



Title	環境効率を高める汎用機械の製品連鎖マネジメントに関する研究
Author(s)	山本, 祐吾
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2102
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

環境効率を高める汎用機械の製品連鎖マネジメント
に関する研究

2003 年

山 本 祐 吾

環境効率を高める汎用機械の製品連鎖マネジメント
に関する研究

2003 年

山 本 祐 吾

環境効率を高める汎用機械の製品連鎖マネジメント に関する研究

論文目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 論文の構成	2
第2章 持続可能な生産と消費の産業システムと製品環境政策の展開	5
2.1 緒言	5
2.2 持続可能な生産と消費の実現に向けた概念とアプローチ	5
2.2.1 持続可能な産業システム論の系譜	5
2.2.2 産業エコロジーの概念と方法論	6
2.2.3 循環複合体の概念と研究フレーム	9
2.2.4 持続可能性を計測・評価する指標	10
2.3 拡大生産者責任を基礎とした製品管理政策	11
2.3.1 拡大生産者責任の概念	11
2.3.2 各国のEPRのアプローチ	13
2.3.3 国内における環境政策の動向	14
2.3.4 拡大・分担型の製品責任	15
2.4 本章のまとめ	15
第3章 都市活動を支える産業機械の製品連鎖マネジメント戦略	17
3.1 緒言	17
3.2 都市活動を支える産業機械製品とそれがもたらす環境インパクト	17
3.2.1 産業機械の分類と社会における役割	17
3.2.2 産業機械製品がもたらす環境インパクト	20
3.3 環境効率を高める産業機械の製品連鎖マネジメント戦略の構想	21
3.3.1 製品連鎖に沿って製品環境政策を展開する必要性	21
3.3.2 環境効率や資源生産性を高める戦略	22
3.3.3 環境効率を高める産業機械の製品連鎖マネジメント戦略	23
3.3.4 包括的な製品管理サービスの展開	28
3.4 本章のまとめ	28

第4章 資源循環の高度化を支援するエコデザインの分析	30
4.1 緒言	30
4.2 持続可能な産業社会の構築とエコデザイン	30
4.2.1 エコデザインの概念と役割	30
4.2.2 エコデザインの目標と設計要素技術	31
4.3 産業ポンプの易分解性設計の分析	32
4.3.1 分析の目的	32
4.3.2 使用済みポンプの分解実験と実測調査の概要	32
4.3.3 分解実験に基づくポンプの易分解性設計要素	34
4.3.4 逆工場を促進する易分解性設計の導入効果	38
4.3.5 ポンプ主要部品のリユースに向けた技術的課題	40
4.4 家電製品の分解特性とリユース性を高める協調設計	41
4.4.1 分析の目的	41
4.4.2 家電製品の手分解実験と部品インベントリーの構造化	41
4.4.3 家電製品の分解特性の把握	43
4.4.4 環境適合性を高める協調設計の必要性和期待される効果	44
4.5 リユース性を高めるエコデザインの事例	45
4.6 本章のまとめ	47
第5章 逆工場を核とした家電製品のリユースシステムの構想	49
5.1 緒言	49
5.2 リユースシステム構想の基本的な枠組みとアプローチ	49
5.2.1 リユースを捉える視点と枠組み	49
5.2.2 リユースシステム設計の基本的なアプローチ	51
5.3 リユースの展開によってもたらされる社会的な価値	54
5.3.1 リユースが製品連鎖にもたらす効果	54
5.3.2 リユース部品の活用による製品補修体制の効率化の評価	57
5.4 家庭用冷蔵庫を対象としたリユースシステム構想のスクリーニング評価	59
5.4.1 リユース対象部材の選定 (input)	59
5.4.2 リユース工程の設計 (process)	63
5.4.3 リユース市場の選定 (output)	65
5.5 本章のまとめ	70
第6章 都市施設を対象としたリユース・メンテナンス型の製品管理と評価	72
6.1 緒言	72
6.2 リユースやアップグレードを指向する製品管理方策	72
6.2.1 製品の長寿命化と更新管理の基本的な考え方	72
6.2.2 リユースを中心とした製品ライフサイクル管理	72
6.2.3 機器の長期利用を促すメンテナンスの方式	73
6.3 家電製品のリユース部品を活用した製品補修の環境負荷削減効果の評価	74

6.3.1	分析の目的.....	74
6.3.2	比較する製品ライフサイクル管理のオプション.....	74
6.3.3	算定条件と使用データ.....	75
6.3.4	環境負荷削減効果の評価.....	78
6.3.5	製品補修による長寿命化の消費者コスト.....	79
6.4	産業ポンプを対象としたアップグレード型の施設管理サービスの評価.....	80
6.4.1	分析の視点と目的.....	80
6.4.2	業務系都市施設 A におけるポンプの稼動特性に応じたリユース戦略.....	82
6.4.3	アップグレード指向の環境ファシリティ・マネジメント戦略.....	85
6.4.4	算定条件と使用データ.....	86
6.4.5	環境効率の改善効果の評価.....	88
6.4.6	使用済み製品の循環形成方策の評価.....	89
6.5	本章のまとめ.....	101
第 7 章	結論.....	104
7.1	本論文の総括と結論.....	104
7.2	今後の課題.....	108

Appendix OECD 諸国における主要な EPR 法

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

産業社会における経済活動は、外部から枯渇性資源を採り入れて財やサービスを生産あるいは消費し、やがてはそれらを再び外部システムに放出するといった浪費的かつ一過型の資源利用形態をとってきた。しかしながら、気候変動問題に代表される地球規模での環境問題や廃棄物問題等の都市型・生活型の環境問題が顕在化しつつある中で、従来のように現行の生産－消費システムを外部の物理的あるいは自然的環境と切り離して考えることに限界が生じつつある。すなわち、経済システムへのインプット側では資源枯渇、アウトプット側では廃棄物の最終処分場の逼迫といった資源・環境的制約が大きくなり、経済システム自体が持続可能性（sustainability）の問題に直面している。また、同時に経済システム全体が化石燃料の大量消費を生み出す構造になっており、それに伴う温室効果ガスの排出も環境容量を越えつつある。

我が国は加工・組立型製造業などの第二次産業を中心として、1960年から70年代にかけて高度経済成長を遂げてきた。現在でも、こうした資源集約的な産業経済活動を通じて、環境から経済システムへ取り込まれる総物質投入量（Total Material Input）や、社会経済活動の結果経済システムから環境中へ放出される国内総排出物量（Total Domestic Output）はともに年々増大傾向にある。平成12年度の物質収支¹を見ると、総物質投入量が約21.3億トンであるのに対して循環利用量は約2.2億トンで、資源の再生利用率は約1割に過ぎない。近年、各種リサイクル法の整備が進んでいるものの、依然として大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済システムが続いている。

こうした持続可能性に乏しい社会経済活動によって引き起こされる資源・環境制約の増大は、将来的にあらゆる産業に対して原材料コストや環境コストの増加という形で影響を与えることが予想される。そのため、現行の産業経済システムの形態を将来にわたって維持することは困難であり、持続可能な産業社会への構造的な転換に対する社会的要請が高まりつつある。近年、欧州を中心として展開されている拡大生産者責任（EPR; Extended Producer Responsibility）を基礎とした製品管理政策の流れを受けて、持続可能な生産と消費のシステム（Sustainable Consumption and Production System）の構築は、特に先進工業各国において重要な課題となっている。

平成15年3月に我が国で定められた循環型社会形成推進基本計画では、マクロなモノの流れを適切に把握・管理するための指標として資源生産性・循環利用率・最終処分量が提案され、それぞれに具体的な数値目標が設定された。これらの指標は、自然界から採取され産業社会に投入される資源量と消費後に再び自然界に排出される廃棄物量を削減するとともに、システム内部での資源の循環利用を促進することを狙いとしている。

このようなマクロな環境政策からの要請を受けて、個々の産業や製品分野では、ライフサイクルの各段階で環境負荷の削減を図る製品政策（Product Policy）を展開していくことが重要となる。このとき、従来の使い捨てや素材レベルにまで戻すことに重点を置く傾向に

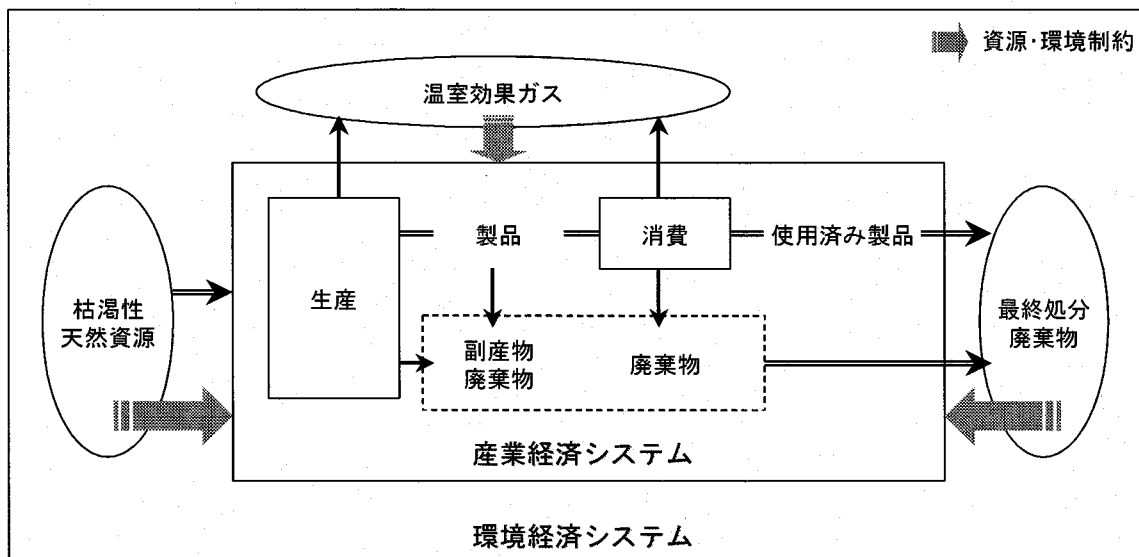


図 1.1 産業社会システムと資源・環境的制約の増大

あるリサイクル戦略を見直し、メンテナンスやアップグレードによる製品の長寿命化や使用済み製品の回収・リユースを通じて産業構造自体を廃棄物の発生抑制（reduce）を指向するものへと転換させていくことが重要となる。その極限の姿は「サービスを提供する持続可能な産業社会」²である。すなわち、生産者が提供する対象を製品本体からそれに付随するサービスを含む領域へと拡大し、製品の運用と廃棄後の資源循環を包括的に管理することを通じて、生産と消費の連鎖におけるエネルギー・資源の消費を最小化する社会サービスを開発していく必要がある。

以上のような背景をもとに、本論文では、高度に工業化が進んだ産業社会における都市活動・都市生活を支える産業機械製品を対象として、その製品の経路に沿って循環形成や環境負荷の最小化を図る製品連鎖マネジメント（Product Chain Management）の構想とその効果の評価を行う。その際、製品管理方策のデザインや技術的・社会的な課題の抽出を具体的に進めるために、指標製品として産業ポンプ（一般機械）および家電製品（民生用電気機械）を設定する。

1.2 論文の構成

本論文は、全7章で構成されている（図 1.2）。

第1章では、浪費的かつ一過型の資源利用形態を採る現在の産業経済活動によって、経済システム自体が持続可能性の問題に直面している状況に対して、持続可能な生産と消費の実現に向けた製品環境政策の展開の重要性を述べた上で、本研究の目的を示した。

第2章では、持続可能な産業社会の形成に向けたアプローチについて、特に産業エコロジー（Industrial Ecology）と循環複合体（Recycle-oriented Industrial Complex）に注目し、その概念と方法論を示すとともに、個別産業分野での製品管理方策の展開を政策面から支援

する拡大生産者責任の基本的な枠組みと機能を整理する。

第3章では、工業化が進展した産業社会における都市活動や都市生活を支える産業機械製品が、エネルギーや資源の利用・制御などを介してもたらす環境インパクトを整理した上で、製品連鎖全体で環境効率（Eco-Efficiency）や資源生産性（Resource Productivity）を高める製品連鎖マネジメントを提示する。ここで描き出される主要な方策について、4～6章で具体的な分析や評価を行う。

第4章では、製品設計から環境への適合を図るエコデザインについて、特に逆工場の操業プロセスの経済効率を高めると同時に、循環形成の高度化を支える易分解性設計（DFD; Design for Disassembly）に着目し、分析や問題発見を進める。

第5章では、リユースの実践や社会化に向けて、リユースの意義の捉え方やシステム設計の視点・枠組みを重点的に検討し、ケーススタディとして使用済み家電製品のユニット・部品に焦点を当て、そのリユースシステムを構想する。

第6章では、リユースと製品サービスを結びつけて、製品利用の効率化と使用後の循環形成を包括的に管理する製品政策を提案し、ライフサイクル-CO₂ 排出量や環境効率を指標として環境側面への効果を評価する。

最後に第7章では、本論文の総括を行うとともに、持続可能な生産と消費の産業システムの実現に向けて重要となる製品連鎖管理の方策を結論としてまとめ、今後の課題について整理する。

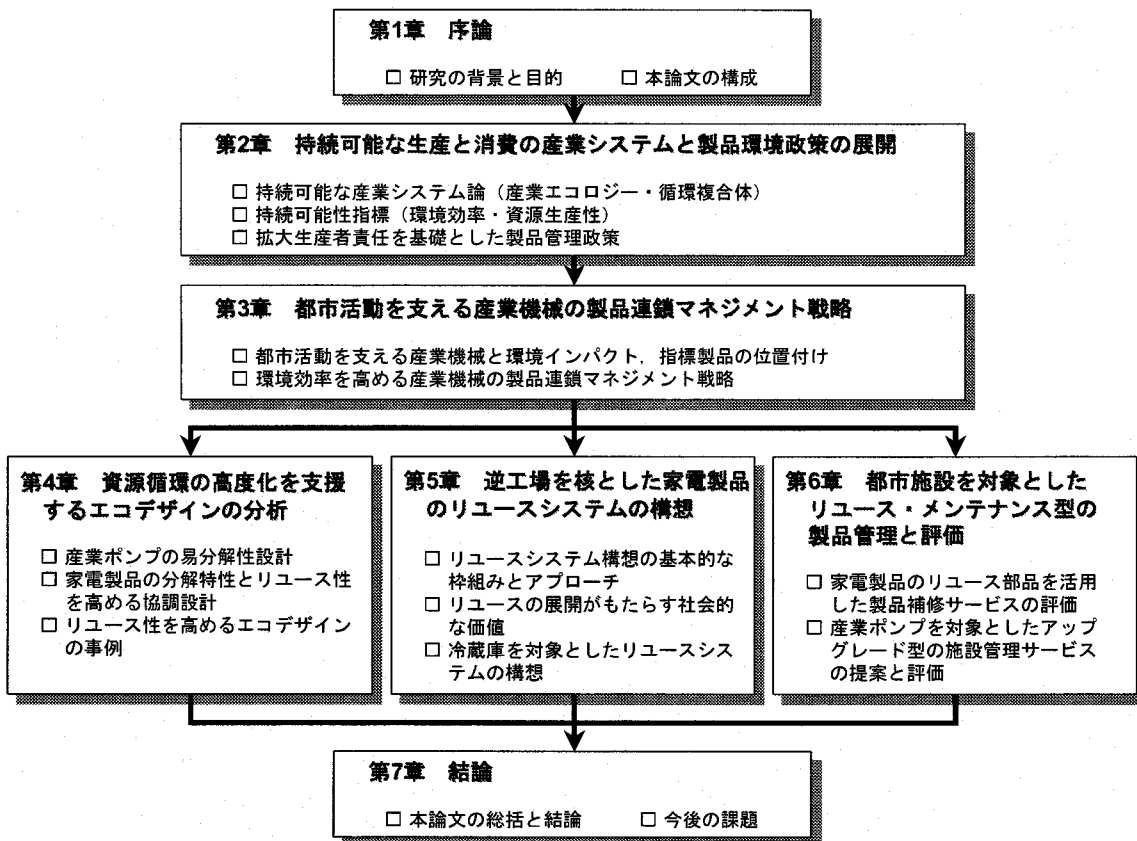


図 1.2 本論文の構成

¹ 環境省編：『循環型社会白書（平成 15 年版）』，ぎょうせい，p.43，2003.

² 盛岡通：循環複合体研究で得られた社会システム変革の方向性，環境システム研究，vol.27，p.147-152，1999.

第2章 持続可能な生産と消費の産業システムと製品環境政策の展開

2.1 緒言

近年、欧州を中心として拡大生産者責任を基礎とした製品管理政策が展開されるなど、従来の浪費的かつ一過型の資源利用形態を見直し、持続可能な生産と消費のシステムへと構造的な転換を図る取り組みが実践の段階へと移行されつつある。特に、1992年の国連環境開発会議以降、産業社会システムの環境適合の実践を図る産業エコロジーの理論と方法論の検討が推し進められてきた。

本章では、まず持続可能な産業社会の形成に向けたアプローチについて、特に産業エコロジーと循環複合体の概念に注目して整理する。その上で、産業社会の持続可能性を経済（サービス）と環境の両側面から評価するための指標の基本的な考え方を示す。次いで、拡大生産者責任の概念とそれを基礎とした各国の製品管理政策の動向を整理する。

2.2 持続可能な生産と消費の実現に向けた概念とアプローチ

2.2.1 持続可能な産業システム論の系譜

1992年にリオデジャネイロで開催された国連環境開発会議（United Nations Conference on Environment and Development）において、先進工業国における浪費型・一過型の資源利用形態を持続可能な生産と消費（Sustainable Production and Consumption）へと変更することが不可欠であると主張された。これを契機に、産業界における環境対策の主眼は、従来のような汚染物質を作り出した後に除去あるいは無害化する末端処理（End-of-Pipe）から、生産体系自体を環境負荷発生の少ない形態に転換させる生産技術の採用（Cleaner Production）へと移行してきた。持続可能な生産と消費とは、「人々の基本的なニーズを満たしよりよい生活をもたらす一方で、将来世代のニーズを侵すことなく天然資源や有害な物質の使用・ライフサイクルを通しての廃棄物や汚染の排出を最小にする製品や財・サービスを使用すること」¹と定義され、この考え方には次のような特徴がある。

- ✓ 資源・エネルギー使用の効率の継続的改善を促す。
- ✓ 財やサービスの供給・需要に変化を及ぼす。
- ✓ 従来のような個々のプロセスだけではなく、財やサービスの製造・使用・再利用・処理に対するライフサイクル的な見方が強調される。

このような持続可能な生産と消費のパターンの達成は、産業界が率先して促進していくべきである。1992年の国連環境開発会議以降、持続可能な産業システムに関するアプローチとして、IHDP（International Human Dimensions Program on Global Environmental Change）の産業転換（Industrial Transformation）²や国連大学のゼロエミッション（Zero Emission）に関する研究、R.U.Ayresの提唱するエコリストラクチャリング（Eco-Restructuring）³など、具体的な取り組みが展開されてきた（表2.1）。

表 2.1 産業社会のエコロジー化の潮流（文献4に加筆）

年代	国際的会議	概念提唱や書物発行	国内外の環境政策
1960		『沈黙の春』（レイチェル・カーソン,62）	公害対策基本法(日,67)
1970	国連人間環境会議(72)	『成長の限界』（ローマクラブ,72）	エコラベル制度(旧西独,76)
1980		エコロジカルな持続可能性(Lester Brown,『地球白書』,81) 持続可能な発展(『我ら共有の未来』,ブルントラント委員会,87) 産業エコシステム(A.R.Frosh,89)	廃棄物の発生回避及び適正処理に関する法律(独,86) NEEP(蘭,89)
1990	環境と開発に関する国連会議(92) COP3(97)	エコストラクチャリング(R.U.Ayres,91) 環境効率(WBCSD,92) 持続可能な生産と消費(OECD,92) ファクター 10(F.S.Bleek,93) ゼロエミッション(UNU,94) 産業エコロジー(Allenby,Graedel,94) 産業転換(IHDP,96) 循環複合体(盛岡通,96)	Pollution Prevention 法(米,90) 包装廃棄物回避に関する政令(独,91),リサイクル促進法(日,91) NEEP2(蘭,93) 循環経済・廃棄物法(独,94),環境基本計画(日,94) 容器包装リサイクル法(日,95) 家電リサイクル法(日,98)
2000	国連人間環境会議(ヨハネスブルグ,02)		循環型社会形成推進基本法(日,00) 循環型社会形成推進基本計画(日,02)

こうした産業社会のエコロジー化の潮流は、従来の廃棄型経済（thrown away economy）から発生抑制を最優先とした循環経済（cycle economy）へ転換すること、大量生産・大量消費の経済成長から持続可能な発展（Sustainable Development）を実現すること、そして環境効率（Eco-Efficiency）を社会全体で高めていくことを目指すという点で、共通した特徴を有している。

2.2.2 産業エコロジーの概念と方法論

持続可能な生産と消費の達成に向けて産業社会側からアプローチするための概念的なフレームワークが数多く提唱されているが、産業エコロジー（Industrial Ecology）^{5,6}はその一つの方法論であると位置付けられる。産業エコロジーとは、Graedel や Allenby によって体系化された、将来の種々の悪影響を評価し最小にするのに役立つような産業－環境の相互作用へのアプローチを指す。

この産業社会と環境の相互関係をみるとき、4つの選択肢が存在する（表 2.2）。その中で、産業エコロジーのアプローチは引き続いての技術進展の必要性を認め、持続可能な世界へ

表 2.2 技術－社会の相互作用に対する選択肢

とるべき方向	技術に対する考え方	前提となっている事項
ラジカル・エコロジー	ロー・テクノロジーへの回帰	人口破滅は不可避. 経済的, 技術的及び文化的な破綻
ディープ・エコロジー	適正技術. 可能な限りロー・テクノロジー	今より低い人口レベル, 経済的, 技術的及び文化的現状をかなり修正
産業エコロジー	環境制約の下での技術進展に依存, つまり環境面だけでなければロー・テクノロジーにこだわらない	多少今よりも多い人口, 経済的, 技術的及び文化的現状をかなり修正
現状維持路線	個別規制等を採用. 全体の傾向には殆ど影響なし	人口破滅は不可避. 経済的, 技術的及び文化的な破綻

転換していくのに環境面で適切な技術を開発することが重要な部分であるとみている。そして、産業エコロジーは企業の経済性とトレード・オフ (trade-off) の関係にある考え方ではなく、経済的な観点は産業エコロジーの推進に決定的に重要な要素であると解釈される。ここで、産業とは、種々の商品 (goods) やサービス (services) の商業規模での生産及び販売であると定義される。産業エコロジー的な配慮を最大限にする対象領域は、例えば鉱業・農業・林業・製造業であり、それは同時に消費者活動に至る経済活動の全域を含むことになる。産業エコロジーの考え方が製造業に適用されると、企業は工業プロセスや製品類を製品の競争力と環境配慮という2つの観点から設計することになる。

産業エコロジーの考え方を生産活動に取り入れるときの分析の視点を大局的に見ると、物質収支 (Material Balance) に着目するものと物質フロー (Material Flow) に着目するものに分けられると解釈できる。前者は「産業代謝 (Industrial Metabolism)」, 後者は「製品の一体的管理 (Product Stewardship)」と称されるものである。これらの戦略的な環境マネジメントは、具体的に以下のような基本理念により構成されている。

- ✓ 資源の効率的な利用 (Efficient Use of Resources)
- ✓ 製品寿命の拡張 (Extending the Life of Products)
- ✓ 汚染防止 (Pollution Prevention)
- ✓ リサイクル及びリユース (Recycling and Reuse)
- ✓ 産業エコシステム (Industrial Ecosystem / Eco-Industrial Parks)

(1) 産業代謝 (Industrial Metabolism)

産業代謝は、産業セクター間における副産物のやりとりや諸物質のカスケード利用を進めることによって、産業システム全体としての input/output を環境的かつ持続的に管理しようとするアプローチである。すなわち、産業システムを構成する原材料の採取事業者または生育事業者、原材料の加工事業者または製造業者、ユーザー (消費者)、廃棄物処理事業者 (同時に第一段階の原材料処理者でありリサイクル事業者でもある) のそれぞれの主体が、その活動部分でものが循環するように事業を行う、あるいは産業の代謝活動システム全体で物質の循環する流れを進めるように事業を行い、全体として産業活動がより効率的

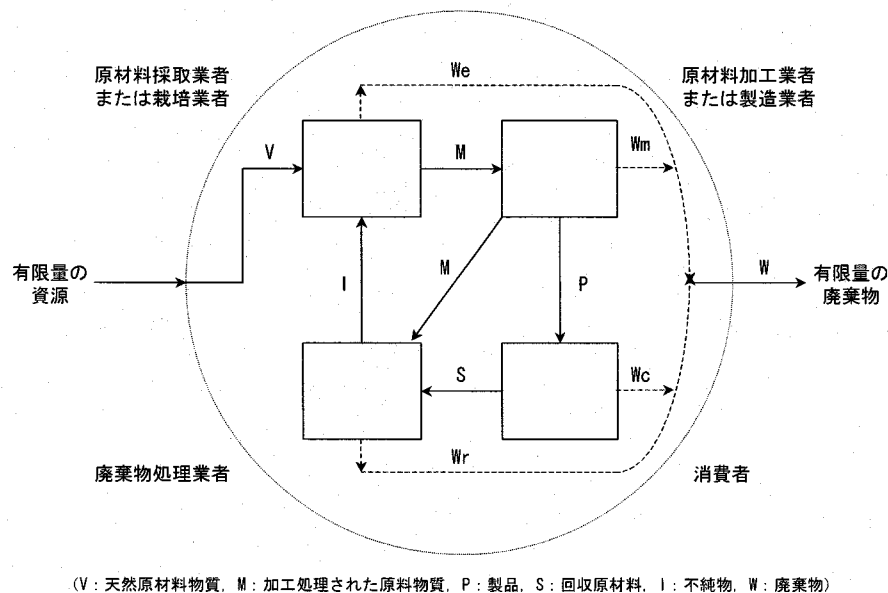


図 2.1 産業代謝システムのモデル

にまた外部の様々なシステムに悪影響を与えない形で発展していく形態を指向する(図 2.1).

産業共生 (Industrial Symbiosis) もこの産業代謝に類似の概念であると解釈され, これらの概念により成立する共生的な産業エコシステムは産業複合体 (Industrial Complex) やエコ・インダストリアル・パーク (Eco-Industrial Parks) と呼ばれる.

(2) 製品の一体的管理 (Product Stewardship)

製品の一体的管理とは, 種々の製品を設計し, 作り上げ, 維持管理し, リサイクルしていく中で, 製品が広義の外界に与える影響を最小にすることを日々実践していくことであり, 広く解釈すれば製品に付随したサービスも含むものである. 換言すれば, 製品やサービスの環境的側面のライフサイクルマネジメント (Life Cycle Management) である.

このアプローチの実施には, 以下のような技術的方法が用いられることになる.

① ライフサイクル・アセスメント (LCA; Life Cycle Assessment)

LCA は, ある製品やサービス, プロセスのライフサイクルにわたる物質の流れや影響等を評価するための方法であり, 製品の一体的管理を実施するた

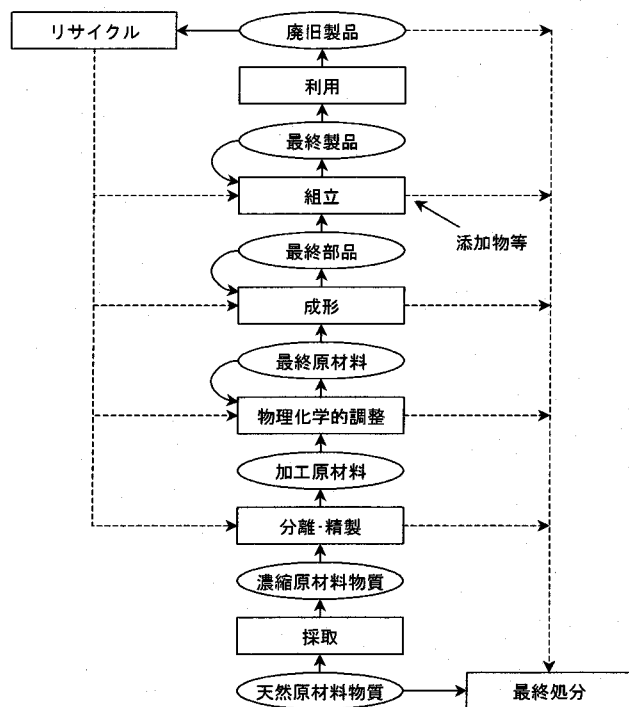


図 2.2 産業エコロジー・サイクル

めの一つのツールとして用いられる。LCA の要諦は、望むらくは同じ形や別の用途への再生を含めた全ライフサイクルを通してそれぞれに必須の環境面、経済面及び技術面での意味するところを十分評価することにある。

産業エコロジーが目指す物質サイクルは図 2.2 の通りである。LCA の実施を通じて、例えば一般的にはこのサイクルにおける上の段階から中間の段階へ原材料をリサイクルする方が、一番下の段階へリサイクルするのに比べてエネルギー的に優位であるということが明らかになる。それによって、種々の物質をできるだけ高い純度でまた高い効用レベルで循環させるカスケード・リサイクル (cascade recycling) を行うべきであるという知見を得ることができる。

② 環境適合設計 (DFE; Design For Environment)

ある製品・プロセスに関する物質の流れや環境影響を評価したとすると、次のステップはそれをどうやって改良するかの方策を設計に活かすことである。そのための種々の設計手法を総称的に環境適合設計 (DFE) と呼ぶ。この DFE は資源・環境的側面に係わる広範な設計概念であり、諸々の要素技術によって構成されるものである。

図 2.2 に示したような物質循環がどの程度効率良く起きるかは、種々の製品やプロセスの設計の仕方に大きく依存している。したがって、例えば DFE 要素の一つである易リサイクル性設計 (DFR; Design for Recyclability) は産業エコロジーを進める上で極めて重要な手段であると言える。

2.2.3 循環複合体の概念と研究フレーム

循環複合体研究 (CCP; Recycle-oriented Industrial Complex Project) は、科学技術振興事業団・戦略的基礎研究 (CREST) の「環境低負荷型の社会システム」の研究領域の一つとして研究代表・大阪大学大学院工学研究科教授盛岡通のもとで 1996 年より開始された、社会実験地 (Societal Experimental Sites) において循環形成を図ろうとする試みである。同研究は、産業工場循環、農工連携、都市集積更新の各循環複合体について具体的な社会実験地を設定し、物質代謝 (Metabolism Balance) と製品連鎖 (Product Chain) の計測、分析、評価を行い、循環社会を形成する技術的、組織的、社会制度的次元の要素を明らかにすることを目指す研究戦略を構築するとともに、3つの社会実験地で見出された循環社会形成に有効な社会システム要素の効果の評価と、地域や都市で複合的な実験地を開発する企画に取り組むことを目的としている⁷ (図 2.3)。

循環複合体 (Recycle-oriented Industrial Complex) とは、「複数の経済主体において相互の信頼関係のもと、他の産業セクターで発生した副産物や廃棄物を活用してそれらを生産活動の入力として用い、廃棄物ゼロをめざして環境的に健全な物質代謝を実現するような組織体」⁸であると定義される。同研究では、次の2つのアプローチを組み合わせることによって、循環複合体の構築を図ろうとしている。

一つは、代謝に伴う環境負荷を最小化する組織あるいは地域の「代謝マネジメント (Metabolism Management)」である。これは、例えば地域や組織などのある代謝体を設定した上で、その境界を通過する入力 (input) 及び出力 (output) のフローを代謝体内外での連携を通じてマネジメントすることによって、代謝体トータルでの環境効率をより高めることを指向するアプローチである。分析手法としては、物質フロー分析 (MFA; Material Flow

準を以下のように具体化している。

- ✓ 財とサービスの物的密度を極小化する。
- ✓ 財とサービスのエネルギー密度を極小化する。
- ✓ 毒物撒布を極小化する。
- ✓ 原料のリサイクルの可能性を高める。
- ✓ 再生可能資源の使用を極大化する。
- ✓ 製品の耐久性を拡大する。
- ✓ 財とサービスのサービス密度を増大する。

産業物質代謝や製品連鎖の効率性を計測するときには有用となる他の指標には、資源生産性 (Resource Productivity) やブッパタール研究所の F.Schmidt-Bleek らによる MIPS (Material Input per unit Service) などがある。これらは物質的投入一単位当たりの経済的産出（もしくはその逆数）を表し、特に非更新性資源の社会的な利用や管理のあり方を問う形で提案されている。すなわち、環境効率を含めたいずれの指標も、資源消費や環境負荷排出のトータル量を最小化しつつ、産み出される社会的サービスを増大させることを意味し、産業主体の経済活動を持続可能な生産と消費の方向へと誘導するものである。

2.3 拡大生産者責任を基礎とした製品管理政策

2.3.1 拡大生産者責任の概念

一方、持続可能な産業社会の形成を支援する環境政策については、各国で拡大生産者責任 (EPR; Extended Producer Responsibility) に基づいて製品のライフサイクル管理を行う製品環境政策 (Product-oriented Environmental Policy) が展開されている。EPR は 1972 年に経済開発協力機構 (OECD; Organization for Economic Co-operation and Development) が提起した汚染者負担の原則 (PPP; Polluter Pays Principle) を発展的に見直すことを求める政策思想であり¹³、持続可能な産業社会の形成、特に工業製品の分野における産業のエコロジー化を推進する上で不可欠な基本原則として共通認識されている。

EPR は、製造者に対して製品ライフサイクルの各段階で汚染の防止や資源・エネルギー使用量の削減等を推進させることを目的とし、原料の選択や製造過程などの製品ライフサイクルの上流側で発生する負荷に加えて、製品の使用や処理などの下流側で発生する負荷に対する責任もその製造者が負うという原則である¹⁴。すなわち、従来使用済みとなった製品の処理やその費用負担を地方自治体や一般納税者が負うなど、必ずしもその責任が製造者に課せられているわけではなかったが、EPR の展開によって製造者の責任が消費者による使用後の段階における製品管理に対する責任も含むように拡大される (図 2.4)¹⁵。これらの責任には、例えば次の項目が含まれることになる。

- ✓ 製造者は、製造物や使用された製品あるいは技術発展・サービス供給を通じて製品が及ぼす負荷の管理を行う。
- ✓ 廃棄物管理にかかるコストの一部あるいは全てを製造者が負担する。
- ✓ 製品及びその製造、使用、処理などによって引き起こされる環境破壊の責任は製造者にある。

生産・流通段階	消費段階	廃棄物処理段階
・労働者の安全性 ・生産工程から環境への汚染排出の防止と管理 ・産業廃棄物の十分な管理に対する資金的・法律的な責任	危険な製品に関する民事的な責任	消費後製品の管理に関する資金的・物理的責任
----- 従来の生産・流通業者の責任範囲 -----		----- 従来の行政の責任範囲 -----
----- 拡大生産者責任（EPR） -----		

図 2.4 拡大生産者責任の範囲

- ✓ 製造者は、製品やライフサイクルのあらゆる段階での影響に関する情報を供給することを必要とされる。

したがって、EPR は廃製品の回収や再資源化、最終処分だけでなく、生産や製品設計段階においても環境影響に配慮させる動機を生産者に与えることになる。EPR の原則に基づいて持続可能な生産と消費のシステムを達成するために各主体が担うべき役割は表 2.3 のように整理される。

表 2.3 拡大生産者責任に基づく各主体の役割¹⁶

目標	生産者	消費者	行政
廃棄物発生抑制	・原材料使用の削減 ・耐久性の設計	・少廃棄物製品に対する特恵の授与	・廃棄物管理に対する十分な価格づけ ・原料税
最終処分の削減			
a) リユースの推進	・リユース可能な製品・包装設計 ・使用済み部品加工の開発	・市場におけるリユース可能製品の選好 ・製品の新たな使用の発見	・デポジット制に対するインセンティブ
b) リサイクルの推進	・リサイクル可能性の設計 ・プラスチックの表示 ・原料使用量の削減 ・生産時の再生原料の使用 ・リパース・ロジスティクス	・リサイクル可能製品の選好の ・実践 ・分別収集への参加	・リサイクル率・期日目標の取り決め ・新回収技術の営利化のサポート ・税制的インセンティブ、助成金 ・再生原料製製品の選好購入 ・消費者に製品属性を知らせるエコラベル ・の確立
c) 削減量に対する取り扱い	・焼却炉における問題の要因 ・となるインプットの使用回避		・焼却に関する政策
廃棄物管理コストの内部化	・製品回収（take-back）		・処理費用の前払い ・購入の時点 or 分配システムの入り口 ・廃棄物業務の単価

2.3.2 各国のEPRのアプローチ

EPR の概念は、1994 年にドイツで制定された循環経済・廃棄物法において明確に表れている。この法制度が一つの契機となり、各国で廃棄物問題に関連して EPR を巡る議論が展開されるようになった（Appendix A 参照）。日欧米において、それぞれ具体的な政策手段として導入されつつある EPR に関して、その議論の背景や政策の相違点を以下に整理する。¹⁷

(1) ドイツ発信の欧州型 EPR

ドイツを発信源とする EPR は、遡れば OECD による汚染者負担の原則に行き着く。この原則は環境政策の柱の一つとして多くの知るところとなったが、現実的な政策の運用においては、遵守されているとは言い難い状況が日本を含めた先進各国において続いていた。それを忠実に実行できるように社会システムを変更しようとしたのが、ドイツの循環経済法である。この法律は、生産者側に使用済み製品の処理責任を課して自治体等の税による事業化を排除すること、すなわち製品価格への処理費の忠実な内部化を通じて市場メカニズムによる調整を行おうとすることを意図したものである。

生産者に責任を課すことは、最も安価な費用で社会的な環境負荷を低減することができるのは生産者であるということ（“The Cheapest Cost Avoider”）を仮定したものと解釈できる。これに関しては現在に至るも多くの議論があり、またドイツをはじめ幾つかの国では実際に実行に移しながら、この仮定がもたらす結果の良否を見守っている段階と言える。

(2) 日本における費用分担型 EPR

日本の容器包装リサイクル法は、基本的には廃棄物処理法とリサイクル促進法のブリッジ法としての性格が強く、結果的に廃棄物処理法に基づく適正処理困難物の考え方の発展形態として位置付けられる。この後に制定された家電リサイクル法についても同様である。そのため、ドイツの包装材令から直接影響を受けているのは生産者に処理費用の一部の負担を求めるという点だけで、EPR を念頭においているものの、基本的には異なるスキームである「分担責任（Shared Responsibility）」の社会システムとなっている。

しかし、責任そのものは分別収集を実施するかどうかの判断主体である自治体に残されているので、いわば否応なく費用の負担だけが生産者に求められている。したがって、費用分担型制度といった方が適切である。リサイクルのコスト圧縮と廃棄物回避を徹底して求めるドイツ型 EPR の理念とは異なるものであることが容易に理解される。

(3) 米国での責任分担型 EPR

米国では、EPR の“Producer”を“Product”に置き換えるとともに、責任の拡大という側面よりむしろ製品のライフサイクル全体を通じて環境に及ぼす影響の責任を、政府・消費者・企業が分担するべきであるとしている。また、欧州の EPR のエッセンスは、使用済み製品の回収と財源的な責任を生産者に集中的に課すことにより、“The Cheapest Cost Avoider”の役割を期待することにあつた。これに対して、もっと広範囲な、例えば製品のリサイクル方法に関する情報提供といった程度の活動も、EPR の取り組みの中に含めて責任の内容を緩やかに捉えているところに米国型 EPR の特徴がある。

2.3.3 国内における環境政策の動向

我が国では、これまで個別的に策定されてきた各種リサイクル関連法が、2000年4月に「循環型社会形成推進基本法」¹⁸として包括的に取りまとめられ（図2.5）、これに伴って関連する法体系が整備された。

まず「廃棄物処理法」が改正され、排出事業者の責任が強化されるなどの拡張強化が図られ、「資源有効利用促進法」は拡張整備され、従来の材料としての再生利用（recycle）に加えて廃棄物の発生抑制（reduce）や部品等の再利用（reuse）の促進が明示された。また、既制定の「容器包装リサイクル法」と「家電リサイクル法」に加えて、建設工事の受注者に建築物の分別解体や建設廃材等の再資源化を義務付ける「建設リサイクル法」、食品の製造・加工・販売業者に食品廃棄物の発生抑制や再資源化を義務付ける「食品リサイクル法」、国等が率先して再生品などの調達を推進することを述べた「グリーン購入法」が新たに制定された。家電リサイクル法^{19,20}には主として以下のような特徴がある。

- ① 処理の優先順位の第一として廃棄物等の発生抑制を明確に位置付け、次いで再使用、再生利用、熱回収、適正処分の順に優先順位をつけている。
- ② 循環型社会の形成に向けた主体の責務を、「排出者責任」あるいは「拡大生産者責任」として明確化している。
- ③ 循環型社会の形成を総合的・計画的に進めるため、政府は「循環型社会形成推進基本計画」を策定し、5年ごとに見直すことを明記している。

家電リサイクル法では、販売事業者は収集及び製造事業者への引き渡しを、製造事業者は引き渡し場所の設営及びその後のエネルギー回収を含む再商品化等の責務を義務付けられた一方で、再商品化等の費用については製品価格への内部化を行わず、排出時に消費者から徴収する形となった。つまり、使用済み製品（End-of-Life Product）に対する管理を全面的に企業の責任とする欧州型の政策と違い、各関連主体による分担責任を基本的な枠組みとしている。

また、2002年に制定された「自動車リサイクル法」においても、製造時業者及び輸入事

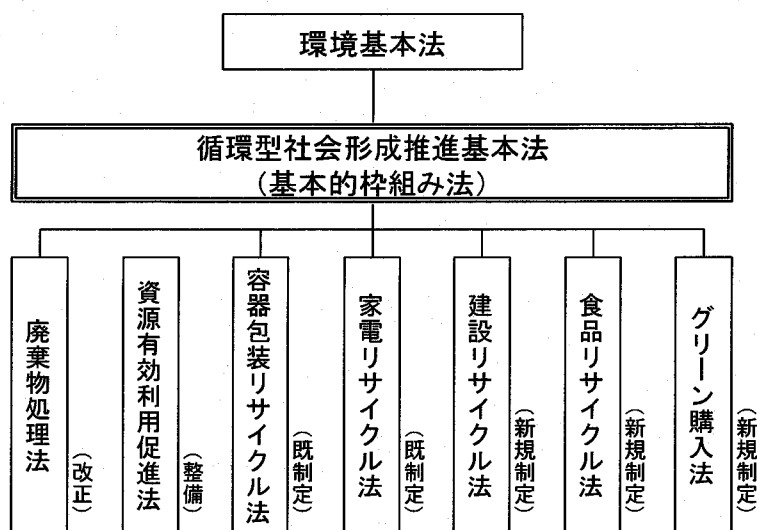


図2.5 循環型社会形成推進基本法の枠組み

業者は使用済み自動車から発生するフロン類、エアバッグ類及びシュレッターダストの引き取りと適正なリサイクル、引き取り業者は自動車保有者からフロン類回収業者または解体業者への使用済み自動車の引き渡し、フロン類回収業者はフロン類の適正な回収と自動車製造業者等への引き渡し、解体業者は使用済み自動車の適正なリサイクル・処理とエアバッグ類の自動車製造業者等への引き渡し、破碎業者は解体自動車の適正なリサイクル・処理とシュレッターダストの自動車製造業者等への引き渡し、自動車保有者は使用済み自動車の引き取り業者への引き渡しの責務を負うなど²¹、家電リサイクル法に見られる分担型システムが採用されている。

2.3.4 拡大・分担型の製品責任

家電リサイクル法と自動車リサイクル法など、我が国の EPR 政策では製品・廃棄物管理の責任を製品連鎖の関係主体で分け合う形をとり、費用負担は消費者に課せられていることから、拡大・分担型の製品責任（Extended and Shared Responsibility for Products）であると言える。この点で、「製品に対する責任は、最終製品の生産者が徹底して負うべき」とする欧州型の EPR 政策とは異なる。

しかし、最終製品の生産者（組立産業）が果たしうる役割は大きいものの、EPR は最終製品の生産者に対して完全な責任を求めるものではない。重要な点は、製品ライフサイクル全体での環境負荷に配慮した製品設計や、回収・分別・リサイクルの制度設計、リサイクル技術の開発などの側面に対するインセンティブとしての機能である。これによって、廃棄物の発生抑制・削減にとって最も効果的かつ効率的な仕組みづくりや役割分担が進み、より持続可能な産業システムへと移行していくことが期待される。

この点で日本の EPR 政策を見ると、自動車リサイクル法ではリサイクル費用の負担を消費者に求めているものの、制度施行後に販売される自動車については新車販売時に徴収されることになる。したがって、リサイクルしやすい設計や製造へのインセンティブが働くとともに、リサイクル料金の低減を巡って自動車製造業者間での競争が生じることが期待される。一方、家電リサイクル法では、排出の時点において企業間で一律に定められたリサイクル料金を徴収する仕組みのため、インセンティブとしての機能は不十分であると考えられる。

2.4 本章のまとめ

本章では、持続可能な生産と消費の産業システムに関する理論的かつ実践的なアプローチについて、産業エコロジーと循環複合体を中心としてその概念を示すとともに、経済と環境の両側面から産業社会の持続可能性を計測・評価するとき、環境効率や資源生産性がある有用な指標となることを述べた。また、産業社会のエコロジー化に向けて、個別産業分野での製品政策の展開において不可欠となる拡大生産者責任の考え方を示した。

産業エコロジーの要諦は、①社会的な効用を維持あるいは向上させつつ、産業が産み出す財やサービスに付随して発生する環境負荷の低減を達成する、②都市や地域といった空間における物質代謝の健全化を通じて、資源生産性や環境効率の高い持続可能な産業社会

の構築を図ることである。製品連鎖マネジメントの視点に立ったとき、特に使用済み製品あるいは部品のリユースを素材レベルまで戻すマテリアル・リサイクルより上位に位置付けること、産業エコロジーを推し進める技術的手法として LCA や環境適合設計（エコデザイン）が重要となる。

-
- ¹ E.G.Falkman et al.: *Sustainable Production and Consumption*, WBCSD report
 - ² IHDP: *Industrial Transformation Draft Science Plan*, 1999.
 - ³ R.U.Ayres, P.M.Weaver: *Eco-restructuring: Implications for Sustainable Development*, United Nations University Press, 1998.
 - ⁴ 盛岡, 吉田, 下田: 循環経済化に沿った情報家電の製品廃棄物の回収システムの枠組みに関する研究, 環境システム研究, Vol.25, 1997.
 - ⁵ T.E.Graedel, B.R.Allenby 著, 後藤典弘訳: 『産業エコロジー』, トッパン, 1996.
 - ⁶ E.A.Lowe, J.L.Warrem, S.R.Moran: *Discovering Industrial Ecology*, 1997.
 - ⁷ 盛岡通編著: 社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発, CREST 中間報告書, p.2, 2000.
 - ⁸ 盛岡通編著: 『産業社会は廃棄物ゼロをめざす』, 森北出版, p.104, 1998.
 - ⁹ 盛岡通: 循環複合体の研究, 土木学会誌, Vol.84-12, p.44, 1999.
 - ¹⁰ OECD: *Eco-efficiency*, 1998.
 - ¹¹ OECD 編, 樋口清秀監訳: 『エコ効率』, インフラックスコム, p.7, 1999.
 - ¹² OECD 編: 前掲 11, p.9
 - ¹³ 佐野敦彦, 七田佳代子著: 『拡大する企業の環境責任』, 環境新聞社, p.1, 2000.
 - ¹⁴ GREENPEACE: *Extended Producer Responsibility*, 1995.
 - ¹⁵ 中央環境審議会: 産業廃棄物に係わる環境負荷低減対策の在り方について(第1次答申), 都市と廃棄物, Vol.28, No.2, p.19-35, 1998.
 - ¹⁶ OECD: *Pollution Prevention and Control Extended Producer Responsibility in the OECD Area*, Phase 1 Report, p.23, 1996.
 - ¹⁷ 佐野, 七田著: 前掲 13, p.6-14
 - ¹⁸ 環境省ホームページ: 循環型社会形成推進基本法の概要, <<http://www.eic.or.jp/eanet/recycle/gaiyo.html>>
 - ¹⁹ (旧) 通商産業省機械情報産業局電気機器課編: 『家電リサイクル法の解説』, p.7-9, 1999.
 - ²⁰ 佐野, 七田著: 前掲 13, p.76
 - ²¹ 経済産業省, 環境省: 自動車リサイクル法の概要, <<http://www.meti.go.jp/policy/automobile/recycle/Rejigyousyamuke.pdf>>, 2002.

