

CRDS-FY2009-IC-03

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC  
TGA CCTAACT CTCAGACC

ナノテクノロジー・材料分野  
科学技術・研究開発の国際比較  
2009年版

0101 000111 0101 00001  
001101 0001 0000110  
0101 11  
0101 000111 0101 00001  
001101 0001 0000110  
0101 11  
00110 11111100 00010101 011

平成21年5月



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

## Executive Summary

ナノテクノロジー・材料分野（以下、ナノテク・材料）への世界各国の公的投資が始まってから5年以上が経過し、日米では双方とも9年目を迎える。2001年に米国のNNI(国家ナノテクノロジー計画)がスタートして以後、日、英、韓を始め世界の主要数10カ国が相次いで独自のナノテク国家計画を発表した。民間を含む世界の年間総投資額は、2007年に1.2兆円(US \$13.5B)に達し、本報告書作成時点の2008年度は1.35兆円(US \$14.9B)と予測されている。特にこの1～2年は、米国、EU諸国を中心として政府投資の継続的強化、新興国(ロシア、アジア、中近東)の新たな参入、ナノテク商業化の兆し、などが相乗して投資急増の傾向となっている。

ナノテク・材料はほとんど全ての産業領域を横断する融合技術分野であり、新材料・新プロセス・新デバイスが生み出されるとの期待が大きい。特にここへ来て、エネルギー・環境や医療・健康、エレクトロニクス等の各応用分野から、ナノテク・材料技術によるブレークスルーへの期待がいつその高まりを見せている。これに伴い米国や日本では、投資に対するリターンを期待し始めているが、2005年以降に世界のナノテク関連製品数が急増しているという調査結果も複数出始め、各国の研究開発投資が製品として結実し始めた兆候が明らかになってきた。現在のナノテク・材料研究開発は、第一世代(個別分野の先鋭化・極限化:ナノ先鋭化)から、第二世代(先鋭化した異分野のナノテクが融合:ナノ複合化)に移行しつつあると見られている。今後はさらに、各応用分野へのイノベーションドライバーとして技術の成熟を目指し、第三世代(各種ナノテクを構成的に組み上げる:ナノ組織化)に突入すると考えられる。

各国の技術水準を全体的に俯瞰すると、国際的に優位を保つ材料科学・物理学・化学の学術ポテンシャルと、圧倒的な強さを持つ部素材産業とを車の両輪にして、日本は欧米と肩を並べて世界をリードしている。ただし、欧米に比較して、企業化を含む長期的な戦略や、そのために必要な人材育成策、インフラ構築策が脆弱である。以下に、個別分野について国際比較の概略を記す。

- ナノ材料・新機能材料分野は、先端材料の基本であり、CNT(カーボンナノチューブ)、超分子、新型超伝導材料、強相関材料など、多くの部分で日本が先端を走っている。米欧が続き、韓国が追う。中国は新型超伝導材料などいくつかのテーマで驚異的な進展を見せ、日米欧と競合している。ナノ加工技術分野は、技術蓄積と総合力の問われる分野で、超微細加工技術、ナノ転写加工・印刷技術、MEMS・NEMSなど日米欧がリードしている。韓・台はエレクトロニクス関連技術に力を入れ、中国が後を追う。
- ナノエレクトロニクス分野では、CMOS関連・スピントロニクス、有機エレクトロニクスなどにおいて、日米のリードに韓国が食い込み、中国が猛追している。米国と欧州は研究開発の中核拠点の整備・充実を図り、新しいプロジェクト等を通じて海外の人材を吸引し始めている。中長期的に日本の苦戦が予想される。バイオ・医療分野では、日本の研究水準が上がり、DDS(薬剤送達システム)や再生医療分野で一步リードしている。しかし、全般的には産業化へのインフラが弱く制度的な課題もあって、欧米

の後塵を拝している。エネルギー・環境分野への応用では、米国のナノテク応用戦略が際立つ。太陽電池材料や、光触媒、電池関連材料では日本はリードしているものの、市場展開で遅れている。二次電池やキャパシタでは、中国の存在感が増している。基礎技術では、英・独・仏が傑出している。バイオ燃料・バイオ発電等の生物材料は欧米がリードし、膜分離による水浄化技術や排出ガス浄化用触媒、環境調和・リサイクル技術では日本がリードしている。高強度・軽量構造材や高機能ガラスなどの産業用構造材分野では、日米欧が先進し、韓・中がキャッチアップ途上である。耐熱構造材については、航空・軍需産業の戦略材料として位置づけてきた米・欧が先行している。化粧品、繊維などの生活関連材料分野では、既に多くの製品が各国で市場に出ている。食品については欧米の産業界が応用開発を主導している。

- ナノサイエンスについては、ナノフルイデックス・ナノトライボロジー、界面・表面、自己組織化理論、新量子概念、マルチフェロイクスなど、日米の上昇傾向が強く、欧州が続いている。界面・表面では、韓国が急上昇中。材料設計・探索手法については、計算機シミュレーション、高速材料探索手法で米国が強く、データベース整備では欧州が強い。日本はこの分野で豊かな研究人材を有す。ナノ計測・評価技術分野では、液中 AFM・高速 AFM (日本)、SPM の汎用機器化 (米国)、スピン偏極 STM (欧米) の発展があり、最先端電子顕微鏡では欧州がリード、米は放射光利用イメージングに注力。ISO のナノテク標準化技術委員会では日米欧が活発である。
- 関連共通課題 (インフラ) として、融合と連携を加速推進するための共用施設、教育・人材育成、国際標準・工業標準、社会受容 (EHS・ELSI)、国際プログラムの諸課題があるが、社会受容を除いて日本は確たる戦略を持たず、欧米や台湾に遅れをとっている。特に共用施設については、米・欧・韓に比して国家投資が極端に貧しく、国際的にも開かれていない。国際戦略の欠如は日本のアキレス腱になりつつある。教育・人材については、米国と台湾が K-12 という小中高一貫教育のためのナノテク教材作りと教員養成を精力的に進めている。

この 1～2 年における注目トピックとして、鉄ニクタイト系新超伝導体の発見及び 50K を超える転移点の実現 (日本 / 東工大 -JST、中国 / 中国科学院) や、近年の新たなナノカーボン材料であるグラフェンのエピタキシャル成長、バンドギャップを持つグラフェンの作製及びそれを使ったトランジスタ作製 (米国 / DARPA\_CERA Program)、が挙げられる。グラフェンは、微細化限界が間近に迫った CMOS 技術を打破しようとする候補材料の一つとして、米欧での研究集中が著しい。また、ナノテク・材料のエネルギー・環境応用を加速させる象徴的な出来事の一つとして、米国新大統領が DOE のローレンス・バークレー国立研究所長の Steven Chu 氏 (1997 年ノーベル物理学賞受賞者) をエネルギー長官に指名した。同氏は「分子工場 (Molecular Foundry)」の提唱者であり、異分野融合とナノテクによって再生可能エネルギー分野でイノベーションを起こすことを宣言している著名な科学者である。

次ページに、本調査における全網目の比較結果を一覧としてまとめた。



領域		ナノテク・材料の応用																							
分野		エネルギー・環境分野												産業用構造材料（輸送・建造等）分野						生活関連材料分野					
中綱目		太陽電池	燃料電池	光触媒・太陽光による水素発生	バイオエネルギー材料	環境浄化微生物	高性能二次電池キャパシタ	熱電変換素子	超電導利用	膜分離技術	排出ガス浄化用触媒	環境調和・リサイクル技術	高強度・軽量構造材料	耐熱構造材料	遮熱ガラス	機能性ナノガラス	繊維	化粧品	食品技術						
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド		
日本	研究水準	◎	→	○	↗	◎	→	○	↗	◎	→	◎	↘	△	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	産業技術力	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
米国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	◎	↗	△	↗	◎	↗	△	↗		
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	◎	↗	△	↗	◎	↗	△	↗		
	産業技術力	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	◎	↗	△	↗	◎	↗	△	↗		
欧州	研究水準	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	技術開発水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	産業技術力	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
中国	研究水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	技術開発水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	産業技術力	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
韓国	研究水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	技術開発水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	産業技術力	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
台湾	研究水準	△	↗																						
	技術開発水準	△	↗																						
	産業技術力	○	↗																						

領域		基盤科学技術																							
分野		ナノサイエンス分野						材料設計・探索分野						ナノ計測・評価技術分野											
中綱目		ナノフレイク・ナノワイヤ・ナノドット	界面・表面	自己組織化・自己集合	量子演算・新量子概念	マルチフェロイック・強誘電体	計算科学・シミュレーション	DBの構築	新材料設計・機能設計	材料探索手法	走査型顕微鏡	電子顕微鏡	放射光・X線計測	単分子分光	3次元計測	ナノ粒子評価	標準（物質・計量）評価法・技術								
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド		
日本	研究水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	技術開発水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	産業技術力	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
米国	研究水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	技術開発水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	産業技術力	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
欧州	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
	産業技術力	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
中国	研究水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	技術開発水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
	産業技術力	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗		
韓国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		
	産業技術力	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗		

領域		関連共通課題									
中綱目		共用研究開発拠点		教育・人材育成		国際標準・工業標準		社会受容・EHS・ELSI		国際プログラム	
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	取り組み水準	○	→	△	→	◎	↗	◎	→	×	→
	実効性	△	→	△	→	◎	↗	◎	↗	×	↗
米国	取り組み水準	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	△	↗
	実効性	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	△	→
欧州	取り組み水準	◎	→	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗
	実効性	◎	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↗
中国	取り組み水準	○	↗	△	↗	◎	↗	○	→	△	→
	実効性	△	→	△	↗	○	→	○	↗	△	→
韓国	取り組み水準	◎	→	△	↗	◎	↗	△	→	○	↗
	実効性	○	→	△	→	◎	→	△	→	△	→

記号の意味	フェーズの意味
現状について ◎非常に進展 ○進んでいる △遅れている ×非常に遅延	研究：大学・公的機関での研究レベル
近年のトレンド ↗上昇傾向 →現状維持 ↘下降傾向	技術：企業における研究開発のレベル
	産業：企業における生産現場の技術力

# 目 次

## Executive Summary

1 目的および構成	1
2 国際技術力比較	5
2.1 ナノテク・材料	7
2.1.1 ナノ材料・新機能材料分野	7
2.1.1.1 概観	7
2.1.1.2 中綱目ごとの比較	10
(1) ナノカーボン材料 (CNT、フラーレン、グラフェン、他)	10
(2) ナノコンポジット材料 (金属、セラミックス、ポリマー等の組み合わせ)	11
(3) 表面改質材料	12
(4) 特異な幾何構造系 (超分子・ゲル)	13
(5) ナノ空間・メソポーラス材料	14
(6) 触媒材料	15
(7) 高分子・プラスチック材料 (ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等)	16
(8) 新型超伝導材料	18
(9) 磁性材料	20
(10) ナノ粒子	21
(11) 強相関電子材料	22
2.1.2 ナノ加工技術分野	23
2.1.2.1 概観	23
2.1.2.2 中綱目ごとの比較	26
(1) 半導体超微細加工技術 (各種リソグラフィ等)	26
(2) ナノ転写加工技術 (ナノインプリント等)	28
(3) 自己組織化技術	29
(4) ナノ・マイクロ印刷技術 (インクジェット描画、ロール・ツー・ロール加工技術)	30
(5) MEMS・NEMS 加工技術	31
2.2 ナノテク・材料の応用	32
2.2.1 ナノエレクトロニクス分野	32
2.2.1.1 概観	32
2.2.1.2 中綱目ごとの比較	36
(1) CMOS 材料技術	36
(2) スピントロニクス (強相関電子デバイス含む)	38
(3) 固体素子メモリ	40
(4) 有機エレクトロニクス	42
(5) 量子ドットデバイス	44
(6) フォトニック結晶	46

(7) 近接場光技術・ナノフォトニクス	48
(8) プラズモニクス・メタマテリアル	49
(9) ディスプレイデバイス	50
(10) 固体照明	52
(11) 次世代ナノデバイス (単電子素子、分子素子、超伝導デバイス含む)	54
2.2.2 バイオ・医療分野	55
2.2.2.1 概観	55
2.2.2.2 中綱目ごとの比較	58
(1) 体内送達システム (DDS:ドラッグデリバリーシステム)	58
(2) 分子イメージング (生体プローブ含む)	60
(3) 再生医療用材料 (細胞シート含む)	62
(4) 生体適合材料	64
(5) 医療用チップ ( $\mu$ TAS、DNAチップ、蛋白チップ等)	66
2.2.3 エネルギー・環境分野	68
2.2.3.1 概観	68
2.2.3.2 中綱目ごとの比較	72
(1) 太陽電池	72
(2) 燃料電池	74
(3) 光触媒・太陽光による水素発生	76
(4) バイオエネルギー材料 (燃料・発電)	78
(5) 環境浄化微生物	80
(6) 高性能二次電池、キャパシタ	82
(7) 熱電変換素子	84
(8) 超電導利用	85
(9) 膜分離技術	86
(10) 排出ガス浄化用触媒	88
(11) 環境調和・リサイクル技術 (回収技術など)	90
2.2.4 産業用構造材料 (輸送・建造等) 分野	92
2.2.4.1 概観	92
2.2.4.2 中綱目ごとの比較	94
(1) 高強度・軽量構造材料	94
(2) 耐熱構造材料	95
(3) 遮熱ガラス (省エネ住宅等への応用)	96
(4) 機能性ナノガラス (情報通信等への応用 ー記録、通信、表示などー)	97
2.2.5 生活関連材料分野	98
2.2.5.1 概観	98
2.2.5.2 中綱目ごとの比較	101
(1) 繊維	101

(2) 化粧品	102
(3) 食品技術（加工、保存、包装含む）	103
<b>2.3 基盤科学技術</b>	<b>104</b>
2.3.1 ナノサイエンス分野	104
2.3.1.1 概観	104
2.3.1.2 中綱目ごとの比較	108
(1) ナノフルイデイクス・ナノトライボロジー	108
(2) 界面・表面	110
(3) 自己組織化・自己集合（理論、機構、ゆらぎ）	112
(4) 量子演算・新量子概念	113
(5) マルチフェロイックス・強誘電体	114
2.3.2 材料設計・探索分野	115
2.3.2.1 概観	115
2.3.2.2 中綱目ごとの比較	118
(1) 計算科学・シミュレーション	118
(2) DB の構築	120
(3) 新材料設計・機能設計	121
(4) 材料探索手法（ハイスループット・コンビナトリアル技術）	122
2.3.3 ナノ計測・評価技術分野	123
2.3.3.1 概観	123
2.3.3.2 中綱目ごとの比較	126
(1) 走査型プローブ顕微鏡	126
(2) 電子顕微鏡	127
(3) 放射光・X線計測	128
(4) 単分子分光	129
(5) 3次元計測（リアルタイム含む）	130
(6) ナノ粒子評価（形状・分布・表面活性・動態解析）	131
(7) 標準（物質・計量・評価法）技術	132
<b>2.4 関連共通課題</b>	<b>133</b>
2.4.1 共用研究開発拠点（融合・連携促進）	133
2.4.1.1 概観	133
2.4.1.2 比較表	135
2.4.2 教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）	136
2.4.2.1 概観	136
2.4.2.2 比較表	137
2.4.3 国際標準・工業標準	138
2.4.3.1 概観	138
2.4.3.2 比較表	140

2.4.4	社会受容・EHS・ELSI	141
2.4.4.1	概観	141
2.4.4.2	比較表	143
2.4.5	国際プログラム	144
2.4.5.1	概観	144
2.4.5.2	比較表	145
<b>3</b>	<b>注目すべき研究開発の動向</b>	<b>147</b>
<b>3.1</b>	<b>ナノテク・材料</b>	<b>149</b>
3.1.1	ナノ材料・新機能材料分野	149
3.1.2	ナノ加工技術分野	156
<b>3.2</b>	<b>ナノテク・材料の応用</b>	<b>158</b>
3.2.1	ナノエレクトロニクス分野	158
3.2.2	バイオ・医療分野	172
3.2.3	エネルギー・環境分野	176
3.2.4	産業用構造材料（輸送・建造等）分野	186
3.2.5	生活関連材料分野	188
<b>3.3</b>	<b>基盤科学技術</b>	<b>190</b>
3.3.1	ナノサイエンス分野	190
3.3.2	材料設計・探索分野	193
3.3.3	ナノ計測・評価技術分野	199
<b>3.4</b>	<b>関連共通課題</b>	<b>206</b>
3.4.1	共用研究開発拠点（融合・連携促進）	206
3.4.2	教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）	207
3.4.3	国際標準・工業標準	208
3.4.4	社会受容・EHS・ELSI	210
3.4.5	国際プログラム	212
	付録：海外の政策動向	215
	略語集	221
	執筆者・協力者一覧	227

# 1 目的および構成



## 1 目的および構成

独立行政法人 科学技術振興機構研究開発戦略センターでは、国が行うべき研究開発の戦略立案を行い、科学技術政策立案者に提言を行っている。的確な戦略提言のためには、我が国の技術力の国際的なポジションを把握するとともに、新しい技術の芽にも注意を払う必要がある。

本調査は、上記二つの目的のため、ナノテクノロジー・材料分野に関して行ったものである。

ナノテクノロジー・材料分野全体の俯瞰した技術力比較を目指しているが、今回は以下の15分野、「ナノ材料・新機能材料」、「ナノ加工技術」、「ナノエレクトロニクス」、「バイオ・医療」、「エネルギー・環境」、「産業用構造材料（輸送・建造等）」、「生活関連材料」、「ナノサイエンス」、「材料設計・探索」、「ナノ計測・評価技術」、「共用研究開発拠点（融合・連携促進）」、「教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）」、「国際標準・工業標準」、「社会受容・EHS・ELSI」、「国際プログラム」の各分野について実施した。

本報告書は、以下の二つの章で構成されている。

第2章「国際技術力比較」は、各国の技術力に関して、専門家の評価を技術カテゴリごとに集めたもので、各国の技術力を比較する際のベンチマーク資料と位置づけられる。対象とする国及び地域は、日本、米国、欧州、中国、韓国を基本とし、必要に応じその他の国についても評価した。

きめ細かい比較のため、上記15分野をさらに中綱目（分野の中をさらに細かく分類したもの）に分けて調査した。また、技術力の比較は、「研究水準」「技術開発水準」「産業技術力」という3つの観点で行った。研究水準とは、大学・公的機関における研究レベルをいう。技術開発水準とは、企業における研究開発のレベルをいう。産業技術力とは、企業における生産現場の技術力をいう。

これら評価は「現状」と「トレンド」の二つの視点で行っており、現状は◎○△×（◎：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）として判断した。トレンドについては矢印の向き（↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向）によって、現在の水準が上昇傾向にあるか、現状維持か、下降傾向にあるかの判断をした。

第3章「注目すべき研究開発の動向」は、国際技術力比較とは別に、重要性が増してきそうな技術の芽や、新しい動向をとらえることを目的に、注目すべき内外の研究開発動向を調査した。国際学会等での最新の動向を踏まえながら、上記15分野に関する注目すべき研究開発の動向としてとりまとめた。



## **2 國際技術力比較**



## 2.1 ナノテク・材料

### 2.1.1 ナノ材料・新機能材料分野

#### 2.1.1.1 概観

ナノ構造材料・新機能材料分野は、ナノテクノロジーの中でも中心的な分野である。様々な中綱目がこの分野に含まれるが、本報告ではナノカーボン材料、ナノコンポジット材料、表面改質材料、特異な幾何構造系（超分子・ゲル）、ナノ空間・メソポーラス材料、触媒材料、高分子・プラスチック材料、新型超伝導材料、磁性材料、ナノ粒子、及び強相関電子材料を含めた。

ナノカーボン材料は、CNT、フラーレン、グラフェン、ナノコーンなどのカーボン素材の総称で、ナノテクノロジーの基本部材と見られている。ナノコンポジット材料は金属、セラミックス、及びポリマーのナノスケールでの混合材料であるが、金属を主とする材料では結晶の微細化やアモルファス化による素材特性の改善、セラミックスを主とする材料では結晶の微細化や異相（金属やポリマーを含む）粒子分散による力学的特性あるいは機能性の改善や新規性付与、ポリマーを主とする材料では異相（金属やセラミックスを含む）の混合による強度、耐熱性、耐摩耗性、あるいは加工性の大幅改善などが特徴となっている。表面改質は、ここでは従来技術とは異なり、分子や原子のナノスケールでの働きを制御して硬度、耐摩耗性、表面活性、親・疎水性などを表面に付与する技術である。特異な幾何構造系（超分子・ゲル）は、分子構造に特徴を凝らした結果、強度や弾性変形のスケールなどで驚異的な特性を示すゲル等の総称で、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分子性化合物である超分子もこれに分類した。ナノ空間・メソポーラス材料は、ナノスケールの特定目的に見合った複雑形状空間や、均一で規則的な配列のメソ孔（直径2～50nm）を持つ多孔質材料であり、触媒や吸着剤などの素材として優れた特性を持つばかりでなく、微細構造材料のテンプレートとしても機能する。高分子・プラスチック材料は、ポリマーアロイ（複数のポリマーをナノスケールで混合して新しい特性を持たせた高分子）やブロック共重合体など、従来にない特徴を持つ高分子材料も含め、ナノテクノロジー活用の先端的な展開が見られるポリマー材料である。新型超伝導材料は、その中心は2008年に発見された鉄系超伝導材料であるが、2001年に発見されたMgB<sub>2</sub>も含めた。磁性材料は、スピントロニクス材料を中心にしたナノ材料であり、日本が世界の先端を進んでいる。次世代集積回路の重要な候補材料との見方がある。ナノ粒子は、ナノスケールで分散した金属、セラミックス、あるいは有機物などの粒子状材料であり、ナノテクノロジーの安全性などで話題になることが多いが、殆どが工業原料として密封系内で利用されるもので、機能性ナノ構造体の製造に使われる。強相関電子とは、多数の電子がお互いに強い影響を及ぼしながら存在する状況であり、このような電子系を持つ電子材料は小さな刺激を入力として劇的な電子相変化を巨大出力とする現象が期待されている。

ナノ構造材料・新機能材料は、先端材料の基本であり、多くの部分で日本が世界の先端を走っている。特に産業化が進んでいる材料に関しては、殆ど日本の独壇場と言ってよく、米国がこれに次ぎ、そして欧州は後追の形となっている。韓国や中国の追い上げは、一部利益率の高いところで日本からの技術導入が進み、現地での工夫も加えられており、現状ではそれほど顕在化していないものの、将来的には大きな脅威と見られる。一方、新規な機能材料については、日本の活躍が目立つものの、欧米で先行する研究開発も少なからず見受けられ、特に欧州での政策に基づく展開が要注意である。政策展開は韓国でも強力に進められている。また、ロシア、インドがナノテク国家計画をスタートさせるなど、新興国の新たな政策動向は要注目である。

日本のナノ材料技術の将来的な競争力確保については決して予断は許されない。ある日突然大きく勢力逆転が起こるかもしれないという危険性をはらんでいるが、その理由を基礎研究の戦略不足と産業化意欲の低調さに見ることができる。

## ナノ材料・新機能材料分野のまとめ

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	◎	→	先端研究開発に力を発揮。欧米主要国と肩を並べる。
	技術開発水準	◎	→	産業との連携が不十分で停滞中だが、従前の開発力はしぶとく維持。
	産業技術力	◎	→	産業化が進んでいるところでは世界の独壇場。レベルは二分化で、将来に不安も。
米国	研究水準	◎	→	世界レベルの研究者が多数。
	技術開発水準	○	→	ベンチャーも含め、技術開発意欲は大きいですが、勢いが不十分。
	産業技術力	○	→	産業現場でのレベルがまちまちだが、何とか従来パワーを維持。
欧州	研究水準	◎	→	国際的には後追いだが、レベルは高く、僅差。
	技術開発水準	○	↗	政策的なバックアップで、何とか上昇中。
	産業技術力	○	→	レベル改善に政策対応が進行中だが、改善は早くない。が、キーマテリアルに光るものあり。
中国	研究水準	○	↗	研究の推進役は、海外からの帰還者が中心で、キャッチアップの意欲は十分。米や欧との研究の連携が進んでいる。論文数ですでに日本を上回る。
	技術開発水準	△	↗	水準は徐々に向上中。意欲は高いものの輸入手法に依存度が高く、その改善が課題。
	産業技術力	△	↗	多くが輸入技術。使いこなすと、現場での工夫付加を強かに習得・推進中。
韓国	研究水準	○	↗	政策による推進が多く、実力が急上昇中であつたが、上昇傾向はやや鈍化。
	技術開発水準	○	↗	政府の重点策中心に、特定綱目で実力が上昇中。企業に対する大学の寄与が大きく、今後の脅威になりそう。
	産業技術力	△	↗	一部を除いて、レベルは高くない。一部の大企業では、世界的な競争力を持つ。が、導入技術が依然として中心。全体として上昇中だが、内容はまちまち。

(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]

## 2.1.1.2 中綱目ごとの比較

## (1) ナノカーボン材料 (CNT、フラーレン、グラフェン、他)

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	○	→	ナノチューブに関する研究は世界的な水準にあるが、科学的発見の点では多少遅れ気味である。一方グラフェンに関する研究は理論を除いて全く遅れている。トランジスタ応用を目指した結晶成長の面である程度の進歩が見られる。新しい成長法などからの巻き返しが期待される。
	技術開発水準	◎	→	ナノチューブ成長などではトップレベルにある。LSI 配線やキャパシター電極など、一部にデバイス志向の開発が進められているが、まだ模索段階である。
	産業技術力	△	↗	産業化している例は、一部のベンチャー企業による試作品配布を除き、皆無と言ってよい状況。
米国	研究水準	◎	↗	グラフェン研究への研究者集中が著しい。そのため、非常に活発な研究が行われている。ナノチューブ研究からグラフェンへの乗り移りもかなり見られる。特にグラフェンの応用を目指した研究で活況を呈している。
	技術開発水準	○	↗	トランジスタ応用を目指した結晶成長の面でもかなり活発な研究が行われている。
	産業技術力	△	↗	確定的ビジネスモデルが不在。しかし、ビジネス提案への意欲は強い。
欧州	研究水準	◎	↗	グラフェンの研究では最も業績を上げており、新しい科学的発見も多い。
	技術開発水準	○	→	応用面での研究はそれほど重視されていない感もあるが、キャパシタ電極、センサ、FET などでは意欲が強い。
	産業技術力	△	↗	産業化の実例は少ないが、先鞭をつける意欲が多く見られる。
中国	研究水準	△	↗	研究者はかなり多数に上り、論文も増大中である。基盤はまだ浅く、玉石混交である。
	技術開発水準	△	↗	これから急激に研究人口が増え、発展する可能性がある。
	産業技術力	×	↗	他の地域と同様、産業は皆無に近いが、世界的な動向は注視しており、技術導入の意欲は強い。
韓国	研究水準	○	↗	ナノチューブに関する研究も近年盛んになってきた。グラフェンの実験研究では日本よりも進んでいる面もある。
	技術開発水準	△	↗	グラフェンの応用に関する研究水準は急激に高まる可能性がある。
	産業技術力	△	↗	技術レベルは欧州と同程度と見て良いと考えられる。
<p>全体コメント：ナノテクノロジーの基本部材と見られているナノカーボン材料は、日米欧を中心に基礎研究の側面が拡大しており、新しい知見が増大している。近年は世界的にグラフェン研究が活気を帯びてきており、特に欧米での研究者集中が著しい。ナノチューブに関しては、これまでの基礎研究によってその基本的な物性が明らかになり、それを熟知した応用などが可能になるうとしている。もちろん半導体と金属の分別成長あるいは分離が最も大きな課題であろう。応用先として、導電性や伝熱性を持つ樹脂やセラミックス、FED 薄型ディスプレイの電子発生源、材料の高強度化、MRI 造影剤や PET への応用などが主に期待されている。グラフェンに関しては、微細化限界が間近に迫った CMOS 技術を打破する候補材料の一つとして、注目が集まっている。まだ基本的な物性の理解が浸透しているとは言えず、そのため、非現実的な応用提案やそれを目指す研究が横行しているようである。さらなる基礎研究が重要と考えられる。</p>				

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) ナノコンポジット材料（金属、セラミックス、ポリマー等の組み合わせ）

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	◎	→	アモルファスナノコンポジット、ナノコンポジット磁石などで世界をリードする成果を出してきたが、新規分野の模索中である。いろいろなポリマーナノアロイやポリマーナノコンポジットの研究が企業、大学などで盛んに行われている。
	技術開発水準	○	→	ポリマー系コンポジット材料の評価技術などは発達しており、企業、大学ともに高い水準を維持している。
	産業技術力	◎	↗	ポリマー系でかなり具体的な応用に繋がる技術が多くなってきた。金属系では、コスト面や新材料開発の企業の消極姿勢により産業化についてはあまり進んでいない。
米国	研究水準	○	→	金属ガラスやナノ結晶材料の基礎研究における研究水準が極めて高い。ポリマー系は、やや細り気味。
	技術開発水準	◎	→	軍関係予算により、基礎基盤研究に強い大学研究者が参加し、層の厚い開発を行っている。ポリマー系では、やや飽和気味か。
	産業技術力	○	→	軍需産業も含め、高い産業技術力があるが、素材を国外に頼る傾向が顕著になっている。依然として高い水準にはあるがやや息切れ気味か。
欧州	研究水準	◎	→	研究水準は高く応用を目指した研究も盛ん。EUのプログラムの後押しもあって、熱心さが顕著である。
	技術開発水準	○	↗	極端な応用研究と極端な物理研究に2極化しているが、意欲は高い。特に省エネルギー関連の素材開発に熱心である。かなり積極的に技術開発を進めている。
	産業技術力	○	→	ナノコンポジットの産業力は限定的であるが、危機感を持って強力に改善中である。
中国	研究水準	○	↗	大量の研究者を擁して、追従研究から先端研究に向かおうとしている。論文数が急速に伸びている。大胆な研究を始めている。
	技術開発水準	○	↗	新しいことに積極的に取り組み始め、水準は急速に向上している。
	産業技術力	○	↗	積極的だがまだ問題も多い。輸入技術主体だが、レベルは上がってきている。着実に自分たちの技術にしつつあり、人海戦術のプロセス研究の進捗が早い。
韓国	研究水準	○	↗	選択と集中を行った分野は、結構強い。一部の企業と大学との連携が成果を挙げ、水準も上がった。論文数も伸びている。
	技術開発水準	○	↗	選択と集中を行った分野は、かなり高い水準にある。日本頼みの意識からの脱却意欲が高い。政策的後押しがある。
	産業技術力	○	↗	実用化を狙って選択と集中を行っている。選択と集中を行った分野は、高い水準にある。

全体コメント：金属を主成分とするものは構造材料が大部分で、伝統的に欧米と日本が先端を担っているが、近年、アモルファス系あるいは微細結晶系の材料の開発が活発である。これらの材料について、日本が研究開発で先端を進み、米国が実用化で一步先を行き、欧州は追随、韓国や中国は追い上げが急速ではあるもののまだ遅れている。セラミックスを主体にしたものも、日本の先行研究が影響力、競争力を維持しているが、米国や欧州の研究も高水準で、競争が激化している。しかし、日米欧共に新規研究開発及び新規産業技術の展開は限定的である。これに対し、韓国は着実に実績を積みつつあり、まだ日米欧の水準にわずかに及ばないが、肩を並べるのは時間の問題である。中国は、産業技術が輸入依存からまだ抜けていないが、実力向上は急である。ポリマー系は全体的に見て、ナノ粒子複合系、ナノファイバー複合系、ナノシート複合系、ナノ3次元複合系に分けられる。それぞれの表面、界面制御、さらにそれらの3次元分散制御、配向制御が問題である。それらについて最近では、3次元電子顕微鏡による実空間での解析、ナノ力学物性マッピング、界面・表面解析、さらにそれらを総合した3次元有限要素法による大規模シミュレーションなどに飛躍的な進歩があり、基礎研究と実際の材料開発がある程度結び付けられそうところまで来た。これらの科学技術の発展に活用し、材料の目的に応じてさらに発展させたところが勝者となるであろう。これらを系統的に実行可能な国は、現在のところ日本と思われるが、米国、欧州などもその方向に進んでいる。中国、韓国はシステム的な動きはやや遅いが、新しいことを積極的に取り上げたり、生体への応用なども進めている。韓国は、ナノテクに、情報通信、エネルギー・環境、などと組み合わせた提案でないと採択されないということもあり、ナノサイエンスとナノテクノロジーを上手く区別しているようである。

(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]

## (3) 表面改質材料

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	◎	↗	大学、公的研究機関での研究には向上が見られる。政府の資金投入は少なく、将来が危惧される。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は現状維持であり、産業界での開発要請が少ない。
	産業技術力	◎	→	産業界での資金投入が少ない。
米国	研究水準	◎	↗	宇宙・航空産業関連、バイオ関連の基礎研究において向上が見られる。
	技術開発水準	◎	→	新しい産業分野での発展は見られるが、従来型産業では日本と同じ状況である。
	産業技術力	◎	↗	産業界での投資は日本より多く、例えばバイオ関連においては向上が見られる。
欧州	研究水準	◎	↗	大学、公的研究機関において向上が見られる。特に旧東欧において、急速な向上が見られる。
	技術開発水準	◎	↗	産業界と研究機関との連関がうまく進み、大幅な向上が見られる。
	産業技術力	◎	↗	産業界で資金投入が見られる。
中国	研究水準	○	↗	国家重点プロジェクトに、表面改質関連研究が取り上げられ急速に向上している。
	技術開発水準	○	↗	国家からの助成を受け、また産業界からの要請も受け、向上している。
	産業技術力	△	↗	合併企業における技術力の向上のみならず、全般的に、産業の基礎となる表面改質への技術意欲が高まっている。
韓国	研究水準	○	↗	国家プロジェクトとして、成均館大学に「先端プラズマ表面技術センター」を設立するなど、研究水準の大幅な進展が見られる。
	技術開発水準	○	↗	研究水準の向上とともに「プラズマビレッジ構想」に見られる産学官を挙げて技術開発力の向上をめざしている。
	産業技術力	○	↗	浦項製鉄関連における表面改質に特化した新研究施設の設立など、積極的展開が見られる。
<p>全体コメント：産業界の傾向として、日本、米国は現状維持、これに対し、欧州、中国、韓国は大幅な上昇が見られる。欧州では、EC のサポートによる旧東欧圏での上昇が急速である。韓国は日本の水準に近づきつつあり、中国も急速に追い上げている。表面改質は、産業を支える基礎分野として極めて重要であるが、日本においては、国家プロジェクトとして「表面改質」が取り上げられることが少なく、米国、欧州、中国、韓国と比べ、競争力が落ちてきている。</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) 特異な幾何構造系 (超分子・ゲル)

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	◎	↗	化学、高分子科学、材料学を中心に多数の研究グループがあり、基礎、応用を問わず研究水準は非常に高く、独創的な機能創出という点で世界をリードしている。特に、微小化学空間の創出や機能性ゲルにおいて、幾つかの Breakthrough が遂げられており、周辺の研究を大きく押し上げている。
	技術開発水準	◎	↗	合成技術を駆使した分子構造設計および応用開発に非常に優れ、次々に新しい材料、技術が開発されている。
	産業技術力	○	↗	一時期停滞したが、再び企業が注目し始める傾向にある。しかし産と学の連携がアメリカより遅れており、優れた研究成果が応用へなかなか結びつかない。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究において世界を大きくリードしているが、最近では少し停滞する傾向にある。横断的な分野の研究者が参入しているのが特徴的である。バイオマテリアル系への応用指向が高い。
	技術開発水準	◎	→	MEMS、BioMEMS、Microfluidics といった微細加工技術とカップリングした分野への応用に大きな技術開発力を持つ。大学との連携も強い。
	産業技術力	◎	↗	コンタクトレンズ、バイオチップなど、バイオ応用の分野での技術力が著しく高く、今後大きな産業として発展する可能性が高い。我が国の最近の機能性ゲルに関する研究成果に対して強い関心をもっている。
欧州	研究水準	○	→	超分子化学の分野では伝統があり、世界的に高い水準にある。物性に関連した基礎研究において世界をリードしていたが、近年停滞する傾向にある。
	技術開発水準	○	↗	実用化に結びつく技術開発が、最近急速に進行している。
	産業技術力	○	↗	これまで大きな飛躍はない印象であったが、他の高分子関連の産業を見ると、もともと潜在能力はかなり高い。最近の新しい研究成果に対して強い関心を持っている。
中国	研究水準	○	↗	日本・欧米に比べて独創的な研究は少なく、水準も高くはない。しかし、近年研究者人口が急速に増え、その質も大きく進歩している。
	技術開発水準	△	→	日本・欧米のキャッチアップにとどまっている。
	産業技術力	△	→	外国の産業技術を利用して現地生産することは得意だが、独自で産業化するには至っていない。
韓国	研究水準	△	↗	日本・欧米に比べて独創的な研究は少なく、水準も低い。しかし最近、国策として、産・官・学でクラスターを形成して、強力に進めている。
	技術開発水準	△	→	日本・欧米のキャッチアップにとどまっている。
	産業技術力	△	→	現時点では、独自で産業化する力はない。
<p>全体コメント：研究開発では日本が世界をリードしている分野である。近年の環動ゲル、NCゲル（ナノコンポジットゲル）、DNゲル（ダブルネットワークゲル）など優れた力学強度をもつゲルの発明により、ゲルの実用化の可能性がきわめて高くなった。超分子に関しては、欧州の産業力は主に dendrimer の分野であり、米国は分子マシンや超分子素子の分野である。特に近年、精緻な分子設計に基づいて様々な新規構造が創出され、その機能が次第に明らかになってきた結果、本分野に対する産業界の関心も高まっている。しかし実際の産業化については、産と学の連携があまりうまくいっておらず、コンタクトレンズやバイオチップなどのバイオマテリアルの分野で米国が先行している。欧州はこれからであり、韓国や中国はさらにその次と考えられるが、韓国で進められている産官学クラスター形成などの政策的取り組みの成果が目される。</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]

## (5) ナノ空間・メソポーラス材料

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	◎	→	メソポーラス材料は黒田一幸教授（早大）が世界に先駆けて報告し、その後多くの研究者によって研究が進展し、論文数は2005年頃まで増加し続け、その後一定になっている。基礎研究レベルは今もなおトップクラスである。なお、配位高分子からなるナノ空間（多孔性金属錯体、Metal Organic Framework：MOF）においても、北川進教授（京大）を中心に、世界トップレベルの基礎研究が展開されている。
	技術開発水準	○	→	メソポーラス材料は豊田中央研究所をはじめ数社で、触媒応用・機能素材の応用を対象とした技術開発が行われている。産業化に繋がる応用は今後の課題で、今後も応用を目的とした研究開発が続くと考えられる。
	産業技術力	◎	→	昨年末に太陽化学株式会社がメソポーラスシリカの量産化を発表した。低誘電率材料・デシカント材料などへの展開が期待され、一部は商品化されている。モービル社の最初のUS Patent（1990）が20年経過する2010年以降の動向が注目される。
米国	研究水準	○	→	黒田教授に続き、モービルがメソポーラスシリカの製造法をNatureに発表して以来、世界的に基礎研究ブームが起きた。近年は以前ほどの勢いはなく、基礎研究のピークは過ぎたと考えられる。バイオ出身の研究者が精力的にバイオ応用への可能性を模索している。なお、MOF研究ではO. Yaghi教授（UCLA）を中心に、基礎研究の盛り上がりが見られる。金属錯体のみならず共有結合性の関連物質も報告され、今後注目すべきナノ空間材料である。
	技術開発水準	○	→	大学がメソポーラス関連のベンチャー企業を興し、産業化への試みがなされている。
	産業技術力	○	→	メソポーラス材料ではモービル社外への展開はなく、MOFにおいても産業化までに至っていない。
欧州	研究水準	◎	→	メソポーラス材料は仏、独、英、西を中心に基礎研究のレベルは高いが、基礎研究のピークは過ぎ応用面への展開が重要と考えられる。寺崎治教授（ストックホルム大学）の下、ナノ空間材料の世界的な構造解析拠点ができてきている。なお、MOFに関しては仏のG. Férey教授らが中心となって先導的な研究を行っており、高い基礎研究開発能力を有している。
	技術開発水準	○	→	MOFに関しては、米国のO. Yaghi教授らの成果を基に、BASFが既にパイロットプラントを立ち上げている。
	産業技術力	△	→	MOFに関しては、今後BASFの動向に注目。メソポーラス材料の産業展開はみられない。
中国	研究水準	◎	↗	日欧米からの帰国組を中心に、基礎研究ポテンシャルが急激に上がっている。また、研究人口も増加し、5年前と比較して、2008年のメソポーラス材料の論文数は約2倍となっており、日欧米をしのぐメソポーラス材料の研究拠点となりつつある。MOFに関しては、日欧米のキャッチアップに留まっているものの、今後の急速な展開が見込まれる。
	技術開発水準	△	→	メソポーラス材料、MOF共に産業界への浸透は薄いのが現状であるが、大学の技術を生かした展開が今後見込まれる。
	産業技術力	△	→	メソポーラス材料、MOF、共に産業化するまでに至っていないが、その試みが徐々に明確になってくるものと思われる。
韓国	研究水準	○	→	R. Ryoo（KAIST）を中心に、メソポーラスカーボンの研究が盛んに行われている。広く基礎研究が行われているが、論文数は比較的少ない。MOFに関しては、優秀な研究者は散在するが、日欧米に並ぶ水準には達していない。
	技術開発水準	△	→	メソポーラス材料、MOF共に産業界への浸透は薄い。
	産業技術力	×	→	メソポーラス材料、MOF、共に産業化するまでに至っていない。
<p>全体コメント：メソポーラス材料が発表されて20年近くが経ち、近年になりようやく低誘電材料や調湿材料として、産業化が試行的に行われ始めた。International Zeolite Associationなどによりメソポーラス材料の名称や構造の規格化が進められており、合成などの基礎研究としては一段落を見せた感があるが、完全結晶性メソポーラス物質等、未踏課題は残っている。今後、メソポーラス材料分野は日本・中国・韓国を中心にアジア地域が世界を牽引していくものと考えられる。メソポーラス材料のポテンシャルは高いものの、産業化にはコストをはじめ汎用性が生まれるには課題が残る。今後いかにコストを抑えて高機能メソポーラス材料を合成できるかが、産業化への鍵となる。MOFに関しては、非常に大きな比表面積を有しているため、水素吸蔵材料を始めとした様々なガス吸着媒体としての期待が高まりつつある。また、熱安定性の悪さが応用への道を閉ざしていたが、近年になり熱安定性の高いMOFが開発され、触媒としての利用も期待されている。将来的には産業化が期待されている材料であるため、メソポーラス材料の研究者の一部はMOFへシフトしていく可能性も考えられる。日欧米の三つ巴状態であり、今後の動向に注目。</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]

(6) 触媒材料

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	◎	→	ナノ触媒材料開発は日本のお家芸ともいえる研究テーマであり、この分野での研究水準は高い。有機合成触媒、環境・エネルギー触媒材料開発ともに高い水準である。
	技術開発水準	◎	→	特に、有機合成（基礎化成品を含む）、光触媒、環境触媒分野の技術開発水準は高い。
	産業技術力	◎	→	日本は、米国に次ぐ触媒生産国であり、サイエンスのみならず実用化にも力を発揮。例えば、分子性酸化物ナノクラスターであるヘテロポリ酸触媒（ポリオキソメタレート）を用いた酢酸・酢酸エチル合成など、数多くの独自の優れた触媒プロセスを確立しており、付加価値の高い優れた材料を世界に供給している。
米国	研究水準	◎	→	この分野での米国の研究水準は最高レベルである。有機基共有結合の三次元骨格を有する結晶性多孔体などの独自のナノ材料開発が行われている。今後、これらの触媒材料としての応用が期待される。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は非常に高い。近年特に、水素エネルギー、バイオマス転換技術関連の触媒開発に関して優れた成果がでている。
	産業技術力	◎	→	世界一の触媒生産国であり、この分野でも独自の優れた触媒・触媒プロセスを開発している。
欧州	研究水準	◎	→	この分野での欧州の研究水準は非常に高い。
	技術開発水準	◎	→	欧州諸国の技術開発水準は非常に高い。
	産業技術力	◎	→	欧州諸国の産業技術力は非常に高い。
中国	研究水準	○	↗	この分野での中国の研究水準は中程度であるが、研究は年々が盛んになりつつある。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発水準はまだ中程度である。
	産業技術力	○	↗	日・米・欧の技術開発力、産業技術力を取り入れて、現在、急激に発展している。今後、更なる発展が見込まれる。
韓国	研究水準	○	↗	この分野での韓国の研究水準は高いといえる。
	技術開発水準	○	↗	技術開発水準は高いといえる。
	産業技術力	○	↗	日・米・欧の技術開発力、産業技術力を取り入れて、現在、急激に発展している。今後、更なる発展が見込まれる。
<p>全体コメント：                      触媒材料は、燃料や石油化学品の製造、ファインケミカルズや医薬品の製造中間体を得るために必要不可欠な材料であり、日・米・欧を中心に、優れた独自性の高いナノ触媒材料が開発されている。日本は、均一系触媒と不均一系触媒化学の研究水準は共に高いレベルにある。米国に次ぐ触媒生産国であり、サイエンスのみならず産業技術でも力を発揮。米国は研究、技術開発、産業技術水準ともに世界をリードしている。近年特に、水素エネルギー、バイオマス転換技術関連の触媒開発に関して優れた成果がでている。欧州も非常に高いレベルを有し、エネルギー・環境応用指向が強い。中国・韓国は、日米欧をキャッチアップ途上であるが、技術力は急速に進展している。</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]

## (7) 高分子・プラスチック材料（ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等）

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	○	→	新規触媒、ナノ構造制御等、世界をリードする先端研究では大きな成果を上げているが、先端研究を支える基礎研究に不安あり。
	技術開発水準	◎	→	情報・エレクトロニクスや自動車向け材料等、素材メーカーを中心とする技術開発力の水準は世界をリードしている。
	産業技術力	◎	→	世界をリードする企業ユーザー（航空・自動車、情報・エレクトロニクス）と組み、グローバルな展開がなされ、研究開発投資も旺盛である。高強度軽量材料は金属を置き換える勢い。新規材料技術で世界を先導。
米国	研究水準	◎	→	地道に高分子化学全般及び基礎研究へ注力しており、研究水準は高い。
	技術開発水準	○	→	米国の高い研究水準を生かした世界をリードするような技術開発成果が見当たらない。但し、ベンチャー等の技術開発成果に対しては、十分な調査が出来ていない。
	産業技術力	○	→	現状及び次代を担うような新しい産業が見当たらない。
欧州	研究水準	◎	→	地道に高分子化学全般及び基礎研究に注力しており、また産業界との連携による研究が盛んである。
	技術開発水準	◎	↗	大学、産業界、国及び地方組織が連携し、技術開発力の向上が図られている。近々大きな脅威となる可能性が大きい。
	産業技術力	○	→	一部を除き、世界をリードするナノテク構造材料や新規な高分子材料のユーザーが少なく、この点が産業技術力水準アップの阻害要因と考えられる。
中国	研究水準	○	↗	産業界の技術力向上への大学の寄与が大きく、今後の技術開発力向上は、脅威となる可能性大。
	技術開発水準	○	↗	水準はまだ低いが、人材、産学官連携等で大きな発展の可能性有り。
	産業技術力	△	↗	政府が音頭を取って、高付加価値化を目指した抜本策を推進中。世界をリードするナノテク構造材料や新規な高分子材料のユーザーが少なく、この点が産業技術力の水準アップの阻害要因と考えられる。
韓国	研究水準	○	↗	産業界の技術力向上への大学の寄与が大きく、今後の技術開発力向上は、脅威となる可能性大。
	技術開発水準	△	↗	水準は未だ低いが、人材、産学官連携等大きな発展の可能性有り。
	産業技術力	△	↗	一部を除き、世界をリードするナノテク構造材料や新機能材料のユーザーが少なく、この点が産業技術力の水準アップの阻害要因と考える。
<p>全体コメント：金属、セラミックスと並んで3大素材の一角を担う材料であり、従来は品質の高い日本製が重視されていたが、新興勢力が品質で追いつきつつあり、一方欧州は危機感を持って追いつけてきている。革新的素材の開発力と、ニーズ対応型高付加価値製品の開発スピードが近未来の競争力の源泉と見られる。日本では従来、大学、国研が基礎研究水準向上に寄与し、その成果を素材メーカーが用いて、技術開発水準の向上に役立て、その技術開発力をベースに世界をリードするナノテク構造材料や新規高分子材料のユーザーが、自らの企業発展に役立ててきた構造が発展を支えてきた。近年、大学から繊維、高分子化学の基礎、製造技術を支える化学工学に関する教育、研究組織が減少しつつあり、このことが、日本の発展を支えてきた良きスパイラルアップ型の競争力向上に対し、阻害要因となることが懸念される。</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]



## (8) 新型超伝導材料

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	◎	→	従来型（クラスレイト、フェビィフェルミオン、有機超電導など）新超伝導材料に関する研究では、やや下降傾向が見られるが、東工大細野 G での鉄系超伝導化合物の発見により、全体としては、ほぼ横ばいで、米国とともに先頭集団を形成している。 鉄系では東工大細野 G が先頭をきっており、大学（東北大、東大、名古屋大、京大、阪大）、独法（AIST、NIMS）なども立ち上がりつつある。しかし、中国、欧州（EU）の研究 G の追い上げが厳しい。さらに、韓国、インド、台湾などからも、注目すべき成果が出てきている。また鉄砒素そのものの物質開拓では押され気味といっても、全く新しい物質パラダイムを開拓する底力は、いまだに世界をリードしている。銅系、鉄系で典型的に見られたように、新超伝導材料の発見は、どこでなされるか予測がつかない。大型装置（中性子、ミュオン、強磁場など）を用いた材料特性評価では、米国、EU に遅れを取っている。対抗できているのは、SPRING8（特にハード X 線）のみである。JPARC（中性子、ミュオン）の早期の立ち上がりが期待される。
	技術開発水準	◎	→	合金系を含む従来型超伝導化合物の応用研究（線材化、電子デバイス）をそのまま、新型超伝導化合物に展開する研究が報告されているが、まだ、技術レベルを比較できる段階にはない。しかし、こうした従来型での技術レベルがそのまま適用できるとした場合（その可能性は大きい）日本のレベルは、先頭集団の一員の地位を保っている。
	産業技術力	-	-	応用の可能性を議論するには、時期尚早である。しかし、銅系超伝導材料実用化の停滞もあり、多くの企業が超伝導分野から撤退しており、ISTEC のマンネリ化もあり、実用化された場合には、米国、中国、EU に大きく遅れることが懸念される。ベンチャー企業を立ち上げるための基盤整備（研究者の意識を含めて）が必要か。ただし、国家規模プロジェクトでの実用化支援は、たとえば、磁気浮上列車への適用など、時期尚早である。現在はむしろ、材料開発に特化すべき段階にある。
米国	研究水準	◎	↘	現象の解析、理論研究では、先頭を走っている。特に、中性子回折、ミュオン（オークリッジ、メリーランドなど）強磁場（フロリダ、ロスアラモスなど）に関しては、NSF、DOE などの支援の元に、圧倒的な力を有している。ただし、材料開発に関しては、力が衰えつつある。多くの材料研究者は、アジア・アメリカン（特に中国系）である。中国の研究・開発の発展と共に、中国に活動の拠点を移す可能性がある。
	技術開発水準	◎	→	日本の状況と同様。ただし、民主党政権の発足と共に、エネルギー関連研究開発に対して、公的開発資金が増加されることにより、新型超伝導研究開発のにも、大きな開発資金が投入されることが考えられる。
	産業技術力	-	-	強磁場研究と関連して、銅系超伝導、MgB <sub>2</sub> 系での線材開発が進んでおり、そこでの技術がそのまま、鉄系超伝導化合物に展開される可能性が大きい。また、ベンチャー企業を受け入れる社会的な素地がある。
欧州	研究水準	○	↗	材料に関しては、ドイツ（ルービック・マキシミリアン大学、ミュンスター大学）などが先駆的成果を上げている。また、IFW（ドイツ、ドレスデン）で強磁場を中心に、集中的な研究が行われているほか、スイス（中性子回折センター）、英国（RAL）などで、大型装置を使った、EU 各国の研究者が関与した共同研究が行われている。また、旧東ヨーロッパとロシアとの関係から、ロシアとの共同研究がなされていることも注目される。（旧ソ連は、ランダウ、ギルスブルグに代表されるように、理論面では、米国とならば超伝導先進国であった。）
	技術開発水準	△	↗	現状では、研究開発全般において、研究水準に比べて、技術開発水準のレベルは低い。しかし、ドイツ（特にマックスプランク研究所）を中心に、EU 全体の開発レベルも向上すると思われる。特に、超伝導は、エネルギー関連テーマの一環として、強化が図られる可能性が大きい。
	産業技術力	-	-	技術開発水準に同じ。
中国	研究水準	◎	↗	銅系超伝導の研究を契機に、研究水準が急速に向上した。周辺物質の開拓に注力し、鉄砒素系の物質開拓では世界をリード、圧倒的な存在感を發揮。また、学理研究用の試料の供給源としてもその存在感を發揮している。特に、中国科学アカデミー（CAS）直轄での研究所（北京の 3 グループ、ファイヘイの 1 グループ）が先行している。CAS の研究所では、博士過程の大学院生が戦力になっている。これらのグループの多くは、米国、EU（一部の日本のグループ）と共同研究を実施している。（材料の供給）しかし、オリジナルな研究成果（新規材料を含む）は、日本、米国に比べて、やや遅れている。その差は急速に解消されつつあり、次の新型超伝導（鉄系越えた新材料）は、中国から出てくる可能性がおおきい。
	技術開発水準	○	↗	日本の状況と同様。しかし、技術開発に関しても、急速にレベルアップすることが想定される。複数の研究者・技術開発者は、日本で研究に従事した経験がある。（ISTEC など）
	産業技術力	-	-	技術開発水準に同じ。

韓国	研究水準	△	→	現状では、遅れているが、POSTEC を中心に研究開発が進められており、数はまだ少ないが、すぐれた研究成果が発表されている。米国、日本に多くの韓国出身の研究者がいることを考慮すると、現状の経済状況が改善されれば、特に技術開発面では、急速にレベルアップすることが考えられる。
	技術開発水準	△	→	研究水準に同じ。
	産業技術力	—	—	研究水準に同じ。

全体コメント：

現状での研究の重心は一連の鉄砒素系の物質開発と機構解明を意識した物性測定・理論にある。2008年度の後半に入り、物質開発から物性研究へと重心が移ってきているが、もちろんより転移温度の高い新物質が飛び出してくるようなことがあれば、また元に戻る可能性もある。産業化については、薄膜化や線材技術などの要素技術の開発がようやく進み始めたところなのでその評価は難しい。材料としてのメリット・デメリットがはっきりし、メリットが強調されるようになってくると、流れが一気に加速されるものと見られる。銅酸化物の高温超伝導体や MgB<sub>2</sub> などの蓄積があるので、研究開発のペースは速い。

鉄系化合物での超伝導発見は、東工大細野 G でなされたものの、化合物自体の発見は、1995年のジェストイコ教授 G (ドイツ、ミュンスター大学) によるものである。また、中国 CAS 研究 G は、少なくとも5年以上、この化合物の研究に従事していた。(同じ結晶構造を有する LaCuOCh を含めれば、中国の研究 G および細野 G は10年以上これらの材料の研究に取り組んでいた。) 新規超伝導材料の発見は突然のように見えるが、実はその裏には、息の長い材料研究がある。

中国では7年程度前から、超伝導研究に必要な装置を大量に購入していた。現在の中国の研究レベルの向上は、こうした研究投資の結果と言える。現在、インドが超伝導関連研究に投資していることが、装置購入状況から推測される。技術水準の将来傾向を見るときに、こうした前兆に気付くことが肝要である。現状では多くの研究開発は、国際共同研究として実施されている。(論文のオーサーから推測できる。) この点からは、研究水準の国際比較とは何なのかを考え直す時期に来ていると思われ、研究・技術の国際水準を上げるとの名目のもとに、研究の国際化を否定する方策が施されることがあってはならないであろう。

(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]

## (9) 磁性材料

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	◎	→	研究水準は大学、国研、産業界ともに極めて高く、世界トップレベル。材料と物性研究は元々強かったが、最近ではデバイスの研究でも存在感あり。ただし、日本の大学では一部を除き、「磁性」や「スピントロニクス」の教育が弱いため将来まで競争力を維持できるかは予断を許さない。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は大学、国研、産業界ともに極めて高く、世界トップレベル。ただし、日本の大学では一部を除き、「磁性」や「スピントロニクス」の教育が弱いため将来まで競争力を維持できるかは予断を許さない。
	産業技術力	○	→	永久磁石では日本メーカーが世界市場を席巻し、トップレベル。MRAMについては、基本技術、応用技術ともに米国メーカーとのしぎを削って競争している。
米国	研究水準	◎	→	研究水準は大学、国研、産業界ともにきわめて高く、世界トップレベル。世界から優秀な人材が集まるため研究者層が厚く、独創的な発想の研究者が多い。またベンチャーも含め強い。スピントロニクス関係では DARPA など政府関係の支援も手厚い。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は大学、国研、産業界ともにきわめて高く、世界トップレベル。スピントロニクス関係では Beyond CMOS を狙った次世代デバイス開発プロジェクトが政府、産業界、大学の協力で進められている。
	産業技術力	◎	→	技術開発力も世界トップレベル。MRAM については、基本技術、応用技術ともに日本メーカーとのしぎを削って競争している。ただし、金融危機の影響がどう出るか不透明。
欧州	研究水準	◎	→	基礎研究の水準は、大学、公的研究機関を中心に極めて高い。スピントロニクス分野では、GMR をはじめ、原理的、基礎的研究をじっくりやる傾向が強い。
	技術開発水準	○	→	技術開発水準は、日米に比べればやや遅れている。
	産業技術力	○	→	産業技術力も、日米に比べればやや遅れている。
中国	研究水準	△	↗	研究水準はいまひとつであるが、スピントロニクス分野では研究者数が増え、研究レベルも向上している。
	技術開発水準	△	↗	まだ目立った水準に達していない。
	産業技術力	△	↗	まだ目立った水準に達していない。
韓国	研究水準	○	↗	スピントロニクス分野では大きな投資がなされ、研究レベルも向上している。
	技術開発水準	○	↗	技術開発水準も向上していると思われる。
	産業技術力	○	↗	サムソンなど半導体メーカーが MRAM 開発に力を入れている。
全体コメント：技術開発力と産業も含めた全体としては日本と米国がリードしている。基礎研究では日米欧が拮抗してしのぎを削っている。韓国は研究レベルはまだ日米欧に及んでいないが、技術開発力は伸びている。中国はさらに遅れているが、米国、日本、欧州で学んだ人材は豊富にいるので今後急速に伸びてくるであろう。				

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(10) ナノ粒子

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	○	↗	古くから応用を目指した研究開発が盛んであり、磁性粒子、酸化チタン、カーボンナノ粒子などにおいて、オリジナリティーの高い材料開発の実績がある。
	技術開発水準	◎	↗	ナノ粒子合成、粒子の表面修飾・改質、粒子の集積化等において高い技術開発水準を有する。
	産業技術力	◎	↗	ナノ粒子開発を手がける企業が多数存在する。エレクトロニクス、磁気記録、エネルギー関連等の材料開発において、世界をリードしている。
米国	研究水準	◎	↗	論文発表数が多く、研究水準も高い。基礎、応用を含め、幅広い分野で研究開発が行われている。
	技術開発水準	◎	↗	エレクトロニクス、バイオ関連等で先行技術を発信し続けている。ベンチャー企業を中心に研究開発が進められている。
	産業技術力	◎	→	市場拡大が予想されるバイオ関連分野では、大手メーカーが複数存在し、ベンチャー企業で開発された材料の世界的な展開に大きく寄与している。
欧州	研究水準	◎	↗	各分野において、公的研究機関における研究開発は盛んであり、優れた成果も多く見られる。
	技術開発水準	◎	↗	米国同様、ベンチャーにおける研究開発も盛んである。近年、バイオ関連のベンチャー企業の振興が目立つ。
	産業技術力	○	→	エネルギー、環境、バイオ関連の産業技術力が高い。
中国	研究水準	△	↗	近年、論文発表件数が急増しているが、研究水準は日、米、欧に劣る。バイオ関連、磁気記録関連のナノ粒子材料開発に積極的である。
	技術開発水準	△	↗	ベンチャー企業が興っているが、際立った成果は見られない。
	産業技術力	×	↗	光触媒材料を生産している。
韓国	研究水準	○	↗	公的研究機関において、広く応用に向けたナノ粒子材料の研究開発が行われている。特に、諸外国との共同研究の中で優れた成果が見られる。
	技術開発水準	△	↗	半導体関連材料の研究開発が中心である。
	産業技術力	○	↗	半導体関連材料、光触媒材料を生産している。

全体コメント：機能性ナノ粒子の研究開発では、今後市場拡大が見込まれるバイオ関連分野への利用に向けた材料、及びアプリケーションに注目が注がれている。既存の細胞分離、物質分離技術への利用に加えて、イメージング、バイオ計測用のナノ粒子材料が多数製品化されている。さらに、ドラッグデリバリーなどの近い将来に実用化が期待されるアプリケーションに向けた材料の開発が盛んになってきている。欧米では、これらに特化したベンチャー企業が多数存在し、大手企業の販売網を利用して製品化が進められているのに対し、日本を含むアジアの動向は活発とは言えない。また、ナノ粒子材料の実際の市場は、磁気記録関連材料、電気・電子部品材料、顔料などの既存製品の延長上にあるものが多くを占めており、新しい機能や原理に基づいた実用化例はまだ多くない。これまでに得られているオリジナリティーの高い成果に基づいた革新的技術や製品の開発が期待される。一方で、欧米ではナノ粒子の毒性評価など、これら材料の利用におけるインフラ整備が進められている。これからの利用においては健康、環境に与えるリスク評価も重要である。

(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]

## (11) 強相関電子材料

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	◎	→	機能性物質開発を中心に、超巨大磁気抵抗効果、マルチフェロイクス（おもに強磁性-強誘電：電磁変換に使われる）などの分野で世界をリード。ヘテロ接合界面の制御など、デバイスの基礎になる技術を新しい問題とし基礎研究者が取り上げている。ここでは日米欧の競争。
	技術開発水準	◎	↗	製品化に至っていないが、産業界の強相関エレクトロニクスとして展開させようとする意識は一番高い。例えば不揮発性抵抗メモリ（RRAM）などで相当数の会社が動いている。
	産業技術力	×	↗	抵抗変化メモリ（RRAM）などの分野で半導体・電機メーカーが活躍。一部産業のフェーズに入っているかもしれないが、まだ外からは見えない。
米国	研究水準	○	↗	物質の開発や現象の発見といった萌芽的な部分で、以前のような存在感を示せずにいる。危機意識は高い。界面制御など、デバイスの基礎になる技術を新しい問題とし基礎研究者が取り上げている。日米欧の競争。日欧が若干リードの印象も受ける。
	技術開発水準	◎	↗	基礎研究と実用化が繋がっていないところがあったが、産業界の一部は現在の半導体デバイスのロードマップの先をにらんで動いている。
	産業技術力	×	→	
欧州	研究水準	◎	↗	ドイツ、イギリス、スイスなどを中心に強相関材料の基礎についてグループ横断的な大きなプロジェクトを立て、長期的な視点で取り組んでいる。界面制御など、デバイスの基礎になる技術を新しい問題とし基礎研究者が取り上げている。日米欧の競争。
	技術開発水準	○	↗	基礎研究と実用化の繋がっていないところがあったが、産業界の一部はロードマップの先をにらんで動いている。
	産業技術力	×	→	
中国	研究水準	△	↗	政府の基礎研究に対する投資の効果が現れ、急激な伸びを見せている。
	技術開発水準	×	↗	基礎研究から応用への動きはまだ顕在化していないように見える。既存の半導体技術のボトムアップに忙しいのでは？
	産業技術力	×	→	
韓国	研究水準	○	↗	各地の大学にセンタが整備され、近年のレベルの向上は目を見張るものがある。国際会議などでの存在感を増している。
	技術開発水準	◎	↗	抵抗変化メモリ（RRAM）などの分野でサムソンのような企業が活躍。
	産業技術力	×	↗	抵抗変化メモリ（RRAM）などの分野でサムソンのような企業が活躍。産業のフェーズに入っているかもしれないが、外からは見えない。
<p>全体コメント：研究水準は日本と欧州がリードしており、米国は存在感を示せないことに危機意識を持っている。技術開発力では、日米が競っているが、日本は新規メモリ技術に、米国は半導体ロードマップの先に据える方向で動いており、欧州は米国と同じ方向に向かっているように見える。韓国では各地に研究センターを設置し、急速に研究水準を高めているが、技術開発では、日本と同じメモリ技術を志向しており、特にサムソンの努力が目立つ。産業技術力は、まだどこも保持しているとは言いがたい。</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]

## 2.1.2 ナノ加工技術分野

### 2.1.2.1 概観

ナノ加工技術は、材料技術と並び、ナノテクノロジーの根幹を成す基盤技術である。ここではナノ加工技術を、半導体超微細加工技術、ナノ転写加工技術、自己組織化技術、ナノ・マイクロ印刷技術、及び MEMS・NEMS 加工技術に分類して、それぞれに関して国際比較する。これらの技術の概要は、以下の通りである。

半導体超微細加工技術：集積回路（LSI）を製造するための微細加工技術で、フォトリソグラフィ技術、エッチング技術、薄膜形成技術、洗浄技術、めっき技術、研磨（CMP）技術、パターン設計・評価技術などから成る巨大最先端技術である。

ナノ転写加工技術：ナノインプリントやマイクロコンタクトプリントと呼ばれる技術で、光・電子リソグラフィと比べて低コスト性に特長がある。

自己組織化技術：自然に秩序あるナノ構造を形成する技術で、単分子膜やポーラス構造の作製、相分離による微細パターンニング、超分子の合成、バイオ機能を用いたパターンニング技術などを含む。主に高機能の材料・素材の製造に利用される。

ナノ・マイクロ印刷技術：インクジェットのような手法で、様々な機能性のインクを精密に基板やシートに置いていく技術であり、量産性と大面積対応とに特長がある。フラットパネルディスプレイや電子ペーパーへの応用が盛んである。

MEMS・NEMS 加工技術：半導体微細加工技術を中核とし、さらに立体的微細加工技術などの様々な微細加工技術を加えた総合微細加工技術で、MEMS と呼ばれる様々な微細デバイスの製造に用いられる。

ナノ加工技術は、それを適用したデバイス・システム技術と不可分であり、総合力の問われる技術である。したがって、本分野では、技術的蓄積があり、しかもこれを用いる産業が発展している日米欧が、研究水準、技術開発水準、および産業競争力で強さを示す。韓国・台湾は、エレクトロニクス産業を国家的に育成しており、エレクトロニクス産業の基盤技術であるナノ加工技術の研究開発にも力を入れている。これには、欧米から帰国した研究者、および集中投資を行う国家の果たす役割が大きい。中国も、韓国・台湾と同じ道を辿ると思われる。

## ナノ加工技術分野のまとめ

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	◎	→	論文数は多く、欧米と肩を並べる研究水準である。大学や公的研究機関では、多様な要素研究が盛んである。
	技術開発水準	◎	→	現状の技術開発水準は高い。しかし、技術の高度化・複雑化や技術開発規模の拡大によって、大学や公的研究機関の一研究室、あるいは一企業で対応できなくなった基幹技術に対して、研究体制の対応の遅れが危惧される。また、ニッチ向け技術の技術開発では、ベンチャー企業の少なさが弱みである。
	産業技術力	○	→	ナノ加工技術の主要な適用先たるエレクトロニクス関連産業の技術力は高く維持されている。懸念点は、欧米に対する上記の技術開発力の差、およびアジアの他の国の追い上げである。
米国	研究水準	◎	→	技術の高度化・複雑化や技術開発規模の拡大によって、一流研究大学が拠点化を進め、高い研究水準を維持している。ナノ加工技術分野でも、優秀な人材が世界から集まっている。
	技術開発水準	◎	→	拠点を構えた一流研究大学と企業との連携、およびベンチャー企業の盛んな活動が、基幹技術からニッチ向け技術まで、幅広い技術開発を支えている。
	産業技術力	○	→	LSI や MEMS では高い産業技術力を誇るが、フラットパネルディスプレイ関連の産業は貧弱である。ベンチャー企業が、既存産業に脅威を与えるような技術を実用化する例が少なくない。
欧州	研究水準	◎	→	日米と肩を並べる研究水準である。
	技術開発水準	◎	↗	フラウンホーファー研究所、IMEC、Leti、CSEM などの半官半民の研究所を中核にする産学官連携体制が確立しており、こうした場で大規模な技術開発が行われている。コンソーシアムによる技術開発で世界的なリーダーシップを発揮している。
	産業技術力	○	→	LSI や MEMS では高い産業技術力を誇るが、フラットパネルディスプレイ関連の産業は貧弱である。
中国	研究水準	△	↗	欧米帰りの研究者が研究を立ち上げているものの、依然、質・量ともに日米欧とは距離がある。ナノ加工技術は総合力の問われる技術であり、本格的な研究の立ち上げには、依然、時間を要する。
	技術開発水準	×	→	ナノ加工技術を用いる産業が未成熟な上、企業は技術開発より技術導入に積極的である。
	産業技術力	△	↗	今後、生産拠点として、産業が急激に立ち上がる可能性がある。
韓国	研究水準	○	↗	欧米帰りの研究者が中心となって、盛んに研究が行われている。エレクトロニクスが国家の基幹産業であるために、研究に対する国家投資が盛んであること、優秀な学生がエレクトロニクス関連の学科に集まることなどが、ナノ加工技術の研究水準を向上させている。
	技術開発水準	○	↗	新しい技術を獲得し、産業化する技術開発に力が入られている。Nanofab Center に代表される大形研究拠点の整備が進められており、このような場で産学連携を進め、自前の技術開発にも力を入れる。
	産業技術力	○	↗	フラットパネルディスプレイと DRAM とが国家の基幹産業であり、最先端の技術への投資が盛んである。

(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]



## 2.1.2.2 中綱目ごとの比較

## (1) 半導体超微細加工技術（各種リソグラフィ等）

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	○	→	装置開発・材料開発については、コンソーシアムを中心に研究開発が行われている。デバイスメーカー側の先端技術開発に対するインセンティブが、1社を除き、低下している。大学での研究は手薄である。
	技術開発水準	○	↘	露光装置、レジスト材料、マスク等の製品開発で世界に先行しており、特にレジスト材料とマスクを得意としている。しかし、顧客の多くが海外企業であり、日本のメーカーによる総合的な研究開発も海外の国際研究開発拠点に集約されつつある。デバイスメーカー側の技術開発は、1社を除き、低調である。
	産業技術力	○	↘	産業がメモリとSOCとで2極化している。メモリメーカーは最先端技術の導入に積極的であるが、SOCメーカーは消極的である。装置と材料では、世界に先行している。
米国	研究水準	○	↗	新技術に対する基礎研究だけではなく、従来技術の高度化研究にも、コンソーシアム、大学、および国立研究所が積極的に取り組んでいる。
	技術開発水準	○	↗	フォトリソグラフィの限界でプロセス側の進歩が厳しい状況で、設計側の技術開発が積極化している。ベンチャー企業によるナノインプリント装置などの開発が盛んである。
	産業技術力	○	→	コンソーシアムとデバイスメーカーを中心に、微細化と利用技術改良に積極姿勢が見られる。生産現場に近い話題が学会等で積極的に議論される。
欧州	研究水準	◎	↗	コンソーシアム活動、装置メーカーの研究開発、および半官半民の研究機関・研究開発拠点の新技術開発に積極性が見られる。特に、露光装置開発では、欧州が世界の研究を方向付けている。日本の材料・装置メーカーも、欧州の国際研究開発拠点やコンソーシアムで積極的に研究開発を行っている。
	技術開発水準	○	↗	企業の研究開発が非常に盛んである。新技術に積極的に挑戦し、最先端の装置をコンソーシアムに持ち込み、性能をユーザが自ら評価する体制が確立されている。
	産業技術力	△	→	最先端デバイスの応用を中心にビジネスで優位に立っている。その結果、次世代のデバイスの方向付けができ、これが装置や材料の研究開発に好影響している。
中国	研究水準	△	↗	大学での研究は急速に立ち上がっている。
	技術開発水準	×	→	リソグラフィ技術を開発するには至っていない。
	産業技術力	△	↗	最先端技術の応用は未だ遅れている。半導体生産工場の進出によって従来技術を急速に吸収し、生産技術の高度化で今後成長が予想される。
台湾	研究水準	△	→	企業活動が盛んな背景を受け、大学や研究機関の意欲は高い。リソグラフィ関連では、設計寄りの技術や評価技術に先端的な研究が散見される。
	技術開発水準	○	↗	海外の研究成果を積極的に取り入れ、最先端のデバイス開発に応用している。
	産業技術力	◎	↗	欧米の影響が強く、特に最先端の露光装置や計算機リソグラフィの導入に積極的である。生産現場への先端技術の採用では、韓国と並んで世界に先行している。LSIファンドリの存在感が大きい。
韓国	研究水準	△	→	国家レベルの研究開発、および大学での研究開発では、日米欧に遅れている。一部、材料技術では新しい動きもある。
	技術開発水準	◎	↗	最先端リソグラフィ技術の利用技術開発に非常に積極的である。欧米で提案された研究成果をいち早くデバイスに適用するとともに、欧米のコンソーシアムに積極的に参加している。
	産業技術力	○	↗	メモリの製造で最先端リソグラフィ技術を積極的に活用している。装置技術や材料技術を生産現場が主導し、さらにデバイスメーカー側が全体の研究開発を主導している。

