

# 科学技術動向

2002  
10

No.19

## 科学技術トピックス

### ▶ ライフサイエンス分野

- ① 相同組換えによるイネの遺伝子ターゲティングに初めて成功
- ② 福山型筋ジストロフィーの原因が糖転移酵素の変異である可能性が示された

### ▶ 情報通信分野

- ① シリコンLSIの10倍の記憶密度に相当する分子メモリIC試作に成功

### ▶ 環境分野

- ① ダイオキシン類を現場で迅速に測定できる技術が開発される

### ▶ ナノテク・材料分野

- ① ナノ組織制御により、永久磁石の10倍以上も強力な酸化物超電導バルク磁石を開発

### ▶ エネルギー分野

- ① 米国での環境規制強化に対応できる石炭・廃棄物ガス化技術の開発動向が報告される

### ▶ 製造技術分野

- ① 従来の300倍の急速水冷により、種々のアモルファス材料製造が可能となる

### ▶ 社会基盤分野

- ① 各国で取り組みが進む磁気浮上式鉄道  
— MAGLEV2002（磁気浮上式鉄道国際会議）より —

### ▶ フロンティア分野

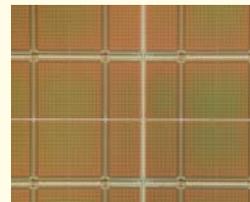
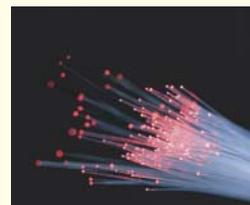
- ① 着々と進展する統合国際深海掘削計画（IODP）

**特別記事** 2002年ノーベル賞  
自然科学3部門の受賞者が決まる

**特集1** 生命科学の研究人材の育成  
および教育の在り方

**特集2** 化石資源を用いない水素製造技術  
— 持続可能な水素エネルギーシステムへの鍵 —

**特集3** エコマテリアルの動向  
— 地球環境問題への材料学のアプローチ —





特別記事

**2002年ノーベル賞  
自然科学3部門の受賞者が決まる**

— 5

10月7日から9日にかけて、2002年のノーベル賞自然科学3部門（物理学、化学、生理学・医学）の受賞者がスウェーデン王立科学アカデミーなどから発表され、物理学賞を小柴昌俊博士（東大名誉教授）が、化学賞を田中耕一氏（島津製作所）が受賞された。化学賞については、わが国から3年連続で受賞者を輩出したことになり、また、同時に2部門の受賞は初めてである。

科学技術トピックス

**ライフサイエンス分野**

7

**① 相同組換えによるイネの遺伝子ターゲティングに初めて成功**

岡崎国立共同研究機構・基礎生物学研究所の飯田滋教授らは、イネの相同組換え体の選抜効率を従来法に比べて10倍向上させることにより、相同組換えによるイネの特定の遺伝子の操作（遺伝子ターゲティング）を実用的に利用可能な技術とし、イネの特定の遺伝子をノックアウトすることに成功した。今後、遺伝子ターゲティングによりイネ等の各種遺伝子の機能が解明されるとともに、狙った遺伝子以外の領域に影響を及ぼさないこの方法が消費者の組換え作物に対する不安の緩和につながる可能性があるものとして期待される。

**② 福山型筋ジストロフィーの原因が糖転移酵素の変異である可能性が示された**

米国のCampbellら、および、わが国の戸田、遠藤らの解析により、日本人に特有な福山型筋ジストロフィーや類縁のMuscle-Eye-Brain病などの病因が、糖転移酵素の変異であることが強く示唆された。福山型筋ジストロフィーの原因とされるタンパク質（フクチン）もこの糖転移酵素と相同性を有し、その原因も同一であろうと推測される。α-ジストログリカノパチーと総称されるこれらの疾患の原因が、構造タンパク質ではなく酵素の変異であることから、遺伝子治療の対象となる可能性も高く、さらなる研究の進展が期待される。

**情報通信分野**

8

**① シリコンLSIの10倍の記憶密度に相当する分子メモリIC試作に成功**

米国のHP（Hewlett-Packard）社のHP研究所のグループは、データ記憶密度約10Gbit/cm<sup>2</sup>に相当し、現在のシリコンベースのメモリに対して10倍以上の密度となる不揮発性分子メモリICの試作に成功した。直交する上下の配線の交差点に約1,000個の分子が挟まれて分子スイッチを形成し、データは電圧パルスによる分子スイッチの電気抵抗の変化として記録される。同じ分子スイッチを使って簡単な論理回路も同時に形成している。また、「スタンプ」を使って微細回路を刻印する、「Nano-imprint lithography」という新技術を配線形成に採用している。今回の技術は、次世代不揮発性メモリの新しい候補として、また、実際に機能を発現した初めての分子デバイスとして注目される。さらに、問題が多くて実用化が困難だった印刷的手法による微細回路形成技術が、実際のLSI回路が形成できるほどのレベルに達しているのか興味を持たれる。

**環境分野**

9

**①ダイオキシン類を現場で迅速に測定できる技術が開発される**

財団法人電力中央研究所と京都電子工業株式会社は、廃棄物焼却施設からの排出割合が高いとされるダイオキシン類（PCDDs、PCDFs）を簡易・高感度かつ迅速に検出できる携帯測定器を開発したと発表した。開発した測定器は、約25cm角の携帯型で、抗原抗体反応を利用して排出基準値相当の低濃度ダイオキシン類を数分間で測定できる。現状では、測定できる抗体が毒性等量の高いダイオキシン類のみに限られているため、今後は、残りのダイオキシン類を測定することができる抗体の開発等が望まれる。

**ナノテク・材料分野**

9

**①ナノ組織制御により、永久磁石の10倍以上も強力な酸化物超電導バルク磁石を開発**

財国際超電導産業技術研究センターの超電導工学研究所は岩手県工業技術センターと共同で、通常の永久磁石より10倍以上も強力な磁力を液体窒素温度で発生させることができる酸化物超電導バルク磁石を試作することに成功した。材料の酸化物は結晶構造の軸が揃ったまま大型のバルク材料になっており、さらに数ナノメートルの粒子状の非超電導体相が縞状に配列している。この微細構造は、酸素制御溶融成長法という独自の方法で作製されたものである。

**エネルギー分野**

10

**①米国での環境規制強化に対応できる石炭・廃棄物ガス化技術の開発動向が報告される**

米国ペンシルバニア州ピッツバーグ市で第19回 Annual International Pittsburgh Coal Conference が開催され、2018年までに石炭火力から排出される硫黄酸化物、窒素酸化物、水銀を約70%削減することを狙ったClear Skies Act of 2002という法律案の審議状況、米国エネルギー省が重点的に取り組んでいる石炭ガス化複合発電の開発状況、環境保護庁が検討している廃棄物に含まれる化学物質について環境中への排出量を半減させるための法令改正の検討、などが報告された。これらの取り組みは、米国における今後の環境規制強化の動きと、それに対応できる石炭や廃棄物のガス化技術への期待を示すものである。

**製造技術分野**

11

**①従来の300倍の急速水冷により、種々のアモルファス材料製造が可能となる**

財電力中央研究所は、溶融金属液滴を従来の300倍の冷却速度で一気に水冷する製造技術を開発した。この超急冷技術により、これまでは添加物無しでは結晶化してしまった純鉄もアモルファス（非晶質）化することが可能になる。さらに、これまでアモルファス化が難しかった種々の金属のアモルファス材料も製造できるようになると期待される。

**社会基盤分野**

11

**①各国で取り組みが進む磁気浮上式鉄道—MAGLEV2002（磁気浮上式鉄道国際会議）より—**

2002年9月、磁気浮上式鉄道の研究開発等に関する国際会議MAGLEV2002が開催された。会議では、ドイツのトランスラピッド（常電導磁気浮上式）が現在、上海で建設中のプロジェクトに続き、ミュンヘンでの建設計画を発表し、実用化の進んでいることを示した。また、わが国からは、2005年に開業が予定されるHSST（常電導磁気浮上式）の現状や、JRマグレブ（超電導磁気浮上式）の実用可能性評価を受けた検討結果などが報告され参加者の関心が集まった。さらに、スイスからは地下式真空チューブ内を走行させる磁気浮上式鉄道についての基礎研究の報告などがあった。

## フロンティア分野

12

## ① 着々と進展する統合国際深海掘削計画 (IODP)

深海底掘削による地球変動メカニズムの解明、未知の地下生命圏等の探索などを通じ、新しい地球・生命科学の創成とその統合的な理解を目指した「統合国際深海掘削計画 (IODP)」が2003年10月に開始予定である。このほど、海洋科学技術センターはIODPの中核となる地球深部探査船「ちきゅう」の運用を担う組織、「地球深部探査センター」を発足させた (2002年10月1日)。今後、「ちきゅう」の運用に関する能力の拡大や、運用技術のノウハウの蓄積及び関連技術の開発を目指した活動が予定されている。

## 特集—1

## 生命科学の研究人材の育成 および教育の在り方

— 13

21世紀は「生命の世紀」と言われており、我が国においても第2期科学技術基本計画における重点4分野の1つとしてライフサイエンス分野が位置づけられ、推進が図られているところである。平成15年度科学技術関係予算におけるライフサイエンス分野の概算要求額は2,091億円であり、対前年度28.0%増と一層の予算拡充がなされている。

その一方で、我が国の生命科学の研究人材は米国と比較して圧倒的に少ないというデータもあり、研究人材が不足している。したがって、生命科学において研究人材の育成は最も重要な課題の一つであり、大学における生命科学教育・研究を充実させる必要がある。生命科学は学際的・融合的になってきているほか、社会との関わりに関する領域などもできており、系統的・総合的に生命科学を教育できるような大学院等を整備することやカリキュラムを充実させることなどが求められる。

また今後は、個人あるいは社会として生命倫理など生命科学に関する問題について、判断や議論をする必要が生じてくることから、生命科学についての社会全体のリテラシー (理解度) の向上が必要である。米国・英国では、国民の科学的リテラシー向上を目標の一つとして科学教育の改革を進めてきている。我が国においても、長期的な視点から科学的リテラシーを向上させるためには、教育における取組が求められる。

特に生命科学については、分子生物学の進展により、遺伝子を中心とする原理を理解すれば、系統的に多様な生物現象や生物のしくみが分かるようになってきた。今後の生命科学の展開は、この原理を軸に派生していくものである。したがって、このような生命科学を教育の中でもきちんと位置づけ、発達段階に応じてその素養を培っていけるよう、理科教育の再構築を検討していく必要があるだろう。

## 特集—2

## 化石資源を用いない水素製造技術

— 21

### — 持続可能な水素エネルギーシステムへの鍵 —

今日、地球規模のエネルギー・環境問題の克服が求められている中、燃料電池をはじめとする水素エネルギー利用システムが大きな関心を集めている。

本稿では、持続可能な水素エネルギーシステム構築のキーテクノロジーとして、「化石資源を用いない水素製造技術」に焦点を当て、3E問題の解決にとっての意義を検討するとともに、主要技術の技術開発動向や課題について分析した。

燃料電池はエネルギー効率が高く、化石資源から水素を製造しても、特に燃料電池自動車の場合、相当の化石資源節約効果や温室効果ガス排出削減効果が見込まれる。ただし、

本稿で検討した範囲において、それらの効果は他の競合する技術－ハイブリッド車、都市ガスコジェネレーションシステム等－の導入による効果に比べて、特に大きいというわけではない。一方、化石資源を用いずに水素を製造した場合には、化石資源消費と温室効果ガス排出は実質的にゼロとなる。

従って、エネルギー自給率が低いわが国にとって、化石資源を用いない水素製造技術の意義は特に大きい。わが国はその研究開発に十分なウェイトを置き、長期的に取り組んでいく必要がある。現在、水電解法を除き、まだ基礎研究、原理実証研究の段階にあり、当面は、対象技術を広く設定し、個々の技術の普及・実用化の可能性を評価することが重要である。

また、二次エネルギーである水素エネルギーを含めたエネルギーシステムのデザインには、エネルギー関連の技術や政策全般に通じる専門家の育成が不可欠である。エネルギー分野の人材の流動化や学会間の交流促進等が望まれる。

再生可能エネルギーによる水素製造は、途上国において大きなポテンシャルを有する。わが国としても、技術開発ならびに国際貢献の観点から、途上国での普及に向けた移転用技術開発や現地共同プロジェクト推進等に積極的に取り組んでいくことは有益であろう。

## 特集－3

# エコマテリアルの動向

## — 地球環境問題への材料学のアプローチ —

— 29

エコマテリアルは、「地球環境に調和し持続可能な人間社会を達成するための物質・材料」と定義され、1991年世界に先駆けて日本が発したコンセプトである。ライフサイクルにおける環境負荷のうち、どの部分に寄与しているかによって、有害物質フリー材料、高物質効率材料、低環境負荷履歴材料、リサイクラブル材料のように4つの開発の方向性が示され、さまざまな取り組みがなされている。

環境問題の基本に大量の物質消費・物質廃棄があることを考えると、今後のエコマテリアルの開発における最大のキーワードは「資源生産性の向上」である。発展途上国の爆発的な物質需要、エネルギー需要の増大にも対応できるように、資源生産性を画期的に高める必要がある。

エコマテリアルは生まれてから10年程度の若い材料分野であるが、振興調整費を中心として継続的にエコマテリアルの研究が行われてきた結果、実用材料を設計するにあたって、従来の高性能化、高機能化という材料特性の向上に加えて、環境調和性も考慮すべきであるというコンセプトを材料研究者および技術者に普及させた点で、これまでの歩みには大きな意義がある。

エコマテリアルの分野で日本は、幸いにして世界をリードする状況にある。しかし、材料技術の確立と実用化までには長時間を要するため、国家的な取り組みがさらに強化されるべきである。エコマテリアルの研究領域が広範に渡り、また学際的であることを考えると、ハブ機関を中心としてオールジャパンの連携による研究の推進が継続的に行われることが必要である。また、個々の材料の環境効率を個別に高めていくのみでは必ずしも全体の環境効率が最適化されるとは限らないため、社会との接点を常に持ち続けることが重要である。

## 特別記事

## 2002年ノーベル賞 自然科学3部門の受賞者が決まる

2002年のノーベル賞自然科学3部門（物理学、化学、生理学・医学）の受賞者が決まった。10月7日には、スウェーデン カロリンスカ研究所から生理学・医学賞の受賞者が、同国王立科学アカデミーからは、10月8日に物理学賞、9日に化学賞の受賞者が各々発表され、物理学賞を小柴昌俊博士（東大名誉教授）が、化学賞を田中耕一氏（島津製作

所）が受賞された。

わが国の研究者については、2000年の化学賞 白川英樹博士、2001年の化学賞 野依良治博士に続き3年連続の受賞となり、しかも物理学、化学において同時の受賞となった。

以下に3部門の受賞者と受賞理由の概要と、小柴博士、田中氏の略歴を紹介する。

### 1. 自然科学3部門受賞者と受賞理由の概要

#### (1) 物理学賞

Raymond Davis Jr. (米) : ペンシルヴァニア大学 名誉教授

小柴 昌俊 (日) : 東京大学 名誉教授

Riccardo Giacconi (米) : アソシエイテッド・ユニヴァーシティズ社 ディレクター

##### 受賞理由の概要

今年度の物理学賞は、宇宙から来るニュートリノやX線を観測し、太陽、銀河、超新星など宇宙への理解を増進させた、宇宙物理学におけるパイオニア的貢献に対し贈られる。

Davis博士、小柴博士は、極めて検出が困難であった宇宙ニュートリノを、地下に設置した巨大なタンクからなる装置を用いて捕獲することに成功し、ニュートリノ天文学という新たな研究分野を開拓した。また、Giacconi博士は、太陽系外からのX線を、宇宙空間に設置した装置を用いて検出することに成功し、X線天文学の基礎を築いた。

#### (2) 化学賞

John B. Fenn (米) : ヴァージニア・コモンウェルズ大学 教授

田中 耕一 (日) : 島津製作所

Kurt Wüthrich (スイス) : スイス連邦工科大学 教授 米スクリプス研究所客員教授

##### 受賞理由の概要

今年度の化学賞は、タンパク質など生体高分子の研究にとって不可欠な新たな分析装置を考案した業績に対して贈られる。

Fenn博士、田中氏は、以前は小さな分子しか同定することができなかった質量分析において、生体高分子も分析可能とする新たな方法を開発した。Wüthrich博士は分子の立体構造と動態に関する情報を得ることができるNMR（核磁気共鳴）をタンパク質分子にも適用できるようにし、タンパク質の立体構造の解析に貢献した。

### (3) 生理学・医学賞

Sydney Brenner (英) : 米国分子科学研究所 創設者  
 H. Robert Horvits (米) : マサチューセッツ工科大学 教授  
 John E. Sulston (英) : サンガー・センター 元所長

#### 受賞理由の概要

今年度の生理学・医学賞は、器官の形成とプログラム細胞死の遺伝的調節を解明した業績に対して贈られる。

線虫を実験系として確立することにより、受精卵から成体までの細胞の分裂と分化を追跡することを可能とし、器官形成やプログラム細胞死を理解する上で鍵となる遺伝子を同定した。同様な遺伝子がヒトを含む高等生物にも存在することを示し、多くの疾患の理解に新たな光をあてた。

## 2. 小柴博士と田中氏の略歴

小柴昌俊	博士	昭和26. 3	東京大学 理学部物理学科卒業
		同 33. 3	同 原子核研究所助教授 (同38.11まで)
		同 38.11	同 理学部助教授 (同45.2まで)
		同 42. 6	理学博士
		同 45. 3	東京大学理学部教授 (同62.3まで)
		同 62. 3	東京大学名誉教授
同		同 62. 8	東海大学教授 (平成9.3まで)
田中 耕一	氏	昭和58. 3	東北大学 工学部電気工学科卒業
		同 58. 4	島津製作所 技術研究本部 中央研究所
		同 61. 5	同 計測事業本部 第二科学計測事業部 技術部 第一技術課
		平成 4. 1	英KRATOS GROUP PLC.に出向
		同 4.12	島津製作所 分析事業本部 第一分析事業部 技術部
		同 9. 4	英Shimadzu Research Laboratory (Europe) LTD.に出向
		同 11.12	英KRATOS GROUP PLC.に出向
		同 14. 5	島津製作所 分析計測事業部 ライフサイエンスビジネスユニット ライフサイエンス研究所

# 科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（10月号は2002年9月7日より2002年10月4日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

## ライフサイエンス分野

### ① 相同組換えによるイネの遺伝子ターゲティングに初めて成功

岡崎国立共同研究機構・基礎生物学研究所の飯田滋教授らが行なった相同組換え<sup>①</sup>の改良法によるノックアウトイネ<sup>②</sup>の作出の評価が、9月9日のNature science update に紹介された。

