

「持続性へ向けた産業科学技術」委員会

最終報告書

平成22年2月

独立行政法人 産業技術総合研究所

株式会社 テクノリサーチ研究所

はじめに

平成 17 年度、吉川弘之前理事長により「持続性へ向けた産業科学技術」委員会（以下、持続性委員会）が組織された。持続的発展可能な地球社会の実現を目指して、第 1 期～第 3 期にわたり、社会や産業の持続的発展型への重心移動や、今後の産業技術総合研究所（以下、産総研）の研究開発の方向性に関する活発な議論が行われた。本報告書は産総研の職員向けにとりまとめられたもので、この 5 年弱にわたった調査の最終報告書となっている。とりまとめにあたり、内外の公表された報告書、官公庁の委員会報告書、企業レポートなどを参照したが、各章末に参考文献としてまとめてあるので、ご参考になれば幸いである。本報告書では、産総研としての Sustainable Development（持続可能な開発）における立ち位置を確認しつつ、産総研としての特徴を出そうと試みた。

Sustainability（持続可能性）は本来、自然科学、産業技術、人文科学、社会科学などの諸側面から論じられるべきものである。しかし、本委員会設立の趣旨に記載されているように、本報告書では、産業科学技術の側面からのみ持続可能性を論じることとした。人文科学的側面、社会科学的側面からの論考については、他の成書や文献を参照されたい。

本書の第 1 章は「持続可能性」に関わる諸問題を取り上げて考察したが、まず第一に産総研が共有すべき「持続可能性」の考え方として、1987 年に「ブルントラント委員会」の提唱した概念が適当であることを提案した。「持続可能性」を脅かす地球規模の問題として、温暖化を含む地球環境問題、エネルギー問題、資源問題、人口問題を取り上げ、その実状と解決の方向性を示した。

第 2 章では、「持続可能性」にかかわる諸問題の解決のために我が国の政府が提示した政策と、省エネルギーや環境保全など、エネルギー・環境分野で実施されてきた我が国の取組について概括した。

第 3 章では、持続可能な社会を支える産業科学技術として環境技術、エネルギー技術、資源制約緩和技術、IT を取り上げ、今後の進むべき方向性について考察した。さらに、2050 年における社会像を描きつつ、環境モデル都市で必要となる技術の活用の現状を概括した。技術の供給側のシーズと、需要側のニーズを対比してお読みいただきたい。

第 4 章では、持続可能性に資する研究課題を 15 件選定し、内外の主要研究機関における研究動向を調査し、産総研における関連研究との対比で比較優位性を論じた。この調査は外部の調査機関に委託した。

第 5 章では、27 名の産総研研究者に対するヒアリングの結果をとりまとめた。第三期の研究戦略策定にあたり、現在行われている研究活動を持続可能性の観点から俯瞰し、産総研の強み・弱みを認識するだけでなく、「産総研の見える化」を図ることは、持続性委員会の重要な目的の一つとなっている。研究分野、研究課題ごとに、研究開発の現状、課題解決のための方策、今後の研究計画などについて、可能な限り紹介させていただいた。読者諸賢のご参考になれば幸いである。また、さらなる産総研の発展に向けて、産総研の運営や研究管理、人材育成などについて率直なご意見をいただいたため、できる限り生の声を収録させていただくことにした。本報告書で紹介されている研究グループは事務局の判断で選定させていただいた。諸事情で、持続可能性にかかわる研究を実施している研究グループのごく一部しか訪問できなかった。また、本報告書の紹介事例でも、共同研究の守秘義務等の関係で意が尽くされていない点があると思われる。力不足の点についてはご容赦いただければ幸いで

ある。

地球上の CO₂ 濃度や CO₂ 排出規制の目標値の多くが官民を問わず 2050 年を想定しているように、持続可能性を論じるには、世代間交代の起こる 50 年程度のスパンが必要であろう。今から 40 年先の資源・環境制約、食料制約、人口問題、感染症・公衆衛生の問題などを回避して我々が安全に安心して暮らせる社会の将来像を見据えるため、本報告書では、可能な限り信頼性の高い 2050 年の予測値を含む統計データを採り入れるよう努めた。

持続性委員会では、暮らし、移動と輸送、産業、各分野における省エネルギーの実態と取組など、基礎的なデータの収集と解析、産業の重心移動や環境効率の定義付けと評価などを行ってきた。この間、産学官でも持続可能性に関する様々な報告書や企業レポート等が出版・公開されるに至っている。持続可能性の定量化は依然として困難な作業であるが、正確なデータの収集と指標の適用可能性の十分な吟味が必要となろう。

この 1 年間にだけ限ってみても大地震や津波などの被害が急増している。種々の地球環境の変動要因により我々の生活が脅かされる可能性も否定できない。緊急課題解決のための技術開発と長期的なスパンでの影響評価・予測技術の開発など、産総研の知を結集して、弾力的に対応できる体制を構築することも求められる。

今回のヒアリングで、分野を問わず、産総研の多くの研究者が持続可能性にかかわる研究に従事していることがわかった。Industrial Science and Technology on Sustainability（持続性にかかわる産業科学技術）に関して本報告書が皆様のご参考になれば幸いである。

最後に、快く事務局のヒアリングにご対応くださいました研究者の皆様と、本報告書のとりまとめにご協力いただいた第 1 期～第 3 期委員会委員・事務局の皆様にはお名前を記して謝意を表します。

平成 22 年 2 月

「持続性へ向けた産業科学技術」委員会 第三期委員長
エレクトロニクス研究部門 機能集積グループ長
清水 貴思

ヒアリングにご協力くださった方々

氏名	所属	役職
赤井智子	環境化学技術研究部門	高機能ガラスグループ長
赤井 誠	エネルギー技術研究部門	主幹研究員
石川 浩	ネットワークフォトンクス研究センター	センター長
上田和永	計測標準研究部門	質量力標準研究室長
蛭名武雄	コンパクト化学プロセス研究センター	材料プロセッシングチーム長
大串 始	セルエンジニアリング研究部門	部門長
大場光太郎	知能システム研究部門	副研究部門長
小垣哲也	エネルギー技術研究部門	ターボマシングループ研究員
河田悦和	バイオベースポリマー連携研究体	主任研究員
岸本勇夫	計量標準管理センター	計量標準計画室長
楠瀬勤一郎	地圏資源環境研究部門	主幹研究員
古宇田亮一	産学官連携推進部門	産学官連携コーディネーター
小林慶三	サステナブルマテリアル研究部門	相制御材料研究グループ長
近藤道雄	太陽光発電研究センター	センター長
坂西欣也	バイオマス研究センター	センター長
匂坂正幸	安全科学研究部門	副研究部門長
清水貴思	エレクトロニクス研究部門	機能集積システムグループ長
田中幹也	環境管理技術研究部門	金属リサイクル研究グループ長
並木 周	ネットワークフォトンクス研究センター	光信号処理システム研究チーム長
成松 久	糖鎖医工学研究センター	研究センター長
平野 隆	産学官連携推進部門	産学官連携コーディネーター
牧原正記	水素材料先端科学研究センター	副研究センター長
松村 健	ゲノムファクトリー研究部門	植物分子工学研究グループ長
三島 望	先進製造プロセス研究部門	エコ設計生産研究グループ長
村岡洋文	地圏資源環境研究部門	地熱資源研究グループ長
湯浅新治	エレクトロニクス研究部門	スピントロニクス研究グループ長
横井一仁	知能システム研究部門	副研究部門長

※ 敬称略、五十音順。

委員会（第 1 期～第 3 期）委員名簿

第 1 期 委員名簿

区 分	氏 名	所属・役職
委員長	増田幸治	地質情報研究部門 地震発生機構研究グループ主任研究員
副委員長	岸本充生	化学物質リスク管理研究センター リスク管理戦略研究チーム主任研究員
	佐脇政孝	技術情報部門総括主幹
委員	小笠原敦	イノベーション推進室総括主幹
	岡田知子	生物機能工学研究部門 分子認識研究グループ長
	小澤寿輔	ライフサイクルアセスメント研究センター 環境効率研究チーム研究員
	尾仲敏也	産学官連携推進部門 関西産学官連携センター総括主幹
	加藤一実	先進製造プロセス研究部門 テーラードリキッド集積研究グループ長
	柴田崇徳	知能システム研究部門 空間機能研究グループ主任研究員
	高橋淳子	技術情報部門総括主幹
	田村具博	ゲノムファクトリー研究部門 遺伝子発現工学研究グループ長
	藤井賢一	計測標準研究部門 物性統計科 流体標準研究室長
	三澤雅樹	人間福祉医工学研究部門 医用計測技術グループ主任研究員
	谷川原久明	イノベーション推進室総括主幹
事務局 技術情報部門	宮本耕一	技術情報企画室招聘研究員
	安平哲太郎	技術情報企画室主幹
	朴 慶浩	技術情報企画室総括主幹
	森本慎一郎	技術情報部門主査
	河尻耕太郎	研究情報整備室主査
	井上佳久	イノベーション経営研究室主査
	水向絢子	イノベーション経営研究室主査

※敬称略・所属・役職は当時

第 2 期 委員名簿

区 分	氏 名	所属・役職
委員長	工藤祐揮	ライフサイクルアセスメント研究センター 環境効率研究チーム研究員
副委員長	増井慶次郎	先進製造プロセス研究部門 エコ設計生産グループ主任研究員
	佐脇政孝	技術情報部門総括主幹
委員	河内眞紀子	デジタルヒューマン研究センター 上席研究員
	酒井夏子	エネルギー技術研究部門 燃料電池グループ主任研究員
	周 豪慎	エネルギー燃料研究部門 ナノエネルギー材料グループ主任研究員
	高橋淳子	技術情報部門総括主幹
	達 吉郎	セルエンジアリング研究部門 分子創製研究グループ研究グループ長
	谷本照己	地質情報研究部門 沿岸海洋研究グループ主任研究員
	都築和代	人間福祉医工学研究部門 環境適応研究グループ研究グループ長
	恒見清孝	化学物質リスク管理研究センター 水圏環境評価チーム研究員
	矢野泰夫	能力開発部門 能力開発センター主幹
事務局 技術情報部門	遠藤秀典	技術情報部門審議役
	宮本耕一	技術情報企画室招聘研究員
	森本慎一郎	技術情報部門主幹
	水向絢子	イノベーション経営研究室主査

※敬称略・所属・役職は当時

第 3 期 委員名簿

区 分	氏 名	所属・役職	
委員長	清水貴思	エレクトロニクス研究部門	
		機能集積システムグループ長	
副委員長	三澤雅樹	人間福祉医工学研究部門 医用計測技術グループ主任研究員	
	佐脇政孝	企画本部戦略経営室総括主幹	
委員	達 吉郎	セルエンジニアリング研究部門 分子創製研究グループ研究グループ長	
	喜多泰代	情報技術研究部門 知的メディア研究グループ主任研究員	
	加藤且也	先進製造プロセス研究部門 生体機構プロセス研究グループ研究グループ長	
	芦田 極	先進製造プロセス研究部門 ファインファクトリ研究グループ主任研究員	
	井原智彦	安全科学研究部門 社会と LCA 研究グループ研究員	
	古瀬充穂	エネルギー技術研究部門 超電導技術グループ研究員	
	斎藤 眞	地質情報研究部門 シームレス地質情報研究グループ長	
	鎗田 孝	計量標準管理センター 国際計量室総括主幹	
	水村 豊	生命情報工学研究センター事務マネージャー	
	小林京子	計測標準研究部門事務マネージャー	
	事務局 イノベーション推進室	市川直樹	イノベーション推進室総括企画主幹
		天神林孝二	イノベーション推進室審議役
		二タ村 森	イノベーション推進室審議役
森本慎一郎		イノベーション推進室主幹	
宮本耕一		イノベーション推進室技術情報チーム招聘研究員	

※敬称略・所属・役職は当時

目 次

1. 持続可能性に関わる諸問題	1
1. 1 「持続可能な開発」の概念	3
(1) 環境保護の立場からの持続性に関わる提案	3
(2) 国連での「持続可能な開発」についての議論	4
(3) 本報告書での考え方	5
1. 2 地球規模の環境問題	6
(1) 地球温暖化の現状と将来	6
1) 国際社会の議論の流れ	6
2) 地球温暖化の自然科学的根拠	9
3) 地球温暖化の影響	10
4) 地球温暖化緩和策	12
(2) 水環境問題	15
1) 水環境問題の現状	15
2) 水関連技術	16
3) 水問題への対応	18
(3) 森林破壊問題	20
1) 世界の森林の現状	20
2) 森林資源の炭素蓄積量	20
3) 森林破壊問題への対応	21
(4) 砂漠化	22
(5) 環境汚染問題	22
1) 酸性雨	22
2) 海洋汚染	23
3) 有害廃棄物の越境移動	23
4) 発展途上国の公害問題	24
1. 3 エネルギー問題	24
(1) エネルギー資源の賦存量	24
1) 世界の石油と天然ガスの埋蔵量	25
2) 世界の石油と天然ガスの可採年数の推移	26
3) 世界の石炭の埋蔵量	27
4) 世界の石炭の可採年数	27
(2) 将来のエネルギー需給見通し	28
1. 4 資源問題	33
(1) 鉱物資源の賦存量	34

(2) レアメタル	36
(3) 資源関連技術.....	36
1) 資源の採掘条件の悪化.....	36
2) 強まる環境制約と求められる対策	37
1. 5 人口問題.....	37
(1) 世界の将来人口推計	38
(2) 人口問題に対する国際的取組.....	40
2. 持続可能性にかかわる従来の取組	49
2. 1 持続的発展可能な社会の構築に向けた日本政府の政策.....	49
(1) 環境政策.....	50
1) 超長期ビジョン.....	50
2) 第2次循環型社会形成推進基本計画	51
(2) エネルギー政策	51
1) 省エネルギー技術戦略 2008.....	51
2) 環境エネルギー技術革新計画	52
(3) 総合的政策	53
1) 低炭素社会づくり行動計画.....	53
2) 新成長戦略.....	53
2. 2 我が国の持続的発展可能な社会の構築へ向けた取組.....	55
(1) エネルギー分野	55
1) 日本のエネルギー供給.....	56
2) 再生可能エネルギー.....	56
i) 再生可能エネルギーの導入状況.....	56
ii) 1次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合	57
iii) 再生可能エネルギーのコスト	58
iv) 再生可能エネルギーの導入目標.....	58
3) 日本のエネルギー需要.....	59
4) 部門別エネルギー消費.....	61
i) 民生部門	61
ii) 移動・輸送部門.....	64
iii) 産業部門	68
5) エネルギー分野での削減方策・方向性.....	71
i) 供給側での方策と方向性	71
ii) 需要側での方策と方向性	71
(2) 環境分野.....	72
1) 循環型社会形成に関連する我が国の法体系.....	72

2) 我が国の物質フロー.....	72
3) リサイクルの現状と問題点.....	74
i) 民生部門.....	74
ii) 移動・輸送部門.....	75
iii) 産業部門.....	75
iv) 公共プラント等行政サービス部門.....	77
v) 省物質資源方策の方向性.....	78
4) 環境保全に関連する我が国の法体系.....	79
5) 環境保全策が今後進むべき方向性.....	79
3. 持続的発展可能な社会を支える産業科学技術.....	83
3. 1 環境技術.....	84
(1) フォアキャストとバックキャスト.....	84
(2) CO ₂ 削減目標の設定と社会的な対応.....	85
(3) COP15 を巡る動き.....	87
(4) 次世代自動車に見る今後の技術開発課題と利活用技術.....	88
3. 2 エネルギー技術.....	90
(1) エネルギー供給構成.....	90
(2) 原子力発電.....	91
(3) エネルギー自給率.....	92
(4) 低炭素社会実現に向けたエネルギー関連技術.....	92
3. 3 資源制約緩和技術.....	94
(1) レアメタルの使用状況.....	94
(2) 資源確保技術.....	95
3. 4 IT の活用と戦略的な開発.....	97
(1) IT 産業の階層と IT 技術.....	97
(2) IT を活用した省エネ.....	97
(3) スマートグリッド.....	98
3. 5 将来のモデル都市で必要となる技術と課題.....	99
3. 6 健康で安全な生活を実現する技術.....	106
3. 7 「持続可能性」の定量的な評価指標.....	107
(1) 環境効率.....	107
(2) 産業の重心移動.....	110
3. 8 2050 年の社会像と産総研が果たす役割.....	113
4. 主要研究機関における「持続的な開発」に資する研究の概要と特色.....	119
4. 1 調査の対象.....	119
(1) 調査対象技術.....	119

(2) 調査対象機関.....	119
4. 2 調査の方法.....	120
4. 3 主要研究機関における研究の概要と特色.....	120
(1) エネルギー・環境分野.....	120
1) 太陽光発電.....	120
2) バイオマスからの液体燃料製造.....	133
3) 水素利用（輸送・貯蔵）技術.....	146
4) 高密度蓄電デバイス（スーパーキャパシタを除く）.....	151
5) SiC パワーデバイス.....	157
6) 地中熱ヒートポンプ.....	162
7) 需要家内エネルギーネットワーク技術.....	167
(2) ナノテクノロジー・材料・製造分野.....	173
1) スーパーキャパシタ.....	173
2) レアメタル（アース）回収・代替技術.....	179
3) グリーンサステナブルケミストリー（GSC）.....	188
4) サービスロボティクス.....	195
(3) ライフサイエンス分野.....	211
1) 植物工場.....	211
(4) 情報通信・エレクトロニクス分野.....	215
1) ネットワークフォトニクス（光ネットワークによる情報通信の省エネ化）.....	215
2) スピントロニクス.....	228
(5) 標準・計測分野.....	233
1) 光・量子ビームイメージング技術（計測・分析用）.....	233
5. 持続可能性に資する産総研の産業科学技術.....	245
5. 1 産総研の「持続的な開発」関連研究.....	246
(1) 環境・エネルギー分野.....	246
1) エネルギー需給関係.....	246
2) LCA・LCD.....	246
3) CCS.....	248
4) 太陽光発電.....	249
5) 風力発電.....	250
6) バイオマス.....	252
7) 地熱利用.....	252
8) 水素製造・利用.....	253
9) メタルリサイクル.....	255
(2) ライフサイエンス分野.....	257

1) バクテリア人工染色体によるゲノム解析	257
2) 完全密閉型植物工場システム	258
3) バイオマス資源を利用する物質生産.....	259
(3) ナノテクノロジー・材料・製造分野	259
(4) 情報通信・エレクトロニクス分野.....	260
1) スピントロニクス	260
2) 光パズネットワーク.....	262
3) 知能システム	263
(5) 地質分野.....	264
(6) 計測標準分野.....	266
5. 2 さらなる産総研の発展に向けて	267
(1) 持続可能性・持続可能な研究開発.....	267
(2) 産総研の組織と運営	267
(3) 研究.....	268
(4) 知財	269
(5) 人材	270
(6) 標準化.....	270
(7) 産学官連携	271
(8) 国際ネットワーク	271
(9) 行政改革.....	271
用語解説リスト	275
略語表	281

1. 持続可能性に関わる諸問題

人類はフロンティアを開拓して活動領域を拡大し、資源・エネルギーを最大限利用して産業を発展させ、富の蓄積と生活の向上を図ってきた。しかしながら、皮肉にも近代的大量生産・大量消費社会においては資源・エネルギーの浪費、地球温暖化に伴う自然環境の破壊などが進行した。富や食料の遍在、発展途上国における劣悪な衛生状態や治安状態の悪化など、世界人口の増大に伴う、さまざまな諸問題が顕在化するに至っている。

このような状況を受けて、自然環境を守り、資源を保全し、温室効果ガスの排出量を大幅に削減しなければ、自分たちを取り巻く自然環境、生活環境を回復不可能なまでに毀損してしまうことに人類は気づき始め、持続可能な社会の構築に真剣に取り組み始めている。

「低炭素社会」の構築、「循環型社会」、「分散型社会」、「自然共生社会」の形成、「生物多様性の保全」等の重要性に関する認識の深まりもこの流れの中にあり、できるだけ自然の循環過程を重視し、環境負荷の少ない形で持続可能な人間社会を再構築しようとする試みが先進国を中心に始まっている。

持続可能な社会を構築するためには大幅な温暖化ガスの削減が求められており、それを実現するためには現在の生活のあり方や社会システムの変更等が必要とされ、行政レベルの対策にとどまらず、全国民の理解・協力・参加が必須の条件になっている。

各国、各地域の経済的条件、地理的条件等はさまざまであるが、地域資源の有効活用、歴史・文化をベースに特色を活かした社会を構築する必要がある。地域レベルでの環境負荷の低減が地球レベルでの環境負荷の低減につながる。しかしながら、地球温暖化、環境劣化、生物多様性の喪失等は全球的レベルで進行していることから、各国の環境負荷低減策を調整し温室効果ガスの削減を強力に推進する国際的な取組も併せて必要とされる。

2009年7月にイタリアのラクイアで開催されたG8サミット首脳宣言（ラクイア・サミット宣言）[1-1e]では、「工業化以前の水準から世界全体の平均気温が2度を超えないようにすべきとする広範な科学的見地を認識」した上で、「洞爺湖サミット（2008年7月）」[1-1d]において合意した、「世界全体での温室効果ガスの排出量を2050年までに少なくとも50%削減するとの目標を再確認し、先進国全体で1990年、またはそれより最近の複数の年と比較して2050年までに80%、またはそれ以上削減するとの目標を支持する」と宣言された。また、「途上国の気候変動に対する緩和策・適応策を支援するための資金援助の重要性」についても述べられている。しかしながら、目標を達成するための具体的アクションプランは示されなかった。

このような状況で人々の生活水準を向上させるために、先進国には現在の温室効果ガスの排出量の大幅削減が、また、発展途上国には温室効果ガスの排出量を極力抑制した経済発展がそれぞれ求められている。現実の世界をみると、各国の発展段階・経済力・資源の賦存状況等には大きな格差が存在する。発展途上国は国民の生活水準を向上させるため経済発展を望んでおり、経済成長を阻害するものとして温室効果ガスの排出枠の設定に異議を唱え、先進諸国に対しては大幅な温室効果ガス排出量の削減、省エネ技術・環境技術の途上国への移転、資金援助を要求している。先進国は「持続可能な社会」の構築するためエネルギー・資源消費量の大幅削減を目指していくことになるが、2050年に1990年比で温室効果ガスを80%削減することは容易なことでない。新たな技術開発、国民の意

識改革、経済・社会システムの大幅な変更等が求められている。さらに発展途上国からの要望にも応えていかなければならない。

重要なことは2050年に向けて温室効果ガスを世界全体で50%削減するという目標を先進国と発展途上国の国際的合意のもとでいかに達成するかであり、そのための道筋をどのようにつけるかが問われている。

しかしながら、EIA (Energy Information Administration) の“International Energy Outlook 2009” [1-2] によれば、世界全体のエネルギー消費量は2030年に2006年比で44%程度増加すると予想されている。特に中国、インドを中心とする発展途上国のエネルギー消費量の増加が著しい。

2009年12月、コペンハーゲンで気候変動第15回締約国会議(COP15) [1-3] が開催されたが、京都議定書に代わる法的な拘束力を持つ削減目標を定めた新たな議定書の締結には至らなかった。「世界全体の長期目標として産業化以前からの気温上昇を2度以内に抑える」としながらも、削減目標を各国の自主的努力に任せたコペンハーゲン合意 [1-4] を取り纏めるにとどまった。

COP15の結果に見られるように、先進国と発展途上国の地球温暖化問題のとらえ方は大きく異なっている。しかしながら、将来、人類がどのような地球規模の環境問題に直面するのか、その原因、対応策(適応策、緩和策)を理解した上で国際社会が発展途上国の「成長のための開発と環境保全」の問題にどのように向き合ってきたのか、その歴史を理解することは、今後の諸課題への対応にあたって重要である。日本は過去の歴史を踏まえ、発展途上国が直面している状況も正確に把握した上で地球環境問題を改善するための粘り強い努力を継続しなければならない。このためには常に国際的視点と国内的視点の両方を併せ持って行動する必要がある。その上で日本自身の「持続可能な社会」の構築、「持続発展可能な開発」の実現、発展途上国の「持続可能な社会」の構築、「持続的発展可能な開発」の実現に対して技術面、資金面等での支援を行う必要がある。

1. 1 「持続可能な開発」の概念

(1) 環境保護の立場からの持続性に関する提案

第二次世界大戦後の先進国における経済成長に伴い、1970年代には資源の浪費、環境破壊、南北格差の拡大等が顕著になった。環境問題に対する国際的な関心の高まり等を受け、このまま従来通りの経済発展、開発等を続けることが可能かということが国際社会（国連）で議論されるようになり、発展途上国の経済発展と環境保護の両立を図るため、「持続可能な開発」という概念が生まれてきた。

「持続可能な開発」について様々な定義、考え方が提案されている。このことは、人類の経済活動に伴って深刻化している環境問題の解決と、発展途上国の人々の生活水準向上のための開発を同時に進めることがいかに困難なものかであることを明瞭に示している。本項では、環境保護の立場から提案された「持続可能性」の考え方を紹介する。

○「ハーマン・デイリーの3原則」（環境経済学者の視点） [1-5],[1-6]

- ・ 再生可能な資源の消費ペースは、その再生のペースを上回ってはならない。
- ・ 再生不可能な資源の消費ペースは、それに代わりうる持続可能な再生可能資源が開発されるペースを上回ってはならない。
- ・ 汚染の排出量は、環境の吸収能力を上回ってはならない。

○「ナチュラルステップの4つのシステム条件」（科学者の視点）¹ [1-7]

- ・ 自然の中に地殻から掘り出した物質の濃度が増え続けない
- ・ 自然の中で人間社会の作り出した物質の濃度が増え続けない
- ・ 自然が物理的な手段で劣化され続けない
- ・ 人々が自らの基本的ニーズを満たそうとする行動を妨げる状況を妨げる状況を作り出してはならない（資源を効率的かつ公平に利用し、富める国と貧しい国の不公平な資源配分は避けるべきである）

○「新・世界環境保全戦略」（環境保護の立場） [1-8]

1980年に国際自然保護連合（International Union for Conservation of Natural Resources, IUCN）、国連環境計画（United Nations Environment Programme, UNEP）、世界自然保護基金（World Wide Fund for Nature, WWF）が作成した「世界保全戦略」の改訂版として1991年に公表された「戦略」。1980年に公表された「世界保全戦略」は副題が「持続可能な開発のための生物資源の保全」となっており、1972年に開催された国連人間環境会議の「人間環境宣言」の具体的行動指針となっている。人類生存のための自然資源の保全について指摘している。1991年に公表された「新・世界環境保全戦略」は副題が「かけがいのない地球を大切に（Caring for the Earth）」となっている。

- ・ 持続可能な開発の定義
人々の生活の質的改善を、その生活支持基盤となっている各生態系の吸収能力限度内で生活しつつ達成すること
- ・ 持続可能な社会の基本原則

¹ 1989年、スウェーデンの医学者、カール・ヘンリック・ロベールが多数の科学者に呼びかけ、科学の視点から持続可能性の原則をまとめ、提唱したもの。

- ① 生命共同体を尊重し、大切にすること
- ② 人間の生活の質を改善すること
- ③ 地球の生命力と多様性を保全すること
- ④ 再生不能な資源の消費を最小限に食い止めること
- ⑤ 地球の収容能力²を超えないこと
- ⑥ 個人の生活態度と習慣を変えること
- ⑦ 地域社会が自らそれぞれの環境を守るようにすること
- ⑧ 開発と保全を統合する国家的枠組みを策定すること
- ⑨ 地球規模の協力体制を創り出すこと

(2) 国連での「持続可能な開発」についての議論

国連を舞台に開催された「環境と開発に関する世界委員会（通称：ブルントラント委員会）」 [1-9a]、「環境と開発に関する国際連合会議（通称：地球サミット）」 [1-9c]、「持続可能な開発に関する世界首脳会議（通称：ヨハネスブルグ・サミット）」 [1-9b] の定義、考え方は発展途上国の経済発展をいかに環境と調和させながら図っていくか課題にしている。地球サミットでは発展途上国のかかえる問題点を指摘し、開発のあり方まで踏込んだ実行計画（アジェンダ 21） [1-10] を公表している。

2000年の国連ミレニアム・サミットで採択されたミレニアム開発目標（Millennium Development Goals, MDGs） [1-9d] は開発と貧困、環境等の課題に対する21世紀の国連の役割に関する方向性を示しており、2015年までに達成すべき8つの目標を宣言している。

これらは「開発」を前提にしているが、途上国の発展のために必要なのは「開発」ばかりではなく、伝統的な社会の知恵・技術を生かして、必要以上の開発を行わず現在の自然共生的社会を維持することも重要ではないかとの意見もある。以下に文献 [1-9a]～[1-9d], [1-10] の概要を示す。

○ 「環境と開発に関する世界委員会（通称：ブルントラント委員会）」報告書「Our Common Future」（1987年）

1984年に国連に設置された委員会で委員長ブルントラント女史（後のノルウェー首相）他、21人の世界的有識者（賢人会議）で構成され、1987年に報告書が公表された。「現在、地球規模で拡大している砂漠化、熱帯林の減少、酸性雨、オゾン層の破壊、地球の温暖化等の環境問題を克服し、現在および未来の世代により高い生活の質を保障するための鍵を握るのが「持続可能な開発」であることは世界の共通した認識になりつつある」との認識を示した上で「持続可能な開発」の広く一般的に受け入れられている概念「将来の世代のニーズを満たしつつ、現在の世代の欲求を満足させるような開発」を提唱している。

○ 「環境と開発に関する国際連合会議」（地球サミット）（1992年）

オゾン層の破壊、地球温暖化、熱帯雨林の破壊、生物多様性の喪失など地球規模での環境問題の

² 地球または特定の生態系が持ちこたえうる外部の作用の最大値。

深刻化を受けてリオデジャネイロで開催された。環境分野での国際的取組である「アジェンダ 21」を採択している。「アジェンダ 21」には条約のような拘束力はないが、「社会的・経済的側面」、「開発資源の保護と管理」、「主たるグループの役割の強化」、「実施手段」の 4 つの側面から地球環境問題にとり組む行動計画を示している。

○「ミレニアム開発目標：MDGs」（国連ミレニアム・サミット）（2000 年）

目標 7（環境の持続可能性確保）で具体的ターゲットの主なものを示す。

ターゲット 9： 持続可能な開発の原則を国家政策およびプログラムに反映させ、環境資源の損失を減少させる。（森林面積の割合、生物多様性の維持、固体燃料を使用する人口の割合等）

ターゲット 10： 2015 年までに安全な飲料水および衛生施設を継続的に利用できない人々割合を半減する。（浄化された水源を継続して利用できる人口の割合、適切な衛生施設を利用できる人口の割合）

ターゲット 11： 2020 年までに、少なくとも 1 億人のスラム居住者の生活を大幅に改善する。（土地および住居への安定したアクセスを有する世帯の割合）

○「持続可能な開発に関する世界首脳会議」（ヨハネスブルグ・サミット）（2002 年）

貧困撲滅、持続可能な生産消費形態への変更、天然資源の保護と管理、持続可能な開発を実施手段、制度的な枠組みといった持続可能な開発を進めるための指針となる包括的文書である「ヨハネスブルグ実施計画」が採択された。実効計画では「持続不可能な生産消費形態の変更」として「資源の利用と生産過程における効率性と持続可能性を改善し、資源の劣化、汚染および廃棄物を軽減することを通じて環境悪化に対処し、適切な場合には経済成長と環境悪化を分離することによって、生態系が持つ維持能力の範囲内で社会および経済開発を推進するために、持続可能な生産消費形態への転換を加速するための計画に関する 10 年間の枠組みの策定を奨励し、促進する」と述べている。

（3）本報告書での考え方

「ハーマン・デイリーの 3 原則」、「ナチュラルステップの 4 つのシステム条件」、「新世界環境保全戦略」の持続性の定義は「開発」を前提とせず、地球という閉じた系（システム）の中での持続性、あるいは地球環境を維持するためには、人間活動に伴う資源・エネルギー消費が自然の循環過程の中で再生可能な範囲内で行われるべきであることを強調している。これら 3 例のように「持続性」を極めて狭義に解釈した定義に従うと、発展途上国はおろか、先進国も現在の経済生活を一切放棄せざるを得なくなる。これでは、先進国も発展途上国も漸進的な成長を遂げてゆくことは不可能である。

その含意を味わうことに意味があるとしても、この地球上で生きている人間にとって同意できる内容とは言い難い。2009 年 12 月の COP15 における先進国と発展途上国との対立、発展途上国間での利害対立が根深いものであることを考慮すると、これらの純粋な定義を採用することは現時点で非現実的な選択である。

一方、ブルントラント委員会の「持続可能な開発」の定義では「ニーズを満たす」と表現している。一見曖昧な印象を与える表現であるが、一定程度の社会の発展を見込みながら、包括的に社会の持続性を維持してゆく試みを支援するための適切な表現と言えよう。ここに盛られた思想をいかに具現化するかは、国際協調の元で、各国が国情に合わせて決定すべきものであろう。

「持続可能性」、「持続的な開発」の基本認識に関しては、今後とも各国間で認識レベルを摺り合わせてゆくことが必要となろう。地球環境問題解決の要諦は漸進的な合意形成にある。「持続可能性」、「持続可能な開発」の定義も時間軸に沿って、世界各国の認識レベルの向上とともに変わってゆくものと期待される。

1. 2 地球規模の環境問題

(1) 地球温暖化の現状と将来

1) 国際社会の議論の流れ

工業化、天然資源の浪費、環境の悪化などの状況が続いた場合には地球環境が持たないとの観点から手遅れにならないうちに対応策を打つべきであるとの提案が以前から多くなされている。特にメドウズ、ブラウンは自然の許容範囲（限界点）を超えた場合、不可逆的な反応が起き、対応できなくなることを強く警告し、そうなる前に手を打つべきであると主張している。

2007年に公表された第4次評価報告書は地球温暖化問題の現状と将来についての作業部会ごとの報告書から構成される。内容は地球温暖化問題の自然科学的根拠から適応策（影響・脆弱性）、緩和策まで多岐にわたるものとなっている。特に適応策については、今後、温暖化の進行に伴って予想される環境面での変化について記述されており、1980年代から議論されてきた地球規模の環境問題と相まって事態が深刻化することが懸念される。特にエネルギー消費量の増加は温室効果ガスの排出増を伴い地球温暖化を加速する。地球温暖化対策も含めた地球環境問題への対応策をいかに作成し、地球規模での「持続可能な社会」の構築をいかに行うかが人類のにとっての喫緊の課題である。

「持続可能な社会」を構築するためには自然の循環過程を重視しそれに沿った社会を作ることが重要であるが、自然の循環過程そのものが地球温暖化の結果、変化していく兆候が見られる。

○「国連人間環境会議」（1972年） [1-9e]

世界の環境問題が初めて世界的規模で総合的に議論され、人間環境宣言、行動計画、などの決議が採択された。「人間環境宣言」は人間環境を自然環境のみならず、経済開発問題や人口問題などを含む総合的なものとして捉え、人間環境の保護と改善に関する原則を宣言している。具体的な環境保護のためには「天然資源の保護、有害物質の排出規制、開発・都市化・人口政策と環境保護との調整、環境保護のための科学技術の開発・移転の促進等」が必要であると述べている。

○ ローマクラブ報告「成長の限界」（D.H. メドウズ他、1972年） [1-11]

- ・ 1970年に設立されたローマクラブの委嘱を受けたMITのメドウズ助教授（当時）のグループは加速度的な工業化、天然資源の枯渇、環境の悪化、急速な人口増加等の結果をシステム・ダイナミックスに基づくモデル（ワールド3）により100年先まで予測し、以下のよ

うな警鐘を鳴らしている。

- ・ 世界人口、工業化、汚染、食糧生産、および資源の使用のがこのまま続くなら、来るべき100年以内に地球上の成長は限界点に到達するであろう。最も起こる見込みの強い結末は人口と工業力のかかなり突然の制御不能な減少であろう。
- ・ こうした趨勢を変更し、将来長期にわたって持続可能な生態学的ならびに経済的な安定性を打ち立てることは可能である。この全体的な均衡状態は、地球上の全ての人の基本的な物質的必要が満たされ、全ての人が個人としての人間的な能力を実現する平等な機会を持つよう設計しうるであろう。
- ・ もし世界中の人々が第一の結末でなくて第二の結末に至るために努力することを決意するならば、その達成のための行動を開始するのが早ければ早いほど、それに成功する機会は大いである。

なお、メドウズはその後、新たなデータを元に以下の書籍を公表している。

○「限界を超えて」(D.H. メドウズ他、1992年) [1-12] 副題:「生きるための選択」

物質およびエネルギーのフローを大幅に削減しない限り、一人当たりの食料生産、およびエネルギー消費量、工業生産量は何十年後にはもはや制御できないような形で減少するであろう。

○「成長の限界」(D・H メドウズ他、2005年) [1-13] 副題:「人類の選択」

人口や工業生産を減らさずに、地球規模で持続可能な社会へ移行することはおそらく可能である。しかし持続可能な社会へ移行するためには家族の規模を小さくし、工業の成長の目標を下げ、地球の資源をより効率的に使おうと一人一人が決めることが必要。選択肢はたくさんある。世界各地がすべて同じ選択を行う必要はないが、選択自体はすぐ行う必要がある。

最近公表されたメドウズの「人類の選択」では、今まさに選択が行われなければ手遅れになってしまうという切迫感のあるメッセージが発信されている。

○「プラン B3.0—人類文明を救うために」(2007年): R.ブラウン [1-14]

地球環境問題に取り組んでいる「アースポリシー研究所」(以前はワールドウォッチ研究所)のブラウンは、現在のままの経済(プラン A)を続けていくと人類文明の存続は限りなく危機に近づいていくため、今こそ新しい経済の構築に取り組む最後のチャンスである。そのための代替案がプラン B であるとして、新しいシステムを提案している。その提案内容は事態の深刻化に伴って変化しており、B2.0「ストレス下にある地球と困難に陥った人類文明を救う」から B3.0「人類文明を救うために力を結集する」に変わっている。シナリオの主要なポイントは以下の通りである。

- ・「自然システムの限界点」と「政治システムの転換点」
 - 限界点: (threshold) ある水準を越えると、不可逆的な変化が起きる
 - 転換点: (tipping point) 多数の人々の意思が、方向転換を選択する
- ・「優先すべき4つの目標」
 - 「気候の安定」、「人口の安定」、「貧困の解消」、「地球生態系の修復」
- ・「構想の3要素」

「エネルギー効率の向上」、「再生可能エネルギー源の開発」、「炭素隔離のための森林伐採の禁止と数十億本の植林による地球の森林面積の拡大」

気候変動に関する政府間パネル（International Panel on Climate Change, IPCC）は世界気象機関と国連環境計画により 1988 年に設立された。設立の目的は二酸化炭素等の温室効果ガスの増加に伴う地球温暖化の科学的・技術的（および社会・経済的）評価を行い、得られた知見を政策決定者をはじめ広く一般に利用してもらうことである。第一次評価報告書が 1990 年に公表され、それ以後、5 年に一回程度、評価報告書を公表して地球温暖化の原因と人間活動の関係について科学的根拠を積み上げてきた。第 4 次評価報告書 [1-15a] では近年の温暖化が人為的なものであることをほぼ断定している。以下、地球温暖化問題に関する重要な国際的動向を時系列的に示す。

○「京都議定書」（気候変動に関する国際連合枠組条約の京都議定書）（1997 年） [1-16]

1995 年に公表された第二次評価報告書をもとに、2008 年から 2012 年までの期間中に、先進国全体の温室効果ガスの合計排出量を 1990 年に比べて少なくとも 5% 削減することを定めている。採択は 1997 年に行われたが、各国の批准が遅れ、効力発生は 2005 年 2 月になった。発展途上国の排出量削減の免除、米国の離脱など、問題は多いが温室効果ガスの削減についての最初の国際的取り決めとして意義深い。

○「IPCC 第 3 次評価報告書・統合報告書」（2001 年） [1-17]

「過去 50 年間に観測された温暖化のほとんどが人間活動によるものであるという、新たな、かつ、より強力な証拠が得られた」と報告されている。その上で、「数々の証拠により、近年の地域的な気温の変化が多く物理・生物システムに対し影響を及ぼしている高い確信がある」と述べられている。

○「IPCC 第 4 次評価報告書・統合報告書」（2007 年） [1-15b],[1-15c]

「気候システムの温暖化には疑う余地がない。このことは、大気や海洋の世界平均温度の上昇、雪氷の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることからいまや明白である。大気中における温室効果ガスとエアロゾルの濃度の変化や、地表面および太陽放射の変化は、気候システムのエネルギーバランスを変化させる」と第 3 次報告書よりも踏み込んだ表現で人間活動と温暖化の関係を指摘している。

○「ラクイアサミット宣言」（2009 年） [1-1e]

IPCC 第 4 次評価報告書を受け、「工業化以前の水準から世界全体の平均気温が 2 度を超えないようにすべきとする広範な科学的見地を認識」した上で、「洞爺湖サミット（2008 年 7 月） [1-1d] において合意された、世界全体での温室効果ガスの排出量を 2050 年に少なくとも 50% 削減するとの目標を再確認し、先進国全体で、1990 年、またはそれより最近の複数の年と比較して 2050 年までに 80%、またはそれ以上削減するとの目標を支持する」と述べられている。また、「途上国の緩和・適応支援、技術の開発・普及のための支援の重要性」が確認されている。

○ 気候変動枠組条約第 15 回締結国会議（COP15）（2009 年 12 月） [1-3]

コペンハーゲンにおいて開催された COP15 では地球温暖化問題の深刻化を受け、京都議定書に変わる新たな「法的な拘束力を持った削減目標を定めた新たな議定書」の締結が期待された。しかしな

がら、発展途上国と先進諸国の間での話し合いがまとまらず、条約締結国会議として「同合意に留意する」として削減目標を各国の自主的努力に任せた「コペンハーゲン合意」 [1-4] が最終的にとりまとめられた。コペンハーゲン合意の主たる内容は以下の通りである。

- ・ 世界全体の長期目標として産業化以前からの気温上昇を 2 度以内に抑える。
- ・ 先進国は 2020 年の削減目標を、途上国は削減行動を、それぞれ付表 I および 2 に記載する。各国は 2010 年 1 月 31 日までに記載事項を提出する。
- ・ 締結国の行動は測定、報告、検証可能なものとされなければならない。途上国が自発的に行う削減行動も国内検証を経た上で、国際的な協議の対象となる。支援を受けて行う削減行動は国際的な測定、報告、検証の対象になる。
- ・ 先進国は 2010 年～2012 年の間に 300 億ドルの新規かつ追加的な資金による支援を共同で行う。また、2020 年までに共同して年間 1,000 億ドルの資金動員目標を約束する。
- ・ 2015 年までに合意の実施状況を評価する。

なお、日本政府は温室効果ガスの排出削減など気候変動対策に積極的に取り組む途上国や、気候変動の悪影響に脆弱な状況にある途上国を広く対象として、2012 年末までの 3 年間で 1 兆 7500 億円（そのうち公的資金は 1 兆 3000 億円）の支援を実施していくことを公表している。

「コペンハーゲン合意」では削減目標を設定できず、各国の自主性に任せることになった。「合意」は「世界全体としての長期目標として産業化以前からの気温上昇を 2 度以内に抑える」と述べているが、それを達成することは第 4 次評価報告書の分析からすると不可能である。それでも中国、米国など各国が自主的に削減目標額を公表したこと自体は前向きな兆候として評価したい。

2) 地球温暖化の自然科学的根拠

第 1 作業部会の報告では気候システムの温暖化には疑う余地のないこととされている [1-15d]。このことは、大気や海洋の世界平均気温の上昇、雪面の広範囲にわたる融解、世界平均海面水位の上昇が観測されていることからいまや明白である（図 1-1）。以下、地上気温と海洋水温の例を示す。

地上気温： 最近 50 年間（1956～2005 年）の温度上昇の傾向は 10 年間に 0.13 度である。

これは過去 100 年間（1906～2005 年）の傾向のほぼ 2 倍である。

海洋水温： 少なくとも水深 3000m までは水温は上昇している。気候システムに加わった熱量のうち 8 割以上を海洋が吸収している。

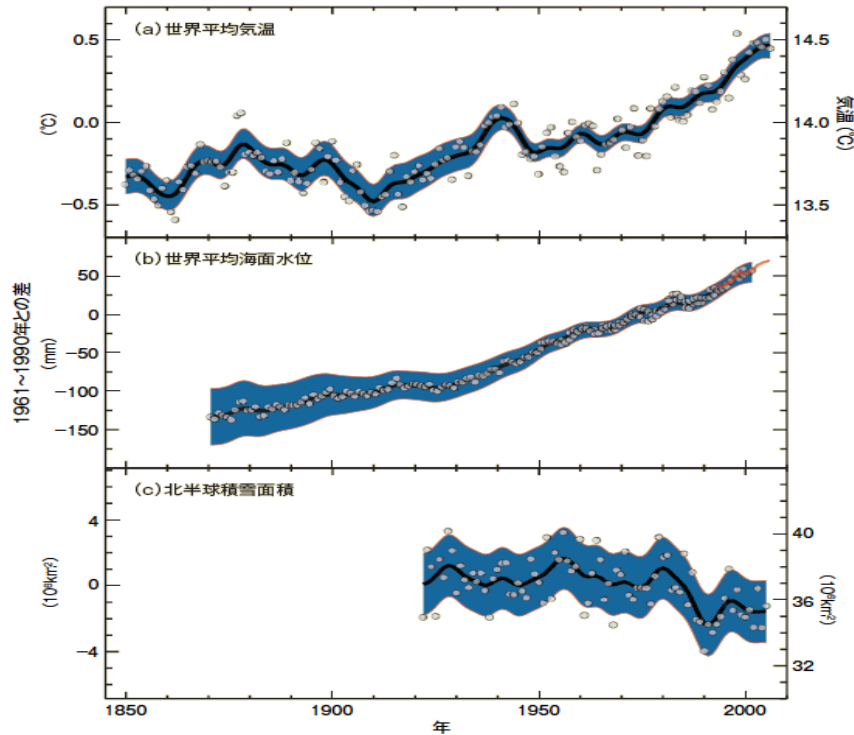


図 1-1 世界平均地上気温、世界平均海面水位、北半球の積雪面積の経年変化

出典：IPCC第4次評価報告書第一作業部会 政策決定者向け要約 [1-15d]

報告書は 20 世紀半ば以降に観測された世界平均気温の上昇のほとんどが、人為起源の温室効果ガスの増加によりもたらされた可能性が非常に高いことは明らかであるとしている。

3) 地球温暖化の影響

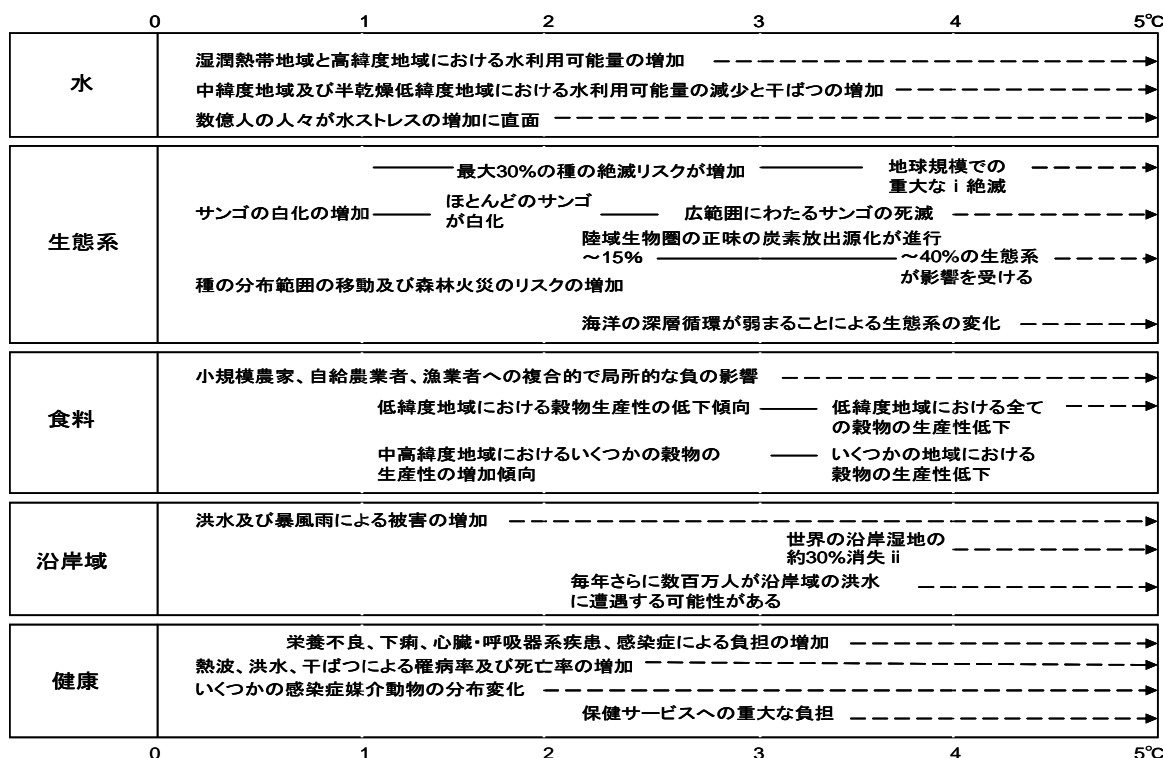
第2作業部会の報告では、多くの観測結果から自然システムが地域的な気候変動、とりわけ気温上昇の影響を受けつつあることが明らかにされている [1-15g]。気候変動が自然環境等に及ぼす影響は以下の通りである。

- ・氷河湖の増加と拡大、永久凍土地域における地盤の不安定化、山岳における岩なだれの増加
- ・春季現象（発芽、鳥の渡りなど）の早期化、動植物の生息域の高緯度、高地方向への移動
- ・北極と南極の生態系（海水生物群系を含む）および食物連鎖上位捕食者における変化
- ・多くの地域の湖沼や河川における水温上昇、熱波による死亡、感染症リスクの増大

多くの生態系の復元力が、未曾有の気候変化とそれに伴う攪乱およびその他の全球的変動要因の併発により今世紀中に追いつかなくなる可能性が高いとしている。世界の潜在的食料生産量は、地域の平均気温の 1～3 度間での上昇幅で増加すると予想されているが、平均気温がその水準を超えて上昇すれば、食料生産量は世界的に減少に転じると予測している（表 1-1）。

表 1-1 世界の平均気温の変化の増大に対応した主要な影響

1980～1990 年に対する世界平均気温の変化 (°C)



注：黒い線は影響間のつながりを表し、破線の矢印は気温上昇に伴い継続する影響を表す。文章の左端がその影響が出始めるおおよその位置を示す。

出典：IPCC 第4次報告書第2作業部会 政策決定者向け要約 [1-15f]

表 1-2 は気候変動が各地域、産業分野、人間生活に及ぼす影響を予測しているがほとんどの地域で気候変動に伴い、気温、降雨量などの変動幅が大きくなり、また強い熱帯性低気圧の活動が活発化することが予想されるため自然災害の規模の拡大が懸念される。降雨量と農業生産は密接に関連しており、食糧供給への悪影響も懸念材料である。

表 1-2 気候変動が各地域、産業分野、人間生活に及ぼす影響予測

現象及び傾向の方向性	SRESシナリオを用いた21世紀の予測に基づく将来傾向の可能性	各分野に予測される主な影響例			
		農業/林業/生態系	水資源	人間健康	産業/住居/社会
ほとんどの陸域で、寒い日や夜の減少と昇温、暑い日や夜の頻度の増加と昇温	ほぼ確実である	寒冷環境での収量の増加 温暖環境での収量の減少 昆虫の大発生が増加	雪融けに依存した水資源への影響 いくつかの水供給への影響	寒冷曝露の減少による死亡率の低下	暖房のエネルギー需要の減少 冷房のエネルギー需要の増加 都市の大気質の悪化 雪水による輸送分断の減少 冬季観光への影響
ほとんどの陸域で継続的な高温/熱波の頻度の増加	可能性が非常に高い	熱ストレスによる温暖地域での収量の減少	水需要の増加 水質の問題(例:藻の発生)	特にお年寄りや慢性的な病気を有する人、子ども、社会的に孤立した人の熱暑関連の死亡リスクの増加	適切な住居を持たない温暖地域の人々の生活の質の低下 お年寄りや子ども、貧困者への影響
ほとんどの地域で大雨の頻度の増加	可能性が非常に高い	農作物への被害 土壌の侵食、土壌への浸水による耕地の耕作不能化	地表水及び地下水の水質への悪影響 給水の汚染 水不足は軽減されるかもしれない	死亡、怪我及び伝染病、呼吸器疾患及び皮膚病のリスクの増加	洪水による住居、商業、輸送及び社会の分断 都市部や農村部のインフラへの圧力 財産の損失
干ばつの影響を受ける地域の増加	可能性が高い	土地の荒廃 収量の低下/作物の被害及び不作 家畜の死亡の増加 森林火災のリスクの増加	より広範囲にわたる水ストレス	食料及び水不足のリスクの増加 栄養不良のリスクの増加 水・食品を原因とする病気のリスクの増加	住居、産業、社会における水不足 水力発電能力の低下 住居移住の可能性
強い熱帯低気圧の活動度の増加	可能性が高い	農作物への被害 木々の風倒(根がえり) サンゴ礁への被害	公共の給水の断絶を引き起こす停電	死亡、怪我、水・食品を原因とする病気のリスクの増加 心的外傷後のストレス障害	洪水及び強風による分断 民間保険会社の脆弱地域に対するリスク保障からの撤退 住民移住の可能性 財産の損失
極端な高潮位の発生の増加(津波を含まない)	可能性が高い	灌漑用水、河口、淡水システムの塩性化	塩水の浸入による淡水利用可能量の減少	洪水による溺死及び怪我のリスクの増加 移住に関連した健康影響	沿岸防護コスト対土地利用の配置転換コスト 住民及びインフラの移動の可能性 また上記の熱帯低気圧の項も参照

出典：IPCC 第4次評価報告書第2作業部会政策決定者向け要約 [1-15f]

4) 地球温暖化緩和策

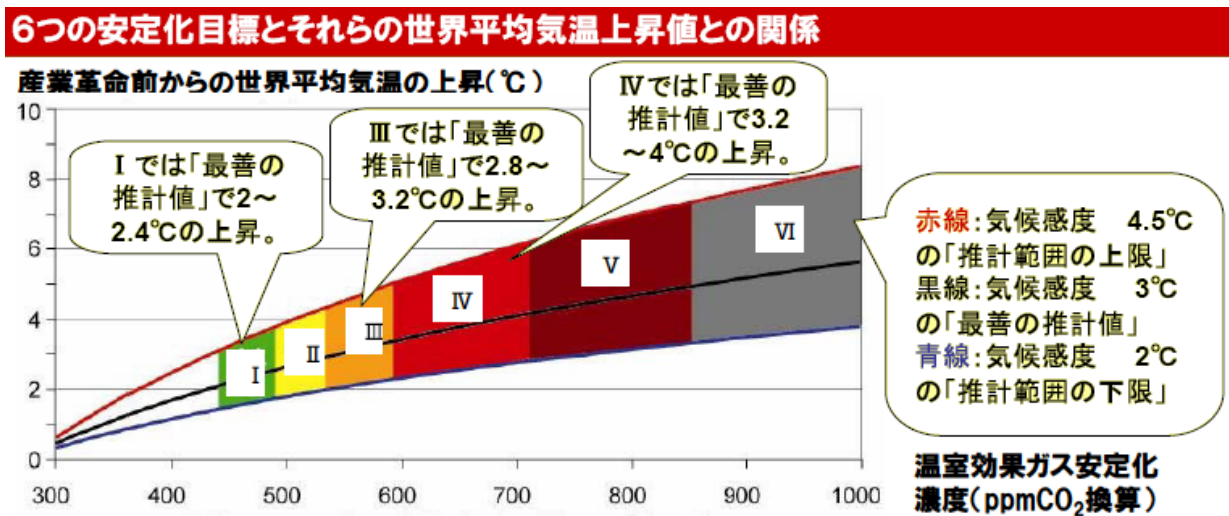
第3作業部会報告書は「温室効果ガス排出量の動向」、「短中期的な各経済部門を横断する緩和(2030年まで)」、「長期的な緩和(2030年より後)」、「気候変動を緩和するための政策、措置、手法」、「持続可能な開発と気候変動の緩和」、「知識上のギャップ」の6部で構成されており、気候変動を緩和するための科学、技術、環境、経済、社会面の事項に焦点が当てられている [1-15i] (表 1-3)。

気候変動に対する緩和行動を促すインセンティブを持たせるため、各国政府が取りうる国内政策および手法は多種多様であり、それらの適用可能性は各国の国内事情やそれらの相互作用についての理解により異なるが、各国および各部門で実施された経験から、いずれの手法にも利点と欠点がある。

規制措置、規制基準は排出レベルをある程度確実に減少させる。具体的には炭素に対する税金・課金の賦課、排出権取引、資金面でのインセンティブ、産業界と政府の自主協定等が考えられる。また、

企業、地方および地域の行政、NGO・NPO、市民団体の広範な自主的行動も温暖化ガス削減に有効である。持続可能な開発と気候変動の緩和を実現するためには、政府だけでなく、民間部門、非政府関係者および市民社会からなる様々な関係者の参加、貢献が不可欠である。一般的に開発と環境保全の取組は相反関係にあるが、環境と開発の両立、社会システムの変更など、いろいろな側面での相乗効果を期待できるような選択肢を採用すべきであるとの認識が深まってきている。

表 1-3 世界平均気温の長期的な安定化シナリオ



カテゴリ	放射強制力	CO ₂ 濃度	温室効果ガス濃度 (CO ₂ 換算)	産業革命前からの気温上昇	CO ₂ 排出がピークとなる年	2050年のCO ₂ 排出(2000年比、%)	シナリオの数
	W/m ²			ppm			
I	2.5-3.0	350-400	445-490	2.0-2.4	2000-2015	-85 to -50	6
II	3.0-3.5	400-440	490-535	2.4-2.8	2000-2020	-60 to -30	18
III	3.5-4.0	440-485	535-590	2.8-3.2	2010-2030	-30 to +5	21
IV	4.0-5.0	485-570	590-710	3.2-4.0	2020-2060	+10 to +60	118
V	5.0-6.0	570-660	710-855	4.0-4.9	2050-2080	+25 to +85	9
VI	6.0-7.5	660-790	855-1130	4.9-6.1	2060-2090	+90 to +140	5
合計							117

出典：IPCC 第4次報告書第3作業部会政策決定者向け要約 [1-15h]

表 1-4 は気候変動に対する緩和策をエネルギー供給、運輸、建築、産業、農業、林業/森林、廃棄物管理までの各部門で示している。規制の強化、税制を含む各種インセンティブの付与、排出権取引など新しい制度の導入、新技術の導入等、環境上効果があると考えられている政策、措置、手法等について詳述するとともにそれに伴う問題点等にも言及している。

表 1-4 環境上効果があることが示されている部門別政策、措置、手法

部門	環境上効果があることが示された政策 ^{a)} 、措置と手法	主要な制約および機会
エネルギー供給	化石燃料用助成金の削減 化石燃料への、課税または炭素課金	既得権者の抵抗により実施が困難となる可能性
	再生可能エネルギー技術に対する固定買取り制度 再生可能エネルギーに関する導入義務 生産者向け助成金	低排出技術用の市場創設が適切である可能性
運輸	義務的な燃費効率、バイオ燃料の混合およびCO ₂ 基準	車の一部車種のみを対象とするなら効果が限定される可能性
	車の購入、登録、利用、車用燃料への課税、道路通行料、駐車料金	高所得層では効果が落ちる可能性
	土地利用規則、インフラの計画によりモビリティのニーズに影響を及ぼす 魅力ある公共交通施設および非動力系の交通システムへの投資	交通システムを構築中の国に特に適する
建築	機器の基準とラベル表示 建築基準および認証 需要側管理プログラム 公共部門主導のプログラム(政府調達含む) エネルギーサービス企業(ESCO)に対するインセンティブ	定期的な基準の見直しの必要性 新規の建物に魅力的である。施行は困難となりうる 実効が得られるような規制が必要 政府調達によりエネルギー効率のよい製品の需要が広がる 成功要因: 第三者資本へのアクセス
産業	基準情報の提供 性能基準 助成金、税控除	技術の導入促進が適切である可能性。国際競争の観点では国内政策の安定が重要。
	排出権取引	割当メカニズムの予測可能性および安定した価格シグナルが投資には重要
	自主協定	成功する要因には次のものが含まれる: 明確な目標、ベースラインシナリオ、設計とレビューにおける第三者の参加、公式なモニタリングの提供、政府と産業の密接な協力
農業	土地管理の改善に対する資金面でのインセンティブと規制、 土壌炭素含有量保持、肥料と灌漑の効率的な利用	持続可能な開発および気候変動に対する脆弱性の低減との相乗効果を促進する可能性があり、それにより実施障壁を克服
林業/森林	森林の拡大、森林減少の削減、森林の保持と管理に向けた資金面でのインセンティブ(国内、国際)	制約には投資資本の不足、土地保有条件問題が含まれる。 貧困を緩和する可能性
	土地利用の規制と施行	
廃棄物管理	廃棄物および廃水の管理の改善に対する資金面でのインセンティブ	技術の普及を促進する可能性
	再生可能エネルギーへのインセンティブまたは導入義務	地域における低価格燃料の利用可能性
	廃棄物管理の規制	施行戦略のある国レベルで最も効果的に適用される

出典: IPCC 第4次評価報告書第3作業部会政策決定者向け要約 [1-15h]

(2) 水環境問題

水は生命にとって不可欠な物資である。地域の文化を育み、また、食糧生産をはじめ人間生活の基盤となる社会のあらゆる側面と絡んでいるため、水に関わる問題の解決は単に技術だけでは困難である。社会的インフラの整備、水を巡る制度改革、人々の意識改革等があいまって、はじめて現在・および将来の水問題への効果的な対応が可能になる。また、台風、津波などの自然災害は地下水の汲み上げすぎによる地番沈下等によって被害が拡大する傾向にあるなど、水に関連する災害は水の利用の仕方と密接に関連している。国際社会（国連等）は発展途上国の水質汚染に伴う健康被害、水関連災害を単なる災害ではなく、貧困問題、人権問題、および感染症等の世界的流行の防止等も絡む、極めて重要な世界的課題であると認識している [1-18]～[1-24]。2006年3月開催された第4回世界水フォーラムの閣僚宣言では以下のように述べられている。

- ・ 貧困と飢饉の撲滅、水に関する災害の縮小、衛生、農業と農村の発展、水力発電、食糧安全保障、環境の持続性の達成などあらゆる面で水が重要であることを再確認する。
- ・ 持続的な水および衛生の利用の増加ならびに統合的水資源管理をスムーズに実施するためには、様々な利害関係者の果たしている役割が重要であると認識する。
- ・ 水関連災害の予防、準備、リスク評価、地域社会の認識などへの取組を支援するための政策の重要性を認識する。

1) 水環境問題の現状

世界水フォーラム [1-22],[1-23] 世界水ビジョン [1-24]、国連開発計画の報告書 [1-21] によれば世界的に水不足、水に関する衛生問題、水関連災害等が深刻な状態になっており、国際社会が真剣に取り組むべき課題であるとの認識を示している。

i) 淡水（表流水、地下水）の使いすぎによる諸問題

人口の増加、農業生産の増加、工業等の発展などにより表流水、地下水の使用量が急増した結果、「水不足」、「河川流域の疲弊」、「帯水層の枯渇」、「湿地の破壊」などの現象が世界各地で発生しており、農業生産量の維持、生物多様性の保持等の観点からも深刻な問題になっている（図 1-2）。

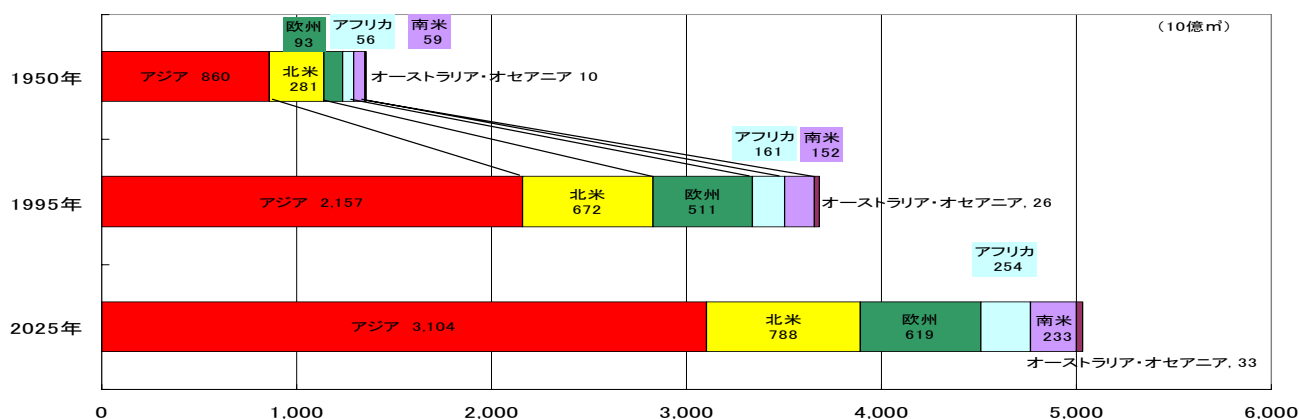


図 1-2 世界の水使用量の地域別将来見通し [1-18]

また、上流の取水に伴う国際河川の下流の水量の減少、国境を跨いだ帯水層からの水の汲みだし等により、関係各国の利害が対立し紛争が頻発している。

ii) 水質汚染に伴う問題

特に発展途上国を中心に都市への人口流入、工業、プランテーション等の発展に伴う未処理の排水の河川・湖沼等への垂れ流し、水の使いすぎ等による水量・水位低下に伴い河川・湖沼等の水質悪化・富栄養化が進行している。特に大都市部では廃棄物の河川、屋外への投棄等により、表流水・地下水とも汚染されており、上下水道施設の未整備と相まって飲料水が原因の感染症の流行等、住民の健康被害が極めて深刻な状況である。現在、世界中の約 10 億人の人々が安全な飲み水を得ることができず、また約 24 億人の人々が適切な衛生設備を持たない。もし、現状の衛生・下水道整備方策を続ければ、事態はさらに悪化し、25 年間に適切な衛生状態にない人口はさらに 20 億人増加する。

世界で発生する排水の 90% は不完全な処理または全く処理されないで排出されており、開発途上国における疾病の 80%、死亡原因の 25% は汚染された水に起因している。

iii) 水関連災害

アジア太平洋地域では水関連災害による 2001～2005 年の年間平均死者数は約 6 万人で、これは世界の水関連災害死者の 80% にもなる。地震や火山等による被災者数に大きな変化が見られないのに対し、洪水や暴風雨による被災者が増加傾向にある。これは貧しい農村部から都市部に流入した人々が洪水や津波・高潮災害を受けやすい低地や水辺に定住せざるを得ないという都市問題・貧困問題と密接に関連している。将来、降雨パターンが変化し、地域的に降水量が増加した場合、温暖化による海面上昇とあいまって、アジア地域での集中豪雨による被害の更なる拡大が懸念されている。

将来の水問題に関連して第 4 次評価報告書 [1-15a] は以下のように述べている。

- ・ 今世紀半ばまでに、年間河川流量と水の使用可能量は高緯度地域で増加し、中緯度の乾燥地帯の乾燥地帯では 10～30% 減少する。
- ・ 干ばつの影響を受ける地域が増える。世界的に、強い降雨の頻度が増す可能性が非常に高く、洪水リスクが高まる。
- ・ 今世紀中に氷河や積雪に蓄えられる水が減少し、主要な山岳地帯からの融解水の供給を受ける地域（世界人口の 6 分の 1 以上が居住）で水の利用可能量が減少する。

2) 水関連技術

生活分野、産業分野、農業分野、発電分野等で利用される水関連技術は多岐にわたるが、多くの技術が実用化・普及段階に到達している。先進国においては社会的インフラ等に組み込まれ、水力発電など再生可能エネルギーの供給、産業・民生面での環境改善、衛生環境の改善等に寄与している。水対策は社会的インフラ整備、上下水道など巨大システムの適切な運用管理など多様な政策手段を動員した総合的な対策であるが、地域ごとに地理的・社会的状況、財政状況、気象条件等が異なるため状況等に応じた様々な政策手段との組み合わせで地域に最適な技術の採用が求められる。民生分野、産

業分野、農業分野等で様々な技術が実用化されているが、膜技術等、現在の技術を更に改良するための研究テーマも多くある。水処理関係および総合水管理関係の主な技術を表 1-5 に示す。

表 1-5 分野別水・環境技術一覧

生活分野	主な技術	概要
上水	高度処理	・これまでの凝集沈殿・ろ過処理から病原菌対策として膜処理、発がん性物質・臭い対策としてオゾン処理・活性炭処理を導入
	節水	・利便性を維持しながら、トイレ、洗面所、台所等の水使用量を削減する技術
中水	廃水利用(ろ過、膜処理)	・上水と下水の中間という意味で、雑排水、厨房排水、汚水、公共下水処理水や雨水を再生利用 ・都市内に存在する貴重な水資源と位置づけ
下水	浄化槽	・し尿と併せて雑排水を処理し、下水道以外に放流するための設備・施設 ・下水道敷設が困難な途上国でもその役割に期待
	し尿処理施設	・回収されたし尿を集中処理する施設。窒素、リンの除去、およびし尿の色や臭気を除去した上で放流 ・資源・エネルギーの回収の視点から污泥再処理センターとして、し尿に加え食品廃棄物、ペット糞尿を受入れ、堆肥化・メタン発酵等を行う形態へ移行 ・浄化槽同様、下水道敷設が困難な途上国でもその役割に期待
	高度処理	・窒素、リン等の富栄養化の原因物質等を多量かつ確実に除去できる高度な処理方法。特に閉鎖性水系や水道水源地域では高度処理が急務 ・水の循環利用に伴う微量化学物質(含むホルモン)の蓄積も問題化
	下水污泥からエネルギー・物質回収	・下水污泥をバイオマス資源として着目し、バイオマスエネルギー利用技術の開発 ・リン回収技術の確立
産業分野	污泥発生抑制	・排水処理による污泥発生を抑制する技術開発(污泥の可溶性、発生量抑制、污泥含水率低減)が進展
	嫌気性消化処理	・発酵効率改善、バイオガス利用率改善等が進展 ・高濃度だけでなく低濃度排水からのエネルギー回収の取組も進展
農業分野	マイクロ灌漑	・標準水量より少ない水を灌漑する節水の方法で、灌漑効率が低い。点滴灌漑、マイクロスプリンクラー灌漑など
総合水管理	貯留・浸透技術	・雨水を貯留し有効活用を図る。また雨水を浸透させることにより災害防止、地下水涵養を図る
	多自然型川作り技術	・河川の護岸整備等で治水面での安全性を確保しながら、生物の生息・生育環境を出来る限り改変することなく改修
	河川浄化導水	・河川間の送水やトンネル漏出地下水の河川への送水により水質汚濁の進んだ寡占の水質改善および水量の確保
	都市・流域圏環境モニタリング・管理モデル	・生態系と都市の現状について自然環境基盤および社会環境基盤双方から観測・診断評価する技術開発 ・欧米とは全く異なる水文・地政学的条件や社会条件を持つアジア諸国では独自の知見が必要との認識

3) 水問題への対応

水に関わる問題は先進国、途上国を問わず存在する。水は循環型資源であるため、国内（地域）でいかに適切に水を循環（表流水と地下水の循環も含む）させるかという観点が重要である。世界水ビジョン（2000年3月）が提案している統合的水資源管理 [1-24] は技術的課題のみでなく、水資源管理制度の改革と水関連サービスの全費用負担を前提にした価格設定、地域での国際的協力（国際河川の管理等）の強化など水のガバナンスを重視した内容になっている。

また、食糧、工業製品の輸出入を通して各国は水の輸出入（仮想水³） [1-25] を行っており、水問題は地域、国境をまたぐ問題でもある。わが国の場合、食糧自給率はカロリーベースで41%であり、食糧（農作物、畜産物）の大半を米国、オーストラリアなどからの輸入に依存している。これらの地域では灌漑用水の汲み上げ過ぎによる帯水層の水位低下、土壌へ塩類の蓄積等の問題が生じているほか、IPCC第4次評価報告書によれば今後、地球温暖化に伴う降雨パターンの変更により影響を受けやすい地域となっている。地球温暖化に伴う降雨パターンの変動、世界的な食糧供給地域の帯水層の水位低下は日本への食糧供給の大きなリスク要因になっている。日本自体もまた地球温暖化の影響を受けて降雨パターンが変化することが予想されている。降雨パターン、気象条件により農業の形態、農産物は制約され、また食糧生産量も変動するため、これらの状況を踏まえた食料政策が求められる。

東京大学沖大幹教授が公表した「農産物」「畜産物」の仮想投入水フローは図1-3、図1-4の通りである。

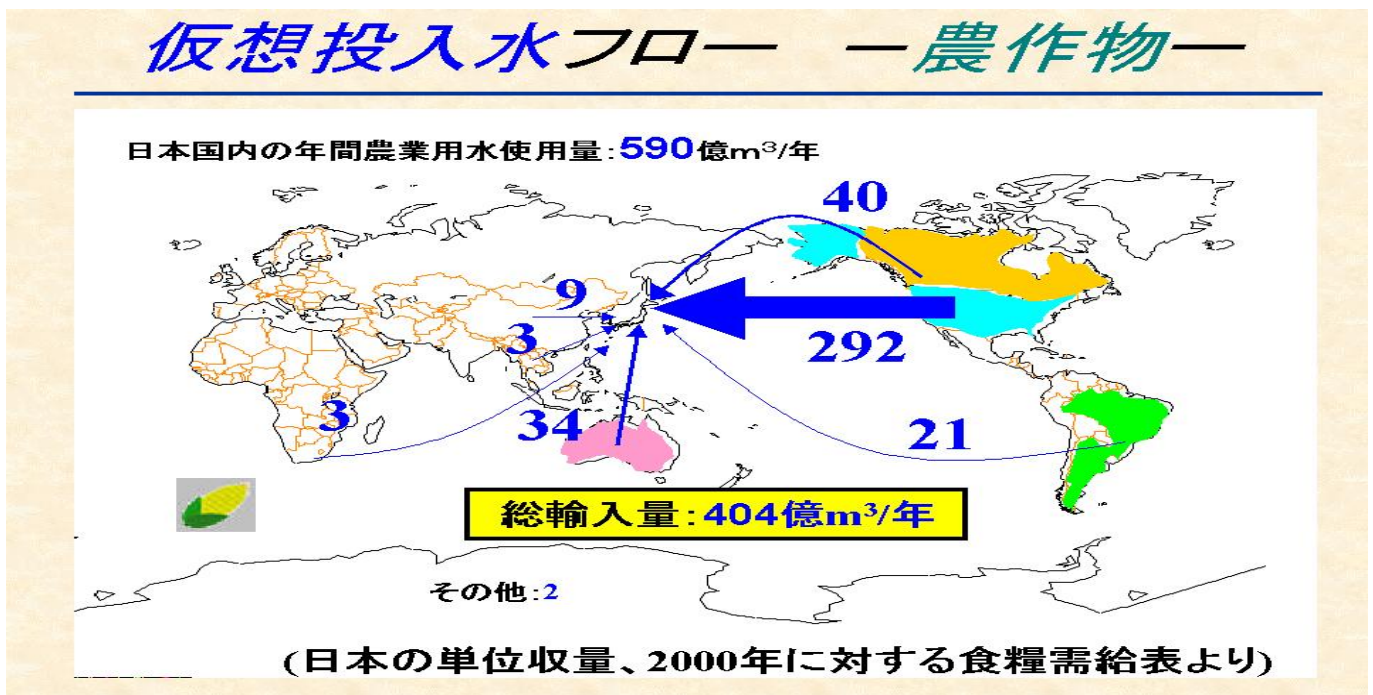


図1-3 仮想投入水フロー（農作物） [1-25]

³ 食料を輸入している国（消費国）において、もしその輸入食料を生産するとしたら、どの程度の水が必要かを推定したもの。

仮想投入水フロー —畜産物—

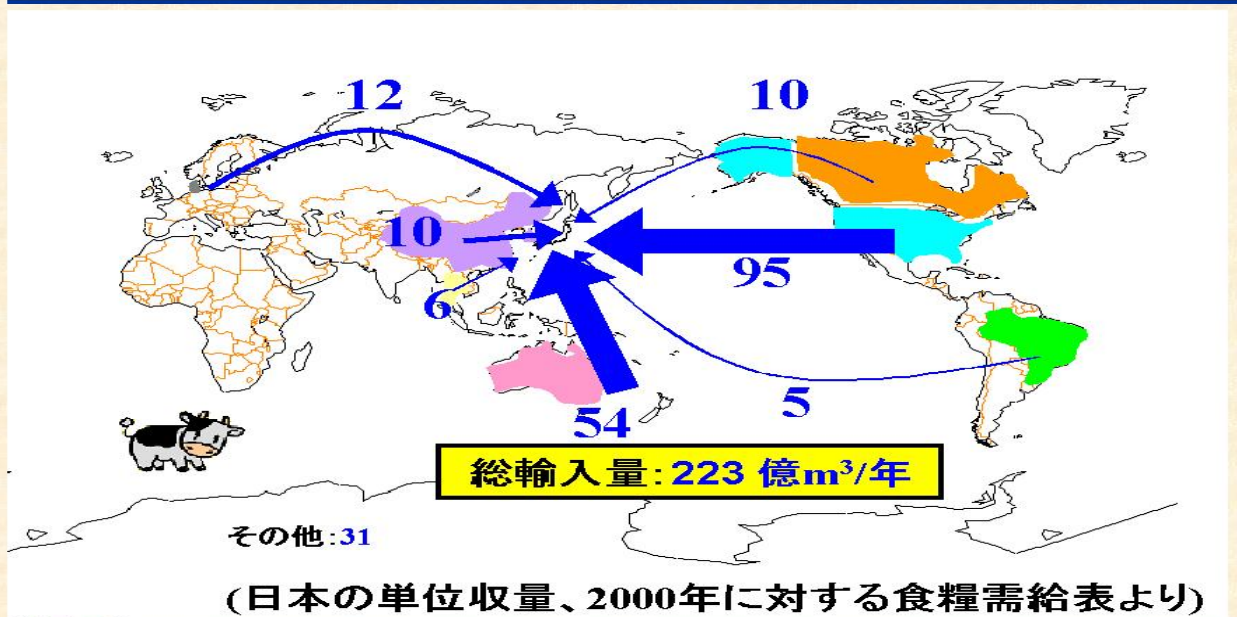


図 1-4 仮想水投入フロー（畜産物） [1-25]

世界水ビジョンの総合的水資源管理 [1-24] で示されているように水問題の解決のための対策は水に関する制度、システムの変更、農業生産方式の見直し、水関連技術の開発・普及等を多岐にわたる。また水は循環型資源であるため利害関係者が多く、関係者の合意形成を前提に解決策を検討する必要がある。発展途上国の水問題の捉え方、研究開発の方向性として以下のように考えられる。

○ 問題の捉え方

発展途上国の衛生環境の改善を重視

- ・メガシティ⁴の環境改善
- ・地域に固有の伝統的な廃水処理技術・システムを再確認し、状況に適合した既存技術を再生・利用する将来の気候変動の影響を重視した適応策を検討
- ・自然災害対策としてのインフラ整備等の促進

○ 研究開発の方向性

水の循環利用の拡大と水使用量の削減が重要であり「発展途上国の水環境（衛生環境）の改善」、「将来の気候変動の影響を重視した適応策の検討」が重要なテーマである。

- ・分散型、循環型で持続可能な水処理システムの構築、運用管理するために必要な技術を開発（MBR（Membrane Bioreactors）等の膜技術の開発等）
- ・地域の自然環境、資源（微生物資源、バイオマス資源を含む）を最大限利活用し、与えられ

⁴ 人口が1千万人以上の都市。特に発展途上国で増加しており、劣悪な都市環境が問題とされる。

た状況・自然条件の中で最適な技術を開発

- ・施設・システムの運用・管理を低コストで安定的に行うため、エネルギー・物質資源の消費量の少ない技術を開発。そのため、最先端技術から既存技術、地域に根ざした伝統的技術まで利用可能な技術を地域水処理システムの中に取り込む。
- ・将来の気候変動の影響を重視した適応策として「主要作物環境耐性・多収化技術」、「水害対策、森林管理」、「灌漑農業の効率化」、「節水型品種の開発」などの技術開発

(3) 森林破壊問題

現在、地球規模で伐採、農地への転用、大規模開発等により森林面積が減少している。森林および森林生態系の保全は生物多様性の維持、森林の CO₂ 吸収源としての機能維持、森林システムとしての炭素貯蔵機能の維持等の観点から非常に重要である。

1) 世界の森林の現状

国連食糧農業機関 (Food and Agriculture Organization, FAO) の “Global Forest Resource Assessment 2005” [1-26] によると 2005 年の世界の森林面積は 39 億 5 千万 ha であり、世界の陸地面積の 30% を占めている。中国における大規模な植林によりアジアでは森林面積が増加している。しかしながら、熱帯雨林等の伐採によりアフリカ、南米で森林面積が大幅に減少している。

2) 森林資源の炭素蓄積量

森林は巨大な炭素蓄積源である。森林による炭素蓄積量は約 2,830 億トン、枯れた木材の炭素蓄積量が 380 億トンと合わせて 3,210 億トンになる。また地表から 30cm までの土壌、および腐葉土の炭素蓄積量は 3,170 億トンであり、森林の炭素蓄積量は 6,380 億トン (2005 年) と、大気中の炭素の量を超えている (図 1-5)。

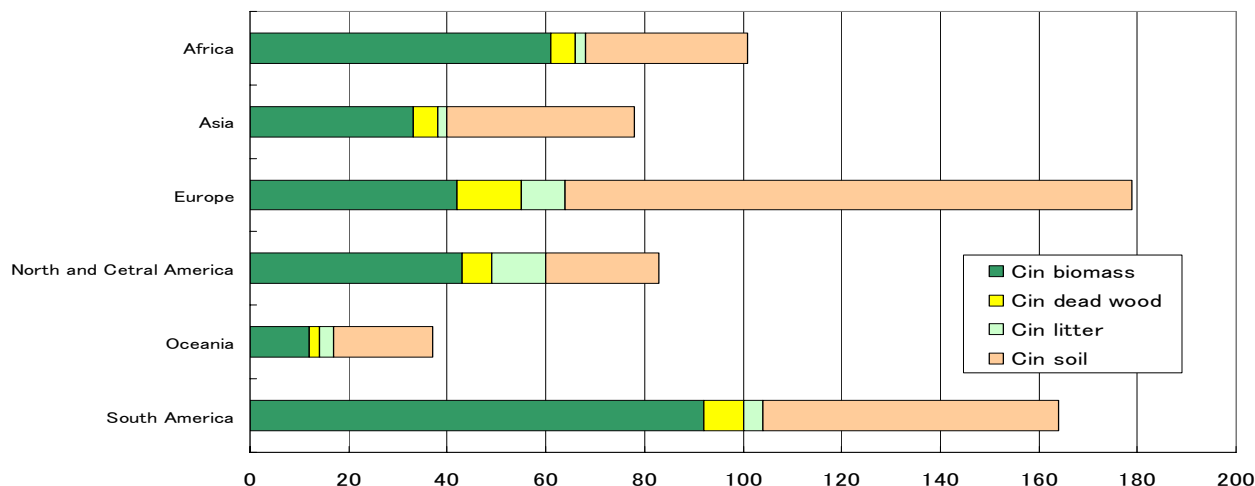


図 1-5 2005 年における地域別種別別炭素蓄積量 [1-26]

森林面積の減少に伴って森林の炭素蓄積量は減少しているが、植林のみでなく土壌や腐葉土まで含めた総合的な森林の保全が必要とされている。違法伐採の問題は深刻であるが、その背景に発展途上国の爆発的な人口増加に伴う食糧増産、薪炭材利用の増加、非伝統的焼畑農法の増大、パーム・オイルなどのプランテーションの増加がある [1-27]。森林伐採以外にも、過放牧、過耕起等によって、保護機能のあった表土を剥ぎ取った結果、土壌が急速に失われ、農業が困難な状況になった地域が増大している。農地土壌と炭素貯留の関係についても関心が高まっている。農地土壌管理に関して農林水産省は「土地への炭素投入の増加」、「不耕起栽培や省耕起栽培による土壌有機物の分解抑制と土壌からの炭素排出の抑制」、「土壌改良資材の施用促進を通じた土壌への炭素貯留の増加」、「多毛作の促進（緑肥等の有機物の投入増加）」による炭素の投入の増加 [1-28] を挙げ、炭素吸収源としての農地管理を選択したいとの意向も述べている。

3) 森林破壊問題への対応

このような森林面積の減少に対して国際社会は従来から深刻な懸念を示している。1992年、リオデジャネイロで開催された「環境と開発に関する国際連合会議」（地球サミット）では「アジェンダ 21」とともに「持続可能な森林経営」の理念を示す「森林原則声明」 [1-29] が採択され、持続可能な森林経営を推進するための「基準・指標」を作成することが決定された。

しかしながら、森林資源を活用して経済を発展させたい国々と地球環境を守る観点から伐採を抑制したい先進国の間では考え方の違いが存在し、それが対策の徹底の妨げになっている面もある。持続可能な森林経営に関してはモントリオール・プロセスの7基準54指標 [1-30] が提案されている。

違法伐採対策について日本政府は「違法に伐採された木材は使用しない」という基本的考え方に基き、違法に伐採された木材を排除するための技術開発や情報交換など、二国間協力、多国間協力を通じて積極的に取り組んでいる。

パームオイルは利用価値の高い植物油として様々な用途で利用されているが、その需要増加を背景にプランテーション開発のための熱帯雨林の伐採等が大きな問題になっている。そのような流れの中で、持続可能なパームオイル生産を目指して「持続可能なパームオイルのためのラウンドテーブル」（Roundtable on Sustainable Palm Oil, RSPO） [1-27] という国際的な非営利団体が2004年に設立された。RSPOは「パームオイルの生産と使用は経済的、社会的、環境的に持続可能でなければならない」と規定している。

森林はCO₂の重要な吸収源・貯蔵庫、土砂流出の防止、水源のかん養や循環型資源である木材の供給源、遺伝資源の宝庫として人類の生存基盤にとって極めて重要であり、計画的な植林・伐採による再生可能な森林バイオマス資源の有効活用が求められている。

森林バイオマスをより一層有効活用ために、以下の技術開発・評価が重要である。

- ・木質バイオマス資源を利用したエタノール生産技術の研究開発
- ・木質バイオマス資源を利用したバイオマテリアルの生産技術の研究開発
- ・木質バイオマス資源の用途拡大のための形成・加工技術等の研究開発
- ・LCA等の評価技術を活用した総合的なバイオマス利用計画の策定

- ・農業土壌、森林土壌の炭素貯留機能を向上させる技術の研究開発
- ・農業用地、森林の土壌劣化を抑制する技術、農法の研究開発

(4) 砂漠化

1996年に発効した砂漠化対処条約（United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD）[1-31]での砂漠化の定義は「乾燥、半乾燥、乾燥半湿潤地域における様々な要素（気候変動および人間の活動を含む）に起因する土地荒廃」となっている。「土地荒廃」とは「土地生産力の長期的、不可逆的な減少、土壌浸食、塩類化、自然植生の消失」を意味している。

砂漠化は乾燥地、半乾燥地、乾性半湿潤地を中心に起きており、サハラ砂漠の南側、中東諸国、中国の西北部などで砂漠化が進行しているが、特に人口増加が著しいアフリカが最も深刻な状況にある。

砂漠化の影響を受けている土地面積は全陸地の約4分の1と言われ、砂漠化の影響を受けている人口は世界人口の約6分の1にのぼり、世界的に深刻な課題である。

砂漠化の原因は自然的要因と人為的要因に分けられるが現在の砂漠化の進行の原因については人為的要因が大きいと考えられている。自然的要因としては地球規模での気候変動、長期の干ばつ、降水量の減少と乾燥化がある。人為的要因は人間の諸活動が原因で起こる砂漠化で過放牧、過伐採、過開墾、灌漑農業による塩類集積が主要な原因である。砂漠化は生物多様性の喪失、貧困の加速をもたらし、また、砂漠化の進展による悪循環などにより、気候変動が加速化されると指摘されている。

(5) 環境汚染問題

地球規模の環境問題として「地球温暖化」、「オゾン層の破壊」、「酸性雨」、「熱帯雨林の減少」、「砂漠化」、「野生生物の減少」、「海洋汚染」、「有害廃棄物の越境移動」、「開発途上国の公害問題」の9つの環境問題が取り上げられている。ここでは環境汚染にかかわる問題として「酸性雨」、「海洋汚染」、「有害廃棄物の越境移動」、「開発途上国の公害問題」について記述する。

1) 酸性雨

酸性雨とは化石燃料などの燃焼で生じる硫黄酸化物や窒素酸化物などが大気中で反応して生じる強酸性の雨のことを言う。酸性雨の特色としては偏西風などにより原因物質が発生源となる地域から数千キロも離れた地域に運ばれることがあげられる。酸性雨による影響でヨーロッパ、北米の等の先進工業国では森林・湖沼等の生態系が甚大な被害を受けている。また、建築物や石造などの歴史的資産への悪影響、地下水の酸性化の進展なども懸念されている。東アジア地域においても近年の経済成長等に伴い酸性雨原因物質の排出量が増加しており、近い将来、酸性雨による影響の深刻化が懸念されている。我が国は日本のイニシアチブにより2001年から始まった「東アジア酸性雨モニタリングネットワーク」の活動を積極的に支え、情報収集に努めている。また、日本では酸性雨による影響の早期把握、酸性雨原因物質の長距離輸送や長期トレンドの把握、将来の酸性雨の影響の予測を目的にして湖沼、土壌、植生モニタリングを実施している。世界最大の石炭消費国である中国から飛来する黄砂も中国の工業地帯の上空を通過する際、硫黄酸化物等大気汚染物質を吸着し、それを韓国、日本に運んできており我が国にとって深刻な課題である。

2) 海洋汚染

海洋汚染とは海域や海水が人間の活動によって排出された物質（廃棄物）によって汚染されることを言い、1994年に発効した国連海洋法条約 [1-32] では海洋汚染の原因を以下のように分類している。

- ・ 陸からの汚染（河川、パイプラインなどを通して川に流れ込む工場や家庭からの汚染物によるもの）
- ・ 海底資源探査や沿岸域の開発などの活動による生態系の破壊、汚染物質の海への流入など
- ・ 投棄による汚染（陸上で発生する廃棄物を海洋に投棄することによる汚染）
- ・ 船舶からの汚染（船舶の運航に伴って生じる油、有害液体物質などの排出による汚染）
- ・ 大気を通じての汚染（大気汚染物質が雨などととも海洋に達して生じる汚染など）

さらに、タンカー事故や戦争（湾岸戦争時の石油流出等）も大きな海洋汚染の原因と考えられる。

人口増加に伴い栄養塩、有機物による海洋汚染が進行しており、ほとんど全ての国際主要河川の河口部で富栄養化による赤潮の発生などが頻繁に起きている。また環境中に排出された特定有害物質（有機水銀、PCB等）が食物連鎖を通して濃縮され、連鎖の頂点にいる魚を食べることにより人間に健康被害を及ぼすことが懸念されている。また、漁獲資源の乱獲による海洋生態系の変化による漁獲量の減少も懸念材料である。我が国の海洋汚染の状況は東京湾、伊勢湾、大阪湾等における科学物質の分布状況は重金属類については湾奥部で濃度が高く、有機塩素化合物については湾奥部の海底において高濃度であることが確認されている。

海洋汚染に対する対策は汚染物質を垂れ流さないことであり、国際条約で「陸上で発生した廃棄物の海洋投棄および洋上焼却」「船舶からの油や有害液体物質、廃棄物の排出」などが規制され、各国に対して「油による汚染に係わる準備、対応および協力」することを求めている。

3) 有害廃棄物の越境移動

人間の経済活動の活発化に伴い廃棄物発生量の増大・質的な多様化が生じている。発生国内での処理が難しくなるにつれて処理・処分を求めて廃棄物が越境移動する事例が増えてきている。有害廃棄物の越境移動は1980年代前半にはヨーロッパ内の移動に留まっていたが、1980年代後半になって移動範囲がアフリカや南米の国々に急速に広がり始めた。このような有害廃棄物の中に有害性が極めて高く、また、受入国で適正な処分がなされず、受入国の環境汚染につながる例が多発したため、それを規制する目的で1989年、「有害廃棄物の国境を越える移動およびその処分の規制に関するバーゼル条約」 [1-33] が採択された。

バーゼル条約の主旨は有害廃棄物の越境移動を適正に管理することにより、国境を越えての環境汚染を未然に防ぐことである。条約では有害廃棄物は発生国において処分することが原則であり、やむを得ず移動する場合は条約の規則にしたがって適正に処分することを求めている。有害廃棄物の越境移動が発生する背景には廃棄物の発生国における処分容量の減少、処分コストの上昇、環境規制の強化等があるが、実際の越境移動は廃棄物の有害性が極めて高い場合や、移動先において適切な処理・処分がなされない場合が多く、地球規模の環境問題になっている。

2008年度の我が国の「特定有害廃棄物等の輸出入等の規制に関する法律（バーゼル法）」に基づく有害廃棄物の輸出入の状況を見ると、日本からの特定有害廃棄物等の輸出力は約5万4千トン、輸入

量は約 4 千トンであった。輸出が行われた特定有害廃棄物等は鉛スクラップ（鉛蓄電池）、ハンダのくず、鉛灰、ニッケルスラッジ等で金属回収を目的にしたものである。また同法に基づく輸入は銀スラッジ、電子部品スクラップ、基板くず、銅スラッジ、ニカド電池スクラップ等でいずれも金属回収など再生利用を目的にしたものである。

4) 発展途上国の公害問題

発展途上国では、工業化、都市化の進展に伴い、大気汚染、水質汚染、土壌汚染等の公害問題が深刻化している。このような問題が起こる背景には、急速な開発や人口増加、人口の大都市への集中等から都市基盤の整備や公害防止施設・制度等の整備が追いつかない現状がある。発展途上国では重油や石炭の燃焼に伴う硫黄酸化物や煤塵による汚染がひどくなっている。またいくつかの大都市では自動車による浮遊粒子状物質や一酸化炭素などの大気汚染が深刻な状況になっている。発展途上国ではこのような状況に対して都市基盤（上下水道、交通網、ごみ処理施設）の整備、環境保全対策、公害防止対策等を行う必要があるが、資金、技術、人材、経験などが不足しており途上国のみでの対応には限界がある。先進国は工業化に伴う深刻な公害問題を経験しており、それを公害防止技術、環境規制等により解決してきた経験がある。今後、先進国は発展途上国に対して、資金、先進的な公害防止技術、環境規制等の経験を発展途上国の実情も勘案しつつ可能な形で移転することが求められている。

高度成長の時代に深刻な公害を経験し、それを克服してきた我が国は「課題先進国」として蓄積した経験・技術・制度を発展途上国に移転することによりこれら環境問題の解決に貢献することが求められている。

1. 3 エネルギー問題

「エネルギー・資源問題」、「人口増加」、「生物多様性の喪失」等は地球温暖化とも密接に関連しており極めて重要な問題である。2050 年までに温室効果ガスの排出量を 50% 削減する目標を掲げたラクイアサミット宣言とは反対に、世界のエネルギー消費量は経済成長とともに増加を続けており、EIA の “International Energy Outlook 2009” [1-2] の 2030 年のエネルギー需要予測では 1990 年比でほぼ倍増している。しかも増分需要の大半は石炭を中心とする化石燃料の消費量の増加で賄われている。地球温暖化防止の観点からは、CO₂ の排出量の大幅削減が求められているが、今後も経済成長が続くと予想されるなか、温室効果ガスの排出量を大幅に削減して低炭素社会を実現するためには、GDP 当たりのエネルギー消費原単位の大幅削減が必要であり、エネルギー利用効率の大幅向上、経済のグリーン化などが必要になる。再生可能エネルギー、原子力発電を大幅に増加させ化石燃料に置き換えることができれば温室効果ガスの大幅削減につながるが、EIA の想定では原子力、再生可能エネルギー源からのエネルギー供給の大幅な増加は見込まれていない。革新的なエネルギー技術の開発、人間のあらゆる側面での省資源・省エネルギー対策が求められる。

(1) エネルギー資源の賦存量

世界のエネルギー資源の賦存量について “BP Statistical Review of World Energy 2009” [1-34] をもとに概観する。

1) 世界の石油と天然ガスの埋蔵量

2008 年末の世界の石油埋蔵量は 1 兆 2580 億バレル、これに対して天然ガスの埋蔵量は 185 兆 m^3 (石油換算:1 兆 1,638 億バレル)であり、石油と天然ガスの合計埋蔵量は 2 兆 4,218 億バレルになる。地域別の埋蔵量は表 1-6 の通りであるが中東が世界全体は約 5 割を占めるなど資源が偏在している。

表 1-6 石油・天然ガス埋蔵量の地域別分布

(単位：億バレル)

地域	埋蔵量	比率 (%)
中東	12,316	50.9
欧州・ユーラシア	5,377	22.2
アフリカ	2,177	9.0
中南米	1,692	7.0
アジア・太平洋	1,388	5.7
北米	1,267	5.2
計	24,218	100.0

出典：BP Statistical Review of World Energy 2009 [1-34]

中東は石油埋蔵量が世界全体の 6 割 (7,541 億バレル) を占めているが、天然ガスの埋蔵量は世界全体の 4 割 (76 兆 m^3 、石油換算 3,956 億バレル) である。これに対して欧州・ユーラシアの場合、石油と天然ガスの埋蔵量はそれぞれ 1,422 億バレル (世界シェア 11%)、63 兆 m^3 (石油換算 3,956 億バレル、世界シェア 34%) である。表 1-7 は国別の石油・天然ガスの埋蔵量を示している。

表 1-7 石油・天然ガスの国別埋蔵量 (上位 10 カ国)

(単位：億バレル)

国名	石油	天然ガス	合計	比率 (%)
ロシア	790	2,724	3,514	14.5
イラン	1,376	1,862	3,239	13.4
サウジアラビア	2,641	476	3,117	12.9
カタール	273	1,602	1,875	7.7
UAE	978	405	1,383	5.7
イラク	1,150	199	1,349	5.6
ベネズエラ	994	304	1,298	5.4
クウェイト	1,015	112	1,127	4.7
米国	305	423	728	3.0
ナイジェリア	362	328	690	2.9

出典：BP Statistical Review of World Energy 2009 [1-34]

2) 世界の石油と天然ガスの可採年数の推移

表 1-8 は世界の原油可採年数を示している。2008 年末の石油の可採年数は 2007 年度で 41.6 年であり、1990 年以降、可採年数はほとんど変化していない。

表 1-8 世界の原油可採年数の推移

(単位：10 億バレル)

年	年末埋蔵量 (R)	年間生産量 (P)	R/P (年)
1985	771	21.0	36.8
1990	1,003	23.9	42.0
1995	1,029	24.9	41.4
2000	1,104	27.3	40.4
2005	1,220	29.7	41.1
2006	1,240	29.8	41.6
2007	1,238	29.8	41.6

出典：BP Statistical Review of World Energy 2009 [1-34]

図 1-6 は世界の天然ガスの可採年数を示している。2008 年末の天然ガスの可採年数は約 60 年で原油の可採年数より長い。

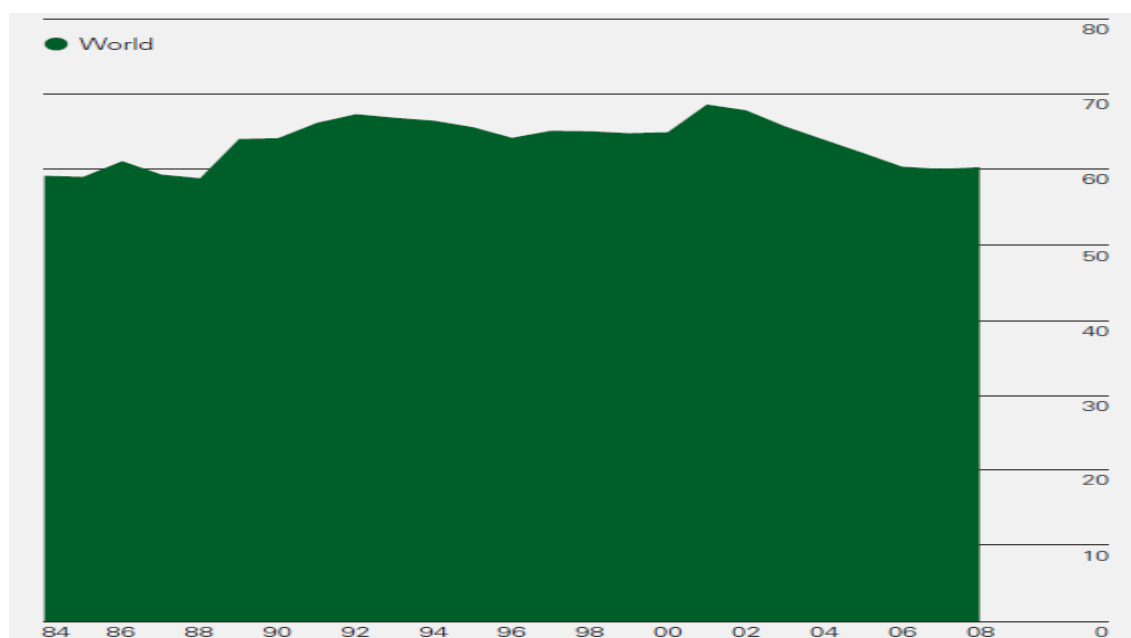


図 1-6 世界の天然ガスの可採年数

出典：BP Statistical Review of World Energy 2009 [1-34]

3) 世界の石炭の埋蔵量

表 1-9 の通り、石油の埋蔵量が中東、天然ガスの埋蔵量がロシアや中東に偏在しているのに比較すると、石炭の埋蔵量は世界全体に広く分布していると言える。

表 1-9 世界の石炭埋蔵量

(単位：百万トン)

地域	埋蔵量	比率 (%)
中東	1,386	0.2
欧州・ユーラシア	272,246	33.0
アフリカ	32,013	3.9
中南米	15,006	1.8
アジア・太平洋	259,253	31.3
北米	246,097	29.8
計	826,001	100.0

出典：BP Statistical Review of World Energy 2009 [1-34]

4) 世界の石炭の可採年数

表 1-10 の通り 2008 年末の世界の石炭可採年数は 122 年である。世界の石炭の主要生産国は中国、米国、インド、豪州、ロシアなどであるが生産量から見ると中国の生産量が極めて大きい。そのため中国の石炭の可採埋蔵量は米国、ロシアについて世界第 3 位であるが可採年数は 45 年と低くなっている。

表 1-10 世界の石炭生産量、可採埋蔵量および可採年数

(単位：百万トン)

	可採埋蔵量 (R)	石炭生産量 (P)						R/P (年)
		1990年	1995年	2000年	2005年	2006年	2007年	
中国	114,500	1,080	1,361	1,299	2,205	2,373	2,537	45
米国	242,721	934	937	974	1,027	1,054	1,039	234
インド	56,498	223	289	335	428	449	478	118
豪州	76,600	210	245	311	379	385	394	194
ロシア	157,010	395	263	258	298	310	314	500
南アフリカ	48,000	175	206	224	244	257	269	178
インドネシア	4,328	11	42	77	153	181	217	25
ドイツ	6,708	427	246	208	203	197	202	33
ポーランド	7,502	215	201	163	160	156	146	51
ベトナム	150	5	7	12	33	39	41	4
カナダ	6,578	68	75	69	68	66	69	95
その他	141,103	1,617	1,168	1,047	1,062	1,072	1,079	131
合計	847,488	4,719	4,593	4,606	5,896	6,187	6,396	133