全体コメント：半導体微細加工技術は、フォトリソグラフィ技術だけをとっても、露光装置、レジスト、マスク、ユーザ側の利用技術、寸法・欠陥評価、設計（DFM：Design for Manufacturability）などに渡る総合システム技術である。また、次世代・次々世代設計ルールを目指したこれらの研究開発には、それぞれに多大な研究開発資源が必要である。研究開発コスト低減の観点からも、総合最適化の観点からも、これらの研究開発は単独メーカーでは成立し得ず、コンソーシアムや国際研究開発拠点によって推進される。日本では、SELETE（半導体先端テクノロジーズ）を中心として研究開発が進められ、露光装置、レジスト材料、およびマスクについては成果を上げている。しかし、ベルギーのIMEC、フランスのLeti、米国のAlbany Nanotechなどは、巨大な研究開発拠点到世界各国（日本を含む）から多数の企業を集め、高い水準の総合的な研究開発を旺盛に進め、益々、国際的な存在感・影響力を増している。国や地域にこのような研究開発拠点が存在することは、国際的リーダーシップの掌握、産学連携による若手研究者の育成などの点で意義が大きく、結局、産業競争力の強化に繋がる。

- (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]

## (2) ナノ転写加工技術 (ナノインプリント等)

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	○	↗	基礎、応用ともに多様な研究が進められている。
	技術開発水準	○	↗	産業化に向けて、装置、スタンプ、樹脂材料、離型材料などの開発が進められている。既に研究開発されていた光学素子や記録媒体に加え、集積回路への応用のための技術開発が開始された。
	産業技術力	○	↗	重ね合わせパターニングを必要としない光学素子や記録媒体への応用展開が進んでいるものの、本格的な産業化はこれからである。ナノインプリント装置、樹脂材料、およびスタンプが製品化されている。
米国	研究水準	○	↗	ミシガン大学、テキサス大学、およびプリンストン大学が中心的な存在である。リバーサル方式やロール方式などの研究、バイオデバイスへの応用などに進展が見られる。
	技術開発水準	○	↗	IBM がマイクロプロセッサの多層配線層への適用を目指し、幅広く技術開発を進めている。パターンメディアのための技術開発も進展している。DARPA などの資金によって、ベンチャー企業が育成されている。
	産業技術力	○	→	ベンチャー企業による国際的な装置販売が始まった。LED の高効率光取出し構造のナノインプリントによる製造技術が、韓国のディスプレイメーカーに移転されている。応用デバイスの産業化状況は日本と同様である。
欧州	研究水準	◎	→	NaPa (欧州のナノインプリント国家プロジェクト) の終了後、成型や離型のメカニズムを中心に基礎研究で高い水準を保っている。フランスの Leti・CNRS が積極的に研究を進めている。
	技術開発水準	○	↗	大学を中心にバイオ応用が進んでいる。LSI 応用のフィージビリティスタディが欧州のプロジェクトとして行われている。
	産業技術力	○	→	ナノインプリント装置、樹脂材料などが製品化されている。スウェーデンの装置メーカーが量産対応装置の販売を開始した。応用デバイスの産業化状況は日本と同様である。
中国	研究水準	×	↗	研究が開始され、キャッチアップが進んでいる。
	技術開発水準	×	↗	
	産業技術力	×	→	
台湾	研究水準	△	↗	国立研究所と大学の官学主導での技術開発に取り組んでいる。基礎研究の水準も上がってきている。
	技術開発水準	○	→	国産装置の開発を進めている。
	産業技術力	△	↗	装置開発等を進めているが、産業化はこれからである。
韓国	研究水準	△	↗	大学を中心として研究水準が格段に上がり、特にシミュレーション、装置、およびスタンプの研究に成果が見られる。
	技術開発水準	○	↗	サムソングループを中心とする産官学連携で、フラットパネルディスプレイや記録メディアにターゲットを絞って技術開発を進め、成果を上げている。LSI への応用も検討されている。
	産業技術力	○	→	LED の高効率光取出し構造のナノインプリントによる製造技術が、ディスプレイメーカーで実用化に近付いている。国産装置の実用化が進んでいる。
<p>全体コメント: ナノ転写加工技術は、ナノインプリント、マイクロ・ナノコンタクトプリント、マイクロ・ナノガラスプレスモールドリングなどを含む光・電子線リソグラフィ代替技術である。ロール・ツー・ロール技術など、ナノ・マイクロ印刷技術と共通する要素技術もある。ナノインプリント技術に関しては、1995年のChouらによる最初の報告以降、玉石混合の多くの基礎研究がなされたが、形状を作るだけの研究は一段落し、応用研究が中心となっている。このような応用研究の中から基礎的な問題が明らかになり、樹脂の流動制御、スタンプの剥離制御、スタンプの長寿命化などを目的とする素過程の観察やシミュレーションが行われている。重ね合わせパターニングを必要としない光デバイスやパターンメディアへの応用については、実用化に向けて開発が進んでいるが、本命のLSIへの応用については、適用可能性が検討されている段階にある。ナノインプリント装置、樹脂材料、スタンプなどは、主に研究開発用に製品化されているが、ナノインプリントを利用したデバイスは、従来からあるマイクロオプティクスの上にある光学素子を除いて、本格的な産業化には至っていない。このような状況は日米欧で同様であり、韓国と台湾とが続いている。</p>				

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗:上昇傾向、→:現状維持、↘:下降傾向]

(3) 自己組織化技術

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	○	↗	化学・材料系の研究は盛んであるが、物理系・バイオ系の学術論文数がやや劣勢である。
	技術開発水準	○	↗	東芝、パナソニックなどの電機メーカー、および東レ、富士フイルム、帝人などの素材メーカーが技術開発に取り組んでいる。特許申請数も他国に比べて多い。
	産業技術力	△	↗	産業化には至っていないが、自己組織化で作られたハニカムフィルムが試験販売されるなど、一部の自己組織化素材が実用化に向けて動き出している。
米国	研究水準	◎	↗	化学（材料）、物理（応用物理）、生物系のいずれの分野においても研究が盛んであり、学術論文数が国別では最多である。
	技術開発水準	○	↗	IBM が low - k 材料の実用化研究に取り組んでいる。
	産業技術力	△	↗	期待感はあるが、目立った産業化例はない。
欧州	研究水準	◎	↗	欧州全体で見ると、学術論文数は全世界の大きな割合を占める。ドイツは化学材料系に強く、英国はバイオ系、特にバイオミメティクス（生体模倣）に強い。
	技術開発水準	○	↗	英国はバイオ系に重点をおいており、バイオチップ、DDS、バイオミメティクス材料の実用化開発が盛んである。
	産業技術力	△	↗	自己組織化を利用した超撥水ナノコンポジット塗料がドイツで実用化されるなど、一部の自己組織化素材が実用化に向けて動き出した。
中国	研究水準	○	↗	研究は化学・材料系に偏っているが、研究報告数は日本に迫ってくる勢いである。
	技術開発水準	△	→	製品開発技術についての目立った報告はされていないが、特許申請は少ないながら一定の数を維持している。
	産業技術力	×	→	産業化には至っていない。
韓国	研究水準	△	→	他地域・国と比較すると報告数が少ないが、国内研究の主流は材料・化学分野である。
	技術開発水準	△	→	近年、自己組織化に関係する特許申請数が増えてきているが、製品開発には至っていない。
	産業技術力	×	→	産業化には至っていない。
<p>全体コメント：自己組織化と呼ばれる技術は幅広く、単分子膜やポーラス構造の作製から、相分離による微細パターンニング、超分子の合成、さらに細胞の組織形成機能を用いた高度なものまで様々で、研究者によっても定義が異なる。自己組織化技術の多くが基礎研究の段階にあるが、欧米が先行し、日本が続ぎ、中国が猛追している。最近、英国とドイツは、バイオミメティック材料やバイオインスパイアード材料の研究に注力している。本分野の大きな課題の1つは、基礎研究の成果を実用化に繋げることにある。自己組織化を利用したハニカムフィルムが富士フイルムから試験販売されたり、自己組織化を利用した超撥水ナノコンポジット塗料がドイツで実用化されたり、空孔の大きさや密度が制御されたポーラス膜が low - k 膜として IBM で LSI 試作に取り入れられたりするなど、一部の自己組織化材料・素材が実用化に向けて動き出したことは注目に値する。東レ（階層構造化繊維）、三菱レーヨン（モスアイ構造フィルム）、帝人（構造色繊維）、富士フイルム（自己組織化多孔質フィルム）などの国内企業の取り組みもあり、今後、多くの自己組織化材料が実用化される。実用化への技術開発でも、基礎研究と同様に欧米が先行し、日本が続ぎ、他のアジア各国が遅れているというのが現状である。このように、自己組織化による素材製造、あるいは機能表面付与は実用化に向かってはいるが、本来、ナノテクノロジーとして大きく期待されていたリソグラフィの一部代替は、ブロックコポリマを利用したパターンドメディアの作製以外、十分な現実味を帯びていない。より高度な制御された階層性・高次構造の構築技術は、依然、基礎的なデモンストレーションが待たれる状況にある。</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) ナノ・マイクロ印刷技術（インクジェット描画、ロール・ツー・ロール加工技術）

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	○	→	企業での研究開発は活発であるが、それに比べて大学や公的機関での基礎研究はあまり活発とは言えない。
	技術開発水準	◎	→	大企業中心に活発な技術開発が行われているのが特徴である。機能性インク開発、インクジェット技術開発、応用開発とバランスよく総合的な開発が行われている。特に材料に関しては日本が強く、高分子有機 EL 材料は日本の技術に集約された。公的機関の取り組みとしては、微細インクジェット装置の実用化、フレキシブル TFT 基板の開発などが注目される。
	産業技術力	◎	→	インクジェット印刷が液晶ディスプレイの製造工程の一部に定着しつつある。実装分野への適用も開始され、現状では世界を圧倒的にリードしている。
米国	研究水準	◎	→	マイクロ液体の挙動に関する基礎研究や有機半導体の研究では、優れた成果が見られる。マイクロ印刷技術のベンチャー企業が興りつつある。
	技術開発水準	○	→	一部の企業、ベンチャー企業において技術開発は活発であり、インクジェットヘッドや装置の開発が進んでいる。ディスプレイ産業が貧弱なので、大規模な応用開発は困難であるが、E-ink の技術を用いた電子ペーパーが主流となると、これを基盤として様々な技術が一気に進展する可能性がある。
	産業技術力	△	→	ディスプレイ産業が貧弱なので、大規模な産業化は難しい。電子ペーパー、バイオデバイスなどの産業化が期待できる。
欧州	研究水準	◎	→	大学、企業ともに有機半導体に関して優れた研究がなされており、良いインク材料が開発されている。マイクロ液体の挙動に関する基礎研究では、歴史的に蓄積があるので、世界に先行している。
	技術開発水準	◎	↗	EU 支援、および国支援のプログラムが充実している。有力なベンチャー企業が生まれ、育っている。ベンチャー企業での技術開発の水準が高く、欧州全体を牽引しているのが特徴である。特に英国 PLL は特出しており、ドイツのドレスデンに 250～300 百万ドルを投入して、有機エレクトロニクス駆動の電子ペーパーを開発している。
	産業技術力	△	↗	上述の PLL に代表されるように、ベンチャー企業を中心にしてマイクロ印刷技術の産業化がなされつつある。インクジェットのヘッドにも伝統的に強みがある。
中国	研究水準	×	→	基礎研究は当面は大学を中心に開始されると予想される。
	技術開発水準	×	↗	現状では特に目立った動きはないが、中国でのディスプレイ産業の発達とともに、今後は活発化すると予想される。
	産業技術力	×	↗	産業化には至っていない。
韓国	研究水準	○	↗	材料やマイクロ液体に関する基礎研究は、大学や国立研究所で活発化している。
	技術開発水準	○	↗	一部の企業が開発に研究開発を行っており、その水準も向上している。ディスプレイ産業や半導体産業があるので、日本の技術水準に追いつくのも時間の問題と思われる。
	産業技術力	△	↗	まだ産業化には至っていないが、適用先であるディスプレイ産業や半導体産業があるので、今後、急速に発展すると思われる。

全体コメント：ナノ・マイクロ印刷技術は、主に①インクジェットノズル技術、②インク技術、および③応用技術の3つで構成される。それぞれに関して国際比較すると、①に関しては、日本の企業が20年間程度、研究開発を続け、研究・技術開発から産業競争までの全ての段階で、圧倒的な国際競争力を発揮している。これを支えているのは、MEMS技術に代表されるマイクロシステム技術、およびメカトロニクス技術である。欧米にも、インクジェットノズルを実用化している企業はいくつかあるが、総合力で日本には全く及ばない。②に関しては、日本では元々、エレクトロニクス用材料などを手がけるハイテク化学産業が強く、こういった企業を中心に研究・技術開発から産業競争までの全ての段階で、圧倒的な国際競争力を発揮している。機能性インク材料には、カラーフィルタの色材、各種金属インク、ITOインク、有機EL等の機能性有機材料インクなどがある。③に関しては、現在、インクジェット印刷技術の最大の応用先はフラットパネルディスプレイであることから、パネルを製造している日本や韓国に強みがあるが、そこに使われている重用な部品・材料は日本製であり、①、②の強みと合わせて、③に関しても日本に最も強みがある。液晶パネルの量産でインクジェット印刷は標準工程になりつつあるが、大型基板用の量産装置の完成度は日本企業が他国を大きく引き離している。しかし、韓国は本技術で日本を急追してくることが予想される。中国には、今のところ見るべきところはない。一方、欧米に関して注目すべきことは、電子ペーパーと有機エレクトロニクスの動向である。2007年末にアマゾンがE-inkの技術を用いて電子ブックを発売し、販売量を伸ばしている。さらに、世界で10社程度がE-inkの技術を用いて電子ペーパーの商品化を目指している。元々、欧米は有機エレクトロニクスの強い技術基盤とフレキシブルデバイスに対する高い関心を有しているため、印刷によって製造する有機電子デバイスをこの流れに乗って商品化する可能性がある。その中でも英国PLLの活動は特出しており、ドイツのドレスデンに250～300百万ドルを投入して、有機エレクトロニクス駆動の電子ペーパーを開発している。

(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]

(5) MEMS・NEMS 加工技術

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	◎	→	論文数では米国に次ぐ大きな貢献をしている。ERATO や科学技術振興調整費による大型プロジェクトが進行している。NEDO による MEMS 関連のプロジェクトは基礎研究志向に振れた。
	技術開発水準	○	→	産学官連携による技術開発も進んでいるが、一部の拠点を除き、散発的な感がある。新しい MEMS にはニッチ市場向けのものが多いが、その実用化の母体となるベンチャー企業は少ない。
	産業技術力	◎	↘	代表的な製品はインクジェットプリンタヘッドと自動車用センサであるが、新しいコンシューマ向け製品、具体的には、情報機器・ゲーム機器用慣性センサ、クロック発振器、マイク、FBAR（無線通信用フィルタ）などでは、既存産業の強さもあり、出遅れた。
米国	研究水準	◎	→	表面マイクロマシニング技術、LSI 集積化技術など、本格的な基盤技術の積み重ねが圧倒的である。その上に、SiGe 技術、SiC 技術などの新しい基盤技術を積み上げ、大学を中心に多様な応用展開をしている。
	技術開発水準	◎	↗	シリコンクロック、MEMS マイク、情報機器・ゲーム機器用慣性センサなどの新しい製品がベンチャー企業を含む非大手企業から次々と登場している。これらの研究開発には大学の役割が大きい。
	産業技術力	◎	↗	MEMS の売り上げ 1 位、2 位の企業はそれぞれ Texas Instruments、Hewlett - Packard で、トップ 10 に 5 社が入っている。SiTime（シリコンクロック）、Knowles（マイク）、InvenSense（ジャイロ）などの新興/中企業の勢いもある。
欧州	研究水準	◎	→	大学での研究開発も盛んであるが、本格的な研究開発では、フラウンホーファ研究所、IMEC、Leti、CSEM などの半官半民の研究所の役割が大きい。
	技術開発水準	◎	↗	フラウンホーファ研究所、IMEC、Leti、CSEM などの半官半民の研究所を中核にする産学官連携体制が確立しており、こうした拠点で本格的な技術開発が行われている。
	産業技術力	◎	→	MEMS の売り上げ 3 位、6 位にそれぞれ Robert Bosch、STMicroelectronics が入っている。有力なベンチャー企業もある。
中国	研究水準	△	↗	欧米からの帰国者が有力大学の教授となり、研究が立ち上がりつつある。
	技術開発水準	△	→	大学での研究成果の受け皿となる企業が少ない。
	産業技術力	△	↗	国主導で MEMS ファンドリを育成する動きがある。
台湾	研究水準	○	↗	欧米からの帰国者が有力大学の教授や公的研究機関の中核研究員となり、研究開発が活発化している。国際的な論文発表数も急増している。
	技術開発水準	△	↗	MEMS を含むエレクトロニクスの研究開発への国家投資が旺盛である。
	産業技術力	○	↗	TSMC が大規模な MEMS 受託生産に乗り出し、欧米で開発されたデバイスが台湾で生産されるという国際協力体制が確立されつつある。受託生産によって、台湾国内に情報や技術の蓄積が進む。今のところ、独自製品を出す企業の動きは目立たない。
韓国	研究水準	○	↗	欧米からの帰国者が有力大学の教授や公的研究機関の主任研究者となり、研究開発が活発化している。国際的な論文発表数も急増している。
	技術開発水準	○	↗	サムソン、LG などのエレクトロニクス関連の大企業で、MEMS への取り組みが盛んである。Nanofab Center などの大形研究拠点への国家投資も盛んである。
	産業技術力	△	↗	サムソン、LG などのエレクトロニクス関連の大企業で MEMS への取り組みが盛んであるが、製品化にはあまり至っていない。

全体コメント：MEMS・NEMS 加工技術は、微小デバイス・システムを実現するための総合加工技術で、その波及範囲は、自動車、情報通信機器、玩具、製造装置、その他の産業機器などと広い。日米欧 3 極では、研究開発、産業ともに盛んであり、論文としての研究成果の数は順調に増え、MEMS 産業も高い成長率を維持している。このような状況下で、次の勝負は、携帯電話用部品に代表されるように、数が膨大で産業的インパクトの大きいコンシューマ部品の研究開発競争にある。この競争において、米国が先行しており、欧州が続いているが、日本の取り組みは、特に大学や公的研究機関では今のところ少ない。これらの研究開発では、米国ではトップ研究大学、欧州では半官半民の大規模研究所の役割が大きく、研究資金の供給元として国家の役割も甚大である。一方、日本では、大学や公的研究機関の各研究室の自主性を生かした多様性のある研究に特徴があり、論文数では米国に続く貢献がある。産学連携で成果を上げている大学もある。韓国・台湾では、欧米帰りの研究者が中心となって研究が立ち上がり、また、産業のエレクトロニクスへの過度な依存に起因する旺盛な国家投資もあり、急速に力を付けてきている。特に、台湾での MEMS 受託生産は増えていき、台湾国内に情報や技術の蓄積が進むと考えられる。中国も同様の道をたどると予想される。

- (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]

## 2.2 ナノテク・材料の応用

### 2.2.1 ナノエレクトロニクス分野

#### 2.2.1.1 概観

ナノエレクトロニクスは大別して CMOS 材料技術、スピントロニクス（強相関電子デバイスを含む）、固体素子メモリ、有機エレクトロニクス、量子ドットデバイス、フォトニック結晶、近接場光技術・ナノフォトニクス、プラズモニクス・メタマテリアル、を主に挙げることが出来る。さらに本分野では、ディスプレイデバイス、固体照明、次世代ナノデバイス（単電子素子、分子素子、超伝導デバイス等）を含め、計 11 中綱目を取り上げた。

CMOS は Si デバイスの最も主要な部分であり、ナノエレクトロニクスも CMOS なくしては語れない。また固体素子メモリも最近の進展はめざましく、新たな技術分野の開拓は進んでいる。スピントロニクス分野では次世代磁気メモリ、不揮発性論理素子などの研究開発が進められており、強相関も含めた材料物性物理の研究も進展している。有機エレクトロニクスも歴史は古いが、現在も進展は著しく、将来のフレキシブル電子デバイスの夢を実現しつつある。量子ドットデバイスでは、それを使ったレーザが実現し、小さな温度依存性により、極めて安定度の高いデバイスが実現されている。フォトニック結晶では、スローライト、フォトニック結晶レーザの研究開発が進展しており、他分野との融合も加速している。また近接場光技術・ナノフォトニクスは、デバイス、加工、システム、エネルギー応用など広い範囲に関わっており、リソグラフィなど半導体プロセスへの応用も注目されている。プラズモニクスはこれからますます重要になるセンサへの応用が期待されている。メタマテリアルはプラズモニクスと分野が合体し、発光増強、光学迷彩などの話題が議論されている。ディスプレイデバイスは大型化、薄型化、高精細化、低消費電力化の技術開発が進む一方、TFT 技術や 3D 映像への対応も検討されている。固体照明は、省エネルギーと CO<sub>2</sub> の排出削減につながるエコ関連の事業が追い風になり、技術開発が世界的に加速している。次世代ナノデバイスは、いくつかの研究機関や大学で、基礎研究とその応用可能性の研究が行われている。

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、これらの研究を世界のアクティビティの中で見たときの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。中綱目の次世代ナノデバイスの項で触れているが、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クトロニクス戦略は存在しない。

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。

## ナノエレクトロニクス分野のまとめ

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	◎	→	スピントロニクス、有機エレクトロニクス、量子ドットデバイス、フォトニック結晶、近接場技術等の分野で日本は世界のトップレベルにある研究水準を維持している。しかし予算の減少により、困難に直面している分野もある。
	技術開発水準	◎	→	多くの分野において世界のトップレベルの開発能力を維持している。ベンチャーが立ち上がり軌道に乗っている分野もある一方で、欧米に比べるとベンチャーやファンドリーが少なく、試行ができない等の根本的な問題を抱えている分野もある。
	産業技術力	◎	→	全般に世界で高い技術力を持ち突出しているところもあるが、同時に世界との激しい競争にさらされているところが多く、遅れをとっているところもあり、政策的な問題も潜在化していると考えられる。今後に大きな不安を残す。
米国	研究水準	◎	↗	基本的には高い水準を保っている。分野によって異なるが、研究拠点や産業界主導の連携組織研究が機能している。新しい原理提案や基礎研究面で高い実力を持っている。
	技術開発水準	◎	↗	大学との共同研究が盛んで依然として強い力を持っているが、研究開発の縮小や海外への拠点移動で、アクティビティが低下している分野もある。
	産業技術力	◎	↗	分野によって大きく異なるので一概に言えないが、圧倒的に強いところと弱いところが出てきている。これは米国の戦略によるものと推測される。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究には非常に強い拠点があり、そこを中心に成果を出している。必ずしも応用を意識していない分野もあるが、将来それが利いてくるかもしれない。又分野によっては日米に比べ弱い分野も見受けられる。
	技術開発水準	○	↗	欧州も最近は産業化という視点を強く持ちつつある。EUとしてのプロジェクトにより国境を越えた連携が活発に行われている。デバイスという視点から見ると基礎とデバイスとのつなぎのところがまだ弱い面もある。一方、IMECの国際的存在感が増している。
	産業技術力	○	→	産業界が必ずしも強くない分野もあるが、産業技術力としては、基礎に裏付けられた高い水準にあると考えるべきであろう。標準化にも力を入れている。
中国	研究水準	△	↗	学会発表や論文発表が急増しており、研究者人口が増えていることから、将来の発展性を予感させる。特に米国帰りの研究者がその主導権を握りつつあり、日米欧に追いついてくるのも時間の問題であろう。
	技術開発水準	△	→	全体として他からの導入型の技術開発で、企業レベルでの先端的技術開発は顕在化していない。独自の技術開発力はこれからの課題であるが、日米欧からの技術導入で水準は上がってきている。
	産業技術力	△	↗	電子部品の多くが台湾、中国製であることは周知の事で、日米欧の技術をマスターするのはそれほど時間を必要とせず、やがては自立するであろう。
韓国	研究水準	○	↗	基礎的な研究水準はまだ低いが学会でも招待講演が韓国からだいぶ出だしており着実な発展が見取れる。ディスプレイデバイス分野では、大手企業による先導で、世界トップの水準にある。
	技術開発水準	◎	↗	分野により差があるが、豊富な資金力と集中したリソース投入により効果的な技術開発が行われている。今はまだ基礎研究は弱い十分な資本力があれば基礎研究を進展させることも容易であり、今後国際競争力も伸びていくことは間違いない。
	産業技術力	◎	↗	資本力と政府のサポートがあるので、ひとたびやると決めると、その力は安い労働力もあって急速に実用化に向かう傾向がある。

(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]



## 2.2.1.2 中綱目ごとの比較

## (1) CMOS 材料技術

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	○	→	MIRAI プロジェクトやナノエレクトロニクス関連の国家プロジェクトの推進で、大学や研究機関は高い研究水準を維持しているが、企業の研究開発予算の大幅な減少により、将来技術の研究アクティビティが大きく低下している。
	技術開発水準	○	↘	日本の装置・材料メーカーのみならず、デバイスメーカーの研究開発も、Albany Nanotech (USA) や IMEC (ベルギー) などの国際的拠点に集約され、国内の空洞化が始まっている。最近目玉となる応用に乏しく、新技術の製品投入に遅れが生じているため、技術開発が後手に回っているのではないかと危惧される。
	産業技術力	○	→	製品化技術に関しては、日本の得意分野であることもあり、比較的高い水準を維持していると思われる。しかし新材料・新技術の導入には企業間で差が生じており、収益性の観点から、将来の生産拠点の維持そのものにも不安が生じている。一方で、装置産業は、高い技術力を維持している。
米国	研究水準	○	→	研究投資や研究アライアンスを続けられる一部企業、およびコンソーシアムでは高い水準を維持している一方、それ以外での産業界のアクティビティは低下傾向にある。その分が大学・国研にアウトソーシングされ、バランスが取られている。多くの大学・国研では良く組織された連携機構により、研究開発に貢献している。
	技術開発水準	○	→	インテルの開発力は強力であり、IBM は開発拠点の位置づけで多くの企業とのアライアンスを進め水準を維持している。特に、IBM が主導する Albany Nanotech は、世界的なナノエレクトロニクスの研究開発拠点として急速に求心力を高めている。これ以外の企業では、プロセス・材料技術から撤退、あるいはアライアンスでの研究開発にシフトする傾向が、引き続き見られる。
	産業技術力	○	→	インテルなど一部企業では、高い水準を確保しているが、プレイヤーが限られてきている。生産技術は、アジアにゆだねる傾向がある。
欧州	研究水準	◎	→	コンソーシアム・研究所を中心に、EU としてのサポートもあって、先端研究のアクティビティが維持されている。又、IMEC、Leti などの機関が研究拠点として研究開発を主導している。
	技術開発水準	○	→	公的機関 (Leti) の開発力を後ろ盾に、SOI 基板などでは世界を席巻するに至っているが、一部のアライアンスパートナーが流出しており、今後欧州内での技術開発力維持は厳しいものが予想される。
	産業技術力	○	→	得意とする製品に特化して、ある程度成功しているように思われるが、分社化なども相次いでおり、収益性の観点から、生産拠点の維持そのものもやや不確定要素がある。
中国	研究水準	△	↗	先端的学会への投稿、論文受諾が増えてきており、確実に力を付けて来ていて、水準も向上している。大学での研究が主体であり、国外からも教員を迎え、活発化している。
	技術開発水準	×	→	企業レベルでの先端的技術開発は、顕在化していない。
	産業技術力	×	→	産業的には、先端的材料や技術を必要とする段階に至っていない。
台湾	研究水準	○	↗	国家的に半導体分野に注力しており、企業は豊富な資金力と人材で研究水準も向上している。全てが最先端とはいえない部分もあるが、大学での研究開発や産学連携も活発であり、質・量ともに充実している。
	技術開発水準	◎	→	企業は限定されるものの、豊富な資金力と人材により高い技術開発水準を維持している。米国企業との繋がりも強く、先端的技術導入にも積極的である。
	産業技術力	○	→	豊富な資金力と人材により高い産業技術力を維持している。
韓国	研究水準	○	→	企業は限定されるが、豊富な資金力と人材で高い水準を保っている。学会発表は意図的に抑制している様子である。大学も力をつけており、学会活動は活発である。
	技術開発水準	◎	→	製品化を意識した研究開発を、豊富な資金力の下で進めており、強力である。集中したリソース投入により、効果的な技術開発が行われ、高い技術開発水準を維持している。
	産業技術力	○	↗	アジア的細やかさとアメリカ流の経営手法と経営者のリーダーシップが合理的に組み合わせられており、高い産業技術力を有している。韓国企業はメモリが主力なので、CMOS 新材料の産業応用は、CMOS ロジックよりもメモリ適用が先行すると予想される。

全体コメント；研究開発・工場投資に莫大なコストがかかるようになり、世界的に見て、プレイヤーとなることができる企業が絞られてきている。日本は世界的に高い水準を維持しているが、全体的に研究開発予算や投資額が低減しているのをこれを補完するために相対的にコンソーシアム・企業間の協業・大学への研究委託などが増加し、重要となっている。また国際半導体技術ロードマップによる技術課題の提示を通じ、国際的に戦略的な連携と競争が行われているので、各極の比較が必ずしも、文字通りの意味を持たない。しかし米国、韓国はそれぞれ得意な分野を持っておりそれでこの世界に切り込んできているので、日本も得意なアイデンティティを明確にして世界と競争する必要がある。今後、いっそう、企業間のアライアンスや国際的な研究開発拠点への集約が明確になる。

- (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]

## (2) スピントロニクス (強相関電子デバイス含む)

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	◎	↗	世界を牽引している。巨大トンネル磁気抵抗効果を実証した。強相関も含めた材料物性物理・技術に強さがある。新しい磁化反転技術やスピン流などの研究も盛んである。半導体スピントロニクスでもリードしており、特にメタル系スピントロニクスは企業との連携も活発である。この分野では、理論・実験の両面にわたる基礎研究の深さがなければ、新しい展開を切り開くことはできなくなっている。
	技術開発水準	◎	↗	ハードディスク基盤技術開発で米国と互角である。Gビット級 MRAM の開発にも注力しており世界をリードしている。特に垂直磁化素子や反強磁性交換結合素子など新しい MRAM 基盤技術の開発が目覚ましい。また、磁気トンネル素子と半導体集積回路を集積した論理回路を実証した。経産省・文科省等のプログラムなどにより企業の技術開発水準は確実に向上している。ベンチャーが少ない日本では、欧米のベンチャーが担っている新しい技術を実地に試す「試行回数」をどこで確保するかが喫緊の課題となっている。
	産業技術力	○	→	磁性関連の装置メーカーが巨大トンネル磁気抵抗作用のスワップ装置を世界販売するなど、技術力は進んでいる。しかし、その下流は技術に対して模様眺めの姿勢が目立つ。主力の 3.5 インチハードディスク、磁気光学デバイスに関しても、他国との競争にさらされている。現代の MRAM は実用化に遅れをとったが、スピン注入型 MRAM 技術は先行している。MRAM に関しては上記にある、産業にするための試行の確保が喫緊の課題。技術の先行性を産業の優位性に結びつける仕組みをタイミング良く立ち上げられるかが死命を制する時期にきている。
米国	研究水準	◎	↗	新デバイス原理提案や基礎研究面での新規性に非常に優れている。材料開発でも理論面が非常に強い。又、スピン注入磁化反転やスピンボールの効果などの新しい理論を提唱し実験で実証している。ストレージ関係の大学のセンターに加え、2006 年には 4 年間にわたり 20 億円の資金を投入して、ポスト CMOS の論理スピンドバイス (強相関含む) を探索、実現する Western Institute of Nanoelectronics が創設された。
	技術開発水準	◎	↗	ハードディスク技術で優れている。MRAM の実用化にも成功した。基礎研究にも目配りしており、大学との共同研究が盛んである。スピントロニクス関連ベンチャーなども含め、上昇中。2008 年には DARPA のスピン注入 MRAM プログラムが立ち上がった。インテル・マイクロン・UCLA、Grandis (MRAM ベンチャー) などが採択されたとされる。
	産業技術力	◎	↗	現在磁場書込型 MRAM を市場に供しているフリースケールの MRAM 部門が EverSpin としてスピニアウトした。ベンチャーキャピタルを集めてフットワーク良く開発を進める体制を整えつつある。実際に大きな市場占有率を持っている。又、新技術を率先して実用デバイスに搭載していく積極性がある。
欧州	研究水準	○	→	基礎研究の水準は極めて高い。超高速のスペクトロスコーピーや基礎材料技術など物理との境界に特に強い。研究者が応用を意識するあまり基礎をおろそかにする風潮に冒されておらず、きちんとした理解を構築し、それに基づく大きな変革を担う可能性が相変わらず高い。フランスが高い研究活動を保っている。全体として個別に強い研究拠点があるが、ドイツは横ばい、イギリスなどは研究開発力が低下している。
	技術開発水準	△	→	目立つ企業が存在しない。域内の大学との連携がうまく言っていないようだ。しかしフランスにはスピントロニクスベンチャーもあり進んだ水準を維持している。
	産業技術力	△	→	主要な企業が無く、デバイスを組み上げていく会社が多くない。
中国	研究水準	×	↗	全般に遅れているものの、日米欧から若手研究者を呼び返し、スタートアップとして 1 億円程度の費用をかけたグループが北京、上海で立ち上がりつつある。日米欧との差を急速に縮めることは間違いない。
	技術開発水準	×	→	上記からこちらに移行するチームが多く出てくるものと予想される。(台湾では、大学・ITRI・TSMC などの関係は極めて密接)
	産業技術力	×	↗	台湾に関しては、集積回路関連の民間会社が多く、上記のように産学官が密接に協力しているため、○と判定する。巨大な市場と豊富な外貨準備高を持つ。

韓国	研究水準	○	→	全般に遅れているが、政府が10年間のプログラムを推進するなど急速に水準を上げている。特に磁気ダイナミクスのシミュレーション技術などの水準は高い。米科大学に研究資金を供給し人も送り込んでエキスパートを育成するなど、自国で賄えないものは積極的に海外のリソースを利用して
	技術開発水準	○	↗	サムスンなど一部の企業が、資金力を生かし高い技術力を持つ。MRAMについても研究開発を進めており、特に現在のメモリが行き詰まる可能性の高い22 nm世代以降にMRAMが使える技術かを検討中。また、サムソン、ハイニックス、漢陽大学のMRAMに関する国家プロジェクトがアナウンスされた。
	産業技術力	○	↗	一旦方向が決まったときの速さ、資金力で群を抜く。必ずしも技術力が高いわけではないが、総合力として進んでいる。
<p>全体コメント：日米が圧倒的強さを示している。スピン注入磁化反転はMRAMで使われる主流技術として集積回路試作のレベルで開発が進められている。材料技術が重要となる。欧米ではベンチャーが産業化の試行回数を稼ぐ機能を担い、技術の善し悪しや不足部分を早くフィードバックできるが、日本はこのような試行のチャンネルが細い。これを超える仕組みをタイミング良く作らないと技術力の優位性が産業に反映されない。スピン注入MRAMの分野で先行者利益を上げるために残された時間は多くない。米国ではシーゲートやインテルなどが研究資金を供給して自分たちがカバーできない基礎研究や将来の芽となる研究をサポートしている。日本では電気メーカーの体力差もありこのような流れになっていない。日本は特に材料開発力に優れているが、地道な材料研究を支える大学研究の厚みが減って行っている点が懸念される。欧州には極めて優秀な研究グループがいくつかあるが、全体としての力強さに欠ける。欧州には主要な企業が無いことも弱点である。韓国、中国の研究開発力、特に半導体の大メーカーを有する韓国・台湾の台頭は不可避であろう。</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]

## (3) 固体素子メモリ

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	○	→	DRAM や NAND フラッシュに代表される高集積メモリの微細化はほぼ限界に達しており、構造的な工夫は難しくなっている。そこで、研究レベルでは新材料を用いたメモリへの期待が高まっており、相変化メモリや MRAM の研究が活発化している。また、イオンプラグメモリ、金属ナノコンタクトメモリなど、ナノ構造を利用した研究なども、大学、独法、企業の共同研究という形で推進されている。
	技術開発水準	○	→	DRAM の微細化に向けた開発は韓国メーカー、欧州メーカーの後追いという状況にある。ただし、国内唯一のメーカーは発表を控えているため、実態を把握するのは難しい。一部の企業で、キャパシタレスメモリなど、新しい DRAM メモリへの取り組みは行われているが、実用化が見えない。フラッシュメモリでは、さらなる大容量化を目指して電荷蓄積膜を積層するメモリの検討が行われており、高い水準にある。
	産業技術力	○	→	産業技術力は高く、DRAM、フラッシュメモリともに W/W でのシェアは上がっているが、現状(2008年11月)のメモリビジネスはかつてないほど厳しい状況にあり、技術力がビジネスに反映されていない。不揮発メモリを混載したマイコンは強みであるが、これも、価格の低下、シェア競争の激化にさらされており、厳しい状況にある。
米国	研究水準	○	→	ナノエレクトロニクス研究が大学を中心に活発に行われており、ナノ構造や現象を利用したメモリの提案は盛んである。しかし、実態はまだ不明である。また、最近、HP がメモリスタと呼ぶ、新しいメモリを発表しており、新メモリへの挑戦という観点からも注目される。
	技術開発水準	△	↘	既存のメモリに関しては、学会発表を見ている限りでは、目新しい発表は出てこなくなり、大容量メモリ集積化の技術開発水準は低下傾向である。一方、必ずしも目新しいものではないが、相変化メモリの分野では、サンプル出荷を行っているとのことで、一歩前進である。問題は、相変化メモリがなかなかブレイクしないことである。
	産業技術力	△	↘	DRAM では Micron が唯一の米国メーカーとして一定のシェアを維持しているが、以前のような、6F2 への転換などに見られる積極的な取り組みはない。フラッシュメモリは欧州メーカーとの合併会社に移しており、必ずしも技術力向上に熱心ではない。一方で、相変化メモリのサンプルを出荷するなど、新メモリの開拓には積極性が見られる。
欧州	研究水準	○	→	欧州もナノエレクトロニクス研究に力を入れており、ナノ現象を利用したメモリの研究は、IMEC などを中心に続けられている。
	技術開発水準	○	→	DRAM 分野では、欧州唯一のメーカーである Qimonda 社が埋め込みワード線構造と呼ぶ、新しい構造を発表した。国内メーカーは技術提携でこれを導入する計画があるとのことである。これは、同社がこれまで採用してきたトレンチ型を積層型に変更するほどの大きな決断であり、技術力の高さを示すものだと言える。
	産業技術力	△	↘	DRAM は迷走しており、存続自体が難しい状況にある。フラッシュメモリは、米国のメーカーとの合併会社に移した。マイコンは強み技術の一つであり、混載用の不揮発性メモリの研究は継続しているが、メモリ自体は特徴のあるものではない。
中国	研究水準	△	↗	研究テーマとして取り上げられ始めているが、レベルとしては高くない。しかし、学会への投稿件数、発表数は確実に増えてきている。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発力は、これからの課題であるが、日本、欧州、米からの技術指導で水準は上がってきている。
	産業技術力	○	↗	ファブリーが成長しており、技術力は向上している。将来、生産拠点の役割を果たすことは確実である。
韓国	研究水準	◎	↗	大学、KAIST などを中心に（メーカーとの共同）、新しい材料やメカニズムを用いたメモリの研究を積極的に行っている。ほとんど全ての種類の不揮発性メモリを手がけ、何が主流になっても対応できる体制を整えつつある。
	技術開発水準	◎	→	DRAM の分野で新しい試みを積極的に行ってきたのは韓国メーカーであり、技術開発水準は非常に高い。フラッシュメモリでは、従来から使ってきた浮遊ゲート構造の微細化限界に対処するため、MONOS 型の研究開発を精力的に進めている。しかし、現状では、多値化の難しさからか、実用化は難しいと言われている。
	産業技術力	◎	→	DRAM、フラッシュメモリに関して、高い競争力を持っている。ビジネス的には厳しい状況にあるが、業界をリードしているのは間違いない。

## 全体コメント：

メモリビジネスはかつて経験したことのない厳しさに直面しており、DRAM、フラッシュともに総崩れという危機的な状況にある。基本的には、生産過剰による価格の低下と過当競争という経済的な側面によるものであるが、ここにきて、金融崩壊にともなう景気の急激な減速が更なる足かせとなってきた。このような状況では、新技術への投資は一時停滞せざるを得なくなっている。

一方で、このような不況は何度も経験してきたことであり、これまでは、不況期にも投資を行ってきた企業が、回復期に大きな利益を得てきたという事実がある。しかし、回復を支えてきた要因として、メモリの適用分野が拡大してきたという背景があることは間違いない。例えば、PC中心であったDRAMが携帯電話やデジタル家電に使われ、フラッシュメモリがUSBメモリだけでなく、携帯電話やデジタルカメラに広まったという事実である。しかしながら、これらの製品の成長には飽和感があり、今後、需要が急回復すると考えるのは難しいとの考えもある。そこで、期待されるのが、フラッシュメモリによるHDD (Hard Disc Drive) 置き換えであり、既に、SSD (Solid State Drive) として、100 GB を越えるものも製品化されている。SSDは省エネ製品としても期待されており、データセンターの省エネ化には不可欠な製品である。

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

## (4) 有機エレクトロニクス

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	◎	→	有機 EL に関する研究は、一段落を迎え、有機太陽電池、有機 FET へ研究のターゲットがシフトしている。ただし、有機 EL の基礎物理の解明や劣化機構の解明は重要な研究課題であり、継続的な取り組みが必要である。有機トランジスタに関しては現在世界でも最もアクティブな国の一つ。
	技術開発水準	◎	→	有機 EL およびそれを取り巻く材料技術、パネル化技術、回路技術の大幅な進展が見られる。有機トランジスタ技術の開発にやや陰りが見える一方、有機太陽電池の開発に力が入りつつある。各個別の有機材料開発からデバイス化まで、幅広い研究開発が脈々と行われている。
	産業技術力	◎	↗	ソニーによる有機 EL テレビが製品化された (2007 年)。EL ディスプレイを中心に、生産技術が著しく進歩。小型素子を作製する技術から、大型素子も作製できる技術へと進んできている。特に材料から製膜技術、パッケージ、ドライバーまで、幅広い技術開発が行われている。有機 EL は生産コストが課題であり、コストを考慮した生産技術の開発が必要とされている。
米国	研究水準	◎	↗	ここ数年やや沈静化傾向があったが、最近有機太陽電池の研究により、勢いを取り戻し、レベルの高い研究が数多く出てくるようになってきている。有機 EL に関する研究は一段落している。有機太陽電池、有機 FET に関する研究開発は基礎から応用まで活発に行われている。特に有機太陽電池では、スタンフォード大に研究拠点が形成される。
	技術開発水準	○	→	牽引役を果たしてきた IBM やルーセントテクノロジーなどが、最近研究を縮小してきたことから、全体としても勢いが減少している傾向。しかし EL に関しては、数社のベンチャーで、徹底した材料・デバイス開発が行われている。日本企業とのコラボが多数見られる。
	産業技術力	△	→	ディスプレイ産業が必ずしも強くないことから、産業技術力としては高くない。日本、台湾、韓国への基礎技術の移管後、米国では、有機デバイスの産業化に関する研究開発は、ほとんど行われていないと予想される。ただし、GE の照明技術や、ベンチャーの活躍は目立つようになってきている。
欧州	研究水準	◎	→	欧米では、有機 EL の解析にしても物理的な解析が深く、有機デバイスの学問としての成熟が感じられる。基礎から応用まで研究開発のスペクトルは世界で一番充実しており、懐の深い研究が多い。
	技術開発水準	○	↗	ディスプレイから太陽電池、モバイル情報端末など、有機エレクトロニクス産業の拡大展開を仕掛ける技術開発の動きが目立つ。大学および大学発のベンチャーを中心として、特に、電子ペーパー、有機 EL 照明の実用化を目指した研究開発が活発である。政府からの支援も手厚い。
	産業技術力	○	↗	当該分野の主力産業となっているディスプレイ産業が必ずしも強くないことから、大手企業の参入は多くない。しかしここ数年で、実用化をめざした研究開発は活発に進んでいる。
中国	研究水準	△	↗	年々研究報告数が増加傾向にあるが、あまり顕著な研究成果は出ていない。台湾においては、ディスプレイに関する研究を中心に勢いがついてきており、太陽電池に関する研究も発展傾向にある。
	技術開発水準	○	→	台湾において、高い技術力を示す企業が現れるようになってきているが、全体としてはまだ他からの導入型の技術開発。本国では、有機エレクトロニクスに用いられる資源に強みを有していることから、それにかかる開発は目につく。
	産業技術力	○	→	台湾においては、ディスプレイ産業が極めて盛んであり、EL 技術を中心に産業技術力は年々上昇。しかし、本国においてはまだ技術はほとんど育っていない。日本企業から装置輸入などを積極的に行っている様子。知財の保護が必ずしも十分でないことから、シンガポールなどへの移動も見られる。
韓国	研究水準	◎	↗	産業界に牽引される形で推進してはいるが、学への投資効果が現われてきたせいも、最近斬新な研究成果等も数多く発表されるようになってきており、着実に力をつけている。現在、世界で最もアクティブに取り組んでいる国の一つとなっている。国際誌や国際学会に多数の論文投稿が見られ、大学、企業において幅広い研究開発が進められている。
	技術開発水準	◎	↗	ディスプレイ産業世界一を国策として狙っていることから、EL を中心に、産が学官と一体となって集中的に取り組んでおり着実に進歩している。EL はサムスンを中心に膨大な投資。サムスンから 40 インチの有機 EL ディスプレイが発表され、有機半導体のデバイス化に高い技術力を有している。
	産業技術力	◎	↗	ディスプレイ技術を中心に大変な勢いで開発。サムスンでは、小型の有機 EL ディスプレイの量産が軌道にのり、有機デバイスに対する幅広い技術の集積が見られる。さらに最近、素材、製造産業も自国内調達を目指して、国策として一連の技術を国内技術でまかなえるような技術育成に取り組んでいる。

全体コメント：全体として有機 EL 技術の産業展開に牽引されている傾向にあるが、有機トランジスタ、有機太陽電池に関する研究が、分野の活性化に大きく寄与している。特に、最近是有機太陽電池に関する注目度の増大が、分野の継続的活性化を維持するのに大きく貢献している。分野としては長い歴史を持ち、主として化学系の研究者と基礎物理系の研究者によって取り組まれてきた背景はあるが、近年企業による産業技術としての開発に勢いがついてきたことと、学においてもエレクトロニクス系の研究者が多く参入するようになってきたことで、研究開発が様変わりするとともに、大きく加速されてきている傾向にある。有機 EL の成功を足がかりに、研究面では、次世代有機デバイスの研究開発に研究ステージが移行している。産業化では、有機 EL の産業化への取り組みが加速してきており、ディスプレイ応用のみならず照明への展開が大きく発展してきている。米国、欧州では、有機デバイスに対する様々なファンドが研究者に降り注いでいる。欧州では、特に、国境を越えた研究開発が進んでおり、EU のプロジェクトが多数立ち上がっている。

- (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]

## (5) 量子ドットデバイス

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	◎	→	量子ドットレーザ、量子ドット光増幅器 (SOA)、ナノ共振器による量子ドット発光強度増強、量子ドット成長法の改善、等で世界をリード。また単一光子光源、単電子デバイス、量子ドット太陽電池 等、研究分野も多岐にわたる。
	技術開発水準	◎	↗	量子ドットレーザや量子ドット SOA、通信波長帯単一光子光源では世界をリード。
	産業技術力	◎	↗	量子ドットデバイスのベンチャー QD レーザ社が設立され、製品化に動いている。
米国	研究水準	◎	↗	フロリダ大 (CREOL) で最低しきい値電流密度を実現するなど、量子ドットレーザの基本技術は日欧と同レベルで拮抗。単一光子発生用量子ドット素子では Stanford 大で先駆的研究。量子ドット赤外センサ (DARPA)、と量子ドット太陽電池 (NREL)、量子ドット EL (MIT) の基礎研究で先行。
	技術開発水準	◎	→	大学とベンチャーが共同で開発する体制。
	産業技術力	◎	→	ベンチャー企業の ZiaLaser 社は欧州の Innolume 社 (旧 NL Nanosemiconductor) に吸収された。開発は継続の様様。
欧州	研究水準	◎	→	量子ドットレーザについては、ベルリン工科大 (独)、デンマーク工科大、ウルツブルグ大学 (独)、シェフィールド大 (英)、ケンブリッジ大 (英) など、量子ドット SOA についてもケンブリッジ大、アインドホーヘン工大 (欄) など多くの大学で研究が盛んである。モードロックレーザへの応用研究については日本より活発である。
	技術開発水準	◎	↗	Alcatel - Thales III - V Lab (仏) が CNRS (仏) と一部連携して 1.55 $\mu\text{m}$ 帯量子ドットレーザと量子ドット SOA を積極的に開発している。シェフィールド大では広波長帯域の LED としての検討もなされている。また、EU プロジェクトを通じて Innolume 社の量子ドットウエハを用いたのデバイス研究がなされている。
	産業技術力	◎	↗	量子ドットレーザのベンチャー Innolume (独) は事業拡大に積極的。量子ドットレーザ、量子ドットエピウエハなどを開発・販売。また、各種 EU プロジェクトに参画。
中国	研究水準	△	→	目覚ましい成果は出ていない。台湾の大学でデバイス研究有り。
	技術開発水準	△	→	目覚ましい成果は出ていない。
	産業技術力	×	→	ベンチャー等の産業化の動きはない。
韓国	研究水準	○	→	数年前量子ドット赤外センサの発表があったが最近では減少傾向。
	技術開発水準	△	→	目覚ましい成果は出ていない。
	産業技術力	×	→	ベンチャー等の産業化の動きはない。
<p>全体コメント：量子ドットを利用することで高性能化が期待されているデバイスには、レーザ、半導体光増幅器 (SOA)、単一光子光源、赤外線センサ、単一電子デバイス、太陽電池、熱電発電素子など多くの種類があり活発に研究されている。中でも研究が活発でしかも最も実用化に近いのは量子ドットレーザである。米国や欧州においていち早くベンチャーが設立されていたが、2004年に富士通研と東大のグループが、従来レーザでは不可能であった 20 <math>^{\circ}\text{C}</math> から 70 <math>^{\circ}\text{C}</math> の広い温度範囲で電流-光出力特性が変化せず一定駆動電流で 10 Gbps 直接変調動作する量子ドットレーザの実証に成功したことで、一気に実用化の機運が高まった。2006年には富士通と三井物産によるベンチャー「QDLaser」が設立され、メトロ・アクセス通信向け 1.3 <math>\mu\text{m}</math> 帯光源としての製品化開発が進められている。レーザに次いで実用化が期待されているのが量子ドット SOA である。1.5 <math>\mu\text{m}</math> 帯広帯域・高出力特性の実証や偏波無依存技術 (同富士通研・東大) など日本が先行している。最近、仏の通信メーカー Alcatel が 1.5 <math>\mu\text{m}</math> のレーザと SOA に関する研究発表を積極的に行っており、日本を急追していると推察される。また、発光層にコア・シェル型 II-VI 族量子ドットを用いる EL (エレクトロルミネッセンス) 素子の研究が米国の MIT などを中心に活発化していて、実験室レベルでは赤色で 9000 <math>\text{cd}/\text{m}^2</math> の輝度の報告がある。</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]



## (6) フォトニック結晶

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	◎	↗	京大、横浜国大、NTT、東大などの主要機関が基礎物理やアイデア、作製、応用全てにわたり世界をリードしている。日本発の高Q値ナノ共振器の進展を反映して、量子ナノ構造との融合が進んでいる。さらに、スローライト、ストップライトなど、次世代の光制御に向けた着実な研究が進展している。一方で、産業応用への可能性が極めて近い研究として、大面積で、単一縦横モードで動作可能なフォトニック結晶レーザの進展が著しい。
	技術開発水準	◎	→	基礎研究、応用研究とも世界最高レベル。上記の研究機関を中心とする研究成果が、共同研究を通じて、企業にも広がり、フォトニック結晶の研究に従事している企業は、ローム、住友電気、アルプス電気を始め、各種の企業に広がっている。東北大発ベンチャーのフォトニックラティスの偏光子をベースとした独自の製品が軌道に乗りつつある。それ以外にも小規模な技術開発を行う企業は多いがブラックボックス化しており、産業応用の壁に当たっているようだ。ファンドリリーサービスの拡大で開発環境が変われば、盛り上がる可能性はある。
	産業技術力	◎	→	作製技術が比較的容易なフォトニック結晶ファイバは、世界に先駆けて、ネットワーク (FTTH) に導入されようとしている。フォトニック結晶 LED や偏光子などの光学部品への導入も、世界で数少ない実用レベルの製品を完成しつつある。ただしこれに続く応用が登場するには、5年程度の時間がかかる。
米国	研究水準	○	→	フォトニック結晶に関する基礎物理の研究は Caltech や Stanford 大学、UCSB を始め、全米で研究が進められている。研究の幅、量と深さは、優れたものがある。量子情報応用やセンサ応用が目立つ。
	技術開発水準	◎	↗	フォトニック結晶の研究は、最近では、シリコンフォトニクスと融合して進められることが多い (日本でも)。IBM、インテル、SUN、HP、ラックステラなどの大企業が活発に研究している。また、シリコンフォトニクスのファンドリリーが他の機関の研究も支え始めている。
	産業技術力	○	↗	日本と同様に、LED への応用に限っては、高い産業技術力がある。シリコンフォトニクスまで含めれば、上記の企業が技術力を急激に高めつつある。
欧州	研究水準	○	↗	米国と同様の傾向であるが、ヨーロッパの伝統で、特に基礎研究の進展が著しい。日本で開発された共振器とドットを組み合わせ、新しい量子状態の形成に向けて、優れた研究がなされている (ドイツ、スイスなど)。ベルギーを中心に、シリコンフォトニクスとの融合が盛んに進みつつある。アントワープ大がシリコンフォトニクスという大枠の中で積極的に研究を展開。光集積、各種デバイス、センサ応用、量子情報応用など、アイデアでは日米を追いかける形だが、技術的には同レベル。
	技術開発水準	◎	↗	アントワープ大を中心とした連合組織 IMEC が拡大させているシリコンフォトニクスのファンドリリーサービスは、世界で最も広いレシピを揃え、一般にも開放されており、フォトニック結晶の研究でも多くの利用が見込まれる。日本の同様の環境から見ると脅威になるかもしれない。
	産業技術力	○	→	全般にヨーロッパ独特の基礎重視の姿勢が見られる。フォトニック結晶ファイバの開発で世界をリードしていたが、各国が追いついた。その他、いくつかベンチャーが現れたが、現在は消えている。むしろ IMEC の技術力が産業に及ぶと脅威かもしれない。
中国	研究水準	△	↗	日米欧を追いかける立場だが、研究者人口は急増している模様。米国から帰国したフォトニック結晶研究者が牽引し始めている。論文数の伸びは極めて著しい。
	技術開発水準	○	↗	急増している模様。フォトニック結晶 LED の開発は盛んになっている、もしくは盛んになると予想される。またここでもファンドリリーサービスの利用が始まれば、日米欧との差が縮まる可能性が出てくる。
	産業技術力	-	-	未知数だが、いったん企業の技術開発が本格的に始まれば、一気に進む可能性がある。
韓国	研究水準	○	↘	KAIST やソウル大学で、米国から帰国したフォトニック結晶研究者が活躍し、レーザや LED の分野では世界的な研究を発表してきたが、やや減速気味。
	技術開発水準	○	↘	あまり表には出てきていないが、LED やディスプレイに対するフォトニック結晶の技術開発はある。ただし一時よりも減速気味。
	産業技術力	○	→	実用的な製品が発表された事例はまだない。

全体コメント；当初期待されたフォトニック結晶のもつ可能性が次々と実証され、異分野との融合が加速している。学会などの発表を見ても、極自然に、異分野においても、フォトニック結晶・フォトニックナノ構造が導入され、フォトニック結晶研究者のこれまでの努力が、様々に実ってきた様子が、如実に伺える。ますます、深く、かつ境界領域を巻き込んだ研究へと進展するものと期待される。フォトニック結晶の研究は、基礎物理の研究、5年以上を要する未来の応用研究、3年以内の実用化を目指す応用の技術開発の三種類に分離しており、全体を一言で俯瞰するのは難しい。基礎研究や未来の応用研究には高度な装置が必要なので、最近ではプレイヤーが固定化される傾向があったが、主に海外のいくつかのシリコンフォトニクスファクトリーがサービスを開始したことで、状況が一変しそうである。つまり誰でも手軽に自分が設計したデバイスを入手し、研究を展開できる可能性が出てきた。日本ではこのような体制にはなっていない。またフォトニック結晶を一種のツールとして考え、他分野がそれを利用する傾向が顕著になっており、同分野以外で目にするが多くなってきた。産業応用では、フォトニック結晶ファイバやLEDに加え、最近では、大面積フォトニック結晶レーザの進展が著しく、複数の企業が本格的に事業化に向けた取り組みを進めている。細かい技術の優位性によって産業化の勝敗が決まると思われるが、全般的に日本がリードしている。

- (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]

(7) 近接場光技術・ナノフォトニクス

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	◎	↗	日本は近接場光学・ナノフォトニクスのパイオニア。日本発の概念、技術である物質励起の衣をまとった光子 (dressed photon) の理論モデル開拓、近接場光エネルギー移動と散逸による固有の機能と現象など、先端的基礎研究をリード。アトムフォトニクスなど周辺基礎科学などが開拓されたが、これは欧米のアトムチップ研究に波及した。また、日本の研究水準の高さに注目した先進諸国 (米、独、豪など) が日本の研究者との専門家会議を開催して情報交換の高効率化が行われた。
	技術開発水準	◎	↗	計測用のファイバプローブ技術、光学禁制遷移を用いたナノフォトニックデバイスの発明、非断熱過程による気相堆積やリソグラフィなどの発明、物質表面の研磨、さらには情報セキュリティ応用、X線用デバイス開発、光エネルギー→光エネルギー変換、光エネルギー→電気エネルギー変換など革新技術が多く開発されている。質、量ともに欧米を凌駕。
	産業技術力	◎	↗	分光計測システムは日本が実用化。国際標準化にむけて国際主導している。産学連携の国プロジェクトにより世界初の 1 Tb/inch <sup>2</sup> 高密度大容量情報ストレージシステム、リソグラフィ装置、などの開発に成功。また、ナノフォトニクスによる新規光デバイス開発も産学連携、国プロジェクトにより開始。また、ナノフォトニクスの技術力強化のための人材育成事業も推進されている。
米国	研究水準	○	↗	化学分野で近接場光エネルギー移動の基礎研究が行われている。バイオ計測などが活発化。光マイクロマシン技術との結合を考える動きもある。材料分野において半導体微粒子などの粉を作っているが、その応用についての新規性はない。ナノフォトニクスの定義が必ずしも統一されておらず、実際にはシリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、光マイクロマシンなど、波動光学の枠組みの技術を推進している研究機関がほとんどである。
	技術開発水準	○	↗	高密度大容量情報ストレージのための HAMR プロジェクトが日本と同時期にスタートしたが、顕著な成果は出ないまま終了した。DARPA などで通常のフォトニクスからナノフォトニクスへの移行の必要性を意識し始めたので、今後の日本への追撃が急になると思われる。
	産業技術力	○	↗	計測分野では技術力不足のために撤退。デバイス、加工、システムなどの産業技術力は少ない。
欧州	研究水準	○	↗	光アンテナなど既存の波動光学の理論、FDTD などの既存の数値計算技術のみで、デバイス、加工、システムなどの研究はない。半導体微粒子の分光分析研究が主流だが、日本と違い計測装置の開発が遅れているので、成果水準は高くない。米国と同様に、シリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、光マイクロマシンなど、波動光学の枠組みの技術を推進している研究機関がほとんどである。
	技術開発水準	○	→	基礎研究開始時期は日本と同程度に速かったが、計測システムへの応用、バイオ計測応用に留まり、デバイス、加工、システムなどの技術開発水準は低い。しかし現在の光通信技術と 30 年後をめざした量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のためにナノフォトニクスを中心にそえた技術ロードマップが策定された (MONA Nano - photonics roadmap)
	産業技術力	△	→	国際的に目立った産業技術力なし。
中国	研究水準	△	↗	研究水準は低いが、急速に研究人口が増えている。また、国際会議などを中国に誘致開催する動きが活発。
	技術開発水準	△	→	現状では技術開発水準低い。
	産業技術力	△	→	国際的に目立った産業技術力なし。
韓国	研究水準	×	→	国際的に目立った研究成果なし。
	技術開発水準	×	→	現状では技術開発水準は低い。韓国人研究者が分光分析装置の国際標準化 (ISO) の準備活動の代表をつとめることになったが、韓国では技術開発水準が低いので技術的実務は日本が担っている。
	産業技術力	×	→	国際的に目立った産業技術力ないが、大容量情報ストレージ技術に関して、一時期サムスンが日本の技術を模倣していた時期があった。

全体コメント：ナノフォトニクスは近接場光のエネルギー移動と散逸を使う技術である。日本は近接場光学研究における世界のパイオニアの拠点の一つ。ナノフォトニクスはその先導基礎研究をもとに日本から生まれた革新技術であり、概念、原理とも日本発。ナノフォトニクスは光全般に関する基盤技術であり、デバイス、加工、システム、エネルギー応用などを広くカバー。これらの広い基礎から広い分野への応用まで、日本が産学連携、産業化にわたり国際的にリードしている。しかし最近では米国、欧州でも研究開発が活発化してきたので注目する必要があるだろう。国際学会活動なども活発化している。特に EU では現在の光通信技術と 30 年後をめざした量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のためにナノフォトニクスを中心に据えた技術ロードマップが策定された (MONA Nano - photonics roadmap) ので今後の急進が予想される。

(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]

(8) プラズモニクス・メタマテリアル

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	○	→	プラズモニクスは近年急速にその研究者／研究グループの数が増加している。メタマテリアルは、電波領域で山口大、豊田中研、光領域で理研、阪大が世界のトップレベルにあるが、依然として米国や欧州に比較すると出遅れている事には変わりがない。
	技術開発水準	◎	↗	プラズモニクスの日本の技術開発レベルは世界的にみても高いと言って良い。特徴は、グループ間のレベル格差が大きいことと、一部の企業の研究者がその牽引を勤めていることである。メタマテリアルに関する技術水準は欧米に比べて遅れているのが現状。ただ理研など日本独自の技術を持つするグループもある。
	産業技術力	○	↗	いくつかの実用例が出てきた、国内で実用化された表面プラズモンバイオセンサもある。また実用化に向けた動きも活発である。メタマテリアルは、マイクロ波／ミリ波領域での応用が先行しているが、光領域では未だ基礎研究レベルで、実用化には5年以上の期間がかかると見られる。
米国	研究水準	◎	↗	基礎研究はここ数年常にトップレベルである。プラズモニクスという言葉も米国から発信されている。コミュニティの中で常に中心的立場にある。メタマテリアルの研究は研究者人口も多く世界をリードしている。特に MURI (Multiple University Research Initiative) などの国家プロジェクトの影響が大きい。メタマテリアルはプラズモニクスと分野が合体し、発光増強、光学クローキングなど、様々な話題が登場している。欧米で協調した研究が世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	応用も視野に入れて、極めて活発に研究が進められている。大学でも産業化を見据えた研究開発が進行している。メタマテリアルは技術よりアイデア勝負の電波応用と、技術的に難しい光応用に分離気味。
	産業技術力	◎	↗	プラズモンセンサやプラズモン光制御素子の実用化に加え、医療応用についても積極的に研究が進められている。最近、発光素子への応用も検討されており、応用分野が急速に広まっている。メタマテリアルについては、本格的な産業応用の兆候はまだ見られない。
欧州	研究水準	◎	↗	研究レベルは世界的にみてトップレベルである。特にドイツやフランスは活発で、米国と肩を並べるレベルにある。研究人口も多い。EUの Plasmo - nano - devices というネットワークの影響が大きい。
	技術開発水準	○	→	応用を視野に入れた研究は必ずしも多くないが増加傾向にある。ただ米国と比較するとややフットワークが重い。
	産業技術力	○	→	プラズモンバイオセンサのシェアトップを誇るスウェーデンのピアコア社を中心に技術力は高いが、その他の分野ではあまり産業応用は考えられていない。新しいサイエンスを取り入れた産業技術の開発に限定すると、やや足踏み気味である。
中国	研究水準	○	↗	論文数の伸びは非常に高く、日本を越えている側面もある。レベルは日本よりやや低い、その水準は急速に日本に追いつきつつある。台湾でも研究人口は多く、レベルも比較的高い。メタマテリアルは、基礎物理の理論か、電波応用に限定されている。
	技術開発水準	△	→	大学を中心に応用に向けた研究がいくつかのグループで報告されている。技術開発の中心は大学で、企業の存在は見えない。
	産業技術力	△	→	産業化の動きはあまり高くない。
韓国	研究水準	○	↗	シミュレーションを中心にいくつかの大学に良い仕事がでてくるようになった。研究者や研究グループの数は日本と同様に急速に増加している。レベル的には日本の方が上であるが、大きく離れているわけではない。
	技術開発水準	△	→	関心の高さは感じられるが、アウトプットはあまり現れない。
	産業技術力	△	→	表向きには企業化の動きはあまりみられない。技術開発は進められているようだが、未だそのレベルは低い。ただ企業のフットワークは日本と比較すると軽く、集中的に投資して一挙に活発化する可能もある。

全体コメント：一部のバイオセンサーを除けば、この分野はまだ市場性はそれほど高くなく、基礎研究が中心に行われているのが現状で、大学、研究機関では研究が盛んである。近年、関心を示す企業は増えたが、将来的には有用なテクノロジーとなる可能性があると感じているのか、研究会などでも企業の関心は高いが、実際に本格的に研究をしているところは少なく、様子を見ていたところである。NEC など基礎研究のレベルが高い企業もあるが少数である、日本の大学や国研だけでなく企業のグループ等からのユニークな応用の提案も多いが、全体として若手の研究者が中心で個別に研究を進めている感がある。米国、欧州の基礎研究のレベルが高いのは、比較的大きなグループへの研究費の投資がうまくいっているからと考えられる。日本の課題は、基礎研究のレベルの引き上げと、高いレベルにある応用研究の成果の効率的な活用である。そのためには、有効な応用先をいち早く見出すことであろう。メタマテリアルは日本では研究者人口は増加せずに限定されている。応用面では、電波周波数における研究が先行している。光の周波数では加工技術における技術的な問題と、金属の吸収ロスの問題の解決が急務である。

(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]

## (9) ディスプレイデバイス

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	○	↘	1990年代は世界トップの位置に在ったが最近は関連企業や大学の減少で低下の方向にあり、国際競争力の低下が懸念される。大学・企業の研究開発力向上が急務となっている。大学での研究は企業に比べて活発とは言えず、独創性、実用性の両面で、学会でのプレゼンスが低下している。
	技術開発水準	◎	→	1970年代から世界のトップの位置を維持してきたが、最近、韓国・台湾の追い上げが急である。LCDではシャープ、日立、東芝、ソニーなど、PDPではパナソニックが、技術開発をリードしている。有機ELでは2007年末にソニーが世界初となる有機ELテレビを発売した。
	産業技術力	◎	↘	ディスプレイ産業の基盤である部材と製造装置については引き続き優位性を保っているが、中心となるディスプレイデバイスに関しては、競争力は低下してきている。韓国、台湾の猛追により、パネル生産技術の優位性は相対的に低下している。
米国	研究水準	○	→	基礎的分野に限られるが、いくつかの大学で独創性とインパクトのある成果が出ている。
	技術開発水準	○	→	事業の海外シフトのため米国内の総合的な技術開発力は弱体化している。要素技術では有機EL用の材料開発でKodak、Dupont、UDCなどが強みを発揮している。
	産業技術力	△	↘	パネル製造が行われていないが、台湾のパネルを用いて低価格の液晶テレビを販売し、米国で高シェアを獲得したVisioのようなファブレスメーカーも出ている。部材では唯一、3Mが液晶テレビ用の輝度向上フィルムで高いプレゼンスを有している。
欧州	研究水準	○	→	ドイツと英国を中心に、基礎研究では高い水準を維持している。米国と同様に弱体化の方向にあるが、有機エレクトロニクスをキーワードに公的補助を受け復活の動きが見られる。日米欧の中では大学や公的研究機関での研究比率が最も高い。
	技術開発水準	○	→	パネル製造が行われていないために、開発課題が不明確で、研究者も減少。要素技術では、高分子有機ELデバイスの開発にCDT(英)、Novaled(独)が注力。
	産業技術力	△	↘	テレビ事業ではPhilipsが唯一大きな市場シェアを有しているが、全体的には産業の裾野は狭くない。
中国	研究水準	△	↗	国の基幹産業にすべく、国を挙げて大学や企業を支援しているが、学会発表できるレベルの成果はまだ少ない。
	技術開発水準	△	↗	未だ先進的な技術を用いた事業が成されていないため韓国・台湾と比べても一段低い水準にあるが今後は上昇するであろう。台湾に学びながら企業を育成しているが、まだ有力企業は育っていない。
	産業技術力	○	↗	国の重要戦略としても取り上げられており、現行の海外企業との合併事業を手掛りにして今後は急速に力をつけ、国際競争力を付けて行くと考えられる。
韓国	研究水準	◎	↗	大手企業が大学や公的研究機関を先導し、質・量ともに世界トップの研究水準である。有力企業によるリソース確保はダイナミックであり、ますます力をつけていく方向にある。
	技術開発水準	◎	↗	日本の技術(部材・設備技術をも含)・人材の活用、米国のベンチャー企業・人材の活用により急速に技術開発水準を上げてきており、いまや世界最高水準にある。本質的な課題に取り組む姿勢があり、実用的でインパクトのある成果が出ている。SIDの発表件数でも、サムスングループとLGグループが他企業を大きく離して1、2位を占めている。
	産業技術力	◎	↗	現状は、実質はサムソン、LGの2社並びにその系列会社が主体であるが、最近、国策として両社を含む業界連合の動きで更なる強化を図る動きに出ている。部材や製造装置も国産化して、産業の裾野を広げようとしている。
台湾	研究水準	○	↗	未だ先導的な研究開発は成されていないが、政府機関の工業技術研究院(ITRI)主体の戦略対応で同院及び大学を中心に強化の方向にある。大学のディスプレイに関する研究の発表件数は、韓国に次いで世界第2位となった。パネル製造産業の存在が、研究水準を引き上げている。
	技術開発水準	○	↗	政府主体の戦略(2星戦略)指導で台湾内の各企業は急速に開発水準を上げてきている。技術はITRIが指導。AU Optronics等のパネル製造メーカーの存在感が増している。
	産業技術力	◎	↗	パネル製造技術は世界トップ水準。部材の事業も取り込み、垂直統合を図っている。大型LCDでは日本・韓国と並び強い国際競争力を有するレベルに成長した。LCDは国の重要戦略としても取り上げられており、強化方向にはあるが、今後、中国本土へのシフトも考えられる事から産業技術力の維持が課題である。

全体コメント：ディスプレイデバイスの産業も一般のモノづくり業界の潮流と同様に、欧米から日本、そして韓国・台湾・中国など新興国へ移行する方向にある。特に韓国は、研究水準、技術開発水準、産業技術力のいずれにおいても日本と同等あるいはそれ以上の力をつけるに至っており、ディスプレイ技術においては世界No.1の地位を韓国に奪われたと言ってもよい。このような状況にあっては、革新的な技術を創出しそれによる格段の生産性向上や付加価値向上が必須であり、そのためには創造性豊かな人材の育成・情報流通や研究資金の確保を含む研究環境の整備などを戦略的に集中強化していく必要がある。日本は、幸いにも今はまだ部材や設備などディスプレイ産業に関する関連インフラの競争力は世界最高位の位置にある。韓国、台湾を始めとする元気なアジア諸国に比べ、欧米ではFPDの製造がほとんど行われておらず、産業技術力では引き続き劣勢の位置にある。しかし基礎研究においては、量的には少ないものの、独創的でインパクトのある成果を上げており、技術開発においても、分野は限定されるが、材料等の要素技術分野でトップレベルの水準を保持している。