それによれば、飯田教授らはイネへの遺伝子導入方法と導入ベクターに工夫を凝らし、イネについての相同組換え体の選抜効率を従来法に比べて10倍向上させて実用レベルに引き上げた。これにより、相同組換えによるイネの特定の遺伝子の操作（遺伝子ターゲティング）を再現性のある実用的に利用可能な技術とし、イネの特定の遺伝子をノックアウトすることに成功した。従来、相同組換え法は酵母やマウスで用いられ、各種遺伝子の機能の解明に役立ってきた。しかしこの方法は、植物ではヒメツリガネゴケ以外には利用することができず、植物遺伝子の研究には用いられてこなかった。

飯田教授らが確立した方法は、イネに限らず、他の高等植物にも応用可能であり、トウモロコシとワタの遺伝子研究の権威であるニ

### 用語説明

#### ① 相同組換え

良く似た配列をもつDNA同士の間で組換えが起こる現象。相同組換えは酵母等では高率で起こるが、植物では相同組換えを利用することは困難といわれてきた。

#### ② ノックアウトイネ

遺伝子組換え技術により、ある特定の遺伝子だけを破壊して、その機能を欠損させたイネ。

ューヨーク Brookhaven 国立研究所の Benjamin Burr 博士も飯田教授らの方法を高く評価している。

今後、遺伝子ターゲティングによりイネ等の各種遺伝子の機能が解明されるとともに、狙った遺伝子以外の領域に影響を及ぼさないこの方法が消費者の組換え作物に対する不安の緩和につながる可能性があるものとして期待される。

### ② 福山型筋ジストロフィーの原因が糖転移酵素の変異である可能性が示された

遺伝子疾患として知られる先天性筋ジストロフィーのうち、重症で、世界的にも有名なデュシェンヌ型、あるいはより軽症のベッカー型の原因は、ジストロフィンの変異であることが分かっている。

これに対し、日本人に特有な福山型筋ジストロフィーは、重症の

筋病変に加え、高度の脳奇形と眼症状を併発する難病である。大阪大学の戸田らの研究チームは、1998年（当時東京大学）、福山型筋ジストロフィーの原因遺伝子が第9染色体に存在し、産物は461アミノ酸からなるタンパク質であることを同定しフクチン（fukutin）と名付けたが、その機能は謎であった。

最近、米国のCampbellらは、福山型筋ジストロフィーや類縁のMuscle-Eye-Brain病を解析し、ジストロフィンと筋基底膜をつなぐ $\alpha$ -ジストログリカンの糖鎖の異常により筋基底膜との結合が弱いことが原因であることを示唆した（Nature 418, 417-425（2002））。一方、戸田、遠藤（現東京都老人総合研究所）らはMuscle-Eye-Brain病の遺伝子解析により、現実に糖転移酵素に変異が起きていることを見出している（Yoshida et al. Dev. Cell, 1, 717-724（2001））。骨

格筋細胞においては、筋線維のアクチンと基底膜とは、ジストロフィンやデスミンそしてジストロフィン関連糖鎖タンパク質と呼ばれる一連のタンパク質群を介してつながり、筋収縮に伴う機械的衝撃が形質膜を壊さないように保護している。その構成成分である $\alpha$ -ジストログリカンの糖鎖は基底膜

の成分であるラミニンに直接結合する。そのため、糖転移が行われないと膜が脆弱になり筋ジストロフィーの症状が現われる。また、フクチンは問題の糖転移酵素と相同性を有し、福山型筋ジストロフィーの原因も同一であろうと推測されている。

$\alpha$ -ジストログリカノパチーと

総称されるこれらの疾患の原因が、構造タンパク質の変異と異なり、酵素の変異であることから遺伝子治療の対象となる可能性も高く、さらなる研究の進展が期待される。

(東京大学医科学研究所 片山栄作氏)

## 情報通信分野

### ① シリコンLSIの10倍の記憶密度に相当する分子メモリIC試作に成功

米国のHP (Hewlett-Packard) 社のHP研究所・量子科学研究グループフェローのR. S. Williamsらの研究グループは、 $1\mu\text{m}^2$ の面積に64個の分子スイッチを配置した不揮発性データ記憶素子(分子メモリ)の試作に成功した。分子スイッチ1個あたりに1ビットのデータを記憶できるので、データ記憶密度は約10 Gbit/cm<sup>2</sup>に相当し、現在のシリコンベースのメモリに対して10倍以上の密度となる。同社の発表によれば、電気的にアドレス可能な記憶素子の記憶密度としては、これまでで最高の値である。

試作した素子は3層の立体構造になっている。まず、幅40 nmの

Pt (白金) 配線を基板の「東西」方向に8本配列に並べる。次に、その上に電気的にスイッチ可能な分子(スイッチング分子)の単分子膜を積む。更にその上に、幅40 nmのPt配線を、今度は「南北」方向に8本並べる。これにより、上下8本ずつのPt配線が64カ所で交差し、各交差点にスイッチング分子が挟まれたサンドイッチ構造となる。各交差点には、おおよそ1,000個の分子が挟まれて1ビットのメモリーとなる。データは各交差点に電圧パルスを与えて分子スイッチの電気抵抗の変化として書き込み、書き込み電圧より低電圧においてこの電気抵抗を読む。この抵抗変化は可逆(書き込み・消去可能)で不揮発性(電源を切ってもデータが消えない)である。同じ分子スイッチを使って簡単な論理回路も同時に形成している。

この分子スイッチを構成する分子の構造は明らかにされていないが、従来の発表から見て、電流によって分子構造が可逆的に変化し、それに伴って電気抵抗も変化する有機分子ではないかと推測される。同社は分子スイッチ自体は理論的には1分子でも機能するため、さらに微細化も可能であるとしている。

また同社は、配線形成に「Nano-imprint lithography」という新技術を採用している。これは基板上に形成したプラスチック薄膜に「スタンプ」を押しつけることで溝を形成し、この溝に金属(ここではPt)を充填する方法である。この技術は従来のリソグラフィ技術<sup>①</sup>に比べるとコスト、製造時間とも大幅に削減可能だとしている。なお、「スタンプ」はシリコン基板を従来のリソグラフィ技術で加工して造られる。一個のICが1 mm角(中央 $1\mu\text{m}^2$ の面積に64個の分子スイッチを配置し、その周囲に入出力用電極がある)、一度に形成するICが625(25×25)個なので30 mm角前後のスタンプを使用していると見られる。また溝に金属を充填する方法は明らかにされていない。

紫外線や電子線を使う従来のリソグラフィ技術では微細化に伴ってコストが高騰することから、「スタンプ」を使って微細回路を印刷・型抜きする製造方法が、コ

## 用語説明

### ①従来のリソグラフィ技術

加工する薄膜上に感光性樹脂の膜を形成し、これを光や電子線で回路パターンに感光し、現像して樹脂パターンを造り、これをマスクとして薄膜をエッチングして回路パターンにする。LSIの微細化に伴い、使用する光は短波長になっており、次世代では極紫外線(EUV、波長15nm)や電子線が必要になると言われている。これに伴い、露光装置のコストも高騰することが問題となっている。

### ②次世代不揮発性メモリ

次世代不揮発性メモリは、パソコンや携帯情報機器の高速化、低消費電力化、立ち上げの高速化等の機能を実現するキー技術として注目されている。現在、MRAM(磁気メモリ)、FeRAM(強磁性体メモリ)、OUM(結晶構造の変化による抵抗変化を使うメモリ)など複数の技術が開発中である。

スト低減の点で注目されつつある。しかし、実際には温度や応力によるスタンプ・基板の伸縮に起因するパターンズレなど、未解決の問題が多く、実用化はされていない。今回の場合、試作品のため回路パターンが単純なので、パタ

ーンズレの問題は無視できるが、実際のLSI回路が形成できるほどのレベルに達しているのか興味を持たれる。

今回の技術は、次世代不揮発性メモリ<sup>②</sup>の新しい候補として、また、実際に機能を発現した初めて

の分子デバイスとして注目される。また、従来のシリコン技術の微細化限界を突破する技術としても期待できる。さらに新しい製造技術の点でも注目される。より詳細な発表が行われることを期待したい。

## 環境分野

### ①ダイオキシン類を現場で迅速に測定できる技術が開発される

毒性が非常に強く、分解されにくい物質として知られるダイオキシン類は、ポリ塩化ジベンゾパラジオキシ (PCDDs)、ポリ塩化ジベンゾフラン (PCDFs) とコプラナーポリ塩化ビフェニル (Co-PCBs) の総称である。

我が国は、ダイオキシン類対策特別措置法により、焼却施設の構造・維持管理・処理基準等の強化を図ってきており、それらの施設から環境中に放出されるダイオキシン類について、1年間に1回以上(1試料について2回)公定法<sup>①</sup>で測定することが定められている。ダイオキシン類の測定は数日から数週間の期間を要し、測定費用も高額なことから、恒常的な測定が難しい状況にある。また、政府が2002年12月にダイオキシン類対策特別措置法のさらなる規制

強化を予定していることから、高精度かつ迅速にダイオキシン類を測定できる技術の確立が重要となっている。

こうした状況の下、(財)電力中央研究所と京都電子工業(株)は、廃棄物焼却施設からの排出割合が高いとされるダイオキシン類(PCDDs、PCDFs)を簡易・高感度かつ迅速に検出できる携帯測定器を開発したと発表した。今回開発した測定器は、約25cm角の携帯型装置ながら、生体の機能である抗原抗体反応を利用することにより、排出基準値相当(10億分の1レベル)の極めて低濃度のダイオキシン類を数分間で測定できる。

現状では、測定できる抗体が

TEQの高いダイオキシン類<sup>②</sup>のみに限られているため、今後は、残りのダイオキシン類を測定することができる抗体の開発等が望まれる。特に、本技術は、従来の測定法で使われているガスクロマトグラフ質量分析などの高度な技術が不要であり、装置本体も従来の測定法と比べ大幅に低コスト化出来るとしている。また、迅速かつ現場での測定が可能かつ、大幅な低コスト化が可能であるといった効果も期待される。本技術は、ダイオキシン類の恒常的な排出状態管理といった、現在不可能な技術への展開も考えられることから、今後のさらなる技術開発の進展が期待される。

### 用語説明

①日本工業規格(JIS)等の公に認められた測定に関する規定。

②PCDDsの異性体2, 3, 7, 8-TCDD、およびPCDFsの異性体2, 3, 7, 8-TeCDFと2, 3, 4, 7, 8-PeCDF。

ダイオキシン類は、塩素のつく位置や数により多くの種類(異性体)があるため、毒性の最も強い2, 3, 7, 8-TCDDの毒性量に換算したTEQ(Toxicity Equivalency Quantity: 毒性等量)として表す。

## ナノテク・材料分野

### ①ナノ組織制御により、永久磁石の10倍以上も強力な酸化物超電導バルク磁石を開発

通常の永久磁石材料では1T(テスラ)以上の強磁場を保持す

ることが難しいため、10T以上の強磁場は超電導磁石がなければ実現できない。したがって、強磁場が必要なNMR(核磁気共鳴)用磁石などへの応用としては、液体ヘリウム(4K: -269℃)で冷却する金属系超電導材料が実用化されている。一方、1986年に発見さ

れた酸化物高温超電導体は、液体ヘリウム冷却よりはるかに容易な液体窒素(77K: -196℃)による冷却で超電導状態になる点に関しては大きな話題を提供したが、電流特性や磁場特性の点では従来の金属系超電導材料に及ばなかったため、強磁場応用の領域での実

用化は遠いと考えられてきた。しかし、その後15年間の研究により次第に諸特性が向上してきており、このたび、(財)国際超電導産業技術研究センターの超電導工学研究所は岩手県工業技術センターと共同で、永久磁石の10倍以上も強力な磁力を発生させることができる超電導材料の試作に成功したと発表した。

超電導バルク材料は、強磁場発生装置でいったん励磁すると、その磁場を捕捉して、冷却する限りいつまでも磁化を保つため、永久磁石のように使用できる。今回試作した酸化物超電導バルク磁石材料は、77Kで14 Tまでの磁場を保

つことが可能であり、10 Tでは20 kA/cm<sup>2</sup>以上の電流を流すことができた。この磁場特性は、液体窒素で使用できる超電導特性としては現時点で世界最高の値である。材料は希土類—Ba—Cu—O系であり、結晶構造の軸が揃ったまま大型のバルク材料になっており、これが強い磁場を捕捉できる理由である。また、この超電導体相の結晶に、数ナノメートルの粒子状の非超電導体相が縞状に配列していることが大きな特徴であり、これが磁力の向きを反転しにくくさせる働きをしており、永久磁石のように使うことができる。この微細構造は、酸素制御溶融成長法と

いう方法で作製される。出発原料の希土類組成を精密に調整した粉末を成型し、これを酸素濃度の低い雰囲気中で溶融した後、徐々に冷却することで結晶成長させた。超電導工学研究所ではこの作製方法に関する基本特許を有している。

従来からの金属系超電導材料を用いた電磁石は、最近、液体ヘリウム使用下で20 Tを実現したところであるが、今回の成果により、液体窒素使用下での高磁場応用も実現に近づいたものと考えられる。なお、本研究は、超電導工学研究所が新エネルギー産業総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて実施したものである。

## エネルギー分野

### ①米国での環境規制強化に対応できる石炭・廃棄物ガス化技術の開発動向が報告される

9月24日～26日、米国ペンシルバニア州ピッツバーグ市で第19回 Annual International Pittsburgh Coal Conference が開催され、米国における今後の環境規制強化の動きと、それに対応できる石炭や廃棄物のガス化技術に関する報告が行われた。

米国では現在、Clear Skies Act of 2002という新たな法律が審議中である。この法律が成立すれば、2018年までに石炭火力から排出される硫黄酸化物を73%、窒素酸化物を67%、水銀を69%それぞれ削減することが求められることになり、それらの削減目標を目指して、環境汚染物質の排出権取引が導入されることになる。また、米国では、経済性と国家安全保障の両方の観点から、全発電量の半分以上を占める石炭火力発電の縮小は考えられていない。

二酸化炭素の排出削減技術の本命は、石炭火力発電所から排出される二酸化炭素の回収と隔離であるとして、米国エネルギー省(DOE)は重点的に回収・隔離技術の開発に取り組んでいる。現在、次世代の高効率石炭火力発電技術として石炭ガス化複合発電(IGCC)の開発に各国が取り組んでいるものの、現状では従来の微粉炭ボイラーを用いた発電方式に比べてコスト高になるため、なかなか商用レベルでの普及が進んでいない。しかし、石炭のガス化過程で酸素を吹込む方式を採用しているIGCCでは二酸化炭素の分離・回収が容易であること、生成ガスの精製過程において生成ガスを一旦常温まで冷却して活性炭に通すことにより比較的容易に水銀が除去できることなどの特長から、IGCCは今後の環境規制に対応できる技術であるとされ、早期の商用化が期待されている。今後、二酸化炭素を含めた環境汚染物質の排出権取引が始まれば、IGCCの経済性が高まることが予想される。

一方、米国環境保護庁(EPA)

は、2005年までに国の廃棄物リサイクル率を35%にまで引き上げることにより、廃棄物に含まれる30種類の化学物質について環境中への排出量を半減させるという目標を打ち出している([www.epa.gov/epaoswer/osw/conserves/](http://www.epa.gov/epaoswer/osw/conserves/)を参照)。その推進方策として、EPAは、石油精製残渣を手始めに、ガス化原料として利用できる広範な廃棄物類を法令における廃棄物の定義から除外することを検討している。このような取り組みが進められているのも、環境負荷の低いリサイクル技術として廃棄物等のガス化技術に大きな期待がかかっているからに他ならない。

わが国でも大規模な国家プロジェクトとしてIGCC開発が計画され、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が廃棄物ガス化発電技術の開発を行っている。その技術開発の推進に当たっては、高い発電効率ばかりを謳うのではなく、低環境負荷の観点をガス化技術の開発に盛り込む必要がある。

## 製造技術分野

### ①従来の300倍の急速水冷により、種々のアモルファス材料製造が可能となる

アモルファス（非晶質）の金属材料は摩擦や腐食に強く、また優れた磁気特性が得られるなどの特徴があり、変圧器用鉄心材料、一部のセンサや光学機器、スポーツ用具などに応用されている。アモルファスの線材や粒子は、熔融金属を冷却水や板材に接触させて結晶化しないように一気に冷却して線材にする方法や、金属粉末の粉砕と圧延を繰り返して混合する方法で製造されてきた。しかし、バ

ルク材料としてアモルファス化できる金属の種類は限られており、また、応用範囲の広い鉄などの金属では添加物を入れないと結晶化してしまうため任意に組成を制御することができず、これらの制限がアモルファス材料の応用範囲を広げるうえでの障害となってきた。

（財）電力中央研究所では、熔融金属の液滴を水流の中に垂らして急激に冷やす急冷手法を改良する研究を進めている。高温の金属液滴に触れた水は水蒸気の膜となって熔融金属滴を包み込み、直後に水蒸気膜が破れてごく小規模の水蒸気爆発を起こす。このときに水流が周囲から同時に金属液滴に接触し、金属は一気に冷却される。従

来の水冷手法では50万℃/秒程度の冷却速度が限界であったが、今回、冷却水にポリエチレングリコールや塩化カルシウムなどを加えて成分調整して水蒸気膜を作る条件を整えることで、冷却速度を従来の300倍に相当する1.5億℃/秒にまで向上させることに成功した。この超急冷技術を用いると、添加物無しでも鉄のアモルファス材料が製造でき、また、これまでアモルファス化が難しかったホウ素などのアモルファス材料が製造できる可能性もある。アモルファス材料の応用範囲を広げる製造技術として期待される。

## 社会基盤分野

### ①各国で取り組みが進む磁気浮上式鉄道 —MAGLEV2002（磁気浮上式鉄道国際会議）より—

2002年9月3～6日、スイスのローザンヌにおいてMAGLEV2002（磁気浮上式鉄道国際会議）が開催され、世界各国における磁気浮上式鉄道の研究開発等の状況が示された。

同会議は、2～3年毎に開催され今回で17回目となる。地元スイスを始めドイツ、フランス、英、米、カナダ、日本（30名程度）など約20か国、300名程度の研究者等が参加した。また今回、中国からは15名が参加しており関心の高さが伺える（次回2004年の開催地は上海に決定した）。

会議では、ドイツから、常電導磁石で浮上しリニア同期モータで

推進するシステムであるトランスラピッド（常電導磁気浮上式 最高速度400km/h程度）について報告があった。現在、建設中の上海空港—市内アクセス交通機関（2003年開業予定）に続き、ミュンヘン空港—市内アクセス交通機関の建設予定についても発表され、実用に向け活発な活動が続けられていることが示された。このシステムは当初、ドイツ国内での実用化が計画されていたが、積極的な海外進出策が功を奏し、発展著しい中国が導入を決定したものである。ただし、トランスラピッド技術のどの部分までを中国に移転するのかは不明である。

