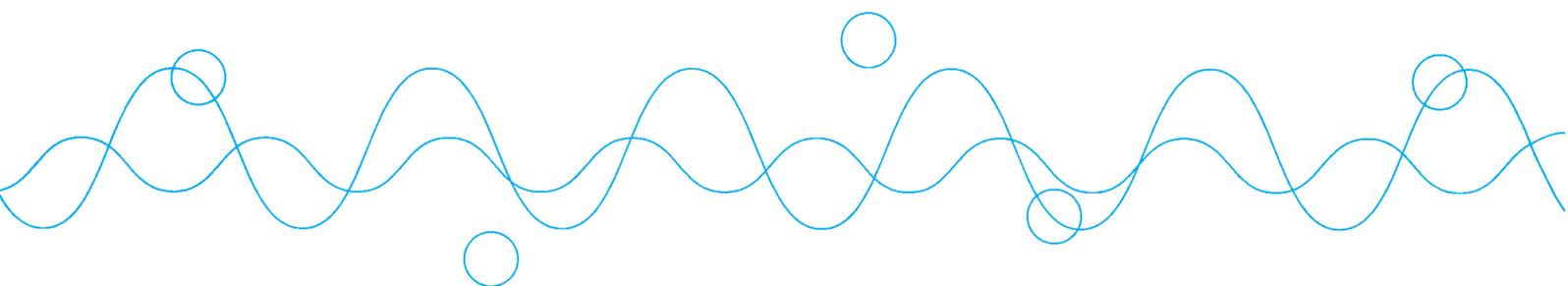


ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA CCTAACT CTCAGACC

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
2008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 20 年 2 月



Executive Summary

2000年以降に始まったナノテクノロジー・材料分野（以下、ナノ・材料）への国家投資ブームは、日米欧亜の主要国を中心に民間投資を含めて2007年時点で1兆円を超え、投資はさらに伸びつつある。ナノ・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。一方、日本においては重点四分野の一つとしてナノ・材料に国家投資が行われ始めて以後7年が経過し、投資効果を検証しつつナノテク産業創出へのグローバルな展望を求める声が強くなりつつある。

ナノテクノロジー・材料分野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シナリオが脆弱である。以下に、ナノ・材料の個別分野について国際比較の概略を記す。

・ナノ構造材料・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、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。中国は将来の脅威である。ナノ加工材料分野は、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分野に力を入れ、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、中国が追っている。米国は特に基礎と応用を包括した戦略を進めている。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歩リードしている。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、英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目立つ。超電導材料、光触媒、太陽電池材料で日本はリードしているものの、市場展開で遅れている。一方、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。バイオ燃料技術は欧米がリードし、膜分離による水浄化は日本がリードしている。排出ガス浄化触媒、高強度・計量構造材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。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主導の展開が予想される。

・ナノサイエンスについては、ナノフルイディクス、界面・表面・ナノ空間、自己組織化、量子新概念、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・ナノ空間では、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・標準分野では、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、工業標準化、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と長期戦略が不足している。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進めている。

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。

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 2008年版 比較表 まとめ

領域		ナノテク・材料																									
分野		ナノ構造材料・新機能材料												ナノ加工技術													
中綱目		ナノカーボン材料		ナノコンポジット材料		表面改質材料		機能性ゲル		超分子・デンドリマー		メソポーラス材料		複合系材料・精密重合高分子		強相関電子材料		半導体微細加工技術		ナノ転写加工技術		自己組織化技術		印刷技術		MEMS・NEMS加工技術	
国	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	現状	トレンド	現状	トレンド
	日本	研究	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↘	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○
技術		○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↘	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→
産業		△	↗	○	→	○	↗	○	↗	△	→	○	→	○	→	○	↘	△	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→
米国	研究	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↘	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↘	○	↗	○	↗
	技術	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
	産業	△	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	△	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
欧州	研究	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↘	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	→	○	↗
	技術	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
	産業	△	↗	○	→	○	↗	△	→	○	→	△	→	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	↗	○	→	○	↗
中国	研究	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	→	○	↗	△	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
	技術	△	↗	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	△	→	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	↗	○	→	○	↗
	産業	○	↗	○	↗	△	↗	△	→	△	↗	△	→	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
韓国	研究	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
	技術	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗
	産業	△	↗	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗

領域		ナノテク・材料の応用																																						
分野		エネルギー・環境												産業用構造材料						生活関連材料																				
中綱目		太陽電池		燃料電池		太陽光による水素発生		バイオ燃料		高性能二次電池・キャパシタ		熱電変換素子		超伝導利用		膜分離技術		光触媒		環境調和・リサイクル技術		排出ガス浄化用触媒		高強度・軽量構造材料		高機能ガラス		繊維		化粧品		食品技術								
	フェース	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ					
日本	研究	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗			
	技術	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗			
	産業	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	↗	○	↗	△	→	○	↗			
米国	研究	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	○	→	○	↗	△	→	○	↗	○	↗			
	技術	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	△	↗	△	→	○	↗	○	↗	○	→	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗			
	産業	△	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	
欧州	研究	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	
	技術	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	
	産業	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	△	→	△	→	△	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
中国	研究	△	↗	△	↗	△	→	△	→	△	↗	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	○	↗	×	→	×	↗	×	↗	△	↗	×	→	×	→	×	→	×	→	×	→	
	技術	△	↗	△	↗	△	→	△	→	△	↗	○	↗	△	→	○	↗	△	→	△	↗	×	→	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	
	産業	○	↗	△	↗	△	→	△	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	×	→	×	→	×	→	×	→	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△
韓国	研究	△	→	○	↗	△	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	
	技術	△	↗	○	→	△	→	○	→	○	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	
	産業	△	→	○	→	△	→	○	→	○	→	×	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○

領域		基盤科学技術																																						
分野		ナノサイエンス								材料設計・探索								ナノ計測・評価・標準																						
中綱目		ナノフルイティクス		界面・表面・ナノ空間		自己組織化・自己集合(理論)		量子演算・新量子概念		マルチフェロイックス		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		顕微鏡・走査型プローブ		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)								
	フェース	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ	現状	トピ					
日本	研究	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	↗			
	技術	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	△	→	△	↗	○	→	○	→	△	→	○	↗	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	↗			
	産業	○	↗	○	→	○	↗	×	→	×	→	△	→	△	→	○	↗	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
米国	研究	○	↗	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	技術	○	↗	○	→	○	↗	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	産業	○	↗	○	→	○	↗	△	↗	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	×	→	○	↗	○	↗	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
欧州	研究	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	技術	○	→	○	→	○	↗	△	→	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	産業	○	→	△	↗	△	→	×	→	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○
中国	研究	△	↗	△	→	△	↗	△	↗	△	↗	×	↗	×	→	△	↗	△	↗	○	→	×	↗	×	↗	○	→	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	技術	△	↗	△	↗	△	→	×	→	△	→	×	→	×	→	△	↗	△	↗	×	→	×	→	×	↗	○	→	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	
	産業	×	→	△	→	△	→	×	→	×	→	×	→	×	→	△	↗	○	↗	×	→	×	→	×	↗	×	→	×	→	×	→	×	→	×	→	×	→	×	→	×
韓国	研究	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	×	↗	△	↗	△	→	△	↗	○	→	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	
	技術	○	↗	○	↗	△	→	△	→	△	→	×	→	×	→	△	↗	△	↗	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	
	産業	○	↗	○	→	△	→	×	→	×	→	×	→	×	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△	→	△

関連共通課題	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)		工業標準国際戦略		社会受容・EHS・ELSI		国際プログラム					
	取り組み	実効性	取り組み	実効性	取り組み	実効性	取り組み	実効性	取り組み	実効性				
日本	○	→	△	→	△	→	○	↗	○	↗	×	↗	×	→
米国	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	△	↗	△	→
欧州	○	→	○	→	○	↗	○	→	○	→	○	↗	○	↗
中国	○	↗	△	→	△	↗	○	→	△	→	○	→	△	→
韓国	○	→	○	→	△	↗	○	→	△	→	○	↗	△	→

目 次

I	目的及び構成	1
II	国際技術力比較	5
2.1	ナノテク・材料	7
2.1.1	ナノ構造材料・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	8
	(1) ナノカーボン材料 (CNT、フラーレン、グラフェン、他)	8
	(2) ナノコンポジット材料 (ポリマー、セラミックス、金属、等の組み合わせ)	8
	(3) 表面改質材料	9
	(4) 機能性ゲル	9
	(5) 超分子・デンドリマー	9
	(6) メソポーラス材料	9
	(7) 複合系材料・精密重合高分子 (ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等)	10
	(8) 強相関電子材料	10
2.1.1.3	比較表	11
2.1.2	ナノ加工技術分野	20
2.1.2.1	概観	20
2.1.2.2	中綱目ごとの比較	20
	(1) 半導体超微細加工技術 (各種リソグラフィ等)	20
	(2) ナノ転写加工技術 (ナノインプリント等)	21
	(3) 自己組織化技術	21
	(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)	22
	(5) MEMS・NEMS 加工技術	22
2.1.2.3	比較表	24
2.2	ナノテク・材料の応用	30
2.2.1	ナノエレクトロニクス分野	30
2.2.1.1	概観	30
2.2.1.2	中綱目ごとの比較	31
	(1) CMOS 材料技術	31
	(2) スピントロニクス (強相関電子デバイス含む)	31
	(3) 固体素子メモリ	32
	(4) 有機エレクトロニクス	32
	(5) 量子ドットデバイス	32
	(6) フォトニック結晶・メタマテリアル	33

(7) 近接場光技術・ナノフォトニクス	33
(8) プラズモニクス	34
(9) ディスプレイデバイス	34
(10) 固体照明・発光デバイス	34
(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)	35
2.2.1.3 比較表	36
2.2.2 バイオ・医療分野	48
2.2.2.1 概観	48
2.2.2.2 中綱目ごとの比較	48
(1) 体内送達システム (DDS)	48
(2) 医療用ナノ粒子材料 (強磁性粒子など)	48
(3) 分子イメージング	49
(4) 再生医療用材料・生体適合材料 (細胞シート含む)	49
(5) 医療用チップ (μ TAS、DNA チップ、蛋白チップ等)	49
2.2.2.3 比較表	51
2.2.3 エネルギー・環境分野	57
2.2.3.1 概観	57
2.2.3.2 中綱目ごとの比較	58
(1) 太陽電池	58
(2) 燃料電池	58
(3) 太陽光による水素発生	58
(4) バイオ燃料	59
(5) 高性能二次電池、キャパシタ	59
(6) 熱電変換素子	60
(7) 超電導利用	60
(8) 膜分離技術 (水)	60
(9) 光触媒	61
(10) 環境調和・リサイクル技術 (回収技術など)	61
2.2.3.3 比較表	62
2.2.4 産業用構造材料 (輸送・建造等) 分野	73
2.2.4.1 概観	73
2.2.4.2 中綱目ごとの比較	73
(1) 排出ガス浄化用触媒	73
(2) 高強度・軽量構造材料	73
(3) 高機能ガラス (熱カットなど)	74
2.2.4.3 比較表	75
2.2.5 生活関連材料分野	79

2.2.5.1	概観	79
2.2.5.2	中綱目ごとの比較	80
	(1) 繊維	80
	(2) 化粧品	81
	(3) 食品技術(加工、保存、包装含む)	81
2.2.5.3	比較表	82
2.3	基盤科学技術	86
2.3.1	ナノサイエンス分野	86
2.3.1.1	概観	86
2.3.1.2	中綱目ごとの比較	86
	(1) ナノフルイディクス	86
	(2) 界面・表面・ナノ空間	87
	(3) 自己組織化・自己集合(理論、機構、ゆらぎ)	87
	(4) 量子演算・新量子概念	87
	(5) マルチフェロイックス	87
2.3.1.3	比較表	88
2.3.2	材料設計・探索分野	94
2.3.2.1	概観	94
2.3.2.2	中綱目ごとの比較	94
	(1) 計算科学・シミュレーション	94
	(2) DBの構築	95
	(3) 新材料設計・機能設計	95
	(4) 材料探索手法(ハイスループット、コンビナトリアル)	95
2.3.2.3	比較表	96
2.3.3	ナノ計測・評価・標準分野	101
2.3.3.1	概観	101
2.3.3.2	中綱目ごとの比較	102
	(1) 走査型プローブ顕微鏡	102
	(2) 電子顕微鏡	102
	(3) 放射光・X線計測	103
	(4) 単分子分光	103
	(5) 3次元計測(リアルタイム含む)	104
	(6) ナノ粒子評価(形状・分布・表面活性・動態解析)	104
	(7) 標準(物質・計量・評価法)	105
2.3.3.3	比較表	106
2.4	関連共通課題	114
2.4.1	共用研究開発拠点(融合・連携促進)	114

2.4.1.1	概観	114
2.4.1.2	比較表	116
2.4.2	教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）	117
2.4.2.1	概観	117
2.4.2.2	比較表	118
2.4.3	工業標準化戦略	119
2.4.3.1	概観	119
2.4.3.2	比較表	120
2.4.4	社会受容・EHS・ELSI	121
2.4.4.1	概観	121
2.4.4.2	比較表	122
2.4.5	国際プログラム	123
2.4.5.1	概観	123
2.4.5.2	比較表	124
Ⅲ	注目すべき研究開発の動向	125
3.1	ナノテク・材料	127
3.1.1	ナノ構造材料・新機能材料分野	127
3.1.2	ナノ加工技術分野	132
3.2	ナノテク・材料の応用	134
3.2.1	ナノエレクトロニクス分野	134
3.2.2	バイオ・医療分野	144
3.2.3	エネルギー・環境分野	150
3.2.4	産業用構造材料（輸送・建造等）分野	156
3.3	基盤科学技術	159
3.3.1	ナノサイエンス分野	159
3.3.2	材料設計・探索分野	167
3.3.3	ナノ計測・評価・標準分野	171
3.4	関連共通課題	177
3.4.1	共用研究開発拠点（融合・連携促進）	177
3.4.2	教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）	178
3.4.3	工業標準化戦略	178
3.4.4	社会受容・EHS・ELSI	180
3.4.5	国際プログラム	182
	略語集	183
	執筆協力者一覧	185

I 目的及び構成

I 目的及び構成

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を目指しているが、今回は以下の15分野、「ナノ構造材料・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・その他）」、「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・標準」、「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）」、「工業標準国際戦略」、「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 分野ごとに注目すべき研究開発の動向としてとりまとめた。

II 國際技術力比較

2.1 ナノテク・材料

2.1.1 ナノ構造材料・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、機能性ゲル、超分子・デンドリマー、メソポーラス材料、複合系材料・精密重合高分子、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。機能性ゲルは、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の総称である。超分子・デンドリマーは、前者が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集合した分子性化合物、後者が中心から規則的に分岐した構造を持つ樹状高分子で、ドラッグデリバリーや電子素子への期待がある。メソポーラス材料は、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。複合系材料・精密重合高分子は、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で、従来にない特徴を持つ高分子材料である。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を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。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。

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)

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が、明確な下流が見つからないために科学的発見が主となっている。近年は世界的にグラフェン研究が活気を帯びてきている。産業を目指した研究開発の意欲は日本国外で非常に強く、本家の日本を追い越す勢いである。国内の研究は着実ではあるが、スピードが不足気味である。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。

(2) ナノコンポジット材料 (ポリマー、セラミックス、金属、等の組み合わせ)

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大きく遅れている。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、研究開発が海亀派に依存し、産業技術が輸入依存から抜けておらず、実力向上は急であるが、追随には少し時間が必要である。ポリマーを主体にしたものについては、素材の脱金属、脱セラミックスの動きを受けて、世界的に開発が盛んになっており、欧州の研究開発力の伸びや米国の産業技術力の向上が目覚ましい。日本は高い研究開発力や工業技術力を誇っているものの、殆ど停滞しており、欧州や米国の後塵を拝する危機となっている。韓国は全体として未成熟と言えるが、発展は急速であり、政策的に選択と集中に努めている。中国は高い研究開発力を持っており技術開発にも大胆である。

(3) 表面改質材料

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、中国も急速に追いついている。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。

(4) 機能性ゲル

研究開発では日本が世界をリードしている。特に近年の環動ゲル、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。産業化への道が開けつつある。しかし産業化はコンタクトレンズやバイオチップなど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遅れているが、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注目される。

(5) 超分子・ dendrimer

研究開発力は日本と米国が一步先んじているが、産業技術としては、欧州が先行している。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。日本ではまだベンチャーの段階である。韓国では特定の研究グループが研究開発に熱心で、その実力も高い。産業技術力は日本と変わらないものの、高いポテンシャルを持っている。中国では研究者は多いが、レベルアップはこれからであり、産業には達していない。

(6) メソポーラス材料

日本の研究者（黒田一幸教授ら）が先駆して研究していたメソポーラス材料は類似プロセスでモービルグループがメソポーラスシリカを Nature 誌に発表して以来（1992 年）、世界的なブレイクが起こり過去 15 年に亘りトップ学術論文誌に数多くの論文が掲載されたが近年は下降傾向にある。元々、モービルグループは日本の合成を真似たプロセスで 1988 年に社内で独自研究により合成に成功しその後 4 年間、数十人以上の研究者を集中的にメソポーラス材料に従事させ、あらゆる実用化可能性を検討した結果、実用化が困難と判断し 1992 年に Nature 誌に公開に踏み切った。その後の 15 年間の世界的なブームは、最初の Nature 誌をモービルが発表するまでに結論していた実用性の乏しいナノ材料を、世界中の化学者が追試、再確認した 15 年間だったと言える。現状はピークを超えたとはいえ、まだ多くの関連した high impact の学術論

文が発表されているので下降傾向とはいえしばらくは研究が継続すると考えられる。従って、研究開発水準では日米がリードしているが、欧州、中国、韓国は後追いの形であり、産業力ではいずれも水準以下と結論できる。ただし、類似のポーラス材料であるゼオライト系の産業技術については、日本が他の国々を引き離している。

(7) 複合系材料・精密重合高分子（ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等）
金属、セラミックスと並んで三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上げてきてきている。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。

(8) 強相関電子材料

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、特にサムスンの努力が目立つ。産業技術力は、まだどこも保持しているとは言いがたい。

2.1.1.3 比較表

◆ナノ構造材料・新機能材料分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	技術開発水準	○	→	産業との連携が不十分で停滞。
	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。
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、全体として上昇中。
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、上昇中。
	産業技術力	△	→	政策的に危機感を持つ現状レベルの改善には時間がかかりそう。
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。
	技術開発水準	△	↗	水準は徐々に向上中。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習得中。
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ったが、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。
	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。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]

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	研究の側面は拡大し、新しい知見は増大しているが、明確な下流が見つからないために科学的発見が主。グラフェン研究はやや活気あるが熱気と言える状態ではない。
	技術開発水準	○	→	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、まだ探索段階である。一時の熱気はない。
	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	◎	↗	ナノチューブよりもグラフェンで活気を呈している。日本より活発だが、下流がはっきりしない点は日本と同じ。
	技術開発水準	◎	↗	様々な応用面への提案があり、盛況である。バリスティックトランジスターなど、新規な技術の提案が多い。
	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	◎	↗	米国と同様、グラフェン研究が活況を呈している。基礎研究の幅と奥行きが拡大している。
	技術開発水準	○	↗	キャパシター電極、センサー、FETなどで技術開発の意欲が強い。
	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。基盤はまだ浅い。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発力のレベルは低いが、外国との共同研究が少なくない。
	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	◎	↗	世界的なリーダーシップを発揮する研究者は少ないが、レベルは高い。論文数は上昇中である。
	技術開発水準	○	↗	欧州とあまり変わらない。欧州との技術開発を目指した共同研究も推進中。
	産業技術力	△	↗	産業化の例は多くない。技術レベルは欧州と同程度と見て良いと考えられる。

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が、明確な下流が見つからないために科学的発見が主となっている。近年は世界的にグラフェン研究が活気を帯びてきている。産業を目指した研究開発の意欲は日本国外で非常に強く、本家の日本を追い越す勢いである。国内の研究は着実ではあるが、スピードが不足気味である。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。

- (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]

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	高いレベルを保持してきた先端研究が一段落で、新規分野の模索中である。
	技術開発水準	◎	→	大学で高い技術水準を持っているが、企業では従来の優れた開発人材を整理し、新規材料開発の研究には消極的。
	産業技術力	○	→	必ずしも高度な技術力で世界を席巻しているとは言えないにもかかわらず、投資意欲が不足で現状維持がせい一杯。
米国	研究水準	◎	→	大学などでリーダーシップを発揮する研究室がかなりあり、世界の動向を先導している。しかし傾向は現状維持である。
	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が、拡大志向は限定的である。
	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。
欧州	研究水準	◎	↗	ヨーロッパ技術の危機感があり、EUのプログラムの後押しもあって、研究水準は高い。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。
	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。
	技術開発水準	○	↗	かなり大胆な試みを実行し、水準は急速に向上している。
	産業技術力	○	↗	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	○	↗	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	○	↗	自力による開発力の充実が課題である。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	○	↗	高い産業技術力があり、日本のライバルを意識して努力中である。実用化を狙って選択と集中を行っている。

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、米国が実用化で一歩先を行き、欧州は追従、韓国や中国は追い上げが急速ではあるもののまだ大きく遅れている。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、研究開発が海亀派に依存し、産業技術が輸入依存から抜けておらず、実力向上は急であるが、追従には少し時間が必要である。ポリマーを主体にしたものについては、素材の脱金属、脱セラミックスの動きを受けて、世界的に開発が盛んになっており、欧州の研究開発力の伸びや米国の産業技術力の向上が目覚ましい。日本は高い研究開発力や工業技術力を誇っているものの、殆ど停滞しており、欧州や米国の後塵を拝する危機となっている。韓国は全体として未成熟と言えるが、発展は急速であり、政策的に選択と集中に努めている。中国は案外に高い研究開発力を持っており技術開発にも大胆である。

(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]

◆表面改質材料

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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携がうまく進み、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、一般的に、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。

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。

(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]

◆機能性ゲル

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	高分子科学、材料学を中心に基礎、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。多数の研究グループがあり、世界を大きくリードしている。特に、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あり。産と学の連携がアメリカより遅れている。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、世界をリードしていたが、近年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は特徴的である。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	○	→	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は一部を除いて少ない。
	産業技術力	△	→	現在のところ大きな飛躍はない印象であるが、他の高分子関連の産業を見ると、潜在能力はかなり高いはずである。むしろ、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ほとんどなく、水準も低い。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。全く持っていないに近い。
	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、独自で産業化する力はない。
韓国	研究水準	△	↗	日本・欧米に比べて独創的な研究はほとんどなく、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。

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。特に近年の環動ゲル、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。産業化への道が開けつつある。しかし産業化はコンタクトレンズやバイオチップなど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遅れているが、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注目される。

(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]

◆超分子・ dendrogram

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	超分子、 dendrogram の化学の研究者は多く、論文数も多く、世界をリードしている。
	技術開発水準	○	↗	超分子や dendrogram の機能化の研究や開発にも力が入れられており、技術開発が進行中とみられる。
	産業技術力	△	→	まだ、成果は少ないが、ベンチャー企業などがつくられ、産業化に向けての努力がなされている。
米国	研究水準	◎	↗	dendrogram の発祥の地である。超分子研究においても世界をリードしている
	技術開発水準	◎	→	大学と企業との共同研究により、超分子素子の開発が進められている。
	産業技術力	○	↗	分子マシンや分子素子（超分子素子）の開発が進められている。
欧州	研究水準	◎	→	超分子化学の発祥の地で、当初はアーティスティックな構造形成研究であったが、機能面の研究も増えてきた。
	技術開発水準	○	↗	大学と企業との協力により、超分子ポリマーや dendrogram の企業化に向けて研究が進められている。
	産業技術力	○	→	ヨーロッパにおいてはじめて dendrogram が企業化された。さらにこの基幹 dendrogram 用いてその応用研究がなされている。
中国	研究水準	○	↗	多くの研究グループが超分子や dendrogram の研究に取り組んでいる。
	技術開発水準	△	↗	多くの研究が応用指向の研究であり、技術開発のポテンシャルは高い
	産業技術力	△	↗	まだ、この分野での産業開発についてはあまり情報を得ていない。
韓国	研究水準	◎	↗	特定のグループにより、超分子や dendrogram の研究が精力的に進められている。
	技術開発水準	○	↗	この分野での技術開発水準は高い。
	産業技術力	△	↗	ポテンシャルは高いので将来的には大きな産業技術力を保持するものと思われる。

全体コメント：研究開発力は日本と米国が一步先んじているが、産業技術としては、欧州が先行している。欧州の産業力は主に dendrogram 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。日本ではまだベンチャーの段階である。韓国では特定の研究グループが研究開発に熱心で、その実力も高い。産業技術力は日本と変わらないものの、高いポテンシャルを持っている。中国では研究者は多いが、レベルアップはこれからであり、産業には達していない。

(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]

◆メソポーラス材料

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↘	テンプレート合成のメソポーラス材料の基礎研究、萌芽的な研究は日本で行われてきた。黒田一幸教授（早大）らのグループが粘土鉱物の界面活性剤処理でメソポーラス材料を世界最初に合成し、それを米国の研究者が真似た研究を nature に発表してからこの分野が大きくブレイクした。C60 と同様、端緒となる材料研究は日本が行っており、基礎研究のレベルは高く、現状では米国と双肩を成している。但し、近年メソポーラス材料の産業応用の可能性が期待ほど大きくないことが認識されてきており、基礎研究のピークは過ぎたとの認識が広まっている。
	技術開発水準	○	→	メソポーラス材料の合成はテンプレートを用いるが、基本的にシリカやチタニアの合成を基にしているためこれらの触媒応用や機能素材の応用を対象とした技術開発力は日本のレベルは高いと考えられる。
	産業技術力	◎	→	メソポーラス材料、そのものは未だ商品として実用化していないため産業技術力の比較は難しいが、類似材料で広く実用化しているゼオライトの技術力で比較してみれば日本の技術は他国と比較しても極めて高いと判断できる。
米国	研究水準	◎	↘	米国においても研究のピークは過ぎたと判断できる。1992年にモービルの研究グループがメソポーラスシリカの製造法を Nature に発表して以来、この材料がブレイクして世界的に基礎研究ブームを引き起こし Nature, Science などに数多くの論文が掲載された。米国においてもメソポーラス材料の研究ポテンシャルは高いが、その基礎となるナノポアを有する無機材料の研究は日本の研究者が行っている。
	技術開発水準	○	→	現在商品化された材料ではないのでゼオライトなどの類似材料で比較すれば世界トップレベルの技術開発力を有していると考えられる。
	産業技術力	○	→	
欧州	研究水準	○	↘	欧州では英、独を中心に基礎研究のレベルは高いが、日米と同様、基礎研究のピークは過ぎたと考えられる。
	技術開発水準	○	→	日米と比較するとやや劣る。
	産業技術力	△	→	
中国	研究水準	△	→	米国のメソポーラス材料分野における先頭教授グループから帰国した海亀派研究者で世界的に有名な研究者を中心に近年基礎研究ポテンシャルが上がっている。また研究人口の急上昇によりメソポーラス材料の論文数も上がっていると考えられる。但し、世界レベルの研究者はまだ一部であり日米の研究ポテンシャルと比較すると劣っていると考えてよい。メソポーラス材料は有望な実用化技術が未知の状態であり中国においても今以上にブレイクする可能性は小さい。
	技術開発水準	△	→	メソポーラス材料合成はシリカやチタニアの合成を基にしており、テンプレートを使ったメソポーラス材料以外に革新的な合成法が見つかったわけではない。技術開発水準としては現状維持が続くと考えられる。
	産業技術力	△	→	
韓国	研究水準	○	→	KAIST, RYO 教授を中心にメソポーラスカーボンの研究が盛んに行われ、関連したナノカーボン系材料の研究開発がさかんである。現在は燃料電池用カーボン担体材料としてエネルギー環境材料への実用化を検討している。日米と比較すると研究水準はやや劣る。
	技術開発水準	○	→	
	産業技術力	○	→	

