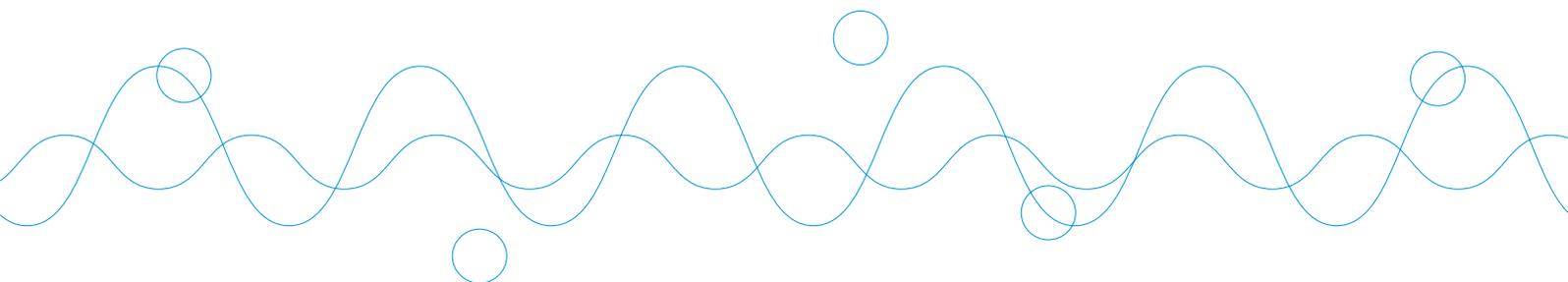


CRDS-FY-2011-IC-04

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTAAC TCTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC  
TGA C CTAAC TCTCAGACC

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**  
**2011年版**

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



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

## エグゼクティブサマリー

ナノテクノロジー・材料分野（以下、ナノテク・材料）への公的投資が始まってから日米双方とも11年目を迎える。2001年に米国のNNI(国家ナノテクノロジー計画)がスタートして以後、日、英、韓を始め世界の主要数10カ国が相次いで独自のナノテク国家計画を発表した。民間を含む世界の年間総投資額は、2008年に約1.2兆円(US\$14B)に達し、2015年度には6兆円(US\$70B)と予測されている。特にこの数年は、米国、EU諸国を中心として政府投資の継続的強化、新興国(ロシア、中国、中近東)の新たな参入などが相乗して投資急増の傾向となっている。また、それに応える形で、ナノテク・材料分野における論文・特許の件数は着実に増加し、研究開発成果の商業化の例も出始めている。

ナノテク・材料分野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期待が大きい。特にここへ来て、環境・エネルギーや健康・医療、エレクトロニクス等の各応用分野から、ナノテク・材料技術によるブレークスルーへの期待がいつそうの高まりを見せている。日本においても、2011年度にスタートする科学技術基本政策においてグリーンイノベーション、ライフイノベーションの実現という2本柱を掲げており、東日本大震災からの復興計画も含めて、これらの社会的課題を解決するためのナノテク・材料分野のポテンシャルは非常に大きいと考える。

各国の科学技術力を全体的に俯瞰すると、日本は国際的に優位を保つ材料科学・物理学・化学の学術ポテンシャルと、圧倒的な強さを持つ部素材産業とを車の両輪にして、欧米と肩を並べて世界をリードしてきたが、韓国、中国の追い上げが急であり、東日本大震災の影響もあり、予断を許さない状況になりつつある。また、欧米に比較して、企業化を含む長期的な戦略や、そのために必要な人材育成策、インフラ構築策が脆弱である。以下に、個別領域について国際比較の概略を記す。

グリーンナノテクノロジーの最近の全体的な傾向としては、低炭素化等の地球規模の課題や熾烈な市場競争を背景に、日・米・欧が従来から行われている先端的な技術開発を背景に先行してきた。しかし、中国、韓国等が部分的にはあるが日本や欧米の持つ科学的知識を参考に最新技術を積極的に導入することによって産業的な競争力を付けながら追い上げ、追いつき、さらには一部では追い越しつつあると言える。米国では従来のNNI等による強力なナノテクノロジー施策に加え、Steven Chu氏がエネルギー長官就任以降、グリーンナノテクを重視する具体的な施策を着々と進め、同国をこの分野のリーダーの地位に押し上げつつある。エネルギー省における46のエネルギーフロンティア研究センター(EFRC)の基礎研究課題の大部分がナノテクノロジーであるという事実は象徴的である。欧州は地道な基礎研究で高いレベルを維持し、新産業の基盤となる技術を生み出している。標準化等では域内諸国の一体化した活動が力を発揮している。グリーンナノテクノロジーで特筆すべきは中国であり、研究水準、技術開発水準、産業技術力は各技術で急速に高まっており、今後の世界全体の動向を左右する存在になりつつある。韓国も最近科学技術予算の決定機構を大きく変え、科学技術政策の強化が鮮明に打ち出される中、政府や特定大企業の集中的な投資により、多くの分野で日本に肉薄している。日本もこれまでの技術蓄積を基盤に依然としてトップレベルにあり、最近ではグリーンイノベーションがライフイノベーションと並んで2大重点分野として取り上げられ、この分野への関心は高まっては

いる。しかし、基礎基盤分野を含めた統一的な研究戦略や人材問題への基本的対策等の検討・確立が不十分で、研究水準、産業技術力のいずれについてもその位置を保持するのは容易でなくなってきた。

ナノバイオテクノロジーは、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DDS（ドラッグデリバリーシステム）用材料、再生医療材料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。また産業技術力は欧米の後塵を拝している。当該領域は、既存の大企業では進出しにくい一面があり、小回りの利くベンチャー企業の活躍が各分野とも必須であるが、ベンチャー育成のためのインフラ整備が欧米に比して日本は遅れている傾向にある。欧州は、特定技術に限っていえば世界水準の研究が数多くある。中国、韓国は、米国等での留学経験者が帰国し、研究開発の主力を演じている。まだレベルにばらつきがあるものの、国際レベルの研究機関も現れ、今後さらに注目である。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がある。

ナノエレクトロニクスでは日本は総じて高い水準を保つが、世界のアクティビティと比較すると必ずしも楽観できるものではない。特にナノエレクトロニクスを牽引するナノCMOS技術においては、世界的に研究開発の拠点化とアライアンスが進むなか、日本メーカーの研究開発アクティビティは大幅に低下している。深刻なのはアカデミアの基礎研究・開発も他国に遅れ始めたことであり、今後、長期的観点に立った人材育成策や産学協同体制の構築を図らない限り、やがては韓国あるいは中国に追い抜かれることは避けられないだろう。

新物質・新材料に関しては、多くの技術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、ほとんど日本の独壇場と言っておく、米国がこれに次ぎ、そして欧州は後追いかたちとなっている。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、まだそれほど顕在化していないものの、将来的には大きな脅威と見られる。一方、新規な機能材料については、日本の活躍が目立つものの、欧米で先行する研究開発も少なからず見受けられ、特に欧州での政策に基づく展開が要注目である。政策展開は韓国でも強力に進められている。今後10年間は真の材料設計が日米を中心にして注目を集めることになるだろう。

ナノサイエンスにおいては、全体的に、近年上昇傾向にある研究テーマが多い。日本および米国ではその傾向が強く、欧州の進捗も大きい。しかし特に注目されるのは、これまで中国や韓国においては日・米・欧と比較して研究水準自体が若干低いテーマが多いと見られていたが、近年、研究者数と学術誌への論文投稿数は激増しており、成長力を感じさせる。特に実用化が著しい半導体関連の「界面・表面」の各テーマについては、韓国の研究・技術開発力の上昇が目立つが、基盤的研究はまだ少ない。日本および米国は、特にハードに関しては研究・技術開発力、更に産業技術力ともに優れている。一方、シミュレーション等のソフトウェアを公開し、商用化に結び付ける産業化力では、日本を含むアジア諸国は米欧の後塵を拝しており、今後の課題となっている。欧州では大学での研究が主体であるが、いくつかのテーマはベンチャー企業が実用化を目指している段階にある。

ナノ加工プロセスでは、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。しかしながら、いくつかの先端分野ではキラーアプリケーションを見出すには至っておらず、研究開発投資戦

略が今後の展開を左右するといえる。韓国・台湾は国家的にエレクトロニクス産業を育成しており、その基盤技術であるナノ加工プロセスの研究開発に力を入れ、量産技術では日米欧に接近しつつある。これには欧米から帰国した研究者、および集中投資を行う政府の役割が大きい。特に韓国は充実したナノファブ리케이션センターのネットワーク構築に巨額の投資を終えている。中国も、韓国・台湾と同じ道をたどり始めている。

計測・評価・解析では、欧米が依然として新しい計測技術を生む土壌において他をしのいでいる。米国は計測機器のみに特化することなく、ナノテク全体の中での戦略として体系的・俯瞰的強化を実行している。欧州は新しい計測技術を長い時間をかけて生み育てる土壌と実績がある。日本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、高分解能・高機能原子間力顕微鏡など特定分野で欧米に勝る技術を有する。韓国は以前に比べて技術力が向上しているが、計測評価機器の大部分は外国からの導入であり、独自の計測技術開発という点では日米欧とまだ差がある。中国も同様であるが、優秀な研究者が欧米から帰国するなどして、今後急速に技術力が向上する可能性がある。計測やリスク評価技術の国際標準化に中国・韓国の積極姿勢が目立っている。

関連共通課題として、融合と連携を加速推進するための共用施設・研究拠点、教育・人材育成、国際標準・工業標準、リスク評価・EHS（環境・健康・安全）、ELSI（倫理的・法的・社会的問題）・社会受容、国際プログラム・国際連携の諸課題がある。

次ページに、本調査における全網目の比較結果を一覧としてまとめた。

比較表 まとめ

		ナノテク・材料の応用																									
		グリーン・ナノテクノロジー																									
		太陽電池	燃料電池	人工光合成	光触媒・バイオ発電	バイオ燃料・ナリイ	バイオリアイ	キャパシタ	新電池、熱電変換素子	超電導利用	固体照明	軽量構造材料	高強度・耐熱構造技術	分離膜	環境浄化用触媒	リサイクル技術	環境調和・環境センシング	環境センシング									
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	産業技術力	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
米国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	△	↗	◎	↘	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
欧州	研究水準	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗	△	→	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	◎	↗	○	↗	○	↗	◎	→	△	→	○	↗	△	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
中国	研究水準	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
	技術開発水準	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
	産業技術力	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
韓国	研究水準	△	↗	○	↗	○	↗	×	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	△	↗	○	↗	△	↗	△	↗	◎	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	○	↗	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
台湾	研究水準																										
	技術開発水準																										
	産業技術力																										

記号の意味	
現状について	
◎	非常に進展
○	進んでいる
△	遅れている
×	非常に遅延
近年のトレンド	
↗	上昇傾向
→	現状維持
↘	下降傾向

フェーズの意味	
研究：大学・公的機関での研究レベル	
技術：企業における研究開発のレベル	
産業：企業における生産現場の技術力	

		ナノテク・材料の応用																									
		ナノバイオテクノロジー												ナノエレクトロニクス													
		ルバイオマテリア	再生医療	システム(DDS)	ドラッグデリバ	バイオデバイス	バイオセンサ	グ分子イメージ	食品	術ナノCMOS技	レトロナノエ	カーボンナノ	スピントロニク	メモリデバイス	有機エレクトロ	近接場光技術・ナ	子学・分子デバイス	次世代ナノデバイス(超伝導)									
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	→	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘	○	↘
	産業技術力	○	→	△	↘	○	↘	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
米国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
欧州	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	○	↗	○	↗	○	↗	△	↘	◎	→	◎	→	△	↘	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	○	↗	○	↗	○	↗	◎	→	◎	→	◎	→	△	↘	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
中国	研究水準	△	↗	○	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
	技術開発水準	×	→	○	↗	△	↗	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→
	産業技術力	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→	△	↗	×	→
韓国	研究水準	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	○	↗	○	↗	△	↗	○	↗	△	↗	×	→	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	産業技術力	△	↗	○	↗	△	↗	○	↗	×	→	△	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
台湾	研究水準																										
	技術開発水準																										
	産業技術力																										

		基盤科学・技術																							
		新物質・新材料																							
		ナノカーボン材		ソフト材料		ハイブリッド材料		高分子・プラスチック材料		融液材料		ナノ・メソポーラス材料		触媒材料		新型超伝導材料		磁性材料		低次元材料		新材料探索・設計			
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	研究水準	○	→	○	↗	○	→	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	→	○	↗	○	→	○	→	○	→
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→
	産業技術力	△	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗
米国	研究水準	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	→
	産業技術力	△	↗	◎	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	↗	○	↗	○	→
欧州	研究水準	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	産業技術力	△	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
中国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
	産業技術力	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗	△	↗
韓国	研究水準	○	↗	△	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
	技術開発水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	産業技術力	△	→	△	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→

		基盤科学・技術																																																					
		ナノサイエンス												ナノ加工プロセス						計測・評価・解析																																			
		原子・分子操作		表面・界面(固体表面)		界面・表面(固液)		表面・界面(ナノデバイス)		自己組織化・自己集合(理論)		量子制御		強相関		理論・シミュレーション		工技術		半導体超微細加工		ナノ転写技術		自己組織化技術		印刷技術		ナノ・マイクロ加工技術		MEMS・NE加工技術		顕微鏡		走査型プローブ		電子顕微鏡		X線計測		放射光		中性子		鳴転/緩和/共振法(MSR)		分光		超高速時間分解		標準(物質・計量・評価法)					
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	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	現状	トレンド	現状	トレンド		
日本	研究水準	◎	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗		
	技術開発水準	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→		
	産業技術力	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→		
米国	研究水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
	産業技術力	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
欧州	研究水準	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	技術開発水準	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→	◎	→
	産業技術力	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
中国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	×	→	△	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
	産業技術力	×	→	×	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
韓国	研究水準	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗	○	↗
	技術開発水準	△	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
	産業技術力	×	↗	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→	○	→
台湾	研究水準																																																						
	技術開発水準																																																						
	産業技術力																																																						

		関連共通課題													
		共用拠点・研究拠点		教育・人材育成		国際標準・工業標準		リスク評価、EHS		ELSI・社会受容		国際プログラム・国際連携			
国・地域	フェーズ	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド	現状	トレンド
日本	取り組み	○	↗	△	↗	◎	→	○	→	○	→	○	↗	△	↗
	実効性	△	→	△	→	◎	↗	◎	→	○	↗	○	↗	△	↗
米国	取り組み	◎	↗	◎	→	◎	→	◎	↗	◎	→	◎	→	○	↗
	実効性	◎	↗	◎	→	○	→	○	↗	◎	→	◎	→	◎	→
欧州	取り組み	◎	↗	○	↗	○	→	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	実効性	◎	↗	○	↗	○	→	○	↗	◎	↗	◎	↗	○	↗
中国	取り組み	○	↗	○	↗	◎	↗	○	→	×	↗	×	↗	○	↗
	実効性	△	→	○	↗	○	→	×	→	×	→	×	→	△	↗
韓国	取り組み	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗	◎	↗
	実効性	○	→	○	↗	○	→	○	↗	◎	→	○	→	○	↗

# 目 次

## エグゼクティブサマリー

目的・調査方法・本書の構成	1
国際技術力比較	5
1. ナノテクノロジー・材料の応用	7
1.1 グリーンナノテクノロジー	7
1.1.1 概観	7
1.1.2 中綱目ごとの比較	10
(1) 太陽電池	10
(2) 燃料電池	12
(3) 光触媒・人工光合成	14
(4) バイオ燃料・バイオ発電	16
(5) バイオリファイナリー	18
(6) 新電池・キャパシタ	20
(7) 熱電変換素子	22
(8) 超電導利用	24
(9) 固体照明	26
(10) 高強度・軽量構造技術	28
(11) 耐熱構造技術	30
(12) 分離膜	32
(13) 環境浄化用触媒	34
(14) 環境調和・リサイクル技術（回収技術・希少資源代替など）	36
(15) 環境センシング	38
1.1.3 注目すべき研究開発動向	40
1.2 ナノバイオテクノロジー	56
1.2.1 概観	56
1.2.2 中綱目ごとの比較	60
(1) バイオマテリアル	60
(2) 再生医療	62
(3) DDS（ドラッグデリバリーシステム）	64
(4) バイオデバイス（医療）	66
(5) バイオセンサ	68
(6) 分子イメージング	70
(7) 食品	72
1.2.3 注目すべき研究開発動向	73
1.3 ナノエレクトロニクス	89
1.3.1 概観	89

1.3.2	中綱目ごとの比較	82
(1)	ナノ CMOS 技術	82
(2)	カーボンナノエレクトロニクス	84
(3)	スピントロニクス	86
(4)	メモリデバイス	88
(5)	有機エレクトロニクス	92
(6)	ナノフォトニクス・近接場光技術	94
(7)	次世代ナノデバイス（単電子、原子・分子デバイス）	96
(8)	次世代ナノデバイス（超伝導デバイス）	97
1.3.3	注目すべき研究開発動向	98
<b>2.</b>	<b>基盤科学・技術</b>	<b>105</b>
2.1	新物質・新材料	105
2.1.1	概観	105
2.1.2	中綱目ごとの比較	108
(1)	ナノカーボン材料	108
(2)	ソフト材料	112
(3)	ハイブリッド材料	114
(4)	高分子・プラスチック材料	116
(5)	融液材料	118
(6)	ナノポーラス・メソポーラス材料	120
(7)	触媒材料	122
(8)	新型超伝導材料	124
(9)	磁性材料	126
(10)	低次元材料（ナノ粒子・ナノワイヤ・ナノチューブ）	128
(11)	新材料探索・設計	130
2.1.3	注目すべき研究開発動向	132
2.2	ナノサイエンス	142
2.2.1	概観	142
2.2.2	中綱目ごとの比較	146
(1)	原子・分子操作	146
(2)	表面・界面（固体表面界面）	148
(3)	表面・界面（固液界面）	150
(4)	表面・界面（ナノフルイディクス・ナノトライボロジー）	152
(5)	自己組織化・自己集合（理論、機構、ゆらぎ）	154
(6)	量子制御	156
(7)	強相関	157
(8)	理論・シミュレーション	158
2.2.3	注目すべき研究開発動向	160

2.3	ナノ加工プロセス	167
2.3.1	概観	167
2.3.2	中綱目ごとの比較	172
	(1) 半導体超微細加工技術	172
	(2) ナノ転写技術	174
	(3) 自己組織化技術	176
	(4) ナノ・マイクロ印刷技術	178
	(5) MEMS・NEMS加工技術	180
2.3.3	注目すべき研究開発動向	182
2.4	計測・評価・解析	185
2.4.1	概観	185
2.4.2	中綱目ごとの比較	188
	(1) 走査型プローブ顕微鏡	188
	(2) 電子顕微鏡	190
	(3) 放射光・X線計測	192
	(4) 中性子	194
	(5) ミュオンスピン回転/緩和/共鳴法 ( $\mu$ SR)	196
	(6) 超高速時間分解分光	198
	(7) 標準(物質・計量・評価法)	200
2.4.3	中綱目ごとの比較	202
3.	共通課題	206
3.1	共用拠点・研究開発拠点	206
3.1.1	概観	206
3.1.2	比較表	208
3.1.3	注目すべき動向	210
3.2	教育・人材育成	212
3.2.1	概観	212
3.2.2	比較表	215
3.2.3	注目すべき動向	216
3.3	国際標準・工業標準	220
3.3.1	概観	220
3.3.2	比較表	221
3.3.3	注目すべき動向	222
3.4	リスク評価、EHS	223
3.4.1	概観	223
3.4.2	比較表	226

3.4.3	注目すべき動向	228
3.5	ELSI・社会受容	231
3.5.1	概観	231
3.5.2	比較表	232
3.5.3	注目すべき動向	233
3.6	国際プログラム・国際連携	234
3.6.1	概観	234
3.6.2	比較表	236
3.6.3	注目すべき動向	238
付 録		239
	海外の政策動向	253
	執筆協力者一覧	248

# 目的・調査方法・ 本書の構成



## 目的・調査方法・本書の構成

### 1. 目的

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター（CRDS）は、社会ニーズを充足し、社会ビジョンを実現させる科学技術の有効な発展に貢献することを目的に、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。

有効な戦略立案・提言のためには、①国内外の科学技術水準や現在行われている研究開発の動向を比較し、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、②新しい技術の芽にも注意を払い、今後の研究開発動向を的確に捉える必要がある。そこで、CRDSでは2008年より、科学技術・研究開発に関する国際比較調査を実施し、その結果を刊行、発表してきている。

本報告書は、ナノテクノロジー・材料分野において、2011年3月末までの調査結果をまとめたものである。

国際比較の結果はCRDSにおける研究開発戦略の企画立案の基礎資料として活用されるとともに、独立した報告書として、科学技術政策立案に関連する諸機関等に配布される。

### 2. 調査方法

本調査は、我が国の専門家集団の主観評価（見識）に基づき実施し、まとめたものである。

具体的には、全体の監修を上席フェローが行い、調査対象の設定、「中綱目」（技術力の比較が可能なレベルに分野をさらに細かくカテゴライズした技術領域）の設定、担当専門家の分担の決定などを行った。専門家（調査協力者）は、担当する中綱目について、最新の文献や国際学会等の動向、関連する研究者、技術者等からの聞き取り調査などにより、科学技術・研究開発の国際技術力比較、及び注目すべき研究開発の動向の調査を実施した。これらの調査結果をCRDSフェローがとりまとめ、編集の上、報告書としてまとめた。

### 3. 本書の構成

本調査は、それぞれの科学技術をいくつかの「分野」に分け、さらに比較可能な技術カテゴリーとして「中綱目」を設定し、「中綱目」単位で比較調査した。

本報告書の「国際技術力比較」は、「分野」ごとに、「概観」「中綱目ごとの比較（比較表）」「注目すべき研究開発の動向」から構成した。

また、「付録：海外の政策動向」は、各分野に関する主要国の科学技術政策や研究開発システム、可能な範囲で分野別のファクトを記述した。

#### （1）概観

「分野」ごとに、日本及び各国の技術力の現状の概観を記載した。

## (2) 中綱目ごとの比較 (比較表)

専門家の知見に基づき各国の科学技術力の比較を中綱目ごとに集めたもので、各国の科学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。

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」：大学・公的研究機関の研究レベル
- ・「技術開発水準」：企業における研究開発のレベル
- ・「産業技術力」：企業における生産現場の技術力

またこれらの評価は、各国の技術力の「現状」と、各国の技術力が過去と比較してどのように変化してきているかの「近年のトレンド」の二つの視点で行った。

- ・「現状」：◎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
- ・「近年のトレンド」：↗上昇傾向 →現状維持 ↘下降傾向

国、地域のカテゴリーは、原則、日本、米国、欧州、中国、韓国とし、その他の国、地域は必要に応じて追記した。

## (3) 注目すべき研究開発の動向

国際技術力比較としての対象設定が可能な、世界的に普及した研究開発領域の動向とは別に、専門家の見識によって選定された注目すべき研究開発動向の最新動向を取りまとめたものである。将来的に重要性が増すと予想される技術革新の芽や、一国単独での記述にはおさまらない国際的な潮流の新しい動向、あるいは我が国においてその情報が十分に紹介されてこなかった諸外国の研究開発や政策上注目すべきトピックを収集、紹介するための手段として位置づけられる。

# 國際技術力比較



## 1. ナノテクノロジー・材料の応用

### 1.1 グリーンナノテクノロジー

#### 1.1.1 概観

グリーンナノテクノロジーは、省エネルギー、エネルギー生成・貯蔵、石油代替燃料生成、環境浄化・保全・計測、元素戦略・資源代替等、低炭素化社会に貢献するナノテクノロジーを意味している。ここでは、その中で昨今国策の基幹ともなっているグリーンイノベーションの観点から今後一層重要になると考えられる15中綱目「太陽電池」「燃料電池」「光触媒・人工光合成」「バイオ燃料・バイオ発電」「バイオリファイナリー」「新電池・キャパシタ」、「熱電変換素子」「超電導利用」「固体照明」「高強度・軽量構造材料」「耐熱構造材料」「分離膜」「環境浄化用触媒」「環境調和・リサイクル技術（回収技術・希少資源代替など）」「環境センシング」について国際比較を行った。

前回の『ナノテクノロジー材料分野 科学技術・研究開発の国際比較（2009年版）』と比較すると、エネルギー・環境分野及び産業用構造材料（輸送・建造等）分野の中綱目を概ね継承しているが、綱目名称等に多少の変更があり、また新設中綱目として「バイオリファイナリー」及び「環境センシング」を採用している。

グリーンナノテクノロジーの最近の全体的な傾向としては、低炭素化等の地球レベルの課題や熾烈な市場競争を背景に、日・米・欧が従来から行われている先端的な技術開発を背景に先行してきたが、中国、韓国等が部分的にはあるが日本や欧米の持つ科学的知識を参考に最新技術を積極的に導入することによって産業的な競争力を付けながら追いつき、追いつき、さらには一部では追い越しつつあると言える。

日本はこれまでの技術蓄積を基盤に依然としてトップレベルにあり、最近ではグリーンイノベーションがライフイノベーションと並んで2大重点分野としてとりあげられてこの分野への関心は高まってはいるが、基礎基盤分野を含めた統一的な研究戦略や人材問題への基本的対策等の検討・確立などが不十分で、研究水準、産業技術力いずれについてもその位置を保持するのは容易でなくなっている。

米国では従来のNNI等による強力なナノテクノロジー施策に加え、Steven Chu氏がオバマ大統領からエネルギー長官に指名されて以後、グリーンナノテクノロジーを重視する具体的な施策を着々と進め、同国をこの分野のリーダーの地位に押し上げつつある。エネルギー省における46のエネルギーフロンティア研究センター（EFRC）の基礎研究課題の大部分がナノテクノロジーであるという事実は象徴的である。

欧州は地道な基礎研究で高いレベルを維持し、新産業の基盤となる技術を生み出している。標準化等では域内諸国の一体化した活動が力を発揮している。

この分野で特筆すべきは中国であり、研究水準、技術開発水準、産業技術力は各技術綱目で急速に高くなっており、今後の世界全体の動向を左右する存在になりつつある。

韓国も、政府や特定大企業の集中的な投資により、多くの技術で一定の存在感を示している。

太陽電池、燃料電池や新電池・キャパシタ等の各種発電・電池技術、あるいは熱電変換

素子などの技術開発では、論文数、研究者数の増大や市場競争力の強化など、中国のポテンシャルがますます高まってきている。また、欧州は将来を見据えた長期的観点の政策や基礎研究で潜在的な強みがあり、中でも英独仏の3カ国は傑出している。

光触媒・人工光合成や、分離膜、環境浄化用触媒については、日本が現時点において優位にあるが、世界的に大規模な基礎研究予算が投入されつつある中、日本はやや後手に回っている。

バイオ燃料・バイオ発電やバイオリファイナリーに関する技術開発では、米国、欧州が政策的に力を注いでおり、これに対して日本は基礎的な技術水準では必ずしも劣らないものの、これまで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。

超電導利用技術に関しては各国とも自立産業には至らず国が支援している。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。

固体照明は基礎技術からデバイス開発まで日本が先導してきたが、低炭素化社会に向けた世界的な省エネルギー動向を背景にいよいよ一般家庭等への普及レベルに入り生産量が増加、中国・韓国・アジア諸国に生産拠点が集中している。最大課題の低コスト化に向けて肝要な標準化の策定は欧米がイニシアティブをとりつつあるので、日本の対応策が求められる問題である。

高強度・軽量構造材料は、自動車用材料では日本が世界をリードしているが、ニーズの変化もあり基礎研究は様子見の状況にある。先端軽量構造材料は、航空産業、軽金属メジャー企業を有する欧米が、依然として研究から産業技術力にわたり強いが、航空機部材の実製造は、日・韓・中などに移行している。耐熱構造材料は、航空機用途を中心に欧米が全体的に先行しているが、日本も発電用ボイラ材料等の産業分野で存在感を示している。

環境調和・リサイクル技術（回収技術・希少資源代替など）や環境センシングでは、日米欧で政策的にアプローチが異なり、技術的に大きな優劣があるわけではない。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されておらず、技術開発レベルはほぼ同等である。日本は排出ガス浄化触媒、エコマテリアルやリサイクル技術などに関して広範な基礎研究力を保持しており、欧州は化学物質リスクへの取組みが進んでおり、関連分野のレベルが高い。なお、最近ではレアアースをはじめとする資源問題が大きくクローズアップされており、それに対する対応は中国が最も積極的である。

なお、本領域に関しては、別途 CRDS が発行している『環境エネルギー分野 科学技術・研究開発の国際比較（2011年版）』とも関連があるため、必要に応じて参照されたい。

◆グリーンナノテクノロジーのまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	グリーンイノベーションを支える太陽電池、燃料電池、二次電池の電池三兄弟や環境関連技術など、総合的にはトップレベルだが、今後を担う人材やオールジャパンの視点での研究戦略の面で不安もある。
	技術開発水準	◎	→	大手、中小の電機メーカーなど、総じて技術開発に力を注いでおり、トップレベルを堅持。
	産業技術力	◎	→	大学や公的研究機関の基礎研究、企業の技術開発を土台に、生産現場においても世界をリード。しかし、世界的な経済停滞や熾烈な国際産業競争に耐える力を保持するのは容易ではない。
米国	研究水準	◎	↗	強いところと弱いところがあるが、総合評価は◎。特に燃料電池や、熱電変換素子、高機能膜技術では基礎研究レベルが高い。オバマ政権の施策が力を発揮しつつある。
	技術開発水準	○	↗	技術開発は日本に比してやや遅れるものの、数多くの大学発ベンチャー企業が高い技術を有する。
	産業技術力	○	↗	オバマ政権では、グリーンナノテクノロジーに支えられる環境エネルギー分野の産業を不況回復対策の中核に位置付けた。生産現場における技術力は必ずしも高くなかったが、分野によっては急激に向上する可能性がある。
欧州	研究水準	◎	→	地道な基礎研究で高いレベルを維持し新産業の基盤となる技術を生み出している。
	技術開発水準	○	→	太陽電池やバイオ燃料など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	○	↗	研究論文数も増え、他国の実績を猛烈にキャッチアップ。トータルでは日米欧に及ばないが、一部では質的にもトップ陣に加わりつつある。先進国から帰国して活躍する研究者も目立つ。
	技術開発水準	△	↗	現状ではまだ高くないが、急激に進展。そのスピードは驚異的。
	産業技術力	△	↗	急速な技術開発を元に人海戦術で産業化が進む。台湾の存在も有力。
韓国	研究水準	○	→	一定の存在感。
	技術開発水準	△	↗	サムスン社やLG社の動きは注目。技術水準は向上している。
	産業技術力	△	→	生産技術では現状日本や欧米に劣るものの、太陽電池や膜技術など海外と連携し意欲的に導入。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的研究機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

### 1.1.2 中綱目ごとの比較

#### (1) 太陽電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	薄膜系や有機系太陽電池の研究水準は高く研究者も多いが、産業の主体である結晶系 Si 太陽電池に対する研究水準は、原料・基盤技術を除き、研究体制も弱く、欧州圏（独 Fraunhofer 研究所、オランダ ECN、ベルギー IMEC）など海外に劣り、材料などの周辺産業技術への対応も遅れ気味である。集光型太陽電池、化合物超高効率太陽電池では日米独で開発競争が激化。有機薄膜太陽電池は米国ベンチャー企業に比してやや劣る。量子ドットなどの新概念新材料など将来技術への準備は、JST、NEDO のプロジェクトでカバーされつつある。
	技術開発水準	◎	→	結晶 Si 系での技術開発は実用化サイズでの効率記録などの高性能化、生産技術とも高水準であるが、Si の原料に関わる技術開発は、欧州に比べやや劣る。世界最高水準を維持するも、中国・台湾・韓国などの新興国に追いつかれつつある。薄膜系は高水準だが低コスト化への追従に手一杯の感がある。モジュール信頼性やシステム技術に関する技術開発は個別企業に依存しており、産業全体としての必要な技術開発が欧米に比べやや劣る。
	産業技術力	◎	→	トップレベルを堅持。量産装置を全て内製している。材料などでは開発機関のバックアップが弱く、台頭しつつある新興国とバリューチェーン全体でどこまで戦えるか。国内市場の拡大で、システム技術も進展している。薄膜太陽電池は米国発の CdTe 型に苦戦。シャープの Si 薄膜トリプル接合モジュールの生産は現在 160MW にとどまる、昭和シェル石油の年産 1000MW（2011 年）の CIGS 薄膜モジュール製造設備導入などは、欧米より進んでいる。原料や製造設備開発では欧米がやや上。
米国	研究水準	○	↗	もともと高い水準を持ち基礎研究では一日の長があるが、産業と市場が育っておらず、現状ではデバイス技術は欧州と日本にやや遅れる。CdTe 薄膜太陽電池で巻き返しを図ろうとしている。AMAT は薄膜ターンキービジネスから撤退するも研究開発は続行している。有機半導体型などの新領域のデバイス研究と GaAs などの化合物半導体型は宇宙用、集光用として活発である。また、太陽光発電の利用技術に関する研究開発は先行している。ベンチャー企業が開発の中心。最近、IBM が CZTS という In フリーの化合物薄膜太陽電池で 9% を超える効率を発表した。量子ドット型やプラズモン太陽電池など新しい技術への取り組みは大学を中心に活発化。有機薄膜の研究は活発だが色素増感の研究はほとんどない。
	技術開発水準	○	↗	研究開発に比して技術開発では日欧にやや遅れるが、化合物系や有機系で多数のベンチャー企業が参入し今後脅威。スライスや引き上げなど周辺産業でも技術開発力が高いベンチャー企業が多く新しいアイデアが生まれている。SunPower 社は変換効率で三洋と世界一を競っている。
	産業技術力	△	↗	例えば宇宙用超高効率、単結晶 Si 超高効率太陽電池のような特殊用途に限って優位性を持つ。有力企業が欧州企業に買収されている。BP ソーラー社のセル生産は中国に移行している。Si 基板材料関連や CIGS 系などで多くのベンチャーが生まれており、巨大な産業力を感じるが、ベンチャーから生産企業への脱皮過程が問題か。但し、First Solar 社は世界で唯一 CdTe 太陽電池の製造でトップ技術を有している。また、スマートグリッドなどシステム産業への注力化が顕在化している。
欧州	研究水準	◎	→	結晶 Si 系の要素技術開発では非常に高レベル。Fraunhofer 研究所に加えて ECN、IMEC など、各国の研究機関が中核的研究機関として世界の産業界をリードしている。開発はどちらかというと現実路線で短期的テーマが中心だが、基礎も重視し各種太陽電池の研究を展開、超薄型や新原料などの次世代技術への取り組みも活発で研究人口も多い。各研究機関は共用の研究プラットフォームを備え、産業界の技術開発や材料開発を積極的にバックアップする体制を構築している。利用技術の開発や標準化、規格化でも産業界と連携して幅広い検討が行われている。一方、Si 系薄膜や化合物でも水準は着実に上がっている。各研究所の成果が中国に流れているケースが散見される。
	技術開発水準	◎	↗	市場拡大を背景にベンチャーが多く設立され、製品化を目指す。企業での開発の中心は生産技術で研究機関との研究コンソーシアを実施し有効に機能している。装置メーカーによるターンキー製造装置の高度化もすすむ。また、利用技術の開発や標準化、規格化では幅広い検討が行われている。薄膜 Si ではエリコンソーラーが中心。AMAT 設備を導入した SUNFILM 社がいったん倒産するも新しい投資を得て再開。世界トップレベルの技術を開発。化合物薄膜でも日本の水準を脅かす。CIS は会社の数が多い。研究機関の開発成果が人とともに移動して企業の技術開発を支えている。研究機関で企業の研究所的な研究を展開しているので実用化は早い。
	産業技術力	◎	↗	製造設備を自社開発せず、購入し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。旺盛な市場を背景に生産技術は日本に追いつく可能性大。

中国	研究水準	△	↗	結晶 Si 太陽電池や原料分野に国家戦略研究所を設置し、研究開発を推進している。研究員は、先進国の留学生が戻って活躍するケースや半導体分野からの転身が多い。現時点では、他国の実績をもとに追跡研究が主体で独創的な研究は見られないが、猛烈なキャッチアップが進む。
	技術開発水準	○	↗	企業は欧米の研究所と連携して先端技術を取り入れようとしている。また、企業間での技術情報に関する障壁が小さいため、キャッチアップされた技術の中国国内全体への拡散は非常に早い。結晶 Si 太陽電池の大手数社の開発力拡充には注目すべきである。結晶 Si では多数の企業が乱立し開発競争をしているため日本の水準に追いつくのも時間の問題。
	産業技術力	○	↗	世界の 50%を生産する最大の生産国になる。結晶 Si では量的には他国を圧倒しており、原料からモジュールまでの垂直統合が行われている。品質に問題あるケースが指摘されており、信頼性の向上が課題。結晶 Si 系の分野では、SunTech 社だけでなくインリ、トリナといった新興勢力も力をつけている。これまでフルターンキー設備の導入で生産技術習得を進めてきたが、最近大手企業ではこれを卒業し、独自に研究所の整備を進めている。また、太陽電池や基板の製造装置に関しても安価な国産のターンキー装置が普及しており、一部工程を除いて欧米に比肩する性能と言われる。この国産装置を使って基板やセルの大幅な生産能力拡張が進んでいる。
韓国	研究水準	△	→	我が国の研究開発を参考に多岐にわたり研究が進められているが、太陽光発電に関する政府の重点的な研究方針は先進技術の国産化による輸出産業の育成。従って、現実の技術を中心に原材料からセル、システムまでこの方針に沿った研究開発がすすめられている。次世代技術の研究もあるが、主流ではない。
	技術開発水準	△	↗	太陽電池関係企業数が増え、大企業が事業参入を目指した技術開発を進めている。サムソン社や LG 社が太陽電池の生産を開始したがまだ様子見段階。むしろ現代グループが結晶 Si で急成長している。高純度 Si や一部製造装置では既にキャッチアップが完了。
	産業技術力	○	↗	太陽電池関係企業数が増えている。高純度 Si では輸出を中心に増産に入っている。セルについてもサムソン社や LG 社が本格的に太陽電池の生産を開始し、今後の展開に注意。システム技術については国内のメガソーラーで既に実習完了した模様。

全体コメント：

太陽電池には使用材料などによりいくつかの種類があるが実用段階にあるのは結晶 Si、薄膜 Si、CIGS [Cu (InGa) Se<sub>2</sub>]、CdTe、GaAs 集光型の太陽電池で、有機薄膜や色素増感型などは開発段階であり、さらに量子ナノ構造などの超高性能を目指した新構造太陽電池も研究されている。また太陽光発電システムとしての利用技術・標準化・規格化技術なども普及拡大につれ重要度を増している。これら技術の研究開発は、実用化された太陽電池の技術革新を含め、主として日本、欧州、米国の 3 極で進められており、中国、韓国における研究開発は現段階では実用化された分野の開発成果の吸収・国産化に主眼が置かれている。今後中国勢の台頭が一層顕著になるだろう。台湾では、CIS 系へのシフトや、国外メーカとの提携、M&A による技術導入、買収、OEM など国際的な活動が目につく。日本は Si 薄膜、CIGS、超高効率共に高い技術を持ち、Si 太陽電池でも企業主体で研究開発し高い技術水準を維持している。欧州、米国も高い技術開発力を維持しており、実用技術分野では研究機関に試作生産ラインを整備し、新材料や設備開発などの周辺産業を含む技術革新に貢献している。結晶 Si 系は、欧州が高い研究能力を獲得してきている。超高効率太陽電池などの次世代技術への研究開発も米国、日本、欧州で進められている。しかし、先進諸国の太陽電池企業の多くは中国、韓国など新興国や CdTe 太陽電池との低コスト競争により停滞傾向にあり、産業の基幹である結晶 Si 系太陽電池の生産はすでに新興国に追い越された。例えば中国製モジュールが圧倒的に安く、日本もコスト競争で苦戦している。性能と信頼性、ブランド面で日本製は優位ではあるがいつまで優位性を維持できるか不安がある。有機系では 9%に迫る勢いで効率が向上してきており、注目を要する。色素増感型との効率での逆転現象もあるかもしれない。日本では環境問題のために CdTe の開発は終了したが、米国の Firstsolar 社は、2009 年に単独で 1GW を超えた。全体的に、現状はまだ日本の優位性はあるが、企業主体の技術開発から脱皮し、産業競争力の強化を図ることが望まれている。

(参考情報)

- [1] 第 35 回 IEEE Photovoltaic Specialists Conf.
- [2] 第 25 回 EUPVSEC

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) 燃料電池

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	NEDO、JST 等による研究資金により、集中的研究拠点の整備も進んでおり、その成果も出始め世界トップを維持し、研究水準は引き続き世界をリードしている。全体的に論文数は前年度並み。しかし、太陽光発電と二次電池に押される形で研究開発投資はスローダウン。関連研究者の減少が懸念材料である。ただし、個別には山梨大における NEDO プロジェクトなど、注目の研究開発が展開中。
	技術開発水準	◎	→	燃料電池本体・発電システム・補機類等の技術が進展し、世界トップの水準を維持。家庭用では一般販売可能な世界トップの耐久性・信頼性を実現。自動車用では、国内各社の実証車は実用レベルに達し、効率・運転性能・走行距離・車両重量など世界を一歩リード。今後は、その性能を維持しつつコスト削減、耐久性・信頼性の確保のための技術開発が必須。集中研究拠点を中心とした産官学の連携強化が図られ、福岡水素タウンや、世界初の高速バス定期運行など、実用化に向けた実証実験も地道に行われている。
	産業技術力	◎	↑	家庭用では 2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コージェネシステムが実用・販売開始。また、ガスメーカーが中心となって 2010 年度に SOFC (固体酸化型燃料電池) 実証試験を開始。家庭用据置き電源・コージェネ利用においては世界をリードしている。自動車用では、欧米と比較して遅れ気味であった水素インフラ整備に向けた異業種連携も進み、2015 年をスタートとする商品化へむけて着実に技術力をステップアップさせている。グローバル商品化への取組みに移行。それに伴い国際標準化への国内基準の採用が重要となる。
米国	研究水準	◎	→	政権交代、経済不況の影響も受けて研究資金の増加は難しい状況。電気自動車関連研究への研究者の移動も見られ、停滞気味。2010 年度には水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約 60% 削減され、その影響はいずれ近いうちに顕在化すると予想される。また 2012 年度予算の優先課題を見てもソーラー、バイオ燃料、バッテリーなどが優先されており、トーンダウンの感は否めない。ただし、水素社会構築の重要研究テーマとして位置づけられ高いレベルを維持している。また、論文では、SOFC に関するものの伸びが大きく、全体的にも増加している。バイオ燃料電池も、中国とともに論文数では世界トップ。
	技術開発水準	◎	↓	基礎と商用化を結ぶ努力はあるようだが、自動車メーカーが経営危機の影響を受けアクティビティ低下が著しい。電気自動車関連への方向転換もみられ、技術開発力は低下している。
	産業技術力	◎	↓	自動車メーカーの活力低下の影響を受けアクティビティ低下が著しい。軍事・フォークリフト・非常電源用途など、ニッチな市場への展開が目立ち、技術力低下傾向。PEFC (固体高分子型燃料電池) に関して、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められている。また SOFC ではブルームエナジー社が 100W 級発電装置を合計数十台、販売しており、商用化で世界トップといえる。
欧州	研究水準	◎	→	ドイツ、イギリス、フランスをはじめとする研究アクティビティは維持され、地道な研究開発を展開している。論文数は前年度から横ばい状態である。
	技術開発水準	○	↑	一時期、日本の自動車メーカーに追い越された技術開発力を回復させるためにアクティビティを向上させている。ドイツを中心に、日本を初めとする海外自動車メーカーを含めての異業種連携により、水素社会インフラ構築を精力的に推進している。関連部材産業の技術開発も活発化しており技術水準は上昇している。英国セレスパワーなど各社で SOFC の実証が始まっている。
	産業技術力	○	↑	ドイツを中心として政府主導の環境技術への支援、各種実証事業も活発化しており、それに伴って関連産業のアクティビティ・技術力は向上している。米国同様、PEFC に関して、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められている。
中国	研究水準	○	↑	米国研究機関からの帰国者を中心にアクティビティを向上。主要研究機関での環境整備も著しく、研究水準が上昇している。PEFC、SOFC、バイオ燃料電池などあらゆる分野で論文数の数、伸びが大きく、燃料電池全体で、論文数は米国とほぼ同じ世界トップレベル。特にバイオ燃料電池の伸びが大きい。
	技術開発水準	△	↑	政府主導の環境技術への支援が増大、産学連携によるベンチャー企業中心に燃料電池主要部品およびシステムの内製化が進められており技術開発力が向上している。燃料電池自動車・バスなどが上海万博会場にて順調に運転された。
	産業技術力	△	↑	大学・国研の開発中心で産業技術力は高くないが、産業の高度成長およびオリンピックと上海万博での実証デモを経て、国外からの技術流入が活発化、確実に上昇している。上海汽車が 2015 年に 1,000 台規模の FCV (燃料電池自動車) の小規模量産を開始すると発表。

韓国	研究水準	○	→	中国より高水準にあるが中国ほどの上昇傾向は見られない。徐々に基礎研究への取組みも図られている。論文では、バイオ燃料電池関係の伸びが大きく、全体を押し上げる要因となっている。他は前年度から横ばい状態である。
	技術開発水準	○	↗	自動車用では、内製技術による日本メーカーに迫るスペックの車両開発が達成され確実な技術力向上が見られる。定置用においても日本同様の実証事業が進められ、着実に技術開発水準が向上している。KEPCO 電力研究院が、SOFC 発電システムを開発し、試験運転を開始している。
	産業技術力	○	→	国内では、自動車・定置用ともに日本同様の実証事業が計画・推進され、関連技術のレベルアップは図られている。産業としての技術力は現状維持。2010年4月に POSCO が燃料電池製造工場に着工し、年間生産 100MW 規模を目指している。現代自動車が 2012～2014年に約 2,000 台の燃料電池自動車のリース販売を計画しており、米国でも約 400 台のリース販売を予定している。

全体コメント：

2008 年下期リーマンショック以後の世界不況から、ようやく回復傾向が見られる中、2010 年当初より第 3 期電気自動車 (EV) ブームが起こり、世界的に燃料電池開発からのシフトが心配されている。そのような中、日本では、電気自動車、ハイブリッド車、燃料電池車の将来市場の棲み分けの必然性が認識され始め、2011 年初頭には国、自動車・エネルギー企業が 2015 年からの燃料電池車の普及に向け量産体制と水素インフラ整備を進める共同声明を発するなど積極的な取り組みが示された。また、2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステムが実用・販売開始され、技術力の高さを示しているが、より一層の低コスト化が必要である。さらに、産官連携推進の状況、NEDO、JST 等による研究資金による集中的研究拠点等からの成果が表明されるなど、日本の燃料電池分野は高い水準を維持、さらに上昇傾向にあることが示された。欧米では、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネ以外へのアプリケーション開発は、日本よりも活発に行われている。米国では先の経済不況と政権交代以後の雇用創出への取組みの遅れから、燃料電池分野から他の産業へのシフト傾向が見られそれに伴って高い水準を保っていた技術水準と産業技術力が低下傾向に転じた模様。欧州では、ドイツを中心に環境政策を強力に推進する政府の支援もあり、関連産業界の技術水準・産業技術力が上昇傾向にある。中国は、著しい高度成長による国外からの技術流入と成長とともに悪化する環境への対応ともなうグリーン技術への政府援助の推進により、研究水準・技術開発水準・産業技術力のすべてにおいて上昇を示している。韓国は、日本と同様の実証事業が進められ着実な技術開発水準の向上が見られる。

燃料電池の研究開発面では、米国の研究予算に顕著に表れているように、太陽光発電、二次電池、バイオ燃料などにトップ・プライオリティが置かれたことのおおきくを受けて、全体的にややトーンダウン、スローダウンの感が否めないが、日米が先導している状況は近年と変わらない。英語発表論文数の各国比較をみると米国が 1 位で中国がこの 2、3 年で急激に数を伸ばして 2 位となっている。米国は、SOFC に関する論文の伸びが大きく、全体数を押し上げる要因となっている。ただし米国では、2010 年度に水素・燃料電池関連の政府研究開発予算が約 60% 削減され、2012 年度予算の優先課題を見てもソーラー、バイオ燃料、バッテリーなどが優先されており、その影響は 1、2 年後には顕在化すると予想される。新技術として注目されているバイオ燃料電池においても、数では米国と中国が首位を争っており、韓国も数を伸ばしている。日本と欧州は多くの項目において、微増か横ばいである。

(参考情報)

- [1] 論文データベース (ISI Web of Knowledge)
- [2] 燃料電池年鑑 (概要)
- [3] 燃料電池新聞
- [4] NEDO レポート：オバマ大統領の 2010 年度予算：概要
- [5] NEDO 海外レポート

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) 光触媒・人工光合成

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	光触媒は、文科省科研費、JST (CREST)、NEDO など継続的な投資がおこなわれており、研究者の質、量とも世界で群を抜いている。人工光合成についても JST (PRESTO) プロジェクトが 2009 年度から始まった。金属錯体による水を電子源とする光酸化の発見や二酸化炭素の光還元など共に世界を主導している。太陽光による水素発生 [以下、単に水素発生] は日本独自の技術であり、粉体/薄膜系光触媒で長年の蓄積があって、特に光触媒材料開発では圧倒的な強さを誇るが、近年欧米、中国において光触媒や人工光合成に関する大きな研究プロジェクトがいくつも動き始めており予断を許さない状態にある。
	技術開発水準	◎	→	光触媒では、金属錯体などによる人工光合成分野では興味を持つ企業が増えてはいるが未だに踏み込んで研究投資をしようとする企業は極めて少ない。水素発生用光触媒の性能は実用化の一手手前にあり、多分野からの技術参入が求められる。光触媒水素発生プロセスのフィージビリティ検討など実用化を睨んだ研究も始まりつつある。
	産業技術力	◎	→	光触媒では、間違いなく世界をリードしているが、グローバルな展開力に欠けている。多方面で酸化チタン系の光触媒が実用化されているので、効率の高い触媒が開発されつつあり水素発生も製品化できる力は十分にある。金属錯体などによる人工光合成分野では産業技術力の評価は困難である。水素発生については多くの企業が注目しているが現状の光触媒は産業的に応用できる性能は有していないため、企業などとの連携の中で実用化を見据えた研究を進められている。
米国	研究水準	◎	↑	水素発生では、政府が大きな研究開発資金を提供し始めており、研究レベルは急速に上がっている。例えば、DOE によるローレンス・バークレー国立研究所の Helios プロジェクトや、その後 Steven Chu 長官主導で 2009 年開始された DOE Energy Frontier Research Center (EFRC) プログラム (46 拠点に各 2~500 万ドル/年で 5 年間)、NSF による Powering Planet Project (Caltech や MIT を中心に多数の大学が参加)、さらには Energy Innovation Hub のひとつとして 2010 年から Joint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) (Caltech : 1 億 2200 万ドル/5 年間) など多くの施策が開始されている。
	技術開発水準	○	→	実用的な光触媒や光電極の開発は遅れているが、グリーンニューディールにもとづいた DOE 主導による再生エネルギー戦略で急速に政策誘導で産業化の促進を図っており、日本にとっては脅威となる。水素発生は産業としてはまだ育ってはいない。オキシナイトライド系触媒では、Schatz Energy 研究センターが代表的。
	産業技術力	○	→	光触媒では、最近になり産業界の一部が本格的に注目し出したので、今後伸びるかもしれない。水素発生を産業に結びつける取り組みはほとんどない。
欧州	研究水準	◎	↑	光触媒では、もともと水処理などに熱心な研究者が多かったが、それらが日本型の研究テーマ (建築材料、空気浄化など) に転向しつつある。水素発生については、酸化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。金属錯体による人工光合成では歴史的には英国での研究が先行していたが、近年スウェーデンなど EU の枠内で研究が活発化している。ソーラー水素生産に関する研究が、スイス連邦工科大学の Grätzel らを中心に行われている。
	技術開発水準	○	↑	光触媒では、産業界が本格的に注目をはじめ、建築材料、大気浄化など実用的な技術開発が盛んにおこなわれている。ただし、研究されている材料が限られていて、日本のような多種の半導体光触媒をもっていない。英国の Solar Hydrogen 社では、WO <sub>3</sub> 光電極と色素増感太陽電池を組み合わせて水素発生を行ない、ハイブリッド型の開発に注力している。
	産業技術力	○	↑	産業化も本格的に始まりつつある。水素発生では、産業化をにらみ、酸化鉄の多孔質電極を高性能化し、低コスト化を実現しようとしている。ソーラー水素生産のデモ機などが Grätzel らを中心にベンチャー企業で作られている。

中国	研究水準	△	↗	レベルは高いと言えないが、研究者は多く大変熱心に研究されつつあり、高レベルの研究が出てくる素地は十分にある。水素発生では、2009年度より、人工光合成に関する大きなプロジェクトが大連化学物理研究所の Can Li 教授を中心にスタートし、国際会議を活発に主催。今後急速に進展すると考えられる。
	技術開発水準	△	→	日本の技術を導入しレベルは向上しているが、日本と比較して水素発生の研究者も少なく技術の大幅な進展は見られない。ただし、材料開発は小さなきっかけで加速する可能性があるため、日本にとって潜在的な脅威はある。
	産業技術力	△	→	光触媒では、産業として成長する段階にないが、種々の元素の資源も豊富で、画期的な材料開発に成功すれば、大きな力を持つことになる。水素発生を産業に結び付ける取り組みは現在見られない。
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ですが、いくつかの研究機関で精力的に研究が推進されている。2009年に Korean Center for Artificial Photosynthesis (KCAP) が開所され、国内で選ばれた 15 人の教授陣によって 2010 年から 10 年計画で人工光合成の大型プロジェクト (5 億円/年、5 年) が立ち上がった。中国同様、小さなきっかけで研究開発が加速する可能性がある。
	技術開発水準	△	→	光触媒では、空気清浄機などに使うための技術開発は熱心で、一定のレベルにある。水素発生の研究をしている研究者は少ない。
	産業技術力	△	→	光触媒は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が、二酸化チタン光触媒製品などを生産している。水素発生を産業に結び付ける取り組みは現在見られない。

全体コメント：

光触媒分野における現在の日本の優位は間違いないが、イタリア、ドイツを中心とした EU 諸国が研究レベルも高く、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に興味を持ちだした。中国、韓国は研究者が多いが、産業界との連携はまだあまり進んでいないように思われる。金属錯体を用いた人工光合成分野では、かつては水の酸化については米国、英国が、二酸化炭素の光還元については、フランス、米国が主導していたが、現在では日本がいずれも主導している。しかし、最近の米国の JCAP (Joint Center for Artificial Photosynthesis) など超大型ハブプロジェクトの設立などの研究投資の動きは日本にとって脅威である。

太陽光エネルギーを化学エネルギーへの直接変換しようとするソーラー・フューエル技術では、米国を初めとして世界各国で再生可能エネルギー転換技術に注目が集まり実用化への期待が高まっている。ソーラー・フューエル技術には、基本的には光電気化学的手法と微粒子系あるいは錯体を用いる手法とがある。各国とも両方の研究を多くの研究室で進めているのが現状である。将来の大規模応用を考えれば、微粒子系・錯体を用いるエネルギー変換の方がコスト的に有利と言われるが、例えば水分解の場合、水素と酸素の効率的分離技術の開発が必須となり、そのような研究も並行して行う必要がある。世界的に大規模な基礎研究費が投入されつつある中、日本は後手に回っている。

(参考情報)

- [1] <http://www.energy.gov/news/9243.htm>
- [2] <http://www.sc.doe.gov/bes/EFRC/index.html>
- [3] <http://www.energy.gov/energysources/solar.htm>
- [4] <http://solarfuelshub.org/>

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(4) バイオ燃料・バイオ発電

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	欧米に比べてスタートは遅かったが、ここ10年間で、大学、国研究所、メーカー等で、バイオマス変換に関する研究が急速に進んだ。セルロース系バイオマスからのバイオエタノール製造技術に関しては、NEDO事業などを通じて産業技術総合研究所を中心に多くの企業や大学が参加して実用化を目指している。バイオマス発電についての研究はやや頭打ちの状態となっている。
	技術開発水準	○	↑	バイオマスガス化発電は小規模のものは実用段階に至っている。バイオエタノールに関しては、新潟県、北海道で、イネ、テンサイ、規格外小麦を用いた試験を開始した。ただし、これらの経済性等実用化には、解決すべき問題が多い。またわが国もバイオエタノールはETBE(エチルターシャリーブチルエーテル)に加工してガソリンに添加するため、地方で製造したバイオエタノールを首都圏に輸送して、ETBE化してガソリンに添加している。バイオ燃料製造は、自治体や民間の食品産業が中心となり進んでいる。
	産業技術力	○	→	欧米に追従する形で日本でもバイオエタノール導入を進めているが、現状では目標値は小さく、十分な温室効果ガス抑制効果は期待しにくい。自動車では、バイオマス混合燃料自動車の普及よりも、家庭で充電できる電気自動車の方に移行する可能性が大きい。バイオマス発電についても、既設の石炭火力への混焼発電以外はほとんど注目に値しない状況である。ガス化発電では、国内でガスエンジンが安価に入手できないことがコスト高につながっている。マーケットの狭さや導入・普及に関するインセンティブが小さいことも産業として成長できない一因となっている。現在議論されている固定買取制度の導入で一気に加速する可能性がある。
米国	研究水準	◎	↑	ここ10年で米国のバイオエタノール生産は3倍以上増加し、ブラジルを抜き世界一位となった。DOEはセルロース系バイオマスとしてコーンコブに焦点を絞ってエタノール製造技術に対し大型の資金投入をし、ダウやデュポンなどと連携し、パツェル研究所等の国立研究機関を中心として研究を進めている。最近の報告では、微生物電池や藻類からのバイオ燃料製造の研究が一段と加速している。
	技術開発水準	◎	↑	中東からの石油輸入を75%削減するためバイオエタノール利用を国家戦略として推進した。その結果、DOE、パツェル研究所、ダウやデュポン等の化学メーカーの研究開発が進み、技術開発水準は極めて高い。
	産業技術力	○	→	バイオエタノールは大手穀物メジャーと連携し、国家戦略により大規模エタノール製造工場が建設され、産業技術力は高度に成長したが、リーマンショック以降国の補助金が減額され、倒産する会社も出てきている。バイオマス燃焼発電も一般に商業化されており産業競争力も有している。
欧州	研究水準	◎	↑	欧州では、バイオエタノールよりも脂肪酸エステルや木質バイオマスガス化ガスからのバイオ燃料合成等の研究が行われている。研究水準は低くはないが、工業化に向いている。
	技術開発水準	◎	→	ガス化発電、メタン発酵(発電、熱利用)いずれも技術開発力は非常に高い。日米とは異なり、欧州はバイオディーゼルの需要がガソリンに比べて非常に高いが、従来型の脂肪酸メチルエステル化に代わる第2世代のバイオディーゼルの開発が進められている。また、今後欧州でもエタノールの利用の拡大も予測されており、リグノセルロースからのバイオエタノール生産に必要な糖化酵素を生産・販売しているノボザイム(デンマーク)等もあり、バイオエタノール生産技術開発も有望である。
	産業技術力	◎	→	バイオ燃料、ETBEはすでに軽油・ガソリンに添加して販売されており、産業技術力は高い。ただし、バイオ燃料の消費量は鈍化しており、ドイツでは100%バイオディーゼルの消費量が落ち込んでいる。
中国	研究水準	○	↑	国策によりバイオエタノール生産量は大幅に増加しており、研究レベルも急速に欧米に追いついてきている。特に関連特許が非常に多い。国際会議での研究発表件数や国際誌への投稿論文数が増えている。
	技術開発水準	○	→	ハイテクではないが、穀物からのバイオエタノール生産技術を有している。バイオマス燃焼発電やガス化発電について開発を始めているという情報はないが、始めるとポテンシャルは大きい。技術的な詳細は明らかでないが、酵素を利用したBDF製造技術が実証されており、注目されている。
	産業技術力	△	↑	中国のバイオエタノール生産量は最近飽和しているが、それでも世界第3位、8%のシェアがある。豊富な穀物生産と安い人件費に支えられ価格競争力は大きい。バイオマスを利用した発電については、ほとんど手つかずの状態である。新型バイオエタノール(混合率85%)製造の研究を韓国企業と共同で実施している。簡易型のメタン発酵も多数実施されている。ローテクではあるが、バイオエネルギー導入には積極的である。

韓国	研究水準	○	↗	大学や国立機関を中心として研究が開始されている。バイオマスガス化発電については韓国電力研究所等の一部の研究機関で実施されている。最近韓国海洋研究院が海藻類からバイオエタノールを製造する技術を開発したと発表されている。
	技術開発水準	○	→	韓国は伝統的に木質バイオマスを家庭暖房に活用してきたが、都市ではこの伝統が失われてきている。しかし、バイオマスを利用する技術ポテンシャルは有している。バイオエタノールやバイオ燃料についてはわが国と同じ程度の段階である。今後数年間で大きな技術進展が予想される。
	産業技術力	△	↗	バイオディーゼル燃料に関しては年々生産量を増大している。また、海外でのバイオマス発電にも積極的である。
<p>全体コメント：                      暖房用バイオ燃料は、薪、木材チップ、ペレットが主流である。これらについては、特に欧州諸国では一次エネルギーの10%前後利用されている。今後は、下水汚泥を醗酵したバイオメタンの利用も増加するものと予想される。しかし、わが国ではこれらのバイオ燃料の利用は極めて少ない。その理由として、ガス、軽油によるインフラが既に整備されていること、バイオ燃料利用の経済性の低さ、利用システム整備の遅れ等が指摘される。また、バイオマス発電については、小規模な木質バイオマスガス化・ガスエンジン発電についてはここ10年間で大きく研究・開発が進んだが、実用化には燃料の確保を含めた経済性を克服することができず、普及には至っていない。平成21年末に農林水産省が森林・林業再生プランを発表し、世界でも豊富な森林国家である日本の新たな展開が開くものと期待できる。森林組合にも新たな取り組みが始められるようになり、豊富な木材を利用したバイオマス利活用の取り組みが出てくる環境が整い始めた。平成24年度から開始が予定される再生可能エネルギー全量買取制度次第では、発電需要も大きくなっていく可能性がある。大規模利用としては、既設の石炭火力発電所に木材チップを石炭に混合して燃焼利用する混焼発電が注目されており、効率的にも経済的にも最も適当な利用方法であると考えられる。既に四国電力、中国電力、関西電力が同社の石炭火力において実施している他、他電力でも実施を計画している。また乾燥下水汚泥を石炭火力で利用する試みが東京都で始められている。これらのことから、わが国のバイオ燃料による暖房・バイオマス発電は、技術的にほぼ確立したと言える。今後は、経済性を改善して、公的な補助金なしに成り立つシステムを構築し、政府・地方自治体等による利用システムをいかに推進していくかが重要である。</p> <p>一方、セルロース系バイオマスからのバイオエタノール生産に関する研究も強力に進められている。アメリカを中心に産学官が中心となって、ナショナルプロジェクトが立ち上がっている。日本でも同様にナショナルプロジェクトが立ち上がっており、また欧州でもバイオディーゼルとともにバイオエタノール需要が増大している。また、アジアでも食料由来の原料からのエタノール発酵が主体ではあるが、中国やタイ他でも同様にバイオエタノールの研究開発が進められている。このように世界的なバイオエタノールの技術開発に関しては当分の間このまま推移すると予測される。また、ジャトロファを原料としたバイオディーゼル生産も徐々に拡大している。</p>				

(参考情報)

- [1] 中国の再生可能エネルギー中長期発展計画、IEEJ (2006/11)
- [2] 天地人 2009年7月号、RIHN=China Newsletter、(2009/7)
- [3] 中国におけるバイオエタノールの実用化、立命館国際地域研究 (2010/3)
- [4] 韓国のバイオ燃料動向<バイオ燃料>、PISAP ミニレポート (2008/2)
- [5] バイオマス発電の最新技術、シーエムシー出版 (2006/7)
- [6] バイオ液体燃料、NTS (2007/6)
- [7] バイオマスからの気体燃料製造とそのエネルギー利用、NTS (2007/10)

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(5) バイオリファイナリー

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	固体触媒によるリグノセルロース分解とグリセリン水素化の研究が世界をリードしている。セルロース分解について、北大は担持金属触媒によるソルビトール合成と加水分解によるグルコース合成を報告し、化成品・プラスチック原料への展開を図っている。また、東工大は固定化スルホン酸触媒によるセルロースの加水分解を報告している。さらに、これらのグループは、触媒技術が実バイオマス分解にも有効であることを示している。リグニン分解では、産総研からの高温熱水によるガス化の報告や、北大がリグニンのモデル化合物を触媒分解し、フェノール樹脂合成をめざして研究を進めている。グリセリン水素化では、東北大と千葉大が 1,2- および 1,3- プロパンジオールの合成法を発表している。1,2-プロパンジオールについては高性能触媒が発表され研究が出揃った感があり、次のターゲットは 1,3-プロパンジオール合成である。得られたジオールはポリエステルへの利用が期待されている。
	技術開発水準	○	↑	触媒法セルロース分解に関して産学から多数の特許が出願されており他国をリードしている。また、リグノセルロースからのリグノフェノールの製造方法に関し、実証プラントが建設されている。
	産業技術力	-	-	酵素法・バイオ触媒法によるバイオリファイナリーの研究開発は既に行われているが、市場形成には至っていない。固体触媒法は研究開発の段階にあり、産学連携の緒についたばかりであるため、生産に要する技術レベルには達していない。
米国	研究水準	◎	↑	ウィスコンシン大学 Dumesic とマサチューセッツ大学 Huber が、水相改質法により、セルロースや糖を水中で触媒分解してガソリンやプラスチック原料を合成する反応を行っている。しかし、化学工学的な研究が中心で、バイオマスから水素、燃料および化成品原料を得ることを優先している。従って、鍵となる触媒は市販品や既存のものを組み合わせて使っており、新規触媒の開発という面では遅れている。一方、イオン液体にセルロースを溶解し、触媒分解させる研究もパシフィックノースウェスト国立研がエネルギー省のプロジェクトとして行なっている。油脂からのバイオディーゼル合成は、アイオワ州立大学などで固体塩基触媒を用いて行われている。
	技術開発水準	○	↑	戦略目標として 2030 年にバイオマス由来製品のシェア 25% を掲げ、エネルギー省を中心として技術開発が推進されている。特に、セルロースを多段分解し、燃料やオレフィンを合成する技術への関心が高い。Dumesic は、本戦略に基づいた触媒反応プロセスについて、バレロラクトンを経由したアルカン合成法などを提案している。バイオディーゼルはアイオワのベンチャー企業 Catilin 社がメソ多孔体を材料にした触媒を開発した。
	産業技術力	-	-	可食バイオマスからのバイオエタノールおよび油脂からのバイオディーゼルは市場投入されているが、非可食バイオマスからの化学品合成については、市場形成には至っていない。しかし、大学発ベンチャー企業も多く設立されており、近く生産に要する技術レベルに達して市場投入してくる可能性は高い。
欧州	研究水準	○	↑	セルロース分解については、日本・中国の後を追って触媒開発競争に参入。ドイツ・マックスプランク研 Schüth らはスルホン酸固定化樹脂触媒によるイオン液体中でのセルロースからオリゴ糖への加水分解を行い、ベルギー・カトリック大学ルーベン校 Sels らは活性炭担持ニッケル触媒によるソルビトールへの水素化分解を報告している。一方、リグニン分解ではモデル化合物を用いた脱酸素水素化について、ドイツ・ミュンヘン工科大学 Lercher が早くから研究を行っている。また、オランダ・ユトレヒト大学 Weckhuysen は触媒法リグニン分解の体系的な研究を開始している。
	技術開発水準	○	↑	欧州は環境意識が高いため、既にバイオマス固体燃料などが精力的に利用されている。欧州研究開発フレームワークプログラム (FP7) にてリグノセルロース利活用技術開発 (主に燃料合成) が、産学連携で推進されるものと推測される。
	産業技術力	-	-	技術開発水準に同じ。

中国	研究水準	△	↗	大連化学物理研究所 Zhang らによる炭化タングステン触媒によるセルロースからのエチレングリコール直接合成、北京大学 Kou らによるリグニン水素化分解によるアルカン合成を除けば、現状ではまだ後追い研究が中心である。しかし、新規性・独創性はともかく、速やかに他国の研究を追試・最適化して高い反応成績を示していることは、注目する必要がある。
	技術開発水準	△	→	研究と同様に急速に追従してくる可能性がある。中国科学院大連化学物理研究所は、欧州の研究機関・企業（例えば BP 社）との連携を強めており、共同研究プロジェクトとしてバイオリファイナリーを行っている。
	産業技術力	-	-	技術開発水準に同じ
韓国	研究水準	×	→	超臨界水や固体酸触媒によるリグノセルロースの変換やバイオディーゼル合成の研究はあるが、特筆すべきものは少ない。
	技術開発水準	△	→	
	産業技術力	-	-	
<p>全体コメント：</p> <p>米国および欧州で、石油代替資源の利用のために触媒法バイオマス変換が挑戦的課題として取り上げられている。なかでも、これまで未利用だった非食料リグノセルロースの分解が注目され、研究競争が激化している。セルロースの加水分解ならびに水素化分解は日本発の技術であるが、各国が急速に追いついてきた。実用化のためには、一層の生産効率の向上が求められるが、数年先の可能性もある。一方、リグニン利用としては、リグノフェノールからポリマー様材料への展開の他に、ごく最近、化学品原料への分解に関する研究が開始された状況である。リグニンから燃料用アルカンの合成は中国・欧州が先んじたが、樹脂原料としてのフェノール類合成は日本が先行した。グリセリンの水素化分解の研究においても、日本の触媒技術が先行している。リグノセルロースの利活用に対する関心は高く、国際的な競争はさらに激化すると推測される。</p>				

(参考情報)

- [1] Chemicals Industry Catalysis Workshop Report, <http://www.ccrhq.org/vision2020/catalysis>
- [2] Future Perspectives in Catalysis, [http://www.nrsr-catalysis.nl/files/media/scientific\\_reports/Future\\_perspectives\\_in\\_Catalysis.pdf](http://www.nrsr-catalysis.nl/files/media/scientific_reports/Future_perspectives_in_Catalysis.pdf)
- [3] 小林、福岡、“木質バイオマスからの糖誘導体の合成”、ペトロテック、2011年1月号
- [4] S. Van de Vyver, J. Geboers, P. A. Jacobs, B. F. Sels, *ChemCatChem*, in press, doi: 10.1002/cctc.201000302.
- [5] J. Zakzeski, P. C. A. Bruijninx, A. L. Jongerius, B. M. Weckhuysen, *Chemical Reviews*, 110 (6), 3552-3599 (2010).

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

(6) 新電池・キャパシタ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	民生用機器の高性能化のため活物質の高容量化で最も熾烈な競争が行われている。高容量材料としてLi過剰系、固溶体系などの試みはあるがまだ実用化までは時間がかかると思われる。電池討論会での発表件数が年々増加しているように、電池開発のすそ野がまだ広がりがつつある。ただし、劣化や安全性のメカニズムの解析など既存電池の改良面が多く新規電池システムの研究はRISINGプロジェクトなどに期待するところであるが、Li/SやLi/Airなどまだ実現には程遠いテーマしかないのが現状といえる。リチウムイオンキャパシタの進展は目覚ましい。欧米に比する高インパクトな研究成果を出すには、じっくり基礎を固める必要がある。
	技術開発水準	◎	↑	技術開発が化学メーカーや金属メーカーなど広範囲にひろがり、全般に日本の技術開発力はトップレベルにはあるが、現状のままでは相対的にレベルが下がるおそれがある。生産規模で韓国・中国の追い上げが激しく価格競争では優位な立場を維持できていない。このため新規用途として自動車、産業用への展開が急務であるがこれも日本特有のものでなく競争は激化している。材料メーカーの研究開発能力が製品性能を大きく左右するため、材料メーカーと電池メーカーの協力が欠かせない。
	産業技術力	◎	↑	全般に日本の産業技術力はトップレベルにあるとは言えるが、中国、韓国の激しい追い上げにより、コスト面などでの競争が大変厳しくなっている。
米国	研究水準	◎	↑	日本と異なり研究は大学や国立研究機関が主体。そのため製品化に必要な作り込みよりも新材料などの提案で日本を上回る。リチウムイオン電池材料のリチウムコバルト酸化物やオリビン材料がGoodenoughによって提案されたのもこのような研究体制のもとと思われる。ただしその後の性能向上では米国内に主要な電池メーカーが育たないことから日本の後追的な研究も多い。グリーンニューディールで海外のメーカーの米国への工場誘致などの施策がこの状況を大きく変える可能性もある。2009/11に米中EVイニシアティブを締結。オリビン、ラミネート電池など日本と異なる方向に注力。次世代電池材料の開発状況とデファクトスタンダード次第では基礎研究と商業化で世界のトップになる可能性がある。
	技術開発水準	○	↑	層状酸化物では日本の後塵を拝したが、オリビンを用いた自動車、産業用電池では有利に進めている。日本のような電池産業の強力な大企業が存在しない反面、次世代材料のベンチャー企業化では先行している。
	産業技術力	△	↑	経済再生再投資法資金で韓国LGなど海外メーカー特を誘致した結果、最大消費国の利点も生かし、有利なポジションになる可能性がある。
欧州	研究水準	◎	↑	米国と同じく大学や国立研究機関の活動が中心。トップクラス研究者が基礎レベルで世界を牽引する成果を出している。フランスのポリマー電解質電池やLi/SO <sub>2</sub> 電池のように特色ある研究は欧州からスタートしたものが多く、今の主流の電池系では劣化メカニズムの解析などの詳細研究が多い。今のところポストリチウムなどの目新しい研究成果はない。EU、ドイツ、フランスがEV、電力貯蔵の国家プロジェクトを進めている。
	技術開発水準	△	→	有力な電池メーカーが育っていないこともあり、電池の製品化に関する技術はそれほど進んでいない。
	産業技術力	△	→	主要電池メーカーが存在せず、産業としての競争力は劣る。中国との連携などによってシステム化では有利に進める可能性がある。
中国	研究水準	○	↑	日本や米国での大学や企業での経験者も多く、また国を挙げて電池開発に力をいれていることもあり、技術レベルが急上昇している。電池性能向上の手法は日本で提案された考えに基づくものが多いが、既存分野では性能よりも価格を優先した結果のシェア増加に伴い研究水準も向上している。学会発表や論文も日本を上回り、急速に競争力をつけている。
	技術開発水準	○	↑	国策として電池開発を強化しており急速に力をつけている。電動バイク、電気自動車など新規用途においても国内消費が旺盛なため実用化研究が一気に進展する可能性がある。2009/11の米中EVイニシアティブで米国とのオリビン系電池での協調も脅威的である。
	産業技術力	○	↑	特に主要用途の民生用電池では価格競争力を武器に市場シェアを伸ばしている。国内が最大の消費地であるため、生産数量を国内消費で高め産業競争力も培われる。

韓国	研究水準	○	↑	サムソン、LG、SKC など国内企業が収益性高く電池事業を行っており、研究開発への投資も強化されて急速に力をつけている。技術開発の方向は日本や米国で提案された手法を踏襲したものが多くが実用研究での成果はすでに日本を凌駕している部分もある。日本の競争力が衰えるのに従い人材流出もあり、急速に競争力を高めていると言える。IMLBなどの海外での電池関連学会での報告も非常に増加している。
	技術開発水準	◎	↑	国策としての電池開発強化のもとでの電池メーカーの成長により開発水準も年々向上し、急速に力をつけている。
	産業技術力	◎	↑	ウオン安など経済環境の効果などにより市場シェアが増大し、半導体産業での成功体験なども踏まえて産業競争力が向上、日本の強力なライバルである。

全体コメント：

新電池・キャパシタ分野は、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拡大しつつあり、また高信頼性、高出力特性など要求される性能が上がっていて、世界各国でのナノテクを用いた革新的な技術開発、高性能電極材料の発見、特許を基にしたベンチャー企業化など、国際競争が激化している。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、容量や信頼性に優れた新型電池の市場投入を目指した激しい開発競争が繰り広げられている。

基礎研究は、このような社会的情勢を背景として先進各国で大きく進展し、論文数や研究者数も増加している。世界的な潮流を作る基礎科学研究、特に端緒を開くインパクトの高い研究成果、すなわち新しい電極材料の開発、インターカレーション反応や相変化型電極反応などの固体電気化学として新しい現象の発見などは依然欧米の研究機関から出ており、その意味で基礎研究レベルは欧米がトップレベルと言える。なかでも英米独仏の4カ国が傑出しているが、数人のトップ研究者が *nature*, *science* に多数の論文を掲載しこの研究分野の世界的な潮流を形成している。日本は基礎・応用と広いスペクトルの研究を行っており総合評価ではトップレベルと言えるが、中韓も激しい価格競争のもとでの事業拡大を背景に研究開発レベルも向上させ、確実にキャッチアップしている。

産業的な観点にたつと、新しい電池系による高容量化研究が必ずしも民生用電池の製品化に結びついていないとは言えない。長期的に性能面で有利とも言われている酸化物/炭素系は、標準化に注意を要する。また、米中は2009年にこれから期待される自動車、産業用途でEVイニシアティブを締結し、オリビンやラミネート電池など、日本の方向性とは異なる電池開発を進めようとしている。ポストリチウムの研究開発が注目されているが、Li/空気、Li/Sが本命になるかどうかは不透明である。なお、海外では大学や国立研究所と企業の技術開発との連携が多いのに比べて、日本は個別の研究開発の傾向が強い。国内企業間競争よりも国際競争力の強化に力点を置く開発を、ポストリチウムに限らずより広い電池系で行う戦略が重要と考えられる。

(注1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(7) 熱電変換素子

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	新規物質開発が盛んに行われている。酸化物、スクッテルライトなど新しい物質ルートの開拓での貢献は大きい。ナノ構造化による特性向上の研究でも、活発な動きが目立つようになってきた。高インパクトファクタージャーナルの掲載数が増加。有名国立大学、私立大学等の研究者数が増加。
	技術開発水準	◎	↑	環境技術への積極的投資の一環として、大手の電機・化学・自動車などのメーカーが着実に技術開発を進め、産学連携のチャンネルを使いながら排熱回収の熱電モジュールの開発を手掛けている。自動車、電機メーカー等が材料メーカーの新規参入も増えつつあり、熱電モジュール、システムの用途に広がりが出てきた。産官学連携が弱い。
	産業技術力	○	→	比較的小規模の専門メーカーでペルチエ素子を扱っている。材料メーカーの参入が相次いでいる。新規材料によるデバイス、モジュールの製造も盛んになり、ベンチャー企業も誕生した。工業炉を持つ素材メーカーが注目し、熱回収装置の導入を検討し始めた。新産業起業へのサポートが必要。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究レベルでは、新しいメカニズムの提唱が目立ち、特に、薄膜超格子構造やナノ構造などのアプローチで研究を先導している。全体的に高水準は保っているが、基礎研究レベルのアクティビティが若干落ち気味で、オリジナル論文数が2,3年前に比べて減少傾向。
	技術開発水準	◎	↑	従前からの小規模メーカーに加えてベンチャー企業が増えた。新材料を応用したデバイス・モジュール技術が着実に進歩している。自動車廃熱、宇宙応用のプロジェクトが走り、自動車用熱電デバイスの開発が技術水準の向上に大きく寄与している。
	産業技術力	○	↑	ペルチエ素子では、比較的小規模の専門製造メーカーがある。また、自動車メーカー、自動車部品メーカー、その他の輸送機械メーカーなどがDOEプロジェクトに参画して技術力をアップさせている。
欧州	研究水準	◎	↑	ロシア、ウクライナ等の東欧からドイツ、フランスなどに主役の座が移り、新材料開発のアクティビティが上がっており、日米とほぼ肩を並べている。環境技術の志向が強いドイツイなどでは、今後さらにこの傾向は高まると思われる。スイス、オランダ等の参入もある。EU北大西洋地区（英、仏、西、葡）でエネルギー材料に関する大学・研究所間の共同研究が目論まれており、熱電変換材料も重要なターゲットになっている。
	技術開発水準	◎	↑	日米と比べるとプロジェクトの立ち上がりは今一つと思われたが、最近フラウンホーファー研究機構を中心とするプロジェクトがドイツで動き始めるなど、技術開発面でも活発な動きがある。ドイツを中心に自動車応用の技術開発が進んでいる。2010年ベルリンで開かれた国際会議“Thermoelectrics goes Automotive”には数多くの自動車関連企業が参加。
	産業技術力	○	↑	ペルチエ素子の分野では、ロシア、ウクライナ等のモジュールメーカーが世界市場で活躍している。最近、ドイツのフラウンホーファー研究所を軸に様々な企業が連携して技術力をアップしてきている。
中国	研究水準	◎	↑	2010年の熱電国際会議を主催したことからもわかるように極めて活発に研究活動が行われ、大学、科学院研究所に熱電研究者が急速に増え、またアメリカとの連携を通して研究は国際水準に達している。材料開発に強く、ますます存在感が大きくなってきているが、物質系やアプローチなどでは後追いも目立ち、独自性が打ち出せるまでにはもう少し時間が必要か。
	技術開発水準	○	↑	ペルチエ素子の製造会社が担い手となり、活発な基礎研究との連携も技術開発の流れを加速すると予想される。CO <sub>2</sub> 排出削減、太陽エネルギー利用等での技術が今後さらに伸びていくであろう。また、自前で宇宙開発を行っているため、これに用いる熱電技術の開発も独自路線で進める可能性がある。
	産業技術力	○	→	ペルチエ素子メーカーが多く存在し世界市場で活躍しているが、今のところはまだ品質に劣る。しかし、今後は大学、研究所等と共同で製品開発を行い、急速に技術力が伸びるものと予想される。

韓国	研究水準	○	↗	大学、研究所の研究者も増え、一定の存在感を示している。理論研究もレベルが高くなり、新材料系の発見もでてきた。韓国の熱電研究の歴史は新しいが、2年前から熱電変換材料の国家プロジェクト（9年間）が始まり、力をつけ始めた。最近ではサムソンがInSe系の高効率熱電材料を発表するなど企業の参入も目につくが、まだ基礎研究にとどまっている印象。
	技術開発水準	○	→	現在進行中の国家プロジェクトの後半では、企業が中心になって実用化を目指す研究開発を行うことになるが、そこには韓国の大手有名企業の多くが参加する。かなりのスピードで技術開発が進むであろう。
	産業技術力	△	→	製造・販売するメーカーはまだなく、実際の製品はほとんど輸入に頼っているようであるが、大手材料・エレクトロニクス系企業が研究参入を始めているので、いずれ育ってくるのは間違いない。

全体コメント：

熱電変換技術には、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技術と、電流によって冷却する（ペルチエ効果）技術があり、エネルギー・環境技術の重要な要素として期待が大きい。例えば、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計り知れず、ペルチエ冷却は脱フロンの冷却を可能にする。熱電変換に用いられる材料を熱電変換材料といい、一般的には半導体材料が用いられる。これまで米国、欧州、日本が熱電科学技術の進歩を引っ張ってきたが、ここ数年の間に中国、韓国が急速に研究人口を増やすとともに着実に実力をつけ、材料研究では日本のレベルを超える面も出てきている。産業技術力に関しては、古くから市場化しているペルチエ冷却と排熱回収・熱電発電技術を分けて考える必要がある。ペルチエ素子については日米や西ヨーロッパだけでなく、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いる。他方、極めて大きな市場が期待される排熱回収技術はまだ市場化していない。現在の材料の熱電変換性能（効率指数ZTで表される）が十分でないことが、市場化を阻む一因となっている。熱電モジュールとして素子化が可能でかつ、ZTが1を大きく超える材料の開発が喫緊の課題とされ、環境意識の高まりの後押しを受けて、排熱回収を目指した技術開発が世界的な規模で活発化しつつある。その鍵を握る材料研究では、最近15年間で新概念・新材料の研究開発が世界中で盛んになり、発表論文数、特許出願数も急激に増加している。国によってアプローチの重点に特徴があり、米国はナノ構造化、たとえば超格子薄膜やワイヤなどのアイデアで勝負する傾向が強く、日本を含むアジアやヨーロッパはどちらかというとバルク新材料の開発の重みが大きい。大規模な熱電産業が出現した場合、どこの国がリードすることになるのかは、今後の技術開発戦略に強く依存する。

(参考情報)