一方、スイスからは、地下式真空チューブ内に磁気浮上式鉄道を走行させるスイス・メトロプロジェクトの報告があった。これは、チューブ内を減圧して走行抵抗を極端に減少させ、磁気浮上で400

～500km/h走行の実現を目指しており、現在、ローザンヌ国立工科大学を中心に基礎研究が進められている。今回、基礎的な技術検討結果や経済性評価が示され、今後の技術開発への期待が現れていた。実現すれば、スイス国内は1時間以内で横断できることになるが、今後の進展は、スイス連邦国家の予算次第である。

わが国からは、HSST（常電導磁気浮上式 最高速度100km/h程度）、JRマグレブ（超伝導磁気浮上式 最高速度500km/h）等について報告があった。

HSSTは2005年開業へ向け愛知県・東部丘陵線で進められているプロジェクトである。ドイツからこのプロジェクト以外について質問があり、米国での展開について回答された。また、超電導磁石で浮上しリニア同期モータで推進するシステムであるJRマグレブに

については、国内での実用可能性の評価を受け、今後の改良に関する発表がなされた。空力性能改善のための先頭形状の改良、超電導磁石を搭載している台車の改良、車

体構造の改良等の説明に関心が集まった。さらに、都市内交通用の浮上式鉄道として日本OTIS社の空気浮上式システムが紹介され、米国等からは案内制御に関する質

問等があり、またリニアモーターとの組み合わせについて議論された。  
((独)交通安全環境研究所 水間毅氏)

## フロンティア分野

### ① 着々と進展する 統合国際深海掘削計画 (IODP)

2003年10月から、日米が主導する「統合国際深海掘削計画(IODP)」が開始される予定である。本プロジェクトは、わが国が提唱した掘削船の開発と、それを用いた国際共同研究計画「深海地球ドリリング計画(OD21)」及びこれまで米国主導で開始された深海掘削計画(ODP)とを統合した新しい国際共同研究である。今後、2005年完成予定の深海掘削船「ちきゅう」と米国の深海掘削船を運用して、水深2,500m(最終的には4,000m)の深海底を掘削するこ

とにより、気候変動や地震などの地球変動メカニズムの解明、未知の地下生命圏やガス・ハイドレートの探索などを行い、新しい地球・生命科学の創成とその統合的な理解を目指している。

IODPの推進母体としては、我が国、米国、および独、英、仏を始めとする欧州各国、カナダ、中国等が連合体を構成して参加する案が検討されているが、最も注目すべきことは、その計画の実質的な運営本部がわが国に設置されようとしていることである。我が国には、技術や資金面のみならず人的な面でのリーダーシップも期待されている。

去る2002年10月1日、こうしたIODPを具体化すべく海洋科学技

術センターが「地球深部探査センター」を発足させた。このセンターはIODPの中核となる地球深部探査船「ちきゅう」の運用を担当する組織であり、今後、「ちきゅう」の安全かつ効率的な運用を通じたIODPの科学目的の達成と、運航、掘削、科学サービスに関するマネジメント能力の拡大、運用技術に係るノウハウの蓄積及び関連技術の開発を目指した活動を本格化する予定であり、IODPにおいて重要な役割を担う組織となる。

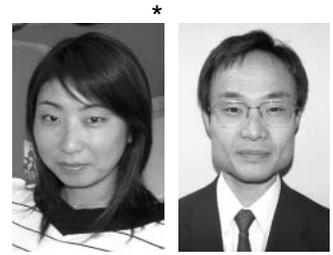
なお、科学技術動向No.11(2002年2月)のトピックスでは『深海掘削船「ちきゅう」進水』を掲載しており、同船について解説している。



特集①

# 生命科学の研究人材の育成 および教育の在り方

ライフサイエンス・医療ユニット 庄司真理子\*、茂木 伸一



## 1. 生命科学における科学技術政策

21世紀は「生命の世紀」と言われるように、現在、生命科学（ライフサイエンス）は国内外問わず最も注目され、急速に発展している分野である。

ライフサイエンスは、「生物が営む生命現象の複雑かつ精緻なメカニズムの解明とともに、その成果を医療、環境、食料生産、産業等の種々の分野に応用するための総合的科学技術であり、国民生活の向上及び国民経済の発展に大きく寄与するもの（平成14年度版科学技術白書）」である。

我が国の科学技術政策においては、第2期科学技術基本計画（2001年3月30日閣議決定）において重点4分野の1つとしてライフサイエンス分野が位置づけられ、推進が図られているところである。2001年9月には、総合科学技術会議によって、2001年度～2005年度に我が国が推進すべきライフサイエンス分野の重点領域および研究開発目標が明確にされた。

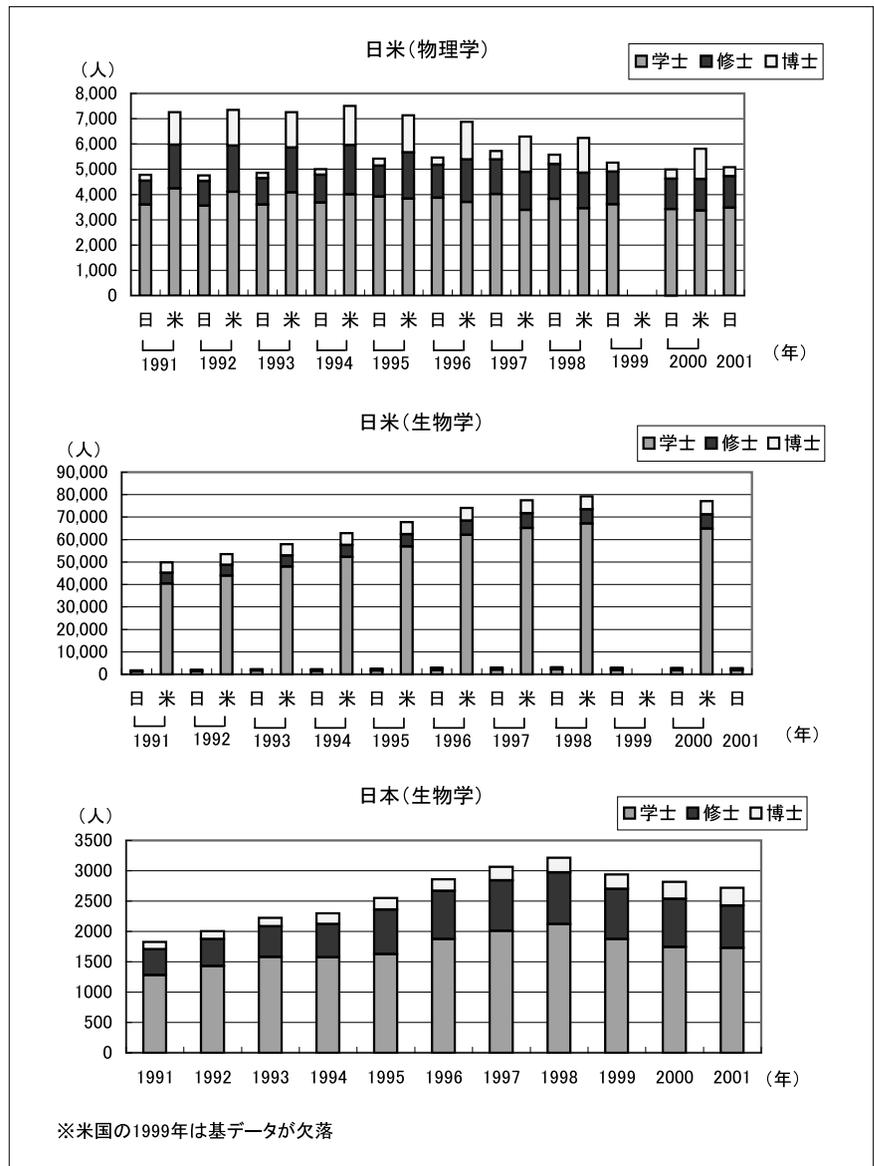
2003年度科学技術関係予算において<sup>1)</sup>、ライフサイエンス分野の概算要求額は、2,091億円（対前年度28.0%増）であり、情報通信分野の1,288億円（対前年度11.5%増）、環境分野の640億円（対前年度26.2%増）、ナノテクノロジー・材料分野の231億円（対前年度100.9%増）と比較しても大きな金額を占めている。

このように、予算の拡充がなさ

れる一方で、ライフサイエンス分野の研究人材の不足も指摘されている。生命科学の研究人材の現状

について、図表1には、我が国と米国における生物学および物理学の学位取得者数を示す。この数値

図表1 日本と米国の大学における生物学・物理学の学位取得者数



(日本のデータは学校基本調査報告書より、「理学」のうち「物理学」と「生物」から抽出。米国のデータは、NSFのScience and Engineering Degrees：1966-2000より、「Physics」と「Biological Sciences」から抽出。)

は、我が国の場合、「理学」の「生物学」のみを抽出しており、生命科学に関連する農学、薬学、医学等を入れていないため、必ずしもこの人数が両国の生命科学の研究人材を表すわけではないが、2000年において、我が国の学士数は米国の約1/37、修士数は約1/8、博士数は約1/21と、かなりの格差が生じている。

一方、物理学の学位取得者数を見ると、米国ではここ数年減少傾向にあることから、2000年においては日米の数値に大きな差はなくなっている。

また、最近のライフサイエンス分野の課題について、第2期科学技術基本計画では以下のように述べられている。

- ライフサイエンス分野の推進にあたっては、国は、国民の理解の増進を推進すること。
- 科学技術の進歩が、人間や社会に大きな影響を及ぼす場合が多くなっており、生命倫理に代表されるように、科学技術の発展がもたらす倫理的問題が重要となっていること。
- 臨床試験や臓器移植・再生医療のように一般の人々にとっても重大な関心をもつものが拡大しており、生命倫理は国民全体の問題として議論されなければならないこと。

● 生命科学、情報科学など科学技術が一層発展し、社会と個人に大きな影響を及ぼすことが予想されるので、社会的コンセンサスの形成に努めることや倫理面でのルール作りを行うことが不可欠であること。

また、分野別推進戦略においては、以下のような記述がなされている。

- 生命倫理の観点からもライフサイエンス分野の先進的研究を推進する上で、国民の大多数の人の理解を得るための積極的な情報開示、教育、広報活動及び意見交換を強化することが必要であること。
- ライフサイエンスの新たな展開を支える融合領域の人材を養成、確保するためには大学やその他の研究機関において、教育・研究の拠点や組織を柔軟に整備することにより人材を育成することや、高校の理科教育の振興のための施策の充実を図っていく必要があること。

生命科学に関する科学的リテラシー(理解度)については、例えば、「科学技術に関する意識調査 — 2001年2~3月調査—」(科学技術政策研究所 NISTEP REPORT No.72)の中に、科学技術関連用語

の理解度に関する調査結果がある。

「DNA」という言葉の理解について、「よくわかる」または「だいたいわかる」と回答した人は全体の74%であり、1991年11月調査までの約2割程度、1995年2月調査の45%を大きく上回った。しかし、「よくわかる」または「だいたいわかる」と回答した人の中で、実際に「DNAが人体で見つかる場所」を問う選択式の設問に正解できたのは、全体の28%であった。本報告書では、「科学技術に関する用語の理解度は、マスメディア等によって取り上げられる頻度と密接に関連していると思われる。」と述べている。

以上の視点から、本稿では以下の2点について述べる。

- ① 今後のライフサイエンスの発展のためには、予算拡充に加えて、生命科学における研究人材の育成をより推進していく必要がある。そのための大学における教育システムについて検討する必要がある。
- ② 21世紀は「生命の世紀」であり、長期的な視点から、生命科学に対する社会全体のリテラシー向上の施策が必要である。そのために教育が果たす役割を検討する必要がある。

## 2. 大学における生命科学の研究人材の育成

研究人材の育成について最も重要な役割を担うのが大学である。今後のライフサイエンス分野を担う人材を育成し、その裾野を広げていくためには、生命科学を推進するための教育システムが求められる。

近年のライフサイエンス分野は、ゲノムや遺伝子といった分子生物学を基礎とした研究開発を主

流に急速に発展しており、内容も学際的・融合的になってきているほか、社会との関わりに関する領域などもでてきている。

しかし、「大学等におけるバイオサイエンス研究の推進について(建議)」(2000年2月学術審議会答申)でも指摘されているとおり、生命科学の革新的で学際的な急展開の一方で、現在これを担ってい

る医学、薬学、理学、農学等の学部及び大学院などの教育・研究体制は、現実の研究の進展に対応しきれていない状況にある。そのため、生命科学を系統的に教育できるような、生命科学系の学科や研究科などを、既存の組織の再編成なども含め整備すべきとの提言がなされている。

これには、例えば、20世紀の半

図表2 我が国の国立大学において設立された生命科学研究科

	京都大学大学院生命科学研究科	東北大学大学院生命科学研究科	大阪大学大学院生命機能研究科
設 立	1999年4月	2001年4月	2002年4月
講座構成	2専攻13講座	3専攻12講座	1専攻7講座
特 徴	理学、農学、医学、薬学等の研究グループを集結。新しい生命科学を駆使し、地球環境保全と人類の福祉と幸福を目指す人材、生物が示す多彩な生命現象を高次機能として捉え、その高次機能を追究する人材を養成。	理学、医学、歯学、薬学、農学、工学などの生命科学分野にかかわる分野を統合。高次生命システムの解析と維持・保全を目標に、分子レベルから個体間レベルまで極めて広い範囲の教育研究を実施。	医学、工学、理学等の生命科学関連分野を集結。サブナノスケールから細胞レベルまでのさまざまな生命素子が、動的な過程のもとで統合されて生命体を形成し生命機能を生み出していく普遍的な機構と原理を明らかにする研究・教育を実施。

(各大学のHPより科学技術動向研究センターにて作成)

ばに誕生した分子生物学が盛んに研究され始めた当時、我が国の大学では必ずしも理学部がその研究・教育の場とはならず、医学部や農学部などで、それぞれの応用研究に向けた手法の一つとして取り入れられたといった背景がある。それは、理学部の中で分子生物学のような新しい学問が生まれてきた時に、その器となる場をつくる柔軟なしくみがなかったためである。

このような問題意識より、既存の理学、農学、薬学、医学などの生命科学を中心とする分野を統合し

た大学院研究科が国立大学でもいくつつくられてきている(図表2)。

さらに、京都大学大学院生命科学研究科長の柳田充弘教授は、「優れた生命科学者の育成には、大学院だけでなく、生命科学部の設置が必要である。生命科学研究科では、理学部、農学部、薬学部、医学部、工学部といった多様な学部卒業者を受け入れているが、そのことによる大学院教育の混乱もある。優れた生命科学者を輩出していくためには、学部から生命科学教育を実施することが必要である。」と述べている。今後とも、

総合的な生命科学を教育・研究できる大学院等の整備について検討していく必要がある。

また、先にも述べたように、今後の生命科学は社会との関わりに関する領域が重要になってくることから、大学での一般教養として、それに関連した授業科目の設置など、カリキュラムの充実等も求められる。例えば米国では、近年、マサチューセッツ工科大学(MIT)が生命科学をすべての学生に必修とした。このことは、画期的なこととして米国でも大きな話題となった。

### 3. 生命科学に関する科学的リテラシーと教育

生命科学は今後ますます社会コミュニケーションの必要性が高まる。したがって、生命科学に関する社会全体のリテラシーを向上させるための取り組みが必要である。長期的な観点から、科学的リテラシーの向上を目指すためにもっとも重要な役割を果たすのが教育である。

生命科学は、分子生物学の進展により、遺伝子を中心とする原理を理解すれば、系統的に多様な生物現象や生物のしくみが分かるようになってきた。今後の生命科学の展開は、この原理を軸に派生していくものであることから、生命科学の教育においても、発達段階に応じてその素養を培っていくことが重要である。

ここでは、近年、米国および英国で行われた科学教育改革について紹介するとともに、その中における生命科学の位置づけを紹介する。

#### ●米国<sup>2, 3)</sup>

米国では、1980年代より、全米科学教育連合学会(NSTA)の主導のもとに引きおこされた「科学教育の危機」の一大キャンペーンをはじめ、学会、全米科学振興協会(AAAS)などの組織、州、地域など個別の活動により、科学教育に対する改革が活発となった。1991年、NSTAは全米研究協議会(NRC)に対し、全米科学教育スタンダード(National Science Education Standards)の開発の調整をするよう依頼し、その開発の

予算が連邦教育局および全米科学財団(NSF)から出された。この開発には、NSTAやAAASをはじめとする多くの科学教育関連学会や行政組織が参加し、1995年12月に発表された。

全米科学教育スタンダードは、21世紀に全ての米国国民が科学的リテラシーを有することが現実となるための科学教育の理想・到達点が描きだされたものであり、いわゆる“基準”ではない。ここでは、科学的リテラシーを、「個人的な意志決定、または市民的および文化的な活動への参加、そして経済生産力の向上のために必要になった、科学的な概念およびプロセスについての知識および理解のこと」と定義している。