全体コメント：日本の研究者（黒田一幸教授ら）が先駆けて研究していたメソポーラス材料は類似プロセスでモービルグループがメソポーラスシリカを Nature 誌に発表して以来（1992年）、世界的なブレイクが起こり過去15年に亘りトップ学術論文誌に数多くの論文が掲載されたが近年は下降傾向にある。元々、モービルグループは日本の合成を真似たプロセスで1988年に社内で独自研究により合成に成功しその後4年間、数十人以上の研究者を集めてメソポーラス材料に従事させ、あらゆる実用化可能性を検討した結果、実用化が困難と判断し1992年に Nature 誌に公開に踏み切った。その後の15年間の世界的なブームは、最初の Nature 誌をモービルが発表するまでに結論していた実用性の乏しいナノ材料を、世界中の化学者が追試、再確認した15年間だったと言える。現状はピークを超えたとはいえ、まだ多くの関連した high impact の学術論文が発表されているので下降傾向とはいえしばらくは研究が継続すると考えられる。従って、研究開発水準では日米がリードしているが、欧州、中国、韓国は後追いの形であり、産業力ではいずれも水準以下と結論できる。ただし、類似のポーラス材料であるゼオライト系の産業技術については、日本が他の国々を引き離している。

◆複合系材料・精密重合高分子（ポリマーアロイ、ブロックコポリマー等）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	新規触媒活用による重合制御、ナノスケールでの3D解析、分子オーダーでの挙動シミュレーションなどで先行するが、基本的な先端研究が少ない。
	技術開発水準	○	→	ニーズに応える技術開発には、精密重合技術を背景に実力を発揮している。革新的な材料の実用化研究は限定的。
	産業技術力	◎	↗	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。耐震材料に新展開。アジア特需で業界は年率5%以上の成長。
米国	研究水準	◎	→	材料複合の基礎構造に実力。高分子化学を多岐にわたり先導。世界のリーダーシップを維持するも、発展性は力不足。
	技術開発水準	◎	→	開発手法は成熟。革新技術はベンチャーよりも企業内努力が中心だが、大学との連携も一段落。次の展開を模索中。
	産業技術力	◎	→	成熟産業になっており、規模によるメリットを追求中。しかし次世代の展開は不透明。
欧州	研究水準	◎	↗	英、独、仏の中心勢力は高い研究水準を保持。東ヨーロッパの研究者巻き込みが顕在化している。ベネルクスや北欧も力を保持。
	技術開発水準	○	↗	従来の開発力不足がEUの頭痛の種。FPなどでの後押しで開発力増強中。
	産業技術力	○	↗	米国や日本に遅れを取った部分があり、これを急速に回復することを目指す。しかし、急成長の中心は北欧や東欧に移りつつある。
中国	研究水準	○	↗	欧米などからの帰国組を中心に比較的高い研究水準を持つ。不足していた研究インフラの整備が進んでいる。
	技術開発水準	○	↗	生産現場を中心に、少しづつレベルを上げている。大学との連携はうまくいっていないが、ベンチャーは盛ん。開発意欲は高い。
	産業技術力	△	↗	導入技術による産業は、コモディティ中心で、レベルも低いが、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。
韓国	研究水準	◎	↗	欧、米、日に均等に目を配り、高いレベルの研究者を抱えている。量的に大きな市場がある分野であることを認識し、政策的な後押しも。
	技術開発水準	○	↗	導入技術依存が長かったため、従来の開発力レベルは高くない。が、国際関係の変化もあり、危機感を持って実力アップを画策中。
	産業技術力	○	↗	導入技術と低賃金の時代が終わり、レベルアップが急務との認識。制御性と付加価値の高い高分子製品への移行を急いでいる。

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。

(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]

◆強相関電子材料

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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）などで相当な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つか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と聞く。
	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たて、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つか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と聞く。
	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。

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。

(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、および 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、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。

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。

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、総合力の間われる技術である。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の果たす役割が大きい。中国も、韓国・台湾と同じ道をたどると思われる。

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）

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、ユーザー利用技術、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資源の投入を要する。したがって、これらの研究開発は単独では成立しえず、コンソーシアムを組んで推進される。日本では、SELETE（半導体先端テクノロジーズ）やASET（超先端電子技術開発機構）を中心としたコンソーシアム型の研究開発で研究水準・技術開発水準を保ち、依然、露光装置、レジスト、およびマスクでは強い。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を構え、そこに世界各国（日本を含む）から多数の企業を集め、高い水準の研究開発を旺盛に進めている。日本のデバイスメーカーの弱体化とも相まって、これらの海外の研究開発拠点が、今後、さらに存在感を増していく傾向にある。もちろん、これらの研究開発拠点で研究開発された技術は、その研究開発拠点が存在する国や地域の技術というわけではないが、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教育などの点で、国や地域に研究開発拠点が存在する意義は大きい。

(2) ナノ転写加工技術（ナノインプリント等）

ナノ転写加工技術は、いわゆる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に代表される。ナノインプリントは、1995年に（現）プリンストン大学のChou教授らによって発表されたが、マイクロサイズでは、CDの製作などで既に実用化されていた技術である。同時期に、米国ハーバード大学のWhiteside教授らによって、PDMSと呼ばれるシリコンゴムを用いたナノサイズの型取り技術が、型取りしたPDMSを判として用いるマイクロコンタクトプリントなどの様々な適用例とともに発表された。両技術とも、一見、「試してみやすい」技術であるために、大学や公的研究機関で玉石混合の多くの基礎研究がなされた。これらの基礎研究に関して、日米欧の水準の差は大きくない。また、本技術は原理が単純なため、世界中でベンチャー企業を含む多くの装置メーカーが実験機や生産機、あるいはモールドを製造・販売、あるいは開発している。一方、ナノ転写加工技術は、基礎研究の間口の広さとは裏腹に奥の深い技術であり、実際の製品に適用しての産業化には、多くの技術的課題が存在する。したがって、世界中で実用化例は少なく、産業競争力でどこかの国や地域が突出しているわけではない。特に、本命の最先端LSIへの適用は、IBM、HP、サムソンなどでも研究されているものの、依然、技術的に難しい課題を残しており、まずは微細光学部品などに適用される。

(3) 自己組織化技術

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、さらにバイオ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。本技術全体は基礎研究

の段階に偏っており、大学や公的研究機関が行う基礎研究に関して、日本より欧米が優位である。また、日本を除くアジア各国の基礎研究水準は、日米欧より劣っている。本技術全体が基礎研究の段階に偏っている中で、この段階から応用・実用化の段階に移行する技術開発競争が重要である。この点で、東芝、東レなどの日本の企業は、それぞれ高密度ハードディスク、高機能素材など市場の大きい製品への適用で先行している。IBM は、low-k 材料（LSI 配線を支える層間絶縁膜材料として使われる誘電率の低い材料）として空孔の大きさや密度が制御されたポーラス膜を利用する開発を進めている。欧州では、パイオチップなど、ややニッチな製品への適用が、大学発ベンチャー企業などに見られる。このように、実用化への技術開発競争では、特許出願件数を含め、日本は欧米に比べて優位にある。他のアジア各国は、実用化への技術開発競争でも日米欧より劣っている。

(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）

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、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。既に、インクジェット印刷のビジネスが立ち上がっているため、インクジェットノズルメーカーとインクメーカーとの連携も確立している。なお、ナノテクノロジーは、このインクの製造に用いられている。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、欧米には出る幕がない。最終製品の製造では、韓国に強みがあるが、そこに使われている重なる部品・材料は日本製であり、①、②の強みと合わせて、③に関しても日本に強みがある。しかし、最終製品を握っている韓国は、今後、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。なお、既に大きなビジネスが立ち上がっているため、企業は大学などの公的研究機関には見えないところで、大規模な研究開発を実施している。

(5) MEMS・NEMS 加工技術

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。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。中国も同様の道をたどると予想される。

2.1.2.3 比較表

◆ナノ加工技術分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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・量ともに貧弱である。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、中国企業は技術開発より技術導入に積極的になる。
	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]

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	装置開発・材料開発は、コンソーシアムを中心に研究開発を行っている。ユーザー側の先端技術開発に対するインセンティブの低下が懸念点である。
	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いるものの、顧客の多くが海外企業である。利用技術であるデバイス側の技術開発は低調である。
	産業技術力	○	↘	産業がメモリとSOCとで2極化している。メモリメーカは、最先端技術の導入に積極的であるが、SOCメーカは消極的である。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、大学や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。
	産業技術力	○	→	デバイスメーカ中心に、微細化と利用技術改良と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、装置メーカの研究開発、および半官半民の研究機関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している。
	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	×	→	まだ、リソグラフィ技術を開発するに至っていない。
	産業技術力	△	↗	最先端技術の応用は未だ遅れている。従来技術を急速に吸収し、生産技術の高度化では、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が、リソグラフィ技術では顕著な研究成果は今のところ見られない。
	技術開発水準	○	↗	欧米や日本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。
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、材料技術を生産現場が主導し、さらにデバイスユーザ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、ユーザー利用技術、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資源の投入を要する。したがって、これらの研究開発は単独では成立しえず、コンソーシアムを組んで推進される。日本では、SELETE（半導体先端テクノロジー）やASET（超先端電子技術開発機構）を中心としたコンソーシアム型の研究開発で研究水準・技術開発水準を保ち、依然、露光装置、レジストおよびマスクでは強い。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を構え、そこに世界各国（日本を含む）から多数の企業を集め、高い水準の研究開発を旺盛に進めている。日本のデバイスメーカの弱体化とも相まって、これらの海外の研究開発拠点が、今後、さらに存在感を増していく傾向にある。もちろん、これらの研究開発拠点で研究開発された技術は、その研究開発拠点が存在する国や地域の技術というわけではないが、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教育などの点で、国や地域に研究開発拠点が存在する意義は大きい。

◆ナノ転写加工技術（ナノインプリント等）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	基礎研究、応用研究とも要素研究に留まっている。シミュレーションの研究に他国にはない特徴が見られる。
	技術開発水準	○	↗	装置、スタンプ、樹脂材料の開発を複数メーカーが進めており、国内のインフラはかなり整備された。応用研究も進んでいる。
	産業技術力	△	↗	ディスプレイ用偏光板や反射防止膜といった光学部品、記録媒体などへの応用展開が始まっているが、産業化には至っていない。いくつかの企業がナノインプリント装置を販売している。
米国	研究水準	○	↗	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。基礎研究からデバイスの試作まで、幅広く研究している。
	技術開発水準	○	↗	IBM がマイクロプロセッサへの、Hewlett-Packard はメモリへの応用を進めている。DARPA などの資金によって、ベンチャー企業も育成されている。
	産業技術力	△	↗	LSI 応用の開発が進むが、量産に耐えられる技術が未確立である。
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）が終了し、研究水準を保っている。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	○	↗	量産用装置をスウェーデンの Obducat が開発している。イギリス、フランス、およびスウェーデンにおいて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開始された。
	産業技術力	△	↗	日米と同様に、産業化には至っていない。いくつかの企業がナノインプリント装置を販売している。
中国	研究水準	×	→	中国籍の研究者が欧米で活躍している。
	技術開発水準	×	→	
	産業技術力	×	→	
台湾	研究水準	△	↗	機械研究所が主導して、装置開発から始まっている。
	技術開発水準	○	↗	国立研究所、台南大学など産官主導での産業化に取り組んでいる。
	産業技術力	△	→	産業化する企業が現れていない。
韓国	研究水準	△	→	研究水準は高くない。
	技術開発水準	○	↗	サムソンを中心に、特にフラットパネルディスプレイ向けにナノインプリントの開発を進めている。
	産業技術力	△	↗	上記の開発が産業化には至っていない。

全体コメント：ナノ転写加工技術は、いわゆる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に代表される。ナノインプリントは、1995年に（現）プリンストン大学の Chou 教授らによって発表されたが、マイクロサイズでは、CDの製作などで既に実用化されていた技術である。同時期に、米国ハーバード大学の Whiteside 教授らによって、PDMSと呼ばれるシリコンゴムを用いたナノサイズの型取り技術が、型取りした PDMS を判として用いるマイクロコンタクトプリントなどの様々な適用例とともに発表された。両技術とも、一見、「試してみやすい」技術であるために、大学や公的研究機関で玉石混合の多くの基礎研究がなされた。これらの基礎研究に関して、日米欧の水準の差は大きくない。また、本技術は原理が単純なため、世界中でベンチャー企業を含む多くの装置メーカーが実験機や生産機、あるいはモールドを製造・販売、あるいは開発している。一方、ナノ転写加工技術は、基礎研究の間口の広さは裏腹に奥の深い技術であり、実際の製品に適用しての産業化には、多くの技術的課題が存在する。したがって、世界中で実用化例は少なく、産業競争力でどこかの国や地域が突出しているわけではない。特に、本命の最先端 LSI への適用は、IBM、HP、サムソンなどでも研究されているものの、依然、技術的に難しい課題を残しており、まずは微細光学部品などに適用される。

(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]

◆自己組織化技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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	○	↗	東芝などの電機メーカ、および東レなどの素材メーカが技術開発に力を入れている。特許申請数も他国に比べて多い。
	産業技術力	×	→	産業化には至ってない。
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などの半導体メーカーが実用化研究に取り組んでいる。
	産業技術力	×	→	産業化には至ってない。
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が強く、英国はバイオ系が強い。
	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 関連の製品開発が盛んである。
	産業技術力	×	→	産業化には至ってない。
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	×	→	産業化には至ってない。

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、さらにバイオ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。本技術全体は基礎研究の段階に偏っており、大学や公的研究機関が行う基礎研究に関して、日本より欧米が優位である。また、日本を除くアジア各国の基礎研究水準は、日米欧より劣っている。本技術全体が基礎研究の段階に偏っている中で、この段階から応用・実用化の段階に移行する技術開発競争が重要である。この点で、東芝、東レなどの日本の企業は、それぞれ高密度ハードディスク、高機能素材など市場の大きい製品への適用で先行している。IBMは、low-k材料として空孔の大きさや密度が制御されたポーラス膜を利用する開発を進めている。欧州では、バイオチップなど、ややニッチな製品への適用が、大学発ベンチャー企業などに見られる。このように、実用化への技術開発競争では、特許出願件数を含め、日本は欧米に比べて優位にある。他のアジア各国は、実用化への技術開発競争でも日米欧より劣っている。

(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]

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	企業の開発活動は活発であるが、大学や公的機関での基礎研究は欧米に比べても見劣りする。しかし、近年はナノ・マイクロ印刷技術に取り組む研究機関が増加しており、良い研究成果が報告されている。
	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。
	産業技術力	○	↗	液晶ディスプレイ分野で大規模な適用が既に開始している。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研究では優れた研究が見られるが、若干、下火になっている印象がある。
	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る。ただし、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。インクジェットヘッドの開発や装置開発は進んでいるが、機能性インク開発は下火になっている。
	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。
	産業技術力	△	↗	一部のベンチャーで産業化がなされつつある。インクジェットのヘッドに強みがある。
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が、水準は低い。
	技術開発水準	○	↗	一部の企業が活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、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。既に、インクジェット印刷のビジネスが立ち上がっているため、インクジェットノズルメーカーとインクメーカーとの連携も確立している。なお、ナノテクノロジーは、このインクの製造に用いられている。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、欧米には出る幕がない。最終製品の製造では、韓国に強みがあるが、そこに使われている重要な部品・材料は日本製であり、①、②の強みと合わせて、③に関して日本に強みがある。しかし、最終製品を握っている韓国は、今後、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。なお、既に大きなビジネスが立ち上がっているため、企業は大学などの公的研究機関には見えないところで、大規模な研究開発を実施している。

(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]

◆ MEMS・NEMS 加工技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	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、散発的な感がある。新しい MEMS には、まず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、国柄から少ない。
	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:クロック、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、大きく出遅れた。
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、RF MEMS スイッチ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（MEMS マイク）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、こうした場で本格的な研究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	×	→	MEMS 産業は立ち上がっていない。
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	△	↗	MEMS 受託生産企業があるが、独自製品を出す企業の登場はこれからである。
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が、層は薄い。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、製品化にはほとんど至っていない。

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。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。中国も同様の道をたどると予想される。

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・メタマテリアル、近接場光技術・ナノフォトニクス、プラズモニクス、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・発光デバイス、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 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。又固体素子メモリも最近急速に重要になりつつあり、そ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。有機エレクトロニクスも歴史は古いが、現在の進展もめざましく、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も最近それを使ったレーザが実現し、小さな温度特性により、デバイスの安定度は飛躍的に上がりそれを売り出そうとするベンチャーも日本で生まれてきた。しかし量子ドットのエレクトロニクスの寄与はそのような直接的な寄与ばかりでなく、InGaN 材料の様に自然形成される量子ドットがその発光特性を飛躍的に上げる隠れた役割を果たす等、いろいろな面で重要な役割を果たしている。又近接場光学技術はそれをを用いた巨大要領のハードディスクの実現を可能にする潜在的要素を持っており、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、最近の進展はまだ基礎研究レベルとはいえ、将来を期待させるものがある。

これらの研究を世界の activity の中で見たときの日本の位置は必ずしも樂觀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、人件費の安い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目を出しつつあることは強く認識すべきである。又韓国は豊富な財力と比較的安い人件費に恵まれ、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事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、それぞれ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。

2.2.1.2 中綱目ごとの比較

(1) CMOS 材料技術

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崇峻を維持しているが、全体的に予算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、重要となってきている。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が明確になる。

(2) スピントロニクス（強相関電子デバイス含む）

本分野は基礎から応用までの幅広い分野を包含しており日米が圧倒的強さを示している。スピン注入磁化反転は米国で理論が提案され、実証されたもので、今後 MRAM で使われる主流技術となりつつあるが、当初我が国の技術者は電流密度が高いなど極めて否定的であった。ブレークスルーには、理論・基礎的実験・開発研究などの幅広い連携が必要である。一方、欧米ではベンチャーがあるので、産業化の試行回数をそこで稼ぐことができ、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、我が国はこのような試行のチャンネルが細かい点が将来響いてきそうである。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。日本ではまだこのような流れになっていない。民間の体力差や大学の受け入れ態勢もあるのであろうが、このような連携を進めていく仕掛けが必要である。日本は特に材料開発力に優れている。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、中国の研究開発力は今後発展してくるものと思われる。

(3) 固体素子メモリ

この分野は将来重要になる分野で積極的な開発が必要である。ただ現状では DRAM、フラッシュメモリの主要分野では、韓国の 2 社が大きな力を持っている。不揮発性 RAM に関しては、すべての地域で研究開発が行われているが、信頼性の確保が今後の課題である。特に MRAM は今後重要になってくるもので、日本は大きな力をこの分野では持っている。

(4) 有機エレクトロニクス

全体は有機 EL 技術の産業展開に牽引されている傾向にはあるが、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。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 の産業化を成功させることが最も大事な時期に来ている。

(5) 量子ドットデバイス

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、2 - 3 年前に 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°C から 70°C 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 10Gbps 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。富士通と三井物産によるベンチャー「QDLaser」が昨年設立され、メトロ・アクセス通信向け 1.3 μm 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 μm 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 μm 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する。

(6) フォトニック結晶・メタマテリアル

フォトニック結晶構造を利用したファイバや LED に関して、実用化のため

の開発が行われている。前者は、光伝搬方向に沿って孔が開けられた光ファイバである。現在、日米欧が拮抗している状況にある。実用を目指した開発では曲げ損失が小さい点が注目され、FTTH で屋内の光ファイバの自由な引き回しに利用されようとしており、この点は FTTH の導入が進む日本がリードしている。後者は LED の発光層の表面や裏面に周期的な凹凸を刻んで光取り出しを向上させるもので、米国が基本特許を出し、日本が実証した。単なる平面 LED の 1.5 ~ 3 倍の輝度が見込まれる。周期性が不完全な構造(テクスチャー構造と呼ばれる)から完全な周期構造まで、安価な製造法との兼ね合い開発が行われているが、層構造や電極も含めた全体設計も重要で、まだ製品としては改善の余地がある。日本では有機 EL への導入も研究されている。フォトニック結晶は日・米から基本構想が出されたものがほとんどであるが、近年の実証実験は日本がリードしている。これらのデバイスの実用化には集積技術の進歩が不可欠だが、その意味では、最近、話題が高まっているシリコンフォトニクスの枠内での進展が理想的である。現在、主流の細線導波路をベースとしたシリコンフォトニクスは日米が基礎研究を競ってきたが、最近ではインテル、ラクスセラ、IBM といった米メーカーが優位で、欧州プロジェクトも進行中である。

メタマテリアルは基礎概念の提唱が 1960 年代までさかのぼるが、実現可能性が議論されるようになったのは 1990 年代後半の欧州の理論研究以降である。インダクタンスとキャパシタンスを併せ持つ金属スプリットリングにより負の屈折率と透磁率が同時発生し、それによる点光源の完全集光や迂回光路(透明人間的な技術)が可能になると予測されたことが、最近の研究ブームの発端となった。ただし金属を利用していることから、光波帯では吸収損失が避けられない。そのため、欧米の共同研究は電波を利用してこれらの現象を実証した。光波帯の吸収損失を減らす研究が日米欧で並行して行われているが、現時点では難しそうである。

(7) 近接場光技術・ナノフォトニクス

ナノフォトニクスは近接場光を使う技術である。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术であり、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でも研究開発が活発化してきたので要注意。国際学会活動なども活発化。今後も先導的立場を保ち続けるためには日本主導で国際間の連携を調整、後進の人材育成、産業界の啓蒙をさらに推進することが必要と考えられる。

(8) プラズモニクス

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、研究機関では研究は盛んであるが、企業ではいくつかの会社をのぞいてそれほど活発ではない。しかし将来のセンサ応用等潜在力があるので企業は大学の力を有効に使いながら企業化のタイミングを見極める必要がある。この分野における日本の特徴は、企業の研究者を含めた応用研究およびその企業化にむけたポテンシャルが高いところにある。ユニークな応用の提案も多い。米国、欧州では応用研究も活発であるが基礎研究のレベルが特に高い。国内でも基礎研究のレベルを一段あげればさらに良い応用が開けてくると考えられる。しかし全般にナノエレクトロニクスの中では投資額はそれほど世界的に高くなく、現在のレベルでしばらく推移するであろう。

(9) ディスプレイデバイス

ディスプレイデバイスの産業は、一般のモノづくりの潮流と同様に、欧米から日本、そして韓国・台湾・中国の方向にあるが、日本としては半導体に於けるインテル等のように知財権に裏打ちされた独自技術により高付加価値・高機能ディスプレイを開発・製造し、この分野の世界の発信基地となり事業競争力を維持させていくべきである。この観点を踏まえ、研究開発・生産に関し、日本企業としては各国企業との競争・協業の両視点から、個々の製品内容（コモディティ／特徴品）を考慮に入れた経営戦略や国際分業の観点も踏まえた国際戦略が益々重要となり、それらに関する法・制度の整備も重要となる。また、合せて現在トップにある日本の国際競争力を維持強化させていくためには、基盤となる革新技術に関する研究開発と人材育成が急務であり、現状、日本の大学に於ける活動が韓国や台湾に比して弱体化しているだけにその強化は重要な視点である。

(10) 固体照明・発光デバイス

白色 LED は、約 10 年前に登場し、半導体照明また固体照明という新しい研究分野における発光素子であるが、現在普及している白色光源は半導体 LED 励起光源と蛍光体との組合せによって成り立っており、急速に市場の製品に応用されている。白色 LED 照明技術は、白熱電球、蛍光ランプ、高圧放電ランプ（HID）を代替可能な次世代省エネルギー型固体照明光源として期待されている。日本から世界に発信され、この 10 年間で、日本の技術を基に一般照明光源への応用を目指し、“見る” あかりから“照らす” あかりとして、世界各国で学術的・産業的な規模で研究が進められている。白色 LED 照明研究は新しく、将来、一般照明システムへの代替には多くの学術的・産業的課題が残されている。そのためには、半導体工学、照明工学、光環境・システ

ム工学及び照明デザインの異分野の融合研究が必要となる。近年、発光効率が100lm/Wを越え、平均演色評価数95以上の高性能白色LED光源が開発された。さらに、蛍光体・樹脂・放熱基板等材料分野の研究も活発に行なわれる様になり、実装・プロセス技術に係る後工程が高度化してきている。日本の大学では窒化物半導体研究が活発であり、一方、照明メーカーは光源・器具開発を行っているのが現状である。産学連携では、固体と照明の研究に大きなギャップがある。現在は、発光効率の向上が製品化に結びついており、白色光の質を議論するところまでできていない。100lm/W以上の製品も間近であるが、新しい技術による新しい光源の出現が待たれている。しかしながら、材料（蛍光体、樹脂、封止剤等）によってがらりと変化する研究開発分野であり、まだ未成熟である。しかしながら、LSI、液晶ディスプレイ等において日本が経験してきた様に、国際競争力の観点から見ると、台湾、韓国の企業と大学が日本の技術のキャッチアップおよびコストの低下が研究開発に直接大きな影響を及ぼし始めている。

(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）

本綱目の研究開発は、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ー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ドリーサービスは、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。

2.2.1.3 比較表

◆ナノエレクトロニクス分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	プラズモニクスやディスプレイの分野を除き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。しかし中には次の目玉が見あたらない、あるいはベンチャーが少なく試行ができない、等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。
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、activityの減衰が見られる分野もあり、又将来のデバイスを目指した基礎研究を構築しつつある分野もある。基礎面では一般に新しい提案等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、分野によっては外国に拠点を移動したり、分野の縮小等で activity 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り、たとえばナノピラー等の材料応用等積極的な提案をし出しており世界を引っ張ろうとしている。只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。
	産業技術力	○	→	欧州はエリクソンや、ノキヤ、あるいはジーマス、インフィニオン等強力な会社が勢揃いしており、たとえばカーボンナノチューブを使った配線等はインフィニオンから発信されており世界がそれに追従している。基礎に裏付けられた高い産業技術力があると考えべきである。
中国	研究水準	△	↗	まだ米国、日本の模倣を中心としたものであるが、質は別として膨大な論文が今中国から出ており、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我々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	△	→	開発研究は装置が良いのがあればある程度はできるので、今まさに発展途上である。台湾等は電子部品の多くのものが世界で大きなシェアを既に占めている。只ナノテクノロジーという観点はほとんどなく将来問題が出てくるかもしれない。
	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、技術はすべて日米からきているが彼らがそれ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。只分野が限定されているのでその先を行く基礎研究を日本は今から準備しておく必要がある。
	技術開発水準	◎	↗	サムソンに見られるように巨大な資本力によって新しい技術はすべて取り入れてしまうどん欲さがあり、将来のびていくことは間違いない。今はまだ基礎研究は弱いが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、これからの大きな競争相手となっていくことは間違いない。
	産業技術力	◎	↗	十分な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]

◆ CMOS 材料技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	MIRAI プロジェクトなどのプロジェクトを初めとして、高い研究水準を維持しているが、研究開発予算の減少により、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	○	→	企業でも世界に伍した研究開発が展開されている。しかし最近目玉アプリに乏しく、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、水準を維持していると思われる。しかし新材料を量産に導入する時期は、企業間で差があると予想される。
米国	研究水準	○	→	研究投資が続けられる一部企業を除いて、アクティビティはやや低下。その分が大学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、IBM を中心に、開発力は強力である。装置メーカーの技術開発力も抜きんでている。しかしこれらの一部企業を除き、プロセス・材料技術からは撤退する傾向が見られ、共同開発などで補填されている。
	産業技術力	○	→	インテル、IBM を中心に、先陣を切る実用化が行われる運びである。しかし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。
欧州	研究水準	◎	↗	コンソーシアム・研究所を中心に、先端研究のアクティビティが維持されている。又、IMEC、Leti などの公的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	○	→	公的機関の開発力を後盾に、SOI 基板では世界を席巻するに至っている。
	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。しかし 開発技術は、必ずしも欧州内での実用生産を意図していない。
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、確実に力は付けて来ているが、総じてまだ水準は低い。しかし大学では研究が行われており、学会発表も増えつつある。
	技術開発水準	×	→	企業レベルでの開発は行われていない。
	産業技術力	×	→	産業的には、新材料を必要とする段階に至っていない。
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。大学も力をつけて来ている。又大学による学会発表は急増している。
	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、強力な技術開発が行われている。
	産業技術力	○	↗	アジア的細やかさとアメリカ流の経営手法が合理的に組み合わせられており、強力である。韓国企業はメモリーが主力なので、CMOS 新材料の産業応用は、CMOS ロジックよりもメモリー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崇峻を維持しているが、全体的に予算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]

