

物質創製工学研究連絡委員会報告

# 「資源生産性」向上のための材料戦略

平成15年7月15日

日本学術会議  
物質創製工学研究連絡委員会

この報告は、第 18 期日本学術会議物質創製工学研究連絡委員会資源生産性小委員会で検討した結果を物質創製工学研究連絡委員会において審議し、取りまとめた結果を公表するものである。

#### 物質創製工学研究連絡委員会

|     |        |                                     |
|-----|--------|-------------------------------------|
| 委員長 | 御園生 誠  | 日本学術会議第 5 部会員、工学院大学 工学部 教授          |
| 幹 事 | 大倉 一郎  | 東京工業大学 生命理工学部 教授                    |
|     | 馬越 佑吉  | 大阪大学 大学院工学研究科 教授                    |
|     | 澤田 嗣郎  | 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授               |
|     | 佐久間 健人 | 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授               |
|     | 荒井 康彦  | 九州大学 大学院工学研究院 教授                    |
|     | 野瀬 卓平  | 東京工芸大学 工学部応用化学科 教授                  |
|     | 牧島 亮男  | 北陸先端科学技術大学院大学 ナノマテリアルテクノロジー・センター 教授 |

#### 委 員 他 41 名

#### 資源生産性小委員会

|     |        |                                     |
|-----|--------|-------------------------------------|
| 委員長 | 大中 逸雄  | 大阪大学 大学院 工学研究科 知能・機能創製工学専攻 教授       |
| 幹 事 | 石原 慶一  | 京都大学 大学院 I&M 科学研究科 I&M-社会・環境科学専攻 教授 |
| 委 員 | 奥 彬    | (財)生産開発科学研究所 資源再生研究室 室長             |
|     | 小田 喜一  | (独)産業技術総合研究所 企画本部 材料戦略室 室長          |
|     | 垣田 行雄  | (財)日本システム開発研究所 専務理事                 |
|     | 川口 春馬  | 慶応義塾大学 理工学部 応用化学科 教授                |
|     | 北田 正弘  | 東京芸術大学 大学院美術研究科 文化財保存学専攻 教授         |
|     | 佐久間 健人 | 東京大学 大学院 新領域創成科学研究科 教授              |
|     | 柘植 秀樹  | 慶応義塾大学 理工学部応用化学科 教授                 |
|     | 中村 崇   | 東北大学 多元物質科学研究所 資源変換・再生研究センター 教授     |
|     | 長谷川 章  | 神奈川大学 産官学連携推進室 室長                   |
|     | 原田 幸明  | (独)物質・材料研究機構 エコマテリアル研究センター センター長    |
|     | 東 健司   | 大阪府立大学 工学部 材料工学科 教授                 |
|     | 丸川 雄浄  | 大阪大学 先端科学研究センター 客員教授                |
|     | 御園生 誠  | 日本学術会議第 5 部会員、工学院大学 工学部環境化学工学科 教授   |
|     | 村田 朋美  | 北九州市立大学 国際環境工学部 環境空間デザイン学科 教授       |
|     | 山本 良一  | 東京大学 国際・産学共同研究センター センター長 教授         |

#### 協力者

|       |                      |
|-------|----------------------|
| 相澤 龍彦 | 東京大学 先端科学技術研究センター 教授 |
| 森 滋勝  | 名古屋大学 大学院工学研究科 教授    |
| 我妻 和明 | 東北大学 金属材料研究所 教授      |

# 要 旨

## 1 . 作成の背景

循環型社会形成推進基本法が制定されて 3 年、我が国も地球的視点から、持続可能な社会構築に向けて目標を明確にし、具体的な戦略を立てて推進することが急務の課題となっている。その中核となる考え方が資源利用のあり方、すなわち資源生産性であり、その向上のためには生産と消費における材料の果たすべき役割と材料戦略を明確にする必要がある。

## 2 . 内容、

### 1 ) 現状および問題点

20 世紀は、技術の急速な発展とその応用によって、多くの国々に物質的豊かさや利便性そして健康的な生活を実現させてきた。その反面で、急速な物質、資源、エネルギー利用の拡大が地球資源の枯渇を招き、さまざまな環境問題を顕在化させている。

特に、日本を含む工業先進諸国では、大量の鉱物資源、化石系エネルギー資源、動植物資源を諸外国から輸入し消費していく経済システムが確立され発展してきたために、消費された資源の行方としてCO<sub>2</sub>を含む廃棄物の増大という問題に直面した。その結果として循環型経済社会システムへの移行など、生産と消費の在り方において大幅な転換を迫られている。