第3章 都市活動を支える産業機械の製品連鎖マネジメント戦略

3.1 緒言

工業化が進展した都市において展開される社会経済活動は、電気・ガス・水などのユーティリティとそれらを利用あるいは輸送、制御する様々な産業機械製品によって支えられている。都市活動や都市生活において幅広く利用される汎用的な機械製品は、エネルギー利用や流体制御・輸送などの機能を通じて経済活動の根幹を支えている一方で、機器運用を通じて都市活動に伴うエネルギー消費を大きく担っていると同時に、使用後の廃棄やマテリアル・リサイクルに止まる再資源化处理など、ライフサイクルの様々な断面で環境負荷を発生させている。

本章では、まず産業機械製品の社会における役割や位置付けを述べた上で、それがもたらす環境インパクトを資源投入とエネルギー消費の面から整理する。次いで、前章で述べた産業エコロジーや循環複合体のアプローチに基づき、産業機械製品の製品連鎖に伴う環境負荷を低減し、都市における諸活動の環境効率性を高めるための製品連鎖マネジメントについて構想を行う。

3.2 都市活動を支える産業機械製品とそれがもたらす環境インパクト

3.2.1 産業機械の分類と社会における役割

高度に工業化が進展した都市における社会経済活動には、電力やガス、水などのエネルギー・資源が不可欠である。阪神大震災を契機に、これらの供給・処理や情報通信の機能を果たす施設が“ライフライン”と称されて注目されたように、都市における経済活動や生活を維持する上でなくてはならないものである。同時に、ユーティリティを利用して展開される都市活動の機能面は、直接的あるいは間接的に様々な産業機械装置によって支えている。

一般に、産業機械は「一般機械」、「電気機械」、「輸送機械」、「精密機械」などに分類される(図3.1)¹。一般機械に分類されるボイラやポンプ、圧縮機、冷凍機などの製品は、都市施設や産業工場、上下水場などにおいて、空調や給水給湯、冷凍・冷蔵、衛生などの様々な用途で運用され、各種のエネルギー・資源を制御あるいは輸送する役割を担っている。また、一般家庭においても、同様の機能を有するコンプレッサーやファンモータなどの汎用部品が、民生用エアコンや冷蔵庫などで幅広く利用されている。(図3.2)

産業機械製品が実社会においてどれだけ利用されているかは、これらの受注状況²から読み取ることができる。まず、産業機械別の受注額を需要部門別に集計したものを図3.3に示す。受注額自体に差はあるものの、民間や官公需、あるいは製造業や非製造業などの部門を問わず、社会的な需要が広く存在していることが分かる。また、図3.4はポンプ・圧縮機・冷凍機械を例として、民間需要の製造業部門別に受注額を集計したものである。ここでも

受注額に差はあるが、様々な製造部門に中間投入されており、その生産活動に不可欠な要素として役割を果たしていると言える。

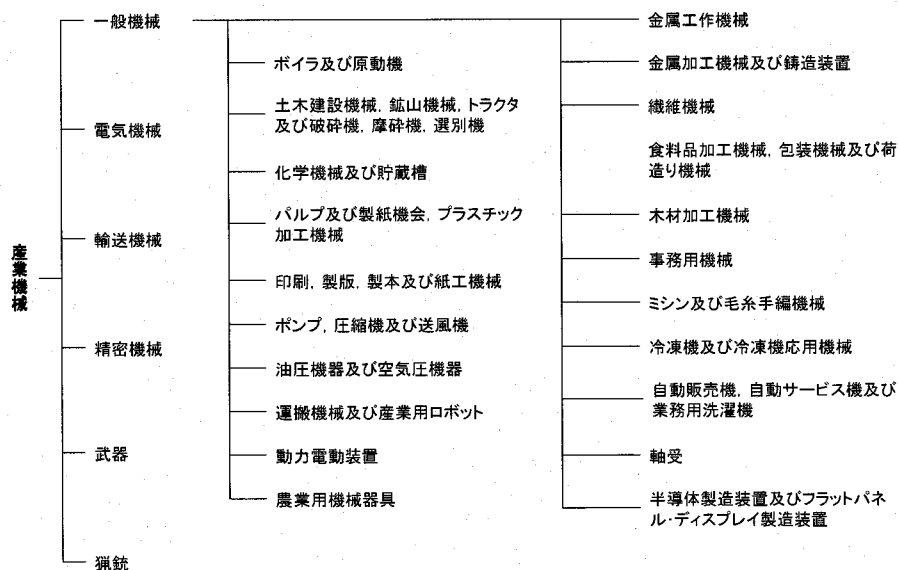


図 3.1 産業機械の分類

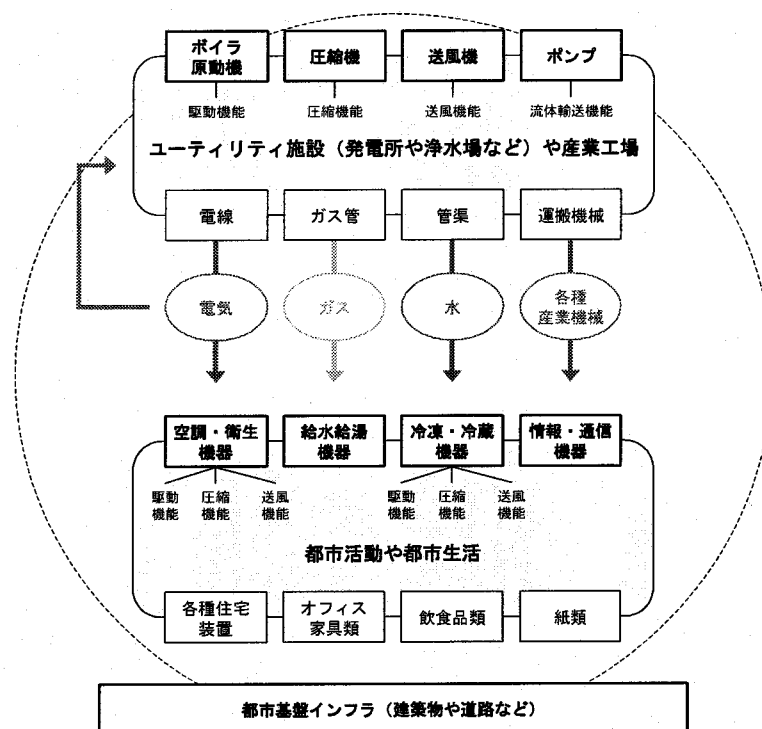


図 3.2 都市における経済活動や生活を支える産業機械製品

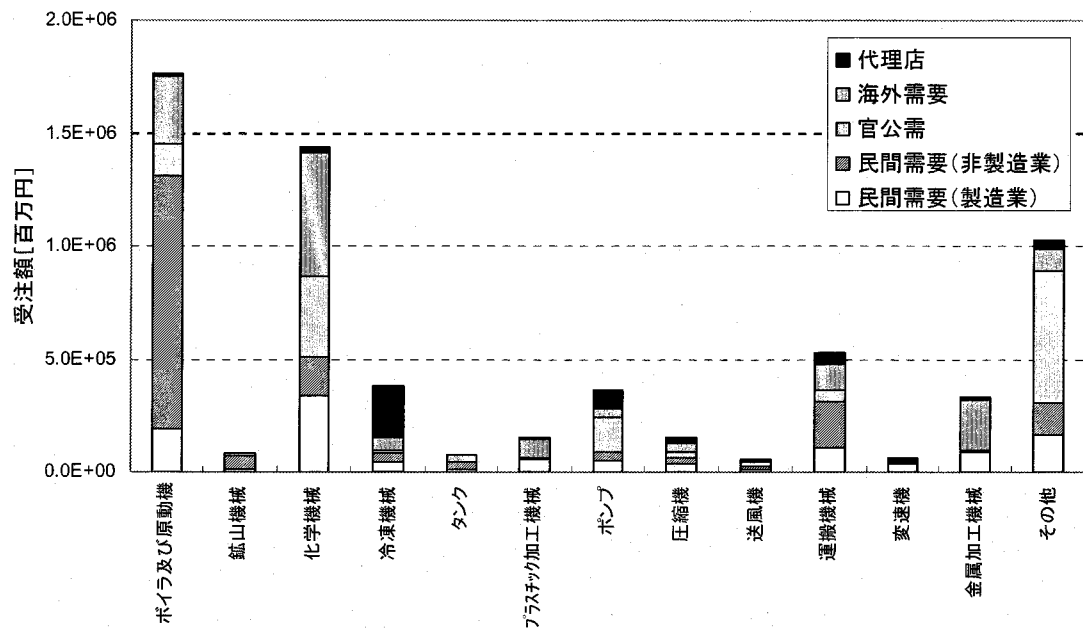


図 3.3 産業機械別の需要部門別受注額（平成 7 年）

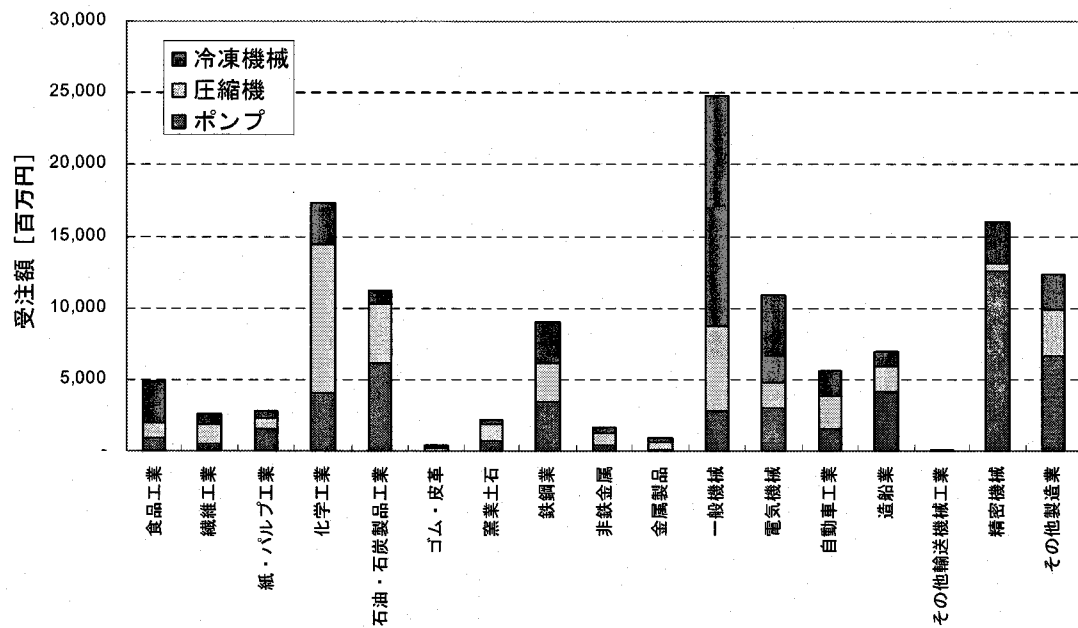


図 3.4 ポンプ・圧縮機・冷凍機械の製造業部門別受注額（平成 7 年）

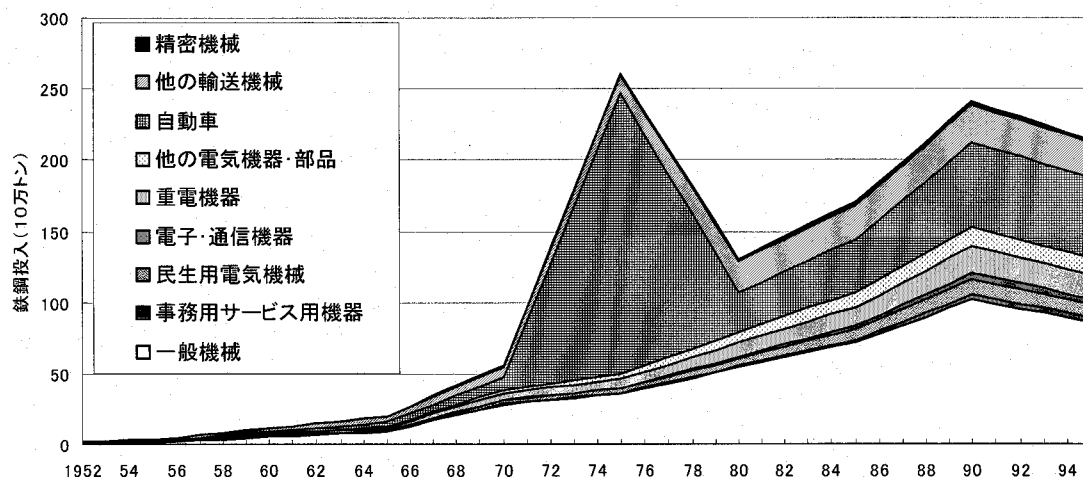


図 3.5 産業機械の国内需要に伴う鉄鋼投入の経年変化

3.2.2 産業機械製品がもたらす環境インパクト

都市における経済活動や生活を支える汎用的な機械製品は、エネルギー利用や流体制御・輸送などの機能を通じて経済活動の根幹を支えている一方で、ライフサイクルの様々な断面で環境負荷を発生させている。ここでは、産業機械製品が社会にもたらす環境インパクトについて、生産に伴う資源投入と運用に伴うエネルギー消費の側面に焦点を当てて整理する。

(1) 生産に伴う資源投入の側面

吉田(2001)³は、産業機械の国内需要に伴い経年的に投入された資源について、鉄鋼を指標に推計している(図 3.5)。1995 年での鉄鋼投入は 2,141 万トンであり、輸出を含めた全国内生産の 78%に相当する。国内需要分のうちでは、一般産業機械が 40%と最も多く、自動車が 27%のシェアを有する。更新需要とみなした場合の耐用年数分の社会ストックは、一般機械 9,088 万トン、電気機械 3,032 万トン、輸送機械 4,146 万トン、精密機械 111 万トンである。

すなわち、ボイラ・原動機・冷凍機械・ポンプ・圧縮機・送風機などの一般機械は、その生産に多くの資源を消費すると同時に、社会ストック分が将来的に更新の時期を迎えたときに大量の廃棄物発生をもたらすことが予想される。

(2) 運用に伴うエネルギー消費の側面

一方、産業機械がエネルギー消費へ与えるインパクトについては、ポンプに代表される代謝装置が利用されている下水道システムを対象とした井村ら(1995,1997)^{4,5}の分析で明らかにされている。ここでは、管渠(雨水管は除く)の建設と維持管理、ポンプ場(雨水ポンプ場を除く)の建設と運転、下水処理場の建設と運転を対象範囲として、処理水量あたりのライフサイクル-エネルギー消費量を推計している(表 3.1)。

ポンプ場と下水処理場の建設と運用とを比較すると、運用段階での負荷が大きいことが分かる。つまり、流体制御や輸送を担う代謝装置の運転を介したエネルギー消費である。

表 3.1 下水処理システムのエネルギー消費量の推計例

	管渠	ポンプ場	下水処理場
建設 [Gcal]	73,580	4,876	89,578
運用 [Gcal]	1,326	11,256	122,362
合計 [Gcal]	74,906	16,132	211,940

したがって、都市あるいは都市施設といった空間におけるエネルギー・物質代謝を健全化するためには、電力や水、物資などのユーティリティ自体の入出力を制御・管理すると同時に、そこに集積する装置群の運用・代謝管理も手掛けていくことが必要となる。

3.3 環境効率を高める産業機械の製品連鎖マネジメント戦略の構想

3.3.1 製品連鎖に沿って製品環境政策を展開する必要性

産業機械あるいは工業製品がもたらす環境負荷について、製品の経路に沿って今一度整理する。

従来の産業社会システムにおける製造者の役割は製品をつくることであり、それら製品の使用や寿命を終えた段階以降のフローの管理に積極的に関与することは、特定の産業を除いてなされてこなかった。しかしながら、産業活動によって産み出される工業製品は、その製品連鎖（Product Chain）の各局面において様々な環境インパクトを及ぼす（図 3.6）。すなわち、

- ① 製品ライフサイクルの上流にあたる生産に係わるプロセスにおいては、大量のバージン資源採取による資源枯渇や環境汚染の問題を引き起こし、製品製造時に大量のエネルギーが投入されまた産業廃棄物を発生させる。

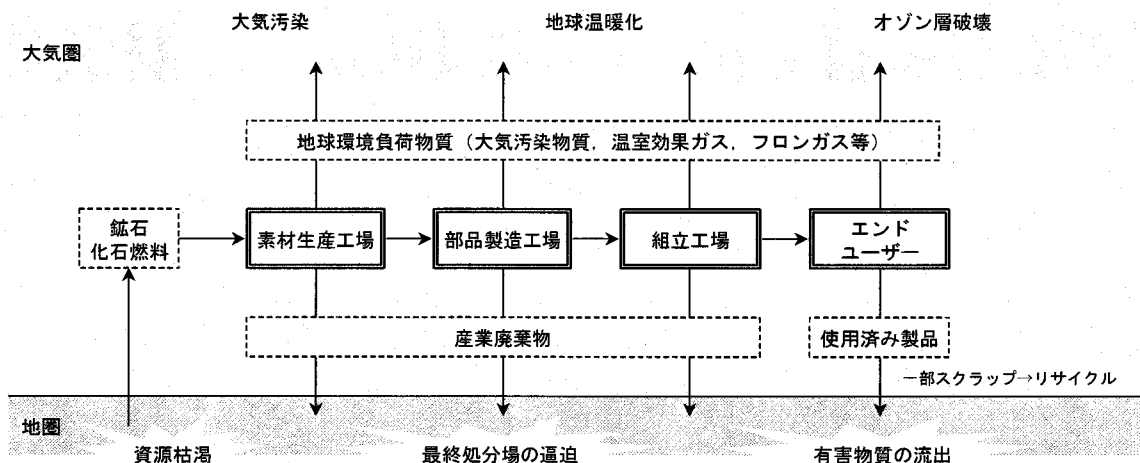


図 3.6 産業社会における広域製品連鎖に伴う環境インパクト

- ② 製品ライフサイクルの中流にあたる運用段階においては、機械製品の運転に大量の電力エネルギーを要することに加えて、製品の販売形態が「売切り」である、つまりメーカーが製品を販売した後の使われ方や維持・管理に対して適切な支援を行う社会システムが構築されていないために、無駄に消費される電力が少なくなく、またメーカーの想定耐用年数に比べて短命でその機能的寿命を終える製品が多い。
- ③ 製品ライフサイクルの下流では、動脈産業と静脈産業との多様な連携による一体的な製品・廃棄物管理システムがとられておらず、使用済み製品を回収し再資源化するための逆流通システム（Reverse Logistics）や逆工場（Inverse Manufacturing）の整備が充分でないために、廃棄されて最終処分場の逼迫や有害物質の流出といった問題を引き起こし、また再資源化される場合にも素材レベルでの再利用するマテリアル・リサイクルにとどまっている。

これらは決して個別的に独立して発生する問題ではなく、例えば製品リサイクルでいうと上流にあたる製品設計段階との係わりが極めて深い。例えば、製品のライフサイクル・コストの 75～85%が製品設計段階で決定されている^{6,7}ことなどから、製品の再生利用やそれに伴う分解等の容易性は製品設計に大きく左右されるものであると言える。

したがって、産業機械製品がもたらす環境負荷の削減あるいは最小化を図るときには、製品連鎖に沿って製品設計から製造、運用、廃棄に至る様々な断面で環境配慮を貫いていく製品政策（Product Policy）を展開することが重要となる。

3.3.2 環境効率や資源生産性を高める戦略

前章で述べたように、環境効率（Eco-Efficiency）や資源生産性（Resource Productivity）の指標が産業主体に対して要請することは、単位サービスの生産に伴う資源消費や環境負荷排出を最小化するような経済活動への転換である。

環境効率や資源生産性を高める戦略について、まず物質の側面から捉えると、第一は非更新性資源の消費を削減し、脱物質化（dematerialization）を図ることである。同時に、非更新性資源や希少な物質を、可能な限り生物由来などの更新性資源や枯渇性の低い他の物質で代替することが必要となる。第二は、社会における物質の滞留（利用）を長期化し、発生抑制（reduce）を目指す戦略である。素材やそれを加工して製造される部品の耐久性を向上させるとともに、製品として現有しているものについては、適切な維持管理や修理を通じて長寿命化を図っていくことになる。第三は、資源・製品の消費によって生じる廃棄物質を効率的に再使用（reuse）もしくは再利用（recycling）し、新造品や新規資源に代替利用することである。

一方、環境効率や資源生産性が「サービスの効率性」という形で表現されているように、産業主体が提供するサービスの側面が強調される。

環境効率を高めて持続可能な生産と消費のシステムへと転換していくとき、その究極的な姿は「モノではなくサービスを提供する産業社会」⁸である。すなわち、消費者は製品という物質ではなく製品の持つ機能を購入して使用し、製造者は製品を単体として売り切るのではなく製品機能の管理に付随したサービスを込みで販売する形態への転換である。富山ら(1997)⁹はこうした考え方を「ポスト大量生産パラダイム」、あるいは「量的充足から質的充足への転換」と表現している。すなわち、資源の効率的な利用や消費抑制を図る取り

表 3.2 産業用ポンプを指標としたサービス提供の構想

ユーザーにとって買い棄てからメンテナンス重視を愛好する核となる私的ビジネス・サービスの開発	■ ユーザーにとってはトータル・コストの削減が結果として環境負荷の減少につながるような商品とサービスを選好するので、ポンプ運転の電気代を節約する製品（インバータ型）による代替とアップグレードのサービスを導入。 ■ 回収時にビジネス側がポンプの運転実態等の有用情報を取得できるように製品に新たに付属するサービスを開発し、その見返りにユーザーに過大な負担を求めなくても私的なビジネス・サービスが成立すること。 ■ 製品の回収時にもメーカー側に役立つように既存設置ポンプに対して行うエンジニアリング・サービスで、ユーザー側が運転記録の取得などの明白な利得があることを提示すること。
核となる私的サービスの魅力を高める社会化された支援サービスの導入	■ ポンプや送風機など工場や産業施設で広汎に用いられている機器の単体としての効率を上げることから始め、産業組織向けの省エネの促進と環境負荷の診断・削減をはかるエンジニアリング・コンサルタントの業務を確立する。 ■ 省エネ型のポンプへの入替えとアップグレードのための品質管理や規格の共通化を促すことで、各社の製品への一斉の取り組みへと刺激する。 ■ 製品のモジュール化をはかりつつ、アップグレードと回収・再生を進めることをねらいとして、モジュールや部品の流通の経路を整備する。

組みが、同時にユーザー満足を充足もしくは向上させうるサービスと一体となって展開されることが必要となる。

盛岡(1999)¹⁰は、産業機械の指標製品としてポンプを取り上げた上で、そのサービス提供の構想フレームを具体的に提案している（表 3.2）。ここで強調すべきは、エネルギー消費の削減や資源の再活用を志向する私的ビジネスサービスが、ユーザー側に電力コストが削減されるなどのメリットがあると同時に、企業にとっても製品の売切り販売に代わる新たなビジネス・チャンスになることが望ましい。すなわち、“win-win situation”を実現できるか否かが、サービス提供型の持続可能な産業社会への転換の鍵であると言える。

3.3.3 環境効率を高める産業機械の製品連鎖マネジメント戦略

工業製品の分野で持続可能な生産と消費（Sustainable Production and Consumption）のシステムを構築するとき、個々の産業では製品連鎖マネジメント（Product Chain Management）の展開を通じて、製品の経路に沿って環境効率を高めていくことが重要となる（図 3.7）。具体的には、

- ① 製品のライフサイクル全般にわたって環境への適合を図るために、まず製品設計の断面でエコデザイン（Eco-Design）を開発すること、
- ② 製品利用に際しては、省エネ診断・改修サービスによる機器運用の効率化や、適切な維持・補修サービスによる製品の寿命延長など、製品付随サービス（Product-based Service）の継続的な提供によってユーザーのニーズや満足度を充足もしくは向上させること、
- ③ 使用後の回収製品は、素材レベルまで戻すリサイクルよりも、正常に機能する製品

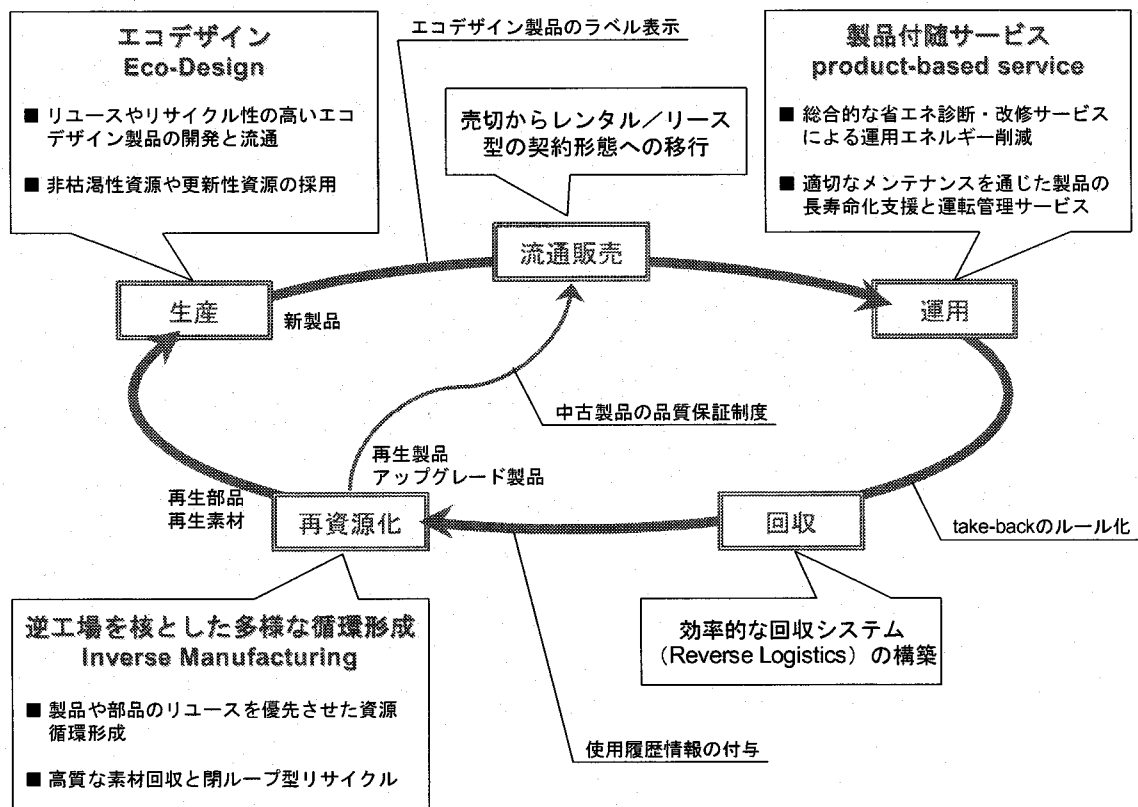


図 3.7 環境効率を高める産業機械の製品連鎖マネジメント

や部品のリユースを優先させて循環形成の高度化を図る逆工場を構築することを核となる戦略として、製品ライフサイクル全体で環境効率や資源生産性を高めていくことを志向する。また、動脈側での流通段階では、従来のような売切り型の契約形態ではなく、機能提供型の製品ライフサイクル管理に適したレンタル (renting) やリース (leasing) などの新たな契約ルールへと移行させていくこと、静脈物流では使用済み製品 (End-of-Life Product) の効率的かつ継続的な回収を行うためのリバース・ロジスティクス (Reverse Logistics) を構築することなども、製品連鎖管理において必要となる。

産業エコロジーや環境効率の概念から導かれるこれらの製品連鎖マネジメントの基本戦略について、以下に説明を加える。

(1) エコデザイン (Eco-Design)

エコデザインは、広義には環境適合設計 (DFE; Design for Environment) と同義であり、製品のライフサイクル全般にわたって環境に与える負荷を極力抑え、環境効率を向上させることを目指した製品設計を意味する。

工業製品の生産段階における製品設計は、以降の製品ライフサイクルにおける様々な活動のパフォーマンスに影響を及ぼす。社会サービスの革新や逆工場における多様な物質循環の形成が効率的に進められるかどうかは製品設計に大きく依存するため、エコデザインの開発を進めていくことは、製品連鎖マネジメントにおいて中心的な戦略となる。なお、

エコデザインの具体的な方策については、第4章において示す。

(2) 逆工場を核とした多様な循環形成 (Inverse Manufacturing)

従来、使用済みとなった多くの工業製品は廃棄物として最終処分されるか、オープン型のマテリアル・リサイクルにとどまった再生処理がなされる程度であった。しかしながら、広義のリサイクルの形態としては、まず製品としての再使用を優先し、次に部品リサイクルにおき、素材としての再資源化リサイクル、そして熱回収の順に可能性を検討すべきである¹¹。

ここで、多様な再資源化の選択肢は表3.3のように分類・定義される¹²。一般的に、再資源化チャンネルのより上位から再生利用を進めることによって複数サイクルでのリサイクルが可能となり、産業システム全体の環境効率が向上すると考えられる。

こうした製品や部品の再生 (Remanufacturing) など、多様な循環形成を実施する拠点として提案されたのが逆工場 (Inverse Manufacturing)¹³の考え方である。現行の産業システムは動脈重視型の構造であり財の流れは生産から廃棄に至る一方通行であるが、この流れを資源循環型に転換するためには、動脈部門と静脈部門が一体化した構造、すなわち使用済み製品を引き取って (take-back) 再資源化を行う基盤としての逆工場を内包した生産・再資源化システムの構築が不可欠であるとされる。従来のリサイクル工場が担ってきたマテリアル・リサイクル中心の再資源化を包含しつつも、逆工場には更に以下の機能・役割が期待される。

- ✓ 保守点検維持サービスを伴う製品の開発
- ✓ 機能向上を容易にするモジュール化された製品の開発
- ✓ 製品のリース契約の導入
- ✓ 製品の修理や部品の回収による小さなループでの再使用

表 3.7 再資源化チャンネルとその定義

再資源化チャンネル	定義
プロダクト・リサイクル (product recycle)	逆工場まで回収されてきた使用済み製品のうち、品質の優れているものについて一部の部品交換及び適切な清掃を行い再出荷する、あるいは分解した後に部品の錆除去や洗浄、再塗装等の適切な処理を施すとともに一部の部品を交換し、再度組み立てて再製品化する行為。リユース (Reuse) もこれに当てはまるものとする。
パーツ・リサイクル (parts recycle)	逆工場における分解部品から品質の優れた再使用可能なものを取り出し、錆除去や洗浄、再塗装等の適切な処理を施した後に、新規部品と合わせて組み立て再製造する行為。リマニュファクチャリング (Re-manufacturing)。
マテリアル・リサイクル (material recycle)	逆工場における分解部品・材から原材料として再利用可能なものを取り出し、リサイクルを行う行為。廃棄物となる前の製品と同等の製品の原材料としてリサイクルするものと、質を落として利用するリサイクルがある。
サーマル・リサイクル (thermal recycle)	逆工場における分解部品・材のうち、プラスチックや木材など熱・エネルギー源として利用可能なものを取り出し、熱回収を行う行為。

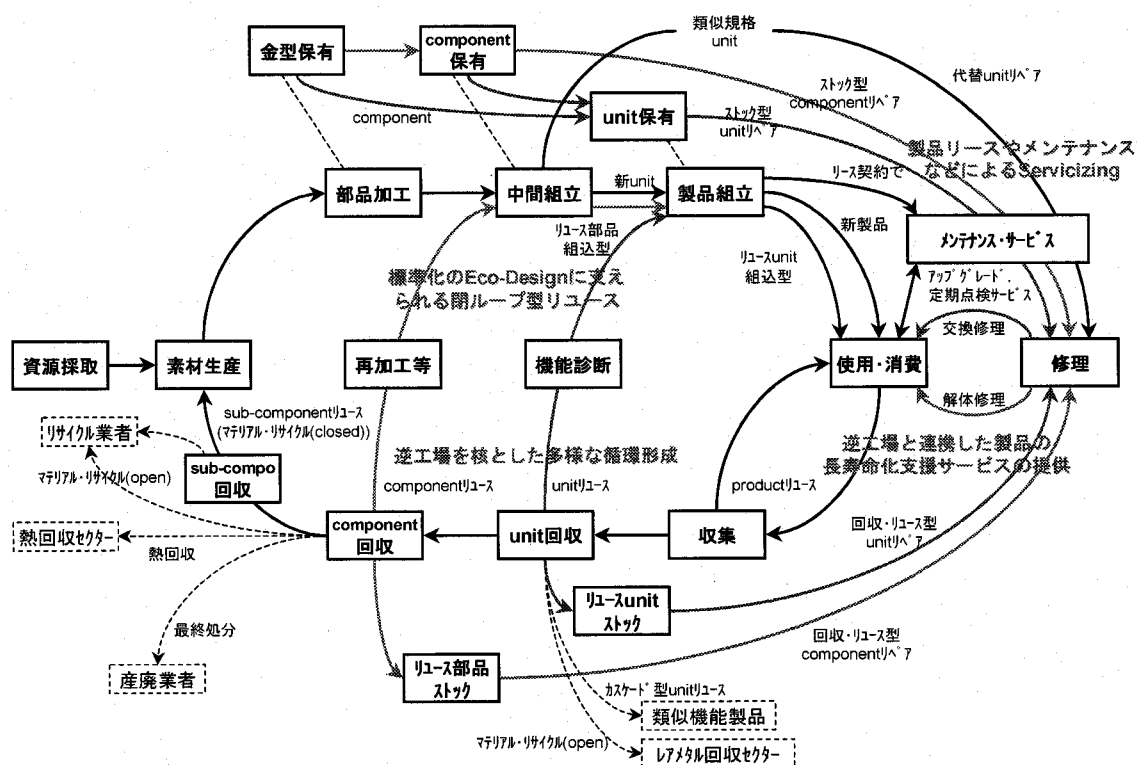


図 3.8 逆工場を核とした多様な資源循環のループ

逆工場を核とした多様な資源循環のループは、図 3.8 のように描くことができる。逆工場はメンテナンスを担う部門との接点があり、そこではオーバーホール (overhaul) による製品の長寿命化など、逆工場と連携した脱物質化の支援サービスが展開される。また、本論文では、製品と部品の間にユニット (中間組立品(subassembly)) を位置付けている。つまり、製品としてのリユースに次いで、ユニットのリユースを優先させた循環形成を指向することになる。こうしたユニットに着目する視点については、第 5 章で詳しく述べる。

実社会において動き始めている逆工場の例としては、レンズ付きフィルム¹⁴や複写機¹⁵が代表的である。また、自動車部品産業では、リビルト事業が市場メカニズムの中で確立している¹⁶。しかしながら、多くの場合、これまで動脈産業部門に投資が集中してきたことから、回収・分解・再生利用といった静脈部門における人材や技術、資本の蓄積が未成熟となっており¹⁷、逆工場の社会化を阻害する一因になっているという課題がある。

(3) 製品付随サービス (product-based service)

環境効率を向上させるとき、産業社会が提供するサービスの革新が重要になることについては、前項において述べた。従来の製造業が提供するサービスとは、消費者ニーズを満たす製品の提供が第一であり、そのアフター・サービスとして修理・部品交換などが行われる程度であった。しかし、工業製品が広く社会に普及し、量的な充足を果たしつつある現在では、メンテナンスやアップグレード、省エネ改修などを含む機器のオペレーション管理がサービスの対象として捉えられるようになってきている。

近年、持続可能な生産と消費のシステムの具体的な姿をサービス化の面から描き出そう

する取り組みが展開されている。アメリカのテラス研究所によって提唱されたサービサイジング（servicizing）もその一つである。

サービサイジングは、これまで製品として販売していたものをサービスとして提供することで、新たな付加価値を生み出そうというビジネス・スタイルを表現している¹⁸。ここでは、「サービス（Services）」は図 3.9 のように分類される^{19,20}。すなわち、非物質サービス（Non-material Services）と物質サービス（Material Services）もしくは製品付随のサービス（Product-based Services）、後者は更に製品機能提供サービス（Product Function Services）と製品寿命延長サービス（Product Extension Services）に分類される。アップグレードやメンテナンス、補修・長寿命化など、資源消費や廃棄物発生抑制に繋がるサービスは、製品付随サービスとして位置付けられる。

一方、事業系ビルや工場を主対象として無駄に消費されているエネルギーを診断し、省エネルギー計画の企画・立案、設計・施工管理等を包括的に提供するサービスは、ESCO（Energy Service Company）事業として既にビジネスとして展開されている。産業機器のメンテナンスは、製品の延命化に加えて適切な運転管理を支援する（性能劣化を緩和する）という点で省エネルギーに寄与するものであり、広い意味で ESCO 事業の一環として捉えることができる。

我が国では、1997 年に京都で開催された「気候変動枠組み条約第 3 回締約国会議（COP3）」で採択された温室効果ガスの削減目標に対して、削減方針の具体化として 1998 年に「エネルギー使用の合理化に関する法律（通称：省エネルギー法）」が改正された。2001 年度よりエネルギー多消費製造業である第一種エネルギー管理指定工場に対して、立ち入り指導を前提に総点検が企画されている²¹。また、同法では第二種指定工場が新たに追加され、都市施設群にも適用されることになった。