- [1] Journal of Electronic Materials 熱電特集号 (ICT2009 Proceedings)、2010.
- [2] MRS Spring Meeting 2010, 2010.4.5-9, San Francisco, USA
- [3] ICT 2010, 2010.5.30-6.3, Shanghai, China
- [4] AMEC-AFM 2010, 2010.6.28-7.1, Jeju, Korea
- [5] ENERMAT, 2010.11.2-3, Liverpool, UK
- [6] ICC-3, 2010.11.14-18, Osaka, Japan
- [7] 第27回日韓国際セラミックスセミナー、2010.11.24-26, Incheon, Korea

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(8) 超電導利用

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	学会レベルでの最近の研究発表は一時に比べると劣っているが、基礎物性、材料探索、超伝導デバイス、薄膜・厚膜・線材研究などでは、JST/S-イノベ、NEDOでの超電導関係のプロジェクトでの大学（東大、京大、九大、横国大、早稲田大など）やNIMSでの研究開発の推進、中部大学での200m直流超電導ケーブル試験線（ビスマス系高温超電導線）の構築といった着実な活動がなされている。
	技術開発水準	◎	→	JST/S-イノベ、およびケーブルの系統連係などNEDOでの超電導関係のプロジェクトにおける企業の研究開発（ケーブルなどの電力機器、モータ、NMR、加速器、SQUID）および東京電力グループの中長期成長宣言における超電導ケーブル技術の確立・導入のロードマップへの位置づけがなされている。さらに、超電導電気自動車や永久磁石の性能評価用高温超電導マグネットなどの開発が将来の商業化へ向かう。超伝導を用いたMRI装置技術では東芝、日立など、他国をリードしている。
	産業技術力	◎	→	特筆すべきは、ビスマス系高温超電導線の量産技術確立と国内外への線材供給である。そのほか、NMRによる物質構造解析分野、MRIによる生体細胞の画像診断分野、粒子線加速器による人体ガン治療分野、SQUID磁気センサーによる生体磁気計測・診断分野などの医療技術分野が着実に伸びている。
米国	研究水準	○	→	DOEなどの政府投資によるケーブルなどの電力機器開発において国立研究所や大学の研究開発を進めている。既に国の投資が長期間続き、主要なマイルストーンは達成したとして、2011年度からはイットリウム系高温超電導線開発予算大幅な削減によりactivity減少の可能性がある。
	技術開発水準	◎	→	DOEなどの政府投資によるケーブルなどの電力機器、モータ、MRIの研究開発など、超伝導パワー応用に関する実用化研究が着実に進行している。ただし、一部のケーブルプロジェクトへの政府ファンドは中止などの減少傾向が認められる。民間ベースでは5GW直流ケーブル系統連係計画(Tres Amigas)がある。
	産業技術力	◎	↑	従来型の材料でもポテンシャルは高く、国内と中国、韓国へのイットリウム系高温超電導線供給が注目に値する。高温超電導線材の量産技術も高いポテンシャルがあり、商用化が始まっているという意味では産業力は上昇傾向にあるといえる。
欧州	研究水準	○	↑	EUベース、ドイツ、イギリス、フランスなどのプロジェクト（ケーブルなど電力機器、船用モータ、発電機など）における大学、国立研究機関の研究開発など、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。
	技術開発水準	○	↑	EUベース、ドイツ、イギリス、フランスなどのプロジェクト（ケーブルなど電力機器、船用モータ、発電機など）における企業の研究開発 [8] および民間独自の高温超電導磁気式ビレットヒータの商業化 [9] など、各国で産業界の技術開発が行われているが、日米と比べると若干遅れている。高温超電導線材応用に関してはドイツが活発である。核融合実験炉(ITER)建設の拠点である仏を中心に欧州での技術開発力が増大することが予想される。
	産業技術力	△	→	まだ具体的な産業として世界に超電導線を供給できる技術水準には到達していない。
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。中国科学院を中心とする研究開発があり世界を先導するものではないものの、直流ケーブルのアルミ電解工場への適用など実用化への意識は高い。
	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。電力会社数社で、超伝導送電実証のためのプロジェクトが進められている。企業の研究開発としては、電力機器ではケーブル、減流器を系統導入をしている。[11]
	産業技術力	△	→	世界に超電導線を供給できる技術水準には到達していない
韓国	研究水準	○	↑	国から相当の研究資金が供給され、各地の大学にセンタが整備されるなど近年のレベルは向上している。KERI（電気研究院）を中心に政府ファンドによるケーブルなど電力機器、モータの研究開発を推進している。[12]
	技術開発水準	○	↑	超伝導パワー応用に関する実用化研究が着実に進行している。韓国電力研究院を中心に政府投資による企業の電力機器、重電を中心にモータの研究開発を推進している [12]。韓国電力では系統連係（ケーブル、限流器）を計画。
	産業技術力	○	→	世界に超電導線を供給できる技術水準には到達していないものの、政府投資により開発した技術を基に超電導線ベンチャーが出現している。[13] また、KEPCOが先導してケーブル開発を進めている。

## 全体コメント：

超電導利用技術には、超伝導材料 NbTi, Nb<sub>3</sub>Sn などを使った従来型の展開と、高温超伝導を市場に入れようとする流れがある。基礎理論、新材料探索などの分野は、従来と変わらず日米欧が研究をリードしている。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。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積極的ではない。ただし、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。韓国・中国は電力機器の超電導化を国が支援。超伝導パワー技術に関しては、韓国の参入が目立ってきている。超電導利用という面でも、日米欧が先陣を切り、中国・韓国が追いつこうとしている。日本は電力機器、輸送分野、医療機器、工場における高磁場磁石応用で欧米と互角の実績を作ってきた。中国・韓国も電力機器の系統連系に進むなど、日米欧の開発に触発され追いつこうとしている。日本発の超電導材料・線材化技術の結晶であり、既に工業製品化されたビスマス系超電導線を用いた応用製品の商業化・社会導入を進めるとともに、イットリウム系などの新材料の開発が期待されている。また、超電導応用にとっては、冷却技術の改良がさらなる商業利用を生み出すので、超電導本体ばかりに焦点を当てるのではなく、冷凍機などの冷却技術の研究開発の見直しも必要とされている。

## (参考情報)

- [1] 科学技術振興機構・産学イノベーション加速事業【戦略的イノベーション創出推進】, <http://www.jst.go.jp/s-innova/>
- [2] NEDO 第 1 回「高温超電導ケーブル実証プロジェクト」(中間評価) 分科会, <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/25/1/index.html> ほか
- [3] H. Yumura et al., Test results of a 30-m HTS cable pre-demonstration system in Yokohama project, *Physica C* 470, 2010, p.1558 ほか
- [4] 『東京電力グループ中長期成長宣言 2020 ビジョン』の策定について, <http://www.tepco.co.jp/cc/press/10091301-j.html> ほか
- [5] 中国での高温超電導直流電力ケーブルプロジェクトに高温超電導線を納入, 2010, [http://www.sei.co.jp/news/press/10/prs862\\_s.html](http://www.sei.co.jp/news/press/10/prs862_s.html) ほか
- [6] Advanced Cables and Conductors Program Peer Review Including High Temperature Superconductivity Research and Development June 29 - July 1, 2010, <http://www.htspeerreview.com/agenda.html> ほか
- [7] Department of Energy FY 2011 Congressional Budget Request, DOE/CF-0049, February 2010, Volume 3, p.528
- [8] P. Tixador, Development of superconducting power devices in Europe, *Physica C*, 2010, Vol. 470, p. 971 ほか
- [9] L. Masur et al., Magnetic Billet Heating, *Light Metal Age*, 2009, April, p.50
- [10] X. Liang et al., Design of a 380 m DC HTS Power Cable, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2010, VOL. 20, NO. 3, p.1259 ほか
- [11] <http://www.innopower.com/english/product.htm>
- [12] J.H. Lim et al., Results of KEPCO HTS cable system tests and design of hybrid cryogenic system, *Physica C*, 2010, Vol. 470, p.1597 ほか
- [13] [www.i-sunam.com](http://www.i-sunam.com)

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(9) 固体照明

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	世界で初めて GaN 系化合物半導体を実用化した前後から、研究開発水準は非常に高いレベルを維持している。2010年3月から、NEDOが新しいプロジェクト「次世代 LED/有機 EL 照明を実現するプロジェクト」を産学の15機関で開始し、2014年に、蛍光灯と比較して消費電力を半分にする発光効率で量産可能な次世代照明を実現するための基盤技術の確立を目指している。
	技術開発水準	○	→	2010年、LEDを使った照明器具が各社から多く提案されるようになった。LEDと照明メーカーは世界一多く、近年では技術のクロスライセンスも進み、企業の総合的な技術力は増している。
	産業技術力	◎	↑	2009年のLED電球の拡大以降、LED照明産業の急激な立ち上がりを見せており、2010年の省エネ法改正に伴い、業務用途でも導入が進んできている。LED照明製品の開発に先立って行われるべき、光源となるLEDモジュールの安全仕様や性能仕様の標準化作業が段階的に完了し始めている。LEDランプやLED照明器具の安全仕様や性能仕様の標準化も国際的な標準化と同調して準備しつつある。蛍光灯代替を目的とした直管形LEDランプに対しては安全性に配慮した業界団体規格を公開しLED照明普及を推進させる動きがある。
米国	研究水準	○	↑	GaN系発光デバイスに関して UCSB (カリフォルニア大学サンタバーバラ校) が米国内外の企業・研究機関との連携でLED、LDの性能向上に対して活動的である。また、エネルギー省(DOE)は市場導入を加速するため、ResearchからManufacturingまで広く支援を行っている。
	技術開発水準	○	↑	2010年は Philips Lumileds、CREE など、LEDチップの面積を広げて白色発光の発光効率を上げる動きが行われた。今後、さらにLEDチップの面積化が進み、既存光源に対してLED照明の発光効率が同等以上のレベルとなる見込み。今後は、低コスト化が進むと予測される。Energy Starの要求レベルが高かったが、2010年、GEが規格を満たす電球を提案した。
	産業技術力	◎	↑	LED光源の評価手順の標準化、LED照明器具の安全仕様、省エネルギー推進のための性能仕様を整備済みであり、LED照明製品の普及環境は整備されている。エネルギー省が推進する照明機器の市場調査対象にLED照明機器も盛り込まれ市場流通製品の実情を定期的にモニタリングする制度が機能しており、固体照明機器の性能向上を推進させる意図が読みとれる。
欧州	研究水準	○	→	有機ELに関するプロジェクトが継続している。2004年からの OLLA プロジェクトに続いて、2008年から予算12.5Mで実施する OLED100.EU では、2011年に100lm/W等为目标に、ヨーロッパでの一般照明に提供する技術開発を開始している。
	技術開発水準	○	→	Philips、Osram がLED照明商品の展開を推進している。PhilipsはLEDチップと蛍光体を分離した Remote Phosphor 方式の照明器具を提案している。有機ELに関してもサンプルレベルだが、今後1～2年での量産を行うとの表明がなされている。
	産業技術力	◎	↑	LED照明関連のIEC規格制定の中心的な活動を行い、固体照明機器の標準化整備に積極的である。LED関連機器のインターフェースの標準化促進を図る団体を運営するなどLED照明産業の発展に向けた活動を精力的に展開している。LED照明の特性を熟知しており、従来の口金を持つランプに代わるLED照明モジュールという新たなソリューションを提案することもできる。
中国	研究水準	○	↑	窒化物半導体の国際会議「Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2009」を2009年に開催。研究は、結晶成長、蛍光体、デバイスまで多岐にわたっており、研究の中心は、Peking Univ. Nanjing Univ. や、Chinese Academy of Sciences で、企業での研究も熱心である。中国文献では北京工業大学などでの GaN 系デバイス、白色発光用の蛍光体に関する研究等が発表されている。また、LED研究センター設立への投資も行われている。
	技術開発水準	○	↑	中国科学技術部は2009年に「10都市街灯普及プロジェクト計画(十城万盞)」を発表し、LED街灯を約200万基設置する計画。また、2015年までに半導体省エネ照明産業の拡大を掲げている。LEDへのシフトは国内の電力事情も影響していると見られる。
	産業技術力	○	↑	LED照明機器の生産拠点としての発展が目覚ましい。日本国内で販売されている電球形LEDランプの市場購入調査では、中国生産品の比率が最も高くなっている。

韓国	研究水準	○	↗	窒化物半導体の国際会議「Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2007」を2007年に、「International Conference on Nitride Semiconductor-8」を2009年に開催。研究は、結晶成長、蛍光体、デバイスまで多岐にわたっており、研究の中心は、Korea Polytechnic Univ. Hanyang Univ. Chonbun National Univ. や Korea Photonics Technology Institute で、企業での研究も熱心である。また、ETRI (韓国電子通信研究院) や企業での有機 EL の研究も進められており、各種展示会で試作品の展示が行われている。
	技術開発水準	○	↗	光州光技術院 (KOPTI) を中心として、国内4箇所に LED 技術支援センターを設置し、人材育成、技術開発を支援する体制を取っている。Samsung、LG、Seoul 半導体、等が LED チップから照明用デバイスの開発を進め、高輝度の LED の生産を行っている。また LED 照明器具の開発も積極的に行われており、日本への売り込みも図られている。
	産業技術力	◎	↗	政府が LED 照明産業を拡大すること、LED 照明器具比率を高める目標を設定している。規格面では、有機 EL を光源とする照明機器の安全仕様及び性能仕様を IEC 規格として提案するなど、独自製品開発技術があり独自の製品仕様を国際標準化提案することで、世界市場へ普及させるという国としての戦略を持っている。
台湾	研究水準	○	↗	窒化物半導体の国際会議「Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2005」を2005年に開催。研究は、結晶成長、蛍光体、デバイスまで多岐にわたっており、研究の中心は、National Taiwan Univ. National Cheng Kung Univ. National Chiao Tung Univ. や、Industrial Technology Research Institute で、企業での研究も熱心である。結晶成長に関する研究が活発。有機 EL は AUO が展示会で試作品の展示を行った。
	技術開発水準	◎	↗	現在、LED 生産量で世界一、生産能力第2位 (PIDA による) であり、固体照明にとって重要な位置を占める。台湾経済部エネルギー局の計画では、2014年には一般照明器具を淘汰して LED とし、さらに2015年には台湾を世界最大の LED 光源およびモジュールの供給国とする計画。
	産業技術力	◎	↗	計測や試験に関する規格整備が進んでおり、光源となる素子やデバイス類の生産拠点としての技術開発が主流とみられる。

全体コメント：

省エネ、CO<sub>2</sub> 排出量削減の取組みについては、グローバルで加速化してきており、照明分野において、その役割は固体照明が担うとの期待が大きい。また、世界的に見て日本は固体照明の技術開発を先導してきた経緯もあり、今後の取り組みに対する日本が果たす役割も重要となっている。一方、学会では、アメリカ、欧州で中心に標準化が進められており、アジアがこれに迫っているという構図であり、また産業界においては、LED 照明はまだコストが高く、労働集約型システムの中国・アジア諸国において生産拠点が集中化している状況にあり、必ずしも日本が期待通りリーダーシップを発揮している状況ではない。しかしながら、電気料金が比較的高い日本において、LED 照明はイニシャルコストを電気代、交換費用などの削減によるランニングコストで賄える可能性があり、2010年の省エネ法の改正以来、導入事例が増加してきている。産業界がまとまって省エネ、CO<sub>2</sub> 排出量削減を進め、ソーラーなどの創エネ技術との相乗効果を図ることにより、国際社会における牽引力が増すものと考えられる。

(参考資料)

- [1] LED 照明の適正使用ガイド (社団法人 日本電球工業会)
- [2] JISC8155 : 2010 一般照明用 LED モジュール性能要求事項
- [3] JEL801 : 2010 L 形ピン口金 GX16 t -5 付直管形 LED ランプシステム
- [4] UL8750 : Light Emitting Diode (LED) Equipment for Use in Lighting Products
- [5] [http://www.energystar.gov/ia/partners/manuf\\_res/downloads/IntegralLampsFINAL.pdf](http://www.energystar.gov/ia/partners/manuf_res/downloads/IntegralLampsFINAL.pdf)
- [6] <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/reports.html>
- [7] <http://www.zhagastandard.org/>
- [8] [http://philips.page-view.jp/LI\\_FortimoLED\\_2010/pageview/pageview.html#page\\_num=5](http://philips.page-view.jp/LI_FortimoLED_2010/pageview/pageview.html#page_num=5)
- [9] 電球形 LED ランプ購入調査報告書 (社団法人 日本電球工業会)
- [10] 34A/1420/NP : Organic light emitting diode (OLED) panels for general lightings < 50 V - Safety requirements
- [11] 34A/1421/NP : Organic light emitting diode (OLED) panels for general lightings < 50 V - Performance requirements

(註1) フェーズ [ 研究水準 : 大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準 : 企業における研究開発のレベル、産業技術力 : 企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↘ : 下降傾向 ]

(10) 高強度・軽量構造材料技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	鉄鋼、軽金属共に、ナノスケールでの微細組織化、ナノ材料の添加などで世界最高性能を誇る。炭素繊維は日本発の材料であり豊富な基礎知見を有する。
	技術開発水準	◎	→	高付加価値材料、高効率加工技術で欧米メジャーに対抗している。省エネ(温暖化ガス削減)型の加工技術も世界をリード。炭素繊維は性能、品質面で世界のトップを維持。
	産業技術力	◎	→	超高張力鋼は加工技術の進歩で自動車の強度部材に実用化されるようになった。資源(地金)を有しないハンディを、高品質の加工生産技術力でカバーしている。炭素繊維の世界シェアは70%を占める。
米国	研究水準	◎	→	航空・宇宙関連の研究所(Air Force office of Scientific Research, NASA)、大企業(Alcoa)研究所など、豊富な資力をバックに、ナノ構造制御した先端材料(軽金属材料、炭素繊維複合材料(CFRP)など)研究の先端を走る。
	技術開発水準	◎	→	航空機関連企業、軍事開発への連邦政府の援助、ベンチャー企業がまだ活発など、軽金属構造体、CFRP構造体の設計・応用で先端を走り、材料開発を牽引する。
	産業技術力	○	→	軍事含めた大きな市場規模に支えられた産業構造を有する。CFRPを含む先端軽量材料を適用した民間航空機を開発するが、部材の実製造は国外に依存しており、生産面で空洞化の傾向がある。
欧州	研究水準	◎	→	国家支援を受けた産・官・学連携プロジェクトの推進を軸に、軽金属材料(AL-Cu-Li合金等)、炭素繊維複合材料(CFRP)で先端を走る。国際標準化は圧倒的に強い。
	技術開発水準	◎	→	エアバスを始めとする航空機関連企業、自動車関連企業などが、国策で軽金属構造体、CFRP構造体の設計・応用で先端を走り、材料開発を牽引する。
	産業技術力	◎	→	欧州内での競争・棲み分け、多国籍企業化(ex. Rio Tinto Alcan)が進んでいる。生産拠点をアジア圏に移転する兆しが見え始めている。
中国	研究水準	△	↗	国家支援(豊富な資金)による研究者層の急速な増大に伴い、研究水準が向上している。
	技術開発水準	△	↗	海外からの技術移転により水準が急速に向上している。巨大な民需と軍需を有する。
	産業技術力	△	↗	海外からの生産拠点移転に伴い、汎用の大量生産技術力を保有している。たとえば、アルミの地金生産量は世界の1/3を占める。しかし、高性能な先端材料の生産化に必要な基盤技術(周辺技術)の整備が遅れている。汎用グレードであるが炭素繊維の製造を開始した。
韓国	研究水準	○	↗	国策(第二次科学技術基本計画)により基礎研究水準は向上してきている。
	技術開発水準	○	→	TWIP鋼の開発もあるが、際だった新材料、新プロセスの創出は少なく、現時点では追従型といえる。
	産業技術力	○	→	鉄鋼はコスト・環境面で競争力のあるFINEX工法を保有。FTAの推進に積極的であり、海外からの高性能先端材料(炭素繊維など)の生産移転が見込まれる。
<p>全体コメント：                      超高張力鋼は加工技術が進歩し、自動車の強度部材に実用化されるようになった。軽金属でもアルミニウム-銅-リチウム合金など軽量・高性能合金が創出され、ナノレベルでの超微細構造制御の時代に突入している。金属以外では炭素繊維複合材料(CFRP)が航空材用途を中心に量産高度化が進んでいる。自動車用材料では日本が世界をリードしているが、ニーズの変化もあり基礎研究は様子見の状況。先端軽量構造材料は、航空産業、軽金属メジャー企業を有する欧米が、依然として研究～産業技術力にわたり強いが、航空機部材の実製造は、日・韓・中などに移行している。また、ロシアは航空・宇宙産業、アルミニウム、チタン、CFRP技術も保有しており、今後の展開が注目される。</p>				

(注1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]



(11) 耐熱構造材料技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↑	ボイラ及び蒸気タービンを対象とした先進的超々臨界圧発電 (A-USC) プロジェクト (経産省) が 2008 年から、またその基盤材料研究プロジェクト (NEDO) が 2007 年から開始され、物質・材料研究機構 (NIMS) のフェライト系鋼、東工大でのオーステナイト系鋼等の基礎研究成果が見られる。1700℃級ガスタービン用 Ni 基および耐火金属の研究プロジェクトが NIMS を中心に実施されている。金属間化合物は基礎研究が主体である。耐熱材料の信頼性・寿命評価研究は基礎研究が主体となっている。
	技術開発水準	○	↑	欧米に約 10 年遅れて A-USC プロジェクト (経産省) が発足し、関係会社、機関が参加して 2008 年から研究を開始した。鉄鋼材料およびボイラ・タービン用 Ni 合金に我が国独自材を開発しており、着実に成果を挙げつつある。航空機、電力用 Ni 合金の開発も進められているが、欧米に比べれば遅れている。
	産業技術力	△	→	600℃級 USC 発電プラント用耐熱鉄鋼材料は世界をリードしているが、国内の新規建設が少ないこともありコスト面で欧米に対し劣勢。車両用、発電用等の大型部品製造において優れた技術を有する企業もあるが、付加価値の高い航空用等の Ni 合金の生産技術力は欧米に後れている。特に、粉末技術は皆無。
米国	研究水準	◎	→	USC の開発では先行しているが、大学、研究機関の基礎研究はほとんど見られない。航空機分野でも軍事応用を目的として古くから最も進んだ研究が行なわれている。近年も NASA を中心とした国家プロジェクト等によって高いレベルの研究が進められている。既存材料で製造した大型部材の評価研究が国立研究所 (ORNL) で実施されている。米国電力研究所 (EPRI) は、米国の電力関連金属材料開発プロジェクトの推進機関としてリーダーシップを発揮している。
	技術開発水準	◎	→	ボイラ・タービンメーカーが集まり、EPRI を中心にプロジェクト研究を推進している。メーカーは人材豊富であり、技術力は高い。軍のバックアップを受けた航空用途を中心に応用研究が進められている。コーティング技術や製造技術などの周辺技術に関する研究でも先行している。
	産業技術力	◎	→	Ni 合金や先進材料に関しては世界をリードする生産能力と技術力を有している。鉄鋼材料に関しては新規開発材に関する技術力は低く、欧州のメーカーに頼っている。
欧州	研究水準	◎	→	材料開発のための基礎研究は少ないが、材料評価研究では技術レベルが高く、欧州全体に研究者が散らばっており、層が厚い。先進的超々臨界圧発電 (A-USC) プロジェクトでも世界のトップを走っている。ULTMAT 等国家プロジェクトをもとに高いレベルの研究が進められている。大学や研究機関と産業界の連携が進んでおり、産業界から PhD プロジェクトとして、基礎研究に対して多くの支援がなされ、成果が活用されている。
	技術開発水準	◎	→	欧州の中に国を超えて企業が存在し、研究者の層が厚い。また、大学や研究機関との連携研究が多く、企業の技術開発水準の向上に寄与している。COST (Cooperation in Science and Technology) プロジェクトが長く続いており、これによって発電、エネルギー・環境関連の高い研究レベルが維持されている。A-USC プロジェクトは日米欧三極の中で最も進んでおり、実証プラントの建設に進む段階であるが、製造技術面の材料問題があり、その対策に迫られている。航空機関連の材料技術力は圧倒的に高いレベルを維持している。
	産業技術力	◎	→	英国、独国を中心に航空機等の付加価値の高い Ni 合金製品の生産で高い収益を上げており、産業技術力は極めて高い。発電用耐熱鋼の生産においても我が国の開発材を取り入れ、コスト面で優位にあり、中国、韓国の市場を取り込んである。また、一部欧州独自に開発した材料の生産とその実用化にも注力している。今後、発電用耐熱鋼の市場で我が国との競争が一層激化するとみられている。

中国	研究水準	△	↗	最近、A-USC 用材料の研究に注力し始めており、日欧米の研究者を招待した研究会やシンポジウムを中国国内で全土の関係技術者を集めて開催し、また欧米の発電用材料関係の国際会議に多くの研究者を派遣し技術吸収に努めている。米国機械学会のボイラ・圧力容器規格委員会への参加や事務局への研修生の派遣も行っている。独自の研究はないが、我が国の開発材の改良と称した研究、あるいは日米欧の研究論文をもとにした中国語論文が国内で発表されている。
	技術開発水準	△	↗	企業の研究開発情報はほとんどないが、軍のバックアップを受けた大学・研究所において航空機エンジンに用いるニッケル合金の自主開発を行っている。米国や日本で開発された高強度フェライト系鋼を多量に生産し、国内プラントや輸出プラントに使用している。ただし、規格に従って生産している状況で、規格外の材料技術ノウハウはまだないとみられる。
	産業技術力	△	↗	欧米企業の進出により、耐熱鋼を扱うボイラ・タービン工場の整備状況やレイアウトは日米欧の工場と大差なく、生産性が大きく向上している。精密鍛造技術や鍛造技術等において力をつけはじめている。また、技術者の技術に対する意識も急激に向上している。
韓国	研究水準	△	→	KIST (Korea Institute of Science and Technology) や KEPRI (Korea Electric Power Research Institute) など高温材料に関する限られた研究 (キャッチアップ) を行っているが、伝統的に高温材料に関する研究者は極めて少ない。電力からは研究よりも個々の実操業上の課題対応を求められており、研究までに発展させる機会が少ない。
	技術開発水準	△	↗	一部企業 (Doosan Heavy Industries & Construction) では、ボイラ・タービン用耐熱鋼の研究や、ガスタービンや原子力用 Ni 合金の研究を行っている。現在 600℃級 USC プラント建設のための技術開発を行っているが、A-USC の開発プロジェクト開始にも意欲を持っている。欧州との合弁会社 (Doosan Babcock、英国) を通じ、技術力の向上を図っている。
	産業技術力	△	↗	国家レベルでの産業競争力向上を図っており、今後プラント輸出に注力するとみられる。素材の生産は、タービン用部材の製造を除き行っておらず、日本や欧州に依存している。
<p>全体コメント： Fe 系合金では、先進的超々臨界圧発電 (A-USC) プロジェクトを通して活発に新規合金の開発が進められ、欧米の Ni 合金と競合しているが、溶接部劣化対策や長期寿命評価の課題がある。科学技術振興機構 (JST) が進める「先端的低炭素化技術開発事業」により、耐熱構造材料全体に新たな新規合金開発の機運が高まりつつある。Ni 合金は航空産業、軍需産業において戦略的な材料として位置づけられてきた経緯もあり、欧米が研究水準、技術開発水準、産業技術力の全てで先行している。一方で、日本は単結晶合金の研究分野で世界的に存在感を示しつつあり、発電タービン、ボイラ等の産業分野においても技術蓄積が進みつつある。TiAl などの金属間化合物も航空産業、軍需産業において戦略的な材料として位置づけられるが、日本は 1980 年代から積極的に研究開発に取り組み、研究水準では一時世界をリードしていたが、航空機への応用など本格的な実用化が始まった今、息切れ気味の感がある。今後、欧米レベルに技術水準を上げるためには、より付加価値の高い航空分野の産業育成等が必要と考えられる。中国は最近の論文発表件数が急増している。韓国ではまだ目立った動きはない。</p>				

(参考情報)

- [1] 物質材料研究機構・新世紀耐熱材料プロジェクト (<http://www.nims.go.jp/>)
- [2] NEDO・鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発事業 (<http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/bunkakai/21h/chuukan/8/1/gijiroku.pdf>)
- [3] IHPTET (Integrated High Performance Turbine Engine Technology) (<http://www.vtol.org/IHPTET.HTM>) , VAATE (Versatile Affordable Advanced Turbine Engine) (<http://www.wpafb.af.mil/news/story.asp?id=123036361>)
- [4] UEET (Ultra-Efficient Technology) (<http://www.grc.nasa.gov/WWW/RT/RT2000/2000/2100shaw.html>)
- [5] ULTMAT (<http://www.ultmat.onera.fr/>)
- [6] Thermie/AD700 (<https://projectweb.elsam-eng.com/AD700/default.aspx/>)

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(12) 分離膜

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↗	水処理膜に関しては膜技術の国家プロジェクトが進行しており、逆浸透膜の研究が活発化してきたが、欧米、中国、シンガポールで盛んになっている正浸透膜技術の研究がほとんど無いので、淡水化が実用化されると遅れる可能性がある。水処理プロセス技術の実用化研究が、官民あげて活発化しているが、世界の水処理プラント受注にはまだ遠い。新しいプロセス研究は欧米に劣る。燃料電池用高分子固体電解質膜は従来からのイオン交換膜の研究蓄積を引継ぎ高レベル。医療用の膜も透析膜や多孔質膜の研究レベルが比較的高い。ナノ空間を利用した分離膜の研究開発も行われている。
	技術開発水準	◎	→	水処理に関する逆浸透 (RO) 膜、NF 膜、多孔膜、イオン交換膜や、世界に先駆けて家庭用システムを実用化した燃料電池用高分子固体電解質膜はなど、技術開発水準は非常に高い。ただし、UF 膜、MF 膜の優位性は低下しており、韓国や中国に追い上げられている。医療用の膜についても透析膜や多孔質膜の技術開発水準は非常に高い。薬物徐放材料の技術開発水準は高いが、臨床研究が欧米に比べて劣っている。RO 膜においてはホウ素除去率や、透過水量の向上などにおいて世界最高の技術レベル。東洋紡績の中空糸型 RO 膜は耐汚染性に強く、サウジアラビアで 6 割以上の高シェア。
	産業技術力	◎	↗	水処理に関する産業技術力は非常に高い。ただし、製造コストが高いため、安価な中国製や韓国製に負けるケースも出てきた。特に、UF 膜、MF 膜の優位性が低下。膜プロセスの産業技術力は並みのレベルであるが向上傾向にある。医療用の膜についても透析膜や多孔質膜の産業技術力は非常に高い。日系メーカーは、RO 膜、NF 膜、水処理用濾過膜、イオン交換膜、人工透析膜、電池用セパレータ等広い分野で高いシェアを有する。
米国	研究水準	◎	↗	2008 年米国議会レベルで、ナノテク応用分野として水質改善が明記された結果、CNT やバイオミメティックスを淡水化技術に使用する研究が活発化。特に浸透膜の研究への関心が高く、例えば、無機粒子混合ポリアミド系逆浸透膜は実用化に向けた評価段階に。膜プロセス研究も高いレベルにあり、特に、エール大学等の正浸透膜研究やそのプロセス研究が盛ん。3 大学・20 企業による、膜のプロジェクト (MemFAST) は 2008 年開始。ナノファイバーを用いた研究もある。Hydration Technology Innovations (HTI) が開発した FO 用膜は FO の事実上の標準膜として多くの研究が行われている。
	技術開発水準	○	→	水処理に関する逆浸透膜、NF 膜、多孔膜、イオン交換膜の技術開発水準は並みのレベルである。膜プロセス技術開発は高いレベルにある。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の技術開発水準は非常に高い。Oasys Water はエール大学との共同研究成果として FO 用膜を販売開始した。
	産業技術力	◎	→	水処理に関する逆浸透膜、NF 膜、多孔膜、イオン交換膜や膜プロセスの産業技術力は比較的高い。燃料電池用高分子固体電解質膜の産業技術力も比較的高い。ダウ・ケミカルの RO 膜は世界市場の約 4 割を占める。Celgard はリチウム電池用セパレータにおいて世界で高いシェアを有する。IBM 社とサウジアラビアの国立研究機関である KACST (King Abdulaziz City for Science and Technology) は、2010 年太陽光発電を利用した淡水化プラントの建設に関して共同研究を開始した。
欧州	研究水準	○	↗	限外ろ過膜や精密ろ過膜の基礎研究レベルは高い。浸透膜を志向した、バイオミメティック膜の研究が進行している。新しい膜プロセス研究も比較的高レベル。燃料電池用高分子固体電解質膜は並みのレベルである。医療用の膜に関しては多孔質膜の研究レベルは比較的高い。Wetsus (オランダ) において水処理技術の研究が盛ん。
	技術開発水準	◎	↗	Statkraft (ノルウェー) は浸透圧発電システムの研究、Wetsus からスピンアウトして設立された Redstack (オランダ) は逆電気透析システムの研究が盛ん。水処理に関する逆浸透膜、NF 膜の技術開発水準はあまり高くないが、UF 膜や MF 膜の技術開発水準は高い。膜プロセス技術開発も高レベル。燃料電池用高分子固体電解質膜の技術開発水準も低い。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の技術開発水準は比較的高い。
	産業技術力	◎	↗	水処理に関する逆浸透膜、NF 膜の産業技術力は低い、UF 膜、MF 膜は市場で優位に立っている。膜プロセスの産業技術力は高レベルである。燃料電池用高分子固体電解質膜の産業技術力も高くない。医療用の膜に関しては透析膜や多孔質膜の産業技術力は比較的高い。Fresenius Medical Care (ドイツ) は人工透析膜で世界 No.1 シェア、Gambro (スウェーデン) は人工透析膜で世界 No.3 シェア、また、Membrana (Polypore に合併) は人工心肺用膜として世界トップシェアを占める。

中国	研究水準	○	↗	膜及び膜利用プロセス技術の研究開発が盛んに行われ、研究レベルは年々向上し、 <b>Journal of Membrane Science(JMS)</b> や <b>Desalination</b> などへの論文投稿数が増加している。水処理膜に関しては膜技術の大規模なプロジェクトを行い非常に活発でありレベルも向上してきた。燃料電池用高分子固体電解質膜も質が向上し、電解用イオン交換膜の国産化を目指している。医療用膜の研究レベルは低い。
	技術開発水準	○	↗	大学での膜研究が技術開発まで進み、さらに生産会社へと発展。技術レベルが年々極めてスピーディに向上している。ヴォントロン製 RO 膜で 99.8% の脱塩率の膜を達成するなど、水処理に関する膜の技術開発水準が海外技術導入等により向上してきた。今後東レと中国藍星グループが逆浸透 (RO) 膜などの製膜・組み立てを行う水処理事業の合弁会社 (TBMC 社) を設立するなど、この傾向が加速することが予測される。
	産業技術力	○	↗	UF、MF 膜メーカーは 100 社以上あり、一般に技術力は低い、低価格市場投入による競争の結果、少数ではあるが高レベルのメーカーが増加。ヴォントロンの 4 インチ型 RO 膜の国内シェアは約 3 割。膜利用プロセス技術は、海外企業との協力で確実に進歩。
韓国	研究水準	○	↗	JMS や <b>Desalination</b> などへの論文投稿数が増加し、盛んに膜研究が行われている。利用研究に重点がおかれているが、素材技術も向上してきている。なお 2006 年から 1,600 億ウォン (約 170 億円) の国費を投じ、膜を含む水処理の研究 SEAHERO (Seawater Engineering & Architecture of High Efficiency Reverse Osmosis) が進められている (期間: 5 年 8 ヶ月)。
	技術開発水準	○	↗	膜メーカーが技術開発及び生産をしている。海外の技術を導入して技術開発水準を上げて来ている。三星、LG などエレクトロニクスで成長した企業が水処理事業への参入を表明しており、間違いなく活発化している。
	産業技術力	◎	↗	日本の競争相手となりうる膜メーカーが出現しており、レベルも非常に高くなっている。新規参入企業は、M&A や技術導入を活発に行い、低コスト戦略で短期間で急成長する可能性がある。大手エンジニアリング会社の <b>Doosan</b> が世界のプラントを受注し、年々増えている。膜利用プロセス技術についても、公共事業を中心に韓国製の膜を使用するようになってきた。韓国第一の RO メーカー ( <b>Woonjing Chemical</b> ) は、低価格戦略の市場積極展開を進めている。
<p>全体コメント:</p> <p>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、現状の膜技術においては優位に立っている。しかし、UF 膜、MF 膜では中国や欧州の膜メーカーの優位性が高まっている。他方、将来を見据えた高機能膜創出研究は、欧米の大学・研究機関で継続されており、米国が大学及び企業を巻き込んで水処理膜の開発に大きな力を入れた成果が出始めている。そこで、日本では、膜利用プロセス技術においては、官民あげて技術開発を始めており、欧米巨大企業に対しオールジャパンで挑む体制作りを進めている。この他、シンガポールでは大学で水処理膜の研究が盛んであり、また最大の水処理会社 <b>Hyflux</b> が近年ビジネスを拡大するなど、活発に研究開発を行っている。なお、東レと中国藍星グループが逆浸透 (RO) 膜などの製膜・組み立てを行う水処理事業の合弁会社 (TBMC 社) を設立、東洋紡績がサウジアラビアで海水淡水化用逆浸透膜エレメントの製造・販売会社 (APD) を設立、さらに東レがシンガポールの大学内に <b>Toray Singapore Water Research Center (TSWRC)</b> を設立するなど、国を超えた研究開発が盛んになり、単純に国別に技術を比較するのが困難な状況になっている。</p>				

(参考情報)

- [1] [http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm\\_special/enefarm/about.html](http://home.tokyo-gas.co.jp/enefarm_special/enefarm/about.html)
- [2] ニューメンブレンテクノロジーシンポジウム 2010
- [3] [http://www.toyobo.co.jp/eco/csr/2005/eco\\_2\\_2.htm](http://www.toyobo.co.jp/eco/csr/2005/eco_2_2.htm)
- [4] [http://www.tx.ncsu.edu/alumni\\_visitors/wolf/text/winter2008/winter08.pdf](http://www.tx.ncsu.edu/alumni_visitors/wolf/text/winter2008/winter08.pdf)
- [5] <http://www.chem.stonybrook.edu/Churesearchc3>
- [6] [www.HTIwater.com](http://www.HTIwater.com)
- [7] <http://www.oasyswater.com/>
- [9] <http://www.celgard.com/>
- [10] <http://www.wetsus.nl/>
- [11] <http://www.statkraft.com/>
- [12] [http://www.fmc-ag.com/files/FME\\_At\\_A\\_Glance\\_2009\\_englisch.pdf](http://www.fmc-ag.com/files/FME_At_A_Glance_2009_englisch.pdf)
- [13] <http://www.polypore.jp/membrana/products03.html>
- [14] [http://www.cocn.jp/common/pdf/FM09\\_pd\\_kurihara\\_5.pdf](http://www.cocn.jp/common/pdf/FM09_pd_kurihara_5.pdf), *Desalination*, 238 (2009) 1-9.
- [15] <http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryo2010/siryo21/siryo1-2.pdf>
- [16] <http://www.hyflux.com/>

(註 1) フェーズ [ 研究水準: 大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準: 企業における研究開発のレベル、産業技術力: 企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗: 上昇傾向、→: 現状維持、↘: 下降傾向]

(13) 環境浄化用触媒

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	文科省元素戦略および NEDO 稀少元素代替材料開発に代表されるプロジェクトの推進の結果、自動車触媒分野におけるナノテクを導入した新材料開発および放射光など先端的分析手法による構造およびメカニズム解析が進展し、高い研究水準が保たれている。貴金属に続いてセリウムなどのレアアース節減の必要性が認識されるようになり、今後も引き続きレアメタル対策のための基礎研究が進展すると予測される。このほか、光触媒の研究が非常に活発で高水準を維持している。トヨタグループが、SPRING-8 に 2010 年より専用ビームラインを稼動、排ガス触媒開発や燃料電池用触媒に使用を開始した。
	技術開発水準	◎	↑	自動車メーカー各社ともガソリン車に関して独自技術による貴金属節減を達成しており、クリーンディーゼルやハイブリッドなど次世代パワーユニットへの対応に重心が移りつつある。これら次世代自動車用の触媒についても技術開発水準は高く、世界を先導している。技術革新を進めるために産学官の連携も盛んである。レアメタルである貴金属低減を目指し、文科省実施事業「元素戦略プロジェクト」では、(独)日本原子力研究開発機構/ダイハツ工業(株)/北興化学工業(株)/大阪大学、熊本大学/三井金属(株)、経済産業省実施事業「稀少金属代替材料開発プロジェクト」では、日産自動車(株)/電気通信大学/名古屋大学/早稲田大学[4]産官学のチームが課題採択されている。このほか、環境浄化用光触媒の技術開発水準が高いのも日本の特徴である。
	産業技術力	◎	↑	深刻な経済環境の悪化に対応したコスト低減のため技術改良が進み、世界的にも高い産業技術力を維持している。自動車メーカー各社ともガソリン車では貴金属節減対策を実用化し、ハイブリッド、アイドリングストップなど CO <sub>2</sub> 削減技術にいち早く対応した触媒技術が市場投入されている。ディーゼル車では尿素選択還元や NOx 吸着触媒などの既存技術だけでなく、ポスト新長期規制に対応する独自技術の実用化が進み、各社から尿素添加選択触媒還元触媒を搭載した車両の発売が続いている。廃触媒からの貴金属回収でも進展が見られ、米国に続き欧州からの回収が開始する。環境浄化用光触媒は既に生活、建築、土木の各分野で商用化されている。
米国	研究水準	△	→	水準が高い触媒の基礎研究の中でも、環境浄化用分野の研究は比較的少ない状況が続いている。自動車触媒および光触媒の研究が中心であるが、いずれの分野も日本に比べると劣勢である感は否めない。なお、リーマンショックから回復中であるが、直接雇用促進につながらない分野での研究開発は依然逆風。
	技術開発水準	△	→	米国自動車各社は、次世代自動車戦略として電気自動車、ハイブリッド車に注力しており、触媒技術開発に大きな技術革新はみられず、技術開発の国際競争力は低下。自動車産業の回復は遅れており、関連産業を含め開発資金が凍結。
	産業技術力	△	→	日本式生産方式の導入などにより技術力は向上しているが、触媒について独自技術の実用化は見られない。廃触媒からの貴金属回収は日欧に比べて進んでいる。オバマ政権によるグリーン・ニューディールは雇用創出を狙ったものであり、電気自動車を志向。2009年6月に経営破たんした GM の破産手続きは終了し新生 GM として業務開始、状況は改善に向かっているが産業技術力は低下。
欧州	研究水準	◎	↑	自動車触媒ではディーゼル車用の基礎研究が盛んで、新材料・新原理の創出は少ない反面、放射光等の大型研究施設を利用した反応メカニズム解析の水準は非常に高い。そのほかの特徴として、バイオ燃料合成、室内空気浄化および飲料水からの硝酸性窒素除去など水質改善を目的とした基礎研究が多く見られる。日米に比べて環境浄化用触媒の応用の裾野が広い。
	技術開発水準	◎	↑	尿素選択還元およびフィルターを中心とするクリーンディーゼル車関連の触媒開発が進んでいる。北欧を中心に豊富なバイオ資源の有効利用を図る技術開発も見られる。浄水および室内空気浄化の分野の実用化技術も進展している。
	産業技術力	◎	↑	経済環境の悪化と低価格なガソリン車に優遇した廃車奨励策により、大幅にディーゼル車の販売台数は低下したが、ディーゼルトラックだけでなく尿素添加選択触媒還元触媒を搭載した小型車両も発売され(メルセデス・ベンツ)、高い産業技術力を維持している。自動車触媒では独の自動車各社を中心に Euro6 対応のクリーンディーゼル用触媒を市場に投入しており、完成度は高い。JM, BASF, Umicore などの大手触媒メーカーは中国、ロシア、東欧などに自動車触媒用の新工場を展開している。排気規制の実施が日米に比べて遅かったため、欧州内での廃触媒からの貴金属回収はまだ遅れている。
中国	研究水準	△	↑	ナノ材料合成および環境触媒応用に関する基礎研究が急速に進展しており、量的にはすでに他国を圧倒する状況(日本の2倍以上)であるが、追従的なものが大半である。幅広い環境・エネルギー触媒分野全般の基礎研究が集中的に進められており、研究費投資額も年々増加している状況から、近い将来には脅威になり得る。
	技術開発水準	△	↑	追従的なものが多い上、基礎研究と実用化研究の間にギャップがあり、企業の技術開発水準は発展途上である。ただし、材料開発に限れば技術力をもつ国内メーカーも現れつつある。中国に拠点をもつ日欧系企業からの技術移転が進むつれ、潤沢な研究資金を背景に急速に技術水準が高まる可能性もある。
	産業技術力	△	↑	日欧系のメーカーの拠点多く、現状では独自技術の市場投入はみられない。先進国水準の自動車排気規制も始まり、数年内に急速に進展することが予測される。

韓国	研究水準	○	→	環境浄化触媒に関する基礎研究水準は高く、量的には日本の2/3程度である。自動車触媒はむしろ少なく、環境浄化用光触媒、水素製造、燃料電池関連触媒の研究が多く見られる。研究者の世代交代により若手の教授がリーダーシップを持って研究水準を押し上げているケースが多く見受けられ、今後、研究水準の急速な成長が期待される。
	技術開発水準	○	↗	自動車の国際シェアおよび品質向上に伴い、自動車触媒技術も進展していると考えられるが、独自技術は見られない。産官学連携によるサイエンスパークを各地で実現中。着実に技術開発力は向上しているものと思われる。
	産業技術力	○	↗	自動車触媒については海外依存度が高いが、国内メーカーも成長しており、中国など海外に拠点をもつメーカーも現れている。自動車の品質向上およびシェア拡大に伴って、直接最終製品に近い分野での産業技術力は着実に高まっている。ただし試薬・計測装置・解析機器などの基盤となる技術は日本製に依存している。
<p>全体コメント：                  自動車触媒に関しては、日欧の二強時代が続いている。触媒および触媒担体の新技術は依然として日本の自動車メーカーから発信されている場合が多い。とりわけ2000年頃から市場投入が始まった三元触媒の省貴金属技術に関しては、09年時点で日本の主要メーカー全てが実用化を果たすなど欧州に先んじている。クリーンディーゼルあるいは内燃機関を利用する次世代自動車用の触媒開発でも貴金属低減が課題になっており、この点に限れば日本が先行している。しかし、クリーンディーゼル技術全般の市場展開はディーゼル車割合が高い欧州がより優勢といえる。欧州は基礎研究でもディーゼルに関連する内容が多く、特に解析的研究では非常に研究水準が高い。また、欧州の技術開発はサプライヤー（触媒メーカー）がリードしている感がある。米国および韓国の自動車触媒は、日欧からの技術移転が主で独自色は依然として薄い。中国は基礎研究の量ではすでに世界一と言ってよいが、まだ追従的な内容が多い。しかし、ナノテクおよび物質合成分野の研究要素が非常に活発な上、日欧系の触媒メーカーが進出しており、技術移転が進めばいずれ脅威になる可能性が大きい。自動車触媒以外に目を向けると、排煙処理、空気清浄、浄水、光触媒、CO<sub>2</sub>有効利用などの研究があげられる。欧州では硝酸性窒素、有機溶剤などを対象とする浄水触媒の研究が多い。日本でも同様の問題は指摘されているが、飲料水水質基準が厳しくないことから、研究例も少ない。環境浄化を目的とする光触媒でも日本の基礎研究および技術開発ともに高い水準を保っているが、全世界的に研究が急速に活発化している。                  なお、2010年7月中国のレアアース輸出許可枠（EL）が削減され、触媒に使用しているセリウム（Ce）、ランタン（La）、ネオジム（Nd）、プラセオジム（Pr）などが高騰、原料確保が最重要課題となっている。貴金属使用量の低減だけでなく、レアアース使用量の低減も視野にいれた開発が必要な情勢である。</p>				

(参考情報)

- [1] <http://www.spring8.or.jp/pdf/ja/sp8-info/14-1-09/14-1-09-p40.pdf>
- [2] [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/19/07/07071217/001.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/19/07/07071217/001.pdf)
- [3] [http://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/20/09/08090307/002.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/09/08090307/002.htm)
- [4] <https://app3.infoc.nedo.go.jp/informations/koubo/press/EF/nedopress.2009-07-27.8101855847/>
- [5] Platinum & Palladium Survey 2010 GFMS 田中貴金属工業（株）、2010、P8
- [6] <http://www.meti.go.jp/press/20101005001/20101005001-2.pdf>
- [7] 触媒工業協会 <http://www.cmaj.jp/>
- [8] Platinum Today <http://www.platinum.matthey.com/>
- [9] Tech-on <http://techon.nikkeibp.co.jp/at/>
- [10] Applied Catalysis B: Environmental <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09263373>
- [11] Dieselnet <http://www.dieselnet.com/news/>
- [12] 光触媒NEDO海外レポート No.1063.
- [13] 光触媒工業会 <http://www.piaj.gr.jp/roller/>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

(14) 環境調和・リサイクル技術（回収技術・希少資源代替など）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	技術に関する基礎研究力では世界トップクラスであり、最近では希少資源代替技術に力点が置かれている。湿式プロセスは従事する研究者が少なく米国に劣るものの、高温処理プロセスは日本が強い。ナノ環境材料などのエコマテリアル開発に関する研究水準は高く欧米とほぼ同等。一方で、今後の資源制約社会に対応した技術開発は、資源に乏しい我が国の重要な課題だが、循環利用や希少元素の大幅代替を果たした例は未だ少ない。
	技術開発水準	◎	↑	高機能の基礎工業素材を省資源、省エネルギーで生産する技術は世界トップクラス。プリンコンシューマーのスクラップを効率的に利用する技術等での開発ポテンシャルも高い。RoHS 対応技術などエコマテリアルの具現化技術も優れている。一方、レアメタルリサイクル技術は平均的で、レアメタル消費大国として研究開発戦略に懸念あり。
	産業技術力	◎	→	既存産業インフラを用いたリサイクル技術の開発に強みを見せており、リサイクルの実効性を担保する上で重要なトレンドである。しかし社会システムとの連携がまだ不十分であり、資源有効利用の観点でのリサイクルはまだ十分に産業化されている部分が少ない。システム評価のソフト面は欧米に匹敵するレベルである。
米国	研究水準	○	↑	欧州同様、化学物質リスクについては配慮が進んでおり、環境モニタリングについての研究報告例は多い。WEEE 等の処理法としてハイドロプロセスは研究者も多く、先行している。豊富な水力発電による電力を念頭に置いた電気化学的方法による活性金属の製造など、次世代素材製造プロセス開発などは散見される。
	技術開発水準	○	↑	これまでは国の総意が環境調和に向いているとは言えず、産業、地域によって相当の差はあるものの、米国でもエコマテリアルへの関心が高まっている。特筆すべき技術開発は多くないが、白金ナノ結晶など、萌芽的な成果が幾つか認められる。ここ数年で著しく重要性が増してきた資源戦略に関連した物質フロー研究が Yale 大学を拠点として先行している。
	産業技術力	△	↑	米国特有の産業エコ技術として特筆すべきものはないが、回収技術などは経済原則に合うものを積極的に進めている。
欧州	研究水準	○	↑	化学物質リスクの観点が強く、ハード的要素研究よりも規制やリスク管理のシステム開発に力が注がれ、リサイクルシステム設計等のソフト面での研究が進んでいる。それを考慮したエコデザインなどの手法を通して製造技術に影響する可能性もある。北京オリンピック前後から世界的な資源需給について逼迫が増し、EU で先行している俯瞰的な物質フロー・ストック勘定に関するソフトウェアの研究では主導権を保つだろう。
	技術開発水準	○	→	化学物質リスクについて配慮が進んでおり、リスク管理としてのソフト面での水準は高い。それを技術開発に結び付ける面は弱い、規制と相まって規制元素フリーの材料開発が進むなど、WEEE の処理についてハードとソフトの両面から研究が進んでいる。下水汚泥等を対象とした有価資源回収には欧州全体で取り組んでいる。最近レアメタルに対しても <b>critical raw metals</b> を定め戦略的対応を開始している。
	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。一方、国ごとの産業技術力にはかなりの差が認められており、エコマテリアルの観点では英、独、仏の力が抜き出ている。特にイギリスは政府が産業界の研究開発をバックアップする姿勢を強めている。

中国	研究水準	○	↗	環境調和材料開発については総じてレベルは低かったが、一部の研究水準は非常に高くなってきている。例えば、清華大、アモイ大学、米国ジョージア工科大学の共同研究で見出された24面体ナノ白金結晶は、ナノ触媒材料として大きな注目を集めている。一般的に、中国の研究機関では環境関連要素研究が個別には活発に行われているが、有力な国内学術誌を持たないため、研究トレンド情報が掴みにくい。地域で発生した問題解決にあたる例が多いようである。
	技術開発水準	○	↗	高い経済成長、旺盛な消費マインドによって、中国版のRoHSやリサイクル法の整備などと合わせて、日本など外国の技術を導入して産業の中に組み込む取り組みが進められだし、回収できる資源、材料はよく回収されている。結果的にリサイクルは経済原理に則って活発に行われていると言えるが、注目すべき技術は特に見当たらない。
	産業技術力	△	↗	エコに対する重要性の認識、危機意識は確実に高まりつつあるが、産業面ではまだエコに力を向ける余裕はなく、環境規制対応、あるいはビジネスとして環境メカニズムに沿ったプロセス改善を行っているのが実態と思われる。むしろ中国国内の環境マーケットに向ける海外の関心が著しく高い。都市鉱山開発については、産業界のスローガンとして日本より積極的に取り組まれている。
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つかみにくい。特に研究トレンド全体を俯瞰する資料がハングルで書かれているものが多く、注意してウオッチする必要があると思われる。また、都市鉱山開発についても積極的な関心をもっており、国家プロジェクト化の準備が進められている。
	技術開発水準	△	↗	資源需給や国内外マーケットの状況は日本と類似しており、世界的な経済危機今後大きく影響する懸念が大きい。材料開発、プロセス開発のいずれにおいても日・欧・米には遅れている。ただし工業現場の技術者レベルは総じて高い。
	産業技術力	○	↗	数少ない大規模素材製造プロセスを利用したリサイクル技術が幾つか報告されているが、未だ主製品の製造に専念しているように思われる。一方で浄化技術などは中国に積極的な参入を行っている。

全体コメント：

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

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

(15) 環境センシング

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	化学センサやバイオセンサ、あるいは物理センサとしての圧電センサ材料の研究では、九州大学、バイオセンサとして九工大がグローバルなセンタ的役割を果たしている事から判るように、世界をリードしているが、今後、発展に繋がる外的要素（新規国家プロジェクト等）に乏しく、現状維持。
	技術開発水準	◎	↗	これまでの技術開発能力はトップを走っていることは間違いないが、上述の外的要因が乏しいことから判るように、技術開発のモチベーションに乏しい。ただし、水素等、新エネルギー関連のセンシング技術は急速な高まりを示している。
	産業技術力	◎	↘	これまでの日本のあらゆる技術力は、優秀なセンシング技術をその基盤の一つとしてきた。しかしながら、全般的な経済の衰えに対応して、センサの技術力も低下してきていることは否めない。
米国	研究水準	◎	↗	9.11 以来、安全・安心に対する国家的な後押しを背景に、基礎部門からの水準向上が著しい。テラヘルツ帯域の電磁波を用いた新しいセンシング技術や、電子鼻に代表されるスマートセンサ、マルチセンサの研究がとりわけ進んでいる。一方、センサに用いる材料研究は我が国に一步およばないものの、システム研究に牽引され、この分野の進展も著しい。
	技術開発水準	◎	↗	背景に 9.11 を抱えている事から軍事的側面が大きい。従って基礎的な技術開発も DARPA 等軍に關係する資金に依拠するところが大きい。
	産業技術力	○	→	環境センサの実用化に関しては軍事産業を除いては、企業サイドのモチベーションが必ずしも大きいとは言えない。民生的にはソフト面あるいはビジネスモデル的なシステムの実用化に注力しており、センサ材料あるいはデバイスに関しては国外と技術的な棲み分けをしているらしいがある。
欧州	研究水準	○	→	欧州に於いては要素技術開発のためのプロジェクトがいくつか進行している。仏では、伝統的に原子力を基礎としたセンサ研究がなされているが、センサ材料の観点からは注目に値する研究に乏しい。
	技術開発水準	○	→	基礎的研究側面が強い欧州では、環境センサの実用化を目指した技術開発が必ずしも活発であるとは言えない。ただし、圧倒的な基礎的データがノウハウとして活かされている例もいくつか散見される。後述の Biacore 社の成功は、技術的側面より、遺伝子とレセプターとの相互作用の膨大なデータによるところが多く、この部分はノウハウとしてはブラックボックスとして使用することが多い。
	産業技術力	△	↗	各国で言い得ることであるが、一般的な環境計測の用途範囲が大きくないことが問題となっている。例えば、企業あるいは地方自治体においては廃水や河川の重金属イオン濃度を必要に応じて測定しているが、このような環境計測の市場は小さく、企業はあまり興味を示さない。ただし、スウェーデンの Biacore 社のようなベンチャー的な企業の実立もある。この会社は表面プラズモン共鳴現象に基づくバイオセンサで圧倒的な技術を有していたが、現在は GE ヘルスケア バイオサイエンスの一事業部となっている。
中国	研究水準	×	↗	センサ用システム・材料への関心が低いため、その研究基盤は脆弱なものであると言わざるを得ない。ただし、圧電性評価に関しては、珪酸塩研究所の d33 メーターが準標準とも言えるような普及を見せていることから判るように、中国国内の環境への配慮が向上するにつれ、急速な進歩の可能性を秘めている。
	技術開発水準	—	—	情報がほとんど無く評価できない。
	産業技術力	—	—	情報がほとんど無く評価できない。

韓国	研究水準	△	↗	韓国はシステム的なキャッチアップは既に終了しており、その要素を構成するデバイス、材料の研究が急速に伸びてきている。センサ材料も同様の状況にあり、いち早く日本の環境センサ状況を把握しており、学理的にも既に、数年前の日本と同程度となっている。これは、近年の日本との共同研究、あるいは日本滞在の経験のある研究者が国内での地位を向上させていることと連動している。
	技術開発水準	—	—	情報がほとんど無く評価できない。
	産業技術力	—	—	情報がほとんど無く評価できない。
<p>全体コメント：</p> <p>環境センサの研究・技術開発は、日本、米国、欧州の三極に限られると考えて差し支えない。ただし、その研究開発方向には大きな違いがある。我が国は地震国であることから、震度評価に限らず構造物の破壊、火山性ガス検知といった自然災害を検知する技術開発に特徴があるが、米国では9.11以来のテロ対策に主眼が於かれている。欧州は、テロとともに食に対する安全・安心を確保に向けた開発がなされているとともに、バイオセンサに対する関心が強い。食の安全確保や新興病原体検知に対する要請は、日本でも急速に高まっており、この三極に共通な研究開発動向として、テラヘルツを用いたセンサへの関心が高まっている。</p> <p>以上の関心が産業的なイノベーションには必ずしも連動しないのが、センサに関わる技術開発の問題点である。関心は有ってもすぐに大きなマーケットを形成するわけではないため、経済的なメリットが見通せない。的確な施策が必要で、ひとつの試みとして文科省の「安全・安心科学技術プロジェクト」が平成19年度からスタートしている。</p> <p>経済的なメリットが希薄なことは、三極以外の地域で必ずしも環境センサに対する関心が高くないことの原因となっている。国の諸施策によりマーケット形成が促進され、結果的にグローバルな環境の改善に結びつくことが期待されている。</p>				

(参考情報)

[1] DARPA ホームページ、[http:// http://www.darpa.mil/](http://www.darpa.mil/)

[2] CEA ホームページ、<http://www.cea.fr/gb/>

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

### 1.1.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) 太陽電池

##### 結晶シリコン太陽電池

単結晶シリコン太陽電池では米国 Sun Power 社が 156mm 角セルで 24.2% を実現、また多結晶シリコン太陽電池では三菱電機が 19.3% を報告している。新興国の台頭、安価な CdTe 太陽電池の拡大などから産業界全体で高効率化競争に入っている。研究開発では特に欧州の研究機関が活発で各種要素技術の議論は変換効率 20% 以上のレベルで進められており、全体の底上げが進むと考えられる。また、欧米や、最近ではシンガポールなどでも、研究機関が産業界と共用の試作ラインを設置して、材料、装置などの周辺産業の技術開発もサポートする流れが顕著になっており、中国、新興国の企業もこのような欧州などの研究機関との結びつきを強めている。日本でも NEDO 技術開発プロジェクトで欧州との共同事業が 2011 年より開始される。太陽電池企業主体の技術開発は変わっておらず、国際競争力の向上に対する総合的かつ腰を据えた対応が望まれている。

##### CIGS 系太陽電池

CIGS 太陽電池は結晶 Si に対抗できる高性能の可能性を有する薄膜太陽電池として本格的な生産が始まっている。日本では、ソーラーフロンティア社が年産 1GW 規模の生産体制を整えつつあり、高性能化技術でも 30cm 角のサブモジュールで変換効率 16.5% を達成している。研究機関でもワイドギャップ材料や新セル構造の開発、フレキシブル太陽電池の開発が進められているなど、世界をリードする状況にある。しかしながら、日本の技術開発では、セル製造プロセスに関して、研究機関は多元蒸着法、産業はセレン化法と、異なった製造プロセスを前提に技術開発が進められており、折角の研究開発成果が実生産に反映されにくい状況になっている。

##### システム技術

最近の太陽光発電の普及拡大にともないドイツなどでは太陽光発電導入量が電力系統による連系許容限界に近づいている。太陽光発電の利用・運用では発電量が天候などにより変動するため、マイクロコンバーター、蓄電池、スマートグリッドなど「隣の技術分野との組み合わせ」が重要となり、幅広い技術分野を結集した総合的な取り組みが必要である。市場拡大が活発化している欧州ではこうした研究開発が活発化している。このような段階は日本でも早晚訪れるため今から準備を進めていくことが期待される。

(参考情報)

- [1] Sun Power : プレスリリース (2010,6.25)、第 35 回 IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (2010、7、ホノルル) において研究発表
- [2] 三菱電機 : プレスリリース (2010,2.11)
- [3] 昭和シェル石油 (櫛屋) : NEDO 技術開発機構、太陽光発電成果報告会 (2010 年 7 月、東京フォーラム)、第 25 回 EUPVSEC (2010 年 9 月、バレンシア) にて研究発表。

## (2) 燃料電池

### 燃料電池の基礎研究と実用化

近年、基礎研究に関しては、米国（DOE プロジェクトなど）、日本（NEDO プロジェクトなど）、また欧州においても研究コンソーシアムの下で、実用性を睨んだ研究が活発化している。例えば、開発する触媒、電解質材料を膜/電極接合体として、それらの材料や接合体多孔質構造の作動模擬条件での性能・耐久性、あるいは氷点下起動・低加湿条件運転の影響の実験的解析とシミュレーション解析、さらには電池特性への不純物の影響等の非常に多くの類似研究が実施されている。

他方、実用面では、日本で 2009 年度に世界で初めて家庭用燃料電池コジェネシステム「エネファーム」が実用・販売開始され、技術力の高さを示しているが、同年度中の販売実績は約 5000 台にとどまり、より一層の低コスト化が必要である。また日本では、ガスメーカーが中心となって 2010 年度に数十台規模の SOFC 実証試験を開始し、2011 年度を目途に各社が市場投入を目指して開発を続けており、家庭用据え置き電源・コジェネ利用においては世界をリードしている。欧米では、バックアップ電源、バッテリー充電電源、小型移動体など幅広い分野への商用化が進められており、家庭用コジェネ以外へのアプリケーション開発は、日本よりも活発に行われている。ドイツについては別に記す。韓国では 2010 年 4 月に POSCO が燃料電池製造工場に着工し、年間生産 100MW 規模を目指している。また、KEPCO 電力研究院が、SOFC 発電システムを開発し、試験運転を開始しており、実用化に向けた取り組みも着実に進展している。中国では、燃料電池自動車・バスなどが上海万博会場で運転された。燃料電池分野における近年の中国の論文数の増加の勢いはすさまじく、総合的には日米欧レベルに達していないが、今後の動向には注目すべきである。

### ドイツの動向

ドイツ連邦政府は 2007 年に 10 年プログラムである「水素・燃料電池技術革新国家プログラム」(NIP: National Innovationsprogramm Wasserstoff – und Brennstoffzellentechnologie) を立ち上げ、官民共同で累計 14 億ユーロを水素・燃料電池技術開発展開に当てるものとしている。半分の 7 億ユーロが政府資金であり、内 2 億ユーロが教育省 R&D 分野からのものである。R&D とデモンストレーションの二本柱で推進されており、市場形成を重視し、42%のリソースを自動車分野にあてている。この政策によって、燃料電池の技術開発、水素インフラ整備が明確なマイルストーンを設定した上で着実に推進されている。また、ドイツの特徴は、一旦確定した多年度 R&D 予算は政権が代わっても変更されることはなく、企業も国家のコミットメントを確信して、長期的な視野を持って研究開発に取り組むことができる。よって、国のコミットメントが明確であるとともに、助成が 50%を上限とするためにダイムラーのような「本気」の企業にとっては展開がしやすい環境だが、中小企業にとっては大きな負担といえる。

### フッ素系電解質膜

燃料電池用の高分子電解質膜として最も使われているのがフッ素系電解質膜であるが、日・米・欧を中心に活発な研究開発が継続的に繰り広げられている。特に、安定性

と耐久性の向上に対する日本企業（旭化成、旭硝子など）の取り組みは世界トップレベルで、分解機構の詳細な解明とその知見に基づく分子設計が実を結んでいる。分子末端の保護、側鎖エーテル結合の数と部位、安定剤の添加により、従来膜では数百時間程度で顕著な分解が起こった高温低湿度条件においても優れた耐久性を持つ電解質膜が開発された。導電率の観点からは、イタリア企業（Solvay-Solexix）が短側鎖で高イオン交換容量の電解質膜の商品化に成功しており、欧州を中心に評価が行われている。同様なコンセプトの膜は、米国や日本でも開発が進められている。

### 非フッ素系電解質膜

芳香族炭化水素系電解質膜を中心に様々な材料が検討されているが、精密な分子設計と物性の正確な評価という観点から、日米の研究開発がこの分野を率いている。ブロック共重合化により低加湿対応への可能性がひらけてきたことが最近の重要な成果であり、フッ素系電解質と同程度の導電率が得られている。今後はいかに耐久性を向上させるかが開発の鍵となる。欧州や韓国ではリン酸ドーブしたポリベンズイミダゾールの検討も引き続き進められており、制御された条件下では無加湿運転でも優れた燃料電池特性と耐久性が報告されている。

### 電極触媒

電極触媒の本格的普及時の燃料電池システムコストに占める割合が電極触媒において、非常に大きくなると予測されることから、主成分である Pt の使用量の現状からの大幅削減 (<1/10)、あるいは脱 Pt 触媒の基礎研究が日米を筆頭に世界的に実施されている。前者に関しては Pt 粒度制御、耐食性 Pt 担体利用、あるいは第二・三成分との合金化とコアシェル化などが、さらには実用電極内での触媒の有効利用率の向上を目指した研究が行われている。後者に関しては、金属酸窒化物、金属炭化物、ポリマーアロイ、Co 担持導電性高分子などが研究されている。またこれらの種々の先端解析機器を使った解析等も併せて活発に行われている。これらの基礎研究の正しい結果評価と効率良い研究推進には、評価技術の共有化が極めて重要である。

## (3) 光触媒・人工光合成

### 太陽光による水素発生

太陽光エネルギーを直接化学エネルギーへ変換するいわゆる人工光合成型光エネルギー変換が世界的に注目を集め、大型の研究プロジェクトが世界各国で始動しているが、日本では未だにそのような大型プロジェクトは立ち上がっていない。本分野においては日本が単独で古くから独自に研究を継続してきたため、現時点では諸外国に比べ、材料開発を中心にリードしている部分はある。しかし、実用化、特に大規模展開に向けてはまだ解決しなければならない課題が数多く残されている。この分野において諸外国からの画期的な高効率エネルギー変換系構築に関する成果は、現在のところ認められない。しかし、要素技術的な面で、部分的に新しい報告は幾つか出てきており、このような積み重ねにより、数年後には大きなブレークスルーが見られる可能性がある。

太陽光による水素発生では、日本では、粉体系の光触媒を用いる研究が中心であり、

東大の堂免教授、東京理科大学の工藤教授らを中心に群を抜いて高い研究水準を維持している。金属錯体による人工光合成では、独自の1光子による水の酸化を発見した首都大学の井上教授、二酸化炭素の光還元で世界記録を持つ東工大の石谷教授などが主導している。

米国では、ローレンス・バークレー国立研究所のヘリオスプロジェクト、その後オバマ戦略によるDOEのSteven Chu長官主導による2009年8月から開始されたEnergy Frontier Research Center (EFRC) プロジェクト(46機関に各2~500万ドル/年で5年間、日本のERATO (JST) クラスの大型プロジェクト)、さらには2010年8月からJoint Center for Artificial Photosynthesis (JCAP) という超大型のハブプロジェクト(Nathan S. Lewis教授、カルフォルニア工科大学:1億2200万ドル/5年間)など多くの研究開発拠点が急速に設立されている。これらの大型プロジェクトに参画する注目すべき研究者としては水の酸化でノースキャロライナ大学のT. J. Meyer教授、MITのDaniel Nocera教授、エモリー大学のCraig Hill教授や水素発生でカルフォルニア工科大学のNathan S. Lewis教授らがいる。

一方欧州では、電子移動研究で英国ニューカッスル大学のA. Harriman教授、スウェーデンのL. Hammerstrom教授、水の酸化でスウェーデンのL. Sun教授などがいる。中国では大連化学物理研究所のCan Li教授、韓国ではSogang大学のK. B. Yoon教授などが注目すべき研究者と言える。

上述のように米国、中国、韓国などで次々と人工光合成の大型プロジェクトが発足し、また、EUを含め、当該分野への若手研究者の参入が顕著である状況で、これまでこの太陽エネルギーの化学エネルギーへの変換の分野で先導していた日本のみが組織的、戦略的な動きが見られないことで我が国の競争力が低下し、逆転されることが懸念される。当該分野における我が国の地位を確固としたものにするためには、基礎研究からエンジニアリングに至る広範な研究者を集め、かつアカデミアだけでなく関連企業とも密接に連携しながら迅速に研究開発を進めることが喫緊の課題である。

#### (4) バイオ燃料・バイオ発電

##### バイオエタノール

韓国企業2社がフィリピンでバイオエタノール工場とBDF工場の建設を計画中で、投資額は合計で80億ペソである。一件は、サトウキビを原料としたバイオエタノール工場で日産50万リットル、もう一件は、ヤトロファを原料としたBDF工場で12.5万リットル。国内では現在2箇所のバイオエタノール工場が稼働しているが、韓国のバイオエタノール利用に弾みがつくものと期待されている。企業名は明らかにされていない。(2009年4/16 NNA.ASIA)

また、韓国のLBLネットワークスと北京理想空間科技発展有限公司の合弁による北京巴奥燃料技術有限公司が、キャッサバ等のバイオマス資源を原料として、混合比85%の新型バイオエタノールを共同開発している。巴奥会社はハイテク技術の応用と新品種の作物の栽培によってエタノール燃料の混合比率を高め、使用範囲を拡大するとともに、山東董海港業股フェン有限公司や青島中魯工貿有限公司と提携し、山東省に燃料混合工場とエタノール生産工場を建設する準備も進めている。

### リグノセルロースからのバイオディーゼル燃料

バイオ燃料のうちディーゼル代替燃料に関しては、これまで植物油由来原料から製造されていたが、食料と競合しないリグノセルロースからのバイオディーゼル燃料の生産が注目されている。これはリグノセルロース(木材やわら等)をガス化し、フィッシャー・トロプシュ法により合成ガスを軽油成分の燃料に変換する。ドイツの Choren では日量 300 バレルを生産できるプラントを有している。ディーゼル燃料の需要が多い欧州では活発に研究開発されているが、日本もナショナルプロジェクトが立ち上がった。また、米国でも研究に着手しようとする動きが出ている。

### 藻類からのバイオ燃料生産

藻類の利用に関しては数年前から非常に注目されているが、日本を始め世界各国で研究が行われている。特にボーイング社は、ジェット燃料代替として世界中の研究機関と藻類の共同研究を立ち上げている。わが国では平成 22 年度から藻類の研究開発を経済産業省傘下の NEDO や農水省が開始し、JST でも CREST やさきがけで藻類利用の基礎研究が始まった。

### バイオマス原料の社会・環境インパクト

バイオマスの原料に対する社会・経済的、環境的なインパクトを図る検討が IEA Bioenergy 実施協定で新しく Task とされているが、この協定は EC の動きに大きく左右される傾向にある。バイオ燃料・バイオ発電の技術開発についてだけでなく、このような原料に対する検討も必要とされる。IEA ではバイオ燃料のブルーマップシナリオに基づくロードマップを作成し、第二世代バイオエタノールとバイオディーゼル導入・普及を推進している。

## (5) バイオリファイナリー

### リグノセルロースの化学資源化

バイオマス変換反応として、サトウキビやトウモロコシなどの分解しやすい原料から燃料であるエタノールを合成する技術が精力的に開発されてきた。しかし、これらのバイオマスは食料と競合するため、価格の高騰や飢餓の増加が懸念されている。そこで近年の動向として、非食料でこれまで化学資源として有効利用されてこなかった木質・草本バイオマスであるリグノセルロース(セルロース、ヘミセルロース、リグニン)の化学資源化が注目されている。

セルロースの触媒分解反応に関し、北大の発表が契機となって特許数では日本が群を抜いて多く、米国と中国がそれに続いている。セルロース分解で生成した糖の利用法として、発酵によりエタノールに変換してガソリンに添加することが実証化実験される一方で、米国では糖を多段ステップでアルカンに変換してガソリンまたは軽油を合成する反応の開発が進められている。さらに、日米において、バイオマスから燃料を合成するのではなくプラスチックなどの化成品原料を合成するプロセスが注目されている。本法では、酸素を多く含むバイオマスの特徴を活かして、酸素官能基をもつポリマー合成への展開が期待されている。

リグニンの利用研究開発は大きく3つに区分され、1つはリグニンをフェノールで抽出分離してリグノフェノールとし、ポリマー様材料として利用する方法である。本法については実証化が検討されている。残り2つは、いずれもリグニンのモデル化合物から脱酸素水素化で分解する方法である。これまでは、芳香環を残してフェノール類を合成することが困難で環状アルカンが得られるのみであったが、最近、北大でこの反応が可能となり、フェノール樹脂合成への道を拓くものとして注目されている。

## (6) 新電池・キャパシタ

### グラフェンと電池・キャパシタ

2004年にManchester大のA.K. Geim教授らが、それまで極めて困難とされたグラフェンの単離に成功し、その物性を直接評価して以来、グラフェンの研究が急激に活性化している。当初は量産が困難なため、基礎物性研究とエレクトロニクス材料としての研究が先行していたが、2007年頃から酸化開裂法による量産化技術が提案され、蓄電材料への応用研究が一気に加速した。グラフェンは炭素系の材料なので、まずリチウムイオン二次電池負極材料の黒鉛の置換えとしてしての評価が行なわれたが、最近是非炭素系負極材料とのコンポジット負極の研究が主流になりつつある。高容量だがサイクル劣化が著しかったSiやSnO<sub>2</sub>のナノ粒子と組み合わせた系ではサイクル特性の向上が確認されている。またTiO<sub>2</sub>やその他金属酸化物とのコンポジットも検討され、新たな機能の発現等に期待が寄せられている。この分野ではPennsylvania State大のD. Wang教授のグループと、Wollongong大のS. Dou教授らのグループが先行しており、日本では東北大の本間教授らの報告が目立っている。さらに、電気二重層キャパシタ材料としての応用研究が世界各地で行なわれており、Tianjin大のY. Chenらは28.5Wh/kg、10kW/kgのコイン型キャパシタを試作している。密度が上がりにくいいため高容量のデバイスは困難であるが、高出力のデバイスへの展開が進む可能性がある。

### ポストリチウム二次電池

ガソリン車の貯蔵エネルギー密度に匹敵する700Wh/kg 超級の蓄電容量を有する高エネルギー密度型電池の研究開発が世界各国で急展開している。最も蓄電密度が高くガソリン等の液体燃料に匹敵するエネルギー密度を有するのは金属空気電池であるが、放電生成物であるLiOH、Li<sub>2</sub>Oなどの水酸化物、酸化物を可逆的にリチウムまで還元する電極材料や電解質材料が存在しないのが現状である。他方、全固体型電池は金属リチウムを負極として、また正極を硫黄とする可能性があるため、高エネルギー密度貯蔵が可能なポストリチウム電池としての期待がかけられている。これらの革新的電池の実現のためには固体電気化学のみならず無機化学、金属工学、分析化学、固体物理学などの学際的知見の集積が必須であり、近年様々な学術分野で新しい電池材料開発の基礎研究の活発化が起きている。

### ナノサイズ活物質を使った高性能電極開発

フランスピカルディ・ジュール・ヴェルヌ大学のJ.M. Tarascon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活物質材料を合成できることを見出し、「ナノテク ⇒ 革新的電極材料」のコンセプトに一流の材料研究者が競って参画している。高容量活物質は自動車用電池応用の観点から極めて有用であるが、新しい電極活物質の探索指針としてナノ材料が極めて有望との認識のもと、国内外で活発な研究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如として活性化し優れた電極性能を発現することが近年見いだされ、学術誌上でもホットな研究テーマとなっている。新しい高性能電池材料の探索領域が広がることにより従来想定されてなかった新物質の発見が期待できるからである。また、大型電池の車載応用が視野に入るにつれて、電池デバイスの安全性も大きな研究課題となり、電池構造での対策と並行してより安全な活物質の開発も大きな研究トレンドとなっている。高温時に酸素の放出の無いオリビン系材料の開発や発熱挙動が緩やかな金属酸化物系正極材料の研究開発も盛んに行われている。またこの安全性や寿命特性の改良のキーポイントである電極活物質表面の構造変化をナノレベルで高精度観察・分析する技術も多々開発されつつある。

### ナノイオニクス

「ナノイオニクス」という新しい学術分野名で電気化学デバイスに資する先端的材料科学が発展している。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 教授であり、現在、この分野の世界トップ研究者である。ナノ物質における界面効果を利用した新しいコンセプトの電極・電解質材料の提言などを行っており、バルクでは実現しないエネルギー貯蔵特性やイオン伝導特性などに理論的根拠を与えつつ実験的に検証し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、欠陥平衡など物理化学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革新的材料開発の一つの有効な指導原理を与えている。表面界面、複合化、ナノサイズ効果、疑似容量、界面イオン伝導などナノレベルでの固体電気化学の基礎科学が各国で発展している。このような研究領域が注目を集めているのはリチウム電池を中心に、燃料電池等も含む革新的電池デバイス創製の重要な基礎科学として認識されつつあるためである。

### 次世代電極材料（リン酸鉄リチウム等）

米国テキサス大学オースチン校の John B. Goodenough 教授が発見した  $\text{LiFePO}_4$  材料が蓄電容量と安全性に優れた次世代の自動車用リチウム二次電池の正極材料として注目されている。これはそれ以前の酸化物インターカレーション材料とまったく異なる反応で蓄電できる新材料であり、大型化した際の化学的・熱的安定性が格段に優れていることから革新的電極材料と言える。絶縁性リン酸化合物を電極材料に用いるような発想は極めて独創的であり、従来の電極材料の常識を超えるものである。しかしながら、近年の電極材料のナノ構造制御技術の発展から、ナノサイズ電極合成と活物質表面の導電性付与が可能となり、リン酸鉄リチウムに代表される金属酸素酸塩化合物の絶縁性材料を実用型電極として用いるイノベーションがなされ一気に世界的な潮流を形成した。現在、日米欧の先進各国でこの材料の基礎科学が進展しており多くの新しい知見が集積しつつある。近年では同様な金属酸素酸塩化合物であるケイ酸塩系 ( $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ ) やホウ酸塩系化合物 ( $\text{LiFeBO}_3$ ) が高容量正極材料として注目を集め基礎研究が

活発化している。ケイ酸塩系活物質では2電子容量が完全に可逆的に利用できれば従来型電極の約2倍の蓄電容量が期待できる。今後、これらの非酸化物系正極材料が自動車用電池材料として用いられるかどうか注目されるが、金属元素と酸素の結合を有さないポリアニオン系材料は大型電池の安全性を向上させる上で極めて大きなイノベーションであると言える。有機系、錯体系、や硫黄などのより高容量を狙える新規材料の研究開発も活発化している。

## (7) 熱電変換素子

### 熱電変換素子開発

ペルチエ素子は松下電器のワインセラーや一部の冷蔵庫など、産業用の精密温度制御や半導体の冷却だけでなく、家庭の比較的身近なところに顔を出すことも多くなってきている。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。熱電発電の方は他の熱回収方式との競合上、材料・素子性能のさらなる向上が必要とされている。材料・素子の性能そのものは確実に進歩しているが、市場性になると効率、コスト、安定性といったポイントでかゆい所に手が届かない状態にある。日本・米国では早くからプロジェクトが走っていたが、ヨーロッパなどでも素子開発を念頭に置いたプロジェクトが走り始めている。これらの動きに注目したい。

### 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っているのはほとんどペルチエ素子としてのBiTeベースの素子である。熱電発電にはBiTe、PbTeなどが特殊用途で一部使われている程度で、本格的な市場化には新物質・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の高い酸化物の利用、強相関電子を用いた高キャリア濃度での高性能実現、クラスター化合物での熱伝導制御など、今までの熱電変換材料にない特長があり、これらをうまく活用していくことが更なる飛躍のポイントになるであろう。ここ2、3年の目立った新物質としては韓国サムスンで開発されたInSe系材料を挙げたい。電荷密度波と呼ばれる電子と格子の協奏現象によって格子の熱伝導が抑えられることが高効率のポイントとされる。周辺分野で新物質が開発されることを期待する。米国MITなどで提唱された薄膜超格子などナノ構造を利用した新材料の開発も目立ってきた。どちらかというバルクで強みを発揮してきた日本でも、ナノ構造系でかなりの進展があった。

### 熱電変換素子の産業化

排熱回収・熱電発電の市場化となると、材料から積み上げる総合力が必要となる。

日本は、新たな物質・材料の開発では世界をリードしている。また、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、世界的にみて高い水準を維持している。米国もプロジェクトを国家レベルで推進していることから、高い国際競争力を有している。かなり基礎物理よりの研究者が参入しているのも米国の

ユニークな点である。ヨーロッパや中国、韓国の追い上げは著しく、その勢力地図も大きく変わる可能性がある。特に活動の規模の大きな中国とプロジェクトが動き始めたヨーロッパの動きに注目したい。

#### 熱電変換方式による太陽熱発電デバイス・システム

熱電変換方式による太陽熱発電デバイス・システムの研究開発が注目される。日本、中国、スイス、アメリカ、オランダ等において太陽熱発電や太陽電池/熱電ハイブリッド発電デバイスなどのシステム設計、デバイス組み立て、発電評価等が進められている。JST 日中共同研究（JAXA と武漢工大）では、太陽エネルギーをフルに活用するため、太陽光を波長分離して紫外・可視光をシリコン太陽電池に照射して光電変換し、赤外光を熱電モジュールに照射して熱電発電するシステムが検討されている。もう一つのJST 日中共同研究（名古屋大学と中国電子科学技術大学）では色素増感太陽電池/熱電ハイブリッド発電デバイスが提案され、上記の欠点を克服するシステムが検討されている。また、スイス EMPA では太陽炉を用いた熱電発電システムの検討と高温酸化物熱電変換材料の開発を進めている。米国 MIT ではマイクロ熱発電デバイスの設計・評価を進めている。いずれも将来の太陽エネルギー利用社会・低炭素社会の実現に資する科学・技術研究開発の一環として行われている先行研究で、今後重要性が増すと予想される。

#### ビークル用・宇宙開発用の材料

アメリカ（DOE 中心）及びヨーロッパ（ドイツ中心）において、産官学連携でビークル用熱電変換材料・デバイスの開発が精力的に進められている。高材料効率化のためのコンセプトや新材料の提案、また新型モジュール・システムの提案などがまだまだ出てくる可能性があるので、引き続き注目しておくべきであろう。

また、アメリカ NASA を中心に宇宙開発用熱電発電機に用いる非酸化物系高効率材料の開発が地道に進められているが、それに加えて自前の宇宙開発に乗り出した中国が材料開発でアメリカに追随すると見られるため、今後の動きを注目したい。

