

# 「エネルギー・環境用材料技術戦略」検討会 報告書

平成 18 年 6 月 17 日（土）開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

## Executive Summary

世界のエネルギーの需要動向を推測すると、2030年には発展途上国を中心に現在に比べ50%増加する。特に、原油の高騰等により資源確保が非常に重要である。

一方、一次エネルギー供給予測では、2050年で石油がピークアウトする。これにより不足するエネルギーを、何らかの形で確保しなければならない。特に、生産がピークになる前に解決する必要がある。このため環境にも配慮した現実的方策としては、2030～2050年までにエネルギーの高度利用を果たし、CO<sub>2</sub>排出量を2分の1～3分の1に削減する。すなわち、化石エネルギーの消費量の大幅な削減、再生可能エネルギーの導入促進、二次エネルギーの電力化・水素化、エネルギー転換部門でのCO<sub>2</sub>分離・回収等が必要で、創エネ、省マテリアル、エネルギー貯蔵の効率化、コプロダクション、エクセルギー再生、物質・エネルギー再生等の技術革新が必要である。

エネルギー・環境分野の進展は材料科学の進展と直結しており、その革新的な技術開発をもたらす可能性のあるナノテク・材料技術との分野融合は必須と言えるが、現状十分な融合がなされていない。数多くの異分野研究者が集まり、推進していく目的志向型基礎研究を構築するため、明確なターゲットをいかに企画していくか。「エネルギーセキュリティ」のような誰にもわかる共通認識のスローガンが必要である。以下に討議で集約された有識者の意見をまとめた。

- ・材料科学分野の進展は、ひらめきや偶然でもたらされる場合が多い。サイエンスよりもむしろ、漠然とした大きな目標の下で、数多くの研究者が集まる仕掛けが必要である。材料屋だけでなく分野全体を見渡せる人が仕掛けを作る。例えば、産業界の議論に大学の基礎研究者を交える機会、場所が必要である。また今、新しい材料が次々と発見されており、新しい発想で実用化していくことが必要だ。新しい発想は、例えば、異分野から取り込む。10のファンディングのうち1を、全く違う分野の人に必ず与える仕組みも必要である。
- ・目的志向型基礎研究で進める共通基盤的な課題を、論文がでなくても格好いいと思える周辺の環境を醸成することが大切である。人類のための国のミッションとして大変重要であることを理解してもらう環境を、給与のあり方、昇進の基準、評価のやり方を含め新しい基準をつくって醸成することが必要である。
- ・目的志向型基礎研究では、同分野の研究者は優秀な人が一人いれば十分であり、異分野をできるだけ取り込み、パフォーマンス追及のための研究体制が望まれる。また研究のフェーズとして、大学と産業界が同じ土俵で仕事をするのは非効率であり、例えば米国の軍事によるサポート等、基礎知見から実用化までのギャップを埋める仕組みが必要となる。材料分野の発見から実用化までに長期間かかるという特殊性をうまくフォローするような仕組みである。

エネルギー・環境用材料技術戦略では、目的志向型基礎研究がまず重要であり、「エネルギーセキュリティ」の重要性が共通認識として得られた。研究者は、この共通認識の下、個々人の立場で様々なアプローチを進めるべきで、日進月歩のナノテクノロジー・材料分野、特にナノ構造制御という新しい学問をベースに進めることが、目標達成に向けて良いツールとなることも理解された。

エネルギーセキュリティという目的を達成するためのキーワードは、以下のものが上げられる。

- ・ 学術研究にのみ没頭してきた研究者に、エネルギーセキュリティという大変重要な課題の解決に向けて、積極的に参加するべきというメッセージである。
- ・ 異分野の人間がこの目的に賛同して参加できるグラントシステムの構築の必要性である。
- ・ アジアの中の日本という視点から、日本がアジアでリーダーシップをとる。
- ・ このため文化を中心に、日本、東洋に根差した科学技術という視点もキーワードになる。

方法論としては、様々なロードマップ等を詳細に分析し、ナノ構造制御材料等のナノテクの各領域が貢献できるアプローチ、コントリビューションのあり方を考える。その上で、テーマ設定をし、重点テーマの洗い出し、チーム編成にもつなげることが重要である。

# 目 次

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Executive Summary .....                                                     | i  |
| [1] はじめに .....                                                              | 1  |
| 1-1. 検討会の目的 .....                                                           | 1  |
| 1-2. コーディネーター挨拶<br>／橋本和仁（東京大学先端科学技術研究センター 所長） .....                         | 3  |
| [2] 第1部：一次エネルギーの多様化 .....                                                   | 5  |
| 2-1. 化石エネルギー高度化、無害化（石油、石炭、オイルシェール等）<br>／吉田正寛（新日本石油（株）研究開発本部 研究開発企画部長） ..... | 5  |
| 2-2. エネルギーシステム、バイオマス、水素<br>／堤敦司（東京大学大学院工学系研究科 助教授） .....                    | 8  |
| 2-3. 太陽電池（有機系）／宮坂力（桐蔭横浜大学大学院工学研究科 教授） .....                                 | 11 |
| 2-4. 燃料電池（SOFC）<br>／横川晴美（産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門<br>総括研究員兼燃料電池グループリーダー） .....  | 13 |
| 2-5. ①課題提言（ユビキタス社会に求められる“エネルギー”）<br>／久保佳実（日本電気（株）基礎・環境研究所 統括マネージャー） .....   | 15 |
| ②課題提言（燃料電池）<br>／青野泰久（（株）日立製作所材料研究所 主管研究員） .....                             | 16 |
| 2-6. 討議 .....                                                               | 19 |
| [3] 第2部：エネルギー貯蔵と輸送 .....                                                    | 21 |
| 3-1. 電力貯蔵（二次電池、キャパシタ）<br>／本間格（産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門<br>グループリーダー） .....       | 21 |
| 3-2. 電力輸送（超伝導）<br>／高木英典（東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授） .....                         | 23 |
| 3-3. 討議 .....                                                               | 25 |

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| [4] 第3部：省エネルギー .....                                | 27 |
| 4-1. 省エネ材料（構造材）／香川豊（東京大学先端科学技術研究センター 教授）…           | 27 |
| 4-2. 多元系セラミック、超伝導展開<br>／石原達己（九州大学大学院工学研究院 教授） ..... | 30 |
| 4-3. 触媒（ナノ構造制御）<br>／水野哲孝（東京大学大学院工学系研究科 教授） .....    | 33 |
| 4-4. 膜（ナノ構造制御）／谷岡明彦（東京工業大学大学院理工学研究科 教授）…            | 35 |
| 4-5. 討議 .....                                       | 37 |
| [5] 第4部：総合討論 .....                                  | 39 |
| 5-1. ①課題提言（環境）／橋本和仁（東京大学先端科学技術研究センター 所長）…           | 39 |
| ②課題提言（環境）／岩橋基行（清水建設（株）技術研究所<br>上席研究員（所長補佐）） .....   | 41 |
| 5-2. 総合討論 .....                                     | 43 |
| Appendix（本検討会の開催日時・場所、プログラム、参加者の構成） .....           | 48 |

## 【1】はじめに

### 1-1. 検討会の目的

現代社会は、化石エネルギーによって支えられ、ここ100年間とどまるところを知らずに拡大を続けてきた。この化石燃料消費傾向は、経済発展途上の人口大国の中国をはじめとするBRICs等の現状の高い経済伸び率から見て、更に加速するおそれがある。

一方、化石燃料の燃え滓としてのCO<sub>2</sub>の増加は著しく、今や地球規模の大きさに大気温に影響を与えるようになった。温かい大気は水分を余分に含むことが出来るので乾いた大地はより乾き（砂漠化）、雨や雪の降りやすい所はより多くの水で溢れるようになる（世界的な各地の水害）。この傾向は、上記化石燃料消費の加速的増加に伴い、さらに増長されることになる。

このような資源制約と環境制約の隘路の中にあって、エネルギー・環境の革新的な解決をするために、我が国のトップ有識者が一堂に会し検討会を開催する。今後の日本のエネルギー関連研究開発の道筋を考え、それを実現するための戦略を立案することを目指すとして、ナノテク・材料との分野融合で開ける“エネルギー・環境用材料技術”に焦点をあて、「エネルギーの多様化、輸送・貯蔵、省エネ、及び環境との絡み」等に関する研究開発戦略を議論する。

本検討会は2005年7月に開催された「ナノテクノロジー・材料分野俯瞰ワークショップ」後に検討を重ねて切り出された俯瞰図（図1.1）の中で、ナノテクノロジーの開発における目的用途である社会・経済軸（縦軸のイノベーション達成分野）のなかの「エネルギー・環境」領域に関する深堀ワークショップに相当する。

ナノテクノロジー・材料研究開発戦略俯瞰図

| 【プログラム戦略構成分野／ ナノテクノロジー・材料達成目標】 |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  | 関連する<br>共通基本課題 |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|--------------------------------|----------|--|--|--|--|-------------|--|--|--------------|--|--------------|--|----------------|--------------|---|-----------|---|---|---|------------------------------------------------|--|--|--|
| ①                              | ②ナノ構造・材料 |  |  |  |  | ③ナノバイオ・システム |  |  | ④ナノ材料・加工プロセス |  | ⑤ナノデバイス・システム |  |                | ⑥設計・探索       |   | ⑦計測・評価・標準 |   |   |   |                                                |  |  |  |
| ナノサイエンス                        |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                | ☆            | 1 | 2         | 3 | 4 | 5 | ・計画・計測・評価技術<br>・計測標準化のための計測技術<br>・研究開発及び工業標準戦略 |  |  |  |
| ナノサイエンス                        |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                | ☆            | 1 | 2         | 3 | 4 | 5 | ・計画・計測・評価技術<br>・計測標準化のための計測技術<br>・研究開発及び工業標準戦略 |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                | 「エネルギー・環境」領域 |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                |              |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |
|                                |          |  |  |  |  |             |  |  |              |  |              |  |                | </           |   |           |   |   |   |                                                |  |  |  |

図1.1 本検討が対象とした俯瞰図における「エネルギー・環境」領域



## 1-2. コーディネーター挨拶/橋本和仁（東京大学先端科学技術研究センター 所長）

エネルギー・環境の観点から、2030年以降の社会システムをどのように構築するかを考えねばならない。しかも中国・インドのエネルギー消費量は、将来、飛躍的に伸びることが確実な状況である。

資源エネルギー庁が2005年に発表した2050年及び2100年の超長期エネルギー需要構造予測では、世界のGDPが2050年に3倍、2100年に10倍程度になり、中国、韓国が現状の日本のレベルに2100年程度に成長するとした前提の上で、エネルギー需要が見積もられている。なお、石油生産量のピークが2050年、天然ガス生産量のピークが2100年という資源制約条件、GDP当たりのCO<sub>2</sub>排出量が2050年で現在の3分の1、2100年で同10分の1に減るなど地球温暖化対策に伴った環境制約条件も盛り込まれている。

その結果、一次エネルギーを原子力、石油・ガス、石炭等、最終エネルギーを電力、水素、石油・ガス、石炭等とすると、例えば2100年、我が国のGDPが2倍になったとき、それを支える一次エネルギーは約半分しか確保されない。このため一次エネルギーの供給から最終的な需要を補う省エネルギー、エネルギー変換効率の向上等の技術開発が求められる。さらに再生可能エネルギーや使っていないエネルギーからつくる創エネ等も当然、必要になる。同様なことが2050年にも予測され、飛躍的な技術開発が要求されている。

なお、京都議定書においても2012年までに、日本は1990年比でCO<sub>2</sub>排出量を6%減らす約束だが、2000年に既に8%増えており、現状から14%減らす必要がある。技術的にはたぶん実現不可能で、国際公約遵守のためには排出権取引等、技術開発以外の方法で達成するほかないのではないかとされている。

ただ、ここ10年間の間に技術も進歩し、例えば、テレビの消費電力は2004年までの10年間に138キロワットから90キロワットにガソリン自動車の理論燃費は格段に向上し、また、セメント製造に必要なエネルギー等の主要業種のエネルギー源単位は飛躍的に向上し、日本は省エネが世界的にも進んでいるのも事実であるにもかかわらずエネルギー消費、排出炭酸ガス量は増えているというのは非常に大きな問題であることを認識する必要がある。

これまでの温暖化対策は、90年代あるいはそれ以前の技術開発の成果である。つまり今後、中長期的には、革新的な技術開発が不可欠であることは間違いない。すなわち、エネルギー・環境用材料の研究開発においては、目的志向型の基礎研究が非常に重要であることを我々科学者は認識すべきである。ナノテク・材料研究は盛んだが、多くはその研究自体が目的であり、得た成果を何かエネルギーや環境の技術に応用しようという態度に思われる。そうではなく、今我々が行うべきは、エネルギー環境用の革新的な解決のためにナノテク・材料の開発研究を行うという逆の発想に基づく研究と思う。

経済産業省の2006年度版「技術戦略マップ」（図1.2）では、地球温暖化対策が中心にあり、協をエネルギー技術分野、環境技術分野が固めた構造となっている。政策立案者



もエネルギー・環境技術開発に大きく期待している。思い切った資源配分で目的志向型の基礎研究を推進し、優秀な研究者が集中して問題解決に取り組むことが国策及び地球上の問題として重要である。

# 環境・エネルギー技術分野体系のイメージ

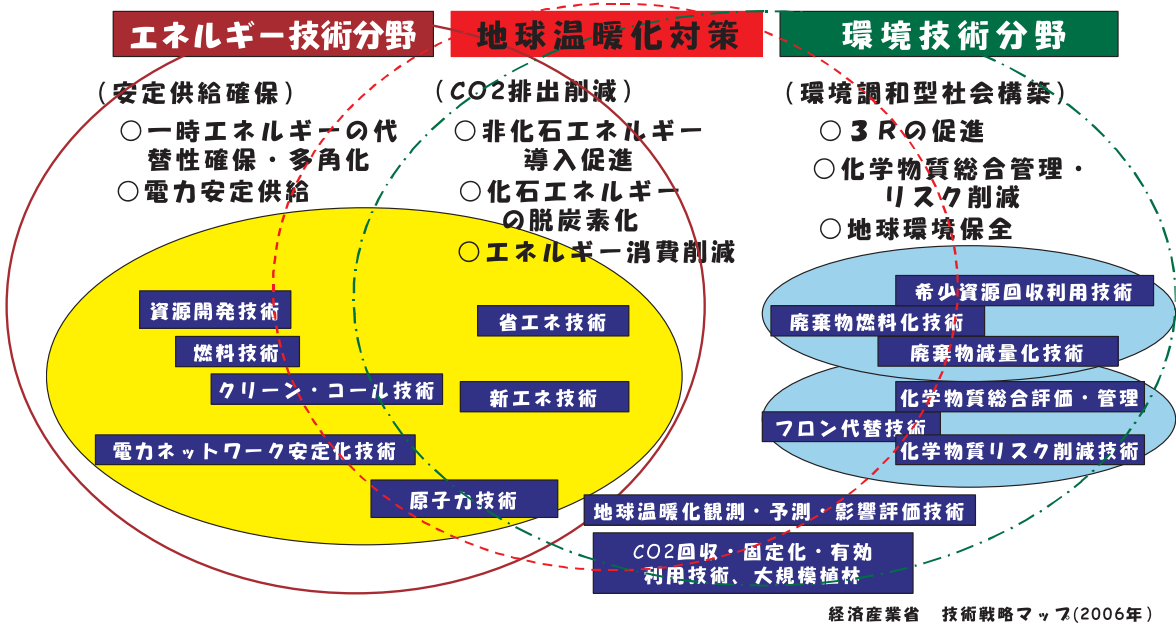


図1.2 環境・エネルギー技術分野体系のイメージ（経済産業省技術戦略マップ2006年）

## [2] 第1部：一次エネルギーの多様化

エネルギーソースとその変換技術について議論。

### 【発表者】

|                 |                                |
|-----------------|--------------------------------|
| 吉田正寛（新日石）       | 化石エネルギー高度化、無害化（石油、石炭、オイルシェール等） |
| 堤 敦司（東大院工）      | エネルギーシステム、バイオマス、水素             |
| 宮坂 力（桐蔭横浜大院工）   | 太陽電池（有機系）                      |
| 横川晴美（産総研）       | 固体酸化物型燃料電池、電気化学反応器             |
| 久保佳実（NEC基礎・環境研） | 燃料電池、太陽電池                      |
| 青野泰久（日立材料研）     | 燃料電池                           |