◆スピントロニクス（強関連デバイス含む）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	世界を牽引。巨大トンネル磁気抵抗効果を実証。半導体スピントロニクスでもリード。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	◎	↗	ハードディスク開発で優位。MRAMの開発にも注力。目先の技術に捉えられすぎている傾向あり。経産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。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課題。
	産業技術力	◎	→	装置メーカーが巨大トンネル磁気抵抗作用のスパッタ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。ハードディスク、磁気光学デバイスに関してはまだ優位性があるが、他国との競争にさらされている。現世代のMRAMは実用化に遅れをとった。
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新しい物理を実証している。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（強関連含む）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。基礎研究にも目配りしており、大学との共同研究が盛ん。スピントロニクス関連ベンチャーなども含め、向上しつつある。
	産業技術力	◎	↗	ベンチャーも含めて向上。実際に大きな市場占有率を持つ。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。全体として個別に強い研究拠点があるが、ドイツ、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。（台湾に関しては、大学・ITRI・TSMCなどの関係は極めて密接で、大学は民間の開発部門の役割を一部担っている。）
	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。
	産業技術力	×	↗	台湾は、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。米国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いる。
	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が、まだ独自性は見えない。大学との連携は不十分なようだ。
	産業技術力	○	↗	企業は限られている。しかし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。

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米国で理論が提案され実証されたもので、今後MRAMで使われる主流技術となりつつある。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点が将来響いてきそうである。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。日本ではまだ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。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、中国の研究開発力は今後発展してくるものと思われる。

◆固体素子メモリ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	不揮発性 RAM、特に MRAM に関する研究が活発である。
	技術開発水準	○	→	生産に必要な技術開発を行っている。韓国勢を凌ぐ微細化を計画していることは注目される。
	産業技術力	◎	↗	東芝の NAND フラッシュメモリ、エルピーダの高性能 DRAM など、特定の分野で頑張っている。
米国	研究水準	○	→	FRAM, MRAM, RRAM などの不揮発性 RAM に関する研究は続けられている。
	技術開発水準	△	↘	大容量メモリの技術開発水準は低下傾向である。
	産業技術力	△	↘	米国では、メモリの生産は主流ではない。
欧州	研究水準	○	→	IMEC などで、一部研究されていると思うが、余り多くはない。
	技術開発水準	○	→	生産に伴う技術開発は行われている。
	産業技術力	○	→	Infinion において、DRAM の生産が行われている。
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。
	技術開発水準	△	→	独自の技術開発力は、これからの課題であろう。
	産業技術力	△	↗	生産拠点の役割は大きくなると予想される。
韓国	研究水準	◎	↗	FRAM, PRAM など多くのメモリを研究開発している。MRAM に対する研究が余り行われていないのは、日本と対照的である。
	技術開発水準	◎	→	FRAM, PRAM に関する技術開発では、信頼性の確保がまだ完全でなく、製品化には至っていない。
	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。Samsung の業績がやや悪化し、Hynix が好調である。
<p>全体コメント：この分野は将来重要になる分野で積極的な開発が必要である。ただ現状では DRAM、フラッシュメモリの主要分野では、韓国の 2 社が大きな力を持っている。不揮発性 RAM に関しては、すべての地域で研究開発が行われているが、信頼性の確保が今後の課題である。特に MRAM は今後重要になってくるもので、日本は大きな力をこの分野では持っている。</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]

◆有機エレクトロニクス

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の 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 の産業展開に牽引され、参入する研究者数が増加。EL に関してはすでに産業技術に追いつけないと判断される傾向があり、その分有機トランジスタ研究に集中する傾向。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	◎	↗	EL に関する技術開発が主流を占めるが、有機太陽電池や有機トランジスタ技術の開発も最近では高い技術力を保有するようになってきている。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	◎	→	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、幅広い研究開発が産学で行われている。
米国	研究水準	○	→	水準は高いが、最近では勢いにかげりが見えてきており、目立つ成果は減ってきている。しかし学会・論文では、勃発的にキーとなる論文が出ている。
	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。
	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はない。ただし、GE の照明技術や、ベンチャーの活躍が目立つようになってきている。
欧州	研究水準	◎	↗	歴史的に強いバックグラウンドを保有し水準は高いが、かなり長期的な視野に立っての取り組みのようで、地道な基礎理論から実験まで、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著しい。コンソーシアムの形成などを積極的に仕掛け、世界の情報発信基地の中心を狙う動きを見せている。
	産業技術力	◎	↗	現在、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、大手企業の参入が多くはなく、産業展開規模はアジア地区と比べると見劣りする。
中国	研究水準	◎	↗	年々研究報告数が増えている。特に台湾においては、ディスプレイに関する研究を中心に勢いがついてきている。膨大な数の論文が出てきている。
	技術開発水準	○	→	台湾において、一部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。一方、本国においてはまだまだほとんど育てていない。日本企業から装置輸入などは積極的に進んでいる様子。
韓国	研究水準	◎	↗	産業界に牽引される形で推進。当初追従型の研究が目立ったが、最近では固有技術の提案も目立ち着実に力をつけている。最近の学内研究施設の充実ぶりは、目を見張る。
	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。
	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。サムスンと LG フィリップスを中心に展開されているが、最近では素材、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む。

全体コメント：全体は有機 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。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組み立てら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 の産業化を成功させることが最も大事な時期に来ている。

(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]

◆量子ドットデバイス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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	◎	↗	昨春、量子ドットデバイスのベンチャー QDLaser 社が設立され、実用化開発中。
米国	研究水準	◎	→	量子ドットレーザは日欧と同レベル。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) の基礎研究では先行している。
	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	◎	→	TiaLaser 社が昨秋欧州の NL-Nanosemiconductor に吸収されたが、継続して開発中の模様。
欧州	研究水準	◎	→	ドットレーザを中心に、ベルリン工科大、デンマーク工科大、ウルツブルグ大学、シェフィールド大、など、多くの大学で研究が盛んである。
	技術開発水準	◎	↗	Alcatel-Thales (仏) が 1.55 μ 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。
	産業技術力	◎	↗	量子ドットレーザのベンチャー NL-Nanosemiconductor (ドイツ) はベンチャー TiaLaser (米) を昨年吸収し、innolume として事業拡大に積極的。
中国	研究水準	△	→	目覚ましい成果は出ていない
	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

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、2 - 3 年前に 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℃から 70℃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 10Gbps 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。富士通と三井物産によるベンチャー「QDLaser」が昨年設立され、メトロ・アクセス通信向け 1.3 μ m 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 μ m 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 Alcatel が 1.5 μ m 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]

◆フォトニック結晶・メタマテリアル

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	フォトニック結晶に関しては、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、応用全てに関して世界をリードしている。ただし直近の応用に結びつく研究が不足気味なのが悩みの種。メタマテリアルに関しては、欧米に比べて遅れている。光吸収の問題が大きいフォトニクス分野よりも、電波の周波数で無線技術として研究されている。
	技術開発水準	◎	→	NTT、NEC などの大企業が国プロで実施している基礎研究は世界最高レベル。その他、ブラックボックス化しているものの、小規模な研究を行う企業は多い。ただし一部を除いては、ここでも産業応用の壁に当たっているため、アクティビティーは横ばい。ただしメタマテリアルに関しては欧米に比べて遅れている。
	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して、基礎物理の研究は Caltech や Stanford 大学、UCSB などが活発だが、発光素子などに限定されており、全般的には日本に押されてやや下降気味。これに対して、メタマテリアルの研究は爆発的に拡大中。欧米で協調した研究が世界をリードしている。光の周波数での動作を目指す研究も多い。
	技術開発水準	○	→	基礎研究と応用研究の内容が分離気味なため、企業での研究事例が少ない。シリコンフォトニクスにおけるフォトニック結晶まで議論を拡大すると、IBM などの大企業が活発に研究している。
	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。その他の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	◎	↗	米国と同様の傾向であり、メタマテリアルに関しては研究が拡大している。
	技術開発水準	○	→	米国と同様の傾向である。
	産業技術力	△	→	フォトニック結晶ファイバー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。目立った産業応用が見られない。
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。メタマテリアルは、基礎物理の理論か、電波周波数帯に限定されている。
	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。
	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いる。メタマテリアルは日本と似た状況。
	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応用研究は活発な模様。
	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：フォトニック結晶は基礎物理の研究、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が難しい状況。フォトニック結晶自体の基礎研究のプレーヤーはやや固定化してきており、分野は横ばい。むしろ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きたため、この分野以外で目にするのが多くなってきた。技術開発に進んでいるフォトニック結晶ファイバーやLEDといった応用は、各国で急速に技術開発されており、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、全般的に日本はリードしている。一方、メタマテリアルはフォトニック結晶と同じコミュニティから登場した分野ではあるが、原理が異なるところがあり、光の周波数帯では本質的に光吸収の問題があるため、電波周波数帯の研究の方がはるかに活発である。

(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]

◆近接場光技術・ナノフォトニクス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	我が国は近接場光学のパイオニア。ナノフォトニクスは完全に我が国発の概念、技術。仮想励起子ポラリトンによる理論モデル開拓、近接場光エネルギー移動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。
	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、さらには情報セキュリティ応用、X線用デバイス開発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我が国産業のみが実用化。国際標準化におい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1Tb/inch ² 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。
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があるが、ナノフォトニクスの原理は使いこなせていない。材料分野において半導体微粒子などの粉を作っているのみで、その応用については新規性なし。
	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、成果は出ていない。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VEECO社などは技術力不足のために撤退（日本のJASCO社にはかなわない）。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。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。
	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、バイオ計測応用のみに留まり、デバイス、加工、システムなどの技術開発水準は低い。
	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、一時期サムソ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。しかし最近米国でも研究開発が活発化してきたので要注意。国際学会活動なども活発化。今後も先導的地位を保ち続けるためには日本主導で国際間の連携を調整、後進の人材育成、産業界の啓蒙をさらに推進すること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]

◆プラズモニクス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	基礎研究の水準は米国や欧州に比べてやや遅れているが、近年この分野の研究を始めるグループが増えている。
	技術開発水準	◎	↗	応用研究は米国や欧州と比べても遜色無い水準にある。大学や国研だけでなく企業の研究者も多いのが特徴である。
	産業技術力	◎	↗	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。実用化にむけた動きも活発である。
米国	研究水準	◎	↗	基礎研究はトップレベルの水準にある。プラズモニクスという言葉も米国から発信されている。
	技術開発水準	◎	↗	応用を視野に入れた研究が活発であり、大学も含めて開発水準は高い。
	産業技術力	◎	↗	応用に向けた動きも多く、ベンチャー企業も多い。企業によるプラズモンセンサの実用化もされている。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究はトップレベルの水準にある。特にドイツやフランス、スイスで基礎研究が高いレベルにある。
	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。
	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エーデンのピアコア社を中心に技術力は高い。
中国	研究水準	○	↗	近年多くの基礎研究報告がある。レベルは日本より少し遅れている程度でかなり高い水準にある。
	技術開発水準	△	→	大学を中心に応用に向けた研究が幾つかのグループで報告されている。
	産業技術力	×	→	企業化の動きはあまりない。
韓国	研究水準	△	↗	シミュレーションを中心に幾つかの大学において関心が高い。
	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	×	→	企業化の動きはあまりみられない。

全体コメント：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、研究機関では研究は盛んであるが、企業ではいくつかの会社をのぞいてそれほど活発ではない。しかし将来のセンサー応用等潜在力があるので企業は大学の力を有効に使いながら企業化のタイミングを見極める必要がある。この分野における日本の特徴は、企業の研究者を含めた応用研究およびその企業化にむけたポテンシャルが高いところにある。ユニークな応用の提案も多い。米国、欧州では応用研究も活発であるが基礎研究のレベルが特に高い。国内でも基礎研究のレベルを一段あげればさらに良い応用が開けてくると考えられる。しかし全般にナノエレクトロニクスの中では投資額はそれほど世界的に高くなく、現在のレベルでしばらく推移するであろう。

(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]

◆ディスプレイデバイス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	産業技術力	◎	↗	部材・装置を含めた総合的な産業技術力は、現在でも世界トップの位置にある。
米国	研究水準	○	↘	1960年代までは世界のトップに在ったが、1970年代以降は事業主体が日本を含め海外へ移行したため、研究開発も徐々に弱体化。
	技術開発水準	○	↘	事業の海外シフトのため米国内の技術開発力は、急速に弱体化。
	産業技術力	×	↘	今日においては主たる事業主体としての企業がなくなり、事実上産業技術力はほとんど無い状況にある。
欧州	研究水準	○	↘	過去の歴史の遺産もあり、大学や公的研究機関の研究開発力は比較的高いが米国と同様に徐々に弱体化の方向にある。
	技術開発水準	○	↘	事業の海外シフトのため EU 内の技術開発力は、急速に弱体化。
	産業技術力	×	↘	米国と同様に今日においては主たる事業主体としての企業がなくなり、事実上産業技術力はほとんど無い状況にある。
中国	研究水準	△	↗	未だ先導的な研究開発は成されていないが、今後は強化の方向にある。
	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徐々に上昇するであろう。
	産業技術力	△	↗	国の重要戦略としても取り上げられており、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	○	↗	研究水準は、日本や欧米と比して一段劣るが、そのシーズの吸収による技術開発力は極めて強い。リソース確保はダイナミック。
	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た。
	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、国策としての強化を図る動きがある。
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主体の戦略対応で同院及び大学を中心に強化の方向。
	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。技術は工業技術研究院（ITRI）が指導。
	産業技術力	○	→	国の重要戦略としても取り上げられてはいるが、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は維持の方向の様。

全体コメント：ディスプレイデバイスの産業は、一般のモノづくりの潮流と同様に、欧米から日本、そして韓国・台湾・中国の方向にあるが、日本としては半導体に於けるインテル等のように知財権に裏打ちされた独自技術により高付加価値・高機能ディスプレイを開発・製造し、この分野の世界の発信基地となり事業競争力を維持させていくべきである。この観点を踏まえ、研究開発・生産に関し、日本企業としては各国企業との競争・協業の両視点から、個々の製品内容（コモディティ／特徴品）を考慮に入れた経営戦略や国際分業の観点も踏まえた国際戦略が益々重要となり、それらに関した法・制度の整備も重要となる。また、合せて現在トップにある日本の国際競争力を維持強化させていくためには、基盤となる革新技術に関する研究開発と人材育成が急務であり、現状、日本の大学に於ける活動が韓国や台湾に比して弱体化しているだけにその強化は重要な視点である。

(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]

◆固体照明・発光デバイス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	II-VI 族、III-V 族、窒化物化合物半導体の水準は非常に高く、量子構造を用いた発光デバイスの新規提案は数多く出されている。しかし、固体照明に関係した研究を推進している大学・国立研究機関はほとんどない。研究体制が偏っている。半導体研究者と蛍光体物性研究者とのギャップが大きい。
	技術開発水準	○	→	LED とエレクトロニクス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、知的財産の取り扱いに問題があり、企業に力がかからない。
	産業技術力	◎	→	省エネ LED 光源の開発を支援する国の体制作りとして現在、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。
米国	研究水準	○	↘	UCSB、コーネル大等有力大学中心に、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、産業界との結びつきが悪い。
	技術開発水準	◎	↗	Philips・Lumileds (米) の技術開発力が格段に高く、Osram 社 (独) に十分に対抗できる。将来固体照明の分野では、世界制覇を狙っている。
	産業技術力	○	↘	主導権を握ろうとして、反対されている。CIE、IEC が主導権を争っている。
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・発光デバイスを作成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、支援は十分ではない。
	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。
	産業技術力	◎	↗	Philips が Lumileds を買収し、又、Osram 社の 2 大照明メーカーの産業技術力は最高水準にある。
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、人材育成がなされている。
	技術開発水準	△	↗	まだ未知であるが、政府の支援が十分なされることによって、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、アモイ、深セン等) 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	◎	↗	中国政府がバックアップしている。自動車産業、宇宙産業、固体照明デバイスの三大産業がある。
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。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。
	技術開発水準	○	→	サムスングループ、LG 電子、を中心にソウル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通信用デバイス、半導体照明 (固体照明) の研究を積極的に推進。
	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。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。
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を超えている。
	技術開発水準	○	↗	ITRI を中心に、企業の支援体制が充実。産業界における固体照明の業界団体 (TEOS) が中心に、ベンチャー企業 (EPISTAR、ARIMA 等) 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高い。
	産業技術力	◎	↗	今年から第二期目の固体照明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。

全体コメント：半導体材料、蛍光体材料ともにナノテク構造を生かした新機能が発現出来ているが、デバイス実用化に結びついていない。今後、ナノテク技術を生かしたデバイス実用化例を目に見える形にする必要がある。LED 照明技術においても、光取出しを目指したフォトニクス結晶の応用例があるが、製品開発では技術の高度化とコストパフォーマンスが釣り合わない。

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	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もいくつかの研究期間、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。個々は高い水準を維持しているが、検出器など新分野への取り組みの遅れが見られる。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。
	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行ける力はない。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。SQUIDの応用に対する技術力は世界最高水準を引き続き維持。
中国	研究水準	×	→	ほとんどやられていない。
	技術開発水準	×	→	ほとんどやられていない。
	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	×	→	応用の観点もほとんど考えられていない。
	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ー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ドリーサービスは、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。

(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]

2.2.2 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)」、「医療用ナノ粒子材料 (強磁性粒子など)」、「分子イメージング」、「再生医療用材料・生体適合材料 (細胞シート含む)」、「医療用チップ (μ TAS、DNA チップ、蛋白チップ等)」についてそれぞれ比較を行った。

本分野全体としては、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と考えられる。欧米は EU 諸国が中心だが、一分野に限っていれ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、米国等で留学経験者が帰国し、研究開発の主力を演じている。まだ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。

2.2.2.2 中綱目ごとの比較

(1) 体内送達システム (DDS)

DDS 分野への関心は世界的に大きく、特に、従来からの経口製剤から体内標的治療や PEG 化タンパク医薬などより先端分野への展開が著しい。それに伴い、生体適合性や標的指向性に優れたキャリア開発の重要性が増加している。特に siRNA 医薬の実現はキャリアが握っていると言っても良い。

(2) 医療用ナノ粒子材料 (強磁性粒子など)

ナノテク研究の加速化により、材料及びアプリケーションの開発が急速に進められている分野である。従来の細胞分離、物質分離に加えて、ドラッグデリバリー、イメージング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研究開発が盛んになっている。欧米では、これらに特化したベンチャーが多く存在するのに対し、日本を含むアジアの国では、企業レベルでの取り組みはあまり多くない。しかしながら、大学をはじめとする公的機関における研究開発が盛んであり、今後の発展が期待される。

(3) 分子イメージング

本綱目においては、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。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。

(4) 再生医療用材料・生体適合材料（細胞シート含む）

再生医療の概念は米国で17年前に始まった。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、細胞の取り扱いに関する科学技術と細胞の許認可に問題があり、思ったほど臨床応用が進んでいないのが世界的な流れである。特に許認可の問題が大きく、細胞移植による再生医療を可能とするためには法規制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、それに近い概念あるいは技術である。細胞を用いた再生医療に比べて、企業が商品化しやすい領域である。それにもかかわらず、このアプローチは前者に比べて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、世界的に見れば、日本が最も得意とする、実際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て遅れている。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。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も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力の不足が考えられる。この点を改善しないと、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。

(5) 医療用チップ（ μ TAS、DNAチップ、蛋白チップ等）

バイオチップ、 μ 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。上に述べたように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。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。 μ 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、ここ2年くらい国内研究助成も奮わず、日本は失速傾向にある。

2.2.2.3 比較表

◆バイオ・医療分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。DNA チップ、 μ TAS でも高水準を保っている。医療用ナノ粒子材料でもオリジナリティーの高い研究が進んでいる。
	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。
	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。遺伝子、RNA 関連医療研究は独壇場。DNA チップ研究は、以前、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も世界をリード。
	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。
欧州	研究水準	◎	↗	1990 年代 μ TAS 分野でトップだったが最近トーンダウン。再生医療分野では、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。
	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。DDS に特化したナノ粒子研究も盛ん。企業レベルでは、米国との連携が目立つ。
	産業技術力	◎	→	DDS 関連の技術力は大手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。磁性ナノ粒子材料メーカーも多数。許認可システムが透明性高いのも有利にはたらく。
中国	研究水準	△	↗	米国留学帰国研究者が研究分野をリード。独創性は低い。
	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以前として発展途上。独自性の高い分野少なく、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]

◆体内送達システム (DDS)

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	DDS 領域における研究者層の厚みが増しており、特に新規 DDS 材料開発において高い優位性を保持している。
	技術開発水準	○	→	経口製剤を中心に高い水準を維持しているが、新規分野への展開に足踏み傾向が見られる。規制との関係が問題とも思われる。
	産業技術力	○	→	上記と同様の傾向。新規 DDS 製剤を本格生産する潜在力は十分に有している。ベンチャーの育成が今後の課題。
米国	研究水準	◎	→	様々な大学、公的研究機関との連携によって、特に遺伝子や RNAi 医薬候補 (ハンチントン病、腫瘍、聴覚障害など) の開発が急ピッチで進められている。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	◎	↗	滲出型加齢性黄斑変性症に対する siRNA 薬 (Sirna-027) が現在 Ph-I/II 進行中。C 型肝炎では IND 申請 (Sirna-AV34)、喘息や呼吸器多核体ウイルスに対する siRNA 薬は前臨床試験を実施。ベンチャーとの連携によるデリバリー技術などの導入を進めている。ベンチャーにおける技術開発能力は群を抜いている。
	産業技術力	◎	→	2006 年 11 月に Merck 社が Sirna 社を \$1.1billion で買収し完全子会社化。自社で GMP グレード生産施設を有しており、豊富な資金力を背景に siRNA 薬の製剤化にもっとも近い企業のひとつ。大企業がベンチャーを丸ごと買収するなど生産技術力の短期間での伸展はめざましい。
欧州	研究水準	◎	↗	合成化学分野などから DDS へ研究者がシフトしており、基盤に立脚した地道な研究が展開されている。
	技術開発水準	◎	→	大手医薬メーカーのみならず DebioPharm など新興中堅医薬メーカーも育っており、先端分野へもかなり開発費が投じられている。
	産業技術力	◎	→	メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有している。新薬の治験体制も整っており、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	△	↗	RNAi の特許に関しては、現時点で国内特許にとどまっているものが多い。RNAi 研究に関しては、日本に比べて「呼吸器系の疾患」を標的としたものが多い。DDS に関しても論文数は指数関数的に増えており、質的には劣るものの今後の展開が注目される。
	技術開発水準	△	↗	臨床研究などの法的拘束が少なく、今後臨床研究が進む可能性が高い
	産業技術力	△	↗	ジーンチップを用いたアレイ解析に関して、ベンチャー企業が増えている傾向がある。
韓国	研究水準	○	↗	質的に上昇傾向にあり、数も年々増加している。DDS のみならず遺伝子や核酸医薬の送達技術についても積極的である。日本と同様に材料技術に立脚したアプローチが特徴的。
	技術開発水準	△	↗	企業における研究開発水準は上昇しているが、まだ、基盤はしっかりしていない。独創技術の開発が出来るかが鍵。
	産業技術力	△	↗	有力な製薬企業がないために産業競争力は高くはない。しかし、着実に上昇しており、ベンチャーの動きも要注目である。

全体コメント：DDS 分野への関心は世界的に大きく、特に、従来からの経口製剤から体内標的治療や PEG 化タンパク医薬などより先端分野への展開が著しい。それに伴い、生体適合性や標的指向性に優れたキャリア開発の重要性が増加している。特に siRNA 医薬の実現はキャリアが握っていると言っても良い。

(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]

◆医療用ナノ粒子材料（強磁性粒子等）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	公的研究機関における研究開発及び発表が盛んである。古くから酸化鉄材料に強い。オリジナルの高い研究も多い。
	技術開発水準	○	↗	ベンチャー企業等から、いくつか注目すべき製品が販売されている。Magnabeat Inc.
	産業技術力	○	→	バイオ関連粒子材料関連の大手企業が存在せず、産業規模が欧米に比較し小さい。一方で、磁性粒子を用いた自動化技術において、世界をリードしている。TOYOBO, PSS
米国	研究水準	◎	↗	論文発表件数が多く、研究水準も高い。材料開発から応用まで幅広く研究を進めている。
	技術開発水準	◎	↗	ドラッグデリバリー、イメージング関連ベンチャー企業が多数存在する。Bioclone Inc 他多数
	産業技術力	◎	↗	大手企業を複数持つ。Invitrogen (Dyna), Clontech, Promega
欧州	研究水準	○	→	公的研究機関における研究開発は盛んであると思われるが、論文等による発表は比較的少ない。
	技術開発水準	◎	↗	ベンチャーにおける研究開発も盛んである。近年、ドラッグデリバリーやイメージング利用に特化したベンチャーの振興が目立つ。GENTAUR, Chemicell, etc
	産業技術力	◎	↗	古くからバイオ関連磁性粒子材料メーカーが興っている。Milteny Biotech, Estapor
中国	研究水準	○	↗	近年、論文数が急増しているが、研究水準は日、米、欧に劣る。
	技術開発水準	△	↗	ベンチャーが興っているようだが、目立った実績は見られない。
	産業技術力	△	→	主力企業が存在せず、産業規模が非常に小さい。
韓国	研究水準	△	→	公的研究機関における研究開発は、他国と比較し盛んではない。
	技術開発水準	×	→	企業において、特に目立つ研究開発は見られない。
	産業技術力	×	→	特に目立つ製品は存在しない。

全体コメント：ナノテク研究の加速化により、材料及びアプリケーションの開発が急速に進められている分野である。従来の細胞分離、物質分離に加えて、ドラッグデリバリー、イメージング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研究開発が盛んになっている。欧米では、これらに特化したベンチャーが多く存在するのに対し、日本を含むアジアの国では、企業レベルでの取り組みはあまり多くない。しかしながら、大学をはじめとする公的機関における研究開発が盛んであり、今後の発展が期待される。

(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]

◆分子イメージング

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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、顕微鏡・カメラ・試薬開発等が活発に行われている。
	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。
	産業技術力	◎	↗	企業における顕微鏡、カメラ、試薬等の新規製品開発能力は高い。
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において進んでいる。
	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	◎	↗	多くの大学において、顕微鏡・イメージング試薬開発が行われている。
	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多い。
	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。
	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。
	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。

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。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。

(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]

◆再生医療用材料・生体適合材料（細胞シート含む）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	ライバルは米国であるが、ここ2-3年の再生医療用材料では世界一である。
	技術開発水準	◎	↗	精密な3次元加工、微細加工が必要となるため、日本が世界のリーディング的な存在である。
	産業技術力	△	→	材料の許認可の問題が大きく、メディカル関連企業単独での開発商品化は困難な状況。技術力有り。ベンチャーの未成熟さ及び審査体制の非効率性から、シーズがうまく産業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、材料よりも細胞移植に重点をおいている感がある。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。
	産業技術力	◎	→	特許運営がうまい、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。細胞関連のベンチャーが多い。欧州に次いで審査体制が整っており、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。
	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。基礎研究レベルはまだ低い。研究資金が一部のグループに集中している。
	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。審査体制にも透明性が求められる。
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。独創性は不足している。
	技術開発水準	○	↗	ここ2-3年で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い。
	産業技術力	○	↗	政府指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	○	→	ベンチャー企業の技術力は高い。
	産業技術力	○	↗	ベンチャー企業による欧米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む。欧米との共同研究を推進。
	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。
	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。
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多い。
	技術開発水準	△	→	該当する企業がほとんどない。
	産業技術力	△	→	該当する企業がほとんどない。

全体コメント：再生医療の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、細胞の取り扱いに関する科学技術と細胞の許認可に問題があり、思ったほど臨床応用が進んでいないのが世界的な流れである。特に許認可の問題が大きく、細胞移植による再生医療を可能とするためには法規制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、世界的に見れば、日本が最も得意とする、実際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。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力の不足が考えられる。この点を改善しないと、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。

◆医療用チップ（ μ TAS、DNAチップ、蛋白チップ等）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	技術開発水準	○	↗	マイクロ・ナノテクノロジーは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。
	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奥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。
	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。
欧州	研究水準	○	↗	90年代初めから μ 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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。 μ 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。
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。
	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、日本との共同研究が中心。
	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。完成製品は皆無。

全体コメント：バイオチップ、 μ 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。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。 μ 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シーケンサー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、ここ2年くらい国内研究助成も奮わず、失速傾向にある。

- (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]

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10綱目「太陽電池」、「燃料電池」、「太陽光による水素発生」、「バイオ燃料」、「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(水)」、「光触媒」、「環境調和・リサイクル技術(回収技術など)」について比較調査をおこなった。近年の全体的な傾向としては、日本及び欧米では継続して先端的な技術開発が行われており、中国、台湾、韓国等アジア地域の国々は、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し、最新技術を積極的に導入することによって、急速に力を付けながら追い上げ始めている。