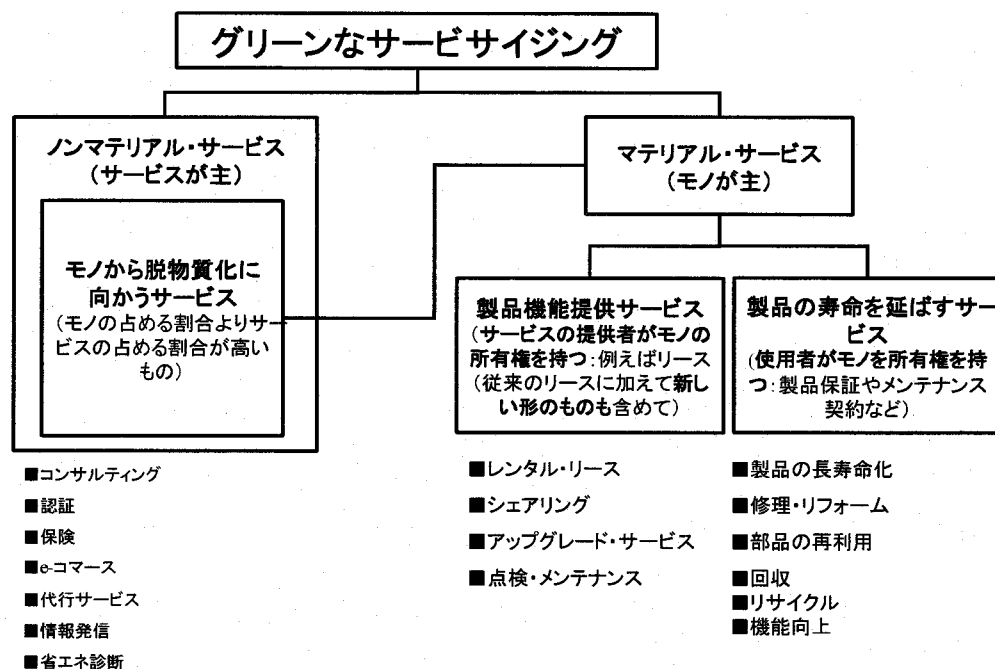


図 3.9 Servicizing におけるサービスの分類

したがって、各種産業装置が集積するユーティリティ施設や都市施設では、維持・補修を通じて製品の寿命管理を図るサービスと、エネルギー消費装置の動力・空調熱・給湯・照明などの負荷低減管理を図るサービスがともに重要になってくると言える。本論文の第6章では、こうした製品付随サービスを具体的に構想し、その評価を行っている。

3.3.4 包括的な製品管理サービスの展開

環境効率を高める方向で製造業・組立産業が持続可能な生産と消費への構造転換を図るとき、製品機能やサービスを提供する動脈産業のエコロジー化と、使用済み製品の再生・再資源化を担う静脈産業の高度化を一体的に展開していくと同時に、それを製品設計から支えるエコデザインの開発を進めていくことが重要である。すなわち、拡大生産者責任のもと、生産者・組立産業が提供する対象を製品本体からそれに付随するサービスにまで拡張し、製品の運用と廃棄後の資源循環を包括的に管理する産業へと転換していくことが肝要となる。

また、資源消費と製品運用時のエネルギー消費の両側面から環境にインパクトを与える産業機械製品に対して、前項(3)で述べたような製品管理サービスを展開するとき、管理の対象は装置単体だけではなく、むしろ機械装置を含むユーティリティ施設・都市施設全体へと広がっていくことになる。

3.4 本章のまとめ

本章では、まず都市活動や都市生活を支える産業機械製品について、社会における役割やそれがもたらす環境インパクトを整理した上で、産業エコロジーや循環複合体のアプローチに基づき、産業機械の製品連鎖に伴う環境負荷を低減し、都市におけるエネルギー・物質代謝を健全化するための製品連鎖マネジメントを構想した。

都市活動に不可欠な各種ユーティリティを制御あるいは輸送する役割を担う産業機械は、その生産と運用に伴って資源とエネルギー消費の両側面から多大な環境負荷をもたらす。したがって、産業機械に対する製品連鎖マネジメントの主要な戦略は、①製品設計の断面でエコデザイン、②製品利用に際しての製品付随サービスの継続的な提供、③使用後の製品に対して循環形成の高度化を図る逆工場の構築に類型化される。資源生産性の具体的な目標として掲げられている Factor 10²²や Factor 4²³を達成するためには、これらの戦略を一体的に展開していくことが必要である。

また、環境効率を高め、持続可能な生産と消費の産業システムを実現するには、生産者・組立産業が提供する対象を製品本体からそれに付随するサービスにまで拡張し、製品の運用と廃棄後の資源循環を包括的に管理する産業へと転換していくことが肝要となる。各種産業装置が集積するユーティリティ施設や都市施設を対象とするときには、維持・補修を通じて製品の寿命管理を図るサービスと、エネルギー消費装置の負荷低減管理を図るサービスがともに重要になってくる。

- ¹ 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：機械統計年報（毎年発行），経済産業調査会
- ² 日本産業機械工業会：産業機械受注状況（工業会調査）平成7年1～12月
- ³ 盛岡通編著：「第2編 産業工場での循環複合体の構築」，p.5-6，「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」CREST最終報告書，2001.
- ⁴ 井村秀文，銭谷賢治，森下兼年，池田秀昭，楠田哲也：下水道システムのライフサイクルアセスメントに関する研究－LCEを指標としたケーススタディ，環境システム研究，Vol.23，pp.142-149，1995.
- ⁵ 井村秀文：建設におけるインバースマニュファクチャリングの視点，p.151-158，「インバース・マニュファクチャリング実現のための基礎研究」，平成7～平成8年度科学研究費補助金（基盤研究(A)(1)）研究成果報告書，1997.
- ⁶ 機械設計/電子技術編集部編：『リサイクル設計入門』，日刊工業新聞社，2000.
- ⁷ Samir B.Billatos, Nadia A.Basaly: *Green Technology and Design for the Environment*, Taylor & Francis, p.41, 1997.
- ⁸ 盛岡通：循環複合体研究で得られた社会システム変革の方向性，環境システム研究，vol.27，p.147-152，1999.
- ⁹ 例えば，木村文彦編：インバース・マニュファクチャリング実現のための基礎的研究，平成7年度～平成8年度科学研究費補助金研究成果報告書，1997.
- ¹⁰ 盛岡通：前掲8
- ¹¹ 盛岡通：循環型経済社会の構築をめざした戦略研究，環境情報科学，Vol.27, No.2, p.26-34, 1998.
- ¹² 環境庁編：「平成11年版環境白書（総説）」，大蔵省印刷局，p.117-119，1999.
- ¹³ 吉川弘之，IM研究会編著：『逆工場－見えてきた製造業これからの10年－』，日刊工業新聞社，1999.
- ¹⁴ 「富士フィルム社会・環境レポート2003」，富士写真フィルム株式会社ホームページ，
<<http://www.fujifilm.co.jp/kankyoreport/fujifilm/2003/pdf/all.pdf>>
- ¹⁵ 例えば，「リコーグループ環境経営報告書2003」，リコー株式会社ホームページ，
<<http://www.ricoh.co.jp/ecology/report/pdf/2003/all.pdf>>
- ¹⁶ 例えば，「株式会社デンソー環境社会報告書2003」，株式会社デンソーホームページ，
<<http://www.denso.co.jp/ENVIRONMENT/report/2003/pdf/pdf/2003.pdf>>
- ¹⁷ 経済企画庁総合計画局：構造改革推進研究会リサイクルワーキング・グループ報告書，1999.
- ¹⁸ 盛岡，今堀，恒見，山本：家電製品のサービサイジングとリユースの融合，季刊環境研究2003，No.130，p.109-120，2003.
- ¹⁹ Allen L.White, M.Stoughton, L.Feng: *Servicizing: The Quiet Transition to Extended Product Responsibility*, U.S Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, 1999.
- ²⁰ 今堀洋子，盛岡通：家電におけるサービサイジングの可能性に関する研究，環境情報科学論文集17，p.259-264，2003.
- ²¹ 大槻満：改正省エネルギー法Q&A，環境機器，2000年8月号，p.126，2000.
- ²² F.Schmidt-Bleek 著，佐々木建訳：『ファクター10－エコ効率革命を実現する』，シュプリンガー・フェアラーク東京，1997.
- ²³ Ernst Ulrich von Weizsäcker, Amory B.Lovins, L.Hunter Lovins 著，佐々木建訳：『ファクター4－豊かさを2倍に，資源消費を半分に』，省エネルギーセンター，1998.

第4章 資源循環の高度化を支援するエコデザインの分析

4.1 緒言

工業製品の生産段階における製品設計は、以降の製品ライフサイクルにおける様々な活動のパフォーマンスに影響を及ぼす。資源生産性や環境効率を高める多様な物質循環の形成が効率的に進められるかどうか、製品設計の仕方に大きく依存する。近年では、組立産業が中心となり、製品のライフサイクルでの環境負荷の最小化を設計段階で配慮しようとするエコデザインの開発が進められている。

本章では、製品設計から環境への適合を図るエコデザインについて、特に製品の維持・補修や使用後の再生、再資源化などを担う逆工場の操業プロセスの経済効率を高め、循環形成を支える易分解性設計（分解容易性設計）に着目して分析を行う。具体的には、まず使用済みとなった産業ポンプの回収と逆工場の実験的操業を通じて、ポンプの分解容易性を高める方策の検討を行う。次いで、家電製品を事例として、部品インベントリーと分解特性の解析をもとに複数の設計要求間の問題を明らかにし、製品の環境品質をトータルで高めるための共存・協調設計の必要性を論じる。最後に、リユースが他産業に先駆けて社会的に展開されている事例を調査し、リユース性やメンテナンス性を高めるエコデザインを見出す。

4.2 持続可能な産業社会の構築とエコデザイン

4.2.1 エコデザインの概念と役割

エコデザイン（Eco-Design）は国連環境計画（UNEP; United Nations Environment Program）を中心に開発された概念であり、「製品開発の全ての段階で環境を配慮し、製品のライフサイクルを通じての環境影響を最小限に抑えるような製品づくり」¹を目指すものと定義される。同様のアプローチを表す単語としては、環境適合設計（DFE; Design for Environment）や環境調和型設計（Environmental Conscious Design）、ライフサイクル・デザイン（LCD; Life Cycle Design）²などがある。従来の製品設計では製造工程の効率化や、コストや品質面で消費者の要求を満たすことなど、製品ライフサイクルの上流側のみの最適化が図られていたのに対して、エコデザインは生産から使用、廃棄、リサイクルに至るあらゆる断面での環境適合を製品生産の段階で図っていくことになる。

工業製品の分野におけるこれまでの循環形成戦略は、使用済みとなった製品の高度リサイクル・処理技術の開発に注意が集まっていた。しかし、最近では循環形成の高度化と製品サービスの革新を図り、環境効率や資源生産性を高めるための鍵はエコデザインであるとの認識が強まりつつある。今後、サービスを提供し脱物質化を図る方向で製造業・組立産業を発展させるとき、製品設計ではリユース指向型を、製造設計では再製造設計を、製品出荷・流通の設計では回収再生ロジスティックスを狙うことになる³。

すなわち、エコデザインの開発を通じて資源循環や社会サービスの高度化が支援され、製品ライフサイクル全体での環境負荷の最小化が促進されれば、産業社会がより持続可能性の高い生産と消費のシステムへと進化していくことに繋がっていく。

4.2.2 エコデザインの目標と設計要素技術

X 適合設計法 (DFX; Design for X) とは、製品ライフサイクルの様々なプロセスを設計段階で考慮する設計思考である。この“X”には設計のターゲットとなる事項が当てはめられ、「製品のライフサイクル全般にわたって環境に与える負荷を極力抑え、環境効率を向上させる」という意味で環境への配慮が目標となるとき、DFE (Design for Environment) と表現される。この設計目標となる“X”には、例えばメンテナンス性 (Maintenability) やアップグレード性 (Upgradability)、リユース性 (Reusability)、リサイクル性 (Recyclability)、ある

表 4.1 エコデザインの設計要素技術^{4,5,6}

大分類	中分類	小分類
易分解・分離性設計	分解容易な締結・構造	・締結工具 (ネジ等) の数・種類の削減 ・溶接, 接着の回避 ・解体方向の統一化 ・部品点数の削減 ・形状維持可能な材料の選択
	規格・標準化	・結合方法の統一化 ・締結工具サイズの統一 ・工具数の削減
	識別性設計	・材料の表示 ・危険物の表示
易リサイクル設計	易リサイクル材の選択	・材料種類の削減 ・混合可能な素材
	材料モジュール化	・リサイクル可能材の集約 ・リサイクル不可能材の集約
易リユース設計	易リユース材の選択	・傷つかない材料の選択 ・形状維持可能な材料の選択 ・耐劣化性設計
	規格・標準化	・製品シリーズ内での部品の標準化
	洗浄・検査の容易化	
易メンテナンス設計	検査・故障診断・修復・部品交換の容易化	・目的部品の集約 ・目的部品の最上部への配置
	余寿命診断	・目的部品の集約 ・目的部品の最上部への配置 ・使用履歴情報の蓄積
	規格・標準化	・接続部分の標準化
易アップグレード設計	部品交換の容易化	・目的部品の集約 ・目的部品の最上部への配置
	規格・標準化	・接続部分の標準化
易回収・運搬設計	大型製品の易分割化	
	回収容器の改善	・回収容器統一 ・回収容器の運搬適性設計 ・包装材の削減
	規格・標準化	
	軽量化	・軽量材の選択

いは組立容易性 (Assembly)、製造容易性 (Manufacturability)、分解容易性 (Disassembly) などがある^{7,8}。

DFE に関連する具体的な設計要素技術を表 4.1 に示す。これらの項目のうち、「規格・標準化」、「分解性設計」、「構造の単純化、部品減、軽量化」などは、逆工程の最適化を検討することにより順工程がより良くなる、つまり順工程と逆工程の正の相互作用をもつ設計項目の典型例である⁹。すなわち、エコデザインにおいて重要となるのは、環境面での配慮事項を設計に盛り込むことにより、従来の製品が持つ品質も同時に向上するという点である。

4.3 産業ポンプの易分解性設計の分析

4.3.1 分析の目的

設置現場での通常の維持・補修や逆工場 (Inverse Manufacturing) を拠点としたオーバーホール (overhaul)、あるいはやがて製品寿命が尽きたときの再製造 (remanufacturing) やリユース、再資源化などの製品管理を行うとき、いずれの場合もその容易性を向上させる製品設計に求められるのは第一に分解作業性の向上である。

易分解性設計 (DFD; Design for Disassembly) は、これまではリサイクルしやすさを向上させる設計要素の一つとして捉えられ、その開発が進められてきた。しかし、例えば部品リユースを行うとき、目的部品に素早くアクセスして取り出す行為は、逆工場の操業プロセスを効率化する面で重要となる。すなわち、易分解性の向上はリサイクル性設計 (Design for Recyclability) のみならず、リユース性設計 (Design for Reusability) においても重要な設計要素となる。

本節では、荏原製作所・藤沢工場において使用済みポンプの解体現場の調査を行い、それに基づいて逆工場の操業と資源循環を支える易分解性設計の要素技術を明らかにする。

4.3.2 使用済みポンプの分解実験と実測調査の概要

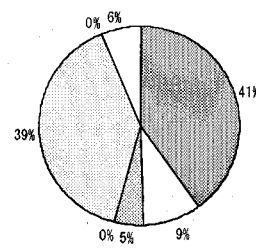
(1) 逆工場における使用済みポンプの回収実績と分解・再生実験の手順

環境装置や産業用ポンプの製造拠点である荏原製作所・藤沢工場では、全国レベルで販売され流通している当社の工業製品を使用済みとなった段階で回収し分解・再資源化するための逆工場を 1999 年度に実験的に設置し、その事業化を探ってきた。この逆工場は関東全域を回収対象地域としており、8 ヶ所の回収拠点から 1999 年 10 月 20 日現在までに約 250 台の使用済み製品が回収された (表 4.2)。

回収製品は、逆工場において次のような手順で分解・再生実験が試みられた。

- ① 回収されてきた使用済みポンプと「回収チェックシート」を対応させ、その後の作業内容が記録できるよう準備する。
- ② 製品の型番をチェックした後に分解を行う。ここでは、分解前後の写真撮影、分解時間及び分解部品の重量を計測・記録する。
- ③ 分解部品のうち部品リユース可能性が検討されるものについては、部品再生 (ショットブラスト) を施す。ここでも、ブラスト前後の写真撮影、ブラスト前後の寸法やブラスト時間等を計測・記録する。

表 4.2 使用済みポンプの回収実績

実験事項	使用済みポンプの回収			
回収期間	1999 年 3 月～10 月			
回収量	247 台	月別回収台数	3 月	16 台
			4 月	31 台
			5 月	0 台
			6 月	37 台
			7 月	34 台
			8 月	42 台
			9 月	38 台
			10 月	49 台
回収機種内訳	渦巻（横型・単段）	76 台	 ■ 渦巻（横型・単段） □ 渦巻（ライン） □ 渦巻（自吸型・単段） □ 渦巻（自吸型・多段） □ 渦巻（横型・多段） ■ 渦流 □ その他・分類不明	
	渦巻（ライン）	18 台		
	渦巻（自吸型・単段）	9 台		
	渦巻（自吸型・多段）	0 台		
	渦巻（横型・多段）	75 台		
	渦流	0 台		
	その他・分類不明	12 台		
	計	190 台		

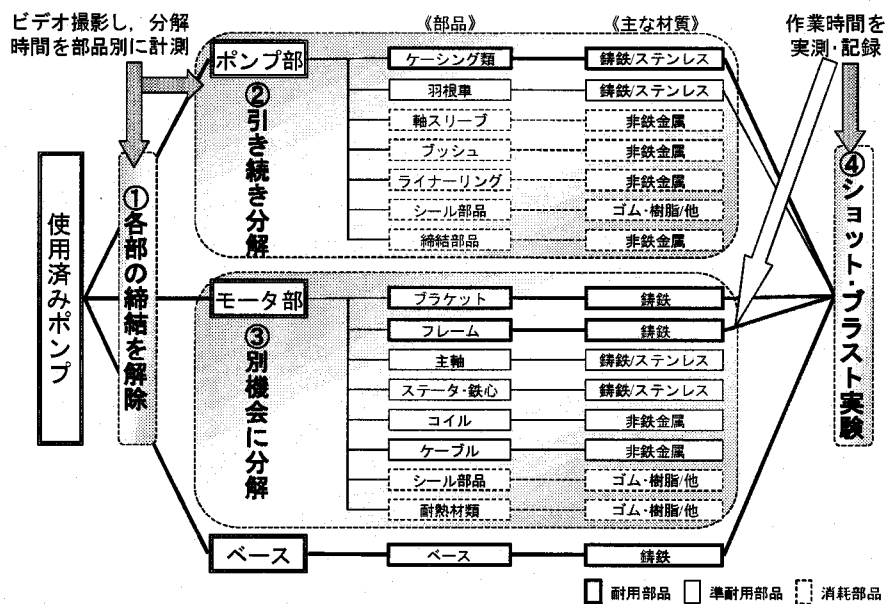


図 4.1 逆工場における実測調査の流れ

(2) 使用済みポンプの分解実験

本節での分析にあたり、実験的に操業されている逆工場において使用済みポンプの解体現場を実際に調査し、より実態的なデータの取得を行った。

回収された使用済み製品の分解作業は 1～2 名の作業スタッフによって行われている。1999 年 9 月 22 日現在までに 48 台のポンプ分解作業をビデオで撮影し、そのうち 41 台分の分解時間を部品別に計測した。なお、当初の作業はポンプ部とモータ部を分離した後にポンプ部のみを分解するものであったため、撮影されたビデオを用いて計測を行ったものはポンプ部のみの分解時間である。モータ部に関しては、別機会に分解実験が行われた際に計測を行っている。(図 4.1)

ポンプ部の分解実験は、1999 年 10 月 20 日現在までに回収された使用済みポンプ 247 台分の全てに対して行われた(表 4.3)。一方、モータ部の分解実験は、51 台分のモータ部に対して行われた(表 4.4)。使用済みポンプの分解実験前後の様子を表 4.5 に示す。

(3) 主要部品の再生実験

分解した部品のうち、逆工場ではケーシング・ケーシングカバー・羽根車・軸受フレーム・軸受カバー・パッキン押え・ポンプ支柱・ベースに対して、部品の再生実験(ショットブラスト装置を用いた表面研削)が行われた。その結果を表 4.6 に示す。

4.3.3 分解実験に基づくポンプの易分解性設計要素

まず、ポンプの機種別の平均分解時間を表 4.7 に示す。ここで、表の下段へいくほどその開発の歴史が新しい。すなわち、ポンプ部を構成する主要な素材が鋳鉄から鋳鉄一部ステンレスを経てステンレスへ、また駆動部が多段型から単段型、インバータ付へと開発される製品の特徴が変化している。表より、ステンレス製品に比べて製品重量が重く腐食(錆)をおこしやすい鋳鉄製品ほど分解に時間を要することが分かる。

次に、ステンレス・可変速型ポンプを例にその部品別平均分解時間を図 4.2 に示す。図中の横軸は主な分解順になっている。機種によって製品の構成部品は異なるものの、計測した全ての機種においてこの主な手順と分解時間の傾向は共通している。すなわち、最も分解に時間を要している部位は締結部分である。締結部品のサイズに合った工具への取り替えに時間を要することや構造上工具による締結解除に手間取る箇所があることなどが影響している。次いで、ライナーリングやメカニカルシール等のような水漏れ防止部品の分解に時間を要している。水漏れ防止という機能を保持するためにケーシング類部品に固着されており、その分離は容易でなかった。特に、ステンレス製ポンプのそれらは樹脂製である一方で、鋳物製ポンプのそれらは金属製であり分離に相当な時間を要した。これら 2 部位に次いで、製品の主要な部品であるケーシング類が続く。ケーシングの分解に時間を要する原因としては、回収の工程を通じて特にポンプ部全体を包む形になっているケーシングケーシング部分に凹みが生じること、モータ部との接触面が腐食していること、作業台上でのポンプの移動や回転を伴うことが挙げられる。

表 4.3 使用済みポンプの分解実験の作業実績（ポンプ部）

実験事項	使用済みポンプの分解作業（ポンプ部）		
実験期間	1999 年 8 月～10 月		
作業量	247 台分	作業率	100%
作業時間*1	約 12 分／台	作業人員	基本的に 1 名
機種別作業時間*1	鋳鉄・多段	約 60 分／台	
	鋳鉄・単段	約 12 分／台	
	鋳鉄（一部ステンレス）・単段	約 11 分／台	
	ステンレス・可変速	約 5 分／台	
作業担当者*2	逆工場推進室（リサイクル事業部）		
	逆工場作業員 A	○	
	逆工場作業員 B	△／□	
	逆工場作業員 C（補助的）	□	
	生産技術室 A		
	生産技術室 B		
	その他（調査学生によるビデオ撮影）	◇	
使用工具	スパナ，レンチ，ハンマー，インパクト，インパクトレンチ用ソケット等		

*1 ビデオ撮影した 41 台の平均値。

*2 ○印：メインで作業，△：状況に応じて交代で作業，□：状況に応じて補助作業，◇：立会い

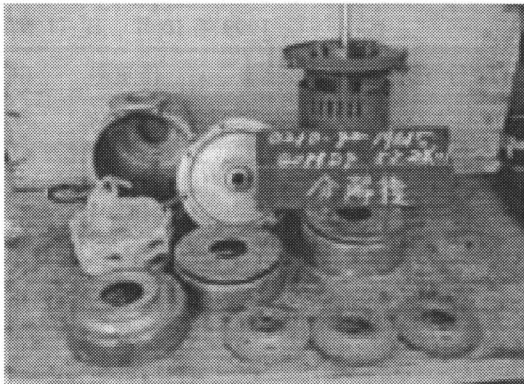
表 4.4 使用済みポンプの分解実験の作業実績（モータ部）

実験事項	使用済みポンプの分解作業（モータ部）		
実験期間	1999 年 10 月 日（1 日間）		
作業量	51 台分（247 台中）	作業率	20.6%
作業時間*1	11.8 分／台	作業人員	2 名
作業担当者*2	逆工場推進室（リサイクル事業部）	◇	
	逆工場作業員 A	○	
	逆工場作業員 B	○	
	逆工場作業員 C（補助的）		
	生産技術室 A		
	生産技術室 B	◇	
	その他		
使用工具	スパナ，レンチ，ハンマー，インパクト，インパクトレンチ用ソケット等		

*1 使用済みポンプ 51 台分のモータの平均値。

*2 ○印：メインで作業，△：状況に応じて交代で作業，□：状況に応じて補助作業，◇：立会い

表 4.5 分解実験前後の写真撮影の作業実績

実験事項	分解実験前後の写真撮影		
実験期間	1999 年 8 月～10 月		
撮影量	247 台分 (前：1 枚，後：1 枚)	撮影率	100%
作業時間	前後ともに数分程度	作業人員	1 名
作業担当者*1	逆工場推進室（リサイクル事業部）		
	逆工場作業員 A		○
	逆工場作業員 B		△
	逆工場作業員 C（補助的）		
	生産技術室 A		
	生産技術室 B		
	その他		
撮影写真例	分解実験前		
	分解実験後		

*1 ○印：メインで作業，△：状況に応じて交代で作業，□：状況に応じて補助作業，◇：立会い

表 4.6 部品再生実験の作業実績

実験事項	部品再生（ショット・ブラスト）実験の作業実績		
実験期間	1999 年 8 月～10 月		
作業量*1	175 部品	作業率	—%
作業時間*2	約 5.6 分／部品	作業人員	基本的に 1 名
機種別作業時間*2	部品名	サンプル数	作業時間
	ケーシング	10	7.94 分／ヶ (0.637 分／kg)
	吸込ケーシング	9	7.89 分／ヶ (0.463 分／kg)
	吐出ケーシング	10	7.60 分／ヶ (0.443 分／kg)
	中間ケーシング	31	4.55 分／ヶ (0.519 分／kg)
	ブラケット	25	3.88 分／ヶ (0.878 分／kg)
	軸受ケーシング	21	3.29 分／ヶ (0.687 分／kg)
	軸受カバー	7	3.29 分／ヶ (0.864 分／kg)
	羽根車	14	2.57 分／ヶ (1.25 分／kg)
	ケーシングカバー	10	4.40 分／ヶ (0.612 分／kg)
	バランスカバー	6	3.83 分／ヶ (0.795 分／kg)
	ベース	6	12.0 分／ヶ (0.408 分／kg)
作業担当者*3	逆工場推進室（リサイクル事業部）		
	逆工場作業員 A		△
	逆工場作業員 B		○
	逆工場作業員 C（補助的）		
	生産技術室 A		
	生産技術室 B		
	その他		
使用機械	ショットブラストマシン		

*1 1999 年 10 月 20 日現在，各情報を集約させたシート上で確認されたもののみの値。但し，作業は対象部品に対して実施。

*2 上記*1 の平均値。

*3 ○印：メインで作業，△：状況に応じて交代で作業，□：状況に応じて補助作業，◇：立会い

表 4.7 ポンプの機種別平均分解時間

ポンプ種	開発時期 [年頃]	サンプル数 [台]	平均分解時間 [秒/台]
鋳鉄・多段	1965	2	3789.12
鋳鉄・単段	1965	9	731.25
鋳鉄・単段，一部ステンレス	1975	11	673.12
ステンレス・可変速	1985	12	302.05

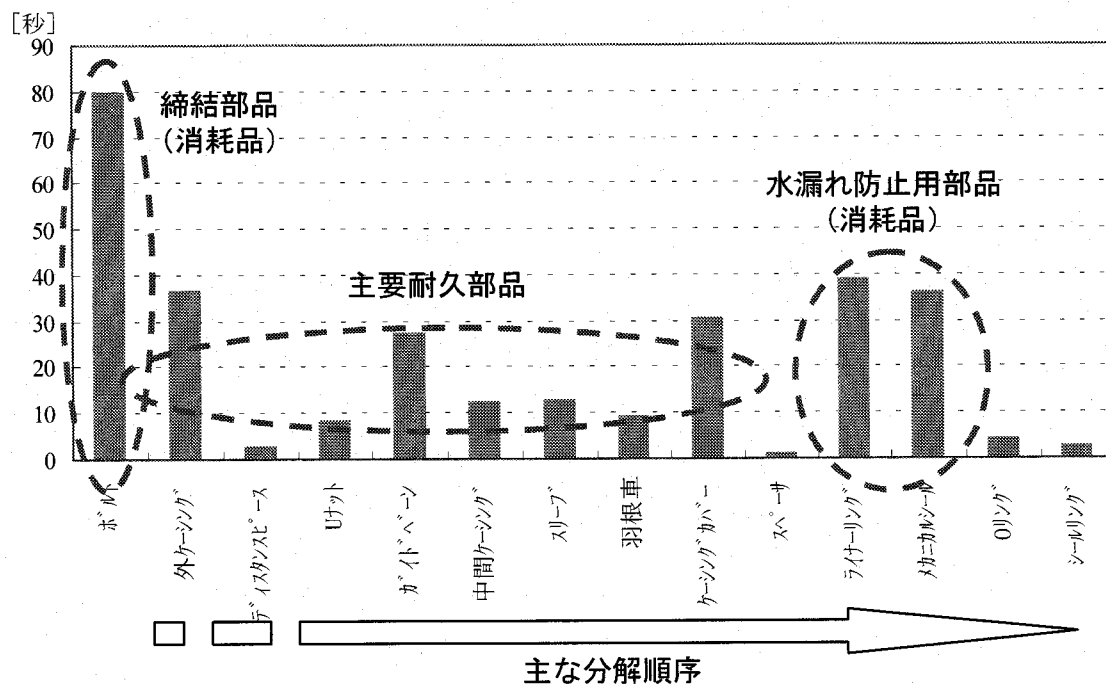


図 4.2 部品別平均分解時間と易分解性設計の導入ポイント

以上の逆工場における分解時間の実測結果から見い出される、製品の易分解性を高める設計要素は次の通りである。

- ① ナットの形状や種類が多様であるために最も分解に時間を要する締結部品に対しては、「締結点数の削減」、「締結方法の統一」、「締結部品形状（口径等）の統一」などが DFD 要素として挙げられる。
- ② 次に、主に主要耐久部品と主軸の間に付着される水漏れ防止部品に対しては、分離の手間を省くための「目的部品の集約」がポイントとなる。一方、部品リサイクルの対象となる主要耐久財については、分解容易性よりも耐劣化性設計がまず優先されることが望ましい。また、分解によって部品を抽出する前に部品の余寿命を判断する技術を活用し、無駄な分解作業を省くことが必要となる。

4.3.4 逆工場を促進する易分解性設計の導入効果

分解作業を撮影したビデオを用いて、易分解性設計を導入することによる分解時間の削減効果を推計した。

まず、「締結部品の形状統一化」の導入によって分解工具の持ち替え時間が削減されると想定し、撮影したビデオからこの時間を計測した。その結果、ポンプ 1 台あたり分解時間は導入前と比較して約 92 [%] まで低減されることが分かった。次いで、水漏れ防止部品に対して「機能集約化」を導入して同部品の分解時間が半減されると仮定すると、「締結部品の形状統一化」と併せたときにポンプ 1 台あたり分解時間は約 88 [%] まで低減されることになる。（図 4.3）

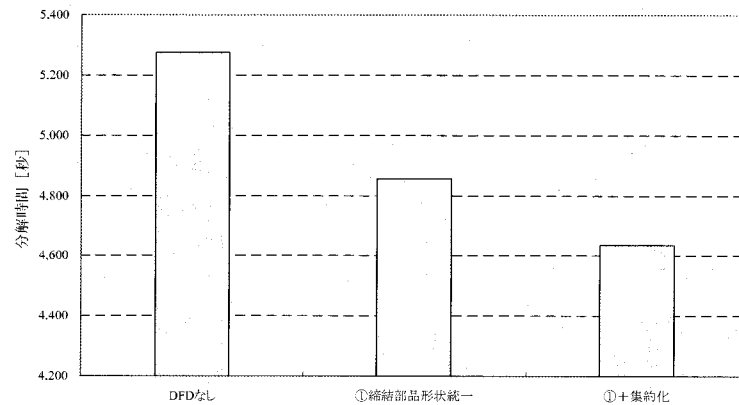


図 4.3 易分解性設計導入による分解時間の削減効果

最後に、易分解性設計に対する投資の費用効果について、循環複合体研究・産業工場循環研究グループにおいて推計された結果^{10,11}を紹介する。ここでは、個別の易分解性設計を導入することによる分解時間の低減効果を既存の分解性評価例¹²から読み取った上で、それに対する投資額を逆工場の実験プラント設置の予算内訳から類推している（図 4.4）。

易分解性設計要素としてネジ種統一・部品形状共通化・結合部位削減・ネジ径統一・部品集約多機能化・治具および専用作業台導入・締結方式統一・専用工具導入を取り上げ、その適用に際して必要となる投資は、締結工具用投資・金型新規製作への投資・新設計開発投資・プレス金型関連投資・治具および作業台導入投資、追加的な工具導入投資を主要項目としている。

費用対効果の高い易分解性設計から導入していくときに、投資に対する限界効用が徐々に低減していく特性を表しており、一定以上のまとまった効果を得るためには、個別の要素技術的なエコデザインだけではなく、製品のフレームデザイン自体を分解性や環境全般に配慮したものへと変えていくことが重要であると指摘している。

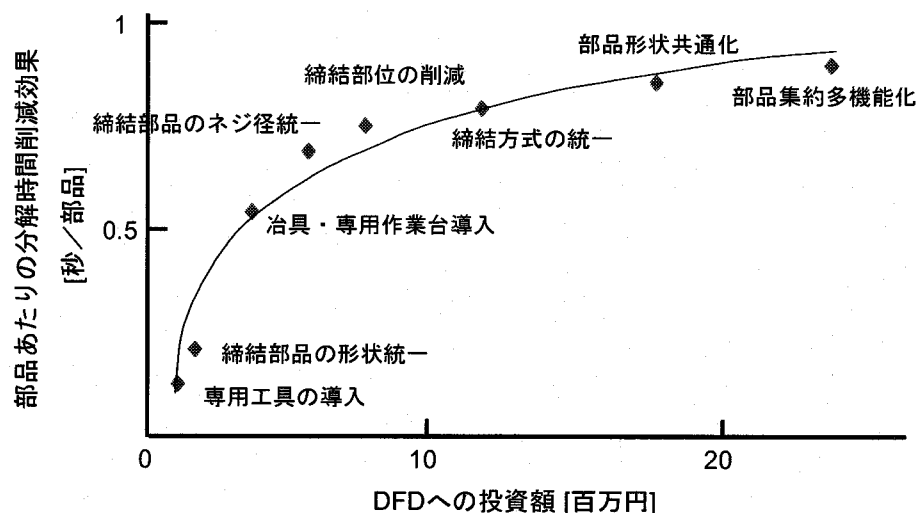


図 4.4 部品別平均分解時間と易分解性設計の導入ポイント

4.3.5 ポンプ主要部品のリユースに向けた技術的課題

ここまで、産業ポンプを対象として易分解性設計の検討を進めてきたが、最後に部品リユースに向けた技術的課題について考察する。表 4.8 は、ポンプ逆工場において実施された主要部品のリユース可能性の評価・診断結果である。

現段階では、そもそもリユース可能性を評価・判定するための十分な情報基盤や技術基盤がない。したがって、リユース可否の判定基準を構築するとともに、運転負荷が加わった使用済みの部品に対する余寿命診断技術を開発し、リユースを事業として展開する上で鍵となる品質保証を確保することが重要である。このとき、効率的な事前選別やリユース判定を図るための運転履歴情報の管理・活用ノウハウの構築も必要である。また、流体制御を担う部品には磨耗や腐食が多く見受けられることから、部品の磨耗・腐食対応やその再生・修復の技術開発が求められる。

表 4.8 部品リユース可能性の評価・診断の結果

実験事項	部品リユース可能性の評価・診断			
実験期間	1999 年 10 月			
作業量*1	(不明)	作業率	—%	
作業時間	(不明)	作業人員	(不明)	
作業担当者*2	逆工場推進室（リサイクル事業部）		◇	
	逆工場作業員 A			
	逆工場作業員 B			
	逆工場作業員 C（補助的）			
	生産技術室 A		◇	
	生産技術室 B		◇	
	その他			
診断結果	材料	部品名	結果	評価
	铸铁铸件	ケーシング	全部品、腐食による錆が強く、	リユースは困難。使用年数、外観での選定基準必要
		ケーシングカバー		
		羽根車	流路内の錆落しは現状工具では不可	リユース不可
		軸受フレーム	データ不足	未検討
		パッキン押え	損傷軽微	再塗装後リユース可
	ベース			
	銅合金铸件	羽根車	摺動部に摩耗傷	リユース困難
	ステンレスプレス	ケーシング	外観、寸法良好 溶接強度測定不可	現状、リユース不可(部品耐用年数予測不能)、洗浄方法検討中
		ケーシングカバー		
		中間ケーシング		
		ガイドベーン	主軸勘合部の評価困難、溶接強度測定不能	リユース困難
	羽根車			
	鋼板	ベース	測定困難	リユース困難
	ポンプ支柱			
プラスチック	全部品	(メーカーに調査依頼中)	—	

*1 1999 年 10 月 20 日現在、各情報を集約させたシート上に記入されたものは 54 台分（約 21.9%）。

*2 ○印：メインで作業、△：状況に応じて交代で作業、□：状況に応じて補助作業、◇：立会い

表 4.9 手分解実験の概要

手分解の対象製品		製造年	実験日時
エアコン	室内機	1992 年	2001 年 11 月 19 日
	室外機	1992 年	2001 年 11 月 21 日
冷蔵庫	旧製品	1991 年	2001 年 12 月 3 日
	現製品	2001 年	2001 年 12 月 4 日

4.4 家電製品の分解特性とリユース性を高める協調設計

4.4.1 分析の目的

循環型社会形成推進基本法のもと、家電リサイクル法では主要 4 品目を対象に達成すべきリサイクル率が定められている（洗濯機：50%、冷蔵庫：50%、テレビ：55%、エアコン：55%）。この数値は 2001 年施行から 5 年程度の期間の達成目標であり、将来的にこの目標値は段階的に上げられていくことになる。実際、EU の廃電気・電子機器（WEEE; Waste of Electric and Electronic Equipment）に関する指令では、2006 年までに再使用率（リユース率）およびリサイクル率を概ね 75～80%程度にまで引き上げることが議論されている¹³。近い将来にはリユース率単独で目標値が設定されると予想され、家電リサイクルの第二フェーズでは、リサイクルの高質化とともにリユースへの踏み込みが重要になってくる。

家電産業における環境側面での製品設計は、これまで省エネ化と省資源化（但し、軽量化や小型化といった他の製品要求への対応の結果として現れてくるもの）が中心であった。家電リサイクル法の施行を契機にリサイクル性に焦点が集まり始めたところであり、リユース性設計の検討・開発はほとんど進んでいないのが現状である。

リユースを容易にする設計の第一は分解・分離性の向上である。本節では、様々な製品要求をもとにして形作られた現在の家電製品に対して、実際に「部品のリユースを目的とした分解・分離」を試みた上で、環境適合性を高める設計を巡る問題を明らかにする。

4.4.2 家電製品の手分解実験と部品インベントリーの構造化

リサイクル性やリユース性のエコデザインを検討する上で、現状の製品構造や部品・素材構成を把握することは重要である。そこで、エアコン（1 台）と冷蔵庫（2 台）の手分解実験を実施した（表 4.9）。冷蔵庫については、製品要求に応じた製品構造の違いを明らかにするため、旧製品と現製品を対象としている。その際、手分解の手順を記録するとともに、分解の様子を撮影したビデオを用いて各部品の分解時間を計測した。

得られた情報をもとに、製品構造と部品情報、分解特性を統合して表現する部品インベントリー樹形図を作成した。この部品インベントリー樹形図の基本構造を図 4.4 に示す。ツリー図は、分解手順に沿って部品をに並べ、部品間の接合関係（親子関係）を記述している。その上で、以下のような各ユニット・部品のインベントリー情報を入力する形をとる。なお、作成した部品インベントリー樹形図には特定メーカー品の詳細な製品・部品情報が記述されているため、ここでは基本構造を示すにとどめる。

① 部品情報

- ✓ 部品の機能分類（電気系／水系／冷媒系／空気系／その他）

- ✓ 重量 [kg] : 実測値
- ✓ 素材構成 : 複合素材で構成される部品は、文献値を引用
- ✓ 素材生産時の環境負荷 (エネルギー消費量 / CO₂ 排出量 / SO_x 排出量 / NO_x 排出量) : 素材構成をもとに別途算出した値

② 分解・分離性情報

- ✓ ライン分解時間 : 家電リサイクル工場の分解・処理ラインにおいて実測した分解時間の平均値
- ✓ 部品別分解時間 : 手分解可能なレベルまで分解されたユニット・部品について、部品を順次取り出していく上で、対象部品の一つ前に分解される部品を取り出した状態からその部品を取り出すまでに要した時間
- ✓ 累計分解時間 : 部品別分解時間のデータをもとに、その製品の中から対象部品を最短時間で取り出そうとした場合を想定して算出した値
- ✓ 接合情報 (接合方法 / 接合解除の方法 / 接合関係)

このようなフォーマットを基本として製品構造や部品間の関係、分解特性などの情報を体系的に整理しておくことには、次のような意味がある。まず、現状の製品設計の中で、リサイクル性や分解性を高めるべき部品を発見するための基礎情報となる点である。これに関連して、締結方法の簡素化や締結数の削減、部品配置の変更など、リサイクルを実施する際の易分解性設計を展開したときに、その設計変更が分解性（分解時間）に及ぼす影響を簡易な方法でシュミレーションすることが可能となる。

また、塩ビなどの適正管理物質やケミカル・リサイクル適合物質などの情報を追加的に記述する枠組みにすれば、高質な素材リサイクルや適正処理に向けた設計課題が明確化される。更に、将来的にユニットや部品のリユースを模索するとき、例えば設計変更が頻繁な部品と不変的な部品、あるいは機能進化が著しい部品と成熟した部品を区分して表記することで、リユースに適合する部品が分解性の観点で取り出しやすい構造になっているかなどを判断する基礎情報となりうる。