### 2 ) 提言

材料技術は古くから資源の有効利用や材料特性を向上させることによって人類の幸福と福祉の向上に多大な貢献をしてきた。循環型社会の実現を目指した「ものづくり」や「価値づくり」は製品設計におけるライフサイクル的思考や次世代への長期的で俯瞰的な資源利用の視点を基盤とするものでなくてはならない。そのような観点から、「資源生産性」の向上にリンクした材料戦略の構築と実現を以下のように提案する。

- a) 材料における「資源生産性」を向上させるために次の三つの領域で戦略的な推進を図る。
  - (i) 環境負荷の少ない素材やリサイクルを容易にする材料の開発、再生材の利用などの材料技術開発、それらのシステム化の推進。
  - (ii) 素材・材料を効率よく利用するための産業間横断ネットワーク構築とそれに必要な材料プロセス技術開発。
  - (iii) 工業製品の生産と消費システムの革新に資するマテリアルリース社会の構築。
- b) 材料利用分野、および連携して推進すべき領域で戦略的な推進を図る。
  - (i) 資源生産性を重視した工業製品のライフサイクル設計を普及させるための材料選択の考え方とデータベースの構築。
  - (ii) 資源生産性向上のための諸制度・施策の整備、「資源生産性」評価法の開発とその基盤となる情報提供システム整備。
  - (iii) 「資源生産性」向上を国境を越して達成するための国際的な人材育成、学術・技術の普及、国際規格などの国際的連携と日本のリーダーシップ確立。
- c) 上記を実現するため経済、社会を包含する総合的推進機構を設立し、戦略的な推進を図る。

## 目 次

|                          |   |
|--------------------------|---|
| まえがき                     | 1 |
| 1．現状と課題                  | 2 |
| 2．「資源生産性」向上に関する提言        | 3 |
| 2.1 材料を中心とした戦略           | 3 |
| 2.1.1 材料技術革新による「資源生産性」向上 | 3 |
| 2.1.2 産業における「資源生産性」向上    | 4 |
| 2.1.3 市場における「資源生産性」向上    | 4 |
| 2.2 連携して進めるべき戦略          | 5 |
| 2.2.1 基盤整備(制度・施策、評価、情報)  | 5 |
| 2.2.2 国際的連携・リーダーシップ      |   |
| (人材、学術、技術、規格における実践的国際協力) | 5 |
| 2.3 「資源生産性」向上のための総合的取り組み | 5 |

## 「資源生産性」向上のための材料戦略に関する提言

### まえがき

20 世紀は、技術の急速な発展によって先進諸国においては物質的に豊かで便利な、そして健康的にも恵まれた生活の実現をもたらしたものの、その結果、限りある地球資源の枯渇を招き環境問題を顕在化させた。また発展途上国を中心とする人口増加は南北問題の根深さをもたらしめている。このような地球規模の問題の顕在化は私たちに豊かさとは何か、また持続する社会とは何か、そしてそれを支える技術とは何かを考えさせるきっかけとなった。しかし、いまや先進諸国の市場経済は量から質へ変わろうとしており、製造業の発展途上国へのシフトなどが進みつつあるなかで、日本はいまだに短期的な利潤への強いこだわりから抜けきれずに、長期的かつ総合的な技術戦略の構築が遅れている。

循環型社会に向けて「資源生産性」の確立が必須：

現在から将来にわたる資源・環境問題を考慮して「資源生産性」という考え方が世界中で広まりはじめた。ドイツでは 1990 年代初頭からファクター4、ファクター10 として「資源生産性」を 4 倍、10 倍に高めることにより地球環境に負荷の少ない持続可能な社会への転換が提唱され、イギリスでは内閣官房から「資源生産性」イニシアチブが提唱されるにいたっている。このような世界の動きは、これまでの社会が資本生産性（あるいは労働生産性）を指標とした大量生産、大量消費によって利潤追求を極めてきたために資源・環境問題が生じたことは明らかであり、したがって量による経済発展を目指す基軸を変えずに個別に工業製品の省エネ・省資源化を進めても、地球経済の破綻は避けられないとみる考え方が強まっていることを示している。そこで、従来の資本生産性に対して「資源生産性」をもう一つの指標として導入することが求められている。