出典：BP Statistical Review of World Energy June 2009 [1-34]

我が国の石炭埋蔵量は 2008 年末で 3 億 5,500 万トンあるが、生産量が少ないため、可採年数は 289 年である。日本の 2008 年の石炭消費量は石油換算で 129 百万トンであり、石炭資源のほとんどを海外から輸入している。

(2) 将来のエネルギー需給見通し

2030 年までのエネルギー消費量の見通しを見ると OECD 諸国では伸び率が低く、非 OECD 諸国で高くなっている。これは先進地域では経済成長率、人口増加率とも非 OECD 諸国に比べて低くとどまっていること、産業構造が変化したこと、エネルギー消費機器の効率改善等による省エネルギーが進んだことによる。以下、EIA の“International Energy Outlook 2009” [1-2] から 2030 年までのエネルギー需要予測を概観する。世界のエネルギー消費量は 2006 年の 472 Q Btu から 2030 年に 678 QBtu と 44% 増加している。最近の世界経済の停滞によってここ 1～2 年のエネルギー消費量の伸びは停滞すると予想されるが、その後は順調な増加に転じるものと考えられる (図 1-7)。

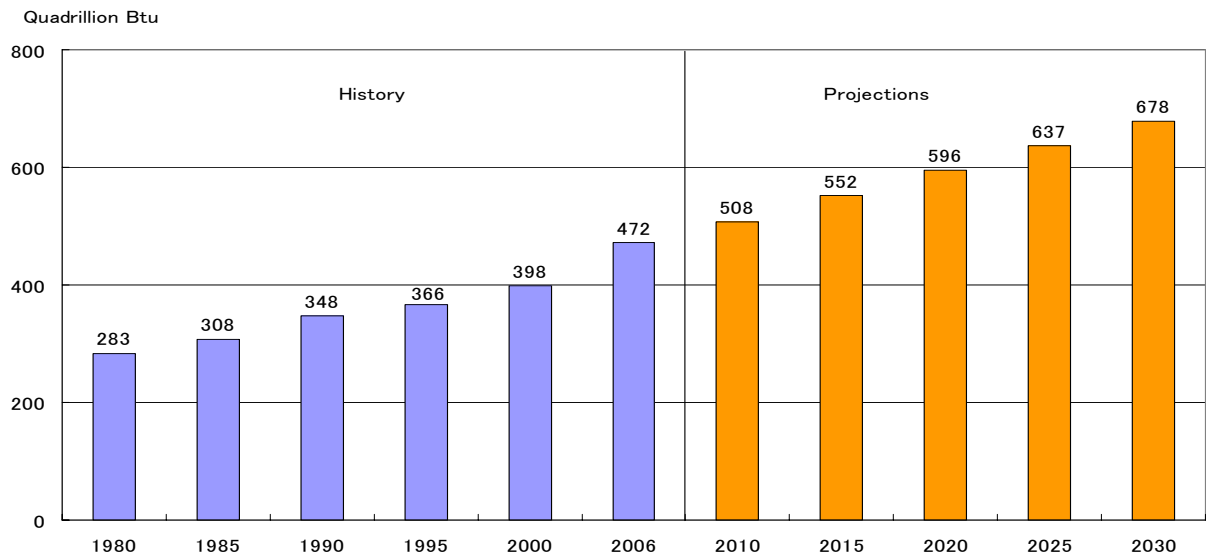


図 1-7 現在までの世界のエネルギー消費量と将来の消費予測量 [1-2]

OECD 諸国と非 OECD 諸国のエネルギー消費量の伸び率に差があるため、図 1-8 が示すように、2006 年を境に非 OECD 諸国の消費量が OECD 諸国を上回り、その差が 2030 年にかけて拡大していく。2006 年度では OECD 諸国の消費量は世界全体の 51% を占めていたが 2030 年にはそれが 41% まで低下している。2030 年まで OECD 諸国の消費量の伸び率は平均で 0.6% であり、それに対して非 OECD 諸国の伸び率は 2.3% と予想されている。

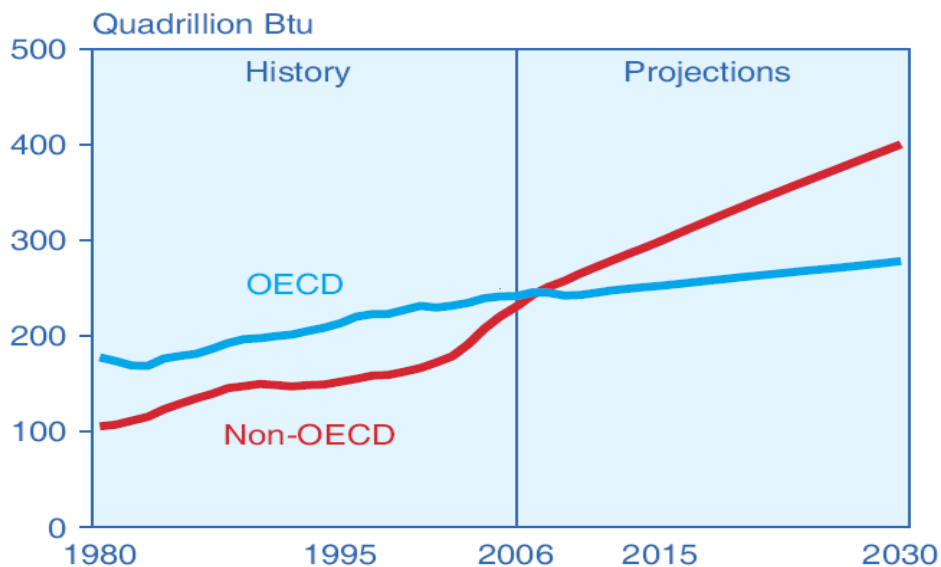


図 1-8 OECD 加盟国と非加盟国のエネルギー消費量と将来の予測消費量 [1-2]

図 1-9 で示すように、中国とインドは非 OECD 諸国の中で最も経済成長率が高く、今後もエネルギー消費が大幅に増加することが予想されている。1990 年には両国のエネルギー消費量は世界全体の 10% であったが、2006 年には 19%、そして 2030 年には 28% になると予想される。それに対して米国のエネルギー消費量の全体に対する比率は 2006 年度の 21% から 2030 年には 17% へ減少している。

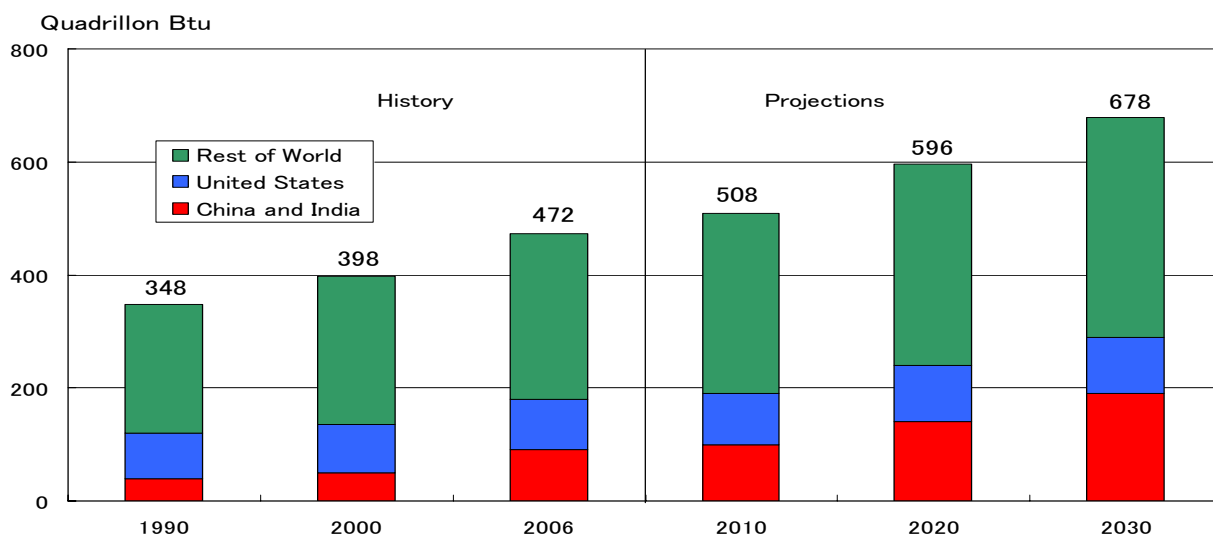


図 1-9 地域別エネルギー消費量の見通し [1-2]

非 OECD 諸国の地域別エネルギー消費（図 1-10）を見るとアジア地域で 2006 年から 2030 年にかけて年平均の伸び率が 4% と最も高い成長を示している。非 OECD ヨーロッパとユーラシアではソビエト時代の非効率的な設備の更新による効率向上と人口減少により 2006 年から 2030 年にかけて 25% 増加に留まっているが、それ以外の地域については 2006 年から 2030 年にかけて 50%~60% の伸び率を示している。

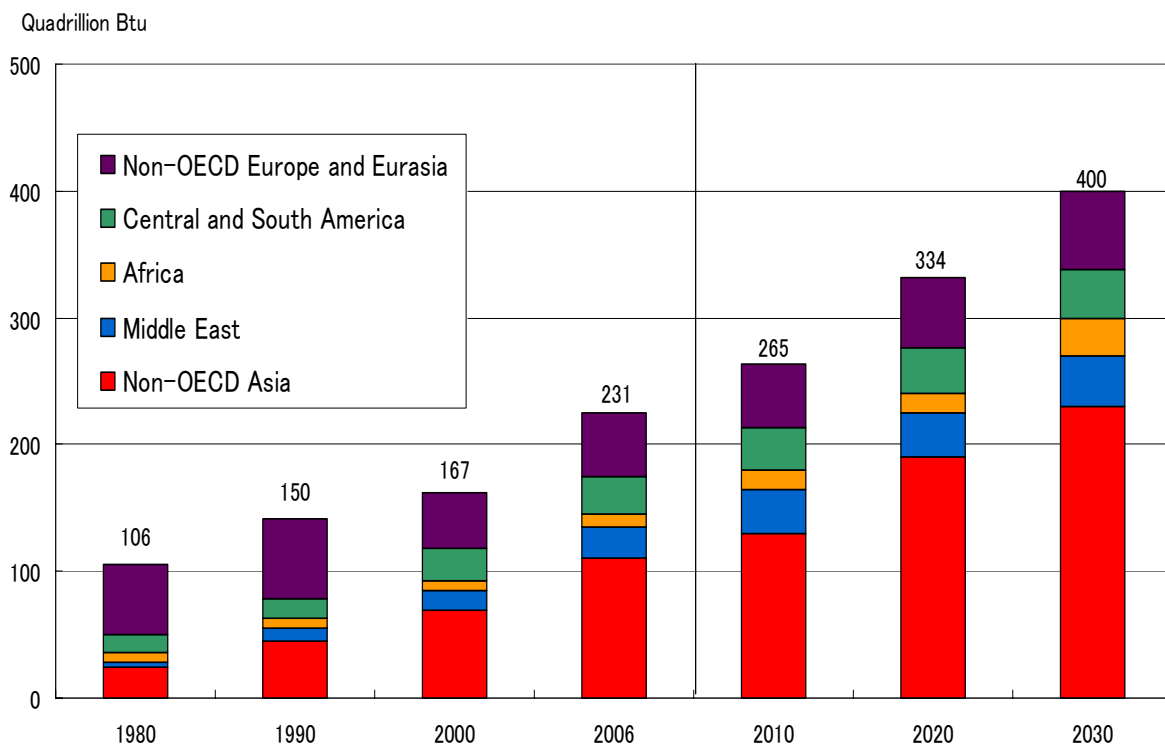


図 1-10 非 OECD 諸国の地域別エネルギー消費見通し [1-2]

2030 年までのほとんどの期間、石油価格が比較的高めに推移するという前提を置いて予測すると石油系の燃料の消費量の平均伸び率は 2006 年から 2030 年にかけて 0.9% である。この期間に世界的に民生部門、および電力部門での石油系燃料の使用量が減少する見通しである。多くの国々では再生可能エネルギーの供給量を増加させる政策を取るため、再生可能エネルギーのその期間の伸び率は 3% と予想される。そのため液体燃料の消費量に占める比率は 2006 年の 36% から 2030 年には 32% に低下する見通しである。しかしながらそれでも石油、石炭、天然ガスといった化石燃料の割合が高く、増加したとはいえ再生可能エネルギーの 2030 年に占める割合は依然低い (図 1-11)。

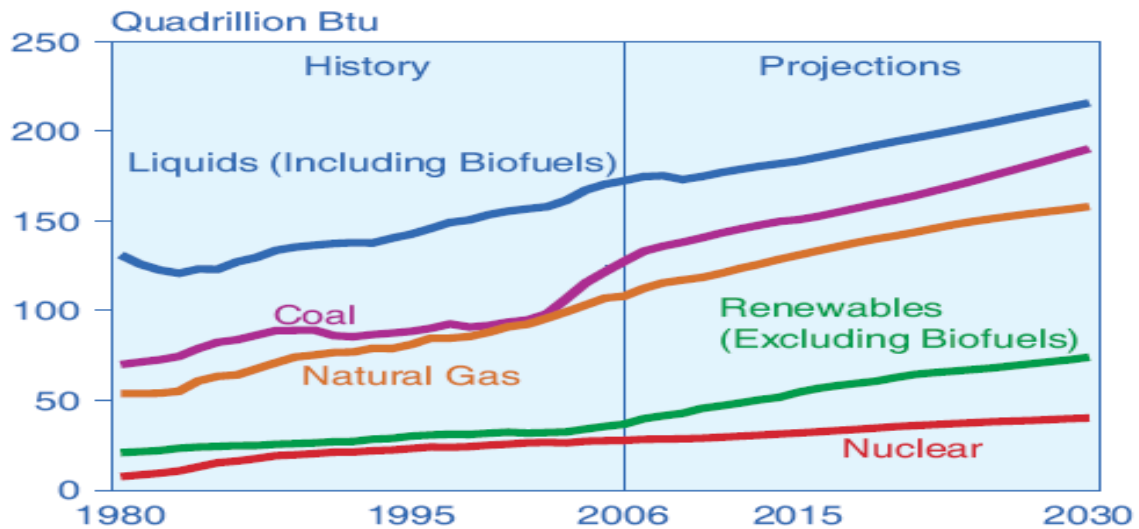


図 1-11 エネルギー消費量予測の燃料種別内訳 [1-2]

世界の発電電力量は 2006 年の 18 PWh から 2030 年には 31.8 PWh⁵ と 77% 増加することが予想される。特に非 OECD 諸国のこの期間の発電電力量の平均伸び率は 3.5% であり、これはこれら諸国の生活水準の向上、社会的なインフラ整備の進展等を反映している。それに対して OECD 諸国のこの期間の発電電力量の平均伸び率は 1.2% と予想されている。現状では石炭および天然ガスによる発電電力量の全体に占める割合は 60% であるが、2030 年の時点でこの比率は 64% に上昇する見通しである。非 OECD 諸国は石炭資源が豊富で、かつ石油は天然ガスに比べて安価であるため、発電燃料として石炭が最も経済的である。原子力発電も様々な問題があり、新規施設の建設が順調に進むとは見込まれていない (図 1-12)。

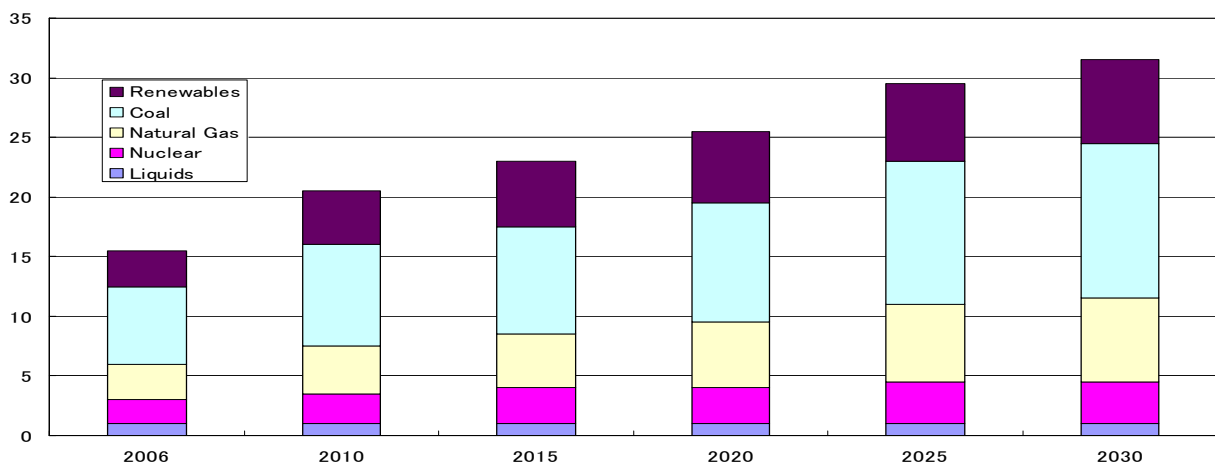


図 1-12 燃料種別別発電電力量予測 [1-2]

⁵ 10¹⁵ Wh。

再生可能エネルギーは2006年から2030年にかけて年平均伸び率2.9%と予想される。水力および風力発電も大幅な増加が期待され、2006年から2030年にかけて増加する3.3 PWhのうち、水力が1.8 PWh、風力が1.1 PWhである。水力発電以外はコスト的に2030年までは化石燃料と競争できないので、政府の政策および誘導策の後押しが必要とされる（図1-13）。

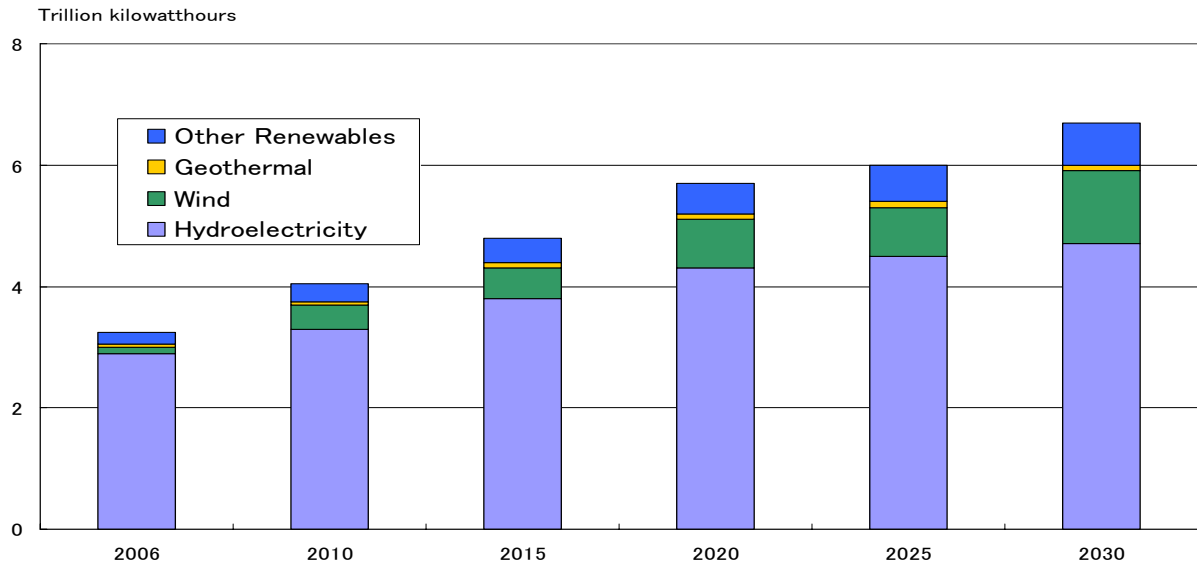


図1-13 再生可能エネルギーによる電力供給量予測 [1-2]

EIAの予測でもエネルギー需要は発展途上国を中心に増加傾向にある。また2030年に向けて一次エネルギー供給量の大部分は石炭を中心とする化石燃料である。原子力発電は残存ウラン資源の問題、使用済み核廃棄物の処理の問題等様々な問題を抱えている。水力発電はIPCC第4次報告書で指摘しているような気候変動、地域によって将来の降水パターンが変化したときに、予想通りの発電電力量が確保できるか見極めるのは困難であるなど問題点は多い。

1.4 資源問題

鉱物資源問題には資源採取に伴う環境破壊の問題と鉱物資源の需要増による資源価格の高騰、需給関係の逼迫がある。鉱業は自然環境に手を加えて鉱山開発や操業を行うことから自然破壊や環境汚染を起こして環境や社会に負荷を与えやすい性格を有しており、過去にも大規模な環境汚染を起こした例がある。我が国の持続的発展にとって鉱物資源の安定確保は必須の条件である。しかしながら新興国の急速な工業化の進展等により鉱物資源に対する需要は増加の一途をたどっており資源価格も急騰している。このような状況に直面して各国とも資源確保に走っている。資源ナショナリズムの再興から資源産出国では外国企業の参入制限や鉱業に対する課税強化、国内への利益還元や内需を優先する政策を採用する国も増えており世界の資源の供給構造は大きな変革期を迎えている。資源メジャーの寡占化も進行している。今後とも世界的に膨大な量の資源・素材が開発・消費されることにより、今後採取される鉱物資源の低品位化および開発条件の悪化は避けられない。開発・生産時の環境制約も

持続可能な開発の観点から強化される見通しである。この様な我が国の資源確保にとり危機的な状況に対応して公表された日本学術会議の「鉱物資源の安定確保に関する課題と我が国が取り組むべき総合的対策」(2008年7月)[1-35]は「鉱物資源の安定供給に必要な体制」、「金属生産の技術開発と環境対策の推進」、「資源確保を支援する研究体制と人材育成」の必要性について提言している。技術開発については「採掘条件の悪化」、「環境負荷の最小化」、「リサイクルの促進」の観点からの技術開発の必要性について強調している。

(1) 鉱物資源の賦存量

2003年から続く資源価格の高騰によって様々な産業部門で資源の供給不安が高まっているが、この要因として中国の需要の急増がある。2007年の中国の消費量は銅で世界の27%、亜鉛は世界の32%、ニッケルは世界の25%とアメリカを超えて圧倒的なシェアを占めている。また中国は数多くのレアメタルを産出する資源生産国である。鉱物資源は地理的に偏在しており、中でもレアメタルは偏在が著しい。中でも白金族金属(南アフリカ)、ニオブ(ブラジル)、タンタル(オーストラリア)などは90%以上の資源が一国に集中している(図1-14)。

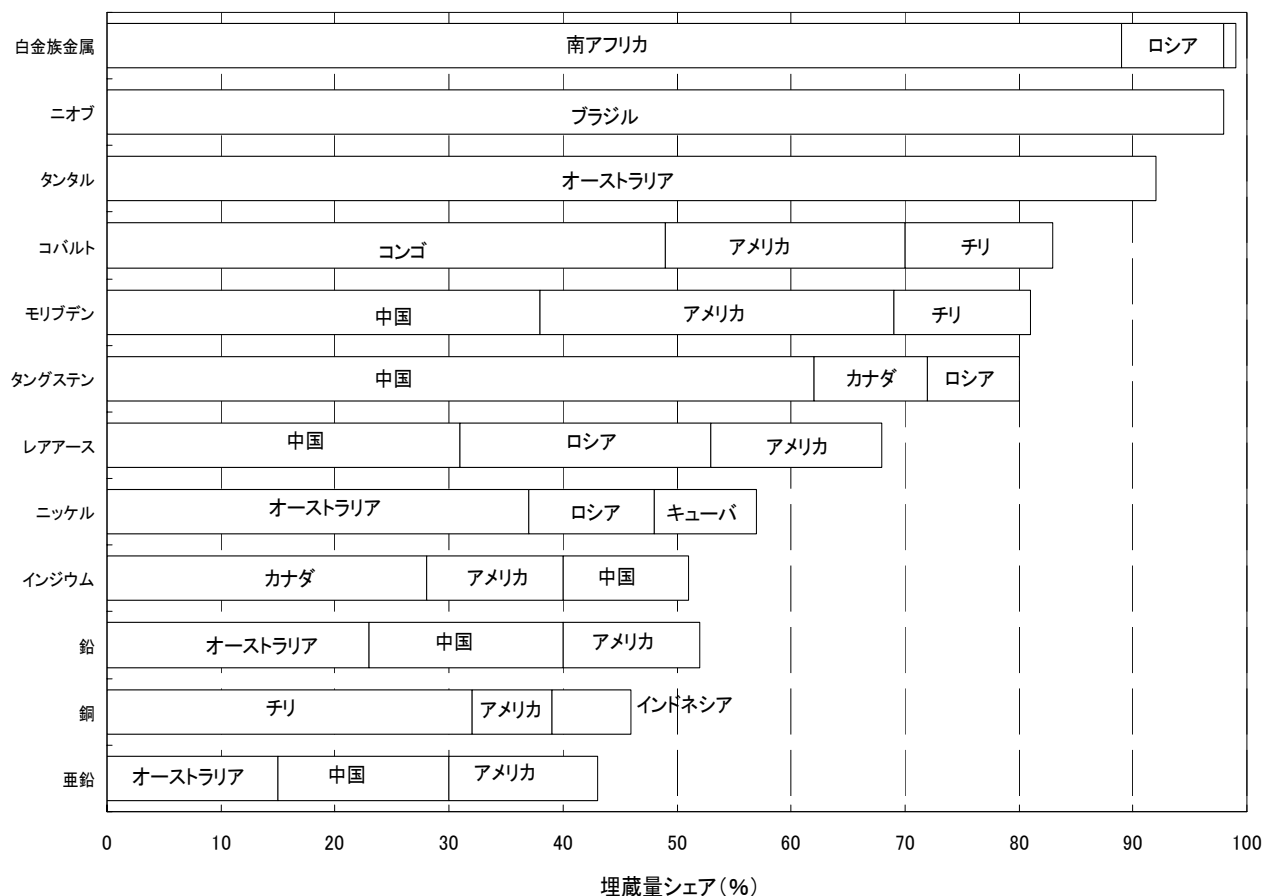


図 1-14 各金属の埋蔵量上位3カ国のシェア

出典：日本学術会議「鉱物資源の安定確保に関する課題とわが国が取り組むべき総合的対策」 [1-35]

以下、安達毅「鉱物資源の安定確保と枯渇性」 [1-36] に基づき、鉱物資源の可採年数を見る。

地球上に豊富に存在する資源としては鉄、アルミニウム、チタン、マンガン、マグネシウム、シリコン等がある。しかしながら、大量に生産されるため、生産の際の環境破壊や投入エネルギー、利用後の廃棄物が問題になり、その点を考えたリサイクルが重要になってくる。エネルギー資源の場合と同様であるが地殻に存在する「鉱物資源の資源量」と人類が現在の経済的・技術的水準で採掘が可能な「埋蔵量」とは異なるため、枯渇問題を考える際には「物理的枯渇」と「経済的枯渇」に分けて考えなければならない。したがって資源量ベースで見た場合には、経済性を考えないため可採年数は増加する。表 1-11 はレアメタルを含む主要金属資源の可採年数を示すが、鉱山の発見、採掘技術の進歩、資源価格の高騰などにより、可採年数は今後とも変動するものと考えられる。

表 1-11 主要金属資源の可採年数

(単位：百万トン)

	生産量	埋蔵量	可採年数 (年)
鉄	1,120	70,000	63
アルミニウム	154.2	23,000	149
銅	13.7	470	34
亜鉛	9.2	220	24
鉛	2.9	67	24
ニッケル	1.3	62	48
銀	0.018	0.27	15

出典：「鉱物資源の安定確保と枯渇性」 [1-36]

図 1-15 は銅、亜鉛の可採年数の推移である。

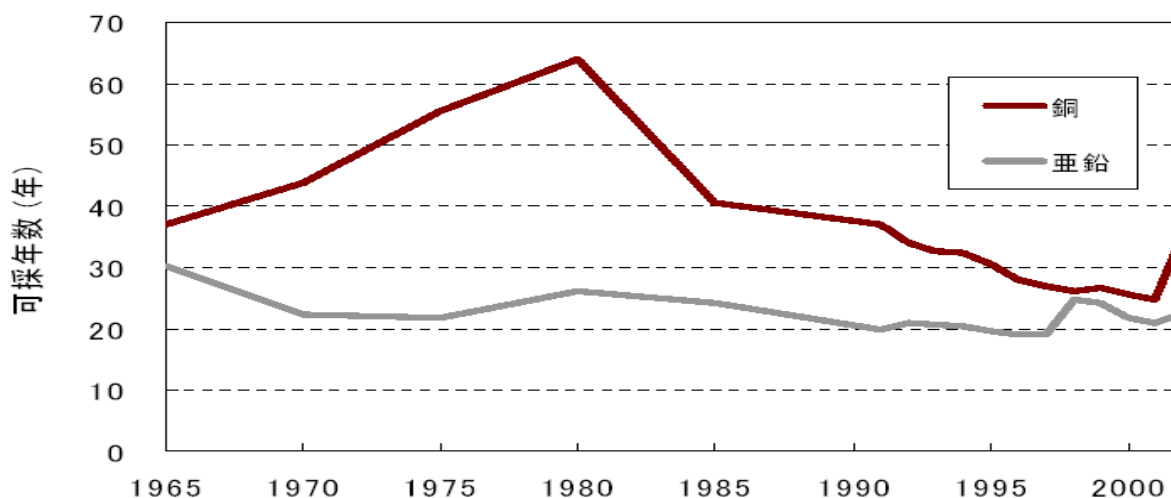


図 1-15 銅と亜鉛の可採年数の推移

出典：鉱物資源の安定確保と枯渇性 [1-36]

(2) レアメタル

レアメタルは次のいずれかに該当するものである。

- ・地球上での天然の存在量が極めてまれである場合
 - ・地球上での存在量が多いが、その金属を抽出するに足りるだけの濃縮した経済性のある品位の鉱石が少ない場合
 - ・地球上での存在量が多いが、化学的、物理的に純粋な金属として抽出することが極めて困難な場合
 - ・抽出された金属を利用するだけの用途がなく、特性も明らかでないため未開発であった場合
- 鉱業審議会ではリチウム、ベリリウムなど 31 鉱種をレアメタルと定義している。

レアメタルはステンレス鋼等の鉄鋼原料からハイテク産業に至るまで幅広く使用されており、国内産業にとって欠かすことのできない材料である。例えば液晶ディスプレイにはインジウム、リチウムイオン電池にはコバルトなど、最先端の製品が高性能を発揮するにはレアメタルが必要不可欠である。レアメタルは希少性が高く、我が国ではほとんどのレアメタルを輸入しており、生産国の紛争や国策等によって供給障害を引き起され、安定供給を確保することは極めて困難である。

そのため日本政府は、このような安定供給に対するリスクを軽減するために主要レアメタル7種（ニッケル、クロム、マンガン、コバルト、タングステン、モリブデン、バナジウム）を備蓄している。しかしながら中国等の需給動向や生産動向の変化やベースメタル（亜鉛/銅/鉛等）の鉱山閉鎖等に大きく影響され、供給不足や価格高騰が頻繁に起きている。

レアメタルを取り巻く環境には、需給両面にわたり様々な課題が存在し、今後より一層の総合的、戦略的な取組が必要であるとして「海外資源確保」、「リサイクル」、「代替材料開発」、「備蓄」を含む総合的な対策として経済産業省は 2009 年 7 月「レアメタル確保戦略」[1-37]を公表している。

(3) 資源関連技術

「鉱物資源の安定確保に関する課題とわが国が取り組むべき総合対策」[1-35]の提言をもとに金属生産技術の課題について見てみたい。

1) 資源の採掘条件の悪化

○ 採掘方法の対応と方向性

これまで人類は経済性が高く採掘が容易な鉱床から開発を進めてきたが、今後は大規模開発が減少し、採掘がより困難な鉱床が開発対象となるのは避けられない。また、持続的発展可能な開発という観点から、従来以上に採掘に伴う環境破壊を抑制することが求められる。そのため、我が国に蓄積されてきた中小規模鉱床開発の知識とノウハウとスケールディメリットを克服する技術を活用することにより環境影響の小さい中小規模の坑内掘鉱山にわが国の優位性を発揮することができる。

○ 鉱物中間処理技術の課題と方向性

近年、低品位鉱石や砒素、あるいは硫黄等の不純物の多い鉱石が増加してきており、これら鉱石群の処理技術の開発が世界的に求められている。また、中小規模鉱山向けの小型で効率性に優れた選鉱技術も求められている。技術的課題としては、省エネルギー化と効率のよい粉碎プロセスの開発のほ

か、浮遊選鉱法の改善と高度化が期待されている。

2) 強まる環境制約と求められる対策

○ 鉱山における環境対策 ～効率的な排水処理の課題～

資源開発では、探査から採掘、精錬の過程で大量の気体・液体・固体の廃棄物が発生するため、それぞれの段階で適正な鉱害防止対策を講じなければならない。我が国は過去の苦い経験から高度な環境対策技術を有している。近年、廃棄物・廃水による直接的な汚染問題や開発・操業の際の騒音・振動・地盤沈下問題に加え、景観破壊や土地利用価値の減少等も広義の環境問題として捉えられてきた。日本をはじめとする先進諸国は、鉱物資源の多くを発展途上国に依存していることを考慮し、環境対策面でも積極的に発展途上国を支えていくことが求められる。

○ 環境負荷を低減する精錬技術

今後採掘される鉱石は、不純物が多く生産効率の悪いものが増加すると予想される。また今後の環境規制の強化等により、製錬の過程で発生する砒素、カドミウム、水銀等の有害物質や硫黄を含めた副産物の処分方法を総合的に検討しなければならない。我が国の場合、製錬段階で発生するスラグの有効活用が大きな課題である。リサイクルや廃棄物処理における日本の強みを生かして鉱物資源や使用済み製品に含まれる有用な金属と有害物質を効率的に分離回収するが重要である。そのためには各精錬所間の連携強化とリサイクルループの構築によって副産物・廃棄物の分担処理と有効利用を効率的に行うことが重要である。

○ リサイクルを支える技術と社会システム

効果的なリサイクルシステムを構築するためには社会的観点からの検討が重要である。金属リサイクルとして、ベースメタル、貴金属、レアメタルを見るとリサイクルシステムが様々な分野で整ってきているものの、経済性の有無によってリサイクルの進展に大きな差がある。我が国はレアメタルの大消費国であり、国内には製品やスクラップの形で膨大な量のレアメタルが蓄積されているが、それは広く薄く分布しているためリサイクルがやりにくい。今後の技術的課題を挙げると、多種多様かつ性状の不安定な廃棄物の成分分離を達成するための選別・製錬技術の高度化が重要となる。リサイクルの対象となる二次資源（スクラップや使用済み製品）については、これまでのように経済性に見合うものからリサイクルするというだけでなく、生産や消費の各過程で排出される種々の廃棄物も循環可能な資源の一つであるという認識が必要となる。それらの資源の有効活用を図るためにも、技術ロードマップの作成が求められている。

1. 5 人口問題

国連人口部によれば世界人口は 2050 年までに 23 億人増加し 91 億人になると予測している。世界各国は国民の福利厚生の上を目指して、経済成長政策を取っており、エネルギー消費量も今後、増加していく見通しである [1-2]。また人口増加は食料消費量、鉱物資源消費量の増加を招くことになる。

今後「低炭素社会」の実現、「循環型社会」、「分散型社会」の構築を行っていく際、人口増加は非常

に重要な要素である。

(1) 世界の将来人口推計

国連人口部は2009年3月、「世界の将来人口推計」(2008年度改訂版) [1-38],[1-39] を公表した。報告書によれば2050年までに世界人口は現在の68億人から23億人増加し、91億人になると予想している。その前提として開発途上国における出生率が継続的に低下すると想定されており、出生率が下がらなければ世界人口は2050年に110億人まで増えると予想している(図1-16)。

報告書は「現在、開発途上国の人口のうちおよそ半数が25歳以下であるが、後発開発途上国では全体の60%に上る。こうした傾向は、現在の経済危機のもとで、各国の教育や雇用に関する深刻な問題に発展する」と述べている。先進国、途上国とも60歳以上の人口が大幅に増加すると予想されることから、高齢者に対する社会経済的な保護制度の確立など、各国が高齢化への事前対応策を早急にまとめる必要性が示唆されている。

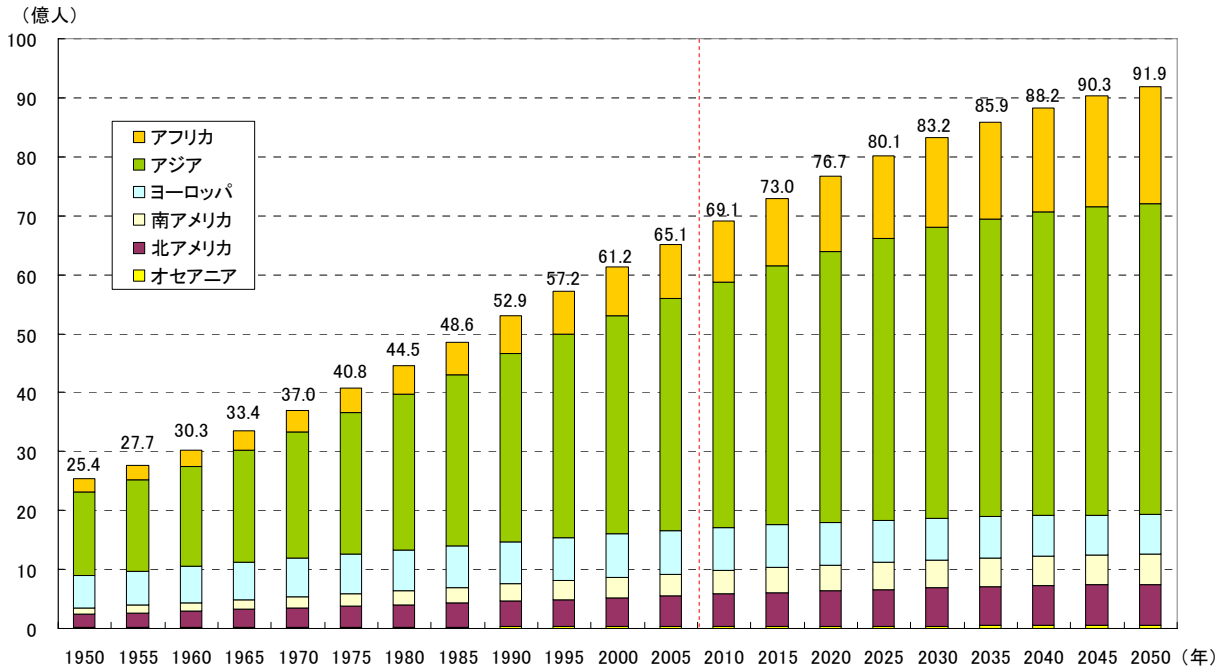


図 1-16 世界人口の推移

出典：世界の将来の人口推計 [1-38]

報告書では「当面、世界の高齢化が進むのと並行し、若い世代の人口が人類史上最大規模まで増加し、開発途上国を中心に高齢者のニーズと若者のニーズを同時に満たすことが課題である」と述べられている。しかし、高齢化は進展し、1950年には15歳未満の若者に人口比率が34.2%であったが、それが2050年には19.8%まで減少し、逆に65歳以上の高齢者の人口比率が5.2%から15.2%と約3倍に増加する(図1-17)。人口の増加に伴い、特に発展途上国において深刻化が懸念される問題として食糧不足、貧困問題の深刻化、エネルギー消費量の増加(薪炭利用による森林の消滅を含む)、都

市部の人口過密化による大気汚染、水環境を含む衛生状況悪化とスラム化、農地の拡大による森林面積の減少、生物多様性の喪失、過放牧による砂漠化の進行等がある。

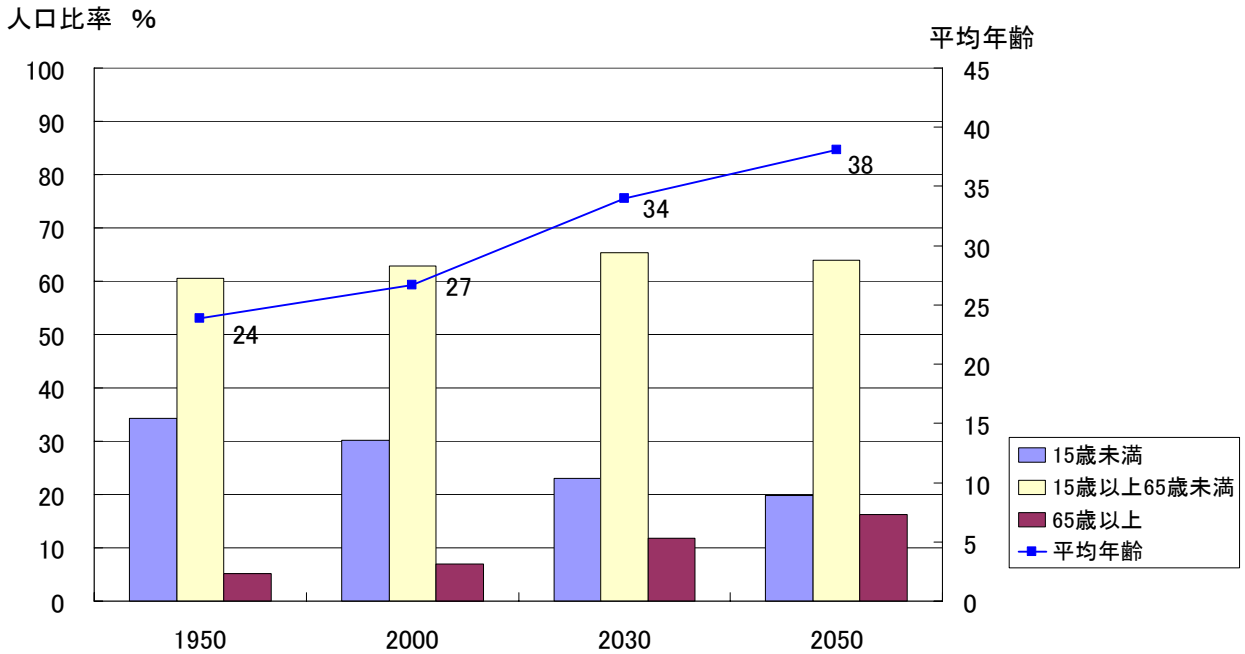


図 1-17 世界人口・年齢構成の推移

出典：世界の将来の人口推計 [1-38]

図 1-18 は人口と所得、エネルギー消費量等各種原単位の経年変化を示している。エネルギー原単位は 1970 年から 2004 年にかけて低下しているものの、1 人当たりの所得、人口が増加しているため、一次エネルギーの総消費量は 1970 年から 2004 年にかけて増加している。今後の発展途上国の人口増加および経済発展を前提に考えた場合、エネルギー消費原単位が大幅に減少しない限り、一次エネルギーの消費量の増大は避けられない。EIA のエネルギー消費量の将来予測 (図 1-6) では 2006 年度の実績に対して 2030 年には総エネルギー消費量が 44% 増加すると予測している。温室効果ガスを 2050 年に向けて世界全体で半減させるとの目標の達成は世界平均気温上昇を 2℃以内に抑えるために必要であると IPCC 第 4 次評価報告書 [1-15] は述べているが、これを達成するのが極めて困難な課題であることは間違いない。世界人口の増加率を少しでも緩和することができれば、人口増加に伴う環境負荷を軽減することが可能になる。

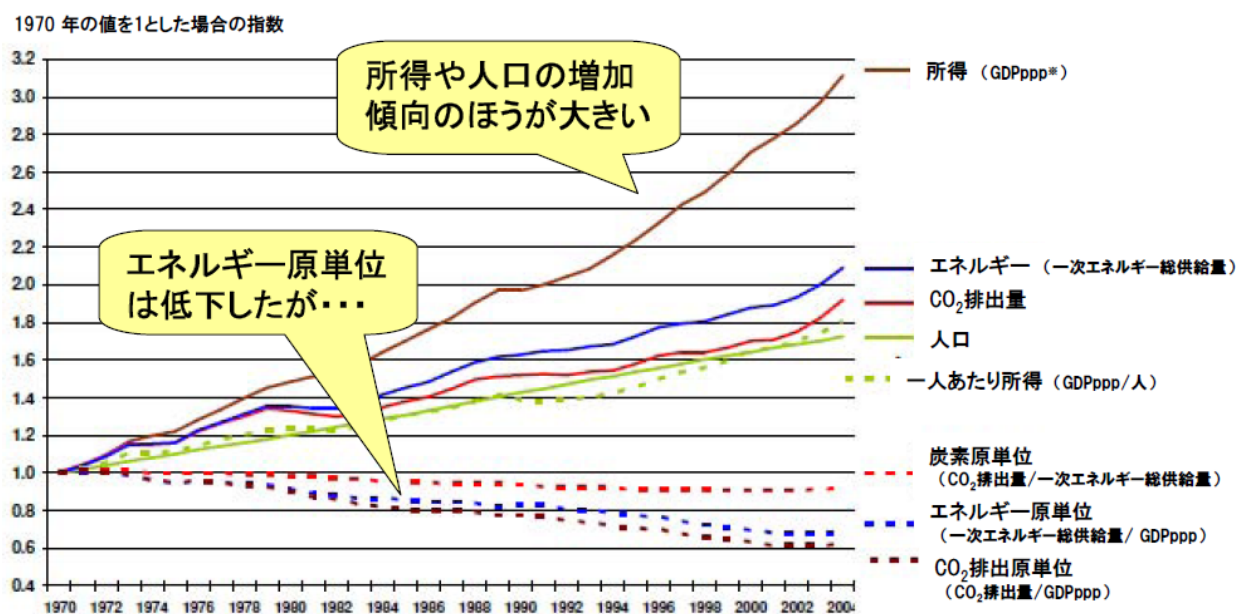


図 1-18 所得、人口、CO₂ 排出量、エネルギー消費量、各種原単位の経年変化 (1970-2004)

出典：IPCC 第 4 次報告書第 3 作業部会政策決定者向け要約 [1-15h]

先進諸国では人口減少、少子高齢化という課題を抱える国が多い。一方、人口大国である中国は一人っ子政策の効果もあり人口増加率が低下している。インド、パキスタン、インドネシア、アフリカ各国等では人口政策が機能しておらず、人口増が続く見通しである。なお、インドは 2030 年頃までに人口が中国を抜くと予想されている。したがって、少子高齢化に直面している先進国と現在人口が増加している発展途上国では、当面人口問題に対する対応が異なることになる。発展途上国における人口問題は地域の宗教、伝統、文化、女性の地位などに大きく影響される微妙な問題であり、人口政策を徹底させることは困難な課題でもある。

(2) 人口問題に対する国際的取組

国連は各国の人口政策を支援するため 1950 年代から国際人口開発会議 (International Conference on Population and Development, ICPD) を 10 年ごとに開催し、様々な課題を検討してきた。

1994 年にエジプトのカイロで開催された ICPD は人口政策の考え方を「抑制」から「家族の選択」に転換して、その後の国際的な人口政策の基本的考え方になる「ICPD 行動計画」(カイロ・コンセンサス) [1-40] は、2015 年までに以下の 3 項目を実現するよう求めている。

- ・ 家族計画の導入、乳幼児および妊産婦死亡率の大幅削減
- ・ 男女間の公平と平等および女性のエンパワーメント⁶ を確保するための幅広い措置
- ・ 初等教育への普遍的アクセス、教育における「男女間格差」の是正

⁶ 女性が社会的な力と能力を獲得すること。

2009年11月に国連人口基金（United Nation Population Fund, UNFPA）が公表した「世界人口白書 2009—気候変動と女性—」 [1-41] は「人間的要因は気候変動問題のあらゆる面に関わっている。気候変動は人口ダイナミクス、貧困、ジェンダーの平等の問題である。気候変動に対する最も有効な解決方法は地域住民の身近な環境に関する知識を基本に置き、彼らの能力を強化することが唯一の永続的解決策である」と述べている。

先進国と発展途上国が直面している人口問題は下記の通りである。

○ 先進国

少子高齢化の進展に伴い労働人口が減少する一方で高齢者の医療費、社会保障費など社会的コストは増大し経済は停滞を招きやすくなる。労働人口の減少を食いとめ、高齢者に関わる社会的コストの増加を抑えることが課題である。これは今後、どのような社会を構築し高齢者世代とそれ以外の世代間の利害調整をどう図るかという問題でもある。具体的には以下のような対応策が必要とされる。

- ・ 低コスト・低エネルギー消費で安心・安全な健康長寿社会を実現（高コスト医療産業から低コスト健康産業へ）
 - 重大疾患の早期発見・治療技術の開発
 - 精神疾患、老人性疾患対策
 - 高齢者の機能維持・改善技術
- ・ 高齢者の社会参加をサポートする社会システムの導入
- ・ 高齢者の社会参加をサポートする技術開発

○ 発展途上国

人口政策が適切に機能していない貧しく、衛生環境の悪い国々では一般的に幼児死亡率および人口増加率が高い。経済状況や環境状況を改善し、人口政策が実施しやすい条件整備を行うことが重要である。発展途上国の環境改善、感染症予防の観点から以下の対応策が必要とされる。

- ・ 水と衛生の徹底したモニタリング
- ・ 小規模で環境に優しい衛生設備の普及
- ・ 地域に適切な衛生政策モデルの開発
- ・ 衛生に関する研究開発（R&D）や技術革新の加速
- ・ 使用環境に適応した健康・医療・バイオ技術の活用

先進国は技術の提供を行う際に発展途上国の置かれている状況を考慮し、

- ・ 発展途上国の衛生状況の改善への協力として現地で容易に利用できる技術の開発
- ・ 持続的発展のためには地域の自然条件、地域資源を最大限活かした分散型・循環型の技術の開発・移転

を実施すべきである。

【引用文献】

- 1) G-8 サミット宣言 (外務省訳)
 - a) 2005 年グレンイーグルスサミット
「アフリカ」、「気候変動、クリーンエネルギー、持続可能な開発」
<http://www.mofa.go.jp/MOFAJ/gaiko/summit/gleneagles05/index.html>
 - b) 2006 年サンクトペテルブルクサミット
「世界のエネルギー安全保障」、「21 世紀における革新 (イノベーション) を生み出す社会のための教育」、「感染症との闘い」
<http://www.mofa.go.jp/MOFAJ/gaiko/summit/saintpetersburg06/index.html>
 - c) 2007 年ハイリゲンドラムサミット
「世界経済における成長と責任」、「アフリカにおける成長と責任」
<http://www.mofa.go.jp/MOFAJ/gaiko/summit/heiligendamm07/index.html>
 - d) 2008 年北海道洞爺湖サミット
「世界の食料安全保障」、「エネルギー安全保障と気候変動」
<http://www.mofa.go.jp/MOFAJ/gaiko/summit/toyako08/index.html>
 - e) 2009 年ラクイアサミット
「気候変動、開発・アフリカ」、「持続可能な未来に向けた責任あるリーダーシップ」
<http://www.mofa.go.jp/MOFAJ/gaiko/summit/italy09/index.html>
- 2) EIA (Energy Information Administration) (2009) International Energy Outlook 2009
<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>
- 3) 外務省 (2010) 「気候変動枠組条約第 15 回締約国会議 (COP15) 等の概要」
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/kiko/cop15_g.html
- 4) United Nations (2009) <http://unfccc.int/2860.php>
- 5) Daly, H. (1990) "Towards Some Operational Principles of Sustainable Development," Ecological Economics vol. 2
- 6) H. デイリー (2005) 「持続可能な発展の経済学」、みすず書房
- 7) ナチュラルステップのフレームワーク <http://www.tnsij.org/>
- 8) 国際自然保護連合、世界自然保護基金、国連環境計画 (1991) 「かけがえのない地球を大切に一新・世界環境保護戦略―」、小学館
- 9) 持続可能な開発に関連する国連会議
 - a) 「環境と開発に関する世界委員会」(ブルントラント委員会) (1987) 「地球の未来を守るために―Our Common Future―」福武書店
 - b) 「持続可能な開発に関する世界首脳会議」(ヨハネスブルグ・サミット) (2002)
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/wssd/>
 - c) 「環境と開発に関する国際連合会議」(地球サミット) (1992)
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/sogo/kaihatsu.html>

- d) ミレニアム開発目標 (2000)
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/oda/doukou/mdgs.html>
- e) 国連人間環境会議 人間環境宣言 (1972)
<http://www.cc.matsuyama-u.ac.jp/~tamura/ninngennkannkyousenngenn.htm>
- 10) 環境省、外務省 (1997) 「アジェンダ 21 実施計画」—アジェンダ 21 の一層の実施のための計画—
- 11) D. H. メドウズ他 (1972) 「ローマクラブ報告」、ダイヤモンド社
- 12) D. H. メドウズ他 (1992) 「限界を超えて」、ダイヤモンド社
- 13) D. H. メドウズ他 (2005) 「成長の限界～人類の選択」、ダイヤモンド社
- 14) R. ブラウン (2007) 「プラン B 3.0」、ワールドウォッチジャパン
- 15) a) IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4) (2007)
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.htm#1
 IPCC 第 4 次報告書 (環境省、文部科学省、経済産業省、気象庁訳)
- b) 政策決定者向け要約
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/syr_spm.pdf
- c) 統合報告書の概要 (環境省資料)
<http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/ar4syr.pdf>
- d) 第 1 作業部会 (自然科学的根拠)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=7993>
- e) 第 1 作業部会報告書の概要 (環境省資料)
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/wg1_gaiyo.pdf
- f) 第 2 作業部会 (影響・適応・脆弱性)
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=8258>
- g) 第 2 作業部会報告書の概要
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/wg2_gaiyo.pdf
- h) 第 3 作業部会 (気候変動の緩和策)
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/press_070504.pdf
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/press_070504-errata.pdf
- i) 第 3 作業部会報告書の概要 (環境省資料)
http://www.env.go.jp/earth/ipcc/4th/wg3_gaiyo.pdf
- 16) H. オットー他 (2001) 「京都議定書—21 世紀の国際機構政策」、シュプリンガー・フェアラーク東京
- 17) 気象庁 (2001) 「IPCC 第 3 次評価報告書」
http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc_tar/spm/spm.htm
- 18) 国土交通省編 (2007) 「日本の水資源平成 19 年版」 ～安全で安心な水利用に向けて～

- 19) 国土交通省編 (2009) 「日本の水資源平成 21 年度版」 ～総合的水資源管理の推進～
- 20) 農林水産省編 (2003) 「危機に直面する世界の水と食糧生産」
<http://www.maff.go.jp/water/siryu.pdf#search>
- 21) UNDP (2006) 「人間開発報告書 2006 年度版—水危機神話を超えて：水資源をめぐる権力闘争と
貧困、グローバルな課題—」
- 22) 外務省 (2006) 第 4 回世界水フォーラム
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/wwf4/index.html>
- 23) 外務省 (2009) 「第 5 回世界水フォーラム」
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/wwf5/index.html>
- 24) 世界水ビジョン (川と水委員会) 編 (2001) 「世界水ビジョン」、山海堂
- 25) 沖大幹 (2003) 「世界の水危機、日本の水問題」
<http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Info/Press200207/>
- 26) FAO (2005) "Global Forest Resources Assessment 2005"
<http://www.fao.org/forestry/fra2005/en/>
- 27) RSPO ホームページ <http://www.rspo.org/>
- 28) 農林水産省 (2007) 「農地土壌が有する多様な公益的機能と土壌管理のあり方 (3)」
http://www.maff.go.jp/j/study/kankyo_hozen/04/pdf/data1.pdf#search=
- 29) 外務省 (2009) 「国連における森林問題への取組」
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/bunya/shinrin_un.html
- 30) 林野庁 (2008) 「モニタリングプロセスについて」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/press/h19-1gatu/0112montori-besshi.html>
- 31) 砂漠化対処条約 (1994)
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/sabaku/index.html>
- 32) 国連海洋法条約 (1982)
- 33) バーゼル条約 (1989) <http://www.mofa.go.jp/mofaj/GAIKO/kankyo/jyoyaku/basel.html>
- 34) BP (2009) "BP Statistical Review of World Energy"
<http://www.scribd.com/doc/16304689/BPs-Statistical-Review-of-World-Energy-Full-Report-2009>
- 35) 日本学術会議 (2008) 「鉱物資源の安定確保に関する課題と我が国が取り組むべき総合的対策」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-t60-6.pdf>
- 36) 安達毅 (2008) 「鉱物資源の安定確保と枯渇性」
http://www.jogmec.go.jp/mric_web/koenkai/081023/briefing_081023_5.pdf#search=
- 37) 経済産業省 (2009) 「レアメタル確保戦略」
<http://www.meti.go.jp/press/20090728004/20090728004.html>
- 38) 国連人口部 (2009) 「世界の将来人口推計」 (2008 年度改訂版)

- <http://www.unfpa.or.jp/news/press/pr2009/pr0903.html>
- 39) 総務省統計局 (2009) 「世界の統計 第2章：人口」
<http://www.stat.go.jp/data/sekai/02.htm>
- 40) 国際人口開発会議+5 (1994) 「カイロコンセンサス」
<http://www.unic.or.jp/centre/pdf/develop.pdf#search>
- 41) 国連人口基金 (2009) 「世界人口白書 2009-気候変動と女性一」
<http://www.unfpa.or.jp/publications/swop/swop2009/swop09.html>

【参考文献】

- 1) G8 サミットへ向けた各国学術会議共同声明 (日本学術会議仮訳)
- a) 2005年「アフリカ開発のための科学技術」、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-s1027-2w.pdf>
「気候変動に対する世界的対応」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-19-s1027w.pdf>
- b) 2006年「鳥インフルエンザと感染症」、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s2j.pdf>
「エネルギーの持続可能性と安全保障」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s1j.pdf>
- c) 2007年「成長と責務—イノベーションの推進と保護」、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s5j.pdf>
「成長と責務—持続可能性、エネルギー効率及び気候保全」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s4j.pdf>
- d) 2008年「地球規模の健康問題 (グローバルヘルス)」、
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s8j.pdf>
「気候変化：適応策と低炭素社会への転換」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s7j.pdf>
- e) 2009年「気候変動と低炭素社会に向けたエネルギー技術への転換」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-s1j.pdf>
- 2) a) 総合科学技術会議 (基本政策推進専門調査会) (2008) 科学技術外交の強化に向けて (中間取りまとめ)
<http://www8.cao.go.jp/cstp/project/kagigaiko/chukan.pdf>
- b) 総合科学技術会議 (科学技術外交戦略タスクフォース) (平成21年8月～)
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sonota/kagigaiko/kagigaiko.html>
- 3) Wayne, R. P. (2000) “Chemistry of Atmosphere,” Oxford University Press. 3rd ed., New York, Chap. 6.
- 4) 環境省編 (2007) 「環境・循環型社会白書平成20年版」

- 5) 環境省編 (2009) 「環境白書平成 21 年度版」(循環型社会白書/生物多様性白書)～地球環境の健全なる一部となる経済への転換
- 6) C. フレイヴィン (2007) 「地球環境データブック」、ワールドウオッチジャパン、東京、1-252.
- 7) 石 弘之 (1998) 「地球環境報告 II」、岩波書店、1-218
- 8) 二宮洸三 (2006) 「気象と地球の環境科学 改訂 2 版」、オーム社、1-256
- 9) 小島紀徳 (2001) 「21 世紀が危ない - 環境問題とエネルギー -」、コロナ社、東京、1 ～ 6 章.
- 10) 赤祖父俊一 (2008) 「正しく知る地球温暖化 誤った地球温暖化論に惑わされないために」、誠文堂新光社、1-183
- 11) 可児一郎、土田進一、杉本完蔵、豊永哲也、鴫田穂積 (2008) 「石油会社の地球温暖化対策」、PETROTECH, 31(7), 466-477.
- 12) 林 宏 (2009) 「石油産業の環境対策 (1) 燃料電池 (1)」、日エネ誌、88(7), 597-604
- 13) 国土交通省水資源部 (2003) 「第 3 回世界水フォーラム」
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/wwf3/index.html>
- 14) 林野庁 (2008) 「平成 20 年度森林・林業白書」
<http://www.rinya.maff.go.jp/j/kikaku/hakusyo/20hakusho/index.html>
- 15) 外務省 (2008) 「違法伐採問題」
<http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/kankyo/bunya/bassai.html>
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=10025>
- 16) IEA (2008) World Energy Outlook 2008
http://www.worldenergyoutlook.org/docs/weo2008/WEO2008_es_japanese.pdf
- 17) 日本エネルギー学会編 「エネルギー便覧 プロセス編」、コロナ社、1-850
- 18) 日本エネルギー学会編 「エネルギー便覧 資源編」、コロナ社、1-334
- 19) NEDO (2008) 「省エネルギー戦略 2008 の策定について」
http://www.nedo.go.jp/informations/other/200418_1/200418_1.html
- 20) 川島博之 (2008) 「世界の食糧生産とバイオマスエネルギー」(2050 年の展望)
- 21) 中村博幸、渡辺健一、岩船由美子、山本博 (2006) 「家庭から見たエネルギー供給の将来像」、PETROTECH, 29(4), 240-252.
- 22) 古川博文 (2009) 「石炭資源開発の現状と課題」、PETROTECH, 32(2), 247-252.
- 23) Syncrude Canada Ltd.、由井聡文 (2007) 「石油代替エネルギーとしてのカナダのオイルサンドビチューメンの開発生産 - 性状および改質技術の現状と将来」、PETROTECH, 30(12), 889-896.
- 24) 田中彰一 (2009) 「メタンハイドレート開発計画フェーズ 1 の成果」、PETROTECH, 32(8), 577-582
- 25) 神田 肇 (2009) 「天然ガスハイドレート (NGH) による天然ガス輸送」、PETROTECH, 32(2), 131-137.
- 26) 栗林利明 (2008) 「将来の自動車用燃料とその課題」、PETROTECH, 31(1), 22-27.
- 27) UNFPA (2008) ”World Population Prospect : The 2008 Revision”

- http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2008/wpp2008_highlights.pdf
- 28) 日本経済新聞社(編) (2006) 「人口が変える世界」、日本経済新聞社、1-229
- 29) WFP (2009) 「世界の飢餓状況」 <http://www.wfp.or.jp/kyokai/hunger.html>
- 30) 農林水産省 (2009) 「2018 年における世界の食料需給見通し」
http://www.maff.go.jp/j/zyukyu/jki/j_zyukyu_mitosi/pdf/2018_summary.pdf#search
- 31) 食料の未来を描く戦略会議 (農林水産省) (2008) 「食料の未来を確かなものにするために」
http://www.maff.go.jp/j/study/syoku_mirai/pdf/message_all.pdf#search
- 32) 環境省 (2007) 「第三次生物多様性国家戦略」
<http://www.env.go.jp/nature/biodic/nbsap3/>

2. 持続可能性にかかわる従来の取組

第1章では地球規模の環境問題、持続的発展可能な開発、持続可能な社会の構築等についてこれまでの国際的な議論の流れをもとに検討してきた。第2章ではこれらの議論を踏まえ、我が国で持続的発展可能な社会を構築するための課題と従来実施されてきた対策について検討する。日本政府はエネルギー分野、環境分野等で様々な政策を立案し、地球環境問題の解決と、我が国における持続的発展可能な社会の構築を図ってきた。また、独自の先進技術を積極的に海外に移転することにより、世界の環境問題、エネルギー問題の改善に貢献するとともに、技術立国日本の経済的基盤の強化を図ろうとしてきた。

2008年9月に発生したリーマンショックは世界的な金融危機を引き起こし、世界経済に大きな衝撃を与えた。特に日本経済への影響が甚大であり、我が国の産業界と国民一人一人の生活に傷跡を残した。そのような経済の閉塞感に見舞われている2009年9月、鳩山政権が誕生した。鳩山首相は同月に開催された国連総会で、我が国の温室効果ガスの排出量を2020年に1990年比で25%削減すると述べ、地球温暖化対策で日本が世界のイニシアチブを取りたいとの意欲を示した。2009年12月に閣議決定された新成長戦略は100年に一度と言われる経済危機を脱却するため「成長戦略で新たな需要・雇用をつくる」と宣言し、地球規模の課題を解決する「課題解決国家」を目指してアジアとともに生きる国の形を実現すると述べている。

これらの政策の分析、各分野での省エネへの取組、3R等循環型社会構築への取組、環境対策等の分析を通じて、我が国が目指そうとしている持続的発展可能な社会を明らかにする。

2. 1 持続的発展可能な社会の構築に向けた日本政府の政策

地球規模の環境問題へ対応しながら「持続的発展可能な社会」を構築するためには全ての国民、あらゆる分野を巻き込んだ長期的かつ幅の広い対策が必要とされる。日本政府は「環境政策」[2-1]～[2-3]、「エネルギー政策」[2-4]～[2-7]等、様々な側面から政策を立案してきたが、それは2008年7月開催された洞爺湖サミット[1-1d]の前に公表された「低炭素社会づくり行動計画」[2-3]に集約される。「行動計画」は「低炭素社会」、「循環型社会」、「分散型社会」、「自然共生社会」を日本に実現することにより、持続的発展可能な社会を構築しようとしている。このような流れを受け、鳩山内閣で決定された「新成長戦略（基本方針）」[2-8]は不況克服と地球環境問題の解決の両立を図るために「グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」、「ライフ・イノベーションによる健康大国戦略」を掲げ、総合的な政策パッケージにより世界ナンバーワンの環境・エネルギー大国を目指すとともに経済の活性化を図ろうとしている。第4期科学技術基本計画を審議している総合科学技術会議でも新成長戦略（基本方針）を科学技術面から支えるため、予算配分方針を分野別から課題別に変更することを検討している。地球温暖化問題への対応、持続的発展可能な社会の構築などが国家的プロジェクトとして我が国が全力を挙げて取り組むテーマとなる見通しである。

以下、最近の政策を環境政策とエネルギー政策の側面から見てみる。

(1) 環境政策

1) 超長期ビジョン

2007年10月、公表された超長期ビジョン [2-2] は第3次環境基本計画(2006年4月) [2-9] に基づいて50年間といった長期間の環境政策ビジョンとしてバックキャストिंगの手法を用いて作成された。超長期ビジョンは2050年の環境像を以下のように記述している。

- ・低炭素社会から見た環境像

世界全体の温室効果ガスの排出量が大幅に削減され、将来世代にわたり人類および人類の生存基盤に対して悪影響を与えない水準で温室効果ガスの濃度が安定化する方向に進んでいる。

- ・循環型社会から見た環境像

資源生産性、循環利用率が大幅に向上し、これに伴って最終処分量が大幅に減少している。バイオマス系の廃棄物の有効利用をはじめとして、廃棄物からの資源・エネルギーの回収が徹底的に行われている。

- ・自然共生社会から見た環境像

農山村が活性化することにより、地域の生活環境である里地・里山が適切に管理され、野性鳥獣との共存が図られている。

- ・快適生活環境社会から見た環境像

環境汚染によるリスクの環境監視が適切に行われ、生命、健康、生活環境に影響を及ぼすリスクがなくなっている。

- ・社会像としては

我が国は少子高齢化が進み、総人口の減少、高齢者比率が増加し、就業者数は減少している。しかし、労働生産性の向上により、日本経済は成長を維持するとともに、環境負荷の少ない持続可能な社会を実現している。

2050年にこのような社会を実現するためには、高齢化社会に対応した職業選択範囲の拡大、コンパクトシティ⁷、合理的な公共交通システム、ゼロエネルギー住宅、再生可能エネルギーの利用拡大、安全・安心な原子力発電技術の確立などが必要であり、現時点から実施可能な様々な対策を導入する必要性が強調されている。

⁷ コミュニティの再生や住みやすい町づくりを目指し、市街地のスケールを小さく保ち、歩いていける範囲を生活圏と捉えた都市の概念。地方都市で深刻化している中心市街地の空洞化・衰退等に対応する観点から、我が国でも1990年代後半から一部自治体で検討された。最近では公共基盤整備と経済成長を優先してきた都市政策が転換を迫られている中、全国的に関心が高まっており、自治体レベルでも様々な構想・計画が立案され始めた。

2) 第2次循環型社会形成推進基本計画

2008年3月に公表された第2次循環型社会形成推進基本計画 [2-10] は環境保全が人類の生存にかかわる極めて重要な課題であるとして、循環型社会の形成を一層促進する必要があると述べている。

- ① 環境保全を前提とした循環型社会の形成
- ② 循環型社会と低炭素社会・自然共生社会への取組の統合
- ③ 地域再生にも寄与する「地域循環圏」の構築
- ④ 数値目標の拡充に加え、補助指標やモニタリング指標を導入
- ⑤ 各主体が連携・協働した3Rの取組、3Rの技術とシステムの高度化
- ⑥ 国際的な循環型社会形成に向けた我が国の主導的な役割

循環型社会の中長期的イメージ（2025年ごろまで）は以下のように記載されている。

- ・ 循環型社会、低炭素社会や自然共生社会に向けた取組を統合的に推進し、「持続可能な社会」を実現
- ・ 長期優良住宅の普及などにより「ストック型社会」の形成
- ・ 地域特性や循環資源の性質等に応じた最適な規模の循環の形成となる重層的な「地域循環圏」の構築
- ・ 「もったいない」の考え方に即したライフスタイルの定着、関係主体の連携・協働による取組の加速化、ものづくりなど経済活動における3Rの浸透、3Rと廃棄物処理システムの高度化、など

循環型社会への移行状況の把握を目的に、2015年を目標年次に設定した。

- ・ 物質フロー「資源生産性」、「循環利用率」、「最終処分量」の数値目標の設定（p.73参照）
- ・ 低炭素社会への取組との連携に関する指標（廃棄物分野の排出削減対策の目標）の設定
- ・ 1人1日あたり家庭から排出されるゴミの量を20%削減するといった数値目標等を新たに導入

（2）エネルギー政策

1) 省エネルギー技術戦略2008

2008年4月、公表された省エネルギー技術戦略2008 [2-7] は2030年に向けてエネルギー使用合理化技術を我が国の国際社会における「産業競争力の源泉」とし、資源制約・環境制約を乗り越え、尊敬される「世界一の省エネ国家」の実現を目指すことを掲げている。

産学官や異なる事業分野、メーカーとユーザなど、様々な主体間での連携を促すことで革新的な技術開発を促進するとともに、今後想定される社会経済的ニーズに対応し、目指すべき技術開発の段階を広く関係者間で共有していくことを狙って策定された。「戦略」では技術開発の相互連携、シナジー効果、社会システムの変革等に合わせてエネルギー使用合理化技術開発が促進されること等を考慮して5つの「重点技術分野」を掲げている。

- ・超燃焼システム技術
 - 燃焼利用を可能な限り省いた革新的な製造システム、従来型燃焼とは異なる反応制御型燃焼、熱物質再生燃焼やプロセス複合型燃焼などの技術等
- ・時空を超えたエネルギー利用技術
 - エネルギー需給のバランスを図る上での制約条件となっている「時間」、「空間（場所）」のミスマッチを解消する技術等
- ・省エネ型情報生活空間創生技術
 - 家電、住宅機器と IT 技術の融合を進め、センサー技術等の開発によるエネルギー利用最適化の推進等
- ・先進交通社会確立技術
 - 自動車電動化、新交通システム等
- ・次世代省エネデバイス技術
 - SiC、GaN、ダイヤモンド等のパワーデバイスに係わる技術開発の推進等

2) 環境エネルギー技術革新計画

2008年5月、公表された環境エネルギー技術革新計画 [2-6] は2008年7月に開催される洞爺湖サミットを前に、環境・気候変動分野で優れた技術を持つ我が国が率先して温室効果ガス排出低減のための革新的技術を開発し、地球温暖化問題に関して我が国が指導的役割を担うべきであるとして作成されている。

低炭素社会に向けた我が国の技術戦略として「短中期的対策（2030年頃まで）に必要な技術」と「中長期的対策（2030年以降）に必要な技術」に分け、以下のように述べている。

「短中期的対策（2030年頃まで）に必要な技術」

エネルギー供給側においては、当面、エネルギー資源を安定的に確保しつつ低炭素化を推進する。需要側においては、生活の質（QOL）を維持しつつエネルギー需要を削減していくために短中期に温室効果ガスの排出削減が期待できる既存技術の普及と併せて、それぞれの技術の的確な性能評価の下に更なる効率向上、コスト低減、性能評価のための技術開発を進める。

- ・ 削減効果の大きい技術
 - 軽水炉の高度利用、ハイブリッド車等
- ・ 地球全体で温室効果ガスの削減を図るための技術
 - 地域レベルでのエネルギー効率向上に寄与する技術等
- ・ 温室効果ガス排出削減効果を高めるための技術の連携
 - 再生可能エネルギーと電力貯蔵技術の組合せ等

「中長期的対策（2030年以降）に必要な技術」

今後の研究開発により大きな温室効果ガスの排出削減が期待される技術や、その導入により社会構造を大きく転換してエネルギー需要を大幅に削減し、排出を抜本的に削減する技術について、戦略的に研究開発に取り組む。

- ・ 削減効果の大きい革新的技術
次世代軽水炉、第3世代太陽電池等
- ・ 技術のブレークスルーを実現するための基盤技術
新しい触媒や材料などを開発する基礎・基盤的な技術の研究
- ・ 超長期的に実現が期待される技術
核融合、宇宙太陽光発電等

(3) 総合的政策

1) 低炭素社会づくり行動計画

2008年7月、洞爺湖サミットを前にして公表された低炭素社会づくり行動計画 [2-3] は「日本としても、先進国として途上国以上の貢献をすべきであり、2050年までの長期目標として現状から60～80%の削減を掲げて、世界に誇れるような低炭素社会を目指すことが必要である」と述べている。目標を達成するための道筋として「革新的技術開発と既存先進技術の普及」、「国全体を低炭素化へ動かす仕組み」、「地方、国民の取組の支援」をあげている。

- 革新的技術開発と既存先進技術の普及
 - ・ 「環境エネルギー技術革新計画（2008年5月）」 [2-6]、「Cool Earth—エネルギー革新技術計画（2008年3月）」 [2-11] 等に示された革新技術（2050年の世界で大幅な温室効果ガスの削減に寄与する技術）開発のロードマップの着実な実行
 - ・ 太陽光発電導入量の大幅拡大、次世代自動車の導入等、既存先進技術の普及促進
- 国全体を低炭素化へ動かす仕組み（CO₂に価格をつけ、市場メカニズムを活用）
 - ・ 排出量取引
 - ・ 税制（税制のグリーン化、地球環境税）
 - ・ 見える化（カーボンフットプリント制度⁸等の普及、カーボンオフセット⁹や炭素会計のルール作り）
 - ・ 環境ビジネス等に資金が流れやすくするための基準と仕組みの整備
- 地方、国民の取組の支援（地方の先導的な取組や国民の理解、行動を促進）
 - ・ 農林水産業の役割を活用した低炭素化
 - ・ 低炭素型の都市や地域づくり
 - ・ 低炭素社会や持続可能な社会について学ぶ仕組み
 - ・ ビジネススタイル、ライフスタイルの変革への働きかけ

2) 新成長戦略

2009年12月に公表された新成長戦略 [2-8] は持続的な成長のためには長期的視点に立った戦略が必要であるとして「成長戦略で新たな需要・雇用をつくる」、「課題解決国家を目指して2つのイノベーションを実施する」ことを宣言している。また、成長のプラットフォームとして科学技術立国戦略

⁸ 商品・サービスの原材料調達から廃棄・リサイクルに至るまでのライフサイクル全体を通して排出される温室効果ガスの排出量をCO₂量に換算して、当該商品およびサービスに簡易な方法で分かり易く表示する仕組み。

⁹ 日常生活や経済活動によって排出されるCO₂を何か別の手段によって相殺しようという考え方。

をうたっている。新成長戦略の具体的な内容については 2010 年 6 月までに決定される予定である。
6 つの戦略分野の目標と主な施策は以下の通りである。

○ 強みを活かす成長分野（環境・エネルギー、健康）

① グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略

2020 年までの目標：

- ・ 50 兆円超の環境関連新規市場、140 万人の環境分野の新規雇用の創出
- ・ 日本の民間ベースの技術を活かした世界の温室効果ガス削減量を 13 億トン以上とすること（日本全体の総排出量の相当）を目標とする

主な施策：

- ・ 電力の固定価格買取制度の拡充等による再生可能エネルギーの普及
- ・ エコ住宅、ヒートポンプ等の普及による住宅・オフィス等のゼロエミッション化
- ・ 蓄電池や次世代自動車、火力発電所の効率化など、革新的技術開発の前倒し
- ・ 規制改革、税制のグリーン化を含めた総合的な政策パッケージを活用した低炭素社会実現に向けての集中投資事業の実施

② ライフ・イノベーションによる健康大国戦略

2020 年までの目標：

- ・ 45 兆円の医療・介護・健康関連新規市場、280 万人の新規雇用

主な施策：

- ・ 医療・介護・健康関連産業の成長産業化
- ・ 日本初の革新的な医療品、医療・介護技術の研究開発推進
- ・ 医療・介護・健康関連産業のアジア等海外市場への展開促進
- ・ バリアフリー住宅の供給促進
- ・ 医療・介護サービスの基盤強化

これ以外の戦略分野は以下の通りである。

○ フロンティアの開拓による成長

③ アジア経済戦略

2020 年までの目標

- ・ 「アジア太平洋自由貿易圏（Free Trade Area of Asia- Pacific, FTAAP）の構想」、「アジアの成長を取り込むための国内改革の推進、ヒト・モノ・カネの流れの倍増」、「アジアの所得倍増を通じた成長機会の拡大」

主な施策

- ・ 2010 年の APEC ホスト国として貿易・投資の自由化を積極的に推進、我が国としての FTAAP のロードマップ策定
- ・ アジア諸国との共同で日本の「安全・安心」の国際標準化を推進
- ・ 官民あがての鉄道、水、エネルギーなどのインフラ整備支援や環境共生型都市の開発

- ・ 羽田の 24 時間国際拠点空港化やオープン・スカイ構想の推進、ポスト・パナマックス船対応の国際コンテナ・バルク戦略港湾の整備
- ・ ヒト・モノ・カネの流れを阻害する規制の大胆な見直し

④ 観光立国・地域活性化戦略

- ・ 地域活性化戦略の主な施策：「定住自立圏構想の推進、過疎地域の自立・活性化支援」、「特区制度を活用した都市再生・地域再生」、「大都市圏のインフラ整備における PFI (Private Finance Initiative)¹⁰、PPP (Public Private Partnership)¹¹ 等の活用」

○ 成長を支えるプラットフォーム

⑤ 科学・技術立国戦略

2020 年までの目標：

- ・ 世界をリードするグリーン・イノベーションとライフ・イノベーション
- ・ 独自の分野で世界のトップに立つ大学・研究機関の数の増加
- ・ 理工系博士課程修了者の完全雇用の達成
- ・ 中小企業の知財活用の促進
- ・ 情報通信技術の活用による国民生活の利便性の向上、生産コストの低減
- ・ 官民合わせた研究開発投資を GDP 比 4% 以上

主な施策：

- ・ 大学・公的研究機関改革の加速、若手研究者の多様なキャリアパス整備
- ・ イノベーション創出のための制度・規制改革
- ・ 行政のワンストップ化、情報通信技術の利活用を促進するための規制改革

⑥ 雇用・人材戦略

- ・ 「出番」と「居場所」のある国、日本の実現

2. 2 我が国の持続的発展可能な社会の構築へ向けた取組

(1) エネルギー分野

我が国はエネルギー資源のほとんどを海外からの輸入に依存している。過去 2 回の石油ショックで原油価格の高騰と供給断絶の不安を経験した我が国はエネルギー供給を安定化させるため、石油依存度を低減させ、石油に代わるエネルギーとして原子力、天然ガス、石炭の導入を進めてきた。また、石油ショック後の産業界の省エネ努力等により、産業部門の省エネ化が進み、世界有数の水準になった。しかしながら、主要国の中で我が国の石油依存度は依然高い水準にあり、温暖化対策の観点からも、エネルギー安全保障の観点からも石油依存度を削減することが望ましい。我が国では省エネ・省資源に関する技術開発、関連する制度の変更等を国家戦略として行っている。国産エネルギーである再生可能エネルギーの供給量を増加させるための技術面の研究、導入を後押しする制度面の改革等も

¹⁰ 公共サービス（公共施設の建設等）に民間の資金、経営能力等を導入し、国や地方公共団体が直接実施するよりも効率的かつ効果的な公共サービスを提供する手法。

¹¹ 公共サービスに市場メカニズムを導入するため、サービスの属性に応じて民間委託、PFI、民営化等の方策を通じて、公共サービスの効率化を図ること。

進んできており、今後それをさらに進めようとしている。

1) 日本のエネルギー供給

我が国の一次エネルギー供給占める石油の割合は第1次石油ショック時の76%から2007年度には44%と大幅に低下し、その代わりに石炭、天然ガス、原子力の割合が増加するなど、エネルギー源の多様化が図られてきた(図2-1)。

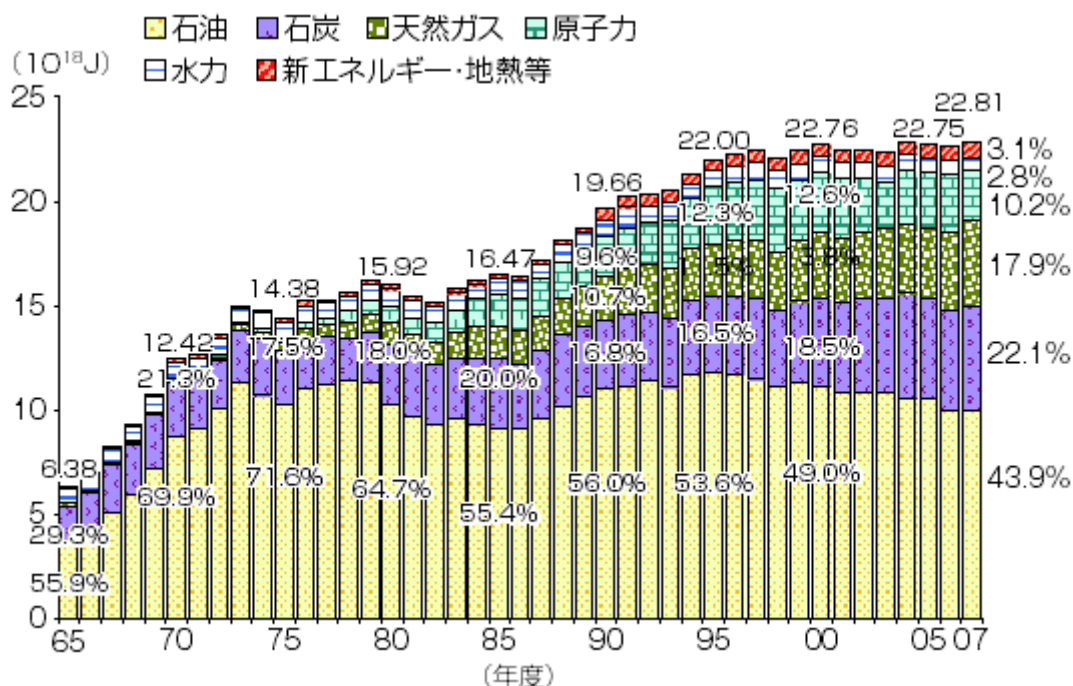


図 2-1 一次エネルギー国内供給の推移

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

しかしながら、2006年度の石油依存度を世界の主要国と比較した場合、我が国の石油依存度は依然高く、また石油の中東依存度が再び高まっている。エネルギー安全保障の観点からも供給源の分散化、再生可能エネルギーの供給量の拡大が期待される。

2) 再生可能エネルギー

再生可能エネルギーは自然界に存在する太陽、風、水、波、地熱、バイオマスなどのように繰り返し再生利用することができるエネルギーを指す。

i) 再生可能エネルギーの導入状況

再生可能エネルギーの供給量は2000年までは700万k1程度を推移していたが、2001年以降、各種導入策などにより導入量が増加した。2000年以降導入量が増加しているのはバイオマス、風力、太陽

光などである（図 2-2）。

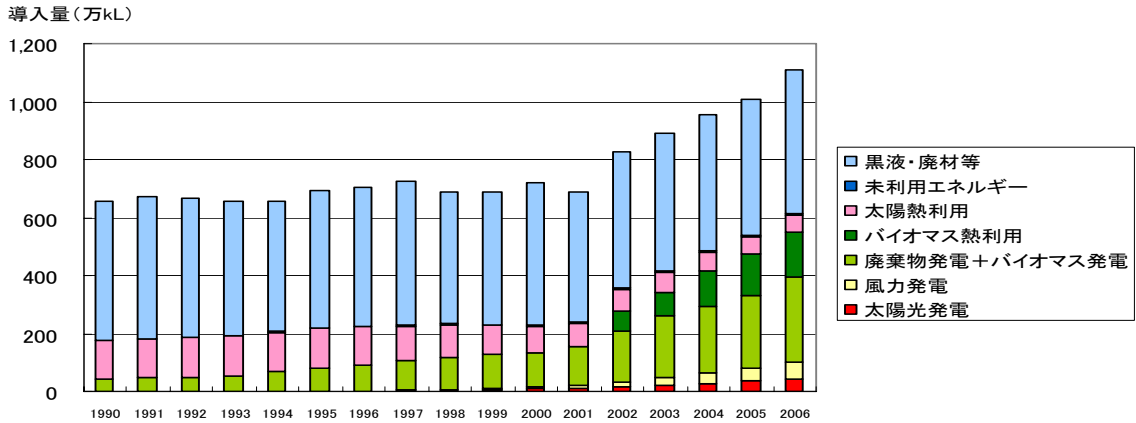


図 2-2 再生可能エネルギーの導入量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

ii) 1次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合

一次エネルギー供給に占める再生可能エネルギーの割合は 6% 弱で推移している。再生可能エネルギーのうち事業用水力発電が最も多く、再生可能エネルギー全体のおよそ半分を占める。ついで廃棄エネルギー直接活用（廃熱活用など）と廃棄物エネルギー活用（廃棄物発電、バイオマス由来の廃棄物燃料）が多く、これらで再生可能エネルギー全体の 9 割を占めている。太陽光発電や風力発電は導入政策の効果とあいまって 2000 年以降、急速な伸びを見せている。地熱発電については、我が国は世界有数の地熱資源国であるにもかかわらず、課題が多く、導入が進んでいない（図 2-3）。

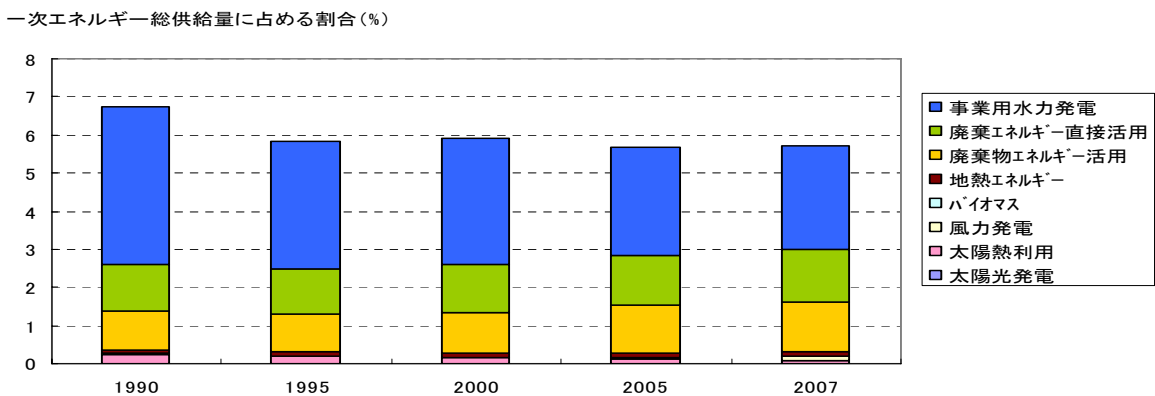


図 2-3 再生可能エネルギーの一次エネルギー供給総量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

iii) 再生可能エネルギーのコスト

再生可能エネルギー施設の設置および運転に要するコストは、現状では化石燃料など競合エネルギーのコストに比べて一般的に高い。再生可能エネルギーの中で最も経済性の高いと言われる風力発電のコストは、2,000 kW の規模のもとで9～12 円/kWh 程度である。これは火力発電のコストと比較して割高である。太陽光発電の発電コストは1990年代に大きく改善されたが、2000年以降は約50 円/kWh のままあまり改善されておらず、発電コストは他の電源に比較して高い(表 2-1)。

表 2-1 再生可能エネルギーのコスト

再生可能エネルギー	設置コスト	発電コスト	備考
太陽光発電	104 万円/kW	73 円/kWh	非住宅用 10kW、1999 年度平均実績値
太陽光発電	68.3 万円/kW	48 円/kWh	住宅用、2006 年度
太陽熱利用	90 万円/台	6.7 円/MJ	標準的住宅用 2007
風力発電	25～32 万円/kW	9～12 円/kWh	2,000kW、最近の平均実績値
	20～30 万円/kW	8.2～11.5 円/kWh	自治体 (平均 800kW)
	16～26 万円/kW	8.2～11.5 円/kWh	事業者 (平均 1,200kW)
バイオマス発電・熱利用・燃料製造	—	—	一般に高価(プラント費、収運コスト、残さ処理コスト)
温度差エネルギー	—	10 円/MJ	設置地点の状況により大きく異なる、設置コスト大、温度差エネルギー・廃棄物熱利用も含めた実績値
雪氷熱利用	—	—	施設数が少なくコスト情報がない、設置コスト大
一般水力発電	76 万円/kW	14 円/kWh	モデルプラント
地熱発電	80 万円/kW	16 円/kWh	モデルプラント
石油火力	—	10.2 円/kWh	
石炭火力	—	6.5 円/kWh	
LNG 火力	—	6.4 円/kWh	
原子力	—	5.9 円/kWh	

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

iv) 再生可能エネルギーの導入目標

2010 年度における再生可能エネルギーの導入目標は各対策が着実に進展した場合に想定される見通しである対策上位ケースとして原油換算で 1,910 万 kl (一次エネルギー総供給量に占める割合は 3% 程度) としている。また、2030 年年度におけるエネルギー需給見通しでは、最大導入ケースとして、水力、地熱を含む再生可能エネルギーが一次エネルギーの国内供給の約 11% を占める見通しを示している。廃棄物由来のエネルギー導入量は 2010 年で頭打ちになり、代わって太陽光発電や、風力、小水力の導入が増えていく見通しである。なお、大規模水力を含めた再生可能エネルギーの一次エネルギーに占める比率は 2030 年度では約 14%～16% である(表 2-2)。

表 2-2 再生可能エネルギーの導入目標（原油換算：万 kl）

	2005 年度	2010 年度		2020 年度	2030 年度
		対策下限ケース	対策上限ケース		
太陽光発電	35	73	118	906	1,934
風力発電	44（陸上）	101	134	399（陸上） 60（洋上）	518（陸上） 419（洋上）
小水力発電	16	-	-	243	421
地熱発電	73	-	-	145	227
廃棄物発電 バイオマス発電	252	449	586	586	586
バイオマス熱利用	142	282	308		
太陽熱利用	61	655	754	131	225
その他	626			982	982
総合計	1,249	1,560	1,910	3,451	5,312
一次エネルギー総供給比	2.0%	2.7%	3.0%程度	6~7%	10~12%
(参考)大規模水力	1,700	-	-	1,900	1,900

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

3) 日本のエネルギー需要

我が国のエネルギー需要は 1970 年代までの高度成長期には国内総生産（GDP）よりも高い伸び率で増加したが、1970 年代の 2 度にわたる石油ショックを契機に産業部門での省エネ化の進展、省エネ製品の普及、産業構造の変換などにより、ある程度、エネルギー消費を抑制しつつ、経済成長を達成することができた（図 2-4）。

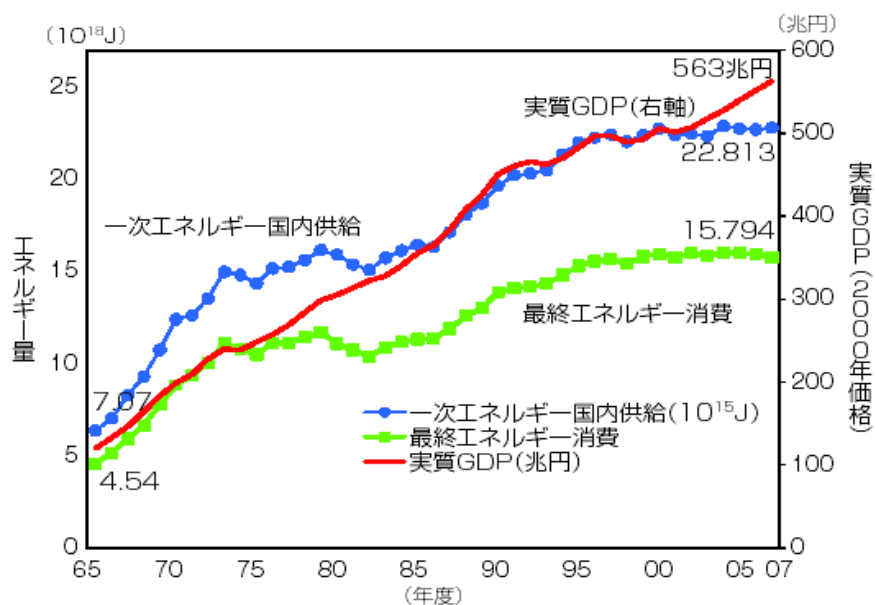


図 2-4 エネルギー需給と経済成長

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

我が国のエネルギー需要の伸び率と GDP 年平均伸び率の関係を見ると、一次エネルギー国内供給の対 GDP 弾性値¹² が第一次オイルショックまでは 1.2 と一次エネルギー国内供給の伸びが GDP の伸びを上回っていたが、2 度にわたる石油ショックを乗切するための産業界の省エネ努力、産業構造の変換等により、2001 年以降は 0.1 と低い値になっている（表 2-3）。

新成長戦略は 2020 年度までの平均で名目 3%、実質で 2% を上回る成長を目指しており、「先進国全体で 1990 年比、2050 年までに温室効果ガスを 80% 削減」（ラクイアサミット宣言）[1-1e] する目標の達成には、対 GDP 弾性値をマイナスにする必要がある。

表 2-3 一次エネルギー国内供給の対 GDP 弾性値

期間	1965 －1973	1973 －1986	1986 －2001	2001 －2007
GDP 年平均伸び率 (%)	9.1	3.3	2.2	1.9
一次エネルギー国内 供給年平均伸び率 (%)	11.3	0.7	2.1	0.3
弾性値	1.2	0.2	1.0	0.1

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

図 2-5 は分野別のエネルギー消費量の推移（1990 年比）を表しているが、産業分野、運輸貨物では横ばいに近い状況が続いているのに対し、民生用（運輸旅客を含む）のエネルギー消費が増加していることが分かる。

¹² エネルギーの GDP 弾性値：GDP が 1% 変化したときのエネルギー供給の変化率。

(1990年度比)

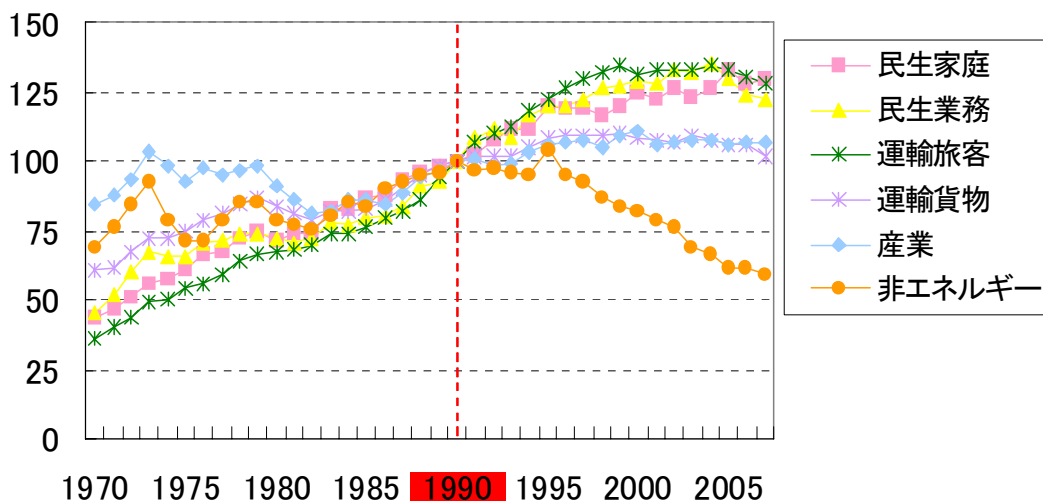


図 2-5 我が国のエネルギー消費量の推移

出典：分野別エネルギー資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

2007 年度の分野別のエネルギー消費量の 1990 年に対する伸び率で見ると、産業部門がほぼ横ばいで推移する一方、民生部門、運輸部門は大幅に増加している（表 2-4）。

表 2-4 1990～2007 年度のエネルギー消費量（1990 年度比）

		1990～2007 年度の最高値	2007 年度
暮らし分野	民生家庭	132.7 (2005 年度)	129.1
	民生業務	134.9 (2004 年度)	122.5
移動・輸送分野	運輸旅客	134.7 (1999 年度)	127.9
	運輸貨物	110.1 (1999 年度)	102.0
産業分野	産業	110.8 (2000 年度)	106.3

出典：分野別エネルギー資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

4) 部門別エネルギー消費

日本政府は「低炭素社会」の構築を目指して、エネルギーの需給両面から様々な対策を立案している。我が国は石油ショック以降の努力により、一次エネルギー国内供給の対 GDP 弾性値が 0.1 と非常に低くなっているが、今後も各部門での省エネ努力が必要とされる。

i) 民生部門

民生部門は家庭部門と業務部門から構成され、2007 年度の最終エネルギー消費全体の 31% を占めている。家庭部門のエネルギー消費は、国民のライフスタイルの変化、世帯数の増加、個人消費の増加等を受けて増加している。業務部門は企業の管理部門等の事務所ビル、ホテルや百貨店、サービス業等のエネルギー消費を対象にしている（図 2-6）。

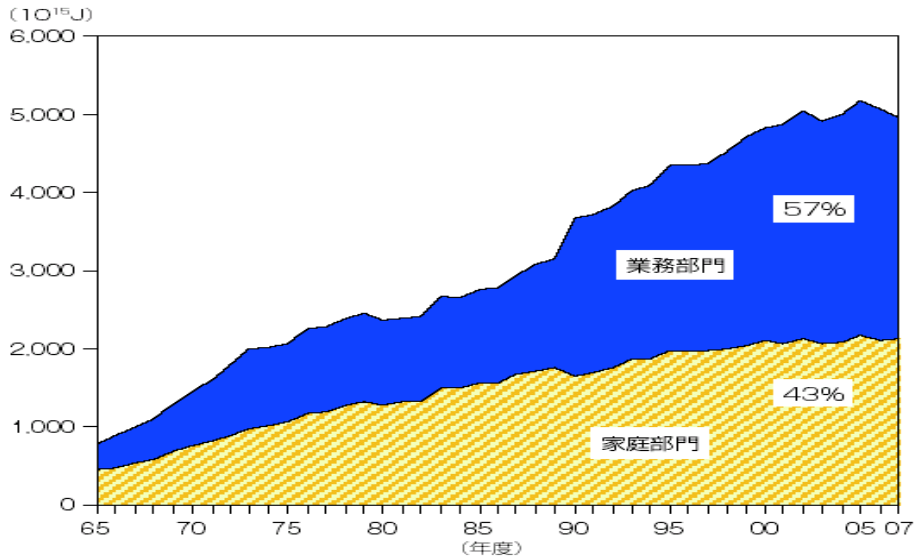


図 2-6 民生部門のエネルギー消費

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

○ 家庭部門のエネルギー消費分析

家庭のエネルギー消費の主な増加要因は 3 人以下の世帯数の増加、住宅規模（住宅あたりの述べ床面積）の拡大、世帯あたりのエネルギー消費量の増加である。

世帯人員が少ないほど、一人あたりのエネルギー消費量は増加している（図 2-7）。

世帯あたりのエネルギー消費量の増加は家庭用電化製品の普及に伴い電力の消費量が大幅に増加したためである。

(10⁷kcal/人・年)

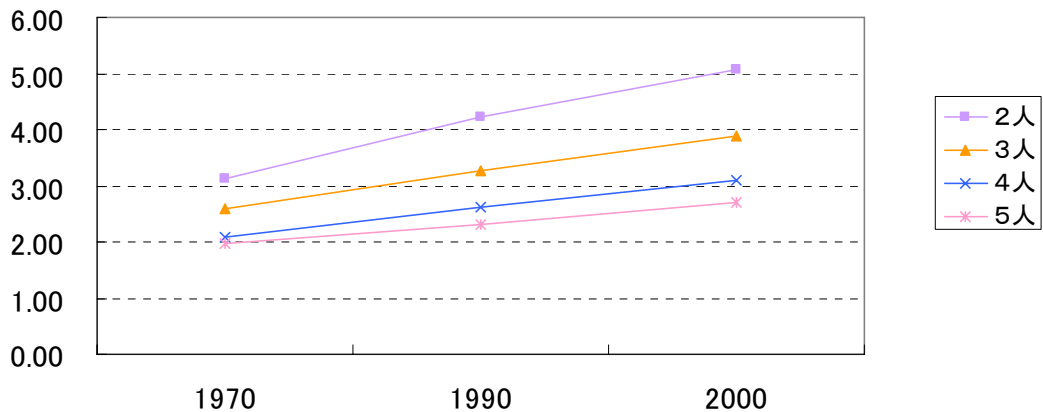


図 2-7 世帯人員別一人あたりエネルギー消費量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

○ 業務部門のエネルギー消費分析

業務部門は、事務所・ビル、デパート、卸小売業、飲食店、学校、ホテル・旅館、病院、劇場・娯楽場、その他サービス（福祉施設等）の9業種に分類される。

図2-8を見ると1990年以前のエネルギー消費量の伸び率は石油ショック、高度成長などを反映して変動しているが、1990年度から2007年度までの17年間では年率2%の増加を示している。これは、この時期に事務所や小売等の延床面積が増加したこと、それに伴う空調・照明設備の増加、そしてオフィスのOA化の進展等によるものと考えられる（図2-9）。

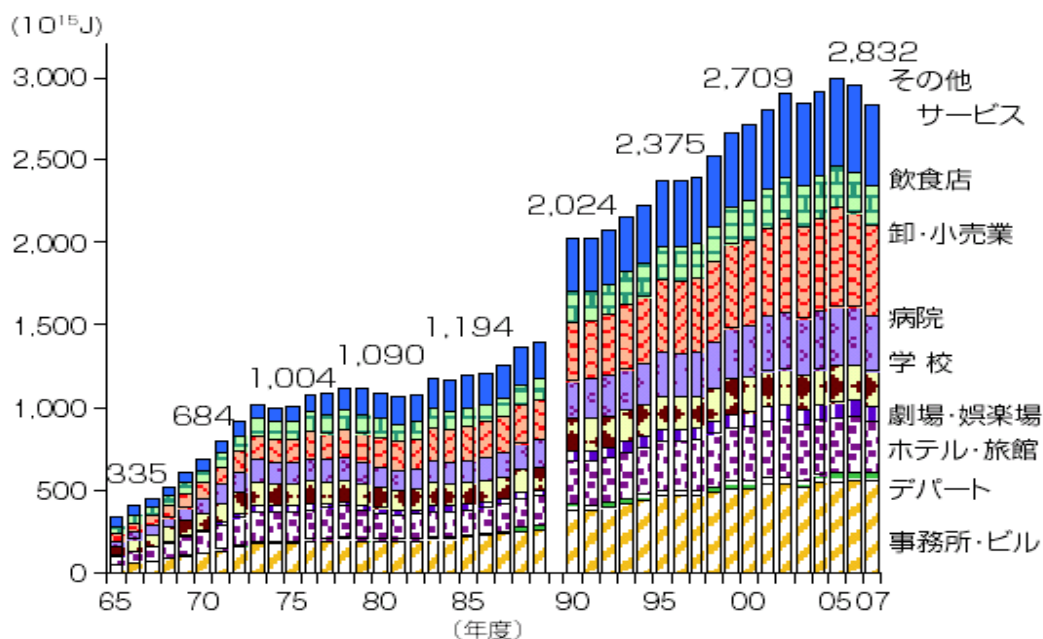


図2-8 業務部門業種別エネルギー消費量の推移

出典：エネルギー白書2009 [2-5c]

