみならず、分子側・分母側のどちらの要因が相対的重要性を占めているか、どのように推移しているか、そのパターンを検証することも有効である。これにより各製品・企業・産業が有する資源生産性・環境効率向上の方向性を明らかにすることができる。あらゆる側面を評価するには制約があるので、製品の開発ステージあるいは産業の発展ステージ、製品の性質、産業固有の特徴も併せて考慮する必要があるだろう。

表 2.4.4 ファクター変化要因（社会的側面）

政策措置		
項目	内訳	事例
技術支援	研究開発補助、 規格設定	国家プロジェクト、 研究開発助成金 JIS 規格、製品基準等
経済的措置	補助金 低利融資 税優遇	生産設備への補助金付与 生産設備へ低利融資 特別償却・税免除
制度策定	排出規制施行 促進法制定	公害防止法、フロン排出規制等 省エネ法、リサイクル法他
関連業界補助 (サブライゾン介入)	関連業界への支援、 関連産業育成	下請（部品）産業保護 振興措置法等、重点産業指定
産業 / 企業間競争調整	生産能力統制 価格統制	政府指導 過剰設備廃棄、品種削減 等
外部参入の調整	輸入制限、 外国・新規産業の参入制限	
需要調整	政府調達 手続簡略化 消費者購買意欲促進	政府購入促進、グリーン購入等 申請・許認可手続簡略化 物品税優遇
社会意識の変化		
生活形態の変化	-	自発的取組（リサイクル等）
環境保全意識の高まり	-	NGO 活動、草の根レベルの活動

3) 指標の変化の解析

以下に指標向上のパターンを整理し簡略化したものを記す。(数値は仮定値)

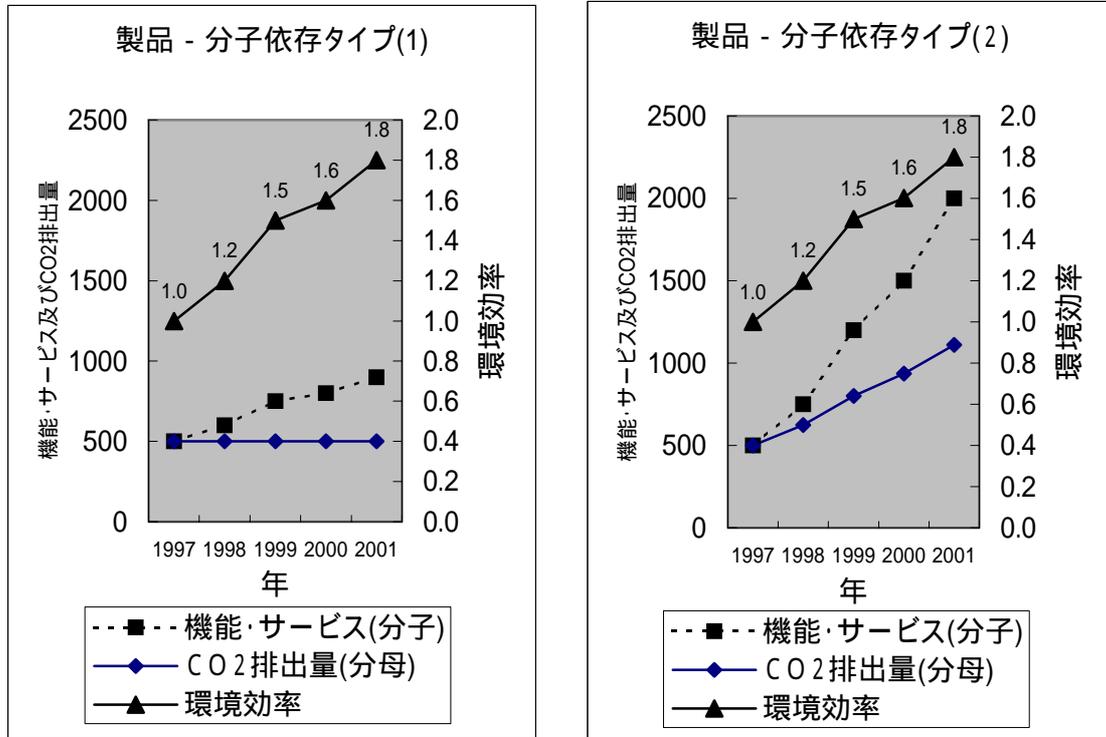


図 2.4.6 機能拡張パターン(分子寄りタイプ)

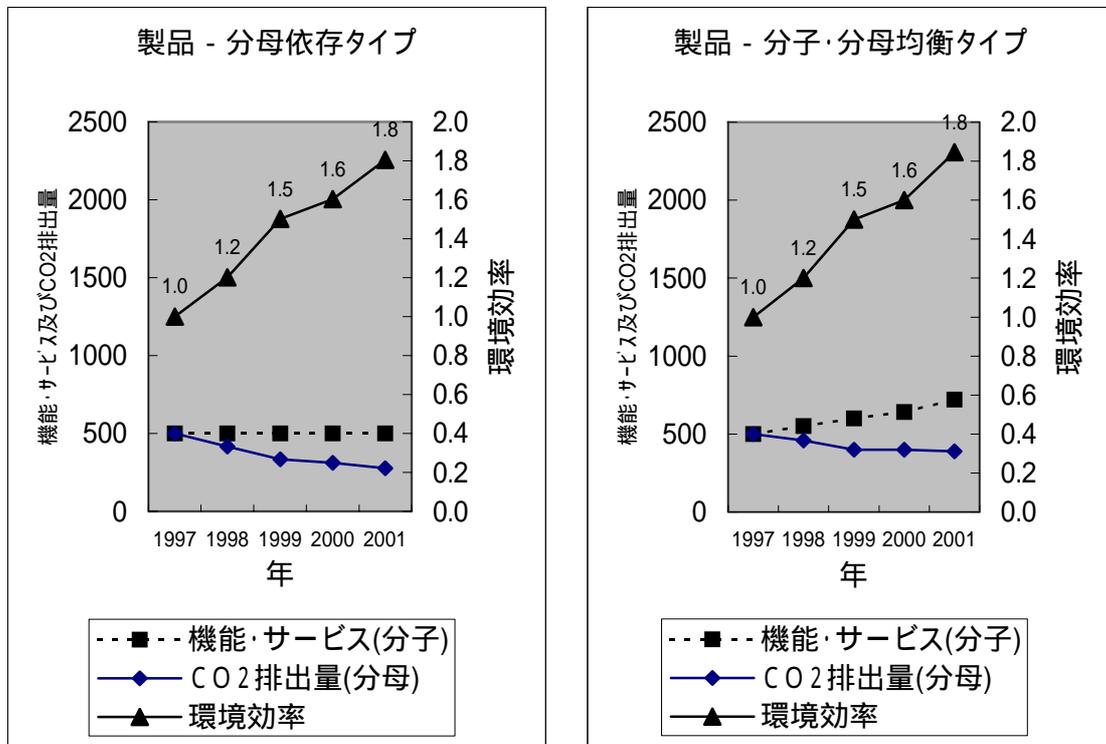


図 2.4.7 環境負荷削減パターン(分母寄りタイプ)

これらの図は、次の2種類のパターンが存在することを示す。

a) 分子寄与タイプ (図 2.4.6)

このタイプは、製品の製造時もしくは使用時の資源投入量・環境負荷を削減することなく、分子側のサービス・機能を改善・向上させることにより、ファクター向上を達成するものである。理想的にはタイプ(1)が望ましいが、製品技術の初期ステージにおいては、タイプ(2)も想定されえよう。

b) 分母寄与タイプ (図 2.4.7)

このタイプは分母側の資源投入量・環境負荷を削減することにより、ファクターを向上させるものである。右側が理想的なパターンである。これは WBCSD でも用いられる切り離し(decoupling)のパターンと同じである。

WBCSD は切り離し(decoupling) (図 2.4.8) を見極めることの必要性を説いている。^[2] 率にすると分子・分母各項目の組合せにより見せかけだけ向上し、実は環境負荷が改善されておらず、悪化を見逃すケースがあるためである。



図 2.4.8 WBCSD の提唱する decoupling

4) 指標の変化が影響を及ぼした技術的・社会的波及効果

これらの指標の変化は、結果として、サービス・生活の質を向上させたといえよう。他産業/他製品のファクターをどの程度向上させたかをみるには、産業/製品間の連鎖関係を整理し詳細にみていく必要がある。

(4) ファクター向上に向けての課題

これまで製品単位と企業・産業(最終需要総量)単位でファクターの事例をみてきた。

製品単位では、製造段階で、より少ない天然資源もしくは廃棄物で、同等もしくはより多いアウトプットを出す製造パターンを確立することが資源生産性・環境効率のファクタ

一向上につながる。

企業・産業（最終需要総量）の単位では、加えて消費パターンを考慮することが必要とされる。企業・産業サイドに立った場合、GDP や収益など、経済的価値における消費量（最終需要総量）は増大することが期待される一方で、増大する経済的価値総量に結びつく天然資源使用量は減らすことが求められる。あるいは消費者サイドに立った場合、普及率などサービスの入手可能性の増大が望まれる一方で、それに結びつく天然資源使用量は減少することが望まれる。

ゆえに課題を検討する際には、製造パターンと消費（最終需要）パターンは互いに補完しあうものであることを認識する必要がある。仮に、消費パターンが天然資源消費を加速させてしまうのであれば、製造パターンの本来の目的と拮抗してしまう。

製品単位の数値と消費総量の数値がどのように関連付けられるか、どのようなタイプの情報を含んだ指標がどのようなプロセスに影響するか、明確な構造を把握することが必要とされる。

これらの事例を受けて、上述の点を勘案しながら今後の技術的課題・政策的課題を製造パターンと消費パターンごとに整理検討してみた。

[製造パターン]

（技術的課題）

3.1 で挙げた項目の一層の改善・向上がファクター向上につながる。事例では例えば次のような課題が挙げられた。

- | | |
|-------------|---------------------------|
| ・物質集約度低減 | 例：塗着効率アップ（塗料）、小型軽量化（パソコン） |
| ・エネルギー集約度低減 | 例：低消費電力駆動部品開発（パソコン） |
| ・有害物質拡散低減 | 例：塩ビ廃止、鉛フリーはんだ（電化製品） |
| ・リサイクル率改善 | 例：多様化する廃棄物の活用技術（セメント） |
| ・サービス集約度増加 | 例：スクリーン高精細化（TV） |

（政策的課題）

事例で挙げられた課題を要約すると次の通りである。

- ・技術的課題解決のための新たな技術を促進・普及させるための研究開発補助
- ・経済的インセンティブの付与（環境に関する優遇税、取引許可緩和、外部コストの内蔵化他）

この他、新たな発想に基づく情報・サービス（新製品の開発、新ビジネス促進等）に向けての刺激策も期待されよう。また、環境問題に関する国民の正しい知識・理解の普及も

求められよう。

[消費パターン]

消費パターンを改善するには下記の課題が考えられる。

(技術的課題)

- ・製品単位で改善された各技術を最大限活用するためのインフラ整備（利用形態改善）
例：自動車利用形態改善のための都市計画整備、ペットボトル分別回収・粉碎工場の地域格差是正他
- ・消費時のエネルギー集約度削減（家庭などの最終消費ステージ）
- ・製品耐久性アップ（消費サイクルの長期化による消費総量削減）

(政策的課題)

- ・最終消費の構成を物質集約度の低い製品・サービス・社会システムに変更
例：再生品使用の促進、グリーン購入、雇用形態の変更（ワークシェアリング）
- ・製品からサービスへのシフト（脱物質化）
例：所有権の意識の変更（自動車所有 カーシェア）
- ・消費者の行動、意識について言及する情報戦略
例：実用的性能を伴えば環境対策製品を購入する国民的意識の構築、
- ・製品の買い換えを抑制し、長期使用を促進させる課税・規制方策
例：減価償却期間、検査制度、メンテナンス用品充実奨励

表 2.4.5 ファクター向上の課題

	技術的課題	政策的課題
製造パターン (製造時ファクターを向上させるための課題)	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー集約度削減 ・有害物質の拡散削減 ・物質集約度の削減 ・再生品使用の最大化 ・リサイクル率改善 ・サービス集約度の増加 	<ul style="list-style-type: none"> ・左記の技術支援（研究開発補助・プロジェクト） ・経済的措置（生産設備の補助金、税制優遇） ・企業の意識を高める環境管理対策への助成 ・制度策定（規格・排出規制等） ・新製品・新サービスへの刺激策 ・正しい知識・理解の普及（リサイクル等）
消費パターン (消費総量単位のファクターを改善するための課題)	<ul style="list-style-type: none"> ・インフラ整備 ・消費時のエネルギー集約度削減 ・製品寿命の長期化（消費量抑制） 	<ul style="list-style-type: none"> ・需要・消費構造調整（グリーン購入等） ・製品 サービスへのシフト促進 ・消費者の行動・意識を改善するための情報戦略 ・製品の長期使用を促進

(5) ファクター計算方法論上の問題

本指標を用いることにより、事例で取り上げた製品・産業は概ね資源生産性・環境効率が向上していることを確認できたが、その方法についてはまだ問題点を多く抱えている。今後検討すべき課題を記す。

A. 指標の設定

1) 対象項目の選定

指標項目としての適正さ

例えば、産業全体のパフォーマンスを評価するのに、生産量・生産額・販売量・販売額どの項目が必要な情報を適切に表現するか判断が必要である。

選定項目のカバーできる範囲

変数が欠落している影響の可能性を認識している必要がある。例えば、経済活動から得られた付加価値は家計・企業・政府のいずれかに分配されるという原則に基づいているが、生産面からみた GDP は分配後、必ずしも国内で支出がなされている訳ではない。殊に海外調達による財貨・サービスの海外からの流入、国内固定資産形成への影響が懸念される海外への生産拠点移動から引き起こされる産業空洞化の影響をどう反映させるか、生産面のみならず、分配面、支出面の GDP との兼合いをどう処理するか、GDP を適用する際の課題として残される。

意図・目的に応じた項目の抽出

各産業（製品）について異なる関心事項・重要性があるため、対象期間、比較単位など適切な指標を選択する必要がある。例えば銅精錬業においては、二酸化炭素より亜硫酸ガス対策の方が比較的関心が高い場合がある。

2) ベースラインの設定

指標計算における基準（旧製品）設定ラインをどこに置くか（時系列比較の場合）

例えば、時期により規制基準の優先順位が異なるので、CO₂ と有害化学物質などのトレードオフがファクターの数値の推移に影響する。

新規の産業（製品）の環境効率を比較する場合の代替手段の選定とみなし効果の算出方法（同機能 [サービス] の異なる製品を比較する場合）

材料の変更をどう評価するか

資源別にみた場合、一製品内の金属・プラスチック間の代替性をどう評価するか。金属がベースになるのか等。プラスチックにより新たに生じる環境負荷をどうみるか。

B. 算出法

1) 計算手法

製品・サービスの感覚的満足度の数値化

人間の主観に基づくものであり、数値化は困難である。

単一指標（統合化）

複数の評価項目を単一指標で表現することは、理解を容易にするという長所がある反面、複数の項目を集約することにより、個別の環境問題や誘因事項を不鮮明にしてしまうという短所がある。また、統合化を行う過程で重み付け係数を決めねばならないが、利害関係者間の調整に困難が予想される。

2) 評価手法

利用実態など普及度合の定量的研究

企業方針や政策のとり環境対策の効果を分析・モニターに用いる際、重要な評価ツールとなり得る。

リバウンド現象のモデルと定量化の研究

開発初期段階、普及段階などの製品のライフサイクルを考慮し、リバウンド現象をどう評価するか。

指標間の関係の詳細分析

今年度は、簡略化した指標を設定し、入手容易なデータで算出するのみであった。

更に詳細な分析、評価を行い、各種指標間の関係を実証し、指標の有効性を示すことが求められる。例えば、今回、指標の測定に用いたのは国内生産のみの数値である。これは一部の地域における資源生産性・環境効率である。日本国のセメント輸入量の動きを反映した場合、ファクターかつ環境負荷はどのように変化するかを考慮していない。海外において環境負荷は高いが安価なセメントを使用するならば、環境負荷を海外に放出しているだけであり、これらをどう評価すべきか、今後検討しなければならない。

さらに、共通の手法によるファクター評価を実際の経済活動に導入する際には、その他にも検討すべき課題がある。早くからファクターや eco-efficiency の概念を取り入れ、指標づくりに取り組んできたヨーロッパ環境庁（European Environmental Agency）は次のような課題を取上げている。^[3]

- ・産業・企業（消費者）は、ファクター指標の考えに合意するか。
- ・どの程度、持続開発可能な発展の側面（項目）を報告システムに含むべきか。
- ・産業・企業は進捗状況やベンチマーキングに関して外部の独立した評価を認めるか。
- ・産業・企業は期限付きの目標を決めて、それを受容れるのに合意するか。

最後に、取り上げたケース及びデータの制約上、上述の整理は問題の一面しか反映され

ていない。実態の産業・企業・消費者動向等を踏まえて、更にデータ収集を行った上で、調査分析することが今後望まれる。

〔引用文献〕

- [1] WBCSD (World Business Council for Sustainability Development)
measuring eco-efficiency p.7
- [2] WBCSD eco-efficiency creating more value with less impact p.23
- [3] EEA Measure and Communicate Sustainable Development: A Science and Policy
Dialog、 Measuring sustainability: the development after Cardiff、 Stockholm、 4-5
April 2001

〔参照文献〕

- [1] GRI 経済的、環境的、社会的パフォーマンスを報告する持続可能性報告のガイドライン
- [2] Standardized Eco-Efficiency Indicators-Report 1:Concept Paper、 2000 Ellipson、
Ltd.、 Switzerland
- [3] Making sustainability accountable: Eco-efficiency、 resource productivity and
innovation/Topic report No 11/1999、 European Environmental Agency
- [4] 日本の競争戦略 マイケル・E・ポーター、竹内弘高、ダイヤモンド社
- [5] The Factor X Debate: Setting Targets for Eco-Efficiency、 Journal of Industrial
Ecology、 Volume 2、 November 1、

2.5 まとめ

資源生産性・環境効率・グリーン度・ファクターは、広く共通的な視点で人間活動を把握できる一方で、その上限を規定することによって地球限界を取り込むことも可能となる大変魅力的な概念である。

しかしながら、それを個別の産業部門や企業、工場、製品、サービスなどに適用しようとすると、その魅力を失わずにケース毎の差異をどう取り込むかは、大変困難な概念でもある。

今回の産業別調査は、その困難を実感する試みであったといえる。そしてその結果は既に個別の事例調査並びにファクターに関する考察で明らかのように、十分に果たされたばかりか困難を克服する方向性がみえてきたといえよう。

当初、採用した方法論は机上の空論とも思われたが、事例調査の過程で現実に適用可能であることが示された。以下には、この事実を踏まえた上で更なる今後の課題を指摘する。

TVの環境効率では、1994年から1999年の5年間でファクター13を得たが、そもそも環境効率は、どのような環境負荷を取り上げるかに大きく依存する。今回、大きいファクターを得た一因には環境負荷の表現法に起因するものがある可能性もある。したがって、このような分母・分子の選択が適切であるのか、一層優れたものがあるか否かなどが今後の検討課題となろう。これは塗料でも同様のことがいえる。その時々 of 流行に流されることのない、地球限界を踏まえ長期的に意味付けられた環境負荷・環境容量の把握が必要である。

パソコンについての事例調査では、その提供するサービスを情報処理、情報伝達、管理の3つに分け、それぞれについての資源生産性・環境効率・ファクターを求めた。今回のスタディが採用した個別ハードウェア性能の各サービスにおける割り振りが広く合意を得られるものか、ソフトウェアの性能パラメーターをどのように選定し各サービスに割り付けるかなどは資源生産性等を計算する際の技術的問題として今後の課題である。

また、このように製品ではなくサービスを志向した分類は、パソコンがまだ新規な製品であり、そのサービスが限定されていないからこそでた発想である。しかしこれは、サービス機能が確定しているかに思われる成熟商品であっても、例えば今後のIT化やハイブリッド化によって多機能な商品が登場してくることがあり得ることから、もっと一般的に対処しておかなくてはならない課題といえる。事実、電話機などはファックス機能の付与から携帯電話と進化する中で、そのサービス機能をどう位置付けし直すかは既に重要な課題となっている。

今回の調査では、ポルトランドセメントと銅という基幹的材料の製造について資源生産性を求めている。これらは、サービスばかりか最終製品に較べても明快な結果を与えた。方法論的に境界なども設定し易く、LCIの充実もありデータの曖昧さをミニマムに抑える

ことができた為である。しかしそれでもなお、例えば銅の場合に資源生産性の分母として炭素排出量を採用しているが、鉱石品位の低下や資源枯渇が心配されていること、更に埋没資源の利用であることなどから、採掘土石量を環境負荷項目とするなどしたマテリアルフロー的な立場からの環境効率を提案してみることも今後の課題といえる。

一方、TV 会議のように新しいサービスが創造されるようなケースでは、どこまでの資源消費あるいは環境負荷を、これらの新サービスに対して許容するのかという難問が残される。今回の調査がそうであるように、一面で機能が重なるもの、すなわち出張会議を代替サービスとして、それとの比較を行うことが 1 つの妥当な方法であろう。しかしそれでもなお、直接対面することの有無による成果の違いの可能性や出張に伴う時間をどう過ごしたかによる人間関係が及ぼす長期的影響など、無視しがたいと思われなくもない差異も存在する。

一般的に熱物縮の観点から、資源生産性や環境効率を考える際には製品ではなくサービスを基本単位とすることが望ましいであろう。しかしそのためには、製品をサービスに読み替える方法論が必要である。この方法論は現時点では存在しない。それを確立するには、これまで馴染んだ生活観そのものの変革も求められる。それがなされない限り、大きなギャップを抱えたことになる。