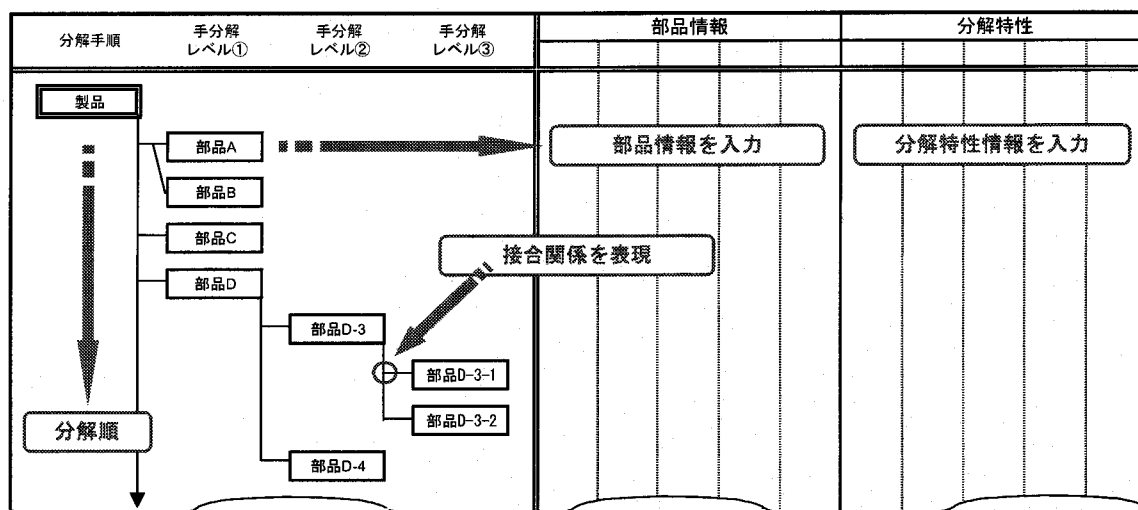


図 4.4 部品インベントリーの基本構造

4.4.3 家電製品の分解特性の把握

以上をもとに、冷蔵庫についてその分解特性の把握を行った。

まず、冷蔵庫の旧製品と現製品の部品構成を図 4.5 に示す。現製品の特徴は、製品の省エネ性能を向上させるために冷蔵室・野菜室・冷凍室を庫別に冷やす構造を採用しており、これに伴って冷蔵室や冷凍室に専用の蒸発器、ファンモータなどが新たに追加されている。

次いで、主要なユニット・部品の累計分解時間の計測結果について、図 4.6 に旧製品、図 4.7 に現製品のものを示す。但し、庫内の内装品類の取り出しに要した時間は除いている。また、縦軸の部品重量は便宜的なものである。これらの図より、リユースを目的として主要部品を全て取り出そうとしたとき、現製品は旧製品より約 13 [分] ほど多く分解時間を要することが分かる。これは、主としてファンモータ及び蒸発器の配置に起因する。冷蔵庫の構造を見ると、ファンモータや蒸発器（放熱器及び冷却器）は冷蔵庫本体の後ろ側、キャビネットと内装パネルの間に配置されている。したがって、これらの部品を取り出すためには、内装品の取り出し、内装パネルの締結解除と取り出しを行う必要がある。しかも、製品内部の奥まった位置にあるため、分離・分解は容易ではない。

蒸発器は銅やアルミといった付加価値の高い素材で構成されており、家電リサイクルの操業上、他の部材とともに破砕処理する前の段階で、純度の高い状態で回収することが望ましい。また、詳しくは第 5 章で示すが、ファンモータは機能が汎用的であること、技術的な成熟度が高く将来的な設計変更の可能性が小さいこと、使用時のエネルギー消費が小さいことなどの理由から、リユースに適したユニット・部品であると考えられ、その際には取り出しやすさや分解性が要求されることになる。

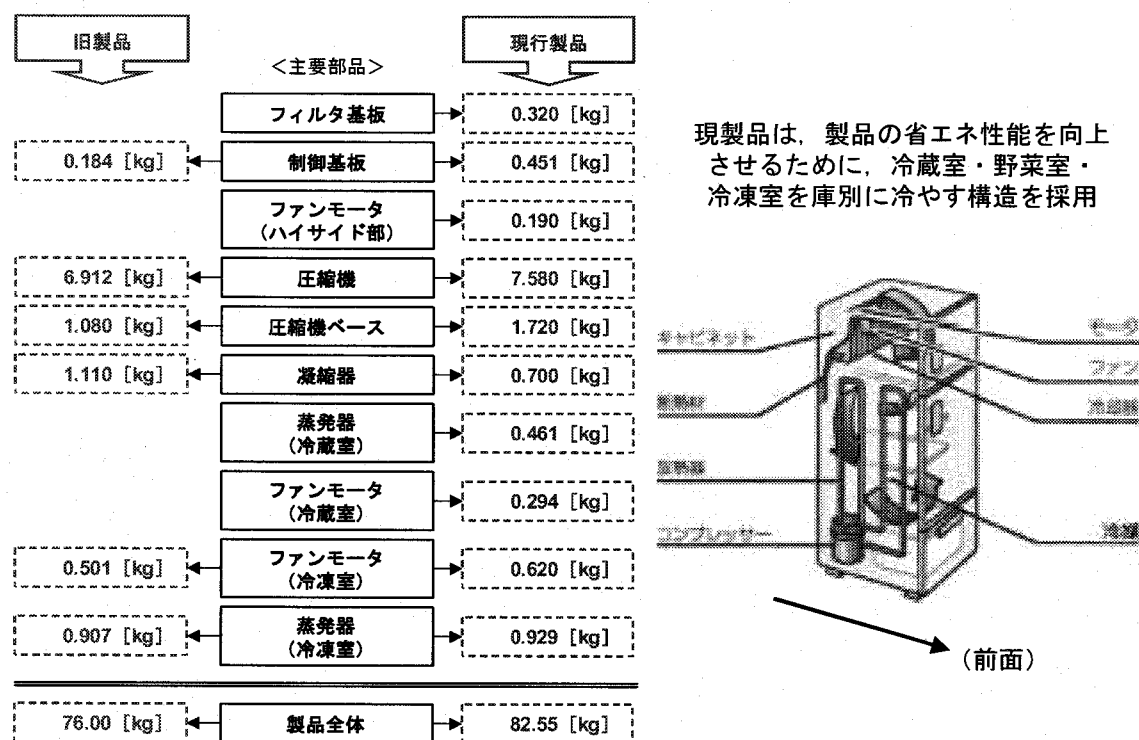


図 4.8 冷蔵庫の旧製品と現製品の部品構成

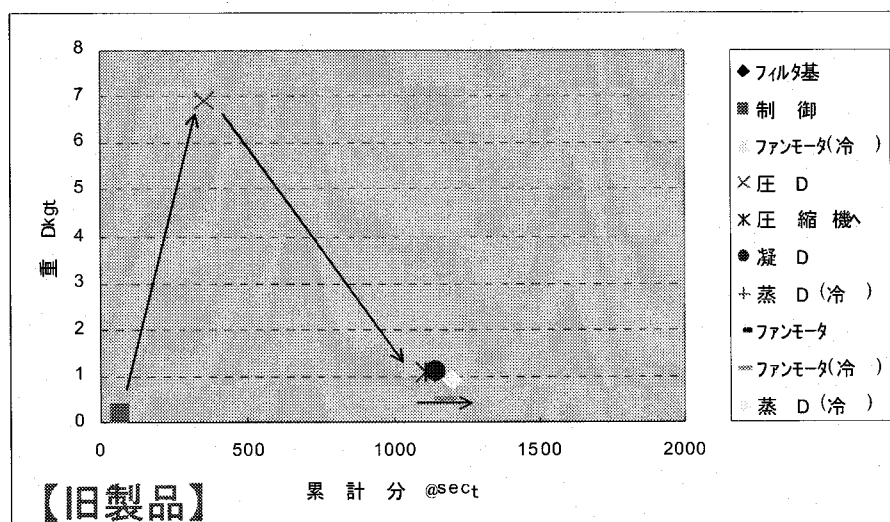


図 4.6 冷蔵庫（旧製品）の分解特性

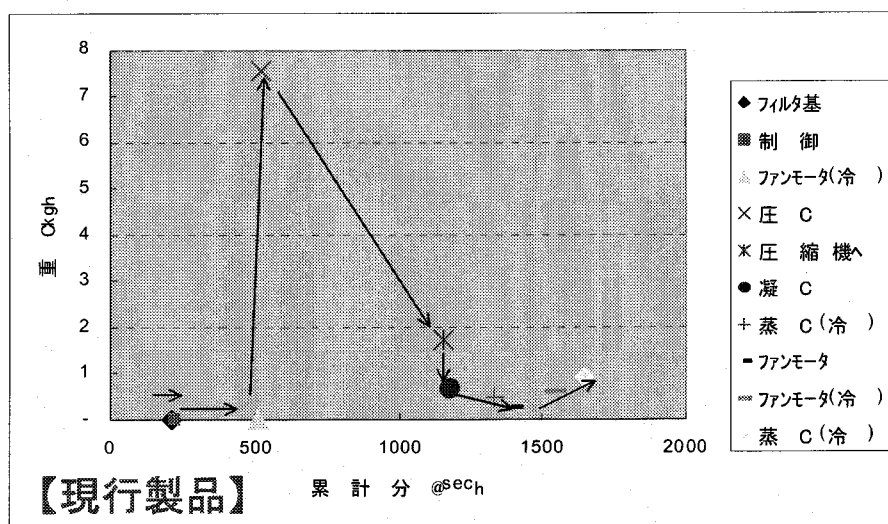


図 4.7 冷蔵庫（現製品）の分解特性

つまり、省エネ性を高めるための製品設計が、リサイクルやリユースを目的としたときの分解・分離性に悪影響を及ぼしている例である。エコデザインに対する社会的な要請が高まるなか、従来の製品機能を損なうことなく、リユースやリサイクル性への配慮といった新たな製品要求をいかに組み込んでいくかが組立産業にとって大きな課題となると言える。

4.4.4 環境適合性を高める協調設計の必要性和期待される効果

持続可能な生産と消費の実現を製品設計の側面から支えるとき、使用時には省エネ性と長寿命・メンテナンス性、使用後は回収性と第一にリユース性、次いでリサイクル性が要求される。こうしたエコデザイン（環境適合性設計）は、従来の設計要素だけでなく、個々のエコデザイン要素との間でも相容れないケースがある。前項で示した例以外にも、省資源化設計としての小型・軽量化が極端に進むと、リユースやリサイクルの際の分離・分解

性が阻害されるなどが考えられる。したがって、今後環境的な側面に対する製品要求が更に増すことが予想されるなか、個々のエコデザインを検討して具現化するとき、製品全体のフレームデザインの中で環境適合の設計要素の共存化・協調設計を図っていくことが肝要となる。そのとき、設計要素間の関係の中で中心度の高い設計要素を見出し、それを優先させながらエコデザインの革新を進めていくことになる。

本節で取り上げた「リユースを目的とした分離・分解性」は、第一にはリユース対象部品の配置の問題であり、「対象部品へのアクセスしやすさ」とも解釈できる。実際、専門技術者を対象に行ったアンケート調査及び分析では、「対象部品をできるだけ製品分解の早い段階で、損傷なく取り出せること」がリユース性設計において重要な要素となることが明らかにされている¹⁴。

この設計要素を例にすると、逆工場のリユース工程で作業効率を高めようとするとき、リユース対象部品の配置に配慮することを通じて、分離・分解と機能診断のそれぞれの断面で「リユース対象となる部品を効率良く、早い段階で取り出せる配置にすること」と「使用済み製品からリユース対象を分離・分解する前に、機能診断や故障判定が簡易に実施できるよう、アクセスしやすい配置にすること」が共通する設計で対応可能となる。また、リユースを目的として「取り出しやすさ」や「アクセスしやすさ」を向上させることは、同時に部品の故障診断や修理・交換を行うときのメンテナンス性の改善をもたらし、更に素材の高質回収や高度分別を追及するときにも有利に働くことになると考えられる。

すなわち、将来的に機能（サービス）提供を図るリユースやメンテナンスが卓越し、同時にリサイクルの面でもより高質な素材回収を追求するマテリアル・リース（Material Lease System）¹⁵を推し進める方向へと産業社会が移行する中で、リユース性を高めるエコデザインとメンテナンス設計、リサイクル性設計との親近性が増し、相乗的な効用がもたらされることが期待される。

4.5 リユース性を高めるエコデザインの事例

自動車産業の分野では、使用済み自動車（ELV; End-of-Life Vehicle）から取り外した中古部品を再生したリユース・リビルト部品の市場が確立され、リユースが他産業に先駆けて社会的に展開されている。自動車補修部品の市場規模は 1997 年データで約 7,170 [億円／年]（用品、その他を除く）で、そのうち中古部品およびリビルト部品は約 770 [億円／年]と推定される¹⁶。リビルト部品として販売されているものは、エンジン部品（エンジン、スタータ、コンプレッサーなど）、ミッション部品（ミッション）、足回り部品（ドライブシャフトなど）、電装部品（オルタネータなど）などの機能部品が中心である。

そこで、自動車部品の一つであるカーエアコン用コンプレッサーのリビルト事業を手掛けるメーカーを対象に、リユースやメンテナンス性を高める製品もしくは部品設計上の様々な工夫を調査した。

(1) 部品の耐磨耗と再生の技術

流体輸送・制御系機械の品質保持、あるいは長寿命化やリユースにおいて、磨耗対応やその修繕技術は重要である。カーエアコン用コンプレッサーでは、部品の耐磨耗性を向上

させるため、ピストンのテフラン加工やシャフトの錫メッキなどが施されている。また、使用を通じて磨耗が起こることを前提として、磨耗度合いの違う部品を組み合わせることで間隙調整し、再生を図る技術が確立している。

(2) 品質劣化の診断・予防保全の技術

カーエアコン用コンプレッサのマグネットクラッチは、保護回路（センサ）の装着によりコンプレッサの正常稼動をチェックすることで、コンプレッサ部品の磨耗を予防保全する機能を持つ。（図 4.9）

(3) 分解性や修理・交換性を高める接合方式

カーエアコン用コンプレッサと自動車本体との接合部をネジ式にすることで、接合部を切断することなく分離や修理・交換することを可能としている。

(4) 設計変更や技術進化にも対応しうる共通化設計

数種類のサービスバルブを開発し、接続部の規格が異なる自動車本体とコンプレッサの接続を可能とすることで、カーエアコン用コンプレッサのリビルト品が幅広い車種に据付できるようになった（図 4.10）。また、省エネなどで設計変更が著しい部分を分離・ユニット化して連結する設計開発が行われ、省エネに対応しながら部品の共通化を担保する協調的な設計方針が採られている。

自動車産業の分野でリビルトやリユースされる機能部品は、部品に対する運転負荷と物理的な劣化、技術進化や設計変更による機種間・世代間の規格差などの



図 4.9 予防保全技術としてのマグネットクラッチ

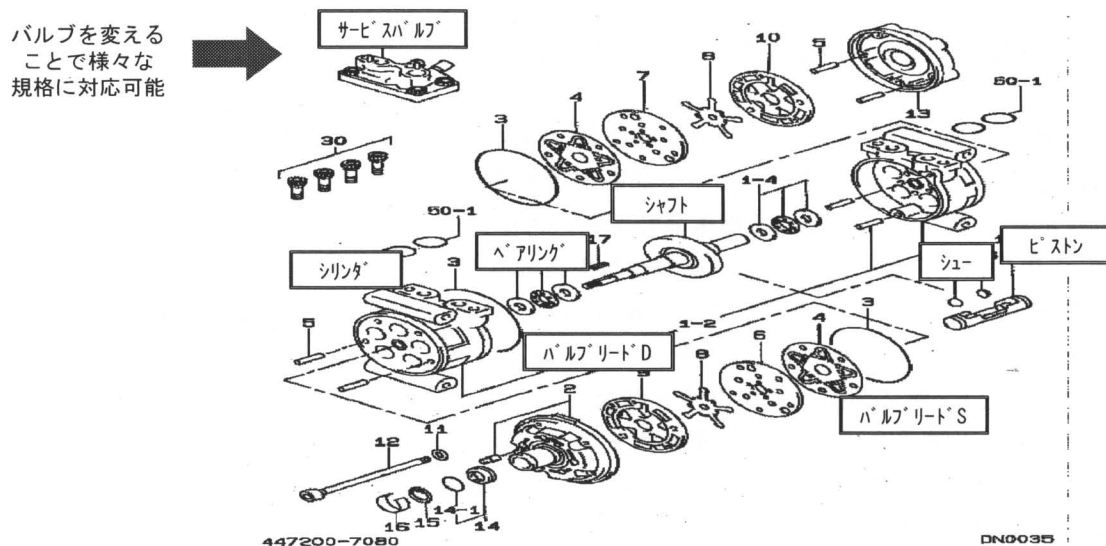


図 4.10 カーエアコン用コンプレッサの互換性を高める工夫

側面で、ポンプに代表される流体輸送機械や家電製品のコンプレッサーなどに近い特性を持つ。つまり、ここで示したエコデザイン事例での発想は、機械製品の駆動や流体輸送・制御を担う様々な製品分野におけるリユースや長寿命化のエコデザイン戦略へと、適用範囲を広げることが可能であると考えられる。

4.6 本章のまとめ

本章では、持続可能な生産と消費の実現を製品設計の側面から支えるエコデザインについて、まず使用済み産業ポンプの分解実験の実測調査に基づいたポンプの易分解性設計の具体的な方策の検討と、エコデザイン導入効果の推計を行った。見出された易分解設計要素の導入によって、分解時間の削減がもたらされることが導かれたとともに、ある一定以上の効果を発現するためには、個別の要素技術的なエコデザインだけではなく、製品の全体フレーム設計を分解性や環境全般に配慮したものへと転換していく必要性を述べた。

家電製品を対象とした分析では、製品一部品インベントリーの構造化を図るとともに、資源循環の高度化に向けたエコデザイン戦略の第一段階として、リユースを念頭に置いた製品設計によって従来の設計事項との間に生じるトレードオフについて考察した。家庭用冷蔵庫では、実際に製品の省エネ化を進める設計が、リユースを目的とした分解性に負の影響を及ぼしていることが明らかになった。一方で、リユース性設計として部品の配置に配慮することが、将来的にリユースやメンテナンスが卓越する社会において、相乗的な効用をもたらす可能性について考察し、製品の環境品質をトータルで高めるための共存・協調設計の必要性を論じた。

また、自動車のカーエアコン用コンプレッサーのリユースを手掛ける分野では、リユース性を高めるために磨耗対応と再生の技術、物理的劣化の予防保全技術、設計変更や技術進化への対応技術など、類似の機能や稼働特性を持つ他の産業機械製品分野にも応用可能なエコデザインの革新が図られていることを見出した。

¹ 国連環境計画（UNEP）原本発行、永田勝也翻訳監修：『エコデザイン』、ミクニヤ環境システム研究所、p.34、2001。

² 人工物設計・生産研究連絡会生産システム学専門委員会：人工物のライフサイクルデザイン（LCD）のために振興すべき基礎学術、日本学術会議、<<http://www.scj.go.jp/info/pdf/kohyo-17-t934-3.pdf>>、2000。

³ 盛岡、今堀、恒見、山本：家電製品のサービサイジングとリユースの融合、季刊環境研究、No.130、p.109-120、2003。

⁴ 梅田靖編著：『インバース・マニュファクチャリング』、工業調査会、p.210-213、1998。

⁵ 盛岡、吉田、下田：循環経済化に沿った情報家電の製品廃棄物の回収システムの枠組みに関する研究、環境システム研究、Vol.25、1997。

⁶ 山際康之：『組立性・分解性工学』、工業調査会、1997。

⁷ T.E.Graedel, B.R.Allenby 著、後藤典弘訳：『産業エコロジー』、トッパン、p.202-203、1996。

⁸ 小林英樹：『製品ライフサイクルプランニング』、オーム社、p.14-15、2003。

⁹ 梅田編著：前掲 4, p.214

¹⁰ 盛岡通編著：「第 2 編 産業工場での循環複合体の構築」, p.80, 「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」 CREST 最終報告書, 2001.

¹¹ T.Morioka, N.Yoshida, Y.Yamamoto: *Cycle-Closing Product Chain Management with Appropriate Production Site Metabolism toward Zero-emission in Industrial Machinery Corporation*, Journal of Clean Technologies and Environmental Policy, Vol.6, No.1, 2004. (4 月刊行予定)

¹² 山際康之：『リサイクルを助ける製品設計入門』, ブルーバックス, 1999.

¹³ European Commission: *DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, Official Journal of the European Union, 2003.

¹⁴ 竹林光昭：家電製品のエコデザインに関する調査研究－冷蔵庫を例とした DiD および DiE－, 2002 年度大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻修士論文要旨集, p.99-104, 2003.

¹⁵ 原田幸明：マテリアルリースシステム構築のための総合研究, 社会技術研究システム・研究領域「循環型社会」第 1 回シンポジウム予稿集(I), p.13-20, 2003.

¹⁶ 矢野経済研究所：「自動車補修部品市場の展望 1999 年版」, p.49. 1999.

第5章 逆工場を核とした家電製品のリユースシステムの構築

5.1 緒言

平成15年3月に定められた循環型社会形成推進基本計画では、資源生産性と循環利用率を高め、最終処分量を削減するという中期的な環境政策の目標が、具体的な数値目標とともに掲げられた。現行の素材へ戻すことに重点を置くリサイクルに対して「大量廃棄・大量リサイクル」との批判があるように、基本計画で掲げられている目標値を同時に達成するためには、特に拡大生産者責任のもとで組立産業が主導してリデュースやリユースを強化していくことが必要となる。

民生用電気機械の代表とも言える家電製品は、自動車と並んで我が国における主要な産業製品であり、かつ資源集約度（Resource Intensity）が高いにも関わらず、頻繁なモデルチェンジが繰り返される結果、社会的な買い替え（棄て替え）サイクルは比較的短い。家電リサイクル法のもと、使用済み製品の回収とマテリアル・リサイクルのシステムが整備されつつあるものの、リデュースやリユースに向けた具体的な取り組みは必ずしも進んでいるとは言えない。

本章では、家電製品のユニット・部品に焦点を当て、そのリユースシステムを構想する視点と枠組みの構築を目指す。また、リユースの展開がもたらす意義や効果を整理するとともに、冷蔵庫を例としてリユース戦略の基礎的な構想や課題の明確化を行う。

5.2 リユースシステム構想の基本的な枠組みとアプローチ

5.2.1 リユースを捉える視点と枠組み

第3章で述べたように、一般的にリユースと言ったとき、その単位には製品（product）・ユニット（unit/subassembly）・部品（component/parts）がある。

本章で対象とする家電製品を見ると、例えば冷蔵庫の冷却機能は主として冷媒を圧縮し循環させるコンプレッサー、冷媒の気化熱を利用した冷却や逆に吸熱する熱交換器、冷気を庫内に循環あるいは吸熱した熱を庫外に放熱させるファンモータ、そしてそれらの入出力をコントロールする制御基板など、ある一定の機能を持ったユニット（中間組立品）によって支えられている。

これらはユニットとして一つの機能を果たしていることから、使用済みユニットに再利用可能な状態で機能が残存していれば、それを分解して部品単位でのリユースを検討する前にまずユニットという形態でのリユースを優先させることが望ましい。

こうした視点をより論理的に説明し、事業者が使用済み製品やその部材のリユース性を評価するための視点と枠組みの構築を進める。

本論文では、「どのユニット・部品がリユースに相応しいか（値するか）」及び「どのユニット・部品がリユースしやすい（しにくい）か」という2つの視点からリユースシステ

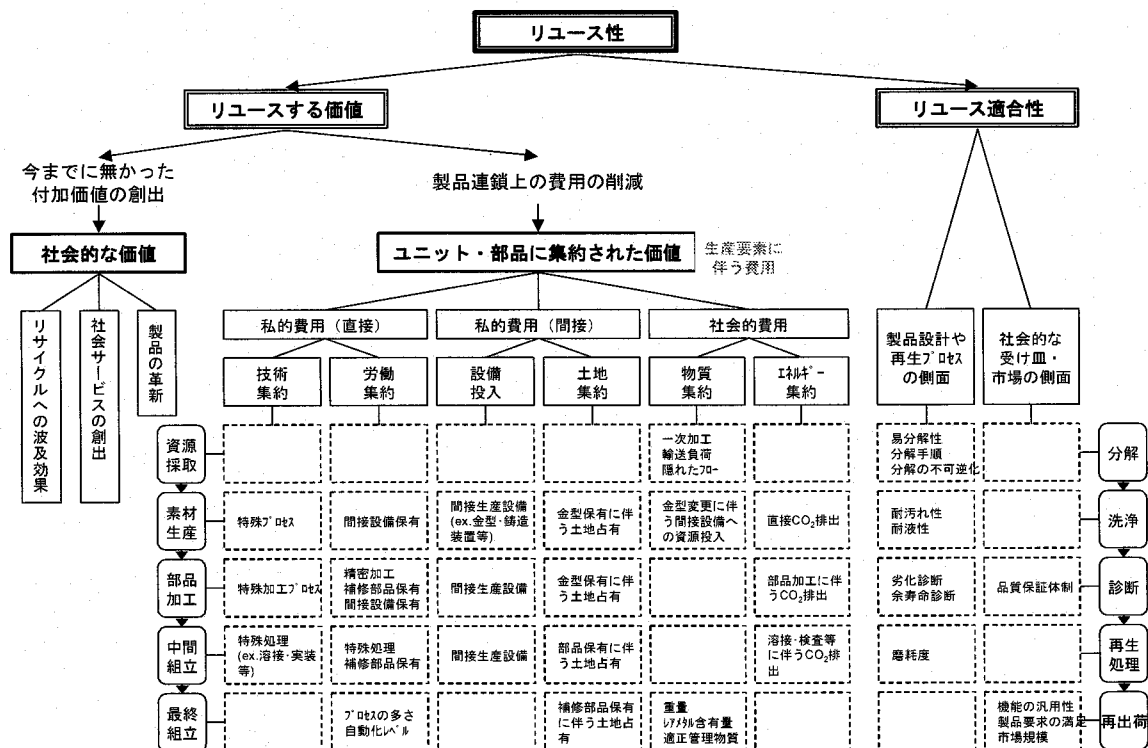


図 5.1 ユニット・部品のリユース性を評価する視点を枠組み

ムの構想を進めていく枠組みを提案する（図 5.1）。ここでは、この 2 軸をそれぞれ「リユースする価値」と「リユース適合性」と表現する。

(1) リユースする価値（相応しさを表す軸）

リユースによって産み出される価値や便益について、大きく分けて 2 つの側面から捉えて定義する。一つは、リユースを通じて今までなかった付加価値をもたらす「社会的な価値」の側面である。具体的な内容は本章の第 3 節で示すが、製品技術の革新や社会サービスの創出などを通じて新たな市場やビジネスが開拓されるなど、持続可能な生産と消費を志向する方向で産業構造に変革をもたらす効果である。

もう一つは、「ユニット・部品に集約された価値」をリユースによって使い切ることで、製品連鎖上のコストを削減する側面である。この集約された価値には、労働・技術・資源・エネルギーなどの生産要素が含まれる。つまり、リユースの実施によって、労働集約や資源集約などの高いユニット・部品が有する価値や機能を使い切らない無駄や、それらを新規に生産する無駄が回避される効果である。

(2) リユース適合性（しやすさを表す軸）

ユニットや部品がリユースに適合しているか（適合するか）ということは、製品がリユースに適合した設計になっているかという製品設計と、リユース品の社会的な受け皿があるかという市場の 2 つの側面から考えるべきである。特に、製品設計は逆工場におけるリユースの作業工程や操業コストを規定する要因となるため、ユニット・部品の構造や物理的な特性がリユースに適合しているか否かは極めて重要である。

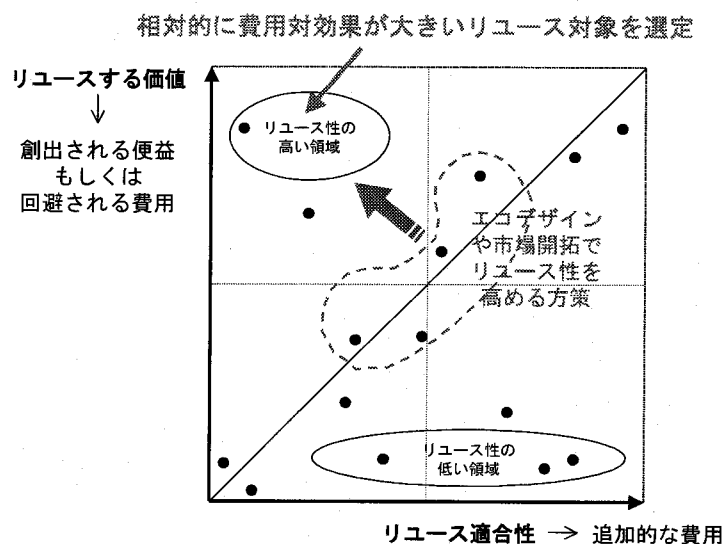


図 5.2 リユース戦略を選定・評価する軸

この2つの視点からリユース性を評価する意味は、基本的には費用 (cost) と便益 (benefit) のバランスで判断する枠組みと同じである。すなわち、リユースの取り組みを企画・構想する段階では、ユニット・部品に内包された価値とリユースの困難さ (容易さ) の概略を評価して、リユース対象の絞り込みを行う。また、事業化計画により近い段階でリユース性を具体的に計測する際には、リユースする価値を便益、リユース適合性を費用の形に置き換え、追加的な費用に対して得られる便益もしくは回避される費用を最大化するリユース事業を選択しようとするものである。(図 5.2)

リユース対象を絞り込む段階で、図 5.1 に示した項目の全てを定量化された情報として把握することが難しい場合には、例えば表 5.1 のようなチェック項目を用いて、リユースする価値の概略を把握することもできる。

5.2.2 リユースシステム設計の基本的なアプローチ

こうした視点と枠組みを基礎として、使用済み製品のユニット・部品を対象としてリユースシステムを設計する基本的な手続きについて整理する。

事業者 (生産者・組立産業) が使用済み製品やその構成部材のリユースシステムを設計するとき、構想 (着想)・計画・開発といったプロセスを経るなかで、分析と総合評価を繰り返しながら事業内容や手段を具体化するような段階的なアプローチが採られる。一般的な製品デザインにおいて、概念設計・実態設計・詳細設計の段階を踏んで、徐々に製品構造や設計図を明確化するアプローチと同様である。

以下に、構想・計画・開発の各段階における基本的な検討事項の概要を示す (図 5.3)。

(1) 構想段階

構想段階では、リユースシステム設計の目標や対象、手段の概観 (アウトライン) を描き出すことが主眼となる。具体的には、まず循環形成の多様なループの中から、製品マネジメントのターゲットとして、製品リユース・ユニットリユース・部品リユース・素材リサイクルのいずれの方策に焦点を置くかを明確にする。次いで、リユース事業を展開する

表 5.1 リユースする価値のチェック項目例

価値・便益		チェック・評価項目	
新たな付加価値	生産者の便益		不特定ユーザーへサービス利用している製品か？そういった部品を有しているか？
			市場規模が大きい製品かどうか？
			競合している製品か？
	ユーザーの便益		製品に付随する定期的なアップデートによって効用が高まる効果があるか？
			更新費用の大きい製品/エント/部品かどうか？
			使いこなすことによる満足度で便益が生まれる更新特性を持っているか？
	社会的な便益		先行してリユースを展開することによって他産業への波及効果が大きいのか？
			リユースの国内 closed のため、remufacturing のための資源が国内にあるか？
			国内に留まることによる雇用創出などのイパ 外が大きいのか？
コストの削減	私的費用 (直接)	技術	高度な技術を要する特殊なプロセスを持っているか？
			技術の研究開発投資が集中されているか？
			頻繁に設計変更が迫られているか？
		労働	エント化や検査、生産設備の operation で労働集約が高いか？
			経験や human decision などの特殊技能を要するプロセスを持っているか？
			研究開発などの間接的な労働費が大きいのか？
	私的費用 (間接)	設備	相対的に設備の償却が早いのか（設備の更新が早いのか）？
			金型などの間接的な生産設備のモデルチェンジが頻繁か？
		土地	工程内リユース部品や副産物のストックによって土地が占有されているか？
			間接的な生産設備や部品の保有によって土地が占有されているか？
	社会的 費用	物質	プロセスへの資源の直接投入が大きいのか？
			有害物質を含んでいるか？
			資源採取に伴う隠れたフロー（hidden flow）が大きい素材を含んでいるか？
		エネルギー	プロセスへの電力投入が大きいのか？
			生産設備の製品連鎖に伴う電力消費が大きいのか？
			素材や部品の輸送距離が長いのか？

ことによってもたらされる効果について、波及的なものを含めて見通す。（主として前項の「リユースの社会的価値」に相当）

そして、リユースシステムの計画要素となる input・process・output の 3 つの断面から、前項の枠組みにおける「ユニット・部品に集約された価値」、「リユース適合性（製品設計・再生工程および市場の側面）」に沿う形で、

- ① input : リユースに適したユニットの選定
- ② process : リユースの転換プロセスの設計
- ③ output : リユースに適した市場・用途の選定

のスクリーニング評価を行い、リユース対象部材や市場の絞込みなどを進める。同時に、リユースを進める上で配慮すべき事柄、特にエコデザインや追加サービスなどによってリ

ユース性を高める必要がある局面や課題を抽出する。本章の以降では、この構想段階を中心として検討を進めていく。

(2) 計画段階

計画段階では、構想段階で描き出された基本システムをもとに、LCAやLCCなどの手法を用いて費用便益を計測し、代替案比較や実行可能性の評価を行っていく。同時に、エコデザインや追加的なサービス提供など、リユースを進める上での課題について、より詳細な検討を進めていくことになる。

(3) 開発（事業化）段階

ここでは、実施される事業の詳細な費用便益が関連主体・セクターごとに計量され、製品設計面ではリユース適合の詳細な設計と製品開発が、リユース市場の面では実際のビジネスとして展開するためのマーケティングや契約などが展開される。

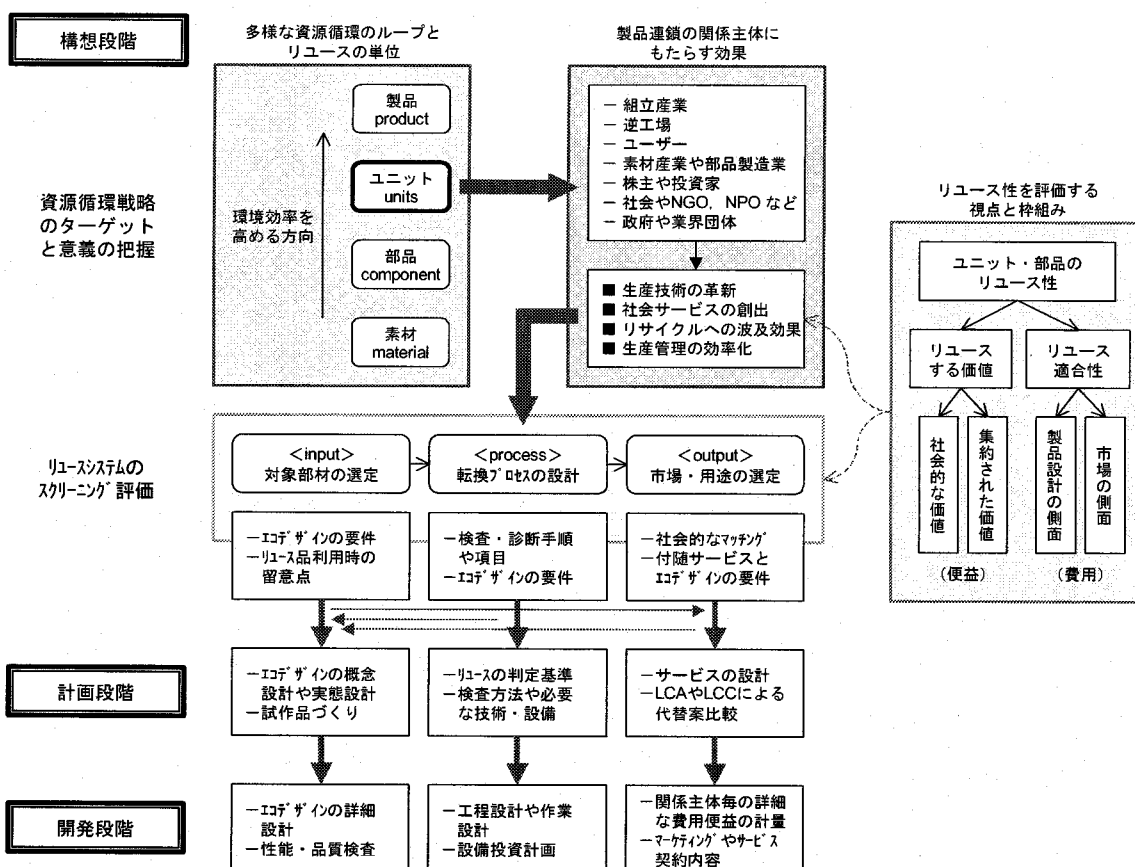


図 5.3 リユースシステム設計の基本的な手順

5.3 リユースの展開によってもたらされる社会的な価値

5.3.1 リユースが製品連鎖にもたらす効果

組立産業が中心となって使用済み製品の分解や再生を手掛ける逆工場を構築し、ユニットや部品のリユースを展開するとき、当該セクターを含めて製品連鎖の関係主体に様々な効果をもたらすことが期待される。そこで、産業社会を構成する 7 つの主体ごとに、リユースの社会的な価値（一部、集約された価値を含む）を検討し、以下に示す。

(1) 組立産業（従来の動脈側の生産技術と製品・サービス提供の側面）

- ✓ ユニットや部品の調達コストが削減される。
- ✓ 使用済み製品やユニットの機能検査・余寿命診断の情報や技術開発が、新製品や新ユニットの機能性や運転時の信頼性、耐久性（“20 年設計”）などの品質向上に繋がる知見となる。（下記(3)の 3 点目に波及）
- ✓ 使用済み製品やユニットの機能検査・余寿命診断の情報や技術開発が、ユーザーに対する診断サービスと買い替え／補修（延命化）などの選択を促す情報コミュニケーションを可能とし、新たなサービス提供や既存サービスの高度化が図られる。（省エネ技術革新の動向を踏まえて）
- ✓ リユース性を高めるエコデザイン（世代間・機種間での共通化など）の開発が、同時に生産工程を含めた動脈側の効率化をもたらす。（ex.生産ラインの効率化、金型の在庫低減など）

(2) 逆工場（家電リサイクルの操業運転の経験から得られた側面）

- ✓ マテリアル・リサイクルで資源の延命化を図る（資源の質的価値を維持する）には、技術的・経済的に限界がある。リユースと組み合わせることで、資源の寿命や資源生産性を高めることができる。
- ✓ 使用済みユニット／部品やリサイクル材の海外輸出に対する規制が厳しくなる中、国内で同じリサイクル率を達成するためにはコスト増となることが予想され、素材まで戻すリサイクルよりリユースの方が優位となる。
- ✓ 波及的な効果として、ユニットや部品のリユース性を向上させること（ユニット、部品単位での取出しやすさなど）が、付加価値の高い状態での素材回収をもたらす。（下記(4)の 1 点目に波及）
- ✓ 機能検査や余寿命診断の技術開発が、製品設計やサービスに革新をもたらす。（上記(1)の 1 点目及び 2 点目に波及）
- ✓ 有害物質の拡散リスクの回避

(3) ユーザー（ユーザーからの意見やニーズから有りようを論じる側面）

- ✓ リユースによって機器更新のパターンが広がり、例えば「故障箇所を修理して、製品を長く使いたい」などの多様化するユーザーのニーズに対応できる。すなわち、モノの所有に対する価値観が変化するなか（機能やサービス志向へ）、機能面やサービスの充実を図ることでユーザーの満足度を向上させる。
- ✓ リユース性設計の向上で、ユーザーが自ら交換品を購入して、安価に修理やアップグレードを図れる。

- ✓ 修理や診断などのサービスを通じて「あと何年は使える」といった情報や保証を得ることで、安心して使い続けることができる。
 - ✓ リユースや付随するサービスの提供によってメーカーに対する信頼性が高まり、将来的な買い替えの際の商品選択に影響を及ぼす。（顧客の囲い込み）
- (4) 素材産業や部品製造業（素材提供や部品提供の側からの主張・要請の側面）**
- ✓ 【素材】付加価値の高い状態での素材回収によって、マテリアル・リサイクルの質が高まる。
 - ✓ 【素材】レアメタルを含むユニット／部品の場合、リユースによってレアメタルの寿命延長や資源採取～素材生産に伴う“隠れたフロー”の回避が図られる。
 - ✓ 【素材】リユース性を向上させるための耐磨耗性の良い素材など、高付加価値素材の開発で、品質の低い海外素材生産セクターとの差別化が図られる。
 - ✓ 【部品】補修需要数と生産ロット数の関係で割高となる補修用部品の新造をリユースで代替することで、コスト削減がもたらされる。
- (5) 株主や投資家（企業を取り巻く社会の株主・投資家の主張の側面）**
- ✓ 将来的に資源・環境制約が高まるときに発生する最終処分コストの増大や資源価格の上昇などの“経営上のリスク”に対して、リユースがその軽減に繋がる。
 - ✓ 企業の社会的責任（CSR ; Corporate Social Responsibility）に対する関心が高まり、法的要求を満たす取り組みや環境面での品質向上の取り組みが社会的責任投資（SRI ; Socially Responsible Investment）の拡大を促す。
- (6) 社会や NGO, NPO など（社会的な主張との情報的コミュニケーションの側面）**
- ✓ 環境報告書に代表されるコミュニケーション手段において掲げられている環境目標や課題が、リユースによって達成される。
 - ✓ リユースを進めることで、持続可能性や資源生産性、環境効率など、社会的に一定のコンセンサスを得た概念の理想に近づくことができる。また、企業の環境活動に対する外部監査・評価（EMS やナチュラル・ステップ等の NGO・NPO など）において、高い評価を得ることができる。
 - ✓ 省エネやリサイクルの推進に環境的な取り組みを限定せず、リユースなどの更に上位の目標を目指すことが、従業員のモチベーションや企業イメージを向上させる効果をもたらす。
 - ✓ 労働集約的なリユース産業において、地域住民の雇用促進が期待できる。
- (7) 政府や業界団体（政府、業界団体、国際イニシアティブなどによる方向付けへの対処、環境規制やガイドライン設定への技術対応の側面）**
- ✓ WEEE 指令で将来的にリユース率が設定されることが予想され、家電リサイクル法の第二フェイズにおいてもリユースの取り組みはリサイクル戦略の中心となる。リユースを視野に入れた技術・設備開発やシステム構築に先行投資することで、リサイクルに合わせて最適化されたシステムとの間に生じるギャップが軽減される。
 - ✓ 他社に先行的して幅広くリユースを検討することで、法律や業界目標でのリユース率設定などにおいてイニシアティブ、リーダーシップを発揮することができる。
 - ✓ グリーン購入法において省エネやリサイクルに加えてリユースが重要な判断基準となれば、国や地方自治体によって優先的な購入・調達が進められる可能性がある。

こうしたリユースの展開による各主体への効果は、製品技術の革新・社会サービスの創出・リサイクルとの相乗効果・生産管理の効率化に分類することができる（表 5.2）。すなわち、動脈産業が逆工場と一体化してリユースの促進を図ることで、製品連鎖の様々な局面で相乗的な効果がもたらされることになる。