### 2-1. 化石エネルギー高度化、無害化（石油、石炭、オイルシェール等）

／吉田正寛（新日本石油（株）研究開発本部 研究開発企画部長）

#### ●世界のエネルギー需要動向とエネルギー確保のための開発課題

世界のエネルギーの需要動向を推測すると、2030年には発展途上国を中心に現在に比べ50%以上増加する見込みで、エネルギー資源の確保が非常に重要となる。特に石油需要の伸びの3分の2を占める輸送用燃料の資源確保は大きな課題とされる。この観点から、①石油からの輸送用燃料得率の向上（例えば、アスファルト等から液体燃料をつくる技術や重質油の分解技術）、②非在来石油（オイルサンド等）のアップグレーディング、③石油以外の炭化水素資源からの液体燃料変換（例えば、天然ガスから液体燃料をつくるGTLや石炭から液体燃料をつくるCTL）、またバイオマス資源から液体燃料をつくる技術開発（例えば、糖化・発酵（バイオエタノール）、植物油脂水素化（バイオディーゼル））が求められる。なお「新・国家エネルギー戦略」では2030年までの数値目標として、①石油依存度40%以下、②エネルギー効率の約30%改善、さらに③輸送部門の石油依存度を約80%以下とすることなどが示された。輸送用部門の石油依存度を下げるためにはバイオマス資源など燃料の多様化が必要であると思われる。

#### ●石油産業の課題と方向性

石油産業の課題として、原油調達環境の悪化、原油の重質化、国内需要の減少・白油化、地球温暖化防止等がある。これらの課題に対応するための技術開発の方向性として、前述した資源確保・燃料多様化に資する技術開発のほか、石油でなければならない付加価値の高い、例えば内燃機関の燃料とか石油化学の原料とかの用途に使用する、石油を高度に利用するための技術開発が重要である。具体的には、重質油を高度分解しガソリンや石油化学品を製造する技術、ガス化による発電、さらにガソリンより軽い超軽質油や化学原料をつくり出すプロセスの開発が重要である。

## ●CO<sub>2</sub>削減、水素社会

大学等には、革新的なCO<sub>2</sub>削減技術を期待している。分離、回収、隔離、有用物変換、低温排熱の有効利用、高効率エネルギー機器の開発等を新たな視点で考えて欲しい（図2.1-1）。また将来の水素社会を見通し、燃料電池に注目している（図2.1-2）。2020年頃には水素自動車が出始めると推測され、それに対応できる水素供給システムが求められる。石油業界は現状で、35億ノーマル立米程度、自動車にすると300万台相当の水素供給能力があるが、ノーマル立米あたり106円と目標40円より2.5倍程度高い。水素ステーションの建設コストの削減が第一の課題である。

### 17. 革新的CO<sub>2</sub>削減技術への期待

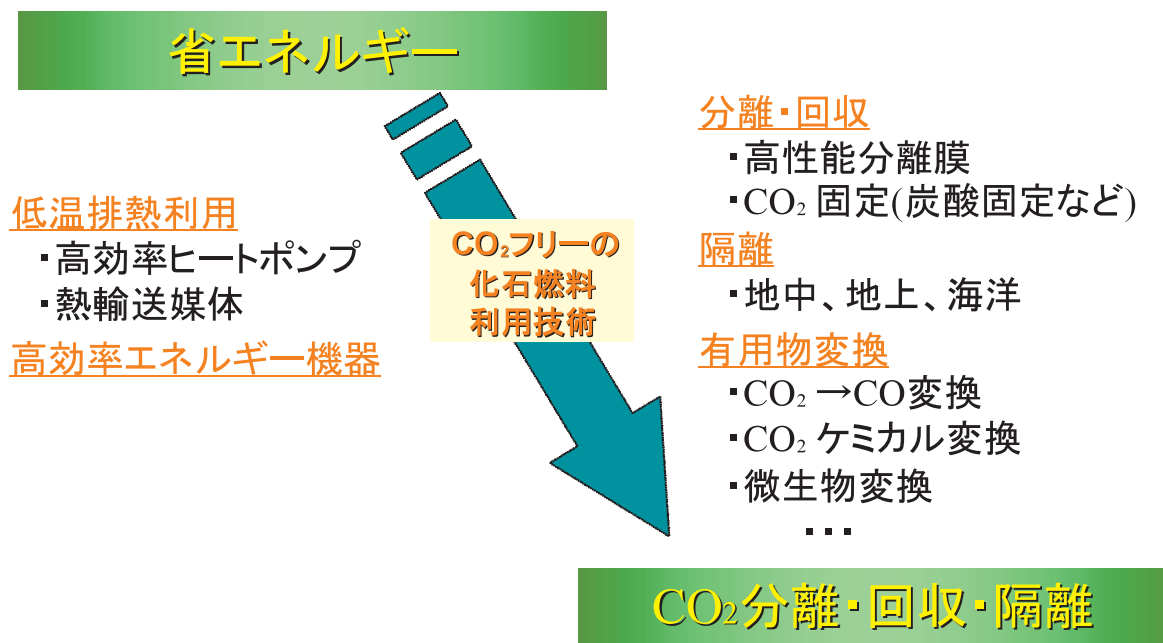


図2.1-1 革新的CO<sub>2</sub>削減技術への期待

# 水素社会へ向けてのイメージと技術開発項

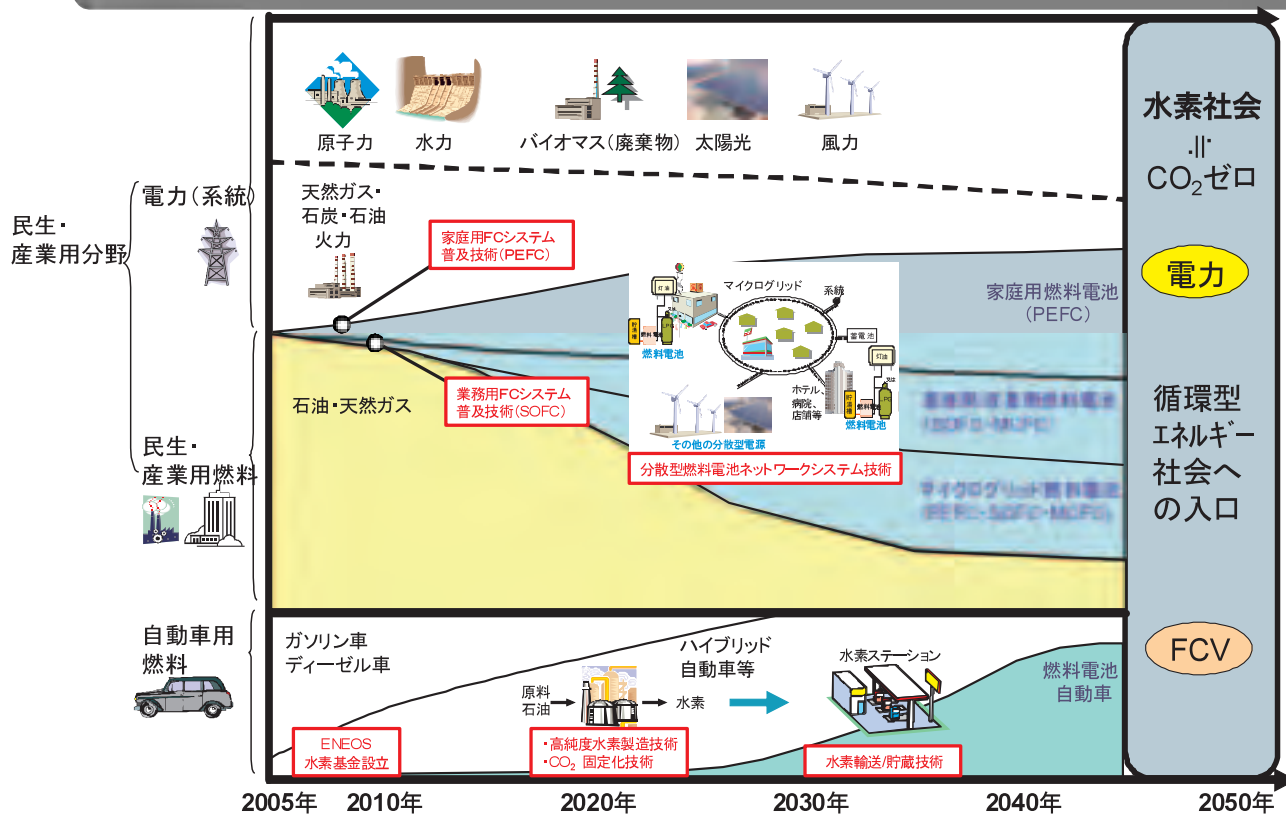


図2.1-2 水素社会へのイメージ

## 2-2. エネルギーシステム、バイオマス、水素

／堤敦司（東京大学大学院工学系研究科 助教授）

### ●超長期エネルギー技術戦略

日本のCO<sub>2</sub>排出量の部門別割合は、94%がエネルギー関連である。すなわち、エネルギー問題を解決しないと環境問題は解決されない。一次エネルギー予測では、2050年で石油がピークアウトする。これにより不足するエネルギーを、何らかの形で確保しなければならない。特に、生産がピークになる前に解決する必要がある。

経済産業省が発表した『超長期エネルギー技術戦略』では、ケースA、B、Cとして、2100年にCO<sub>2</sub>排出量を現在の10分の1にする技術戦略が描かれている。ケースAは、石炭等の化石資源とCO<sub>2</sub>回収・隔離の最大限利用ケースであり、石炭が使える代わり、約20億トンのCO<sub>2</sub>を処理しなければならない。ケースBは、原子力の最大利用ケースであり、2100年の段階で200基の原発が必要である。ケースCは、再生可能エネルギーの最大限利用と究極の省エネルギー実施ケースである。2030～2050年までにエネルギーの高度利用を果たし、CO<sub>2</sub>排出量を2分の1～3分の1に削減する。すなわち、化石エネルギーの消費量の大幅な削減、再生可能エネルギーの導入促進、二次エネルギーの電力化・水素化、エネルギー転換部門でのCO<sub>2</sub>分離・回収等が必要で、創エネ、省マテリアル、エネルギー貯蔵の効率利用、コプロダクション、エクセルギー再生、物質・エネルギー再生等の技術革新が必要である。

### ●エネルギー及びエネルギー変換技術の本質論

ナノテク・材料分野で重要なのは、素材・製品の高性能化・高機能化である。例えば、鉄の強度を2倍にし、半分の生産量、半分のエネルギー消費で済ませる。また小型化により生産量を半分とすれば、素材で2倍、製品で2倍となり、エネルギー消費が4分の1で済む。エネルギー変換に対し、デバイス及び素材へのナノテクの応用を考えるのである。

コプロダクションでは、石炭、バイオマス、重質油、廃棄物、電力、水素燃料等から製品をつくる生産体系が重要になる。エネルギーを考えるとときに重要なのはエクセルギー損失をできる限り低減させるという視点である。例えば、天然ガスから水素をつくる時、単純なエネルギー効率のほか、圧縮空気に圧縮エネルギーが保存されており、液体水素も冷熱エクセルギーで保存されているからである。このため早急に、エネルギー効率に熱と電気を併産する部分の評価、コプロダクションなら、生産物及びエネルギーを併せて評価する指標及び手法の確立が必要である。

また、石油エネルギーは化学産業であれば製品に3分の2が保存されて、エクセルギーの損失は大きい。このため、プロセスを究極に省エネにしてエネルギー消費をゼロにしても、エネルギーを減らせるのは最大で4割に過ぎない。エネルギーの電力・水素による回収、プロセスでの廃熱の省エネの徹底とともに、何より化学製品に保存された3分の2のエネルギーの回収が重要となる。すなわち、部分最適から全体最適への転換の視点で

あり、従来の3Rであるケミカルリサイクル、マテリアルリサイクル、リユースに代わって、廃棄物をガス化し、合成ガスより化学製品を作る体系を確立する必要がある。

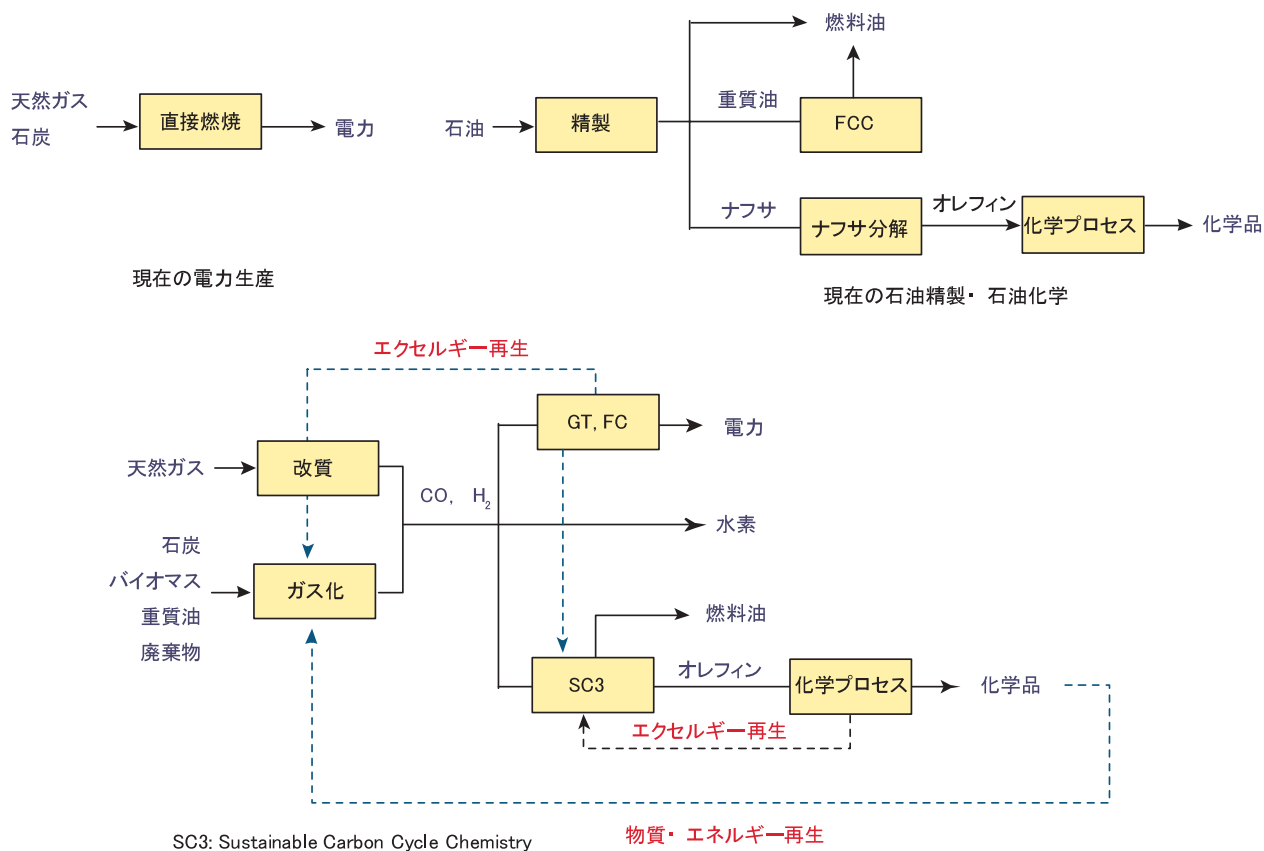
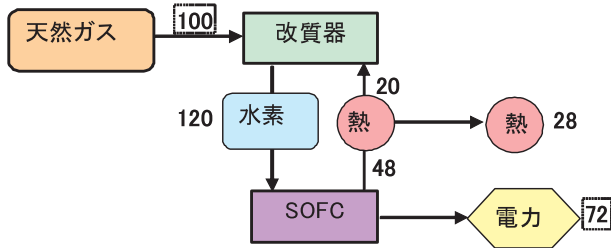


図2.2-1 コプロダクション

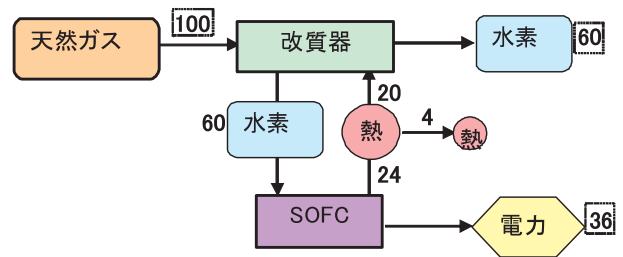
### ●再生可能エネルギー

風力は20分程度の周波数変動があり、その周波数を調整する同規模の発電所を作る必要がある。メイングリッドで吸収すればよいのだが、大規模風力では大きな問題である。太陽エネルギーでは、出力が最も出るときに電圧が上がるため、電圧が上がると制御できずシャットダウンせざるを得ない。このため蓄電、蓄エネルギー技術の高度化が求められている。

## エクセルギー再生型水素・電力・水素コプロダクション



**コジェネレーション モード**  
(熱電需要時→熱電併給運転モード)



**コプロダクション モード**  
(熱需要不要時→水素電力併給運転モード)

- 天然ガス改質と燃料電池を組み合わせることにより、エクセルギー再生でき、高効率化(発電効率70%以上)・熱電比率が小さい
- 電力・熱・水素を併産することにより、負荷変動に対応できる。このため、再生可能エネルギーとの親和性が高い
- 数MW級分散型エネルギーシステムであり、水素供給ステーションの機能も持つ