さらに、サービス量そのものを分子にするのではなく、例えば 1 人当たりのサービス提供量の総和を分子とするといった考えも必要とされよう。これは、サービス享受者の数と 1 人当たりのサービス量の積を最大化することと、莫大な量のサービスを一人が独占することとは異なる筈であるという考えに基礎を置くものである。

既に何度も述べられているように、ファクターを求めることの本来的意義は、その向上を具体的な目標として先進工業国における大幅な熱物縮を実現し、ひいては人間活動全体を持続可能なものとするところにある。したがって、地球限界に由来する許容最大環境負荷量から導かれる目標ファクター値の設定がいずれはなされることになる。そしてそれは結局、異なる製品やサービス間での環境負荷量の分配問題となる。現在問題となっている二酸化炭素排出権に似た事態が国レベルではなく、製品やサービス、あるいは産業間で複数の環境負荷について起きるのである。この時、恐らくは、人間一人一人のニーズから発生するサービス要求が最も基礎的に考慮すべき因子となるであろう。

この意味で、もっとも基本的なヒューマンニーズである食料と水に関する産業や産物について同様な資源生産性と環境効率の算定が早急に行われる必要がある。これらは、他のニーズを満たす他のサービスとの環境負荷分配問題を考えることが出来る程度に比較可能な方法論で求められなくてはならず、翻って現在本委員会が検討している工業系のサービス提供に関する資源生産性等の計算方法論にも影響が及ぶことになる。

さらに住居や都市形成も人間の基本的ニーズを満たすものであるという面がある。これらの資源生産性と環境効率をどう把握するのかという今年度の考察を一層発展させ、具体的な事例調査へと進めていく必要性も高い。

いずれにせよ、今回の予備的調査では、境界の設定、回収システムの効果など、多種多様な計算上の前提が採用されている。これは、アウトプットごとに関連事情が大いに異なり、それらを充分考慮するためには産業界の自己主張を極力生かすことが望ましいと考えたからである。研究のフェーズとしてはいわば適応放散の段階にある。

しかし他方で、そのような自己主張が社会的に認められる公正なものであることの検証も長期的には必要である。したがって、このような方法論上の理解を共通化することが今後の作業に重要であろう。中でも熱物縮についての表現やグリーン度を用いた解釈などはそれぞれで相当に異なっている。これらの概念整理と一層の共通化は、今後ファクター目標値を設定する前提として欠かすことができないと思われる。

第3章 資源生産性・環境効率手法の検討

3.1 資源生産性または環境効率の考え方

本年度の WG2 では資源生産性及び環境効率について概念的アプローチによりその定義、手法と問題点を探った。第3章では、この1年のWGの議論を踏まえた各委員による考え方を披露する。

3.1.1 検討の枠組み

(1) 製品の環境効率とファクターの考え方

LCA で製品を比較する場合には、機能を同一にして比較することが基本となっている。機能はその製品が提供するサービスであり、機能が同一であれば、資源の消費量などの環境影響を代表する指標が小さいほど、環境への影響が小さいものと判断できる。製品が環境へ与える負荷を基準として、製品が提供するサービスと比較する考え方が、「環境効率」である。製品の環境負荷を代表する指標として資源消費量を選択すれば、「資源生産性」となる。同一のサービスであれば、資源消費量が少ないものほど「資源生産性」は高い。

$$\text{製品の環境効率} = \frac{\text{製品が提供するサービス}}{\text{製品の環境負荷}}$$

サービス（機能）が同一の製品で、資源の使用量など環境負荷を代表する指標が決定されれば、環境効率の考え方は理解し易い。サービスを同一にして、環境負荷を削減するという考え方がその基礎となっている。

さらに、同一の機能を持つ過去の製品と環境効率を比較し、環境効率の向上を数値化することが可能である。環境効率を比較する概念が、ファクターである。機能が同一であれば、ファクターは過去の製品の環境負荷を現在の製品の環境負荷で除した値に等しい。

過去からの向上だけでなく、ファクターの概念には、ファクターをどこまで上げなければならないかという議論が含まれている。先述したように、機能を同一とみればファクターは環境負荷の比で示される。現状の環境負荷と、将来的に守らなければならない環境負荷（環境容量）の比が、目標とすべきファクターとなる。

(2) 環境負荷を代表させる指標を選択する問題点

ファクターの考え方は、製品の環境側面の改善を数値化して示すためには便利である。しかし、製品の環境側面は多様であり、製品ごとに主張したい改善点が異なる。資源生産性だけでは製品の環境側面の改善を示すことができない場合もある。

現在、多様な環境側面を統合化し、理解し易い単一指標として表現することが求められている。環境影響の統合化は、「地球温暖化」と「オゾン層の破壊」のどちらを重要視するかという判断のように、主観を避けることができない。主体的判断をよりの確に行うために、それぞれの被害を定量的に推定することで、「人間の健康影響」や「生態系への影響」などの「保護対象」に集約する被害算定型の影響評価手法が研究されている。しかし、この方法においても、保護対象間の重み付けには主観的判断が必要とされる。

多様な環境影響を統合化することが困難であるという現状が、「代理指標」として CO₂ やエネルギー消費量に特化した LCA の実施を促している。多様な環境側面を統合化することを断念し、インベントリ分析の段階で算出可能な排出物量や資源消費量によって環境影響を代表させる考え方である。資源生産性の考え方も、インベントリ分析の段階で環境負荷を代表させる方法の一つであると考えることができる。

この考え方は、製品の生産に係わる物質の移動量を計量する MIPS や、生産に必要な土地面積を計量するエコロジカルフットプリントに発展している。

これらの数値は、LCA でのインベントリ分析を基礎とした科学的な算出が基礎となっているので、主観を排除しているようにみえる。しかし、多様な環境側面を代表する指標として何を選択するか判断することが、そもそも主観的判断によって行われていることに注意する必要がある。

(3) 企業/産業、国の環境効率とファクターの考え方

LCA の概念は、ISO に定義された製品及びサービスの環境側面の評価だけでなく、企業や産業の環境活動の評価に発展させることが可能である。

企業の環境マネジメントシステムは ISO14001 に、またその結果である環境パフォーマンス指標は ISO14030 に記述されている。環境パフォーマンス指標として測定される事業所への投入物質にその上流のインベントリデータを付加し、更に事業所で生産される製品の使用・廃棄の段階のインベントリデータを付加することで、事業所の活動に関するインベントリ分析を実施することが可能である。この手法は、複数の事業所を総合した企業のインベントリ分析にも適用できる。

現在でも、企業全体のライフサイクルにおける環境負荷を定量化し、環境報告書に記載している企業がある。さらに、アサヒビールやリコーは、環境負荷を企業の自主的判断により重み付けし、単一指標に換算して企業全体の環境影響を表す指標として活用している。

さらに、これらの企業では、統合化した単一指標を企業全体の付加価値（総利益）と比較することが行われている。企業の活動を金銭的付加価値で表した環境効率とみることが

できる。

このように、環境効率やファクターの考え方は、企業や産業、国全体の環境側面の評価にも適用することができる。この場合は、それらの主体が提供するサービス（活動）に相当する「機能」を何にとるかが問題となる。国全体の影響評価では、通常、国民総生産（GDP）が使われることが多い。GDP 当たりの CO₂ 排出量などの数値をよく目にするが、国の活動指標として GDP を選択し、環境負荷を代表する指標として CO₂ 排出量を選択した、環境効率の逆数と考えることができる。地球温暖化問題で京都議定書が発効したように、今後、国レベルで遵守すべき環境負荷の総量が決定されることが多くなると思われる。ファクターの考え方がさらに定着して行くことになろう。

(4) まとめ

環境効率は、環境負荷とサービスの比である。環境負荷として何を選択し、どのように統合化するかという問題と、サービスの指標として何を選択するかという問題がある。ファクターは環境効率の比である。サービスが一定なら、環境負荷の比を示すことになる。製品、企業/産業、国の各レベルでの環境効率をどのように決定し、それらを環境負荷の削減にどのように活用するかという議論が必要とされている。

以下に、環境負荷を代表する指標とサービスを代表させる指標の考え方を整理する。

3.1.2 環境負荷を代表する指標の考え方

(1) 環境負荷を代表する指標を選定する考え方

環境負荷を代表とする指標は、様々な環境への影響を統合化したものであることが望ましい。しかし、環境影響の統合化は、本質的に異なる環境カテゴリ又は保護対象間の主観的（戦略的）な重み付けを避けることができない。

したがって、環境負荷を代表する指標の選択には、次の2つの方向が考えられる。

主観に基づく指標を許容する方向

主観を避け、科学的に算出できるインベントリ分析での排出物量又は資源消費量で環境負荷を代表させる方向

前者の方向は、企業の自主的判断に任せる方向である。企業が個々に環境効率を設定すると、製品の選択者である消費者（購買者）はそれを理解することが困難であると想像される。少なくとも同種類の機能を有する製品群については、環境負荷を代表させる指標を統一することが必要と思われる。また、各社が過去の製品と比較する環境効率及びファクターを示すことも環境負荷の削減を示す意味では重要と考えられるが、その製品群が目標とする環境負荷量との現状の比較を示す方が、相対的な比較が容易になると思われる。

企業の評価においても、企業独自の手法による環境影響の単一指標化は、その解釈が困難であり、社会的混乱を来たすという指摘もある。しかし、企業の環境主張は個々に異なる

り、単一指標はそれに基づいて作成されている。環境影響の単一指標化は、設定する企業にとっては、生産する製品の選択、環境投資の順位付けなどに反映される重大な意思決定の表明である。企業の積極的な環境活動を高く評価し、公表される指標に表現される主張を分析し判断する能力を、政府や自治体を含めた消費者が身につけることが必要であると思われる。

これに対し、後者の方向は企業の自主的判断による環境効率の設定を排除することを意味する。製品群ごとの特徴や企業の主張を取り入れることができない難点がある。反面、計算手法を明確に示すことができ、かつどの製品、企業にも共通に適用することができる。

この方向の最大の利点は、CO₂の京都議定書にみられるように、世界的な目標値を定めることが可能な点にある。目標値の決定と同様に、各国の分担を決めることも合意が成立すれば可能である。換言すれば、世界的な目標に向かって、国・産業・企業が努力する合意が得られた時にのみ、インベントリ分析での排出物量または資源消費量で環境負荷を代表させる方向が効果を発揮する。したがって、合意を得ることが容易であり、国・産業・企業が分担し易い目標物質を選定することが肝要である。

さらに、サービスを代表する指標について合意を得ることができれば、環境効率の考え方は、国・企業・産業の分担量を決定する基礎となり得る。現状の京都規定書による各国の分担は、サービスの概念に対する合意がないことが問題を複雑にしている原因と考えることができる。

前者の方向を採る場合は、製品群ごとにその特殊性を活かした環境効率の計算手法を標準化することが課題となる。

後者の方向を採る場合には、合意を得ることが容易で、かつ国・産業・企業の分担量を決定する方法を確立することが課題である。

以下、後者の場合について、CO₂と資源消費量を例に、その問題点を更に検討する。

(2) CO₂排出量を環境負荷を代表する指標とする場合の問題点

CO₂排出量は、京都議定書及びその後の交渉により目標と各国の分担量が既に決定されている。今後、国内の産業及び企業の分担が議論されることになるとと思われる。

CO₂排出量は、エネルギー需給分析に基づき、従来から産業・運輸・民生という部門別に算出されてきた。例えば、最終消費財の省エネルギー化は、民生部門のCO₂削減として算定されている。これは、LCAの観点からは、工業製品の使用段階でのCO₂排出削減である。使用段階での排出負荷削減のために、製造段階での排出量が増大することがあることが多くの人に認識されたことが、LCAの成果の1つである。したがって、使用段階でのCO₂排出削減量を、製品の製造者の努力による効果とみなし、上流の産業に適切に配分することが必要ではないかという議論が生じる。

この考え方で分担を決定するためには、従来運輸・民生部門のとして算定されているCO₂排出量を、上流の各産業部門に再配分する新たなCO₂排出量算定手法が必要となる。

例えば、次のような算定手法が想像される。

民生家庭部門の電気機器のエネルギー消費による CO₂ 排出量は、各電気機器産業の CO₂ 排出量に計上する。電気機器の台数増加による CO₂ 排出量の増加も電気機器産業の負担となるが、省エネルギー器機の開発による CO₂ 排出量の削減は、電気産業に還元される。

このように考えると、発電時に排出される CO₂ は各産業に全て分担されることになる。電力部門での CO₂ 排出削減を促進するためには、電力部門の CO₂ 排出量の算定方法を決める必要があると思われる。そうでないと、発電効率が向上した時の CO₂ 排出削減量を電力部門に還元することができない可能性がある。

また、自動車の走行による CO₂ 排出量は、自動車産業分と素材産業分に分け、素材産業分は更にアルミニウム材製造業分と鋼板製造業分に分ける。素材の計量化又は計量素材の使用による CO₂ 排出削減量は素材製造業の削減量となるが、自動車の台数増加による CO₂ 排出量の増大もまた素材産業が応分に負担することになる。自動車の効率向上による CO₂ 排出削減は、自動車産業に還元されるべきと考えられるが、自動車の軽量化による CO₂ 排出削減との分離が困難という課題が残る。さらに、道路整備の進行による CO₂ 排出削減、及び輸送量減少による CO₂ 排出削減量の各産業への還元方法などが課題である。

民生家庭部門に戻れば、電気機器に使用される素材の製造部門も、民生家庭部門の CO₂ 排出量を分担することが適当とも考えられる。この場合にも、省エネルギー器機の開発による CO₂ 排出削減を、電気機器産業と素材産業にどのように還元するかが問題となる。

LCA は、製品単体の環境影響評価手法として発達してきた。マクロな産業連関の中で、LCA の概念を活かした CO₂ 排出量の分担原則を新たに構築することが必要であると思われるが、課題が多い。

産業間での CO₂ 排出量の分担原則が決定されれば、企業及び製品の CO₂ 排出量算定の手法も、それに準じて決定される。例えば、自動車産業が考える自動車の走行段階の CO₂ 排出量は、素材産業が分担する分を除いた量となる。アルミホイールの CO₂ 排出量は、自動車の走行段階の CO₂ 排出量の一部を、使用段階として計上する。

また、自動車の製造段階においては、従来の LCA ように、素材の製造段階まで考慮する必要がない。上流の産業での CO₂ 排出量は、それぞれの産業での排出量として計上されているからである。いわゆる「Gate to Cradle」の LCI となる。

製品の長寿命化は、製造段階での製品個数の変化として評価される。これは、従来の機能単位での LCI と同様に考えることが可能である。

CO₂ 排出量を環境効率に適用するためには、LCA の概念を活かして、最終消費財の使用段階での CO₂ 排出量を各産業が分担する原則を、新たに構築することが必要であると思われる。従来の LCA におけるインベントリ分析とは全く異なる手法が必要となるだろう。

(3) 資源消費量を環境負荷を代表する指標とする場合の問題点

「資源消費量」には、金属資源と化石燃料とがある。ここでは金属資源を考えることに

する。金属資源は、あと何年使用することを可能とするかを基準に世界的な目標値を定めることができる。品位により採取に必要なエネルギー投入量が異なるので、エネルギー問題も勘案し、金属種ごとに適切な目標値を設定することが必要である。さらに、金属種ごとの目標値を基準とし、金属資源全体としての目標値を統合化指数として定めることが適切であると思われる。

合意さえ得られれば、この目標値を各国へ配分することができる。サービスを代表する指標が合意されれば、環境効率の考え方は各国の分担原則を定める時に有用であると思われる。

資源消費量はインベントリ分析では、最上流にある。例えば、自動車産業での資源消費量は、鉄鋼やアルミニウム産業が消費する資源量のうち、自動車に使用される量の和となる。このように考えると、素材産業での資源消費量は、下流の組み立て製品産業に全て分担されることになる。

この方法では、資源消費量を各産業が分担するという考え方が成立しない。資源消費量を環境負荷を代表する指標に使用できるのは、国全体としての資源消費量の比較と、その国の産業技術の集成としての最終消費財の比較のみであると思われる。

国全体の資源消費量は国内産出量と輸入量で計算できる。最終消費財の資源消費量は、従来の LCI で算出が可能である。

(4) サービスを代表する指標の考え方

環境効率を各国の目標値の設定に使用するのであれば、各国で算出できる指標であることが必要である。さらに、各国での指標を、産業・企業に分割できるものであることが望ましい。

この観点からは、各企業の付加価値の総計としての国内総生産 GDP を指標とすることが適切と思われる。

国内総生産は更に産業別 GDP 及び企業の付加価値に分割することが可能である。さらに、製品の環境効率に使用するためには、企業の付加価値を製品ごとに分割する手法が必要となる。企業会計の知見の導入が必要である。この時、製品のサービスは機能ではなく、製品に配分された企業の付加価値であることに注意する必要がある。

(5) CO₂ 排出量と資源消費量を環境効率に使用する場合のまとめ

以上をまとめると、CO₂ 排出量を環境負荷を代表する指標として使用する場合は、国、産業、企業、製品の環境効率は概略以下のように考えられる。

表 3.1.2.1 CO₂ 排出量を環境効率に使用する場合の課題

	分子（サービス）	分母（環境負荷=CO ₂ 排出量）
国	GDP	国全体の CO ₂ 排出量 （輸出入に係わる算出が課題）
産業	産業別 GDP	産業の排出 + 最終消費の配分量 （最終消費の当該産業への配分が課題）
企業	付加価値	企業の排出 + 最終消費の配分量
製品	付加価値 （企業の付加価値の製品への配分が課題）	企業の排出の製品への配分量 + 最終消費の配分量

さらに、ファクターとして考えるためには、目標値の設定のために、世界規模の GDP の成長予測が必要である。

また、金属資源の消費量を環境負荷を代表する指標として使用する場合は、国及び最終消費財の（効率）のみを定義することができる。

表 3.1.2.2 CO₂ 排出量を環境効率に使用する場合の課題

	分子（サービス）	分母（環境負荷=CO ₂ 排出量）
国	GDP	国全体の資源消費量
最終消費財	最終消費財の機能	最終消費財の資源の消費量

最後に、ファクターとして目標値を定めることが目的であるなら、各排出物に対する目標値を設定し、それを統合化指標の作成に使用することを再考する必要があると思われる。この環境影響の統合化は、環境容量に基づくスイスのエコポイント法に具体化されている。国全体の目標値をどのように定めるか、また、国全体の目標値と現状の排出量を、各産業・企業が共通に使用することが適当であるか検討することが必要である。

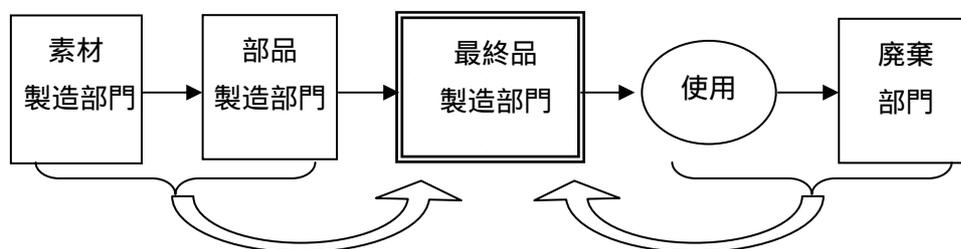
3.1.3 LCA 思考に基づく産業部門別の環境効率について

(1) 基本的な考え方

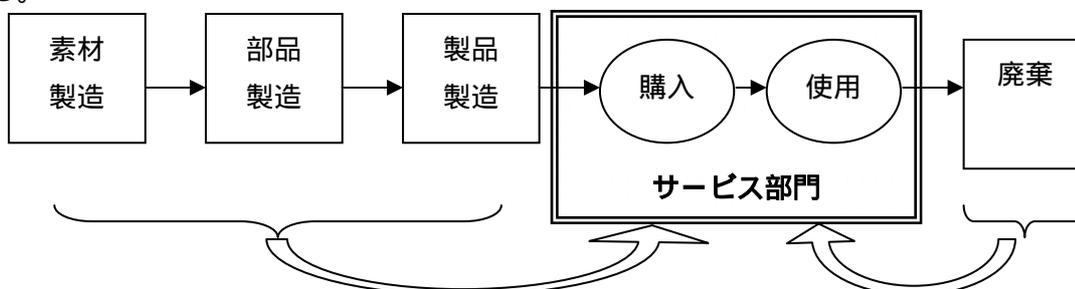
定義： LCA 環境効率 = (部門が提供するサービス量)
 ÷ (提供するサービスに起因する上流・下流の環境負荷量)

環境負荷の中には資源消費も含まれる。環境負荷量として資源消費量のみを計上する場合は資源生産性と考えることができる。

各産業部門は最終消費材・サービスを直接提供しているとは限らない。LCA 思考に基づく環境効率が算出できるのは最終消費材・サービスを直接提供している産業部門のみである。



輸送業などサービス産業部門も LCA 思考に基づく環境効率を算出することが可能である。



定義式分子のサービス量を全最終製品製造・サービス部門で総和すると国民の享受する総サービス量となる。

定義式分母の環境負荷量を全最終製品製造・サービス部門で総和すると国民生活に起因する総環境負荷量となる。

サービス量と環境負荷量に関して目標を設定することによりファクターを定義することができる。

ファクター = 目標 LCA 環境効率 ÷ 現状 LCA 環境効率
 = (目標総サービス量 / 現状総サービス量)
 ÷ (現状環境負荷量 / 目標環境負荷量)

全産業部門で目標を設定する場合は、最終製品製造・サービス部門ごとに目標を設定

したのち、その目標値を何らかの方法で上流及び下流の産業部門に目標値を配分する必要がある。

定義： 部門環境効率 = (部門が提供するサービス量)
÷ (部門の直接的な環境負荷量)

サービス産業部門を含む全ての産業部門で算出可能である。



LCA 思考が反映されていないため、上流で生産される材料の選択や、下流での環境負荷削減をねらった環境に優しい設計などの努力が指標に反映されない。

主に、部門内でのプロセス改善の効果が指標に反映される。

算出がシンプルで扱い易い。

(2) サービス量

オプション 1 (物理量)