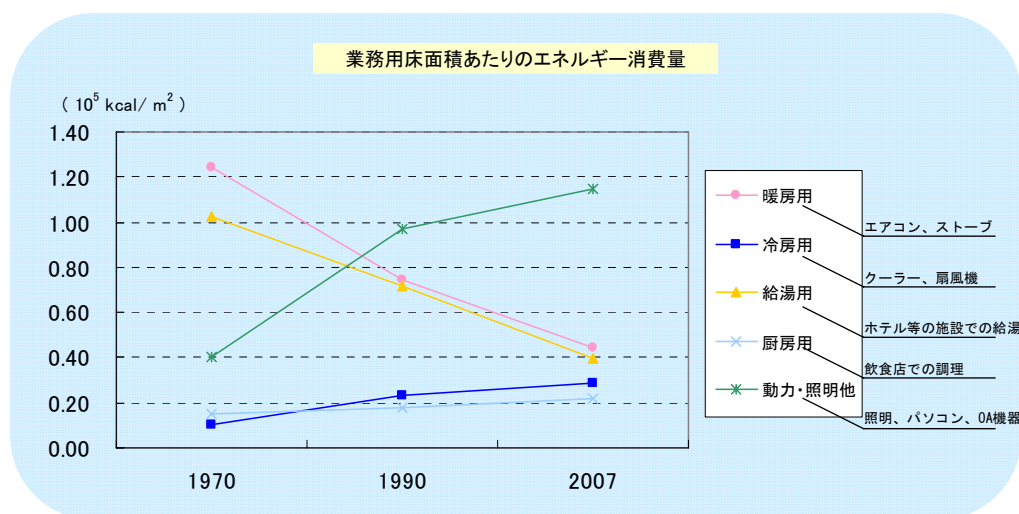


図2-9 業務用電力における用途別エネルギー消費原単位の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

ii) 移動・輸送部門

移動・輸送部門は乗用車やバス等の旅客部門と陸運や海運、航空貨物などの貨物部門に分けられる。2007年度において同部門のエネルギー消費量は全エネルギー消費量の23%であり、旅客部門が61%、貨物部門が39%を占めている(図2-10)。

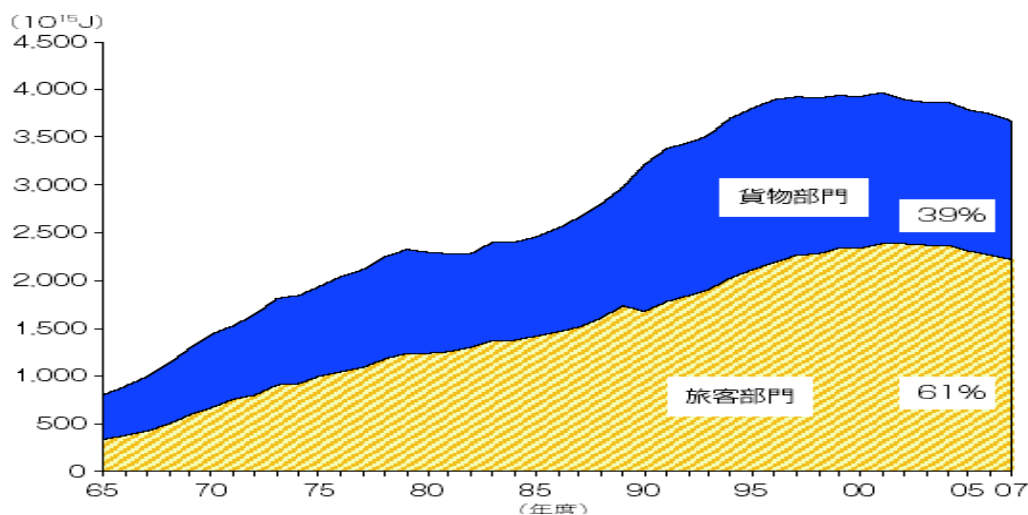


図2-10 移動・輸送分野のエネルギー消費量

出典：エネルギー白書2009 [2-5c]

○ 旅客部門のエネルギー消費分析

旅客部門のエネルギー消費量は1965年から2002年までは順調に伸び、その後減少した。2007年度では1965年比、6.7倍になっている。その間、乗用車の台数は年平均5.4%と増加し、旅客部門全体のエネルギー消費量に占める乗用車の割合は1965年度の64%から85%へと増加している。逆にこの期間の公共交通機関の割合はバスが11%から3%へ、鉄道が18%から3%へと減少している(図2-11、図2-12)。

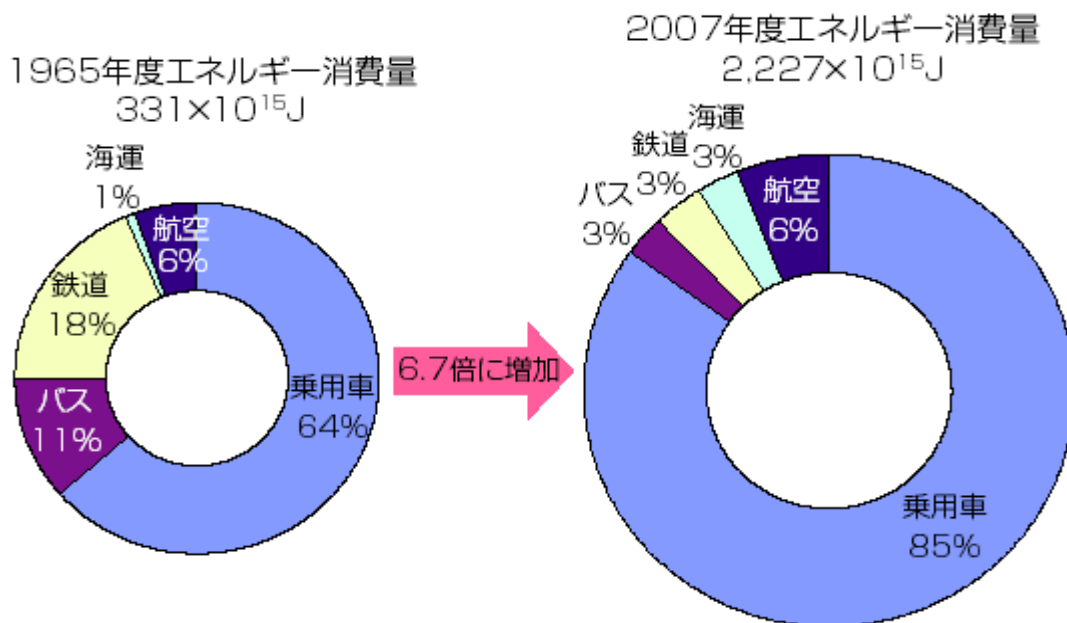


図 2-11 旅客部門のエネルギー消費量の推移

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

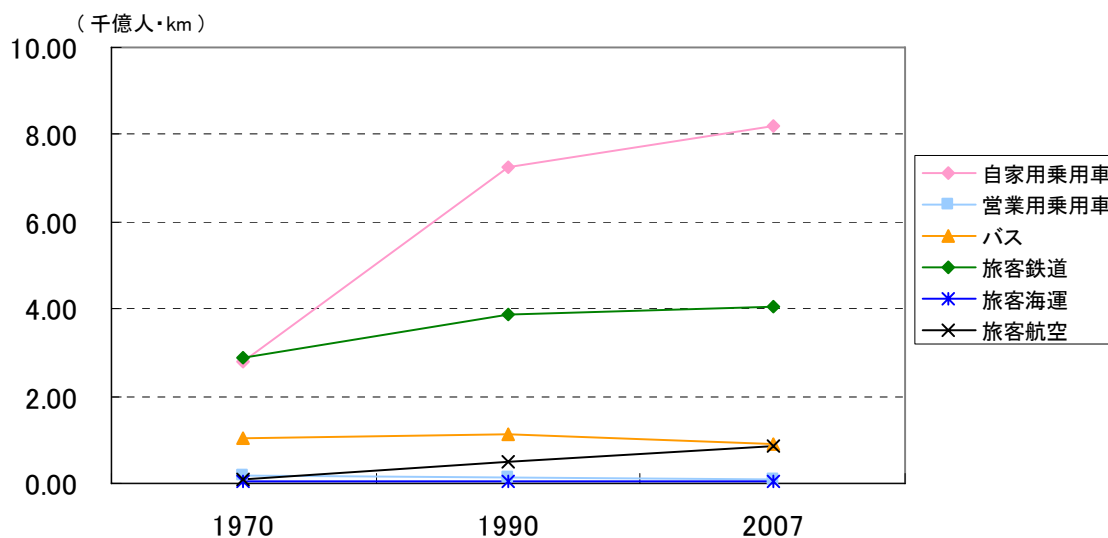


図 2-12 運輸旅客における輸送機関別輸送量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

1 人の人間が 1km 移動するのに消費するエネルギー量は航空機と自動車が多い。特にタクシーなどの営業用乗用車のエネルギー消費効率は悪い。なお、航空機は大型化、機体の軽量化、エンジン性能の向上などにより 1970～1990 年にかけてエネルギー効率が向上している (図 2-13)。

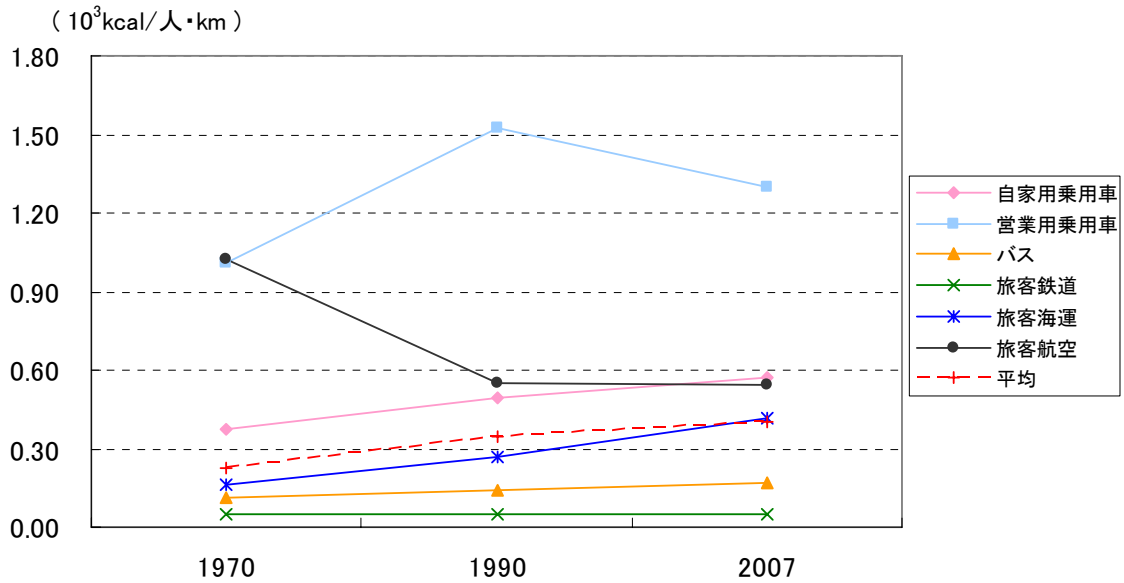


図 2-13 運輸旅客における輸送機関別エネルギー消費原単位の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

○ 貨物部門のエネルギー消費分析

貨物部門のエネルギー消費量は経済情勢、価格の変動、産業構造の変化および省エネルギー技術の普及等に影響される。貨物部門のエネルギー消費の内訳を見ると鉄道、海運が大幅に減少し、貨物自動車の割合が大幅に伸びたこと、率は小さいが航空貨物輸送が大幅に増加（1965年 0.2%→2007年 1.6%）していることが特徴である（図 2-14）。

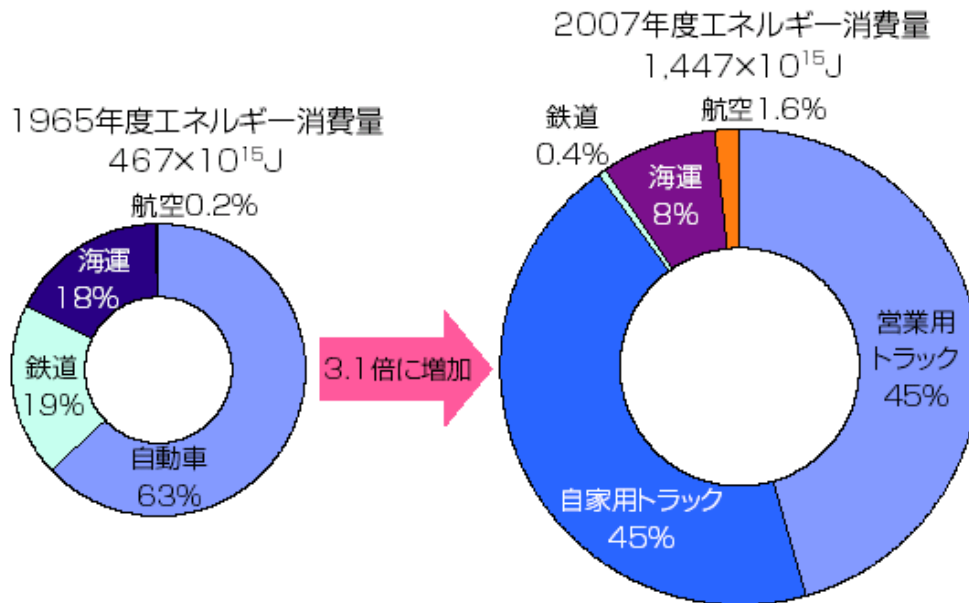


図 2-14 貨物部門のエネルギー消費量の推移

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

貨物の輸送量は 1990 年までは自動車と海運が多かったが、1990 年以降は自動車の輸送量のみが大幅に増加している（図 2-15）。

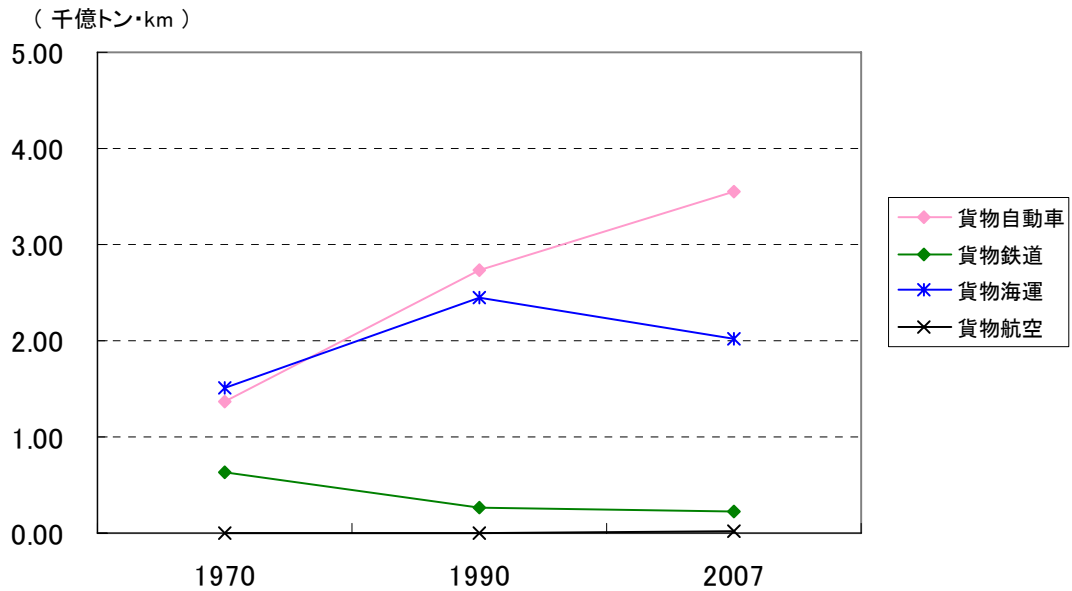


図 2-15 運輸貨物における輸送機関別輸送量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

1 トンの貨物を 1 km 移動させるのに必要なエネルギー消費量は航空機が最も大きく、その次が貨物自動車である。貨物自動車は少量の貨物を高頻度で運ぶため、輸送に要するエネルギー量は大きく、輸送効率が悪い（図 2-16）。

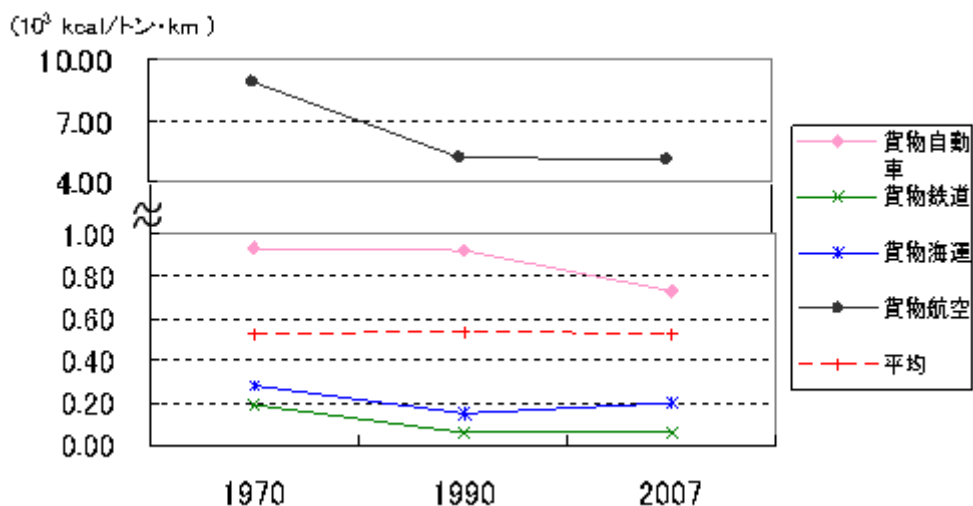


図 2-16 1 トンの貨物を 1km 移動させるのに消費するエネルギー量

出典：分野別エネルギー・資源消費及び環境保全に関する実態調査 [2-12]

iii) 産業部門

産業部門のエネルギー消費量はエネルギー消費全体の 45% であり、そのうちの約 9 割を製造業が占めている (図 2-17)。

1973 年と 2007 年を比較すると経済規模は約 2.3 倍になり、製造業全体の生産額も約 1.9 倍に増加しているが、製造業のエネルギー消費量はほとんど伸びていない。これは製造業が生産コスト削減の観点から石油ショック以降、エネルギー分野で省エネ努力、産業構造の変化 (素材産業から加工組立型産業へのシフト) 等のコスト削減努力を続けてきた結果である (図 2-17、図 2-18)。

しかしながら、産業部門のエネルギー消費は、我が国のエネルギー消費量の 45% を占めており、同部門でのエネルギー消費量削減努力は今後も必要とされる。

このため「環境エネルギー技術革新計画」でも特にエネルギー使用量の多い産業を対象に「水素還元製鉄」、「革新的製造プロセス」などが長期的研究課題とされている。

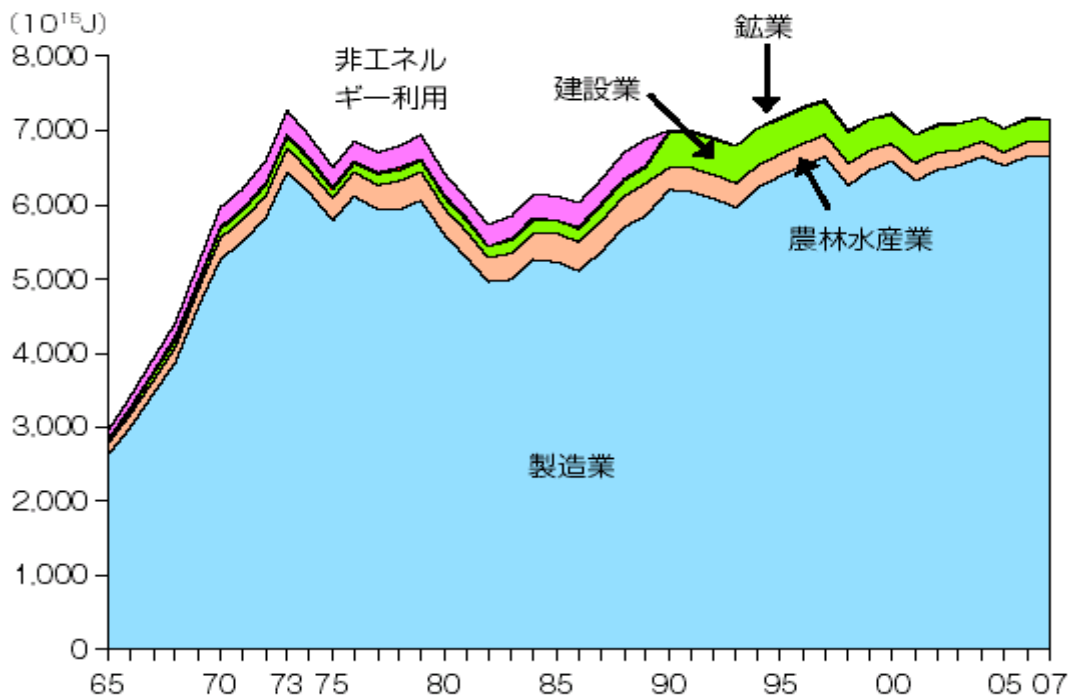


図 2-17 産業部門のエネルギー消費の推移

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

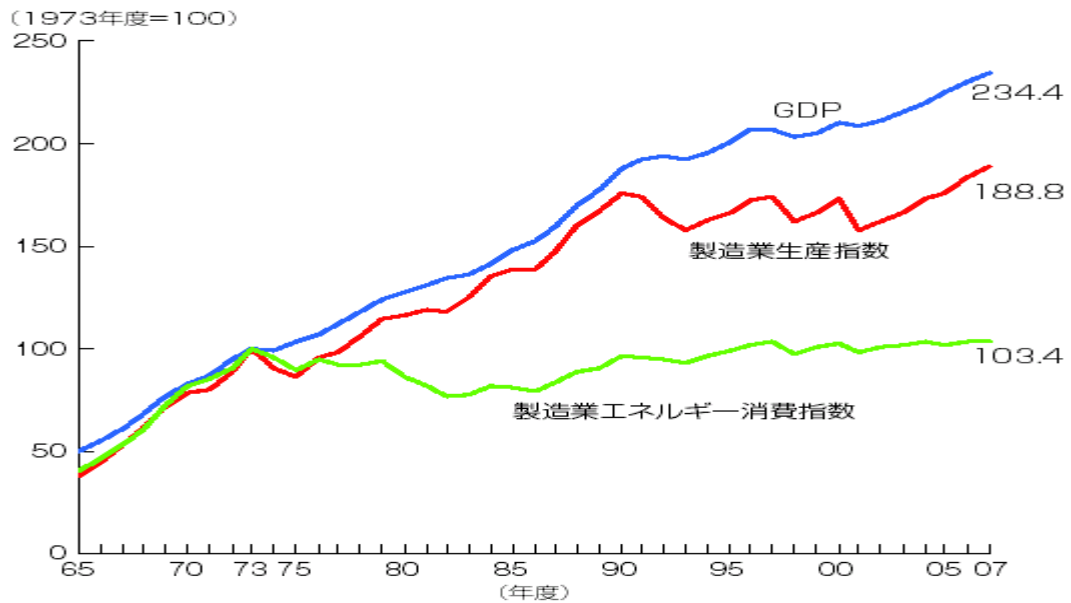


図 2-18 製造業のエネルギー消費と経済活動

出典：エネルギー白書 2009 [2-5c]

○ 製造業

鉱工業生産指数 (IIP) あたりのエネルギー消費量は第一次石油ショックのあった 1973 年以降、1980 年代の半ばまで急速に低下している。これには技術的な省エネのほか、製品の高付加価値化等による生産性の変化も影響しているものと考えられる。鉄鋼業や化学工業などのエネルギー多消費産業では 1990 年ごろから横ばいの状況が続いている (図 2-19)。

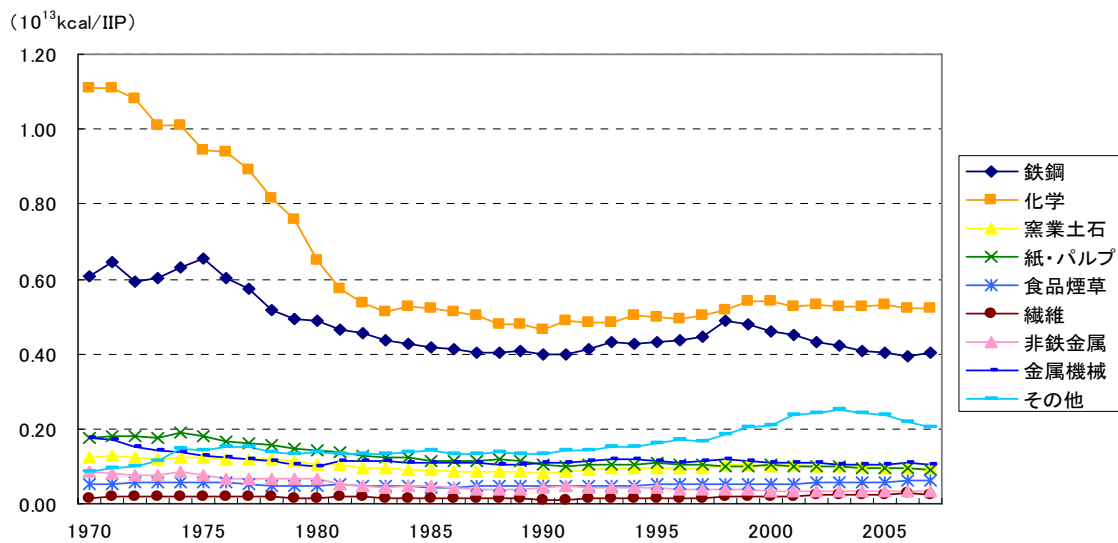


図 2-19 IIP あたりの業種別エネルギー消費量の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

○ 鉱業・建設業

鉱業・建設業でのエネルギー消費量は、重機などの燃料がそのほとんどを占め、1990年以降、公共工事の減少に伴い、減少傾向にある（図 2-20）。

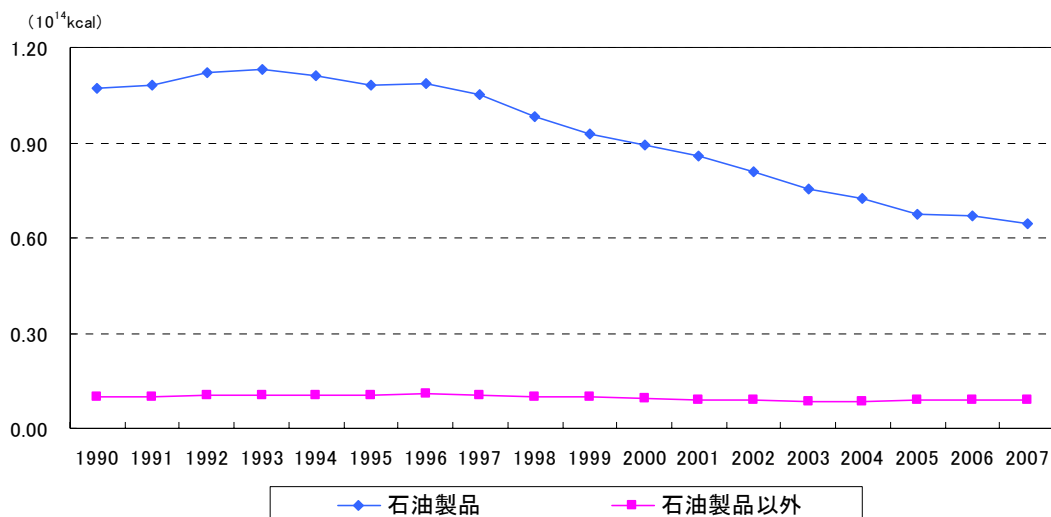


図 2-20 鉱業・建設業における燃料種別エネルギー消費

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

○ 農林水産業

農林水産業におけるエネルギー消費は温室などの暖房用、農業用機械、漁船などの燃料として石油消費が中心である（図 2-21）。

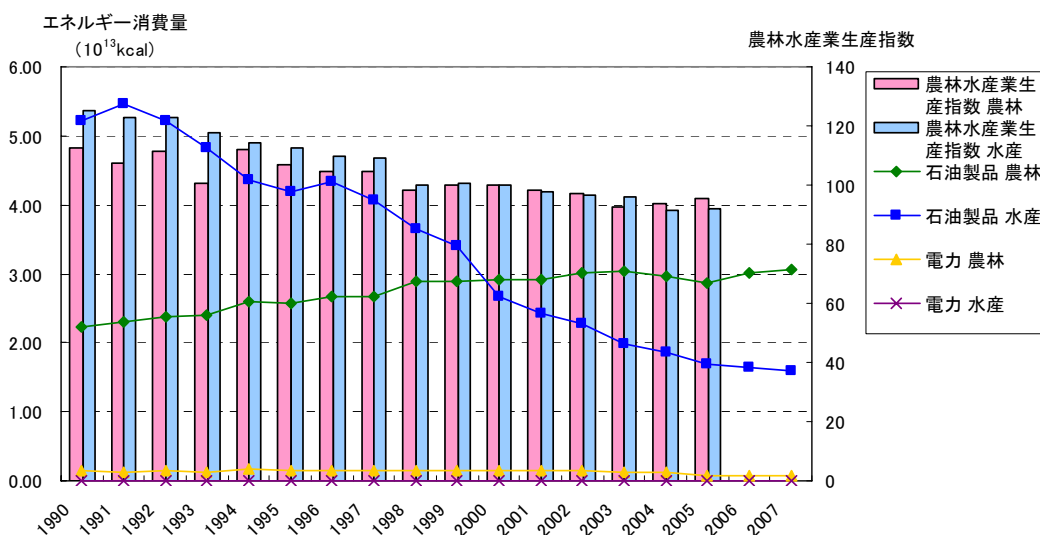


図 2-21 農林水産業における燃料種別エネルギー消費量と農林水産業生産指数の推移

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

農林業で農林水産業生産指数に比べてエネルギー消費が伸びているのは、機械化や消費者ニーズの高度化に対応したビニールハウスなどの整備の増加の影響であると考えられる。

一方、水産業ではエネルギーを大量に消費する遠洋漁業などの低迷により、石油の消費量が減少していると考えられる。

5) エネルギー分野での削減方策・方向性

i) 供給側での方策と方向性

- 化石燃料： 大量のエネルギーを安定的に供給できるというメリットはあるが、資源枯渇、温室効果ガス排出などの問題があり、今後削減していく必要がある。そのため、発電効率の向上、ロス率低減等の技術開発や二酸化炭素貯留技術（Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS）などの研究が行われている。また燃料電池などの研究が行われている。
- 原子力： 使用済放射性廃棄物の処理・処分、原子力発電所の安全確保、ウラン資源の枯渇などの問題がある。将来の原子力技術として高速増殖炉、核融合の研究が行われているが、現状では課題が多い。
- 再生可能エネルギー： 自然界に「広く」、「薄く」存在しており、出力は天候等、気象条件に左右される。このためエネルギーとしてみた場合、「出力」等が変動して不安定であり、また発電コストも現状では既存の電源に比べて割高であるという問題がある。再生可能エネルギーを普及させるためには、技術面、および制度面での対策が必要とされる。具体的には「効率的な機器の開発」、「スマートグリッドと蓄電池などエネルギー貯蔵技術等の組合せによるネットワーク構築とネットワーク安定運用技術」、「余剰電力の高値買取り、導入促進に向けた経済的インセンティブの付与」等、官民一体となった条件整備が必要とされ、様々な政策が立案されている。

ii) 需要側での方策と方向性

- 産業部門： 産業分野での省エネ技術は世界有数であり、1990年以降、産業分野でのエネルギー需要は横ばいである。しかしながら、今後、「省エネ技術の開発」、「産業構造の転換」、「企業単位でなく工業地域単位、行政区単位等より広域的な省エネ対策」等、更なる省エネ努力を行う必要がある。
- 民生部門： 民生部門でのエネルギー消費量の増加は家庭部門では世帯数の増加、業務部門では事務所等の床面積の増加が主な原因である。この部門でのエネルギー消費量を削減するためにはエネルギー消費原単位の大幅な削減が必要である。
- 移動・輸送部門： 移動・輸送部門のエネルギー消費の増加は大半が自動車の燃料消費が増加した結果である。自動車単体レベルにおける燃料消費効率の向上、公共交通システムの有効活用などが必要である。

（２）環境分野

我が国の環境政策の基本を定めている環境基本法（1993年）[2-13]は第3条から第5条にかけて豊かな自然環境など環境の恵みを享受するとともに、これを将来の世代へ引き継いでいくこと、環境の負荷を出来る限り減らし、公平な役割分担と自主的、積極的な環境保全活動、環境への負荷の少ない健全な経済の発展などによる持続的発展可能な社会の構築、科学的知見の充実による予防原則を示している。

1）循環型社会形成に関連する我が国の法体系

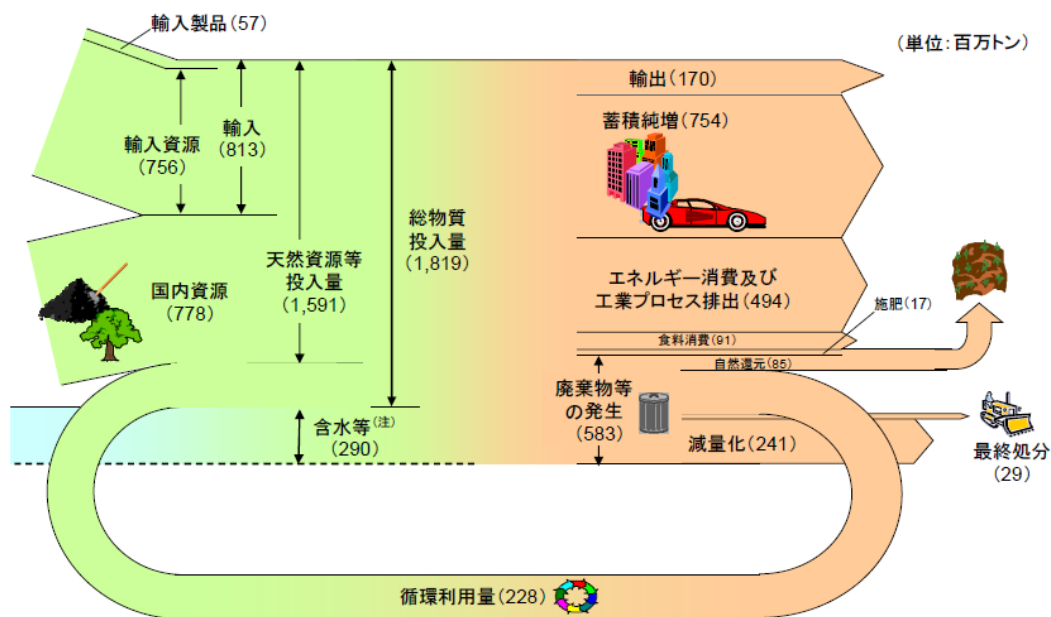
循環型社会形成の基本的枠組みとして2000年に成立した「循環型社会形成推進基本法」[2-14]のもと、廃棄物の適正処理に関する法律（廃棄物処理法[2-15]）、リサイクル（3R）の推進に関する法律（資源有効利用促進法[2-16]）が制定されている。同法は循環型社会を「大量生産・大量消費・大量廃棄型の経済社会から脱却し、生産から流通、消費廃棄に至るまで物質の効率的な利用やリサイクルを進めることにより資源の消費が抑制され、環境への負荷が少ない社会」と規定している。個別物品の特性に応じた規制として「容器包装リサイクル法」、「家電リサイクル法」、「建設リサイクル法」等が制定されている。また、この法律により廃棄物等の処理の優先順位が発生抑制（Reduce）、再利用（Reuse）、再生利用（material Recycle）、熱回収（thermal Recycle）、適正処分と明確に規定され、同法の制定以降、「3R」が社会に広く認識されるようになった。

2）我が国の物質フロー

循環型社会を構築するためには、日本人が1年間にどれだけの資源を採取、消費、廃棄しているかを知ることが重要である。平成18年度における我が国の物質フロー[2-17]をみると18.2億トンの総物質投入量があり、その半分程度の7.5億トンが建物や社会インフラなどの形で蓄積されている。また1.7億トンが製品の形で輸出され、4.9億トンがエネルギー消費および鉱業プロセスで排出されている。5.8億トンの廃棄物等が発生しているが、このうち2.3億トンが循環利用されている。天然資源等投入量の削減、特に枯渇が懸念されている金属資源、化石燃料資源の消費抑制が持続的発展可能な社会を構築していく上で重要である（図2-22）。

平成18年度の総物質投入量は平成12年度に比べて3.2億トン減少しているが、これは国内採取の非金属鉱物（岩石や土砂等）の減少量にほぼ相当し、国内建設工事の減少が最大の要因であると考えられる。

平成18年度と平成12年度の比較でいうと、輸入資源はほぼ横ばい、循環利用量は7%程度増加しているが、我が国の社会構造としては物質資源投入量を抑制する方向への転換はほとんど進んでいないとみることができる。



(注)含水等：廃棄物等の含水等(汚泥、家畜ふん尿、し尿、廃酸、廃アルカリ)及び経済活動に伴う土砂等の随伴投入(鉱業、建設業、下水道業の汚泥及び鉱業の鉱さい)

図 2-22 我が国における物質フロー [2-17]

平成 18 年度の廃棄物発生量 (583 百万トン) の内訳を見ると、産業廃棄物 (418 百万トン) が 72%、ゴミ (52 百万トン) が 5%、し尿 (25 百万トン) が 4%、その他 (87 百万トン) が 15% となっている。また、廃棄物発生量 (583 百万トン) の内、循環利用量 (228 百万トン)、自然還元 (85 百万トン)、減量化 (241 百万トン)、最終処分 (29 百万トン) となっている。

第 2 次循環型社会形成推進基本計画では 2015 年を目標年度にして「循環型社会形成のための指標及び数値目標」を設定している。

指 標	資源生産性	循環利用率	最終処分量
目 標	42 万円/トン	14~15%	23 百万トン

資源生産性 GDP/天然資源等投入量 2015 年度において 42 万円/トン

平成 12 年度 (約 26 万円/トン) から概ね倍増

循環利用率 循環利用量/循環利用量+天然資源投入量

平成 12 年度 (約 10%) から大向け 4~5 割向上

最終処分量 廃棄物最終処分量

平成 12 年度 (約 56 百万トン) から概ね 60% 減

また、2015 年を目標年度に一般廃棄物、産業廃棄物の減量化を行うための目標設定も行っている。天然資源投入量削減のためには「循環利用量をできるだけ増やす」ことと、「総物質投入量をできるだけ削減する」ことが必要である。資源の循環利用量を増やすためには「廃棄物として発生したもの

の再利用（Reuse）」と再生利用（Recycle）を増やす必要がある。総物質投入量を減らすためには「廃棄物の発生抑制（Reduce）」と物質投入量そのものを削減することが必要である。

3) リサイクルの現状と問題点

i) 民生部門

家庭での3Rの取組は、モノを大事に使ったり、買い物にマイバッグを持参するなどいった身近な発生抑制活動が中心である。過剰な生産や流通を抑制して物質資源の使用を削減するためには、無駄な消費（製品、包装容器）を行わないことが有効である。ゴミ収集やレジ袋の有料化、比較的安価な詰め替え商品の提供もゴミ量の削減に効果がある。しかしながら、家庭自らが行うリサイクルは、自然還元に任せた堆肥化など伝統的に行われてきたごみ減量を除き、実施例は多くない（表2-5）。

表 2-5 家庭における3Rの具体例

区分	具体的な方策例
発生抑制 (Reduce)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 必要なものだけの購入 ・ 過剰包装を断る ・ 買い物へのマイバッグ持参 ・ 使いかけのものを最後まで使う ・ 長持ちし詰め替え可能な商品の購入
再使用 (Reuse)	<ul style="list-style-type: none"> ・ リサイクルショップやフリーマーケットの利用 ・ リターナブル容器の使用 ・ 故障した家財の修理・再使用
再生利用・熱回収 (Recycle)	<ul style="list-style-type: none"> ・ ごみの分別・回収への協力 ・ 各種リサイクル法のスキームへの協力 ・ 生ごみ処理機を使ったコンポスト化 ・ リサイクル商品の購入

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

業務における取組も家庭と同様、発生抑制が中心である。業務分野における取組には、企業が単独で行えるもの（用紙節減、ロス削減のための販売管理等）もあれば、顧客である家庭・市民とともに取り組むもの（レジ袋有料化、割り箸の廃止等）もある。

リサイクルについては、食品を扱う飲食店や商業店舗等において、廃棄食品や廃食用油をそれぞれ肥料・飼料、燃料などへ再生利用する取組が見られる（表2-6）。

表 2-6 業務における 3R の具体例

区分	具体的な方策例
発生抑制 (Reduce)	<ul style="list-style-type: none"> ・ コピー用紙の使用量削減 ・ 補充式の事務用品の購入 ・ レジ袋配布の削減 ・ 店頭でのマイバック持参の呼びかけ ・ 販売商品の簡易包装化 ・ 売れ残り商品を削減するための販売管理 ・ 調理時の工夫による廃棄食材の削減 ・ 料理の量も注文可能なオーダーの導入
再使用 (Reuse)	<ul style="list-style-type: none"> ・ コピー・印刷時の裏紙使用 ・ ファイル等文具類の繰り返し使用 ・ 詰め替え式トナーカートリッジの使用 ・ 割り箸の廃止
再生利用・熱回収 (Recycle)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再生紙の購入 ・ リサイクル事務用品の購入 ・ 食品廃棄物のリサイクル（肥料化・飼料化・エネルギー回収等） ・ 廃食用油からの BDF 製造

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

ii) 移動・輸送部門

移動・輸送部門でも 3R に関する様々な取組が見られる。トラック運送業や倉庫業などでは、貨物の包装の簡易化、繰り返し使用、通い箱の利用などにより包装材の減量に取り組んでいる。高速道路や鉄道の分野では、サービスエリアや駅などの利用客が捨てていくゴミや飲食店から排出される食品廃棄物を堆肥等に再資源化する活動がなされている（表 2-7）。

表 2-7 移動・輸送部門の 3R の具体例

区分	具体的な方策例
発生抑制 (Reduce)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生産・加工段階での簡易包装化 ・ 通い箱、ハンガー輸送等による無包装化 ・ ロングレール、プレストレス・コンクリートまくらぎによる長寿命化 ・ IC 乗車券の導入による紙資源使用の抑制
再使用 (Reuse)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 流通用梱包資材の繰り返し使用 ・ 引越用反復梱包資材 ・ 列車機材の修理・再使用
再生利用・熱回収 (Recycle)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 再生パレットの利用 ・ 高速道路のサービスエリア・パーキングエリアでのごみ再資源化 ・ 駅ごみ再資源化

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

iii) 産業部門

産業部門では発生抑制、再使用、再生利用のすべての区分において、最も多様でかつ深い取組が行われている。製造業では、厳しいコスト削減の要請から歩留まり向上や原材料のロス低減のための無

駄の排除が古くから徹底して行われており、通常考えられる省資源への取組はほとんど実施されている。

近年のグローバル化した経済環境の中で新たな環境規制の遵守や企業のCSRが求められるようになった結果、省資源の取組にも新たな展開が見え始めている。

従来から個々の企業内で取組まれてきたリサイクルを高付加価値化して第二のビジネスに育てようとする動きや、セメントや鉄鋼などをはじめとする異業種との連携を前提とする取組に広がっているほか、企業にとって省資源とともに重要な温暖化対策に貢献する熱回収が急速に拡大している。近年になって、特に大手の製造業を中心に発展しているのが、省資源化等をあらかじめ意識しながら製品設計を行う「環境配慮設計」(Design for Environment, DfE)であり、それを支援するLCAや「マテリアルフローコスト会計¹³⁾(Material Flow Cost Accounting, MFCA)などのツール開発が経済産業省の支援のもとで進められている。環境省は「環境会計¹⁴⁾(Environment Accounting, EA)のガイドラインを示して、環境面での企業活動全体の定量的な評価の算定、公表を促している(表2-8)。

表 2-8 産業部門の3Rの具体例

区分	具体的な方策例
発生抑制 (Reduce)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 廃棄物を出しにくい製品の企画・設計 ・ 小型化・軽量化した製品の企画・設計 ・ 長寿命型の製品の企画・設計 ・ 頻繁なモデルチェンジの抑制 ・ ソフトウェアアップデートの充実 ・ 修理サービスの充実化 ・ 歩留向上による原材料の使用量抑制 ・ 工場等建設時の廃棄物の発生抑制 ・ LCA や MFCA 等の環境管理ツールの導入 ・ RoHS 指令¹⁵⁾、REACH 規則¹⁶⁾ 等への対応のための環境管理体制の構築
再使用 (Reuse)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 飲料容器のリターナブル化・デポジット化 ・ 詰め替え可能な製品の製造 ・ 再使用可能な製品の製造 ・ 工場内設備の補修・再使用 ・ 建設発生土の工事間利用

¹³⁾ 製造プロセスにおける資源やエネルギーのロスに着目して、そのロスに投入した材料費、加工費、設備償却費などを“負の製品コストとして”として総合的にコスト評価を行う原価計算、分析の手法。

¹⁴⁾ 企業などの組織が、事業活動における環境保全のためのコストとその活動によって得られた効果を可能な限り定量的(貨幣単位または物量単位)に測定する会計である。環境会計は環境報告書などに記載され、公表されることが多い。

¹⁵⁾ RoHS (Restriction of Hazardous Substances) 指令: 電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用制限に関する指令。鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリ臭化ビフェニール、ポリ臭化ジフェニールエーテルが指定され、2006年7月1日から販売が制限されている。

¹⁶⁾ REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) 規則: 化学物質の総合的な登録、評価、認可、制限の制度(2007年6月1日発効)。EU域内にて化学品を製造、輸入する場合、欧州化学品庁への物質の登録、評価を製造業者、輸入業者に対して義務づけ、さらに発がん性を有するなど、健康・環境に影響を与える懸念のある物質について認可、禁止などの制限を設けた規制。

区分	具体的な方策例
再生利用・熱回収 (Recycle)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 事業活動に伴う廃棄物等のリサイクル ・ スラッグの多様なリサイクル技術の開発 ・ 廃棄物等からの金属類の回収・利用 ・ 一般廃棄物・産業廃棄物の原燃料としての受け入れ ・ RPF¹⁷ の製造・利用 ・ セメント・鉄鋼業界との連携 ・ 再資源化に積極的な廃棄物処理業者の選定 ・ サーマルリサイクルによるリサイクル率向上 ・ 家畜糞尿を利用したエネルギー回収 ・ 再生資源の積極購入 ・ エコタウン事業の取組 ・ 複数工場の連携によるゼロエミッションの取組 ・ リサイクル事業のビジネス化

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

iv) 公共プラント等行政サービス部門

公共プラント等の行政サービス部門には一般廃棄物焼却工場のほかに浄水場や下水処理場、およびそれらの関連施設があるが、種々の処理過程において非常に多量の有機系汚泥や焼却残渣が発生する。したがって、これら汚泥や残渣の減容化や再生利用に関する取組が中心である。リサイクルの取組は、大きく原材料化（マテリアルリサイクル）とエネルギー回収・燃料化（サーマルリサイクル）に分けることができる。

マテリアルリサイクルとしては、汚泥や焼却残渣の堆肥化・建設資材化などが代表的である。サーマルリサイクルについてはごみ発電・余熱回収・下水消化ガス発電などが比較的古くから行われてきた。最近では、下水汚泥を使ってバイオプラスチック（生分解性プラスチック）や石炭混焼燃料を製造する先進的な取組もなされている。リサイクル以外の方策としては、可溶化菌により下水汚泥の発生そのものを抑制したり、1,300℃以上の高温で廃棄物をガス化しながら焼却灰をも溶融して減容化するガス化溶融炉などといった発生抑制の方策も取られるようになった（表 2-9）。

¹⁷ Refuse Paper & Plastic Fuel（固形燃料）。主に産業系廃棄物のうち、マテリアルリサイクルが困難な古紙およびプラスチックを原料とした高カロリーの固形燃料を指す。

表 2-9 公共プラント等行政サービス部門の 3R の具体例

区分	具体的な方策例
発生抑制 (Reduce)	<ul style="list-style-type: none"> 下水処理における汚泥発生抑制システム 溶融炉による焼却灰の減容
再使用 (Reuse)	<ul style="list-style-type: none"> リサイクルプラザでの粗大ごみ再利用品の販売 高度処理水の路面散水（ヒートアイランド対策）
再生利用・熱回収 (Recycle)	<ul style="list-style-type: none"> 下水汚泥のコンポスト化・レンガ材料化 下水汚泥のバイオプラスチック原料化 脱水ケーキの改良土へのリサイクル RDF 燃料の製造・利用 浄水汚泥のセメント原燃料へのリサイクル 施設工事における建設リサイクルの実施 ごみ焼却時の余熱回収・ごみ発電 廃棄物等のガス化溶融発電 下水汚泥等の消化ガス発電 下水汚泥の燃料化（石炭混焼発電）

出典：分野別エネルギー・資源消費および環境保全に関する実態調査 [2-12]

v) 省物質資源方策の方向性

リサイクルを中心にした個々の取組は循環型社会形成のために重要ではあるが、自然界から採取する物質資源の使用量を大幅に削減する上では十分でない。無駄な物質使用を徹底的に排除した生産構造を構築することが必要である。物質資源削減の基本的方向性としては「リサイクルの高度化」、「廃棄物発生の抑制」、「脱物質消費社会の構築」などが重要である。以下、方向性として重要であると考えられる項目をリストアップする。

- ・ エコデザインの浸透

環境への配慮を予め組み込んだエコデザインの実施が重要。エコデザインを支援するツールとして LCA や MFCA が代表的であるが、実際の製品設計の現場で使えるものを構築することが必要。

- ・ リサイクル手法の賢明な選択

マテリアルリサイクルとサーマルリサイクルの効果や影響を総合的に評価・比較し、賢明と判断される手法を選択する合意形成のプロセスを踏むべきである。

- ・ 発生抑制に軸足を置いた 3R の推進

発生抑制を現状よりさらに進めていく方策を講じる。

- ・ サービサイジングへの転換

サービサイジングとは、従来、製品として提供していたものをサービス化して提供することを指す。製品が持つ機能に着目し、機能の部分だけを提供しようとする新たなビジネスの考え方である。機能提供型のサービスとすることで、余剰な生産や機器等の重複所有にともなう物質資源の使用量を軽減することにつながる。サービサイジングは新たな産業創出や既存の製造業の業態変革を促す意味で経済的な意義も大きいと言える。

- ・ ストック社会への転換

これまでのフローにより形成された蓄積を十分に活かすストック重視の考え方に転換することが重要である。ストック社会では既存の社会資本の補修やメンテナンスを適切に行って寿命を延ばすこと、将来のリフォームを前提に住宅を設計することなどをあげることができる。

- ・ 物質資源の使用量削減を支援する評価技術の開発

物質資源の使用量削減を支援する評価技術の開発が必要である。評価の対象となる物質資源の使用量には、製品等の生産に必要な量だけでなく、採掘時に付随的に採取・掘削される物質についても含めるべきである。付随的に採取・掘削される物質は隠れたフロー（Hidden flow）¹⁸ やエコロジカル・リュックサック（Ecological Rucksack）¹⁹ などと呼ばれるが、多量の物質の採取・掘削が付随的に必要とされる鉱物資源の使用量を評価する際には特に重要な視点となる。以上のような包括的な物質資源管理を行うためには、MFA や LCA の活用が有効である。ライフサイクル全体にわたる間接的な影響分までもを含めた範囲を対象に、環境への負荷を見積もることが可能であり、物質資源の使用量の削減をきめ細やかに検討するための材料を与えるものである。

4) 環境保全に関連する我が国の法体系

環境基本法では、我が国が環境保全のためにとる施策を第 14 条で次のように定めている。

- ・ 人の健康の保護と生活環境の保全、自然環境が保全されるように、大気や水、土壌その他の環境の自然的構成要素が良好な状態に保持されること
- ・ 生態系の多様性の確保、野生生物の種の保存など生物多様性が確保されるとともに、森林、農地、水辺地等における多様な自然環境が保全されること
- ・ 人と自然との豊かな触れ合いが保たれること

これらの目的を達成するため地球環境から地域の環境におよぶ環境保全にかかわる環境影響評価、規制措置を含む膨大な法体系ができています。我が国ではかつて深刻であった大気汚染や水質汚染などの公害問題は環境規制等により大幅に改善されている。今後の課題は、地域ごとでは許容範囲であっても流域全体を通して見た場合に悪化している水循環、生物多様性の保全機能の劣化など、より広域的な対策が必要な環境問題に対していかに対処していくかということである。

5) 環境保全策が今後進むべき方向性

○ 大気環境：持続可能な町づくり

都市においては、大気汚染、騒音、ヒートアイランド現象、地球温暖化など、様々な大気環境問題が発生している。これらの問題の解決には環境的に持続可能な都市・交通環境の構築が必要であり、そのためには、エネルギー消費の少ない都市、環境への負荷の少ない交通システムの実現が主な対策

¹⁸ 資源採取等に伴い、直接使用する資源以外に付随的に採取・掘削されるか又は廃棄物として排出される物質のこと。

¹⁹ ある製品の素材に関して、その生産のために移動された物質量を重さで表した指標。例えば 1 トンの鋼を得るために鉱石、土砂などの自然資源を 500 トン移動する必要がある場合、エコロジカル・リュックサック値は 500 と表される。

である。

○ 水環境：流域全体での水環境改善

土地の改変や地表面の被覆、河川護岸のコンクリート化などにより、雨水の地下浸透能力や森林の水源涵養能力が低下することで、河川の平常時の流量の低下、湧水の枯渇、水生生物の生息環境の悪化などが引き起こされてきた。さらに、水は土壌中で保水・浄化されることにより良好な水質が保たれるなど、水循環の悪化が水質を含めた水環境を規定してきている。つまり、水環境の総合的な改善には、特に健全な水循環系の構築が必要であると言える。そのためには、流域の特性に応じ、水質、水量、水生生物、水辺地を含む環境等を保全しつつ、その持続的利用を図り、人と身近な水のふれあいを通じた豊かな地域づくりを流域全体で進めていくことが必要である。

○ 化学物質：化学物質の環境リスクの低減

国民生活で利用されている多くの化学物質は存在量の違い、環境中での挙動の違い、化学物質そのものの有害性や生物蓄積性などの性質も多様である。このように市場に流通している化学物質については、その有害性・暴露に関する情報を収集し、科学的なリスク評価を進めることが必要である。また、化学物質は様々の用途で使われており、製造段階から廃棄段階の各段階において環境に排出され、影響を及ぼす可能性がある。そこで化学物質のライフサイクルにわたる環境リスクの低減や予防的な取組方法の観点に立った効果的、効率的なリスク管理が必要とされる。

○ 自然環境：生物多様性の保全

人間活動の活発化や土地の改変などにより、我が国に生息・生育する動物・植物の多くの種が絶滅の危機に瀕している。生物の多様性を保全することは、環境の多様性の維持、生物によりもたらされる数々の恩恵の維持につながる。

○ 基盤的：環境の価値が評価される仕組み

環境を保全し、良好な環境を将来の世代に継承することにより、持続可能な社会を構築することができるようになる。環境問題に対する認識は国家レベルから国民レベルの各階層において確実に高まっている。これらをさらに進めるためには、環境の価値を高めること、環境によいことをすることが企業の経済活動を進める上で優位に働く社会を構築することが必要である。

【引用文献】

- 1) 環境省 (2007) 「21 世紀環境立国戦略」
http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/index.html
- 2) 環境省 (2007) 「超長期ビジョンの検討について」
http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/index.html
- 3) 環境省 (2008) 「低炭素社会づくり行動計画」
- 4) 経済産業省 (2006) 「新・国家エネルギー戦略」
http://home.hiroshima-u.ac.jp/~er/ZR11_Z_08.html
- 5) a) 資源エネルギー庁 (2008) 長期エネルギー需給見通し
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/080523.htm>
b) 資源エネルギー庁 (2009) 長期エネルギー需給見通し (再計算) について
<http://www.meti.go.jp/report/data/g90902aj.html>
c) 資源エネルギー庁 (2009) 「エネルギー白書 2009」
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2009/index.htm>
- 6) 経済産業省 (2008) 「環境エネルギー技術革新計画」
<http://www8.cao.go.jp/cstp/output/080519iken-2.pdf#search=>
- 7) 経済産業省 (2008) 「省エネルギー技術戦略 2008」
http://www.nedo.go.jp/informations/other/190423_1/all.pdf#search=
- 8) 首相官邸：新成長戦略 (基本方針) <http://www.kantei.go.jp/jp/sinseichousenryaku/>
- 9) 環境省 (2006) 第 3 次環境基本計画
http://www.env.go.jp/policy/kihon_keikaku/thirdplan01.html
- 10) 環境省 (2008) 「第 2 次循環型社会形成推進基本計画」
http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=11035&hou_id=9486
- 11) 経済産業省 (2008) 「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」
http://www.enecho.meti.go.jp/policy/coolearth_energy/index.htm
- 12) 産総研、建設技研 (2009) 「分野別エネルギー資源消費および環境保全に関する実態調査」、
H21.08.31.
- 13) 環境基本法 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H05/H05HO091.html>
- 14) 循環型社会形成推進基本法 <http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H12/H12HO110.html>
- 15) 廃棄物処理法 <http://www.interq.or.jp/blue/alfa69/kankyau/hou2.htm>
- 16) 資源有効利用促進法
http://www.meti.go.jp/policy/recycle/main/admin_info/law/02/index.html
- 17) 環境省 (2006) 「日本の物質フロー2006」
http://www.env.go.jp/recycle/circul/mate_flow/mate_flow.pdf#search

【参考文献】

- 1) 田所利一 (2008) 「新エネルギー総論」、PETROTECH, 31(7), 518-524
- 2) 水道技術研究センター (編集) 「新しい浄水技術」、技報堂出版、東京、1-423
- 3) 経済産業省 (2007) 「次世代自動車・燃料イニシアティブ」
<http://www.meti.go.jp/press/20070528001/20070528001.html>
- 4) 津川定之 (2009) 「ITS 技術による自動車交通の省エネルギー化」、PETROTECH, 32(2), 101-106.
- 5) 林 石英 (2008) 「ガス化技術を用いた石炭利用の最新動向」、PETROTECH, 31(3), 177-183.
- 6) 斉藤郁夫 (2008) 「今、再び注目！石炭液化技術」、PETROTECH, 31(3), 184-190.
- 7) 島田荘平 (2009) 「石炭地下ガス化」、PETROTECH, 32(2), 253-258.
- 8) 経済産業省 (2008) 「資源循環ハンドブック 2008」、経済産業省産業技術循環局リサイクル推進課

3. 持続的発展可能な社会を支える産業科学技術

第1章では、様々な「持続可能性」と「持続的な開発」についての見解が示された。環境経済学者である H. デイリーの3原則 [1-5], [1-6] や、科学者の視点からとらえられた「ナチュラルステップの4つのシステム条件」 [1-7] はあまりにも厳しすぎ、人間本来の欲求を満たすことが難しい。1987年にブルントラント委員会で提唱された「将来の世代のニーズを満たす能力を損なうことなく、今日の世代のニーズを満たすような開発」 [1-9a]、1991年に国際自然保護連合、国連環境計画、世界自然基金が公表した「新・世界環境保全戦略」 [1-8] でうたわれている「人々の生活の質的な改善を、その生活支持基盤となっている各生態系の吸収能力限度内で生活しつつ達成する開発」のようにとらえるのが穏当であろう。ここには定性的ではあるものの、持続可能な社会の基本原則が9ヶ条として示されている。

2009年12月に政府が公表した新成長戦略 [3-1] の発信するメッセージの特徴の一つは「供給サイドから需要サイドへの視点の変更」である。2011年度から始まる第4期科学技術基本計画の方針として、「科学技術政策から科学技術・イノベーション政策へ」という方向性が文部科学省の科学技術・学術審議会 基本計画特別委員会(第9回)の中間報告 [3-2] で示されている。新成長戦略では、グリーン・イノベーションとライフ・イノベーションが二本柱となっており、科学技術立国戦略の中でITが取り上げられている。新成長戦略と学術審議会中間報告でうたわれているのは「持続的な(経済)成長・発展」であり、我が国が国際社会で果たすべき責務、少子高齢化社会でQOLを維持した社会の実現を考えると、うなずけるものがある。

英国政府は2006年10月にスターン・レビュー「気候変動の経済学」を発表した [3-3]。N. スターン卿は「気候変動に対する強固で早期な対策によりもたらされる便益は、対策を講じなかった場合の被害額を大きく上回る」ことを提示した。これを契機に世界は低炭素経済にかじを切ってきた。我が国の産業界からは2020年におけるCO₂ 25%削減は困難との声が上がっているが、景気の悪い今こそグリーン投資を積極的に行い、次の飛躍に備えるべきであろう。環境産業をベースとした新規産業を育成することこそが「持続的に発展する」社会の構築に資するものである。

第2章では、持続的な発展が可能な社会の構築に向けた日本政府の政策の流れを概観した上で、その目的を達成するために「暮らし」、「移動・輸送」、「産業」部門で実施されてきた取組をエネルギー分野と環境分野ごとにとりまとめた [2-12]。

第3章ではまず、2050年の社会像を見据えた上で、バックキャストिंगの手法による技術評価が重要であることに言及し、今後必要とされる環境技術、エネルギー技術、IT技術、健康で安全な生活を支える技術について述べる。将来の社会像については、すでにさまざまな刊行物に示されている [3-4] ~ [3-9]。本章では、2050年の「持続可能な」社会を実現するために必要な技術、その開発の望ましい姿、評価法などについて検討した上で、望ましい社会構造について考察することとする。

3. 1 環境技術

(1) フォアキャストとバックキャスト

2009年9月、鳩山首相は国連総会において、我が国が2020年にCO₂排出量を1990年比で25%削減(2000年比で30%)すると発表した。麻生首相が公約した2005年比15%減に比べると、格段に厳しい数字が提示された。首相の声明を聞いていると、理系出身の首相ならではの、とも思える我が国の環境技術力に対する自信、技術開発の可能性に対する楽観的な確信が感じられた。

裏を返して言えば、これはまさに2020年のCO₂排出量を規定し、その実現に向けて技術開発を行うべしとの強力なメッセージであり、バックキャストの手法(図3-1) [3-4],[3-8]を取り入れて対応せざるを得ない。鳩山首相は、約10%の途上国との排出権取引を前提とした目標値としているが、排出権取引自体、「持続可能」なものではない以上、技術的、社会的にこの目標値を達成すべく我々が最大限の努力をしなければならないのは言うまでもない。

新成長戦略で需要サイドの視点が強調されていると述べたが、経済学的に考察すると、需要の拡大で成長できる背景には、供給に制約がないという前提が必要になる。したがって、成長産業の生産性向上が実現できなければ、我が国の経済が成長するとは思われない。環境技術、省エネ技術は我が国世界をリードしている分野であり、バックキャスト的な評価を加えて、成長産業に育てていかなければいけない技術領域である。

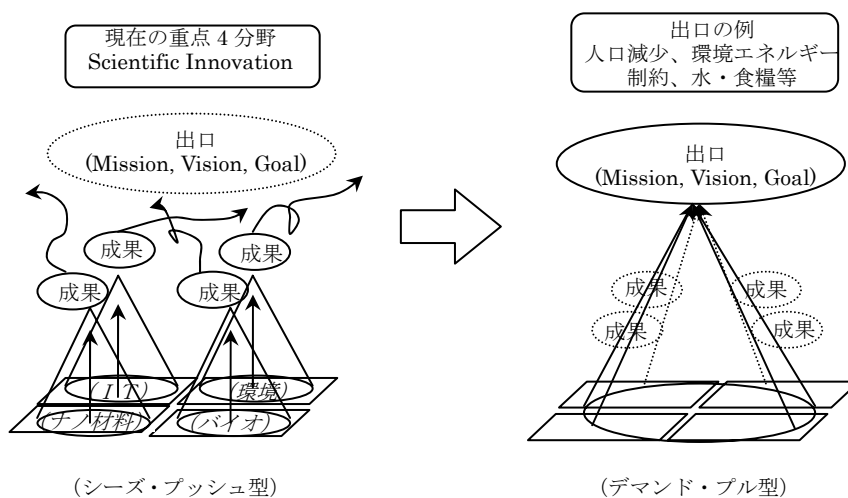


図 3-1 フォアキャストとバックキャストの対比

「持続可能性」を論ずる以上、世代交代の起こる、今から40年余り後の社会像を描くのが妥当であろう。2008年の洞爺湖サミットでは2050年にCO₂排出量を半減させると規定され [1-1d]、2009年のラクイア・サミットでは、主要8ヶ国の共同宣言に「先進国全体で2050年までにCO₂排出量を80%以上削減すること」が盛り込まれた [1-1e]。これを受けて環境省は2009年8月に、「生活水準を下げずに2050年までに温室効果ガス排出量の2050年比80%減を可能にする」試案 [3-10]

を公表した。また、セイコーエプソン、リコー、INAX などの企業は 2050 年における CO₂ 削減目標をホームページ上に公開している [3-11] (表 3-1)。

表 3-1 CO₂ 排出量削減に対する長期目標を持つ企業とその概要

社名	目標				策定/更新 年月	
	何年の	何を		何年比で		どれだけ
セイコー エプソン	2050 年	製造プロセス	CO ₂ 排出量	2006 年比	90%削減	2008 年 6 月
東芝	2025 年	製造プロセス	温室効果ガス排出量	1990 年比	37%削減	2008 年 9 月
リコー	2050 年度	製造プロセス+ 製品・サービス	「総合環境影 響」指標	2000 年度比	87.5%削減 (1/8)	2005 年
INAX	2050 年	製造プロセス	CO ₂ 排出量	1990 年比	80%削減	2008 年 8 月
ライオン	2020 年	製造プロセス+ 製品・サービス	CO ₂ 排出量	1990 年比	67%削減	2008 年
清水建設	2020 年度	製造プロセス+ 製品・サービス	CO ₂ 排出量	1990 年度比	30%削減	2008 年 3 月
損保ジャパン	2050 年度	運用プロセス	CO ₂ 排出量	2002 年度比	56%削減	2008 年 6 月
JR 東日本	2030 年度	運用プロセス	CO ₂ 排出量	1990 年度比	50%削減	2008 年 3 月

(2) CO₂ 削減目標の設定と社会的な対応

以上の背景を踏まえ、本報告書で「持続可能性」を論じるにあたり、環境・資源・人口の制約を前提に 2050 年の社会像を描き、バックキャスト手法 (図 3-1) により低炭素社会実現に向けて開発すべき技術要素を洗い出し、その開発可能性を論じることにした。

まず 2050 年に 2005 年比 80% 減という数字の妥当性について検証してみる。IPCC 4 次報告 [1-15] によれば自然界の CO₂ 吸収能力 110 億トン。2050 年における世界と日本の想定人口はそれぞれ 90 億人、0.9 億人。人口が世界の 1% を占める我が国が排出可能な CO₂ 量 1.1 億トン。2009 年現在の日本の CO₂ 排出量が約 13 億トンであることを考慮すると、我が国の CO₂ の削減率は 91.5% となる (図 3-2)。この値は 80% から近からず遠からずであり、法外な削減率とは言い難い。この算定法に中国、インド、他の途上国は猛反対であり、今後の先進国と途上国とのせめぎ合いには予断を許さないものがある。いずれにしても、政治的な要素を極力廃して、地球自体の環境容量基準で 2050 年における CO₂ 排出量削減率 80% がほぼ妥当な値であることを考慮し、本報告書では、環境省試案をベースに諸問題を考察することにする。

$$\begin{aligned}
& \text{2050年に日本が排出可能なCO}_2\text{量} \\
& = \text{自然界のCO}_2\text{吸収能力} \times \frac{\text{2050年における日本の人口}}{\text{2050年における世界の人口}} \\
& = 110 \text{億トン} \times \frac{0.9 \text{億人}}{90 \text{億人}} \\
& = 1.1 \text{億トン} \quad \text{現在の日本のCO}_2\text{排出量 13億トン} \\
& \quad \underbrace{\hspace{10em}} \\
& \quad \text{CO}_2\text{削減率 91.5\%}
\end{aligned}$$

図 3-2 2050 年における日本の CO₂ 排出量削減率の試算（人口ベース）

環境省の試算 [3-10] では、一人あたりの GDP（国内総生産）成長率が年 1 ～ 2% でも実現可能な対策が発表されている（表 3-2）。経済発展重視・都市集中型（シナリオ A）では、2005 年比で原子力発電量が 1.4 倍、太陽光発電量が 120 倍、乗用車は全て EV で、公共交通機関利用率 50% を前提としている。再生可能エネルギーと原子力がエネルギー全体に占める割合はそれぞれ 28%、26% と見積もられている。ゆとり重視・地域分散型（シナリオ B）では、再生可能エネルギーの占める割合が 40% まで増大しているのが特徴である。目標値の達成は極めて困難であると予想されるが、新技術の開発に期待したいところである。

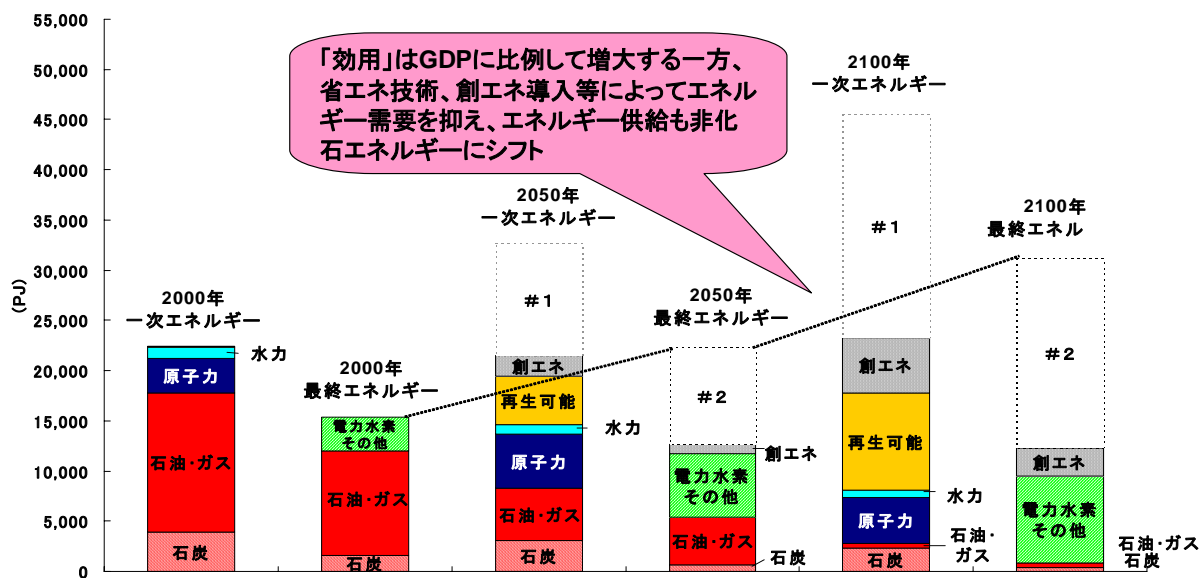
表 3-2 2050 年 CO₂ 排出量 80% 減のための主な対策（環境省、2009 年 8 月）

シナリオ		A	B
原発の発電量（05 年比）		1.4 倍	1.2 倍
太陽光発電量（05 年比）		120 倍	140 倍
乗用車		電気自動車 100%	電気、ハイブリッド車が各 50%
公共交通機関利用率		00 年 40% → 50 年 50%	00 年 40% → 50 年 50%
エネルギー全体に占める割合	再生可能エネルギー	28%	40%
	原子力	26%	26%

シナリオ A： 経済発展重視・都市集中型（成長率年 2%、人口 9,500 万人）

シナリオ B： ゆとり重視・地域分散型（成長率年 1%、人口 1 億人） [3-10]

資源エネルギー庁が 2005 年にまとめた超長期ビジョン [3-12]（図 3-3）では、2050 年において、2000 年時一次エネルギーの 4% の削減を前提としているものの、石油・ガス、石炭の占める割合は合計で 39% となっており、環境省の目標を達成するためには、炭素燃料のいっそうの削減を図る必要がある。2050 年最終エネルギーの分布についても炭素系燃料の割合は大幅に減じなければならないだろう。



技術目標達成時の日本のエネルギー需給構成の一例

※全ての技術的備えの結果としての一例(コスト最小化モデルによる試算)

※試算結果は暫定的なものであり、将来の前提および結果には不確実性を伴う。
 ※最終需要家によるエネルギーを「創エネ」と定義した。
 ※非化石エネルギーの一次エネルギー量については、化石燃料による転換効率率を用いて便宜的に換算したものの。
 #1 GDP比例での最終需要の伸びと同率で一次エネルギーが伸びたと仮定した場合の一次エネルギー供給量から、最終需要削減、転換効率率向上等によって削減された供給量
 #2 GDP比例での最終需要から、省エネルギー、機器効率率向上等によって減少した需要

図 3-3 エネルギー超長期ビジョン (資源エネルギー庁、2005 年 10 月) [3-12]

(3) COP15 を巡る動き

2009 年 12 月にデンマークで開催された COP15 の前に、中国は GDP 当たりの CO₂ 排出量を 2005 年比で 40~45% 削減すると発表した。CO₂ 削減に対する有効性に疑問はあるものの、数値目標が出されたこと自体に意義があるものと認められている。米国は 2020 年までに 2005 年比 17% 削減の方針を打ち出した。韓国やブラジルなど、削減義務を負っていなかった国々が数値目標を発表して、国際的な CO₂ 削減のコンセンサス形成に動きが出てきた。しかし、会議の進行は難渋を極め、具体的な削減目標のない「コペンハーゲン合意」 [1-4] がとりまとめられるにとどまった。2010 年 1 月末までに先進国は 2020 年までの削減目標を、途上国は削減の取組をそれぞれ申告することになっているが、予断を許さない状況である。表 3-3 に、会議後の各国の削減目標を示す。不十分な内容とはいえ、中国、インドの数値目標が示されたことに意義が認められる。唯一具体的な合意に達したのは、2020 年まで、先進国全体で途上国に対する 1,000 億ドルの支援の約束である。中国は先進国の支援を受けた場合でも CO₂ 削減量の検証には応じられないとの態度を表明しており、今後の成り行きは不透明なままである。

日本政府は「90 年比 25% 減」の中期目標について、「全ての主要国の参加による公平かつ実効性のある枠組みと、意欲的な目標の合意」が前提であると説明してきた。政治的なシナリオを安易に読むことは避けなければならない。我が国の先進的な環境技術を一層磨き上げて、途上国へ技術移転す

る姿勢が必要であろう。

表 3-3 主要国の温室効果ガス削減目標

	2020 年までの温室効果ガス削減目標	
先進国	ノルウェー	90 年比 30～40% 減
	EU	90 年比 20～30% 減
	スイス	90 年比 20～30% 減
	日本	90 年比 25% 減
	ロシア	90 年比 15～25% 減
	ニュージーランド	90 年比 10～20% 減
	オーストラリア	00 年比 5～15% または 25% 減
	米国	05 年比 14～17% 減
	カナダ	06 年比 20% 減
途上国	中国	05 年比で GDP 当たり 40～45% 減
	韓国	05 年比 4% 減または対策なしに比べ 30% 減
	ブラジル	対策なしに比べ 36.1～38.9% 減
	インド	05 年比で GDP 当たり 20～25% 減
	インドネシア	対策なしに比べ 26% 減 支援あれば 41% 減
	メキシコ	50 年までに 00 年比 50% 減
	南アフリカ	対策なしに比べ 34% 減 25 年までに 42% 減

(4) 次世代自動車に見る今後の技術開発課題と利活用技術

COP15 は残念な結果に終わったが、ツケが残されただけで、CO₂ 削減に向けた技術開発の意義が失われたわけではない。船舶にしても、重油を燃料とする従来型ディーゼル機関の代わりに燃料電池を採用し、風力、太陽光エネルギーの活用、水の抵抗を低減する特殊塗装を施したエコシップ構想も生まれている。世界の CO₂ 排出量のうち国際海運が約 2.7% を占めていることから、69% の CO₂ 削減が可能というエコシップが 2030 年までに開発されることを期待したい。輸送関連でほかにも特記する内容があると想定されるが、本項では次世代自動車技術を例に取り、今後の技術開発課題と利活用技術について概観することにする。

自動車メーカーの戦略も様変わりを見せ、2009 年の東京モーターショーで、トヨタは次期主力車種を実質的な電気自動車であるとする プラグインハイブリッド車 (Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV) と定めたが、ホンダも 2010 年 2 月にはハイブリッド車を発表する予定である。これに対し、日産は、CO₂ 25% 削減に向けて電気自動車 (Electric Vehicle, EV) しか選択肢はないと明言した。2010 年秋には新 EV が市場に投入される見込みである。一方、マツダは従来のガソリンエンジンに比べて燃費を 15% 向上させた次世代直噴ガソリンエンジン SKY-G を発表した。途上国を含めた世界市場では、当面ガソリン車が主力と見られることから、多くのユーザが使用するガソリン車の燃費向上も確かに重要である。

かつてはデザインの違いだけで、横一線の華やかなモーターショーが展開されたのも今は昔。今後はそれぞれのメーカーが今まで以上に独自の戦略で技術開発を行うことになる。まさに時代は動き出し

たわけで、産総研における技術開発もこのような周囲の状況を十分に踏まえたものでなければならない。

トヨタ自動車社長の豊田章男氏は、NHK テレビ (2009/10/18) で、「自動車会社は 20 世紀にはよくやった。しかし、21 世紀には市場から出て行け、と言われるのだろうか」と発言し、危機感を露わにした。確かに EV になると、シャーシ、電源系、情報ケーブルだけでまかなえ、エンジンや駆動系に関するノウハウが不要となる。SHARP 製 EV、SONY 製 EV が現実のものとなるかもしれないし、はたまた無名ベンチャー企業などの中小企業が登場してきても何ら不思議はない。20 世紀初頭に T 型 Ford が当時の EV を駆逐し、豊富に掘削された石油とガソリンエンジン車が米国繁栄のシンボルとなり、世界標準になっていった。それから 1 世紀が経った今日は、言わば第二自動車革命のまっただ中にあり、EV 反逆の時代を迎えたと言えよう。この流れは、2010 年初めに米国議会を巻き込んだ大問題に発展した PHEV 車、新型プリウスのリコール問題に目をくらまされることなく、将来の技術戦略を中長期的に見通さなければならない。

EV の活用についてもいろいろなアプローチがあり得る。夜間、原子力発電の余剰電力により EV を充電するというのが尤もらしいシナリオとされていたが、最近グーグルは、日中太陽電池で EV を充電し、夜間は EV を蓄電池として家電を動かすというビジネスモデルを提出している。EV 電池の容量にもよるが、技術開発力の差により、採用される技術が決まっていくという意味では、今後ますます競争が激化してゆくものと予想される。好むと好まざるとにかかわらず、オープンイノベーションの枠組みの中で、発展途上国の地場系企業も多国籍企業と取引関係を持つことにより、技術情報へのアクセスが可能となり、イノベーションの源泉となってゆく。最近、東アジアの産業集積の中で多国籍企業と地場系企業との生産分業がかなり密であること、また、それが技術情報等のチャンネルになっていることが知られるようになった。産総研も独自の技術開発力のみならず、地場企業の巻き込み能力も問われてゆくことになる。

第二期の本委員会でも産業の重心移動が論じられたが、今まさに大きなうねりがやってきた。この激動期にシナリオが読みにくいとすれば、バックキャストिंगにより重点技術を適切に選択し、研究資源を重点配分すべきであろう。

EV 時代になれば、従来産総研で注力してきた移動源対策としての NOx 低減技術あるいは PM 抑制技術自体過去のものとなり、NOx と粒子状物質 (Particulate Matter, PM) のトレードオフの関係などに悩む必要などなくなるというわけだ。燃料電池ハイブリッド車 (Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle, FCHEV) の場合には Pt 触媒を使用するため、資源制約上、ガソリンエンジン車と同様の問題を抱えている。ハイブリッド車 (Hybrid Electric Vehicle, HEV) や EV では Li の他にニッケル、マンガン、コバルト、ネオジムやディスプロシウムなどの永久磁石用レアアース が将来的に逼迫することになる。産総研ではすでにそのような事態を想定し、レアメタル代替技術、レアメタルリサイクル技術に取り組んでいる。今後は材料の問題が大きくクローズアップされてこよう。

動力源としてはリチウムイオン電池となるが、2018 年の市場規模は 3.2 兆円と見込まれており、大きな成長が期待される分野となっている。開発のポイントは高出力化・高容量化と併せて発火リスクの抑制とコスト削減である。

先述した環境省試案 [3-10] のゆとり重視・地域分散型シナリオでは、乗用車の半分ずつを EV とハイブリッド車が占めることになる。CO₂ 削減を強力に推し進めるならば、ETC の義務化と高機能化が必須になろう。シンガポールではすでに日本の ETC 相当の装置装着が義務づけられている。ゲートにバーは設けられていないが、ETC 未装着の車両は日本製のカメラで記録され、罰金が科されている。日本でも可能なシステムであろう。ETC であれば、プログラム次第でガソリンを消費するハイブリッド車の場合、炭素税とも言うべき環境税を自動的に ETC-クレジットカードシステムにより引き落とすことができる。このような車種割引に加えて、時間割引（渋滞時は高料金、閑散時は普通料金など）、公共性の高い消防車、救急車などの無料化、障害者乗車車両に対する無料化などである。ちなみにシンガポールには高速道路がなく、システムは Electronic Road Pricing (ERP) と呼ばれている。

3. 2 エネルギー技術

(1) エネルギー総供給構成

CO₂ 排出量削減率が上がれば上がるほど、エネルギー需要・供給両者の選択権は狭められることになる。CO₂ 排出量抑制の観点からは家庭や業務用ビルで重油・軽油・灯油を使用するなどのもつてのほかとなり、ガスから電気に転換しないと、末端レベルでの CO₂ 排出量削減につながらない。一次エネルギーは電力への集中が進むものと想定される。電力需要が急増することから、供給側での対応も必要なものとなる。当然のことながら産業の重心移動も必然的に起こることになる。

2009 年末の COP15 で CCS が途上国への技術協力による削減分を先進国の削減に充てるクリーン開発メカニズム (Clean Development Mechanism, CDM) の対象に決まっている。電力供給サイドでは、当面石炭火力発電技術の高度化と CCS の組み合わせによる CO₂ 発生量削減の試みが進められることになろう。

ガソリン、軽油、重油などの炭素燃料の使用は必要最小限に抑えるべきである。完全に輸送関係車両が EV や PHEV に置き換わる場合、内航タンカーやフェリーの出番はなくなる運命となる [3-13] ~ [3-15]。従来型ハイブリッド車が使用される場合は経済性だけでなく、CO₂ 削減効率の観点からの比較検討が必要となる。FCHEV が輸送車両までの大型化に対応可能か、といった検討も必要になる。航空燃料の必要性は 40 年後も減じることはないであろう。以上の事態を想定すると、石油改質技術についても従来型のものがそのままでは使用できないとの結論に立ち至る。石油製品軽質化の流れは必然的なものとなり、新技術の開発が求められる。

地熱発電は量的なポテンシャルが大きく、日本は技術力もある。しかしながら、地熱発電効率が低いのが難点であり、その評価が十分に行われていないきらいがある。民間企業では、外国でビジネスをしているところもある。地熱発電に比べると温度が低い熱水を利用した温泉発電の利用も注目される。また、初期投資が高い難点はあるものの、地熱ヒートポンプによる冷暖房システムの開発も CO₂ 排出量削減の観点から注目される技術となっている [3-16]。北海道地域ではすでに実用化が始まっている。

風力発電について、全球的に風力資源を評価すると、ユーラシア大陸にしても北米大陸にしても西側で「良い風」が吹いている。したがって、大陸東側に位置する日本やアジア諸国で使用する風力発

電機に対するスペックとしては厳しいものが求められる。

バイオマス燃料はカーボンニュートラルということで、将来期待される炭素燃料であるが、各輸送機関の占有率が上述のように変化した場合、エタノールやバイオディーゼルの製造のみではなく FCHEV、EV 対応の水素製造も視野に入れて LCA 的に検討する必要があるのではないかと [3-17] ~ [3-19]。二次エネルギーとしての水素を受容する社会の構築と安全に水素を使用する技術の開発も急務である。

(2) 原子力発電

原子力発電については、すでに敦賀の「ふげん」など二基が閉鎖されたが、国は原子炉を含めて原子力発電所を解体する予定とのことである。2009 年 10 月現在、世界中で閉鎖された原子炉は 107 基ある。ヨーロッパでは日本より 10 年先行して原子力発電を開始した経緯で、ドイツではすでに 15 基、英国では 25 基が閉鎖されている。

ドイツのビュルガッセン原子力発電所では閉鎖後 14 年経過したものの、原子炉自体に相変わらず強い放射能が残留し続けており、最新技術を駆使した遠隔操作による解体作業も進んでいないのが実状である。これは長期間原子炉が中性子に曝されたため、原子炉自体が強い放射能を出す放射化²⁰ が起きているためである。ドイツで現在稼働中の原子力発電所は 57 基あり、放射性廃棄物問題は原子力発電のトータルコストを飛躍的に高めることにつながってしまう。日本の原子炉でも放射化が起これば、除去はきわめて困難になる。発電所立地、トータルコストなど、解決すべき問題は多岐にわたっている。

2009 年 11 月に玄海発電所でプルサーマルがスタートした。燃料の有効利用の観点から望ましい方向と考えられるが、すでに計画が 10 年ほど遅れていることに加え、今後の普及の可能性についても未知な部分が多い。

原子力発電のもう一つの問題としては放射性廃棄物の保管があげられる。英国では、閉鎖された 25 基の原子力発電所に大量の放射性廃棄物が残された。その保管費用として 11 兆円の予算が入用であると試算されている。これは税金から支出されることになる。納税者の理解が得られないと、原子力発電を推進することはきわめて難しい。

麻生前政権の CO₂ 削減目標値 (90 年比 8% 減) の達成には 2020 年までに原発 9 基の新增設が必要とされていた。鳩山政権は「計画中の原発が 15 基あり、順調に着工、運転開始すれば可能」としているが、地元の根強い反対があり、あと 10 年以内に 9 基を新增設するのは容易でない。

しかしながら、太陽光発電、風力、地熱、バイオマスといった再生可能なエネルギーなどで現在のエネルギー消費量を補填することはきわめて困難であり、原子力発電を抜いたシナリオは非現実的なものである。再生可能エネルギーの総和が水力と同等レベルであるとの試算結果も得られている。比較的電力調整の困難な原子力発電所の深夜余剰電力により FCHEV や EV の充電を行えば、電力の節約につながる。電力に占める原子力や再生可能エネルギーの利用割合が増えることで、温暖化ガス

²⁰ 元々は放射能のない同位体が他の放射性物質から発生する放射線を受けることにより放射性同位体となること。放射化の度合いは放射線の種類とエネルギー、放射線を受ける同位体による。

の排出量削減に貢献すると見込まれる。より安全性を高めた発電技術、時定数の大きい放射性廃棄物の保管場所の確保などが達成すべき喫緊の課題である。

(3) エネルギー自給率

2006年時点で我が国のエネルギー自給率は19.2%であり、原子力を除くとわずか4%と低いのが実状である[2-16]。将来エネルギー自給率を上げることができないと、エネルギーセキュリティ上の問題が大きくなる。将来のエネルギー確保のために、エネルギー資源調達、新規発電技術開発等に対して包括的かつ国際的な戦略が必要である。

(4) 低炭素社会実現に向けたエネルギー関連技術

2008年5月に公表された「環境エネルギー技術革新計画」[2-6]に基づき作成された「環境エネルギー技術のロードマップ及び普及シナリオ」[3-20]から作成した低炭素社会実現に必要なエネルギー関連技術は表3-4に示す通りである。

表 3-4 低炭素社会実現に向けたエネルギー関連技術の一覧

システム技術	課題	産業技術	技術の概要	日本の国際競争力
発電システム	<ul style="list-style-type: none"> 原子力に対する社会的理解の促進 使用済み核燃料の再処理等バックエンドに係わる課題の解決 膨大な研究開発金・設備投資資金の調達 	高速増殖炉サイクル	ナトリウム取扱い技術の確立。信頼性の実証試験。実用化高速増殖炉の概念設計および実用化のステップの着実な進捗。	
		次世代軽水炉	現行軽水炉の稼働率向上や高経年劣化対策による高度利用の促進。次世代軽水炉の概念設計から基本設計・要素技術開発、から建設にいたる基礎基盤技術の研究の実施。	世界最高水準の技術
		中小型炉	途上国や島嶼国等における中小規模の発電需要に対応可能なコンパクトで安全性の高い原子炉の開発を実施。	一定の競争力を有する
		高効率天然ガス火力発電	主要要素技術は、高温ガスタービン技術、高耐熱材料技術、高負荷圧縮機・タービン技術、先進冷却・燃焼、遮熱技術。	世界最高水準の技術
		高効率石炭火力発電	現在実用化されている超々臨界圧発電(発電効率42%)を超える発電システムとして「先進的超々臨界圧発電」(蒸気条件を更に高温、高圧化)、石炭ガス化複合発電の開発。	
		超電導送電	技術の方向性としては、線材・ケーブルの長尺化、高電圧化、大電流化、低損失化のほか変圧器や電力貯蔵装置の開発や冷凍機技術がある。	日本がリード
		パワーエレクトロニクス	発電、送配電、蓄電、電気機器で使われる次世代半導体を活用したインバータ等の省エネルギー技術。	プロセス、デバイス、実装技術はトップレベル
		二酸化炭素回収貯蔵(CCS)	分離・回収、輸送。圧入および貯留の4つの機能別に研究が行われている。技術開発の中核となるのは分離回収技術であり、化学吸収法、物理吸収法、膜分離法、物理吸着法、深冷分離法などである。	膜技術で先行している

システム技術	課題	産業技術	技術の概要	日本の国際競争力
分散型電源システム	・電力ネットワークの安定性の確保 ・発電コストの削減 ・景観問題等社会的コンセンサスの形成	太陽光発電	量子ナノ・多接合型等の新材料・構造による飛躍的な効率の向上、有機系太陽電池技術や超薄膜化等により低コスト化を図る。	我国の優位性は予断を許さない状況にある
		風力発電(洋上発電)	着底式、浮体式、セイリング式などの方式についてFSが始まった段階。陸上に比べて稼働率が飛躍的に増大する。	セイリング式については研究が進んでいる
		定置用燃料電池	電気化学反応により、直接電力を取りだすため発電効率が高い技術。固体高分子形(PEFC)、固体酸化物形(SOFC)、の開発を実施。	世界に先行
		定置用燃料電池	蓄電池としてはリチウムイオン、ニッケル水素、ナトリウム硫黄、キャパシタとしては電気二重層キャパシタの研究を実施。	競争が激しく予断をゆるさない
新交通システム	・社会的インフラ整備(電気スタンド、水素ステーション等) ・インフラ整備資金の負担についての社会的コンセンサスの形成 ・法整備	ハイブリッド・電気自動車	高性能蓄電池技術の開発。リチウムイオン電池の性能向上。	日本が世界をリード
		燃料電池自動車	高性能燃料電池、高容量水素貯蔵技術の開発、および水素供給インフラの整備が必要。	日米欧が一線で研究
		高効率鉄道車両	軽量化、車体傾斜システム、遺伝的アルゴリズムによる空力解析、ハイブリッド鉄道車両、燃料電池鉄道車両の研究。	日本が世界をリード
		低燃費航空機(低騒音)	空力設計、炭素繊維複合材、操縦システム等の技術により燃費性能を向上。	炭素繊維複合材技術に関しては優位
		高効率船舶	高度な省エネルギー船舶・推進器、航行支援システム、環境性能エンジンにより船舶の排出する二酸化炭素を大幅削減。	我国が優位
		高度道路交通システム	路車間・車車間の通信技術、GPS ²¹ ・レーダー等の測位システム、個々の自動車より集めた情報等を活用して、渋滞緩和・省エネルギー走行の実現を図る。集めた情報でシミュレーションを行い、より安全かつ効率的な移動・輸送を行う。	世界で優位
		水素製造	核となる要素技術は水蒸気改質、オートサーマル技術、部分酸化技術、水電解等。	要素技術では世界レベル
		水素貯蔵・輸送	水素輸送では圧縮水素輸送、液体水素輸送、有機ヒドランド輸送、水素貯蔵では高圧ガス、液体水素、水素吸蔵合金等の研究。	世界レベル
		バイオマス(ガソリン代替形)	セルロース系バイオエタノールの製造・利用技術。リグノセルロース系バイオマスから効率的にエタノールを生産する技術。高バイオマス植物の開発等。	加圧熱水処理法は日本独自の技術
バイオマス(軽油代替形)	高効率バイオディーゼル燃料等製造技術。BDF ²² 、DME ²³ 、BTL ²⁴ 等の技術開発。	世界に追いつくべく努力		
生産技術		革新的製造プロセス技術	具体的には「プラズマ等を利用してガラス熔融を行う省エネガラス製造技術」、「非鉄金属材料製造プロセスの抜本的な効率改善技術」、「微生物機能を活用したバイオマスからの化学品製造技術(バイオリファイナリー技術)」、「水処理に伴うエネルギー消費を大幅に低減させる分離膜技術」、「自動車等の軽量化による省エネ材料技術」蒸気生成ヒートポンプ等による加熱プロセス技術、「ポリマー類製造重合触媒技術」。	
		水素還元製鉄	プロセス革新、プロセス効率化、副生ガスの回収・利用、各種省エネ技術。	各国との基礎・基盤技術研究段階

²¹ 全地球測位システム (Global Positioning System)。

²² バイオディーゼルフュエル (Biodiesel Fuel)。

²³ ジメチルエーテル (Dimethyl Ether)。

²⁴ バイオ燃料 (Biomass to Liquid)。

システム技術	課題	産業技術	技術の概要	日本の国際競争力
住宅・オフィス・地域の省エネ化	<ul style="list-style-type: none"> 法整備 促進する為の政策上の配慮 社会的コンセンサスの形成 	高効率照明	高効率LED照明、有機EL照明、マイクロキャビティ等次世代照明技術の開発。	
		高効率ヒートポンプ	膨張動力回収技術、高効率熱回収技術、等の開発。	効率は世界トップレベル
		省エネ家電・情報機器(グリーンIT)	情報通信機器の消費電力増大に対応する為、半導体の微細化光技術の活用、新たなディスプレイ開発、ネットワークシステム全体の最適制御の技術開発等いわゆる「グリーンIT」を推進。	省エネ家電では世界をリード、それ以外は各国がしのぎを削っている状態
		省エネ住宅(断熱材・断熱ガラス)	新規断熱材料等による高断熱・遮熱、室内空気改善技術等住宅・ビルの省エネ技術の開発。	日本がリード
		エネルギーの面的利用(HEMS/BEMS/地域レベルEMS)	住宅やビル、さらに地域がネットワークを介してエネルギー計測・管理を行う省エネ技術。要素技術としては、通信ハードウェア技術、家庭内/建物内センサーネットワーク、マイクロセンシング技術、予測技術等の技術開発が必要。地域レベルのEMS技術としては地域コジェネシステムや再生可能エネルギーとの連携技術、電気・熱などのエネルギー利用最適化・評価技術、蓄熱・電力貯蔵のための技術開発が必要。	わずかにリード
		テレワーク	超高精細映像・立体映像・立体音響等の伝達・提示技術を統合制御し、遠隔地においてモノの実在感や人の存在感も再現する技術。	先行している
		建築物総合環境性能評価システム(CASBEE)	住宅・建築物の居住性(室内環境)の向上と地球環境への負荷の低減等と、総合的な環境性能として一体的に評価を行い、評価結果を分かり易い指標として示す手法。	日本が先行
超長期住宅(住宅の長寿命化による廃棄物等の削減)	材料・工法の工夫や適切な維持管理により住宅の長寿命化を図る。新しい住宅像の確立。			

3. 3 資源制約緩和技術

2050年に2005年比CO₂排出量80%削減という、大きな目標を達成するためにはバックキャストिंगの手法が最適であることを先に述べた。それでは資源制約についてはどうであろうか。将来的にレアメタルの枯渇が懸念されているとしても、CO₂削減のようにメタル使用量にキャップがかかっていないこともあり、本報告書では主にフォアキャストिंग的に論じることにしたい。

(1) レアメタルの使用状況

レアメタルの中でもコバルト、インジウムは世界の消費量に占める日本のシェアが1位であり、白金、ニッケル、レアアースでは2位、モリブデンでは3位、タングステン、バナジウムで4位、マンガンで5位と続いている。例として、各分野で使用されているレアメタルを表3-5に示す。

表 3-5 各分野で使用されているレアメタル [3-21]

<u>電子材料用レアメタル(デジタル素材用レアメタル)</u>
半導体(Si, Ge, GaAs)
磁性材料(Nd, Dy, Sm, Co, etc.)
各種電子材料(In, Ta, Li, Ba, Sr, etc.)
<u>合金用レアメタル</u>
工具用特殊合金(W, Co, Ta, etc.)
鉄鋼添加用(V, Cr, Mo, Nb, etc.)
<u>航空・宇宙材料用レアメタル(空飛ぶレアメタル)</u>
航空機材料(Ti, Ni 基超合金, Re, PGMs, Al-Se 合金, etc.)
<u>自動車用レアメタル(走るレアメタル)</u>
合金添加元素(Mo, V, Nb, Ti, etc.)
磁石材料(Nd, Dy, Sm, Co)
触媒(Pt, Pd, Rh, etc.)
<u>エネルギー関連メタル</u>
太陽光発電(Si, Cd, Te, In, Ga, Ru, Ag, etc.)
電池材料(Li, Co, Ni, Pt, etc.)
電極・送電材料(Ag, Nb, Sn, Bi, etc.)
<u>原子力用レアメタル</u>
原子炉用材料(Zr, Hf, 特殊合金, etc.)
放射性廃棄物(PGMs, etc.)
<u>医療・生体用レアメタル、その他</u>
生体材料(Ti, Nb, Ta, etc.)
薬品・健康食品

今後も薄型テレビ用液晶パネルにインジウムの使用量は増加してゆくであろうし、ハイブリッド車用モーター等に用いられる高性能永久磁石用レアアース、発光ダイオード用ガリウム、リチウムイオン電池用リチウムなど、今後も使用量が増大するものと想定される。ものづくりでも部材産業が主力の我が国にとって、レアメタルの確保、言い換えれば、レアメタルの果たす「機能」の継続的な確保は喫緊の課題と言える。

(2) 資源確保技術

これに対して、レアメタルは世界に偏在している(図 1-13)。2009年7月に資源エネルギー庁から公表された「レアメタル確保戦略」[1-38]では、i) 希少性、偏在性、ii) 世界規模の消費拡大、iii) 資源ナショナリズムの台頭、iv) 資源獲得競争の激化、v) 新エネ、省エネ、環境対策分野等での需要拡大が課題とした上で、①海外資源の確保、②リサイクル、③代替材料開発、④備蓄が4つの柱を掲げている(図 3-4)。①では、資源国との戦略的互惠関係の構築が求められる。アジア地区での資源循環システムの構築も重要な課題である。政府開発援助(ODA)との一体的な支援とともに、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)等の活用によるリスクマネーの安定的な供給が必要となる。図 1-13からは、レアアース、タングステン、モリブデン、インジウム、亜鉛、鉛など、中国にレアメタルが偏在している傾向が顕著であるが、中国政府はすでにレアメタルの囲い込みに動いており、メタル原料の輸出に消極的な姿勢を見せ始めた。リチウムにしてもリチウムイオン電池の

製品であれば輸出可能としており、企業連携についても戦略が必要である。半導体と同様、見返りにコア技術の移転が求められる可能性が極めて高い。④は政治的な課題であり、先見的な施策が求められる。

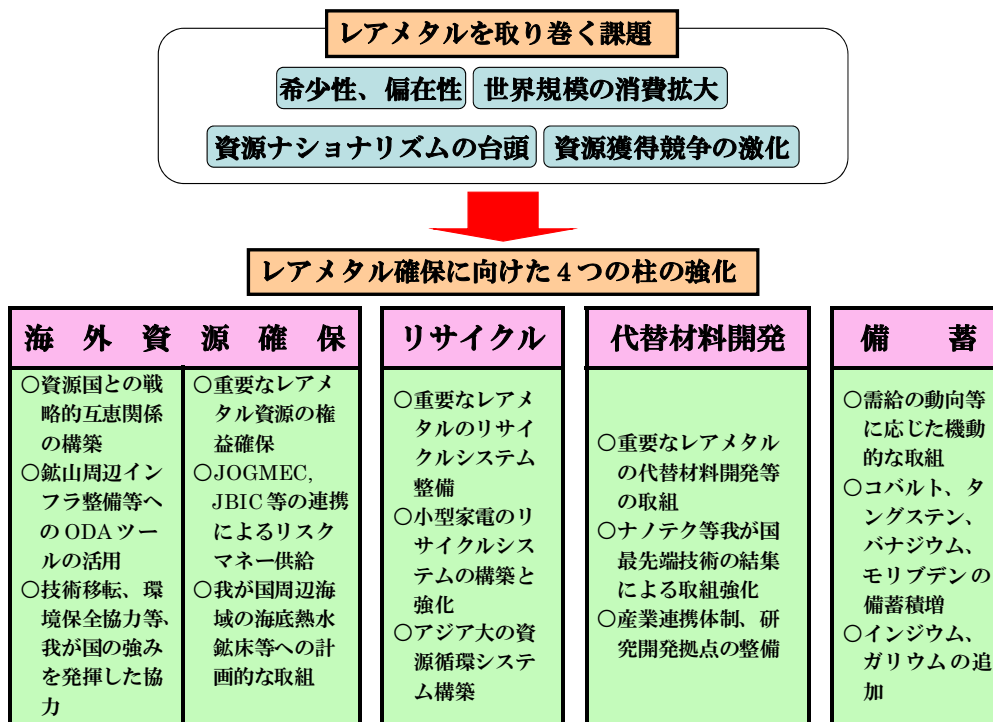


図 3-4 「レアメタル確保戦略」のポイント [1-38]

産総研に求められる機能は②と③になる。③代替材料開発の課題は、特にバックキャスティング的に、2050年にはレアメタルを他のメタルに置き換えても同等以上の製品品質が得られるような材料を開発するといった姿勢が必要である。これには、金属工学の基礎に立脚したレベルでの金属材料の構造と機能の解析にとどまらず、大企業や地場の優れた技術力を有する企業との連携ならびに研究拠点整備が必須であろう。NEDOのサポートを受けて、産総研ではすでにその方向で精力的に研究開発が行われている。

②リサイクルについては回収システムの構築と整備が課題であると報道されており、国民レベルでのリサイクルに対する意識の高まりがまず必要となる。一口に金属リサイクルと言っても、希土類鉱石中には放射性メタルが混入しているため、原研との協力が必須なものとなる。金属リサイクルについても2050年において様々なオプションが許容されるか否かについて明確なことは言えないが、特定金属の省エネルギー的な分離回収技術の確立が望まれるところである。

最近 NEC エレクトロニクスと音力発電が、電池がなくても動く家電用リモコンを試作した。大手家電各社と協力し、2011年までの実用化を目指している。これなどは、そもそも電池不要の技術であり、金属資源の節約に貢献する。使い道は限定されるものの、このような発想も必要であろう。