### (8) 超電導利用

#### 室温超電導材料の研究開発

米・エネルギー省は、イットリウム系高温超電導線への研究開発投資はその性能が十分な到達点に達したとして打ち切り、引き続き「higher (room) temperature superconductors」の材料研究を進める、としている。

その内容は、以下の三つが挙げられている。

- ・新しいプロセス、ナノ構造の成長メカニズム
- ・高温超電導材料と長尺にわたって超電導電流を流すことの出来る能力の理解改善
- ・超電導、磁性、磁性電子の相互作用の理解改善

### 超電導磁気式ビレット・ヒーター

ドイツ・Zenergy Power社は、ビスマス系超電導線をコイルに用いたアルミや銅ビレットの押出用ビレットのヒーターを開発し、既に5台の装置を受注し、3台が客先で稼働中である。これは高温超電導線を用いた初の商業利用で、ドイツのベッサールミ社では、25%の生産量向上を記録している。使用エネルギーは、ガス炉の400kWh、誘導加熱では285kWhに対して165kWhと省エネが可能である。

(参考情報)

- [1] Department of Energy FY 2011 Congressional Budget Request, DOE/CF-0049, February 2010, Volume 3, p.528
- [2] L. Masur et al., Magnetic Billet Heating, Light Metal Age, 2009, April, p.50
- [3] 超電導磁気式ビレット・ヒーター、工業材料、2011, Vol.59, No.1, p.4

### 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電力危機などの影響もあり、国家戦略として超電導の電力応用を進めている。高温超伝導ケーブルによる世界初の高圧ケーブルが導入された米国のHolbrook変電所での長期試験のデータも得られ始めている。日本での実験も継続して進められており、SRLと昭和電線を中心にしたIBAD基板による線材開発、九州電力による変圧器開発、住友電工による冷却システム検証実験など、技術的な質は高い。まだ実用レベルに達していないが、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ってくると考えられる。

### 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、誘導加熱炉用コイルなどは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。他に、磁気分離、磁気誘導、SMES（超電導エネルギー貯蔵）などで開発・実証が継続されている。中国白銀市に建設中の10.5 kVパワーサブステーションでは、将来のパワーグリッドを見据えて、超伝導ケーブル、変圧器、SMES、限流器などの設置を計画している。輸送分野では、超電導モータの適用が、操舵性、効率等が格段に向上することから、船舶の推進装置として期待されており、例えばSiemensの4 MW船舶用モーターなどが検証実験中である。これに加え、車載用全超伝導モータの開発へも展開している。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電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ている。

また、産業界が注目する今後の分野である「医療技術」に焦点を当てた流れが感じられる。セキュリティ検査を目的としたテラヘルツ帯イメージングのための超伝導素子技術のような、従来から研究がなされていたさまざまな技術分野において、この傾向が顕著になりつつあり、今後の研究展開が期待される。

## (9) 固体照明

### 固体照明

LED と OLED を光源とした固体照明は、年々効率の改善、コストの低下が進み、2010 年代後半には、照明の大きな部分を占めると考えられる。2010 年 7 月にオランダで開催された 第 3 回白色 LED と固体照明国際コンファレンス (whiteLED3) では、発表件数の約 3 割が固体照明に関するものであった。

白色 LED は、R&D レベルでは 200lm/W を超える発光効率が報告され、商業レベルにおいても、いよいよ、既存照明の発光効率を超えようというレベルに達している。2009 年に日本で起こった LED 電球の低価格化の流れは、2010 年も続いており、今後更に低価格化が進み、世界的な流れとなることは必至である。

一方で、LED 電球の性能表示がわかりにくいとの指摘に対して、2009 年から 2010 年にかけて、日本では電球工業会が、アメリカでは Energy Star が、ヨーロッパでは EUR が、従来の白熱電球との比較表示の方法を定義した。ヨーロッパでは製品に CE マークを取得する事がほぼ必須となるのに対して、日本、アメリカでは任意となるため、今後、市場で、混乱が残る可能性がある。

固体照明の普及拡大には、コスト面が大きな課題であることは変わらない。従来の LED デバイスと照明器具とが連携したブレークスルーが必要と考えられる。また、LED デバイスの価格については、装置産業としての視点から考えれば、生産数量が大きく伸びてくれば、価格低下の動きもでてくることになる。その動きに影響を与えるのが、昨年からグローバルで伸びてきている液晶 TV のバックライトの LED 化である。この市場に飽和感と LED 素子の製造装置である MOCVD (有機金属気相成長装置) の稼働能力から見れば、価格低下の時期も予測される。

(参考情報)

[1] 照明学会誌 第 94 巻 第 11 号 pp.753

[2] 日亜化学 NewsRelease

## (10) 高強度・軽量構造材料技術

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) 性質を持つことから、複雑な形状の部品には強度の高い材料の適用が限られていた。しかし、自動車を中心とした車両の軽量化による燃費向上と二酸化炭素排出量削減が強く求められて、強くてもよく伸びる材料の開発が進められている。例えば、鉄鋼材料では、プレス用部品に適用される鋼材の強度は 980MPa が上限であったが、これを 1200MPa まで向上させる取り組みが世界各国 (特に欧州・韓国・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ため、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。

軽量構造材料は、航空・宇宙産業を中心に発展してきた。2009 年末に、主翼、胴体共に CFRP 化 (軽量化) した大型民間航空機 (米国) が初飛行し、航空機の主要構造部材への炭素繊維複合材料 (CFRP) 本格実用化が始まった。欧州でも CFRP を適用した同様の民間航空機プロジェクトが進行中であり、注目すべき動向である。複合材料 (CFRP)

は、不均質、異方性材料（多くの場合積層構造）であるため、金属材料とは異なる破壊挙動を呈し、長期信頼性も含め材料データベースの構築研究が国を挙げて進行中である。部材の構造設計においても、接合部のない一体（成形）構造、サンドイッチ構造、接着接合などが特徴であり、より軽量の部材の構造設計、成形研究も盛んに行われている。航空産業を保有する欧米が、材料データベース、軽量構造設計共に先行しているが、航空機部材の実製造（サブコントラクター）は、日本（国産機も検討）、韓国、中国（国産機も検討）等へと移行しており、かつ CFRP を構成する炭素繊維は日本がリードしている（炭素繊維の世界シェアは約 70%）ことから、今後は、アジアが航空機産業で欧米を凌駕する可能性がある。

また、地球環境問題、省エネへの配慮から、日欧を中心に、LCA（ライフサイクルアセスメント）を評価指標とする材料技術開発、成形技術開発が始まっている。航空機産業を中心に発達してきた軽量化技術は、自動車などの輸送機器構造体全体に波及していくと考えられる。

### (11) 耐熱構造材料

耐熱構造材料の中で石炭火力発電の大幅な高効率化のため、蒸気温度が 700°C 級 A-USC プラント用耐熱構造材料が必要とされる。Ni 基合金については一部に我が国の独自材を開発しているが、欧米は資源が豊富で実績が多く、産業構造的にも優位にあるため先行している。我が国では経済性の面から鉄鋼材料（高 Cr フェライト系、オーステナイトステンレス系）の一層の高度化による材料開発を始めており、鉄鋼材料の開発では我が国は世界をリードしている。高 Cr フェライト系鋼は溶接部の劣化問題があり、これを解決する材料開発が行われ、使用温度も 650°C まで向上できる性能が得られつつある。また、安全性と信頼性確保のためにその材料劣化と寿命評価の研究が世界的に強く求められている。

1700°C 級ガスタービン実現のための翼材料の開発が日米欧で進められており、同時に必要となるコーティング材料技術の研究も盛んである。

自動車用ガソリンエンジンのターボチャージャーとして実用化されていた TiAl 金属間化合物が、ボーイング社の最新鋭機 B787 で GE 社製 GEnx エンジンに搭載されることが決まっており、ブレードの切削加工技術、鋳造技術、補修技術の開発が欧米を中心になされている。B787 型機に搭載予定のロールス・ロイス社製 TRENT-1000 エンジンにも搭載が検討されており、日欧米の企業が競って技術開発をしている。特に、切削加工に代わる鋳造技術の開発が競争的に行われており、ロールス・ロイス社が中国・瀋陽の化学技術院金属材料研究所と提携を結んだことは注目に値する。欧州ではディーゼル車が主流で、ディーゼルエンジンのターボチャージャーへの応用もドイツ、特にベンツ社を中心に検討されている。日本は 1980 年代から積極的に研究開発に取り組み、研究水準では一時世界をリードしていたが、現在では欧米に遅れを取っている。ドイツが主流となり行った欧州のプロジェクト IMPRESS（Intermetallic Materials Processing in Relation to Earth and Space Solidification; 2004 年から 5 年間で 4100 万ユーロ）の果たした役割は非常に大きい。このプロジェクトの支援を受けた Access e.V. 社（ドイツ）は最も進んだ遠心鋳造技術を有する。

ニッケル基単結晶合金でも耐えられない温度で使用できる金属間化合物として遷移金属

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

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

## (12) 分離膜

### 新素材を用いた膜の基礎研究

米国では、依然としてナノテクノロジーを用いた新素材膜の研究成果を発表し続けている。アメリカ化学会が分離膜に関するシンポジウムを開催しており、米国の注目のほどが伺える。たとえば、カーボンナノチューブを配列した膜やカーボンナノチューブをブレンドした有機膜の研究成果は発表され続けている。また、下記のように正浸透膜の研究が活発化しており、将来逆浸透膜に替わる技術になる可能性もあると言われている。

欧州などでは、細胞膜の水チャネル“アクアポリン”を利用した膜の研究が行われている。逆浸透膜を志向した研究である。

### 正浸透現象を用いた水処理やエネルギー生成の研究

最近、正浸透現象を用いた水処理やエネルギー生成の研究が注目されている。海水と淡水を半透膜仕切り、淡水が海水に浸透するエネルギーを電気に変換する技術開発が、欧米を中心に活発化している。課題は、正浸透膜及びそのモジュールである。正浸透 (Forward Osmosis:FO) 膜法は逆浸透 (Reverse Osmosis:RO) 膜法と同様に半透膜を使用するが、RO 膜法では圧力が駆動力であるのに対して FO 膜法は高濃度塩溶液などの高浸透圧溶液 (Draw Solution:DS) の浸透圧を駆動力としている。そのためほぼ大気圧での水処理プロセスが可能となり、RO 膜法で必要な高圧ポンプや高圧配管などは必要としないことから低設備コスト、低エネルギー稼働が期待される。また RO 膜法よりも高い水流束、高い水回収率が得られる。この技術の実用化には高水流束、高塩排除率、かつ内部濃度分極が少ない新規な FO 膜、及び高浸透圧で分離・再生が容易な DS の開発が求められる。この研究は現在エール大学、コロラド鉱山大学、ネバダ大学、国立シンガポール大学、南洋理工大学などで盛んに研究が行われている。

さらに海水と高濃度塩水と河川水などの淡水間の浸透圧差が約 300 m の水位差を有するダムに相当することを利用した浸透圧発電 (Pressure Retarded Osmosis:PRO) の研究も注目されている。この技術が実用化されれば、海水と淡水からほぼ稼働率 100% のクリーンエネルギーが得られる。この研究はノルウエーの Statkraft などで行われて盛んに行われている。

### (13) 環境浄化用触媒

#### 自動車触媒貴金属使用量低減技術

環境浄化用触媒は、レアメタルや貴金属資源に依存しており、尖閣諸島の事件に端を発した中国のレアアース輸出制限政策が国際問題に発展する中、稀少資源の確保は国家として産業を守るために極めて重要であることが再認識されている。全世界の貴金属全需要の約50%を自動車触媒用途が占めており、自動車触媒の貴金属を低減する技術開発は企業の利益を超えて、社会的な意義を持っている。これまで、ダイハツ工業、日産自動車（ルノーとのアライアンス）、マツダなど自動車メーカーが主体となってナノテクを応用した触媒材料開発等の貴金属使用量低減技術にしのぎを削ってきたが、2009年にはガソリン車用三元触媒の貴金属節減対策について、日本の主要メーカー（トヨタ、ホンダ、日産、マツダ、ダイハツ）全てが独自技術を市場投入した。自動車触媒における省資源化は、日本が先頭をきって開拓してきた技術であり、欧米メーカーでは資源リスクが日系メーカーほどには顕在化していないこともあって、自動車メーカー主体の触媒開発技術の実用化は報告されていない。今後、中国およびインドなど巨大新興国のモーターゼーションが劇的な変化をもたらすのは必至であり、そのほとんどが内燃機関であるため、自動車触媒の省資源化技術の蓄積が全世界的に重要なインパクトを生じると予測される。

研究開発および技術開発段階では一層高い水準の貴金属節減が課題になっている。新日鉄マテリアルズ、NIMS、東北大学、熊本大学から貴金属を節減した触媒が発表され、三井金属はディーゼル用排気浄化触媒としてAgを使用した触媒を開発した。また、東京農工大、パナソニックエコシステムから貴金属フリーの触媒が発表されている。

#### 貴金属節減と回収技術の関係

自動車触媒の節減技術が進展するにともなって懸念されるのが、回収技術とのバランスである。自動車用貴金属はリサイクルが最も成功している分野で、排気規制が遅れた欧州は例外として、日米では全供給の10～20%をリサイクルから還流しているほど成熟している。日本国内はもともと中古車が海外に輸出される割合が高いため、廃触媒の回収拠点を海外におく企業もある。しかしながら、触媒単体あたりの貴金属含有量が将来極端に減れば、①廃触媒の単価が下がり回収自体が困難になる、②精製における貴金属回収率を確保することが技術的に困難になる、といった問題が予測される。触媒製造側で節減が進んだ結果、回収されず散逸してしまう貴金属が大幅に増加すれば、本末転倒になりかねない。貴金属節減技術と回収技術はバランスしながら進展するための施策が必要である。

#### レアアースの節減

ガソリン車用三元触媒の貴金属節減対策に用いられる主な技術は酸化セリウム( $\text{CeO}_2$ )など貴金属と強く結合する成分を利用している。例えば、2002および2006年の日本国内の自動車触媒用需要と比較すると、貴金属は1.5倍の増加であるのに対して、セリウムは2倍以上も増加している。現状では自動車1台あたりに20グラム程度のセリウムが消費されている。レアアース全体の需要のうちセリウムは約半分も占め、その

約 15% が自動車触媒用である。このように、現在の貴金属節減技術はレアアース大量消費の上で成り立っていると言える。わが国はレアアースのほぼ全量を中国からの輸入に依存してきたが、中国は資源保護の観点から、輸出制限を強めている。これに不安定な日中二国間関係の状況も加わり、2005年に比べて2010年11月時点でセリウムの市場価格が約100倍に高騰する事態に至っている。レアアースの供給不安と価格変動リスクを回避するために、自動車触媒のセリウム節減技術が次なる課題として急速にクローズアップされてきた。

#### ディーゼルおよび次世代自動車対策

グリーンイノベーションの取り組みの中で、自動車分野ではクリーンディーゼルや次世代自動車の研究開発が重点化されている。ディーゼルの割合が高い欧州系メーカは酸化触媒(DOC)、尿素選択還元(SCR)、NO<sub>x</sub>吸蔵還元(NSR)、粒子状物質除去フィルター(DPF)などから構成される複雑な触媒システムを市場に導入している。しかし、この結果としてディーゼル車はガソリン車に比べてより多量の貴金属触媒を必要とする。これに対して、日本では、ホンダが開発した触媒内部でアンモニアを発生させてNO<sub>x</sub>を浄化するシステムに続き、マツダが触媒による後処理が不要な低圧縮比クリーンディーゼルを開発し、欧州Euro6、北米Tier2Bin5、日本のポスト新長期規制をクリアすることを可能とした。マツダは粒子状物質を除去する触媒フィルターでも独自技術を実用化した。このほか、日産、三井金属、産総研などがディーゼル用触媒の貴金属節減を目的とするプロジェクト研究を進めている。

次世代自動車ではその大半を占めることが予想されるハイブリッド車において独自の対策が必要である。ハイブリッド車のエンジンは、通常のガソリンエンジンに比べて小型だが、間欠的な動作のために排気温度が低い。この状況では低排気レベルを達成するためにより多量の貴金属触媒が必要になる。同様の状況はアイドリングストップ式の自動車でも予想される。したがって次世代自動車でも内燃機関を部分的にでも利用する限り、触媒のさらなる技術革新が求められる状況にある。

#### (14) 環境調和・リサイクル技術（回収技術・希少資源代替など）

##### ナノテクを利用したエコ技術

ナノ材料製造、使用、廃棄（ナノリスク）を含めたナノマテリアルに対するライフサイクル評価の研究例が増えてきている。特にナノマテリアルの環境影響に対する注目度が上がっている。しかしながら、ナノテクを利用したエコ技術は未だ萌芽的であり、研究をおこなう意義は大きい。なお、ナノ触媒技術はやや米国が先行しているようであるが、人的資源を含む基礎研究力は日本も遜色はなく、ナノ光触媒技術（触媒材料自身、アセンブリ、担持法などの周辺技術）は日本がトップクラスである。

米国と中国で共同開発された24面体白金ナノ結晶は高い触媒能を有しているとの報告があり、今後数年内の研究動向が注目される。

### (15) 環境センサ

9.11 は、欧米のセンサ研究に非常に大きな影響を与えているが WANTED プロジェクト (Wireless Area Networking of Terahertz Emitters and Detectors) は、その前年の 2000 年 9 月にスタートしている。テラヘルツ帯の電磁波は、気化しにくい有機物質を可視化する可能性を秘めていることから注目を集めている。この系列の研究プロジェクトとして、最近我が国でも、「平成 22 年度地域産学官連携科学技術振興事業費補助金 イノベーションシステム整備事業 地域イノベーションクラスタープログラム (グローバル型) 京都環境ナノクラスター」の課題の一つとして取り上げられている。環境モニタリングの重要性は、学術会議と米国科学アカデミーの主催で開催された “Sensors and Sensor Systems: A US-Japan Dialogue” (2005 年、2 月 28 日～3 月 2 日、つくば) でも指摘されており、NIMS のセンサ材料センターは、ここでの審議結果に呼応する形で発足したものであり、例えば化学グループでは、ナノサイズの粒子・薄膜の三次元構造を構築するとともに、センサ応用で不可欠な組成制御を可能とするプロセスを開発し、開発した材料のセンサとしての可能性を追求している。

一方、21 世紀に入りシックハウスの問題が大きく取り上げられるようになってきた。NEDO では、エネルギーイノベーションプログラムの一つの課題として「揮発性有機化合物対策用高感度検出器の開発」プロジェクト (平成 17 年度～20 年度) が取り上げられ、ppb オーダーの VOC 環境モニタリングを現実的なものとしている。

(参考情報)

- [1] <http://www.nims.go.jp/senmc/index.html>
- [2] [http://www.nims.go.jp/senmc/senmc\\_chem/index.html](http://www.nims.go.jp/senmc/senmc_chem/index.html)
- [3] <http://www.nedo.go.jp/iinkai/kenkyuu/houkoku/21h/jigo/10-1.pdf>

## 1.2 ナノバイオテクノロジー

### 1.2.1 概観

ナノバイオテクノロジーとは、ナノテクノロジーとバイオテクノロジーの融合領域をいい、健康・医療、環境分野などに応用される先端技術を生み出す領域である。本報告書ではナノバイオテクノロジーをバイオマテリアル、再生医療、DDS（ドラッグデリバリーシステム）、バイオデバイス、バイオセンサ、分子イメージング、食品の7綱目に分類し、国際比較を行った。

全体として、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。日本は研究水準こそ高いものの、産業技術力は欧米の後塵を拝している状況にある。既存の大企業では進出しにくい一面があり、小回りの利くベンチャー企業の活躍が実用化には極めて重要であるが、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。欧州は、特定技術に限っていえば世界水準の研究が数多くある。日本はDDS用材料、再生医療材料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、欧米から留学経験者が帰国し、研究開発の主力を演じている。まだレベルにばらつきがあるものの、国際レベルの研究機関も現れ、今後さらに注目すべきである。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がある。各綱目の具体的な内容を以下に略記する。

バイオマテリアルでは、日本は独創的なコンセプトに基づく優れたナノスケールのバイオマテリアルを数多く開発しており、研究水準ではトップレベルにある。しかし、アカデミアと大企業をつなぐベンチャーの醸成が遅れており、死の谷は深い。米国、欧州はベンチャーが盛んで、産業への橋渡し展開は日本より優れており、製品化・産業化で先行している。中国、韓国はオリジナルな研究は少ないが、技術開発水準と産業技術力に関して、欧米、日本のよいところを積極的に吸収している。

再生医療では、米国では、2009年に、オバマ大統領がES細胞研究に対する連邦予算の助成を解禁し、米食品医薬品局（FDA）はヒトES細胞を用いる臨床研究計画を認可し、すでに数例の臨床応用が開始されている。iPS細胞に関する多くの報告もあり、米国は揺るぎない地位を占めている。わが国の論文及び特許出願件数は米国について2位であるが、市場に出ている再生医療製品はわずかであり、企業の取り組みについて韓国を含む他の諸国との差はあまりにも大きい。

DDSでは、世界中でナノテク融合研究拠点が設立され、siRNAなどの核酸医薬の実用化などに向け分野融合的なDDS研究が行われている。材料開発が非常に重要であり、この点において日本は世界をリードしているといえる。一方、医薬品開発に関しては、ターゲティング製剤やPEG化タンパク医薬で多くの製剤の上市が見込まれるが、欧米がリードしており、日本はベンチャー企業の育成が課題である。

バイオデバイスでは、汎用的マイクロ集積化技術を2000年頃から先導してきた日本は依然として非常に高い研究・技術開発力を有している。ただし、欧米、アジア間での研究者の移動の活発化、欧米で教育を受けたトップクラスの研究者が母国に帰り研究を指導するなどの理由により、他のアジアの諸国の台頭が著しい。全体として、依然米国が豊富な

資金力と人材を背景に基礎・産業応用ともに先導しているが、医療分野などへの本格的な実用化には至っていない。日本では、規制・認証におけるベンチャー企業への支援や、信頼性向上・コスト低減などの技術的側面、新規技術の啓蒙・市場創出などのサポートが弱い。

バイオセンサでは、日本は研究開発において世界をリードしてきたが、近年米国が、連続血糖測定が可能な血糖測定器を開発・販売の開始しており一歩リードしているといえる。また、インスリンポンプとの組み合わせにより、将来的な人工膵臓の応用が期待される。バイオセンサに関連する各国の論文数では、中国、韓国の増加傾向が著しい。

分子イメージングにおいては、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で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では米国が先行している。また、ソフトウェア開発においても、欧米が先行している。イメージングの応用に関し、米国では動物実験による実証が進んでいるが、日本・欧州はこの点で少し遅れている。

食品では、総合的な研究開発・技術レベルは、米国・欧州が先行しており、日本はそれに次ぐ。米国と欧州では、米国が多数のサプリメント製品やナノサイズキャリアの開発を進めているのに対し、欧州は食品そのもののナノサイズ化には積極的でなく、ナノ食品の安全性に関わる研究が先行して進められている。一方、中国、韓国の場合には、銀ナノ粒子を使用した抗菌キッチンウェア等が中心であり、技術力はまだそれほど高くないと考えられる。台湾では、ナノ食品及び関連製品の調査が行われており、ナノミセル、銀ナノ粒子、ナノ化薬草などが開発されている。

◆ナノバイオテクノロジーのまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	日本は独創的なコンセプトに基づく優れたナノスケールのバイオマテリアルを数多く開発しており、研究水準ではトップレベルにあると考えられる。DDS 研究では、材料開発が非常に重要であり、この点において日本は世界をリードしている。
	技術開発水準	○	→	アカデミアと大企業をつなぐベンチャーの醸成が遅れており、死の谷は深い。臨床ニーズを出口にきちんと据えていない研究のための研究も多く認められる。日本はオリジナリティの高い研究を企業化していく手法をもっと欧米に見習うことが求められている。
	産業技術力	○	→	規制の不透明性や非効率性、治験のためのインフラ未整備があり、せっかくのシーズが芽を摘まれたり、海外に流出している。
米国	研究水準	◎	↑	全体として、依然アメリカが豊富な資金力と人材を背景に研究開発を先導している。再生医療に関する論文ならびに特許出願は米国が断然トップの地位をしめている。
	技術開発水準	◎	→	ベンチャーを育成する文化が根付いており、技術シーズが出てきたときの投資は盛んである。大企業もベンチャーを上手く利用して、リスクを分散している。そのため、ベンチャーを核とした研究開発が活発に進む。
	産業技術力	◎	→	バイオベンチャーと大手製薬企業とのアライアンスによる広範囲な再生医療技術開発が行われている。これらの技術開発に際して、政府から多額の研究費サポートがある。
欧州	研究水準	◎	→	特に、ナノバイオテクノロジー技術の再生治療、DDS 展開に力を入れており、遺伝子デリバリーシステムの研究開発などにおいて、世界をリードしている。
	技術開発水準	○	→	欧州科学財団 (ESF) が、2005 年に「ナノメディシンの科学的将来展望」との方針発表を行い、欧州が首尾一貫したアプローチによってナノ DDS の研究開発を進めることによって、米国や日本に対する競争力を強化している。
	産業技術力	◎	→	欧州の製薬企業は、メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有しており、また、新薬の治験体制も整っていることから、今後も高い水準を維持するものと考えられる。産業化を促進する制度的にも最も進んでいる。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	△	↑	全般的に見ると模倣的な研究も多く、研究の質はバラツキが大きい。中国科学院、南京大学などは世界に並ぶレベルである。多くの海外留学生および外国企業での研究経験者の帰国により、今後の研究水準はさらに向上すると考えられる。
	技術開発水準	△	↑	科学技術人材の呼び戻し政策の継続的实施により、優秀な留学生在が多数帰国しているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め研究水準および技術開発水準が急速に上昇している。
	産業技術力	△	↑	医薬品開発においては、臨床研究などの法的拘束が少なく、今後再生医療、DDS 等の臨床治験が進む可能性が高い。また、中国ではバイオベンチャーが数多く設立されており、ナノバイオ関連においても今後ベンチャー企業が増えていくものと思われる。
韓国	研究水準	○	↑	優秀な人材を欧米に留学、研究レベルの向上を狙っている。その成果が徐々に出てきている。基礎研究においては、従来の改良型の研究フェーズを脱して、独自の技術を構築しつつある。
	技術開発水準	○	↑	グローバル化を目指していることが特徴。ベンチャーに対する投資も旺盛。
	産業技術力	△	↑	米国のグローバル化を見本に技術力と産業化力のアップをねらっている。当局の審査体制は整備され迅速であり、治験のインフラも整備されてきている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行く。その一方で、革新的なシーズが不足している。

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向 ]



### 1.2.2 中綱目ごとの比較

#### (1) バイオマテリアル

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	<p>独創的なコンセプトに基づくバイオマテリアルが創製されている。特に、材料の表面加工とサイズ制御による細胞や組織親和性の改善を目指した研究が多い。高分子とセラミックス、高分子と金属とのナノ複合体についての研究では、オリジナリティの高い先端的なものも報告されている。出口は生体材料の細胞・組織親和性の向上、生体吸収性の修飾再生治療、予防ワクチン、細胞の機能改変などがある。</p> <p>また、金属材料やセラミックス材料の研究に関しては、もともと高い水準にあるが、最近では三次元造形法の革新による高機能な材料が生まれている。</p>
	技術開発水準	◎	→	<p>基礎研究から派生する技術水準は高い。しかし、生物医学研究や創薬研究が出口なのか、治療が出口なのかによって技術開発の方向性は異なるはずであるが、その差別化ができていないように見える。</p> <p>高分子材料の基礎研究は、そのまま企業における研究開発へと比較的シームレスにつながっている。金属材料やセラミックス材料に関しても、基礎研究からの技術を企業への研究開発へと進める努力がなされており、一部は上手く橋渡しされている。</p>
	産業技術力	○	→	<p>独創性の高いシーズ研究開発が進む一方で、基礎研究の成果がうまく応用産業化に展開されていない。ベンチャーを支援する文化の不足、当局による規制の不透明性や非効率性、治験のためのインフラ未整備があり、せっかくのシーズが芽を摘まれたり、海外に流出している。臨床ニーズを出口に据えた、官民挙げてのバイオマテリアル産業を推進する制度が必要である。</p>
米国	研究水準	○	→	<p>バイオマテリアルに関しては既存のコンセプト、技術、材料の組合せて複雑なものを作ることが流行っているが、基礎研究の深みは今ひとつ。高分子材料と細胞（特に幹細胞）と組み合わせる、という点が強調されすぎており、表層的な研究が多く、バイオマテリアルそのものの基礎的な改質に関する研究が不足している印象がある。産業化を目標にした基礎研究が多い印象がある。</p>
	技術開発水準	○	→	<p>ベンチャーを育成する文化が根付いており、技術シーズが出てきたときの投資は盛んである。大企業もベンチャーを上手く利用して、リスクを分散している。そのため、ベンチャーを核とした研究開発が活発に進む。</p>
	産業技術力	○	→	<p>ナノバイオマテリアルに必要なナノ加工技術はいまひとつ。海外のよい技術を買いたっている。</p> <p>FDAの審査はかなり厳しいが、規制の透明性が高く、治験のためのインフラはよく整備されている。産業化を促進する制度は進んでいて、市場に出てくるものもあるが、組合せ的なものが多いため、ブレイクスルーといえるような製品はなかなか出ていない。</p>
欧州	研究水準	○	→	<p>ある程度ユニークな素材が出てきているが、既存のものが多い一方で、地に着いた研究も多く、基礎研究の深みは米国よりはるかにある。高分子セラミックス複合体の研究がオランダを中心に進んでいる。特に骨関連の研究が多く、EU加盟国の中で、研究費投資が盛ん。特に、ナノバイオテクノロジー技術の再生治療、DDS展開と若手研究者の留学援助と育成に力を入れている。</p>
	技術開発水準	○	→	<p>EU全体が基礎から産業化までに一貫した体制を作るように動いている。特にスウェーデンは、産学連携に大変優れたシステムをもっている。</p> <p>ベンチャーを育成する文化が根付いており（特に北欧）、技術シーズが出てきた際の投資は盛んである。大企業もベンチャーを上手く利用して、リスクを分散している。そのため、ベンチャーを核とした研究開発が活発に進む。</p>
	産業技術力	○	→	<p>産業化を促進する制度的には、最も進んでいる。組合せ的なものが多いため、ブレイクスルーといえるような製品はなかなか出ていないものの、次々と新しいものが登場し、活況を呈している。</p>

中国	研究水準	△	↗	新たなコンセプトに基づくナノバイオマテリアルはほとんど出しておらず、既存の材料の改善や、欧米研究の追試と改良研究がほとんどである。基礎的研究の深みやオリジナリティは不足傾向。ただし、人口が多く、欧米留学者の帰国促進によって、研究の裾野は急速に拡大している。
	技術開発水準	×	↗	知的財産権の意識が低く、欧米、日本などの追試と模倣研究が多い。オリジナリティは不足傾向。しかし、人的資源と原材料資源は豊富なので、変化が著しく、動向の調査は必要。革新的な技術シーズはまだない。ベンチャーに対する投資は旺盛。
	産業技術力	△	↗	官民挙げて、産業化に力を入れている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行くようである。産業化は速く、日本、欧米企業の進出により、導入技術の発展は著しい。その一方で、革新的なシーズが不足している。
韓国	研究水準	△	↗	新たなコンセプトに基づくナノバイオマテリアルはほとんど出しておらず、既存の材料の改善や、欧米研究の追試と改良研究がほとんどである。基礎的研究の深みやオリジナリティも不足傾向。優秀な人材を欧米に留学させ、研究レベルの向上を狙っている。その成果が徐々に出てきている。
	技術開発水準	○	↗	急激な投資により開発力は付いてきている。米国の技術力を導入。グローバル化を目指していることが特徴。ベンチャーに対する投資も旺盛。
	産業技術力	△	↗	官民挙げて、産業化に力を入れている。米国のグローバル化を見本に技術力と産業化力のアップをねらっている。当局の審査体制は整備され迅速であり、治験のインフラも整備されてきている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行く。その一方で、革新的なシーズが不足している。
インド	研究水準	△	↗	セラミクスデザインとその応用研究レベルは高い。
	技術開発水準	△	↗	知的財産権の意識が低く、欧米、日本などの追試と模倣研究が多い。オリジナリティは不足傾向。しかし、人的資源と原材料資源は豊富なので、変化が早く、動向の調査は必要。革新的な技術シーズはまだない。
	産業技術力	△	↗	官民挙げて、産業化に力を入れている。そのため、すでに出来上がったものの認可等は比較的スムーズに行くようである。産業化は速い、日本、欧米企業の進出により、導入技術の発展は著しい。
シンガポール	研究水準	○	↗	材料表面加工、ナノ複合体の治療、予防、診断への応用研究のレベルは高い。欧米の大学との共同研究を推進し、レベルアップをねらっている。
	技術開発水準	×	→	産業が国内にないので、欧米のグローバル企業と協力体制をねらっている。
	産業技術力	×	↗	コメントなし
<p>全体コメント：</p> <p>日本は独創的なコンセプトに基づく優れたナノスケールのバイオマテリアルを数多く開発しており、研究ではトップレベルにあると考えられる。企業の技術レベルも高いが、大学、国立研究所と同じような基礎研究にその方向が向いていることが問題であり、企業は産業化を目指した基礎研究に課題がある。また、アカデミアと大企業をつなぐベンチャーの醸成が遅れており、死の谷は深い。臨床ニーズを出口にきちんと据えていない研究のための研究も多く認められる。日本はオリジナリティの高い研究を企業化していく手法をもっと欧米に見習うことが求められている。</p> <p>米国、欧州は研究レベルでは日本にやや劣るが、ベンチャー文化が盛んで、産業への橋渡し展開は日本より優れているため、製品化・産業化では先を行っている。</p> <p>中国、韓国はオリジナルな研究は少ないが、企業研究と産業技術力に関して、欧米、日本のよいところを積極的に吸収している。今後、その成果が現れると予想される。また、論文数は急速に増えているほか、国を挙げてベンチャー支援を含めた産業化を支援するような仕組みを整えつつあり、手をこまねいていると、特に産業化に関して日本が後塵を拝する可能性は少なくない。</p>				

(参考情報)

[1] <http://www.lakemedelsverket.se/english/>

[2] <http://www.vinnova.se/en/>

(註1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) 再生医療

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	iPS 細胞の移植による癌化を回避できる新たな作製技術が開発された。また、幹細胞の増殖分化を適正化する人工生体外マトリックスポリマーの開発も行われている。iPS 細胞に特化した研究所として、2010年4月1日にiPS細胞研究所が設立され、さらなるiPS細胞研究の展開が期待できる。また、現在臨床応用されている体性幹細胞の増殖分化能制御技術に関する進展もみられる。
	技術開発水準	○	↘	上記の癌化を回避する技術（非染色体組み込みiPS細胞作製）はディナベック株式会社の開発したものである。しかし、数年前には再生医療ベンチャーの旺盛な研究開発の取り組みが行われたが、投資ファンドからの資金不足もあり、数社をのぞいて企業レベルでの研究開発、特に臨床応用を目指しての再生医療技術開発は遅延している。
	産業技術力	△	↘	再生医療の周辺技術は着実に伸びている。しかし、欧米や韓国の数多くの再生医療製品が市場に出ているのに比し、現在日本で販売されている再生医療製品はジャパン・ティッシュ・エンジニアリング社の皮膚再生医療製品ジェイスのみである。現在申請中の製品はあるも、すべて時間がかかり、今後の産業力をつけるに際して許認可体制の刷新が望まれる。
米国	研究水準	◎	↗	分化した体細胞をもとに別の種類の体細胞を作るために、iPS細胞を経ずに直接体細胞から目的とする分化技術を種々開発しつつある。また、細胞分化を材料のtopographyにより調節する研究もなされ、この分野（幹細胞と材料科学）において世界をリードしている。例えば、ヒト間葉系幹細胞の分化がナノチューブ上で制御できうることを報告している。
	技術開発水準	◎	↗	ジェロン社は世界に先駆けてヒト胚性幹細胞（ES細胞）を脊髄損傷治療に用いた。また、アドバンストセルテクノロジー社は先天性網膜疾患患者へのES細胞移植治療について米食品医薬品局（FDA）の認可を得た。このように企業の研究が直接再生医療へつながるケースが出始めている。
	産業技術力	◎	↗	上記のような挑戦的な技術開発のみならず、バイオベンチャーと大手製薬企業とのallianceによる広範囲な再生医療技術開発が行われている。これらの技術開発に際して、政府から多額の研究費のサポートがある。
欧州	研究水準	○	→	幹細胞分化に影響する生体材料技術は再生医療においても基礎的な技術となりうる。オランダのLeiden大学やポルトガルのMinho大学では以前より積極的のこの方面の研究を行っている。また、イタリアのグループもカーボンナノチューブが培養神経細胞の電気活動のネットワークを促進することを報告した。全体的に研究水準は一定のレベルを保っている。
	技術開発水準	○	→	再生医療の実用化には細胞のキャリアとしてのバイオマテリアルの開発が必須で、ヨーロッパでは実用研究が盛んである。例えば軟骨再生に用いられる生体吸収性ポリマーの開発をドイツのBioTissue Technologiesが行い、ヒアルロン酸はイタリアのFAB（Fidia Advanced Biopolymers）が開発し、現在多くの患者に用いられている。
	産業技術力	○	↗	各企業単独での開発のみならず米国企業等との連携による技術開発も行われ、さらに再生医療に関する規制もEMEA（欧州医薬品審査庁）が欧州連合全域についての承認手続（集中的承認手続統一化）をおこなう方向性にあり、今後の産業技術力が高まるとおもわれる。
中国	研究水準	○	→	iPS細胞に関して2008年以後すでに9報以上報告されている。上海再生医療研究センター（STERC）を中心とするグループが精力的に種々の生体材料を用いて再生医療技術開発を行っている。また、Chinese Academy of Medical Scienceはナノテクの応用としてカーボンナノチューブをpolymer（polyurethane）に添加することによりpolymerの生体適合性をあげる研究を行っている[8]。
	技術開発水準	○	→	いくつかの企業が再生医療の臨床応用に取り組んでいる。四川省のBeike Biotechnologyではこれまでに5000人（海外からの患者は900人）の患者を臍帯血を用いて細胞治療したと報告し、これに関する論文も報告している。また、北京天壇普華医院ではパーキンソン病等の治療を患者自身の幹細胞を用いて治療している。
	産業技術力	△	→	技術開発に同じ。ただし、明確な規制の下に治療がされているか不明の点が多い。

韓国	研究水準	○	→	再生医療に使用される生体材料研究は活発に行われ、最近では nano particle と DDS による幹細胞の分化研究の報告もある。また、2009年に2nd World Congress of the Tissue Engineering and Regenerative Medicine International Society (TERMIS) ならびに2010年には World Stem Cells and Regenerative Medicine Congress Asia 2010 を開催するなど国際的に initiative を取るような動きもある。
	技術開発水準	○	→	再生医療における産業界の技術力は薬事承認を得た再生医療製品の数ならびに現在施行中の治験数に反映される。韓国の再生医療製品は少なくとも9つあり、治験中の案件は23件である。このように、韓国では企業による研究は高水準をたもっている。
	産業技術力	○	↑	技術開発水準に同じ。
<p>全体コメント：</p> <p>米国では、2001年8月にブッシュ前大統領がES細胞を使う研究に対する政府助成を禁止していたが、2009年3月、オバマ大統領がES細胞研究に対する連邦予算の助成を解禁したのは周知の事実である。このような状況の中、米食品医薬品局(FDA)はヒトES細胞をもちいる臨床研究計画を認可し、すでに数例の臨床応用が開始されている。iPS細胞に関する多くの報告もある。また、再生医療に関する論文ならびに特許出願は米国が断然トップの地位をしめている(特許庁平成20年度特許出願技術動向調査報告書：平成21年4月)。以上のように、この分野では米国は揺るぎない地位をしめている。</p> <p>特許庁調査では、日本の論文ならびに特許出願は米国について2位の地位をしめるが、上市された再生医療製品はわずかであり、韓国を含む他の諸国との差はあまりにも大きい。我が国においては今後iPS細胞を含む種々の基礎研究の成果をふまえて、この分野での企業の取り組みを奨励する環境を整えることが求められる。</p>				

(参考情報)

- [1] Fusaki N et. al. Proc. Jpn. Acad.,2009, Ser. B 85, 348-362
- [2] Yue XS, et. al. Biomaterials. 2010, 31(20):5287-96
- [3] Vierbuchen T et. al. Nature. 2010;463:1035-41
- [4] Oh S. et.al. PNAS 2009,106: 2130-2135
- [5] <http://www.alliancerm.org/press.html>
- [6] Oliveira JM, et.al. Biomaterials. 2009, 30(5):804-13
- [7] Cellot, G. et al.. Nature Nanotech 2009, 4: 126-133
- [8] Yang M et. al. J Nanosci Nanotechnol. 2010, 10(11):7550-3.
- [9] Yang WZ et. al. Journal of Translational Medicine 2010, 8:75-81.
- [10] <http://x-journals.com/2010/china-a-rising-star-in-regenerative-medicine-despite-world-skepticism-of-stem-cell-therapies/>
- [11] Jung Y et. al. Biomaterials. 2009,30(27):4657-64
- [12] Kurata K and CHO Y-H RIETI Discussion Paper Series 10-J-039, 2010: I

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(3) DDS (ドラッグデリバリーシステム)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	日本の大学・公的機関における研究レベルは欧米に劣らず非常に高い。固形がんに対するターゲティング型 DDS の基本原理でもある EPR (Enhanced permeation and retention) 効果は、東大・片岡らによって発見されており、現在内閣府 FIRST プロジェクトで関連研究が実施されている。DDS の開発において材料は極めて重要であり、この点において日本は高い優位性を有している。
	技術開発水準	○	↗	総合科学技術会議で「ナノ DDS」を府省連携プロジェクトとして位置づけ、各省によるナノ DDS のプロジェクトが実施されてきた。これによって、技術開発水準は上昇している。これらのプロジェクトでは、核酸医薬やイメージングのための DDS、物理エネルギーを利用した DDS など将来を見据えた研究開発も取り組まれた。
	産業技術力	○	↗	医薬品としては、リュープリンやスマンクスなどの国内発の DDS 製剤が早くから上市されている。また、我が国で開発された高分子ミセルなどの DDS 製剤の臨床試験が国内外で実施されており、実用化が期待されている。最近、DDS 製剤の薬価に対する考え方も変わりつつあり、DDS 開発の追い風となっている。日本では、ベンチャー企業の育成が今後の課題である。
米国	研究水準	◎	→	米国の大学・公的機関における研究レベルは非常に高く、世界をリードしている。NCI (国立癌研究所) によるナノテクアライアンスが設立され、標的発見研究の手法開発、分子イメージング・早期発見、予防とコントロール、in vivo イメージング、多機能治療薬、効果判定指標の 6 分野を分野横断的に発展させることを目標としている。また、ボストン大学 Center for Nanoscience and Nanobiotechnology (CNN)、UCLA California Nanosystems Institute (CNSI)、ノースウェスタン大学 Institute for BioNanotechnology in Medicine など、多くのナノテク融合研究拠点が設立され、DDS 研究が行われている。研究水準は高いが材料開発の面ではそれほど水準は高くない。
	技術開発水準	◎	↗	ナノ粒子の DDS として Doxil および Abraxane が FDA の承認を受けている。また、Mylotarg (抗 CD33 抗体 +calicheamycin) が急性骨髄性白血病に対して FDA の承認を受けており、アクティブターゲティング型 DDS 製剤として既に上市済みである。多くの DDS 医薬品を上市しているのは米国の高い技術開発水準によるものである。医薬品として実用化が期待されている siRNA に関しては、Alnylam 社が肝臓へのデリバリーのための DDS を開発し、従来型 DDS の 1/10~1/100 の siRNA 投与量で優れた遺伝子ノックダウン効果を達成することに成功した。
	産業技術力	◎	→	近年、抗体、siRNA、アプタマーなどの次世代バイオ医薬の DDS 製剤の開発を目指したベンチャー企業などが多く設立されている。Johnson & Johnson 社が Alza 社を買収したようにメガファーマがベンチャー企業を丸ごと買収するなど、豊富な資金力による短期間での生産技術力の伸展にはめざましいものがある。
欧州	研究水準	◎	↗	欧州の大学・公的機関における研究レベルは非常に高い。欧州は、高分子-薬剤コンジュゲート、リポソーム、ナノ粒子など、第一世代の DDS の多くを世界に先駆けて開発してきた。近年も、遺伝子デリバリーシステムの研究開発などにおいて、世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	→	欧州科学財団 (ESF) が、2005 年に「ナノメディシンの科学的将来展望」と題した方針発表を行い、欧州が首尾一貫したアプローチによってナノ DDS の研究開発を進めることによって、米国や日本に対する競争力を強化している。スイスの The Swiss Nanoscience Institute (SNI) 等のナノテク融合研究拠点やドイツの Nanosystems Initiative Munich (NIM) 等のリサーチクラスターが設立され、活発な DDS 研究が行われている。
	産業技術力	◎	→	医薬品としては、PEG 化タンパク質医薬品や加齢黄斑変性に対するリポソーム製剤 (Visudyne) など DDS 製剤が次々に実用化されている。欧州の製薬企業は、メガファーマの資金力を背景に、高い技術力を有しており、また、新薬の試験体制も整っていることから、今後も高い水準を維持するものと考えられる。

中国	研究水準	△	↗	中国では、中国科学院と中国教育部との共同出資で、The National Center for Nanoscience and Technology (NCNST) を北京大学と清華大学の構内に2003年に設立し、ナノテクノロジーおよびナノバイオテクノロジー研究を推進している。特に、NCNSTでは、ナノマテリアル、ナノデバイス、ナノバイオロジーに重点を置き、中でもナノDDSは高い関心を集めている。DDSに対する論文数や特許は、指数的に増加している。
	技術開発水準	△	↗	科学技術人材の呼び戻し政策の継続的実施により、優秀な留学生在が多数帰国しているが、このような人材を中心に、国際共同研究を進め研究水準および技術開発水準が急速に上昇している。
	産業技術力	△	↗	医薬品開発においては、臨床研究などの法的拘束が少なく、今後DDSの臨床治験が進む可能性が高い。また、中国ではバイオベンチャーが数多く設立されており、DDS関連においても今後ベンチャー企業が増えていくものと思われる。
韓国	研究水準	○	↗	1994年にバイオナノテクノロジー促進基本計画が制定されて以来、当該分野への研究開発投資額が年に約30%ずつ増加し、2005年には全研究開発投資額の10%を占めるようになった。韓国では、日本のCOEプロジェクトにあたるBrain Korea 21 (BK21) やその後継プログラムに当たるNew University for Regional Innovation (NURI) に採択されている延世大学、亜州大学、漢陽大学等が、超高感度ナノバイオセンサーによる癌と梗塞の早期診断、多機能型ナノハイブリッド材料によるナノ治療、生体内外での診断とバイオイメージング等の研究を精力的に行っている。
	技術開発水準	△	↗	ナノバイオに関しては、国家レベルでのインフラ整備が進められており、Seoul National University や Yonsei University などの重点的な投資により、臨床まで見据えたナノDDSの研究プロジェクトが進められており、技術開発水準も上昇している。
	産業技術力	△	↗	医薬品としては、有力な製薬企業は存在しないが、サムヤン ジェネックス社は、高分子ナノ粒子を利用した制ガン剤や siRNA の DDS 製剤の研究および臨床治験を進めており、産業技術力は着実に上昇していると言える。サムヤン ジェネックス社のパクリタキセルを内包した高分子ミセル製剤 (Genexol-PM) は、国内では上市済みである。また、ベンチャー企業の動きも要注目である。
<p>全体コメント：</p> <p>DDS 研究への関心が世界的に高まっており、世界中でナノテク融合研究拠点が設立され、分野融合的な DDS 研究が行われている。</p> <p>DDS 研究では、材料開発が非常に重要であり、この点において日本は世界をリードしているといえる。一方、医薬品開発に関しては、ターゲティング製剤や PEG 化タンパク医薬で多くの製剤の上市が見込まれるが、欧米が世界をリードしており、日本ではベンチャー企業の育成が今後の課題である。また、siRNA などの核酸医薬の実用化のためには DDS 開発が必要不可欠であり、世界中で活発に研究が行われている。論文、特許とも中国の伸びが顕著な技術でもある。</p>				

(参考情報)

- [1] Matsumura, Y., Maeda, H. (1986) A new concept for macromolecular therapeutics in cancer chemotherapy: mechanism of tumorotropic accumulation of proteins and the antitumor agent Smancs. *Cancer Res.* 46, 6387-6392.
- [2] 総合科学技術会議 科学技術連携実施策群 ナノバイオテクノロジー連携群 成果報告会 (主催：内閣府) 平成 21 年 1 月 28 日 日本科学未来館、東京
- [3] Matsumura, Y., Kataoka, K. (2009) Preclinical and clinical studies of anticancer agent-incorporating polymer micelles. *Cancer Sci.* 100, 572-579.
- [4] <http://nano.cancer.gov/>
- [5] Davis, M. E., Chen, Z., Shin, D. M. (2008) Nanoparticle therapeutics: an emerging treatment modality for cancer. *Nature Rev. Drug Discov.* 7, 771-782.
- [6] Semple, S.C., Akinc, A., Chen, J., Sandhu, A.P., Mui, B.L., Cho, C.K., Sah, D.W.Y., Stebbing, D., Crosley, E.J., Yaworski, E. et al. (2010) Rational design of cationic lipids for siRNA delivery. *Nature Biotechnol.* 28, 172-176.
- [7] Duncan R. (2003) The dawning era of polymer therapeutics. *Nature Rev. Drug Discov.* 2, 347-360.
- [8] <http://www.esf.org/>
- [9] <http://www.nccr-nano.org/nccr/>
- [10] <http://www.nano-initiative-munich.de/>
- [11] <http://english.nanoctr.cas.cn/>
- [12] <http://bnc.krf.or.kr/home/eng/nuri/aboutnuri.jsp>
- [13] Kim, T.Y., Kim, D.W., Chung, J.Y., Shin, S.G., Kim, S.C., Heo, D.S., Kim, N.K., Bang, Y.J. (2004) Phase I and pharmacokinetic study of Genexol-PM, a cremophor-free, polymeric micelle-formulated paclitaxel, in patients with advanced malignancies. *Clin. Cancer Res.* 10, 3708-3016.

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(4) バイオデバイス (医療)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	マイクロシステム分野最大の国際会議であるマイクロ TAS(Total Analysis System) などにおける日本の発表件数はトップレベルであり、マイクロ・ナノ化学システムやセンシング技術における研究レベルは依然として高い。しかし、ここ数年横ばいの状態が続いており、アジアの他の国々の追い上げが激しいことを考慮すると、相対的には若干低下の傾向にある。
	技術開発水準	○	→	これまで同様、加工技術、センシング技術、流体制御技術、バイオマテリアル、さらにはそれらのデバイス化、システム化技術において、独法、企業においても堅実な技術開発が行われており、大きなポテンシャルを有している。総合的な技術開発力が要求されるバイオデバイスにおいては、日本は依然とし高い優位性を有していると考えられる。また、具体的な疾病を対象とした医療応用開発が増えてきている。
	産業技術力	△	→	いくつかのベンチャー企業がマイクロ化学チップを用いたデバイス・システムを実用化しているがここ数年はほぼ横ばいであり、新たな展開が見られない。依然研究市場が中心である。機械・電気分野では技術的に高いポテンシャルを持っているが、医療・バイオ応用ではマーケティング力、企画力、提案力が弱いように感じる。特に医療分野においては、認証をふくめて実用化の障壁が高く、ベンチャー企業においては公的なサポートが必要である。半導体関連企業や化学系企業など新たにマイクロデバイスに参入を希望する企業もあるが、個別のアクティビティであり全体として大きな流れになっていない。市場創成や大量生産技術によるコスト競争力強化も引き続き大きな課題である。
米国	研究水準	◎	↗	従来から高い研究開発力を有しており、国際会議における発表件数や発表の質が依然トップレベルであり、本分野を率いている。また、一分子レベルでのシーケンス技術開発やがん細胞の分離・診断などの研究開発に加えて、単一細胞分析や幹細胞の分化誘導デバイス、診断薬の合成 (PET 診断試薬) デバイスなどの新たな研究開発も非常に活発であり、引き続き本分野をリードすると思われる。
	技術開発水準	◎	→	本分野に関連した半導体技術、MEMS 技術、エレクトロニクス技術などの要素技術、さらにはデバイス技術・システム化などにおいて非常に高い技術開発力をアカデミア、ベンチャー、大企業にそれぞれ備わっているように見受けられる。ベンチャー企業の開発力をうまく活用しながら、大学発の基礎研究を実用化できるレベルまで引き上げ、大企業がそれを買収してブラッシュアップし、世界中に販売する、というモデルが機能している。
	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、Agilent technology 社の分離チップなど既存の企業に加えて、現在非常に多くのベンチャー企業 (30 社以上) が本分野 (マイクロアレイ、マイクロフルイディクス) に参入しており、産業技術応用は非常に活発である。2010 年は特に大企業が大きな決定をしており今後の動向が注目される。
欧州	研究水準	◎	→	EU 内で (国を越えて) 大きなプロジェクトが推進されており、研究が活性化している感がある。当初トレンドであった DNA チップの研究は、すでに実用化フェーズへと移り、近年は細胞培養デバイスや細胞診断デバイスの研究が主流となっている。スウェーデンを中心として、独自の DNA 分析技術やタンパク分析技術を有しており、医工連携によるメディカル応用への研究開発力が強く、circulating tumor cell (CTC) の診断プロジェクトなどの単一細胞レベルの分析に関するプロジェクトが進められている。近年、IMEC、LETI-CEA など半導体デバイスの先端的研究の基盤インフラを医療・バイオ分野に応用展開する動きも活性化の driving force の一翼を担っている。
	技術開発水準	△	↘	マイクロ化学がもともとは欧州から発展してきたこともあり、高い技術力を有している。しかし、近年 DNA の分離技術から一般的な化学・バイオへ移行してきて以降は、特に大きな技術的な進展は見られない。特徴が生かせる市場開拓、医療応用への展開などが課題である。
	産業技術力	△	→	高い技術水準の割にはベンチャーを含めた企業のアクティビティは米国・アジアに比べ全体的に低い。従来から、ドイツの Ehrfeld Mikrotechnik 社やオランダの Micronit Microfluidics 社など、マイクロ化学チップや周辺デバイスを提供する会社はあるものの、デバイス化・システム化においては米国や日本に劣っており、新たな市場を創成する勢いは見られない。ベンチャーがうまく機能すれば、産業化が進む条件はあるように思われる。

中国	研究水準	○	↗	復旦大学、浙江大学、南京大学、中国科学院、東北大学を中心に、バイオ（タンパクの検出）や医学への応用（癌の診断など）に向けたマイクロ化学チップの基礎研究に大きな予算がついている。また、急激な経済発展に伴う安全・安心への要求の高まりに伴い、食品の検査（農薬、ウィルス、アレルギーなど）や医療診断などの検査デバイスの開発など、緊急の問題に対する開発が急速に進められている。これまでは従来技術の改良技術が主であったが、独自の技術開発が見られるようになってきた。
	技術開発水準	△	→	大学においては、バイオデバイス分野への大きな予算の配分に伴い、研究環境・設備が充実しており、それに伴って欧米や日本の技術レベルに追いついてきている。しかし、まだ改良技術が主であり、基礎研究とともに今後独自の技術がでてくると考えられる。企業の技術開発力はまだ未知数であるが、実試料評価や動物実験などを行いやすい環境にあり、今後実用化開発が進むと考えられる。
	産業技術力	△	→	バイオデバイス分野に関してはまだ基礎研究が中心であり、大きな実用展開の流れは見られず、医療・バイオ分野の製品化例は少ない。しかし、急速な経済発展にともない、安全・安心に関するさまざまな診断・分析技術が要求され、市場も巨大であることから、今後産業技術力も向上していくことが考えられる。
韓国	研究水準	○	↗	Lab on a chip や Biochip など関連研究に政府が力を入れており、産学連携によって研究を進めている。当初は DNA やタンパクの分離分析が主であったが、近年はソウル大学、POSTECH、KAIST、YONSEI 大学、KIST などの大学あるいは研究所で細胞培養デバイス、Drug discovery デバイス、癌などの疾病診断デバイスなどの研究が進められている。基礎研究においては、従来の改良型の研究フェーズを脱して、独自の技術を構築しつつある。医療・バイオ応用ではないが、昨年 Angew. Chem. Int. Ed に掲載された“イオン回路”は新しい概念に基づくデバイスの提案であり、“More than Moore” デバイスの一つとして注目している。
	技術開発水準	○	→	高度に発達した半導体技術を利用した DNA, タンパク質の固定技術、流体制御技術、MEMS 技術、さらにはこれらのデバイスが技術を有している。しかし、新たな展開は特に見られない。
	産業技術力	○	→	バイオチップ分野において、サムスン電子や LG 電子などの大企業（半導体技術を応用したマイクロ PCR のための温度制御デバイス、微小電極や薄膜を用いたセンサーなど）、KMDT、Biomedlab、e-biogen、Macrogen などのベンチャー企業（細胞やウィルス検出デバイスなど）から実用化が積極的に進められている。全体的に半導体・MEMS 技術を応用した DNA やタンパクの検出技術など既存の応用分野が主であり、新しい応用展開は見られない。
<p>全体コメント：</p> <p>汎用的マイクロ集積化で 2000 年より先導してきた日本は依然として非常に高い研究開発力、技術開発力を有している。ただし、欧米、アジア間での研究者の移動の活発化、欧米で教育を受けたトップクラスの研究者が母国に帰り研究を指導するなどの理由により、研究開発分野におけるアジアの他の国の台頭が著しい。例えば、マイクロ TAS 国際会議（採択率 50%）ではシンガポール・台湾・韓国などがすでに欧州の国々の採択数を上回っている。これまで欧米や日本の改良技術が中心であったが、近年では独自の方法論や技術も増えてきている。</p> <p>全体としては、依然米国が豊富な資金力と人材を背景に基礎・産業応用ともに先導しているが、医療分野などへの本格的な実用化には至っていない。日本においてもシステム化で先導している企業があるが、研究市場が対象であり飽和している状態である。規制認証におけるベンチャー企業への支援や、信頼性向上・コスト低減などの技術的側面、新規技術の啓蒙・市場創成など多方面からのサポートが必要である。</p>				

(参考情報)

[1] TAS2009, 2010 などの学会

[2] J-H. Han, K. B. Kim, H. C. Kim, and T. D. Chung: Angew. Chem. Int. Ed., 48, 3830 (2009)

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

(5) バイオセンサ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	ナノデバイスやナノマテリアルを活用したバイオセンサ研究開発については、世界的にも先導的立場であり、研究水準は全般的に高いが、近年の論文数は横ばいとなっている。従来、酵素センサ等で日本が世界をリードしてきたが、欧米各国の追従により、現在トップレベルであるとは断言できない。今後は、カーボンナノチューブといった、日本発のナノテクノロジー技術との融合により、技術のグローバル化が期待される。
	技術開発水準	◎	→	<b>MEMS</b> を中心としたマイクロデバイス分野の技術を用いたバイオセンサの開発が、半導体メーカー等を中心に積極的に進められている。非侵襲型の簡易血糖計の開発は米国と並んで先頭を走っている。両国とも <b>FAD</b> 未認証だが、将来大きな市場を予想できる。 <b>LSPR</b> (局在表面プラズモン共鳴) チップの量産をめざして東工大と田中貴金属が、独自の手法を展開。その他、ナノインプリント法による <b>LSPR</b> チップ作成などが阪大などで進んでいる。
	産業技術力	◎	→	生産能力、製品管理能力は非常に高い。マルチチャンネル対応小型 <b>SPR</b> 装置 (NTT アドバンステクノロジー)、シリコン基板バイオチップを用いた反射干渉分光型の装置 (コニカミノルタオプト) から販売されている。田中貴金属は、金ナノ粒子を用いた新たなイムノクロマトを開発しており、インフルエンザ、 <b>PSA</b> (前立腺特異抗原)、豚肉などの製品開発事例が見受けられる。 <b>CNT</b> やグラフェンをもちいた <b>FET</b> デバイスや金ナノ構造 <b>LSPR</b> チップについては、今後量産技術などの開発が求められる。
米国	研究水準	◎	↗	研究水準は全般的に高く、近年の論文数は増加傾向となっている。バイオセンサ全般に関する理論と実現ともにトップを走っている。特に、医療健康診断や安全安心分野への応用が積極的に図られている。
	技術開発水準	◎	↗	酵素センサとして代表的な血糖測定器において、 <b>Dexcom</b> 社では1週間の連続血糖測定を可能とした針型血糖測定器が <b>FDA</b> から認可されており、その市場も拡大傾向にある。特許も米国のみならず、日本、オーストラリア、ヨーロッパで取得しており、今後のグローバル化に期待できる。アメリカの <b>Abbott</b> 社、 <b>Medtronic</b> 社が <b>Dexcom</b> 社に追従している。伝統的な血糖センサについては、 <b>Abbott</b> 社、 <b>Johnson &amp; Johnson</b> 社は大きな世界シェアを占有している。また、 <b>DNA</b> 、 <b>RNA</b> 技術に基づく次世代遺伝子診療センサの開発も進んでいる。
	産業技術力	◎	↗	生産能力、製品管理能力は非常に高い。開発と事業化の両面でも高い水準を維持している。大学等の成果を基礎としたベンチャー企業が多数生まれており、これらの市場競争を背景に産業技術力への展開が進められている。
欧州	研究水準	◎	→	大学、企業ともに研究水準は全般的に高い。研究者と医療機関などの共同研究に力を入れている。特にセンサに関する基礎研究が多い。英国、フランス、ドイツ、スウェーデン、スイス、スペイン、イタリアなど欧州の多くの国で積極的に研究が進められている。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は高い。
	産業技術力	◎	→	生産能力、製品管理能力は非常に高い。
中国	研究水準	◎	↗	バイオセンサ関連の論文数は年々増加傾向にあり、研究者層の広がりも見られる。この十年間 (2000～2010) でバイオセンサ全般に関する学術論文の発表数はアメリカを抜いて1位となった。国レベルの公的研究資金の大量投入が一つの要因と考えられる。全般的に見ると模倣的な研究も多く、研究の質はまだ高くないが (バラツキが大きい)、中国科学院、南京大学などは世界に並ぶレベルである。多くの海外留学生および外国企業での研究経験者の帰国により、今後の研究水準はさらに向上すると考えられる。特に、ナノテク、ナノ材料の国家戦略に応じてナノ材料に基づくバイオセンサの研究に注力している。タンパク質とナノ材料との複合化・固定化に関する研究が多い。
	技術開発水準	△	↗	高い研究水準に比べて、技術開発の水準は落ちるのが現状である。経済の急激な発展と伴って、医療、健康あるいは食品分野にバイオセンサの市場規模は急速に増加しているが、マーケットシェアは外国の製品が主流である。しかし、高度な測定装置も導入されたラボなども増えており、ナノバイオセンサ開発に関連する基盤も整ってきていることから、外国の技術を真似しながら、自己開発もできるベンチャー企業は近い将来急速に成長することが予想できる。血糖計、インスリンポンプなどの製品の開発と生産能力は外資系と比べて差は縮んでいる。
	産業技術力	×	↗	現段階ではコピー製品が多いが、研究と技術開発能力の向上により、将来国産能力が高まることが予想できる。

韓国	研究水準	○	↗	模倣的な研究が多いが、ナノマテリアルを用いたバイオセンサ研究はきわめて熱心である。海外経験を持つ研究者の数も増えているので、さらにレベルが上がるのが予想できる。バイオセンサ関連の論文数は年々増加傾向にある。
	技術開発水準	○	↗	開発水準は高い。
	産業技術力	×	↗	Samsung や Hyundai などの大手企業において研究開発が積極的に進められている。バイオに関する様々なセンサ製品を開発し、売り上げを伸ばすことが予想できる。

全体コメント：

バイオセンサの応用先として、医療・環境、食品等分野が挙げられ、巨大な市場が期待できることから、世界中の研究機関で積極的に研究が行われている。しかしながら、現在市場として成り立っているのは医療分野であり、そのほとんどが血糖測定である。日本は、研究開発において世界をリードしてきたが、近年米国は、連続血糖測定が可能な血糖測定器の開発・販売を開始しており一歩リードしているといえる。また、インスリンポンプとの組み合わせにより、将来的な人工膵臓の応用が期待できる。

第20回 Biosensors2010 の国際会議（2年に一度開催される最も歴史のある国際会議）においては、全体で約850件の発表（口頭、ポスターとあわせて）のなかで200件以上がナノテク関連であった。特に、ナノエレクトロニクス、ナノプラズモニクス、ナノマテリアルに関するバイオセンサが多い。

Scopus でアブストラクト、タイトル中にキーワードが入っている論文数を各年で調べると、グラフェンが2010年に急激に増大した。ナノ粒子も増え、SERS（表面増強ラマン散乱）による細胞センシング解析する内容も増えている。また、Science direct を用いて調べた調査でも Biosensor と Nanotechnology に関するキーワードと内容が増加している。さらにバイオセンサに関連する各国の論文数を調べると、中国、韓国の増加傾向は著しい。

(参考情報)

- [1] 最新センサ技術とその用途—安全・環境・健康のために—（東レリサーチセンター）
- [2] Dexcom 社ホームページ：<http://www.dexcom.com/>
- [3] 国際特許：(WO/2008/042625) ANALYTE SENSOR
- [4] ISI Web of Knowledge
- [5] 生物传感器产业现状和发展前景（中国のバイオセンサの産業現状と発展前景）

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(6) 分子イメージング (生体プローブ含む)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	理化学研究所 (ERATO)、東京大学 (CREST)、名古屋大学 (FIRST、ERATO) など、国研や大学等において、試薬開発等は活発に行われている。電子顕微鏡の開発は世界トップレベルと思われる。光学顕微鏡の開発のレベルも高い。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。
	技術開発水準	○	↑	新規顕微鏡開発、高感度カメラ開発において世界の最先端を行く企業が多い。超解像度のレーザー顕微鏡開発ではドイツに遅れをとることが多い。高性能カメラ、試薬等の開発では欧米と対等あるいは一部遅れをとっている。
	産業技術力	◎	↑	ニコンが、超解像レーザー顕微鏡を上市するなど、企業における顕微鏡の新規製品開発能力はドイツと双璧であろう。
米国	研究水準	◎	↑	顕微鏡の新規技術およびイメージング試薬の開発が多くの主要大学および NIH において進んでいる。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。さらに、イメージングの臨床応用では、世界の最先端研究が多く行われている。
	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が、超解像レーザー顕微鏡では日欧に遅れをとっている。
欧州	研究水準	◎	↑	顕微鏡・イメージング試薬開発が活発に行われている。とくに光学顕微鏡の開発においては、目を見張るものがあり、超解像レーザー顕微鏡の新規原理の大半は、ドイツ等で開発されている。光、超音波、NMR などを使ったイメージングにおいてもレベルは高い。特に、独創性のある発明が多く見られる。
	技術開発水準	◎	↑	世界最高性能の顕微鏡を研究開発する企業がある。
	産業技術力	◎	↑	Lieca 社および Carl Zeiss 社で超解像レーザー顕微鏡を上市するなど、本分野における最先端技術開発力を保持している。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。特に、米国から帰国した多くの研究者が活発に研究を開発している。
	技術開発水準	×	→	ベンチャーで研究開発が開始されつつある。
	産業技術力	×	→	産業技術はまだ確立されていない。
韓国	研究水準	△	→	大学において、イメージングの基礎研究が開始されている。米国より優秀な研究者が帰国して研究を開始している。とくに KAIST は優秀な研究者を集めている。
	技術開発水準	△	→	ベンチャーで研究開発が開始されつつある。顕微鏡本体以外のイメージング関連製品について、いくつかのベンチャーがユニークな開発研究を行っている。量子ドットなどの研究も活発である。
	産業技術力	△	→	周辺技術の製品化が進みつつある。

全体コメント：

分子イメージングは、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。特に、今年になり日独の3社が超解像レーザー顕微鏡を上市し、現在、熾烈な光学顕微鏡の解像度向上および市場獲得争いが起こっている。

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。イメージングの応用において、米国では動物実験による実証が進んでいるが、日本・欧州はこの点で少し遅れている。

(参考情報)

- [1] ニコン 超解像レーザー顕微鏡 N-SIM(Structured Illumination Microscopy) および N-STORM(Stochastic Optical Reconstruction Microscopy) <http://www.nikon-instruments.jp/jpn/page/products/nsim.aspx>
- [2] Leica 社 超解像 STED (stimulated emission depletion) レーザー顕微鏡 TCS STED CW <http://www.leica-microsystems.com/jp/products/confocal-microscopes/details/product/leica-tcs-sted-cw-2/>
- [3] Carl Zeiss 社 超解像レーザー顕微鏡 PALM(Photoactivated Localization Microscopy) および SR-SIM(Structured Illumination Microscopy) <http://www.zeiss.de/microdissection>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(7) 食品

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↑	農水省のナノテック研究プロジェクトを、農研機構食品総合研究所が中心となり大学等との協力の下、食品のナノ化による新規な特性や安全性に関する評価を進めている。また、国立医薬品食品衛生研究所においても安全性評価が行われており、総合的に見て研究水準は高いと考えられる。
	技術開発水準	◎	↑	シリコンプロセスで作製したマイクロチャネルアレイにより、極めて均一な粒径で乳化が可能な技術が開発されている。生産量の向上に向けた研究も進行中であり、世界的にも高い技術を有する。
	産業技術力	○	↑	サプリメントの開発が積極的に行われ、市販されている。多くは中小企業であるが、大企業でも開発を行っている例がある。また、印刷技術などを応用したガスバリア包材等においても高い技術をもつ。
米国	研究水準	◎	↑	農務省主導の下、2006～2010年にかけて、食品ナノテックに関連する分野に約16.8百万ドル援助を行なっている。食品包材やセンサに関する技術が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↑	ナノテックを利用した機能性食品包材や危害因子を検出するセンサ開発が盛んであり、さらにセンサ機構の包装への組み込みも行われている。またデリバリーシステムとしてのリポソームカプセルやナノスケールキャリア等の研究・実用化が行われている。
	産業技術力	○	↑	市販商品としては日本と同様、サプリメント類が多いが、包材やセンサ等、流通工程でのナノテック利用も進んでおり、技術力は高い。
欧州	研究水準	◎	↑	日米に比べて、安全性研究の比重が大きく、社会科学的取り組みも進んでいる。ナノ食品そのものの開発は少ない。現在は、サイズに関する規制は無いが、食品添加物については将来規制される可能性もある。
	技術開発水準	◎	↑	研究のレベルは高く、EU域内の大学、研究機関と大企業からなる共同体で研究が行われ、粒径100nmのカロテノイドや各種サプリメントが開発されている。安全性に関しては、不溶性ナノ粒子の体内吸収性やナノ粒子と他の成分の結合にその影響に関する研究が積極的に行われている。
	産業技術力	○	↑	製品としては、ナノ食品・サプリメントの開発は少なく、食品添加物が多い。安全性に関しては多数の論文が出されている。
中国	研究水準	△	↑	ガスバリアフィルムやセンサに関する論文があるが数は少ない。
	技術開発水準	△	→	主に銀ナノ粒子を利用した抗菌製品が中心。ナノ化した茶などの製品が少数見受けられる。
	産業技術力	△	→	少数の食品関連ナノ製品が販売されているが、数は少ない。
韓国	研究水準	△	→	ナノクレイ等を使用したフィルムやナノ毒性に関する論文が出されているが、数は少ない。
	技術開発水準	×	→	銀ナノ粒子を利用したキッチンウェア類が数種類市販されている。食品そのもののナノ化に関しての情報は乏しい。
	産業技術力	△	→	少数の食品関連ナノ製品が販売されているが、数は少ない。
台湾	研究水準	△	↑	国家科学会議のデータベースを使用した食品ナノテックの調査が行われている。
	技術開発水準	△	↑	銀ナノ粒子を利用した抗菌製品が開発・市販されている。また、特殊なものとしては、薬草のナノ化の研究が行われている。
	産業技術力	△	→	少数の食品関連ナノ製品が販売されているが、数は少ない。

全体コメント：

総合的な研究開発レベルとしては、米国・欧州が先行しており、日本がそれに次ぐ。米国と欧州では、米国が多数のサプリメント製品やナノサイズキャリアの開発を進めているのに対し、欧州は食品そのもののナノサイズ化には積極的でなく、ナノ食品の安全性に関わる研究が進められている。一方、中国、韓国の場合には、銀ナノ粒子を使用した抗菌キッチンウェアが中心であり、技術力はそれほど高くないと考えられる。台湾では、ナノ食品及び関連製品の調査が行われており、ナノミセル、銀ナノ粒子、ナノ化薬草などが開発されている。なお、台湾にはナノテックを使用した優良工業製品にナノマークを付ける制度があるが、食品には適用されていない。

(注1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

### 1.2.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) バイオマテリアル

バイオマテリアルは、表面材料、DDS（薬剤送達）材料、構造材料と大きく分類することができる。前二者に関しては、日本において世界トップレベルの研究とその応用展開が進んでおり、活況を呈している。典型例は、石原（東大）のMPC（2-メタクリロイルオキシエチルホスホリルコリン）ポリマーによるコーティング、岡野（東京女子医科大）の細胞シート工学、片岡（東大）のブロックコポリマーによるミセルなどである。

これに対して、構造材料の研究は金属材料が中心で、用いることのできるセラミックス、ポリマー材料は極めて限られており、今後の発展が望まれる。最近の注目すべき動向としては、東大の鄭らによるセラミックスやポリマーの三次元形状を精密に制御することで、機能や強度を飛躍的に高める試みがある。

表面材料、DDS材料、構造材料という3つの異なる材料をバランス良く開発して発展させていくことが臨床応用や産業化を目指した際には重要であり、これらを組み合わせることで、さらに高機能なバイオマテリアルが生まれることが期待される。

ナノバイオマテリアル技術を活用した、細胞研究、創薬研究、再生治療への応用は今後、注目されるべき研究領域である。

ナノ加工技術を利用して細胞の増殖、分化をコントロールできれば、これは細胞の生物医学研究、創薬研究を進展させ、その成果は再生医療（治療）に大きく貢献することは疑いない。体内にある細胞の増殖分化を促す表面ナノ加工材料（一般的には足場材料と呼ばれている）があれば、再生治療も可能となる。そのために今後は、ナノバイオテクノロジー研究成果を中小企業をもつ「モノ作り」技術とうまく組み合わせることが大切であり、中小企業の技術を活用するためのしくみ作りが必要不可欠である。具体的には、材料の表面と3次元内部構造のナノオーダー加工によって、細胞の増殖分化挙動を制御するナノバイオマテリアルを創製する。この技術は、細胞の生物医学研究と細胞を用いた創薬研究の発展に大きく貢献する。加えて、質の高い大量の細胞の調製を可能とし、移植再生医療のための細胞を得るキー技術となりうる。

#### (2) 再生医療

再生治療には3つの出口がある。1つ目は新しい治療法の研究開発。2つ目は体内の細胞能力を高めて適用外治療を適用内にする。3つ目は、細胞能力を促し自然治癒力を高めることで、病気の悪化進行と抑制することである。

分化した体細胞をもとに別の種類の体細胞を作るには、山中教授（京大）の開発した新型万能細胞の人工多能性幹細胞（iPS細胞）を作製し、このiPS細胞を分化誘導して目的とする細胞を作る方法があるが、作製された細胞には元のiPS細胞が混在する可能性がある。この混在するiPS細胞は移植により腫瘍を発生する可能性があり、iPS細胞由来の分化細胞を再生医療へ用いるにはまだまだ乗り越える壁がある。

この腫瘍発生の危険性を回避するための一つの手段として、iPS細胞を経ずに直接体細胞から目的とする細胞を得るための分化技術が米国を中心に開発されつつある。こうした方法ですでに、神経細胞や心筋細胞などの作製例の報告が最近なされている。iPS細胞は種々の細胞へ分化しうるため汎用性のある技術となりうるが、特定の疾患治療においては、

このような技術がより安全に用いられる可能性がある。

再生医療には種々の細胞が用いられるが、多くの疾患においては生体材料も必要とする。以前より、生体材料の開発研究が各国で行われ、すでに多くの材料が実際の臨床の場で用いられるようになってきている。しかし、これらの多くは単なる細胞のキャリアとしての役割で使用されている。この点において、細胞に能動的に働きかけ、その増殖と分化に好影響を与える材料の開発がカーボンナノチューブの利用等によるナノテクノロジーによりなされつつある。今後の展開を期待したい。

### (3) DDS (ドラッグデリバリーシステム)

DDS とは、活性をもつ Drug とナノバイオマテリアルと組み合わせることで、Drug 活性を高める普遍的な基盤技術である。多大な経費をかけ、長期にわたる新規化合物のスクリーニング期間を必要とする現在の新薬開発と比べて、既存の薬物を患部へ送達するための最適化を行う DDS 医薬品の開発プロセスは低コスト化を実現でき、極めて効率的である。また、DDS 医薬品は高い薬価が期待できる一方で、副作用対策費や入院費・通院費を抑制することができるためにトータルとしての医療費を圧縮する効果がある。このことは米国で承認されているアブラキサン (パクリタキセルを内包したアルブミン粒子) の例などで明らかになってきている。

治療だけではなく予防、診断にも適用できる。細胞への遺伝子導入、細胞の増殖分化促進のためにも利用可能である。再生医療における DDS 技術応用は日本がリーダー的位置を占めている。細胞内に Drug を取り込ませ、細胞機能を人為的に改変、増強する技術も DDS である。

分子生物学の急速な進歩によって疾患のメカニズムが分子レベルで明らかになり、遺伝子治療や siRNA などの核酸医薬による分子療法は、21 世紀の先端医療における革新的治療法として期待されている。このような革新的治療法の実用化にあたって、技術面での鍵を握っているのが、標的まで治療分子をデリバリーする一方で、その分子を細胞内で効率的に機能発現させることのできるデリバリーシステムの開発である。特に、siRNA の実用化のため、現在までに世界中の公的研究機関や大手製薬企業が siRNA のデリバリーシステムの開発に躍起になっているが、臨床的に未だ有用なシステムが開発されていない。

一方、診断と治療の機能を一体化した DDS (Theranostics) も高い注目を集めている。DDS に、MRI 造影剤などのイメージング分子を搭載することによって、DDS の患部への集積から治療効果までをイメージングにより追跡することができる技術であり、これにより「手遅れの無い」確実な薬物治療の実現が期待される。

### (4) バイオデバイス (医療用)

この領域においていくつか実用化され基盤技術も整備されてきたことに伴い、特に単一細胞レベル・単一分子の分析・診断技術や高度医薬品・診断薬の合成デバイス、再生医療用デバイスなどの新しい分野でのより高度な展開が見られる。今後、これらに付随する周辺技術・方法論など、次世代の新たな研究開発が医療、生物学と機械・電気・化学分野が融合しながら一層推進されると見込まれる。

単一細胞・単一分子の分析では、例えば、血液中の 10 億個の細胞からたった一つの癌 (循環腫瘍) 細胞 (CTC) を分離・分析するデバイスの開発競争が世界中で繰り広げられており、

大きな予算が付いている。

また、分析デバイスだけでなく、希少な医薬品などの合成への展開も見られる。例えば、PET 画像診断では放射性核種で標識した非常に高価な診断薬を投与するが、その半減期が短く短時間での合成が要求される。そこでその診断薬をマイクロ化学チップで合成する研究開発が世界中で繰り広げられている。

新しい学術領域としては 10-1000nm の空間である拡張ナノ空間が挙げられる。マイクロよりもケタ違いに小さい空間であり高度な基盤技術が要求されるが、最近いくつかのグループが開発に成功している。バルク空間と同様の溶液・流体物性を示すマイクロ空間とは異なり、さまざまな特異物性が報告されつつあり、それらを利用した新たなデバイスが期待される。例えば、単一細胞よりも小さな空間であることを利用して、単一細胞内の単一分子分析への応用もある。今後、マイクロと拡張ナノを組み合わせた新たな展開が期待できる。

また、DNA を一分子レベルでシーケンスする技術開発も引き続き大きな流れとなっている。ヒトゲノムプロジェクトによるヒトの全塩基配列解読後も、米国を中心に低価格・高速 DNA シーケンサの開発競争が激しさを増しており、従来 DNA の塩基配列解析は蛍光や生物発光を用いた光学的検出法とは異なる新しい原理に基づく DNA シーケンシング方法論の研究が進められている。バイオトランジスタを用いた DNA シーケンシング技術は米国のベンチャー企業により開発が進められていたが、最近 DNA シーケンサのリーディング企業であるライフテクノロジー社がそのベンチャー企業を買収したニュースが学術誌にも掲載され (1)、学会・業界関係者の関心を集めている。

また、ナノポアデバイスを用いた DNA シーケンシング技術は、 $\alpha$ -Hemolysin に代わる工学的なナノポア形成技術 (2)、DNA 断片に垂直方向に電圧を印加するトンネル電流計測方式 (3) の開発などにより、塩基識別の分解能の向上が図られている。このような中、IBM 社と診断薬メーカーのロッシュ社と共同でナノポアデバイスを基盤とする DNA トランジスタを開発することが発表された (4)。

これら最近の動きにより電氣的 DNA シーケンシング技術の開発が今後加速されることが示唆され、関連したバイオデバイス・バイオチップがそれらの開発に貢献することが期待される。

(参考情報)

(1) M. Eisenstein: Nature Biotech. 28, 994 (2010)

(2) D. Branton, et. al.: Nature Biotech. 26, 1146 (2008).

(3) M. Tsutsui1, M. Taniguchi1, K. Yokota1 and T. Kawai1: Nature Nanotech. 5, 286 (2010).