資本生産性は言うまでもなくインプット（資源、エネルギー、マンパワーなどの投入資本あるいは労働力）に対するアウトプット（製品、利便性、サービスなどの生産量）を高めることを第一指標としている。しかしながら現実にはインプットの減少ではなくアウトプットの増大で対応する傾向になりやすく、この資本生産性のみの指標では、現在および将来にわたる資源の効率的利用とは必ずしも結びつかない。

それに対し、「資源生産性」は「生産と消費における資源の効率的利用」という限定された発想ではなく、（１）資源の長期的かつ戦略的な選択と投入、（２）資源循環を考慮した製品のライフサイクル設計、そして（３）資源・環境の視点から工業製品の使い方や消費の在り方に関するガイドライン作り等を具現化して、未来市場や未来社会に責任を持つ考え方を含んでいる。したがって「資源」の概念を広げ、従来のエネルギー資源、鉱物資源、化石資源、生物資源にとどまらず価値創造に資する情報資源、問題解決に資する人材、あるいは蓄積されている社会・文化インフラも取り込んで多様な資源利用を進めることが重要になってくる。それによって種々のサービス、利便性などの向上によるソフト経済の発展を質的に高くすることができ、いわゆる「脱物質社会」や「知識基盤社会」の実現に資することが出来る。

「資源生産性」の中核となるのは工業材料の戦略的な研究：

この「資源生産性」は日本がリーダーシップをとり、地球的視点から、持続可能な社会を実現させるためにきわめて重要であることは言うまでもない。そして、多くの資源がさまざまな素材を

通じて製品として利用されることを考えると、その中核に工業製品のライフサイクル設計と、それを支える工業材料の適切な研究開発が位置付けられる。

本報告書は、日本学術会議第5部物質創製工学研究連絡委員会資源生産性小委員会で以上のような観点から検討した結果を物質創製工学研究連絡委員会で審議し、まとめたものである。ここでは循環型社会の実現に向けて「資源生産性」という新しい概念設計が必要であることを述べ、「資源生産性」の意味づけ、その向上策について議論した結果をまとめた。そもそも「資源生産性」概念の重要性を打ち出したのは、日本学術会議物質創製工学研究連の金属材料専門委員会での「循環型社会に向けて材料研究はどうあるべきか」という議論であった。それは、平成12年6月26日発表の金属材料専門委員会報告「材料の21世紀への戦略 - 金属系材料の視点から見た提言」としてまとめられている。この提言に基づき、金属材料関係のみならず、高分子材料関係および化学系学協会にも呼びかけて、学協会連合委員会（呼びかけは日本金属学会）を設置して議論を重ね、その後日本学術会議でさらに議論し、まとめたものである。本報告をもとにさらに建設的に議論が進められ、具体化が進むことを強く期待している。

## 1. 現状と課題

20世紀は、技術の急速な発展とその応用によって、多くの国々に物質的豊かさや利便性そして健康的な生活を実現させてきた。その反面で、急速な物質、資源、エネルギー利用の拡大が地球資源の枯渇を招き、さまざまな環境問題を顕在化させている。

特に、日本を含む工業先進諸国では、大量の鉱物資源、化石系エネルギー資源、動植物資源を諸外国から輸入し消費していく経済システムが確立され発展してきたために、消費された資源の行方としてCO<sub>2</sub>を含む廃棄物の増大という問題に直面した。その結果として循環型経済社会システムへの移行など、生産と消費の在り方において大幅な転換を迫られている。

また、アジア諸国をはじめとする工業化過程にある諸国では、多くの人々がより豊かで健康的な生活をおくることのできる産業基盤を構築するために、今後継続して多量の資源、エネルギーの投入が必要とされている。もしこれらの国々の資源・エネルギー投入のあり方が、2割弱の人口でありながら地球資源の8割強を使用しているOECD諸国と同様の道をたどるならば、これまでもまして深刻な急激な資源の枯渇と地球環境問題の拡大をもたらす危険があると指摘されている。

「資源生産性」は上記のような問題を解決するための視点を与える指標として期待されている。「資源生産性」の適切でわかりやすい定式化には、工学、社会科学など広い学問分野を覆う課題として早急に取り組まなければならない。そこにおける「資源生産性」とは、地球資源の消耗を減速させながら生産と消費の効率を高め、脱物質社会に適した「ものづくり」と「価値づくり」を進め、循環型社会における新たな豊かさを目指した、エコノミーとエコロジーという一見矛盾する二つの目標の融合をめざし、従来の資本（労働）生産性向上メカニズムから「資源（環境）生産性」を重視した方策へ価値基準を切り替える改革につながるものでなければならない。また、資源の概念自体にも、材料やエネルギーの直接の原料だけでなく、再生資源の再生産性なども考慮した地球環境負荷的な概念を含めたものとして定式化していく必要がある。