持続可能性の指標として考えるなら、できるだけ物理量を採用するのが好ましい。

例：	発電業	総発電量	kwh
	輸送業	総輸送量	トン・km
	セメント製造業	総生産量	トン
	自動車製造業	総生産数	台

大半の産業部門は質の異なる複数の製品及びサービスを提供しているため、産業部門ごとのサービス量を物理量とした定義するのは困難な場合が多い。

各産業部門の時系列比較には適すが、産業部門間の比較には適さない。

オプション 2 (付加貨幣価値又は販売価格)

付加貨幣価値と販売価格のどちらがサービス量をより代表するかは検討を要す。

LCA 環境効率に付加貨幣価値を採用する場合は、上流・下流産業部門の付加貨幣価値も加算する必要がある。

同一産業部門内で複数の製品及びサービスを提供している場合にも対応可能である。産業部門間の比較にも適用できる。

(3) 環境負荷量

環境負荷量の総量を代表あるいは代替する指標についてはまだ十分な合意がとれていない。

現在のところ、考え得る指標はCO₂排出量又はエネルギー使用量である。
CO₂排出量、エネルギー使用量とも、資源消費、環境負荷全般に密接に関連している。
CO₂排出量を採用する利点は、比較的客観的に計算できる、政策的目標値が設定し易い、加算・配分が可能、などである。(本報告書の稲葉氏の稿参照)
エネルギー使用量を採用する利点は、CO₂排出量の場合とほぼ同じであるが、政策的目標値の設定が難しい。

(4) 結論

当面は、全部門について、サービス量に付加貨幣価値、環境負荷量にCO₂排出量を採用するのが現実的である。

LCA環境効率と部門環境効率を算出し、目的によって使い分けるのが好ましい。

サービス量を物理量で定義できる産業部門は物理量ベースの環境効率を計算し、提示すると分かり易い。

サービス量を代表する指標、環境負荷量を代表する指標について、より多くの合意を得るため議論を継続する必要がある。

3.1.4 企業・産業・国民経済を通じての資源生産性と環境効率

(1) 資源生産性について

1) 考察の視点

- ・資源生産性に関する指標の測定の実行可能性を重視し、国民経済レベルの指標を中心に、産業別及び企業別の指標にも言及する。同一指標を製品レベルまで使用することは実効性に問題があり、考察外とする。
- ・資源生産性を「より少ない投入によるより多くの産出」と定義する。すなわち次の式で表される。

$$\text{資源生産性} = \text{産出} / \text{投入}$$

・資源生産性指標の比較可能性

指標の比較には時系列比較と同一時点における横断的比較がある。

- ・時系列比較においては、国民経済、産業別及び企業別の比較が考えられる。
- ・横断面比較においては、国際間、産業間及び企業間の比較が考えられる。

問題点：現実には企業は多様な生産物を生産しており、この企業の主生産物を基
づいて産業を構成すると、当該産業も多様な生産物を生産することになり、異種の生産物を含む同一業種企業間比較や重複生産物を含む異種産業間比較の可能性がある。少なくとも産業分類は、機能別部門分類基準すなわち投入産出表における事業所ベースに依拠する分類が使用されることが望ましい。

2) 産出について

資源生産性は、上記に示したように産出と投入の比率として測定される。

まず、分子の産出であるが、企業レベルでも多様な生産物を生産するところが多く、ましてや国民経済レベルでの生産物の種類は数多くあるため、多様な生産物をウェイト付けして物的統一量で産出を示すことは困難である。そこで、各種の生産物の価格をウェイトと使用して得られたGDP(NDPの使用も考えられる)を物的統一量の代替値として選択することが考えられる。この場合、産業の産出は産業別GDPが、企業の産出は総付加価値が使用される。

産出に原材料の生産高(中間投入)を含む産出高を用いることも考えられる。『国民経済計算年報』によれば、1999年の我が国の産出高は856兆円であり、これより中間投入378兆円を控除するとGDP478兆円が得られる。この産出高を利用する場合には、『国民経済計算年報』より産業別産出高の利用も可能である。企業レベルでは売上高が産出高に近似する。しかしながら、この経済量(産出高)は、上記の説明にもあるように、中間投入を含

めているため、国民経済、産業及び企業のいずれのレベルでも産出について重複計算されている。それゆえ、国民経済、産業及び企業について正味の産出(最終生産物)を示す GDP あるいは総付加価値を産出として使用することが望ましい。

3) 投入について

次に、分母の投入であるが、企業レベルでも多様な資源が投入される。分子に正味の産出を意味する GDP あるいは総付加価値が使用されることを考えると、これらの産出に見合う投入を分母に選ぶ必要がある。しかしながらこのことは困難である。実行可能性の視点から、投入を代表する指標を選択しなければならない。

指標として石油・石炭・天然ガスなどのエネルギー資源、鉄・銅・アルミニウムなどの鉱物資源あるいは製品生産に使用された原油などの投入量が考えられる。全ての産業及び企業に共通して投入されるのはエネルギー資源であることから、その投入量すなわちエネルギー消費量を分母に選択することが妥当と考える。この場合においても、ウェイト付けは避けられない。しかし、エネルギーの長期需見通しなどで、既に多様な 1 次エネルギーを原油に換算したり、あるいはカロリーやジュールなどの物量単位に換算している例があり、ウェイト付けに関わる問題は少ないとみられる。

エネルギー消費量を物量でなく、金額換算することも考えられる。エネルギー資源の多くが輸入されることを考えると、金額換算に当たり、外貨換算の問題を考慮しなければならない。エネルギー価格はエネルギー市場の需給ばかりでなく、為替市場の変化の影響も鋭く受けるため、金額換算したエネルギー消費額の変動はかなり大きいとみられる。それゆえ、実体経済の活動以外の要因が入り込む金額換算は回避されることが望ましいと考える。

(2) 環境効率について

1) 考察の視点

環境効率すなわち Eco - Efficiency は、Economy と Ecology の Eco と理解すると、この指標は経済と環境の相互作用を示すものとみることができる。そして、指標が大きくなることが、経済と環境の双方を改善することを示すように指標を工夫することが望ましい。この 2 つの視点から、環境効率を次の式のように考える。

$$\text{環境効率} = \text{経済価値 (経済活動から生み出される)} / \text{環境負荷 (経済活動に起因する)}$$

2) 経済価値について

国民経済、産業及び企業を通じて同一の指標を用いることを前提とすると、経済価値としては何らかの経済実体による経済活動の正味の生産物である付加価値が望ましい。これは、国民経済については GDP (NDP も考えられる) であり、産業については産業別 GDP

であり、そして企業においては総付加価値（ないし純付加価値）である。

3) 環境負荷

分母の環境負荷としていかなるものを持ってくるかが問題である。分子の経済価値は、原則的にはその年度に付加された価値（value added）であることから、分母もその年度に新たに付加された環境負荷（environmental impact added）であることが望ましい。この考え方に従うと、分母には、経済活動から年々排出される環境負荷物質の全量を取り上げ、これらに環境リスクを考慮に入れたウェイトを乗じて得られた統一量を持ってくることが望ましいといえる。しかしながら、この場合、大方の合意が得られるウェイトを開発することが可能かという困難に直面する。

このような困難を回避し、実行可能な方策として、下記の理由により、分母に CO₂ 発生量を使用することが考えられる。すなわち、環境問題の核心部分は、増大する人口を支える経済活動の結果排出される CO₂ などの温暖化ガスによる気候変動にある。そこで温暖化ガスの過半を占める CO₂ 発生量を分母とするのである。CO₂ のみで不十分とするのであれば、メタン、亜酸化窒素及びフロンなどの温暖化ガス発生量を CO₂ に換算して CO₂ 発生量に加算して使用することも一案といえよう。

4) 持続可能性の指標としてのグリーン GDP

GDP は経済活動量の大きさを示す指標であり、経済的福祉を示す指標ではない。そこで、公害問題が耳目を集めた 1970 年代に、経済的福祉の指標づくりに関心が寄せられ、ほぼ同時期、アメリカで経済福祉指標（MEW）が、日本で国民純福祉（NNW）が試算された。これらの経済的福祉指標は、GDP から、環境悪化要因など、経済的福祉の視点からマイナス要因を差し引き、主婦の労働や余暇時間を貨幣換算して加算するなどして算出された。GDP に環境要因が考慮された最初のケースである。

ところで、1990 年代に入り温暖化をはじめとする環境問題に関心が寄せられるようになり、経済の持続可能性の視点から GDP の検討が試みられた。グリーン GDP である。

我が国では、内閣府（旧経済企画庁）がその試算を行っている。その試算では、グリーン GDP は、環境調整済国内純生産（Eco Domestic Products、EDP）といわれ、GDP から維持費用（maintenance cost）で推計された帰属環境費用を控除することによって求められる。維持費用は、期首と同じ環境水準を維持するために計算対象とされた年度に排出された全ての環境負荷物質を除去する費用つまりゼロ・エミッションを実現するに要する費用を意味する。したがって、EDP は、概念的には、国民がそれを全て消費しても、経済が持続可能であることを示唆する。しかしながら、維持費用の測定に関わる問題に加えて、EDP は持続可能性を示さないとの意見もあり、EDP ないしグリーン GDP については未だ議論があるところである。

3.1.5 エコエフィシェンシーの考え方、評価因子について

(1) 資源生産性、環境効率(エコエフィシェンシー)

我々が直面している環境問題 - 地球温暖化、資源枯渇、人口増加と食料・水不足など - に対応し、持続可能な社会を実現するためには、資源・エネルギーの消費量を減少させ、地球環境に与える影響を減少させることが必要である。

資源エネルギーの絶対消費量を全世界で減らしていかなければならず、特に先進国はより減らさなくてはならない。

しかし、そういう資源・エネルギーの消費量を減少させることが、多くの苦痛を伴うものであっては人々が受け入れるものとはなりえない。したがって、我々は生活のレベル、生活の質を維持しながら、資源・エネルギーの消費量あるいは地球環境に与える影響を減少させることを考えなくてはならない。これが資源生産性の向上、環境効率（エコエフィシェンシー）の向上である。

すなわち、よりわずかな資源・エネルギーの投入で、より多くの製品性能を実現することである。

$$\text{資源生産性} = \frac{\text{製品の性能、提供されるサービス}}{\text{資源使用量 or エネルギー使用量}}$$

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品の性能、提供されるサービス}}{\text{環境負荷量}}$$

また、この時に考えなければならないのは、世界中の人々が使用する資源とエネルギーの量が同じでなければならないことである。

このため、現在よりも資源生産性、環境効率を大きく向上させることが必要である。

(2) ファクター

1) ファクター4

先進国、OECD 諸国は、人口が全世界の 20% であるにもかかわらず、全世界の資源の 80% を使っている。これは全世界の人々が同じ生活の質を営むために同じ量の資源・エネルギーを消費できる権利を持つという観点からは非常に不平等である。したがって、我々は直ちに資源・エネルギー消費量を 4 分の 1 に減らさなくてはならないという考え方がファクター4 である。

すなわち、製品の性能を 2 倍にして、資源の投入あるいはエネルギーの投入を従来の半分に減らす製品がファクター4 を達成した製品となる。非常にシンプルな考えで分かり

易いために、全世界の多くの企業の経営者・技術者に指示されている。

2) ファクター10

一方、2050年を考えると、ファクター4では不十分である。なぜなら、環境に与える影響(Environmental Impact)は、

$$\text{環境影響} = \text{人口} \times \frac{\text{GDP}}{\text{人口}} \times \frac{\text{Impact}}{\text{GDP}}$$

で表されるとすると、1990年に比べて2050年の人口は2倍に増え、1人当たりの所得(GDP/人口)も、恐らく中国・インドの急速な経済成長を考えると大体5倍に増えることから、2050年には現在の10倍に環境影響が増えてしまう。

したがって、人類全体の産業活動の地球に及ぼす影響を1990年と2050年で同じ水準に保つためには、「Impact/GDP」を10分の1に下げなくてはならない。逆にいえば「GDPをImpactで割ったもの」を10倍高めなくてはならない。これがファクター10という考えである。

表 3.1.5.1 環境効率（エコエフィシェンシー）の考え方と評価要素（1）

研究機関	考え方	評価要素	環境効率評価と目的等
BASF 世界最大級の化学会社	環境効率 = $\frac{\text{製品}}{\text{環境影響}}$	環境影響の評価要素 <ul style="list-style-type: none"> ・ 原材料消費 ・ エネルギー消費量 ・ 水と大気への排出物と廃棄方法 ・ 潜在的毒性現地 ・ 潜在的リスク 	<ul style="list-style-type: none"> ・ エコノミーとエコロジーの調和にある。 ・ 製品を省資源化、省エネルギーで生産する。 ・ 排出物をできる限り減らす。 ・ 製品のライフサイクルの全工程を評価する。 ・ 消費者の利益を基本にする。
WBCSD 150 程度の国際的会社が参加している研究機関	環境効率 = $\frac{\text{製品、サービスの価値}}{\text{環境負荷}}$	（製品、サービスの価値） <ul style="list-style-type: none"> ・ 消費者に対する製品やサービスの質 ・ 正味売上高 （環境負荷） <ul style="list-style-type: none"> ・ エネルギー消費量 ・ 資源消費量 ・ 水消費量 ・ 温室効果ガス排出量 ・ オゾン層破壊物質排出量 	<ul style="list-style-type: none"> ・ エコエフィシェンシーはWBCSDの哲学の核である。
Wuppertal ドイツ Wuppertal にある Factor、Eco-efficiency の中心的研究機関	MIPS とマテリアルフローから環境効率を評価	$\text{MIPS} = \frac{\text{資源使用料}}{\text{単位サービス}}$ MIPS (Material Intensity Per Service Unit)	
OECD			人間の欲求を満たしつつ、資源使用の効率性を改善するための政策を検討

表 3.1.5.2 環境効率（エコエフィシェンシー）の考え方と評価要素（2）

研究機関	考え方	評価要素	環境効率評価と目的等
Eco-Efficiensy Net work	環境効率		<p>(目指すもの)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ サービスの強化 ・ 人間の欲求とライフスタイルの質の見直し ・ 製品の全ライフサイクルを取り入れること ・ エコシステムの許容量の限界に対する認知 ・ コンセプトの途切れない更なる発展 <p>(評価を通じての発展のステップ)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 効率のよいプロセスの増加 2. 新たな、より良い製品を開発し効率的な製品設計により、新たな利益を生み出す。 3. 市場メカニズムの変化が新たなサービスを作り出し、物質の使用を減らし、消費パターンを変え、持続可能な市場を生み出す。
Factor10 institute Wuppertal 研究所が中心となった Factor10 の研究所。東京ガス、コスモ石油が参加している。	$\text{MIPS} = \frac{\text{資源使用料}}{\text{単位サービス}}$ <p>資源生産性を 10 倍に高める</p>	<p>Low MIPS (Material Intensity per Service Unit)が基本</p> <p>あるサービスを提供するのに必要な資源の量を少なくすること</p>	<p>(評価結果の適用方向)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 適正な市場戦略、維持管理、リサイクリング ・ 製品、サービスの環境に係る情報の消費者への提供 ・ 脱物質の製品、サービス、建築物、インフラの開発など
Rocky Mountain Institute アメリカのエネルギー資源の研究を中心とした研究所	$\text{MIPS} = \frac{\text{サービス}}{\text{資源使用量}}$		<p>少ない資源で同等あるいはより良い製品を創り出すこと</p>
Eco-efficiency2000 国際会議のホームページ	$\text{資源生産性} = \frac{\text{サービス}}{\text{資源使用料}}$ $\text{環境効率} = \frac{\text{サービス}}{\text{サービス}}$		<p>人間の欲求を満たしつつ、資源使用の効率性を改善するための政策を検討</p>

(3) エコエフィシェンシーの因子

1) エコエフィシェンシー

$$\text{資源生産性} = \frac{\text{製品、サービス}}{\text{投入資源}}$$

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品、サービス(財)}}{\text{環境への負荷量(インパクト)}}$$

2) エコエフィシェンシーの分子

製品等の財（付加価値含む）

サービス等の財（付加価値含む）

知的生産による財（負荷価値含む）

3) エコエフィシェンシーの分母

資源消費量

a エネルギー資源

b 鉱物資源

c 一般資源（鉱物資源以外）

d 建物

e 水

f 土地

CO₂ 発生量

エネルギー消費量

4) 計算のプロセス

ライフサイクル段階

リサイクル率

積み上げ方式

マクロ方式

5) 評価

積み上げ方式での評価（個別）

マクロ方式での評価（政策）

トータル評価（実態）

(4) ファクターX(製品レベル)の考え方と今後の課題

1) 分子であるサービスの考え方

日本の場合、加工貿易を基本とする経済を基本としており、もともと資源採取を海外に依存している上に、今後人件費節減の面から生産拠点多海外に移行しつつある。分子を製品等の価格とした場合、海外生産と国内生産で環境効率に大きな差が出る可能性があり、その差の持つ意味が本来の環境効率を高める目的と一致しないこともある。

したがって、地域差によって変動する指標(価格等)ではなく、環境効率を高める目的と一致した安定的な基準に基づいて比較評価できる指標を用いるべきである。

用いる指標を明確にする意味でも製品のファクターXの適用範囲を日本国内にするのかを明確にすべきである。

WBCSDの環境効率は、単に企業のパフォーマンスを実現するツールである可能性がある。例えば、生産対象品がそれ自体明確に環境に悪いもの(例えば爆弾)であっても、環境効率が良いという結果をもたらすこともできる。

そのため、ファクターXの分子のサービスの定義に「人間活動に不可欠又は生態系にマイナス影響を与えないもの」等の範囲を示す定義付けをすべきである。

分子の指標を付加価値とする場合でも「付加価値」の定義を明確にしないと誤った評価をする可能性がある。

高品質でなくてもよい製品にリサイクル材を用いれば高い環境効率が結果として表現できるツールにすべきである。

都市インフラ等では消費する資源量、環境負荷、費用とも膨大である。そのため、「製品」の概念を工業製品に限定することなく、インフラ等にも含めて議論すべきである。

2) 分母である環境負荷の考え方

分子でのサービスの場合と同様、日本では、資源採取を海外に依存している上に、今後、人件費節減の面から生産拠点多海外に移行しつつあることを考えると、分子である環境負荷データとして海外の原単位を用いるか国内の原単位を用いるかどうか(例えば電力消費負荷)等の問題が生じる。

したがって、国際的に変動する指標ではなく、長期間にわたって同じ基準に基づいて効率を比較評価できる指標を用いるべきである。

日本では循環型社会形成推進基本法の施行以来、材料リサイクルのみでなく、エレクトロニクス製品分野で部品リユース率が高くなっている。同法の基本的考え方でもリサイクルよりリユースを優位に位置付けているため、リユース部品を用いた製品を用いた製品の方が環境効率が高いように評価されるべきである。製品の長寿命

化が製造段階での製品個数の変化として評価されるとしても、寿命の異なる様々なリユース部品を組み込んだ製本をどのように評価するかを考慮する必要がある。環境負荷を考える場合に、LCA と同様、オープンリサイクル、カスケードリサイクルの結果、材料が複数製品に配分される場合のライフサイクル環境負荷の考え方を明確にしておくべきである。

3.1.6 資源生産性・環境効率手法

(1) 企業レベルの資源生産性評価について

1) はじめに

環境効率、資源生産性を考慮した、製品の製造、企業経営、産業/国レベルでの対応が必要に迫られてきている。各レベル（製品、企業、産業、国）の環境効率/資源生産性の算出方法は、製品を積み上げて企業の評価になりにくいいため、同様の手法では達成できない。ここでは、企業活動に対し環境効率/資源生産性を求めるための問題点、課題を抽出し、手法開発の検討を行う。

2) 企業レベルの環境効率/資源生産性を求める目的

企業の環境対策を促進させ地球環境への付加を低減させるために、企業活動の資源生産性の指標を作成し、企業の環境に対する対策の達成すべき目標の設定をすること。また、環境活動を公平に評価することのできる指標を作成する。

3) 環境効率/資源生産性の定義

$$\text{環境効率} = \frac{\text{サービス}}{\text{環境負荷量}}$$

$$\text{資源生産性} = \frac{\text{サービス}}{\text{資源使用量}}$$

上に示したように環境効率と資源生産性を定義できる。LCA ではサービスの機能単位を統一して、環境負荷量の大小で比較検討できた。一方、環境効率/資源生産性はそのサービスを統一せずに機能単位の違う製品/企業等を比較できる指標である。

4) 問題点の抽出

A. 分子（サービス）

一口にサービスといってもいろいろな考え方があり、対象とする企業が社会/購入者に対して与えているサービスを分子にすることが必要である。例えば、商品 X（1 台当たりのサービス量を A）を a 台生産、商品 Y（1 台当たりのサービス量を B）を b 台生産、商品 Z（1 台当たりのサービス量を C）を c 台生産している企業の提供しているサービスは、 $a*A+b*B+c*C$ となる。しかしながら 1 台当たりのサービスを定量することが困難である。

現状で考えられる、もしくは評価可能な指標は、企業の四季報、環境報告書等から引用可能な企業の年商、企業の利潤等を用いることが考えられる。CO₂ 排出量を各国の GDP に

対して比較したり、グリーン GDP を用いて国全体の環境に対する取り組みを検討したりしている経緯から、企業の利潤をサービスと考えることが現実的と考えられる。

B. 分母

資源生産性を求めるための分母は、各資源の使用量を求め、それらを何らかの方法で統合して分母にする必要がある。その統合方法には、総重量で比較する方法、埋蔵量を考慮し求める方法、埋蔵量と世界の消費量を考慮して求める方法がある。しかし、上記方法にはそれぞれ長所短所を持ち合わせており、LCA のインパクト分析の分野においても研究途上であるため、各手法の長所短所を注意深く扱いながらの評価となるであろう。