(4) 例えば、<http://www.fastcompany.com/1665802/dna-nanopore-identification-gene-sequencing-medicine-roche-ibm>、<http://www.youtube.com/watch?v=wwclP3GySUY>

## (5) バイオセンサ

バイオセンサの応用先として、医療、環境、食品等分野が挙げられ、巨大な市場が期待できることから、世界中の研究機関で積極的に研究が行われている。しかしながら、現在市場として成り立っているのは医療分野のみである。今後は、ニーズにマッチしたセンサシステム全般の構築が重要テーマとなり、バイオ、材料、センサ工学等の横断的な連携を行っていく必要があると考えられる。

## 日本

FET型バイオセンサでは、阪大・松本らがグラフェントランジスタを用いてIgEの検出を、東医歯大・宮原らは、シリコンFETを用いたベースに展開している。

ナノプラズモン型バイオセンサについては、阪大・民谷らが、ナノ金構造の干渉-LSPRバイオセンサやナノインプリントLSPRバイオチップ（阪大・齊藤）を進めている。また、東工大・遠藤らは、企業とも連携し、電気泳動法によるナノ粒子配置型LSPRバイオチップの作成を行っている。

さらに、金や銀のナノ粒子を細胞内に取り込ませてSERSを用いたin vivoシングル細胞センシングの展開もはじまっている（産総研・伊藤、阪大・吉川）。

食品分野へのバイオセンサの例として、九州大都甲によって開発された味認識装置があり、これは味を数値化する世界初の測定装置である。生体の味覚系は、個々の化学物質にではなく味質への緩やかな応答特性、つまり広域選択性（global selectivity）とも呼ぶべき特徴を有する。味覚センサは広域選択性を設計思想にもち、独自の分析方法によりセンサ出力を人の味覚として数値で捉えることができ、グラフ表示や味のマップで味の違いを視覚的に把握することが可能である。これまでに大学や公的研究機関、大手食品・飲料メーカーなどを中心に200台以上が導入され、新製品開発・マーケティング、製造工程における品質管理、クレーム対策、流通における品質保証等、幅広い用途に活用されている。今後、世界のデファクトスタンダードとして成長することが期待される。

## 米国

R.M.Corn (UC,Irvine) らは、金ナノワイヤやシリカ被覆ナノ金ロッドを用いた遺伝子センシング、Ashok Mulchandani (UC,Riverside) らは、単層のカーボンナノチューブを用いて唾液中のストレスマーカー検出、Weihong Tan (Florida 州立大学) らがSPRとアプタマーアレイによるCTC (Circulating Tumor Cells) のモニタリング、E.C Alcocilija (ミシガン州立大学) らは、磁性をもつ電気化学活性なナノ複合体を用いて炭疽菌などのモニタリングを行っている。SERSによる単一分子の測定で有名な Shuming Nie (エモイ大学) らも、EGF (上皮細胞増殖因子) リガンドを金ナノ粒子上に配置し、SERSを用いてCTCの特異検出を行っている。

## 欧州

Shun Mao (University of Wisconsin-Milwaukee、英) らがグラフェントランジスタを用いたIgGの検出に成功（中国 Tonjin 大学とも連携）。

S. Piletsky (Cranfield University、英) らは、分子インプリントナノ粒子を用いたバイオセンサへの応用を、C.J. Campbell (University of Edinburgh、英) らは、SERSを用いた細胞内レドックスセンシングを実施。C.R. Lowe (University of Cambridge、英国) は、独自のナノ構造チップを配置した多機能なSPRバイオセンサを開発している（東芝ヨーロッパとも連携）。K. Haupt (Compiègne University of Technology、仏) は、MIP-金ナノ複合粒子とSERSを用いたセンサ開発を、Arben Merkoçi (CIN2 (ICN-CSIC)、スペイン) は、金属ナノ粒子を用いた電気化学バイオセンサの開発を進めている。

N. Jaffrezic-Renault (Lyon Univ. フランス) らは、SWCNT修飾金電極を用いた免

疫センサを、A.Chiasera (CNR-IFN, イタリア) のグループでも金電極の上に CNT を化学修飾している。C.N. Prinz (Lund Univ. スウェーデン) は、ナノワイヤアレイを用いた神経成長モニタリングを、F. Höök (Chalmers University of Technology, スウェーデン) は、金薄膜ナノポアチップを用いたフロー型バイオセンシングを行っている (スイス ETH とも共同)。

## 中国

X-E Zhang (Chinese Academy of Sciences) が、プロテインナノワイヤを用いた超高度免疫センサの開発を行っている他、複数のグループで CNT 電極を用いたアミノ酸センシングやグラフェン/金ナノ粒子/キトサン複合体を用いたグルコースセンシングなどが行われている。Yi-Tao Long (East China Univ of Science and Technology) は、タンパク質のナノポアを用いる分子センシングを行っている。

(参考情報)

- [1] JACS. (2010) 132, 18012
- [2] Anal.Chem. (2010) 82(4) 1221
- [3] Adv. Mater. (2010) 22, 3521

## (6) 分子イメージング

2010 年になり、レーザーを用いた光学顕微鏡でありながら、光学顕微鏡の解像度の限界 (可視光領域では、200 nm 程度) を超えて、100 nm 以下の解像度を有する超解像レーザー顕微鏡が、日独の 3 社により上市された。これらは、Structured Illumination Microscopy、Stochastic Optical Reconstruction Microscopy、Stimulated Emission Depletion Microscopy、Photoactivated Localization Microscopy とそれぞれ高解像度を得る原理は異なるために、それぞれに、分解能の差や、イメージング速度の差など特徴があるが、それぞれの超解像レーザー顕微鏡が、現在、日米欧で実際の研究に応用され始めている。これらの超解像レーザー顕微鏡に適した蛍光試薬などの開発や動物実験等への応用が開始されており、2010 年は、超解像レーザー顕微鏡元年とも言える年となった。今後、この技術を活用した新たな超解像なバイオイメージングの研究が一気に加速するものと思われる。

## (7) 食品

農水省による食品ナノテク研究プロジェクトは、2007 年に開始され食品のナノ化技術、その応用による食品の新規特性の評価を進めており、これまでに微細化による魚肉加工品の塩分低減や舌触りの良い全粒粉パンなどの実用レベルの成果が得られている。また、安全性に関しては、ナノスケール化  $\beta$  カロテン含有エマルジョンを使用した動物実験で、ハイリスク群においても、生化学および組織病理学的に健常群との違いが生じないことが確認された。さらに、2010 年には食品工学会、食品機械工業会とプロジェクトの共催により、米国、カナダ、オランダ、英国、台湾、韓国の各研究者及び EU の食品ナノテク担当者を日本に招いて国際会議 (International Conference on Food Applications of Nanoscale Science – Japan, 2010) を開催し、国内外の研究者から多くの研究成果が紹介された。

一方、2009 年から 2010 年にかけて、ナノスケール食品の特に安全性に関する重要な国

際会議がいくつか開催されている。FAO/WHO Expert Meeting[1]では、食品分野におけるナノテクノロジーの活用と潜在的な健康リスク及びステークホルダー間の建設的な対話について話し合われ、EFSA[2]では、ナノテクノロジーに起因するリスクについての科学的見解についての話し合いがあり、英国上院科学技術委員会[3]では食品分野におけるナノテクノロジーの開発をサポートし、消費者の適正な利益を確保するための勧告を行っている。

また、EUでは1997年以前に域内で食経験が無い食品及び食品添加物は、Novel Foodと定義され、販売前に認可が必要であるが、将来的にナノスケール食品（添加物含む）に影響が及ぶ可能性がある。この規制にはサイズの条項は無いが、100nm以下のサイズに対しては、製品の品質に顕著に影響する場合、Novel Foodとしての審査が要求される可能性が示唆されている[4]。

(参考情報)

- [1] FAO/WHO Expert meeting on the Application of Nanotechnology in the Food and Agriculture Sectors: Potential Food Safety Implications (FAO/WHO, 2009).
- [2] Potential Risks Arising from Nanoscience and Nanotechnology on Food and Feed Safety (EFSA, 2009).
- [3] Nanotechnology and Food (House of Lords, Science and Technology Committee, UK, 2010).
- [4] International Conference on Food Applications of Nanoscale Science – Japan, 2010, Abstract pp.12-15.

## 1.3 ナノエレクトロニクス

### 1.3.1 概観

ナノエレクトロニクスは、ナノ CMOS 技術、カーボンナノエレクトロニクス、スピントロニクス、メモリデバイス、有機エレクトロニクス、ナノフォトニクス・近接場光技術、次世代ナノデバイス（単電子素子、超伝導デバイスなど）の 7 綱目について国際比較を行った。

ナノ CMOS 技術はシリコンデバイスの最も主要な部分であり、現在から将来にかけてのナノエレクトロニクスも CMOS なくしては語れない。またメモリデバイスも新しい材料の開発が進み、最近の進展はめざましく、新たな不揮発性記憶素子の分野が台頭しつつある。スピントロニクスでは次世代磁気メモリ、不揮発性論理素子などの研究開発が進められており、強相関も含めた材料物性物理の研究も進展している。有機エレクトロニクスも歴史は古いが、現在も進展は著しく、将来のフレキシブル電子デバイスの夢を実現しつつある。またナノフォトニクス・近接場光技術は、デバイス、加工、システム、エネルギー応用など広い範囲に関わっており、リソグラフィなど半導体プロセスへの応用も注目されている。最後に次世代ナノデバイスは、対象範囲も広く、多くの研究機関や大学で基礎研究とその応用可能性の研究が行われているが、今回はその中で単電子、原子・分子デバイスと超伝導デバイスを取り上げた。

ナノエレクトロニクスでは日本は総じて高い水準にあるが、これらの研究を世界のアクティビティの中で見たときの日本の位置は必ずしも楽観できるものではない。特にナノエレクトロニクスを牽引するナノ CMOS 技術においては、世界的に研究開発の拠点化とアライアンス化が進むなか、日本メーカーの研究開発アクティビティは大幅に低下しており、さらに昨今の公的な研究開発投資低減の流れのもとで、アカデミアの基礎研究・開発も他国に遅れをとっているのが現状である。今後、長期的観点に立ってこれら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追い抜かれることは間違いない。

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を発展させており、欧州は伝統的に基礎研究を得意とする国が多く、そこから新たな芽を出しつつあることは強く認識すべきである。中綱目のナノ CMOS 技術の項で触れているが、米国は研究から産業化まで高い水準を維持しているのに比べ、日本における研究は系統的進展が見えにくい状況にある。特に最近スタートした米国の NRI（ナノエレクトロニクス研究イニシアチブ）は、全米 21 州の 30 以上の大学の参加のもと、2020 年を目指して世界から若い人材を集めて、18 以上の多岐に亘るプロジェクトを展開している。プロジェクトの内容を見ても、オバマ政権のグリーン・ニューディール政策に合致した環境エネルギーに直結するテーマから、グラフェンやスピンに関する beyond CMOS のテーマ、さらには、最近 NIST が加わったことによる、高度な計測・解析技術に関するテーマなど、考え得るあらゆるテーマを網羅している。テーマ選定には、国家プロジェクトを立ち上げる際に常に拙速のそしりを免れない日本と違い、長年にわ

たつて全米の有識者が議論してきた結果を十分反映している。また米国では大学を中心に複数のナノエレ拠点を設け、そこを中心にしたネットワーク（CON）の形成も万全である。

EUはIMECとMINATECがナノエレの研究から開発までを引っ張っており、特にIMECは先端技術の分野でオープンイノベーション方式を採用し、完全なトップダウンマネジメントで産学の連携をグローバルに展開して大成功した例と言える。

一方、日本国内にはそのような規模のナノエレ拠点はなく、全体を統率するコントロールタワーも存在していない。最近スタートしたTIANano（つくばイノベーションアリーナ構想）が、日本のナノエレクトロニクスの拠点に成長することが期待される。

アジアに目を向けると、韓国は豊富な財力と選択と集中によって、現在急速に進展している。既にいくつかの技術、特にメモリ分野に関しては三星（samsung）の群を抜いた研究開発力もあり、日本、米国を抜いている。他の技術分野でも同じことが容易に予想される。中国はまさにキャッチアップの途上であるが、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、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。ナノエレクトロニクス関係の主要ジャーナルへの採択も急激に増えており、論文数でまもなく日本を抜き去ることは間違いない。米国で学んだ多くの若い研究者が本国や台湾に帰り、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。5年後、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。さらにシンガポールなどは、世界中から優秀な学生、教授陣を集めて着々とアジアの研究開発のハブ化を狙っていることも注目すべきである。

◆ナノエレクトロニクスのまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	カーボンエレクトロニクス、スピントロニクス、有機エレクトロニクス、ナノフォトニクス・近接場技術等の分野で日本は世界のトップレベルにある研究水準を維持している。しかし研究開発費の減少により、困難に直面しつつある。
	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かりうじて維持している。ベンチャーが立ち上がり軌道に乗っている分野もある一方で、企業の開発力に陰りが見え、欧米に比べるとベンチャーやファンドリーも少なく、試行ができない等の根本的な問題を抱えている分野もある。
	産業技術力	◎	↘	全般に世界で高い技術力を持ち突出しているところもあるが、同時に世界との激しい競争にさらされているところが多く、遅れをとっているところもあり、政策的な問題も潜在化していると考えられる。今後産業技術力は低下することが懸念される。
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、研究拠点や産業界主導の連携組織研究が機能している。新しい原理提案や基礎研究面で高い実力を持っているとともに、産業界のアカデミアへの支援が、基礎研究力を支えている。
	技術開発水準	◎	↗	大学と産業界の連携がうまく機能しており、依然として強い力を持っているが、研究開発の縮小や海外への拠点移動で、アクティビティが低下している分野もある。しかし、軍事技術への転換を目的とした技術開発は高い水準を維持しており、国全体のレベル維持に貢献している。
	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。また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	○	↗	欧州も最近では産業化という視点を強く持ちつつある。EUとしてのプロジェクトにより国境を越えた連携が活発に行われている。デバイスという視点から見ると基礎とデバイスとのつなぎのところがまだ弱い面もある。一方、IMECの国際的存在感が増している。
	産業技術力	○	→	産業が必ずしも強くない分野もあるが、産業技術力としては、基礎に裏付けられた高い水準にあると考えるべきであろう。標準化にも力を入れている。
中国	研究水準	△	↗	学会発表や論文発表が急増しており、研究者人口が増えていることから、将来の発展を予感させる。特に材料分野では論文数も急速に増加するなど、躍進著しい。米国帰りの研究者がその主導権を握りつつあり、日米欧に追いついてくるのも時間の問題であろう。
	技術開発水準	△	↗	全体として他からの導入型の技術開発で、企業レベルでの先端的技術開発は顕在化していない。独自の技術開発力はこれからの課題であるが、日米欧からの技術導入で水準は上がってきている。
	産業技術力	○	↗	電子部品の多くが台湾、中国製であることは周知の事で、日米欧の技術をマスターするのはそれほど時間を必要とせず、やがては自立するであろう。
韓国	研究水準	○	↗	基礎的な研究水準はまだ低いが学会でも招待講演が韓国からだいぶ出ており、着実な発展が見て取れる。ディスプレイデバイス分野では、大手企業による先導で、世界トップの水準にある。
	技術開発水準	◎	↗	分野により差があるが、豊富な資金力と集中したリソース投入により効果的な技術開発が行われている。今はまだ基礎研究は弱いですが、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、今後国際競争力も伸びていくことは間違いない。
	産業技術力	◎	↗	資本力と政府のサポートがあるので、ひとたびやると決めると、その力は安い労働力もあって急速に実用化に向かう傾向がある。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

### 1.3.2 中綱目ごとの比較

#### (1) ナノ CMOS 技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	これまでの国家プロジェクトなどの投資の蓄積により、現段階では、大学や研究機関の研究水準やプレゼンスはそれなりに高まってきている。しかし、近年の国家プロジェクト予算の削減、企業の研究開発予算と意欲の大幅な減少、半導体産業全体の不振による有能学生の当該分野への志望の低下などにより、今後は、将来技術の研究アクティビティの急激な低下が危惧される。
	技術開発水準	○	↓	ここ数年の半導体産業全体の不振や企業再編に伴い、技術開発力は大きく低下している。特に先端技術開発の拠点は、海外のコンソーシアムに移り、国内での研究開発の空洞化が始まっている。企業では、先端研究ばかりでなく生産技術に近い分野でも、海外拠点での開発が進行しており、併せて人材の国外流出や、同じ社内でも他部門への配置転換も進んでいることから、技術開発水準の低下が顕在化している。
	産業技術力	○	↓	製品化技術に関しても、近年の業績不振を反映して、生産拠点の維持そのものに不安が生じており、産業技術力の低下がみられる。特に、新材料・新技術の導入には、現在各企業ともに積極的でないことから、特に、ロジック LSI 分野でのナノ CMOS 分野の競争力は、大きく失われつつある。当該分野での我が国の産業競争力は、デバイスメーカーよりも、むしろ、装置メーカーに移行しつつあると思われる。
米国	研究水準	◎	→	研究投資や研究アライアンスを続けている一部企業やコンソーシアムが、高い水準を維持しており、それらに支えられる形で大学の研究も活発であり、先端的研究開発力を維持している。産学連携や大学間連携の仕組み作りに優れ、企業やコンソーシアムは、巧みに大学成果を活用している。特に、Stanford 大、MIT、UC バークレー、UC サンタバーバラ、Purdue 大などの大学の活躍が目立つ。
	技術開発水準	◎	↑	インテルの開発力は引き続き、極めて強力である。また IBM はロジック開発の世界的開発拠点の位置づけを強め、インテルと TSMC 以外のほぼすべての有力企業との研究開発アライアンスの中心となって、高い研究開発の水準を維持している。その拠点である Albany Nanotechnology Center は、SEMATECH や装置メーカーも集結した当該分野の世界拠点となっている。世界中からの投資と人材を集めることで、拠点をもつ米国が、結果として、技術開発水準を高め、世界をリードする役割を引き続き担っている。
	産業技術力	◎	↑	世界的にプレイヤーの数は絞られているが、その中で、インテル・IBM などの一部企業が、高い水準を確保している。世界の叡智を集約して産業技術力を高める仕組みづくりに優れていると言える。
欧州	研究水準	○	→	コンソーシアムや国立研究所を中心に、先端研究のアクティビティが維持されている。引き続き、IMEC、Leti などの機関が研究拠点として研究開発を主導している。
	技術開発水準	○	→	日本と同様、IBM とのアライアンスが強まり、欧州内での技術開発は多少後退している面もあるが、強みのある特定分野では高い技術力を保持、育成しており、More than Moore などの新応用技術などにも積極的であるように見える。
	産業技術力	○	→	日本と同様に、収益性の観点から、生産拠点の維持そのものにやや不確定要素があるものの、得意とする製品に特化した戦略的経営と技術力確保に成功しており、日本よりも、技術戦略上優れた立場を保持しているように見える。
中国	研究水準	△	↑	近年は、先端的学会や論文誌での論文件数が急激に増えてきており、相当の実力を備えつつあるように見える。大学は、海外から多くの教員を迎えて、国際化を図っており、このような研究グループでは、研究水準も高い。
	技術開発水準	×	→	企業レベルでの先端的技術開発は、まだ顕在化していないように見える。
	産業技術力	×	→	企業的には、先端的材料や技術を開発する段階に至っていないように見える。

韓国	研究水準	○	↗	企業数は限定されるが、豊富な資金力と人材で高い研究水準を保っている。また、大学も力をつけており、海外での経験を積んだ教員を多く迎え、国際化も進んでおり、学会活動は、より活発になっている。
	技術開発水準	◎	↗	製品化を意識した研究開発を、トップダウン型の指導力と豊富な資金力の下で進めており、極めて強力である。集中したリソース投入と適切な経営判断で、効果的な技術開発が行われており、また先端分野への研究投資にも貪欲であることから、極めて高い技術開発水準が実現されている。
	産業技術力	◎	↗	引き続き、高い産業技術力を有している。特に、Samsungは、極めて強力な産業技術力をもつメモリ製品に加え、近年は、ロジック分野でも着実に力をつけており、インテル、TSMCと並んで世界の第三極としての力をつけつつある。マーケティング力の強さも際立っている。
台湾	研究水準	○	↗	国家的に半導体分野に注力しており、国研や大学での研究開発や産学連携が活発であり、大学の成果は玉石混交の部分もあるが、質・量ともに充実している。企業もTSMCを中心に、豊富な資金力と人材で、研究水準が向上している。
	技術開発水準	◎	→	TSMCなど、企業は限定されるものの、豊富な資金力と人材により高い技術開発水準を維持している。先端的技術導入にも積極的かつ貪欲であり、多くの海外パートナーとの連携による情報収集にも積極的であり、世界の半導体生産拠点の一つとしてプレゼンスは増している。
	産業技術力	◎	↗	豊富な資金力と人材により高い産業技術力を維持している。
<p>全体コメント：                      先端ロジックの研究開発を中心に、研究開発の拠点化とアライアンス化が一層進行しており、ロジック分野ではインテル、IBM連合、IMECに、先端研究開発拠点がほぼ収斂している。また、産業的にも、ロジックLSIはインテル、TSMC、Samsung、グローバルファブリーに、ほぼ集約されつつある。以上の環境の中で、日本の半導体メーカーの研究開発アクティビティは、デバイス・プロセスの分野では、大幅に低下しており、特に国内の研究活動は極めて低調になっている。結果的に、国内での企業の研究開発は、つくばでの研究開発拠点を中心としたプロジェクトなど、政府の研究開発投資に依存したものに移行しつつあるが、先行きは極めて不透明であると言える。一方で、海外では、インテル、Samsung、TSMCを中心に、資金力のある企業が、先端研究開発に積極的に手を伸ばし、また国際的なコンソーシアムも最大限有効に活用しながら、極めて貪欲かつスピード感のある技術開発を進めている。以上の状況から、これまで日本が有してきた、幅広い、材料・デバイス・プロセス分野に関する優位性と競争力は、現在、急速に失われつつある危機的状況にあると言える。</p>				

(参考情報)

[1] 「半導体メガメジャー」、日経エレクトロニクス、2010年6月14日号、p. 27-57

(注1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) カーボンナノエレクトロニクス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	MIRAI プロジェクトでのカーボン配線 [1]、CREST プロジェクトでのグラフェントランジスタ関連の研究があり、研究水準は高い。企業の研究開発予算は減少しているが、研究アクティビティはナノエレクトロニクス関連のコンソーシアム (TIA nano) や国家プロジェクトの推進で補完され、大学や研究機関とともに高い研究水準を維持している。しかし、カーボンエレクトロニクスとして研究領域が広範囲にカバーされているとはいえない。
	技術開発水準	○	↑	ナノエレクトロニクス関連のコンソーシアムや国家プロジェクトにおいて、装置メーカーも巻き込んだ形で拠点に集約され、今後の製品化へ向けた技術開発の新展開が期待されている。
	産業技術力	○	→	研究開発や工場投資に莫大なコストがかかるため、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。競争力を確保する上での製品化技術への新材料・新技術の導入のためには、集約された開発拠点の重要性が増してきている。
米国	研究水準	◎	→	研究アクティビティは大学・国研において、国家プロジェクトや企業とのアライアンスがうまく機能し、高い水準を維持している。SRC 傘下のコンソーシアム NRI が成果を挙げている。IBM がグラフェンのトランジスタ応用技術で先行している。
	技術開発水準	○	↑	Albany Nanotech は IBM 主導のアライアンスで研究開発が展開されており、ナノエレクトロニクスの世界的な研究開発拠点として高い技術開発の進展が期待されている。
	産業技術力	○	↑	従来の製品では、アライアンスや国家プロジェクトに依存した一部企業にプレイヤーが絞られてきている。一方で、ベンチャーキャピタルを通じたナノテク・ベンチャー企業の展開により、新たな市場の形成が予測されている。
欧州	研究水準	◎	→	ガイム教授ら (マンチェスター大) が「グラフェン」に関する業績によって 2010 ノーベル物理学賞を受賞した。企業と大学、公的機関が、ナノエレクトロニクス関連のコンソーシアム (IMEC、CEA/LETI) や国家プロジェクトにより組織的な連携を図り、高い研究水準を維持している。
	技術開発水準	○	→	IMEC、CEA/LETI の拠点を中心に新しい取り組みが進められており、幅広い研究領域をカバーしている。MIRAI プロジェクトと類似した VIACARBON という EU プロジェクトが進行しているが、大きな成果は見えていない。
	産業技術力	○	↑	各国政府と民間資金で、産業界寄りのナノエレクトロニクス研究を推進している。出口を見据えたアライアンスにより着々と実用化に向かって進めている。国が主導するベンチャー投資により、シード技術を育成する仕組みもある。
中国	研究水準	△	→	学会や論文レベルでの研究成果から判断すると、大学中心の研究アクティビティに見える。
	技術開発水準	△	→	先端技術レベルには到達していない。
	産業技術力	△	→	豊富な資源と技術力から産業競争力を着実に伸ばしているが、先端技術を取り入れた形にはなっていない。
韓国	研究水準	◎	↑	Samsung グループおよび大学を中心に、研究アクティビティが高い。透明電極向けに大面積のグラフェン成長技術など高水準な注目発表が目立つ。
	技術開発水準	○	→	魅力あるコンソーシアムあるいは国家プロジェクトは見当たらないが、Samsung グループが豊富な資金力の下で着実に技術力を蓄えている。
	産業技術力	○	→	Samsung グループが関連大学との連携から技術を引き出す形で産業技術力を蓄えている。

## 全体コメント：

企業での研究開発予算や投資額が低減している中で、カーボンエレクトロニクスといった先端技術開発は各国とも一企業では難しくなっている。日本ではこれを補完するためにコンソーシアムや国家プロジェクトを展開することで、大学や研究機関とともに高い研究水準を維持している。しかし、カーボンエレクトロニクスとして研究領域が広範囲にカバーされているとはいえない。米国や欧州では、国あるいは企業主導のアライアンスを有効的に機能させ、ベンチャー展開の流れも含んだ形で相乗的に技術力を高めている。特にグラフェンの研究予算については、ノーベル賞の影響もあり、欧米に比べて日本はかなり見劣りしている。アジアでも韓国を中心に、グラフェン関連の研究成果が目立ってきており、今後の産業化へのシナリオ次第では強力な存在となる可能性がある。

現在、世界的にも産学官が連携し、アライアンスや国際的な研究開発拠点への集約の方向で進んでいるが、どう産業化へ結び付けるかのシナリオが重要になってくる。

## (参考情報)

- [1] M. Sato, T. Hyakushima, A. Kawabata, T. Nozue, S. Sato, M. Nihei, and Y. Awano, "High-Current Reliability of Carbon Nanotube Via Interconnects", *Japanese Journal of Applied Physics* 49 (2010) 105102.
  - [2] H.-C. Kang, R. Olac-vaw, H. Karasawa, Y. Miyamoto, H. Handa, T. Suemitsu, H. Fukidome, M. Suemitsu, T. Otsuji, "Extraction of Drain Current and Effective Mobility in Epitaxial Graphene Channel FETs on Silicon Substrates", *Extended Abstracts of the 2009 International Conference on Solid State Devices and Materials*, Sendai, 2009, pp954-955.
  - [3] Y.-M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H.-Y. Chiu, A. Grill, Ph. Avouris, "100-GHz Transistors from Wafer-Scale Epitaxial Graphene", *SCIENCE*, 327 (2010) 662.
  - [4] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films", *SCIENCE*, 306 (2004) 666.
- S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. Xu, J.-S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y.-J. Kim, K. S. Kim, B. Ozyilmaz, J.-H. Ahn, B. H. Hong and S. Iijima, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes", *NATURE NANOTECHNOLOGY*, PUBLISHED ONLINE: 20 JUNE (2010) 1.

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) スピントロニクス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	金属、半導体、強相関の物理、材料分野で引き続き世界を牽引している。ホイスラーや有機系材料の研究も着実に進められている。新しい磁化反転技術やスピン流、スピン注入の研究も着実に進んでおり、特に実験面で世界をリードしている。応用面でも、産総研のMgO系トンネル磁気抵抗素子が全てのハードディスクに搭載されるなど、世界を牽引している。理論的な新提案力・解析力では欧米に一步譲る面がある。半導体スピントロニクスもリードしている。メタル系スピントロニクスでは企業との連携も活発である。産総研によるノーマリーオフコンピュータや東北大による不揮発性論理素子の提案など、回路・システムへの展開を図る動きも活発である。スピントロニクスの量子力学的な側面が顕在化するに従い、理論・実験の両面にわたる基礎研究が重要となってきた。科研費特定領域研究やさきがけ研究で、多くの若手が育っている。
	技術開発水準	◎	↑	ハードディスク基盤技術開発は米国企業と互角である。Gビット級MRAMの開発では、東芝が垂直磁化系スピン注入型MRAM[3]という大きなトレンドを創り出し世界をリードしている。産総研・東芝や東北大・日立など産学官の連携体制も良好である。最先端・NEDOのプロジェクトやつくばイノベーションアリーナにおける試作環境の構築により、産学官のスクラムがさらに強まることが期待される。一方、ハードディスクとMRAMの双方において、開発投資額の巨大化に対応できず脱落する企業が続出し、事業化能力を持つ企業が絞られてきた。東芝とTDKは、ポストトンネル磁気抵抗素子としてスピントランジスタの開発にも手を広げている。
	産業技術力	○	→	昭和電工、富士電機、TDKなど部品製造企業が強く、キャノンなど装置産業も強い。ハードディスク製品では、5社に寡占化した世界市場の約30%シェアを日立と東芝の2社が確保している。日本の強みであった2.5インチディスク市場では、外国企業もシェアを伸ばしている。容量が少ない現世代MRAMの量産化には興味を示さなかった日本企業であるが、巨大な市場が期待されるGビット級のスピン注入型MRAMの開発では東芝が世界をリードしている。量産技術を確認できるかどうか注目される。ただし、大手電機メーカー数社が半導体事業を切り離すなど、先行きが不透明になっている。ベンチャーが少ないわが国では、欧米のベンチャーが担っている新しい技術を実地に移す「試行回数」をどこで確保するかが喫緊の課題となっている。
米国	研究水準	◎	↑	Cornell大、Alabama大、Carnegie-Mellon大、UCSB大などを始めとして新デバイス原理提案、材料設計、スピン注入磁化反転ダイナミクス、スピンホール効果など基礎研究面での新規性に非常に優れている。技術を個別要素ではなく、パッケージとして研究開発する点で優れている。大学の基礎研究を、公的な資金と並んで企業の資金が支えている。
	技術開発水準	◎	→	資金提供も含めて基礎研究にも目配りしており、大学との共同研究が盛んである。ハードディスク関連では、ここ暫く大きな国家プロジェクトは行われていないが、60%程度の世界市場シェアを持つSeagateとWestern Digitalの2企業の技術開発力は依然として高い。スピン注入型MRAMではIBMはTDKと共同して開発を行っているが、実用化への立場は不明である。基礎研究力は優れている。GRANDISなどのMRAM関連ベンチャーはDARPAが支えている。DARPAがスピン注入MRAMプログラムに引き続き、2010年に10aJ/Opの低消費電力で演算可能な電荷に代わる演算方式（不揮発ロジック）の公募を行った。スピンの想定されている。
	産業技術力	◎	→	ハードディスクではSeagate、Western Digitalの2社が世界市場の60%を確保している。EverSpin社は16Mbの現世代の磁場書込型MRAMを市場に供給している唯一の企業である。その応用市場はまだ産業用や軍用にとどまっている。その他、Grandisなどのベンチャーが活発に活動している。
欧州	研究水準	○	→	基礎研究の水準は高いが、企業との連携が弱い。フランスでは政府の強い後押で開発拠点MINATEC・Spintecが整備された。また大学を中心に不揮発性FPGA開発プロジェクトが開始された。ドイツは基礎面で強みがあるが、やや存在感が薄れてきている。イギリスは研究が活発化している。
	技術開発水準	△	→	めぼしい企業が存在しない。SpintecのMRAM技術を実用化するための米国ベンチャー企業Crocusは積極的な実用化予告をしているが、その中核技術である熱アシスト型MRAMは独自性が強く、技術の完成度と市場競争力は不明である。最近ではスピン注入型MRAMにシフトしつつあるようにも見える。
	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が、フランスなどは国策として、MRAMやスピントロニクスを用いたマイクロ波発振器などに取り組んでいる。

中国	研究水準	×	↑	全般に遅れているものの、若手の帰国研究者を積極的に支援して研究拠点を構築しており、磁性半導体など新材料に関する報告が多くなっている。北京ではファンドリと組んだMRAMのプロジェクトが動き始めている。台湾では国立研ITRIや台湾国立大が材料を中心とする開発を進めており、一部の研究室は高い水準の成果を出している。
	技術開発水準	×	↑	台湾では、大学・ITRI・TSMCなどの関係は極めて密接で、今後開発が急速に進む可能性がある。
	産業技術力	△	↑	米国QualcommとTSMCのスピ注入型MRAMの共同開発は、TSMCの収益力の高い半導体事業を背景に一気に事業化が進む可能性があり、特に注目される。
韓国	研究水準	○	→	全般に遅れているが、磁気ダイナミクスのシミュレーション技術などの水準は高い。米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。Samsungが大学と共同で、Nature Physicsに論文を発表するなど、産学官の連携で高い水準の研究成果が出つつある。
	技術開発水準	○	↑	SamsungとHynixがスピ注入型MRAMの研究開発を進めており、国家プロジェクト拠点として整備された漢陽大学の施設を、それぞれ独自に利用している。成果は2010年12月のIEDMで発表された。20nm世代の実現可能性の明確化が目標。企業を支える大学・国研の研究層が薄いのがネック。
	産業技術力	○	↑	Samsungはハードディスクの基幹部品を外部に頼りながら低コスト製品を製造している。必ずしも技術力が高いわけではないが、機動力と資金力で群を抜く。
<p>全体コメント：</p> <p>日米が圧倒的強さを維持している。日本では若手の優秀な人材が育ってきている。ハードディスクの記録密度向上には大きな壁が立ちふさがっており、5社に寡占化した企業が大学と協力しながら解決策を探っている。スピ注入型MRAMは垂直磁化系に流れが移ってきており、実際に量産技術に展開できるかどうかかが焦点である。韓国、米国、台湾がこれを追っている。米国ではシーゲートやインテルなどが研究資金を供給して自分たちがカバーできない基礎研究や将来の芽となる研究をサポートしている。日本企業は自己資金で大学をサポートする体制が取れていない。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。主要な企業が無いことが弱点である。半導体大メーカを有する韓国・台湾が力を付けてきている。中国の台頭も時間の問題であろう。</p>				

(参考情報)

- [1] 安藤功兒、「不揮発性デバイス ノーマリーオフコンピュータは実現できるか」電気情報通信学会誌 2010年11月号
- [2] S. Matsunaga et al., "Fabrication of a Nonvolatile Full Adder Based on Logic-in-Memory Architecture Using Magnetic Tunnel Junctions", App. Phys. Express vol.1, pp. 091301-1-3, 2008.
- [3] T. Kishi et al., "Lower-current and Fast switching of A Perpendicular TMR for High Speed and High density Spin-Transfer-Torque MRAM", 2008 IEDM, pp. 309-312, December 2008.
- [4] T. Marukame et al., "Read/write operation of spin-based MOSFET using highly spin-polarized ferromagnet/MgO tunnel barrier for reconfigurable logic devices", 2009 IEDM, pp. 215-218, December 2009.
- [5] T. Sasaki et al., "Temperature dependence of spin diffusion length in silicon by Hanle-type spin precession", Appl. Phys. Lett. 96, 122101 (2010).
- [6] <http://www.darpa.mil/mto/solicitations/baa10-42/index.html>  
<http://www.lirmm.fr/SPIN/>

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(4) メモリデバイス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	高集積メモリが微細化限界に近付きつつあることを受け、産官学にて次世代メモリの研究が盛ん。RRAM (Resistive Random Access Memory) とスピン RAM 研究が中心だが、FeRAM、PCM (Phase Change Memory)、有機高分子膜メモリの研究も行われている。スピン RAM では垂直磁化型で世界をリードし、磁壁移動型も提案。特に、NVM (Non-Volatile Memory) 用材料研究が強い。NVM 技術をロジックに適用する研究も行われている。しかし、2009 年の報告書発行時と比べて、新メモリとしてブレイクスルーと言える進捗は見られない。
	技術開発水準	○	→	微細化は難しくなりつつあるものの、微細加工技術の着実な進展を活かし、既存の DRAM や NAND 型フラッシュの集積度は上がっている。DRAM では、国内唯一の DRAM メーカーであるエルピーダメモリが 30nm の加工技術を使った 2G ビット DRAM を製品化し、NAND 型フラッシュでも、東芝が 24nm の 64G ビット NAND 型フラッシュを製品化し、加工寸法は 30nm 台に突入している。DRAM では、微細化以後をにらみ、DRAM チップを TSV (Through Silicon Via) を使って積層する技術が進展、NAND 型フラッシュでも、電荷を絶縁膜にトラップする、いわゆる電荷蓄積型のメモリを積層する技術開発が進められており、積層化が高集積化の流れの一つになっている。RRAM とスピン RAM の製品化検討が進められているが、具体的な用途・市場をつかみ切れておらず、開発に行き詰まり感もある。
	産業技術力	○	↘	2009 年版報告書の発行時は高集積メモリにとっての最悪期であり、国内メーカーは赤字という状況であった。今回は、最悪期を脱し、かつ、メモリの単価も向上したことで、収益状況は大幅に改善している。今後のスケールアップの困難さ、市場規模の不透明さなどから、NAND、DRAM 代替を狙うメーカー以外は自社生産に慎重な姿勢が伺える。NVM の期待市場は大きいものの、ビジネスモデルの構築が必要。高集積メモリ以外では、日本が得意とするフラッシュメモリ混載のマイクロコントローラー (MCU) を挙げることができる (ルネサスエレクトロニクス)。
米国	研究水準	○	→	日本と同様、低電力化指向にそって、不揮発メモリの研究開発が活発。メモリ動作に必要な材料の研究も盛んであり、メモリ候補が多岐に渡る。RRAM、スピン RAM、PCM に研究リソースを集中。メカニズムや物理の基礎研究に強い。前回の調査で触れた HP の memristor に関しては、データ記憶機能を持つプロセッサを開発できるとの発表などがあり、進展をみせている。CNT を用いた NVM やニューロ・コンピューティングを実現するシナプス型アナログメモリの研究も行われている。
	技術開発水準	○	→	大手メーカーからベンチャーまで、幅広いプレーヤーが参画して活発に開発を進めている。Intel、IBM が牽引。高集積メモリの分野では、Micron とインテル、STMicroelectronics の合弁会社である Numonyx が DRAM と NAND 型フラッシュを生産している (ただし、Numonyx はすでに Micron に買収されている。) DRAM に関しては 2G ビットが製品化され、NAND 型フラッシュでは、25nm の 3 ビット/セルの製品を発表しており、微細化技術、多値化技術などの技術水準は高い。また、Numonyx は相変化材料を利用した PCM を製品化、2011 年に 1Gbit 品出荷を発表。DRAM 代替狙いと見られる。スピン RAM では、磁気抵抗変化を利用した MRAM をスピナウトしたベンチャーが製品を販売。16M ビットまで高集積化が進んでいる。
	産業技術力	○	↘	生産はファブリーへの委託が中心と見られる。基礎研究を製品化する技術力として注目したいのは、Freescale の TFS (Thin Film Storage) である。これは、フラッシュメモリ混載の MCU 用に開発したメモリであり、シリコンのナノドットに電荷を溜めることを特徴としている。ナノドットは、密度を増加させるのが難しい、すなわち、蓄積できる電荷量が制限され、メモリ動作に必要な動作範囲が狭められるなどの指摘があったが、これを製品化した技術力は注目に値する。

欧州	研究水準	○	→	IMEC や Leti が、メモリデバイスや材料の研究を継続的に行っている。複数の研究機関が PCM の材料及び伝導メカニズムを研究。また、スピントロニクス基礎研究が強く、その NVM 応用研究にも力を入れている。IMEC は、様々なタイプの RRAM とその動作メカニズムを研究している。分子デバイスの研究も行われており、メモリ応用も含まれる。
	技術開発水準	△	↘	NAND 代替を狙った PCM の開発が行われているが、資本は米国。IMEC は、20-nm 世代以降の NVM として RRAM の Crossbar array の開発を行っている。注目は、Innovative Silicon が手掛けている Z-RAM である。従来の DRAM と異なり、キャパシタを持たないため、製造プロセスが簡略化できる画期的なメモリである。期待は高いが、前回の調査(2008年11月)からの目立った進展はない。
	産業技術力	△	↘	欧州における唯一の DRAM メーカーだった Qimonda は、事実上の破産となった。NAND 型フラッシュに関しては、Numonyx が生産している。新規 NVM を産業として育てる環境が不足。一方、ST は小容量の EEPROM などに関しては製品を出しており、高い技術力を保有している。
中国	研究水準	○	↗	ナノエレ、スピントロニクス等の先端技術には強い関心を持っており、海外大学における中国人留学生の増加と共に本分野における中国の勢力も今後拡大すると予想される。国際学会への投稿件数も急増している。最近では、RRAM の研究報告がある。
	技術開発水準	△	↗	海外研究機関との提携、共同研究等を通じて技術力を高めつつある。
	産業技術力	△	↗	メモリ分野ではないが、インテルが大連に 65nm 技術を使う 300mm のファブを作り、プロセッサ搭載サーバー向けのチップセットを作っている。生産拠点、アウトソーシング先として発展する可能性大。
韓国	研究水準	○	↗	産官学一体となって新材料を用いたメモリの研究開発、および発表は相変わらず盛んである。金属酸化物利用、三次元積層型有機半導体メモリ。特に PCM、RRAM、スピン RAM に注力。30nm 世代から sub.10nm までをカバーできる NVM 研究ラインナップを整えている。基礎研究から、プロセス研究まで、オールラウンドな研究レベルを有する。
	技術開発水準	○	↗	新技術を製品に展開する技術力を象徴するものとして注目しているのが、三星の PCM である。今後の主流となるナノピラー型を逸早く発表。スピン RAM では、垂直磁化型、磁性半導体、多値化など、最先端の開発成果を上げている。RRAM では、Cross-point memory、sub.10-nm のスケーリングを狙った技術開発を進めている。
	産業技術力	○	↗	韓国メーカーの DRAM は、世界市場で 60% 以上のシェアを有している。微細化技術に関しても他のメーカー同様、着実な進歩を見せており、依然と高い産業力を維持している。NAND 型フラッシュでは、50% 弱とほぼ半分のシェアを得ている。これらの高い生産技術力を背景に、代替となる新規 NVM 生産に向けた製造環境を整えつつある。PCM は、一部、生産開始。ナノピラー型も試作品出荷を予定。
台湾	研究水準	△	↗	急成長している。大学、研究機関、企業からの学会発表件数が増加。RRAM、PCM の材料、メカニズムの研究は高レベル。海外メーカー、研究機関との共同研究も積極的。
	技術開発水準	△	↗	RRAM、PCM、スピン RAM に対し、製品化を強く意識したプロセス/インテグ技術開発を行っている。CMOS ロジック製造で培った技術をベースに、NVM を混載する製造技術開発に取り組んでいる。
	産業技術力	○	↗	NVM についてもトップクラスのファンドリーとなることが予想される。海外メーカーとの開発段階からの提携が見られ、アウトソーシング先としての期待が伺える。

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

## 全体コメント：

2010年以降、金融危機からの脱出とメモリ単価の上昇という追い風を受けて、半導体産業は久しぶりの好景気になっている。国内のメモリメーカーは、DRAMのエルピーダとNAND型フラッシュの東芝の実質2社のみとなったが、両社ともに、最高益に近い状況になった。しかし、これらは、既存のメモリを従来技術の延長線上で微細化し、かつ、設計に工夫を加えた結果であり、材料、デバイスなどには革新性は見られない。新メモリ研究開発への期待は依然として高いが、製品要求にはまだまだ答えられる性能に至っていないというのが実情である。このような状況下、不揮発デバイスを低電力化に繋げようとする研究開発が進行しており、新しい展開が期待されている。

多くの探索系NVM候補のうち、重点的に研究がなされ、かつ、今後、製品化が期待されるは、PCM、RRAM、スピンRAM。用途は、NAND代替、DRAM代替、ストレージ(HDD, SSD)のキャッシュがメイン。開発課題は、20-nm以降のスケールアップ(大容量化)、低消費電力、多値化、3D化など。RRAMは、動作メカニズムの解明が急務。CMOSロジックと同様に、NVMもアウトソーシングが進み、生産は一部のファブリーに集中する可能性がある。その前準備として、研究開発段階からファブリーメーカーと共同開発する構図が多く見受けられる。

## (参考情報)

- [1] <http://www.elpida.com/ja/news/2010/09-29.html>
- [2] [http://www.toshiba.co.jp/about/press/2010\\_08/pr\\_j3101.htm](http://www.toshiba.co.jp/about/press/2010_08/pr_j3101.htm)
- [3] <http://www.elpida.com/ja/news/2010/06-21.html>
- [4] [http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2009/12/64\\_12pdf/rd02.pdf](http://www.toshiba.co.jp/tech/review/2009/12/64_12pdf/rd02.pdf)
- [5] <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20100729/184694/>
- [6] [http://japan.renesas.com/products/mpumcu/flash/child\\_folder/monos\\_child.jsp](http://japan.renesas.com/products/mpumcu/flash/child_folder/monos_child.jsp)
- [7] <http://www.hpl.hp.com/news/2008/apr-jun/memristor.html>
- [8] <http://www.hp.com/hpinfo/newsroom/press/2010/100831c.html>
- [9] <http://news.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=467225>
- [10] <http://investors.micron.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=461480>
- [11] <http://www.numonyx.com/en-US/MemoryProducts/PCM/Pages/P8P.aspx>
- [12] <http://www.everspin.com/press.php?qttype=press&year=2010>
- [13] [http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=TM\\_RD\\_PROCESSTECH\\_90NMTFS\\_FLXMEM](http://www.freescale.com/webapp/sps/site/overview.jsp?code=TM_RD_PROCESSTECH_90NMTFS_FLXMEM)
- [14] <http://www.innovativesilicon.com/>
- [15] [http://www.intel.com/jp/intel/pr/press2010/101026.htm?wapkw=\(%e5%a4%7e9%80%a3\)](http://www.intel.com/jp/intel/pr/press2010/101026.htm?wapkw=(%e5%a4%7e9%80%a3))
- [16] <http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20101121-00000007-yonh-kr>
- [17] <http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20101105-00000018-yonh-kr>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ /：上昇傾向、→：現状維持、\：下降傾向 ]



(5) 有機エレクトロニクス

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	有機 EL に関する研究は、一段落を迎え、有機太陽電池、有機 FET へ研究のターゲットがシフトしている。ただし、有機 EL の基礎物理の解明や劣化機構の解明は重要な研究課題であり、継続している。有機トランジスタに関しては現在世界でも最もアクティブな国の一つである。
	技術開発水準	◎	→	有機 EL およびそれを取り巻く材料技術、パネル化技術、回路技術、集積化の大幅な進展が見られるが、大型基板での製造技術が蒸着、塗布型とも未解決。有機トランジスタ技術の開発にやや陰りが見える一方、有機太陽電池の開発に力が入るようになり、実用化も近い。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。印刷技術の進展はやや停滞気味である。
	産業技術力	◎	↗	2007 年のソニーによる有機 EL テレビの製品化以降、大きな進展は見られないが、EL ディスプレイを中心に、生産技術は著しく進歩した。小型素子を作製する技術から、大型素子も作製できる技術へと進んできている。特に材料から製膜技術、パッケージ、ドライバーまで、幅広い技術開発が行われている。有機 EL は生産コストおよび大型基板製膜の製造技術が課題であり、コストを考慮したデバイスおよび生産技術の開発が必要とされている。
米国	研究水準	◎	↗	ここ数年やや沈静化傾向があったが、最近有機太陽電池の研究により、勢いを取り戻し、n 型半導体材料、薄膜単結晶などの材料面、基礎物性でレベルの高い研究が数多く出てくるようになってきている。有機 EL に関する研究は一段落している。有機太陽電池、有機 FET に関する研究開発は基礎から応用まで活発に行われている。特に、有機太陽電池では、スタンフォード大に研究拠点が形成されている。
	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。しかし有機 EL に関しては、Dow Chemical の韓国への進出、Dopont の低分子インク開発など大手化学メーカーによるマテリアル分野で先導的な開発が進められる一方、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。大学やコンソーシアムでは活発な活動も見られ、日本企業とのコラボも多数行われている。
	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。日本、台湾、韓国への基礎技術の移管後、米国では、有機デバイスの産業化に関する研究開発は、ほとんど行われていないと予想される。ただし、GE の照明技術や、ベンチャーの活躍は目立つようになってきている。Solid State Lighting について DOE がコア技術開発と製品開発のプロジェクトを開始、有機 EL 照明では 26 プログラムが推進されている。
欧州	研究水準	◎	→	欧米では、有機 EL の解析にしても物理的な解析が深く、有機デバイスの学問としての成熟が感じられる。基礎から応用まで研究開発のスペクトルは世界で一番充実しており、懐の深い研究が多い。
	技術開発水準	○	↗	EU の枠組みをフルに活用し、ディスプレイから太陽電池、モバイル情報端末など、有機エレクトロニクス産業の拡大展開を仕掛ける技術開発の動きが目立つ。大学および大学発のベンチャーを中心として、特に、電子ペーパー、有機 EL 照明の実用化を目指した研究開発が活発である。マテリアル面ではメルク社による有機 TFT 材料および有機 EL 材料への開発強化が顕著になってきており、また独自の BASF 社はオスラム社と組んだ照明分野への取り組みも依然として続けられている。政府からの支援も手厚い。FP7 では Photonics and Organic Electronics 分野に '07- '08 : 47 プロジェクト 153M ユーロ、'09- '10 : 42 プロジェクト 150M ユーロを実施、'11- '12 : 187M ユーロを計画している。
	産業技術力	○	→	当該分野の主力産業となっているディスプレイ産業が必ずしも強くないことから、大手企業の参入は多くない。しかしここ数年で、照明の実用化をめざした研究開発は活発に進んでいる。

中国	研究水準	△	↗	あまり顕著な研究成果は出ていないが、年々論文数は増加傾向にあり、上昇傾向がみられる。特に台湾においては、ITRIを初めとして、ディスプレイに関する研究を中心に勢いがついてきており、太陽電池に関する研究も発展傾向にある。
	技術開発水準	○	→	中国本土には、特に注目すべき動きは見当たらないが、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。台湾において、高い技術力を示す企業が現れるようになってきているが、全体としてはまだ他からの導入型の技術開発レベルに止まっている。
	産業技術力	○	↗	台湾においては、欧米先進技術の導入を積極的に進め、ディスプレイ産業が極めて盛んになってきた。有機EL技術を中心に産業技術力は年々上昇している。しかし、中国本土においてはまだ技術はほとんど育っていない。日本企業から装置輸入などを積極的に行っている様子。知財の保護が必ずしも十分でないことから、シンガポールなどへの移動も見られる。
韓国	研究水準	◎	↗	産業界に牽引される形で推進してはいるが、国家の学への投資効果が現われてきたせいか、最近斬新な研究成果等も数多く発表されるようになってきており、着実に力をつけている。現在、世界で最もアクティブに取り組んでいる国の一つとなっている。国際誌や国際学会に多数の論文投稿が見られ、大学、企業において幅広い研究開発が進められている。可能性のある研究シーズには網羅的な投資を行っている。
	技術開発水準	◎	↗	ディスプレイ産業世界一を国策として狙っていることから、ELを中心に、産が学官と一体となって集中的に取り組んでおり着実に進歩している。ELはSamsung、LGを中心に膨大な投資を行っている。Samsungから40インチの有機ELディスプレイが発表され、有機半導体のデバイス化に高い技術力を有している。日本では未解決の、蒸着での大型基板塗り分け技術に目処をつけつつある。
	産業技術力	◎	↗	ディスプレイ技術を中心に大変な勢いで開発。Samsungでは、小型の有機ELディスプレイの量産が軌道にのり、有機デバイスに対する幅広い技術の集積が見られる。また、近年では第5.5世代の基板サイズの設備投資を発表。大型化開発は日本より先行し、その製造技術にかかる特許出願も日本を上回る勢いとなっている。さらに最近では、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んでいる。

全体コメント：

全体として有機EL技術の産業展開に牽引されている傾向にあるが、有機トランジスタ、有機太陽電池に関する研究が、分野の活性化に大きく寄与している。特に、最近では有機太陽電池に関する注目度の増大が、分野の継続的活性化を維持するのに大きく貢献している。分野としては長い歴史を持ち、主として化学系の研究者と基礎物理系の研究者によって取り組まれてきた背景はあるが、近年企業による産業技術としての開発に勢いが出てきたことと、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、大きく加速される傾向にある。有機ELの成功を足がかりに、研究面では、次世代有機デバイスの研究開発に研究ステージが移行している。産業化では、有機ELの産業化への取り組みが加速してきており、ディスプレイ応用のみならず照明への展開が大きく発展してきている。米国、欧州では、有機デバイスに対する様々なファンドが研究者に降り注いでいる。米国ではDOEが有機EL照明、有機太陽電池に特化したプログラムを推進。欧州では、特に、国境を越えた研究開発が進んでおり、EUのFP7に関連しプロジェクトが多数立ち上がっている。一方日本は、基礎研究、技術開発共に世界の先端を走っているが、産業化への取り組みが停滞しており、産業界の奮起が期待される。有機エレクトロニクスは、これからの産業であり、有機材料の特徴である印刷エレクトロニクス、フィルムエレクトロニクスの産業化に総力で取り組むことが期待される。

(注1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(6) ナノフォトニクス・近接場光技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	日本は近接場光学・ナノフォトニクスのパイオニアであり、多くの概念と技術を日本が創造した。物質励起の衣をまとった光子 (dressed photon) の理論モデルを構築し、近接場光エネルギー移動と散逸による固有の機能と現象など、先端的基礎研究をリードしている。アトムフォトニクスなど周辺基礎科学などが開拓されたが、これは欧米のアトムチップ研究に波及した。また、日本の研究水準の高さに注目した先進諸国 (米、独、豪など) が、日本の研究者との専門家会議を開催して情報交換の高効率化が行われた。
	技術開発水準	◎	↑	量子光ドット NOT スイッチの世界初の室温動作に成功した。これにより、近接場光で動作する全光型回路を、2020 年ごろまでに実用化する目途が立った。計測用のファイバプローブ技術、光学禁制遷移を用いたナノフォトニックデバイスの発明、非断熱過程による気相堆積やリソグラフィなどの発明、物質表面の研磨、さらには情報セキュリティ応用、X線用デバイス開発、光エネルギー→光エネルギー変換、光エネルギー→電気エネルギー変換、近接場光を利用したナノフォトダイオード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している。
	産業技術力	◎	↑	分光計測システムは我が国の産業界のみが実用化し、国際標準化にむけて世界を主導している。産学連携の国プロジェクトにより、1Tb/inch <sup>2</sup> 高密度大容量情報ストレージシステム、リソグラフィ装置、などの基本実証に成功し、世界に先駆けて実用化が進められている。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し、参考情報 2 に記載した大きな成果が得られた。また、ナノフォトニクスの技術力強化のための人材育成事業も推進されている。
米国	研究水準	○	↑	化学分野で近接場光エネルギー移動の基礎研究が行われている。またバイオ計測などが活発化している。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を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がないし、ナノフォトニクスと称するも実際にはシリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、光マイクロマシンなど、既存の波動光学の枠組みの技術を推進している研究機関がほとんどである。
	技術開発水準	○	↑	高密度大容量情報ストレージのための HAMR プロジェクトが日本と同時期にスタートしたが、成果は出ないまま一旦は終了した。しかし、カーネギーメロン大学を中心に研究グループが組織され、研究を再開し、成果が出つつある。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、今後日本への追撃が急になると思われる。
	産業技術力	○	↑	計測分野では技術力不足のために撤退した。デバイス、加工、システムなどの産業技術力は少ない。但し、上記のカーネギーメロン大学の動きを注意する必要がある。
欧州	研究水準	◎	↑	光アンテナなど既存の波動光学の理論、FDTD などの既存の数値計算技術のみである。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。ナノフォトニクスと称するも実際にはシリコンフォトニクス、プラズモニクス、メタマテリアル、光マイクロマシンなど、既存の波動光学の枠組みの技術を推進している研究機関がほとんどである。
	技術開発水準	○	↑	基礎研究開始時期は日本と同程度に速かったが、計測システムへの応用、バイオ計測応用のみに留まり、デバイス、加工、システムなどの技術開発水準は低い。しかし現在の光通信技術と 30 年後をめざした量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のためにナノフォトニクスを中心に添えた技術ロードマップが策定された (MONA Nano-photonics roadmap)。日本が追われていることを認識しなくてはならない。
	産業技術力	○	→	国際的に目立った産業技術力はない。
中国	研究水準	△	↑	研究水準は低い、急速に研究人口が増えている。また、国際会議などを中国に誘致開催する動きが活発。
	技術開発水準	△	→	現状では技術開発水準低い。
	産業技術力	△	→	国際的に目立った産業技術力なし。

韓国	研究水準	×	→	国際的に目立った産業技術力なし。
	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はないが、大容量情報ストレージ技術に関して、サムソンが日本の技術を模倣して研究を行っている。

全体コメント：

ナノフォトニクスは近接場光のエネルギー移動と散逸を使う技術である。日本は近接場光学研究における世界のパイオニアの拠点である。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、原理とも日本発である。ナノフォトニクスは光全般に関する基盤技術であり、デバイス、加工、システム、エネルギー応用などを広くカバーした応用範囲が非常に広い技術である。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。その一つの成果として、量子光ドット NOT スイッチの世界初の室温動作に成功した。これにより、近接場光で動作する全光型回路を、2020年ごろまでに実用化する目途が立った。しかし最近米国、欧州でも研究開発が活発化してきたので要注目である。国際学会活動なども活発化してきており、特に EU では、現在の光通信技術と 30 年後をめざした量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のために、ナノフォトニクスを中心に添えた技術ロードマップが策定された (MONA Nano-photonics roadmap)。このため今後の急迫が予想される。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期待される。

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(7) 次世代ナノデバイス（単電子、原子・分子デバイス）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	ナノワイヤ、グラフェンなど新構造・新材料トランジスタの研究者が増加している。単電子、分子・原子などを用いたデバイスについては、センサ、標準、量子ビット、スピン制御など、より極限的な動作を目指す基礎研究に比重が多くなってきている。研究の質・技術力では高い水準を維持しているが、分野を牽引する先導性にやや欠ける。
	技術開発水準	○	→	技術先行の体質からの脱却を目指した産官学連携の動きもあるが、産業につながるには時間がかかる。物理、デバイス、回路など個々の高い研究水準・技術力を有機的につなげようという取り組みも始まりつつあるが、ややスピード感に欠ける。
	産業技術力	△	→	産業化の道筋は見えていない。技術的な壁や課題が原因ではあるが、ビジネスイメージや産業界の牽引が不足している。
米国	研究水準	○	→	産学連携（NRI など）で、beyond CMOS の視点から原理的な検討を進めている点が強みであるが、現時点では有力な候補は見つかっていない。ナノ構造を用いた光電素子、熱電素子（Caltech）、バイオセンサ（Harvard）など多様な応用を意識した先駆的な成果を輩出する一方、量子・スピン系デバイスの基礎分野でも高レベルを維持している。
	技術開発水準	○	↗	グラフェンなどカーボン系材料を用いたデバイス、たとえば高速デバイス（IBM）などに注力をしている。応用志向が強く、ポテンシャルがあると判断するとテーマを重点的に絞って取り組む姿勢が見られるが、実用化には多くの課題があり容易ではない。
	産業技術力	△	→	産業化にはいたっていないが、先行投資や投資戦略の決定がダイナミックに行われている。ベンチャー企業、ファンドリ利用など産業化の手段の多様性があるのも強みか。
欧州 豪州	研究水準	○	↗	米国のように派手な研究成果は少ないが、各分野で継続的に地道な基礎研究を積み上げていることもあり、量子（Delft, Cambridge）や分子デバイスで良質な研究成果を輩出している。豪州では Si 量子コンピュータの大型プロジェクトの継続が決定しており、アクティビティも高くなってきている（UNSW）。米国との連携も増加傾向にある。
	技術開発水準	○	→	基礎研究に比重を置いているため、実用化に向けた動きは全体としてはあまり活発ではないが、ナノワイヤ、分子、量子などでは高い技術力を有している。
	産業技術力	△	→	産業化については保守的な分野に限定する傾向があり、新しい分野での動きは少ない。
中国	研究水準	△	↗	後追いのフェーズであり、玉石混交ではあるが、物理系の著名雑誌への投稿も増加しており、上昇傾向にある。学生の意欲も高い。
	技術開発水準	×	↗	デバイス作製の技術力は依然として高くないが、上昇傾向にある。
	産業技術力	×	↗	技術開発水準に同じ。
韓国	研究水準	△	→	後追いの研究が多く、単電子デバイスなどでも継続的な取り組みが見られるが、研究レベルはあまり高くない。
	技術開発水準	△	↗	デバイス作製技術のレベルは向上しており、産業界主導でものづくりに関する研究開発は上昇傾向にある。
	産業技術力	○	→	産業化の動きはないが、新メモリやグラフェン（Samsung）など産業界主導の積極的取り組みが見られる。

全体コメント：

次世代ナノデバイスは、単電子・スピン・量子・分子電子状態や分子構造・機械的自由度などを利用した beyond CMOS デバイスとして期待されてきたが、有力な候補が見つかっていないのが現状である。さらに、加工技術やボトムアップ作製技術の限界により集積化技術としての展望が見えないこともあり、物性の極限的制御を実証するデバイス、高感度・高精度を利用するセンサ（電荷、光、バイオ）・標準デバイス（単電子、グラフェン）など単体デバイスとしての応用、あるいは量子コンピュータ応用などへ研究動向がシフトしつつある。米国は、量子・スピンなどの基礎研究を継続しながらも、応用志向の強い研究（センサ、光電、熱電）を展開している一方、欧州・豪州は基礎に比重をおき、計測、標準、量子などの分野で強みを示している。日本はその中間に位置し、高い技術力を維持しているが、やや発散的であり、分野としての方向性や戦略が見えにくい状態にある。なお、グラフェンなど新規材料を用いたデバイスは、beyond CMOS というよりむしろ新チャネル材料の位置づけで主であるが、集積化技術につながるかは今後の動向を見る必要がある。また、次世代ナノデバイスは、CMOS を完全に置き換えるものではなく、CMOS への新機能付加を目標とするのが現実的な見方となっているが、応用ターゲットを明確にして、回路・システムまで含めた検討を行うレベルに到達するにはまだ時間がかかりそうである。

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(8) 次世代ナノデバイス (超伝導デバイス)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	大学、国立研究所等で引き続き堅調に研究が進められている。超伝導デバイスについてはナノワイヤを用いた量子通信単一光子検出器システムの優位性が示されたほか、高エネルギー分解能を求める検出器の研究が活発化している。
	技術開発水準	△	↘	全体的に見ると、企業のこの分野の研究は低調。検出器/センサや量子ビットの研究には、一部企業が参画している
	産業技術力	○	↗	電子顕微鏡に付随する EDX (エネルギー分散型 X 線分光) に超伝導転移端センサを組み込み、材料分析性能を格段に向上させた製品が商品化された。
米国	研究水準	○	→	低電力計算機を超伝導デバイスによって実現する国家プロジェクトが継続しており、拠点研究機関では研究アクティビティは引き続き高い。また、検出器の多素子化技術などは、世界をリードする成果を上げている。さらに、量子計算へ向けた基礎研究も引き続き活発に行われている。
	技術開発水準	○	→	Hypres 社が、2009 年に量子ビット関係の予算を獲得し、Nb 系超伝導集積回路も含め、多くの装置を一新した。同社の量子ビット関係の成果はまだ見えてこないが、無線信号を直接デジタル化するデジタル RF 受信機などはシステムデモなどに至っている。カナダではあるが d-wave 社もやはり、量子ビットを中心とした超伝導エレクトロニクスに力を入れている。高性能計算機を構築する国家プロジェクトの中心メンバーは Northrop Grumman 社であり、ここの Activity も上がっている。
	産業技術力	○	→	Starcryo 社は、超伝導磁気センサのチップ (SQUID センサ自身) や周辺機器を扱い、この分野の製品で世界的なシェアを握っている。また、Hypres 社も超伝導デジタル回路チップの試作サービスなどでは世界的なシェアを握っている。このようにマーケットが小さくても、ベンチャー企業が着実に商品化している。
欧州	研究水準	○	→	検出器、SQUID を中心に堅調に研究が進められている。しかしながら、景気の後退もあって、研究資金は縮小化の方向と思える。
	技術開発水準	△	↘	この分野で新たに積極展開を図ろうとする企業はほとんど見られなくなった。
	産業技術力	△	→	高温超伝導薄膜や磁気センサ関連機器など、もともと有していた技術力はそのまま維持されている。しかし、将来へ向けての展開はほとんど見られない。
中国	研究水準	△	→	レアメタルなどの資源が豊富なこともあり、主に酸化物材料を中心とした研究が推進されている。デバイス化の研究はあまり進んでいない。
	技術開発水準	×	→	デバイス研究が盛んではないため、技術開発水準も高くない。
	産業技術力	×	→	デバイス自身の将来性やマーケットの大きさが明確でないためか、企業からの製品化の目途はほとんど立っていない。
韓国	研究水準	△	→	超伝導デバイスに関しては、SQUID 応用などは堅調に研究が進められている。また、超伝導検出器の研究も開始されたが、全体としては世界をリードする成果が上がっているとは言い難い。
	技術開発水準	×	→	現時点では、企業が積極的な開発を行っていない。
	産業技術力	×	→	中国と同様な理由により、製品化にはほど遠い感がある。

全体コメント：

日米欧で超伝導量子ビットに関する研究が引き続き盛んである。特に米国、カナダでは、Hypres 社や d-wave 社といった民間会社も積極的に開発に当たっている。また、超伝導検出器の開発が最近 10 年で飛躍的に進んだ。超伝導転移端センサ、カインティックインダクタンス検出器ともに米国が先導し、すでに多数の検出器を搭載したシステムも実現している。量子通信に用いる単一光子検出器は、最近になって日本で高性能なものがデモンストレーションされ、注目を集めている。デジタル回路の分野では、米国の国家プロジェクトが本格化している。エネルギー/ビットを小さくすることで、超低消費電力の計算機構築を目指している。このように米国の研究が活気づいている一方で、欧州は景気後退の影響を受け縮小気味、アジアも新たな大きな動きは見られない。日本は、比較的堅実に研究が進められている。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

### 1.3.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) ナノ CMOS 技術

##### 高移動度半導体材料

高駆動力トランジスタのチャネルとして、ゲルマニウムや III-V 族化合物半導体、またグラフェンなどカーボン系材料などの、高移動度材料の研究が、引き続き活発になされている。III-V/Ge を用いた CMOS 技術は、現在、インテル、IMEC、SEMATECH を中心に、15 nm 技術ノード以細での適用に向けて、活発な研究開発が続いている。III-V 族 MOSFET は、インテルが、Si 上にエピタキシャル成長した InGaAs を用いたロジック用途の nMOSFET の開発を強力に進めており、SEMATECH は、8 インチ Si ウェハ上にエピ成長させた III-V 基板を、通常 CMOS ラインに投入して、LSI 実証を進めている。一方、III-V/Ge を含めた、Si 基板上の異種材料集積 (heterogeneous integration) による More than Moore の研究開発も活発化しており、特にフォトニクス応用と CMOS を絡めた研究領域では、Si フォトニクスと III-V 光デバイスの異なる研究フィールドの双方から、高い関心が寄せられている。また Ge は、最近、MIT からのレーザ発振の報告なども受け、光デバイス用材料そのものとしても脚光を浴びており、光電子融合技術に最適な材料としての関心が高まっている。

また、グラフェンに関する研究開発は、現在、基礎から応用まで、世界的なフィーバーと言える勢いで、急速に進んでいる。但し、CMOS 応用としては、バンドギャップがほぼゼロである問題が技術的に解決したとは言い難く、リーク電流の点で根本的な課題が残されている。このため、高周波アナログ応用への関心が先行している。

##### 低 S ファクター素子 (Steep sub-threshold devices)

0.5V 以下の電源電圧の LSI を目指し、室温で約 60mV/dec という MOSFET の有限の S ファクターの限界を超える、新しい動作原理や材料・構造の研究が活発化している。すでに、いくつかの新しい素子が提案されているが、現段階では、pn 接合での GIDL (Gate-induced Drain Leakage) 電流を活用するトンネル FET が最も注目されており、米欧の大学を中心に、近年多くの報告が行われている。特に最近では、トンネル FET の低駆動力を補うために Si 以外の材料 (Ge、III-V 族半導体) での検討が活発化し始めている。

##### スピン MOSFET 技術 (MRAM ロジック融合技術)

近年の MRAM 技術の進展やスピントロニクス材料・デバイス研究の進展により、MRAM あるいはスピンを利用した不揮発性メモリをロジック LSI の中に融合させ、低消費電力ロジック素子を実現する提案と試みが、目立つようになってきており、低消費電力 LSI を実現する上での注目技術となっている。

## (2) カーボンナノエレクトロニクス

日本では、MIRAI プロジェクトでのカーボン配線、CREST プロジェクトでのグラフェントランジスタ関連の研究があり、研究水準は高い。企業の研究開発予算は減少しているが、研究アクティビティはナノエレクトロニクス関連のコンソーシアム (TIA nano) や国家プロジェクトの推進で補完され、大学、研究機関だけではなく装置メーカーも巻き込んだ形で拠点に集約され、今後の製品化へ向けた技術開発の新展開が期待されている。しかし、カーボンエレクトロニクスとして研究領域が広範囲にカバーされているとはいえ、更なる投資が必要である。特にグラフェンの研究予算については、ノーベル賞の影響もあり、欧米に比べて日本はかなり見劣りすることが懸念される。

米国では、SRC 傘下のコンソーシアム NRI が成果を挙げている。大学・国研において、国家プロジェクトや企業とのアライアンスがうまく機能し、高い水準を維持している。Albany Nanotech は IBM 主導のアライアンスで研究開発が展開されており、ナノエレクトロニクスの世界的な研究開発拠点として高い技術開発の進展が期待されている。IBM がグラフェンのトランジスタ応用技術で先行している。

欧州では、ガイム教授ら (マンチェスター大) が「グラフェン」に関する業績によって 2010 ノーベル物理学賞を受賞した。企業と大学、公的機関が、ナノエレクトロニクス関連のコンソーシアム (IMEC、CEA/LETI) や国家プロジェクトにより組織的な連携を図り、高い研究水準を維持している。MIRAI プロジェクトと類似した VIACARBON という EU プロジェクトが進行しているが、大きな成果は見えていない。

アジアでは、特に韓国において Samsung グループおよび大学を中心に、研究アクティビティが高い。透明電極向けに大面積のグラフェン成長技術など高水準な注目発表が目立つ。魅力のあるコンソーシアムあるいは国家プロジェクトは見当たらないが、Samsung グループが豊富な資金力の下で着実に技術力を蓄えている。

## (3) スピントロニクス

### シリコンスピントロニクス

シリコン中に注入したスピンを制御利用するシリコンスピントロニクスの研究が活発化してきた。この分野は、米国海軍研究所、メリーランド大学、蘭 Twente 大学などが先導してきたが、東芝、TDK、九大などが良い成果を報告しはじめた。シリコンは半導体デバイスの中核材料であるため、今後の展開が注目される。

### スピン流

従来の巨大磁気抵抗効果やトンネル磁気抵抗効果は、スピン偏極した電子の流れによって引き起こされる現象である。最近、電流の流れを伴わない純スピンの流れを含めてスピン流として理解しようとする動きが活発化してきた。非局所磁化反転、スピンホール効果、逆スピンホール効果、スピンゼーベック効果などの新しい現象が議論されており、よりエネルギー効率の良いスピンドバイスの出現に結びつくのではないかと期待がある。この分野では、東北大や東大などが先導している。

### 電界による磁化の制御技術

磁界やスピン偏極電流による磁化のスイッチングに比較して 2 - 3 桁スイッチング

エネルギーの低減が可能であるとされる電界による磁化スイッチングの研究が盛んになりつつある。マルチフェロイクス・磁性半導体などの新しい材料を使う方法や磁歪を利用するものに加え、Fe系の強磁性合金と絶縁体の界面の異方性を直接制御する方法も見いだされ、磁化スイッチングの第三の方法にむけた研究開発がなされている。

#### 不揮発性論理集積回路

磁気トンネル接合は不揮発性であると同時に、高速かつ書換耐性が高いため、これを利用して論理集積回路を不揮発化することができる。これにより現在のLSIの発展を妨げる最大の原因である発熱問題を解決できる可能性がある。FeRAM技術を用いたデバイスは実用化寸前まで来たが、スピントロニクスを用いて、より高い集積度・高機能を実現しようという研究が進展している。

#### (4) メモリデバイス

PCMはスイッチングの消費電力の大きさ等が問題となり、当初の期待よりは製品化速度は遅いが、世界各域での開発は着実に進んでいる。ナノピラー型PCMの動向が注目される。一方、RRAMの研究比重が増加している。様々なタイプ、材料が提案されているが、メカニズムの解明を通じて、方式が淘汰されていくと思われる。

ナノカーボンを用いたデバイス研究が活発化しているが、NVMについてもカーボンベースの抵抗変化メモリ提案が広がりを見せている。局所的なsp<sup>2</sup>/sp<sup>3</sup>相変化、CNTを用いたクロスポイントのナノ・メカニカルスイッチなど、今後、究極のスケールリング性に対する有望なソリューションとなることが期待される。

NVM技術の不揮発性ロジックへの適用検討が進んでいる。ロジックに不揮発性メモリ機能を融合することで、不揮発性パワーゲーティング、再構成可能ロジック、電流モードロジックなどが可能となり、超省電力LSIとして大きな発展をする可能性がある。RRAM技術はCrossbarスイッチとして再構成可能ロジックを形成し、スピンRAM技術はスピン機能MOSFETとして電流駆動能力可変トランジスタを形成できる。メモリとロジックは、不揮発化を介して、回路レベル、トランジスタレベルで融合していくことが予想される。

多くの抵抗変化型NVMは、メモリストアとして動作する。メモリストアは高効率な演算アーキテクチャを実現できる素子として期待されており、その意味でも、NVM素子がロジック要素として使われる可能性が広がる。

#### (5) 有機エレクトロニクス

##### 有機薄膜太陽電池

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

### 有機単結晶薄膜

有機単結晶薄膜の報告が、ちらほら見られる様になっている。アモルファスより多結晶、多結晶より単結晶が、電子デバイスとしては好ましいのが一般である。大面積基板に対応できる、均一な製膜技術が鍵である。

### 有機 EL 照明

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

### 有機デバイス評価技術に関する研究

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

### 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、有機磁性材料を活用した有機スピントロニクスに関する研究が増加傾向にあり、新たなターゲットとなる予兆を見せている。後者では、有機レーザや有機メモリへの取り組みが増加傾向にあり、特に有機レーザは有機エレクトロニクスの極限への挑戦として注目を集めている。

### 欧州における有機デバイスの研究プロジェクトの状況

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

(参考情報)

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

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

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

EU の FP7, FP8 のプログラムでは Organic & Large Area Electronics (OLAE) のカテゴリーで大規模なプロジェクトを計画。

(単位：M ユーロ)

	FP7 (2011-2013)	FP8 (2014-2015)	合計
有機 EL 照明	120	80	200
有機太陽電池	54	46	100
有機 EL ディスプレイ	57	43	100
Printed Electronics	24	16	40
集積・スマートシステム	45	45	90
合計	300	230	530

米国スタンフォード大学に有機太陽電池の研究教育センターが誕生

サウジアラビアのファンド (5M\$ × 5 年) によって有機太陽電池を中心とした太陽電池に関する研究拠点 The Center for Advanced Molecular Photovoltaics (CAMP) が形成された。40 名の教授陣が本プロジェクトに参加する。

DOE は傘下の NREL で 2009 年太陽電池研究開発に 14.5M\$ を投資。有機太陽電池はそのうち 2M\$。大学へのファンドの内、有機太陽電池には 4 テーマ 3.3M\$ である。また、有機 EL 照明へのファンドも活発で、これまでに 46 テーマが完了、現在 26 テーマを推進中。Building Technologies Program (27 テーマ) は NL や大学、大企業が中心。Small Business Innovation Research (45 テーマ) でベンチャー企業をサポート、特に UDC は 20 テーマと突出している。

## (6) ナノフォトンクス・近接場光技術

### 日本

近接場光を用いた製品・プロトタイプを発表しているのは日本だけである。現在は諸外国に対し圧倒的な優位性を確保している。この理由は、近接場光学が日本発の技術であることと、大学で基礎研究がなされたことと、産官学の連携が上手く行われてきたことである。大学の力を借りて、日本としてリードを保ち、さらにそれを拡げることが重要である。

NEDO は、東京大学とともに、近接場光を用いた新機能部材の開発を進め、2010 年 8 月に、光で動作する論理回路 (ドット NOT スイッチ) の室温動作 (300K) に世界で初めて成功したことのプレスリリースを行った。近接場光のエネルギー移動を用いたもので、従来の電子デバイスをこの技術によって光デバイスへ置き換えることで、1/10,000 の超低消費電力の素子を実現できるようになり、エネルギー消費量の削減に大きく貢献する。従来の量子ドットデバイスでは  $10^8 \sim 10^9$  個にのぼる多数の量子ドットからなる寸法 100 マイクロメートル程度の集合体の特性を用いていた。これに対して 2 個の量子ドットの形状、構成と、その近接場光の振る舞いを物理原理に基づいて設計し、これを 2 個の量子ドットの垂直位置制御、低温埋め込み制御等の革新的な製造プロセスで作製することにより、寸法 50 ナノメートル以下で室温動作するデバイス

を開発した。これにより、近接場光で動作する全光型回路を、2020年ごろまでに実用化する目途が立った。

## 米国

DARPAでも、ドレストフォトン (dressed photon) の有望性に注目しており、いくつかの研究が開始された。また、光コンピューティングでは Duke 大学が、イメージングでは Stanford 大学が、ドレストフォトンを活用したシステムの論文発表を行った。さらに、2010年7月には、Intel 社からハイブリッドシリコンレーザ技術を活用したシリコンフォトニクスの開発と製品化が発表されている。

## 欧州

MONA では、現在の電気 IC の限界が近付いていると認識している。2030～2050年頃には量子デバイスが出来る。その間をつなぐ技術は、ドレストフォトンと見極めたロードマップを発表した。ドレストフォトンの研究に大きな予算が付いて、電気 IC の次の素子にターゲットを絞って研究開発が開始されている。

EU では現在の光通信技術と 30年後をめざした量子情報通信技術との間をつなぐ次世代通信技術のためにナノフォトニクスを中心に添えた技術ロードマップが策定された (MONA Nano-photonics roadmap)。すでにフィージビリティスタディの予算がついている。当面はフォトニック結晶、シリコンフォトニクスなどの波動光学技術を用いて通信デバイスを開発しようとしている。また、一部ナノフォトニクスの概念も含むプラズモニクスにも力を入れており、早晩、日本が推進している近接場光のエネルギー移動、散逸に基づくデバイスへと移行する可能性がある。

## アジア

アジアからの報告はほとんどないが、シンガポールでは、ドレストフォトンの研究がハードディスク向けに開始されている。

## (7) 次世代ナノデバイス (単電子、原子・分子デバイス)

ナノワイヤトランジスタなどいわゆる More Moore (従来型トランジスタの延長) と位置づけられるデバイスについては、欧州、日本、米国、韓国、台湾など世界各国で行われている。実用化の時期などの見通しは不明であるが、その基本的性能の評価についてはほぼ完了しており、最近では、ランダムテレグラフノイズなど微細デバイスに特徴的な性質やその影響を調べる研究が増加している。また、バイオセンサ、熱電、光電、圧電などその他の応用を模索する動きが数年来見られるが、今後も継続することが予想される。単電子デバイスについては、欧州、日本で継続的な取り組みがなされているが、標準デバイス・センサなど基礎分野への応用へ研究がシフトしつつある。最近、キャリアの供給源として長年導入されてきたドーパントについて、極少数もしくは1個に注目し、トランジスタをはじめメモリ、単電子輸送、フォトン検出などデバイス機能に活用する単一ドーパントデバイス研究が活性化している。スピンを用いた次世代デバイスについては、例えばスピンドルを用いた電力消費のないデバイスなどが米国で検討されている。日本では、デバイス化の議論はまだないが、スピンホール効果など物理分野で高いレベルの研究が行われている。

機械的自由度など Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) などの論理回路応用については欧州などで試みられてきたが、従来の MEMS 応用の枠を出られそうなものは今のところ見当たらない。量子ビットデバイスについては、超伝導や化合物量子ドットなど最先端の物理を駆使して研究が進捗してきたが、やや飽和傾向にある。一方、後を追う形ではあるがカーボンやシリコンを用いた量子ビットについての検討が進行しつつある。次世代ナノデバイスを新アーキテクチャと結びつけようという議論はここ数年行われているが、具体的な方向性を示すものは今のところ見当たらない。確率共鳴現象などノイズとデバイス応答の関連を調べる研究が増加してきおり、今後そういう検討の中から、次世代ナノデバイスの活用方法、デバイス特性ばらつきを緩和するが手法などが生まれてくるかが注目される。

### (8) 次世代ナノデバイス (超伝導デバイス)

この1-2年間で、超伝導デジタル回路のトレンドが大きく変化した。これまで、超伝導デジタル回路は約20年間にわたって超高速低電力を特長とした単一磁束量子 (Single Flux Quantum) 回路が主流であった。しかし、グリーンIT化の流れを受け、高速性ではやや劣るもののよりより低消費電力な別な回路方式が次々と提案されるに至った。米国の超伝導技術による高性能計算機プロジェクトも、Reciprocal Quantum Logic と呼ばれる新しい論理回路方式を採用しており、従来の1/10 - 1/20に消費電力を下げられるとしている。日本は単一磁束量子集積回路の設計・集積回路では現時点で世界屈指の技術を有しているが、米国ではもともと Hypres 社が高い技術を持っていたところに、さらに新しい製造ラインを MIT に作るなど急速な展開が図られている。また、d-wave 社では、超伝導回路プロセスを半導体 CMOS 製造プロセスの一部で行うなど、設備投資を抑えたプロセスラインの構築を目指している。プロセスの維持方法としての新たな取り組みとして注目される。

## 2. 基盤科学・技術

### 2.1 新物質・新材料

#### 2.1.1 概観

新物質・新材料は、マテリアルサイエンスとして独立した分野を形成するのみならず、ナノテクノロジーにおいて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、本調査ではナノカーボン材料、ソフト材料、ハイブリッド材料、高分子・プラスチック材料、融液材料、ナノ・メソポーラス材料、触媒材料、新型超伝導材料、磁性材料、低次元材料、及び新材料探索・設計の11綱目に分類した。

多くの綱目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、ほとんど日本の独壇場と言ってよく、米国がこれに次ぎ、そして欧州は後追いの形となっている。韓国や中国の追い上げは、現状では顕在化していないものの、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、将来的には大きな脅威と見られる。一方、新規な機能材料については、日本の活躍が目立つものの、欧米で先行する研究開発も少なからず見受けられ、特に欧州での政策に基づく展開は要注意である。政策展開は韓国でも強力に進められている。

ナノカーボン材料では、グラフェンに関して2010年度のノーベル物理学賞受賞対象研究となったことから明らかなように、微細化限界が間近に迫ったCMOS技術を打破する候補材料の一つとして、現在精力的な研究が世界中で行われており、ナノカーボン研究において最も注目すべき材料であるといえる。米国では、ナノチューブからグラフェンへの研究者の移行が顕著であり、基礎・応用研究両面で一歩先んじている。欧州はグラフェン研究のフロンティアとして基礎研究に強みがある。韓国は産学連携により研究が急速に進展している。日本ではナノチューブに関しては特に成長やデバイスへ向けた研究で世界的な水準にあるが、基礎科学的な側面では遅れている。一方、日本はグラフェン研究進展に関して米国や欧州に比べて出遅れたが、基礎物性面で注目すべき成果を挙げ始めている。

ソフト材料では、日本が研究開発で世界をリードしている分野である。超分子に関しては、欧州は主として dendrimer、米国は分子マシンや超分子素子の研究が盛んである。特に近年、精緻な分子設計に基づいて様々な新規構造が創出され、その機能が次第に明らかになってきた結果、産業界の関心も高まっている。産業化については、コンタクトレンズやバイオチップなどのバイオマテリアルで米国が先行している。また最近では特に、いずれの国においてもソフト材料の環境分野への応用研究がきわめて盛んになっている。欧州はこれからであり、韓国や中国はさらにその次と考えられるが、中国のベンチャー企業の動向や韓国で進められている産官学クラスター形成などの政策的取り組みの成果が目される。

ハイブリッド材料では、応用分野を限定し研究開発が行われている米国、中国、韓国に比較して、日本は多くの研究で目的が限定されておらず、欧米の後追いのものが多い。構造材料としてのハイブリッド材料では、欧米と日本が研究開発で先端を進み、これに対し、韓国や中国は着実に研究実績を積みつつあり、肩を並べるのは時間の問題であると考えられる。ハイブリッド材料の研究・技術開発は素材以外にもそれぞれの表面、界面制御、それらの3次元分散状態制御、配向制御、計測、解析技術がキーポイントである。それら

についても、現時点では、日本が進んでいるが、欧米も水準を上げてきたことと、中国・韓国の選択と集中によるレベルアップが著しい。

高分子・プラスチック材料においては、日本が機能性高分子の分子設計、新規触媒、ナノ構造制御等、世界をリードする先端研究では大きな成果を上げているが、先端研究を支える基盤研究に不安がある。一方で、化学・材料メーカーは世界をリードする企業ユーザー（自動車、情報・エレクトロニクス）と組み、グローバルな展開がなされ、研究開発投資も旺盛である。欧米は、地道に高分子化学全般及び基盤研究へ注力しており、研究水準は高い。ここ数年で韓国、中国の特許出願件数が急増しており、将来日本にとって大きな脅威となる可能性がある。

融液材料においては、固体電解質（膜、酸化物）、イオン液体、ゲルのすべての分野において、量的には中国が他国を圧倒している。リチウムイオン電池や燃料電池といったエネルギー変換デバイスの開発に関連した界面研究に中国が力を入れている。欧州は巧みな連携を始めている。イオン液体の研究は、日・欧・米を中心に進められているが、それぞれ指向している出口が少しずつ異なる。日本は、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車といった環境配慮型自動車が次世代有力産業として期待され、さらに電池産業が非常に活発なため、これら電気化学デバイスにイオン液体を応用しようとする研究が非常に盛んであり、この分野の研究では世界をリードしている。一方、欧州では、有機溶媒の排出規制が日米以上に厳しいためか、化学プラントで化学反応・触媒反応・抽出などに用いられてきた有機溶媒をイオン液体で代替しようとする研究が盛んである。米国は、日欧と比較すると研究者人口が少し少な目であるが、CO<sub>2</sub>の分離・回収への応用研究が非常に活発である。産業技術力という観点では固体電解質膜以外は産業化のレベルに到達していないものが多い。