## (10) 固体照明

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	◎	→	窒化物化合物半導体の研究水準は非常に高い。しかし固体照明・ディスプレイに特化した研究を推進している拠点となる大学・国立研究機関はほとんどなく、研究体制が偏っている。今後、この分野の研究の発展には、大学におけるLED照明の研究プログラムの構築、および人材育成が不可欠であろう。熱設計プロセス・実装プロセスの研究は皆無に近い。
	技術開発水準	○	→	LEDと照明メーカーは世界一多いにもかかわらず、技術がブラックボックス化していることと、知的財産の取り扱いに問題があり、企業に総合力がつかない。
	産業技術力	◎	↗	経済産業省、環境省が省エネに積極的に取り組んでおり、企業の協力体制も徐々にできあがってきている。2010年以降、大手照明メーカーは電球の製造中止を発表した。標準化においてイニシアティブをとるための施策が必要。
米国	研究水準	○	↗	拠点大学として、UCSB（カリフォルニア大学サンタバーバラ校）、GIT（ジョージア工科大学）を中心に、力のある大学の研究成果が十分に生かされているように見えるが、産業界のレベルが高すぎるので、学会（SPIE、MRS、米国照明学会）が強力に支援をする必要がある。2005年に発足したDOEのEnergy star、Caliperプログラムが、機能し始めた。大学や国立研究所の寄与が2006年から活発化してきた。
	技術開発水準	◎	↗	Philips・Lumileds（米）の技術開発力が格段に強く、将来固体照明の分野では、世界制覇を狙っている。webを通し、目に見える努力をしている。
	産業技術力	◎	↗	企業のビジネスモデルが明確である。国として、DOEが積極的に支援している。最近、ANSI、IESNA、NIST等が全面的な支援を行って、新しい標準化プログラムの構築と民間での取り組みを促進している。SPIE、MRS学会での発表が活発になっている。
欧州	研究水準	○	→	化合物半導体の光物性の評価に対して、基礎研究に才長ける大学が数多くあるが、固体照明デバイスを作製するに至っていない。多くの研究者は固体照明分野に興味を抱いているが、政府の支援・研究資金などが十分ではない。最近、UK、フランスを中心に、学術研究への取組みに積極的で、光源の物理と工学に関する国際学会が主導権を握っている。
	技術開発水準	○	→	Osram、Philips 以外は、大中小のエレクトロニクス企業がほとんど固体照明に関する研究開発に手をつけていない。ただし、蛍光体材料の研究に関しては、大学と連携をしながら新しい材料開発に着手している。Osramの1mm2薄膜チップ技術は最近、ドイツ首相賞を獲得した。
	産業技術力	◎	↗	PhilipsがLumiledsと連携し、Color kinetics等を買収し、世界的に産業技術力は最高水準にある。IECに重要なポストをもって、標準化に強い。
中国	研究水準	○	→	政府の支援で北京大学、清華大学を中心に、結晶成長、LEDプロセス、照明応用、という一貫したプログラムのもとで、研究が進んでいると同時に、ベンチャー企業と人材育成がなされている。多くの大学、国立研究機関が参加し、将来非常に期待される研究分野である。
	技術開発水準	○	↗	未知であるが、政府の十分な支援により企業と大学の連携がうまく進むような仕組みを作ると世界トップレベルの成果が生まれる可能性がある。5都市（北京、上海、廈門、深圳等）が特区になっており、アライアンスセンターを形成。台湾等の企業が入ってきている。
	産業技術力	○	→	同上。
韓国	研究水準	○	→	多数の大学の研究室で窒化物半導体の研究が盛ん。産学連携も活発。ほぼ完全に日本の研究システムをキャッチアップしながら進めている。現在、世界の研究拠点大学院を目指そうとしている。
	技術開発水準	○	↗	サムスングループ、LG電子、を中心にSeoul半導体等中規模クラスの企業が力をつけつつある。KOPTIという政府の支援団体が産学連携の中心となって半導体照明（固体照明）の研究を積極的に推進している。LG電子が日本へLED照明製品の売り込みをかけている。
	産業技術力	◎	↗	政府の支援があり、半導体照明国家プロジェクトが推進されている。政府は、2013年までに多額の資金を投入し、バイオ、グリーンカー、ヘルスケア等を含む重点研究テーマを支援する方針。その1つにLED照明を取り上げている。日本の現状をキャッチアップし、常に高い目標値を設定したロードマップを作成している。国内に、SSLの組織学会が出来た。中・大型LCD BLUの製品化に力を入れている。

台湾	研究水準	◎	↗	主要大学（台湾国立大学、台湾中央大学等）の研究が活発。特に、結晶成長の成果が日本とほぼ同程度である。LEDのプロセス技術は日本の大学のレベルを超えている。大学におけるLED応用が活発になっている。第2回白色LEDと固体照明国際学会が2009年12月台北にて開催予定である。
	技術開発水準	◎	↗	ITRIを中心に、企業の支援体制が充実している。また、産業界における固体照明の業界団体（TEOS）が中心に、EPISTAR、ARIMA等有力LEDメーカーの知財の保護、製品開発支援を行っている。中国への技術提携を政府を中心に行っている。さらに、海外の結晶成長メーカー、LEDメーカーが積極的に台湾企業をバックアップしている。研究の人口密度は世界で一番多い。
	産業技術力	◎	↗	昨年から第二期目の固体照明プロジェクト（Ho-Yiプロジェクト）が発足。ITRIからスピンアウトしたベンチャー企業が中国へ移行していくという仕組みが働き、競争力が上がっている。MOCVDメーカーのアキシトロン社（独）が結晶成長装置を約数百台近く納品し、精力的なバックアップを行っている。企業間連携が進むと同時に、青色LEDチップのコストを決める主導権を握っている。

全体コメント：省エネルギーとCO<sub>2</sub>の排出削減につながるエコ関連の事業が追い風になり、固体照明の技術革新は世界的に加速している。世界の技術・産業競争力が上がる中で、日本がどのようなイニシアティブをとるかが注目される。日本は、世界に先駆けて、電球製造中止をアナウンスした。しかしながら、この10年間で、固体照明の技術がまだ未成熟のまま、非常に早いスピードでLED照明が産業に取り込まれている。アメリカはDOEを中心に学会・産業界のまとまりを強化し、欧州と協力して、LED照明の標準化を行おうとしている。アジア諸国は、これに追従し、製品を生産する拠点作りを行ってくる可能性がある。すでに、日本の市場状況を見ながら、台湾、韓国などの低価格製品が流入してきており、蛍光灯の代替品まで出回っている。一方、日本は、産業界のまとまりが悪く、国際標準化に乗り遅れる可能性がある。

- (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]

## (11) 次世代ナノデバイス (単電子素子、分子素子、超伝導デバイス含む)

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	○	→	単電子素子、分子素子等は一頃多くの大学でやられていたが、しっかりした出口が見えないので、現在では、いくつかの研究機関、大学での基礎研究とその応用可能性の研究が行われているにすぎない。個々は、それなりの水準を維持しているが、基礎および応用において、系統的進展が見えにくい。また、研究者数の減少傾向が見られる。
	技術開発水準	△	→	技術的にも難しい壁がいくつもあり、実用に近いデバイスに持って行くには時間がかかる。量子ビットや単一光子検出器を含め従来から取り組んでいるアナログ応用、デジタル応用ともに引き続き高い水準の技術開発が行われている。
	産業技術力	△	→	量子通信等いくつかの実用化の可能性を示す実験が為されているが、分野は限定的である。産業界は様子眺めである。ベンチャーも含め新規参入の企業はここ数年ない。企業化は欧米が先行している。
米国	研究水準	○	↗	すべてのこれらの発想は米国から来ており一時ブームになったが、現在では数少ない大学や研究所で実施。しかし、内容は先駆的で基礎研究としては高いレベルにある。高温超伝導デバイスのように研究が低調な分野はあるが、水準は高い。産業界 (NRI) の主導で、CMOS の次の技術探索を目指して、大学の研究を組織的に推進させている。
	技術開発水準	○	→	実用化にはまだ克服しなければいけない多くの問題点があり、解決するのに時間がかかると推察される。この分野の予算的サポートはそれほど多くなく研究者人口は以前に比べ減っている。ターゲットを絞った開発が進められており、その分野での水準はきわめて高い。
	産業技術力	△	→	まだ産業化に持っていける力はない。しかし、超伝導デバイスを取り巻く環境は良いとは思えないが、ベンチャーが現れており、技術開発力の高さが産業技術力に繋がっている。
欧州	研究水準	○	→	将来を見越して、ドイツ、スイス、イギリスなどの特定の研究機関が着実に研究を進めている。出てくる成果は質が高く評価できる。
	技術開発水準	○	→	実用化に向けての研究は一部を除いてそれほど盛んでないが、デルフト大の量子コンピュータを初め、将来の可能性に向かって着実に歩んでいる。SQUID を利用したシステムは、すでに確立された技術として様々な分野で応用されているが、SQUID を除き、応用へ向けた研究が以前にも増して低調になった。検出器に関しては、堅調に開発が推移。
	産業技術力	△	→	量子通信が最も実用化に近いと考えられ、研究は盛んである。単一電子素子、分子素子等は実用化とはまだ遠く、産業化は具体的には考えられていない。高温超伝導薄膜、SQUID などが商品化されているが、その他の産業化はあまり活発とは言えない。
中国	研究水準	△	↗	SPR をはじめとして先端機器への投資が堅実に行われており、幾つかの研究機関で分子素子に関する研究が展開されている。また、豊富な資源を背景に酸化物超伝導材料の研究は盛んである。しかしながら、デバイスなどへの展開は低調である。
	技術開発水準	×	→	デバイス研究が低調であるため、技術開発水準も高いとは言えない。
	産業技術力	×	→	ほとんどやられていない。
韓国	研究水準	△	→	単電子デバイスの研究は限られたところで行われているが大きなターゲットにはなっておらず、研究水準も低い。生体磁気計測などのバイオ関連分野で研究が活性化している。そのほかの研究は数年前から低調。
	技術開発水準	×	↗	応用の観点からは、ほとんど考えられていないが、SQUID の医療応用などに進歩がみられる。
	産業技術力	×	→	産業化の考えはほとんど現時点では考えられていない。

全体コメント：本網目の研究開発は、一時多くの研究者が参加し、基礎研究として興味深いものではあるが、産業への出口論が表に出だした頃から急速にその研究者人口は減り、基礎の部分に興味を持っている人が現在も持続的に研究しているのが実情である。その中でもディテクタ等では将来につながる開発もなされ始めているがまだ大きな流れとはなっていない。単電子素子を使った量子コンピュータ等も着実に研究が進んでいるが、長い展望で見る必要がある。研究分野の特化はされているが、総合的に見ると米国が研究から産業化まで高い水準を維持している。Hypres 社の Nb ジョセフソン接合のファンダリーサービスは、ジョセフソン接合を使わないフィルタなどの分野においても利用されており、米国の超伝導研究を支える機能を果たしている。日本は高温超伝導デバイスやデジタル分野、SQUID 分野で世界水準にあるが、産業技術力は米国に先行されている。欧州は研究開発が低調になりつつあるが、SQUID 応用については世界のトップにある。日本以外のアジア各国は SQUID を除き遅れが目立つ。

(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]

## 2.2.2 バイオ・医療分野

### 2.2.2.1 概観

ナノテクノロジー・材料技術の主要な応用先の一つとして、バイオ・医療分野がある。本分野では、最近顕著な進展が見られている「体内送達システム(DDS)」、「分子イメージング(生体プローブ含む)」、「再生医療用材料(細胞シート含む)」、「生体適合材料」、「医療用チップ( $\mu$ TAS、DNAチップ、蛋白チップ等)」についてそれぞれ国際比較を行った。

分野全体としては、研究水準、技術開発水準、産業技術力ともに米国が依然として優位を占める。日本は研究水準は高いものの、産業技術力は欧米の後塵を拝している状況にある。当該分野は、既存の大企業では進出しにくい一面があり、小回りの効くベンチャー企業の活躍が各分野とも必須であるが、ベンチャー育成のためのインフラ整備が欧米に比して日本は遅れている傾向にある。欧米はEU諸国が中心だが、一分野に限っていけば世界水準の研究が数多くあると思われる。日本はDDS用材料、再生医療用材料分野の基礎研究で一步先んじているものの、他の分野では圧倒的優位を誇るものが無い。中国、韓国は、米国等での留学経験者が帰国し、研究開発の主力を演じている。まだレベルは高くないものの、今後は注目に値する。特に中国は、許認可に関わる法的制約が日米欧に比して少ないと考えられ、今後急激に発展する可能性を秘めている。各項目の具体的な内容を以下に略記する。

DDS：材料開発が非常に重要であり、この点において日本は世界をリードしている。一方、医薬品開発に関しては、欧米が世界をリードしており、日本ではベンチャー企業の育成が今後の課題である。また、siRNAなどの核酸医薬の実用化のためにはDDS開発が必要不可欠であり、世界中で活発に研究が行われている。

分子イメージング：日米欧が拮抗しながら、熾烈な国際競争を行っている。日本は、顕微鏡・カメラなどのハードウェアについては、高い国際競争力を有している。しかし、独創性のあるイメージング機器は欧米の後塵を拝することが多い。イメージング試薬においても一部高い競争力を有しているが、量子ドットなどの半導体イメージング材料の分野では米国が先行している。

再生医療用材料：精密な材料加工技術やDDS技術が不可欠となる。この種の技術は、世界的に見ても、日本が最も得意であり、学術レベルも高く、かつ企業技術的にも最も進んでいる。しかしながら、日本の医療機器の許認可は世界的に極めて厳しい。また、日本は特許戦略が欧米に比べ遅れている。そのため、せっかくの科学技術が企業化にうまく生かされていないのが現状である。

生体適合材料：日本は独自の材料を数多く開発しており、研究の分野ではトップレベルにあると考えられる。その一方で、基礎研究を実際の産業に結びつける点に問題がある。米国、欧州は研究レベルでは日本にやや劣るが、産業への展開が優れている。中国、韓国はまだ独創的な研究は少なく、上記三国でなされた仕事の延長や焼き直しが多い。ただし、論文数は急速に増えており、また、国家を挙げて産業化を支援するような仕組みも整えつつある。

医療用チップ：日本・欧米とも技術開発力は高く、製品化を推進するポテンシャル

ルは十分あると考えられる。日本における課題は、本分野の技術的特長を生かし、新しい市場を社会的要請に沿った形でいかにして創出するかであると考えられる。しかし、ここ2年くらい国内研究助成も奮わず、失速傾向にある。

## バイオ・医療分野のまとめ

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	◎	↗	再生医療材料分野では世界トップクラス。DDS や $\mu$ -TAS でも高水準を保っている。分子イメージングの分野でもオリジナリティーの高い研究が進んでいる。医療用チップに対する公的投資が、近年減少傾向にある。
	技術開発水準	○	↗	再生医療用材料加工技術は、世界最高水準にある。顕微鏡、高感度カメラ開発でも高水準。DNA チップ関連の米国基本特許が切れたので独自技術開発も活発化。ハード面では強いがコンテンツ面で弱みがある。
	産業技術力	○	→	再生医療に関しては、許認可問題が産業化を妨げる障壁となっている。分析機器、電気機械メーカーと製薬診断薬メーカーとの情報交換不活発。ベンチャー育成が今後の課題。
米国	研究水準	◎	↗	材料開発に比して、細胞生物学的研究が世界をリードしている。大学・公的研究機関のポテンシャルは非常に高い。特に、遺伝子、RNA 関連医療研究は独壇場。DNA チップ研究は、依然、世界をリード。分子イメージングについても独創的な試薬開発は進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	DNA チップに関しては、依然として世界トップ。DDS、イメージング関連のベンチャーも多数。RNA の送達システムに関して世界をリード。
	産業技術力	◎	→	DNA チップビジネスでは米国の独壇場。分子イメージング用の高感度カメラの開発力も高い。再生医療用材料関係でも特許戦略が秀逸。企業買収等による効率化も進む。基礎研究を産業化するパイプラインが存在する。
欧州	研究水準	◎	↗	1990年代 $\mu$ -TAS 分野でトップだったが最近若干トーンダウン。再生医療用材料分野では、EU 諸国で研究さかん。合成化学出身の DDS 研究者が増加。レベルは高い。分子イメージングについては、伝統的に光学顕微鏡関連が強い。
	技術開発水準	◎	↗	スウェーデンのピロシークエンス技術等、高度な独自技術が育っている。ベンチャーも活発にシーズを吸い上げている。企業レベルでは、米国との連携が目立つ。
	産業技術力	◎	→	DDS 関連の技術力は大企業をバックとして高い。顕微鏡、レンズの開発力は世界最高水準。許認可システムが透明性高いのも有利に働く。産業化促進制度が充実している。
中国	研究水準	△	↗	米国留学帰国研究者が研究分野をリード。独創性は高くない。
	技術開発水準	△	↗	臨床研究等に法的拘束が少ないので、今後、DDS や再生医療用材料は大きく進展する可能性大。
	産業技術力	△	→	バイオ分野の産業技術は依然として発展途上。独自性の高い分野が少なく、資本の有効投資も希少。
韓国	研究水準	△	↗	欧米の後追い研究が多く、技術レベルは高くない。欧米との共同研究を積極的に進めている。DDS 研究等では質的な向上もみられる。
	技術開発水準	△	↗	企業の研究開発水準は向上。基盤はしっかりしていない。医療用チップ開発分野は日本との共同開発が多い。
	産業技術力	×	→	有力な製薬企業が無いため産業競争力は低い。再生医療用材料分野では、政府主導でのベンチャーが成長し、欧米での展開を模索している。

(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]

## 2.2.2.2 中綱目ごとの比較

## (1) 体内送達システム (DDS: ドラッグデリバリーシステム)

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	◎	↗	日本の大学・公的機関における研究レベルは欧米に劣らず非常に高い。固形ガンに対するターゲティング型 DDS の基本原理でもある EPR (Enhanced permeation and retention) 効果は、日本の研究者によって発見されている。DDS の開発において材料は極めて重要であり、この点において日本は高い優位性を有している。
	技術開発水準	○	→	総合科学技術会議で「ナノ DDS」を府省連携プロジェクトとして位置づけ、各省によるナノ DDS のプロジェクトが設立されている。これによって、技術開発水準は上昇している。これらのプロジェクトでは、核酸医薬やイメージングのための DDS、物理エネルギーを利用した DDS など将来を見据えた研究開発も進行している。
	産業技術力	○	→	医薬品としては、リユープリンやスマクスなどの国内発の DDS 製剤が早くから上市している。しかし、近年上市した DDS 製剤のほとんどは国外企業で開発されたものである。最近、DDS 製剤の薬価に対する考え方も変わりつつあり、DDS 開発の追い風となっている。日本では、ベンチャー企業の育成が今後の課題であると言える。
米国	研究水準	◎	→	米国の大学・公的機関における研究レベルは非常に高く、世界をリードしている。NCI によるナノテックアライアンスが設立され、標的発見研究の手法開発、分子イメージング・早期発見、予防とコントロール、 <i>in vivo</i> イメージング、多機能治療薬、効果判定指標の 6 分野を分野横断的に発展させることを目標としている。研究水準は高いが材料開発の面ではそれほど水準は高くない。
	技術開発水準	◎	↗	ナノ粒子の DDS として Doxil および Abraxane が FDA の承認を受けている。また、Mylotarg (抗 CD33 抗体 + calicheamycin) が急性骨髄性白血病に対して FDA の承認を受けており、アクティブターゲティング型 DDS 製剤として既に上市済みである。多くの DDS 医薬品が上市しているのは米国の高い技術開発水準によるものである。
	産業技術力	◎	→	近年、siRNA などの新規治療薬の DDS 製剤の開発を目指したベンチャー企業などが多く設立されており、Johnson & Johnson 社が Alza 社を買収したようにメガファーマがベンチャー企業を丸ごと買収するなどによって、豊富な資金力による短期間での生産技術力の伸展にはめざましいものがある。
欧州	研究水準	◎	↗	欧州の大学・公的機関における研究レベルは非常に高い。欧州は、高分子-薬剤コンジュゲート、リポソーム、ナノ粒子など、第一世代の DDS の多くを世界に先駆けて開発してきた。近年も、遺伝子デリバリーシステムの研究開発などにおいて、世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	→	欧州科学財団 (ESF) が、2005 年に「ナノメディシンの科学的将来展望」との方針発表を行い、欧州が首尾一貫したアプローチによってナノ DDS の研究開発を進めることによって、米国や日本に対する競争力を強化している。
	産業技術力	◎	→	医薬品としては、PEG 化タンパク質医薬品や加齢黄斑変性に対するリポソーム製剤 (Visudyne) など DDS 製剤が次々に実用化されている。欧州の製薬企業は、メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有しており、また、新薬の治験体制も整っていることから、今後も高い水準を維持するものと考えられる。
中国	研究水準	△	↗	中国では、中国科学院と中国教育省との共同出資で、The National Center for Nanoscience and Technology (NCNST) を北京大学と清華大学の構内に 2003 年に設立し、ナノテクノロジーおよびナノバイオテクノロジー研究を推進している。特に、NCNST では、ナノマテリアル、ナノデバイス、ナノバイオロジーに重点を置き、中でもナノ DDS は高い関心を集めている。DDS に対する論文数や特許は、指数関数的に増加している。
	技術開発水準	△	↗	科学技術人材の呼び戻し政策の継続的实施により、優秀な留学生が多数帰国しているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め研究水準および技術開発水準が急速に上昇している。
	産業技術力	△	↗	医薬品開発においては、臨床研究などの法的拘束が少なく、今後 DDS の臨床治験が進む可能性が高い。また、中国ではバイオベンチャーが数多く設立されており、DDS 関連においても今後ベンチャー企業が増えていくものと思われる。

韓国	研究水準	○	↗	韓国の研究水準は、欧米や日本のそれには及ばないが、日本と同様に材料開発において高い技術力を有しており、 <i>Journal of the American Chemical Society</i> などの国際的一流化学誌に数多くの論文が掲載されているように、質的にも数的にも年々上昇傾向にある。
	技術開発水準	△	↗	ナノバイオに関しては、国家レベルでのインフラ整備が進められており、Seoul National University や Yonsei University などの重点的な投資により、臨床まで見据えたナノ DDS の研究プロジェクトが進められており、技術開発水準も上昇している。
	産業技術力	△	↗	医薬品としては、有力な製薬企業は存在しないが、サムヤン ジェネックス社は、高分子ナノ粒子を利用した制ガン剤や siRNA の DDS 製剤の研究および臨床治験を進めており、産業技術力は着実に上昇していると言える。また、ベンチャー企業の動きも要注目である。
<p>全体コメント：DDS 分野への関心は世界的に大きく、特にターゲティング製剤や PEG 化タンパク医薬に関しては多くの製剤の上市が見込まれる。また、DDS 研究では、材料開発が非常に重要であり、この点において日本は世界をリードしている。一方、医薬品開発に関しては、欧米が世界をリードしており、日本ではベンチャー企業の育成が今後の課題である。また、siRNA などの核酸医薬の実用化のためには DDS 開発が必要不可欠であり、世界中で活発に研究が行われている。</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]

## (2) 分子イメージング (生体プローブ含む)

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	◎	↗	多くの大学・国研において、試薬開発等は活発に行われている。電子顕微鏡の開発は世界トップレベルと思われる。光学顕微鏡の開発のレベルも高い。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。
	技術開発水準	○	↗	新規顕微鏡開発、高感度カメラ開発において世界の最先端を行く企業が多い。新規モダリティの顕微鏡開発ではドイツに遅れをとることが多い。高性能カメラ、試薬等の開発でも、欧米の後塵を拝することが多い。
	産業技術力	◎	↗	企業における顕微鏡、の新規製品開発能力はドイツと双壁であろう。
米国	研究水準	◎	↗	顕微鏡の新規技術およびイメージング試薬の開発が多くの主要大学および NIH において進んでいる。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。
	技術開発水準	◎	↗	多くの企業で世界最高性能の高感度カメラ開発と顕微鏡開発が行われている。
	産業技術力	○	→	高感度カメラの製造技術は高い。
欧州	研究水準	◎	↗	顕微鏡・イメージング試薬開発が活発に行われている。とくに光学顕微鏡の開発においては、目を見張るものがある。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。特に、独創性のある発明が多く見られる。
	技術開発水準	◎	↗	世界最高性能の顕微鏡を研究開発する企業がある。
	産業技術力	◎	↗	顕微鏡およびレンズの製造技術は世界最高である。
中国	研究水準	△	→	大学において、イメージングの基礎研究が開始されている。とくに、米国から帰国した多くの研究者が活発に研究を開発している。
	技術開発水準	×	→	ベンチャーで研究開発が開始されつつある。
	産業技術力	×	→	産業技術はまだ確立されていない。
韓国	研究水準	△	→	大学において、イメージングの基礎研究が開始されている。米国より優秀な研究者が帰国して研究を開始している。とくに KAIST には、優秀な研究者を集めている。
	技術開発水準	△	→	ベンチャーで研究開発が開始されつつある。顕微鏡本体以外のイメージング関連製品について、いくつかのベンチャーがユニークな開発研究を行っている。量子ドットなどの研究も活発である
	産業技術力	△	→	周辺技術の製品化が進みつつある。
<p>全体コメント：本網目においては、日米欧が拮抗しながら、熾烈な国際競争を行っている。日本は、顕微鏡・カメラなどのハードウェアについては、高い国際競争力を有している。しかし、独創性のあるイメージング機器は欧米の後塵を拝することが多い。イメージング試薬においても一部高い競争力を有しているが、量子ドットなどの半導体イメージング材料の分野では米国が先行している。また、ソフトウェア開発においても、欧米が先行している。イメージングの応用において、米国では動物実験による実証が進んでいるが、日本・欧州はこの点で少し遅れている。</p>				

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]



## (3) 再生医療用材料（細胞シート含む）

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	◎	↗	ライバルは主に米国であるが、細胞移植および生体材料を利用した再生医療の2つのアプローチとも、再生医療用材料研究では世界一である。
	技術開発水準	◎	↗	生体内、生体外のいずれにおいても、細胞の足場の創製には、精密な3次元加工、微細加工が必要となり、加えて、細胞増殖因子などに対するDDS材料技術が不可欠となる。これらの企業技術は、日本が世界のリーディング的な存在である。
	産業技術力	△	→	材料の医療への許認可のハードルが高く、メディカル関連企業単独での開発商品化は困難な状況。技術力は有る。ベンチャーの未成熟さ及び審査体制の非効率性とスピードの遅さから、シーズがうまく産業化へと転化されていない。
米国	研究水準	○	↗	再生医療分野に関しては、生体材料よりも細胞移植によるアプローチに重点を置いている感がある。幹細胞研究が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	軍事応用を目的とした応用研究は力を入れ、推進している。ハイリスクハイリターン初期開発をベンチャーが担当する風土が根付いている。最近、生体材料を用いた再生医療にも注目し始め、外国の技術を探し買い始めている。企業研究における研究費が多い。
	産業技術力	◎	↗	特許運営が上手い、加えてグローバルな展開ができる企業が商品化を進めている。生体材料に比べて、細胞関連のベンチャーが多い。医療への許認可審査体制とシーズをベンチャー企業へとつなぐ仕組みが日本よりも整っており、基礎研究を産業化するパイプラインがある。
欧州	研究水準	○	↗	オランダ、ドイツ、ポルトガル、スウェーデンなどを中心にEU全体として、この分野の研究開発に力を入れている。英国は幹細胞や細胞培養技術に関する研究が強い。
	技術開発水準	◎	↗	米国に本社、分社がある企業のレベルは高い。研究におけるシーズを、効率的に技術開発段階へ移行するシステムが確立している。ベンチャーも活発にシーズを吸い上げている。グローバルな展開ができる企業は研究開発費が多く、商品化を進めている。最近、生体材料を用いた再生医療にも注目し始め、外国の技術を探し買い始めている。企業研究における研究費が多い。
	産業技術力	○	↗	国によって許認可の容易さが異なっているが、概して審査体制が透明かつ効率的であり、基礎研究の産業技術への展開が比較的容易である。
中国	研究水準	○	↗	米国留学経験者による研究が主体で、独自性の高いものはない。基礎研究レベルはかなり高くなってきているが、まだ低い。研究資金が一部のグループに集中しており、全体的なレベルは低い。
	技術開発水準	△	→	技術は海外からの導入のものがほとんどであり、独自のシーズが不足している。
	産業技術力	△	→	徐々に力をつけているが、その内容は海外の類似技術が多い。まだ資本の有効な投資がなされていない。審査体制も整ってきてはいるが、より高い透明性が求められる。国内のみの商品化をねらった方法論が多い。
韓国	研究水準	○	↗	生体分解性材料の技術は進んでいる。欧米との共同研究を積極的に進めている。特に米とのつながりを強化している。研究内容の独創性は不足している。
	技術開発水準	○	↗	ここ2-3年を力をつけてきている。歯科分野に重点をおいている。アカデミアと産業界の壁が少なく、協力体制がよくできている。欧米とのつながりの強化に目を向けている。
	産業技術力	○	↗	政府主導でのベンチャー企業が成長し、米国、欧州への展開を始めている。
シンガポール	研究水準	○	↗	独創的なものはないが、欧米との共同研究を積極的に推進、レベルは高い。
	技術開発水準	○	→	自国ではないが海外と提携し、ベンチャー企業の技術力は高い。自国の企業はない。国立シンガポール大学で開発されたベンチャー企業ががんばっている。
	産業技術力	○	↗	ベンチャー企業による欧米や韓国、インドなどへの進出が進んでいる。
インド	研究水準	○	↗	セラミックスを用いた骨領域の研究が進んでいる。欧米との共同研究を推進。国立研究所を充実させ、医工連携、産学連携を推進。
	技術開発水準	△	→	ベンチャー企業と研究所との協力体制がうまく機能している。中国と同じように、国内のみの商品化をねらった方法論が多く、特許を含めてグローバル化は考えていない企業が多い。
	産業技術力	△	→	海外への展開ではなく、国内での商品化を主に考えている。ITはグローバル化しているが、医療分野はまだだ。

タイ	研究水準	○	↗	医療材料分野の研究レベル上昇を国を上げて狙っている。留学経験のある研究者が中心に医工連携の促進をねらっている国立研究機関の研究活動は活発である。
	技術開発水準	△	→	該当する企業がほとんどない。
	産業技術力	△	→	技術力は低い。
インドネシア	研究水準	△	↗	医療材料分野、特に医工連携に興味あり。この分野に力を入れていく方向性で国を上げて進んでいる。
	技術開発水準	△	→	該当する企業がほとんどない。
	産業技術力	×	→	技術力は低い。

全体コメント：再生医療のオリジナル概念は米国で始まり、その実現の方法には、細胞移植と生体材料（生体吸収性足場材料および細胞増殖因子の DDS）を用いた再生誘導治療の 2 つがある。これまで、前者のアプローチが中心的であった。しかしながら、幹細胞の基礎生物医学研究の進歩の一方、細胞の増殖、分化のコントロールが必ずしも完成していないことや、細胞治療に対する許認可ハードルの高いことなどに問題があり、期待に反して臨床応用が進んでいないのが世界的な状況である。許認可の問題に対しては、細胞移植による再生医療を可能とするための法規制と企業のビジネスプランの検討とともに企業の技術力と財力、体力が必要となる。これに対して、生体材料を利用した再生誘導治療は、これまでの医療機器あるいは薬の DDS と同じ、あるいは、それに近い概念・技術である。細胞を用いた再生医療に比べて、企業がビジネス化のイメージを作りやすく、商品化しやすい領域である。にもかかわらずこのアプローチは、前者に比べて大きく遅れているのが現状である。この領域には、精密な材料加工技術や DDS 技術が不可欠となる。この種の技術は、世界的に見ても、日本が最も得意であり、学術レベルも高く、かつ企業技術的にも進んでいる。しかしながら、日本の医療機器の許認可は世界的に極めて厳しい。また、日本は特許戦略が欧米に比べ遅れている。そのため、せっかくの科学技術が企業化にうまく生かされていない現状がある。日本では、基礎研究から生まれた潜在的価値の高いシーズを産業化まで持っていくシステムがうまく働いていない。これには日本の文化的背景と社会基盤整備の不備からくる臨床応用への推進力の不足が考えられる。再生医療の実現のためには、この点を改善できなければ欧州・米国に追いつくことは難しく、中国、韓国にも後塵を拝する可能性が出てくる。

- (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) 生体適合材料

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	◎	↗	新たなコンセプトに基づく生体適合材料が提案されている。特に、高分子材料の分野で、オリジナリティーの高いユニークなものがコンスタントに出てきている。基礎的な検討も先端的な試みが多くある。 チタン合金、ニッケルフリー合金開発、表面処理などの研究では、質量ともに圧倒的優位に立つ。
	技術開発水準	◎	→	シーズとしては優秀なものが数多くあると考えられる。基礎研究から派生する技術水準は高い。
	産業技術力	○	→	オリジナリティーの高いユニークな研究がある一方で、その産業化に関しては、一層の努力が求められる。特にインフラの問題、規制緩和等の制度的な改善が求められる。
米国	研究水準	○	→	ある程度ユニークな素材が出てきているが、生体適合材料に関しては既存のものが多い。既存のコンセプトを組み合わせることで複雑なものを作ることが流行っているが、基礎研究の深みは今ひとつか。再生医療の実用化に偏っている。
	技術開発水準	○	→	技術開発のための研究が多い。
	産業技術力	○	→	産業化を促進する制度は進んでいるものの、組合せ的なものが多いため、ブレイクスルーといえるような製品はなかなか出ていない。
欧州	研究水準	○	→	米国と同様、ある程度ユニークな素材が出てきているが、生体適合材料に関しては既存のものが多い。既存のコンセプトを組み合わせることで複雑なものを作ることが流行っているが、基礎研究の深みは今ひとつか。生分解性マグネシウム合金の研究が多い。
	技術開発水準	○	→	基礎から産業化まで一貫した体制がある。
	産業技術力	○	→	産業化を促進する制度的に進んでいるものの、組合せ的なものが多いため、ブレイクスルーといえるような製品はなかなか出ていない。安定的な成長という印象。
中国	研究水準	△	↗	新たなコンセプトに基づく生体適合材料はほとんど出しておらず、既存の材料の改善や、追試が多い。基礎的研究の深みやオリジナリティーは不足傾向。ただし、研究の裾野は急速に拡大している。
	技術開発水準	×	↗	知的財産権の意識が低く、模倣研究が多い。オリジナリティーは不足傾向。
	産業技術力	△	↗	官民挙げて、産業化に力を入れている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行くようである。その一方で、革新的なシーズが不足している。
韓国	研究水準	△	↗	中国と同様、新たなコンセプトに基づく生体適合材料はほとんど出しておらず、既存の材料の改善や、追試が多い。基礎的研究の深みやオリジナリティーも不足傾向。
	技術開発水準	○	↗	急激な投資により開発力は付いてきている。
	産業技術力	△	↗	官民挙げて、産業化に力を入れている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行くようである。その一方で、革新的なシーズが不足している。
<p>全体コメント： 日本は独自の材料を数多く開発しており、研究の分野ではトップレベルにあると考えられる。その一方で、基礎研究を実際の産業に結びつける点に問題がある。米国、欧州は研究レベルでは日本にやや劣るが、産業への展開は日本より優れている。中国、韓国はまだ独創的な研究は少なく、上記三国でなされた仕事の延長や焼き直しが多い。ただし、論文数は急速に増えており、また、産業化を国家を挙げて支援するような仕組みが整えつつある。</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]



(5) 医療用チップ ( $\mu$  TAS、DNA チップ、蛋白チップ等)

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	○	↘	企業での研究は盛んであるがハード面の大学での研究は横ばい。産業技術に移行しつつある。ソフト研究は盛んである。Lab-on-a-chip 技術は広く普及している。多くの化学・生物系の研究室でも簡単に作製し評価できるようになってきている。裾野が広がっている一方、新しいアイデアのデバイス技術は少なく、飽和状態にある感がある。公的研究資金は減少傾向。
	技術開発水準	○	→	得意分野であるため、開発力のポテンシャルは高い。ベンチャー企業などの活力を基盤とした新技術開発は米国に比べて少ない。DNA チップについては米国基本特許が切れたので独自技術の開発が始まっている。ハードは開発できるが、それに載せるコンテンツの開発力が弱い。マイクロチップならではのアプリケーション開発が必要。生物系・医学系の研究者との一層のコラボレーションが必要と考えられる。研究費減少に伴い、独自技術が停滞気味。
	産業技術力	○	→	分析機器、電気、機械などの産業分野の大企業の産業開発力は高いと考える。バイオ・医療分野との融合、製薬・診断薬メーカーとの情報交換などが米国に比べて少ない様子。ベンチャーは苦戦。
米国	研究水準	◎	↗	要素技術から集積化、システム化技術まで広がりとお深さをもった研究が行われている。特に、コンテンツに照準を定めた研究に移行。Lab-on-a-chip を実際の試料の解析に応用する研究が行われており、単なる小型化・集積化だけでなく、マイクロチップでなければできない検出・解析が報告されている。ナノポアデバイスによる1分子DNAシーケンシングのコンセプトが提案されており、次世代の1分子計測技術の研究が進行している。今年に入り、特に若手新規参入層が活発化している。
	技術開発水準	◎	↗	米国アフィメトリクス社の独創的技術が依然として優位。NIH による支援も充実している。新しい高スループットDNAシーケンサ技術 (Helicos BioSciences, Applied Biosystems, Illumina/Solexa, Pacific Biosciences, Roche/454 Life Sciences など) の開発が進められている。新技術の実用化研究を確実かつ効率的に進めており、開発力は高い。
	産業技術力	◎	↗	アフィメトリクス社のDNAチップ、Caliper社の電気泳動チップ、最近では454ライフサイエンス社のDNAシーケンサなど新しい技術に基づく製品が開発されており、研究から製品まで世界をリードしている。米国の独壇場。日本の後退により、その傾向は顕著。
欧州	研究水準	○	↗	90年代初めから $\mu$ TASの研究を先導してきた。一時の勢いは無くなり落ち着いてきているが依然として研究水準は高い。DNAチップのハード研究は、日米の技術に依存傾向。依然として同様の傾向であるが、欧州全体として大きなプロジェクトが進行しており、ヘルスケアを目指したe-textileなど興味深いコンセプトの研究も開始された。
	技術開発水準	○	→	スウェーデンはパイロシーケンス、RCAなど特徴ある技術を開発している。全体として開発力のポテンシャルは持っていると考えられるが、米国ほど実用化が進展していない。日米に技術依存の傾向あり。同様の傾向。
	産業技術力	△	→	パイロシーケンシングなど特徴ある技術が製品化されたが、大企業における高い開発力を考えると米国ほど製品化が進展していない。ベンチャー企業の数やactivityも米国ほど伝わってこない。同様の傾向。
中国	研究水準	△	↗	米国への留学から帰国した研究者がバイオチップ・遺伝子解析などのバイオ分野の研究を立ち上げており、日米欧の水準に比べると低いものの上昇傾向にある。韓国、台湾に比べると $\mu$ TASデバイス技術は依然として発展途上である。再生医療の分野の研究は進んでいる。
	技術開発水準	△	↗	北京、西安などの主要都市で研究センターが整備され、ベンチャー化の兆しあり。規制が緩やかなため、実試料評価や動物実験などを行いやすい環境にあり、実用化開発が進むと考えられる。現状では製品研究は遅れている。同様の傾向。
	産業技術力	△	→	バイオ分野における企業の基盤技術レベルは依然として発展途上と考えられる。 $\mu$ TASの技術レベルは低い。しかし、電気機器、機械部品などの技術に支えられ、今後上昇すると考えられる。同様の傾向。
韓国	研究水準	△	↗	過去に日米欧で研究されたテーマの改良型の研究が多く、独自技術に基づくハード開発はあまり行われていない。しかし研究人口は増加しており、要注意。最先端の半導体技術により、ナノワイヤを用いたバイオチップなどナノテクを用いた新しい研究が育ちつつある。
	技術開発水準	△	↗	世界的に優位を誇る半導体産業を背景にして、MEMS/NEMSや電子デバイスを用いたバイオチップの研究・開発が盛んに行われており、上記デバイスの開発力は高いと考える。ただし、日米との共同研究が中心。アプリケーション開発が課題。
	産業技術力	×	→	KISTやGISTなどの国立研究機関、三星などの大企業の研究所でバイオチップの開発が行われているが、半導体デバイス中心であり医療・バイオとの融合は今一歩遅れていると思われる。

全体コメント：バイオチップ、 $\mu$  TAS などの分野は米国・欧州で始まり、その流行が落ち着き、問題点（コスト、市場性など）が指摘されるようになってから、約7、8年遅れて日本でも流行になった。日本では現在では小康状態であり同様な問題を抱え、この状況の中で韓国、中国などのアジアが積極的に研究を拡大している。日本でも欧州でも技術開発力は高く、製品化を推進するポテンシャルは十分あると考えられる。日本の課題は、本分野の技術的特長を生かし、新しい市場を社会的要請に沿った形でいかにして創出するかであると考えられる。このためには技術開発とインフラ（制度など）整備をあわせて社会技術として開発する必要がある。2007年、厚生労働省が発表した「かかりつけ医療」制度は在宅医療を促進するものであり、在宅で用いるような小型、簡便、迅速な検査機器・治療装置の開発を加速すると考えられる。 $\mu$  TAS、バイオチップ技術はこれらの要請に適した技術であり、今後の実用化の拡大が期待される。欧米で盛んだった DNA シーケンサをチップ化する初期の研究フェーズが衰退した後、より一般的に応用できる日本の研究がここ5年間世界をリードした。しかし、世界から追われる立場になったにもかかわらず、近年の公的研究資金は奮わず、失速傾向にある。

米国では次世代及び次々世代の低価格・高スループット DNA シーケンサの開発を目指して、様々な特徴ある技術が開発されている。数年前から政府投資は増加傾向にあり、今年から新規参入層の成果が出始めた。既に実用化されている技術からナノポアデバイスのように1分子シーケンシングを目指した将来技術まで NIH の資金援助を受けながら、幅広く開発されている。日欧など米国以外の地域では次世代 DNA シーケンサ技術については大幅に遅れた感がある。

また、マイクロチップの医療応用に関する研究については、実際の試料（ヒト試料、患者試料など）を用いた研究が質の高い学術誌に報告された。がん患者から採取した血液中に含まれるがん細胞をマイクロチップで検出する研究が *Nature*, 450, 1235 – 1241 (2007) に掲載され、さらにそのジェノタイプを検出する研究が *The New England Journal of Medicine*, 359, 366 – 377 (2008) に掲載された。マイクロチップが実際の医療に役に立つことを具体的に示しており、注目に値する。デバイスを製作し標準試料やモデル試料で評価する研究から、ヒト試料・患者試料へ応用する研究が今後増えてくると考えられる。緩やかながらマイクロチップの医療応用が着実に進むと考えられる。

(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]

## 2.2.3 エネルギー・環境分野

### 2.2.3.1 概観

エネルギー・環境分野は材料科学の進展と直結しており、その革新的な技術開発をもたらす可能性のあるナノテクノロジー・材料技術との融合は必須と言える。エネルギー・環境分野ではその中でも今後一段と重要になると考えられる11 綱目「太陽電池」「燃料電池」「光触媒・太陽光による水素発生」「バイオエネルギー材料(燃料・発電)」「環境浄化微生物」「高性能二次電池・キャパシタ」、「熱電変換素子」「超電導利用」「膜分離技術」「排出ガス浄化用触媒」「環境調和・リサイクル技術(回収技術など)」について国際比較を行った。

なお、本分野に関しては、別途 CRDS が取りまとめる『環境技術分野 科学技術・研究開発の国際比較(2009年版)』とも関連があるため、必要に応じて参照されたい。

エネルギー・環境分野の最近の全体的な傾向としては、地球レベルの課題を背景に、日本及び欧米では従来から行われている先端的な技術開発が継続し、中国、台湾、韓国等アジア地域の国々では部分的にはあるが日本や欧米の持つ科学的知識を参考に最新技術を積極的に導入することによって力を付けながら追い上げ始めていると言える。特に、中国の存在感は各分野で急速に拡大しつつある。

ナノテクノロジー・材料科学の激戦応用区の中核である太陽電池や二次電池、キャパシタ等の各種電池技術、熱電変換素子などの技術開発でも、中国のポテンシャルがますます高まってきている。アジア各国で論文数、研究者数の増大が起きており、これら技術への大きな期待が見てとれる。また、欧州は将来を見据えた長期的観点の政策や基礎研究で潜在的な強みがあり、中でも英独仏の3カ国は傑出している。

超電導利用技術に関しては各国とも自立産業には至らず国が支援しているのが実状である。米国では、電力インフラの超電導化、特に送電ケーブルの超電導化に注力しており、日本は物質開発の点で世界をリードしているものの、技術開発、産業技術で米国に遅れをとっている。欧州ではドイツを除き、高温超電導利用の技術開発には消極的である。

バイオエネルギーに関する技術開発では、米国、欧州が政策的に力を注いでおり、これに対して日本は基礎的な技術水準では必ずしも劣らないものの、政策的な導入目標や道筋の観点で欧米ほど明確ではなく、この点が技術開発水準や産業技術力の差にもつながっているものと考えられる。

光触媒技術や、膜分離による浄化技術については、日本が現時点において優位にあるが、日本企業は規模の大きさを欧米企業に比して不利にあり、世界市場への展開では遅れている。

環境調和・リサイクル技術(回収技術など)では、日米欧で大きな優劣は現在のところないと考えられる。温暖化ガス排出削減に、量的に結びつくような実効性の高いリサイクル技術はまだ特筆すべきものが見出せてないのが現状であり、技術開発レベルはほぼ同等であるといえる。日本は、排出ガス浄化触媒、

エコマテリアルやリサイクル技術などに関して広範な基礎研究力を保持しており、欧州は化学物質リスクにナーバスで関連分野のレベルが高い。エコマテリアルに対する関心、研究のトレンドは世界中のいずれの国においても間違いなく上昇傾向にあると考えられる。

また、エネルギー・環境応用を加速させる象徴的な出来事の一つとして、米国新大統領が DOE のローレンス・バークレー国立研究所長 Steven Chu 氏（1997 年ノーベル物理学賞受賞者）をエネルギー長官に指名したことが挙げられる。同氏は「分子工場（Molecular Foundry）」の提唱者であり、異分野融合とナノテクによって再生可能エネルギー分野でイノベーションを起こすことを宣言している著名な科学者である。今後このエネルギー・環境の全分野で米国が一気に主導権をとる可能性もある。

## エネルギー・環境分野のまとめ

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	◎	↗	太陽電池や燃料電池、二次電池、環境技術など、総合的にはトップレベルだが、先行き不安な分野もある。
	技術開発水準	◎	→	大手、中小の電機メーカーなど、総じて技術開発に力を注いでおり、トップレベルを堅持。
	産業技術力	◎	→	大学や公的研究機関の基礎研究、企業の技術開発を土台に、生産現場においても世界をリード。しかし、世界的経済停滞や熾烈な国際産業競争に耐える力を保持するのは容易ではない。
米国	研究水準	◎	↗	強いところと弱いところがあるが、総合評価は◎。特に燃料電池や、熱電変換素子、高機能膜技術では基礎研究レベルが高い。この分野を重視する新大統領の施策が注目される。
	技術開発水準	○	↗	技術開発は日本に比してやや遅れるものの、数多くの大学発ベンチャー企業が高い技術を有する。
	産業技術力	○	↗	新大統領は、環境エネルギー分野の産業を不況回復対策の中核に位置付け。生産現場における技術力は必ずしも高くなかったが、今後全分野にわたり急激に向上する可能性がある。
欧州	研究水準	◎	→	地道な基礎研究で高いレベルを維持している。
	技術開発水準	○	→	太陽電池やバイオ燃料では製品化に向けたアクティビティーが非常に活発。
	産業技術力	○	→	欧州全体で環境、リサイクル技術に対するベクトルが揃いつつある点で有利。
中国	研究水準	○	↗	トータルでは日米欧に及ばないが、他国の実績を猛烈にキャッチアップし、一部では追いつき始めている。先進国から帰国して活躍するケースも目立つ。
	技術開発水準	△	↗	現状ではまだ高くないが、急激に進展。そのスピードは驚異的。
	産業技術力	△	↗	急速な技術開発を元に、人海戦術で産業化が進む。太陽電池などでは台湾も注目すべき。
韓国	研究水準	○	→	一定の存在感。
	技術開発水準	△	↗	サムスン社や LG 社の動きは注目。技術水準は向上している。
	産業技術力	△	→	生産技術では現状日本や欧米に劣るものの、太陽電池や膜技術など海外と連携し意欲的に導入。

(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]



## 2.2.3.2 中綱目ごとの比較

## (1) 太陽電池

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	◎	→	薄膜太陽電池や色素増感型は高水準。結晶系 Si は独 Fraunhofer 研究所に劣る。新概念新材料など将来技術への準備は、JST・NEDO のプロジェクトでカバーされつつある。
	技術開発水準	◎	→	薄膜系は高水準。結晶 Si の原料に関わる技術開発は、欧州に比べやや劣る。世界最高水準でリードするも、欧米の追い上げでその差は縮まっている。
	産業技術力	◎	↗	トップレベルを堅持。量産装置を全て内製しているが、将来台頭してくるであろう水平分業勢力とどこまで戦えるか。シャープの年産 60000MW (2012 年) の Si 薄膜トリプル接合モジュールの製造設備導入、昭和シェル石油の年産 1000 MW (2011 年) の CIGS 薄膜モジュール製造設備導入などは、欧米より進んでいる。原料や製造設備開発では欧米がやや上。
米国	研究水準	○	↗	もともと高い水準を持つが、産業と市場が育っておらず現状では欧州と日本にやや遅れる。CdTe 薄膜太陽電池で巻き返しを図ろうとしている。ターンキーによる大面積モジュール製造に注力。有機半導体型などの新領域では非常に活発。GaAs などの化合物半導体型は宇宙用、集光用として活発。最近、IBM が Si 半導体分野の開発成果を CIGS 太陽電池の新製膜法に適用するなど、新しい動きが出ている。
	技術開発水準	○	↗	研究開発に比して技術開発ではやや遅れるが、化合物系や有機系で多数のベンチャー企業が参入し今後脅威。大学教授によるベンチャー設立 (R. Swanson 教授設立の SunPower 社) など、技術開発力高い。Si 系薄膜モジュールでは、United Solar Systems 社が強い。また First Solar 社は世界で唯一 CdTe 太陽電池を開発・製造。
	産業技術力	○	↗	有力企業が欧州企業に買収されている。特殊用途に限って優位性を持つ。例えば宇宙用超高効率、単結晶 Si 超高効率太陽電池。AMAT など半導体企業の太陽電池産業への参入は注目。CIGS 系などで多くのベンチャーが生まれており、巨大な産業力を感じる。
欧州	研究水準	◎	→	結晶 Si 系の要素技術開発では非常に高レベル。Fraunhofer 研究所に加えて IMEC など、従来半導体分野で多くの成果を上げている研究機関が Si 太陽電池の研究開発に本格参入。超薄型や新材料など活発で研究人口も多い。将来を考え、基礎重視。一方、圧倒的に日本が有利な Si 系薄膜も猛追している。色素増感型では世界をリード。短期的実用的研究が中心。
	技術開発水準	◎	↗	市場を背景に製品化に向けて急成長。大学教授関係のベンチャーが多く設立され、製品化を目指す。結晶 Si では短期間で 20% 超の超高効率を達成。薄膜系は日本に一歩遅れている。
	産業技術力	◎	↗	製造設備を購入してきて、生産を開始する企業が非常に増えている。結晶 Si のフルターンキーでは世界を制覇し薄膜 Si にも進出。薄膜製造では計画分で日本を追い抜く勢い。膨大な投資額によって、生産技術は日本に追いつく可能性大。
中国	研究水準	△	↗	論文数は圧倒的に多いが、目を引くほどの大きな成果はいまだ現れていない。現状では日本に及ばないが、先進国の留学生が戻って活躍するケースが多い。他国の実績をもとに追跡研究を行っている。現時点では、独創的な研究は見られないが、猛烈なキャッチアップ。
	技術開発水準	△	↗	現状は高くない。IPO などで調達した資金を元に技術開発に投資。今後脅威。課題ごとに拠点を設置して戦略的に集中投資し、研究人口も多いため水準向上。特に日欧米の技術を参考に、追いつこうと努力。依然としてキャッチアップ型が多いが、Suntech などは要注意。
	産業技術力	○	↗	欧米 (一部日本も) のフルターンキーに頼っているが資金力では日本をしのぐケースもある。生産量も日本企業に比肩する勢い。市場は欧米に頼っている点が弱みか。結晶 Si 系の分野では、SunTech 社の力が急速に拡大。
韓国	研究水準	△	→	昔から研究しているところは多いが、政府予算の増減に左右され、長期展望に立った研究にはなっていない。現状では新しい研究の目や新しい技術は見あたらない。
	技術開発水準	△	↗	太陽電池関係企業数が増えている。技術力は中国と比べまだ高くない。サムソン社や LG 社が本格的に太陽電池の生産を開始し、今後の展開に注意。
	産業技術力	△	↗	液晶産業のインフラをベースに薄膜 Si では今後の脅威になる可能性。フィードインタリフ導入で国内市場の急成長が期待。まだ産業としては小さい。韓国よりもむしろ台湾の方が急速に力を付けてきている。システム応用では、すでに日本よりも大きなメガソーラーが出現。

台湾	研究水準	△	↗	工業技術院 (ITRI) に太陽光発電技術研究センターを設立し結晶 Si 系から薄膜系、有機系と広範囲にかつ重点的に研究を推進。日本のレベルには達していないが新しいテーマに独自のアプローチをしている。日本の研究の調査など情報収集力は非常に高く、キャッチアップは時間の問題。米国留学経験者の多いグループリーダークラスは基本的能力が高い。若い人材が多いのも特徴。交通大学などいくつかの大学でも研究が始まっている。
	技術開発水準	△	↗	企業では基本的に研究開発はやらず、独自技術開発の意欲も乏しいが、技術導入 (キャッチアップ) の能力は高い。量産化大面積プロセスに対して開発用の実験機を用いるなど、導入ターンキー装置のプロセスの最適化や改良などの技術開発には積極的。
	産業技術力	○	↗	ターンキーメーカー出現によって基本プロセス構築に必要な時間・手間が簡略化でき、半導体や液晶産業など関連産業からの人材導入により、日本の 90% のレベルに容易に到達できる。この結果、多結晶やアモルファスでは日本との技術力の差は無いといってよい。超高効率 Si や薄膜タンデムなど高い技術力を要求されかつ日本が困っている分野ではまだ相当差があるが、いつまでもその優位性を維持できるとは言い難い。

全体コメント：太陽電池材料には結晶 Si、薄膜 Si、CIGS ( : Cu (InGa) Se<sub>2</sub> )、CdTe、有機半導体型、色素増感型があり、国により得手不得手がある。日本は Si 薄膜、CIGS 共に高い技術を持つ。結晶 Si 系は、欧州が潜在的に高い研究能力を有する。日本は企業主体で Si 太陽電池を開発してきており研究開発水準は高い。米国、欧州では太陽電池産業への本格的な投資が行われるようになり、製造設備を購入して多量に製造する企業が増えている。日本では環境問題のために CdTe の開発は終了したが、米国の Firstsolar 社は、2010 年に 1GW を目指して製造設備の拡大を図っている。現在、CdTe の製造コストが非常に安いことから、世界の太陽電池価格を牽引している。現状はまだ日本の優位性があるが、結晶 Si 系のような近未来の将来技術では欧州が、その先の将来の革新的技術ではアメリカが先行。特に最近、欧州で Si 太陽電池の劣化が抑えられたとの報告もあり、注意を要する。日本はここで盛り返すことができなければ、地盤崩壊の危険性あり。Si 系太陽電池では、材料面のみでなくデバイス開発面でも、これまでの Si 半導体産業との連携が必要と考えられる。

- (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]

## (2) 燃料電池

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	◎	↗	NEDO、JST等による幅広い研究資金により順調に裾野が広がり、全体として米国とともに世界トップといえる。生物燃料電池では公的研究資金は少ないが、研究水準は世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	中心となる電池システムや自動車、燃料製造メーカーの他、関連する補機の開発も盛んに行われており、高いレベルを保っている。生物燃料電池では、ごく限られた企業の参入ではあるが、プロトタイプ電池システム開発において高いレベルを保っている。
	産業技術力	◎	→	自動車、家電メーカーの頑張り、それを支え得る大規模実証研究、規制緩和などでここ数年継続的に大きく進展している。但し2008年後半に生じた自動車業界を中心とする不況の影響が懸念される。生物燃料電池では、家電メーカーの基礎開発研究に着実な進展が見られ、公開はされていないが、他業種企業も技術開発をすすめているもようであり、潜在的技術力は高いレベルにある。
米国	研究水準	◎	↗	日本の資金投資に刺激されて、基礎研究者が領域を超えてコンソーシアムを形成、連携効果を出している。個別の大学発基礎研究で優れた成果が見られる。生物燃料電池では、軍事研究費からの資金投資や、日本の自動車メーカーによる資金提供があり、研究者層が比較的厚く、マイクロ電池の研究レベルも高いが、モバイル機器用電源を目指す研究においては日本よりやや劣る。微生物燃料電池の研究では世界をリード。
	技術開発水準	◎	→	高い水準を保持していたが、自動車メーカーの活力低下に伴いアクティビティは顕著に低下。生物燃料電池では、自動車メーカーのような大企業の参入は見られない。大学やベンチャー企業によるプロトタイプ開発のレベルは日本と同程度。
	産業技術力	◎	→	自動車メーカーの危機的状況により活力低下が大きく響いているが、インフラの整備などは徐々にではあるが着実に進んでいる感がある。生物燃料電池では、ベンチャー企業によってマイクロバイオ電池にターゲットを絞った商品化研究が進められている。
欧州	研究水準	◎	→	研究資金の低下で大分冷え込んでいたが、昨年スタートしたコンソーシアムによる立て直しが幾分進んだ模様。生物燃料電池では、フランス、ドイツをはじめとするEU諸国でバイオ電池研究への関心が高まってきている。
	技術開発水準	○	→	顕著な進展は見られないが、いずれは研究水準の立て直し効果が現れると考えられる。生物燃料電池では、技術開発に対する取り組みが徐々に高まっている様子。
	産業技術力	○	→	燃料電池車、燃料電池航空機、家庭用燃料電池などの実証が各国で行われた。
中国	研究水準	○	↗	まだまだ後追いの研究が主流に見えるが、研究論文の数は相変わらず圧倒的な勢いで増大しており、将来は全く侮れない。
	技術開発水準	△	↗	キーラボラトリーが作ったベンチャー会社が未だ支えている様子。
	産業技術力	△	↗	オリンピックで燃料電池バスの実証が行われ、技術力は着実に向上している。
韓国	研究水準	○	↗	中国より上ではあるが、まだ後追いの研究が多い。基礎研究の顕著な進展は特に見られない。
	技術開発水準	○	→	産学協同で事業化に向けた投資を行う計画が発表された。ただし、技術開発水準の向上を示す報告は見られない。
	産業技術力	○	→	鉄鋼メーカーのPOSCOが浦項南東部に世界最大規模の燃料電池製造工場を開所。2011年までにさらに同規模工場の建設計画があり注目されるが、不況の影響でどうなるか。

全体コメント：燃料電池は、水素と酸素を電気化学的に反応させた化学エネルギーを、直接電気エネルギーに変換するもので、環境負荷の小さい高効率な次世代エネルギーとして期待されている。固体高分子形燃料電池（PEFC）は、自動車用や家庭用発電、携帯電話、ノートPC等の用途で研究開発が行われている。他方、固体酸化物形燃料電池（SOFC）には20年以上の歴史があるが、開発期間が長く難しい技術の一つである。最近、米ウエスティングハウス社などが、100キロワット級の比較的大きなシステムでの研究開発を行っている一方で、SECA（Solid State Energy Conversion Alliance）プロジェクトで中・低温作動の低コストな小型システムの開発に対しても関心が払われている。小型システムは欧州での国際プロジェクトのほか、日本でも、京セラ、三菱マテリアル等が家庭用、業務用を含めた1～10キロワット級のシステムを開発している。2007年度からは家庭用SOFCの実証研究、2008年度からはSOFC劣化解析プロジェクトも開始された。なお、これまでの日本は右肩上がりの取り組みであったが、2007年度あたりから頭打ちの傾向も見られる。特に企業においては、未だ社会実装には時間がかかるとの認識から長期的取り組みのモードに移りつつある。さらに、2008年後半に起こった全世界的な不況の影響、特に自動車業界の経営危機が燃料電池の研究開発に与えるマイナス影響も強く懸念される。他方、従来は日米および欧州の一部でのみ行われていた燃料電池自動車、バス、家庭用定置型燃料電池の実証試験が、北京オリンピックのあった中国など、より広く世界中で行われ始めた。米国では水素インフラの整備なども少しずつではあるが進展している。本格的な普及には未だ時間がかかるとの認識から、長期的取り組みのモードに移っているが、技術の導入・普及に向けた準備は着実に進展している。米欧は、日本に刺激される形で再活性化されて基礎回帰（Back to Basic）の傾向を強めており、この基礎重視の取り組みが堅実に継続された場合には、これまでの努力が将来結実するものと考えられる。なお、中国では研究論文数が急激に増大しており、今後の大きな発展も予想される。

ブドウ糖やエタノールを電気化学的に酸素と反応させて電気エネルギーを取り出す生物燃料電池は、環境負荷の低い高効率な次世代エネルギーとして、携帯電話、ノートPC、血糖モニター用体内埋め込み電源等の用途が想定されている。米国では、テキサス大学のヘラーが、血糖計とインシュリンポンプの駆動電源として血糖を燃料とするバイオ電池を開発し、使い捨て目的の2週間程度の寿命を技術的にクリアしている。日本では、技術的に障壁の高い、モバイル機器用電源を目指す研究を進めており、京都大学が直接電子移動型バイオ電池の飛躍的出力増大を実現し、またソニーがウォークマン駆動可能なパッシブ型バイオ電池を発表している。日米に刺激され、ヨーロッパ諸国や中国、韓国でもバイオ電池研究が活性化している。

微生物を用いる生物燃料電池もその出力が飛躍的に向上してきている。排水や水田土壌の微生物を嫌気条件で炭素フェルト電極に付着させ、デンプンのような有機物を燃料とするもので、反応詳細は未解明であるが、環境浄化と同時にエネルギー獲得ができるシステムとしての実用化研究が、米国、日本、オーストラリア、フランスなどで進められている。

- (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]

## (3) 光触媒・太陽光による水素発生

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	◎	↗	光触媒は、文科省科研費、JST (CREST) などで継続的な投資がおこなわれており、研究者の質、量とも高い。 太陽光による水素発生 [以下、単に水素発生] では、粉体/薄膜系光触媒で長年の蓄積があり、特に光触媒材料開発では圧倒的な強さを誇る。しかし、近年欧米、中国において大きな研究プロジェクトがいくつも動き始めており、近い将来の逆転も考えられる。
	技術開発水準	◎	↗	光触媒では、産学連携、産官学連携、産産連携など様々な連携が積極的に行われている。 また、最近水素製造に興味を持つ企業が増えつつあり、共同研究により実用的な技術開発が行われつつある。
	産業技術力	◎	↗	光触媒では、間違いなく世界をリードしているが、グローバルな展開力に欠けている。多方面で酸化チタン系の光触媒が実用化されているので、効率の高い触媒が開発できれば水素発生も製品化できる力は十分にある。
米国	研究水準	○	↗	光触媒では、以前は優秀な研究者がこの分野にいたが、現在の研究レベルは高くなく、過去の遺産が中心と思われる。 水素発生では、多接合半導体光電極の最適化と材料開発に特化。NREL のタンデム型のセルの研究が有名。政府が大きな研究開発資金を提供し始めており、研究レベルは急速に上がっている。典型的な例は、ローレンス・バークレー国立研究所の Helios プロジェクトであるが、そのほかにも多くの研究開発拠点が設立されつつある。
	技術開発水準	○	↗	光触媒では、以前は優秀な研究者がこの分野にいたが、現在の研究レベルは高くなく、過去の遺産が中心と思われる。 水素発生は産業としては全く育っていないが、変換効率 10% 達成という報告もある。オキシナイトライド系触媒では、Schatz Energy 研究センターが代表的。
	産業技術力	○	↗	光触媒では、最近になり産業界の一部が本格的に注目し出した。今後は伸びるかもしれない。 水素発生は日本と比較するとかなり低いと言える。今後、ベンチャー企業などでの技術力アップが期待される。
欧州	研究水準	◎	→	光触媒では、もともと水処理などに熱心な研究者が多かったが、それらが日本型の研究テーマ (建築材料、空気浄化など) に転向しつつある。 水素発生については、酸化半導体光電極では潜在的に高い研究能力を持つ。ドイツのフラウンホーファー研究所が有名。近年、EU の枠内で研究が活発化している。
	技術開発水準	○	↗	光触媒では、産業界が本格的に注目をはじめ、建築材料、大気浄化など実用的な技術開発が盛んにおこなわれている。 また、英国の Solar Hydrogen 社では、WO <sub>3</sub> 光電極と色素増感太陽電池を組み合わせて水素製造を行っている。ハイブリッド型の開発に注力している。
	産業技術力	○	↗	産業化も本格的に始まりつつある。 水素発生では、産業化をにらみ、酸化鉄の多孔質電極を高性能化し、低コスト化を実現しようとしている。
中国	研究水準	△	↗	レベルは高いと言えないが、研究者は多く大変熱心に研究されつつあり、高レベルの研究が出てくる素地は十分にある。 水素発生では、本年度より、人工光合成に関する大きなプロジェクトが大連化学物理研究所の Can Li 教授を中心にスタートし、今後急速に進展すると考えられる。
	技術開発水準	△	→	日本の技術を導入しそれなりのレベルにあるが、独自の技術はそれほどない。ただし、材料開発はちょっとしたきっかけで加速する可能性があるため、日本にとって潜在的な脅威はある。
	産業技術力	△	→	光触媒では、まがい物的な製品が主で産業として成長する段階にないが、種々の元素の資源も豊富で、画期的な材料開発に成功すれば、大きな力を持つことになる。
韓国	研究水準	△	→	水分解の研究者が中心で、建築材料、環境浄化などの研究水準は低いが、いくつかの研究機関で精力的に研究が推進されている。まだ、大きなプロジェクトは立ち上がっていないが、ソウル国立大学、浦項工科大学など、いくつかのグループに分かれて研究が推進されている。
	技術開発水準	△	→	光触媒では、空気清浄機などに使うための技術開発は熱心で、それなりのレベルにある。 材料開発は、ちょっとしたきっかけで加速する可能性があるため、日本にとって潜在的な脅威はある。
	産業技術力	△	→	ベンチャー企業を中心に、まだ産業として展開するに至っていないが、二酸化チタン光触媒製品などを生産している。

全体コメント：研究水準、技術水準、産業水準のいずれにおいても光触媒分野における日本の優位は間違いない。イタリア、ドイツを中心とした EU 諸国が研究レベルもそれなりに高く、日本を追い上げている。米国は欧州の動向を見守っていたが、最近産業界の一部が本格的な興味を持ちだした。中国、韓国は研究者が多い割に産業界との連携が進んでいないように思われる。太陽光による水素発生では、日本では、粉体系の光触媒を用いる研究が中心であり、東大の堂免教授らを中心に高い研究水準を維持している。米国では、ローレンス・バークレイ国立研究所のヘリオスプロジェクトが代表的であるが、MIT の Nocera 教授やカルテックの Lewis 教授らのもとでも大きなプロジェクトが立ち上がっており、今後も更に多くのグループが参入すると考えられる。NREL でタンデムタイプの光電極を用いた研究を実施している。技術力が向上してきたようだ。一方欧州では、酸化物半導体の光電極に関する基礎研究が継続されている。また、酸化タングステンと色素増感太陽電池と組み合わせる効率的な太陽光利用を実現しようというスイスでの取り組みも注目される。本年度から EU 全体でのプロジェクトがスタートする。中国でも人工光合成の大型プロジェクトが採択された。

- (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) バイオエネルギー材料 (燃料・発電)

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	◎	→	欧米に比べてスタートは遅かったが、ここ10年間で、大学、国研、メーカー等でバイオマス変換に関する研究が急速にすすんだ。しかし、最近ではバイオマス発電についての研究は頭打ちの状態となっている。技術的にはガス化で副生するタール除去がネックとなっている。
	技術開発水準	○	↗	バイオマスガス化発電は小規模のものは実用段階に至っている。バイオエタノールに関しては、宮古島でサトウキビを燃料として開発が行われている。また、イネ、テンサイ等を用いた試験設備を計画している。ただし、これらの経済性等実用化には、解決すべき問題が多い。
	産業技術力	○	→	欧米に追従する形で日本でもバイオエタノール導入を進めているが、現状では目標値は小さく、十分な温室効果ガス抑制効果は期待しにくい。自動車では、バイオマス混合燃料自動車の普及よりも、家庭で充電できる電気自動車の方に移行する可能性が高い。バイオマス発電についても混焼発電以外は殆んど注目に値しない状況である。ガス化発電では、国内でガスエンジンが安価で入手できないことがコスト高につながっている。マーケットの狭さや導入・普及に関するインセンティブが小さいことも産業として成長できない一因となっている。
米国	研究水準	◎	↗	ここ10年で米国のバイオエタノール生産は3倍以上増加し、ブラジルを抜き世界一位となった。DOEはセルロース系バイオマスからのエタノール製造技術に対して大型の資金投入をし、ダウやデュポンなどと連携し、パツェル研究所等の国立研究機関を中心として研究を進めている。最近の報告では、微生物電池や藻類からのBDF製造の研究が一段と加速している。
	技術開発水準	◎	↗	連邦政府は中東からの石油輸入を減らすためバイオエタノール利用を国家戦略として推進した。その結果、DOE、パツェル研究所、化学メーカーの研究開発が進み、技術開発水準は極めて高い。
	産業技術力	◎	↗	バイオエタノールは大手穀物メジャーと連携し、国家戦略により大規模醗酵設備が建設され、産業技術力は高度に成長している。
欧州	研究水準	◎	↗	欧州では、バイオエタノールよりも脂肪酸エステルや木質バイオマスガス化ガスからのBDF（バイオディーゼル油）合成等の研究が行われている。研究水準は低くはないが、工業化に向いている。
	技術開発水準	◎	→	木質バイオマスガス化ガスからのBTL合成、脂肪酸からのETBE（エチルチーシャリーブチルエステル）合成に関しては、実用化水準に達している。
	産業技術力	◎	↗	BDF、ETBEはすでに軽油・ガソリンに添加して販売されており、産業技術力は高い。
中国	研究水準	△	→	バイオエタノール生産量は増加しており、研究開発レベルも急速に追いついてきている。
	技術開発水準	△	→	ハイテクではないが、穀物からのバイオエタノール生産技術を有している。バイオマス燃焼発電やガス化発電について開発を始めているという情報は少ないが、始めるとポテンシャルは大きい。技術的な詳細は明らかではないが、酵素を利用したBDF製造技術が実証されており注目される。
	産業技術力	△	↗	中国のバイオエタノール生産量は最近飽和しているが、それでも世界第3位、8%のシェアがある。豊富な穀物生産と安い人件費に支えられ価格競争力は大きい。バイオマスを利用した発電については、殆んど手付かずの状態である。
韓国	研究水準	○	↗	大学や国立機関を中心として研究が開始されている。バイオマスガス化発電については韓国電力研究所等の一部の研究機関で実施されている。
	技術開発水準	○	→	韓国は伝統的に木質バイオマスを家庭暖房に活用してきたが、都市ではこの伝統が失われてきている。しかし、バイオマスを利用する技術ポテンシャルは有している。バイオエタノールやBDFについては日本と同じ程度の段階である。今後数年間で大きな技術進展が予想される。
	産業技術力	○	→	米国や欧州と比較した場合は産業技術力は高いとはいえない。

全体コメント: バイオエネルギー材料(燃料・発電)には、無加工の薪、木材チップ、粉砕して固めた木材ペレット等の木質バイオマス、植物油(パーム油、ひまわり油、ジャトロファ)、これを加工した脂肪酸エステル、さらに植物(小麦、トウモロコシ、サトウキビ)を醗酵させたバイオエタノール等幅広い種類が利用されている。世界的には、セルロース系バイオマスからのエタノール製造技術に関する研究開発に最も資金が投入されているが、まだ決定的な技術には至っていない。バイオディーゼル関連では、原料としてジャトロファが注目され、品種改良や栽培技術などの研究が推進されている。発電用としては、木質バイオマスの石炭火力への混焼が中心となっている。

暖房用バイオ燃料は、薪、木材チップ、ペレットが主流である。これらについては、特に欧州諸国では一次エネルギーの10%前後利用されている。バイオ燃料に関しては、米国では2012年までに75億ガロンの導入目標をたて、EUでも明確な導入目標を定めており、農業とリンクしたこれらの政策がバイオ燃料の導入に大きく影響している。また、欧米では、国によってそれぞれ異なるが、税制や導入義務などの社会システムによりバイオ燃料導入・普及に大きく貢献している。今後は、下水汚泥を醗酵したバイオメタンの利用も増加するものと予想される。しかし、日本ではこれらのバイオ燃料の利用は極めて少ない。その理由として、ガス、軽油によるインフラが既に整備されていること、バイオ燃料利用の経済性の低さ、利用システム整備の遅れ等が指摘される。また、バイオマス発電については、小規模な木質バイオマスガス化・ガスエンジン発電についてはここ10年間で大きく研究・開発が進んだが、実用化には燃料の確保を含めた経済性を克服することができず、普及には至っていない。大規模利用としては、既設の石炭火力発電所に木材チップを石炭に混合して燃焼利用する混焼発電が注目されており、効率的にも経済的にも最も適当な利用方法であると考えられる。既に四国電力、中国電力、関西電力が同社の石炭火力に於いて実施している他、他電力でも実施を計画している。また乾燥下水汚泥を石炭火力で利用する試みが東京都で始められている。今後は、さらなる技術開発を推進し、経済性を改善して、公的な補助金なしに成り立つシステムを構築させ、それを政府・地方自治体等による利用システムをいかに推進していくかに掛かっていると思われる。全体として、日本は基礎的な技術水準では決して劣らないものの、欧米ではより強い国家的指導力にもとづく技術開発を推進している点で、技術開発水準や産業技術力の差にも一部つながっていると考えられる。