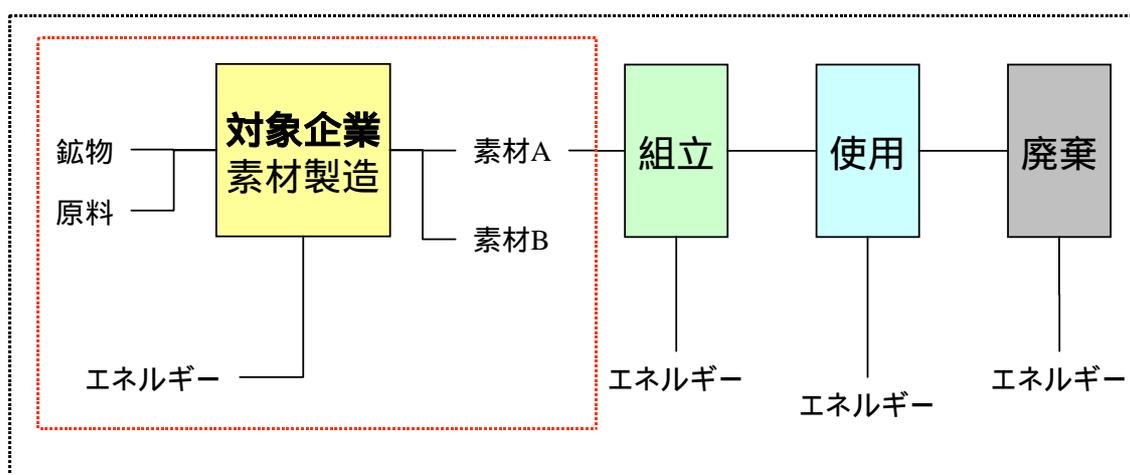
環境効率を求めるために環境負荷を分母にした場合は、各資源の使用量の統合化よりも困難な温暖化、酸性雨等の環境負荷を統合するといった問題がある。LCA の分野でも統合化は盛んに研究を実施しているが、世界的に受け入れられる指標となるには、少々時間がかかるであろう。

以上のことを踏まえると、短期的には企業の環境効率/資源生産性の分母の算出は、産業毎に問題となっている環境負荷について抽出を行い実施すること、長期的には環境負荷の統合を行い実施することが望まれる。

C. 考慮するライフステージの考え方

企業を評価する際に、考慮するライフステージは各産業において違うことが考えられる。素材製造業、組立産業、サービス業を例にして想定できるライフステージを列挙してみる。（資源生産性を例に説明をするが、環境効率の場合も同様と考えることができる）

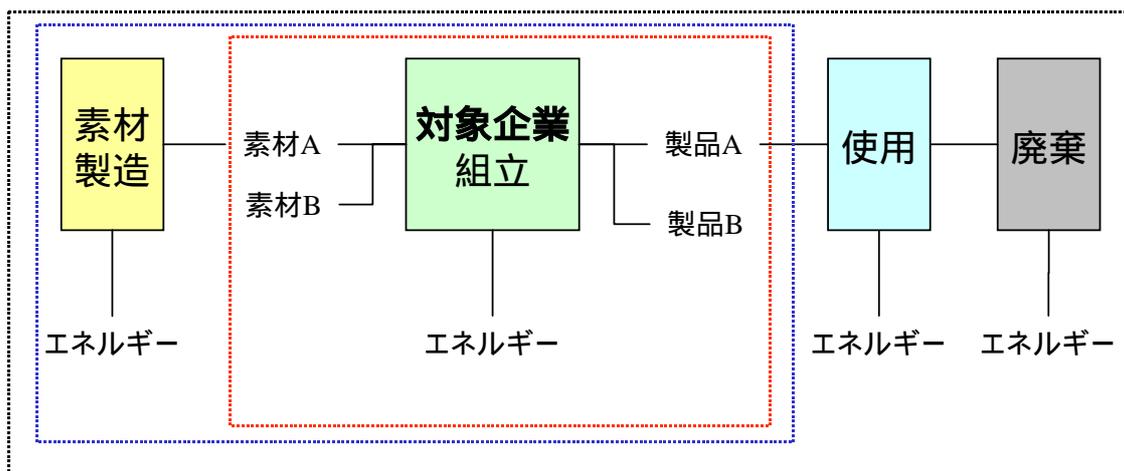
素材製造業



対象企業が購入している資材/原料の資源消費量（Input、分母）と製造した素材によるサービス（Output、分子）を考慮する

対象企業が関与しているすべての物質フローの資源消費量（Input、分母）と製造した製品の Output を考慮する

組立産業

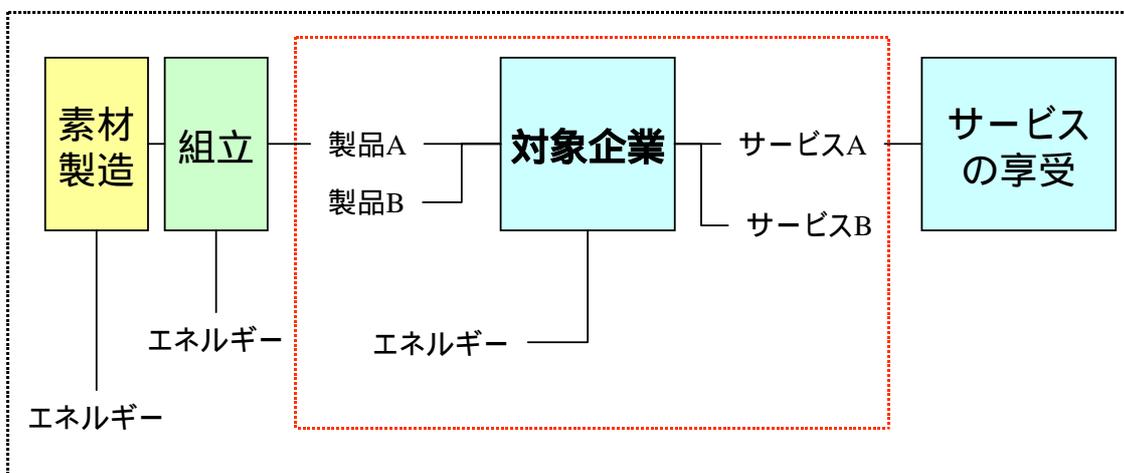


対象企業が購入している素材/製品の資源消費量（Input、分母）と製造した素材によるサービス（Output、分子）を考慮する

対象企業が関与している全ての物質フローの資源消費量（Input、分母）と製造した製品の Output を考慮する

対象企業の関与する上流部分の資源消費量（Input、分母）と製造した素材によるサービス（Output、分子）を考慮する

サービス業



対象企業が購入している資材の資源消費量（Input、分母）と製造した素材によるサービス（Output、分子）を考慮する

対象企業が関与している全ての物質フローの資源消費量（Input、分母）とサービスを考慮する

以上のように、評価の対象となる企業が影響を及ぼしている範囲全体を考慮する の範囲の考え方と、評価する企業の GATE to GATE を考慮する の範囲の考え方、その中間的な の考え方に大別できる。 ~ の範囲の考え方は長所短所を有しており、多くのケーススタディの実施することにより、産業群毎に合致した手法を開発し、産業群ごとの統一した範囲で評価を実施することが望まれる。なお、産業を横断して活動している企業に関しては、注意する必要がある、多くのケーススタディが必要となってくる。

D. リサイクルの考慮の影響について

上記の のライフステージを考える場合は、リサイクル品を使用した場合の時に問題になると思われる。例えば素材製造業の原料にスクラップを使用した場合、スクラップの背負ってきた資源消費量とは何であるかの取り扱いが難しい。また、 の場合廃棄段階も考慮にするので、リサイクルプロセスをも考慮したものにしていかなくてはならない。そして、製造された2次製品の取り扱いが問題になる。つまり、リサイクル品（2次製品）が背負っている環境負荷とは何であるか、また、持っている代替効果（バージン材との）とは何であるかを定量する必要がある。

5) まとめ

企業レベルの環境効率/資源生産性を求めることに着目して記述してきたが、製品レベル、産業レベル、国レベルとの整合性、拡張性を考慮して手法開発を実施しなければならない。また、企業が環境対策に投じた努力を評価でき、正しい環境対策を実施できうる手法の開発が望まれる。

3.1.7 資源生産性の考え方の整理：試論

1) 資源生産性（ファクター）の基本概念：その得失

資源生産性（ファクター）の考え方には得失の両面があり、万能ではない。

[長所]

- ・資源・物質とエネルギーを同列に論じ得る
- ・分かり易く、身近な行動目標を立て易い

[短所]

- ・資源・物質の個別の特徴（希少性／再生可能性、有害度... etc.）を捨象している
- ・持続可能性の指標とするには、別途メタレベルの判断（どの程度のファクター値を実現すれば持続可能性目標達成とするのか）が必要

資源生産性の指標の定義と選択においては、これらの得失の両面に留意した上で、その指標を用いて達成しようとする目的に照らして最も適切な指標を選択することが重要であることを、まず指摘しておきたい。

本節では、この指摘に沿って、資源生産性（ファクター）について考えられるいくつかのバリエーションを考察する。

2) 資源生産性指標のバリエーション

資源生産性指標の基本形は、評価対象として定義される各種の社会経済活動に対して[分子／分母]の形で表される。このとき、分子及び分母は次のいくつかの中から適宜選択される。

[分子]

- ・投入エネルギー量
- ・環境影響（環境影響物質の排出量、あるいは環境影響の社会的費用）
- ・投入物質（個別物質毎、あるいは統合化指標）

[分母]

- ・総売上高
- ・総付加価値
- ・総生産量
- ・総サービス供給量
- ・社会的効用

上の分子・分母の区分けは、通常「資源生産性」（あるいは「環境効率」と称される）効率指標とは異なり、単位活動当たりの「影響指標」として表す場合に相当している。資源生産性あるいは環境効率としては、上記の分子・分母を入れ替えたものが相当する。

上述の通り、分子・分母としてどの因子を用いるかは、評価対象の特徴やデータの入手可能性に依存する。その考え方は他節に譲り、ここでは評価の目的、より具体的には「評

価結果に基づいてどのような行動（アクション）を取るか」に着目して、指標のバリエーションを考えてみたい。

基本形として、次の *MIPS* を考える。

- ・ *MIPS*(Material Intensity per Services)

$$MIPS = M_{input} / S$$

*MIPS*の長所は、その単純さ、つまりデータ入手性、評価の容易さ、結果の分かり易さにある。反面、最大の短所は、*MIPS*が対象プロセスの現状を示しているのみであり、その改善の必要度合い（目標）改善目標実現のための時間経路などについて何らの示唆も与えないことにある。つまり、*MIPS*を評価したからといって、それを踏まえた「アクション」につながらないのである。

この点を改良するために、以下のようなバリエーションが考えられる。

- ・ 到達目標への必要努力量(Material Intensity Reduction Requirements per Services)

$$MIRRPS = (M_{ideal} - M_{actual}) / S$$

現状値 M_{actual} のみならず、究極目標値 M_{ideal} を与えることにより、今後必要となるアクション量（投入物質量ないし環境影響物質排出量の削減量）を求めるものである。究極目標値¹をいかに決めるか、というデータ上の問題が生じる上に、時間経路上の示唆を与えない点で不満が残る。

- ・ 到達目標に目標時点 T において到達するための必要努力量（年削減量）

$$\Delta MIRRPS = (M_{ideal} - M_{actual}) / S / (T - t)$$

目標への到達努力を、目標年次に向けた差分表現で表したものである。絶対量ではなく、相対値（前年比 $x\%$ 減）で示すとすれば、以下の指標が考えられる。

- ・ 到達目標に目標時点 T において到達するための必要努力量（削減量年率）

$$dMIRRPS = 1 - \ln\{(M_{ideal} / S) / (M_{actual} / S)\} / (T - t)$$

目標実現までの到達年数をいかに決めるかという問題が新たに発生する。反面、実際の政策あるいは戦略の立案においては、何らかの目標水準とその到達目標年次を想定した上で具体的なアクションが決定されるという意味で、上記の時間要素を加味した指標での評価が暗黙裡に（定量的な厳密さの程度の差はあれ）行われているはずである。資源生産性の評価を具体的なアクションに結びつけるためには、評価指標の基本形で満足せず、時間軸上の展開について、少なくともその可能性を念頭におくべきである。

3) Herman Daly の 3 原則とその関連ファクター

Daly は、「再生可能資源に関する 3 原則」を提唱した。¹

¹ 実際には、評価対象プロセスの投入量（ないし排出量）に対して目標値が定まるのではなく、分母で除算した影響指標自体の目標値が定まるという形での政策誘導が行われると考えるほうが現実的かもしれない。この場合は、現状値としての *MIPS* と、上記の意味での *MIPS* 目標値とを比較することで、目的を達成することになる。

Renewable resources should be exploited in a manner such that:

- 再生の原則： Harvesting rates do not exceed regeneration rates,
- 環境容量の原則： Waste emissions do not exceed the renewable assimilative capacity of the local environment, and
- 代替の原則： Nonrenewable resources should be depleted at a rate equal to the rate of creation of renewable substitutes.

松橋(1998)は、このDalyの3原則を参考に、有限資源（鉱物、エネルギー、環境など）の持続可能性の十分条件として、以下を提示した。

ある資源の可採年数（ R/P 比、 R ：資源賦存量、 P ：資源生産量）を減少させないことを条件とすると、以下を得る（サフィックスの0は、全て初期時点（評価時点）の値であることを表す）。

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} &= \frac{\partial R}{\partial t P} \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\Delta t} \left(\frac{R(\Delta t)}{P(\Delta t)} - \frac{R_0}{P_0} \right) \right] \geq 0 \\ &= \frac{\mu_0 R_0}{D_0} \left\{ \frac{a+r+s-\beta}{1-C_0} + \frac{C_0 c}{(1-C_0)^2} \right\} - 1 \geq 0 \end{aligned}$$

ここで、 $a+r+s+\frac{C_0 c}{1-C_0} = \alpha$ とおくと、 $\alpha - \beta \geq \frac{P_0}{R_0}$ を得る。

この式の意味するところは、埋蔵量の増加率ないし資源の再生率 r 、技術の改善等によるライフサイクル効率(μ)の改善率 a 、他の資源による代替率 s 、リサイクル率(C)とその改善率(c)で決まる項 $C_0 c / (1 - C_0)$ の和から、当該資源の需要増加率 を差し引いた「持続可能性指標」の値が当該資源の可採年数の逆数以上であれば、その資源の需給状態は（その可採年数を維持あるいは増大させるよう推移するという意味で）持続可能である。

リサイクル項については、修正の余地がある。現状のリサイクル水準が次式の形で生産量 P に既に反映されているので、評価式の両辺にリサイクルの効果が分散し、リサイクル項 $C_0 c / (1 - C_0)$ の値は改善率が大きければ大きくなるが、 C_0 が 1 に近づく（完全リサイクル）ほど小さくなる。

$$P = D(1 - C) / \mu$$

そのため、判断基準である右辺（可採年数の逆数）を、現状生産量に対して技術的に可能な「究極リサイクル率(C_∞)」を加味したものとすれば、持続可能性指標からリサイクル項を消去できる。

$$\alpha - \beta \leq \frac{P(C_0 / C_\infty)}{R} \quad \text{ただし、} \alpha = a + r + s$$

持続可能性指標は、MIPSの一面性(単なる量的インプットとしてのみカウントする)を補う上で、埋蔵量のみならず、資源探査努力や技術水準、成功率(r)、利用プロセス全体の総合効率の改善(a)、代替効果(s)などを加味したものとなっている。反面、計算のために要するデータ、労力や、直感的に理解しにくいなどの欠点も併せ持つ。リサイクル項に示したように、解釈や定義にまだまだ工夫の余地も残っている。

何よりも、「当該の資源の消費量は、再生産量と代替量とを常に下回らなければならない」ことの継続的な達成を要求するDalyの持続可能性の定義は、相当に強いものである。確かにこれが維持実現されれば、あらゆる資源の実質的可採年数は減少することがないので、事実上永久の持続可能性が実現する。しかし、反面、現在全く使用されておらず存在すら知られていない新しい資源が発見されるかもしれない、また将来の人類は現世代よりも優れた技術を保有していると想定されるので、ある資源の枯渇が直ちに深刻な影響を及ぼすとは考え難い。極端な考え方を採るならば、現有の資源を全て消費し尽くしてでも、将来世代に豊かな社会と、資源枯渇に対処するためのより高度な技術体系を残していけばよい、という見方も可能かもしれない。このように、持続可能性の考え方には単なる資源枯渇だけでなく、資源消費によって実現される「豊かさ」と技術進歩とを加味する必要があることも確かであり、この点でもなお慎重な吟味を要する。

しかしながら、今回の「資源生産性」の評価においても、こうした「持続可能性」あるいは類似の概念が示唆する「究極の行動目標」を念頭において作業を進める必要があることを指摘したい。

4) 「環境負荷を減らす」ための考え方：産業レベルを例に

ここでは、以上に述べた指標選定の一般論を踏まえて、産業レベルを例に実際の評価作業のあり方を展望してみたい。以下の設問について考える。

【設問】産業(ここでは、電気機械、食品などの産業分類をイメージしている。工業、製造業といった大括りではなく、またテレビ製造、製パン業といった製品別の括りでもない)にとって、「環境負荷を減らす」ことそれ自体が行動目的たり得るか、否か? 換言すれば、「環境負荷を減らす」ことそれ自体が、企業収益に直結するか、否か?

【設問への答えがYESの場合】環境負荷そのもの、あるいはそれへの影響度合い(たとえば影響物質の排出量)すなわち『分母』を指標化し、その低減努力とその効果を訴える

【設問への答えがNOの場合】製品1単位あたりのパフォーマンス、すなわち『分子』が産業全体/平均で向上していることを訴える

では、現在の状況において、【設問】を巡る状況はどうであろうか。政府からの規制、あるいは産業界としての自主行動計画の設定等にみられるように、環境負荷そのものが問わ

れる説明責任や、それを果たすべき必要と機会は増している。他方、後者「分子の向上」は、トップランナー方式等の導入により、一企業レベルでは魅力的な努力目標となっているが、「産業」全体としての目的付けは薄れてきている。将来をも見越すと、産業レベルにおいても「分母の指標化」とその低減に着目して良いし、また着目すべきではないかと考える。

- ・ 分子（サービス）

同一製品による産業分類レベルであれば、「テレビ 1 台」「パン 1 斤」という固有単位での比較が可能である。しかし、産品横断的な産業分類レベルでは、完全に統合された形での指標化は困難なのではないか。付加価値による表示は可能だが、IT 産業などの例を考えれば、異なる産業間の比較に供するにはミスリーディングに過ぎると思われる。

- ・ 分母

- a. 項目

- ・ CO₂ 排出量
- ・ 投入一次エネルギー量、とくに化石燃料（起源の電力を含む）消費量
- ・ 有限資源、とくに貴金属、レアメタルの投入量
- ・ 排煙、排水中の化学物質（種別毎）濃度、年間総排出量
- ・ 事故リスク
- ・ 騒音、景観その他の影響

- b. 計算の仕方

単一のファクター表示には抵抗を感じる。目標が「環境負荷の低減」といっても、到達すべき何らかの目標水準があつてのことか、低減すればするほど良いのか、その指標に基づく行動の背景となる「目標」の考え方が必要である。特に、持続可能性に対しては、環境負荷の大小よりも希少性のほうが利く可能性がある。

環境負荷目標水準への到達度：あと何年現状努力を続ければ水準を満たすか？

持続可能性目標水準への到達度：あと何年現状努力を続ければ、希少物質の消費量を目標水準にまで低減できるか？

産業としての社会費用：「分母」に挙げた「社会的費用」を全て貨幣価値換算すると、産業全体として社会にいくら負担を強いていることになるか。そのうちのどの要素が容認でき、どの要素が容認できないか。容認できないもののうち、費用効率的に改善が可能なものはどれか。

このような、現状と今後の行動の積分値を総合した指標と、その解釈の考え方の整合性が取れている必要があることを指摘して、本節の結論としたい。

(参考文献)

Daly, H. (1992) "Steady-State Economics: Concepts, Questions, Policies," *Ecological Economics*, GAIA / (1992) no.6, pp.333-338.