図2.2-2 エクセルギー再生型水素・電力・水素コプロダクション



## 2-3. 太陽電池（有機系）／宮坂力（桐蔭横浜大学大学院工学研究科 教授）

### ●太陽電池への期待

太陽電池はエネルギーデバイスである。このためCO<sub>2</sub>抑制の対策等の要請から、製造にかかるエネルギーを最小限に抑えて安くつくことに意味がある。従来から太陽電池素子が高いのは、シリコン・薄膜が高温製造でプラズマCVDによる真空工程を経るからである。また消費者エレクトロニクスの観点から、二次電池のキロワット時あたりのコストが250円と系統電力よりも一桁高く、廃棄することも問題であり、太陽電池を低コストに生産していく要求がある。特に、注目するのが、色素増感型太陽電池である。

### ●色素増感型太陽電池の特徴

我々のフレキシブル色素増感型有機太陽電池は、大気中での製造、印刷工程の利用などにより、極端な低コスト化を果たしている。寿命は3～5年だが、従来よりも一桁安い。プラスチックセルで5～7%の性能があり、交換可能でリサイクルもできる。既存技術との比較では、フィルム型アモルファスシリコン太陽電池がプラズマCVDを使うため、設備投資に50億円以上最大100億円かかるが、色素増感型太陽電池は印刷・塗布で簡単にできるため、数億円規模の設備で月間メガワット級の生産能力を出せる。さらにシースルー性、カラフル性等の付加価値があり、拡散光でも効率的に発電できる。さらにフレキシブルなため、壁、屋内のスペースにも設置できるので効率が良いというメリットがある。有機系太陽電池は光の当たらない部分に性能が引きずられる影響も少ない。総コストの3分の1を占める設置コストも低減でき、量産効果によってワットあたり75円のNEDOの目標を十分にクリアできると期待できる。

### ●太陽電池の直接電力としての利用

また、我々の色素増感型有機太陽電池は、蓄電能力も備えている。光を直接電力として蓄えるのである。従来の太陽電池の弱点は、自立電源として使えず、停電の際のバックアップさえできなかったことにあった。パソコンのバッテリーでは500回、600回のサイクルで1、2年使えるが、太陽電池は1日に10～20サイクルするため、非常に寿命が短い。しかし、電極を太陽電池と兼用させたソフトキャパシタを製造して蓄電機能を備え、負荷抵抗を抑えた太陽電池をつくった。その結果、シミュレーションから光量の変動に対しても安定した出力が出ることを確認した。全体で厚さ3ミリの薄型素子であり、プラスチック化も可能である。太陽電池は根本的に、絶えず存在する生活の光を全部、発電に使えるのが特徴であり、社会貢献としても環境、廃棄物の問題、安価、メンテフリーの電源となる等、様々な適用が太陽電池に期待されている。

### ●産学連携

企業と大学・研究機関は、産の収益性の思想と学の論文を出すという思想の間にある乖離を埋める技術で連携し、技術開発を進めるべきである。企業は収益を出すことが第

一の命題であり、ユーザーに対して信頼性、安全性を確保すること、今後5年程度の市場を確保すること等の使命を含め、企業側から産学が連携する要素は見あたらないと思われる。一方、大学は論文で成果を出して、国からのファンドを獲得することが第一の命題と思われる。このため例えば、リチウム電池は吸蔵材料が膨張するが、膨張の危険を知らながらも、安全性の数値目標をクリアすれば売れる。大学は膨張しないような吸蔵材料を、時間をかけても開発する。また、リチウムが廃棄しないで済む方法を開発するのが良策と思われる。つまり、企業が課題解決の必要性を感じながら、収益等の問題、目先の開発では行えない技術を大学へ向けて発信することが必要である。

### 企業と大学研究機関の連携が生み出すべき技術

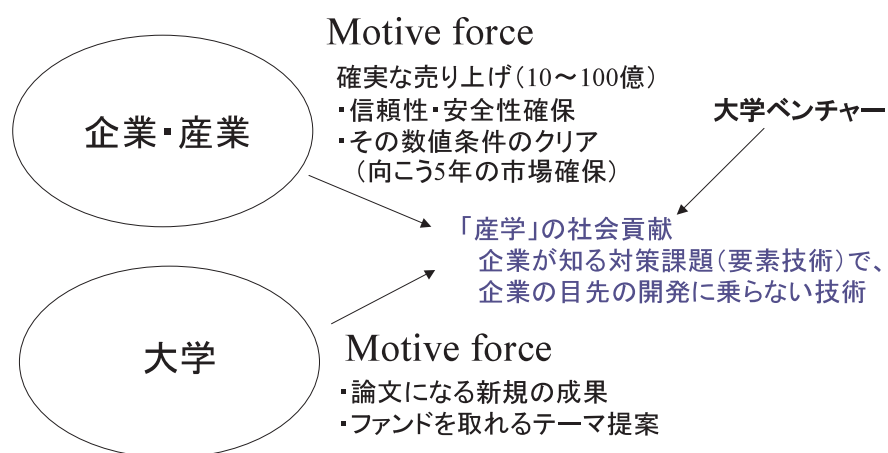


図2.3 産学連携で生み出すべき技術

## 2-4. 燃料電池 (SOFC)

／横川晴美（産業技術総合研究所エネルギー技術研究部門 総括研究員兼燃料電池グループリーダー）

### ●SOFCの概要

固体酸化物形燃料電池（SOFC）は20年以上の歴史があり、開発期間が長く、難しい技術の一つである。最近、最も先端の米ウエスティングハウス社などが、100キロワット級の比較的大きなシステムの開発に対して非常に大規模な努力を行っている一方で、小さなシステムの開発に対しても大きな関心が払われている。小型システムは欧米のほか、日本も追随し、京セラ、三菱マテリアル等が家庭用、業務用を含めた1～10キロワット級のシステムを開発している。

燃料電池はエネルギー変換装置であるため、様々な材料が使われている。発電部分には電解質、電極等のほか、インターコネクターが必要となる。各材料の伝導特性の要求、高温製造のため材料間で反応しない等、材料の制約が非常に大きい。特に、材料開発をはじめ、スタック製造技術、全体のデザイン開発の3つを並行して開発していく難しさがある。

SOFCの稼働温度を下げる研究がホットな話題で、燃料電池にはSOFCで1000℃、MCFCが650℃、リン酸型が160℃、固体高分子型燃料電池が80℃等の4種類程度があるのだが、電解質の物質で高温型、低温型が明確に分かれる。コンダクティビティギャップと呼ばれる中間の温度領域に良い電解質がないことが材料化学の問題である。

## 材料化学的ポイント

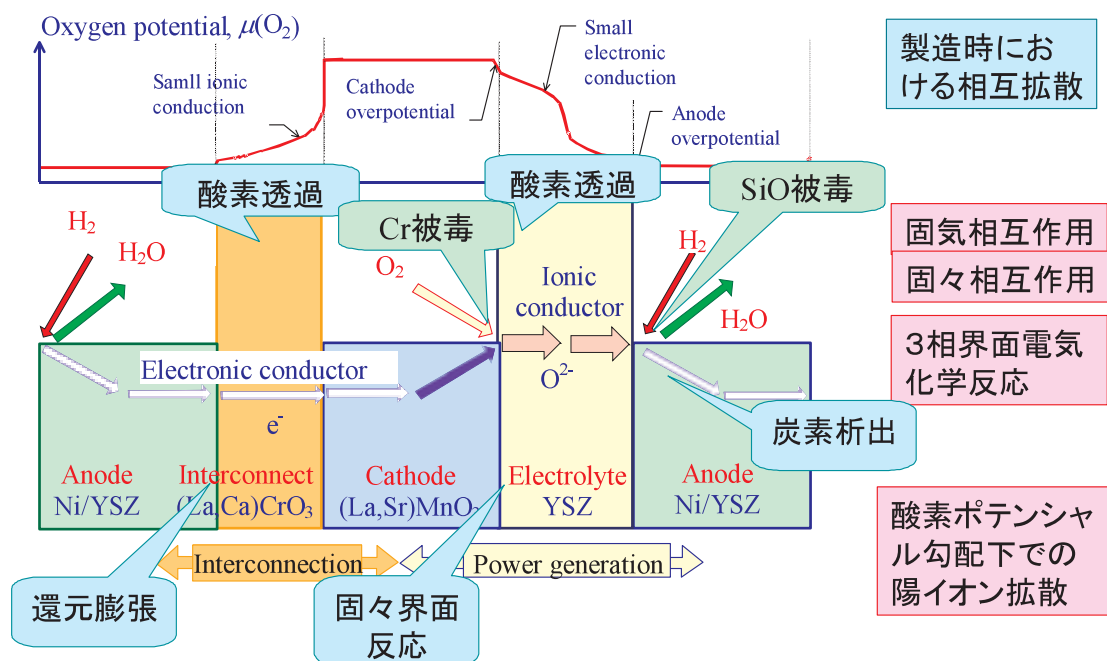


図2.4 材料化学的ポイント

## ●SOFCの低温化技術

SOFCの低温化では、九州大学石原教授によるランタンストロンチウムガリウムマグネシウムが非常に注目されている。また、低温下では電気抵抗の影響を非常に受けるため、同じ材料で低温化する際には製膜技術も焦点となる。さらに製造コストを安くできるかの点、電極性能を低温でも高く維持する点も研究開発のポイントとなる。ここ10年、製膜技術で薄膜化した電極が、1000℃の場合よりも優れた性能を示す例もでてきた。素材とともに、総合的な観点から材料を決めていくことも考えられている。

電解質の温度依存性の強さは、イオン伝導性および電子伝導性と関係する。温度を上げると通常、電子伝導度が高くなり、イオン伝導に比べて相対的に電子伝導度が高いと短絡してしまって発電できない。逆に温度を下げると、イオン伝導の抵抗が大きくなり、発電できるもののジュール熱で消えてしまう。つまり、ある特定の温度領域だけで発電でき、この領域が膜厚によってずれる。低温化では、素材の選択と膜厚の決定が鍵を握る。ただし、他の熱機関の熱効率は容量が小さくなるほど下がる傾向があるが、燃料電池の二次元的な反応器の特徴により、小さくしても効率は余り下がらないメリットはある。

また、SOFCのコストは基本的に貴金属を扱っておらず、材料費は極めて安価である。また、プロセッシングも既存の技術を適用できるため、コストを低減できる。ただし、初期導入期では既存競合技術に比べると大量生産段階に達していないため高く、この点が最大の問題である。このため性能を2倍すればコストは2分の1になるという高機能化によるコスト低減を図ることが開発の方向である。

## ●基礎研究への要望

材料科学への要望は、高温電気化学である。固体の中でイオンが動く等、メンブレンリアクターを含め、プロセス技術の理解を深める基礎科学の進展を望む。例えば、表面反応の反応係数と拡散の温度依存性との相関を調べると、表面反応は温度依存性が高いため、温度を下げて行くと拡散による平衡化よりも表面が律速段階になる。その結果、外気と固体内部の平衡がずれるが、表面加工により表面反応が進めば、触媒効果等、非常に効率的な反応が見込める。また、酸化物とニッケルで電極をつくれば、酸化物の性質の違いで表面がまったく違うものになるという興味深い現象が観測された。例えば、YSZとニッケルで電極をつくれば炭素で覆われ、セリアでは酸素で覆われる。炭化水素系燃料を使った電極反応では、電解質を起点とする物質移動が非常に重要で、同燃料でも直接SOFCに導入でき可能性がある。

このほか、固体にある陽イオンの拡散、酸素イオンの拡散、水素の拡散等が機能に直結するため、陽イオンの挙動の理解が表面の材料を決める上で非常に重要である。

## 2-5. ①課題提言(ユビキタス社会に求められる“エネルギー”)

／久保佳実(日本電気(株)基礎・環境研究所 統括マネージャー)

エネルギー問題は2つある。一つは大きな地球規模のエネルギー問題と、小さなエネルギーと呼ばれるモバイル環境でのエネルギーの問題である。ユビキタス社会は、すべてがネットワークにつながり、“いつでも、どこでも、だれとでも”情報をやりとりする。このため、各個人の端末に通信および情報処理の機能が必要となり、ここにエネルギー源が必須となる。その結果、長時間連続駆動する燃料電池の必要があり、超小型、充電レス等の要求もある。すなわち、マイクロ燃料電池、二次電池、太陽電池、マイクロ波受電、熱発電等、永続的に使える新しいエネルギー源開発が求められる。

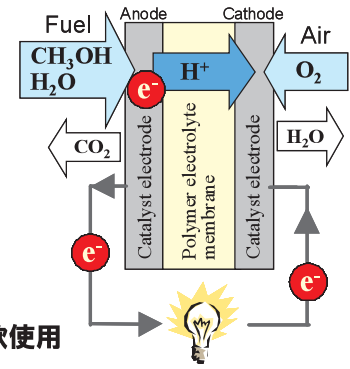
マイクロ燃料電池で現状、ダイレクトメタノールの方式でプロトタイプレベルができたが、出力密度の向上、小型化の問題がある。さらに白金触媒を使うため、脱白金がコスト低減に重要である。CO<sub>2</sub>排出低減の観点から、燃料のメタノールをバイオマス化する課題もある。一方、太陽電池、マイクロ波等の永続的な発電では現状、密度が薄い。太陽の場合、エネルギー密度は100mW/cm<sup>2</sup>程度だが、変換効率や日照条件を考えると平均では1mW/cm<sup>2</sup>程度だ。マイクロ波受電では安全基準的が1mW/cm<sup>2</sup>程度で、太陽光と同程度まで発電できる可能性がある。人間を利用した人体発電は、人体のエネルギー約100Wの内2、3%を電力に使いたい、熱電変換では効率が低く、埋め込み型のバイオ燃料電池の発想が生まれている。

今後、携帯端末へのエネルギー要求が高まるのは必至で、ロボットという携帯機器も含めると20～30年後には切実な問題となる。一人1台ロボット時代に100億台のロボットがそれぞれ100W消費すると、全世界のエネルギー消費の約1割を占めることとなる。「小さなエネルギー」の問題も今から、サステイナブルを考える必要がある。バイオマスや光合成/水素生成、燃料電池は、サステイナブル社会の基本インフラであり、触媒材料がキーテクノロジーである。



### マイクロ燃料電池の現状と課題

- ・ダイレクトメタノール型(DMFC)で、プロトタイプレベル
- ・出力密度向上による一層の小型化が必要 → 触媒性能向上
- ・信頼性向上(～10000時間、低温起動、長期保管、耐衝撃性など)
- ・コスト低減(各種開発部材、白金触媒) → 非白金系触媒
- ・燃料のバイオマス化



### 太陽電池、マイクロ波受電

- ◆ 永続的発電が可能
- ◆ エネルギー密度の低さが最大の課題 → 二次電池への蓄電による間歇使用

太陽光のエネルギー:  $100 \text{ mW/cm}^2$  (真昼天頂時)

- ➡ 太陽電池の電力(効率～10%):  $10 \text{ mW/cm}^2$  (真昼天頂時)
- ➡ 夜間、室内、靴の中、等を考慮すると、実効的な平均電力は  $1 \text{ mW/cm}^2$  程度か？

### マイクロ波受電

- ・生活空間をマイクロ波で満たし、定常的にエネルギーを供給する。
- ・機器側には、マイクロ波受電システムを搭載。
  - マイクロ波の電力密度の安全基準:  $1 \text{ mW/cm}^2$  (24時間、365日浴び続けても安全なレベル)
  - (因みに、宇宙発電/マイクロ波送電の受電サイトの電力密度の設計値:  $\sim 10 \text{ mW/cm}^2$ )
- ➡ マイクロ波受電の電力(効率～90%):  $0.9 \text{ mW/cm}^2$  → 高効率昇圧回路必要
- ➡ ✓ マイクロ波受電の電力は、太陽電池の平均的な電力と同程度
- ✓ マイクロ波で満たされた空間を人々が受け入れるか？

### 人体発電

- ・人間は100Wの機械 → 2-3Wを電力に使えるかも？
- ・熱電は効率低い(数%以下): せいぜい0.1W, 実際はもっと低い。→ 腕時計ぐらいか？
- ・埋め込み式バイオ燃料電池？