ナノポーラス・メソポーラス材料（空間空隙材料）の研究開発としては、ゼオライト、メソポーラス材料、PCP/MOF（多孔配位高分子）の三材料が主要な材料群となっている。2009年及び2010年に発表された論文数を比較すると、いずれの分野も中国の勢いが顕著であり、今後も中国の伸張は続くと思われる。産業応用に関しては、メソポーラス材料およびPCP/MOFは欧州が一步リードしているが、ようやく量産化体勢が整った状況にある。

触媒材料について、米国は研究水準、実用化の面でも先端を担っている。日本は、ナノ構造体および分子・原子レベルでの触媒設計や特に精密有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発の研究水準は極めて高い。光触媒、環境触媒分野の技術開発水準も高い。近年、白金代替のカーボンアロイ触媒に関する研究にも力を入れており、今後の発展が期待される。また、バイオマスの有用化合物への転換反応開発にも注力しておりその研究水準は高い。欧州諸国の産業技術力は極めて高いが、研究水準はここ数年現状維持のままである。研究水準、実用化の面では、韓国や中国は追い上げが急速ではあるものの日・米・欧と比べるとまだ遅れている。

超伝導研究においては、とりわけ新物質合成、物性測定・計測、理論の連携が重要であるが、わが国ではそのサイクルが諸外国に比較して良く機能している。基礎研究面では日米が高い研究水準を維持しており、欧州がそれに続く。中国における物質探索の勢いは一段落しており、既知物質の試料提供の役割を担っている。技術開発では、良質な薄膜作製技術の進歩が顕著で、線材化研究では臨界電流密度がかなり低いもののゼロ抵抗で通電で

きる短尺線材が日本、中国で得られるようになっている。依然として、産業技術研究に発展できる成果、ブレークスルーなどは無い。

磁性材料では、技術開発力と産業も含めた全体として日本と米国がリードしている。基礎研究では日米欧が拮抗してしのぎを削っているが、欧州の基礎研究の層は厚い。韓国の研究レベルはまだ日米欧に及んでいないが、技術開発力は伸びている。中国はさらに遅れているが、米国、日本、欧州で学んだ人材は豊富にいますので今後急速に伸び、将来、中国が磁石産業を完全に支配する可能性もある。

ナノ粒子・ナノワイヤ・ナノチューブといった低次元材料では、現在、プラズモニクス、燃料電池触媒などのエネルギー関連、バイオ関連への利用に向けたナノ粒子材料の研究開発が注目されている。欧米では、これらの基礎研究と技術開発が密接に結びついており、ベンチャー企業を中心とした製品化が精力的に進められている。一方、日本を含むアジアの動向は数年前と変わらず活発とは言い難い。

新材料探索・設計について、材料の設計という思想は欧米に端を発しているもので、依然として欧米が強い分野である。アジアは、材料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。わが国は、触媒や半導体の材料設計など欧米に先駆けており、現段階では決して後塵を拝しているわけではない。新しい鉄系超伝導等、新材料設計の思想から出てきた材料もあり、世界の注目を集める状況になりつつある。一方、電子材料に加えて、新エネルギー・省エネルギー材料、生体材料の開発競争とともに、高速探索手法への関心が高まっている。ドイツでも、コンビナトリアル手法による個体材料の開発が活発化しており、独米大学の連携が進んでいる。また、ルール大学を中心としたコンビナトリアルネットワークが構築されつつあり、大学もそれを支援している。日本では、医薬用コンビナトリアルケミストリーと同様に材料分野（特に触媒、ポリマー）での取組みの遅れが懸念される。

震災の影響により、東北地域の材料メーカーからの供給や開発がストップしたことで、日本だけでなく海外を含めて産業構造が（自動車産業等に代表される最終製品の多くにまで）大きな影響を受けている。例えば、自動車会社に部品を供給する部品メーカーは、部品を作るために使用する材料をこれまで通りに入手することができなくなった。実際には部品メーカーの多くは東北以外の他地域にあったとしても、そこに材料を供給する材料メーカーの多くが東北地域に存在しており、このことによって産業構造全体が大きな打撃を受けている。これはまさに材料産業の戦略上の課題といえる。海外の材料メーカーは、これまで日本が供給していた材料を日本に取って代わって生産し、供給する体制を一早く築こうとしている。材料産業において高いシェアを誇り、基礎研究開発を支えている日本がいかにか早く復旧し、またその上でさらなる新しい次世代材料を開発・供給していくという戦略が重要になってくるだろう。企業だけでは対応には困難があり、産官学が協同する政策的な措置を講じなければ対応できない大きな課題と考えられる。

◆新物質・新材料のまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	この分野の研究レベルは世界トップレベルにあり、触媒材料、超伝導材料、酸化半導体材料、アクア材料、有機金属フレームワーク、ナノ材料、強相関化合物などに関して、際立った研究者・研究グループが世界をリードしている。
	技術開発水準	◎	→	大学、企業共に高い開発水準にあり、構造材料、液晶関連材料、電池材料、逆浸透圧材料、ナノカーボンなどの先端材料が開発されている。
	産業技術力	○	→	高分子・プラスチック材料などでは、世界をリードする企業（自動車、情報・エレクトロニクス）と組み、グローバルな展開がなされ、研究開発投資も旺盛である。日本独自の優れた数多くの触媒プロセスを確立しており、付加価値の高い優れた材料を世界に供給している。先端材料の産業化に関しては、米国と伍して世界の先端にあるが、韓国、中国などに追い上げられている。
米国	研究水準	◎	→	最近、材料研究全般に活気がなくなりつつあるが、依然として 高いレベルの人材と研究設備を維持している。
	技術開発水準	◎	→	企業研究所に変わって、国が資金を提供する研究開発拠点で、機能材料に関わる研究開発が行われている。産学連携と国際的交流が効率的に行われており、高いレベルと人材を維持している。
	産業技術力	○	→	産業技術力は、IT・システムに重点が置かれており、材料研究全般に関しては、活気がなくなってきたが、依然として高い力を持つ。
欧州	研究水準	◎	→	長年にわたる基礎研究の伝統と成果の蓄積があり、グラフェンなど革新的な新機能材料を生み出す可能性を有している。従来から、計算科学に強かったが、EU 各国間の連携により、一層強化された。新材料設計ソフト面に特に強みをもつ。欧州で作られた設計に関するソフトが目につく
	技術開発水準	○	↗	基礎研究と応用研究の融合が始まっている化学材料・医薬材料分野、電子材料（特に液晶材料）では高い技術開発水準にある。
	産業技術力	○	→	EU および各国の政策により、特に、グリーン技術に関しての技術開発水準は向上してきている。標準化。データベースが産業技術力の向上に寄与している。
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（欧米からの帰国組＋国際連携）、平均レベルが急激に向上しており、かつ韓国よりも研究のスペクトルが広い。そのため、この分野の急速な進展が見られる予兆を感じる。日欧米で流行しているテーマを取り上げ人材パワーで圧倒しているが、中国発の国際トレンドを生み出すまでにはまだ至っていない。
	技術開発水準	△	↗	現況では独自技術は少なく日米欧には及ばないが、実用化が見込まれる分野（白色 LED、電池、平面ディスプレイなど）では、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	○	→	日本・欧米に比べて独創的な研究は少なく、水準も低い。しかし、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	○	↗	現況では日米欧には及ばないが、実用化が明確な分野（ナノ粒子構造材料、白色 LED、液晶ディスプレイ）では、大きな進展が見られる。
	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。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]



## 2.1.2 中綱目ごとの比較

### (1) ナノカーボン材料 (CNT、グラフェン他)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	ナノチューブに関しては特に成長やデバイスへ向けた研究で世界的な水準にあるが、基礎科学的な側面では遅れている。グラフェン研究進展に関して米国や欧州に比べて出遅れたが、基礎物性面で注目すべき成果を挙げ始めた（物質材料研究機構、産業技術総合研究所など）。CNT研究はトランジスタ応用、キャパシタ電極など応用研究を中心に進展している。
	技術開発水準	◎	→	電子デバイス利用研究が先行していたが、素材開発研究においても進展が見られる。電子材料応用に欠かせない高品質 CNT 合成についても高い技術力を維持している。グラフェンのエピタキシャル成長や金属表面での CVD などでの研究が発展し始めたが、その品質の面では米国の水準にほど遠い段階である。これからますます発展する余地がある。
	産業技術力	△	↑	CNT 量産化（年産数百ト）と、自動車用樹脂材料の原料、リチウムイオン電池材料など自動車・電池関連用途での利用が始まった。
米国	研究水準	◎	↑	ナノチューブからグラフェンへの乗り換えが顕著であり、グラフェン研究における研究者数が増加している。基礎物性の理解も非常に進むなどアクティビティは非常に高い。CNT 研究で実績を挙げている大学（ライス大学、MIT など）が牽引しているが、新しい研究拠点の広がりも見られる。基礎・応用研究両面で一步先んじている感が強い。CNT 研究ではセンサ応用、医療分野への展開が注目される。
	技術開発水準	◎	→	CNT のトランジスタ応用を目指した研究が盛んであるが、その研究基盤を生かしてグラフェンの電子デバイス応用研究においても先鞭をつけている（IBM）。エピタキシャル成長と CVD の両面で進歩が著しい。
	産業技術力	△	↑	自動車・電池関連用途で一定の需要が生まれており、今後さらに発展すると思われる。
欧州	研究水準	◎	↑	グラフェン研究のフロンティアとして基礎研究で強みがある。マンチェスター大学の A.Geim と K.Novoselov がノーベル物理学賞を受賞したのもそれを反映している。各国の拠点的研究機関と連携し（ドイツ：マックスプランク研究所、オランダ：デルフト工科大学など）、活発な研究が展開されている。
	技術開発水準	○	→	応用研究では米国ほど目立つものがないが、グラフェンをベースにした電子デバイス応用（トランジスタなど）の水準は高い。
	産業技術力	△	↑	CNT 量産化と、自動車・電池関連用途での市場形成が始まった。
中国	研究水準	○	↑	研究者数、論文数は飛躍的に増加しており、量的観点から見れば世界的な一極を占めているといえる。中国科学アカデミー（CAS）、精華大学などが拠点となり、裾野も広がっている。
	技術開発水準	△	→	研究人口は増加しており、市場の大きさも相まって急激な発展を遂げる可能性が高い。
	産業技術力	△	↑	ベンチャー CNT 製造メーカーが工場生産を開始するなど、ビジネスとしての注目度は高い。
韓国	研究水準	○	↑	研究拠点（KAIST、POSTEC、成均館大学）が官・学に形成され、産業界とも連携して研究が急速に進展している。電子デバイス応用に向けた材料研究も盛んである。特にグラフェンに関する研究で日本を追い越す勢いがある。
	技術開発水準	◎	↑	CVD 法により大面積のグラフェンを作製しタッチパネルを試作するなど、強みを持つディスプレイ用途を目標に見据えたグラフェン応用研究が注目される（サムスン）。官学との連携を強力に進めている。
	産業技術力	△	→	量産および素材原料としての利用が始まり、具体的な応用が一つでも実現すれば、急激に発展する可能性を秘めている。

## 全体コメント：

グラフェンに関しては2010年度のノーベル物理学賞受賞対象研究となったことから明らかなように、微細化限界が間近に迫ったCMOS技術を打破する候補材料の一つとして、現在精力的な研究が世界中で行われており、ナノカーボン研究において最も注目すべき分野であるといえる。グラフェンはCNTで当初予測どおり進まなかったエレクトロニクス分野での利用が期待されており、CNT研究で培われた技術と手法を基にして、急速な発展を遂げることが予想される。ただし、基本的な物性の理解が浸透していないために、非現実的な応用提案やそれを目指す研究が横行している感もある。CNTは産業応用研究が進展し、環境・エネルギー分野での利用が主流となる可能性もある。その際のリスク管理の成否が、今後のナノ材料応用における安全性の指針となるであろう。

## (参考情報)

- [1] F.Schwierz, Nature Nanotechnology, 5, 487 (2010).
- [2] <http://www.nims.go.jp/news/press/index.html>
- [3] [http://www.aist.go.jp/db\\_j/list/l\\_research\\_press\\_release.html](http://www.aist.go.jp/db_j/list/l_research_press_release.html)
- [4] S.Bae et al., Nature Nanotechnology, 5, 574 (2010).
- [5] [http://asunews.asu.edu/20100701\\_graphene](http://asunews.asu.edu/20100701_graphene)
- [6] <http://www.physorg.com/news184420861.html>
- [7] <http://www.kva.se/en/pressroom/Press-releases-2010/The-Nobel-Prize-in-Physics-2010/>
- [8] <http://www.nano.org.uk/>
- [9] S.-K. Bae, H.-K. Kim, Y.-B. Lee, X.-F. Xu, J.-S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y.-J. Kim, K. S. Kim, B. Ozyilmaz, J.-H. Ahn, B. H. Hong, and S. Iijima, Nat. Nano. 5, 574 (2010). «Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes»

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

## (2) ソフト材料 (超分子など)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	化学、高分子科学、材料科学を中心に多数の研究グループがあり、基礎、応用を問わず研究水準は非常に高く、独創的な機能創出という点で世界をリードしている。特に、微小化学空間の創出や機能性ゲルにおいて、幾つかのブレイクスルーが遂げられており、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	○	→	産と学の連携がアメリカより遅れており、優れた研究成果が応用へなかなか結びつかない傾向がある。リーマンショックなどにより一時期停滞したが、業績の回復とともに、大企業が新しい技術を取り入れようと積極的にやり始めてきた。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究において世界を大きくリードしているが、最近では少し停滞する傾向にある。横断的な分野の研究者が参入し、応用分野への研究展開が盛んになっている。従来よりバイオマテリアル系への応用指向が高かったが、特に最近、バイオだけでなく環境への応用指向が強くなってきている。
	技術開発水準	◎	↑	<b>MEMS、BioMEMS、Microfluidics</b> 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もつ。大学との連携も強い。特に、ベンチャー企業が中心となって新しい技術開発をリードしている点に大きな特徴が見られる
	産業技術力	◎	↑	従来より、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、また最近では、太陽電池や蓄電池など環境分野においても著しい発展が見られている。
欧州	研究水準	◎	→	超分子化学や高分子科学の分野では伝統があり、世界的に高い水準にある。物性に関連した基礎研究において世界をリードしているが、近年停滞する傾向にある。
	技術開発水準	○	↑	実用化に結びつく技術開発が、最近急速に進行している。
	産業技術力	○	↑	これまで大きな飛躍はない印象であったが、他の高分子関連の産業を見ると、もともと潜在能力はかなり高い。最近の新しい研究成果に対して強い関心を持っている。
中国	研究水準	○	↑	日本・欧米に比べて独創的な研究は少なく、水準も高くはない。しかし、近年研究者人口が急速に増え、その質も大きく進歩している。
	技術開発水準	○	↑	環境分野での技術開発が急速に進んでいる。日米欧で生まれた基礎研究の応用や産業化への展開にきわめて意欲的である。ベンチャー企業が次々と誕生し、新しい技術開発をリードしている。
	産業技術力	△	↑	従来は、外国の産業技術を利用して現地生産することは得意だが、独自で産業化するには至っていなかった。しかし最近では、海外の企業が研究拠点を設立したこともあって、現地の技術水準が急速に向上してきており、特に環境分野では、独自で産業化に進んだ例も出始めている。
韓国	研究水準	△	↑	日本・欧米に比べて独創的な研究は少なく、水準も低い。しかし最近、国策として、産・官・学でクラスターを形成して、強力に進めている。
	技術開発水準	△	→	日本・欧米のキャッチアップにとどまっている。
	産業技術力	△	↑	現時点では、独自で産業化する力はないが、日本の部材技術にきわめて強い興味を示している。サムソングループを代表として電子産業についてはきわめて高い技術力を有しており、しかも経済が好調なことから、部材企業の買収などが今後進むと予想される。
<p>全体コメント：  研究開発では日本が世界をリードしている分野である。近年の新規な架橋構造の発明により、ソフト材料の実用化の可能性がきわめて高くなった。超分子に関しては、欧州は主として dendrimer、米国は分子マシンや超分子素子の分野が盛んである。特に近年、精緻な分子設計に基づいて様々な新規構造が創出され、その機能が次第に明らかになってきた結果、本分野に対する産業界の関心も高まっている。しかし実際の産業化については、産と学の連携があまりうまくいっておらず、コンタクトレンズやバイオチップなどのバイオマテリアルの分野で米国が先行しているにすぎない。また最近では特に、ソフト材料の環境分野への応用研究がいずれの国においてもきわめて盛んになっている。欧州はこれからであり、韓国や中国はさらにその次と考えられるが、中国のベンチャー企業の動向や韓国で進められている産官学クラスター形成などの政策的取り組みの成果が目される。</p>				

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) ハイブリッド材料（金属、セラミックス、ポリマー等の組み合わせ）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	日本ではハイブリッド材料という言葉を分野ごとに使っているために統一した研究開発が行いにくい環境にある。また、研究が行われているディメンジョンも限られている。評価装置は高水準を維持しているが、現象の理解のための解析技術が非常に弱い。特にナノアロイ、ポリマーナノコンポジットの研究が新しい評価解析装置の開発も伴いながら盛んに進められている。例えば、高分子学会の高分子ナノテクノロジー研究会プログラムなど。
	技術開発水準	○	→	機能性とナノというキーワードからのハイブリッド材料は無機材料と有機材料のハイブリッドを中心として研究が数多くあるが、工業材料レベルでの研究開発は非常に少ない。解析装置としての電子線トモグラフィの実用化（京都工繊大）、ナノ力学物性マッピングの開発（東北大）、大規模コンピュータシミュレーション（東大、産総研）、L/Dの大きな2軸押し出し機開発（山形大）、ナノハイブリッド超微粒子（東北大）などは世界最先端である。
	産業技術力	○	→	用途が民生用に限定されるために、コスト高になるハイブリッド材料を利用してメリットを得ることが難しい。素材としての産業化は進んでいない。
米国	研究水準	◎	→	巨視的なハイブリッドと微視的なハイブリッドの融合技術が進んでいる。マルチスケール性を考えた材料の研究に移行している。エレクトロスピンニングを使ったナノファイバーによる、超純水製造用フィルター（アクロン大、ニューヨーク州立大）、電場や磁場配向を使った色素増感有機太陽電池フィルム（アクロン大）、ブロック共重合体の自己組織化を利用したナノエレクトロニクス（マサチューセッツ大）など大学がかなり出口志向になってきた。
	技術開発水準	◎	→	目的指向を強く打ち出した技術開発を行っているために、ハイブリッド化の目的や目標が明確に絞られた研究が行われている。
	産業技術力	○	↑	軍事産業、航空宇宙産業への利用を目的としたものでは技術力が高いことが予測される。今後は、高度利用技術で培われた成果が民生用に普及する可能性が大である。
欧州	研究水準	◎	→	米国と類似した研究分野である。しかし、国により研究の水準が開く傾向にある。ドイツでは基礎から基盤研究が進み、イギリス、フランスでは一定の水準を保っている。グラフェン、ナノ粒子、ナノ有機材料など新しい発想による研究も見受けられる。
	技術開発水準	○	→	企業と大学の連携が進んでいる。企業のニーズを取り入れた研究開発分担と実用化までの研究開発が行われている。
	産業技術力	○	↑	明確な目標のもとに着実に応用につなげる努力が払われている。時間をかけて続けてきた研究開発の成果が、徐々に産業に結びつくものと考えられる。
中国	研究水準	○	↑	研究のレベルに大きなばらつきはあるものの、多くの研究者が同じようなテーマに競争して取り組んでおり、ハイブリッド材料の元になる、ナノ粒子、ナノファイバー、ナノプレート、ナノ共連続に関する素材、新しい素材、複合材の研究等大変盛ん（中国科学院、清華大など）。論文や学会発表のレベルは確実に向上している。ハイブリッド材料を含む材料全般の分野における国際会議の中国国内での開催頻度が急激に増加し、欧米からの研究者を招聘している。
	技術開発水準	○	→	基礎研究の成果が具体的な技術として役立つには時間がかかると考えられる。しかし、研究分野や応用技術に関して国のトップダウンによる分野、資金配分が行われている様子である。技術開発を丁寧に行うのではなく研究室レベルから実際に使えそうなプロセスまで直接応用につなげる傾向が強い。
	産業技術力	△	↑	産業競争力のある分野にハイブリッド材料を適用するには至っていない。軍事関係は詳細が不明であるが、欧米と同様の応用分野を探っているといわれている。日本よりも開発が早くなる可能性大である。高分子系及びセラミックス系複合材料を発展させたハイブリッド材料の軍事的な応用研究が多く行われているようである。

韓国	研究水準	○	→	微視的なハイブリッド材料の研究に関しては欧米と同じ研究分野が行われている。巨視的なハイブリッド材料の前段階である複合材料、特に高分子系複合材料に関しては急速に研究がなされている。最近、WCU（ワールドクラス大学）プログラム等で世界中から優れた人材を集め始めた。スタートアップ資金も豊富で急速に研究水準を挙げつつある（POSTEC等）。
	技術開発水準	◎	↑	企業と大学・研究機関との連携が取れている（例えば、POSTECとLG、ポスコ静鉄）。特に、企業からの出資による技術開発が多いようで技術開発水準が急速に向上している。
	産業技術力	○	→	産業への展開をにらんだ企業出資により、大学・研究機関の技術開発と産業技術力が効率よく伸ばされている。急速には産業技術まで結びつ機能性を重視したハイブリッド材料と、すぐには結びつかない構造用ハイブリッド材料に分けられる。

全体コメント：

応用分野を限定し研究開発が行われている米国、中国、韓国に比較して日本は多くの研究が無目的であるとともに欧米の後追いの研究も多く、投資に対する効果が小さなことが懸念される。構造材料としてのハイブリッド材料では、ハイブリッド材料の前段階である複合材料について、欧米と日本が研究開発で先端を進み、韓国や中国の追い上げが急速ではあるもののまだ遅れている。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成熟した材料であり限定的である。これに対し、韓国や中国は着実に研究実績を積みつつあり、肩を並べるのは時間の問題であると考えられる。

ハイブリッド材料の研究／技術開発は素材以外にもそれぞれの表面、界面制御、それらの3次元分散状態制御、配向制御、計測、解析技術がキーポイントである。それらについても、高分解能電子顕微鏡による界面・表面解析、第一原理計算、分子動力学計算、3次元有限要素法による大規模シミュレーションなどの計算機科学の飛躍的な進歩があり、計算機科学が実際の材料開発のツールになりつつある。現時点では、日本が進んでいるが、欧米も水準を上げてきたのと、中国・韓国の選択と集中によるレベルアップが著しい。特に、一部で中国と欧州、特にドイツとの連携が起きているのが要注目である。

(参考情報)

- [1] Advanced Polymeric Materials and Technology Symposium(APMT2010)( 濟州島、韓国、2010年1月)
- [2] Tire Technology EXPO 2010 (ケルン、ドイツ、2010年2月)
- [3] International Symposium on Polymer Physics(PP2010), 済南、中国、2010年6月
- [4] International Symposium on Advanced Organic Photonics(ISAOP-10) and International Symposium on Super-hybrid Materials(ISSM-1)( 仙台、2010年9月)
- [5] 9<sup>th</sup> Thermoplastic Elastomer Topics Conference(TOPCON2010)( アクロン、オハイオ、米国、2010年9月)
- [6] International Rubber Conference(IRC2010)( ムンバイ、インド、2010年11月)
- [7] 1<sup>st</sup> Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations( 柏崎、新潟、2010年11月)

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(4) 高分子・プラスチック材料（ポリマーアロイ、ブロックポリマー等）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	機能性高分子の分子設計、新規触媒、ナノ構造制御等、世界をリードする先端研究では大きな成果を上げているが、先端研究を支える基盤研究に不安あり。
	技術開発水準	◎	→	情報・エレクトロニクスや自動車向け材料等、素材メーカーを中心とする技術開発力の水準は、引き続き世界をリードしている。
	産業技術力	◎	→	世界をリードする企業ユーザ（自動車、情報・エレクトロニクス）と組み、グローバルな展開がなされ、研究開発投資も旺盛である。
米国	研究水準	◎	→	地道に高分子化学全般及び基盤研究へ注力しており、研究水準は高い。
	技術開発水準	○	→	2009年以降、米国の高い研究水準を生かした世界をリードするような技術開発成果が見当たらない。ただし、ベンチャー等の技術開発成果は、十分な調査が出来ていない。
	産業技術力	○	→	現状及び次代を担うような新しい産業が見当たらず、日本との差は広がっている印象である。
欧州	研究水準	◎	→	地道に高分子化学全般及び基盤研究に注力しており、また産業界との連携による研究が盛んである。
	技術開発水準	◎	→	大学、産業界、国及び地方組織が連携し、技術開発力の向上が図られている。EUとして連携していく構造は、大きな脅威となる可能性が高い。
	産業技術力	◎	↗	従来、世界をリードするナノテク構造材料や新規な高分子材料のユーザーが少なく、この点が課題であったが、治験を中心に医療関連で大きな進展が見られる。
中国	研究水準	○	↗	産業界の技術力向上への大学の寄与が大きく、今後の技術開発力向上は、脅威となる可能性大。
	技術開発水準	○	↗	水準は未だ高いといえないが、ここ数年特許出願が急増しており、国家戦略的な取組みとなれば、大きく発展する可能性がある。
	産業技術力	△	↗	世界をリードするナノテク構造材料や新規な高分子材料のユーザーが少なく、この点が産業技術力の水準アップの阻害要因と考える。
韓国	研究水準	○	↗	産業界の技術力向上への大学の寄与が大きく、今後の技術開発力向上は、脅威となる可能性大。
	技術開発水準	○	↗	中国と同様に、ここ数年で特許出願件数が急増しており、将来大きな脅威となる可能性有り。
	産業技術力	△	↗	一部を除き、世界をリードするナノテク構造材料や新機能材料のユーザーが少なく、この点が産業技術力の水準アップの阻害要因と考える。

全体コメント：

「高分子・プラスチック（ポリマーアロイ、プラスチックコポリマー等）」の範囲は、合成、製造、成形加工、用途等を含む。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る。日本では従来、大学、国研が基礎研究水準向上に寄与し、その成果を素材メーカーが用いて、技術開発水準の向上に役立て、その技術開発力をベースに世界をリードするナノテク構造材料や新規高分子材料のユーザーが、自らの企業発展に役立ててきた構造が発展を支えてきた。近年、大学から繊維、高分子化学の基礎、製造技術を支える化学工学に関する教育、研究組織が減少しつつあり、このことが、日本の発展を支えてきた良きスパイラルアップ型の競争力向上に対し、阻害要因となることが懸念される。なお産業技術力を比較するには、エレクトロニクス、フォトリソ、自動車・機械、医療、ライフサイエンス等までカバーする必要があり、特定の技術のみに着目するとトレンドを見落とす危険がある。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]



(5) 融液材料（ゲル・電解質・イオン液体など）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	発表論文数では固体電解質（膜、酸化物）、イオン液体、ゲルのすべての分野で中国、欧州、米国の次に位置し、先導的立場に立っている。イオン液体を中心とする融液材料の研究は非常に活発であり、さらに上昇傾向にある。日本の優位点として、ゲルの研究で独創的な成果が得られている他、特にイオン液体の電気化学的材料化に関する研究では横浜国大などが先導している。
	技術開発水準	○	↑	固体電解質（膜、酸化物）やゲルの分野で高い技術開発水準にある。企業では、イオン液体の合成（真に革新的なものは限定される）とその材料としての用途開発が行われており、環境・エネルギー分野の研究開発の活発さに後押しされ現在でも技術開発水準は上昇している。
	産業技術力	○	→	まだ、大きな具体的産業に結び付くレベルには達していない。しかし、固体電解質膜については高い産業技術力がある他、電気二重層キャパシタなど一部応用された例もある。コストパフォーマンスを上げるための低価格化が必要である。
米国	研究水準	◎	↑	米国の研究の特徴は、イオン液体の計算化学やシミュレーション、NIST (National Institute of Standards and Technology) を中心としたデータベース構築、CO <sub>2</sub> などのガス回収・分離・貯蔵（ノートルダム大、コロラド大）、天然物資源からのセルロース回収（アラバマ大）などの分野の研究が世界をリードしている。日本、欧州と比較すると研究者人口は少ない。
	技術開発水準	○	→	DuPont、Air Product といった大企業が、新しい溶媒、新しいガスリザーバなどの研究を進めていることが特筆すべきである。
	産業技術力	○	→	固体高分子膜について技術力が高いものの、日本と同様、大きな具体的産業に結び付くレベルには達していないと思われる。CO <sub>2</sub> 排出削減が国としてあまり進んでいないので、CO <sub>2</sub> 回収・貯蔵技術などに利用される可能性がある。
欧州	研究水準	◎	↑	欧州全体の論文数は固体電解質（膜、酸化物）イオン液体、ゲルのほぼすべての分野において中国に次ぐ2位となっており、量的水準の高さがわかる。欧州の研究の特徴は、イオン液体を具体的な化学プラントのプロセス技術に適用し、有機溶媒の使用料を減らしてグリーン化学を実現しようとしている点にある。QUILL（クイーンズ大イオン液体研究センター）が欧州全体の研究を牽引している。またドイツでは2009年から日本の科研費のような政府からの支援のプロジェクト研究が始まり、エルランゲン・ニュルンベルグ大がその牽引役を果たしている。
	技術開発水準	◎	↑	BASF がイオン液体を用いた新しい化学プロセス開発に積極的である。また Merck はその合成技術を生かし、革新的イオン液体を多く製造、日本企業への販売攻勢をかけている。また、イオン液体に関する有力なベンチャーも欧州に多い。
	産業技術力	○	↑	BASF が既にイオン液体を用いた化学プラントを稼働させている。また、QUILL がイオン液体を安価に大量に製造するプラントをアジアに建設中である。
中国	研究水準	○	↑	論文の質は高くないが、固体電解質（膜、酸化物）イオン液体、ゲルのすべての分野において数は既に世界随一になっている。今後もトライアルアンドエラー型研究の数の勝負では、中国に日・米・欧ともかなわない。
	技術開発水準	○	↑	技術開発水準が急速に向上しつつある。日本と比べ、圧倒的に安価なイオン液体の販売を始めている。品質もそこそこということで、購入する日本企業も多いとの情報がある。
	産業技術力	○	↑	人材の集積に伴って産業技術力が急速に向上しつつある。低価格の物質、デバイス、システムを大量に製造できる潜在力はある。
韓国	研究水準	○	→	固体電解質（膜、酸化物）の研究レベルが燃料電池、二次電池研究の活発さと相まって高い。また、他の分野でも一定のレベルを保っている。しかし、研究の厚みには欠ける。
	技術開発水準	△	→	電池、キャパシタといった電気化学デバイスへの応用以外、あまり活発な技術開発は行われていない。無機系に比べてイオン液体やゲルの研究水準は他国との比較でやや低い。
	産業技術力	○	→	限られた企業において産業技術力が高いが、厚みは薄い。

## 全体コメント：

固体電解質（膜、酸化物）イオン液体、ゲルのすべての分野において量的に中国が他国を圧倒している。研究機関別でも中国科学院がほとんどの分野で論文発表数が1位となっている。特にイオン液体や固体電解質の分野では中国が論文全体の30%を占めており、リチウムイオン電池や燃料電池といったエネルギー変換デバイスの開発に関連した界面研究に中国が力を入れていることがわかる。特に研究機関別トップ10のすべての分野で半数以上が中国の研究機関であることは注目に値する。欧州は上手な連携を始めている。

イオン液体の研究は、日・欧・米を中心に進められているが、それぞれ指向している出口が少しずつ異なる。日本は、ハイブリッド車、電気自動車、燃料電池車といった環境配慮型自動車が次世代有力産業として期待され、さらに自動車産業のみならず電池産業が非常に活発なため、これら電気化学デバイスにイオン液体を応用しようとする研究が非常に盛んであり、この分野の研究では世界をリードしている。従って物質製造を担う化学企業もこのようなデバイスの材料としてイオン液体を供給しようとする姿勢が顕著である。一方、欧州では、有機溶媒の排出規制が日米以上に厳しいためか、化学プラントで化学反応・触媒反応・抽出などに用いられてきた有機溶媒をイオン液体で代替しようとする研究が盛んである。またQUILLは20社程度の企業（日本企業も1社）を集めたコンソーシアムであり、研究体制は研究スタッフ40名以上、研究支援者・PhD学生40名以上と、欧米での研究のセンターとしての役割を果たしている。他大学との共同研究も多く、情報発信地的な存在でもある。米国は、日欧と比較すると研究者人口が少し少な目であるが、CO<sub>2</sub>の分離・回収への応用研究が非常に活発である。産業技術力という観点では固体電解質膜以外は産業化のレベルに到達していないものが多い。

## (参考情報)

- [1] 文科省科研費特定研究「イオン液体の科学」研究成果報告書、領域代表者 西川恵子、2010年8月
- [2] NIST イオン液体に関するデータベース、<http://ilthermo.boulder.nist.gov/ILThermo/>
- [3] QUILL ホームページ、<http://quill.qub.ac.uk/>

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(6) ナノポーラス・メソポーラス材料（空間空隙制御材料）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	ゼオライトに関しては、ゼオライト学会を中心に、多くの研究室で質・量ともに世界レベルの研究がなされている。メソポーラス材料は日本発の材料（1990年 早大 黒田 教授）であり、組成・構造・形態制御など基礎研究レベルは今もなお日本が研究センターの一つである。ポーラスカーボン材料では信州大がリードしている。多孔性金属錯体（PCP/MOF <sup>※1</sup> ）は京大 北川教授が世界ではじめて室温吸着機能を発表し、その後、世界トップレベルの研究展開がなされており、新規吸着現象をはじめ種々の特異現象が見いだされている。また、ERATO等の大型プロジェクトが進行中である。このように基礎研究レベルは世界トップクラスであるが、全体的には応用研究へシフトしつつある。また、いずれの材料に関しても、全体のトレンドは、急速に進展するPCP/MOFを除くと、ほぼ横ばいである。
	技術開発水準	◎	→	分離機能に優れたゼオライト膜に関しては、膜化の研究やパイロットプラントが稼働するなど、水準は高い。メソポーラス材料の技術開発は、豊田中央研究所をはじめ数社や、AISTやNIMS等の国の研究機関が積極的に進めており、触媒応用にとどまらない機能素材としての応用を目指した技術開発が幅広く行なわれている。PCP/MOFに関しては、基礎開発の段階が主であるが、各社が合成技術開発および応用展開に乗り出し、従来システム（触媒、PSAシステム）からの転換の可能性を計っている段階である。
	産業技術力	○	↗	ゼオライトは触媒や吸着分離材料、イオン交換材料、抗菌剤などとしての利用が確立している。2007年に太陽化学株式会社がメソポーラス材料の量産化を発表して以来、空調機（デシカントロータ）などの吸湿材料、低誘電材料、低熱膨張材料、香料担体などへの展開が期待されており、商品化が進みつつある。ポーラスカーボンの産業技術力は著しく高い。PCP/MOFの産業利用は今後の課題である。
米国	研究水準	◎	↗	ゼオライトやメソポーラス材料は触媒やバイオ応用等の応用志向性の強い研究開発がなされている。研究機関の数は限られるが、世界トップレベルの研究が展開されている。PCP/MOFはUCLAのO.Yaghi教授を中心に、数グループが研究展開しており、基礎研究から応用研究に移り、吸着材として実用化レベルに達してきている。共有結合性のCOFなど新たな多孔質材料の創製もあり、米国の研究成果は今後も注目すべきである。
	技術開発水準	◎	↗	プラントレベルでの合成を可能とするMOF合成も開発されている。エネルギー、環境、バイオ関連での研究資金の流れにのって、大学がベンチャー企業を興したり、企業と協力し、産業化への試みがなされている。今後特にエネルギー関連材料としての利用に向けた技術開発が盛んになると予想される。
	産業技術力	○	→	メソポーラス材料やPCP/MOFが米国で産業化に至るとする情報はあまり流れていないものの、O.Yaghi教授とBASFによって、Basoliteとしていくつかのナノ空間材料が販売されるようになった。またゼオライト分野での産業化の力量はあなごれず、メソポーラス材料やPCP/MOFの本格的な応用が見込める段階では、その強みが生きてくる可能性が高い。
欧州	研究水準	◎	→	MOFに関しては、仏のG.Ferey教授（ベルサイユ大学）を中心に欧州全体の研究ネットワークができあがっている。一方で独の研究基金（DFG）で、S.Kaskel教授（ドレスデン大学）を中心とした大きなプロジェクトが進行中であり、高い基礎研究開発能力を有している。その他、A.Corma（ゼオライト：スペイン）、F.Schüth（メソポーラス材料：独）、C.Sanchez（ハイブリッド・メソポーラス材料：仏）らの中心となる研究者がおり、質量の両面で層が厚い。
	技術開発水準	○	→	2010年の10月のプレスリリースにみられるように、米国O.Yaghi教授の成果をもとに、BASF社がPCP/MOFの大量合成法を確立し、一般企業向けに数種類の汎用性MOFの生産・販売を開始しているが、それを用いた具体的な応用例は未だ出てきていない。また英のR.Morris教授（セントアンドリュース大学）がMOFを用いた薬品の開発により起業化しつつある。
	産業技術力	○	→	ゼオライト関連での産業の実績があり、最近でもSÜD-CHEMIE社（独）がゼオライト触媒を製品化している。MOFに関しては、BASFの今後の動向に注目すべきである。

中国	研究水準	◎	↑	日欧米からの帰国組の教授を中心に、ここ数年基礎研究の量が急激に上昇している。また、研究人口も増加しており、ゼオライト、メソポーラス材料および PCP/MOF いずれも、2009 - 2010 年の論文発表数はトップである。量の急速な増大につれて、多くの研究者の研究が一流紙に掲載されるようになり、質の面でもレベルの高い成果が数多く生まれているが、世界トップレベルの研究者はほとんど見かけられず、革新的・ブレークスルーの研究は比較的少なく、本質的な学術進展にどこまで貢献するかが、今後の課題といえよう。
	技術開発水準	△	-	メソポーラス材料・MOF 共に産業界への浸透は薄いのが現状であるが、全体的な力量の飛躍的向上に伴い、大学の技術を活かした展開が今後見込まれる。特にメソポーラス材料は復旦大学 D.Zhao 教授らが世界的な活躍を見せており、今後水処理関連他のベンチャー立ち上げなど産業化に向けた技術開発が急速に進む可能性はある。
	産業技術力	△	→	産業界への浸透は薄く、いまだ目立った動きはない。
韓国	研究水準	○	↑	メソポーラスカーボン材料のトップ研究者である KAIST の R. Ryoo に加え、POSTECH や KRICT など、基礎研究から応用まで幅広く材料扱う研究組織が相次いで軌道にのり、世界中からポーラス材料研究者の招聘を行っており、水準は上昇している。
	技術開発水準	△	→	上記したように新たな研究組織は応用に焦点を置いている研究が立ち上がりつつあり、ゼオライト技術で先導するヨーロッパの研究者・施設の導入が進んでいる。しかしまだ韓国発で世界を先導する応用開発技術は持ち合わせていない。
	産業技術力	△	↑	韓国の研究者はアメリカと強いつながりを有している者も多く、現在ポーラス材料の産業化を進めている組織との交流により、技術力の強化を図っている。基礎的な研究が多く、産業界への浸透は薄いのが現状である。

全体コメント：

空間空隙材料の研究開発としては、ゼオライト、メソポーラス材料、PCP/MOF の三材料が主要な材料群となっている。2009 - 2010 年に発表された論文数を比較すると、メソポーラス材料(約 6000 件)が最も多く、ゼオライト(4000 件)、PCP/MOF(約 3000 件)となり、メソポーラス材料が基礎研究の対象として、最も注目されていることが伺えるが、一方発表数の伸び率は PCP/MOF が最も大きく、今後空間空隙材料の主流の一つとなると考えられる。

国別にみると、中国の勢いが顕著であり、2009 - 2010 年の論文に占める割合は、ゼオライト(23%)、メソポーラス材料(35%)、PCP/MOF(44%)である。今後も中国の伸張は続くと思われる。また、ゼオライトに関しては、イラン等の中東の産油国発の論文が、レベルはそれほど高くないものの最近増加していることも注目すべきである。

産業応用に関しては、ゼオライトが、触媒や分離膜等吸着剤、イオン交換剤などの利用が確立されているのに対し、メソポーラス材料および PCP/MOF は欧州が一歩リードしているが、ようやく量産化体勢が整った状況にある。Mobil 社のメソポーラスシリカの最初の特許が期限切れを迎えつつあるので、今後どのような応用が現れるか予測しにくい。メソポーラス材料の応用方向性としては、調湿材料や種々の機能物質との複合化としての利用が確実視されている。素材の生体適合性が確実となれば、生体医用応用も期待できるが、実用には相当の時間を必要とする。また、PCP/MOF に関しても、ガス吸蔵/分離材料としての利用検討が進められているが、今後は新たな応用展開に向けた努力がなされよう。

(参考情報)

- [1] 科学技術未来戦略ワークショップ「空間空隙制御・利用技術」報告書  
<http://crds.jst.go.jp/output/pdf/09wr05s.pdf>
- [2] 太陽化学メソポーラスシリカ <http://taiyo-chem.com/category/用途/mps>
- [3] MOF の量産化に関するプレスリリース  
<http://pubs.acs.org/subscribe/journals/cen/88/i41/html/8841busc3.html>
- [4] UCLA Omar Yaghi 研究室 <http://yaghi.chem.ucla.edu/s>
- [5] 京都大学北川進研究室 <http://www.sbchem.kyoto-u.ac.jp/kitagawa-lab/member.html>
- [6] ERATO 北川統合細孔プロジェクト <http://kip.jst.go.jp/eratojp.html>

※ 1: PCP/MOF (porous coordination polymer/ metal-organic framework)

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [ ↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向 ]

(7) 触媒材料

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	ナノ触媒材料および分子・原子レベルでの触媒材料開発は日本のお家芸ともいえる研究テーマであり、この分野での日本の研究水準は高いといえる。触媒開発のみならず、2010年度の根岸教授、鈴木教授のノーベル化学賞受賞からもわかるように、特に有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発の研究水準は極めて高い。光触媒、環境触媒分野の技術開発水準も高い。近年、白金代替のカーボンアロイ触媒に関する研究にも力を入れており、今後の発展が期待される。また、バイオマスの有用化合物への転換反応開発にも注力しておりその研究水準は高い。
	技術開発水準	◎	→	特に有機合成（基礎化成品を含む）に関する触媒および新規反応開発、光触媒や環境触媒（特に自動車排ガス除去触媒など）分野の技術開発水準は極めて高い。
	産業技術力	◎	→	日本は、米国に次ぐ世界第2位の触媒生産国であり、サイエンスのみならず実用化にも貢献している。例えば、分子性酸化物ナノクラスターである担持ヘテロポリ酸触媒を用いた酢酸・酢酸エチル合成や弱酸・弱塩基触媒の性質を利用したピロリドン類の合成など我国独自の優れた数多くの触媒プロセスを確立しており、付加価値の高い優れた材料を世界に供給できている。
米国	研究水準	◎	↗	この分野での米国の研究水準は最高レベルである。ナノ触媒材料としては、Metal Organic Framework (MOF) に代表される配位性高分子錯体や共有結合からなる三次元骨格を有する結晶性多孔体などの独自の材料開発が行われている。分子・原子レベルでの酸化化合物などの研究にも注力されている。また、光学活性なMOFも開発されており、これらを用いた不斉反応の研究も行われている。今後、これらの触媒材料としての応用が期待される。
	技術開発水準	◎	→	技術開発水準は非常に高い。近年特に、水素エネルギー、バイオマス転換技術関連の触媒開発に関して優れた成果がでてきている。近年、水の酸化反应用触媒の開発にも積極的に取り組んでいる。
	産業技術力	◎	→	世界一の触媒生産国であり、この分野でも独自の数多くの優れた触媒・触媒プロセスを開発している。
欧州	研究水準	◎	→	この分野での欧州の研究水準は非常に高い。
	技術開発水準	◎	→	欧州諸国の技術開発水準は非常に高い。
	産業技術力	◎	↗	欧州諸国の産業技術力は非常に高い。
中国	研究水準	○	↗	大胆な研究を始めている。この分野での中国の研究水準は年々高くなっている。大量の研究者および研究設備を導入して、追隨研究を行い、そこから新しい先端研究を探索している。この分野での研究論文数がここ数年急速に多くなっている。
	技術開発水準	○	↗	独自の技術開発水準はまだ中程度であるが、日・米・欧の技術開発力を取り入れて、今後、ますます開発力は伸びていくと思われる。
	産業技術力	○	↗	日・米・欧の技術開発力、産業技術力を取り入れて、現在、急激に発展している。今後、更なる発展が見込まれる。
韓国	研究水準	○	↗	この分野での韓国の研究水準は高いといえる。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発水準は非常に高くなっている。
	産業技術力	○	↗	日・米・欧の技術開発力、産業技術力を取り入れて、現在、急激に発展している。今後、更なる発展が見込まれる。
<p>全体コメント：</p> <p>触媒材料は、燃料や石油化学品の製造、ファインケミカルズや医薬品の製造中間体を得るために必要不可欠な材料であり、日・米・欧を中心に、優れた独自性の高いナノ触媒材料が開発されている。米国は研究水準、実用化の面でも先端を担っていると思われる。日本は、ナノ構造体および分子・原子レベルでの触媒設計や特に精密有機合成（基礎化成品を含む）に関する反応開発の研究水準は極めて高い。光触媒、環境触媒分野の技術開発水準も高い。近年、白金代替のカーボンアロイ触媒に関する研究にも力を入れており、今後の発展が期待される。また、バイオマスの有用化合物への転換反応開発にも注力しておりその研究水準は高い。欧州諸国の産業技術力は極めて高いが、研究水準はここ数年現状維持のままである。研究水準、実用化の面では、韓国や中国は追い上げが急速ではあるものの日・米・欧と比べるとまだ遅れている。</p>				

(注1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]



(8) 新型超伝導材料

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	物質開発、単結晶作製技術、物性評価、理論など広範な分野で優れた成果を挙げている。鉄系超伝導体が日本で発見されたこと、ファンディングスキームがいち早く立ち上がり比較的多くの研究者が参入したことなどが理由として挙げられる。具体的には、様々な系の薄膜作成で世界を牽引、超伝導転移温度の世界記録保持。さらに粒界接合を利用した最初のジョセフソン接合作成。物性測定（磁気励起、弾性定数、NMR、光電子分光、高周波伝導度、不純物効果等）が活発、その結果超伝対称性が系によって異なる可能性が意識され、それに対応して強相関効果に加えて格子振動の果たす重要な役割が明らかになりつつある。これは機構解明に向けての大きな動きである。
	技術開発水準	◎	→	電子デバイス応用に向けた薄膜作製技術や線材化及び臨界電流特性の評価などでは、いずれも世界のトップレベルにある。東工大細野 G を中心に、1111 系・122 系最初のエピタキシャル薄膜、高温での超伝導発見、Fe 系超伝導体初の Josephson 接合など、いずれも日本のグループが先鞭をつけている。少しずつ応用が意識されてきているものの、銅酸化物時代と比較して基礎・応用の連携が良くない。
	産業技術力	—	—	これを評価する事例は未だない。
米国	研究水準	◎	→	国立研究機関を中心に物性・理論分野では量・質ともに世界トップ水準で、中性子回折や強磁場など大型設備を使った研究にも強い。当初の熱気はないが大型プロジェクトが動き出したので着実に研究が展開されると予想される。一方、物質開発においては、単結晶や薄膜作製でいくつかの成果を挙げているが、物性研究に比べると目立たない。
	技術開発水準	○	→	高臨界電流密度の薄膜作製以外に目立つ報告はない。2つの国立研究所にのみ配されたものであるが大型予算のもとで材料化を目指した研究が始まっている。これまでの銅酸化物、二ホウ化マグネシウム超伝導体における技術開発実績が豊富であり、また、鉄系超伝導体の臨界電流特性改善への課題も世界に先駆けて指摘している等、研究者の質、数を含めて潜在的なポテンシャルは高い。とりわけ応用に向けた研究は見えないが基礎・応用の好連携の伝統があり、要注目。
	産業技術力	—	—	これを評価する事例は未だない。
欧州	研究水準	○	→	物質開発では 122 系の発見や 1111 系単結晶など先駆的成果を挙げているが最近やや陰りが見られる。一方で固体化学の伝統を踏まえた薄膜作成（SIS 接合を含む）・高周波測定等質の高い研究あり。物性研究に関しては大規模実験施設を利用した総合的物性研究が展開されており、高い水準を保っている。
	技術開発水準	○	→	1111・122・11 系の薄膜など、薄膜作製技術に関しては特徴ある成果を挙げている。とりわけ応用に向けた研究は見えないが基礎・応用の好連携の伝統があり、要注目。
	産業技術力	—	—	これを評価する事例は未だない。
中国	研究水準	○	↗	欧米からの帰国研究者の実質的な活動が開始され当初の熱意が実質的な研究内容へと変化し研究規模が拡大。研究の量とスピードの点で目覚ましいものがあり、現在も日米欧への試料提供を通じて存在感は大きい。一方で先端的な物性評価ができる研究設備が少なく研究内容にもやや偏りがあり、物性分野の主体的な研究は限られ、顕著な成果が見当たらない。
	技術開発水準	○	→	線材開発には鉄系超伝導体研究初期から取り組んでおり、一定の成果を挙げているがそれ以外の分野ではそれほど目立った成果は見られない。
	産業技術力	—	—	これを評価する研究事例は未だない。
韓国	研究水準	△	→	122 薄膜の作製などいくつかのテーマで成果を挙げているが、全体としてはそれほど目立った研究は見られない。国家的サポートが他の対象に。
	技術開発水準	△	→	研究水準に同じ。
	産業技術力	—	—	これを評価する研究事例は未だない。

## 全体コメント：

超伝導研究においては、とりわけ新物質合成、物性測定・計測、理論の連携が重要であるが、我が国ではそのサイクルが諸外国に比較してよく機能している。基礎研究面では日米が高い研究水準を維持しており、欧州がそれに続く。中国における物質探索の勢いは一段落しており、既知物質の試料提供の役割を担っている。技術開発では、良質な薄膜作製技術の進歩が顕著で、線材化研究では臨界電流密度がかなり低いもののゼロ抵抗で通電できる短尺線材が日本、中国で得られるようになっている。また、依然として、産業技術研究に発展できる成果、ブレークスルーなどは無い。2009年以降、転移温度の上昇は足踏みしており、これを越える物質が見いだせるかどうかは今後の研究の進展にも大きく影響を与える。

中国では7年程度前から、超伝導研究に必要な装置を大量に購入していた。現在の中国の研究レベルの向上は、こうした研究投資の結果と言える。現在、インドが超伝導関連研究に投資していることが、装置購入状況から推測される。こうした前兆からも技術水準の将来傾向を見ることができる。現状では多くの研究開発は、国際共同研究として実施されており（論文の著者から推測できる）、この点からは、技術水準の評価は困難になっている面もある。また研究・技術の国際水準を上げるとの名目のもとに、研究の国際化を否定する方策が施されることがあってはならない。

## (参考情報)

- [1] 細野秀雄、“鉄系超伝導物質：発見の経緯と現状”、セラミックス、Vol. 45, No. 10 (2010) pp907-917.

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(9) 磁性材料

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	研究水準は大学、国研、産業界ともに極めて高く、世界トップレベルを維持している。材料と物性研究は元々強かったが、最近では新現象やデバイスの研究でも存在感あり。近年の磁性材料の研究のメインストリームは巨大磁気抵抗・トンネル磁気抵抗素子に代表される、金属スピントロニクス素子。欧米の基礎研究に端を発したが、実用化研究では日本が検討、産総研・東北大が世界を代表する研究機関となっている。米欧に端を発する磁気冷凍材料・磁気形状記憶材料などでも東北大がオリジナルな成果を出し、大きな流れを作り研究水準は高いが、応用展開は未知。 世界的な仕事をする優秀な若手研究者も出てきているが、日本の大学では一般に「磁性」や「スピントロニクス」の教育が弱い将来まで競争力を維持できるかどうか懸念がある。
	技術開発水準	◎	→	産業界のニーズに裏付けされた日本の磁性材料の技術開発水準は、大学、国研、産業界ともに極めて高く、世界トップレベル。省ジスプロシウム希土類磁石、省エネ磁気記録技術、MRAM など省エネルギー型磁気メモリの開発などは、雇プロに支えられ、技術開発水準は極めて高い。ただし、産業界も優れた研究開発人材の雇用や研究開発への投資に積極的でないため、将来の競争力の衰退に歯止めをかけられるかどうか不安材料の方が大きい。
	産業技術力	○	↘	永久磁石では日本メーカーが世界市場を席巻し、トップレベルを誇ったが、近年は資源を持つ中国が生産量では世界を圧倒、将来展望は悲観的。軟磁性材料でハードディスクの磁気記録媒体でも米国メーカーに押されている。磁気を応用した不揮発性メモリ (MRAM) の開発については、基本技術、応用技術ともに米国メーカーとの力を削って競争している。韓国メーカーの追い上げが厳しく、日本の磁気記録・メモリの産業技術力は激しい競争にさらされていて、楽観できない。一方、スピントロニクス、More than Moore、Beyond CMOS のような新しい材料やデバイス原理探究の研究に関しては意欲が低く、米国インテルなどの後塵を拝している。
米国	研究水準	◎	→	研究水準は大学、国研、産業界ともにきわめて高く、世界トップレベル。世界から優秀な人材が集まるため研究者層が厚く、独創的な発想の研究者が多い。またベンチャーも強い。ただし、磁石材料は製造企業が全て国外流出したために、その基礎研究もふるわなかったが、近年の希土類磁石のエネルギー用途の急増に対応すべく、省希土類元素磁石の巨大ナショプロがスタート。軟磁性材料研究は軍用用途の高価な材料が研究対象となっている。磁気記録媒体研究では HDD 産業の後押しで、幾つかの磁気記録関係のセンターが活発な研究を行っており、層も厚い。金属スピントロニクス研究も DARPA など政府関係の支援も多く水準が高い。若手も含め人材の層は厚く、一流大学には世界中から優秀な学生が集まる（ただし日本からの留学生は減っており現在ではきわめて少ない）。
	技術開発水準	◎	→	磁石・軟磁性材料研究は産業基盤を失い、技術開発水準は低迷。磁気記録の技術開発水準は大学、産業界ともにきわめて高く、世界トップレベル。磁気冷凍材料は Ames Lab が世界の大本山。スピントロニクス関係では Beyond CMOS を狙った次世代デバイス開発プロジェクトが政府、産業界、大学の協力で進められており研究水準は高い。
	産業技術力	◎	→	技術開発力も世界トップレベル。MRAM については、基本技術、応用技術ともに日本メーカーとの力を削って競争している。More than Moore、Beyond CMOS のような新しいデバイス原理探究の研究も積極的で大学にも資金を投資している。
欧州	研究水準	◎	→	基礎研究の水準は、大学、公的研究機関を中心に極めて高い。出口を意識しない基礎研究から、いくつかの応用分野が現れている。磁石・軟磁性材料との産業基盤は弱くなったが、相変わらず基礎研究では研究者の層が厚い。スピントロニクス分野では、GMR をはじめ、原理的、基礎的研究をじっくりやる傾向が強い。しかし IMEC がスピントロニクス研究を中止するなど一部見直しの動きもある。
	技術開発水準	○	→	大きな産業がなく、産業基盤が弱いために、技術開発水準は、日米に比べればやや遅れている。
	産業技術力	○	→	産業技術力も、日米に比べればやや遅れている。

中国	研究水準	△	↗	磁石研究者の人口はおそらく世界一であろうが、研究水準は高くない。磁気記録については、世界水準のグループはない。スピントロニクス分野では研究者数が増え、研究レベルは急速に向上している。潜在的な人材の層は厚く、科学技術研究への投資も急速に増えているので、今後は急速に伸びてくるであろう。日本が追いつかれ追い越されるのも時間の問題
	技術開発水準	△	↗	まだ目立った水準に達していない。
	産業技術力	△	↗	まだ目立った水準に達していないが、希土類磁石生産量は世界一。風力発電、自動車など国内消費で希土類磁石が使い果たされる可能性があり、世界の脅威。
韓国	研究水準	○	→	スピントロニクス分野では大きな投資がなされ、研究レベルも向上している。最近論文の質量ともに飽和している。
	技術開発水準	○	↗	技術開発水準も向上していると思われる。
	産業技術力	○	↗	サムソンなど半導体メーカーが MRAM 開発に力を入れている。
<p>全体コメント：                      技術開発力と産業も含めた全体としては日本と米国がリードしているが、日本では産業界も含め、優れた研究開発人材の雇用や研究開発への投資に消極的である。基礎研究では日米欧が拮抗してしのぎを削っているが、欧州の基礎研究の層は厚い。韓国の研究レベルはまだ日米欧に及んでいないが、技術開発力は伸びている。中国はさらに遅れているが、米国、日本、欧州で学んだ人材は豊富にいるので今後急速に伸びてくるであろう。将来、中国が磁石産業を完全に支配する可能性もある。</p>				

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(10) 低次元材料 (ナノ粒子・ナノワイヤ・ナノチューブ)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	無機ナノ粒子を中心にオリジナリティのある研究が盛んであったが、現在では一部の水準の高い研究を除き、アジア諸国中でも平均的なレベルとなっている。 磁性ナノ材料、酸化チタン粒子、ナノチューブなどの開発に代表されるように、大学、研究所、企業における研究水準は非常に高い。特にナノ磁性粒子、カーボンナノチューブ、高分子系ナノ材料などの機能化に関する研究で世界をリードする。
	技術開発水準	◎	→	ナノ材料の産業利用における技術開発力は非常に高い。特にナノ材料の機能化、これらのデバイス化に関する研究開発、ナノチューブの技術開発力は極めて高い。ナノ粒子合成や表面修飾技術において、ある程度の技術開発水準を有しているが、基礎研究をうまく技術開発に生かせていない。
	産業技術力	◎	→	東レ、JSR、富士フイルム、三菱マテリアル、戸田工業、田中貴金属、帝人など多数の企業がナノ粒子開発に携わっており、エレクトロニクス、触媒、エネルギー関連等の材料開発が盛んであるが、社会への貢献度は高いとはいえない。ナノワイヤ、ナノチューブの産業応用力もまだ低い。
米国	研究水準	◎	↑	Nature, Science などの有力誌での論文発表件数は他国を圧倒しており、特に基礎研究分野における層の厚さが伺える。プラズマモニクス、エネルギー関連、バイオ関連をはじめとして幅広い分野で世界を牽引している。世界的な有力校が多数存在することも強みである。中国をはじめとするアジア出身研究者の活躍が特に目立つ。
	技術開発水準	◎	↑	技術開発力は非常に高く、広い材料分野をカバーする大手企業が多数存在する。また、これを支えるベンチャー企業が多数存在し、引き続き高い技術開発水準を維持するものと考えられる。エネルギーやバイオ関連の技術開発が基礎研究と密接に結びついている。
	産業技術力	◎	↑	開発されたナノ材料の製品化に積極的である。資金力のある世界企業が産業を支えており、次の材料開発にも余念がない。高性能燃料電池の開発が期待される。市場拡大が予想されるエネルギー・バイオ関連分野では、複数の大手メーカーがあり、ベンチャー企業とタイアップして、世界的な展開に大きく寄与している。
欧州	研究水準	◎	↑	公的研究機関における研究水準は高く、グラフェン、高分子系材料など、ナノ材料開発の研究水準は非常に高い。その他磁気材料・光学材料・エレクトロニクス材料開発において、優れた成果を挙げている。EUの研究開発プログラムの後押しも大きい。オックスフォード、マックスプランク研究所などを中心に基礎研究が盛んである。
	技術開発水準	◎	→	大学、産業界、政府が連携し、技術開発力の向上が図られている。米国と同様に、ベンチャー企業での研究開発も盛んに行われている。エネルギー、バイオ関連のベンチャー企業が育っている。特にドラッグデリバリー、遺伝子デリバリーなどで世界をリードしている。
	産業技術力	○	→	グラクソ・スミスクライン、バイエル、フィリップスなどの産業技術力のある企業が存在する。資金力を背景に、今後も高い技術開発水準を維持するものと考えられる。米国と同様に、エネルギー・バイオ関連分野に注目しているようだが、米国ほど勢いがあるとはいえない。
中国	研究水準	○	↑	The National Center for Nanoscience and Technology を設立し、ナノ材料開発に力を入れている。北京大学、清華大学、中国科技大などを中心に論文数、研究の質が大幅に向上している。質の高いナノ粒子合成研究が増加している。科学技術者数も世界トップクラスに達している。米国帰りの研究者による貢献が大きい。
	技術開発水準	△	↑	海外人材呼び戻し政策の積極的実施により、優秀な研究者が帰国後も継続的に成果を挙げている。これに伴い、研究水準および技術開発水準が急速に上昇している。今後、高い水準の基礎研究を基にしたベンチャー企業が興ってくると予想される。
	産業技術力	△	↑	世界展開する目立った企業は存在しないが、今後産業技術力が急激に上昇していくことは明白である。

韓国	研究水準	◎	↑	アジア諸国中で最も研究水準が高くなっている。特に、バイオ関連のナノ粒子材料研究が活発である。Korea Advanced Institute of Science and Technology、Seoul National Universityなどの有力校への集中した政府支援の成果が現れている。中国同様、留学帰国者の貢献も大きい。
	技術開発水準	○	↑	政府支援のプロジェクトの下、大学、研究機関、企業の技術開発水準は向上している。特に、National Center for Nanomaterials Technologyを中心に、ナノ材料の電気・電子分野への応用技術開発に強い。磁性、半導体ナノ粒子を用いたバイオ関連（MRI造影剤、バイオイメージングなど）の技術開発も中心である。
	産業技術力	○	↑	サムソン、LG エレクトロニクスを中心に、ナノコンポジット熱電変換材料を用いた熱発電及びペルチェ冷却デバイス、圧電性 ZnO ナノワイヤを用いた振動発電デバイス、QD ディスプレイなどの機能性ナノ材料を利用した製品開発に積極的に動いている。バイオ応用を目指した半導体ナノ粒子関連材料の生産が今後活発になると予想される。

全体コメント：

現在、プラズモニクス分野、燃料電池触媒などのエネルギー関連分野、バイオ関連分野への利用に向けたナノ粒子材料の研究開発が注目されている。欧米では、上記分野において基礎研究と技術開発が密接に結びついており、ベンチャー企業を中心とした製品化が精力的に進められている。一方、日本を含むアジアの動向は数年前と変わらず活発とは言い難い。日本でのナノ粒子材料のターゲットは、導電性ペースト（エレクトロニクス材料）や磁気記録材料などの既存製品の延長上にあるものが変わらず多く保守的である。最近では、化合物半導体太陽電池用の半導体ナノ粒子合成に力を入れている企業もあるが、新原理に基づいた挑戦的な製品開発に向けた研究開発には消極的である。ナノ粒子の安全評価は日本でも数年前から行われており、製品開発に生かされることが望まれる。

(参考情報)

- [1] ACS、Wiley InterScience、RSC の各種学術誌
- [2] Materials Research Society などの材料に関する国際会議
- [3] Public Engagement with Nano-based Emerging Technologies,  
URL: <http://unit.aist.go.jp/nri/nano-plan/index.html>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(11) 新材料探索・設計

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	固体材料の高速探索・評価システム開発では世界の最先端にあるが、コンピュータによる材料設計に関しては、米国および欧州にやや劣っている。 有機合成、触媒、ポリマー分野における技術水準は欧米に比べ致命的に遅れている。研究戦略（公的研究支援）が広範な適用性、革新性の高い研究手法の開発、及びそのための人材育成の方向に向いていない。
	技術開発水準	○	→	ハイスループット分析・計測装置の開発や固体材料の高速評価において世界をリードしている。しかし、高分子や触媒探索分野の国内学会の取組みは不十分で、国産の自動合成・評価技術を構築する取組みに欠ける。新薬の発見や新材料設計の組織的探索に必須のライブラリも未整備である。
	産業技術力	○	↗	高スループット化合物・材料探索はものづくり競争力の原点として関心は高まっている。一方、金融危機に伴う企業の基礎研究力は低下傾向にあり、この部分を担うベンチャーが発生してきた。
米国	研究水準	◎	→	最近、材料研究全般に活気がなくなりつつあるが、依然として高いレベルの人材と研究設備を維持している。NISTは、コンビナトリアル高分子研究センターを2011年3月で終了し、新しくエネルギー、環境、電子材料探索への応用研究への展開を始める。コンビナトリアル材料合成は各地の大学、国研で進行中。現場の主役は中国人、インド人。材料特性解析（特に、中性子、放射光などの大型装置を駆使した）は極めて強いが、新材料研究に取り組む企業研究所がほとんどないこともあり、材料合成が弱い。そのため、きちんと設計通りに合成された試料が少なく、本来のすぐれた特性解析能力を生かし切っていない印象。また、データマイニングなどの情報処理に関する研究も進行している。
	技術開発水準	◎	→	国が資金を提供する研究開発拠点で、機能材料に関わる研究開発が行われている。産学連携と国際的交流が効率的に行われており、高いレベルと人材を維持している。 大企業でのコンビナトリアル材料研究は定着し、個別のシステム開発を進める一方、新物質・材料の委託開発をビジネスとするベンチャー企業が10年前から立ち上がり、一部は日本へ進出している。特に半導体関連材料は国内企業との協業を発表している。また、企業から大学への知識・経験・人材の移動もあり、研究の裾野の広がりを感じる。アメリカのベンチャーは最盛期には20社を超えていたが、現在は、合成系、解析ソフト系に大別され、確実な成長を続けている。
	産業技術力	○	→	産業技術力は、IT・システムに重点が置かれており、材料研究全般に関しては、活気がなくなってきたが、依然として高い力を持つ。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。オバマ政権がエネルギー・環境関連新材料や国際競争力の高い製品開発技術育成にどれだけ力を入れるかが注目される。
欧州	研究水準	◎	↗	ポリマー、触媒分野のコンビナトリアル・ハイスループット探索が多く大学の研究所で進行し、国際会議や学会誌特集を使ってマートものづくり研究モデルを構築中。固体ナノ材料研究では、日本の技術が一部導入されている。Li電池に代表されるエネルギー分野へのコンビナトリアル手法の応用が進んでいる。 また、従来から、計算科学に強かったが、EC各国間の連携により、一層強化された。新材料設計ソフト面に特に強みをもつ。欧州で作られた設計に関するソフトが目につく。
	技術開発水準	○	↗	データベース・マイニング技術に標準化、設計技術への展開の動きがある。産学連携のベンチャーも創設されている。フランスを中心に欧州で進められてきたTopCombiプロジェクトは終了したが、後継プロジェクトが計画されている。
	産業技術力	○	→	燃料電池、自動車排ガス用触媒、新規ポリマー、複合材料の開発に展開。ECおよび各国の政策、特に、太陽電池産業への固定価格買取制度（フィードインタリフ）などにより、グリーン技術に関する技術開発水準は向上してきている。標準化・データベースが産業技術力の向上に寄与している。
中国	研究水準	△	↗	急拡大する太陽電池を含む各種電池等の新エネ研究、触媒等の省エネ材料研究に、高速探索手法の導入の動きがある。
	技術開発水準	△	↗	世界に人材を送り込み、最新の技術情報を収集し、導入・普及に力を入れており、近未来の世界をリードする潜在力は高い。
	産業技術力	△	↗	2008年後半からの経済情勢の悪化で、技術開発への投資も減り、当面は冬の時代を迎えるが、欧米ベンチャーの中国進出もあり、長期的には成長の可能性大。

韓国	研究水準	△	→	KAISTなどの国立研究所での研究は5年前くらいからスタート。触媒、セラミックスを中心に展開。実施機関は少ないが、確実な成果と人材を育成している。また、他国からの技術移転にも熱心である。現時点で際立った研究成果はほとんどみられない。
	技術開発水準	○	↗	第一回国際コンビナトリアル触媒シンポジウムを08年に開催、2010年にも小規模なワークショップを開催するなど活発である。触媒およびポリマーの探索技術開発で欧米を追随している。中国の急成長をにらんで日本との連携を強化する兆候もある。
	産業技術力	△	→	独自の技術は少なく、現況では日米欧には及ばないが、一定の水準にある。産業界の技術開発に選択と集中の傾向が強い。化学、電子産業を中心に技術輸入の機運はある。

全体コメント：

材料の設計という思想は欧米に端を発しているもので、依然として欧米が強い分野である。アジアは、材料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。日本は、触媒や半導体の材料設計など欧米に先駆けている分野もあり、現段階では決して後塵を拝しているわけではない。新しい鉄系超伝導等、新材料設計の思想から出てきた材料もあり、世界の注目を集める状況になりつつある。

電子材料に加えて、新エネルギー・省エネルギー材料、生体材料の開発競争とともに、高速探索手法への関心は高まっており、コンビナトリアル触媒シンポジウム（韓国）やコンビナトリアル・ハイスループット材料学会議（ドイツ）などの国際会議において、研究発表や関連装置の展示が活発化している。2010年にはコンビナトリアル材料開発に関する国際会議が日本で開催されたが、オーストラリアのCSIROからの熱心な参加が目立った。オーストラリアはこの分野の強化を考えているようで、日本との連携を求めている。ドイツでも、コンビナトリアル手法による個体材料の開発が活発化しており、独米大学の連携が進んでいる。また、ルール大学を中心としたコンビナトリアルネットワークが構築されつつあり、大学もそれを支援している。日本では、医薬用コンビナトリアルケミストリーに次いで、材料分野（特に触媒、ポリマー）での取組みの遅れが懸念される。

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

### 2.1.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) ナノカーボン材料（CNT、グラフェン他）

ナノカーボン材料は電気自動車やスマートグリッド、航空機用軽量高強度複合材料など、グリーンイノベーションを実現する素材として発展が期待されており、科学・技術研究、産業振興が国際的に広く展開されている材料である。事実、製品素材としての市場規模も近年急激に拡大しており、新しい利用分野も見出されている。なかでも、2010年のノーベル物理学賞の受賞研究対象となったグラフェンはCNTで当初予測どおりに進まなかったエレクトロニクス分野での利用が期待されており、CNT研究で培われた技術と手法を基にして、急速な発展を遂げることが予想される。

グラフェンを電子デバイス材料として利用するためには大面積結晶を作り出す必要がある。そのためには基礎物性研究で現在も用いられる剥離法ではなく、基板上への結晶成長による方法を開発する必要がある。これに関して、韓国SKKUの研究チームがメタンCVD法を用いた銅薄膜上へのエピタキシャル成長による、工業規模の大面積のグラフェン作製に成功している。この方法で得られたグラフェン膜はrole-to-role法で透明基板上への転写も可能であり、タッチパネルディスプレイへの応用が見込まれる注目すべき技術であり、今後の発展に期待したい。ただし、まだ単層グラフェン1枚が大面積でできているわけではなく、電気伝導率もかなり目標値を下回っているのが実情のようである。ITOに置き換われるのか研究開発能力が問われるところである。

またグラフェンの半導体材料としての利用において鍵となるバンドギャップ導入に関して、日本の物質・材料研究機構の研究グループが、電界効果型トランジスタ（FET）構造を用いたバンドギャップ導入を確認した。現時点では電気伝導率の面からほとんど現実的ではないが、グラフェン素子におけるバンドギャップ制御技術の確立は”Beyond Silicon”実現につながり、半導体技術の観点からも注目すべき研究である。

グラフェンの基礎物性に関しては、サスペンドしたデバイスで分数量子ホール効果が観測され始めた。そのため、基板をSiO<sub>2</sub>からBNなどへと変更して結晶品質を高める工夫が行われている。グラフェンに空間変調した格子歪みを導入して有効的な磁場を発生させ、ランダウ準位を実現するなど興味深い展開が見られる。

#### (2) ソフト材料（超分子など）

最近、欧米でネオバイオミメティックという分野が新しい潮流として注目されている。バイオミメティックとは、生物の構造や機能を人工物によって模倣することを意味しているが、最近の精密合成、精密構造制御、精密加工、自己組織化などにおける大幅な技術的進歩を利用して、従来よりはるかに精緻に生物を模倣することが可能になってきたことから、これをネオバイオミメティックと称し、欧米のナノ材料の研究者がこの分野に参入し始めている。具体的な例としては、ハスの葉の構造を模倣した超撥水表面材料、モルホ蝶の構造色を模倣した塗料などが有名であり、日韓中でも盛んになりつつある。ただし今後、大きな産業に展開するかどうかは未知数である。企業もある程度の興味は持っており、ある特殊な分野や用途では導入が図られた例もあるが、汎用技術としての開発はまだあまり進んでいない。

### (3) ハイブリッド材料（金属、セラミックス、ポリマー等の組み合わせ）

ハイブリッド材料は、基本的に微視～巨視レベルでの機能材料であり、金属、セラミックス、ポリマー等を組み合わせて作成するが、その形態は、粒子状、繊維状、プレート状、3次元共連続状になる。最近では、それぞれの大きさがナノサイズというハイブリッド材料が研究開発、産業化の中心となっている。

従来の材料技術にナノオーダーの材料技術を融合した新規材料技術開発が進められている。これにより、強度や弾性率などという力学機能だけであった特性に新たな電氣的、熱的機能を付与することが可能になる。例えば、炭素繊維は軽量構造体用の材料用素材として不動の位置を確立した。炭素繊維とカーボンナノチューブのハイブリッド化は材料自体の力学特性の向上に加えて新たな機能を付与できる可能性がある。また、セラミックス系のハイブリッド材料では強度を向上させるセラミックスと破壊抵抗を向上させる繊維強化セラミックスのハイブリッド化が試みられ、低炭素社会へ貢献することが可能な成果が得られつつある。このように、ハイブリッド材料という名称も、単に新しい材料開発を行うという側面ではなく、今後は必要な特性を既存の材料系の中に組み込むための手段として活用が考えられる。計算機科学の発展により、材料に要求される特性が与えられた場合にハイブリッド材料の構成や組織を設計することも可能になりつつある。近い将来に、力学特性を利用する構造材料では「ハイブリッド技術」はプラス $\alpha$ の特性付与に対するブレークスルー技術として役立つものといえる。今後は、材料に要求される特性も多様になり、材料と材料の組み合わせや形を利用した対象とする大きさを問わないハイブリッド化やマルチスケールハイブリッド化がキーテクノロジーになることが強く期待される。近年の特筆すべき成果例として下記を挙げる。

- 1) NEDOによる「超低燃費タイヤ用ゴム材料の開発」が進んでいる。これは、ゴム分子とナノ補強粒子の相互作用、界面制御、ナノ粒子の3次元分散状態の電子線トモグラフィによる解析、ナノ力学物性マッピングによる局所物性解析、ナノ有限要素法によるハイブリッド材料の解析と巨視物性予測等を組み合わせて超低転がり抵抗でウェットスキッド、耐摩耗等の相反物性を満足させようとする総合工学である。これにより、低燃費化でCO<sub>2</sub>発生量を減らしたり、電気自動車であれば走行距離を延長できる。この研究開発が成功すれば、他のハイブリッド材料にも応用可能であろう。
- 2) 透明な熱可塑性エラストマー（クラレ）、透明で強靱な熱可塑性ポリウレタン（BASF）などナノ構造を制御した新材料が発表された。これらは、機能性ハイブリッド材料開発の素材として注目されている。
- 3) ナノハイブリッド材料ともいえる、「環動ゲル」の原理を使った「傷の付きにくい塗料」が実用化された（東大・伊藤教授、アドバンスド・ソフトマテリアル）。
- 4) 無機超微粒子と有機分子のナノハイブリッド材料が、超臨界を使って可能となり、ポリマーと組み合わせて、透明磁性体、高熱伝導フィルム、高屈折率材料等が可能になった（東北大・阿尻教授ら）。
- 5) ゴムとモンモリロナイトのハイブリッド材料を使ったガスバリアー性ゴムをタイヤに応用するプロジェクトが進んでいる（北京化工大学）。
- 6) エレクトロスピンニングを使った傷修復材、超純水フィルター等がパイロットプラント規模で開発されている（アクロン大学、ニューヨーク州立大学）。
- 7) 巨視的なハイブリッド材料であるが、ゴムと鉄板を多層積層した免震ゴムが、フラ

ンスの原子力発電所、次世代核融合炉（トカマク、ITER）等の免震に実際に使われ始めた。

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

我が国は、アカデミアの高分子化学基盤研究力をベースに、素材メーカー間の激しい競争、ユーザーからの厳しい要求性能とその対応による技術開発力向上でスパイラルアップがなされ、世界トップの地位を築いてきたし、現在もその状態をキープしているといえる。また、中国・韓国の産業を支える製品の中核部品は、日本製が大半であることも、上記の現状認識の証明となる。

しかしながら、このスパイラルアップを支えてきたアカデミアでの高分子基盤研究や製造技術を支える化学工学、製品開発に必要な成型加工等の教育、研究組織が減少しつつあり、長期的に見て、今後も世界トップの地位を確保していくには困難な状況にある。

一方、中国・韓国は、国をあげて教育、研究、人材育成に取り組んでおり、特許の出願を中心にここ数年飛躍的に力をつけてきた。このままでいくと、いずれ技術開発力や産業技術力で中国・韓国に並ばれ、化学産業を支えてきた構造が崩れる可能性が危惧される。

このような状況を鑑みると、アカデミアと産業界が新たな連携をして、研究開発の中核となる人材の養成のためのカリキュラム作成や産業を支える基盤研究を戦略的に取り進める体制作りが国家的課題である。

以下、トピックスについて、アカデミアと産業の視点から記述する。

#### ハニカム構造を持つ高分子機能膜

貫通孔を持つフィルムやシートを製造する際、穴径をサブミクロンからナノオーダーで制御することは、金型技術およびその製作コストから見て難しい課題である。この課題に対して自己組織化の概念で取り組み、成功した事例にハニカム構造を持つ高分子膜がある。

この穴径が制御された高分子機能膜は、医療用途でのその有効性が確認され、肝管ステントのカバー材として使用されている。

#### ナノピラー状シートによる肝細胞の三次元培養

新薬の開発では、ヒトの細胞を培養した組織体による創薬スクリーニングを行いたいとのニーズが大きい。このニーズに対応する試みの一つにナノピラー状培養シートによる細胞の三次元培養がある。このシートは、従来日本が世界をリードしてきた半導体微細加工技術をベースにシリコン金型を鋳型にしてポリスチレンに転写して作られ、肝細胞の三次元組織体（スフェロイド）の培養に成功している。

#### 燃料電池用高分子電解質膜

高効率の発電システムとして位置づけられる燃料電池の中心部材となる高分子電解質膜は、開発初期はパーフルオロ系が主流であったが、最近では高分子設計の多様性から芳香族系も検討が進んできた。この傾向は、親水性の伝導チャンネル形成と耐水性や強度的性質を発現する疎水構造からなるブロック共重合体を含む相分離組織を設計する考え方が主流となりつつあることに起因する。

### (5) 融液材料（ゲル・電解質・イオン液体など）

ここでは、イオン液体に着目して記載する。研究は非常に広い範囲にまたがる。

1. 蓄電・発電デバイスへのイオン液体の応用は、これまでこれらデバイスの安全性を向上させるためという研究が多かったが、最近、イオン液体を使うことによる高性能化（例えばリチウム電池のエネルギー密度の飛躍的向上、燃料電池の無加湿運転の実現など）が報告され、注目されてきている。
2. イオン液体をセルロースなどの難溶性生体高分子の溶媒として用い、バイオマスからセルロースを分離、精製、利用しようとする研究が報告されている。イオン液体のリサイクル技術が確立すれば、新しいセルロースプロセス技術となる可能性がある。
3. イオン液体は合成高分子の溶媒になることも見つかってきている。イオン液体と高分子を複合化する方法論に進展が見え、新しい導電材料、制電材料、ゲル材料などが生まれる可能性がある。
4. イオン液体の不揮発性を利用することにより、液体技術と真空技術が融合できる可能性が出てきている。電子顕微鏡観察技術にイオン液体を利用する新しい方法には大きな進展がみられる。
5. イオン液体を溶媒（柔らかい鋳型）に用いたナノ材料合成の作製技術に進展がみられる。イオン液体の特異性を利用することにより例えば金属を真空中でイオン液体にスパッタリングすることによって金属ナノ粒子が合成可能、イオン液体を溶媒に用いてゾルゲル反応等を行うことにより特異なナノ材料が合成可能等の報告がある。

### (6) ナノポーラス・メソポーラス材料（空間空隙制御材料）

空間空隙材料の研究開発としては、ゼオライト、メソポーラス材料、PCP/MOFの三材料が主要な材料群となっているが、世界的な論文発表数の伸び率はPCP/MOFが最も大きく、今後空間空隙材料の主流の一つとなると考えられる。

#### PCP/MOFの急展開

PCP/MOF (porous coordination polymer/ metal-organic framework) とは有機配位子と金属イオンを連結して作られるナノ領域の大きさの空間（細孔）を有する新しい結晶性ナノポーラス材料である。ゼオライトやメソポーラス材料を超える非常に大きな比表面積を有しており、空間サイズ/形状や空間内部の化学的性質を精密に制御できる特徴を有し、ガス吸蔵材料や分離膜、触媒としての利用が期待されている。近年では、骨格の柔軟性や酸素の選択的吸着、高い熱安定性等の新規機能・特性が報告されており、活躍の場が広がっている。水素を安定かつ安全に吸蔵することができれば、革新的な水素貯蔵材料となりうる。また、BASF社が大量生産を確立したこともあり、今後の研究開発動向に注目すべきである。

#### 精密ナノ空間の利用

PCPの精密ナノ空間に導入されたイミダゾールは整列配置し、この結果、高温無加湿条件でも高いプロトン伝導性を示すことが示され（2009年）、中温領域で作動可能な燃料電池の固体電解質への応用が期待されている。

### ナノインテリジェントマテリアル

一部の PCP は、結晶性でありながら柔軟性を示すという特異な性質を有しており、この柔軟性を利用すると、高いガス（二酸化炭素、メタンなど）分離特性が発現することが判明し、注目を集めている。このような特殊な挙動は、ヘモグロビン（蛋白質）が外部の状況に応じて特性を変化させるのに類似した現象であり、ナノインテリジェントマテリアルとしての展開が期待される。このような特殊な柔軟性 PCP の研究は、京大北川進教授、千葉大加納教授を中心に進められており、日本のお家芸である。

### PCP の実用化動向

PCP の研究は、従来大学が主体であったが、近年になって、電気、ガス、化学、石油、触媒など多様な業種の企業が、大学と連携して本材料の実用化を急速に進めている。化学最大手 BASF 社が工業スケールでの PCP 製造を開始したとのレポート（2010年）が示す通り、実用化に関しては欧州が先行している。日本の基礎研究の成果を海外に流出させない為にも、日本で実用化研究の促進が必要と考えられる。

### 新規ポーラス材料の台頭

上記した多孔質材料以外にも、メソポーラスゼオライト（KAIST(韓国)；R. Ryoo 教授）やゼオライト様トポロジーを有するイミダゾレート多孔体（UCLA: O. Yaghi 教授）、共有結合性有機多孔体（UCLA: O. Yaghi 教授）、ポリオキソメタレートからなる多孔質材料（東京大学：水野 哲孝教授）等、多種多様な多孔質材料が開発されており、新機能の出現等が期待されている。

### (7) 触媒材料

欠損型分子性酸化物ナノクラスターを設計し、それを“分子鑄型”として種々の金属を導入することにより“人工無機酵素”とも呼べる機能性分子触媒を世界ではじめて合成することに、日本で始めて成功した。これらの設計された分子触媒が種々の官能基変換反応（特に、酸化反応）に対して高い活性を示すことや、これらを用いた新しい反応も開発されている。また、分子触媒から得られた知見を基にした、活性点構造を分子レベルで制御した固体触媒も開発されている。様々な種々の官能基変換反応、環境触媒、電極触媒としての利用も検討されている。

### (8) 新型超伝導材料

鉄系超伝導に関して、着実な物性研究の段階に入ったものと思われる。銅酸化物高温超伝導体や重い電子系超伝導でこれまでに実績を挙げてきている研究室からのしつかりとした研究内容が報告されてきている。この物質は、組成に富むこと、単結晶が作成できること等から系統的な研究が可能である。さまざまな研究の結果、従来から活発に議論されてきた超伝導の対称性に関する知見（とりわけ不純物効果）を基礎に、弾性定数の温度依存性についての新しい実験結果の報告を受けて超伝導発現機構究明に大きな展開が見えてきた。この方向での総合的な研究から臨界温度上昇への「構造最適化」の指針の提示が期待される。

新物質開拓に関しては、取り組んでいる研究機関数、研究報告例は2年前と比べて減

少傾向にあるが、ほぼ一定のペースで続けられている。この1年間にもいくつかの新超伝導物質が報告されており、さらに、水素や水蒸気により超伝導が誘起されるなど新たな展開も見られる。一方で  $T_c$  の最高値は  $\sim 55$  K のまま、この2年間足踏みしており、これを超える物質が見いだせるかどうかは今後の研究の進展にも大きく影響を与えると思われる。局所構造と  $T_c$  の関係は日本の研究者を中心にかなり定量的に理解されるようになってきたものの、 $T_c$  上昇の兆候を含んだ実験事実は報告されておらず、研究者は  $T_c$  の停滞打開に対して、新しい物質設計概念の導入や積極的な類縁の新規化合物開拓が必要であると意識し始めている。

単結晶及び薄膜作製技術は着実に進歩しており、特に当初作製が困難とされてきた高  $T_c$  の薄膜も作製可能になっている。さらに、焼結体試料についても純度や組織が少しずつ改善されている。銅酸化物超伝導体の経験より、良質な試料の物性評価により超伝導発現機構の解明や、高  $T_c$  の物質設計指針が構築されることが期待できる。

なお、世界的に産業界からの注目がほとんどない状況には変わりなく、これは銅酸化物超伝導体を超える材料創出の可能性が示せていないことと、毒性元素を含むためである。

## (9) 磁性材料

磁石材料・軟磁性材料ともに日本の研究が現在実用化されている磁性材料の礎となっている。磁石材料については、約30年前に日本で開発された NdFeB 系に匹敵する材料はいまだ見出されていない。軟磁性材料も日本の研究が先行している。日米欧を中心とした世界的な研究開発の流れとして、磁性と電子の伝導がかかわる巨大磁気抵抗効果など新しい物理現象の発見を契機に応用技術も発展し、20世紀末頃から「スピントロニクス」といわれる新しい分野が形成された。最近では固体中の「スピン」の生成、蓄積、流れ（スピンの流れは「スピン流」とよばれる）を理解し制御することが中心的課題の1つになっている。この「スピントロニクス」の研究は、固体物理、材料科学、電子工学、磁気工学およびそれらを横断する諸領域において、今では世界的に大きな潮流となっている。折りしも、情報技術を支えてきたシリコン集積回路が過去35年以上にわたって辿ってきた微細化による高性能化のトレンドが、近く限界に到達することが予想され、新しい原理や機能を導入した次世代デバイスの研究開発が関心を集めている。スピントロニクスは”More than Moore”あるいは”Beyond CMOS”とよばれる将来技術の1つとしても期待されるようになってきた。また、対象とする物質も、金属や半導体のみならず、強相関系を含む酸化物、グラフェンやカーボンナノチューブを含む有機物や分子にも広がっており、それらの物質系においても様々な興味深い現象が観察されている。

このスピントロニクス分野では次々に新しい物質や現象が開拓・発見され、今後も意外性に富む研究が出現する可能性が高く、数ある学術・技術領域の中でも最も活力に満ちた分野の1つであるといえる。関連する領域も広く、基礎研究と応用が密接に関係しているという特色がある。また、日本の研究機関に所属する研究者達の活躍がめざましく、日本発の優れた仕事がこの分野の発展に大きく貢献している。

(参考情報)

- 1) 高梨弘毅 応用物理 77 巻 第 3 号, 255 (2008).
- 2) 田中雅明 応用物理 78 巻 第 3 号, 205 (2009).
- 3) 特集「スピントロニクス」表面科学 32 巻 3 号 (2011).