具体的には、製品設計におけるリユース指向型のエコデザインの開発は逆工場を核とした循環形成を支援するだけでなく、同時に動脈側の生産技術に革新をもたらし、生産工程の効率化や製品の品質向上に繋がると考えられる。また、使用済み製品やユニットの機能検査・余寿命診断の情報蓄積や技術開発が、ユーザーに対する診断サービスと買い替え・補修（延命化）などの選択を促す情報コミュニケーションを可能とし、既存サービスの高度化や製品に付随した新たなサービスの創出にも波及すると考えられる。こうした流れは、やがてはサービスを提供する持続可能な生産と消費の進化への展開されることになる。

一方、生産者が従来の生産体制の効率化を図ろうとする際にも、リユースが有効な手立てとなりうる側面がある。すなわち、製品機種ごとに補修用部品を一定期間在庫として抱える費用の削減や、その新造に伴う手間や非効率な生産の回避などである。

表 5.2 リユースがもたらす社会的な価値

	製品技術の 革新	社会サービスの 創出	リサイクルとの 相乗効果	生産管理の 効率化
素材産業	リユース性の高い高付加価値素材（耐摩耗性など）の開発で、品質の劣る海外素材生産セクターと差別化が図られる。		付加価値の高い状態での素材回収によって、リサイクルの質が高まる。	
部品製造業	逆工場での技術開発が、新ユニット・部品の機能性や信頼性、耐久性などの品質向上に繋がる知見となる。			補修サービスの需要と生産ロットの量的なアンバランスによってコスト高となる補修用部品の新造に対して、リユース品を活用することでコスト削減がもたらされる。
組立産業	リユース性を高めるエコデザインの開発が、同時に生産工程を含めた動脈側の効率化をもたらす。	逆工場での技術開発や廃製品情報の取得・分析が、ユーザーに対する診断サービスの情報基盤となり、既存サービスの高度化や新たなサービスの創出が図られる。		リユース品の利用によって、ユニットや部品の調達コストが削減される。 リユース品を活用した製品補修体制の構築によって、補修用部品の保有に伴う手間やコストを削減することができる。
ユーザー		モノの所有に対する価値観が変化することで、機能面やサービスの充実を図ることで多様化するユーザーの満足度を向上させることが可能となる。		製品補修にリユース品を活用することで、ユーザーが支払う交換部品代を低減することができ、製品長寿命化を図る機会が増す。
逆工場	機能検査や余寿命診断の技術開発が、新製品・ユニットの機能性や信頼性、耐久性などの品質向上に繋がる知見となる。		リユース性を向上させる工夫（ユニット・部品単位での取り出しやすさなど）が、同時に付加価値の高い状態での素材回収を可能とする。	

5.3.2 リユース部品の活用による製品補修体制の効率化の評価

ここでは、リユースがもたらす効果として生産者が最も認識しやすいと考えられる「生産体制の効率化」に焦点を当て、その効果を定量化して示しておく。具体的には、家庭用冷蔵庫のコンプレッサーを例に、従来のストック型（在庫保管型）に対して回収・リユース型の製品補修体制を提案し、企業経営コストの削減効果を推計する。

(1) ストック型製品補修体制が抱える課題

従来、電気・電子機器メーカーやその系列の関連セクターは「補修用性能部品の保有期間」の義務付けに従い、製品故障時の修理用として部品を保有してきた。特に民生用電気機器のように頻繁な設計変更が進む分野では、製品や部品が多様化しており、製品連鎖の上流側の部品製造セクターや素材生産セクターにおいて保有される部品や部品製造に必要な金型などの生産設備の種類と数が増え、部品保有に係わる保管やメンテナンスの費用が増大している。すなわち、現行のストック型製品補修体制は、背後にこうした系列・関連セクターにおける費用負担を抱えている。

そのような中、この部品保有期間の規制が事業所の自主目標設定に切り替えられることになった。これは、販売した製品のアフター・サービスのレベルを低下させて新製品への買い替えを促進するという意味ではなく、むしろリユース部品の活用などメーカー独自の方策を模索することを通じて、部品在庫費用の低減や安価な補修用部品の提供といった、より充実した製品補修サービス体制を構築することが期待される。

(2) 製品補修体制の生産者コストの算定条件

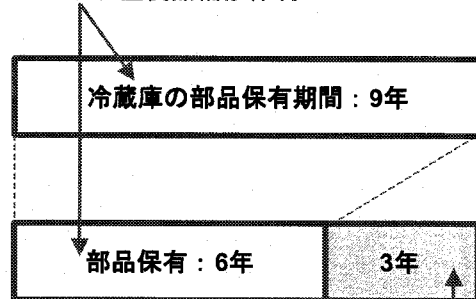
ストック型および回収・リユース型製品補修の2つの代替オプションを設定する。ストック型では、コンプレッサーの故障に際して、従来の「補修用性能部品の保有期間」の義務付けに準じてメーカーが保管している補修用新規コンプレッサーを利用して補修を行い、製品延命化を図る。一方、回収・リユース型は、使用済み冷蔵庫から回収・再生されるリユース品を利用して補修を行い、製品延命化を図るものである。ここでは、補修用部品やその生産設備の保有などに要する費用（製品補修体制の隠れた費用）が軽減される一方で、リユース部品の回収、診断、再生などのプロセスに追加的な費用が発生する。

ここでは、ストック型では補修用部品（新造品）を9年間保有するのに対して、回収・リユース型ではその保有期間を6年に短縮し、残りの3年間の補修用部品を使用済み製品から回収されるリユース品で対応するものとする（図5.4）。

この2つの代替施策について、補修用部品の生産や再生産（リユース）、保管、在庫処理など、製品補修に伴う費用を推計した。ここで、補修用部品の保管台数やサービス出荷量はヒアリングに基づいて設定した。また、リユース型の製品

補修用性能部品の保有期間内、新規部品を保有及び管理

ストック型製品補修体制



回収・リユース型製品補修体制

部品保有期間終了前の3年分の補修部品をリユース品で対応

図5.4 代替オプションの設定

補修体制では、サービス需要量の変動に応じた回収、再生、出荷が可能であるとして、保有台数をサービス出荷量とほぼ同じ値としている。

その上で、補修用部品としては出荷されない在庫部品の製造や保管、在庫処理に係わる費用も、サービス出荷される補修用部品が背負っている費用であると捉えて配分している。なお、保管に係わる人件費及び備品代、リユース工程における電力費は無視できる程度と仮定し、考慮していない。

(3) リユース部品の活用による製品補修体制の効率化

補修用部品1台に伴う費用の推計結果を図5.6に示す。リユース型製品補修体制では、ストック型に比して新規製造あるいはリユース費用が約6%、保管用地代が約50%削減され、トータルで約36%の費用削減に繋がることが分かる。

すなわち、使用済み製品の部品を回収・リユースする製品補修体制の構築によって部品

■保有台数及び出荷台数（初期設定条件）
ストック型製品補修体制

	補修用新規部品	補修用リユース部品
補修用部品の保有台数〔台/保有期間〕	12,480.00	-
保有年数〔年〕	9.00	-
出荷台数〔台/保有期間〕	9,000.00	-

回収・リユース型製品補修体制

	補修用新規部品	補修用リユース部品
補修用部品の保有台数〔台/保有期間〕	8,320.00	1,500.00
保有年数〔年〕	6.00	3.00
出荷台数〔台/保有期間〕	-	9,000.00

※上段には、ストック+回収・リユース型製品補修体制

■補修用新規部品の製造費

補修用新規部品の直接材料費

素材	素材重量〔kg〕	素材単価〔円/kg〕
冷媒銅板	3.312	58.00
電磁銅板	1.905	73.00
銅箔	1.865	164.00
その他の鉄材	0.230	200.00
銅線	0.887	53.00
その他の銅材	0.189	540.00
ALU	0.504	521.00
合計〔kg/1台〕	8.870	2076.00
単位製品重量あたりの直接材料費〔円/kg〕		168.87

補修用新規部品の製造費（合計）

	ストック型体制	回収・リユース型体制
単位製品重量あたりの直接材料費〔円/kg〕	168.87	168.87
製造原価換係数	1.88	1.88
製造原価〔円/台〕	7.90	7.90
補修用新規部品の保有台数〔台/保有期間〕	12,480.00	8,320.00
補修用新規部品の製造費（合計）〔円/保有期間〕	31,354,879.83	20,902,253.22

■補修用部品に内包されたの新規製造／リユース費

	ストック型体制	回収・リユース型体制
補修用部品の新規製造／リユース費〔円/保有期間〕	31,354,879.83	20,902,253.22
出荷台数〔台/保有期間〕	9,000.00	9,000.00
補修用部品に内包された新規製造／リユース費〔円/台〕	3,483.88	2,322.58
※サービス出荷される部品に隠れた負荷を割り付けた量	201.29	
差額〔円/台〕		5.78
削減率〔%〕		5.78

■補修用部品の保管に伴う地代

	ストック型体制	回収・リユース型体制
補修用新規部品の保有台数〔台/保有期間〕	12,480.00	8,320.00
補修用リユース部品の保有台数〔台/保有期間〕	9.00	1,500.00
補修用リユース部品の保有台数〔台/保有期間〕	-	3.00
補修用部品の占有面積〔m ² /台〕	0.065	0.055
保管用庫の段数〔段〕	4.00	4.00
地代（相率は考慮しない）〔円/m ² /年〕	41,600.00	41,600.00
出荷台数〔台/保有期間〕	9,000.00	9,000.00
補修用部品の保管に伴う地代〔円/台〕	7,138.56	3,458.69
※サービス出荷される隠れた負荷を割り付けた量	3,679.87	
※回収・リユース型体制では、6年目に保管面積を縮小		51.55
差額〔円/台〕		51.55
削減率〔%〕		51.55

■在庫処理費

	ストック型体制	回収・リユース型体制
補修用部品の在庫台数〔台/保有期間〕	3,480.00	820.00
在庫のリサイクル処理費〔円/台〕	41.00	41.00
リサイクル素材の売却益〔円/台〕	-141.70	-141.70
補修用リユース部品の保有台数〔台/保有期間〕	-	1,500.00
補修用リユース部品あたりリサイクル料金充当分〔円/台〕	-453.00	-453.00
出荷台数〔台/保有期間〕	9,000.00	9,000.00
補修用部品の在庫処理費〔円/台〕	-84.74	-84.74
※サービス出荷される隠れた負荷を割り付けた量	48.74	
差額〔円/台〕		-117.46
削減率〔%〕		-117.46

■補修用リユース品の再生費

補修用リユース部品の再生費（1台あたり）

従事人数〔人〕	4.00
処理能力〔台/日〕	20.00
労働時間〔h/日〕	8.00
賃金単価〔円/h〕	3,600.00
補修用リユース部品の再生費〔1台あたり〕〔円/台〕	5,760.00

補修用リユース部品の再生費（合計）

	ストック型体制	回収・リユース型体制
補修用リユース部品の再生費（1台あたり）〔円/台〕	5,760.00	5,760.00
補修用リユース部品の保有台数〔台/保有期間〕	-	1,500.00
補修用リユース部品の再生費（合計）〔円/台〕	-	8,640,000.00

★製品補修体制の費用

	ストック型体制	回収・リユース型体制
新規製造／再生費〔円/台〕	3,483.88	3,262.58
保管の地代〔円/台〕	7,138.56	3,458.69
在庫処理費〔円/台〕	-84.74	-84.67
製品補修体制の費用〔円/台〕	10,583.50	6,656.60
差額〔円/台〕		3,926.90
削減率〔%〕		37.10

図 5.5 算定手順

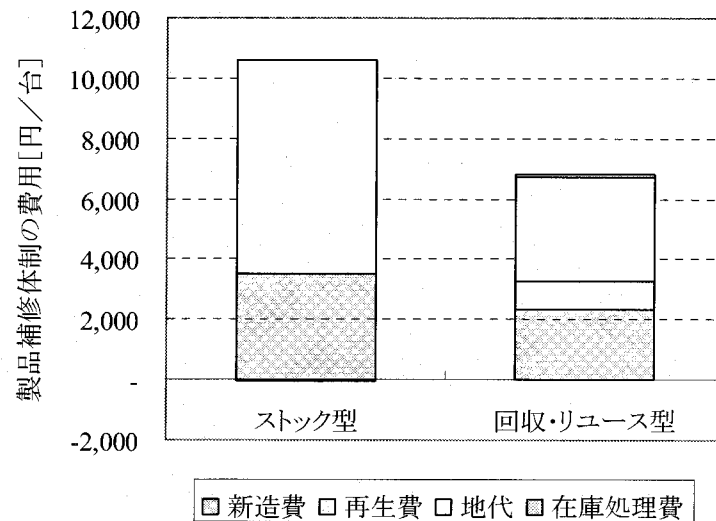


図 5.6 補修用部品 1 台に伴う生産者費用の推計結果

リユースによる製品延命化サービスを展開しつつ、系列の関連セクターが負担する私的費用を含めた生産者コストが削減され、補修用部品の単価を下げる可能性があると言える。

5.4 家庭用冷蔵庫を対象としたリユースシステム構想のスクリーニング評価

5.4.1 リユース対象部材の選定 (input)

(1) リユース対象ユニット・部品の選定の視点

一般に機械製品は部品を幾つか結合・組立作業して完成されており、それにより機構や構造が確立する¹。すなわち、部品からユニット（中間組立品）、そして製品へと構成されていくとき、エネルギー・資源や労働などの生産要素の投入を経て結合もしくは総合され、付加価値が高められていく。したがって、「ユニット・部品に集約された価値」の側面から見るとユニットは部品に比べて資源集約や労働集約度が高いため、部品や素材レベルに分解または破砕する前に、ユニットの持つ付加価値や機能をリユースによって使い切ることを優先させるべきであると言える（図 5.7）。

そこで、家庭用冷蔵庫の主要ユニットであるコンプレッサー・ファンモータ・制御基盤を取り上げ、そのリユース特性の把握を行う。その際、先述したリユース性評価の視点と枠組みに基づきつつ、使用済み冷蔵庫の手分解実験や残存機能検査などを通じて観測可能な指標を設定する。

(2) リユース特性の評価尺度

製造者が使用済み製品の主要ユニットのリユース性（Reusability）の概略を評価し、リユース対象を戦略的に選定するとき、便益の側面として①当該ユニットをリユースすることによって回避される資源消費量・廃棄物量やエネルギー消費量が大きいこと（回避される社会的費用）、②使用済みユニットが余寿命・残存する価値を有していることが望ましい。

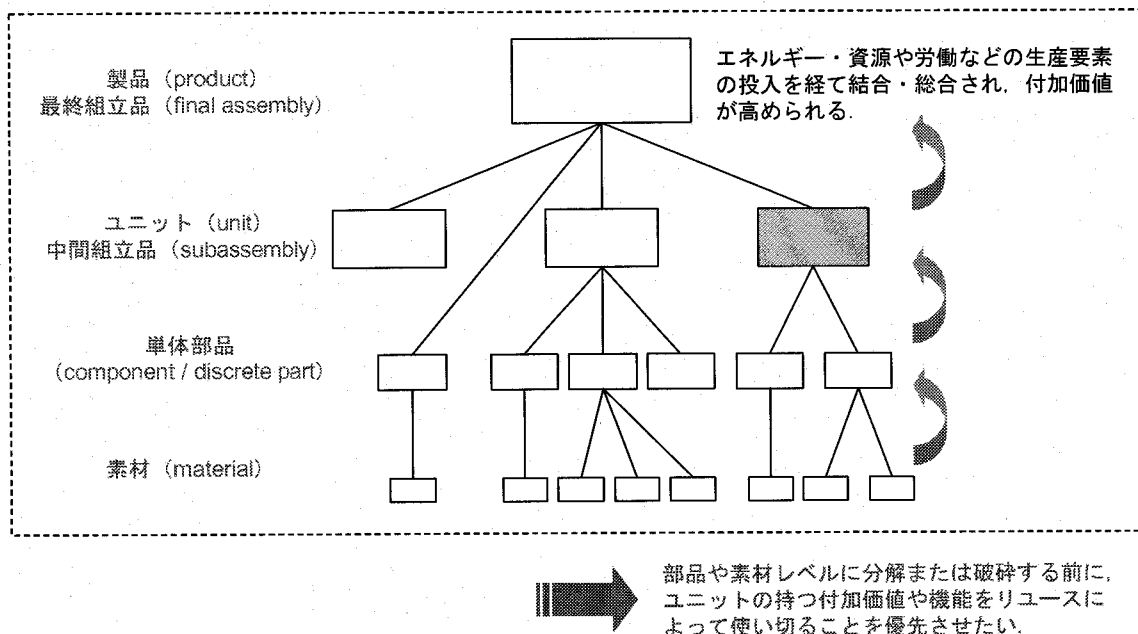


図 5.7 製品の基本構成とリユース対象としてのユニット

一方、費用の側面として、③リユースによって追加的に発生するコストが小さいことが望ましい。リユースを通じて資源消費の抑制を目指すときには、①では資源集約度（重量）の優先順位が高い。また、②ではまず物理的な損傷や起動不良が少なく、機能が残存していることが第一条件となり、その上で適合することが望ましい尺度として残存機能の陳腐化の度合いを取り上げる。

なお、ここでの評価はユニットのリユース適合性や課題の大局を掴むことが主眼であり、詳細な LCA (Life Cycle Assessment) や LCC (Life Cycle Costing) を志向するものではない。また、現段階で定量的な把握が困難なものについては、定性的な解釈に止まっている。

以下に、スクリーニング評価に際して設定した評価尺度について説明する。

① 環境負荷

- ・資源消費量／廃棄物量：資源採取～製造に伴う隠れたフロー（hidden flow）は考慮せず、ここではユニット重量で表す。重量が大きいユニットほど、リユースによって回避される環境インパクトが大きい。

- ・エネルギー消費量：使用時のエネルギー消費量が大きい製品の場合、機器効率が低下したユニットのリユースがライフサイクルでのエネルギー消費を増加させることに繋がる。そこで、各ユニットの素材構成をもとに素材生産時のエネルギー消費量を算定した上で、使用時の年間エネルギー消費量に対する比を算出した。つまり、製造時のエネルギー消費に対する使用時のエネルギー消費の比が小さいものほど、リユースに適していると言える。

② 余寿命

- ・物理的寿命：使用済み冷蔵庫を対象に、ユニットの残存機能の一次検査・診断を実施した。具体的には、コンプレッサーの起動検査、庫内灯の点灯確認、ファンモータの稼動確認などである。ここでは、残存機能の詳細かつ定量的な把握には至らなかったため、起動・稼動不良台数の割合で表現する。

・社会的寿命：リユースを進める上では、ユニットに残存する機能の陳腐化が小さいことが望まれる。ここでは、省エネ性の陳腐化の度合いを定量的に示すため、1993 年度の消費電力値に対する 2002 年度値の比を算出した。

③ 追加コスト

- ・分解性：分解性を分解時間（対象ユニットを取り出すまでに要した時間）で表現する。
- ・検査性：ユニット残存機能の一次検査・診断での実態をもとに、検査時間の解釈を行った。

(3) 主要ユニットのリユース特性

コンプレッサー・ファンモータ・制御基板のリユース特性を表 5.3 に整理する。

コンプレッサーは、資源消費や廃棄物量の削減効果が大きく、また機能の残存状況も良好であり（図 5.8）、リユース可能性は高い。一方で、使用時のエネルギー消費量が大いため、リユースする際には機器運用時のエネルギー消費への影響に配慮・対応することが重要となる。また、劣化診断技術の確立などを通じ、効率的な検査・診断システムの構築が必要となる。

なお、ここでは他ユニットとの相対的な比較が困難であったため、労働集約などの付加

表 5.3 主要ユニットのリユース特性

パラメータ		コンプレッサー	ファンモータ	制御基板
環境	重量 (*1)	7.58[kg]: 製品重量の約 9% を占め、外装部を除く部品の中では最も大きい。	0.565[kg] (計 3 点): 1 点あたりの重量は大きくない。	0.451[kg]: 機能ユニットの中ではコンプレッサーに次ぐ。
	運転時エネルギー消費の製造時比 (*2)	6.6: 使用時エネルギー消費全体の約 80~85% がコンプレッサーの稼動によるものであり、運転時のエネルギー消費量は極めて大きい。	2.3: コンプレッサーに比べると、使用時の電気的な入力はいす。	1.1: 制御回路の消費電力は製品全体の約 3% 程度であり、大きくない。
余寿命	起動不良 (*3)	6.8[%]: 起動不良は少なく、製品自体の買い替えー廃棄の周期に比べ、物理的寿命は長い。	0 [%]: 稼動不良はなく、製品自体の買い替えー廃棄の周期に比べ、物理的寿命は長い。	(特定できず。しかし、他のユニットの不具合の原因が、制御基板の故障による可能性がある。)
	省エネ化の進展 (*4)	約 0.68: 今後も年平均 2~3% 程度ずつではあるが、省エネ化が進むと予想される。	約 0.25: DC モータへの切り替えによる省エネ進展は大きい。が、省エネ技術はほぼ成熟している。	約 0.45: インバータ化や他の多機能化に合わせた技術進歩の余地は大きい。
追加費用	取り出し時間 (*1)	約 520[sec]: アクセスしやすい位置にあり、取出ししやすい。	約 1,150[sec] (1 点あたり平均): 製品内部にあり、取出しにくい。	約 220[sec]: アクセスしやすい位置にあり、取出ししやすい。
	検査時間 (*3)	搬出〜電源投入〜起動確認に 30 分程度を要する。冷却能力等の検査を実施する場合、更に 1~2 時間を要する可能性がある。	搬出〜電源投入〜稼動確認に 30 分程度を要する。	簡易な方法での故障・劣化診断は困難。

*1 冷蔵庫の手分解実験（サンプル：1 台）を通じて実測した値

*2 算定の諸条件については、第 6 章の表 6.2 を参照

*3 使用済み冷蔵庫の検査・診断（サンプル：44 台）に基づく。

*4 家電メーカーへのヒアリングをもとに算出した値

価値の高さを表す指標は設定していない。しかし、コンプレッサの組立ラインでは常時 10 人前後の労働者が技能的な作業を担っている、また漏れ検査工程でも常に 1 名が目視による検査を行っている（図 5.9）。つまり、組立や検査工程の自動化が進む他ユニットに比べて、コンプレッサは極めて労働集約・技術（技能）集約的なユニットであり、リユースによって削減される生産費用も高いと言える。

ファンモータは、資源消費の削減効果は大きくないものの、機能の残存状況が極めて良好である。また、使用時のエネルギー消費の増大や将来的な機能の陳腐化も少なく、リユース可能なユニットの一つであると言える。しかし、製品内部に配置されていることから取り出しに手間がかかり、リユース費用の増大を招く可能性がある。したがって、取り出し容易性を高めるエコデザインの検討が重要な課題となる。

制御基板については、マイコンの設計変更が毎年なされているため、基板全体としてリユースすることは困難であると考えられる。しかし、個々の電子部品で見ると、寿命の長いものや設計技術の変更が小さいもの、あるいは広汎な用途で利用される機能を有するものがあると考えられる。したがって、基板を構成する複数の電子部品の中から再使用可能なものを選び取り、他の製品分野の部品としてリユースする形態が構想されうる。

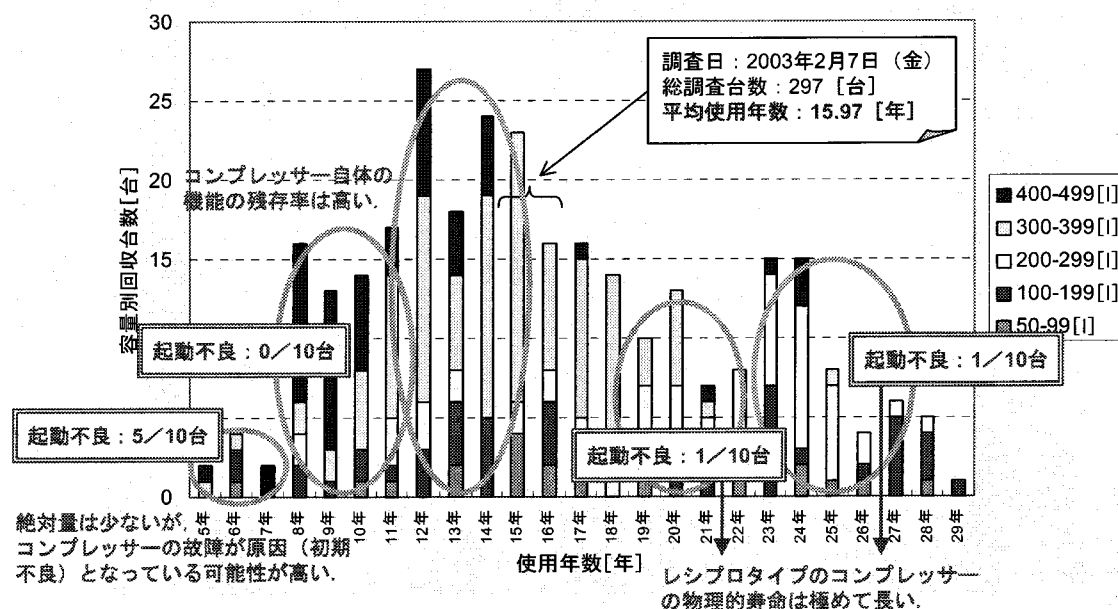


図 5.8 使用済み冷蔵庫の廃棄特性とコンプレッサの機能残存状況

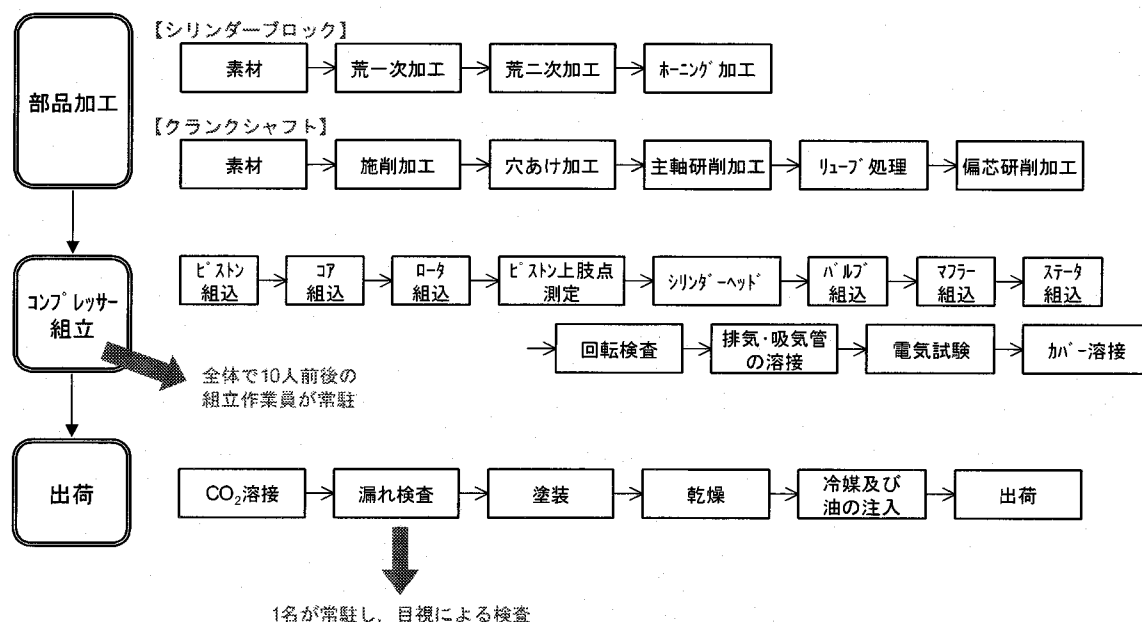


図 5.9 コンプレッサの加工・組立工程の大まかな流れ

5.4.2 リユース工程の設計（process）

ここでは、コンプレッサを例に、リユースの転換プロセスを設計するときの課題について整理及び考察する。

リユース工程における分解や検査などに伴う作業時間の評価は、前項で先行して整理した通りである。実際にコンプレッサのリユース事業を手掛けようとするとき、効率的な検査・診断体制の構築は重要な検討事項となる。

使用済み冷蔵庫を対象とした残存機能の実験調査では、既存の家電リサイクル工場の分解・破砕ラインから製品を抜き取って実験室まで運搬した後に、図 5.10 に示す手順で調査を実施した。しかし、意匠的劣化（外観、汚れなど）・電氣的劣化（作動不良、絶縁劣化など）・機械的劣化（冷却性能、磨耗、騒音など）について、家電リサイクル工場まで回収されてくる使用済み製品の全てを検査の対象とするのは非効率である。したがって、リユース可能性の高い製品やユニットを段階的に選別・検査しながら、無駄なコスト要因を省いていく必要がある。具体的には、例えば以下のような大きく分けて 3 段階程度での選定・検査プロセスが考えられる。

① 検査対象の選定・選別（一次検査）

まず機能検査・診断を行う前に、不可逆的な物理的破損や意匠的劣化の有無などから、明らかにリユース不可能と考えられる製品もしくはユニットを事前選別する段階がある。このとき、目視などの検査・判断基準を構築するとともに、将来的には製品情報や運転履歴情報の管理と活用によって、より効率的なふるい分けを行う方法も考えられる。これを家電製品の分野で展開するときには、履歴情報から部品寿命を予測する技術の確立が課題となるが、実際にリユースが社会化している例としてのレンズ付きフィルムの分野では、使用回数や生産時の素性、リユースの時期などの履歴情報をレーザーでチップにマーキングし、回収時に自動ソーティングするシステムが確立されており、逆工場の効率的な操業

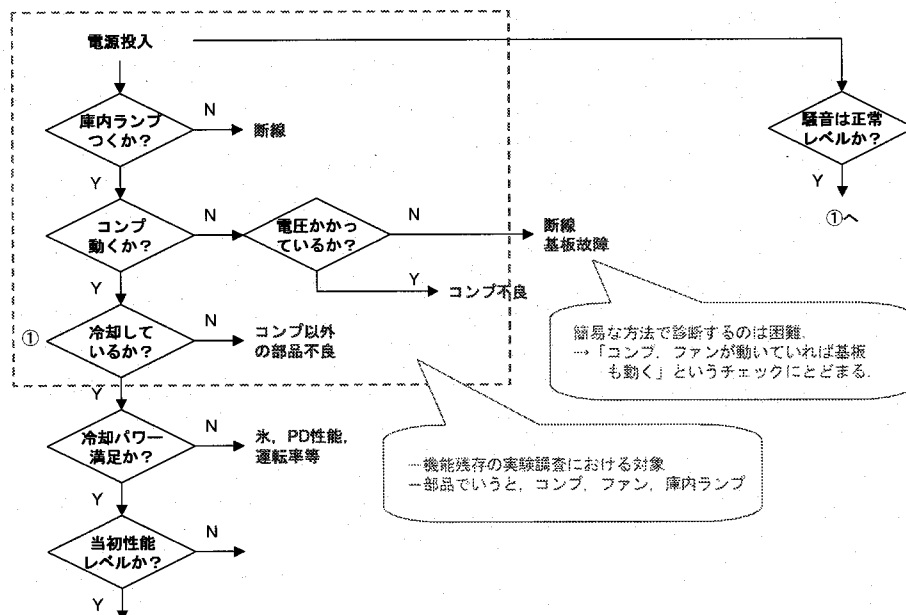


図 5.10 使用済み冷蔵庫の残存機能調査の手順

を支えている。

この時点で検査・診断対象となりうるものについて、通常は製品ごとラインから選別（抜き取り）するのか、あるいはリユース対象部分を製品から切り離して選別するかの判断が必要となる。コンプレッサーの場合、現在のリサイクルラインにおいて既に製品から分離する工程が組まれている（フロン回収と専用破砕処理のため）。また、製品ごと選別して検査工程へ投入することを想定すると、運搬などの付随して発生する作業において煩雑さが増すことや、ストックヤードの確保が問題となる。したがって、ここではユニット単体で分離して検査することが効率的であると考えられる。

② コンプレッサー単体の基礎機能の検査（二次検査）

コンプレッサーの冷却能力や冷媒圧縮能力を測定しようとする、電源投入から1～2時間程度の冷却時間を必要とする。したがって、二次的な検査の段階では、むしろ通電や起動不良の確認、加圧試験など、コンプレッサー生産工程における品質管理事項と照らし合わせながら、電気的な働きの基礎的な検査を行うべきである。ここでの検査をクリアしたものについて、より詳細な能力試験を行う次工程へと投入されることになる。

③ 製品システム全体に対するコンプレッサー機能の検査（三次検査）

ここでは、リユース品のコンプレッサーの圧縮・冷却能力が、製品システム全体の中で規定のパフォーマンスを発揮するかを検査することが中心となる。同時に、稼動時の騒音チェックなどから、構成部品の磨耗や不具合を診断することも必要となる。

以上で考察したように、構想段階でリユース工程を考えるとときには、製品、ユニットのそれぞれの段階でどのような検査・診断を行うのかを検討することが主眼となる。これによって、リユース対象部分の分離・分解のタイミングなど、プロセス設計の手順が変わってくる。但し、本来的にはこの構想段階において検査・診断に要する時間や費用などをスクリーニング評価し、代替案選択をしていく手続きを踏む必要がある。

なお、計画段階では、これに基づいてより詳細なリユース工程の設計が図られる。すなわち、コンプレッサーをリユースする上で検査すべき項目やその方法について、実際に順工程側で行われている品質・規格管理情報を参考にしながら、具体的な設定やライン設計を行っていくことになる。

5.4.3 リユース市場の選定 (output)

(1) リユース市場・用途の選定の視点

リユースシステムを設計するときには、当然ながらリユース対象となるユニット・部品を転用させる用途や市場を選定・特定しなければならない。特にコンプレッサーなど、製品システムの中で重要な“仕事”を担う機能部品をリユースすす場合には、新造品に比べて品質や信頼性、エネルギー効率などの面で劣ることが否めないため、利用する側に抵抗感が生じる。

したがって、リユースの展開を図るためには、リユース品の利用でも十分に製品機能を果たし、ユーザーの満足度も高めることが可能な市場を発掘し、ユーザーや製品の特性に応じてコンプレッサーを階層的にリユースするシステムを模索する必要がある。

リユースシステムの設計における構想段階では、リユース品に対する受容性・選好性が高いユーザーや製品分野を選定しながら、リユース市場の社会的なマッチングを図るアプローチを採る。同時に、異なる製品・産業分野間でのリユースを実現するためのエコデザインを中心とした技術的課題、受容性や選好性を高めるために製品に付随させるべきサービスのあり方などについて、その方向性の概観を導き出すことが主眼となる。なお、構想段階でのマッチングは対象を絞り込むためのものであり、より詳細なマーケティングは計画や事業化の段階において実行されることになる。

(2) リユース品に対する受容性や選好性が高い市場要件

リユース品の利用に伴うリスクや抵抗感が緩和あるいは低減され、受容性や選好性を高めることが可能な市場の要件として、以下のような点が強調される。(図 5.11)

① 製品管理の側面 (故障リスクを低減しうる体制や製品システム)

- ✓ 既にメンテナンスなどの定期的な製品管理サービスが介入しており、リユース品の稼動状況診断や故障時の迅速な対応のシステムが整っている。もしくは、他の要求から行われるサービスで定期的に製品にアクセスする機会があり、別サービスの延長で稼動チェックや故障時の部品交換を行うことが比較的容易である。
- ✓ リユースを図る当該品や製品の機能に代替可能なシステムが備わっており、リユース品に故障が発生しても、それが即座に全体システムの停止には繋がらない。

② 製品利用の側面 (故障リスクが少ない使われ方)

- ✓ リユース品の追加的な使用がある一定期間に限定される。
- ✓ 運転の頻度や時間の関係で、リユース品への負荷が大きくない。

③ 市場ニーズや生産技術の側面 (リユース品利用がコスト面で有利に働く)

- ✓ 製品本体に対して当該ユニットの寿命が相対的に短く、イニシャルコスト(メンテナンスコスト)の低減要求が強い。そのため、安価な修理・交換部品に対する選好が高い。
- ✓ 間欠運転で利用されるなど、リユース品に伴う運転効率の低下がランニングコスト

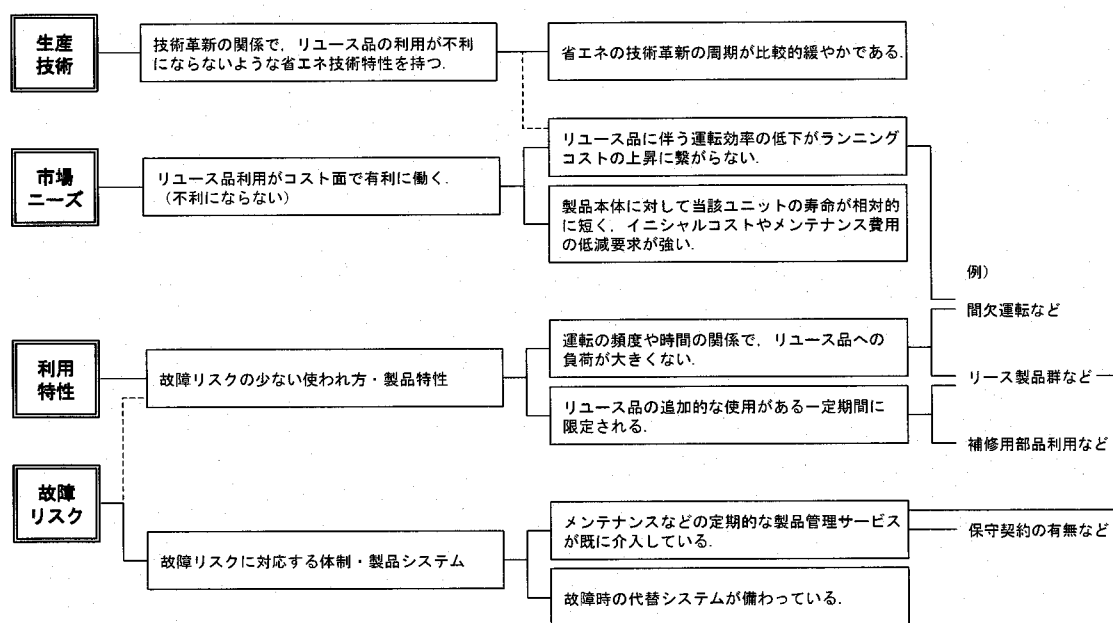


図 5.11 リユース品に対する受容性・選好性の高い領域

の上昇に繋がらない。

- ✓ 技術革新の関係で、リユース品の利用が不利にならないような省エネ技術特性を持つ。すなわち、省エネの技術革新の周期が比較的緩やかであり、むしろリユース品を利用した方が機器効率のアップに繋がる。

(3) リユース市場の候補とその特徴

機能ユニット・部品のリユース市場の拡大を図るとき、製品機能に対する要求が異なるユーザー間や、共通もしくは類似する機能部品を有する異なる製品分野間で階層的に使い分けていくことが重要となる。回収製品から抽出した部品をそれまでとは異なる種類の製品で利用するリユースの形態はグローバル・リユース (global reuse) とも呼ばれ、例えばパソコンから取り出した CPU やメモリを玩具に再利用する、自動車から取り出したエンジンをモーターボートで再利用するなどの例がある²。

コンプレッサーの持つ機能は、家電製品の冷蔵庫やエアコン以外にも冷凍冷蔵機器・応用設備の他産業製品分野において汎用的に利用されており (図 5.12)、製品の使われ方やユーザーの特性によってコンプレッサーに対する要求品質レベルや要求事項は多様である。

これらの中から、圧縮方式や使用冷媒の違いなど現状の製品設計や技術を前提とせず、特徴的な製品特性や使われ方の側面に焦点を当て、家庭用冷蔵庫の使用済みコンプレッサーをリユースする市場

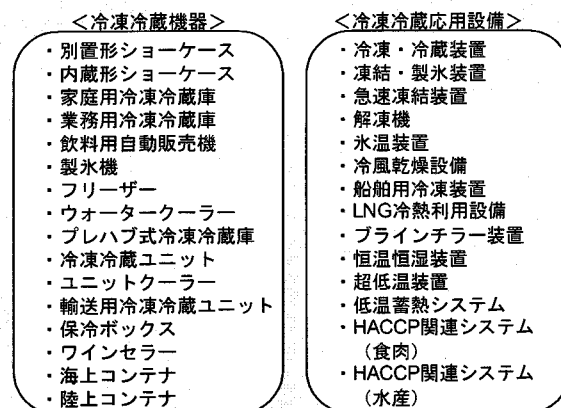


図 5.12 コンプレッサーの用途例

としての可能性を考察する。

① 同一製品への水平リユース（家庭用冷蔵庫から家庭用冷蔵庫へのリユース）

5.4.1 で述べたように、家庭用冷蔵庫のコンプレッサーを同じ家庭用冷蔵庫の部品としてリユースするとき、省エネの技術革新との関係で機器運用時のエネルギー消費（電力コスト）の増加が懸念される。現時点での技術開発の将来動向を鑑みると、同一製品への水平リユース（horizontal reuse）を構想する場合、新製品の部品としてではなく、追加的な使用期間が比較的短い補修用部品としてリユースが適当である。すなわち、製品本体の長期使用を促すメンテナンス・サービスを通じて、リユース品の再流通を図る方策である。

ここで、こうしたリユースやメンテナンス・サービスの展開の可能性について、消費者の製品買い替え動機の側面から考察する。

家庭用冷蔵庫の買い替え要因について、家電メーカーが独自に行ったアンケート調査の結果を集計したものを図 5.13 に示す。買い替え動機の第一は、冷蔵庫の故障や不調によるものである。他の家電製品と違って冷蔵庫は「運転停止してしまっは困る」製品であるため、はっきりとした故障というよりは、むしろ冷え鈍りやコンプレッサー音などの不調を察知して買い替えるケースが目立つ。したがって、日常的な定期点検やメンテナンス・サービスの介入で、不調の不安解消と故障（運転停止）の未然防止を図るとともに、修理・交換が必要な場合には安価なリユース品の提供を行うといった、二段階での製品長寿命化サービスが展開できそうである。