全米科学教育スタンダードは、

図表3 米国の全米科学教育スタンダードにおける生命科学スタンダード

学年	内容スタンダード	内容スタンダードへの指針の概要
幼稚園 第4学年	生物の特徴	生物が基本的に必要とするもの。 植物あるいは動物の様々な機能に対応する体の構造。 生物の行動にある内部信号と外部信号。
	生物のライフサイクル	植物や動物の持つ、誕生、成長、生殖、死というライフサイクル。 植物や動物はそれらの親とかなりよく似ている。 生物の多くの特徴は、親からの遺伝と環境との相互依存の結果生じたもの。
	生物と環境	すべての動物は植物に依存している。 生物の行動パターンは環境の特徴と関連している。 すべての生物は生活している環境によって変異を起こす。 人間は、自然のままの環境と造られた環境に依存している。
第5 — 8学年	生命システムにおける構造と機能	生物は、生命の基本的な単位である細胞から成り立っている。 細胞は、多くの機能を有し、成長と分裂によって、より多くの細胞を生み出す。 分化した細胞の集まりは、組織を形成し、組織は器官を形成するために配置される。 人間には消化、呼吸、生殖、血液循環、排出、運動などのシステムが備わっており、相互に影響しあう。
	生殖と遺伝	生殖はすべての生命システムの特徴であり、種の保存のために必須のもの。 多くの種では、卵（雌）と精子（雄）が受精し、新しい個体に発生し始める。新しい個体は遺伝情報をその母親と父親から受け取る。 遺伝情報は、遺伝子に含まれ、人間の一つの細胞には何万、何十万もの異なった遺伝子が含まれている。
	調節と行動	生物の内部環境の調節には、内部環境を感じとり、生理的活動を変えることが仕組みられている。 行動的反応には、細胞、器官システム、生物全体を含んだ多くのレベルにおける調節と伝達が必要。 生物の行動は環境に適応することを通して進化する。
	個体群と生態系	同時に生活しているすべての個体群と、それらが相互作用する物理的要因によって生態系は構成されている。 食物網は、生態系における生産者、消費者、分解者の間の関係を定めたもの。 生態系によって支えることができる生物の数は、光と水の量、温度の幅、土の質などの利用可能な原料と非生物的要因によって決まる。
	生物の多様性と適応	数百万種もの動物や植物、そして微生物が今日生きているが、生物間の統一性がある。 生物進化によって、多くの世代を通して徐々に進行した種の多様性が説明できる。 種の絶滅は、環境が変化したり種の適応的特徴が生存していくために不十分であるときに起きる。
第9 — 12学年	細胞	各細胞はそれらの細胞の機能に応じた構造を持つ。 多くの細胞機能は化学反応を伴う。 DNAに蓄えられた遺伝情報は、細胞が必要とする数千のタンパク質の合成に直接使われる。
	遺伝の分子的基础	すべての生物において、生物の特徴を規定するための指令は、四種類のサブユニット（A, G, C, T）から成るDNAが伝える。 人間のほとんどの細胞には、22対の異なる染色体と、性を決定する1対の染色体がある。 DNAの中の変化（突然変異）は、低い割合で自然に起きる。
	生物進化	種は時を越えて進化している。 生物の多様性は、生活様式でそれぞれ有効な生態的地位を得た35億年以上の進化の結果である。 今日地球上に生存している数百万種の動物、植物、微生物は、共通の祖先でつながっている。
	生物間の相互依存	地球上の原子と分子は、生物圏の生物と非生物を構成する物質の間を循環する。 エネルギーは、光合成をする生物から草食動物、肉食動物、分解者へと生態系の中を一方向に流れる。 人類は世界の生態系の中で生存している。人間は徐々に、人口の増加や技術、消費の結果として生態系を変えている。
	生命システムにおける物質、エネルギー、組織化	食物の分子の化学結合にはエネルギーが含まれている。 生態系における生物体の個体群の分布と数度（abundance）は、物質とエネルギーの利用可能性と物質を循環処理する生態系の能力によって制限される。 物質とエネルギーは、細胞、器官、生物体、群集といった生物システムの組織化の様々なレベルを通して流れており、生命システムと物理環境の間では、化学元素は異なった様式で組み変わっている。
	生物の行動	多細胞の動物は行動を産み出す神経系を持っている。 生物体には内部の変化と外部の刺激に対して行動的反応がある。 行動生物学は、心理学、社会学、人類学と関連づけを与えるものとして、人間と密接な関係を持っている。

(文献<sup>2)</sup> より一部を抜粋)

以下の6つのスタンダードより構成されている。

- (1)科学教授 (Science teaching) スタンダード  
すべての学年の科学教師が知っていなければならない事柄や、できるべきこと。
- (2)科学教師のための専門性向上 (Professional development) スタンダード  
科学教師に必要とされる専門的知識および能力を向上させるための事柄。
- (3)科学教育におけるアセスメント (Assessment) スタンダード  
アセスメント (科学教育システムにおける主要なフィードバック機能) を行う際、その質を判断するための事柄。
- (4)科学の内容 (Science content) スタンダード  
幼稚園から高等学校卒業までの間に児童・生徒が自然科学に関して知っているべき、理解すべき、行えるべき内容の概説。
- (5)科学教育プログラム (Science education programs) スタンダード  
質の高い学校科学プログラムに必要な条件。
- (6)科学教育システム (Science education system) スタンダード  
科学教育システム全体の達成度を判定するための事柄。

このうち、(4)科学の内容 (Science content) スタンダードは、州や地方がそれぞれのカリキュラムを作成するための様々な強調点や観点について記述されたものである。内容スタンダードは、以下の8つのカテゴリーに分けられる。①の「科学における統合概念とプロセス」については、幼稚園～第12学年 (6～18歳) までについて示されており、他の7つのカテゴリーは、幼稚園～第4学年、

第5～8学年、第9～12学年ごとに分けられている。

- ①科学における統合概念とプロセス (Unifying concepts and processes in science)
- ②探究としての科学 (Science as inquiry)
- ③物理科学 (Physical science)
- ④生命科学 (Life science)
- ⑤宇宙および地球科学 (Earth and space science)
- ⑥科学と技術 (Science and technology)
- ⑦個人的、社会的観点から見た科学 (Science in personal and social perspectives)
- ⑧科学の歴史と本質 (History and nature of science)

この中で生命科学は、カテゴリーの1つとして挙げられている。生命科学における内容スタンダードとその指針について、その一部を図表3に示す。例えば、幼稚園～第4学年の「生物のライフサイクル」において遺伝の概念が取り入れられていることや、第5～8学年の「生命システムにおける構造と機能」というタイトルに見られるように、生命をシステムとして捉えていることなど、現在の生命科学の展開に沿った形の傾向が読み取れる。

また、今後の生命科学に必要な不可欠な視点である、科学と社会との関わりについては、「⑦個人的、社会的観点から見た科学」などで取り扱われている。

#### ●英国<sup>4, 5)</sup>

英国 (イングランド、ウェールズ) では、1970年代より、児童・生徒の基礎学力の低下や地域・学校間格差などが大きな問題となり、改善のための論議が活発となった。カリキュラムに関しては、全国基準の設定が論点となり、中

央政府機関によって数多くの政策声明が公表されるようになった。

そして、1988年の教育改革法 (Education Reform Act) をもとに、公立 (営) 学校を対象とした共通カリキュラムである National Curriculum (NC) が1989年度に導入された。それ以降、NCは1991年、1995年と改訂され、現在は2000年9月から新しい改訂版が施行されている。

同法において、科学 (理科) は基礎教科 (foundation subjects) の中でも英語 (国語)、数学とともに必修であるコア教科 (core subjects) として位置づけられた。この背景には、すべての子ども達が科学を学習することにより、国民に共通の科学的リテラシーの向上を図るとともに、急速に変化する科学技術社会への準備教育を施すという社会的要請に対応する一方で、科学技術を背景とした国際競争に勝つための人的資源を効率的に生産するという意図があったと考えられている。

NCは省令で示され、学習目標や内容が提示されている。しかし、NCに準拠した全国テスト (外部評価) と教師による評価 (内部評価) によって児童生徒が評価されること、公立 (営) 学校が対象としていないこと、学校全体のカリキュラムではないことなど、我が国の学習指導要領とは質的に異なるところがある。

NCでは、初等教育と中等教育の連続性や一貫性から、義務教育段階が Key Stage 1 (5～7歳)、Key Stage 2 (7～11歳)、Key Stage 3 (11～14歳)、Key Stage 4 (14～16歳) という4つの段階に区分されている。

NCは各教科の到達目標や学習プログラム等から構成されている。科学に関する学習プログラムは、主としてスキル (技能・能力) や態度に関係する「科学的探究

図表4 英国（イングランド、ウェールズ）の National Curriculum における ライフプロセスと生物（Life processes and living things）のプログラム

	Key stage 1 (5歳～7歳)	Key stage 2 (7歳～11歳)	Key stage 3 (11歳～14歳)	Key stage 4 (14歳～16歳)*
内容	ライフ・プロセス	ライフ・プロセス		
			細胞と細胞の機能	細胞の活動
	人間とその他の動物	人間とその他の動物 (栄養作用/循環器/運動/ 成長と生殖/健康)	生物としての人間 (栄養作用/運動/生殖/ 外呼吸(Breathing)/ 内呼吸(Respiration)/健康)	生物としての人間 (栄養作用/循環器/外呼吸/ 内呼吸/神経系/ホルモン/ 恒常性/健康)
	緑色植物	緑色植物 (成長と栄養作用/生殖)	生物としての緑色植物 (栄養作用と成長/内呼吸)	生物としての緑色植物 (栄養作用/ホルモン/ 物質輸送と水の関係)
	変異と分類	変異と分類	変異、分類、遺伝 (変異/分類/遺伝)	変異、遺伝、進化 (変異/遺伝/進化)
	環境における生物	環境における生物 (適応/摂食の関連性/ 微生物)	環境における生物 (適応と競争/摂食の関連性)	環境における生物 (適応と競争/ エネルギーと栄養素の移動)

※ Key stage4 には single science と double science があり、大多数の生徒が double science を選択する。上記は double science のプログラム。

(文献<sup>5)</sup> および「The National Curriculum for England」より作成

(scientific enquiry)」と、主として知識・理解に関係する「ライフプロセスと生物 (life processes and living things)」、「物質とその特性 (materials and their properties)」、「フィジカルプロセス (physical processes)」が設定されている。またNCでは、生命科学のような自然科学の領域に加えて、「科学の本質 (nature of science) が扱われていることや、「日常生活の文脈における科学 (science in an everyday context)」という考えに基づいて、科学を社会や日常生活との関連で学習するといった特徴がある。

生命科学は、このうち「ライフ

プロセスと生物」として取り上げられている。図表4で示したとおり、NCでは、連続性や一貫性をもった生命科学の教育がデザインされており、ステージが上がるごとに項目が増え内容が高度化している。また、人間の体の機能や健康などについても、ここで取り扱っている。

米・英の科学教育改革においては、国民の科学的リテラシーを向上させる目標があった。その目標達成のため、長期的な視点に基づいて科学教育を見直し、再構築を図った結果が、全米科学教育スタンダードやNCであると言える。

また、生命科学に関する内容についても、それぞれに違いがあるものの、生命科学をいかに系統的に理解するかといった視点が重視されていることが読みとれる。

我が国においても、長期的な視点で科学的リテラシーを向上させるための取組が必要である。21世紀は「生命の世紀」であり、分子生物学を中心とする系統的な生命科学を教育の中できちんと位置づけ、発達段階に応じてその素養を培っていけるよう、理科教育の再構築を図っていくことを検討していく必要があるだろう。

## 4. 結び

今後の我が国の産業基盤を支えらることも期待されるライフサイエンスの発展のためには、研究人材の育成が最も重要な課題の一つであり、大学における生命科学教育・研究を充実させる必要がある。また、生命科学は学際的・融合的になってきているほか、社会との関わりに関する領域などもでてきており、系統的・総合的に生命科学を教育できるような大学院等を整

備することやカリキュラムを充実させることなどが求められる。これらについて、実際にどのような教育システムをつくっていくかは、今後の国立大学の独立行政法人化に伴い各大学に求められると同時に、そのための行政側のサポートも求められる。

また今後は、個人あるいは社会として生命倫理など生命科学に関する問題について判断や議論をす

る必要が生じてくる。生命科学についての社会全体のリテラシー向上について、長期的な視点で考えた場合、教育の果たす役割は大きい。分子生物学を中心とする系統的な生命科学を教育の中できちんと位置づけ、発達段階に応じてその素養を培っていけるよう、理科教育の再構築を検討していく時期にきていると言えよう。

**謝辞**

本稿は、科学技術政策研究所において2002年7月18日に行われた京都大学大学院生命科学研究科長の柳田充弘教授による講演会「わが国大学における生命科学の研究と教育推進の危機的状況」をもとに、我々の調査を加えてまとめたものである。柳田教授からは、最前線で活躍する生命学者かつ教育者としての立場から、我が国の生命科学の振興のための提言をいただいた。本稿では全てについて触れることはできなかったため、最後に付表として概要を記す。

本稿をまとめるにあたって、柳田教授には、ご指導をいただくとともに、関連資料を快くご提供いただきました。また、広島大学大学院教育学研究科磯崎哲夫助教授、静岡大学教育学部熊野善介助教授には、各種情報をいただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

**引用文献・参考文献**

1) 総合科学技術会議（第21回）「平成15年度科学技術関係予算の編成に向けた取組について」(<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryoo/haihu21/siryoo1-1.pdf>)  
 2) 長洲南海男 監修、熊野善介・丹沢哲郎 他 訳「全米科学教育スタンダード —アメリカ科学教育

**付表 柳田充弘教授による生命科学振興のための提言**

<p>(1) 生命科学教育の充実</p> <p>①初等・中等教育における理科教育の改善が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●博物学的な生物学と、生命科学との二本立てで教える。</li> <li>●早い時期から遺伝子教育を行う。</li> <li>●生命科学分野の教員を養成する。</li> </ul> <p>②高等教育では生命科学分野の学生を養成するために学部・研究科の新設が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●従来の理学、農学、薬学、医学とは別に生命科学部を設置する。</li> <li>●大学院に生命科学研究科を設置する。</li> </ul>
<p>(2) 優れた人材の養成</p> <p>①優れた研究を継続的に保持できる体制づくりが必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●研究評価の質と客観性の向上。</li> <li>●優れた研究者に対する定年制度の緩和。</li> <li>●大学院生等の生活を支援する奨学金制度の充実など経済的サポート。</li> </ul> <p>②リーダー養成が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●若手（30代）の研究リーダー。</li> <li>●国際的に通用する国家レベルのリーダー。</li> </ul> <p>③人材養成に必要とされる要素。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●外国人研究リーダーと外国人研究員が多数参加できる環境。</li> <li>●女性研究者が活躍し、リーダーになりやすい環境。</li> <li>●日本の研究者の英語力の向上。</li> </ul>
<p>(3) わが国の生命科学政策の現状と課題</p> <p>①政策策定にはわが国独自の価値観が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●米国や欧州への対抗的立場からの政策策定ではいけない。</li> <li>●一方で、米国や欧州とはできる範囲で共同歩調をとる必要がある。</li> </ul> <p>②国策（資金の流れ）に対する注視が必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>●優れたグラント制度はよい方向で継続させる必要がある。</li> <li>●国策を担う特殊法人等の成果などは注視していく必要がある。</li> <li>●国策としての資金の流れに対しては外部評価が必要。</li> </ul>

(科学技術政策研究所講演録No.90「わが国大学における生命科学の研究と教育推進の危機的状況」より作成)

の未来を展望する—」 梓出版社、2001年

3) 熊野善介「アメリカ合衆国—科学教育改革の動向と新しい科学教育課程の方向性—」(国立教育政策研究所編『理科系教科のカリキュラムの改善に関する研究—諸外国の動向—』、83-102、2001)

4) 磯崎哲夫「ナショナル・カリキュラム」(日本理科教育学会編『キーワードから探るこれからの理科教育』、32-37、東洋館出版社、1998)

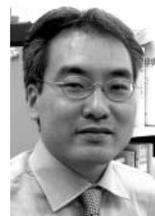
5) 磯崎哲夫「イギリス —新しい科学教育を目指して—」(国立教育政策研究所編『理科系教科のカリキュラムの改善に関する研究—諸外国の動向—』、1-35、2001)

6) 柳田充弘「『いのち』のサイエンス 生命科学はこんなに面白い」日本経済新聞社、2000年



## 特集②

# 化石資源を用いない水素製造技術 — 持続可能な水素エネルギーシステムへの鍵 —



環境・エネルギーユニット 大森 良太

### 1. はじめに

今日、われわれは地球規模のエネルギー・環境問題に直面し、3E問題の克服、すなわち、エネルギー供給、環境保全、経済成長の同時達成が求められている。

こうした中、大きな関心を集めているのが、燃料電池をはじめとする水素エネルギー利用システムである。将来的には、水素は電気と共に中心的な二次エネルギーとしての役割を担っていくものと期待されている。

水素エネルギーの普及にあたっては、燃料電池や水素の製造・輸送・貯蔵・利用等に関連する多くの要素技術開発やインフラ整備が必要である。国際的にも競争が激化する中、わが国の産業界や学界では多大なリソースを燃料電池・水素エネルギー関連の研究開発にあて、それらの成果は続々と学術誌やマスメディアに発表されている。

政府も推進戦略の構築や予算的措置に積極的に取り組んでいる。総合科学技術会議は今年6月に取りまとめた「平成15年度の科学技術に関する予算、人材等の資源配分の方針」<sup>1)</sup>において、エネルギー分野の「特に重点的に推進すべき領域・事項」として、燃料電池・水素利用を冒頭に挙げている。

また、経済産業省の燃料電池実用化戦略研究会は、燃料電池導入の意義として「省エネルギー効果」、「環境負荷低減効果」、「エネルギー供給の多様化・石油代替効果」、「分散型電力エネルギーとしての利点」、「産業競争力強化と新規産業創出」の5項目を挙げ、燃料電池を21世紀のエネルギー・環境分野におけるキーテクノロジーと位置付けている<sup>2)</sup>。

燃料電池は、水素と酸素が水になる過程から電気を取り出す、い

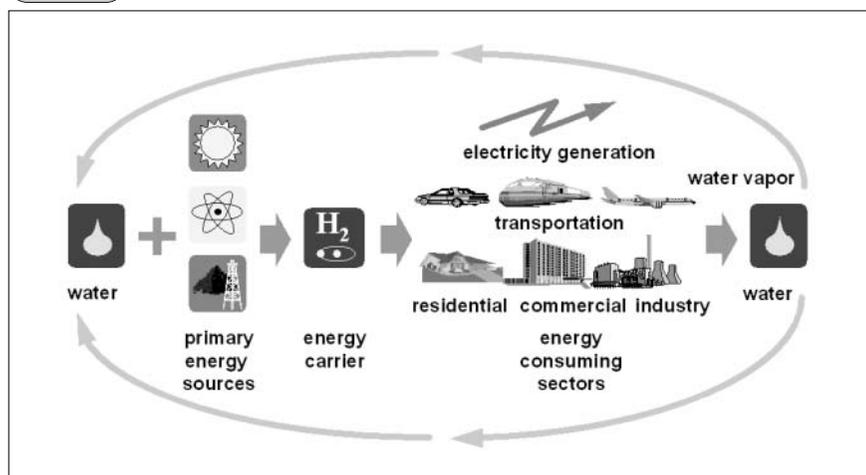
わば水素を燃料とする発電機である。燃料電池自体からは水しか排出されない。ただし、水素は単体としては天然にほとんど存在せず、化石資源、バイオマス、水などから製造する必要がある。

現在のところ、当面は天然ガス等の化石資源から大半の水素を製造して行かざるを得ないとの見方が支配的である。これは、化石資源を用いない水素製造技術に多くの課題があり、その実用化や普及にはまだ相当の時間がかかると見込まれているためである。

しかしながら、化石資源の節約や地球温暖化ガス排出の削減の観点から、長期的には、化石資源を用いない水素製造技術に移行していくことが望まれる。再生可能エネルギーや原子力エネルギーを利用して水やバイオマスから水素を製造する技術が普及すれば、水素エネルギーシステム全体として、化石資源の消費や地球温暖化ガスの排出が大幅に低減される（より定量的な検討は3-3節で行う）。このような持続可能な水素エネルギーシステムの実現に対する期待が、今日の燃料電池・水素エネルギー研究のバックボーンとなっている。図表1に水を原料とした水素をベースとする水素エネルギーサイクルを示す。