図2.5-1 ユビキタス社会とエネルギー

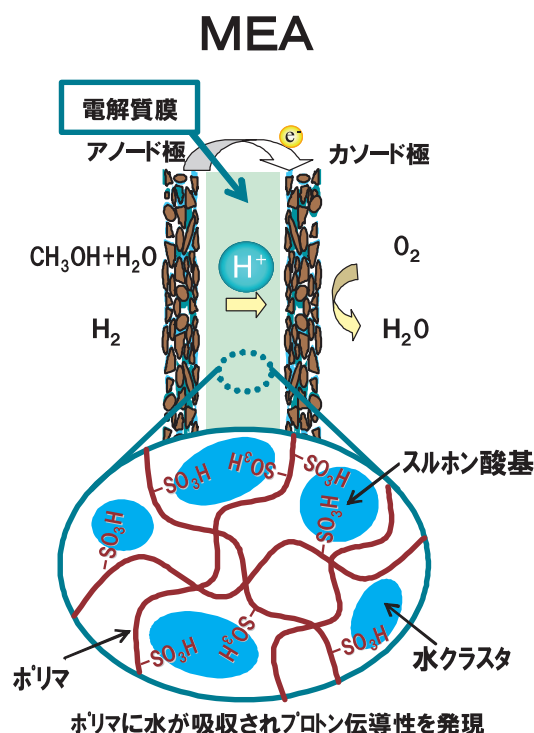
## 2-5. ②課題提言／青野泰久（(株)日立製作所材料研究所 主管研究員）

固体高分子電解質膜を使用する燃料電池では、その膜に触媒を含む電極材料が塗布された膜・電極接合体（MEA:Membrane Electrode Assembly）が電池性能（出力、寿命）を大きく左右させる。燃料電池の市場競争力の面では、発電材料であるこのMEA性能の実用化目標達成と同時に、量産を含むコスト問題解決の見通しが評価される。電池発電条件として一番厳しいパッシブ型DMFCを例にすると、最大出力密度は室温近辺で $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 以上、そのために白金レス化を含め触媒および電極材料の機能性を格段に向上させる必要があるだろう。寿命は最も緩い条件で約3000時間（1日3時間、3年間使用）の目標、コストはMEAのサイズ $10\text{cm}^2$ で約500円以下の実現性が必須であり、現状の5000円を超える価格と大きな開きがある。

まず非常に高い目標の開発対象に関しては、対象の求める性能理想系を良く吟味して、現在の使える先端技術を導入し、課題解決に向かうことが必要であろう。電解質膜の理想的な目標性能を出すためには、現状の様々な分子レベルのナノテクノロジーを含めた材料技術を活用すべきである。水を含むと膨潤する高分子の問題も分子構造に架橋構造を採用するなどの設計の思想を取り入れる。燃料を通さないこと、抵抗を抑える等の性質をもつ斬新な分子構造の設計も必要である。特に、このように材料に種々の機能を持たせるためには、分子構造設計から製造プロセス、構造・性能の評価・計測技術の三位一体の開発方法論が有効であり、それを支えるナノテクノロジーの活用についてはメーカーに加え基礎研究を推進する官学との連携が強く求められる。

さらに電極材料では触媒が課題であり、将来的には非白金の材料を開発すると共に、活性度、安定性が課題となる。触媒を担持し電子伝導を担う担持材のほか、拡散層でカソード側に生成される水を外に押し出す撥水性材料の開発等も含め、ナノレベルでの電極材料の構造設計が必要である。例えば、NECのカーボンナノホーン担持体、日立では白金中へのリンの添加で非常に安定したナノ粒子分散化触媒が開発されている。





## 膜の理想系(分子レベル制御)?

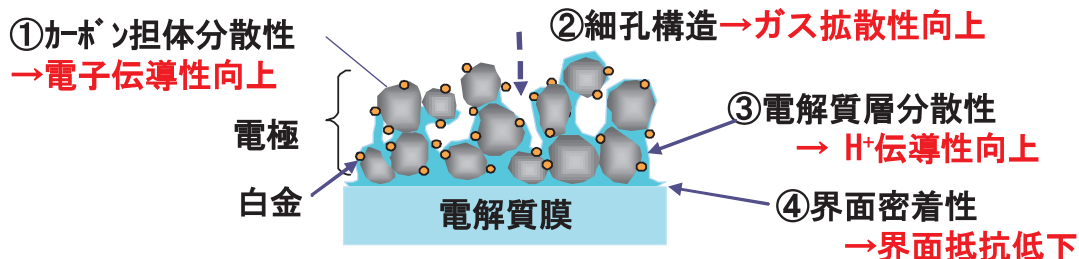
- 1) 高 $\text{H}^+$ 伝導(低抵抗)  
 $\text{H}^+$ チャンネル、キャリア濃度増加
- 2) 低膜膨潤  
 主鎖間相互作用強化、架橋導入
- 3) 燃料遮断(低メタノールクロスオーバー)  
 ミクロクラスター化
- 4) 長寿命(安定性)  
 主鎖の高耐酸化性

## ナノテクノロジー活用

- 1) 分子構造設計(根源を見る)  
 計算機シミュレーション
- 2) 新規合成製造技術(モノづくり)  
 ハイブリッド化も含む
- 3) ナノ計測技術

図2.5-2 電解質膜の課題

| 電極部材 | 性能/コスト                                                                                  | 寿命                                                                         |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 触媒   | <ul style="list-style-type: none"> <li>高い反応活性</li> <li>安価なPtレス触媒</li> </ul>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>溶出しないこと</li> <li>凝集しないこと</li> </ul> |
| 担体   | <ul style="list-style-type: none"> <li>触媒の高分散性</li> </ul>                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食しないこと</li> </ul>                  |
| 拡散層  | <ul style="list-style-type: none"> <li>高い導電性</li> <li>燃料供給量制御</li> <li>高い排水性</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>腐食しないこと</li> </ul>                  |



## 高性能電極部の断面イメージ

図2.5-3 電極材料の課題

## 2-6. 討議

エネルギーの多様化として政府は、燃料電池、太陽電池、バイオ技術等、様々なプロジェクトを進めている。しかし、このままで果たして良いのか、何かが足りないという疑問も残る。ここでは“俯瞰的な技術”をキーワードにナノテク・材料の観点から、日本のため、人類のため、10年後20年後、あるいは50年後、100年後の技術へのアプローチを、燃料電池、触媒の各論を通じて討議した。

- ・ SOFCの開発では、これまで政府はPEMを中心に動いてきた。しかし、つくるのに専念をしてきたあまり、利用法をおざなりにしてきた背景がある。本質的には、材料とつくることと全体のスタックをつくることを同一人がやらないといけない。目的の下にもものづくりをする思想、すなわち目標を明確に定め、資源を集中投下する思想が必要である。ただし材料分野の特殊性として、一つの新しい材料で大きくブレークスルーする可能性は留意すべきである。
- ・ 例えば、1メガワット級の燃料電池の開発には非常に大きな時間とコストを必要とする。100%国の資金ではまかなえず、民間企業の出資も必要となると、小さな市場とのインタラクションを考えながら大きな開発を進めるシナリオをつくらざるを得ない。
- ・ 燃料電池の投資先のズレは、例えば、膜の問題に現れている。膜劣化という根本的な問題に対し、例えば、古くさく、格好悪い研究であり、論文にできない、一生浮かび上がらない等で大学では行えず、目的志向型基礎研究に材料の専門家が参加できない原因がある。解決のための本質的な研究に投資できないでいる現状がある。
- ・ 企業の開発努力と大学の研究開発とでは隔離がある。その中間が産総研だが、ユーティリティではない。PEMでの新しく科学的に理解された部分が、基礎成果として学会で議論がされても、実用化に近いと特許等で全容を発表できない等も問題もある。
- ・ 触媒の研究開発でも同様な様相がある。省エネ、化石燃料の転換の観点から本質的な課題でありながら、大学の触媒の研究者は激減している。脱白金の課題も民間、大学を含め大きな研究テーマとなるにもかかわらず、白金触媒自身は、大学で取り扱う研究ではない。その一方でアカデミックな広がりを考えても、酸化物、窒化物のものづくり、水溶液中の金属の状態、凝縮等のケミストリーが共通基盤として確立されていない。すなわち、ジェネラルに様々な分野を見ている人がいないのである。
- ・ 工学部の人間がジェネラルにもものを見ていないことが問題だ。工学の本質は、様々な学術フロンティアを見渡し、社会のニーズに従って新たな技術力を開いていく融合にあるはずだ。特に、日本は欧米と比べ化学の手法が弱い。おそらく、ナノテクのプログラムの推進施策と結びついている。産業界を含め、工学全体の新しいポテンシャル、加速化する能力が不足している。目的を決め、基礎から応用までを総動員し、格好良さではなくて、目的に合うか合わないかの評価が必要だ。国全体のプログラムの立案でも、全体を見るコーディネート力が不足している。例えば、エネルギーの分野でそのきっかけになるシステムが作れば、戦略になり得る。

- ・例えば、鉄鋼材料の衰退原因の約9割が腐食と摩耗と疲労である。燃料電池の問題と様相が似ている。欧米をキャッチアップする時代であれば、電車のレールを摩耗から守るという共通認識の下、大学も企業も一緒に開発できた。しかしグローバル化の中で、各人が違う目的を持ち、国を挙げての目的が不明確になっている。共通した大きな目的が決まれば、新しいテーマとしてチャレンジできる。古いテーマでも、新しい視点から再チャレンジできる可能性がある。また、研究者を集めるためにも、例えば、5年間等、やや長い期間打ち込める環境・体制を整える必要がある。
- ・企業は市場原理の中で、明日を生きるための競争をしている。大学は難しいことをやらなければいけない命題がある。このため、50年100年の計の中で求められる明確な目標を決めてブレークダウンし、各要素技術で必要最低限の解決課題をしていくコーディネーション力が必要である。
- ・約20年前に一度、触媒、太陽電池等の問題意識を非常に熱心にNEDOがまとめている。このレポートを、ナノテク、コンビナトリアルケミストリー、計算科学等、この20年で新しく誕生したコンセプト、方法論を適用して、もう一度見直すことが必要だ。また20年の間に日本は、欧米のキャッチアップから、アジアを含めて競争してかなければいけなくなったという前提で、戦略を検討する必要がある。
- ・日本は、これまで戦略を持って科学技術政策をしてきたとは思えない。戦後のキャッチアップは、下手な戦略は練らないという戦略でキャッチアップを加速化させた。その間に、トップの人間が将来進むべき道、特に中長期の視点を探る作業を全部放棄してきた反省がある。権限ある機関に、中長期をウォッチして軌道修正させる機能を付加することが必要だ。さらに、独立行政法人は機関評価等で、近視眼的になっており、それを打破する仕組みも重要である。
- ・新たな視点として、30年先50年先を思い描くとき、自由主義経済でエネルギーを考えることが適当なのか、プレーヤーが企業のままでいいのか等の視点も重要だ。こういった根本的な部分から検討しない限り、同じことを繰り返す危険性がある。特に、エネルギーの多様化の問題という特殊性も考える必要がある。
- ・目的志向型基礎研究で進める共通基盤的な課題を、論文がでなくても格好いいと思える周辺の環境を醸成することが大切である。米国では、システムバイオロジー等の融合研究で、参加する研究者から等距離の場所に新しい研究所をつくり、当分の間は成果がなくても構わないと宣言する等の新しい評価基準を決めた。さらに、大変重要なミッションであるとして研究者の意識を高揚させている。日本の場合も格好悪い研究かもしれないが、人類のための国のミッションとして大変重要であることを理解してもらう環境を、給与のあり方、昇進の基準、評価のやり方を含め新しい基準をつくって醸成することが必要である。

## 【3】第2部：エネルギー貯蔵と輸送

貯蔵については電気貯蔵（二次電池、キャパシタ、超伝導マグネット）材料と、輸送は電力輸送の超伝導材料について議論。

【発表者】

本間 格（産総研） 電力貯蔵（二次電池、キャパシタ）

高木英典（東大新領域） 電力輸送（超伝導材料、熱電材料）

### 3-1. 電力貯蔵（二次電池、キャパシタ）

／本間格（産業技術統合研究所 グループリーダー）

#### ●高出力型電源

高出力型電源に焦点をあて、「電力貯蔵分野におけるナノテクノロジーの有効性」としてナノテク・材料が省エネに貢献できるのかどうかを述べる。まず高出力型電源は、ハイブリッド車の回生電源等、交通部門の排出削減があり、また太陽光、風力等、再生可能エネルギーを導入するときの負荷平準化の電源等で将来、非常に省エネに役立つと期待されている。有望な温暖化対策技術であり、リチウム電池、キャパシタ等では自動車産業において約3兆円の世界市場もある。高出力型電源にはリチウム電池等、全体を電気化学的に使う電池、化学反応を含んだ蓄電式システムおよび電気化学二重層、EDLC等比表面積の大きな電極に物理的なイオンの吸着を使うデバイスがあるが、従来の領域を超えた高容量化、ハイパワー化が要求されている。ただ、既存材料ではボーダーを越えた高性能電源をつくることはできない。ナノテク・材料のアプローチによりリチウム電池の高出力化およびEDLC等の炭素系キャパシティの高容量化・ハイパワー化の目的指向型基礎研究が盛んに行われている。

#### ●リチウム2次電池の高出力化

リチウム2次電池の高出力化に向けては、高速インターカレーション電極として活物質の全体容量が使える新しい電極が望まれている。メソポーラス、ナノチューブ、ナノ粒子等のナノ構造材料、バナジウム酸化物等の分子材料、キャパシタ等の研究が進む。例えば、メソポーラス材料はフレームワークと空間からなり、2～20ナノメートルオーダーでヘキサゴナ、キュービック等の規則化された構造を持つ。触媒材料技術で誕生したメソポーラス構造を電気化学的に使うと、バルク等の従来材料と違った効果が見込め、私たちはメソポーラス型チタニア電極を採用し、ナノテク・材料のアプローチで研究を進めた。その結果、電荷やイオンが秒オーダーで拡散され、非常に速いスピードで電荷を蓄積できることを確認し、高出力高容量電源の一つのコンセプトを立証できたと考えている。カーボン表面にマンガン酸化物の活物質をコーティングし、3次元的な界面をもつナノ構造電極でも高い出力が期待でき、約10秒で既存のリチウムバッテリーと同容量の充電を確認している。



## ●炭素系キャパシティの高容量化

特に、ナノ領域で初めての電荷貯蔵現象も複数見つかった。鉄の酸化物、コバルト酸化物等の不活性材料を数ナノメートルのサイズにすると突然活物質になる。特に、メソポーラス構造、カーボンコーティングした界面に導電性を付与する等の加工でも活物質ができる。すなわち、活物質のサイズが結晶中の電子の広がりと同じサイズになると、表面の数ナノレベルのナノ結晶、ナノ結晶を通り越して既存の電子材料では考えられない現状が出現するのである。EDLC等では、炭素系キャパシティの高容量化としてカーボンナノチューブ、メソポーラスカーボン、コロイドテンプレートカーボン等、比表面積の大きなカーボン材料をボトムアップ的に規則化したコアサイズを持つ3次元の構造電極が注目され、これによりイオンや電子の動きが高性能化されている。最近では、ナノファイバー、ナノシート等のナノ材料に関する貯蔵メカニズムに関する研究が増えてきた。高出力型電源は、ナノテクが有効活用できるエネルギー技術分野である可能性が大きい。温暖化対策の具体的なデバイスをはじめ、将来のロボットにも使える。ナノテク・材料の技術適用が革新的で高性能な電力貯蔵デバイスを誕生させる可能性が大きいと考えている。