3. 4 IT の活用と戦略的な開発

(1) IT 産業の階層と IT 技術

IT 産業の階層は IT 技術をベースに大きく四つに分類することができる。第一階層は情報システムを構築する上で基本的機能を提供するデバイス、材料の階層である。半導体記憶デバイスの DRAM や光ディスクが該当する。第二階層は情報システムの基盤となる階層であり、コンピューター・アーキテクチャー、OS、ネットワーク、CPU 等がここに該当する。第三階層は、空間的に分散している情報資源の高度統合化の階層であり、最上位の第四階層は高度のアプリケーションとなる。

1990 年代までは日本企業が DRAM の世界市場をほぼ独占していた。しかし、この階層では巨大な先行投資と、あるレベル以上の開発力、トップの判断力があれば、競争の勝者になりうる。事実、1990 年代後半、我が国はサムソン電子にトップの座をやすやすと奪われてしまった。第二階層では、デジタルカメラ、DVD、液晶テレビで日本企業は世界をリードしている。しかしながら、携帯電話端末では我が国のガラパゴス化が声高に叫ばれており、日本企業はトップファイブにすら顔を出していない。将来のユビキタス社会で PC よりも中心的な機器となる携帯電話端末でのこの状況はゆゆしき問題であろう。我が国の弱点は携帯電話の事実上の世界標準 Global System for Mobile Communications (GSM)²⁵ に対応していないことであった。ビジネス領域での勝者は CPU のインテルや ARM Ltd.、OS のマイクロソフトにルータのシスコであり、ここには日本企業が顔を出していない。

第三階層のビジネスの中心はシステムインテグレーション²⁶ である。高度なソフトウェア技術が必要となるが、中核技術の多くが米国で開発された。システムインテグレーションの基本コンセプト、基本設計の考え方、インプリメンテーション技術は我が国が米国に遅れを取っている分野であり、現在の第三次産業の生産性の低さを招いてしまった。今後の我が国にとって、第三次産業の高度情報化が最優先の課題となろう。

将来の我が国が IT 産業で世界と伍して戦ってゆくには、高度 IT 人材の育成がかかせない。従来、我が国の大学ではコンピューター・サイエンスが中心に教えられてきた。一方、産業界が強く求めているのは情報システムの教育である。この分野ではすでに人材の国際化が進行しており、積極的に外国人の研究者・技術者が日本企業で雇用されている。我が国も産学の対話を進めて、国際的な競争力を擁する高度 IT 人材を本腰で育成しなければ、2050 年における我が国の IT インフラが優秀な外国人に握られるのは必定である。

(2) IT を活用した省エネ

3.2 で述べたエネルギー制約を考慮すると、2050 年においては IT を活用した省エネ (Green by IT) がより厳格に徹底されているであろう。IT によるヒトやモノの動きの最適化を例にとると、モノの輸送やヒトの移動には莫大なエネルギーが必要になるが、情報通信にかかるエネルギーはそれに比べて格段に小さい。輸送や移動を最小限に抑えることにより、大幅な省エネルギー化、省コスト化が

²⁵ FDD-TDMA 方式で表現されている第二世代携帯電話 (2G) 規格。日本と韓国以外の世界中で一つ以上の周波数帯域が割り当てられている。

²⁶ 顧客の業務内容を分析し、問題に合わせた情報システムの企画、構築、運用などを一括して行うこと。

期待できる。物流効率の改善、テレビ会議の導入のほか、書類の電子化やソフトウェアのオンライン配信によるメディアの省略と配送にかかるエネルギーの削減などはすでに多くの業界や企業で取り入れられている。最近の報道では、電子化書籍に対する国民の受容度が上がっているとされている。今求められるのは、「IT を活用した省エネ」の定量的な評価であろう。また、その分析結果を広く国民に周知することが、2050 年の省エネ社会の実現を早めることに貢献するのではないかと。

住環境についても「IT を活用した省エネ」が大きく貢献する。家庭用エネルギー管理システム(Home Energy Management System, HEMS)²⁷ やビル用エネルギー管理システム (Building and Energy Management System, BEMS)²⁸ は家電や照明、空調などの機器を IT でネットワーク化し、それらを適切にコントロールすることにより省エネを図るシステムである。室内の状況をモニタリング（「見える化」）し、集められた情報を元に機器や設備の運転の最適化を行うことになる。近年、家庭用燃料電池コジェネレーションが注目されているが、発電と給湯の管理は IT で行われるものと期待される。発電時に発生する熱エネルギーを余すことなく利用できるため、総合エネルギー効率が大幅に向上する。

（3）スマートグリッド

スマートグリッド（次世代送配電網）²⁹ においても IT の活用が期待されている。再生可能エネルギーの導入促進のため、既存の電力系統に多数の分散電源（太陽光発電や風力発電、燃料電池など）が直接連系されると、発電と電力消費のバランスがとれなくなり、電圧や周波数が変動して電力系統の安定な運用ができなくなる。そのため、ある地域内の分散型電源、蓄電設備、エネルギー負荷をまとめた小規模なネットワーク（マイクログリッド） [3-22] を構築し、その中でできる限りの需給バランスをとる。過不足分は、さらにそれらを束ねる上位ネットワークで融通する、という階層構造をとることにより、自然環境に左右されがちな再生可能エネルギーの大量導入が可能になる。

新丸の内ビル（東京都千代田区）は、再生可能エネルギーを使って発電し、CO₂ 排出量がゼロである「生グリーン電力」を 2010 年 4 月から利用すると発表している（毎日新聞、2009/12/10）。出光が青森県六ヶ所村の風力発電所や水力発電所などの再生可能エネルギーで発電した電力を、東北電力と東京電力の送電網を経由して供給するという計画になっている。新丸の内ビルは使用する電力全てを生グリーン電力でまかなうことにより、CO₂ 排出量が約 2 万トン削減される予定である。このように CO₂ 削減に向けた具体的な動きも出てきた。実効性の高い取組が加速されることを期待したい。

マイクログリッド単独でのエネルギーの自給自足は難しいため、上位系統や隣接マイクログリッドとのエネルギー融通を行うことも想定される。ネットワーク内のエネルギー需給状況の監視やネットワーク間の協調のために IT が不可欠で、これも一種の「IT を活用した省エネ」である。2050 年に想定されるエネルギーネットワーク像を図 3-5 に示す。

東芝は沖縄電力が 2010 年秋に宮古島で行うスマートグリッドシステムの一括受注を発表している。

²⁷ 家電機器や給湯機器など住宅内のエネルギー消費機器をネットワーク化し、自動制御するシステム。

²⁸ ビルの機器、設備等の運転管理によってエネルギー消費量を削減するためのシステム。

²⁹ 低炭素社会の実現に向け、最新の IT を駆使して電力消費と発電の状態を把握し、今後、オール電化などの需要側と、風力発電などの供給側の多様化が進行しても、双方のバランスを取りながら柔軟に電力の流れを制御する次世代電力網。

既存の風力 (4.2 MW)、火力 (61.5 MW)、ガスタービン (15 MW) に新設の太陽光発電システム (4 MW) を加えて、既存の電力系統に接続する際の課題などを詳しく調査する予定である。また、IT 通信網で各家庭などの電力消費状況をリアルタイムで把握し、新エネルギーと既存電力との最適な組み合わせも探ることになっている。東芝は 2015 年に売上高 1,000 億円を目指している。モデルケースとしての成果に期待が持たれる。

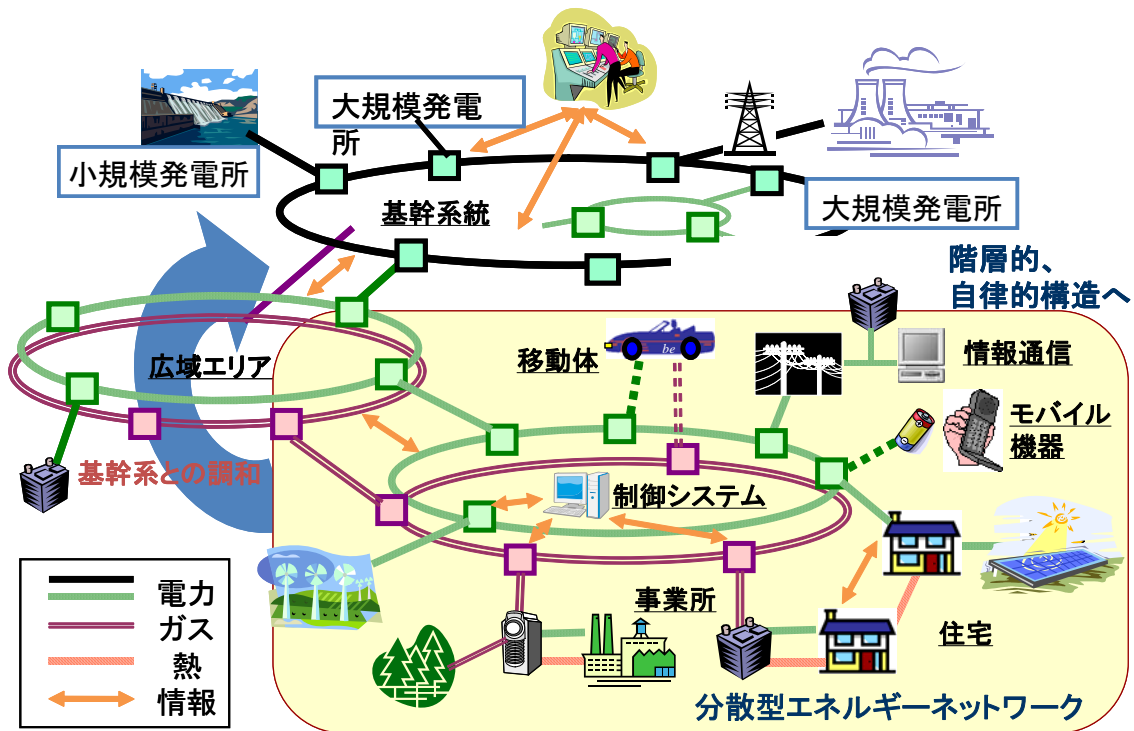


図 3-5 2050 年に想定されるエネルギーネットワーク像

3. 5 将来のモデル都市で必要となる技術と課題

2009 年 10 月には、経済産業省がスマートグリッドなどの低炭素技術の集積地域「非化石タウン」の実証事業をアジア太平洋地域で展開する方向で検討に入った。日本がホストを務める 2010 年のアジア太平洋経済協力会議 (APEC) で提案する方針である。具体的には、スマートグリッド、ヒートポンプ、省エネビルなどの技術を組み合わせた街を APEC 加盟国に設置するというものである。加盟国の実状や日本の強みを勘案し、実現可能なプロジェクトの類型を整理し、実現に向けた工程や資金供与のあり方に関する調査が 2009 年度内に終了する予定である。

2009 年 9 月の国連気候変動首脳会合で鳩山首相が途上国支援の「鳩山イニシアチブ」を提唱し、同年 10 月にインドネシアに対する 4 億ドルの円借款を供与した。同年 12 月にデンマークで開催された COP15 において決められた資金・技術支援については、先進国全体で 2010～2012 年に計 300 億ドルを供与し、2020 年までに 1,000 億ドル供与するというものである。日本も応分の資金援助と優れた環境技術の供与が求められる。

2008 年 4 月に内閣官房により環境モデル都市の公募が行われ、同年 7 月に大都市として横浜市と

北九州市、地方中心都市として富山市と帯広市、小規模市町村として北海道下川町と水俣市の計 6 自治体、2009 年 1 月には京都市、堺市、飯田市、豊田市、宮古市と高知県梶原町、東京都千代田区の 7 自治体、計 13 都市が選定された。いずれの都市も CO₂ の削減目標を 2050 年において 1990 年比 ~ 70% と掲げたうえで、2009 年 4 月には環境モデル都市のアクションプランを示している [3-23]。「環境モデル都市」構想は、エネルギー対策や森林保全など、低炭素社会の実現に向けて高い目標を掲げて先駆的な取組にチャレンジする都市を支援するものである。表 3-6(a) ~ 表 3-6(c) に各都市の取組概要を示す。資源・エネルギー対策技術、運輸交通対策技術、建築物・都市計画・環境整備技術を大都市、地方中核都市、小規模都市、東京特別区で比較すると、資源・エネルギー対策技術は都市サイズによる影響を顕著に受けるが、運輸交通対策技術や建築物・都市計画・環境整備技術では都市サイズによらない共通課題が浮かび上がってくる。バイオマス燃料合成技術や省エネルギー型建築材料製造技術が重要になってくるものと想定される。

梶原町では 1999 年に 6,000 kW の風力発電機 2 基を設置し、その売電益を間伐や太陽光発電の補助金に充てている。北九州市の北九州エコタウンでは、新日鐵や日本風力開発が出資した「エヌエスウィンドパワーひびき」が 1,500 kW の風力発電機 10 基を稼働、約 1 万世帯分の発電能力を有している。北海道下川町では、切り出された木材を町内で資源化するゼロエミッションの木材加工が実施されている。加工の際に出る乾燥集成材の端材なども町内の温泉のボイラーで燃焼するなどの努力をしている。需要の少ない夏場の平日には重油を使わず、このボイラーで温水がまかなえる。その結果、重油換算で年間 490 万円の経費削減を達成した。

これらの二例のように、風力エネルギーやバイオマスエネルギーなど、次世代エネルギーへの移行や太陽光発電などで消費までのロスが減らせる「地産地消」の取組で成果が上がるのが期待される。

また、北九州市の北九州エコタウンでは、2009 年 7 月 7 日のクールアースデーのライトダウンイベントが門司港のレトロ地区で行われた。この日のライトダウンには東京タワー、通天閣、コンビニエンスストアなど 85,583 ヶ所が参加。削減電力量は約 161 万 kWh にも上り、CO₂ 換算では、44,000 世帯が 1 日に排出する量に匹敵する約 645 トンを減らすことができたと環境省は公表している。

2050 年においては、表 3-2 に示された経済発展重視、ゆとり重視の何れを問わず、民生用炭素燃料の使用は必要最小限のものに限られるものとなる。

富山市 [表 3-6(c)] や青森市に認められるように、コンパクトシティは将来の地方都市モデルとして有望である。ただ、地域分散と言っても、低密度居住にならないように留意すべきであろう。コンパクトシティでは高齢者に優しい都市作りが行われ、LRT (Light Rail Transit)³⁰ などの公共交通機関を中心とした交通網が整備されることになる。この他、堺市、宇都宮市、東京豊島区における池袋駅前からサンシャインシティ方面に向けた計画、岡山市と総社市を結ぶ JR 西日本の吉備線を LRT 化する計画が進んでいる。静岡市、浜松市、四日市市、京都市、高松市でも LRT 導入計画が進められている。

欧米に比べて我が国で路面電車による街作りが進まない理由は公共交通に対する採算性に対する意識の違いと交通渋滞に対する誤解であろう。車両規制を行えば、環境保全と渋滞緩和の両立は可能で

³⁰ 軽量軌道輸送(機関) (Light Rail Transit)。次世代路面電車と訳される場合も多いが、非英語圏の新型路面電車の英語名称。

ある。公共交通は公共財という考え方がそもそも必要であり、渋滞緩和、環境保全、都市再生という社会的な便益と費用により採算性を考えるべきである。2008年6月～7月にヤフーがインターネットで実施した意識調査では、37,920の回答のうち、路面電車の復活を希望する意見が78%を占めた。国民の意識も確実に変わってきている。

表 3-6(a) 環境モデル都市（大都市・地方中核都市）の取組

市区町村	資源・エネルギー対策	運輸交通対策	建築物・都市計画・環境整備	生活・市民活動など	
大都市	北九州市	1) 工場等の廃熱利用 2) 水素エネルギー利用 3) 太陽光発電事業の実施 4) バイオマスエネルギー高度利用 5) レアメタルリサイクル産業の創出	1) 高効率システム(EV、LRT、BRT ³¹)の導入 2) 鉄道貨物輸送拡大によるモーダルシフトの推進	1) 低炭素先進モデル「200年街区」200年住宅、省エネ住宅の導入 2) CASBEE ³² 評価結果を義務化	1) 北九州市民環境パスポート省エネの見える化 2) 低炭素社会総合学習システム低炭素学習システムモデルを構築
	京都市	(住宅用)太陽光発電	1) マイカー使用規制 2) トランジットモール化 3) BDF の利用促進 4) 低燃費車、EV の導 (2018)	1) CASBEE 京都 2) 木材の地産地消 3) 住宅用太陽光発電の設備助成拡充	1) 環境ファンドの創設 ・エコ町内会、エコ学校、エコ企業 3) 「DOYOUKYOTO?」プロジェクト ・節電の取組を各種実施
	堺市	1) 低炭素型コンビナートの形成(世界最大級燃料電池の利用、全工場 LED 照明採用等) 2) 省エネ・省資源に寄与する技術開発における企業間連携 3) 太陽光発電の普及(2030 年度に10 万世帯(3 軒に 1 軒)導入)	LRT、自転車の活用		低炭素型まちづくりを支える環境文化の創造 1) 「クールスポット」の保全・創出 2) 市民・企業の知恵の活用 低炭素活動に顕著な功績のある個人・団体を顕彰、若者の柔軟な発想を活用
	横浜市	再生可能エネルギーの供給拡大 [エネルギー消費量に占めるシェア 0.7% (2004) → 12% (2025)] 市民出資等によるグリーンファンド グリーン電力証書販売	1) PHV、EV の導入促進 2) EV、マイクロモビリティの共同利用	住宅性能の評価・格付け制度 (CASBEE)	横浜環境ポイント制度 各家庭での省エネ促進、小学生向けの環境学習、地域の商店街活性化 大都市・農山村連携モデルの構築 産学官連携によるバイオマス資源活用ビジネス促進
地方中核都市	飯田市	1) 太陽エネルギー(光、熱)の利用促進 2) タウンエコエネルギーシステムの展開(太陽熱等による面的熱供給)	EV、電動自動車、デマンド型乗合タクシー	建築物の省エネ化 1) 地域独自の省エネ基準の設定 2) 高効率エネルギー機器への転換	1) 地域ぐるみ環境 ISO 研究会による低炭素企業活動 2) 子供たちに対する環境教育 3) 地球温暖化防止コーディネーターの活用 4) 低炭素社会基本条例(仮称)の制定
	帯広市	1) 再生可能エネルギーの活用・豊富なバイオマス資源の活用 2) 天然ガスへの燃料転換	自動車、バスによる BDF、CNG ³³ の利用	1) (仮称)エコタウンの造成・新エネルギー施設など 2) 市民参加の森づくり	1) 環境家計簿の普及 2) マイ箸・マイボトルの持参 3) 木質ペレットストーブの普及
	富山市	1) 再生可能エネルギーの活用・資源循環施設の拠点整備 2) 小水力発電の導入	LRT ネットワークの活用	コンパクトシティの実現(LRT を軸とした公共交通沿線の都市機能の強化)	「チーム富山市」によるエコ活動の推進(省エネ住宅やエコ機器の導入、ゴミの減量化など)
	豊田市	1) 太陽光発電の普及促進(PHV、EV の充電インフラ整備) 2) 中小工場における CO ₂ 削減対策	1) PHV の共同利用 2) トランジットモール化等のゾーン規制 3) 公共交通への転換	全人工林の健全化 1) 間伐の実施、地域の合意形成組織の展開 2) 地域材の活用体制強化	市民・企業・行政等の一体的な取組の推進・エコポイントの拡充

³¹ Bus Rapid Transit の略。バス専用車線や連節バスなどを用いた都市輸送システムのこと。

³² 建築環境総合性能評価システム (Comprehensive Assessment System for Building Environment Efficiency)。従来の環境性能よりも広い意味での環境性能評価法。詳細は 3. 7 (1) を参照のこと。

³³ 圧縮天然ガス (Compressed Natural Gas)。

表 3-6(b) 環境モデル都市（小規模都市）の取組

市区町村	資源・エネルギー対策	運輸交通対策	建築物・都市計画・環境整備	生活・市民活動など	
小規模都市	下川町	<ul style="list-style-type: none"> 1) 早生樹ヤナギの栽培→バイオエタノール 2) 森林バイオマスエネルギーの導入 <ul style="list-style-type: none"> 1) 高齢者複合施設、知的障害者更生施設等で重油の 80% を代替 2) 地域熱供給システム(暖房)の導入 		<ul style="list-style-type: none"> 1) ウッドマレージの削減 住宅建築における町産材利用に対して補助金使用 2) 環境効率の高い住宅の建設(CASBEE の活用) 3) 快適住環境整備促進(リフォーム住宅)制度の導入 4) 世界的な FSC(森林管理協議会)森林認証を取得 	<ul style="list-style-type: none"> 1) 住民参画協働運動 ゴミの資源化(廃油→BDF) 2) CO₂ 削減コンテスト 3) 森林環境教育 子供たちが森林の果たす役割を学ぶ 家庭等において CO₂ を削減
	水俣市	<ul style="list-style-type: none"> 1) ゴミの減量・高度分別 2) エコタウン(リサイクル・リユース工場の立地)整備 3) バイオマスエネルギーの創出 (原料: 柑橘類の搾りかす、間伐材、竹) 4) 新エネルギーの活用 (太陽エネルギー、風力) 		<ul style="list-style-type: none"> 1) 市民の森づくり ボランティアを活用した植林等の推進 2) みなまた環境大学 市内外の環境意識を高める取組 3) 村丸ごと生活博物館 無駄のない暮らしの体験学習 	<ul style="list-style-type: none"> 1) 「水俣版」環境 ISO の推進 2) エコショップ認定制度 3) 地区環境協定制度 環境保全のための住民の生活ルールを作り、ルールに沿った生活をする取組を推進
	宮古島市	<ul style="list-style-type: none"> 1) バイオマスによる自給自足のエネルギー供給 ・バイオマス発電(バガス残渣) ・サトウキビ→バイオエタノール ・廃食用油→バイオディーゼル 2) 南国型エコハウスのアジア展開 南国の太陽熱を活かした空調・給湯システムを有するモデルハウスを島内、アジア地域に展開 	運輸部門の CO ₂ フリー化 <ul style="list-style-type: none"> 1) 大規模な新エネルギー発電所・蓄電池の整備 2) エコカー(バイオエタノール車、PHV)の普及拡大 エコカーが走行可能な環境(インフラ等)の整備 	年間 40 万人の観光客が訪れる観光都市を形成	<ul style="list-style-type: none"> 1) 美ぎ島募金運動 ・自然と環境保護、緑化推進のための財源確保、地域住民・来島者への啓蒙活動を推進 2) エコ活動のネットワーク推進 ・島民のエコアクション(プロ野球選手とのマングローブ植林等)をネットワーク化、島全体でエコ活動を拡大
	構原町	<ul style="list-style-type: none"> 1) 木質バイオマスの有効利用 木質ペレットの生産、ペレット消費機器の普及 2) 風力発電施設(現状 2 基→2050 年までに 40 基)、小水力発電、太陽光発電の整備 3) 廃食油→BDF 		<ul style="list-style-type: none"> 1) 確実な森林施業と作業の効率化 四万十川源流の水や森林を守り、森林の公益的な機能を発揮する森林づくりを行う 2) 持続的な森林経営の実現 FSC 森林認証取得をめざす 	低炭素社会づくりの取組を継続・定着 <ul style="list-style-type: none"> 1) あらゆる世代の人材育成と、都市や企業との交流・連携による地域活力の創出 2) 森林セラピー等の環境産業の推進

表 3-6(c) 環境モデル都市（東京特別区）の取組

市区町村		資源・エネルギー対策	運輸交通対策	建築物・都市計画・環境整備	生活・市民運動など
東京特別区	千代田区	1) 地方に設置する市民風力発電の直接電力購入 2) 木質バイオマスプロジェクトの推進 3) 温暖化対策促進地域を指定 ・地域冷暖房のエリア拡大 ・未利用エネルギーや再生可能エネルギーの面的な活用を推進	1) 区役所における EV や EV 充電器の地下駐車場設置 2) マンション等への EV 充電器設置を指導要綱に明記 3) 庁有車(低 CO ₂ 車)のカーシェアリング ³⁴ 化	高水準な建物のエネルギー対策 1) 新築対策 トップランナーレベルの省エネ機器の導入促進 2) 既築対策 3) サポートセンター(仮称) 公民連携組織を設置、情報提供や技術支援等を実施	区民・大学・企業等で組織される CES (千代田エコシステム) 推進協議会等と連携した環境配慮行動の促進と環境教育等の充実

³⁴ 一般に登録を行った会員間で特定の自動車を共同使用するサービスないしはシステム。

IPCC では、温暖化防止において住環境をよくすることと並んで交通のポテンシャルが大きいとされている。窒素ガス中で製造された氷を使用すると魚介類の鮮度を保つことができ、この技術はすでに実証段階に入っている。鉄道あるいは船舶と組み合わせて輸送すれば、消費者レベルでの満足度は落ちないと考えられる。このように新規技術と組み合わせることで、トラックから鉄道へといったモーダルシフトを実効性のあるものにすることができる。低炭素社会実現に向けた知恵が求められる。

2008年8月には「2050 日本低炭素社会」シナリオチームから低炭素に向けた12の方策(表3-7)が公表されている[3-8]。技術的には、再生可能エネルギー、原子力、CCS 併設高度火力発電技術、水素製造・利活用技術、家電など低炭素型製品製造技術が重要であると指摘されている。

表 3-7 低炭素に向けた 12 の方策（「2050 日本低炭素社会」シナリオチーム）

	方策の名称	説明	CO ₂ 削減量/MtC
1	快適さを逃がさない住まいとオフィス	建物の構造を工夫することで光を取り込み、暖・冷房の熱を逃がさない建築物の設計・普及	民生分野 48~56
2	トプランナー機器をレンタルする暮らし	レンタルなどで高効率機器の初期費用負担を軽減し、モノ離れたサービス提供を推進	
3	安心でおいしい旬産旬消費型農業	露地で栽培された農産物など旬のものを食べる生活をサポートすることで農業経営が低炭素化	産業分野 30~35
4	森林と共生できる暮らし	建築物や家具・建具などへの木材積極的利用、吸収源確保、長期林業政策で林業ビジネス進展	
5	人と地球に責任を持つ産業・ビジネス	消費者のほしい低炭素型製品・サービスの開発・販売で持続可能な企業経営を行う	
6	滑らかで無駄のないロジスティクス	SCM ³⁵ で無駄な生産や在庫を削減し、産業で作られたサービスを効率的に届ける	運輸分野 44~45
7	歩いて暮らせる街づくり	商業施設や仕事場に徒歩・自転車・公共交通機関で行きやすい街づくり	
8	カーボンミニマム系統電力	再生可能エネ、原子力、CCS 併設火力発電所からの低炭素な電気を、電力系統を介して供給	エネルギー転換分野 81~95
9	太陽と風の地産地消	太陽エネルギー、風力、地熱、バイオマスなどの地域エネルギーを最大限に活用	
10	次世代エネルギー供給	水素・バイオ燃料に関する研究開発の推進と供給体制の確立	
11	「見える化」で賢い選択	CO ₂ 排出量などを「見える化」して、消費者の経済合理的な低炭素商品選択をサポートする	横断分野
12	低炭素社会の担い手づくり	低炭素社会を設計する・実現させる・支える人づくり	

³⁵ サプライチェーン・マネジメント (Supply Chain Management)。物流システムをある一つの企業の内部に限定せず、複数の企業間で統合的な物流システムを構築し、経営の成果を高めるためのマネジメント。

第 1 章で概観したように、世界的には人口爆発が起きてもわが国では少子高齢化が進行し、2050 年における人口は 9,000 万人～1 億人と推定される。この人口減の問題は単なる人口減少という言葉で片づけることができない。1) 人口の集中化が地方から都市圏へ、都市圏では郊外から中心部へ起こる。このような人口分布のひずみを考える必要がある。2) 新産業を起こさない限り、将来のわが国の経済を維持することは不可能である。先進国の工業は都市の都市周辺部で生まれ、やがてスペースを求めて郊外に移転し、地方に分散していった。さらに、円高要因と低賃金により、東南アジアへの生産拠点シフトが起こってわが国の産業は空洞化した。製造拠点の雇用吸収力と産業連関効果は大きいため、わが国は産業構造の転換を図らなければ将来がない。さらに言うと、わが国サービス業の労働生産性が製造業に比べてかなり低いことを考えると悲観的な見通しが強くなる。さらに、高度経済成長期に建設されたわが国のインフラが 2030 年代に寿命を迎えるようになると、大幅な投資が必要になってくる。一步間違えば、大地震が起きなくても多数の人々の生命が危険にさらされることにもなりかねない。2050 年の安全な社会実現のための技術開発として何が必要か、産総研としても精査する必要がある。

2050 年の望ましい都市像を展望すると、1) コンパクトシティのような集積化によるエネルギー効率の高い都市造り、2) 高密度に集積されたヒト、モノ、金を活用した創造的な都市造りが必要となる。地方にしても都市にしても活性化の核を作ることが最も重要である。中心が分散すると活性化につながらないことは、すでにわが国の多くの地方都市が証明している。新産業のみならず、文化を創造することで、都市はさらに活性化する。昨今の世界的な漫画・アニメブームを 30 年前に予想した人はいただろうか。文化から産業への流れで 21 世紀の新産業を起こしていきたいものである。

3. 6 健康で安全な生活を実現する技術

第 1 章で述べたように、今後ますます世界人口は増加するものの、わが国の人口は逡減してゆく、高齢化してゆく。2008 年における日本人の平均寿命は女性が 86 歳で世界一、男性は 79 歳でアイスランドに次いで 2 位となっている。しかし、詳細に実情を眺めてみると問題も浮かび上がってくる。男性の平均寿命ランキングは 1965 年時点で東京、京都、神奈川、愛知がベスト 4 で、1995 年のベスト 4 は長野、福井、熊本、沖縄に代わっている。1965 年に 1 位だった東京は 20 位に後退している。女性もほぼ同じ傾向を示している。このことから、平均寿命の伸びと医療設備の充実度との間に相関がないことがわかる。問題の核心は生活習慣病であり、運動不足による肥満により引き起こされる心筋梗塞、高血圧、糖尿病、痛風、腰痛といった類である。これは国民自身の自助努力により改善していくほかにない。もう一つは喫煙の問題である。米国ではガンの死亡率が 1994 年から減少しているが、日本では逆に 3 倍も増加した。日本人の死因で二番目に多い心筋梗塞の年間死亡者数は 9 万人から 15 万人に増加したのに対し、米国では 1/3 に減少している。米国では 1970 年代の喫煙率が 50% を超えていたが、今では 23% に減少している。日本の成人男性の喫煙率はいまだに 44% と、先進国の中では極めて高くなっ

ている。フィンランドでは 1970 年代に 76% あった成人男性の喫煙率が 25% まで下がったことにより、肺ガンの死亡者数が半分に減り、心筋梗塞の年間死亡者数が 1/3 に減ってしまった。健康で安心な社会の実現には、このような事実関係を知った上で適切な生活習慣を取り入れなければいけない。

健康と寿命の関係についても言及しておく必要がある。2000 年、世界保健機構 (WHO) は「健康寿命」という概念を提出している。これは平均寿命から寝たきりになってしまった期間を差し引いた年数で表される。2004 年の WHO 保健レポートで世界各国の平均寿命を見ると、日本がスイスを抑えてトップに立っている。わが国の女性の健康寿命は 77.7 歳、男性は 72.3 歳となる。平均寿命から健康寿命を差し引くと男性は 7 歳、女性は 8 歳程度となる。この期間は寝たきりや認知症の影響を受けることになる。健康な社会、あえて健康長寿と言わない理由はここにある。

産総研で実施されたヒトゲノム解析はゲノムと疾病との関係を明らかにしたもので、特定個人が将来かかる確率の高い疾病を予測し、その予防に役立てることが可能となる。これはまさに健康寿命を延ばすことに貢献することになる。

ハイテクものづくりプロジェクトでは不凍タンパク質を低コストかつ高効率に改質する技術が開発されている [3-24]。不凍タンパク質は細胞保存、細胞移植、再生医療といった医療から長期高品質保存される食品まで多岐にわたる応用が可能であり、今後の展開が期待されている。この他にも種々の健康増進器具、高齢者に優しい建物、乗り物、都市空間の設計など、様々なものが考えられる。

寝たきり状態にある患者や認知症患者のケアを助けるための技術に対する社会的なニーズは今後ますます高まるものと想定される。パロのような癒しロボットも一つの貢献例に数えられる。ソフトなサービスという観点からの検討も必要になる。

3. 7 「持続可能性」の定量的な評価指標

(1) 環境効率

本委員会では、第二期までに環境効率に対して種々の検討を行ってきたが、持続可能性を定量的に示すことは難しい課題である。従来、持続可能性の評価指標としてエコロジカル・フットプリント (面積指標) [3-25],[3-26]³⁶、エコロジカル・リュックサック (重量指標)、Genuine Progress Indicator (GPI) (金銭指標)³⁷、JFS 指標 (点数指標)³⁸ が知られている。エコロジカル・フットプリントは地球全体、あるいは特定の国の活動を支えるために必要な面積が実際の面積を超えている場合には持続的でないと考えられるもので、定義そのものは理解しやすい。しかしながら、指標としての有効性の可否、世界的な標準化の問題など、現在でも賛否両論があり、持続可能性を定量的に評価することは一般に難しい。

³⁶ 人間活動が環境に与える負荷を資源の再生産および廃棄物の浄化に必要な面積として数値化した指標。

³⁷ GNP に対して、ボランティア活動などの付加項目や環境汚染対策などの控除項目を加減した指標。

³⁸ 2050 年の姿を満点として、環境、経済、社会、個人の 4 軸で点数化した指標。1990 年が 41.5 点、2005 年が 33.5 点で、この 15 年間で後退したとされている。

一般的な環境効率の考え方と産業の資源生産性の考え方を図 3-6 に示す。持続可能な社会を実現するには、経済成長と生活の豊かさのデカップリング [3-27] を行う必要がある。企業レベルにおける製品・サービスの価値とは売上高であったり、生産数量であったりする。環境負荷は CO₂ 排出量、廃棄物発生量などで表される。

一般的な環境効率の考え方

$$\text{環境効率} = \frac{\text{製品・サービスの価値}}{\text{環境負荷}}$$

産業の資源生産性の考え方

$$\text{産業の資源生産性} = \frac{\text{産業の付加価値(粗利益)}}{\text{産業活動に投入した資源量}}$$

図 3-6 産業の重心移動指標の考え方

日経 BP 社による 2008 年環境ブランド調査イメージランキング上位 20 社における環境効率の使用状況についてみると、企業レベルの環境効率を算出しているのはトヨタ自動車、サントリー、東京電力、ソニー、新日本石油の 5 社、製品レベルの環境効率を算出しているのは松下電器産業、松下電工、三菱電機の 3 社となっている。

環境効率の問題点を図 3-7 に示す。現状では①標準化された指標がない、②基準がない、③活用しにくい、といった指摘がなされている。これに対して、産総研では環境効率を国・産業・企業・製品レベルで相互に関連させるため、国、企業、労働者、投資家、消費者、各ステークホルダーにとっての付加価値をそれぞれ GDP、利益、給与、株価総額、製品の価値と規定し、各レベルでの環境効率が業種にかかわらず適用可能で、活用しやすいものとした。環境負荷項目として、直接部分で排出される CO₂、NO_x、SO_x、資源消費量、有害化学物質、廃棄物量の考慮が可能な LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling、日本版被害算定型環境影響評価手法) が提案されている。2008 年に環境効率算出マニュアル、環境効率算出支援ツール、産業レベルの環境効率算出シート、環境効率算出のための環境影響(LIMEによる統合)算出シートをホームページ上に公開した [3-28]。産業間比較、企業内組織間比較、経年比較などが行える (図 3-8)。

- ①標準化された指標がない
 - ・異なる定義の指標が比較される恐れがある
 - ・分母・分子の評価範囲が異なる
 - ・都合のよい定義が用いられる恐れがある
- ②基準がない
 - ・製造業がサービス業と比較されると不利になる
 - ・算出された値の評価が難しい
(高水準で推移しても努力していないように見える等)
- ③活用しにくい
 - ・産業により環境効率値が異なるため、企業での目標設定や達成評価度が難しい
 - ・どの定義を導入したらよいかの判別が難しい

図 3-7 環境効率の問題点

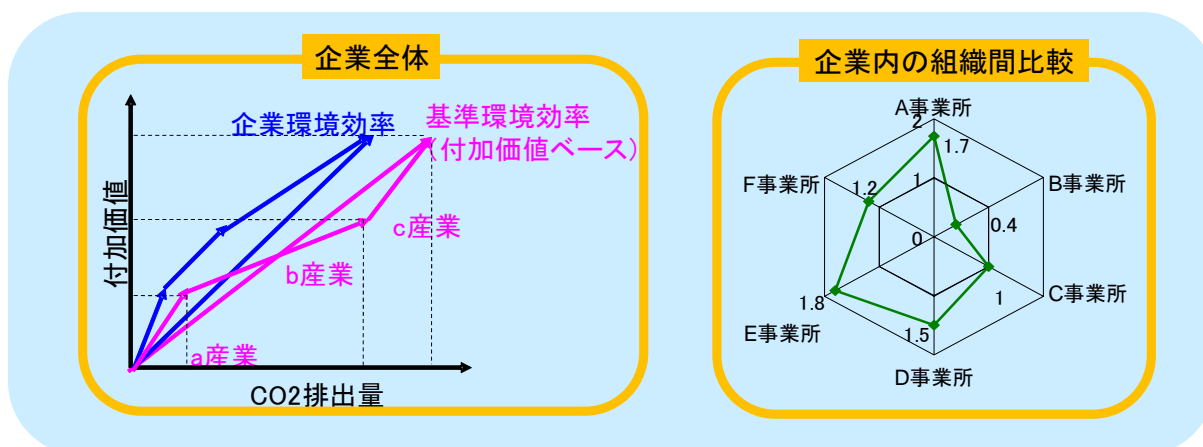


図 3-8 環境効率の活用方法

産業環境管理協会 [3-29] では、全企業 (27 業種) から見たケーススタディーを公表しているが、2009 年 9 月段階で登録企業 104 件、登録事例 5 件という状況である。分野も IT のみに限定されているのが実状である。同協会に設置されている日本環境効率フォーラム「ファクター X」標準化に関する WG では、図 3-9 に示される環境効率と温暖化防止効率を定義している。

$$\text{環境効率} = (\text{製品の価値}) / (\text{環境への影響})$$

$$\text{共通ファクター} = (\text{評価製品の環境効率}) / (\text{基準年度における同種の製品の環境効率})$$

※ 共通ファクター：環境効率(温暖化防止効率、資源効率)の向上倍率。ファクター X とも言う。

$$\text{環境効率} = (\text{基本機能}) \times (\text{標準使用期間}) / (\text{ライフサイクル全体における温室効果ガスの排出量})$$

$$\text{温暖化防止効率} = (\text{製品機能}) \times (\text{製品寿命}) / (\text{ライフサイクル全体における温室効果ガスの排出量})$$

図 3-9 日本環境効率フォーラムによる環境効率と温暖化防止効率の定義

これら、環境効率等の指標としての問題は、製品・サービスの価値、製品の価値、基本機能、製品機能の規定の仕方にバラツキがあり、信頼性に欠ける点である。今後、データセットの取得の問題等も解決してゆく必要がある。また、本質的な問題として、動的な分析ができない弱みを有している。

現状、まだ我が国での実施例は少ないものの、建築関係で環境性能効率(BEE = Building Environmental Efficiency) = [Q(Quality)] / [L(Load)] (Quality: 環境性能の総合評価値; Load: 環境負荷の総合評価値) が使われ、建築物は S, A, B+, B, C の 5 段階に格付けされている。この CASBEE は 2001 年に国土交通省主導で設置された(財)建築環境・省エネルギー機構内の委員会で開発された環境性能評価システムである。実際の評価は一級建築士の CASBEE 評価員により行われる。環境性能・環境負荷とランクが関係づけられている。英国、米国、カナダではすでに実用化されている。我が国では S 評価を受けた建築物として、ゲートシティ大崎(東京都品川区)、みなとみらい 21 地区・40 街区プロジェクト、竹中工務店東京本店などが知られている。他の事例は CASBEE 評価認証一覧 [3-30] に掲載されている。

IPCC の中では温暖化対策として一番可能性があるのは建物であり、建物の断熱化はポテンシャルが大きい。今後、環境性能の高い建物の建設が進むことが望まれる。

環境効率に類する指標の有効性を評価するためには、1) 定量化する際のデータが容易に得られること、2) 認定評価に使える基準が設けられていること、3) 達成目標が明示できることなどが必要条件となろう。

(2) 産業の重心移動

図 3-10 は産業変革による産業構造の重心移動の概念図を示している。伝統的な経済成長の図式では、開発レベルを上げようとするれば環境負荷も高くなる。逆に環境負荷を低下させれば開発レベルも低下するというものであった。これに対して、今後目指すべき産業群は環境負荷を低下

させても開発レベルが上がるというものであるが、これには新規技術の開発が必須なものとなる。3.7(1)で述べた環境効率で議論すると、従来の解析ではサービス業の方が製造業よりも環境効率が高い結果を与えるものと考えられる(図3-11)。望ましい産業の重心移動が右上に進むものとする、製品製造業や素材製造業はやめて、サービス業にシフトするのが賢明であるという結論になってしまう。しかし、エネルギー投入量の内容が異なるサービス業と製造業をこのように単純比較するのは危険なことであろう。各産業分野内での重心移動を議論するには有用であると考えられる。環境効率そのもので議論するならば、ガソリンエンジン自動車の水素自動車や電気自動車に変われば、走行中のCO₂量が殆どゼロになるため、環境効率は飛躍的に高くなる。このように大幅な環境効率の改善と比較して、各産業間の環境効率の差が小さいことをどのように評価するかも課題の一つと言えよう。

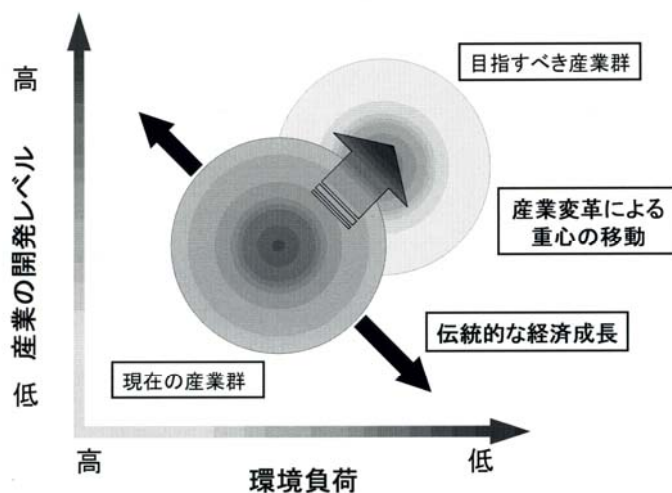


図 3-10 産業変革による産業構造の重心移動の概念図

付加価値とエネルギー投入量の関係(1980~2000年)

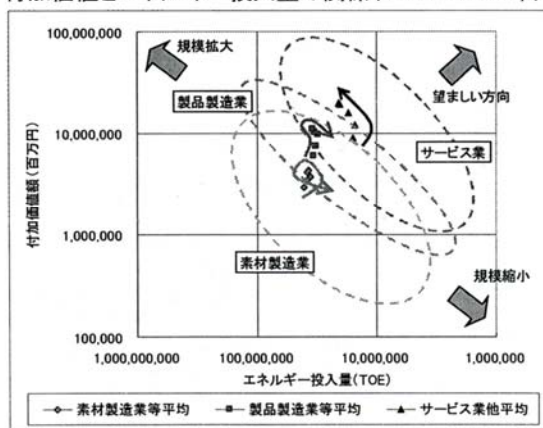


図 3-11 付加価値とエネルギー投入量との関係

産業の重心移動を考えると時のもう一つのポイントは外貨獲得額と労働生産性の比較である。GDP 的にはサービス業の方が 7 割近くと、製造業に比して圧倒的に勝っているが、外貨獲得額での比較になると、主客逆転する (図 3-12)。さらに労働生産性についてみると (図 3-13)、製造業ではリストラ等で労働者を削減して生産性を向上してきたのに対し、サービス業では労働者数が増えて、生産性は低迷している。このような事態を招いた最大の要因は貧困な IT の活用にあると考えられる。

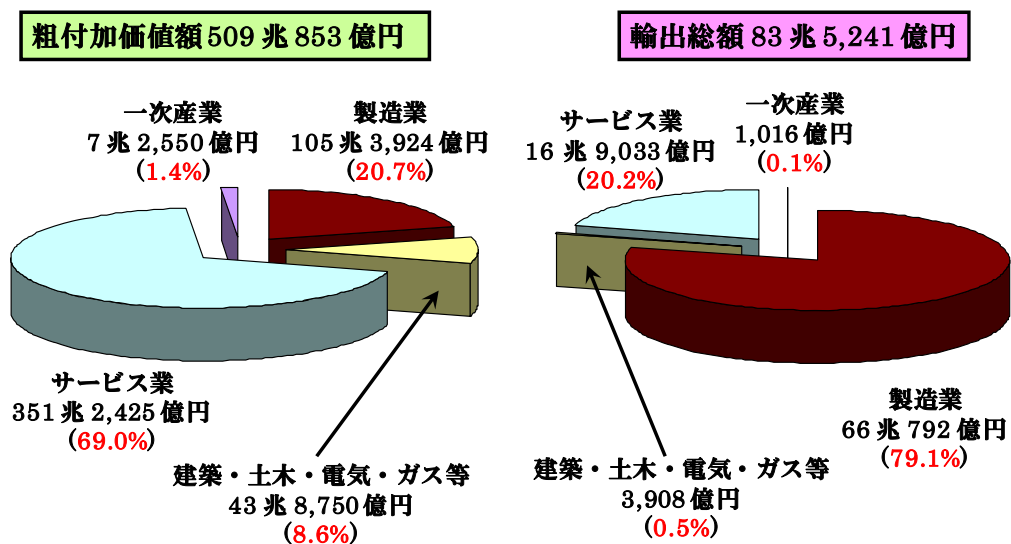


図 3-12 マクロ産業分類による我が国の粗付加価値額と輸出額およびその割合 [3-31]

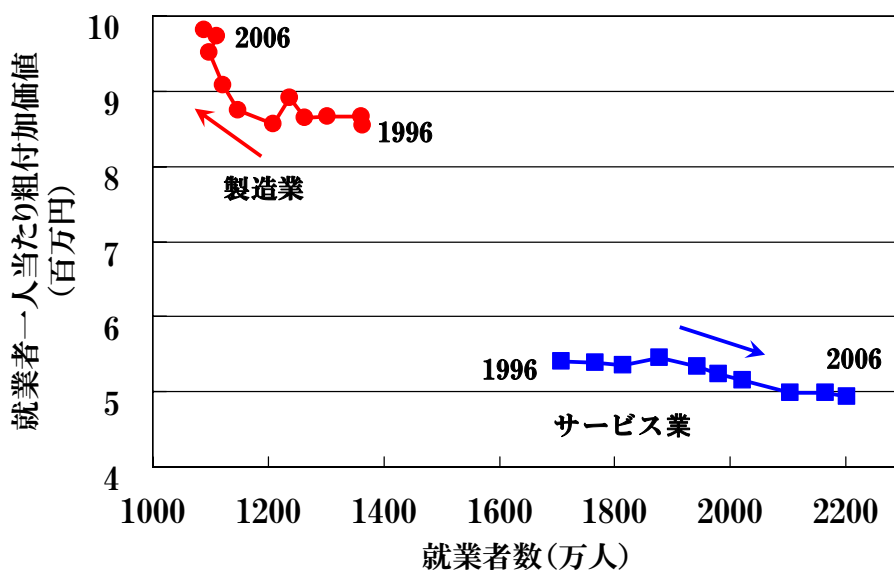


図 3-13 製造業とサービス業の労働生産性と就業者数の比較 [3-32]

以上、見てきたように、大局的な産業構造の重心移動を論ずるならば、安易な結論を引き出すことは危険であろう。これに対して、産業分野、あるいは産業そのものを固定して、環境効率を比較し、進むべき望ましい方向を議論することには意味が出てこよう。2050年の産業構造を想定すると、ロボット等の機械で人の機能を置き換えられる仕事は機械に代替するが、介護等の人でないと機能しない仕事については人が担うといった人的ファクターを考慮する必要があるということである。

30年以上前、多くの若者は燃費を考える前に高速性能の良い車、デザインの良い車に群がったものであるが、今は、日本の主要自動車産業も、今後開発するターゲットがPHEVであったり、EVであったりと、明確に差別化されるような面白い社会が到来した。自動車産業だけでも、走行車両の環境効率で持続可能な社会の構築に対する各社の貢献度を評価することも可能となったと言える。定量的に環境効率や産業の重心移動を評価することは現時点で難しいのが現状だが、今後の解析法の進歩が望まれる。

3. 8 2050年の社会像と産総研が果たす役割

日本政府が2009年に発表した2006年の相対的貧困率は15.7%であり、2000年の14.9%に比べて上昇している。OECD日本経済白書[3-33]によれば、1980年代から我が国は相対的貧困率が上昇しており、高齢化や単身世帯の増加が原因とされている。1990年代からは、勤労者層の格差拡大が影響を与えている。勤労者層の格差については、正規労働者における格差が拡大していない一方で、正規労働者に比べて賃金が低い非正規労働者が増加したことと、非正規労働者間の格差が拡大している点が問題になっている。かつて、日本は「一億総中流」と呼ばれた時代を経験したが、それも今は昔である。

2050年が、1) 低炭素社会、2) 資源循環型社会、3) 高度情報化社会、4) 健康で安全な社会となり、持続的な低成長を続けてゆく社会となるためには、国民全てがパラダイムシフトを遂げなければならない。その上で産総研が開発すべ技術課題についてはすでに述べた。「持続可能性」、「持続可能な技術開発」から短絡的に誘導される「環境・エネルギー分野における新規技術の開発」ではなく、ロボティクス、エレクトロニクス、バイオエンジニアリング、計測技術、標準化など、あらゆる分野に携わっている研究者・技術者の協働が必要となる。産総研の知を結集した技術パッケージを世に問うて行く必要がある。産総研は研究開発型独立行政法人として官との連携を図りながらも、経済的な自立性をより強く求められている。産業界との連携を深めつつ、研究成果を着実に社会に還元して国民の負託に応えられる研究機関としての責務を全うすることが求められる。

2050年の社会像を描くに当たって、介護など人手のいる仕事は人間に、機械にできることは機械にそれぞれ担ってもらおうという社会の省力化、効率化こそが、少子高齢化の進む日本の目指すべき道であろう。そこで余った人的資源を吸収するのは新規産業であり、第一の自動車革命ですでに経験済みである。製品のライフサイクルが極端に短くなった今日、プロダクトイノベーションを通じた新規産業創成により豊かな社会を実現するためには、産学官の叡智の結集が必要と

なる。

持続的な社会の成長に資する技術を開発した結果、上述した 1) ～ 4) の社会的な要求を満たす、2050 年における持続可能な街のイメージを図 3-14 に示す。



図 3-14 2050 年における持続可能な街のイメージ
(バリアフリー推進室チャレンジドグループ 石司幸歩 画)

【引用文献】

- 1) 首相官邸 (2009)
<http://www.kantei.go.jp/jp/hatoyama/actions/200912/30weichou.html>
- 2) 文部科学省 (2009)「科学技術・学術審議会 基本計画特別委員会 (第 9 回) 中間報告 (素案)」
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu11/siryu/05030101.htm
- 3) N. スターン (2006)「気候変動の経済学」
<http://env.go.jp/press/file-view.php?serial=9176&hou-id=8046>
- 4) 経済産業省 (2009)「産構審産業技術分科会基本問題小委員会 イノベーション力を強化する産業技術政策の在り方 (中間報告) ～出口を見据えた競争と協調～」、H21.05.15
<http://www.meti.go.jp/report/downloadfiles/g90908a01j.pdf>
- 5) [三菱総合研究所産業市場 (2007)「全予測2030年のニッポン」、日本経済新聞出版社、1-163
- 6) 小宮山宏 (1999)「地球持続の技術」、岩波書店、1-215
- 7) D. コイル (2001)「脱物質化社会」、東洋経済、1-370
- 8) 西岡秀三(編) (2008)「日本低炭素社会のシナリオ」、日刊工業新聞社
- 9) 東京大学、電通ほか (2008)「2050 年脱温暖化社会のライフスタイル」
- 10) 環境省 (2009) <http://www.env.go.jp/earth/info/80vision.pdf/>
- 11) イーズ調査レポート No. 3 (2008)「企業の温室効果ガス削減目標についての調査」報告
<http://www.es-inc.jp/>
- 12) 経済産業省 (2005)「技術戦略マップ (エネルギー分野) ～超長期エネルギー技術ビジョン～」、H17.10
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/tender/tenddata/0609//18.pdf>
- 13) 宮野春雄、中谷博司 (2007)「船舶の排出ガス規制と燃料油」、PETROTECH, 30(11), 808-813.
- 14) 大貫 伸 (2007)「内航タンカーに対する環境規制が与える影響」、PETROTECH, 30(11), 814-820.
- 15) 立石信義 (2007)「内航タンカーの消える日がやってくる?! 船員不足、船腹の減少と高齢化、事業者の転廃業」、PETROTECH, 30(11), 821-824
- 16) a) 江原幸雄、安達正敏、村岡洋文、安川香澄、松永 烈、野田徹郎 (2008)「2050 年自然エネルギービジョンにおける地熱エネルギーの貢献」、日本地熱学会誌、30(3), 165-179
b) Lindal, B. (1973) “Industrial and Other Applications of Geothermal Energy,” Amstead, H.C.H. ed., Geothermal Energy, UNESCO, Paris, 135-148.
- 17) 匂坂正幸 (2008)「LCA の概要とバイオマスへの適用」、31(8), 611-616.
- 18) 田原聖隆、堤 友哉、山崎章弘、里川重夫、小島紀徳 (2009)「大規模植林を想定した木質バイオマスの輸送用燃料化におけるインベントリ分析」、日エネ誌、88(3), 205-212.
- 19) 豊橋技術科学大学、東京大学、農業・食品産業技術総合研究機構、国際農林産業研究センター、鹿児島大、循環社会ビジネス研究所 (2008)「バイオマス利活用システム設計・評価ソフトウェア 基本版 GIS 版」、H20.09

- 20) 経済産業省 (2008) 「環境エネルギー技術のロードマップおよび普及シナリオ」
<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryu/haihu75/haihu-si75.html>
- 21) 岡部 徹 (2009) 「レアメタルの最近の情勢」、PETROTECH、32(12), 862-869
- 22) 進士誉夫、山上哲雄、森山顕仁、秋澤 淳、柏木孝夫、藤田吾郎、松原正芳 (2009) 「電力貯蔵設備を含んだマイクログリッドの評価」、日エネ誌、88(3), 199-204
- 23) 首相官邸 地域活性化統合本部会合
<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kankyo/index.html>
- 24) 産総研 (2010)
http://www.aist.go.jp/aist-j/aistinfo/pamph/full_research_03.pdf.
- 25) N. チェンバース他 (2005) 「エコロジカルフットプリントの活用」、(株)インターシフト、東京、1-237
- 26) M. ワケケナゲル (2004) 「エコロジカル・フットプリント」、合同出版、東京、1-293
- 27) 北川正恭、山本良一 (2005) 「サステナビリティの科学的基礎に関する調査 2006 A View from Japan」、サステナビリティの科学的基礎に関する調査プロジェクト事務局
- 28) 産総研 (2010) 「LIME 算出シート」
<http://www.aist-riss.jp/old/lca/ci/activity/project/efficiency/jstee/manual/manualD.html>.
- 29) (社) 産業環境管理協会 (2010)
http://www.jemai.or.jp/CACHE/eco-efficiency_guidelines.com.
- 30) 建築環境・省エネルギー機構 (IBEC) (2010)
http://www.ibec.or.jp/CASBEE/accredited_bulds.htm
- 31) 簡易延長産業連関表 (2006) <http://www.stat.go.jp/data/io/>
- 32) 内閣府国民経済計算 (SNA) (2009) <http://www.esri.cao.go.jp/sna.menu.html>
- 33) OECD 編 (2007) 「OECD 日本経済白書」、中央経済社

【参考文献】

- 1) 三橋規宏 (1997) 「ゼロエミッションと日本経済」、岩波書店、1-223
- 2) 世界銀行 (2003) 「世界開発報告 ダイナミックな世界における持続的開発 制度—成長および生活の質を転換する 2003」、一灯舎、1-479
- 3) S. L. ハート (2008) 「未来をつくる資本主義」、英治出版、1-352
- 4) 日引 聡、有村俊英 「入門 環境経済学 環境問題解決へのアプローチ」、中公新書
- 5) 上平田 潤、堂脇清志 (2009) 「園芸施設におけるバイオマスガス化 + 燃料電池 CGS のシステム分析」、日エネ誌、88(6), 492-499
- 6) 天満則夫ら (2008) 「特集 地熱利用技術の研究開発最前線」、日エネ誌、87(10), 790-839
- 7) 山中伸弥、他 (編纂) (2008) 「再生医療へ進む 最先端の幹細胞研究」、羊土社、1-2
- 8) 海道清信 (2007) 「コンパクトシティの計画とデザイン」、学芸出版社、京都、1-318
- 9) 久繁哲之介 (2008) 「日本版スローシティ」、学陽書房監修 大来佐武郎 (1987) 「地球の未来を守る

ために」、福武書店、1-440

10) K. S. スズキ (2003) 「デンマークという国自然エネルギー先進国」、合同出版

11) K. S. スズキ (2008) 「なぜ、デンマーク人は幸福な国をつくることに成功したのか、どうして、日本では人が大切にされるシステムをつくれぬのか」、合同出版

12) C. K. プラハワード (2005) 「ネクスト・マーケット「貧困層」を「顧客」に変える次世代ビジネス戦略」、英治出版、1-496

13) N. P. サリバン (2007) 「グラミンフォンという奇跡」、英治出版、1-336.

4. 主要研究機関における「持続的な開発」に資する研究の概要と特色

本章では、内外の主要な研究機関における「持続的な開発」に資する研究の概要と特色について述べることとする。

4. 1 調査の対象

(1) 調査対象技術

本章の調査対象技術を表 4-1 に示す。

表 4-1 調査対象技術

<p>(1) エネルギー・環境分野 (7 技術)</p> <ul style="list-style-type: none">① 太陽光発電② バイオマスからの液体燃料製造③ 水素利用 (輸送・貯蔵) 技術④ 高密度蓄電デバイス (スーパーキャパシタを除く)⑤ SiC パワーデバイス⑥ 地中熱ヒートポンプ⑦ 需要家内エネルギーネットワーク技術 (戸建て住宅対応 CO₂ 削減技術) <p>(2) ナノテクノロジー・材料・製造分野 (4 技術)</p> <ul style="list-style-type: none">① スーパーキャパシタ② レアメタル (アース) 回収・代替技術③ グリーンサステナブルケミストリー (GSC)④ サービスロボティクス <p>(3) ライフサイエンス分野 (1 技術)</p> <ul style="list-style-type: none">① 植物工場 <p>(4) 情報通信・エレクトロニクス分野 (2 技術)</p> <ul style="list-style-type: none">① ネットワークフォトンクス (光ネットワークによる情報通信の省エネ化)② スピントロニクス <p>(5) 標準・計測分野 (1 技術)</p> <ul style="list-style-type: none">① 光・量子ビームイメージング技術 (計測・分析用)
--

(2) 調査対象機関

本章の調査対象機関は、①に示す国・地域の、②に示す機関とする。

①対象国： 日本、米国、欧州、その他 (アジア等)

②対象とする研究機関：

- ・ 主対象： 上記対象国における主な研究機関
- ・ 対象とする研究機関の種別： 大学、公的研究機関 (国立、独立行政法人、州立等)、民間企業・研究機関

4. 2 調査の方法

文献・Web 調査を行い、調査結果を4. 3節にとりまとめた。

4. 3 主要研究機関における研究の概要と特色

(1) エネルギー・環境分野

1) 太陽光発電

i) 技術の概要

太陽光発電は、太陽電池を利用して太陽光のエネルギーを電力に変換する発電方式である。太陽電池は図4-1に示すように、光起電力効果を利用して光エネルギーを直接電力に変換する素子であり、光吸収層材料の種類や構造により以下の種類がある。

- ① シリコン系太陽電池
 - ・ 単結晶シリコン太陽電池
 - ・ 多結晶シリコン太陽電池
 - ・ 微結晶シリコン太陽電池
 - ・ アモルファスシリコン太陽電池
- ② 化合物系太陽電池
 - ・ InGaAs 太陽電池
 - ・ GaAs 系太陽電池
 - ・ CIS 系（カルコパイライト系）太陽電池
 - ・ CZTS (Cu₂ZnSnS₄) 太陽電池
 - ・ CdTe-CdS 系太陽電池
 - ・ その他：InP 系太陽電池、SiGe 系太陽電池、Ge 太陽電池、ZnO/CuAlO₂ 太陽電池（透明太陽電池）等
- ③ 有機系太陽電池
 - ・ 色素増感太陽電池
 - ・ 有機薄膜太陽電池
- ④ 量子ドット型太陽電池

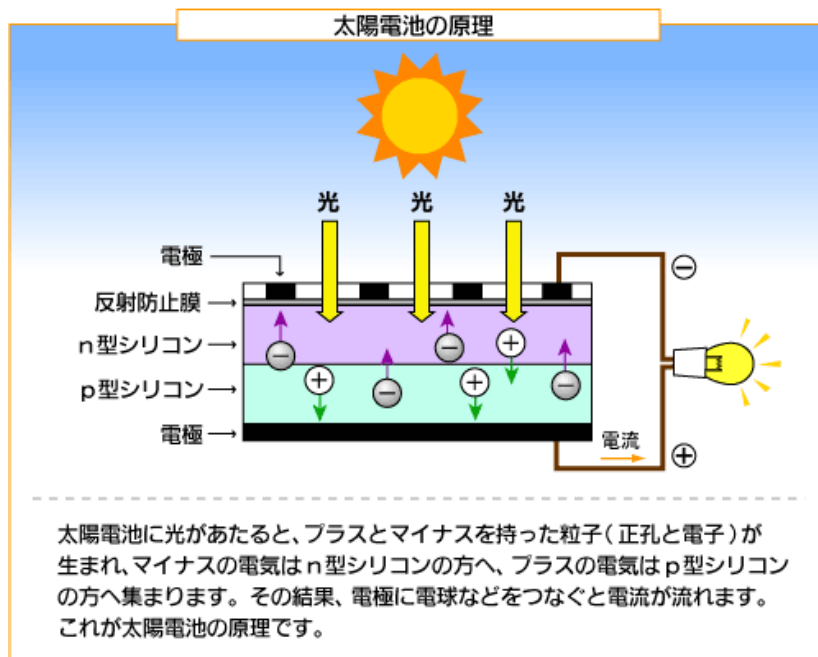


図 4-1 太陽電池（シリコン系）の原理 [4-1]

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

我が国では、1970年代から経済産業省（当時：通商産業省）のサンシャイン計画において太陽光発電に関する研究開発プロジェクトが実施され、我が国における太陽光発電技術の進歩と実用化に貢献してきた。

現在、NEDO は 4 つの政府関連プロジェクトを実施している（表 4-2）。

表 4-2 NEDO が現在推進している太陽光発電関連プロジェクト

名称	実施期間	概要
太陽光発電システム実用化促進技術開発	2008～2009年度	<p>これまでの技術研究開発等で得られた先進的な太陽電池作製関連の要素技術を早期に実用化し、太陽光発電が長期的にエネルギーの一翼を担える発展を遂げることを目的とし、また我が国の技術開発力の優位性を維持するため、以下の課題を設定した課題設定型産業技術開発費助成事業（助成率 1/2）を実施。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 薄膜シリコン太陽電池の高生産性技術（超大面積化、高速製膜等）、軽量化技術等 2. 極薄型多結晶シリコン太陽電池のためのスライス技術等 3. CIS系薄膜太陽電池に係るセレン化法のプロセス最適化技術等

名称	実施期間	概要
太陽光発電システム未来技術研究開発	2006～ 2009年度	<p>現状技術の延長にない技術革新を目指した中・長期の技術研究開発として、下記のテーマに関する研究開発を実施。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. CIS系薄膜太陽電池の高効率化技術、軽量基板上への太陽電池の形成プロセス要素技術 2. 薄膜シリコン太陽電池の高効率化技術 3. 色素増感太陽電池の高効率化技術、モジュール化技術・耐久性向上技術 4. 次世代超薄型シリコン太陽電池の高効率化技術および関連プロセス技術 5. 有機薄膜太陽電池の高効率化技術、耐久性向上技術 6. 太陽光発電システムの大幅な低コスト化・高性能化・長寿命化が実現可能と考えられる次世代技術の探索
革新的太陽光発電技術研究開発(革新型太陽電池国際研究拠点整備事業)	2008～ 2014年度	<p>太陽光発電技術に関連し、新材料・新規構造等を利用して飛躍的な高性能化へのアプローチを探索し、可能性を実証することを目標にした研究開発を行う。</p> <p>そのために、開発の中心となるリーダーが参画研究機関との協力関係を構築し、海外との研究協力(人材交流等)も行いながら、ブレークスルーを探る。</p> <p>具体的には以下のテーマを実施。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ポストシリコン超高効率太陽電池の研究開発 2. 高度秩序構造を有する薄膜多接合太陽電池の研究開発 3. 低倍率集光型薄膜フルスペクトル太陽電池の研究開発
太陽光発電システム共通基盤技術研究開発	2006～ 2009年度	<p>今後の太陽光発電システムの円滑かつ健全な導入拡大のためには、太陽電池の低コスト化だけでなく、共通的な基盤技術の開発・整備が不可欠なため、以下の研究開発を実施。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 新太陽電池評価技術の開発 2. PV環境技術の開発 3. 標準化支援事業およびIEA国際協力事業等

このほか、文部科学省の「宇宙太陽光発電に係る研究開発」等の研究開発プロジェクトが実施されている。

②主要な研究機関と主な研究内容

日本における太陽光発電に関する代表的な研究機関(公的研究機関、大学)と主な研究内容を表4-3に示す。

表 4-3 太陽光発電に関する代表的な研究機関（公的研究機関、大学）と主な研究内容

研究機関等	主な研究内容
産業技術総合研究所・太陽光発電研究センター	<ul style="list-style-type: none"> ● 結晶シリコン太陽電池 ● アモルファスおよび微結晶シリコン太陽電池 ● CIGS 化合物薄膜太陽電池、ZnO 系透明導電膜 ● 太陽電池の評価技術、評価機関機能の提供、大規模システム運用、リサイクル技術 ● 有機材料を用いた太陽電池 ● パイロットラインによる技術実証、産業界への技術移転加速
東京大学・先端科学技術研究センター	<ul style="list-style-type: none"> ● 超高効率太陽電池 ● エルギー貯蔵型色素増感太陽電池 ● 有機無機ハイブリッド太陽電池 ● 多接合タンデム太陽電池 ● 量子ナノ構造マルチバンド太陽電池
東京工業大学・大学院理工学研究科・電子物理工学専攻・小長井/山田研究室	<ul style="list-style-type: none"> ● 結晶シリコン系太陽電池 ● 薄膜シリコン系太陽電池 ● 量子ドット太陽電池 ● CIGS 系太陽電池 ● 歪 Ge 太陽電池

注) 上記は代表例であり、このほか多くの大学・研究機関において太陽光発電や太陽電池に関する研究開発が行われている。

このほか、太陽電池メーカ（シャープ、三洋電機、京セラ等）を含む多くの機関（表 4-4）が太陽光発電、太陽電池に関する研究開発を行っている。

表 4-4 PVTEC（太陽光発電技術研究組合）の参加機関 [4-2]

(株) I H I	大同メタル工業(株)
旭化成ケミカルズ(株)	大日本印刷(株)
旭硝子(株)	DIC(株)
英弘精機(株)	帝人デュポンフィルム(株)
エスペック(株)	デュポン(株)
(株)エヌ・ピー・シー	電気化学工業(株)
大倉工業(株)	(財)電力中央研究所
(株)カネカ	東洋アルミニウム(株)
菊水電子工業(株)	東洋インキ製造(株)
京セラ(株)	東洋紡績(株)
(株)クラレ	東レ(株)
(株)コベルコ科研	東レエンジニアリング(株)
コマツ NTC(株)	凸版印刷(株)
サエス・ゲッターズ・エス・ピー・エー	日産化学工業(株)
(独)産業技術総合研究所	日東電工(株)
三洋電機(株)	日本板硝子(株)
シーアイ化成(株)	日立化成工業(株)
シャープ(株)	富士電機ホールディングス (株)
昭和シェル石油(株)	富士フィルム(株)
新栄電子計測器(株)	藤森工業(株)
新日本石油(株)	三井化学(株)

住友ベークライト(株)	三井・デュポン ポリケミカル (株)
(株)スリーボンド	三菱化学(株)
積水化学工業(株)	三菱重工業(株)
ソニーケミカル&インフォメーションデバイス (株)	三菱樹脂(株)
大研化学工業(株)	YOCASOL(株)
ダイセル化学工業(株)	リンテック(株)
大同特殊鋼(株)	

iii) 米国における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

従来は、米国エネルギー省 (United States Department of Energy, DOE) および国立太陽光発電センター (National Center for Photovoltaics, NCPV)³⁹ が推進する「太陽光発電プログラム」が代表的な研究開発プログラムであった [4-3]。

本プログラムは 2008 年に、DOE が直轄する先端エネルギー計画 (Advanced Energy Initiative, AEI) に基づくソーラー・アメリカ計画 (Solar America Initiative, SAI) に移行した。

SAI 計画により、従来より強力かつ短期間での低コスト化・実用化を推し進めるため、政府主導により民間企業が主体となるコンソーシアム形式の技術開発が開始された。

本計画では、数年間毎に中間審査を実施し、ステージゲート方式でより有望なプロジェクトを継続して支援し、2015 年に商用系統の電力料金と同程度のコスト (~5 円/kWh) の実現を目標としている。予算も 1 億 4,800 万ドル (2007 年度要求) へと倍増し、集中的に資金を投入している。

NREL は、SAI 計画の一つの委託契約先として、引き続き幅広い研究開発分野で太陽光発電技術開発を行っている。同研究所は、コロラド州の大学等と「州再生可能エネルギー協同研究所」を組織し、再生可能エネルギー・コンソーシアム⁴⁰ として太陽光発電の基礎研究開発・応用技術開発を含めて取り組むこととしている。

SAI 計画では、以下の取組を行っている。

- a. 「テクノロジー・パスウェイ・パートナーシップ (Technology Pathway Partnerships, TPP)」
(システム開発および製造のための大型コンソーシアム)
- b. 「基礎科学研究開発」(大学による太陽エネルギー基礎研究開発プロジェクト)
- c. 「太陽電池モジュール・インキュベータ」(中小企業革新研究開発 (Small Business Innovation Research, SBIR) 方式、ハイリスク・ハイリターン型プロジェクト)
- d. 「次世代太陽電池プロジェクト」(新規デバイスおよびプロセスの概念の実証)
- e. 「太陽エネルギー系統連系システム」(コンポーネントおよびパイロットスケール製造)

このほか、SAI 計画と連動した市場開発プロジェクトとして、f. 「市場移転」(産学協力による技術商業化への障壁の低減)、g. 「ソーラー・アメリカ・ショーケース」(大規模システム導入)、h. 「ソーラー・アメリカ・シティーズ」(地方自治体普及モデル) にも取り組んでいる。

³⁹ NCPV には、国立再生可能エネルギー研究所 (National Renewable Energy Laboratory, NREL)、サンディア国立研究所 (Sandia National Laboratories, SNL) 等が参画している。

⁴⁰ 米国のコンソーシアムには日本の研究組合のように政府が関与するものと、純粋な民間ベースのものがある。本コンソーシアムの場合は、コロラド州政府が関与、資金提供する方式であり、前者に該当する。

②研究開発ロードマップの策定・見直し

研究開発ロードマップの策定・見直しも頻繁に実施されており、2004年の太陽エネルギー工業会（Solar Energy Industries Association, SEIA）産業ビジョン策定の後、従来の国家太陽光発電プログラムの短期／長期目標（各年毎に示されたマイルストーン）を踏まえて、SAI計画における各種「太陽電池技術ロードマップ」がNCPVを中心として策定された（2007年）。

③主要な研究機関

米国における太陽光発電に関する主要な研究機関を以下に示す。

- ・NCPV（NREL、SNL等）（太陽電池、太陽光発電に関する基礎から応用に至る幅広い分野）
- ・ジョージア工科大学（結晶シリコン）
- ・デラウェア大学（化合物半導体）
- ・トレド大学（薄膜シリコン）
- ・フロリダ太陽エネルギー・センター（Florida Solar Energy Center, FSEC）（インバータ、系統連系等）
- ・国防高等研究計画局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）（超高効率太陽電池）

iv) 欧州における研究開発動向

①EU・政府関連プロジェクトにおける研究開発

欧州委員会（European Commission, EC）研究開発総局（Directorate-General for Research, DG RTD）⁴¹および運輸・エネルギー総局（Directorate-General for Transport and Energy, DG TREN）の共同による「枠組みプログラム（FP）」の中で、再生可能エネルギー分野として太陽光発電技術開発プロジェクトを実施している。国をまたぐコンソーシアム形式を条件に、マッチング・ファンド方式で支援している。

1998～2002年に実施された第5次プログラム（FP5）では、実証を含む99プロジェクトが支援されたが、その後の産学界による研究開発・普及促進強化に向けた検討を経て、2003年～2006年に実施されたFP6においては、33プロジェクトに絞り込まれた。

欧州各国に、太陽光発電研究開発を得意とする歴史ある研究開発組織が存在している。それぞれ、結晶シリコン、薄膜シリコン、化合物半導体、集光型、超高効率、色素増感型、有機などの各太陽電池、系統連系技術、特性評価、規格・認証などのあらゆる分野に特化して、あるいは横断的に研究開発を実施している。関連産業との結びつきが古くからあり、ヨーロッパ産業の発展の基盤となる基礎技術から応用技術までを幅広くカバーしている。

FP6の中では、「統合プロジェクト」の範疇で、

- a. 「Crystal Clear」（低コスト・高変換効率・高信頼性の結晶シリコン太陽電池技術）

⁴¹ 欧州委員会の研究開発総局の正式名称は、Directorate-General for Research である。これをなぜ DG-RTD と略称するか、正確には不明であるが、おそらく以前は Directorate-General for Research and Technological Development という名称であり、その頃からの略称が今も引き継がれているのではないかと推察される。

- b. 「Fullspectrum」(集光型・第三世代を含む超高効率太陽電池)
- c. 「ATHLET」(シリコン・化合物半導体による低価格薄膜太陽電池)
- d. 「PERFORMANCE」(システム性能評価方法の確立)

の4つの大型コンソーシアムが実施されている。原料部門から太陽電池、利用分野、リサイクルまでを包含した、要素技術だけではなくユーザを意識したプロジェクト形式を採っている。

また系統連系技術に関しては、

- e. 「EU-DEEP」(分散型電源の大規模導入に向けた障壁の除去)
- f. 「IRED」(電力系統への再生可能エネルギー電源の導入)

等のプロジェクトがある。

FP7の策定やヨーロッパ内外への太陽光発電システム普及促進に向けて、特にFP6以降にロードマップや戦略検討などの動きが相次いだ。欧州委員会の招聘による太陽光発電技術諮問会議(Photovoltaic Technology Research Advisory Council, PV TRAC)は、太陽光発電産業ビジョンを策定し、欧州太陽光発電技術プラットフォーム(Photovoltaic Technology Platform, PVTP)の設立を提言した(2005年)。

また、FP6の調整活動の一環として、「PV Catapult」プロジェクトが実施され、産学により長期的な太陽光発電研究開発・普及促進のための提言がまとめられた。2005年には、全ヨーロッパ的な諮問組織としてPVTPが設立された。現在、PVTPの中で太陽光発電に関する戦略的研究開発計画(Strategic Research Agenda, SRA)が検討されており、既に2030～2050年に向けた「太陽光発電ロードマップ」が示されている(2008年)。

②主要な研究機関

欧州における太陽光発電に関する主要な研究機関を以下に示す。

- ・欧州委員会共同研究センター(European Commission Joint Research Centre, EC JRC)
- ・ドイツ: フラウンホーファー太陽エネルギー・システム研究所(Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem, FhG-ISE)、ヘルムホルツ研究センター(Helmholtz-Zentrum Berlin, HZB)、太陽エネルギー・水素研究センター(Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, ZSW)、太陽エネルギー技術研究所(Institut für Solare Energieversorgungstechnik, ISET)、ユーリッヒ研究センター(Forschungszentrum Jülich Startseite, FZJ)、ハーンマイトナー研究所(Hahn-Meitner-Institute, HMI)
- ・ベルギー: 大学間マイクロエレクトロニクス・センター(Interuniversity Microelectronics Center, IMEC)
- ・オランダ: エネルギー研究財団(Energy Research Centre of the Netherlands, ECN)
- ・スイス: ヌーシャテル工科大学(Université de Neuchâtel, UniNE)、ローザンヌ工科大学(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, EPFL)、連邦工科大学(Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, ETHZ)
- ・フランス: 太陽電池エネルギー研究所(Institut de Recherche et Developpement sur l'Energie

- Photovoltaïque, IRDEP)、太陽エネルギー研究所 (Institut National de l'Energie Solaire, INES)
- ・イタリア：新技術・エネルギー・環境庁 (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, ENEA)、電気部品・システム研究所認証研究所 (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano, CESI)
- ・スペイン：集光型太陽光発電システム研究所 (Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración, ISFOC)

v) アジアにおける研究開発動向

①概要

アジア新興国においては、エネルギーや産業を所管する省庁の下、再生可能エネルギーに関する研究開発が実施されている（中国：国家発展改革委員会 (National Development and Reform Commission, NDRC)、韓国：通商・産業・エネルギー省 (Ministry of Commerce, Industry and Energy, MOCIE)、台湾：經濟部 (Ministry of Economic Affairs, MOEA)、インド：新・再生可能エネルギー省 (Ministry of New and Renewable Energy, MNRE) など）。

韓国・太陽光発電開発機構 (Korea Photovoltaic Development Organization, KPVDO) のように専門機関を組織する例もある。

公的な研究開発機関が、太陽光発電研究開発を主導している。韓国：エネルギー研究所 (Korea Institute of Energy Research, KIER)、台湾：工業技術院 (Industrial Technology Research Institute of Taiwan, ITRI) - 太陽光発電科技中心 (Photovoltaics Technology Center, PVTC) など。

太陽電池デバイス研究開発では、原料からセル、モジュールまで各種太陽電池の研究開発を実施している。

システム利用分野でも技術開発を実施しているが、先進国に比べて研究レベルが高いとは言えない。

太陽光発電システムの導入や産業の発展に関して、各国で太陽光発電ロードマップが策定されている。たとえば、中国：太陽光発電開発ロードマップ (2007年)、韓国：PV ビジョン 2012 等がある。

②主要な研究機関

アジアにおける太陽光発電に関する主要な研究機関を以下に示す。

- ・韓国：KIER [太陽電池モジュール、BIPV (Building Integrated PhotoVoltaic module)⁴²、パワーコンディショナ、システム計測等]
- ・台湾：ITRI-PVTC [CIGS (Copper Indium Gallium diSelenide)⁴³ 系太陽電池、薄膜形成プロセス等]

⁴² 建材と太陽電池モジュールを一体化した建材一体型太陽電池モジュール。

⁴³ 太陽電池 (ソーラーバッテリー) などに使用される素材の一種で、銅とインジウム、ガリウム、セレンの化合物を材料とする薄膜状態の物質のこと。CIGS 系太陽電池は、シリコンを使用しないため、基板の厚みや製造コストなどを抑えることができる。発電効率や耐劣化性も高く、現在実用化されている太陽電池の中では最高クラスの性能を有する。個人用から宇宙開発まで様々な用途での利用が期待されている。

vi) 国際的な比較

太陽電池に関する特許出願件数と論文発表件数について、国際的な比較を行った。

①特許出願件数

太陽電池に関する、出願人国籍別の日本・米国・欧州（欧州特許庁への EPC 出願を含む）・中国・韓国の各特許庁への特許出願件数の推移（図 4-2）から、次の a.、b. が読み取れる。

- a. 出願人の国籍で見ると、日本の割合が最も高く、次いで欧州、米国の順となっている。
- b. ただし、日本の割合は減少傾向にあり、代わりに中国、韓国の割合が増加している。

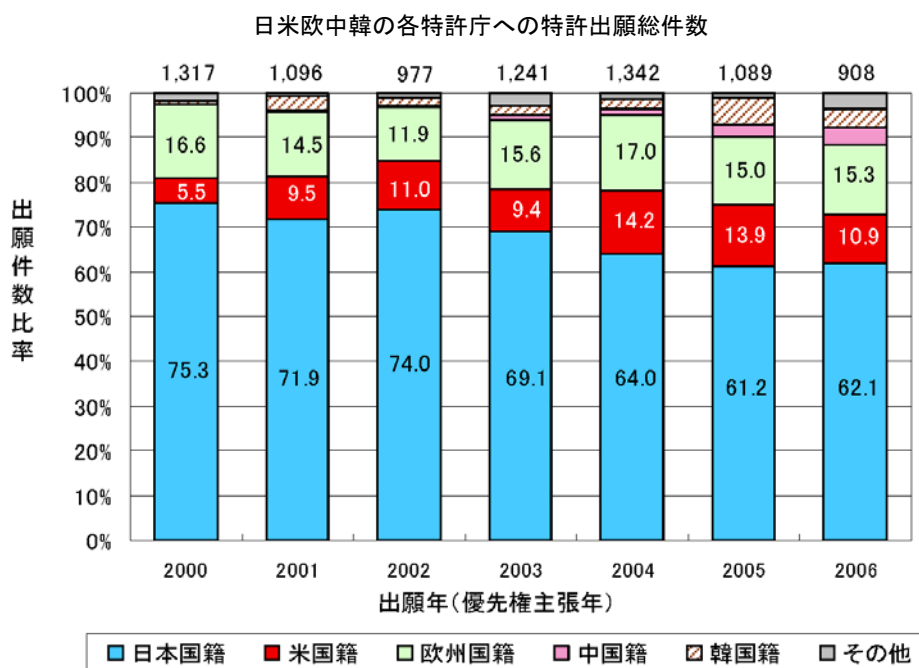
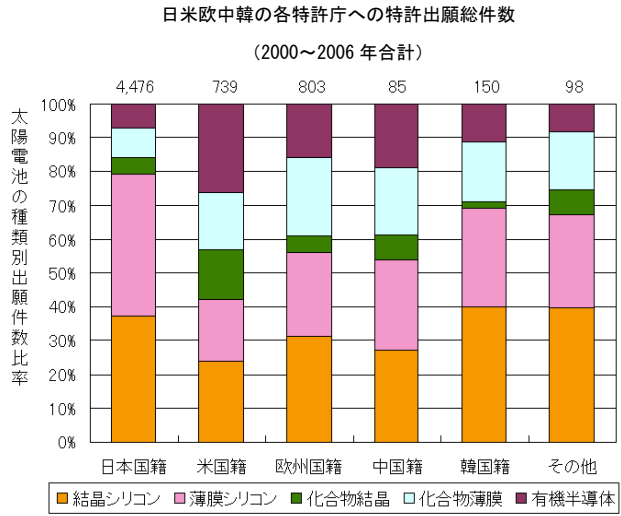
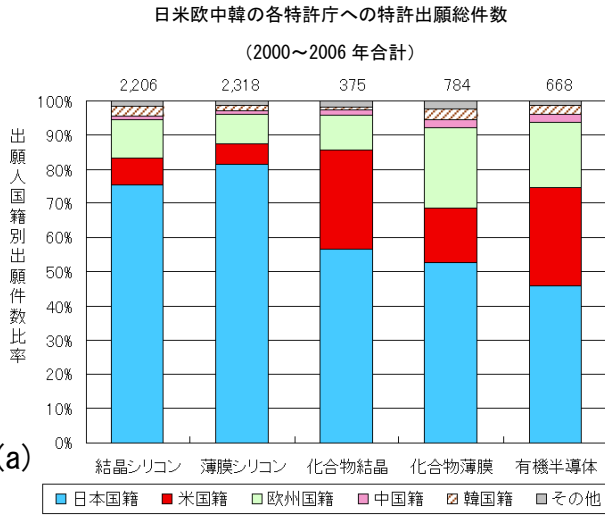


図 4-2 太陽電池に関する出願人国籍別の出願件数比率（日米欧中韓への出願）[4-4]

次に、出願人国籍×種類別で見た出願件数の比率（図 4-3）から、次の a. ～ c. が読み取れる。

- a. 日本（の特許出願）は、結晶シリコン系、薄膜シリコン系（特に後者）に特に強みがある。
- b. 米国（の特許出願）は、日本より出願比率は低いものの、化合物結晶系、有機半導体系の出願件数の多さに特色がある。
- c. 欧州（の特許出願）は、日本より出願比率は低いものの、化合物薄膜系の出願件数の多さに特色がある。



(a) 太陽電池の種類別に見た出願人国籍別の出願件数比率

(b) 出願人国籍別に見た太陽電池の種類別の出願件数比率

図 4-3 太陽電池に関する出願人国籍×種類別で見た出願件数の比率

注) 対象年次：優先権主張年ベースで 2000～2006 年の合計

各国出願における出願人別の出願件数ランキング (表 4-5) から、全体として、日本の企業 (京セラ、シャープ、キャノン、三洋電機等) および研究機関 (産業技術総合研究所) の特許出願におけるプレゼンスが国際的に高いことがわかる。

表 4-5 各国出願における出願人ランキング

日本への出願			米国への出願			欧州への出願			中国への出願			韓国への出願		
順位	出願人	件数	順位	出願人	件数	順位	出願人	件数	順位	出願人	件数	順位	出願人	件数
1	京セラ	569	1	キャノン	118	1	三洋電機	63	1	三洋電機	42	1	三星 SDI (韓国)	46
2	シャープ	556	2	シャープ	67	2	シャープ	45	2	キャノン	38	2	E.I. デュボン (米国)	11
3	キャノン	347	3	三洋電機	63	3	キャノン	37	3	シャープ	14	3	シャープ	9
4	三洋電機	289	4	京セラ	35	4	コミッサリア タレネルジー アトミック (フランス)	31	4	E.I. デュボン (米国)	13	3	プリンストン大学 (米国)	9
5	三菱重工業	209	5	カネカ	24	5	フラウンホーファー (ドイツ)	24	5	パナソニック	12	3	三洋電機	9
6	富士電機ホールディングス	183	5	半導体エネルギー研究所	24	6	カネカ	23	6	半導体エネルギー研究所	10		8件以下省略	
7	カネカ	177	7	BP ノース アメリカ (米国)	23	7	コナルカ テクノロジーズ (米国)	19	7	ジェネラル エレクトリック (米国)	9			
8	パナソニック	104	8	コナルカ テクノロジーズ (米国)	21	7	信越化学工業	19		8件以下省略				
9	産業技術総合研究所	78	9	プリンストン大学 (米国)	20	9	サン ゴバン グラス フランス (フランス)	18						
10	凸版印刷	75	10	ボーイング (米国)	19	10	ジョイデン グラースグループ (オランダ)	17						

注) 年次：優先権主張年ベースで 2000～2006 年の合計

②論文発表件数

太陽電池および太陽光発電に関する論文発表件数（図 4-4）から、日本は欧州（40%）、米国（20%）に次ぐプレゼンス（17%）を有していることがわかる。

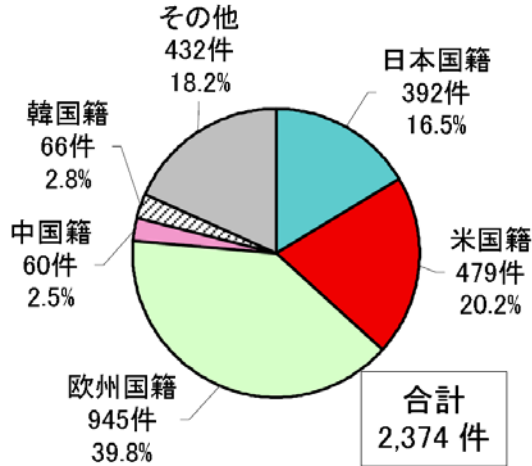


図 4-4 論文の研究者所属機関国籍別の件数比率（国際的な主要論文誌）

注）年次：論文発行年ベースで 2000～2007 年の合計

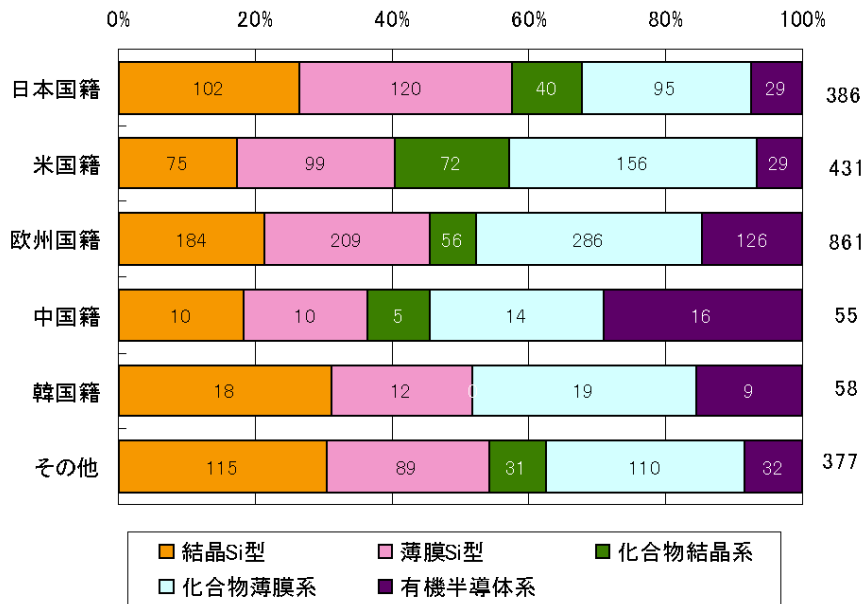


図 4-5 研究者所属機関国籍別・種類別の論文件数比率（国際的な主要論文誌）

注）図の数値は、各論文発表件数（2000～2007 年の合計）。

・最も右に記載の数値（386、431 等）は、論文発表件数の国籍毎の合計。

種類別に見ると、図 4-5 より次の a. ～ c. の特徴が読み取れる。

a. 日本は、薄膜シリコン系に強みがある。

- b. 米国は、化合物結晶系、化合物薄膜系に強みがある。
- c. 欧州は、化合物薄膜系、有機半導体系に強みがある。

次に、表 4-6 により研究者所属機関別の論文発表件数上位ランキングを見ると、海外では米国の NREL、ドイツの HMI、FhG-ISE、日本では産業技術総合研究所、東京工業大学等の論文発表件数が多く、これらの研究機関が中核を担っていることがわかる。

表 4-6 研究者所属機関別の論文発表件数上位ランキング（全論文件数）

順位	研究者所属機関名(国籍)	発表件数
1	国立再生可能エネルギー研究所(米国)	246
2	ハーンマイトナー研究所(ドイツ)	114
3	フラウンホーファー太陽エネルギーシステム研究所(ドイツ)	86
4	ニューサウスウェールズ大学(オーストラリア)	80
5	産業技術総合研究所	73
6	東京工業大学	66
7	IMEC(ベルギー)	59
8	シュツツガルト大学(ドイツ)	57
8	大阪大学	57
10	ユーリヒ総合研究機構(ドイツ)	51
11	中国科学アカデミー(中国)	49
12	東北大学	48
13	ヨハネス・ケプラー大学(オーストリア)	46
14	CNRS(フランス)	45
15	アイントホーフェン工科大学(オランダ)	43
15	豊田工業大学	43
17	カリフォルニア大学(米国)	42
18	ユトレヒト大学(オランダ)	40
18	名古屋工業大学	40
20	マドリッド工科大学(スペイン)	38
21	ジョージア工科大学(米国)	37
21	宇宙航空研究開発機構	37
23	京都大学	33
24	オーストラリア国立大学(オーストラリア)	31
25	インド科学振興協会(インド)	30
25	立命館大学	30
27	ハーメルン太陽エネルギー研究所(ドイツ)	29
28	エネルギー研究センター(オランダ)	28
28	コンスタンツ大学(ドイツ)	28
28	シャープ	28
28	スイス連邦工科大学(スイス)	28

注) 論文発表件数は、2000～2007年の合計。

なお、日本は数年にわたり太陽電池の生産量が世界一であったが、2005年から2007年にかけて日本の生産量が横ばい傾向になり、2007年では欧州、中国、台湾を中心とした、その他の地域の生産量が多くなった。

③まとめ

以上をまとめると、各国の特色は以下の通りである。

a. 量的な比較

- ・ 特許出願件数（出願人国籍別）は、日本の割合が最も高く、次いで欧州、米国の順。日本の割合は減少傾向にあり、代わりに中国、韓国の割合が増加している。
- ・ 論文発表件数（研究者所属機関国籍別）は、日本は欧州、米国に次ぐ位置付け。

b. 太陽電池の種類別・国別の特徴

- ・ 日本は、結晶シリコン系（特許、論文）、薄膜シリコン系（論文）に強みがある。
- ・ 米国は、化合物結晶系（特許、論文）、化合物薄膜系（論文）、有機半導体系（特許）に強みがある。
- ・ 欧州は、特許出願では化合物薄膜系（特許、論文）、有機半導体系（論文）に強みがある。

c. 個別研究機関のプレゼンス

- ・ 特許出願においては、日本の企業（京セラ、シャープ、キャノン、三洋電機等）および研究機関（産業技術総合研究所）のプレゼンスが国際的に高い。
- ・ 論文発表においては、海外では米国の NREL、ドイツの HMI、FhG-ISE、日本では産業技術総合研究所、東京工業大学等の論文発表件数が多く、これらの研究機関が中核を担っている。

d. 太陽電池の生産量

- ・ 日本は数年にわたり太陽電池の生産量が世界一であったが、2005年から2007年にかけて日本の生産量が横ばい傾向になり、2007年では欧州、中国、台湾を中心とした、その他の地域の生産量が多くなった。このため、日本の欧州等に比べた相対的な産業技術力は以前より低下している可能性もある。

2) バイオマスからの液体燃料製造

i) 技術の概要

バイオマスから製造される液体燃料としては、以下がある。

- ・ バイオエタノール
- ・ **BDF**
- ・ バイオブタノール
- ・ バイオメタノール
- ・ **ETBE** (エチル *tert*-ブチルエーテル)
- ・ その他 [合成ガスを経由する **GTL (Gas to Liquid)**、**DME** 等]

ここでは、このうち特に利用が期待されているバイオエタノール、BDF、バイオブタノールに焦点を当てることとする。

①バイオエタノール

バイオエタノールは、サトウキビやトウモロコシなどのバイオマスを発酵させ、蒸留して生産されるエタノールである。

バイオエタノールの原料は、炭水化物を含む原生生物由来の任意の資源であるが、生産効率の面から糖質あるいはデンプン質を多く含む植物資源が選好され、主に以下の農産物が原料として利用されている。

- ・ 糖質原料： サトウキビ、モラセス、てんさい
- ・ デンプン質原料： トウモロコシ、ソルガム (モロコシ、こうりゃん)、ジャガイモ、サツマイモ、
麦

ブラジルではサトウキビに由来するモラセス (サトウキビなどの原料糖から不純物を取り除いた糖液)、米国ではトウモロコシ、欧州ではてんさいが主な原料となっている。

一般的な製造工程は、先ず植物由来の原料に水と硫酸を加えて酵母が代謝できる糖を得た後、酵母によるアルコール発酵で低濃度のエタノール溶液を生成する。その低濃度溶液を濃縮・蒸留して 95% 程度のエタノール濃度とし、さらに分子篩などを使って精製 (脱水) することにより、ほぼ純粋なエタノール (無水アルコール) が生産される。燃料として使用する場合には、ガソリン等を混ぜる場合が多い。

一方、食料用とバイオ燃料用の競合に伴うトウモロコシ等の価格高騰の問題もあり、非食用のセルロース系バイオマスを原料とする低コストエタノール燃料製造技術の開発が世界的に行われている。

②BDF

BDF は生物由来油から作られる軽油代替燃料 (ディーゼルエンジン用燃料) の総称である。

菜種油、パーム油、オリーブ油、ひまわり油、大豆油、コメ油、ヘンプ・オイル (大麻油) などの植物油、魚油や豚脂、牛脂などの獣脂および廃食用油 (天ぷら油等) 等、様々な油脂が BDF の原料と

なり得る。

欧州では菜種油、中国ではオウレンボク等、北米および中南米では大豆油、東南アジアではアブラヤシやココヤシ、ナンヨウアブラギリから得られる油が利用されている。

BDF は、図 4-6 に示すように原料となる油脂からグリセリンをエステル交換により取り除き、粘度を下げる等の化学処理を施して製造され、主に自動車等のディーゼルエンジンに使用される。



図 4-6 BDF の一般的な製造工程 [4-5]

③ バイオブタノール

バイオブタノールは、「アセトン・ブタノール菌」という細菌を用いた発酵工程（ABE 発酵⁴⁴）により製造される。

ABE 発酵は古くからあるアセトンとブタノールの製造法であるが、生産性が高くなく、培養時間が長くなると代謝阻害により生産性がさらに悪くなるという問題があった。そのため、経済性に難点のある生産法であった。しかし、発酵という非常に単純で温和な方法でバイオマスから生産できることから、発酵法の欠点であるブタノールの低効率生産性の改良を行い、経済性の確立を試みている。

バイオブタノールは、原料として多くの非食料バイオマスを利用できること、エタノールに比べ水分を含みにくく、保存や流通に有利であること、単位容量あたりのエネルギー価が高くガソリン代替燃料として現在のエンジンにそのまま利用できること等の利点から、その効率的な生産法の開発が求められている。

ii) 日本における研究開発動向

① バイオエタノール

a. 政府関連プロジェクトにおける研究開発例

NEDO では、以下の研究開発プロジェクトを実施している。

○ バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発（2004～2012 年度）

・ バイオマスエネルギー先導技術研究開発

2015～2030 年頃の実用化を目指し、様々な原料・エネルギー転換技術・利用方法を対象とし、バイオマス技術の種を育てる研究を行う「中長期的先導技術開発」と、2008 年 3 月に公表された「バイオ燃料技術革新計画」を踏まえ、2015～2020 年頃に技術革新ケースとしてエタノール 1 リットルあたり 40 円を目指す取組として、セルロース系バイオマス（農業残渣も含む）からのエタノール製造技術に

⁴⁴ アセトン・ブタノール・エタノール発酵。第一次世界大戦当時、軍事活動の増加に伴って爆薬が大量に必要になり、ダイナマイトを造るために必要だったアセトンを経酸菌（現在ではアセトン・ブタノール菌）を用いて生産する発酵工業が英国、米国で興った。この発酵では、原料の糖からアセトンとともにブタノール、エタノールも生産されるため、アセトン・ブタノール・エタノール発酵またはアセトン・ブタノール発酵と呼ばれる。

係わる研究開発等に重点化した「加速的先導技術開発」を実施している。

○ セルロース系エタノール革新的生産システム開発事業（2009～2013年度）

食料と競合しない草本系又は木質系バイオマス原料からのバイオエタノール生産について、大規模安定供給が可能なセルロース系バイオマスの栽培からエタノール製造プロセスまでの一貫生産システムの構築を目指して研究開発を実施し、更には環境負荷・経済性等の評価も行っている。また、我が国におけるバイオ燃料の持続可能な導入のあり方についても検討している。

本プロジェクトの成果により、2015～2020年において事業ベースで数十万kl規模単位でのバイオエタノールの生産が期待されるとしている。

このほかNEDOでは、「2030年に向けた液体燃料関連テーマへの重点化」を主眼として、バイオエタノールの製造コスト低減に係るロードマップを含む「バイオマスエネルギー中長期研究開発戦略」⁴⁵を図4-7の通り策定している。

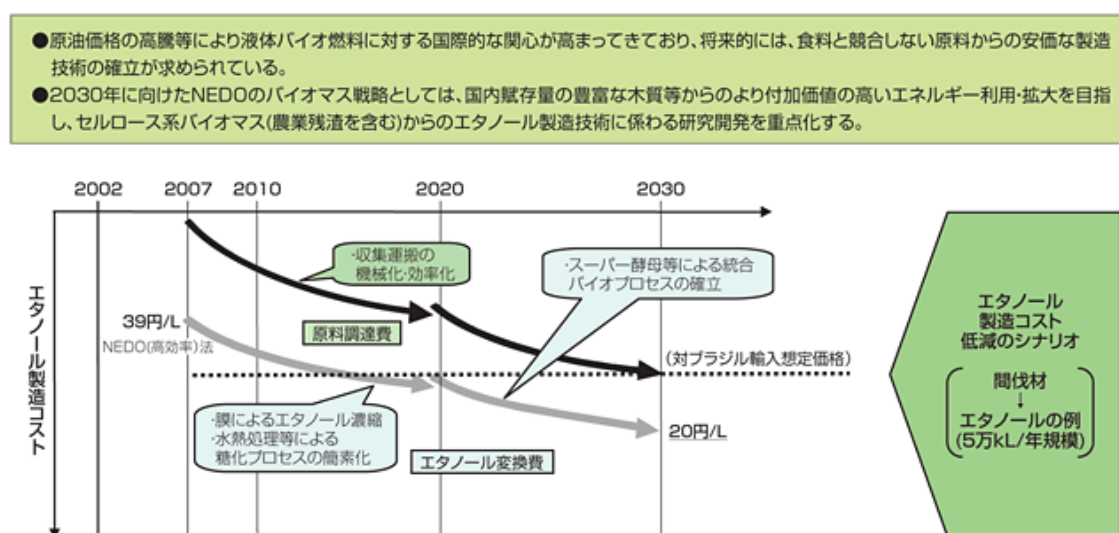


図 4-7 バイオエタノール製造コストの低減に向けたロードマップ [4-6]

⁴⁵ http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p07015_5/p07015_5.html

b. 公的研究機関・大学における研究開発例

○ 産業技術総合研究所・バイオマス研究センター

産業技術総合研究所・バイオマス研究センターでは、産学官連携プロジェクト「産総研産業変革研究イニシアチブ」の一つである「中小規模雑植性バイオマスエタノール燃料製造プラントの開発実証」の中で、エタノール燃料一貫製造プラントのベンチプラントを産総研中国センター（広島県呉市）内に建設し、製造プロセスの実証試験を行っている。

産総研が考案・研究開発したバイオマス原材料のメカノケミカル⁴⁶な前処理技術を中心とした環境負荷の小さい非硫酸方式によるエタノール燃料一貫製造プラントのベンチプラント（1回処理量：200kg 木材）を開発・設置した。試運転において、原料からエタノール燃料までの一貫した製造が行えることを確認した。今後、本格稼動を行い、食料と競合しない多様なセルロース系バイオマス（針葉樹、広葉樹、わらなど、雑植性バイオマスと呼称）を原料にエタノール燃料生産技術を実証することとしている。

また、このプラントで得られる実証データを基に経済性評価、ライフサイクル評価を行い、プロセス全体の改良とともに、より大規模なプラントの設計・開発等に生かすことで、持続可能な社会のための産業化シナリオを描く予定としている。

本プロジェクトは、2007年12月から2011年3月までの約3年半のプロジェクトとして実施されている。

（ポイント）

- ・ 食料生産を圧迫せず、かつ環境負荷が小さい非硫酸方式によるバイオエタノール製造プロセスのベンチプラントを開発・建設（1回処理量：200 kg 木材）。
- ・ 試運転において、原料からエタノール燃料までの一貫製造を確認済み。
- ・ 本格稼動により本方式を実証し、持続可能な社会のための新エネルギー産業創出のシナリオを描く。