このような“理想的なシステム”がいつ、どのような形で実現するかについての見通しは、今後の燃

図表1 水からの水素をベースとする水素エネルギーサイクル<sup>3)</sup>



料電池・水素エネルギーの研究開発戦略や導入・普及に向けた政策の意義やあり方を大きく左右する。従って、その実現にとって不可欠な化石資源を用いない水素製造技術のポテンシャルを見定めておくことは、わが国の長期のみな

らず短中期のエネルギー政策や研究開発戦略の策定にとって極めて重要と考えられる。

以上より、本稿では化石資源を用いない水素製造技術に焦点をあてる。水素エネルギーや燃料電池についての基礎事項に簡単に触れ

た上で（2章）、3E問題の解決についての意義を既往の研究例を基に定量的に検討し（3章）、さらに、主な技術の研究開発動向を概観し（4章）、本稿のまとめと提言を述べる（5章）。

## 2. 水素エネルギーと燃料電池

21世紀のエネルギーシステムにおいて、水素は電気と共に中心的な二次エネルギーとしての役割を担うと期待されている。電気と水素は互いに容易に変換でき、以下のように補完的な存在である<sup>4)</sup>。

- 水素は大量に貯蔵できるが電気はできない
- 電気はものを移動させずにエネルギーを輸送できるが水素はできない
- 水素は化学燃料または化学工業原料となれるが電気はなれない
- 電気は情報の加工や貯蔵にも使えるが水素は使えない
- 水素は長距離の輸送に適しているが、電気は短距離の輸送に適している

今日、水素エネルギーの利用システムとして最も期待されているのは燃料電池である。燃料電池の原理は、水の電気分解の逆であり、水素と酸素が水になる反応から電気を取り出す。図表2に示すように、燃料電池は電解質の種類によって、固体酸化物形（SOFC）、熔融炭酸塩形（MCFC）、リン酸形

図表2 各種燃料電池の比較<sup>5, 6)</sup>

	固体酸化物形 (SOFC)	熔融炭酸塩形 (MCFC)	リン酸形 (PAFC)	固体高分子形 (PEFC)
電解質	安定化ジルコニア	炭酸塩	りん酸	イオン交換膜
燃料 (反応物質)	水素、一酸化炭素	水素、一酸化炭素	水素	水素
作動温度	900～1,000℃	650～700℃	200℃	70～90℃
発電効率 (HHV)	45～55%	45～50%	40～45%	35～40%
特徴	高発電効率 内部改質可能	高発電効率 内部改質可能	実用化に近い 起動・停止が困難	低温作動可能 高エネルギー密度 起動・停止が比較的容易
開発状況	実証段階	実証段階	商品化段階	実用化間近
用途	集中大規模発電、分散電源、コジェネレーション	集中大規模発電、分散電源、コジェネレーション	分散電源、コジェネレーション	自動車、家庭用コジェネレーション、ポータブル

図表3 燃料電池実用化戦略研究会として期待する導入目標（累積）<sup>3)</sup>

期間	期の位置付け	期末での導入目標	
		燃料電池自動車	定置用燃料電池
現在～2004年	基盤整備・技術実証段階	—	—
2005年～2010年	導入段階	約5万台	約210万kW
2010年～2020年	普及段階	約500万台	約1000万kW

(PAFC)、固体高分子形（PEFC）の4つのタイプに分類される。主な用途は、燃料電池自動車（FCV）、家庭用・事業所用の定置電源（コジェネレーションシステムも含む）、ポータブル機器電源等である。

図表3に燃料電池実用化戦略研究会の報告書に明示された「期待する導入目標」を示す（固体高分子形燃料電池が対象）。

## 3. 化石資源を用いない水素製造技術の意義 —3E問題解決の視点から

先に述べたように、水素は単体では天然にほとんど存在しない。従って、燃料電池の燃料となる水素をオンサイトまたはオフサイトで製造しなければならない。例えば、燃料電池自動車であれば、他

の場所で水素を製造してこれを輸送し利用するか（純水素型燃料電池自動車）、メタノールやガソリンなどから水素を製造する装置（改質器）と組み合わせて用いるか（改質型燃料電池自動車）、い

ずれかの方式となる<sup>(注1)</sup>。燃料電池の導入による石油代替効果、省エネルギー効果、環境負荷低限効果等は、燃料や製造方法に大きく依存する。

本章では、はじめに水素の需給

(注1) 熔融炭酸塩形や固体酸化物形の燃料電池では内部改質が可能であり、天然ガスや石炭ガスを燃料とすることができる。ただし、現在のところは、自動車用、あるいは、小規模定置電源用としての用途は考えられていない。

(注2) 化石資源改質による場合でも、大規模プラントで水素を製造する場合には、二酸化炭素の回収・固定

化技術を適用することにより、ゼロエミッションを達成できるという考え方もある。最近では、二酸化炭素の地中貯留技術への関心が高まりつつある。これについては、宮本和明：「CO<sub>2</sub>地中貯留技術を中心とした温暖化対策技術の開発動向」、科学技術動向2002年6月号を参照されたい。

動向と製造方法を概観する。その上で、燃料及び製造方法による、省エネルギー効果や温室効果ガス排出削減効果の差異についての既往の解析例を紹介し、化石資源を用いない水素製造技術の意義を明らかにする。

3 - 1

水素の需給動向

世界の水素生産量は年間約5,000億Nm<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup>: 0℃、1気圧の条件下でのm<sup>3</sup>) である。大部分は天然ガス等の化石燃料の水蒸気改質により生産され、約40%がアンモニア合成、約20%が石油精製で消費されている。世界最大級の水蒸気改質プラントの水素製造能力は10万Nm<sup>3</sup>/hである<sup>7)</sup>。

日本では年間150~200億Nm<sup>3</sup>の需要があり、ほぼ半分が石油精製で使用されている。エネルギー用としては宇宙ロケットの打ち上

げ用に液体水素が年間300~500万Nm<sup>3</sup>用いられている<sup>5)</sup>。また、製鉄、石油精製、エチレン製造プロセスなどで、年間100億Nm<sup>3</sup>以上の水素が副生しているが、大部分は化学製品等の原料やエネルギーとして自家消費され、外販される割合は1%程度である。

図表3に示したように、燃料電池実用化戦略研究会は、2020年における燃料電池自動車の期待する導入目標を500万台(累積)としている。500万台の燃料電池自動車が全て水素を搭載して走行するようになると年間約140億m<sup>3</sup>の水素が必要になる<sup>8)</sup>。仮に、燃料電池自動車が将来的にさらに普及し、今日のが国の乗用車保有台数約5,300万台<sup>9)</sup>の半数の燃料電池自動車が走行すると、さらにその5倍程度の水素が必要になる。定置型燃料電池などの水素需要も考慮すればその量はさらに増える。

このように、水素エネルギーシステムが本格的に普及した際の水素需要は、現在の供給量を大きく超える。これをどのように製造していくかが大きな課題であり、水素エネルギーシステム全体の骨格を規定する。

3 - 2

水素の製造方法

図表4に代表的な水素製造法を示す。原料またはエネルギーとして化石資源を用いる方法と用いない方法に大別してある。現在、化石資源を用いる方法は工業的製造法として確立しているが、大量の二酸化炭素を放出する<sup>(注2)</sup>。例えば、今日主流となっている水蒸気改質プロセスでは、最も二酸化炭素の副生が少ない天然ガスを原料とする場合でも、水素を1m<sup>3</sup>生成する際に約0.9kgの二酸化炭素を放出する<sup>7)</sup>。

一方、化石資源を用いない水素製造法としては、(1)水の電気分解(非化石燃料起源電力)、(2)水の熱化学分解、(3)バイオマスの変換、(4)水の光分解が挙げられ、二酸化炭素排出や化石資源消費が実質的にゼロとなる。ただし、(1)を除いては、技術的に未確立である。

3 - 3

燃料電池利用システムのライフサイクルアセスメント

3 - 1節で水素エネルギー利用システムの普及に伴ない、水素生産量を大幅に増加しなければなら

図表4 水素製造法の分類

	方法	原料	エネルギー	技術的開発レベル
化石資源利用	水蒸気改質	天然ガス、LPG・ナフサ	熱	実用化レベル
	部分酸化	LPG・ナフサ、原油、石炭	熱	実用化レベル
	接触改質	LPG・ナフサ	熱	実用化レベル
	コークス炉ガス	石炭	熱	実用化レベル
	電気分解	水	電力(化石燃料起源)	実用化レベル
非化石資源利用	電気分解	水	電力(非化石燃料起源)	実用化レベル
	熱化学分解	水	原子力、太陽熱	実証レベル
	バイオマス転換	バイオマス	熱、微生物等	実証レベル
	光分解	水	太陽光	基礎研究レベル

ないことを確認した。この際、化石資源を用いて水素を製造しこの増加分を満たした場合でも、燃料電池を用いた自動車や定置電源のエネルギー効率が既存のものより高ければ、その分だけ化石資源の節約、さらには、地球温暖化ガスの排出削減が期待されることになる。その効果はどの程度であろうか。

これを評価するには、原料の採掘から、輸送、燃料製造、使用までに要するエネルギーを総合的に考慮したライフサイクルアセスメントが要求される。自動車の場合には Well-to-Wheel 解析とも呼ばれる。

二酸化炭素排出について考えると、通常ガソリン自動車は、原油の採掘、ガソリンの製造・輸送よりも、走行時に大部分の二酸化炭素を排出する。これに対して、化石資源から製造した水素を搭載する燃料電池自動車では、水素製造時に大部分の二酸化炭素が発生する反面、走行時の排出はゼロとなる。

IPCC 第三次報告書<sup>10)</sup>では Thomas et al.<sup>11)</sup> と Wang<sup>12)</sup> のライフサイクルアセスメント解析結果を引用しながら、燃料電池自動車のエネルギー消費や温室効果ガス排出削減効果について論じている。また、わが国では新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が実施している水素エネルギー利用技術開発 (WE-NET) プロジェクト<sup>(注3)</sup>において同様の解析がなされている<sup>13)</sup>。本節ではこれらを基に、燃料電池システムの化石資源節約効果と温室効果ガス排出削減効果について検討する。

はじめに、化石資源節約効果に

ついて見る。Thomas et al.は、既存のガソリン車に比べ、純水素型燃料電池自動車、および、メタノール車上改質型燃料電池自動車の燃費<sup>(注4)</sup>は、それぞれ75～250%、25～125%向上している。一方、Wangによれば純水素型燃料電池自動車、および、メタノール車上改質型燃料電池自動車の燃費向上は180～215%と110～150%と評価されている。また、WE-NETの評価では、ガソリン車上改質型燃料電池自動車の燃費は現行ガソリン車より3倍程度良好と評価されている。その他、コークス炉副生水素を用いたり、天然ガス起源の液体燃料を車上改質する場合にも40～60%のエネルギー消費低減効果がある。ただし、ガソリンハイブリッド車や電気自動車の場合でも同程度の効果がある<sup>13)</sup>。

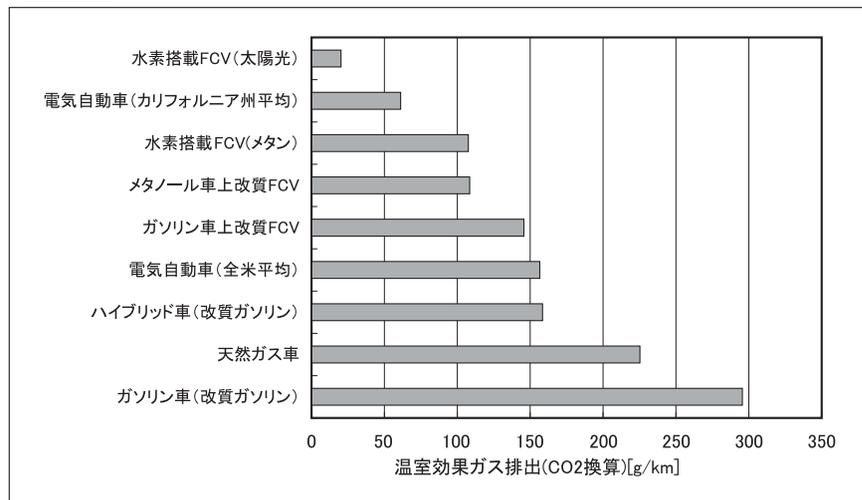
化石資源を燃料やエネルギーとして用いずに生産した水素を搭載する燃料電池自動車のトータルで見たエネルギー消費は、水素製造に用いるエネルギー源、製造場所、輸送方法などに大きく依存する。

また、再生可能エネルギーをエネルギー消費として算入すべきかについても議論がある。いずれにしても、化石資源の消費は大幅に低減されることは確実である。

次に、温室効果ガス排出削減効果について、図表5にWangのライフサイクルアセスメント結果の一部を示す(米国の乗用車を仮定)。温室効果ガス排出量は、燃費についての結果と概ね同じ傾向を示す。現行ガソリン車に比べ、ガソリンやメタノールを車上改質する場合は約1/2、天然ガス(メタン)から製造した水素を搭載する場合は4割程度となる。また、電気自動車は発電構成に依存するが、全米平均では約1/2であり、ガソリンハイブリッド車も同程度である。一方、太陽光から水素を製造する場合には排出を大幅に削減できることが分かる。

以上は燃料電池自動車についての評価であったが、定置用燃料電池分散電源についてはWE-NETで評価が実施されている<sup>13)</sup>。これによれば、発電のみの利用を考えた場合、現在の大規模発電システ

図表5 温室効果ガス排出のライフサイクルアセスメント<sup>12)</sup>



(注3) 水素による再生可能エネルギーのグローバルな利用を目指して平成5年度より発足した。平成10年度に第1期研究開発計画(6年間の研究開発費総額約100億円)が終了し、平成11年度より第2期研究開発計画が進捗している。なお、第1期WE-NETプロジェクト

は終了を一年繰り上げ、平成14年度で終了し、平成15年度から発足する「水素安全利用等基盤技術開発」プロジェクトに統合されることになっている。

(注4) 本節では原料の採掘から自動車の運転までのトータルエネルギー消費を意味する。

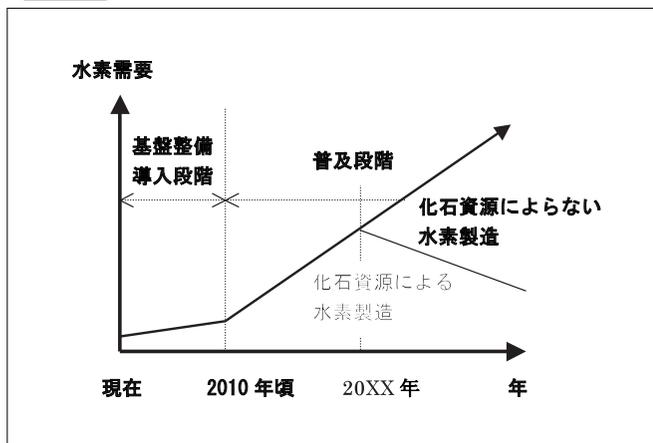
ムとエネルギー効率や二酸化炭素排出量に関しほぼ同程度であり、高効率のLNG複合サイクル発電よりも劣る。コジェネレーションシステムとしての燃料電池を考えた場合にも、都市ガスや軽油をそのまま用いるコジェネレーションシステムと比べて同程度かやや劣る程度である。

要するに、化石資源を用いて水素を製造する場合でも、特に燃料電池自動車の場合にはかなりの化石資源節約効果と温室効果ガス排出削減効果が見込まれる。ただし、燃料電池自動車の場合にはガソリンや天然ガスのハイブリッド車、電気自動車などの競合、定置型燃料電池の場合には都市ガスなどを直接利用するコジェネレーションシステムとの競合があり、それ

らの競合技術に対する燃料電池システムの優位性は明確ではない。これに対し、化石資源からではなく、水やバイオマスから再生可能エネルギーや原子力を用いて水素を製造すれば化石資源の消費や二酸化炭素排出は実質的にほぼゼ

ロになる。3E問題の克服の観点からは、できるだけ早期に化石資源を用いない水素製造法を普及させることが望まれる。図表6に化石資源によらない水素製造技術への移行のイメージを示す。

図表6 化石資源によらない水素製造技術へのシフト



## 4. 化石資源を用いない水素製造技術の研究開発動向

本章では、化石資源を原料としてもエネルギーとしても用いない水素製造方法を(1)水の電気分解、(2)水の熱化学分解、(3)バイオマスの転換、(4)水の光分解の4つのカテゴリーに分け、それぞれの技術開発動向について概説する。

エネルギー供給トータルコストの最小化などを考慮する必要がある。一義的には、設備利用率向上のための夜間オフピーク電力の活用や風力発電所の系統連系のための出力平準化などの観点での導入が着目されよう。

の問題がないなどの長所を有する。WE-NETプロジェクトでは、平成5年以降、固体高分子電解質水電解法に関する技術開発を実施している。平成14年2月には、高松の四国総合研究所構内にオンサイト水素製造型の水素供給ステーション（最大水素製造能力

### 4-1

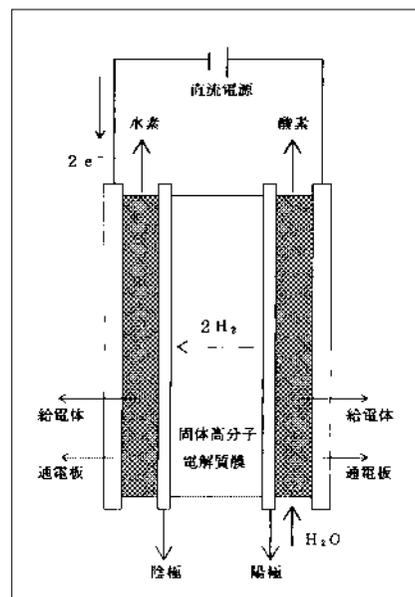
#### 水の電気分解

水の電気分解は水素製造法として最もシンプルなものである。ただし、火力発電のように化石資源を燃焼させて発電した電力を用いてこれを行う場合には、発電時に大量の二酸化炭素を排出することになる。一方、原子力や再生可能エネルギー（水力を含む）による電力を用いて水の電気分解を行えば、化石資源の消費や温室効果ガスの排出は実質的にゼロとなる。

ただし、電力は価値の高いエネルギー形態であり、これを大規模水素製造に使用するにあたっては、他の電力需要とのバランス、

水の電気分解プロセスは、アルカリ水電解法と固体高分子電解質水電解法に大別される。アルカリ水電解法はすでに商業プラントで用いられており、構造が簡単であるが、エネルギー変換効率が低い上、腐食の問題がある。図表7に固体高分子電解質水電解法の原理図を示す<sup>5)</sup>。フッ素樹脂系の固体高分子電解質膜を白金族触媒の電極、多孔質性の給電体、通電板ではさむ構造になっている。給電体は給電と気液の流路としての役割を兼ね、水は陽極側の給電体に供給され、水素は陰極側の給電体から発生する。まだ、商業化には至っていないが、エネルギー変換効率が高く、装置のコンパクト化が可能、アルカリ水溶液を用いず腐食