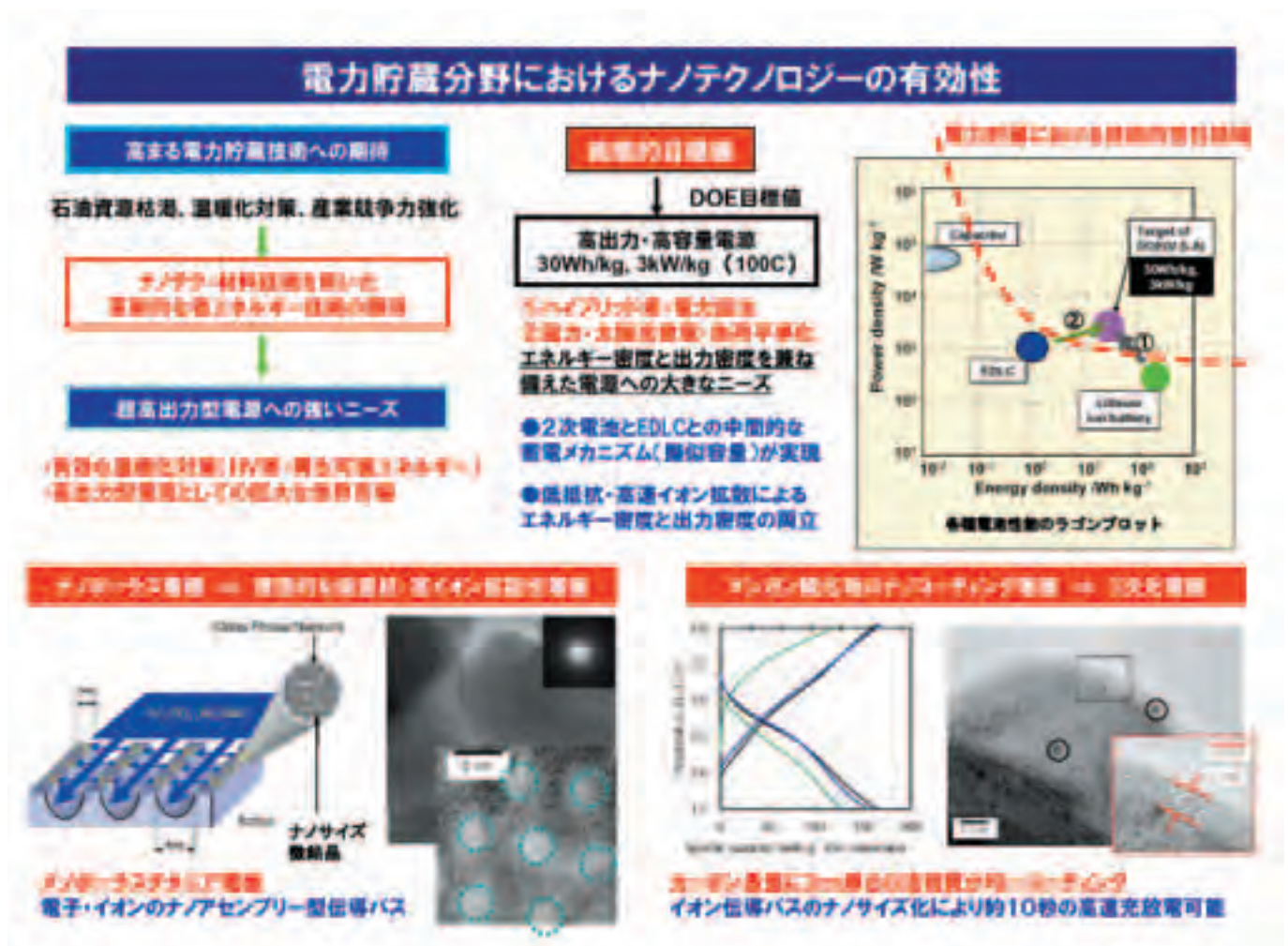


図3.1-1 展望:電力貯蔵分野におけるナノテクノロジーの有効性

### 3-2. 電力輸送（超伝導）／高木英典（東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授）

#### ●超伝導による電力輸送

超伝導は、ゼロ抵抗、磁力で超伝導体が浮くマイスナー効果、量子干渉効果等の特徴が分けられる。環境への貢献では、ゼロ抵抗による送電のほか、MRI、リニアモーターカーへの強力磁石の応用がある。マイスナー効果はベアリング等のエネルギー貯蔵に使える。量子干渉効果は低消費デバイスに適用できる。電力輸送では、主な送電損失が電圧の低い都市部内および変電所およびにあることから、都市部内での短距離送電への応用へ向けたプロジェクトが進んでいる。また将来的に風力発電や太陽光発電がある程度まで進行すると、ゴビ砂漠で発電したものを超伝導ネットワークで欧州に送電する等の計画もあり、超長距離への送電にも活躍すると期待できる。リニアモーターカーは1キロ動くのに必要なエネルギー消費量が飛行機の3分の1と、平均スピードと併せて考えると交通手段で一番環境に優しいことになる。ただ、液体窒素温度以上の高温超伝導体が次々と発見され、状況は一変したものの、超伝導材料がヘリウム温度でないと使えない課題が完全に解決されたわけではない。高温で機能するには、臨界温度のほか大量の電流を流せる、磁場に対して強い等の特徴が必要で、磁場中の磁束のピン止め、高温超伝導体の電流の異方性制御等の基盤技術の開発をさらに進める必要がある。

## 超伝導送電

- ・ 都市部（変電所を経由して低電圧）の短距離送電
- ・ 数100kmを超える長距離送電--直流の場合原理的に無制限



- ・大陸間送電 数1000km 無損失

- ・遠隔地で自然エネルギー発電
- ・昼間好天地域での太陽光発電
- ・強風地域での風力発電

- ・地球温暖化、化石燃料の枯渇に対応
- ・エネルギー有効利用

欧州における長距離超伝導ケーブル構想

- ・ 銅線ケーブルの交流送電損失 高々5%（高電圧送電 50万V）  
送電可能距離--数100km

図3.2-1 超伝導送電



## ●ビスマス系高温超伝導体の可能性

現状、ビスマス系と呼ばれる高温超伝導体で研究開発が先行し、線材化も果たしている。液体窒素温度での臨界電流の性能は既存材料より良好で、特に全長1キロメートルの長尺のワイヤーがつくられ、コストダウンが課題として検討されるレベルにある。送電線への適用はすでに、電力中央研究所や米国で、実際に使用されている送電線の一部に超伝導線を採用し、実証試験の段階にある。磁場応用では、ビスマス系超伝導体は磁場をかけると急に電流が流れなくなる問題がある。液体窒素温度では特性が十分発揮されず、冷凍機で10-20Kまでは冷却しなければならない。ただし液体ヘリウム温度でなく、10K-20Kという温度で使えるならば、熱容量が温度の3乗で大きくなることを利用して、磁石の安定性が高まるので、大きなメリットとなる。逆に、この点に着目するなら液体窒素温度まで達しなくとも30K以上の臨界温度をもつ超伝導体に可能性が見込める。例えば、青山学院大学の秋光純教授の2ホウ化マグネシウムなら臨界温度が40Kのため、熱容量のメリットを活かしつつ10Kで様々なことができると期待される。BCS理論の限界値に相当する臨界温度をもつ超伝導体は、線材として使いやすいなら相当なインパクトを有する。最大の課題は、産業界の期待する時間スケールと開発スケールとのミスマッチであり、せっかく研究が進んできているのに、待ちきれずに産業界の熱がさめてきている面がある。特に磁場応用では、ビスマス系線材の磁性特性向上に加え、ビスマス系以外の線材（銅系、非銅系）の開発を進める必要がある。新材料の開発は、長期的に実施しないと新物質は現れないと考えられ、実用への多彩な要求に応えるためにも物質のラインアップを充実させる基礎研究が重要である。

## ●熱電変換材料

熱電変換材料は、温度差による発電、電流による冷却（ペルチエ冷却）等の使い方で、環境材料として期待されている。自動車や産業廃棄物処理施設など様々な場所での廃熱を少しでも回収できればそのメリットははかりしれない。ペルチエ冷却は脱フロンの冷却を可能にする。現在のところ、冷却材料としてノンフロン冷蔵庫、ワインセラー等で市場に登場している以外は、その応用（特に発電）は極めて限られている。発電熱電材料の能力は変換効率指数 $ZT$ と呼ばれるパラメータで表される。冷却能力で言えば、従来の冷蔵庫の指数が3程度だが、既に使われているビスマス系の熱電材料は指数が1程度と3分の1に過ぎない。変換効率係数を決める熱起電力、抵抗、熱伝導度といったパラメータが必ずしも独立でなく、これらをうまく操って変換効率を最適化するのが開発のポイントとなる。同時に機能を発現するにはp型、n型の両方の熱電材料が必要であること、十分な起電力を確保するために積層モジュールを構築する必要があるといった観点が考慮されねばならない。最近変換効率係数が1を超えるとされる新たな熱電材料の報告が相次いでいる。たとえば半導体超格子薄膜、遷移金属酸化物など新しいパラダイムが登場している。これらが基礎研究の中から出てきたことも注目に値する。実験室レベルの性能がすぐに応用に供せるわけでないので、今の時点では高いポテンシャル有する材料のラインアップの充実は極めて重要である。

### 3-3. 討議

エネルギー貯蔵・輸送の観点でキーワードになるのは、キャパシタを含めた二次電池、超伝導材料、熱電材料の分野等である。これらの分野の進展は、材料科学の進展と直結する場合が多い。ただ、ナノテク・材料のアプローチが革新的な技術開発をもたらす可能性が大きいにもかかわらず、材料科学分野の特殊性から、産業界とアカデミアとの間に非常に大きな乖離があると指摘されている。数多くの研究者が集まり、推進していく目的志向型基礎研究を構築するため、明確なターゲットをいかに企画していくか。ここでは、討議で集約された有識者の意見をまとめた。

- ・「サイエンス」「ネイチャー」等、インパクトの高い論文に掲載される電池に関する学術論文はコンセプト的な話題が中心で、実用の観点から非常に遠い。ナノテクの良い成果と電池が求めるニーズとが、必ずしも一致しないのである。ただ、リチウム電池のコンセプトが登場したのが70年代、実用化は90年と、商品になるまでに非常に時間がかかっている。このため基本的なコンセプトは、大学で蓄積する必要がある。
- ・電池の世界は発見がそのまま商業化と結びつき、さらに市場も大きい。競争が激しいため、ノウハウ、技術が凝縮されている。革新的な技術を隠す傾向があり、学問を進めづらい要因となっている。
- ・電池の世界では、新しい材料のみでブレークスルーとして進むのではなく、新材料と既存材料の配合等、エンジニアリングの視点も非常に重要である。
- ・電池は、電子を1個1個、原子と原子とのすき間の中に入れていく究極のナノテクだ。現場のノウハウ、ニーズとうまく整合させることが、目的志向型基礎研究のテーマにできると考える。
- ・電池は基幹技術になる可能性が高く、ナノテクの適用で、物理学者等の優秀な人が参加する可能性もある。その中で今後50年、100年を見通して、現場の研究者とコラボレーションするキーワードが必要だ。ただ、電池性能は材料の組み合わせで決まり、明確な定義できるテーマがないことも課題である。例えば、新しい材料の発見から実用化までの長期間のギャップを埋めるキーワードがあればよい。
- ・需要の広がりをつ捉えて取り組む産業界のスピードと、大学のスピードのミスマッチが乖離の原因の一つだ。進展の早い分野で基礎研究を進めても成果が出たときには時代遅れとなる。例えば、5年、10年後の展望を産業界が提示すれば、大学は基礎研究をきちっと進められる。これによりスムーズなコラボレーションが組めると思う。
- ・技術課題は、産業界と大学とが共通の場を持てば、自然と共通認識として浮かび上がる。技術のギャップよりもむしろ、交流の場が不足していることが問題である。
- ・ただ、電池の方向性を展望することは難しい。電池は小さいほど良いとされ、電気がたまるほど良い。ロードマップが発表されているが、むしろ産業界から大学に期待するのが、ロードマップに書いていないこと、さらに現象の理解である。特に、材料分野がロードマップの世界ではない特殊性があることを念頭に置くべきである。

- ・超伝導分野は逆に、基礎研究者と現場の研究者とが近い距離にいたにもかかわらず、20年たつと、そのコミュニケーションがなくなっている。その一方で、熱電材料は材料系の研究者の独占だったものが、超伝導が役に立つという可能性等により、物理学者も例えばバンド計算等でアプローチした。ただ、設計等では経験と勘に頼る部分もある。熱電材料は、学術研究と現場との接点があるグッドサンプルである。
- ・材料科学分野の進展は、ひらめきや偶然でもたらされる場合が多い。サイエンスよりもむしろ、漠然とした大きな目標の下で、数多くの研究者が集まる仕掛けが必要である。材料屋だけでなく分野全体を見渡せる人が仕掛けを作る。例えば、産業界の議論に大学の基礎研究者を交える機会、場所が必要である。
- ・興味深い材料があることと、商品にすることとは、大きく違う側面がある。今、新しい材料が次々と発見されており、新しい発想で実用化していくことが必要だ。新しい発想は、例えば、異分野から取り込む。10のファンディングのうち1を、全く違う分野の人に必ず与える仕組みである。
- ・産業界は長期的な技術問題を大学等に明確に示すことが必要である。大学は逆に、長期的なポテンシャルを備えておくことが何より重要である。現状、10年、20年先のターゲットに対する展望がないことが問題ではないか。
- ・二次電池には大きなマーケットがあり、大企業と中小企業、ベンチャーとで違う論理が働く。材料の発見から実用化するまでに、ベンチャーは電池としてもものに仕上げる役割があるため、学術よりむしろ総合的なものづくりのメカニズムが働く。これを活用できる仕組みが必要である。

## 【4】第3部：省エネルギー

省エネに最も効果のある構造材、触媒、膜材料技術について議論。

### 【発表者】

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| 香川 豊（東大先端研）  | 構造材（耐熱セラミック、高分子複合材）                 |
| 石原達巳（九大院工）   | 多元系セラミック、ペロブスカイト、酸素イオン伝導材、<br>超伝導展開 |
| 水野哲孝（東大院工）   | ナノ構造制御触媒                            |
| 谷岡明彦（東工大院理工） | ナノ構造膜（プロトン導伝膜、省エネ分離膜）               |

### 4-1 省エネ材料（構造材）/香川豊（東京大学先端科学技術研究センター 教授）

#### ●構造材料の材料開発

20世紀の構造材料の研究開発は、強度と破壊靱性とを両立させることを追求してきたといっても過言ではない。木の時代から、ブロンズ、鋳鉄、スチール、複合材料、有機繊維系、カーボン繊維と年代ごとに使われてきた材料の強度を考えると、今後は、材料強度の向上は難しいという結論が導ける。一方、破壊靱性はセラミックのように大きな強度が得られるがいまだに破壊靱性が小さく、鉄鋼材料でも強度と破壊靱性の両立は依然として十分ではない。最近、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）の用途が拡大の一途にある。カーボン繊維は軽くて強度が大きい。しかし、破壊靱性が小さく傷に弱い。炭素繊維をプラスチック中に入れて表面を保護したことで、軽くて大きなヤング率や強度、破壊靱性を持つ材料が実現する。CFRPは風力発電、航空機、人工衛星などへの適用範囲が増加すると考えられている。最近、国産で600ギガパスカル（GPa）のヤング率や6ギガパスカル（GPa）の強度を持つものが得られた。カーボンナノチューブ（CNT）のヤング率が1テラパスカルであり、このような材料を使うことにより、CFRPよりはるかに効率が良い材料ができる可能性がある。問題点は、耐熱プラスチックがないことや、界面をうまく制御することなどである。また、ガラスやセラミック中にセラミックのSiC繊維を入れた複合材料は、複合材料構造をうまく設計すれば、セラミックに釘やピンを打つことも可能だ。航空機エンジン等、安全で、事故の際にも簡単に割れない超高温用構造材料として適用できる。これらの材料では後加工がしにくいために省エネのネットシェーププロセス、金属材料との結合・接合技術、リサイクル、寿命予測などが共通の課題となる。

#### ●ナノテクの適用

ナノテクの適用を考える。例えば、高分子本来のヤング率は182～340ギガパスカル（GPa）で鉄鋼材料にも匹敵する。だが、工業的に使うもののヤング率は1～3ギガパスカル（GPa）に過ぎない。これをナノテクで高分子材料を操作すれば、アルミニウム、スチール等に匹敵するヤング率の高分子材料がつくれる。さらに、材料中に破壊が始ま



ったとき、ナノの粒子の間を亀裂が進むと非常に大きな抵抗が起きることを利用してセラミックや高分子材料の破壊を止めれば、破壊に対して抵抗の大きな材料が得られる。すなわち、ナノテクの適用により20世紀に解決できなかった強度と靱性を両立させることが期待できるのである。この技術は、今後の構造材料技術を大きく変える可能性を秘めている。さらに、これらの技術にナノバイオミメティックスデザインを組み合わせることによりさらに優れた強度と破壊靱性を両立したセラミックができる。例えば、炭酸カルシウムのアワビの貝殻が足で踏んでも割れない仕組みは、数百ナノピッチでセラミック層がタンパク質で積層されているからである。ナノテクでチタニアとアルミナの積層材料をつくった結果、大きな変形をしても割れず、金属のように変形することを確認した。将来、材料の高品質化、光干渉を利用したコーティング等によるエネルギーを節約した材料開発も可能となる。

#### ●ナノテクによる学問の新たな課題

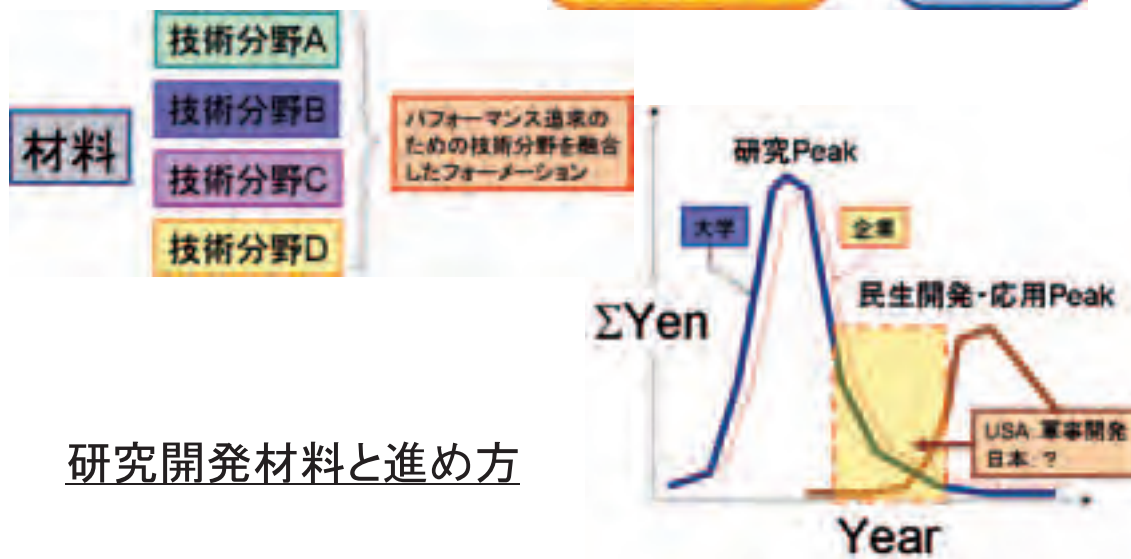
学問としての課題は、壊れることをナノスケールで扱うことである。オングストロームレベルのひずみの定義、ナノスケールの応力の定義等、ナノレベル力学が必要となる。さらに、ナノの世界から私たちの目に見える世界までシームレスにつなぐ技術も必要だ。構造材料分野は非常に歴史があり、材料ごと、用途ごとの離散型研究となっているため、適材適所の視点および総合的な視点が両立する研究アプローチが必要となる。同分野の特性として適用する環境でのパフォーマンスを常に意識しており、この意識を取り入れた研究体制が、様々なエネルギーの問題の解決にも役立つと考える。ただ、目的志向型基礎研究では、同分野の研究者は優秀な人が一人いれば十分であり、異分野をできるだけ取り込み、パフォーマンス追及のための研究体制が望まれる。また研究のフェーズとして、大学と産業界が同じ土俵で仕事をするのは非効率であり、例えば米国の軍事による研究開発の支援等、基礎知見から実用化までのギャップを埋める支援の仕組みが必要となる。材料分野の発見から実用化までに長期間かかるという特殊性をうまくフォローするような仕組みで、キーワードは超軽量、超高温、超耐環境等、超がつくと必ず派生技術が起きていることに注目している。