## (10) ナノ粒子・ナノワイヤ・ナノチューブ

現在、プラズモニクス分野、燃料電池触媒などのエネルギー関連分野、バイオ関連分野への利用に向けたナノ粒子材料の研究開発が注目されている。

まず、バイオ関連材料では欧米および韓国を中心として、既存の細胞や物質の分離技術への応用に加えて、酸化鉄ナノ粒子等のMRI造影剤への利用、半導体ナノ粒子によるバイオイメージング、金属ナノ粒子による癌治療等に関する基礎、応用研究が盛んに行われている。特に、米国での研究開発が活発である。今後、ターゲティングや生体反応制御機能を持つナノ粒子材料の開発とともに、これらの医療現場での利用が期待される。

第2はエネルギー関連材料の研究開発である。微量の白金あるいは低コスト代替材料を用いる燃料電池用酸素還元触媒の開発や、可視光応答水素発生触媒の開発に注目が集まっており、日米を中心に研究が進められている。低炭素社会実現に向けた新エネルギー事業の創出は、今後ますます重要になることは想像に難くない。

第3の注目すべき研究開発動向としては、ナノ粒子の規則集積による新規電子・光・磁気特性の発現が挙げられる。例えば、導電性ナノ粒子の一次元、二次元規則集積体における局在表面プラズモン誘起増強光電場による新しい光科学分野の開拓や、エレクトロニクス応用を目指したプラズモン導波路の創成などである。ナノ粒子の規則集積による新規特性の発現に関しては世界的に研究されており、エネルギーの高効率利用という観点から重点的に研究開発が行われるであろう。他のナノワイヤ、ナノチューブ等の低次元材料は、エレクトロニクス応用を中心に各国が研究開発を続けていくであろう。

ナノ材料の実際の市場は、磁気記録関連材料、電気・電子部品材料、顔料などの既存製品の延長上にあるものが多くを占めており、基礎研究から発見された新しい機能や原理に基づいた実用化例はまだ多くない。革新的な機能開拓に基づいた材料とこれを利用した技術の開発が期待される。以下に2つの具体例を挙げる。

### 標的型ナノ粒子材料

ドラッグデリバリーや細胞内機能の制御を可能とする機能性ナノ粒子材料の実用化研究の動向が注目されている。この分野では、特にsiRNAを用いた分子療法に関する研究が急速に進展している。最近の研究で、siRNAを吸着した有機ポリマーナノ粒子をがん患者に全身投与することで特異的な遺伝子の抑制効果が示され、実用化に向けた大きな可能性が示されている(Nature 464: 1067(2010))。また、交番磁場印加による磁性ナノ粒子の局所加熱を利用して、温度感受性チャンネルの開閉(Nat Nanotech 3: 36(2008))やレセプタークラスターリング(Nat Nanotech 5: 602(2010))を制御し、細胞内シグナル伝達を操作する技術も開発されている。これらの成果に基づいて、機能性ナノ粒子材料の生体内利用に向けた研究が加速化することが期待される。

### 外部刺激に応答する磁性材料

機能性有機分子を表面修飾した刺激応答性ナノ粒子は数多く開発されており、バイオ関連分野における分離用材料として製品化が進んでいる。一方で、東京大学の研究グループは、光によって可逆的に金属-半導体転移を示す10~20ナノメートルの微粒子(ラムダ型五酸化三チタン)を開発した(Nat Chem 2:539(2010))。安価で比較的容易なプロセスで合成可能であることから、次世代の超高密度光記録材料としての利用が期待

される。この他、逆保磁力を示す磁性体、湿度に応答する磁性体、化学的刺激に応答する磁性体なども開発されており、小型センサや磁気メモリ用材料としての応用が期待される。

### (11) 新材料探索・設計

従来、新材料は発明よりも発見への依存が強かった。「新材料設計・機能設計」とは、目的機能から出発して新材料を設計・構築するという、より根元的かつ高次元の取り組みを指す。いわゆる逆問題を解く取り組みであり、極めて挑戦的なアプローチである。

#### 元素戦略プロジェクトの推進

我が国発の研究開発思想である「元素戦略」は、新材料の設計や機能設計により、希少元素の代替や新機能・新材料を得る取り組みであり、多くの成果が出つつある。この希少元素の代替、原料、循環や、元素の持つ新機能を導き出し世に出していくためのプロジェクトが、文部科学省および経済産業省で行われている。この中では、既存の機能の発現要素に立ち返り、そこから新材料の設計や機能設計を行う取り組みが為されている。ディスプレイ（Dy）を必要としない耐高温超高性能磁石や、ITOの代替材料開発、新規熱電材料、蓄電池・燃料電池用高速イオン伝導体、貴金属を用いない自動車用触媒等、注目すべき多くの研究開発が行われている。

#### 急激な透明アモルファス酸化物半導体の本格研究の立ち上がり

これまで殆んど注目されていなかった透明アモルファス酸化物半導体（TAOS）の研究が世界中で急速に立ち上がっている。新材料の設計・機能設計の成果により、透明アモルファス酸化物が、現在の液晶ディスプレイ（LCD）バックプレーン TFT に用いられているアモルファスシリコン膜よりも1桁以上大きな電子移動度を有し、かつプラスチック基板上にも形成できる低温で、しかも汎用のスパッタリング法で作成できる。

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、TAOSを用いた有機EL（OLED）ディスプレイや電子ペーパーを相次いで試作、さらには次世代LCDのバックプレーンTFTとしての検討など応用に向けた本格的な開発が始まっている。

このように、急速に実用に向けた本格研究が開始された原因は、TAOSが次世代FPDとしての大型高精細LDC・OLEDのバックプレーンTFTチャンネル材料として優れた特性を有していることによる。20年以上の歴史のある低温ポリシリコンのみがチャンネル材の候補であったが、TAOSというダークホースが本命になりつつあるという状況である。

#### ハイスループット、コンビナトリアルに関するトピックス

コンビナトリアルテクノロジーは、計算科学、エレクトロニクス、計測分析技術の進歩を‘ものづくり’研究開発に応用し、集積化と自動化によって物質・材料の研究開発を画期的に高速・高効率（ハイスループット）化する発展途上の新技術である。

#### 1) 触媒、ポリマー分野における高速合成技術

日本のものづくりの強みのひとつは、その道一筋の名人による伝統技術やノウハウの蓄積、伝承にある。その一方で、環境、エネルギー等の社会ニーズ、あるいはエレクトロニクス、IT、バイオ、ナノテクノロジーの進化のスピードは材料・デバイスサイクルを短縮し、新製品開発の可能性と国際競争を激化させ、研究開発の方法についてのイノベーションをもたらしている。医薬を中心とする有機合成に始まったコンビナトリアルケミストリーの装置は企業に広く導入されているが、国内の大学や研究所開発のシステムは、固体材料・デバイス研究用を除くと極めて少ない。欧米では、コンビケムが触媒やポリマー分野に展開し、活発な産学連携研究によりハイスループットな開発ツールが製品化され、普及している。韓国でも、2008年夏には第一回コンビナトリアル触媒国際シンポジウムを開催し、日中韓の連携プログラムに参加するなど、新たな研究手法の採用に積極的に取り組んでいる。

日本では、大学主導の触媒学会や高分子学会でも、この分野の研究発表はほとんど取り上げられていない。このような方法論変革の動きに日本は鈍感であることが、第一の注目すべき動向と言えよう。

## 2) 材料ライブラリー、インフォマティクス分野の展開

「日本の大学はなぜ新薬の開発力が弱いのか？」という問題が提起されている。法規制もさることながら、基本的な問題は(薬品)合成化学の研究室において、化合物の構造および薬理活性に関する情報(データベース)と、両者を結びつけ新物質を設計するデータマイニング技術情報の蓄積(化合物ライブラリー)が少ないことが挙げられている(現代化学、2008年、5月号)。特定物質の合成技術には優れていても、望みの機能を有するリード物質を設計し、高速合成ルートを予測する計算科学(インフォマティクス)への取り組みが不十分である。マテリアルに関するインフォマティクス技術の開発は、アメリカのNSF支援によるIMI-Cosmic、EUのTOP-COMBIなどのプロジェクト研究が取り扱っていたが、その後も後継プログラムや取り組みが企業経験者を入れるかたちで続いている。日本でも予備的検討は始まっているが、このような、実体的、即効的でない研究への支援の道は細い。国際的に通用するライブラリー構築に対する積極的姿勢、データフォーマットの互換性や言語の共通性など、国際標準に関わる欧米との連携戦略が重要である。(「コンビナトリアルテクノロジー」第7章(丸善、2004); 先端科学技術動向、2006年1月号、Feature article #2 (2006) など)

## 3) もの作り研究開発の代行(受託)を業務とするハイテクベンチャーの台頭

最先端の分析・計測装置を用意し、主として企業からの依頼で、研究開発中の新物質・材料について、秘密保持契約の元にデータを取っての構造・基礎物性を測定し、評価する分析ビジネスは、日本でも1970年代から広く行われている。一方、企業や公的資金の大型プロジェクト等で、開発したいものづくり(材料、触媒等)について、設計から試作、評価にいたる基礎研究を代行するベンチャー企業は最近に至るまでほとんどなかった。作るものによる合成や評価手法の差が大きく、勘と経験(名人芸)がものを言う余地が大きく、一般化できるハイスループットシステムが整備されていなかったことが大きな要因としてあげられる。コンビナトリアル技術の出現は、この

状況を打開し、10年ほど前からハイスループットものづくりをビジネスとするベンチャーがアメリカに出現し（Symix社、Intematex社）、すぐにヨーロッパでも産学連携でのベンチャーがフォローした。但し、開発対象の物質・材料は異なり、アメリカでは電子材料、高速評価装置に始まり、NISTのコンビナトリアル高分子センター、マイクロエレクトロニクスに特化したベンチャーにつながり、ヨーロッパでは触媒（hte社@Hydelberg、ザール大）、高分子研究（オランダのEindhoven大など）が主流である。韓国のKAISTでも触媒研究からスタートし、日本の固体材料を取り入れたシステムが動き、国際会議を開催するなど、活動を内外にアピールしている。日本では1996年にJST-CREST研究での固体材料の先駆的研究が始まり、1999年からのNIMS/東工大連携プロジェクトの7年間で独創的技術とシステムが開発されている。プロジェクトは終了したが、それをベースにするNIMS発ベンチャーが2007年末に設立された。未だ基盤は弱いだが、企業の基礎研究部門の廃止、縮小に対処し、中国の人海戦術に対抗する新たなハイスループット技術の有用性が少しずつ浸透し、立ち上がり始めている。システム的には固体材料、デバイス開発では日本が欧米、アジアをリードし、欧米の一流大学や研究機関にも輸出されている。

## 2.2 ナノサイエンス

### 2.2.1 概観

ナノテクノロジーの学術的・技術的基盤を支えるナノサイエンスでは、原子・分子操作、表面・界面（固体表面界面、固液界面、及びナノフルイディクス・ナノトライボロジー）、自己組織化・自己集合、量子制御、及び強相関（マルチフェロイックス）、理論・シミュレーションの各中綱目に分類し、個々の最新動向について国際比較を行った。

全体として、近年上昇傾向にある研究テーマが多い。日本および米国ではその傾向が強く、欧州の進捗も大きい。しかし特に注目されるのは、これまで中国や韓国においては研究水準自体が日・米・欧と比較して若干低いテーマが多いと見られていたが、近年、研究者数と学術誌への論文投稿数が激増しており、成長力を感じさせることである。特に実用化が著しい半導体関連の「界面・表面」のテーマについては、基盤的研究はまだ少ないものの、韓国の研究開発水準および技術開発水準の上昇が目立つ。

日本および米国は、特にハードに関しては研究開発水準・技術開発水準、更に産業技術力ともに優れている。一方、シミュレーション等のソフトウェアを公開し、商用化に結び付ける産業化力では、日本を含むアジア諸国は米欧の後塵を拝しており、今後の課題となっている。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いが（半導体関連を除く）、すさまじい勢いで追い上げている。韓国では、ナノテクセンター構想に基づいてナノサイエンス分野に注力しており、今後急速な進展が予想される。以下に、具体的な綱目について概要を略記する。

原子・分子操作は、走査型プローブ顕微鏡（SPM）を発明した IBM を有する米国、ならびに顕微鏡メーカーの実力が高い日本が先端技術研究の先頭を走ってきており、現在もそのトレンドは維持されていると見てよい。また、欧州では、歴史的強みもあって、表面科学の基礎研究で斬新かつ着実な研究が進められている。膨大な数の研究者を有する中国、製品開発のスピードに長けた企業を有する韓国が今後急速に台頭する可能性は高い。

表面・界面では、半導体を中心とする真空中の研究に加え、液体中の固-液界面の研究が、評価手法の進歩と産業界の材料ならびに製造プロセス研究への必要性から活発になっており、全体的に研究水準は上昇している。日本の研究水準は、材料ならびに評価法の分野ともに高い。産業界の界面・表面への研究の必要性の認識は高まってきており、そのため産学の研究の距離は縮まりつつある。中国・韓国では引き続き研究投資が活発に行われており、研究水準が向上している。とりわけ中国の進展はすさまじいものがある。

ナノフルイディクスでは、MEMS や  $\mu$  TAS などの分野にナノテクノロジーを適用し、1分子計測技術やチップ上での組織構築などの研究が進展している。ナノトライボロジーでは、ナノレベルの空間における摩擦現象を取り扱い、ナノフルイディクスを支える重要な要素技術となっている。ナノフルイディクスは、日米が世界の研究開発をリードしているが、現状では、特に、臨床応用において少し米国がリードしている状況である。これは、米国が、NCL (Nanotechnology Characterization Laboratory) などのナノテクノロジーの前臨床研究を支援する機関をいち早く立ち上げ、ナノフルイディクスなどの臨床応

用を加速していることに起因している。また、日米のもう一つの違いは、ベンチャー企業の研究開発能力の違いにある。大企業における研究開発は日本がリードしているが、ベンチャー企業での小回りのきく研究開発の点では、米国がリードしている。

自己組織化は、自然科学をより深い次元で理解するための普遍科学的側面を持つ基盤研究であるが、昨今はバイオミメティクスと協働し材料開発においても興味深い展開がみられるようになった。従来から日米欧という三極構造があり依然大きな変化はないが、中国は帰国研究者を中核とした研究活動が活発化しており、滞日研究者の引き抜きも始まっている。10年単位の国際戦略が求められる。

量子制御に関しては、日本は特定の大学と企業が、欧米では大学、国立研究機関が進んでいる。中国、韓国は日欧米に比べると、特に実験面で遅れている。いずれの国においてもまだ基礎研究段階であり、実用化の面ではかなり先との認識がある。

遷移金属酸化物材料を中心とする強相関物質材料開発、物性研究のアクティビティは高く、特に基礎研究面での投資は、欧州で堅調、中国では著しく上昇している。銅酸化物系高温超伝導体の主に線材用途の実証研究は進んでおり産業技術力としても高い。巨大抵抗変化や熱電特性に出口としての注目が集まりやすい。

理論・シミュレーションでは、概して研究水準に、米国、欧州、日本で大差がない。しかし、その結果をソフトウェアとして公開あるいは市販する技術力は、米国が非常に進んでいる。また、そのベースは欧州発も多く、地力がある。また、ここ数年の中国の計算科学に携わる研究者数と学術誌への投稿論文数は急増している。さらに韓国企業も、エレクトロニクス・機械を中心に、積極的に計算科学を産業開発に取り込みつつある。

◆ナノサイエンスまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	半導体界面物理のレベルは世界トップレベル。グラフェン、トポロジカル絶縁体表面などの新しい話題によって研究が活況を呈しており、スピントロニクスやナノデバイスの分野に広がりを見せている。分子層、(電極)触媒、ナノ空間材料など国際的に高いレベルにある。
	技術開発水準	○	→	スピン分解光電子分光装置やマルチプローブ走査トンネル顕微鏡など世界をリードする計測技術の開発が継続的に行われている。界面・表面の課題の解決は必須であるとの認識が、材料分野で高まっている。
	産業技術力	△	→	ナノ粒子修飾シート、ナノ粒子増粘材など比較的単純な技術を活かした製品が開発されている。自己組織化による鋳型を利用した無反射高分子フィルムの実用化が目前。基礎研究の広範なポテンシャルは今後生かす余地がまだ残されている。
米国	研究水準	◎	↑	依然としてナノサイエンスの水準は高い。特に純粋基礎及び応用を見据えた基礎研究が強い。SEMATECHなどのコンソーシアムが材料科学分野で牽引している。いくつかの分野で国別発表論文数のトップを中国に譲っているが、基礎科学の力は強く、特に表面科学の分野では他国を圧倒している。
	技術開発水準	○	↑	技術のレベルは群を抜いている。研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。特に半導体分野では、SEMATECHなどのコンソーシアムが材料科学分野を牽引しており、応用技術への展開がはかられている。
	産業技術力	○	→	Intel、IBMなどの大企業を中心に産業技術力の向上が認められる。人材の流動性により、複数の企業の共同研究が行われるなど機動力がある。
欧州	研究水準	◎	↑	基礎研究については、各国に特徴的な分野や中心になる研究機関があり、世界をリードしている。国際的な存在感の大きい核になる研究機関が複数存在し、大型施設を用いる計測も含め欧州全体での研究交流・共同研究も活発である。
	技術開発水準	○	→	伝統的に計測機器の開発力に優れたものがあり、衰えを知らない。半導体に関しては、IMEC、LETIを中心に高い技術開発力を誇る。官学と企業の研究の間のバリアが低く、連携がはかられている。ドイツでは環境関連の研究の意識が高い。
	産業技術力	△	↓	大量生産やコストパフォーマンスの限界があり、生産に使うレベルには達していない。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。化学や医療分野では国際化が進んでいる。触媒等化学分野は伝統的に強いが、最近では特別な進展はない。
中国	研究水準	○	↑	国家政策として大規模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。多くの研究者のいる特徴を生かした、条件探索など活発に行われている。特に材料分野では、外国(欧米、日本)での経験を持ったレベルの高い研究者が帰国しており、研究者数、学術誌への投稿論文数は激増している。今後急速な研究水準の向上が見込まれる。
	技術開発水準	×	↑	短期的な製品化が期待できない基本技術を研究対象とした活動は顕在化していない。半導体分野においては国策として大学を中心とした研究開発の躍進がめざましく、中国はその存在感を急速に増している。しかし、技術開発力は低水準にとどまっている。まだ輸入装置・技術に頼っている部分は大きい、勢いがある。
	産業技術力	×	↑	応用の可能性を議論する段階にない。大学発のベンチャーなどが出てきているが、世界的な水準まで達していないのが現状であろう。中国にある国外のナノテク企業が高度な技術を持ち込んできている結果、人材の集積が進み、トップ企業の産業技術力は国際的レベルに到達している。
韓国	研究水準	△	↑	アメリカでの研究経験者が多く、研究体制もアメリカ型を採用しており、ナノバイオなど学際的、融合的研究が進んでいる。小数ながら世界的に高水準の研究成果が継続的に出ている。しかし、大半は日本の10年前の状況に似たテーマの研究も多く、全体としては遅れている。半導体界面の研究レベルは高いものもある。
	技術開発水準	○	↑	世界的水準の技術開発が行われている例は認められないが、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可能性がある。特に、燃料電池、二次電池、バイオセンサなどの領域で産学連携研究が活発に行われている。
	産業技術力	○	↑	サムスンを中心にグラフェンをデバイスに実用化するための研究が盛んに行われており、世界をリードしている。基礎研究より実用化志向の技術開発。情報収集能力と、製品化のスピードに長けており、研究開発から製品化までを短期間で行う強みがある。

(註1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]



## 2.2.2 中綱目ごとの比較

### (1) 原子・分子操作

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	原子操作では、室温原子間力顕微鏡 (AFM) を用いた元素識別と交換型水平・垂直原子操作による半導体原子埋め込み文字が世界のトップを走っている他、固体電解質を用いた原子スイッチの開発が代表的。分子操作では、走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた一次元重合分子細線作製のような画期的研究が行われており、単一分子の状態制御で世界トップクラス。分子膜中の単一分子を励起することで、自己組織的な構造変化を制御する研究も立ち上がりつつある。有機ナノデバイスのための要素技術となる超分子の合成については、強い底力を持っており、10・20nm 幅の高信頼性ナノ電極作製技術も完成しつつある。
	技術開発水準	△	→	株式会社ユニソクや日本電子株式会社などが原子操作可能な高性能の STM や AFM 等を開発して市販している。また、依頼による原子操作が可能な高性能装置の試作なども行っている。しかし、景気低迷、ならびに具体的製品化イメージが描きにくいことなどから、質・量ともに縮小傾向にある。
	産業技術力	×	→	STM や AFM を用いない固体電解質を用いた原子スイッチシステムの実用化を目指した開発が NIMS と NEC 等との共同研究で行われている他は、製品化を指向した活動は見受けられない。フラーレンなどナノ材料の作製・販売等にとどまっている感がある。
米国	研究水準	◎	↗	IBM Almaden、UC Berkeley、Ohio University、NIST、UC Irvine、UCLA やライス大学などグループで原子・分子の操作に関する研究が活発に行われている。医学応用を指向した細胞レベルの操作も行われている。この他、グラフェンの2枚面を併せることによる基礎物性制御、カーボンナノチューブの「ジッパーはずし」によるグラフェンナノリボンの作製、固体デバイスとしての量子コンピューター機能の開発、ウィルスを用いてのリン酸鉄 (リチウムイオン電池の正極材料) とカーボンナノチューブの複合材料化など、originality の高いものが多いのが特徴である。ナノ電極接続については善戦している。
	技術開発水準	○	→	原子操作が可能な極低温 STM を制作・販売する会社は RHK Technology, Inc. IBM Almaden など上記の世界のトップグループでは自己開発した世界トップの高性能 STM が有り、原子・分子操作によるセルオートマトンなどの演算動作実証など技術のレベルは群を抜いている。
	産業技術力	×	→	大量生産やコストパフォーマンスの限界があり、極低温 STM による原子・分子操作は可能だが、生産に使うレベルには達していない。製品化を指向した活動は見受けられない。
欧州	研究水準	◎	↗	IBM Zurich の G. Meyer グループや Freien Universität Berlin の旧 Karl-Heinz Rieder グループや University of Hamburg の Roland Wiesendanger グループや The University of Nottingham の Peter Beton グループなど STM による原子・分子操作の実績のある実験グループだけでなく、有力な理論グループも多数有る。フランス・CNRS を中心に分子コンピューティングを指向した分子操作に関する理論研究では群を抜いている。実験でも、歴史的に表面物理・化学の研究が盛んであったことも反映して、基礎に軸足を置いた着実な研究が進められている。ナノ接合計測について、1997~2005 年頃はオランダのデルフト工科大学が圧倒的な強みを誇っていたが、現在ではその計測の再現性・可視化などの問題によって、やや低迷している。しかしオランダ・英国・ドイツの研究水準は引き続き高く、オランダ Eindhoven 大学ではグラファイトの磁気モーメントが強磁性的配列をもつことの観測やその機構解明に成功し、また英国 Glasgow 大学ではゲート長 50 nm の世界最小のダイヤモンドトランジスター (テラヘルツ対応) の作製を行っている。
	技術開発水準	○	→	Omicron NanoTechnology GmbH や CreaTec Fischer & Co. GmbH や SPECS Surface Nano Analysis GmbH などの原子操作が可能な高性能の STM や AFM 等を開発して市販している有力な会社がある。主たる応用先であるデバイス関連の企業が少ないこともあり、将来的な技術である原子・分子操作に関する研究は顕在化していない。
	産業技術力	×	→	大量生産やコストパフォーマンスの限界があり、極低温 STM による原子・分子操作は可能だが、生産に使うレベルには達していない。製品化を指向した活動は見受けられない。

中国	研究水準	○	↗	海外から購入した原子操作が可能な高性能の STM や AFM 等を所有し、分子操作の研究が行われ始めている。現状は、一部のグループに限られているが、膨大な研究者数と経済力の上昇によって、極めて近い将来に少なくとも数の上では中国が世界を圧倒することは間違いない。強いのは北京大学、清華大学ほか、中国科学院所属の研究所群である。日本の AIST との共同研究で原子スケールの細い炭素鎖を作ったり、一方で理論も含めながら、例えば単一分子磁石中の電子運動についての統計力学的見解など、研究成果を出している。
	技術開発水準	×	→	短期的な製品化が期待できない本技術を研究対象とした活動は顕在化していない。フラーレン・カーボンナノチューブの作製に注力している大学発のベンチャー会社等がある、原子操作が可能な高性能の STM や AFM 等を開発して市販している会社はない。
	産業技術力	×	→	応用の可能性を議論する段階にない。原子・分子操作が出来る会社は無く、原子操作を生産に使う会社はない。製品化を指向した活動は見受けられない。
韓国	研究水準	○	↗	主に空気中や液中で使う AFM による研究が中心である。ソウル大学などを中心として、活発な研究が行われている。もともと韓国におけるナノサイエンスの実力は低かったが、近年、米国のナノサイエンス・ナノテクのメッカであるコロンビア大学やハーバード大学ほかに留学して帰国した若い PD を抜擢し、これが韓国のナノサイエンスの底上げを推進している。また産官学の連携研究が盛んである。
	技術開発水準	△	↗	サムソンがカーボンナノチューブの FED (Field emission display) に向けた応用技術開発に引き続き注力している。タッチパネルを志向する大面積グラフェンシートについても迅速な技術開発を行っている。将来技術として、脳型素子など将来の演算素子として原子・分子操作に注目し始めている。
	産業技術力	×	↗	応用の可能性はまだ議論できないがグラフェンシートをエレクトロニクス部材として大規模に作製・販売するポテンシャルができつつある。情報収集能力と、製品化のスピードに長けており、研究開発から製品化までを短期間で行う強みがある。しかし真の意味で原子・分子操作が出来る会社は無く、原子操作を生産に使う会社はない。

全体コメント：

原子・分子操作は、走査型プローブ顕微鏡 (SPM) などの原子スケールの分解能を持った顕微鏡開発の歴史と密接に関連している。SPM を発明した IBM を有する米国、ならびに顕微鏡メーカーの実力が高い日本がその先頭を走ってきた。また、原子・分子操作の舞台は物質の表面であることから、表面の研究が盛んな欧州において着実な研究が進められている。走査型トンネル顕微鏡 (STM) を用いた極低温での原子操作は、2000 年代初頭には、個々の原子を自由に操ってナノ構造体を組み立てて新物質や新デバイスを探るさらには生産する真のボトムアップの Richard P. Feynman の夢が世界中に拡がり、ナノテクノロジーに対する研究予算の集中投資が世界中で行われた。その後、極低温で STM を用いて行う原子・分子操作には、材料や温度環境や原子・分子操作現象に限界があることが判明して実用化への夢が消えた。しかし、AFM を用いた室温での元素識別と交換型水平・垂直原子操作による半導体原子埋め込み文字組立や、固体電解質を用いた原子スイッチシステムの実用化を目指した開発により、新たな夢と可能性が出てきたところである。また、最近になって、分子の自己組織化現象などを利用した新しい演算の可能性が実験的に示唆されるなどしており、第 2 のブームが到来する予兆がある。膨大な数の研究者を有する中国、製品開発のスピードに長けた企業を有する韓国が台頭する可能性が高い。いわゆるナノサイエンスという言葉のカバーする領域には若干の曖昧さがあるが、ここでは有機分子ナノやカーボンナノチューブと同様にナノサイエンスに含めていることに注意されたい。さらに上記の国々には入っていないが、イスラエル、シンガポールにおけるナノサイエンスの進展にも看過できないものがある。

(参考情報)

- [1] O. Custance, R. Perez and S. Morita, *Nature Nanotechnology*, 4, 803-810 (2009).
- [2] 和田恭雄, *化学*, 65(No. 3), 48 (2010).
- [3] S.-W. Hla, *Jpn. J. Appl. Phys.* 47, 6063-6069 (2008).
- [4] Y. Zhang, et al., *Nature*, 459, 820 (2009).
- [5] J. Tour, et al., *Nature*, 458, 872 (2009).
- [6] F. Chen, N. J. Tao, *Acc. Chem. Res.*, 42, 429 (2009).
- [7] J. Cervinka, et al., *Nature Physics*, 5, 840 (2009).
- [8] <http://www.nanowerk.com/news/newsid=10158.php>
- [9] C. Jin, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 102, 205501 (2009).
- [10] H. -B. Xue, et al., *J. Appl. Phys.*, 108, 033707 (2010).
- [11] S. Bae, et al., *Nature Nanotechnology*, 5, 574 (2010).
- [12] Seizo Morita, Franz J. Giessibl, Roland Wiesendanger (Eds.); "Noncontact Atomic Force Microscopy Volume 2", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Series: NanoScience and Technology, 2009, ISBN: 978-3-642-01494-9

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) 表面・界面（固体表面界面）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
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。グラフェン、トポロジカル絶縁体表面などの新しい話題によって研究が活況を呈している。これらは表面界面の分野だけでなくスピントロニクスやナノデバイスの分野にも関連するために研究の広がりを見せている。
	技術開発水準	○	→	研究のための先端計測装置として、スピン分解光電子分光装置やマルチプローブ走査トンネル顕微鏡など世界をリードする技術開発が継続的に行われている。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ない。
	産業技術力	○	→	計測装置メーカーは技術力の向上を図っているが、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。
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SEMATECHなどのコンソーシアムが材料科学分野で牽引し、グラフェン、トポロジカル絶縁体表面を中心に爆発的な研究が繰り返されている。デバイスに向けた基礎研究も大学や企業の研究所でも活発に行われており、応用技術への展開が主要なモチベーションになっている。
	技術開発水準	○	→	電子顕微鏡および先端的走査トンネル顕微鏡（超低温超強磁場中やパルス電圧型）など先端的装置の開発が継続的に行われている。しかし、大勢は流行の物質を扱う近視眼的な研究に終始している感がある。研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。
	産業技術力	○	→	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。大学および研究所での成果が産業に有効に結びついていないと言えないが、Intel・IBMなどの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上に貢献している。
欧州	研究水準	◎	↑	表面界面の研究は、ドイツを中心に伝統的に強い。金属表面での触媒作用に関する研究など根強いものがある。グラフェンなど新しい話題も欧州に端を発している。先端的な計測機器の開発も継続的に試みられている。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	◎	↑	ドイツの低速電子顕微鏡や走査プローブ顕微鏡、スウェーデンの高分解能電子分光器など表面界面に関する計測機器の開発力は衰えを知らない。半導体界面に関しては、IMEC、LETI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。表面界面に関する最先端の計測機器についてはメーカーの活躍が目立つ。大学との協力によって高い産業技術力を維持している。
中国	研究水準	○	↑	表面界面の多くのトピックスに関して、質・量ともに日本を凌駕する状態になった。清華大学など複数の中核となる大学が世界的な成果を出し続け、存在感は急速に増している。国家政策として大規模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。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おり、有力国の一つに数えられる日はそう遠くないと思われる。
	技術開発水準	△	→	半導体分野においては国策として大学を中心とした研究開発の躍進がめざましい。半導体デバイス分野の研究開発水準の指標として知られているIEDMにおいても中国はその存在感を急速に増している。しかし、技術開発力は低水準にとどまっている。まだ輸入装置・技術に頼っている部分が多い。基盤となる技術を持つ企業の不足によるものと考えられる。
	産業技術力	×	→	大学発のベンチャーなどが出てきているが、世界的な水準まで達していないのが現状であろう。現時点ではかなり低い。技術集約型、ハイテク型でない分野では、昨今の経済危機という逆風はあるものの、急速に立ち上がることは疑いないと思われる。

韓国	研究水準	○	→ ↗	小数ながら世界的に高水準の研究成果が継続的に出ている。しかし、大半は、日本の10年前の状況に似た陳腐化したテーマの研究も多く、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	△	→	世界的水準の技術開発が行われている例は認められないが、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可能性がある。
	産業技術力	○	↗	サムスンを中心に、グラフェンをデバイスに実用化するための研究が盛んに行われており、世界をリードしている。基礎研究より実用化志向の技術開発が盛ん。巨大半導体産業を「てこ」にして今後もイノベーションが進むと思われる。

全体コメント：

総じて言えば日米欧は3極構造で世界をリードしている。Si LSI 分野では、研究・基礎技術レベルでは、日本が界面現象の物理的理解において一歩リードしており、米韓は新材料界面開発で世界をリードしている。産業技術力においては、サムソン、Intel、IBM を背景に米韓が一歩リードしている。表面界面の分野では、グラフェンとトポロジカル絶縁体表面という新しい大きな話題によって活況を呈している。これらのトピックスは、スピントロニクスや量子効果デバイスなどの分野にも影響するもので、従来にない広がりを見せている。そのため、表面界面分野の研究者だけでなく、他分野の研究者も参入してきており、求心力のあるテーマとなっている。これらのテーマは、欧米から端を発したが、日本だけでなく中国・韓国の研究者も巻き込んでおり、各国で大小の研究予算がついているようだ。しかし、実用化されるかどうかはまだ未知数。それらの研究のための計測装置に関しては、研究室レベルでは米国が一歩リードしているが、メーカーによる製品レベルでは、日欧が世界をリードしている。

(参考情報)

- [1] International Vacuum Congress/International Conference on Surface Science (2010年8月北京開催)での研究発表および企業展示会

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) 表面・界面（固液界面）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	分子層、(電極)触媒、ナノ空間材料など国際的に研究をリードしている分野が多く、先端機器を用いた基礎研究も国際的に高いレベルにある。新領域研究「ソフト界面」、JST/CRESTの界面関連プロジェクトなどでは、物理、化学、材料・高分子など幅広い分野の界面・表面の基礎研究を推進し、これらをバイオやITデバイスなどの技術へつなぎ・展開しようという試みが活発に行われている。SPRING 8においても、引き続き、ナノテク、界面・表面関係の測定テーマが増加している。また、半導体物理は世界一のレベルであり、スピントロニクスなどでも技術への展開が図られている。しかし、全体的に国際的な地位は低下しつつある。分野間の共同研究はまだ不十分であり、また基礎研究が必ずしも“真”の基礎的、基盤的研究になっておらず、新しい研究や大きな革新的技術への展開につながっていない場合も多い。
	技術開発水準	○	→	製品・技術開発において界面・表面の課題の解決は必須であるとの認識が、材料分野で高まっている。例えば、ナノインプリント技術には、広範なナノ材料基盤技術が関わっている。アカデミックな研究の成果がまだなかなか生かされておらず、徐々に距離は縮まっている。ナノ粒子、ナノファイバーなど材料供給の研究から利用に研究がシフトし、これらナノ材料の界面・表面への集積、シート形成などが活発に研究されている。触媒、レアメタル代替物質などで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いえない。全体としてのレベルは高いが、分野間また産学間の連携が不十分であり、研究の展開がやや硬直的である。
	産業技術力	○	→	ナノ粒子修飾シート、ナノ粒子増粘材など、比較的単純な技術を活かした製品は開発されているが、基礎研究の広範なポテンシャルは生かされていない。企業の余裕もなくなり、研究開発基盤が低下しつつあるように思える。たとえば、電池については、実用化は進んでいるが効率や寿命に重要な影響を与える界面に関する基盤的な研究は少ない。
米国	研究水準	◎	↑	新しい研究、試行に対する意欲が高く、質、量ともにレベルが高い。外国人研究者（大学院学生あるいは博士研究員）の移入が大きな力となっている。分野を越えた共同研究が活発であり、新しい研究分野の創出力が高い。いくつかの分野で国際発表論文数のトップを中国に譲っているが、基礎科学の力は強く、特に表面科学の分野では他国を圧倒している。2008年には、「太陽エネルギー変換技術の開発」を長期目標に掲げたHELIOSプロジェクトがスタートし、界面を含むナノサイエンスが大きな技術要素と考えられている。また、2009年に米国化学会から新ジャーナル“Applied Materials and Interfaces”が発刊された。化学・工学・物理・生物の研究領域の雑誌と位置づけられ、電子・光学材料、界面・コロイド、高分子さらに摩擦・磨耗までカバーする。同化学会からは、界面に関する学術雑誌として、Langmuir, Nano-Letters, Nanoと既に4誌が発刊され、いずれも多くの特載掲載数と高いImpact Factorを得ており、関心の高さがわかる。
	技術開発水準	◎	↑	研究体制の流動性、研究者の意識、ベンチャー支援システムまで総合的にみて高レベルにある。特に半導体分野では、SEMATECHなどのコンソーシアムが材料科学分野を牽引しており、応用技術への展開がはかられている。また、オバマ政権によるエネルギー関連研究・開発支援を受け、電池技術など関連分野の技術開発水準が向上している。
	産業技術力	○	↑	大企業の研究開発基盤は低下しつつあるように思えるが、大学などの技術をベースにしたベンチャー企業が次々と生まれ力となっている。必ずしもイノベーションの効果が十分に波及しているとは言えないが、Intel、IBMなどの大企業を中心に緩やかな産業技術力の向上が認められる。しかし人材の流動性により、複数の企業の共同研究が行われるなど機動力がある。オバマ政権によるエネルギー関連研究・開発支援を受け、産業技術力も向上している。

欧州	研究水準	○	↗	基礎研究については、各国に特徴的な分野や中心になる研究機関があり、世界をリードしている。例えばドイツはマックスプランク研究所のコロイド界面研究所、高分子研究所など複数の専門の研究所を有し、ミュンヘン大学などの大学のセンター、ミュンスターのCeNTechなどもある。オランダ、スウェーデンなどにも国際的な存在感の大きい核になる研究機関が複数存在し、大型施設を用いる計測も含め欧州全体での研究交流・共同研究も活発である。欧州連合も基礎から応用までの研究支援に注力しており、IMEC、Letiなどのコンソーシアムをはじめとして、基礎研究の十分な支援がある。デンマークなどの小国でも理論（計算）科学の表面・界面への展開などユニークな国際レベルの研究が見られる。表面科学や電気化学界面などの分野では欧州全体の論文数は米国と肩を並べる程度であるが、EUとしての研究支援が進んでいる。
	技術開発水準	○	→	官学と企業の研究の間のバリアが低く、連携がはかられている。ドイツでは環境関連の研究の意識が高い。また、ベンチャーに対する関心も高い。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。この様に、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。
	産業技術力	△	↘	化学や医療分野では国際化が進み、特定の地域のみ限定できなくなっている。欧州をベースとするトップ企業の産業技術力は高いが、事業化に先端の成果が活用されているかは不明。日米韓と比較すると半導体関連の産業技術は弱い。触媒等化学分野は伝統的に強いが最近では特にみるべき発展はない。
中国	研究水準	◎	↗	研究拠点は主に北京や上海に集中しており、装置設備も含め質量ともに向上している。多くの研究者がいる特徴を生かした、条件探索など活発に行われている。特に材料分野では、外国（欧米、日本）での経験を持ったレベルの高い研究者が帰国しており、今後急速な研究水準の向上が見込まれる。現に国際的研究が急増しており、関連分野の多くで、国別発表論文数の1位となっている。しかし、依然として基礎的、基盤的研究をじっくりと行うというよりは応用的研究に重心があり、ナノ材料の形成など個別的なものが多い。とはいえ、Surface Science、固液界面、自己組織化単分子層といった分野でも存在感が高まっている。引き続き外国（欧米、日本）での研究経験をもったレベルの高い研究者の帰国を推進しつつあり、今後ますます研究水準の向上が見込まれる。
	技術開発水準	○	↗	独自の技術開発を生み出すためには、時間が必要と思われるが、近年の向上速度は大きい。
	産業技術力	○	↗	中国にある国外のナノテク企業が高度な技術を持ち込んできている結果、人材の集積が進み、トップ企業の産業技術力は国際的レベルに到達している。
韓国	研究水準	○	↗	アメリカでの研究経験者が多く、研究体制もアメリカ型を採用しており、ナノバイオなど学際的、融合的研究が進んでいる。第2次 Korea Nanotechnology Initiative では2015年に世界第3位を目指すナノテク研究が振興されている。ナノテクに関する学科、学生数、及び自国研究者による論文数はKNIが立ち上がった2001年から増加し続けており、今後も順調に増加していくと思われる。ナノテク特にナノバイオ関連のセンターが大学に国の支援によりいくつか設置されている。さらに引き続きエネルギー関連での研究機関（例えばGIST）の増強が進んでいる。近年の主な研究対象は、半導体、コーティング、ナノインプリントである。一方で、機器のレベルはトップクラスの大学でも不十分であり、物理化学的な理解に基づく基盤的研究はまだまだ少なく、各分野の国別論文数の順位は低く、表面科学、固液界面などの基礎的研究ではトップ10にも入っていない。
	技術開発水準	○	↗	多くの領域で基礎研究とその技術展開が行われつつある。特に、燃料電池、二次電池、バイオセンサなどの領域で産学連携研究が活発に行われている。
	産業技術力	○	→	サムソン電子やLGエレクトロニクスを中心に巨大半導体産業を形成している。

全体コメント：

半導体を中心とする真空中の研究に加え、液体中の固-液界面の研究が評価手法の進歩と産業界の材料ならびに製造プロセスの研究への必要から活発になっており、研究水準は上昇している。日本の研究水準は、材料ならびに評価法の分野ともに高い。産業界の界面・表面への研究の必要性の認識は高まってきており、そのため産学の研究の距離は縮まりつつある。ナノ粒子調製では、粒子の結晶面の特性の違いを用いる粒子形態制御、様々な基板への集積法の開発が進み、ナノテクノロジーの基盤概念としての表面・界面の重要性も高まっている。各国で研究は推進されており、中国・韓国では引き続き研究投資が活発に行われており、研究水準が向上している。とりわけ中国の進展はすさまじいものがあり、関連分野の殆どで発表論文数が国別でトップとなっている。数年前にはトップではなかった固液界面、電気化学界面でもトップとなり、もともとトップであったものはさらに2位以下との差を広げている。しかし、非常に基礎的な表面科学分野では論文数は増加しているものの米国や欧州との差は依然として大きい。日本は関連分野のほとんどで、中国、米国に次ぐ第3の地位を占めているが、勢いは感じられない。また、表面科学や電気化学界面などの基礎分野では欧州全体との比較では劣る場合もある。

(注1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(4) 表面・界面 (ナノフルイディクス・ナノトライボロジー)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	ナノフルイディクス (以下、FLD) について、大阪大学 (FIRST)、東京大学 (CREST、特別推進)、名古屋大学 (FIRST)、東北大学 (CREST) などをはじめとした多くの大学、国研で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進んでいる。最近、ナノポアと量子技術を融合することで、1分子 DNA シークエンシングを実現する成果が大阪大学で開発され、米国の 1000 ドルゲノムシークエンス技術を猛追している。 ナノトライボロジー (以下、TRB) について、TEM (透過型電子顕微鏡) にマイクロデバイスを組み込み、固体が接触したり摩擦されたりしたときの原子の構造変化を調べる研究が行われている。また、SPM (走査型プローブ顕微鏡) を利用して、グラフェンやナノチューブなどの摩擦特性の検討も行われている。
	技術開発水準	○	↑	FLD: パナソニック、東芝、東レ、富士通、日立、ソニー、NEC など半導体メーカー、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。特に、医療応用を目指した研究および太陽電池などの開発を目指した研究が進みつつある。 TRB: 近年までハードディスク開発が、企業におけるナノトライボロジーの研究を牽引していたが、最近では自動車など大きなシステムを扱う企業でもナノの視点から材料や潤滑特性の研究開発を行うようになってきている。
	産業技術力	○	↑	FLD: 最近、東芝が、DNA チップで、日本初の医療機器の認可を得るなど、ナノフルイディクスの医療応用が進みつつある。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。 TRB: 固体潤滑膜や硬質膜を形成する製膜技術や製膜装置の開発に関して、国内メーカーが積極的に取り組んでいる。また、添加剤開発に関するポテンシャルも高い。
米国	研究水準	◎	↑	FLD: ハーバード大学、スタンフォード大学、UCLA、ノースウェスタン大学など多くの大学で、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。最近、ハーバード大学からグラフェンによるナノポア構築で、1分子 DNA シークエンシングを可能にする技術が開発され、1000 ドルゲノムシークエンスの実現が加速化している。 TRB: SFA (表面間力測定装置) や SPM を用いた研究は盛んで、基板上の原子や分子を操作する研究が行われている。また、コンピュータシミュレーションでは、第一原理計算や MD (分子動力学) を用いた研究で世界一のレベルを維持している。
	技術開発水準	○	→	FLD: 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。 TRB: 計測機器の開発をきっかけとしたベンチャー企業の設立が行われている。しかし、応用研究が中心で、基礎分野の研究に関しては大学とのギャップは大きい。
	産業技術力	○	→	FLD: 新しいインプリンティング技術などが多く開発され、低コストで高品質のデバイス製造技術が開発されている。ナノマテリアルなどの素材開発などで、技術力の高さが推察されるが、大きな産業での展開力に関しては、力強さに欠けている。 TRB: 最先端の研究開発と企業の生産技術とが直接結びついていないように思われる。特に、大きな産業規模の製造業で、研究開発の展開力が欠けているように思われる。
欧州	研究水準	○	↑	FLD: オランダ・トウェンテ大学、フランス・CNRS、スウェーデン・カロリンスカ大学・ルンド大学など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。 TRB: SPM を利用して、表面の原子とプローブとの相互作用を 3 次元的に調べる研究が行われるなど、独自に開発した装置を利用してオリジナリティのあるレベルの高い研究が進められている。
	技術開発水準	△	→	FLD: いくつかのベンチャー・大企業において、研究開発が行われている。トライボロジーに関しては、企業における研開発は、全体としてあまり活発でない。また一時期、ミリピードの開発で注目を集めていたが、現在はその勢いを失いつつあるようにも見える。 TRB: 大学や公的な研究機関との共同研究が盛んである。その分、企業が単独で行う研究開発は、全体としてあまり活発では無く、注目すべき研究発表は少ない。
	産業技術力	○	→	FLD: 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。 TRB: 製膜装置メーカー、真空機器メーカー、計測機器メーカーが伝統的に強く、産業技術力の下支えをしている。

中国	研究水準	△	↗	FLD：北京大学、南京大学などいくつかの大学において基礎研究が開始されている。国際的に注目に値する研究はまだ少ない。 TRB：経済的な発展を背景に研究開発力が急速に向上している。また、2011年にはナノサイエンス及びナノテクノロジーに関する大きな国際会議を開催する計画もある。
	技術開発水準	×	→	FLD：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。 TRB：企業における研究開発は極めて低調であると思われる。
	産業技術力	×	↗	FLD：製造技術については、ほとんど確立されていない。技術のポテンシャルはある。産業技術力は全体として向上しており、そのため、この分野における技術力にもポテンシャルは感じられる。
韓国	研究水準	○	→	FLD：ソウル国立大学、KAISTを中心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。 TRB：キャッチアップ的なテーマが多いように思われる。全体として活発に研究を進めている。大学や公的研究機関のポストが少ないためか、優秀な人材が国外に流出している傾向がある。
	技術開発水準	○	↗	FLD：大企業を中心に、バイオ応用のための研究開発が進展している。国家プロジェクトが企業の研究開発力を下支えている。また戦略的に研究資源を投資する土壌があるため、今後ポテンシャルが向上していく可能性が高い。 TRB：国家プロジェクトが企業の研究開発力を下支えている。SPMの草分け的なメーカーがアメリカから韓国に本拠地を移し、レベルの高い機器開発を行っており、関連計測機器の研究開発が活発化しつつある。
	産業技術力	○	→	FLD：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。 TRB：自動車産業をはじめ、電子情報機器などの製造業を支えるのに必要十分な技術を保有していると推察される。

全体コメント：

ナノフルイディクスでは、MEMSや $\mu$ TASなどの分野にナノテクノロジーを適用し、1分子計測技術やチップ上での肺などの組織構築などの研究が進展している。ナノトライボロジーでは、ナノレベルの空間における摩擦現象を取り扱い、ナノフルイディクスを支える重要な要素技術である。ナノフルイディクス分野は、日米が世界の研究開発をリードしているが、現状では、特に、臨床応用において少し米国がリードしている状況である。これは、米国が、NCL (Nanotechnology Characterization Laboratory) などのナノテクノロジーの前臨床研究を支援する機関をいち早く立ち上げ、ナノフルイディクスなどの臨床応用を加速していることに起因している。さらに、米国ではナノフルイディクスの研究費がバイオ応用や医療応用を中心に増加傾向にあるが、日本では横ばいあるいは若干低下傾向にあるために、本研究分野における研究者層の厚さは米国のほうが勝りつつある。また、日米のもう一つの違いは、ベンチャー企業の研究開発能力の違いにある。大企業における研究開発は日本がリードしているが、ベンチャー企業での小回りのきく研究開発の点では、米国がリードしている。

世界的に見れば、SPM技術の発展がナノトライボロジーを中心としたナノサイエンスの研究開発を牽引している印象がある。力検出感度の高度化にともない、水平力の検出や表面から数Å程度離れていった時の力の検出が可能になったり、極低温で単原子や単分子の操作が行えるようになったりするなど、固体間の相互作用の検討が原子分解能で活発に進められている。また、コンピュータシミュレーションもこの分野の研究を支えており、特に炭素系のナノ材料の解析などに今後も威力を発揮していくと思われる。大学や公的研究機関が、それぞれの国や地域でこの分野の研究開発の大部分を担っているが、日本の場合は民間企業も基礎的な分野の研究開発に積極的で、それが産業技術力の維持に結びついていると考えられる。

(参考情報)

- [1] M. Tsutui, et al., *Nature Nanotechnology*, 5, 286-290 (2010).
- [2] T. Ishida et al., *Nanotechnology*, 21, 435705 (2010).
- [3] S. Garaj, et al., *Nature*, 467, 190-193 (2010).
- [4] B. Such, et al., *J. Vac. Sci. & Technol. B*, 28, C4B1 (2010).

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的研究機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(5) 自己組織化・自己集合 (理論、機構、ゆらぎ)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	科研費新学術領域「創発化学」では、散逸界面を介する超分子構造形成という国際先導的な学理がうまれつつある。ICORP「時空間秩序」では吉川研一(京大)が生物のパターン形成を説明する斬新な離散モデルを提案。いずれも従来理論を書換える可能性を秘める。
	技術開発水準	◎	↑	ノイズに強い低電圧デバイスの開発を目指して、ゆらぎを活用する確率共鳴理論を電子デバイスなどへ応用するための検討が企業でも進められている。
	産業技術力	○	↑	自己組織化による鋳型を利用した無反射高分子フィルムの実用化が目前。また、電気化学や表面技術などの学協会機関紙に自己組織化の特集が組まれるなど、産業界への自己組織化技術の浸透傾向が伺える。また、産総研・明渡純のエアロゾルデポジションは多孔質表面を自己組織的に形成する有力技術として国内外の注目を集めている。産学官の共同により研究開発は順調に進められており、産業技術力としての力は蓄えられている。
米国	研究水準	◎	↑	高度な実験環境下で樹状ナノワイヤーが見出され、数理科学者との協働で成長メカニズムが解明されている。B. Grzyborskiらの研究活動も依然活発である。学術トレンドの形成に影響力を持つGordon会議では、カオス、超分子、非線形ダイナミクス、細胞システム生物学、液晶、ソフトマターなど多数のテーマが2年ごとに開催され、各々100-200名の研究者が非公開で議論を交えている。基礎から実用的技術開発まで分野間、組織間の壁なく研究が進展しており、底力はある。競争的原理のもと、飛躍的な進展が予想される。
	技術開発水準	◎	↑	分子や材料の自己組織化のみならず、ニューラルネットやインターネットの自己組織化の研究でも一日の長がある。DARPAでは小型ロボットと組み合わせるセンサーネットワークの研究が進められている。自己集合・自己組織化を含めたナノバイオ技術の展開が技術革命を担うとの認識のもとに技術開発は着実に進んでいる。
	産業技術力	○	↑	歩行するDNA分子ロボットは、将来の医療用ナノロボットに向かう研究開発であるように思われる。ナノテクノロジーではないが、カオス理論を援用したタイル型カーペットの開発など、数理科学を背景とする自由な(時として奇抜な)商品発想力が強み。基礎研究と結びついた産業技術力は柔軟性に富んでおり、将来性を感じさせる。産業とどう結びついてゆくかは未だ手探りの状態ともいえるが、革新的な技術創出への期待が基礎研究への支援を後押ししている。
欧州	研究水準	◎	↑	大腸菌の分裂に関与するMindタンパク質の協同現象(進行波の形成)や、バイオミネラリゼーションの結晶成長理論など、基礎研究は依然堅調である。ブリュッセル学派の重鎮・ニコリス教授が散逸構造理論の基幹概念であるエントロピー生成の論文を提出したことも注目される。基礎研究の懐が深く、移流、非線形拡散、ゆらぎなどを介したパターン形成理論や分子集合体研究などの分野でも、着実な研究が進んでいる。
	技術開発水準	◎	↑	原子力(炉材など)や宇宙開発などにナノ材料とその自己組織化を活用しようという流れが見受けられる。一企業を越えた大型技術や採算性を越えた用途に向けた技術開発の流れがある。分子から生物まで広い範囲で協力的に研究開発が効率的に行われている。分野間連携に対し国から予算が確保され、組織的にも連携が強化されている。
	産業技術力	○	↑	汚れない表面や摩擦低減表面などの製品開発力に依然強みを発揮。英国、ドイツを中心に産学連携が予算的に保証され、活発化している。
中国	研究水準	○	↑	研究所を設置して帰国者を遇するなど、欧米(特に米)との連携が年々強化されている。日欧米三極に比肩するのは時間の問題で、国際シンポジウムの自国内開催も活発化している。
	技術開発水準	○	↑	特許庁の調査によれば、自己組織化に関連する中国の特許出願数は欧州を抜いて日米に次いで第3位(1990-2008年)。2007年以降の出願数が急増(但し自国内)。
	産業技術力	△	→	ナノ材料やコンポジット材料が主体と思われる。

韓国	研究水準	○	↑	ノーベル賞受賞者の G. Ertl の名を冠する Ertl センター (GIST (光州) は国際アドバイザーとバーチャルラボを構成し、レベルの高い研究に取り組んでいる。欧米で学んだ研究者が大学や研究所で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報告されている。まだ組織化されていないが、力をつけている。
	技術開発水準	○	↑	上記 Ertl センターでは、自己組織化理論を援用した表面科学をもとに、韓国内の企業と連携して次世代電池の開発などに取り組んでいる。
	産業技術力	△	↑	日本の技術に関心が高い。高分子ハニカム膜の応用研究も散見され、AD (エアロゾルデポジション) 法の技術動向も企業を中心にフォローしている模様。

全体コメント：

自己組織化は自然科学をより深い次元で理解するための普遍科学的側面を持つ基盤研究であるが、昨今はバイオミメティクスと協働し材料開発においても興味深い展開がみられるようになった。従来から日米欧という三極構造があり依然大きな変化はないが、中国は帰国研究者を中核とした研究活動が活発化しており、滞日研究者の引き抜きも始まっている。10年単位の国際戦略が求められるところである。

今後のキーワードとしては、分野間の連携がポイントとなる。多岐にわたる協力体制が新しい技術開発に必須である。

(参考情報)

- [1] 創発化学の HP : <http://www-souhatsu.sanken.osaka-u.ac.jp/>
- [2] ICORP 「時空間秩序」 : [http://www.jst.go.jp/icorp/jpn/current\\_proj/spatio.html](http://www.jst.go.jp/icorp/jpn/current_proj/spatio.html)  
H. Nagahara et al., PRE 80, 021906 (2009).
- [3] [http://www.aist.go.jp/aist\\_j/aistinfo/annual/2008/highlight\\_p18/highlight\\_p18.html](http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/annual/2008/highlight_p18/highlight_p18.html)
- [4] Jin Song の HP : <http://jin.chem.wisc.edu/publications.htm>
- [5] Bartosz A. Grzybowski の HP: <http://dysa.northwestern.edu/>  
Grzybowski は日本の流れを受けて「自己組織化対自己集合？」という WS (2007年) を企画。 <http://www.mpiyks-dresden.mpg.de/~patfor07/>
- [6] GRC HP: <http://www.grc.org/> プログラムは学術誌 Science にも掲載。
- [7] <http://www.the-scientist.com/blog/display/57400/>
- [8] GRC のプログラム参照：  
<http://www.grc.org/programs.aspx?year=2010&program=oscillat>
- [9] G. Nicolis, "Transformation properties of entropy production," PRE 83, 011112 (2011).
- [10] 例えば : <http://www.icce-nano.org/>
- [11] 特許庁・平成 22 年度重点八分野の特許出願状況調査ーナノテクノロジー・材料 分野ー
- [12] Ertl Center HP : <http://env1.gist.ac.kr/ertl/new/ERTLCenter/>

(註 1) フェーズ [ 研究水準 : 大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準 : 企業における研究開発のレベル、産業技術力 : 企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↑ : 上昇傾向、→ : 現状維持、↓ : 下降傾向]

(6) 量子制御

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↗	東大、阪大、東北大、東工大、北大、慶大、国立情報研、NECなどで活発に行われていて、基礎研究としてのレベルは極めて高い。世界でトップ10グループを選ぶとすると、そこに列挙できるのは東大と東工大の半導体量子ビットとNECの超伝導量子ビットであろう。スピンを用いた量子ビット研究は欧米の大学と肩を並べるまでになった。
	技術開発水準	◎	↗	NECの超伝導量子ビット研究は世界トップでNTTが追随している。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
米国	研究水準	◎	↗	UCSB、Yale、Harvard、Stanford、MIT、Princeton、NISTなど主だった大学や研究機関で活発に行われており、特にUCSB、Yale、の超伝導量子ビット、NISTのイオントラップ量子ビットが世界トップ10に入るであろう。
	技術開発水準	○	↗	IBMがDARPAの大きな予算を得て研究を進めている。またHYPRESSが超伝導量子ビット用のファンドリーサービスを始めている。
	産業技術力	△	→	カナダのベンチャーであるD-Waveが、断熱量子演算回路を売り出すと宣伝しているが、その信頼性は低い。それ以外の企業では、生産はまだ全く考えていない。
欧州	研究水準	◎	↗	デルフト工科大を筆頭にCEAサックレー、インスブルック大、ミュンヘン工科大、シュツットガルト大、マックスプランク研、チャルマース大、ルンド大などが基礎研究に力を入れている。単一量子ビットの世界トップ10にはデルフト工科大、インスブルック大が入るであろう。主だった各国に必ず一つは大学で非常にレベルの高いものがある。
	技術開発水準	△	→	ごく一部のベンチャーで量子暗号を開発している以外、企業での研究は盛んではない。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
中国	研究水準	△	↗	理論面が先行していて、実験はまだこれからという状況である。
	技術開発水準	×	→	企業では、まだ全く研究されていない。
	産業技術力	×	→	まだ産業は、量子コンピュータなどを生産する技術レベルに達していない。
韓国	研究水準	△	→	理論面が先行していて、実験はまだこれからという状況である。
	技術開発水準	△	→	企業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。
<p>全体コメント：                      日本は特定の大学と企業が、欧米では大学、国立研究機関が進んでいる。中国、韓国は日欧米に比べると、特に実験面で大きく遅れている。いずれの国においてもまだ基礎研究段階であり、実用化の面ではかなり先であると思われる。</p>				

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

(7) 強相関

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↑	高温超伝導（銅系、鉄系）、巨大磁気抵抗、マルチフェロイクスなど先導的な研究を行っており、また基礎研究プロジェクトも厚い。
	技術開発水準	○	↑	強相関電子材料のうち、熱電材料の研究、および、遷移金属酸化物をベースとする抵抗変化型メモリー（ReRAM）の基本動作研究は盛ん。
	産業技術力	○	↑	ReRAM について、DRAM と NAND フラッシュ・メモリの間の性能差を埋めるキャッシュ・メモリなどの用途を狙って、日本半導体大手と官学との共同開発が進行中。高温超伝導材料も含めれば、線材の実証試験が進行中。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究の実績・ポテンシャルは、強相関分野でも依然として高い。強相関ナノ物性、鉄系超伝導物質の研究も高水準。
	技術開発水準	○	↑	強相関系の金属・絶縁体転移を基本とするモットロニクスの研究が進行中である。遷移金属酸化物をベースとする抵抗変化型メモリー（ReRAM）の基本動作研究も盛ん。
	産業技術力	△	↑	ReRAM については、ベンチャー企業の発信、製品リリース情報が目立ったが、実現していない。高温超伝導材料も含めれば、線材開発の実証試験が進行中。
欧州	研究水準	◎	↑	強相関磁性に関与した研究では、卓越した研究水準を保っている。また、遷移金属酸化物の固体化学にも強い伝統があり、新規の物質開発力も強い。基礎プロジェクトへの投資、手当ても厚い。
	技術開発水準	○	↑	強相関電子材料のうち、熱電材料の研究、および、遷移金属酸化物をベースとする抵抗変化型メモリー（ReRAM）の基本動作研究は盛ん。
	産業技術力	×	→	現在は基礎研究フェーズで産業技術化の動向はない。
中国	研究水準	◎	↑	物性科学基礎としての強相関系の研究およびその投資は大変アクティブ。特に、鉄系超伝導体研究では世界をリードしており、その他の基礎研究も水準が向上中。
	技術開発水準	×	→	現在、技術開発的な側面は少ない。
	産業技術力	×	→	現在は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	○	↑	物性科学基礎としての強相関系の研究は盛んであり、中心大学にセンターが設立され、プロジェクト研究も盛ん。
	技術開発水準	○	↑	遷移金属酸化物をベースとする抵抗変化型メモリー（ReRAM）の基本動作研究は盛ん。
	産業技術力	△	↑	ReRAM 開発については、実証研究が進行中か。
インド	研究水準	○	↑	遷移金属酸化物の合成、物性研究に強い伝統があり、またナノ材料化、ナノ物性の研究もアクティブ。
	技術開発水準	△	↑	熱電材料、磁気冷凍材料の開発研究が進行中。
	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していない。
<p>全体コメント：</p> <p>遷移金属酸化物材料を中心とする物質材料開発、物性研究のアクティビティは高く、特に基礎研究面での投資は、欧州で堅調、中国では著しく上昇している。銅酸化物系高温超伝導体の主に線材用途の実証研究は進んでおり産業技術力としても高いが、これは上記の現状評価からは除き、また磁性材料も広い意味では強相関材料として近年再評価されるものも多いが、ここでは、主に巨大抵抗変化や熱電特性の研究に評価を絞った。</p>				

(注1) フェーズ[研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(注2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(8) 理論・シミュレーション

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	↘	基礎研究、応用研究は進んでおり、一部の大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフト、デバイスシミュレーション等 TCAD(Technology CAD)の基礎的研究等は世界のトップレベルにある。第一原理計算を中心とした材料物性に関する計算科学分野は十分な研究者人口があるが、ナノエレ等の応用分野に直結する TCAD 等工学分野の研究者数は、欧米に比べてかなり貧弱である。
	技術開発水準	△	→	みずほ総研、数理システム、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、基本フレームワークは欧米に追従したものが多く、世界を先導するものになっていない。国内でもシェアは未だ小さい。また、一部企業が韓国企業に買収されるなど、国内の技術開発力が国外に流出している。
	産業技術力	△	↘	計算科学を材料開発に応用した研究においては、産業界全体の意識は高く、商用計算ソフトの普及率は世界一である。しかしながら、日本で開発された計算科学ソフトは商業ベースになっておらず、日本企業、大学の多くが欧米製計算科学ソフトを使用している。一方、半導体関連企業では、これまで自社開発してきた TCAD を維持する余力が無く、ごく一部（東芝およびルネサス）を除いて壊滅状態にある。国費を投入して Selete で開発されたシミュレータも各社で有効活用されているとは言い難い。
米国	研究水準	◎	→	大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界トップレベル。計算理論、計算科学や TCAD 等工学ソフトを用いた研究を大学での重要かつ効果的な教育手段として位置づけたうえで、活発な研究が進められている。有力大学では、自国の TCAD ベンダーと連携して研究が進められている。国からの資金も日本より格段に多く、歴史的に強い。あらゆる研究機関が、アジア諸国からの優秀な留学生を豊富に受け入れており、人材の層が極めて厚い。
	技術開発水準	◎	→	計算の高速化と大規模化について、ハードの面だけでなく、プログラムコードの改良についても大学発ベンチャーを中心として抜き出ている。TCAD ベンダーである Synopsis, Silvaco が世界的シェアをもっており、欧米の有力大学との連携によって研究開発力を維持している。また、ハーバード大 Karplus らによる CHARMM や、カリフォルニア大 Kollman による AMBER は有名。1983 年に発表された CHARMM 原著論文の引用件数はすでに 8000 回を超える。また、2006 年の ANSYS 社による Fluent 社買収や、2010 年の Accelrys 社と Symyx Technologies 社の合併など、再編や大規模化の流れの中で企業が成長し世界をリードしている。
	産業技術力	◎	→	シミュレーションのソフトは多くが米国製である。量子論における Gaussian, DMol、連続体力学における ANSYS など、世界標準となっている計算科学、TCAD ソフトも多い。
欧州	研究水準	◎	→	米国とほぼ同等。歴史的に基礎研究を重視しており、大学や研究機関における新たな計算理論、計算科学ソフトの開発は世界一である。量子化学と古典分子動力学を融合した第一原理分子動力学計算の応用研究が世界的に活発化しているが、その原著は 1985 年のイタリアの研究グループによって提案された Car-Parrinello 法である。また、米国同様に、TCAD 工学ソフトを用いた研究を大学での重要な教育手段として位置づけており、活発な研究開発が進められている。特に、EU の有力大学では TCAD ベンダーと連携して研究開発をしている場合が多い。国からの研究資金も日本より格段に多い。
	技術開発水準	◎	→	量子化学の分野は伝統的に強く、アムステルダム自由大学の ADF やウィーン大学の VASP が世界的に普及している。また最近では、90 年代に製薬大手の独 Bayer 社が開発した COSMO-RS 法に基づく各種の物性推算ソフトウェアも世界的に普及し始めている。しかし、分子シミュレーションの CASTEP や、デバイスシミュレーション分野で ETH 発の ISE 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きている。
	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、世界で広く使用されているものは多い。但し、米国に比較すると少し遅れている。VASP はこの種の計算の中で、世界標準になりつつある。工学分野では、米国製の TCAD が使用されている。ただし、もともとは欧州発のものも多い。

中国	研究水準	○	↗	欧米からの帰国研究者を中心に、研究のレベルは急速に高まり、研究者の数も爆発的に増えている。国からの豊富な研究資金の投入が計算科学の分野に対して行われており、特に機械・エレクトロニクス・電池分野における計算科学の研究レベルの進展は質・量ともに著しく、日本を凌駕する勢いがある。ただし、ソフトウェアパッケージを利用した研究が多く、独創性のある自立した研究には今一步の感もある。
	技術開発水準	△	↗	量子論ソフトウェアの開発は行われていないが、機械や原子力分野では、マルチスケールを意識したモンテカルロ法や分子動力学法などの独自ソフトの開発が進んでいる。
	産業技術力	×	↗	欧米製計算科学ソフトウェアの普及が進んでいる。自国開発ソフトは商業ベースとなっていない。しかしながら、欧米に多くの中国出身の研究者がいることを考慮すると、今後急速にレベルアップすることが考えられる。
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研究が積極的に進められている。特に、エレクトロニクス・機械分野での進展が著しい。世界的に著名な国際会議ですぐれた研究成果が発表され始めている。ソフトウェアパッケージに頼らず、自家製シミュレータを用いた研究も多いことから、今後急速にレベルアップする可能性がある。
	技術開発水準	△	↗	企業の多くが欧米製計算科学ソフトを使用し、企業独自のソフトウェア開発は、全く行われていなかったが、最近、Samsungによる日本のソフト企業(TCAD-I)の買収により、Samsung内でTCADソフトウェアの整備が急速に進められている。実デバイスの研究開発と歩調を合わせた研究が進められることから、近い将来、急速にレベルアップすることが予想される。
	産業技術力	×	↗	計算科学ソフトウェアは全く産業になっていないが、大手エレクトロニクス産業を中心に計算科学への意識は高く、計算ソフトを利用した材料開発が積極的に推進されている。企業内(Samsung)でTCADソフトの研究開発が始まったものの、国内に計算科学ソフトウェアの開発産業は未だ無い状況である。

全体コメント：

量子論の原理のみに基づく、いわゆる第一原理法による電子状態計算により、材料の電気的、磁氣的、光学的、力学的、化学的性質が実験的情報なしに精確に計算できるようになってきた。計算精度や手法に於いて、たとえば励起状態や強相関系を精度良く計算する方法など未解決の問題もあり、更なる手法開発も必要であるが、一方で計算精度や手法について競う時代は一段落し、計算用のソフトが市販あるいは公開されて、特別な専門家でも利用できるようになってきたとも言える。研究水準としては、米国、欧州、日本で大差がない。しかし、その結果をソフトウェアとして公開あるいは市販する技術力は、米国が非常に進んでいる。多くの市販ソフトが米国製である。ソフトウェアの市販では、大学で開発されたプログラムをベースに市販することが多いが、そのベースとしては欧州発も多い。ソフトの市販や公開という点では、日本を始めとしてアジアの国は弱い。一つには言語の問題もあると考えられる。ネットワークで世界が結ばれている中で、フリーや市販を問わず優秀なソフトだけが生き残る。しかしながら、メニューなどの英語化を進めず国内利用者だけを対象とすることが多い日本製ソフトでは、世界にユーザー層を広げることができない。そのためソフトに対する世界からの信頼が得られず、それが反映されて国内企業での利用も中々進展しないという現状に至っている。

ここ数年の中国の計算科学に携わる研究者数の増加と学術誌への投稿論文数の急速な増加は目を見張るものがある。また韓国企業も、エレクトロニクス・機械分野を中心に、積極的に計算科学を産業開発に取り込みつつある。

一方、日本ではSPring8やKEK-PFなどの放射光を用いたX線解析、J-PARCなどでの超高分解能中性子回折、各所に設置が進められているサブオングストローム分解能での走査透過型電子顕微鏡および電子分光装置、超高分解能表面分析装置、超高感度核磁気共鳴装置など、ナノテクノロジー・材料分野の最先端評価装置の技術革新・インフラ整備の面で我が国は世界をリードしている。これに伴い、これら評価装置の解析に計算科学を積極的に取り入れ効率を高める研究が発展しつつある。このような計算科学は我が国の強みになる可能性がある。また、同時に実験者にとって使いやすくアプリケーションを強く意識した計算ソフトウェアの開発にも大きな期待が寄せられている。しかしながら、いずれも国際化を強く意識した開発を推し進めなければ広くは普及せず、やがては欧米に追いつかれ追い越される恐れがある。また、工学分野の代表である最先端デバイス開発のためのTCADソフトにおいても、米国製のソフトウェアの独占状態が続いている。特に懸念されることは、他国での認識と大きく異なり、TCAD関連研究の重要性に対する認識が大学や日本企業で希薄となっていることである。メモリ市場を席巻している韓国企業が、実デバイス研究開発の効率化に向けて本格的にTCADの研究体制の整備を進めていることは注目に値する。

(註1) フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

## 2.2.3 注目すべき研究開発動向

### (1) 原子・分子操作

半導体トランジスタの微細化限界が近づくとつれ、脳型コンピューターなど新しい演算原理に基づくコンピューター開発に関する研究が本格化すると予測される。その結果、従来、科学的興味によって推進されてきた原子・分子操作に関する研究が、応用面から加速される可能性が高まってきた。例えば、米国では、原子の移動を制御して動作する素子を用いた人工知能に関する研究が産学連携で始まっている。いまや世界の半導体メーカーである韓国企業も、脳型演算素子などに多大なる興味を示しているとの情報もある。また、日本でも、分子操作によって演算らしき動作を始める分子集団が観測されたとの報告が相次いでいる。原子・分子間の相互作用を利用した演算は、従来、超高真空・極低温下で行われるのが常であった。これが、適切な分子の合成によって大気中・室温で可能になりつつある。原理実証は、今後もプローブ顕微鏡を用いた手法が中心になると思われるが、物理、計測、化学、コンピューター科学など、複数分野の融合によって、飛躍的な進歩が遂げられる可能性が出てきた。物理、計測、化学の分野では、日本のポテンシャルは高く、原子・分子操作でも最先端にある。しかしながら、次世代を指向したコンピューター科学の分野では、日本における研究者の母数は圧倒的に少ない。最終製品で負けないためにも、バランスの取れた投資が求められる。注目すべき動向として、次の点が挙げられる。

#### 室温原子操作でナノテクノロジーのボトムアップ

極低温で STM を用いて行う原子・分子操作には、材料や温度環境や原子・分子操作現象に限界があることが判明して、実用化への夢が消えた。しかし、AFM を用いた室温での元素識別と交換型水平・垂直原子操作による半導体原子埋め込み文字組立<sup>[1]</sup>や、固体電解質を用いた原子スイッチシステムの実用化を目指した開発により、実用化への新たな夢と可能性が出てきた。

#### 原子操作の実験に Engineering (工学) という言葉の使用

Science Tool と考えられてきた原子操作の実験に、Engineered Atomic Structures や Single Molecule Engineering や Engineered CoCu<sub>n</sub> Nanostructures などの言葉が使われ始めて、原子操作が科学だけでなく工学にも広がり始めている。ただし、これらの実験は全て低温で行われている。

#### 原子操作と非弾性トンネル分光、もしくはスピン偏極 STM の組み合わせによるスピン研究への応用

原子操作で原子を並べて、構造を作って、非弾性トンネル振動励起 (STM-IETS) を組み合わせたスピンプリップ分光<sup>[2]</sup>、あるいはスピン偏極 STM (SP-STM)<sup>[3]</sup> でスピン相互作用をはかるスピンの研究が始まってきている。

この他、水平原子操作と IETS 原子操作で化学反応の step-by-step 制御<sup>[4]</sup>、化学結合や局所電子励起による原子操作時の原子のダイナミクスを STM のノイズで観測が可能となり<sup>[5]</sup>、非弾性トンネル分光による振動励起・振動分光と局所電子状態密度計測が一体化し

てきた<sup>[6]</sup>。

近年ナノサイエンスの境界が広がりを見せているところにも注目したい。ナノサイエンス・ナノテクの真髄とも言えるボトムアップ型の有機分子を用いた研究成果が相次いでいる。2002年に有機分子ナノテクデバイスのランドマークとなる論文が米国で相次いで発表された<sup>[7, 8]</sup>が、その後、ナノ電極接続についての疑義が持たれ、同様の研究を行っていたオランダ発のナノサイエンス研究も測定結果の再現性に悩むことにより、このラインの研究は2005年あたりにいったん鎮静化する。比較的最近になって、高い信頼性を持つ10-20 nm幅のナノ電極作製が可能になってきたこと<sup>[9]</sup>、メカニカルブレークジャンクション法による単一分子の電気伝導測定が目鼻がつき、その結果を用いて伝導機構を議論するスタートラインに立つことができるようになってきた<sup>[10]</sup>ところである。このトレンドはグローバルな視点から見てもほぼ同じである<sup>[11]</sup>。一方で、実験の解釈を行うに足る欠陥の少ないカーボンナノチューブを、つくばの産総研（飯島グループ）を中心にある程度大量に作製することができるようになったのも最近である<sup>[12]</sup>。この様に周辺要素技術の確立によって、真の意味でナノサイエンス・ナノテク研究における原子・分子相操作を行えるプラットフォームが整いつつある。

我が国は個々の要素技術開発に優れているが、必ずしもこれらが有機的に結びついて、ナノサイエンスの全般的な押し上げを果たせていない点がある。一方、2004年に発表された剥離法によるグラフェンの作製及びそれに直結した2次元物理学の革新的進歩<sup>[13, 14]</sup>はナノサイエンスの幅を広げたばかりではなく、そのタッチパネルへの応用展開などと急速に結びつき、主に韓国を中心に30インチのグラフェンシートの量産体制が確立されつつある<sup>[15]</sup>。この韓国の急成長、及び中国の猛追には目を見張るものがある。またこれらの国では、産官学の連携が比較的うまく機能していることも見逃せない。

(参考情報)

- [1] Y. Sugimoto, et al., *Science*, 322, 413 (2008).
- [2] C. F. Hirjibehedin, et al., *Science*, 312, 1021 (2006).
- [3] D. Serrate, et al., *Nature Nanotechnology*, 5, 350 (2010).
- [4] S.-W. Hla, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 85, 2777 (2000).
- [5] J. A. Stroscio, et al., *Science*, 313, 948 (2006).
- [6] S. Katano, et al., *Science*, 316, 1883 (2007).
- [7] J. Park, et al., *Nature*, 417, 722 (2002).
- [8] W. Liang, et al., *Nature*, 417, 725 (2002).
- [9] 和田恭雄, *化学*, 65(No. 3), 48 (2010).
- [10] R. Yamada, et al., *Nano Lett.*, 8, 1237 (2008).
- [11] F. Chen, N. J. Tao, *Acc. Chem. Res.*, 42, 429 (2009).
- [12] 齋藤ら, *日本物理学会誌*, 62, 591 (2007).
- [13] K. S. Novoselov, A. K. Geim, et al., *Science*, 306, 666 (2004).
- [14] K. S. Novoselov, A. K. Geim, et al., *Nature*, 438, 197 (2005).
- [15] S. Bae, et al., *Nature Nanotechnology*, 5, 574 (2010).

## (2) 表面・界面（固体表面界面）

グラフェンは2010年のノーベル物理学賞の対象となったが、表面界面の分野の格好の研究対象となっている。最近では、その基礎物性だけでなく、デバイスへの実用化の研究も始まっており、その点では韓国が一步リードしている。日本では基礎的な研究がほとん

どであり、実用化研究が手薄になっているように見える。

トポロジカル絶縁体は米国で発見され、世界中で爆発的に研究が現在行われている。表面界面の分野だけでなく、スピントロニクス分野への応用展開も期待されており、異分野間の交流も盛んになってきている。しかし、まだ基礎研究の段階であり、まだまだ未知数の部分が多い。しかし、表面界面の分野で培われてきた結晶育成・製膜技術や計測技術が有効利用されており、日本はその点で世界をリードしている。

表面界面に関する計測技術として、最近注目されているのがスピン分解電子分光装置、先端的走査プローブ装置（超低温超強磁場中で動作可能、パルス電圧印加可能、フェムトレーザー照射可能、複数プローブ型など）、低速電子顕微鏡などであるが、日欧がその技術開発に伝統的に強く、産業化も進んでいる。米国では、研究室レベルでの開発能力は極めて高いが、それを産業化する企業がない。

中国は、計測装置を自前で開発する技術力はまだないが、高価な装置を日欧などから盛んに輸入して、研究を活発に進めている。それによって科学論文レベルでは質・量ともに日本を凌駕するまでになった。表面界面・真空に関連する産業の技術レベルは見るものはまだ無いが、成長速度と意欲はすさまじいものがある。

半導体デバイス分野の研究開発水準の指標として知られている International Electron Device Meeting (IEDM) においては、特にバイオチップ等の発表が大きく増加した。従来のメモリやロジックではない、新しい応用に向けて電子デバイス技術が舵を切る兆候がみられる。巨大市場を持つ従来のメモリやロジックと同時にバイオセンサ等の新しい技術に向けた界面研究は今後必要となることは疑いない。なお 2010 年の IEDM において注目すべきことは、バイオチップ関連の発表が大きく増加したが、真の生化学的知識を前提とせず、バイオセンサへの応用を試みている発表が散見された。第一線の生化学者との有機的な連携を行うことで日本が優位に立てる分野である。

### (3) 表面・界面（固液界面）

表面・界面は太陽電池、燃料電池、二次電池といったエネルギー変換デバイスの心臓部であり、効率や寿命の向上を目指して、関連界面に関する研究が各国で活発に行われている。しかし、これらの過程は固液、固々界面などの埋もれた界面で起こっており、そのような界面の局所のみを **under operation** で、しかも液体や固体を通して動的にプローブすることは非常に困難である。水平分解能が非常に高い走査プローブ顕微鏡は主として最外層の情報のみが得られ、また時間分解能が低い。さらに固々界面に適用することはできない。埋もれた界面幾何構造の観察という観点からはシンクロトロン放射光（X線）や中性子を用いた計測法などの構造を反応が起こっているその場で実時間追跡する技術の開発が進んでいる。一方、界面の電子構造や分子構造の測定には非線形分光法が有効であるが、水平分解能と時間分解能が低く、それらの向上のための装置開発が行われている。

表面・界面をキーワードとして論文数の推移を見てみると、微粒子集積、界面化学について、米国、欧州では論文数が安定して増加しており、中国の増加が著しい傾向にある。

一方、韓国、日本の増加はより緩やかであり、最近の韓国の増加が日本より著しい。コーティング、表面・界面については、ほぼ類似の傾向にある。

#### (4) 表面・界面 (ナノフルイディクス・ナノトライボロジー)

ナノフルイディクスでは、ハーバード大学の Donald E. Ingber のグループがマイクロチップ上に肺と同じ機能を有する組織を再構築し、肺の呼吸機能の再現や、肺に様々な薬物を作用させたときの機能評価を可能にするデバイスを世界で初めて開発し、肺呼吸したときの細胞内の変化を組織レベルで計測することにも成功している<sup>[1]</sup>。本研究では、マイクロチップ中に肺組織を形成する細胞群を形成し、マイクロチャンネル中の気体の流れを制御することにより肺呼吸を巧みに再現した。さらに、肺呼吸時に起こる気体中の物質の肺血管への取り込みを実現するなど、肺の機能を組織レベルでマイクロチップ上に再現した。また、インターロイキンなどを投与した際に起こる肺の機能変化を計測することに成功したことは、動物実験を通り越して、チップで創薬や再生医療を可能にする研究である。この研究を契機に、新たな研究領域が開拓されると思われる。

MEMS (micro electromechanical systems) は高い固有振動数を有していることから、振動による擾乱に対してロバストで、微小な力計測に適している。しかしながら、MEMS 技術を利用したナノサイエンスに関する研究は、ナノトライボロジーに関して言えば、近年までは MEMS を利用することが目的となっているような報告主流であった。Ishida らは、静電気力で駆動される MEMS アクチュエータを TEM (透過型電子顕微鏡) に組み込み、シリコンが接触したときに結合が形成される様子を観察することに成功した<sup>[2]</sup>。初期状態ではアモルファス状であったシリコンが、結合が形成されるとアモルファス状態から多結晶に変化していくことを TEM による観察と電子線回折によって明らかにしている。また、同グループでは、同様な機構を用いて接触面に摩擦駆動を与えたときの、塑性変形の様子も調べている。TEM ではサンプルを設置する空間に制限があり、サンプル同士を接触させる機構を組み込むことに成功した研究は少なかったが、MEMS では機構のサイズが小さいために、分析機器等への組み込みに適している。ナノスケールの計測のための MEMS デバイスの需要は今後高まっていくと予想される。

(参考情報)

[1] D. Huh, et al., *Science*, 328, 1662-1668 (2010).