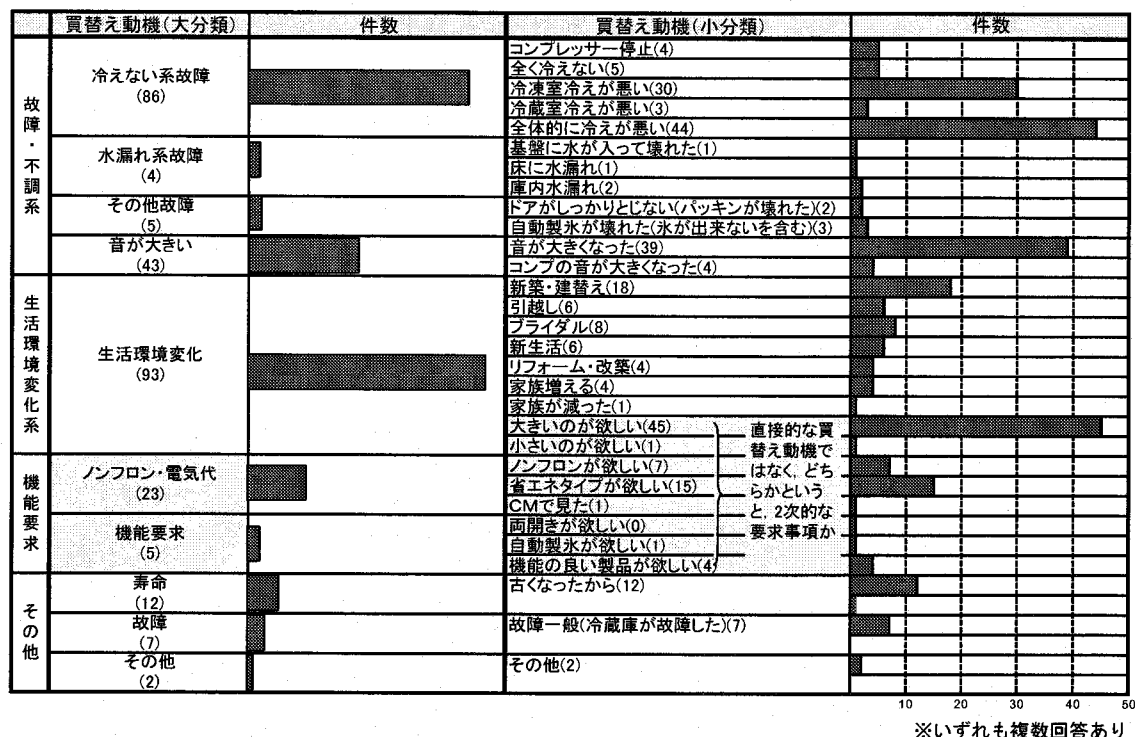


図 5.13 家庭用冷蔵庫の買い替え要因

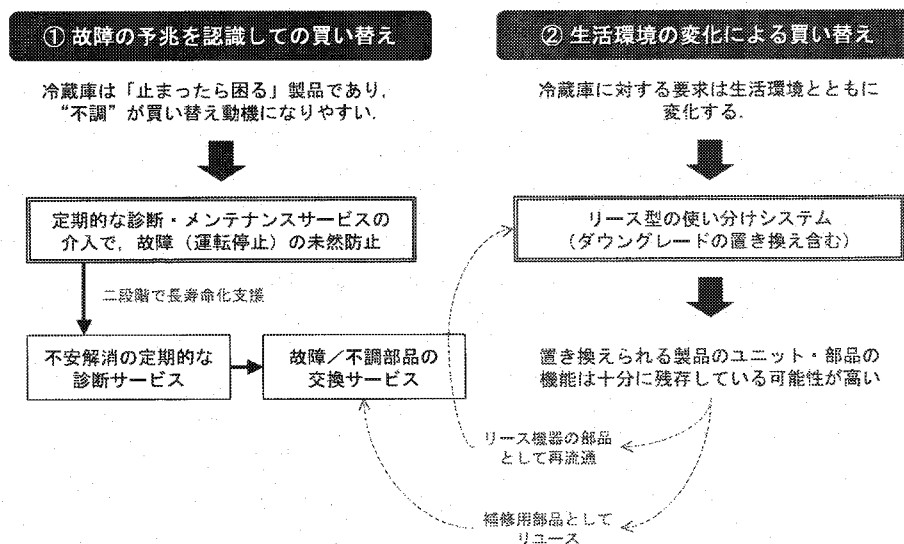


図 5.14 部品リユースを促進する診断サービスとリース型システム

第二の要因は、引っ越しや家族構成の増減など、生活環境の変化に伴った買い替えである。特に、冷蔵庫の容量への要求が生活環境とともに変化するものと推察される。つまり、例えば独立（独り暮らし）→結婚（家族増）→出産（家族増）→子供の独立（家族減）といったライフステージに沿って、ダウングレードを含めた冷蔵庫の置き換えサービスを図るリース事業が構想されうる。このとき、置き換えられる製品のユニット・部品の機能は十分に残存している可能性が高く、製品として再使用することが困難な場合には、ユニット・部品はリユース品として活用することができる。（図 5.14）

なお、使用済み冷蔵庫のコンプレッサーを補修用部品としてリユースしたときの環境側面への影響については、次章の第 3 節において定量的な評価を行う。

② 異なる製品分野へのカスケード型リユース（家庭用冷蔵庫から他製品へのリユース）

一般に、コンプレッサーのエネルギー消費効率（＝定格能力／定格消費電力）を表す COP（Coefficient of Performance）から見ると³、同じ冷蔵庫製品の中でも家庭用冷蔵庫の値は他用途製品に比べて大きいことが分かる（表 5.4）。こうした製品性能に対する要求水準の違いを活かしたカスケード型リユース（cascade reuse）を展開するとき、次のような候補が挙げられる。

表 5.4 冷蔵庫用コンプレッサーの COP 比較

利用用途	平均 COP
業務用冷蔵庫，ショーケース用など	1.15
小型冷蔵庫，冷温水ボトル用など	1.23
冷蔵庫，冷凍庫，ショーケース用	1.32
冷蔵庫用	1.65
冷蔵庫用（インバータ制御）	2.55

■ 業務用小型冷蔵庫

冷蔵庫の中で技術開発があまり進んでいない分野には、ホテルなどで利用されている室内用小型冷蔵庫がある。低価格化を巡って競争が行われているため、省エネ化の推進は家庭用冷蔵庫やその部品と比較すると緩やかであり、リユース品利用が必ずしも製品運転に伴うランニングコストの上昇に繋がらない可能性を持つ。また、技術的な側面でも、業務用小型冷蔵庫に主として使用されている R12 冷媒は、家庭用ノンフロン冷蔵庫のイソブタン冷媒と互換性があり、材料・部品構成の変更を必要としないという利点がある。

また、省エネ化の進展が遅い同じ業務用冷蔵庫でも、飲食店などの厨房で用いられる中～大型の冷蔵庫の場合は、エネルギー消費効率よりもむしろ圧縮パワーが性能上の問題となる。したがって、このような用途へリユースするときには、例えばコンプレッサーを二個付けするなど、パワー不足を補うための工夫やエコデザインの開発が必要となると考えられる。

■ 飲食料用自動販売機

故障リスクや不安解消のためには、リユース品が組み込まれた製品の稼働点検などを行うサービスが望まれる。しかし、こうしたサービスが個々の家庭用機器に展開されるには時間を要する。したがって、リユースを展開する初期段階においては、既にメンテナンス体制が整った産業用機器を対象とした方が、事業化しやすい。

飲料用自動販売機の分野では、基本償却期間 8 年の間に二度、整備工場においてオーバーホールするシステムが既に整備されている。この際、不調あるいは故障部品の交換なども行われており、故障リスクに対する備えが整っている。同時に、商品の詰め替えで定期的に製品にアクセスする機会が多く、この延長でリユース品の稼働チェックや故障時の部品交換を図ることが可能である。更には、故障時の対応として、設置現場での修理・交換を容易とする製品設計や、サービス部品としてのリユース品の活用なども手掛けられており、リユースの受容性や実行性は高いと言える。

また、飲料缶の場合には、生鮮食品の冷蔵ほどの温度制御精度が求められないため、リユース品の冷却能力低下や急な停止も比較的許容されうる側面もある。

■ 低温蓄熱システム（電源補助装置）

コンプレッサーが利用されている冷凍冷蔵応用設備の分野で、将来的に市場拡大が期待されているものとして、低温蓄熱システムのヒートポンプユニットが挙げられる。このシステムでは、夜間の外気熱や安い電力を利用し、運転に投入したエネルギー以上のエネルギーを産み出すことが可能な省エネ・省コスト指向の分散型電源である。

基本的には間欠運転（夜間のみ）であり、また通常の電力利用よりランニングコストを低く抑えることが可能なシステムのため、リユース品の効率低下が極端でない限り、運転コストの増加には繋がらない。また、リユース品のコンプレッサーに故障や不調が発生して全体システムの停止が起こったとしても、既存の電力売買という代替システムがあるため、リユース品の故障リスクに対する警戒心も低減されうると考えられる。

なお、ここではロータリータイプのコンプレッサーが主として利用されるので、レシプロタイプが主流である家庭用冷蔵庫より、エアコン用コンプレッサーの転用の方が適していると考えられる。

5.5 本章のまとめ

本章では、まずリユースシステム設計の視点・枠組みの検討と提案を行った。具体的には、新たな付加価値をもたらす社会的な価値とユニット・部品に集約された価値からなる「リユースする価値」と、製品設計と市場の側面の「リユース適合性」の2つの視点からリユース性を評価する枠組みを提示した。

次いで、リユースの展開が製品連鎖の関連主体にもたらす社会的な効果の検討を行った。ここでは、社会的な効果として、製品技術の革新・社会サービスの創出・リサイクルとの相乗効果・生産管理の効率化があることを見出した。また、生産管理の効率化に焦点を当てた評価の結果、資源循環を高度化させるリユースの推進が、製品連鎖上の私的費用のスリム化を図ろうとする経営戦略の一つの手段となりうることを明らかにした。

そして、リユースシステム設計の構想段階として、input・process・outputの3つの断面から、それぞれリユースに適したユニットの選定、リユースの転換プロセスの設計、リユースに適した市場・用途の選定のスクリーニング評価や考察を行った。ここでは特に、リユース市場に適した製品分野を探るため、リユース品に対して高い受容性や選好性を持ちうる要件を提示した。これに沿って、家庭用冷蔵庫のコンプレッサを例として、同一製品の補修用部品としての転用や、複数用途を持つ汎用ユニットを他の製品分野へと階層的にリユースしていくシステムを提案し、その具体的な市場候補の特徴や課題を示した。こうしたリユース・ビジネスは、事業化の初期段階では既にメンテナンス体制が整った産業用機器などを対象に展開されるが、故障リスクの軽減などを図るサービスの付随や運転履歴

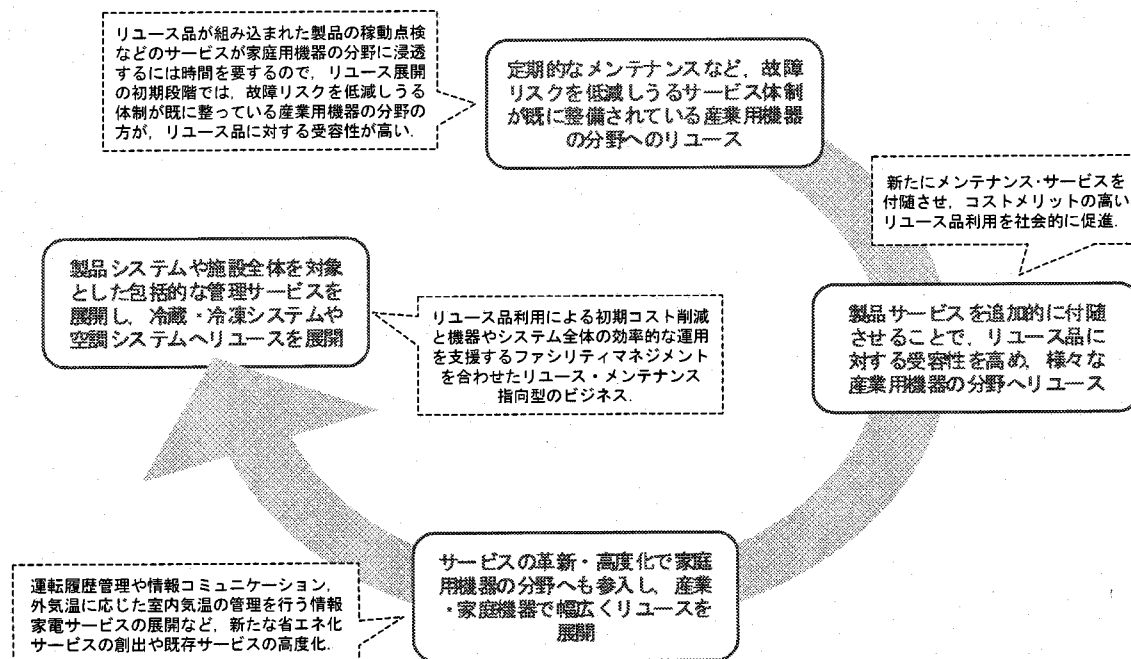


図 5.15 汎用的な機能ユニットを活かしたリユース・モデルの展開

の取得・活用を進めながら次第に市場を広げ、やがて機器単体だけでなく施設単位での環境ファシリティ・マネジメントも手掛けていくビジネスへと展開されていくことに繋がると考えられる（図 5.15）。

¹ 人見勝人：『生産システム工学（第2版）』，共立出版，p.106-107，1990.

² 小林英樹：『製品ライフサイクルプランニング』，オーム社，p.47，2003.

³ 松下電器産業・松下冷機'99 コンプレッサー総合カタログより算出

第6章 都市施設を対象としたリユース・メンテナンス型の製品管理と評価

6.1 緒言

環境効率の高い産業社会の構築を目指すとき、生産者は自らが提供する対象を製品本体からそれに付随するサービスを含む領域へと拡大し、製品の運用と廃棄後の資源循環をトータルで管理することを通じて、生産と消費の連鎖におけるエネルギー・資源の消耗を最小化する製品付随サービス（product-based service）を開発していくことが求められる。すなわち、メンテナンスや製品リユース、部品リユースなどによって産業機械製品の長寿命化と循環形成を推し進めながら、同時に製品の効率的な運転と省エネ化を支援することで、ユーザーに直接的なコストメリットをもたらす私的ビジネスサービスの展開である。

本章では、リユースを中心とした製品ライフサイクル管理の形態を示した上で、まず家電製品を対象として、省エネ化の技術革新のもとで機能ユニットのリユースが製品利用時のエネルギー消費に及ぼす影響を評価する。次いで、産業機械装置が集積する都市施設を具体的に設定して、そこで運用される産業ポンプに対して省エネと省資源を同時達成する製品更新管理サービスを構想し、その展開による環境効率の改善効果を評価する。

6.2 リユースやアップグレードを指向する製品管理方策

6.2.1 製品の長寿命化と更新管理の基本的な考え方

環境効率の高い工業製品の循環形成を目指すとき、まず維持管理や補修を通じた機器の長寿命化・長期使用が図られ、使用済みとなって回収されるものについては、製品やユニットとしてのリユースが優先されるべきである。一方、地球温暖化に係わる CO₂ 排出量の削減を目的としたとき、製品やユニット、部品の長期使用より省エネ型機器への更新を計画的に進めた方が良いとする指摘がある¹。特に、頻繁なモデルチェンジと機器の省エネ化技術の促進を商品戦略とする製品分野において、既設製品の継続的な利用はエネルギー消費の増加を招くため、省エネ型の製品へと切り替えるべきとの主張である。

しかし、既設機器を直ちに省エネ型機器へと更新すると、切り替えに伴う投資コストが大きくなるばかりでなく、資源の消費抑制や有効活用の面からも決して望ましい選択であるとは言えない。むしろ、省エネ型機器への置き換えを順次進めながらも、基本的なスタンスとしては既設製品やその部材の有効活用を図り、ライフサイクル全体でのエネルギー消費を増加させることなく製品やユニットのリユースを進めることが重要となる。

6.2.2 リユースを中心とした製品ライフサイクル管理

産業エコロジーが推進するリユースを中心とした製品・ユニット管理の形態と特徴を図 6.1 に示す。機器更新のパターンは、①新規製品への買い替え、②製品リユース、③部品リユースと外観更新、④メンテナンスによる製品延命化に大別される。ここでは、リユース

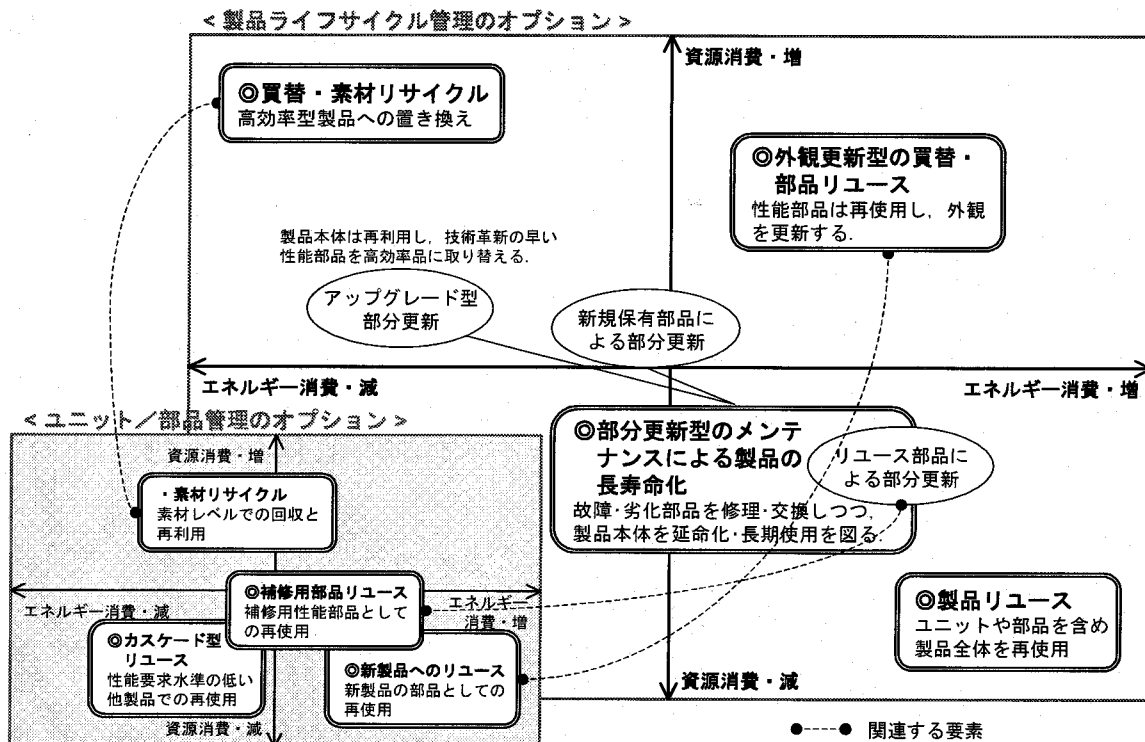


図 6.1 製品・ユニット管理の形態と環境的側面の特徴

の単位やその形態によって、資源やエネルギーの消費といった環境的側面に及ぼす影響が異なってくるという特徴を表している。

一般的に、機能的な性能部品を有する製品の場合、製品あるいはユニットのリユースによって資源投入量や廃棄物発生量が抑制される一方で、高効率の新規製品／ユニットへの置き換えに比べて運用時における機器のエネルギー効率が低下し、エネルギー消費が増加するといった省資源と省エネのトレードオフが生じる。こうした傾向は、特に民生用電気機器など、省エネの技術革新の進展が速い機器において極めて顕著である。すなわち、製品連鎖マネジメントの視点から機械装置の生産や運用、廃棄等に伴う環境インパクトを低減するには、省エネルギー化や機器の延命化、使用済み製品の再生利用等によってライフサイクル全体で資源生産性や環境効率を高める製品管理が重要となる。

6.2.3 機器の長期利用を促すメンテナンスの方式

製品の長寿命化を図るメンテナンス（maintenance）の方式は、一般的に製品が故障する前に保全する方式を予防保全（preventive maintenance）と、製品が故障してから保全を行う事後保全（corrective maintenance）に大別される。前者は、更に状態監視保全（condition based maintenance）と時間計画保全（time based maintenance）の方式に分類することができ、製品を完全に分解して徹底的な点検・検査を行うオーバーホール（overhaul）が行われることもある。

表 6.1 製品や部品の長期使用を促すメンテナンスとリユース

対象製品	リユースの単位	メンテナンスの方式	サービスの内容
家電（冷蔵庫）	ユニット	事後保全	リユース品による修理・交換
汎用ポンプ	製品	予防保全	オーバーホール型メンテナンスとアップグレード

故障時の社会的影響が大きい社会インフラや大規模な工場設備などでは、あらかじめ決められたスケジュールに沿った定期的な検査やオーバーホールが行われている²。一方、家電製品の分野では、主に事後保全の方式で故障や不調箇所の修理・交換が行われている。

また、製品機能や性能を向上させるアップグレード（upgrade）も、“positive maintenance”と呼ばれるように、機器の長期利用を促すメンテナンスの一種である。パソコンのように製品性能の進化が著しい製品分野では、機能の追加・拡張サービスによってユーザーの効用を高めつつ、製品の長期使用を支援するアップグレードに対する市場の選好が高まってきている。

なお、本章では、製品の利用と使用後の循環に対する総合的・包括的な製品サービスとして、メンテナンスを通じた製品の長寿命化とリユースを組み合わせる展開する製品政策を提案し、その分析を行う（表 6.1）。

6.3 家電製品のリユース部品を活用した製品補修の環境負荷削減効果の評価

6.3.1 分析の目的

家庭用冷蔵庫に代表される民生用電気機械は、ライフサイクル全体でのエネルギー消費に対して機器運用時の占める割合が大きく、また省エネ化の技術革新の進展が著しく速いため、製品やユニットのリユースは最新の省エネ型機器への更新に比べて運用時のエネルギー消費量が増加する傾向にある。

本節では、家電リサイクル法や改正省エネ法のトップランナー方式のもとで資源の再生利用と機器の省エネ化の促進が同時に取り組みされている家庭用冷蔵庫を対象製品として取り上げ、コンプレッサーをリユースすることによる環境負荷削減効果の評価を行い、省資源と省エネの両側面においてリユースが優位となる局面を導き出すことを目指す。

6.3.2 比較する製品ライフサイクル管理のオプション

機器更新／リユースシナリオとして以下の 4 つを設定し、環境負荷指標としてライフサイクル CO₂ 排出量及び資源投入量・最終処分量を取り上げ、その算定を行った。

(1) リユース品を活用した製品補修による製品延命化

ユーザーは、コンプレッサーの故障に際し、使用済み冷蔵庫から回収・再生されるリユース品を利用して補修を行い、製品延命化を図る。下記(2)に比べ、新規部品の製造に係わる負荷が回避される一方で、使用段階ではエネルギー効率の低下を想定する。

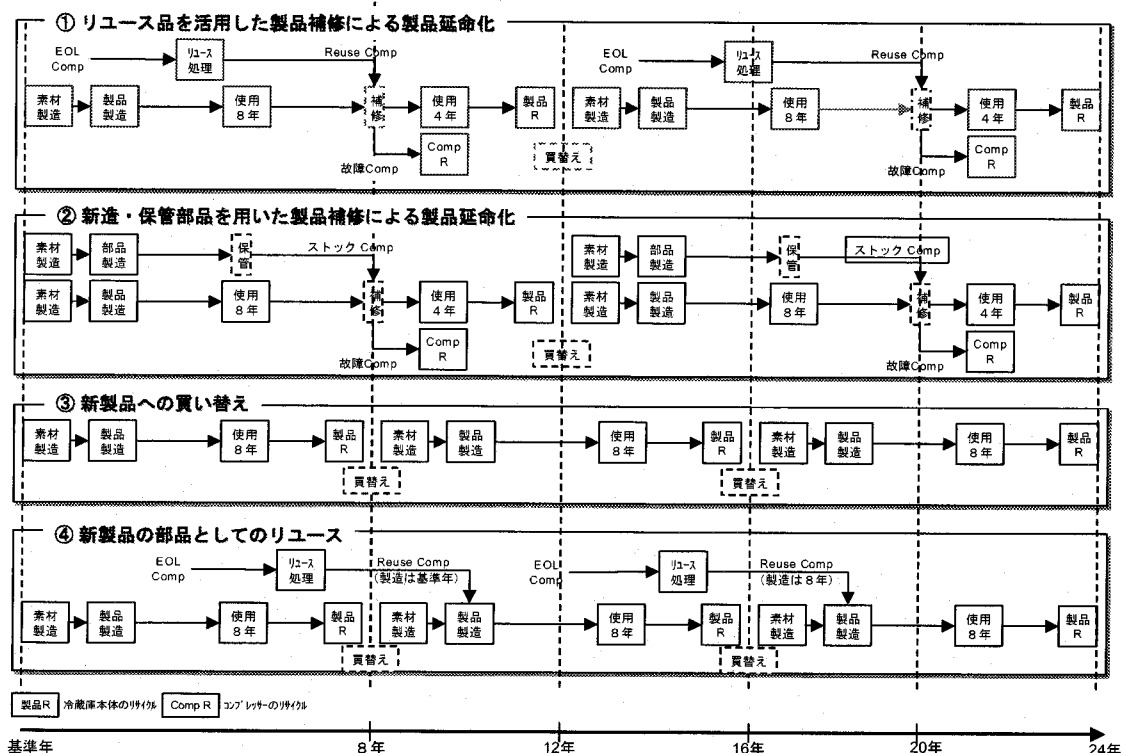


図 6.2 比較する製品ライフサイクル管理のオプション

(2) 新造・保管部品を用いた製品補修による製品延命化

ユーザーは、コンプレッサの故障に際し、「補修用性能部品の保有期間」の義務付けによってメーカーが保管している補修用新規コンプレッサを利用して補修を行い、製品延命化を図る。この補修用部品の規格は、当該製品用コンプレッサの製造時と同じであるとする。

(3) 新製品への買い替えとマテリアル・リサイクル

ユーザーは、コンプレッサの故障に際し、補修を行わずに新製品へ買い替える。より高効率型の製品への切り替えによって、運用時のエネルギー消費量の削減が見込まれる。

(4) 新製品の部品としてのリユース

ユーザーは、コンプレッサの故障に際し、補修を行わずに製品を買い替える。ここで、再生コンプレッサを組み込んだ製品を想定する。上記(3)に比べ、コンプレッサの製造に係わる負荷が回避される。一方、コンプレッサの省エネ化の進展はなく、逆にエネルギー効率の低下を考慮する。

6.3.3 算定条件と使用データ

比較評価シナリオの概略を図 6.2 に示す。内閣府経済社会総合研究所の調査³によると、冷蔵庫の平均使用年数は約 12 年である。また、兵庫県立生活科学研究所の調査⁴では、冷蔵庫の修理件数は修理するまでの使用年数が 5 年以上 10 年未満の間で最も多くなっている。そこで、使用期間が 8 年を経過した時点で製品寿命を前にコンプレッサが故障すると仮定し、買い替えか補修（コンプレッサ交換）かの選択が発生するものとする。その上で、

補修を選択した場合には機器寿命が追加的に4年延長され、製品自体はトータルで12年間使用されるものとしている。

次いで、インベントリー分析において設定・引用したデータを表6.2に示す。ここでは、標準仕様の機種を対象としたものや重量あたりに換算された原単位を中心に調査もしくは引用を行うなど、データ間で整合が図れるように留意している。また、整合性への配慮が十分でないデータが一部あるものの、その誤差が基本的なCO₂排出構造や傾向に及ぼす影響は小さいと考えられる。以下に算定方法の概要を示す。

① 素材生産

コンプレッサー素材別重量に、産業連関表に基づく素材別CO₂排出原単位を乗じて算出する。

② 部品（コンプレッサー）製造

コンプレッサーの組立等の負荷に対応するデータがないため、冷蔵庫製造のデータ（下記③）を重量比で按分して導出する。

③ 製品製造

平均的な冷蔵庫1台の組立・製造に要するユーティリティから算出する。

④ 運用

使用段階における環境負荷は、電力消費起源のCO₂排出である。製品カタログ値をもとに冷蔵庫の電力消費量を設定し、そのうちコンプレッサー入力に係わる負荷を85 [%]とする。また、省エネ進展が一定の割合 α [%/年]で進むと仮定する。この省エネ進展率は1999年度以降の変遷をもとに冷蔵庫全体で5 [%/年]とし、省エネ化進展分のうちコンプレッサーの効率化に寄与するものを25 [%]とする（残りは断熱・制御技術によるものと仮定）。買い替えの場合、基準年の年間消費電力から毎年 α [%]ずつ消費電力量が低減すると仮定する。

⑤ リユース

民生用電気機器の部品リユースを実際に行っている事例は極めて少なく、またリユースやリサイクルなどの逆工程の情報は十分整備されていない状況にある。一方、使用済み自動車に関しては、部品リユースやリビルト（rebuilt）の取り組みがビジネスとして社会化されつつある。そこで、本研究では、カーエアコン用コンプレッサーのリビルト事業の調査を実施した上で、家庭用冷蔵庫コンプレッサーのリユース工程を想定した。

また、リユース部品は新規部品に対して β [%]の性能劣化があると想定し、消費電力中の圧縮機入力分が β [%]増加すると仮定する。ここで、使用済み冷蔵庫を対象に行った簡易な稼動検査の結果をもとに、性能劣化 β は-10 [%]と設定する。リユース部品を新製品に組み込む場合、買い替えの際にコンプレッサーによる省エネ削減は見込まず、逆に性能劣化分を想定する。ただし、断熱・制御技術による省エネ化は達成されるものと仮定する。

⑥ 破碎・選別

コンプレッサーは専用破碎機（常温破碎方式）で処理され、その後に磁選機（二段）及び非鉄選別機を通ると仮定する。そのプロセスでの電力消費量を環境負荷として算出する。

⑦ スクラップの扱い

スクラップは環境負荷を伴って系外に移動するものと捉え、（スクラップの持ち出す環境負荷）＝（二次素材の環境負荷）－（リサイクル工程に係わる負荷）として求める。

表 6.2 インベントリー分析に使われる算定条件

工程	項目	数値	
素材生産	素材別重量（冷蔵庫の手分解実験により測定）	—	
	素材別 CO ₂ 排出原単位 ⁵	—	
コンプレッサー製造	（製品組立時の電力消費量を重量で 按分して算出）	—	
製品組立	製品組立・製造における電力消費量 ⁶	51.6 [kg-CO ₂ /台]	
運用	冷蔵庫の年間電力消費量	290 [kWh/年]	
	冷蔵庫の消費電力に占めるコンプレッサー入力の割合 ⁷	85 [%]	
	省エネ進展率（冷蔵庫全体） ⁸	5 [%/年]	
	省エネ化進展に対するコンプレッサー効率化の寄与度	25 [%]	
	リユース品使用によるコンプレッサー入力の増加	10 [%]	
リユース	（洗浄）	洗浄機の定格電力	2.2 [kW]
		洗浄機の運転時間（*1）	2.5 [min/台]
		洗浄機の灯油使用量	5 [ℓ/h]
	（ブラスト）	ブラスト装置の定格電力	9.2 [kW]
		ブラスト装置の運転時間（*1）	1.67 [min/台]
	（稼働検査）	コンプレッサーの定格電力	0.175 [kW]
		稼働検査時間	10 [min/台]
	（漏れ検査）	検査装置の定格電力	0.15 [kW]
		漏れ検査時間	10 [min/台]
	リサイクル ^{6,9,10}	鉄スクラップ再利用による CO ₂ 排出量削減効果	−0.80 [kg-CO ₂ /kg]
銅スクラップ再利用による CO ₂ 排出量削減効果		−1.10 [kg-CO ₂ /kg]	
アルミスクラップによる再利用 CO ₂ 排出量削減効果		−1.53 [kg-CO ₂ /kg]	
破碎・選別（*2）	破碎・選別における電力消費量	0.139 [kWh/kg]	
最終処分 ⁶	埋立処理における軽油消費量	9.4×10 ^{−4} [ℓ/kg]	
	浸出水処理における電力消費量	2.0×10 ^{−3} [kWh/kg]	
エネルギー・燃料使用 ^{5,11}	電力使用の CO ₂ 排出原単位	0.38 [kg-CO ₂ /kWh]	
	軽油使用の CO ₂ 排出原単位	2.794 [kg-CO ₂ /ℓ]	
	灯油使用の CO ₂ 排出原単位	2.607 [kg-CO ₂ /ℓ]	

*1 カーエアコン用コンプレッサーのリビルト事業の調査・ヒアリングに基づく。

*2 廃 OA 機器の処理を中心とした再資源化施設へのヒアリング調査をもとに算出した。

⑧ 最終処分

埋立て処理に係わる負荷を軽油使用量 [ℓ] = $0.62 \times$ 埋立物の重量 [t]，浸出水の処理の投入材による負荷を電力量 [kWh] = 1.6669×5.167 [t] として算出する。また，最終処分量は，コンプレッサー重量から破碎・選別工程を経て回収されなかった分とする。

6.3.4 環境負荷削減効果の評価

図 6.3 にシナリオごとの資源投入量及び最終処分量の算定結果を、図 6.4 に LC-CO₂ の算定結果を示す。部品リユースとメンテナンスを組み合わせる製品の延命化を図ることによって、機器更新に比して資源投入量で約 30 [%]、最終処分量で約 40 [%] の削減が達成される。一方、CO₂ 排出量では、高効率型の製品に置き換える機器更新シナリオが最も少なく、これに比してリユース志向型の製品延命化シナリオでは CO₂ 排出量が約 4.4[%]増加する。

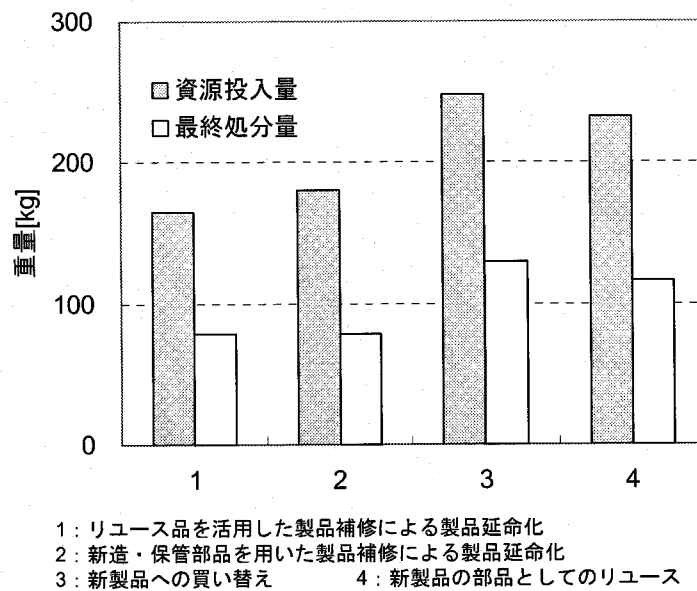


図 6.3 資源投入量及び最終処分量の算定結果

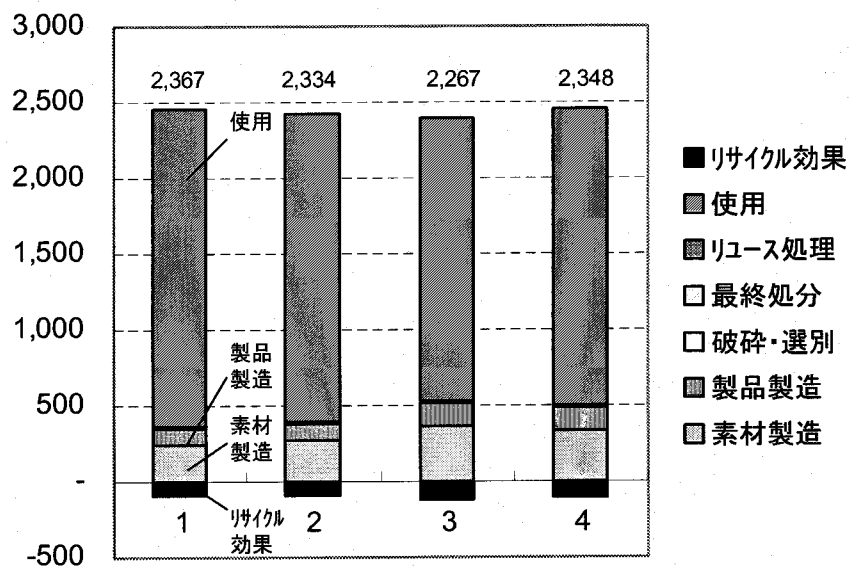


図 6.4 LC-CO₂ 排出量の算定結果

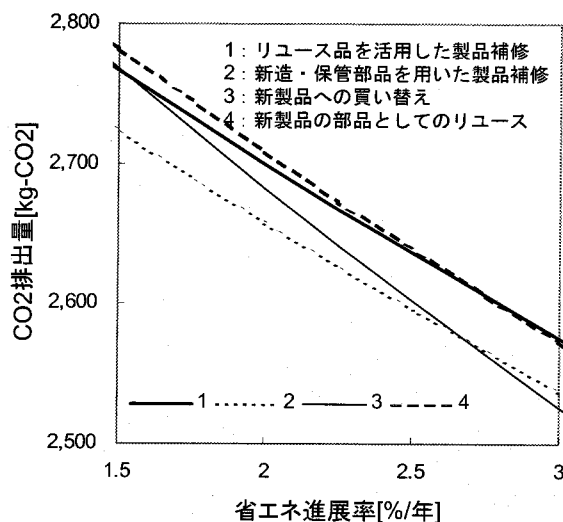


図 6.5 省エネ率を変化させたときの LC-CO₂
(リユース品の効率劣化が-10%の場合)

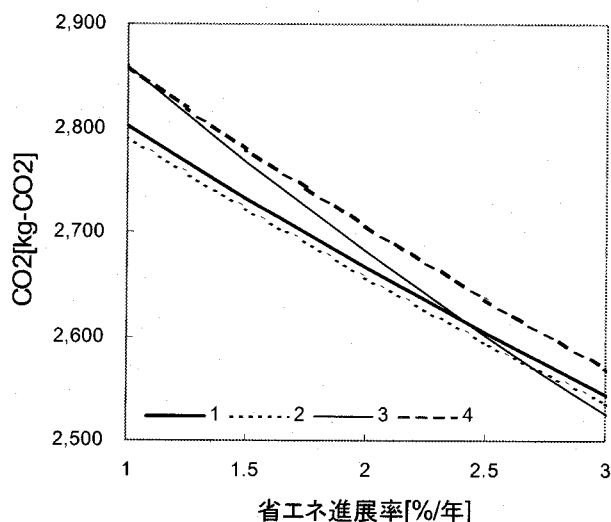


図 6.6 省エネ率を変化させたときの LC-CO₂
(リユース品の効率劣化を-5%とした場合)

CO₂ 排出の内訳を見ると、素材や製品製造起源の CO₂ 排出量がリユース志向型の製品延命化によって約 30 [%] 減少し、運用時ではリユースによって CO₂ 排出量が約 13 [%] 増加する。その結果、使用時の電力消費起源 CO₂ 排出の絶対量が大きいいため、トータルでは機器更新が優位となる。

図 6.5 は、省エネ進展率を変化させたときの LC-CO₂ の変動をシナリオ毎に算出した結果を示している。省エネ進展率が約 2.7 [%/年] よりも小さいとき、買い替えより新造・保管部品による製品延命化が、また約 1.6 [%/年] 以下のとき、リユースによる製品延命化が有利となる。図 6.6 は、リユース品の機器効率の低下分を新造品の 5 [%] としたときの省エネ進展率と LC-CO₂ の関係を示している。機能残存の優れたコンプレッサーのリユースが可能な場合、省エネ進展率が約 2.5 [%/年] よりも小さいとき、買い替えよりリユースによる製品延命化が有利となることが分かる。

以上より、省エネの技術革新の速度が緩やかになる期間であれば、リユースとメンテナンスを組み合わせる機器延命化を図る製品管理によって、機器更新型シナリオに比べて資源とエネルギーの両側面においてリユースが優位となる可能性が示された。こうした製品環境政策を展開するとき、リユースに対するユーザーの受容性や選好性を高めるためには、製品進化の動向や余寿命情報などの把握を通じてリユース志向の機器延命化による環境及び経済的なメリットを定量的な情報としてユーザーに提示するといった、診断サービスと買い替え／延命化の選択を促す情報コミュニケーションが重要となる。

6.3.5 製品補修による長寿命化の消費者コスト

一方、リユースやメンテナンス指向の製品管理を消費者が選び取る側面では、省エネ型製品への買い替えに比べて、総支払いコストが相対的に小さくなることで、環境配慮行動に対する選好が高まる。そこで、省エネ型新製品への買い替えとリユース型製品補修による機器延命化の 2 つのオプションについて、消費者コストを推計した (図 6.7)。なお、算

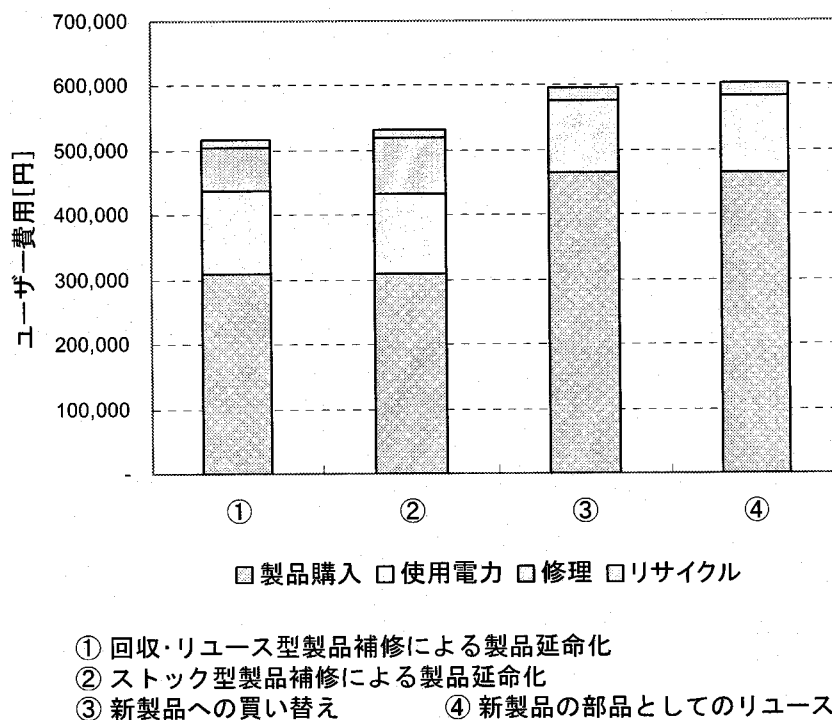


図 6.7 リユース型製品補修による製品長寿命化に伴う消費者コストの推計結果

定項目を製品購入費、使用電力費、修理費、リサイクル料金とし、機器の省エネ化の進展率を 5 [%/年]、リユース部品の新造品に対する効率劣化を 10 [%] と設定した。

リユース型製品補修による製品延命化シナリオでは、買い替えシナリオに対して使用電力費が増加し、追加的に修理コストが発生する。しかし、製品延命化によって買い替え回数が減ることによって製品購入費が約 33 [%] 削減され、全体で約 13 [%] のユーザー費用が削減される結果となった。すなわち、消費者は機器更新に際して部品リユース型の製品延命化を選択することによって、長期的に追加投資を抑えることができると言える。

6.4 産業ポンプを対象としたアップグレード型の施設管理サービスの評価

6.4.1 分析の視点と目的

前節で示したように、都市活動におけるエネルギー消費の多くを担う産業機械製品やその機能部品のリユースを社会的に展開するとき、機器の省エネ化動向や運転負荷状況などの情報を把握しながら、ライフサイクルで見たときのエネルギー消費の面で不利にならない局面を戦略的に選んでいく必要がある。都市施設や産業工場などでは、ポンプを始めとする様々な産業用エンジニアリング装置が集積し、その保守契約が成立しているので、分散して利用されている民生用電気機器よりも製品やそれに付随した運転履歴情報を管理・運用しやすい側面がある。産業機械の製品連鎖におけるエネルギー・物質フローのマネジメントを産業主体が手掛けるとき、次の 2 つのアプローチが考えられる (図 6.8)。