(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]

## (5) 環境浄化微生物

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	○	↗	この分野の研究は、大学、研究所、を中心に企業を含め、新しい分子生物学的手法を用いて発展している。全体として研究水準が向上しているが、世界をリードするレベルまでには到達していない。
	技術開発水準	○	→	国内市場が成熟し、飽和状態に達したことは影響しているかもしれないが、企業の技術開発投資が減っている。また、類似研究テーマを独立に推進している多省庁がその融合連携をはかることによる技術開発の推進が期待される。
	産業技術力	○	→	微生物を用いた環境技術と自動制御技術を組み合わせて応用する高度な産業技術を有している。特に、膜分離技術と環境微生物を組み合わせた応用技術に関しては、世界をリードしている。他方、主要な環境浄化技術のように、海外からの輸入が主の技術もある。
米国	研究水準	◎	→	環境浄化微生物に限らず、微生物学、微生物生態学、細菌学、分子生物学の分野において、米国がリードしている。研究進度が速い。異分野の専門家が共同で、新規性の高い、質の高い研究が行われている。現在盛んに行われている、メタゲノム解析は、DNA解析の強力な組織を有する米国がコントロールしている。今後この状況は続くだろう。
	技術開発水準	○	→	研究費の配分に強く影響されたためか、この分野の水準はヨーロッパに少し劣るが、韓国、中国よりは数段レベルが高い。しかし、現在の経済状況の悪化から、今後、どうなるか目が離せない。
	産業技術力	○	→	土壌地下水汚染の修復などの分野で、技術の蓄積がある。目に見える実績を確実に残している。
欧州	研究水準	◎	→	世界をリードする新しい研究を開拓している。近年の新しい研究テーマはヨーロッパ発のものが多い。米国と並んで研究をリードしている。新規性の高い研究論文は欧州から多く出ている。研究の質が高い。
	技術開発水準	◎	→	欧州が一步リードしている。近年の新しい技術はヨーロッパ発のものが多い。環境にやさしい排水浄化技術として世界的注目を集めるUASB、EGSB、ANAMMOXなどはいずれもヨーロッパで開発された。基礎研究、応用（技術開発）がうまくかみ合っている。
	産業技術力	◎	→	高い技術力を武器に世界で事業を展開している。EUは、環境ビジネス分野で世界の市場をリードしている。国家レベルでの戦略が明確である。
中国	研究水準	○	↗	若い研究者が多く、関連の論文数が急増しているが、オリジナリティの高い研究はまだ少ない。大学等の研究機関の整備、人材確保が急速に進められているので、今後、成長してくるものと思われる。
	技術開発水準	△	↗	国家的研究プロジェクトを設定して取り組んでいる。今後、水準は高まると思われるが、現在はまだ評価できない状況である。
	産業技術力	△	↗	現在、海外からの技術導入を積極的に行っておりまだ発展途上であるが、応用技術のレベルは徐々に向上してきた。
韓国	研究水準	○	↗	関連の論文数が急増しているが、オリジナリティの高い研究はまだ少ない。多くの米国帰りの研究者が研究しているが、あまり目立った成果は出ていない。
	技術開発水準	△	↗	現在のレベルは高くないが、新しい技術の開発を積極的に進めている。
	産業技術力	△	↗	応用技術のレベルは徐々に向上してきた。
<p>全体コメント：  環境浄化微生物の研究はもともと欧州が強かった。近年、世界的注目を集めた新しい研究分野は欧州発のものが多い。一方、日本の技術開発の伝統的強みはハードウェアとソフトウェアを組み合わせたシステム化段階においてハイテック化・ハイブリッド化などの工夫によりシステム機能を大幅に向上させる事例が多い。環境浄化微生物の分野でも、新素材、自動制御を積極的に取り入れ、膜分離生物反応技術においてトップレベルの技術実績がある。従来の後進国であった中国と韓国では、若い研究者の層が増え、研究論文や出願特許が増えている傾向が明らかである。なお、日本では、基礎研究から応用研究、さらに技術開発、製品化（商品化）までを視野に入れた、研究組織、プロジェクト、予算付けを一体で考える明確な戦略が見えない。そのためこのままでは、アジア圏の中でも中国、韓国に先を越される可能性がある。</p>				

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]



## (6) 高性能二次電池、キャパシタ

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	◎	↗	ハイブリッド自動車電源や電動鉄道車両、産業用電池、および再生可能エネルギー（太陽光・風力発電）の負荷平準化電源として将来の大きな市場期待があり研究が産官学の広い分野で活発に行われている。市場も急成長しており、ナノテク研究者、システム研究者も巻き込み研究水準は上がっている。電池技術は元々日本は基礎研究者が多い分野であるが近年は周辺の研究分野（化学工学、エレクトロニクス、金属工学）の研究者も参入してきて活性化している。諸外国でもトップ研究者群の参入により基礎研究レベルは年々上がってきており、世界的な激戦り分野である。
	技術開発水準	◎	↗	日本は現状では世界トップと言える。
	産業技術力	◎	↗	日本は現状では世界トップ。ただし近年は中国、韓国の激しい追い上げが起きている。
米国	研究水準	◎	↗	全体的に見れば基礎研究水準は高い。日本よりやや劣っている部分もあるが、新材料に関する研究レベルは高い。リチウム二次電池に関するイノベーションでは日本より先行している。例えば、インターカレーション材料を発見しリチウム二次電池を実用化させたコバルト系層状化合物や、自動車の次世代リチウム二次電池材料であるリン酸鉄リチウム（LiFePO <sub>4</sub> ）はテキサス大学のGoodenough教授により発見された。また、この材料のいち早い特許化とベンチャー企業創出を行ったのはMITのY-M. Chiang教授らのグループであり、有望電池材料の特許を基にベンチャー企業を先行させたのは米国であるといえる。この材料に関しては特許係争が起きているが、Hydro-Quebec社やPhostechLithium社などがベンチャー企業化を通して商業化を進めている。次世代電池材料の開発状況次第では基礎と商業化で世界のトップになる可能性がある。
	技術開発水準	○	↗	日本と比較して相対的に劣っている。次世代材料のベンチャー化では先行。自動車用リチウム二次電池電極材料のLiFePO <sub>4</sub> のイノベーションが創出した。オリビン正極、高電圧材料の研究が盛ん。
	産業技術力	○	↗	日本と比較して相対的に劣っている。
欧州	研究水準	◎	↗	著名な化学者、物理学者が電池材料分野に参加しており基礎研究は世界のトップである。端緒を開く研究と現在の世界的潮流を作るインパクトの高い研究はほとんど欧州から発表されている。基礎研究者の層も厚く、独・仏・英、特に無機化学にポテンシャルの高い研究者を擁する英国とフランスの研究レベルが高い。既存技術から離れた革新的なアイデアもフランスなどから提案されている。基礎研究のレベルは日本と同等と言える。
	技術開発水準	○	→	日本と比較して相対的に劣っている。基礎研究のレベルは高くとも本格研究（基礎と実用を結びつける研究開発）のポテンシャルは低い。
	産業技術力	△	→	日本と比較して劣っている。強力な電池メーカーが欧州には少なく電池技術としての開発力は高いとは言えない。
中国	研究水準	△	↗	近年、劇的に研究レベルが向上している。電池は中国の研究開発においても有望な市場であり、安価製品を武器に世界シェアを順調に伸ばしている。研究者人口、発表論文数とも増えている。但し基礎・応用の双方において日本または欧州を真似た研究が主体であり、独創的な研究は少なく現状では決して高くはない。国際会議などでの発表論文数が飛躍的に増大している。
	技術開発水準	○	↗	日本と比較して10年以上遅れていると考えられるが、基礎研究、市場規模、中国企業規模とも急成長している。これまでの生産基地としての考え方から研究拠点としての実力をつけてきている。企業の研究投資も積極的である。
	産業技術力	○	↗	日本と比較して劣っている。安価性を武器に世界シェアを伸ばしつつ電池企業が伸びている。設備の低価格化で製品競争力が強くなりつつある。
韓国	研究水準	○	↗	韓国においても研究レベルが向上している。中国と同様、世界シェアを順調に伸ばしている。研究者人口もおそらく増えている。但し基礎研究レベルは日本・欧州と比較すると決して高くはないが、学術誌、国際会議での論文発表が活発である。
	技術開発水準	○	↗	日本と比較して相対的に劣っている。
	産業技術力	○	↗	日本と比較して相対的に劣っている。

全体コメント：電池技術分野は基礎研究でも応用研究でも世界的に研究投資が著しく増大しており材料科学の分野では激戦区である。温暖化対策としてのハイブリッド車電源やエレクトロニクス用電池を含めて市場が急速に増大しつつあり、また高信頼性、高出力特性など要求される性能が上がっていて、世界各国でナノテクを用いて革新的な電源開発、高性能電極材料の発見（LiFePO<sub>4</sub>）、特許を基にしたベンチャー企業化など、目が離せない分野である。容量や信頼性に優れた新型電池の市場投入を目指した激しい開発競争が繰り広げられている。Nature、Scienceなどの一流誌も過去数年数多くの電極材料開発の論文を掲載し、産業界からの大きな期待を背景として先進各国で基礎研究が大きく進展している。市場のシェアでも中国、韓国の追い上げが最も激しい分野の一つである。論文数の指数関数的な増大、研究者の増大が起き、これらのアジア各国での電池分野への大きな期待が見て取れる。現在、日本は基礎、応用の両方で世界の先頭を走っているが、世界各国からの激しい追い上げ研究開発を認識すれば、この技術分野への投資を怠れば近い将来技術レベルで中韓に追いつかれる可能性がある。電源技術は21世紀において順調な市場拡大が見込まれる分野であり日本の産業競争力強化に対して基礎研究の投資が求められている分野でもある。現状は、中韓は研究開発レベルは向上しつつあるが、まだ日本より10年以上は遅れていると結論できる。しかしながら確実にキャッチアップされている。世界的な潮流を作る基礎科学研究、特に端緒を開くインパクトの高い研究成果は欧米の研究機関から出ており、その点では基礎研究レベルは欧米がトップレベルである。すなわち総合的な基礎研究開発ポテンシャルは日本が優位といえども、新しい電極材料の開発、インターカレーションなどの固体化学反応として新しい現象の発見を行うトップクラス研究者は依然欧米に存在する。中でも英米独仏の4カ国が傑出していると言えるが、数人のトップ研究者がnature, scienceを独占し基礎研究の方向を左右している。日本は基礎・応用と広いスペクトルの研究を行っており総合評価ではトップレベルと言える。現状では日本企業が市場での大きな世界シェアを持っているが近年は中韓企業の追い上げが激しくなっている。

- (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]

## (7) 熱電変換素子

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	◎	→	新規物質開発が盛んに行われている。酸化物など新しいルートの開拓で目立つ。
	技術開発水準	○	→	小さな専門メーカーだけでなく、大手の電機メーカー、自動車メーカーなども、研究開発を手がけている。今後、材料関連企業の参入も増えるであろう。国家プロジェクトの継続が必要。
	産業技術力	○	→	比較的小規模の専門メーカーのほかに東芝などの大手も活躍している。様々な応用製品も出ている。もともとそれほど大きな分野ではないので、比較的目立っている。
米国	研究水準	◎	→	新しいメカニズムの提唱など基礎研究レベルでは、研究が極めて活発。
	技術開発水準	◎	↗	比較的小規模のメーカーやベンチャーが中心。自動車廃熱、宇宙応用のプロジェクトが走っている。
	産業技術力	○	↗	比較的小規模の専門の製造メーカーがある。
欧州	研究水準	◎	↗	ドイツ、フランスなどで、アクティビティが上がっており、日米とほぼ肩を並べている。
	技術開発水準	○	↗	米国で、国家プロジェクトの技術開発のプログラムが走っているのに比べると、産学連携の技術開発が個別に進められているだけであるが、今後 EU レベルの開発プロジェクトも予想される。
	産業技術力	○	→	ロシア、ウクライナのメーカーは世界市場で活躍している。
中国	研究水準	○	↗	材料開発に強く、国内に熱電の製造業を抱えており、今後ますます存在感が大きくなると思われる。
	技術開発水準	○	↗	ペルチエ素子の製造会社とその担い手となると思われる。活発な基礎研究との連携も流れを加速すると予想される。
	産業技術力	○	→	ペルチエ素子の製造会社が多く存在する。世界市場で活躍している。
韓国	研究水準	△	↗	研究レベルでは大学研究所などが、一定の存在感を示している。昨年の熱電国際会議をホストした。
	技術開発水準	△	→	一部電力会社系の技術開発プロジェクトが見られる程度。企業の参入もようやく始まったところ。
	産業技術力	×	→	実際の製品はほとんど輸入に頼っているようである。

全体コメント：熱電変換技術は、固体素子の両端に温度差を付けることにより、熱エネルギーを直接電気エネルギーに変換する（ゼーベック効果）ことによって電気を取り出す方法と、電流によって冷却する（ペルチエ効果）等の使い方で、エネルギー・環境技術として期待されている。自動車や産業廃棄物処理施設など様々な場所での廃熱を少しでも回収できればそのメリットははかりしれない。ペルチエ冷却は脱フロンの冷却を可能にする。熱電変換に用いられる材料を熱電変換材料といい、一般的には半導体材料が用いられる。日本においては、新たな熱電変換物質・材料の開発が積極的に行われており、技術開発、産業技術力の観点でも小規模メーカーから大手企業まで幅広く活躍しており、世界的に高い水準を維持している。製品のレベルでは、日本以外には米国、欧州ばかりでなく、中国、ロシア、ウクライナといったところが世界へ向けて輸出をしており、高い産業技術力を有している。材料研究では、新概念・新材料の研究開発が最近 15 年間で世界中で盛んになり、発表論文数、特許出願数も急激に増加している。技術開発では、米国が巨額を投入して国家レベルで推進していることから、一歩抜け出ている。産業技術力に関しては、いずれの国でも熱電産業が大きく育っていない状況のため、他分野との協調・競合関係の上で向上していくと考えられる。

(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]

(8) 超電導利用

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	◎	↗	新物質開発では、鉄砒素系超伝導体発見のインパクトはきわめて大きい。MgB <sub>2</sub> 、ビスマス系などの発見でも世界をリードしている。高温超電導線材の実現に向けた基礎・基盤的研究では米国の国研に比べて劣るが、欧州や中・韓との比較では進んでいる。
	技術開発水準	◎	→	高温超電導モータや送電ケーブルの技術開発において米国に遅れを取っているが、他国との比較においては進んでいる。高温超電導線材開発では住友電工だけとなっているが、品質は極めて高い。
	産業技術力	○	→	従来型の超伝導の応用では一定の存在感を發揮している。高温超伝導の分野では、基礎固めをしてからという意識が高く、線材の量産技術では米国に対して遅れを取っている。電力応用ではまだ産業に至らないので国が支援しているのが実情。これは他国も同様。
米国	研究水準	◎	→	高温超電導線材開発に関わる基礎研究に関しては、米国国立研究所の研究水準は非常に進んでいる。物質の開発や現象の発見といった萌芽的な部分で、以前のような存在感を示せずにいる。しかし昨年頃より室温超伝導体探索に向けた研究を国研を中心に組織的に行っている。危機意識は高い。しかし、放射光や中性子などの先端プローブを用いた研究では依然として大きな存在感を示している。
	技術開発水準	◎	↗	従来型、高温超伝導ともに、DOEなどが集中投資する兆しがあり、さらにレベルが上がる様相。高温超電導線材開発ベンチャー2社が商品化した。
	産業技術力	○	↗	従来型の材料でもポテンシャルは高い。高温超電導線材の量産技術も高いポテンシャルがあり、商用化が始まっているという意味では産業力は上昇傾向にあるといえる。高温超電導線を用いた電力ケーブルの製造・試験では圧倒的な実績を有する。
欧州	研究水準	○	↗	基礎研究では、苦しい状況の中でも続けられていた地道な研究が徐々に存在感を發揮し始めている。
	技術開発水準	○	↗	各国で高温超伝導をはじめとする産業界の技術開発が行われているが、日米と比べると若干遅れている。高温超電導線材応用に関してはドイツが活発である。核融合実験炉 (ITER) 建設の拠点である仏を中心に欧州での技術開発力が増大することが予想される。
	産業技術力	△	→	まだ具体的な産業として成果が見えない状況。
中国	研究水準	○	↗	政府の基礎研究に対する投資の効果が現れ、伸びを見せている。新物質の開発のポテンシャルは高く、鉄砒素系の研究でこれを実証した。物質関係で評価するなら◎も近い。
	技術開発水準	△	→	国の支援で高温超電導ケーブルの技術開発を行なっているが、開発水準は高くない。電力会社数社で、超伝導送電の実証のためのプロジェクトが進められていた。
	産業技術力	×	→	生産技術の検討のレベルでの具体的な動きは見えない。
韓国	研究水準	△	↗	国から相当の研究資金がでているものの、研究水準としては必ずしも高いとはいえない。各地の大学にセンタが整備され、近年のレベルの向上は目を見張るものがある。
	技術開発水準	△	↗	科学技術部がケーブルの開発を行っているが、日米と比較して技術開発力はやや遅れている。韓国電力公社の研究所 KEPRI など、超伝導送電の実証のためのプロジェクトが進められている。
	産業技術力	△	→	生産技術の検討のレベルでの具体的な動きは見えず、国内で産業化されたものはないのではないかとと思われる。LG グループの LS 社がケーブル開発を、KEPRI と共同で進めている。
<p>全体コメント：超電導利用技術には、従来型の超伝導材料 NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn などを使った従来型の展開と、高温超伝導を市場に入れようとする新しい流れがある。米国は電力インフラの超電導化、特に送電ケーブルの超電導化に注力。欧州はドイツを除き、高温超電導利用の技術開発には消極的。但し、低温超伝導材料を用いた MRI、NMR、粒子加速器等の事業には積極的に取り組んでいる。ドイツでは、高温超電導材料利用の船舶用モータ及び風力発電機の開発が盛ん。韓国は電力機器の超電導化を国が支援。中国も同様。日本では電力機器に関して国が支援。産業・輸送機器は産業界が主体。</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]

## (9) 膜分離技術

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	○	↗	水処理膜に関しては膜技術の大掛かりなプロジェクトが始まり逆浸透膜やイオン交換膜の研究が活発化してきた。基礎研究も再開され今後盛んになると考えられる。膜を使った応用研究は盛んに行われており、産業界での適用に繋がっている。燃料電池用高分子固体電解質膜は従来からのイオン交換膜の研究蓄積を引き継ぎレベルが高い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の研究レベルは比較的高いが、薬物徐放等は並みのレベルである。新しいプロセス研究は欧米に比べ劣っている。
	技術開発水準	◎	↗	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜や、燃料電池用高分子固体電解質膜の技術開発水準は非常に高い。医療用の膜に関しても透析膜や多孔質膜の技術開発水準は非常に高い。薬物徐放の技術開発や膜プロセス技術開発は並みのレベルである。
	産業技術力	◎	↗	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜や、燃料電池用高分子固体電解質膜の産業技術力は非常に高い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の産業技術力は非常に高い。薬物徐放はあまり高くない。膜プロセスの産業技術力は並みのレベル。
米国	研究水準	◎	↗	逆浸透膜の新しいプロジェクトが始まり研究が活発化してきた。特に不織布を利用した逆浸透膜の研究は興味深い。燃料電池用高分子固体電解質膜は比較的高いレベルがある。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の研究レベルは比較的高い。薬物徐放等は非常に進んでいる。膜プロセス研究は高いレベルにある。
	技術開発水準	○	→	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜の技術開発水準は並みのレベルである。燃料電池用高分子固体電解質膜の技術開発水準も比較的高い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の技術開発水準は非常に高い。薬物徐放の技術開発水準は非常に高レベルである。膜プロセス技術開発も高いレベルにある。
	産業技術力	◎	→	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜の産業技術力は比較的高い。燃料電池用高分子固体電解質膜の産業技術力も比較的高い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の産業技術力は非常に高い。薬物徐放の産業技術力も比較的高い。膜プロセスの産業技術力は高レベルである。
欧州	研究水準	○	→	水処理膜に関しては限外ろ過膜や精密ろ過膜の基礎研究レベルは高い。燃料電池用高分子固体電解質膜は並みのレベルである。医療用の膜に関しては多孔質膜の研究レベルは比較的高い。薬物徐放等は並みのレベルである。膜プロセス研究は比較的高レベル。
	技術開発水準	○	→	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜の技術開発水準はあまり高くない。燃料電池用高分子固体電解質膜の技術開発水準も低い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の技術開発水準は比較的高い。薬物徐放の技術開発水準は高レベルである。膜プロセス技術開発も高いレベルにある。
	産業技術力	○	→	水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜の産業技術力は低い。燃料電池用高分子固体電解質膜の産業技術力も高くない。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の産業技術力は米国と同様である。薬物徐放の産業技術力は並である。膜プロセスの産業技術力は高レベルである。
中国	研究水準	○	↗	膜及び膜利用プロセス技術の研究開発が盛んに行われ、研究レベルは年々向上している。水処理膜に関しては膜技術の大掛かりなプロジェクトを行い非常に活発でありレベルも向上してきた。燃料電池用高分子固体電解質膜も質が向上してきた。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の研究レベルは低い。薬物徐放等の膜もレベルは高くない。膜プロセス研究は非常に活発で急速にレベルが向上している。
	技術開発水準	○	↗	大学での膜研究が技術開発まで進み、さらに生産会社へと発展している。技術レベルが年々向上し、極めてスピーディであり、脅威を感じる。水処理に関する逆浸透膜、NF膜、多孔膜、イオン交換膜の技術開発水準が海外技術導入等により比較的上向してきた。燃料電池用高分子固体電解質膜の技術開発水準はそれほど高くない。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の技術開発は活発に行われているがレベルは高くない。薬物徐放の技術開発水準もそれほど高くない。膜プロセス技術開発は海外に支配されている。
	産業技術力	○	↗	中小膜メーカーが乱立し一般に技術力は低いが、過当競争の結果、少数ではあるが高レベルのメーカーが増えてきた。膜利用プロセス技術は、海外企業と組んで進んでいる。
韓国	研究水準	△	→	膜の研究は日本より活発に行われ論文が増えているが、利用研究に重点がおかれている。
	技術開発水準	○	↗	膜メーカーが技術開発及び生産をしている。米国の技術者と組んで技術開発水準を上げて来ているなど、活発化の兆候あり。
	産業技術力	○	↗	日本の競争相手となりうる膜メーカーが出現しており、レベルも非常に高くなっている。大手エンジニアリング会社 (Doosan) が世界のプラントを受注している。膜利用プロセス技術については、海外の膜を使用して、海外企業と連携して進めている。韓国 RO メーカー (Saehan) を韓国大手企業 (Woonjing) が買収し、積極展開開始。

全体コメント：日本はナノテクノロジーを活用した材料研究開発に優れ、既に多くの技術を保有しており、現状の膜技術においては優位に立ち約70%のシェアを取得している。一方、膜利用プロセス技術においては、日本企業は技術力はあるが規模が小さく、欧米巨大企業に比べ世界市場への展開が著しく遅れている。また、将来を見据えた高機能膜創出研究は、欧米の大学・研究機関で継続されており、さらに近年米国が大学及び企業を巻き込んで水処理膜の開発に大きな力を入れはじめ今後大きな展開を見せる可能性がある。

- (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]

## (10) 排出ガス浄化用触媒

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	◎	↗	大学・公的研究機関と民間企業の協力関係も良好で、放射光を用いた in - situ 解析等の基礎研究が実際の産業成果に結びつき、この分野では世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	自動車企業が中心となり、大学や公的研究所とのコラボレーションにより新技術を開発し、速やかに実用化していく日本スタイルが築かれている。
	産業技術力	◎	↗	トヨタ、ダイハツだけでなく、ホンダ、日産、マツダなどからも新機能触媒の開発や実用化発表が相次ぎ、世界的にも高い産業技術力を維持している。
米国	研究水準	△	→	経済環境の悪化が深刻で、研究開発に対する戦略が停滞。
	技術開発水準	△	↘	ビッグスリーの財政状況が最悪のため、関連産業を含め開発資金が凍結。国際競争力は大幅に低下。
	産業技術力	×	↘	サブプライムローン崩壊による景気悪化により急激に低下。特にビッグスリーと関連企業は深刻。
欧州	研究水準	◎	↗	放射光を用いた in - situ 解析等の基礎研究でも高い水準に達している。
	技術開発水準	○	↗	排出ガス規制が開始されたのが 1993 年と日米に遅れること約 15 年であったが、急速に水準が高まっている。
	産業技術力	◎	↗	特にディーゼル車の市場占有率が高く、その排気処理の分野では世界をリードしている。
中国	研究水準	△	↗	研究論文数は急増しているが、オリジナリティが打ち出せるレベルには至っていない。
	技術開発水準	△	↗	政府の後押しによる省エネ、環境、安全技術の獲得が進められている。
	産業技術力	△	↗	各国の自動車および関連企業が進出し産業技術力も向上。オリンピック景気も好影響。
韓国	研究水準	○	→	特に韓国発信の新規研究は現れていないが、基礎的な水準は維持しているものと予想。
	技術開発水準	○	→	特に韓国発信の新技術は現れていないが、基礎的な水準は維持しているものと予想。
	産業技術力	○	→	技術水準は維持している。

全体コメント:国際的な比較を試みると、新しいコンセプトは日本初のものが多い。実用化された例ではトヨタの NOx 吸蔵還元触媒、ダイハツの貴金属が自己再生するインテリジェント触媒などがある。また NOx を触媒内でアンモニアに変えて還元剤とする新概念のリーン NOx 触媒、PM を触媒酸化するディーゼルパティキュレートフィルター (DPF) がホンダにより提案され、2 - 3 年後に低公害型のクリーンディーゼル車が欧米市場に投入される予定である。このようにディーゼルに関しても研究開発力も産業技術力も日本が世界をリードし、かつ向上中である。しかし欧州の実力も高く、排ガス規制が遅れたこともあって後塵を拝した感があったが、今後日本を追い越す可能性はある。特にディーゼル機関に関しては、すでに世界トップである。韓国は基礎的な水準は確保しているが、新規開発や産業技術力の向上には見るべきものが少ない。中国はまだまだである。2008 年の動きを総括すると北京オリンピックで上昇気流に乗る中国と、サブプライムローン崩壊による景気の急激な悪化を被った米国の明暗が分かれたことが印象に残る。自動車産業もその影響をダイレクトに受け、北米を重要市場としていたトヨタ、ホンダはじめ大手企業は研究開発力にも今後影響が大きく出て来ることが懸念される。ホンダの F1 完全撤退に象徴されるように、研究開発においても集中と選択が進むことは必至であるが、環境技術に関してはむしろ生き残りをかけて研究開発が激化するものと考えられる。

(注 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。

(注 2) 近年のトレンド [↗:上昇傾向、→:現状維持、↘:下降傾向]



## (11) 環境調和・リサイクル技術（回収技術など）

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	◎	↗	技術に関する基礎研究力では世界トップクラスであり、最近では希少資源代替技術に力点が置かれている。湿式プロセスは従事する研究者が少なく米国に劣るものの、高温処理プロセスは日本が強い。ナノ環境材料などのエコマテリアル開発に関する研究水準は高く欧米とほぼ同等。一方で、今後の資源制約社会に対応した技術開発は、資源に乏しい我が国の重要な課題だが、循環利用や希少元素の大幅代替を果たした例は未だ少ない。
	技術開発水準	◎	↗	高機能の基礎工業素材を省資源、省エネルギーで生産する技術は世界トップクラス。プリコンシューマーのスクラップを効率的に利用する技術等での開発ポテンシャルも高い。RoHS 対応技術などエコマテリアルの具現化技術も優れている。一方、レアメタルリサイクル技術は平均的で、レアメタル消費大国として研究開発戦略に懸念あり。
	産業技術力	◎	→	既存産業インフラを用いたリサイクル技術の開発に強みを見せており、リサイクルの実効性を担保する上で重要なトレンドである。しかし社会システムとの連携がまだ不十分であり、資源有効利用の観点でのリサイクルはまだ十分に産業化されている部分が少ない。システム評価のソフト面は欧米に匹敵するレベルである。
米国	研究水準	○	↗	欧州同様、化学物質リスクについてはナーバスであり、環境モニタリングについての研究報告例は多い。WEEE 等の処理法としてハイドロプロセスは研究者も多く、先行している。豊富な水力発電による電力を念頭に置いた電気化学的方法による活性金属の製造など、次世代素材製造プロセス開発などは散見される。
	技術開発水準	○	↗	これまでは国の総意が環境調和に向いているとは言えず、産業、地域によって相当の差はあるものの、米国でもエコマテリアルへの関心が高まっている。特筆すべき技術開発は多くないが、白金ナノ結晶など、萌芽的な成果が幾つか認められる。ここ数年で著しく重要性が増してきた資源戦略に関連した物質フロー研究が Yale 大学を拠点として先行している。
	産業技術力	△	↗	米国特有の産業エコ技術として特筆すべきものは無い。
欧州	研究水準	○	↗	化学物質リスクの観点が強く、ハード的要素研究よりも規制やリスク管理のシステム開発に力が注がれ、リサイクルシステム設計等のソフト面での研究が進んでいる。それを考慮したエコデザインなどの手法を通して製造技術に影響する可能性もある。北京オリンピック前後から世界的な資源需給についてタイト感が増し、EU で先行している俯瞰的な物質フロー・ストック勘定に関するソフトウエアの研究では主導権を保つだろう。
	技術開発水準	○	→	化学物質リスクについてナーバスであり、リスク管理としてのソフト面での水準は高い。それを技術開発に結び付ける面は弱いが、規制と相まって規制元素フリーの材料開発が進むなど、WEEE の処理についてハードとソフトの両面から研究が進んでいる。下水汚泥等を対象とした有価資源回収には欧州全体で取り組んでいる。
	産業技術力	○	→	決して一枚岩ではないが、欧州全体でリサイクル産業技術力開発のベクトルが揃いつつある点は有利である。環境イデオロギーのみが先行しているくらいはあるが、そのため、LCA、MFA 等のシステム研究が進んでいる。一方、国ごとの産業技術力にはかなりの差が認められており、エコマテリアルの観点では英、独、仏の力が抜き出ている。
中国	研究水準	○	↗	環境調和材料開発については総じてレベルは低いが、一部の研究水準は非常に高い。例えば、清華大、アモイ大学、米国ジョージア工科大学の共同研究で見出された 24 面体ナノ白金結晶は、ナノ触媒材料として大きな注目を集めている。一般的に、中国の研究機関では環境関連要素研究が個別には活発に行われているが、有力な国内学術誌を持たないため、研究トレンド情報が掴みにくい。地域で発生した問題解決にあたる例が多いようである。
	技術開発水準	○	↗	高い経済成長、旺盛な消費マインドによって、中国版の RoHS やリサイクル法の整備などと合わせて、日本など外国の技術を導入して産業の中に組み込む取り組みが進められだし、回収できる資源、材料はよく回収されている。結果的にリサイクルは経済原理に則って活発に行われていると言えるが、注目すべき技術は特に見当たらない。他国にも同じことが言えるが、特に中国はオリンピック後の経済停滞が技術開発トレンドにどのように影響するか不明である。
	産業技術力	△	↗	エコに対する重要性の認識、危機意識は確実に高まりつつあるが、産業面ではまだエコに力を向ける余裕はなく、環境規制対応、あるいはビジネスとして環境メカニズムに沿ったプロセス改善を行っているのが実態と思われる。むしろ中国国内の環境マーケットに向ける海外の関心が著しく高い。

韓国	研究水準	△	↗	合金元素によらない組織制御によるベースメタル材料の機能向上について、日本に次ぐ成果を挙げつつあると言える。中国と同様、有力な国内学術誌を持たないため、研究トレンド情報は掴みにくい。特に研究トレンド全体を俯瞰する資料がハングルで書かれているものが多く、注意してウォッチする必要がありと思われる。
	技術開発水準	△	↗	資源需給や国内外マーケットの状況は日本と類似しており、世界的な経済クラッシュが今後大きく影響する懸念が大きい。材料開発、プロセス開発のいずれにおいても日・欧・米には遅れている。ただし工業現場の技術者レベルは総じて高い。
	産業技術力	△	↗	数少ない大規模素材製造プロセスを利用したリサイクル技術が幾つか報告されているが、未だ主製品の製造に専念しているように思われる。

全体コメント：環境を意識したエコマテリアルに対する関心、研究トレンドはいずれの国においても上昇傾向にある。日本、欧州、米国の3者間で個別エコマテリアル技術についての大きな優劣はないが、積極的に位置付けて取り組んでいる点で日本が進んでおり、特に有害物質対応では欧米がリスク管理のシステムでの対応を強めているのに対して、実質的な材料技術で回答を出している。一方、リサイクル技術については日本、韓国を中心に産業技術としては進んでいるが、個々の要素基礎研究は別としても、温暖化ガス排出削減に量的に結びつくような実効性の高いリサイクル技術やポストコンシューマーのリサイクルを経済的に成立させる技術としては未だ特筆すべきものがなく、技術開発レベルはほぼ同等である。日本はエコマテリアル技術、リサイクル技術に関して広範な基礎研究力を有しているにもかかわらず、国内に有力な環境専門学術誌が少ないため、研究成果が各要素技術の専門誌や欧米の環境専門誌に投稿される傾向が著しく、情報発信の点で不利である。

(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]

## 2.2.4 産業用構造材料(輸送・建造等)分野

### 2.2.4.1 概観

この分野は多岐にわたるため、ここでは代表的な例として、高強度・軽量構造材料、耐熱構造材料、高機能ガラス(遮熱ガラス、機能性ナノガラス)を取り上げた。

高強度・軽量構造材料は、鉄、アルミ、チタンなどの分野で日本と欧州が世界をリードしている状況にあるが、日本では基礎研究分野が停滞傾向にあるのに対して、欧州では再び活性化している。米国の研究水準および技術開発水準は現在衰退しているが、産業としては経済界に確固たる地位を占めており、産業技術力が技術のみでないこと(経営戦略に大きく寄与する)を示している。

耐熱構造材料はニッケル基合金が航空産業、軍需産業において戦略的な材料として位置づけられてきた経緯もあり、欧米が研究水準、技術開発水準、産業技術力の全てで先行している。一方で、日本は単結晶合金の研究分野で世界的に存在感を示しつつあり、発電タービン、ボイラ等の産業分野において技術蓄積が進みつつある。

高機能ガラスは熱遮蔽やディスプレイが応用目的の大半である。ナノガラス技術は日本の強い分野の一つで、大型フラットディスプレイ、非球面レンズ、情報通信用光ファイバーや光学部品に多く応用されている。しかし、米国やEUでもナノガラス技術の国家プロジェクト立ち上げが始まり、中国でも多くの投資がなされようとしており、国際的競争が激しくなると予想される。

全体として日・米・欧が先行して、韓・中がキャッチアップを目指す形になっている。先行の日・米・欧では各国、地域での形は明らかに異なっており、日本は新コンセプト提案型、欧州は政策誘導型、米国は企業の経営戦略依存型、という構図になっている。

一方で韓国は90年代の急進展で高い技術レベルに達しているものの、やや伸び悩み、中国はまだレベルは高くないが、現在急進展中である。

高強度・軽量構造材料の項で産業技術力は技術力だけでなく、経営戦略に大きく寄与することに触れたが、日本と比較して欧米では、実用化を加速させるための官民一体の施策に力が注がれている。例えば、省エネ住宅等への応用を念頭においた遮熱ガラスを例にすると、住宅の省エネを目指した日本の取組みは始まったばかりで、欧州に比較して出遅れ感がある。温室効果ガス排出量の削減が求められる昨今、潜在的な技術力を活用するためには、省エネのための規制誘導(法改正など)は不可欠と考えられる。それに加えて、室内環境やエネルギー利用状況の計測や制御、監視、管理などを行うエネルギー管理トータルシステムの導入を促進が重要となる。技術力を産業力として活かすためには、個別の技術、部材をトータルシステムとして構築する社会的、経済的仕組みが求められている。

## 産業用構造材料（輸送・建造等）分野のまとめ

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	◎	→	金属系高強度軽量材料では研究人口が減少、先端機能材料では産学協力で進展中、機能ガラスなどでは研究深化が進むが全般的には現状維持。耐熱構造材料の研究層が欧米より薄い。
	技術開発水準	◎	→	先端機能材料では水準も高く更なる展開が見られるが、全般には水準は高いものの、発展速度は他の国に比較して大きいとは言えない。耐熱構造材料は一部を除いて遅れ気味。
	産業技術力	◎	→	先端機能材料では群を抜く技術もあるが、金属系高強度軽量材料などでは、中国特需に依存する面がある。耐熱構造材料の粉末技術が弱い。
米国	研究水準	○	→	航空機、軍事関連応用が研究を牽引する構造が、研究レベルを維持しているが、日欧に比べて研究人口の減少が目立つ
	技術開発水準	○	→	Low - E ガラスなどの活発な分野を除き、開発現場に PhD が少なく、自動車産業の不振などで、発展は限定的である。
	産業技術力	◎	→	マーケットが大きく、技術力は何とか保持しているが、近年企業統合などで、ビジネス的側面から活性化している。航空、軍事応用により、大型部品の製造技術が高い。
欧州	研究水準	◎	→	ユーロ圏という研究集団として研究者層も厚い。共同利用施設の活用による基礎研究が高いレベルを維持している。
	技術開発水準	◎	→	民生、航空、軍事分野と幅広く技術の水準は高い。
	産業技術力	○	→	米国同様マーケットが大きく、生産現場の技術力は高い。金属系高強度材料では効率の高い生産技術を持っている。機能性ガラスでは Low - E ガラスを除き、生産技術は日米に劣る。
中国	研究水準	△	→	研究論文が増えてきた、という段階である。注目すべき論文もあるが、レベルは全般に低い。
	技術開発水準	△	↗	海外からの装置導入により生産現場の技術力が向上し、改良技術の開発も進み始めた。全般的には外国技術導入に深く依存している。
	産業技術力	△	↗	技術移転により最新設備を有する工場を建設し、急速にキャッチアップを進めている。しかし周辺技術の充実などはこれからの課題である。
韓国	研究水準	△	↗	新規なものは少なく、自動車や建築関連での研究に積極性が十分でないが、研究拠点の重点化などで研究論文の増加は見られる。
	技術開発水準	○	→	新規技術開発の発信が不十分だが、技術導入と平行して独自の開発も進められており、急速に力をつけている。耐熱構造材料を除き、キャッチアップしたとの印象がある。
	産業技術力	○	→	内需に限りがあることが産業技術力向上の足かせとなっているが、技術導入の段階から独自の改良を加える段階に伸展している。

(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]

## 2.2.4.2 中綱目ごとの比較

## (1) 高強度・軽量構造材料

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	◎	↘	高度解析技術や計算シミュレーションを活かした研究を行っている。しかし、研究者人口の減少により、その水準はむしろ下降傾向。
	技術開発水準	◎	→	新材料の開発力に優れている。高効率生産に関する技術力も高い。一方、航空分野・軍事関係に弱い。
	産業技術力	◎	→	中国特需による需要拡大で工場設備がフル稼働し、効率の高い生産を実現。ここにいたって資源の枯渇高騰に苦しむ。
米国	研究水準	△	→	研究者人口が極端に少ない。しかし、航空分野や軍事関係に限るとポテンシャルは高い。
	技術開発水準	△	→	生産現場に学位を持った研究者がいない。新材料の開発は行っていない。
	産業技術力	○	↗	再編統合により企業としてのポテンシャルを上げている。
欧州	研究水準	◎	↗	ユーロという集団として研究ポテンシャルを上げている。各材料について研究拠点を持つ。
	技術開発水準	◎	→	新材料の開発力に優れている。民生品から航空分野・軍事関係まで幅広く高い技術水準を持つ。
	産業技術力	◎	→	中国特需による需要拡大で工場設備がフル稼働し、効率の高い生産を実現。
中国	研究水準	×	↗	キャッチアップ途中。研究拠点の重点化により急速に力をつけつつある。トップレベル大学から優秀な若手研究者が多く育っている。
	技術開発水準	△	↗	キャッチアップ途中。現状は外国からの技術移転が頼り。
	産業技術力	△	↗	技術移転により最新設備を有する向上を建設。急速にキャッチアップ中。
韓国	研究水準	○	↗	研究拠点の重点化により再び上昇傾向。
	技術開発水準	○	→	キャッチアップを完了したが、新材料を開発するに至っていない。
	産業技術力	○	→	最新鋭の工業設備を持つが、内需に限りがあることが産業技術力向上の足かせとなっている。
<p>全体コメント:高強度軽量材料については、鉄、アルミ、チタンなどの分野で日本と欧州が世界をリードしている状況にある。しかし、日本では基礎研究分野が停滞または下降傾向にあるのに対して、欧州では再び活性化している。米国の研究水準および技術開発水準は20年前まで世界をリードしていたが、現在衰退している。しかし、産業としては経済界に確固たる地位を占めており、産業技術力が技術のみでないこと(経営戦略に大きく寄与すること)を示すものである。韓国は90年代に大きく伸びたが現在頭打ちの状態である。中国は90年代末から生産が急増したが、その技術は海外からの導入であり、現在急速にキャッチアップ中である。</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]

(2) 耐熱構造材料

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	△	↗	物質・材料研究機構（NIMS）や一部の大学などで優れた研究開発も見られるが、欧米と比べて層が薄く、金属間化合物では基礎研究、Ni 軽合金では単結晶合金開発、Fe 系合金では新規フェライト系合金開発などの特定分野のみに偏っている。
	技術開発水準	△	→	発電タービン、ボイラを対象に一部の企業で研究開発が進められているものの、先行する欧米に比べて遅れが目立つ。先進的超々臨界圧発電（A-USC）プロジェクトで欧米を追尾している。航空分野の研究開発はさらに大きく遅れる。
	産業技術力	△	→	車両用、発電用等の部品製造において優れた技術を有する企業（発電プラントの大型ローターの鍛造や TiAl ターボチャージャーの鍛造など）もあるが、付加価値の高い航空用等の技術で欧米に大きく遅れる。特に、粉末技術は皆無。
米国	研究水準	◎	→	発電では、古くから最も進んだ研究が行なわれている。航空機分野でも軍事応用を目的として古くから最も進んだ研究が行なわれている。近年も NASA を中心とした国家プロジェクト等によって高いレベルの研究が進められている。
	技術開発水準	◎	→	先進的超々臨界圧発電（A-USC）プロジェクトでは実証プラントでの過去の失敗から様子見気味だが、高い技術力を維持している。航空用途を中心に応用研究が進められている。コーティング技術や製造技術などの周辺技術に関する研究でも先行している。
	産業技術力	◎	→	付加価値の高い航空用の精密鍛造部品や鍛造部品、あるいは大型部品は欧米企業でなければ作れないものも多い。
欧州	研究水準	○	→	先進的超々臨界圧発電（A-USC）プロジェクトでも世界のトップを走っている。ULTMAT 等国家プロジェクトをもとに高いレベルの研究が進められている。材料評価やシミュレーション技術において優れた研究がある。
	技術開発水準	◎	→	先進的超々臨界圧発電（A-USC）プロジェクトでも実証プラントで最も進んだ成果を挙げている。航空用途を中心に応用研究が進められている。コーティング技術や製造技術などの周辺技術に関する研究でも先行している。
	産業技術力	◎	→	付加価値の高い航空用の精密鍛造部品や鍛造部品、あるいは大型部品は欧米企業でなければ作れないものも多い。
中国	研究水準	△	↗	過去の先導研究の模倣が多いが、最近の論文発表件数が急増している。
	技術開発水準	×	↗	公開情報はほとんど見当たらない。しかし、研究水準より推察すれば技術開発水準は年々向上している。
	産業技術力	×	↗	欧米企業の進出により、精密鍛造技術や鍛造技術等において力を付けはじめている。
韓国	研究水準	×	→	目だった研究は行なわれていない。
	技術開発水準	×	→	目だった開発は行なわれていない。
	産業技術力	×	→	目だった生産は行なわれていない。
<p>全体コメント：ニッケル基合金は航空産業、軍需産業において戦略的な材料として位置づけられてきた経緯もあり、欧米が研究水準、技術開発水準、産業技術力の全てで先行している。一方で、日本は単結晶合金の研究分野で世界的に存在感を示しつつあり、発電タービン、ボイラ等の産業分野においても技術蓄積が進みつつある。TiAl などの金属間化合物も航空産業、軍需産業において戦略的な材料として位置づけられるが、日本は 1980 年代から積極的に研究開発に取り組み、研究水準では一時世界をリードしていたが、航空機への応用など本格的な実用化が始まった今、息切れ気味の感がある。今後、欧米レベルに技術水準を上げるためには、より付加価値の高い航空分野の産業育成等が必要と考えられる。中国は最近の論文発表件数が急増しているため、今後の動向を注目すべき。韓国ではまだ目立った動きはない。</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]

## (3) 遮熱ガラス (省エネ住宅等への応用)

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	◎	→	全般的に高いレベルにあり、多くの分野で最先端の研究が行われている。また、プロセスは半導体産業、材料はナノテク産業との関連で研究が深化している。
	技術開発水準	◎	→	欧米と比較すると、特に自動車への応用分野での研究が精力的に進められており、トップ水準にある。また、近年では、単なる材料の積層だけではなく、ナノスケールの構造を持った膜が実用化されている。
	産業技術力	◎	→	市場からの品質要求レベルが高く、生産現場の技術力はトップレベルにある。
米国	研究水準	○	→	欧州と比較すると数は少ないが、一部の大学でトップレベルの研究がなされている。
	技術開発水準	◎	→	Low - E ガラスを中心に活発に開発が進められており、高い水準にある。
	産業技術力	◎	→	Low - E ガラスの法制化により、大きな Low - E ガラスの市場があり、企業による生産現場の技術力は高い
欧州	研究水準	◎	→	民間からの出資と、政府からの援助を組合せた研究プログラムが各研究機関で有効に進められており、高い水準にある。
	技術開発水準	◎	→	上記研究機関と上手く連携して研究を進めており、高い水準にある。
	産業技術力	◎	→	Low - E ガラスの法制化により、大きな Low - E ガラスの市場があり、企業による生産現場の技術力は高い。
中国	研究水準	×	↗	一部の大学で研究開発が始まった段階である。
	技術開発水準	△	↗	成膜メーカーの装置導入により、生産現場の技術力が向上し、その改良技術の開発が進んでいる。但し、高付加価値商品に関する技術開発はまだ萌芽期にある。
	産業技術力	△	↗	近年、Low - E 用に成膜装置メーカーから多くの装置を導入しており、これに伴い生産現場の技術力も向上していると考えられる。
韓国	研究水準	○	↗	一部の大学で研究開発が進められており、近年、学会発表等が増えている。分野別ではディスプレイ関連の研究開発が積極的に進んでいる。ただ、自動車分野や建築分野での積極的な研究開発は停滞気味である。
	技術開発水準	○	↗	技術導入と平行して独自の開発も進められており、急速に力をつけている。
	産業技術力	○	↗	技術導入の段階から独自の改良を加える段階に伸展している。

全体コメント：ドライ成膜に関しては欧州は長い研究の歴史があり、近年の Low - E ガラスの法制化で大きな市場が形成され、技術レベルは高い。米国は同様に大きな Low - E ガラスの市場があり、企業を中心に高いレベルにある。一方、日本は特に自動車・ディスプレイ用の開発が牽引する形で高いレベルにあり、韓国、中国は近年の進展が著しい。ウェット成膜法を利用した高機能ガラスに関する研究は、日本国内での高付加価値商品に対する需要を背景に積極的に行われている。しかし、国外では、ドライ成膜が主流であり、学会等における発表件数を見ても圧倒的に乾式に関するものの方が多い。国内でのウェット成膜に関する研究の主流は、プロセス開発よりも材料開発にあり、プロセス開発は、半導体産業での成果が転用される事が多い。材料開発は、ナノテクノロジーへの展開を見据えた研究が主であり、基礎的アプローチは主に大学・各種研究機関が、実用化技術を各企業が担っているのが現状である。

Low - E : (Low - Emissivity)

Low - E ガラスとは、通常のフロートガラスに金属膜をコーティングし放射率を小さくすることで伝熱が小さくなるという特徴を有するガラス。複層ガラスの材料として使用することで、断熱性をより一層高めると共に、夏場の遮熱性をも高めることができ、冷暖房両方の負荷を軽減し省エネ性に優れた開口部の実現に貢献する。

- (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) 機能性ナノガラス (情報通信等への応用 —記録、通信、表示など—)

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	◎	↗	NEDO ナノガラス技術プロジェクトが 2000 年から 2005 年までの 5 年間に亘って行われ、それに 6 大学も参画したことにより、研究水準は飛躍的に向上し、その後も学協会が活性化している。
	技術開発水準	○	↗	上記プロジェクトや潜在的なガラス企業のノウハウにより、ナノガラスの技術開発は世界最高レベルにあり、多くのフラットパネルや光学部品が開発されている。
	産業技術力	◎	→	日本のガラス技術の高さにより、産業技術力も高水準を維持している。ガラス製品の各分野においてシェアの 1 位や 2 位を占めていることが、それを物語っている。
米国	研究水準	△	↘	大学は人材不足にあり、研究水準が高いとは言えない。
	技術開発水準	○	↗	コーニング社が技術開発において米国内で他を大きくリードしている。
	産業技術力	◎	↗	コーニング社が、大型テレビ用パネルの生産において日本に肩を並べるべく開発に注力したため、産学技術力は大きく伸びた。
欧州	研究水準	◎	→	伝統的な分野も含めて、多くの研究者が存在し、研究は活発に行われている。
	技術開発水準	○	→	ショット社 (独)、ピルキントン社 (英)、サンゴバン社 (仏) など、技術開発水準は以前から基盤研究も含めて高い。
	産業技術力	△	→	研究開発は盛んだが、産業技術力は必ずしも高くない。
中国	研究水準	○	↗	ガラスの研究者の数は多く、論文も多く出ている。ナノガラス技術を日本で学んだ留学生などが活躍している。
	技術開発水準	△	↗	進出した日本企業と合併会社を作るなどして、開発水準は上がっている。
	産業技術力	○	↗	人件費の安さと労働力の多さに符号して、産業技術力も上がっている。
韓国	研究水準	△	→	大学などにおいてガラスの研究者が極端に少ない。
	技術開発水準	△	→	進出した日本企業から学んでいる。
	産業技術力	△	→	進出した日本企業に依存している。
全体コメント： 日本のお家芸といわれるナノガラス技術は、大型フラットディスプレイ、非球面レンズ、情報通信用光ファイバーや光学部品に多く応用されており、新製品の開発が依然として続いている。これに対抗するように米国や EU でもナノガラス技術の国家プロジェクト立ち上げが始まり、中国でも多くの投資がなされようとしている。今後はさらに国際的競争が激しくなると思われる。				

(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]

## 2.2.5 生活関連材料分野

### 2.2.5.1 概観

米国の Woodrow Wilson International Center のプロジェクトで実施しているナノテク消費者製品評価によれば、ナノテクを応用した消費者製品の数は最近急増している。2008年8月時点で、その数は803に達し、2006年11月以来279%増加している。最も広く利用されている材料は銀で約50%を占め、後に続くカーボン、亜鉛（酸化亜鉛含む）、チタン（酸化チタン含む）、シリカなどを圧倒している。製品の数を分野別で見ると、ヘルス・フィットネス分野（衣類、化粧品、ろ過、個人介護製品、スポーツ用品など）が圧倒的に多い。地域別では米国が最も多く、約55%を占めている。このように、ナノテクが生活関連材料に応用される分野は広く、ここでの国際比較に全てを網羅することは困難である。そこで、世界の論文発表の分野別数（ナノテクテクノロジー総合支援プロジェクトセンターの分析）から、日本の役割が大きいもの、中程度、小さな分野として、化粧品、繊維、食品を選んだ。

これらの分野でナノテクが応用されている例を示す。

**化粧品：**化粧品の原材料でのナノテク応用としては、ナノカプセルやナノ粉体の開発などが挙げられる。ナノカプセル化は、各種有効成分の浸透向上を狙ったものが多く、また、ナノ粉体を利用した自然な仕上がりとしみ・しわなどの遮蔽効果を両立させることを狙ったメイクアップ用途を想定したナノサイズコントロールなどの検討がなされている。また、併せてナノ粒子の安全性についても議論・確認がなされている。

**繊維：**繊維産業は厳しい環境の中で、機能性繊維を中心に新たな方向への脱皮が求められている。現在、安全、健康、清潔などの快適衣料に加え、産業用繊維（テクニカル・テキスタイル）、インテリジェントファイバー、ナノファイバーなどの付加価値の高い新しい機能性繊維が登場し用途拡大が期待されている。

衣料の材料である繊維にはナノテクにより高機能性が付与される。例えば、発光色繊維は屈折率の異なるポリエステルとナイロンを数十nm単位の多層構造にして、無染色で神秘的な発色を可能にした。また、繊維表面にナノオーダーで制御されたバインダー皮膜を形成させ、消臭剤を繊維表面に接着させている。更に、数十nmの単糸数140万本以上のナイロン・ナノファイバーには吸着や接着特性などの新機能を発現させている。

**食品：**ナノテク利用食品の定義をナノ技術、ツールが食品の栽培、製造、加工、または包装のいずれかの工程で利用された食品とした。スマート容器包装、センサー、ICタグ、栄養成分の微細カプセル化などが代表的な応用例である。

生活関連材料は広く、全体を一言で述べることは適当ではないが、ここでは化粧品、繊維、食品を代表させることを試みた。各国で共通的なことは、この

分野は産業界が技術開発を牽引していることである。その結果、大学での研究者人口が少なく、大手企業のグローバルな技術力を反映する形になり、国別、地域別の技術比較の意義が大きく薄れているといえよう。そのような中で、敢えて結論的なことを言えば、化粧品と繊維での日本の技術的優位性はかろうじて保たれているものの、化粧品では欧州、繊維では米国との競争が激化している。食品では、欧米が研究、技術開発、産業いずれのレベルでも日本を引き離している。中国、韓国との技術力では日米欧ともに優位性は著しいが、化粧品技術で韓国が急速に伸びていることは特筆すべきであろう。

ナノテク利用食品の安全性に関する検討は、ナノテク全般の安全性の取り組みの中でも、人が直接口にするという観点で重要な位置付けにある。日本のこの方面の取り組みの弱さは、ナノテクを利用する他の工業製品群の安全性検討・社会受容にまで波及することが懸念される。2002年以降、欧米諸国では「フードナノテク」または「ナノフード」をキーワードに、政府機関や産業界、大学、一般消費者を含めたシンポジウムが定期的開催されるなど、ナノテクを食品産業へ利用・応用しようとする動きと、安全性・社会受容についての取り組みが始まっている。一方、日本では、安全性評価の取り組みが進められているが、欧米ほどの勢いはまだ見られない。

## 生活関連材料分野のまとめ

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	○	↗	この分野は産業界が技術開発を牽引している結果、大学での研究人口が少なく、全体的な研究水準も欧米に比べて見劣りする。
	技術開発水準	◎	↗	繊維、化粧品では欧米を凌ぐものがいくつか見られる。スーパー繊維、帯電防止繊維では世界をリード、化粧品でも勝っている。食品では世界の大手企業の背を見ている。
	産業技術力	○	↗	繊維、化粧品では欧米を凌ぐものがいくつか見られる。スーパー繊維、帯電防止、難燃繊維では世界をリード、化粧品の品質は世界のトップである。特に、美白訴求成分などの開発は他国に群を抜いている。食品への大手企業の取組みは欧米に比べて弱い。食品用の包装材料技術は世界トップである。
米国	研究水準	◎	→	繊維と食品は非常に進んでいるが、化粧品は日欧より遅れている。機能性繊維での野心的な研究が目立つ。国家的な研究資金が大学に流れており、研究を活性化させている。
	技術開発水準	◎	→	PIPD 繊維、ポリパラフェニレン繊維などの高強度高耐熱繊維が研究の中心になっていて、高いレベルにある。化粧品製剤技術のレベルは非常に高い。また、食品では包装技術が非常に高い。
	産業技術力	○	↗	スーパー繊維ではアラミド（デュポン）、高強度 PE（ハネウエル）が世界的に強い。機能性繊維についても高い生産技術レベルにある。化粧品の産業技術力は日本より若干弱い程度である。食品のサプリメント開発の水準は進んでいる。
欧州	研究水準	◎	↗	機能性繊維について、難燃の研究水準は高い。ESP では先行し、応用研究はドイツが強い。界面化学、コロイド化学で日、米より研究水準の高い大学がある。食品の研究は EU からの支援が産学連携を促進し、その結果、水準はトップである。
	技術開発水準	◎	→	スーパー繊維の企業研究は、事業を持つ割に比較的低調。難燃ではトレピラ（リン系ドリップ型）などで世界的に水準が高い。導電性の技術開発は米、アジアの追従。極細繊維ではノズルレス ESP 装置開発など技術水準は高い。
	産業技術力	○	→	繊維の産業技術力では日米より劣っているが、大きな差ではない。化粧品では伝統的に産業技術力がある。品質は規格内にあり、原料についての規制が徹底されている。欧州での原料規制をアジア・アメリカでも踏襲する傾向にある。食品での安全性の研究が非常に活発で、市場開拓の推進力にもなっている。
中国	研究水準	×	→	繊維では日欧米留学からの帰国者に依存するレベルにあり、独自技術を開発できるまでに至っていない。化粧品、食品に関する研究成果の発表は少ない。
	技術開発水準	△	→	繊維では欧米日の産業技術を現地化する程度の技術力はあるが、自力で産業化できない。化粧品では皮膚研究や有効薬品の探索に熱心な企業も見られるが、国際学会での発表は国家として制限されている。食品については有効な情報はない。
	産業技術力	△	↗	欧米日の産業技術を現地化する程度の技術力はあるが、自力で産業化できるレベルには達していない。
韓国	研究水準	×	→	繊維では日欧米留学からの帰国者に依存するレベルにあり、独自技術を開発できるまでに至っていない。化粧品、食品に関する研究成果の発表は少ない。
	技術開発水準	△	→	化粧品では、企業間の競争によって技術力の増加傾向が見られる。繊維、食品については目立った成果の発表がない。
	産業技術力	△	↗	日本に比べ化粧品の産業技術力は若干弱い程度である。最近、韓国で著名な化粧品会社が日本進出をはたしている。繊維では一部 ESP の商業生産を始めたと報じられているが、その用途開発では国際競争力は乏しい。食品については不明。

(注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。

(注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

2.2.5.2 中綱目ごとの比較

(1) 繊維

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	○	↗	難燃、帯電防止では高い水準の研究レベルにある。極細繊維については ESP で出遅れたが巻き返しを狙っている段階である。スーパー繊維に関しては東工大のポリエステル高強度以外に目立ったものはない。
	技術開発水準	◎	↗	スーパー繊維について、日本は欧米を部分的には引き離している程度である。帯電防止繊維は世界をリードしている。極細繊維では ESP 技術は遅れているが、熔融紡糸型では先行している。
	産業技術力	◎	↗	スーパー繊維について炭素繊維、アラミド、PBO、高強度 PE、PPS、PTFE に関して他国を圧倒。難燃、帯電防止についても高い水準にある。
米国	研究水準	◎	→	機能性繊維についてベンチャーによる野心的な高水準の研究が目立つ。スーパー繊維は軌道工レベータを狙ったカーボンナノファイバーなどの高強度繊維の研究が行われている。ESP で先行し、バイオメディカルへの応用研究も進んでいる。
	技術開発水準	○	→	PIPD 繊維 (Magellan)、ポリパラフェニレン繊維 (MPT) などの高強度高耐熱繊維が研究されている。ESP については 20 年前にフィルターに応用されている。
	産業技術力	◎	↗	スーパー繊維ではアラミド (デュボン)、高強度 PE (ハネウエル) が世界的に強い。機能性繊維についても高い生産技術レベルにある。ESP についてはベンチャーが支えている。
欧州	研究水準	◎	→	スーパー繊維の原糸基礎研究はやや低調。機能性繊維について、難燃の研究水準は高いが、導電性についての研究に目立つものはない。ESP では先行し、応用研究はドイツが強い。
	技術開発水準	○	→	スーパー繊維の企業研究は、事業を持つ割に比較的低調。難燃ではトレビラ (リン系ドリップ型) などで世界的に水準が高い。導電性の技術開発は米、アジアの追従。極細繊維ではノズルレス ESP 装置開発など技術水準は高い。
	産業技術力	○	→	アラミド繊維 (トワロン)、高強度 PE (DSM)、ポリアミドイミド (Kermel)、ポリイミド (Inspec)、PTFE (Lenzing) 等を有する。難燃ではトレビラは世界的な市場を維持している。極細繊維では大学からの技術移転を活用する風土がある。
中国	研究水準	△	↗	欧米、日本からの帰国者に依存するレベルにあり、独自技術を開発できるまでに至っていない。
	技術開発水準	△	↗	欧米、日本の産業技術を現地化するタイプの技術力はあるが、自力で産業化できるレベルにはまだ遠い。
	産業技術力	△	↗	同上。
韓国	研究水準	△	↗	欧米、日本への留学からの帰国者に依存しながら ESP 研究を行っている程度で、目立った研究活動はない。
	技術開発水準	△	→	同上。
	産業技術力	△	→	一部 ESP の商業生産を始めたと報じられているが、その用途開発では国際競争力は乏しい。

全体コメント：ここではスーパー繊維（高強度、高弾性率）、高機能繊維（難燃、帯電防止）、極細繊維を対象にした。スーパー繊維の研究開発、事業化について、日本は欧米を部分的には引き離しているが、アラミドで米国、高強度 PE で米国、オランダ、フッ素繊維も欧米において研究開発、事業拡大が進められており、また中国も技術レベルは不明ながら独自の開発が開始されている。難燃繊維については「安全」に対する関心の高まりとともに需要が拡大し、難燃性能のさらなる向上が今後ますます強く求められる。特に欧米では難燃規制の広がりや脱ハロゲンの動きが先行し、研究・技術開発を促進する形となっている。帯電防止については、IT 関連を中心とする産業用途をターゲットとして製糸メーカー主導の技術開発が盛んで、より高導電化を目指した基礎研究も活発化している。日本、米国が技術レベルで世界をリードしており、中国が猛追しつつある。極細繊維では、欧米が早くから国がバックアップして研究が立ち上がり先行した。一方、日本は ESP では完全に出遅れたが、熔融紡糸型という日本独自技術を活かしたナノファイバーが立ち上がりつつある。前者は国のバックアップがようやく始まったが、日本の強みである後者は各企業に委ねられている現状である。

(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]

## (2) 化粧品

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	○	↗	界面科学、高分子溶液物性、新規有効成分、皮膚生理の研究で優れているが、研究人口が伸びず研究の進展は緩慢である。
	技術開発水準	◎	↗	企業における研究水準は世界でも最高水準にある。特に、新しい製造方法の研究や商品の安定化技術には他国より勝っている。
	産業技術力	◎	↗	海外展開の流れの中で培われた製品品質は世界最高レベルにある。
米国	研究水準	△	→	界面科学、高分子化学をベースにした化粧品の研究は活発でないが、化粧品以外の分野で開発された原料の応用を研究する動きが見られる。
	技術開発水準	◎	→	化粧品製剤技術のレベルは高い。
	産業技術力	○	→	日本に比べ産業技術力はほぼ同じか若干弱い程度である。製品品質は完全に規格内にある。
欧州	研究水準	◎	↗	界面化学、コロイド化学でフランス、オランダ、スウェーデンで日、米より研究水準の高い大学がある。
	技術開発水準	◎	→	化粧品製剤技術のレベルは高い。
	産業技術力	○	↗	化粧品の歴史は欧州から始まっており、伝統的に産業技術力がある。品質は規格内にあり、原料についての規制が徹底されている。
中国	研究水準	×	→	大学からの研究発表は極めて少なく、研究水準はまだ進展途上である。
	技術開発水準	△	→	皮膚研究や有効薬品の探索に熱心な企業も見られる。政治問題で国際学会での研究発表は制限されている状況下にある。
	産業技術力	×	↗	外資系企業の技術水準は概ね本国と同等であるが、地元企業の技術力は遅れているところ、それなりの水準を持ったところもある。
韓国	研究水準	×	→	大学からの研究発表は極めて少なく、研究水準はまだ進展途上である。
	技術開発水準	○	↗	企業間の競争によって技術力の増加傾向が見られる。
	産業技術力	○	↗	日本に比べ産業技術力は若干弱い程度である。最近、韓国で著名な化粧品会社が日本進出をはたしている。
<p>全体コメント：化粧品の乳化技術と粉体・微粒子技術にナノテクが応用され、それを界面化学やコロイド化学が支えている。企業における技術水準については、日米欧に大きな差は見られない。大学における研究では、欧州と日本が米国より優位に立っている。ここで最近注目すべきは韓国企業からの研究発表数の増加である。中国は台湾問題での政治問題が解決すれば、国際社会での研究発表が盛んになるものと予想される。また、研究水準は日本や欧州と比べて見劣りするものの、東南アジア諸国の企業での研究も盛んになってきた。</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]

(3) 食品技術（加工、保存、包装含む）

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	○	↗	農水省によるナノテク研究プロジェクトを、食品総合研究所等が中心に推進。研究の対象は部分的ではあるが、基礎研究力に関しての潜在能力は高いと考えられる。
	技術開発水準	○	↗	半導体微細加工技術の応用でマイクロチャンネル乳化技術開発するなど、日本の得意技術を生かした開発がおこなわれている。乳化剤等における界面技術に関しては世界的に高い技術を有する。
	産業技術力	△	→	中小の食品企業によりナノテク食品が販売されているが、真偽、効果は不明である。大企業の関与はまだ少ない。化学系企業や印刷会社を中心とした包装材料技術は極めて高い技術を持つ。
米国	研究水準	◎	↗	農務省（USDA）が、米国家ナノテクイニシアティブに基づき、大学や農業研究局（ARS）に支援し、積極的に推進している。安全のためのセンサー開発や食品包装用途への展開を指向している。
	技術開発水準	◎	↗	ナノテク応用食品包装技術で盛ん。
	産業技術力	○	↗	サプリメント開発を中心に推進されている。
欧州	研究水準	◎	↗	EU の FP プロジェクト等により、積極的に推進している。リスク研究とあわせた総合的研究展開を志向している。大企業と主要大学で連携して進められている。
	技術開発水準	◎	↗	北欧企業を中心とした研究コンソーシアム「ナノフードコンソーシアム」が立ち上がるなど、積極的な展開を見せている。リスク研究に注力している。
	産業技術力	○	→	ナノテク食品に対するリスク研究に注力。
中国	研究水準	×	→	関連論文、学会発表などほとんどみられない。
	技術開発水準	△	→	公表されているものが少なく、評価は難しい。
	産業技術力	△	↗	一部、ナノテク応用食品が販売されているが、真偽、効果は不明。
韓国	研究水準	×	→	関連論文、学会発表など少ない。
	技術開発水準	△	→	公表されているものが少なく、評価は難しい。
	産業技術力	△	↗	一部、ナノテク応用食品が販売されているが、真偽、効果は不明。
<p>全体コメント：食品へのナノテク応用の期待度の国家、地域レベル差が、研究水準の差となって現れており、米欧が日本より高い。韓国や中国からの論文、学会発表は非常に少なく、水準は高くない。技術開発水準は企業での技術開発レベルを表す指標であるが、食品産業界は既存の世界的な大手企業（ネスレ、クラフト、ハインツ、ユニリーバーなど）が先行的に研究を進めてきた結果、企業の資本力を反映する一面が強い。欧米が日本よりも水準が高く、韓国、中国は公表される情報が少なく、高くないと思われる。産業技術力の水準も技術開発水準と同じように、欧米が日本よりも水準が高く、韓国、中国は低い。日米欧の技術開発水準、産業技術力が拮抗している分野が一部見られる。ナノテクと食品のかかわりを強めるとして早くから期待されたためである。特定ガス成分透過または非透過ポリマー材料がその一例である。</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]

## 2.3 基盤科学技術

### 2.3.1 ナノサイエンス分野

#### 2.3.1.1 概観

ナノテクノロジーを支えるナノサイエンス分野では、ナノフルイディクス・ナノトライボロジー、界面・表面、自己組織化・自己集合（理論・機構・ゆらぎ）、量子演算・新量子概念、及びマルチフェロイクス・強誘電体の5中綱目に分類し、個々の最新動向について国際比較を行った。全体的には、近年上昇傾向にある研究テーマが多い。特に日本および米国ではその傾向が強く、次いで欧州の進捗が大きい。これに対し、中国や韓国においては研究水準自体が日・米・欧と比較して若干低いテーマも多く、今後の進展が待たれる。しかし実用化が著しい半導体関連の「界面・表面」のテーマについては、韓国の研究開発力および技術開発力が急速に上昇している。これは、本研究テーマが既にビジネスに繋がるサイエンスという位置付けにあるためと考えられる。ただし基盤的研究は少ない。

日本および米国は、研究開発力・技術開発力更に産業技術力ともに優れている。ベンチャー企業の貢献により今後の製品化が期待されるテーマが多い。（細胞シートのように実用化段階に入ったテーマもいくつか出てきた。）欧州では大学での研究が主体であるが、いくつかのテーマがベンチャー企業により実用化を目指している段階にある。これに対し、中国はまだ基礎検討が始まったばかりのテーマが多く（半導体関連を除く）、ベンチャー企業の実力もまだ高くない。韓国では、ナノテクセンター構想に基づいてナノサイエンス分野に注力しており、今後急速な進展が予想される。

以下に、具体的な項目について概要を略記する。

ナノフルイディクス・ナノトライボロジー：ナノフルイディクスでは日米が世界の研究開発をリードしているが、現状では、少し米国が上である。これは、大型研究費は持たないが若くて独創的なアイデアを持つ研究者が利用できる、ナノ微細加工を行うための施設・支援者などのサポートが充実しているためである。一方ナノトライボロジーでは、ハードディスク関連研究が力強さを失うのに伴い、この分野の研究を牽引する力が弱まった。しかし、SPM 技術及び、コンピュータ科学の発展に伴い、それらの分野から新しく研究者が参入しつつあり、学術的な活性はむしろ増加している。

界面・表面：研究－基礎技術レベルでは、日本が界面現象の物理的理解において一歩リードしており、米韓は新材料界面開発で世界をリードしている。産業技術力においては、サムスン、Intel、IBM を背景に米韓が一歩リードしている。

自己組織化・自己集合：日米欧の3極構造だが、日本は「自己組織化 and 自己集合」、欧州は「自己組織化 or 自己集合」、米国は「自己集合 oriented」という傾向。日本は自己組織化と自己集合の乖離が解消されつつあるのが強みで、2008年には新学術領域「創発化学」もスタートした。

量子演算・新量子概念：日本は特定の大学と企業が、欧米では大学、国立研究機関が進んでいる。日本の大学もかなりレベルが上がってきた。中国、韓国

は日欧米に比べると、特に実験面で大きく遅れている。いずれの国においてもまだ基礎研究段階であり、実用化の面ではかなり先である。

マルチフェロイックス・強誘電体：日本および欧米ともに、基礎研究開発が活発化している。実用化研究や技術開発には、これから本格的に着手されると思われる。基礎研究レベルで比較すると、日本・欧米ともほぼ互角であるが、一方中国および韓国では、まだ目立った成果は出ていない。