## 極限環境で利用できる構造材料研究

⇒極限パフォーマンス特性

波及効果が大きい  
技術の融合が必要  
形と構造の相互利用



### 研究開発材料と進め方

図4.1 構造材料研究へのアプローチ

## 4-2. 多元系セラミック、超伝導展開／石原達己（九州大学大学院工学研究院 教授）

### ●ペロブスカイト型酸化物

ペロブスカイト型酸化物は $ABO_3$ と書きあらわせる化合物である。地球の地殻の約70%がこの化合物で占める等、非常に安定である特徴がある。格子中には、大きなイオンのA、小さなイオンのBの異なる2つのイオンから構成され、配位数およびイオンサイズを制御することで選択的に、特定元素で変えることができる。非常に格子エネルギーが安定で、鉄の4価、コバルトの4価といった異常酸化状態の化合物もつくりだせるため、触媒から酸素イオン伝導体等にわたる様々な機能性材料として使われている。

特に、燃料電池の場合、10のマイナス1乗の酸素イオン伝導度を使うため、従来のイットリアで安定したジルコニア材料では約1000度で利用するが、ランタンとガリウムのサイトにストロンチウムとマグネシウムを入れた我々のランタンガレート系酸化物では、非常に高い酸素イオン伝導度で、作動温度が約600度付近まで下がることが分かった。このような高い酸素伝導の発現する機構についても基礎研究を行い、酸素の拡散係数は従来材料に比べ約6倍を示すことを明らかにしている。また同酸化物は、伝導度が純酸素雰囲気から純水素雰囲気まで依存せず、酸化も還元もされない非常に安定な特徴がある。材料中のストロンチウムのAサイトへの固溶限界は10%だが、マグネシウムの添加でストロンチウムの固溶限界が広がった。すなわち、元素をうまく利用することで、固溶限界の拡張が期待され、熱力学で予想される限界を超えることができたのである。今後もこのような平衡から逸脱できる新しい柔軟な考え方が必要と考えられる。

### ●産学連携

産学連携により、約10年間で10キロワットの燃料電池を作製した。これは、現在、世界で4番目の規模と思われる。特に、56%の効率と燃料電池で非常に良好な性能を低い温度で達成している。最近、同酸化物を薄膜化した結果、伝導度に変化はないものの、非常に大きな出力がでており、500度程度でも作動することも分かった。このため現状、10キロワットの燃料電池セルを小型化し、より低温で動くものを開発している。ナノサイズの薄膜化によるイオン伝導度向上に関する期待は、表面の緩和現象として薄膜の格子欠陥濃度が非常に向上することにある。酸素イオン伝導体は従来、低温下に対し負の効果を示すのだが、ランタンの代わりにゲルマニウムを置いた新しい材料では、酸素イオン伝導が低温で大きく向上した。特に、伝導度の酸素分圧依存性がほぼゼロのため、同じ材料でも膜厚に依存して伝導度が上がり、数十ナノレベルの領域でほぼ飽和した。さらに、ランタンゲルマネートにランタンガレートの膜を二つ組み合わせた結果、同じ膜厚で組み合わせを上下に変えることで、伝導度が変わった。つまり、ナノ効果による異常酸素伝導を利用すれば従来にない低温でも大きな酸素イオン伝導を示す材料ができることを示唆している。

## ●省エネルギーへの応用

現在、エネルギーカスケード利用を目的とした水蒸気電解への応用を試みている。CO<sub>2</sub>削減のためには産業プロセスでの排出エネルギーを減らす必要があるからである。例えば、製鉄所では1000度で出された熱がその後、約200度の水蒸気で回収されるため、エクセルギー損失が起こる。これを等温プロセスの水蒸気電解装置を使って水素で回収する。我々の酸化物を使うと、600度程度の温度域で十分に電解できており、将来的にはゴミ発電等とうまく組み合わせ、水素、酸素等でエネルギーを回収することが見込める。また酸素を通しながらのメタン生成、位置選択的な遷移元素導入による混合伝導性の発現なども期待できる。まとめると、下記ようになる。

1) 新しい材料の開発により、多くのデバイスが飛躍的に性能を向上できるが、最近の流れとして、材料を地道に開発しているグループが減っている。特にナノテクは究極の“ものづくり”なので、ナノテクを通して、ものづくりの復活を期待したい。

2) 表面や界面では原子の緩和現象があり、この領域では従来見出されていない、高イオン伝導が発現する可能性がある。これらのナノ接合界面の構造を制御できれば、優れたイオン伝導体が開発できる可能性がある。

究極には人工格子に基づいた新しいイオン伝導性材料の開発を期待したい。

3) 現在の石油価格の高止まりを考えると、新しい省エネルギー技術への期待が高まり、この点から酸素イオン伝導体を利用するデバイスの開発への期待が高まっている。特に、省エネルギーの切り札としての酸化物電解質形燃料電池(SOFC)の実用化が期待される。

特に地道に新しい材料を探す研究は、新しいデバイスをつくる観点で非常に重要である。地道な研究が低く見られがちの傾向を見直すべきである。

## 水蒸気電解セルを利用する省エネルギー技術

### 主な熱源

原子力発電所、火力発電所、ゴミ焼却炉、小型燃焼炉  
太陽光、バイオマス焼却炉

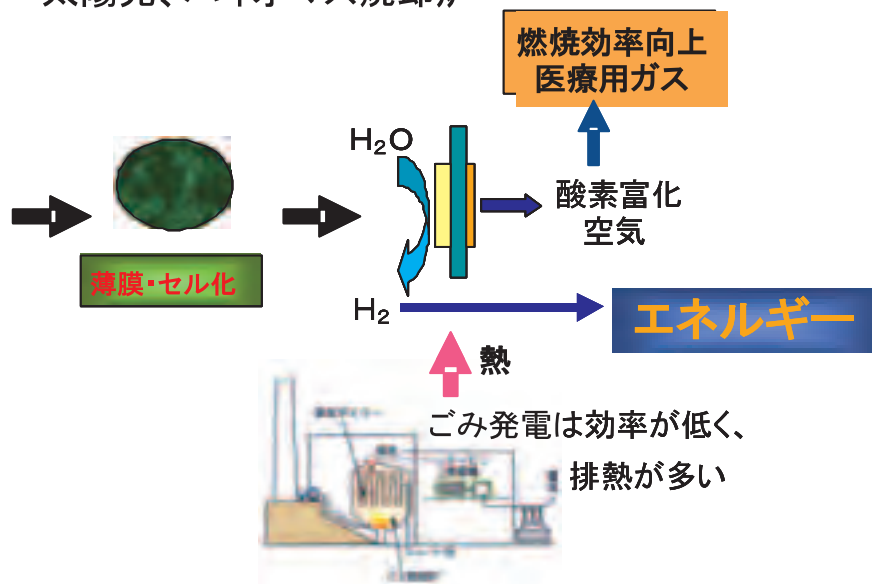


図4.2 水蒸気電解セルを利用した省エネルギー技術

### 4-3. 触媒（ナノ構造制御）／水野哲孝（東京大学大学院工学系研究科 教授）

#### ●ナノ構造制御触媒

ナノ構造制御触媒とは、均一系と不均一系の触媒科学の概念が融合し、ナノ構造を制御した触媒と考えている。触媒には、固体触媒、多金属触媒、分子触媒、生体触媒等がある。固体触媒は実用化の進んでいる触媒だが、設計概念が欠如している問題がある。多金属触媒も触媒設計という面で十分でない。分子触媒は、原子制御による触媒づくりを行っているが、実用化という点で力不足である。生体触媒は分子性の概念がなく、一部実用化の例はあるが、不十分である。従って、真に力量ある触媒化学に向けて、ナノ構造から制御された触媒という新しい概念を確立するために絶好の時期にある。特に、環境調和型の社会貢献を考えた次世代のものづくりは、省資源や省エネルギーにつながる。例えば、自動車に使われる白金の軽減、代替等は大きく叫ばれている課題であるが、溶存中の白金種を調べていない等、分子触媒では常識的なことがやられていない現状がある。固体触媒化学の研究者が、錯体触媒化学、生体触媒化学、多金属触媒化学らの研究者と連携が薄かった過去がある。すなわちアカデミックなベースが求められており、それに対する様々なアプローチの例として、酸化反応、多金属が関与する反応へのアプローチを提案する。

#### ●高い選択性および多核の活性点という概念

複数の金属が集まれば機能が融合し、役割分担あるいは相乗効果、相加効果があり、多点活性化や多電子移動等の機能・役割分担が行われている。アルカンを分子状酸素や過酸化水素で活性化してアルコールにする、オレフィンからエポキシドをつくる等の分子変換が高効率的に進行する触媒には、高い選択性が求められている。例えば、メタンの水酸化酵素は鉄の2核で酸素で架橋された構造を持つが、このような活性点をナノテクで酸化物のクラスターの上に単結晶状態をつくることができる。また、メタンの水酸化酵素に含まれる鉄をルテニウム、バナジウム等に置換すれば、異なる機能が期待できる。例えばバナジウムが水酸基で架橋された構造では、過酸化水素が選択的に反応し、ヒドロペルオキシドが生成して高選択的にオレフィンと過酸化水素とを反応させてエポキシドを生成する良い触媒系となる。また、酸化反応では通常、酸化剤として酸素、過酸化水素を使うが、これらの反応の場合は水のみが副生成物であるため、環境に優しい選択酸化反応が実現できる。金属が複数凝集した状態では、例えば、ゼオライトの中で銀が3個凝集すると水素を非常に効率活性化する。このほか、単核のルテニウムがアルコールの酸化に非常に良いことが分かり、アルミナの上に担持するとアルコールの酸化が非常に速やかに進行する。また、複核、3核、多核の活性点を高比表面積担体に担持できる場合もある。特に、単核の活性点構造はメソ孔、ミクロ孔等と複合化しやすい。すなわち、選択酸化反応、多核の活性点等のコンセプトを触媒の設計に導入すると、様々な新たな反応を触媒的に進行させる可能性がある。



## ●ナノ構造制御触媒の研究開発

分子・原子レベルでデザインしたナノ触媒、金属の酸化物、金属系等、様々な触媒を開発する際に、高選択制の概念を導入すれば、汚染物質を無害化する環境触媒および環境調和型化学プロセスの新しい時代が築けることが期待される。特に、これまで成功しなかった低濃度の有害物質の除去、あるいは、副生成物がなく原子効率の高い反応系の構築などが見込める。また創薬に応用できる新しい反応系、原子効率よく進行させる系へと展開することも期待できる。近視眼的にも、自動車触媒の白金の低減に向け、単一の白金種をナノテクで固体上に植えつけ担持することで、溶液から固体に移るケミストリー等に適用できる可能性があると考えている。

### 総括

研究開発のターゲット：分子・原子レベルでデザインしたナノ触媒の開発により、汚染物質を無害化する環境触媒と環境調和型化学プロセスの新しい時代を築く

経済・社会での活用に関する具体的ビジョン：我が国が世界をリードするナノスケールのクラスター触媒により、地球環境問題対策に応え、有害な副産物を生成しない環境調和型化学プロセスを実現。極限条件下で機能する新しい環境浄化触媒や創薬につながる新しい化学プロセスを創製する。

#### 特徴：

極低濃度 (ppmレベル) の有害物質を除去  
99%以上の収率で、副生成物ゼロ  
DDSと組み合わせて創薬に応用可能

#### 概要：

ナノスケールの分子性触媒としての金属酸化物クラスター触媒やゼオライトをはじめとする細孔性触媒などを用い、環境対策、創薬に応用可能な部分酸化触媒等を開発。  
①分子設計に基づく原子レベルでの活性点制御  
②化学機能と構造の関係の解明  
③超耐久性超高収率触媒材料の実用化研究  
④グリーンケミストリーの創薬への応用研究

産に蓄積された実用化技術と、学が有する先鋭的な分子性触媒合成技術を組み合わせることにより、研究開発を加速

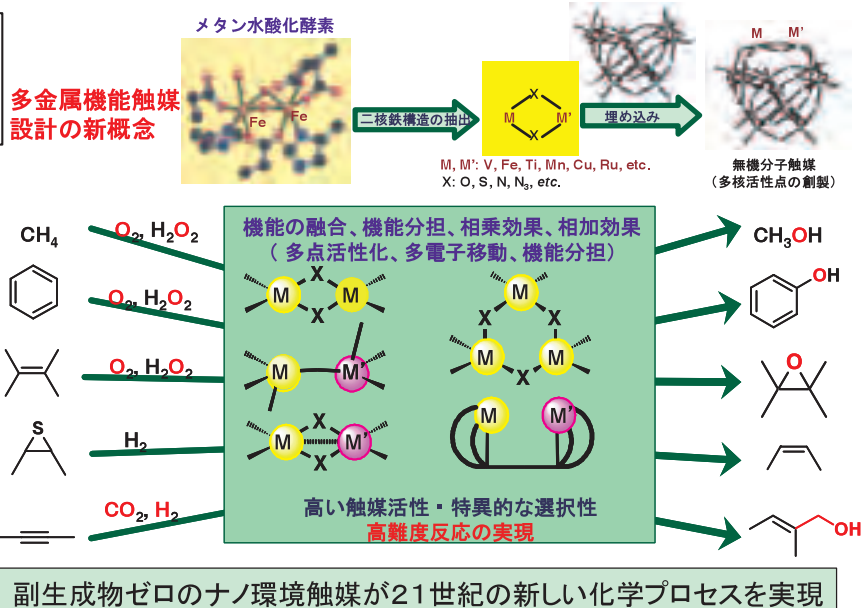


図4.3 多金属機能触媒設計の新概念

## 4-4. 膜（ナノ構造制御）／谷岡明彦（東京工業大学大学院理工学研究科 教授）

## ●エネルギー・環境用材料としての膜

エネルギー・環境用材料としての膜の用途には、まずエネルギー関連として燃料電池、二次電池、レドックスフロー電池、浸透圧発電用があり、さらに環境関連として気体分離、パーエバポレーション、逆浸透、ナノろ過、限外ろ過、精密ろ過、電気透析等がある。即ち、発電、蓄電、気体分離、アルコールの回収、水処理、クロル・アルカリの製造、空気浄化等に使用されている。燃料電池にはカチオン交換膜が、二次電池には限外ろ過または精密ろ過膜が、レドックスフロー電池にはアニオン交換膜が利用されている。気体分離膜はCO<sub>2</sub>、水素分離等に適用できる。パーエバポレーション膜はエタノールの回収に使う。逆浸透膜は水処理等で多くの適用がある。ナノろ過は1ナノメートルレベルの分離で、限外ろ過、精密ろ過は通常のフィルトレーションである。電気透析は、クロル・アルカリの製造に使用されており省エネ効果が大きいが、使用されている膜自体は燃料電池用隔膜そのものである。エアフィルターは孔がナノではなくミクロだが、素材がナノオーダーである。なお、膜にはイオン交換膜、限外ろ過膜、イオン交換膜、正浸透膜、逆浸透膜、パーエバポレーション膜といった呼ばれ方があり、空孔の大きさにより微多孔膜、粗多孔膜、緻密膜といった分類ができる。また不織布も膜に含めることができる。利用されるナノ構造は、空孔、自由体積、ナノファイバー等である。