(財)地球環境産業文化研究所編著「地球環境'98-99」第1章第6節、ミオシン出版

3.1.8 生産財としての工作機械の資源生産性・環境効率について

(1) 生産財に関連した産業、企業レベルにおける資源生産性・環境効率の目的

日本工作機械工業会では、工作機械メーカーの実情を常に把握し、統計量の整備を行っている。その資料では、工作機械以外に種々の産業機器や機械部品を生産しており、工作機械だけを別個に抽出することが難しい点がある。ものづくりの基盤となる生産設備の主役である工作機械に関しては、産業分野として区分しにくいこと、企業形態としても明確な定義がしにくいこと、などの理由で、統計的に正確なことが示しにくい。しかし、産業別、企業別に資源生産性・環境効率を考慮することの重要性は明らかで、具体的な指標を明示することにより、産業分野あるいは企業としての開発目標を策定する上での指針を示すことが可能となると考えられる。

特に生産設備は初期投資額が膨大になるため、経済状況によって大きく変動する。不況のときは設備投資が真っ先に削減されることになる。そこで、ものづくりを支える工作機械などの生産設備に関しては、産業間あるいは企業間における環境負荷割合が比較でき、資源生産性・環境効率の視点から評価が行われることにより、産業、企業としての戦略や目標がたてやすくなるとともに、国の政策的な課題も提示することが可能になる。

(2) 工作機械関連の産業、企業を対象とした資源生産性 E の考え方

産業別、企業別の指標を概略的に求めるには次のような統計量を用いるのが簡便と考える。

$$E = (\text{産業別生産額}) / (\text{産業別エネルギー消費量})$$

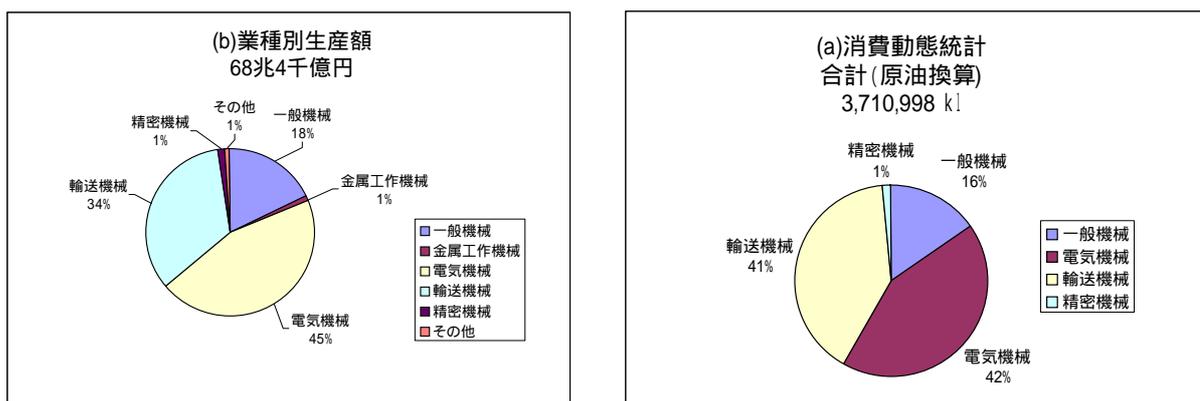


図 3.1.8.1 産業別統計量による比較

図 3.1.8.1 は 99 年度の資料であるが、産業別に生産額と消費動態統計を比較すると、全体に対する比率は生産額も消費動態統計もほぼ同じであることが確認できる。工作機械は生産額は 1%弱であり、消費動態も同じ割合と考えられ、他の精密機器と比較しても同様の傾向が認められる。生産額に対応してエネルギーも消費されており、この数値が資源生産性を概

略的に表しているといえる。ただし、生産額の中に製品の機能、性能などサービスの質が反映されているかは、議論の必要があろう。

(3) 生産財としての工作機械における検討事項

工作機械が提供するサービスを製品価格が代表しているとは一概にいえず、サービスの質は経済状況や産業間のバランス状態に左右され、金額に簡単に反映されないという問題点がある。大量に生産され、一般家庭で使用、消費される製品では、サービスの質は妥当な価格で評価されるが、製造業で利用される生産設備は、産業全体の景気に依存している部分があり、異なる産業間の比較は基本的には難しい。

製造工程における生産方法は一義的に決められないため、安く早く良いものをつくる場合と付加価値の高い工程の場合で、資源生産性・環境効率の考え方も異なると予想される。ものづくりの基盤である工作機械は、基本的にエネルギーや資源を使い、工業製品を生み出しているもので、工作機械のサービスを明確に定義することは困難である。消費財の場合は、機能や性能が明確に定義できる部分があるが、生産財では、それで作った製品の特性、性能を考慮しないと、工作機械の性能向上が正しく評価されない場合が起り得る。

図 3.1.8.2 に示すように、工場内の工作機械は製造工程で、多くのエミッションを出しており、資源生産性・環境効率の向上を問われるのは当然である。ところが、工場から出荷された工業製品の使用時における環境負荷は、この工作機械の性能に大きく影響されている。自動車や洗濯機の製造時に直接影響するとともに、その使用時に対しても工作機械が間接的に影響することになる。

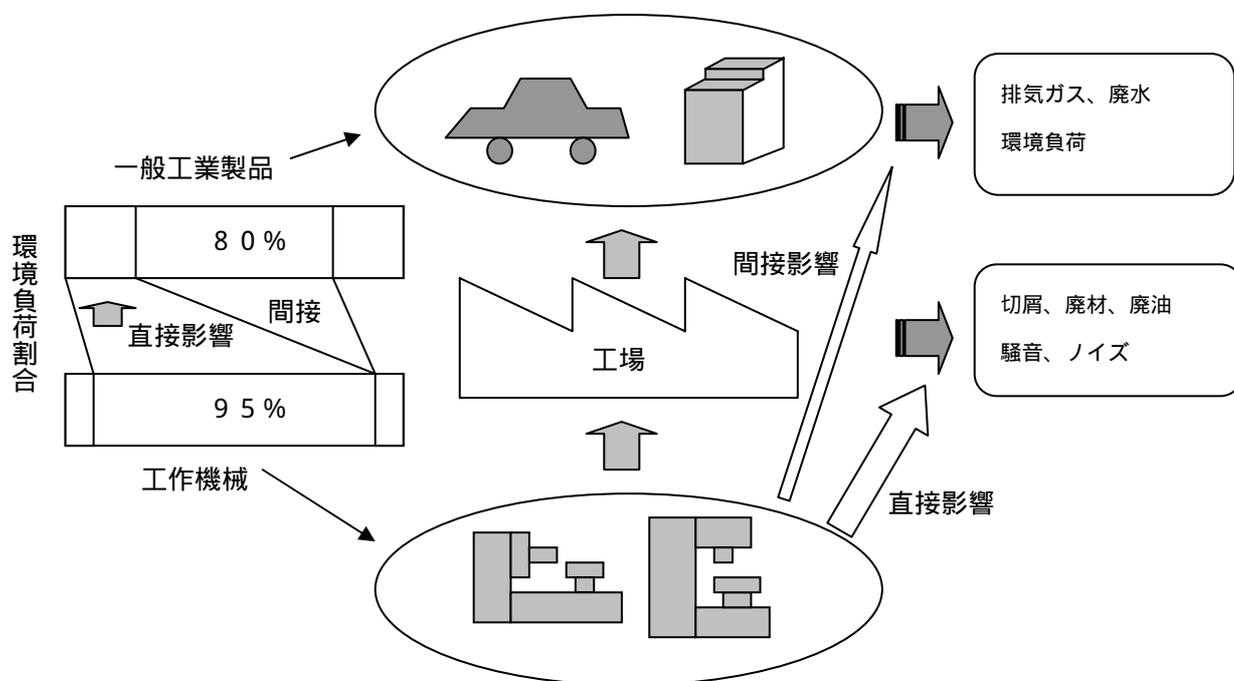


図 3.1.8.2 生産財としての工作機械と消費財の関連

例えば、節水型洗濯機として洗濯槽をステンレス製に変更すると、ステンレスの加工は難削材であるため、加工に多くのエネルギー消費とエミッション放出が伴う。ところが、加工しにくい材料であるがため、機械的強度が増大するので薄肉構造の軽量化が実現でき、洗濯槽の高速回転を可能にする。寿命も延び、効率よく洗濯ができるため、洗濯機の使用時の水や洗剤の消費を大幅に削減できる結果になる。洗濯機の製造時の環境負荷は増大するが、洗濯機の使用時、廃棄時の環境負荷がその増大を補うほど削減できる事例である。この例で、工作機械が担う役割を工業製品の性能まで拡張しないと、節水型の洗濯機が示した環境効率の向上は工作機械と切り離されてしまい、工作機械は環境負荷を増大しただけになってしまう。

(4) 生産財としての工作機械の評価項目

工作機械に対する入力として考慮しなければならない項目としては、資本金、生産設備（工場など建造物も含む）、マンパワー（間接、直接）、エネルギー（空気源、油圧源、空調など含む）、素材、原料、工具、切削油剤、などが挙げられる。これに対して出力については、製品（半製品、仕掛かり状態）、廃棄物（不良品、切りくず、廃油）などが考えられ、これらの項目をもとに資源生産性・環境効率を吟味する必要がある。これらの関係に関しては、2.3.1 節で前述しているので、ここでは、技術的な観点から具体的な技術課題の関連についてまとめる。

図 3.1.8.3 は加工 1 サイクル中の電力を比較したもので、関連する技術とその省エネ効果を模式的に示したものである【1】。加工を行う場合、工作機械だけでなく周辺機器も利用される。そのため、高速化が達成されると、高速化により電力は増大するが、加工時間が短縮されるため、周辺機器の電力消費が削減され、全体として省エネ効果上がる。一方、油剤を使わないドライ加工、あるいは極微量の油剤を用いるセミドライ加工は、クーラントポンプなど周辺機器の使用が不要になり、さらに環境負荷の大きい油剤の使用量を大きく削減できるため、環境効率は向上するものと期待されている。

また、従来の加工方法とは全く異なる新しい加工法が開発された場合、加工時間は長くても資源生産性・環境効率から評価に値する可能性も考えられる。エミッションを極端に低減した製品の製造方式が実現できれば、飛躍的な環境効率の改善に結びつくことから、エミッションフリマニュファクチャリングに関するフィージビリティスタディが具体的に実施されている【2】。また、バクテリアなどを利用して時間をかけて微細加工をする研究も資源生産性・環境効率の観点から評価できる研究といえる。

工作機械自身は丁寧に精度よく製造されており、耐久性に優れている。寿命が長く、10 年とも 20 年ともいわれ、レトロフィットされていつまでも利用されている。そして、廃棄時は重量比で 95% 以上が故銑として鋳物材料に再生されているので、リサイクル性も高く環境効率の良い一面がある。ところが、使用時の生産工程ではエネルギーを大量に消費し、エミッションを大量に発生しながらものづくりすることになり、この部分だけを対

象とすると環境効率は悪くなってしまふ。

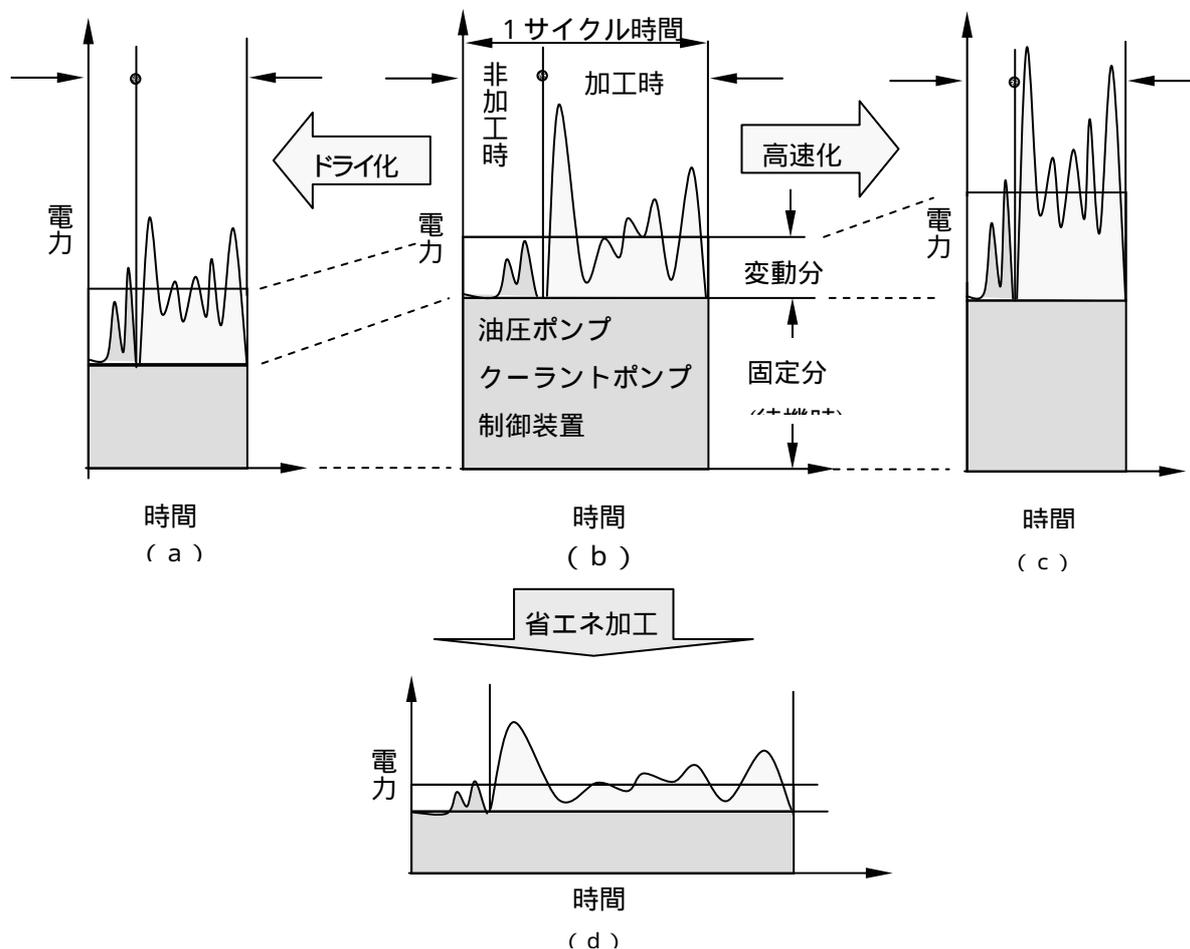


図 3.1.8.3 加工 1 サイクル中の電力比較と省エネ効果

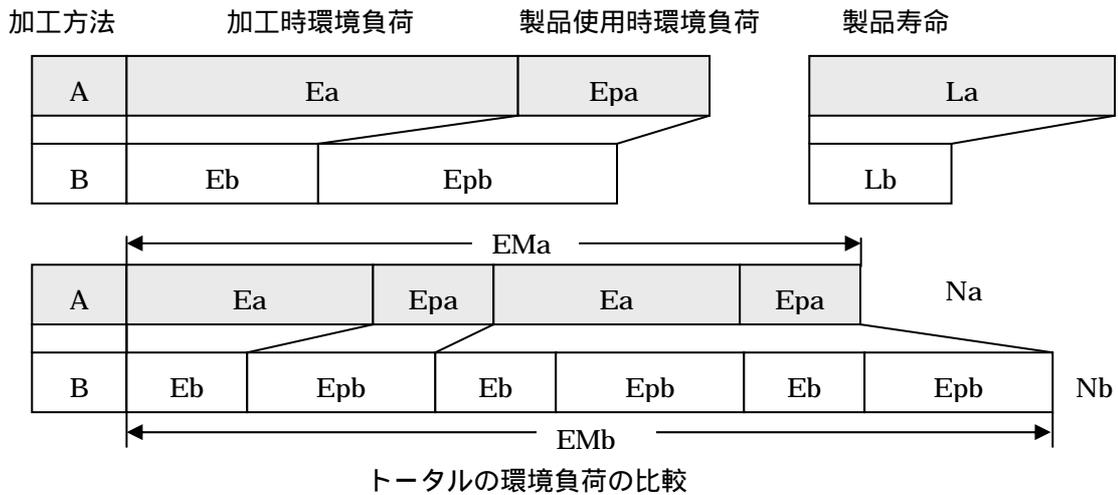


図 3.1.8.4 生産工程と製品間の二次的・波及的環境負荷割合

(5) 工作機械の製品レベルにおける資源生産性 E の考え方

工業製品として工作機械をとらえると、利用できる統計量はあまり整備されていないが、概略試算例として次式が考えられる。

$$E = (\text{性能、機能、サービス、シフト}) / (\text{投入資源、エネルギー、マンパワー、...})$$

具体的な検討事項としては、工作機械などの生産財と一般の消費財では性格が異なるので、この点を考慮する必要がある。工作機械の利用形態などを取り入れたシナリオを想定すること、システムバウンダリを広げ二次的・波及的效果を考慮すること、が重要になると考える。素材、原材料と一般消費者が使う工業製品ではサービスの意味が異なるのは容易に想像でき、ユーザについても最終ユーザとしての一般消費者か、二次生産者側かで、二次的・波及的效果の範囲が違うことになる。

評価項目は工業製品ごとに定める必要があり、次の2点が基本として挙げられる。

- (1) 入力には製品そのものにかかった費用総額で代表値として利用する。
- (2) 出力は製品特有の性能、機能に合わせて考える。

ここで、図 3.1.8.4 に示すように工作機械の性能にそれで製造した製品の寿命を考慮した例を示す。加工方法 A は加工方法 B と比較して、加工時の環境負荷が大きいですが、できた製品の使用時の環境負荷が削減され、その製品の寿命も長くなる場合である。トータルの環境負荷は製品寿命も考えると、加工方法 A のほうが低減効果が顕著であり、環境効率としては高く評価できることになる。これは節水型の洗濯機の開発と同じで、加工時の環境負荷のみを評価対象にすると違う結果になってしまうので、配慮が必要である。

以上のことから、工作機械のような生産財では、それで製造する製品の二次的な影響を

考慮することが必要不可欠と考えられ、これに基づく資源生産性・環境効率の指標を定義することが望ましい。また、生産財は生産設備という位置付けで大切に利用されることも加味して、無駄に余分に製造される消費財とは異なる点に配慮したファクターの考え方を提案することが必要であろう。

参考文献

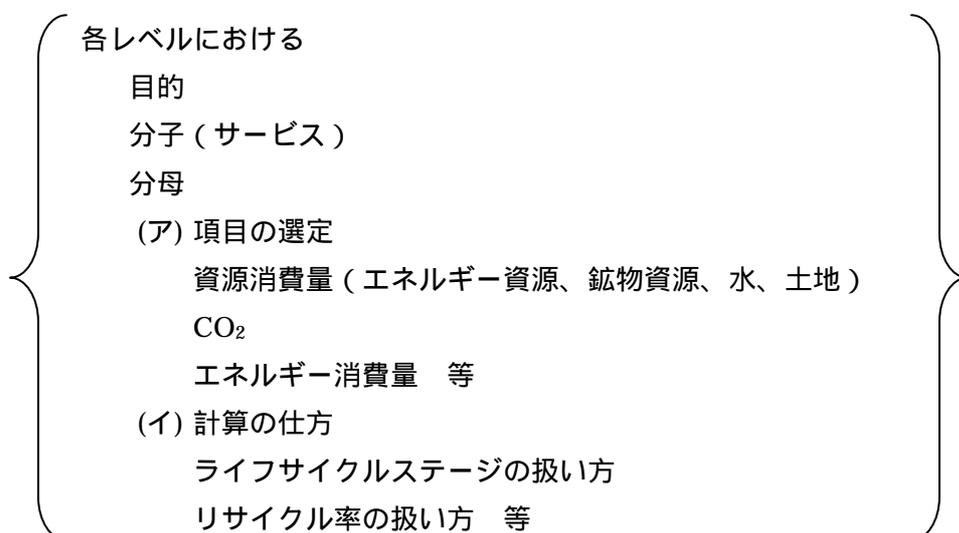
- 【1】 斎藤義夫：工作機械の環境・省エネへの最新対応技術、機械と工具、45,7 (2001.7) 10-15
- 【2】 稲崎一郎他：エミッションフリーマニュファクチャリングの調査研究報告書、製造科学技術センター、(2000.3)

3.2 まとめ

既往の研究の概念・手法比較調査の他に、各委員による資源生産性・環境効率の定義と意義及び手法の検討を実施した。

“製品を積み上げても企業の評価になりにくい”、“企業を積み上げても産業の評価になりにくい”ことから、国、産業、企業、製品レベルで資源生産性・環境効率の算出目的、方法が異なることを確認した。資源生産性・環境効率を評価するときに、考慮するライフステージは、製造した製品が使用、廃棄されて行く下流、上流のステージ全てを考慮すべきか、どのように考慮すべきか等を議論した。

本年度報告書では、各委員による具体的な考え方の整理として、評価の対象とするレベル(国、産業、企業、製品)ごとに、以下のような項目に着目して、意見をまとめている。



既往の研究事例の整理

概念の整理と位置付けを調査することで、資源生産性・環境効率から導き出せるものが分かり、目標が決まることから、海外の研究機関を中心に調査を行った。

資源生産性・環境効率を評価するためのサービスについては、大きくコスト(経済的価値)と製品機能サービスの2つに分類でき、多くはコストを用いている。サービスとしてコストを用いる場合は、製品や企業が環境への負荷に対して産出する経済的価値(利益)に着目している。一方、製品機能サービスを用いる場合は、MIPSの単位機能サービスのよう、環境への負荷に対していかに多くのサービスを提供できるかに着目している。海外の既存事例及び研究ではコストを用いているケースがほとんどであったのに対し、国内で調査した3つの事例全てが製品機能に着目している点も特筆すべきかもしれない。

環境負荷についても、資源やエネルギー使用量・消費量を環境への負荷として用いる場

合と、製品のライフサイクルにおける環境負荷や事業活動に伴う環境負荷を算出して環境への負荷として用いる場合の 2 つに分類できる。環境負荷に活用されるデータは、サービースに比べて多くの項目が検討されており、EEA のヘッドライン指標のような指標セットが用意されている事例もある。製品や事業に伴う環境負荷の側面を適切に表せるデータ項目を検討し、採用することが重要だと考えられる。資源やエネルギーの消費量から実際の環境負荷を算出するためには、重み付けや集約化・統合化といった手法が必要となる。これらの手法については、広く一般的な概念というものはなく、それぞれの研究機関・企業が独自の考え方に基づいて手法を開発している段階である。重み付けを行うための係数の設定などは、主観的な視点がどこかに介入するとともに、製品や企業、産業によって統合される項目の重要性も異なり、係数も変わってくるものと思われる。集約化・統合化は、その手法開発が困難であることから、行っている事例はまだ少ない。ただし、このような様々な製品や企業、産業に対応できる汎用性の高い集約化・統合化手法が開発されれば、製品間や企業間の資源生産性・環境効率の評価も可能になるとと思われる。今後、既存の事例を整理しながら、より一般的な集約化・統合化手法が開発できるかどうかが課題である。

資源生産性・環境効率の評価の対象が製品の場合には、資源の採取から製造、輸送、使用、廃棄といったライフステージ全般を視野に入れている事例が多かった。一方、企業や産業が対象の場合には、製造段階に限定、あるいは製造段階の前後にある実施者がコントロールできる段階を対象とするなどの事例が多かった。資源生産性・環境効率の評価においては、経済活動のどこまでを対象として扱うのかシステムバウンダリの決定が大きな課題であり、システムバウンダリの設定が合理的かつスムーズに行うことができれば、より多くの製品や企業、産業に対して資源生産性・環境効率の手法を促進することになるかもしれない。今後は、システムバウンダリの考え方について更なる検討を行うとともに、資源生産性・環境効率に必要な他分野に渡るデータをいかに整備するかが課題といえる。