## ナノサイエンス分野のまとめ

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	◎	↗	半導体のナノ構造構築技術の急速な進展により、バイオ・化学応用を目指した基礎研究と応用研究が多くの大学・国研で進んでいる。特に「界面・表面」分野では、基礎研究が非常に活発で世界一流のレベルにあるが、応用技術への展開に繋がっていない。
	技術開発水準	◎	↗	半導体メーカー、材料・化学メーカーなど大企業を中心に多くの企業で研究開発が進んでいるが、まだまだアカデミックの成果が十分生かしきれていない。
	産業技術力	○	→	半導体関連産業を除けば、再生医療用細胞シートやチタニア触媒などで実用化段階にあるが、まだ新たなビジネスの創出までには到っていない。
米国	研究水準	◎	↗	多くの大学で、ナノ構造を用いたバイオ・応用を目指した研究開発が進んでいる。さらに、ナノフルイディクスによる流体ダイオード開発のような新展開も見られる。新しい研究・試行に対する意欲が高く、レベルも高い。
	技術開発水準	◎	↗	多くのベンチャー企業が、大学の基礎研究に基づいて、バイオ・医療応用、バイオテロ対策などを旨とした研究開発が進んでいる。研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。
	産業技術力	○	↗	新しいインプリンティング技術などが多く開発され、低コストで高品質のデバイス製造技術が開発されている。必ずしもイノベーションの効果が十分に波及しているとは言えないが、Intel・IBMなどの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上が認められる。
欧州	研究水準	○	↗	基礎研究については、各国に特徴ある研究機関が存在する（独：マックスプランク、ミュンヘン大）。欧州連合も基礎から応用まで幅広く研究支援を実施している。IMEC や Leti などのコンソーシアム活動も活発。
	技術開発水準	○	→	官学の研究と企業の研究との間の障壁が低く、良く連携が図られている。特にドイツでは、環境関連の研究意識が高い。
	産業技術力	○	→	ナノ微細加工の製造技術は進んでいるが、低コスト化の点で、日米に比べて遅れている。触媒化学や真空技術などのように伝統的に強い分野もある。
中国	研究水準	△	↗	いくつかの大学において基礎研究が開始されているが、研究機関の格差は非常に大きく、国際的研究は量的に少ない。しかし欧米留学経験者の帰国が相次いでおり、今後急速なレベルアップが予測される。
	技術開発水準	△	→	大学発ベンチャーにおいて、研究開発が開始されているが、日米に比較すると遅れている。企業における開発事例は殆どない。
	産業技術力	×	→	製造技術については、殆ど確立されていない。ポテンシャルはある。
韓国	研究水準	○	↗	主要大学と国研にナノテクセンターを構築し、若手教授を日米から呼び戻し、基礎研究を急速に展開しつつあり、日米を猛追している。しかし、基盤的研究がまだ少ない。
	技術開発水準	○	↗	大企業を中心に、バイオ応用のための研究開発が進展している。国家プロジェクトが企業の研究開発力を支えている。戦略的に研究資源を投資する土壌があるため、今後ポテンシャルが向上する可能性が高い。
	産業技術力	○	↗	製造技術について、新たな低コスト・高精度技術開発を行い、日米を急追している。中心はサムソン電子。

(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]



## 2.3.1.2 中綱目ごとの比較

## (1) ナノフルイディクス・ナノトライボロジー

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	◎	↗	半導体のナノ構造構築技術の急速な進展により、バイオ・化学応用を目指した基礎研究と応用研究が多く、多くの大学・国研で進んでいる。SPM（走査型プローブ顕微鏡）を利用した研究は盛んで、高いレベルを維持している。それ以外の機器を利用した実験的研究やコンピュータシミュレーションが若干遅れている。
	技術開発水準	◎	↗	半導体メーカー、材料・化学メーカーなど大企業を中心に多くの企業で研究開発が進んでいる。近年までハードディスク開発が、企業におけるこの分野の研究を牽引していたが、牽引力は弱まりつつある。それに対して、自動車産業など他の産業での研究開発が盛んになりつつある。
	産業技術力	◎	↗	ナノフルイディクスのためのナノデバイスの製造技術の開発が進展しており、低コストで高品質のデバイス開発が実現されつつある。固体潤滑膜や硬質膜を形成する製膜技術では、一定のレベルを有している。また、製膜装置の開発に関しても、国内メーカーが積極的に取り組んでいる。
米国	研究水準	◎	↗	多くの大学で、ナノ構造を用いたバイオ・応用を目指した研究開発が進んでいる。さらに、ナノフルイディクスによる流体ダイオード開発のような新展開も見られる。海外からの若い研究者を集め、SPM、SFA（表面間力測定装置）、コンピュータシミュレーションを利用した研究で高いポテンシャルを維持している。トライボロジー分野では若干停滞気味。
	技術開発水準	◎	↗	多くのベンチャー企業が、大学の基礎研究に基づいて、バイオ・医療応用、バイオテロ対策などを旨とした研究開発が進んでいる。計測機器の開発をきっかけとしたベンチャー企業の設立が行われている。しかし、大学における研究と企業における研究とのギャップは大きい。トライボロジー分野では若干停滞気味。
	産業技術力	◎	↗	新しいインプリンティング技術などが多く開発され、低コストで高品質のデバイス製造技術が開発されている。ナノマテリアルなどの素材開発などで、技術力の高さが推察されるが、大きな産業での展開力に関しては、力強さに欠けている。トライボロジー分野では若干停滞気味。
欧州	研究水準	○	↗	いくつかの大学でナノフルイディクスの基礎研究が進んでいる。また、応用研究が開始されつつある。トライボロジーについては、SPMの発明に代表されるように装置開発から実験まで、一貫して進めていくバックグラウンドが伝統的にあり、常に高いレベルを維持している。
	技術開発水準	○	→	いくつかのベンチャー・大企業において、研究開発が行われている。トライボロジーに関しては、企業における研開発は、全体としてあまり活発でない。また一時期、ミリピードの開発で注目を集めていたが、現在は一時期の勢いを失いつつあるようにも見える。
	産業技術力	○	→	ナノ微細加工の製造技術は進んでいるが、低コスト化の点で、日米に比べて遅れている。製膜装置メカ、真空機器メカが伝統的に強く、産業技術力の下支えをしている。
中国	研究水準	△	→	いくつかの大学において基礎研究が開始されている。国際的に注目に値する研究は極めて少ない。
	技術開発水準	△	↗	大学発ベンチャーにおいて、研究開発が開始されているが、日米に比較すると遅れている。企業における研究開発事例は殆どない。
	産業技術力	×	→	製造技術については、ほとんど確立されていない。技術のポテンシャルはある。
韓国	研究水準	○	↗	主要大学と国研にナノテクセンターを構築し、若手教授を日米から呼び戻し、基礎研究を急速に展開しつつあり、日米を猛追している。トライボロジーに関しては、この分野に関わる研究機関や研究者の絶対数がそれほど多くはないように思える。
	技術開発水準	◎	↗	大企業を中心に、バイオ応用のための研究開発が進展している。国家プロジェクトが企業の研究開発力を下支えしている。また戦略的に研究資源を投資する土壌があるため、今後ポテンシャルが向上していく可能性が高い。
	産業技術力	○	↗	製造技術について、新たな低コスト・高精度技術開発を行い、日米を急追している。製膜に関する技術は、自動車産業やMEMS関連産業などで保有している。それらの技術は、固体潤滑膜の形成にも転用可能であるため、一定のポテンシャルは有していると見られる。

全体コメント：ナノフルイディクスでは、MEMS や $\mu$  TAS などの分野にナノテクノロジーを適用している。様々な微細加工技術を使い、種々のデバイスを開発している。ナノトライボロジーでは、ナノレベルの空間における摩擦現象を取り扱い、ナノフルイディクスを支える重要な要素技術である。ナノフルイディクス分野は、日米が世界の研究開発をリードしているが、現状では、少し米国がリードしている状況である。これは、大型研究費は持たないが若くて独創的なアイデアを持つ研究者が利用できる、ナノ微細加工を行うための施設・支援者などのサポートが充実しているために、多くの応用分野での研究が進展しているためである。日本でもナノテクノロジーネットワークなどが有効に働き、産学連携がより密接に進むようになれば、米国と肩を並べることが出来ると考えられる。さらに、米国ではナノフルイディクスの研究費がバイオ応用や医療応用を中心に増加傾向にあるが、日本では横ばいあるいは若干低下傾向にあるために、本研究分野における研究者層の厚さは米国のほうが勝りつつある。また、日米のもう一つの違いは、ベンチャー企業の研究開発能力の違いにある。大企業における研究開発は日本がリードしているが、ベンチャー企業での小回りのきく研究開発の点では、米国がリードしている。

一方ナノトライボロジー分野では、ハードディスク関連研究が力強さを失うのに伴い、この分野の研究を牽引する力が弱まった。しかし、SPM 技術及び、コンピュータ科学の発展に伴い、それらの分野から新しく研究者が参入しつつあり、学術的な活性はむしろ増加している。また、固体潤滑剤の超低摩擦現象が注目を集め、ナノトライボロジーの研究によって、その発現条件が検討されている。それに加えて、超低摩擦を示す新しい系についても検討が行われるなど、この分野は、また新しい牽引力を得つつある。

- (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]

## (2) 界面・表面

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	◎	↗	基礎研究は非常に活発で、世界一流のレベルにある。特定領域研究「ソフトマター物理」、JSTのナノテク関連プロジェクトに象徴されるように、物理、化学、材料・高分子など幅広い分野に界面・表面のサイエンス・テクノロジーの基礎研究が広がり成果につながっている。Spring 8においても、ナノテク、界面・表面関係の測定テーマが増加している。特に半導体物理は世界一のレベル。ただし、応用技術への展開に繋がっていない。また基礎研究が必ずしも“真”の基礎的、基盤的研究になっておらず、新しい研究や大きな革新的技術への展開につながっていない場合も多い。
	技術開発水準	○	→	製品・技術開発において界面・表面の課題を避けては進めないとの認識が高まっているが、アカデミックな研究の成果がまだなかなか生かしきれていない。チタニア触媒やHigh-k膜作製法、CNTデバイスなど、画期的な成果も散見されるが、潜在的な可能性が十分に発揮されているとは言えない。
	産業技術力	○	→	ナノ粒子修飾シートなど、比較的単純な技術を生かした製品は開発されているが、基礎研究の広範なポテンシャルは生かされきれていない。関心は高い。
米国	研究水準	◎	→	新しい研究、試行に対する意欲が高く、レベルも高い。大学においても関連分野の研究者を複数名集め特徴ある分野を形成していることが多い。特に SEMATICH などのコンソーシアムが材料科学分野で牽引しており、応用技術への展開が主要なモチベーションになっている。また、2009年に米国化学会から新ジャーナル“Applied Materials and Interfaces”が発刊された。化学・工学・物理・生物の境界領域の雑誌と位置づけられ、電子・光学材料、界面・コロイド、高分子さらに摩擦・磨耗までをカバーする。
	技術開発水準	○	→	研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。特に、アカデミックな研究の新しい動向に対しての関心が高い。
	産業技術力	○	→	必ずしもイノベーションの効果が十分に波及しているとは言えないが、Intel・IBMなどの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上が認められる。しかし人材の流動性により、複数の企業の共同研究が行われるなど機動力がある。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究につき、各国に特徴的な分野や中心になる研究機関がある。例えばドイツはマックスプランク研究所のコロイド界面研究所、高分子研究所など複数の専門の研究所を有し、ミュンヘン大学などの大学のセンター、ミュンスターのCeNTechなどもある。フランスでは研究室は分散しているが、オランダ、スウェーデンなどにも国際的な存在感の大きい核になる研究機関が複数存在し、大型施設を用いる計測も含め欧州全体での研究交流・共同研究も活発である。欧州連合も基礎から応用までの研究支援に注力しており、IMEC・Letiなどのコンソーシアムを始めとして、基礎研究の十分な支援がある。
	技術開発水準	○	→	官学と企業の研究の間のバリアが低く、連携がはかられている。ドイツでは環境関連の研究の意識が高い。また、ベンチャーに対する関心も高い。特色のある技術開発は一部に見られるが、全面展開の状況にはいたっていない。しかし半導体界面に関しては、IMECを中心に高い技術開発力を誇る。
	産業技術力	○	→	化学や医薬分野では国際化が進み、特定の地域のみに限定できなくなっている。欧州をベースとするトップ企業の産業技術量は高いが、事業化に先端の成果が活用されているかは不明。次世代半導体の開発から欧州メーカーが撤退し、日米韓と比較すると半導体関連の産業技術は弱い。一方、触媒等化学分野では伝統的に強い分野もある。
中国	研究水準	○	↗	国際学会で評価を受ける研究が急速に増加しているが、全体としては基盤的研究をじっくりと行うというよりはナノ材料の形成など個別的なものが多い。また、研究機関間の格差は非常に大きく、国際的研究は量的に少ない。先端の機器が導入されていても、人材不足などの理由で充分生かされていないケースも散見される。しかし、外国（欧米、日本）での研究経験をもったレベルの高い研究者が帰国しつつあり、今後急速な研究水準の向上が見込まれる。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発を生み出すためには、時間が必要と思われるが、近年の向上速度は大きい。
	産業技術力	△	→	現時点では必ずしも高くはないと思われるが、特定の分野で急速に伸びる可能性はある。

韓国	研究水準	○	↗	アメリカでの研究経験者が多く、研究体制もアメリカ型を採用しており、ナノバイオなど学際的、融合的研究が進んでいる。ナノテク、特にナノバイオ関連のセンターが大学に国の支援によりいくつか設置されている。一方で、機器のレベルはトップクラスの大学でも不十分であり、物理化学的な理解に基づく基盤的研究はまだ少ない。
	技術開発水準	△	↗	多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われつつある。特に、燃料電池、二次電池、バイオセンサなどの領域で産学連携研究が活発に行われている。
	産業技術力	△	→	韓国における電子・自動車産業を支える意味で今後成長する分野と考えられる。巨大半導体産業を形成しているが、これを「てこ」にして今後もイノベーションが進むと思われる。中心はサムソン電子。

全体コメント：総じて言えば日米欧は3極構造で世界をリードしている。Si LSI 分野では、研究-基礎技術レベルでは、日本が界面現象の物理的理解において一歩リードしており、米韓は新材料界面開発で世界をリードしている。産業技術力においては、サムソン、Intel、IBM を背景に米韓が一歩リードしている。基礎研究レベルでは日米欧が世界をリードしているが、カナダ、韓国、中国、台湾、シンガポールなどにおいてもトップレベルの研究は国際レベルにある。例えば、中国では中国科学院のいくつかの研究所（例えば化学研究所）、また国家重点研究室（例えば厦門大学固体表面物理化学国家重点実験室）などにおける研究は基礎研究レベルでも高い評価を受けている。日本は分野横断的研究や基礎研究から技術開発への展開力が米欧特に米に比べて劣るが“この道一筋”を高く評価するメンタリティが影響しているように思える。開発支援としての産学連携のみならず、重要でありながら時間・研究資源の制限から未解決の問題を大学などで基礎的立場から研究すると言った産学連携や、研究レベルは高いが、分野間、産学連携に必ずしも熱心ではない研究者の成果を引き出すシステムが重要になってくると考えられる。

- (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]

## (3) 自己組織化・自己集合 (理論、機構、ゆらぎ)

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	◎	↗	ハイレベルの研究が継続されている。新学術領域「創発化学」がスタートした。CREST 数学領域には K4 炭素材料など興味深い材料研究課題がある。1 分子計測にも注目。また、再生医療用の細胞シートの開発もユニーク。基礎研究、技術、産業が結びついている形で進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	高分子関係者が依然元気。自己組織化と自己集合の統合的な理解が強み。金属や結晶との協働は古くて新しい今後の課題。
	産業技術力	○	↗	長尺ナノチューブ、ハニカム膜、低融点金属ナノ粒子など、日本発の材料が実用化のステージを目指している。産業界の意欲は依然衰えていない。再生医療用細胞シートの開発は、角膜、心臓などで実用化の段階。
米国	研究水準	◎	↗	実験科学全般に幅広い領域をカバーし、自由な発想のもとに研究が展開されている。数理・物理も強く、非線形拡散がパターン形成の俎上に上るなど、着実に研究が推進されている。
	技術開発水準	◎	↗	アニーリングを活用して自己組織化構造を整然と配列させる 2 段構えの技術が検討されている。Directed self - assembly 志向が強い。
	産業技術力	○	↗	日本同様、即実用化というレベルではないものの、基礎研究と結びついた産業技術力は柔軟性に富んでいる。ブロックコポリマーリソグラフィなどは実用化により近づいた。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究の懐が深く、移流、非線形拡散、ゆらぎなどを介したパターン形成理論や分子集合体研究などの着実な研究が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	昆虫学と材料化学の融合に代表されるユニークな着想に基づいた研究に注目。
	産業技術力	○	↗	自己組織化を介して形成する超撥水表面などの開発がある。
中国	研究水準	○	↗	カオス研究やナノ材料の研究などにレベルの高い研究がある。
	技術開発水準	○	↗	ナノ材料の研究が急成長。しかし多くは自己組織化理論に裏打ちされたものではない。コンポジット材料が主だが、材料系のキャッチアップ力は強そうである。
	産業技術力	△	↗	海外レポートなどでもあまり聞こえてこない。
韓国	研究水準	○	↗	欧米で学んだ研究者がグループを立ち上げ研究を展開。複雑系の自己組織化などにハイレベルの研究がある。複雑系の自己組織化、超分子化学などにレベルの高い研究が散見される。
	技術開発水準	△	→	海外レポートなどでもあまり聞こえてこない。
	産業技術力	△	→	海外レポートなどでもあまり聞こえてこない。
<p>全体コメント：日米欧の 3 極構造だが、日本は「自己組織化 and 自己集合」、欧州は「自己組織化 or 自己集合」、米国は「自己集合 oriented」という傾向。日本は自己組織化と自己集合の乖離が解消されつつあるのが強みで、2008 年には新学術領域「創発化学」もスタートした。産業技術力で見ると、日本では徐々に実用化の芽が出始めたところであるが、米国ではバイオベンチャーとの融合で既に実用レベルの研究も散見される。</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) 量子演算・新量子概念

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	◎	↗	東大、阪大、東北大、東工大、北大、慶大、国立情報研、NECなどで活発に行われていて、基礎研究としてのレベルは極めて高い。ただし、単一量子ビット研究に関しては世界でトップ10グループを選ぶとすると、そこに列挙できるのは東大と東工大とNECであろう。スピンをを用いた量子ビット研究は欧米の大学と肩を並べるまでになった。
	技術開発水準	◎	↗	NECの超伝導量子ビット研究は世界トップでNTTが追随している。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
米国	研究水準	◎	↗	UCSB、Yale、Harvard、Stanford、MIT、Princeton、NISTなど主だった大学や研究機関で活発に行われており、単一量子ビットに関してはUCSB、Yale、Harvard、Stanfordが世界トップ10に入るであろう。カナダの大学も本分野に積極的な進出を狙っている。
	技術開発水準	○	↗	ヒューレットパッカードやIBMで行われているが、大学との共同研究の成果として、日本の企業と同水準に近いレベルまで上昇した。
	産業技術力	△	→	カナダのベンチャーであるD-waveが、簡単な量子演算回路を売り出すと宣伝しているが、その信頼性は低い。それ以外の企業では、生産はまだ全く考えていない。
欧州	研究水準	◎	↗	デルフト工科大を筆頭にインスブルック大、オックスフォード大、ミュンヘン工科大、シュツットガルト大、マックスプランク研、チャルマース大、ルンド大などが基礎研究に力を入れている。単一量子ビットの世界トップ10にはデルフト工科大、インスブルック大、シュツットガルト大、マックスプランク研が入るであろう。主だった各国に必ず一つは大学で非常にレベルの高いものがある。
	技術開発水準	△	→	ごく一部のベンチャーで量子暗号を開発している以外、企業での研究は盛んではない。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
中国	研究水準	△	↗	理論面が先行していて、実験はまだこれからという状況である。
	技術開発水準	×	→	企業では、まだ全く研究されていない。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
韓国	研究水準	△	→	理論面が先行していて、実験はまだこれからという状況である。ただし、中国よりは進んでいるが、近いうちに抜かれる可能性大。
	技術開発水準	△	→	サムスン電子が興味を持っているようだが、実際に研究しているかは、不明。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
全体コメント：日本は特定の大学と企業が、欧米では大学、国立研究機関が進んでいる。日本の大学もかなりレベルが上がってきた。中国、韓国は日欧米に比べると、特に実験面で大きく遅れている。いずれの国においてもまだ基礎研究段階であり、実用化の面ではかなり先であると思われる。				

(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]

## (5) マルチフェロイックス・強誘電体

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	◎	↗	磁性強誘電体研究の歴史に加えて、最近は、新規物質の開発や巨大化のためのドメイン壁応答の基礎研究など、学理的側面で最近の研究を主導する立場にある。
	技術開発水準	△	→	現在は全くの基礎研究フェーズで技術開発的な側面は少ない。
	産業技術力	×	→	現在は全くの基礎研究フェーズで産業技術化は当面ない。
米国	研究水準	◎	↗	関与する研究者の層が厚く、広範囲のトピックスについて活発な研究が展開され始めた。
	技術開発水準	○	↗	現在は全くの基礎研究フェーズで技術開発的な側面は少ない。但し、多層キャパシタ（MLC）については、技術開発が進行中（全体コメント参照）。
	産業技術力	×	↗	現在は全くの基礎研究フェーズで産業技術化は当面ない。多層キャパシタ（MLC）は近い産業化に有望。
欧州	研究水準	◎	↗	マルチフェロイックス研究には伝統があり、その光学応答などについて、高い研究レベルを示す。
	技術開発水準	○	↗	現在は全くの基礎研究フェーズで技術開発的な側面は少ない。但し、多層キャパシタ（MLC）については、技術開発が進行中（全体コメント参照）。
	産業技術力	×	↗	現在は全くの基礎研究フェーズで産業技術化は当面ない。MLCは近い産業化に有望。
中国	研究水準	△	→	まだ、目立った仕事は出ていない。
	技術開発水準	△	→	現在は全くの基礎研究フェーズで技術開発的な側面は少ない。
	産業技術力	×	→	現在は全くの基礎研究フェーズで産業技術化は当面ない。
韓国	研究水準	△	↗	理論グループのアクティビティがある。但し、関連研究グループ（酸化物薄膜など）のポテンシャルは高い。
	技術開発水準	△	→	現在は全くの基礎研究フェーズで技術開発的な側面は少ない。
	産業技術力	×	→	現在は全くの基礎研究フェーズで産業技術化は当面ない。
<p>全体コメント：日本および欧米ともに、基礎研究が活発化している。実用化研究や技術開発には、これから本格的に着手されると思われる。基礎研究レベルで比較すると、日本・欧米ともほぼ互角である。一方中国および韓国では、目立った成果は出ていない。一方、マルチフェロイック物質そのものではないが、強磁性層を挟み込んだ多層キャパシタ（MLC；一種の人工マルチフェロイックス）において、安価で大量生産に向く高感度磁場センサとしての応用が再び注目を集めている。これは主に、欧州、米国で先端的研究を展開中である。</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]

## 2.3.2 材料設計・探索分野

### 2.3.2.1 概観

新材料の創製や探索は、科学技術を持続的に発展させ、社会・経済を活性化させるために不可欠である。しかし、所望の機能を持つ革新的な新規物質をゼロの状態から設計し創製することに、普遍的な解法は存在しない。

過去の例から考えて、以下が関連していることが多い。

- 1) 深い学術的専門知識に裏打ちされた固有の物質観（勘）を持つ人材の存在
- 2) 最先端の物質科学、DB、高演算能力のコンピュータと計算科学の駆使
- 3) 系統的かつ高速の試料合成・評価法の実践（コンビナトリアルアプローチ）

技術の進展が急激にスピードアップする中で、材料探索のスピードと効率をどう上げていくのかは本質的に重要な問題である。これらの考えに対する内外の研究開発状況を議論するために、「材料設計・探索分野」を4つの中綱目「計算科学・シミュレーション」、「DBの構築」、「新材料設計・機能設計」、「材料探索手法」に分けて比較を行うこととした。

日本の本分野の代表的取り組みとして、試行錯誤的な研究開発アプローチから脱却して新しい材料を合理的に設計・探索することを中心的な考えとする「元素戦略」が推進されている。諸外国にはないコンセプトであり、今後の展開が注目される。DB、計算科学等は欧米と比してやや弱い感もあるが、新材料の設計や機能を設計する人材は育っており、今後伸びていくと考えられる。材料探索手法も有機合成や製薬等では欧米がリードしているが、無機固体、半導体、特にナノテクと融合した薄膜材料のコンビナトリアルテクノロジーでは、日本が世界をリードしている。

米国は総じて本分野で強さを発揮しているが、計算科学・シミュレーションや、材料探索手法での強さが特に目立つ。また、創薬・有機合成の探索システムは、他国の追随を許さない。（上述のように、無機系では日本に強みがある。）

欧州では、DBの構築でリードが目立つ。歴史的に物質・材料のDBに強く、今後もリードしていくと思われる。

また計算科学等は研究開始に要する経済的コストが少なく済むために、中国やインドにおいても研究者数の大幅な増加が予想される。また、海外で技術と情報を身につけた人材移動による急速な水準向上の可能性があり、計算科学、材料探索等に急速な発展の兆しもあり、注視する必要がある。既に学術誌への投稿論文数の急速な増加として顕在化している。

## 材料設計・探索分野のまとめ

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	◎	↗	新材料設計等の研究は、何人かの際立った研究者が世界を明らかにリードしている。新超伝導材料の発見、透明酸化半導体、ZnO 材料、非白金有機触媒など、強みを発揮している。過去には欧州に比べて低調な時期もあったが、最近は改善しつつある。但し、人材育成が急務になっている。
	技術開発水準	○	↗	産学連携による開発の関心は高まる傾向にあるが、海外技術の導入に頼りがちである。
	産業技術力	○	↗	設計思想が企業に広まりつつあるが、計算や DB はなかなか産業になっていない。
米国	研究水準	◎	→	高いレベルと人材を維持しており、世界のトップレベル。国からの資金も日本より格段に多い。
	技術開発水準	◎	→	世界的な企業も多く、ベンチャーも技術開発を多く推進中である。
	産業技術力	◎	→	材料研究全般に活気がなくなってきたが、高い力を持つ。計算や DB も強いが、欧州よりは遅れている。
欧州	研究水準	○	→	計算や DB は歴史的にも強い。機能設計や材料設計も強くなりつつある。
	技術開発水準	◎	→	欧州で作られた設計に関するソフトは数多い。高い開発力がある。
	産業技術力	◎	→	各種 DB 等も利用して、高い水準を維持している。
中国	研究水準	△	↗	研究者の裾野が広がり、平均レベルが急激に向上している。特に、海外で技術と情報を身につけた人材移動による急速な水準向上がある。
	技術開発水準	×	↗	日米欧には及ばないが、急速な進展の気配がある。
	産業技術力	×	→	企業としての取り組みはこれから進展すると思われる。
韓国	研究水準	△	↗	際立った研究成果はみられないが、材料探索などを国立研究所等で推進する動きがある。
	技術開発水準	×	↗	現況では日米欧には及ばない。
	産業技術力	×	→	現況では日米欧には及ばないが、ある一定の水準にある。

- (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]



## 2.3.2.2 中綱目ごとの比較

## (1) 計算科学・シミュレーション

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	◎	↗	基礎研究、応用研究は進んでおり、一部の大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの研究は世界のトップにある。過去には欧州に比べて低調な時期もあったが、最近は改善され、世界のトップランナーになりつつある。但し、人材育成が急務である。
	技術開発水準	△	↗	みずほ総研、アドバンスソフトなど一部の企業で、日本独自の計算科学ソフトの開発が行われているが、欧米に比較して立ち遅れており、国内でもシェアはまだ小さい。
	産業技術力	△	→	日本で開発された計算科学ソフトは商業ベースになっておらず、日本企業、大学の多くが欧米製計算科学ソフトを使用している。計算を材料開発に応用した研究においては、産業界全体の意識は高く、商用計算ソフトの普及率は世界一である。
米国	研究水準	◎	↗	大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界トップレベル。国からの資金も日本より格段に多い。歴史的に強い。
	技術開発水準	◎	→	計算の高速化と大規模化について、ハードの面だけでなく、プログラムコードの改良についても抜きん出ている。また、量子論における Gaussian Inc.、計算化学における Accelrys 社、連続体力学における ANSYS 社など計算ソフトウェアのベンチャー企業が十分育っており、世界的な企業に成長している。世界の中心的な役割を担っている。
	産業技術力	◎	→	計算科学シミュレーションのソフトは多くが米国製である。量子論における Gaussian、Dmol、連続体力学における ANSYS など世界標準となっている計算科学ソフトも多い。
欧州	研究水準	◎	↗	歴史的に基礎研究を重視しており、大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界一である。特に手法開発の点で非常に進んでいる。量子論における Order - N 法など大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は歴史的に強い。国からの研究資金も日本より格段に多い。
	技術開発水準	○	→	量子論におけるオランダの ADF Inc.、連続体力学におけるスウェーデンの COMSOL 社など大学発のベンチャー企業が多く育っている。しかし、CASTEP など欧州で開発されたソフトが米国の企業から販売されるなど技術流出も起こっている。世界的に普及しているフリーのソフトも多い。
	産業技術力	○	→	量子論における VASP、ADF、Siesta、連続体力学における COMSOL など欧州製の計算科学ソフトで、欧州で広く使用されているものは多い。但し、米国に比較すると少し遅れている。VASP はこの種の計算の中で、世界標準になりつつある。
中国	研究水準	△	↗	大学や研究機関における新たな計算理論や計算科学ソフトの開発は従来ほとんど行われてこなかったが、欧米からの帰国研究者を中心に、高いレベルでの研究が急速に広まりつつある。実験研究に比べて、研究開始に要する経済的コストが少なくてすむために、研究者数の大幅な増加が予想される。新しい計算理論、計算科学ソフトの開発という意識はない。
	技術開発水準	×	→	企業での計算科学ソフトウェアの開発は、全く行われていない。
	産業技術力	×	→	計算科学ソフトウェアは全く産業になっていない。
韓国	研究水準	△	↗	大学や研究機関における新たな計算理論や計算科学ソフトの開発は従来ほとんど行われてこなかったが立ち上がりつつある。
	技術開発水準	×	→	企業での計算科学ソフトウェアの開発は、全く行われていない。
	産業技術力	×	→	計算科学ソフトウェアは全く産業になっていないが、大手半導体産業を中心に、計算ソフトを材料開発に応用しようという気運が見られる。

## 全体コメント：

量子論の原理のみに基づく、いわゆる第一原理法による電子状態計算により、材料の電氣的、磁氣的、光學的、力學的、化學的性質が実験的情報なしに精確に計算できるようになってきた。計算精度や手法に於いて、たとえば励起状態や強相関系を精度良く計算する方法など未解決の問題もあり、更なる手法開発も必要であるが、一方で計算精度や手法について競う時代は一段落し、計算用のソフトが市販・あるいは公開されて、特別な専門家でなくても利用できるようになってきたとも言える。

研究水準としては、米国、欧州、日本で大差がない。しかし、その結果をソフトウェアとして公開あるいは市販する技術力は、米国が非常に進んでいる。多くの市販ソフトが米国製である。ソフトウェアの市販では、大学で開発されたプログラムをベースに市販することが多いが、そのベースとしては欧州発も多い。ソフトの市販や公開という点では、日本を始めとしてアジアの国は弱い。一つには言語の問題もあるであろう。ネットワークで世界が結ばれている中で、フリーや市販を問わず優秀なソフトだけが生き残る。そのようなソフトでシミュレーションをして、理論/実験の研究が進む。国内だけで使われるソフトというのは、世界から信頼されないであろう。また計算は実験研究に比べて研究開始に要する経済的コストが少なくてすむために、中国やインドにおいても研究者数の大幅な増加が予想される。それは既に学術誌への投稿論文数の急速な増加として顕在化している。

ごく最近になって、熱力学・統計力学計算と量子論の原理のみに基づく第一原理計算とを統合することにより、相平衡、相転移、化学反応、状態図などを実験的情報なしに精確に計算できるようになってきた。これは第一原理熱力学あるいは第一原理統計熱力学と呼ばれ、極めて有用と期待されるが未だ黎明期にあり、技術蓄積は今後の課題である。計算用ソフトウェアも、まだ充分には開拓されていない。最新の情報科学手法を取り入れたマテリアルズインフォマティクスと言われる分野は、材料設計手段として大きな進捗が近い将来に予想され、材料研究・開発に直接的に結びつくことから大いに注目される。

日本では SPring8 や KEK - PF などの放射光を用いた X 線解析、J - PARC などでの超高分解能中性子回折、各所に設置が進められているサブオングストローム分解能での走査透過型電子顕微鏡および電子分光装置、超高分解能表面分析装置、超高感度核磁気共鳴装置などナノテクノロジー・材料分野の最先端評価装置の近年の技術革新が著しい。これに伴い、実験技術の進展と相まって計算技術の更なる進展が望まれている。また実験者にとって使いやすい計算ソフトウェアの開発にも大きな期待が寄せられている。

- (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]

## (2) DBの構築

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	△	↗	物質・材料データベースについて Extensible Markup Language (XML) による共通フォーマットの検討がなされ CODATA2008 において紹介された。データの共通フォーマットの研究では欧米を先導している。省庁連携施策の補完課題としてナノマテリアルのデータベース指標の検討が進められている。また、最近コンビナトリアル計算科学を活用したデータベース構築に期待が集まっている。
	技術開発水準	○	↗	物質・材料研究機構の物質・材料データベース (MatNavi) は Web で公開されているデータベースとしてはデータ数、登録ユーザ数およびアクセス数において世界最大規模のものになっている。学協会で開発された貴重なデータベースはその維持・管理を行うための経費と人材の継続性がないことからそれらのデータベースは有効に活用されることがほとんどない。
	産業技術力	△	→	データベースは産業になっていない。
米国	研究水準	○	→	原子力、安全、国防などの非公開のデータベースが充実している。ナノマテリアルの生体影響に関するデータの収集が活発である。
	技術開発水準	○	→	物質・材料系データベースは ASM International、Oak Ridge National Laboratory、National Institute of Standard and Technology で開発されている
	産業技術力	○	→	素材メーカーのカタログから数値データを纏めた ACI の MatWeb および IDES Inco. の IDES Resin Source などが Web で公開され一部有償ではあるが広く利用されている。
欧州	研究水準	◎	→	研究機関、学術雑誌の出版社などデータベースの構築は継続的に行われている。歴史的に強い。
	技術開発水準	◎	→	物質・材料系データベースは英国のケンブリッジ大学、National Physical Laboratory およびオランダにある欧州連合 Joint Research Center の Mat - DB が知られている。
	産業技術力	◎	→	機器を設計する際の材料選択のためのシステムを英国の Granta Design 社が開発し、欧米の大手企業が導入を進めている。これは各企業内部のデータベースと公開されている標準参照データが統合できるシステムでデータベースが有効に活用できるものである。
中国	研究水準	△	→	主要な大学、研究機関を拠点として物質・材料データベース構築の国家プロジェクトを立ち上げる計画がある。
	技術開発水準	△	→	金属研究所において大気腐食の実験データのデータベース化を進めている。
	産業技術力	×	→	データベースは全く産業になっていない。
韓国	研究水準	△	↗	2007 年度に産、学、官参加の国家プロジェクトとして Materials Bank Project を開始した。また、Korea Institute of Machinery & Materials で非鉄金属を中心としたデータベースの開発が進められている。
	技術開発水準	△	↗	Materials Bank Project では KIMS が金属材料、KICET がセラミックス、KRIC が有機材料のデータベースを構築する。
	産業技術力	×	→	企業でのデータベースの開発は全く行われていない。
<p>全体コメント：欧州は歴史的に物質・材料系のデータベースに強く、学術機関や企業などでデータベースの維持・管理が行われている。米国は原子力、安全、国防など限られた分野のデータベースは充実しているが、公開されていない。欧米ではベンチャー企業が工業材料のカタログデータをデータベース化して Web で公開している。欧米に比較すると日本の物質・材料系データベースは学術論文から数値データを収集した学術的で基盤的なデータベースであるといえ、比較的弱く資金不足等も指摘されている。NIMS 物質・材料データベースは公開して 5 年半を経過して登録ユーザは 125 ヶ国から 40,630 人に達し、毎月 100 万を超えるアクセスがある。韓国では材料データベースの国家プロジェクトが 2007 年から開始し、中国およびインドにおいても材料データベースプロジェクトの計画がある。</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]

(3) 新材料設計・機能設計

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	◎	→	この分野の研究レベルは世界トップレベルにある。何人かの際立った研究者が世界を明らかにリードしている。文部科学省の「元素戦略プロジェクト」が、この考え方で推進されており、成果が待たれる。
	技術開発水準	◎	→	大学、企業共に高い開発水準にあり、各種の先端材料が供給されると思われる。
	産業技術力	○	↗	設計思想が企業に広まりつつある
米国	研究水準	◎	→	最近、材料研究全般に活気がなくなってきたが、この領域では依然高いレベルと人材を維持している。解析（特に大型装置を駆使した）は極めて強いが材料合成が弱い。そのため、きちんとした試料がないため、本来のすぐれた特性を見出せない印象がある。
	技術開発水準	◎	→	高いレベルと人材を維持している。
	産業技術力	○	→	材料研究全般に活気がなくなってきたが、高い力を持つ。
欧州	研究水準	◎	↗	もともと計算が強いが、新材料設計というソフト面に特化している。
	技術開発水準	○	↗	欧州で作られた設計に関するソフトが目につく。
	産業技術力	○	→	各種 DB 等も利用して、高い水準を維持している。
中国	研究水準	△	↗	研究者の裾野が広がり（欧米からの帰国組＋国際連携）、平均レベルが急激に向上しており、かつ韓国よりも研究のスペクトルが広い。そのため、この分野の急速な進展が見られる予兆を感じる。日欧米で流行しているテーマを取り上げパワーで圧倒しているが、中国発の国際トレンドを生み出すまでにはまだ至っていない。
	技術開発水準	△	↗	現況では日米欧には及ばないが、急速な進展の気配がある。
	産業技術力	△	↗	企業としての取り組みはこれから進展すると思われる。
韓国	研究水準	△	→	この分野で際立った研究成果は殆どみられない。
	技術開発水準	△	↗	現況では日米欧には及ばない。
	産業技術力	△	→	現況では日米欧には及ばないが、ある一定の水準にある。
<p>全体コメント：この項の「新材料設計・機能設計」とは、目的機能から出発して新材料を設計・構築するという、より根元的かつ高次元の取り組みを指す。いわゆる逆問題を解く取り組みであり、極めて挑戦的なアプローチである。材料分野での設計という思想は欧米から出てきたので、依然として欧米が強い分野である。アジアは、分野全体のアクティビティに比べ、この領域は相対的に弱いと感じる。日本は、触媒や半導体の材料設計など欧米に先駆けている分野もあり、現段階では決して後塵を拝しているわけではない。さらに、新しい鉄系超伝導等、新材料設計の思想から出てきた材料もあり、世界の注目を集める状況になりつつある。日本発の研究開発思想である「元素戦略」も、新材料の設計や機能設計により、希少元素の代替や新機能・新材料を得る取り組みであり、多くの成果が出つつある。</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) 材料探索手法 (ハイスループット・コンビナトリアル技術)

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	○	→	固体材料の高速探索・評価システム開発では世界の最先端にあるが、有機合成、触媒、ポリマー分野における技術水準は欧米に比べ致命的に遅れている。研究戦略（公的研究支援）が広範な適用性と革新性の高い研究手法の開発と、そのための人材育成の方向に向いていないことが一因か。
	技術開発水準	○	→	ハイスループット分析・計測装置の開発や固体材料の高速評価において世界をリードしている。しかし、高分子や触媒探索分野の国内学会の取組みは不十分で、国産の自動合成・評価技術を構築する取組みに欠ける。新薬の発見や新材料設計の組織的探索に必須のライブラリーも未整備である。
	産業技術力	○	↗	高スループット化合物・材料探索はものづくり競争力の原点として関心は高まっている。一方、金融危機に伴う企業の基礎研究力は低下傾向にあり、この部分を担うベンチャーが発生してきた。
米国	研究水準	○	→	NIST は、コンビナトリアル高分子研究センターを設置し、ポリマーの合成と物性制御研究の高速化を主導するとともに、計測・分析拠点（USMS）として機能している。エネルギー、環境、電子材料探索への応用研究が、各地の大学、国研で進行中。現場の主役は中国人、インド人。
	技術開発水準	◎	→	GE、デュポン等の大企業が個別のシステム開発を進める一方、新物質・材料の委託開発をビジネスとするベンチャー企業が10年ほど前から立ち上がり、一部は日本へ進出している。これまで日本が先行してきた薄膜分野でもコンビナトリアル合成をビジネスとするベンチャー企業が登場しており、半導体材料を中心に材料開発を加速させて、高誘電体材料、拡散防止膜の開発などで実績をあげている。
	産業技術力	○	↘	創薬、有機合成のシステムは国際ビジネスに展開中。燃料電池等への触媒、半導体部材開発にも浸透している。半導体産業に関連する材料開発は次世代デバイス開発に不可欠であるが、米国企業が開発した300mm基板に対応し、最先端プロセスラインにも投入できる装置は脅威となる可能性がある。金融危機対策にも関連して、オバマ政権がエネルギー・環境関連新材料や国際競争力の高い製品開発技術育成にどれだけ力を入れるかが注目される。
欧州	研究水準	◎	↗	ポリマー、触媒分野のコンビナトリアル・ハイスループット探索が多くの大学や研究所で進行し、国際会議や学会誌特集を使ってスマートものづくり研究モデルを構築中。固体ナノ材料研究では、日本の技術が一部導入されている。
	技術開発水準	○	↗	産学連携による材料開発ばかりでなく、TopCombi プロジェクトなど、データベース・マイニング技術に標準化、設計技術への展開の動きがある。産学連携のベンチャーも創設されている。
	産業技術力	○	→	燃料電池、自動車排ガス用触媒、新規ポリマー、複合材料の開発に展開。太陽電池産業へのフィードインタリフなど、政策による技術開発支援についても要注意。
中国	研究水準	△	↗	海外で技術と情報を身につけた人材移動による急速な水準向上の可能性あり。急拡大する太陽電池を含む各種電池等の新エネルギー研究、触媒等の省エネルギー材料研究に、高速探索手法の導入の動き。
	技術開発水準	△	→	現時点で独自技術は少ないが世界に人材を送り込み、最新の技術情報を収集し、導入・普及に力を入れている。金融危機の影響で一時的なダウンはあるが、近未来の世界をリードする潜在力は高い。
	産業技術力	○	↗	2008年後半からの経済情勢の悪化で、技術開発への投資も減り、当面は冬の時代を迎えるが、欧米ベンチャーの中国進出もあり、長期的には成長の可能性大。
韓国	研究水準	△	→	KAIST などの国立研究所での研究は5年前くらいからスタート。触媒、セラミックスを中心に展開。世界レベルの大学育成計画のテーマとなるか、急速な景気悪化による影響がどうなるか。
	技術開発水準	○	↗	第一回国際コンビナトリアル触媒シンポジウムを2008年に開催するなど、触媒およびポリマーの探索技術開発で欧米を追跡している。中国の急成長をにらんで日本との連携を強化する兆候もある。
	産業技術力	△	→	産業界の技術開発に選択と集中の傾向が強い。独自の技術は少ないが、化学、電子産業を中心に技術輸入の機運はある。ただし、景気後退による遅れが予測される。

## 全体コメント：

材料探索手法の中でコンビナトリアルテクノロジーは、計算科学、エレクトロニクス、計測分析技術の進歩を‘ものづくり’研究開発に応用し、集積化と自動化によって物質・材料の研究開発を画期的に高速・高効率（ハイスループット）化する発展途上の新技術であるが、日本にとって特に重要な革新技術と言えよう（技術の概要については2008年版比較表を参照）。電子材料に加えて、新エネルギー・省エネルギー材料、生体材料の開発競争とともに、高速探索手法への関心は高まっており、コンビナトリアル触媒シンポジウム（韓国）やコンビナトリアル・ハイスループット材料学会議（ドイツ）などの国際会議において、研究発表や関連装置の展示が活発化しているが、日本からの参加は少なく医薬用コンビナトリアルケミストリーに次いで、材料分野（特に触媒、ポリマー）での取組みの遅れが懸念される。また、電子産業が集中する台湾、デバイス開発が盛んなシンガポールでもコンビナトリアル材料技術は注目されており、今後の動向が注目される。

(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]

## 2.3.3 ナノ計測・評価技術分野

### 2.3.3.1 概観

ナノ計測・評価・標準は、ナノテクノロジーの根幹を成す共通基盤技術である。欧米は依然として新しい計測技術を生む土壌において他を凌いでいる。米国は計測機器のみに特化することなく、ナノテク全体の中の戦略として体系的・俯瞰的強化を実行している。バイオ、電子デバイス関連計測技術は産業的にも強い。欧州においては、走査型プローブ顕微鏡などの新しい計測技術を長い時間をかけて生み育てる土壌と実績がある。日本においては、新しい計測技術を生みだす点では欧米に一步譲る面もあるが、電子顕微鏡など特定分野では欧米に勝る分野として育てた領域もある。韓国は以前に比べて進展しつつあるが、計測評価機器の大部分は外国からの導入であり、計測技術開発を行う余裕が出るまでには至っていない。中国も同様である。

本分野では7中綱目、走査型プローブ顕微鏡、電子顕微鏡、放射光・X線計測、単分子分光、3次元計測、ナノ粒子評価（形状・分布・表面活性・動態解析）、標準（物質・計量・評価法）技術について国際比較を行った。これらの技術の概要は、以下の通りである。

走査型プローブ顕微鏡（SPM）技術：真空・大気・液中においてナノメートルスケールの物体表面3次元構造を観察するための技術である。原子間力顕微鏡 AFM、走査トンネル顕微鏡 STM、近接場光学顕微鏡 NSOM などから成る最先端観察技術である。液中、高速 AFM では日本、スピン偏極を含む STM では欧米、産業機器としての SPM では米国が優位である。

電子顕微鏡技術：真空中で、マイクロからナノメートルスケールの2次元構造を観察するための技術である。透過電子顕微鏡 TEM、走査電子顕微鏡 SEM 技術がある。電子顕微鏡基礎研究は欧州が進んでいるが、技術レベルは日欧同等レベルである。分解能を高めるための技術である球面収差補正装置では、日本は欧州に対し大きく出遅れていたが、企業努力によって現在は再び世界トップレベルに追いついたと思われる。

放射光・X線計測：電子線加速器から放射される高強度・高品質の放射光（X線）は、成分分析、構造解析、化学反応の時間経過計測、3次元イメージングなど様々な利用される。ナノテクノロジーにとって重要な評価技術であり、施設が充実している日米欧はこれを利用した研究活動が活発である。日米欧でX線自由電子レーザーの建設が進められている。

3次元計測：ナノメートルスケールの3次元の構造を観察するための技術である。透過電子顕微鏡、走査プローブ顕微鏡、放射光・X線を利用したイメージング技術がある。米国では特に放射光を利用したイメージング技術に力が注がれている。

単分子分光：バイオ分野応用が期待される極微量の有機物質分析など、高分解能分析技術であり、表面増強ラマン分光、蛍光分光技術などがある。蛍光分光技術はすでに普及しているが、表面増強ラマン分光はこれからの技術である。

ナノ粒子評価：材料の品質評価や排ガス規制などに重要な技術。3次元形状、ガス・液体・固体中のナノ粒子径などの分布、触媒作用など表面活性、形状や

サイズの動態解析などがある。理論面では欧米が一步先んじるが、技術開発では日米欧が競合している。

標準（物質・計量・評価法）技術：科学技術、法規制などに重要なデータの客観性を保証するための技術である。長さを測定する測長原子間力顕微鏡など、装置と装置を校正するための標準物質に分類される。日本では、ナノテク標準に関する ISO の 229 技術委員会（TC229）において、「ナノテク物質の測定と評価 WG」の議長国であり、欧米と共同で活発な標準化活動を展開している。（別項「国際標準・工業標準」を参照）アジア諸国は欧米日の後を追う状況にあり、科学技術基盤としてまだ根付いていない。

## ナノ計測・評価技術分野のまとめ

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	○	→	研究水準は決して欧米に劣っていない。新計測・解析手法研究は欧米に比してやや弱い印象。
	技術開発水準	◎	→	独創的な開発は少ないが、組み合わせ技術で計測・分析装置を作ることが得意。技術開発自体は盛んである。
	産業技術力	◎	→	ハード面は強いがソフト面が欧米に比較しやや弱く、市場競争力で劣る場面もある。
米国	研究水準	◎	→	研究論文の質・量ともに高い水準。新しい計測・解析手法研究にも積極的であり、研究水準も高い。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は高く、新しい技術の発信源になることも多い。
	産業技術力	◎	→	ベンチャー企業などで、画期的な製品開発が盛んに行われており、産業技術力は強い。特にソフト面の強さが市場競争力につながっている。
欧州	研究水準	◎	→	研究論文の質・量ともに高い水準。新しい計測・解析手法研究を生み、息長く育てる土壌があり、基礎研究水準は高い。
	技術開発水準	◎	↗	新計測・解析手法の高い基礎研究水準をベースに、技術研究開発力は高い。
	産業技術力	○	→	高い研究水準、技術開発力を基盤に画期的な製品開発が盛んに行われているが、産業応用面で若干弱い面もある。
中国	研究水準	△	→	装置の導入には積極的であり、研究の量は増加している。欧米から帰国研究者を中心に研究の質も今後高くなると考えられる。
	技術開発水準	×	→	現在は、海外からの装置導入がほとんどである。
	産業技術力	×	→	同上。
韓国	研究水準	△	↗	半導体製造分野における強い競争力の効果として、大学、研究所での研究開発が活発化している。
	技術開発水準	×	↗	まだ、自国で製造する装置については高度なものはないが、日本と同様、組み合わせ技術には長けていると予測される。
	産業技術力	×	↗	製品までは至っているものは少ないが、今後力を付けてくると考えられる。

- (注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。
- (注2) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

## 2.3.3.2 中綱目ごとの比較

## (1) 走査型プローブ顕微鏡

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	◎	↗	原子間力顕微鏡 (AFM) を始めとする走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の研究水準は高く、半導体だけでなく分子やバイオなど幅広い応用範囲において研究されている。原子分解能のスピン SPM は、欧州に比べ研究グループが少ないが、有機磁性を対象とした研究の成果が出始めている。
	技術開発水準	◎	↗	超高真空 AFM による元素識別・原子操作/組立、液中原子/分子分解能 AFM、バイオ用高速高分解能 AFM、非線形誘電率顕微鏡、多探針プローブなど、日本発の技術が多数ある。低温スピン STM 技術は有機磁性分子の研究に進展が期待される。
	産業技術力	○	→	AFM、STM について高い産業技術力あり、装置の国内シェアは高いが、海外でのシェアが高くない。また、汎用や研究開発分野用の装置が主で製造現場用は少数である。
米国	研究水準	◎	↗	極低温・超高真空 STM の化学やバイオや磁気応用や、簡易型 AFM のバイオ応用を中心とする高い研究水準にある。IBM Almaden グループが極低温 AFM に q - plus センサ方式を欧州から導入して極低温原子操作で画期的成果を出してきた。
	技術開発水準	◎	↗	超高真空 AFM の技術が日欧より少し劣るが急速に進歩しつつある。これまでベンチャー企業を中心であったが、大手の Agilent Technology 社が参入し計測への応用拡大が見込まれる。STM による原子操作・非弾性トンネル分光/励起など走査型プローブ顕微鏡全般の技術開発水準は高い。原子分解能の磁気 SPM は、研究グループ数も増えつつあり、研究レベルは極めて高い。
	産業技術力	○	→	世界シェアの半分を占める。特に半導体製造ライン用の CD - AFM (Critical Dimension AFM) は米国製が高いシェアを有する。
欧州	研究水準	◎	↗	STM、AFM、NSOM (SNOM) など SPM 全般の研究水準が高く、絶縁体や分子やバイオなど応用分野も多岐にわたる。
	技術開発水準	◎	↗	q - plus センサ方式の超高分解能 AFM、原子分解能の交換相互作用力顕微鏡、スピン偏極 STM など世界のトップ技術が多数有り。
	産業技術力	◎	↗	世界展開している高性能 SPM 関連のメーカーがあり、産業技術力は高い。カンチレバークローブや標準試料などの消耗品で独・スイス・ロシアなど欧州製のものも多く、世界中で販売されている。q - plus センサ方式の超高分解能 AFM の市販開始。
中国	研究水準	○	→	超高真空 STM や簡易型 AFM による研究水準は高いが、SPM 全般で比較すると、欧米や日本より少し劣る。スピン SPM の研究はほとんどない。
	技術開発水準	×	→	使用している超高真空 STM や簡易型 AFM の大半は海外の市販装置か海外から輸入した技術を使用している。独自の装置校正手法や、バイオ分野・ナノ材料分野への応用が見られるが、まだ発展途上である。
	産業技術力	×	→	特筆すべき SPM メーカーは存在しない。
韓国	研究水準	○	→	超高真空 STM などによる研究水準は高いが、SPM 全般で比較すると、欧米や日本より少し劣る。スピン SPM 研究グループもある。
	技術開発水準	△	→	特筆すべき著名な発明や先行技術は見当たらないが、SPM の中で近接場光プローブ顕微鏡 (NSOM/SNOM) や電気計測用の SPM の開発・標準化に力を入れている。
	産業技術力	△	→	汎用機器のレベルは高く、日本の研究機関や欧州の国家計量標準機関でも導入されるようになってきた。

## 全体コメント：

原子間力顕微鏡 (AFM) を始めとする走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が開発されて 20 年余りが経ち、観察ツールから計測ツールへと変わりつつある。走査型プローブ顕微鏡 SPM は、今後産業ニーズの極めて高い計測技術であり、各国がしのぎを削っている。SPM の分類としては、原子間力顕微鏡 AFM、走査トンネル顕微鏡 STM、近接場光顕微鏡 NSOM (または SNOM) などがある。日本は、高速化、液中 AFM など高分解能・高機能 AFM の技術が欧米より全般として進んでいる。また、AFM による室温原子識別・原子操作/組立など追従を許さない技術がある。欧州は、交換相互作用力顕微鏡、スピン偏極 STM、q - plus センサ方式 AFM などで世界のトップ技術を多数有する。米国はソフトウェアまで含めた汎用機器としての品質レベルは高い。これらの技術開発力を反映して、SPM を利用した先端研究は、日米欧は中韓に比べていずれも高い水準にある。一方、SPM 市場は、汎用機器の世界シェアの半分を占める。特に半導体製造ライン用の測長 AFM は米国製がほとんどである。欧州は、高い技術力に支えられ、研究機器市場では高いレベルにある。国産装置は、汎用や研究開発分野の装置が主で製造現場用は少数であり、国内シェアは高いが、海外では高くない。韓国は簡易型 AFM を中心とした製品群を有する企業があるが、中国ではほとんどないのが現状である。

(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]

(2) 電子顕微鏡

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	○	→	収差補正技術基礎研究はすべて欧米によって行われたもので完全に立ち遅れたが、新規技術の開発に積極的に取り組んでおり、現在はほぼ追いついたと思われる。応用は論文の質・量ともに高い水準。大学等の研究機関での基礎研究は量・質共に一定のレベルにある。
	技術開発水準	○	→	電子光学系の設計・開発に関しては、日本の技術は伝統的に優れているが、収差補正など革新的なアイデアは欧米からの輸入。
	産業技術力	○	↘	電子顕微鏡装置の製造台数シェアは世界一であるが、高性能機種では欧米（とくに FEI 社）に技術的に遅れをとっている。
米国	研究水準	○	↗	TEAM という大型国家プロジェクトが推進されており、最新技術の開発・導入に積極的。応用は論文の質・量ともに高い水準。
	技術開発水準	○	→	NION 社が独自の照射系収差補正機構を研究用に開発・販売。電子線分光器等の周辺機器メーカー（Gatan）が独自技術を所有。
	産業技術力	◎	↗	FEI 社が電子顕微鏡本体、Gatan 社が電子線分光器等周辺機器で優れている。
欧州	研究水準	◎	→	電子顕微鏡理論、アプリケーション共に伝統的に高い水準。革新的な収差補正装置で世界をリード。2007～8年にかけて電子銃とその単色化技術も大きく進展している。
	技術開発水準	◎	↗	エネルギーフィルターや収差補正装置で最高水準にあり、高性能機種の技術力が高い。米国の TEAM 予算を用いてドイツの CEOS 社が新しい収差補正技術の開発に取り組んでいる。
	産業技術力	○	↗	高い技術力を背景にシェア増加傾向。FEI 社の急成長は日本の電子顕微鏡産業にとって脅威。
中国	研究水準	○	↗	電子顕微鏡技術に関する基礎研究はない。ただし最新の電子顕微鏡の導入には積極的であり、台数は飛躍的に増えている。アメリカ等から帰国した研究者が理論系で活躍。
	技術開発水準	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
韓国	研究水準	△	↗	電子顕微鏡技術に関する基礎研究はない。ただしいくつかの国家プロジェクトにより日本から最新の電子顕微鏡が導入されている。
	技術開発水準	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。

全体コメント：

電子顕微鏡技術はナノテクの研究開発に不可欠であり、欧州と日本が技術開発においてしのぎを削っている。電子顕微鏡技術は、90年代までは日本のお家芸の一つであった。その後、日本は透過電子顕微鏡の超高压化に傾倒したのに対して、欧州では超高压化に代わる分解能向上手段として収差補正技術の開発に成功した。これが今や世界の大きなトレンドとなり、日本は大きく出遅れる結果となった。しかしながら、企業努力（日本電子）により、技術的には2007年には再び世界トップレベルに戻ったと思われる。今後はこれに色収差補正技術開発が大きなトレンドである。FEI社は独自の電子銃・モノクロメータの開発に取り組んでおり、初期データが公開されつつある。これに競争できる日本の技術は少ない。米国が産学官連携の大規模な研究開発をスタートさせ、先行していた欧・日を急激に追い上げている。日本の電子顕微鏡世界市場シェアは60%以上、半導体計測に重要な測長SEMにおいては65%以上と汎用機種では今なお高いが、収差補正技術で出遅れたため高性能機種では欧州に遅れをとっており、シェアは過去に比較し低下傾向にある。当分野の中韓の技術開発力は、日欧米に比べて大きく劣る。また、解析技術に関しても、日米欧は各々得意分野があり、中韓がなかなか追いつけない数少ない分野のひとつであるといえる。

- (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]

## (3) 放射光・X線計測

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	◎	↗	各放射光施設共ナノテク関連の課題、プロジェクトが多くなっている。構造生物（DNA、タンパク）、製薬関連の研究が増加している。
	技術開発水準	◎	↗	企業の施設まで含め、大中小放射光施設が稼働している。現場レベルともにX線計測分野を良く使いこなしているが、計測機器開発は進んでいない。
	産業技術力	◎	↗	欧米に比べて、多くの広範な産業界が自ら放射光を利用し、成果を上げている。各放射光施設が産業利用促進のためのシステムを導入し、イノベーションに直結する積極的な利用を図っている。
米国	研究水準	○	↗	ナノテクの国家戦略の一環に位置づけられ、当該分野で発展が予想される。
	技術開発水準	◎	↗	EUと比べて施設の建設は停滞気味である。最先端の放射光施設建設の技術は充分有している。第3世代の放射光の特徴を生かしたナノレベルの3-Dイメージングなど最先端の技術開発がなされている。
	産業技術力	○	↗	蛋白質構造解析以外、生産に近い放射光利用はない。医療やエネルギー、情報関連技術において放射光を利用して得られた新しい技術や知識を利用して経済競争力を増そうとする動きがある。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究を中心とした技術開発が盛んに行われている。放射光利用技術、新しい計測技術の発信が盛んになってきている。
	技術開発水準	◎	↗	ESRF以外にも、各国で最新の中型放射光施設を建設し、各国およびEU共同の科学技術政策と積極的にリンクさせている。施設スタッフが産業界ニーズに対応した解析技術を積極的に開発し、新しい利用を開拓している。計測機器、解析ソフトともに先行している。
	産業技術力	◎	→	大企業の多くが放射光を利用した研究開発を推進しており、産業応用への研究開発も盛んである。
中国	研究水準	×	↗	最先端レベルの研究は少ないが、欧米の放射光施設で研究した帰国研究者によって放射光関連の研究基盤を築いている感がある。
	技術開発水準	×	↗	現在は北京（1991年稼働開始）と合肥（1992年稼働開始）の中小型放射光施設を中心に研究が行われているが、上海第三世代放射光施設が2009年稼働予定。（日本へ技術協力が期待されており、加速器とビームラインのR&D等の共同研究が実施されている）
	産業技術力	×	↗	最先端の放射光施設建設に係る技術を持つ企業は非常に少ない。世界に発信するような産業技術への応用は認められない。
韓国	研究水準	△	→	大型施設を利用した分析・評価の研究が着実に進展している。多くの研究者が日本の放射光施設を利用している。
	技術開発水準	△	→	POHANG 第二世代放射光施設のみで圧倒的に劣勢である。（日本へ技術協力を期待）
	産業技術力	△	→	積極的な企業は少ない。半導体など世界的に競争力のある産業があり、技術力が向上している。

全体コメント：  
放射光を利用した研究は、近年では、基礎研究からナノテク関連や構造生物学への応用研究が盛んになってきており、今や必須な技術となりつつある。ナノテクノロジーにおいて放射光は、成分分析、構造解析、化学反応の時間経過計測、3次元イメージングなど様々な用途に利用されている。当分野の特徴は、大型の放射光施設が必要不可欠であることである。このため、最新の放射光施設の量的・質的な地域間格差が、そのまま利用研究レベルに反映している。ちなみに、世界の放射光施設の数、約68であり、日14、米16、欧州25（独7、仏3、英2）、中3、韓1、その他9であり、米国、欧州、日本が他を圧倒している。中韓はともに技術開発が遅れており、研究レベルも高くはないが、最近では、利用研究者と大型施設の世界的な連携が活性化しており、中韓の研究者も追い上げている。特に、中国は多くの優秀な研究者が海外の放射光施設で研究を行っており、帰国した研究者によって放射光関連の研究基盤を築いている感もある。産業利用では、欧米と日本で大きく異なる。欧米は製薬に偏るが、日本はエレクトロニクス等広い産業分野で、かつ多数の企業が自ら利用している。大型の施設を使用することから産業の生産現場での利用は難しいが、技術開発への応用は盛んに行われており、間接的に製産現場へも波及も大きくなっていると考えられる。大型施設に対して、半導体製造プロセスにおける次世代露光装置の光源や物性評価などを目的とした汎用性の高い小型光源の研究開発が、欧米に先んじて日本では民間企業を中心に進められている。

(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) 単分子分光

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	◎	↗	一部の研究所（理研・産総研）・大学（阪大・埼玉大）で着実に成果を上げている。
	技術開発水準	◎	↗	大学（北大・埼玉大）で、色々な手法（電子ビーム、化学還元法など）での超高感度ラマン分光用金属ナノ構造基板形成が進められつつある。
	産業技術力	△	→	超高感度ラマン分光用金属ナノ構造基板を含めて、まだ実用化はほとんどされていない。その方向で動いている企業・大学はほとんどない。他国も同じであるが、実用化のためには、増強メカニズムの解明が必須である。
米国	研究水準	◎	→	先行研究があったが（MIT, Emory Univ.）、現在単一分子分光の研究は停滞している。
	技術開発水準	◎	↗	大学（Rice Univ., Northwestern Univ.）で、色々な手法での金属ナノ構造基板形成が進められつつある。近赤外レーザーを用いた癌組織の <i>in vivo</i> SERS 分光が行われている（Emory Univ.）。
	産業技術力	○	↗	大学発の金属ナノ構造基板の形成と販売のベンチャーができ、注目されている。ただし、感度自体は従来法と同じくらいであり、単一分子感度検出には4桁以上不足している。
欧州	研究水準	◎	↗	一部の研究所（FHI, ETH）で、単一分子感度・ナノメータ空間分解能ラマンで、成果をあげている。
	技術開発水準	◎	↗	色々な大学で、色々な手法での金属ナノ構造基板形成が進められつつある。
	産業技術力	○	↗	大学発の金属ナノ構造基板の形成と販売のベンチャーがあり、注目されている。ただし、感度自体は従来法と同じくらいであり、単一分子感度検出には4桁以上不足している。
中国	研究水準	◎	→	一部の大学（Xiamen Univ.）・研究所（CAS, Beijing）で成果を上げている。
	技術開発水準	○	→	いろいろな大学で、化学還元法での金属ナノ構造基板形成が進められつつある。
	産業技術力	×	→	実用化はされていない。
韓国	研究水準	△	→	単一分子ラマン分光研究は、ほとんどなされていない。
	技術開発水準	△	↗	一部の大学・研究所（KAIST）でナノ構造形成が進められている。
	産業技術力	×	→	ベンチャーなどでの実用化はなされていない。
<p>全体コメント：単分子分光技術は、極微量の有機物質分析などの高分解能分析技術であり、バイオ技術などへの応用が期待される重要な手法である。一般に単一分子分光には、蛍光分光と単一分子ラマン分光があり、前者はすでに実用化されていることから、ここでは単一分子ラマン分光に焦点を絞ってまとめた。まだ増強メカニズムが完全には解明されていないため、実用化は進んでいない。一方で、その前段階として有用な、目的分子種に対する汎用性があり、かつ定量分析性の高い超高感度ラマン分光用金属ナノ構造基板形成が、上記のとおり世界的に進められている。各種リソグラフィ技術の利用により、活発に技術開発がされ、実用化も進められつつある。世界的に、単一分子分光＋ナノスケール（約15nmまでの）空間分解能のチップ増強ラマン分光の進展が見られる。</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]

## (5) 3次元計測 (リアルタイム含む)

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	○	→	日本は材料科学分野（非金属）では一線級の開発・研究で世界を先導。金属分野・生物分野はやや立ち後れている。
	技術開発水準	◎	→	独創的な開発は少ないが、組み合わせ技術で計測・分析装置を作ることが得意。寸法計測用 CD-SEM を始め、多くの優れた装置が開発されている。
	産業技術力	◎	→	新製品や新機能の追加など、特に半導体分野では米国との協力の中で開発されることが多く、今後の活力の維持・向上に懸念。欧米に比べると産学連携の取り組みが少ない。
米国	研究水準	◎	→	生物分野での3次元計測が非常に優れており、研究者の層も厚い。アイデアを国家プロジェクトでバックアップする体制がある。
	技術開発水準	◎	→	アトムプローブ法を応用した3次元ドーパントプロファイラーなど、計測装置・計測法を独自開発する気概がある。リアルタイム3次元計測という面では、放射光施設（APS）などでの開発が進みつつある（エックス線 CT や中性子線-CT など）。
	産業技術力	△	→	電子顕微鏡の関連部品（例えば検出器など）の製造会社は豊富であるが、肝心の電子顕微鏡製造会社が無い弱点を国家プロジェクトで補い成果を挙げている。
欧州	研究水準	◎	→	電子顕微鏡では米国よりもより一層生物分野の比重が高い。金属分野では世界を先導している研究者が存在する。また、三次元構築に関しては数学者など他分野の研究者との連携研究も活発に実施されている。
	技術開発水準	◎	↗	透過電子顕微鏡など息の長い技術開発が進められている。3次元 TEM や He イオン顕微鏡などで新しい分野が開けてきている。また、大学や国研との連携も非常に活発であり、米国同様大きな研究成果を挙げている。
	産業技術力	◎	→	電子顕微鏡製造会社もあり、伝統もあることから、産業技術面でもレベルが高い。これらの会社で3次元計測の重要性が良く認識されており、産学連携も活発。
中国	研究水準	△	→	遅れている。しかし、装置の導入には積極的である。
	技術開発水準	×	↗	外来の装置に頼り、自ら創意工夫を持って計測技術を磨こうとしていないため、3次元計測についても見るものはない。ただし、欧米に多くの研究者を送り技術導入には積極的である。
	産業技術力	×	→	同上。
韓国	研究水準	△	↗	半導体製造分野における強い競争力の効果として、大学、研究所での研究開発が活発化している。
	技術開発水準	×	↗	まだ自国で製造する装置については高度なものはないが、日本と同様、組み合わせ技術には長けていると予測される。欧米に多くの研究者を送り技術導入には積極的である。
	産業技術力	△	↗	製品化には至っていないが、大手半導体メーカーなどを中心に TEM トモグラフィなどの3次元計測技術を積極的に導入し、成果に繋げ始めている。
<p>全体コメント：  3次元計測技術には様々な手法があるが、前述の中項目（1）走査プローブ顕微鏡、（2）透過電子顕微鏡、（3）放射光を利用したイメージング技術に加えて、最近ではレーザー補助3次元アトムプローブ法や、He イオン顕微鏡などの新しい手法が開拓されている。これら計測装置・計測法の研究開発は引き続き欧米が中心である。米国では特に放射光を利用したイメージング技術に力を入れており、新しい研究施設（ビームライン等）が稼働し始めた。またレーザー補助3次元アトムプローブ法を応用した半導体中の3次元ドーパントプロファイラーなど、世界中の技術を集約して進捗している。一方、欧州では3次元 TEM や He イオン顕微鏡などの分野の開拓が盛んである。特に欧米ではアイデアを国家レベルでバックアップする体制が整備されており、三次元解析のために分野を超えた研究者の連携が活発に行われている。これに対して日本は独創的な開発は少ないが、組み合わせ技術で計測・分析装置を作ることが得意である。1μm オーダーの厚膜の3次元 TEM 技術開発などでは、取り組みがスタートしている。3次元計測を利用した研究の現状は、全体としては、欧州・米国が優勢と言える。ただし、分野によっても勢力分布は非常に異なっており、生物関係では欧米が大きくリードおり、金属系材料では欧州、非金属材料（ソフトマター）では日本が世界を先導している。</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]

(6) ナノ粒子評価 (形状・分布・表面活性・動態解析)

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	◎	→	研究水準は決して欧米に劣っていないが、新計測・解析手法の開拓は欧米に比してやや少ない印象。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発自体は盛んに行われている。
	産業技術力	◎	↗	ナノ粒子計測を意識した製品開発が行われてきている。
米国	研究水準	◎	↗	ナノテクノロジーが提唱され始めた当初から、基礎研究のポテンシャルは高いレベルを保っている。ナノ粒子のリスク評価においても先進的な役割を果たしている。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発水準は非常に高い。技術の発信源になることが多い。
	産業技術力	◎	↗	ベンチャー企業などで、画期的な製品開発が盛んに行われている。
欧州	研究水準	◎	↗	非常にポテンシャルは高く、研究者の層も厚く、ナノ粒子計測を意識した研究が盛んで、着実に研究基盤を拡張している。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発水準は非常に高い。
	産業技術力	◎	↗	画期的な製品開発が盛んに行われている。一方で、ナノ粒子の環境リスクに対する懸念も強く、規制に向けた動きも活発化している。
中国	研究水準	○	↗	台湾の研究水準は近年向上している。APEC 下の国際標準を意識している。
	技術開発水準	○	↗	台湾において、近年、標準化を意識したサイズ分布測定技術の研究開発が行われている。
	産業技術力	○	↗	台湾において、近年、製品開発が活発化している。中国は ISO TC229 (ナノテクノロジー技術委員会) の材料規格分野などにおいて活動を活発化させている。(別項「国際標準・工業標準」を参照)
韓国	研究水準	○	→	国際的に特に目立った研究成果は伺えないが、安定した水準を維持している。
	技術開発水準	○	→	ナノ粒子評価に特化した動向は伺えない。
	産業技術力	○	↗	自国産の計測機器を輸出するなど、製品開発が活発化してきた。

全体コメント：

材料の品質評価や排ガス規制など法規制、近年問題視されているナノ粒子のリスク評価においても重要な評価技術である。ナノ粒子の評価には、3次元形状、ガス・液体・固体中のナノ粒子径などの分布、触媒作用など表面活性、形状やサイズの動態解析などがある。形状評価は、透過型電子顕微鏡 TEM、走査型電子顕微鏡 SEM、原子間力顕微鏡 AFM などの顕微鏡を利用した手法が中心であるが、レーザー光による粒子散乱・回折を使用した計測では、光学計測に歴史のある欧州において新規実用計測器の開発が盛んである。

分布測定には、気相中の粒子を観測する方法として、TEM 法、計数ミリカン法、微分型電気移動度分析器 DMA、エアロゾル粒子数質量分析器 APM による測定法などがある。液相中粒子の分布測定では、動的光散乱法 DLS が最も一般的だが、フィールド・フロー・フラクシオネーション法 FFF などのように、実際に粒子を粒径ごとに分離することによって分布を計測する手法も開発されている。これらの手法は主に欧米の発案・開発であり、欧米は基礎研究、技術開発や製品開発において高いレベルであるといえる。日本は新計測・解析手法の開拓は欧米に比してやや少ないが、高い技術レベルである。

表面活性の評価は、2007 年ノーベル化学賞受賞者エルトル博士 (独) に見られるように欧米で地道な基礎研究が行われている。日本では基礎研究は少ないが、春田博士の金ナノ粒子の研究など高いレベルのものもある。

動態解析は、基礎理論では欧米が中心であるが、実験的研究では日欧米はほぼ同じレベルにある。表面活性の評価や動態解析は、ナノ粒子のリスク評価においても重要視される傾向にあり、技術開発と標準化が国際的に求められている。なお、中国をはじめとするアジア圏の国々では、ナノテクノロジー分野では革新的な技術によって産業が急激に進歩するという見解があり、国策的にナノ粒子の産業応用を推進する傾向がある。

(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]