○ 農業・食品産業技術総合研究機構・バイオマス研究センター

同センターでは、以下の研究開発を行っている。

・ てんさい搾汁液を原料とするバイオエタノール生産用酵母

バイオエタノールの製造効率の向上には、てんさい搾汁液や馬鈴薯澱粉など各々用いる原料に適した発酵菌の開発が必要である。更には、エタノール精製時の蒸留阻害要因であるグリセロールの生成量が少ないなど、製造工程全体の効率向上に繋がる発酵菌を開発する必要がある。

そこで、バイオエタノールの製造効率向上に向け、てんさい搾汁液を原料に既存の実用酵母株と同等のエタノール生産能を有し、グリセロールの生成量が実用株より少ない高効率な発酵菌の開発を目指す。

⁴⁶ メカノケミカルプロセス： 固体の粉碎や物質への超音波照射等により起こる固体などの物質の構造・結合状態変化や周囲の物質との相互作用を利用した物質処理法。

・ 易分解性糖質を蓄積する稲わら稈部の並行複発酵⁴⁷ によるバイオエタノール生産

食料生産と競合しないバイオ燃料製造技術を開発するため、稲わらを原料としたバイオエタノール製造研究や実証試験が行われている。しかしながら、その対象糖質は稲わら中のセルロースおよびヘミセルロースであり、シュクロース、でん粉、グルコース、フラクトースおよび β -1,3-1,4-グルカンから構成される易分解性糖質の存在を考慮したエタノール生産技術は開発されていない。そこで、稲わら中の易分解性糖質を蓄積する部位を用い、並行複発酵による高濃度エタノールの生産技術を開発する。

・ バレイショ磨砕・液化物を用いた高濃度エタノール生産技術の開発

バレイショ磨砕物を液化したものを高濃度条件下で並行複発酵し、エタノールを生産する。高濃度処理により加水量が減るとともにファーメンターの利用効率が向上するが、その一方で、酵母に対する浸透圧ストレス、栄養源不足、エタノール毒性ストレス等により、生育・発酵阻害が起こることから、発酵条件を最適化する必要がある。そこで、本研究では、磨砕物の粘性低下処理技術を開発するとともに、糖化酵素、硫酸濃度および発酵時間に注目し、高濃度処理工程によるエタノール発酵効率の最適化を行う。

c. 民間企業における研究開発例

新日本石油(株)、三菱重工業(株)、トヨタ自動車(株)、鹿島建設(株)、サッポロエンジニアリング(株)、東レ(株)は、食料と競合しないセルロース系バイオエタノールの一貫製造技術⁴⁸ に関する研究開発を開始するため、「バイオエタノール革新技术研究組合」(表 4-7) を 2009 年 2 月に設立した [4-7]。

食料と競合しないセルロース系バイオエタノール製造の各工程における要素技術を保有する上記 6 社は、経済的かつ多量、安定的な製造技術の確立に向けた技術研究組合を共同で設立するに至った。

本研究組合は、原油と競合できる価格 (40 円/リットル) で、20 万 kl/年規模を生産できる製造プロセスの技術を 2015 年までに確立することを最終目標として、バイオマス資源に関する先端的な研究拠点である東京大学との共同研究や、農林水産関係研究機関 (農業・食品産業技術総合研究機構、森林総合研究所)、秋田県農林水産技術センター総合食品研究所、北海道大学等との連携により、画期的な革新技术の確立を目指している。

⁴⁷ 醸造酒の製造過程で起こる発酵の一種であり、麴の酵素によってデンプンがブドウ糖に変化する糖化と、ブドウ糖が酵母の働きによってアルコールに変化する発酵とが、同一容器中で同時に行われること。

⁴⁸ エネルギー植物生産技術、前処理・酵素糖化・発酵・濃縮脱水技術や、各工程を繋ぎ合わせる上で必要な技術等、様々な技術の複合体。米国では、国策として多額の資金を投入し研究開発を推進しつつあるが、無資源国である我が国においては、エネルギーセキュリティー上の観点からも大変重要な研究と考えられている。

表 4-7 バイオエタノール革新技術研究組合の概要

(1) 理事長	: 松村 幾敏 (新日本石油株式会社 代表取締役 副社長執行役員)
(2) 所在地	: 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学アントレプレナープラザ内
(3) 設立日	: 2009年2月
(4) 事業内容	: ① エネルギー植物の生産技術開発 ② 前処理・酵素糖化・発酵・濃縮脱水のプロセス技術開発 ③ 一貫製造プロセスのベンチ実証試験(25 k l/年)
(5) 研究開発体制	共同研究: 東京大学 連携: 農林水産関係研究機関 ・ 農業・食品産業技術総合研究機構、森林総研 ・ 秋田県農林水産技術センター総合食品研究所 ・ 北海道大学 等
(6) 期間	: 2008年度末～2013年度 (約5年間)

②BDF

a. 政府関連プロジェクトにおける研究開発例

・製造技術

NEDOの「新エネルギーベンチャー技術革新事業」における「マイクロ波化学を利用した革新的バイオディーゼル製造プロセスの開発」(委託先: マイクロ波環境化学㈱、再委託先: 大阪大学)では、マイクロ波化学を利用したBDF製造プロセスの開発に取り組んでいる。

・利用技術

NEDOの「バイオマスエネルギー高効率転換技術開発」プロジェクトでは、「産業用ディーゼル機関における廃食油バイオディーゼル燃料の利用技術開発」(委託先: ヤンマー㈱)において、廃食油BDF 100%でも商用ベースで使用可能なディーゼルエンジンの開発が行われた。低質な廃食油BDFの場合、未燃焼の燃料が潤滑油に混入するため、潤滑油交換頻度が増加し、商用運転の障害となっている。このためピストンヘッドの形状変更やコーティング等を検討し、特に燃料ノズルの改良により通常燃料と同様の約1,000時間の無交換運転を可能としている。

b. 公的研究機関・大学における研究開発例

埼玉大学・工学部応用化学科・三浦研究室では、高品質なBDFを製造するための製造プロセスの検討を民間の企業(日本エコシステムズ㈱)と共同で進めている。また、BDFの製造時に副生成物として回収されるグリセリンの精製方法や有効利用法についても検討している。

同研究室では、埼玉大学の環境科学・社会基盤部門・循環制御研究室とともに、文部科学省のプロジェクト研究である「都市エリア産学官連携推進事業」に参画している。

同事業では「都市廃棄バイオマス等からのBDF燃料の製造・利用技術の総合化」というサブテーマでBDF製造のための効率的なプロセスの開発を進めており、具体的には、超音波を用いた反応、精製

技術を実際のプラントに適用するための研究開発を行っている。

超音波技術を用いた新しい BDF 製造プロセスの概略図を図 4-8 に示す。

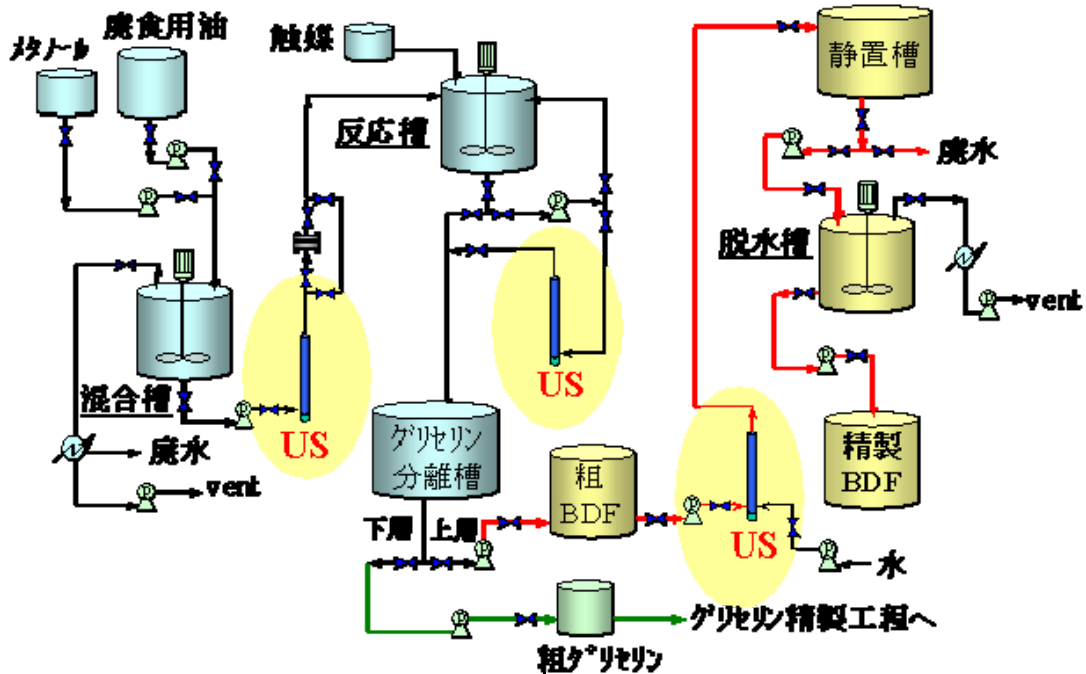


図 4-8 BDF 製造プロセスの検討 [4-8]

このほか農業・食品産業技術総合研究機構・バイオマス研究センターでは、以下の研究開発を行っている。

- ・ 無触媒メチルエステル化法実証プラントによる BDF 製造
- ・ マイクロ波照射によるナタネ種子加熱

c. 民間企業における研究開発例

新日本石油(株)とトヨタ自動車(株)は、既存の BDF 製造技術（原料油脂をメチルエステル化してグリセリンを除去し、脂肪酸メチルエステルを精製）とは異なり、広範な原料油脂（原料の植物を問わず、獣脂も含む）を石油精製の水素化分解し、雑物を除去してバイオ水素化処理油（Bio Hydrofined Diesel, BHD）を製造する技術について、研究開発を行っている。

本技術によれば、油脂を原料としつつ、既存の石油由来の燃料と何ら遜色のない、一般の軽油の規格に適合した燃料を精製することが可能であるとしている。BHD は油脂の水素化過程で不純物が除去される。また、酸化劣化が起こりやすく、化学合成軽油（GTL）と同等品であるとしている。

減圧軽油留分とパーム油を混合して水素化分解処理を行い、パーム油の水素化分解による軽油留分の収率の向上や、既存の石油精製で得られている軽油に近い性状の軽油留分が得られることが確認されている。また、製造した BHD を路線バスの営業運行で使用する実証実験が、2007 年 10 月から 2008 年 3 月まで都営バス渋谷営業所の一部車両で行われた。

サンケアフューエルズ(株)では、NEDOの「新エネルギーベンチャー技術革新事業」からの助成を得て、「バイオ航空機燃料の生産技術開発」を、また、NEDOの「イノベーション推進事業(実用化)」からの助成を得て、「植物粗精製油を用いた高品質バイオディーゼルの大量生産」に関する研究開発を行っている。

マイクロ波環境化学(株)では、従来商業的に難しいとされていた遊離脂肪酸を多く含む油脂を省エネ、小型かつ低コストの装置でエステル化することを可能とする技術を開発している。これにより、食用と競合する油脂だけではなく、非食用を含む多種多様な油脂からBDFを製造することが可能になったとしている。

同社ではさらに、NEDOの新エネルギーベンチャー技術革新事業からの助成を得て、マイクロ波化学技術を応用してBDFの抽出などを可能とする研究開発を行っている。

バイオマス・ジャパン(株)では、BDF製造プラントの研究開発、製造販売を行っている。たとえば、崇城大学工学部ナノサイエンス学科・池永研究室との産学連携により、「簡単」、「容易」、「速い」をキーワードにBDFの精製技術の開発を行っている。

③ バイオブタノール

a. 政府関連プロジェクトにおける研究開発例

NEDOは高効率二段醗酵による有機性廃棄物のエネルギー転換技術開発を2011～2014年度に実施し、生ゴミ、焼酎粕および廃食用油の有機性廃棄物を原料として高効率の二段醗酵法として「ABE醗酵」と「メタン醗酵」の組合せ技術によりバイオ燃料を製造するプロセスの技術開発を行った。

NEDOはまた、マレーシアパームオイル局と国際共同研究プロジェクトを実施した。本プロジェクトは、パームオイル廃液を原料として、水素やアセトン、ブタノール、エタノールなどバイオマス燃料を生産する技術開発である。

b. 公的研究機関・大学における研究開発例

九州大学・大学院農学研究院・吉野貞藏准教授等の研究グループでは、高速高効率ブタノール生産システムの構築を目指した研究開発を行っている。

奈良先端科学技術大学院大学の湯川英明教授(RITE 兼務)等の研究グループでは、バイオマスを原料とした次世代燃料として期待されるバイオブタノールや、微生物により水素を発生させるバイオ水素などの基盤研究に取り組んでいる。

c. 民間企業における研究開発例

日本では、バイオブタノールに関する民間企業における研究開発はさほど活発ではない。

なお、詳細は不明であるものの、トヨタ自動車は自動車燃料としてのバイオブタノールについて、評価を開始したとの情報 [4-9] がある。

iii) 米国における研究開発動向

① バイオエタノール

a. 政府関連プロジェクトにおける研究開発例

2006年8月、DOEは、ガソリン代替燃料として、セルロース系バイオマスを原料とする低コストエタノール燃料製造技術を早期に確立する目的で、「**Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol: A Joint Research Agenda**」と題する研究ロードマップと、基礎研究開発拠点として「バイオエネルギー研究センター (Bioenergy Research Centers)」を設立する構想を発表した [4-10]。

米国政府の研究開発資金は、セルロース系バイオ燃料の開発を多く支援している。とりわけ DOE は、コスト競争力を持つ商業規模のセルロース系エタノールの生産を 2012 年までに実現する目標に向けて、多大な投資 (2008~2011 年度の 4 年間の合計で 3,380 万ドル) を行っている。

b. 公的研究機関・大学における研究開発例

DOE の共同ゲノム研究所/ **Joint Genome Institute**⁴⁹ は、ソルガムの完全なゲノムを配列することに成功した。ソルガムは、米国内で、トウモロコシに次ぎ二番目に普及しているバイオ燃料作物である。完全に配列されたゲノムを使用することで、研究者らは変異体を開発し、その植物からセルロース系バイオ燃料を生産する可能性を最大にすることができるようになる、としている。

米国酪農飼料研究所 (U.S. Dairy Forage Research Center)⁵⁰ の農業研究局 (Agricultural Research Service) の研究者と、ウィスコンシン大学の研究者らは、植物の細胞壁の構成に関する研究を始めた。細胞壁に含まれるリグニンは、セルロースからバイオエタノールへの変換を抑制する性質があるが、この研究者グループは、このリグニンを変化させ、これを容易に分解できるようにした。

ミシガン州立大学⁵¹ の研究者らは、バイオエタノールへの変換前に行なわれる、バガス (トウモロコシ藁) の前処理に関わるプロセスについて特許を取得した。この新しいプロセスは栄養素を追加する必要性を否定するもので、セルロースからバイオエタノールを生産するコストを削減するものである。

ミネソタ大学⁵² が 2009 年に行った調査研究では、セルロース系エタノールを使用した場合、ガソリンやトウモロコシ系エタノールに比べて粒子状物質 (Particulate Matter, PM) の排出量が少ないということが立証されている。

c. 民間企業における研究開発例

セルロース系エタノールの技術開発に長年積極的に取り組んでいる DuPont と生体触媒企業の Genencor International は、2009 年に新しい合弁会社 DuPont Danisco Cellulosic Ethanol LLC

⁴⁹ <http://www.jgi.doe.gov>

⁵⁰ <http://www.ars.usda.gov>

⁵¹ <http://www.msu.edu/>

⁵² <http://www.umn.edu>

(DDCE)⁵³ の立ち上げを発表した。

エタノール生産事業者である Poet, LLC⁵⁴ は、アイオワ州にあるエタノール工場を改造して、トウモロコシの穂軸を 1 日あたり 842 トン加工し、年間 9,990 万リットルのセルロース系エタノールを生産できるよう計画している。同社は、2009 年初頭にセルロース系エタノールの試験工場の操業を開始し、現在では年間 7.6 万リットルのエタノールを生産している。

Abengoa Bioenergy Biomass of Kansas, LLC⁵⁵ は、2009 年度時点で、最大 7,600 万ドルの DOE 資金を得ることになった。このバイオリファイナリーでは、1 日 700 トンのトウモロコシ茎葉、麦わら、スイッチグラス、その他の原料を加工し、年間 4,320 万リットルのセルロース系エタノールと合成ガスをエネルギー用に生産する。Novozymes A/S (デンマーク)は、このプロジェクトの主要パートナーである。

2009 年、ベンチャー企業である Range Fuels, Inc.⁵⁶ は、米ジョージア州ソパルトンの近くに工場を建設し、近隣の森林が伐採される際に出る 1 日あたり 1,200 トンの木くずを原料として、年間約 1 億 5,140 万リットルのエタノールと 3,410 万リットルのメタノールを生産すると発表した。同社は、この生産プロセスを使えば、酵素を使用してセルロース系エタノールに変える既存の方法や、従来のコーンエタノールの生産方法（1 リットル約 50 円）よりも、コストを低く抑えることができると見込んでいる。

Mascoma は、Chevron と、リグノセルロース系バイオマス由来のセルロース系エタノールを提供する 2 年契約を 2009 年に結んだ。

2009 年 2 月、Genencor は、セルロース系のバイオマス酵素製剤である、アクセラレーゼ 1500 の形成に着手した。これは、以前のアクセラレーゼ 1000 にとって代わるもので、より低コストでエタノール収率を上げることが期待される。

②BDF

BDF は、環境保護庁 (United States Environmental Protection Agency, EPA) に生分解性で安全な燃料として登録され、カリフォルニア大気資源局により定められた新しいクリーン・ディーゼル基準に合致した代替燃料として、一部で導入が始まっている [4-11]。

2009 年 10 月、DOE は 37 の野心的なエネルギー研究プロジェクトへの大規模な資金提供を発表し、この中には、直接太陽エネルギーから炭化水素の BDF を生産するバイオリクターの研究も含まれている。この研究助成金は、最近設立された DOE の先進研究プロジェクト機関－エネルギー (Advanced Research Projects Agency - Energy, ARPA-E) を通じて提供されることとなっている。

③バイオブタノール

デュポン社は、1990 年頃より新しい品種のトウモロコシの開発や既存のエタノール生産の改善、セ

⁵³ <http://www.ddce.com>

⁵⁴ <http://www.poetenergy.com>

⁵⁵ <http://www.abengoabioenergy.com>

⁵⁶ <http://www.rangefuels.com>

ルコース系バイオ燃料の新しい製造プロセスの開発を手がけている。同社はバイオブタノールの開発に成功し、市場への導入を検討している。

エタノールはエネルギー密度が 65% とガソリンより低いため、高い燃費効率が得られにくい。これに対してバイオブタノールは、エネルギー密度がエタノールより高く、より高い燃費効率が得られる。

また、エタノールでは利用できなかった既存のパイプライン等の供給設備も、バイオブタノールではそのまま使用することができるといった利点もある。さらに、バイオブタノールは、大麦、トウモロコシ、サトウキビなど幅広い種類の原料から生産できることから、原材料供給の視点からも地域の特性に応じた対応が可能とされている。

iv) 欧州における研究開発動向

①バイオエタノール

英国では、バイオテクノロジー生物科学研究会議 (Biotechnology and Biological Sciences Research Council, BBSRC) が 2009 年に、2,700 万ポンドを拠出して Sustainable Bioenergy Centre (持続可能性のあるバイオエネルギーセンター) を設立した。この新しいセンターは、第二世代バイオ燃料に焦点を絞り活動を行うこととなっている。

BP (英、ロンドン) と Verenum (米マサチューセッツ州、ケンブリッジ) は、2009 年 2 月に合弁会社 Vercipia Biofuels の立ち上げを発表した。Vercipia は、手始めにフロリダ州ハイランズ郡で操業を開始する。これは全米で展開される最初の商業規模セルロース系エタノール製造工場の一つである。

このほか、ゲーテ大学(独、フランクフルト) の研究者らは、酵母を遺伝子工学的に操作することで、発酵によりキシロースをエタノールに変換することに成功している。

②BDF

イタリアでは、自動車等の燃料添加物となる農業生産物による BDF や、バイオエタノール、山林の伐採等によって出される木質バイオマス、牛や豚等の家畜の糞尿によるバイオガスに関する研究開発が実施されている。さらに、海草から BDF を製造する革新的な研究開発も行われている [4-12]。

自動車の燃料となり得る BDF の生産のために、微小な藻類の栽培が注目されている。イタリアにおいても微小な藻類の栽培研究が推進されており、フィレンツェ大学の農業バイオテクノロジー部が光合成による BDF 生産に適した微小な藻類株を究明する研究を実施している。

海草栽培は、汚水処理・温室効果ガス削減・新エネルギー生産を可能とする多大な潜在性を持っているが、まだ市場に出せる段階に至っていない。しかしながら、イタリアの炭化水素部門の大企業 Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) は、この潜在性に賭けており、海草によるバイオ燃料生産研究に投資することを発表している。

ENI は、新エネ・代替エネ研究のために 2007 年～2010 年の 4 年間で 3 億 5,000 万ユーロの予算を計上している。優先される研究は、バイオエネルギー、ソーラーエネルギーであり、海草エネルギー

研究のようなフロンティア研究も実施すると ENI は表明している。

ENI のパオロ・スカローニ会長は、「ENI では、微小な生物の利用をベースにした研究活動を実施しており、特にバイオ燃料生産のための藻類や海草に照準を合わせている。海水でも淡水でも流水により非常に速いスピードで成長することのできる藻類、海草が存在している。海草は、成長のために我々が除去を欲している CO₂ を栄養とする。イタリアは、海に囲まれており、耕地面積が少ないために海草により生産されるバイオ燃料は食糧用農産物と競合することなく獲得できる。藻類・海草栽培による解決策は、非常に面白い」とコメントしている。

③ バイオブタノール

EU・欧州委員会の「エネルギー科学技術の指標と基準—革新的バイオテクノロジー」(Energy Scientific and Technological Indicators and References, 2006) は、ABE 法によるバイオブタノール(およびアセトン)の生産技術について、以下のように述べている。

a. 技術の現状

- ・発酵によるブタノールおよびエタノール混入アセトン (ABE) の製造は、20 世紀前半においては産業的に重要であった。しかし現在では、石油化学プロセスに対し、経済的な競争力を失っている。
- ・伝統的な ABE 発酵は、炭素源として糖蜜、トウモロコシ、マッシュポテトを用いる厳密な嫌気性バッチ・プロセスである。このプロセスは汚染しやすいため、殺菌する必要がある。
- ・規則的なプロセスを明らかにするための、微生物に関する基礎的研究が必要。
- ・最終生産物の濃度は、特異な変異菌によって増加する可能性がある。

b. 将来展望

- ・改善された発酵技術等の開発による、ファージ汚染回避のための効率的な方法の開発が必要。
- ・蒸留やナノろ過による生産物回収の最適化が必要。

c. 重要事項

- ・より安価で利用が容易な原材料の産業的開発による生産コストの低減が必要。
- ・コストを抑えた生産物回収のための、エネルギー効率の高い後処理プロセスの開発が必要。
- ・長期プロセスの安定性と再生産性の改善(例:ファージ汚染および生産菌株劣化の回避)が必要。
- ・全ての発酵生産物の完全かつ高度な利用が重要。

v) その他の国々における研究開発動向

カナダ企業の Iogen Corp.⁵⁷ は、現在トロントで、世界唯一の商用セルロース系エタノールの大型実証プラントを Royal Dutch Shell 社と共同で開発・建設し、商業運用を行っている。

両社は、生体触媒メーカー Codexis, Inc.⁵⁸ (米カリフォルニア州)と密接に連携を図りつつ、エタノー

⁵⁷ <http://www.iogen.ca>

⁵⁸ <http://www.codexis.com>

ル生産に必要な生体触媒の効率を上昇させることに成功した。

vi) 国際的な比較

食料との競合を避けるため、非食用のセルロース系バイオ燃料に関する研究開発・実証・実用化が世界的に進展している。

米国では、セルロース系バイオ燃料に関するパイロット規模の商業化とその生産プロセスの検証が進められている。景気後退にもかかわらず、米国では第二世代バイオ燃料への開発資金の提供が現在も継続されている。

欧州では、セルロース系バイオ燃料技術に対する膨大な研究開発が、スカンジナビア諸国、特にフィンランド、スウェーデン、デンマークで行われている。

欧米では、セルロース系原料からのバイオ燃料の生産に使用する新たな生体触媒、酵素、酵母、バクテリア、その他微生物の開発分野で、膨大な数の研究が進行中である。

バイオマス液体燃料技術に関する技術水準や競争力の国際比較を軽々に論じることはできないが、既存文献 [4-13] における国際比較の分析例を以下に引用する。

①日本

- ・研究水準： ユニークな研究開発がなされ、研究水準は高い。
- ・技術開発水準： バイオエタノール技術水準は高いが、まだ、実用段階にいたっていない。
- ・産業技術力： バイオ燃料では市場が明確でないため、欧米に較べて劣勢である。

②米国

- ・研究水準： バイオ燃料では基礎研究は高い水準にあるが、実用化研究にやや遅れが見られる。
- ・技術開発水準： バイオエタノール開発には国家的な取組を展開中で、技術開発水準は高い。
- ・産業技術力： バイオエタノール開発には国家的戦略と穀物メジャーの思惑が一致して、産業技術力は極めて高い水準にある。

③欧州

- ・研究水準： バイオエタノールは BDF に比べて普及率が低いですが、先導的な研究が行われている。
- ・技術開発水準： BDF については、変換技術や周辺技術が高い。風力発電、地熱発電の研究開発水準は高い。
- ・産業技術力： BDF については、需要の増加に対応する形で、技術も高くなってきた。

④中国

- ・研究水準： バイオマス利用は、燃料を主に開発している我が国とは異なり、混焼利用を中心に検討されている。

⑤韓国

- ・技術開発水準： バイオエタノールや BDF も導入され始めており、技術水準も向上の兆しが見られる。

3) 水素利用（輸送・貯蔵）技術

i) 技術の概要

水素の輸送技術としては、以下の技術が検討されている。

- ・ 圧縮 → ボンベ格納 → トラックやトレーラによる輸送
- ・ 冷却 → 液化 → ローリーによる輸送
- ・ 水素貯蔵合金への吸蔵 → トラックやトレーラによる輸送
- ・ 有機ハイドライド（デカリン等）への変換 → ローリーによる輸送
- ・ パイプライン（配管）

水素の貯蔵技術は、上記の輸送技術と密接に関連しており、以下の技術が検討されている。

- ・ 圧縮 → ボンベ貯蔵
- ・ 冷却 → 液化 → 保冷容器による貯蔵
- ・ 水素貯蔵合金への吸蔵
- ・ 有機ハイドライド（デカリン等）への変換 → タンク貯蔵

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

NEDO では以下の研究開発プロジェクトを実施している。

○ 水素先端科学基礎研究事業（2006～2012 年度）

PL：村上 敬宜（独立行政法人 産業技術総合研究所 水素材料先端科学研究センター センター長）

水素エネルギー社会の構築には、大量の水素をコンパクトに輸送・貯蔵することが必要であり、高圧化または液化した状態の水素の取扱いが不可欠とされている。一方、水素を安全に利用するために必要となる基礎的挙動等のデータや科学的知見の蓄積・深化は、我が国のみならず世界的にも不十分な状況にある。

特に、高圧／液化水素環境下における水素脆化（水素を吸収して金属材料が脆くなる現象）や水素トライボロジー⁵⁹に係る科学的知見は、水素貯蔵・輸送関連機器、部品、材料等の製造、および一般ユーザ利用において必要不可欠とされている。

このような背景のもと、本プロジェクトでは、高圧下又は液化状態の水素基礎物性の解明、水素脆化などの基本原理の解明、および対応策を幅広い分野で横断的に検討している。より安全・簡便に、低コストで水素を利用するために、材料選定や機器設計の指針、劣化評価法などを産業界に提供し、水素エネルギー社会の真の実現を促進することを目指している。

⁵⁹ 水素雰囲気下における 2 つの物体の接触面の摩擦、摩耗、潤滑などの現象。

○ 水素貯蔵材料先端基盤研究事業（2007～2011 年度）

PL：秋葉 悦男（独立行政法人 産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門 副部門長）

現在、燃料電池自動車に大量の水素をより安全・簡便・効率的かつ低コストに搭載するための技術として「水素貯蔵材料（水素吸蔵合金など）」が注目を浴びている。しかし実用化・普及のためには水素貯蔵能力の大幅な向上が不可欠である。

このため、本事業では高性能かつ先端的水素貯蔵材料開発に必要な水素貯蔵に関する基本原理の解明および材料の応用技術に必要な基盤研究を幅広い分野で横断的に行う。それにより、水素貯蔵材料の基本原理の解明、計算科学等材料研究への応用技術の基礎を確立し、水素貯蔵材料の開発指針を産業界等に提供することを目的としている。

○ 水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発（2008～2012 年度）

これまでの事業成果等を踏まえ、燃料電池自動車実用化のための水素供給インフラ市場立上げ（2015 年頃を想定）に向け、水素製造・輸送・貯蔵・充填に関する低コストかつ信頼性・耐久性に優れた機器およびシステムの要素技術開発、実用化技術開発を行う。

これにより、水素エネルギー供給に必要な一連の機器およびシステムに関する技術を確立することを目的とする。また、実証研究や基準・標準化に関する事業と連携して技術開発を推進することにより、燃料電池自動車の実用化・普及展開および国際競争力の確保に寄与する。

開発対象機器例を図 4-9 に示す。



図 4-9 開発対象機器例 [4-14]

②公的研究機関・大学における研究開発例

東北大学金属材料研究所水素機能材料工学研究部門では、環境材料としての次世代水素貯蔵物質の基礎研究として、超高容量の「水素」を機能的に貯蔵・輸送するための新規なナノ・クラスター型水素貯蔵物質を探索・設計する研究を行っている。また、環境材料としての次世代水素貯蔵物質の合成プロセス・応用研究では、新規なナノ・クラスター型水素貯蔵物質の合成プロセスや燃料電池自動車などへ搭載するための応用研究を行っている。

東北大学大学院工学研究科知能デバイス材料学専攻では、高水素含有リチウム系化合物の合成と探索研究、水素中熱処理による合金組織の結晶粒微細化研究、高容量水素吸蔵合金の開発に関する研究、超高压合成法による新規水素化物の探索等を実施している。

東海大学工学部エネルギー工学科では、水素吸蔵合金と廃熱を利用した 5 °C 以下の冷水製造により、イチゴ栽培や陸上養殖など、農水産業への応用展開を図る研究を実施している。廃熱としては、工場、ごみ焼却施設などからの高温廃熱と、地下水、河川などの低温廃熱を利用する。水素技術で地域固有の農業、水産業を振興し、持続可能な地域発展をめざすことを目標としている。

名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻では、水素貯蔵材料の設計と開発として、主要な水素吸蔵合金の電子状態を分子軌道法で計算し、水素化合物の安定性を電子・原子レベルのミクロな立場から評価している。また、幾つかのモデル合金を実際に作製し、その水素吸蔵特性を実験的に評価している。

佐賀大学理工学部機械システム工学科では、水素吸蔵合金の熱特性、高压水素急速充填時の貯蔵容器内水素温度と容器壁内の温度特性の研究を実施している。

群馬大学大学院工学研究科機械システム工学専攻では、Ti-Cr 系水素貯蔵合金や Ti 系水素貯蔵合金の第一原理計算⁶⁰ による特性評価を実施している。

京都大学大学院理学研究科では、水素吸蔵ポリマーの創製や水素吸蔵物質の開発を行っている。

産業技術総合研究所・超臨界流体研究センターは、超臨界二酸化炭素と担持ロジウム触媒との組み合わせにより、燃料電池用水素貯蔵材料として有望とされているデカリン⁶¹ を従来技術より低温でかつ高選択・高効率に得る合成技術を開発した。本技術は、触媒劣化が起こらないため長期使用が可能となること、生成物であるデカリンの回収が容易であること、溶媒である CO₂ は反応後に気体として回収し再利用が容易であること等の利点があり、水素貯蔵材料の合成システムとして実用化が期待されている。

③民間企業における研究開発例

現在、産業界で用いられている水素の製造法は、ナフサ、メタノール、天然ガスなどの炭化水素系原料を水蒸気改質する場合と、食塩電解の副生ガスや水素成分を多く含むコークス炉ガス (COG) を精製して得る場合がほとんどである。

岩谷産業㈱をはじめとする水素供給企業は、主に副生ガスや COG を高純度に精製して得た水素を、ユーザの使用量に合わせてシリンダー、カードル、長尺容器に高压充填して供給するオフサイト方式により圧縮水素の販売事業を行っている。近年では、液化水素による供給も増え、加えて、顧客企業の敷地内に水素のオンサイト供給設備を建設し、供給からメンテナンスまでを一貫して管理するオンサイト供給も行われている。現在の外販水素市場の規模は、年間約 1 億 4,000 万～6,000 万 m³ で推移

⁶⁰ 実験データや経験パラメータを使用せずに理論計算を行う方法の総称。一部の学会・業界では、より具体的に、シュレディンガー方程式を解く電子状態計算を指す場合がある。

⁶¹ 正式な名称はデカヒドロナフタレン (decahydronaphthalene) であり、化学式 C₁₀H₁₈ で表されるシクロアルカンの一種である。ナフタレンを水素化することによって合成される。常温で液体であり、溶剤として用いられるほか、水素貯蔵材料としての研究が行われている。

している。

液化水素による供給は、圧縮水素よりも大量輸送が可能な点で注目されている。岩谷産業㈱は2004年から、JHFC（水素・燃料電池実証プロジェクト）の一環として建設された新日本製鐵君津製作所の液化水素製造設備で製鉄副生ガスである COG を冷却して液化水素を製造する共同研究に参加している。製造された液化水素は、有明水素ステーションで運用されている。

また岩谷産業㈱は、2004年に堺 LNG と合弁で㈱ハイドロエッジを設立し、大阪府堺市に生産能力 6,000 t/h の日本最大級の液化水素プラントを稼働させ、2006年から既存設備の数倍規模で液化水素の生産を開始し、液化水素の民生利用に積極的に取り組んでいる。

石油会社では、水素の製造・利用技術の開発を行なっている。たとえばコスモ石油は、独自の触媒技術を応用し、石油留分を利用できる燃料電池システムの開発や水素ステーション用小型水素製造技術の開発に取り組んでいる。

iii) 米国における研究開発動向

水素貯蔵システム用のロジウム（Rh）ベース触媒の研究が DOE のパシフィック・ノースウエスト国立研究所（Pacific Northwest National Laboratory, PNNL）で行われている [4-15]。水素ガスをタンクに圧縮貯蔵する手法ではなく、大きな分子に水素を含有させる手法を開発している。この研究結果は、水素エネルギーを燃料電池などに利用する際に用いられる、触媒の設計に向けた一つのステップとなる。触媒は Rh、ボロンおよびその他の原子のクラスターで構成されている。

水素ステーションの設置数はカリフォルニア州が全米で最も多いが、近年は停滞気味で、計画中の補給ステーションが中止された例として、パシフィック・ガス・アンド・エレクトリック（Pacific Gas & Electric, PG&E）社が建設する予定のものがある。これまで水素に強い関心を示してきたこの大手電力会社の州政府との契約は合意期限切れとなった。

同社のステーションは、サンカルロス（カリフォルニア北部、最も既存ステーション数が多い地域）に建設される予定であった。予定建設コストは少なくとも 250 万ドル、うち 150 万ドルは州政府からの助成予定であった。このステーションは、GM 社の試験プログラムのカリフォルニア北部への拡大、およびメルセデス・ベンツの FCEV リースプログラムにとっても、重要な拠点になるはずであった。このように、米国での水素ステーションの建設は、やや停滞しているように見受けられる。

iv) 欧州における研究開発動向

欧州では、水素・燃料電池共同技術イニシアチブ（Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative, JTI-FCH）が中心となって研究開発を実施している。2009年7月2日に第二期研究公募が発表され、水素の生産からアプリケーションの実証までを含むサプライチェーン全体と、自動車から大規模発電プラントまでの研究を実施している。

研究の枠組みは、①輸送・燃料補給インフラ、②水素の生産および流通、③定置式発電およびコジェネ、④早期の市場（携帯型アプリケーションや小型実用車など）、⑤分野横断的な課題、と 5 つに分類される。

輸送・燃料補給インフラ（予算額 2,640 万ユーロ）関連では、路上走行車と燃料補給インフラの大規模実証研究が実施されており、公共輸送機関用の第二世代燃料電池ハイブリッドバス、乗用車の研究と平行して、適切な燃料補給インフラの実証が行われている。

また、低温水素貯蔵の開発にも取り組んでおり、代替貯蔵技術（車載用圧縮水素貯蔵など）の基準に関する技術的目標の達成度の評価なども行われている。高圧複合容器の設計基準を標準化するための研究では、経年劣化、圧力レベル、耐衝撃性、故障モードなどを評価しており、製品および性能の基準の作成、安全係数の規定を目標としている。水素の燃料品質の標準化のための研究では、燃料電池の安全な運用に関する要件に基づいて、燃料品質の仕様と基準を決定することを目指している。

水素の生産および流通（予算額 570 万ユーロ）関連では、固体水素貯蔵システムの改良研究が行われている。

v) 国際的な比較

米国は、水素エネルギーについて、以前から世界で最も力を入れており、大統領府や DOE を中心として、国を挙げた研究開発に取り組んできた。ただし最近では以前よりはややトーンダウンしている可能性もある。

欧州も、米国の取組に触発されて、EU レベルで水素の利用（貯蔵・輸送）について水素・燃料電池共同技術イニシアチブをはじめとする精力的な取組を行っている。

日本も、国家プロジェクト、公的研究機関、民間企業において水素に関する多くの基礎研究、研究開発プロジェクトや実用化努力が行われてきた。ただし、燃料電池自動車の本格的な実用化にまだ時間がかかることなどもあり、水素エネルギー社会への道のはなお遠い感もある。

日本で家庭用の燃料電池が販売開始されたことは世界的にみても画期的である。ただし厳密に見れば、燃料は水素ではなく都市ガスである。

日米欧ともこれまで水素エネルギーについて、積極的な研究開発を行ってきた。ただし、本格的な水素エネルギー社会の到来までには、技術開発、水素供給インフラの整備やコスト面を含めて、解決すべき課題が多く残っている。

4) 高密度蓄電デバイス（スーパーキャパシタを除く）

i) 技術の概要

本調査では、代表的な高密度蓄電デバイスとして、主にリチウムイオン二次電池（リチウムイオンポリマー二次電池を含む）とその発展系デバイス（例：リチウムイオン電池とリチウムイオンキャパシタのハイブリッド・デバイス）を取り上げる。なおスーパーキャパシタについては、別項で扱うこととする。

リチウムイオン二次電池は、非水電解質二次電池の一種で、電解質中のリチウムイオンが電気伝導を担う二次電池である。正極にリチウム金属酸化物を用い、負極にグラファイトなどの炭素材を用いるものが現在主流となっている。

リチウムイオン二次電池の過充電特性を改良したリチウムイオンポリマー二次電池が開発され、一部で実用化されている。また、さらなる性能向上への取組として、正極材料に LiNiO_2 、 LiMn_2O_4 、負極材料にスズやケイ素とリチウムの合金を用いる方式等が研究されている。

なお非リチウム系の二次電池として、アイデア段階ではあるが、カルシウムイオン電池やマグネシウムイオン電池、ナトリウムイオン電池も研究されている。

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

第3期科学技術基本計画においては「電源や利用形態の制約を克服する高性能電力貯蔵技術」が戦略重点科学技術として選定され、2006年に決定された経済成長戦略大綱においても次世代自動車向け電池の技術開発が重点分野として位置付けられている。

これらを受けて、NEDOでは2007年度より、HV、EV、FCHVなどの早期実用化を目的に、高性能・低コスト二次電池を狙いとする「次世代自動車用高性能蓄電システム技術開発」を行っている。2015年を目途に、エネルギー密度100 Wh/kg、出力密度2 kW/kg、コスト3万円/kWhを目標値とする3 kWh級リチウムイオン電池の研究開発を推進している。この中には、長期的な基礎研究開発対象として、リチウムイオン電池を超える革新的な新電池も含まれている。

このほかNEDOでは、「革新型蓄電池先端科学基礎研究事業」として、電池の基礎的な反応メカニズムを解明することにより、ガソリン車並みの走行性能を有するEV用二次電池の実現に向けた基礎技術を確立することを目的とした研究開発を2009年度から7年間の計画で行っている。この研究開発の成果により、飛躍的な性能向上や安全性・信頼性が向上した革新的リチウムイオン電池が実現され、EV、PHVなどの走行性能の著しい向上が可能としている。

②公的研究機関・大学における研究開発

産業技術総合研究所（ユビキタスエネルギー研究部門・蓄電デバイス研究グループ）では、現在のリチウムイオン電池を超えるエネルギー密度と安全性・信頼性を併せ持った次世代の蓄電デバイスを提案するため、リチウム系二次電池を中心に主に図4-10に示す研究開発を行っている。

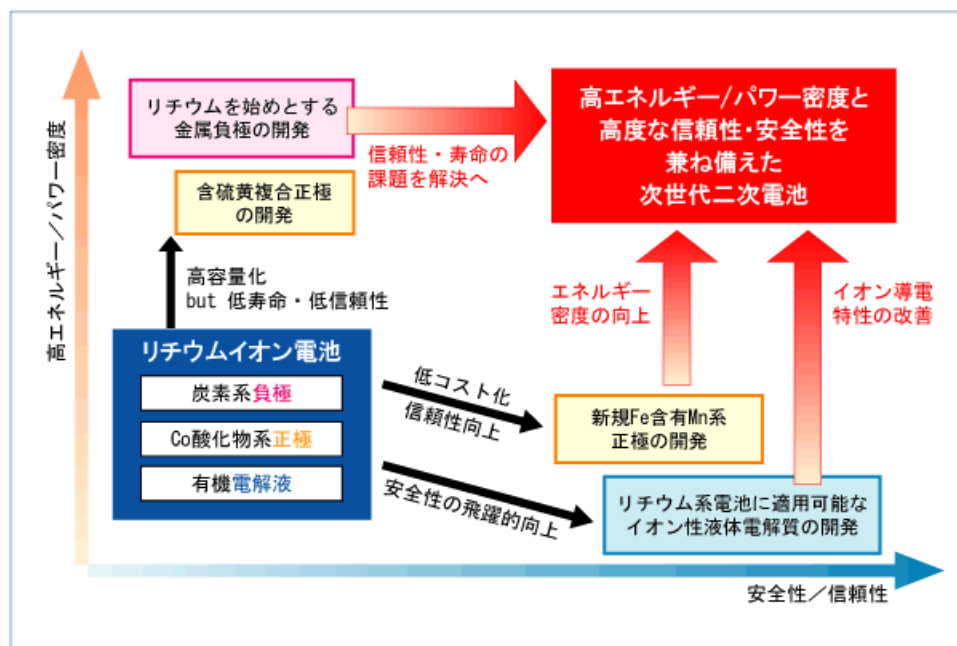


図 4-10 産業技術総合研究所における次世代二次電池に関する研究開発の方向性 [4-16]

③民間企業における研究開発

特筆すべき動向として、リチウムイオン電池とリチウムイオンキャパシタ⁶²を一体化したハイブリッド・デバイスがある。

三菱電機(株)は、大型モーターの電力回生や太陽光発電の出力平準化に有効な蓄電デバイスとして、リチウムイオンキャパシタとリチウムイオン電池をセルの内部で一体化し、短時間での充放電（瞬発力）と長時間の電力貯蔵量（持続力）を両立した複合型蓄電デバイスを世界で初めて開発した。

本デバイスは、リチウムイオンキャパシタの特長（高出力密度）とリチウムイオン電池（高エネルギー密度）の特長を併せ持った充放電特性を有しており、動作電圧が 3.2 V のリチウムイオン電池に対して 2.0 V から 4.0 V の電圧帯でリチウムイオンキャパシタが動作し急速充放電を分担する。市販の高出力タイプのリチウムイオン電池に近い 60 Wh/kg のエネルギー密度が得られている（図 4-11）。

⁶² 一般的な電気二重層キャパシタの原理を使いながら、負極材料としてリチウムイオンを吸蔵可能な炭素系材料を使い、そこにリチウムイオンを添加することでエネルギー密度を向上させたキャパシタ。

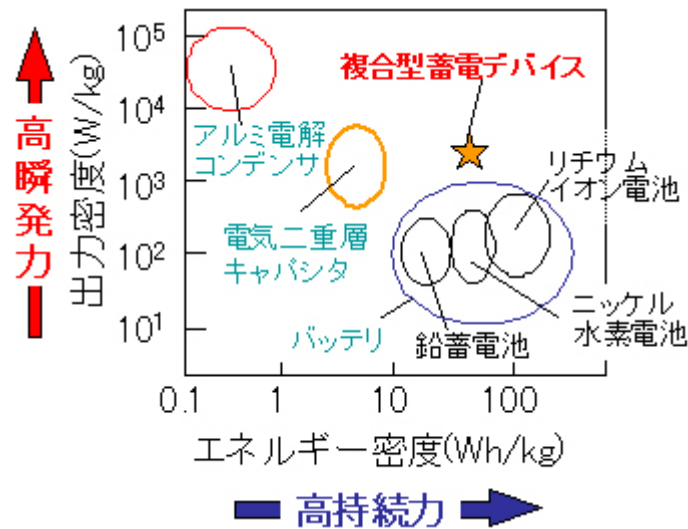


図 4-11 複合型蓄電デバイスの性能 [4-17]

iii) 米国における研究開発動向

DOE は、主に 1991 年に自動車業界のビッグスリーなどが中心となって設立した米国先進バッテリー協会 (United States Advanced Battery Consortium, USABC) に開発費を 50% 支給する形で、A123 Systems Inc., Compact Power Inc., EnerDel Inc. 等の電池メーカーの参画を得て、EV 用二次電池の開発を推進してきた。

この USABC への支援プログラムに加えて、DOE は、ATD (Applied Technology Development) プログラム、ABR (Applied Battery Research) プログラム、BATT (Batteries for Advanced Transportation Technologies) プログラムを通して、HV、PHV、EV などを対象にした自動車用リチウムイオン電池の研究開発を勢力的に実施している。高エネルギー密度型 PHV 用電池および高出力型 HV 用電池のいずれにおいても、エネルギー密度、出力密度、寿命、安全性、コストが重要な技術開発要素となっている。

USABC プログラムでは、Compact Power Inc. が正極材料に層状酸化物とマンガンスピネル酸化物の複合材料、A123 Systems Inc. がリン酸系正極材料、EnerDel Inc. が負極にナノスケール粒子分散チタン酸スピネル、正極にマンガン・ニッケル酸リチウム ($\text{LiMn}_{1.5}\text{Ni}_{0.5}\text{O}_4$) 等の高電位材料を用いることによるエネルギー密度の向上などに関する研究開発を進めている。

特に、ATD プログラムおよび ABR プログラムでは、PHV 用のリチウムイオン電池の開発を重点に、電池セルの研究開発を実施している。これらの研究開発では、40 マイルの PHV 走行を可能とするエネルギー密度の実現、5,000 充放電サイクルに至る十分な寿命の実現などが目標とされている。これらのプログラムはアルゴンヌ国立研究所 (Argonne National Laboratory, ANL) が中心になって推進しており、ブロックヘブン国立研究所 (Brookhaven National Laboratory, BNL)、アイダホ国立研究所 (Idaho National Laboratory, INL)、SNL 等も参加して、電池セル材料、カレンダー寿命 (充電状態を継続保存しておける寿命)、充放電サイクル寿命、および過負荷許容性に関する研究を推進している。

一方、BATTプログラムでは、ローレンス・バークレー国立研究所（Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL）が研究を主導して、HV、PHV、EV で利用される高性能の次世代のリチウムイオン電池用の正極材料、負極材料および電解質の基礎研究を行っている。

iv) 欧州における研究開発動向

欧州では、EU が取り組む JOULE (Joint Opportunities for Unconventional or Long Term Energy Supply) プロジェクトの下で、1993 年よりリチウムイオン電池の研究開発が始められ、主に、EV 用二次電池をターゲットに研究開発が行われてきた。さらに、EU 行政府・欧州委員会が、資金援助を行い、新しいリチウム二次電池を開発するプロジェクトを開始している。たとえば、EU 内の 16 の電池関連研究グループから成る ALISTORE (Advanced Lithium Energy Storage Systems Based on the Use of Nano-powders and Nano-composite Electrodes / Electrolytes) プロジェクトが 2004 年から 5 年間の計画で実施されている。

①定置用

- ・リチウムイオン電池

EU の FP5 の EESD (エネルギー・環境・持続的開発) プログラムにおいて、LIBERAL プロジェクト (リチウム電池の寿命評価、2002～2005 年) が行われた。仏 SAFT 社⁶³ が通信基地局用の製品を現在供給している。

- ・リチウムポリマー電池

EU の FP5 の EESD (エネルギー・環境・持続的開発) プログラムにおいて LI-ION STARTER BATTERIE プロジェクト (電解質不要のリチウムポリマー電池開発、2000～2004 年) が行われた。

②自動車用

- ・リチウムイオン電池

EU の Joule プログラムの中で、仏 SAFT 社、独 Varta 社等が研究開発を行った。SAFT 社は現在、HEV 用、EV 用、電気スクーター用の製品を供給している。EU の FP5 の EESD (エネルギー・環境・持続的開発) プログラムにおいて、LION HEART プロジェクト (自動車用リチウムイオン電池開発、2003～2005 年) 等が行われている。

- ・リチウムポリマー電池

仏 Bolloré 社/EDF 社等が研究開発を行っている。

v) その他の国々における研究開発動向

韓国では、2004 年から 5 年間の計画で政府主導での大型国家プロジェクトが開始され、超高容量型のリチウム二次電池および電気二重層キャパシタの開発が行われている。

中国では、1986 年より「863 プロジェクト」と称する技術開発プロジェクトが行われており、2001 年から 2005 年の間に EV および HV 用の二次電池の研究開発が行われた。

⁶³ フランスの電池メーカー。

2006年からは、HVおよびEVに加えて、FCHVも対象としたリチウムイオン電池の開発が行われている。

vi) 国際的な比較

日本企業は、リチウムイオン電池の製品化にいち早く成功し、1998年には日本企業の世界生産シェアを100%とし、研究開発においても世界をリードしてきた。

しかし、2000年にはリチウムイオン電池の世界シェアの上位6位までを日本企業が占めていたものの、その後、2005年時点での我が国の世界シェアは約60%になり、2008年には約50%を占めてまだ世界一であるものの、日本企業の世界生産・販売シェアが急減している(表4-8)。

表 4-8 量産リチウムイオン電池の企業別ランキングと世界シェア [4-18]

年度 国・企業・シェア 順位・出荷額	2000年			2005年			2008年		
	国名	企業名	シェア (%)	国名	企業名	シェア (%)	国名	企業名	シェア (%)
1	日本	三洋電機 三洋GSソフト エナジー	33	日本	三洋電機 三洋GSソフト エナジー	28	日本	三洋電機 三洋GSソフト エナジー	23
2		ソニー	21		ソニー	13		韓国	Samsung SDI
3		松下電池工業	19	韓国	Samsung SDI	11	日本	ソニー	14
4		東芝	11	日本	松下電池工業	10	中国	BYD	8.3
5		NECトキン	6.4	中国	BYD	7.5	韓国	LG Chemical	7.4
6		日立マクセル	3.4	韓国	LG Chemical	6.5	中国	BAK	6.6
7	中国	BYD	2.9	中国	天津力神	4.5	日本	パナソニック	6.0
8	韓国	LG Chemical	1.3	日本	NECトキン	3.6		日立マクセル	5.3
9		Samsung SDI	0.4			日立マクセル	3.3		ATL
販売金額 (億円)	2,956			2,891			3,904		

(注) パナソニック(株)の三洋電機(株)に対する株式公開買い付け(TOB)が2009年12月11日付で成立した。2008年の両社を合わせたリチウムイオン電池の世界シェアは29%である。

2005年以後、韓国企業と中国企業による研究開発の追い上げが、価格の低下とともに激しくなっている。韓国のSamsung SDI Co. Ltd. およびLG Chemical Ltd.、中国のBYD Co. Ltd. によるHVやFCHV用などの二次電池の研究開発が注目されている。その他の企業では、フランスのSAFT社がEVやHV用の二次電池の開発を進めている。また、米国のA123 Systems Inc. もHVを念頭に置いた低価格で安全性を重視したリチウムイオン電池の製造・販売を始めている。

2006年に開催された国際会議IMLB2006 (International Meeting on Lithium Batteries)⁶⁴ および米国電気化学会と日本の(社)電気化学会が2008年に主催した国際会議PRiME2008 (Pacific Rim

⁶⁴ リチウム一次電池、二次電池に関する世界最大の国際会議。2年に一度開催され、世界各国からリチウム電池に関するキーパーソンが参加している。日本は世界で唯一開催国を3度務めており、世界が我が国で開催することを重要視している表れとも受け止められている。

Meeting on Electrochemical and Solid-State Science) ⁶⁵ における、リチウムイオン電池材料に関する国別論文発表状況を図 4-12 に示す。

IMLB2006 においては、正極、負極、電解質などの発表分野における日本の発表論文数はこの時点では上位 2 位以内に位置している。

一方、PRiME2008 においては、正極の場合の国別発表件数割合では、米国と日本からの発表が全体の約 65% を占め、その他の国では韓国、中国からの発表件数が欧州各国よりも多い。

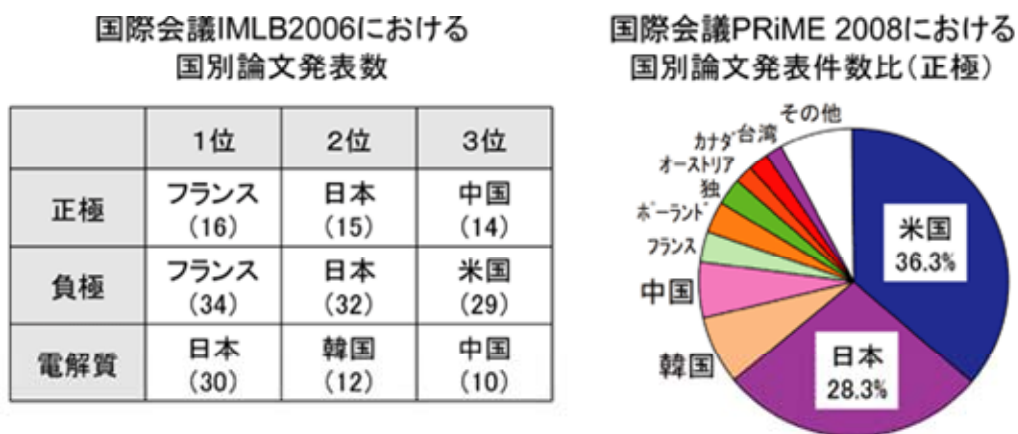


図 4-12 最近の国際会議における国別論文発表件数

これらの情報から、我が国のリチウムイオン電池に関する競争力は、依然として高い地位を保っているものの、中国、韓国の追い上げにより、相対的な競争力は以前より低下しているものと考えられる

⁶⁵ 日本の電気化学会と米国の電気化学会は、従来より「電気化学日米合同大会」を開催してきた。2008 年は新たに PRiME（環太平洋電気化学大会）と名称を付し、日・米の電気化学会が主催するほか、日本の応用物理学会、韓国電気化学会、オーストラリア化学会、中国電気化学会が新たに共催者に加わった。ハワイで開催された PRiME2008 においては 3,237 件の講演があり、電池やキャパシタから基礎的な電気化学や電気分析化学まで幅広い分野の研究に関する発表が行われた。

5) SiC パワーデバイス

i) 技術の概要

現在使用されている、ショットキーダイオード、パワートランジスタ、サイリスタ、GTO (Gate Turn Off) サイリスタ⁶⁶、IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ)⁶⁷、パワーMOSFET⁶⁸などのパワーデバイスの大部分は Si (一部 GaAs) デバイスであり、より革新的な低損失化の実現のためには、SiC (炭化ケイ素)、GaN (窒化ガリウム) 等のワイドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが期待されている。

このうち、SiC はバンドギャップが Si の 2~3 倍ある。このために絶縁破壊電界が約 1 桁大きく、飽和電子速度は 2 倍、熱伝導度は 3 倍大きいと、通電状態での抵抗値が Si デバイスよりも 2 桁程度下がるものと予想されている。さらに動作温度の上限が 500~600 °C と高いだけでなく、熱伝導度が高いために伝熱面積が小さくても容易に冷却できる。SiC は自動車 (HEV、FCEV、EV) 等に用いられるインバータを小型化・低損失化できる。また送配電用 (保護回路、柱上変圧器、直流送電、電力補償装置等) や分散電源用の電力素子に SiC を適用できるようになれば、電力変換の際の損失を大幅に低減できる。

SiC パワーデバイスの構造例を図 4-13 に示す。

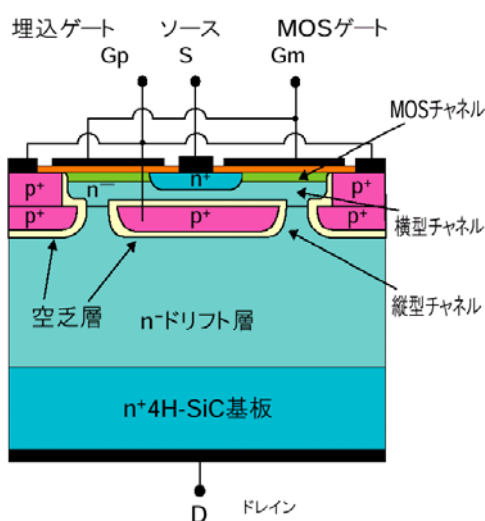


図 4-13 SiC パワーデバイスの構造例 [4-19]

⁶⁶ ゲートに逆方向の電流を流すことにより、ターンオフ (オン状態よりからオフ状態への切り替え) ができる機能をもつサイリスタ。
⁶⁷ 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ (Insulated Gate Bipolar Transistor) は MOSFET をゲート部に組み込んだバイポーラトランジスタ。
⁶⁸ モスフェット (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) のこと。電界効果トランジスタ (FET) の一種で、LSI の中では最も一般的に使用されている構造。

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

NEDO の「超低損失電力素子技術開発」プロジェクト（1998～2002 年度）において、SiC デバイス（一部 GaN デバイス）に関する以下の研究開発が実施された。本プロジェクトにより我が国の SiC デバイスに関する技術力は大幅に向上したとされる。

- a. 基盤技術開発（基板作製技術、薄膜エピタキシャル成長技術、伝導度制御技術、界面制御技術、素子設計・評価基礎技術）
- b. 素子化技術（接合 FET、MOSFET、MESFET⁶⁹、GaN-HEMT⁷⁰ の各基盤技術）
- c. 次世代パワー半導体デバイス実用化調査
- d. 超低損失電力素子革新的要素技術

NEDO の「次世代パワーエレクトロニクス技術開発（グリーン IT プロジェクト）」（2009～2012 年度）において、IT 機器の省エネルギー化を目指して、以下の研究開発が行われている。

- e. SiC パワーデバイスを用いたデータセンタ用サーバ電源技術開発
 - ・ SiC パワーデバイスの高性能化技術開発と、この開発により得られた高性能デバイスをサーバ電源へ適用するための電力変換技術の開発を行い、数 kW 級のデータセンタ用電源の早期実用化を目指す。
- f. SiC パワーデバイスを用いた太陽光発電用パワーコンディショナ技術開発
 - ・ SiC パワーデバイスの高性能化技術開発と、この開発により得られた高性能デバイスを太陽光発電用パワーコンディショナへ適用するための電力変換技術開発を行い、数 10 kW 級の太陽光発電システム用パワーコンディショナの早期実用化を目指す。
- g. 次世代 SiC パワーデバイス・電力変換器基盤技術開発
 - ・ 革新的な電力変換器を実現するために、非常に低いオン抵抗⁷¹ をもつ次世代 SiC パワーデバイスの開発を行うと共に、これらのデバイスを利用した電力変換器の設計技術、高温実装技術等の高度化基盤技術開発を行う。

このほか、SiC デバイスについて以下の政府関連プロジェクトが実施された。

- ・ 経済産業省/NEDO（地域大プロ）「エネルギー使用合理化燃焼等制御システム技術開発」（イオン工学研究所等が参加）（SiC 素子の高温応用を目指した研究開発）（1994～99 年度）

②公的研究機関・大学における研究開発

以下の公的研究機関・大学において SiC デバイスに関する研究開発が行われている。

- ・ 公的研究機関・公益法人：

⁶⁹ Metal-Semiconductor Field Effect Transistor のことで、電界効果トランジスタ(FET)の一種。ショットキー接合性の金属をゲートとして半導体上に形成した構造を持つ。

⁷⁰ 高電子移動度トランジスタ (High Electron Mobility Transistor) のこと。半導体ヘテロ接合に誘起された高移動度の二次元電子ガス (two Dimensional Electron Gas, 2 DEG) をチャネルとした電界効果トランジスタ。

⁷¹ パワーデバイス等のトランジスタが ON 状態の際に電極間に存在する抵抗値。オン抵抗が小さいほど損失が小さくなる。

産業技術総合研究所（パワーエレクトロニクス研究センター デバイス・プロセスチーム 福田憲司リーダー等）、宇宙科学研究所、RITE、日本原子力研究所、電力中央研究所、イオン工学研究所、新機能素子研究開発協会、ファインセラミックスセンター、エンジニアリング振興協会 等

・ 大 学：

京都大学（松波弘之教授等）、立命館大学（名西やすし教授等）、埼玉大学（吉田貞史教授等）、京都工芸繊維大学（紙中伸征客員教授等）、大阪電気通信大学（松浦秀治教授等）、名古屋工業大学（江龍修教授等）、長岡技術科学大学（高橋勲教授等）、関西学院大学（金子忠昭教授等）等

③民間企業における研究開発

日立製作所、松下電器産業、HOYA（Hoya Advanced Semiconductor Technologies）、豊田中央研究所、古河電気工業、富士通研究所、関西電力、日産自動車、デンソー、新日本製鐵、新日本無線、富士電機総合研究所、三菱電機、三洋電機、東芝、沖電気工業、シャープ、日本電気、エクトロン（日新電機の社内ベンチャー）、ローム、日本インター等が SiC パワーデバイスに関する研究開発を行っている。

○ 最近の動向

ロームが SiC を使ったインバータパワーモジュール（IPM）を 2009 年 6 月に発表した。同社は SiC デバイスの量産時期を迎えようとしている。SiC デバイスを中耐圧デバイスとして位置付け、耐圧 600-1,200V の範囲でアプリケーションの展開を図ることとしている。耐圧 600V をハイブリッド車向けに、同 1,200V 品は産業機器、なかでも海外の電源向けに展開する予定である。同社の SiC デバイスは 3 インチウェハを採用しており、2008 年に福岡県筑後市のローム・アポロデバイスに試作ラインを設け、2009 年 1 月には、社内にプロジェクトを発足させ、フル SiC パワーモジュールの開発体制を整えている。

一方、SiC の量産採用では、日本インターのフィリピン子会社が、米国クリー社の SiC 基板を使用したショットキーバリアダイオード（SiC-SBD）の生産を 2009 年 6 月から開始している。月産能力は 150 万個である。SiC はシリコンに比べ、絶縁破壊電界強度が 10 倍、熱伝導率が 3 倍、飽和電子速度が 2 倍と高く、高温動作が可能など、優れた特性を有し、薄型テレビの力率改善回路に用いれば、部品点数削減により電源の小型化が可能になるとしている。

新日本製鐵は SiC ウェハの事業化を開始した。2009 年 4 月から、子会社の新日鉄マテリアルズを通じて 2~4 インチ（50~100 mm）径の SiC の販売を開始している。従来はデバイス試作用ウェハをサンプル品として供給してきたが、2009 年 4 月からはデバイスの量産に使える品質保証品を供給している。2015 年頃には年間売上高 100 億円規模の事業に育てる意向としている。

iii) 米国における研究開発動向

DARPA と海軍研究局 (Office of Naval Research, ONR) の出資による SiC パワー素子開発コンソーシアム (1998 年～) が SiC パワーデバイスに関する研究開発を行った。

SiC ウェハの製造に関しては、Cree 社が開発、量産の両面で世界を主導しており、パワーデバイスに先んじて LED 等の発光デバイス用の基材として出荷を開始している。

EPRI (Electric Power Research Institute) は、系統制御用パワーエレクトロニクス機器への SiC デバイスの適用について研究を行っている。ヴァージニア工科大学の CPES (Center for Power Electronics Systems) も、パワーエレクトロニクス研究の一環として、SiC パワーデバイスに関する研究開発を行っている。

このほか、Rockwell 社、Northrop Grumman 社、Technologies and Devices International 社、ノースカロライナ大学等が SiC パワーデバイスやその SiC 基板等の研究、開発、実用化を行っている。

iv) 欧州における研究開発動向

・ EU

ESPRIT (European Strategic Program for Research and Development in Information Technology) プログラムの援助のもとに HITEN (The High Temperature Electronics Network) が組織され、高温エレクトロニクス分野での情報交換を実施している。

・ ドイツ

研究開発省の SiC Electronics プログラム、エアランゲン大学 等が SiC パワーデバイスに関する研究開発を行っている。Infineon Technologies 社、SiCrystal 社 (Siemens の関連会社)、が SiC ウェハに関する研究開発を行っている。

・ スウェーデン

大学と産業界の共同開発センターである IMC (Industrial Microelectronics Center) における SiC パワー素子開発研究プロジェクト (ABB 社、フィンランドの Okmetic 社等が参加) において研究開発が行われた。

・ フランス

SiC を中心とした産学官連携による国家プロジェクトを実施した。

v) 国際的な比較

日米欧とも SiC パワーデバイスの開発に、積極的に取り組んでいる。

各国の特徴を比較すると、米国は早期に開発に着手し、SiC 基板技術 (Cree 社) の実用化では国 (DARPA) 等の支援も得て世界を大きくリードしており、アプリケーションとしては国防用の応用を目指した研究開発に特徴がある。

一方、欧州は民生用の応用を目指した EU、国、企業レベルでの取組に特徴がある。比較的早くから国家プロジェクトが立ち上がったため、評価技術に優れ、デバイス化、ダイオード化が早かった。例えばドイツの Infineon 社が SiC ウェハの製品化を推進している。

日本は SiC デバイスの開発への着手が遅れたが、国/NEDO の「超低損失電力素子技術開発」プロジェクト（1998～2002 年度）をきっかけとして産学官の技術力が大幅に向上した。技術面では SiC 基板用の単結晶技術に弱みがあるものの、SiC デバイス用の半導体プロセス技術に強みがあり、自動車向け、産業機器向け、電源向け等の用途を目指して、デバイスの量産段階に進みつつある。

次に、世界知的所有権機構（World Intellectual Property Organization, WIPO）への国際特許出願件数から、日米欧の技術開発の活発度を比較する。WIPO の特許データベース（1978～2010 年）により、国際出願された特許の件数を次の①～④の条件のもとで検索した。

- ①キーワード： "Silicon Carbide" and "Power Device" （注：パワーデバイスに限定した）
- ②検索範囲： 請求項（クレーム）
- ③対象特許： WIPO の特許データベースに登録されている全国際特許出願
- ④対象国： 日本、米国、欧州（英独仏の主要 3 カ国に、先述の研究開発動向を踏まえてスウェーデン、フィンランドを追加）

検索結果は、日本：5 件、米国：52 件、欧州 6 件となった。この結果を見ると、SiC パワーデバイスに関する技術開発の活発度については、米国の優位性を認めざるを得ない。日本の技術力が以前に比べて格段に向上したことは確かであるが、依然として米国が優位で、日・欧がそれに続いているものと考えられる。

6) 地中熱ヒートポンプ

i) 技術の概要

冬場の寒冷地では外気温が零下になるが、このような低温下では通常の空気熱ヒートポンプの効率が著しく低下する。一方、地中では年間を通じて概ね 7℃から 21℃程度（地域や深さにより異なる）の温度が保たれ、空気中よりも温度変化が小さい。

地中熱ヒートポンプは、ヒートポンプ式の冷暖房システムにおいて地中の熱源（上記に記載の 7～21℃の地中熱）を利用して熱交換を行う技術であり、空気熱ヒートポンプに比べてより高い効率で運転を行うことが可能となり、より一層の省エネルギーが可能となる。

地中熱ヒートポンプの仕組み（暖房時）の一例を図 4-14 に示す。一般のヒートポンプエアコンが、外気（例：5℃）から熱を冷媒により室内に輸送して暖房するのに対し、地中熱ヒートポンプは地中に熱交換器を設け、地中（外気より高温：例：15℃）に不凍液を循環させて、地中から熱を輸送して暖房するため、より少ない電力で暖房ができる。地中熱ヒートポンプは、大地熱源ヒートポンプとも呼ばれる。

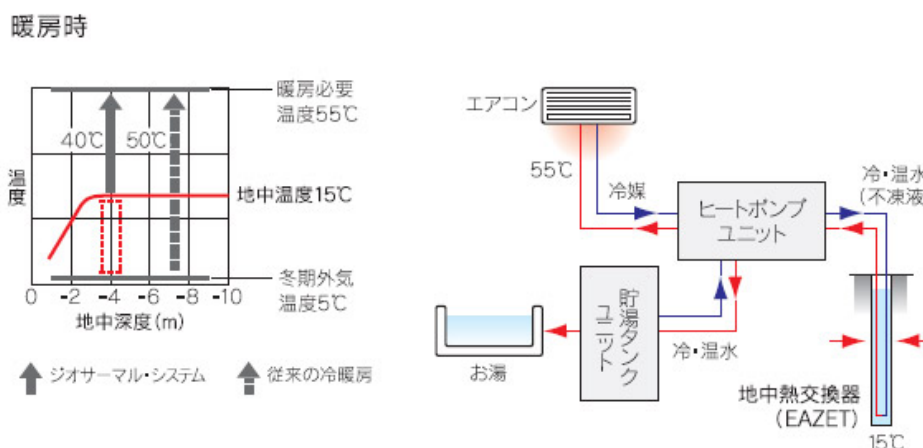


図 4-14 地中熱ヒートポンプの仕組み（暖房時） [4-20]

ii) 日本における研究開発動向

○研究開発動向

環境省では 2006 年度から、地中熱や地下水を利用したヒートアイランド対策技術について、有効性の確認と同時に地中の微生物への影響や地下水位の変動などを分析・評価する「クールシティ推進事業」を実施しており、環境への悪影響を及ぼさない実施条件の確立を目指している。

また環境省は「環境技術実証事業ヒートアイランド対策技術分野（オフィス、住宅等から発生する人工排熱低減技術）地中熱・下水等を利用したヒートポンプ空調システム」に関する実証試験を、地中熱利用促進協会と協力して、民間企業等への委託により実施している（2009 年度）。

NEDO の住宅・建築物高効率エネルギーシステム導入促進事業（建築物）（1999～2010 年度）の実

施例の中には、地中熱ヒートポンプを利用したものがある。

- ・星野リゾート 谷の計画 「地熱利用熱源システム」

- ・ 地中熱および温泉排湯熱を熱源とするヒートポンプによる空調と給湯を行うシステム。冷房の廃熱回収給湯、氷蓄熱給湯も組み合わせられている。給湯蓄熱、温水蓄熱、蓄熱床暖房による深夜電力を利用している。

この他、地中熱交換器の開発や低コストで掘削する技術の開発などが民間で行われている。

○普及動向

現在、複数の企業が地中熱利用ヒートポンプシステムを商品化し、販売している。また NEDO では、一定の要件を満たす場合に工事費の 1/3 を補助する制度の対象としている。

特に日本では土地面積の制限から垂直型の熱交換器の埋設技術のニーズが高い。しかしながら、日本での普及率は極めて低く、今後の広報対策、支援策などが望まれている。

iii) 米国における研究開発動向

○研究開発動向

2009 年 10 月、DOE のスティーブン・チュー長官は、新しい地熱資源の探査と開発、および先進的な地熱技術の研究に最大 3 億 3,800 万ドルを米国再生法資金から助成すると発表した。

この助成金は 39 州の 123 プロジェクトを対象にしており、助成金を受け取るのは民間企業、学術機関、原住民部族事業体、地方政府および DOE 傘下の国立研究所である。助成金に対して 1 対 1 以上の比率でマッチングが行われ、民間セクターおよび連邦政府以外の（公的）資金 3 億 5,300 万ドルがコスト分担金としてプロジェクトに追加される。

この助成金は新しい地熱地帯の特定と開発に向けられたもので、革新的な探査・掘削プロジェクトとデータ開発・収集を通じて地熱開発に伴う先行投資リスクを軽減するものである。さらに助成金は、全国に渡る地熱ヒートポンプ実証設備の普及とそれに必要な資金調達に寄与する。

これらのプロジェクトを全部合わせれば米国地熱産業の劇的な拡大が見えて来る。また、掘削、探査、プラント建設、地熱発電設備の運転、および地熱ヒートポンプ設備の製造が何千もの雇用を生み出し、確保するものと予測されている。

助成金の対象として選ばれたプロジェクトは 6 つの分野に及ぶが、そのうち地中熱ヒートポンプに関するプロジェクトを以下に示す。

- ・ 地熱ヒートポンプの実証（最大 6,190 万ドル。37 プロジェクト）

学術機関、地方政府および商用ビルなど様々な顧客タイプ向けの、様々な建物の暖房および冷房に使用する地熱ヒートポンプの展開を実証する。

○普及動向

米国では、特に北部の寒冷地を中心に 1940 年台から地中熱利用ヒートポンプが普及しており、現状

では圧倒的に世界最大の利用国である。熱利用量にして 4,800 MWt⁷² と推定されている。隣国のカナダも 360 MWt と、かなり普及している。

地中熱交換システムは室外機がないため、騒音がなく、可動部分も少ないことから熱交換器の寿命が 20 年程度、地中パイプは 25 年から 50 年の寿命が製造メーカにより保証されている [4-21]。DOE によれば、空気熱交換型のヒートポンプよりも 25%~50% 電気消費が少ない [4-22]。

米国では、ある程度以上大きな空調設備はパッケージ型の製品ではなく、ローカルの工務店が顧客の注文により機器を組み合わせて設置を行う。業界では、現在年間 1 万から 4 万台の地中熱利用設備が設置されていると推定している [4-23]。

2005 年のエネルギー政策法では、地中熱交換システムの設置費用のうち、設置者個人に対して 1 システム当たり 300 ドルを税控除としている。また、米国では池や水溜なども熱源として利用しているケースがある。

米国の地中熱交換システムの設置例を図 4-15 に示す。地中熱交換システムには水平型、垂直型などがあるが、これは水平型の例である。地中に螺旋形のパイプを水平方向に 3 列程度配置し、これらを直列で接続している。螺旋形とすることにより、比較的コンパクトなスペースで地中熱をできる限り多く不凍液に伝達する工夫がなされている。

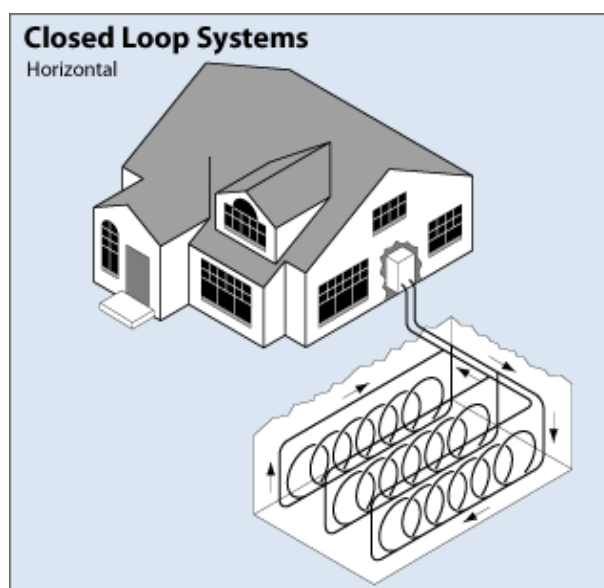


図 4-15 米国の地中熱交換システムの設置例 [4-24]

⁷² MWt : 熱出力の瞬間的な値を、電気の単位 (MW) で表した単位 (t は thermal の略)。

iv) 欧州における研究開発動向

○研究開発動向

EU の FP7 ではギリシャの Centre For Renewable Energy Sources が中心となって、GROUND-MED (Advanced ground source heat pump systems for heating and cooling in Mediterranean climate) と呼ばれる地中熱ヒートポンプに関する共同研究開発プロジェクトが、2009年から実施されている。

○普及動向

欧州では、スウェーデン、ドイツ、スイス、オーストリアが地中熱ヒートポンプの大規模な利用国であり、特にスイスは推定 60,000 基が設置され、人口当たりの利用率では世界最大の利用国と推定されている。スイスでは、近年設置されたヒートポンプのうち約 40% が地中熱利用型と推定されている。

地熱エネルギーは、地中熱ヒートポンプを使って建物の暖房、空調用に利用されている。多数の国が市場の正確な統計を有していないが、欧州はこの技術を開発した世界の主要地域の1つである。

欧州では 2006 年末時点で、約 60 万台が設置されていると推定され、設備容量では、7,328.6 MW に相当する。これは熱の直接使用の約 3 倍の規模である。欧州内ではスウェーデンのシェアが高く、ドイツ、フランス、デンマーク、フィンランド、オーストリア等がこれに続いている。スウェーデンにおける販売台数推移を図 4-16 に示す。

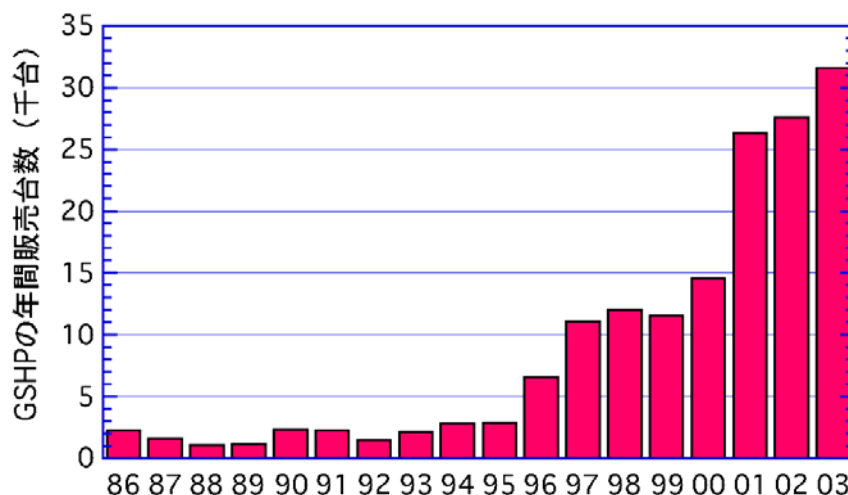


図 4-16 スウェーデンにおける地中熱ヒートポンプの販売台数推移

v) 国際的な比較

地中熱ヒートポンプの普及状況、研究開発ともに欧米が進んでおり、日本では研究開発・普及に関する取組が官民ともに遅れている。

表 4-9 により普及状況を国別にみると、特に米国、スウェーデンにおける普及が進んでいる。

表 4-9 地中熱ヒートポンプの国別設置台数 [4-25]

国	台数 (千台)
米国	600
スウェーデン	200
ドイツ	40
カナダ	36
スイス	25
オーストリア	23
デンマーク	13
フィンランド	9
フランス	9
合 計	>955

WIPO の特許データベース (1978~2010 年) により、WIPO に国際出願された特許の件数を次の①~④の条件のもとで比較する。

- ①キーワード： Ground Source Heat Pump、Geothermal Heat Pump の 2 種類
- ②検索範囲： 請求項 (クレーム)
- ③対象特許： WIPO の特許データベースに登録されている全国際特許出願
- ④対象国： 日本、米国、欧州 (表 4-9 に示すスウェーデン、ドイツ、スイス、オーストリア、デンマーク、フィンランド、フランスのほか、欧州を代表する主要国の 1 つとして英国を加えた。)

まず、Ground Source Heat Pump とのキーワードで検索した結果は以下の通りである。

- ・日本：0 件、米国：52 件、欧州：8 件

次に、Geothermal Heat Pump とのキーワードで検索した結果は以下の通りである。

- ・日本：1 件、米国：52 件、欧州：20 件

これらの特許検索結果は、表 4-9 に示す地中熱ヒートポンプの普及台数とも整合しているように見受けられる。この結果から一概には断定はできないものの、特許の WIPO への国際出願件数で見ると、地中熱ヒートポンプに関する技術力は、米国が最も高く、欧州が続いており、日本の技術力は低いと捉えざるを得ない。

7) 需要家内エネルギーネットワーク技術

i) 技術の概要

本項では、「住宅対応 CO₂ 削減技術」として、住宅内のエネルギーネットワーク技術、すなわち住宅における太陽光発電、燃料電池、蓄電池、パワーコンディショナ等を用いた CO₂ 削減に資するエネルギーシステム技術を対象とする。

ここでの「エネルギーネットワーク」とは、電気のやり取りを行う配電線、熱や温水・冷水のやり取りを行う配管、都市ガス導管、およびこれらに接続されているエネルギー利用・変換・制御機器を意味する。エネルギーネットワークの単位としては、各戸建住宅の内部、集合住宅の各室の内部、集合住宅の内部、複数の戸建住宅等があり得る。「エネルギーネットワーク技術」とはこれらの「エネルギーネットワーク」全体を管理・制御する技術、および個々の要素技術の集合である。

住宅内エネルギーネットワーク技術の代表例としては、まず太陽光発電システムがある。住宅用太陽光発電システムは、屋根等に設置した太陽電池モジュールが発電した直流の電力をパワーコンディショナにより交流に変換し、分電盤に接続して住宅内での使用や余剰電力の商用系統への売電に供するシステムである（図 4-17）。

高性能断熱材、高性能断熱窓、パッシブソーラーシステム⁷³、高性能ヒートポンプ（エコキュート等）を採用して住宅を省エネルギー設計とし、太陽光発電システムによる年間の発電量がエネルギー消費量を上回るいわゆる「ゼロエネルギー住宅」、「ゼロエミッション住宅（ゼロ CO₂ 住宅）」も登場している。

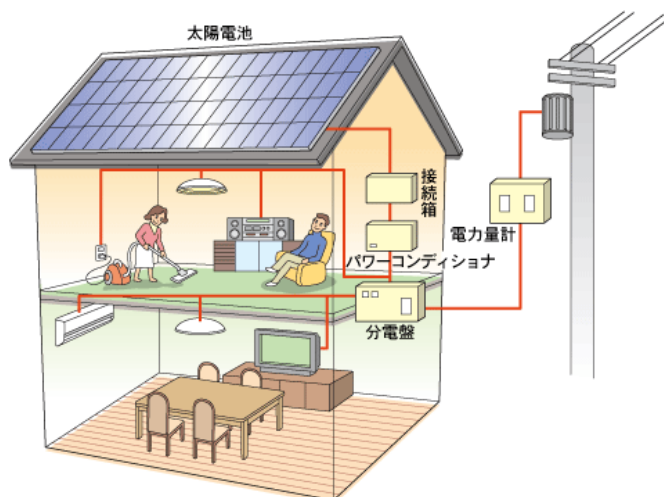


図 4-17 住宅用太陽光発電システムの仕組み [4-26]

⁷³ 太陽熱を取り込むのに動力を使って機械的に行うシステムをアクティブソーラーシステム（Active Solar System）と呼び、そうでないものをパッシブソーラーシステム（Passive Solar System）と呼ぶ。パッシブソーラーシステムには、グリーンハウス方式（家の南側に温室をつくる方式）、ダイレクトゲイン方式（南向きの窓から入射する太陽熱を部屋の石やコンクリートなど蓄熱性のある床や壁に貯えさせる方式）などがある。

一方、電源にマイクロガスエンジンを用いたエコウィルがある程度普及しており、最近では燃料電池を用いたエネファームが販売開始されている。これら住宅用電力システムは太陽光発電システムとほぼ同様の構成となっているが、燃料として都市ガスを用いる点、コージェネレーションにより発電の際に生じた熱を活用する点に特徴がある。エコウィルと太陽光発電、エネファームと太陽光発電を組み合わせたハイブリッドシステム（いわゆるダブル発電）も開発・提供されている。

また、蓄電池を設けて昼間に太陽光発電や風力発電で発電した電力を蓄電し、夜間に放電して利用するシステムが開発されており、電力系統が存在しない地域（例：日本では山小屋、海外では発展途上国や離島）等で使用されている。

住宅用太陽光発電システムの場合、停電時には専用のコンセントで電気を使用できるようにしている場合がある。一方、エコウィルやエネファームは停電時には使用できないため、蓄電池等を活用して停電時にも独立運転できるシステムも研究されている。

また、上記の発電システムと HEMS を組み合わせたいわゆる「スマートエネルギーハウス」、EV やプラグイン HEV の充電を可能とするシステム、直流配電によるシステム等も検討・開発されている。

ii) 日本における研究開発動向

NEDO と産業技術総合研究所は、北海道洞爺湖サミットにおいて、国際メディアセンターに隣接する形で、太陽光発電、燃料電池、有機 EL 照明等の先端技術を備えた住宅「ゼロエミッションハウス」を 2008 年 6 月に設置し、内外の報道関係者等に対して展示を行った。

諏訪東京理科大学の沖村らは、太陽光発電と燃料電池を組み合わせた住宅用エネルギーシステムについて研究を行っている。具体的には、住宅が電力系統やガス供給網から完全に独立した場合を想定し、その場合の太陽光発電と燃料電池による住宅へのエネルギー供給方法について検討している。太陽光発電による電力が住宅の電力需要を上回った場合、ヒートポンプを駆動して蓄熱し、さらに余剰電力で水素を生成して貯蔵し、必要な場合には水素を使って燃料電池で発電し、余熱も利用する。

10 軒の一般住宅で構成される小コミュニティを対象に、各戸に太陽光発電を設置して水素モジュールは共用する集中設置方式と、個別の住宅にそれぞれシステムを設置する分散設置方式を検討した。日射などの環境データや住宅の負荷を想定してシミュレーションを行い、システムの設計パラメータや運転パラメータを検討した。この結果、システム構成機器が小さくなる点で集中方式が有利としている。

積水ハウスと大阪ガスは、燃料電池・太陽電池・蓄電池を設置した次世代の家庭用エネルギー管理システムにより、将来のスマートグリッドや低炭素社会における家庭のエネルギー利用の様々な組み合わせにおける管理などを実証実験するスマートハウスを建設し、その実証実験を開始することとしている（2009 年 12 月発表）。

パナソニック電工では、照明やセキュリティシステムを遠隔操作できるホームネットワークシステムを発展させたエコマネージメントシステム等の HEMS や直流配電システムを開発している。一般家庭の部屋別や電気回路毎の電気使用量を「見える化」したコントロールパネル、接続機器の一括制御機能や省エネルギーアドバンス機能、太陽光発電との連携機能等を有している。ガスや水道、燃料電

池等を含めたエネルギー管理システムや、太陽光発電の直流電力を液晶テレビやパソコン等内部電圧が直流の機器に直接供給して交流への変換ロスを軽減する AC-DC ハイブリッド配線システムについても研究開発を行っている。

iii) 米国における研究開発動向

○研究開発動向

NREL では、EV やプラグイン HEV の充電に適したスマートハウスの研究を行っている(2009年)。米国ではエネルギー消費の 29% を輸送部門が占めているが、同部門のエネルギー効率改善に資する EV や PHEV が普及しようとしている。これらのインフラとして、電力系統や住宅の設計も変わろうとしている。住宅に太陽光発電と EV や PHEV の充電設備を備えたスマートハウスについては、消費者だけでなく連邦政府、地方自治体、自動車メーカー、ハウスメーカー、建築設計者、電力会社等も関心を寄せている。

米国ではスマートグリッドに関する取組が非常に活発となっている。その一部として、標準化の取組がある。たとえば、米国電気電子学会 (The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., IEEE) は 2009 年 3 月に、スマートグリッド関連システムの互換性の実現を目指す WG 「P2030」を設立した。2011 年 3 月に関連標準を IEEE 全体での投票に付すことを目指している。また、「地域的なスマートグリッド用の無線通信網」に関する標準では、既に標準化されている IEEE 802.15.4 (通称 ZigBee) の物理層を拡張し、数キロメートルの範囲の地域的な通信をカバーできる無線通信方式の標準化をめざして、802.15WG 内に「802.15.4g」(SUN : Smart Utility Network) というタスクグループが設立された。

現在の電力システムは基本的に、発電所から送電線を経由して、各地域へ配電され、各住宅等に電力が供給される仕組みとなっている。しかし、スマートグリッドの環境では、特に、再生可能エネルギーとして太陽光発電や風力発電が地域的に行われることを想定して、住宅やそこに設置されたスマートメータと、その地域における電力需給の制御センターの間で、双方向通信による制御が重要となってくる。そのため 802.15.4g では、その通信部分に焦点を当てて標準化が進められている。

○普及動向

米国では、官民の協力により、グリーンビルディング (環境配慮型建築) の開発や施工が行われている。その一環として、ゼロエネルギー住宅の開発や施工が 5 年ほど前から広がりを見せている。その背景にあるのは、深刻化する米国のエネルギー事情である。米国でのエネルギーコストはこの 10 年で倍増した。エネルギー利用の 40% を占めると推定されているのは、住宅でのエネルギー消費である。

ゼロエネルギー住宅は、光熱費が抑えられ、補助金が出るなどのメリットがあるため、消費者の関心も高く、取り扱う住宅メーカーの数も増えている。

一方で、ゼロエネルギー住宅の高い建築費が今後の課題となっている。たとえば、太陽電池パネルを屋根に設置するには約 90 万円かかる。マサチューセッツ州グリーンフィールドの建築会社、ルーラ

ル・ディベロップメントは、ゼロエネルギー住宅 20 戸の建築を計画しているが、同社のゼロエネルギー住宅は、初期コストが従来の住宅より 15% も割高となる。しかし、同社の住宅は、年間約 24 万円以上になる光熱費を、年間 6.3 万円程度にまで削減することができるため、約 12 年で元が取れ、同社が現在までに完成させたゼロエネルギー住宅はすべて売約済みとのことである。ゼロエネルギー住宅の建築費は、環境配慮型建物が主流になるにつれて下がる傾向にある。

iv) 欧州における研究開発動向

ドイツのフラウンホーファー研究所 (Fraunhofer-Gesellschaft, FhG) は、大学とも連携をとり、住宅用エネルギーシステムや自然エネルギーシステムについて研究開発を行っている。以前から自然エネルギー利用の研究が盛んであり、近年はゼロエネルギー住宅の研究が進められている。このほかスウェーデンでもゼロエネルギー住宅の研究が進められている。

マイクログリッド⁷⁴については、EU のフレームワークプログラムにおいて、FP5 から精力的な研究開発が継続されている。FP5、FP6 で実施された複数のプロジェクトについては多くの成果が得られ、公表されている。

現在は FP7 において、「More Microgrids」と称する研究開発プロジェクトが実施されている。これはオランダにおける住宅用マイクログリッドに関する実証研究で、図 4-18、図 4-19 に示す自立型の住宅用電力システムが設置され、住宅の屋根に設置した太陽光発電と、周辺に設置されたコンバータや制御装置を用いて、停電時にも自立的に運転できるシステムに関する実証試験が行われている。

⁷⁴ 種々の発電設備等（太陽光発電、天然ガスコージェネレーション、燃料電池等）を組み合わせ、IT 技術を活用して制御・運用し、安定した電力・熱供給を行うシステム。対象となるエリア/建築物は、コミュニティー単位から工業団地、住宅団地、業務用・産業用建築物、マンション、戸建住宅まで様々である。

Holiday park provides its own energy

How does the autonomous electricity grid work?