材料科学の激戦区の一つ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は、中国の存在感が高まってきている。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取れる。また、欧州では将来を見据えた基礎研究の観点で潜在的な強みがあり、特に英独仏の3カ国は傑出していると言える。

超電導利用技術に関して、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取っている。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。

バイオ燃料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決して劣らないものの、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、膜分離による水の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、エコマテリアル技術やリサイクル技術に関して広範な基礎研究力を保持しており、今後エコマテリアルに対する関心、研究のトレンドは間違いなく世界中のいずれの国においても上昇傾向にあると考えられる。

2.2.3.2 中綱目ごとの比較

(1) 太陽電池

太陽電池材料には主に、結晶シリコン、薄膜シリコン、CIGS 系 (Cu (InGa) Se_2)、CdTe、色素増感型、有機半導体型があり、国によって得意な部分と弱い部分があるが、日本は薄膜シリコン、CIGS 系共に高い技術力を持っている。結晶シリコンは、欧州が潜在的に高い研究能力を有している。日本は企業主体でシリコン太陽電池を開発してきておりその研究開発水準は高い。最近、米国と欧州では、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まず太陽電池を多量に製造するという企業が増えている。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 First Solar 社は 300MW 規模での製造を行っている。現在、CdTe の製造コストが非常に安いことから、世界の太陽電池の低価格化を牽引している。現状はまだ日本の優位性があるが、近未来の将来技術ではヨーロッパが、その先の将来の革新的技術ではアメリカが先行している。日本はここで盛り返すことができなければ、地盤崩壊の危険性もあると考えられる。

(2) 燃料電池

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、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。固体酸化物形燃料電池 (SOFC) には 20 年以上の歴史があり、開発期間が長く難しい技術の一つである。最近、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、小さなシステムの開発に対しても関心が払われている。小型システムは欧米のほか、日本も追随し、京セラ、三菱マテリアル等が家庭用、業務用を含めた 1 ~ 10 キロワット級のシステムを開発している。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が見られる。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。しかしながら、着実な取り組みこそがこれまでの努力を結実させる鍵になると考えられる。今後米欧は、日本に刺激され再活性化方向に向く可能性がある。また、中国では研究論文数が急激に増大しており、今後の大きな発展が予想される。

(3) 太陽光による水素発生

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、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。エネルギー変換効率で 10% を達成した

という報告もある。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て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。

(4) バイオ燃料

バイオ燃料は、植物性の物質を利用して作られる燃料のことであり、ガソリン代替で利用されるバイオエタノールと軽油代替で利用されるバイオディーゼル燃料等がある。日本のバイオ燃料の総体的な位置関係は欧米から遅れをとっていると考えられる。米国は包括的エネルギー法により 2012 年までにバイオ燃料を 75 億ガロン導入する目標を立てており、EU では 2020 年までに燃料の 10% をバイオ燃料にすることを 2007 年のブリュッセル会議で決めている。これに対し日本は、京都議定書目標達成計画として 2010 年度に原油換算で 50 万キロリットルの導入目標としている。また経済産業省と農林水産省は 2007 年 11 月に「バイオ燃料技術革新協議会」を立ち上げ、2015 年に 1 リットル当たりの生産コストを 40 円という、国際競争力のある水準まで下げる目標を掲げている。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。

(5) 高性能二次電池、キャパシタ

蓄電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しい競争が起きている。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り、世界各国でナノテクを用いて革新的な電源を開発し、いち早く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 などの一流科学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。中でも中国、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。現状では中国、韓国の研究レベルは向上しつつあるが、まだ日本より 10 年以上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。純粋な科学研究、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、その点では純粋基礎研究レベルで欧米はトップレベルであり、特に英米独仏の4カ国が傑出していると言える。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、近年は中国、韓国企業の追い上げが激しくなっている。

(6) 熱電変換素子

熱電変換とは、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ものである。又は、電流によって冷却する（ペルチエ効果）等の使い方で、環境材料として期待されている。自動車や産業廃棄物処理施設など様々な場所での廃熱を少しでも回収できればそのメリットははかりしれない。ペルチエ冷却は脱フロン冷却を可能にする。熱電変換に用いられる材料を熱電材料といい、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国々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。

(7) 超電導利用

超電導利用技術には、従来型の超伝導材料 NbTi, Nb₃Sn 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している。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である。但し、低温超電導材料を用いた 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である。韓国は電力機器の超電導化を国が支援している。中国も同様である。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である。

(8) 膜分離技術（水）

現状の膜技術においては、日本企業が優位に立っており大きくシェアを取得している。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は著しく遅れている。将来を見据えた高機能膜創出研究は、欧米の大学・研究機関で精力的に始まっており、この傾向が続けば将来の日本企業の優位性確保は難しくなる可能性がある。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ており、既に多くの技術を保有している。

(9) 光触媒

光触媒では、研究水準、技術水準、産業水準のいずれにおいても日本が優位な状況にある。イタリア、ドイツを中心とした EU 諸国は、研究レベルも高く、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。

(10) 環境調和・リサイクル技術（回収技術など）

エコマテリアルに対する関心、研究トレンドは、間違いなくいずれの国においても上昇傾向にある。日本と欧州、米国の3者において、エコマテリアル技術についての大きな優劣はなく、むしろ日本の方が進んでいると言える。一方、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は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。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が、国内に有力な環境専門学術誌が少ないため、情報発信の点では不利である。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い。従って、実力と国別評価の乖離が大きい分野と言える。リサイクルの有効性を保証する上で、環境負荷低減の保証、原料・製品の需給バランス確保は極めて重要な指針である。要素技術自体に加え、MFA (Material Flow Accounting)、LCA (Life Cycle Assessment) によるソフト技術も極めて重要な要素である。このような観点に立つと、欧米ではエコマテリアルに関するソフト技術研究が活発に行われており、世界に先行している。日本はソフト面で研究者数が相対的に不足しており、ハード面に比べてやや遅れている。エコ材料開発では、5R (Reduce、Reuse、Recycle、Refuse、Repair) 技術に加え環境負荷低減を支援・保証するソフト技術が必要であり、総合力では日本と欧州がほぼ同等レベルにある。高耐熱材料開発による発電効率の大幅改善等、エコ材料は定義によって拡大する。バイオ燃料ブームが原料である穀物、ひいては畜産物や肥料に波及するように、産業間相互依存関係の考慮が不可欠であり、俯瞰的戦略では欧州に一日の長がある。日本と欧州では最近、リンに代表される未利用資源開発が進められている。

2.2.3.3 比較表

◆エネルギー・環境分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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、総合的にトップレベル。
	技術開発水準	◎	→	大手、中小の電機メーカーなど、技術開発に総じて力を注いでいおり、トップレベルを堅持している。
	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。(バイオ燃料除く)
米国	研究水準	◎	↗	強いところと弱いところをはっきりしているが、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。
	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、数多くのベンチャー企業が高い技術を有することが特徴的。
	産業技術力	○	→	生産現場における技術力は必ずしも高いとはいえないが、バイオ燃料に関しては国家戦略と穀物メジャーとが協力し、非常に強い。
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	△	↗	現状では日米欧に及ばないが、先進国からの留学生が帰国して活躍するケースや、他国の実績を元に猛烈なキャッチアップ。
	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。
韓国	研究水準	○	↗	一定の存在感。近年の研究レベル向上には目を見張るものがある。
	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]

◆太陽電池

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	薄膜太陽電池は高水準。結晶系 Si は欧州、独 Fraunhofer 研究所に劣る。新概念新材料など、将来技術に対する準備不足は懸念。色素増感型のレベルは高い。
	技術開発水準	◎	→	薄膜系は高水準。結晶シリコン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おり、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 1000MW のシリコン薄膜トリプル接合モジュールの製造設備導入など、欧米以上に進んでいる点はあるが、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。次世代技術で巻き返しを図ろうとしている様子。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。
	技術開発水準	○	↗	産業がさほど育っていないため、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。今後脅威。大学教授によるベンチャー設立 (Richard Swanson 教授が設立した SunPower 社) など、技術開発力高い。シリコン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	△	→	低い。有力な米国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、単結晶シリコン超高効率太陽電池。AMAT など、半導体企業の太陽電池産業への参入は注目。
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。超薄型や新原料など活発で、研究人口も多い。将来を考えた基礎をしっかりと行っており、基礎重視の姿勢が出ている。一方シリコン系薄膜は圧倒的に日本が有利だが、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	◎	↗	製品化に向けての activity が非常に活発。市場を背景に急成長。結晶 Si では短期間で 20% 超の効率を達成。薄膜系は日本に一步遅れている。大学教授が関係したベンチャーが多く設立され、製品化に向けて注力している。
	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	△	↗	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ている。研究人口も多いため向上している。特に日欧米の技術を参考に、追いつこうと努力。
	産業技術力	○	↗	欧米 (一部日本も) のフルターンキーに現状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は出てきていない。
	技術開発水準	△	↗	太陽電池関係企業数が増えているが、まだ入り口の段階。技術力は中国と比べまだ高くない。サムソン社や LG 社の動きに注意する必要あり、本格始動すると脅威。
	産業技術力	△	→	液晶産業のインフラをベースに薄膜シリコン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。

全体コメント：太陽電池材料には結晶 Si、薄膜シリコン、CIGS (:Cu (InGa) Se₂)、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。日本はシリコン薄膜、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。日本は企業主体でシリコン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まず太陽電池を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 First Solar 社は 300MW 規模での製造を行っている。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、近未来の将来技術ではヨーロッパが、その先の将来の革新的技術ではアメリカが先行。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。

◆燃料電池

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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裾野が広がり、平均値も米国レベルに追いつきつつある。
	技術開発水準	◎	↗	中心となる電池システムや燃料製造メーカーの他、多くの部品メーカーの参入で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で大きく進展。
米国	研究水準	◎	↗	日本の資金投資に刺激されてか、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。
	技術開発水準	◎	→	自動車メーカーの活力低下に伴い、アクティビティーが下がったかに見える。政府主導の水素、バイオ燃料指針に振り回されている印象がある。
	産業技術力	◎	→	自動車メーカーの活力低下が大きく響いているが、ベンチャーのアクティビティーは日本にない特色。
欧州	研究水準	◎	→	研究資金の低下で大分冷え込んでいたが、今年から新たにコンソーシアムを組み直し立て直しを図っている。
	技術開発水準	○	→	大手企業の取り組み意欲が下がっているように見える。
	産業技術力	○	↘	大手企業の取り組み意欲が下がっているが、なおベンチャーで頑張っているところもある。
中国	研究水準	△	↗	まだまだ後追いの研究が主流に見える。しかし、研究論文の数は学会誌に洪水のように増大しており、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	△	↗	オリンピックを目指したデモのため人海戦術で努力している。
韓国	研究水準	○	↗	中国より上ではあるが、まだまだ後追いの研究が多い。韓国南部大学の大学コンソーシアムが今後何を狙うか注目。
	技術開発水準	○	→	KIST 等限られた国研に資金と人が集中し、其れによって維持されている印象。
	産業技術力	○	→	自動車会社ヒュンダイ、電機会社サムソンなどの開発意欲が低下していると診られ、少し停滞気味か。

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、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。固体酸化物形燃料電池（SOFC）には 20 年以上の歴史があり、開発期間が長く難しい技術の一つである。最近、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、小さなシステムの開発に対しても関心が払われている。小型システムは欧米のほか、日本も追随し、京セラ、三菱マテリアル等が家庭用、業務用を含めた 1～10 キロワット級のシステムを開発している。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が見られる。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。しかしながら、着実な取り組みこそがこれまでの努力を結実させる鍵になると考えられる。今後米欧は、日本に刺激され再活性化方向に向く可能性がある。また、中国では研究論文数が急激に増大しており、今後の大きな発展が予想される。

(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]

◆太陽光による水素発生

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	粉体／薄膜系光触媒では、長年の蓄積があり、圧倒的な強さを誇る。近年、徐々に研究水準が上昇している。
	技術開発水準	○	→	光触媒開発では実績がある。
	産業技術力	○	→	水分解ではないが、多方面で酸化チタン系の光触媒は実用化されており、効率の高い触媒が開発されれば製品化できる力は十分にある。
米国	研究水準	○	→	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。
	技術開発水準	○	↗	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	○	→	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	○	→	酸化物半導体光電極では、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。
	技術開発水準	○	→	英国の Solar Hydrogen 社では、WO ₃ 光電極と色素増感太陽電池を組み合わせ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	○	→	産業化をにらみ、酸化鉄の多孔質電極を高機能化し、低コスト化を実現しようとしている。
中国	研究水準	△	→	日本より水準は劣る。しかし、研究者数の増加には目を見張るものがある。
	技術開発水準	△	→	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	△	→	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	△	→	日本より水準は劣る。しかし、いくつかの研究機関で精力的に研究が推進されている。
	技術開発水準	△	→	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	△	→	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：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、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。エネルギー変換効率で 10%を達成したという報告もある。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。

(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]

◆バイオ燃料

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	個々の大学、研究機関ではユニークな研究開発がなされ研究水準は高い。
	技術開発水準	○	↗	バイオエタノールに関しては技術水準は高いが、まだ実用段階には至っていない。
	産業技術力	○	→	日本ではバイオフェューエル導入目標や道筋の点では欧米ほど具体的でない。マーケットが形成されていないので欧米に比べて弱い。
米国	研究水準	◎	↗	実用化への技術開発が遅れている。
	技術開発水準	◎	↗	米国DOEの強力な指導力と国家としてバイオ燃料開発への目標達成のために研究開発が進展し、技術開発水準は高い。
	産業技術力	◎	↗	バイオエタノールに関しては、国家戦略と穀物メジャーの思惑が一致し強力な産業技術力となっている。
欧州	研究水準	◎	↗	バイオエタノールに関しては欧州ではBDFに比べて普及率が低い、研究は先導的である。
	技術開発水準	◎	→	BDFに関しては、変換技術や周辺技術は高いレベルにありほぼ確立している。
	産業技術力	◎	↗	BDFに関して需要が増加しており対応する産業技術力も高い。
中国	研究水準	△	→	バイオエタノール生産量は増加しているが、特筆すべき研究開発は見られない。
	技術開発水準	△	→	既存技術ではあるが、一定の技術開発水準を持っていると考えられる。
	産業技術力	△	↗	中国でのバイオエタノール生産量は着実に増加しており、それなりの競争力があることがうかがえる。
韓国	研究水準	○	↗	大学や国立機関を中心として研究水準は向上している。
	技術開発水準	○	→	バイオエタノールやBDFも導入されつつあり技術開発水準も向上している。
	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：バイオ燃料は、植物性の物質を利用して作られる燃料のことであり、ガソリン代替で利用されるバイオエタノールと軽油代替で利用されるバイオディーゼル燃料等がある。日本のバイオ燃料の総合的な位置関係は欧米から遅れをとっていると考えられる。米国は包括的エネルギー法により2012年までにバイオ燃料を75億ガロン導入する目標を立てており、EUでは2020年までに燃料の10%をバイオ燃料にすることを2007年のブリュッセル会議で決めている。これに対し日本は、京都議定書目標達成計画として2010年度に原油換算で50万キロリットルの導入目標としている。また経済産業省と農林水産省は2007年11月に「バイオ燃料技術革新協議会」を立ち上げ、2015年に1リットル当たりの生産コストを40円という、国際競争力のある水準まで下げる目標を掲げている。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。

(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]

◆高性能二次電池、キャパシタ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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エレクトロニクス電源としての大きな市場期待があり研究が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。諸外国でも研究レベルは上がってきており、世界的な激戦分野である。
	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と言える。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	◎	↗	基礎研究水準は高いが日本よりやや劣っている。
	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。
欧州	研究水準	○	↗	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 high impact の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・英の研究レベルが特に高い。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。
	産業技術力	△	→	日本と比較して相対的に劣っている。
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、現状では決して高くはない。この分野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。
	産業技術力	△	↗	日本と比較して劣っている。
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：蓄電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おり世界各国でナノテクを用いて革新的な電源開発、いち早い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。中でも中国、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。現状では中韓は研究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。純粋な科学研究、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、その点では純粋基礎研究レベルは欧米がトップレベルであり、特に英米独仏の4カ国が傑出していると言える。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。

(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]

◆熱電変換素子

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	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が目立つ。
	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なども、研究開発を手がけている。
	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か。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、ある程度のアクティビティはあるが、日米に比べると迫りに欠ける。
	技術開発水準	○	↗	日本や米国で、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、ステージとしては手前のようなものである。
	産業技術力	△	→	スウェーデンやフィンランドなどに製造メーカーがある。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。今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で、大きな流れは見えない。
	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：熱電変換とは、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ものである。又は、電流によって冷却する（ペルチエ効果）等の使い方で、環境材料として期待されている。自動車や産業廃棄物処理施設など様々な場所での廃熱を少しでも回収できればそのメリットははかりしれない。ペルチエ冷却は脱フロンの冷却を可能にする。熱電変換に用いられる材料を熱電材料といい、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。

(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]

◆超電導利用

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	物質開発では、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。高温超伝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発揮している。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する基礎研究に関しては、米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。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。高温超伝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。
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発揮し始めている。各国で物質関連の大型プロジェクトが立ち上がり、状況は上向きの印象。
	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。
	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いが先駆的研究例はまだ少ない。
	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と思われる。LGグループのLS社がケーブル開発を、KEPR I と共同で進めている。

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, Nb3Sn 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、高温超伝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。

(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]

◆膜分離技術（水）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	膜に関する研究開発はほんの一部の大学で行われているだけであるが、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。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	○	↗	膜及び膜利用技術の開発が盛んに行われており、世界をリードしている。相対的に工業化、実用化がより盛んである。
	産業技術力	◎	↗	膜生産販売は世界をリードしている。膜利用技術については、技術力はあるが、各社の規模が小さく世界的競争力は欧米に比べ低い。
米国	研究水準	◎	↗	近年、飛躍的な高性能膜創出を目指し、膜素材基礎研究が大学・研究機関で盛んに行われており、そのレベルも高い。膜を利用した新しいプロセスも提案されている。
	技術開発水準	△	↘	現在使用されている膜の技術開発が一通り終了し、活発とはいえない。膜を利用した新しいプロセスの技術開発は行われているようである。
	産業技術力	○	→	膜については、一部の企業が優位性を持っているが、総合的には日本が上回っている。膜を利用したプロセス技術は、優位にある。
欧州	研究水準	○	→	膜による分離・透過理論の基礎研究が継続的に行われており、高いレベルを維持している。膜及びプロセス研究も継続されている。
	技術開発水準	○	→	膜及び膜利用プロセス技術の開発が継続的に行われている。
	産業技術力	○	→	膜については、一部の企業が優位性を持っているが、総合的には日本が上回っている。膜を利用したプロセス技術は、優位にある。
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ている。研究レベルは低いが脅威である。
	技術開発水準	○	↗	大学での膜研究がその大学で技術開発まで進み、さらに生産会社へと発展している。技術レベルは低いが、極めてスピーディであり、脅威を感じる。
	産業技術力	△	↗	非常にたくさんの中小膜メーカーが乱立している。2、3のメーカーを除き技術レベルは低い。膜利用プロセス技術は、海外企業と組んで進めている。
韓国	研究水準	△	→	膜の研究は行われているが、活発ではない。情報が少ない。
	技術開発水準	△	→	膜メーカーがあり、技術開発及び生産をしている。一部を除きあまり活発ではない。
	産業技術力	△	↗	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。導入意欲強く、加速されている。
<p>全体コメント：現状の膜技術においては、日本企業が優位に立っており大きくシェアを取得している。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。将来を見据えた高機能膜創出研究は、欧米の大学・研究機関で精力的に始まっており、このままでは将来の日本企業の優位性確保が難しくなる可能性がある。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ており、既に多くの技術を保有している。</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]

◆光触媒

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	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。
	技術開発水準	◎	↗	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。
	産業技術力	◎	↗	間違いなく世界をリードしている。しかし、グローバルな展開力にかけている。
米国	研究水準	○	↘	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。
	技術開発水準	△	→	同上
	産業技術力	△	→	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。
欧州	研究水準	◎	→	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。
	技術開発水準	○	↗	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。
	産業技術力	○	↗	産業化も本格的に始まりつつある。
中国	研究水準	△	↗	研究者は多いが、そのレベルは高いと言えない。しかし、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。
	技術開発水準	△	→	日本の技術を導入し（まねて）、それなりのレベルにある。ただし、独自の技術はそれほどない。
	産業技術力	×	→	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。
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。
	技術開発水準	○	→	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。
	産業技術力	×	→	ベンチャー企業が中心で、まだ産業として展開するに至っていない。
<p>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。</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]

◆環境調和・リサイクル技術（回収技術など）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。エコマテリアル開発は欧米とほぼ同等とみなせる。
	技術開発水準	○	↗	省資源、省エネルギー技術では世界トップクラス。資源を持たない国として特にレアメタル代替技術に開発ベクトルが向くのは当然とも言える傾向である。
	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。システム評価のソフト面でも欧米を追っている段階である。
米国	研究水準	○	↗	欧州と同様、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	○	↗	国全体のベクトルが環境調和に向いているとは言い切れず、産業、地域によって相当の温度差がある。環境調和、リサイクル技術はスポット的に開発されているものの、特筆すべきものは見当たらない。物質フロー研究はYale大学を拠点として先行している。
	産業技術力	○	↗	リサイクル技術はミニミル化しており、米国特有の産業エコ技術として特筆すべきものはない。
欧州	研究水準	○	↗	地理的条件と豊富な統計資料から、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が、ハードの要素研究そのものに特筆すべき成果は見当たらない。
	技術開発水準	○	↗	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。化学物質リスクについてナーバスであり、規制と相まって規制元素フリーの材料開発が進む。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きらいがあるが、そのため、LCA、MFA等のシステム研究が進んでいる。
中国	研究水準	○	↗	清華大等、一部の研究機関では環境関連要素研究が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。環境調和材料開発については未だ研究アクティビティは高いとは言えない。
	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、回収できる資源、材料は良く回収されている。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。
	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い。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。
	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いると思われるが、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。
	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：エコマテリアルに対する関心、研究トレンドは、間違いなくいずれの国においても上昇傾向にある。日本と欧州、米国の3者において、エコマテリアル技術についての大きな優劣はなく、むしろ日本の方が進んでいると言える。一方、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は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。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が、国内に有力な環境専門学術誌が少ないため、情報発信の点では不利である。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い。従って、実力と国別評価の乖離が大きい分野と言える。エコ材料開発では、5R (Reduce、Reuse、Recycle、Refuse、Repair) 技術に加え環境負荷低減を支援・保証するソフト技術が必要であり、総合力では日本と欧州がほぼ同等レベルにある。

(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]

2.2.4 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が、代表的な例として、排出ガス浄化用触媒、高強度・軽量構造材料、及び高機能ガラス（熱カットなど）を取り上げた。

排出ガス浄化用触媒は自動車用が主であり、排ガス中のヒドロカーボンと酸化窒素の浄化が目的である。高強度・軽量構造材は鉄、アルミ、及びチタンが主であり、添加元素だけでなく、結晶粒微細化や方位制御などによる性能向上が開発の流れである。高機能ガラスは熱線遮蔽やディスプレイが目的の大半でレンズなどの光学製品はここでは省いた。

産業用構造材料全体を一言で述べるのは難しいが、全体として日米欧の先進に対して、韓中のキャッチアップの形と見てよい。しかし、日米欧の先進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、欧州は法制化も含めた政策誘導型、米国は企業の経営戦略依存型、という構図が見える。一方で韓国は90年代の急進展で高いレベルに達しているものの伸び悩み、中国はレベルは高くないが、急進展中である。ただし、この一般的観測は、中綱目の内容により大きく変動している。詳細は下記の中綱目の比較を参照されたい。

2.2.4.2 中綱目ごとの比較

(1) 排出ガス浄化用触媒

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。また実用化前であるがディーゼルに関してもホンダからNOxを触媒内でアンモニアに変えて還元剤とする新コンセプトが発表されており注目される。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。しかし欧州の実力は高く、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。

(2) 高強度・軽量構造材料

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である。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、その技術は全て輸入ものであり、現在急速にキャッチアップ中である。

(3) 高機能ガラス（熱カットなど）

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、乾式成膜が主流であり、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。国内での湿式コーティング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、実用化技術を各民間会社が担っているのが現状である。

2.2.4.3 比較表

◆産業用構造材料（輸送・建造・その他）分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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、排ガス浄化触媒など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。
	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とは言えない
	産業技術力	◎	→	先端機能材料では群を抜く産業技術もあるが、金属系高強度軽量材料などでは、中国特需で高水準を守るものの、資源枯渇問題に直面している。
米国	研究水準	○	→	欧州と比較して数は少ないが、一部の大学で高い水準がある。排ガス浄化触媒では研究の活発化が見られるが、金属系高強度軽量材料では、軍事関連を除き、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。
欧州	研究水準	◎	↗	ユーロ圏という研究集団として活発化が進んでいる。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	◎	→	排ガス規制が日米より遅れており、技術開発は活発化傾向にあるが、他は水準は高く新技術に強いものの、全般的傾向は横ばいである。
	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中国特需で効率の高い生産が進んでいるが、全般的傾向は横ばいである。
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など、活性化は見られる。
	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。キャッチアップは終了との印象がある。
	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]

◆排出ガス浄化用触媒

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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 解析等の基礎研究でも世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	↗	ガソリン車用、ディーゼル車用とも継続的かつ精力的に技術開発されており水準は高い。
	産業技術力	◎	↗	使用環境の中でナノ粒子形成するインテリジェント触媒の実用化など産業技術力は群を抜いている。
米国	研究水準	○	↗	市場がガソリン車中心であったが、燃料価格の高騰により燃費の良いディーゼルが見直され研究も活発化してきた。
	技術開発水準	○	→	ビッグスリーの財政状況が思わしくなく、技術開発は少し沈滞気味のように見受けられる。
	産業技術力	○	↗	世界最大のマーケットであり高い技術力を保持している。
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93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	×	→	研究論文等から判断するとまだ後発でオリジナリティの低い研究が中心である。
	技術開発水準	×	→	まだ未知数である。
	産業技術力	×	→	触媒だけでなくそのキャニングなど周辺技術の育成もあわせて必要な段階である。
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：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。また実用化前であるがディーゼルに関してホンダからNOxを触媒内でアンモニアに変えて還元剤とする新コンセプトが発表されており注目される。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。しかし欧州の実力は高く、排ガス規制が遅れたこともあって後塵を拝した感はあるが、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。

(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]

◆高強度・軽量構造材料

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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ており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ており効率の高い生産を実現。
中国	研究水準	×	↗	キャッチアップ途上。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	△	↗	キャッチアップ途上。現状は外国からの技術移転がたより。
	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。

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である。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、その技術は全て輸入ものであり、現在急速にキャッチアップ中である。

(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]

◆高機能ガラス（熱カットなど）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	一般的に高いレベルにあるが、特に光触媒や透明導電膜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で、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、ディスプレイ用の分野の研究が勢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。
<p>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、乾式成膜が主流であり、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。国内での湿式コーティング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、実用化技術を各民間会社が担っているのが現状である。</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]

2.2.5 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技術消費者製品評価によれば、ナノ技術を応用した消費者製品の数は最近急増している。2007年10月時点で、その数は580に達し、2006年11月以来63%増えている。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（ナノテク支援センターの分析）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：

化粧品の原材料のひとつである粉体では種々のナノテクが使われている。例えば、ファンデーションを付けた時の透明感と、サラサラ感の持続を向上させたパール剤（酸化チタン皮膜マイカ）の表面に酸化亜鉛をナノレベルで形状制御して被覆されている。また、酸化亜鉛の表面に数nmのシリカをコートして、スキンケア作用のあるファンデーションが開発された。

繊維：

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ている。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た。

食品：

ナノ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難しい。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、大学での研究人口が多くなく、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うとしたら、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。

ナノ食品の安全性はナノテク全般の安全性の中でも際立っており、日本のこの方面の国としての取組みの弱さが、ナノテクを利用する他の製品群の安全性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「フードナノテクノロジー」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で開催されるなど、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組みが始まっている。一方、日本では、安全性評価への取組みが進められているが、欧米ほどの勢いがまだ見られない。

2.2.5.2 中綱目ごとの比較

(1) 繊維

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）、極細繊維を対象にする。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。