## (7) 標準（物質・計量・評価法）技術

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	○	↗	測長 SEM や X 線回折計用など、特定の分野での計量標準が整備されている。標準化については、米国と協力して世界を牽引している。
	技術開発水準	○	↗	標準の種類が広がっているが不十分である。要素技術は欧米の借り物が多い。
	産業技術力	◎	→	上記の標準が整備されている分野では対応して計測装置も強みを発揮している。
米国	研究水準	◎	→	半導体分野を初めとして、幅広い産業分野を対象とした標準整備が図られている。リスク評価や標準化に対する意欲が高い。
	技術開発水準	◎	→	NIST が強い指導力を発揮し、研究サイドと産業との交流がうまく行っている。
	産業技術力	◎	→	産業界の要求に沿って、幅広い分野での標準供給が進んでいる。ただし、ナノテク分野では今後のものが多い。
欧州	研究水準	◎	→	ドイツ、イギリスを中心に長い歴史と豊富な人材を有し、幅広い分野で基礎研究が盛んである。
	技術開発水準	○	↗	フラウンホーファー研究所など実用化に向けた開発を目指す動きが活発になっている。
	産業技術力	○	→	他の分野も同様の様であるが、欧州では産業応用が課題である。EUV 露光に向けた開発が活発化している。
中国	研究水準	×	→	中国標準研究所の開発項目において最近になってナノテクという単語が含まれるようになった。また、2007年のナノテク国際会議（ChinaNano2007）でナノ計量を取り上げられている。
	技術開発水準	×	→	研究開発がスタートしたばかり。
	産業技術力	×	→	独自開発のものはほとんど見あたらない。
韓国	研究水準	○	↗	KRISS を中心に標準の整備や標準化に対して活性化されてきた。
	技術開発水準	○	↗	サムソンなど巨大企業の支援で独自の技術開発に努力しているが、計測に関する標準や標準化については特異分野に限られている。
	産業技術力	○	↗	標準を搭載した製造装置や計測装置は欧米や日本から輸入されたものである。

## 全体コメント：

科学技術、法規制などに重要なデータの客観性を保証するための技術である。ナノテクノロジー分野の標準は国家の長さ標準にトレーサブルなスケールを中心に、2次元や3次元の長さ測定を行うための測長原子間力顕微鏡と数十 nm の長さ標準物質、薄膜深さ方向の厚さを評価するための高精度 X 線反射率測定装置と標準物質、排ガスや液中のナノ粒子径測定技術と粒系標準物質、空孔標準測定技術と標準物質などが日米欧の標準研究所を中心に進められている。ナノテクノロジーを支える標準は、単にナノスケール標準だけでなく幅広く標準全体に亘る。欧米は、標準開発に関わる研究者数や国家標準研究所の規模において他の3国と比べてかなり大きく、ナノテクノロジー分野においても裾野は広い。日本では、ナノテク標準に関する ISO の 229 技術委員会 (TC229) において、「ナノテク物質の測定と評価 WG」の議長国であり、欧米と共同で活発な標準化活動を展開している。(別項「国際標準・工業標準」を参照) ISO の TC229 内に新設された4つ目のWG「材料規格」は中国が議長国になっている。

- (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]

## 2.4 関連共通課題

### 2.4.1 共用研究開発拠点(融合・連携促進)

#### 2.4.1.1 概観

世界各国いずれにおいても共用研究開発拠点を融合・連携の場、人材育成の場としてその整備を重要施策に位置付けている。米国、EU、韓国、台湾などの主要国は全ナノテク国家投資額の10~20%を投入している、一方で日本は、2~3%の投資であり、各国に比べて一桁近く低く、産業界のニーズに応えられる充実した設備状況にはなっていない。

日本ではナノテクノロジー総合支援プロジェクトで本格的に始まり、現在は第二期の位置づけにあるナノテクノロジー・ネットワークプロジェクトとして推進されている。第二期ナノネットの特徴は運営の継続性を目指して課金制を導入したことで、各センター・拠点を運営の工夫が行われている。しかしながら、制度上・運用上の問題があり、継続的な運営のためには解決されるべき課題は多い。産業界の共用施設使用のニーズは益々高まっている一方で、測定機器など設備の老朽化が懸念され始めている。また、特定プロジェクト等を産学で推進するための設備の揃った中核的研究拠点もまだ設置されていない状況にある。全般的に研究者が設備の共有化に慣れておらず、また、イノベーションの立場から融合・連携を促進する工夫にも欠ける。今後の深刻な問題は、日本のセンターが国際的に開かれていないことであり、積極的に海外から研究グループを誘致している主要国と大きな差がある。

米国では共用研究開発拠点を世界に先駆けて開始し、NNIN(国家ナノテクインフラネットワーク/NSF)13拠点、NCN(ナノテクコンピューターネットワーク/NSF)7拠点、NSRC(ナノスケール科学研究センター/DOE)5拠点を代表にして分厚いインフラが計画的に整備されてきた。年間100-150億円が投入され、異分野融合研究やK-12教育プログラムの教師養成の目的のために有効に利用されている。NNINやNCNは基本的に外部に開かれた共同利用施設であり、NSRCはプロジェクトあるいはプログラムを実施するための研究拠点である。これらの充実した施設を利用して、米国では大学の若い研究者やベンチャービジネスが研究開発活動を展開している。NNINが最も代表的だが、13拠点の中で東のコネル大学、西のスタンフォード大学の力が圧倒的であり、利用者、NSF予算ともに両大学が全体の8割を超える。学術的な成果が出る一方、ナノテクノロジーを活用した実用化から事業化への展開は現時点ではまだそれほど目立っていない。NNINは国家予算への依存度が低い中で、運営に成功している。NSFやDOEのファンディング政策は学際研究が条件であり、学際・融合のインセンティブを与えている。また、大学も学際・融合への自主努力を進めている。その他に注目すべき点として、ナノエレクトロニクス分野における共用研究開発拠点の役割が高まってきていることが挙げられる。ベンチャーキャピタルからの投資が継続的に行われており、Silicon Valley Technology Center(SVTC)など、施設・装置の利用には相当な資金が必要な施設においても大学発の知財がその実用化に向けた研究開発の対象となって

いる。

欧州では、独、英、蘭などが共用施設のネットワークを自国に持っているだけでなく、EUとしての大きなネットワーク N&N Network (142 のセンター) が形成されている。欧州における巨大研究拠点としては、IMEC (ベルギー) と MINATEC (仏) の2つが代表的である。IMEC は将来のナノエレクトロニクスにまで守備範囲を延ばし、日本企業の研究センターを誘致している。これらは、産業界からの More than Moore に対する要望を組織的に吸い上げることで、施設運営そのものがビジネスとして成立している。英国の拠点は全体的には新しいものが多いが、最初に設立されたニューキャッスル大ではベンチャーも積極的に設立されているようである。

中国では北京の大型共用拠点、国家ナノ科学技術センターが稼働を開始し、産業界からの資金が共用拠点に導入される仕組みを形成しつつある。産業界への波及はこれからである。

韓国では長期的に制度化された予算によって、NNFC (国家ナノテクファウンダリーセンター) など大型共用拠点が整備は積極的に続けられている。課金制度の運用により、NNFC では既に3~4億円の収入があるなど、自主運営に入っている。ただし最近は、施設が乱立しすぎたとの反省もあるようで、整理も検討されている模様。産業界への波及はこれからと考えられる。

2.4.1.2 比較表

共用研究開発拠点（融合・連携促進）

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	取り組み水準	○	→	2007年、文部科学省により「先端研究施設共用イノベーション創出事業」が開始された。ナノテクノロジー・ネットワーク（第2期ナノテク支援プロジェクトの位置づけ）と産業戦略利用プログラムからなっている。共用研究開発拠点整備は、ナノテクノロジー総合支援プロジェクトで本格的に始まり、当該事業で拡大した。利用料課金制度などを整備し、持続的、自立的に運営できる体制を確立することが課題である。その他の大きな流れとして「研究開発力強化法」においても研究施設・装置の共用化促進が謳われており、今後の実効的なサポートが期待されている。
	実効性	△	→	上記のプログラムは2007年度開始なので実効性の評価には時期尚早。既存設備の活用が大半であり、分散している。一方、当該事業に対する予算措置は、研究開発力強化法実施にもかかわらず第1期ナノテク支援プロジェクトのそれと比較して減少しており、共用研究開発拠点におけるオープンイノベーションにブレーキがかかる恐れもある。また、学際研究を促進するためには、集約型施設の設置が喫緊の課題である。現在、課金制の導入を文部科学省が促進している。今後の深刻な問題は、日本のセンターが国際的に開かれていないことであり、積極的に海外から研究グループを誘致している主要国と大きな差がある。
米国	取り組み水準	◎	→	共用研究開発拠点を世界に先駆けて開始し、NNIN他、複数の制度が有機的に共用施設における研究開発を支援している。NNINが最も代表的であり、13の大学が参画。また、DOE傘下のCenter for Integrated Nanotechnologies (CINT)も稼働を本格化している。さらに、アルバーニ他に、産学連携の大型拠点が形成され、ナノエレクトロニクス分野における共用研究開発拠点整備が急速に進められている。
	実効性	◎	→	学術的な成果が出る一方、ナノテクノロジーを活用した実用化から事業化への展開は現時点ではまだそれほど目立ってはいない。NNINは国家予算への依存度が低い中で、運営に成功している。ナノエレクトロニクス分野においては、一部、拠点形成による実効的な成果が出始めている。NSFやDOEのファンディング政策は学際研究が条件であり、学際・融合のインセンティブを与えている。
欧州	取り組み水準	◎	→	ビジネスモデルに定評があり実績もあるIMECに加え、大型共用拠点MINATECが稼働を開始している。国によって方針が異なる。フランス、英国が全国に広がる共用施設ネットワークを持つ一方、ドイツを持つ拠点ネットワークは日本の知的クラスターに近く、施設の共用には重きを置いていない。IMECは将来のナノエレクトロニクスにまで守備範囲を延ばし、日本企業の研究センターを誘致している。
	実効性	◎	↗	成功しているベルギーIMECの例など、実効性に優れる。施設運営そのものがビジネスとして成立していると言ってもよい。英国の拠点は全体的には新しいものが多いが、最初に設立されたニューキャッスル大ではベンチャーも積極的に設立されているようである。
中国	取り組み水準	○	↗	北京の大型共用拠点、国家ナノ科学技術センターが稼働を開始し、産業界からの資金が共用拠点に導入される仕組みを形成しつつある。台湾は計画的にネットワークを形成している。
	実効性	△	→	産業界への波及はこれからである。
韓国	取り組み水準	◎	→	長期的に制度化された予算によって、大型共用拠点が整備されている。施設の建設は積極的に続けている。ただ最近、施設が乱立しすぎたとの反省もあるようで、整理も検討されている模様。
	実効性	○	→	代表的な集約型研究施設である韓国NNFC (National NanoFab Center) はスタートして2年だが、課金によって年間3～4億円を得て自立している。センター長によれば、雇用に関しても、応募者のレベルが着実に上がってきた、とのことである。国際的にも開かれている。一方、KANCなどの他の施設に関しては、経営的に苦戦しているとの情報がある。

(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]

## 2.4.2 教育・人材育成 (ナノテクリテラシー含む)

### 2.4.2.1 概観

日本では教育プログラムとして、経産省・製造中核人材育成事業、文科省・ナノテクネットワーク及びキャリアパス多様化促進事業、また、サマースクールをはじめ各大学の自助努力などがある。それぞれの事業は単発的ではあるが、今後社会が必要な科学技術系人材の議論が産官学の間で開始されたといえる。ただし、小中高から大学院に至るまでの長期にわたる根幹的な教育プログラムは不在である。

米国は、人材育成を国家的戦略的に行う仕組みを基盤として有している。ナノテク分野においては2000年の国家ナノテクノロジー戦略 NNI に、明確にその重要性が記載されている。今後15から20年の間に約100万人のナノテクノロジー研究技術者が必要との目標と計画のもと、着実に実行されている。全ての理工系の大学にナノテクノロジー関連コースが設けられている。K-12という小中高一貫した教育システムをナノサイエンス、ナノテクノロジーをベースとして構築しようとしている。K-12教育の教官の養成と教科書作りを着々と進め、外国語への翻訳も実施しており、若年層から社会人教育までの取り組みがなされている。例えば国立ナノスケール科学・工学訓練指導センターでは、高校教材・プログラムの開発・高校教師の訓練や中学から大学まで一貫したナノスケール科学・工学教育の推進などがなされている。背景には、NSFやDOEなどが教育プログラムをファンディングの条件としていることにもある。

欧州では大型共用拠点の個別プログラムのほか、欧州科学財団ESFの研究開発を志向するプロジェクトに人材育成予算が組み込まれているケースもある。科学技術に対する社会からの理解を深めようとする積極的な施策が従来からなされているが、全体としては米国型の戦略性は見られない。

中国では大型共用施設で、要素技術を習得するサマースクールなどが開催されるなどの取り組みが見られる。なお、台湾では、米国型の積極的な人材育成プログラム(K-12)が実行され、世界的にトップレベルの活動をしている。

韓国ではナノテク技術施策の3本柱の1つと、産学連携にて、長期の予算確保がなされている。

2.4.2.2 比較表

教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）

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	取り組み水準	△	→	経産省・製造中核人材育成事業の一部、文科省・ナノテクネットワーク及びキャリアパス多様化促進事業の一部など。しかし、小中高から大学院に至るまでの長期にわたる根幹的な教育プログラムは不在。全体の方向性が見えていない。
	実効性	△	→	上記の事業は単発であり、それぞれの事業の実効性が社会に向けて明確になることは難しい。
米国	取り組み水準	◎	→	人材育成を国家的戦略的に行う仕組みを基盤として有しており、国家ナノテクノロジー戦略 NNI にも明確にその重要性が記載されている。NNIN - REU など、産業界が積極的にインターンシップを実施。また、共用施設を持った K - 12 プログラムの教師育成コースを積極的に推進。教官の養成と教科書作りを着々と進め、外国語への翻訳も実施している。NSF の Partnerships for International Research and Education 事業なども特筆すべき取り組みである。
	実効性	◎	→	受講生が社会に向けて見えるようになるための仕掛けがある。K - 12 教育プログラムに 300 大学、1 万人の学生が参加。今後 15 から 20 年の間に約 100 万人のナノテクノロジー研究技術者が必要との目標と計画のもと、着実に実行されている。NSF や DOE が教育プログラムへの取り組みをファンディングの条件としている。
欧州	取り組み水準	○	↗	大型共用拠点の個別プログラム他、ESF の研究開発を志向するプロジェクトに人材育成予算が組み込まれているケース有。
	実効性	○	↗	科学技術に対する社会からの理解を深めようとする積極的な施策が、従来からなされている。
中国	取り組み水準	△	↗	大型共用施設で、要素技術を習得するサマースクールなどが開催されるなどの取り組みが見られる。一方、台湾の教育プログラムは世界有数のもので、米国と同様に K - 12 を推進し、世界的にトップレベルの活動。
	実効性	△	↗	人材育成の実効性を計るには、時期尚早。ただし台湾は、世界で最も活発に教科書作りや翻訳が行われている。
韓国	取り組み水準	△	↗	ナノテク技術施策の 3 本柱（技術、人材、施設）の 1 つと、産学連携にて、長期の予算確保がなされている。
	実効性	△	→	人材育成の実効性を計るには、時期尚早。

(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]

## 2.4.3 国際標準・工業標準

### 2.4.3.1 概観

2005年に活動が開始されたナノテクノロジーの国際標準化は、昨年までISOのナノテクに関する技術委員会（TC229）でナノカーボン材料を中心に用語や計測・評価及び安全性についての議論が進められてきた。TC229にはWGが3つ設置されていて、その内の「測定と評価」WGの議長国として日本は活発に活動をしているが、他の2つのWGにおける活動内容が必ずしも国内関係者に共有されていない現状もあり、関係各省間の調整機能をどう確保するのか、今後の国際対応の一つの課題と考えられる。

2008年度には用語や命名法の検討を行ってきた第1作業委員会（WG1）において、イギリス規格協会（BSI）からの提案によるナノ物質の定義に関する最初のTS（ISO/TS27687）が制定・出版されるなど、具体的な成果が出始めている。また2008年6月のフランスボルドーにおけるISO/TC229会議から、材料規格に関する第4番目のWG4が活動を開始、中国がコンビナー（座長のこと。幹事国）に就任したことや、二酸化チタンや炭酸カルシウムのナノ粒子に関する中国の国内規格を国際標準化の場に持ち込んできたことが注目される。2008年11月にはISO/TC229の総会を中国上海に誘致するなど、この1年は国際標準化活動における中国の積極さが際立っていた。ただ、1995年のWTO/TBT協定（貿易の技術的障害に関する協定）の発効により、加盟国は関連する国際標準を国内標準や技術基準（強制規格）の基礎として用いることが義務付けられている。国内の標準を国際標準にしようとする中国の積極性は注目されるが、国際標準に相応しいものとするには参加各国の要求や意見を反映する必要がある、今後の審議の結果次第では大幅な修正が迫られると思われる。

その他、この一年で目立ったのはイギリスの動きである。2008年度、BSIは9件のナノテクノロジー関連の国内新規格を発行している。内容は6件が用語に関するものであるが、そのほかにナノ材料の取り扱いや廃棄に関するガイドライン3件が含まれている。BSIからはこれまで最初のTechnical Specificationとなった上記用語に関する提案しか出されていなかったが、上海のISO/TC229会議においてこれら国内規格を国際規格に提案してきた。また、アメリカ規格協会（ANSI）からの新提案「Risk Evaluation framework」は、DuPont等の産業界の意向を反映しているものと思われる。多くの項目と詳細な内容がアメリカ国内でも議論になっていることと、欧米からの反論も多いことから、今後の推移が注目される場所である。欧米の企業のナノ粒子のリスクに関する取り組みは、自ら提案するナノ粒子の管理策をデファクト化することにその狙いがあると思われる。既に産業展開をにらんだ熾烈な動きが始まっていると見るべきである。

なお、現在のところISOとIECのふたつの国際標準機関のナノテクノロジー標準化活動はWG1および2をジョイントWGとして共同作業を進めているが、今後安全性に関する議論でも協力関係が深まっていくものと思われる。日本はIECの動きに対応した活動の国内での充実をはかり、カーボンナノチューブの研究者や企業の半導体部門の専門家による体制が出来上がってきたところであ

る。経済産業省のナノテクノロジー関連国際標準化戦略では二酸化チタン光触媒とカーボンナノチューブが戦略課題として挙げられており、国際的にも日本のこれら材料に関する取り組みは良く知られるようになってきている。

今後はより広範なナノ材料に関して議論が展開するとともに、ナノテクノロジー製品のスチュワードシップ（事業者側からの自主申告制度）の議論へと展開していき、最終的には製品のなかのナノ材料の安全性やリサイクル等の課題も議論が進められると思われる。今後の科学技術や材料研究動向、産業化動向を正確に把握し、リスク管理等の社会基盤の充実及び産業化へ向けた戦略課題として位置づけ、中長期的な標準化の戦略策定が必要と考えられる。

## 2.4.3.2 比較表

## 国際標準・工業標準

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	取り組み水準	◎	↗	日本は ISO/TC229 の活動をリードしており、IEC/TC113 の活動も含め、現在進められているカーボンナノチューブをはじめとするナノ炭素材料の計測・評価法の規格作りでは民間と学際が協力した国内体制が作られ、包括的な対応が進められている。2008 年に入って ISO に中国が中心となって材料規格の活動が始まり、英国 BSI 等も多くの提案をあげてきた。日本の動きは良くなってきているが、今後は産業界の意向を反映したより積極的な新規の追加提案活動が期待されることである。
	実効性	◎	↗	産総研を国内審議の中心機関とし、民間や学際 of 包括的な体制が整ったことから、おおむね実効性の高い対応が取れているように思われる。民間企業の積極的な参画も目立ってきており、今後はいかにそれらの力を結集して日本のナノテクノロジーの国際競争力と国際的な枠組みのなかでリーダーシップを発揮できるかが重要と考えられる。そのためには国際標準化をリードできる人材の育成と、国際標準化の中長期的な戦略策定が待たれる。
米国	取り組み水準	◎	↗	OSTP の C. Teague 氏が直接 TC229 の会議に乗り込んでいることに象徴されるように、国家戦略としての位置づけが明確である。多層ナノチューブやフラレンまで抱えている日本の進め方に対して、米国は 10 年後のナノテクノロジーで有用なのは単層ナノチューブだけとみており、これに特化している。現在は TC229 の活動においてリーダー的存在である。計測に関する提案が安全性の問題を見据えた上で行われている点もアメリカのナノテクノロジー工業標準化の特徴である。
	実効性	◎	↗	米国は決してナノテクノロジーの分野でのものづくりに弱いわけではなく、ナノチューブであれば量産化や分散技術など、優れた技術の蓄積を行っている。また応用展開の幅が広く、製品・商品コンセプトまで含めて戦略的な強みが集約されている。またこの 1~2 年はナノ材料を製造している企業やナノ材料を用いてビジネス展開を考えている企業の積極的な対応、ITRS を通じた Intel の Emerging Nanomaterials の管理策定に向けた議論、BIAC を通じた OECD の WPMN への DuPont らの働きかけなど、民間企業の積極的な取り組みがみられるようになってきている。ANSI は国際標準化活動において、アメリカ国内の企業の意向を積極的に反映しようとしている。新規の提案も戦略的で積極的である。
欧州	取り組み水準	○	→	2007 年までは主要国のうちフランスは活動がよく見え、英国も原案作成に積極的ではなかった。目立った動きとしてはドイツが IEC/TC113 でナノ材料の機能評価に特化した提案を戦略的に行っている程度であった。しかし 2008 年に入り BSI がナノテクノロジーに関する国内規格策定を急いでおり、11 月の ISO/TC229 会議において国際標準化の舞台へ提案を行ってきた。
	実効性	○	→	EU として統一的な動きにはなっていないと、全般に取り組みが弱くターゲットが見えない。ただ、IEC の動向、ドイツの動きは良く見ておく必要がある。
中国	取り組み水準	◎	↗	上記のとおり、この 1~2 年で状況は大きく変わり、積極的な対応がみられるようになってきた。11 月には ISO/TC229 の総会を上海で開催するなど、ISO 活動そのものへの積極的な参画も注目されることである。ただし中国国内でも様々な議論があるようで、中国の標準化戦略が国際的なフレームの中で実効的に進められるかどうか、注目しておく必要がある。
	実効性	○	→	中国は国際標準化に積極的な貢献を開始したものの、国際標準化における手続きがまだ理解されていないところもあり、現時点では実効的な対応がとられているとはいえない。しかしながら国際舞台で力を発揮しはじめたら底力は強いので、中国の動向からは目が離せない状況にある。
韓国	取り組み水準	◎	↗	日本同様にナノ炭素では積極的な対応が見られた。また、サムスンの銀ナノ粒子が米国 EPA からたたかされたことから、これを積極的に取り上げて化粧品のような具体的応用への評価を行うといった提案が出てきた。産業界の意向を受け国の戦略課題として位置づけられている。
	実効性	○	→	ソウル会議の際の既に決まっている原案策定作業への韓国の参画や取り込み交渉等見ていると、韓国の標準化は極めて押しの強いプレーヤーが揃っており、それぞれがしっかりと動いていることが特徴である。

(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]

## 2.4.4 社会受容・EHS・ELSI

### 2.4.4.1 概観

欧米ではナノテクノロジーの研究開発が戦略的な資源の投入を受け始めた2000年以降、環境・衛生・安全（EHS）や倫理的・法的・社会的問題（ELSI）の課題への包括的な対応が図られてきた。EHS や ELSI の課題への対応を含めた社会受容が政策的に、且つ包括的に進めているのはアメリカとイギリスであり、公聴会や市民対話の仕組みが政府の資金のもとに整備されている。アジア圏では台湾がアメリカとの緊密な連携の下に社会的影響に関する取り組みを日本より先に進めていた。日本はコア技術の研究開発投資については欧米に遅れをとっていなかったものの、EHS や ELSI の課題への取り組みは遅れ、2004年から本格的な対応がとられるようになってきた。中国は急速に研究体制を整備中であり、韓国も取り組み始めたところといえる。

日本ではこのような世界的な動向や、2005年に進められた社会受容に関する科学技術振興調整費プロジェクトの政策提言を反映して、2006年4月からの第3期科学技術基本計画でナノテクノロジーの社会受容に関するナノ粒子のリスク管理や、ナノテクノロジーの工業標準化の課題に具体的に取り組むことが決まった。以降ナノ粒子のリスク管理策や工業標準化への取り組みが具体的な展開をはじめ、経済協力開発機構（OECD）や国際標準化機構（ISO）といった国際的枠組みのなかで日本は積極的に活動を開始し、2007年に入るとすでに国際的な枠組みの中で社会受容の課題をリードするところまで展開してきている。

また、テクノロジーアセスメント（TA）の取り組みでは、JST「科学技術と社会の相互作用」プログラムで、東京大学を中心としたTA手法の研究開発が進められており、その他にも科学技術振興調整費の新興分野人材養成プログラムにおいて、食品へのナノテク応用に関するコンセンサス会議が2008年に北海道大学で開催されるなど、パブリックエンゲージメントの取り組みも見られるようになってきた。

アメリカでは、2008年に「21世紀ナノテク研究開発法」の改正法案が出され、EHS（環境・健康・安全）への影響に関する戦略的な取り組みが不可欠であることが示されている。特にEPA（環境保護局）によるナノ材料管理プログラム（NMSP：Nanoscale Material Stewardship Program）は事業者自身による有害性評価の流れをつくった。また、TSCA（有害化学物質管理法）によるCNT（カーボンナノチューブ）の規制開始で有害性評価の一つの方向が提示されている。化粧品等に含まれる銀粒子の安全性に対する関心が高まっている。

ヨーロッパでも同様の認識の下、EU や英国は独自のプログラムだけではなく米国との共同研究を開始し、国際的には科学的なリスク評価技術、安全性の合理的な認定法、標準化等の早期確立を目指してISO や OECD を巻き込んだ活動が急速に高まっている。OECD では、WP「工業用ナノ材料の評価法」の他、WP「ナノテクノロジー」が活動していて、議論はOECD内でも多様である。英国ではRoyal Commission of Environmental Pollutionがナノテクノロジーの安全性に関するレポートを発表している。

上述のOECDのWP「工業用ナノ材料の評価法」やISOのTC229といった

国際的な枠組みへの日本の対応は、関係省庁や公的研究機関、ナノテクノロジービジネス推進協議会や日本化学工業協会などの業界団体と包括的な対応がとられつつある。日本のナノ材料安全性評価法に関する NEDO プロジェクトは世界をリードする質の高さである一方、国際対応の継続的な窓口機能を果たす部署が欠如している。将来の産業の趨勢を左右する重要課題であるため、省庁間や部署間での情報交換や、一貫したコヒーレンシーのある戦略策定と、それに基づいた国際的なフレームへの対応が鍵となる。実効的な横串の連携と、中長期的な戦略策定を担うキーパーソンが決め手になると思われる。

2.4.4.2 比較表

社会受容・EHS・ELSI

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	取り組み水準	◎	→	2000年頃から包括的な対応をとり始めていた欧米に対して、日本では2004年以降急速に展開した。日本のEHSに関する活動は最初に経済省/産総研のフレームが主導して展開したことから、リスク管理等の社会基盤の整備、標準化のような産業化戦略の戦略的課題としての位置づけが明確であった。2006年度からの第3期科学技術基本計画において、関係省庁が取り組むべき具体的課題として位置づけられたことから、活動はより具体化した。しかしながら、社会受容促進についての国際的な活動拠点は不在のままである。
	実効性	◎	↗	2006年になりNEDOが支援する中西プロジェクトがナノ粒子のリスク管理策定へ向け動き出した。欧米の取り組みからは遅れたものの、Pjで示されたリスク管理策定のロードマップや実際のアセスメントは欧米の取り組みに引けをとらないだけでなく、すでに国際的な場で主導的役割を果たしている。2007年から内閣府が進めるナノテクノロジーの社会受容に関する連携施策のなかで、さらに連携が進むものと思われる。
米国	取り組み水準	◎	↗	ナノテクノロジーの研究開発が本格的になった2000年から、政府(OSTP/NNI)が主導して展開した。EPAの取り組みでも明確に規制だけでなく開発型のプログラムにも積極的な展開を見せるなど、このような課題をナノテクノロジーの研究開発投資の還元という視点から位置づけている。OECD、IRGC、ICONなど、国際的枠組みでも指導的役割を果たしている。
	実効性	◎	↗	主導的な役割を果たしているのはEPAで、NIOSHやOSHA、NIH等の研究機関の取り組みも活発である。EPAの公聴会、NRCやFDAのパブリックミーティング、様々な大学での意識調査など、パブリックエンゲージメントの活動も並行して進められている。また関係各機関からエキスパートを集めて発足したProject on Emerging nanotechnologyは包括的な社会受容に向けたシンクタンクの機能を発揮し始めている。
欧州	取り組み水準	◎	↗	英国における市民対話を政策やEHS研究に反映させる取り組みは包括的なもので、学際エキスパートと政策サイドとの連携の成功例である。研究そのものはドイツ、スイス、ベルギー、英国、といった国を中心に展開されており、これを欧州委員会が様々なプロジェクトのプログラムで支援している。
	実効性	○	→	欧州連合のメンバー国間の意識や対応の差異は大きい。研究が進んでいる国でもまだ学際の研究域を出ておらず、社会基盤づくりへの取り組みへ現時点では包括的に進められているとはいえない。欧州委員会は域内のEHS研究の活性化のために、アメリカや日本へ共同研究の呼びかけを行っている。
中国	取り組み水準	○	→	2004年あたりから急速に研究体制の整備が進められてきた。EHS研究に携わる研究者の数は現在では約50人に達するものと思われる。海外との研究や研究成果の交流はまだ本格的に進められてはいない。
	実効性	○	↗	2007年3月の中国版RoHS指令の施行など、国際社会のなかでの存在感のアピールと自国の利益確保の両面を強く意識した取り組みが展開されている。現時点で実効性が高いとはいえないが、政策としての取り組みはしたたかであり今後の展開には充分注意しておく必要がある。
韓国	取り組み水準	△	→	2007年8月に台湾で開催された第3回のナノEHSの国際会議における韓国の発表件数は5件のみであり、アカデミアの研究テーマとしてナノ粒子のEHSの研究が始まった段階である。包括的で戦略的な取り組みが進んでいるとはいえない。
	実効性	△	→	これらの研究がリスク管理や標準化といった活動とリンクして行くのはもう少し先になると思われる。ただし昨今の銀ナノ粒子の騒動の頃から、民間や政府を含めてEHSの課題に対する対応が大きく変わり始めている。

(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]

## 2.4.5 国際プログラム

### 2.4.5.1 概観

この数年間、ナノテクに関する国際協力に向けた会議の場がいろいろと持たれているが、これらはいずれも日米欧の3極が主体である。米国はNSF、欧州はECが国家機関を代表して参加しているのに対し、日本はそれらに相当するアクティブな国家代表機関の顔が見えない。また、国際協力に関する国としての中長期スコープが希薄であり、具体的かつ骨太のシナリオは発表されていない。この状況は、国際的な孤立を免れない懸念がある。一方、産業技術総合研究所が中心になって立ち上げたアジアナノフォーラム（ANF）は、アジア、オセアニアの13経済圏をメンバーとして非政治的な運営で活動を続け、昨年NPOとして独立、現在、シンガポールに本部が設置されている。ISOに正式加盟できない台湾は、リエゾンメンバーとしてのANFの代表者としてISOの標準会議に参加し、活動を続けている。

米国は、NSFとEUとが共同出資する国際プロジェクトが制度化されたなどの明確な国家プログラムだけではなく、共用施設・プロジェクトの海外へのオープン化をはじめ、海外研究者へ研究環境・場を提供することによる積極的受け入れ、研究参加を通じた種々の国際ネットワークに伴う協力が推進している。CNSE（College of Nanoscale Science and Engineering, NY）、CNSI（California NanoSystems Institute）など、積極的な連携を図っている。

欧州は、FP7において海外との連携を積極的に奨励している。ベルギーIMECなど国際的な産学連携の場の提供も大きな役割をなしている。ドイツは、Fraunhofer Microelectronics Allianceや、中国国内に研究所を設立するなど、将来の人材確保、標準化戦略を念頭においた積極的施策が目立つ。

中国は、在欧米の中国系研究者を介して欧米の研究資源を誘導している。先進国への人材供給国としての中国は将来大きな国際ネットワークを確保する可能性がある。

韓国では、研究機関や大学の主要ポストに外国人を積極的に登用するなどの取り組みがあり、公的研究機関であるKAISTは、すでにヨーロッパに研究拠点を持ち、さらにIMECやフランスのMINATECにも参加し、国際連携の深化を図っている。

2.4.5.2 比較表

国際プログラム

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	取り組み水準	×	→	国際共同研究のためのファンディングは極めて乏しい。JST ICORP はもともと対象が限定されている。
	実効性	×	↗	ファンディングが極めて乏しいなかで、研究者個人ベースのインフォーマルな共同は徐々に発展してきているが、このままでは大きな向上は望めない。いろいろな国際プログラムは用意されているが、それを提供する側の戦略が不明確であり（そもそも国際協力のメリットが関係者に共有されていない）、納得できる成果が得られていない場合が多いと感じる。NIMSのMANA(WPI)は数少ない成功例になりそうである。
米国	取り組み水準	△	↗	対EUでの研究協力を積極的な動き。二国間。多国間などの共同出資プロジェクトのスキームが具体化。共用施設・プロジェクトの海外へのオープン化をはじめ、海外研究者へ研究環境・場を提供することによる積極的受け入れ、研究参加を通じた種々の国際ネットワークに伴う協力が推進している。
	実効性	△	→	米国は元来が内国志向が強かったこともあり、官民ともに現在手探り状態であり、実効性の判断はこれから。
欧州	取り組み水準	◎	↗	EUのFP7では、さらに強力で国際化を進めている。研究開発のレバレッジ戦略が垣間見える。
	実効性	○	↗	中国を中心とするアジア圏。北米(米国、カナダ)。また、資源国にも着実に地歩を築くことで、徐々に上向き。
中国	取り組み水準	△	→	自らが外に出るとのことより、外を引き込む戦略。在欧米の中国系の研究者を上手く仲介者として利用しつつ、欧米の研究資源を誘導している。
	実効性	△	→	中国の求心力と発展力に対する期待感から、欧米が官民を上げて進出しているが、中国の強固な伝統と国民性を背景にして、どこまで真価を得られるか、予断を許さない。一方的に吸収されるだけで、ウィンウィンの関係の展望が出てこなければ、潮が引くように、国際協力が衰退する危険性もある。
韓国	取り組み水準	○	↗	韓国は比較的閉鎖性の高い社会であるという意味で、日本と似た環境にあるが、研究機関や大学の主要ポストに外国人を積極的に登用するなど、果敢な取り組みが顕著である。
	実効性	△	→	産業的には大変に偏った状態であり、その浮沈によって、研究開発投資も大きな影響を受ける。真にイノベーションが必要な部分について、どれだけ国際社会からの協力を得られるかは、現在進めているような一人勝ち戦略から、どれだけ協調的な姿勢に展開できるかにかかっている。

(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]



### **3 注目すべき研究開発の動向**



## 3.1 ナノテク・材料

### 3.1.1 ナノ材料・新機能材料分野

#### (1) ナノカーボン材料 (CNT、フラーレン、グラフェン、他)

グラフェンの結晶成長：

グラフェンは、微細化限界が間近に迫った CMOS 技術を打破しようとする候補材料の一つとして、米欧での研究集中が著しい。スコッチテープを用いたグラフェンの基本的物性が明らかになりつつある。電子デバイスを目指すためには基盤上の結晶成長により大面積のグラフェンをたやすく作り出すことが必須である。そのために、SiC のグラフェン成長が試みられているが、まだ、実際のデバイスまでの道のりは近くはない。さらに、ニッケル表面などの金属表面へ成長したグラフェンを絶縁体基盤上へ移すことも試みられ、一部成功しているが、大面積が得られるかが問題である。グラフェンへのバンドギャップ導入を目指したリボンや2層グラフェンの研究も進んでいるが、半導体化までの道は険しい。米国の DARPA による CERA Program では、グラフェンのエピタキシャル成長、バンドギャップを持つグラフェンの作製及びそれを使ったトランジスタ作製に関する報告がなされている。今後、最も注目すべき研究開発動向と考えられる。

#### (2) ナノコンポジット材料

金属主体ナノコンポジット材料：

アモルファス・ナノ結晶系ナノコンポジット材料の分野では独創的な先導研究が日本の企業や大学から発信された。日立金属のナノ結晶軟磁性材料はすでに大きな市場を形成する工業材料として発達し、この材料に関する基礎・応用研究は世界で広く行われた。磁気的な基礎研究は欧州が強く、ナノ解析は日本勢が強力に推進、中・韓では追従研究が行われた。最近、さらに高い飽和磁束密度を目指した研究が日立金属で進んでいる。ナノコンポジット磁石研究の発信と基礎研究は欧州で盛んに行われたが、工業応用は NEOMAX (現日立金属) で進められ、実用化された。欧州の研究水準は高かったが、現在では殆ど継続されていない。希土類資源の豊富な中国でも多くの研究が行われたが、その水準は低い。日本のナノコンポジット磁石研究の水準を高めたのは、優れたナノ組織解析技術 (NIMS) によるところが大きい。現在は異方性ナノコンポジット磁石の実現を目指した研究が、アメリカ、日本で盛んになっている。韓国では殆どこの分野への貢献がない。

ナノシリカ補強タイヤの開発：

2008年洞爺湖サミットで世界の炭酸ガス発生削減対策の内、一番問題が多い、運輸部門に対して IEA (国際エネルギー連盟) がいくつか勧告を出したが、その筆頭は、低こがり抵抗タイヤの開発であった。この実現には、ゴム材料の粘弾性制御が重要で、そのキーは、ナノ粒子補強でのナノシリカや、ナノカーボンブラックの粒子径、凝集状態、3次元空間分散状態、ナノ粒子界面の制御

である。これらは、ポリマー系ナノコンポジット材料に基礎、応用面からも興味ある問題である。すでに、フランス（ミシュラン社）日本（ブリヂストン、ダンロップ、横浜、東洋）で研究開発が始まって熾烈な競争が起きている。これらに関しては、いかに最新の材料評価技術を活用したり、他者がまねをできない技術を開発できるかが勝負となる。

モンモリロナイト補強プラスチックの実用化：

豊田中研が開発したナノシートによる補強プラスチックの実用化として、最近中国の華南利口大学が、ガラス繊維補強ポリエステルにモンモリロナイトを添加し、加工工程を工夫して高強度・高弾性率の自動車ボデー用材料を開発した。軽量なので燃料電池車、錆びないので農業用自動車などに使えるという。中国では、モンモリロナイトの価格が安いものが在り、どこまで普及するか注目される。

### (3) 表面改質材料

ダイヤモンドライクカーボン（DLC）：

日本においては、自動車産業でダイヤモンドライクカーボン（DLC）の使用が第2期のブームを迎えつつあり、今後DLCの応用が進展していくと見られる。DLCについては、ハードディスクなどへの応用が先行したが、ようやく自動車産業でも使えるようになってきた。このDLCについては、韓国でも追い上げがあり、欧州、米国とともに産業応用が進展すると考えられる。DLCのバイオ・メディカル産業への応用も進展していることは注目しなければならない。生体適応性の良さから、今後発展が予想される。同じ炭素系材料では、ダイヤモンドの利用が工具を中心に進んでいる。航空機に使われるようになった炭素繊維の加工にダイヤモンド被覆工具は適しており、コスト削減を含めた今後の動向が注目される。

金型、工具、摺動部材応用：

ナノ材料の表面改質への応用が進んでいる。工具、金型など硬度、耐摩耗性、耐久性が要求される分野でナノコンポジット、多層膜、傾斜機能膜などナノ構造制御により作製された材料が使用されるようになってきた。欧州においては、耐熱性に優れたナノ材料の開発が進んでいる。日本においても、タービン関連部材の表面改質材料の開発が進められたが、欧州、米国の方が研究は先行している。欧州では、多元系材料の開発に熱心である。環境対策に関連し、欧州ではめっきなどのウエットプロセスに替わるドライプロセスの開発に熱心である。近年注目されている「大気圧プラズマ」を用いた表面改質技術は、日本、韓国、欧州で応用が進んでいる。今後、自動車関連産業での応用展開が注目されるが、金型、工具、摺動部材などへの応用が期待される。

超撥水材料・超親水材料：

超撥水材料の開発は日本が先行しているが、近年、欧州において研究の拡大が見られる。同時並行的に超親水材料による表面改質の基礎研究も日本が先行

する形で進んでいる。また、韓国、中国においても開発が開始された。日本での産業応用への展開が期待される。一方、超親水材料の応用では、酸化チタン光触媒に関連し、日本での研究が進んでいるが、ようやく欧州、米国において開発研究が進展してきた。中国、韓国においても研究が盛んに行われている。また、超撥水・超親水のパターン化基板のバイオ関連への応用が日本で始まり、世界中に広まろうとしている。さらに、一分子の膜で、表面官能基を変えることで表面特性を制御できる自己組織化単分子膜 (Self-Assembled Monolayer; SAM) の応用が産業界で使われようとしている。SAMについては、究極の表面改質材となりうる可能性があり、作製法、多層化法を含め、今後の開発研究が注目される。

#### (4) 特異な幾何構造系材料 (超分子・ゲル) :

超分子エラストマーの開発研究 :

フランス CNRS の研究グループが、一度切り離したゴム材料が瞬時にくっついて伸び縮みするエラストマーを開発した。従来のゴムは共有結合でネットワークができていたため、一度切り離されると元にもどれない。これに対してこの材料は、超分子化学の分子設計に基づいて、水素結合などの弱い相互作用を用いながら多くの結合を共同的に作用させることにより、このような従来の材料には見られない新しい物性が現れたものと考えられている。すでに米国企業が量産化に向けた応用開発を進めている。同じような材料は MIT などでも開発が進んでいるようである。

機能性ゲルの開発研究 :

最近東京大学で、4本のスターポリマーの末端を結合することにより、均一な構造を有するテトラゲルが開発された。従来のゲル材料は、架橋点間分布が不均一なために応力集中が起こり、伸びや圧縮強度が不十分であったが、テトラゲルは架橋点間分子量が一定であるために、すぐれた特性を示す。また、スターポリマーの成分が生体親和性の高いポリエチレングリコールであるため、医療材料としての応用が期待されている。

#### (5) ナノ空間・メソポーラス材料 :

Metal Organic Framework (MOF) の展開 :

多孔性金属錯体 (Metal Organic Framework : MOF) はミクロ細孔を有する結晶性多孔質材料である。ゼオライトやメソポーラス材料を超える非常に大きな比表面積を有している。米国では O. Yaghi、欧州では Férey ら、日本では北川らを中心にこの分野が押し進められている。触媒応用や水素吸着をはじめとする様々なガスの吸蔵が可能であるため、次世代エネルギー技術に貢献しうる新たな機能物質として、メソポーラス材料以上のポテンシャルを見せつつある。現在、パイロットプラントを建造した BASF の動向が注目される。

#### (6) 触媒材料

結晶性多孔体材料開発 :

米国で、有機基共有結合の三次元骨格を有する結晶性多孔体などのナノ材料の開発に成功しているが、UMCM-1 とよばれる結晶性多孔体は規則正しいメソ細孔を有し (1.4 nm + 3.2 nm)、約 5000 m<sup>2</sup>/g の比表面積を有する。これは驚異的な数字で、今後、これらの吸着・吸蔵材料、触媒材料としての応用が注目される。

分子性金属酸化物クラスター：

欠損型分子性酸化物ナノクラスターを設計し、それを“分子鑄型”として Fe、Cu、V などの金属を導入することにより“人工無機酵素”とも呼べる機能性分子触媒を世界ではじめて合成することに、日本で成功した。これらの設計された分子触媒がこれまでに実現されてなかった酸素分子を酸化剤とするオレフィン類のエポキシ化反応、過酸化水素有効利用率 100% の酸素添加反応 (エポキシ化、水酸化など) などの超高難度選択酸化反応に対する優れた触媒となることも実証されており、日本の研究開発力の健在を示している。

#### (7) 高分子・プラスチック材料 (ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等)

ラジカル電池：

従来の電池材料は、鉛、コバルト、リチウム等の金属を用いているが、資源の有限性、廃棄処分時の問題や使用時の安全性など改善すべき課題も大きい。これらの課題をブレークスルーするべく、日本が世界に先駆けて提唱し、研究に取り組んでいるのが、ラジカル電池である。有機ラジカル分子は、不対電子をもち、一般的に反応性が高く、不安定な物質である。このラジカル種を安定化することが出来れば、可逆的な電極反応が期待される。この研究では、共役系に非局在化した不対電子やかさの高い置換基で保護されたラジカル部位がかなり安定であることに着目し、この安定ラジカル分子を繰り返しユニット当りに有する有機ラジカルポリマーを先ず分子設計し、数々の有機ラジカルポリマーの合成に成功した。そしてこれら有機ラジカルポリマーを電極活物質とする有機物だけで構成された電池を試作し、既にその動作が実証されている。このラジカル電池は、電気を繰り返して大容量蓄えることができ、短時間のフル充電・放電可能な出力特性を有し、しかも従来の電池材料の課題をクリアする可能性が高い。

窒化ホウ素ナノチューブを用いた先端複合材料：

電気絶縁性を保持しながら、熱を逃がす高性能材料の出現が、産業分野、家電製品、医療分野等を中心に広く求められている。この要求に答える新たな材料系が、窒化ホウ素ナノチューブである。窒化ホウ素ナノチューブは、直径が 30 ナノから 100 ナノ、長さが数マイクロ程度の電気絶縁体である。このナノチューブは、カーボンナノチューブに比べ高分子に分散しやすい特性を持ち、既に溶剤に溶かした樹脂やフィルムに分散させることに成功、耐熱性や引っ張り強度等の改良効果が確認されている。この研究は、アカデミアと産業界の共同でなされた物であり、カーボンファイバー系で世界をリードしている日本の次代を担う先端複合材候補となりうる。

低電圧駆動高分子アクチュエータ：

日本が世界に誇る技術分野に、ロボットがある。今後もロボット分野で世界をリードしていく為の要素技術のひとつに、ロボットの関節をスムーズにかつ低エネルギーで動作させる為のアクチュエータ開発がある。低電圧駆動高分子アクチュエータは、イオン液体、フッ素ポリマーからなるイオン液体ゲルにカーボンナノチューブ (CNT) を分散させた CNT 高分子電極層の電気伸縮を利用した物である。この CNT 電極層 2 枚の間にイオンゲル電解質をサンドイッチした CNT 高分子アクチュエータを製作し、既に高出力のアクチュエータ性能が確認されている。この研究は、アカデミアと産業界の共同でなされた技術であり、ロボットや人口筋肉等分野で世界をリードする可能性を有する。

### (8) 新型超伝導材料

鉄系超伝導化合物の転移温度 ( $T_c$ ) の向上：

SmFeAsO : F で、 $T_c = \sim 55K$  が実現して以来、 $T_c$  のより高温化が実現してない。一部には、鉄系超伝導化合物では、 $T_c = 77K$  すら困難との悲観論がある。しかし、東工大細野 G が、最初に、LaFeAsO : F での超伝導 ( $T_c = 26K$ ) を報告したのが、本年 (平成 20 年) 2 月であり、それから、わずか 8 カ月しか経っていない。また、Fe-1111 系をはじめ、Fe-122 系 ( $BaFe_2As_2$  など)、Fe-111 系 (LiFeAs など)、及び Fe-11 系 (FeSe など) の多様の類似構造があり (2 次元の鉄正方格子を含むことでは共通)、10,000 種を超える同族化合物が存在する事実から、より高温の転移温度を有する鉄系超伝導化合物は、必ずや、存在すると考えられる。

鉄系超伝導化合物の超伝導発生機構の解明：

米・日・中を中心に機構解明へ向けた研究が進んでいる。Fe 系超伝導は、Fe の 3d 軌道電子に由来している。これは、銅系超伝導が銅の 3d 軌道電子の由来しているのと同様であり、基本的には、両超伝導の発生機構は同様であると考えられる。しかし、銅が 9 個の d 電子を有するのに対して、鉄は 6 個の d 電子しか有していないために、両超伝導は、細部では異なる機構になることが考えられる。現時点では、従来合金型超伝導とは異なり (従来型は BCS 型と称され、格子振動が関与している。)、超伝導電子 (クーパ対) の形成に磁気スピンが関与したものではあるものの、銅系は超伝導電子対の対称性が「d」、鉄系は「s」と言われており、細部では、両者は異なるものとなっている。今後のより正確な超伝導発生機構の解明が期待されている。なお、s 対称性は、線材化したときに、結晶粒界の影響が少なく、大電流を流すときに有利であると言われている。

鉄系超伝導材料の実用化に対する潜在的特性：

鉄系超伝導体の実用化の可能性を判断するには、時期早尚であるが、材料としての潜在能力に関する研究開発は重要である。材料固有パラメーターとしては、①  $T_c$  (高ければ高いほどよい)、② 第二臨界磁場 ( $H_{c2}$  : 超伝導状態が耐

えうる最大磁場、磁場中で線材として使用するとき特に重要。)とその異方性(小さい方の値で、最大磁場が決まる。)。また、外的なパラメーターとして、③結晶界面の特性、④内部磁気フラックスのピンニングサイト(ピンニングがよいほど、流しうる最大超伝導電流が大きくなる。)⑤薄膜形成 などがある。これらに関して、比較的ポジティブなデータが発表されつつある。たとえば、Hc2が大きく、その異方性も比較的小さい。また、最近、超伝導エピタキシャル薄膜が実現している。

2007年、東工大の細野グループによるLa(O,F)FeAsの発見により一連の鉄砒素超伝導体の研究に火がついた。中国のフォーローアップは極めて迅速であり、その後のSm系、Nd系など、転移温度が50Kを超える超伝導体が次々と中国から発信された。中国は物質科学関係のインフラ整備に相当な投資を行い、またこれとリンクする形で、米国などで活躍する中国人を呼び戻してきたが、そのタイミングで鉄砒素系が出現し、その投資効果をアピールすることになった。国際会議などでも中国の有力グループはすっかり常連となっており、この分野での競争力に相当自信を深めたと思われる。銅酸化物高温超伝導体で活躍した米国の中性子、光電子分光、STMはこぞって中国から試料の提供を受けて研究を進めている。

#### 薄膜化・線材化：

今後の展開を伺う上で、薄膜化・線材化の進展は極めて重要である。国内でも細野グループをはじめとして、薄膜化の報告が現れ始めた。また線材化の検討もスタートしたようである。銅酸化物、MgB<sub>2</sub>、従来型の超伝導体と比べてのメリット・デメリットが今後明らかになっていくと思われる。実用化にむけての鉄砒素のメリット・デメリットとクーパー対の対称性、不純物効果といった基礎研究者の興味は密接にリンクしている。この脈絡での連携も重要であろう。砒素を扱うことは銅酸化物や重い電子系などを扱っていた基礎研究のグループがこの分野に入ってくるにあたり、バリアの一つになっていた。薄膜磁性半導体の世界では砒素、マンガンなどをつかったMBE薄膜成長を当たり前のようにやっている。これらの分野の研究者にとってのバリアは比較的低いと思われる。この様なグループが登場するのも近いのではないだろうか。

### (9) ナノ粒子

#### 医療用ナノ粒子：

ドラッグデリバリーや遺伝子治療に用いる材料としては、生体への安全性、標的細胞や組織に対する高いターゲティング機能が求められる。国内大学発ベンチャー企業の一つであるビーグルでは、ウイルスの外殻を酵母に作らせた中空ナノ粒子を利用した系によって実用化に迫っている。日欧米の企業及び研究機関を中心に実用化目前の成果が、近年多数報告されており、これからの動向が注目される。

診断用ナノ粒子：

疾患や遺伝子診断においては、短時間に簡便に検査が行える検出原理が求められる。米ノースウエスタン大学のグループは、ハイブリダイゼーションに伴う金ナノ粒子の凝集による色変化を利用した遺伝子診断法を開発している。さらにこれを発展させ、金ナノ粒子、磁性粒子、バーコードを組み合わせて、標的分子を高感度に検出する系を構築している。

#### (10) 強相関電子材料

抵抗スイッチングメモリ (RRAM)：

電極に挟まれた強相関酸化物からなるごく単純なデバイス構造は、電圧印加によって高抵抗状態と低抵抗状態の間でスイッチングを起こす。この現象を応用した次世代不揮発メモリが注目されている。ペロブスカイトマンガン酸化物を用いたデバイスでスイッチングが発見され注目を集めた（日、米、スイス）を契機として、NiO（韓国）やCuO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のような単純な二元酸化物でも普遍的にスイッチング特性が発見された。その構造の単純さや、スイッチング速度、消費電力などのバランスのよさから beyond CMOS 候補に躍り出た。

酸化物ヘテロ接合作製技術：

酸化物ヘテロ接合の作製・評価技術の構築が進み、界面金属状態と金属絶縁体転移（日、独、米）、界面磁性（日、独、蘭）、界面2次元電子の量子ホール効果（日）、超伝導の観測（独、スイス）などのニュースが業界をにぎわしている。「酸化物イコール汚い」の図式は系によっては過去のものになりつつある。同時に、酸化物界面特有の物理が問題意識として共有されその理解も進みつつある。

遷移金属酸化物を舞台とする強相関物理の過去十年の集中的な基礎研究は、強相関電子材料の応用の種を生みだしてきた。ポスト CMOS として期待される抵抗 RAM はもちろん、そのほかにも超巨大磁気抵抗効果、巨大熱電変換機能、非線形光学、巨大負熱膨張などが挙げられる。これらの機能の研究のフェーズは、企業の研究開発まで進んでいるが、さらに具体的な市場化に進む技術も現れると期待され、注目に値する。基礎研究から発信する革新的デバイスのモデルケースになりうる可能性がある。

### 3.1.2 ナノ加工技術分野

#### (1) 半導体超微細加工技術（各種リソグラフィ等）

EUV リソグラフィ技術：

EUV リソグラフィ技術の確立には、光源、露光光学系、マスク、レジストなど、広範囲な技術の研究開発が必要である。露光光学系に関しては、光学メーカーの研磨・評価技術の研究開発能力が問われ、日本と欧州が競合するが、欧州がやや優勢である。マスク欠陥の低減・検査評価技術に関しては、日本と米国が競合する。レジストに関しては、日米欧で研究開発が進むが、レジスト材料自体の実用化では日本メーカーが抜け出ている。

DFM、設計データ処理：

フォトリソグラフィの解像限界に近づくとともに、DFM や設計データ処理の重要性が増し、マスク、露光装置、および計測装置を包含する総合的な最適化技術として、囲い込みが始まっている。これらの技術に対する日本の貢献は小さい。

#### (2) ナノ転写加工技術（ナノインプリント等）

ナノインプリント：

2008年春にソウルで行われた国際会議で、韓国と台湾から質の高い成果が報告され、アジア地域での進展が著しい。多くは産官学の連携で取り組んだプロジェクトの成果として報告された。全体的には、従来からある光学素子に加えて、パターンドメディア、LSI、バイオチップなどへの応用展開が研究開発の中心となりつつある。直近の動向としては、これまでの剛体スタンプではなく、樹脂製の柔軟なスタンプを用いて、微小な凹凸を有する現実のデバイス表面に高精度にインプリントする技術が開発されている。また、ロール加圧方式によるインプリント面積の増大も進捗著しい。

マイクロ・ナノガラスプレスモールドイング：

樹脂に対して、（ナノではなく）マイクロパターンを転写する技術は、既にCDや光学部品の製造で確立しているが、ガラスに対してはそれが容易ではない。一方、ガラス製マイクロ・ナノオプティクスは光記録、プロジェクトなどで必要であり、マイクロ・ナノパターンをガラスに直接転写する技術が研究開発されている。日本では、NEDOによる産官プロジェクトが行われたが、これに参加していない企業や研究機関も有力な技術を開発し、実用化を目指している。

#### (3) 自己組織化技術

自己組織化を利用した材料・素材の実用化：

自己組織化を利用したハニカムフィルムが富士フィルムから試験販売されたり、自己組織化を利用した超撥水ナノコンポジット塗料がドイツで実用化されたり、空孔の大きさや密度が制御されたポーラス膜がlow-k膜としてIBMで

LSI 試作に取り入れられたりするなど、一部の自己組織化材料・素材が実用化に向けて動き出した。東レ（階層構造化繊維）、三菱レーヨン（モスアイ構造フィルム）、帝人（構造色繊維）、富士フィルム（自己組織化多孔質フィルム）などの国内企業の取り組みもあり、今後、多くの自己組織化材料が実用化される見通し。

リソグラフィ代替としての自己組織化：

東芝は、高密度ハードディスク媒体（パターンドメディア）の製造にブロック共重合体ポリマーが自己組織的に形成する微細周期構造を利用する開発をしている。1平方インチあたり1テラビットに相当する記録区画を実現する基本技術が確立されている。

自己組織化のバイオ応用：

英国ニューカッスル大学の研究者が設立したベンチャー企業が、タンパク質単層膜を精密にかつ再現性よく製造する技術を開発し、バイオチップとして実用化している。最近、英国とドイツは、バイオミメティック材料やバイオインスパイアード材料の研究に注力している。

#### (4) ナノ・マイクロ印刷技術（インクジェット描画、ロール・ツー・ロール加工技術）

電子ペーパーへの応用：

欧米は、日韓と圧倒的な差がついているフラットパネルディスプレイを諦め、電子ペーパー・フレキシブルディスプレイに研究開発資源を集めている。2007年末にアマゾンが E-ink の技術を用いて電子ブックを発売し、販売量を伸ばしている。さらに、世界で 10 社程度が E-ink の技術を用いて電子ペーパーの商品化を目指している。英国 PLL は、ドイツのドレスデンに 250 ～ 300 百万ドルを投入して、有機エレクトロニクス駆動の電子ペーパーを開発している。

#### (5) MEMS・NEMS 加工技術

MEMS の新しいメインストリーム：

インクジェットプリンタヘッド、自動車用センサ、マイクロミラーアレイなどに続く、次の成長をもたらすデバイスとして、携帯機器・ゲーム機器用慣性センサ、クロック発振器、マイク、FBAR（無線通信用フィルタ）などが新たに登場し、特に欧米で研究開発・実用化が盛んである。MEMS・NEMS 技術は総合微細加工技術であり、また、LSI との集積化を含む本格的な研究開発にはまとまった設備・装置が必要であることから、欧米では、益々、拠点化が進んでいる。米国ではトップ研究大学、欧州では半官半民の大規模研究所が拠点として機能している。また、MEMS・NEMS 技術は、“More than Moore” のためのキーテクノロジーとして期待されている。

## 3.2 ナノテク・材料の応用

### 3.2.1 ナノエレクトロニクス分野

#### (1) CMOS 材料技術

高誘電率 (High-k) ゲート絶縁膜およびメタルゲート電極の実用化：

米インテルは、高誘電率 (High-k) ゲート絶縁膜およびメタルゲート電極を、量産に導入した。従来と異なる工程を採用し、ひずみの効果も最大限に活用した MOS トランジスタ技術にとって、画期的な材料変革である。これは、LSI の高速化だけでなく、低消費電力化にも大きな効果をもたらしている。後続のメーカーの開発も続いているが、インテルと同じ工程を採用するとは限らず、いつ、どの様な工程で、どんな目的に適用されるかが注目される。また、マイクロプロセッサなどの論理素子目的以外に、フラッシュを始めとするメモリへの導入も注視すべき課題である。

高移動度半導体材料：

高駆動カトランジスタのチャンネルとして、ゲルマニウムや III-V 族化合物半導体、またグラフェンなどのカーボン系材料などの高移動度材料の研究が、活発に研究されている。特に、インテルが、ロジック用途の III-V 族半導体 FET の研究を、自社での研究に加え、IMEC などの研究機関や多くの大学にファンドを提供することにより、世界的に強くドライブしている。また、SRC や Sematech においても、III-V FET の研究を推進あるいは支援しており、このような動きの結果、High-k 絶縁膜を用いた III-V MOSFET に関して、最近大きな進展が見られており、注目が集まっている。また米国では、貼りあわせ技術などを用い、III-V デバイスと CMOS を融合する政府主導のプロジェクトも進められており、Ge も含めた Si 基板上的異種材料集積 (heterogeneous integration) による More Moore および More than Moore の研究開発が活発化している。

欧州においても、IMEC に加え、2007 年末には EU のファンドによる産官学の Ge/III-V CMOS プロジェクトがスタートしており、この分野での研究が活性化している。また、米欧ともに Si 上の Ge 層を光検出器などの光デバイス応用として捉えている例も多く見られる。

日本では、企業に超高速分野のアプリケーションが少ないことから、このような異種材料集積による CMOS 技術への関心はあまり高くなく、研究機関も限定的であるが、光電子集積を含めた新しいアプリケーションが、このような材料技術主導の研究開発の過程で発展する可能性もあるので、よく動向をウォッチしながら、的確な研究開発投資を行う必要があるものと思われる。

ナノワイヤートランジスタ技術：

32 nm 以降の世代での短チャンネル効果抑制と基板不純物によるばらつき抑制のために、FinFET などの立体構造チャンネルの研究が以前より盛んとなっているが、その更に先 (より微細なチャンネル長) の世代に対応することを念頭に、

直径数 10 から数ナノメートルの細線状の半導体の周りをゲート絶縁膜とゲート電極で包んだナノワイヤートランジスタの研究開発が活発化している。トップダウン技術を用いた FinFET 技術の延長線上にある Si ナノワイヤートランジスタと、金属微粒子上の Si や Ge の VLS 成長技術やカーボンナノチューブなど新材料を用いたボトムアップ型のナノワイヤートランジスタの両方が研究されている。ボトムアップ型は、大学を中心に膨大な研究人口と研究アクティビティがあるが LSI を志向した研究は必ずしも多くなく、デバイスの位置制御などに基本的課題がある。一方、トップダウン型の研究開発も三星や TSMC などの企業、米国やシンガポールなどの大学でも近年活発化しており、これらは現在の Si テクノロジーとシームレスな技術である。

低 S ファクター MOSFET :

CMOS の低消費電力化のためには、リーク電流の低減と閾値の低減の両立が必要であるが、これを原理的に阻む要因が、MOSFET の有限の S ファクターである。通常動作の CMOS を使う限り、室温において、約 60 mV/dec が、S ファクターの理論極限となるが、新しい動作原理や材料・構造を用いることにより、この限界を打ち破るような低 S ファクターの素子の研究が活発化している。すでに、いくつかの新しい素子が提案されており、そのいずれも、通常の CMOS とは異なる伝導機構あるいは構造を有している。代表的な例として、pn 接合での GIDL (Gate-induced Drain Leakage) 電流を活用するトンネル FET、pn 接合でのインパクトイオン化を利用する I-MOS、強誘電体の誘電率変化を利用する Fe-FET、MEMS と MOSFET を組み合わせた Suspended Gate FET などが、米欧の大学を中心に報告され始めている。

日本では、このような方向を狙った研究例はまだ少ないが、携帯端末用 SOC などのアプリケーションを得意とし、低消費電力 CMOS の必要性が高い日本企業のニーズから考えて、今後、注力すべき分野の一つと考えられる。

## (2) スピントロニクス (強相関電子デバイス含む)

大容量次世代不揮発性磁気メモリ :

大容量・高速・無限回書き換え耐性を有する夢の不揮発性メモリが実現すればその産業的・社会的インパクトは大きい。そのため、高速性と無限回書き換え耐性を持つスピン注入磁化反転技術を用いたスピン RAM の開発競争が盛んになっている。従来、データの安定的な保持と低電力動作が両立するが危ぶまれていたが、ごく最近、日本のグループが、垂直磁化系新材料を用いることにより、この問題が解決可能であることを示した。

電流による磁化の制御技術 :

従来、電流により磁化方向やその位置を制御するには、コイルが用いられていた。最近、電荷とスピンとの間の量子力学レベルの相互作用を用いて、電流で直接磁化を制御する技術が急速に発展しつつある。スピン注入磁化反転や電流駆動磁壁移動とよばれるこれらの現象は、スピン RAM、三次元ストレージ、マイクロ波発生器などへの応用が日本、米国で真剣に検討されている。

不揮発性論理素子：

不揮発性メモリ技術を利用して、論理回路などにも不揮発性機能を付加できれば、現在のLSIの発展を妨げる最大の原因である発熱問題を解決できる可能性がある。FeRAM技術を用いたデバイスは実用化寸前まで来たが、スピントロニクスを用いて、より高度な機能を実現しようという研究が日本を中心に活発化しつつある。

### (3) 固体素子メモリ

不揮発性RAM：

不揮発性RAMでは、FeRAM（強誘電体）が日米欧で、MRAM（磁界書き込み磁気）が米国で製品化され、PcRAM（フェーズチェンジ）、ReRAM（レジスティブ）、spinMRAM（スピン注入型書き込み磁気）が依然として製品化開発を競っている。学会発表レベルではそれぞれ毎年特性の向上が見られる。中ではFeRAMの高集積化（セル縮小）とspinMRAM（技術開発中）が注目される。量産化の課題は（1）加速試験による信頼性寿命の確認、また経済上の課題として（2）今量産時期である90 nmプロセスの300 mmウエハでの特殊製造装置と投資額の増大、（3）300 mmウエハによる大量の製造キャパシテを満たすアプリケーションや販路の開拓である。またコストが厳しいためセルの微細化、高集積化、また駆動するMPU等回路の高速化に従い、高速書き込みに適する技術が求められている。

セルの微細化：

生産技術に関しては、東芝がNANDフラッシュへの大規模投資を続け、さらにSamsungを凌ぐセルの微細化を計画していることが注目される。フラッシュ回路技術もMLC（マルチレベルセル）の3 bit（8値）化、モバイル向け高速I/F等の進展がある。一方新規の不揮発性メモリは0.13  $\mu$ mや90 nm程度のバルクでありDRAM/FLASH/MPUの65～45 nmに対してセル微細化に遅れをとっている。

メモリスタ：

HP研究所の研究チームが、コンデンサー、抵抗器、インダクター（誘導子）という有名な3つの構成要素から成る電子回路に、4番目の構成要素を加えた。新しい構成要素は、「memristor」（memory resistor、記憶抵抗）と呼ばれている。memristorはこれまで、理論的に説明されただけのものだった。今回の発見によって、瞬時に起動するPCや、もっとエネルギー効率が高いコンピュータ、人間の脳と同じように情報を処理して関連付ける新しいアナログ・コンピュータへの道が開ける可能性がある。

[http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor.html?jumpid=reg\\_R1002\\_USEN](http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor.html?jumpid=reg_R1002_USEN)

[http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/engineering\\_memristor.html?jumpid=reg\\_R1002\\_USEN](http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/engineering_memristor.html?jumpid=reg_R1002_USEN)

#### (4) 有機エレクトロニクス

有機薄膜太陽電池：

有機薄膜太陽電池に対する注目度が全世界的に著しく高まってきており、現在の有機エレクトロニクスの主要研究課題になりつつある。それまで主流であった湿式色素増感型太陽電池にかわり、有機半導体を用いた有機薄膜太陽電池に関する研究への取り組みが飛躍的に増加してきている。特に、米国、欧州での取り組みが著しく、その性能向上も著しい。

有機 EL 照明：

有機 EL 照明への取り組みが、顕著になってきている。有機 EL 技術は、これまで対象が主にディスプレイ応用であったが、ここに来て照明用途への展開が急速に加速してきている。これにより、ひと時やや膠着状態にあった有機 EL 技術への注目が、主として産業界を中心に再燃してきている。特に、欧米で、有機 EL 技術の照明展開が顕著になってきている。

有機デバイス評価技術に関する研究：

有機 EL 素子や有機トランジスタなどの有機エレクトロニクス主要研究が、性能向上に対する研究開発がひと段落し、信頼性・安定性追求のための性能評価技術に関する研究が数多くなされるようになってきている。特に界面評価にかかる有機界面電子状態解析に関する研究開発が活性化している。

欧州における有機デバイスの研究プロジェクトの状況：

欧州では、有機デバイスの研究プロジェクトが複数立ち上がっている (2006-)。有機半導体レーザ関連では、OLAS プロジェクトが、Consiglio Nazionale delle Ricerche Italy、IMEC Belgium、RWTH-IHT Aachen University Germany、AMO GmbH Germany、IBM-ZRL Switzerland の5カ国で研究チームを立ち上げている。また、有機 EL は、OLLA プロジェクトが、2004年からスタートし、有機 EL デバイスの照明としての可能性を産学連携で進めている。FP7 関係では2008年だけでも、有機 EL 関連で、OLED100.EU、COMBOLED、FLAME、FAST2LIGHT、AEVION、POLYMAP、HYPOLED、AMAZOLED など複数のプロジェクトがスタートしている。欧州では、国境を越えた連携が活発に行われていることが特徴的である。

OLAS プロジェクト：<http://www.olasproject.eu/index.php>

OLLA プロジェクト：<http://www.olla-project.org/>

OLED100.EU プロジェクト：<http://www.oled100.eu/homepage.asp>

米国スタンフォード大学に有機太陽電池の研究教育センターが誕生：

サウジアラビアのファンドによって有機太陽電池を中心とした太陽電池に関する研究拠点 The Center for Advanced Molecular Photovoltaics (CAMP) が形成された。40名の教授陣が本プロジェクトに参画する。

<http://www.kaust.edu.sa/research/bio-center-stanford.aspx?nav=cent>

### (5) 量子ドットデバイス

#### 量子ドット太陽電池：

米国の National Renewable Energy Laboratory (NREL) のグループが研究の中心である。量子ドットあるいは微粒子において、バンドギャップの2倍以上のエネルギーを持つ光子1個を吸収すると、2個以上のエキシトンが形成される現象 (Multiple Exciton Generation (MEG)) があることや、逆にバンド間とサブバンド間のエネルギーに相当する2つの光子から1つの電子・ホール対を生み出す現象 (2光子吸収) があることが報告・議論されている。これらはいずれも太陽電池の高効率化につながると期待されている。日本では筑波大学、東京工業大学、東京大学等が研究中である。

#### 量子ドットとナノ共振器の組合せによる発光増強：

量子ドットを活性層に持つフォトニック結晶内に 100 nm オーダーのナノ共振器を形成し光励起すると、共振モードでの発光が10倍から100倍に増強される現象がある。これは自然放出レートが共振波長において大きくなるパーセル効果によるものである。AlGaAs 中の GaAs ドット (物材機構)、GaAs 中の InAs ドット (東大)、Si 中の Ge ドット (武蔵工大) の報告例がある。この技術は LED やレーザの低消費電力化につながる可能性があり注目される。

#### 量子ドット EL 素子：

代表的な素子の構成は、有機 EL の発光層で蛍光性色素分子に代えて量子ドットを用いる構造。量子ドットとしては、化学合成で作製される粒径の揃った、欠陥の少ないコア・シェル型 II - VI 族量子ドット (CdSe/ZnS など) が利用される。量子ドットの粒径を 2 nm から 8 nm まで変えるだけで、量子閉じ込め効果により青色から赤色までの発光が得られる。この数年、高輝度デバイス開発の報告が相次いでいる。

### (6) フォトニック結晶

#### フォトニック結晶を用いたフルカラーディスプレイ：

フォトニック結晶は、光の伝播や発光を自在に制御できる新しい光ナノ材料として注目を集めている。トロント大学のグループは、二次元に展開したフォトニック結晶の隙間を制御することにより RGB カラーディスプレイの作製に成功しており、色変化の誘導に必要な電力が少ないことから、ポータブル製品への応用が期待される。カリフォルニア大学のグループは、結晶クラスター間の隙間を磁気によって制御できる材料を開発しており、ディスプレイの他、診断用マイクロデバイス等の検出器への応用が期待される。

#### ナノ共振器の Q 値の極限的な増大：

近年、2次元フォトニック結晶を用いたナノ共振器の Q 値の増大が著しい。2次元フォトニック結晶に人為的な周期性の乱れ、点欠陥共振器を導入すると、光は、欠陥中に面内方向では、フォトニックバンドギャップ効果により、上下方向は、全反射により閉じ込められる。1999～2000年頃は、Q 値は、数 100

程度 (Caltech、京都大学) に過ぎなかったが、2003年に、上下の全反射条件を満たすために、ガウス型の光閉じ込めの概念が、京都大学により提唱され、Q値 45,000 が実現されてから、その進展は、著しい。2005年には、ダブルヘテロ共振器の概念が、提唱され、Q値 600,000 が実現され (京都大学)、2006年末には、京都大学とNTTがそれぞれ、Q値 100万を上回る成果を挙げた。さらに、2007年になると、Q値 250万 (京都大学) まで増大するようになった。

#### スローライト技術の進展：

ある冷却原子が示す巨大な一次分散を用いると光の群速度を著しく遅くできることが1990年代にハーバード大で実証され、スローライトと呼ばれるようになった。同様の光は光デバイスの構造分散を用いてもできる。上記のように、フォトニック結晶のバンド端においては、光の群速度が零、すなわち光が停止し、定在波状態を形成するが、その近傍では、その停止には至らないものの、群速度が極めて遅くなる。フォトニック結晶中において、群速度の変化により、光伝播現象が変調を受けることは、まず、3次元フォトニック結晶を用いて実証された (2000年、京都大学)。2001年にはNTTがフォトニック結晶導波路で真空中の光速に比べて約1/100のスローライトを観測した。また2002年には、北大において、バルク2次元フォトニック結晶を用いて、群速度制御の可能性が議論された。NTTと京都大学は、それぞれ、ファブリーペローの波長間隔の測定および導波路モード端近傍でのレーザ発振動作から、導波路端近傍における光群速度のスロー化および停止現象が起こることを実証した。その後、実時間でのスローライト現象の実測 (京大) を経て、スローライト帯域の拡大の試みが横浜国大、St. Andrews大などで行なわれるようになった。2008年には、フォトニック結晶共振器を複数連結した結合共振器導波路で、最大1/170の減速、遅延量として最大126 psが報告されている (NTT、CREST)。