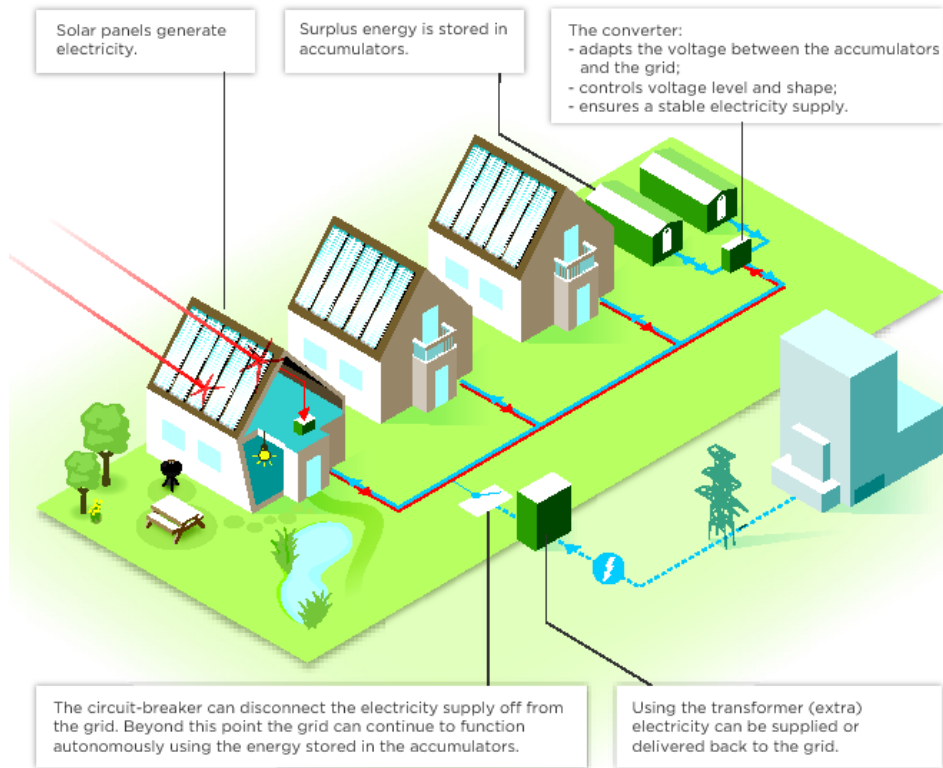


図 4-18 EU の More Microgrids プロジェクトにおける住宅用マイクログリッドのコンセプト [4-27]



図 4-19 オランダにおける More Microgrids 実証施設（住宅）の外観 [4-27]

v) その他の国々における研究開発動向

カナダのクイーンズ大学・ピアース教授らは、住宅用の太陽光発電と小型コージェネレーションのハイブリッドシステムを研究している [4-28]。代表的な戸建て住宅での日射量と電力・熱需要の時間的な分布を分析した結果、コージェネレーションと太陽光発電をハイブリッド化すると、従来システムに比べて高いエネルギー効率が達成できることが示されている。具体的には、従来の商用電力と都市ガスによる住宅用エネルギーシステムの総合エネルギー効率が約 35% であるのに対し、太陽光発電と小型コージェネレーションのハイブリッドシステムの場合は約 84% と高いエネルギー効率が実現されるとしている。

カナダのダルハウジー大学のシェド氏は、建築物エネルギーシミュレーションによりカナダ住宅部門の太陽光発電・風力発電のポテンシャルを分析している (2009 年)。住宅部門のエネルギー消費および温室効果ガス排出量は増大を続けており、その対策のため再生エネルギーの利用が望まれている。このためカナダの住宅を対象に、太陽光発電/風力発電ハイブリッドシステムを導入した場合の効果をシミュレーションにより解析している。解析のために、高分解能建築物エネルギーシミュレーションソフトウェア ESP-r を使用した。まず基本ケースとして太陽光発電と風力発電がない場合を検討し、次に太陽光発電と風力発電を設けた場合についてシミュレーションを行った。この結果、太陽光発電/風力発電ハイブリッドシステムの導入により、燃料コストおよび CO₂ 排出量が相当程度低減するとされている。

vi) 国際的な比較

日・米・欧それぞれにおいてゼロエネルギー住宅 (ゼロエミッション住宅) や住宅用エネルギーシステムの研究開発が進められている。

日本では住宅メーカーが実際にゼロエネルギー住宅を販売しており、その点では一歩抜きん出ている。また、マイクロガスエンジンや燃料電池を活用した実用システムでは、日本が最も進んでいる。

米国は、住宅だけでなく業務部門も含めたグリーン建築物に関する取組が最も進んでいる。たとえば LEED (The Leadership in Energy and Environmental Design) と称する建築物の省エネルギー基準があり、ゼネコン、省エネルギーコンサルタント、建材メーカー等がその認証取得に向けて積極的に取り組んでいる。

米国はまた、スマートグリッドに関する取組が最も進んでいる。スマートグリッドは発電所から住宅を含む最終需要家までをカバーした幅広い概念であるが、住宅と商用系統との通信・連系という観点から、標準化を含む取組が活発である。また以前からマイクログリッドに関する研究開発において欧・日に先行してきた。ただし最近では、日本においてもマイクログリッドに関する実証研究が官民ともに活発に行われており、数年前に比べて日本の技術力は向上している。

欧州は、EU のプロジェクトや公的研究機関が、地中熱ヒートポンプを活用したゼロエネルギー住宅や住宅用マイクログリッドなどユニークな取組を行っている。

(2) ナノテクノロジー・材料・製造分野

1) スーパーキャパシタ

i) 概要

電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor, EDLC) は、活性炭等の炭素系材料と電解質界面に生じる電気二重層を電荷貯蔵に利用するもので、特性は誘電体をもつ従来のコンデンサと二次電池の中間に位置する。EDLC の国内市場規模は、小型 (<1 F)、中型 (1~100 F 級)、大型 (100~5000 F) を合わせて、2005 年で 460 億円、8.3 億個と推計されている。このうち大型は、電力貯蔵装置や無停電電源装置 (Uninterruptible Power Supply, UPS)、太陽光/風力発電の電力調整、HEV や FCEV の補助電源、鉄道、産業機器等の用途が想定されている。

市販の EDLC の大部分は活性炭をベースとした電極を用いている。一方、導電性金属酸化物や導電性有機材料を用いた超大容量・高エネルギー密度のキャパシタが開発および一部で実用化されており、レドックスキャパシタ、電気化学スーパーキャパシタ、ウルトラキャパシタ等と呼ばれる。なお海外では EDLC 自体をスーパーキャパシタ、電気化学キャパシタ、ウルトラキャパシタと呼ぶことも多い。

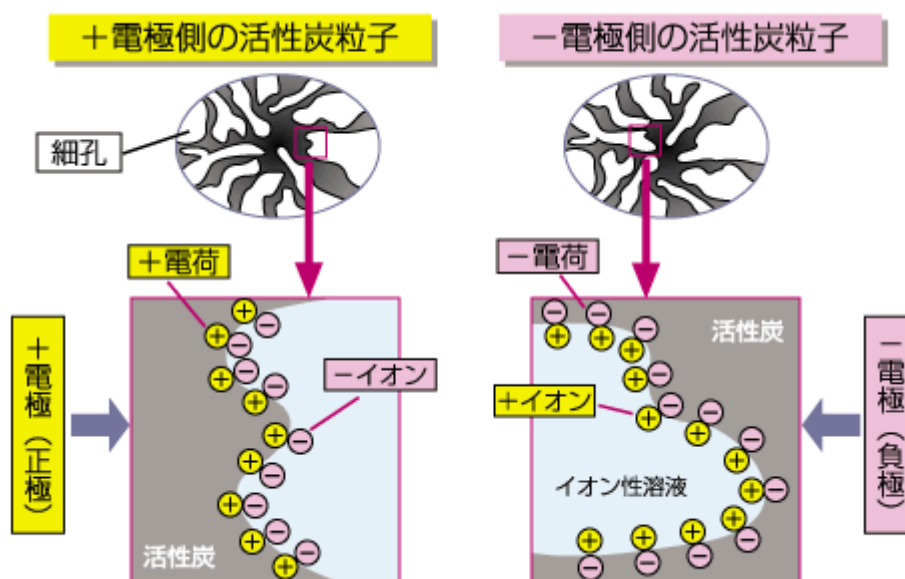


図 4-20 スーパーキャパシタの原理 [4-29]

スーパーキャパシタの原理を図 4-20 に示す。スーパーキャパシタは、固体と液体のような異なる二相が接する面に電気が蓄えられるという「電気二重層」の現象を利用している。

充電時に、イオン性の溶液中に一对の電極を浸して電圧をかけると、それぞれの電極の表面にイオンが吸着され、プラスとマイナスの電気が蓄えられる。一方、放電時に外部に電気を放出すると、正

負のイオンは電極から離れて中和状態に戻る。これを繰り返すことにより、充放電が行われる。

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

NEDO からエネルギー総合工学研究所、(株)パワーシステムへの委託により、1997 年度から 3 年間にわたり、電力貯蔵用 EDLC の実証試験が行われた。(株)パワーシステムは ECS (Energy Capacitor System) と呼ぶ EDLC の充放電を電子回路により最適化して総合的に高いエネルギー密度と充放電効率を実現する技術 (特許) を保有しており、これをベースに実際のシステムに発展させる形で、システム設計および実証試験が行われた。

(株)パワーシステムでは現在、各種用途 (HEV/FCEV 用、鉄道用、太陽光/風力発電用、UPS 用等) に使用できる高出力タイプ、高絶縁耐圧タイプ、超高出力タイプ、高容量タイプのキャパシタモジュールを製品化しており、さらに高性能なタイプを開発している。

NEDO の電気自動車実用化に関する ACE プロジェクト (1997 年～) でも HEV 用電源として EDLC が採用された。日産ディーゼルはこの成果をもとに、2002 年 6 月に HEV トラックを実用化した。NEDO の太陽光発電出力平準化試験は太陽光発電の電力貯蔵用としての EDLC を対象としている。

NEDO は現在、カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト (2006～2010 年度) を実施している。本プロジェクトでは、エネルギー密度 20 Wh/kg、パワー密度 10kW/kg、寿命 15 年をデバイスレベルで達成することを目標として、電極材料として活性炭の代わりにカーボンナノチューブを用いることにより、高出力、高エネルギー密度、長寿命の電気二重層キャパシタを開発している。このほか、NEDO では自動車用キャパシタに関する標準化に関する検討を 2009 年度に実施している。

②公的研究機関・大学における研究開発

a. 産業技術総合研究所における研究開発

産業技術総合研究所は、関西電力、関西新技術研究所と共同で、電気化学スーパーキャパシタに関する研究を行った。本研究は、従来の物理吸着を利用した炭素系キャパシタと異なり電気化学反応を含むもので、正負極材料にナノ構造の巨大比表面積構造体を利用することにより、炭素系 EDLC に比べて出力密度とエネルギー密度の飛躍的向上を図る。電力負荷平準化、電気自動車等への適用を想定しており、HEV で使用するレベル (出力密度: 5 kW/kg 以上、エネルギー密度: 50 Wh/kg 以上) を目標に掲げたものである。

b. その他の公的研究機関・大学における研究開発

要素研究として、電極材料へのカーボンナノチューブの適用、エネルギー密度向上に大きく寄与する電解液耐電圧の向上のための、常温溶融塩など新規電解質の開発 [萩原ら (2002)、武田ら (2002) 等]、2 重層の容量向上のための従来の活性炭と異なる新規多孔質炭素の開発 (群馬大学・白石ら)、等の研究・開発が行われている。

(その他の研究開発例)

このほか、たとえば以下の研究者、研究機関が研究開発を行っている。

- 東京電機大学 (充放電チョップ回路を用いた EDLC を有する単相 UPS の制御 等)
- 東京農工大学 (エネルギー密度が 20 Wh/l の EDLC「ナノハイブリッド・キャパシタ」の開発 等)
- 東北大学 (単層カーボンナノチューブの EDLC への適用 等)
- 大阪工業大学 (古紙や植物質から作製した活性炭の EDLC の電極への適用 等)
- 山口大学 (電解コンデンサとコンバータを用いた EDLC シミュレータの開発 等)
- 関西大学 (EDLC の高出力電極や高機能電解質の開発、ハイブリッド EDLC の開発 等)
- 東京理科大学 (水素製造用小型風力発電システムにおける適正 EDLC 容量の検討)
- 鉄道総合技術研究所 (EDLC と蓄電池を併用した電気鉄道用の電力貯蔵装置の研究 等)

③民間企業における研究開発

松下電子部品は、UP-Cap シリーズを実用化し、電極の高密度化と低抵抗化により大出力 EDLC を実現した。うち UPB シリーズはパワー密度 1.2 kW/L、200 A×10 秒間放電という瞬発力で EV、HEV や産業機器の動力源に、UPA シリーズは 2000 F 級の大容量で電流を長時間供給でき、太陽電池や風力発電の電力調整用に適している。

本田は、FCEV 用の補助電源として EDLC を開発し、2002 年 12 月からリース販売している FCX⁷⁵ に搭載した。EDLC は減速時の回生エネルギーを蓄電し、加速時に瞬発的なパワーを供給する。EDLC は、アルミケース、封口板、巻き電極体 (活性炭、アルミ箔、セパレータ)、巻き芯、正/負極集電板、端子、電解液から構成される。封口板はトーノ精密と東亜電化、電極は大同メタル工業がホンダと共同開発した。

旭硝子は、従来品の 3 倍近くまでエネルギー密度を向上させた新型 EDLC の開発に成功した。新型キャパシタは、セルベースで 13 F/cc の高容量密度と世界最高レベルの耐電圧 3.0 V を有し、二次電池と比較したエネルギー不足を解消し、1,000 W/l という高出力域において、10 Wh/l の高エネルギー密度を実現した。当面はミニ HEV 用をターゲットとしている。

(その他の EDLC 開発企業の例)

- 日本ケミコン(株)、NEC ラミリオンエナジー(株)、NEC トーキン(株)、エルナー(株)、(株)指月電気製作所、ニチコン(株)、(株)明電舎、ダイソー(株)、日立マクセル、京セラ、富士電気化学(株)、(株)岡村研究所、クラレケミカル(株)、いすゞ自動車(株)、三洋化成工業(株)、三菱化学(株)、積水樹脂(株)、日本電信電話(株)等

iii) 米国における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

DOE のエネルギー効率・再生可能エネルギー局 (Energy Efficiency and Renewable Energy,

⁷⁵ ホンダが開発した燃料電池自動車。

EERE) ではエネルギー貯蔵プログラム (Energy Storage Program) を展開しており、その開発対象には EDLC が含まれる。

EERE では FCVT プログラム (Freedom CAR and Vehicle Technologies Program) を実施し、その中で NREL、ANL、ORNL、アイダホ国立工学・環境研究所 (Idaho National Laboratory, INL)、USABC、SatCon Technology 社⁷⁶、Silicon Power 社 (略称 SPCO)、Semikron 社、SNL、ローレンス・リヴァモア国立研究所 (Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)、Ames Laboratory、Delphi 社、Delco-Remy 社、Lynx Motor Technologies 社、ICS 社 (Industrial Ceramic Solutions) 等が HEV 等自動車用のウルトラキャパシタの研究開発を行った。なお、FCVT プログラムの前身である PNGV (Partnership for a New Generation of Vehicles) プロジェクトにおいてもキャパシタに関する研究開発が行われていた。

EPRI は、風力発電を系統連系する際の電力貯蔵装置として、EDLC に関する評価を行っている。

キャパシタ (スーパーキャパシタ) は国防関係のプロジェクトでも開発されている。その用途は戦車や潜水艦のエンジンの起動用、ミサイルにおける二次電池の代替等である。

② 公的研究機関・大学における研究開発

NREL、ORNL、EPRI PEAC (EPRI の子会社) は 3kW-固体高分子 (Polymer Electrolyte Membrane, PEM) 燃料電池とウルトラキャパシタを組み合わせた分散電源システムを開発している。目的は、高速応答かつ負荷適応性の高い系統連系型ハイブリッド燃料電池システム (分散電源および UPS 用) の開発である。

EPRI では、電力貯蔵用のキャパシタ (1998 年の TR-108888)、UPS 用の PEM 燃料電池/キャパシタのハイブリッドシステム (1998 年の TR-111678、2003 年の分散電源プログラム 101.0 等)、配電所用の鉛電池の新型電力貯蔵装置への代替 (2006 年までの予定で進行中、P37.090/P37.010/P95.007)、送配電網のための新世代の先進パワーエレクトロニクスおよび電力貯蔵に関するフィールド実証 (2003 年の送電システムに関するプログラム 038.0) など電力分野のキャパシタに関する多くの研究を行っている。

イリノイ工科大学では IPRO-314 と呼ぶプロジェクトチームにより HEV 用のウルトラキャパシタを開発している。Florida A&M University and Florida State University の Jim P. Zheng、T. Y. Chang、X. Wang 氏らもキャパシタに関する研究を行っている。

SBIR の支援により、キャパシタに関する研究開発が複数行われており、その中には Centre Capacitor, Inc.による高分子を用いた多重層キャパシタの開発等が含まれる。

③ 民間企業における研究開発

マクスウェル社では 2004 年に kF 級の静電容量の EDLC を開発しており、製品として PC2500 (2.7 kF, 2.5 V) 等がある。同社のキャパシタ技術は BOOSTCAP と呼ばれ、既存の二次電池の 10 倍の容量と持続時間を有している。同社では携帯機器・玩具用の小容量セルと HEV 用の大容量セルを開発

⁷⁶ <http://www.satcon.com>

しており、後者のサイズは2×2×6インチで、最大500セルまでのモジュール化が可能である。

このほか小容量EDLCのメーカとしては、AVX社（1990年より京セラの子会社）、クーパー・バスマン社〔発泡性エアロゲル状の炭素電極を採用し、ESR（直列等価抵抗）が低い〕がある。ロードアイランド州に本拠地を置くEvans Capacitor⁷⁷が、航空・国防用向け小容量キャパシタの開発・製品化を行っている。タンタル電解コンデンサの湿式正極とEDLCの陰極をハイブリッド化することにより、最大2 J/cc、500 J/kgの高エネルギー密度を実現している。

iv) 欧州における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発

EUのFP4の下のJOULEプログラムでは、仏SAFT社を筆頭に、Development of Supercapacitors for the Electric Vehicleと称するプロジェクトが1996～99年に、また英ERA Technology社を筆頭に、Supercapacitor Development for Automotive Systemsと称するプロジェクトが1998～2001年に実施された。FP4の下のBRITE/EURAM4プログラムでは、仏Alcatel社を筆頭に、Advanced Technologies Supercapacitorsと称するプロジェクトが1997～99年に、OPTELEC (Energy optimised traction system for electric vehicle) プロジェクトが、1998～2001年に実施された。これらでは、EV等の自動車用スーパーキャパシタ、スーパーキャパシタを活用したEVのトラクション制御システム等が開発された。

FP5の下のEESDプログラムでは、独FEV Motorentchnik社を筆頭に、2001～5年の計画でEST (Electric Starting Torque with Short Term Supercapacitor Energy Storage for Boosting Small Lightweight Gasoline Engine Powertrains) プロジェクトが、また、オランダのEnergy Research Centre of The Netherlandsを筆頭に、2001～4年の計画でFRESCO (European Development of a Fuel-cell, Reduced-emission Scooter) プロジェクトが実施された。これらのプロジェクトでは、自動車のエンジン起動時のスーパーキャパシタによるトルク改善、燃料電池スクータ用のスーパーキャパシタ等に関する研究開発が行われた。

FP6（第6次フレームワークプログラム）の下のSUSTDEVプログラムでは、Use of Graphite and Carbon black in Batteries, Fuel Cells and Supercapacitorsと称するスーパーキャパシタ用の電極の開発が実施された。

②公的研究機関・大学における研究開発

ロシア科学アカデミー初のベンチャー企業であるESMA社（1993年にロシアで創立）は、1996年からキャパシタの製造、1997年からロシアでの販売を開始し、2000年から米国での販売、2001年からUPSの販売を開始し、2002年には新世代のスーパーキャパシタを開発している。独フォルクスワーゲン社や仏ルノー社は、HEV用のEDLCを開発している。また、ボローニャ大学のマストラゴスティン教授がキャパシタの研究を行っている。

⁷⁷ <http://www.evanscap.com>

③民間企業における研究開発

Alcatel 社等は、EU の FP3 (第3次フレームワークプログラム) の下の JOULE2 プログラムからの支援を受けて、EV 用の 2000 W/kg、30 kJ/kg、100,000 サイクル級の全固体高分子スーパーキャパシタに関する研究を 1992~94 年に行った。

独エプコス社 (松下電器産業と独ジーメンス社の合併) が最大 5000 F、850 g、7.4~16 kW/kg、5.1 Wh/kg の大容量 EDLC を市場化しており、ジーメンスのハイブリッド・バスに搭載されている。仏 SAFT 社は大容量キャパシタを開発した (製品名 : D.L. SC3500F 等)。ただし同社の主力製品はあくまで Ni/Li/Ag/Zn 系の二次電池である。

v) 国際的な比較

日米欧とも、特に自動車用のアプリケーションを中心として、実用化や研究開発が積極的に行われている。

各国の特徴的な分野を見ると、欧州では自動車用、米国では自動車と国防向けの研究開発が多い。

一方、日本では HEV、FCEV 等の自動車用だけでなく、鉄道用、太陽光/風力発電の出力平滑化用、UPS 用、瞬時電圧低下補償装置用等、幅広い用途への適用に向けた研究開発が行われており、研究開発の対象としている用途分野の幅が広い点に特徴がある。

研究開発動向を総合的に勘案すると、国による注力分野の特徴はあるものの、日米欧の研究開発、実用化の活発度や水準は、総合的にはほぼ横並びとみることができる。

これを特許件数面から傍証するため、WIPO の特許データベース (1978~2010 年) により、WIPO に国際出願された特許の件数を次の①~④の条件のもとで比較した。

- ①キーワード : "Electric Double Layer Capacitor" or "EDLC" or "Electrochemical Capacitor"
- ②検索範囲 : 請求項 (クレーム)
- ③対象特許 : WIPO の特許データベースに登録されている全国際特許出願
- ④対象国 : 日本、米国、欧州 (英独仏の主要3カ国に、先述の研究開発動向を踏まえてオランダ、イタリアを追加)

検索結果は、日本 : 11 件、米国 : 17 件、欧州 9 件となった。この件数を見ると、米国が最も多いが、この結果は多少割り引いてみる必要がある。WIPO の特許データベースに登録されている全国際特許日本 : 222,394 件、米国 : 546,454 件、欧州 (英独仏蘭伊) : 450,898 件である。このように、全特許ベースでは米国、欧州の国際出願件数は日本のその2倍以上であり、全特許に関する WIPO への国際特許出願の活発度は米国、次いで欧州が日本より高いと言える。このため、上記の EDLC に関する検索結果は、日米欧がほぼ横並びと解釈して差し支えないものと考えられる。

2) レアメタル（アース）回収・代替技術

i) 技術の概要

レアメタルは、非鉄金属のうち、国際的な賦存量・産出量や流通量・使用量が少なく希少な金属である。どの元素をレアメタルと呼ぶかについてコンセンサスはないが、近年は、経済産業省の定義に従って、図 4-21 に示される 47 の金属元素をレアメタルと呼ぶ場合が多い。図中の 17 種類の希土類元素（レアアース）を 1 種類とカウントして 31 元素と数える場合もある。レアアースをレアメタルに含める場合と、これらを区別し、レアメタルにレアアースを含めない場合がある。自然界に存在する元素 89 種類のうち、半分以上の元素がレアメタルである。

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H			レアメタル			レアアース			ベース メタル								2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt									
			* ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			** アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

注) 本表におけるレアメタルは、レアアースを除くものを青色で示した。

図 4-21 元素表におけるレアメタル、レアアース

レアメタルは、高品質・高機能製品の多くをはじめ、幅広い産業分野で利用されている。このうち、機能性部材に利用されるレアメタルの事例を表 4-10 に示す。

表 4-10 機能性部材に使用されるレアメタルの事例

鉱種	用途
インジウム(In)	液晶用材料、蛍光体、低融点合金、半導体素子、撮像管
タンタル(Ta)	Ta コンデンサ(携帯電話、デジタルカメラ、パソコン)
ニオブ(Nb)	超伝導材、真空グレード Nb 合金(航空機エンジン)
レアアース(RE)	永久磁石、セラミックコンデンサ、ブラウン管ガラス
ガリウム(Ga)	半導体(GaAs)、LED(Light Emitting Diode)チップ ⁷⁸ (GaP)
リチウム(Li)	Li 電池正極材、弾性表面波フィルタ
白金族(PGM ⁷⁸)	燃料電池触媒、自動車用排ガス触媒、電気接点、熱伝対
ストロンチウム(Sr)	ブラウン管、フェライト磁性材料、光ガラス
ジルコニウム(Zr)	圧電セラミックス、核燃料被覆管

レアメタル（アース）は、国際的な賦存量・産出量が少なくかつ偏在しているため、国際的な価格の上下が著しく、近年は価格高騰に見舞われたこともあり、携帯電話等に含まれるレアメタルを回収・リサイクル・再利用したり、レアメタルを使用しない方向で技術開発を行うことが強く求められている。

レアメタルの回収・リサイクル技術については、個々のレアメタルの物理・化学的性状の違いや、レアメタル含有製品の含有率、利用方法、廃棄・回収事情の違いなどに基づいて、様々な技術が開発されている。たとえば自動車、機械、電気・電子機器、半導体などの表面処理に重要な役割を果たしているニッケル（Ni）めっきについては、めっき加工後の廃液処理の経費が高騰していることと相まって、廃液から Ni を選択的に分離して回収する技術の研究開発が進められている。

レアメタルの代替技術についても、個々の製品やレアメタルの種類により技術は異なるが、たとえば液晶テレビの材料に使われる In や、超硬工具を作るタングステン（W）、パソコンのハードディスクのモーターに使われる Dy などの代替品として、高性能コンピュータでレアメタルの原子配列を解析して類似の材料を探したり、強度を増したセラミックスで代替を目指す研究開発が行われている。

ii) 日本における研究開発動向

日本における研究開発例を経済産業省、文部科学省のプロジェクトから概観する。経済産業省の関連プロジェクトは以下の通りである。

⁷⁸ 白金族元素（Platinum Group Metals、PGM）は、元素のうち周期表において第 5 および第 6 周期、第 8、9、10 族に位置する元素、すなわち Ru、ロジウム（Rh）、パラジウム（Pd）、オスミウム（Os）、イリジウム（Ir）、白金（Pt）の総称。

○ 経済産業省：希少金属等高効率回収システム技術開発（2007～2010年度）

鉱石等原料を補完しレアメタルのリサイクルを推進するため、廃小型電子・電気機器、廃超硬工具からのレアメタルの効率的なリサイクル技術の研究開発を実施している。

- ・実施者：（独）石油天然ガス・金属鉱物資源機構を通じて公募
- ・研究開発テーマ： タンタル（Ta）コンデンサから Ta を回収するにあたってのアンチモン（Sb）等の不純物除去技術の開発、およびその熱力学的挙動の解析等

○ 経済産業省/NEDO：希少金属代替材料開発プロジェクト（2007～2013年度）

液晶パネル等に使用される透明電極向け In、希土類磁石向け Dy および超硬工具向け W の代替／使用量低減に向けた研究開発を実施するとともに、In および W の代替に向けた研究開発を 2007 年度から実施している。

①透明電極向けインジウム使用量低減技術開発

- a. テーマリーダー：国立大学法人東北大学 中村 崇 教授
- b. 実施体制：国立大学法人東北大学、株式会社アルバック、三井金属鉱業株式会社、DOWA エレクトロニクス株式会社

②透明電極向けインジウム代替材料開発

- a. 酸化亜鉛系混晶材料による高性能透明電極用材料の開発
 - ・テーマリーダー：独立行政法人産業技術総合研究所 柴田 肇 主任研究員
 - ・実施体制：独立行政法人産業技術総合研究所
- b. 酸化抑制型マグネトロンスパッタ製膜技術(材料技術を含む)の開発
 - ・テーマリーダー：学校法人金沢工業大学 南 内嗣 教授
 - ・実施体制：学校法人金沢工業大学
- c. 酸化亜鉛系液晶ディスプレイの開発
 - ・テーマリーダー：学校法人高知工科大学 山本哲也 教授
 - ・実施体制：学校法人高知工科大学、アルプス電気株式会社、カシオ計算機株式会社、ジオマテック株式会社、株式会社 ZnO ラボ、ハクスイテック株式会社、三菱瓦斯化学株式会社

③希土類磁石向けディスプロシウム使用量低減技術開発

- a. テーマリーダー：国立大学法人東北大学 杉本 諭 教授
- b. 実施体制：国立大学法人東北大学、国立大学法人山形大学、独立行政法人物質・材料研究機構、独立行政法人日本原子力研究開発機構、株式会社三徳、インターメタリックス株式会社、TDK 株式会社

○ 経済産業省：産業技術研究開発委託費（レアメタル抽出技術開発）（2009年度）

廃電子機器等の廃製品の各種部品等には Ni、クロム（Cr）、モリブデン（Mo）、セレン（Se）およびレアアース等のレアメタルが使用されているが、その含有量は低く、現状の手法では処理に要する

コストに見合う回収量とならないため、その多くは埋立て処理されている。このため、現状の手法では経済的な抽出が困難なレアメタルを、生物学的な手法等を用いて低環境負荷、低コストで高効率な回収が可能となるようリサイクル手法を確立することが必要である。

このため、廃製品中のレアメタルの含有量が低く現状の手法では経済的に抽出が困難なレアメタルを生物学的手法等により、低環境負荷、低コストで高効率な回収が可能となるリサイクル手法を開発する。

・実施者： 芝浦工業大学、秋田大学

○ 経済産業省：産業技術研究開発委託費（リチウムイオン電池からのレアメタルリサイクル技術開発事業）（2009年度）

Li は現在、リチウムイオン電池や耐熱ガラス、冷凍機の吸収剤等に使用されており、今後、EV などの次世代自動車用リチウムイオン電池を中心に大幅な需要増が見込まれる。しかし、我が国は Li の全量を輸入に依存しており、リチウムイオン電池から Li を回収して再利用するリサイクル技術は確立されていない。

このため、将来、低炭素社会においてその重要性がますます増大することが見込まれる Li について、リサイクル技術が確立されることにより我が国の鉱物資源の安定供給確保および循環型社会システム構築に大きく寄与することが期待される。

我が国の鉱物資源の安定供給確保と循環型社会システム構築を図る観点から、使用済み自動車用リチウムイオン電池およびリチウムイオン電池製造工程内で発生する廃正極材からリチウム等レアメタルを回収し、リチウムイオン電池に再利用するための技術を開発する。

・実施者： 日鉱金属株式会社

○ 経済産業省：レアメタル等高効率抽出・分離技術開発事業（2008年度）

現在1年間に買いかえられる携帯電話と PHS はおよそ 5,000 万台といわれているが、廃携帯電話からの金属資源回収は、金・銀・銅と一部のレアメタルに限られ、残りは回収されないままとなっている。この廃携帯電話から未回収となっている金属資源には、液晶の In、振動モーター等の Nd、W、カメラの Ni 等多くのレアメタルが含まれている。このレアメタルを効率的に回収できる技術の確立により、廃棄物の発生抑制、天然資源の消費抑制、環境への負荷低減が実現できるため、携帯電話に含まれるが現在未回収となっているレアメタルを対象とした回収技術の開発を行う。

未回収となっているレアメタルを廃携帯電話から商業的に実用化されている方法等を活用し、経済的に分離・抽出回収する技術を確立する。

文部科学省の関連プロジェクトは以下の通りである。

○ 文科省「元素戦略」19年度採択テーマ

● 亜鉛 (Zn) に替わる溶融アルミニウム (Al) 合金系めっきによる表面処理鋼板の開発：水流徹（東

工大)：東北大学、物質・材料研究機構、JFE スチール、新日本製鐵、日本軽金属：メッキ鋼板に用いられる亜鉛を代替する Al 合金系の表面処理技術を開発する。

- アルミ陽極酸化膜を用いた次世代不揮発性メモリの開発：木戸義勇（物質・材料研究機構）：日本GIT：次世代メモリ候補として有望な抵抗変化型メモリ(ReRAM)をアルミニウムの陽極酸化により実現し、環境にやさしく安価なナノ構造デバイスを開発する。
- サブナノ格子物質中における水素が誘起する新機能：岡田益男（東北大）：福山大学、岩手大学、九州大学、電気磁気材料研究所、トヨタ自動車、日鉱金属、本田技術研究所、旭エンジニアリング、フューチャープロダクト、昭栄化学工業、東芝従来：金属材料に悪影響のみを与えると考えられてきた水素の効果を多面的に理解・活用し、それぞれの材料の特性を飛躍的に向上させる可能性を追求する。
- 脱貴金属を目指すナノ粒子自己形成触媒の新規発掘：西畑保雄（JAEA）：ダイハツ工業、北興化学工業、大阪大学：自動車排出ガス浄化触媒や有機合成触媒中の貴金属の大幅削減、更には脱貴金属触媒の実用化を目指す。
- 圧電フロンティア開拓のためのバリウム系新規巨大圧電材料の創生：和田智志（山梨大）：東京工業大学、京都大学、東京理科大学、AIST、キヤノン：自動車、家電から微小電子機械(MEMS)等の革新に不可欠の新デバイス開発に向けた、有害な鉛やビスマス等を含まないバリウム系新規巨大圧電材料を創生する。
- 酸化インジウムスズ (Indium Tin Oxide, ITO) の代替としての二酸化チタン (TiO_2) 系透明導電極材料の開発：長谷川哲也 (KAST)：東京大学、旭硝子、豊田合成：ITO を TNO (二酸化チタン系透明導電体) で代替するため、スパッタ法および CVD 法による成膜プロセスを確立する。
- 低希土類元素組成高性能異方性ナノコンポジット磁石の開発：広沢哲（日立金属）：名古屋工業大学、九州工業大学、物質・材料研究機構：従来の焼結磁石と同等以上の磁石特性を低希土類元素組成で実現できる、Dy、Ndなどを低減した全く新しい磁石材料の開発を目指す。

○ 産業技術総合研究所：レアメタル回収のための生分解性吸着分離材の創製に関する研究

地球的規模の環境問題の解決策の一つとして、環境調和型資源循環技術の研究開発が考えられる。すなわち、環境破壊を最小限に食い止めるためには、有用資源を回収し、循環使用しなければならない。また、その回収技術自体も環境を汚染しないような環境調和型の技術でなければならない。

これらの観点から、当所では、半導体の性質をもつなど特異な性質を有するゲルマニウム (Ge) などの半金属元素を選択的に回収することができる分離材で、しかも、使用後の廃棄処分が容易な生分解性の天然多糖類を素材とした環境調和型の分離材を創製する研究開発を実施している。

一般に、従来の分離材は金属陽イオンを対象としているので、オキソ酸またはその陰イオンとして水溶液中に存在する半金属の分離には使用できない。分子内に複数の水素基を有する化合物は半金属と錯形成することが知られているので、本研究では、分離材をキトサンなどの多糖類の化学修飾により創製し、創製した分離材を用いてバッチ式吸着法などによる半金属の選択的分離を検討している。

iii) 米国における研究開発動向

ロスアラモス国立研究所 (Los Alamos National Laboratory, LANL) では、固体高分子形燃料電池 (Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC) カソード用の非貴金属/ヘテロ原子ポリマーのナノ化合物触媒で、低コストの新しい分野の開発が行われている [4-30],[4-31]。この触媒は、より高い酸素減少反応特性を長時間維持する能力がある。最適化を行わなくても、コバルト (Co) -ポリピロール混合触媒によって約 0.15 W/cm^2 のパワー密度を可能とする燃料電池を 100 時間以上安定して使用することができる。

DOE 傘下のエイムズ研究所 (Ames Research Center, ARC) では、水素燃料電池に使用するパラジウム (Pd) の代替金属を開発している。代替金属には、Pd より低コストで容易に入手できる材料が求められる。また、水素が通過可能で、延性を有する材料である必要がある。さらに、水素中の不純物として酸素と水蒸気が存在するため、耐酸化性を持っていなければならないことに加えて、加熱・冷却を繰り返し受けても脆性が劣化しないことが必須である。ARC ではこれらの特性を念頭に置きつつ、合金の設計を行っている。

ARC のチームは、亜鉛化合物の新しい一群を発見した。これは他の材料における幾つかの物理的特性と性質を帯びるように調整されたもので、その範囲は銅から希少元素である Pd まで、あるいは磁石、半導体さらには超電導化合物にまで及んでいる。こうした化合物の組成は約 85% が亜鉛であり、それらは大変安くユニークな特性のため、ある状態の下では、レアメタルに置き換わる可能性もある。

ライス大学とジョージア技術工学協会の科学者は、金と Pd のナノ粒子が、トリクロロエチレン (TCE) を浄化する上で、最も効果的な触媒であることを発見した。TCE は、米国の地下水中に存在する最もよく見られる毒性の強い有機有害物質の一つであり、金属電子部品を脱脂するための溶媒として広く使用されている。科学者らは、Pd 触媒の 4 形態の効果を比較した。4 形態とは、バルク Pd、酸化アルミニウム基板上的 Pd 粉末、純粋な Pd ナノ粒子および Pd 原子の薄い皮膜で覆われた金のナノ粒子からなるハイブリッドナノ粒子である。

金属粒子が徐々に小さくなるに従い、粒子中の原子は高いパーセンテージで粒子の表面に存在することが認められる。反対に粒子が大きくなると、原子は他の化学物質と接触が不可能な金属の内部に閉じこめられる。たとえば、バルク Pd では、粒子表面に存在する Pd 原子は 4% 以下だった。純粋な Pd ナノ粒子では、金属表面上に 24% が存在していた。金-Pd ナノ粒子中では、Pd 原子の 100% が反応可能な位置にある。科学者たちは、金-Pd ナノ触媒は、バルク Pd 触媒よりも約 100 倍の速さで TCE を分解することを発見した。そして、この研究は他の貴金属触媒反応の効率を向上させることに応用でき、必要な金属量を低減させることができる。他のグループにおける最近のレポートでは、ナノ粒子金属を使用することにより、同様な改善効果を見出すことができている。

ペンシルバニア州立大学の研究者らは、水素を発生させる微生物電解質セル中のプラチナ (Pt) 触媒を、効率性を落とさずにステンレス鋼ブラシと置き換える方法を見出した。ステンレス鋼ブラシカソードは、Pt 触媒カーボクロスと同じ比率と効率で水素を生産できる。研究者らは、ステンレス鋼のカソードを使用して、0.6 V の印加電圧において、約 0.19 A/リットルを発生させた。ステンレス鋼ブラシを生産するためにはより多くのステンレス鋼を必要とするものの、ステンレス鋼ブラシは、Pt

触媒カソードより 5 倍程度安い。Pt が必要なために微生物燃料電池の開発が抑制されてきたが、ステンレス鋼による代替品は科学者らの研究推進を可能にするとみられている。研究者らは、ブラシの間に取り込まれる水素気泡を最小にするなどの改良を行うことによりステンレス鋼の効率をさらに向上することができると考えている。

iv) 欧州における研究開発動向

a. 回収・リサイクル技術

カーディフ大学（ウェールズ）とバーミンガム大学（イングランド）の科学者らは、道路粉塵から高価な金属をリサイクルする方法の研究を行っている。全ての車の触媒コンバータは、Pt を使用している。しかしながら、Pt は何年もたつうちに排気パイプから徐々に抜け出てくる。研究者らは毎年、何 kg もの白金が街路や道に飛散しているの見積もっている。

科学者らは、Pt を再生使用するためのコスト効率が良く、継続可能な方法を開発するために回収に十分な高濃度で Pt が存在する場所を探そうとしている。1 つの主要な場所は、道路清掃車のコンテナである。触媒コンバータに存在する Pt、Pd と Rh は、非常に希少なもので、数 ppm 程度の低濃度の場所を採掘しても経済性がある。道路粉塵サンプルの代表的な分析値は、数百 ppb から 2ppm の希少金属含有率であった。また研究者らは、金属を捕集するバクテリアあるいは重力と磁気を使用した金属の選別を行い、様々なゴミから高価な金属を抽出している。

Chematur Engineering 社（スウェーデン）とジョンソン・マッセイ社（英国）は、超臨界水の酸化を使用し、触媒から貴金属を再生するプロセスを開発した [4-32]。一般的な触媒の再生は焼却処理によるが、この新技術は、AquaCat と呼ばれる燃焼環境の改善を提供している。すなわちその技術は、外部からの熱エネルギーをほとんど必要せず、コストの高い排気ガス処理プロセスもなくし、材料の物理的ハンドリングの総量を減らすことにより、格納を容易にしている。

ユミコア社（ベルギー、ブリュッセル）は、世界最大の携帯電話のリサイクル業者で、50,000 台の携帯電話機を処理し、金と銀をそれぞれ 1 kg ずつ抽出している。ユミコア・アントワープ工場では、年間約 250 万台の携帯電話を処理している。金は携帯電話のトラッキング回路に使用される。また、シリコンチップは腐食防止のため金に含浸される。銀はハンダ付け材料として使用されている。また携帯電話は、Pt、Pd そしてハフニウムなどの高価な金属を少量含んでいる。電話のバッテリーからは Li と Ni を回収することができる。ユミコア社は、スクラップされたコンピュータやその他の電子製品を回収しているが、その中から年間 6t 程度の金を回収している。ドイツの競合会社である Norddeutsche Affinerie 社は、ハンブルグに拠点を置き、同じような回収品から毎年約 3.5 t の金、約 1 億 1000 万ドル相当を回収している。

b. 代替・省資源化技術

バスク（スペイン、ビルバオ）大学の科学者らは、より安く効率的にメタノール燃料電池を製造出来る新しい材料を開発した。研究者は、Pt の比率を 1% まで減らすことが可能な合金触媒化合物を発

明した。これらの合金は、たとえば Ni、ニオブ (Nb)、アンチモン (Sb) またはルテニウム (Ru) 元素から構成され、特に、CO の分子を効率的に CO₂ に変換させるユニークな特徴を持っている。CO₂ の気体は触媒に吸着しないため、触媒工程において有利に働く。もし、Pt 合金がアモルファス状であれば、電気伝導特性は改善され、腐食しにくくなる。さらに、結晶状態の Pt よりも 80~100 倍の動作能力がある。

ジョセフ・フーリエ大学 (フランス、グルノーブル) の科学者らは、貴金属触媒を必要としない分子システムによる水素生産に成功している。研究者らは、光増感作用と触媒、あるいは両方の能力がある分子システムを開発した。今のところ、水素製造に使用するために開発された全ての技術システムは、貴金属触媒に依存している。新しいシステムは、Co-ベース触媒を使用して開発された。自然中の超分子⁷⁹ は、光増感と触媒の両方の役割を演じている。光触媒作用により、有機分子中の電子が水からの水素脱離に用いられる。これは、貴金属 (Pd、Rh と Pt) を使用したシステムと比較して、コバルトによる触媒作用がより高効率だということを意味している。Ru は、今も光増感剤として利用されている [4-33]。

vi) 国際的な比較

JST の「科学技術・研究開発の国際比較 2009 年版：環境技術」 [4-34] より、レアメタルリサイクル技術に関する部分を引用する。なおレアメタル代替技術については、特許情報を含め、比較すべき情報に乏しい。

○ レアメタルリサイクル技術

日本はレアメタル資源をほぼ全量輸入し、人件費やエネルギーコストなども高く、厳しい環境規制があるなど、レアメタルの製造やリサイクルについては、他国に比して数々のハンディを負っている。しかし、今も日本は世界に冠たるレアメタルの生産大国であり、製造技術およびリサイクル技術では、基礎研究、技術開発水準、産業技術力のいずれをとっても、世界的にみて日本が圧倒的にリードしている。

最近、日本では、レアメタルの高騰や供給障害の不安から、レアメタルのリサイクルに関する研究が盛んに行われている。また、政府の施策の一貫である元素戦略 [4-35] や希少資源代替技術開発 [4-35] などのプロジェクトにより、関連分野の研究が活発になりつつある。非鉄金属関連企業の技術開発水準は、他国と比べても圧倒的に高い水準にある。

日本はレアメタルを多量に必要とするハイテク産業を擁しているため、リサイクルに関する産業技術力も高い。特に、貴金属や素材の単価が高いレアメタルのリサイクル技術については、極めて高い技術力を要し、工業的にも盛んにリサイクルが行われている。

欧米諸国では、一部の非鉄製造業がリサイクルに力を入れているため、高い技術力を維持している。しかし、本分野に関与する研究者、技術者が不足しているため、長期的な発展には障害が多い。

⁷⁹ 複数の分子が共有結合以外の結合 (配位結合、水素結合など) や比較的弱い相互作用により秩序だって集合した単体、化合物。

現時点の中国におけるレアメタルのリサイクル技術に関する研究水準は低いが、関連分野に取り組む研究者、技術者の数も多く、急速に研究水準も高まっている。経済成長に伴いレアメタルの製造量および消費量が増大したため、リサイクル技術についても、国家的な支援の元、熱心に研究が行われている。しかし現状では、中国におけるレアメタルの製造やリサイクルに伴う環境対策が大幅に遅れているため、環境破壊や健康障害が深刻な問題になっている。

韓国では、In などのハイテク産業用のレアメタルのリサイクル技術の開発を行っているが、現時点では日本や欧米諸国と比べてレアメタルの研究水準は低い。国内にハイテク産業を擁し、今後も発展が期待されるため、レアメタルのリサイクル技術の開発に対する関心は高いようであるが、技術開発に取り組む研究者、技術者は少ない。一部の非鉄金属の関連企業が、非鉄金属製錬プロセスや関連技術を利用してレアメタルのリサイクルを行っている。

3) グリーンサステナブルケミストリー (GSC)

i) 技術の概要

グリーンサステナブルケミストリー (GSC) とは、「製品設計、原料選択、製造方法、使用方法、リサイクルなど製品の全ライフサイクルを見通した技術革新により、“人と環境の健康・安全” “省資源・省エネルギー” を実現する化学および化学技術」であり⁸⁰、エネルギー、資源制約を克服して、環境との共生を図ると同時に、安全・安心で競争力のある持続可能な社会を構築するための重要な基盤技術と位置付けられる。

当該技術の体系は広範であるが、具体的な課題を整理して図 4-22⁸¹ に示す。



図 4-22 グリーン・サステナブルケミストリー (GSC) 重要技術俯瞰図 [4-36]

⁸⁰ 1999年11月、産学官の化学関係者参加により開催された「グリーンケミストリー ワークショップ」において合意された内容。この概念を表現する名称としては、米国、英国、イタリアなどでは「グリーンケミストリー」を使用しているが、ドイツでは「サステナブルケミストリー (Sustainable Chemistry)」を用いている。また、OECDの活動でも「サステナブルケミストリー」を使用している。

⁸¹ NEDOによりとりまとめられたグリーン・サステナブルケミストリー分野の技術ロードマップ(2009年版)において、同分野の重要技術と位置付けられる項目を俯瞰・整理したものである。

ii) 日本における研究開発動向

副生成物や排出物の低減、環境浄化などに貢献する技術、製品の開発レベルが高く、近年においても新たなプロセスや製品の実用化が進んでいる。以下ではその動向を具体例に基づき示す。

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

経済産業省・NEDO では、GSC の名称を冠した我が国初の国家プロジェクト「グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発」を 2008 年度より実施するに至った。同プロジェクトの目標として、「有害な化学物質を削減できる、又は使わない革新的プロセスおよび化学品の開発」、「廃棄物、副生成物を削減できる革新的プロセスおよび化学品の開発」、「資源生産性を向上できる革新的プロセスおよび化学品の開発」を掲げている⁸²。

②公的研究機関・大学における研究開発例

ここでは、代表的な研究開発例としてグリーン・サステイナブル ケミストリー賞（略称：GSC 賞）⁸³ の受賞対象をとり上げる。公的研究機関・大学における研究開発例を表 4-11 に示す。

表 4-11 公的研究機関・大学における研究開発例

主体	テーマ	概要
大学共同利用 機関法人自然 科学研究機構 分子科学研究 所（魚住泰広） （2006 年度）	水中での精密 化学合成を実 現する高分子 触媒の研究	両親媒性高分子であるポリスチレンポリエチレングリコール共重合体（PS-PEG）にパラジウム錯体、ロジウム錯体、4級アンモニウム塩、パラジウムあるいは白金のナノ金属粒子を担持することで水中不均一条件下で機能する化学合成触媒を創製した。アルコール類の酸化反応はカルボニル化合物を与える基幹的な化学変換反応であるが、未だに実用レベルでの触媒反応が確立されていない未成熟な反応系である。水中で駆動する不均一系酸素酸化触媒工程が実現されるならば、環境調和性に富み安全安価な理想のアルコール酸化となりうる。パラジウムあるいは白金のナノ金属粒子を PS-PEG 担体に担持させた触媒を用いることで、水中で常圧酸素ガスによるアルコール酸化を達成している。本研究成果の実用性やポテンシャルの高さから、現在、PS-PEG 担持パラジウム錯体触媒は複数の国際的試薬メーカーから市販されている。

⁸² なお、NEDO の研究開発プロジェクトとしては、GSC の先駆けとして 1995 年に、省資源・省エネルギーおよび環境負荷の低減を狙う「次世代化学プロセス技術開発（通称：シンプルケミストリープログラム）」が創設され、産学官連携による研究開発が展開された（2004 年 3 月に終了）。

⁸³ 2001 年にグリーン・サステイナブルケミストリーネットワーク（GSC ネットワーク）が創設。我が国における GSC の推進に貢献のあった個人、法人、任意団体を表彰するもの。

主体	テーマ	概要
産業技術総合研究所糖鎖工学研究センター・北海道大学大学院理学研究科（西村紳一郎） （2005年度） 共同研究主体：塩野義製薬株式会社、東洋紡績株式会社、株式会社日立ハイテクノロジーズ	人工ゴルジ装置による複合糖質の自動合成法	本研究では生合成の仕組みに学ぶ試験管内での安全で効果的な糖鎖合成反応を基本とする「糖鎖自動合成の新手法」を確立し、産学連携研究によってこの原理を発展させた糖鎖自動合成装置「Golgi™」を完成させることで医療産業分野への波及効果の期待できる新技術開発に展開している。自然界で営まれている生合成システムに学ぶ連続的酵素反応を基本とする複合糖質の合成法は、保護基を使わずに位置および立体選択的なグリコシド結合の形成を実現できる点に大きな利点がある。同時に、有機溶媒や危険な試薬を必要としない環境適応型の新たなグリーンケミストリープロセスの構築という観点からも、極めて大きな意義がある。
産業技術総合研究所超臨界流体研究センター（生島豊） （2004年度）	超臨界流体を利用した環境調和型化成品製造技術の創成	本研究では、超臨界水や超臨界二酸化炭素が、反応媒体、触媒、原料として利用され、これにイオン性液体、マイクロエマルジョンが添加された多相系反応場や、これらとマイクロ空間での反応が組み合わせられた“ハイブリッド反応場”が開発された。本開発により、有害な化合物や有機溶媒を一切使用・排出することなく、高速でかつ高選択的な反応が実現されている。このことより、「超臨界水がプレーステッド、ルイス型の酸および塩基の両機能を発現する」ことが初めて明らかされ、「超臨界水無触媒有機合成技術」が実証された。水は、安全、安価で、最も環境に優しい溶媒なので、革新的な環境調和型製造技術として特筆される。超臨界二酸化炭素利用の系でも、有機溶媒フリーでグリーンな、省エネルギーを実現した有機合成技術が確立された。
独立行政法人製品評価技術基盤機構（御園生誠） （2006年度） 共同研究主体：北海道大学（奥原敏夫）、昭和電工株式会社	固体ヘテロポリ酸触媒によるグリーンプロセスの開発	本研究開発は、固体ヘテロポリ酸触媒の基礎研究の蓄積を活かし、緊密な産学連携により、担持ヘテロポリ酸触媒に関する基盤・応用研究を展開し、エチレンと酢酸からの酢酸エチル合成およびエチレンの直接酸化による酢酸合成の工業プロセスの飛躍的な改良を実現し、競争力のあるグリーンプロセスとして完成させたものである。ヘテロポリ酸触媒は、わが国が基礎・応用研究と工業化を先導した日本のオリジナリティの高い、いわば「日本発の触媒」である。ヘテロポリ酸を液相で用いる酸触媒および酸化触媒反応、さらに固体触媒として用いる酸化触媒反応を利用した工業プロセスは既に存在するが、固体酸触媒としての工業化は本件が初めてである。
大阪大学大学院（基礎工学研究科：真島和志） （2009年度）	多核金属クラスター触媒による環境調和型直接変換反応の開発	生体内でアミド結合の加水分解反応に極めて高活性を示す二核金属酵素の構造と触媒活性をヒントに、一つの分子内に亜鉛イオンを4個含む亜鉛四核クラスター触媒を新規に開発し、クラスター内に存在する複数の金属が助け合いながら機能することで、様々な触媒反応が効率的に進行することを見出した。本触媒を用いることで、従来目的物に対して等量以上の廃棄物を生じていたエステル化反応や複素環構築反応などの合成プロセスを、副生物が水や低級アルコールのみとなる環境調和型の合成プロセスへと変換することが可能となった。この触媒反応は無溶媒でも実施することができ、りんごの香料などのエステル化合物をグリーンに合成することにも成功した。
京都大学大学院（工学研究科：吉田潤一） （2009年度）	マイクロリアクターの特性を生かした環境調和型精密有機合成	マイクロリアクターの特性を明らかにするとともに、それらを生かすことにより環境調和型合成・製造ができることを実証した。精密化学品合成において、実験室では保護基や補助基がよく用いられるが、実際の製造においては、資源やコストの点から望ましくない。マイクロリアクターを用いると、反応条件を精密に制御することができるので、保護基などを用いない直截的な合成反応を達成することができる。たとえば、従来エステルは有機リチウム化合物と速やかに反応することが知られていたが、マイクロリアクターを用い滞留時間を短く精密に制御することにより、両者が共存できエステルを保護する必要がないことを明らかにした。また、有機リチウム反応は-78℃といった超低温が必要である点が工業化のネックとなっていたが、マイクロリアクターを使うと0℃や室温で行えることも明らかにした。

主体	テーマ	概要
京都大学大学院 (工学研究科: 近藤 輝幸) (2007 年度)	低原子価 Ru 錯体触媒によるアルケンの高度分子変換手法の開発	N-ビニルアミド、電子不足のアクリル酸エステル、そして電子的に中性のエチレンという3種類のアルケンの高原子効率の共オリゴメリゼーションによるエナミド類の新合成法の開発に成功。異なる物質を化学的に結合させようとした場合、目的とする物質以外にも多岐にわたる異性体が同時に得られるのが一般的であるが、本反応では、目的とする一種類のエナミドのみが、原子効率100%で無駄なく得られることから、実用的で波及効果の高い革新的技術である。遷移金属錯体触媒を用いる異種アルケンの共オリゴメリゼーションは、単純で基本的な反応であるが、世界中の多くの著名な化学者がこのテーマに取り組んでいるように、依然として高難度の研究課題である。
鳥取大学大学院 (工学研究科 化学・生物応用 工学専攻: 伊藤 敏幸) (2008 年度)	化学的に制御された生体触媒反応による環境調和型有機合成反応の開発	入手容易な生体触媒としてパン酵母とリパーゼに着目し、これらの酵素反応を「化学的に制御する」という方法論による有機合成化学反応を展開。酵素にフィットする反応基質デザイン指針や、クラウンエーテルの添加でリパーゼ触媒加水分解反応の加速が起こることを見だし、酵素反応と化学反応を相補的、相乗的に使用するという方法論で多くの機能性分子合成を達成し、なかでも、イオン液体という新しい溶媒を使う酵素反応を世界に先駆けて実現した。
東京大学大学院 (工学系研究科: 水野 哲孝) (2007 年度)	精密制御された金属酸化物クラスター触媒による選択的酸化反応系の開発	原子レベルで活性点構造の制御が可能な酸化物クラスターアニオンであるポリオキシメタレート(PO)の固体化合物を用いて、構造・機能・炭化水素選択酸化触媒特性の関係を添加金属イオンの役割を含めて原子レベルで解明した。特に、複数個の金属が集積した多核金属活性点が、酸素分子や過酸化水素などの酸化剤を効率よく活性化することを明らかにした。さらに、上記で得られた基質および酸化剤活性化に関する基礎的知見を基盤に、新規なポリオキシメタレートを精密に設計・合成し、酸素分子や過酸化水素などのグリーンな酸化剤を用いた環境調和型の酸化反応系の開発に成功した。また、分離・回収・再利用が容易であり、より環境に優しい固体触媒として、(a) 固定化・複合化ポリオキシメタレートや、(b) ポリオキシメタレート研究で得られた知見を基に種々の選択的酸化反応に高原子効率を示す新規な担持金属水酸化物固体触媒、の開発にも成功している。

③民間企業における研究開発例

ここでは、代表的な研究開発例としてグリーン・サステイナブル ケミストリー賞 (略称: GSC 賞) の受賞対象をとり上げる。民間企業における研究開発例を表 4-12 に示す。

表 4-12 民間企業における研究開発例

主体	テーマ	概要
花王株式会社 (2009 年度)	亜臨界水を応用した低環境負荷な界面活性剤合成プロセスの実用化	花王が開発した製造プロセスは、触媒や溶媒を一切使用せず、水を高温高压の亜臨界と呼ばれる状態で用いることで、水のみで反応を完結させるものである。亜臨界状態の水は、通常の水に比べて、①誘電率が低下し溶剤の性質を示す、②解離度が促進され触媒の性質を示す、という特徴を持つ。反応物質でもある水を、溶剤や触媒の働きをも併せ持つ亜臨界状態にして用いることで、反応系を均一化し、触媒フリーな合成を達成した。この技術により、反応時間は、従来の 9 時間から 3 分に短縮し、生産効率が飛躍的に向上した。また反応器サイズは、従来に比べ 260 分の 1 にコンパクト化され、設備としても負荷の低いプロセスを達成した。さらに反応物は、グリシジルエーテルと水だけであり触媒や有機溶剤などを一切使わず、利用した水もリサイクルすることで、廃棄物を大きく削減した。本技術は、環境負荷低減型の工業化プロセスを実現したもので、人と環境に配慮した、グリーン・サステイナブル ケミストリーを実現したプロセスといえる。亜臨界水を利用して特定化合物を選択的に合成する工業化例は殆どない。亜臨界水を用いた反応制御は、アルキルグリセリルエーテルの合成にとどまらず、他の反応用途への応用も見込まれる。

主体	テーマ	概要
住友化学株式会社 (2008年度)	クメンを循環利用するプロピレンオキサイド新製法の開発と工業化	住友化学が開発した新しいプロセスは、クメンを循環利用するという新しい製法により、副生物や併産品を生じることなく「プロピレンオキサイド」だけを生産することができるとともに、独自開発した高性能エポキシ化触媒により、極めて高い製品収率を達成したものである。本製法はクメンを反応媒体“酸素キャリアー”として用い、酸化、エポキシ化、水素化の3つの反応工程を通して、プロピレンオキサイドのみを生産すると同時にクメンを回収リサイクルするものである。技術開発における最大の課題は、プロピレンオキサイド生成工程であるエポキシ化工程においてクメンハイドロパーオキシドのような大きな分子とプロピレンとのエポキシ化反応を効率よく進める高活性な触媒をいかに開発するかにあった。この為に、大きな分子とも容易に反応できるナノ反応場を多く持つ新たな触媒の開発に挑戦した。その結果、大きなナノ反応場を提供しうる“メソポーラス構造”という特徴を有する新規なチタン含有珪素酸化物触媒を開発し実用化することに成功した。
住友化学工業株式会社 (2003年度)	気相バックマン転位プロセスの開発と工業化	気相バックマン転位プロセスは、硫安副生の原因となる発煙硫酸に替え固体触媒を使用して、気相反応条件下でカプロラクタムだけを製造するプロセスである。従来、バックマン転位反応は典型的な酸触媒反応であるため、触媒には酸性が必要と考えられていた。本技術はこの常識とは逆に、殆ど固体酸性を持たないシリカを主成分とした MFI 型ゼオライトが高性能であることの発見をベースに、工業触媒の製造技術、選択率、触媒ライフを飛躍的に改善する技術、流動層による反応技術、製品の精製技術など一連の開発を進めて、世界で初めて硫安を全く副生しない、高収率、省資源、省エネルギーなプロセスを確立したものである。
株式会社三菱化学科学技術研究センター、三菱化学株式会社、三菱化学エンジニアリング株式会社 (2007年度)	固体酸触媒を用いた低環境負荷 THF 開環重合プロセスの開発	本研究開発は、弾性繊維の原料として近年需要が急増しているポリオキシテトラメチレングリコール (PTMG) を製造するための新しいプロセスとして、メソ細孔を有する固体酸触媒を用い、無水酢酸の存在下でテトラヒドロフラン (THF) を連続的に重合させる低環境負荷型の触媒的重合プロセスを完成させ、実用に供したものである。本研究開発は、取り扱い性および廃棄物の視点で環境負荷の大きな均一系酸触媒を、取り扱いの容易な固体触媒に換えることを可能にした事で、廃棄物量を実質的にゼロにしつつ、高い生産性と高品質を同時に実現したグリーン・サステイナブルケミストリーの工業化の好例である。
旭化成株式会社 (2002年度)	副生二酸化炭素を原料とする新規な非ホスゲン法ポリカーボネート製造プロセスの開発	本技術は、エチレンオキシドと副生 CO ₂ 、およびビスフェノールAの3つを原料とし、高性能のポリカーボネートと高純度エチレングリコールの2つの製品を高収率で製造するものである。CO ₂ は化学反応を殆ど起こさないのに、これをポリカーボネートの主骨格の中に取り入れることは困難とされてきたが、この技術では化学反応が巧みに利用され、用いた CO ₂ の全量を製品中に取り入れることに成功している。原料として用いる CO ₂ はエチレンオキシド (PET ボトルやポリエステル繊維用のエチレングリコールの原料)の製造時に副生し、これまでその殆どが大気中に放出されていたものである。本技術は、ホスゲン法の持つ課題を解決し、その上、収率が高く省資源、省エネルギーを達成しており、CO ₂ の削減 (ポリカーボネート1万トン当たり1730トン)にも寄与している。

iii) 米国における研究開発動向

医薬品をはじめとする精密化学品の製造技術の開発が目覚ましい。また、原料の脱石油化への取組が盛んであり、バイオ原料からの化成品生産技術の開発が進んでいる。揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOC) 削減のための製品設計や技術の開発も積極的に行われている。大学での研究は有機合成分野にやや偏りが見られるが、基礎研究をベースにしたベンチャー企業による技術開発と実用化が盛んに行われている傾向もうかがわれる。また、「グリーンケミストリー」においては単なる個々の生産技術のグリーン化やそれを目指した研究開発ではなく、化学技術の枠組みの変革と社会からの信頼関係の確立も重要な課題であり、後者を産学官一体で推進する活動が活発に行われている [4-37]。

iv) 欧州における研究開発動向

米国と同様に、医薬品や化粧品等の精密化学品の製造技術の開発が意欲的に進められている。バルクケミカルの製造技術の革新についても日本に次いでいる。資源・エネルギーの消費・エネルギーの消費低減、特に二酸化炭素排出抑制を全面に打ち出した研究開発を推進する動きが著しい [4-37]。

v) その他の国々における研究開発動向

中国においては、中国科学院や一部の大学で研究が活発に行われ、近年は日米欧への追随からの脱却の兆しが見える。バイオ原料の有効利用の研究開発は盛んである。企業における開発は発展途上である。生産現場においては廃棄物の低減に対する問題意識がようやく出てきた段階と見られ、今後、日本等の先進的な技術の移転への環境が整ってくることも予測できる。韓国においては、国立の韓国化学研究所や一部の大学で研究が活発に行われ始めているが、浸透は中国に比較しても遅れている。企業の技術開発、生産活動においても注目すべき成果はまだみられない [4-37]。

vi) 国際的な比較

科学技術振興機構研究開発センターのレポート（環境技術 科学技術・研究開発の国際比較 2009年版）（表 4-13）によれば、当該分野の日本の技術水準は相対的に高く、特にバルクケミカルの製造技術のグリーン化におけるレベルが高い実態があることが述べられている。

表 4-13 環境配慮・グリーンケミストリーの国際比較 [4-37]

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	高いレベルであるが、有機合成化学・技術への傾斜が見られ、また、実験室レベルの研究を産業化する動きが見られる。
	技術開発水準	◎	→	副生成物や排出物の低減、環境浄化に技術、製品の開発で世界をリードしている。省資源、省エネを目指した新規技術開発も注力され始めた。
	産業技術力	◎	→	バルクケミカルの製造技術のグリーン化で世界をリードしている。
米国	研究水準	◎	→	有機成分野にやや偏っている傾向が見られるが、基礎研究をベースした技術開発への展開もうかがえる。
	技術開発水準	◎	→	精密化学品のグリーン製造、グリーン製品化、バルクケミカル原料の脱石油化への取り組みで世界をリード。
	産業技術力	◎	→	医薬業をはじめとする精密化学品の製造技術、バイオ原料からの製造技術の開発の成果で先行している。
欧州	研究水準	◎	→	精密化学品のグリーン合成、が中心。国による落差がかなり見られる。
	技術開発水準	◎	→	精密化学品の製造技術の革新を目指した研究は活発、二酸化炭素排出抑制をターゲットとした研究開発も盛ん。
	産業技術力	◎	→	医薬品の製造技術の開発が意欲的に進められている。バルクケミカルの製造技術についても日本に次いでいる。
中国	研究水準	△	↗	CAS や一部の大学で研究が活発に行われ、日欧米への追従からの脱却の実力をつけてきた。
	技術開発水準	△	↗	SINOPEC などの研究は活発で、石油資源、バイオ原料の有効利用の研究開発は盛んである。
	産業技術力	△	↗	省資源や石油代替資源の開発を目指した技術力をつけてきた。廃棄物の低減に対する問題意識は全般にまだ高くはない。
韓国	研究水準	△	→	KRICT や一部の大学で研究が活発に行われ始めているが、浸透は中国に比較してやや遅れている。
	技術開発水準	△	→	企業の技術開発において注目すべき成果はまだ見られない。
	産業技術力	△	↗	技術導入により化学企業の生産活動に省エネルギー、省資源を目指した動きが見られる。
<p>全体コメント: 日本はバルクケミカルの製造技術のグリーン化で世界をリードしている。中国で廃棄物の低減がようやく課題とされ、日本等からの先進的技術移転の環境が整いつつある。米国、欧州は精密化学品の製造技術、バイオ原料からの製造技術の開発の成果で先行している。</p>				

(註1) 現状について 【◎:非常に進んでいる、○:進んでいる、△:遅れている、×:非常に遅れている】

※我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド 【↗:上昇傾向、→:現状維持、↘:下降傾向】

4) サービスロボティクス

i) 技術の概要

サービスロボットとは、JIS (B 0187: ロボット用語) において、「人間にサービスするロボット」と定義されている。一般的には、産業用ロボット以外の、業務用や家庭用に使用するロボットをサービスロボットと呼ぶ。その分類を図 4-23 に示す。

サービスロボティクスは、「サービスロボット」に関する研究、技術や使用を意味している。

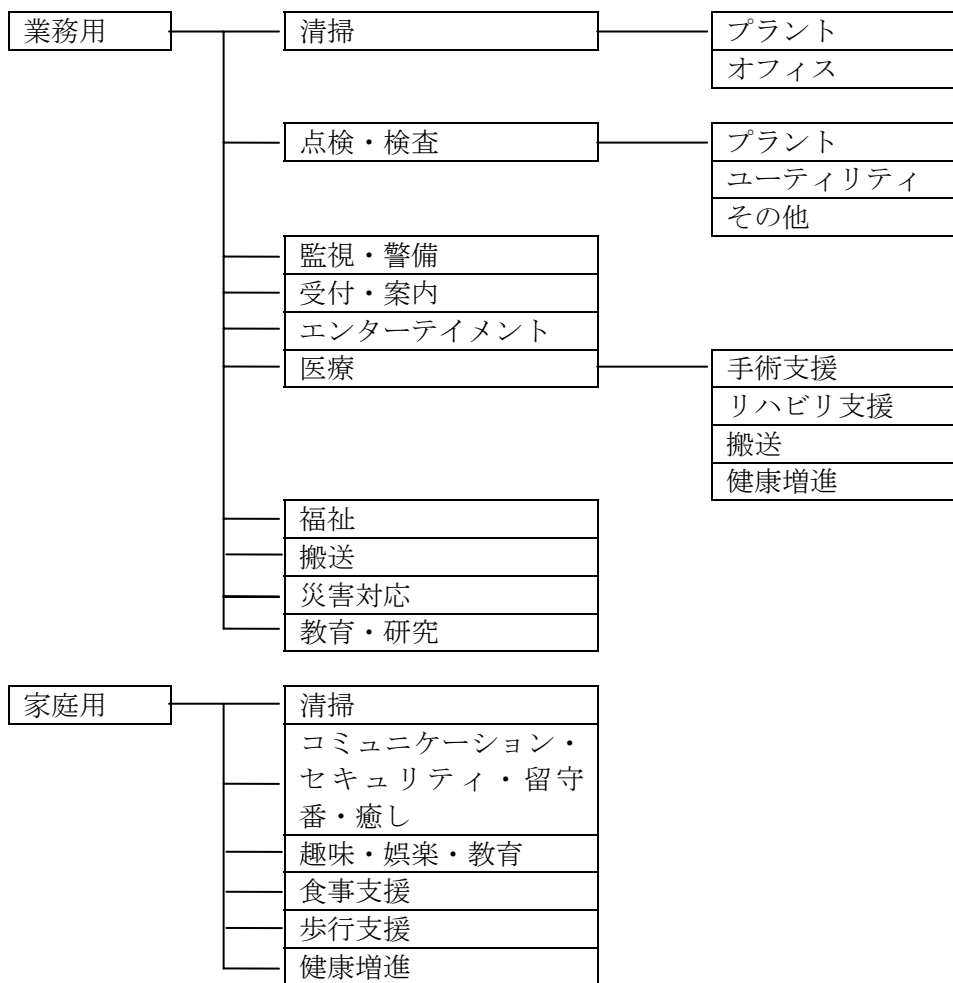


図 4-23 サービスロボットの分類

サービスロボティクスの技術は、多様な機械技術、電子技術、制御技術、ソフトウェア技術の集合体であり、経済産業省/NEDO の技術戦略マップ 2009 [4-38] によれば、関連する要素技術は表 4-14 に示す通りである。

表 4-14 サービスロボティクスに関連する要素技術

大分類	中分類	小分類			
システム化技術	運用技術	総合デザイン技術			
		インテグレーション技術			
		インテグレーション技術			
		サービス科学			
		RT プロセッサ			
		RT ミドルウェア			
環境構造化	環境構造化・標準化	ユビキタスセンサ			
		個人対応サービス			
		ロボット同士の連携			
		機器シンプル化			
		外部情報連携(施工情報)			
		移動体高速通信インフラ			
		アドホック通信と UWB 通信インフラ			
認識処理	コミュニケーション	音声処理、対話処理			
		ジェスチャ、姿勢認識			
		状況・意図推定/理解			
		学習/適応技術			
		作業対象物状態認識			
		作業指示理解			
		最適情報提示			
		対話、動作の学習・生成			
		脳活動状態センシング			
センシング	コミュニケーション	話者方向センサ ビジョンセンサ			
	マニピュレーション	触覚センサ ビジョンセンサ 大型構造物姿勢位置センシング 作業対象性質(土質)センシング センサの小型化			
		移動	ビジョンセンサ 測位センサ 環境認識センサ 挙動検出センサ		
			制御	マニピュレーション	マニピュレータ制御 大型重量マニピュレータ制御 作業計画
					移動
	エネルギー源・パワーマネジメント				
	安全技術	安全予測制御 接触安全制御			
		機構		マニピュレーション	
	移動				2足～多足 脚車輪 不整地、段差、狭隘地、狭窄空間でのモビリティ
			アクチュエータ	エネルギー源・パワーマネジメント	ロボット適合アクチュエータ 過負荷適合制御 重量物可搬アクチュエータ、動力系

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

NEDO では以下の研究開発プロジェクトを実施している。

○ 戦略的先端ロボット要素技術開発プロジェクト（2006～2010 年度）

PL：平井 成興（千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 副所長）

本プロジェクトは、ロボットの「技術戦略マップ」を踏まえ、将来の市場ニーズおよび社会的ニーズから導かれ、かつ、国として関与すべき「ミッション」（本プロジェクト終了時点で達成されるべき作業内容）を、必要とされるロボットシステムおよび要素技術を開発し活用することで達成し、当該ニーズを満たす一助となることを目的としている。

具体的には、「次世代産業用ロボット分野」において、(1) 柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステム、(2) 人間・ロボット協調型セル生産組立システム、「サービスロボット分野」において、(1) 片付け作業用マニピュレーション RT (Robot Technology) システム、(2) 高齢者対応コミュニケーション RT システム、(3) ロボット搬送システム、「特殊環境用ロボット分野」において、(1) 被災建造物内移動 RT システム、(2) 建設系産業廃棄物処理 RT システムの研究開発を行っている。

○ 生活支援ロボット実用化プロジェクト（2009～2013 年度）

PL：比留川 博久（独立行政法人 産業技術総合研究所 知能システム研究部門 研究部門長）

本プロジェクトでは、生活支援ロボットとして産業化が期待されるロボットを対象に関係者が密接に連携しながら本質安全・機能安全に関する試験を行い、安全性等のデータを取得・蓄積・分析し、安全性検証手法の研究開発を実施している。

具体的には、以下の研究開発を行っている。

- a. 生活支援ロボットの安全性検証手法の研究開発
- b. 安全技術導入ロボットの開発
 - ・ 安全技術を導入した移動作業型（操縦が中心）生活支援ロボットの開発
 - ・ 安全技術を導入した移動作業型（自律が中心）生活支援ロボットの開発
 - ・ 安全技術を導入した人間装着（密着）型生活支援ロボットの開発
 - ・ 安全技術を導入した搭乗型生活支援ロボットの開発

○ 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト（2008～2011 年度）

PL：佐藤 知正（東京大学 情報理工学系研究科 教授）

本プロジェクトでは、まず、モジュール型知能化技術（周辺環境が変化しても所期の仕事を行うことができるロボスタビリティに優れ、かつ汎用性のあるモジュール型知能）を開発し、その成果である知能モジュールを実行可能なソフトウェアモジュールの形で提供することとしている。

また、次世代ロボットシステムを開発する際に、これらの知能モジュール群を統合し事前に動作を

シミュレートすることにより、確実に実現できるロボット知能ソフトウェアプラットフォームの研究開発を行っている。さらに、開発した知能モジュールを相互に利用し、利用者の評価を反映させて改良を促進させる再利用性向上技術を開発することとしている。

これにより、生産分野・社会分野・生活分野における作業・移動・コミュニケーションに関する知能モジュールが蓄積され、ロボットのみならず、それ以外の製品分野にもロボット技術が広く波及することが期待されるとしている。

②公的研究機関・大学における研究開発例

a. 産業技術総合研究所

産業技術総合研究所・知能システム研究部門・サービスロボティクス研究グループでは、日常生活（家庭やオフィスなど、人と共存する実環境）において移動支援、作業支援など生活支援を行うロボットの研究開発を通して、超高齢化社会に向けた次世代ロボットの実用化を目指している。高信頼の実用レベルのシステム構築を行うだけでなく、企業との連携や実証実験を通して、実用化による社会への成果還元を目指している。この目標へ向けて以下の技術課題を設定し、研究開発を行っている。

- ・ 屋内移動技術（高信頼なナビゲーション技術）
- ・ 対人アーム技術（安全なハードウェアと使いやすいインタフェース）
- ・ システム統合技術（移動支援・作業支援ロボットのシステム構築と実証実験）

b. 理化学研究所

理化学研究所では、高分子ゲル（IPMC アクチュエータ⁸⁴）を使った人工筋肉を用いて、全身が柔らかいロボットを2005年に開発した。これは、理研バイオ・ミメティックコントロール研究センター生物型感覚統合センサー研究チーム向井利春チームリーダーらと産業技術総合研究所・関西センターのセルエンジニアリング研究部門との共同研究の成果である。

IPMC は、イオン導電性高分子の膜（ゲル）の両面に金属（金など）をメッキしたもので、水中でこの両面の金属に電圧（2V程度）をかけると、高分子ゲルが変形して屈曲し動力源になる。従来の電磁モータと比べ、柔軟、軽量、無音、小型化が容易などの特徴がある。

同研究グループは、1枚のIPMC アクチュエータを領域分割し、ヘビのように泳ぐロボットを製作した。ロボットはきわめて単純な構造だが、前進後退および回転もできる。人工筋肉だけを用いた全身が柔らかいロボットは世界でも他に例がない。制御用コンピュータは外部にあり、制御および電源供給のためにケーブルが接続し、外部からエネルギーを供給し、コントロールする仕組みとなっている。将来的には、血管のように傷つけてはいけない管の中を移動し、手術の安全性を高めるような仕事ができるロボットにつなげたいとしている。

⁸⁴ イオン導電性高分子（高分子電解質ゲル）の両面に電極を接合した接合体であり、電極間に電圧をかけることにより屈曲するアクチュエータ。

c. 総務省消防庁消防大学校・消防研究センター

消防研究センター（旧：独立行政法人 消防研究所）では、消防隊員の安全を確保し、負担を軽減するために、消防活動支援ロボットシステムを開発している。これまでに、はしご車では届かない高層ビルを自ら登ることのできる昇降ロボットや、JCO⁸⁵ 臨界事故のような原子力関連施設における事故発生時に、避難できない人を被ばくから守る防護壁ロボットなどを開発してきた。

現在は、カルガモの親子のように消防隊員に追従して移動し、移動した経路を記憶することができる要救助者搬送ロボット（図 4-24）を開発している。このロボット一台一台は小さなロボットだが、複数台のロボットが力を合わせて、消防隊員が救助した人を自動的に安全な場所まで搬送することができる。また資材搬送や撤収時の先導などにもその威力を発揮する。

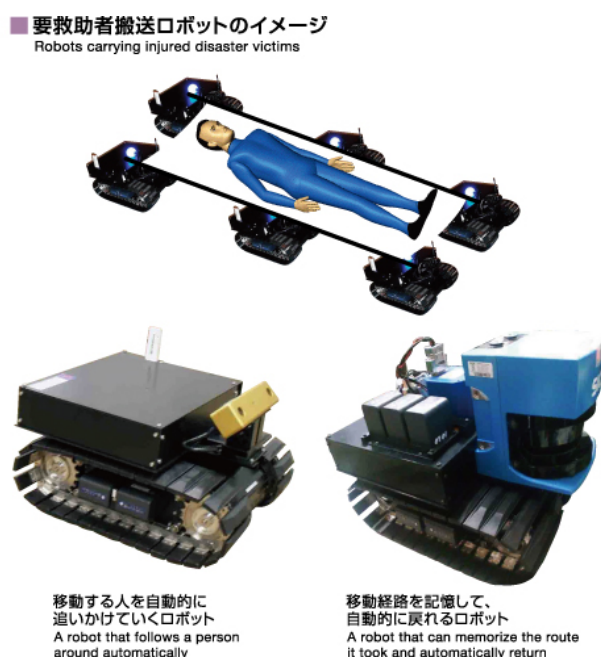


図 4-24 要救助者搬送ロボットのイメージ [4-39]

使用するロボットのベースは、同研究所がこれまでに開発した「FRIGO」シリーズである。「FRIGO」シリーズには、研究用の拡張性を重視した「FRIGO-R」と、実用機への応用性を重視した「FRIGO-D」がある。「FRIGO-D」については、実用化を進めるために、防水・防塵・防爆・耐衝撃性の向上を図る計画である。また、各消防本部と連携しながら、実践配備へ向けた検討も行っている。

d. 大学

サービスロボットに関する研究開発を行っている大学の研究室・研究者は数多くあり、(社) ロボット工業会の Web サイト [4-40] に、長大な一覧表が掲載されている。

ここでは、その一例を紹介する。東京大学・大学院情報理工学系研究科の佐藤・森研究室では、「環

⁸⁵ 株式会社ジェー・シー・オー。

境型ロボット」と呼ばれるロボットの研究・開発を行っている [4-41]。

環境型ロボットとは、いわゆる人間型ロボット（ヒューマノイドロボット：ASIMO、HRP 等）とは違った形態のロボットである。様々な形をし、様々な役割を持ったロボットが部屋中に分散して埋め込まれて、あたかも環境全体がロボットのように協調して振舞うことで、環境内にいる人を支援する。その意味では「ロボットに見えないロボット」とも表現される。

同研究室は、この環境型ロボットの先駆者として、1992 年から「ロボティックルーム」と呼ばれる生活空間をロボット化した近未来住宅の開発に取り組んでおり、現在は第 3 バージョンである「ロボティックルーム 3」を開発している。それを構成する環境型ロボットとして、天井を移動するロボット、智能化された収納ケース、動く植物のようなロボット等が開発されている。

③民間企業における研究開発例

民間企業におけるサービスロボットの開発例としては、富士重工業、松下電工等の清掃ロボット、総合警備保障、セコム、テムザック等の警備ロボット、富士通、ホンダ等の多目的ロボット等があり、このほか医療福祉ロボット、研究用ロボット等、様々なサービスロボットが開発されている。

富士通フロンテックが開発した **enon** は、受付、案内、搬送、警備、情報伝達等の多目的な人間型ロボットである。人間型ロボットとしては、このほかホンダの ASIMO、ソニーの QRIO、日立製作所の **emiew** 等がある。

富士重工業の清掃ロボットシステムは、六本木ヒルズ、中部国際空港等に導入されている。セコムの「屋外巡回監視ロボット X」は、予め設定された巡回路を、常駐警備員に替わり自動的に巡回するロボットであり、巡回中はカメラによる画像記録や、侵入者、不審車両、盗難、火災等の検知を行うロボットである。異常を検知した際には警備室などに設置されているロボット操作装置に無線にて異常を通知する。異常が通知されると、警備室に待機している常駐警備員はリアルタイムで送られてくる画像を確認しながら、遠隔操作により異常に対処する。

上記以外の開発参入企業例としては、松下電器産業、日本 SGI、日立製作所、トヨタ自動車、安川電機、東芝等があり、このほか多くの中小企業、ベンチャー企業が、サービスロボットの開発を行っている。

④標準化の動向

日本におけるロボットに関する標準化の取組を表 4-15 に示す。

ロボット技術用のミドルウェアは、産業技術総合研究所、ロボット工業会等による標準化作業と NEDO の支援により、日本が国際標準を主導しており、2008 年 2 月に国際標準 OMGRTC (Object Management Group, Robotic Technology Component) Specification 1.0 として正式にリリースされることが決定された。

このほか、総務省が中心となっているネットワークロボット標準化の取組や、NEDO の委託事業である「次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト」等の国家プロジェクトが進められている。民間主導の取組としては、ORiN (Open Resource interface for the Network/Open Robot interface for the

Network) 評議会やロボットサービスイニシアチブの取組が挙げられる。

表 4-15 日本におけるロボットに関する標準化の取組 [4-42]

取り組み	概要
RT ミドルウェアプロジェクト	<p>経済産業省「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として実施された新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「ロボットの開発基盤となるソフトウェア上の基盤整備」（2002年から2005年）において、産業技術総合研究所、日本ロボット工業会、松下電工株式会社によりロボット用ミドルウェアが開発された。ロボットシステムの機能要素をソフトウェア的にモジュール化し、ユーザの幅広いニーズに合わせた新しいロボットシステムを容易に構築するための基盤技術である。</p>
ネットワークロボット・プロジェクト	<p>ネットワークロボットは、ネットワーク技術とロボット技術を融合したロボットであり、総務省が2002年12月から2003年7月にかけて開催した「ネットワーク・ロボット技術に関する調査研究会」において提唱された。当該研究会の報告書では、ネットワーク・ロボット実現のための標準化課題と標準化時期に関し、6つの技術分野について標準化ロードマップが作成されている。また、2004年度から2008年度までの5ヵ年計画で、(株)国際電気通信基礎技術研究所を中心とする研究開発が実施されている。</p>
次世代ロボット共通基盤開発プロジェクト	<p>経済産業省「21世紀ロボットチャレンジプログラム」の一環として2005年度から2007年度までの計画で実施されたNEDOの委託事業。次世代ロボット共通基盤技術開発の成果およびその課題を踏まえ、共通化・標準化の観点から、認識処理や制御用のデバイスおよびモジュール開発を行う。また、開発したモジュールをロボットシステムに組み込むことにより有効性の検証が行われた。</p>
ORiN 協議会	<p>ORiN（オンライン）はロボットをはじめとする各種FA機器に対する標準通信インタフェースを提供するツールであり、産業用ロボットメーカーや大学等からなるORiN協議会において開発・管理されている。製造業におけるロボットをはじめとする生産システムのオープンなデータ交換環境実現のため、必要な共通基盤技術の確立を図り、製造業の健全な発展に寄与することを目的としている。</p>
ロボットサービスイニシアチブ	<p>通信ネットワークを活用したパーソナルロボットによる多様なサービスの、家庭や職場への円滑な導入を推進することを目的とした、富士通、三菱重工業、東芝等の民間企業を中心とした民間組織。2004年5月に設立され、2006年10月には、ロボットとサービスを結ぶ基本的な機能のほか、ロボットの動きの制御、画像・音声のやり取り、情報・コンテンツの提供の仕組み等を規定した「RSiプロトコル仕様書1.0版」を公開している。</p>

取り組み	概要
ユーザ指向ロボットオープンアーキテクチャの開発	産業技術総合研究所が2006年4月より3年間実施の産学官連携プロジェクト。複数の次世代型ロボットのプロトタイプ開発を通じ、ロボット要素技術（省電力高性能プロセッサ、実時間Linux、分散コンポーネント型シミュレータ、アクティブRF-ID、3次元視覚、雑音下での音声認識、2足歩行技術等）をRTミドルウェアで再利用可能なロボット機能部品としてモジュール化する。モジュール群とその規範・仕様およびロボットシステムのアーキテクチャは公開され、これらの組み合わせにより新たなロボット製品が効率良く開発できる環境を整える。

iii) 米国における研究開発動向

政府関連のロボット研究開発は、主に DARPA (国防用)、NASA (宇宙用)、全米科学財団 (National Science Foundation, NSF) (民生用)、NIH (National Institutes of Health) (医療用) の支援により行われている。

米国が他国に比べて特に研究開発に力を注いでいる分野は、移動・輸送用ロボット (Robotic Vehicles) である。防衛用、宇宙用への用途需要があることが背景にある。たとえば、米軍は軍事用アプリケーション向けとして地上、空、水面下で使用する移動・輸送用ロボットの開発に力を注いでいる。

移動・輸送用ロボットの多くは遠隔操作を採用しており、コントローラを通じ双方向で位置情報、ビデオ画像、その他のセンサによる情報収集を行うことができる。加えて、自律的に他の軍事用システムを認識する機能を有している。複雑なコンピュータとの統合、コミュニケーションアーキテクチャは、これらのシステムで必要不可欠な機能である。

宇宙環境下での組立、建築、メンテナンス等のサービスを行うことを目的に開発されている NASA の「Space Robotics」は、現場のコントロール・コンソールから操作するタイプのロボット (たとえば宇宙船内からの操作) と、地球から人間がオペレータとなり操作するリモートタイプがある [4-43]。

その他、農業、採掘、建築、有害物質処理、海中作業等の現場用ロボットに関する研究開発も行われている。

○ 標準化の取組

米国内に本拠を置く2つの国際標準化団体、IEEE、OMG (Object Management Group) は、ロボットの標準化に関して表 4-16 に示す取組を行っている。

表 4-16 米国内に本拠を置く国際標準化団体におけるロボット関連標準化の取組

取組	概要
IEEE RAS ロードマップ	IEEE Robotics and Automation Society は新たなサービスロボットの実現に向けたロードマップ中で標準化技術に言及し、ネットワークロボットやプログラム環境などを議論している。
OMG における RT ミドルウェア標準化	ソフトウェア技術の国際標準化団体 OMG において、日本主導の RT ミドルウェア標準化活動グループ (Robotics-DSIG) を発足し、NEDO「ロボットの開発基盤となるソフトウェア上の基盤整備」の成果であるロボット用ミドルウェア (RT ミドルウェア) をベースにしてロボット技術の国際標準化活動を展開し、2006 年 9 月に開催された OMG 技術会議において国際標準仕様原案が採択された。

このほか米国独自の取組として、表 4-17 に示す NIST (National Institute of Standards and Technology) 主導の取組や米国防総省主導の取組の事例がある。

表 4-17 米国独自のロボット関連標準化の取組

取り組み	概要
RCS	NIST が提唱する制御システムのアーキテクチャである Real-Time Control Systems (RCS) は、制御システムのデザイン、エンジニアリング、統合、テストのための包括的な方法論を提供している。特に、不確実な環境下に適応するための知能システムの制御に注力したものとなっている。
JAUS	Office of the Under Secretary of Defense (OUSD) をスポンサーとする Joint Architecture for Unmanned Systems (JAUS) が提唱する無人操縦システムのアーキテクチャ。JAUS は米国防総省指定の標準で、これによって既存の可動性プラットフォームを元にして作られたモジュールを活用したロボット開発が加速すると見られている。また、JAUS によりノートパソコンや携帯電話端末(PDA) など各種機器からロボットに命令を送ることができる。

iv) 欧州における研究開発動向

EU では、第 6 次フレームワークプログラム (FP6 : 2002~06 年) において、ロボットに関する研究開発が Information Society Technologies (IST) プログラムを中心に実施されてきた。このほかに「FET (Future and Emerging Technologies) Beyond Robotics (ロボット工学を越えて)」においても、ナノスケールロボット等の研究開発プロジェクトが実施されている。

具体的なプロジェクトとしては、EURON (各種ロボットの研究、普及、教育などの活動をするコミュニティ)、CLAWAR (車輪、脚双方を含む移動、登坂ロボットのチームの集まり)、COMET (環境調査、災害救助などのために、ヘリコプターや飛行船などの飛行体などの自律飛行体プロジェクト) 等がある。

欧州においては、高齢化による労働力不足の担い手としてロボットへの期待が高く、FP6 の戦略的テーマである「先進的ロボット工学」の目的は、消費者、家庭、娯楽といった広範な市場での製品、サービスを可能にする基盤技術の開発を目的としている。

欧州では、ロボット技術を多様なサービス間の選択の組合せを媒介する「インタフェース技術」として位置づけていることが特徴的である。すなわち、ロボットを歩行や把持などの人の基本的な動作能力を模倣するようなヒューマノイドとしてではなく、人を支援する道具として捕らえている。

2007 年からは第 7 次フレームワークプログラム (FP7) が始まり、表 4-18 に示すロボット関連プロジェクトが実施されている。

表 4-18 FP7 におけるロボット関連プロジェクトの例

プロジェクト名	プロジェクト略称	上位プログラム	幹事機関の国籍
Dexterous and autonomous dual-arm/hand robotic manipulation with smart sensory-motor skills: A bridge from natural to artificial cognition	DEXMART	FP7-ICT	ITALY
Emergence of cognitive grasping through emulation, introspection, and surprise	GRASP	FP7-ICT	SWEDEN
Symbiotic evolutionary organisms	SYMBRION	FP7-ICT	GERMANY
Cooperative cognitive control for autonomous underwater vehicles	CO3 AUVS	FP7-ICT	GERMANY
European clearing house for open robotics development	ECHORD	FP7-ICT	GERMANY
Cooperative human interaction systems	CHRIS	FP7-ICT	UNITED KINGDOM
Variable impedance actuation systems embodying advanced interaction behaviours	VIATORS	FP7-ICT	GERMANY
Novel design principles and technologies for a new generation of high dexterity soft-bodied robots inspired by the morphology and behaviour of the octopus	OCTOPUS	FP7-ICT	ITALY
Swarm of micro flying robots	SFLY	FP7-ICT	SWITZERLAND
Biomimetic technology for vibrissal active touch	BIOTACT	FP7-ICT	UNITED KINGDOM

○ 国際標準化の動向

ISO/TC184/SC2 では、2006 年 6 月のパリ会議において産業用ロボット以外の、サービスロボット等の国際標準化を開始することが決定された。サービスロボットの安全性については 2006 年 10 月から、用語については 2007 年 11 月から、それぞれ国際標準化の検討作業が始まっている。

このほか、EU の支援を得て、ロボット制御用オープンソフト **OROCOS** (Open Robot Control Software) 等の開発プロジェクトが実施されている。**OROCOS** は、欧州で開発されているオープンソースのロボット制御ソフトウェアライブラリである。ベルギーのルーヴェン・カトリック大学 (KULeuven)、フランスの Laboratory for Analysis and Architecture of Systems (LAAS)、スウェーデンの王立工科大学 (KTH) の 3 機関が中心となって開発が進められ、Real-Time Toolkit、Kinematics and Dynamics Library、Bayesian Filtering Library、Orocos Components Library の 4 つが公開されている。

v) その他の国々における研究開発動向

①韓国

韓国のロボットの科学技術政策はまだ浅く、1999年に韓国の技術経済分野におけるロボット技術の重要性の意識が高まり、2002年に科学技術省によるロボティクス研究会が発足し、国家レベルの研究が盛んになったところである。2003年には、科学技術省(Ministry of Science and Technology, MOST)において、21世紀フロンティア R&D プログラム(Frontier21)の一つとしてヒューマンライフサポートにおける知能ロボットプロジェクトが開始された。

現在、情報通信省(Ministry of Information and Communication, MIC)においては、ITベースの知能サービスロボットに関する研究開発プロジェクトが実施されている。通商産業省(Ministry of Commerce, Industry & Energy, MOCIE)では、クリーニングやセキュリティ、監視、教育を含むホームサービスロボットや、先端的な製造プロセスのためのロボット、フィールドロボットの研究開発プロジェクトが実施されている。

ロボット産業の国家戦略である「第一次知能型ロボット基本計画」が、2009年4月、国家科学技術委員会(委員長:大統領)で審議・確定された。本計画は、知能型ロボットの開発および普及を促進するために2008年9月に施行されたロボット特別法の具体的実現のための実践戦略である。

本計画は韓国政府・知識経済部の主導の下、教育科学技術部、国防部、保健福祉家族部、国土海洋部等8個の関連中央行政機関が協議して作成した今後5年間(2009~2013年)のロボット分野の国家基本計画である。長期ビジョンとして、2013年にロボット3大大国、2018年にロボット先導国家となることを目指している。

同計画の実現のため、R&D力の向上、先行的ニーズの拡大、持続可能な成長のための基盤構築、汎国家的な協力体系の構築等、4分野で合計16個の核心課題を選定している。

2009年は、基本計画と共に策定された2009年実行計画に基づき、関連する8中央省庁および9地方自治体において、合計57個の課題(予算規模約2,000億ウォン)を推進している。韓国政府は、本基本計画の推進のため、関係省庁との協議により、2013年までにR&Dを含めて約1兆ウォンの政府予算を投資することとしている。

これにより、2013年には国内市場規模4兆ウォン、世界市場占有率13.3%、輸出10億ドルを達成し、5年間で約13,800人の雇用創出効果を生み出すことが期待されている。

○ 標準化の取組

韓国の「IT839」戦略⁸⁶の一環として、ネットワーク基盤サービスロボット URC(Ubiquitous Robotic Companion)の開発が行われている。外部のセンサーネットワーク利用やサービスの遠隔操作により、ロボットの機能やサービスの向上を促し、いつでもどこでも必要なサービスを提供してくれるロボッ

⁸⁶ 韓国のIT推進政策。8・3・9とは、8大新規サービス、3大インフラ、9大新成長動力を意味する。2004年2月に制定され、その後2006年2月にu-IT839(uはユビキタスの頭文字)と改名された。それとともに内容も若干修正され、現在はそれに沿った計画が進められている。

トを目指している。この URC の取組の中で、URC 基盤技術の標準化についても検討が行われている。

②中国

中国の代表的な国家的ロボットプロジェクトは 1986 年の 3 月に開始された「863 プログラム（ハイテク研究発展計画）⁸⁷」と呼ばれるハイテクプログラム制度のもとで推進されている。

ロボット技術は「先端製造・オートメーション」技術分野のサブプログラムであり、大学・国立研究所の参画のもと、国家規模で行われている。本プログラムのロボット分野は、基礎研究（多指ハンド、ヒューマノイド、生物模倣ロボット）から応用ロボット（産業用ロボット、屋内／外サービス／メンテナンスロボット、検査ロボット、土木作業ロボット、農業／林業ロボット、医療福祉ロボットなど）まで幅広い分野を扱っている。

863 プログラムのほか、国の 5 ヶ年計画に基づき、中国独自の産業用のロボットについて研究開発が推進されている。2001 年からの「第 10 次 5 ヶ年計画」では、ハイアール・ハルビン工業大学ロボット技術有限公司⁸⁸ においてサービスロボットやペットロボットの開発、上海交通大学ロボット研究所では自律行動型の掃除ロボット（掃除ロボット隊）の開発、ハルビン工業大学⁸⁹ では人との会話が可能で知能サービスロボット、二足歩行ロボットの研究開発、中国化学技術隊では、深海探査用ロボットの開発および応用プロジェクト等の具体的なロボットプロジェクトが実施されている。

vii) 国際的な比較

①競争力評価

NSF、NASA、国立生物医学画像・生物工学研究所（National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, NIBIB）の 3 機関が WTEC, Inc. に委託してまとめた、世界各国のロボット事情を綿密に調査したレポート「WTEC Panel Report on International Assessment of Research and Development in Robotics (2006)」 [4-44] がある。同レポートは、米国、日本、韓国、欧州それぞれの強み・弱みの比較を、表 4-19 の通り要約している。

表 4-19 によれば、先ずインプット面では、日本は応用研究・産業ベース研究、国の研究イニシアチブ・プログラム、産学官連携においては、世界トップクラスと評価されている。

次にアウトプット面では、日本はヒューマノイド（人間型）ロボット、産業用ロボット（製造業用）、パーソナルロボット（家庭用）に強みがあると評価されている。サービスロボット（非製造業用）については、国による差異は小さいものの、韓国が最も強いと評価されている。

一方、米国は移動用ロボットと医療用ロボットに強みがあり、欧州は産業用ロボット（製造業用）と医療用ロボットに強みがあると評価されている。

⁸⁷ 中国政府が進めている研究開発プログラムの一つ。ハイテク産業技術の開発を目的とした応用技術研究開発プログラム。鄧小平国家主席の決断で 1986 年 3 月に実施が決定されたことから、863 計画と呼ばれる。

⁸⁸ 中国の大手家電メーカ「ハイアール」とハルビン大学の合弁企業。サービスロボット、ペットロボット等の開発を行っている。

⁸⁹ <http://www.hitsx.com>

表 4-19 ロボット分野における国際比較

分類	比較項目	米国	日本	韓国	欧州
インプット	基礎研究・大学研究（個人、グループ、研究センター）	*****	***	***	***
	応用研究・産業ベース研究（企業、国立研究所）	**	*****	****	****
	国または複数国による研究イニシアチブ・プログラム	**	*****	*****	****
	産学官連携と起業（アントレプレナーシップ）	**	*****	*****	****
アウトプット	移動用ロボット（軍事用、民生用）	****	**	**	**
	宇宙ロボット	***	**	n.a.	***
	ヒューマノイド（人間型）ロボット	**	*****	****	**
	産業用ロボット（製造業用）	**	*****	**	****
	サービスロボット（非製造業用）	***	***	****	***
	パーソナルロボット（家庭用）	**	*****	****	**
	医療用ロボット	****	**	**	****

②特許の出願件数

特許庁の「特許出願技術動向調査：ロボット」（2007）[4-42] より、日米欧の特許出願動向について述べる。

日本、米国、欧州の特許庁への出願を対象として、研究開発テーマ別・出願人国籍別の出願件数伸び率および1999年から2004年までの累積出願件数を軸に、研究開発テーマ毎の各国籍の出願状況を図4-25に示す。

出願件数伸び率は下式で定義されている。

$$\text{（2002年から2004年までの出願件数）} \div \text{（1999年から2001年までの出願件数）}$$

図4-25における配置は、次のように解釈できる。右上に位置している分野は、伸び率・出願件数ともに大きい「特に注力されている分野」、右下に位置している分野は、出願件数は少ないが伸び率が大きい「最近注目されている分野」、左上に位置している分野は、伸び率は小さいが出願件数が大きい、「成熟している分野」と解釈できる。

出願件数および伸び率を見ると、日本国籍については、歩行技術および多指ハンド技術の出願件数・伸び率がともに大きく、特に注力されている分野と考えられる。歩行技術と安全技術は、欧米からの出願件数はそれぞれ50件以下と少ないのに対し、日本からの出願件数は350件以上と多い。一方、複数ロボットの制御技術と遠隔操作技術については、米国籍による出願件数が最も多い。一方、音声認識技術、自律移動制御技術、画像認識技術等は、伸び率はそれほど大きくはないが出願件数が多く、比較的成熟しつつある分野と推察される。

米国籍については、遠隔操作技術、複数ロボットの制御技術、画像認識技術等は米国籍による伸び率が大きく、最近注目されている分野であると考えられる。欧州からは、いずれの技術もそれほど多くの特許出願が行われていない。

ロボット関連技術においては日本国籍による出願件数が最も多いことから、我が国は多くの分野で欧米に比べて優位性を確保しているものと想定される。特に歩行技術や多指ハンド分野で優位性が顕著であるが、その一方、複数ロボットの制御技術や遠隔操作技術に関してはやや米国に遅れをとっているように見受けられる。

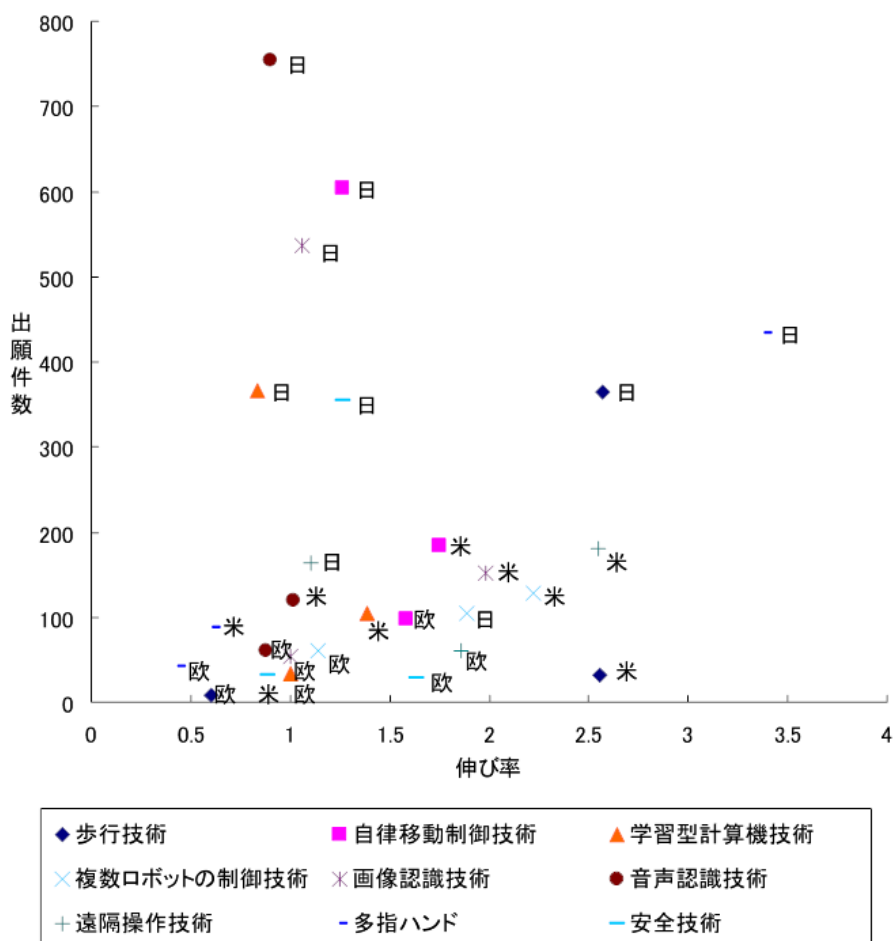


図 4-25 研究開発テーマ別の国籍別出願件数伸び率および出願比率

○ 出願人別の出願件数ランキング

日本、米国、欧州それぞれの特許庁への出願について、出願人の出願件数ランキングを表 4-20 に示す。日本特許庁出願について上位を見ると、全て日本企業が占めている。米国特許庁出願の出願人の出願件数ランキングをみると、日本と米国が各 4 社、韓国とドイツが各 1 社となっている。欧州特許庁出願の出願人の出願件数ランキングを見ると、日本が 4 社、ドイツが 3 社、米国が 1 社、スイスが 1 社、スウェーデンが 1 社となっている。日米欧ともに、日本企業が上位を占めており、日本企業の特許出願におけるプレゼンスの高さを示している。

表 4-20 出願人別の出願件数ランキング

・日本特許庁への出願

順位	出願人	出願件数
1	ソニー	733
2	松下電器産業	604
3	本田技研工業	461
4	安川電機	409
5	東芝	220
6	川崎重工業	215
7	トヨタ自動車	209
8	ファナック	201
9	三菱重工業	190
10	日立製作所	167

・米国特許庁への出願

順位	出願人	出願件数
1	ソニー	246
2	本田技研工業	207
3	アプライド マテリアルズ (US)	175
4	ファナック	168
5	三星電子 (KR)	126
6	松下電器産業	103
7	SIEMENS AG (DE)	85
8	インターナショナル ビジネス マシーンズ (US)	75
9	ストレイジ テクノロジー (US)	69
10	イントウイティブ サージカル (US)	64

・欧州特許庁への出願

順位	出願人	出願件数
1	ファナック	172
2	ソニー	114
3	本田技研工業	112
4	アー ベー ベー (SE)	72
5	松下電器産業	67
6	クーカ ロボテル (DE)	66
7	SIEMENS AG (DE)	64
8	アプライド マテリアルズ (US)	59
9	DUERR SYSTEMS GMBH (DE)	41
9	レリー エンタープライジズ AG (CH)	41

注) US : 米国、KR : 韓国、DE : ドイツ、SE : スウェーデン、CH : スイス

③論文の発表件数

特許庁の「特許出願技術動向調査：ロボット」(2007) [4-42] より、日米欧の論文発表動向について述べる。

同調査ではロボットに関する代表的な国際会議である IROS (IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems)を対象に、1999 年から 2005 年までの論文の発表件数を調査している。

大学、国の研究機関別の論文発表件数ランキングを表 4-21 に示す。

大学では東京大学が圧倒的に多く、全体の発表件数の 5% を占めているほか、日本の大学が上位を占めている。米国では、表 4-21 にあるカーネギー・メロン大学のほか UCLA、MIT の 3 大学が多い。

研究機関では、韓国の KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) および KIST (Korea Institute of Science and Technology)、日本の産業技術総合研究所、フランスの INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique) による発表件数が多い。

表 4-21 IROS の発表文献の研究機関別ランキング

a. 大学

順位	機関名	国	合計
1	東京大学	日本	151
2	カーネギー・メロン大学	米国	98
3	大阪大学	日本	81
4	東京工業大学	日本	77
5	東北大学	日本	60

b. 研究機関

順位	機関名	国	総計
1	KAIST	韓国	63
2	産業技術総合研究所	日本	55
3	INRIA	フランス	43
4	KIST	韓国	38
5	ATR	日本	19

(3) ライフサイエンス分野

1) 植物工場

(完全密閉型工場で遺伝子組換え植物を利用した医薬品合成等)

i) 技術の概要

ここでは主に「遺伝子組換え植物工場」を対象とする。「遺伝子組換え植物工場」とは、医薬品の原材料を生産する遺伝子組換え植物 (Genetically Modified Plants, GMP) の栽培を人工気象下で行う施設である。いわゆる植物工場において、遺伝子組換え技術を用いて植物に遺伝子を導入し、植物細胞内に新規タンパク質を生産させ、この新規タンパク質を抽出して医薬品等に用いる。あるいは、新規タンパク質の働きによって、植物細胞内で作りだされる新規化合物を抽出して医薬品等に用いる。

製造された医薬品は、植物製造医薬品 (Plant-Made Pharmaceuticals, PMP) と呼ばれる。この医薬品はタンパク質であることが多く、これは植物由来医療用タンパク質 (Plant-Derived pharmaceutical Protein, PDP) とも呼ばれる。

トウモロコシやホウレンソウを用いたワクチンや、タバコを用いた医療用抗体などの研究開発、製造、臨床試験などが進められている。遺伝子組換え微生物を用いた低分子量の医療用タンパク質の製造は既に広く行われているが、遺伝子組換え植物を利用すると、より高分子量の巨大な医療用タンパク質を安価に製造できる。

また、有用物質の生産に遺伝子組換え植物を利用することは、生産物の安全性や生産コスト、省エネルギーなどの点で大きなメリットがあると期待されている。

ii) 日本における研究開発動向

○ NEDO「植物の物質生産プロセス制御基盤技術開発」(2002～2009年度)

PL: 新名 惇彦 (奈良先端科学技術大学院大学 客員教授)

植物の物質生産プロセスをシステムとして解析してデータベースを構築し、工業原料などの有用物質を生産させる様々な実用植物の物質生産プロセスを人為的に改変するための技術基盤を構築することを目的としている (図 4-26)。

本プロジェクトではこれまでに、モデル植物としてシロイヌナズナとミヤコグサを選定し、DNA マイクロアレイによる遺伝子発現の網羅的解析や遺伝子導入による機能解析を行い、代謝経路の解明とデータベース化を進めた。また、代謝系の一連の遺伝子群を制御する調節因子の探索や、タバコを材料に葉緑体形質転換技術により基幹代謝系改変植物の作出も進めた。

モデル植物での成果を活用して、実用植物 (ユーカリ、ゴム、カンゾウ、アマ等) における目的物質の生産経路の解析と遺伝子組換え系の構築などを行って、植物の物質生産機能の工業的利用のための技術を開発した。

(研究開発の内容)

- 1.モデル植物を用いた植物の物質生産機能の解析
 - 1) cDNA⁹⁰ の取得および解析
 - 2) 物質生産系の経路と機能の解析
 - 3) 物質生産系における調節遺伝子等の機能の解析
 - 4) 統合データベースの作成
- 2.実用植物を用いた物質生産制御技術の開発
 - 1) cDNA の取得および解析
 - 2) 物質生産系の経路と機能の解析
 - 3) 物質生産系における調節遺伝子等の機能の解析
 - 4) 目的物質生産に関する遺伝子等の解析
 - 5) モデル植物や実用植物を用いた確認試験

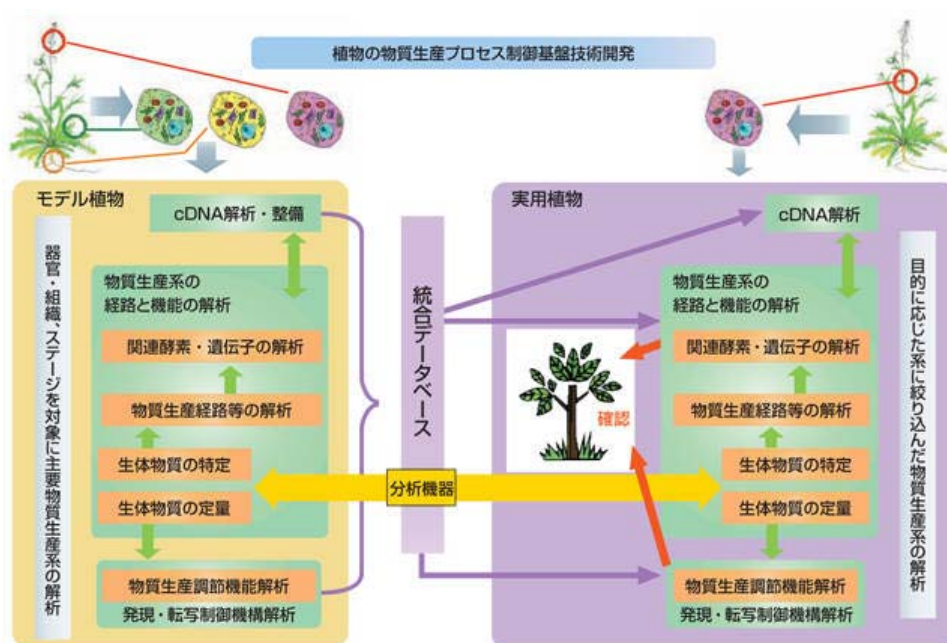


図 4-26 植物機能を活用した高度モノづくり基盤技術開発

○ 産業技術総合研究所

産業技術総合研究所では、完全密閉型遺伝子組換え植物工場システムを開発し、医薬品原材料を生産する遺伝子組換え植物の栽培を完全人工気象下で行う実証研究を進めている（図 4-27）。

インターフェロン（医薬品）などのタンパク質は組換え微生物や動物細胞を使って生産されるが、「培養タンクが必要」、「生産コストが高い」等の欠点があるため、本来、標的タンパク質を生産しないタバコやイチゴ、イネ、ジャカイモなどの遺伝子組換え植物を利用した研究を行っている。

⁹⁰ 相補的 DNA (complementary DNA) ともいい、mRNA から逆転写酵素を用いた逆転写反応によって合成された DNA。

遺伝子組換え植物を使うと「大量生産が容易」、「細菌毒素や動物由来感染症のリスクが低い」、「凍結乾燥すれば冷蔵不要で運搬も容易」という利点があり、低コスト化も期待できる。

今後は、人工気象下での遺伝子組換え植物を用いた生産システムにより、医薬原材料や機能性食品を生産する新たなものづくり産業ができると期待されている。



図 4-27 遺伝子組換え植物を使った医薬品原料生産のための密閉型遺伝子組換え植物工場システム [4-45]

○ 鹿島建設

鹿島建設㈱では、「完全密閉型遺伝子組換え植物工場」に関する研究・開発を行っている。

完全密閉型遺伝子組換え植物工場とは、遺伝子組換え植物による有用物質の安定的かつ高効率な生産を目的とした植物工場であり、外界と隔離したクリーンな環境で、光や温湿度などを植物の生育と有用物質生産にとって最適な条件に制御するとともに、組換え遺伝子の拡散を完全に防止する。また、医薬生産用 GMP 基準に対応した医薬品原料生成ラインを併設することにより、収穫から有用物質の抽出・精製を一つの施設内で一貫して行うことができる。

完全密閉型遺伝子組換え植物工場の建設には、クリーンルームや GMP 対応などの医薬品工場建設のノウハウと、植物を効率的に生産する施設建設のノウハウの、両者のエンジニアリング力が要求される。同社は両分野で培ってきたノウハウ、エンジニアリング力を結集させることにより、完全密閉型遺伝子組換え植物工場に求められる高い要求品質をクリアしている。また、この「完全密閉型植物工場システム」が 2007 年度グッドデザイン金賞【新領域デザイン部門】を受賞している。

iii) 海外における研究開発動向

海外での組換え植物体を用いた有用物質生産については、関係特許の申請数は、米国が最も多い。海外企業による研究で対象とされている宿主植物と有用物質には、

- ・ ニンジンおよびタバコによるゴーチェ病酵素（イスラエル Protalix Biotherapeutics）
- ・ 浮き草による C 型肝炎用インターフェロン（米国 Biorex）
- ・ トウモロコシによるのう胞性線維症治療用胃リパーゼ（フランス Meristem）
- ・ 浮き草による慢性中耳炎治療用 OP-145CSOM（オランダ OctPlus）
- ・ ナタネとメロンによるコクシジウム症用経口ワクチン（カナダ Guardian Biotechnologies）

等があり、また、カナダの SemBioSys はインスリン生産のための組換えベニバナを開放系で栽培し、インスリンを抽出・精製して製品化する研究を進めている。EU の R&D プロジェクトである Pharma Planta では、組換えトウモロコシとタバコで、HIV 治療用のモノクローナル抗体の生産に取り組んでいる [4-46]。

主として野外栽培を念頭に置いた欧米では、組換え遺伝子および生産物の通常作物への混入リスクに関する指摘が数多く出されており、組換え植物を開放系ではなく、温室等の施設内で栽培させる傾向が強まりつつある。