[2] T. Ishida T, et al., *Nanotechnology*, 21, 435705 (2010).

#### (5) 自己組織化・自己集合

##### <階層構造の創発、技術の融合>

そもそも生物に学ぶことから始まった自己組織化の研究は、生物の持つ階層性に注目し再び生物の問題に回帰しつつあるようにも見える。構成要素の単なる秩序化にとどまらず、要素が組織化することによって新しい機能や物性を発現する、階層の創発現象に関心が寄せられるようになり、数理学のみならず、熱力学的理論、超分子科学、材料科学、ロボティクスなど様々な分野で協働体制を模索する動きが始まっている。ナノテクノロジーの必然として、MEMS・NEMS とボトムアップ技術の協働は進むべくして

進むであろう。一方では、トップダウンとして上位階層を与える融合技術では実現が難しい医療用ナノロボットのような開発課題も透けて見えるようになりつつある。なお、国内における自己組織化技術を総覧できる資料としては『自己組織化ハンドブック』（国武豊喜監修、NTS（2009））がある。

#### <生命システムの理解>

複雑系の理論とモデル生物を使った実験を組み合わせるにより自己集合・自己組織化について JST・ERATO の研究で有用な情報が得られており、今後の展開が膨らんでいる。これまでも生体分子の自己集合、自己組織化の特性を基礎にした生命の理解はなされてきたが、それとは全く異なり生命システムの観点から、生命の持っている基本的複製過程や発生過程、適応、進化が現れるのに最低限満たすべき普遍的論理を明らかにし、理論的な定式化を行っている。ゆらぎを基盤に細胞成長などの性質で発生、適応、進化など生命の基本的なしくみが理論的実験的に説明されることを示した。定量生物学の基礎ツールの開発から、ネットワークシステムの自己組織化・自己集合の理解まで、大きな貢献をしている。生命から物理、情報までを結び、広く応用可能な注目すべき研究である。

## (6) 量子制御

#### <量子ビットの結合制御>

超伝導量子ビットと共振器や導波路中の光子とコヒーレントに結合させる研究が近年進んでいる。このような人工原子（超伝導量子ビット）を使った混合量子系は、これまでの量子光学において自然原子を使って行われてきた多くの実験を再現できる。人工原子は自然原子より遥かに強く光子と結合するので、単一の人工原子だけを使ったレーザー発振や電磁誘導透明化のような効果が実現している。同様な光子共振器を使った技術は、量子ビット間の結合のオンオフを可能にするので、量子コンピュータの開発において重要な意味を持つ。既に3量子ビット程度の超伝導量子ビット系の制御が複数の研究室で実現している。この結合方式は有効であるが、量子ビットの数をスケールアップする場合、このような結合方式でどのようなアーキテクチャが考えられるかまだ解決していない。またそれ以外にも、非線形結合器を使った量子ビットの結合法も研究が進んでいる。このような方式は、ビット数のスケールアップに比較的有利であることが考えられる。超伝導量子ビットの研究は特に急速に進展していて、独立した量子ビットファウンドリーが米国、ヨーロッパ、日本で立ち上がりつつあることを特記する。このようなファウンドリーでもし高性能な量子ビット作ることに成功すると、近い将来、かなりの集積規模を持つ複雑な超伝導量子ビット集積回路が実現するであろう。

米国 DARPA の研究資金は、超伝導量子ビットとイオントラップ量子ビットの研究により多く投資されるようになってきた。

## (7) 強相関

### <強相関機能研究の展開>

強相関機能の典型例としては、外部からの刺激（電氣的、磁氣的、熱的）に応じて電子物性、特に伝導性、磁性、光学特性など、が劇的に変化する機能が挙げられる。惑星探査機「はやぶさ」の窓材にも採用されたペロブスカイト型 Mn 酸化物を用いた放射率可変素子（Smrat Radiation Device、温度による金属－電荷整列絶縁体転移により赤外光透過性を調整）はその典型例と言えよう。一方、抵抗変化を電気パルスで制御する ReRAM（抵抗変化型メモリ）は、産業技術化が一段と進み始めたようである。一方、将来のより高度な電気情報処理も視野におく強相関接合、強相関界面の研究は、量子ビーム技術（軌道放射光、中性子、電子顕微鏡）の進展もあり、世界的にも研究が活発に、かつ広範に進行している。また、強相関電子の強いスピン交換相互作用に基づくマルチフェロイクス（磁性強誘電体）は、この数年で数多くの物質開発がなされ、最近ではフェライト磁石（らせん磁性）での室温での誘電分極の磁気制御が可能となった。また、同じくらせん磁性体の物質群で、弱い磁場下の存在で、スキルミオン (skyrmion) と呼ばれる渦状のスピンテクスチャー（磁気バブルのナノスケール版）が観測され、その低電流駆動、電界制御などが大きな関心を集めつつある

## (8) 理論・シミュレーション

### <大型分析解析装置インフラと計算科学の融合>

日本では SPring8 や KEK - PF などの放射光を用いた X 線解析、J - PARC などの超高分解能中性子回折、各所に設置が進められているサブオングストローム分解能での走査透過型電子顕微鏡および電子分光装置、超高分解能表面分析装置、超高感度核磁気共鳴装置など、ナノテクノロジー・材料分野の最先端評価装置の技術革新・インフラ整備の面で我が国は世界をリードしている。これに伴い、これら評価装置の解析に計算科学を積極的に取り入れ効率化を高める研究が発展しつつある。このような計算科学は我が国の強みになる可能性がある。また、同時に実験者にとって使いやすくアプリケーションを強く意識した計算ソフトウェアの開発にも大きな期待が寄せられている。しかしながら、いずれも国際化を強く意識した開発を推し進めなければ広くは普及せず、やがては欧米に追いつかれ追い越される恐れがある。

### <プロセス・デバイスシミュレータ (TCAD) 研究の新展開～電子相関、散逸、量子輸送～>

第一原理計算をベースにした材料科学計算ソフトウェアの商用化が進み、専門家だけでなくも容易に計算を実行することができることから、材料計算ソフトパッケージが物理・化学（薬学も含む）の多くの分野で活用されるようになった。最近、第一原理計算をベースにした材料科学と（簡略化した）非平衡グリーン関数法を結合させた計算手法が、不可逆反応や伝導のような動的特性の解析に活用され始めてきている。欧州では計算パッケージとして既に商用化しているものもある。一方で、伝導特性で本質的な散逸現象が十分に考察されていないことから、このような計算手法の理論的基礎付けが曖昧な状況にあることも強く認識するべきである。

一方、古典論に基づいた TCAD ソフトウェアにおいても、非平衡グリーン関数法のような量子論に基づいた手法が、大学等での研究で広く用いられ始めている。しかしながら、現実的な特性評価で重要な散逸過程や電子間相関が、従来の TCAD 関連のシミュレーションのように考慮されていない。まずは、このような新手法が実デバイス特性を実際に評価（説明）し得るかどうか、といった基本的な検証が必要であろう。

いかなるデバイスにおいても、量子系と古典系がコンタクト領域で混在することから、量子系と古典系をつなぐ基礎研究（つまり、散逸現象の機構解明や電子間相関）が、今後のナノサイエンス或いはナノテクノロジーのいずれの分野においても、最重要課題になると予想される。

## 2.3 ナノ加工プロセス

### 2.3.1 概観

ナノ加工プロセスは、材料技術や計測技術と並び、ナノテクノロジーの根幹を成す基盤技術である。ここではナノ加工プロセス技術を、半導体超微細加工技術、ナノ転写技術、自己組織化技術、ナノ・マイクロ印刷技術およびMEMS・NEMS技術に分類して、それぞれに関して国際比較を行った。

ナノ加工プロセスは、それを適用したデバイス・システム技術と不可分であり、総合力の問われる技術である。したがって、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。ただし、いくつかの先端分野ではキラアPLICATIONを見出すには至っておらず、研究開発投資戦略が今後の展開を左右するといえる。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、その基盤技術であるナノ加工プロセス技術の研究開発に力を入れて来ている。量産技術においては日米欧に接近しつつあるが、これには欧米から帰国した研究者、および集中投資を行う国家の果たす役割が大きい。中国も、韓国・台湾と同じ道を辿り始めている。

以下に各中綱目の概観を記す。

半導体超微細加工技術は集積回路（LSI）を製造するための微細加工技術で、フォトリソグラフィ技術、エッチング技術、薄膜形成技術、洗浄技術、めっき技術、研磨（CMP）技術、パターン設計・評価技術などから成る巨大最先端技術である。これらは、様々な分野での微細加工技術の基本であり、近年、バイオ、MEMS、医療用、自動車の制御など、様々な分野への応用研究が進んでいる。こうした研究開発や生産設備には巨大な投資が必要で、単独メーカーでは難しく、研究開発はコンソーシアムや国際研究開発拠点によって推進され、事業は企業間の連携や統合が盛んである。日本では、Selete（半導体先端テクノロジーズ）を中心として研究開発が進められ、露光装置、レジスト材料、およびマスクについては成果を上げている。しかし、ベルギーのIMEC、フランスのLeti、米国のAlbany Nanotechなどは、巨大な研究開発拠点到世界各国（日本を含む）から多数の参加企業を集め、高い水準の総合的な研究開発を旺盛に進め、国際的な存在感・影響力を増している。結果として日本は、欧米に比べて研究水準、技術開発水準ともに後塵を拝しつつある。アジアにおいては、台湾、韓国におけるユーザー企業が、最先端技術の実用化に非常に積極的であり、微細化技術でのリーダーシップを握っている。

ナノ転写技術では熱可塑性樹脂を用いた熱転写技術に続いて紫外線硬化性樹脂を用いた光ナノ転写技術の研究開発が進み、一桁精度が高い10nmレベルの微細構造を比較的簡単な装置・プロセスで形成できることが示されている。電子リソグラフィと比べて大幅なコスト低減が期待されているが、微細化の追及と同時に繰り返し精度確保、すなわち型の長寿命化、欠陥の克服等が課題であり、欠陥を多少許容できる分野から次第に普及が進むと考えられる。日本は材料技術を中心に研究開発が活性化して来ており、一部の製品開発

も進んで欧米を追い上げている。欧州は仏 Leti の研究水準が高く、基盤技術も着実に水準を上げている。米の研究は大学は要素技術が中心、企業やコンソーシアムがハードディスクと半導体の次世代品を開発している。韓国や台湾、シンガポールは応用製品開発で伸張著しい。

自己組織化技術は自然に秩序あるナノ構造を形成する技術で、単分子膜やポーラス構造の作製、相分離による微細パターンニング、超分子の合成、バイオ機能を用いたパターンニング技術などを含む。主に高機能の材料・素材の製造に利用される。基礎研究の段階から材料・素材ベースでの実用化に向けた動きが出てきているが、欧米が先行し、日本が続き、中国が追い上げている。当初期待された電子線リソグラフィ代替については、高精度高次構造の制御性に目途が立っていない。一方、欧米ではナノからマイクロにいたる未踏領域を特徴とする新世代バイオミメティクスとも言うべき分野が著しい展開を見せており、自己組織化に基づくナノ加工や自己集合を利用した材料開発に注目が集まっている。また、米国ではエネルギー・環境問題の解決策の一つとしてバイオミミクリーに注目が寄せられている。いずれも、本格的な産業化はこれからである。

ナノ・マイクロ印刷技術はインクジェットのような手法で、様々な機能性のインクを精密に基板やシートに置いていく技術であり、量産性と大面積対応とに特長がある。フラットパネルディスプレイや電子ペーパーへの応用が盛んである。さらに、半導体デバイス製造、デバイス実装など非常に幅広い応用分野で精力的に研究開発が進められている。材料では、印刷に適用できる溶解性や分散性を持たせたナノ材料が実用レベルにまで開発が進んでいる。日本と米国が強い開発力と競争力を有しているが、これらの材料の応用は日本が世界をリードしており、実用化に向けた進歩は日本の企業が中心となり推進している。グラビア印刷、オフセット印刷、マイクロコンタクトプリントを含む凸版印刷、スクリーン印刷、そしてインクジェットという日本の企業が極めて高い技術と実績を持つ装置とプロセスが基盤となっているからである。一方で、これらの技術を用いた最終製品の商品化に関しては、海外の後塵を拝することが懸念される。ディスプレイ製造では、韓国と台湾の積極的投資と中国における生産展開により、日本企業の国際競争力が低下してきている。プリンテッドエレクトロニクスの期待される応用分野の一つである電子ペーパー技術は台湾企業により買収され、日本の外で市場に直結した開発が進められるようになってきている。但し、生産技術の確立にはまだ多くの課題を有しており、本格的展開に向けて日本の要素技術開発力は依然として世界をリードして行く可能性がある。

MEMS・NEMS 技術は半導体微細加工技術の中核とし、立体的加工技術を加えて機械的微細構造を形成し、電気信号を取り出したり化学的反応を制御したりするデバイスを製造するための技術である。製品としては従来の加速度センサ等単機能デバイスから、生物化学的多機能センサ等複合デバイスの研究が進み始めている。様々な応用展開が期待されるものの、次世代のキラーアプリケーションは見えておらず、当面は研究成果をいち早く市場トライアルにつなげるベンチャーの存在が重要となる。米国が依然アカデミックアウトプットおよび産業に優位性を示している。これは大学の基礎研究を産業に移すための仕組みが優れているためと思われる。欧州は独仏、ベルギーの国立研究所を中心に、非常な

勢いで技術的蓄積を増やしており、企業がうまく関与している。日本ではこれまで大学における個別研究が中心であったが、NTT等のインフラ系企業や大企業から新事業に人材が流入しているため、近い将来改善されるものと期待される。また、つくばに欧州を模した産学連携拠点づくりが始まっており、産官学の組織を超えた機関連携や共同研究が期待されている。日米欧の比較では、研究水準ではそれぞれ活発な取組が進んでいるものの産業化という視点では、欧米が先行する。台湾はファンドリで勝負、韓国はMEMSについては静観しているが、中国が軍事や監視技術と絡めて技術レベルを一気にあげる可能性が大きく、またベンチャー育成施策が進むと同時に産業についてもファンドリの招致を進めている。

◆ナノ加工プロセス技術のまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
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	◎	→	材料技術を中心に企業の活動は活発で、個別の技術開発水準は向上を続けている。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、研究体制は十分でない。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、欧米と比較した場合の産官学の総合的技術開発力の差、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弱い。
中国	研究水準	△	↗	欧米帰りの研究者が研究を立ち上げているものの、依然、質・量ともに日米欧には及ばない。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時間を要するが、キャッチアップは早い。
	技術開発水準	△	↗	ナノ加工技術を用いる産業が未成熟。これまでは技術開発より技術導入に積極的であったが、そうした技術蓄積が進みつつあり、上記研究成果とのサイクルが回り始めると技術開発水準の向上は早まる可能性が高い。
	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。ベンチャーも旺盛。
韓国	研究水準	○	↗	欧米帰りの研究者が中心となって、盛んに研究が行われている。エレクトロニクスが国家の基幹産業であるために、研究に対する国家投資が盛んであること、優秀な学生がエレクトロニクス関連の学科に集まることなどが、ナノ加工技術の研究水準を向上させている。
	技術開発水準	○	↗	新しい技術を獲得し、産業化する技術開発に力が入られている。Nanofab Centerに代表される大形研究拠点の整備が進められており、このような場で産学連携を進め、自前の技術開発にも力を入れる。
	産業技術力	○	↗	フラットパネルディスプレイとDRAMとが国家の基幹産業であり、最先端の技術への投資が盛んである。

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的研究機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]



### 2.3.2 中綱目ごとの比較

#### (1) 半導体超微細加工技術（各種リソグラフィ等）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	装置開発・材料開発については、コンソーシアムを中心に研究開発が行われている。デバイスメーカー側の先端技術開発に対するインセンティブが、1社を除き、低下している。大学での研究は、一部で活発な面もあるが、全体としては低調である。
	技術開発水準	○	↘	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り、日本のメーカによる総合的な研究開発も、海外の国際研究開発拠点に集約されつつある。露光装置は、特に最先端技術開発において、技術力の差が広がっている。デバイスメーカー側の技術開発は、1社を除き、低調である。
	産業技術力	○	↘	デバイス産業がメモリと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。マスクと材料では、世界に先行しているが、従来リードしていた露光装置部門が、ここに来て、海外メーカに対し、大きくシェアを落としている。
米国	研究水準	○	↗	新技術に対する基礎研究だけではなく、従来技術の高度化研究にも、コンソーシアム、大学、および国立研究所が積極的に取り組んでいる。
	技術開発水準	○	↗	フォトリソグラフィの限界でプロセス側の進歩が厳しい状況で、設計側の技術開発が積極化している。特に設計と露光装置のトータル最適化への動きが盛んである。この他ベンチャー企業によるナノインプリント装置などの開発も盛んである。現状の光リソグラフィ技術の延命策に関して、SPIE等での報告では、米国企業、特にベンチャーの発表が多く、活発である。
	産業技術力	○	→	デバイスメーカーを中心に、コンソーシアムをうまく活用して、微細化と利用技術改良に積極姿勢が見られる。生産現場に近い話題が学会等で積極的に議論されている。
欧州	研究水準	◎	↗	コンソーシアム活動、装置メーカーの研究開発、および半官半民の研究機関・研究開発拠点の新技術開発に積極性が見られる。特に、露光装置開発では、欧州が世界の研究を方向付けしている。日本の材料・装置メーカも、欧州の国際研究開発拠点やコンソーシアムを舞台に積極的に研究開発を行っている。
	技術開発水準	○	↗	企業の研究開発が非常に盛んである。新技術に積極的に挑戦し、最先端の装置をコンソーシアムに持ち込み、性能をユーザが自ら評価する体制が確立されている。
	産業技術力	△	→	研究開発機関が世界の研究者を集め、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が、欧州産業への影響は露光装置等に限定。
中国	研究水準	△	↗	中国では、大学・研究機関での研究は急速に立ち上がっている。ただし先端技術をけん引するまでには至っていない。台湾での大学の研究水準は大変高い。
	技術開発水準	×	→	この分野での独自の動きはまだ見られない。台湾は、微細加工に非常に積極的で、最先端技術開発をリードし始めている。
	産業技術力	○	↗	最先端技術の応用は未だ遅れている。半導体生産工場の進出によって従来技術を急速に吸収し、生産技術の高度化で今後成長が予想される。台湾は、最先端微細加工技術をデバイス生産に積極的に応用して来ている。
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。一方企業での研究活動は非常に盛んである。
	技術開発水準	◎	↗	最先端リソグラフィ技術の利用技術開発に非常に積極的である。欧米で提案された研究成果をいち早くデバイスに適用するとともに、欧米のコンソーシアムに積極的に参加している。
	産業技術力	◎	↗	メモリの製造で最先端リソグラフィ技術を積極的に活用している。装置技術や材料技術を生産現場が主導し、さらにデバイスメーカー側が全体の研究開発を主導している。

## 全体コメント：

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

## （参考情報）

日本の露光装置メーカーのシェア低下に関しては、下記の書籍に紹介されている。

- [1] 湯之上 隆著 “日本「半導体」敗戦” 光文社 2009年 p 159 図 5-11 等  
ASML社とニコンのEUV露光技術に対する取り組みは、下記の両者の報告が参考になる。
- [2] C. Wagner et al, “EUV into production with ASML’s NXE Platform”, Proc. Of SPIE No. 7636 p76361H
- [3] T.Miura et al, “Nikon EUVL development progress update”, Proc. Of SPIE No. 7636 p76361G

（註1）フェーズ [研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

（註2）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3）近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(2) ナノ転写技術 (ナノインプリント)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↑	基礎から応用まで幅広い研究が進められている。特に光ナノインプリントの実用化につながる研究が充実してきた。JST-CRESTのLSI(大規模集積回路)製造への応用研究など。
	技術開発水準	◎	↑	装置、樹脂材料の開発が進められている。微細モールド作製水準は突出している。三菱レイヨンの反射防止フィルム、住友電工のレーザーダイオードなどの光学分野や日立製作所の細胞培養への応用が着実に進んでいる。
	産業技術力	○	↑	光学素子の量産化が始まった。LEDやパターンドメディアの開発も進んでいる。装置メーカーが研究用や量産対応機を販売し、事業を拡張。樹脂材料は大手化学メーカーも参入し活性化している。ただし、大型の応用製品が出ないと今後の大型市場の形成は難しい。
米国	研究水準	○	↑	熱ではプリンストン大 Chou 教授、光ではテキサス大 Willson 教授、ユニークなインプリントではミシガン大 Guo 教授らの研究が盛ん。SEMATECHでも研究されている。MRS(Material Research Society)でロール方式の専用セッションが設けられるなど、また各種国際会議での発表も活発。
	技術開発水準	◎	→	HP社では memristor の作製をナノインプリントで行っている。Molecular Imprints社のパターンドメディア用および半導体用装置に関する論文が多数あり。
	産業技術力	○	↑	パターンドメディア用および半導体用装置の出荷がある。MIIが次世代磁気記録メディア(ハードディスク)向け量産設備を完成。LSI向けの開発も継続中。Nano-opto社が光学部品を製品化済み。
欧州	研究水準	◎	→	NapaNILにおいて8カ国がナノインプリントの研究を推進。基礎研究では Wuppertal 大、Leti 研究所、CNRS 研究所が強い。熱ナノインプリントの研究水準が高い。
	技術開発水準	◎	↑	光ナノインプリントは Soft UV-NILを採用。窓ガラス調光の研究はユニーク。ASMLが次世代のLSIリソグラフィ装置の特許出願を加速。ASMLとHolstセンターが協同でフレキシブルエレクトロニクスへの応用研究を進めている。
	産業技術力	○	↑	Obuducat社、EVG社、SUSS社などが熱ナノインプリントの一括方式の装置を市販している。材料は、独 MicroResist社やフラウンホーファー研究機構の有機無機ハイブリッド材が普及している。
中国	研究水準	△	↑	国際真空学会を招致する等、世界から一流の研究者を招聘し、最先端研究の動向を把握している。研究論文が着実に増えている。
	技術開発水準	△	↑	反射防止膜などの比較的、単純な構造の応用製品を欧州の装置を導入し、着実に開発を進め、レベルアップを図っている。
	産業技術力	△	↑	光学素子、偽造防止シールなどの製品が製造されているとの情報がある。
韓国	研究水準	△	↑	KIMM(韓国機械研究院)、Souel大、Korea大などで応用研究が進んでいる。
	技術開発水準	○	↑	Samsung社やLG社がパネルや実装、フラッシュメモリ等の開発を行っている。ロール方式での大量生産技術の開発が進んでいる。
	産業技術力	○	→	装置事業が展開されているが規模は小さい。Samsungなどの財閥系企業がアプリケーションデバイスを実用化すると巨大市場を形成する可能性が高い。
台湾	研究水準	△	↑	Taiwan大、Tsing Hua大、Chang Kung大で研究が行われている。基礎研究の水準も上がってきている。
	技術開発水準	○	→	ITRIで大面積のロールインプリント装置の開発を進めている。
	産業技術力	○	↑	光取り出し効率の改善が図られたLEDが製造されている。

## 全体コメント：

ナノ転写技術は、ナノインプリント、ホットエンボッシング、場合によっては射出形成を含めることもあるが、電子線リソグラフィの微細性を低コストで実現することが期待されている。微細化の追及と同時に繰り返し精度の確保から、型の長寿命化、欠陥の克服等が課題であるが、欠陥を多少許容できる分野から次第に普及が進むと考えられる。また、室温プロセスが可能な点で光ナノインプリントは高スループットが期待される。欧州は仏 Leti の研究水準が高く、基盤技術も着実に水準を上げている。米の研究は、大学は要素技術が中心、企業やコンソーシアムがハードディスクと半導体の次世代品を開発している。韓国や台湾、シンガポールはナノインプリント分野の応用製品開発で伸張著しい。

## (参考情報)

- [1] <http://www.jst.go.jp/kisoken/crest/ryoiki/bunya04-2.html>
- [2] <http://www.semtech.org/research/litho/>
- [3] <http://www.memristor.org/news/450/selfaligned-one-step-nanoimprint-lithography-fabrication-crosspoint-memristive-array>
- [4] [http://www.molecularimprints.com/technology/technical\\_library.php](http://www.molecularimprints.com/technology/technical_library.php)
- [5] <http://www.napanil.org/>
- [6] <http://www7.ipdl.inpit.go.jp/Tokujitu/tjka.ipdl?N0000=108>
- [7] NNT(Nanoimprint and Nanoprint Technology)2010 Proceedings.

## (その他の参考文献)

- (1) ASNIL(Asian Symposium on Nano imprint Lithography) 2008,2009,2010 Proceedings.
- (2) The 9<sup>th</sup> International Conference on Nanoimprint and Nanoprint Technology (2010).
- (3) 36<sup>th</sup> International Conference on Micro & Nano Engineering (2010).
- (4) 23<sup>rd</sup> International Microprocesses and Nanotechnology Conference (2010).
- (5) The 3<sup>rd</sup> Asian Symposium on Nano Imprint Lithography (2010).
- (6) 応用物理学会ナノインプリント研究会資料

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) 自己組織化技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	→	ERATO や CREST、科学研究費など複数の大型プロジェクト（彌田超集積材料、高原ソフト界面、新学術領域「分子ナノシステムの創発化学」、「ソフトインターフェースの分子科学」など）において、自己集合・自己組織化を利用したソフト・マテリアル開発が着実に推進されている。超撥水やモスアイ構造などバイオミメティック・マテリアルが注目されているが、生物学とナノテク・材料との異分野連携が不十分で、新規な研究課題の着想には至っていない。
	技術開発水準	◎	↑	電気、素材、繊維など多様な業種において自己組織化技術に対する関心は高く、陽極酸化アルミナ、ブロック共重合体、微粒子配列系、結露現象（breath figure）、などを利用したフィルムや素子が開発されており、技術水準は高い。
	産業技術力	○	↑	東芝（高密度パターンメディア）や日立（ナノリソグラフィ）などがエレクトロニクス分野でブロック共重合体のマイクロ相分離現象に注目、富士フィルムが結露現象を用いたハニカム膜の医療向け開発・上市、東レが金属粒子の dewetting を利用し資源問題の観点からも注目される透明導電フィルムを開発、三菱レイヨンがバイオミメティック・デザインと自己組織化を組み合わせた陽極酸化アルミナやモスアイ構造フィルムを開発、王子製紙も同様にナノドットアレイと光学素子を開発、等々活発な動きがあるが市場確立はこれから。
米国	研究水準	◎	↑	自己組織化・自己集合とトップダウンのプラグマティックな融合など、G.Whitesides 教授や Tom Russell 教授の研究グループに見られるように総合力では現在も世界をリードしている。DNA-based self-assembly (DNAorigami) やブロック共重合体研究では先導的。最近、dewetting 現象を利用したマイクロパターン作成や結露現象（breath figure）を利用した多孔質フィルムに関する論文数が増加、自己組織化や自己集合に関するリバイバル的な状況が見られる。
	技術開発水準	◎	↑	エネルギーや持続可能性に対する政策的観点からも、ナノテクノロジーとバイオミメティクス（米国ではバイオミクシー）の連携が注目されており、自己集合や自己組織化によるナノ加工や材料開発が進んでいる。無反射フィルムを組み込んだ太陽電池や構造色を利用したディスプレイなど。
	産業技術力	○	↑	例えば IBM は、ブロック共重合体のマイクロ相分離を利用したエア・ギャップや DNA 折り紙構造を集積化した足場とする微細加工など、自己集合現象と現行のトップダウン・プロセスを組み合わせ、低コストで高精度微細化を実現しようとしている。
欧州	研究水準	◎	↑	グラフェンの研究でノーベル物理学賞を受賞した A.Geim 教授はゲッコーテープの開発者の一人でもあり、ナノテクノロジーとバイオミメティクスは欧州、とりわけ英国とドイツでは生物学との緊密な連携も政策的に促進されることもあって、その研究水準を高く維持している。材料、センサ、ロボティクスの研究者が会する学会や研究プログラム（FP7 など）が意識的に設置されており、総合化が図られている。
	技術開発水準	◎	↑	ドイツのナノ・イニシアティブ 2010 では自己組織化プロセスを重視しており、バイオミメティクス材料開発において産学連携が進んでいる。ドイツにおける下記製品の開発・実用化のほか、英国ではバイオチップ、DDS、バイオミメティクス材料の実用化開発が盛んである。
	産業技術力	○	↑	ボン大学で Lotus-Effect® という超撥水材料（自己組織化による微細構造を有する自己洗浄塗料）を開発し、Evonik や BASF などが商品化を進めている。ボトムアップ・ナノテクノロジーによる材料開発が主体。2011 年にはベルリンにおいて世界で初めてのバイオミメティクスに関するコンベンションが開催されるなど、政策的にも産学連携を通じた産業化に力を入れている。
中国	研究水準	○	↑	論文数が多い。なかには中国科学院の J.Lei 教授らの濡れ性に関するバイオミメティクス研究など世界的にも注目されるものがあるが、多くは既知の材料を組み合わせた応用研究。今後は、米国から帰国したポスト Dr の活躍が想定される。
	技術開発水準	△	↑	自己組織化を利用しているという観点では目立った製品開発には至っていない。バイオミメティクスとナノ加工を組み合わせることで、防水防汚ナノネクタイや印刷技術などのベンチャービジネスが目を引く。
	産業技術力	△	→	大学等への研究費投入も目覚ましいものがあり、自己組織化・自己集合技術においても、産学連携や産業技術の質の向上は進むと考えられる。

韓国	研究水準	○	↗	論文数は多く、インパクトファクターの高い論文への掲載数も日本に迫る勢いである。政策として研究課題の重点化が明確。米国からポスト Dr が帰国し始めている。米国の研究潮流に沿ったブロック共重合体に関する研究が注目されている。Breath figure 現象を使ったフィルム加工の論文も増えている。
	技術開発水準	△	↗	例えば、Postec の Jin Kon Kim 教授と LG Electronics が、共同研究においてブロック共重合体のパロプラスティック現象（圧力による相転移）を利用した高密度メモリの可能性を示したように、先端技術の水準は高まっている。
	産業技術力	△	→	2003 年から始まった NANO KOREA 展示会は世界でも 3 番目の規模と言われており、今後、自己組織化・自己集合技術の成長があるものと思われる。

全体コメント：

欧米が先行し、日本が続き、特に中国が猛追しているという構造はここ数年大きくは変わっていないが、それぞれ研究開発は格段に進歩した。産業化についてはもう少し時間がかかると見られる。今世紀初頭からのナノテクノロジーの飛躍的な展開は、生物学やロボティクスなど異分野との連携に門戸を広げた。特に欧米では、博物学（自然史学・分類学）との連携によって新しい材料やセンサの開発が展開しており、ナノからマイクロにいたる未踏領域を特徴とする新世代バイオミメティクスとも言うべき分野が著しい展開を見せている。米国アカデミーは 2008 年に「Inspired by Biology: From Molecules to Materials to Machines」と題した科学技術政策提言をし、ナノテクノロジーと生物学の連携強化を強く示唆している。それに先立ち、欧州、とりわけドイツと英国では、バイオミメティクスの産業化に向けて調査や産学連携の組織化が政策的になされている。新世代バイオミメティクスを実現する最も有力なナノテクノロジーとして、自己組織化に基づくナノ加工や自己集合を利用した材料開発に注目が集まっている。さらに、ヨーロッパではバイオミメティクスとナノテクノロジーの総合化が始まっており（例えば、「Bulletproof Feathers: How Science Uses Nature's Secrets to Design Cutting-Edge Technology: R.Allen(2010)」）、米国ではエネルギー・環境問題の解決策の一つとしてバイオミクシーに注目が寄せられている。

欧米日の研究者は、自己組織化を生産技術に応用することで、製造コストの削減と微細加工精度の向上（ $\mu\text{m}$  から  $\text{nm}$ ）が可能になるとの認識で一致している。しかしながら、生産技術に求められる高い歩留まりと、制御性の点で自己組織化を生産技術に持ち込むのは容易なことではないことも認識されている。上述の如く、精度や欠陥の許容される分野でいくつかの製品が上市され始めているが、本格的な産業化はこれからである。IBM の DNA 折り紙構造利用の電子回路適用が成功すると様相は一変するかもしれない。

(参考情報)

- [1] JST, ERATO, 彌田超集積材料プロジェクト
- [2] “Large-Area Three-Dimensional Molecular Ordering of a Polymer Brush by One-Step Processing”, Nobuhiko Hosono, Takashi Kajitani, Takanori Fukushima, Kazuki Ito, Sono Sasaki, Masaki Takata, and Takuzo Aida, Science 330 (6005), 808 - 811 (2010), published online 5 November 2010.
- [3] 東レ：銀ナノ粒子透明導電フィルム連続塗工技：http://www.toray.co.jp/news/rd/nr090209.html
- [4] 富士フイルム：溶液製膜生産技術によるメディカル・ライフサイエンス分野向けハニカムフィルムの開発・試験販売：http://www.fujifilm.co.jp/corporate/jobs/aboutus/technology/02/review06.html
- [5] 王子製紙：数十～数百ナノメートルサイズのドット型周期微細構造を作製する新規技術の開発に成功。http://eco.nikkeibp.co.jp/article/news/20090612/101626/
- [6] 東芝：2.5Tb/in<sup>2</sup> 級自己組織化ビットパターンドメディアの試作に世界で初めて成功し、記録再生ヘッドの制御動作を確認。http://www.toshiba.co.jp/rdc/rd/detail\_j/1008\_01.htm
- [7] 三菱レイヨン：連続製造可能なモスアイ（蛾の目）型の無反射フィルム製造プロセスの開発に成功、大面積化及び量産化の技術開発に着手。http://www.mrc.co.jp/press/p08/080116.html
- [8] “Block Copolymer Self-Assembly-Directed Single-Crystal Homo- and Heteroepitaxial Nanostructures”, Hitesh Arora, Phong Du, Kwan W. Tan, Jerome K. Hyun, John Grazul, Huolin L. Xin, David A. Muller, Michael O. Thompson and Ulrich Wiesner, Science 8 October 2010: Vol. 330 no. 6001 pp. 214-219
- [9] IBM:DNA 応用の次世代チップ製造法 http://www.computerworld.jp/topics/ibm/158649.html
- [10] “Ultrathin PbS Sheets by Two-Dimensional Oriented Attachment”, Constanze Schliehe, Beatriz H. Juarez, Marie Pelletier, Sebastian Jander, Denis Greshnykh, Mona Nagel, Andreas Meyer, Stephan Foerster, Andreas Kornowski, Christian Klinke and Horst Weller, Science 30 July 2010: Vol. 329 no. 5991 pp. 550-553
- [11] “Free-standing mesoporous silica films with tunable chiral nematic structures”, Kevin E. Shoopsowitz, Hao Qi, Wadood Y. Hamad & Mark J. MacLachlan, Nature, Volume:468, Pages:422-425
- [12] “Aggregate Nanostructures of Organic Molecular Materials”, Huibiao Liu, Jialiang Xu, Yongjun Li, and Yuliang Li, Acc. Chem. Res., 2010, 43 (12), pp 1496-1508
- [13] 韓国の研究チームが超高密度データストレージにつながる常温ナノパターニング技術を開発  
http://www.nanoinfo.jp/press/670.shtml

(註 1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註 2) 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 3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(4) ナノ・マイクロ印刷技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↑	組織を超えた基礎研究や応用研究の取り組みが徐々になされてきている。しかし、基礎研究や応用研究の受け渡し先が既存の企業であり、海外のような機動性のある企業化に結びついていない。
	技術開発水準	◎	→	大企業を中心に、材料と装置に関して高い技術開発力と実績を有している。また、製品化技術開発力も極めて高い。インクジェット技術や印刷技術に関するハードウェア開発では性能と品質で海外に対して強い競争力を持つ。一方で、高機能な有機材料開発では海外との熾烈な競争を強いられており、必ずしも磐石でない。
	産業技術力	◎	→	製造装置の強みを生かしてディスプレイや実装分野で実績を積み重ねてきてい。材料面でもナノ材料を用いたインクや有機半導体材料の供給で世界をリードしている。デバイスへの展開も大企業で積極的に進められているが、商品化のスピードで韓国や台湾の企業に遅れをとる場合も見受けられる。
米国	研究水準	◎	→	基礎研究から応用研究、実用化研究まで幅広く取り組まれている。材料に関しては大学発のベンチャー企業が多く輩出しており、研究費用面も含めて活発な研究開発が行われている。フラットパネルディスプレイの製造拠点が存在しないため、これらの開発では日本、韓国、台湾に独占されているが、E-ink に代表されるように独創的なデバイスや材料の開発では世界をリードしている。
	技術開発水準	○	↑	ディスプレイや半導体等の既存産業では、製造拠点がアジアに集約されているため開発は注力されていない。他方、材料、ナノ加工、バイオ関係では大手の化学メーカーと大学発ベンチャーが主体となり、コア技術開発に積極的に取り組んでいる。
	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。先端技術分野で積極的な展開が図られている。市場の立ち上がりにより、強いコア技術を生かした発展が予想される。
欧州	研究水準	◎	→	大学、企業ともに有機半導体とプリンテッドエレクトロニクスに関する優れた基礎研究が行われている。大学や国の研究機関を核としたこれらの基礎開発を企業活動に展開する環境が整っている。
	技術開発水準	◎	→	国や機関をまたがったEU支援の下、種々の技術開発が取り組まれている。独立研究法人としてドイツの Fraunhofer Institute、オランダの Holst Center が拠点となり基盤技術開発を推進している。OE-A (Organic Electronics Association) における研究機関と企業を横断した技術連携も活発である。また、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。
	産業技術力	◎	→	産業化に向けた多くの取り組みがなされている。まだ市場規模が小さいため、具体的な事例は乏しい。
中国	研究水準	×	→	基礎研究は大学を中心として取り組まれている。今後、材料分野において研究が進むと予想される。
	技術開発水準	×	↑	独自の技術開発では目立った展開が見られないが、液晶ディスプレイ工場が多く立ち上がる中で、今後は活発化すると予想される。
	産業技術力	×	↑	目立った成果は見られない。
韓国	研究水準	○	↑	韓国企業の積極的な研究開発投資に牽引され、実用化技術への研究が集中的に行われている。材料やプロセスに関する基礎研究はあまり活発とは言えない。
	技術開発水準	○	↑	ディスプレイ産業や半導体産業の国際的シェアが拡大するに従い、新技術への取り組みが加速されてきている。特にフレキシブルディスプレイの実用化に向けた技術開発を積極的に進めている。実用化にいち早く展開することで技術開発水準が大きく向上する可能性が高い。材料や装置は日本を中心とした国外に大きく依存している。
	産業技術力	△	↑	まだ生産現場への技術適用が進んでいないとは言えない。材料や装置など要素の産業化が遅れている。生産立ち上げが進むことで生産技術から実用的な技術革新が進む可能性が高い。
台湾	研究水準	△	→	ITRI での研究が中心となっており、大学での研究は不足している。材料やプロセスに関する基礎研究は十分でなく、もっぱら実用化技術の研究開発が行われているが、国内で材料や装置にかかわる産業が無いため、独自性、先進性の高い研究が行われていない。
	技術開発水準	△	↑	電子ペーパーの分野で、湾企業の AUO による米 SiPix の買収、PVI による米 E-ink の買収というように、積極的な企業展開が図られている。しかし、開発拠点は米国に在り、台湾での技術開発は十分でない。
	産業技術力	△	↑	まだ産業化には至っていないが、プリンテッドエレクトロニクスへの関心は極めて高く、電子ペーパー技術を足がかりに積極的な投資が行われれば、展開が図られる可能性がある。

## 全体コメント：

ナノ加工プロセス/ナノマイクロ印刷技術は、半導体デバイス製造、ディスプレイ製造、そしてデバイス実装など、非常に幅広い応用分野で精力的に研究開発が進められている。材料では、印刷に適用できる溶解性や分散性を持たせたナノ材料が実用レベルにまで開発が進んでいる。日本と米国が強い開発力と競争力を有しているが、これらの材料の応用は日本が世界をリードしており、実用化に向けた進歩は日本の企業を中心となり推進している。ナノマイクロ印刷技術では、グラビア印刷、オフセット印刷、マイクロコンタクトプリントを含む凸版印刷、スクリーン印刷、そしてインクジェットという日本の企業が極めて高い技術と実績を持つ装置とプロセスが基盤となっている。これにより、製造装置、製造技術の分野では、日本が圧倒的な国際競争力を発揮している。一方で、これらの技術を用いた最終製品の商品化に関しては、海外の後塵を拝することが懸念される。ディスプレイ製造では、韓国と台湾の積極的投資と中国における生産展開により、日本企業の国際競争力が低下している。プリントドエレクトロニクスの期待される応用分野の一つである電子ペーパー技術は台湾企業により買収され、日本の外で市場に直結した開発が進められるようになってきている。

しかし、ナノマイクロ印刷による生産技術の立ち上げは目前に迫っているものの、まだ多くの課題を有しており、本格的展開に向けて日本の技術力と競争力は依然として世界をリードしている。圧倒的に強い要素技術を最終製品に結実させる商品企画と総合開発を強化推進する必要がある。

## (参考情報)

- [1] 財団法人三重県産業支援センター「全印刷プロセスによるシート型全固体ポリマーリチウム二次電池」を試作 <http://www.miesc.or.jp/amic/cityarea/news/n100224/index.htm>
- [2] P E 研究会：主催 大阪大学産業科学研究所 菅沼克昭教授 <http://www.eco.sanken.osaka-u.ac.jp/pe/index.html>
- [3] 有機エレクトロニクス実用化研究会 <http://www.shopbiz.jp/lf/news/69694.html>
- [4] 独立行政法人物質・材料研究機構「溶液から有機結晶トランジスタを作る溶液プロセスを開発し、世界最高の電界効果移動度を有する有機トランジスタを基板上に直接作ることに成功した。」 <http://www.nims.go.jp/news/press/2010/11/p201011290.html>
- [5] 財団法人三重県産業支援センター「全印刷プロセスによるシート型全固体ポリマーリチウム二次電池」を試作 <http://www.miesc.or.jp/amic/cityarea/news/n100224/index.htm>
- [6] 下田ナノ液体プロセスプロジェクト [http://www.jst.go.jp/erato/project/snp\\_P/snp\\_P-j.html](http://www.jst.go.jp/erato/project/snp_P/snp_P-j.html)
- [7] ソニー：ペンほどの太さに巻き取れる有機 TFT 駆動有機 EL ディスプレイを開発 <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201005/10-070/>
- [8] 「東京エレクトロンとセイコーエプソン、有機 EL ディスプレイ製造技術の共同開発契約を締結」 [http://www.epson.jp/osirase/2010/101111\\_2.htm](http://www.epson.jp/osirase/2010/101111_2.htm)
- [9] 米国のフレキシブルディスプレイ組織：“The flexible Display Center”，Arizona State University，2004年設立。 <http://flexdisplay.asu.edu/>
- [10] 米国のナノパターニング技術 Dip-Pen Nanolithography. 継続して研究が進められている。 <http://chemgroups.northwestern.edu/mirkingroup/group.html>  
<http://www.nanoink.net/>
- [11] 材料に関する大学発のベンチャー企業として以下のような企業が知られている。  
Universal Display Corp. <http://www.universaldisplay.com/> Plextronics Inc. <http://www.plextronics.com/index.aspx>
- [12] 米 Kovio 社と日産化学がシリコンインク製造で協業  
Kovio and Nissan Chemical Ramp Up Production of Silicon Ink for RF Products and Displays <http://www.prnewswire.com/news-releases/kovio-and-nissan-chemical-ramp-up-production-of-silicon-ink-for-rf-products-and-displays-83389167.html>
- [13] JJAP No. 5, Issue 2 (2010) は” Printed Electronics” の特集であったが、9割以上が韓国からの論文であった。
- [14] Plastic Logic が印刷法で製造した有機 TFT 駆動の電子ペーパーを製品化；Seamus Burns, SID symposium digest, p.477-479, 2010. Plastic Logic は欧州と米国に開発拠点を持つが、技術開発の中心は欧州であることか欧州での技術評価を含めた；<http://www.plasticlogic.com/index.php>
- [15] 欧州のプリントドエレクトロニクス開発では、ドイツに本拠地を置く OE-A (Organic Electronics Association) がワーキンググループ活動を通じてイニシアチブを発揮している；  
<http://www.vdma.org/wps/portal/Home/en/Branchen/O/OEA/> またプリントドエレクトロニクスにの展示会 LOPE-C (Large-area, Organic and Printed Electronics Convention) と連携して積極的に企業活動への展開を図っている；  
<http://www.lope-c.com/>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

(5) MEMS・NEMS 技術

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	基礎から応用まで幅広い研究が進められている。異分野融合 MEMS 技術が当面のターゲット。また、課題解決型研究開発（グリーンやライフ応用センサネット等）が進み始めているが、成果はこれから。
	技術開発水準	○	→	深堀エッチング装置や接合装置等のプロセス装置分野は進んでいる。つくばに IMEC や MINATECH に対抗すべく産学官連携拠点が形成進み始めたが早期の定着が期待される。実用化への橋渡しとなるベンチャー企業は少ない。
	産業技術力	○	→	自動車や携帯機器用のセンサ等の市場占有率が伸び悩んでいる。日立金属、沖電気等の MEMS からの撤退もあった。新しい量産用途市場を切り拓けていない。
米国	研究水準	◎	→	UCLA、UCB、CALTECH、スタンフォード等の西海岸グループの活動が盛ん。ミシガンや MIT も健闘。基礎技術をベンチャーへ手渡し仕組みや、宇宙開発等の極限技術につなげる MEMS 技術の長期的研究開発方針等が、研究を牽引している。
	技術開発水準	◎	↗	ワイヤレス情報端末や携帯機器用のデバイスの水準が高い。TI の DMD は依然最高峰の集積化 MEMS デバイスであり、携帯電話用ピコプロジェクト等の新しい製品が開発されている。大学と連携し、ベンチャー企業を含む非大手企業は新製品開発に挑戦する風土がある。
	産業技術力	◎	↗	依然 MEMS デバイスの売り上げのトップクラスは米国企業が占めている。
欧州	研究水準	◎	→	IMEC や LETI が MEMS の 8 インチ試作や 12 インチ集積化ライン投資等大規模な研究開発を進めており、フラウンホーファも同様な投資を行っている。
	技術開発水準	◎	↗	上述の研究拠点には、IMEC であればフィリップスと ASML、LETI であれば ST マイクロ、フラウンホーファならジーメンズという強力なパートナーと密接な技術開発を進めている。
	産業技術力	◎	→	EVG 社、SUSS 社などが露光装置や接合装置を市販している。デバイスメーカーも ST マイクロやボッシュが健闘している。
中国	研究水準	△	↗	先進国から有力な教授が帰国して、急速に研究水準が上がっている。大衆監視の道具という観点からセンサネットワークが注目されている。
	技術開発水準	△	↗	現状では軍事と国内の監視という側面から MEMS 技術開発が進んでいるいわれており、学会では発表されないものの、急速に水準が上がっていると思われる。
	産業技術力	○	↗	国主導の産業育成が進み始めている。米国やシンガポールのベンチャーの工場などが招致されて、立ち上がりつつある。
韓国	研究水準	△	↗	KAIST を中心に欧米帰りの教授が多いが、研究は米国追随の感否めない。韓国は大学教授の待遇が良く、産業界からも教授が集まっており、産業につなげる研究は進みつつある。
	技術開発水準	○	→	Nanofab Center や RFID/USN Center 等の大規模な研究開発拠点の整備が進んでいるが、拠点の自立化の圧力が大きく、経営は容易ではないと想像される。
	産業技術力	△	→	サムソンや LG は、半導体や太陽電池等の大規模マーケット製品にしか手を出さないために、MEMS については当面積極的な投資は行っていない。
台湾	研究水準	△	→	台湾大、精華大学に欧米帰りの教授が帰国して、急速にレベルが上がっている。Caltech のタイ教授や UCLA のホー教授も台湾大学出身で人脈が厚い。
	技術開発水準	○	→	台湾はパネルや太陽電池に主な興味があり、MEMS にはそれほど大きな国家的投資はされていない。
	産業技術力	○	↗	TSMC、APM 等ファブドリ事業が進んでおり、製造ラインの主流も 8 インチになってきている。受託生産が中心なので、独自開発は表向き行っていない。

全体コメント：

**MEMS、NEMS** 技術は微細加工およびそれによって製造されるデバイスの総称である。米国が依然アカデミックアウトプットおよび産業に優位性を示している。これは大学の基礎研究を産業に移すために仕組みが優れているためと思われる。特に西海岸の大学は卒業生が官公庁で出世するのは別のキャリア（起業）を目指しているのと、アジアを中心とする優秀な学生がレベルを押し上げていることに起因すると思われる。特に中国やインドの学生は起業意識が非常に高く優秀である。欧州は独仏、ベルギーの国立研究所を中心に、非常な勢いで技術的蓄積を増やしており、フィリップス、ASML、ST マイクロ、ジーマックスといった企業がうまく関与している。日本ではこれまで大学における個別研究が中心であったが、NTT等のインフラ系企業や大企業から人材が流入しているので、近い将来改善されるものと期待される。また、つくばに欧州を模した産学連携拠点づくりが始まっており、産官学の組織を超えた機関連携や共同研究が期待されている。台湾はファンドリで勝負、韓国はMEMSについては静観しているが、中国が軍事や監視技術と絡めて技術レベルを一気にあげる可能性が大きく、また産業についてもファンドリの招致を進めており、いずれ台湾のファンドリが移転すると思われる。

(参考情報)

- [1] <http://www.beanspj.org/>
- [2] <http://www.mu-sic.tohoku.ac.jp/saisentan/>
- [3] <http://www.beanspj.org/kyoten/gdevice/index.html>
- [4] <http://www.micromanufacturing.com/showthread.php?t=981>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(註2) 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3) 近年のトレンド [ /：上昇傾向、→：現状維持、\：下降傾向 ]

### 2.3.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) 半導体超微細加工技術（各種リソグラフィ等）

日本の半導体デバイス企業がマーケットシェアの主導権を失ってから10年、半導体製造装置もその後を追うように、シェアを失う兆しが見え始めている。その典型が半導体露光装置のマーケットシェアの主役交代である。ここ数年、欧州のASML社の躍進が目覚ましい。15年前、ニコンとキヤノン2社で、半導体露光装置のマーケットシェアの80%を抑えていたが、昨年は、ASML1社で70%を超えるマーケットシェアを占めるようになった。さらに次世代の露光技術として注目されている、EUV露光技術に対しても、ASML社が今年から来年にかけて、量産プロト機を出すと言う計画に対し、我が国のメーカーは、その計画を後ろ倒しして数年間は、現状のArF液浸技術の改良に専念するという姿勢である。このような、将来技術の研究開発に後ろ向きな取り組みでは、次世代技術開発で大きな水をあけられてしまうことは必至である。リソグラフィ技術は、総合システム技術でもあり、露光装置以外のリソグラフィ関連技術では、マスク技術、レジスト技術、検査計測技術、そして露光光源技術等において、我が国企業が未だ世界の主導権を握っていたり、切磋琢磨している分野も多い。これらの技術分野を梃子として、再び我が国の主導権の回復を図ることも夢ではない状況である。これを実現するためにも、何らかの国家的な取り組みが必要な状況と考える。

#### (2) ナノ転写技術（ナノインプリント）

ナノインプリント最大の会議であるNanoimprint and Nanoprint Technology会議は2002年に始まりNNT 2010はコペンハーゲンにおいて開催された。EU以外からの参加者では日本が最も多く、日本が研究開発に熱心であることが分かる。研究の種別では熱ナノインプリントよりも光ナノインプリントの発表が多い状況に変わってきた。ナノインプリントはカラーアプリケーションが無い状況であったが現在では反射防止膜が実用化の段階にある。また、パターンドメディアへの適用も、コストの問題がクリアされれば2-3年以内に実用化に入ると見られている。LEDの高効率化への適用は一部始まっているが、今後ますます広まると考えられている。

次世代ハードディスクとして開発が進んでいるパターンドメディア製造へのナノインプリントの適用は、半導体リソグラフィ分野への展開を加速する可能性がある。従来の延長技術である高価なEUV（極端紫外光）露光方式に比べて、安価な方式の実現が期待される。特に、これまで日本勢が席捲して来たこの市場で、欧州での台頭が著しいASMLのナノインプリント特許件数が伸びていることは注視すべきである。米国も半導体やパターンドメディアのハイエンドを重視している傾向がある。米国Molecular Imprints社の装置を使用し、SEMATECHを始めさまざまな企業で検討、改良が進んでいる。

アジアはロールタイプの大面積指向の様子。ロール加圧型ナノインプリント方式でのフィルム加工は実用レベルに達しつつある。反射防止のような比較的、単純な光学変調フィルム製品だけでなく、トランジスタや配線を形成したフレキシブルエレクトロニクス分野への応用技術の水準が高まってきた。欧州と韓国の開発動向に注意が必要である。

欧州はバイオに注力している模様で、NapaNILでは窓ガラスの調光を仏国Sant Gobain Resercheが手がけている。この分野は非常に大きなマーケットになる可能性を秘

めている。日本は、多様な研究開発がなされており、反射防止フィルム、パターンドメディアの他、光ナノインプリントの半導体応用に関しても実用化を目指した研究がなされている。このほか、ガラスへの直接インプリントという点でも日本の研究水準は高いレベルにある。ただし、日本は研究開発の規模が欧米に比べて小さい。応用製品も小型の光学部品が多く、欧米韓のLSI、HDD、ディスプレイを志向した大型テーマに乏しい。ナノインプリント技術の次のステップとして、生体を模倣するバイオミメティクスへ応用する動きが日本と台湾で出ている。基材表面の加工によって、親水・撥水効果による汚れの防止、虫除け、空調など、電子デバイスとは全く異なる産業分野へナノインプリントが展開される可能性が出ている。

### (3) 自己組織化技術

ロータス効果やゲッコテープなど表面ナノ・マイクロ構造制御を特徴とする材料開発の世界的な動向が、今世紀になってバイオミメティクス研究の新しい潮流として注目されている。これはナノテクノロジーとりわけボトムアップ型材料ナノテクノロジーと生物学、機械工学、センシングテクノロジーなどとの異分野連携のありかたを問うものである。従前より、分子ナノテクノロジーやナノ加工の分野において、自己集合現象や自己組織化技術は重要な課題であるものの、両者の定義やその解釈は研究分野によってまちまちであった。「自己組織化」は自然科学のみならず情報科学、社会科学でも使われる概念であるが、とりわけナノテクノロジーの領域においては、化学と物理学、生物学や医学との異分野連携が進むにつれて、その定義と解釈に関する議論が世界的に始まっている。我が国では、2009年に「自己組織化ハンドブック」が250名を超す様々な分野の寄稿によって編集され、欧米においてもナノテクノロジーにおけるSelf-assemblyとSelf-organizationを「生気論」と「要素還元」の視点から問題提起する論文も出てきている。

こうした研究開発動向は、進化と適応によって展開してきた「生物」の「技術体系」と、産業革命以降「人間」が展開してきた「技術体系」の比較検証が「自己組織化」技術の意義をクローズアップしつつあることを指している。その根源には、エネルギーや環境、資源問題に有効に対応すべき技術革新とライフスタイルの変革を含むパラダイムシフトへの潜在的な時代要求があるともいえる。具体的には、自己組織化の応用分野としてこれまではエレクトロニクス、生体医療材料への応用に注目が集まっていたが、最近では欧米を中心として、超撥水表面、防汚表面、無反射表面などのバイオミメティクス材料開発への応用も進み始めた。また、ナノからミクロ、更にはマクロへの繋ぎとして、nmから $\mu\text{m}$ に到る繰り返し構造を作製するための鋳型としてブロックコポリマーの相分離構造が自己組織化の一つとして注目されている。これまでの相分離構造は二次元が主であったが、近年、3次元の相分離構造へと展開しており、今後は粒子内の相分離構造やジャイロイド構造に注目が集まると予想される。この分野は日米だけでなく、カナダでもNINT(National Institute of Nanotechnology：国立ナノテク研究所)において研究が進んでいる。

(参考情報)

- [1] 下村政嗣：科学技術動向2010年5月号「生物の多様性に学ぶ新世代バイオミメティック材料技術の新潮流」<http://www.nistep.go.jp/achiev/ftx/jpn/stfc/stt110j/report1.pdf>
- [2] 国武豊喜監修：「自己組織化ハンドブック」NTS出版(2009)
- [3] Bernadette Bensaude-Vincent, "Self-Assembly, Self-Organization: Nanotechnology and Vitalism". NANOETHICS, Volume 3, Number 1, 31-42, (2009)

#### (4) ナノ・マイクロ印刷技術

欧州ではプリンテッドエレクトロニクスに関する積極的な産学連携が図られている。ドイツに本拠地を持つ OE-A (Organic Electronics Association) には 155 の企業と機関が参加し、技術情報交換による市場開拓を推進している。米国は、コア技術・コア材料の開発に注力している。大学で開発された技術がいち早くベンチャー企業に展開され、知的財産による競争力を守る戦略が取られる。しかし、これらの技術が必ずしも最終的に米国で産業展開されるわけではない。E-ink や SiPix という米国発の電子ペーパー技術は、いずれも台湾企業に買収され、商品企画はアジアを拠点になされるようになった。台湾は買収や技術導入によりデバイス商品化スピードを速めており、機動力で日本企業に勝っている場合が見受けられる。韓国はウォン安によりリーマンショックからいち早く立ち直り、サムスングループと LG グループがフラットパネルディスプレイ製造に積極的に投資をしている。日本が技術で先行していた有機 EL 技術も、これらの韓国企業が積極的投資で商品化で先行している。この流れの中で、プリンテッドエレクトロニクスについても研究投資を増強しており、液晶ディスプレイに関する中国台頭後の新ディスプレイ技術での競争力維持に努めている。

なお、プリンテッドエレクトロニクスに欠かせないナノテクについては、最近日本で世界に先駆けて銅ナノインクの開発実用化が進んでおり、依然として日本が材料技術の強さを維持している。

#### (5) MEMS・NEMS 技術

これまでは、インクジェットプリンタヘッド、自動車用センサ、マイクロミラーアレイなどが主流であったが、ここ数年の MEMS デバイスの進歩は携帯用機器とゲーム端末用のデバイスの開発によっている。すなわち前者に使われる MEMS マイクロフォンや携帯電話の周波数帯を自由に選ぶコグニティブ通信用の MEMS スイッチや、フィルター (FBAR : film bulk acoustic resonator)、後者に用いられる慣性センサである。この次に来るとみられるのはセンサに自立電源と通信機能を持たせたセンサネットワーク技術であり、社会の安全安心や、エネルギーの見える化、健康モニタリング等社会の安定化にとって重要な課題解決型技術であり、将来のマーケットに向けて各国で取組が始まっている。

このことは以前からニーズ側、技術提供側双方の関心を呼んだが、ニーズに応えるだけの高機能化とそれに見合うコストとのバランスについて未だ見通せず、社会的実証が必要との認識が高い。センサネットを集積化 MEMS で製作する製造技術サイドと、センサネットを利用するサイドに認識の隔たりがあり、利用する側が必要最小限のスペックを製造者側に提示して、できるだけコストの低いデバイスを実現することが期待されている。

MEMS・NEMS 技術は総合微細加工技術であり、また、LSI との集積化を含む本格的な研究開発にはまとまった設備・装置が必要であることから、欧米では、益々、拠点化が進んでいる。米国ではトップ研究大学、欧州では半官半民の大規模研究所が拠点として機能している。また、MEMS・NEMS 技術は、“More than Moore”のためのキーテクノロジーとして期待されている。

## 2.4 計測・評価・解析

### 2.4.1 概観

計測・評価・解析は、ナノテクノロジーの根幹を成す共通基盤技術である。本領域では7中綱目、走査型プローブ顕微鏡、電子顕微鏡、放射光・X線計測（SE、自由電子レーザー）、中性子、ミュオンスピン回転/緩和/共鳴法（ $\mu$ SR）、超高速時間分解分光、標準（物質・計量・評価法）の各技術について国際比較を行った。

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、ナノテク全体の中での戦略として体系的・俯瞰的強化を実行している。欧州は新しい計測技術を長い時間をかけて生み育てる土壌と実績がある。日本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、高分解能・高機能原子間力顕微鏡など特定分野で世界をリードする技術を有する。韓国は以前に比べて技術力が向上しつつあるが、計測評価機器の大部分は外国からの導入であり、独自の計測技術開発という点では日米欧とまだ差がある。中国も同様であるが、優秀な研究者が欧米から帰国するなどして、今後急速に技術力が向上する可能性がある。

各中綱目の概要は、以下の通りである。

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

電子顕微鏡は、真空中でマイクロからナノメートルスケールの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。分解能を高めるための技術である球面収差補正装置では、日本は欧州に対し大きく出遅れていたが、色収差補正技術で注目を集める開発成果もあり、巻き返しが図られている。

放射光・X線計測技術は、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）を、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目的に利用する技術である。施設が充実している日米欧は、これを利用した研究活動が活発である。日米欧韓でX線自由電子レーザーの建設・運用が進められている。

中性子技術は、中性子が物質透過力、軽元素および隣接原子識別力、磁性検出能力に優れ、精密な原子・分子・スピン等の運動状態の観測も可能であることから、学術分野のみならず、材料開発、元素分析などの産業利用も盛んに行われている。高性能の加速器駆動型中性子源を保有する日米がリードしている。

ミュオンスピン回転/緩和/共鳴法（ $\mu$ SR）技術はパイ中間子の崩壊によって生成するミュオンは、独特の特徴をもつ磁気プローブとして、磁性体や超伝導体の物性研究に利用されてきた。また、水素が関与する化学反応などについても有益な情報をもたらす。ミュオン源である陽子加速器施設を保有する日米欧が精力的に研究を進めている。電池材料や水素貯蔵材料の物性を対象とした応用研究では日欧が若干優位にある。

超高速時間分解分光技術はピコ秒（10-12秒）からフェムト秒（10-15秒）の時間領域を対象とする分光法で、電子の励起状態や化学反応過程の解析に有効な手段である。大学

や公的研究機関の研究水準は日米欧韓がほぼ肩を並べる状況にあるが、総合力では米国が他をリードしている。

標準（物質・計量・評価法）技術は科学技術、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の装置と、装置を校正するための標準物質に分類される。日本では、ナノテク標準に関する ISO の 229 技術委員会（TC229）において、「ナノテク物質の測定と評価 WG」の議長国であり、欧米と共同で活発な標準化活動を展開している。アジア諸国は欧米日の後を追う状況にあるが、中国、韓国ではナノ計量標準の整備が進められつつある。

◆計測・評価・解析のまとめ

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	◎	→	研究水準は欧米に比肩しうるが、一部分野に人材育成の点で懸念がある。
	技術開発水準	◎	→	日本発の技術が牽引している分野もあり、企業も先端的計測技術へ積極的に取り組んでいる。
	産業技術力	○	→	基盤的技術は強いが、製品として突出したものが少ない。
米国	研究水準	◎	→	基礎から応用に至るまで高い研究水準にある。
	技術開発水準	◎	↗	技術開発水準は高く、ライフサイエンスへの応用で強み発揮。産学の連携も活発である。
	産業技術力	○	→	世界トップシェアの製品も多く、生産現場への応用でも進んでいる。
欧州	研究水準	◎	→	基礎から応用に至るまで高い研究水準にあり、研究人材も豊富。
	技術開発水準	◎	→	世界トップの技術を多数保有。新規技術の開発にも積極的。
	産業技術力	○	↗	高い技術開発水準を背景に、シェアを伸ばしつつある。
中国	研究水準	△	↗	欧米から帰国する研究者が増加しつつあり、一部分野で高い水準の研究成果が出始めている。
	技術開発水準	×	→	豊富な資金を背景に、海外から装置を積極的に導入している。
	産業技術力	×	→	装置メーカーはほとんど存在しない。
韓国	研究水準	△	↗	一部分野で高い水準の研究が行われているが研究者層が薄い。
	技術開発水準	△	→	特筆すべき技術は見当たらない。
	産業技術力	×	→	一部汎用機器のレベルは高くなってきている。

(注1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力 ]

(注2) 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3) 近年のトレンド [ ↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向 ]

## 2.4.2 中綱目ごとの比較

### (1) 走査型プローブ顕微鏡

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↗	原子間力顕微鏡 (AFM) を始めとする走査型プローブ顕微鏡 (SPM) の研究水準は高く、半導体、分子、バイオなどの幅広い応用が研究されている。原子分解能のスピニング STM (STM、操作トンネル顕微鏡) は欧州に比べ研究グループが少ないが、有機磁性分子を対象とした研究で成果があがっている。
	技術開発水準	◎	↗	超高真空 AFM による元素識別・原子操作/組立、液中原子/分子分解能 AFM、バイオ用高速高分解能 AFM、非線形誘電率顕微鏡、多探針プローブなど、日本発の技術が多数ある。また、スピニング STM に応用できる極低温 STM が開発されている。
	産業技術力	○	→	AFM、STM では高い産業技術力あり、装置の国内シェアは高いが、海外シェアは低い。また、汎用や研究開発分野用の装置が主で製造現場用は少数である。
米国	研究水準	◎	↗	極低温・超高真空 STM の化学、バイオ、磁気への応用や、簡易型 AFM のバイオ応用を中心に高い研究水準にある。IBM の Almaden グループや Yale University の Udo Schwarz グループが Q-plus センサ方式の極低温超高性能 AFM による画期的な成果を発表している。
	技術開発水準	◎	↗	化学、バイオ、磁気への応用分野における極低温・超高真空 STM、バイオ応用を中心とする簡易型 AFM で高い技術開発水準にある。超高真空 AFM の技術が日欧よりやや劣るが、急速に進歩しつつある。
	産業技術力	○	→	世界シェアの半分を占める。特に半導体製造ライン用の CD-AFM (Critical Dimension AFM) は米国製が高いシェアを有する。
欧州	研究水準	◎	↗	STM、AFM、走査型近接場光学顕微鏡 (NSOM または 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。IBM Zurich の G. Meyer グループが Q-plus センサ方式極低温 AFM で画期的な実験結果を報告している。
	技術開発水準	◎	↗	Q-plus センサ方式や Kolibri センサ方式の水晶振動子を基盤とする超高分解能 AFM、原子分解能の交換相互作用力顕微鏡、スピニング偏極 STM など世界のトップ技術が多数ある。
	産業技術力	◎	↗	グローバル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も独・スイス・ロシアなど欧州製のものが多い。Q-plus センサ方式の超高分解能 AFM もグローバルに市販されている。
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やや劣る。スピニング フリップ STM 分光の研究成果が出始めている。
	技術開発水準	×	→	超高真空 STM や簡易型 AFM の大半は、潤沢な予算で海外から輸入した市販装置・技術を使用している。独自の装置校正手法や、バイオ分野・ナノ材料分野への応用が見られるが、まだ発展途上である。
	産業技術力	×	→	特筆すべき SPM メーカーは存在しない。
韓国	研究水準	○	→	超高真空 STM などによる研究水準は高く、スピニング SPM の研究グループもあるが、SPM 全般で比較すると欧米や日本よりやや劣る。
	技術開発水準	△	→	特筆すべき発明や先行技術は見当たらない。
	産業技術力	△	→	汎用機器のレベルは高く、日本の研究機関や欧州の国家計量標準機関でも導入されるようになってきた。

全体コメント：

原子間力顕微鏡 (AFM) を始めとする走査型プローブ顕微鏡 (SPM) が開発されて 25 年余りが経ち、観察ツールから計測ツールへと変わりつつある。SPM には AFM、STM、NSOM (または SNOM) などがあり、今後の産業ニーズが極めて高い計測技術であるため、各国が開発にしのぎを削っている。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に進んでいる。また、AFM による室温原子識別・原子操作/組立など追従を許さない技術がある。欧州は交換相互作用力顕微鏡、スピニング偏極 STM、Q-plus センサ方式 AFM などで世界のトップ技術を多数有する。米国はソフトウェアまで含めた汎用機器としての品質レベルは高い。これらの技術開発力を反映して、SPM を利用した先端研究は、日米欧は中韓に比べていずれも高い水準にある。一方、SPM 市場は汎用機器の世界シェアの半分を米国製品が占める。特に半導体製造ライン用の測長 AFM は米国製が大半を占める。欧州は高い技術力に支えられ、研究機器市場では高いレベルにある。国産機器は汎用や研究開発分野の機器が主で、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、中国には機器の市販企業はほとんどない。

(参考情報)

- [1] Morita, S.; Giessibl, F.J.; Wiesendanger, R. (Eds.) Noncontact Atomic Force Microscopy: Volume 2 (NanoScience and Technology), Springer-Verlag, 2009, 401p.

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(2) 電子顕微鏡

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	○	→	収差補正技術基礎研究はすべて欧米によって行われたもので完全に立ち遅れたが、ホログラフィ、3D トモグラフィなどの新規技術の開発に積極的に取り組んでおり、現在はほぼ追いついたと思われる。応用研究は論文の質・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おり、独自のアイデアも創出されつつある。低加速用高次収差補正機構(日本電子)は欧米からも注目されている。
	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(特に FEI 社、Carl Zeiss 社)に技術的に遅れをとっている。新型収差補正機構の早期商品化が待たれる。
米国	研究水準	◎	→	DOE の TEAM プロジェクトから多くの成果が公表されている。ただし、次期プロジェクトとして継続されるかは不明。主要研究機関は最新技術の開発・導入に積極的であり、応用研究は論文の質・量ともに高い水準。
	技術開発水準	○	→	NION 社が独自の照射系に限った収差補正機構を研究用に開発・販売し、一定の成功を収めている。電子線分光器等の周辺機器メーカー Gatan 社が独自技術を所有しており世界中で高いシェアを持つ。
	産業技術力	◎	→	FEI 社が電子顕微鏡本体、特にトモグラフィ、収差補正 TEM の技術が高い。Gatan 社が電子線分光器、特殊試料ホルダ等周辺機器で世界トップシェア。
欧州	研究水準	◎	→	電子顕微鏡理論、応用共に伝統的に高い水準。革新的な収差補正装置で世界をリード。2007～9年にかけて電子銃とその単色化技術も大きく進展している。ドイツにおいて低加速電子顕微鏡開発を目指した SALVE プロジェクトがスタートした(Ulm 大、Carl Zeiss 社、CEOS 社が参加)。
	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。ドイツの CEOS 社が常に新しい収差補正技術の開発に取り組んでおり、色収差補正技術を米国 TEAM プロジェクトに提供した。また超高压電子顕微鏡用収差補正機構を日本の FIRST プロジェクトに向けて開発する予定。
	産業技術力	○	↑	FEI 社の Titan をはじめ、高い技術力を背景にシェアを伸ばし、日本の主要研究機関にも導入され始めている。日本の電子顕微鏡産業に脅威となる競争相手。
中国	研究水準	○	↑	電子顕微鏡技術に関する基礎研究は少ない。国立研究機関は、最新の電子顕微鏡の導入には積極的であり、台数は飛躍的に増えている。欧米から優秀な研究者の帰国が増えており、研究水準は向上しつつある。
	技術開発水準	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
韓国	研究水準	△	↑	電子顕微鏡技術に関する基礎研究はない。ただしいくつかの国家プロジェクトにより日本から最新の電子顕微鏡が導入されている。
	技術開発水準	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。
	産業技術力	×	→	電子顕微鏡本体、周辺機器共にメーカーはほとんど無い。

全体コメント：  
電子顕微鏡技術はナノテクの研究開発に不可欠であり、日米欧が技術開発においてしのぎを削っている。欧州では分解能向上手段として収差補正技術の開発に成功し、これが世界の大きなトレンドとなっている。現在もっとも注目されているのは色収差補正技術開発で、CEOS 社と日本電子が開発を続けている。FEI 社は独自の電子銃・モノクロメータを製品化し、日本の主要研究機関にも導入されている。日本電子および米国 NION 社のモノクロメータ開発は研究開発レベルであるが、製品化は近いと考えられる。当分野の中韓の技術開発力は、日欧米に比べて劣る。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。

(参考情報)

- [1] Proceedings of IMC17 - International Microscopy Congress, Rio de Janeiro, 2010
- [2] Microscopy Society of America, Microscopy Today, <http://www.microscopy-today.com>
- [3] Tonomura FIRST\* International Workshop on "Challenges to New Developments in Electron Microscopy", Tokyo, 理化学研究所, 2010
- [4] Proceedings of M&M 2010, Portland, Microscopy Society of America, 2010

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(3) 放射光・X線計測

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	X線自由電子レーザーの施設が完成し、2011年度に共用開始。
	技術開発水準	◎	↑	公開されているだけでも、トヨタ自動車、ダイハツ工業、マツダなどによる自動車排気浄化触媒の研究や日本電気によるルテニウムナノ粒子の研究など多くの企業による成果報告がある。
	産業技術力	○	↑	大企業だけでなく中小企業を含めた産業利用を目的とする中部シンクロトロン光利用施設が建設中である。
米国	研究水準	◎	↑	米国の最大の放射光施設APS (Advanced Photon Source) はナノやバイオ、触媒等の高度な研究に対応するために、より高輝度高強度を目的とした大規模なアップグレードを計画している。
	技術開発水準	◎	↑	インテルのLi-Peng Wang博士は大学等と共同してAPSでSi半導体メモリの記憶保持時間を延ばす研究を行っている。
	産業技術力	○	↑	APSのビームタイムの10%程度が産業利用であり、大学等との共同研究を含めるとさらに多くの利用があると考えられる。
欧州	研究水準	◎	↑	X線自由電子レーザー、高X線放射光リングに力を入れてきている。
	技術開発水準	◎	↑	ヨーロッパ各国の共同で運営されているESRFの施設運営にヨーロッパ経済不況の影響がでてきている。ドイツBESSYや英国DIAMONDなどの各国放射光施設では支援セクションを設け産業利用を促進している。
	産業技術力	○	→	フランスの地元の産業への貢献を背景に2006年末に運転を開始したSOLEILでは農業、化粧品、薬品、化学、電気、建築、輸送、材料、エネルギー、環境・エコ産業の分野で積極的な利用を推進している。
中国	研究水準	△	↑	中国最大の第3世代放射光施設である上海放射光施設(SSRF)が稼働しており、7本のビームラインで実験が開始された。台湾では日本が技術協力して第3世代放射光施設を建設中である。
	技術開発水準	△	→	中国国内の企業動向は明らかではないが、企業による放射光を利用した研究はそれほど行われていないと考えられる。
	産業技術力	×	→	中国国内の企業動向は明らかではないが、放射光を利用した研究成果はまだ、生産現場まで浸透していないと考えられる。
韓国	研究水準	△	↑	PLS (Pohang Light Source) の高輝度化、3GeV-運転への改造中である。現在は協定の下に日本、中国の放射光施設を利用した研究が行われている。また、X線自由電子レーザー施設も建設中である。
	技術開発水準	×	→	基礎的研究が中心で、少なくとも公開された情報の範囲では企業の利用はほとんど無く、産業利用を推進する制度も無いようである。
	産業技術力	×	→	放射光を利用した研究成果はまだ、生産現場まで浸透していない。
<p>全体コメント：</p> <p>日米欧で第4世代放射光施設の計画、建設が進行中であり、既存の第2世代、第3世代の放射光施設は先端的学術研究から、産業応用を含む材料創製、プロセス研究への応用を中心とする解析的利用にシフトしている。中国、韓国では第3世代、第3.5世代の放射光施設の建設が行われ、第4世代の放射光施設も計画されている。公開が前提の大学等の学術研究に比べ、産業応用の実際は不明であるが、公開されている情報だけからでも、日米欧では大企業を中心に産業界が積極的利用していることがわかる。</p>				

(参考情報)

- [1] X線自由電子レーザー(XFEL)計画合同推進本部. <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/milestone/index.html>
- [2] SPring-8. <http://www.spring8.or.jp/>
- [3] 名古屋大学シンクロトロン光研究センター. <http://www.nusrc.nagoya-u.ac.jp/>
- [4] Argonne National Laboratory. <http://www.aps.anl.gov/Upgrade/>
- [5] Gibson, J. Murray "The APS and synchrotron facilities in the US and worldwide: a network perspective". Argonne National Laboratory. [http://www.aps.anl.gov/Users/NUFO/2009\\_Meeting/Presentations/Gibson.pdf](http://www.aps.anl.gov/Users/NUFO/2009_Meeting/Presentations/Gibson.pdf)
- [6] Tschentscher, T.; Gehrke, R.; Laasch, W. Joint European XFEL and HASYLAB Users' Meeting at DESY. Synchrotron Radiation News. 2010, 23(3), p.2-6

- [7] ESRF. <http://www.esrf.eu/news/general/council/>
- [8] BESSY. [http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/grossgeraete/azm/index\\_en.html](http://www.helmholtz-berlin.de/forschung/grossgeraete/azm/index_en.html)  
Diamond. <http://www.diamond.ac.uk/Home/ForUsers/industry.html>
- [9] SOLEIL. <http://www.synchrotron-soleil.fr/portal/page/portal/IndustrieValorisation>
- [10] アジア加速器プラザ. <http://www.aaplaza.org/>
- [11] PAL. <http://paleng.postech.ac.kr/>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(4) 中性子

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	2008年より稼働したJ-PARC中性子源(1MW)は、これまで、世界最高強度の欧州連合原子炉の100倍以上の瞬間強度を有し、これを利用した研究成果が近い将来期待できる。一方、研究用原子炉JRR3はこれまで同様高い成果を生み出し続けると考えられる。
	技術開発水準	◎	↑	世界最高強度の陽子加速器、中性子源の建設をほぼ独自の技術で完遂した。これにより、他国にはない高い技術力を有していることを示した。
	産業技術力	◎	↑	J-PARCの機器のほぼ90%以上は国内の産業界が製作・建設したものであり、その技術力の高さを示した。また、リチウム電池材料、水素吸蔵物質の開発研究、その他の工業材料の開発に中性子を利用することが進んでおり、他国にはない国際競争力を持ちつつある。産業界の中性子利用は他国にはないJ-PARCの非常にユニークな点でもある。
米国	研究水準	◎	↑	2006年に稼働した核破砕中性子源SNS(1.4MW)は、J-PARCと並び世界最強の加速器駆動型中性子源である。これを利用した優れた研究成果が得られつつある。
	技術開発水準	◎	↑	SNSは超伝導加速器を利用しており、その技術水準は現在においても世界最高レベルである。中性子源についての技術は我が国と協力をして進めており、両者がともに高い水準を持っている。
	産業技術力	◎	↑	SNSの機器の製造建設のほとんどは米国内の企業によってなされた。このような特殊な機器についての技術は高いレベルを維持している。
欧州	研究水準	◎	→	これまで、欧州連合原子炉(ILL)が高水準の研究成果を生み出してきた。また、英独仏には高性能の加速器型中性子源(ISIS)、原子炉が配備されており、相当の研究成果を出している。
	技術開発水準	○	↑	16カ国の参加がするスウェーデンの次世代核破砕中性子源ESS計画が2年後には動こうとしている。建設にはさらに8年間を要するが、技術力は高いものになると予想される。一方、すでに40年間稼働したILLは今後20年から30年の内にESSにその役目を譲るものと考えられる。
	産業技術力	○	↑	加速器型中性子源の建設を担える企業は欧州には現在ほとんどない。しかし、米日と欧州との協力によりその技術は徐々に欧州に提供されると同時に独自の底力により、その技術力は近い将来高いものになると思われる。
中国	研究水準	×	↑	中国は今年より核破砕中性子源CSNS計画の建設に入った。CSNSはJ-PARC中性子源の10分の1程度の強度を持つ施設である。現在、中国には加速器型中性子源の技術はほとんど無く、先進施設の模倣で進めようとしている。また、国内で中性子散乱を進める研究者はごく少数だが、欧米に留学中の研究者の引き戻しを進めている。日米に技術協力が要請されている。
	技術開発水準	○	↑	CSNSの建設に必要な機器の開発を独自に進めようとしている。現在、技術開発水準はあまり高くないが、将来的には高まることになろう。60MW級の研究用原子炉(CARR)の建設はほぼ終了しつつある状況である。
	産業技術力	○	↑	原子炉建設の技術は一定のレベルにあると考えられる。一方、CSNSの建設を行える企業は国内にほとんどないが、近い将来その技術力は向上するものと考えられる。
韓国	研究水準	◎	↑	新型原子炉の増設、欧米の留学生の引き戻しにより、中性子散乱における研究水準は飛躍的に向上し始めている。また、J-PARCの利用を正式に組織的に行うこととなり、その水準はさらに高まるものと考えられる。
	技術開発水準	○	↑	加速器型中性子源の建設を計画している。しかし、原子炉の技術を除き、加速器に係る技術開発水準は決して高いものではない。今後、特にJ-PARCとの開発協力が重要になる。研究用原子炉施設の増強を最近行っている。
	産業技術力	○	↑	原子炉建設技術は世界第一級のものを持っているが、大型陽子加速器の建設はなされておらず、建設を担える企業はほとんど無い。しかし、国家レベルの戦略により技術力は高まるものと考えられる。

全体コメント：

研究用原子炉は一部の建設(ドイツ、韓国、中国、オーストリア)を除き、世界的には収縮に向かいつつある。一方、加速器駆動型中性子源は世界のトレンドであり、将来さらにその潮流は拡大するものと考えられる。我が国は米国と並びこの技術のパイオニアである。この分野では英米日欧の国際協力がよく機能しており、これにより、米国SNS、日本J-PARCの建設された。今後、欧州のESS、中国のCSNSが建設される予定である。各施設は学術研究のみならず産業界の技術開発にも利用できることから、今後さらにその重要性が増すであろう。

(参考情報)

- [1] J-PARC Center, J-PARC Annual Report 2008. <http://j-parc.jp>
- [2] ESS European Spallation Source Scandinavia. <http://ess-scandinavia.eu/>
- [3] ISIS. <http://www.isis.stfc.ac.uk>
- [4] SNS Spallation Neutron Source. <http://neutrons.ornl.gov/>
- [5] CSNS China Spallation Neutron Source. <http://csns.ihep.ac.cn/english/index.htm>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(5) ミュオンスピン回転 / 緩和 / 共鳴法 ( $\mu$  SR)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	↑	ミュオンを用いた物性研究の研究水準は高く、超伝導体、磁性体などの基礎研究から、二次電池材料などの産業分野まで幅広い範囲で盛んに研究が行われている。J-PARCの超低速ミュオン実験施設が稼働すれば、さらなる研究の進展が期待される。
	技術開発水準	◎	↑	J-PARCで最高強度のパルスミュオン源が稼働しており、また阪大でも直流ミュオン源の建設が行われている。パルスミュオン源やレーザー解離法による超低速ミュオン源など日本で開発された技術が多くあり、技術開発水準は非常に高い。
	産業技術力	○	→	新規材料開発に向けて、リチウム電池の正極材料や燃料電池用の水素伝導体・水素貯蔵材料中のリチウム・水素の振舞いをマイクロな視点で研究するミュオン実験が行われている。超低速ミュオン源を用いた物性研究も計画されている。
米国	研究水準	◎	↑	研究水準は高いが、超伝導体などの基礎研究の分野の研究が主流であり、ミュオンを用いた材料開発などの応用研究は、日欧と比較してやや劣る。
	技術開発水準	◎	→	カナダのトライアンプ研究所で直流ミュオン源が稼働しており、高磁場下のミュオン実験など独自の装置開発が行われている。アメリカでは新しいミュオン源の計画はあるが、物性測定に使用されることは今のところ予定されていない。
	産業技術力	△	↓	以前は製薬関連の会社によりミュオンを使った物性研究がなされていたが、近年はあまり活発には行われていない。
欧州	研究水準	◎	↑	研究水準は基礎・応用とも高く、英国やフランスの研究者により、熱電材料や電池材料の物性応用研究が行われている。また、ドイツのグループによる水素貯蔵材料中の水素吸蔵サイト・脱離エネルギー等に関するミュオンを用いた研究は古くから行われおり、中性子散乱と相補的に組み合わせて研究され、重要な測定手段となっている。また、スイスでは、低速ミュオンを用いたスピントロニクスの研究も行われつつある。
	技術開発水準	◎	↑	英国のラザフォード研究所およびスイスのパウル・シェラー研究所 (PSI) でミュオン源が稼働している。特に減速法による超低速ミュオン源が実用化し、一般ユーザーへのビーム供与も行われており、技術開発水準は非常に高い。
	産業技術力	○	→	大手の製薬会社により非公開のミュオン研究が行われていたが、詳細は不明。
中国	研究水準	×	↑	ミュオンを用いた物性研究はほとんど行われていないが、日本や欧米の研究施設で多数の留学生等が研究を行っており、中国にミュオン施設を建設する計画も進行しており、今後急速に発展する可能性はある。
	技術開発水準	×	↑	ミュオン源の建設計画はあるものの、建設開始は早くても数年後であり、技術開発水準は未知である。
	産業技術力	×	→	現状ではミュオンを使った物性研究は行われていない。
韓国	研究水準	×	↑	ミュオンを用いた物性研究はほとんど行われていないが、韓国の研究者が J-PARC で実験研究を行う両国間の枠組み形成が進んでおり、今後、発展していく可能性はある。
	技術開発水準	×	→	技術開発水準は上昇してきていると考えられるが、現状でのミュオン源開発等の計画はない。
	産業技術力	×	→	ミュオンを用いた研究は行われていない。

全体コメント：

素粒子のミュオンを使用した物性実験は、独特の時間観測領域をもつ微視的観点からの磁気プローブとして、磁性体の磁気構造やスピンの揺らぎの観測、超伝導体の発現機構の解明等に貢献している。またミュオンはプロトンの同位体と考えられることから、水素の化学反応のトレーサーや物質中の水素の動きをシミュレートするプローブとしても、独特な知見をもたらし、研究の発展に寄与している。プロトン加速器施設で生み出されるミュオン源は、直流ミュオン源ではカナダのトライアンプ研究所とスイスの PSI があり、パルスミュオン源は日本の J-PARC と英国のラザフォード研究所が稼働し、世界各国の大学、研究機関や産業界の研究者にビームが供与され、物性の基礎研究や材料開発の応用研究などが盛んに行われている。また中国においても、建設中のプロトン加速器施設にパルスミュオン源の設置計画が進んでいる。現状では産業界の材料の製品開発を目的とした利用は各国の施設ともあまり進んではいないが、日本では、Li 二次電池の正極材料中の Li 拡散の観測、水素貯蔵材料中の水素位置や水素吸放出過程の解明、全固体燃料電池の電解質として期待されるプロトン伝導体中のミュオン拡散を観測し、プロトンの拡散過程をシミュレートする実験等、製品開発につながる材料の基礎研究が企業の研究者により実施されている。ミュオンを用いた物性研究の有用性が認識され始めており、今後産業界からの利用も増加していく傾向にあると思われる。

(参考情報)

- [1] Miyake, Y. et al. Journal of Physics: Conference Series. 2010, vol. 225, 012036.
- [2] Sugiyama, J. et al. Physical Review Letters. 2009, vol. 103, p. 147601.
- [3] Powell, A. S. et al. Journal of Physical Chemistry C. 2009, vol. 113, p. 20758.
- [4] Hempelmann, R.; Richter, D. Europhysics News. 1991, vol. 22, p. 110.
- [5] Drew, A. et al. Nature Materials. 2009, vol. 8, p. 109-114.
- [6] Bakule, P. et al. Contemporary Physics. 2004, vol. 45, p. 203.