図表7 固体高分子電解質水電解法の原理図<sup>5)</sup>



図表8 水電解法によるオンサイト水素製造型の水素供給ステーション<sup>14)</sup>



30Nm<sup>3</sup>/h、実用規模の約1/10)が完成した(図表8)。

#### 4-2 水の熱化学分解

水を熱により直接分解するためには理論的には2,500℃以上の高温を必要とする。しかし、いくつかの熱化学反応を組み合わせることにより、1,000℃以下の熱で水を分解する熱化学サイクルが多数提案されている。二酸化炭素を排出しない熱源として、原子炉の核熱や太陽熱の利用が考えられているが、特に水素の大規模製造が可能な原子炉の核熱の利用が近年注目されている<sup>15)</sup>。

水分解熱化学サイクルの中で、今日、最も精力的に研究がなされているのは、日本原子力研究所が中心となって研究を進めているISプロセス<sup>16)</sup>である。ISプロセスは米国ゼネラル・アトムクス社により考案された手法であり、以下の3つの化学反応で構成され、原料水と反応させるヨウ素(Iodine)および硫黄(Sulfur)から生じる化合物をプロセス内部で循環使用させることで、外部に有害物質が排出されない工夫がされている。

現在のところ、ISプロセスの熱源としては高温ガス炉が想定され

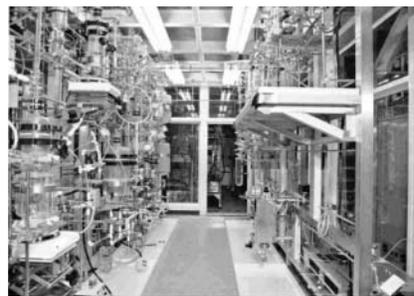
ている。高温ガス炉は900℃を超える熱を取り出すことができ、固有安全性が高い。軽水炉から取り出せる熱は300℃程度であるため用いることができない。

日本原子力研究所では、2001年にISプロセスによる連続水素製造装置(水素製造量毎時50リットル規模)を完成し、試験研究に着手した。さらに、同研究所が試運転している高温工学試験研究炉(HTTR)と連結させる予定である<sup>16)</sup>。図表9に本装置の外観を示す。

100万kWeの高温ガス炉により1年間に(運転時間7,000時間)、34億Nm<sup>3</sup>の水素が製造可能である(水素生成熱効率=50%)。一方、同じ出力の軽水炉で電気分解により水素を生成する場合には年間17億Nm<sup>3</sup>が生成される<sup>4)</sup>。熱分解法は電気分解法に比べ、熱を電気に変換する際のロスがないため、トータルのエネルギー効率が高くなる。また、高温ガス炉とISプロセスを組み合わせた場合の水素製造コストは、今日商用化されている化石資源の水蒸気改質法の1.5倍との評価結果がある<sup>4)</sup>。

原子力プラントでの水素製造

図表9 水の熱化学分解(ISプロセス)による連続水素製造装置(日本原子力研究所)<sup>16)</sup>



(左手前: プンゼン反応工程の機器、同奥側: 硫酸分解反応工程の機器、右奥側: ヨウ化水素酸の蒸留分離の機器)

ブンゼン反応	$2\text{H}_2\text{O} + x\text{I}_2 + \text{SO}_2 = 2\text{HI}_x + \text{H}_2\text{SO}_4$	室温~100℃
ヨウ化水素分解反応	$2\text{HI} = \text{H}_2 + \text{I}_2$	400℃
+ 硫酸分解反応	$\text{H}_2\text{SO}_4 = \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$	800℃
	$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 1/2\text{O}_2$	

は、そのエネルギー出力および密度の高さから、大規模な水素製造が可能であり、将来の大きな水素需要を環境制約、資源制約を満たしつつ賄うオプションとして期待される。ただし、現在の原子炉の主流である軽水炉の核熱を利用可能な熱化学サイクルは見出されていない。

#### 4-3

#### バイオマスの転換

バイオマスとは植物起源の有機資源—農林水産系廃棄物、生ごみ、エネルギー作物等—であり、これらに由来するエネルギーをバイオエネルギーと呼ぶ。バイオエネルギーは資源量が膨大であり、また、トータルでは二酸化炭素を排出しないエネルギー源として地球温暖化対策オプションとしても注目されている。バイオエネルギーを利用したり(燃焼熱、発電、液体燃料など)、あるいは、本節で述べるようにバイオマスを原料として水素を製造する際には二酸化炭素が発生するが、その量はそのバイオマスの起源である植物が成長する過程で大気中から固定した二酸化炭素の量に等しい。従って、トータルで見るとバイオマスの利用は大気中の二酸化炭素濃度を増加させない(カーボンニュートラル)。

バイオマスの形態は多様であり、水素製造方法も様々なものが考えられる。乾燥系バイオマスの場合には、基本的には熱化学的ガス化プロセスにより水素を製造できる。この際、反応温度を高めるために、バイオマス自身の燃焼熱を利用することが一般的である。ただし、水素の他に、一酸化炭素や炭化水素系ガスが発生するため、これらの副生物の改質や除去が必要となる。

一方、含水率の高いバイオマスの場合には、メタン発酵プロセスが実用化の段階に達しており、生

成メタンから水素を製造できるが、発酵に数週間程度の時間がかかる。この他、触媒による水相改質<sup>17)</sup>、超臨界水ガス化法<sup>18)</sup>、微生物による水素発酵法<sup>19)</sup>などが考案されている。

なお、バイオマスの長所の一つとして、エタノール、メタノール、バイオディーゼルなどの液体燃料に変換できる点があげられる。自動車燃料としての利用を考えた場合にも、バイオマスから製造したメタノールや水素を燃料電池自動車に供給する方式の他、その液体燃料を直接自動車燃料として用いるオプションも存在する<sup>(注5)</sup>。

#### 4 - 4

### 水の光分解

太陽光の光エネルギーにより、水を分解し水素を生成する技術である。以下では主に光触媒を用いた水を直接光分解について説明する。1972年に二酸化チタン光電極と白金電極で構成される電気化学セルによる水の光化学分解、すなわち本多・藤嶋効果<sup>20)</sup>が報告されて以来、日本が世界の研究をリードしている分野である。

これまでに、紫外域の光に対し反応する光触媒材料は多数見出されているが、紫外光は太陽光の入射エネルギーの約4%にすぎない。従って、水素を効率的に生成するには、太陽光の入射エネルギーの約43%を占める可視光(波長~400-700nm)のできるだけ広い波長範囲に対して応答する光触媒の開発が必要となる。

これまで、この条件を満たし、安定で実用的な光触媒の開発は困

難とされてきた。しかし、近年、いくつかの新しい研究成果が報告され、本分野の研究が活発化してきている。

産業技術総合研究所の荒川裕則光反応制御研究センター長らのグループは、ニッケルをインジウム・タンタル酸化物にドーブした酸化物半導体 $\text{In}_{1-x}\text{Ni}_x\text{TaO}_4$  ( $x=0-0.2$ )を用い、可視光一段励起による水の完全分解(水素:酸素=2:1)に初めて成功し、昨年Natureに発表した<sup>21)</sup>。ニッケルを添加することによって、可視域の短波長側の光に対する光触媒活性が著しく向上する。ただし、550 nm以上の波長に対しては、光触媒活性は消滅する。量子効率<sup>(注6)</sup>は402 nmの光に対して0.66%という値を得ている。また、植物の光合成メカニズムである二段階光励起反応を模倣した可視光による水の完全分解にも成功している<sup>22)</sup>。

東京理科大学の工藤昭彦助教授は、紫外線照射下ではあるものの、Laをドーブした $\text{NiO}/\text{NaTaO}_3$ を用いて、水の完全光分解を行い、約400 mlの反応管から20 mmol/h(500 ml/h)という高速度で水素を生成することに成功した<sup>23)</sup>。これは水の電気分解に対比させると1A以上の電解電流に相当し、量子効率は波長が270nmで約50%に達している。可視光応答性光触媒に関しては、 $\text{Cr}^{3+}$ と $\text{Ta}^{5+}$ または $\text{Sb}^{5+}$ を共ドーブした $\text{SrTiO}_3$ や、 $\text{NaInS}_2$ 、 $\text{AgInZn}_7\text{S}_9$ などが、犠牲試薬<sup>(注7)</sup>存在下ではあるが、高い水素生成活性を示すことを報告している<sup>24)</sup>。

東京工業大学の堂面一成教授ら

のグループでは、太陽光中に多く含まれる600 nm付近までの可視領域の光に応答し、水を分解できる光触媒の開発を目的とし、オキシナイトライド・オキシサルファイド系光触媒材料に着目し、その可視光応答性について検討している。特に $\text{LaTiO}_2\text{N}$ 、 $\text{Ta}_3\text{N}_5$ 、 $\text{TaON}$ 、 $\text{Sm}_2\text{Ti}_2\text{S}_2\text{O}_5$ 等が600 nm付近まで十分な吸収を示すことを見出している<sup>25, 26)</sup>。

可視光応答性光触媒の研究は、水素生成のみならず、建物の外壁や車内の防汚、除菌、脱臭などを目的として、現在、活発な研究が行われている。材料科学や触媒科学の基礎研究としても、研究者にとって魅力的な分野であろう。

しかし、水素生成に関して言えば、エネルギー効率が低く、実用化には程遠い段階にある。実際、他の太陽光起源の水素製造システムと比較して見ても、太陽光発電と水電解を組み合わせたシステムや、バイオマスを育成し水素に変換するシステムよりもエネルギー効率が1~2桁低い。可視域の長波長側でも高い量子効率で応答するような、画期的な光触媒の開発が求められる。

なお、上記のような半導体タイプの光触媒を用いるのではなく、光合成によって水から水素を生成する光合成微生物を介して水素を生産する光生物的水素生産の可能性についても検討されている<sup>19)</sup>。光合成微生物の開発には遺伝工学的手法も適用されている。現在のところは、生産に関わる投入エネルギーが高く現実性に乏しく、微生物の水素生産能を大幅に向上させることが不可欠である。

(注5) これらのオプションの比較は本稿のスコープを超えるが、ブラジルや米国の一部の州ではさとうきびやトウモロコシから生成したエタノール、または、これとガソリンの混合物が自動車燃料として普及している。

(注6) 入射した光子数に対する反応に関与した電子数の割合。

(注7) 生成した水素が再度酸化されて水に戻る逆反応を防ぐために加えるメタノール等の添加物。水素の代わりに“犠牲となって”酸化される。

## 5. おわりに

本稿では、持続可能な水素エネルギーシステム構築のキーテクノロジーとして、化石資源を用いない水素製造技術に着目し、その意義について、水素の将来的需要、化石資源節約効果、温室効果ガス排出削減効果等の観点から検討した。さらに、そのような技術を(1)水の電気分解、(2)水の熱化学分解、(3)バイオマスの転換、(4)水の光分解の4つのカテゴリーに分け、それらの技術開発動向や課題について分析した。

燃料電池はエネルギー効率が高いため、化石資源から水素を製造した場合でも、特に燃料電池自動車の場合には、相当の化石資源節約効果や温室効果ガス排出削減効果が見込まれる。ただし、本稿で検討した研究報告の範囲において、それらの効果は他の競合する技術オプション—ハイブリッド車、電気自動車、複合サイクル発電、都市ガス利用コージェネレーションシステム等—に対して明確な優位性は認められない。

一方、化石資源を用いずに水素を製造した場合には、化石資源の消費と温室効果ガス排出は実質的にゼロとなる。この意味で、化石資源を用いない水素製造技術は持続可能な水素エネルギーシステム構築のキーテクノロジーと言える。特に、エネルギー自給率が低いわが国にとってその意義は大きい。

従って、わが国は本分野の研究開発に十分なウェイトを置いて、長期的に取り組んでいく必要がある。それらのいわば“水素製造の本命として期待される技術”のポテンシャルを把握することは、わが国の長期的エネルギー政策のみならず、短中期的な水素エネルギーの研究開発戦略の構築にとっても基盤的な知見を与えよう。

本稿で見たように、化石資源を

用いない水素製造技術は、水電解法を除き基礎研究、原理実証研究の段階にある。当面は、対象技術を広く設定し、個々の技術の普及・実用化の可能性を評価することが重要と考えられる。

また、関連技術の進歩や国際エネルギー情勢の変化を把握しつつ、エネルギーシステム全体における水素の位置付けを検討していくことが重要である。例えば、電気と水素の役割分担などについては、まだ具体像が見えてこないのが現状である。

水素は電気と同様に2次エネルギーであり、エネルギーシステムのいわば通貨としての役割を担う。その意味で、エネルギーの生産・変換・輸送・消費などすべての技術と関連することになる。水素エネルギーを含めたエネルギーシステムのデザインには、何よりも、エネルギー関連の技術や政策全般に通じる専門家の育成が不可欠であろう。エネルギー分野の人材の流動化や学会間の交流促進等が望まれる。

再生可能エネルギーによる水素製造は、土地、バイオマス資源、太陽や水力等のエネルギー源が豊富で、非電化地域の多い途上国において大きなポテンシャルを有すると考えられる。いずれも初期投資が小さく、プラントの保守にもそれほど高い技術が要求されない。

わが国としても、技術開発ならびに国際貢献の観点から、途上国での普及に向けた移転用技術開発や現地共同プロジェクト推進等に積極的に取り組んでいくことは有益であろう。

なお、本稿で取り上げた水素製造関連技術の他、水素の貯蔵、輸送、利用等に関する技術にもそれぞれ多くの課題がある。将来の水素製造技術のあり方も、それらの

技術の進歩状況、関連インフラの整備状況、水素エネルギーの利用形態等の全体の枠組みにおいて決定すべきであることを付言する。

### 参考文献

- 1) 総合科学技術会議，平成15年度の科学技術に関する予算、人材等の資源配分の方針，2002年6月
- 2) 経済産業省燃料電池実用化戦略研究会，燃料電池実用化戦略研究会報告，2001年1月
- 3) 国際水素エネルギー協会 (International Association for Hydrogen Energy) ホームページより転載 (<http://www.iahe.org/>)
- 4) 日本原子力産業会議原子力システム研究懇話会，原子力による水素エネルギー，NSA/COMMENTARIES：No.10 (2002)
- 5) 大角泰章，水素エネルギー利用技術，アグネ技術センター (2002)
- 6) 林健，燃料電池のすべて，ガスエネルギー新聞 (2001)
- 7) 五十嵐哲，PETROTECH，25，125 (2002)
- 8) 武松敏式，水素エネルギーシステム，26(2)，2 (2001)
- 9) 日本自動車工業会，自動車統計月報2002年8月
- 10) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)，Working Group III，Climate Change 2001: Mitigation，Section3.4.4.4 (2001)
- 11) C. Thomas et al.，SAE Technical Paper 982496 (1998)
- 12) M. Wang，Argonne National Laboratory ANL/ESD-39，vol.2 (1999)
- 13) WE-NET 平成12年度報告書概要
- 14) WE-NET ホームページより転載 (<http://www.ena.or.jp/WE-NET/>)
- 15) 例えば、エイブラハム米DOE長官は World Nuclear Association Luncheon (2002.8.15) での講演

で次のように述べている。

"As many of you know, our Administration has identified hydrogen as being a potential source of unlimited and clean energy. (中略) But this is a vision that will take several decades to implement. And one of the challenges will be to cleanly and efficiently produce hydrogen. What is exciting about nuclear energy is that it promises to do exactly that." (<http://www.energy.gov/HQDocs/speeches/2002/augss/World>

NuclearAssociationLuncheon.html)

- 16) 日本原子力研究所, プレスリリース2001年5月15日 (<http://www.jaeri.go.jp/open/press/2001/010515/index.html>)
- 17) R. Cortright et al., *Nature*, **6901**, 964 (2002)
- 18) 松村幸彦, *金属*, **72**, 419 (2002)
- 19) 松本光史, 松永是, *金属*, **72**, 405 (2002)
- 20) K. Honda and K. Fujishima, *Nature*, **238**, 37 (1972)
- 21) Z. Zou et al., *Nature*, **414**, 625 (2001)
- 22) K. Sayama, K. Mukasa, R. Abe, Y. Abe, H. Arakawa, *Chem. Commun.*, 2416 (2001)
- 23) A. Kudo and H. Kato, *Chem. Phys. Lett.*, **331**, 373 (2000)
- 24) 工藤昭彦, *金属*, **72**, 401 (2002)
- 25) 原亨和, 堂面一成, *マテリアルインテグレーション*, **14**(2), 7 (2001)
- 26) 堂面一成, 日本エネルギー学会新エネルギー部会セミナー「水素製造を目的とした直接水分解光触媒の研究開発の最前線」, 工学院大学, 平成14年6月25日

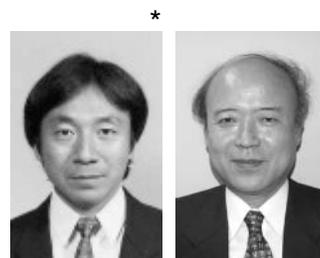


## 特集③

# エコマテリアルの動向

## —地球環境問題への材料学のアプローチ—

客員研究官 西村 睦\*  
 材料・製造技術ユニット 多田 国之



### 1. はじめに

2002年は1992年6月にリオデジャネイロで環境サミット、正確には国連環境開発会議(United Nations Conference on Environment and Development)が開催されてから10年目の節目の年にあたる。そしてまたこの節目は、地球規模の環境問題の存在と持続可能な開発や発展の課題を提起した国連人間環境会議(通称ストックホルム会議)から30年の節目でもある。この間、地球環境問題は、問題提起から認識の広まり、先行的な取り組み、枠組みの議論を経て、具体的な解決(ソリューション)に向け

て踏み出す段階に達してきている。その節目の今年、ヨハネスブルグにおいて「持続可能な開発に関する世界首脳会議(環境開発サミット)」が8月26日から9月4日まで開催された。国連の会議で世界各国が大量消費・大量生産・大量廃棄からの脱却を図る決意を示し、産業構造の転換を求めた。

そのような中で、古来から人類の生活と生産を支えてきた材料技術についても、この地球環境問題に対して責任と役割を再認識し、将来の社会の基盤技術としてのあり方を積極的に提示していくこと

が求められるのは当然のことといえる。「エコマテリアル」はリオサミットに先行した1991年、日本が世界に先立って発信したコンセプトである<sup>1)</sup>。地球上のマテリアルフローは膨大な量であり、環境に与えるインパクトは極めて大きい。すなわち材料をエコマテリアル化できるかどうか、地球環境問題の総合解を大きく左右するといえる。そのような状況を踏まえてここでは、エコマテリアルの動向(地球環境問題への材料学のアプローチ)を紹介するとともに今後を展望したい。