表4.4 エネルギー・環境用材料技術に利用される膜・フィルター

| エネルギー・環境用材料技術に利用される膜やフィルター |            |      |                      |      |           |
|----------------------------|------------|------|----------------------|------|-----------|
|                            | システム       | 用途   | 膜の名称                 | 分類   | 利用されるナノ構造 |
| 1                          | 燃料電池       | 発電   | イオン交換膜               | 微多孔膜 | 空孔        |
| 2                          | 二次電池       | 蓄電   | 限外または精密ろ過膜           | 粗多孔膜 | 空孔        |
| 3                          | レドックスフロー電池 | 蓄電   | イオン交換膜               | 微多孔膜 | 空孔        |
| 4                          | 浸透圧発電      | 発電   | 正浸透膜                 | 緻密膜  | 空孔        |
| 5                          | 膜分離        | 逆浸透  | 逆浸透膜                 | 緻密膜  | 空孔        |
| 6                          |            | ナノろ過 | ナノろ過膜                | 微多孔膜 | 空孔        |
| 7                          |            | 限外ろ過 | 限外ろ過膜                | 微多孔膜 | 空孔        |
| 8                          |            | 精密ろ過 | 精密ろ過膜                | 粗多孔膜 | 空孔        |
| 9                          |            | 電気透析 | クロル・アルカリ製造<br>イオン交換膜 | 微多孔膜 | 空孔        |
| 10                         | エアフィルター    | 空気浄化 | フィルター                | 不織布  | ナノファイバー   |

エネルギー・環境用材料は膜状物質のナノオーダーの空間を利用する。1nm以下の自由体積空間を利用する膜を緻密膜、1nm～10nmの空間を利用する膜を微多孔膜、10nm以上の空間を利用する膜を粗多孔膜と呼ぶ。フィルターに利用する不織布の空間はμmのオーダーであるが繊維径は100nm程度である。

## ●膜研究に関する視点

膜に関する研究アプローチとしてまず、ナノテクノロジーのスケールを1～100ナノと狭義に設定せず、1万ナノ、100万ナノとフレキシブルに考えても良いのではないかと思います。また分離方法や機構、構造等の理論を使ったシミュレーションおよび原理原則は、物理学、数学の研究者とのコラボレーションで進めることが効率的であると考えます。また膜のイメージを持つことが大切で、緻密膜はポリエチレンの油膜を想像すればよい。微多孔膜はゲル。粗多孔膜は孔の大きい膜。不織布は網目と捉える。イオン交換膜はゲル膜で高分子鎖に固定荷電基があるイメージである。特に、チャンネルの分離機構に注目すると、カリウムが大きさが0.266ナノメートル、ナトリウムが0.194であるにもかかわらず、カリウムチャンネルはナトリウムを通さず、カリウムだけを通す。この仕組みは水和であり、カリウムのみが脱水和して通っている。水和型のエネルギーを見ると、カリウムがナトリウムに比べエネルギーが高く、ここに選択性がある。すなわち、ナノ構造を考えたとき、表面、また表面の周りの雰囲気も重要な視点となる。

## ●課題

1ナノメートル前後では、ナノフィルトレーション膜と呼ばれる表面に分離活性層を有した膜ができる。例えば、塩酸を分離すると拡散電位のみが現れ、残りの平衡電位はほとんど出ないといった興味深い結果が得られている。1～10ナノの空孔径を有する分離膜では、イオン交換膜がこの領域に相当するが、ナフィオン（燃料電池に使用されているフッ素系のカチオン交換膜）に見られるように4～5nm程度のイオンクラスターをつくっていることが重要である。10～1万ナノになると、限外ろ過及び精密ろ過という膜の形となる。さらに、1万ナノ以上の空孔を持つ膜状物質はフィルターやろ材と呼ばれている。太い繊維からなっているフィルターの上にナノオーダーの細い繊維から成っているフィルターをかぶせると圧力損失が非常に改善され、効率の良いフィルターとして注目される。米軍の戦車に使われ、空気中の砂塵、微粒子対策として使われている。現状、技術トランスファーとして大型トラック、ベンツ等の最高級車への適用が検討されている。ただ膜研究の問題として、自由体積や空孔表面と言った非常に局所的なところに研究課題が集中してしまい全体をきちんと見る人がいなくなっている。なお、ナノオーダーの繊維状物質は、ナトリウムを空气中にまぜて吹きつけると、ナノオーダーの繊維の上に非常に結晶が成長してくる一方で、ミクロンオーダーの繊維状には出ない現象が知られている。こういった現象があるため、様々な新しい膜が今後も登場することが期待される。

## 4-5. 討議

第3部討議では、材料分野の切り口から、省エネ材料の目的志向型基礎研究のプラットフォーム形成に向けた方策を、複数の具体例を取り上げながら討議した。地道なものづくりこそが省エネに結びつくことは明白であり、まず目的志向型基礎研究の構築には構造材料、ペロブスカイト型電池材料等の材料科学の泥臭い耕地の上に、ナノテクノロジーのキーワードを入れてプラットフォームをつくることが求められる。さらに、ロードマップから要素技術にブレークダウンしていく視点も必要である等の共通認識が得られた。集約された意見を<具体例><総論>に分け、以下にまとめる。

### <具体例>

- ・担持して使う2価のルテニウムの合成には、10日の労力が必要だ。有機金属、有機合成の人の地道な体力が必要であり、ものづくりには欠かせないことは明白である。
- ・繊維というテーマで、56億円のビッグプロジェクトを獲得できた背景には、まず基盤技術と応用技術の両方組み合わせたことにある。基盤技術は大学が中心で、企業も入った。応用技術はほとんどを企業に任せた。大学の基盤技術を下に、様々な企業に関係性を説明し、理解を得てプロジェクト化した。なお、欧米でも軍服の軽量化にナノテクノロジーを使うという明確な目標の下で繊維に関する国家プロジェクトが進み、説得力があった。日本では軍事利用の先を見通した民生利用を考えている。
- ・宮坂氏の色素増感型太陽電池の開発では、フィルム型を目標に進めたところ、安さに目標を変えたことで、数～数十ナノメートルの粒子を焼結しないで電気伝導性を出す作成方法が生まれた。泥臭いが、様々なことに挑戦することが必要である。
- ・PC、テレビ等、最近注目のマグネシウムを使う技術は、20、30年前のものである。電池等を含め、使える材料が分かると企業はそれに懸命になり、技術が進まない。その一方で、大学は企業が進めない研究は時代遅れとして違うことをやり始める。材料が使われだすと途端に、大学と企業が違うベクトルを向くのである。20、30年前に完成した材料も、最新の周辺技術を取り入れ、リコンストラクトする視点が必要だ。その視点に膜、バルク、界面の適用等により、数多くの人間が集まると考える。
- ・目的志向型基礎研究はエンドユーザーに直結するため、マーケット性が常に意識される。ただ、実用化の過程で生まれる様々な付加価値に対し、その経済性、市場性の評価を経済学者がしない問題がある。エコノミーとエコロジーは同じ語源であり、新しいものを世の中に浸透させる道筋に経済学者の参加も必要である。プラットフォームの設計では当初、経済ベースに乗らない話でも、進展により乗る可能性がある。
- ・材料分野の目的志向型基礎研究では、材料のマクロの特性を飛躍的に向上させるため、機能発現するベースの理解を進めることが必要だ。原子、ナノレベルでの現象把握、構造設計をしていくための計測技術を忘れてはいけない。
- ・泥臭く、格好悪い技術が減るのは、脚光を浴びず、さらに論文が出ない、予算が集まらない等の理由がある。この問題を解決しなければ、プラットフォームができてナノ



テクというきれいな絵だけで終わってしまう危険性がある。

- ・化学会は優秀な研究者が良い論文を数多く出しているが、地道なことをする人は減っており、応用物理学会がむしろ化学会のレポートを見てものづくりをしている。また欧米では新しいことをトップの物理学者、化学者が進める一方で、日本ではどの分野にも属さないという理由でいずれの学会にも受け入れられない閉鎖性も問題である。

#### <総論>

- ・ロードマップそのものよりむしろ、ロードマップをつくり上げていく作業に注目すべきである。エネルギー・環境の観点から何年までにある技術を、このレベルにまで高めるといった議論をすべきで、その結果がロードマップとなる。特に、政策立案者とともに数多くの基礎研究者が参画すべきで、目標設定をすると現状技術ではいけないことがクリアになり、ブレークスルーが必要だという共通認識が生まれる。応用は企業がスペックを追求すればよい。大学の人はそれを支援する技術、また次への展開、波及する基盤技術を担うべきである。エネルギー・環境では、2100年、2050年、2030年と大枠の目標があり、このため2030年までに達成すべき技術が大体分かり、要素技術までブレークダウンできる。さらに要素技術にまで分けることができれば、切迫感等により重複する技術の優先順位も定めることができる。ただし、革新的な材料がないと何も進まないという材料分野の特殊性から、バックキャストだけではいけない。フォアキャストとすり合わせをしながら作業を進めるという留意点もある。
- ・大学は本当の研究が自分の好きなことをやるのが基本だろうが、やはりサバティカル等で企業に出なくてはならない。非常にコントリビューションできる局面が数多くあることを理解すべきである。さらに、ロードマップを明確に説明する人が必要で、要素技術としてブレークダウンした意味を理解できるアカデミアの構造も重要である。このため、従来の論文主義の評価基準を実質主義にするなど、評価基準の柔軟性が最も求められるところである。



### 5-1. ①課題提言（環境）／橋本和仁（東京大学先端科学技術研究センター 所長）

エネルギー・環境用材料技術戦略について、環境の観点から話題提供する。先日、ある勉強会で環境ジャーナリスト枝廣淳子氏はデニス・メドウズ著『成長の限界、人類の選択』（ダイヤモンド社）を大変危機感を持って紹介していた。すなわち、2100年までの今後100年間を、過去100年間のデータをもとにコンピューターで予測すると、現状のまま経済発展を続けると、汚染だけが2050年を過ぎても上がり続ける一方、工業生産高は2050年を前に落ち込み、人口減、食料、資源も枯渇する。シミュレーション条件を「資源を2倍、汚染除去技術、収穫率向上技術、土地保全技術、省資源技術等、科学技術を総動員したもの」に変えてみても社会は持続することは困難という結果になってしまふそうである。これらの条件に子供の人数を2人までに制限する、生活水準に「足るを知る」などの成長を抑える条件を入れて初めて持続社会が得られるのだそうである。21世紀に我々が持続可能な道は、単に技術だけではなく、「足るを知る」という、20世紀までの発展だけを求める技術開発だけでなく、満足感、幸福感といった新しい尺度の導入が必要であることを示唆している。

一方、最近、日本学術会議イノベーション強化分科会で北澤宏一氏が提出したレポートでは「若者たちが夢を持って生きていける社会を実現するためには“第4の価値”となる科学技術」の必要性を示している。同氏によれば新たな価値観とは、人々の集団が必要とする価値、何となく必要で、何となく格好いい価値だそうである。米カリフォルニア州の低公害自動車エンジン、いわゆるマスキー法を例示し、同法を非常に早い段階に導入して様々な技術が進んだ背景には、「何となく格好いい」と支持した一般人のサポートがあったとしている。ハイブリッド車で便利にはならないし、マスキー法でも便利にはならない。ただ、持続的な社会に対して貢献できることが、新たな価値として人々に支持された。上記の「足るを知る」の概念と一致するのである。

環境技術は直感的に、新たな価値観となりうることを感じさせる。直接的な何かではなく、何となくある不安感に対する技術というイメージである。若者は環境に対し非常に意識が高く、重要性を深く認識している。これに投資し、新たな第4の価値の創造で初めて、持続的な社会ができるのではなからうか。21世紀は環境負荷低減、自然に調和した技術、自然エネルギーの利用等が必要だが、単に技術だけでなく、自然回帰等の“満足感”がキーワードとなるであろう。21世紀という時代において我々科学者は、新たな価値を作りだし、提供するという大変大きな使命を与えられることとなったということを認識すべきである。

## **20世紀の科学技術**

- ・財産(化石燃料)をふんだんに消費可
- ・便利な社会を得ることの代償に掛替えのない地球を汚し続けてきた

## **21世紀に求められている科学技術**

- ・環境に負荷をかけないで便利な社会を持続するための技術
- ・自然に調和した技術
- ・自然エネルギーの利用(太陽光、風力、地熱)
- ・満足感を与える技術

図5.1-1 20世紀の科学技術と21世紀に求められている科学技術

### 5-1. ②課題提言（環境）／岩橋基行（清水建設（株）技術研究所 上席研究員（所長補佐））

「ナノと環境」にエネルギーを絡めて述べる。環境負荷低減の観点において、法規制では欧米型と日本型で大きく異なっている特徴がある。排出源対策では、無公害プロセスにおける高効率触媒や、ろ過、吸着、吸収等の捕集技術や浄化における分解、無害化にナノテクによる新しい技術ができると考えられる。その結果、省資源、省エネがナノテクに期待できる。また排出後対策では、有機系難分解性物質、環境ホルモン等の既に環境中に広がったものに対し、ナノテクが持つ特異性、選択性により、エネルギー的に非常にバランスがとれたパッシブ浄化が開放系、半閉鎖系のいずれにも使える可能性がある。

さらに都市排熱では、酸化チタンの超親水性が使える。ただ、ナノ素材の性能や太陽光の強度等で左右され、建物汚損の問題もペンキの塗りかえ、タイルの交換、水による冬場の凍結等、本体の構造的以外の部分で寿命が決まるため、トータルに考えると普及は困難ではと考えられる。さらに輻射熱の問題では、輻射熱を下げることによる社会的経済的な有用性を積極的に訴えるなどの努力も必要である。

太陽電池の性能向上もある。たとえば色素増感型太陽電池では、緑色光のように植物が必要としない波長光を利用したものにすることで、温室や植物工場での電力利用（防犯センサー、温湿度制御など）も可能である。

局所空間の快適化では、高齢化、化学物質過敏症等の弱者と健常者の両方に対し、どのように快適な環境を維持するかが問題である。クールビズも、室内温度が28度で一定では執務効率が下がる。これを真の省エネなのかといったとき疑問が残る。しかし、“時々冷やす”といった新たな発想で解決できる可能性がある。例えば、春、秋の季節は温度変化があるのだが、少し暑いが時々、涼しい風がくる。そこで30度の空間を瞬間的に23度に下げるといったコントロールをする。この適度なストレスが、人間の生理機能に一番好ましい。この観点から、省エネ、エネルギー削減を考えると将来の建物の温熱環境は激変する可能性がある。“元気が出る”ため弱者の対応にもなる。最小限に抑えるという空調設備の視点が瞬間的な瞬発力に変わり、電力の問題を平準化で解決できる。その結果、キャパシタの容量、燃料電池等への能力要求につながり、マーケットが見えてくる。年中冷房を入れている事務所ビルへは、照明、プロジェクター、プリンター等の内部排熱に対し、そのまま外部に捨てられるヒートパイプを使うと、冷房の負荷が減った分、都市排熱全体では下がる効果が期待できる。建物も完成時ではなく、手をかけるほど価値が上がる思想になれば、省エネの視点が浸透していく。

これまで公害等、マイナス環境には我々の健康が保てないため、投資の意義が明確であるが、健常者対応では投資の意義が不明確だった。ここでは、ナノ素材の潜在特性を発信する積極性に期待する。ただ、この分野はマーケットが見えづらい。民活では困難であるため、国の援助や国際協調を期待する。

## 環境立国と市場

- ・ 顕在マイナス環境への投資
- ・ 潜在マイナス環境
- ・ 弱者対応環境創造
- ・ 健常者対応環境創造

財布の紐の固さ

十/素材の持つ**潜在特性**の開発と把握(民活では困難)

国の援助、国際協調

図5.1-2 環境立国と市場

## 5-2. 総合討論

### 5-2-1. 話題提供／松村光雄、田中一宜（JST研究開発センター）

エネルギー・環境用材料技術戦略について、米国2004年発表の報告書『ナノサイエンス・リサーチ・フォー・エナジー・ニーズ』から複数、抜粋して話題提供をする。

エネルギー・環境用材料技術戦略の分野融合研究領域の方向：

- ① 触媒（反応、微粒子、クラスター、ナノポア、担体）
- ② 界面
- ③ 物質移動、エネルギー移動、電子輸送、膜
- ④ ナノ構造と機能
- ⑤ 集合体
- ⑥ 機能発揮のための構造設計、製造
- ⑦ 理論、モデリング、シミュレーション
- ⑧ 品質、信頼性、特性評価、標準
- ⑨ スケールアップ

エネルギー関連としてナノテクノロジーが適用できる領域を考えると、まず触媒に大きな可能性が見いだせる。さらに界面でもSOFC電極、エネルギー輸送、膜等で活かすことができる。ナノ構造・機能では、高機能なナノ粒子をつくる。集合体では、機能を発揮するための構造設計などがナノテクの技術課題となる。また理論、モデリング、シミュレーションが基盤としてあるほか、ナノ材料の標準、品質、信頼性といった評価分析技術もテーマだ。全体を使ったスケールアップを考えることも課題に挙げられる。ただし、ものづくりの継続性が非常に重要であることはいうまでもない。民間企業等で応用ばかりを考えると新しいものが誕生しない。このためのファンディングシステムも議論の対象となる。