(2) 化粧品

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。

(3) 食品技術（加工、保存、包装含む）

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。

2.2.5.3 比較表

◆生活関連材料分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。食品への大手企業の取組みは欧米に比べて弱い。
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めだつ。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。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	○	→	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。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極めて少ない。
	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極めて少ない。
	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]

◆繊維

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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エ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应用されている。
	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 (ハネウェル) 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	◎	→	スーパー繊維の原系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 (トクロン)、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、日本への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。
	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）、極細繊維を対象にする。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]

◆化粧品

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。

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。

(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]

◆食品技術

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。

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。

(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、界面・表面・ナノ空間、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、およびマルチフェロイクスの5綱目に分類し、個々の最新動向について調査をおこなった。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・欧と比較して若干劣っているテーマも多く、今後の進展に期待が持たれている。しかし実用化が著しい半導体関連の「界面・表面・ナノ空間」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。

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研究テーマが多い。しかし、実際の製品化まで繋がっているものは半導体関連を除くとほとんど見当たらないのが実状である。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ということのようだ。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かなり劣っている。韓国では、ナノテクセンター構想に基づいて本分野に注力しており、今後急速な進展が予想される。

2.3.1.2 中綱目ごとの比較

(1) ナノフルイディクス

ナノフルイディクスでは、MEMS や μ -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。本研究分野は、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い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できる。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、米国がリードしており、この点でも日本における改善が望まれる。

(2) 界面・表面・ナノ空間

本分野においては、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。我が国の基礎研究は米欧と比べて遜色はないが、実用的な産業技術や、医療技術などへ展開波及することがとりわけ難しいところに問題がある。シリコンLSI分野に限って言えば、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。

(3) 自己組織化・自己集合（理論、機構、ゆらぎ）

日米欧の三極体制だがスタンスが異なる。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」という傾向がある。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。産業技術力で見ると、日本では徐々に実用化の芽がスタートしたところであるが、米国ではバイオベンチャーとの融合で実用レベルの研究も散見される。

(4) 量子演算・新量子概念

日本では特定の企業が、欧米では大学・国立研究機関が進んでいる。中国・韓国は、日本・欧米と比較すると、特に実験面で大きく遅れている。本分野は、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。

(5) マルチフェロイックス

日本および欧米ともに、本分野では基礎研究開発が活発化してきた段階である。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、理論分野では日本、光学応答では欧州という得意分野が存在する。一方中国および韓国では、漸く研究が始まった段階であり、目立った成果は出ていない状況である。

2.3.1.3 比較表

◆ナノサイエンス分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	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。
	産業技術力	○	→	半導体関連産業を除けば、新たなビジネスが創出されていない。
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。
	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目指した研究開発が進んでいる。
	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。
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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。

(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]

◆ナノフルイディクス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。
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。
	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。
	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。

全体コメント：本研究分野は、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。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。大企業においての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、米国がリードしており、この点も日本における改善が望まれる。

(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]

◆界面・表面・ナノ空間

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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、世界をリードするものが多い。特に半導体界面物理のレベルは世界一。ただし、応用技術への展開に繋がっていない。
	技術開発水準	○	→	チタニア触媒や High-k 膜作製法など、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	○	→	一部の大企業を除けば、優れた基礎研究や潜在的な技術開発力が産業現場で残念ながら生かされていない。企業連携・ベンチャー支援などが必要。
米国	研究水準	◎	→	研究者の層が厚く、境界領域の研究に積極的に参入する傾向がある。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いる。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。
	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。
	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。
欧州	研究水準	○	→	基礎研究のある領域では、オランダ、デンマークなどの研究は世界をリードしている。欧州連合としては、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	○	→	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	△	↘	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	△	→	優れた世界に伍する研究グループは少数である。国家政策的な支援を受けているので、これからの発展の速度は大きいと思われる。ただし半導体界面研究に関しては、急速に研究レベルが向上している。
	技術開発水準	△	↗	独自の技術開発を生み出すためには、かなりの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	△	→	現時点ではかなり低いが、技術集約型、ハイテク型でない分野では、急速に立ち上がる可能性もある。
韓国	研究水準	◎	↗	最近では、先端的な研究が少数の研究グループでは行われる用になってきたが、全体としては遅れている。ただし、半導体界面の研究レベルは特に高いものがある。
	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。これから、大きな発展期を迎えると思う。
	産業技術力	○	→	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：本分野においては、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。				

(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]

◆自己組織化・自己集合（理論、機構、ゆらぎ）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	統計力学、高分子・コロイド科学、ソフトマター物理を中心にハイレベルの研究が展開されている。特にゆらぎを含めた概念を取り入れ、生物に学ぶナノテクとして有望である。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	◎	↗	高分子関係者が元気。自己組織化と自己集合の統合的な理解が進みつつある。
	産業技術力	○	↗	長尺ナノチューブ、ハニカム膜、低融点ナノ粒子など、日本発の材料が実用化のステージに移行しつつある。まだまだ初歩的段階ではあるが、産業界からの意欲が起こっている。
米国	研究水準	◎	↗	実験科学全般に幅広く、相変わらず自由な発想が強み。ジャルジンスキー方程式のジャルジンスキーなど、数理物理も強い。着実に研究が推進されている。
	技術開発水準	◎	↗	大学ベンチャーが依然元気である。日本同様、基礎技術力は強い。
	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、バイオテクノロジー融合へも進みそうな気配。爆発的な動きはないが、基礎研究と結びついて産業は柔軟性に富んでいる。
欧州	研究水準	◎	↗	基礎研究の懐が深い。伝統的な力を持っており、着実に研究が進んでいる。
	技術開発水準	○	↗	分子集合体研究の実績がある。光合成中心や液晶・固体結晶の多形制御などもかなりの技術力がある。
	産業技術力	△	→	実用化というレベルまでには行っていない。
中国	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。カオスのシミュレーションなどレベルの高い研究もある。
	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。
	産業技術力	△	→	海外レポートでもあまり聞こえてこないが、キャッチアップ能力は高いと思われる。
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。
	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。
全体コメント：日米欧の3極体制だがスタンスが異なる。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」という傾向がある。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。				

(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]

◆量子演算・新量子概念

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	東大、阪大、東北大などで活発に行われているが、量子ビット研究に関しては、欧米の大学の方が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↗	NEC、NTTでの超伝導量子ビット研究はかなり進んでいる。
	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	◎	↗	UC, NIMS, Yale, Harvard など主だった大学や研究機関で活発に行われており、レベルも世界最高水準。
	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、日本の企業における研究レベルの方が高い
	産業技術力	△	↗	カナダのベンチャーである D-wave が、2008 年度に簡単な量子演算回路を売り出すと宣伝している。
欧州	研究水準	◎	↗	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（デルフト、チャルマース、ENS 等）
	技術開発水準	△	→	極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。
	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：日本は特定の企業が、欧米では大学、国立研究機関が進んでいる。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。

(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]

◆マルチフェロイックス

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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、新規物質の開発や理論の提唱など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。
	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。
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。
	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。
中国	研究水準	△	↗	まだ、目立った仕事は出ていないが、多くの仕事が現在進行中のような状態である。
	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。
韓国	研究水準	△	↗	一部、理論グループのアクティビティがある程度。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。

全体コメント：日本および欧米ともに、本分野では基礎研究開発が活発化してきた段階である。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、理論分野では日本、光学応答では欧州という得意分野が存在する。一方中国および韓国では、漸く研究が始まった段階であり、目立った成果は出ていない状況である。

(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]

2.3.2 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、データベース、高演算能力のコンピュータをベースとする計算科学の駆使
 - ③作製パラメータ高速スキャンによる絨毯爆撃的な試料合成・評価の実施
- 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、大項目である「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」にわけて比較を行うこととした。

我が国の本分野の取り組みは、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にリードされているが、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、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目立つ。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の構築でのリードが目立つ。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。

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

日本の一部の大学・研究機関における研究水準は世界のトップであるが、全体的には少し欧米に遅れる。日本の技術開発水準、産業技術力は欧米に比較して完全に立ち遅れている。米国製計算科学ソフトが世界標準となっているものも多く、日本でも米国製ソフトを使用している大学・研究機関が非常に多い。

(2) DBの構築

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。欧米に比較すると日本の物質・材料系データベースは弱く、学術機関において維持管理のための資金不足が指摘されている。

(3) 新材料設計・機能設計

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。アジアの材料先進国では、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。

(4) 材料探索手法（ハイスループット、コンビナトリアル）

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。日本は無機固体、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世界をリードしているが、創薬、有機合成、触媒、ポリマーのコンビナトリアル手法の研究、産業応用はアメリカ、ヨーロッパが先行している。韓国では、触媒開発、中国では固体材料を中心に、日米の動きを注視しながら、この分野の産学共同研究の機運が高まってきている。インフォマティクスはデータの標準化の問題を含み、国際連携による主導権の確保が重要である。

2.3.2.3 比較表

◆材料設計・探索分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。しかし、計算科学や DB の構築などは、欧米への遅れも目立つ。
	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いる。
	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。
	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殆どみられないが、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]

◆計算科学・シミュレーション

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	量子論における SAC-CI、MRMP 法、Fragment MO、RISM、Tight-Binding MD、連続体力学における粒子法など一部の大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界のトップにあるが、全体的には欧米より少し遅れる。
	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が目立つ。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、全く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。
米国	研究水準	◎	↗	量子論では 1999 年に Kohn と Pople がノーベル賞を受賞するなど歴史的にも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。
	技術開発水準	◎	→	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。
	産業技術力	◎	→	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く、米国のみならず日本を含め世界中で使用されている。
欧州	研究水準	◎	↗	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、欧州にて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。
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、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。
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急速に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。
<p>全体コメント：日本の一部の大学・研究機関における研究水準は世界のトップであるが、全体的には少し欧米に遅れる。日本の技術開発水準、産業技術力は欧米に比較して完全に立ち遅れている。米国製計算科学ソフトが世界標準となっているものも多く、日本でも米国製ソフトを使用している大学・研究機関が非常に多い。</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]

◆ DB の構築

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	△	↗	物質・材料系に関するデータベースの開発は欧米に比較して立ち遅れているが、最近コンビナトリアルケミストリーやコンビナトリアル計算化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・材料研究機構において、広範な物質・材料データベースの構築が行われている。データベースの構築には予算がおりるが、データベースの維持・管理に予算がおりない問題点が指摘されている。
	産業技術力	△	→	データベースは産業にはなっていない。
米国	研究水準	○	→	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、公開はされていない。
	技術開発水準	○	→	物質・材料系に関しては、米国金属学会、Oak Ridge National Laboratoryなどが技術開発を行っている。
	産業技術力	○	→	ACI社のMatwebやIDES Inco.社のIDES Inco.社のIDES Resin Sourceなどが有名だが、欧州より遅れる。
欧州	研究水準	◎	→	歴史的にデータベースの構築には強い。
	技術開発水準	◎	→	物質・材料データベースとしては、英国のNational Physical Laboratory、オランダにある欧州連合などで大規模なデータベース構築を行っている。
	産業技術力	◎	→	歴史的に物質・材料データベースには強く、英国Granta Design社のMatdata.net、NAMTEC社、UK Steelなどが有名。
中国	研究水準	×	→	大学や研究機関において、新たなデータベースの開発は、現状では行われていない。
	技術開発水準	×	→	企業でのデータベースの開発は、全く行われていない。
	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	△	↗	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最近開始された。非鉄金属を対象としたのは、日本で鉄に関するデータベースが充実しているため。
	技術開発水準	×	→	企業でのデータベースの開発は、全く行われていない。
	産業技術力	×	→	データベースは全く産業になっていない。
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。欧米に比較すると日本の物質・材料系データベースは弱く、学術機関において維持管理のための資金不足が指摘されている。				

(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]

◆新材料設計・機能設計

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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科学技術政策に支えられ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。
	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ているが、この領域では依然 高いレベルと人材を維持している。
	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ているが、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	△	↗	これまでは韓国と同水準であったが、研究者の裾野が広がり、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。
	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。
全体コメント：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。アジアの材料先進国では、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。				

(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]

◆材料探索手法

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	↗	固体材料分野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研究開発は少数の大学研究室に限られている。
	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、具体的な動きは鈍く、海外技術の導入に頼りがちである。
	産業技術力	△	↗	製造ラインに適用する技術要素は少ないが、コンビナトリアル手法による材料探索を委託するベンチャーへの期待はある。
米国	研究水準	◎	↗	NISTのATPプログラムをベースに、大学、国研、企業における独自のシステム開発とポリマー、触媒を中心とした基礎研究が進行。
	技術開発水準	◎	↗	GE、デュポン等の大企業のほか、ベンチャー企業による技術開発も進行中。
	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。
欧州	研究水準	◎	↗	ポリマー、触媒分野を中心に独仏英蘭の大学主導で活発な研究。
	技術開発水準	○	↗	EU連携によるTopCombiプロジェクトが2005年からスタートし産学連携による技術開発拡大の動き。
	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。
中国	研究水準	△	↗	アメリカのコンビテック研究の最前線は中国人主導的。2、3の大学を中心に米日の技術の情報収集と導入の動き。
	技術開発水準	△	↗	独自技術は少ないが世界の状況を探り、普及を図っている。
	産業技術力	○	↗	米国産ベンチャーの中国進出もあり、今後急進展の可能性。
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、セラミックスに展開。
	技術開発水準	△	↗	産官連携、日米技術の吸収に積極的。
	産業技術力	×	→	目に見える技術は未だないが、化学、電子産業を中心に関心は高まっている。

全体コメント: 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。①原料（組成）や反応条件を系統的に変えた多数の化合物や材料のコンビナトリアル自動合成、②高速走査やマルチチャンネル計測システムによるハイスループット評価、③データを高速処理し材料設計に活用するインフォマティクスの3要素からなり、化学とエレクトロニクス、ロボティクス、ITの融合をシステム設計の基本とする。1980年代に溶液系の創薬コンビナトリアルケミストリーに始まり、1990年代の後半からは気相や湿式合成による固体材料に展開している。医薬品・有機化合物から、触媒、ポリマー、半導体、金属、セラミックス、ガラスなどの固体素材、さらに複合材料、ナノマテリアル、積層デバイスにまで広く適用できる技術コンセプトであり、それぞれに対応するシステム開発が世界で進行している。広汎な基盤技術を有する一方、若年技術者の減少に直面している我が国の「ものづくり」研究開発における国際競争力の維持、強化に必須の新技術として発展が期待される。

日本は無機固体、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世界をリードしているが、創薬、有機合成、触媒、ポリマーのコンビナトリアル手法の研究、産業応用はアメリカ、ヨーロッパが先行している。韓国では、触媒開発、中国では固体材料を中心に、日米の動きを注視しながら、この分野の産学共同研究の機運が高まってきている。インフォマティクスはデータの標準化の問題を含み、国際連携による主導権の確保が重要である。

(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]

2.3.3 ナノ計測・評価・標準分野

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。一方欧州においては、走査プローブ顕微鏡など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。我が国においては、新しい計測技術を生み出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多少の進展はあるが、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までには至っていない。中国も同様である。

ここでは、走査プローブ顕微鏡 SPM、電子顕微鏡、放射光・X線、3次元イメージング、単分子分光、ナノ評価、標準技術に分類して、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。

走査プローブ顕微鏡 SPM 技術：真空・大気・液中においてナノメータ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、スピン偏局を含め 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、マイクロからナノスケールの 2次元構造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。機器市場は、我が国が半数以上を占めている。

放射光・X線技術：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に利用される。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利用した研究活動においても活発である。欧米ではさらに施設の更新が進められている。

3次元イメージング技術：ナノメータスケールの 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。

単分子分光技術：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。

ナノ評価技術：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。理論面では欧米に一步譲るが、技術開発は日米欧競合している。

標準技術：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。我が国を含めてアジア諸国は欧米の後を追っているが、科学技術基盤として根付いていない。

2.3.3.2 中綱目ごとの比較

(1) 走査型プローブ顕微鏡

走査プローブ顕微鏡 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。欧州は、交換相互作用力顕微鏡、スピン偏極 STM、3次元測長 AFM など世界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である。国産装置は、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。

(2) 電子顕微鏡

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。

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。

(3) 放射光・X線計測

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、欧米に先んじて我が国では民間企業を中心に進められている。

(4) 単分子分光

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。単一分子ラマン分光には、その増強メカニズムが完全には解明されていないために、未だ実用化は進んでいない。しかしながら、研究レベルや増強技術の開発は世界的に精力的に進められている。欧米日の大学・研究所では、電子ビームなど様々な微細加工技術を利用した金属ナノ構造基板形成技術によるものが主であるのに対して、中国では、化学還元法での基板形成技術開発が行われている。

実用化については、前述のように、未だ進んでいないが、欧米で大学発の金属ナノ構造基板の形成と販売のベンチャー企業があり、注目されている。一方、日本では、一部企業・大学が準備中の段階である。中国・韓国とも実用化は行われていない。

(5) 3次元計測（リアルタイム含む）

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。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。レーザ補助3次元アトムプローブ法や3次元TEMの開発も行われている。

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、欧米がぬきんでており、金属系材料では欧州、非金属材料では日本が世界を先導している。

(6) ナノ粒子評価（形状・分布・表面活性・動態解析）

材料の品質評価や排ガス規制など法規制に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、透過電子顕微鏡TEMを利用した従来の手法が中心であり、方法論の進化は少なく、各国差が少ない。

分布測定には、TEM法、動的光散乱法、計数ミリカン法、エアロゾル粒子

数質量分析器による測定法などがある。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。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、07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。我が国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。

なお、中国、韓国では、ナノ粒子の評価に関しては目だつた動きは見られない。

(7) 標準（物質・計量・評価法）

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。我が国を含めてアジア諸国は、欧米の後を追っているが、科学技術基盤として根付いていない。

2.3.3.3 比較表

◆ナノ計測・評価・標準分野のまとめ

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。

(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]

◆走査型プローブ顕微鏡

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	AFM を利用した研究水準は高く、半導体だけでなく分子やバイオなど応用範囲も広い。スピン SPM は、研究グループが少ない。
	技術開発水準	◎	↗	超高真空 AFM による元素識別・原子操作、液中 AFM、バイオ用高速 AFM、非線形誘電率顕微鏡、多探針プローブなど、日本発の技術多数。低温スピン STM 技術は遅れている。
	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、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。
	技術開発水準	○	→	超高真空 AFM の技術が少し日欧より劣るが、STM による原子操作など走査型プローブ顕微鏡全般の技術開発水準は高い。磁気 SPM は、研究グループ数は少ないが、研究レベルはきわめて高い。
	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測長 AFM (Critical Dimension AFM) は米国製がほとんど。
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-パルスセンサー方式の超高分解能 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。カンチレバープ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。
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が海外から輸入した技術を使用している。
	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 研究グループはある。
	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、技術レベルはかなり高いと思われる。
	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：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。欧州は、交換相互作用力顕微鏡、スピン偏極 STM、3 次元測長 AFM など世界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である。国産装置は、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。

(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]

◆電子顕微鏡

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の 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。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が独自技術を所有。
	産業技術力	×	→	産業的に提供できる電子顕微鏡メーカー、周辺機器メーカーともに規模は大きくない。
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。
	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。
	産業技術力	○	↗	高い技術力を背景にシェア増加傾向。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る。
	技術開発水準	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共に製造メーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共に製造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、周辺機器共に製造メーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共に製造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。

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。

(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]

◆放射光・X線計測

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の 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。
	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。
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。
	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、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
	技術開発水準	×	↗	本格的な放射光施設の建設遅れによる。本格的な放射光施設の建設遅れによる。上海第三世代放射光施設が2009年稼働予定。(日本へ技術協力を期待)
	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。
	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、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、間接的に生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、欧米に先んじて我が国では民間企業を中心に進められている。

(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]

◆単分子分光

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	一部の研究所で着実に成果を上げている。
	技術開発水準	○	↗	大学で、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・大学はごく一部。
米国	研究水準	◎	→	先行研究があったが、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でき、注目されている。
欧州	研究水準	◎	↗	一部の大学で成果をあげている。
	技術開発水準	◎	↗	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。
中国	研究水準	◎	→	一部の大学・研究所で成果を上げている。
	技術開発水準	○	→	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	×	→	ほとんど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。

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。単一分子ラマン分光には、その増強メカニズムが完全には解明されていないために、未だ実用化は進んでいない。しかしながら、研究レベルや増強技術の開発は世界的に精力的に進められている。欧米日の大学・研究所では、電子ビームなど様々な微細加工技術を利用した金属ナノ構造基板形成技術によるものが主であるのに対して、中国では、化学還元法での基板形成技術開発が行われている。実用化については、前述のように、未だ進んでいないが、欧米で大学発の金属ナノ構造基板の形成と販売のベンチャー企業があり、注目されている。一方、日本では、一部企業・大学が準備中の段階である。中国・韓国とも実用化は行われていない。

(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次元計測（リアルタイム含む）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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・生物分野は非常に立ち後れ。
	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た。
	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。
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
	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、放射光施設などでの開発が進みつつある（エックス線CT）。
	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ところが産業面で弱いところである。
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。
	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。
	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、産業技術面でも手強い。これらの会社で3次元計測の重要性が良く認識されていることは特筆に値する。
中国	研究水準	△	→	すべての面で非常に立ち後れている。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。
	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ないが、今後急速に力を付けてくると考えられる。

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。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。レーザー補助3次元アトムプローブ法や3次元TEMの開発も行われている。
 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、欧米がぬきんでおり、金属系材料では欧州、非金属材料では日本が世界を先導している。

(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]

◆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	現状についての比較	近年のトレンド	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	◎	↗	従来より、基礎研究のポテンシャルは高いレベルを保っている。
	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	◎	↗	従来より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。
中国	研究水準	○	↗	台湾の研究水準は近年向上している。国際標準も意識している。
	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。
韓国	研究水準	△	→	現在まで目立った研究成果は伺えない。
	技術開発水準	○	→	さほど目立った動向は伺えない。
	産業技術力	○	↗	近年、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に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、透過電子顕微鏡 TEM を利用した従来の手法が中心であり、方法論の進化は少なく、各国差が少ない。
分布測定には、TEM 法、動的光散乱法、計数ミリカン法、エアロゾル粒子数質量分析器による測定法などがある。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。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、07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。我が国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。
なお、中国、韓国では、ナノ粒子の評価に関しては目立った動きは見られない。

(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]

◆標準（物質・計量・評価法）

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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	○	↗	標準の種類が拡大が図られ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 露光にむ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。我が国を含めてアジア諸国は、欧米の後を追っているが、科学技術基盤として根付いていない。

(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]

2.4 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。予算的にも米国、韓国、台湾などはナノテク予算の15 - 20%を投入、一方、日本は、2 - 3%の投資であり、主要国に比べて一桁近く低い。

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、ナノテクノロジー・ネットワーク・プロジェクトで拡大した。サービスの質は欧米に比べて高く、十分に役立っていると考えられる。その分コストも高く、公的援助に依存しすぎない、課金制度の確立が課題である。既存設備の活用が大半であり、分散しており、学際研究を促進するためには集約型施設の方が有利であろう。一般的に研究者が設備の共有化に慣れておらず、意識改革も必要かもしれない。イノベーションの立場から融合、連携促進を謳うものの、リーダーの個人的努力に委ねており、科学技術政策としての連携・融合インセンティブなど具体性に欠ける。

米国では共用研究開発拠点を世界に先駆けて開始し、国家ナノテクノロジー基盤ネットワーク（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が最も代表的だが、13 参画大学の中で東のコーネル大、西のスタンフォード大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。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。

欧州では、国によって方針が異なるが、仏、英国が全国に広がる共用施設ネットワークを持つ一方、ドイツが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。大型共用拠点としては産業界からの More than Moore に対する要望を組織的に吸い上げて成功しているベルギー IMEC に加え、仏の MINATEC が代表的であり、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。しかし、

まだ敷居が高く、アカデミックソサエティからの利用は進んでいない模様である。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、国家ナノ・ファブ・センターなど大型共用拠点の整備は積極的に続けられている。ただ最近、施設が乱立しすぎたので、整理も検討されている模様。産業界への波及はこれからである。

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	現状についての比較	近年のトレンド	留意事項などコメント全般
日本	取り組み水準	○	→	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、Nanotechnology Network（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が開始された。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、ナノテクノロジー・ネットワーク・プロジェクトで拡大した。サービスの質は欧米に比べて高く、十分に役立っていると考えられる。公的援助への過大な依存から脱却するため2007年にスタートした。課金制度の確立が課題である。
	実効性	△	→	上記のプログラムは2007年度開始なので、実効性の評価は出来ない。既存設備の活用が大半であり、分散もしている。学際研究を促進するためには集約型施設の方が有利と考えられる。上記第2期では、課金制の導入を文科省が促進している。
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。
	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。
欧州	取り組み水準	◎	→	その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、ドイツが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。
	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	○	↗	大型共用拠点が稼働開始し、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	△	→	大型共用拠点は数居が高く、アカデミックソサエティからの利用は進んでいない模様である。産業界への波及はこれから。
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ので、整理を検討しているとの話もある。
	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4億円を得て自立している。国際的にもオープンにされている。

全体コメント：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。予算的にも米国、韓国、台湾などはナノテク予算の15-20%を投入、一方、日本は、2-3%投資であり、主要国に比べて一桁近く低い。日本では共用施設のサービスの質は欧米に比べて高く、十分に役立っていると考えられるが、公的援助依存脱却が課題である。既存設備の活用が大半であり、分散しており、学際研究を促進するためには不利。イノベーションの立場から融合、連携促進を謳うものの、リーダーの個人的努力に委ねており、科学技術政策としての連携・融合インセンティブなど具体性に欠ける。米国では共用研究開発拠点を世界に先駆けて開始し、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。13の大学が参画するNNINが最も代表的。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。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。欧州では、国によって方針が異なる。大型共用拠点としては成功しているベルギーIMECに加え、仏のMINATECが代表的であり、施設運営そのものがビジネスとして成立している。ベンチャーが積極的に設立されている拠点もある。中国では北京の大型共用拠点が稼働開始し、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。アカデミックソサエティからの利用は進んでいない模様である。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、国家ナノ・ファブ・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。ただ最近、施設が乱立しすぎたので、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]

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といえる。ただし、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に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教育を含む若年層から社会人教育まで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ウ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。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。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。

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	現状についての比較	近年のトレンド	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。骨太の教育プログラムは不在。
	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	◎	→	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。
	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。
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。
	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	△	↗	技術、人材、施設を 3 つの柱にして、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。

全体コメント：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といえる。ただし、根幹的な教育プログラムは不在。

・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に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 教育を含む若年層から社会人教育まで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。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。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。

(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 工業標準化戦略

2.4.3.1 概観

ナノテクノロジーの標準化は、現在のところナノカーボン材料に特化して用語や計測評価及び安全性についての議論が日米を中心に進められている。今後は他のナノ材料まで含めた材料規格の議論、ナノテクノロジー製品のスケジュールシップ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この製品管理のなかで進められることになると思われる。この点については、日本は取り組みが少なく、米国は力がある。欧州では全体的な動向は明確ではないが、独は IEC にナノテクノロジーの標準化を立ち上げ、材料規格に近いような原案作成を進めようとしている動きを注視する必要がある。中国では、先の全人代以降ナノテクノロジーの標準化は重要な国家戦略として位置づけられて進められようとしているので、今後の展開には目が離せない。韓国では、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。

ナノテクノロジーの標準化はまだ緒に就いたばかりといっても過言ではない。今後の科学技術や材料研究動向、産業化動向を正しく把握し、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、包括的な取り組みを展開していくことが望まれる。また将来の産業化を見据えた中長期的な標準化の戦略策定が求められる。