これらの手法は、次世代に期待される光ルーターにおいて光パケットを所望時間だけ蓄積する光バッファを実現すると期待され (次項も参照)、米国DARPAがプロジェクトを立ち上げている。ただし一般にスローライトは帯域が狭く、二次以上の高次分散も巨大なため、変調された光信号に適用できないという問題があった。2004年に横国大は、高次分散をなくしつつ帯域を拡大する手法を初めて議論し、スローライトの最も重要な性能指標は遅延と帯域の積 (これは蓄積信号ビット数と等価) であることが認知された。オンチップのスローライトデバイスでは、2007～2008年にIBMが約10ビット、セントアンドリュース大が約20ビット、横国大が約30ビットを報告している。また横国大は、外部制御による±10ビットの遅延のチューニングを実現し、光バッファの基本動作を初めて実証した。今後、デバイスの長尺化により光パケットに相当する数千キロビットのバッファは可能と思われる。

#### スローライト、ストップライトを利用した光バッファメモリ、波長変換：

スローライトと関連して、光のスペクトルを瞬時に狭くし、上記の遅延帯域積を保ったままで遅延時間を極大化させるストップライトが2004年にスタンフォード大より提案され、ビット単位の光メモリを実現すると期待され、動的

制御と呼ばれて実証研究が活発になった。例えば、フォトニック結晶共振器やスローライト導波路、結合リング共振器などの屈折率を局所的に変化させると、共振 Q 値を高めたり弱めたりすることができる。光がやってきたときに瞬時に Q 値を上昇させると、光パルスを完全停止させることができる。2005 年に京都大学が、ナノ共振器 Q 値の動的制御の概念を提唱し、2007 年には、実際に、ピコ秒という短い時間間隔で、1 桁以上、Q 値を変化させることに成功した。このような動的制御は波長変換を伴うが、この種の変換は原理的に効率が 100 %なので、光の停止に関係なく波長変換の新しい原理になり得ることが NTT によって議論されており、特に MEMS 技術を用いれば数 100 nm クラスの超広範囲の連続波長変換が可能なが示唆されている。京大、コーネル大、NTT の三つのグループでは、既に 1 nm 程度の波長変換を実際に観測している。

以上のように、ナノ共振器および導波路の特性を動的に変化させ、光を一瞬の間止める、波長変換を行なうなどの研究が、現在、端緒についたところであり、今後、著しい発展が期待される。

#### 大面積コヒーレントレーザ技術の進展：

フォトニック結晶のバンド端およびバンド端近傍を利用した光の群速度制御技術の進展が著しい。フォトニック結晶のバンド端においては、光の群速度が零となり、光の停止が起こる。言い換えれば、様々な方向に伝播する光が互いに結合し合い、定在波状態を形成することになる。この現象を利用して、2 次元フォトニック結晶の大面積コヒーレント動作が可能であることが、1998、1999 年に、京都大学および MIT グループにより指摘・実証された。このレーザの特長は、原理的にどのような大面積であっても、単一縦・横モード動作が可能であると期待されるため、将来的には、数 10 W ~ 1 kW 級の単一縦・横モード半導体レーザの実現も可能になるものと期待される。光出力は、デバイス垂直方向に発射することが可能であるため、所謂、面発光動作が可能となる。最近では、CW 状態で、80 mW、パルス状態では、1 W に迫る単一縦・横モード面発光動作が報告されるに至っている（京都大学、ローム）。さらに、極最近、GaN 系への展開も行なわれ、青紫色領域で、電流注入での面発光動作もが実現されるに至っている（京都大学）。本レーザのもう一つの重要な特徴は、フォトニック結晶の構造を変化させることで、ビームパターンを様々に変化できることである。円形ビームはもちろんのこと、ドーナツ状のビームの放射も可能であり、光のベクトル性を用いることで、波長よりも遥かに小さく絞ることも可能であり、次世代 DVD や、ニアフィールドオプティクス分野への応用が期待される。現在、複数の企業で精力的に開発が進められており、産業展開もまもなくと予測される。

#### 量子ナノ構造との融合による究極のナノレーザ、新しい光量子状態の形成：

ナノ共振器の Q 値の増大は、量子ナノ構造との融合をもたらすこととなった。京大により提案された高 Q 値ナノ共振器の概念（ガウス閉じ込め型共振器）を用いて、2004 年に Caltech と、アリゾナ大のグループは、真空ラビ分裂の観察に成功した。この成果は、チップレベルでの量子演算チップ実現の基礎とな

るものである。その後、2007年には、UCSB、ETHのグループは、量子状態のより詳細な報告を行なった。また、低温ではあるが、無閾値動作に近い究極のナノレーザ動作も報告されるに至っている。国内では、東大・京大も、ナノ共振器と量子ドットの融合を進め、優れた性能の報告を行なっている。

なお、フォトリソナノ共振器・量子ドット融合系では、極めて特異な現象、すなわち、ナノ共振器の共振波長と、量子ドットの遷移波長が大きくずれていても、両者が強い結合をすることが見出されている。2008年に、京大は、この現象が、ナノ共振器により増大された量子アンチゼノ効果によることを突き止め、究極のナノレーザ実現、さらには、新しい量子状態形成のための大きな指針を与えることとなった。

### シリコンフォトニクスによるファンドリーサービス

シリコンフォトニクスは、高度なCMOSプロセスや大規模な集積技術を使って従来を大きく凌駕する高度かつ低コストの光デバイス・回路を実現する試みである。2000年代前半にMIT、横国大、NTTがSOI基板上光導波路デバイスを開発したことが契機となり、2004年からインテルが研究を開始したことが各国研究者や計算機メーカーに衝撃を与えた。さらに2005年、製造部門を持たない米国ベンチャー企業ラックステラがモトローラのファンドリーサービスを利用して低価格の光トランシーバモジュールをリリースしたことが、今後の研究開発を象徴するさらに大きな衝撃を与えた。2007～2008年、欧州IMEC、シンガポールIME、日本NTT-ATNが一般向けのファンドリーサービスを開始し、この流れが加速しつつある。

このようなサービスは、シリコンフォトニクスだけでなくフォトリソ結晶など微細光デバイスの研究スタイルを大きく変えるかもしれない。近年、フォトリソ結晶のレベルが上がり、高度な設備を持たないと研究競争に参加できないため、研究機関が徐々に絞られていた。しかし市販の計算ツールも増えてきているため、アイデアと計算ツールさえあれば新しいデバイスを考えることはできる。ここでファンドリーサービスを利用すれば、テーラーメイドのデバイスが入手できることになり、研究機関を劇的に増やす契機になるかもしれない。またファンドリーサービスを使うと、従来よりも桁違いに大規模な光集積回路が容易に得られるので、基礎研究にとっても「単体デバイス開発」から「機能の合成と利用」へというパラダイムシフトが生まれ、未開の基礎テーマが数多く生まれると予想される。フォトリソ結晶を他のナノ構造デバイス、電子回路、MEMS、バイオ・流体回路などと組み合わせれば、極めて広い応用分野の強力かつ主要なツールになることは間違いない。事実、米国ではこのような傾向が顕著になってきており、日本の立ち後れが特に懸念される状況になってきている。

### スロット構造光デバイス（フォトリソ結晶を含むフォトリソナノ構造）：

フォトリソ結晶そのものではないが、関連分野で最近注目されているデバイスとして、スロット構造光デバイスがある。通常、光は屈折率が高い箇所を通りたがると一般に考えられている。例えば多くの光導波路は、低屈折率のク

ラッドで囲まれた高屈折率のコアを光が伝搬する。しかし、もしコアの中央に極めて狭い空気スロットを形成し、コアと空気の屈折率差がきわめて大きいと、伝搬モードがスロット部分に強く局在することが2004年にコーネル大により発見された。これは境界面のモード電界の法線成分が大きな不連続を起し、二つの不連続な電界が狭いスロット内で結合することで発生する。このような現象は古典的なモード解析で説明でき、物理的に新しいことではないが、このような現象が顕在化する高屈折率差デバイスが従来は存在しなかったため、議論されてこなかったと思われる。驚くのは、スロットの幅を光学波長の1/10以下にしても、光エネルギーのほとんどがスロットに閉じ込められることであり、回折限界を超える光の局在が単なる誘電体構造で可能になるという事実である。同様の光局在は、中心部に空気スロットや空気穴をもつ共振器でも起こる。

光が空気に局在するので、例えば導波路や共振器をガスや液体にさらして成分を分析するセンサに応用すると、大きな感度を発生させることができる。液体中で微小球を捕獲する光ピンセットとしても、巨大な引力を生むことができる。また、例えば気体原子をスロット内に捕獲し、発光の増強や抑制、電子と光の強結合状態の生成など、量子情報に向けた応用も考えられる。

#### (7) 近接場光技術・ナノフォトニクス

EUにおける光情報通信システムへのナノフォトニクス応用：

EUでは現在の光通信技術と30年後を目指した量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のためにナノフォトニクスを中心に据えた技術ロードマップが策定された(MONA Nano-photonics roadmap)。すでにフィージビリティスタディの予算がついている。当面はプラズモニクス、シリコンフォトニクスなどの波動光学技術を用いて通信デバイスを開発しようとしている。早晚、日本が推進している近接場光のエネルギー移動、散逸に基づくデバイスへと移行する可能性があるため、注意が必要である。

太陽光発電を中心とするエネルギー応用：

光エネルギーを電気エネルギーに変換する機能応用の代表例として太陽光発電があるが、その効率を上げるために欧米では研究が活発化している。多くの研究は太陽電池用の材料開発が主流であるが、最近の新たな潮流として、材料はシリコンなどの既存のものを使いつつ、近接場光のエネルギー移動と散逸を利用した方法が提案されている。先駆的提案は日本から出されているが、関連する提案として、米国 Los Alamos 研究所から紫外線の有効利用に特化したものが出されており、これを受けて米国では活発に研究が進み始めている。日本からの提案は紫外線のみでなく赤外線を広く利用するものであり、より有効な方法である。またこれは光エネルギーを別の光エネルギーに変換する事へも応用可能なため、最近では近接場光・ナノフォトニクスを多様なエネルギー分野へと応用する可能性が開けつつある。

新規な光メモリや情報セキュリティへの応用：

日本では近接場光・ナノフォトニクスの技術により2008年3月までに記録

密度 1 Tb/inch<sup>2</sup> の磁気記録システムの雛形が実現した。それを受けて、現在では 1 Pb/inch<sup>2</sup> (1000 Tb/inch<sup>2</sup>) を実現するための近接場光技術が提案され、その基礎研究としてのフェードインメモリ、近接場光による磁化、光版フラッシュメモリなどの開発が活発化している。これは日本がリードしているが、オランダでは伝搬光による磁化の研究を活発に行っている。また、日本ではむやみに記録密度を増大させるだけではなく、情報セキュリティ機能の付加された光メモリなどの新機能メモリの研究開発が進んでいる。さらに近接場光のもつ空間的階層性を用いた情報セキュリティ機能の発現が研究されており、ホログラフィカードの偽造防止、ナノ寸法のバーコードリーダーなどの検証研究が急進している。

### (8) プラズモニクス・メタマテリアル

ナノ金属微粒子：

ナノ金属微粒子中に生じる局在モード表面プラズモン共鳴を利用した技術が、米国を中心に進められている。光計測法としては、表面増強ラマン散乱法 (Surface Enhanced Raman Scattering: SERS) が挙げられる。SERS は、本来微弱なラマン散乱光を表面プラズモン共鳴によって増強することで、S/N 比高く計測する技術である。課題は、その増強効果の再現性が低い事である。これ以外にも、金属ナノ粒子に光を照射した際に生じる発熱現象を利用したガン治療など、医療分野への応用も研究されている。

発光素子における増強効果の利用：

金属 / 誘電体境界面に発生する表面プラズモンモードの強い電場局在は、到来する光のエネルギーを受け取って、強く局在、散乱させることがこれまで主に議論されてきた。しかし発光層自体が金属 / 誘電体境界の近くにあると、表面プラズモンモードの真空場が直接的に自然放出レートを増強し、発光効率を増大させることが 2005 年に Caltech (同研究者は現在、京大に在籍) から報告され、国内外で注目を浴びている。これは単に半導体発光層近傍に金属膜 (例えば Ag) を蒸着するだけで起こり、普通は光りづらい材料の発光の外部効率を桁違いに向上させることが示されている。InGaN 系発光素子での増強効果が報告 (京大) されている他、シリコン発光素子への適用も検討されている。

光学迷彩：

メタマテリアルを用いて特殊な屈折率分布を物体の周りに形成し、光が物体の周りを迂回するように制御すると物体は見えなくなる。物体を透明化する技術で、一見 SF 小説のようであるが、マイクロ波領域においては既に実験的にも成果が得られており、光領域への展開が精力的に進められている。米国では軍事関連予算からの研究プロジェクトも始まっており、その動向が注目されている。メタマテリアルを用いて物体からの光の反射を消す技術は、理研からも独自の技術が提案されており、古典光学の範囲では説明できない光学現象の探索、実現という点で期待されている。

光機能材料：

電磁気学的には、物質の光の屈折率は比誘電率と比透磁率の平方根の積で決まる。しかし光の周波数領域では、物質の比透磁率はどの物質でも 1.0 なので、光の世界では屈折率は比誘電率のみで決まるとされる。つまり、プラスチックレンズのように、高屈折率材料が望まれる分野における材料開発は、高比誘電率材料の開発であった。しかし比誘電率の制御による高屈折率化はその限界に達しており、新たなブレイクスルーが望まれている。このような背景のもと、メタマテリアルを用いて物質の比透磁率をプラス方向に制御することで物質の屈折率を高める技術が日本で提案されている。このようなメタマテリアルを用いた新しい光機能材料の創製法は、化学的な材料創製法とは全く異なる手法として注目されている。

### (9) ディスプレイデバイス

液晶ディスプレイ (PDP 含む) 技術の動向：

液晶ディスプレイ (LCD) は、その技術及び市場分野から大別して、大型のカラー液晶テレビ用ディスプレイと中小型のモバイルディスプレイに分類できる。

前者の薄膜トランジスタ (TFT) 技術を応用した大型 LCD 技術は、薄型大画面カラーテレビを支える技術であり、表示性能に関しては高コントラスト・高速応答・広色度範囲・精細度などに関しては PDP プラズマディスプレイパネル) と共にほぼ理想に近い状況を実現するに至ってきている。特に LCD では、PDP との比較優位性を狙いハイビジョン仕様の数倍から十数倍の超高精細化 (デジタルシネマ、スーパー HD) の動きや超薄型化テレビ実現への動きが活発化している。

LCD の残る大きな課題は、PDP の場合と同様に更なる普及のための材料構造革新・生産性向上による抜本的なコストダウン実現と省エネルギー化を中心とする地球環境問題への対応である。日本ではこれらの活動を支援すべく LCD、PDP 共に平成 19 年から 5 ヶ年計画で「次世代大型低消費電力液晶ディスプレイ基盤技術の開発」、「次世代大型低消費電力プラズマディスプレイ基盤技術開発」がそれぞれ国家プロジェクトとして開始され、日本の技術競争力を高める上で意義深い施策である。

後者の中小型ディスプレイ技術は、携帯電話・スマートフォン・ゲーム・車載用機器などの商品を中心に世界市場に向け日本がリーダーシップを取り市場展開をいっているが韓国・台湾の追い上げが厳しくなっている状況にある。今後は、上記テレビへの応用と同様の表示性能の向上と共にこの分野では特にコストダウンや機能の向上のために半導体集積回路 (LSI) のディスプレイ内への取り込む高付加価値形態のシステム・オン・パネルを目指した TFT の高性能化やそれを用いた新たな回路システムによる高機能化などが重要ポイントとなる。

有機 EL ディスプレイ技術の動向：

有機 EL (OLED) ディスプレイは、その構造が LCD と比べ簡単なことから

薄型・低コストが期待されている。材料面や構造面での進展は著しく、最近では半導体素子として認識したデバイス設計・製造プロセスも検討開発され、最大課題であった寿命問題も解決に向け大きく進展してきており、今後は大きな市場が期待される大画面分野への基盤技術の開発が急がれる。これらを背景に日本では平成20年度から5カ年計画で「次世代大型有機ELディスプレイ基盤技術の開発」が国家プロジェクトとして開始され、時を得た施策である。

LCD分野で開発されたポリシリコン技術を活用した高性能TFT技術や高生産性技術などの成果活用もこの分野には直接反映できるため、有機ELディスプレイの特徴を活かせる商品像が見出されれば一気に市場展開が進展することが期待されているが、一方でLCDの市場価格低減などがあり本格市場参入に対する壁は高くなりつつある。そこで、超薄型テレビの開発など有機ELディスプレイ技術ならではの応用商品の模索が各企業でなされている。

#### フレキシブルディスプレイの動向：

フレキシブルディスプレイは、平面型ディスプレイ（FPD）の基板を従来のガラスから軽量・非破壊性（割れない）・フレキシブル性等を有したプラスチックフィルムや金属フォイル・シートを基板として用いたディスプレイで、特に可搬性（モバイル）電子機器、大型壁掛けディスプレイ、曲面ディスプレイ、ウェアブルディスプレイ、さらにはアンビエントディスプレイ等がその応用先として期待されている。フレキシブルディスプレイ技術を応用することで商品形態としては軽くて丈夫で曲げられるなどの従来のガラス基板では達成できなかった新デザインの適用が可能となる事と合せてフィルム基材を用いる事から従来のバッチ処理や枚葉処理にかえて大幅な生産性向上が期待できるロール・トゥ・ロール生産方式の適用も革新的なコストダウン策の一つとして期待されている。

この分野へ応用できるディスプレイ技術は、液晶技術を始め有機EL技術、電気泳動表示技術など従来から提案されてきた技術のみならず、ナノテク材料技術、マイクロマシン技術や界面化学技術など新技術分野との融合が広く研究されつつある状況にあり、特にアメリカ、ヨーロッパではポストLCD技術分野として日本に勝る競争力を復活させる狙いで政府が積極的に支援しその研究開発が盛んに行われている。

#### 薄型化：

最近特に各社がしのぎを削っているのは、薄型化である。これまでは薄型テレビと言っても10cm程度の厚さがあったが、2007年には2～4cmのLCDテレビが発表ないしは発売され、2008年には40型で1cmを切る（最薄部9.9mm）LCDテレビが製品化された。これはバックライト部に導光板を使う等の工夫で実現している。PDPも薄型化の発表を行っているが、薄型化という点で最も有利なのは有機ELディスプレイである。

ソニーが2007年12月に、11型という小型サイズではあるが、有機ELを用いたテレビを世界で初めて発売し、大きな注目を集めた。厚さはわずか3mm（最薄部）であるほか、高コントラスト、高色再現性、動画対応力の高さなど、画

質的にも大変優れている。今後の大型化、低コスト化に向けての技術開発が期待される。

#### (10) 次世代ナノデバイス（単電子素子、分子素子、超伝導デバイス含む）

ナノワイヤートランジスタ：

欧州では、IMEC や Leti などの公的機関が、ナノワイヤートランジスタなどのナノデバイス研究を主導している。論理デバイスとしては、CMOS の極限形であるナノワイヤートランジスタを超える次の候補技術が見えていない。この状況を受けて、米国では、インテルを始めとする半導体企業が戦略的に、大学の研究を組織的にドライブし、極めて広範囲な萌芽的なアイデアの育成と検証を図っている。NSF などの研究資金も、大学ネットワークに対して組織的に行われることにより、戦略的な研究を加速している。有機エレクトロニクスでの成功と今後の開発における問題点の解決についての進展が、米国では分子エレクトロニクスに還元される形でフィードバックされ、分子デバイス開発を積極的に進める風潮があるが、日本での研究開発において、有機エレクトロニクスと分子エレクトロニクスとが乖離している。

デジタル RF 無線機への超伝導デバイス利用：

米国 Hypres 社は、US. Army、Air Force へデジタル RF 無線機のプロトタイプを納入し、現在フィールドテストを実施中である。すでに衛星を経由した通信（超伝導デバイスは受信側に使用）に成功している。デジタル RF 無線機は無線信号を直接デジタル化する方式で、通信方式の変更などに極めて柔軟性に高いシステムである。Hypres 社は複数の単一磁束量子回路のチップを搭載したマルチチップモジュールを冷凍機で冷却し、50 K 程度に置かれた半導体アンプで信号を増幅して室温の FPGA に送る形で実現し、Hybrid Technology Hybrid Temperature と名づけて開発を進めている。Mixed Signal 技術としては他のデバイスでは達成が困難で、特筆すべき成果といえる。

低温検出器システム：

米国は NIST、Caltech、Brown 大学などを中心に X 線、 $\gamma$  線、中性子などの低温検出器システムの研究が盛んになってきている。数年前までは検出器単体のレベルであったが、現在はそれをアレイ化し、イメージングシステムなどの実用化を目指した研究が着々と進められている。検出器の信号の多重化には SQUID と時間領域多重化が用いられていたが、最近はマイクロ波の共振を利用した周波数領域の多重化が試みられており、非常に良い成果をあげている。欧州でも超伝導転移端センサの研究のほかに、それに用いる SQUID も SQUID 応用の重要な分野と位置づけられており、ベンチャー企業の参画も見られる。日本では多重化に対する対応の遅れが目立つが、最近になって SQUID や単一磁束量子回路の適用が検討されるようになってきた。

超伝導単一光子検出器：

通信ネットワークにおける情報漏洩は将来通信の最重要課題であり、これに

対し研究が進められてきた量子情報通信技術において、超伝導単一光子検出器を用いることで、従来の記録（107 km）を大きく上回る、世界最長となる 200 km 長の光ファイバにおいて、安全な量子暗号鍵の配送が実現された。この分野においては種々の信号処理素子の研究が進められているが、超高感度かつ高時間分解能特性を有する超伝導素子の優位性が示されたことで、今後超伝導技術によるこの分野の進展が期待される。超伝導単一光子検出器は単膜を微細加工してナノワイヤとすることで実現される。NbN、MgB<sub>2</sub> といった材料で研究が進められている。日米欧の技術は拮抗している状況と見られる。

#### ナノ SQUID :

SQUID は、高感度磁束計として知られる。SQUID の超伝導ループを小さくすると、磁束密度感度が悪化するため、従来は応用が見つからなかった。しかし、最近のスピン트로ニクス発展により、高い空間分解能と相応の磁場感度を有する材料薄膜の磁気特性評価装置が求められるようになった。ナノ SQUID はこの要求に応えるもので、ループが数百ナノメートルまで小型化している。欧州での研究が盛んである。

#### 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 :

単一光子の検出は、量子通信を実用化する上で不可欠となっている。超伝導薄膜を細線化して光子の照射時に常伝導化する現象を利用した検出器が急速に伸びてきている。米国がリードしていたが、日本がほぼ追いつきつつある状況である。

#### 高性能超伝導計算機 :

米国では 90 年代のペタフロップス（浮動小数点演算を 1 秒間に 10<sup>15</sup> 回実施）コンピュータを目指したプロジェクトを最後に、この関連の研究は中断されていた。この間、日本では国の支援により、単一磁束量子回路を利用して着実に成果をあげてきた。これに触発される形で、今年になって米国は高性能計算機プロジェクトを再開した。作製プロセス、設計、アーキテクチャなど総合的な開発が盛り込まれている。

## 3.2.2 バイオ・医療分野

### (1) 体内送達システム (DDS)

核酸医薬のデリバリーシステム：

分子生物学の急速な進歩によって疾患のメカニズムが分子レベルで明らかになり、遺伝子治療や siRNA などの核酸医薬による分子療法は、21 世紀の先端医療における革新的治療法として期待されている。このような革新的治療法の実用化にあたって、技術面での鍵を握っているのが、標的まで治療分子をデリバリーする一方で、その分子を細胞内で効率的に機能発現させることのできるデリバリーシステムの開発である。特に、近年、米国で臨床治験が実施されていた naked siRNA の眼球内投与による加齢黄斑変性 (AMD) の治療効果が Toll 様受容体 3 による認識を介した配列非特異的な効果であることが明らかとなり (*Nature* **452** : 591 (2008))、siRNA の実用化にはデリバリーシステムが必要不可欠であるものと思われ、現在までに世界中の公的研究機関や大手製薬企業が siRNA のデリバリーシステムの開発に躍起になっているが、未だ有用なシステムが開発されていない現状である。一方、近年、iPS 細胞が大きな注目を集めているが、iPS 細胞をウイルスベクターを使用することなく高効率で作成するためには、遺伝子のデリバリーシステムが鍵を握っているものと考えられる。このような遺伝子や siRNA などの核酸医薬を生体内で有効に機能させるための DDS 設計として、環境応答性や標的指向性などのマルチ機能を付与したインテリジェント型 DDS の研究開発が進められている。これらの研究開発は、今後注目すべき動向である。

### (2) 分子イメージング

光の回折限界を超えて、高いイメージング分解能を有する技術開発が期待される。特に、フォトンクス結晶や量子材料などのナノテクノロジーの活用による新規技術の開発が期待される。さらに、これまで主に使われてきた可視光のイメージング以外に赤外線などの他の波長のみならず、磁場、電場など、細胞が発する様々な情報をイメージングできる、超高感度・超高分解能な技術開発が重要である。また、2008 年ノーベル化学賞を受賞した GFP などの蛍光タンパク質の改良や量子ドットなどの新規イメージング材料の開発が急速に進展している (米国及び日本)。さらに欧米と日本において、動物や生体の深部のイメージングのために近赤外イメージング、超音響イメージング、テラヘルツイメージングなどの技術開発が進展しつつある。内視鏡などの診断技術と分子イメージングの融合により、生体内の機能・反応・疾患状態などをリアルタイムにイメージングできる技術開発が期待される。また、内視鏡と顕微鏡の融合により、体内のがん組織を細胞レベルで診断できる技術の開発が期待される。

### (3) 再生医療用材料 (細胞シート含む)

内科的再生誘導治療 (難治性慢性線維化疾患や血管障害の新規治療法)：

DDS 技術を活用した内科的薬物治療によって、病的線維化組織を消化分解、周辺組織の自己修復能によって疾患治癒を促す、あるいは悪化進行を抑制する

肝硬変、肺線維症、慢性腎炎、拡張型心筋症などの難治性線維化疾患に対する再生誘導治療。血管障害の1つである動脈瘤に対して行われている金属コイルを用いた内科的血栓閉塞カテーテル治療では、血栓溶解による瘤の再発が問題である。閉塞コイルと細胞増殖因子の DDS 技術を組み合わせ、瘤内に投与、器質化組織により完全閉塞させる。線維化組織消化、再生細胞の誘引、その活性化のための薬物が利用可能となり、再生医療アイデアを内科治療に融合させる新規治療技術が注目される。この分野は、日本で始められ、その研究・技術レベルは高いが、現在、欧米の製薬メーカーによる開発が進んでいる。

再生医療の実現には、2つの方法論が考えられる。外から細胞を与える移植治療と体内にもともと存在している再生修復のための細胞の利用である。近年、主に米国及び日本（京都大学・田畑泰彦教授）において細胞の増殖分化を制御できる足場バイオマテリアル材料技術が進歩し、再生修復細胞の体内移動メカニズムやその誘引因子が解明されていることから、体内細胞を活用した再生誘導治療が可能になっている。細胞誘引作用をもつケモカインを必要部位で徐放化させ、体内細胞を集積させる DDS 技術、集積細胞の生物機能を高めるバイオマテリアル足場材料・技術が注目される。この研究開発の方向性は再生医療の世界的な流れである。

#### (4) 生体適合材料

高強度ハイドロゲル：

理論的に考えると、ハイドロゲルは生体材料としての理想的要件を幾つか備えているが、生体において構造材料としての使用に耐えるハイドロゲルは、ほぼ皆無である。これまで考案されてきた通常の物理ゲルや化学ゲルでは、強度が全く足りない。この点で、近年日本で創製された、ナノコンポジットゲル、スライドリングゲル、ダブルネットワークゲルの3つは、特殊な構造によって高強度を付与したハイドロゲルであり、今後の生体材料としての展開が注目される。ただし、これらのゲルは、製法が複雑で、一部生体に安全とはいえない成分を含んでいる。この点で、同一形状の正四面体様マクロマーを組み合わせ均一網目を作製したテトラゲルは、製法が単純で安全性も良く、強度的にもダブルネットワークゲルに迫っており、新たな高強度ゲルのコンセプトとして注目されて良いであろう。これらの新しいゲルが、生体材料として使用可能になると、産業化への道筋も大きく開けると予想される。

生体材料としてのセラミックスは特に骨組織において、生体適合性など様々な優位な性質を持っている。これは、骨の主成分がリン酸カルシウムというセラミックスであることから容易に理解できる。その一方で、セラミックスは成形が難しく、また力学的強度も荷重部には不十分であることから、今後、造形方法の革新と、力学的強度の向上に十分な研究資源を投下することが重要と考えられる。その意味で、日本及び米国で現在試みられている様々な三次元造形法（特に積層造形）による生体材料の成形、金属材料とのハイブリッド化、生理活性物質や細胞の付与による高機能化などが、ソリューションとして注目

を集めている。

#### 感染症対策：

体内埋入部材の摘出原因の大半は感染症によるものである。最近、これらが材料上のバイオフィルム形成によるものであることが明らかになっている。脊椎固定器具のような複雑な形状の部材での症例が多い。そのため、バイオフィルム非形成表面の創出が必要である。欧米で高分子に対する研究例があるが、セラミックスに関しては研究が行われておらず、金属は日本で始まったばかりである。せいた機能分子電着固定による材料表面からの東京医科歯科大学の取組、臨床面からの北海道大学の取組が注目される。この技術は、他の生体埋入部材はもちろんのこと、経皮デバイス、歯科インプラント、歯科修復物に利用でき、さらに抗菌の必要な建築構造物にも利用できる。

#### 生分解性金属：

血管内治療や骨折固定においては、治療後器具が消失することが望ましい。これまで、生分解性材料としては、高分子やセラミックスが考えられてきた。ドイツでは古くからマグネシウム合金を生分解性金属として使用する臨床研究が行われているが、既存の合金を使っているために成功していない。マグネシウム合金の溶解速度、崩壊性、溶出に伴う水素発生などを制御できなければ、実用化できない。物質・材料研究機構では、溶解速度を制御できる合金の開発に取り組んでいる。開発までには多くの困難が伴うが、成功したときのインパクトは大きい。他には、中国で純鉄の利用が研究されている。

#### MRI アーチファクト対策：

MRI 造影下では、既存合金は磁化してしまい、アーチファクトを生じて周辺組織の造影を妨げる。特に、脳神経外科における脳動脈瘤クリップのアーチファクトは深刻である。この解決のためには、低磁性合金の開発を行うしかない。また、近年オープン MRI 造影下での手術が行われるようになり、手術器具にも低磁化率のものが求められている。MRI 機器のイメージング面からの北海道大学の取組、Co-Cr 合金開発あるいは合金積層による東北大学の取組、ジルコニウム合金開発による東京医科歯科大学の研究が注目される。

### (5) 医療用チップ (μ TAS、DNA チップ、蛋白チップ等)

#### e-textiles：

欧州では生体情報をセンシングする技術に関して活発に研究がおこなわれている。特に e-textiles と称してエレクトロニクス技術と織物技術を組み合わせた高機能な織物材料の研究が始まっている。医療分野の例としてセンサを一体化した洋服の開発が EC のいくつかの国が参加したプロジェクトとして推進されている。織物(布)の表面に電極材料などをコーティングしてセンサを製作し、その織物で作った洋服を着ることにより、非侵襲、無拘束で生体情報を取得できるシステムの実現が目標である。現在ではまだ材料開発の段階で、センサとしては温度センサ程度しか実現されていないが、体温のほか、血圧、酸素飽和

度、血糖値などのモニタリングを目指している。欧州の強みである伝統的な織物技術を再活性化する狙いもあり、日本ではほとんどこの種の研究は行われていない。非侵襲、無拘束の生体情報モニタリングは生体計測の理想形態であり、高齢化社会のニーズともマッチしているため、今後とも動向を watch する必要がある。

#### マイクロチップの医療応用：

Harvard Medical School を中心とするグループでは、がん患者から採取した血液に含まれるがん細胞をマイクロチップで検出する研究を行い、その成果が *Nature*, **450**, 1235-1241 (2007) に掲載された。血中を流れているがん細胞は非常にまれであるが、これを検出できればバイオプシーによる組織採取に代わるがんの検査手法になる。肺がん、すい臓がん、乳がんなどの患者から血液を採取し、血液に含まれるがん細胞を、抗体をコーティングしたマイクロ柱構造 (Si のエッチングで作製) を有するチップで捕捉した。その結果いずれのがん細胞も高い選択性で検出することができた。

また同じグループは、上記技術をさらに発展させて、血液中を浮遊する肺がん細胞のジェノタイプを検出する研究を *The New England Journal of Medicine*, **359**, 366-377 (2008) に報告した。上記チップに肺がん患者の血液を導入し、捕捉した肺がん細胞を用いて allele-specific PCR によりジェノタイプを決定した。薬剤耐性を持つ患者から採取したがん細胞において薬剤耐性に特異的な多型を検出した。本技術により治療経過の途中において、がん細胞の多型の変化をモニタリングできる可能性がある。

### 3.2.3 エネルギー・環境分野

#### (1) 太陽電池

シリコン薄膜の量産：

これまでの技術開発をもとに、シリコン薄膜太陽電池の本格的な製造が始まりつつある。2012年には、シャープ1社で6GWの製造設備になるとアナウンスされている。また、Cu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜太陽電池の製造設備も、2011年には、1GW以上にになると思われる。現在、企業は製造設備の増強とこれらの立ち上げに人的資源を割いているため、基礎研究に手が回りにくい状況にある。2020年以降の実用化を目指した画期的な性能を有する研究開発を今から行わなければ、日本は欧米各国の後塵を拝す危険性が高い。特にシリコン薄膜では、エネルギー変換効率18%以上を狙えるトリプルセル用光吸収層材料開発に期待が高い。また、2接合、3接合の大面積高効率シリコン薄膜太陽電池モジュールの製造技術開発が急務である。

シリコンヘテロ接合太陽電池：

三洋電機が開発したシリコンヘテロ接合太陽電池は、接合が200℃程度の低温で形成され、しかも開放電圧が非常に高いものができるため、世界中で研究開発が非常に活発になっている。この系は、シリコン表面・界面そのものの高品質化に関わっており、界面制御研究は、将来の超薄型シリコン太陽電池の重要な要素研究になると思われる。今後は、多結晶シリコン系への展開も期待される。

Cu(InGa)Se<sub>2</sub>薄膜太陽電池：

米国を中心に、CIGS系太陽電池に関係したベンチャー企業が数多く設立されており、今後の動向に注目。特に、製造コストを大幅に削減する技術（ナノ粒子をもちいたもの）やフィルム基板を用いたものが注目される。2007年、IBMが発表した金属とヒドラジンの反応を利用してCIGSを焼結・合成する新しい薄膜製造技術には注意が必要。国内では、昭和シェルとホンダが生産を開始したが、欧米に比べると研究人口があまりにも少ない。CIGS系では、セルの変換効率25%以上を目指す基礎研究が必要と考えられ、具体的にはワイドギャップからナローギャップをカバーする広い波長範囲での光吸収層材料開発が鍵となる。

システム技術：

設置技術、大型システム設計技術、系統連系技術など、ヨーロッパでは大型モジュールが主流になりつつある。日本では住宅用小規模システムが主流となっているが大型システムのマーケットは無い。日本では国内需要が無く、マーケットの欠如からシステム技術で遅れを取っている。将来のコスト削減と導入拡大には大型システムの普及、発電事業の発展が不可欠と考えられる。最近、電力会社や地方自治体を中心にメガソーラー建設が始まろうとしており、大いに期待される。

## (2) 燃料電池

Back to Basic :

特定の技術ではないが、日本、米欧などにおいて、燃料電池の開発では現状の材料・技術に頼ってはいはコスト面、性能面から本格的な普及は極めて困難であるとの認識のもと、基礎に立ち返り、ナノテクノロジーを最大限に活用して優れた材料を開発することにより、現状課題のブレイクスルーが可能であるという考え方が広く受け入れられた。この考えに基づき、長期的に研究投資が続けられて初めて、燃料電池が広く実際に使われ、世界のエネルギー保障、サステナビリティに大きく貢献できると考えられるようになってきている。

低白金・非白金触媒 :

日本では、経産省と文科省が連携して希少資源・元素戦略の取り組みを行っているが、コスト面、資源制約の面から燃料電池の普及の大きなネックの一つであった白金触媒の使用量低減、さらには白金を全く用いない触媒開発に関して、日米で顕著な進展が見られた。特に、日本で発見・開発されたカーボンアロイ触媒は、早くも米国で性能、耐久性ともに日本と同等レベルの結果が得られており、今後も激しい開発競争が繰り広げられると予想され、進展が注目される。

生物燃料電池 :

酵素を用いるバイオ（燃料）電池の開発研究は、以下のように三つの方向に分けることができる。(1) 米国のヘラーが先導している、皮膚毛細管の血糖を燃料にする、出力数マイクロワットのマイクロバイオ電池で、価格1ドルで2週間の使い捨てを想定している。技術のネックになっているのは、血中尿酸が酵素に悪影響を与えることで、この問題を解決する技術が必要である。(2) ソニーらが進めているモバイル機器の電源を想定したバイオ電池開発である。出力は実用レベルに達しつつあり、長期安定性の実現（使い捨てを想定しても数ヶ月の連続使用の可能性が必要）が今後の技術課題である。現在使われている乾電池に比べてエネルギー密度で優位性を確保するには、現在の2電子酸化から理論限界の24電子酸化へ迫る研究が必要であるが、これはかなり障壁の高い課題であろう。(3) 酵素と電極との直接電子移動反応の基礎研究展開である。次の世代のバイオ電池を見据えた長期的視野で、地道な研究に投資する必要がある。ナノバイオ技術の思いもよらない新しい実用展開に繋がる可能性も秘めている。

このほかに、微生物を用いる生物燃料電池の研究も環境浄化型エネルギー獲得システムとしての研究が注目される（p.180 参照）

## (3) 光触媒と太陽光による水素発生

光触媒の高性能化と浄化技術の新展開 :

日本では2007年より5カ年の予定で大型のNEDOプロジェクトが始まる

など、産業界、学界だけでなく行政サイドからの支援も強く、さらなる発展が期待されている。現在の中心課題は、(1) 室内光下においても十分な機能を発揮することができる可視光応答高感度光触媒の開発（現状の可視光光触媒の10倍の活性が目標）、(2) 工場などから発生する大量の揮発性有機物（VOC）を分解する浄化装置の開発、(3) 土壌浄化、廃液浄化など環境浄化技術としての新たな展開であり、それぞれについて熱心な開発がおこなわれている。

#### 大気浄化用建築材料：

ヨーロッパで盛んな光触媒研究の一つは、主として大気浄化（NO<sub>x</sub>、一酸化炭素）を目的とした建築材料（特にセメント材料）の開発である。EUでは2010年1月までにNO<sub>x</sub>濃度を現在より20%減少させなければならないことを決めており、光触媒建築材料はそのための重要技術として位置付けられている。NO<sub>x</sub>除去光触媒建材の開発を主題とした3年間のEUプロジェクトが昨年終了したが、その成果は高い評価を受けているようである。プロジェクト終了後も、ベルガモ（イタリア）、パリ、アントワープなどで実際の道路を使った検証実験が行われている。また、2007年、ローマ市内のトンネルにおいて、紫外線強度を上げた蛍光灯を設置し、内壁に光触媒をコーティングしたものがリニューアルオープンした。光触媒コンクリートで外装を仕上げた教会も建設されている。光触媒コーティングによるセルフクリーニング建材も展開が急速に進んでいる。特にガラス分野ではサンゴバン、ピルキントンといった大手メーカーが熱心に技術開発、産業化を進めており、建材ガラスに限れば日本の10倍ぐらいの市場となっているとの分析もある。

#### 太陽光による水素発生

現在日本では太陽エネルギー利用は主に太陽電池開発に研究資金が流れているが、欧米・中国等では、太陽エネルギーの化学エネルギーへの変換にも研究資金が出始めており、大型のプロジェクトが多数立ち上がり始めている。本分野における日本の研究現状は、長年の研究者の蓄積があり、材料開発に一日の長があるため世界をリードする立場にあるが、各国は日本の研究を入念に調査し、研究を加速している。したがって、このままでは数年以内に立場が逆転することも十分に考えられる。太陽エネルギーの化学エネルギーへの変換は、そのエネルギー形態が貯蔵・運搬可能であるため、将来極めて大規模に展開する可能性があり、これが諸外国の研究の加速につながっていると考えられる。例えば、米国のヘリオスプロジェクトでは、太陽エネルギーから燃料への変換により将来の米国のガソリン消費を全て賄える可能性を示し、これを目標としている。

#### (4) バイオエネルギー材料（燃料・発電）

##### 二酸化炭素で培養した藻類のバイオディーゼル化：

米国のフェニックス西部でバイオフューエル社は、近くにある発電所からの二酸化炭素で藻類を培養している。横100メートル、縦14メートルのビニールハウスで大量の藻類を培養し、これからバイオディーゼルを製造することを

目的としている。理論上は1ヘクタールあたり1万9,000リットルのバイオディーゼルを作れるとしており、トウモロコシの2,500リットルや大豆の230リットルに比べて桁違いとなる。詳細はまだ明らかにされていないが、経済性評価の点でも有望とのことであり注目に値する。

#### セルロースの糖化：

セルロースの糖化酵素の最大の課題は酵素コストの削減であり、この分野で世界最大の産業用酵素メーカーであるNovozyme社とGenencor International社が、特にトリコデルマ属糸状菌について世界をリードしている。両社ともアメリカの会社であり米国エネルギー省から補助を受けていたが現在はデンマーク資本となっている。なお、2008年にGenencor社は米国デュポン社とセルロース系バイオエタノールのベンチャーを設立した。他方、日本独自の研究としては、アクレモニウム属糸状菌による糖化酵素生産技術があり、明治製菓が飼料用酵素を販売している。また、リグノセルロースは酵素だけでは糖化されないため効率の良い酵素前処理技術が必要であって硫酸法等の方法が検討されているが、この分野では日本と米国の差は無い。

#### 低リグニン植物の開発：

酵素法を中心にしたリグノセルロース系バイオマスの糖化技術は、経済性などの課題も多いため、酵素糖化が容易な低リグニン作物の研究が進められているが、日本発の技術であるGRES-T法によってリグニン含量を低下できることが報告された。

### (5) 環境浄化微生物

#### 環境微生物の代謝機能を用いたバイオエネルギー生産：

バイオエタノールの他に、微生物による水素生産（バイオ水素）、バイオメタン（メタン発酵）や微生物燃料電池などの研究は世界的に注目されている。これらの技術はバイオマスから液体燃料、気体燃料または電気を生産できるので、排水・廃棄物処理を行うと同時に、バイオエネルギーを生み出すことも可能であり、循環型社会の構築に必要・不可欠な技術になると予想される。バイオメタノールと微生物燃料電池の研究はアメリカがリードしているが、バイオメタンの研究ではヨーロッパが進んでいる。一方、水素発酵の研究については日本、アメリカ、中国でそれぞれ活発に行っており、ヨーロッパ（イギリス、デンマークなど）と韓国は後追いとの印象がある。

#### 窒素代謝関連微生物の新たな展開：

窒素は富栄養化や地下水汚染の代表的な原因物質である。様々な排水から効率よく窒素を除去することは重要な研究課題である。近年ヨーロッパの研究者が新しい代謝経路と関連微生物を発見し、新しい技術開発の競争が注目されている。特に、このような微生物の自己固定化や高濃度化装置開発が注目されている。

特殊機能をもつ環境微生物の探索：

特殊微生物の代謝機能によるレア元素の濃縮が新しいテーマとして注目されている。たとえばリン蓄積微生物の代謝機能を活用することで、排水中の低濃度リンを高濃度に濃縮して回収できることが期待されており技術開発が進んでいる。また、微生物による金属元素の濃縮も注目されている。これらの技術は環境浄化に寄与するとともに、資源回収にも貢献できるので、新規微生物の探索やその遺伝子解析をはじめ、効率的に活用する技術の開発が重要である。全体としてアメリカ、ヨーロッパの研究が進んでいる印象があるが、近年日本でも積極的な取り組みが見られる。

微生物燃料電池：

微生物の代謝作用（呼吸機能）により、廃水中の有機物を電子と水素イオンに分解する（除去する）際に、放出する電子を奪い取り発電する微生物燃料電池が注目されている。微生物が有機物を代謝（分解）する必要があるため、廃水処理が同時に行われ、下水汚泥の大幅な減量化（電子を微生物から奪い取るため）・安定化と共に、①汚泥処理のための消費エネルギーおよびCO<sub>2</sub>排出量の大幅削減、②付加価値の高い電力とバイオプラスチック原料を同時に生産することが可能な電力生産型下水汚泥処理システムの開発につながるが、実用志向が先走りしており展望が見えない。現時点で一番大切なのは、微生物の電極反応についての基礎的研究の進展であり、地道な研究が必要である。この分野では、アメリカ、オーストラリア及び韓国の研究グループが精力的に研究を行っている。日本でも2-3年前から研究が行われ始めたが、これら先行する国々に比べて研究費も圧倒的に少なく、水をあけられている。

嫌気性アンモニア酸化細菌：

嫌気性独立栄養性細菌を用いた嫌気性アンモニア酸化反応を応用することにより、従来の活性汚泥法に比べて大幅にランニングコストを削減でき、温室効果ガス（N<sub>2</sub>O ガス）が発生しない新規省エネ型窒素除去プロセスの構築が可能となる。窒素除去速度も従来の活性汚泥法の数十倍であり、この嫌気性アンモニア酸化細菌を活用した新排水処理法が有望視されている。この研究はドイツ、スイスなど欧州を中心に進められ、特にオランダが最も進んでいて既に実排水処理プラントを建設した。日本は着手は遅かったがここ5-6年で急速に研究が進展し、企業による研究開発も盛んであるが規制が厳しく実用化には時間を要している。

## (6) 高性能二次電池、キャパシタ

金属酸化物ナノ粒子を使った高性能電極開発：

フランスの J.-M. Tarascon (Universite de Picardie Jules Verne, LRCS, FR) 教授らが金属酸化物ナノ粒子を使った高性能電極開発に火をつけた。ナノ物質を用いることにより、従来よりも格段に高容量な二次電池材料を合成できることを見出し、ナノ⇒革新的電極材料、のコンセプトに一流研究者が競って参画している。高容量活物質は実用上極めて有用であるため新物質

の探索の方向としてナノ材料の開発が行われている。特にバルクサイズでは不活性だった化合物がナノ化により突然活性化し優れた電極性能を発現することが見出され、学術誌上でもホットな研究テーマとなっている。電池の高性能化に伴い安全性が大きな問題となり、電池構造での対策と並行して安全な活物質の開発も大きなトレンドとなっている。高温時に酸素の放出の無いオリビン材料の開発や発熱挙動が緩やかな特性の金属酸化物正極の研究開発も盛んに行われている。またこの安全性や寿命特性の改良に表面の物質変化を高精度で観察する技術も多々開発されてきた。

#### ナノイオニクス：

「ナノイオニクス」という新しい学術分野ができるような先端的な材料科学の知見が集まりつつある。中でも世界的な潮流を作っているのがマックスプランク研究所の J. Maier (Max-Planck-Institute, 70569 Stuttgart, Germany) 教授であり、現在の世界トップ研究者である。ナノ物質における電界効果を利用した新しいコンセプトのイオン伝導材料の提言などを行っており、またナノサイズ物質において従来にないエネルギー貯蔵特性などを発見し学術界に大きなインパクトを与えている。ナノ材料の界面、コンポジット、電界効果、欠陥平衡など物理的アプローチでエネルギー材料の物性制御技術を提唱しており世界中の多くの研究者がこの流れに乗りつつある。このような流れの中、従来までの材料界面のナノサイズ領域での現象がナノイオニクスとして捉えられていたが、ナノ材料そのものの界面、コンポジット、電界効果、欠陥平衡などの幅広い分野がナノイオニクス領域として扱われつつある。

#### リン酸鉄リチウム ( $\text{LiFePO}_4$ )：

米国のテキサス大学オースチン校 (The University of Texas at Austin) の John B. Goodenough 教授が発見した  $\text{LiFePO}_4$  材料が次世代の自動車用リチウム二次電池の正極材料として注目されている。これはそれ以前の酸化物インターカレーション材料とまったく異なる反応で蓄電できる新材料であり、その安定性が格段に優れていることから革新的電極材料だと言える。絶縁性のリン酸化合物を電池電極に用いるような発想は極めて独創的であり、それまでの常識を破る発想である。しかしながら、近年の電極材料の表面制御技術の発展から、そのような絶縁性材料も電極として用いることができる技術開発がなされ一気に世界的な潮流を形成した。現在、日米欧の先進各国でこの材料の基礎科学が進展しており多くの新しい知見が集積しつつある。今後、この新電極材料が自動車用電池として用いられるかが注目されるが、自動車という大きな市場に電池技術を導入する上で極めて大きなイノベーションであると言える。

### (7) 熱電変換素子

#### 熱電変換素子開発：

ペルチエ素子は松下電器のワインセラーや一部の冷蔵庫など、産業用の精密温度制御や半導体の冷却だけでなく、家庭の比較的身近なところに顔を出すこ

とも多くなっている。ワインセラーは冷蔵庫と違い、あまり冷えすぎても困る、振動を嫌う、高級感も大事などの理由で、現状のペルチエ素子でも十分に目的を果たしている。熱電発電の方は他の熱回収方式との競合上、材料・素子性能のさらなる向上が必要とされている。材料・素子の性能そのものは確実に進歩しており、東芝が発売している GigaTopaz はその性能の高さから注目される。NEDO プロジェクトから出てきた成果として、シリサイド系材料素子や高効率 BiTe 系素子などが注目される。また、産総研が世界に先駆けて開発している酸化物モジュール化技術も、実用的な熱電発電技術を発展させる意味で大いに注目される。

#### 熱電変換新物質・新材料の開発：

小さいながらも市場にでてきているのはほとんど BiTe ベースの素子で、新物質・新材料の開発が必要とされている。最近では酸化物、クラスター化合物、半導体超格子など、従来のアプローチとは異なる物質群から、高い性能指数を有する材料が発見されている。これらの物質には、高温での化学的安定性の高い酸化物の利用、強相関電子を用いた高キャリア濃度での高性能実現、クラスター化合物での熱伝導制御など、今までの熱電変換材料にない特長があり、これらをうまく活用していくことが更なる飛躍のポイントになるであろう。これら新物質・新材料の開発では、日本が極めて重要な役割を果たしてきている。

#### 熱電変換素子の産業化：

市場に近いところではロシアや中国が活躍しているのが特徴的である。ペルチエ素子の製造メーカーが中国、ロシアに多く存在し世界へ輸出している。ここ数年の中国での物質科学の基礎研究に対する投資の伸びを見ると、次世代材料の開発といった基礎的な部分でも、中国が相当な存在感を将来示すと考えられる。

### (8) 超電導利用

#### 送電技術の実用化：

高温超伝導の送電では、日米のみならず実用送電線の一部を高温超伝導線材に置き換える実験が進行している。特に電力インフラが弱い米国においては国家戦略として、超電導の電力応用を進めている。米国のアルバニーでの実験と日本での実験はよく知られている。米国では電力危機などの影響もあり、国家プロジェクトとして追い風ムードである。一方日本はステップバイステップで技術的問題を解決してからという姿勢がありゆっくりに見えるが、技術的な質は高い。まだレベルが達していないが今後、太陽光発電や地熱発電、風力発電などの組み合わせで、低電圧の DC 送電への応用もきわめて重要になると考えられる。

#### 送電以外の新技術：

超伝導線は送電以外にも、発電、変圧、モータといった AC 応用できわめて重要な役割を果たす。この場合は交流損失との戦いになる。最近、輸送分野で

は船の推進装置として、液体窒素を用いた世界最高出力の高温超伝導モータが IHI を中心とするグループで開発され、すでに販売されている。AC 部分での交流損失を抑えたところに特徴があり、新しい環境技術として注目される。超伝導モータの船舶への適用が、操舵性、効率等が格段に向上することからこの分野の利用も注目に値する。また、2025 年には商業運行するといわれているリニアモーターカーへの高温超伝導利用も大いに期待が持てる利用技術である。欧州では近年の風力発電機の設置ブームから、さらにはその大容量化への対応のため、超伝導回転機が期待され、2011 年製造にむけた開発が始まっている。

### (9) 膜分離技術

新素材を用いた膜の基礎研究：

米国では、最近になってナノテクノロジーを用いた新素材膜の研究成果が発表されてきている。例えば、①カーボンナノチューブを配列しその中空部を水分子や気体分子が高速で透過する膜、②ポリマーマトリックスとナノ多孔微粒子とを複合した逆浸透膜、③燃料電池の電解質膜技術を活用した耐久性に優れた逆浸透膜、④ナノファイバー不織布などを用いた新たなコンポジットメンブレンなどを挙げることができる。これらは、NSF 等のファンドを使い、複数の大学・研究機関が密に連携して進めている。また GE やジームス等電気会社が大きな力を入れており、今後欧米を中心にさらなる新技術が生まれる可能性がある。

汚れに強い限外ろ過（精密ろ過）膜の研究：

中国、台湾を中心に既存の膜素材（例えば、ポリフッ化ビニリデン = PVDF）を用いた汚れにくい膜の研究が盛んに行われている。中国では、膜を利用した水処理技術の導入が急ピッチで進んでいる。中国の原水は汚れており、膜の目詰まり（汚れ）によって膜性能の低下が起こりやすく、コスト増の原因の一つにもなっている。このような背景で、汚れにくい膜の研究が盛んに行われていると推定される。また、水処理だけでなくバイオ関連にも膜は使用できるため、バイオ分野を指向した研究も多い。

### (10) 排出ガス浄化用触媒

インテリジェント触媒：

排出ガス浄化触媒におけるナノテクノロジー利用の唯一の事例としては、ダイハツ工業（株）が（独）日本原子力研究開発機構などと共同開発したインテリジェント触媒が挙げられる。これはアルコキッド法という工業的手法を用いペロブスカイト型結晶構造を持つセラミックス粉末を合成する際に、パラジウム、白金、ロジウムといった貴金属を結晶格子に固溶させることにより、使用環境であるガソリン車の排出ガス中でナノ金属粒子を自ら形成するという新しい機構を持つ。さらに排出ガスの自然な酸化還元変動に応じて初期状態に修復・ナノ粒子形成を繰返し、劣化の支配的要因である貴金属の粒成長を抑制できる。

ディーゼル排気浄化：

欧州の排出ガス規制は1993年から開始され、日米に遅れること約15年であったが、CAPoCのような定置・定例的な国際会議（ブリュッセルにて3年ごと）の開催などの努力もあり、研究フェーズから産業応用まで着実に進化している。特に欧州の特徴として市場に占めるディーゼル乗用車の比率は50%を超え、ディーゼル排気浄化においては触媒のみならず、担体・フィルタ・制御などシステム全般にわたり技術力が高い。ダイムラー社からはブルーテックと呼ばれるNOx浄化のための尿素選択還元(SCR)システムの導入が発表されている(ただし米国市場向け)。この技術はフォルクスワーゲンとアウディも採用を表明している。また欧州では尿素のインフラ整備も進められており、大型ディーゼルトラックにおいてもSCRの導入が既に始まっている。ただしナノテクノロジーの活用はまだ始まっていない。

全世界的な課題である地球温暖化への対策として、運輸部門の早急な燃費改善が求められている。これを受けて排出ガス浄化技術も理論空燃比（ストイキオメトリ）で燃焼させるガソリン車用三元触媒だけでなく、ディーゼル車の粒子状物質（PM）とNOxを同時除去できる触媒の研究に、近年は力が注がれてきた。このような新しい技術チャレンジの中で、そのソリューション技術としてナノテクノロジーへの期待はますます高まっている。ナノテクノロジー実用化に対し、インテリジェント触媒の事例にみられるように、ナノサイズで製造するのではなく、より工業的な大きなサイズで製造し、使用環境でナノサイズに変化して機能を発現させる手法は一つの方向性を示しているものと考えられる。

#### リーンNOx触媒：

本田技術研究所は、リッチ燃焼時にNOxを水素還元してアンモニアを貯蔵し、リーン燃焼時のNOx除去に用いる新しいコンセプトの触媒を開発した。この触媒で主に機能する成分は白金とゼオライトであり、これまで日本で見出されてきた選択還元触媒の研究成果、ノウハウの蓄積が生かされている。このリーンNOx触媒と触媒付ディーゼルパーティキュレートフィルタを搭載した低公害型クリーンディーゼル車が開発されている。

#### 貴金属使用量の低減技術：

ナノテクノロジーを排出ガス浄化触媒に応用し、貴金属使用量を大幅に低減した先行事例としては、上述のインテリジェント触媒が挙げられ、自動車触媒に使われるパラジウム（Pd）、ロジウム（Rh）、プラチナ（Pt）の全ての貴金属に対しこの技術は開発実用化され、既に4百万台以上の搭載実績を持つ。

その後、日産自動車（株）も2007年7月に発表した新技術を2008年11月に実用化した。これは触媒中の構造をナノレベルで見直し、貴金属をしきり材で細かく分離することにより、貴金属同士が凝集することによる表面積の減少を防ぎ、貴金属の使用量を約50%低減できると発表している。3種全ての貴金属に適用可能で、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンのほか、自動車以外の触媒についても適用が可能な汎用性の高い技術だとしているが、床下触媒での採用に限定されており貴金属使用量の多いマニフォールド触媒（エンジン直下）の熱負荷に耐えうる技術開発が望まれる。また、マツダが2007年10月に発表し

たシングルナノ触媒も 2008 年度の新型車には搭載されていない模様で今後の実用化可否が注目される。このように自動車メーカー各社が主体となってナノテクを応用した触媒材料開発にしのぎを削り、限られた貴金属資源を有効に使う環境技術に対する日本の技術力はさらに高まっていくものと考えられる。

一方、ホンダは 2008 年 11 月に発売した新型車で先代と同じ 4 つ星（国土交通省の平成 17 年排出ガス基準 75%低減レベル）を達成しつつ、貴金属使用量を 40%低減したことを発表した。発表によると排気管をエンジンヘッド内に組み込むことにより冷間始動時の触媒暖気特性を高めたと有り、材料開発だけでなくエンジンの設計構造によっても大きな効果が得られることを実証したものであり注目に値する。

#### 脱貴金属燃料電池技術：

2007 年 9 月にダイハツ工業（株）は（独）産業技術総合研究所と協力し、従来、燃料電池車の電極触媒材料として欠かせなかった貴金属（白金）を全く使用せず、また、燃料には水加ヒドラジンを安全な状態にして使用することにより、CO<sub>2</sub> を全く排出しない燃料電池の新たな基礎技術を開発したと発表。「省資源、低コスト」「高出力」「燃料の安全かつ容易な取り扱い」が可能となる。従来の燃料電池技術で用いられていたプロトン（水素イオン）導電性の電解質膜は強い酸性のため、電極触媒材料には高い耐蝕性が求められる白金が大量使用されていた（100～200g/台）。新技術はアルカリ性のアニオン（陰イオン）交換膜を使うことにより、ニッケルやコバルトにて白金以上の発電性能を可能とした。また燃料には気体の水素ではなく、常温常圧で液体である水加ヒドラジンをを用い、自動車燃料としての充填のしやすさを確保し、インフラ整備の負荷も大幅に低減できる。バイオ燃料とは違って炭素を含まない人工燃料であり、CO<sub>2</sub> を全く排出しない。同時に水加ヒドラジンの安全な貯蔵技術も開発した。この新燃料電池技術は 2008 年 7 月に開催された北海道洞爺湖サミットの環境ショーケースにも出展され注目を集めた。今後の実用化開発が期待される。

#### (11) 環境調和・リサイクル技術（回収技術など）

##### ナノテクを利用したエコ技術：

ナノ材料製造、使用、廃棄（ナノリスク）を含めたナノマテリアルに対するライフサイクル評価の研究例が増えてきている。特にナノマテリアルの環境影響に対する注目度が上がっている。しかしながら、ナノテクを利用したエコ技術は未だ萌芽的であり、サイエンスメリットは大きいと思われる。なお、ナノ触媒技術はやや米国が先行しているようであるが、人的資源を含む基礎研究力は日本も遜色はなく、ナノ光触媒技術（触媒材料自身、アセンブリ、坦持法などの周辺技術）は我が国がトップクラスであると言える。米国と中国で共同開発された 24 面体白金ナノ結晶は高い触媒能を有しているとの報告があり、今後数年内の研究動向が注目される。

### 3.2.4 産業用構造材料(輸送・建造等)分野

#### (1) 高強度・軽量構造材料

強く伸びる材料：

金属材料は引張強度が向上すると、伸びにくくなる(延性が低下する)性質を持つ。このために複雑な形状の部品には、強度の高い材料の適用が限られていた。しかし、自動車を中心とした車両の軽量化による燃費向上と二酸化炭素排出量削減が強く求められて、強くてもよく伸びる材料の開発が進められている。例えば、鉄鋼材料では、プレス用部品に適用される鋼材の強度は980MPaが上限であったが、これを1200MPaまで向上させる取り組みが世界各国(特に欧州と日本)で活発化している。また、軽量材料の代表であるマグネシウム合金は、その結晶構造に由来して延性がアルミ合金よりも低い。この延性を向上させる研究取り組みが活発化しているが、これもマグネシウム合金の自動車への適用・軽量化・燃費向上が指向されているためである。

#### (2) 耐熱構造材料

軽量耐熱金属間化合物 TiAl の実用化研究：

自動車用ガソリンエンジンのターボチャージャーとして実用化されていた TiAl 金属間化合物が、ボーイング社の最新鋭機 B787 で GE 社製 GENx エンジンに搭載されることが決まっており、ブレードの切削加工技術、鋳造技術、補修技術の開発が欧米を中心になされている。B787 型機に搭載予定のロールス・ロイス社製 TRENT-1000 エンジンにも搭載が検討されており、日欧米の企業が競って技術開発をしている。欧州ではディーゼル車が主流で、ディーゼルエンジンのターボチャージャーへの応用もドイツ、特にベンツ社を中心に検討されている。日本は1980年代から積極的に研究開発に取り組み、研究水準では一時世界をリードしていたが、現在では欧米に遅れを取っている。ドイツが主流となり行った欧州のプロジェクト IMPRESS (Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification; 2004年から5年間で4100万ユーロ)の果たした役割は非常に大きい。

遷移金属シリサイド：

ニッケル基単結晶合金でも耐えられない温度で使用できる金属間化合物として遷移金属シリサイドが再び注目を集め、実用化に向けた開発研究が欧米を中心に始まろうとしている。雑誌 Flight International で GE 社材料部門の責任者 R. Shafrick が2010年までに航空機エンジンに Nb シリサイド合金を搭載すると明言したためである。米国では軍需産業においてこれまでに戦略的に研究がされており、欧州でもドイツの大学、フランス SNECMA 社、オーストリアのプランゼー社を中心に IMPRESS に代わる欧州プロジェクトの立ち上げが検討されている。

高温強度に優れたニッケル基単結晶合金の開発：

世界で最も高温強度に優れた合金を日本の物質・材料研究機構(NIMS)が

中心となって開発しており、航空エンジンへの適用による燃費向上、環境負荷低減が期待されている。レニウムやルテニウムなどの成分を最適量加えることにより、優れた高温強度を実現する安定した材料組織が得られ、現在、英国ロールス・ロイス社は NIMS と共同で次世代単結晶合金の開発を目的とした共同研究を開始している。

### 3.2.5 生活関連材料分野

#### (1) 繊維

従来の加工と異なりナノテクノロジーは繊維を根本的に改質することを可能にする。その可能性は無限大で、合繊各社とも、機能加工での実用範囲を拡大している。以下の3つの性質を持つ製品開発に向けての動きが注目される。

強くてしなやかな繊維：

現在、非常に強い材料または非常に伸縮性のある材料。個別に作製することは技術的に既に可能であるが、両方の性質を兼ね備えた材料を作るまでには至っていない。MITのSoldier Nanotechnologies研究所(ISN)ではこれらの材料を効果的に作る新しい方法の開発に取り組んでおり、新しい流れを作るものとして注目される。クモの糸の強さと柔軟性の合わさった秘密が、クモの糸が作られる時のナノ結晶構造を持った強化材の配列にあることを突き止め、これをヒントにして合成ポリマーでこのナノ強化材の構造を模倣する方法を見出している。高分子ナノ複合材料の用途例として、強化包装材、耐催涙性繊維(布)または生医学的なデバイスなどが挙げられる。

温度調節する織布：

天候に関係なく、夏は涼しく、冬は暖かく着用できる衣服の研究開発が進んでいる。フランスの繊維企業Avelana and Roudiere社が、“温度調節”織布を作製したと発表している。Klimeoという新しいプロセスで、純又は混合ウール繊維への塗布だけで、マイクロカプセルが繊維に組み込まれる。これらのカプセルは温度により様相を変え、冷たい環境ではマイクロカプセルは固体状で、暖かい環境では液体状になる。

健康と衛生を守る繊維：

インドの綿技術中央研究所(Central Institute for Research on Cotton Technology : CIRCOT)は、ZnO-可溶性でんぷんナノコンポジットの生成方法と、抗菌性と紫外線保護綿織物への応用について研究を進めている。簡単な水ベースの技術を使用して、水溶性でんぷん充てん剤の中にZnOナノ粒子を上手く分散させる方法を発見している。綿織物に浸透させたナノ-ZnOが、2つの代表的なバクテリアである黄色ブドウ球菌と肺炎桿菌に対する抗菌作用、および紫外線からの保護について量粉特性を示している。

#### (2) 食品技術

ナノエマルジョン：

ヘブライ大学(イスラエル)のNissim Garti教授らは、ナノオーダーのエマルジョン作成技術により、食品栄養成分であるリコピン、ベータカロチン、ルテイン、CoQ10、DHA/EPA等の栄養素を取り込んだミセルを開発している。ベンチャー企業(Nutralase社)を立ち上げ、さらにこの技術を他の企業へライセンスするなど、開発を進めている。ミセルの直径は約30ナノメートルで

あり、成分が腸から吸収されやすくなるよう設計されている。食品分野におけるナノテク応用の主用な技術の一つとして、このようなナノエマルジョン技術があり、生体との相互作用、吸収効率等に関する研究開発がおこなわれている。今後は、ナノテクを応用した食品技術が、成分の高機能化や、加工、保存技術等で広く開発されていくことが予想されるが、食品そのものの粒子径をナノオーダーにする場合には、生体内における吸収、体内動態解明、作用機構の解明など、「機能」を明らかにする研究開発が重要になってくると考えられる。同時に、生体内における食品機能を測るためのイメージング技術等計測技術も開発が進むと考えられる。

## 3.3 基盤科学技術

### 3.3.1 ナノサイエンス分野

#### (1) ナノフルイディクス・ナノトライボロジー

CNT（カーボンナノチューブ）やフラーレン、ナノダイヤモンド、オニオンライクカーボンなど炭素系のナノマテリアルを摩擦面に適用した検討が活発化している。例えば、日本や米国では、フラーレンをグラファイトの層間に配置することで、超低摩擦が得られる現象が報告されており、ナノトライボロジーのアプローチから検討が進められている。CNTを固体表面から成長させる技術が日本で開発されており、その摩擦特性が検討されている。オニオンライクカーボンはナノダイヤモンドの結晶表面をsp<sup>2</sup>構造にしたもので、タマネギの皮のような構造をしていることから、そのように呼ばれている。母材が硬く表層が柔らかいという低摩擦の条件を有しているため、低摩擦材として期待されている。

狭所に閉じこめられた液体が、バルクの液体と全く異なる特性を示すことが各機関（米国及び日本）から報告されており、最近では、固体表面との化学的相互作用、固体の格子サイズや結晶方位の影響など、液体だけでは無く、固体の影響も含めて実験およびコンピュータシミュレーションによって検討が進められている。

コンピュータ科学：

Atomic-scale Friction Research and Education Synergy Hub (AFRESH) が、フロリダ大学のグループを中心に、NSFのスポンサーシップの元に設立された。目的は、研究情報の共有化を進め、ナノトライボロジー分野の研究発展を目指すことにある。コンピュータシミュレーションを行っている研究者に加えて、実験的な研究を進めているナノトライボロジー関連の研究者も参加している。米国の大学に所属する研究者が多いが、スイス、オーストラリア、ドイツからもメンバーが参加している。日本からは、産総研から2名が加わっている。

#### (2) 界面・表面

従来はナノ粒子を調製し、個々の粒子の特性を調べ解明する、あるいは単にきれいに並べ集積するような研究が主であったが、ナノ粒子の集積による粒子間相互作用（例えばプラズモン共鳴）を利用し、より高度な機能材料を調製する方向へ研究のシフトが見られ、今後の展開が期待される（米国及び日本）。

国際雑誌刊行：

当分野に関連する国際雑誌の刊行が最近、非常に盛んである。最近では、米国化学会の“Applied Materials and Interfaces”が2009年1月から発行され、正にこの分野に焦点を当てた雑誌であり、しかも化学・材料・物理・生物の学際領域を扱うとしている。また、米国の真空学会は既に対象を真空に限定せず”

Biointerphases” をオープンアクセスジャーナルとして 2006 年より発行している。

### (3) 自己組織化・自己集合 (理論、機構、ゆらぎ)

創発化学と数理科学：

2008 年、日本のアカデミアでは 2 つの注目すべき動きがあった。①新学術領域「創発化学」(領域代表：川合知二(阪大))がスタート。有機分子や超分子の設計・合成からトップダウン・ボトムアップ融合までを通じて、階層を越えた自己組織化を実現し、学理として体系化を目指す。単なる自己集合に留まらず、非平衡下の秩序形成やゆらぎの積極的な活用も視野に入れたプロセスデザインが重要な課題となる。自己組織化・自己集合に関わる理論、メカニズム、ゆらぎのすべてが関与する構造化学的なプロジェクトとしては世界に類をみない。②CREST 数学「数学と諸分野の協働」(領域代表：西浦廉政(北大))がスタート。数学者・小谷元子(東北大)の予言する新炭素構造を材料科学者が探索する内容である。

昆虫ミメティクス：

地上で最も成功した生物である昆虫の仕組みを学び、ナノテクノロジーにつないでいこうというユニークな着想が国内外で生まれつつある。国内では下村正嗣・東北大教授が昆虫学者と材料科学者のアカデミックな連携体制を構築している。この分野は欧米が先行しており、例えば Nicolas Franceschini (CNRS&Mediterranean U.) は複眼の構造・機能研究から飛翔体の自走性を可能にする電子ニューロンの作成に至る幅広い研究を展開している。

### (4) 量子演算・新量子概念

回路 QED：

固体素子を用いた量子ビット研究は、まだ 2 量子ビットにやっと届いた段階であるが、ここ 2-3 年、ある技術が注目されている。それは Circuit QED と呼ばれるもので、もともとは、量子光学の分野で Cavity QED (Quantum Electro Dynamics) として研究されてきた物理技術である。例えばある種の原子を高い Q 値を持つ共振器に補足し、この原子と共振器が量子力学的に結合した系において、両者間で光子のやりとりをする現象である。Circuit QED では、本当の原子のかわりに量子ビットを人工原子とみなし、これと例えば外部 LC 共振器との結合構造において、先の Cavity QED 技術を展開している。いわば異なる分野の技術の転用(展開)である。日米欧の主だった研究機関での実験で、両者間の光子のやりとりによる量子ビットのコヒーレント振動の観測に成功している。この成果は純粋に物理の基礎としても重要であるが、更に量子ビットの複数化という観点からも今後重要な技術になると考えられる。即ち、複数の量子ビットがこの外部共振器に結合した構造において、個々の量子ビット間の結合・演算はこの共振器を介して行うことが可能であるからである。このような構造では、この共振器は Qu-bus (量子バス) と見なすことも可能である。ここ数年で、この方法を用いた複数量子ビット間の演算が実行されるで

あろう。これは世界的傾向である。

※：ただし、複数量子ビット間の結合方法は、勿論これ一つに限らず、例えば結合用の量子ビットを間に入れるなどの方法も試みられている。

### 3.3.2 材料設計・探索分野

#### (1) 計算科学・シミュレーション

計算科学、シミュレーションへの産業界からのニーズの高まり：

計算を材料開発に応用する研究については、日本ではバブル経済の時期にブームが訪れた。しかし、実際には当時の計算能力や計算技術でカバーできる材料科学的課題は極めて限定的であり、経済状況の失速と共に、計算科学は材料研究に役立たないという負の印象だけを残して、ブームが終焉を迎えた。21世紀に入り、計算能力や計算技術が大幅に改善され、温度や化学ポテンシャルなどを正確に取り入れた材料科学的な課題を実際に計算で解決できるようになり、再び計算科学への意識が高まってきている。産業界は新たな研究投資に必ずしも積極的ではないが、現在の計算科学への興味はきわめて高い。産官学での第一原理に基づいた研究を支援する機関として、たとえば2008年度に（財）ファインセラミックスセンター内にナノ構造研究所が開設され、活発な活動を行っている。近い将来に、計算科学による材料開発の成功事例が多数認識されるようになるかと予想される。