同時に、現実の課題としての「資源生産性」向上に着手することが早急に求められている。特に、材料技術は古くから資源の有効利用の中で材料特性を発揮させて人類への有用性を増すことを追求してきており、この材料技術を基盤としてライフサイクル的思考や次世代への長期的で俯瞰的な資源利用の視点に立った具現化技術を開発すれば、「資源生産性」を重視した「ものづくり」

「価値づくり」に大きく踏み出すことができる。そのような視点から、材料開発に関わる「資源生産性」の向上を目指した次に掲げる戦略を提案する。

もちろん、ここで提案する「資源生産性」向上には、製品を作る立場だけでなく、それを生活スタイルのなかで実践しつつ改革をたゆまず進めるときに、この目標が如何に大切であるかを啓発普及させて、21世紀の世界的な社会像として定着させることを含んでいる。次に述べるのはその中で、具体的な目標として材料という立場で見た「資源生産性」向上のための材料研究・技術開発の戦略目標である。

## 2. 「資源生産性」向上に関する提言

### 2.1 材料を中心とした戦略

材料における「資源生産性」の向上を目指すために次に掲げる三つの戦略を提案する。

- (ア)環境負荷の少ない素材、リサイクルを容易にする材料、再生材の利用などの材料技術革新による「資源生産性」向上
- (イ) 素材・材料の無駄のない物流・環流のための産業間横断ネットワーク構築とそれに必要な材料プロセス技術開発による「資源生産性」向上
- (ウ)物流システムおよび市場システムと、消費生活スタイルの変更を含む新しいマテリアルリース社会の構築による「資源生産性」向上

以下、それぞれに課された開発課題の一例を掲げる。なお、「資源生産性」の評価方法が確立するまでは、少なくとも、リサイクルを含めたライフサイクル（循環過程）でのエネルギーや環境負荷を考慮した「資源生産性」が計られ、その結果として資源消費総量の削減メカニズムが働くことが考慮されなければならない。

#### 2.1.1 材料技術革新による「資源生産性」向上

##### i. 資源の見直し、素材の吟味

- 環境に負荷を与えない原料の選択

バイオマス資源を化石資源代替として積極的かつ適切に活用することは、有機材料技術におけるひとつの方向である。また、As などを含まない化合物半導体、鉛フリー材料などの有害物質を含まない新しい材料開発が求められる。

- リサイクルが容易になる素材、複合材料の素材選択と材料設計

無機材料としては再生セメント、再生タイル、再生ガラスの開発などがある。

プラスチック材料においては材料再生を繰り返した後で、燃焼あるいは水と炭酸ガスへの分解はやむを得ない最終の手段とする考え方も必要であろう。この点では、生分解性素材が「資源生産性」の高い素材とはいえない。むしろ生分解性素材を化学的技術によるリサイクルしやすい素材として開発する方向で評価すべきである。

- 寿命の長い素材の選択、少量でより高い性能や機能をもたらす素材、材料の開発

有機材料、とくに高分子材料では、さらなる性能や機能の向上が図れる余地がある。金属材料ではこれまでに長寿命化が図られてきているが、疲労、クリープ、腐食などに対する寿命予測技術のさらなる開発が望まれる。

## ii. 使用時にエネルギー負荷の小さい材料

- 軽負荷構造材料の開発  
輸送機器や可動部分において使用時にエネルギー負荷の小さい軽量構造を実現できる有機系・無機系・金属系材料の開発が求められる。
- 高効率エネルギー変換材料およびそれを支援する材料  
耐熱材料、耐食材料など特殊環境で機能を発揮する材料の特性向上や、燃料電池、二次電池材料などの高機能化に対応できる材料開発が挙げられる。
- 低エネルギー損失材料  
使用時のエネルギー損失をできるだけ抑えられるゼロ摩擦材料、超伝導材料、高絶縁材料の開発、ならびにそれらを利用した表層構造化、一体成形化などシステム化技術の開発が望まれる。