温室等の施設栽培を指向する主な要因としては、開放系による栽培では、遺伝子拡散防止や食物への混在問題が完全に解決できていないこと、収穫が天候に左右されて希望の有用物質を安定的に生産できないこと等が挙げられる。

完全密閉型の遺伝子組換え植物工場に関する開発事例は、特に見当たらない。

iii) 国際的な比較

現在、世界中で開発中の医療用物質生産遺伝子組換え植物は、多くのものが医薬品としての許認可を得るためのデータを取得中で、上市に近い段階に来ている。

2006 年に米国の企業が米国農務省の許認可を得た鶏のワクチンが植物生産の第 1 号だが、これはタバコ細胞をタンク培養して生産したもので、植物体の栽培による生産ではない。

遺伝子組換え植物を用いた医薬生産では、世界的に 2 割の機関が「タバコ」を基盤植物として用いている。

欧米では、組換え植物を開放系ではなく、温室等の施設内で栽培させる傾向が強まりつつある。

しかし完全密閉型遺伝子組換え植物工場は、海外では開発事例は特に見当たらない。したがって、この分野では日本が先行していると考えられる。

(4) 情報通信・エレクトロニクス分野

1) ネットワークフォトンクス（光ネットワークによる情報通信の省エネ化）

i) 技術の概要

「フォトンクス」とは、フォトン（光の粒子、光子）を利用する技術の総称であり、その一般的な代表例にはディスプレイ、光メモリ、光通信等がある。現在、インターネットの通信トラフィックは年率 40% で増加しており、この情報量処理するネットワーク機器の消費電力が問題となってきた。情報量が巨大な高精細映像情報などを活用した高度情報化社会の恩恵を多くの人が等しく享受するためには、現状より数桁低い消費電力で巨大情報を処理できる超低エネルギーネットワークが必要とされている。ネットワークフォトンクスとは、高精細映像情報などの巨大情報を超低消費電力で送受信できる新しい光パスネットワークに必要な光利用技術（フォトンクス）である。

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

○ NEDO： フォトニックネットワーク技術の開発（2002 年度～2006 年度）

PL：中野 義昭（東京大学先端科学技術研究センター 教授）、荒川 泰彦（東京大学ナノエレクトロニクス連携研究センター センター長）

フォトンクスネットワークを実現する上でコアとなる電子制御型の波長分割多重（Wavelength Division Multiplexing, WDM）光スイッチノードに関する研究開発として、WDM 光バーストラフィックの経路を自立的に切り替えるノード装置の心臓部を構成する光スイッチ、光波長変換器、光合分波器、波長可変光源、光増幅器の革新的技術開発を行った。

また、開発した各デバイスを接続して、サブシステムの研究および動作の実証を行った。さらに、将来を見据えた次世代光スイッチノード用デバイスとして、量子ドットやフォトンクス結晶等の先進的半導体構造を用いた高機能光集積回路の要素技術開発を行った。光スイッチノードの概念図と基幹光デバイス構成を図 4-28 に示す。

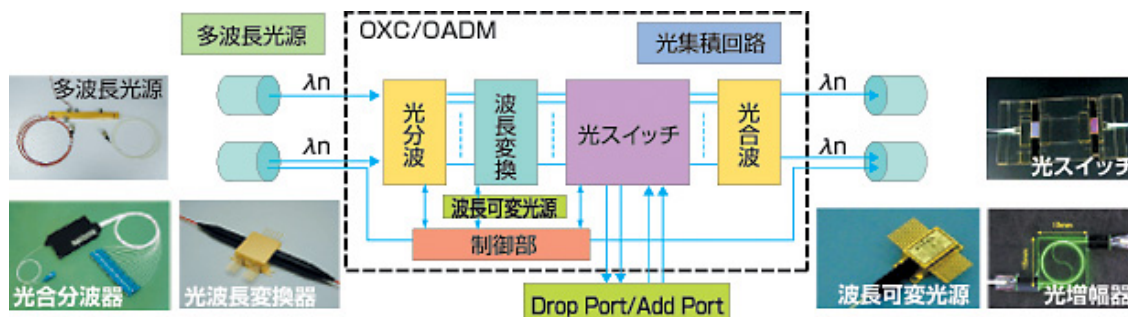


図 4-28 光スイッチノードの概念図と基幹光デバイス構成 [4-47]

○ NEDO： 次世代高効率ネットワークデバイス技術開発（2007～2011年度）

PL：浅見 徹（東京大学大学院 情報理工学系研究科 教授）

本プロジェクトでは、基幹通信網だけでなく、ローカルなネットワークにおける情報通信機器に対し、今後の情報化社会のインフラを支え、省エネルギー化への要求に応えることのできる大規模ルータや超高速ネットワーク実現に向けた研究開発を行うこととしている。

具体的には、光・電子デバイス技術およびそれらの融合技術、集積化技術、さらにシステム化技術の開発を行い、大規模エッジルータや超高速 LAN/SAN のシステム実証を通じて次世代高効率ネットワークのための基盤技術確立を目指している（図 4-29）。

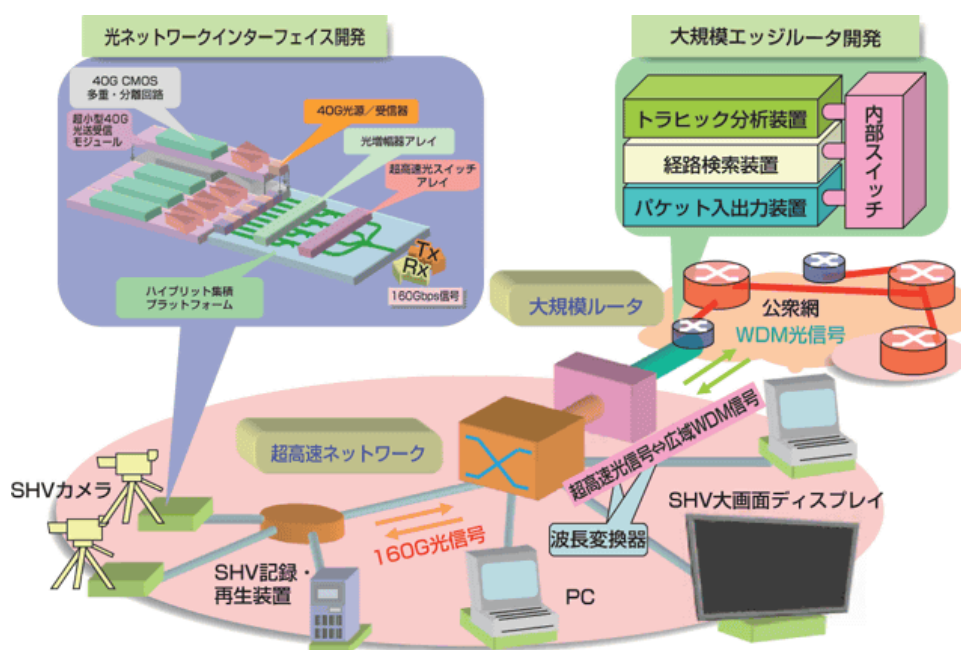


図 4-29 「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」の研究開発内容 [4-48]

○ 総務省： 次世代バックボーンに関する研究開発（2005～2009年度）

・概要：インターネット基幹通信網（バックボーン）における通信量（トラフィック）の急増やトラフィック交換の東京一極集中等に対応し、社会経済活動のインフラとなりつつあるインターネットの高信頼化、高品質化を図るため、次の技術に関する研究開発を推進する（図 4-30）。

- (1) 地域に閉じるトラフィックは当該地域で交換するため、トラフィックの交換管理・制御等を行う分散型バックボーン構築技術
- (2) 個々のサービスに応じた複数事業者間の品質保証技術
- (3) 異常トラフィックの検出・制御技術

・実施機関

NTT コミュニケーションズ(株)（代表研究機関）、日本電気(株)、日本電信電話(株)、東日本電信電話(株)、

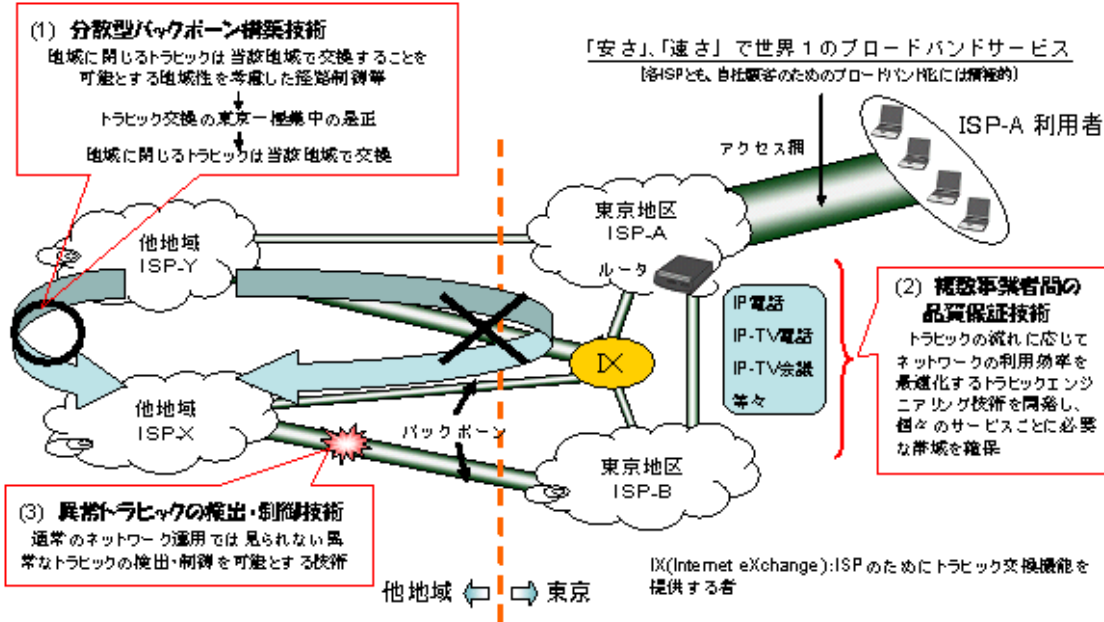


図 4-30 研究開発のイメージ [4-49]

②公的研究機関・大学における研究開発例

a. 産業技術総合研究所・ネットワークフォトンクス研究センター

同研究センターでは、産総研内の研究ユニット間の連携に加え、外部企業と連携を行い、低消費電力で巨大な情報を扱うことが可能な光パスネットワークを目指して、デバイス・光信号処理技術などを中心にした研究開発を、以下の4つのプロジェクトの中で進めている。

- 「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発プロジェクト」(2007年度～2011年度)
- 「高機能波長ドメイン光スイッチ」(2007年度～2009年度)
- 「光ネットワーク超低エネルギー化技術拠点」(2008年度-2017年度)
- 「グリーンネットワーク・システム技術研究開発プロジェクト(グリーン IT プロジェクト)」(2008年度-2011年度)

実際の研究は、以下の3チームにおいて実施されている。

- 超高速光デバイス研究チーム
- ナノフォトンクス集積研究チーム
- 光信号処理システム研究チーム

b. 情報通信研究機構 (NICT)

NICT では、光の属性を極限まで効率的に利用する最先端のフォトニックネットワークシステムの基礎技術を研究開発するとともに、急速に進展するブロードバンド環境や映像等のコンテンツ利用の拡大に対応してネットワークの大容量化・高機能化を実現するため、Pb 級のフォトニックネットワーク技術に関する研究開発を行っている。

- 超高速フォトニックネットワークの研究開発
- 高機能フォトニックノード技術の研究開発
- λ アクセス技術⁹¹ の研究開発
- λ ユーティリティ技術⁹² の研究開発
- 全光パケットルータ実現のための光 RAM サブシステムの研究開発
- 大容量光通信における高信頼データ秘匿技術に関する研究開発

③民間企業における研究開発例

a. NTT

NTT の「未来ねっと研究所」では、光の波長をルーティング識別子として利用し、電気信号処理では実現できない超大容量の IP トラフィックを処理する光パスの概念を世界で初めて提唱した。さらに、自律分散的にルータ間で制御信号を通信することで、トラフィックの状況に応じてダイナミックに大容量光パスを設定したり、その経路を切り替える GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching)⁹³ 制御技術も開発した。光パスと GMPLS 制御技術を組み合わせ IP と光を融合することで実現される光 MPLS (Multi-Protocol Label Switching)⁹⁴ ルータは、柔軟性と経済性を兼ね備えたペタビット級ネットワークの構築を可能とし、21 世紀の日本の情報通信基盤を支えるコア技術であり、さらなる大容量化、暗号通信など新たな情報通信インフラも視野に入れ、革新的基盤技術にも取り組んでいる。

代表的な研究開発成果の例を以下に示す。

- ・ NTT が提唱し標準化を図ってきた光パスの概念に基づく光ネットワークを実現する Tb 級光 MPLS ルータを世界で初めて開発
- ・ 2 時間の映画 1 本を 1 秒で送信できる世界最速 43 Gbps 超高速実験ネットワークを慶応大学で運用開始

⁹¹ 国際標準化を目指したテラビット級 LAN の基盤技術。

⁹² 異なる LAN (またはドメインなど) に属するユーザ同士が、ネットワークを跨いでいることを意識せずにストレスなく双方向に高速大容量通信を可能とするための技術。

⁹³ 光ネットワーク上の信号をルーティング (経路選択) するための技術。光信号の波長を元にルーティングの経路を決定したり、制御専用の IP チャンネルを用意して、実データは光信号のままルーティングするといった処理を行なうもの。

⁹⁴ IETF (Internet Engineering Task Force) が標準化を進めている、ラベルスイッチング方式を用いたパケット転送技術。現在インターネットで主流となっているルータを用いたパケットリレー式のデータ転送を、より高速・大容量化するもの。ルータが他のルータから受け取ったパケットを別のルータに転送する際には、ルーティング情報として IP ヘッダを利用するが、MPLS ではこの代わりに「ラベル」と呼ばれる短い固定長の識別標識を利用する。

- ・ ドイツテレコムと連携してドイツで 43 Gbps 共同フィールド実験を実施。共同で NTT 考案の新変調方式とドイツテレコムの測定方法の国際標準化の検討
- ・ 環境変化による波形ひずみを自動補正する技術によって従来の 16 倍の通信速度である 160 Gbps 伝送に成功し、超大容量光ネットワーク実現へ前進
- ・ 光パスを高速に切り替えることで、光メモリなしでルーティングを行う次世代光通信網の基盤技術である光バーストスイッチング技術の基礎実験に成功
- ・ 1 台のレーザーから 1,000 波長を発生させる SC 光源⁹⁵ を用いて、京阪奈～大阪間往復の 1000 波 WDM 伝送に世界で初めて成功

b. 富士通

富士通では、フォトニクスネットワーク関連製品として、以下を実用化・提供している。

・ WDM

光ファイバー1本あたりの伝送容量を飛躍的に拡大することが可能。ブロードバンド・ネットワークのバックボーンインフラを担うキープロダクト。

・ FLASHWAVE 7000 シリーズ

光ダイナミッククロスコネクタ機能を搭載、次世代ネットワークを支える第三世代 WDM 「FLASHWAVE 7500X WDM システム」をはじめ、高品質かつ柔軟なバックボーンネットワークの構築を強力に支援する製品。

iii) 米国における研究開発動向

米国政府は、IT により牽引された好景気 (IT バブル) の頃より、国際社会における IT 分野でのイニシアチブの確保を目指し、国家的視点から IT 戦略を展開してきた。また、競争促進こそが超高速ネットワークインフラ整備に不可欠との認識のもと、FCC (Federal Communications Commission) を核として競争環境の整備や規制緩和を実施している。また近年では、消費者保護に関する動きも開始している。R&D では大統領諮問機関のもと、省庁横断でプロジェクトを推進している。

DARPA 等が中心となり、各種の要素技術に関するプロジェクトを戦略的に推進している。

- ・ Chip-scale WDM : WDM 技術を利用した次世代ダイナミック網およびその構成要素技術の研究開発
- ・ Analog optical signal processing : 光アナログ信号処理技術によるシステム性能向上、高性能光検出、任意光波形発生等
- ・ Chip to chip interconnects : 40 Tbps での接続を可能とする光接続技術の開発

このほか、フォトニック技術を導入した研究開発ネットワークについて、以下のプロジェクトが実施されている。

- ・ 光スイッチ技術を導入して、ネットワーク相互接続点である STAR TAP (The Science,

⁹⁵ スーパーコンティニウム光源。種となる光パルスをガラスなどの透明な物質中に入射させたときに、種パルスの波長幅が数 100 倍に広がる現象を利用した光源。

- Technology, And Research Transit Access Point)⁹⁶ を光化する StarLight プロジェクト
- 100Tbps 以上の光ルータの実現を目標とする DODN (Data in the Optical Domain Networks) プロジェクト

iv) 欧州における研究開発動向

EU では 1998 年 1 月 1 日の電気通信完全自由化以降、旧独占事業者による独占状況が緩和され、インターネットの普及と活用を EU 全域にわたり調和の維持しつつ実現すべく、整備推進と法整備が進められている。具体的には、全欧州においてインターネットの普及を目指した「eEurope 2002 アクションプラン」、「eEurope 2005 アクションプラン」 [4-50]、従来の電気通信分野における規制の枠組を見直して競争を促進するための「電気通信パッケージ」 [4-51] 等である。また研究開発ではフレームワークプロジェクトで、IST (Information Society Technology) 関連に予算の 22% を割り当てて推進している。

研究開発については、FP6 (2002~2006 年) の OPTIMIST_II (Optical Technologies in Motion for the IST Programme II) プロジェクトにおいて、コアネットワークからアクセス系までの光ネットワーク技術や、波長の動的な制御・運用に向けた研究開発が行われた。

- STOLAS (Switching Technologies for Optically Labeled Signals) :
光ラベルスイッチによるルーティングを用いた光パケットネットワークの研究
- TOPRATE (Terabit/s Optical Transmission Systems based on Ultrahigh Channel Bitrate) :
1 波長当たりの伝送容量限界の追求や、160 Gbps を超える超高速光信号処理技術の研究

FP7 においては、現在表 4-22 に示す研究開発プロジェクトが実施されている。

表 4-22 EU-FP7 におけるフォトニックネットワーク関連の研究開発プロジェクト

ALPHA
Title: Architectures for flexible <i>Photonic</i> home and access networks
Research area: ICT-2007.1.1 The <i>network</i> of the future
Project start date: [2008-01-01]
BOOM
Title: Terabit-on-chip: micro and nano-scale silicon <i>photonic</i> integrated components and sub-systems enabling Tb/s-capacity, scalable and fully integrated <i>photonic</i> routers
Research area: ICT-2007.3.5 <i>Photonic</i> components and subsystems
Project start date: [2008-05-01]
APACHE
Title: Agile <i>photonic</i> integrated systems-on-chip enabling WDM Terabit networks
Research area: ICT-2007.3.5 <i>Photonic</i> components and subsystems
Project start date: [2008-04-01]
PHOTONICS4LIFE

⁹⁶ 北米、欧州、アジア地区の科学技術先進インターネット基盤ネットワークを相互接続するための交換サービスを行うプロジェクト。NSF の資金援助をもとに、イリノイ大学、ANL、インディアナ大学が共同で運用。

Title: <i>Network</i> of excellence for biophotonics
Research area: ICT-2007.3.5 <i>Photonic</i> components and subsystems
Project start date: [2008-05-01]
GIGAWAM
Title: Giga bit access passive optical <i>network</i> using wavelength division multiplexing
Research area: ICT-2007.3.5 <i>Photonic</i> components and subsystems
Project start date: [2008-04-01]
EURO-FOS
Title: Pan-European photonics task force: integrating Europe's Expertise on <i>photonic</i> subsystems
Research area: ICT-2007.3.5 <i>Photonic</i> components and subsystems
Project start date: [2008-05-01]

v) その他の国々における動向

①中国

中国は1999年の中国電信の分割を皮切りに独占体制を打破し、市場競争を促進し、ユニバーサルサービス構築のための政策や法整備を進めてきている。また2001年12月にWTOへの正式加入を果たし、電気通信市場の開放を進めている。その結果、1999年末に1億840万だった固定電話の加入者数が、2004年12月には固定電話の加入数が3億1,244万に、携帯電話の加入数が3億3,482万となり、加入数で世界第1位となった。また、インターネット利用者数は9,400万人となり、単独の国としては世界第2位と推定されている。

「情報産業第十一次五カ年計画」（2006年～）では、情報技術分野での独創能力、情報化発展能力を強化し、国民経済と社会の情報化に有力な基盤を提供していくことが重視されており、情報セキュリティ技術、電子政務関連技術の開発の強化、規格標準や知的財産権戦略の推進も重点課題とされている。なお研究開発の詳細については明らかではない。

②韓国

韓国は早くから国家戦略としてITに取り組んでいる。ITを活用して国全般の知識情報化を促し、韓国を知識情報強国にしようとしている。競争力の確保や新たな成長産業の育成を目指し、「CYBER KOREA 21⁹⁷⁾」や「u-KOREA⁹⁸⁾」、「Broadband IT KOREA Vision 2007⁹⁹⁾」、「IT839戦略¹⁰⁰⁾」等を策定している。

韓国は参与政府の科学技術基本計画（2003～2007）で国家戦略科学技術として6つの技術（IT:情報技術、T:バイオ、NT:ナノテク、ST:航空宇宙、ET:環境エネルギー、CT:文化）を選択した。各分野における研究開発は主に民間主導で進められているが、官民の研究開発費におけるIT分野の比率は3割を超え重要な位置を占めている。また、デジタルメディアに基づいた先端文化芸術産業を発展させ

⁹⁷⁾ <http://www.mic.go.kr/ck21/eng>

⁹⁸⁾ http://www.ukoreaforum.or.kr/ukoreaforum/eng/forum_01.jsp

⁹⁹⁾ http://eibm.co.kr/board/material_files/1217_IT%C4%DA%B8%AE%BE%C6%BA%F1%C0%FC%C0%FC%B7%AB%20.pdf

¹⁰⁰⁾ http://www.mic.go.kr/eng/res/res_pub_it839.jsp

るための技術 CT を国家戦略として位置づけたことも注目に値する。

1995 年に策定された「2025 年に向けた科学技術発展長期ビジョン」においても、研究開発投資の拡大と科学技術人材の育成に力を入れている。なお、情報通信分野を担当し、IPTV (Internet Protocol TeleVision)¹⁰¹ や高速無線通信規格である WiBro¹⁰² などの IT 政策を推進している情報通信部の再編 (IT 産業、放送、電子政府、デジタルコンテンツなどの各担当部への移行) が 2007 年末から検討され始めている [4-52]。なお研究開発の詳細については明らかではない。

vi) 国際的な比較

特許庁の特許出願技術動向調査報告書「光伝送システム」(2008) [4-53] を基に、国際的な特許の出願動向、論文の発表動向を比較する。

①特許の出願動向

a. 出願人国籍別の出願動向

出願件数は 2001 年をピークに急速な減少傾向にあり、特に米国籍出願人の出願件数の減少が大きい (図 4-31)。

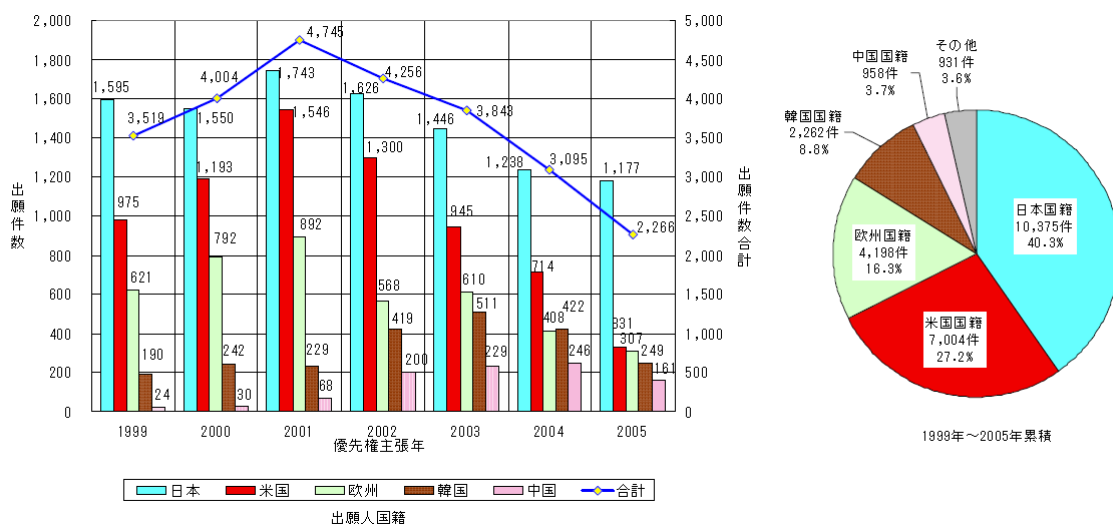


図 4-31 出願人国籍別出願件数推移とシェア (出願先: 日米欧中韓) [4-53]

b. 日米欧中韓における出願バランス

出願先国別では日本への出願件数が 8,343 件と最大で、次いで米国、欧州、中国、韓国への順になっている。韓国籍出願人の出願件数は各国・地域に対して支出超になっている (図 4-32)。

¹⁰¹ IP (Internet Protocol) を利用してデジタルテレビ放送を配信するサービス、またはその放送技術の総称。

¹⁰² WiMAX 規格を元に韓国の電子通信研究院 (ETRI) が中心になって独自に拡張した移動体無線用通信規格。

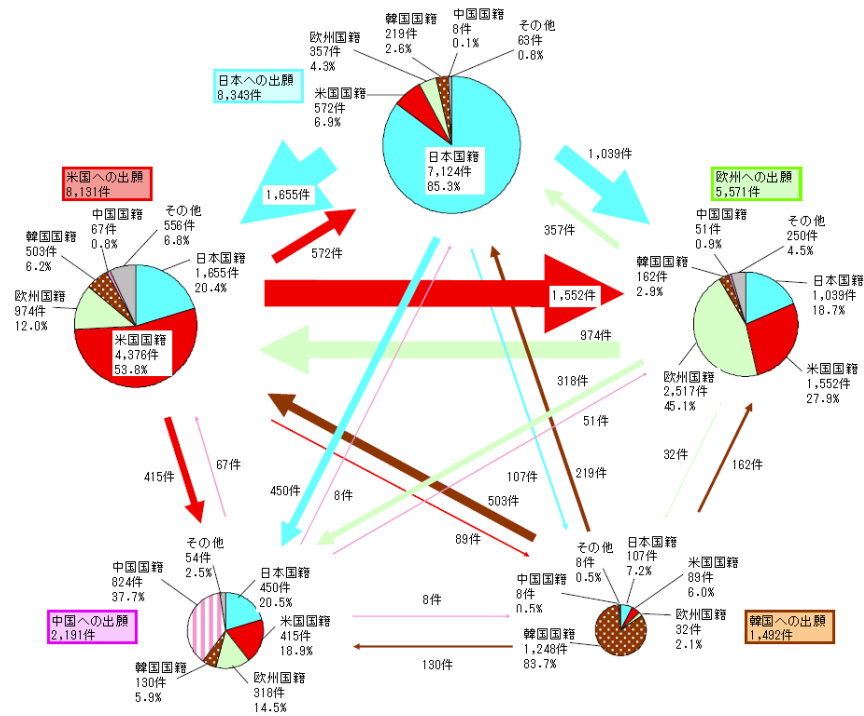


図 4-32 日米欧中韓における出願収支（1999年～2005年累積）[4-53]

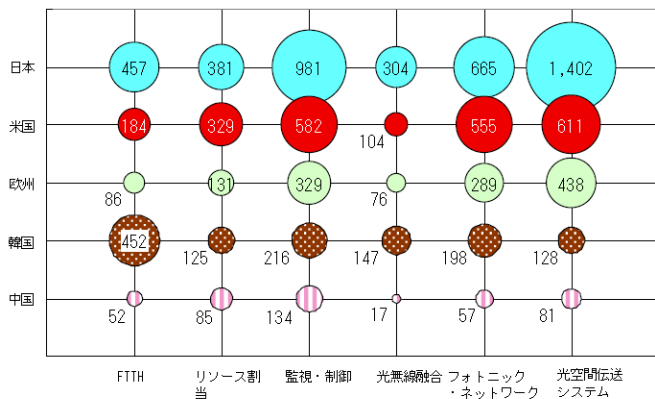
c. 技術区分別の特許出願件数比較

全ての技術区分で日本国籍の出願件数が最も多く、特に光無線融合、光空間伝送システム、光多重化の分野で他を大きくリードしている。

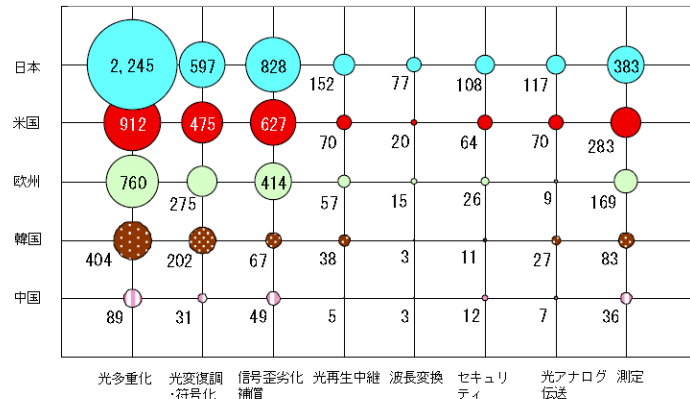
光ネットワーク技術では、光空間伝送システム、監視・制御、フォトニック・ネットワークに関する出願件数が多く、それぞれに日米欧の国籍で 80 数% から 90 数% を占めている。韓国は FTTH (Fiber To The Home)¹⁰³ には集中的に、他の技術項目についてはほぼまんべんなく出願している。

光伝送方式では、光多重化、信号歪劣化補償、光変復調・符号化に関する出願件数が圧倒的に多い。特に光多重化については、日本国籍出願人の出願件数が米国籍の 2.5 倍と多い (図 4-33)。

¹⁰³ 光ファイバーを伝送路として一般個人宅へ直接引き込むアクセス系光通信の網構成方式。



(a)光ネットワーク技術



(b)光伝送方式技術

図 4-33 出願人国籍毎の技術軸別出願件数の分布（出願先：日米欧中韓、1999年～2005年累積）[4-53]

d. 出願人別動向

富士通、アルカテル、三星電子、ルーセント・テクノロジーズ、シーメンスが3～5カ国（地域）で上位にランキングされている（表 4-23）。

表 4-23 出願先国別出願件数上位ランキング（対象期間：1999年～2005年）[4-53]

出願先	日本	件数	出願先	米国	件数	出願先	欧州	件数	出願先	韓国	件数	出願先	中国	件数
1	日本電信電話（日）	938	富士通（日）	556	アルカテル（仏）	748	三星電子（韓）	835	華為技術（中）	178				
2	富士通（日）	756	アルカテル（仏）	424	シーメンス（独）	350	ETRI（韓）	148	アルカテル（仏）	147				
3	日本電気（日）	680	ルーセント・テクノロジーズ（米）	335	富士通（日）	340	LG電子（韓）	124	三星電子（韓）	88				
4	三菱電機（日）	446	ノーテル・ネットワークス（加）	276	ルーセント・テクノロジーズ（米）	196	コリア・テレコム（韓）	83	ルーセント・テクノロジーズ（米）	72				
5	松下電器産業（日）	420	三星電子（韓）	266	三星電子（韓）	137	エスケー・テレコム（韓）	46	富士通（日）	65				
6	住友電気工業（日）	380	日本電気（日）	175	アジレント・テクノロジーズ（米）	129	KIST（韓）	25	マルコーニ（英）	54				
7	日立製作所（日）	368	フィニサー（米）	168	マルコーニ（英）	124	KAIST（韓）	18	ジー・ティー・イー（中）	51				
8	東芝（日）	246	シーメンス（独）	131	ノーテル・ネットワークス（加）	105	松下電器産業（日）	15	上海交通大学（中）	49				
9	古河電気工業（日）	205	アジレント・テクノロジーズ（米）	110	インフィニオン・テクノロジーズ（独）	96	フィニサー（米）	14	シーメンス（独）	48				
10	三星電子（韓）	189	コーニング（米）	99	日本電信電話（日）	96	情報通信大学（韓）	13	松下電器産業（日）	47				

②論文の発表動向

日米欧中韓とも論文発表件数は、ほぼ横ばいまたは漸増傾向で、特許出願動向とは異なり、全体として増加傾向にある（図 4-34）。

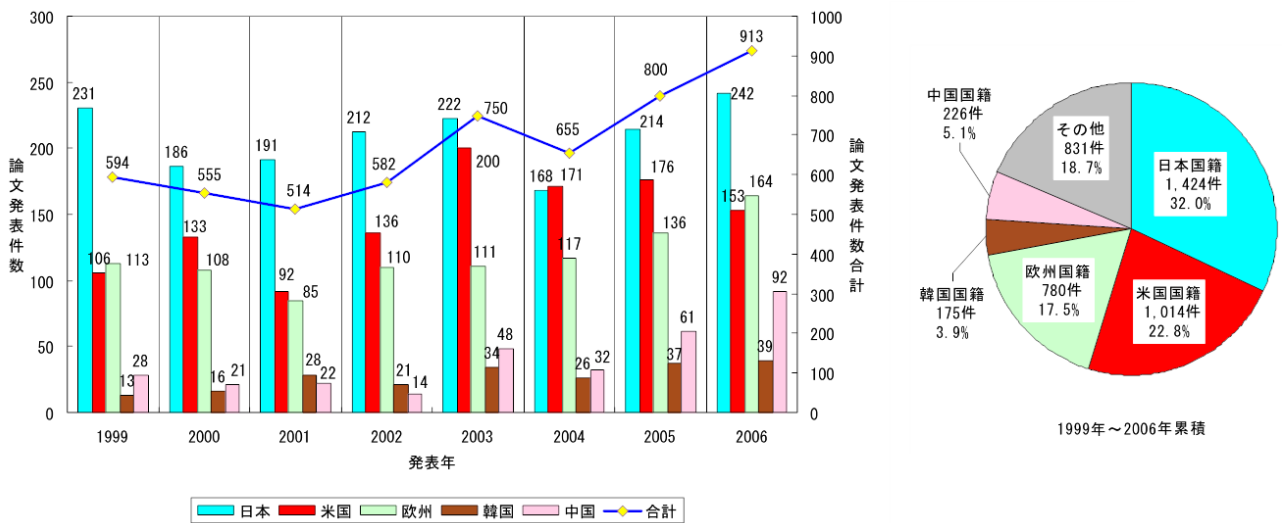


図 4-34 研究者所属機関国籍別論文発表件数の推移とシェア [4-53]

③特許出願動向と市場動向の関係

特許出願件数の推移と市場動向を重ね合わせたものを図 4-35 に示す。特許出願件数は、1999 年から 2001 年にかけて増大して以降、2005 年まで大きく減少しており、この出願減少傾向と 1999 年から 2003 年にかけての市場動向は、一致している。市場は、世界最大であった米国で 2000 年頃発生した光バブルの崩壊に巻き込まれる形で、欧州市場も一気に縮小した。

この二大市場の急速な縮小は、米国、欧州の企業のみならず、これらの市場に多くを輸出していた我が国の企業にも打撃を与え、結果、特許出願件数の上位にランキングされている日米欧の業の生産額は減少している。この影響を受け、特許出願件数も減少しているものと推察される。

特に、特許出願に熱心であったベンチャー企業は、光バブルの崩壊で大きな打撃を被ったと考えられ、出願人、出願数とも激減している。中でもベンチャー企業が多い米国国籍出願人（ベンチャー企業出願件数の約 60% は米国国籍）の出願件数の大幅減が出願総件数低減の 1 つの要因と推察される。

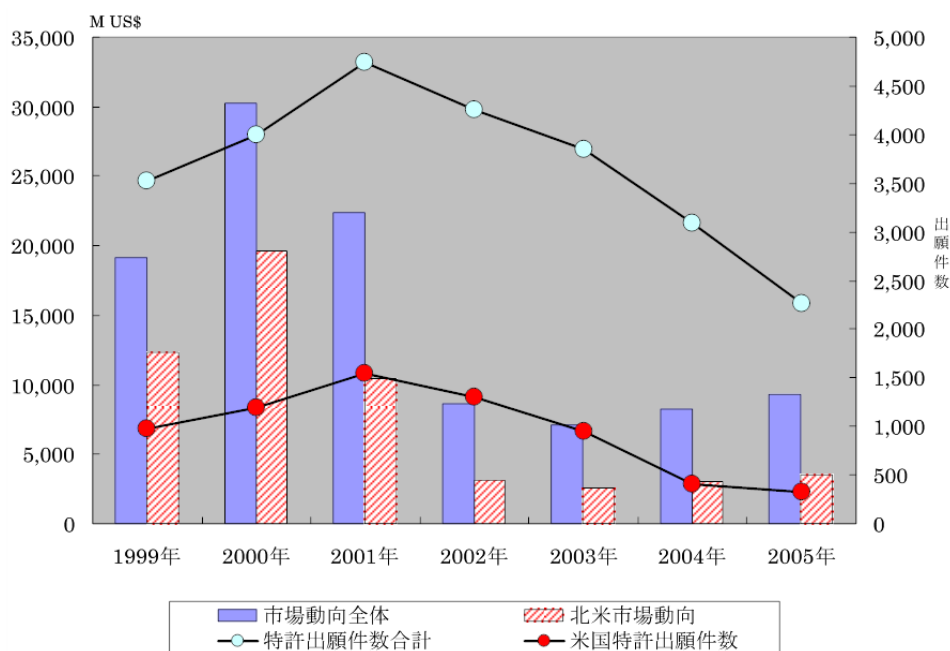


図 4-35 特許出願件数と市場動向との比較 [4-53]

④特許出願動向と論文発表動向の関連分析

論文発表の総数は、特許出願が減少傾向にある 2001 年から 2005 年にかけて増大傾向にあり（図 4-36）、光バブル崩壊の影響は見受けられない。論文発表者の所属機関を大学・公的研究機関と企業とに分類して発表論文件数を分析すると、前者の件数が 2003 年以降増大しているが、それに対して後者の件数にはほとんど変化が見られない。

論文発表件数の増大は、大学・公的研究機関が光伝送の分野に注力した結果であると考えられる。論文発表件数が大きく増大している分野は、光ネットワーク技術ではリソース割当、フォトニック・ネットワーク、FTTH、光伝送方式技術では光変復調・符号化、信号歪劣化補償の分野であるが、これらは、光伝送システムの基礎技術領域であり、産業界・学会がともに注目している技術分野である。今後は、これらの技術分野に関しての特許出願が増加する可能性がある。

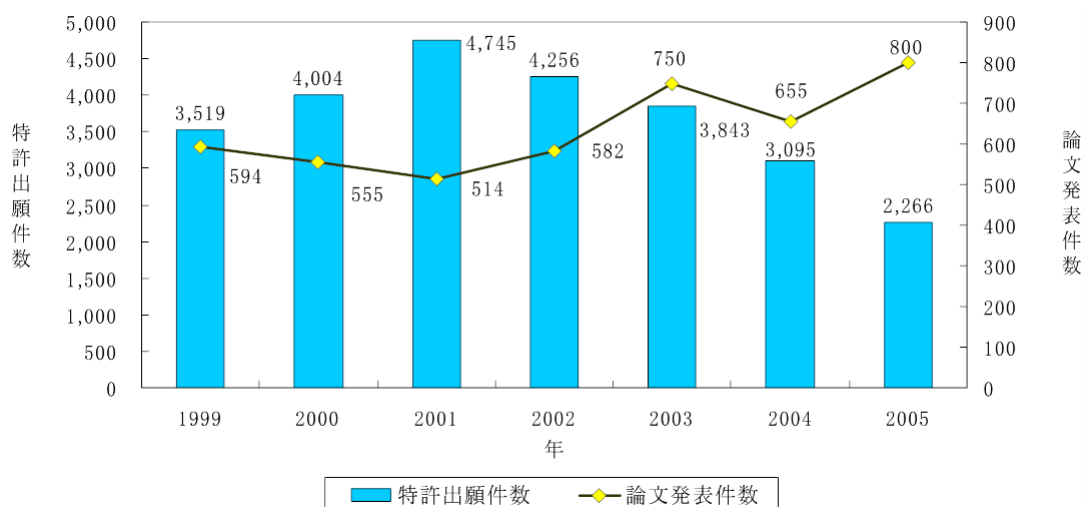


図 4-36 特許出願件数と論文発表件数の対比 [4-53]

⑤まとめ

- ・ 特許出願件数は全体として 2001 年をピークに減少傾向（2005 年：2001 年比 48%）にあるのに対して、研究開発発表論文件数は、むしろ増加傾向にある（2005 年：2001 年比 156%）。出願件数の減少には、2000 年に始まったいわゆる光バブルの崩壊が影響していると考えられる。
- ・ 技術分野別の出願件数では全ての分野で日本からの出願件数が最も多く、特に光無線融合（日米欧中韓への出願の 47%）、光空間伝送システム（同 53%）、光多重化の分野（同 51%）で他を大きくリードしている。

2) スピントロニクス

i) 技術の概要

スピントロニクスは、固体中の電子の電荷とスピンの両方を工学的に利用、応用する分野または技術を意味する。

これまでのエレクトロニクスではほとんどの場合電荷の自由度のみが利用されてきたが、この分野においてはそれだけでなくスピンの自由度も利用し、これまでのエレクトロニクスでは実現できなかった機能や性能を持つデバイスが実現されている。

代表的な応用例として、1988年に発見された巨大磁気抵抗効果¹⁰⁴があり、現在ハードディスクドライブのヘッドに使われている。

なお、スピントロニクスの原理、および産業技術総合研究所における研究の詳細については、第5章に譲ることとする。

ii) 日本における研究開発動向

①政府関連プロジェクトにおける研究開発例

スピントロニクスに関する政府関連プロジェクトにおける研究開発例を以下に示す。

○ 新機能素子研究開発協会、産業技術総合研究所「メモリデバイスの研究開発事業」（2002～2006年度）

・目的

不揮発性磁気抵抗メモリ（MRAM）は、スピン現象を応用したスピンメモリデバイスの一つであり、スピン依存電気伝導が引き起こす大きなトンネル磁気抵抗（Tunnel Magneto-Resistance, TMR）効果¹⁰⁵を用いる新規の不揮発性メモリである（図4-37）。これは、無限回数の書き換えが可能、TMR素子の微細化や積層により超ギガビットの大容量化が可能、高速動作が可能、低電圧動作が可能などの優れた潜在的可能性を持つ。本プロジェクトでは、MRAMの超ギガビット級大容量化と高速動作を可能とするために必要な高品質TMR素子技術、低電力磁化反転技術、磁性体微細加工技術、集積化プロセス技術などの基盤技術を開発することを目的とする。

・研究開発体制

MRAMの超ギガビット級大容量化と高速動作を可能とするために必要な高品質TMR素子技術、低電力磁化反転技術、磁性体微細加工技術、集積化プロセス技術などの基盤技術を開発した。新機能素子研究開発協会と産業技術総合研究所が、研究項目を分担して本研究開発を行った。

¹⁰⁴ 磁気抵抗効果： 固体物質や固体素子に磁界を印加することにより電気抵抗が変化する現象であり、その電気抵抗の相対的な変化率を「磁気抵抗比」あるいは「MR比」という。巨大磁気抵抗効果： 通常の金属の磁気抵抗比は数%だが、1nm程度の強磁性薄膜（F層）と非強磁性薄膜（NF層）を重ねた多層膜には、数十%以上の磁気抵抗比を示すものがある。このような現象を巨大磁気抵抗効果と呼ぶ。

¹⁰⁵ 磁気により絶縁体膜のトンネル電流が変化する現象。

・研究開発項目

①MRAM 要素技術の研究開発

- (i)単結晶高品質 TMR 素子技術 (独立行政法人産業技術総合研究所)
- (ii)高耐熱性 TMR 素子技術 (財団法人新機能素子研究開発協会)
- (iii)スピン注入磁化反転技術 (独立行政法人産業技術総合研究所)
- (iv)反磁界低減化新材料技術 (財団法人新機能素子研究開発協会)

②MRAM デバイス化技術の開発

- (i)磁性体加工技術 (財団法人新機能素子研究開発協会)
- (ii)メモリセル高性能化技術 (財団法人新機能素子研究開発協会)

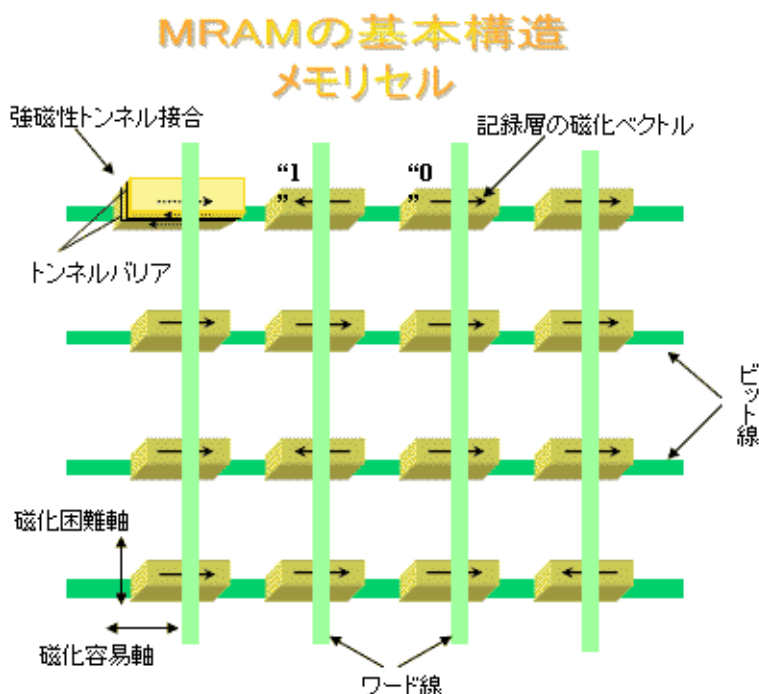


図 4-37 MRAM の基本構造 [4-54]

○ NEDO「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」(2006～2010 年度)

電子の電荷自由度のみならず、電子のスピン向きも利用するスピントロニクス技術は、将来のエレクトロニクスにおける中核的な基盤技術として期待されている。スピンの最大の特長である磁気ヒステリシス効果¹⁰⁶を利用する不揮発性機能は、待機電力をほとんど必要としないスピン不揮発性デバイスを可能にする。これらのデバイスを使用することで、電子情報機器の超低消費電力化を実現している。

本プロジェクトでは、強磁性金属のナノ構造体を基本とし、超高集積で高速な不揮発性メモリとし

¹⁰⁶ 外部から磁界あるいは電流を加えて物質の磁化の状態を変えた状態から、磁界あるいは電流をゼロにしても磁化の状態が保持されている効果。

て期待されるスピン RAM のための基盤技術、また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピン光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子実現のための基盤技術を確立することを目標としている。

②公的研究機関・大学における研究開発

産業技術総合研究所では、不揮発エレクトロニクスによる究極のグリーンIT機器の実現を目指して、スピントロニクスの本格的な研究開発を行った。不揮発エレクトロニクスの中核となる大容量・高速・高信頼性の不揮発性メモリを実現するために、酸化マグネシウム (MgO) を用いた高性能の磁気抵抗素子とその量産技術を開発した。この技術を用いた超高密度ハードディスク (HDD) 磁気ヘッドはすでに製品化され、現在究極の不揮発性メモリ「スピン RAM」の研究開発が精力的に進められている [4-55]。

京都大学・化学研究所では、金属・半導体などを組み合わせてナノスケールの人工物質を作り出し、電子の電荷・スピン・位相の織り成す多彩な物性の制御を目指した研究を行っている [4-56]。

特に、電子の二つの自由度である電荷とスピンを自在に制御するスピントロニクスを実現することを目指している。このような研究は、近年の微細加工技術の飛躍的な進展によって初めて可能になったもので、基礎研究が応用へと直結する物質科学研究として世界的に一大潮流となっている。

人工物質の作製は、

- (1) 超高真空蒸着による原子層単位での多層膜作製
- (2) 電子線リソグラフィーを用いたナノメートルスケールの加工

という二つの微細加工技術を組み合わせて行われる。

得られた人工ナノ物質を舞台として、電気伝導度・X線回折・磁化率・磁気力顕微鏡・トンネル顕微鏡・メスバウアー分光・中性子回折などの様々な測定手法を駆使して、新しい物性の探索を行い、電気伝導や磁性などの物性の制御を行っている。

現在進行中のテーマは以下の通りである。

- (1) ナノ磁性体 (磁性細線やナノドット等) における磁化過程の制御
- (2) 強磁性体から非磁性体 (金属、超伝導体、半導体) へのスピン注入による物性制御
- (3) 超高密度記録媒体・磁性単電子素子への応用を目指した磁性ナノ微粒子
- (4) 強磁性体の磁化状態のスピン電流による制御
- (5) 人工量子系 (人工原子など) における量子状態制御

大阪大学・産業科学研究所では、酸化物スピントロニクスデバイスの研究を行っている。たとえば、同デバイスに適用しうる新規な物性・機能を示す新しい酸化物材料の探索・創製を行っている。そのような新材料の例として、強磁性酸化物電界効果トランジスタ用に向けて創製した $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 薄膜がある。レーザ MBE 法で新たに作製したスピネル型 $\text{Mn}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ 薄膜では、Mn のドーピング量を増やすことにより、電子移動度はほとんど変化せず、キャリア濃度が 2 桁ほど減少する。にもかかわらず、MRAM への応用に重要なキャリアのスピン偏極が観測された。化学的安定性 (耐酸化性) も向上しており、様々な物質 (強誘電体、光伝導体) と組み合わせてヘテロ構造デバイスを作製できる。

本材料は、強磁性電界効果トランジスタを実現する可能性を有する物質として期待されている。

③民間企業における研究開発例

日立製作所と東北大学金属材料研究所は共同で、固体中の電子が持つ磁気的な性質「スピン」を制御する、スピントロニクスデバイスのシミュレーション技術を開発した（2009年）[4-57]。

開発した技術は、電子の波としての性質を記述する量子力学的な手法により、磁性多層膜に電流を流した状態での微視的な電子のレベルにおける「スピン」の流れ(スピン流)と、電子単位のスピントルク¹⁰⁷を計算し、結果を磁化の動的シミュレーションに組み入れることにより、磁化を反転させる電流を予測し計算するというものである。

この計算によって求めた電子単位のスピントルクを、磁化の動的シミュレーションに組み入れることにより、微視的な電子のレベルから巨視的な磁化のレベルに拡張するシミュレーション技術を開発。これにより、磁化が反転する電流を予測することが可能となった。

iii) 米国における研究開発動向

米IBMとスタンフォード大学は、電子スピンと呼ばれる物理現象を電子工学に応用するスピントロニクス分野の研究を進めるため、研究センター「IBM-Stanford Spintronic Science and Applications Center (SpinAps)」を2004年に設置した。

同センターの設立資金はIBM社とスタンフォード大学が出資している。個々の研究プロジェクトに対しては、DARPA、DOE、NSF等の組織が資金を提供している[4-58]。

iv) 欧州における研究開発動向

欧州におけるスピントロニクスに関する主な研究拠点・研究者を以下に示す。

- ・ドイツ：ユーリッヒ研究所・固体物理学研究所： Peter H. Dederichs 教授 等
(その他：ミュンヘン大学、ハレ大学、マックスプランク微細構造物理研究所、クラウスタール工科大学)
- ・英国：ダレスベリー研究所・物理部： Walter Temmerman 教授 等
(その他：キール大学、ランカスター大学、ワーウィック大学、シェフィールド大学)
- ・フランス：国立科学研究センター(CNRS)： Frédéric Petroff 教授 等
(その他：ストラスブルグ大学)

v) 国際的な比較

JST・研究開発戦略センターの「科学技術・研究開発の国際比較(2009年版)概要版」(2009)[4-59]によれば、スピントロニクス材料を中心にしたナノ磁性材料について、日本が世界の先端を進んでいる、とされている。また、日米のリードに韓国が食い込み、中国が猛追している、とも記されている。

以下、同レポートにおける、スピントロニクスを含むナノエレクトロニクスに関する記述を引用す

¹⁰⁷ 電流によって磁化を反転させる回転力。

る。

- ナノエレクトロニクス分野では日本は総じて高い水準にあるが、世界の中における日本の位置は必ずしも楽観できるものではない。
- 長期的観点に立ってその技術を育てていかなければやがては韓国あるいは中国にいずれ追い抜かれるであろう。
- これだけの情報の交換が頻繁に行われている中で表に出てきた成果はすぐ世界共通の技術となり、人件費で有利な国がその恩恵を被る仕掛けとなることは過去の歴史が物語っている。
- このような観点で世界をもう一度見てみると、米国は基礎から応用まで巧妙に戦略的にナノエレクトロニクスの分野を発展させており、欧州は伝統的に基礎研究を得意とする国が多くそこから新たな芽を出しつつあることは強く認識すべきである。
- 米国は研究から産業化まで高い水準を維持しているのに比べ、日本における研究は系統的進展が見えにくい状況にある。
- 特に最近スタートした米国の NRI（ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ）は、35 大学 21 州を含み、2020 年を目指して世界から若い人材を集めようとしているのに対し、日本にはそのような規模のナノエレ戦略は存在しない。
- また韓国は豊富な財力と比較的低い人件費によって、現在急速に進展している。
- 既にいくつかの技術に関しては日本、米国を抜いており他の技術分野でも同じことが容易に予想される。
- 中国は、まさに発展途上であるが、まだ基礎研究は弱いとはいえ、どん欲に日米欧の技術を取り入れつつあり、それこそ低い人件費で少なくとも既存のデバイスに関しては非常に有利な状況に立ちつつある。
- 米国で学んだ多くの若い研究者が本国、台湾に帰りその研究者たちが中核となって現在急速な発展を遂げつつある。10 年後の中国のこの分野での力は計り知れないといえる。

(5) 標準・計測分野

1) 光・量子ビームイメージング技術 (計測・分析用)

i) 技術の概要

光・量子ビームイメージング技術 (計測・分析用) は、コヒーレント放射光、レーザー、マルチパス X 線、電子ビーム等の光・量子ビームを用いたイメージングを、医療用・科学用・産業用の計測・分析に用いる技術である。

ii) 日本における研究開発動向

① 主な研究開発例

産業技術総合研究所の光・量子イメージング技術研究グループでは、光・量子ビーム源や高感度検出技術の開発など、先端的な計測・分析機器に関する研究開発により、高度医療診断、次世代材料の探索等を進めている。特に病院・産業の現場等のサイトに導入できる小型加速器を用いた光源の開発を進め、新たな材料分析技術の研究を行っている。

重点研究として、小型加速器をベースとしてレーザーコンプトン散乱¹⁰⁸ という手法を用いた新しい X 線光源や、独自の技術に基づいた偏光可変放射光源の開発を進めている。

現在、医療現場において小形加速器の利用が普及しつつあるが、同グループではさらに一歩進めて、小形加速器をベースとしたより鮮明な医用診断イメージングへの応用研究や、真空紫外円二色性計測による分子キラリティについての研究に取り組んでいる。

主な成果として、以下が得られている。

① コンパクト加速器で準単色マルチパルス X 線生成に成功

- コンパクト加速器でマルチパルス X 線生成・観測に世界で初めて成功した。レーザーコンプトン X 線としては世界初のピコ秒 X 線パルスによるリアルタイム血管造影、屈折コントラスト法による卵巣摘出マウスの病状撮影等、医療応用に着手した。

② 溶液中試料の真空紫外域円二色性測定に成功

- フッ化カルシウム窓の溶液セルによる水溶液の真空紫外域円二色性測定技術を高度化し、糖の分子立体構造を真空紫外域円二色性スペクトルに対応付けた。世界初の溶液の窓無し測定 (溶液ジェット法) も可能とした。

③ 遺伝子 DNA の新しい電子移動機構を発見

- 癌化のメカニズム解明の一助となる遺伝子 DNA の新しい電子移動機構を発見した。DNA の電子構造とその動的変化を直接的に調べる手法を独自に開発し、一次元分子鎖のアト秒領域の電子移動速度を新たに計測する手法を確立し、リン酸基に沿ったらせん軸状に電子が移

¹⁰⁸ コンプトン散乱とは、X 線が物質の衝突して散乱する場合、長波長側にシフトした光と電子を放出する現象。一方、レーザーコンプトン散乱とは、レーザー光と電子線を衝突させて X 線を発生させる現象のこと。

動するという新しい知見を得た。

②主な研究機関

ビーム物理（光・量子ビームメーキングを含む）に関する主要な研究機関を表 4-24 に示す。

表 4-24 ビーム物理に関する主要な研究機関の例 [4-60]

研究機関	代表研究者	研究内容等	URL
■東北大学; 理学部・物理学科/大学院理学研究科; 物理学専攻・原子核理学講座【協力講座】(原子核理学研究施設)	浜 広幸(教授)	コヒーレント放射光・電子ビーム診断技法、自由電子レーザー、リング加速器のビーム物理、ストレッチャー・ブースターリング開発。	http://www.lns.tohoku.ac.jp/
■東京大学; 工学部システム創成学科環境エネルギーシステムコース/大学院工学系研究科・原子力専攻(専門職大学院)	上坂 充(教授)	先進小型加速器、レーザープラズマ加速、医学物理、放射線診断治療。	http://www.nuclear.jp/~kiki/uesaka/index.html
■早稲田大学; 理工学部/大学院理工学研究科・物理学及応用物理学専攻(理工学総合研究センター)	鷲尾 方一(教授)	フォトカソードRF電子銃による高品質電子ビームの生成およびビームを用いた応用実験。	http://www.f.waseda.jp/washiom/
■光産業創成大学院大学; 光エネルギー分野	北川 米喜(教授)	ハンディ粒子加速器の開発。超小型低コスト放射線装置・ガラス細管加速器・低侵襲放射線治療への適用。	http://www.gpi.ac.jp/
■名古屋大学; 理学部・物理学科 / 大学院理学研究科・素粒子宇宙物理学専攻・高エネルギースピ物理研究室 (SP 研)	中西 疆(教授)	リニアコライダー用スピン偏極電子源、表面電子顕微鏡 (LEEM)用スピン偏極電子源、ERL 用低エミッタンス電子源の開発および実用化の研究、高偏極度、高量子効率を有する半導体フォトカソードの基礎開発研究。	http://spin.phys.nagoya-u.ac.j
■立命館大学; 理工学部・電子システム系・電子光情報工学科/大学院理工学研究科(21世紀COE放射光生命科学センター)	山田 廣成(教授)	卓上型放射光装置「みらくる20」および「みらくる6X」の開発研究、X線・軟X線発生機構(制動放射、パラメトリック放射、遷移放射)研究、新型自由電子レーザー「光蓄積リング」開発、ビーム入射法、ビームダイナミクス、位相コントラストイメージング、タンパク質構造解析、遠赤外線吸収分光、生命科学研究、物質科学研究。	http://www.ritsumei.ac.jp/se/re/yamadabalab/home1.htm http://www.bkc.ritsumei.ac.jp/se/re/SLLS/

研究機関	代表研究者	研究内容等	URL
■京都大学; 大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻・ビーム物理分科【協力講座】(化学研究所・先端ビームナノ科学センター 粒子ビーム科学研究室)	野田 章(教授)	小型加速器(7MeV陽子線形加速器、100MeV電子線形加速器など)を建設整備しつつ、最先端の加速器技術の開発とビーム物理学の研究、さらに産業や医学応用のための加速器設計研究など。	http://wwwal.kuicr.kyoto-u.ac.jp/www/index.html
■京都大学; 工学部・物理工学科 / 大学院工学研究科・原子核工学専攻・量子ビーム科学講座	伊藤 秋男(教授)	光、電子、イオンなどの量子ビームと気体、液体、固体との相互作用。	http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/Groups/Gr3/
■大阪大学; 大学院理学研究科・物理学専攻【協力講座】(産業科学研究所・量子ビーム科学大部門・量子ビーム発生科学分野)	磯山 悟朗(教授)	線形加速器による高輝度・超短パルス電子ビームの発生; 赤外自由電子レーザーの開発と短波長自由電子レーザーの基礎研究; 低速陽電子の発生と輸送; コヒーレント放射などの高エネルギー電子による光の発生。	http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/as/index2.html
■兵庫県立大学; 理学部・物質科学科/大学院物質理学研究科・物質機能解析部門【協力分野】(高度産業科学技術研究所・光量子科学技術大講座・ビーム物理分野)	宮本 修治(教授)	「ニュースバル」電子蓄積リングの高性能化、放射光の高輝度化とコヒーレント化を目指した加速器とビーム物理に関する、実験・理論・シミュレーション研究。	http://www.lasti.uhyogo.ac.jp/beam_physics/index.html
■広島大学; 理学部・物理科学科/大学院先端物質科学研究科・量子物質科学専攻・ビーム物理研究室	岡本 宏巳(教授)	次世代高エネルギー加速器の基礎開発、極限ビーム生成、非中性プラズマ物理、ビーム冷却法、ビームの相転移現象などに関し、実験と理論の両面から研究する。	http://home.hiroshima-u.ac.jp/beamp_hys/index.html
■高エネルギー加速器研究機構(KEK)	-	高エネルギー加速器およびその応用に関する研究開発。	http://www.kek.jp/
■産業技術総合研究所	三浦 永祐 (パワーレーザーグループ、リーダー) 小池 正記 (光・量子イメージング技術研究グループ、リーダー)	ビーム物理を研究している研究ユニットとして、エネルギー技術研究部門パワーレーザーグループや計測フロンティア研究部門光・量子イメージング技術研究グループなどがある。	http://unit.aist.go.jp/energy/groups/pw_laser.htm http://unit.aist.go.jp/riif/ci/organization/qrg.html

注) ほかに多くの大学で物理ビームに関する研究開発が行われているが、ここでは紙面の都合上割愛した。

iii) 米国における研究開発動向

特に米国が注目している光科学技術の研究開発分野として、超高速現象、テラヘルツ光科学、膜タンパク質の機能計測、超高精密計測技術、セラミクスレーザー、パルス X 線イメージング、X 線領域

の光物理学、強光子場科学などが挙げられる。

①ALS (Advanced Light Source)

ALS は真空紫外・軟 X 線領域で世界最高峰の輝度を誇る放射光施設で、LBNL 内にある。高精度・高分解能の軟 X 線発光・吸収分光測定が可能である。

軟 X 線結像顕微 CT では、50~20 nm の 2 次元分解能が得られている。焦点深度を考えるとこの分解能で測定できるのは数 μm 以下のサイズで細胞一個の内部構造の計測が可能である。光学素子は電子線描画と金のウェットプロセスによるフレネルゾーンプレート (Fresnel Zone Plate, FZP)¹⁰⁹ で、LSI の多層配線と同じようなプロセスにより電子線露光での近接効果の問題を回避させている。

軟 X 線領域では最外輪帯幅 20 nm 以下の FZP が実現されており、さらに 10 nm 以下のゾーンプレートの実現を目指し、2 枚のゾーンプレートを組み合わせる方法などが検討されている。また、左右で位相をシフトさせた FZP や渦巻き状の FZP の開発も行われている。この FZP を用いることにより FZP 単体で位相差イメージングが可能となる。

②APS (Advanced Photon Source)

APS¹¹⁰ は我が国の SPring-8 と同クラスの第三世代施設として、ANL に建設された先端シンクロトロン放射光施設で、1996 年から稼働している。

本施設でのイメージング関連の研究としては、マイクロ秒の時間分解能を持つ各種イメージング技術を使ったディーゼルやガソリンエンジンの燃料スプレーの研究がなされている。トピックスとしては、1) 高圧高速ディーゼル燃料噴霧により発生する衝撃波を X 線ラジオグラフィーで可視化した研究、2) ノズルから噴霧されたガソリン燃料スプレーの断面を超高速 X 線 CT で可視化した研究、3) 高エネルギー X 線を利用した位相コントラストイメージング法により、3 mm 厚の鉄を通して高圧燃料入射チャンバー内での燃料入射プロセスを可視化した研究などがある。第 3 世代放射光光源ならではの最先端のイメージング技術を産業応用に結びつけている点が特徴的である。

¹⁰⁹ 規則的に間隔の変化する同心円帯を作り、各輪帯からの光が同位相で 1 点に集まるようにしたもので、レンズと同じような機能を有する。

¹¹⁰ <http://www.aps.anl.gov/About/Visiting/>

③SLAC National Accelerator Laboratory

SLAC National Accelerator Laboratory¹¹¹ では、2009年に LCLS (Linac Coherent Light Source) で、世界世界初の X線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser, X-FEL)¹¹² の発振に成功した。LCLS では、タンパク質粒子などのバイオ試料の単粒子イメージングを目指しており、X-FEL の超短パルスにより、試料が壊れる前に回折パターンを取得することを狙いとして研究が進められている。JTEC¹¹³ 製の 1 μm -KB ミラーと 0.1 μm KB ミラーの二段集光により、1 μm 以下の大きさの試料に対してサブ nm 分解能での観察を目指している。高ダイナミックレンジの 2次元検出器の開発も進められている。

また、硬 X線イメージングでは、マウス等の生体 CT などの研究が行われている。直径 200 μm 、最外輪帯幅 30 nm の FZP を用いて、空間分解能 50 nm での吸収および位相コントラストイメージングを行っている。

iv) 欧州における研究開発動向

欧州の研究開発は、フランスに施設をおく欧州の共通基盤的研究施設である ESRF、その他ドイツ、英国の放射光施設などが研究開発の中核的な役割を担っている [4-61], [4-62]。

①ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) (フランス)

ESRF¹¹⁴ は、我が国の SPring-8 と同クラスの第三世代施設として建設された先端シンクロトロン放射光施設で、フランスのグルノーブルにある。

X線の集光に関して、KB ミラーや回転楕円鏡を用いて 100 nm 以下の集光サイズが実現され、シンクロトロン放射光を用いた蛍光 X線イメージングによる空間分解能 100 nm 以下での細胞などの元素分析イメージングの研究がなされている。

X線のコヒーレンスを利用した回折顕微法では、2つの Si 屈折レンズを平行配置した新しいタイプの干渉計が研究されている (ESRF の ID06¹¹⁵ で開発され、エネルギー10~20 keV で使用可能)。近

¹¹¹ <http://www.slac.stanford.edu>、“Stanford Linear Accelerator Center” から 2008 年に SLAC National Accelerator Laboratory に名称変更。

¹¹² 自由電子レーザーのうち、X線領域で発振を行うものから得られる光。可干渉性を持ち、短いパルス幅と大きなピーク輝度を持つ。X-FEL は、波長 0.1nm 以下の X線領域において、100 フェムト秒以下の極短パルスおよび良好な干渉性を実現する「放射光とレーザーの特徴を併せ持つ光」であり、そのピーク輝度は Spring-7 の 10 億倍を上回る。このような特性を持つ X-FEL による、対象物の原子レベルでの構造解析や超高精度・超高速イメージングにより、単分子での生体成分の立体構造解析、ナノレベルでの化学反応の動的観察、細胞の高分解能イメージングなど、従来の手法では実現が不可能な、あるいは極めて困難な分析が可能となる。たとえば、タンパク質の立体構造解析において、X-FEL は放射光、電子顕微鏡および NMR などの従来の分析法における制約を取り除く手法を提供する。特に、現状では構造解析に膨大な労力と資源を要し、新たな手法の開発も検討されている結晶化の困難なタンパク質に対して、単分子レベルでの迅速な解析が X-FEL により可能となれば、重要なタンパク質の構造・機能情報の特許化や創薬・新規診断法への波及が期待される。

¹¹³ 株式会社ジェイテック。同社の主力製品・技術の 1 つである X線ナノ集光ミラーの表面加工技術は、世界トップレベルの加工精度として認められている。

¹¹⁴ <http://www.esrf.eu/>

¹¹⁵ ESRF のビームラインの名称。次の ID17、ID19 も同様。

接場光 (Nearfield)¹¹⁶ の干渉縞¹¹⁷ と Ta グリッドとのモアレ縞を利用することで、5 nm の精度で干渉縞ピッチ変化を検出可能である。

ID17 と ID19 では硬 X 線顕微鏡の投影イメージングと CT を中心とした応用実験が多数行われている。Talbot 干渉計による位相コントラスト等も行われている。ID17 での医学利用は既に終わっており、代わりに考古学、古生物学等への応用が見られる。球面波による拡大投影による高分解能イメージングも可能である。

なお、ESRF ではアップグレード計画 (2008~2017 年) が進められており、イメージング法に特化した新ビームラインや新ブランチの建設の計画されている。

② DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) (独)

DESY¹¹⁸ では、自由電子レーザー利用実験として期待されているコヒーレント X 線イメージングが進められている。コヒーレントイメージングにおいて、一般的な限界 (約 10 nm) を、これを乗り越える方法として、一つは、X-FEL の超短パルス性により、放射線損傷の閾値を引き上げること、もう一つは、イメージングに必要な照射量を減らすということを挙げた。自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL)¹¹⁹ のフェムト秒パルスでは試料が壊れる以前の構造を取得できること、異なる配向の試料からの回折データから再構成していくことにより、これらを達成することを目指している。

③ Diamond Light Source(英)

Diamond Light Source¹²⁰ は 2007 年から稼働している英国の国立シンクロトロン施設である。Diamond では、2011 年 10 月の利用開始を目指し、赤外線から X 線領域までの高輝度ビームライン (I13L) を建設中である。I13L はマイクロからナノスケールの硬 X 線イメージングのために設計されている。このビームラインにより、医薬品、材料科学など幅広いイメージングの研究がなされることが期待されている。

v) その他の国々における研究開発動向

欧米以外の国でも、近年、量子ビーム関連施設の建設が相次いでおり、アジアでは、NSRC (National Synchrotron Research Center, タイ)、NSRRC (National Synchrotron Radiation Research Center, 台湾)、PAL (Pohang Accelerator Laboratory, 韓国)、Australian Synchrotron (豪) などで、放射光利用の一環としてイメージングの研究開発が実施、ないし計画されている。

たとえば、Australian Synchrotron¹²¹ は 2003 年に建設が始まり、2007 年に開設された。硬 X

¹¹⁶ 光の波長よりも微小な物質構造に光を当てた際に、その物質構造の表面に発生するが遠くへ伝搬することがない特殊な光。

¹¹⁷ 光の干渉によってできる明暗の縞模様。

¹¹⁸ http://www.desy.de/html/home/index_eng.html

¹¹⁹ 自由電子のビームと電磁場との共鳴的な相互作用によってコヒーレント光を発生させる方式のレーザー。

¹²⁰ <http://www.diamond.ac.uk/Home/About.html>

¹²¹ <http://www.synchrotron.org.au/index.php/home>

線マイクロビームは、2008年4月からコミッショニング¹²²、2009年1月からユーザ利用を開始している。X線エネルギー領域4～25 keV、全反射非球面KB鏡で約1 μmのビームサイズ、FZPを用いた場合の最高分解能で60 nmである。この性能自体は標準的であるが、光学素子がすべて水平偏向とされている点に特徴がある。

2009年現在、イメージング用に中尺ビームラインが建設中であり、中尺ビームラインは医学利用（動物実験と臨床応用）を目的とした大視野イメージングのためのウィグラー光源ビームラインである。

vi) 国際的な比較

たとえば、放射光を利用したイメージングをキーワードとする論文発行数で見ると、我が国を発行国とする論文は欧米と比較しても多く、我が国の研究開発レベルは、国際的に高いレベルにあることは間違いない¹²³。

もっとも、量子ビームを利用した先端的なイメージング研究は、新規光源の開発戦略に大きく影響される。近年ではX-FEL装置について、欧米では既に大規模プロジェクト（DESY(独)、SLAC(米)）が開始されており、この分野で我が国の研究開発はこれを追う状況となっている。

¹²² 当初性能検証。

¹²³ たとえば、「放射光」and「イメージング」のキーワードで科学技術論文データベースJSTPlusを検索すると、2000年代の論文数は発行国が日本であるものが396報、米国であるものが43報、欧州（英、独、仏、イタリア、スイス）であるものが50報である。検索キーワードの設定次第でこの種の論文数は変化するため、これをもって我が国の研究開発が欧米と比較して、非常に活発であると速断することはできないが、我が国の研究開発層の厚さの証左の一つと見ることはできる。

【引用文献】

- 1) NEDO (2010) 「よくわかる技術解説」
<http://pub.maruzen.co.jp/ntsshop/search/NTS830895.html>
- 2) 太陽光発電技術研究組合 (PVTEC) (2010)
<http://www.pvtec.or.jp/about/index.html>
- 3) NEDO/株資源総合システム (2009) 「太陽光発電技術開発動向等の調査」
- 4) 特許庁 (2009) 「平成 20 年度特許出願技術動向調査報告書 (太陽電池) 要約版」
- 5) 埼玉大学・工学部応用化学科・三浦研究室 (2010) 「高品質バイオディーゼル燃料製造プロセスの開発」
<http://www.apc.saitama-u.ac.jp/bukka/BDF.htm>
- 6) NEDO (2010) 「バイオマスエネルギー等高効率転換技術開発」
http://www.nedo.go.jp/activities/portal/p07015_5.html
- 7) 新日本石油 (2009) 「ニュースリリース」
http://www.eneos.co.jp/company2/press/2008_2009/20090209_01_0940197.html
- 8) 埼玉大学・工学部応用化学科・三浦研究室 (2010)
<http://www.apc.saitama-u.ac.jp/bukka/BDF.htm>
- 9) <http://biotech.nikkeibp.co.jp/bionewsn/detail.jsp?newsid=SPC2010012670611>
- 10) NEDO (2010) 「海外レポート：第二世代バイオ燃料の研究開発動向 (欧米)」、No.1059
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1059/1059-01.pdf>
- 11) NEDO (2006) 「海外レポート：バイオディーゼル燃料の動向 (米国)」、No. 973
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/973/973-15.pdf>
- 12) NEDO (2008) 「海外レポート：バイオガス・バイオディーゼルプロジェクト(イタリア)」、No.1021
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1021/1021-08.pdf>
- 13) (独) 科学技術振興機構・研究開発センター (2009) 「科学技術・研究開発の国際比較 (環境技術)」
- 14) NEDO (2010) 「水素製造・輸送・貯蔵システム等技術開発」
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p08003/p08003.html>
- 15) PNNL (2006), "Chemical & Materials Sciences Division Research Highlights - Hydrogen Storage: Operando Methods in Catalysis"
<http://www.pnl.gov/science/highlights/highlight.asp?id=114>
- 16) 産業技術総合研究所・ユビキタスエネルギー研究部門・蓄電デバイス研究グループ (2010)
<http://unit.aist.go.jp/ubiqen/advbat/index.html>
- 17) 環境メディア (2010)
http://kankyomedia.jp/release/20100216_262.html
- 18) 河本 洋 (2010) 「自動車用高出力・大容量リチウムイオン電池材料の研究開発動向」
http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt106j/1001_03_featurearticles/1001fa02/201001_fa02.html

- 19) 関西電力 (2003) 「R&D News Kansai」
- 20) 旭化成 (2009)
<http://www.asahi-kasei.co.jp/hebel/eco/eco7.html>
- 21) DOE エネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE) (2010)
<http://www.eere.energy.gov>
- 22) DOE エネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE) (2010)
http://www.eere.energy.gov/consumer/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12660
- 23) Geo Heat Center (2010)
<http://geoheat.oit.edu/whatgeo.htm>
- 24) DOE エネルギー効率・再生可能エネルギー局 (EERE) (2010)
http://www.eere.energy.gov/consumer/your_home/space_heating_cooling/index.cfm/mytopic=12650
- 25) 産業技術総合研究所 (2010) 「大地の熱的機能とその利用方法」
<http://staff.aist.go.jp/k.morita/functions.html>
- 26) 太陽光発電協会 (2010) 「太陽光発電のしくみ」
<http://www.jpea.gr.jp/11basic03.html>
- 27) EU (2010), "Brochure More Microgrids"
<http://www.microgrids.eu/documents/552.pdf>
- 28) Pearce J.m. (2009), "Expanding photovoltaic penetration with residential distributed generation from hybrid solar photovoltaic and combined heat and power systems," Energy, Vol.34, No.11, 1947-1954
- 29) NEC トーキン (2009) 「スーパーキャパシタの原理と構造」
http://www.nec-tokin.com/product/cap/sucap/pri/pri_1.html
- 30) NEDO (2009) 「海外レポート」、No.1047
- 31) Rajesh Bashyam& Piotr Zelenay (2006), "A class of non-precious metal composite catalysts for fuel cells," Nature
<http://www.nature.com/nature/journal/v443/n7107/full/nature05118.html>
- 32) NEDO (2009) 「海外レポート：レアメタルの回収及び代替材料の研究開発動向 (欧米)」
<http://www.nedo.go.jp/kankobutsu/report/1047/1047-10.pdf>
- 33) CNRS (仏・国立科学研究センター) (2008) 「プレスリリース」
<http://www2.cnrs.fr/en/1112.htm>
- 34) JST (2009) 「科学技術・研究開発の国際比較 2009年版」
- 35) 文部科学省・経済産業省 (2007) 「文部科学省・元素戦略プロジェクト及び経済産業省・希少金属代替材料開発プロジェクト：研究開発課題の採択について」
http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/07/07071217.htm

- 36) NEDO (2009) 「グリーン・サステイナブルケミストリー分野の技術ロードマップ」
- 37) JST (2009) 「科学技術・研究開発の国際比較 2009年版：環境技術」
- 38) 経済産業省 (2009) 「技術戦略マップ 2009」
http://www.meti.go.jp/policy/economy/gijutsu_kakushin/kenkyu_kaihatu/str2009.html
- 39) 総務省消防庁消防大学校・消防研究センター (2010) 「消防活動を支援するロボット技術・救助資機材の開発」
http://www.fri.go.jp/cgi-bin/hp/index.cgi?ac1=JRR1&ac2=21&ac3=495&Page=hpd_view
- 40) (社) ロボット工業会 (2010)
http://www.jara.jp/x2_lab0/list.htm
- 41) 東京大学・大学院情報理工学系研究科・佐藤・森研究室 (2010)
<http://www.ics.t.u-tokyo.ac.jp/projects/projects-j.html>
- 42) 特許庁 (2007) 「特許出願技術動向調査報告書：ロボット」
- 43) NEDO (2006) 「海外レポート」、No.980
- 44) World Technology Evaluation Center, Inc. (2006), "WTEC Panel Report on International Assessment of Research and Development in Robotics"
- 45) 産業技術総合研究所 (2010) 「密閉型遺伝子組換え植物工場」
http://www.aist.go.jp/aist_j/sst/exhibition_guide/43.html
- 46) 経済産業省 (2010) 「有用物質生産のための基盤植物作出技術の研究開発プロジェクト関連資料」
- 47) NEDO (2010) 「フォトリソグラフィ技術の開発」
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p02035/p02035.html>
- 48) NEDO (2010) 「次世代高効率ネットワークデバイス技術開発」
<http://www.nedo.go.jp/activities/portal/gaiyou/p07012/p07012.html>
- 49) 総務省 (2010) 「次世代バックボーンに関する研究開発」
http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/051020_2_3_2.html
- 50) 欧州委員会 (2002), "eEurope 2005: An information society for all"
http://ec.europa.eu/information_society/eeurope/2005/all_about/action_plan/index_en.htm
- 51) 欧州議会 (2009), "Telecoms package: strengthening users' rights and internet security"
<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?language=EN&type=IM-PRESS&reference=20090330IPR52900>
- 52) 産業技術総合研究所 (2009) 「第 2 期研究戦略 平成 21 年度版：情報通信・エレクトロニクス分野」
- 53) 特許庁 (2008) 「特許出願技術動向調査報告書：光伝送システム」
- 54) (財) 新機能素子協会 (2010) 「MRAM・スピントロニクス」
<http://www.fed.or.jp/project/mram/index02.htm>
- 55) 湯浅 新治, 久保田 均, 福島 章雄, 薬師寺 啓, 長浜 太郎, 鈴木 義茂, 安藤 功兒 (2009) 「スピントロニクス技術による不揮発エレクトロニクスの創成 - 究極のグリーン IT 機器の実現に向け

- てー」、Synthesiology、Vol. 2、No. 3
- 56) 京都大学・化学研究所・ナノスピントロニクス・小野研究室 (2010)
<http://ssc1.kuicr.kyoto-u.ac.jp/indexj.html>
- 57) <http://journal.mycom.co.jp/news/2009/07/24/052/index.html>
- 58) <http://www.nikkeibp.co.jp/archives/304/304506.html>
- 59) 科学技術振興機構・研究開発戦略センター (2009) 「科学技術・研究開発の国際比較 (2009 年版) 概要版」
- 60) 日本物理学会 (ビーム物理領域) (2010)
<http://beam-physics.kek.jp/bpc/inst.html>
- 61) (財) 高輝度光科学研究センター, (独) 理化学研究所 (2006) 「第 9 回放射光装置技術国際会議 (SRI 2006) 報告」、SPring-8 Information (SPring-8 利用者情報)、Vol.11、No.4
- 62) (財) 高輝度光科学研究センター, (独) 理化学研究所 (2009) 「第 10 回放射光装置技術国際会議 (SRI 09) 報告」、SPring-8 Information (SPring-8 利用者情報)、Vol.14、No.4

5. 持続可能性に資する産総研の産業科学技術

1980年代、我が国の製鉄業は経営の多角化で、いわゆるシロモノに手を出し、ファインケミカルから薬品など新規事業を立ち上げたが、採算ベースに乗らないケースが目立ち、バブル崩壊とともに新規事業のほとんどが消え失せる憂き目を見た。各社とも **Change** に挑戦したが、不首尾に終わったと言える。現在、廃熱回収利用等の省エネルギー設備の導入により、製鉄プロセスにおいて世界最高水準のエネルギー原単位が達成されているものの、2050年にCO₂3割削減を達成するには、高炉ガスから効率よくCO₂を分離する技術やコークス製造時の副成ガス改質技術など、優れた技術の複合化が必要であると言われている。

比較的最近ではBPがビヨンド・ペトロリウムと揶揄されたように風力発電などの再生可能エネルギーに手を出して本業でシェルに追いつかれる状況に立ち至った。そこで本業のてこ入れにより持ち直したところ、バック・トゥー・ペトロリウムと再びからかわれているのが実状である。

上記2例は、特定の民間企業が事業分野の重心移動を行う難しさを示す好例である。各産業で成長分野の重心をどのように移動させてゆくべきか、また、社会全体の産業構造の重心をどのように移動させてゆくべきか、となるとさらに難しい問題である。しかも持続的に成長しなければならないとすればなおさらである。

米国ではオバマ大統領がグリーンニューディール政策を掲げて環境重視の姿勢を打ち出した。2009年2月に実施を決めた総額7,872億ドル(約70兆円)の大型景気対策の眼目はスマートグリッド、ブロードバンド、ヘルスITに重点投資を行うというものである。スマートグリッド関係では、130億ドル(約1兆1,700億円)が計上されている。2009年5月には米国政府が自国企業など66社のCEOを集めて会合を開くなど、民間企業の取組を後押ししている。太陽光発電や風力発電を活用した電力の需給調節が主なものとなるが、単なる送電網の整備に留まらず、最新の送電網と発電所に全米の各家庭を結合することにより、省エネ、コスト削減だけでなく、新産業の育成と雇用創出をねらっている。この政策誘導により産業の重心移動が確かなものとなり、雇用も再生可能エネルギー利活用分野で増加しているとの報道がなされている。

我が国でも政権が交代し、鳩山首相が国連総会で、2020年におけるCO₂削減量を1990年比25%と明言し、国際的な評価が得られている。前政権における2005年比15%という削減目標に比べてハードルが高くなり、産業界からの不満も聞こえてくる。しかしながら、この事態をむしろビジネスチャンスととらえ、相当数の企業が新規技術の開発に取り組んでいるものと推察される。事実、産業界からは、「極めて高いハードルだが、ビジネスチャンスと考えるべきだ」(パナソニック、大坪文雄社長、毎日新聞2009/11/07)という受け止め方も出てきている。少なくとも今後10年間はCO₂削減にかかわる新技術の開発にスポットライトが当たるのは当然として、各種技術の組み合わせにより実効的なCO₂削減技術パッケージを示すことも肝要である。幸か不幸か、定まった目標(値)をクリアーするために頑張るといふ、日本人の特性に合致した状況が生まれたと言えよう。高度経済成長期は「欧米に追いつけ、追い越せ」であったが、今はそれが「CO₂25%削減」に変わっただけという考え方である。

さらに言えば、CO₂削減に関する社会的なコンセンサスを得るために、技術と社会の問題を深く考

察し、有効な施策を打つ必要がある。この点については本報告書の守備範囲を越えるので割愛する。

第 2 章では、2050 年の社会像からバックキャストिंगの手法により、開発すべき技術について考察した。第 3 章では、現在までの「暮らし」、「輸送」、「産業」各分野での省エネの実態を概観した。第 4 章では、内外の大学、研究開発法人など、主要研究機関で実施されている「持続的な開発」に関連する研究内容を概観した。本章では、各分野の研究者へのヒアリングを通じて得られた、環境・エネルギーや資源に対する制約の見通し、2050 年の社会環境を見据えた技術開発オプション、産総研の研究開発の現状などについて述べる。なお、包括的な産総研の第 2 期研究戦略については文献 5-1 を参照されたい。

5. 1 産総研の「持続的な開発」関連研究

(1) 環境・エネルギー分野

1) エネルギー需給関係

2050 年に 2005 年比 80% 削減という目標設定を認めると、需要サイドで家庭・ビルなどからの排出量はゼロ、すなわち家庭での灯油使用量は極力ゼロにしなければならない状況に立ち至ると想定される。車からの排出量もゼロ、すなわち EV のみが可能となる。現実的には、車両の出力と走行距離に関する性能評価から、バイオエタノールや BDF との HV が利用可能なオプションになるであろう。産業部門でも極力 CO₂ を出さないようにしなければならず、ゼロエミッションの電気か水素の使用が必要となり、技術オプションはきわめて限定的にならざるを得ない。製鉄、飛行機、船など、残りの 2 割が必要最小限の化石資源のユーザになると想定される。近未来的には、CCS などと組み合わせた水素製造技術、安全安心な水素利用技術の開発と、水素をエネルギー源として受容可能な社会の構築が課題になる。当然のことながら、ガス、石油が民生部門で占める割合は大幅に減少することから、我が国はエネルギー供給のビジネスモデルを変えてゆく必要がある。

原子力発電なしで CO₂ 削減の議論を進めることはできないが、環境省試案 (2009) [3-10] のように原子力発電の寄与率を高められるか、という点については不確定要素が多い。

地熱発電は資源量が多い。発電所の建設により景観を損なうと報道されているが、回避することは可能である。日本は技術力もある。現時点で地熱発電の効率は悪く、その評価が十分でないのが実状である。民間企業の中には外国でビジネスをしているところもある。

風力発電については、日本や東南アジア諸国において良い風が吹いているわけではなく、発電機的设计をする上でスペックが厳しくならざるを得ない。ライバルは中国であろう。

地熱の農業利用など、低コストの熱利用技術を導入すべきである。

物流システムを鉄道主体の昔の様態に戻すことがあって良い。

燃料電池車などで脱 Pt 触媒など、研究開発が進む。持続可能な研究提案が望ましい。

2) LCA・LCD

経済・環境・社会を考え、意志決定に必要なツールを作り、定量化する必要がある。経済に対しては続付加価値法が知られている。環境については LCA による評価が行われる。しかし、現状ではデ

ータが少ないという欠点があり、時間軸に対して自由度がない、即ち現時点の評価しかできないという欠点がある。この意味では、動的な解析が行えない弱みがある。社会に対しては UNDP の人間開発指標 (Human Development Index, HDI)¹²⁴ が指標の一つとして用いられている。3 つの指標を合わせることが重要である。

私企業からの CO₂ に関するデータが公開されない場合が多く、LCA にしても カーボンフットプリントにして測定値を用いた評価ができない例が少なくなく、シミュレーターによる計算や統計からの推定値を利用しているのが現状である。CO₂ を減らすための企業経営については持続性ガバナンス研究グループで検討されている。エネルギー使用量をトレースするのは行政である。

現在まで、持続可能性に関連するところでは、バイオマス燃料の評価について、東アジア・ASEAN 経済研究センター [Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA)] で検討してきた。これとは別にバイオマスアジアワークショップを 2004 年度から 1 回 / 年開催してきた。ERIA の 2008 年版報告書の 3 章は G8 の Government Book の手本となり、頻繁に引用されている。

LCA もリスクの概念を取り入れた評価の研究を部門重点として行っている。Core LCA、ISO LCA など、LCA の発展形は国により異なる。

LCA 研究センターは JST の支援で 2007 年まで環境効率フォーラムにおいて環境効率に対する検討を行ってきたが、現在はプロジェクト展開が行われていない。CO₂ はほぼデータが出そろっているものの、NO_x はデータがあるという程度、PM 2.5 についてはほとんどないのが実情であり、詳細な検討は行えていない。

持続可能な社会を構築するには低環境負荷、低コストで高付加価値製品・サービスを提供することも不可欠となる。これには、製品をリユース・リサイクル可能に設計するのみならず、廃棄製品の回収やユーザによる使い方などを適切にコントロールすることが必要である。そこで、製品の使用段階・回収段階・廃棄段階までを考慮し、製品の特性や市場環境に適したサステナブルビジネスのアイデアを同時に検討することが重要となる。産総研では、サステナブルビジネスを定量的に評価するトータルパフォーマンス指標 (Total Performance Indicator, TPI) を導入し、TPI を構成する諸パラメータに 16 個のビジネスルールがどのように影響を与えるかを整理することで、ルールの適用条件を明確化し、体系的にサステナブルビジネスのアイデア生成を支援する手法を提案している [5-2]。TPI は (1) 式で表される。分母にライフサイクル環境負荷 (Lifecycle Environmental Impact, LCE) とライフサイクルコスト (Lifecycle Cost, LCC) の相乗平均をとるのは、環境負荷とコストの単位が異なることによる。

$$TPI = UV \times LCE^{-1/2} \times LCC^{-1/2} \quad (1)$$

UV: Utility value of product

LCE: Lifecycle environmental impact

LCC: Lifecycle cost

¹²⁴ その国の人々の QOL や発展度合いを示す指標。

この TPI と、陳腐化指数（市場において技術進歩や流行の変化により製品が陳腐化する速さを表すパラメータ）、価値評価指数（市場における製品性能に対する評価の高さを表すパラメータ）、劣化指数（摩耗などにより製品が物理的に劣化する速さを表すパラメータ）など、19 個のビジネス環境パラメータの値を計算する。これらのパラメータで TPI の感度分析を行い、効率的に TPI を向上させるパラメータを選び出す。次に LC 囲い込み、ビジネス規模の拡大、知識・ノウハウの利用など、サステナブルビジネス実現の 16 個のルールと 19 個のパラメータからなるマトリクスから各パラメータを改善するルールを選択する。そのルールが適用されている既存事例の検索により、ルール適用の具体的なアイデアを設計者に示す。この手続きによりサステナブルビジネスのアイデア生成を支援することができる。

3) CCS

海洋貯留はハワイや大西洋での実証試験を行ったが、成功はしていない模様である。環境学者達からの批判もあり、待ちの状態になっている。日本では、CO₂ の海洋投棄に関して海洋汚染防止法が規制法として成立しているが、内陸地下への CO₂ 廃棄に関する法整備はなされていない。環境省の考え方では、酸を捨てるのと同じである。落とすどころを考える必要がある。我が国の地中貯留は数十万トンクラスの実証試験がいわき沖で実施予定である。産総研の複数の部署でも基礎研究を実施している。この 4 年間で CCS に関する動きは早い。2020 年 CO₂ 25% 削減を達成するために、関係部署で連携して技術パッケージを提案していく姿勢が必要であろう。

化石燃料はたかだか数百年で枯渇する。CO₂ の地中貯留期間は 1,000 年程度を考えれば十分であろう。温暖化対策での CO₂ 圧入量：100 万 t/y としてトータル数千万トンに上る。放射性廃棄物は 10,000 年単位で考える必要があり、CO₂ の地中貯留は原子力発電に比べると環境に与える影響は小さいと考えられる。

CO₂ の排出量は火力発電（全体の 1/3）> 製鉄 > セメントの順に減少する。この手の大口事業者がクリアできれば解決可能である。CO₂ は大規模工業地帯のオンサイトで捨てる必要がある。東京湾の底（1,000 m 以上の深さにある砂層）に埋めると、上には漏れてこない（地温勾配が低いいため、超臨界 CO₂ が液体状 CO₂（密度 > 1）に変わっても、その状態で止まる）。地表から 1,000 m から深さ方向 100m ずつの層（砂岩 + 泥層の繰り返し、空隙率 20%、水を押しつけて CO₂ を圧入するイメージ）に切って CO₂ を圧入する。この CO₂ が横に逃げたとして、10 年で半径 5 km の円内に拡散するイメージとなる。2,000 m の深さがあれば使えるものと想定される。CCS のコストは競争相手にも左右されるが、高くても 6,000 円 / t-CO₂ 以下、現在なら 2,000 円 / t-CO₂（排出量取引が 2,000 円 / t-CO₂ 以下）でないと競争力が維持しがたい。現状では、圧入と運送だけで 2,000 ~ 3,000 円 / t-CO₂ かかり、トータルコストは 10,000 円 / t-CO₂ 程度となる。

掘削、ガス圧入については既存技術がある。枯れた油田に CO₂ を入れて油を採るのは普通のこと。天然ガス採取、CO₂ 圧入では日揮、三菱重工業のプロセスが先行している。今後の技術開発要素としては、①腐食などの材質の問題、②CO₂ 圧入後のモニタリング、③トラブル対策技術、④地下開発高度化が挙げられる。産総研はセンサー技術が得意であることから、②に特化するのも一法であろう。

CO₂ を排ガスから分離・回収する技術には化学吸収（アミンや炭酸カリ水溶液使用）、物理吸収、膜分離、物理吸着、深冷分離が知られているが、アミン法と膜法が技術開発の主流である。アミン法はまだ膜に置き換わっていないのが現状である。アミン法では CO₂ がアミンと反応して炭酸塩を形成する。アミンとしてはアルカノールアミンなどを利用する。110～130℃に加熱することで CO₂ は脱離し、放散される。高純度ポリカーボネートは合成用原料に供することができる。旭化成プロセスがメインとなっているが、産総研内でも研究を実施している。

原子力、再生可能エネルギーの電力量の大幅な増加が見込めないことから、世界的に CO₂ 削減の魅力的なオプションは石炭火力発電 + CCS で、我が国も例外ではない。CCS の効率的モニタリングと安全性評価に向けた地質モデル構築のイメージを図 5-1 に示す。

英国政府の「クールアース」は 2050 年までに 1990 年比 60% 削減を掲げている。英国では CCS 商用デモ施設の操業（～2014 年）と、新規の石炭火力発電所への CCS 併設（～2020 年）を目指している。日英両国の連携も期待される。気候の安定化にかかる費用が莫大だとしても、対応の時期を誤れば、地球規模での環境危機を招くだけでなく、環境修復にかかる経済コストが世界の GDP の 5% ～ 20% に達するとの試算も出ている。全世界の対応が早急に求められる。CCS に関する総説等については、[5-3]～[5-5]などを参照されたい。

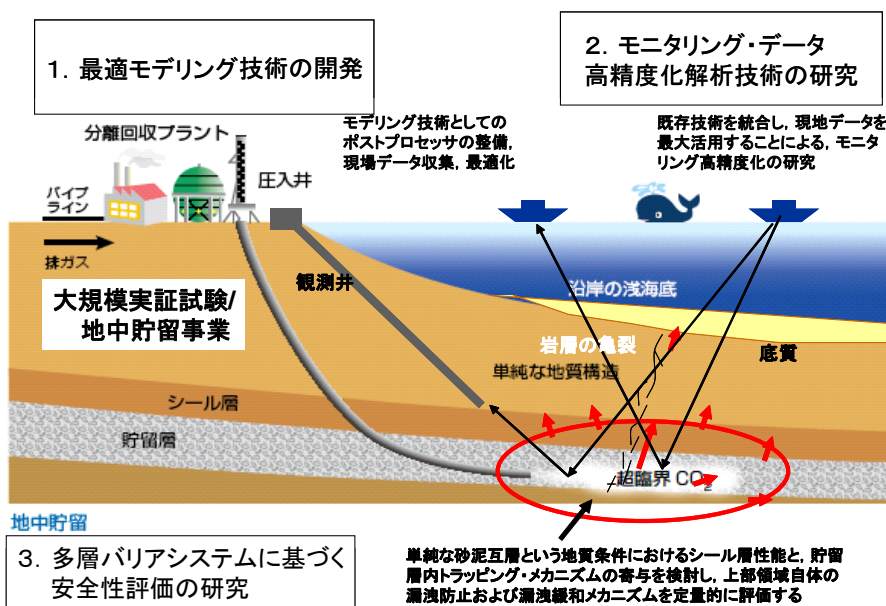


図 5-1 CCS の効率的観測と安全性評価に向けた地質モデルの構築

4) 太陽光発電

環境省は麻生政権時代に 2050 年までに温室効果ガスを 70% 削減するためにはどうしたらよいかというレポートをまとめている。太陽光センターとして 2050 年の太陽光発電電力量を 170 GW と試算して提出している。もちろん省エネも織り込んでいる。この数値は経済産業省の試算値よりも大きな数値となっている。整合性の検証は今後の課題となろう。

太陽光発電研究センターではテクノロジーニュートラルで幅広い研究分野をカバーすることになっている。太陽電池の校正にしても具体的な作業に手を下すのではなく、2次標準を軌道に乗せるのが主な仕事となる。1次標準については計量標準と同じ考え方で産総研が関与する方が業界から見たときに安心感がある。

太陽電池開発にはいろいろなシナリオがある。韓国、台湾、中国は日本の開発した技術を買ひ、人・モノ・金を投入して優位な産業を作ろうとしている。そのためにも太陽光発電研究センターでは敢えて研究分野を絞らない戦略を取っている。経済産業省、NEDO では担当者が定期的に変わるため、長期的な戦略の立案は難しい。決まったキーパーソンが一つの戦略に関わり続けることが大切である。最近、過去30年の太陽電池に関わる研究のフォローアップをしようとしたところ、NEDO、経済産業省には資料がなく、工技院OB等から情報を集めることになった。大学の先生は流行に、企業は経営判断に、それぞれ左右される。国研として継続的にフォローできることが国研を前身とする研究開発型独法の強みである。特定の研究を国策として継続していけることが産総研の強みになると言える。

1990年代初頭、曇天が多いドイツで太陽電池がここまで普及するとは誰も想像しなかった。そのため日本企業はドイツで特許を出願していない。また、最近欧米でカドミウムを使った「カドテル」という太陽電池が伸びている。それを20年前に想像できた人はいなかった。何が起きるか分からない。様々な研究分野の可能性を検証してダメなものは落とし、可能性のあるものについてはセンターで切磋琢磨しながら研究している。

民間企業が何を考えているかが研究の方向性を定める上で重要である。政策立案の際に民意を反映することが求められる。民間に支持されているという証拠が必要となる。共同研究、受託研究などの数も重要である。地方の公設試などからの相談件数が重要となる。そういう証拠を役所にアピールすることが大切であると考え。そのようなつながりが産総研の強みになる。

再生可能エネルギー、太陽光の導入については電力会社との関係が微妙である。電力会社は本音では再生可能エネルギーの導入に消極的な面もある。国民の目から見ると、原子力の信頼性が高いとは評価しにくい事例が起きている。このような状況も考慮した上で信頼性の高い研究成果を社会に発信するのが研究者、技術者であり、彼らの良心、良識が最も大事にされるべきである。

大学ではカバーできない領域、企業から見たときにニーズがある部分が産総研にとっての狙いどころとなる。産総研の強みは先述のように中立性であり、国際的な規格、基準の設定等も産総研の重要な仕事である。その場合、力づくでデファクトをやるのではなく、デジュールを重視すべきであろう。

5) 風力発電

風力発電は再生可能エネルギーの中でも発電コストと建設コストが低くなっている(図5-2)。しかしながら、我が国では1) 風力発電の位置づけが不明確、2) 風力発電の事業性悪化、3) 好条件の建設適地が減少、4) 許認可に要する期間と費用の増大などの理由から、必ずしも導入が進んでこなかった[5-6]。しかし、鳩山政権への交代で、我が国における風力発電事業の推進と発展途上国におけるビジネスチャンスの拡大という追い風が吹いてきた。

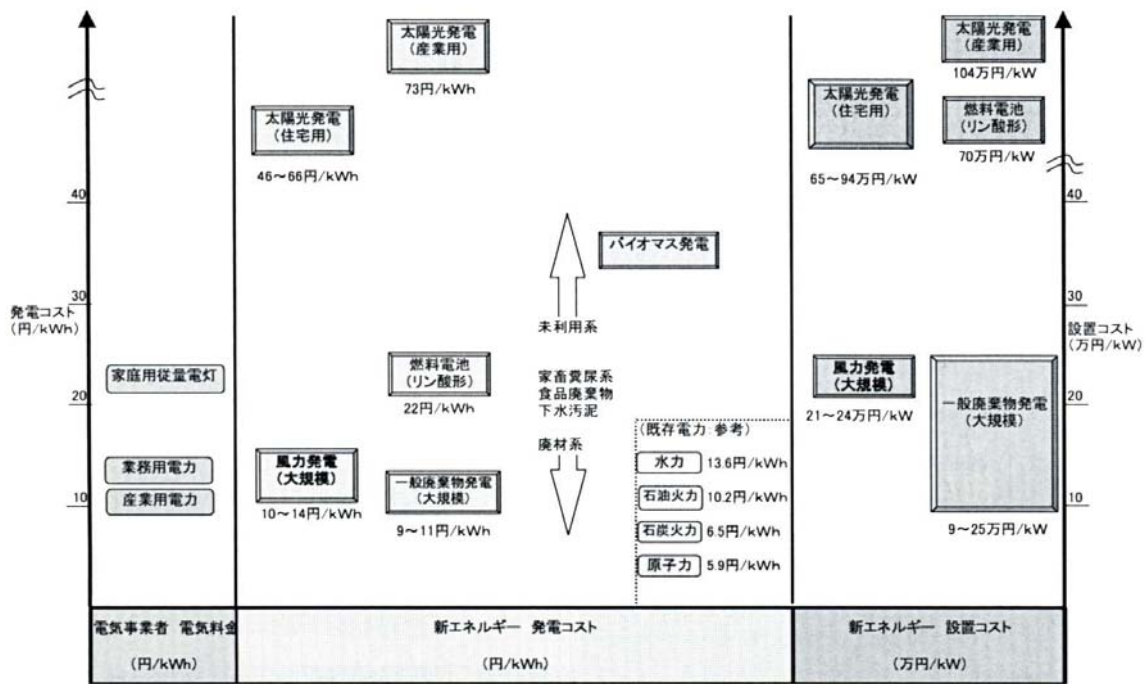


図 5-2 風力発電の発電コストと建設コスト

産総研では 1978 年に開始されたサンシャイン計画に参画して以来、30 年以上風力発電の研究に携わり、風力変換システムの研究、大型風力発電システムの解析・評価等を実施してきた。現在は NEDO の次世代風力発電技術研究開発事業を受託した 5 者の代表機関として参画し、基礎・応用技術研究開発の一翼を担っている。第三期に向けては、「我が国の厳しい風・気象条件を反映した複雑地形風特性モデルの開発と IEC (国際電気標準会議、International Electrotechnical Commission) 国際標準への提案」が中心的な課題となる見込みである。併せて、「風速リモートセンシング技術の信頼性評価」、「リモートセンシング技術の高度化に関する応用研究」も他機関と共同で実施予定である。

MEASNET¹²⁵ 基準に基づく風速計のキャリブレーションは、我が国では産総研しか実施できず、国内試験研究機関としての優位性があるものの、自主試験報告書として処理せざるを得ないのが実状である。現在の産総研のマンパワーの問題と、産総研を認証機関として積極的に認めていくのかという判断の問題がある。この種の社会的貢献は今後一層求められるものと想定されることから、産総研自体が体制・制度的に対応できないと国際的に遅れをとることになりかねない。今後の検討が急がれる。