考え方の整理

資源生産性・環境効率の考え方の整理として、定義、意義の確認、それぞれの問題点の抽出を実施した。各委員の意見は様々で 1 つの方向性を示すことができていない。今年度は、委員の意見を収束させるのではなく、様々な意見を加味した指標構築の準備段階と位置付けた。次年度以降に、我が国に広く浸透する指標を構築するための考え方をまとめ、新たな手法を構築することを目指したい。

以下に各委員の資源生産性・環境効率についての考えをまとめ、表に示す。

表 3.2.1 (1) 資源生産性・環境効率についての考え方のまとめ

	3.1.1~2	3.1.3	3.1.4	3.1.5
	国～産業～企業～製品	産業部門	国～産業～企業	製品
目的				生活レベルを維持しながら資源・エネルギーの消費量あるいは地球環境に与える影響を減少させるために、資源生産性、環境効率の向上が必要である。
分子: サービス	国：GDP 産業：産業別GDP 企業：付加価値 製品：付加価値（企業の付加価値を製品に配分する問題あり）	物理量： 金銭的指標： 付加貨幣価値or 販売価格	GDP（NDP） 産業別GDP 総付加価値（企業）	製品等の財 サービス等の財 知的生産による財 （いずれも付加価値含む）
分母： 環境負荷	CO ₂ 排出量： 国：国全体 産業：産業+最終消費の配分量 企業：企業+最終消費の配分量 製品：企業の排出の製品への配分+最終消費の配分 資源使用量： 国：国全体 最終消費財：最終消費財の消費量（LCIによる）	当面はCO ₂ 排出量	資源生産性： エネルギー資源 （すべての産業に共通の投入であるから） 環境効率： その年度に新たに付加された環境負荷(environmental impact added) 現実的にはCO ₂ 排出量	エネルギー資源 鉱物資源 一般資源 建物 水 土地 CO ₂ 発生量 エネルギー消費量
考慮するライフステージ	負荷を配分することですべてのライフステージを考慮できる	・付加貨幣価値/該当産業への直接投入資源量（一様に適用可） ・物理量/ライフサイクルを考慮した資源量	年間の国の活動	ライフサイクル段階 リサイクル段階 積み上げ方式 マクロ方式
備考	CO ₂ 排出量を環境効率に適用するためには、LCAの概念を活かして、最終消費財の使用段階でのCO ₂ 排出量を各産業が分担する原則を、新たに構築することが必要であると思われる。従来のLCAにおけるインベントリ分析とは全く異なる手法が必要となるだろう。	LCA環境効率と部門環境効率を算出し、目的によって使い分けるのが好ましい。 サービス量を物理量で定義できる産業部門は物理量ベースの環境効率を計算し、提示すると分かり易い。	資源生産性指標の比較可能性は時系列比較と同一時点における横断的比較がある。 ・時系列比較：国民経済、産業別及び企業別の比較 ・横断面比較：国際間、産業間及び企業間の比較	

表 3.2.1 (2) 資源生産性・環境効率についての考え方のまとめ

	3.1.6 企業	3.1.7 産業	3.1.8 産業（特に工作機械）
目的	企業の環境対策を促進させ地球環境への付加を低減させるために、企業活動の資源生産性の指標を作成し、企業の環境に対する対策の達成すべき目標の設定をすること。また、環境活動を公平に評価することのできる指標を作成すること。	・環境負荷そのもの、あるいはそれへの影響度合いすなわち分母の指標化をして、その低減努力とその効果を訴える ・製品1単位あたりの性能、すなわち分子が産業全体/平均で向上していることを訴える	資源生産性を考慮することの重要性を明らかにし、資源生産性の具体的な指標を明示することにより、産業分野あるいは企業としての開発目標を策定する上での指針を示すこと
分子： サービス	企業の年商、利潤 サービスの数値化	固有単位（産業分類レベル） 付加価値	産業別生産額
分母： 環境負荷	エネルギー資源消費量 鉱物資源使用量 土地使用量 水資源使用量 環境負荷量（統合指標の利用） CO ₂ 排出量 廃棄物排出量	CO ₂ 排出量 化石燃焼消費量 有限資源（特に貴金属レアメタル） 排煙、排水中の化学物質濃度、年間総排出量 騒音、景観	産業別エネルギー消費量
考慮するライフステージ	対象企業のinputとoutputを考える 対象企業が関与するすべてのフローのinputとoutputを考える		資本金、生産設備、マンパワー、エネルギー、素材、原料、工具、切削油剤等をinput。製品、廃棄物をoutput。
備考	企業レベルの環境効率/資源生産性を求めることに着目して記述してきたが、製品レベル、産業レベル、国レベルとの整合性、拡張性を考慮して手法開発を実施しなければならない。また、企業が環境対策に投じた努力を評価でき、正しい環境対策を実施できうる手法の開発が望まれる。	単一のファクター表示には抵抗を感じる。目標が「環境負荷の低減」と言っても、到達すべき何らかの目標水準があつてのことか、低減すればするほど良いのか、その指標に基づく行動の背景となる「目標」の考え方が必要である。とくに、持続可能性に対しては、環境負荷の大小よりも希少性のほうが利く可能性がある。	具体的な検討事項としては、工作機械などの生産財と一般の消費財では性格が異なるので、この点を考慮する必要がある。生産財は生産設備という位置付けで大切に利用されることも加味して、無駄に余分に製造される消費財とは異なる点に配慮したファクターの考え方を提案することが必要である。

第4章 概念・手法比較調査

4.1 海外調査の概念整理

資源生産性/環境効率の研究機関・企業のうち、海外における次の9機関(企業)について、詳細に概要を整理した。

- Wuppertal Institute
- Factor 10 Institute
- World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)
- BASF 社
- European Environmental Agency (EEA)
- PRe Consultants 社
- Ecole Polytechnique Federate Lausanne
- Eco-Efficiency 2000
- SAM Index GmbH (Dow Jones Sustainability Index)

9 機関についての主な情報は次のとおりである。

表 4.1 海外における資源生産性 / 環境効率・研究機関リスト(その 1)

研究機関	アドレス、ホームページ URL、等
Wuppertal Institute	<p>ドイツ Wuppertal にある、環境効率の中心的研究機関。 Wuppertal Institute for Climate, Environment, and Energy Working Group Eco-Efficiency & Sustainable Enterprise が環境 効率の研究を担当。 http://www.wupperinst.org/Sites/home1.html Doppersberg 19,42103 Wuppertal,GERMANY Tel.: +49-202-2492-0 Fax: +49-202-2492-138</p>
Factor10 Institute	<p>Wuppertal Institute が中心となったファクター10の研究所 ファクター10の代表的な概念である MIPS を開発した、F. Schmidt-Bleek が所長を務めている。 日本からも東京ガス、コスモ石油が参加している。 http://www.factor10-institute.org/ La Rabassière, Carrère des Bravengues, F 83660 Carnoules Tél. et Fax ++33 494 332458</p>
WBCSD	<p>世界の 30 カ国、20 の産業分野から 150 程度の国際企業が参加し て、持続可能な発展を研究している機関。 World Business Council for Sustainable Development http://www.wbcd.ch/</p>
BASF	<p>世界最大級の化学会社。 http://www.basf.de/en/</p>
EEA	<p>European Environment Agency : ヨーロッパ環境庁 http://org.eea.eu.int/ Kongens Nytorv 6, 1050 Copenhagen K, Denmark Tel: +45 3336 7100 Fax: +45 3336 7199</p>
Pre consultants	<p>1990 年創立のエコデザインおよびライフサイクルアセスメントの スペシャリスト。 http://www.pre.nl/pre/default.htm Plotterweg 12 · 3821 BB Amersfoort · The Netherlands phone +31 33 4555022 · fax +31 33 4555024</p>

表 4.2 海外における資源生産性 / 環境効率・研究機関リスト(その2)

研究機関	アドレス、ホームページ URL、等
EPFL	フランス・ローザンヌにある、科学技術の研究所。 ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE http://www.epfl.ch/Eindex.html Lausanne phone ++41 +21 693 11 11
Eco-efficiency 2000	資源生産性・環境効率に関する国際会議の概要を紹介するホームページ。 http://www.nutek.se/information/ecoeficiency2000/themes.html NUTEK Förlag Fax nr 46-8-681 92 05
SAM Index GmbH (DJSI)	研究機関ではないが、金融市場が求める持続可能性の高い企業や資金への投資行動基準を定める合理性、一貫性、柔軟性、投資可能性を備えた指標を開発した。

その他、参考にした研究機関の情報も記す。

表 4.3 海外における資源生産性 / 環境効率・研究機関リスト(その3)

研究機関	アドレス、ホームページ URL、等
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development : 経済協力開発機構 現在 30 カ国が加盟する国際機関。主として、1)経済成長、2)貿易自由化、3)途上国支援のテーマの取組を行っているが、その中で環境問題についても幅広く研究が行われている。 資源生産性・環境効率だけでなく、一般的な環境指標から持続的発展指標などの開発も進んでいる。 http://www1.oecd.org/env/efficiency/coeff.htm OECD Environment Directorate 2, rue Andr・Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France Fax: +33 (0)1.44.30.63.99
Eco-Efficiency Network	Wuppertal Institute が中心となったネットワーク 研究者も Wuppertal Institute と兼任が多いよう。 http://www.oekoefizienz.de/english/maske1.html

この中から、幾例かを紹介する。

4.1.1 WBCSD (World Business Council for Sustainable Development)

WBCSD は 1992 年に発行した「Changing Course」の中でエコエフィエンスシーの概念を明らかにした。企業が適用しやすいようにその概念を具体化し、測定方法を示したレポートを発行している。

多様な企業活動を考慮し、柔軟に対応できるように、2 種類の指標を設定した。これは企業内部の効率的意思決定を可能にし、利害関係者の要求を充たすためである。

(1) 環境効率指標の種類

(a) 一般適用指標 (generally applicable indicator)

あらゆる企業活動に適用可能で、地球規模の環境問題に関連する指標である。国際的に普及している測定方法・定義に基づく。指標種類の数は少ない。

(b) ビジネス特有指標 (business specific indicator)

1 企業もしくはある産業にのみ適用され、個々の企業の業務内容・性質を反映した固有の指標である。企業が各自の業務内容に最適な指標を選択する。可能な組み合わせの種類は多い。注意事項：「ビジネス特有指標」が「一般適用指標」より重要度が劣るわけではない。単に広範囲に適用できないだけである。企業の環境効率パフォーマンスは両方の指標を含むべきである。

(2) 環境効率の定義

WBCSD による環境効率の定義は次のとおりである。

$$\text{環境効率性} = \frac{\text{製品・サービス価値 (A)}}{\text{環境負荷 (B)}} \quad \text{製造時 (B-1)、使用時 (B-2)}$$

分子・分母項目の例は次のとおりである。

表 4.1.1.1 環境効率の分子・分母の項目例

(A) 製品・サービス価値	(B-1) 製品・サービスの製造時環境負荷	(B-2) 製品・サービスの使用時環境負荷
容量 / 質量 金銭価値 機能	エネルギー消費 物質消費 天然資源消費 非製品アウトプット 予測し得ない事態	製品・サービス特性 梱包品廃棄物 エネルギー消費 使用・廃棄時の排出物

ただし、表 4.1.1.2 のように WBCSD は考えている。

表 4.1.1.2 分母 (B) に含めることのできる環境負荷

	製造時環境負荷	使用時環境負荷
一般適用指標	○ (含む)	× (含まない)
ビジネス特有指標	○	○

適用できるような標準化された使用時環境負荷は存在しないため。

(3) 指標項目の設定

(a) 一般適用指標

表 4.1.1.3 一般適用指標「分子項目」

指標側面		指標項目	単位
容量・質量		製品・サービス販売量	例：個
		販売量	例：kg
		生産量	例：kg
金銭価値		売上高 (国際会計基準)	通貨
	ポテンシャル指標	収益・収入 (国際会計基準)	通貨

表 4.1.1.4 一般適用指標「分母項目」

指標側面		指標項目	単位
エネルギー消費		エネルギー消費 (電力、化石燃料他)	GJ
物質消費		材料 (原材料、溶剤、中間製品他)	トン
天然資源消費		水	m ³
非製品アウトプット		オゾン層破壊物質排出量	CFC 換算 t
		温暖化ガス排出量	CO ₂ 換算 t
非製品アウトプット	ポテンシャル指標	酸性化係数	SO ₂ 換算 t
		総廃棄物量	トン

(b) ビジネス特有指標

表 4.1.1.5 ビジネス特有指標「分子項目」

指標側面		指標項目	単位
容量・質量		従業員数（人数、労働時間） 占有面積	-
	ポテンシャル指標	市場シェア	-
金銭価値		株価、負債、準備金・引当金、投資・損失、原価	通貨
	ポテンシャル指標	製品価格	通貨
機能		製品パフォーマンス（例：赤ちゃんおむつ、洗濯容量）	-
		提供サービス	-
		農業効率	取扱 ha
		製品寿命（例：製品使用年数、一車耐久距離）	-
		輸送能力（例：重量、人数）	トン/km 人/km

表 4.1.1.6 ビジネス特有指標「分母項目」

	指標側面	指標項目	単位
製造時	天然資源消費	木材、鉱物、土地利用	t、m ³ 、ha
	非製品アウトプット	大気圏・水圏へのガス・金属排出物質（VOC、NO _x 、重金属）	トン
		有害物質（残存性、蓄積度の高い物質）	-
		その他環境負荷（富栄養化、光化学スモッグ）	-
	予測し得ない事態	例：放出される量	-
使用时	製品・サービス特性	リサイクル率、再利用率、生物分解性、耐久性、安全性	-
	梱包廃棄物	販売量比例、供給元別（天然素材・再生素材）	-
	エネルギー消費	製造時同様	-
	使用・廃棄時排出	埋立、水中・大気中への排出	-
	その他	供給者（上流）の環境負荷	-

(4) 環境効率測定

(バウンダリ測定方法)

「一般適用指標」… 測定を実施する企業が直接コントロールできる範囲にとどめる(例: 購入電力)

「ビジネス適用指標」… 企業のコントロールは利かないが、対象指標と関連性が高い上流・下流も含むことができる(購入電力の燃料採掘・発電・送電ロスの過程も含む)

4.1.2 EEA (European Environmental Agency)

(1) ワークショップの背景

環境効率の概念を利用可能なものにするために、EEA、ファクター10研究所、WBCSD、EPE、オーストリア環境省、Family and Youth Affairs、北欧閣僚会議(Nordic Council of Ministers)は、専門的な知識を集積し、将来の作業を支援するための更なるアイデアを得るためワークショップを組織した。

(2) ワークショップの目的

ワークショップの目的は次のとおりである。

環境効率(eco-efficiency)、資源生産性(resource-productivity)の概念を導入し、明確にする。

経済および企業レベルにおける環境効率、資源生産性の指標開発に役立つ議論を行う。

環境効率(資源生産性)の概念及び指標を、ヨーロッパの国や企業で適用した事例を整理する。

環境効率(資源生産性)を促進するための機会や障壁を調査するとともに、環境効率の適切な指標の開発および実施を促進するためのEEAの役割を調査する。

(3) 環境効率の概念および算出手法

(a) 環境効率の基本的考え方

環境効率は、自然の使用を減少させながら、全ての人々の豊かさを実現することが目的である。

(図4.1.2.1)

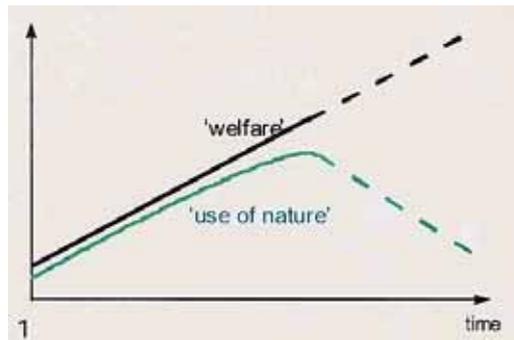


図 4.1.2.1 More welfare for all, with less use of nature

また、環境効率とは、資源の使用と経済活動による環境への汚染排出の関係を分断することを目的とした、戦略・手法といえる(WBCSD や OECD などの定義では、投入(input) 産出(output) 負荷(Pressure) 影響(impacts) 資源強度(resource intensity)といった概念を含んでおり、異なる解釈もある)。

環境効率、逆に言えば資源生産性という2つの指標は、「資源投入を少なく、サービス産出を多く」の達成に向けた進捗度を把握するために、相互に補完し合う関連した指標といえる。環境効率に加え、資源フローの絶対的な減量化は、地球の環境容量(carrying capacity)を維持するために必要である。

(b) 経済システムと環境システムの関係

経済システムは、環境システムの4つの基礎的な機能に依存している。

資源：エネルギー又は物質

容量：水

サービス：水が流れる法則、炭素循環

空間：生活、経済活動

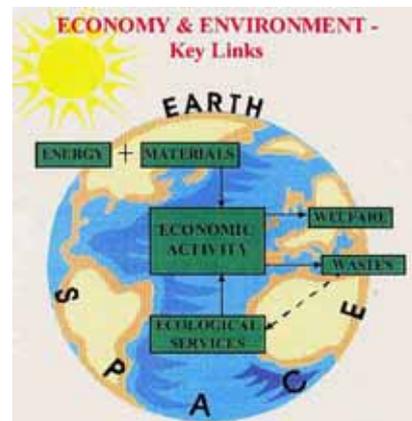


図 4.1.2.2 経済と環境の主たる関係

(c) 環境効率の算出手法

環境効率の算出式は、基本的には2つの変数によって構成される。

(Y) = 経済活動による豊かさの増減量

(M) = 自然の使用量

この変数を用いて、環境効率（M/Y）と資源生産性（Y/M）を計算できる。ただし、この2つの指標はYとMの変数によって簡単に計算できるため、両者を区別する必要はない。

環境効率性（eco-efficiency） =	$\frac{\text{自然の使用（use of nature）}}{\text{豊かさ（welfare）}}$
資源生産性（resource productivity） =	$\frac{\text{豊かさ（welfare）}}{\text{自然の使用（use of nature）}}$

指標は、意思決定過程で活用されるために情報を濃縮している。指標の主な役割は次のとおり。

- ◇ 情報を意思決定の場に運ぶこと
- ◇ 重要な現象や問題を把握すること
- ◇ 数値を単純に、そして制限すること
- ◇ 目標に結びつけること

（e）分子の指標：「豊かさ・経済産出（Y）」

豊かさを表す指標として、国家レベルでは国内総生産（GDP）が用いられてきた。GDPの計算は、国連のSNA（UN. System of National Accounts：GDPの基礎となる会計情報が提供される）に基づいているが、GDPが本当に豊かさかどうか批判されてきた。

中レベルでは、GDPを産業部門別に細分化したGVA（gross value added）がしばしば指標として用いられてきた。また、小レベル（企業、工場、製品、サービスレベル）では、GDPと同等の経済的尺度として「利益＋賃金＋価値低減＋税金－助成金」、又は単純に商品（製品又はサービス）の価格が用いられてきた。

豊かさやサービスの量を把握するための指標開発は、さらなる研究が必要である。

（f）分母の指標：「自然の使用（M）」

自然の使用量については、GDPのような総括的であり、かつ一般的に受け入れられている指標はまだない。しかし、資源生産性の指標のためには、活用できる基準を見つける必要がある。

指標は、環境で生じている現象を科学的に正確に把握する必要があるが、そのためには指標の数が大変多くなり、政策決定者や一般には全体的な理解が難しくなっている。例えば、OECDやUNCSD（the United Nations Commission on Sustainable Development）UKなどの主たる持続可能性指標は、90～130の指標から構成されている。そこで、最近、5～20の環境指標のコアセットが開発された（表）。コアセット指標は、従来の持続可能性指標に比べ資源生産性の算出のために明らかに適切なものとなった。

表 4.1.2.1 境指標コアセットの例

組織・機関	名称	環境指標項目数
UN-DSD/DESA (1998)	Measuring Changes in Consumption and Production Patterns gopher://gopher.un.org:70/00/esc/cn17/1997-98/patterns/mccpp5-9.txt	17 項目 ・ 8 項目は資源や環境問題関連 ・ 9 項目が消費関連
The Netherlands (1998)	National Environmental Policy Plan 3 http://www.minvrom.nl/environment/nepp3/	9 項目
Germany Minister for the Environment (1998)	Draft Programme for Priority Areas in Environmental Policy (Environment- Barometer) http://www.bmu.de/englisch/programme/baromete.htm	6 つの環境分野に 7 つの中心指標
Sweden(1998)	Grona Nyckeltal http://www.regeringen.se/info_rosenbad/departement/miljo/baromente.htm	11 の中心指標 (環境持続可能な発展) 6 つの将来の鍵となる指標
UK(1999)	Sustainability Counts http://www.environment/detr.gov.uk/sustainable_sustcounts/index.htm	・ 環境保全上の 6 つのヘッドライン指標 ・ 天然資源消費量に着目した 1 つのヘッドライン指標

自然の使用による環境への負の影響として、酸性化、オゾン層破壊、気候変化、化学物質による毒性などがよく知られている。ほとんどのコアセット指標には、資源利用に関する 4 つの指標とともに、環境への影響に関する 5 つの指標が含まれている(表)。このように、環境指標のコアセットでは、(1) 物質投入量の規模、(2) 環境影響、の 2 つの問題を抑える必要がある。

表 4.1.2.2 自然の利用による 9 つの指標

投入（資源利用） Inputs (resource use)	排出（影響 / 汚染） Outputs (impact / pollutants)
<ul style="list-style-type: none"> ・ 原材料使用量 ・ 国内総エネルギー消費量 ・ 土地利用 ・ 水消費量 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 温暖化ガス ・ 酸性化 ・ オゾン層破壊 ・ (危険な) 廃棄物 ・ 化学物質

(g) 目標およびタイムテーブル

目標を設定することは政策の説明責任に役立つ。全ての目標には、目標を達成するまでの期限が設定される。目標には、環境効率や資源生産性のような相対的なものと、資源使用量など絶対的なものの、2種類あることを区別しなければならない。