### 2. 広範なエコマテリアルの領域

2-1

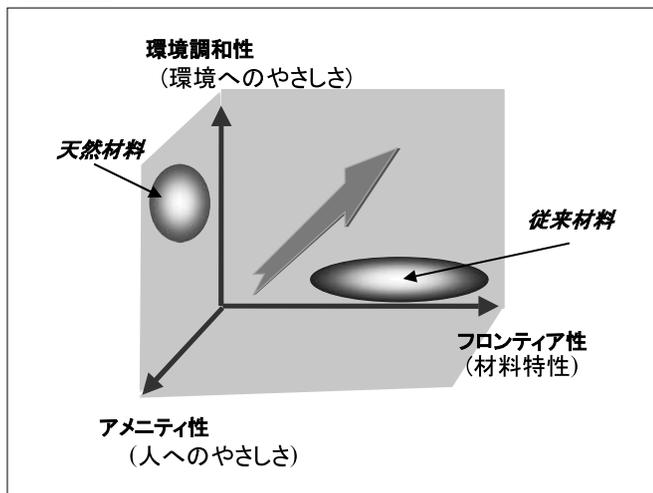
#### エコマテリアルの定義

エコマテリアルは、未踏科学技術協会に設けられたレアメタル研究会が、次世代の構造材料のあり方を議論する中で1991年に生み出されたコンセプトであり、「地球環境に調和し持続可能な人間社会を達成するための物質・材料」と定義された。図表1は、エコマテリアルで考慮される材料性能を3つの座標軸で表したものである<sup>2)</sup>。フロンティア性の軸は通常材料性能の尺度を指す。環境調和性の軸は材料が環境に与える負荷の小ささの度合いを意味し、持続的発

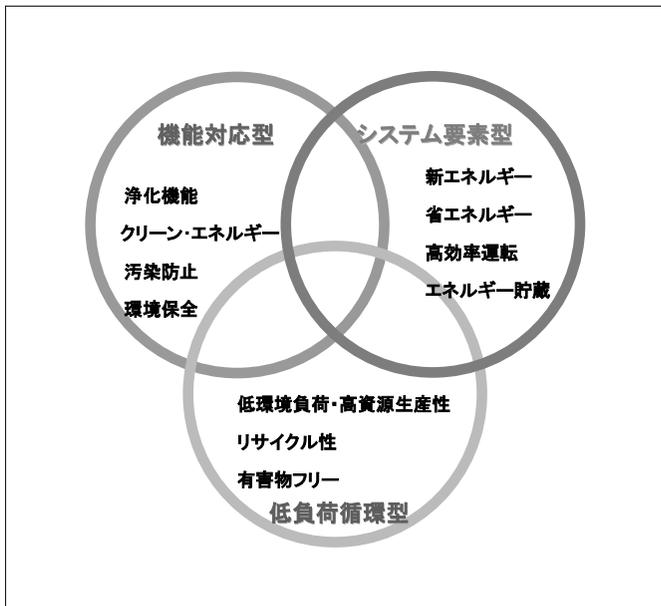
展の観点から材料が環境に優しいかどうかの基準を示す性能軸である。さらに、人への優しさの指標

であるアメニティ性(分かりやすい例は生体親和性、非アレルギー性、ぬくもり感など)を加えてあ

図表1 エコマテリアル性能の3軸表示



図表2 エコマテリアルの分類



2 - 3

環境に直接機能する  
機能対応型

機能対応型の代表的な例は触媒であり、1970年代の自動車排気ガスの炭化水素と一酸化炭素および窒素酸化物を同時に低減させた三元触媒の成功は自動車産業に大きなインパクトを与えた。現在、触媒分野で特に注目されているものの一つに光化学触媒がある。基本的に太陽光のエネルギーで励起して水を分解させるこのタイプの触媒には二つのアプローチがある。一つは可視光領域での応答を可能にすることにより、効率よく水を分解し水素を製造していこうとする方向であり、他の一つは、紫外領域での反応を利用した浄化作用を目指す方向である。

また浄化機能として環境ホルモンや重金属などの有害物質を除去する機能は重要である。特に近年問題となっている有害物質は極めて希薄な状態でも毒性の高いものや難分解性のものが多い。超臨界領域の利用、強磁場の利用など大がかりな設備による特異な場を利用した分解・分離技術なども開発されているが、他方で、天然素材

る。従来、性能のみが求められていた材料の世界において、この新たな座標系の中で最大化を目指す方向がエコマテリアル化であるとした。現在では、(1)式で表される環境効率

$$\text{環境効率 (EE)} = \text{材料性能 (P)} / \text{環境負荷 (B}_L\text{)} \dots\dots(1)$$

が相対的に同種の材料よりも高い材料をエコマテリアルと呼ぶ<sup>3)</sup>。従って、超伝導材料、半導体、磁性材料等のあらゆる材料群において、エコマテリアル群と環境効率の低い材料群があることになる。

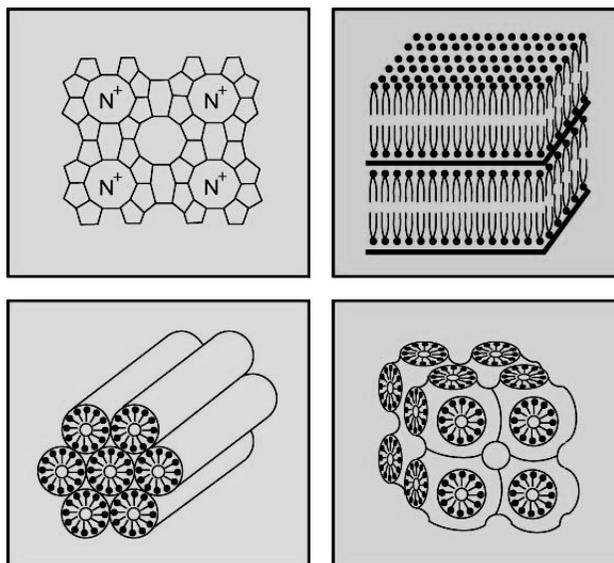
のではないが、リサイクル適合性などを通して環境に優しい材料群である。これらは厳密に分類されるわけではなく、実用が近づくほどに、これらの特徴を兼ね備えた材料、すなわち図で円が重複した部分が要請されるケースが多くなると考えてよい。また、例えば有害物質フリーは、低負荷循環型領域に特徴的な要因であるが、勿論このキーワードは全ての材料が目指すべき方向性である。以下に各分類ごとの代表的な材料と研究トピックを簡単に紹介する。

2 - 2

エコマテリアルの分類

地球環境への作用の仕方という観点から、エコマテリアルは図表2のように大きく3つの領域に分けられる<sup>4)</sup>。一番目は機能対応型であり、浄化機能や触媒など主に物質の化学的機能が直接生かされる領域である。二番目は、システム要素型で、高効率クリーンエネルギーシステムを実現するために必要な材料群である。三番目は低負荷循環型で、材料そのものが能動的に環境システムに用いられるも

図表3 ゼオライトの構造



エコマテリアル研究センターのホームページ<sup>10)</sup>より転載

をベースとしたゼオライトに代表される微細な空隙を持つ物質（図表3）での吸着・脱着など、物質の固液界面の構造を利用したソフトな反応物質系の研究も進んでいる。特にゼオライト系は、今後生活圏のその場において浄化機能が求められる場合に重要な役割を果たすと期待されている。

物質の化学的特性を生かした機能対応型の環境材料は、これ以外にも、炭酸ガス固定化物質やダイオキシンや有機塩素化合物の分解触媒など広い領域に渡っている。また先述した三元触媒についても、近年導入されているリーンバーンエンジンの作動によって排ガス中の酸素濃度が増加し、触媒活性の劣化が問題となっている。このように希薄燃焼条件でも機能する触媒材料の開発が求められており、環境問題への対応が新たな課題を物質・材料技術に提起している。

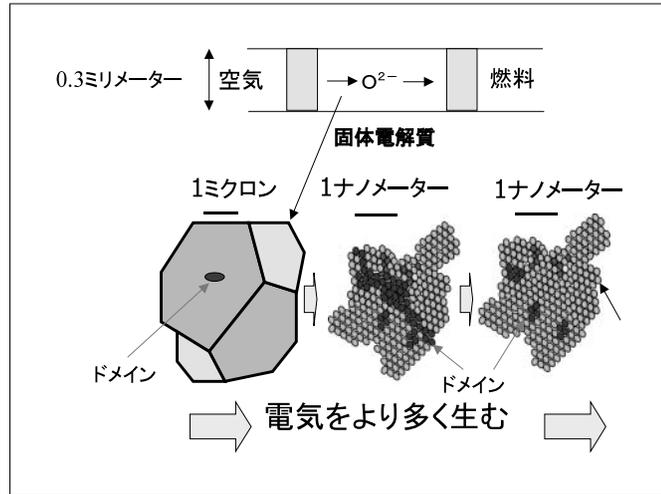
**2 - 4 エネルギーシステムの中心要素 —システム要素型—**

システム要素型の典型例は高効率発電用の耐熱材料である。火力発電などの熱機関は熱源の温度差が大きいほど効率がよくなるの

で、熱から電気への変換効率が高く二酸化炭素発生が少ないエネルギー変換を行うには高温で操業できる条件を整える必要がある。その際タービン翼は高温で高速回転を要求されるため、耐熱性に優れたタービン翼材の開発が天然ガスなどの燃焼ガス温度を上昇させる鍵となっている。このように環境に配慮したエネルギーシステムが成立するには、それを支える材料技術の裏づけが必要であり、そのための機械的、熱的、化学的、または電気的な特性を持った材料群がシステム要素型の環境材料である。

最近特に注目されている燃料電池の開発においても、セパレータ材料や固体電解質材料などが燃料

図表4 ナノ構造固体電解質

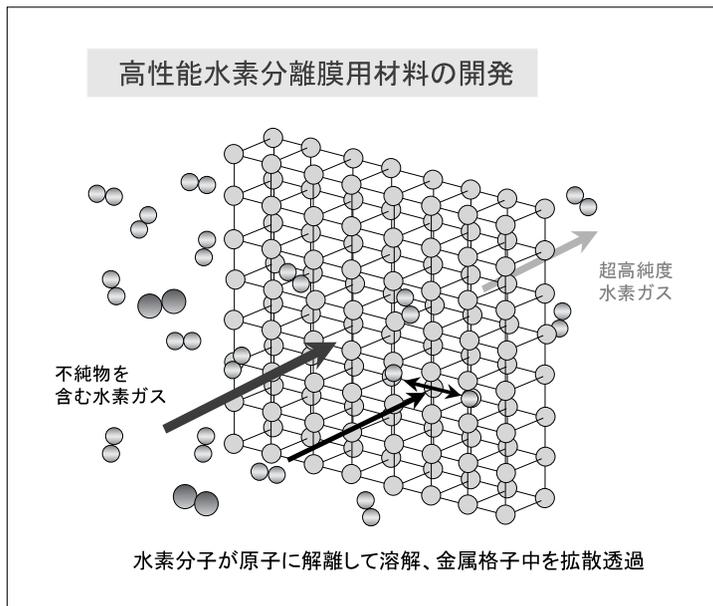


電池をシステムとして組み上げる上での鍵となっている。例えば固体電解質はドメインと呼ばれる微細領域から構成されているが、ドメインが均一に分散するとイオンの透過能が上がり電気的性能も大きく向上する（図表4）。このように材料のナノ構造を制御することが、エネルギーの発生や転換の無駄をなくし、システム要素型材料の高性能化を図る上で不可欠の要素である。

燃料電池にも用いられる水素は21世紀の鍵となる二次エネルギーであるとされているが、精製、輸送や貯蔵、さらにはエネルギー変換に用いる材料が必要となる。たとえば図表5は、水素を透過させ純化する金属製水素分離膜である。これは膜表面で水素を原子に解離し、この原子状態の水素のみを透過するものであり、不純物や触媒毒を除去することで、水素エネルギーシステムを有効に働かせることができる。金属製水素分離膜としては現在白金族のパラジウムが主流であるが、石油燃焼灰からの回収が可能なバナジウムで優れた特性を出す試みが行われている。

システム要素型のエコマテリアルとしては、これら以外にも、効率的なエネルギー輸送に大きく貢献しうる超伝導材料や、低品位の廃熱からもエネルギーを取り出すための熱電材料、さらには、ごみ

図表5 金属製水素分離膜の原理図



発電などに必要な耐熱・耐磨耗・耐食材料なども含まれる。

2 - 5

常生活を広く支える  
—低負荷循環型—

上記二つのタイプのエコマテリアルが、材料の持つ機能や特性で

能動的な環境システムの用途に用いられるのに対して、低負荷循環型材料が使用される用途はビルディングや家電製品など日常の我々の生活を支えているもの全てである。いかに材料を選び使うかという中に環境を意識した選択があり、その選択に適合できる材料群である。

低環境負荷とは、製品や素材などに対してその資源の採取から使用後の廃棄・処理にいたるライフサイクル全体で環境負荷が低いことを意味している。その評価手法がLCA（環境ライフサイクルアセスメント）である。

3. LCA 的に優れた材料とは

ライフサイクルの環境負荷  $B_L$  は製造時の環境負荷  $B_P$ 、使用時の環境負荷  $B_U$ 、材料のエンド・オブ・ライフにおける廃棄物処理等による環境負荷  $B_E$ 、およびリサイクルによる負荷の控除  $B_R$  から成っている<sup>5)</sup>。すなわち、

$$B_L = B_P + B_U + B_E - B_R \quad \dots\dots(2)$$

使用段階での材料の性能を  $P$  とし、先述の(1)式と組み合わせることにより、環境効率 (EE) の中身を表す次式(3)が得られる。

$$EE = P / (B_P + B_U + B_E - B_R) \quad \dots\dots(3)$$

(3)式により、環境負荷のどの部分が寄与しているかでエコマテリアルを特徴づけることができる。

前章では、環境に対する作用の仕方によってエコマテリアルを3つに分類したが、ここでは環境負荷の中身によってエコマテリアルを特徴づける。

- ①有害物質フリー材料 (=  $B_E$  を小さくした材料)
- ②高物質効率材料 (=  $P$  を大きくした、または  $B_U$  を小さくした材料)
- ③低環境負荷履歴材料 (=  $B_P$  を小さくした材料)
- ④リサイクラブル材料 (=  $B_R$  を大きくした材料)

以下、順に材料開発の現状とポイントを述べる。

3 - 1

有害物質フリー材料

接合性、フィルムとしての性能、電気特性など特殊な機能を期待されて、広く生活の中に拡散して入り込んでいる材料群がある。それらにおいては、その性能を安価に実現するために廃棄時などに有害となる物質を含んでいる場合も多い。このような物質を安全なものに代替しつつ目的機能を実現していく材料の開発が求められている。鉛フリーはんだや、水銀ゼロの乾電池などがこれに該当する。さらには、ダイオキシンや環境ホルモンによる汚染のおそれのない材料の開発へと進んでいくものと期待される。この際、直接有害な物質を含まないのみでなく、廃棄処理の段階で有害な物質に転化する可能性のある物質を使用せず、そのような物質に依存していた機能を他の物質や構造で置き換えることが必要である。鉛については、はんだだけでなく、めっきや、潤滑性をだす添加物、切削性を増す添加物として金属材料に用いられており、これらの性能を保持しながら鉛を含まない各種の鉛フリー材料が開発されている。

カドミウムや水銀などは現時点では多くが管理可能な部分へと使用領域が限られている。クロムめ

っきは高機能であり現在多用されているが、これもクロムフリーめっきの技術が開発されている。

携帯電話やCD-ROMドライブなどに広く使用されているガリウム砒素発光素子も、環境中に広く拡散している材料の典型である。他を持ってどうしても代え難い性能を持つ材料の場合、徹底した製品の管理が必要となるが、用途から言ってガリウム砒素の場合、それは不可能である。有害物質を用いずに高性能な材料の開発を目指す、それがエコマテリアルの方向性である。

3 - 2

高物質効率材料

エネルギーの伝達や転換・輸送などにかかわる材料、すなわち自動車のトランスミッションや軽量化ボディなどがこの仲間に入る。これらの材料の場合、材料自体の製造に関わる環境負荷よりも、その使用時のエネルギーフローなどにかかわる環境負荷の方がはるかに大きい。その場合、材料自体の環境負荷が小さいことも重要であるが、目的とする役割をいかに効率よく実現するかが重要となり、目的とするサービスのために有効に機能を発揮することのできる材料の開発が重要である。特に素材の場合、使用段階での環境負荷が往々に無視されがちであるが、LCAで見ると自動車などのケース

では使用時の環境負荷が製造時の10倍以上になっている。軽量化や耐熱性の増加による高温高効率動作、摩擦等によるエネルギー伝達損失の軽減など、エネルギーの伝達や発生をより効率的にすすめていくことのできるような材料の選択がポイントとなる。これらについては、以前からも省エネルギー等の視点での材料開発の努力が行われており、それらを環境負荷低減の視点からも積極的に取り入れていくことが重要になる。

3 - 3

低環境負荷履歴材料

低環境負荷履歴材料は資源採掘から素材製造までの環境負荷の小さい材料である。原料となる資源が鉱石や化石燃料のように枯渇性のものでなく、再生性の資源である木質を利用した材料はこの意味でエコマテリアルである。石油を原料とせずバイオマスから合成される植物性プラスチックもこの仲間に含まれる。また、人類の活動から産出される副産物を原料とする材料も資源確保に負荷を与えず、かつ廃棄物処理の負荷も軽減して得られる、低環境負荷履歴の材料である。焼却灰や汚泥などの

図表6 我が国の主な非鉄金属におけるリサイクル率

	消費量 (トン)	排出量 (トン)	リサイクル率 (%)
銅	350万	59.8万	66
アルミ	230万	166.2万	54
亜鉛	100万	36.4万	20
鉛	30万	27.7万	66
カドミウム	2,000	1,080	28

通産省「非鉄金属素材における循環型経済システムのあり方」に関する調査報告1999

人工資源である産業廃棄物を利用したエコセメントはその典型例である。また、スチールにポリマーコートすることで、製缶の加工段階での潤滑剤をなくし、廃液をゼロにして製造プロセスの環境負荷を大幅に下げたスチール製TULC缶なども成功の典型例といえる。製造時の環境負荷を小さくすることは、単なる省プロセスや省エネルギーではない。これからは低品位原料や回生原料などに対応しつつ環境負荷を低減させていくことのできる新しいプロセス技術が求められている。