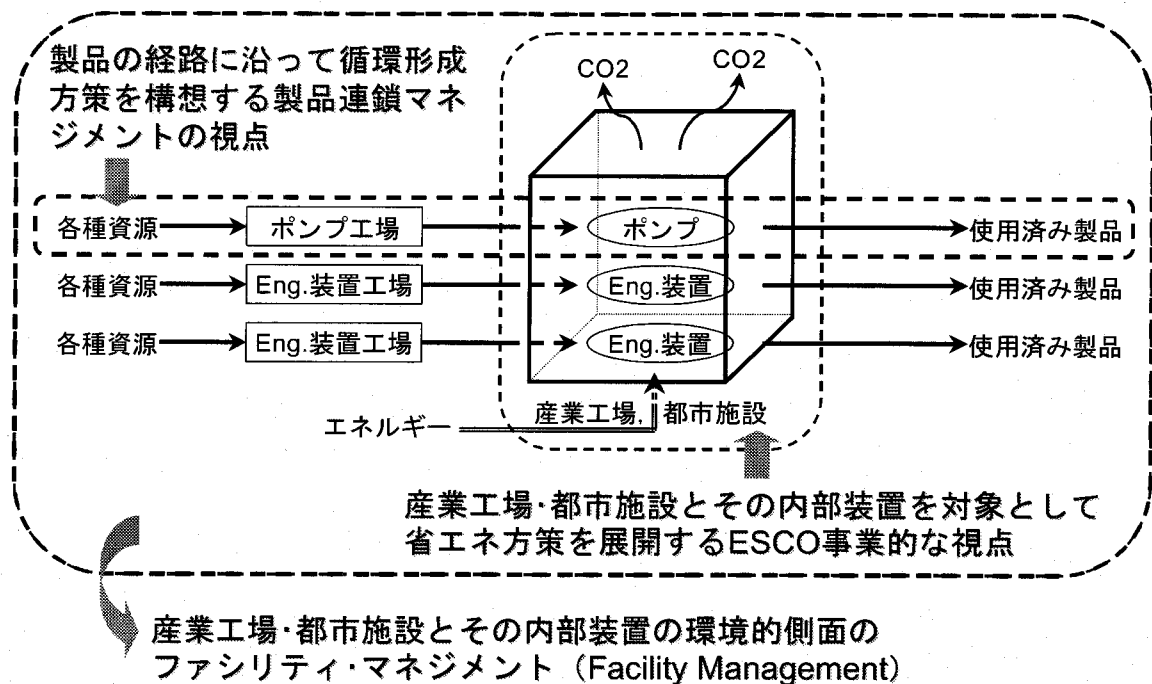


図 6.8 環境ファシリティ・マネジメントの視点

まず製品単体で見ると、各エンジニアリング装置の製造者が製品ライフサイクルに沿って循環形成のための方策を展開する製品連鎖マネジメントである。第3章や第5章で述べたように、ここではEPRの原則に基づいてエコデザイン製品を社会に流通させ、使用後は逆工場を中心として製品や部品のリユースを優先させた多様な循環利用が図られる。また、保守契約に準じて、ある段階で逆工場においてオーバーホールして再出荷する長寿命化サービスも手掛ける。一方、施設単位で見ると、ESCO (Energy Service Company) のように都市施設や産業工場とその内部装置を対象とした総合的な省エネルギー診断・改善サービスとともに、用途や稼働特性に応じて産業機械製品や部品を施設内あるいは施設間で使い回すなど、環境面から施設管理システムを築いていくアプローチがある。

こうした都市施設内の機械装置を対象とした運転時の効率的な利用と使用後の資源循環を包括的に担う製品付随サービスは、施設における経営資源の管理・有効活用を行うファシリティ・マネジメント (Facility Management) に準えると、環境ファシリティ・マネジメント (Environmental Facility Management) と呼ぶことができる。ポンプに代表される産業機械製品の環境戦略を環境効率や資源生産性を高める方向で構築していけば、環境ファシリティ・マネジメントを指向するものへと発展していくことになる。

本節では、製品連鎖マネジメントの展開による循環形成を産業工場と都市施設の中で捉え、都市施設に集積する産業ポンプの環境ファシリティ・マネジメントの視点に立脚した分析を指向する。具体的には、循環複合体研究の社会実験地である荏原製作所の藤沢工場を使用済みポンプの再資源化拠点となる逆工場を内在化した産業工場として、またポンプが集積的に納められた機能集積都市施設Aを消費・運用サイトとして固定した上で、そこで展開される環境ファシリティ・マネジメントによる環境効率の改善効果を明らかにする。

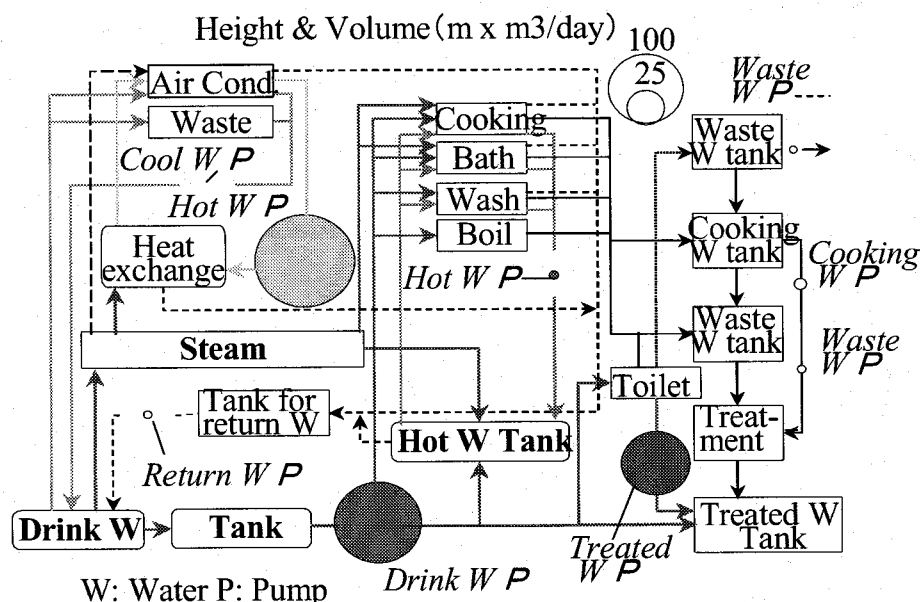


図 6.9 業務系都市施設における産業ポンプの配置

6.4.2 業務系都市施設 A におけるポンプの稼働特性に応じたりユース戦略

(1) 都市施設 A におけるポンプの稼働状況とエネルギー消費

業務系都市施設 A は、地上 5 階・地下 1 階、全長 840m、延べ床面積約 29 万 m^2 を有し、商務・業務関連施設などの様々な用途のテナントが 110 ほど入居している複合的な機能集積の都市施設である。同施設内では 12 の用途で 230 台の産業ポンプが稼働しており、約 77,000 [$\text{m}^3/\text{日}$] の上下水の輸送を支えている（図 6.9）。

各種ポンプの主要な機能と用途、および同施設における実際の稼働状況は以下の通りである。

① 冷水ポンプ

現在、冷水が上記循環系統に到達する段階で既に水圧を持ち、冷水ポンプの力を借りずとも空調が可能のため、同ポンプは稼働していない。主な機能は空調（冷房）用水循環であり、用途としては空調機やゴミ処理室などがある。

② 温水ポンプ

同ポンプは 2 台を 1 組として設置され、双方が隔日 24 時間連続で運転されている。主な機能は空調（暖房）用水循環であり、用途としては空調機などがある。

③ 給湯ポンプ

同ポンプは、ビル高層部を担当するものと低層部を担当するものとに役割分担されて設置・稼働している。また、各所とも 2 台を 1 組として設置されており、隔日 24 時間連続運転である。主な機能は飲用・浴用熱湯水供給であり、用途としては厨房や浴室、洗面所、湯沸室がある。

④ 上水給水ポンプ

同ポンプは 3 台が 1 組として運用されており、持ち回りでいずれか 1 台が 8 時間連続運

転されている。主な機能は上水道供給であり、用途としては厨房や浴室、洗面所、湯沸室、便所がある。

⑤ 中水給水ポンプ

同ポンプは3台が1組として運用されており、持ち回りでいずれか1台が8時間連続運転されている。主な機能は中水道供給であり、用途としては便所がある。

⑥ 汚水ポンプ

ビル内には計20機の汚水槽があり、その中に汚水用水中ポンプが2台1組で設置されている。すなわち、汚水ポンプの合計数は40台である。それぞれが交互に稼働されるため、1回あたりの連続稼働時間は約15分である。主な機能は尿尿・汚物輸送である。

⑦ 雑排水ポンプ

同ポンプは、油分を含まない一般排水の輸送に利用される。主な機能は洗面排水輸送である。

⑧ 厨房排水ポンプ

同ポンプは、厨房からの油分を含んだ排水の輸送に利用される。主な機能は油分含有水輸送である。

⑨ 湧水ポンプ

主な機能は、地下湧水排水用（地下湧水を空港敷地外へ排水する）である。

⑩ 雨水ポンプ

主な機能は、雨水排水用（勾配を有する車道の降雨水を空港敷地外へ排水する）である。

⑪ 冷却水ポンプ

同ポンプは、2台1組で運用されている。ビル全体で1組が用意されており、双方を1ヶ月に1度切り替える。すなわち、一度運転を始めると1ヶ月間連続運転され、その間他方のポンプは休止状態となる。主な機能は、冷蔵庫用冷却塔給水（ビル内の冷蔵庫内を冷却するための冷却塔へ給水する）である。

判明したポンプの電動機出力、台数、稼働状況と、同ビルにおけるポンプの1日あたりエネルギー消費量の概算結果を表6.3に示す。なお、汚水ポンプ・雑排水ポンプ・厨房排水ポンプ・湧水ポンプ・還水ポンプの稼働状況については、ポンプの設置年月と積算運転時間、及びその計測年月日が記載された運転記録をもとに、1日あたりの平均稼働時間を推計している。一般家庭の一世帯平均年間消費電力量を4,795 [kWh]¹²とすると、同施設のエネルギー消費量は一般家庭の約930世帯分と推定される。このことから、都市施設Aに集積したポンプの流体輸送機能に伴うエネルギー消費量の大きさが伺える。

(2) ポンプの稼働特性に応じたリユース戦略

都市施設Aにおける実際のポンプの稼働特性から、次のような製品管理の方策が考えられる。（図6.10）¹³

- ① 上水・冷水・温水・中水・冷却水・給湯の用途に利用されているポンプは、1日24時間稼働しており、運転時の負荷やエネルギー消費が大きい。したがって、メンテナンスやアップグレードを通じて製品機能の低下緩和あるいは向上を行うとともに、省エネ型製品への計画的な切り替えを実施することで、エネルギー消費の低減を図ることが有効となる。また、製品仕様が固定され、数量も限定されるため、施設内で部品リユースを展開することは困難であり、より広域な範囲で他の施設と連携してリユースを進める戦

略を採るべきである。

- ② 厨房排水・雑排水・汚水・還水・湧水・雨水の用途に利用されているポンプは、間歇で短い稼働時間であるため、過大な運転負荷による製品劣化は小さいと考えられる。同一のものが複数の用途で設置されており、施設内で製品や部品としてのリユース可能性が高い。また、用途によって稼働時間に幅があり、使われ方の差に応じてカスケード型で製品リユースを進めることも可能であると考えられる。

表 6.3 都市施設 A 内ポンプの消費エネルギーの推計結果

ポンプ種類	出力 [kW]	台数 [台]	稼働状況	消費エネルギー [kWh/日]	
冷水ポンプ	45	22	停止状態	0	0
温水ポンプ	37	18	常時 9 台が 1 日 24 時間稼働	7,192.8	7,192.8
給湯ポンプ	1.5	4	常時 2 台が 1 日 24 時間稼働	64.8	160.04
	2.2	4	常時 2 台が 1 日 24 時間稼働	95.04	
上水給水ポンプ	55	6	常時 2 台が 1 日 24 時間稼働	2,376	2,376
中水給水ポンプ	30	6	常時 2 台が 1 日 24 時間稼働	1,296	1,296
汚水ポンプ	1.5	2	全てが 1 日約 1.07 時間稼働	2.889	234.972
	5.5	22	全てが 1 日約 1.07 時間稼働	116.523	
	7.5	16	全てが 1 日約 1.07 時間稼働	115.56	
雑排水ポンプ	1.5	22	全てが 1 日約 1.085 時間稼働	32.2245	79.6824
	2.2	2	全てが 1 日約 1.085 時間稼働	4.2966	
	3.7	6	全てが 1 日約 1.085 時間稼働	21.6783	
	5.5	4	全てが 1 日約 1.085 時間稼働	21.483	
厨房排水ポンプ	1.5	8	全てが 1 日約 2.02 時間稼働	21.816	260.7012
	2.2	6	全てが 1 日約 2.02 時間稼働	23.9976	
	3.7	16	全てが 1 日約 2.02 時間稼働	107.6256	
	5.5	8	全てが 1 日約 2.02 時間稼働	79.992	
	7.5	2	全てが 1 日約 2.02 時間稼働	27.27	
湧水ポンプ	0.25	5	全てが 1 日約 0.456 時間稼働	0.513	20.8278
	1.5	33	全てが 1 日約 0.456 時間稼働	20.3148	
雨水ポンプ	3.7	4	停止状態	0	0
還水ポンプ	2.2	4	全てが 1 日約 0.875 時間稼働	6.93	69.93
	1.5	4	全てが 1 日約 0.875 時間稼働	4.725	
	18.5	4	全てが 1 日約 0.875 時間稼働	58.275	
冷却水ポンプ	22	2	常時 1 台が 1 日 24 時間稼働	475.2	528
合計	12 種類	230		12,165.9534	

	稼働時間 [day]	電動機出力 [kW]											
		0.25	1.5	2.2	3.7	5.5	7.5	18.5	22	30	37	45	55
上水ポンプ	24 h												6
冷水ポンプ	24 h											22	
温水ポンプ	24 h										18		
中水ポンプ	24 h									6			
冷却水ポンプ	24 h								2				
給湯ポンプ	24 h		4	4									
厨房排水ポンプ	87 min		8	6	16	8	2						
雑排水ポンプ	67 min		22	2	6	4							
汚水ポンプ	60 min		2			22	16						
還水ポンプ	49 min		4	4									
湧水ポンプ	37 min	5	33					4					
雨水ポンプ					4								

使われ方に差あり
⇒カスケードで製品
リユースの可能性

同一ポンプが複数用途で利用
⇒製品・補修用部品などでの
リユース可能性
施設外との連携

品番固定で数量も限定
⇒施設内だけでは難しく、より広域でのリ
ユース

図 6.10 ポンプの用途と稼働特性に応じたリユース戦略

6.4.3 アップグレード指向の環境ファシリティ・マネジメント戦略

都市施設 A における産業ポンプの稼働特性に応じたリユース戦略をもとに、計 18 台のポンプを対象として、アップグレードを指向する環境ファシリティ・マネジメント戦略を構想し、通常の機器更新との比較を行う。

(1) 通常の機器更新

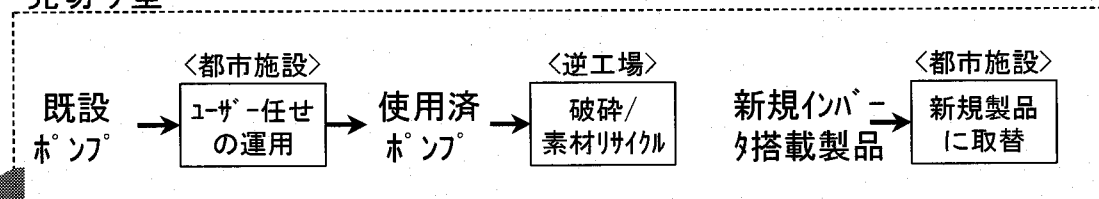
時間計画保全が実施され、機器の使用が一定期間を過ぎた段階で省エネ型のポンプへと置き替えていくことを主眼とする。現在、省エネ性能の高いポンプとしてインバータ搭載のステンレス製ポンプ (Hzfree) が開発され、同程度の仕様の铸铁多段ポンプより安価で販売されている。したがって、インバータ制御による省エネルギー改修では、既設ポンプを新規で Hzfree に置き換えていくことが主眼となっている。

(2) リユースとアップグレード指向の製品管理

既設の铸铁多段ポンプに対してメンテナンスを販売し、機器の延命化を支援すると同時に、ある時期に一旦ポンプを逆工場まで回収し、オーバーホールを行った上でモータ部をインバータ内蔵のものに取り替え、再びユーザーに戻す「省エネルギー型の修繕とアップグレードのサービス」を展開する (図 6.11)。すなわち、直ちに省エネ型ポンプへ置き替えるのではなく、エネルギー消費の増加を緩和しながら既設製品の長期使用を促した上で、製品寿命が尽きた際に省エネ型製品へと切り替える戦略である。

こうした環境戦略が事業として成立するためには、ユーザーに投資コストを上回る電力コストの削減がもたらされるのと同時に、製造事業者にとっても売切り形態の製品販売に代わる新たな私的ビジネスサービスの開発に繋がる必要がある。

売切り型



メンテナンス+アップグレードサービス型

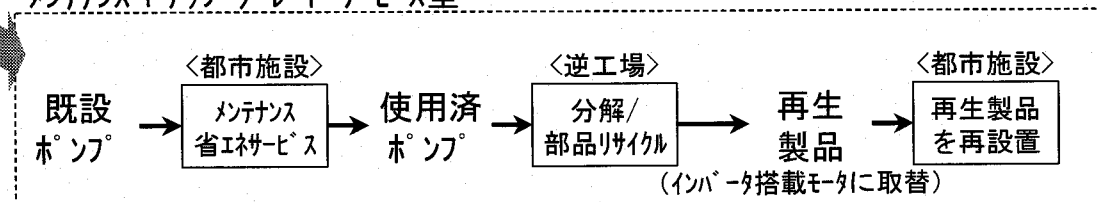


図 6.11 省エネルギー型のメンテナンス及びアップグレード戦略の概観

6.4.4 算定条件と使用データ

都市施設 A の給湯ポンプ（鋳鉄製）のうち，電動機出力 2.2 [kW]，稼働時間 24 [h/日] のポンプ 18 [台] を分析対象とする．同ポンプは，設置後 0 年が経っていると仮定する．

ポンプの更新およびアップグレードのスケジュールを図 6.12 に示す．通常の製品利用期間は 12 年とし，メンテナンスを実施した場合には 18 年に延長される．その製品寿命 1 サイクルの間に，機器エネルギー消費効率の係数が 1.0 から 0.8 まで低下する．メンテナンスは 5 年に 1 度行われ，それによって機器効率が向上するよう設定している．また，5 年目にメンテナンスの際に行われるオーバーホールでは，逆工場まで回収してインバータ内蔵モータを実装（モータ部の交換）した上で再設置される．インバータ実装による運転効率の向上の効果は，実際の運転点や流量変動などの調査に基づいた値ではなく，導入事例より明らかにされた省エネ効果の実績値を用いる．

以下に，工程別の算定条件および使用データを示す．

(1) 新規購入，新規製造

0 年目から使用される製品の新規製造に要するコスト及び CO₂ 排出量は計上しない．

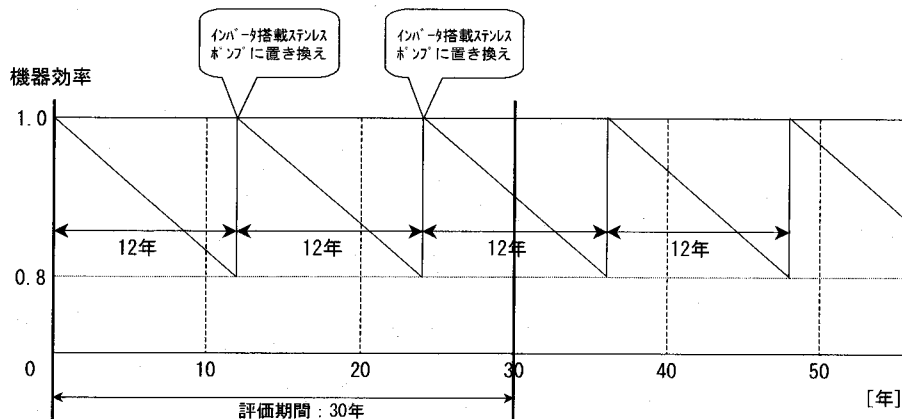
① 消費者コスト

新規のインバータ実装ポンプ価格を 314,000 [円/台]（実際の標準販売価格）と設定する．通常の機器更新では評価期間トータルで買い替え回数 2 回，一方アップグレード指向の製品管理では買い替えは 1 回である．

② CO₂ 排出量

産業連関表に基づく産業部門別の CO₂ 排出原単位¹⁴をもとに，新規ポンプの生産に伴う CO₂ 排出原単位を 1.1096 [kg-C/百万円]（産業部門「ポンプおよび圧縮機」）と設定する．これに上記ポンプ価格を乗じて，ポンプ 1 台あたり CO₂ 排出量を算出する．

■ 通常の機器更新



■ リユースとアップグレード指向の製品管理

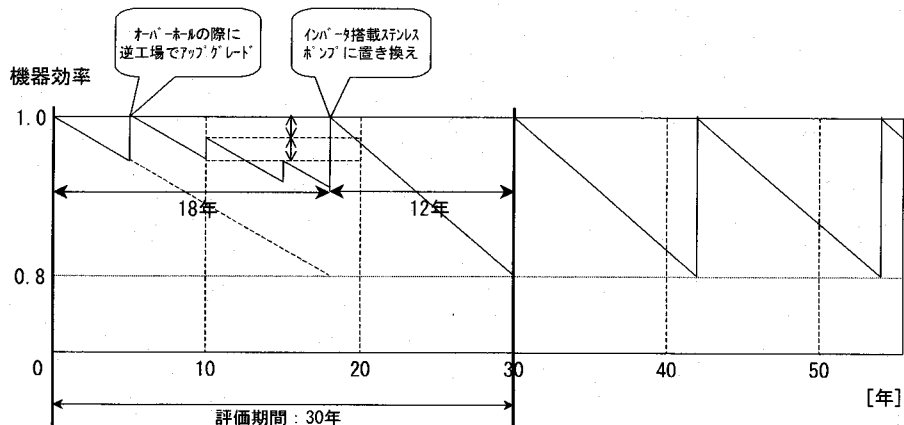


図 6.12 通常の機器更新とアップグレード型戦略の製品管理スケジュール

(2) メンテナンス、アップブレード

① 消費者コスト

通常のメンテナンス費用に、逆工場におけるアップグレード・サービスの追加費用を上乗せして算出する。通常のポンプのメンテナンス費用を約 54,500 [円/年]¹⁵、アップグレード用のインバータ実装モータ価格はヒアリングに基づいて 150,000 [円/台]と設定する。また、逆工場におけるオーバーホールの追加ランニングコストとして、ポンプ部の部品単位での分解と再生（表面研削）、再組立にかかる費用を計上する。分解・再生に要する時間はポンプ逆工場での実測調査に基づいて算出し、再組立の時間は分解時間に等しいと仮定する（表 6.4）。なお、機械運転にかかる費用は無視できる程度であるとして考慮せず、労務費のみを計上する。

② CO₂ 排出量

アップグレード用インバータ実装モータの新規製造に伴うものについて、先述した産業部門別 CO₂ 排出原単位をもとに追加モータの CO₂ 排出原単位を 1.0118 [kg-C/百万円]（産

表 6.4 逆工場におけるオーバーホールでの追加費用

工程	コスト項目	パラメータ	数値
分解	労務費	分解時間 (*1)	63.2 [分／台]
		作業人員	1 [人]
		労働単価	2,500 [円／人・h]
		小計	3,792 [円／台]
再生	労務費	作業時間 (*2)	61.24 [分／台]
		作業人員	1 [人]
		労働単価	2,500 [円／人・h]
		小計	3,674.4 [円/台]
再組立	労務費	(分解工程に等しいものとする)	
		小計	3,792 [円／台]
合計			11,258.4 [円／台]

*1 鋳鉄多段ポンプの分解実験調査に基づく平均分解時間

*2 ケーシング・中間ケーシング・ブラケット・羽根車・ケーシングカバー・吸込ケーシング・吐出ケーシング・軸受ケーシング・軸受カバー・バランスカバー・ベースを対象として行われたショットブラスト実験調査に基づく平均ブラスト時間

業部門「原動機」と設定し、これに上記モータ価格を乗じて算出する。逆工場における分解・再生時の機械装置の運転に伴う排出量は、無視できる程度であるとして考慮しない。

(3) 運用

① 消費者コスト

運用時のエネルギー消費量の算定に際して、対象とするポンプの稼動状況に基づいて電動機出力 2.2 [kW]、稼働時間 24 [h/日] とした上で、図 6.12 に示したように製品寿命 1 サイクルの間に機器エネルギー消費効率の係数が 1.0 から 0.8 まで低下することを想定する。また、インバータ実装の新規ポンプへの置き換えと、インバータ実装モータへのアップグレードによる省エネ効果は、導入事例から 36.2 [%]¹⁶と設定してエネルギー消費量を算定し、これに電力単価を乗じて電力コストを算出する。

② CO₂ 排出量

上記で算出されるエネルギー消費量に CO₂ 排出原単位 0.107 [kg-C/kWh]¹⁷を乗じて、運用時の CO₂ 排出量を算定する。

6.4.5 環境効率の改善効果の評価

図 6.13 に環境効率の改善効果とライフサイクル・コストの算定結果を示す。ここで、環境効率は都市施設 A における輸送流量が一定であるとして、そのサービスを産み出すときのエネルギー消費に起因するライフサイクル-CO₂ 排出量で表現している。アップグレード指向の製品及び施設管理は、追加的にサービスされたインバータ制御によって製品運転時のエネルギー消費が削減され、通常の機器更新に対してトータルで約 15 [%] の CO₂ 排出量削減が達成される。また、アップグレードのサービスに追加的なコストが発生するものの、製品運用の効率化によってトータルで約 14 [%] の費用削減に繋がる。その結果、環

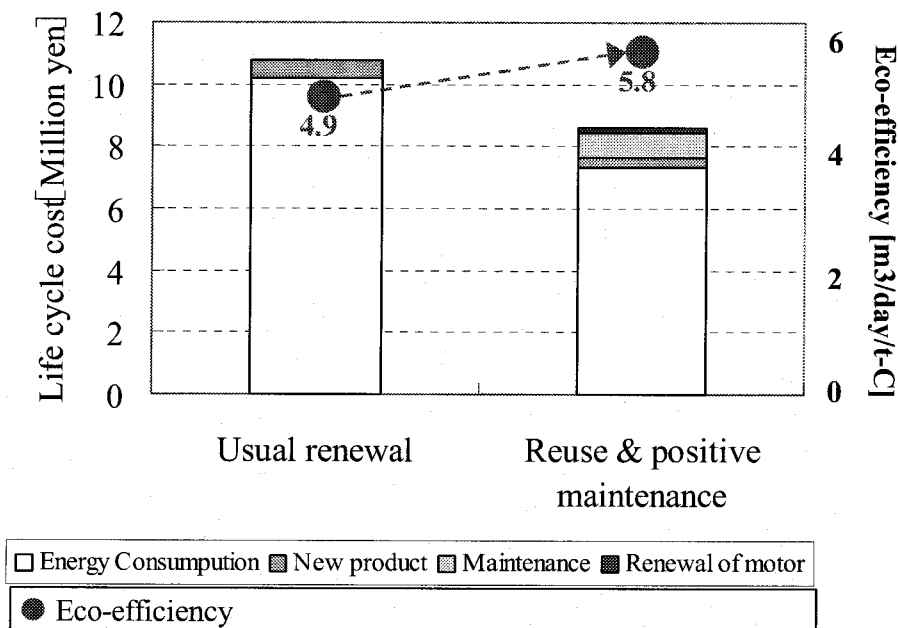


図 6.13 アップグレード型の製品管理による環境効率の向上

境効率も約 18 [%] 向上する結果となった。

すなわち、施設単位で産業ポンプのオーバーホールとアップグレードを展開し、省エネ型機器への更新のタイミングを図りながら製品の長寿命化を展開することで、省エネを進めながら資源消費を抑制し、同時に追加コストも回収できるという、環境効率の向上に繋がる製品サービスの提供の可能性が示された。

6.4.6 使用済み製品の循環形成方策の評価

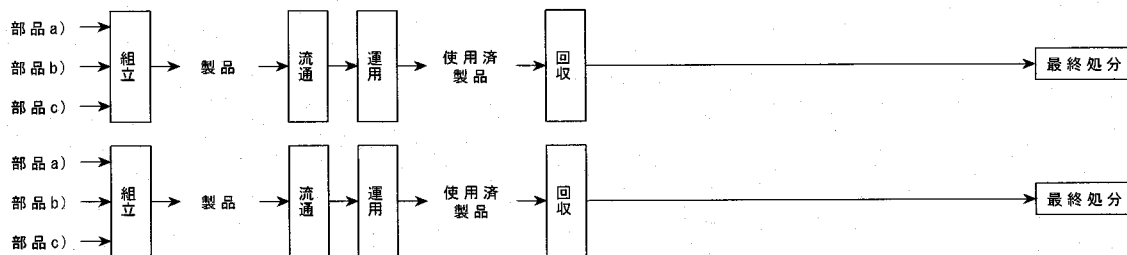
一方、通常の機器更新でも長寿命化サービスが図られる場合にも、いずれ製品としての寿命が尽きるため、逆工場を中心とした資源循環システムを整備しておく必要がある。そのとき、規範的には更に部品寿命を残存させたものを検品・選定して部品としてのリユースを優先させ、次に素材としてのリサイクルを図っていくことが望ましい。そこで、本項では使用済みポンプに対する循環形成方策としての部品リユースに着目し、その環境および経済的な側面での効果を評価する。具体的には、ライフサイクル・コストおよび CO₂ 排出量を指標として設定する。

(1) 比較評価のオプション

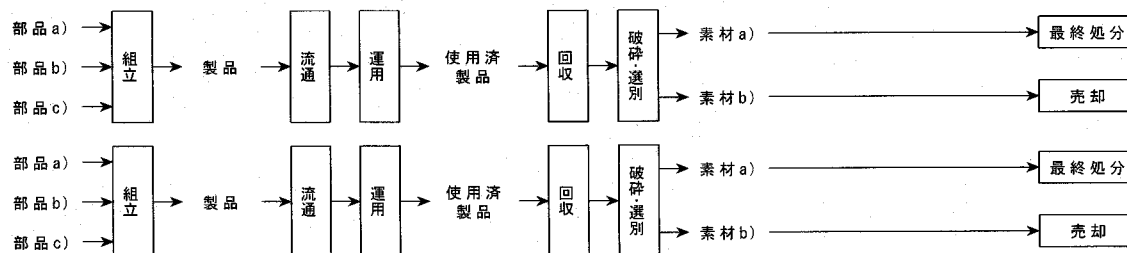
逆工場を核とした循環形成方策の比較評価シナリオを図 6.14 に示す。ここでは、回収された製品に対して最終処分・素材リサイクル・部品リユースの 3 つのオプションを設定している。

まず最終処分オプション A では、製造者によって一旦引き取られた使用済み製品は、廃棄物処理業者に受け渡されて最終処分される。オプション B では、逆工場の機能を現状の再資源化の主流であるマテリアル・リサイクルに限り、機械設備による破碎・選別を行うも

シナリオA



シナリオB



シナリオC

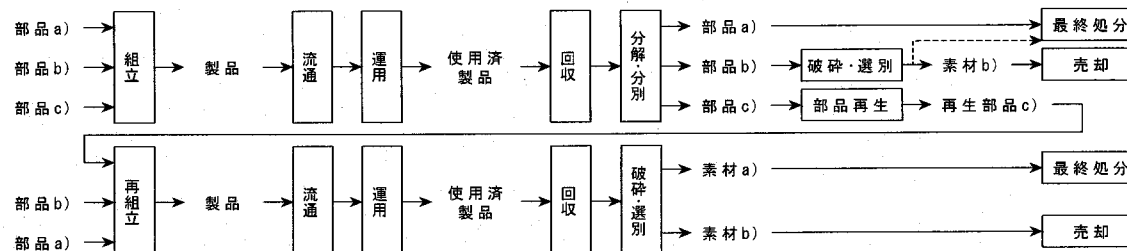


図 6.14 比較評価オプションの概要

のとする。一方、オプション C では、回収された使用済み製品を部品単位に分解・分別し、部品としての再利用が可能なものは再生処理が施された後に組立工程に組み込まれる構成を持つ。また、再生部品で構成されるリマニュファクチャリング製品が再び使用済みとなった際には、素材としてリサイクルされるものとする。

なお、図中の“a)”は最終処分対象となる部材を、“b)”は素材リサイクルの対象となる部材を意味する。“c)”は、まず部品リサイクルを検討し、次いで素材リサイクルを検討する部材を意味する。

(2) 設定条件

算定は、鋳鉄製の渦巻き多段ポンプを対象として行う。同ポンプの諸元を表 6.5 に示す。同ポンプの部品別重量データを入手することが困難であったため、同ポンプの素材構成¹⁸および逆工場の調査より明らかになったモータ部素材重量をもとに、ポンプ部とモータ部の重量を表 6.6 のように推計・設定した。

表 6.5 対象ポンプの諸元

	数値	単位
口径	50	[mm]
段数	7	[段]
電動機出力	5.5	[kW]
重量	200	[kg]

表 6.6 ポンプ部およびモータ部重量

材料	ポンプ部		モータ部	
	重量 [kg]	含有率 [%]	重量 [kg]	含有率 [%]
鋳鉄	129.2	74.2		
鋼	28.7	16.5	23.3	90.0
ステンレス	8.4	4.82		0
銅	6.13	3.52	2.27	8.76
アルミニウム	1.3608	0.782	0.0392	0.151
その他	0.365	0.210	0.235	0.907
合計	174.1	100.0	25.9	100.0

同ポンプのポンプ部は 44 種類・136 点の部品で構成されるが、そのうち物理的及び材質的な特徴から耐久部品に分類されるものには、吸込ケーシング・吐出ケーシング・中間ケーシング・軸受ケーシング・軸受カバー・バランス室カバー・羽根車・ベースがある。これらのうち、逆工場における部品劣化の状況などから判断し、流体制御を直接的に担うために磨耗が激しい羽根車と、腐食による錆が非常に強固な吸込ケーシング、吐出ケーシング、中間ケーシングについては上記分類の c) から除き、部品リユースは以下の 4 種類・6 部品を対象とすることとする。

- ☐ 軸受ケーシング ☐ 軸受カバー
☐ バランス室カバー ☐ ベース

また、b) に属するものは上記の部品を除く鉄・非鉄金属部品とし、その他のゴム・樹脂系部品は a) に属すると設定する。モータ部については、逆工場実験プラントにおいて分解実験は行われたものの、部品再生の実験は行われず、部品としての再生利用を評価するためのデータが得られていない。したがって、本分析においてはモータ部の部品再生利用については検討しないこととする。すなわち、モータ部は逆工場においてポンプ部と分離された後に部品単位に分解されず、構成部材は最終処分される a) と破碎による素材リサイクルされる b) に属するものとする。

(3) 各工程における算定条件

① 製造工程

- ✓ 部材 a), b) に分類される部品の投入は 3 つのオプションに共通であるため、これらに由来するコスト及び CO₂ 排出量は算出せず、部品 c) のみを算定対象とする。
- ✓ 部品製造は同一の産業工場内で行われる。すなわち、部品製造工場と組立工場間の輸送によるコスト及び CO₂ 排出量は考慮しない。
- ✓ 製品の組立に係わる労務費や機械運転費は、オプション A～C において異なる。
- ✓ 新規部品から構成されるオプション A および B の製品と、新規部品及び再生部品から構成されるオプション C の製品の市場価値に差はなく、ここでは製品販売による利潤は計上しない。
- ✓ オプション C において組立工程に投入される再生部品 c) は、逆工場における分解や

				利益		販売価格
				販売費 (7.0)	営業費 (17.7)	
				一般管理費 (10.7)		
		間接経費 (10.2)	製造間接費 (13.6)	製造原価 (82.3)		
		間接労務費 (2.0)				
		間接材料費 (1.4)				
直接経費 (13.3)		製造直接費 (68.7)				
直接労務費 (11.7)						
直接材料費 (43.7)						

算定に用いたデータと結果を表 6.7 に示す。なお、部品価格については具体的な数値を記載せず、桁数で表示している。また、以降表中の「Ⅰ」及び「Ⅱ」は、それぞれ第一期目の製品、第二期目の製品を表すものとする。

■ CO₂ 排出量

計上する CO₂ は、製造部品に内包された排出分、すなわち部品製造に由来して直接・間接的に排出されるものとする。算出にあたって、産業連関表をもとに森口ら(2000)²¹が導出した産業部門別の CO₂ 排出原単位を用いる。同原単位は、[t-C/百万円-生産者価格] で表され、各財の生産者価格あたりの直接・間接的に排出される CO₂ を算出することができる。これを用いて、部品製造に係わる CO₂ 排出量は以下のように定義する。また、算定に用いた原単位と結果を表 6.8 に示す。

$$E_{parts} = \sum (e_i \times P_p)$$

E_{parts} : 部品製造に係わる CO₂ 排出量 [t-C]

i : 部品 p が属する産業部門

p : 部品種

e_i : 産業部門 i における CO₂ 排出原単位 [t-C/百万円]

P_p : 部品価格 [円]

② 流通・運用・回収工程

- ✓ 製品の流通段階における諸々の作業は、全てのオプションにおいて同一であり、流通に係わるコストや CO₂ 排出量に差はない。
- ✓ 再生部品を用いて製造されるオプション C の製品は、新規部品から構成されるオプション A および B の製品と同等の性能を有する。つまり、再生部品を用いることで製品の運転効率が低下する、あるいは物理的寿命が短くなるなどの影響はないものと仮定する。
- ✓ 使用済み製品は回収拠点に持ち込まれ、廃棄目的あるいは再資源化目的にかかわらず一旦逆工場（再資源化拠点）まで回収される。オプション A では、逆工場まで回収された後に最終処分場まで輸送され、B および C では再生処理される。

表 6.8 部品製造に係わる CO₂ 排出量

分類	部品名	部品価格 [円]	産業部門	排出原単位 ((I-A)型) [t-C/百万円]	システム (Ⅰ/Ⅱ)		
					A	B	C
c)	バランス室カバー	*****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
	軸受ケーシング	*****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
	軸受ケーシング	*****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
	軸受カバー	****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
	軸受カバー	****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
	ベース	*****	铸铁品及び鍛工品 (鉄)	4.5246	×2	×2	×1
総 CO ₂ 排出量 [t-C]					0.05956	0.05956	0.02978

表 6.9 シナリオ毎の部材分類別重量（ポンプ部のみ）

素材	シナリオ A		シナリオ B				シナリオ C				
	I	II	I		II		I			II	
	a)	a)	a)	b)	a)	b)	a)	b)	c)	a)	b)
鋳鉄	129.2	0	0	129.2	0	129.2	0	74.5	54.7	0	129.2
鋼	28.7	0	0	28.7	0	28.7	0	28.7	0	0	28.7
ステンレス	8.4	0	0	8.4	0	8.4	0	8.4	0	0	8.4
銅	6.13	0	0	6.13	0	6.13	0	6.13	0	0	6.13
アルミニウム	1.36	0	0	1.36	0	1.36	0	1.36	0	0	1.36
その他	0.365	0	0.365	0	0.365	0	0.365	0	0	0.365	0
合計	174.1	0	0.365	173.7	0.365	173.7	0.365	119.09	54.7	0.365	173.7

すなわち、本分析では、流通、運用及び回収工程におけるコスト及び CO₂ 排出量はオプション間で全て同一であると考え、評価対象から除くこととする。

③ 廃棄・再資源化工程

- ✓ オプション A では、逆工場まで回収された使用済み製品は逆有償で引き取られ、B および C の再生素材は有償で引き取られる。一方、オプション C の再生部品を巡る金銭的取引は行われず、再組立に投入される。
- ✓ 逆工場を構築した際には新規に設備投資されるが、これらの設備に係わるコスト（設備償却費、維持・管理費等）及び CO₂（設備の製造時）は考慮しない。
- ✓ 分類 a)～c)に属するポンプ部部品の素材別重量を、表 6.9 のように設定する。重量は素材別に集計的に把握されているため、同一素材が複数の分類に分かれてしまっている場合には、素材別重量と部品価格から按分して a)～c)に配分している。

■ コスト

廃棄・再資源化コストは、使用済み製品の最終処分や分解・破砕、あるいは分解後の再生処理段階での労務費及び機械運転に係わる電力費、廃棄物や再生材の輸送段階での労務費及び車両運転に係わる燃料費、製品あるいは部材の取引に係わる料金（有償／逆有償）とし、以下のように定義する。

$$C_{inverse} = \Sigma(n \times P_M \times T_i + P_E \times w \times T_j) + \Sigma((M/Z) * (n \times P_M \times L/V + (P_F/F) \times L) + \Sigma(P_{k,recycle} \times M_{k,recycle} + P_{j,waste} \times M_{j,waste}))$$

$C_{inverse}$: 廃棄/再資源化コスト

i : 輸送を除く工程の種類

j : 機械設備の種類

n : 作業人員 [人]

P_M : 労働単価 [円/h・人]

T_i : 工程 i に要する作業時間 [h]

P_E : 電力単価 [円/kWh]

W_j : 機械設備 j の消費電力 [kW]
 T_j : 機械設備 j の運転時間 [h]
 Z : 輸送車両の積載可能重量 [kg]
 M : 輸送重量 [kg]
 L : 輸送距離 [km]
 V : 輸送車両の平均速度 [km/h]
 P_F : 燃料単価 [円/l]
 F : 輸送車両燃費 [km/l]
 k : 素材種
 $P_{k,recycle}$: 素材 k の再生品単価 [円/kg]
 $M_{k,recycle}$: 素材 k の素材リサイクル量 [kg]
 P_{waste} : 廃棄物の最終処分単価 [円/kg]
 M_{waste} : 廃棄物量 [kg]

廃棄・再資源化工程の分解に係わるコストの算定に使用したデータおよび結果を表 6.10 に示す。データは、基本的に逆工場実験プラントでの実測結果をもとにしている。逆工場まで回収されてきた使用済みポンプはポンプ部とモータ部に分離された後、ポンプ部は更に部品単位に分解され、モータ部は破碎されると設定している。したがって、この表で示す分解時間には、ポンプ部とモータ部の分離およびポンプ部の分解に要した時間が含まれている。