同報告書の作成には、米国で長期的にエネルギー・環境分野の問題が議論された。その結果、極めて絶望的な見通しが得られ、解決に向けてナノサイエンス、ナノテクノロジーが不可欠であるとなった背景がある。その問題意識として以下の9課題が挙げられた。

- ① 水素生成のための太陽光を用いた水の分解の拡張可能な方法
- ② クリーンでエネルギー効率のよい高度な選択触媒
- ③ 20%の出力効率と100倍低コストな太陽エネルギー採集方法
- ④ 現在の電力消費量の50%での固体光源
- ⑤ 車、飛行機などの能率を改善する超軽量材料
- ⑥ 大気温度で使える可逆性水素貯蔵物質
- ⑦ 1ギガワットの送電が可能な電源供給ライン
- ⑧ ナノ構造材料による低コスト燃料電池、熱電素子、ウルトラキャパシタ
- ⑨ 生物学の有効かつ選択的なメカニズムに基づいた材料合成とエネルギー採取



なお、これら9課題はエネルギー消費を50%以下にするといった宣言とともに発表され、全ての人の共通プラットフォームになり得るとしている。

## 5-2-2. 総合討議

ここでは、議論の中で挙げられた「共通プラットフォーム」、「キーワード」「アジアの中の日本」という言葉ごとに、検討会に参加した有識者の意見をまとめた。

### <共通プラットフォーム>

- ・エネルギー・環境用材料技術戦略について、ナノテク・材料という切り口から考えると、膜、触媒、電池、導電体、構造材料、電子材料等の特徴のある分野で、研究者個人がそれぞれ強みをもっている。その人々が共同作業をする一つのプラットフォームがあれば、直接的な環境・エネルギー材料から、省エネに結びつく長期的なことまで日本で非常に強い戦略が組めると考える。この共通プラットフォームの構築とともに、プラットフォームに人を集めるエネルギー・環境をイメージする宣言が必要である。
- ・新国家エネルギー戦略で5項目の数値目標が出された今、ナノテクノロジー、ナノサイエンスの切り口から整理する作業が必要である。米国の国家戦略ではフィロソフィーよりも石油依存度を下げる、セキュリティの問題等、国家の存続の問題と捉えられている。石炭をガス化して水素にし、CO<sub>2</sub>は完全にシークエストラクションするとブッシュが提唱した「フューチャージェン」という言葉も実現不可能な話であるが、水素燃焼タービン、ガス化プロセス、酸素富化分離膜、水素分離膜、燃料電池等と、将来にわたり必要な要素技術が基本的に揃っている。共通プラットフォームの構築には、少なくとも将来を描いてみせる作業が必要である。
- ・国家戦略、ロードマップは一つのイメージの下で描く。しかし科学技術は、複数の経路が想定され、競合し、重複し、ブレイクスルーして、想定と現実とは少し違ったものとなる。科学技術のシナリオには、競合する複数の技術が並立できる基盤的、横断的な戦略が求められる。このためロードマップに沿ったファンディングとともに、様々なことに挑戦できるファンディングの仕掛けも必要だ。
- ・民間企業は、非常に効率的な組織である。限られたマンパワーと予算の中で、いち早く成果を出す仕組みがある。一方、大学教員は自分の畑の方向しか持っていない。他人の畑を見渡せ、自分は違う畑だが、別の畑にも寄与するという意識が求められる。このためJSTは、出口となる重要技術の一つ挙げ、少なくとも共通のタスクを認識し、収束できる共通プラットフォームの構築が必要だ。界面等の必要技術を複数挙げるのがJSTの目的ではなく、畑の違う研究者同士を効率よく融合させ新しい技術をつくる企画力が求められる。
- ・国として非常に重要で、人類にとっても非常に必要な課題を挙げ、それに対して要素を当てはめていく戦略がまず必要だ。その一番の中心が日本ではエネルギーとなる。個人的には、水問題が日本では機能せず、米国の国家プロジェクトになった経験があ

る。このプロジェクトでは、米国内外を問わず、さらに水問題のアカデミアだけでなく、商売人の中国人、現場で作業する労働者も会合に加わり、現実の問題で共通認識を作り上げた。技術的な課題に関しても、ファウリングという汚れの問題で、アカデミアなら興味を失うところを、ファウリングが起こる直前の前ファウリング現象を捕捉し、検出し、回収するとした新たな発想で、バイオフィルム等のバイオテクノロジーの手法を使うとした。ナノテクノロジーを組み込む、水の構造変化のために物理学者も呼ぶ、基礎から応用を経て最終的な商売までを念頭に議論が進んでいった。こういったプロジェクトを組み上げる企画力を備えることが求められていると考える。

- ・エネルギー分野が広すぎるため、共通プラットフォームをつくることが非常に難しい。さらに満足度の要素を入れるとなると非常に困難が伴う。しかし、それを支えるのはナノテクであり、原子から始まり組織化していくというテクノロジーそのものが、共通プラットフォームになると考える。ただし、キャッチフレーズは必要である。
- ・いかにソフトなエネルギーに転換するかの問題が共通プラットフォームとなる。現状、原子1個1個の所在を明確に整理するナノテクが、実際の材料とはリンクしていないため、まず、この間に橋をかけるプラットフォームが必要だ。さらに省エネの観点から、エネルギー回生、カスケード利用等、エネルギーの再利用の問題として、エネルギーに関するリサイクルの考え方を、ナノテクを絡ませて浸透させる必要がある。また、次世代の継続的な発展のため、ソフトのエネルギーの有効利用、エネルギーの平準化等のエネルギーシフトも必要である。
- ・共通プラットフォームがこれまでの日本では明確でなかった。上記に示された米国の例は、非常に明確だ。誰が見てもわかり、知識人であれば、自分の身の回りで役に立つことを考えられる。このため共通プラットフォームの構築には、雑でもよいから非常に簡単な言葉が必要だ。例えば、日本の自動車産業では、「1リットルで50キロ走れる自動車をつくる」といった号令の下、個々人の分野の貢献・寄与を考えている。
- ・共通の概念、ナノ材料等、共通プラットフォームが構築できる可能性は複数ある。例えば、ナノファイバーは無機化学、電池材料で同様な材料が使われ、研究されている。電池材料の酸化物はナノ化、シート化で超伝導材料になっている。つまり、ある分野のナノ化技術が別の分野で新しい発見になる可能性がある。このため相互の分野の交流、情報交換、コミュニケーションが少ないのが問題で、非常に近いところにある宝を見逃している。エネルギー分野の広さを逆に利用してリンケージさせることが必要だ。エネルギー分野で得意なスプレッドしたところから、“宝はある”という見込みでリフォーカスした研究プロポーザルができると考える。

#### <キーワード>

- ・エネルギー分野のキーワードは、水素、二次電池・燃料電池、バイオマス等であり、これらの領域にナノテクノロジーをどのように組み合わせていくかを考えるべきである。

- ・“物足りる世界”をキーワードにすれば、これまでは大学、企業とも不自由な生活を送る世界にするためにハイテクをやってきた。しかし今後は、生活の中に浸透してきたローテクを見直し、ナノテクで応用する視点を入れ、アプリケーションを数多く創出する必要がある。例えば、生活を豊かにする技術というキーワードだ。さらに、環境付加の観点から、ものづくり全体を点検できるシステム技術が必要である。
- ・エネルギー分野ではシステムまでで一つの成果となるため、システム化技術のための材料研究は浸透している。逆に物理化学、材料科学等の共通基盤の理解が置き去りにされている。例えば、炭化水素系、酸化物、金属の三つの相互作用は、触媒、燃料電池等のすべてに共通するベーシックがあるはずだ。この成果がエネルギー分野全体で享受できていないと考える。
- ・例えば、エネルギー効率を上げるという目標の下、材料探索するという視点になれば、材料の選択肢などは大幅に広がる。大きな目標の下で何でもするスタイルが必要である。すると、異分野融合は不可欠で、他分野で良い仕事をした人間の取り込みは必須である。目的に応じ、様々な人間が挑戦できる仕掛けが求められる。
- ・直ちにエネルギーと主張されると、異分野の人間は参加しにくい。このため異分野の人間にも魅力があるキーワードが必要だ。さらに、異分野の人間を取り込み、新しい発想を創造するための特別なファンディングの仕組みも求められる。キーワードは20年前のエネルギーとは違うことが分かる言葉である必要がある。例えば、電池の人間として本検討会に参加したが、電子構造等、他の分野の面白いネタを探すという目的があった。
- ・民間企業内で研究開発マネジメントしている立場からは、まず経営陣にきちんと説明しなければ、プロジェクトが成立しないことである。すると最初に、象徴的な言葉を使って分かりやすく説明する必要がある。さらに、プロジェクトを体系的に進めるためには、社内向けにシンボリックなテーマ、スローガンを設定し、その下で戦略を考え、人材、予算等を当てはめる手法が求められる。エネルギー・環境用材料の観点からキーワードを探ると、「エネルギーの確保」は不可欠であると考え。

#### <アジアの中の日本>

- ・アジアをメッセージとして発信することが重要である。アジアの人材育成も含め、技術開発等を責任持ってやると明確に宣言する必要がある。世界戦略としてのアジアであるというメッセージも打ち出すべきである。
- ・価値の転換、価値の再構築という意味も含めて、東洋や日本の文化に根差した方針、プラットフォームが必要である。満足感是人種によって異なり、日本、東洋の根差すところを共通の基盤にすることで、日本人の心象にかない、皆が支持し、研究者が不安なく目的に没頭できると考える。例えば、エネルギーの使うべきところは使うが、我慢するところは我慢するといった価値転換を進める必要がある。

### 5-2-3. まとめ／橋本和仁（東京大学先端科学技術研究センター 所長）

エネルギー・環境用材料技術戦略では、目的志向型基礎研究がまず重要であり、「エネルギーセキュリティ」の重要性が共通認識として得られた。研究者は、この共通認識の下、個々人の立場で様々なアプローチを進めるべきで、日進月歩のナノテクノロジー・材料分野、特にナノ構造制御材料という新しい学問をベースに進めることが、目標達成に向けて良いツールとなることも理解された。

エネルギーセキュリティという目的を達成するためキーワードは、まず学術研究にのみ没頭してきた研究者に、エネルギーセキュリティという大変重要な課題の解決に向けて、積極的に参加するべきというメッセージである。さらに、異分野の人間がこの目的に賛同して参加できるグラントシステムの構築の必要性である。また、アジアの中の日本という視点から、日本がアジアでリーダーシップをとる。このため文化を中心に、日本、東洋に根差した科学技術という視点もキーワードになる。

方法論としては、様々なロードマップ等を詳細に分析し、ナノ構造制御材料等のナノテクの各領域が貢献できるアプローチ、コントリビューションのあり方を考える。その上で、テーマ設定をし、重点テーマの洗い出し、チーム編成にもつなげることが重要である。

# Appendix

## 1. 本検討会の開催日時・場所

日時：平成18年6月17日（土） 10時00分～19時00分

会場：（独）科学技術振興機構 研究開発戦略センター 3階大会議室

## 2. 本検討会のプログラム、参加者の構成について

表1 本検討会のプログラム

|                           |       |             |
|---------------------------|-------|-------------|
| プロローグ                     |       | 10:00～10:30 |
| はじめに（趣旨説明）                | 田中 一宜 |             |
| コーディネーター挨拶                | 橋本 和仁 |             |
| 第1部 「一次エネルギー多様化」          |       | 10:30～12:15 |
| 「化石エネルギー高度化、無害化」          | 吉田 正寛 |             |
| 「エネルギーシステム、バイオマス、水素」      | 堤 敦 司 |             |
| 「燃料電池（SOFC）」              | 横川 晴美 |             |
| 討議                        |       |             |
| 「課題提言」                    | 久保 佳実 |             |
| 「課題提言」                    | 青野 泰久 |             |
| 第2部 「エネルギー貯蔵・輸送」          |       | 13:15～14:45 |
| 「電力貯蔵（二次電池、キャパシタ）」        | 本 間 格 |             |
| 「電力輸送（超伝導）」               | 高木 英典 |             |
| 討議                        |       |             |
| 第3部 「省エネルギー」              |       | 15:00～17:15 |
| 「省エネ材料（構造材）」              | 香 川 豊 |             |
| 「触媒（多元系セラミック、超伝導展開）」      | 石原 達己 |             |
| 「触媒（ナノ構造制御）」              | 水野 哲孝 |             |
| 「膜（ナノ構造制御）」               | 谷岡 明彦 |             |
| 「太陽電池（有機系）」 <sup>*)</sup> | 宮 坂 力 |             |
| 討議                        |       |             |
| 第4部 「総合討議」                |       | 17:30～19:00 |
| 「課題提言」                    | 橋本 和仁 |             |
| 「課題提言」                    | 岩橋 基行 |             |

\*) 第1部に属するが、第3部で発表。



表2 本検討会参加者一覧

## (a) 発表者

| 氏 名   | 所属・役職（いずれも検討会開催当時）                                 |
|-------|----------------------------------------------------|
| 青野 泰久 | （株）日立製作所 材料研究所 主管研究員                               |
| 石原 達己 | 九州大学大学院 工学研究院 応用化学部門 教授                            |
| 岩橋 基行 | 清水建設（株） 技術研究所 上席研究員（所長補佐）                          |
| 香 川 豊 | 東京大学 先端科学技術研究センター 教授                               |
| 久保 佳実 | 日本電気（株） 基礎・環境研究所 統括マネージャー                          |
| 高木 英典 | 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 基盤科学研究系<br>物質系専攻 教授             |
| 谷岡 明彦 | 東京工業大学大学院 理工学研究科 有機・高分子物質専攻 教授                     |
| 堤 敦 司 | 東京大学大学院 工学系研究科 化学システム工学専攻 助教授                      |
| 橋本 和仁 | 東京大学 先端科学技術研究センター 所長                               |
| 本 間 格 | （独）産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門<br>ナノエネルギー材料グループ グループリーダー |
| 水野 哲孝 | 東京大学大学院 工学系研究科 応用化学専攻 教授                           |
| 宮 坂 力 | 桐蔭横浜大学大学院 工学研究科 生命・環境システム工学科 教授                    |
| 横川 晴美 | （独）産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門<br>総括研究員 兼 燃料電池グループリーダー   |
| 吉田 正寛 | 新日本石油（株） 研究開発本部 研究開発企画部長                           |

## (b)その他の参加者

|                       | 氏 名   | 所属・役職（いずれも検討会開催当時）                                       |
|-----------------------|-------|----------------------------------------------------------|
| 文科省                   | 氏 原 拓 | 文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課<br>ナノテクノロジー・材料開発推進室 室長補佐             |
|                       | 宮本 智之 | 文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課<br>ナノテクノロジー・材料開発推進室 学術調査官            |
|                       | 前田 征児 | 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<br>特別研究員                    |
| 経産省                   | 御器谷俊之 | 経済産業省 ナノテクノロジー・材料戦略室 技術係長                                |
| 物質・材料<br>研究機構         | 長谷 正司 | (独) 物質・材料研究機構 総合戦略室 主幹研究員                                |
| ナノテクノロジービジネス<br>推進協議会 | 亘理 誠夫 | ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長                                  |
|                       | 水本 宗男 | ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長                                  |
|                       | 平原奎治郎 | ナノテク総合支援プロジェクトセンター 企画部門長                                 |
| JST                   | 白木澤佳子 | JST 研究推進部 第二課 課長                                         |
|                       | 長谷川景子 | JST 研究推進部 第二課 主査                                         |
|                       | 上 田 孝 | JST 研究領域総合運営室 主任調査員                                      |
|                       | 田中 一宜 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ 上席フェロー                              |
|                       | 井 下 猛 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー                             |
|                       | 江 口 健 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー                             |
|                       | 松村 光雄 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ シニアフェロー                             |
|                       | 鯉沼 秀臣 | JST/CRDS 計測・産業技術グループ シニアフェロー                             |
|                       | 村井 眞二 | JST研究成果活用プラザ大阪 館長<br>JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー         |
|                       | 木村 茂行 | (社) 未踏科学技術協会 理事長<br>JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー          |
|                       | 田中 秀治 | 東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 助教授<br>JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー |
|                       | 村上 正紀 | 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻 教授<br>JST/CRDS ナノテク・材料グループ 特任フェロー     |
|                       | 雄山 泰直 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ フェロー                                |
|                       | 中山 智弘 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ フェロー                                |
|                       | 永井 康介 | 東北大学金属材料研究所 助教授<br>JST/CRDS ナノテク・材料グループ フェロー             |
|                       | 横 田 修 | JST/CRDS ナノテク・材料グループ アソシエイトフェロー                          |

**研究開発戦略センター報告書**

**「エネルギー・環境用材料技術戦略」検討会**

**CRDS-FY2006-WR-06**

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター

平成19年2月

田中グループ

(ナノテクノロジー・材料分野担当)

---

〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地

電話 03-5214-7483

ファックス 03-5214-7385

<http://crds.jst.go.jp/>

平成19年2月

©2006 CRDS/JST

許可なく複写・複製することを禁じます。  
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

---