また、最近の中央環境審議会の専門委員会では、環境影響評価 (アセスメント) 法の対象事業に風力発電を追加すべきとの中間報告がまとめられた。環境省では 2010 年の通常国会にアセス法改正案の提出を目指している。この評価プロセスにおいても産総研の貢献が期待されるところである。

¹²⁵ The International Measuring Network of Wind Energy Institutes の略称。スペイン、オランダなどの 6 参加機関と 2 協力機関で構成。風力研究をリードする研究機関が集まり、各種計測法に関する独自の基準を規定。IEC 標準に採用されるケースも多い。

6) バイオマス

CO₂ 排出量削減の観点から、石油代替液体燃料としてのバイオエタノールや BDF に期待が集まるのは当然として、バイオマスからの水素製造などもオプションの一つに入れておくべきであろう。2050 年において民生用エネルギー源の大半が電気に置き換わっているのに対し、輸送機関用燃料については徐々に構成比が変わるシナリオをとるものと予想される。バイオマス関連の総説等については [5-7] ~ [5-13] を参照されたい。

経済産業省が 2006 年 5 月に発表した新エネルギー国家戦略 [5-14] では、輸送燃料のうち石油は 80% 以下とし、一翼を担うのがバイオ燃料で、占有率は高々 10% となる見込みである。2050 年までに EU では石油化学コンビナートで生産する石油製品のバイオマス化を推し進めている。バイオマス燃料の占める割合は 2 割程度になると想定される。

国際協力については、マレーシア (UPM、現地ラボ設立)、タイ、ブラジル (JST-JICA)、インドネシア、ベトナム等と実施中である。

第三期に向けては ERIA 事業を中心にした展開が期待される。バイオマス研究センターでは、アジア・バイオマスエネルギー研究コア (Research Core for Asian Biomass Energy) を中核としてバイオマスエネルギーの製造技術開発と並んで、本分野における国際協力・研究人材育成への貢献が求められている。ERIA エネルギープロジェクトワーキンググループでは、新燃料自動車技術研究センターが「東アジアにおけるバイオディーゼル燃料の基準調和」で、安全科学研究部門では「東アジアにおけるバイオマス利活用の持続性評価」という研究を継続中であり、国際的に高く評価されている。将来のバイオマス燃料を利用する立場からは、東アジア地区におけるバイオマス燃料の合成だけでなく、規格制定や品質評価が重要な課題となるが、日本が指導的な立場をとることが期待される。また、バイオマス燃料の合成の際の環境影響評価は重要な視点となる。現在、環境影響、社会的な影響、経済的な影響を加味した評価指標の作成が進行中であり、我が国が指導的な役割を果たしている。今後も良好な協調関係を保ちながら、バイオマス資源の確保とバイオ燃料開発と普及促進を主導することが求められる。

7) 地熱利用

2020 年において CO₂ 排出量を 1990 年比で 25% 削減するためには、様々な新規技術を開発しながら、化石資源の占める割合を減少させなければならない。経済産業省では自然エネルギーの利用をうたいながら、1997 年に地熱エネルギーが新エネルギーから除外されたことに伴い、我が国の地熱エネルギー開発市場は一挙に冷え込んだ [2-11]。しかしながら、我が国はインドネシア、米国に次ぐ世界第三位の地熱資源国で、地熱資源量 2,347 万 kW を保有している。現在、太陽光や風力の設備利用率がそれぞれ 12%、20% と低いのに対し、地熱は約 70% と高いのが実状である。このように設備容量に比して発電電力量の大きい地熱発電は分散型でありながら、ベースロード電源として使えることが特徴である。

NPO 法人環境エネルギー政策研究所の試算では、2050 年に地熱エネルギーの寄与が 10% と見積もられているが [5-15]、この目標値をクリアするためには革命的なブレークスルーが必要だとされ

ている [3-16]。電力関係では、地熱発電の他に、100℃以下の熱水系資源を対象として、カーリーナサイクル発電方式による温泉発電も利用可能であり、地熱エネルギーが 10% の寄与率に達する場合、利用率を考慮した発電電力量で、地熱発電、温泉発電がそれぞれ 719.7 億 kWh、137.2 億 kWh と見積もられている [3-16]。

直接的な熱利用については、図 5-3 に示されるとおり、広い温度範囲で様々な産業に応用可能であることから、カスケード利用により無駄なく利用することが可能である。温泉浴用利用によるエネルギー代替効果は熱利用の 2 倍弱程度である。このほか、地中熱を利用したヒートポンプが熱量比較で、直接熱利用の 5 倍程度となっている。また、2008 年の総合科学技術会議でも最近の革新的なエネルギー技術として超高効率ヒートポンプが取り上げられ、地中熱利用ヒートポンプシステムが紹介されている。



図 5-3 地熱流体の温度別利用方法

8) 水素製造・利用

現在、わが国は原子力を国産とした場合のエネルギー自給率は 18%、輸入とした場合は 4% となり [5-16]、先進国では最低レベルとなるのが実状である。今世紀半ばにピークオイルを迎え [3-25]、40～50 年で枯渇することを想定すると、2 次エネルギーとしての水素エネルギーは蓄電技術として有望である。燃料電池との組み合わせで高効率エネルギー利用が可能であり、エネルギーセキュリティ確保、低炭素社会実現の観点から、安全と経済性が両立する水素社会構築のための技術開発が必要である。水素関連の総説等については、[5-17]～[5-23] を参照されたい。

エネルギーシステムとして、燃料電池はリチウムイオン電池の約 4 倍も高いこと、現在の車両を全部 EV に代替するには原発の大量増設が必要であることなどを考慮すると、長距離大型車には FCEV、中距離中型車にはバイオ燃料を用いた PHV、短距離小型には EV といった使い分けが現実的な選択となる (図 5-4)。長距離・大型車両として FCHV が最適か、という議論は依然として残る。BDF を使用するディーゼル車との優位性については今後の検討課題と言えよう。2050 年における水素社会を

想定した姿が図 5-5 となる。東北・北海道地方では風力発電との組み合わせが有効であり、関東から九州にかけては太陽光発電を利用した水素製造好適地が存在する。副生水素を生成するプラントもほぼ同地域に立地している。

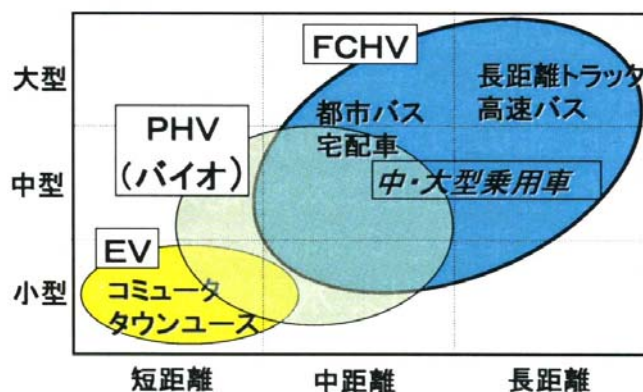


図 5-4 車両の走行距離と車種との関係

水素材料先端科学技術研究センター（以下、水素センター）は九州大学内に設置されたユニークな研究センターであり、「水素脆化」の基本メカニズム解明と使用材料の実用的な安全指針確立を目的として 2006 年に設立された。集中研として世界で唯一の Hydrogenius として研究開発を実施中である。現在、水素脆化に関する重要な知見を得ている。産業界との連携例としては、霞ヶ関水素ステーションの健全性評価と、愛・地球博 水素ステーションにおける水素漏洩原因の解明の二つがあげられる。

現行の高圧ガス保安法により研究開発の障害・開発遅延が問題となっており、関係官庁と協議中である。国際競争力低下を招く危機的な状況下にあり、早急な問題解決が望まれる。

国際標準化に向けた取組としては、水素ステーションを作る際の充填ボンベの ISO 規格作成時に最も信頼性の高いデータを提供し、情報交換を促進する活動を水素センターは継続している。

福岡水素エネルギー戦略会議との連携により製品試験評価や研究開発に留まらず、新産業創出、情報交流・普及啓発事業、人材育成なども精力的に実施中である。

コンパクト化学プロセス研究センターでは、水素バリア性に優れた粘土膜「クレスト」をガスシール層とした水素タンクを開発している [5-24]。これは、球状クレストに炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) を複合化して粘土膜複合化 CFRP ライナーとし、さらにフィラメントワインディングにより炭素繊維層を形成すると、粘土膜 - CFRP 複合水素タンクが完成する (図 5-6)。内容積約 1 リットルで、耐圧 700 MPa の設計である。航空機・ロケット・車用の軽量水素タンクなどに利用可能で、水素センターとも連携して研究開発を行っている。粘土膜クレストは 家庭用コジェネレーションシステム用水素分離膜としても利用可能であり、今後幅広い応用が期待される。

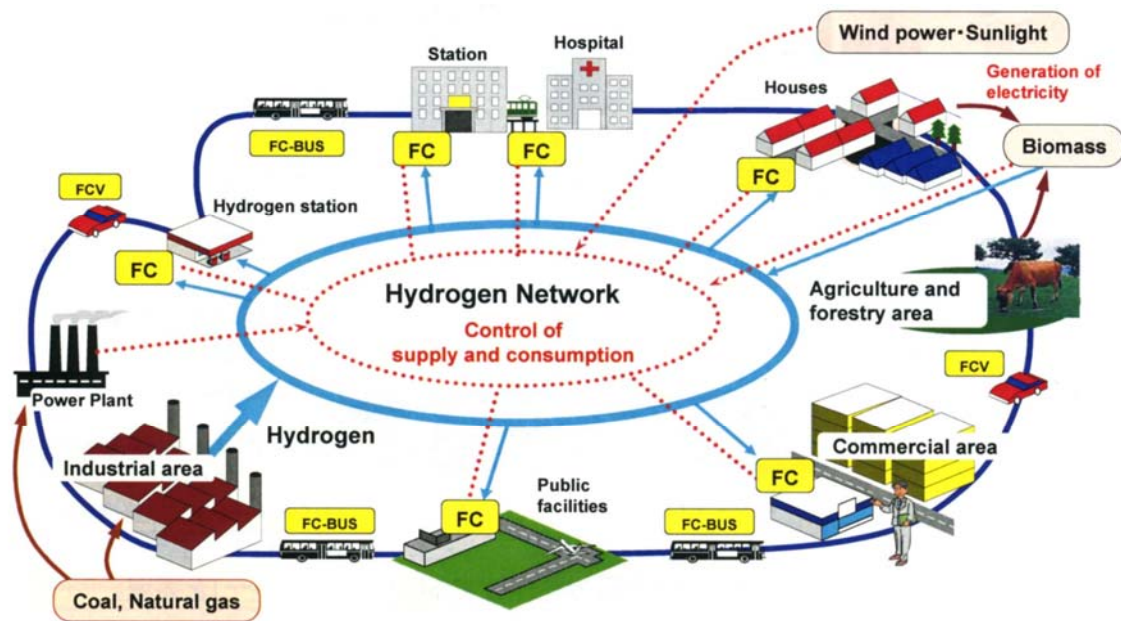


図 5-5 2050 年における水素社会の想定図



図 5-6 粘土膜 - CFRP 水素タンクの製造プロセス

9) メタルリサイクル

化石燃料と同様、金属資源についても将来的な枯渇が懸念されており、需要増大に応じて金属価格が高騰し、金属製品の最終処分場逼迫の不安も相変わらずぬぐえない状況にある。そこで省エネルギー

一的な金属分離回収技術の開発が不可欠なものとなる。産総研では溶媒抽出法や電解採取技術など、湿式法に関する技術革新の達成と、1次および2次資源からの金属分離回収に関するコンパクトな新規リサイクルプロセスの確立を目指している。

溶媒抽出法では、Pd や Rh といった白金族金属の分離精製について検討している。適切な抽出試薬の使用により、異種金属の相互分離度と抽出速度を向上することができる。さらに、使用済み無電解 Ni めっき液からニッケルのリサイクルが可能であることも明らかにしている。また、70% 以上の鉄、ボロン、ネオジム (Nd)、ディスプロシウム (Dy) を含む希土類磁石廃棄物から Nd と Dy を分離回収するプロセスの研究も行っている。

電解採取技術では、省エネルギー型の銅リサイクルプロセスを研究している。銅はベースメタルの一つであるが、鉱石の低品位化も進行しており、リサイクルの必要な金属種の一つになっている。電化製品、各種ケーブルなどに広く用いられていることもあって、可採年数は 50 年程度と短いのが実状である。従来型の銅電解採取では Cu(II) から Cu(0) への還元反応を用いており、2000 kWh/t-Cu ものエネルギーが必要であった。これに対し、図 5-7 で示す産総研で検討しているプロセスは Cu(I) を Cu(0) に還元するもので、130 ~ 800 kWh/t-Cu 程度のエネルギーしか消費しないメリットがある。

2050 年の持続的な定常化社会において金属リサイクルの果たしている役割は極めて大きいと考えられる。リサイクルのスタイルとして、金属機器の回収は地方分散的に進められる。小規模リサイクルが有効な金属は湿式法を採用し、外部環境に影響を与えないクローズドシステムで処理する必要がある。廃家電製品の回収システムの構築やプロセス全体のコストの精査など、課題は多いが、省エネルギー的な金属リサイクルマップを早急に完成する必要が求められよう。

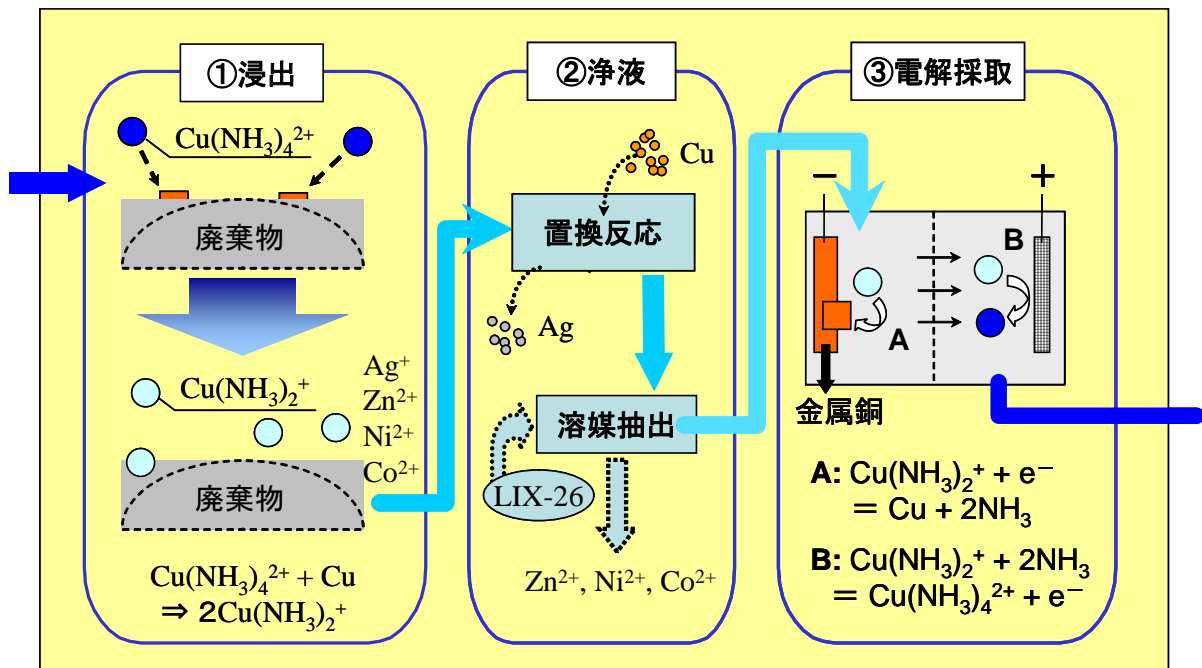


図 5-7 省エネ型銅リサイクルプロセスの概念図

(2) ライフサイエンス分野

1) バクテリア人工染色体によるゲノム解析

ヒトゲノムが完全に解析された 2001 年以降、ポストゲノム時代に突入した。産総研ではその後、NEDO 染色体プロジェクト (2006-2010) において、日本人人工染色体 (Bacterial Artificial Chromosome, BAC) ゲノム Yamato (臍帯血由来で EB ウイルス不使用、33 万クローンという世界初の画期的なもの) に続いて日本人女児ゲノムライブラリー Yayoi を確定した。日本人 BAC による補正・ギガシークエンサーによる解析で達成した結果である。疾患関連領域の配列の比較解析、創薬・診断技術への応用が実施されている。

日本人と欧米人のゲノム配列には差が認められることから、ゲノム創薬・診断には正確な標準日本人ゲノムの解析が不可欠となる。理研や微工研ではヒトゲノム解析が実施されていない。ゲノムライブラリーの作成は国の根幹となる仕事であり、産総研が日本人標準ゲノム作成を達成したことに大きな意義が認められる。

さらに、日本最大のギガシークエンサー拠点である沖縄の健康バイオテクノロジー開発センターと産総研が共同して、沖縄先端ゲノムプロジェクト (2008-2010) が実施されている。次世代ギガシークエンサーの東アジア圏拠点を目指して、先端バイオ技術開発が行われている。(1) 日本人 (弥生 / 縄文) と微生物のゲノム解析による創薬・医療応用、(2) 幹細胞の安全性評価による再生医療、(3) 食の安全を目指した、魚など海洋資源のゲノム解析などが行われている。ゲノムライブラリー作成と識別マーカー探索により、鱗 1 枚で魚個体が識別されるようになると、自動解析装置も可能となる。本技術は完全養殖への道を開くもので、将来の海産資源枯渇と世界的な人口増を考慮すると、今後の展開が大いに期待される。

ごく最近では、分野横断的に次世代シークエンサー開発のための調査研究が開始され、報告書が 2009 年 9 月にまとめられている。この種の研究は、ナノテク、高度な計測・加工技術、ゲノム解析技術、ライフサイエンスの基盤技術、センシング技術、情報処理技術、生物資源への応用技術が一体となって初めて可能となるもので、そこにこそ産総研の強みが発揮できる利点が存在する。

現状では、世界各国で開発された新薬の数を 100 とすると、欧米先進国では 80 - 95 であるのに対し、日本では 15 - 20 程度であり、治験の相当部分を欧米に依存している。今後の我が国におけるゲノム創薬とゲノム医療の発展に支障を来している。ゲノムを基盤にした産業化の推進が求められるところであるが、個別化医療には分子診断 (ゲノミックス、プロテオミックス、メタボロミックス)、ゲノム分析機器、治験用製剤 (遺伝子医療ベクター、ドラッグデリバリー)、診断用インフォーマティクス、ゲノム材料等の研究開発が必要となるが、産総研では、高速・高性能シークエンサーの開発に注力している模様である。ゲノムを基盤とした健康科学の戦略構築と先進的な研究開発の実施が望まれる。

2) 完全密閉型植物工場システム

産業変革研究イニシアチブのプロジェクトとして、「医薬製材原料開発のための密閉型組換え植物工場の開発」が実施されている。完全密閉型植物工場システムにより、遺伝子組換え植物からインターフェロンなどのタンパク質の医薬製剤原料を合成する概念図を図 5-8 に示す。従来法に対するメリットとして、1) 安全性が高い、2) 培養タンクが不要、3) 保存・輸送が簡便という 3 点があげられ、医薬製剤原料の製造コストも著しく低く抑えられる。この研究は世界初の試みであり、ものづくり産業の創成の観点から大いに評価でき、世界に提唱するモデルとなりうる。また、植物工場の稼働以来、すでに内外から 200 組の視察団が訪れている。研究開発のみならず、製品の実用化、国際交流など、産学官の国際的な人的交流にも大いに貢献している。

従来高価な医薬品であったものが安価で大量に提供できるようになれば、発展途上国の人々の命を救うことに貢献する。遺伝子組換え植物の可能性について現段階で安易な評価は差し控えたいが、今後も適用可能性がますます広がるための技術開発が期待される。

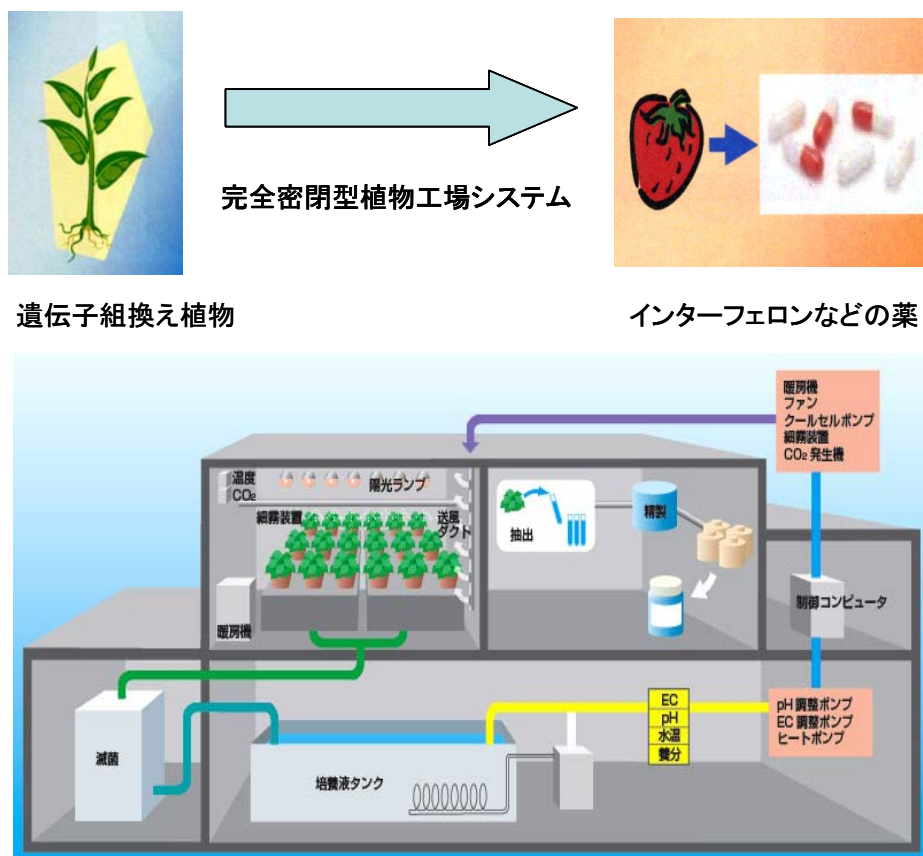


図 5-8 完全密閉型植物工場の概念図

3) バイオマス資源を利用する物質生産

カーボンニュートラルな燃料として注目されるバイオディーゼルの製造には、原料油脂に対して 10 wt% の廃グリセリンが副生し、世界で年間 100 万トン以上に達する。その組成はグリセリンが 60 ~65%、アルカリ触媒が 2~3%、メタノールが 2% 以下である。この高塩濃度、高アルカリ環境でもハロモナス菌 (*Halomonas sp.* KM-1, FERM BP-10995) は生育し、グリセリン等からポリヒドロキシアルカン酸 (PHA、バイオプラスチック) を合成することができる。この菌は栄養塩と廃グリセリンで培養可能であり、培養初期から PHA が菌体内に蓄積する。炭素源として C6 糖グルコース、C5 糖キシロース、アラビノースも利用でき、C5 糖の利用が C6 糖で抑制されない特徴を持ち、木材や、海洋バイオマスの糖化液などの混合原料からも良好に PHA が合成可能となる。さらに、高塩濃度、高アルカリ環境では雑菌の混入がないため、低エネルギー・低コストインフラでの生産が可能であり、ゲノムやメタボローム解析が終了しているため、安全性を担保し、特定代謝産物の増産に向けた取組も可能である。図 5-9 に、このハロモナス菌が PHA を体内に蓄積している様子を示す。回分培養の PHA の生産効率は、廃グリセロールとグリセロールを基質とした場合、それぞれ 0.57、0.56 g L⁻¹ h⁻¹ であり、世界トップクラスに達している。

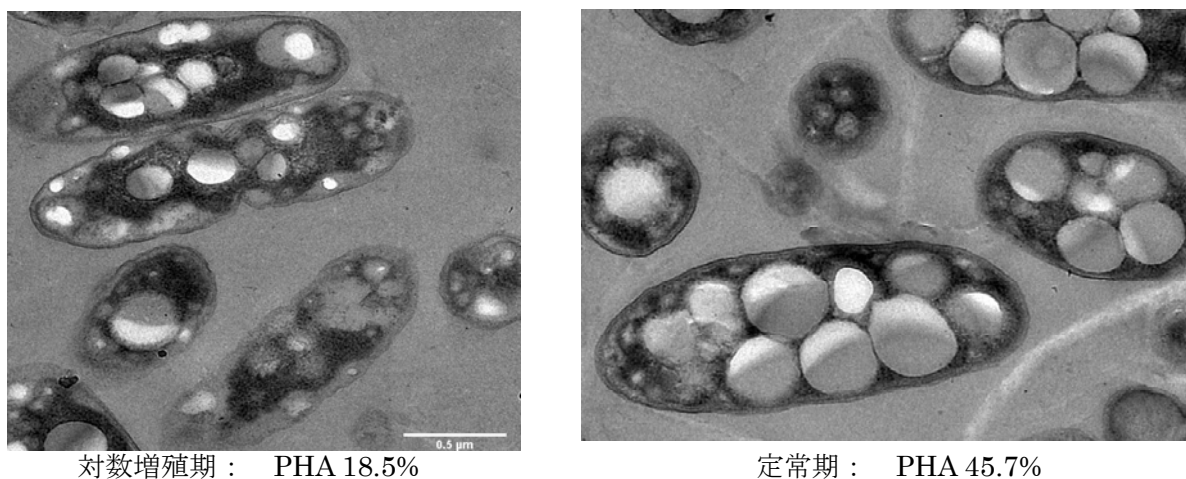


図 5-9 ハロモナス菌が PHA を取り込んでいる様子

(3) ナノテクノロジー・材料・製造分野

ナノテクノロジー・材料・製造分野における研究課題を図 5-10 に示す。新成長戦略に掲げられたグリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略に基づき、i) エネルギー消費削減による低炭素化技術、ii) 資源確保と高度利用技術、iii) 製造業の環境負荷低減技術の開発と iv) グリーン・イノベーションの核となる材料・システムの創成を目指している。製造技術の低コスト化・高効率化・低環境負荷化によりエコプロセスを確立し、2030 年までにエネルギー消費量の 50% 削減を目指す。図 5-10 から明らかなように、エコプロセスで開発された材料は多様な製品に展開可能である。エコカー関連では高出力・高エネルギー密度キャパシタや燃料電池用白金触媒代替材料、エコハウス関連では調光用多機能ガラスや家庭用小型コージェネ燃料電池など、エコトレイン関係では Mg 合金構造

体やパワーデバイス用 8 インチダイヤモンドウェハ、エコプレーンではカーボンナノチューブのような軽量高強度構造体、エコシップ関連では、燃費削減に有効な船底塗料がそれぞれあげられる。開発要素技術としては、グリーンマイクロ電子機械システム (Micro Electro Mechanical System, MEMS)、ナノカーボン材料の量産化技術、住宅・ビル・工場の省エネルギー技術、運輸システムの省エネルギー技術、資源有効利用・代替技術があげられる。



図 5-10 ナノテクノロジー分野における重要課題

(4) 情報通信・エレクトロニクス分野

1) スピントロニクス

スピントロニクスは電子の持つ電氣的な性質（電荷）と磁氣的性質（電子スピン）の両方を利用して新しい機能を創出する分野である。詳細は文献 [4-55] に譲るが、本分野で最も重要な効果が磁気抵抗効果である。厚さ数 nm 以下の絶縁体層（トンネル障壁）を 2 枚の強磁性金属層で挟んだ磁気トンネル接合素子 (Magnetic Tunnel Junction, MTJ) に電流が流れる現象をトンネル効果という。強磁性電極層が平行磁化状態の場合、トンネル抵抗が小さくなり、トンネル電流が増大する。一方、反平行磁化状態の場合、トンネル抵抗が大きくなり、トンネル電流は減少する。この現象を「トンネル磁気抵抗効果」 [TMR (Tunnel Magneto Resistance) 効果] という。湯浅らは分子線エピタキシー (MBE) を用いて高品質の単結晶 Fe(001) / MgO (001) / Fe (001) – MTJ 素子の作製に成功した (図 5-11)。室温でアモルファス酸化アルミニウムのトンネル障壁を越える巨大 TMR 効果を実現した。さらに、酸化マグネシウム障壁の厚さに対する TMR 効果の振動現象、トンネル電子が媒介する層間換結合、複雑なスピン依存トンネルスペクトルなど、新現象の観測にも成功している。

さらに、産総研は製造装置メーカ、キャノンアネルバとの共同研究により MgO-MTJ 素子の量産技術を開発し、上記の第 1 種基礎研究からわずか 3 年という短期間でハードディスク (HDD) 磁気ヘッドの開発にこぎ着けたことは特筆に値する (図 5-12)。現在、共同開発された CoFeB/MgO/CoFeB-MTJ 素子と同社の製造装置は HDD メーカの製造開発ラインに導入され、2007 年には第二世代の TMR ヘッドである MgO-TMR ヘッドの製品化に成功した。この磁気ヘッドと最新の垂直記録媒体とを組み合わせることにより、500 Gbit/inch² を超える超高密度 HDD が実現されている。この結果、現在主流の 3.5 インチ HDD を 2.5 インチ HDD に置き換えても十分な大容量が得られることになり、ストレージの消費電力の大幅な削減が可能となった。

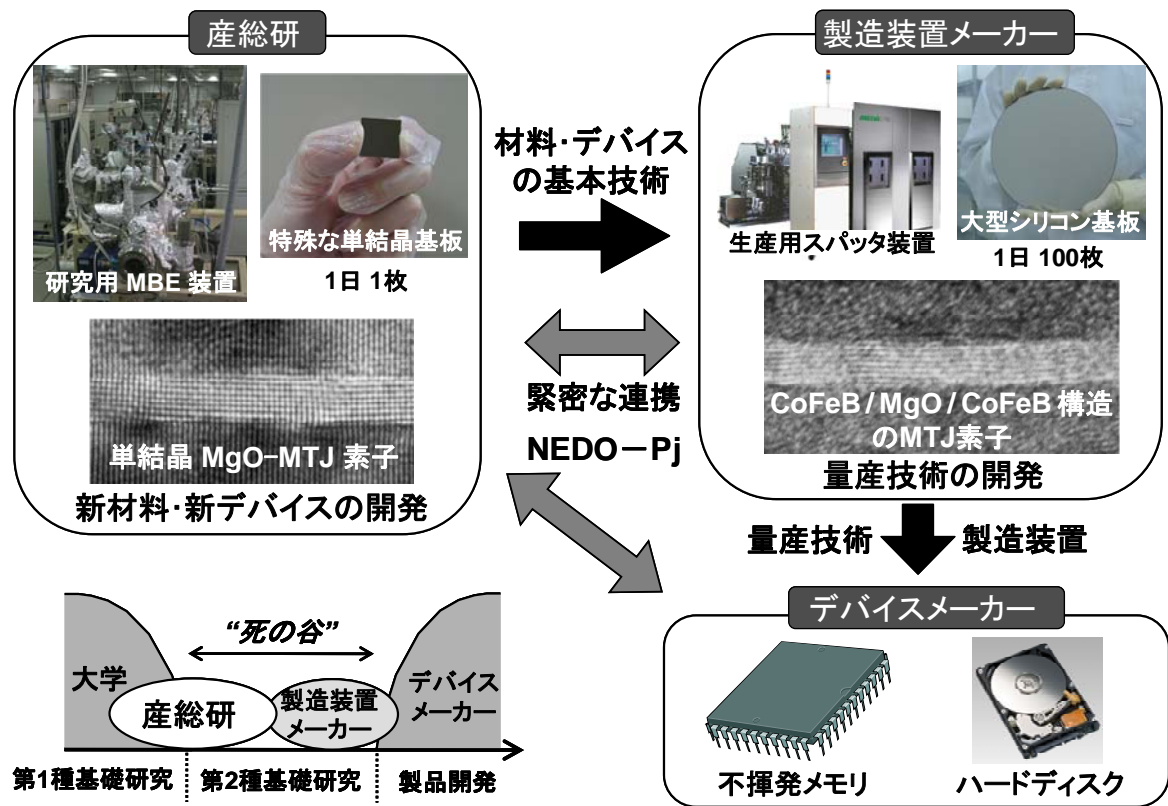


図 5-11 MgO-MTJ 素子に見る本格研究モデルの 1 例

巨大 TMR 効果による読み出し出力増大の他に、スピントルク磁化反転による低電力書き込み技術を用いた究極の不揮発性メモリ「スピン RAM」の開発を現在 (株)東芝などと共同して実施している。長期的には、ノーマリー・オフ¹²⁶ 電子機器による究極のグリーン IT 機器の実現を目指して研究開発が鋭意継続中である。

本研究は産総研の本格研究モデルの好例である。巨大な TMR 効果を世界初で発見し、単結晶 MgO-MTJ 素子を開発していたにもかかわらず、デバイスメーカーの要求に合わず、量産化にはつながらなかった。この不可能を可能にしたのは製造装置メーカとの連携であり、材料・デバイスの技術シ

¹²⁶ 電源オフの状態を基本状態にして、演算をする瞬間だけ電源をオンにすること。

ーズと製造装置メーカーの持つ優れた製造プロセス技術・装置の統合により、製品開発につなげることができた (図 5-11)。本プロジェクト成功の鍵は「技術シーズの良さ」にあると、文献 4-55 に述べられている。そもそも、我が国では米国よりも、シーズやアイデアが圧倒的に少ないため、製品化に至っていないとの指摘もあり、技術シーズの良さが製品開発において最も重要な成功要因であるとの指摘は示唆に富む。産総研として、製品化につなげるための第 2 種基礎研究はもちろん大切だが、第 1 種基礎研究がやせ細ると、死の谷に行き着く前に技術シーズ自体が死に絶えてしまうことになる。技術シーズの発掘・磨き上げが本格研究推進の原点にあることを忘れてはならないだろう。

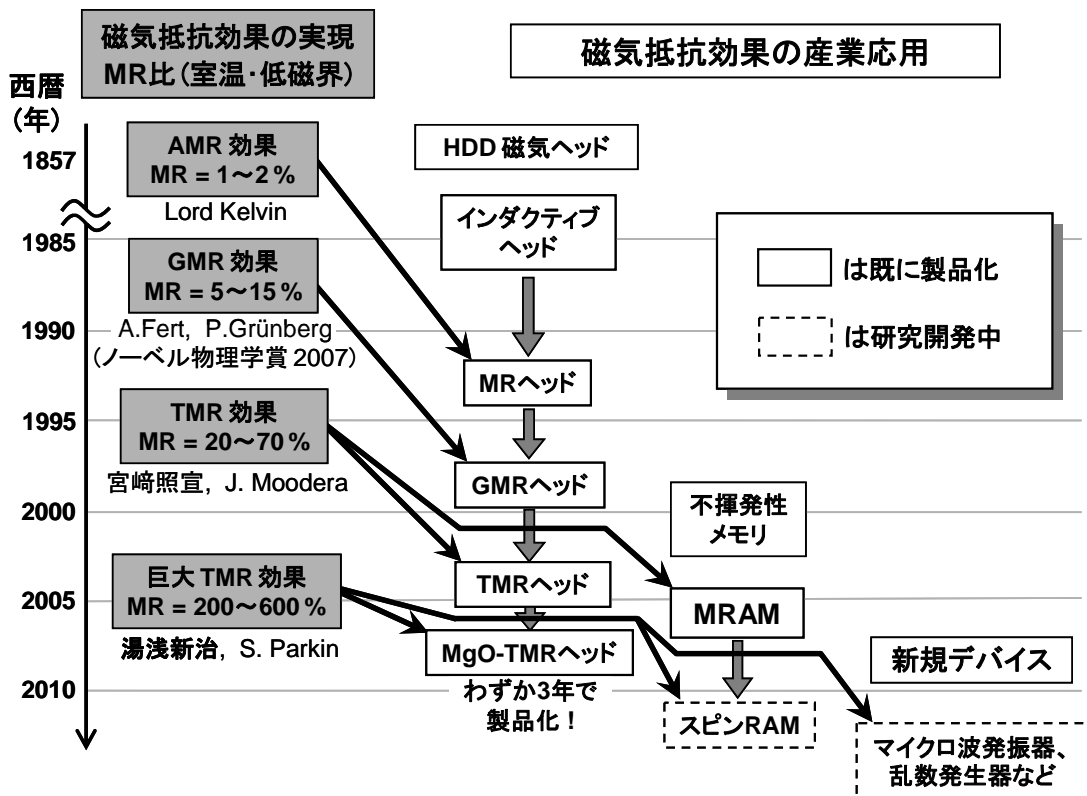


図 5-12 磁気抵抗効果とその産業応用の歴史と展望

2) 光パスネットワーク

近年の映像情報の通信増に伴い、ネットワークの情報通信量はほぼ年率 40% 増大しており、ネットワークルータの消費電力もこれに比例して増大している。現在のネットワークルータは IP パケットを電子的に処理する方式を用いているが、この方式はメール、ウェブ閲覧などの小さいな情報を扱うのに極めて便利であるが、高精細映像などの巨大な情報の伝送には非効率であり、ルータの消費電力の増大の要因となっている。このまま推移すると、2030 年には今より 3 ~ 4 桁の消費電力増が見込まれ、2007 年の年間総発電量を優に超えてしまう。

産総研は、電話交換回線網に類似した、ユーザとユーザを光パスでつなぐ光パスネットワークが巨大な高精細映像情報を扱う次世代の低消費電力ネットワークとして最も有望であると考え、検討を進

めてきた [5-25]。新規光パスネットワークの仕組みと、IP パケットネットワークと大規模光パスネットワークの融合により、低消費電力で高度の情報サービスが可能なネットワークの概念図を図 5-13 に示す。主な技術開発課題は光パスネットワークを管理制御する技術、光伝送走路を最適化する技術（分散補償など）、回線交換のための小型低消費電力のシリコン・フォトリソグラフィを用いた光スイッチの開発などである。情報量あたりの消費電力を現状のルータに比べて 3 桁低くする技術確立を目指して現在精力的に研究開発が進められている。

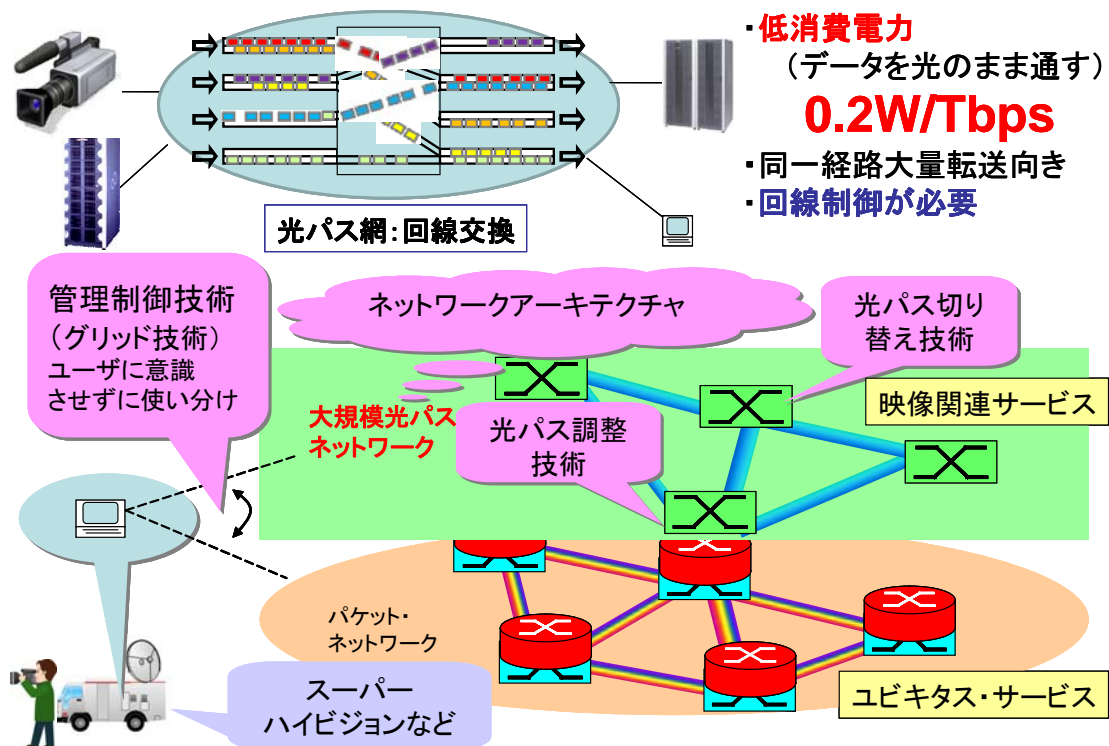


図 5-13 新規光パス網と既存パケット網との併用によるネットワークの概念図

3) 知能システム

ユビキタスロボティクス（機能を持つ空間）は人間にサービスすることが目的であり、ロボットは手段でしかない。したがって Dependable でなければいけない。Dependable System は①信頼性、② security、③ safety が満たされていなければならない。ロボットも課題をクリアーするために作成している。ロボットと人との関係では、ロボットを隔離して使用する本質安全のケースと、車の組み立てなど、人とロボットが一体になって作業する機能安全のケースがある。ロボットという名前自体に特別な意味はない。人間をアシストしているだけ。ロボットにパワーはある。機能をどう作り込むかが重要である。ロボットは電子制御のデバイスで、社会システムまで広がっている。

原子力プラントではすでに機能安全の規格ができあがっている。そのほかでは飛行機・鉄道が先行しており、車はあと 2 年くらいかかる。ロボットはこれからの状態だが、まずリスク評価をする必要があるだろう。対人安全を重視する立場から、認証基準としては暴走したときのハザードを見積もる必

要がある。車のブレーキ・ステアリングは現在 1 系統だが、2 系統にする必要が出てこよう。機能安全の分野ではドイツが強い。日本は 10 年ほど遅れている。ドイツはハード、ソフトとも規格で勝負していこうとしている。リスクマネジメントをしてからハード、ソフトに向かう。センサーメーカーがコミットしている。センサーシステムとして完成されている（二重系）。日本は IC61501 をキャッチアップして規格を作ってゆく。ハードは EU の先を走ってゆく。産総研はセンサーデバイスに強い。

将来の人口減社会では全くの素人が突然入ってきてロボットを操作するようになる。匠の技に期待できない社会では、素人がいじっても安全を守ってやれるようなシステムを作ることが必要となる。産総研は NEDO の生活支援ロボットプロジェクトを担当している。これは安全を一つの柱としており、将来の少子高齢化に対応するものである。規格・認証基準。高度医療の倫理とロボットの規準は似ている。日本の文化を守りながら、現在ないものを作ろうとしている。

完全安全な社会はあり得ない。人間とロボットのインターフェースをどのようにデザインするかが課題である。社会がどれだけそのシステムを容認するかが次の問題となる。

ロボットの省エネを考えると、ロボットを駆動するコンピューターでのエネルギー消費が大きい。モーターなどはドイツ航空宇宙センター（Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., DLR）は放熱量が少なく、優れている。レアメタルの使用が鍵となるようだが、レアメタルの代替技術とからんで、今後の研究開発課題となろう。図 5-14 に産総研で開発されたロボットを示す。



図 5-14 パロとヒューマノイドロボット HRP-4C ・HRP-2

（5）地質分野

エネルギーの確保の観点から CCS、地熱利用の技術は重要だが、それらの開発と平行して、まず化石燃料を原油のような C/H 比の大きい化石燃料から天然ガス、メタンハイドレートのような C/H の小さいものに変えていき、その上で CCS も導入していくことが必要になるのではないかと。

鉱物資源では、レアメタルだけでなく太陽電池の素材原料となる SiO₂ のような資源についても、

品位の高い資源を確保していく必要がある。資源の争奪戦に負ければ、CO₂削減の技術の製品化にも影響が出る。1990年前後のバブルの時代には、資源を海外から買えばよいという風潮があったが、資源を他国に依存することは非常に危険である。海外で資源開発を進めることはもちろん、国内資源も必要に応じて開発できる準備は整えておく必要がある。

CO₂の削減には、現状を見る限り原子力発電の役割は今後とも不可欠である。日本のような海洋プレート沈み込み帯では火山活動や地震活動が激しく、原子力発電所の立地や高レベル放射性廃棄物の地層処分場の立地に、サイトおよび周辺の地質の検討は必要不可欠である。

「持続性＝自然に対する低インパクト」とすれば、それは「地球と人間が上手につきあっていくこと」であり、土壌汚染対策、自然の特性を生かした低インパクトな国土の開発も考える必要がある。このためには、国土の詳細な地質情報が整備され、これらが的確に利用されるような社会的な仕組みが必要である。また、「安全な社会」の重要な要素として「災害に強い社会」があり、火山噴火、地震をはじめとする災害に対する備えは重要である。活断層、火山などの詳細な地質情報や、人口密集地の地下の地質の正確な情報が得られ、かつそれが的確に利用される必要がある。地球のことをよく知ること、すなわち活断層、火山などの詳細な地質情報や、人口密集地の地下の地質の正確な情報を得れば、それらを的確に利用することにより、これらの災害に強い社会を作ることができる。これら突如起こる災害から市民を守ることは、持続的な社会の発展を続けるために重要である。

産総研の他に地質について総合的に研究行っている研究機関は国内に存在しない。産総研の地質分野は地質学研究のナショナルセンターとして基礎研究・基盤情報の提供を担い、民間は技術開発・地質情報の具体的な活用を行っており、その役割分担は比較的明確に分けられている。

地質学は地球の性質に対して空間軸と時間軸の四次元情報を提供し、地球をよく知り、将来予測に用いることができる。過去の気候変動を地層から読み取るのもその一例である。産総研の地質分野は持続的発展のための技術の基礎情報とともに、そのバックグラウンドとなる地質図類を初めとする地球の理解のための基本情報を提供している。この情報が専門家だけでなく、一般の住民に正しく理解されること、すなわち地質学的リテラシーの向上によってこそ、原子力発電所をはじめとする様々な建造物の立地に対する理解や、地震や火山噴火などの災害に対する備えにつながることから、情報の生産と流通の双方について努める必要がある。

現在、地質学の分野では大学での教育力が落ちている。それは短期的な研究成果をあげないと研究者、教育者としての就職が難しいためである。地質学は地球の性質を観察を基に総合的に理解する学問であり、その成果は長期にわたり利用されるが、成果が出るまでには時間がかかることが多い。このため、現在は地質学の分野でも短期的な成果が出やすい分野が盛んで、地球のことを総合的に理解できる人材の育成は進んでいない。産総研の作る地質情報や技術を社会で利活用するためには、地球の性質を総合的に理解でき、伝えることのできる人材が必須である。2050年に地質情報が市民の身近なところで使われ、地球と上手につきあっていくことができるために、産総研は研究開発・情報整備とともに、人材育成や地質情報が社会へ浸透できるような仕組み作りをバランス良く図っていかねばならないであろう(図 5-15)。

2050年 人間が地球と共存できる社会＝地質情報が身近にある社会

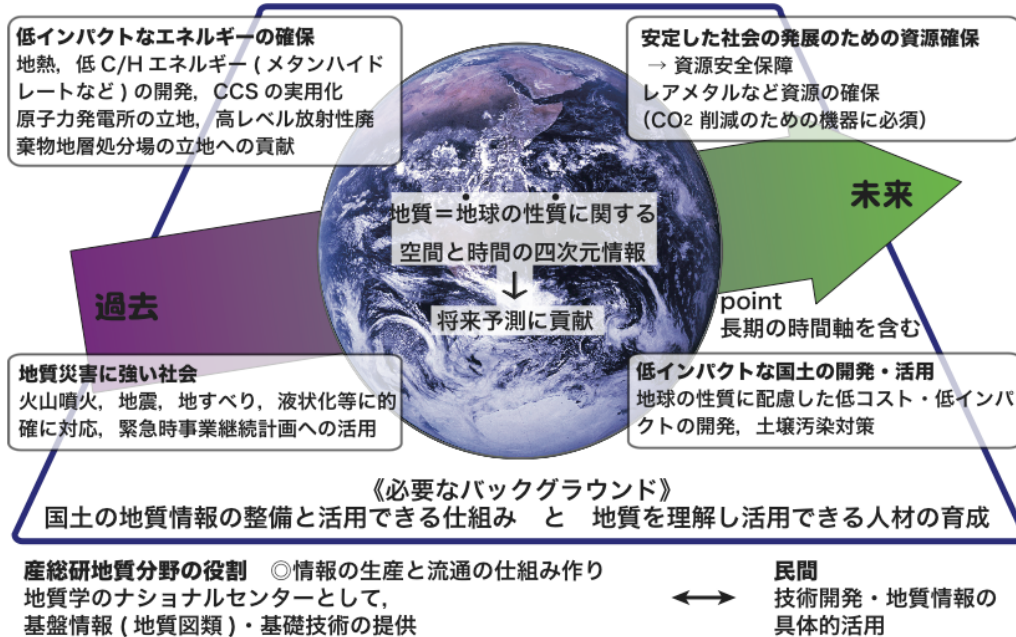


図 5-15 2050年における社会と地質情報との関わり

（6）計測標準分野

グローバル化した世界経済の中、技術競争では優位性が、社会生活には安全・安心が求められている。これらを支える測定の信頼性を保証する上で、計量トレーサビリティ¹²⁷が重要な意味を持つに至っている。国家標準から現場の一般計測器につながる計量トレーサビリティを確保するため、産総研では測定機器の校正（キャリブレーション）をしている会社の標準器のキャリブレーションを行っており、持続的な研究開発実施のための重要な業務を担っている。

計量標準については、2010年までに計量標準の知的基盤を欧州並みに整備することが閣議決定されており、物理量、化学量ともに250種類程度ずつ整備する方向で検討が進められている。

セシウム（Cs）原子時計は12桁の精度を持ち、カーナビゲーションシステムにも利用されるものとなるため、精度管理はきわめて重要である。産総研ではCs原子周波数標準器の開発とその高精度化に関する研究を行っているが、社会が産総研に求めるところも大きいものがある。

計測分野での開発状況を質量標準で例示すると、(1)真空秤量技術の開発、キログラム原器表面への汚染分子の吸着量の定量的な評価といった質量の国家計量標準自体の高精度化を目指した基礎的な研究、(2)自動音響式体積計や走査型磁化率計など分銅の特性評価技術の開発、大秤量6,000 kg質量比較器（天秤）の高精度化といった産業界への標準供給に際して校正サービスを高精度かつ効率的に実施するのに必要な実用技術の開発、(3)分銅やはかりの校正事業者のための校正方法や不確かさの評価

¹²⁷ 物品の流通経路を生産段階から最終消費段階あるいは廃棄段階まで追跡することが可能な状態。我が国では、一般に工業製品や食品など、市場を流通する商品が最終的に販売されるまでを指す場合が多い。物理量の記述の蓄積がトレーサビリティ構築の必要条件となる。

方法に関する技術基準の作成、関連する JIS 規格等の制定・改定への協力といった計測のトレーサビリティ体系の整備に必要とされるソフトウェア面での貢献などがあげられ、様々なレベルで質量の計測に関する研究・開発を展開している。

国際貢献では、1999 年～2009 年にかけて JICA を通じてタイの標準研究所立ち上げを支援している。技術指導、トレーニング、標準作成法の指導を主に実施している。タイには日系企業が多いことから、現地で計量トレーサビリティを容易に確保できるよう、測定器の標準を整備する必要に迫られている。また、タイから周辺国への波及効果も期待されているため、人事交流を含めて今後も支援活動を継続する必要がある。

5. 2 さらなる産総研の発展に向けて

産総研が今後解決すべき課題等について、ヒアリングに応じてくださった方々から貴重なご意見をいただいた。内容を(1) 持続可能性・持続可能な研究開発、(2) 産総研の組織と運営、(3) 研究、(4) 知財、(5) 人材、(6) 標準化、(7) 産学官連携、(8) 国際ネットワーク、(9) 行政改革の 9 項目に分類し、アラカルト的に掲載させていただく。類似のコメントがある場合は、複数の方から同内容のコメントが寄せられたことを意味している。

(1) 持続可能性・持続可能な研究開発

- 恐竜時代、CO₂ 濃度は今の 4 ～ 10 倍。生物体としてはさほど困らない。数千万年～ 1 億年の変化なら進化で対応可能。数十年で上がっているのが問題。
- 生物学そのものが生命は命を引き継いでいるという意味で持続的である。
- 社会の持続性と産総研の持続性は必ずしも関係ないし、産総研がなくなっても社会は困らない。また、一般論としての地球の持続性を議論してもあまり意味がない。やるのなら研究ユニットで横断的なグループを作って調査しないと、独りよがりなものになってしまう。
- 社会の持続性に産総研が資するためにはどうしたらよいか、社会の持続性に産総研としてどのような寄与ができるかが重要なポイントである。

(2) 産総研の組織と運営

- 産総研に来てコミュニケーション問題を抱えている。ボキャブラリーが違う。生物学の発想がない。
- 企業は金勘定+エゴ、大学は霞を食っている。産総研は両方がやらないことをやるべきである。
- 産総研は研究所でなければならない。お役所ではいけない。
- 産総研は組織が大きすぎ、専門分野に別れてそれぞれが独立している。昔の組織に戻った方が良い。
- 交付金についてはフリーダムが必要。ただし、フリーダムはルーズになりがちである。自由と墮落は違う。自由の名の下の墮落を散々見てきている。
- 哲学、宗教を研究所の経営理念に持ち出すと弊害が大きい。

- 産総研の持続性とは産総研が研究所として健全に発展していくことである。政権お抱えの研究所になってはいけない。研究所の仕事は技術的、経済的観点から可能性を提示することにつきる。それを最終的に判断するのは行政である。
- 産総研が研究所として独立性を保つためには、資金的自立が必要である。大学ではできず、産業界のニーズを取り込んだ研究を産業界と組んで行い、それを行政に PR することが重要である。そのためには多数の共同研究、受託研究の実施や、大学、企業の中央研究所にない特色を持つことが必要となる。大学との差別化、企業の中央研究所との差別化を考えると「原理原則に遡って実用的な技術を開発」することが重要であり、継続的に研究しているプロのスタッフを抱えることが大切である。
- 産総研は経済産業省傘下の研究所である。しかしながら色々なモノの見方があり、それらは必ずしも整合しない。役所のお抱え研究所では政権が変わったらいらなくなるということになってしまう。独立、自治でいくためには原資が必要。経済産業省予算に対する依存性は適宜コントロールする必要がある。せめて1~2割は外部資金（NEDO 資金は含まれない）を取りたい。
- 産総研のルールはお役所的。こんなことをやっていると良い研究ができない。
- ぜひ、産総研幹部から将来のビジョンを示してもらいたい。「このような産総研を目指す」、「このような産総研にする」といった内容である。

(3) 研究

- ロードマップがあると、いつまでにどこまで計測する必要があるかわかり、研究計画が立てやすい。
- 研究費が若手研究者に回るような配慮が必要。
- スマートマニュファクチャリングが重要。
- 途上国との研究協力をしないとたない。
- 生物学はまだ分からないことが圧倒的に多い。ゲノムの解析が出来れば生物・生命現象が理解できるというのはいそ。
- 研究には「発見」と「発展」がある。「発見」は巨大な研究所がなくてもできるが、研究の自由がないといけない。ただ、「発見」の確率をどの程度で妥協するかが問題である。「発展」には金がかかる。「発見」は学術論文にできるが「発展」は難しい。
- 交付金予算が減ってきているので NEDO の大型プロジェクトを取っている。これは第2種基礎研究であり、アウトプットを出さないといけない。
- 日本の自然科学は欧米に握られている。日本の大学教授は欧米で決めている。それは欧米のジャーナルに投稿し、インパクトファクターが大きいことが日本で評価される基準になっているからである。しかしながら、たとえばガンを例にとると、日本人には胃ガンが多いが、欧米人には胃ガンが少なく、腸ガンが多いので、欧米のレフェリーは胃ガンに関心を持たない。そうすると、教授になりたい日本人研究者は腸ガンの研究を行うことになり、日本人に多い胃ガンの研究者が少なくなってしまう。肝炎もアジア人に多

く、欧米人に少ない疾病であり、同様の事情にある。

- 研究にはシナリオが必要。その上でいろいろなオプションを持って研究することが重要であり、太陽光研究センターでもそのように研究を行っている。
- 安定的資金（交付金予算等）は競争を阻害し、刺激がない状況で停滞を招く恐れがある。マッチングファンドを活用するのも一案である。交付金予算を限りなくゼロに近づけ、プロジェクトを取ってきたところにマッチングファンドをつける、ということを考えても良いのではないか。
- 役所は完全には中立的でない。役所の利害・利権もある。国研として中立的であるというのは官であるということだけでなく、学問的に中立であるということである。継続的に刺激がないと活性化しない。交付金予算も安定的な資金であるというメリットはあるが、刺激がなくなるという危険がある。
- 産総研としては出口につながる研究が重要。
- 研究が国民にどれだけ受け入れられるかを考えなければいけない。「見える化」もきわめて重要である。
- 自分の分野では、バイオと言っても照明関係、センサー関係、空調関係、水耕栽培など様々な分野の専門家と意見交換をした後にプロジェクトを立ち上げるに至った。異分野融合なくして発展はない。
- 情報は世界を走ると言われるように、情報共有のスピードが猛烈に速い。「優れているものはたかられる、優れていないものにはたからない」現状から、競争資金を得るのは困難である。産学官連携推進部門やイノベーション推進室が中心にリードして、外部資金を取りに行く必要があるのではないか。
- 次の研究、次の次の研究を企画し、予備実験を行うには、自由度の確保された資金が必要である。
- インパクトファクターの高い論文誌に論文を発表し、かつ企業からの外部資金を取り続けることは至難の業である。運営費交付金の配分や評価法について抜本的な見直しをお願いしたい。
- 米国では、何とか技術を売り抜けようとし、それに成功したものがどんどん売り抜かれていき、成長・蓄積し、製品化にたどり着く。産総研というより、日本全体でシーズ研究がなくなっていくのではないかとの危機感を持っている。良い研究をしても、研究資金が枯渇すると、ストップして（されて）しまう場合が多い。

（４）知財

- 知財戦略としては特許を取ることに意味があるのではなく、戦いに勝つことが重要。知財紛争のときに戦える部署が必要。

(5) 人材

- 人に知識は付いて回る。ブレインになれる人、持続可能な社会を考えることのできる人の育成が重要。
- 各ユニットあるいは各分野の新人採用枠を固定してほしい。さもないと研究計画が立てられない。
- 技術継承の観点から新人の採用は必須である。最先端研究と校正業務に対する人的資源の適正配分は悩ましい課題である。どちらの業務にも従事してポテンシャルを上げる必要がある。
- 外国からひきあいのくる研究者を育成すべき。
- 資源リサイクルの分野は大学の講座が減少していることもあり、ドクターで産総研を希望する人がいない。外国人ポスドクなどの外部人材に頼らざるを得ない状況。
- 産総研には後進を育てるシステムがなく、教育をやらない。良い研究を進めるためには人間性が重要である。研究者を育てるということは研究に対するモチベーションを伝えるということである。産総研に頭の良い人は多くいるし、知識を簡単に吸収している。しかし、それだけでは良い研究者が生まれにくい。
- 自分は生きて証として人間社会に役立つことをやりたい。別に形が残らなくても良い。
- 自分はセンターのスタッフの能力を見抜いている。NEDO のプロジェクトは「発見」より「発展」が目的。ポスドクを雇用しても「発展」では科学的な業績になりにくいので誰に何をやってもらうか人選に苦勞している。
- 能力がないのに博士の学位を持っている人間が多い。国は雇用のことを考えないで博士を増やしてしまった。
- 新しいセンターなのでほとんどが非常勤職員。常勤にするときにも待遇を含めて大変苦勞した。雇用に関しては旧工技院の感覚が残っている。昔の国立研究所の意識が変わっていない。県立機関から優秀な人材を採用したとき、人事から県なので一段低いランクの給料を提示された。アクティビティの高さと常勤職員の数が不均衡である。研究に関しては世界的、待遇に関してはきわめて低い。
- 研究グループの一人一人に実験室を与えて、実験室間移動は禁止している。企業との共同研究を行っているため、情報管理は厳しく行っている。研究を円滑に進めるためには 5 ～ 6 人程度の人材補充が必須である。

(6) 標準化

- 国際規格に関わっている人を評価できるようにする必要がある。評価システムを見せないと人は集まらない。
- 許認可につながる標準化を心がけなければいけない。
- 計量標準は国際協調の元に進められており、特段の問題は生じていない。
- 標準化の委員長、議長のポストを押さえることが重要。
- 海外に役人が出ると標準が重要であると認識してくれる。

- 標準化人材についても人がころころ変わる企業、役所では無理。企業では優秀な人が標準に関する仕事をやらせてもらえない。産総研としてはできるだけ企業の人がそういう仕事を続けられるようサポートしている。

(7) 産学官連携

- 企業は技術を買うのではなく、人を買う。
- 研究者もグループ長レベルになれば、官（特に経済産業省）と一緒に行政の基となるサイエンスを実施しなければいけない。ロードマップの作成なども一緒に作業すべき。それが制度の改革につながるようになるのが望ましい。医療関係でも製品を流通させる制度を整備してゆくということ。技術を制度に乗せながら開発するという姿勢。他省庁の研究所・研究者の巻き込みも必要。
- 外部資金を上手に取っている研究者は組織や専門家を上手に使っている。しかし、そのような研究者は少ない。企業との共同研究が円滑に進行する場合でも、いわゆる「お見合い」期間が必要である。その間に、研究者のポテンシャルを示し、企業側の信頼を得る必要がある。
- 共同研究の連携先としては、大企業ではなく、優良な中小企業やベンチャーをねらうべきである。
- 産総研独自の発明を集めた技術シーズを持って企業回りをしてもマッチングは難しい。相手企業のニーズをよく聞いて、適切なアドバイスの提供に心がけるのが効果的。

(8) 国際ネットワーク

- これからはアジアとの関係が重要である。自分はアジアとの関係を強化するために努力している。近いうちにアジア糖鎖会議を日本で開催するが、自費でアジア各国から 50 人以上の研究者が来る予定である。アジア文化圏を創りたい。
- 歴史の流れはものすごく速い。自分は週末を利用して中国、インドなどのアジア諸国に行き、研究者と意見交換を行って、時代をフォローアップしている。

(9) 行政改革

- 縦割り行政の弊害が出ている。バイオ分野では理研と産総研が研究している。役人は予算を取ってくるのが仕事であり、それで評価されるというのは間違っている。日本のためには理研＋産総研で新しい研究を始めても良い。
- 科学者が国の行政から遠ざかりすぎている。明治の時代から役所はゼネラリストの養成を目的に人事をやってきた。2年ローテーションでは研究所の継続性など確保できない。
- 他の研究所と一緒にするのは難しい。いろいろなケースを知っているが、家庭内離婚するぐらいならやめたほうがよい。研究所間で真剣勝負をするのもよい。一緒になると競争しなくなり、何も考えなくなり、かえって競争力を失う。制度上の制約でできないものについては政策主導で決めればよい。

- NIMS は材料、産総研はデバイス指向。大学が競争相手であり、大学との差別化が必要。NEDO と産総研を一緒にするなどの話があるが、産総研がファンディングの力を持つと頂点に立つことになり、健全性を喪失する。米国の場合、NREL が大学にいく予算を仕切っている。科学論争、技術論争があると、皆それになびくことになり、本来のニュートラルな議論ができなくなる。

【引用文献】

- 1) 産総研 (2009) 「第 2 期研究戦略平成 21 年度版」、H21.04
- 2) 近藤伸亮、増井慶次郎、三島 望、松本光崇 (2009)「サステイナブルビジネスのアイデア創成支援」、日本機械学会論文集 (C 編)、75(756)、2105-2113
- 3) 天満則夫ら (2009)「特集：二酸化炭素回収・貯留 (CCS) の研究開発最前線」、日エネ誌、88(4)、261-300
- 4) 川田耕司 (2004)「二酸化炭素地中貯留のための貯留槽選定」、PETROTECH, 27(1), 82-86
- 5) 山本正隆 (2008)「油田への CO₂ 挿入」、PETROTECH, 31(1), 29-33
- 6) 白石浩之 (2008)「日本における風力発電の導入状況と促進に向けた取り組み - 日本型風力発電ガイドライン策定事業 -」、PETROTECH, 31(9), 702-707
- 7) 坂西欣也ら (2006)「特集 バイオマス」、PETROTECH, 29(11), 794-829
- 8) 小木知子 (2008)「バイオマスの定義と分類」、日エネ誌、87(4), 297-302
- 9) 五十嵐泰夫、五十嵐春子 (2008)「バイオエタノール 何が問題なのか、日本で何ができるか」、PETROTECH, 31(7), 525-530
- 10) 矢野伸一 (2008)「セルロース系バイオエタノールの製造技術動向」、PETROTECH, 31(6), 429-434
- 11) 小宮山知成 (2009)「変革の時期を迎えつつある米国バイオ燃料開発」、PETROTECH, 32(7), 501-506
- 12) 山川誠夫 (2009)「欧州バイオ燃料事情 - EU の高い目標と現実 -」、PETROTECH, 32(7), 507-511
- 13) 森本慎一郎、宮本耕一 (2009)「持続可能なバイオマス・バイオ燃料開発における社会影響評価の現状と動向」、日エネ誌、88(2), 133-139
- 14) 経済産業省 (2006)「新エネルギー国家戦略」
<http://www.enecho.meti.go.jp/topics/energy-strategy/index.htm>
- 15) 環境エネルギー政策研究所 (2008) 「2050 年自然エネルギービジョン、再生可能エネルギー展望会議」参考資料、1-12
- 16) IEA (2006) Energy Balances of OECD Countries 2003-2004 (2006 Edition)
- 17) 阿部俊明ら (2003)「特集 水素製造技術の現状と課題」、PETROTECH, 26(9), 692-719
- 18) 岡野一清ら (2005)「特集 水素社会に向けたエネルギー産業の役割 - 石油系燃料電池を中心に」、PETROTECH, 28(11), 814-833
- 19) 安藤祐司ら (2006)「総説特集：水素エネルギー社会への展望 I」、日エネ誌、85(7), 494-524
- 20) 梅沢順子ら (2006)「特集 水素貯蔵材料」、PETROTECH, 29(4), 253-25
- 21) 橋本辰彦ら (2006)「小特集 水素貯蔵・運搬システム」、PETROTECH, 29(12), 882-895
- 22) 児玉竜也ら (2009)「特集：CO₂ フリー水素製造技術の最新動向」、日エネ誌、88(5), 369-421
- 23) 和田洋流 (2009)「水素ステーション用低合金鋼製蓄圧器の水素環境脆化特性と安全性検証」、PETROTECH, 32(7), 459-464

- 24) 蛭名武雄 (2009)「水素ガスバリアー性の高い粘土膜プラスチック複合材料」、プラスチックエージ、Mar. 2009、91-95
- 25) 石川 浩、並木 周、工藤知宏、産総研 Today、vol. 10, no. 2, 4-5

【参考文献】

- 1) 総合科学技術会議（気候変動適応型社会の実現に向けた技術開発の方向性立案のためのタスクフォース）（平成 21 年 3 月～）
<http://www8.cao.go.jp/cstp/sonota/kikoutf/kikou.htm>
- 2) 経済産業省 (2009)「技術戦略マップ」、H21.04.
- 3) 川口荘介 (2009)「インフラの長寿命化とスマートシュリンクを進める」、自治体チャンネル、No. 115, 8-9.
- 4) 分山達也、江原幸雄 (2009)「GIS を用いた再生可能エネルギー評価 - 長崎県雲仙市の例 -」、日エネ誌、88(1), 58-69
- 5) 木下 健ら (2009)「特集：海洋エネルギー・資源の最前線」、日エネ誌、88(7), 524-576
- 6) 栗原史郎、宇都隆一、青木頼幸 (2009)「新エネルギー事業のファイナンス実態調査とキャッシュフロー・モデル分析」、日エネ誌、88(4), 310-325

用語解説リスト

① 用語の表記順（アルファベット順、50音順）

ページ	用語
206	863 プログラム
134	ABE 発酵
93	BDF
98	BEMS
127	BIPV
102	BRT
93	BTL
102	CASBEE
127	CIGS
212	cDNA
102	CNG
125	DG RTD
93	DME
175	FCX
226	FTTH
218	GMPLS
93	GPS
97	GSM
157	GTO サイリスタ
107	Genuine Progress Indicator
98	HEMS
158	HEMT
157	IGBT
155	IMLB2006
198	IPMC アクチュエータ
222	IPTV
205	IT839 戦略
199	JCO
107	JFS 指標
237	JTEC
100	LRT
251	MEASNET
158	MESFET
157	MOSFET
218	MPLS
164	MWt
124	NCPV
55	PFI
55	PPP
156	PRiME2008

ページ	用語
32	PWh
76	REACH 規則
77	RPF
76	RoHS 指令
105	SCM
219	SC 光源
220	STAR TAP
290	UNFPA
222	WiBro
237	X 線自由電子レーザー (X-FEL)
218	λアクセス技術
218	λユーティリティ技術
107	エコロジカル・フットプリント
79	エコロジカル・リュックサック
60	エネルギーの GDP 弾性値
158	オン抵抗
104	カーシェアリング
53	カーボンオフセット
53	カーボンフットプリント
189	グリーン・サステイナブル ケミストリー賞
50	コンパクトシティ
233	コンプトン散乱
97	システムインテグレーション
231	スピントルク
98	スマートグリッド
148	デカリン
266	トレーサビリティ
228	トンネル磁気抵抗効果
3	ナチュラルステップ
261	ノーマリー・オフ
206	ハイアール・ハルビン工業大学ロボット技術有限公司
137	バイオエタノールの一貫製造技術
167	パッシブソーラーシステム
236	フレネルゾーンプレート
170	マイクログリッド
76	マテリアルフローコスト会計
136	メカノケミカル
19	メガシティ
152	リチウムイオンキャパシタ
79	隠れたフロー
18	仮想水
238	干渉縞
76	環境会計
228	巨大磁気抵抗効果
238	近接場光
124	再生可能エネルギー・コンソーシアム

ページ	用語
229	磁気ヒステリシス効果
238	自由電子レーザー
40	女性のエンパワーメント
146	水素トライボロジー
148	第一原理計算
4	地球の収容能力
186	超分子
247	人間開発指標
180	白金族(PGM)
137	並行複発酵
91	放射化

② ページ順

ページ	用語
3	ナチュラルステップ
4	地球の収容能力
18	仮想水
19	メガシティ
32	PWh
40	女性のエンパワーメント
50	コンパクトシティ
53	カーボンフットプリント
53	カーボンオフセット
55	PFI
55	PPP
60	エネルギーの GDP 弾性値
76	マテリアルフローコスト会計
76	環境会計
76	RoHS 指令
76	REACH 規則
77	RPF
79	隠れたフロー
79	エコロジカル・リュックサック
91	放射化
93	GPS
93	BDF
93	DME
93	BTL
97	GSM
97	システムインテグレーション
98	HEMS
98	BEMS
98	スマートグリッド
100	LRT
102	BRT
102	CASBEE
102	CNG
104	カーシェアリング
105	SCM
107	エコロジカル・フットプリント
107	Genuine Progress Indicator
107	JFS 指標
124	NCPV
124	再生可能エネルギー・コンソーシアム
125	DG RTD
127	BIPV
127	CIGS

ページ	用語
134	ABE 発酵
136	メカノケミカル
137	並行複発酵
137	バイオエタノールの一貫製造技術
146	水素トライボロジー
148	第一原理計算
148	デカリン
152	リチウムイオンキャパシタ
155	IMLB2006
156	PRiME2008
157	GTO サイリスタ
157	IGBT
157	MOSFET
158	MESFET
158	HEMT
158	オン抵抗
164	MWt
167	パッシブソーラーシステム
170	マイクログリッド
175	FCX
180	白金族(PGM)
186	超分子
189	グリーン・サステイナブル ケミストリー賞
198	IPMC アクチュエータ
199	JCO
205	IT839 戦略
206	863 プログラム
206	ハイアール・ハルビン工業大学ロボット技術有限公司
212	cDNA
218	λ アクセス技術
218	λ ユーティリティ技術
218	GMPLS
218	MPLS
219	SC 光源
220	STAR TAP
222	IPTV
222	WiBro
226	FTTH
228	巨大磁気抵抗効果
228	トンネル磁気抵抗効果
229	磁気ヒステリシス効果
231	スピントルク
233	コンプトン散乱
236	フレネルゾーンプレート
237	X線自由電子レーザー (X-FEL)
237	JTEC
238	近接場光

ページ	用語
238	干渉縞
238	自由電子レーザー
247	人間開発指標
251	MEASNET
261	ノーマリー・オフ
266	トレーサビリティ
290	UNFPA

略語表

略語	日本名	欧文名
ABE	アセトン・ブタノール・エタノール	Acetone-Butanol-Ethanol
ABR	応用電池研究	Applied Battery Research
AC	交流	Alternating Current
ACE	高効率クリーンエネルギー自動車	Advanced Clean Energy vehicle
AEI	先端エネルギー計画 (米)	Advanced Energy Initiative
ALISTORE	リチウム電池開発プロジェクト	Advanced Lithium energy STORAGE systems based on the use of nano-powders and nano-composite Electrodes / electrolytes
ANL	アルゴンヌ国立研究所 (米)	Argonne National Laboratory
ANSI	米国規格協会	the American National Standards Institute
AOGCMs	大気・海洋結合循環モデル	Atmosphere-Ocean General Circulation Models
APFED	アジア太平洋環境開発フォーラム	the Asia-Pacific Forum for Environment and Development
APN	アジア太平洋地球変動研究ネットワーク	the Asia-Pacific Network for global change research
ARC	エイムズ研究所 (米)	Ames Research Center
ATD	応用技術開発	Applied Technology Development
BATT	先進輸送技術用バッテリー	Batteries for Advanced Transportation Technologies
BBSRC	バイオテクノロジー生物科学研究会議 (英)	Biotechnology and Biological Sciences Research Council
BDF	バイオディーゼル燃料	Bio-Diesel Fuel
BEE	環境性能効率 (建物)	Building Environmental Efficiency
BEMS	ビル・エネルギー管理システム	Building Energy Management System
BHD	バイオ水素化処理油	Bio Hydrofined Diesel
BIPV	建材一体型太陽電池モジュール	Building Integrated Photovoltaic Module
BNL	ブルックヘブン国立研究所 (米)	Brookhaven National Laboratory
BRT	バス高速輸送システム	Bus Rapid Transit
CASBEE	建築物総合環境性能評価システム	Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency
CCS	二酸化炭素回収貯留	Carbon dioxide Capture and Storage
CDB	国連生物多様性条約	Convention on Biological Diversity
CDM	クリーン開発メカニズム	Clean Development Mechanism
CdTe	カドミウム・テルル	Cadmium Telluride
CESI	電気部品・システム研究所認証研究所 (イタリア)	Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano
CFRP	炭素繊維強化プラスチック	Carbon Fiber Reinforced Plastics

略 語	日 本 名	欧 文 名
CIGS	銅-インジウム-ガリウム-セレン系 太陽電池	Copper Indium Gallium diSelenide
CIS	セレン化銅インジウム	Copper Indium diSelenide : CuInSe ₂
CNG	圧縮天然ガス	Compressed Natural Gas
CNRS	国立科学研究センター (仏)	Centre National de la Recherche Scientifique
COG	コークス炉ガス	Coke Oven Gas
COP	気候変動枠組条約締約国会議	Conference Of Parties to the united nations framework convention on climate change
CPES	パワーエレクトロニクスシステム センター (米・ヴァージニア工科大学)	Center for Power Electronics Systems
CSR	企業の社会的責任	Corporate Social Responsibility
CVD	化学気相成長	Chemical Vapor Deposition
CZTS	-	Cu ₂ ZnSnS ₄
DARPA	国防高等研究事業局	Defense Advanced Research Projects Agency
DDCE	- (米)	Dupont Danisco Cellulosic Ethanol LLC
DEER	分散型電源および電力信頼性プロ グラム	Distributed Energy and Electric Reliability program
DESY	- (独)	Deutsches Elektronen-SYNchrotron
DfE	環境配慮設計	Design for Environment
DG RTD	EU 研究開発総局	Directorate-General for Research
DG TREN	EU 運輸・エネルギー総局	Directorate-General for TRansport and ENergy
DLR	ドイツ航空宇宙センター	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DME	ジメチルエーテル	DiMethyl Ether
DOE	米国エネルギー省	United States Department Of Energy
E3	バイオエタノール 3% 混合ガソリ ン	Ethanol-gasoline blends containing 3%
EA	環境会計	Environmental Accounting
EANET	東アジア酸性雨モニタリングネッ トワーク	the acid deposition monitoring NETwork in East Asia
EC	欧州委員会	European Commission
EC JRC	欧州委員会共同研究センター	European Commission Joint Research Centre
ECHA	欧州化学物質庁	the European CHemicals Agency
ECN	エネルギー研究財団 (オランダ)	Energy research Centre of the Netherlands
ECS	エネルギーキャパシタシステム	Energy Capacitor System
EDF	フランス電力公社	Électricité De France
EDLC	電気二重層キャパシタ	Electric Double Layer Capacitor

略 語	日 本 名	欧 文 名
EERE	エネルギー効率・再生可能エネルギー局（米国：DOEの下部組織）	Energy Efficiency and Renewable Energy
EESD	エネルギー・環境・持続的開発	Energy, Environment and Sustainable Development
EF	エコロジカル・フットプリント	Ecological Footprint
EIA	エネルギー情報管理局（米）	Energy Information Administration
ELV	ELV 指令	End of Life Vehicles directive
ENEA	新技術・エネルギー・環境庁（イタリア）	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
EPA	経済連携協定	Economic Partnership Agreement
EPA	環境保護庁（米）	united states Environmental Protection Agency
EPC	ヨーロッパ特許条約	European Patent Convention
EPFL	ローザンヌ工科大学（スイス）	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne
ERP	電子式道路料金徴収システム	Electronic Road Pricing
EPRI	電力研究所（米）	Electric Power Research Institute
ERIA	東アジア・アセアン経済研究センター	Economic Research Institute for Asean and east asia
ESPRIT	欧州情報技術研究開発戦略計画	European Strategic Program for Research and development in Information Technology
ESR	直列等価抵抗	Equivalent Series Resistance
ESRF	-（仏）	European Synchrotron Radiation Facility
EST	-（EU）	Electric Starting Torque with short term supercapacitor energy storage for boosting small lightweight gasoline engine powertrains
ETBE	エチル <i>tert</i> -ブチルエーテル	Ethyl <i>tert</i> -Butyl Ether
ETC	イーティーシー	Electronic Toll Collection system
ETHZ	連邦工科大学（スイス）	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
EU	欧州連合	European Union
EV	電気自動車	Electric Vehicle
FAO	国連食料農業機関	Food and Agriculture Organization of the united nations
FCC	連邦通信委員会（米）	Federal Communications Commission
FCEV	燃料電池自動車	Fuel Cell Electric Vehicle
FCHEV	燃料電池ハイブリッド車	Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle
FCHV	燃料電池ハイブリッド車	Fuel Cell Hybrid Vehicle
FCVT Program	FCVT プログラム（米）	Freedom Car and Vehicle Technologies Program
FEL	自由電子レーザー	Free Electron Laser

略 語	日 本 名	欧 文 名
FET	電界効果トランジスタ	Field Effect Transistor
FIT	固定価格買取制度	Feed-In Tariff
FP	フレームワークプログラム(枠組みプログラム)(EU)	Framework Programme
FRESCO	-	european development of a Fuel-cell, Reduced-Emission SCOOTer
FSC	森林管理協議会	the Forest Stewardship Council
FSEC	フロリダ太陽エネルギー・センター(米)	Florida Solar Energy Center
FTA	自由貿易協定	Free Trade Agreement
FTAAP	アジア太平洋自由貿易圏	Free Trade Agreement of the Asia-Pacific
FTTH	ファイバートゥザホーム(光ファイバーによる家庭向けのデータ通信サービス)	Fiber To The Home
FZJ	ユーリッヒ研究センター(独)	Forschungszentrum Jülich Startseite
FZP	フレネルゾーンプレート	Fresnel Zone Plate
FhG	フラウンホーファー研究所(独)	Fraunhofer-Gesellschaft
FhG-ISE	フラウンホーファー太陽エネルギー・システム研究所(独)	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
GaAs	ガリウムヒ素	Gallium Arsenide
GaN	ガリウムナイトライド=窒化ガリウム	Gallium Nitride
GDP	国内総生産	Gross Domestic Product
GEOSS	全地球観測システム	the Global Earth Observation System of Systems
GFN	グローバル・フットプリント・ネットワーク	Global Footprint Network
GHG	温室効果ガス	GreenHouse Gas
GINC	地球規模化学物質情報ネットワーク	the Global Information Network on Chemicals
GLASOD	地球規模影響評価	GLobal Assessment of human induced SOil Degradation
GMP	グッドマニュファクチャリングプラクティス	Good Manufacturing Practice
GMP	遺伝子組換え植物	Genetically Modified Plants
GMPLS	-	Generalized Multi-Protocol Label Switching
GNP	国民総生産	Gross National Product
GPI	真の進歩指標	Genuine Progress Indicator
GSC	グリーンサステナブルケミストリー	Green Sustainable Chemistry
GTL	ガス液化油	Gas To Liquid
GTO	ゲート・ターン・オフ	Gate Turn Off

略 語	日 本 名	欧 文 名
GWP	地球温暖化指数	Global Warming Potential
HDI	人間開発指標	Human Development Index
HEMS	家庭用エネルギー管理システム	Home Energy Management System
HEMT	高電子移動度トランジスタ	High Electron Mobility Transistor
HEV	ハイブリッド車	Hybrid Electric Vehicle
HITEN	- (EU)	The High Temperature Electronics Network
HIV	ヒト免疫不全ウイルス	Human Immunodeficiency Virus
HMI	ハーンマイトナー研究所 (独)	Hahn-Meitner-Institute
HV	ハイブリッド車	Hybrid Vehicle
HZB	ヘルムホルツ研究センター (独)	Helmholtz-Zentrum Berlin
ICPD	国際人口開発会議	International Conference on Population and Development
IEA	国際エネルギー機関	International Energy Agency
IEC	国際電気標準会議	the International Electrotechnical Commission
IEEE	米国電気電子学会	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
IFCS	政府間化学物質安全性フォーラム	Intergovernmental Forum on Chemical Safety
IFPRI	国際食糧政策研究所	International Food Policy Research Institute
IGBT	絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ	Insulated Gate Bipolar Transistor
ILO	国際労働機関	International Labour Organization
IMC	産業マイクロエレクトロニクスセンター (スウェーデン)	Industrial Microelectronics Center
IMEC	大学間マイクロエレクトロニクス・センター (ベルギー)	Interuniversity MicroElectronics Center
IMF	国際通貨基金	International Monetary Fund
IMLB	リチウム電池国際会議	International Meeting on Lithium Batteries
INES	太陽エネルギー研究所 (仏)	Institut National de l'Energie Solaire
InGaAs	インジウムガリウムヒ素	Indium Gallium Arsenide
INL	アイダホ国立研究所 (米)	Idaho National Laboratory
InP	リン化インジウム	Indium Phosphide
INRIA	国立情報学・自動制御研究所 (仏)	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
IPCC	気候変動に関する政府間パネル	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPM	インテリジェントパワーモジュール	Intelligent Power Module
IPMC	イオン導電性高分子・貴金属接合体	Ionic Polymer-Metal Composite

略 語	日 本 名	欧 文 名
IRDEP	太陽光エネルギー研究所（仏）	Institut de Recherche et Developpement sur l'Energie Photovoltaïque
IRHTDF	再生可能水素輸送のための国際共同実証施設	the International Renewable Hydrogen Transmission Demonstration Facility
IROS	-（米）	IEEE/RSJ international conference on Intelligent RObots and Systems
ISET	太陽エネルギー技術研究所（独）	Institut für Solare EnergieversorgungsTechnik
ISFOC	集光型太陽光発電システム研究所（スペイン）	Instituto de Sistemas FOtoltaicos de Concentración
ISO	独立系統運用事業者	Independent System Operator
ITO	酸化インジウムスズ	Indium Tin Oxide
ITRI	工業技術院（台湾）	Industrial Technology Research Institute of Taiwan
ITS	高度道路交通システム	Intelligent Transportation Systems
IUCN	国際自然保護連合	International Union for Consideration of Nature and natural resources
JAEA	日本原子力研究開発機構	Japan Atomic Energy Agency
JAUS	-	Joint Architecture for Unmanned Systems
JHFC	水素・燃料電池実証プロジェクト	Japan Hydrogen & Fuel Cell demonstration project
JICA	国際協力機構	Japan International Cooperation Agency
JIS	日本工業規格	Japanese Industrial Standards
JOULE	-（EU）	Joint Opportunities for Unconventional or Long Term Energy supply
JST	科学技術振興機構	Japan Science and Technology agency
JTI	共同技術イニシアチブ（EU）	Joint Technology Initiative
KAIST	韓国科学技術院	Korea Advanced Institute of Science and Technology
KAST	神奈川科学技術アカデミー	Kanagawa Academy of Science and Technology
KIER	韓国エネルギー研究所	Korea Institute of Energy Research
KIST	韓国科学技術研究院	Korea Institute of Science and Technology
KPVDO	韓国太陽光発電開発機構	Korea PhotoVoltaic Development Organization
KTH	王立工科大学（スウェーデン）	Kungliga Tekniska högskolan
LAAS	国立科学研究機関の一部として活動するシステム分析・アーキテクチャに関する研究所（仏）	Laboratory for Analysis and Architecture of Systems

略 語	日 本 名	欧 文 名
LAN	ローカルエリアネットワーク	Local Area Network
LANL	ロスアラモス国立研究所 (米)	Los Alamos National Laboratory
LBNL	ローレンス・バークレー国立研究所 (米)	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCA	ライフサイクルアセスメント	Life Cycle Assessment
LCC	ライフサイクルコスト	Life Cycle Cost
LCCO ₂	ライフサイクル CO ₂	Life Cycle CO ₂
LCD	ライフサイクルデザイン	Life Cycle Design
LED	発光ダイオード	Light Emitting Diode
LIME	被害算定型環境影響評価手法	Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling
LLNL	ローレンス・リヴァモア国立研究所 (米)	Lawrence Livermore National Laboratory
LPI	生きている地球指数	Living Planet Index
LRT	軽量軌道交通	Light Rail Transit
LSI	大規模集積回路	Large Scale Integration
MBR	膜式活性汚泥法	Membrane BioReactor
MCS	多種化学物質過敏症	Multiple Chemical Sensitivity syndrome
MDGs	ミレニアム開発目標	Millennium Development Goals
MEASNET	-	the international MEASuring NETwork of wind energy institutes
MEMS	マイクロ電子機械システム	Micro Electrical Mechanical System
MESFET	- (電界効果トランジスタの一種)	Metal-Semiconductor Field Effect Transistor
MFA	物質フロー分析	Material Flow Analysis
MFCA	マテリアルフローコスト会計	Material Flow Cost Accounting
MIC	情報通信省 (韓国)	Ministry of Information and Communications
MM	モビリティ・マネジメント	Mobility Management
MNRE	新・再生可能エネルギー省 (インド)	Ministry of New and Renewable Energy
MOCIE	通商・産業・エネルギー省 (韓国)	Ministry Of Commerce, Industry and Energy
MOEA	經濟部 (台湾)	Ministry Of Economic Affairs
MOSFET	- (電界効果トランジスタの一種)	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MOST	科学技術省(韓国)	Ministry Of Science and Technology
MPLS	-	Multi-Protocol Label Switching
MRAM	不揮発性磁気抵抗メモリ	Magnetoresistive Random Access Memory
NASA	アメリカ航空宇宙局	National Aeronautics and Space Administration
NCPV	国立太陽光発電センター (米)	National Center for PhotoVoltaics
NDRC	国家発展改革委員会 (中国)	National Development and Reform Commission

略 語	日 本 名	欧 文 名
NIBIB	国立生物医学画像・生物工学研究所 (米)	National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering
NICT	情報通信研究機構 (日)	National institute of Information and Communications Technology
NIH	国立衛生研究所 (米)	National Institutes of Health
NIST	国立標準技術研究所	National Institute of Standards and Technology
NOx	窒素酸化物	Nitrogen Oxides (NO and NO ₂)
NREL	国立再生可能エネルギー研究所 (米)	National Renewable Energy Laboratory
NRI	ナノエレクトロニクス研究イニシ アチブ	Nanoelectronics Research Initiative
NSF	米国立科学財団	National Science Foundation
NSRC	- (タイ)	National Synchrotron Research Center
NSRRC	- (台湾)	National Synchrotron Radiation Research Center
OECD	経済協力開発機構	Organisation for Economic Cooperation and Development
OMG	オブジェクトマネジメントグルー プ	Object Management Group
OMGRTC	- (ソフトウェア標準化団体 OMG による仕様)	Object Management Group, Robotic Technology Component
ONR	海軍研究局 (米)	Office of Naval Research
OPTELEC	-	Energy Optimised Traction system for ELECtric Vehicle
ORNL	オークリッジ国立研究所 (米)	Oak Ridge National Laboratory
ORiN	オンライン	Open Resource interface for the Network / Open Robot interface for the Network
OROCOS	-	Open ROBOT CONTROL Software
OUSD	-	Office of the Under Secretary of Defense
P&BR	-	Park & Bus Ride
PAL	- (韓国)	Pohang Accelerator Laboratory
PCB	ポリ塩化ビフェニル	PolyChlorinated Biphenyl
PDP	植物由来医療用タンパク質	Plant-Derived Pharmaceutical protein
PEFC	固体高分子形燃料電池	Polymer Electrolyte Fuel Cell
PEM	プロトン交換膜	Proton Exchange Membrane
PFC	力率改善	Power Factor Correction
PFI	-	Public Finance Initiative
PFOS	パーフルオロオクタンスルホン酸 塩	PerFluoroOctane Sulfonic acid
PHA	ポリヒドロキシアルカン酸	Polyhydroxyalkanoates
PHEV	プラグインハイブリッド車	Plug-in Hybrid Electric Vehicle

略 語	日 本 名	欧 文 名
PHV	プラグインハイブリッド車	Plug-in Hybrid Vehicle
PM2.5	粒径 2.5 μm 以下の粒子状物質	Particulate Matter 2.5
PMP	植物製造医薬品	Plant-Made Pharmaceuticals
PNGV	次世代自動車パートナーシップ	Partnership for a New Generation of Vehicles
PNNL	パシフィック・ノースウエスト国立研究所	Pacific Northwest National Laboratory
POPs	残留性有機汚染物質	Persistent Organic Pollutants
PPP	パブリックプライベートパートナーシップ	Public Private Partnership
PRI	責任投資原則	Principles for Responsible Investment
PRiME	電気化学日米合同大会	Pacific Rim Meeting on Electrochemical and solid-state science
PRTR	環境汚染物質排出移動登録	Pollutant Release and Transfer Register
PV	太陽光発電	PhotoVoltaic power generation
PVTC	太陽光発電科技中心（台湾）	PhotoVoltaics Technology Center
PVTP	欧州太陽光発電技術プラットフォーム	PhotoVoltaic Technology Platform
PV TRAC	太陽光発電技術諮問会議（EU）	PhotoVoltaic Technology Research Advisory Council
RA	リスクアセスメント	Risk Assessment
RAS	・（米・IEEE）	Robotics and Automation Society
RCS	リアルタイム制御システム	Real-Time Control Systems
RDF	ごみ固形燃料	Refuse Derived Fuel
REACH	化学品規制（EU）	Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals
ReRAM	抵抗変化型メモリ	Resistance Random Access Memory
RoHS	RoHS 指令	Restriction of Hazardous Substances directive
RPF	固形燃料	Refuse Paper & Plastic Fuel
RPS	電気事業者による新エネルギー等の利用に関する特別措置法	Renewables Portfolio Standard
RSPO	持続可能なパームオイル円卓会議	Roundtable on Sustainable Palm Oil
RT	ロボット技術	Robot Technology
RTO	地域送電機関	Regional Transmission Organization
SAI	ソーラー・アメリカ計画	Solar America Initiative
SAN	ストレージエリアネットワーク	Storage Area Network
SBD	ショットキーバリアダイオード	Schottky Barrier Diode
SBIR	中小企業技術革新制度（米）	Small Business Innovation Research
SEIA	太陽エネルギー工業会（米）	Solar Energy Industries Association
SiC	シリコンカーバイド=炭化ケイ素	Silicon Carbide

略 語	日 本 名	欧 文 名
SiGe	シリコンゲルマニウム	Silicon Germanium
SNL	サンディア国立研究所 (米)	Sandia National Laboratories
SOFC	固体酸化物型燃料電池	Solid Oxide Fuel Cell
SRA	戦略的研究計画	Strategic Research Agenda
SRI	社会的責任投資	Socially Responsible Investment
SUTDEV	- (EU)	SUSTainable DEvelopment, global change and ecosystems
TCE	トリクロロエチレン	Trichloroethylene
TDM	交通需要マネジメント	Transportation Demand Management
TEMM	日中韓三カ国環境大臣会合	the Tripartite Environment Ministers Meeting
TMR	関与物質総量	Total Material Requirement
TMR	トンネル磁気抵抗	Tunnel Magneto-Resistance
TNO	二酸化チタン系透明導電体	Titanium Niobium Oxide
toe	石油換算トン	ton of oil equivalent
TPI	トータルパフォーマンス指標	Total Performance Index
TPN	テーマ別プログラムネットワーク	Thematic Programme Network
TPP	テクノロジー・パスウェイ・パートナーシップ (米)	Technology Pathway Partnerships
UCLA	カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (米)	University of California, Los Angeles
UCTE	欧州送電協調連盟	the Union for the Coordination of Transmission of Electricity
UNCCD	砂漠化対処条約	the United Nations Convention to Combat Desertification
UNCSD	国連持続可能な開発委員会	the United Nations Commission on Sustainable Development
UNDP	国連開発計画	United Nations Development Programme
UNEP	国連環境計画	United Nations Environment Programme
UNFCCC	国連気候変動枠組条約	United Nations Framework Convention on Climate Change
UNFPA ¹²⁸	国連人口基金	United Nations Population Fund
UNIDO	国連工業開発機関	United Nations Industrial Development Organization
UniNE	ヌーシャテル工科大学 (スイス)	Université de NEuchâtel
UPS	無停電電源	Uninterruptible Power Supply
URC	ユビキタスロボティクコンパニオン	Ubiquitous Robotic Companion
USABC	米国先進電池コンソーシアム	United States Advanced Battery Consortium

¹²⁸ United Nations Fund for Population Activities (国際連合人工活動基金、UNFPA) が発展して、1987 年に現在の United Nations Population Fund (国連人口基金) に改称された。なお同機関の略称は、現在も 1987 年以前と同じ UNFPA である。

略 語	日 本 名	欧 文 名
VICS	道路交通情報通信システム	Vehicle Information and Communication System
VOC	揮発性有機化合物	Volatile Organic Compounds
WB	世界銀行	the World Bank
WDM	波長分割多重	Wavelength Division Multiplexing
WEC	世界エネルギー会議	World Energy Council
WEEE	電気電子機器廃棄物指令	Waste Electrical and Electronic Equipment directive
WEPA	アジア水環境パートナーシップ	the Water Environmental Partnership in Asia
WFP	国連世界食糧計画	United Nations World Food Programme
WHO	世界保健機構	World Health Organization
WIPO	世界知的所有権機構	World Intellectual Property Organization
WNA	世界原子力協会	World Nuclear Association
WRI	世界資源研究所	World Resources institute
WTEC	世界技術評価センター (米)	World Technology Evaluation Center
WTO	世界貿易機関	the World Trade Organization
WTW	油井からホイールまで	Well to Wheel
WWF	世界自然保護基金	World Wide Fund for nature
X-FEL	X線自由電子レーザー	X-ray Free Electron Laser
ZSW	太陽エネルギー・水素研究センター (独)	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-forschung baden-württemberg

おわりに

経済産業省から古巣の産総研に戻ってからの 8 ヶ月間、「持続可能性」と「持続可能な開発」という概念について考えさせられてきた。2009 年 11 月に広島で開催されたバイオマス-アジアワークショップでも Sustainability、Sustainable development という言葉が幾度となく飛び交ったが、必ずしも会議場に集まっていた 200 名近くの有識者が同じ考えを共有しているようには感じられなかった。バイオマス研究の第一線に立っている国際的な研究者達にとっても国や立場により微妙な問題が出てくるように感じられた。

言葉上の問題であるが、産総研では第二期研究戦略の中で「持続可能性」を「サステナビリティ」と表現している。また、サステナブルマテリアル研究部門が活発に研究していることから、表記上「サステナビリティ」、「サステナブル」とさせていただいた。なお、国内の関連研究機関や文献などの固有名詞は「サステイナブル」と記載させていただいた。

本報告書では、「持続可能性」が何を意味するのか、「持続可能な開発」とはどのようなもので、いかに進めていくべきか、といった観点から調査を行い、持続可能な社会の構築に向けて産総研は何ができるのか、という視点で研究者の方々に対してヒアリングを実施させていただいた。異分野の研究者の方々のお話を直接うかがって、自分にも産総研が「見える」ようになってきた。次は、社会に対してどのように産総研を「見せる」かに心を配らなければいけない、と強く感じた次第である。

2010 年 2 月、国連大学本部でメキシコ大統領のウ・タント記念講演を聴講した。彼のメッセージで印象に残っているのは、Green Economy (グリーン経済、持続可能な経済) が公平で雇用を生み出し、持続的に成長する経済であるとし、その経済モデルによる低炭素社会での成長が可能であると力強く語った点である。Green Economy にシフトしてゆくためには Green Innovation が必要不可欠であろう。これは、第三期の産総研中期計画の大きな柱になっている。世界的な経済危機をむしろ産総研のチャンスとしてとらえ、イノベーションハブとして、積極的に研究成果を社会に還元してゆく必要がある。

クリーブランド大のハートレー教授は、失敗する企業の共通要因 (3C)として以下の 3 項目を掲げた。

Complacency (自己満足)

Conservatism (保守主義)

Conceit (思い上がり)

運営交付金が毎年減少し、萌芽的な研究を実施するための原資がどんどん目減りしてゆく中で、「思い上がっている」研究者が多くいるとは思われない。しかし、研究環境が厳しくなっていく中で、自分のグループだけは、自分のユニットだけは、といった「保守主義」に走ろうとする人たちはいるに違いない。また、「研究費が少ないのだから、これだけの成果があれば十分だ、また、そう思いたい」という人たちも少なからずいるのではないだろうか。これでは異分野融合など望むべくもない。今回のヒアリングで感じたのは、活発な研究者や研究グループほど、産総研の内外を問わず、広い分野の

専門家と交流して自らの世界を広げ、「いわゆる常識」を超えているということであった。上記の 3C に陥らぬよう、自戒したい。

一方、MIT マイケル・ハマー元教授に言わせると、成功の鍵はやはり 3C で、下記の 3 項目となるらしい。

Customer (顧客)

Competition (競争)

Change (変革)

経済産業省に出向していたとき、産総研がどのように社会に見えているのか、と思い、和英両方で検索してみた。産総研、産業技術研究所等で検索すると、先端研究が続々と続き、心強く思った。国内の大学や研究独立行政法人との比較が行われて、政治家や国民のセンサーがどのように働いているか気になっても、目立つ成果はそれなりに出ている。世評のことが頭をかすめたので、論文数、特許件数よりもインターネット上でどのように見えているかが気になった次第である。

一方、これも出向中の出来事だが、あるシンポジウムに参加していたとき、二人の男性が傍で話していた。盗み聞きといえは聞こえは悪いが、正直耳をそばだてて聞いていた。「おい、あの男、産総研だってよ。どこの産総研だ？」 相手は間髪を入れず、「大阪（大阪府立産業技術総合研究所）だろう」と答えていた。実は我が産総研・関西センターの研究者による発表であった。その日はショックが大きく、その晩にホテルでした作業は、インターネットで「産総研」という略称を持つ研究所を全国レベルで調べることだった。

今の産総研は、世界的な「競争」に勝とうと熱意を燃やして基礎研究や実用化研究に励んでいる研究者が多いものと推察する。しかし、地域活性化、地域発イノベーションに励んでいる研究者はそう多くないだろう。オープンイノベーションの枠組みの中で、発展途上国の地場系企業も多国籍企業と取引関係を持つことで技術情報へのアクセスが可能となり、イノベーションの源泉となってゆく。最近、東アジアの産業集積の中で多国籍企業と地場系企業との生産分業がかなり密であること、また、それが技術情報等のチャンネルになっていることが知られるようになった。産総研も独自の技術開発力のみならず、地場企業の巻き込み能力も問われてゆくことになるろう。

自分の研究シーズや技術がどのように社会で活用されるだろうかと思いつくことは重要だろう。恥ずかしながら、自分も研究グループ長をしていた 3 年前までは論文第 1 主義で、「顧客」をまじめに考えたことはなかった。「顧客」との話し合い、「顧客」のことを考えた設計で、研究のとらえ方はずいぶん変わってくる。本格研究の枠組みで、第一種の基礎研究のときから製品化や「顧客」を考慮していれば、死の谷の期間は大幅に短縮されるはずである。

少し話を変えて、ここでは一つ製品を売る相手の「顧客」ではなく、ヒントを与えてくれる「パートナー」について考えてみる。経済産業省では、知識ゼロの仕事を与えられたため、ひたすら現場主義で臨み、産学官、全ての方々と虚心坦懐に交流させていただいた。発想の異なる人の話を一方的に聞かされても怒らないほどの歳になり、教えられることが多いと感じた。イノベーションの生まれる原点は、おそらく異なる「アイデア」の衝突にあるのであろう。単なる「接触」にはないと感じている。イノベーションを起こす際に有益な「パートナー」が誰かわからないというところがミソである。

いつも顔を合わしている人でもどんなきっかけを与えてくれるかわからない。自分の回りにはそのような「パートナー」がいるかもしれないという意識で常に人と接していたいと思う。

「変革」という言葉もオバマ大統領の“Change”を聞き飽きたと思ったら、鳩山首相も「チェンジ」と言い出した。確かに、行政刷新会議の有り様を見ていると、埋蔵金の取り崩しなど「変化」は起きている。我が国初の理系首相だなど思ったのは短慮に過ぎた。主要閣僚にも複数理系人間がいる。昨年の政権交代は日本政治史における一大椿事であると自分は思う。ここは一つ補正予算の減額査定を嘆くのではなく、積極的に新規プロジェクト提案を行政側に投げかけていきたい。これも「変革」に向かう一つの試みである。低炭素社会実現のための技術パッケージは産総研こそが胸を張って提示できるものであるし、提示しなければいけないものであろう。「変革」こそ「持続可能な開発」のためのキーワードになりうるし、広い意味での社会の「持続可能性」実現にも貢献することを信じて疑わない。産総研は、第三期においても「持続可能性」の意義を理解しつつ、「持続可能な社会」をめざして研究開発、知的基盤の構築、人材育成を推進してゆくことになる。

余談だが、レストラン等の外食店から廃棄される食べ残しを金額に換算すると、年間で 11 兆円に上るとの報告もある。この額は今回の行政刷新会議で削減された額より大きいものであり、この種の国民的なロスは座視できない。国民一人一人が意識して無駄をなくす必要がある。と同時に、食品ロスをなくすような商品の開発やサービスの提供により新規産業が生まれ、国民経済にプラスに作用することを期待したい。

最後に、ご多忙中にもかかわらず、快くヒアリングにご対応くださいました 27 名の研究者と持続性委員会委員の皆様、2050 年における持続可能な街のイメージを描いてくださったバリアフリー推進室チャレンジドグループの石司幸歩さんに心よりお礼を申し上げます。

平成 22 年 2 月

産業技術総合研究所 イノベーション推進室審議役

二村 森