計算材料科学の人材養成：

計算技術の進歩に伴い、材料科学計算を実践的に行うことのできる人材育成が急務となっている。国際高等研究所（京都府相楽郡）は、コンピュータショナル・マテリアルズ・デザイン ワークショップという人材養成セミナーを10年近く開催し、人材養成に大きく貢献してきた。文部科学省科学技術振興調整費では新興分野人材養成「計算機を活用した物質・材料・プロセス開発」（H14～H18）プロジェクトにおいて、東北大学・日本再生のためのコンビナトリアル計算化学および京都大学・計算材料研究者養成ユニットが実施された。さらに、次世代スーパーコンピュータプロジェクトの計画に合わせ、計算物質科学連絡会議を中心に様々な活動が始まっている。人材養成としては、たとえば神戸大学工学研究科にシミュレーション工学コースが設置された。

量子化学や第一原理計算の進展：

実験的には困難な条件（高温、高圧、等）でも、計算としては容易なものがあるが、逆に実験としては簡単であるが計算にその条件を入れるのが困難な場合がある。例えば電気化学系がそうであり、燃料電池やリチウム電池のように我々にとって必須の技術、を量子化学や第一原理計算の立場から正確に計算するのはこれまで困難であった。最近、均一な溶液系でのレドックス反応の第一原理分子動力学計算が可能になり、そのレドックス電位の推測ができるようになった。さらに最近では、電場のかかった電極上での反応が扱えるようになってきた。また、電解質膜中におけるプロトンなどのイオン伝導についても、計算条件として均一電場の導入などが可能になり、これまで不可能であったが実操業上重要な水輸送の計算などが可能になってきた。これらは日本の貢献も大きい。量子化学からのアプローチ、および物性物理の分野で発展してきた第一原理分子動力学法を化学反応などに使うアプローチの2系統で研究開発が進ん

でいる。

#### コンビナトリアル計算科学：

従来、計算科学・シミュレーションは、既に実験的に知られている現象のメカニズム解明に利用されることがほとんどであった。これに対し近年では、計算科学を材料開発のための高速スクリーニング手法として活用するコンビナトリアル計算科学技術に注目が集まっている。本技術は日本において提唱され、NOx 分解触媒の理論的高速スクリーニングに応用され注目を浴びた。その後、海外でも同様の手法が活用されるようになり、水素吸蔵材料、燃料電池触媒などに成果が得られている。

#### 第一原理材料熱力学計算とマテリアルズインフォマティクス手法：

材料科学での基軸学問体系となっている熱力学・統計力学をもとにしたシミュレーションとデータベースを組み合わせた研究に、量子力学に基づいた第一原理計算を統合することにより、相平衡、相転移、化学反応、状態図など材料科学における基盤的情報を実験的情報なしに正確に計算できるようになってきた。これを第一原理熱力学あるいは第一原理統計熱力学と呼ぶ。このような計算を実施しているのは、日本を含め世界全体で10に満たないグループであり、まだ黎明期にあるが、日本が世界をリードできる可能性がある。バイオ分野でのバイオインフォマティクス手法が、実験による多量のデータ取得、データの選別と加工、解析（統計的手法、データ・マイニングなど）を通じてゲノム創薬に大きく貢献した例と同様に、第一原理計算結果による多量のデータ取得と最新の情報科学手法に基づいた統計処理を行うマテリアルズインフォマティクス手法が、従来法とは根本的に異なる材料設計が可能とすることが予想されており、大きな注目を集めている。

#### マルチスケール力学シミュレーション、電気特性シミュレーション：

安心・安全社会を支える社会基盤材料を的確に利用するためには、材料の原子レベルからメートルレベルの実部材に至る10桁に亘るスケール横断の議論を行う必要がある。これを目的として、分子動力学、結晶転位論、結晶塑性論、多結晶塑性論、連続体力学、マイクロメカニクス、フェーズフィールド法など様々な階層での力学シミュレーションが行われるようになり、日本では、これら相互を繋ぐマルチスケール計算技術が開発されはじめている。また、10桁のスケール横断が包括的にできているわけではないが、一部の計算技術は、鉄鋼材料、非鉄材料、高分子材料、セラミックス材料および複合材料などの設計に利用されはじめ、すでに産業応用の範囲が広がりつつある。

また、量子科学を活用して電気伝導度をはじめとする材料の電氣的性質を予測することが近年では可能となり、デバイス設計への応用が期待されるようになってきた。さらに最近では、量子科学によって得られた電気伝導度や誘電的性質を $\mu\text{m}$ から $\text{mm}$ スケールのデバイスシミュレータに展開するマルチスケール電気特性シミュレーション技術の発展により、量子論に基づき非経験的にデバイス設計を実現できる技術が開発されている。このマルチスケール電気

特性シミュレーション技術は、半導体デバイス設計を格段に高精度化するものとして、その産業競争力へのインパクトが注目されている。

フェーズフィールド法による材料組織設計と特性計算：

物質と材料を区別するものは、組織や高次構造であり、その組織形成や設計、与えられた物質における組織に依存した各種特性（磁気特性、誘電特性、力学特性など）をシミュレーションすることは、極めて重要である。このような計算は、フェーズフィールド法によって効果的に行うことが可能である。金属の凝固組織や結晶成長現象のシミュレーションに端を発したこのような計算手法は、現在では、日本をはじめ世界的に、様々な機能材料のナノからメゾスケールにおける材料組織設計・特性最適化のために広範に利用されるようになってきており、材料設計ツールとして不可欠なものとなっており、今後のさらなる発展が期待される。

分光分析技術の高性能化に伴う高精度計算のニーズの高まり：

日本では、ナノテクノロジー・材料分野の最先端評価装置の近年の技術革新が著しい。たとえば SPring8 や KEK-PF などの放射光を用いた X 線解析、J-PARC などでの超高分解能中性子回折、各所に設置が進められているサブオンブストローム分解能での走査透過型電子顕微鏡および電子分光装置、超高分解能表面分析装置、超高感度核磁気共鳴装置などに大きな進歩が見られ、得られる情報の質が格段に向上してきた。これは欧米においても同様で、中国や韓国もそれに続こうとしている。実験情報の精度が上がると、それに基づいて材料の高度な制御が可能となるが、同時に実験情報を解釈するための理論計算にも高い精度が要求されるようになる。最新の第一原理計算に基づくと、複雑結晶の原子配列や、欠陥構造の詳細な情報が得られるとともに、各種のスペクトルを計算によってシミュレーションすることが可能である。

## (2) DB の構築

NIMS 物質・材料データベース MatNavi：

NIMS 物質・材料データベースは 2003 年 4 月に Web で公開 (<http://mits.nims.go.jp>) され 5 年半が経過した。結晶基礎 DB、計算物性 DB、拡散 DB および高分子 DB などの基礎物性から構造材料の強度 DB など 11 種類のデータベースを公開するとともに外部機関とのリンクを張り材料データベースのハブの機能をはたしている。2008 年 10 月 30 日で 125 ヶ国、11,935 機関から 40,630 人（国内 29,554 人、海外 11,076 人）がユーザ登録している。アクセス数は毎月 100 万件を超えている。これらのデータベースのデータのさらなる充実とユーザビリティの向上が望まれている

Asian Materials Database Symposium (AMDS 2008)：

2008 年 1 月 30 日 -31 日に韓国と日本の共催で韓国済州島において Asian Materials Database Symposium2008 が開催された。韓国 (KMAC、KIMS、KICET、KRICT)、日本 (NIMS、AIST、豊田工大)、中国 (北京科技大、

MRI) および米国 (NIST) からそれぞれの機関の材料データベース構築の現状と計画が報告された。次回は 2009 年中国で開催される。

Materials Bank :

韓国では 2007 年から国家プロジェクトとして 10 年計画で Materials Bank の構築がスタートした。Korea Institute of Materials Science (KIMS) が Metals Bank、Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech. (KICET) が Ceramics Bank および Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT) が Chemical Materials Information Bank を Korea Materials & Component Industry Agency (KMAC) の統括の下で構築する。上記の AMDS を通じて関係各国は情報交換を行っていく。

マテリアルインフォマティクス :

バイオインフォマティクスという言葉に象徴されるように、インフォマティクス技術は世界的にもバイオ分野を中心として発展してきた。これに対し、最近では材料分野においても、インフォマティクス技術、データベース技術を活用した新材料開発に強い期待が集まっている。しかし、世界的に見てもこの分野は十分に立ち上がっていない。この動向に対し、コンビナトリアル手法を活用した大量合成・大量同時計測技術の発展、さらにはコンビナトリアル計算科学を活用した理論的大量評価技術の発展を基礎に、日本においてもマテリアルインフォマティクス技術の開拓が開始されたばかりである。アメリカでは NSF による IMI-COSMIC、EU では TopCombi プロジェクトの中心課題としてファンディングされている。COSMIC のパートナーとして日本では NIMS・大学連携の Comet プロジェクトが指名された。

コンビナトリアル計算科学によるデータベース構築 :

従来、データベースは実験によって得られた結果を集計することで構築されてきた。しかし、異なる実験条件で得られた結果が同一データベース上にまとめられている、データの信頼性が評価されないままデータベース化されている、データの維持・更新に大きな労力を必要とするなどの問題点が指摘されている。

これに対し、日本では最近、理論計算の信頼性の向上と計算速度の高速化の実現により、計算科学をコンビナトリアル的に活用することで理論に基づくデータベースを構築し、材料開発に活用しようという試みが行われている。特に、全ての材料について同じ信頼性が実現できること、データの維持・更新が容易であることなどから、今後の動向として注目される。

### (3) 新材料設計・機能設計

元素戦略プロジェクトの推進 :

希少元素の代替、原料、循環や、元素の持つ新機能を導き出し世に出していくためのプロジェクトが、文部科学省で行われている。この中では、既存の機能の発現要素に立ち返り、そこから新材料の設計や機能設計を行う取り組みが為されている。ディスプロシウムを必要としない超高性能磁石や、ITO の代替

材料の開発、新規熱電材料、貴金属を用いない自動車用触媒等、注目すべき多くの研究開発が行われている。

急激な透明アモルファス酸化物半導体の本格研究の立ち上がり：

透明アモルファス酸化物半導体 (TAOS) というこれまで殆んど注目されていなかった新しい半導体の研究が世界中で急速に立ち上がっている。新材料の設計・機能設計の成果により、ガラスのような透明なアモルファス物質が、現在の LED ディスプレイに用いられているアモルファスシリコン TFT よりも 1桁大きな移動度を有し、かつプラスチック基板上にも形成できるような低温で、しかも汎用のスパッタリングで作れるようになった。TAOS の提案 (1996年) と TAOS-TFT の試作 (2004年 11月 27日、Nature) は、東工大グループによっておこなわれたが、後者の論文が発表されて以降、大学だけでなく、世界的な大手企業が相次いで有機 EL ディスプレイや電子ペーパーを相次いで試作、および次世代 LCD のバックプレーンとしても検討など応用に向けた本格研究が始まっている。このような急速な実用に向けた本格研究の開始された原因は、次世代 FPD としての有機 EL のバックプレーンとしての期待によるものである。20年という歴史のある低温ポリシリコンのみがその候補であったが、TAOS というダークホースが現れたという状況である。

#### (4) 材料探索手法 (ハイスループット、コンビナトリアル)：

触媒、ポリマー分野における高速合成技術：

日本のものづくりの強みのひとつは、その道一筋の名人による伝統技術やノウハウの蓄積、伝承にある。その一方で、環境、エネルギー等の社会ニーズ、あるいはエレクトロニクス、IT、バイオ、ナノテクノロジーの進化のスピードは材料・デバイスサイクルを短縮し、新製品開発の可能性と国際競争を激化させ、研究開発の方法についてのイノベーションをもたらしている。医薬を中心とする有機合成に始まったコンビナトリアルケミストリーの装置は企業に広く導入されているが、国内の大学や研究所開発のシステムは、固体材料・デバイス研究用を除くと極めて少ない。欧米では、コンビケムが触媒やポリマー分野に展開し、活発な産学連携研究によりハイスループットな開発ツールが製品化され、普及している。韓国でも、2008年夏には第一回コンビナトリアル触媒国際シンポジウムを開催し、新たな研究手法の採用に積極的に取り組んでいる。大学主導の触媒学会や高分子学会でも、この分野の研究発表はほとんど取り上げられていない。このような方法論変革の動きに日本は鈍感であることが、第一の注目すべき動向と言えよう。

電子材料分野におけるコンビナトリアル材料開発技術：

急速に新材料の必要性が求められている半導体材料分野で、最先端プロセスラインに投入できるコンビナトリアル材料合成措置とその評価システムが開発され、半導体材料製造メーカーで話題になっている。この会社は Intermolecular 社で、シリコンバレーに誕生した半導体材料開発を専門とするベンチャー企業であり、ここ数年で急速に成長している。社員は大半が元半

導体企業が関連する装置メーカーの出身であり、顧問にもスタンフォード大学教授や企業経験者を連ねている。特徴は 300mm 基板を使っでの材料開発であり、ゾル-ゲル法やスパッタ法も取り入れた装置とその評価装置、材料委託開発などのビジネスを展開している。半導体分野では研究開発コストが年々、上昇しているが、この開発の材料開発のアウトソーシング先として今後の発展が期待される。これまで層間絶縁膜絶縁膜用の拡散防止膜や新誘電体材料の開発に短期間で成功し、注目された。300mm 基板をつかうことで、最先端プロセスラインへの投入や既存の LSI テスターとの互換性も確保し、企業にとっても魅力ある装置となっている。日本でもビジネスを展開し始めているが、知財の確保も狙っており、今度の動向が注目される。

材料ライブラリー、インフォマティクス分野の展開：

「日本の大学はなぜ薬をつくれぬのか?」、という問題が提起されている。法規制もさることながら、基本的な問題は（薬品）合成化学の研究室において、化合物の構造および薬理活性に関する情報（データベース）と、両者を結びつけ新物質を設計するデータマイニング技術情報の蓄積（化合物ライブラリー）が少ないことが挙げられている（現代化学、2008年、5月号）。特定物質の合成技術には優れていても、望みの機能を有するリード物質を設計し、高速合成ルートを予測する計算科学（インフォマティクス）への取組みは不足している。マテリアルに関するインフォマティクス技術の開発は、アメリカの NSF 支援による IMI-Cosmic、EU の TOPCOMBI などのプロジェクト研究が進行している。日本でも予備的検討は始まっているが、このような、実体的、即効的でない研究への支援の道は細い。国際的に通用するライブラリー構築に対する積極的姿勢、データフォーマットの互換性や言語の共通性など、国際標準に関わる欧米との連携戦略が重要と考えられる。（「コンビナトリアルテクノロジー」第7章（丸善、2004）；先端科学技術動向、2006年1月号、Feature article #2（2006）など）

### 3.3.3 ナノ計測・評価技術分野

#### (1) 走査型プローブ顕微鏡

バイオ高分子反応観察：

光では波長による制限のためモーター蛋白等の形の変化の検出が出来ず、分子を点として点の動きを観察していた。他方、液中 AFM では、金沢大の安藤教授らによる高速化と京都大の山田准教授や金沢大の福間准教授らによる原子・分子分解能達成により、生体分子反応やモーター蛋白等の液中での分子形状の変化を実時間で精密観察できる可能性が出てきた。今後、バイオ高分子反応の観察は、光を用いた観察から高速・高分解能液中 AFM を用いた観察に変わるものと思われる。

複素ナノ構造体の設計と原子操作による組立：

未来の高機能なナノ材料やナノデバイスは多元素による機能とナノ構造体による量子効果の融合による未知の画期的な複素ナノ構造体となる可能性がある。このような複素ナノ構造体を、実験的に、個々の原子を元素識別して選択した特定の元素を設計どおりの位置に原子操作して設計どおりの複素ナノ構造体を組み立てる基盤技術が大阪大学の森田教授グループにより開発された。

自己検出型 AFM センサー：

ドイツの Giessibl 教授が開発した超高真空 STM 装置とコンパクトな水晶振動子をベースにした q-Plus センサーと呼ばれる自己検出型 AFM センサーの感度・分解能・用途・測定例が急速に向上・発展しつつあり、原子を越える分解能 (Subatomic feature) の観察や原子操作時の水平力の測定、原子分解能の STM/AFM 同時測定なども可能になってきた。市販装置の販売も始まり、今後、高分解能・高機能 AFM の主流となると予想される。

カーボンナノチューブに内包されたフラレン分子の観察：

ドイツの Wiesendanger グループの芦野研究者らにより、カーボンナノチューブに内包された金属フラレン分子で内部観察だけでなく三次元の力の分布やエネルギー散逸マップが原子分解能測定可能となった。これは、AFM による原子分解能内部観察・分光へつながる非常に重要な研究である。

磁気交換相互作用力顕微鏡：

ドイツの Wiesendanger グループの A.Schwarz らにより、NiO (001) 表面や Fe/W (001) 表面で磁気交換相互作用力の精密な AFM 測定が原子分解能で可能となった。この手法はスピン偏極 STM と相補的なスピン情報を与えるだけでなく、STM では不可能な絶縁体のスピン分布を原子分解能で研究可能な画期的方法となる。

低温・磁場中 STM：

2006 年、非弾性トンネル分光によってカールスルーエ大学の Wulfhekel ら

は強磁性体探針を用いたマグノン励起の観察に成功している。このようにスピンSTMは直接的にスピンの励起状態を実空間で観察することも可能となった。

レーザー干渉計搭載型 AFM :

計測用の AFM には、1) 高精度な精密ステージと 2) ステージの移動距離を測るセンサーが必須である。これまで、各国の国家計量標準機関 (NMI) がレーザー干渉計搭載型 AFM を独自に開発してきた。また、独の SIOS Messtechnik 社が 25 mm x 25 mm x 5 mm で分解能 0.1 nm の高精度・高走査範囲の精密ステージを有する三軸レーザー干渉計搭載型 SPM (NMM-1) を開発した。NMM-1 は東南アジアの NMI に普及しつつある。

## (2) 電子顕微鏡

透過型電子顕微 (TEM) 鏡装置球面収差補正器 :

電子顕微鏡の分解能を高める装置として、近年、球面収差補正装置が開発された。この理論はドイツの研究者が考案したものである。大学の基礎研究では日本は遅れをとっているが、企業は既に追いついたと思われる (日本電子)。日立はドイツ CEOS 社製収差補正機を用いた STEM 専用機を開発、市販している。

TEM 電子線分光器 (エネルギーフィルター) :

ナノ局所化学状態分析を可能にする電子線エネルギー分光器は、ドイツのカールツァイスとアメリカのガタン社により開発・製造されており、日本メーカーは技術開発に大きく遅れている。ドイツでは次世代エネルギーフィルター TEM を国家プロジェクトで開発を進めている。

透過型電子顕微鏡 (TEM) 用色収差補正機構 :

球面収差の次に補正される収差として色収差が挙げられる。色収差が低減すれば、TEM 像のコントラストが改善されると同時にエネルギーフィルター像の SN 比も向上する。この色収差補正装置としては、現在米国 TEAM プロジェクトと CEOS 社がプロトタイプを開発中である。日本でも開発に取り組むメーカーが現れた。

高輝度電子銃とモノクロメータ :

電子銃に関しては、日立ハイテク社の冷陰極電子銃や日本電子社のショットキー型電子銃が高性能で汎用型であったが、近年 FEI 社が高輝度でありながらエネルギー幅の狭い電子銃の開発に取り組んでおり、日本のメーカーにとっては脅威である。また FEI 社は STEM と組み合わせても分解能が劣化することなくエネルギー分解能を向上させられるモノクロメータの開発についても順調である。

TEM 電子線トモグラフィ :

3 次元画像を構築する技術であり、FEI 社が世界に先駆けて製品化に成功し

た。日本メーカーも近年力を入れて開発している。

#### 電子顕微鏡関連国家プロジェクト：

米国では TEAM プロジェクトという 1 億ドル規模の超大型の国家予算が計上されている。最新の収差補正レンズを最適化した電子顕微鏡本体、高圧電源などシステム全体の再設計を検討するプロジェクトであり、米国 FEI 社と 5 カ所の大学との共同プロジェクトである。米国の 5 カ所の大学・研究所に最新の収差補正電子顕微鏡を導入する。すべてフィリップス社の電子顕微鏡に CEOS 社の収差補正機構を組み合わせたものである。欧州では、英国の Super STEM プロジェクト、EU の ESTEEM プロジェクトなどが走っているが、どちらも TEAM プロジェクトに比べれば規模が小さい。最近ではデンマーク技術大学に大型の電子顕微鏡センターの設立計画があり 2007 年現在すでに着工した。

#### 走査型電子顕微鏡 (SEM) の技術動向：

SEM は汎用機器として TEM に比べ製造台数は多く、研究分野での普及率は高いが、新しい研究・技術のトピックは無かった。しかし、近年ドイツのカールツァイス社が開発した、インレンズ検出器を装着した SEM は従来の SEM に比較し、低加速電圧により試料表面の微細構造観察が可能になり、金属、高分子等の材料解析において、インパクトのある成果が出ている。

#### 環境制御型 TEM：

差動排気システムを利用し、試料近傍だけを低真空に保つことにより、水などを含有する試料を乾燥せずに観察することが可能となり、生体試料のありのままの観察が可能となる。この様な装置の開発が、デンマーク、ノルウェイの大学、阪大が FEI 社の TEM をベースに進めている。

### (3) 放射光・X線計測

#### X線自由電子レーザー：

X-FEL は、波長 0.1 ナノメートル以下の X 線領域において、100 フェムト秒以下の極短パルス及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って、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あるいは極めて困難な分析が可能となる。2008 年末の時点において、米国 (SLAC)、日本 (理化学研究所)、ヨーロッパ (DESY) で建設が進められている。

#### 日本における産業利用：

エレクトロニクス、素材、製薬など分野の広がりも利用企業数も欧米を凌駕し、その傾向はしばらく継続する。ほとんどの企業が自ら研究者を派遣して実験する。利用企業の増加と多様化(業界、将来研究から今の事業)は引き続き増大する。

測定装置、X線検出器、解析ソフトなどで、企業の開発は多量の民生需要が見込めるものに限定され、かつ少ない。

#### ナノスケール 3D イメージング：

世界的な研究の潮流は放射光の特性を生かした、X線によるナノスケールのイメージングがあげられる。原子分子レベルの物性や化学反応の解明に利用できるのも近い将来可能になると期待できる。特に米国ではこの分野に力を入れており、新しい研究施設（ビームライン等）が稼働始めた。

#### 陽電子ビームを利用したナノスケール空孔計測法：

陽電子寿命測定によるナノスケール空孔計測法の技術開発など、エキゾチックな粒子線・放射線を利用した新しい計測法は、日本が世界に先駆けている分野が多い。陽電子ビームは、原子炉（独）、電子線加速器（日、中）、放射線同位元素（米）などを利用して発生させる。JST 先端計測プロジェクト「透過型陽電子顕微鏡」において、陽電子マイクロビームの開発が行われており、将来の非破壊 3 次元空孔計測技術開発の基礎となる成果が得られるものと期待される。

### (4) 単分子分光

#### 増強メカニズム解明：

単一分子感度ラマン分光のための 2 つの増強メカニズムのうち、「電磁気学的増強」におけるジャンクションモデル（プラズモンカップリングにより金属ナノ構造体間の空隙に形成される巨大電場による増強）について、種々の実験・理論計算による証拠が報告されている。近接場分光により、ナノ構造体内部の局所的なラマン散乱強度の空間分布を通して、直接解明されると期待される。単一分子検出に必要な、もう一つのメカニズムである「化学的増強」に関して、アニオンによる活性化機構が日本のグループにより最近解明され、金属表面と分子間の電子的相互作用増大に伴い、金属電子の非弾性散乱が観測されている。1 分子の局所的な環境における電子状態の実験的及び理論的研究が進み、近い将来増強メカニズムの完全な解明が期待できる。

#### ギャップモードによる単一分子感度ラマン分光：

上記ジャンクションモデルを縦型にしたギャップモード（STM や金属コートカンチレバーを有する AFM プローブと金属基板間のナノメータギャップに形成される局在プラズモンモードであり、単一分子感度を与えうることが 1980 年代から理論計算で予測されていた）により、ドイツ（MPI）や中国（Xiamen Univ.）のグループをはじめとして、15nm の空間分解能で単結晶金表面の 1 分子のラマン検出が可能となりつつある。規定された電極表面での単一分子の吸着特性・反応性を直接解明する技術として確立される可能性がある。AFM プローブ方式では、コートした金属のシェル構造や島状膜における複雑なプラズモン共鳴が利用しにくいいため、単一金属ナノ粒子をプローブ先端に固定する方式が、今後利用されると考えられる。

### (5) 3次元計測（リアルタイム含む）

He イオン顕微鏡：

半導体集積回路の微細化に伴い、表面感度がより高く、微細な構造を正確に測定する手法の開発に興味を持たれている。最近、走査電子顕微鏡と同じ原理であるが、He イオン顕微鏡が半導体分野で注目されてきた。He イオンビームの安定性が不足するため実用化に至らなかったが、SEM の分解能限界が近づいたためもあって急速に性能の向上が図られており、最近、分解能はサブ nm に達するとされる。技術開発は米国などで行われている。

放射光三次元イメージング：

従来から国内では SPring-8、米国 APS、欧州 ESRF などでの放射光イメージング及び 3次元化（トモグラフィ）技術開発が取り組まれているが、産業界のニーズも合わせ、技術開発への取り組みは更に加速すると考えられる。X線 CT に留まらず、陽電子（透過型）顕微鏡や中性子 CT の技術開発動向にも注目すべきである。

TEM による厚膜三次元化技術：

従来、加速電圧 300keV 程度までの汎用 TEM を用いた 3次元化は、サブミクロン厚さの試料片からしか実施できないとされてきたが、欧州や日本で、焦点深度を挙げる照射系を導入することにより、ミクロンオーダーの厚膜から 3次元化を行う技術開発が取り組まれている。超高圧電子顕微鏡を用いずに厚膜の 3次元情報を取り出せる本技術は、X線 CT と TEM とのギャップを埋める汎用技術として注目される。

### (6) ナノ粒子評価（形状・分布・表面活性・動態解析）

液体中のナノ粒子個々の動きとサイズを直接計測：

英国 NANOSIGHT 社は、液体中の個々の粒子からの光散乱強度を CCD カメラで直接位置観測しながらビデオ記録することによって、それらのブラウン運動の解析からサイズ分布を導出するシステムを開発した。従来のシステムでは多くの粒子からの光散乱強度（平均値）の情報のみを計測していたが、この新システムでは、個々の粒子をピックアップして動的観察（局所計測）を行うことを可能にした。異種粒子の混合溶液などの計測などに多大な威力を発揮する。

微小サイズの液中粒径計測：

数 10nm 以下の微粒子を計測する新技術として誘電泳動現象を利用して形成した周期的な粒子密度変調が拡散によって消滅する仮定を回折光として計測し、その拡散係数から粒子径を求める方法が考案されている（島津製作所の発明）。

ナノ粒子実試料を *in situ* 計測：

従来、ナノ粒子を乾燥などの工程を経ずに溶液状態のまま *in situ* 計測しようとする場合、動的散乱法 DLS が用いられることが一般的であった。しかし、

通常の DLS 法では、ナノ粒子が十分に希薄な状態でない限り多重散乱による影響が大きく、正確な測定を行うことが難しかった。ドイツ Sympatec 社や、スイス LSI Instruments 社が開発した装置は、多重散乱の影響を消去するため試料にレーザー光を 2 本入射する方式を採用し、より実用に即した濃度のナノ粒子溶液を希釈などの手順を踏むことなく *in situ* 計測することが可能となっている。

### (7) 標準（物質・計量・評価法）

半導体集積回路製造のための長さ標準物質：

半導体集積回路製造において正確な長さスケールの必要性が高まっている。日本では昨年 12 月に最小間隔ピッチ 100nm の標準物質供給が開始された。半導体回路線幅 90-65nm のプロセスにおいて、寸法計測のために測長 AFM や測長 SEM の校正に利用される。国際単位にトレーサブルな長さスケールとしては世界唯一のものである。今後のデバイスの微細化に伴い、さらに小さいピッチのスケールが必要になる。米国では、線幅が数十 nm という、世界最小の線幅標準が開発されている。

AFM 装置校正用標準試料と校正技術：

産総研計測標準研究部門は世界最小 25 nm から 100 nm ピッチを有する標準試料（面内方向スケール）を開発し、レーザー干渉計搭載型 AFM で正確に値付けを行っている。また、値付けされた標準試料を用いた市販 AFM の校正技術開発はハードウェア・ソフトウェアとも欧州の NMI を中心に進められており、市販の AFM 校正手順の標準化が進められている。

AFM 探針形状評価技術：

カンチレバープローブ先端の探針形状が磨耗により変化するため、AFM を用いたナノ計測の高精度化には探針形状評価技術の開発が欠かせない。米国 NIST（米国の NMI）は、半導体製造ライン用の CD-AFM（米国 Veeco 社製）のフレア型探針形状を評価する標準試料（SCCDRM）を開発した。また、産総研計測フロンティア研究部門は通常の AFM カンチレバープローブの探針形状評価用標準試料を開発した。

EUV 露光装置のための標準：

半導体製造分野で回路パターンを焼き付けるための EUV（波長 13.5nm）露光技術は、回路線幅 32nm から導入され、以降の 22nm 世代までの微細化を推進する技術として期待されている。多層反射率測定標準など、EUV 露光装置のための標準計測研究が米、独で進められている。

陽電子寿命測定法以外の空孔計測技術：

X 線などによる空孔計測として蒸気吸着と X 線反射率測定を組み合わせた技術の開発が米国標準技術研究所で行われている。市販の X 線反射率が利用できる注目の技術である。X 線散乱、中性子散乱などを利用した空孔計測

も行われている。

ディーゼル・エンジン排ガス規制と標準：

2011年の欧州ディーゼル・エンジン排ガス規制に向けた標準の開発がトピックスである。日本では排ガス中に含まれるナノ粒子数濃度の測定装置のトレーサビリティ確保に必要な粒子数濃度の国家標準を世界に先駆けて開発した。排ガス中ナノ粒子数濃度の規制のために、凝縮核計数装置（CPC）が利用される見込みであるが、この装置は米国企業が極めて大きなシェアをもっている。

## 3.4 関連共通課題

### 3.4.1 共用研究開発拠点(融合・連携促進)

中韓の大型共用拠点連携：

中国と韓国の大型共用拠点が2007年にMOUを締結している。北京の国家ナノ科学技術センターと韓国の国家ナノ・ファブ・センターである。双方の共用施設運営形態が比較的似ていることが有利に働いたと考えられる。一方、日本では、両国で共用拠点事業が開始される前に、それぞれの国のキーパーソンを招聘してワークショップを開催するなど、共用施設策について先駆的ではあったものの、諸制度の縛りがあって国際的な連携が十分に取れない状況にある。共用施設にて実施される前競争的な研究開発分野に関しては、特にアジア諸国との連携を進めておくことが日本にとっても重要と考えられる。

韓国の国家ナノテク計画：

「韓国における国家ナノテクノロジー計画」には「国家の一貫した関与と国際ネットワークを保持したままでの機能的独立性」の重要性を指摘する箇所がある。このような認識を持つ指導者がアジア各国が増えてくると、日本の共用拠点の国際的な重要性・プレゼンスは相対的に低下することになると思われる。より具体的に、日本の共用施設においては、独法における関係規程の縛りにより運転資金を国費に頼るほかない状況にあり、外為法により国際的な人材交流に縛りがある。

産学の拠点利用：

大型共用拠点は産業界とのつながりが密に、一方、大学の共用施設などが連携するネットワークでは学会とのつながりがより密になるという傾向が出ているように思われる。これら双方を適切に使い分け、それぞれに推進しているのが台湾であろう。

### 3.4.2 教育・人材育成 (ナノテクリテラシー含む)

NNIN :

アメリカの国家ナノテク基盤ネットワーク (NNIN) では、学部学生のための研究訓練 (REU) プログラムを 10 年間以上も継続している。このプログラムに参加する学生は会議に召集され、共用施設拠点でのインターンシップ成果を発表している。日本の大企業を含む民間企業スポンサーがついており、インターンシップ生は Web 上で見えるようになっている。優秀な人材が産業界への途を拓くことができ、また動機付けとしてもプログラムには多彩な仕掛けがなされていて、極めて高い完成度である。

### 3.4.3 国際標準・工業標準

ナノテクノロジーの国際標準化：

これまで、国際標準化活動は主に関係者の手弁当で進められてきたが、2007年度より単層ナノチューブへは NEDO の飯島プロジェクトから、多層ナノチューブとフラーレンについては経済産業省基準認証の開発事業として活動資金の配分が認められた。また産総研を中心とする国内審議活動に対しても経済産業省/NEDO からの資金が充当されてきた。このような公的な援助は、国際標準化活動への旅費等の資金的補助という側面のほかに、国の科学技術政策の一環として国際標準化活動が進められているというインセンティブを与えることになり、民間企業からの参画を容易にしている。またナノ粒子の製造やナノ計測の企業からの多くの参画者が集まりやすくなることで、国際標準化活動に対する人的リソースが育ち、その質が高まっている。僅かではあっても、公的資金が充当されることでこのような大きな戦略的波及効果が生まれる。出来るだけ速やかに産総研から民間事業者を中心とした国内審議の体制へ移行し、民間事業者のなかから標準化活動を支える人材を育てていくことが望まれている。

ナノカーボン材料の標準化：

ナノカーボン材料、とりわけカーボンナノチューブについては製造からキャラクタリゼーションまでの技術分野では日本が強みを持っている。現在 ISO の国際標準化活動のなかで日本が主導的役割を果たしている背景である。ようやく日本からの積極的な対応がとられた 2007 年末に、ドイツが主導して米国と共同でもうひとつの国際標準化機関 IEC のなかにナノテクノロジーの標準化のための技術委員会 TC113 を設立した。既に電子機器用のカーボンナノチューブの純度の評価法といった具体的な提案が行われている。米国とドイツのナノエレクトロニクスに関する基本特許は日本に比べかなり強い。現在 IEC へは日本から JEITA が中心に対応を行っており、産総研からもカーボンナノチューブの専門家の対応が取られているが、包括的で戦略的対応が取られているといった状況にはない。ナノエレクトロニクスの産業としての展開を睨んで、今後さらにナノエレクトロニクスに造詣の深い戦略的な人材の配置が望まれる。また公的研究機関にはスピントロニクス等のナノデバイスに深い造詣を有する研究者が多く、日本が主導できるようなテーマを戦略的に抽出して IEC に持ち込むような戦略議論が必要であろう。

一方 2008 年に入って以降、アメリカにおけるナノカーボン材料の管理策が大きく動き始めている。2008 年 9 月には、英国企業 Thomas Swan Ltd. の米国支社 Swan Chemicals が米国環境保護庁との協議の結果、同社が製造するカーボンナノチューブ 2 種を有害物質規制法 (TSCA) の定める新規化学物質として製造前届出を行うことを決定した。製造前届出は TSCA の条項に添った申請が求められること、さらに製造者は多層 CNT のサンプルと MSDS の提出、ラットを用いた 90 日間の吸入毒性試験の実施、材料の解析データの提出、グローブの使用および政府機関認定のマスクの着用といった労働衛生の確保が求められることになる。このような背景から、今後吸入暴露試験が重要視されるように

なってくると思われる。また同様な取り扱いが、単層 CNT についても行われるものと思われる。

### 3.4.4 社会受容・EHS・ELSI

世界的な規制の流れ：

EHS や ELSI の課題は直接的に規制策に結びつく課題である。2000 年以降を俯瞰したとき、まず空白の一年と呼ばれる 2000 年の鉛フリーハンダの日米間の特許紛争、2001 年の日本製ゲーム機器のオランダ税関での差し止めの等が従来の化学物質管理の課題に関わるリスクが顕在化した事例である。2003 年から 2006 年にかけて日本の企業は電子工業会を中心にこういった課題への対応を図ってきた。2006 年 7 月には RoHS 指令が施行され、2007 年 6 月には欧州化学物質規制所謂 REACH 規制の施行、2007 年 3 月の中国版 RoHS 指令施行と続いたが、今後さらに世界各国が独自の指令を施行する動きがある。アメリカの TSCA、日本の化審法といった化学物質規制の枠組みも含め、今後これまでの化学物質管理の枠組みでナノ材料を管理できるのか、新しい規制の枠組みが必要なのか、今後数年でその基本的な方向付けがなされるものと思われる。2000 年以降の様々な動きがどのような考えを背景に展開してきたのか、正しく把握しておく必要がある。

アジアにおける EHS・ELSI 研究：

2007 年 8 月末に台北で開かれた第 3 回ナノテクノロジー労働環境衛生シンポジウムの状況をみると、EHS や ELSI に関する研究は確実にかつ急速に増えつつある。アジアでもこれまでの日本、台湾、中国に加え、韓国、台湾、シンガポールからの発表が増えてきている。ただ、それらの研究がリスク管理や標準化への展開と言った戦略的位置づけがなされているのはアジアではまだ日本、台湾、中国に限られる。

社会受容の議論：

ナノテクノロジーの社会受容が、とりわけ日本では社会学の枠組みで取り上げられる傾向が目立っている。実用化は着実に進みつつあるものの、依然としてナノテクノロジー技術が研究開発の段階にある状況を考えると、こういった課題が技術開発の実態とかけ離れて議論されることには一抹の不安もある。日本では今日ニセ科学の問題が科学者の間でも大きな関心事になっており、ナノ粒子やナノテクノロジー製品についての書籍や新聞報道も増えてきている。ナノテクノロジーが正しく情報発信され、正しく伝えられ、正しく理解されるため、今は地道な努力が必要とされる時期である。ナノテクノロジーの理解に有効であった事例として、2003 年にアメリカにおいて、ナノテクノロジーのコンセプトに大きな影響を与えた Drexler 氏とノーベル化学賞受賞者の Smalley 氏が行った公開のディベートを挙げることができる。どちらもナノテクノロジーに深い造詣をもつ科学者が冷静な態度でナノテクノロジーの可能性を論じたこの公開のディベートは、アメリカにおけるナノテクノロジーに対する冷静な市民意識の醸成に大きく貢献したのである。

また、社会受容の課題をどう進めるかについてはアメリカと欧州の間で大きな考え方の差異があり、これまでも国際的なフレームでの合意形成に影響を与

えてきた。日本ではこの差異は予防原則に対する考え方の違いとの認識があったが、アメリカに予防原則の考え方がないわけではない。Practicalに個別Case毎の展開を図ろうとする傾向の強いアメリカに対して、欧州は枠組みを重視したDebatableな展開を図ろうとする傾向が強く、明らかに文化の違いである。

イギリスの調査報告；

日本においても経済産業省などへ調査団が訪れた英国のRoyal Commission on Environmental Pollutionの報告書がまとめられ、"Nobel Materials in the Environment：The case of nanotechnology"として公表された。CNT等のリスクに関しては2004年の王立協会・王立工学アカデミーの立場を踏襲している。今後、欧州のナノに関する規制策に影響を与えていくものと思われる。

文部科学省科学技術振興調整費プロジェクト「社会受容に向けたナノ材料開発支援知識基盤」；

本プロジェクトは内閣府総合科学技術会議 科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容に関する基盤開発」の補完的課題として2007年度より実施、研究代表者は東大ナノマテリアルセンターの山口由岐夫教授、連携機関としてNIMSと産総研が参画している。このPjは、適切なリスク管理下でのナノ材料の研究開発および事業化を支援するためのデータベース指標の構築におけた調査研究を目的とする。これまで知の構造化Pjの一環として進められてきたナノマテリアル開発の知識基盤に、ナノ粒子の有害性情報を統合することで、より包括的なナノ材料開発支援知識基盤の構築に向け、ハード・ソフトの両面からデータベース指標のあり方を検討するものである。コア技術の研究開発とレギュラトリーサイエンスの戦略的統合が試みられており、今後の新興科学技術の研究開発の一方法論として極めて有用な課題研究が進められている。従来はナノ粒子の有害性に関する論文情報が収集されても、それを蓄積・継承させていく仕組みがなく、その知識体系を研究開発知識基盤に統合させようとする試みも行われてこなかった。プロジェクトの達成目標は容易ではないが、その社会ニーズは極めて大きく、社会受容に向けた日本の独創的なグランドチャレンジともいえる試みである。

### 3.4.5 国際プログラム

ドイツの中国への研究進出：

ドイツが自らの資金で研究開発を実施するための研究所を中国内に設立した。中国研究機関との共同プロジェクトの推進を目指す。当面は自己資金のみでの活動を想定。長期的な視点で、中国の優れた人材確保を狙った施策と考えられる。

韓国の国際連携策：

韓国の公的研究機関である KAIST などは、既にヨーロッパに研究拠点を持っているが、さらに積極的に、ベルギーの半導体コンソーシアムである IMEC やフランスの MINATEC にも参加し、国際連携の深化を図っている。日本に対しては、2008 年の新政権発足以来、連携強化に一層積極的な姿勢を示している。

国際会議：

この数年間、ナノテクに関する国際協力に向けた討論の場が次から次へと現れたが、徐々に淘汰されつつあるようである。ISO、OECD などの既存の国際機関を除けば、やはり NSF、EC が積極的に関与している会議の持続力が高い。代表的なものは「国際ナノテクノロジー会議 (International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation)」、「責任あるナノテクノロジー研究開発に関する国際対話 (International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology)」であり、第 16 回日・EU 定期首脳会議 (2007.6.5) の共同声明にも明記されている。これらはいずれも日米欧の 3 極が主体である。米欧は粘り強く議論を続けることによって両者のギャップを徐々にクリアしつつある。研究開発に関する国際協力は今後 INC が主要な議論の場になる可能性が高い。既にナノエレクトロニクスに関しては国際計画作成 WG (IPWGN) が立ち上がっており、次にエネルギーに関して同様の WG が立ち上がる可能性が高い。INC4 (2008 年東京開催) においてもエネルギーのセッションが新設され、具体的な研究分野として、燃料電池、太陽電池、熱電変換などが挙げられている。IPWGN に関してはインテル主導が揺るぎないようである。日本においては、INC4 の日本開催がきっかけとなり、INC に対する国内の関心度が高まりつつある。INC5 (2009 年米国開催) では内閣府、NIMS、AIST、JEITA、NBCI が日本の主催機関として参加している。

世界材料研究所会議 (World Materials Research Institute Forum)：

NIMS の主導により、公的研究機関からなる世界材料研究所会議が 2005 年 6 月に発足し、現在 21 カ国から 35 機関がメンバーになっている。7 つのワーキング・グループを設置し、特定のテーマに関するシンポジウム、若手研究者ワークショップなどを開催してきた。2009 年 6 月に第 3 回総会を米国 NIST にて開催。併せて、環境・エネルギー材料に関するワークショップを行い、具体的な国際共同研究に実行に関して議論される。

米国 NSF の国際プログラムへの投資：

NSF の材料研究部門 (Division of Materials Research) が 2008 年、International Materials Institute (IMI)、Materials World Network (MWN) の公募を行った。いずれも米国の大学に、材料研究に関する海外研究機関との国際共同プロジェクトを奨励するものである。NSF の担当者によれば、米国の研究者に対して、国外からの研究者を受け入れるだけでなく、自らより積極的に国外に出ることを促すことが必要な時になっている、とのことである。

IMEC の台湾進出：

IMEC が新たに台湾の新竹にオフィスを置き、National Device Laboratories (NDL) などとの連携促進を進めている。

アジア・ナノ・フォーラム (Asia Nano Forum)：

産総研の主導により 2004 年 5 月発足した本フォーラムは、年を追うごとに徐々に活動が活発になってきた。例えば、2008 年 2 月にはアジア・ナノテク・キャンプを日本で開催し (公式には AIST、TITECH、NIMS が主催)、ISO のナノテク標準化委員会である ISO TC229 においてはリエゾンメンバーとして発言を行っている。



# 付録：海外の政策動向



## 海外の政策動向

ナノテクノロジー・材料分野（以下、ナノテク・材料）への世界各国の公的投資が始まってから5年以上が経過し、日米では双方とも9年目を迎える。2001年に米国のNNI（国家ナノテクノロジー計画）がスタートして以後、日、英、韓を始め世界の主要数10カ国が相次いで独自のナノテク国家計画を発表した。民間を含む世界の年間総投資額は、2007年に1.2兆円（US \$13.5B）に達し、本報告書作成時点の2008年度は1.35兆円（US \$14.9B）と予測されている。特にこの1～2年は、米国、EU諸国を中心として政府投資の継続的強化、新興国（ロシア、アジア、中近東）の新たな参入、ナノテク商業化の兆し、などが相乗して投資急増の傾向となっている。以下に主要各国のナノテク・材料分野に関する政策動向をまとめた。

### 米国

米国におけるナノテクノロジー・材料分野は大統領イニシアティブの下、NNI（National Nanotechnology Initiative）として省庁横断的に取り組まれており、原子・分子レベルのナノスケールで物質を操作・制御した際に特有の現象・特性を利用して、新素材、ナノスケール計測用機器、およびナノ製造産業へ向けた有用な新技術の研究開発に取り組んでいる。2009年度予算案では前年比2%増の15.3億ドルが計上され、2001年にNNIが発足して以来、総計で約100億ドルが投資されることになる。今までの投資の結果として、ナノスケールで起こる現象についての理解が進み、医療、製薬、製造技術、情報技術、エネルギー技術、環境技術の発展を促している。予算配分はDOD（国防総省）、NSF（国立科学財団）、DOE（エネルギー省）、HHS（厚生省）、DOC（商務省）が多くの割合を占めている。

2007年にNNI戦略計画（2004年）を改善した新戦略プランを発表し、2008年にPCAST（大統領科学技術諮問会議）による3年に1度のNNIに対する評価レポートを発表した。2009年度においてもNNI戦略計画に従って、基礎・応用研究、分野横断的な研究拠点の構築、ナノテクの研究者、教育者、技術者、一般市民の教育と訓練、ネットワークの構築、研究インフラの整備、そしてナノテクの標準化活動を継続される予定である。今後のナノテクは2007年に開所されたCNSI（California Nano System Institute）に象徴されるナノテクのシステム化（第3世代のナノの組織化）に向かうと考えられるが、PCASTはエネルギーと医療関係にパラダイムシフトを起こすポテンシャルがあると予測している。戦略面での大きな変化は、NNIの構成要素として従来7項目であったPCA（Program Component Area）でEHS（環境、健康、安全）を独立させ8項目にしたことである。ナノテク産業の成長を確信して社会受容を加速するため、安全性評価に重点を置くとする意思の表れが見て取れる。人体や環境に与える影響の評価、倫理的問題、法的问题、その他の社会的問題に配慮しながら研究開発を行うとしている。連邦政府の重点分野としてもEHSは重視されており、2006年にNSTC（国家科学技術会議）から発表された報告書「Environment, Health and Safety Research Needs for Engineered

Nanoscale Materials]との整合を図り、連邦政府が支援すべき研究開発課題の明確化や、省庁間での研究センターや共同利用型施設での学際活動およびそれらの効率的共同利用の促進が行われる予定である。ナノエレクトロニクスに関しては、全米に整備された NNIN (国家ナノテクインフラネットワーク 13 拠点) の施設を使って展開し始めた SCR (エレクトロニクスメーカー) と NSF の共同プロジェクト NRI (ナノエレクトロニクス研究イニシアティブ) が進められている。2020 年にゴールを設定し 35 大学、21 州が参加する。国際規模での人材吸引戦略と見ることもできる。

## 欧州

2007 年から 2013 年の FP7 では、研究開発へ欧州委員会から投資される資金の総額は 505 億ユーロ (7 年間) となっている。そのうち「共同研究」への助成が 323.65 億ユーロあり、「ナノサイエンス・ナノテクノロジー・材料・新製造技術」への研究に FP6 の 2 倍近い 35 億ユーロが配分される予定である。具体的な助成方針は、毎年発行される「ワークプログラム」に記載されている。また欧州委員会のナノテクの基本となる政策文書には、「EU ナノテクノロジー政策 (2004-2008)」、「ナノサイエンス & ナノテクノロジー：欧州アクションプラン 2005-2009」がある。上記以外の関連文書として、2008 年に「ナノ粒子の健康および環境への影響に関する欧州ナノテクノロジー研究開発」を、2006 年に「ナノテクノロジーの経済発展」、2005 年に「ナノテクノロジー：欧州の将来のための重要技術」などを発表している。

長期的かつ多額の資金が必要なハイリスク研究で、産業界の支援が明確な領域を優先的に支援する「ジョイント・テクノロジー・イニシアティブ (JTI)」を立ち上げており、その中に、「ナノエレクトロニクス」が含まれている。

「ヨーロッパ・テクノロジー・プラットフォーム (ETP)」では、すべての利害関係者が参画し、特定分野 (現在 30 以上) の研究開発投資戦略を立案しており、その中に、「ナノエレクトロニクス」、「ナノ医薬」、「金属技術」、「先端エンジニアリング材料」などがある。また「欧州ナノテクノロジー施設およびネットワーク」報告書では、欧州各国のナノテクに係わる取り組みが施設毎に示されている。

社会受容への関心は米国同様に高く、Nanolmmune 他のプロジェクトを立ち上げている。

## 英国

英国政府が出資するナノテク・材料分野の研究費は、主に工学・自然科学研究会議 (EPSRC)、技術戦略審議会 (TSB)、高等教育資金会議から拠出されている。

2002 年には、旧貿易産業省から英国のナノテク戦略の基礎となる「製造の新しい方向性：英国のナノテクノロジーのための戦略」が発表されており、この提言を受け 2003 年から 2009 年に 9,000 万ポンドを「マイクロ・ナノ製造技術イニシアティブ」に投資している。同イニシアティブでは 23 の「マイクロ・ナノ技術センター」も支援している。

2007年10月に発表された「包括的歳出見直し（CSR）」では、研究会議横断・重点戦略研究プログラムに6つの分野を指定し、その中に「工学から実装へのナノサイエンス」が挙げられ、2008年から2010年の間に5,000万ポンドが助成される予定である。

EPSRCでは「材料・機械・医療技術」の研究に6,000万ポンド、トレーニングに1,800万ポンドを、「工学から適用へのナノサイエンス」の研究に1,900万ポンド、トレーニングに2,500万ポンドを配分する予定である（2008年度）。

技術戦略審議会では「先端材料」および「ナノテクノロジー」を重要技術領域として選定し、助成を行っている。

科学技術会議（CST）が発表した、5年先に最も有望な技術・分野に「プラスチック・エレクトロニクス」、「メディカルデバイス」が選定されている。

また、社会受容関係では、Royal Commission of Environmental Pollutionがナノ材料に対する報告書を2008年に発表している。

## ドイツ

2006年に発表されたハイテク戦略に基づき、研究開発投資を増強している。ハイテク戦略では2006年～2009年の間に、「ナノテクノロジー」に6.4億ユーロを、「材料技術」に4.2億ユーロを投資する方針である。

連邦研究教育省（BMBF）をはじめとする7省横断プログラムとして「ナノイニシアティブ・アクションプラン2010」を発表し、これは産業へのナノテク応用を主眼にしている。2004年から推進されている「産業・社会のための材料イノベーションフレームワークプログラム」では、10の重点分野を設定し助成を行っている。

主な研究機関は、基礎研究に重点を置いたマックスプランク協会、応用研究を主に行うフランホーファ協会、大型研究施設を持つヘルムホルツ協会、そして大学、州政府管轄研究所など多岐にわたる。また大学における研究拠点を設立する「エクセレンスイニシアティブ」を立ち上げ、ナノテク・材料関係の拠点も設立されている。また、人材確保戦略のために中国との関係を深めている。

2008年9月には、世界的な競争力を有する5つのトップクラスターのうち、エネルギー効率化を目的としたマイクロ・ナノ・エレクトロニクスの開発に取り組むクール・シリコン・クラスターとしてザクセン州が選出された。

科学の振興を目的としたドイツ研究協会（DFG）からの研究資金のうち、材料科学への配分は4%程度（4,900万ユーロ、2005年）となっている。

## ロシア

2007年に初めて8カ年の国家科学技術計画を発表した。ナノテク公社法およびナノテク国家計画を制定し、ナノテク材料分野の投資を、2008-2010年の間に277億ルーブル（約1000億円）計上している。2008年からはナノテク研究インフラ整備のため、NNN（国家ナノテクノロジーネットワーク）計画を開始した。中国、韓国との連携を深め、国際共同プロジェクトを積極的に展開している。

## アジア

韓国、中国、台湾、シンガポールが、基礎から産業化まで幅広くナノテクの重点化を継続している。韓国と台湾はナノテクの国家計画を更新した。韓国の第2次科学技術基本計画（2008-2012年）では、主力基幹産業技術、知識基盤サービス、グローバル課題対応、基礎・基盤・融合技術、などの7大研究開発分野を定め、さらに新政権の打ち出した方針「緑色成長」で環境・エネルギー関連技術にナノテクの融合研究を取り入れることによってブレークスルーを起こそうとしている。台湾は、6ヵ年開発計画（2003-2008年）の下で、ナノテク関連メーカーの生産額96.8億ドルを達成し、新6ヵ年開発計画（2009-2014年）では、7億2600万ドルの予算を計上している。教育、産業化を含めバランスの取れた計画を進めており、オーストラリアの産業界と連携を始めている。中国はナノテク・材料のほぼ全分野を重点分野として取り揃えており、ナノテク材料だけでなくバイオナノ分野にも注力している。中国科学院の化学研究所ではバイオナノの5年間のプロジェクトがスタートしている。蘇州には「バイオベイ」という国際ベンチャー拠点形成されつつある。

## 略語集

## A

- **AFM** : Atomic Force Microscope  
*123, 126, 131, 199, 200, 202, 204*
- **ANSI** : American National  
Standards Institute *52, 138, 140*

## B

- **BASF** : Badische Anilin- und Soda-  
Fabrik *14, 151*
- **BDF** : Bio Diesel Fuel *78*
- **BIAC** : Business and Industry  
Advisory Committee *140*
- **BLU** : Backlight Unit *52*
- **BSI** : British Standards Institution  
*138, 140*

## C

- **CdTe** : Cadmium Telluride *72, 73*
- **CIGS** : Copper Indium Gallium  
DiSelenide *72, 73, 176*
- **CMOS** : Complementary Metal  
Oxide Semiconductor *10, 20, 32, 36,  
38, 54, 149, 155, 158, 159, 165, 170*
- **CMP** : Chemical Mechanical  
Polishing *23*
- **CNRS** : Centre National de la  
Recherche Scientifique *28, 44, 151,  
191*
- **CNT** : Carbon Nano Tube *7, 10,  
110, 141, 149, 153, 190, 208, 209, 211*
- **CREOL** : The Center for Research  
and Education in Optics and  
Lasers *44*
- **CW** : Continuous-Wave *164*

## D

- **DARPA** : Defense Advanced  
Research Projects Agency *20, 28,  
38, 44, 48, 149, 163*
- **DDS** : Drug Delivery System *29,  
55, 57, 58, 59, 62, 63, 172, 173*
- **DFM** : Design for Manufacturibility  
*27, 156*
- **DOE** : Department of Energy *18,  
52, 53, 69, 78, 85, 133, 135, 136, 137, 217*
- **DPF** : Diesel Particulate Filter *88*
- **DRAM** : Dynamic Random Access  
Memory *24, 40, 41, 160*

## E

- **EHS** : Environment Health and  
Safety *3, 141, 143, 210, 217*
- **EL** : Electro Luminescence *30, 42,  
43, 44, 50, 161, 162, 168, 169, 197*
- **ELSI** : Ethical Legal and Social  
Issues *3, 141, 143, 210*
- **EPA** : Environmental Protection  
Agency *140, 141, 143, 188*
- **EPR** : Enhanced Permeation and  
Retention *58*
- **ESF** : European Science  
Foundation *58, 136, 137*
- **ESP** : ElectroSpinning Process  
*100, 101*
- **ETBE** : Ethyl Tertiary Butyl Ether  
*78*
- **ETH** : Eidgenössische Technische  
Hochschule *129, 165*
- **EUV** : Extreme Ultra-Violet *132,  
156, 204*

---

**F**


---

- **FBAR** : Film Bulk Acoustic Resonator 31, 157
- **FDA** : Food and Drug Administration 58, 143
- **FDTD** : Finite Difference Time Domain 48
- **FED** : Field Emission Display 10
- **FeRAM** : Ferroelectric Random Access Memory 160
- **FET** : Field Effect Transistor 10, 42, 158, 159
- **FinFET** : Fin Field Effect Transistor 158, 159
- **FP** : European Commission - Research The Seventh Framework Programme 103
- **FPD** : Flat Panel Display 50, 169, 197
- **FPGA** : Field Programmable Gate Array 170
- **FTTH** : Fiber To The Home 46

---

**G**


---

- **GFP** : Green Fluorescent Protein 172
- **GIDL** : Gate-induced Drain Leakage 159
- **GIT** : Georgia Institute of Technology 52
- **GMR** : Giant Magneto Resistive 20

---

**H**


---

- **HAMR** : Heat Assisted Magnetic Recording 48
- **HD** : High Definition 168

- **HDD** : Hard Disk Drive 41
- **HP** : Hewlett Packard 40, 46, 160

---

**I**


---

- **I/F** : Interface 160
- **ICON** : International Council on Nanotechnology 143
- **IEC** : International Electrotechnical Commission 52, 138, 139, 140, 208
- **IESNA** : Illuminating Engineering Society of North America 52
- **IMEC** : Interuniversity Microelectronics Center 24, 27, 31, 34, 36, 40, 46, 72, 106, 110, 134, 135, 144, 158, 161, 165, 170, 212, 213
- **I-MOS** : Impact-Ionization Metal Oxide Semiconductor 159
- **IRGC** : International Risk Governance Council 143
- **ISO** : International Organization for Standardization 48, 124, 131, 132, 138, 140, 141, 144, 208, 212, 213
- **ITER** : International Thermonuclear Experimental Reactor 85
- **ITO** : Indium Tin Oxide 30, 196
- **ITRI** : Industrial Technology Research Institute 38, 50, 53, 73
- **ITRS** : International Technology Roadmap for Semiconductors 140

---

**K**


---

- **KAIST** : Korea Advanced Institute of Science and Technology 14, 40, 46, 60, 122, 129, 144, 212
- **KOPTI** : Korea Photonics Technology Institute 52

---

**L**


---

- **LCA** : Life Cycle Assessment 90
- **LCD** : Liquid Crystal Display 50, 52, 168, 169, 197
- **LED** : Light Emitting Diode 28, 44, 46, 47, 52, 53, 162, 197
- **Leti** : Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information 24, 27, 28, 31, 36, 106, 110, 170
- **LSI** : Large Scale Integration 10, 23, 24, 26, 28, 29, 31, 111, 156, 157, 158, 159, 160, 168, 198

---

**M**


---

- **MEG** : Multiple Exciton Generation 162
- **MEMS** : Micro Electro Mechanical Systems 13, 23, 24, 30, 31, 66, 108, 109, 157, 159, 164, 165
- **MFA** : Material Flow Accounting 90
- **MINATEC** : Micro and Nanotechnology Innovation Centre 134, 135, 144, 212
- **MIRAI** : Millennium Research for Advanced Information Technology 36
- **MIT** : Massachusetts Institute of Technology 44, 77, 82, 113, 129, 151, 164, 165, 188
- **MLC** : Multi Level Cell 114, 160
- **MOCVD** : Metaorganic Chemical Vapor Deposition 53
- **MOF** : Metal Organic Framwork 14, 151
- **MONA** : Merging Optics and Nanotechnology 48, 166
- **MONOS** : Metal-Oxide-Nitride-

Oxide-Semiconductor 40

- **MOSFET** : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor 158, 159
- **MPU** : Micro Processing Unit 160
- **MRAM** : Magnetoresistive Random Access Memory 20, 38, 39, 40, 160
- **MRI** : Magnetic Resonance Imaging 10, 85, 174, 196
- **MRS** : Material Research Society 52
- **MSDS** : Material Safety Data Sheet 208
- **MURI** : Multiple University Research Initiative 49
- **μTAS** : Micro Total Analysis System 55, 57, 66, 67, 109, 174

---

**N**


---

- **NCI** : National Cancer Institute 58
- **NEMS** : Nano Electro Mechanical Systems 23, 31, 66, 157
- **NF** : Nanofiltration Membrane 86
- **NIH** : National Institutes of Health 60, 66, 67, 143
- **NIOSH** : National Institute for Occupational Safety and Health 143
- **NIST** : National Institute of Standards and Technology 52, 113, 122, 132, 170, 196, 204, 212
- **NMR** : Nuclear Magnetic Resonance 60, 85
- **NNI** : National Nanotechnology Initiative 136, 137, 143, 217
- **NNIN** : National Nanotechnology Infrastructure Network 133, 135, 137, 207, 218
- **NREL** : National Renewable Energy

Laboratory 44, 76, 77, 162

- **NRI** : Nanoelectronics Research Initiative 33, 54, 218
- **NSF** : National Science Foundation 18, 133, 135, 136, 137, 144, 170, 183, 190, 196, 198, 212, 213, 217, 218
- **NSOM** : Near-field Scanning Optical Microscopy 123, 126

## O

- **OLED** : Organic Light Emitting Diode 168
- **OSHA** : Occupational Safety and Health Administration 143

## P

- **PcRAM** : Phase Change Random Access Memory 160
- **PDP** : Plasma Display Panel 50, 168, 169
- **PE** : Polly Ethylene 100, 101
- **PEFC** : Polymer Electrolyte Fuel Cell 75
- **PEG** : Polyethylene Glycol 58, 59
- **PET** : positron emission tomography 10
- **PLL** : Phase Locked Loop 30, 157

## R

- **RAM** : Random Access Memory 155, 159, 160
- **ReRAM** : Resistive Random Access Memory 160
- **RF** : Radio Frequency 170
- **RGB** : Red Green Blue 162
- **RNA** : Ribonucleic Acid 57

- **RRAM** : Resistive Random Access Memory 22, 155

## S

- **S/N** : Signal-to-Noise (Ratio) 167
- **SEM** : Scanning Electron Microscope 123, 127, 130, 131, 132, 201, 203, 204
- **SERS** : Surface Enhanced Raman Scattering 129, 167
- **SFA** : Surface Force Apparatus 108
- **SOA** : Semiconductor Optical Amplifier 44
- **SOC** : System on a Chip 26, 159
- **SOFC** : Solid Oxide Fuel Cell 75
- **SOI** : Silicon on Insulator 36, 165
- **SPIE** : Society of Photonics Industry and Engineering 52
- **SPM** : Scanning Probe Microscopy 104, 108, 109, 123, 126, 200
- **SPR** : Surface Plasmon Resonance 54
- **SQUID** : Superconducting Quantum Interference Device 54, 170, 171
- **SSD** : Solid State Drive 41
- **SSL** : Solid-State Lighting 52
- **STEM** : Scanning Transmission Electron Microscope 200, 201
- **STM** : Scanning Tunnel Microscopy 123, 126, 154, 199, 200, 202

## T

- **TEM** : Transmission Electron Microscope 123, 130, 131, 200, 201, 203

- TFT : Thin Film Transistor 30, 32, 168, 169, 197
- TSCA : Toxic Substances Control Act 141, 208, 210
- TSMC : Taiwan Semiconductor Manufacturing Company 31, 38, 159

---

## U

---

- UCLA : University of California Los Angeles 14, 38
- UCSB : University of California Santa Barbara 46, 52, 113, 165, 225
- USB : Universal Serial Bus 41



## 執筆者・協力者一覧 (五十音順 / 分野毎、敬称略)

(※所属・役職は本調査実施の時点)

### 《ナノテク・材料》

#### ■ナノ材料・新機能材料分野

安藤 恒也	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
伊藤 耕三	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
木村 茂行	社団法人未踏科学技術協会 理事長 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 特任フェロー
黒田 一幸	早稲田大学理工学術院 教授
高井 治	名古屋大学エコトピア科学研究所 教授
高木 英典	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
高橋 浩	早稲田大学理工学術院 客員教授
田中 雅明	東京大学大学院工学系研究科 教授
永野 智己	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
西 敏夫	東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授
平野 正浩	東京工業大学フロンティア研究センター 客員教授
福山 秀敏	東京理科大学大学院理学研究科 教授
松永 是	東京農工大学 副学長
水野 哲孝	東京大学大学院工学系研究科 教授

#### ■ナノ加工技術

居城 邦治	北海道大学電子科学研究所 教授
岡崎 信次	株式会社日立製作所中央研究所先端技術研究部 主管研究員
金山 敏彦	独立行政法人産業技術総合研究所ナノ電子デバイス研究センター 研究センター長
下田 達也	北陸先端科学技術大学院大学ナノマテリアルテクノロジーセンター 教授
下村 政嗣	東北大学多元物質科学研究所 教授
田中 秀治	東北大学大学院工学研究科 准教授 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 特任フェロー
平井 義彦	大阪府立大学大学院 工学研究科 教授
宮内 昭浩	株式会社日立製作所材料研究所 ユニットリーダー

### 《ナノテク・材料の応用》

#### ■ナノエレクトロニクス分野

安達 千波矢	九州大学未来化学創造センター 教授
--------	-------------------

安藤 功兒	独立行政法人産業技術総合研究所エレクトロニクス研究部門 副研究部門長
江部 広治	東京大学ナノ量子情報エレクトロニクス研究機構 特任研究員
大津 元一	東京大学大学院工学系研究科 教授
大野 英男	東北大学電気通信研究所 教授
梶川 浩太郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授
金山 敏彦	独立行政法人産業技術総合研究所ナノ電子デバイス研究センター 研究センター長
鎌田 俊英	独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門 グループ長
川嶋 将一郎	富士通マイクロエレクトロニクス株式会社システムマイクロ事業部 FRAM 汎用設計部長
河村 誠一郎	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
木村 俊作	京都大学工学研究科 教授
木村 紳一郎	株式会社日立製作所中央研究所 主管研究長
迫田 和彰	独立行政法人物質・材料研究機構量子ドットセンター センター長
進藤 典男	ソニー株式会社技術戦略部 担当部長
高木 信一	東京大学大学院工学系研究科 教授
田口 常正	山口大学大学院 研究特任教授
田中 拓男	独立行政法人理化学研究所田中メタマテリアル研究室 准主任研究員
野田 進	京都大学大学院工学研究科 教授
波多腰 玄一	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
馬場 俊彦	横浜国立大学大学院工学研究院 教授
藤巻 朗	名古屋大学大学院工学研究科 教授
船田 文明	シャープ株式会社研究開発本部 技監
横山 直樹	株式会社富士通研究所ナノテクノロジー研究センター センター長

## ■バイオ・医療分野

石森 義雄	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
片岡 一則	東京大学大学院工学系研究科 教授
松田 道行	京都大学大学院医学研究科 教授
馬場 嘉信	名古屋大学大学院 工学研究科 教授
田畑 泰彦	京都大学再生医科学研究所 教授
鄭 雄一	東京大学大学院工学系研究科 教授
埴 隆夫	東京医科歯科大学 教授
北森 武彦	東京大学大学院工学系研究科 教授
宮原 裕二	独立行政法人物質・材料研究機構生体材料研究センター グループリーダー

## ■エネルギー・環境分野

池田 篤治	福井県立大学生物資源学部生物資源学科 教授
石原 聡	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
岡部 聡	北海道大学大学院工学研究科 教授
大林 元太郎	東レ株式会社研究本部 理事
河本 邦仁	名古屋大学大学院工学研究科 教授
小長井 誠	東京工業大学 大学院 理工学研究科 教授
近藤 道雄	独立行政法人産業技術総合研究所太陽光発電研究センター 研究センター長
澤山 茂樹	独立行政法人産業技術総合研究所バイオマス研究センター 研究グループ長
瀬恒 謙太郎	大阪大学大学院工学研究科 教授
高木 英典	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
田中 裕久	ダイハツ工業株式会社先端技術開発部 エクゼクティブ・テクニカル・エキスパート
谷岡 明彦	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
堂免 一成	東京大学大学院工学系研究科 教授
長井 龍	日立マクセル株式会社開発本部 副本部長
長坂 徹也	東北大学大学院環境科学研究科 教授
西村 睦	独立行政法人物質・材料研究機構燃料電池研究センター センター長
橋本 和仁	東京大学大学院工学系研究科 教授
原田 幸明	独立行政法人物質・材料研究機構材料ラボ ラボ長
堀上 徹	財団法人国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員
本間 格	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 グループ長
水野 哲孝	東京大学大学院工学系研究科 教授
森塚 秀人	電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員
横山 伸也	東京大学大学院農学生命科学研究科 教授 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 特任フェロー
李 玉友	東北大学大学院工学研究科 准教授
渡辺 政廣	山梨大学 クリーンエネルギー研究センター センター長

## ■産業用構造材料（輸送・建造等）分野

乾 晴行	京都大学大学院工学研究科 教授
真田 恭宏	旭硝子株式会社中央研究所 主幹研究員
津崎 兼彰	独立行政法人物質・材料研究機構新構造材料センター センター長
豊蔵 信夫	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
平尾 一之	京都大学大学院工学研究科 教授

## ■生活関連材料分野

大林 元太郎	東レ株式会社研究本部 理事
上野 則夫	株式会社資生堂マテリアルサイエンス研究センター 素材開発研究所 参与
佐藤 清隆	広島大学大学院生物圏科学研究科 教授
豊蔵 信夫	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
中嶋 光敏	筑波大学大学院生命環境科学研究科 教授
山崎 律子	花王株式会社ケアビューティ研究所 主任研究員

## 《基盤科学技術》

### ■ナノサイエンス分野

安藤 泰久	独立行政法人産業技術総合研究所先進製造プロセス研究部門 グループ長
石森 義雄	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
伊藤 公平	慶應義塾大学理工学部 教授
魚崎 浩平	北海道大学大学院理学研究科 教授
栗原 和枝	東北大学多元物質科学研究所 教授
白石 賢二	筑波大学大学院数理物質科学研究科 准教授
高柳 英明	東京理科大学大学院理学研究科 教授
塚田 捷	早稲田大学大学院理工学研究科 教授
十倉 好紀	東京大学大学院工学系研究科 教授
馬場 嘉信	名古屋大学大学院工学研究科 教授
柳田 敏雄	大阪大学大学院生命機能研究科 教授
山口 智彦	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構ナノテクノロジー・材料技術開発部 プログラムマネージャー

### ■材料設計・探索分野

池庄司 民夫	独立行政法人産業技術総合研究所計算科学研究部門 部門長
鯉沼 秀臣	独立行政法人物質・材料研究機構 特別顧問
田中 功	京都大学大学院工学研究科 教授
知京 豊裕	独立行政法人物質・材料研究機構 半導体材料センター センター長
中山 智弘	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
細野 秀雄	東京工業大学フロンティア研究センター 教授
宮本 明	東北大学大学院工学研究科 教授
山崎 政義	独立行政法人物質・材料研究機構材料基盤情報ステーション ステーション長

## ■ナノ計測・評価技術分野

大林 元太郎	東レ株式会社研究本部 理事
川越 毅	大阪教育大学教育学部 准教授
小島 勇夫	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門 室長
小林 慶規	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門 室長
古宮 聰	財団法人高輝度光科学研究センター コーディネータ
末永 和知	独立行政法人産業技術総合研究所ナノチューブ応用研究センター
高橋 かより	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門
西木 玲彦	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー
二又 政之	埼玉大学大学院理工学研究科 教授
堀内 伸	独立行政法人産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門 主任研究員
松林 信行	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門 主任研究員
三隅 伊知子	独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門 主任研究員
森田 清三	大阪大学大学院工学研究科 教授

## 《関連共通課題》

### ■共用研究開発拠点（融合・連携促進）

秋永 広幸	独立行政法人産業技術総合研究所ナノ電子デバイス研究センター 副センター長
竹村 誠洋	独立行政法人物質・材料研究機構企画部国際室 室長
永野 智己	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

### ■教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）

秋永 広幸	独立行政法人産業技術総合研究所ナノ電子デバイス研究センター 副センター長
竹村 誠洋	独立行政法人物質・材料研究機構企画部国際室 室長
永野 智己	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

### ■国際標準・工業標準

阿多 誠文	独立行政法人産業技術総合研究所イノベーション推進室 総括主幹
永野 智己	独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

## ■社会受容・EHS・ELSI

阿多 誠文 独立行政法人産業技術総合研究所イノベーション推進室 総括主幹  
永野 智己 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

## ■国際プログラム

竹村 誠洋 独立行政法人物質・材料研究機構企画部国際室 室長  
永野 智己 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター フェロー

## 全体総括

田中 一宜 独立行政法人科学技術振興機構研究開発戦略センター 上席フェロー

**ナノテクノロジー・材料分野  
科学技術・研究開発の国際比較  
2009年版**

CRDS-FY2009-IC-03

---

平成 21 年 5 月

発行者 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
ナノテクノロジーユニット／物質・材料ユニット

〒102-0084 東京都千代田区二番町 3 番地

電話 03-5214-7483

ファックス 03-5214-7385

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

---

Copyright 2009 独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター  
無断での転載、複写を禁じます。引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA CCT

GA C CTA ACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