部品再生に係わるコストはショット・ブラスト作業のみを計上する。算定に使用したデータ及び結果を表 6.11 に示す。なお、表中のショットブラスト時間は、逆工場実験プラントでの実測結果をもとにし、表 6.12 のようにして算出している。

表 6.10 分解工程のコスト

工程	コスト項目	パラメータ	単位	シナリオ C (I)
分解	労務費	分解時間	[sec/台]	3,789.12
		作業人員	[人]	1
		労働単価	[円/人・h]	2,500
		小計	[円/台]	2,631.33
その他	労務費	作業時間	[sec/台]	220.085
		作業人員	[人]	1
		労働単価	[円/人・h]	2,500
		小計	[円/台]	152.84
	機械運転費	運転時間	[sec]	100.085
		消費電力	[kW]	15
		電力単価	[円/kWh]	17
		小計	[円/台]	7.089
合計			[円/台]	2,791.26

表 6.11 部品再生工程のコスト

工程	コスト項目	パラメータ	単位	シナリオ C (I)
ブラスト	労務費	ブラスト時間	[min /台]	28.99
		作業人員	[人]	1
		労働単価	[円/人・h]	2,500
		小計	[円/台]	1,207.9
	機械運転費	運転時間	[min]	28.99
		消費電力	[kW]	15
		電力単価	[円/kWh]	17
		小計	[円/台]	123.21
		合計		[円/台]

次いで、破碎・選別に係るコストの算定に使用したデータ及び結果を表 6.13 に示す。ここでのデータは、既存再資源化施設の調査結果をもとに算出した処理量あたり労務費及び電力費の原単位を使用している。

一方、廃棄物及び再生材の輸送工程に係わるコストの算定に使用したデータ及び結果を表 6.14 および表 6.15 に示す。輸送距離は、逆工場から最終処分場までを 50 [km]、再生材利用先までを 20 [km] と設定し、逆工場前の戻り分も考慮する。

表 6.12 分解部品のブラスト時間

部品	個数 [個]	実測による原単位 [分/個]	ブラスト時間 [分]
軸受ケーシング	2	3.29	6.58
軸受カバー	2	3.29	6.58
バランスカバー	1	3.83	3.83
ベース	1	12.0	12.0
合計			28.99

表 6.13 破碎・選別工程のコスト

工程	コスト 項目	パラメータ	単位	シナリオ B		シナリオ C	
				I	Ⅱ	I	Ⅱ
破碎・ 選別	労務費	処理量あたり労 務費	[円/t]	3,304	3,304	3,304	3,304
		処理量	[kg/台]	200	200	25.9	200
		小計	[円/台]	660.8	660.8	85.574	660.8
	電力費	処理量あたり電 力費	[円/t]	2,375	2,375	2,375	2,375
		処理量	[kg/台]	200	200	25.9	200
		小計	[円/台]	475.0	475.0	61.513	475.0
		合計	[円/台]	1,135.8	1,135.8	147.086	1,135.8

表 6.14 輸送工程のコスト（廃棄物）

工程	コスト 項目	パラメータ	単位	シナリオ A	シナリオ B	シナリオ C
				I / II	I / II	I / II
輸送	労務費	可載重量 ²²	[kg]	2,700	2,700	2,700
		積載重量	[kg/台]	200	0.6	0.6
		作業人員	[人]	1	1	1
		労働単価	[円/人・h]	2,500	2,500	2,500
		輸送距離	[km]	50 (×2)	50 (×2)	50 (×2)
		車両平均速度	[km/h]	20	20	20
		小計	[円/台]	925.93	2.78	2.78
	燃料費	積載可能重量	[kg]	2,700	2,700	2,700
		積載重量	[kg/台]	200	0.6	0.6
		輸送距離	[km]	50 (×2)	20 (×2)	20 (×2)
		燃料単価	[円/l]	80	80	80
		車両燃費 ²³	[lm/l]	5.5	5.5	5.5
		小計	[円/台]	107.74	0.323	0.323
	合計			1,033.67 (×2)	3.103 (×2)	3.103 (×2)

表 6.15 輸送工程のコスト（再生材）

工程	コスト 項目	パラメータ	単位	シナリオ B		シナリオ C	
				I	II	I	II
輸送	労務費	可載重量	[kg]	2,700	2,700	2,700	2,700
		積載重量	[kg/台]	199.4	199.4	144.7	199.4
		作業人員	[人]	1	1	1	1
		労働単価	[円/人・h]	2,500	2,500	2,500	2,500
		輸送距離	[km]	20 (×2)	20 (×2)	20 (×2)	20 (×2)
		車両平均速度	[km/h]	20	20	20	20
		小計	[円/台]	369.26	321.67	267.96	321.67
	燃料費	積載可能重量	[kg]	2,700	2,700	2,700	2,700
		積載重量	[kg/台]	199.4	199.4	144.7	199.4
		輸送距離	[km]	20 (×2)	20 (×2)	20 (×2)	20 (×2)
		燃料単価	[円/l]	80	80	80	80
		車両燃費	[lm/l]	5.5	5.5	5.5	5.5
		小計		42.97	42.97	31.18	42.97
	合計			412.23	412.23	299.14	412.23

表 6.16 部材の取引に係わる利潤

素材	単価 [円/kg]	重量 [kg]			
		シナリオ A	シナリオ B	シナリオ C	
		I / II	I / II	I	II
鉄類	4	0	181.2	97.8	181.2
ステンレス	50	0	8.4	8.4	8.4
銅	60	0	8.4	8.4	8.4
アルミニウム	80	0	1.4	1.4	1.4
その他	-29.6	200	0.6	0.6	0.6
合計		-5,926 (×2)	1,743.0 (×2)	1,409.4	-1,743.0

なお、再生部品は同敷地内の組立工場へ運搬されるものとし、輸送コストは考慮していない。

最後に、廃棄材や再生材などの部材の取引に係わる利潤の算定に使用したデータ及び結果を表 6.16 に示す。最終処分対象となるその他の材については、4t 車（積載可能重量 2.7t）1 台あたり 80,000 [円] から値を算出している。

■ CO₂ 排出量

計上する CO₂ は、各工程における電力消費と輸送に伴う燃料消費に伴うものとし、以下のように定義する。また、算定に使用したデータ及び結果を、電力起源のものについては表 6.17 に、燃料起源のものについては表 6.18 に示す。

$$E_{inverse} = \sum (i, j: e_p \times W_j \times T_j) + \sum ((M/Z) \times e_f \times (L/F))$$

$E_{inverse}$: 廃棄/再資源化に係わる CO₂ 排出量 [g-C]

i : 輸送を除く工程の種類

j : 機械設備の種類

e_p : 電力の CO₂ 排出原単位 [g-C/kWh]

W_j : 機械設備 j の消費電力 [kW]

T_j : 機械設備 j の運転時間 [h]

M : 輸送重量 [kg]

Z : 輸送車両の積載可能台数 [台]

e_f : 燃料（軽油）の CO₂ 排出原単位 [g-C/l]

L : 輸送距離 [km]

F : 輸送車両燃費 [km/l]

表 6.17 廃棄・再資源化工程の CO₂ 排出量（電力起源）

工程	パラメータ	単位	シナリオ B	シナリオ C	
			I / II	I	II
分解	運転時間	[sec/台]	-	100.085	-
	消費電力	[kW]	-	15	-
	CO ₂ 排出原単位 ²⁴	[g-C/kWh]	-	107	-
	小計	[円/台]	-	44.62	-
部品再生	運転時間	[min/台]	-	28.99	-
	消費電力	[kW]	-	15	-
	CO ₂ 排出原単位	[g-C/kWh]	-	107	-
	小計	[円]	-	775.48	-
破碎・破碎	処理量あたりエネルギー消費量	[kWh/t]	139.7	139.7	139.7
	処理量	[kg/台]	200	25.9	200
	CO ₂ 排出原単位	[g-C/kWh]	107	107	107
	小計	[円/台]	2,989.58	387.15	2,989.58
合計			2,989.58 (×2)	1,162.63	2,989.58

表 6.18 廃棄・再資源化工程の CO₂ 排出量（燃料起源）

工程	パラメータ	単位	シナリオ A	シナリオ B	シナリオ C	
			I / II	I / II	I	II
廃棄物輸送	可載重量	[kg]	2,700	2,700	2,700	2,700
	積載重量	[kg/台]	200	0.6	0.6	0.6
	輸送距離	[km]	50	50	50	50
			(×2)	(×2)	(×2)	(×2)
	車両燃費	[km/l]	5.5	5.5	5.5	5.5
	CO ₂ 排出原単位 ²⁵	[g-C/l]	740.52	740.52	740.52	740.52
	小計		997.33	2.992	2.992	2.992
再生材輸送	可載重量	[kg]	-	2,700	2,700	2,700
	積載重量	[kg/台]	-	199.4	144.7	199.4
	輸送距離	[km]	-	20	20	20
			-	(×2)	(×2)	(×2)
	車両燃費	[km/l]	-	5.5	5.5	5.5
	CO ₂ 排出原単位	[g-C/l]	-	740.52	740.52	740.52
	小計		-	397.74	288.63	397.74
合計			997.33 (×2)	400.73 (×2)	291.62	400.73

(4) ライフサイクル分析の結果および考察

各オプションのライフサイクル・コストおよびライフサイクル-CO₂ 排出量の算出結果をそれぞれ図 6.16、図 6.17 に示す。

まず、経済的側面の効果について考察すると、最終処分オプションは素材リサイクルした場合に比べてライフサイクル・コストは高くなる。将来的に最終処分単価が増大するにつれて、リサイクルの優位性は更に増すと考えられる。また、部品製造に係わるコストがライフサイクル・コストにおいて支配的であることが明確である。したがって、本分析で設定した条件のもとで、使用済みとなった製品を分解して部品を取り出し、再生して再利用するオプション C は、A に対して約 57%、B に対して約 43%のコスト削減効果があり、経済的な優位性が生じることが分かる。

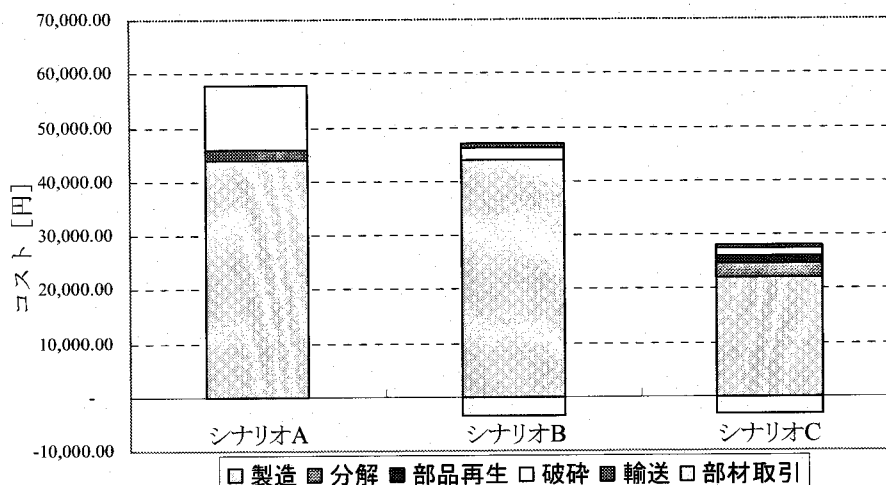


図 6.16 LC-コストの算出結果

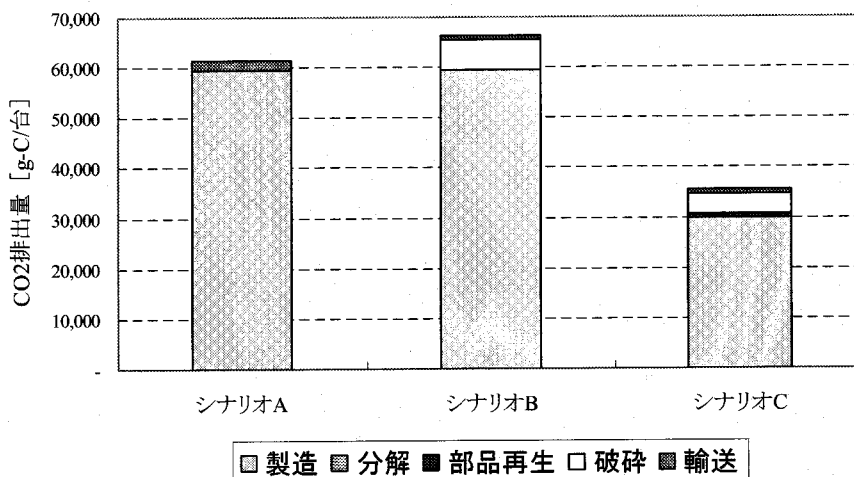


図 6.17 LC-CO₂の算出結果

本分析に使用した逆工場データは実測に基づくものであるが、例えば分解時間に関しては、作業が最も効率化した状態を想定してその時間を計測している。したがって、一般に使用済み製品の分解や部品再生は最終処分や破碎による素材リサイクルに比べて高コスト構造になるとされているが、将来的に逆工場が社会化し、工程の効率化が推進されるにつれて、むしろ部品リユースによる利潤の方が大きくなっていく可能性が示された。

一方、環境的側面としての CO₂ 排出量においても、部品製造に係わるものが支配的であることが分かる。したがって、マテリアル・リサイクルより上位の部品リユースを進めることで、調達部品に内包された CO₂ 排出分が削減され、オプション C では B に対してライフサイクル-CO₂ 排出量が約 47%削減されることになる。

すなわち、メンテナンスやアップグレードによって長寿命化が図られた製品に対して、更に使用済みとなった段階で部品リユースを優先させる逆工場の取り組みを推進し、多重な循環ループの形成を図ることによって、より環境効率や資源生産性を高めることができると言える。

以上のような製品－物質管理としてリユースを展開するときには、ユーザーに対する品質保証が重要な課題となるが、そのためには部品の余寿命予測の技術を確認していかなければならない。しかし、多くの工業製品の分野では、部材の余寿命診断を行う技術システムが未成熟である。ポンプや前節で扱ったコンプレッサーなど、流体輸送や駆動といった基幹的な働きを担う機能製品・ユニットでは、それが使われてきた環境状況やどの程度の運転率で使われてきたか、あるいはどの程度の負荷がかけられてきたかなど、運転履歴に関連した情報が重要な判定材料となる。したがって、リユースの事業化や社会化を進める上で、運転履歴情報の管理と活用技術システムが不可欠であると言える。また、ポンプや前節で扱ったコンプレッサーなど、流体輸送や駆動といった基幹的な働きを担う機能製品・ユニットでは、運転負荷による部品の磨耗や腐食を完全に回避することはできないため、第 4 章で示したカーエアコン用コンプレッサーに見られるような、耐磨耗技術や品質保持技術などの予防保全の技術開発を進めていく必要がある。

6.5 本章のまとめ

本章では、リユースを中心とした製品ライフサイクル管理の形態を示した上で、まず家電製品のコンプレッサーを対象として、省エネ化の技術革新のもとで機能ユニットのリユースが製品利用時のエネルギー消費に及ぼす影響を評価した。その結果、省エネの技術革新の速度が緩やかになる期間であれば、リユースとメンテナンスを組み合わせる機器延命化を図る製品管理によって、機器更新型シナリオに比べて資源とエネルギーの両側面においてリユースが優位となる可能性が示された。また、製品補修による長寿命化の消費者コストの推計も行い、消費者が機器更新に際して部品リユース型の製品延命化を選択することで、長期的な追加投資を抑えることが可能となることを見出した。

次いで、産業機械装置が集積する都市施設を具体的に設定して、そこで実際に運用される産業ポンプの稼動状況に基づき、省エネと省資源を同時達成しうる製品更新管理サービスを構想し、その展開による環境効率の改善効果を評価した。その結果、施設単位で産業

ポンプのオーバーホールとアップグレードを展開し、省エネ型機器への更新のタイミングを図りながら製品の長寿命化を展開することで、省エネを進めながら資源消費を抑制し、同時に追加コストも回収できるという、環境効率の向上に繋がる製品サービスの提供の可能性を示すことができた。

本章で扱った省資源と省エネのトレードオフの問題は、電気やガス、水など都市活動を支えるユーティリティの制御や輸送、利用を介してエネルギーを消費する産業機械装置に共通性の高いものである。したがって、こうした製品分野では、製品の運用と廃棄後の回収・資源循環をトータルで管理し、都市における物質代謝を健全化する製品政策を展開することが望まれる。

¹ 例えば、藤本、梅田、増井、山際他：迅速循環による地球温暖化防止の可能性の検討－第1報 コンセプトと評価結果－、エコデザイン2002ジャパンシンポジウム論文集, p.268-271, 2002.

² 小林英樹：『製品ライフサイクルプランニング』、オーム社, p.43-44, 2003.

³ 内閣府経済社会総合研究所：主要耐久消費財の買替え状況（全世帯）、消費者動向調査（平成14年9月実施調査結果）、<<http://www.esri.cao.go.jp/jp/stat/shouhi/0209shouhi.html>>, 2002.

⁴ 兵庫県立生活科学研究所：家電製品の長期使用に関する調査研究、兵庫県立生活科学研究所研究報告第9号, p.9, 1994.

⁵ 森口祐一、南齋規介編：産業連関表によるエネルギー・二酸化炭素排出原単位'95, 2000.

⁶ 稲葉敦：冷蔵庫のライフサイクルインベントリ、環境管理, Vol.31, No.7, p.91-97, 1996.

⁷ 野田、木村他：W冷却システム省エネ冷蔵庫、松下テクニカルジャーナル, Vol.45, No.3, p.20-26, 1999.

⁸ 木村、橋本他：省エネ基準達成率200%ノンフロン冷蔵庫、松下テクニカルジャーナル, Vol.49, No.1, p.9-13, 2003.

⁹ 中島謙一、井野博満、原田幸明：LCIにおけるマテリアルリサイクルの取り扱い方法の類型化、第4回エコバランス国際会議講演集, p.291-294, 2000.

¹⁰ 成田暢彦、匂坂正幸、稲葉敦：銅製品生産システムにおけるCO₂排出のライフサイクルインベントリ分析、資源と素材, Vol.117, No.8, p.671-676, 2001.

¹¹ 松野泰也、稲葉敦：わが国における電力10社の受電端基準電力のライフサイクルインベントリ、日本エネルギー学会誌, Vol.77, No.12, p.1162-1176, 1998.

¹² (財)産業創造研究所：平成9年度 家庭設置型小規模分散型エネルギーシステムに関する調査報告書, 1998.

¹³ 盛岡通編著：「第2編 産業工場での循環複合体の構築」, p.87, 「社会実験地での循環複合体のシステム構築と環境調和技術の開発」CREST最終報告書, 2001.

¹⁴ 森口、南齋編：前掲5

¹⁵ 金子、竹林、吉田、盛岡：ポンプを指標製品とした環境ラベルの提案、エコデザイン2000ジャパンシンポジウム論文集, p.262-264, 2000.

¹⁶ 高田秋一、堀川武廣共著：『ポンプの選び方・使い方』、オーム社, p.156-159, 2000.

¹⁷ 環境情報科学センター編：『ライフサイクルアセスメントの実践』、化学工業日報社, p.107, 1996.

¹⁸ H.Okazaki, K.Kaneko, M.Takebayashi: *Eco-Design, Take Back and Maintenance System of Industrial Pumps*, Proceeding of CCP International Workshop 1999, p.97, 1999.

¹⁹ 荏原サービス：「陸上ポンプ部品価格表」より

²⁰ 人見勝人：『生産システム工学』、共立出版, p.182, 1990.

-
- ²¹ 森口祐一，南齋規介編著：産業連関表によるエネルギー・二酸化炭素排出原単位’95，2000.
- ²² 廃棄物学会編：『廃棄物ハンドブック』，オーム社，1997.
- ²³ 元田欽也，大山長七郎：『わかりやすい廃棄物処理・リサイクルの実務計算』，オーム社，1999.
- ²⁴ 環境情報科学センター編：『ライフサイクルアセスメントの実践』，化学工業日報社，p.107，1996.
- ²⁵ 総務省郵政事業庁：環境負荷低減型情報通信システムの普及方策に関する調査研究，
<<http://www.mpt.go.jp/pressrelease/japanese/tsusin/0404j502.html>>，1996.

第7章 結論

7.1 本論文の総括と結論

本論文では、高度に工業化が進んだ産業社会における都市活動・都市生活を支える産業機械製品を対象として、その製品の経路に沿って循環形成や環境負荷の削減を図る製品連鎖マネジメントの構想とその評価を行い、産業社会が持続可能な生産と消費を実現するための具体的な方策を導き出すことを目指してきた。その過程においては、特に産業ポンプの逆工場社会実験地や家電製品のリサイクル工場といった産業エコロジーの実践の場との連携を重視し、産業主体（組立産業）が循環形成の高度化を図ろうとするときに直面する技術的・社会的な制約や意思決定の難しさなどの問題把握を進めてきた。

第1章では、工業化が進展した産業社会における浪費的かつ過剰の資源利用形態を見直し、持続可能な生産と消費のシステムへと構造的な転換を図る必要性を指摘し、個々の産業や製品分野ではライフサイクルの各断面で環境効率の向上を図る製品政策の展開が重要であることを述べた。

第2章では、まず持続可能な産業システムの形成に向けた理論的かつ実践的なアプローチについて、産業エコロジーと循環複合体を中心としてその概念を整理した。ここでは特に、都市施設や地域などの空間におけるエネルギー・物質代謝の健全化を図るアプローチと、産業活動によって生産される製品やサービスの連鎖に付随する資源消費や環境負荷排出の低減あるいは最小化を図るアプローチを併せて展開することが、環境効率や資源生産性を高めるときに重要となることを示した。また、産業エコロジーを推進するとき、エコデザインやリユースといった取り組みが有効な手段となることに言及した。

次いで、製品管理政策を実践し産業のエコロジー化を図る上で不可欠となる拡大生産者責任の原則について、その基本的な枠組みや機能を示した上で、循環形成を支援する我が国の法制度の仕組みと資源循環の高度化に対するインセンティブ機能の問題点を示した。

第3章では、まず産業工場や都市施設に集積する産業機械製品が、各種ユーティリティを制御あるいは輸送することで都市活動や都市生活を支え、社会において重要な役割を果たしている一方で、その生産や運用に伴って物質とエネルギーの面で多大な環境インパクトをもたらしていることを示した。

次いで、こうした産業機械の製品経路に沿って環境効率を高める方策を講じる製品連鎖マネジメントを構想し、特に製品設計・運用・使用後の3つの断面において、それぞれ製品の環境適合を高めるエコデザインの開発、製品の寿命管理やエネルギー消費負荷の低減管理を手掛ける製品付随サービスの提供、逆工場を核とした多様な循環形成を中心的な戦略として提示した。その上で、持続可能な生産と消費の実現に向けて、特に組立産業が中心となって製品の運用と廃棄後の資源循環を包括的に管理することを通じて、生産と消費の連鎖におけるエネルギー・資源の消費を最小化する社会サービスの開発が重要になることを論じた。

第4章では、製品ライフサイクル全般にわたる環境適合を製品設計の側面から支えるエ

コデザインについて、まず産業ポンプを対象として、その使用済み製品の分解実験の実測調査に基づいて易分解性設計の具体的な方策を見出した。また、易分解性設計の導入による分解時間削減の効果が導かれたとともに、ある一定以上の効果を発現するためには、製品の全体フレーム自体の設計を環境に配慮したものへと転換していく必要性を述べた。

次に、家電製品を対象とした分析では、手分解実験を通じて製品－部品インベントリーの構造化を図るとともに、その分解特性を明らかにした。その中で、リユースを念頭に置いた製品設計が、従来の設計事項との間にトレードオフを生じさせる問題点を指摘した。その上で、製品の環境品質をトータルで高めるための共存・協調設計の必要性を論じ、将来的にリサイクルの高質化やメンテナンスが重視される社会において、リユース性を高める設計がもたらす波及的・相乗的な効用について述べた。

第 5 章では、逆工場を核とした家電製品のリユースシステムを構想するにあたり、まずリユースシステム設計の基本的な視点と枠組みを提案した。すなわち、リユースによって得られる便益（あるいは回避される費用）とリユースに伴う追加的な費用の観点に基づき、「リユースする価値（相応しさを表す軸）」と「リユース適合性（しやすさを表す軸）」の 2 つの視点からユニット・部品のリユース性を評価する枠組みである。また、前者は更に「新たな付加価値をもたらす社会的な価値」と「ユニット・部品に集約された価値」に、後者は「製品設計の側面」と「市場の側面」に分節化して提示した。

次に、リユースを社会に深化させることによって製品連鎖の関連主体にもたらされる社会的な効果を示した。具体的には、製品技術の革新・社会サービスの創出・リサイクルとの相乗効果・生産管理の効率化に波及することを見出した。

更に、リユースシステム設計の構想段階として、input・process・output に焦点を当て、それぞれの断面における具体的な選択肢や課題を示した。特に家庭用冷蔵庫において基幹的な役割を担うコンプレッサーは、エネルギー・資源集約型のユニットであり、かつ労働集約的に付加価値が高められているため、リユースによってその機能を使い切ることによって得られる便益や回避される費用が大きいことを示すとともに、リユースする際には機器運用時のエネルギー消費への影響に配慮・対応することが重要になることを指摘した。また、製品管理の体制や利用のされ方といったソフト面に着目して、リユース品に対して高い受容性や選好性を持ちうる市場要件を提示し、同一製品の補修用サービス部品としての転用や、二重用途を持つ汎用ユニットとして他の製品分野へと階層的にリユースするシステムを提案した。

第 6 章では、逆工場の推進と連動して産業機械の寿命管理とエネルギー消費負荷の低減管理を図る製品管理サービスについて、まず家電製品の冷蔵庫を対象として、使用済みコンプレッサーを補修用部品としてリユースし、製品の長期利用を促すサービスを構想した。そこでは、省エネ化の技術革新のもとで機能ユニットのリユースが運用時のエネルギー消費に及ぼす影響を LCA 評価し、省エネ進展が緩やかになる期間であれば、リユースとメンテナンスを組み合わせる機器延命化を図る製品管理サービスが資源およびエネルギー消費削減の両側面に対して有効となることを明らかにした。同時に、ユーザーの総支払いコストが製品の買い替えとの比較で相対的に小さくなることから、リユースやメンテナンス指向の製品管理に対する選好が高まる可能性を示した。

次いで、産業機械製品が集積する都市施設を具体的に設定し、そこで運用される産業ボ

ンプを対象として、実際の稼動状況に基づいたオーバーホールとアップグレード型の製品管理サービスを提案した。その効果を環境面と経済面から評価した結果、施設単位で産業ポンプの環境ファシリティ・マネジメントを展開することによって、運転時の省エネ化を進めながら資源消費を抑制して同時に追加コストも回収できるという、環境効率の高い持続可能な産業社会におけるサービス提供の方針を導き出すことができた。

以上のような分析や考察を受けて、環境効率の高い持続可能な生産と消費の産業システムの実現に向けた製品連鎖管理方策として、以下のような取り組みの必要性を導き出すことができる。

(1) 製品利用の最適化と使用後の循環形成を包括的に管理する産業への転換を図ること

都市活動を支える産業機械製品は、生産に伴う資源消費や製品利用でのエネルギー消費、使用後の廃棄物排出などの局面で多大な環境インパクトをもたらす。こうした製品の生産と消費の連鎖におけるエネルギー・資源の消耗を低減あるいは最小化し、環境効率の高い産業システムを構築するためには、製品利用の最適化と使用後の循環形成を包括的に管理する製品連鎖マネジメントの展開が重要となる。

すなわち、組立産業や製品提供側がメンテナンスやアップグレードを通じた製品の寿命管理と、エネルギー消費装置の負荷低減管理を図ることで、ユーザー満足を高めつつ資源消費の抑制（リデュース）やリユースを推し進めるエンジニアリング・サービスを開発し、機器単体だけでなく施設単位での環境ファシリティ・マネジメントも手掛けていくことである。

(2) 生産管理の効率化やサービスの充実化の手段としてリユースを展開すること

ユニット（中間組立品）や部品をリユースすることは、補修用部品の保管や非効率な新造に伴うコストの削減に繋がり、経営戦略として製品連鎖上の私的費用のスリム化を図るときに一つの有効な手立てとなる。

また、メンテナンス・サービスでリユース品を補修用部品として転用することによって国内での迅速な部品調達が可能となり、しかもそれをより安価でユーザーに供給できれば、既存サービスの高度化が図られることになる。とりわけ、家電製品のように生産拠点の海外移転が進行し、補修用部品の調達が今後更に困難になることが予想される製品分野では、アフター・サービスの充実化を図る有効な手立てとなる。

(3) 環境配慮型の選択行動を促す診断サービスの提供と情報コミュニケーションを促進すること

機能的な働きをする製品やユニットのリユースは運用時の省エネ化（省コスト化）とトレードオフになることが懸念されるが、省エネの技術革新の進展度合いや製品・ユニットの余寿命との関係で、リユース品を補修用部品に転用して製品の延命化を図ることで省資源と省エネが両立されうる局面がある。しかし、所有する製品に不調なり故障が発生したときに、ユーザー自らがこうした経済的なメリットを見通して買い替えるか修理するかを判断することは難しく、そのことがリユース品を利用した修理に対するニーズの発生自体を阻害していると言える。

したがって、リユース品に対するユーザーの選好を高めるためには、メーカー側が製品進化の動向や余寿命情報などの把握を通じて、補修用部品としてリユース品を転用するサ

ービスの環境及び経済的なメリット（あるいはデメリット）を定量的な情報としてユーザーに提示する診断サービスと、買い替え・補修・長寿命化の選択を促す情報コミュニケーションを提供することが重要となる。

(4) ユーザーの製品や機能要求の違いに応じてリユース品を使い分ける市場の開拓とマネジメントを進めること

環境効率の観点から製品機能がもたらすサービスの側面も重視する立場をとれば、リユースやリースを志向する社会は、ユーザーの製品要求や機能要求の水準に応じて製品やユニットを上手く使い分け、労働集約・資源集約的に付加価値が高められたユニットが持つ機能を有効に使い回していくシステムを持ち合わせることになる。しかし、これは革新的な省エネ技術や製品を採用し、炭酸ガス排出の抑制を図ることを否定するものではない。リユースの事業化を手掛けるビジネス戦略では、省エネ型機器への効果的な置き換えを進めながらも、リユース品の利用でも十分に製品機能を果たし、ユーザーの満足度も高めることが可能な市場を発掘して、複数ユーザー間あるいは複数製品用途間で階層的にリユースしていくシステムを模索する必要がある。同時に、故障リスクの軽減やユーザーの抱く不安・警戒心の緩和を図るサービスを付随させ、リユース品に対するユーザーの受容性や選好性を高めながら、リユース市場を新たに創出するような市場マーケティング、需要マネジメントを進めていくことが重要となる。

(5) 省エネ革新に対応しうる共通化のエコデザインを開発し、環境品質をトータルで高める協調設計を目指すこと

持続可能な産業社会における工業製品には、省エネ性やリサイクル性だけでなく、メンテナンス性やリユース性にも配慮した製品エコデザインが求められる。しかし、リユースや長寿命化の促進が製品利用時の省エネ化を阻害する、あるいは省資源化設計としての小型・軽量化が分離・分解性を阻害するなど、環境要求間にもトレードオフが生じる可能性がある。

したがって、今後様々な環境側面へ対応することの社会的な要請が高まるなか、製品設計の断面では環境品質をトータルで高める協調設計を目指すことが重要となる。例えばリユースと省エネ化の問題に対しては、省エネ化が進展する部位と進展しない部位を独立・ユニット化し、省エネが進展しない部位については世代間・製品間で共通化して互換性を高めるなど、革新的なエコデザインを図っていく必要がある。

(6) 運転履歴情報の管理と活用の技術システムを確立すること

リユース品を社会に広く再流通させるためにはユーザーに対する品質保証の付与が鍵であり、利用を経た後の部材に対する余寿命予測の技術開発が重要である。このとき、運転履歴に関連した情報が重要な判定材料となりため、その管理と活用の技術システムを確立していく必要がある。しかし、売り切り形態での製品提供では、製品利用の局面に積極的に関与することがないため、運転履歴情報の取得することは難しい。これに対して、施設単位で製品寿命と機器運転の管理サービスを手掛けることは、運転履歴情報の取得という面でも有効であり、同時にそれを活用することでサービスが更に高度化し、使用後の循環形成も促進することに繋がる。

7.2 今後の課題

本論文では、指標製品として取り上げた産業ポンプと家電製品に即して製品連鎖マネジメントを構想し、リユースやメンテナンス・サービス、エコデザインなどの製品管理方策の展開によってミクロなスケールではある一定の環境・経済的な効果をもたらすことを見出すことができた。今後はそれぞれの戦略について、ビジネス展開しうるレベルでのより詳細な検討を進めていく必要がある。具体的には、

- ✓ リユース性を高めるエコデザインのアイデアを掘り出すことや、余寿命診断システムや品質保証サービスの付与のさせ方などの技術システムを確立すること
- ✓ リユースやメンテナンスによってもたらされる生産技術の革新や生産管理の効率化などの効果、および社会的費用を含めて費用便益を計測すること
- ✓ リユース品を複数製品間で使い回す市場の発掘や、そこに付随させるメンテナンスやアップグレード・サービスの開発を通じて、環境効率の高い社会システムのデザインを進めること

などである。同時に、リユース品やアップグレード品を実際に利用する場面を社会実験的に設計し、技術的な課題や起こりうる不具合、求められる製品サービスのあり方などを掘り出し、リユース事業モデルを提案していくことが必要となる。

また、リユースやアップグレードを指向する持続可能な産業社会を築いていくためには、本論文で構想した製品管理政策の考え方や手法を広く他の汎用機械にも展開し、産業政策の提案へと繋げていくことが求められる。したがって、まず下水処理場に集積する各種一般機械や建設機械、住宅設備などで今後更新時期を迎えるもののなかで、部品の機能的な寿命に比べて製品の社会的寿命が短い、あるいは製品寿命に比べてそれらが設置される建築物の寿命が短い寿命特性を持つものに対して、リユースやアップグレードを活用しながら効率的なリニューアルを図ることが可能な製品・産業領域を探っていくことが課題となってくる。

一方、リユースやメンテナンスが社会に深化していくと、リユース品と新規品の競合や製品長寿命化に伴う買い替え需要の減少など、産業連関を通じて素材生産部門や他の製造部門、サービス部門に正負の影響をもたらすことになる。したがって、リユースや製品の長寿命化に伴う新規製造部門の産出の減少分を、メンテナンス・サービスを担う部門などが吸収しながら雇用を拡大し、産業連関を介してマクロな経済指標の上でも成長することを示すことが、リユースやメンテナンスの社会展開を図る上で重要となる。また、循環型社会形成推進基本計画などで掲げられるマクロな環境政策の目標達成に対して、個別産業での製品政策の展開がどの程度の効果を持つのかについても見通す必要がある。

Appendix A OECD 諸国における主要な EPR 法

表 A-1 OECD 諸国における主要な EPR 法

(OECD: *Pollution Prevention and Control Extended Producer Responsibility in the OECD Area, Phase I Report*, p.42-49, 1996.)

国名	EPR プログラム管理法
ドイツ	○ 廃棄物回避及び廃棄物管理法 (1986.08.27) ・ 製品にデポジット金制度を課し、生産者が消費者の使用後の製品を回収することを要求する権限を、法令によってドイツ政府に与える。 ○ 閉物質循環及び廃棄物管理法 (1994.09.27) ・ 汚染者負担の原則 (PPP) を具体化し、生産における少廃棄物型技術の使用や少廃棄物型製品の製造に関する生産者の責任を明確に定義する。 ・ 一定の質的水準が達成されるならば、エネルギー回収に向けた状態を確立する。 ・ 法によって、優先的に一種の回収 (原料あるいはエネルギー) を課せられる。 ・ 製品責任を論じており、製品回収及びリサイクルだけでなく、生産工程における二次的原料の使用に関する生産者の義務を明確にする。 ・ 法の展開・実行を通じて、特定製品に対する強制的義務が定義される。 ・ 特定製品の循環を制限あるいは禁止し、様々な目的に必要なラベリングを確立する権限が与えられる。
日本	○ 廃棄物の処理及び清掃に関する法律 (1970. 1991 改正) ・ 自治体の長は、適正処理・処分の促進のために企業協力を要求する権利を与えられる。 ・ 厚生省は、自治体が行き扱い困難とされる特定廃棄物の処理・処分を目的としてそれに関わる産業の協力を確保できるようにするために、通産省の対策を要求できる。 ○ 再生資源の利用の促進に関する法律 (1991) ・ 製造工程で再生資源を使用し、製品設計の段階においてはリサイクルを考慮に入れるという企業の責任を明確にする。 ・ リサイクルに向けた分別が可能のように、製品の表示を求める。 ・ 産業廃棄物のリユース目標を立てる。 ○ 環境基本計画 (1993) ・ 企業は自らの活動に関係した製品やその他の財から発生する廃棄物の適切な処理の確保に必要な措置をとる責任がある、と明確にし、「廃棄物処理法」の規定を補強する。 ○ 容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律 (1995) ・ 自治体によって適切に回収された容器包装材全ての再商品化を企業に求める。 ・ 特定容器の使用・特定包装材の使用・特定容器の製造を行う企業に対して適用する。 ・ 特定状況下の企業に対する適用は免除する。 ・ ある紙及びプラスチック容器への適用は、2000 年までの 5 年間延長する。

スウェーデン	○廃棄物収集及び処理法（1979、1994 改正） ・生産者を、民間製造者・輸入業者・製品販売者と定義する。 ・営利的な活動の間に、廃棄物の回収及び処理あるいは環境保全の観点から特別な措置を要する廃棄物を発生させる者も含む。 ・製品からの廃棄物のリユース・リサイクル、あるいは環境に受け入れられる方法での処理を生産者に要求する権限を政府に与える。 ・生産者による廃棄物の移動・最終処分に対する課徴金を課す規制を行う権限を国あるいは地方自治体に与える。 ・故意あるいは不注意にそのような責任を果たさなかった者に対するペナルティや可能な拘束を規定する。 ・効力のある規制に関する誤報を与えることに対して罰金を課す。 ・家庭の廃棄物の管理に関して、地方自治体に責任を課す。 ○アルミ製飲料容器のリサイクルに関わる法律（1982） ・市場に出回る全てのアルミ製飲料容器にデポジット制を求める。 ・デポジット額は 0.6 クローネ。 ・90%以上のアルミ缶が回収・リサイクルされる。 ○特定飲料容器に関わる法律（1991） ・デポジット制が適用されていないペットボトルは全て、市場に出るためには原料回収スキームが適用され、政府の許可を得なければならないことを明確にする。 ・デポジット額は 1～4 クローネ。 ・許可証を得るには、ボトルの 90%のリサイクルあるいはリユースが必要である。
オーストリア	○廃棄物管理法（1990） ・環境省に対して、市場における製品の導入及び流通に関する状況を制限あるいは規定する権限を与える。 ・行政府に対して、生産者及び分配者に廃棄物の回収を要求する権限を与える。 ・製品製造に再生原料を使うことを要求する権限を与える。 ・家庭の有害廃棄物を返却する個々人の責任を明白に述べている。 ・これらの権限のもとで展開される要求に応じないことに対して、多様な額の罰金を課す権限を与える。
ベルギー	○環境税法（1994） ・7つの製品カテゴリー（炭酸飲料・使い捨て製品・バッテリー・有害物質を含んだ製品・殺虫剤・製薬品・紙及び厚紙）の市場への導入に対する環境税の支払いを明白に述べている。 ・その産業に特別な事情がある場合、個々の企業は PVC 製の包装材を除く全てのカテゴリーに対する税の支払いが免除される。
米国	・国の関連法はない。 ・様々な州に、問題ある廃棄物の流れを対象にした法がある。

謝辞

本論文は、大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻における研究成果を学位請求論文としてとりまとめたものであります。本論文の筆をおくにあたり、ご指導・ご協力・ご支援いただきました多くの方々に、この場を借りてお礼申し上げます。

大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の盛岡通教授には、指導教官として常に温かく、時に厳しくご指導いただきましたことに深甚なる謝意を表します。研究室配属から今日までの6年間という長きにわたり、盛岡教授のもとで研究活動を行えたことによって、環境工学や環境システムの分野における多くの知見を学ばせていただくことができました。また、戦略的基礎研究推進事業・循環複合体研究プロジェクトを始めとする産学連携研究のなかで、常に産業エコロジーの実践の場と連携しながら研究を進めていける環境を整えていただきました。こうした貴重な経験と学習は、今後の研究活動の礎になるものと感じております。

本論文の査読をしていただきました大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の宮本欽生教授（大阪大学接合科学研究所・附属再帰循環システム研究センター）には、専門的な視点からのご指導をいただくとともに、循環型社会の構築を図るときに問題となる革新技術の基本的な捉え方についてご助言いただきました。ここに記して深謝致します。

同じく査読をしていただきました大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻の恒見清孝講師には、本論文全体に対して非常に幅広く、そして細やかなご助言・ご指摘をいただきました。深く感謝致します。

和歌山大学システム工学部環境システム学科の吉田登助教授には、本専攻在任時から今日に至るまで、常に懇切丁寧なご指導と斬新なアイデアのご提供をしていただきました。また、学位請求論文発表会の場におきましても、今後の研究の飛躍に向けた視点や展望について非常に貴重なご助言をいただきました。ここに記して深い謝意を表します。

東洋大学工学部環境建設学科の藤田壮教授には、本専攻在任時に研究ゼミを通じて有益なご指導・ご討議いただきました。深く感謝致します。

また、研究・調査活動を遂行するなかで、多くの企業関係者にご指導・ご支援を賜りました。特に、株式会社荏原製作所の竹林征雄氏、金子一彦氏には、1999年5月から2000年1月までの間、逆工場実験プラントでの調査活動の場を与えていただきました。松下エコテクノロジーセンターの堤常固取締役社長、松下電器産業株式会社生産革新本部の酒井良典氏を始めとする関係諸氏には、様々な調査活動をご支援いただいただけでなく、数多くのご議論・ご助言を通じて、研究の水準を高めていただきました。深謝致しますとともに、厚くお礼申し上げます。

福島大学行政社会学部の後藤忍助教授、国土交通省国土技術政策総合研究所の村野昭人技官、国立環境研究所流域圏環境管理研究プロジェクトの岡寺智大主任研究員を始めとする博士後期課程の諸先輩方や同期の林周氏、科学技術振興事業団の楠部孝誠氏、NPO 法人イ・キューブの今堀洋子氏には、様々なご助言や叱咤激励をいただきました。また、共に研究活動を行ってきた大阪大学大学院工学研究科環境工学専攻・博士前期課程の竹林光昭氏（2002年度修了）、皐月久美子氏、山崎裕貴氏には多くのご協力・ご指摘をいただきました。筆者の研究活動を支えていただいた研究室の先輩、同僚、後輩、関係諸氏に深く感謝致します。

最後に、筆者の日々の生活と研究活動を温かく見守り、支えてくださった両親に心より感謝致します。

2004年3月