(4) ワークショップの結果

(a) マクロレベルでの環境効率のモニタリング

持続的発展を確実なものとするためには、マクロレベルにおいて環境効率をモニタリングすることが必要である。EEA では Eurostat とともに、産業部門（製造業、輸送、農業、エネルギーなど）に対して、環境効率の導入を促進する役割がある。そのため、環境効率指標の開発は、経済や産業部門レベルの目標設定を促進することになる。環境効率の指標は、EEA で作成した指標類型（Typology of Indicators）のタイプ C 指標に該当する

表 4.1.2.3 EEA の指標類型（Typology of Indicators）

指標タイプ		指標例
タイプ A	Descriptive Indicators	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自動車走行距離 ・ 二酸化硫黄排出量 ・ 湖沼水質 <p style="text-align: right;">など</p>
タイプ B	Performance Indicators	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境基準を上回る二酸化窒素の曝露人口 <p>など</p>
タイプ C	Efficiency Indicators	<ul style="list-style-type: none"> ・ GDP に対するエネルギー消費量 ・ 自動車走行距離に対する排気ガス排出量 <p>など</p>
タイプ D	Total Welfare Indicators	<ul style="list-style-type: none"> ・ グリーン GDP ・ ISEW (Index of Sustainable Economic Welfare) <p style="text-align: right;">など</p>

(b) エコエフィシエンシー算出に必要な環境ヘッドライン指標

エコエフィシエンシーは、豊かさの指標と環境指標（自然の使用）の比率である。そこでワークショップでは環境ヘッドライン指標（Environmental headline indicators）が提案され、EEA ではその開発に着手している（表 4.1.2.4）。このうち、EU における GDP に対する危険な化学物質強度の経年変化が図 4.1.2.3 のとおりである。

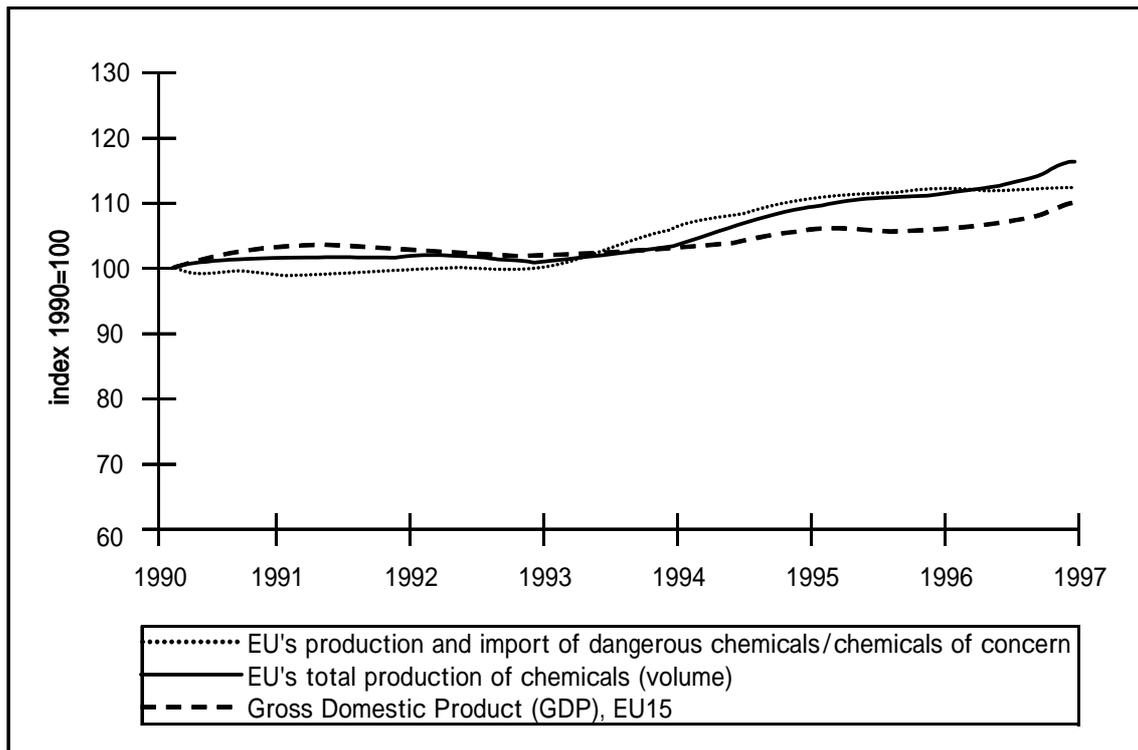


図 4.1.2.3 EU における GDP に対する危険な化学物質強度（1990-97）

表 4.1.2.4 EUの環境ヘッドライン指標

環境問題	実際の指標 Actual Indicator	理想的な環境ヘッドライン指標 Ideal environmental headline index
気候変動	温室効果ガス 3 種 (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O) の統合指標	温室効果ガス 3 種 (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC _s , PFC _s , SF ₆) の統合指標
対気質	異なる場所における汚染基準を超えた日数 3 種または 4 種の汚染物質 (SO ₂ , NO _x , NH ₃ , NMVOC _s) の統合指標	異なる場所における汚染基準を超えた日数 3 種または 4 種の汚染物質 (SO ₂ , NO _x , NH ₃ , NMVOC _s) の統合指標
水質	陸水 EU 又は国の硝酸塩の水質基準を超える陸水の割合 大河川における窒素・リンの集積	EU 又は国の水質基準を超える陸水の割合 European river quality index
	海水 海岸及び海域における窒素・リンの排出量 (未定義)	(未定義)
水量	総給水量	水使用強度 (総給水量に対する再生利用水の割合に関する比率) (Intensity of fresh water use)
自然及び生物多様性		・ 遺伝子と生息地の多様性に基づく生物多様性の指標 ・ 農業・環境計画 (Agri-environment programme)
土地利用	建物密集地域の増加量	異なる土地利用者への変化 (自然から建物密集地や、侵食・砂漠化など)
化学物質	危険な化学物質/化学薬品の生産量・輸入量指標	有害化学物質の使用における重み付けをした有害性指標
廃棄物	埋立処分量	・ 埋立処分量および焼却処分量 (熱回収の有無) ・ 廃棄物フローにおけるリサイクル
資源利用	国内総エネルギー消費量	総物質必要量 (TMR: Total Material Requirement)
都市的地域	輸送による旅客量	未定義 (可能性のある指標は、交通、大気質、土地利用に関連する)
環境システムの脆弱性		未定義 (可能性のある指標は、海水質、土地利用に関連する)

(c) 持続可能性の総合的な分析に活用されるフレームワークとしてのエコエフィシエンシー
エコエフィシエンシーは、EEA の役割の一つでもある社会経済開発の統合的分析及び評価のための概念の一部として活用される。持続可能性に関する分析は、政策立案において事前に必要なものである。

統合した分析を行う場合、相対的及び絶対的なエコエフィシエンシーの区分に注意しなければならない。国の環境計画の目標にファクター10を採用した最初の国であるオーストリアの場合、1970～1990年の間に相対的なエコエフィシエンシーは24%増加しているけれども、77%の経済成長によって資源の絶対的使用料量も34%増加している。

(d) ビジネスとパートナーシップ

経済活動のエコエフィシエンシーを高めていくためには、経済部門の役割が重要であり、ビジネスとパートナーシップは不可欠である。EEEI(the European Eco-Efficiency Initiative) は、ビジネスにエコエフィシエンシーを導入するための複数の利害関係者から成るプロジェクトであり、EPE や WBCSD から構成される。

4.1.3 Pre Consultant

(1) 背景及び研究の目的

西欧諸国の政策は、持続可能な経済開発を目指している。環境負荷の削減を伴う長期的な経済成長は、私たちの生産及び消費システムの変化を求めており、経済活動とそれに伴う環境への負荷を切り離す手法が必要となる。そのための手法として、この10年間、新技術を用いた製品生産過程における環境負荷の低減、エコデザインを用いた製品開発、製品のライフサイクル管理の導入が行われてきた。しかし、コスト的な効率性を求めた単位生産あたりの環境負荷削減は、消費の成長によって実際は環境負荷が増加する恐れがある。

そこで、持続可能な発展に向けた次のステップとして、生産及び消費システムの変化を促進するために、生産とサービスの融合を図った新たな概念として、製品 サービス・システム (Product-Service Systems : PS Systems : 以下、PS システム) が考えられた。

オランダにおける経済・環境政策によれば、製品 サービス・システム (Product-Service Systems : PS Systems : 以下、PS システム) は、中期・長期的な持続的な経済発展の経過を捉えるために適していると認識されている。本研究は、PS システムの環境政策に関して、PS システムの可能性を評価することを目的として行われた。研究の進め方としては、まず理論的なフレームワークを開発し、次に新たな分析手法の開発及びケーススタディの実施を行った。

(2) PS システムの概念

(a) 用語定義

PS システムの概念に誤解がないよう、使用する用語の定義を行う。

表 4.1.3.1 PS システムの用語の定義

用語	定義
製品	販売されるために生産された物。
サービス	経済価値を他者へ提供する活動 (多くの場合、商業ベースで行われる)。
システム	関連する全ての要素の集合体。
製品システム	消費者のニーズを満たすための、一連の製品生産のセット
PS システム	消費者のニーズを満たすための、製品の生産とサービスの市場的なセット。
“pool” を構成する価値 (Value crating pool)	消費者のニーズを提供するために、相互に関連する一連の経済活動。
機能単位	PS システム及び参照システム (reference system) によって満たされる、測定可能な機能の基本量。

(b) 基本的な考え方

PS システムは、消費者のニーズを満たすために必要な製品及びそれに伴うサービスで構成される。生産とサービスの比 (product/service ratio : P/S ratio : 以下、P/S 比) は、技術の進展や経済活動の最適化、それに伴う消費者のニーズの変化によって異なってくる。

異なる製品とサービスを融合し新しい経済的価値を創出する新たな PS システムは、経済成長とそれに伴う環境負荷の発生を切り離す可能性を持っている。

また、製品とサービスの関係は、製品のライフサイクルステージに応じて明確にすることができる。この考えを Product-Service Cross を用いて示した。縦軸は生産サイクル (Product cycle) を示しており、設計、販売、生産、分配、設置・セットアップ、使用、メンテナンス、修理、アップデート・機能拡張、廃棄管理の段階がある。一方、横軸はサービス段階 (Service stage) を示しており、サービスのデザイン、そのためのツールの作成、試用、使用、デザインの修正の段階がある。

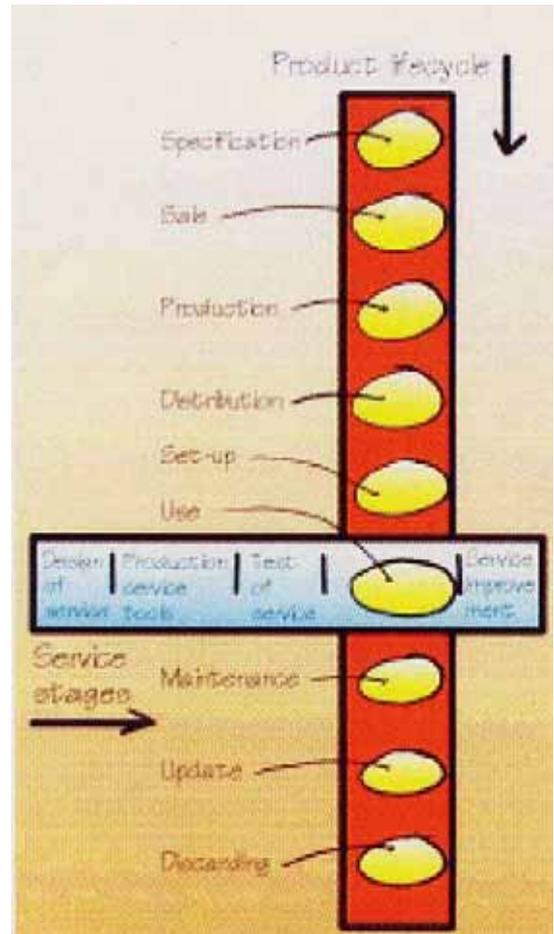


図 4.1.3.1 Product-Service Cross

各産業の製品とサービスの位置づけが、Product-Service Cross のどこで交わるかによって PS システムの種類も異なってくる。この考え方に基づき、PS システムは 4 つに分類される。

製品に付加的なサービスが伴うシステム（“Ps”）

- 例)・「Odin Holland B.V 社」の有機野菜の予約購入：製品のデリバリー時にサービスが提供される。
- ・「Stybenex 社」の建築用断熱材 EPS のレイアウトプラン・予測・回収サービス：製品の仕様を決める際に、廃棄段階でのサービスが提供される。
- ・「Gispen 社」のホテル・オフィスサービス（オフィス家具を含めた総合的家具サービス）：製品の仕様を決める際に、使用段階でサービスが提供される。

サービスに付加的な製品が伴うシステム（“Sp”）

- 例)・「Liberter 社」の携帯電話サービス（携帯電話本体は無料で加入者に配布される）：携帯電話のサービスプロバイダーから、電話サービスの利用に伴い製品が提供される。

消費者ニーズを満たすために製品及びサービスが同等に重要なシステム（“PS”）

- 例)・「Douwe Egberts 社」のコーヒーシステム及び「Electrolux 社」の貸洗濯機サービス：クライアントの満足度を高めるために、製品・補助設備・内容物など製品の使用による満足度を得るためのサービスも合わせて提供される。
- ・「Greenwheels 社」のカーシェアリングサービス：自動車のパートタイム使用（サービス）と所有（製品）が提供される。

PS システムから改良されたものへと変化が生じるシステム（“STCH”）

- 例)・「Postbank 社」の Chipper カード：電子マネーのシステム導入によって、製品・サービスというシステムから新しいシステムへと転換された例。

(3) PS システムの分析 (Four axes model)

(a) 分析の基本的考え方

PS システムの評価のために、定性的及び定量的な分析手法の 2 つの手法を開発した。

PS システムの分析にあたり、PS システムの価値そのものを独立して表すことは難しい。そこで、現在の市場においてリーダー的位置づけの参照システム (reference) を選び、PS システムと参照システムとの比較を通じて分析を行う。

参照システムは、PS システムによる機能・サービスを明確に把握した上で、同様の機能・サービスに関する顧客を持っている、あるいは市場において利用可能である、といった視点から選択される。

(b) “ four axes model ” を用いた定性的評価

PS システムの評価は、企業にとって最も関係のある顧客と及び社会背景を考慮に入れ、環境特性、経済特性、企業理念への適合、市場への適合、の 4 つの観点から評価すべきである。

この考えに基づき、PSシステムを評価するための“four axes model”を開発した。“four axes model”は、まだアイデアの段階におけるシステムの評価を行う場合や、システムの評価にあたりデータの不足や評価値の算出が困難な場合に適用される。

定性的評価は、様々な分野の専門家が集まる expert panel を設置し、expert panel において PS システムと参考システムを比較し、PS システムに対して 4 つの項目(環境特性、経済特性、企業理念への適合、市場への適合)の評価を検討することによって行われる。

(c) “E2 Vector (Economy-Environment Vector)”を用いた定量的評価

定性的評価における 4 つの評価項目のうち、環境特性と経済特性の 2 つについて、更なる定量的評価を行う。

1) 経済特性に関する定量的評価

経済特性の評価は、次の 2 つの側面から評価することができる。

表 4.1.3.2 経済特性に関する定量的分析

企業レベル	PS システムと参照システムについて、その投資額と製品・サービスによって得られる収益の比較を通じて、定量的評価を行う。
利益プールレベル (profit pool level)	<p>“利益プール(profit pool)”という概念を用いて、製品やサービスの提供に伴う投資と利益を分析し、評価を行う。分析は次のような手順で行われる。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 製品やサービスの経済活動の側面(生産、税金や保険、燃料消費など)を決定する。 2) 各経済活動側面における、投資量、取引量など「経済的価値」と、そこで得られる「利益」を算出する。 3) X 軸に経済的価値、Y 軸に利益をとり、グラフ化する。 4) PS システムと参照システムの両者について作成し、どの経済活動側面でどちらが有利かを比較する。

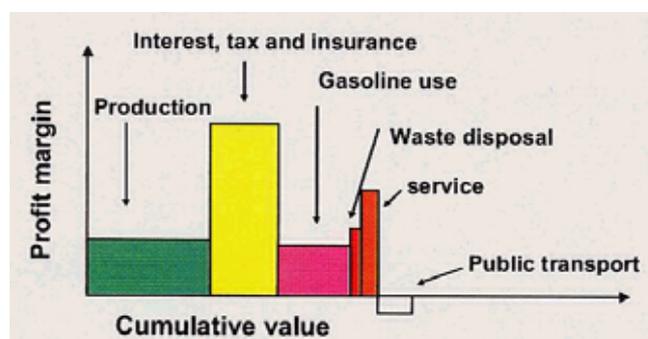


図 4.1.3.2 利益プールレベルの算出結果

2) 環境特性に関する定量的評価

環境特性の評価は、次の2つの側面から評価することができる。

表 4.1.3.3 環境特性に関する定量的分析

LCA を用いた分析	製品やサービスのライフサイクルで行われる様々な活動に伴って生じる環境への負荷（二酸化炭素の排出量など）を算出し、製品やサービスの環境負荷を把握する。
環境プール概念を用いた分析 (eco pool concept)	基本的な概念・手法は“利益プール”と同じ。ただし、異なる点は“利益プール”の「利益」の代わりに「環境負荷」を用いることである。

3) “E2-Vector” の開発

ここまでの経済特性で用いた“利益プール”及び環境特性で用いた“環境プール”では、企業や産業レベルでの経済活動側面を対象として利益や環境負荷を算出していた。そこで、経済活動側面に代わり、LCA の概念に基づいたライフサイクルステージ別に経済的価値や環境負荷を算出する、“LCA-based eco pool”を作成した。

さらに、“LCA-based eco pool”の各ライフサイクルステージにおいて、経済的価値と環境負荷から成るベクトル（Vector：矢印）を記述し、全ライフサイクルステージのベクトルを統合した“E2-Vector”を作成した。

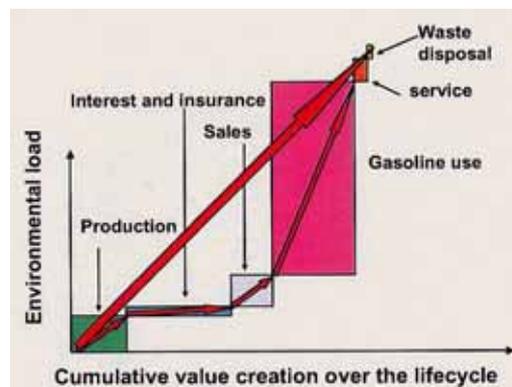


図 4.1.3.3 “E2-Vector”

“E2-Vector”を用いた環境特性、経済特性の評価の視点は次のとおりである。

- PS システムの導入により単位経済活動当りの経済的価値は高まるか（経済的側面）
- PS システムの導入により単位経済活動当りの環境負荷は削減されたか（環境的側面）
- PS システムの導入により経済活動の成長と環境負荷の増加という関係を切り離すことができたか（環境効率的側面）

上記の評価の視点について、 は“ E2-Vector ”の X 軸方向の大きさ、 は“ E2-Vector ”の Y 軸方向の大きさ、 は“ E2-Vector ”の傾き（傾きが X 軸に近づくほど環境効率は高い）によって評価することができる。

“ E2-Vector ”を用いて PS システムと参照システムを比較し、PS システムの有効性を評価する場合、評価結果は次の 4 つのパターンに分類することができる。

経済的価値は同じだが、参照システムで環境負荷が高い場合

PS システムが有効

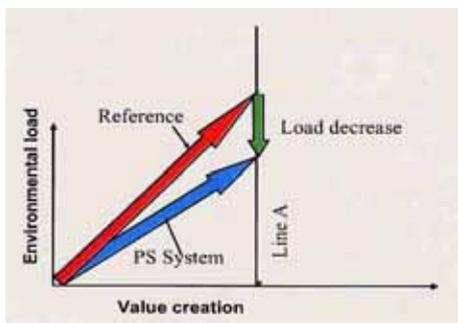


図 4.1.3.4 “ E2-Vector ”の例（その 1）

環境負荷は同じだが、参照システムで経済的価値が高い場合

参照システムが有効

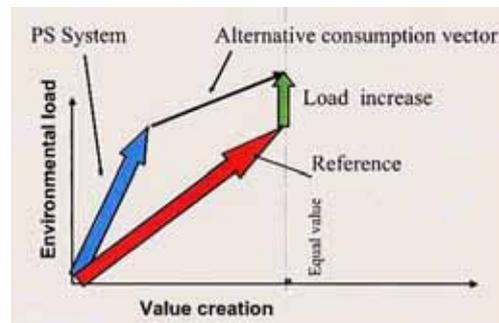


図 4.1.3.5 “ E2-Vector ”の例（その 2）

環境負荷は同じだが、参照システムで経済的価値が低い場合

PS システムが有効

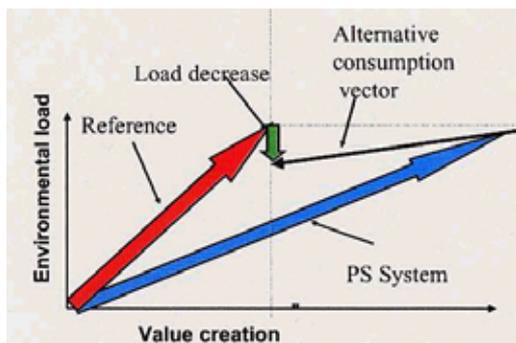


図 4.1.3.6 “ E2-Vector ”の例（その 3）

環境負荷と経済価値の割合（傾き）は同じ

1 次使用では PS システムが有効だが、再消費段階のベクトルによってその評価が変わる

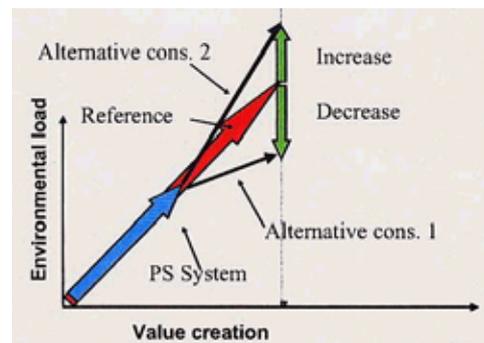


図 4.1.3.7 “ E2-Vector ”の例（その 4）

(4) まとめ

(a) PSシステムの定性的評価

140のPSシステムの事例から10の事例を選択し、“four axes model”による定性的評価を行った。

評価に用いたデータは、各企業のマネージャに対するヒアリングによって収集している。

ヒアリング後、内部の検討組織によって評価を行った(panel assessment)。各企業に対する評価の後で、10の企業の評価結果を比較して、評価基準が一致するように調整を行った。10の企業のPSシステムに対する、参照システムとの比較した定性的評価の結果は表のとおりである。この事例研究では、10の企業のうち、6つの企業で、PSシステムの環境特性及び経済特性に関する評価がプラスとなった。