3 - 4

リサイクラブル材料

リサイクルへの取り組みは、2000年の循環型経済社会基本法の

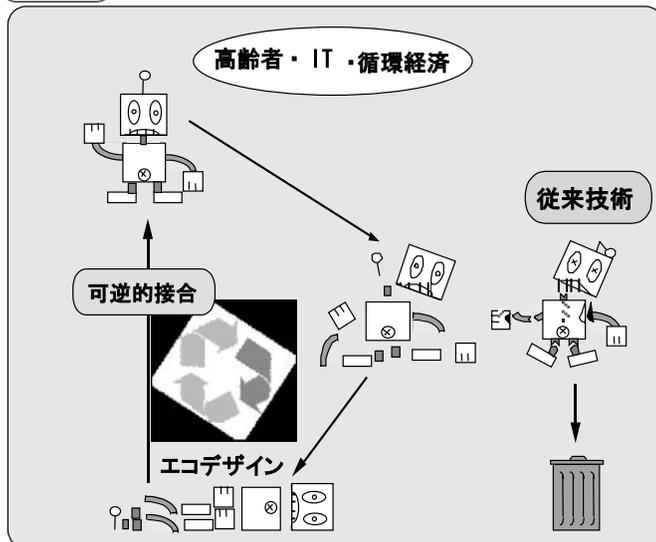
制定を契機に急速に前進している。リサイクル性の問題は、社会システムの問題、リサイクルのプロセス技術の問題、さらには製品設計の問題としてとらえられがちであるが、第4の問題として材料自体の問題がある。すなわち、材料は単一のものではなく、微妙な組成の違いや表面処理などの複合処理がなされており、それらが再生時に品質低下をもたらす。

芝浦工業大学の武田邦彦教授はその著作<sup>6)</sup>の中で、リサイクル過程で混入する不純物の問題と材質の劣化の問題、リサイクルコストの評価のあり方について、現行では多くの場合リサイクルすればするほど環境負荷が大きくなると指摘している。これは正しい指摘であるが、物質的に閉鎖系である地球においては、将来的には循環型社会を構築しなくてはならず、それに対する準備を開始する必要がある。

現状では図表6に示すように、枯渇性資源である多くの金属のリサイクル率は決して高いとはいええず、材料技術としてもリサイクル性を高めるために前向きに取り組む必要がある。そのために以下のアプローチがある。

- (a)リサイクル工程を阻害する物質を含まない材料設計
- (b)それでも混入する人工不純物に鈍感な材料体系
- (c)識別や分解などリサイクルプロセスを意識した機能の内包

図表7 易解体性接合技術の概念図



東京大学先端科学技術研究センター微小製造科学分野のホームページ資料<sup>9)</sup>より作成

(a)を達成するためには、添加元素に頼らず単純な組成で組織制御による高性能化が試みられており、リサイクラブル材料設計と呼ばれている。成功例は自動車用薄鋼板である。これは軽量・高強度とともにリサイクル性も追求し、熱処理で強度を出すことで添加元素量を低減させた。このような取り組みは鉄鋼の分野では今や材料設計の大前提となっており、「強度2倍・寿命2倍」の鉄鋼材料の開発を目指している「超鉄鋼プロ

ジェクト」<sup>7)</sup>でもリサイクラブルの観点の基本に置かれている。

(b)については、スクラップ鉄中の銅のように電線などの混在物から入る場合、さらには錫のように表面処理層から混入する場合などがある。不純物を積極的に活用する方法が試みられ、銅によって鉄の微細組織を制御して、強度・延性を改善する最新の研究例がある<sup>8)</sup>。

(c)は有用成分の回収と部品の再利用を容易に行うために必要な、接合の新しい方向性である。一例として図表7に易解体性接合技術

の概念を示すが、分離の手法としては水素の吸収による体積膨張を利用した方法が提案されている<sup>9)</sup>。

特にこれからのリサイクルで注意しなければならないことは、これまでのリサイクルの多くが、自家発生スクラップや加工スクラップ等の由来のわかったスクラップを対象としてきていたということである。様々な形態や混入物、複合物を含む使用済み素材のリサイクルはようやく端につこうとしている段階であり、ここに材料技術の課題がある。

## 4. 政策的・組織的な取り組み

平成13年に閣議決定した「科学技術基本計画」では戦略的に投資を行い研究開発の推進を図るべき科学技術の重点4分野として「ライフサイエンス」「情報通信」「環境」「ナノテクノロジー・材料」を挙げている。また、総合科学技術会議が今年6月に取りまとめた「平成15年度の科学技術に関する予算、人材等の資源配分の方針」においても、上記4分野の「ナノテクノロジー・材料」の中で「環境保全・エネルギー利用高度化材料」が明確に示されている。エコマテリアルは環境と材料にまたがり、両者を結ぶ重要なコンセプトと位置づけることができよう。

我が国の学協会における取り組みとしては図表8に示すような研究会や分科会が設立されている。他にも化学工学会、日本化学会などの化学系の学協会で、プロセスという観点から環境をキーワード

とした活発な学会活動が行われており、その会報には環境と材料プロセスを中心とした特集が毎号のように組まれている。

国際会議も数多く開催されている。冒頭述べたようにエコマテリアルは日本発のコンセプトであるため、国際会議においては日本が中心的役割を果たしている。代表的なものを図表9にまとめる。それらの会議では、「LCAをはじめとした様々なツールやゼロエミッション、リサイクルの推進、有害物質の制限などの個々のアプローチはほぼ出尽くしたが、それらが全体として社会を動かしていくために何が必要か?」という問題意識が強く見られるようになってきている<sup>4)</sup>。

研究を推進する母体については、今年4月に独立行政法人物質・材料研究機構にエコマテリアル研究センターが設立された。環

境循環材料、エコデバイス、環境エネルギー材料、環境浄化材料の4つの研究グループから成っており、パーマネントの研究者23名をはじめとする総勢65名で構成されている。エコマテリアルと名のつく研究組織はこれまでも、例えば産業技術総合研究所のエコマテリアルグループのように、研究室規模あるいは研究部規模では見られた。しかしエコマテリアル研究センターは、図表2に示したエコマテリアルの領域を網羅し(環境循環材料は低負荷循環型、環境エネルギー材料はシステム要素型、環境浄化材料は機能対応型に対応している)、さらに環境に調和したデバイス化技術の確立を目指したエコデバイスグループを擁し、材料のエコマテリアル化に向けて総合的な取り組みを行う母体を目指している<sup>10)</sup>。

図表8 エコマテリアルに関する学協会の研究会・分科会

未踏科学技術協会	エコマテリアル研究会 (1993年設立)
高分子学会	エコマテリアル研究会 (1992年設立)
日本金属学会	エコマテリアル分科会 (2000年設立)

図表9 エコマテリアルに関わる代表的な国際会議

エコマテリアル国際会議	1993年から隔年開催、昨年第5回
エコバランス国際会議	1994年から隔年開催、今年第5回
エコデザイン国際会議	1999年から隔年開催、昨年第2回

## 5. エコマテリアル研究が生み出したもの

1991年にエコマテリアルのコンセプトが世界に先駆けて発信されて以来、振興調整費を中心として継続的にエコマテリアルに関連するプロジェクト研究が行われてきた。その結果と、地球環境問題への関心の高まりの影響も受けて、エコマテリアルという言葉は企業の製品の宣伝の中で使われたり、製造現場でも使われている。また、大学の学科名にも使われており、着実に社会に浸透しつつある。材料研究者および技術者に、実用材料を設計するにあたり、従来の高性能化、高機能化という材料特性の向上に加えて、環境調和性も考慮すべきであるというコンセプトを普及させた点で、これまでの歩みには大きな意義がある。

エコマテリアル研究の重要なア

ウトプットの一つがMLCA (Materials LCA) の提案である。以前は製品に関するLCA (PLCA = Products LCA) しか行われていなかった。製品におけるPLCAにおいて、材料に関する事項は、「ある部品の環境負荷が大きいのので、それを小さくすることが有効である」というレベルであった。MLCAの進展により、材料の環境負荷、すなわち材料のエコマテリアル度指標が徐々に確立されつつある。それにより、PLCAへの貴重なデータベースを与えるばかりでなく、物質収支のデータと結びつくことによって、物質の流れ・循環をマクロにもミクロにも捉えることが可能となった。

もう一つの重要な成果はリサイクルラブル材料設計の提示である。

添加元素による材質の制御でなく、単純組成で、微細組織制御によって高性能化を果たすという資源循環性の観点からは、エコマテリアルの初期の議論から生まれてきたものであり、それは超鉄鋼プロジェクトの骨格を成し、その後の材料系研究プロジェクトに大きな指針を与えたといえる。

エコマテリアル研究は始まって日が浅いため、研究開始以降にプロジェクトから直接実用化された「エコマテリアル」は未だない。しかし、超鉄鋼材料をはじめとする構造材料では実用まであとわずかというレベルにまで達してきている。また、天然素材をベースとしたウッドセラミックなどは、プロジェクトの影響を強く受けて生まれた製品といえる。

## 6. 今後のキーワード：資源生産性向上

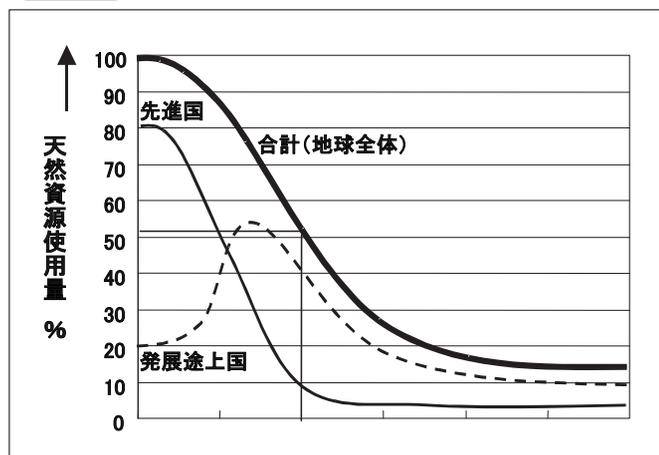
環境問題の基本に大量の物質消費・物質廃棄があることを考えると、エコマテリアルを開発していく基本は「資源生産性の向上」であるといえる。資源生産性とは、資本生産性や労働生産性などの経済用語と類似しているが、地球環境問題を考慮して使用される用語であり、さまざまな資源やエネルギーの総投入に対してそれが生み出すことのできる製品やシステムのパフォーマンスの効率を意味する。資源生産性の重要さを判りやすく指摘したのは、ドイツのワイゼッカーであり「半分の物質消費で二倍の豊かさ」としてサービス当たりの物質利用を1/4にする「ファクター4」を唱えた<sup>11)</sup>。さらに、ブッパタール研究所のシュミットブリークは先進国では物質の使用量を現在の1/10に削減しなければならないとして「ファクター10」を提唱している<sup>12)</sup>。その

根拠を彼らはこう説明している(図表10)。現在先進国の人口は地球全体60億の20%で、資源量の80%を使用している。今後途上国の資源使用量が3倍弱程度は増加することを見越した場合、人類全体が100年後、200年後にも生産活動を行って持続していくためには、50年後に天然資源の使用量を

現在の50%に減らすペース(図の太線)に乗せる必要があり、そのためには先進国は現在の資源使用量の10分の1でやっていかなくてはならない(図の細線)。

この資源生産性を測るパラメータとして地球環境からどのくらいの総資源が投入されているかというTMR (Total Material Require-

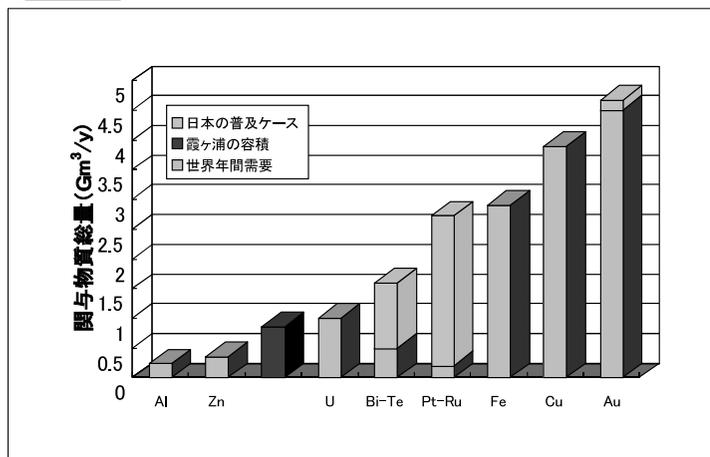
図表10 何故ファクター10か？



ment：関与物質総量）という量がある。図表11は世界の年間金属使用にかかわるTMRをグラフにしたものである。比較のために左から3番目の棒グラフは霞ヶ浦の水の総量であり、金の採掘のために毎年霞ヶ浦を5つ埋める分量の土壌を掘り起こし、同量の残土を生み出して環境に負荷を与えていることになる。鉄は同様に霞ヶ浦3個分となる。このようなTMRを低減させていくために、地球環境への負担を低減できる循環型の材料の開発を進めていくことは勿論のこと、少ない資源消費量およびTMRでパフォーマンスが高い材料、すなわち資源生産性の高い材料の開発が必要である。

さらに、図表11に、日本におけるこれからの材料ニーズを付け足してみた（色が薄いコラム）。今注目されている燃料電池に用いられる触媒の素材、これらは使用量は微量でも単位あたりの生産には多量の資源が投入されている。将来、わが国の自動車生産がすべて素材技術はそのまま燃料電池

図表 11 世界の年間金属需要量に対する関与物質総額



に置き換えられるとすると、図のPt-RuおよびAuの塗りつぶした分のTMRを増加させ、それは世界中の鉄の使用に誘発されるTMRと同等になる。また廃熱利用などで期待されている熱電材料(Bi-Te)も日本の発電の5%に見合う利用で年間に霞ヶ浦1.5個分の資源消費を誘発してしまう計算になる。既に、物質利用が飽和状態にあり、循環型社会への移行でそれを削減しようとしているわが国でさえこれらの値である。これ

から、アジア、アフリカの多くの国の人々がより豊かな生活を目指して、自動車に、半導体に、エネルギー需要に、膨大なニーズを形成していく。それに対して構造用素材も機能性素材も現在と同レベルの資源生産性ではどうてい応えていくことはできないであろう。発展途上国の爆発的な物質需要、エネルギー需要の増大にも対応できるように、資源生産性を画期的に高める必要がある。

## 7. おわりに

ストックホルムで行われた国連人間環境会議から20年経過して1992年にリオデジャネイロで行われた国連環境開発会議では、地球環境を救うための行動計画アジェンダ21が策定された。しかし昨年末にまとめられた報告書「アジェンダ21の実施」では「リオで決めた目標の達成は予想以上に遅く、いくつかの分野では10年前より悪化している」と指摘されている。

それを受けて今年ヨハネスブルグで行われた環境開発サミットの実施文書では、貧困撲滅のための提言とともに、「クリーンで効率的なエネルギー技術の使用」「産業廃棄物の発生を防ぎ、リサイクルや環境に優しい代替物質の活

用」「有害化学物質の抑制と生産方法見直し」「天然資源の減少防止」などが明確に述べられている。これらは、環境に調和し持続型社会を達成するためのエコマテリアルが目指す視点そのものである。

材料技術が確立され、実用化されるまでに長時間を要することを鑑みると、国家的な取り組みがさらに強化されるべきである。幸いエコマテリアルの分野では、今現在でも我が国が世界をリードしている状況にある。また、中国を始めとする世界の発展途上国へのエコマテリアル展開は、地球環境問題の解決に向けて喫緊の課題であると同時に、経済効果も大きなものと期待される。

エコマテリアルの研究領域は広

範にわたり、かつ学際的であるため、多くの研究者や開発者がネットワークを形成する必要がある。ハブ機関を中心としてオールジャパンの連携による研究の推進が継続的に行われることが期待される。

エコマテリアル度の指針を与えるMLCAによって個々の材料に対する環境効率を求めることはできる。しかし個々の材料に対する環境効率の総和が、システム全体としての環境効率を表し、それを最高にするかどうかは別問題である。全体の効率を正しく判断するためには、分野間の連携を密にして研究を進めることは勿論であるが、さらに社会との接点を常に持ち続けることが最も重要であろう。

材料と社会の関わりをいかに形

作るかは、材料に携わる研究者、科学技術政策関係者が常日頃心がけるべき重要な点であるが、解を見つけるのはなかなか困難な問題である。しかし、環境と社会となると、その関わりは急に身近で現実的なものとなってくる。第4章で、エコマテリアルは環境と材料を結ぶ重要なコンセプトであると述べたが、さらに社会と材料を結ぶ重要なコンセプトでもあると言えよう。エコマテリアルの視点は、環境を通して材料と社会の接点を鮮明化させる鍵を握っている。

### 謝辞

本稿をまとめるに当たって、(独)物質・材料研究機構の原田幸明エコマテリアル研究センター長には、ご指導をいただくとともに、関連資料を快くご提供いただきました。ここに深甚な感謝の意

を表します。

### 参考文献

- 1) レアメタル研究会調査研究報告書「エコマテリアル (I)」, 社団法人未踏科学技術協会レアメタル研究会, (1991)
- 2) エコマテリアルのすべて, 日本実業出版社, p.23, (1994)
- 3) グリーンケミストリー—持続的  
社会のための化学, 講談社, p.52  
(2001)
- 4) 原田, エネルギー・資源, vol.23  
No.1 (2002)
- 5) K. Halada, A First Materials  
Forum on Future Sustainable  
Technologies, September 17-20,  
2002, Augsburg, Germany にて発  
表
- 6) 武田邦彦, 「リサイクル」汚染列  
島, 青春出版社, (2000)
- 7) たとえば, 特集「微細結晶粒金  
属材料の研究開発動向」, 科学技  
術動向, 文部科学省科学技術政  
策研究所科学技術動向センター,  
p.23, No.16 (2002年7月号)
- 8) H. Kakisawa et al., Materials  
Transactions, Vol.42, No.3 p.301  
(2002)
- 9) 東京大学先端科学技術研究セン  
ター微小製造科学分野, [http://  
www.su.rcast.u-tokyo.ac.jp/index-  
j.html](http://www.su.rcast.u-tokyo.ac.jp/index-j.html)
- 10) 独立行政法人物質・材料研究機  
構エコマテリアル研究センター,  
[http://www.nims.go.jp/ecomate  
center/](http://www.nims.go.jp/ecomate<br/>center/)
- 11) V.ワイゼッカー, E.ウルリッヒ,  
L.エイモリー: 「ファクター4」,  
省エネルギーセンター (1998)
- 12) F.シュミットブリーク: 「ファ  
クター10 エコ効率革命」, シュ  
プリンガーファラーク東京  
(1997)



---

# SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

**October 2002**  
(NO.19)

## Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and  
Technology Policy (NISTEP)  
Ministry of Education, Culture, Sports,  
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記のURLにアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

## 文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

---

連絡先：〒100-0013 東京都千代田区霞が関1-3-2  
電話 03-3581-0605 FAX 03-3503-3996  
URL <http://www.nistep.go.jp>  
Email [stfc@nistep.go.jp](mailto:stfc@nistep.go.jp)



- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier

Science & Technology Trends

科学技術動向

《2002年10月号》

文部科学省 科学技術政策研究所  
科学技術動向研究センター