2.4.3.2 比較表

◆工業標準国際戦略

国・地域	フェーズ	現状について の比較	近年の トレンド	留意事項などコメント全般
日本	取り組み 水準	◎	↗	日本の活動は ISO/TC229 の活動をリードしており、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包括的な対応が進められている。しかしながら今後ナノテクノロジーの国際標準化活動がナノ炭素だけでなく酸化チタン等の他のナノ粒子へ展開し、材料規格や製品スチュワードシップへと展開していくと考えられ、このような動きに対する将来戦略求められている。またもうひとつのナノテクノロジーの国際標準化のフレームである IEC への対応も早急に戦略的推進の方策が求められる。
	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、ナノ炭素に特化した現在の標準化では実効性は大きい。日本提案の純度測定法等の標準が出来、この課題がさらに安全性と絡んで大変重要になっていくと思われる。問題は現在進められているナノ炭素はいとしても、今後のナノテクノロジーの標準化に対する包括的取り組みの戦略策定が期待される。原案作成の人は大変多いが、戦略策定に人材が少ないのが気になる点である。
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。
	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いし、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。数年後には米国提案の規格も出ていくと思われるが、かと言って現時点で日本を大きくリードしているわけでもない。概ね同じようなレベルである。ただ、ASTM の EHS に関する活動や MRS での EHS のセッションなど、リスクやバイオに関係する領域では底力がある。
欧州	取り組み 水準	○	→	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い。注意しておかなければならないのはドイツで、ナノ材料の機能評価に特化した提案を戦略的にやっている。これが ISO 内の投票で否決されるとすぐ、自ら IEC にナノテクノロジーの標準化を立ち上げ、材料規格に近いような原案作成を進めようとしている。
	実効性	○	→	全般に取り組みが弱くターゲットが見えないし、EU として統一的な動きにもなっていない。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	○	→	メタルオキサイドに関する国内規格を作るなど、国際標準化活動のなかでの存在感を戦略的に示そうとしているように思われる。この国内規格をどのタイミングで ISO や IEC に持ち込んでくるのか、動向を見ておく必要あり。
	実効性	△	→	ASTM とは情報交換をしているようだが、ISO では存在感が薄く目立った存在でもないので実態の把握が困難。しかしながら先の全人代以降ナノテクノロジーの標準化は重要な国家戦略として位置づけられて進められようとしているので、今後の展開には目が話せない。
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、サムソンの銀ナノ粒子が米国 EPA からたたかれたことから、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言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。

全体コメント：ナノテクノロジーの標準化は、現在のところナノカーボン材料に特化して用語や計測評価及び安全性についての議論が日米を中心に進められている。今後は他のナノ材料まで含めた材料規格の議論、ナノテクノロジー製品のスチュワードシップの議論へと展開していく。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この製品管理のなかで進められると思われる。この点について日本は取り組みが少なく、米国は力がある。欧州では全体的な動向は明確ではないが、独は IEC にナノテクノロジーの標準化を立ち上げ、材料規格に近いような原案作成を進めようとしている動きを注視する必要がある。中国では、先の全人代以降ナノテクノロジーの標準化は重要な国家戦略として位置づけられて進められようとしており、今後の展開には目が離せない。韓国では、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。ナノテクノロジーの標準化はまだ緒に就いたばかりといっても過言ではない。今後の科学技術や材料研究動向、産業化動向を正しく把握し、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、包括的な取り組みを展開していくことが望まれる。また将来の産業化を見据えた中長期的な標準化の戦略策定が望まれる。

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。これに対して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。俯瞰的にみると、EHSやELSIの課題への対応を含めた社会受容が政策的に包括的に進めているのはアメリカとイギリスで、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。アジア圏では唯一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。ナノ粒子のリスク管理や標準化の活動において、日本は急速に世界の潮流の主導的位置を確保した。今後はより社会受容を意識した活動が必要となる。中国は急速に研究体制を整備中であり、韓国は取り組み始めたところといえる。この両国は各々の事情から今後、実効性を目指した施策に取り組む可能性がある。

2.4.4.2 比較表

◆社会受容・EHS・ELSI

国・地域	フェーズ	現状についての比較	近年のトレンド	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。現時点では世界をリードする具体的取り組みが展開されているが、社会受容（パブリックエンゲージメント）についてはもう少し工夫が必要である。
	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ひ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、NNCO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、学際の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。
<p>全体コメント：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。これに対して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。俯瞰的にみると、EHSやELSIの課題への対応を含めた社会受容が政策的に包括的に進めているのはアメリカとイギリスで、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。アジア圏では唯一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。ナノ粒子のリスク管理や標準化の活動において、日本は急速に世界の潮流の主導的位置を確保した。今後はより社会受容を意識した活動が必要となる。中国は急速に研究体制を整備中であり、韓国は取り組み始めたところといえる。この両国は各々の事情から今後、実効性を目指した施策に取り組む可能性がある。</p>				

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も発表されていない。

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。欧州は、FP7において、海外協力者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、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、また、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もち、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	現状についての比較	近年のトレンド	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	×	→	ファンディングがゼロに等しいなかで、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。
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。
	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、さらに強力に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でてこなければ、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。

全体コメント：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も発表されていない。

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。欧州は、FP7において、海外協力者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、中国国内に研究所を設立するなど、将来に人材確保、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、また、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もち、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。

(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]

Ⅲ 注目すべき研究開発の動向

3.1 ナノテク・材料

3.1.1 ナノ構造材料・新機能材料分野

(1) 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）ですすめられ、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。

高強度材料：

高強度材料としてのナノコンポジット材料の研究は、東北大を中心として液体急冷法を用いたアモルファス・ナノ結晶材料、金属ガラスに関する膨大な研究が行われ、これが世界的な研究の流れを作った。コストと生産性が重視される構造材料では実用化では多くの課題がある。米国では軍がコスト度外視の特性重視の材料研究の牽引となっている。先導研究は日本、力学特性などの基礎研究では米国が高い水準の研究を推進してきたが、膨大な研究者人口を有する中国が数では圧倒しつつある。この分野では欧州勢は日本の追従研究を行っている。

カーボン繊維補強高分子材料：

最近の大きな話題は、ボーイング社の次期主力旅客機 B787 のエンジン以外の殆どの部分がカーボン繊維補強高分子材料となったことである。これは、基礎研究を含めて日本、アメリカの共同研究成果であると思う。今後は、国内外の連携研究開発が重要になるであろう。

ナノシリカ補強タイヤの実用化：

ミシュラン社がナノシリカ補強タイヤ（低燃費でウエットスキッド良好という相反性能）を実用化している。この場合、ナノ粒子の分散、界面処理、加工条件などが重要である。これに刺激されて世界各国でナノコンポジット（ナノフィラー（粒子）、ナノファイバー・ナノチューブ、ナノシートなど）の研究開発が盛んになっている。

ナノシート：

豊田中研のモンモリロナイト補強プラスチック、ゴムなどのナノシートが世界的に脚光を浴びている。またドイツ（カイザーラウテルン工科大学複合材料研究所）では、エポキシ樹脂とミクロンオーダーの SiC 粒子、ナノオーダーのアルミナ粒子複合材料で耐摩耗性の製紙用カレンダーロール（直径 1m、幅 10m）を実用化したという。ナノコンポジットを大型の装置に適用する視点（ボーイングもこれ）が重要視されており。かなり大掛かりな実験を視野に入れる方向性が考えられる。

(2) 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）の使用がようやく始まり、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か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。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。

(3) 機能性ゲル

機能性ゲル研究：

韓国は、大学、民間企業、および商務省 (Ministry of Commerce) から構成される高分子ゲル研究クラスターセンター (<http://www.polygel.re.kr/>) を立ち上げており、国家戦略でゲル材料の研究開発を進めている。

日本の幾つかのグループによって、極めて高い力学強度を示すゲル (破断伸びが 20 数倍、破断応力が数メガパルカル) や表面摩擦係数が固体の百分の一から千分の一しかない低摩擦ゲルが近年開発されており、注目を集めている。関連のベンチャー企業も設立されている。福祉、環境、安全、省エネルギーなどの関連する分野において、幅広い応用が見込まれている。機能性ゲルの研究は 80 年代後半 - 90 年代前半にかけて急激に飛躍し、当時は世界中で活発に行われていたが、その後は日本以外では縮小傾向にある。日本も撤退したグループは多いが、合成、物性・構造解析、機能化、応用といったすべての分野において持続的に発展を続けている。さらに最近では、合成技術の発展と共に新しい物性・機能を持つゲル研究が再び盛んになってきており、とくに日本に先駆的・独創的な研究が多い。米国は特化した領域 (バイオマテリアルへの応用展開) での研究水準が高く、再び機能性ゲルが注目される動向がある。日本においても、バイオマテリアルや BioMEMS などのナノバイオシステムへの応用は、今後最も注目すべき研究開発課題と思われる。

(4) 超分子・デンドリマー

基幹デンドリマーの開発：

ヨーロッパ（オランダ）においては基幹デンドリマーの企業化に成功している。これは化学修飾することにより、いろいろなデンドリマーに変換することが可能であり、主に研究開発用として用いられている。このデンドリマーに生理活性物質などを付与して、ドラッグデリバリーのキャリアとして研究されている。

超分子デバイスの開発：

アメリカのカリフォルニア大学 UCLA と Hewlett-Packard 社は共同して、超分子素子の開発に取り組んでいる。電子を多く含む分子の輪と分子が不足した分子の輪を組み合わせることにより、その相対的な動きを信号として取り出すことにより、新たなコンピュータ素子として利用しようとするものである。

超分子ポリマーの開発：

これまでポリマーは共有結合で結合した分子とされていたが、弱い分子間相互作用でも多くの結合が共同的に作用することにより、十分強いポリマー（超分子ポリマー）が得られることが明らかにされた。このことを利用してさまざまな超分子ポリマーが開発されつつある。

(5) メソポーラス材料

蓄電技術への応用：

導電性かつリチウムイオンのインターカレーションが可能なメソポーラス材料を用いれば高容量・高出力のリチウム 2 次電池電極材料を作製できるのでこれらの革新的エネルギー材料への応用を年頭にした研究開発が盛んに行われている。産総研の本間、周らはメソポーラスタニアを世界最初に合成し、その高容量・高出力特性を実証した。またカーボン系材料のメソポーラス材料のリチウム 2 次電池、燃料電池への応用も盛んである。英国の brus らは実用材料である LiCoO_2 のメソポーラス材料の合成にも成功している。メソポーラス電極材料の安価、大量の合成技術が開発されれば実用化への可能性が高まると考えられる。

バイオ応用：

メソポーラス材料のドラッグデリバリーなどへの応用も近年盛んである。ナノ空間内に薬剤を封入し、それを所望の位置に運搬した後、光や電気化学的に放出を行う DDS システムも注目されており、本来触媒応用で開発されたメソポーラス材料のバイオ応用も今後注目すべき動向である。

(6) 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) のを契機として、NiO (韓国) や CuO, Fe₂O₃ 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。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 3 極で研究開発が進むが、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ている。本分野における日本の貢献は小さく、日本の優位性は低下している。

(2) ナノ転写加工技術（ナノインプリント等）

ナノインプリント技術：

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、高性能微細光学素子をガラスで作製することには、多くのニーズがある。そこで、ナノパターンを含むマイクロパターンをガラスに転写する技術が研究開発されている。日本では、NEDO による国家プロジェクトが研究開発例として知られているが、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、実用化を狙っている。

基礎技術の蓄積：

欧州における NaPa プロジェクトが 2007 年度で終了するが、3 年間の欧州主要国にポーランド・ロシアを含めた横断的な取り組みの結果、基礎的な技術蓄積がかなり行われた。たとえば、樹脂の流動解析に基づくモールド設計手法の開発、離型材料・条件の開発、ロール技術の開発などが行われた。

(3) 自己組織化技術

自己組織化技術の利用：

ブロック共重合体を用いた自己組織化技術は、依然、基礎的研究段階にあるが、周期構造を有するコンタクト、ラメラ構造を利用したゲートパターンなど、応用の可能性が見えつつある。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。

low-k 膜へのポーラス構造利用技術：

IBM は、次世代マイクロプロセッサ内部の low-k 膜として自己組織化技術による制御されたポーラス構造を利用することで、35 %高速化、および 15 %の省電力化が可能であることを報告している。

タンパク質単層膜の精密製造技術：

ニューカッスル大学 (英国) 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。

(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)
有機 EL 材料印刷技術：

東芝が、有機 EL ディスプレイにインクジェット印刷技術を適用する予定である。

電子ペーパー：

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。これに用いる米国の E インクは有望である。

(5) MEMS・NEMS 加工技術

MEMS・NEMS の新技術：

インクジェットプリンタヘッド、圧力センサ、加速度センサ、ジャイロ、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、シリコンロック、MEMS 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強く期待されている。

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：

インテル (米) 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、間もなく量産に導入するとアナウンスしている。実現されれば、MOS トランジスタ技術にとって、画期的な材料変革になる。その具体的な技術内容と共に、後続のメーカーがいつ現れるかが注目される。High-k 材料の量産への初期投入は、SiO₂ の一部に Hf 酸化物を添加したような、比較的限定的な使い方になると予想される。これに続いて、ゲート絶縁膜の大部分を High-k 材料に置き換える第2世代、第3世代の High-k/メタルゲートが、いつ、量産展開に至るのかが、今後の注目である。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：

トランジスタのチャンネル材料候補として、ゲルマニウムやⅢ - V 族化合物半導体のような高移動度半導体材料の研究が、米欧で活発化している。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ている。欧州では、IMEC や Leti などの公的機関が中心的役割を果たしている。日本では、MIRAI プロジェクトなどの一部でゲルマニウムの研究が行われているのみである。現状では 90nm 世代から導入されたはずの Si 技術の改良が中心であるが、32nm 世代以降をにらんで、チャンネルを Si から Ge やⅢ - V 族化合物半導体に変えて、CMOS 性能を向上させる研究が活発化している。これらの新チャンネル材料の研究はまだ探索的な段階で、トランジスタ技術としての有用性を判断するためには多くの解決すべき課題があり、実用に結びつくかどうかは、予断を許さない。ゲート絶縁膜形成 (良好な MOS 界面形成) 技術や Si 上への異種半導体形成技術が、キーとなると考えられる。欧米で急速な盛り上がりを見せているグラフェンの他、新規材料の探索や設計を含めて、総合的な戦略を描くことが必要である。

ナノワイヤートランジスタ技術：

32nm 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、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。

(2) スピントロニクス (強相関電子デバイス含む)

不揮発性メモリと不揮発性論理素子：

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。また今後、トランジスタなどの論理素子にも不揮発性機能が用いられる可能性がある。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からである。種々の不揮発性論理素子の開発と、それらの特長を生かした応用の実用化が期待される。

三次元ストレージ技術：

ハードディスクは急速に大容量化しているが、すでにビットサイズが 20nm 程度となっていることを考えると、今後は微小化だけでなく、縦方向に数 100 ~ 1,000 層の多重化が可能な三次元ストレージ技術の開発が必要と思われる。最近、IBM などは電流駆動で磁壁を移動させる新しい三次元化技術を提案しており注目される。種々の多様な三次元化技術も今後開発されてくるとと思われる。

個々のスピンを制御して演算する論路素子：

スピンの上向き、下向きをビット情報として用いるまったく新しい論理素子が提案されている。Intel の論文に寄れば、原理的には、非常に少ないエネルギーで論理演算ができるとされている。新材料開発やスピン制御技術など基礎技術の開発が必要な長期的なテーマとして注目される。スピンデバイスを論理回路に応用するプログラムを DARPA が立ち上げる話がある。日本でもそのような指向を持ったプログラムはあるが、今後、ナノテクと IT が密に連携した展開は重要になると考えられる。

(3) 固体素子メモリ

不揮発性 RAM:

不揮発性 RAM では、ユニバーサルメモリとの考えは受け入れられなくなり、そのメモリの特性に合った用途（キラーアプリケーション）を見つけることが重要になっている。2008年から、JR東日本の Suica に FRAM が導入されることが予定されている。これを機に、非接触 IC カード用のメモリとしては、EEPROM に代わって FRAM が主役になると考えられる。MRAM に関しては、電流注入磁化反転技術によって、どこまで書き込み電流が下げられるかが鍵であろう。

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。

(4) 有機エレクトロニクス

有機レーザ:

有機 EL の次世代デバイスである有機レーザの研究が、大幅に進展してきた。近い将来、レーザ発振を含め、大きな展開が期待されている。

デバイスの溶液製造プロセス技術に関する研究開発:

有機エレクトロニクスを最も有効に活用する技術として、溶液プロセスの適応が期待されているが、それを実際に具現化させるための新たなプロセス技術（微小液滴、ナノ粒子、マイクロコンタクト、表面修飾など）に関する研究開発がその重要性を増してきているとともに、取り組みも年々増加してきている傾向にある。

有機回路に関する研究開発:

有機 EL 素子や有機トランジスタ素子など、代表的な素子に関する研究が軌道に乗ってきていることから、それをさらに発展させて回路化、しかもフレキシブル回路化していくための素子（ダイオード、メモリ、バッテリー、配線など）および回路設計に関する研究が萌芽しつつある。フレキシブルという動作環境が変化する状態におけるエレクトロニクスなどが、新たな課題となってきた。

新機能・極限機能に関する研究:

有機材料の材料設計の多様性を活用した単一材料における機能の複合化に関する研究ならびに、有機材料のエレクトロニクスとしての極限性能を追及した

研究が増える傾向にある。前者では、磁性や光学特性等との複合化に関する研究などが、後者では有機素子内における超高電流密度の実現による有機レーザーの発振に関する研究などが注目を受けるようになってきている。

(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つの光子からひとつの電子-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100nm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。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と考えられている。GaAs中のInAsドット(東大)やSi中のGeドット(武蔵工大)の報告例がある。Siなどの間接遷移型バルク結晶でも発光が増強することが最近報告され注目されている(東大、京大)。この技術はLEDやレーザーの低消費電力化につながる可能性があり注目される。

(6) フォトニック結晶・メタマテリアル

スローライト光バッファ技術：

ある冷却原子の準位が示す巨大な材料分散を利用すると、光の群速度を著しく(例えば自転車の速度まで)遅くできることが1990年代にハーバード大学で実証され、スローライトと呼ばれるようになった。その後、同様の光は構造分散を用いても起こることがわかり、NTTがフォトニック結晶導波路に対して100分の1の光速を評価した。ただし一般にこれらのスローライトは帯域が狭く(自転車の速度が得られる帯域は1kHz以下)、また高次分散も巨大なため、変調された光信号に適用できなかった。2004年に横国大は、高次分散をなくしつつ帯域を拡大するフォトニック結晶構造を考案し、最近その実証に成功した。現在の性能は数THz帯域で50分の1程度の速度であり、デバイス内部で100ps程度の遅延が得られていえる。もし帯域を光通信の1チャンネルに対応した100GHz以下に狭め、デバイスを長くすれば、3桁以上の遅延

時間が得られると見込まれている。これは小型の光遅延素子や、光信号を光のまま蓄積する光バッファを実現する。次世代の光ネットワークはノード部分の速度がボトルネックになると予想され、これを解決する光パケットスイッチに大きな期待がある。しかしパケット同士の衝突を回避する時間調整に利用される光バッファに技術的な見通しが無い。フォトリソ結晶光バッファが実現できれば、重要なブレイクスルーになる可能性がある。

動的制御による高効率・広帯域波長変換技術：

光が通過中にその場の媒質の屈折率を変化させると、その光が位相変調されることが知られているが、例えばステップ的に媒質の屈折率を変化させると、光の波長が線形的にシフトする現象が研究されている。屈折率が変化したままの状態が媒質を通過すると、波長がシフトしたまま光が出力されるので、波長変換器として働くことになる。このような動作は従来の位相変調器でも可能なはずだが、光は短時間に通過するので光がいる間に屈折率変化を起こさせるには、長い媒質長と迅速かつ一様な屈折率変化が必要となり、容易ではない。一方、フォトリソ結晶では、光を微小共振器やスローライト導波路により長時間（例えばナノ秒）とどめることができるので、このような動的制御が容易になる。話題の発端は、短パルス光を高 Q 値微小共振器に蓄積させる手法を議論したスタンフォード大学の研究であり、その後 NTT がその機構を波長変換として解釈し直した。最近コーネル大学は、リング共振器に蓄積された光の波長を 1nm 程度シフトさせることに実際に成功した。京都大学も同様の実験を始めている。また NTT は、MEMS 技術を使って微小共振器の形状を短時間のうちに変えることができれば、機械／光エネルギー変換によって最大 400nm に及ぶ連続的な波長変換が起こることを理論的に予測した。分野外では詳しく理解されていない話題だが、原理的に変換効率は 100% であり、従来の波長変換とは異なる手法として具体的なデバイス応用が期待される。

超解像リソグラフィ、超解像顕微鏡：

通常の光学レンズで点光源を別の点に結像しようとする時、光源からの放射成分は伝搬し、近接場成分は伝搬しないため、像にボケが生じる。もし近接場も伝搬できればボケのない完全な結像が得られるので、リソグラフィや解像に大きなインパクトをもたらす。これを実現する構造として、メタマテリアルなど負の屈折率媒質が注目されている。人工的な金属ナノ構造を用いて、物質の光学応答を模倣するメタマテリアルの研究は、新しい光学のパラダイムを実現させるとして注目されている。研究の中心は可視光領域で負の屈折を実現させるという試みであり、現在 780nm 付近まで報告がある。もし、負の屈折が実現できれば、「完全レンズ」が実現され、通常の光源で微細な構造を露光でき

るステップが実現される可能性がある。このほか、物質を透明化する媒質の開発（クローキング技術）などこれまでの常識では考えられない光学素子や媒質が実現する可能性がある。研究の中心は米国であり、欧州がそれにつづく。この分野では日本は出遅れている。正負の屈折率境界では光がスネルの法則の逆向きに曲がるので、平坦面でも伝搬光が集光される。メタマテリアルではさらに負の透磁率を実効的に発生させて近接場成分も伝搬させ、理論的には完全な結像を実現する。ロンドン大学は1998年にこれらを予測し、具体的な構造として微小な金属スプリットリング配列を提案した。2004年にはマイクロ波に対する構造がUCSDにより作製され、動作が確認された。しかし光領域では金属に強い吸収損失があるため、動作が明確ではない。金属自体は負の屈折率をもつので、損失を無視すればそれ自体でも集光が起こり、超解像が得られたとする報告がある。さらに誘電体と金属の交互配置によって、回折限界以下の物体が拡大表示されたという報告もある。一方、1998年にNEC北米研は、金属の微小開口の周期配列で異常に高い光の透過が起こることを発見した。その後の研究では、周期構造が入射波から表面プラズモンを効果的に励起し、それが裏面に伝達されて、高透過が得られることが示された。これを利用すれば、金属微小開口により従来の近接場光学の性能も改善できる可能性がある。現在、これら様々な研究がメタマテリアルやプラズモニクスというキーワードで研究され、背景理論は混濁気味ではあるが、上に書いた回折限界を打破する可能性がある技術として注目される。

(7) 近接場光技術・ナノフォトニクス

近接場光を使った分光計測装置の国際標準化：

近接場光を使った分光計測装置の国際標準化（ISO）の準備活動が始まっている。日本の産業界が世界をリードする装置を製造しており、先端測定機器に関する国際標準の舞台に日本の規格が登場する初めての例になる。日本の産業界はナノフォトニクスを次世代技術として注目度を高めている。NEDOプロジェクトでのアンケート調査結果では電気、通信、光学メーカーのみでなく材料、化学、印刷など、従来のフォトニクスのカバーする分野以外の業種も高い興味を示している。

技術限界を超えるための動き：

米国ではDARPA、NSFなどの公的機関が基礎研究から応用に至るまで、従来のフォトニクスの技術限界（小型化、高密度化、低消費電力化）を超えるためにナノフォトニクス推進主導を開始した。米国が主導して国際会議、学術雑誌発刊などを行い始めた。日本はナノフォトニクスの発祥地であるが、それを追い越し、さらには米国が主導するという動きが見え始めている。欧州では近

接場光学の研究開始は日本同様速かったが、その後の基礎研究の進展が見られない。中国、韓国、台湾では特筆すべき高水準の研究開発はないが、日本の大容量情報ストレージ、微細加工の技術を模倣しようとする動きが活発である。

(8) プラズモニクス

SERS センサ：

新しいタイプの化学・バイオセンサとして表面増強ラマン散乱 (SERS) を使ったセンサの開発が米国を中心に進められている。ラマン散乱は弱いですが、金属ナノ構造中に生じる表面プラズモンにより増感することにより、実用的に用いることができるようになる。ラマンスペクトルから分子種をその場で直ぐに同定できるため、有害な化学物質やバイオ物質をいち早く検出することができるという特徴がある。米国では、屋外での利用を目指して研究開発が行われており、セキュリティの分野で重要な位置づけとなっている。国内ではラマン散乱の分光研究は多いが、実用化を目指した研究はじめられたばかりである。

超解像：

通常の光学顕微鏡の理論分解能 (回折限界) は波長の半分程度 (数百ナノメートル) である。近接場光学顕微鏡を用いれば、回折限界を超えた分解能が得られるが、走査型の顕微鏡であるという点で、たとえばビデオレートでの観察が困難であるなど満足できるものではない。近年、金属ナノ構造を用いて回折限界を超えた分解能を持ち、拡大像が得られるレンズ (ハイパーレンズ) が開発された。これを用いれば、CCD カメラを使ってリアルタイムで微細構造の観察が可能となる。たとえば、活きたままのウイルスや DNA の様子を画像化することができるなど、特にバイオ分野での期待が高い。研究の中心は米国であり、この分野では日本は出遅れている。

(9) ディスプレイデバイス

液晶ディスプレイ技術の動向：

液晶ディスプレイ (LCD) は、その背景となる技術から大別して、大型カラー液晶テレビ用ディスプレイと中小型モバイルディスプレイに分類できる。大型 LCD は、平面大型カラーテレビを支える技術であり、広視野角・高速応答・高コントラスト・広色度範囲などに関する液晶関連技術 (光学技術含む) と高精細 (ハイビジョン、デジタルシネマ、スーパー HD) 並びにデバイスの大型化と生産性向上に関する薄膜トランジスタ (TFT) 技術に集約される。特に、今後は更なる普及のためのコストダウンを図るための材料革新・生産革新などブレイクスルー技術の開発が重要であり、また、更なる普及に対応してディスプレイデバイス並びにその生産エネルギーの削減が地球温暖化対策としても急

務である。中小型ディスプレイは、携帯電話・スマートフォン・ゲーム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行っている。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み（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付加価値化が重要ポイントとなる。これらの課題に関する研究開発強化の一環として日本に於いては 2001 年度から国家プロジェクト（㈱液晶先端技術対発センター）により「省エネ化対応」と「国際技術競争力強化」を目的に推進されている。

有機 EL ディスプレイ技術の動向：

有機 EL ディスプレイ（OLED）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ている。上記の LCD 技術成果としての高性能 TFT 技術や高生産性技術の活用もこの分野には適用できるため事業各社は各技術の特徴商品への棲み分けを戦略検討している状況にある。

フレキシブルディスプレイ：

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）電子機器や大型壁掛けディスプレイ等がその応用先として期待されている。また、あわせてフィルム基材を用いること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抜本的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、マイクロマシー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る。

(10) 固体照明・発光デバイス

チューナブル白色 LED 照明光源：

白熱電球および蛍光灯の発光原理は、それぞれ、熱放射および放電によっているため、任意の発光スペクトルを得ることは不可能である。そのため、例えば、蛍光灯の光源の色温度は一義的に決定され、電球色（3000K 前後）、温白色（3500K 前後）、白色（4200K 前後）昼白色（5000K 前後）、昼光色（6500K

前後) と区別される。1つの光源から、色度座標の黒体放射曲線にそって、上述した色温度を得ることが出来ると理想的な白色照明光源となる。色温度を制御可能な理想的な光源を蛍光式白色 LED で実現することが出来る。これまで、R (赤)、G (緑)、B (青) の3色 LED を用いて白色光を発光さす試みは、フルカラーディスプレイへの応用として考えられてきたが、LED の持つ特有な狭いスペクトル線幅と特定された波長のため、演色性の優れた照明光源を作製することは不可能であった。そこで、近紫外 LED (405nm 近辺の波長) を用い、R、G、B 蛍光体を、それぞれ、独立に励起・発光させることにより、発光スペクトルが連続分布に近く、かつ、平均演色評価数の高い ($R_a > 95$) チューナブル光源を作製することが可能である。従って、照射面の色、色温度、平均演色評価数、彩度等一般照明光源に最も重要なパラメータおよび発光効率を自由に制御可能な完全色調変調固体光源となる。

(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)

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。

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、50K 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、 γ 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、最近で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。

高速低消費電力デバイス：

超伝導のデバイス応用では、SFQ (single flux quantum) 素子が、高速低消費電力を両立させる究極のデバイスとしてそのポテンシャルが注目されている。(高速だが消費電力が大きいデバイスが多い) 量子磁束の出し入れで、デバイス動作を行う。現在はまだ従来型の超伝導体を用いた開発のレベルにある。

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 (107km) を大きく上回る、世界最長となる 200km 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、MgB2 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。

3.2.2 バイオ・医療分野

(1) 体内送達システム (DDS)