(b) PSシステムの定量的評価

定性的評価において、環境特性及び経済特性の評価がプラスとなった企業から、3つの企業(Car sharing、Laundry-services、Vegetable by Subscription)を選択し、“E2-Vector”の分析を行った。その結果、PSシステムはわれわれの生活をより持続的なものにする役割を果たす潜在能力があることが明らかになった。

(c) 結論

今回、10の企業を対象にPSシステムの効果を検証した。その結果、PSシステムは持続可能な発展のために、高い潜在的能力を持っていることを示すことができた。また、PSシステムの効果を把握する最初の試みではあるが、新たな手法を活用して、経済的な価値を増加させながら環境負荷を低減させるPSシステムの導入の手助けになることを期待している。

PSシステムの実行可能性は、少なくとも次の3つの視点によっている。

経済の長期的展望

企業の理念及び戦略

PSシステムに対する顧客の適合

今回の事例研究では、上記の視点とともに環境への負荷に対してより適切に取り組むためには、次の視点も必要である。

PSシステムの自然生態系に対する負荷

経済的価値と自然生態系への負荷の関係

4.2 国内調査の概念整理

国内でも、数は少ないものの企業や研究機関が、資源生産性・環境効率の算出を試みている。ここでは三菱電機の例を紹介する。

4.2.1 三菱電機株式会社

(1) 背景と目的

2001年4月から施行されている「資源有効利用促進法(改正リサイクル法)」では、製品設計についてリデュース、リユース、リサイクル(3R)の優先順序が示され、指定再利用促進製品として個別の製品を指定して環境適合設計の適用が義務付けられた。

環境適合設計の評価方法に関しては製品アセスメントマニュアルの実施があるが、製品自体の環境負荷を定量的に表現する手段はまだ確立されていない。そのための有力な手段の一つとしてLCA(Life Cycle Assessment)が最近急速に理解され始めたが、さらに直接的で簡易手法であるファクターによる表現法の研究も進んでいる。

ファクターは、製品の環境負荷低減の改善度を総合的に表すものであり、製品の様々な環境側面(エネルギー消費量や資源消費量など)を総合的に捉えることを目的にした指標である。

(2) 環境適合設計へのアプローチと評価

三菱電機(株)で取り扱われている製品やシステムは5分野、4万点を越えるものであり、環境適合設計を統一する事は難しいが、全製品に適用できる「環境適合設計ガイドライン」を定めて、同一の理念の下で、個別製品毎の「製品アセスメント」を実施している。

同一理念の基本は、「資源の有効利用(M: Effective Use of Materials)」、「エネルギーの効率利用(E: Efficient Use of Energy)」、「環境リスク物質の排出回避(T: Evasion of Toxic Substance Discharge to the environment)」の3つの視点で、「MET」と呼ばれている。三菱電機(株)ではMETに基づいて、部門毎、製品毎に定量的評価を求めており、資源の有効利用、エネルギーの効率的利用、環境リスク物質の排出回避、の3つの視点で、環境適合への改善状況をチェックしている。

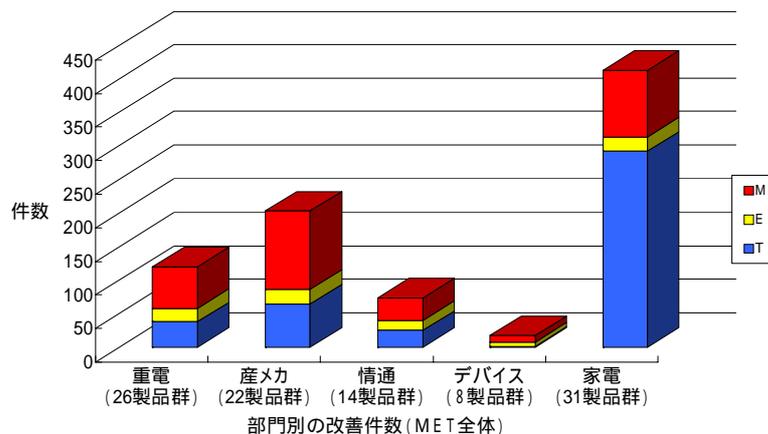


図 4.2.1.1 部門別 MET 取組実績

(3) 資源生産性手法を用いた製品別の環境適合性評価

個別製品の環境適合設計の効果を評価する手法として、資源生産性（ファクター）を用いた。

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品の性能改善度}}{\text{製品の環境負荷改善度}} \quad \text{ファクター} = \frac{\text{新製品の環境効率}}{\text{基準製品の環境効率}}$$

環境効率やファクターの算出手法は、国内外で多くの研究が行われている状況であるが、三菱電機株式会社としての試算として行っている。

(a) 研究段階でのファクター

性能改善度や環境負荷改善度は、製品によって様々な側面を持っている。そのため、環境効率を算出するためには、製品別の性能改善項目と環境負荷改善項目を設定する必要がある。

環境負荷改善項目については、METの基本理念を受けて、「製品質量 (M)」、「電気消費量 (E)」、「環境リスク物質使用量 (T)」の3つを設定している。また、性能改善項目については製品に応じて項目を設定している。

性能改善項目と環境負荷改善項目が複数になるため、統合化が必要であるが、それには各項目に重み付けを行っている。環境負荷改善項目については、「製品質量 (M)」が 0.4、「電気消費量 (E)」が 0.4、「環境リスク物質使用量 (T)」が 0.2 としている。また、性能改善項目については、全自動洗濯機を例にとると「時間短縮」が 0.5、「節水」が 0.5 となっている。

全自動洗濯機を例に、基準製品の性能や環境負荷を 1 として、基準製品に対する評価製品の性能や環境負荷を求め、性能改善度と環境負荷改善度を試算した結果は次の表のとおり。

表 4.2.1.1 ファクター の算出過程

(1) 性能向上の度合い

性能向上項目 (Pn)	重み	基準製品の性能	評価製品の性能	評価製品の重み付け性能 ×	備考
時間短縮	0.5	1	2.46	1.23	1サイクル69 28分
節水	0.5	1	2.09	1.045	使用水量245 117L
計	1	1	-	2.275	合計 1

(2) 環境負荷低減度の計算

環境負荷項目 (In)	重み	基準製品の環境負荷	評価製品の環境負荷	評価製品の重み付け環境負荷	備考
M	0.4	1	0.66	0.264	製品質量 60 40Kg
E	0.4	1	0.36	0.144	消費電力 219 78Wh
T	0.2	1	1	0.2	基準製品と同様
計		1	-	0.608	合計 1

上表では、「性能改善度」、「環境負荷改善度」の各項目の評価点を加算している。これによってファクター を算出した結果が次のとおり。

$$\begin{aligned} \text{ファクター} &= \text{評価製品の環境効率} / \text{基準製品の環境効率} \\ &= (2.275 / 0.608) / (1 / 1) = 3.74 \end{aligned}$$

試算では、性能改善度、環境負荷改善度の各項目の評価点を加算する「加算方式」を用いている。研究段階では、この他に各項目の評価点を乗じる「積算方式」、性能改善度については加算、環境負荷改善度については積算する「併用方式」も試算されている。全自動洗濯機を例にした、「加算方式」、「積算方式」、「併用方式」のファクター の試算結果は表のとおり。

表 4.2.1.2 全自動洗濯機のファクター 試算結果

製品例	ファクター×試算結果			備考
	加算方式	積算方式	併用方式	
全自動洗濯機	3.74	21.6	9.58	91年度製品比

(b) 公表用のファクター

三菱電機株式会社では、研究段階のファクター の基本的考え方をういて、2001年12月段階においてより簡易的なファクター を公表している。

公表されているファクター の基本的考え方及び算出手法は次のとおり。

基準製品（原則として10年前の製品）と現行製品を比較する。

METに基づき、1)製品質量、2)消費電力量、3)環境リスク物質使用量、の3つについて、基準製品に対する現行製品のそれぞれの割合（ a, b, c ）を算出し、これをベクトルの長さとして統合したものを環境効率とする。

$$\begin{aligned} \text{基準製品の環境効率 (A)} &= \sqrt{1^2 + 1^2 + 1^2} \\ \text{現行製品の環境効率 (B)} &= \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \end{aligned}$$

製品の性能・機能向上分は、原則として評価に加えない。

ファクター は次のように算出する。

$$\text{ファクター} = B / A$$

全自動洗濯機を例にファクター を算出すると、 製品質量が 41%削減、 消費電力量が 63%削減、 環境リスク物質使用量が 49%削減、 となりファクター は 2.00 となる。

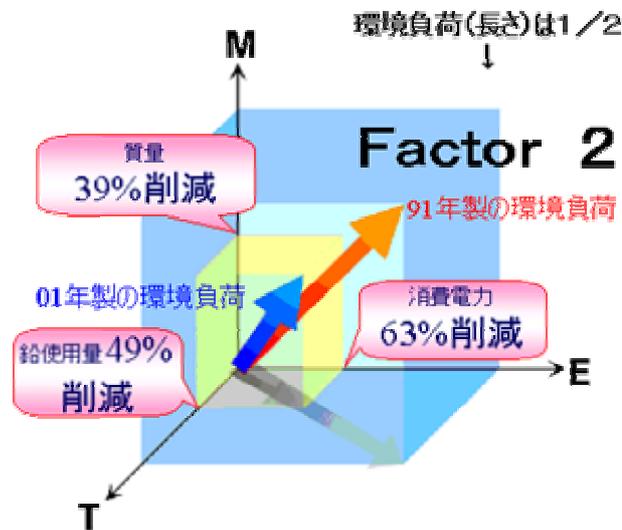


図 4.2.1.2 ファクタ - の算出結果

(4) 今後の課題

研究段階でのファクター では、加算、積算、併用の 3 種類の手法が用いられ、次のような課題があげられている。

重み付け係数の数値の根拠。

MET の項目の設定。

使用時、廃棄時の環境負荷が取り上げられていない。

このような課題を受け、2001 年 12 月段階では の重み付けをなくしたファクター が公表されている。

また、ファクター の利点として次のような点があげられている。

新規開発製品の評価について、自社製品比較が定量的にできる。

LCA では相対的に数値が低くなる、製造段階での評価が明確である。

LCA に比べ計算が極めて簡単である。

多くの製品の企業内環境評価指標として大変わかりやすく、過去から現在までの製品の環境評価のトレンドを追うこともでき、製品によっては環境貢献の成熟度を判定することもできる。

消費者にもわかりやすい指標である。

表4.6 調査結果 - 概念・手法比較(1)

機関	指標	レベル	算出に用いるサービス・環境負荷のデータ (N: Numerator 分子, D: Denominator 分母)		算出に当たっての統合化・集約化の有無と手法	対象とするライフステージ					システムバウンダリー of の考え方	リサイクルの考え方
			(サービス)	(環境負荷)		採	製	輸	使	廃		
						取	造	送	用	棄		
Wuppertal Institute	Material Input per Service Unit (MIPS)	製品	単位機能サービス(D) 単位機能サービス = $n \times p$ n = 利用回数・時間・面積 etc p = 利用人数	物質集約度(N) 物質集約度 = $(M_i \times R_i)$ M _i = 物質集約度 (リュックサック因子) R _i = 素材重量	・「物質集約度」について統合化・集約化が行われている ・物質集約度は、製品・サービスの製造から使用、廃棄段階までに投入される全ての資源ごとに、それぞれのリュックサック因子(資源を活用するために必要となる総物消費量・移動量)を乗じその総和とする。 物質集約度 = (物質量 × リュックサック因子)						・対象とする製品によって、扱うライフステージは変わる。	・物質集約度やMIPSの算出に、利用段階における資源の再投入量及びサービスの再増加を考慮している。
WBCSD	Generally Applicable indicator (一般適用指標)	企業	製品・サービス価値(N) 容量/質量 金銭価値 機能	環境負荷(D) エネルギー消費 物質消費 天然資源消費 非製品アウトプット 予測し得ない事態							・環境効率を算出する企業が、直接コントロールできる範囲まで算出対象とする。	・特に考慮されていない。
	Business specific indicator (ビジネス特有指標)	企業 産業	製品・サービス価値(N) 容量/質量 金銭価値 機能	環境負荷(D) (製造時) エネルギー消費 物質消費 天然資源消費 非製品アウトプット 予測し得ない事態 (使用時) 製品・サービスの特性 梱包品廃棄物 エネルギー消費 使用・廃棄時の排出物							・企業のコントロールできない範囲においても、環境効率の算出対象と関連性の高い部門については、算出対象とする。(例えば、使用電力の燃料採掘や発電・送電ロスなど)。	・特に考慮されていない。
BASF	エコ効率分析	製品	消費コスト(標準化) 消費者負担	環境負荷ポイント(標準化) ・5要素 (資源、エネルギー、大気系、排水系、土壌系排出物) ・2要素 (潜在的毒性、潜在的リスク及び誤用) 潜在的毒性はMAK値 ・(Maximale arbeitssplz-Konzentration)を使用 ・誤用は0~3の4段階評価	・環境負荷ポイントについて統合化・集約化が行われている。 ・環境負荷ポイントは、環境負荷の側面別に下記の環境負荷係(社会的係数)を乗じている。 ・社会的係数は、消費者へのアンケートによって決定している。 ・環境効率の算出には、環境負荷ポイント及び消費コストを正規化している。 [環境負荷係数(社会的係数)] エネルギー消費量: 0.25 資源消費量: 0.25 大気汚染物質 (温室効果ガス): 0.05 (オゾン層破壊物質): 0.02 (光化学オゾン): 0.02 (酸性雨): 0.01 水質汚染物質: 0.07 固形廃棄物: 0.03 人間毒性、生態系毒性: 0.2						・LCAの概念に基づいて作成されており、下流工程までを算出の対象としている。	・特に考慮されていない。

表4.7 調査結果 - 概念・手法比較(2)

機関	指標	レベル	算出に用いるサービス・環境負荷のデータ (N: Numerator 分子, D: Denominator 分母)		算出に当たった統合化・集約化の有無と手法	対象とするライフステージ					システムバウンダリーの考え方	リサイクルの考え方
			(サービス)	(環境負荷)		採取	製造	輸送	使用	廃棄		
EEA	Eco-efficiency (環境効率) resource productivity (資源生産性)	産業	豊かさ(Welfare) GDP GVA 利益+賃金+税金-助成 商品(製品・サービス)価格	自然の使用(Use of nature) (投入:資源利用) 原材料使用量 国内総エネルギー消費量 土地利用 水消費 (排出・影響・汚染) 温暖化ガス 酸性化 オゾン層破壊 (危険な)廃棄物 化学物質 ・「自然の使用」に関する指標 として、環境ヘッドライン指標 を開発中	・今のところ、統合化・特集化は行われていない。 ・「豊かさ」、「自然の使用」からそれぞれ指標の選び出し、比を算出している。						・環境効率の向上の必要性とともに、環境容量(carrying capacity)の維持の必要性が、概念として言及されている。 ・主に産業部門への適用を考慮して開発されており、ライフサイクルに関してはあまり言及されていない。	・特に考慮されていない。
	Industrial Eco-efficiency indicators (産業環境効率指標)	国 産業	経済的アウトプット VA(Value added at factor cost)	環境影響 (環境からの利用量) エネルギー利用 天然資源利用 他の物質利用 土地利用 (環境への放出) 汚染物質の放出 廃棄物発生/副産物発生	・今のところ、統合化・特集化は行われていない。 ・「環境影響」の各指標項目について、「経済的アウトプット(VA)」に対する比を1つずつ検証している。						・産業部門に適用可能な環境効率指標の開発であり、ライフサイクルやシステムバウンダリはほとんど言及されていない。	・特に考慮されていない。
Pre	E2-Vector (Economy Environment Vector) Product Service System(PSシステム)の環境効率評価の手法	産業	経済価値 ライフサイクルにおける経済的費用の累計	環境負荷 ライフサイクルにおける環境負荷(使用する環境負荷側面は、産業によって異なる)	・環境効率について、統合化・集約化を行っている。 ・環境効率は、ライフサイクルの各段階における「経済価値」と「環境負荷」の比を、ベクトル(矢印)として表現している。全ライフサイクルのベクトルを積算することで、総合的な環境効率を表す。						・産業部門への生産サービスシステムの導入のため環境効率指標の開発のため、特定の産業部門システム内に限定している。 ・ただし、サービス提供時も対象にするなど、ライフサイクルは考慮されている。	・再利用段階における「計税価値」、「環境負荷」の増加が考慮されている。
EPFL	Return on Environment (ROE)	製品	販売価格に対するライフサイクルコスト(N) 資源採取・輸送・生産・使用・廃棄段階のコスト	環境負荷(D) ライフサイクルにおける環境影響評価結果(使用する環境負荷側面は、対象とする製品によって異なる)	・環境効率指標の分子の算出において、統合化・集約化を行っている。・ライフサイクルコストの集約にあたり、販売価格で標準化を行っている。						・ROEの算出に当たってはシステムバウンダリなどは考慮されていないが、国や地域、産業を越えたマクロ的・ミクロ的な環境効率指標のリンクの必要性が言及されている。	・環境影響にリサイクルの視点を盛り込んでいる。
三菱電機株式会社	環境効率	製造	製造の性能改善度(N) ・製品によって評価項目が異なる。 (例)洗濯機:時間短縮、節水	製品の環境負荷改善度(D) ・製品質量 ・電気消費量 ・環境リスク物質使用量	・「性能改善度」については、評価項目ごとに係数を設定して、統合化・集約化を行っている。 ・「製品の環境負荷改善度」については、評価項目ごとに係数を設定して、統合化・集約化を行っている。 ・2001年12月現時で公表されているものは、「製品の環境負荷改善度」のみであり、3つの項基準年に対する割合をベクトル表現する手法で統合化・集約化を行っている。						・設計段階において、製品の消費電力量や資源消費量を考慮している。	・特に考慮されていない

第5章 平成13年度調査の成果と今後の課題

平成13年度は本調査を立ち上げ、委員会で次年度以降の本格調査項目についての検討を行った。今後の調査方向について、核心となるであろう検討課題の抽出を行うことができた。また2つのWGでは次年度以降の調査内容基盤となる情報収集を行い、具体的な調査研究活動策定及び評価指標検討において成果を収めることができた。本成果を踏まえて、平成14年度はファクター算出方法の開発に着手する予定である。

平成13年度のWG1では、幾つかの製品・産業の事例を取り上げ、統一された算出方法にて、資源生産性、環境効率及びファクターを試算した。実際の算出過程を経ることにより、理論上では想定し得ない算出方法論上の問題点が明らかにされた。これらの問題点を解決しながら、実効性の高い手法を構築することがWG1の課題である。

WG1では指標に変化を与えた要因が抽出されたが、数値の変化との関連性を十分に検証できなかった。技術的・社会的側面における複数の要因が入り組み、明確にその構造を把握することは難題を極まることが予想される。しかし、ファクターの有用性・実効性を高めるためにも、引き続きこれらの要因の影響度を徹底的に解明することが必要であろう。ファクターによる製品・企業・産業のパフォーマンス評価の信頼性を高めるのみならず、要因構造の解明はWG1で抽出された技術的課題・政策的課題の解決プロセスにも寄与すると思われる。

平成14年度は、製品に焦点を当て、ファクター算出方法を確立する予定である。この手法は可能な限りあらゆる製品群に適用できることが望ましい。そのためには多様な環境側面の中から、製品群ごとに重視すべきサービス・機能側面（分子）、環境側面（分母）を整理していくことが重要な検討要素となる。また製品レベルから企業レベルに本手法を拡張し、企業の環境経営戦略ツールとしても用いられるような算出方法構築も検討の視野に入れている。

将来的には、機能・サービスの提供方法が従来の製品とは全く異なるサービスシステムへと適用範囲を発展させていくことも見込まれる。

一方、WG2では、自由な発想に基づく手法論の検討が展開された。まず国、産業、企業、製品単位の視点から指標の枠組みについての検討を行った。また分母側の環境側面について単一指標を用いるか統合化指標を用いるか、その測定対象にライフサイクルを対象とするか否か、海外の研究事例も参考に、討論を重ねていった。これらはいずれも指標開発において避けて通れない過程である。

常にWG2の議論の根幹となっていたのは、マクロ的な視点と地球環境容量の観点から資源消費量及び環境負荷を的確に把握しようという視点であった。

平成14年度は産業間の物質連鎖を基にしたファクター算出手法の開発・標準化を行う。生産ステージと消費ステージを連結させたマクロ的な視点で資源消費量及び環境負荷を把

握することをねらいとする。削減目標を想定し、目標達成に向けたアプローチを再構築する手法（backcasting）を適用し、サプライチェーンを考慮したファクターについて、国全体の俯瞰を可能にするものである。

平成 14 年度は本格的調査開始の年である。環境問題解決に向け、その取組成果を明晰な手法で掌握することが今後重要性を増してくる。それに応えるべく引き続き 2 つの WG に分かれて、算出評価方法策定に向けて効果的な活動を展開していきたい。