## iii. 使用後の環境負荷の小さい材料

- 分別・精製・リサイクルを容易にする製品設計  
履歴・標識票の装着、可能な限り単一素材からなる製品開発、混ぜ物が少ないかあるいは分離精製が容易な混ぜ物を使用する製品を開発する。例として金属材料に関しては固相リサイクル、不純物無害化加工技術、人工不純物利用材料設計、アップグレードリサイクリング、合金成分の統合化、構造制御リサイ클ラブル設計、解体可能な可逆的インターコネクションなどがあげられる。有機材料に関してはリユース可能部材設計、分離容易なコンポジット設計、分離不可能な色素の使用排除、モノマーリサイクルの推進、既存製造プロセスへの再生資源受け入れ、再生素材品質の用途別見直しなどがあげられる。  
製品寿命を超えた再利用可能な部品・素材の開発も重要である。

## 2.1.2 産業における「資源生産性」向上

- 産業間連携によるトータルな「資源生産性」向上  
鉄鋼業を中心としたエココンビナートによる産業間フュージョンの推進などがある。
- 環境・資源負荷の少ない製造・加工・リサイクルプロセスの開発  
製造プロセスの省エネルギー化はもちろん、高効率触媒（例えば固定化酵素）の活用や環境にやさしい触媒・溶媒の選択、さらに揮発性有機溶媒など有害物質を極力回避した製造プロセスの開発を促進する（グリーンサステナブルケミストリーなど）。
- 省資源で環境に適合した製品設計を可能にする新しい素形材製造技術
- 既存の素材、材料製造設備への再生素材循環プロセスの受け入れ推進  
従来の技術では困難であった異種材料の接合技術や鋳造技術を応用したハイブリッド素形材や高分子複合材料さらには新しい加工プロセスを応用したナノメタルや金属ガラスなどの高機能部材の製造技術の開発が望まれる。

## 2.1.3 市場における「資源生産性」向上

- マテリアルリース社会の実現による循環型社会の構築  
ワンウェイを許容しない社会通念を確立して素材ごとの最適なりサイクル方法の選択、また素材あるいは製品ごとに可能な限りリユース、マテリアルリサイクル、モノマーリサイクル、エネルギー回収を促すマテリアルリース社会の実現が望まれる。
- マテリアルリース社会のための新しい製品設計技術の開発  
マテリアルリース社会に適したD F E（Design for the Environment）やトータルシステムとしてのさらなる追求が望まれる。

素材・製品の適切な寿命管理、部品や材料を分離しやすい設計、材料加工技術の開発も必要である。

- 2.1.2 に述べた「産業における資源生産性向上」をさらに推進し市場と連携実践した広範囲にわたるマテリアルリース社会の実現

## 2.2 連携して進めるべき戦略

「資源生産性」向上のため、材料分野に限らず各方面と連携して推進すべき次の戦略を提案する。

(ア)「資源生産性」向上のための制度・施策の整備、「資源生産性」評価法の開発とその基盤となる情報提供システムの整備

(イ)資源の無国籍性を前提として世界的な規模で「資源生産性」向上が達成できるように、国際的な人材育成、学術・技術の普及、国際規格などの国際的連携とリーダーシップの実践

### 2.2.1 基盤整備（制度・施策、評価、情報）

- 「資源生産性」向上のための制度・施策と当事者責任の明確化  
グリーン調達、税制等による支援、規制や法律などの見直しなどがある。
- 「資源生産性」評価指標の確立  
「資源生産性」の評価、評価情報の集積と共有、情報発信と双方向コミュニケーションがとれる「資源生産性」情報ヘッドクォータなどの設立。

### 2.2.2 国際的連携・リーダーシップ（人材、学術、技術、規格における実践的国際協力）

- 世界的規模で「資源生産性」向上の普及啓発と人材育成  
国際「資源生産性」向上教育プログラムなどを整備する。
- 国際的な「資源生産性」向上  
国内ならびに国外に「資源生産性」向上拠点を設け、現地適合型の「資源生産性」技術開発と技術移転に伴う最適化などを行う。
- 「資源生産性」の国際標準化  
地域特性を取り入れた共通理解のための土壌を作る。それによって工業製品に関する国際的な連携による「資源生産性」の向上を図り、世界全体としての「資源生産性」向上の実現につなげる。

## 2.3 「資源生産性」向上のための総合的取り組み

「資源生産性」の向上は単なる科学技術だけでなく、人々の理解と協力を得て、統合的に上記の全てを種々の分野が連携して進めなければ実現困難である。このための総合的取り組みが必要である。たとえば、上記を実現するための経済、社会を包含する総合的推進機構の設立が望まれる。