難治ガン治療を目的とする DDS:

ガン治療のための DDS 開発は当然として、更にガン細胞が全身臓器に転移した末期ガンであったとしても、副作用少なく安全に原発巣と転移巣の両方のガン細胞を死滅させることのできる DDS 医薬品の開発が行われている。EPR 効果に基づく受動的ターゲティングからさらには、リガンドを用いる能動的ターゲティングなど、より選択性の高いシステムの開発が注目される。また、患者のコンプライアンス改善の見地から、投与法の改善など喫緊の課題への対応も重要である。

物理エネルギー等によるスマート DDS の実用化:

電気、超音波・衝撃波のような音響波、レーザーのような光、磁場等外部物理エネルギーを用いて、効率よく目的とする場所に薬物・遺伝子等を運搬し、診断・治療するシステムの実用化を図る。このようなシステムは診断 (diagnostics) と治療 (therapy) が一体化した Theranostics nanodevice として 21 世紀の医療を先導していくことが期待される。

超分子ナノデバイスによる未来型標的診断・治療の実現:

分子生物学の急速な進歩によって生命活動が分子レベルで解明されるようになり、遺伝子治療や核酸医薬に代表される分子レベルでの標的治療は、難治がん治療や再生医療など、21 世紀の先端医療における革新的治療法として、臨床の現場で実用化されることが強く望まれている。このような革新的分子治療の実用化にあたって、技術面での鍵を握っているのが遺伝子や薬物を体内の標的細胞に的確に輸送し、かつ細胞内で効率よく機能発現に導く送達システムの開発である。この様なシステムにおいては、生体内の異物認識機構を巧みに回避するステルス機能、体内を移動して組織に浸透する組織浸透機能、標的細胞を認識してその表面に結合する標的認識機能が必須であり、さらには、細胞内においてエンドソームから細胞質に移行するエンドソーム脱出機能、細胞質中を移動して核などのオルガネラに到達するオルガネラ・ターゲティング機能、細胞内で位置・時間特異的に効率的な遺伝子発現や薬理効果を発現させるエフェクター機能が必要とされる。ここに挙げた一連の高度な機能を位置・時間的に制御された形で遂行するシステムは、単にモノを輸送する運搬体 (キャリア) の域を超越し、搭載物と運搬体が構造的かつ機能的にナノスケールで一体化 (インテグレート) したシステム、すなわち、「超分子ナノデバイス」として定義されるべきと言えよう。繊細で高度な機能を有し、かつ、時間的・空間

的に制約の多い環境である人間の体に優しく作用し、検出（センサー機能）→診断（プロセッサ機能）→治療（エフェクター機能）を一体として成し遂げる超分子ナノデバイスの創製こそが、安全で効果に優れた次世代型 DDS 治療の実用化にとって喫緊の最重要課題である。日本の第三期科学技術基本計画におけるライフサイエンス分野の7つの柱の一つには、「標的治療等の革新的がん医療技術」が掲げられているが、国外においても、米国国立がん研究所を中心に全米の大学と研究機関が参画する「Cancer Nanotechnology Plan」や欧州科学連合がイニシアチブを取る「Nanomedicine」プロジェクトが始動しつつある。

(2) 医療用ナノ粒子材料（強磁性粒子など）

イメージング・治療用ナノ磁性粒子：

米 Stanford 大学のグループは、鉄 - コバルト合金をグラファイトカーボン薄膜によって保護することで、高い飽和磁化を持ち、毒性の少ない粒子材料を構築している。特に、MRI 造影剤としての応用が期待される。また、粒子表面のグラファイトに近赤外光を照射することで、近傍の微小領域を加熱することが可能であることから、腫瘍等の温熱療法（ハイパーサーミア）への利用も可能と考えられる。

分散性と磁気特性に優れたナノ磁性粒子：

バイオテクノロジー分野に利用される磁性粒子には、水溶液中における高い分散性、優れた磁気特性が要求される。細菌の合成する強磁性ナノ粒子は、サブミクロンサイズで脂質二分子膜に覆われていることからこれらの要求を満たし、細胞分離用試薬としての製品化が期待される。また、この粒子合成に直接関与するタンパク質が発見されており、これを利用することで、粒子形態とサイズの制御された粒子が合成されている。粒子の大量生産技術として、工学的応用が期待される。

磁性粒子マーカーを利用した生体分子の高感度測定システム：

磁性粒子をマーカーとして利用し、磁化測定装置により検出することで、対象物を定量的に測定する技術が日米を中心に進められている。磁気シグナルは高感度検出が可能であり、検出装置も小型化、低価格化が容易である。米カンタムデザイン社は、いち早く製品化をしており、従来の蛍光、発光検出システムと競合する系として、今後の動向に注目している。特に、イムノアッセイ等に基づいたポイント・オブ・ケア診断等への応用が見込まれる。

(3) 分子イメージング

高分解能のイメージング技術開発：

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ている。特に、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。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。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。

(4) 再生医療用材料・生体適合材料（細胞シート含む）

幹細胞培養法、分化法の開発：

幹細胞培養法、分化法の開発では、米国企業、欧米（特に英国）研究機関で大きな進歩がある。日本ではES細胞様の全分化能を有する細胞を体細胞から誘導する技術が開発される等、国際的にも高い評価を得ている。薬物スクリーニングへの応用も含め、商業化の可能性も高い。

社会基盤の整備：

医療機器の開発に直結する再生医療用材料・生体適合材料の研究開発に関しては、欧州が最も効率的で進んだシステムを持っていると考えられる。欧州は、一流のレベルのアカデミアの研究機関を抱え、独創的な研究も多く出している。さらには、アカデミアが積極的にベンチャーを作ってリスクの高いシーズを吸収して研究開発を行い、産業化への橋渡しを果たしている。当局の審査も、透明性が高く、効率的で体制が整っている。米国は、審査体制では欧州に次ぎ優れており、ベンチャーが充実していて、活発にアカデミアのシーズを吸い上げている。これに対し、中国、韓国は、急速に外部から技術導入しているものの、基礎研究や独自のシーズという意味では決定的に不足している。これに対して日本は、この分野においてそれなりに独創的な成果を出してきていると言えるが、中間にいてシーズを展開するべきベンチャーが十分育たず、当局の審査体制も不透明かつ非効率的で、産業化に遅れをとっている。このような社会基盤の整備が鍵となっている。

高機能性バイオマテリアル創製のための周辺技術：

高機能性バイオマテリアルを実現するための基本技術としては、三次元造形法の開発、薬剤送達システムとマテリアルの融合、局所投与のための創薬などが重要である。再生用のバイオマテリアルは多くの場合、三次元的形状を制御することを求められるが、切削法・鋳型法・積層法などからバイオマテリアル

を自在に造形できる方法を開発する必要がある。日本はこの分野ではプリンター技術など優れた基盤技術をもっているが、広い視野を持って十分に展開し切れていない。薬剤送達システムと創薬に関しては、現在これらの研究開発は全身投与を大前提として行われているが、今後バイオマテリアルから周囲に薬剤を送達する局所送達システムの開発も重要であると考えられる。この分野においても、日本は優れた基盤技術をもっているが、展開は不十分である。

難治性線維性疾患の内科的再生誘導治療：

これまで治療法がなかった肝硬変、肺線維症、慢性腎炎、動脈硬化症などの難治性の慢性線維性疾患に対して、体のもつ自然治癒力を高めて、再生誘導能によって治療あるいは症状の悪化を抑制する。この治療法は内科的な薬物投与により行うため、内科的再生誘導治療と呼ばれ、期待される。すでに、線維化組織を消化分解させる薬を組織局所で働かせることで、線維症の治療が可能となっている。

血管内再生誘導治療：

これまでの金属コイルによる脳動脈瘤、大動脈瘤の治療では、瘤内の血栓の溶解、あるいは血圧による血栓サイズの縮小により、瘤の再発が問題となっていた。それを解決する試みの1つとして、瘤内に再生医療材料を入れ、その場で血管組織の再生を誘導促進、瘤内を生体組織で閉鎖できることが報告されている。また、再生誘導能をもつステントによる新しい血管内治療も始まっている。

幹細胞の機能改変、増強技術：

移植細胞の体内での生着率が悪く、かつ機能発現効率の低いことから、必ずしも期待通りの治療効果が得られているとはいえない。その解決方法として、遺伝子あるいはタンパク質導入による細胞機能の改変、増強が期待される。非ウイルス性材料を用いた効率のよい物質導入技術、方法論が報告され、細胞移植の治療効果を高めるための材料と技術として期待される。

再生誘導力をもつ細胞足場：

細胞はその周辺環境（足場と呼ばれている）と接触することにより、生存あるいは生物機能を発揮している。この足場には、細胞接着、増殖のための物理的な性質と細胞の増殖と分化を促す生物学的な性質との両方が必要である。足場の3次元構造と分解性などの前者の性質とともに、細胞接着因子、細胞増殖因子を組み込んだあるいはそれらの3次元濃度勾配をもつような天然の細胞周辺環境により近い特性をもつ足場の研究が進んでいる。

(5) 医療用チップ (μ TAS、DNA チップ、蛋白チップ等)

マイクロ流体技術：

マイクロ流体を扱う MEMS 関連技術の研究が、現実に医療に必要とされる技術と乖離してきている。例えば、現場に必要な流体制御は流量調整バルブや吸引吐成型マイクロポンプ、コネクタなどであるが、対応できるものは無い。一方で、単一 DNA を伸張したり酵素切断する MEMS 研究は盛んだが直近の出口とはほど遠い。また、医療応用にしても何にしても、ナノリットルを扱う産業技術としての技術標準が無い。例えば、1 ナノリットルをどう保証するか。ナノ空間における流量や温度プローブなどもこれからの技術である。

ハード研究：

ハード研究のフェーズとしてはコスト競争に入っていると思われる。原理や方式としてはすでに出尽くし、基板材料や加工法、フォーマットやコンピュータとのインターフェースなどに研究は移行しているように見られる。

マイクロアレイ技術とマイクロフルイディクス技術の融合：

DNA を使った診断の研究は盛んであり、コンテンツに見合う技術開発という意味では実用化研究の領域と考えられる。ただし、DNA チップをはじめ、いわゆるマイクロアレイに装填する試料の前処理と試料調製についても高速、ハイスループット、超微量の要件を満たさないと、マイクロアレイの良さは半減する。その意味で、マイクロアレイ技術とマイクロフルイディクス技術 (m-TAS、マイクロ化学チップ、ラボオンチップ等) の技術は近い将来融合して行くであろう。マイクロフルイディクスは前処理や試料調製に適すると考えられるが、その方向の研究は世界的にも進んでいない。日本はマイクロフルイディクスで進んでいる。

生体分子の高感度計測技術：

広範囲の分野を包含するナノテクノロジーの中で、特に半導体微細加工技術によるナノメートルサイズの科学・技術とバイオテクノロジーを融合した研究分野は注目に値する。生体分子に特有の物性とナノ構造の特性をうまく組み合わせ、主に生体分子を高感度に計測する技術あるいは一分子計測技術が開発されている。特徴的なナノ構造として、柱 (ナノピラー)、細孔 (ナノポア)、梁 (カンチレバー)、間隙 (ナノギャップ)、薄膜 (電界効果)、チャンバーなどが利用され、生体分子の特異的反応性、高次構造、電荷、塩基配列などとの相互作用が研究されている。

バイオトランジスタ：

従来、MIEMS/NEMS や microTAS の分野では半導体の機械的性質の活用、あるいは機構デバイスとして流路を利用する研究が多かったが、半導体の電子的性質、電子デバイスとしての融合研究がある。例えばバイオトランジスタでは、細胞内シグナル伝達とシリコンデバイスによる信号処理が接合界面を介して組み合わせられており、細胞や生体分子を利用した新論理デバイス、バイオ素子へと展開できる可能性がある。“ムーアの法則 (Moore's Law)” によるトランジスタ微細化の限界が指摘され、半導体分野ではムーアの法則の外挿から外れる (More than Moore) タイプの新しい機能を有する半導体デバイスの出現が望まれている。バイオトランジスタを基盤とする新たな情報処理デバイスは、認識、連想、予知など従来のシリコンデバイスが苦手とされている分野に応用展開することが可能である。

DNA シーケンスを現状コストの 1/10000 に低減する技術開発：

米国で National Institute of Health (NIH) を中心に \$1000 ゲノムプロジェクトが進められている。哺乳類ゲノムの大きさの DNA シーケンスを現状コストの 1/10000 に低減する技術の研究開発が行われている。これを実現するためには現状の電気泳動を中心とする技術の延長では困難であり、全く新しい原理に基づく DNA シーケンシング方法論の確立が必要である。この目的のため、束ねた光ファイバを用いて一塩基伸長反応によるピロリン酸の発光反応を検出する技術、高密度 DNA プローブのハイブリダイゼーションを利用した蛍光検出 DNA チップ、ナノポアデバイスなど、短い塩基配列の超並列解析技術の研究・開発が活発に行われている。超並列解析に基づく次世代の夢の DNA シーケンサ (例えば、1000 \$ シーケンスを可能にする DNA シーケンサ) のコア技術開発を目指して、現在米国を中心に激しい開発競争が展開されている。

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。2010年には、日本のシリコン薄膜太陽電池の製造設備は、2GW程度になる可能性がある。また、Cu(InGa)Se₂薄膜太陽電池の製造設備も数100MW程度になると思われる。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。

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。

Cu(InGa)Se₂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。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。

(2) バイオ燃料

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の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はバイオエタノール生産のキーテクノロジーである。この分野では世界最大の酵素メーカーである Novozyme 社がリードしているが、酵素の価格低下が期待されている。商業化には 10¢ を切らないと普及は難しいのではないかと考えられる。

(3) 高性能二次電池、キャパシタ

ナノテクを用いた高性能電極開発：

近年要求されている電池性能の一つが高出力化であるが、これを実現するためにはナノ材料が極めて有効に用いられるため、各国でナノテク研究者の参画が起きている。2000 年以降、Nature、Science などに高性能電極の開発の成果が掲載されており、トップ数人の研究者が学術上の潮流を作っている。

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 (Université 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。

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。

(4) 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きている。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。熱電発電の方は身近の所で使うにはさらなる性能の向上が必要とされている。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。

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いのはほとんど 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かもしれない。これら新物質の開発では、日本は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多く中国、ロシアに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みると、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示すと考えられる。

(5) 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。

超伝導材料開発：

材料開発では室温超伝導の開発がきわめて重要であるのは誰しもが認めるところ。Hg 系銅酸化物で 164K (圧力下) の超伝導が見出されてから、10 年以上記録は更新されていない。酸化物線材の研究で、高温で線材を使うメリットや異方性のデメリットが十分に認識されたので、日本で発見された MgB₂ のように、転移温度が 30K を超える超伝導体で異方性が小さいものが見つかれば、十分実用化のメリットになりうる。もちろん MgB₂ 系の線材の開発動向は要注目である。

低温超伝導マグネット：

産業分野では、Si 単結晶引上げ用装置に低温超伝導マグネットが多く用いられており、産業を形成している。医療分野では、脳医科学の臨床現場における高磁場による高精細画像データや体内における暗部の観察手段として期待され、MRI が多くの医療施設に導入されている。また、化学分析用 NMR が数多く市場に出ていることは周知の通りである。MRI と NMR だけで超伝導市場の 60% 程度を占めているのが現状である。また、大型科学研究として粒子

加速器や核融合炉等への超電導応用も顕著で、超電導市場の30%程度がこの分野での利用となっている。今後注目される低温超電導利用は核融合実験炉（ITER）向け超電導マグネットであろう。また、昨今の地球規模における水問題を解決する有力な手段として、超電導マグネットを用いた磁気分離式浄水装置の開発が活発になってきており、これも注目すべき「超電導利用」の動向であろう。

(6) 膜分離技術（水）

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などを挙げるができる。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。

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。

(7) 光触媒

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_x、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_x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_x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。

抗菌建材・空気清浄機：

中国、香港、台湾では抗菌建材、空気清浄機が注目されている。SARSや鳥インフルエンザ対などの対策が主たる目的である。ただ、まがい品も多く出回っているようであり、効果に対する評価も落ち着いていない。セルフクリーニング建材も注目はされているようであるが、日本の技術の表面的な模倣がほとんどで、機能的に不十分なものが多いようである。一方、韓国では空気清浄機、セルフクリーニング建材が一部市場に出ているが、産業として形成されるまでに至っていない。韓国では、研究としては水分解による水素製造などが中心であり、米国の大学との共同研究なども進められているようである。

(8) 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：

ナノテクを利用して材料機能の著しい向上や高効率化を図った研究報告例がいずれの国でも増加している。いずれも現状ではポテンシャルを示す域を出ず、スループットの著しい向上が達成できなければナノ粒子製造時の負荷が凌駕できない。しかしながら、ナノテクを利用したエコ技術は萌芽的であり、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がない。

3.2.4 産業用構造材料（輸送・建造等）分野

(1) 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。この事例以外のナノテクノロジーはまだ研究段階と思われる。

ディーゼル排気浄化：

欧州の排出ガス規制は93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（ストイキオメトリー）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。

(2) 高強度・軽量構造材料

強くて伸びる材料：

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。

軽くて高温に耐える材料：

ジェットエンジンの動翼や自動車エンジンの部品は、高効率を達成するために軽量であり高温に耐える材料が求められる。融点の高い材料は、高温に耐えることができるが、比重が大きく重い。軽量を指向すると低融点となり、高温に耐えないというジレンマがある。このジレンマを克服する材料としてチタン基の金属間化合物が80年代から活発に研究されたが、室温での延性に乏しい（脆い）ために限られた範囲でしか実用化に至っていなかった。研究水準では日本がリードしていた分野であっただけに残念な結果であった。しかし近年、GEがチタン基金属間化合物の実用化に再び意欲を見せていることに留意する必要がある。

(3) 高機能ガラス（熱カットなど）

調光ガラス：

長年、アクティブに特性を変化させる事ができる調光ガラスの研究が進められてきたが、長期耐久性や大面積化に課題があり、小面積や特殊用途を除いて実用化されていない。一方、マグネシウム・ニッケル合金系の調光ミラーは、長年研究されてきた酸化タングステン系と異なり、透明⇄ミラー状態の可逆的遷移である点が新しい。最近、この系で課題であった透過率が改善できる事が産業技術総合研究所から報告されており、今後注目すべき技術である。

導電ガラス（透明導電膜）：

フラットパネルディスプレイ市場の成長とともに、その透明導電膜材料（ITO）に含まれるInは、供給不安定性の問題もあり、代替材料の開発が望まれており、非In系材料の開発が随所で行われている点が注目される。また、

薄膜太陽電池用の透明導電膜のニーズが急速に立ち上がりつつある。

ガラス表面上に規則性を持たせてナノ粒子を配列する技術開発がはじまりつつあり、ガラス表面での量子物性発現が期待される。ただ、その実用化には、粒子径のそろったナノ粒子の合成技術、ナノオーダー及び3次元空間での粒子配列技術など、多くのブレークスルー技術が必要となる。

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

ドライとウェットの技術融合：

ドライな半導体技術とウェットなナノフルイディクスの融合を促進するような新たなデバイス開発が望まれる。特に半導体で研究開発されている量子効果デバイスをウェットなフルイディクスに応用したり、フルイディクスでダイオードなどの電子回路と同様なデバイスを開発するなどの研究開発が、これまでに考えもつかなかったような新たなデバイス開発に結実するものと期待される。

医療応用：

ナノフルイディクスの最初の出口は医療応用が期待される。この分野での研究開発をより促進するために医工連携・産学連携をより進展させるとともに、医療機器の認可制度や診断分野における新たな医療制度の導入などの制度面での工夫も重要となる。

ナノフルイディクスを再生医療やインプラント DDS などに応用するなど、これまでに考えられなかった応用分野のさきがけ研究が進んでおり、これらの研究に基づいて、ナノフルイディクスの新たな応用分野を模索するような研究開発が望まれる。

(2) 界面・表面・ナノ空間

今後の界面技術の強化について：

日本の界面評価技術が世界を一步リードしているが、具体的には、ラザフォード後方散乱法 (RBS) 等の評価技術である。これらの技術の中には、精密な表面分析からナノ界面評価技術へと展開された例が多く見られる。90年代に表面分析プロジェクトが行われた結果が現在の世界一の界面評価技術となって結実したと思われる。これは、表面分析技術の重要性を如実に示している一方で、界面評価技術への展開の重要性も示唆している。Spring-8等の大型施設においても、さらに界面評価技術への展開を進めることは日本の界面科学での優位性をさらに強固にすると信じる。精密な界面評価の下に界面科学の新概念が生まれるからである。

新材料界面の科学：

新材料を用いた界面形成という大きな研究開発の流れが確かに起こってい

る。注目すべきは、Si/SiO₂ 界面に代わる Si/High-k 界面を作製することが、LSI の発展に極めて重要となっていることである。HfO₂ が High-k として始めて製品に用いられようとしているが、SiO₂ 界面層が必要である。この為、次世代の界面として、希土類酸化物などの新材料を探索することにより、Si との直接接合の界面制御を行うことが大きな課題となっている。日本では原子レベルの界面制御等の科学的知見の蓄積も多く、科学・技術的土壌は十分である。このような未来技術を見据えた新材料界面科学の推進は、産業競争力に直結するもので極めて重要である。

有機デバイスの界面科学：

有機デバイスに関連した界面の基礎研究は、日本、欧州、米国で、表面科学的手法と電気的手法を併用しつつ行われている。分野の中での交流は活発で、共同研究も行われている。手法開発を含め、かなりのペースで理解が深まりつつあり、それを反映させたデバイス構造の開発も行われている。現在は素子には必ず含まれる有機 / 金属界面の研究が主流であるが、デバイスの性能向上のためには、有機太陽電池などでの有機 / 有機界面、トランジスタにおける有機 / 絶縁体界面の研究なども重要である。この数年でこのような界面も各国で研究されるようになってきた。日本は研究手法の開発を含め、欧州と共に世界をリードしている。

有機半導体の界面研究：

無機半導体では界面制御（バンドオフセットの制御、オーミック接触の実現）は主にドーピングによってバンドの曲がりを起こすことで行われているが、有機界面では固体表面への極性分子や、電子供与性・受容性分子の吸着を用いる手法も試みられている。これらの物質の開発がかなりの重要性を持っており、有機合成化学者との連携が必要である。この種の研究が日米欧韓、それに香港で進展しつつある。

高効率の電荷注入：

効率よく電荷を注入できる界面を実現し、長寿命で動作させるには、酸素や水の影響を排除することが重要で、乾燥剤や封止の技術が実用化においては重要である。高分子基板を用いた曲げられるデバイスの実現には、これらの基板の気体透過性を下げる工夫が必要である。実用化の進んでいる日韓ではこの種の技術が進んでいると推察される。ただしこの点は、空気中でも安定に注入を行える電極が開発されれば、大きな問題ではなくなると思われる。

単分子エレクトロニクス：

電子情報技術に全く新しいパラダイムを開くものとして、個々の分子を電子デバイスや各種機能デバイスとして利用することに大きな期待がかけられている。分子を用いるデバイスとしては有機分子薄膜を用いた有機 FET や有機 LED など、すでに実用的なレベルに達したものもあるが、これらは単一分子によるものではない。単分子エレクトロニクスは個々の分子と電極とを架橋した電極 -- 単一分子 -- 電極系を用い、分子内の電子の流れを制御することで、その新機能を引き出そうとするものである。シリコンなど無機半導体結晶において実現している以上の微細化、原子レベルからの構造制御も特長であるが、化学的・電子的・光学的質を組み合わせた新規な量子効果による機能を開発することに大きな魅力が集まっている。現状では、理論研究による基礎原理と機能探索が盛んに行われているが、実験的にはごく簡単な有機分子の非線形電流電圧特性、非弾性トンネルスペクトル、近藤効果などが観察されている。しかし、架橋構造と同時に伝導特性を観察された例は殆どなく、これを実現することは実験研究の課題であり、世界的に研究が集中している。この分野におけるわが国の取組みは活発であり、分子を金属電極や半導体電極に接続（化学結合）させるときの構造・安定性、局所物性の計測、そのような系の電子輸送などについての実験理論両面での研究が始められている。しかし、実用的なデバイスへと展開するにはさらに多くの基礎研究の積み重ねが必要である。

電極界面素過程：

燃料電池や NAS 電池、光触媒など電気化学系の固液界面現象は、実用技術として極めて重要な役割を果たしているが、そのメカニズムの理解は現象論にとどまり、原子論的なレベルでは十分に解明されているとはいえない。界面現象は、電子トンネル遷移、化学反応過程、拡散過程にいたるまで階層横断的な複雑な素過程から構成され、真の実態が把握し難いからである。しかし、原子尺度から電極構造をデザインして、望みの反応を効率よく起こすことができるならば、電極における化学過程、光科学過程、触媒過程を合目的に制御し、すぐれたエネルギー変換系を実現することができる。この研究を推進するには、従来型の電気化学と精密科学としての表面科学との協力、理論と実験研究との協力などがきわめて重要である。分子動力学計算におけるような理論シミュレーションも極めて有効であると期待されるが、多数の液体分子の運動とトンネル遷移過程を含む化学反応動力学、生成する溶液イオンのミクロからマクロに渉る揺動・拡散過程などを統一的にシミュレーションすることは、従来の計算処理能力では難しかったが、最近の計算機の発展に伴い可能となりつつある。一方では、界面現象そのものを捉えようとする非線形分光法、電気化学セルをとおりて電極周辺を観察するための電子顕微鏡技術などが開発されつつあり、

反応中の構造と素過程とを実証的に原子的なスケールから研究する実験手法も進歩しつつある。このような研究動向は世界的に進みつつあるが、日本においては世界をリードする研究が開始されている。

グラフェン：

グラフェンとは、単層グラファイトの断片で、その大きさはナノからマイクロスケールにわたる。単層または複数層グラファイトの作るナノ構造として、カーボンナノチューブが良く知られているが、グラフェンの構造はグラファイト層が筒状に丸まることなく平板状になっている。グラフェンにおける電子の平均自由行程は、カーボンナノチューブと同様に非常に長く、電子の運動がコヒーレンスを保つために、試料内のループ電流と磁気効果などいろいろな量子現象が顕在化すると期待され、これを用いた量子デバイスなどに大きな期待が高まっている。さらに単層グラファイトのバンド構造は、荷電子帯と伝導帯が対をなす典型的ディラック型であるために、種々の新しい量子現象も期待され、基礎研究の大きな焦点になっている。量子ドットのように用いることで、コヒーレンス伝導と電子相関が制御可能で、これにより興味深い機能を引き出せると思われる。現在は理論実験ともに基礎研究が先行しているが、任意形状に加工したり電極を自由にとりつけたりすることも比較的簡単であるため、今後の新規デバイス技術への展開が最も注目される材料である。

(3) 自己組織化・自己集合（理論・機構・ゆらぎ）

レイ・カーツワイルの予測：

「今後は遺伝学（バイオテクノロジー）、ナノテクノロジー、ロボット工学の3つの領域が急成長する」というレイ・カーツワイルの予測。ムーアの法則に裏付けられる情報テクノロジーの加速機構を享受する技術が今後急速な成長を遂げる。2020年代には、電子機器と機械技術の多くがナノテクノロジーになる。ナノテクノロジーによって、あらゆる物質－われわれの身体や脳も含めて－は情報テクノロジーが扱う領域になる。真のナノテクノロジーは「今まさに始まりつつある」分野なのである。また、遺伝学、ナノテクノロジー、ロボット工学が融合したさらに新たなテクノロジー：“ナノボット”は、ヒトの身体機能のみならず頭脳機能も変えうるといふ。かかるナノテクノロジーには精緻な自己組織化・自己集合の技術が不可欠であることは論を待たない。（参考：レイ・カーツワイル＋徳田英幸、『NHK 未来への提言 レイ・カーツワイル 加速するテクノロジー』、日本放送協会（2007））

昆虫に学ぶ自己組織化：

「昆虫に学ぶ自己組織化」を下村正嗣教授（東北大）が提唱している。視覚

と飛行、ノイズとセンシングなど興味深い話題がある。①ハエの視覚に学ぶ自走性バイオロボティクスの研究（ニコラス・フランチェスチーニ（Nicolas Franceschini、仏）：複眼中の個眼 1 個の直径は $25 \mu\text{m}$ で、そこに入った光は 7 個の光受容細胞に伝達される。7 個のうち中央の 1 個が色を、周囲の 6 個が光の方向を認識する。高々 100 万個のニューロンが階層的なニューラルネットを構成し、オプティカルフローにも的確に対応して自走的な飛行を可能にしている。②熱ゆらぎに応答するほど敏感なコオロギの尾のセンサが熱ゆらぎにさらされながらも外的シグナルを的確にキャッチする仕組み（確率共鳴による S/N 比の向上）③蝶や甲虫の構造色と高分子材料、など。米国で軍主導の下に開発が進んでいる MAV（micro air vehicles）の大きさはスズメガ程度（約 8 cm）。

欧州の自己組織化研究：

イリヤ・プリゴジン（ベルギー、1977 年ノーベル化学賞）～ゲルハルト・エルトル（独、2007 年ノーベル化学賞）と続くことからわかるように、欧州の自己組織化研究はさすがに懐が深く正統的である。プリゴジンは線形領域における熱力学を体系化し、散逸構造（いわゆる自己組織化）という概念を確立し、非平衡熱力学の礎を築いた。エルトルは白金固体表面の状態観測に基づいた反応ダイナミクスの研究によって、産業的に用いられるごくありふれた系の中にも自己組織化の重要な問題があることを認識させた。ベルギーチームでは若手の Anne de Wit が活躍しており、次期 Gordon 会議の座長を務める。また、エルトル教授のグループのアレキサンダー・ミハイロフ教授らが構成した自走性ナノ周期構造の方程式は、マクロスケールの自己組織化を記述する辻川亨・宮崎大教授の方程式と同形であることが知られている。数理科学的記述がナノとマクロをつなぐ鍵となるであろうことが伺える。

確率的概念：

生物らしさを説明する言葉として、確率的と言う概念が重要な役割を演じている。さまざまな生物現象から、それを具体化している現象を記述し、その原理を理論的、実験的に模索している。その原理を産業と結びついて応用しようというのは、新しい動向である。

(4) 量子演算・新量子概念

単一光子源：

現在単一光子源として最も注目されているのが、半導体量子ドットで、代表的な材料としては、InAs（インジウム砒素）と InGaAs（インジウム・ガリウム砒素）である。単一光子源として使われているのは、大きさが数 nm か

ら 20nm 程度のピラミッドあるいはディスク形状の自己成長量子ドットである。例えば GaAs 基板上に MBE 法（分子線エピタキシー法）によって、適当な条件下で GaAs に埋め込まれた多数の InAs あるいは InGaAs 量子ドットを成長させることができる。特定のエネルギーレベルからの自然発光は 1 光子発光なので、励起レーザーによるパルス励起に応じて、単一光子がドットから発生する。ただし、発光の効率は低く、また完全に on-demand でもない。そこで自然放出光子を効率良く取り出すためにポスト型マイクロ共振器を形成する。

単一光子源としては、これら以外に単一原子や分子、更にはダイヤモンド中の窒素欠陥などいろいろ試みられているが、半導体量子ドットが注目されるのは、常に半導体素子に期待される高い集積性という特徴の故である。しかし、半導体量子ドットにもまだ解決しなければならない問題がある。例えば、まだ低い量子効率や 5K 程度の非常に低い動作温度である。しかし、製造技術の進展はこれらの問題を徐々に解決するであろう。動作温度に関しては、アメリカの NIST で、135K までの動作の可能性が示されている。実用化という観点からは、素子の再現性がより重要である。100 個作って 1 個の動作というレベルから今後、如何に脱却するかが、量子ドットが本当に使われるかどうかを左右するであろう。

量子もつれ光子源：

量子もつれ状態が注目されるわけは、ひとつにはこの状態が他者による攻撃に強いからである。従って、もつれ状態を量子暗号に用いる研究も始まっている。また、2 つのもつれた光子をそれぞれ送信者と受信者に送れるため、量子暗号の到達距離が伸びるというメリットもある。しかし、これらのメリット以上に重要なのは、量子テレポーテーションや量子中継といった量子暗号の先にある量子情報通信方式に欠くことのできないものだからである。このような量子もつれ光子対（エンタングル光子対）の発生で注目されるのは、やはり半導体量子ドットである。最近（2006 年）、イスラエルとカリフォルニア大の共同研究グループと、東芝ケンブリッジのグループが、InAs 量子ドットを用いて、量子もつれ光子対の発生に成功した。バイエキシトンのカスケード放出といって、量子ドット中に 2 つの励起子（バイエキシトン）を生成し、これが順に光子を放出する過程を用いている。まだまだ研究段階であるが、将来性のある技術として注目したい。わが国でもこの量子もつれ光子対の研究は盛んになりつつあり、例えば東北大では CuCl_2 （塩化銅）結晶を用いた発生に成功しているが、まだ半導体量子ドットからの発生には至っていない。今後、日本でも半導体量子ドットを用いた研究が盛んになると考えられる。

超伝導単一光子検出器：

最近、にわかに脚光を浴びつつあるのが、超伝導単一光子検出器 (Superconducting Single-Photon Detector, SSPD) である。米国ロチェスター大で開発された SSPD では、材料は NbN (窒化ニオビウム) という超伝導金属で、超伝導転移温度は 15K 程度である。この NbN の薄膜からなる細線をパターンニングしてある。この細線のどこかに光子があたり NbN 膜に吸収されると、電子 (正確には準粒子) のなだれ現象を引き起こし、ホットスポット (hot spot) と呼ばれる、常伝導転移した部分が形成される。こうして抵抗ゼロから電圧が発生した状態になり、これが単一光子の信号として検出される。動作原理のポイントは通信波長帯の光子のエネルギーが超伝導エネルギーギャップより二百数十倍も大きなことで、これによって多数の準粒子が形成されることである。もう一つは、準粒子がクーパー対に再結合することによってホットスポットが消える速度が速いことである。これから、最も大事な応答速度は 1GHz 以上になる。応答周波数帯域も $0.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ と広く、量子効率も 5 ~ 10% である。量子効率が低い理由は、NbN が金属光沢表面を持っているために、光子が表面で反射されてしまうからである。反射防止膜を施せば量子効率は飛躍的に上がると考えられており、現在この方向での研究が、NIST やわが国、そしてヨーロッパ諸国で行われている。この SSPD の動作温度は、もちろん NbN の転移温度以下でなければならないが、それ程低温にする必要はなくて、例えば 10K あたりである。将来量子効率が上がれば、量子情報通信のキーデバイスとして活躍することが期待される。

(5) マルチフェロイックス

マルチフェロイックスの開発例：

マルチフェロイックスの他の開発例として、Bi または Pb を含有するペロブスカイトがその Ti 酸化物などと同様に、磁性体においても強誘電性を発現する例が見られ (たとえば BiFeO₃)、一連の物質群の薄膜形成や高圧下での物質開発などに進展が著しい。ただ、マルチフェロイックス機能 (電気磁気効果) の開拓はまだ十分に解明されていない。一方、磁性体の超格子 (たとえば、3 種の層からなる 3 色超格子など) を利用して、その界面でのマルチフェロイックス特性を人工的に設計する試みも精力的に行われており、電気磁気光学効果の検出 (下記) が成功している。

磁性強誘電体：

木村-有馬-十倉グループによるペロブスカイトマンガン酸化物での磁気強誘電性と巨大電気磁気効果の発見 (2003 年)、および永長グループによる螺旋磁性による強誘電性発現機構の理論 (2005 年) によって、非共線

(noncolinear) スピン構造による磁性体での強誘電性発現機構のひとつが確立した。この指針に沿った物質開発あるいは既存物質の見直し・再検討が加えられ、多くの磁性強誘電体（マルチフェロイクス）が見出されつつある。これらの物質群では、多くの場合、磁場による強誘電性の制御（大きさと方向）が可能となっており、また電場によって螺旋構造の巻き方（ヘリシティ）、すなわち磁気構造の制御が可能となっている。

マルチフェロイクスにおける電気磁気効果：

マルチフェロイクスにおける電気磁気効果のなかで、特に、光学領域での現象・効果の探索も急ピッチで進んでいる。たとえば、スピンと分極が作るトロイダルモーメントと呼ばれる物理量が、非線形光学効果や特異な磁気光学効果（偏光によらず、しかし光の進行方向によって2色性を示す効果）を誘起することが明らかになっている。また、この効果は界面の磁気構造のプローブとしても応用されている。一方、テラヘルツ領域の遠赤外光においても、磁気励起（マグノン）による強い光吸収（電気双極子）がマルチフェロイクスで観測されるようになり、このエレクトロマグノンは、共鳴光励起による高速磁性制御の観点からも大きな関心を集めつつある。

3.3.2 材料設計・探索分野

(1) 計算科学・シミュレーション

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、既の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、NO_x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。

マルチスケール電子伝導シミュレーション：

量子化学を活用して電気伝導度を求め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、量子化学によって得られた電気伝導度を μm 、 cm 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子伝導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た。このマルチスケール電子伝導シミュレーションは、デバイス設計技術を格段に高精度化するものとして注目される。

マルチフィジックス量子化学シミュレーション：

従来の量子化学の応用は、構造最適化、電子状態の解明などによる静的な物性・機能予測に限られてきた。これに対し近年では、触媒反応ダイナミクスや半導体プロセスの解明など量子化学をプロセス設計にも応用できる可能性が広がってきた。さらに最近では、化学反応に対して衝撃、摩擦、応力、流体、伝熱、光、電場、磁場などが与える影響の解明が可能なマルチフィジックス量子化学シミュレーション技術が注目されている。本シミュレーションの活用によって、求める化学反応を自由に起こすための理論設計が行われるようになってきた。

(2) DBの構築

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、最近では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。

マルチスケールデータベース：

従来のデータベースは、結晶構造などのミクロスケールのデータベース、物性を表すメソスケールのデータベース、機能を表すマクロスケールのデータベースなど異なるスケールで個別に構築されてきた。しかし、結晶構造などのミクロスケールの情報はメソスケールの物性やマクロスケールの機能と直接相関があるため、マルチスケールでのデータベース構築が期待されている。マルチスケールでの相関関係の解明には計算科学の活用が有効であり、実験研究と計算科学の融合によるマルチスケールでのデータベースの構築が強く求められている。

(3) 新材料設計・機能設計

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。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からである。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するなど応用に向けた本格研究が始まっている。具体的には、この分野の最大の会議であるアモルファス・ナノ半導体国際会議 (ICANS) は、2005 年 (ICANS-21) で酸化物を初めてセッションとして設けた。そして、今年 8 月の ICANS-22 (コロラド) では、全発表論文の～15%を占めるまでに急成長した。また、ディスプレイ分野の最大の会議である SID 大会 (米国) にも、今年から透明 TFT というセッションが初めて設けられた。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。LG は今年 5 月の SID 大会で、サムソン SDI は、8 月の IMID で、相次いで試作した TAOS-TFT 駆動の OLED ディスプレイ (3.5-4.1 インチ) を発表した。また、凸版印刷は、TAOS の特徴を巧く利用した新しい構造のカラー電子ペーパーを発表した。

(4) 材料探索手法 (ハイスループット、コンビナトリアル)

医薬・有機合成のコンビナトリアルケミストリー (コンビケム) :

コンビケムは溶液系の有機合成を集積 (パラレル) 化し、新薬の開発を高速・高効率化するシステム合成手法として、1990 年代に急速に発展した。システム開発の主体は欧米のベンチャー企業で、日本の製薬会社や化学企業は海外の装置を導入しフォローした。しかし、産学共同や関係学協会の動きも欧米に比べると弱く立ち遅れた状態にある。当初の期待程の成果はないという説もあるが、評価のハイスループット化、構造・物性データのインフォーマティクスと組み合わせた技術進化は、システム合成化学という新分野を開きつつあり、化学をベースとする未来戦略技術として極めて重要である。

コンビナトリアル・ナノテクノロジー :

集積化によるシステム合成の固体材料への展開は、1990 年代の後半に日米でほぼ同時に始まった。半導体集積回路におけるマスクや計算機制御技術を時空間分離に応用し、一枚の基板上に組成や反応条件を変えた試料 (ライブラリー) を一括気相合成する方法からインクジェットなどの湿式合成、熔融ガラスプロセス等のコンビ化に波及している。特に、薄膜の原子レベル構造制御と並列集積をターゲットにしたコンビナトリアル (レーザ) MBE は、日本で開発され多数のナノ材料・機能素子の一括合成を可能にした最先端物質・材料・デバイス探索システムとして注目され、海外にも輸出されている。

ハイスループット評価技術：

コンビケムや固体コンビロボットを用いた合成プロセスが高速化しても、生成物の構造、物性評価が従来のままでは、ものづくり全体の高速化は望めない。パラレル合成による集積化試料（ライブラリー）の高速評価には、原理的に測定プローブの高速走査とマルチチャンネル測定との2種がある。SPMの高速化、走査SQUID（磁性）や走査マイクロ波顕微鏡（誘電性）等の出現は前者の例であり、マルチプローブ法や2次元センサアレイなど後者の評価技術の開発も進んでいる。

コンビナトリアルベンチャービジネス：

各種機器分析装置を整備した計測・分析の委託ビジネスは日本でもすでに30年以上の歴史があり、化学、電気、材料等の業界から派生した企業として自立している。しかし、物質・材料の委託開発ビジネスは、MEMSやマイクロエレクトロニクス系のファンドリーが散見される程度で未開拓の領域である。アメリカでは1990年代末にコンビ技術による材料、触媒開発のベンチャーとしてSymyx社がスタートし、走査マイクロ波顕微鏡と新蛍光体を主商品とするIntematix社がこれに続いた。日本では有機合成のコンビケムが東工大発ベンチャーとして活動し、固体材料についてはCometプロジェクトをベースとするNIMS発ベンチャーの設置の動きがある。中国でもSymyx社をドロップアウトした技術者によるベンチャーが始動している。企業におけるものづくり基礎研究をサポートするメカニズムとして、今後の展開が注目される。

3.3.3 ナノ計測・評価・標準分野

(1) 走査型プローブ顕微鏡

バイオ高分子反応観察：

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。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でてきた。今後、高速化と高分解能化の平行・複合的推進とフォーススペクトロスコピーや散逸や接触電位差などの実時間高分解能測定の実現により、バイオ分野に画期的進歩が期待できる。

原子・分子レベルのスピン画像化：

スピン偏極 STM や交換相互作用力 AFM により、スピンを原子分解能観察可能となってきた。また、非弾性トンネル STM により磁気スピンの変化を原子分解能観察可能となっている。このような、原子分解能のスピン計測は、未来の原子レベルのスピンデバイスや材料の構築に必須の新しい知見を与えてくれる可能性を有す。

走査型非線形誘電率顕微鏡 (SNDM)：

東北大の長教授が発明した SNDM は、原子分解能で誘電率を観察・制御できる可能性を有する。誘電体や半導体デバイスやメモリの評価や、高密度記録に新しい道を切り拓く可能性を有している。

レーザ干渉計搭載型 AFM：

各国の国家計量標準機関 (NMI) がレーザ干渉計搭載型 AFM を独自に開発し、標準試料を校正してきた。最近、独の企業が高精度・高走査範囲の精密ステージを有する三軸レーザ干渉計搭載型 SPM (NMM-1) を開発した。SPM のみでなく、光学式・触針式粗さ計・マイクロ三次元座標測定機としても利用可能なナノ計測装置である。従来の計測装置と融合する計測用 AFM 装置の動向が今後注目される。

(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）。・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。

TEM 電子線トモグラフィー：

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。米国の 5 箇所の大学・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 SuperSTEM 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。

(3) 放射光・X線計測

欧米における放射光の産業利用：

タンパク質の構造解析に集中し、製薬以外の業界の利用は少ない。大学、施設との共同研究が多く、企業研究者が自ら施設で実験をすることは少ない。また、非公開の有料利用のみを産業利用と狭義に位置づけている。タンパク質の構造解析分野は、当面相当の割合を占めるが、製薬業界の利用は将来的には減退傾向である。測定装置、X線検出器、解析ソフトなど、放射光独自であっても施設と連携して積極的に開発が進められている。

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限定され、かつ少ない。

標準化：

放射光を利用したX線計測技術は多くの研究者が通常の計測手法として利用するようになってきている。これに伴い、これまで、研究者や放射光施設、装置ごとに独自に行ってきた実験、計測について、互いに比較ができるように、標準化の必要が増している。また、発展途上の分野だけに標準化は容易ではないが、各分野の国際会議など通じて活発な情報の交流がなされている。

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。

フェムト秒レベルの時間分解測定：

自由電子レーザー（FEL）やエネルギー回収型直線加速器（ERL）など次世代の光源の建設は各国ともにあまり進んでいないが、これら次世代光源は非常に強力なX線を非常に短時間のパルスとして照射できるために、ナノ領域でのフェムト秒オーダーの反応課程の解明に役立つと期待されている。新しい物理現象の発見・解明に、さらに放射光を利用した計測、加工など関連技術の進展に繋がると期待される。

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実現及びその利用のために必須である2つのメカニズムの解明が進められている。(a) 金属ナノ構造体間の狭いギャップに形成される巨大電場を利用した単一分子検出について、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、直接解明されるものと期待される。(b) 化学的増強に関して、重要な役割を果たしていると考えられてきたハロゲン化物イオン等、特異的なアニオンの役割が日本のグループにより最近解明された。近い将来に増強メカニズムの完全な解明が期待できる。

SPM を利用した単一分子感度ラマン分光：

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が、単一分子感度を与えうることが最近の近接場ラマン分光の進展により、報告されている。この方法では、近接場プローブサイズで決まるナノメータスケールの空間分解能が実現されうるとともに、単結晶金属基板も利用可能であり、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期待される。

(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1nm に至っているとされる。技術開発は欧州で行われている。

(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）。

(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。我が国では昨年 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 探針形状評価技術：

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 や産総研は 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。探針形状評価技術は、AFM が半導体製造ラインなどの製造現場で用いられるとき、特に半導体デバイスの回路幅やゲート長のばらつき評価に欠かせない技術であり、今後の進展が注目される。

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ため注目される技術である。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。わが国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、我が国は、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、共用施設施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取れずにいる状況にある。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に増えてくると、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 工業標準化戦略

ナノテクノロジーの国際標準化：

これまで、国際標準化活動は関係者の手弁当で進められてきたところがある。しかしナノテクノロジーの国際標準化では、炭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レンについては経済産業省基準認証の開発事業として今後3年間の活動資金が認められた。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。このような資金的な補助は、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、国の政策の一環として進めているというギャランティを与えることになり、民間企業からの参画を大変容易にしている。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。今後、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ーリゼーションまで日本が強みを持っている。これが現在 ISO のなかで日本が主導的役割を果している背景である。しかし昨年末にドイツが主導して米国と共同で IEC のなかにナノテクノロジーの標準化のため 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

ているが、包括的で戦略的対応が図られているわけではない。ナノエレクトロニクスが産業として展開する頃をにらんで、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ている。また公的研究機関も、例えば産総研のスピントロニクス、物質・材料研究所であればCNTのバリスティック伝導の平均自由行程の評価法といった、ナノデバイスの原理や周波数特性に直接関り、しかも日本が主導できるようなテーマを戦略的に抽出し、IECに持ち込むことが必要視されている。

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 TOSCA、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粒子を管理できるのか、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

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者の枠組みで取り上げられる傾向が目立ち始めている。悪いことではないのだが、依然として殆どの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、こういった課題が現実の技術開発の実態とかけ離れて議論されることがどういった影響を及ぼすのか、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。こういったことは NANO-HYPE The truth behind the nanotechnology buzz, By M. Roco and D. Berube, Prometheus Book 2006 がいい参照となる。

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。

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。

略語集

A

- **AFM** : Atomic Force Microscope
99, 100, 105, 169, 172, 173, 181

C

- **CdTe** : Cadmium Telluride 57, 62, 181
- **CIGS** : Copper Indium Gallium DiSelenide 57, 62, 148, 181
- **CMOS** : Complementary Metal Oxide Semiconductor 30, 31, 37, 38, 129, 132, 140, 181
- **CMP** : Chemical Mechanical Polishing 20
- **CNT** : Carbon Nano Tube 7, 8, 177, 181

D

- **DDS** : Drug Delivery System 27, 47, 48, 50, 51, 54, 128, 142, 143, 157, 181
- **DFM** : Design for Manufacturibility 20, 25, 130, 181
- **DRAM** : Dynamic Random Access Memory 24, 32, 39, 181

E

- **EHS** : Environmental, Health, and Safety 3, 118, 119, 120, 178, 179, 181, 186

- **EL** : Electro Luminescence 3, 21, 25, 32, 33, 40, 41, 57, 64, 119, 120, 131, 134, 135, 139, 167, 171, 178, 179, 181, 186
- **ELSI** : Ethical, Legal and Social Issues 3, 119, 120, 178, 179, 181, 186
- **ESP** : ElectroSpinning Process 79, 81, 82
- **EUV** : Extreme Ultra-Violet 111, 130, 173, 181

F

- **FET** : Field Effect Transistor 12, 132, 133, 159, 181
- **FPD** : Flat Panel Display 139, 167, 181
- **FPGA** : Field Programmable Gate Array 140, 181
- **FTTH** : Fiber To The Home 33, 42, 181

I

- **IC** : Integrated Circuit 78, 134
- **IEC** : International Electrotechnical Commission 46, 117, 118, 176, 177, 181
- **ITO** : Indium Tin Oxide 155, 181

L

- **LCA** : Life Cycle Assessment 60, 71, 181

- LED : Light Emitting Diode 32, 33, 34, 35, 42, 46, 135, 139, 140, 159, 166, 167, 181, 182
- LSI : Large Scale Integration 3, 12, 20, 21, 22, 24, 26, 29, 35, 86, 119, 120, 131, 133, 139, 158, 178, 179, 181, 186

M

- MEMS : Micro Electro Mechanical Systems 15, 20, 22, 23, 24, 28, 29, 55, 85, 127, 131, 136, 146, 168, 182
- MFA : Material Flow Accounting 60, 182
- MRAM : Magnetoresistive Random Access Memory 31, 32, 38, 39, 134, 182
- MRI : Magnetic Resonance Imaging 8, 12, 59, 68, 143, 151, 182
- μ TAS : Micro Total Analysis System 47, 48, 49, 50, 55, 146

N

- NEMS : Nano Electro Mechanical Systems 20, 22, 29, 55, 131, 147, 182
- NMR : Nuclear Magnetic Resonance 59, 68, 151, 182
- NNI : National Nanotechnology Initiative 112, 114, 115, 116, 120, 176, 182
- NNIN : National Nanotechnology Infrastructure Network 112, 114, 116, 176, 182
- NSOM : Near-field Scanning Optical Microscopy 99, 100, 105, 182

O

- OLED : Organic Light Emitting Diode 139, 167, 182

P

- PE : 8, 12, 47, 51, 79, 179

R

- RF : Radio Frequency 29, 107, 140, 182
- RRAM : Resistive Random Access Memory 19, 39, 129, 182

S

- SEM : Scanning Electron Microscope 24, 29, 89, 99, 101, 106, 109, 111, 170, 172, 173
- SPM : Scanning Probe Microscopy 99, 100, 105, 169, 172, 182
- SQUID : Superconducting Quantum Interference Device 35, 141, 168, 182
- STM : Scanning Tunnel Microscopy 29, 99, 100, 105, 118, 169, 172, 182

T

- TEM : Transmission Electron Microscope 99, 102, 109, 110, 169, 170
- TFT : Thin Film Transistor 138, 139, 166, 167, 182

◆執筆者・協力者一覧 (五十音順 / 分野毎)

《ナノテク・材料》

■ナノ構造材料・新機能材料分野

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) 未踏科学技術協会 理事長
高井 治	名古屋大学 エコトピア科学研究所 教授
西 敏夫	東京工業大学大学院理工学研究科 教授
原田 明	大阪大学大学院理学研究科 教授
宝野 和博	(独) 物質・材料研究機構 フェロー
本間 格	(独) 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
高木 英典	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授

■ナノ加工技術分野

居城 邦治	北海道大学 電子科学研究所 教授
岡崎 信次	(株) 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) 産業技術総合研究所次世代半導体研究センター 副研究センター長
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
田中 秀治	東北大学大学院工学研究科 准教授
平井 義彦	大阪府立大学大学院工学研究科 教授
堀池 靖浩	(独) 物質・材料研究機構 フェロー
宮内 昭浩	(株) 日立製作所 材料研究所 ユニットリーダー
横山 浩	(独) 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長

《ナノテク・材料の応用》

■ナノエレクトロニクス分野

青柳 克信	立命館大学 COE 推進機構 特別招聘教授
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) 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
石原 宏	東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授
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 准教授
金山 敏彦	(独) 産業技術総合研究所次世代半導体研究センター 副研究センター長
鎌田 俊英	(独) 産業技術総合研究所 光技術研究部門 グループ長
高木 信一	東京大学大学院工学系研究科 教授
田口 常正	山口大学大学院理工学研究科 教授
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 ディスプレイ技術開発本部 技監
横山 直樹	(株) 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

片岡 一則	東京大学大学院工学系研究科 教授
北森 武彦	東京大学大学院工学系研究科 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
馬場 嘉信	名古屋大学大学院工学研究科 教授
福崎英一郎	大阪大学大学院工学研究科 教授
松永 是	東京農工大学大学院共生科学技術研究院 教授
宮原 裕二	(独) 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
宮脇 敦史	(独) 理化学研究所 脳化学総合研究センター グループディレクター
大和 雅之	東京女子医科大学大学院医学研究科 准教授

■エネルギー・環境分野

石森 義雄	(独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
大林元太郎	東レ株式会社滋賀事業場 研究本部 理事
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) 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
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
堂免 一成	東京大学大学院工学系研究科 教授
長坂 徹也	東北大学大学院環境科学研究科 教授
永野 智己	(独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシエイトフェロー
橋本 和仁	東京大学大学院工学系研究科 教授
堀上 徹	(財) 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) 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

横山 伸也 東京大学大学院農学生命科学研究科 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 研究センター長

■産業用構造材料(輸送・建造等) 分野

真田 恭宏 旭硝子株式会社 調査役
 木村 茂行 (社) 未踏科学技術協会 理事長
 田中 裕久 ダイハツ工業株式会社 エクゼクティブ・テクニカル・エキスパート
 津崎 兼彰 (独) 物質・材料研究機構 新構造材料センター センター長

■生活関連材料分野

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 参与
 大林元太郎 東レ株式会社 滋賀事業場 研究本部 理事
 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) 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

石森 義雄 (独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
 白石 賢二 筑波大学大学院数理物質科学研究科 准教授
 関 一彦 名古屋大学大学院理学研究科 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
 山口 智彦 (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 プログラムマネージャー
 柳田 敏雄 大阪大学大学院生命機能研究科 教授

■材料設計・探索分野

池庄司民夫 (独) 産業技術総合研究所 計算科学研究部門 部門長
 中山 智弘 (独) 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 フロンティア創造共同研究センター 教授
 宮本 明 東北大学大学院工学研究科 教授
 鯉沼 秀臣 (独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー

■ナノ計測・評価・標準分野

- 大林元太郎 東レ株式会社滋賀事業場 研究本部 理事
 川越 毅 大阪教育大学教育学部 准教授
 古賀 健司 (独) 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
 小島 勇夫 (独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 科長
 小林 慶規 (独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 室長
 古宮 聰 (財) 高輝度光科学研究センター 主席研究員
 小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長
 末永 和知 (独) 産業技術総合研究所 ナノカーボン研究センター チームリーダー
 永井 康介 東北大学 金属材料研究所 准教授
 藤本 俊幸 (独) 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 室長
 二又 政之 (独) 産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクニクス 研究センター 主任研究員
 堀内 伸 (独) 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) 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) 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)

- 小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長
 竹村 誠洋 (独) 物質・材料研究機構 国際室 次長
 秋永 広幸 (独) 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 グループ長

■教育・人材育成 (ナノテクリテラシー含む)

- 小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長
 竹村 誠洋 (独) 物質・材料研究機構 国際室 次長
 秋永 広幸 (独) 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 グループ長

■工業標準化戦略

阿多 誠文 (独) 産業技術総合研究所 総括主幹
小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長

■社会受容・EHS・ELSI

阿多 誠文 (独) 産業技術総合研究所 総括主幹
小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長

■国際プログラム

小柳 正男 (独) 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 副センター長
竹村 誠洋 (独) 物質・材料研究機構 国際室 次長
横山 浩 (独) 産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長

全体総括

田中 一宜 (独) 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
2008年版**

CRDS-FY2007-IC-03

平成 20 年 2 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・材料グループ

〒 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 2007 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。