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(6) 超高速時間分解分光

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	留意事項などコメント全般
日本	研究水準	◎	→	超高速分光の分野では、日本は長く米国、欧州とならんで世界のトップ集団を形成している。高い水準の研究は全分野にまたがり、極短光パルス発生の研究などで優れた成果があがっている。世界のトップレベルを維持し続けるには、若い世代の活力が必須だが、その育成がやや不足している。
	技術開発水準	○	↗	浜松フォトニクスのような先端企業や、三菱化学、富士フィルムなど材料に強い企業の分析部門で、大学・研究機関で研鑽を積んだ研究者が研究を行っている。また、産総研では産業に直結できる形で、理研では、学、官、産を結ぶユニークな位置で、極めて水準の高い研究が行われている。
	産業技術力	○	→	浜松フォトニクスは超高速分光関係を含め、光検出器一般で世界を牽引している。超高速レーザーの開発は、ベンチャーが育ちにくい我が国においては難しい面があるが、産業用を中心に徐々に高まりを示している。光学のレベルは高く、短パルスを利用した顕微鏡に関してはオリンパス、ニコンが強い。
米国	研究水準	◎	→	MITなどを筆頭に、全国に優れた研究者が多く、極短パルス光の発生、応用、それを用いた分光研究などで世界を牽引している。概して裾野は広いとされるが、近年特にライフサイエンスに重点を置いた研究に全体がシフトなど、トレンドであるトピックスに研究が集中する傾向が見られる。
	技術開発水準	◎	↗	レーザー開発や分光計測に関する研究は大学がリードして行っている。企業はシーズをいち早くとりあげて開発を進めている。高出力超短パルスレーザーシステムがコヒーレント社、カントロニクス社などやベンチャーのKML社で商品化されている。
	産業技術力	◎	→	コヒーレント、スペクトラフィジックス等、超短パルスレーザーを製造、販売する大企業がある。フェムト秒ファイバーレーザーが生産ラインに応用されている。
欧州	研究水準	◎	→	ドイツが質、量とも圧倒的に高い研究水準を誇り、マックスプランク研究所、マックスボルン研究所、ミュンヘン大学を始め、多くの大学、研究機関に優れた研究者が数多くいる。イタリア、オランダ、フランス、イギリス等にも、数は多くはないがそれぞれ存在感を持つ研究者がおり、多様性を保ちつつ連携して質の高い研究を進めている。
	技術開発水準	○	→	特殊であるが性能の高い超短パルスレーザーを製造、販売するなど、産業に近い技術力がある。また、東欧には高い非線形技術があり、光パラメトリック増幅器はOEMによって世界市場をほぼ独占している。また、短パルスを用いた顕微鏡開発ではカールツァイス、ライカが強い。
	産業技術力	○	↗	上に同じ。
中国	研究水準	△	↗	近年、急成長する経済を背景に力をつけ始めている。研究水準の高い外国の大学・研究機関で研鑽をつんだ若い世代の研究者が帰国し、中国で研究を始めている。ただし現時点では先進国の技術を導入している段階であり、世界水準で真に新しい成果がでるまでにはまだ時間がかかると思われる。
	技術開発水準	△	→	非線形結晶の開発は高い水準にある。レーザーおよびそれを用いた計測に関しては、現時点では外国から技術輸入を始めた段階であるが、科学アカデミー物理学研究所ではベンチャー会社を作り、フェムト秒パルスレーザー発振器を商品化している。
	産業技術力	△	→	優れた非線形結晶の供給に関して世界的に知られている。
韓国	研究水準	○	↗	ソウル大、延世大、高麗大、POSTECH、KAISTなどを中心に高い水準の研究が行われている。特に超高速X線回折や超分子の超高速分光では世界的に見て高い水準の研究が行われている。若い世代の研究者は多くは長期間米国でトレーニングを受けており、世界スタンダードを身につけている。ただし、研究者人口が少ないためやや層が薄いことと、米国の動向に敏感すぎる面があるため、韓国自身の独自性を育むには課題がある。
	技術開発水準	○	→	サムスン、LG等は高い技術開発力をもっていると思われるが、学会、論文等であまり知る機会がない。
	産業技術力	△	→	韓国自身の市場は大きくないので、現在、当該分野の産業技術力はそれほど高くない。
<p>全体コメント： 超高速分光の分野は出口にやや遠い反面、基礎科学と先端技術開発の基盤位置に存在するため、その活動の活発さは、国力の指標となるとともに、学術と産業を結び、次世代の研究者の養成のための基礎力に強く関わる。産業界における研究開発・技術開発は世界景気の影響を受けやすく、近々ではリーマンショックのダメージが大きく影を落としている。</p>				

(参考情報)

- [1] Ultrafast Phenomena XV: Proceedings of the 15th International Conference, Pacific Grove, 2006-07-30/08-04, Springer-Verlag, 2007.
- [2] Ultrafast Phenomena XVI, Proceedings of the 16th International Conference, Palazzo dei Congressi Stresa, 2008-06-09/13, Springer-Verlag, 2009.

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

(7) 標準 (物質・計量・評価法)

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	研究水準	○	↗	東大、東北大、阪大、長岡技大を中心に、ナノ計測技術の研究開発が進められている。また産総研 (AIST) 計量標準総合センター (NMIJ) では、各種ナノ計量標準技術を開発し、国家計量標準機関 (NMI) 間の国際比較測定において良好な結果を示している。NMIJ は、欧米の NMI 同様、産業界向けに依頼試験や認証標準物質頒布を行うことによって、自身が有するナノ計量標準技術を社会に還元している。
	技術開発水準	◎	→	JSR 社、日立ハイテクノロジーズ社、NTT AT 社を中心に、ナノ標準物質やナノ計測技術の研究開発が行われている。
	産業技術力	◎	→	上記の各社で、国家標準へのトレーサビリティを確保し、かつ国際 MRA (相互承認) 対応の校正証明書が添付された高品質なナノ標準物質から、手ごろな価格なナノ標準試料まで、幅広く販売が行われている。
米国	研究水準	◎	→	ノースカロライナ大 R.Hocken グループや米国の NMI である NIST (米国国立標準技術研究所) が、ナノ計測・ナノ計量標準分野で高い研究水準を保っている。
	技術開発水準	◎	→	半導体の技術組合である SEMATECH が NIST と協力し、半導体分野のナノ標準物質の研究開発を行っている。
	産業技術力	◎	→	KLA テンコールグループの VLST スタンダード社が、NIST トレーサブルと明記した校正証明書を添付して各種ナノ標準物質を国内外で販売している。
欧州	研究水準	◎	→	欧州の主要 NMI であるドイツ物理工学研究所 (PTB)・英国物理学研究所 (NPL) 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	◎	→	ドイツのハイデンハイン社、PI 社、SIOS 社、NANOSENSORS 社などを中心に、ナノ計測・ナノ計量標準分野で高い技術水準を誇る。
	産業技術力	◎	→	技術開発水準に同じ。
中国	研究水準	×	↗	ナノ計測に関する研究は開始したところである。また、中国計量科学研究院 (NIM) がナノ計量標準の整備を進めている。
	技術開発水準	×	→	ナノ計測装置・ナノ標準物質は、外国企業の製品である。
	産業技術力	×	→	技術開発水準に同じ。
韓国	研究水準	○	↗	韓国科学技術院 (KAIST) S. W. Kim グループを中心に、ナノ精密計測に関する研究開発が行われている。また韓国標準科学研究院 (KRISS) でナノ計量標準の整備が進められている。
	技術開発水準	○	↗	Park systems 社が半導体デバイス側壁計測用に、傾斜機構を持つ原子間力顕微鏡 (AFM) を開発するなど、独自の技術開発が進みつつある。
	産業技術力	○	↗	技術開発水準に同じ。

全体コメント :

標準 (物質・計量・評価法) 技術は、科学技術、貿易、法規制において、計測データの客観性を保証するために必須の基盤技術である。ナノテクノロジー分野の標準は、長さの国家標準にトレーサブル (追跡可能、遡及可能) 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、各国の国家計量標準機関 (NMI) によって研究開発及び産業界に供給・維持されている。ナノ計測データを国際間で受け入れる (ワンストップテストングを実現する) ためには、各国の NMI が高い技術水準・品質管理水準を維持する必要がある。ナノテクノロジーの進展が著しい今日、各国の NMI が単独で高い技術水準を保つのは困難であるため、自国の大学・企業と協力し、時には他国の NMI・大学・企業とも協調・競争していくことが求められる。

(参考情報)

- [1] 東大 高増 G. <http://www.nano.pe.u-tokyo.ac.jp/>
- [2] 東北大 高 G. <http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/>
- [3] 阪大 高谷 G. [http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp/top\\_jp.html](http://www-optim.mech.eng.osaka-u.ac.jp/top_jp.html)

- [4] 長岡技大 明田川 G. <http://mcweb.nagaokaut.ac.jp/~picotech/>
- [5] 産総研 (AIST) 計量標準総合センター (NMIJ). <http://www.nmij.jp/>
- [6] 国際度量衡局 ((BIPM). <http://www.bipm.org/en/home/>
- [7] JSR 株式会社 標準粒子. [http://www.jsr.co.jp/pd/fc\\_pd.shtml](http://www.jsr.co.jp/pd/fc_pd.shtml)
- [8] 株式会社日立ハイテクノロジー 100 nm ピッチ標準マイクロスケール. [http://www.hitachi-hitec.com/news\\_events/product/2007/mr20071207.html](http://www.hitachi-hitec.com/news_events/product/2007/mr20071207.html)
- [9] エヌ・ティ・ティ・アドバンステクノロジー株式会社 ナノテク・材料技術分野. <http://www.ntt-at.co.jp/product/technical/list/0309/?0309=1&numpp=10>
- [10] ノースカロライナ大 R. Hocken グループ. <http://www.coe.uncc.edu/~hocken/>
- [11] 米国 国立標準技術研究所 (NIST). <http://www.nist.gov/index.html>
- [12] SEMATECH. <http://www.sematech.org/>
- [13] VLSI スタンダード社 (KLA テンコール社グループ). <http://www.vlsistd.jp/>
- [14] ドイツ物理工学研究所 (PTB). [http://www.ptb.de/index\\_en.html](http://www.ptb.de/index_en.html)
- [15] 英国物理学研究所 (NPL). <http://www.npl.co.uk/>
- [16] ハイデンハイン社. <http://www.heidenhain.com/>
- [17] ピーアイ社. <http://www.physikinstrumente.com/>
- [18] SIOS 社. <http://www.sios.de/INDEXENG.HTM>
- [19] ナノセンサーズ社. <http://www.nanosensors.com/>
- [20] 中国計量科学研究院 (NIM). <http://www.nim.ac.cn/>
- [21] 韓国科学技術院 (KAIST) S. W. Kim グループ. <http://pem.kaist.ac.kr/>
- [22] 韓国標準科学研究院 (KRISS). <http://english.kriss.re.kr/>
- [23] Park systems 社. <http://www.parkafm.com/>
- [24] 製品評価技術基盤機構 (NITE) 認定センター. ワンストップテストティングとは. <http://www.iajapan.nite.go.jp/iajapan/gaiyou/onestop.html>

(註1) フェーズ [ 研究水準：大学・公的機関での研究レベル、技術開発水準：企業における研究開発のレベル、産業技術力：企業における生産現場の技術力]

(註2) 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3) 近年のトレンド [↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向]

### 2.4.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) 走査型プローブ顕微鏡

##### 溶液中原子分解能 AFM

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できず、分子を点として点の動きを観察していたが、液中 AFM では金沢大の安藤教授らによる高速化と京都大の山田准教授や金沢大の福間准教授らによる原子・分子分解能達成により、生体分子反応やモータータンパク質等の液中での分子形状の変化を実時間で精密観察できる可能性が出てきた。今後、バイオ高分子反応の観察は、光を用いた観察から高速・高分解能液中 AFM を用いた観察に変わるものと思われ、Nature や Nature Nanotechnology 誌で成果が発表されている。市販装置を使った研究も報告され始めている。色々な材料で実験が行われ、三次元のフォース・マッピングも行われるようになった。今後、触媒化学や電気化学への応用も急速に進展する可能性がある。

##### スピン STM

2004 年に非弾性トンネル分光とスピントリプルを組み合わせた Single-Atom Spin-Flip Spectroscopy が米国 IBM Almaden の Hienrich グループで開発され、その後、原子操作で作ったナノ構造と組み合わせた研究などに発展し、中国でも研究が進められている。2006 年、非弾性トンネル分光によってカールスルーエ大学の Wulfhekel らは強磁性体探針を用いたマグノン励起の観察に成功している。このようにスピン STM はスピンの励起状態を実空間で直接観察することも可能になった。スピン STM の観察対象は、有機分子（東京大学の川合真紀教授グループ、ストラスブルグ大学 Bucher 教授、オハイオ大学 Hla 教授グループなど）や磁性合金、強相関酸化物に広がりつつある。特にこの数年、有機分子の磁性をミクロな観点から調べる研究が勢力的に行われている。スピントロニクスや磁性物理の基礎の観点からもスピン STM を用いた研究がより普及し、発展していくことが予想される。

##### 非線形誘電率顕微鏡 (SNDM)

東北大学の長教授が発明した日本初の新しい SPM である非線形誘電率顕微鏡 (SNDM) が原子分解能を達成し、従来の走査型キャパシタンス顕微鏡 (SCM) と置き換わりつつある。SNDM は強誘電体メモリの開発などに応用できる可能性がある。

#### (2) 電子顕微鏡

##### 透過型電子顕微 (TEM) 鏡装置球面収差補正器

電子顕微鏡の分解能を高める装置として、近年、球面収差補正装置が開発された。基礎となる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、企業による製造技術は既に追いついたと思われる（日本電子）。日立はドイツ CEOS 社製収差補正機を用いた STEM 専用機を開発、市販している。高分解能分析電子顕微鏡として、走査透過型電子顕微鏡 (STEM) に収差補正装置を組み込ん

だ装置による単一原子分析が進められている。また、炭素系材料の解析のために、低加速電圧での高分解能観察が注目されている。

#### 走査型透過電子顕微鏡 (TEM/STEM) 用収差補正装置開発

近年大きなトレンドとなった球面収差補正装置は CEOS 社、米国 NION 社、日本電子がそれぞれ独自の技術開発を行った。日本電子社製収差補正装置の出荷台数は多くはない。日立ハイテクは CEOS 社製収差補正機を用いた STEM 専用機を開発、市販している。米国 FEI 社および日本電子はともに CEOS 社製収差補正機構を搭載した TEM および STEM を市販する。球面収差補正装置に現在は、色収差補正装置とモノクロメータの開発が注目されている。やはり米国 TEAM プロジェクトと組んだ CEOS 社と FEI 社の技術が先行しているが、日本電子も独自の技術で参入を図っている。

#### 電子顕微鏡関連国家プロジェクト

超大型の米国 TEAM プロジェクトは終盤を迎えており、次期プロジェクトが継続するかは現在のところ不明である。英国の Super STEM プロジェクト、EU の ESTEEM プロジェクトに加え、ドイツにおいて SALVE プロジェクトが低加速に特化した電子顕微鏡開発がスタートした (Ulm 大、ZEISS 社、CEOS 社)。日本では外村 FIRST プロジェクトがスタートしている。

### (3) 放射光・X線計測

米欧を中心に高輝度化のための第3世代の放射光施設の建設が進み、2009年に運転が開始されたドイツの DESY の PETRA III では世界最高レベルの高輝度を利用したマイクロおよびナノトモグラフィーなどの報告がされている。米国 Brookhaven, NSLS - II (3GeV、2015年)、スウェーデン Lund, MAX IV (3GeV、2012年以降)、スペイン (ALBA, 3 GeV、2010年)、デンマーク、ASTRID2 (0.58 GeV、2011年)、ポーランド PSLs (0.7 or 1.5 GeV、2014年) などの放射光施設が建設中である。この1、2年のうちにアジアでも中部シンクロトロン (1.2GeV、2012年)、韓国 PLS、台湾 (Taiwan Photon Source, TPS) (3GeV、2014年) など第2 - 3世代放射光施設が稼働する予定である。

アジア地域の放射光施設が増えるとともに、地域内なでの連携、協力が重要になっており、日本を中心とした、アジア、オセアニア地域の放射光研究の議論の場として、AOF-SRR 毎年開催されており、2010年は第5回が7月5-9日に韓国浦項 (Pohang) で開催された。

日米欧で第4世代の光源として X線自由電子レーザー XFEL の計画、建設が進んでいる。XFEL からの高輝度、高コヒーレント、超短パルスの X線を利用した研究により、対象は空間的、時間的により微小な領域の研究へ進んでおり、ナノサイエンス・ナノテクノロジーにとって強力なツールとなると考えられる。

### (4) 中性子

世界の中性子源の潮流は加速器駆動型中性子源にある。米国 (SNS)、日本 (J-PARC) で、それまでの施設の100倍規模の施設の建設がなされた。一方、中性子散乱研究でこれまで世界の頂点にいた欧州では、各国の合意がようやく得られ、J-PARC の五倍の性能

(5MW) の ESS をスウェーデンに建設することが決定された。一方、中国は先進国のこのような動きを早期にキャッチし、J-PARC の 10 分の 1 ではあるが、これまで世界最強であった ISIS 施設の規模の施設の建設に着手したところである。一方、韓国は自国にならない技術であるために、大勢の研究者を J-PARC に派遣しその経験を得ることから始めることを進めている。このようなことから、先進各国に加速器駆動型中性子源が多数建設されることが大いに想定される。その際、我が国は今後も国際的な協力・連携の中心的役割をもつものと期待できる。

#### (5) ミュオンスピン回転 / 緩和 / 共鳴法 ( $\mu$ SR)

スイスのパウル・シェラー研究所 (PSI) では、固体 Ar・窒素での、表面ミュオンの減速と再放出、いわゆる減速法による低速反ミュオン粒子  $\mu^+$  が開発され、様々なナノ物質、薄膜の実験にビーム供与が行われている。一方で、高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、理研・RAL ミュオン施設では、Mu ( $\mu^+$  が  $e^-$  と結合したパラマグネティックな電子状態) のレーザ共鳴イオン化法という全く別の手法で、低速  $\mu^+$  を生成する研究が進んでいる。2000 °C に加熱したタングステンから蒸発してくる Mu を、大強度のパルス状ライマン  $\alpha$  光を用いた共鳴イオン化プロセスを通じて、より輝度の高い超低速  $\mu^+$  生成をする手法である。時間分解能 (サブ ns)、打込み深さ (1 nm) を含めた空間分解能、強度等において、レーザ共鳴イオン化法は減速法を凌駕している。現在、建設が進行している J-PARC ミュオン施設 (MUSE) では、そのパルスという特徴を生かして、レーザ共鳴イオン化法による、高輝度・大強度超低速  $\mu^+$  専用ビームチャンネル建設が計画されている。日本国内での、表面、薄膜・多層膜、スピントロニクス等の様々な研究分野において新しい展開を期待される。また、英国のラザフォード研究所でも同方式の超低速ミュオン源の建設計画が進められている。

#### (6) 超高速時間分解分光

超高速分光の研究開発は大きく 2 つの方向に動いている。第一の方向は、より短い時間領域の科学を目指したアト秒光パルスの発生とそれを用いた計測である。現在では高強度のレーザを用いて数百アト秒の光パルスを生成させることが可能であり、それを用いたサイエンスが展開しつつある。ただしフェムト秒領域までとは異なり、アト秒パルスは本質的に軟 X 線パルスであること、アト秒では分子の核の動きは止まっているため研究対象は自ずと電子の動きとなる。したがって、しばらくは物理分野の研究者によって気相分子を対象としてサイエンスの広がりが検討されると思われる。第二の方向は、フェムト秒領域までの超高速分光の手法と対象の拡大である。赤外～可視～紫外光領域に関しては短パルスレーザ技術が成熟し、かなり自由に利用できるようになってきている。これを背景に、基礎研究の深化としては反応の遷移状態に迫ろうとする研究の試みが進むと思われる。研究対象の拡大としては単純な分子に対する研究から、実学的にも重要な界面、超分子、生体、新材料等の超高速現象の解明が進み、より広い領域に知的基盤を提供する分野として発展すると考えられる。さらに、超高速分光によって培われた技術による新しい (生体) イメージングなど周辺領域への波及が進み、X 線や電子線を用いた超高速回折実験が新しい計測法として一般化していくと思われる。これらによって、超高速分光は基礎科学としての単なるフロンティアにとどまらず、大きな広がりや厚みをもつ分野になると期待され

る。

## (7) 標準（物質・計量・評価法）

### 走査電子顕微鏡によるフォトマスク線幅の校正

現在、画像測定器の受入検査規格の国際標準化が進んでいるが、その規格を満たすために校正値と不確かさが明記された線幅標準が必要である。産総研は、産業界からの要望を受け、2010年6月よりフォトマスクの線幅標準の供給を開始した。校正範囲は線幅 500 nm ～ 10  $\mu$  m で不確かさは約 60 nm である。

### 3. 共通課題

#### 3.1 共用拠点・研究開発拠点（融合・連携促進の方策）

##### 3.1.1 概観

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

日本では「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」で本格的に始まり、現在は第二期の位置づけにある「ナノテクノロジー・ネットワークプロジェクト（ナノネット）」として推進されている。2011年度は第二期の最終年度にあたる。第二期ナノネットの特徴は運営の継続性を目指して課金制を導入したことで、各センター・拠点で運営の工夫が行われている。しかしながら、制度上・運用上の問題があり、継続的な運営のためには解決されるべき課題は多い。産業界の共用施設使用のニーズは益々高まっている一方で、測定機器など設備の老朽化が懸念され始めている。まだ全般的に研究者が設備の共有化に慣れておらず、また、イノベーションの立場から融合・連携を促進する工夫も十分とはいえない。今後の深刻な問題は、日本のセンターが国際的に開かれているとはいえない状況にあることであり、積極的に海外から研究グループを誘致している主要国と大きな差がある。

米国では共用研究開発拠点を世界に先駆けて開始し、NNIN（国家ナノテクインフラネットワーク／NSF）14拠点、NCN（ナノテクコンピューターネットワーク／NSF）7拠点、NSRC（ナノスケール科学研究センター／DOE）5拠点を代表にして分厚いインフラが計画的に整備されてきた。年間100-150億円が投入され、異分野融合研究やK-12教育プログラムの教師養成の目的のために有効に利用されている。NSFでは教育プログラムの実施がファンディングの条件にもなっている。そのため、ファンディングを受ける側は積極的に独自の教育プログラムを推進しており、幅広い層におけるナノテクの理解増進と次世代研究者の人材育成につながっている。NNINやNCNは外部に開かれた共同利用施設であり、NSRCはプロジェクトあるいはプログラムを実施するための研究拠点としての機能と共同利用施設としての機能をあわせもつ。これらの充実した施設を利用して、米国では大学の若い研究者やベンチャービジネスが研究開発活動を展開している。NNINが最も代表的だが、14拠点の中で東のコネル大学、西のスタンフォード大学は共同利用施設としての経験が豊富で、NNIN全体を牽引している。学術的な成果が出る一方、ナノテクノロジーを活用した実用化から事業化への展開は現時点ではまだそれほど目立っていない。NNINは国家予算への依存度が低い中で運営に成功している（運営費に占める政府公費の割合は半分以下であり、拠点機関自身の経営努力により維持されている）。運営費の内訳は、NSF予算、利用料金、州政府マッチングファンド、寄付金（個人や企業）、そして大学の自己負担金である。NNINの各拠点は地元企業との連携が強く、企業にとっては大学が研究情報、情報交換の場として重要な機能を果たしている。大企業よりもベンチャーや中小企業の利用者が多く、裾野拡大への貢献が大きい。利用施設と企業との間に

立って総合的なアドバイスをおこなうコンサルタントビジネスも存在し、地域経済と強力に結びついているケースもある。DOEではエネルギーフロンティア研究センター(EFRC)として46の研究拠点を設置、2009年に開始している。さらにエネルギーイノベーションハブとして施設共用拠点プログラムを2010年に開始、共用施設拠点と研究開発拠点の2つのネットワーク事業を重層的に展開している。46のEFRCは、実にその7-8割がナノテクを主要テーマとする拠点である。NSFやDOEのファンディング政策は学際研究が条件となっており、ファンディング側が共同利用施設や研究センター側に学際・融合のインセンティブを与える仕組みを構築している。ファンディングを受ける拠点機関側も自主的な努力を蓄積している。例えば、米国コーネル大学のDuffield Hallは大学側が努力して寄付金を集めて建設した建物であり、共同利用施設や研究センターをこのHallに統合している。その他に注目すべき点として、ナノエレクトロニクス分野における共用研究開発拠点の役割が高まってきていることが挙げられる。ベンチャーキャピタルからの投資が継続的に行われており、Silicon Valley Technology Center (SVTC)など、施設・装置の利用には相当な資金が必要な施設においても大学発の知財がその実用化に向けた研究開発の対象となっている。

欧州における集中型研究拠点としては、IMEC (ベルギー) と MINATEC (仏) の2つが代表的な存在である。IMECは将来のナノエレクトロニクスにまで守備範囲を延ばし、日本企業の研究センターを誘致している。これらは、産業界からの More than Moore に対する要望を組織的に吸い上げることで、施設運営そのものがビジネスとして成立している。IMECでは、研究資金の100%を一機関からの委託にしないことで独立性を維持している。また、1つのプロジェクトを複数企業と共同研究することで中立性も維持している。プロジェクトから発生した知的財産は必ず拠点自身で保有している。MINATECには大学と製造センターが集積され、研究者数千人、製造・ソフトウェア従事者数万人のクラスターになっている。(213頁も参照)

共用施設のネットワークとしては、仏、英、蘭などが各国の状況に応じた独自の政策を展開している。英国のMNT Networkでは、産業化支援に重点を置き、地方政府との連携などを通して財政的独立を目指しており、当初より50%の資金調達を拠点機関側に要請していた。すなわち、ファンディングする政府機関側の仕組みと、拠点機関側の自主努力・運営による総合運営システムを構築している。欧州では、拠点機関の中核に研究開発を理解できるマネジメントの専門家が常駐しているという特徴がある。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を中心に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ている。

韓国では長期的に制度化された予算によって、教育科学技術省傘下に2つ、知識経済省傘下に3つのセンターを有し、いずれも約1000m<sup>2</sup>のクリーンルームを持つ国際的に開かれた共用施設が建設されている。NNFC(国家ナノテクファウンダーセンター)では、課金制度の運用により、既に3-4億円の収入があるなど、自主運営に入っている。総じて米国に次いで充実したインフラをもっているといえる。

### 3.1.2 共用拠点・研究開発拠点（融合・連携促進の方策）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	○	↑	大学・研究独法・公的機関からなる 13 拠点 26 機関が参加する 2007 年度より開始された文部科学省「先端共用施設共用イノベーション創出事業」ナノテクノロジーネットワーク（ナノネット）が、2011 年に最終年度を迎える。2002 年より 2 期 10 年にわたる共用基盤ネットワークプロジェクトとして行われてきた。今後、研究成果を追跡調査し、その後の成果の発展状況の把握、および国際比較の中での位置づけ・ベンチマークの必要性が問われている。また、2010 年度より文部科学省「低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワークの整備事業」低炭素研究ネットワークが開始され、大学・研究独法 18 拠点が参加している。ナノテクノロジーを環境・エネルギー技術に適用・融合させ、環境技術の実用化を加速させることを目的としている。 また、TIA-nano（つくばイノベーションアリーナ）として、ナノテク・ナノエレクトロニクスの国際中核拠点の一つを目指した拠点構築が開始されている。
	実効性	△	→	ナノネットは施設・設備の共用化と機関のネットワーク化を推進したプロジェクトとして内閣府総合学術会議から一定の評価を受けている。ベンチャー企業創業につながった成果も出ている。高度なインフラ設備を持たない若手研究者や研究を開始してまもない研究者が、先端共用設備を利用することにより、短期間で優れた成果を上げることができる事例が徐々に生まれてきている。今後は各機関の更なるネットワーク化の強化が望まれている。また、まだ開始間もない TIA 拠点成功の鍵は、如何にして参画機関や研究領域間の責任ある協力体制を築くことができるかにかかっている。
米国	取り組み水準	◎	↑	共用拠点・研究開発拠点構想は、1993 年ごろより世界に先駆けて開始された。この中でも 2004 年よりスタートし、国立科学財団（NSF）が主催、現在 14 大学が参加する国家ナノテクインフラネットワーク（NNIN）は、2009 年にその活動が評価され、2014 年までの延長が決まっている。NSF の目的はユーザファシリティを設置することで、ナノテク研究施設の揃っていない全米の研究者らのナノテク研究を加速・促進することであり、施設を開放し、外部の利用者に対して施設利用サービス、トレーニング、スタッフによる機器利用援助を提供することを基本コンセプトとしている。運営費は、主に NSF とユーザーからの利用料収入でまかなわれ、大学ユーザーの利用料は内外部同一である。施設自身では研究を行わず特徴的な共用拠点の運営システムを構築している。エネルギー省（DOE）が進める研究開発フロンティアエネルギー研究センター（EFRC）（46 拠点）はエネルギー分野の研究開発拠点として 2009 年にスタートしている。さらに DOE はエネルギーイノベーションハブも研究開発拠点として 2010 年に開始している。
	実効性	◎	↑	若手研究者の優れた研究成果が加速されること、たくさんのベンチャー創業につながった成果、および支援スタッフを含め雇用創出を生み出している。NNIN 内で、大学生のための研究インターンシップ事業（REU プログラム）や若手研究者の交流事業を実践しており、人材育成においても高い評価を受けている。
欧州	取り組み水準	◎	↑	欧州では、第 7 次研究開発フレームワーク計画 2007～2013 年としてナノテクユーザ共用施設・研究拠点のネットワークに力を入れている。この中でもイギリスのマイクロ・ナノテクノロジー（MNT）ネットワーク、ドイツの CCN 等、集中型拠点としてフランスの MINATECH、ベルギーの IMEC が有名である。 フランスでは国立科学研究センター（CNRS）と仏原子力庁（CEA）が中心となり、1999 年にはナノテクノロジー分野におけるフランスの公共研究体制を強化再編し、産業界と公共機関の研究開発の相互協力を支援する全国ナノテクノロジー研究ネットワーク（RNMNT）を構築し、その後 RTB に引き継がれている。このネットワークは、分散型（CNSR）と集中型（CEA-LETI）の混合型であり、産業化へのリニアモデルを構築している。ドイツでは連邦教育研究省（BMBF）がナノテクノロジー研究開発政策の中心であり、その研究促進プログラムが Competence Centers for Nanotechnology（CCN）である。CCN は 1998 年に開始された研究ネットワークプログラムで、分野横断研究、産学官連携などの促進を目的とし、ドイツ国内の 9 つの各地域でクラスターを形成している。現在はクラスター間をネットワーク化して連携を強化している。イギリスの MNT ネットワークはオープンユーザファイシリティプログラムであり、2003 年より開始されている。オープンファシリティを通じて、基礎研究から大量生産、高付加価値生産に至る企業の R & D サプライチェーンを支援することをミッションとしている。国内 24 か所に分散拠点ネットワークを構築している。IMEC は、1984 年にルーベン大学をスピンオフした約 70 名のスタッフにより非営利組織として創設されたナノエレクトロニクスとナノテクノロジーの分野で世界トップレベル、欧州最大の独立した研究センターである。IMEC の研究活動は、大学における基礎研究と産業界の技術開発の間にあるギャップを埋めるものとなっている。当該分野におけるプロセス技術のノウハウ、知的財産ポートフォリオ、最先端インフラ、そして世界中の企業・大学・研究機関との強固な連携が、IMEC の活動の中心をなしている。
	実効性	◎	↑	欧州でのネットワークプロジェクトは、地域拠点の利点を生かしながら、公的研究機関、大学、企業すべての連携をとる形が特徴的である。

中国	取り組み水準	○	↑	中国科学院 (CAS) と国家自然科学基金委員会 (NSFC) が進めるハイテク支援プログラムに基づいて、ナノ材料とデバイス応用の研究助成が開始されるとともに、ナノ科学技術センター (NCNST) が北京、天津、および上海に設置され、2005年より稼働を始めている。中国のナノテク基本戦略は、第一に基礎研究・応用研究の強化を図ることでナノ科学技術の長期的な進歩を可能にする創造的なマンパワーや体制を確立すること、応用面では既存製品の性能を高める新しいアプローチ (例えば、ナノ材料やナノ複合材) の開発を支援すること、そして長期的にはナノテクの新しい産業応用 (例えば、ナノバイオやナノデバイス) を花開かせるために国家レベルで戦略的な方策を取ることにある。
	実効性	△	→	現時点ではネットワークの強化は未成熟であり、集中センター拠点を整備することによって、拠点を中心とする研究方式をとっている。現状では、国研や有力大学による知識創造システム、様々なレベルの大学や学校での知識普及システム、企業と協調した技術革新や技術応用システムの確立に加えて、相互の人的交流・情報交換の強化を打ち出すなど、世界的なイノベーション政策のトレンドを意識したものになっている。
韓国	取り組み水準	◎	↑	共用施設として教育科学技術省が主導する組織に、NanoFab と呼ばれる NNFC と KANC の2つの組織がある。NNFC は韓国が国を挙げて大規模投資を進めている Si 系集積化デバイスの研究開発施設であり、2005年に韓国科学技術院 (KAIST) 内に建設され、ナノ総合ファブとして位置づけられている。KANC はスウォンに建設され、2006年から稼働している。NNFC に対して、ナノ特化ファブとして位置づけられ、シリコン以外の材料 (化合物半導体等) を対象として運営されている。さらに、知識経済省では、POSTEC 内の NCNT や韓国南部に KPEC、NCNE など計3センターを建設して運営も軌道に乗せている。また、科学技術省が主導して2003年に設立されたナノ技術研究協議会は、産・学・研それぞれの研究開発分野の専門機関で構成されてネットワークを形成している。ナノ技術関連の総合企画から人材育成、国際協力体系まで様々な機能を果たしている。
	実効性	○	→	日本やアメリカで行われているような大学・国研・企業すべてを含むような共用設備ネットワークプロジェクトは行われていなく、集中センター組織を取っているのが特徴であり、ベルギー IMEC を目指している。課金制度の運用により、NNFC では既に3-4億円の収入があるなど、自主運営に入っている。

(参考情報)

- [1] 「我が国の研究開発拠点構築に資する主要各国のナノテクインフラ投資戦略調査」H18年7月、独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター、海外比較調査報告書 G-Tec、CRDS-FY2006-GR-02
- [2] 「米国におけるナノテクノロジーネットワークに関する実態調査報告書」H19年3月、文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター

(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]

### 3.1.3 注目すべき研究開発の動向

#### (1) 米国の国家ナノテクノロジー推進戦略の動向

2000年にスタートした米国の国家ナノテクノロジー推進戦略（NNI）は、2000年からの初期段階プラン、2005年からの第1段階計画、2007年からの第2段階計画を経て10年目を迎えている。米国政府はナノテクノロジーの重要性を再確認し、今後更に2020年までの10年間の研究推進概要を策定し、以下の5つの重要な研究分野を発表している。①ナノスケール知識の集積化と設計に基づくナノ技術のシステム化、②分子自己組織化、量子的振舞い、新分子創製、ナノ構造と外場との相互作用の実験的・理論的制御、③バイオプロセスおよびナノバイオ界面の理解、④持続的発展のためのナノテクノロジーによる解決法、⑤イノベーションと産官学連携を促進するためのガバナンス。NNIにおいては、大学および国立研究所の施設整備、共用化、およびネットワーク化が重点課題に挙げられており、この10年間でNSFによる国家ナノテクノロジーネットワーク（NNIN）、DOEによるナノスケール科学センター（NSRC）、NISTによるナノテク科学技術センター（CNST）などを通して各省庁から統合的に進められた。これに加えて、DOEは2009年から共用施設設備のネットワーク（エネルギーイノベーションハブ）と課題解決型研究ネットワーク（エネルギーフロンティア研究センター）を両輪として進めており、国家戦略として多面的・複合的に施設整備、共用化、およびネットワーク化を推進している。

#### (2) 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。日本の共用施設は、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状況にあり、外為法により国際的な人材交流にも難がある。

韓国の大型施設に関する最近の大きなニュースとしてはPOSTECにXFEL（X線自由電子レーザー）を建設し始めたことである。

#### (3) 中韓の大型共用拠点連携

中国と韓国の大型共用拠点が2007年にMOUを締結している。北京の国家ナノ科学技術センターと韓国の国家ナノ・ファブ・センターである。双方の共用施設運営形態が比較的似ていることが有利に働いたと考えられる。一方、日本では、両国で共用拠点事業が開始される前に、それぞれの国のキーパーソンを招聘してワークショップを開催するなど、共用施設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十分に取れていない状況にある。共用施設で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。

中国では、スーパーコンピュータ、DNAソーター、重イオン加速器など最先端の大型設備が続々と建設され、あるいは新計画が始まっている。

#### (4) 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。

## 3.2 教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）

### 3.2.1 概観

ナノテクノロジーは、幅広い分野横断性が要求されること、科学から技術への移転速度が早いため日頃からの産学連携のネットワークが不可欠であること、これまでの常識が通用しない未知の際だった効果をもたらすこと、等によって、研究、教育・人材育成形態は極めて多彩である。これを大きく分類すると以下の二つに大別される。一方は、最先端の産業界で要求される短・中期の課題解決型のもの、他方は、学際性と複眼性を駆使した10～20年先の将来産業の中核を担う課題発掘型のものである。教育・人材育成を考えると、前者は産学官の研究拠点形成と一体となってエキスパートとしての若手高度技術人材を育てる形で、日本ではつくばイノベーションアリーナ（TIA-nano）、米国のAlbany、フランスのMINATECなどが挙げられ、実践型、短期即戦力が問われるものである。一方、後者は大学を中心に現在の幅広いナノテク分野のキャッチアップと分野融合を目指す学際領域専攻・学科・コースの設置による人材育成、さらに進んで物理、化学、生物といった従来の学問体系の知識の上に異分野のナノ理工学の基本知識を加えて新しい学問領域・新産業分野形成に貢献できる大学院生・社会人を生み出すための中長期的人材育成であり、そこでは基礎力、創造力、そしてデザイン力（専門力、応用力、学際力、構想力のバランスの取れた知識と能力により新分野を開拓する力）が問われるものである。その際、ナノテクリテラシーとして不可欠な社会受容（public engagement）、EHS（environment, health, and safety）、ELSI（ethical, legal, and social issues）、国際標準などの教育も重要とされ、海外では特に米国や台湾がK-12教育（小中高一貫教育）を含む先進的な教育を行っている。

日本では、ナノサイエンス、ナノ理工学、ナノ物質の名称で、東北大、千葉大、早稲田大、東洋大、高知工科大など10大学ほどで学際領域専攻が開設されている。東北大がナノ物質科学に特化して纏まっているように、小単位では学際性よりも専門性に重点を置かざるを得ない状況にある。これらとは区別されるべき二つの人材育成プログラム活動がある。1つは筑波大学と周辺地区の研究所群が一体となって研究活動と先端研究人材養成を行おうとする「つくばイノベーションアリーナ」である。H22年度から一部開始されており、ナノエレクトロニクス領域に重点を置いた即戦力の先端人材を養成する連携大学院を目指している。東工大、東京理科大、芝浦工業大学他との連携が図られている。

これに対して、2004年度より科学技術振興調整費の新興分野人材養成プログラムとして発足した大阪大学のナノ高度学際教育研究訓練プログラムは、物理、化学、生物、電気、機械等の従来型学問体系を主専攻として、6研究科、5研究所・センターが参加するナノサイエンスデザイン教育研究センターが、副専攻として提供する大規模オプションプログラムであり、ナノ理工学関連の異分野領域を幅広く教育研究訓練するものである。ナノテクノロジーの活用で最も大切な融合の促進・複眼的思考によって産業・社会に役立つ新規技術への応用力を育むことを目指している。これまでの7年間に修士課程370名、博士課程60名が修了しており、企業や大学等へ人材を供給している。このプログラムには、社会人向けの4コースの夜間講座が設置されており、国内10カ所以上の遠隔教室へのライブ配信によって便宜を図っている。実習を含む1年間のプログラムで、これまでに30

歳前後を中心に110社の企業からの620名余りが受講し、500名余りが所定の大学院正規単位を取得し修了している。大学院、社会人プログラムでは共通に、ナノテクの社会受容、ロードマップデザイン、科学技術政策、リスク、EHS、標準化、アセスメント手法、コミュニケーション、ELSIに関する講座も開設されている。

上記のような研究所や高等教育機関での取り組みは進展してきているが、一方で、小中高から大学院に至るまでの長期にわたる根幹的な教育プログラムは不在である。

米国で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。2000年の国家ナノテクノロジー戦略NNIには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であるという目標と計画のもと、着実に実行されている。全ての理工系の大学にナノテクノロジー関連コースが設けられている。

NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network) の14拠点に70の教育機関が参加し、K-12 STM (K-12: 幼稚園から小中高校まで、STM: science, technology, engineering and mathematics) の標準カリキュラムや共通課題設定などを含む人材育成活動が10年に亘り拡大継続されている。K-12教育の教官養成と教科書作りを着々と進め、外国語への翻訳も実施しており、若年層から社会人教育までの取り組みがなされている。長期戦略に基づき、不足気味の理工系、特に物理・化学・生物を含む材料科学系を中心とした大学、大学院に進学する若者を積極的に育成し、理工系に対する強い関心と学際力を兼ね備えた米国の将来を担うナノテク高度研究技術者・研究者の確保を目指している。大学レベルでは、種々の試みが行われているが、NNINによる10週間の先端研究体験プログラム (REU: Research Experience for Undergraduates) が全米規模で行われている。一部では、K-12活動に呼応して、高校教員向けの体験、訓練プログラム (RET: Research Experience for Teachers) も行われている。一方、大学院レベルでは、ナノテク専門コースも少なくないが、専門分野を究めつつ、ナノテクに必要な学際性にも優れたPhDを養成するための先駆的な人材育成活動が2000年から全米に先駆けてワシントン大学で始まった。これはNSF-IGERT (Integrative Graduate Education Research Traineeship) programの下に展開される複合学位プログラムで、理、工、医の3研究科10専攻が参加するナノテクノロジーセンターが提供するオプションプログラムであり、付加的にナノテク研究訓練を受けることにより、主専攻の学位と組み合わせでナノテクノロジー学位を出す制度である。この試みは成功裏に継続されており、現在までに60名余りが修了または在籍中である。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。

なお、MRS (材料研究学会) ではほぼ毎年のように、ナノテクに関連した人材育成活動の報告とあり方を議論するセッションが開かれている。

欧州では第7次フレームワークプログラム (FP7、2007-2013) において人材育成に力点が置かれており、Nanoforumの主導によるナノテク高等教育綱領に基づく大学院ナノテク学位コースが修士・博士課程で数多く行われている。そのうち7カ国の23大学のコースがNEAT (Nano, Enabling and Advanced Technologies Post-Graduate Course Directory) のサイトに纏めてリストアップされており、大学院生は自分にあったコース

をその中から選び出すと共に、企業からの求人にも活用されている。

その他のプログラムとして、グローニンゲン大学（オランダ）のナノ科学トップマスターコースがある。ナノテクの幅広さと深さを併せ持つ物質科学中心の英語による少人数エリート教育研究訓練プログラムであり、毎年20名（過半数が海外から参加）の優秀な学生を排出し、本コースはオランダで最優秀の評価を受け、世界的にも10指に入るプログラムの評価を受けている。また、学生がヨーロッパ内で移動するプログラムとして、パリ第6大学（フランス）・ウプサラ大学（スウェーデン）、ローマ第3大学（イタリア）のNanomat（ナノ物質科学）programが挙げられる、これはビデオ講義（ライブ中継）が一部利用されている。

社会受容で最も重要なリスクや倫理に関する市民との対話や、教育として特筆すべきものがグルノーブル・ジョーゼフフーリエ大学（フランス）のnanoSMILE活動である。ここでは、リスクの理解、有害物質の計測と除去、健康への影響、環境への影響など市民対話を中心とした平易な教育サイトが開設されている。

アジア地域では、まず中国では、大型共用施設で要素技術を習得するサマースクールが開催されるなどの取り組みが見られる。台湾では、米国型の積極的な小中高一貫の人材育成プログラム（K-12）が実行され、世界的にトップレベルの活動をしている。

韓国では韓国科学技術院（KIST）を中心に、教育省の支援を得てナノテクの理解度に関する調査、ナノテク製品の消費者モニタリングなどを通じて市民教育活動を展開している。ナノテク世界第3位を狙う韓国にとって、教育・社会受容活動をナノテクノロジー産業化の重要な課題として包括的な視点での取り組みが行われている。

韓国のナノテクに関する大学での教育重点化は著しく、2001年時点でのナノテク関連学科数は3つであったのが、2008年には59にも増加している。このような高等教育におけるナノテクの重点化は世界でも例をみない。

東南アジアのナノテク人材養成活動はまだキャッチアップの途上であるが、例えばベトナムを見ると、ハノイ、ホーチミンの両国家大学、ハノイ工科大学、ベトナム科学技術院などを中心にナノ計測・ナノ材料に関する研究施設を整備し国内での大学院教育に力を入れると共に、海外の大学との連合大学院の開設（一部を国内で教育、先端研究部分は日本、フランスなど海外で教育するシステム）、独・仏・英・露など先進国の協力を得た国際標準の国際大学の設置、海外への国費派遣などを通じて、博士号取得者の若手のリーダー養成を積極的に行っており、ナノ人材のレベルは確実に上昇している。勉学意欲と国家を担う気概によって、希少金属活用、エネルギー・環境分野などのナノ理工学を中心として10年以内に相当レベルにまで達すると予想される。

また、アジアでは15の国際地域が参加するASIA NANO FORUMが活動を継続しており、その中で国際人材育成活動としてAsia Nanotech Campが2008年（日本）、2009年（台湾）、2010年（シンガポール・マレーシア）で開かれている。これは、各国の35歳以下の若手研究者・大学院生40名程度が参加し、10日間に亘り、大学、研究所、企業を訪問し、セミナー、ワークショップ、シンポジウム、見学訪問を組み合わせた活動を体験し、国際性を涵養しながら最先端教育を受けるものであり、これら活動における日本の積極的な貢献を通じてのパートナーシップの形成が将来的に重要と考えられる。

### 3.2.2 教育・人材育成（ナノテクリテラシー含む）

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	△	↑	東北大、千葉大、早稲田大、東洋大、高知工科大など10大学ほどでナノテク関連の学際領域専攻が開設されている。また、つくばイノベーションアリーナにおける即戦力の先端人材養成、大阪大学のナノ高度学際教育研究訓練プログラムなど、特徴を持った象徴的な取り組みがおこなわれている。これら、研究所や高等教育機関での活動は進展してきているが、一方で、小中高から大学院に至るまでの長期にわたる根幹的な教育プログラムは不在であり、全体の方向性はまだ明確になっていない。
	実効性	△	→	上記の事業は単発の域を脱しておらず、それぞれの事業の実効性が社会に向けて明確になるには難しい面がある。
米国	取り組み水準	◎	→	人材育成を国家的戦略的に行う仕組みを基盤として有しており、国家ナノテクノロジー戦略NNIにも明確にその重要性が記載されている。NNIN・REUなど、産業界が積極的にインターンシップを実施。また、K-12STMの標準カリキュラムの教師育成コースを積極的に推進。教官の養成と教科書作りを着々と進め、外国語への翻訳も実施している。NSFのIGERT (Integrative Graduate Education Research Traineeship) programの下に展開される複合学位プログラムなども特筆すべき取り組みである。
	実効性	◎	→	受講生が社会に向けて見えるようになるための仕掛けがある。K-12教育プログラムに300大学、1万人の学生が参加。今後15から20年の間に約100万人のナノテクノロジー研究技術者が必要との目標と計画のもと、着実に実行されている。NSFやDOEが教育プログラムへの取り組みをファンディングの条件としている。
欧州	取り組み水準	○	↑	FP7において人材育成に力点が置かれおり、Nanoforumの主導によるナノテク高等教育綱領に基づく大学院ナノテク学位コースが修士・博士課程で数多く行われている。
	実効性	○	↑	科学技術に対する社会からの理解を深めようとする積極的な施策が、従来からなされている。
中国	取り組み水準	○	↑	大型共用施設で、要素技術を習得するサマースクールなどが開催されるなどの取り組みが見られる。一方、台湾の教育プログラムは世界有数のもので、米国と同様にK-12を推進し、世界的にトップレベルの活動。
	実効性	○	↑	人材育成の実効性を計るには、時期尚早と考えられる。ただし台湾は、世界で最も活発に教科書作りや翻訳が行われている。
韓国	取り組み水準	◎	↑	ナノテク技術施策の3本柱（技術、人材、施設）の1つと、産学連携にて、長期の予算確保がなされている。韓国科学技術院を中心に、ナノテク世界第3位を狙う韓国にとって、教育・社会受容活動は、ナノテク産業化の重要な課題として包括的な視点での取り組みが行われている。具体的にはナノテク専修コースが多くの大学でスタートしており、研究者数は8年間で4倍に増えている。
	実効性	○	↑	人材育成の実効性を計るには、時期尚早と考えられるが、上記取り組みの効果は着々と表れ始めている。

(註1) 現状について [◎:非常に進んでいる、○:進んでいる、△:遅れている、×:非常に遅れている]\*

\*我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↑:上昇傾向、→:現状維持、↓:下降傾向]

### 3.2.3 注目すべき研究開発の動向

#### (1) Albany -SUNY(米)の CNSE(College of Nanoscale Science and Engineering)

世界初のナノ科学・ナノテクのカレッジである。IBM や他企業との接触が良く、ニューヨーク州の支援も受けている。政府や企業が資金をサポートし、口も出さず INDEX (Institute for Nanoelectronics Discovery and Exploration) の実施には学ぶべき点が多いと考えられる。大学院生の大学間移動の考え、初めの2年間(マスターコースに対応)での勉強の質・量は、日本の大学院と大きく異なる。

#### (2) 米国のナノエレクトロニクス戦略における教育・人材育成

半導体企業のコンソーシアムである SRC がサポートする Nanoelectronics Research Initiative (NRI) が進行している。これは、全米の有力大学を地域ごとに4つのグループとし、2020年を目途に現在の CMOS に取って代わる新しいロジック用スイッチングデバイスを実証する研究開発を進めるものである。4つのグループとは、NY 州立大 Albany 校 (SUNY) の CNSE を中心とした INDEX、Notre Dame 大を中心とした MIND (Midwest Institute for Nanoelectronics Discovery)、テキサス大 Austin 校を中心とした SWAN (Southwest Academy of Nanoelectronics)、UCLA を中心とした WIN (Western Institute of Nanoelectronics) である。NRI の第一義的な狙いは、SRC のメンバー企業が関心を持っている長期的な研究開発を効率化・加速することであり、そのアプローチとして全米の大学を組織し支援しており、人材育成は目的として顕わには含まれていない。しかし、大学の探索的・萌芽的な研究をサポートすることを通じて、結果として、最先端の知識と技術をもった人材の育成を狙っている。

一方、ナノテク研究のための共用施設の例として、ロスアラモス国立研究所とサンディエゴ国立研究所が共同で運営する Center for Integrated Nanotechnologies (CINT) がある。ここでは、クリーンルーム施設等を使って行う研究プロポーザルが認められれば、大学院生等も整った設備を利用しての研究活動が行え、また様々な機関から集まる研究者と交流や情報交換できる場ともなっている。hand-on の研究経験を通じた人材育成のためには、このような場のほうがより効果的と考えられる。

#### (3) 欧州の中核研究拠点における人材育成

大学教員が主に運営している点が独特であり、2、3年先の実用研究に関連して、大学院生も参加している。欧州では、IMEC を中心として Eindhoven (オランダ)、Leuven (ベルギー)、Aachen (ドイツ) を結ぶ Point One、MINATEC を中心とした Grenoble-Crolles クラスタ、Global Foundry, X-Fab 等のファウンドリ企業を求心力とした Dresden クラスタ、の3つが中心的な研究開発拠点となっているが、その中で IMEC と MINATEC は人材育成にも力をいれている。IMEC では、隣接する Catholic University of Leuven と連携して多数の大学院生やポスドクを欧州各国から受け入れて研究・教育の場を提供しており、MINATEC でも最先端の研究開発に多数の学生が参加している。学生等を受け入れは、組織のミッションとしての人材育成という側面もあろうが、研究開発を推進するための貴重な戦力を、人件費を抑えつつ調達するというメリットは確実に存在している。

これら欧州の拠点においても、他国の拠点と同様、最先端の装置を学生等が実際に操作

することはなく、実際のデバイス作製プロセスはテクニシャンによって行われる。学生やポスドクは、装置レシピを編集したり、出来上がってくるデバイスを評価・解析することが研究活動の中心であることが多い。

より規模の小さな人材育成の取り組みの一例として、ナノテク関連の光学計測技術を対象とした NanoCharm プロジェクトを紹介する (<http://www.nanocharm.org>)。NanoCharm は、EU がサポートしているプロジェクトであり、エリプソメトリ/ポラリメトリを柱とした材料評価法の水準を高めていくことを通じて、ナノ材料とその応用におけるヨーロッパの競争力を維持していくことを目的としている。中心となっているのは、イタリア、フランス、オーストリア、ドイツ、チェコ、セルビア、イギリスの 8 つの公的研究機関・大学・企業である。共同研究、異分野融合、産学連携、解析手法の標準化、知識の流通、インフラ共用、人材育成等を促進する仕掛けとして、ワークショップやスクールを定期的に行い、また、データベースの構築を進めている。

#### (4) MINATEC (仏)

敷地南端の国立グルノーブル工科大学 (INPG、1971 年) が中心。過去、45 カ国間で 180 以上もの国際提携・協定を締結。毎年 500 名の留学生と 500 名の研究者を海外から迎える。教育従事者は 1,400 人。

教育プラットフォームは CIME Nanotech。予算は 2.5 M € / 年。専用クリーンルーム ~ 700m<sup>2</sup>。学生は Phelma (全教科英語教育の国際修士課程) プログラムから、技術系 1,300 名。専攻は 4 コース (機能性材料工学、マイクロ・ナノテクノロジー、電気通信工学、原子力分野特有材料工学)。国際留学生も受け入れ、国際提携も活発 (米 Caltech など)。交換留学も盛ん (ペンシルバニア大学など)。このほか、同 CEA キャンパスでは、フランス原子力科学技術学院 (INSTN) で毎年生涯学習過程の研修生 600 名を受け入れている。また ESRF (欧州放射光施設)、EMBL (欧州分子生物学研究所)、CNRS (国立科学研究所) などの国立研究施設に 10,000 人以上の研究者が従事し、学生の基礎研究への教育効果は大きい。

MINATEC は産学連携研究拠点であることから、ここでの教育・研究には、産業界との直接的な協力関係を利用でき、産業界代表出席での PhD 学生の発表会、研修計画の提案、サイト内の様々な活動・イベント参加、週間報告会 (MIDIS MINATEC) に参加できる、などから、将来の様々なキャリアパスの拡大が図られる。学生には大きな利点。

更に、国内の企業の多くが米国と異なり国営であることに起因して起業意識が低いフランスの学生に対し、大学・研究所密着型の MINATEC では、起業プロセスを間近に見せて起業意識の高揚を図ることが可能で、教育システムの重要な利点。

#### (5) 国立交通大学 (台湾)

半導体を中心としたナノエレ関連への大学院進学希望者は、他分野に比べて人気が高い。特に、交通大学はトップクラスとみなされていることもあって、大学院への競争率はいつも 10 倍以上とのこと。半導体エレクトロニクスへの就職が良いこともあって、修士で就職する学生も多い。また、台湾の全ての大学が博士課程を持っているわけではないことから、台湾のトップ 4 大学 (台湾大学、精華大学、交通大学など) の博士課程に進学する傾向が強い。台湾の全大学平均で、修士修了者の 10% が博士課程に進学する。

台湾の有力大学でも国際化が推進されており、外国人向けの特別なコース（全て英語）も用意されている。約20%の講義が英語で行われている。

博士を取得するためには、入学試験に加えて、筆記の資格試験を課している。資格試験は、それぞれの専門に応じて3科目からなり、博士進学後2年以内に3科目全てに合格する必要がある。2年以内にパスしない場合は、博士候補生としての資格を失う（アメリカのシステムに似ている）。この3科目はコア科目として、（修士までの）コースワークとして習得している内容からなる。資格試験をパスしてから、博士論文の最終試験（defence）をパスする必要がある。その際、雑誌等への論文発表件数がポイントとして加算され、最終試験をパスするには、最低クリアすべきポイントが設定されている。

## (6) 韓国の動向

国立釜山大学が近隣の大学と協力して、College of Nano Science and Technology を設営した。米国 Albany の CNSE に次いで世界で2例目である。また、KoNTRS は、英語のナノテク関連の教科書（大学向けでナノエレ等3部作）を作成している。

韓国には日本以上の厳しい受験があるが、外に向かう熱意は日本と桁違い。アメリカへの留学生の数は、最近のデータで中国12万8千人、インド10万5千人に次ぐ数で、7万2千人。日本はカナダ、台湾に次ぎ6位で2万5千人。特に、日本からアメリカへの大学院留学生数が他のアジア主要国と比べ少ない。また、世界水準の研究大学の育成を目的とした Brain Korea21 や世界水準の研究拠点大学育成事業等による重点投資、優れた外国大学との共同カリキュラム開発や英語による授業の導入が取り込まれている。

## (7) 中国の動向

アメリカへの留学生数は世界トップ。例えば精華大学は、義和団の乱後の対米賠償金により毎年多数の留学生をアメリカに送り出し、そのために作った語学学校が大学の基になっているが、帰国組みが教授となって作られた、もともとがアメリカ型大学である。現在は、985 プロジェクトや高水平プログラムで多くの重点大学から海外へ毎年5千人以上の大学院生を派遣している。東京教育大学が前進の筑波大に類似した上海の華東師範大学でも、日曜日に大学で講習会等のイベントを多数催しており、大学キャンパスは祭りのような賑わいである。土日に学生、教員がまばらな日本の大学とやる気とエネルギーが違う。

## (8) 筑波大学の「つくば産学独連携ナノエレ人材育成プログラム（2010～2014）」と TIA-nano 大学院構想への取り組み

日本におけるナノテクノロジーの世界拠点化を進める筑波研究学園都市（以下、つくば）に関し、現在の重要な課題として、1) 豊富な研究施設と人材が集まっているつくばにおいて研究、教育に対する相乗効果や集積効果を具体的にどのような手法で引き出すか、2) そのために如何に研究と人材育成の“共鳴場”作りを行うか、ということが挙げられる。世界競争の激しいナノエレクトロニクス分野の人材育成を進めるプログラムでは、特に、異なるカルチャーを有する産・学・独の連携による大学院人材育成システムの構築は大切なキーポイントである。

このプログラムでは、ナノエレクトロニクス分野での産・学・独の組織としての結びつきを強化し、この連携に相乗効果を出すために、広く国内から選んだ「連携コーディネー

タ」を6-7名配置することにより、高度な共鳴場を形成し、そこで知の流れ、技術の流れ、人の流れを引き起こす。そこに選ばれた大学院生が参加するシステムである。連携コーディネータは、従来のコーディネータとは決定的に違い、卓越した研究業績と産学独のうち2か所以上で実務経験を有するエキスパートをあてる。役割は、連携プロジェクトに参加する関連研究グループの研究スキルを把握し、企業の重要ニーズを把握、その上で、企業の重要ニーズを基礎科学に基づく教育研究課題にブレイクダウンし、研究スキルと適正を考慮して各院生の産学独アドバイザーを選定し、その各グループに教育研究課題を提案する。したがって、大学院生にとっては、高度な共鳴場により一大学あるいは一研究室のモノカルチャーだけでなく、独立行政法人研究所、企業研究所などの第一線の仕事の面白さと厳しさ、そして異なる文化を知ることができ、俯瞰的視野が広がる。(T字型人材育成の実行)このようなプログラムが2010年から5年間の計画で、TIA-nano(つくばイノベーションアリーナ)と密接に共同して実施されている。

一方、政府の新成長戦略の一つとしても、筑波大学を含めたTIAの形成が明記された。日本の基幹産業を担うナノテク関連の高度な人材育成が求められているが、ナノテク関連の高度インフラが整備されているつくばでナノテク関連の人材育成を行うことが最も有効と考えられており、筑波大学はその役割の一翼を担う。そのために、ナノテク、ナノサイエンス関連教員を集約している筑波大学において、先ず物質創成先端科学専攻の組織整備(当該専攻を再編して、専攻名をナノサイエンス・テクノロジー専攻と改めるなど)を行い、博士後期課程の入学定員と教員定員の増を計画している。加えて、最先端研究開発プログラム、WPI等のナノテク関連大型プロジェクトがつくば地区を中心として遂行されることに伴って、全国各地から大学教員、大学院生がつくば地区にTIAで多数滞在する。そのため、これら他大学院生の教育カリキュラムの一端を筑波大学が担うことで、つくば地区での研究効率化の促進が図られている。

(参考情報)

- (1) 潮木守一著「職業としての大学教授」中公叢書(2009年)
- (2) 潮木守一著「世界の大学危機 ー新しい大学像を求めてー」中公新書(2004年)
- (3) ペリン・ジュラルディン 筑波大での講演「ヨーロッパのエリート教育システム」(2007年)
- (4) 氷見谷直紀「国際的な学生流動性の向上」IDE現代の高等教育(2010年12月号p 43-47)

### 3.3 国際標準・工業標準

#### 3.3.1 概観

ナノテクノロジーに関する国際標準化はISO（国際標準化機構）におけるTC229設置（ナノテクノロジーに関する技術専門委員会、2005年）、IEC（国際電気標準会議）におけるTC113設置（電気・電子分野の製品及びシステムのナノテクノロジーに関する技術専門委員会、2006年）に呼応して、日、米、英、独、カナダが中心となって枠組みを構築してきた。TC229ではナノカーボン材料を中心に用語や計測・評価及び安全性についての議論が進められてきた。現在は定常期に移行しつつあり、作成する標準の質を如何に向上させるかが議論になっている。また各国とも標準化活動を行えるリソースに限りがあることから重複を排除した効率的な開発を行えるように広範な組織とリエゾンを結んでいるが、情報共有の域をなかなか脱しておらず、いかに調整を図っていくかが課題となっている。

TC229には当初WG（作業委員会）が3つ設置され、WG1は「命名法」、WG2は「測定および特性記述」、WG3は「EHS問題」である。その後、2008年に材料の仕様を構築すべきとの要請があり、WG4「材料規格」がTC229に形成された。ISO/TC229およびIEC/TC113は緊密に協力することを決定し、WG1およびWG2はJWG2という名の共同ワーキンググループを形成している。今後安全性に関する議論でも協力関係が深まっていくものと思われる。

日本はIECの動きに対応した活動の国内での充実をはかり、カーボンナノチューブの研究・技術者や企業の半導体部門の専門家による体制が徐々に整ってきている。経済産業省のナノテクノロジー関連国際標準化戦略では二酸化チタン光触媒とカーボンナノチューブが戦略課題として挙げられており、詳細なデータが公表されるにつれ、国際的にも日本のこれら材料に関する取り組みは広く知られるようになってきている。

今後はより広範なナノ材料に関して議論が展開するとともに、ナノテクノロジー製品のスチュワードシップ（事業者側からの自主申告制度）の議論の継続、製品のなかのナノ材料の安全性やリサイクル等の課題も議論が展開していくと思われる。

欧米の企業のナノ粒子のリスクに関する取り組みは、自ら提案するナノ粒子の管理策をデファクト化することにその狙いがあると思われる。産業展開をにらんだ熾烈な動きが始まっていると見るべきであろう。

各国とも、今後の科学技術や材料研究動向、産業化動向を正確に把握し、リスク管理等の社会基盤の充実及び産業化へ向けた戦略課題として位置づけており、中長期的な標準化の戦略策定は諸外国において必須と考えられている。

### 3.3.2 国際標準・工業標準

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	◎	→	ISO/TC229 (ナノテクノロジー) 発足時 (2005年) から積極的に関与しており、JWG2 (測定および特性記述作業委員会) コンビナー国 (議長国) として国際標準化活動に貢献している。年2回行われる総会およびそれに付随した会議に常に10名を超える代表団が参加しておりJWG1 (用語命名法作業委員会)、JWG2、WG3 (環境安全作業委員会)、それぞれにおいて国際標準を提案し、プロジェクトリーダーを務めている。更に2008年に新設されたWG4 (材料規格作業委員会) においても提案された標準化案の整理統合等において会議をリードする等、高い取り組み水準を維持している。
	実効性	◎	↗	日本が炭素系ナノ物体の開発および製造に高い優位性を有していたことから、カーボンナノ物体の用語や計測法の国際標準化を並列して行う等、体系的な標準化を組織的に行っている。またWG4においても、酸化チタンナノ粒子や炭酸カルシウムナノ粒子に関連した提案が中国から為されるや否や、国内の関連工業界と連携して対応にあたり、標準の内容を国内産業の要求に沿ったものへの修正に成功している。
米国	取り組み水準	◎	→	ISO/TC229 発足時から積極的に関与しており、WG3 コンビナー国として国際標準化活動に貢献している。年2回行われる総会およびそれに付随した会議に10名程度の代表団が参加しておりJWG1、JWG2、WG3それぞれにおいて国際標準を提案し、プロジェクトリーダーを務めている。WG4においてはコンビナー国である中国を補佐するための副コンビナーを務めている。2010年12月に行われたクアラルンプール総会では、コンビナー (中国人) が欠席したため、当該副コンビナーが会議を主導した。
	実効性	○	→	コンビナーを務めているWG3においては責任を持った標準の開発が活発に行われている一方、JWG2においてはプロジェクトリーダーの頻繁な交代や期日の不遵守等が見られる。JWG2では特に産業界からの参加が激減しており、開発された標準の産業界での実効性が懸念される。
欧州	取り組み水準	○	→	ISO/TC229 議長・幹事国である英国、および独が活発に活動している。独はIEC/TC113 幹事国でもある。フランス、ロシア等は継続して参加しているが、標準化への取り組みは消極的。EC-JRC はリエゾンとして継続して参加しているが、ECとして統一された活動は見えていない。欧州地域の標準化機関としてCEN/TC352がナノテクノロジーに特化した標準化活動を行っている。
	実効性	○	→	国立標準研からの参加が大勢。規制等での利用を意図した標準化活動の動向は十分注意する必要がある。
中国	取り組み水準	◎	↗	ISO/TC229 発足時から関与しており、WG4 コンビナー国として国際標準化活動に参加している。年2回行われる総会およびそれに付随した会議に継続して代表団が参加しておりJWG2、WG4それぞれにおいて国際標準を提案し、プロジェクトリーダーを務めている。WG4においては中国国内の材料規格を英訳したものを提案している。
	実効性	○	→	標準化活動が活発に行われており、数多くの国内規格が速成されている。国内規格には内容が詰まっていないものが散見され、それらを単に英訳した国際標準の提案は各国から修正を強力に要請されている。また、WG4の運営においても他TCとの連携への努力等が足りず、摩擦を生じさせている。
韓国	取り組み水準	◎	↗	ISO/TC229 発足時から積極的に関与しており、特にWG3において銀ナノ粒子に関する標準化を活発に推進している。JWG2、WG3それぞれにおいて国際標準を提案し、プロジェクトリーダーを務めている。一時期参加人数が減少したが、2010年12月のクアラルンプール総会では、10名程度の代表団が参加していた。更に、カーボンナノチューブ評価法に関する新たな標準化提案を行う意向が表明されている。
	実効性	○	→	提案された標準化原案に間違いや不備、矛盾等が見られる。韓国の標準化は主張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。

(参考情報)

[1] ISO-TC229\_N0791\_Business\_Plan\_November\_2010

(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]

### 3.3.3 注目すべき研究開発の動向

#### (1) ナノラベリングに関する動向

英国が国内で公表している公開仕様書（BSI PAS 130 : Guidance on labelling of manufactured nanoparticles and products containing manufactured nanoparticles）はナノ粒子を含むすべての製品が行うべき一定の表示に関する指針である。英国は同公開仕様書を CEN（European Committee for Standardization）規格の TS（技術仕様書）へ格上げすべく CEN において標準化作業を開始した。CEN で開発した標準はウィーン協定により ISO での投票を経て ISO 化が可能であることから、標準化作業の途中から日米の専門家が ISO 側専門家として参加した。同文書の ISO 化は規制等での利用も懸念され、その内容に関して非常に大きな議論となっている。原案では、例えば携帯電話には数千のラベルを貼らなければならない、そもそも発生するナノ粒子や含有するナノ粒子の計測法が国際標準として確立されていない現状における実効性等に関する疑問等が指摘されている。ナノ物体に関する安全安心の観点からのアセスメントは重要且つ早急に進めるべき問題であるが、ナノ物体を含有することに関する表示は、風評被害や産業活動の不必要な制限に繋がらないように、同標準化作業の進展に継続した注意が必要である。

#### (2) 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ゼーションまでの技術分野では日本が強みを持っている。ISO の国際標準化活動のなかで日本が主導的役割を果たしている背景である。ようやく日本からの積極的な対応がとられた 2007 年末に、ドイツが主導して米国と共同でもうひとつの国際標準化機関 IEC のなかにナノテクノロジーの標準化のための技術委員会 TC113 を設立した。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。

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

日本 NEDO の中西プロジェクトにおいて、最近 CNT のリスク評価とラット実験のより詳細なデータが発表された。今後の標準化と規制についての議論が活発になるだろう。

## 3.4 リスク評価、EHS

### 3.4.1 概観

EHS や ELSI の課題は直接的に規制策と結びつく課題である。2000 年以降を俯瞰したとき、鉛フリーハンダの日米間の特許紛争（2000 年）、日本製ゲーム機器のオランダ税関での差し止め（2001 年）、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した課題への対応を取ってきた。2006 年 7 月には RoHS 指令が施行され、2007 年 6 月には欧州化学物質規制所謂 REACH 規制の施行、2007 年 3 月の中国版 RoHS 指令施行と続いたが、今後さらに世界各国が独自の指令を施行する動きがある。アメリカの TSCA、日本の化審法といった化学物質規制の枠組みも含め、今後これまでの化学物質管理の枠組みでナノ材料を管理できるのか、新しい規制の枠組みが必要なのか、今後数年でその基本的な方向付けがなされるものと考えられる。

日本は当初、OECD における議論に集中し、その結果を待つ姿勢が強かったが、欧州議会や米国 EPA では、すでにナノ材料特有の規制が動きだしており、また、欧米の一部の事業者はこれらに先手を打つ形で自主的取組を実施している。そのため、EHS 研究は研究自体のクオリティだけでなく、製品の市場化（事業者）や法規制枠群への取り込み（行政）とセットで EHS 研究開発を実施しなければ、標準化に向けた議論に勝ち目はない。日本はリスク評価研究のクオリティにおいては、NEDO プロジェクト（産総研が実施するキャラクター化技術と有害性評価技術の組み合わせが世界をリードした）が OECD においても高い評価を受けており、熱心な産業界とのコミュニケーションも活発である。ただし、毒性学など EHS 関連の学術基盤層の薄さが気になるところである。また、日本は、国際対応の継続的な窓口機能を果たす部署が欠如している。一貫したコヒーレンシーのある戦略策定と、それに基づいた国際的なフレームへの対応が鍵となる。実効的な横串の連携と、中長期的な戦略策定を担うキーパーソンが決め手になると思われる。

米国では、EPA（環境保護局）によるナノ材料管理プログラム（NMSP: Nanoscale Material Stewardship Program）は事業者自身による有害性評価の流れをつくった。また、TSCA（有害化学物質管理法）による CNT（カーボンナノチューブ）の規制開始で有害性評価の一つの方向が提示されている。また、化粧品等に含まれる銀粒子の安全性に対する関心が高まっている。2011 年 2 月に発表された NNI の FY2012 予算要求では、EHS 関連の予算が前年度比 34% 増となっている。2011 年 3 月には、NNI の主導で EU との共同ワークショップ「US/EU bridging nanoEHS research efforts」が開催された。ワークショップでは、ナノテクにより実現された製品の環境・健康・安全に関する共同プログラムの推進や、プログラムに参画する欧米研究者間の実行機関の設立を目的として活発な議論が行われた。

ヨーロッパでも米国同様の認識の下、EU や英国は独自のプログラムだけではなく米国との共同研究を推進し、科学的なリスク評価技術、安全性の合理的な認定法、標準化等の早期確立を目指して ISO や OECD を巻き込んだ活動が高まっている。OECD では、

WP「工業用ナノ材料の評価法」の他、WP「ナノテクノロジー」が活動していて、議論はOECD内でも多様である。英国ではRoyal Commission of Environmental Pollutionがナノテクノロジーの安全性に関するレポートを発表している。

ただし、米国、EUは国家レベルでの取組みはしっかりしているものの、企業での実効性については大きな成果が見えない。むしろ、日本の企業の方が意識は高い。

アジアにおけるEHS・ELSI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、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いった具体的かつ戦略的位置づけがなされているのはアジアでは韓国、台湾、日本に限られる。特に韓国ではEHSに対する国家予算の投資比率は2010年で3%で2020年までに7%に引き上げるとしている。日本にはこのような定量目標はない。台湾では、各省が連携を取ってこの問題に取り組んでいる。労働委員会、環境庁、保健庁が共同でEHS問題に取り組む一方で、経済産業省が標準化と商業化を促進している。2009年にはナノテクノロジー標準化委員会を発足させた。台湾はANF(Asia Nano Forum)のまとめ役としてISO/TC229とIEC/TC113に参画しており、アジアにおける活動を整理している。全体の活動状況から、言葉の定義、計測・解析方法、EHS問題への取組状況、材料・製品の規格等を半年ごとに一覧表に纏めている。これらが今後の標準化に繋がるものと考えられる。



3.4.2 リスク評価、EHS

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	○	→	経産省／産総研による NEDO プロジェクト「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」は最初からリスク評価を目的として計画されたため、有害性評価や曝露評価の手法開発が効率的に行われた。炭素系ナノ材料について、OECD のスポンサーシッププログラムに対して主導的な役割を果たしている。また、厚生労働省や環境省においても、作業環境でのリスク管理、環境管理の側面で積極的に調査研究を実施している。ただし、毒性学をはじめ、この分野の研究者が非常に少なく今後の不安。
	実効性	◎	→	国の戦略や司令塔が存在しないため、省庁連携は全く取れておらず、体制を整えてきた欧米に対して、このままでは国際的なリードを保つことは難しいと考えざるを得ない。欧米が法規制枠組みでも先行しつつあり、後追いになりつつある。また、公的研究機関による取り組みは国際的に先行しているものの、高度なキャラクタリゼーション技術が必要であることもあって、大学研究室レベルにおける研究はいまだ断片的かつ少ないままである。産業界の問題意識は欧米よりも高く、実効性が見えてきている。
米国	取り組み水準	◎	↑	国内では、国家ナノテクノロジーイニシアティブ (NNI) が戦略を作成し、定期的に更新する体制が確立した。戦略の中で EHS 研究もきちんと位置付けられている。EHS 研究は、環境保護庁 (EPA) と国立労働安全衛生研究所 (NIOSH) が中心であったが、近年、食品医薬品庁 (FDA) や消費者製品安全委員会 (CPCS) も予算を増やしている。また、OECD や ISO の場でも存在感を高めている。
	実効性	○	↑	これまで希薄だったリスク評価という側面も EPA によるプロジェクトが動き出したことで今後加速していくものと思われる。また、NIOSH は今後、カーボンナノチューブ等の (法的拘束力のない) 作業環境基準値 (REL) の提案を行う可能性がある。国立科学財団 (NSF) のファンドも (日本と違い、省庁別でなく横断的に) 戦略的に配布されている。2009 年の EHS 予算の 40% 近くを占める。EPA、NIOSH、FDA は法規制枠組みの検討や整備と並行して EHS 研究を進めている点の特徴であり、OECD や ISO の場とうまく連携をとっているため、今後も世界の議論をリードしていくものと思われる。ただし、産業界での実効性はそれほど明確ではない。
欧州	取り組み水準	◎	↑	欧州委員会予算や、ドイツやフランス等各国予算による数多くの公的プロジェクトが進行中である。ただし、数が多く、似通ったものもあり、外から見ると整理が難しい。数多くのメンバー国が同じプロジェクトに参加しているため、意識や対応の差は大きい。そのため、研究機関における EHS 研究やリスク評価研究のレベルは様々である。リスク評価としての取り組みは、ENRHES プロジェクトなどで実施されている。むしろ、事業者が自主的取組として実施する EHS 研究のレベルが高い場合も多い。
	実効性	○	↑	欧州議会では法規制にナノ材料を明示的に取り込む試みが続いている。そのため、EHS 研究の多くは、REACH 規制などの法規制に実装されることを前提としていることから結果の潜在的なインパクトは大きい。ISO (さらに欧州規格の CEN) や OECD の場においても、存在感が大きい。 REACH 規制改正にナノマテリアルを取り込むためのプロジェクトが多数進行中 -REACH Implementation Projects on Nanomaterials (RIP oNs) RIP-oN 1 (Substance Identification) RIP-oN 2 (Information Requirement) RIP-oN 3 (Exposure & Chemical Safety Assessment)
中国	取り組み水準	○	—	リスク研究、毒性研究などの研究者は圧倒的に増えている。北京大学の中にナノ EHS センターも作られている。
	実効性	×	—	外からはほとんど実効性は見えない。
韓国	取り組み水準	◎	↑	EHS は国家ナノテク予算の 3%(2010 年) を占める。2020 年までに 7% に増やす予定。OECD の WPMN (工業用ナノ材料の評価法) での活動に参加。標準化に関する ISO/TC229 WG3(EHS) でも積極的に活動している。
	実効性	○	↑	今後産業界への浸透が期待される。

(参考情報)

[1] <http://www.aist-riss.jp/projects/nedo-nanorisk/>

[2] [http://www.oecd.org/document/47/0,3343,en\\_2649\\_37015404\\_41197295\\_1\\_1\\_1\\_1,00.html](http://www.oecd.org/document/47/0,3343,en_2649_37015404_41197295_1_1_1_1,00.html)

[3] [http://www.jniosh.go.jp/joho/nano/files/mhlw/Notification\\_0331013.pdf](http://www.jniosh.go.jp/joho/nano/files/mhlw/Notification_0331013.pdf)

- <http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=10899>
- [4] <http://www.nano.gov/>
- [5] [http://www.nano.gov/NNI\\_2011\\_budget\\_supplement.pdf](http://www.nano.gov/NNI_2011_budget_supplement.pdf)
- [6] <http://www.nature.com/nnano/journal/v3/n11/abs/nnano.2008.323.html>
- [7] 水処理と局所サンスクリーンにおけるナノスケール二酸化チタン <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=230972>
- [8] 抗菌スプレーにおけるナノスケール銀  
<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=226723>
- [9] [http://www.nano.gov/NNI\\_2011\\_budget\\_supplement.pdf](http://www.nano.gov/NNI_2011_budget_supplement.pdf)
- [10] <http://www.epa.gov/opptintr/nano/>  
<http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>
- [11] European NanoSafety Cluster におけるプロジェクトの紹介 <http://www.nanoimpactnet.eu/uploads/Compendium%20NanoSafety%20Cluster%202010.pdf>
- [12] ENRHES の最終報告書 : <http://www.nanowerk.com/nanotechnology/reports/reportpdf/report133.pdf>
- [13] Bayer MaterialScience (<http://www.baytubes.com/>)  
BASF (<http://www.basf.com/group/corporate/en/sustainability/dialogue/in-dialogue-with-politics/nanotechnology/index>)  
Nanocyl (<http://www.nanocyl.com/en/HS-E/Introduction>)
- [14] 化粧品指令 (<http://ec.europa.eu/consumers/sectors/cosmetics/documents/directive/>)  
新規食品規制 (<http://www.europarl.europa.eu/oeil/file.jsp?id=5583302>)  
RoHS 指令改正 (<http://www.europarl.europa.eu/oeil/file.jsp?id=5723432>)
- [15] <http://www.health.fgov.be/internet2Prd/groups/public/@public/@mixednews/documents/ie2divers/19064214.pdf>

(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]

### 3.4.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) 米国 EPA の TSCA 規制と吸入曝露試験

米国 EPA は単層 CNT と多層 CNT については製造業者ごとに異なる化学物質であるという立場をとっているため、通常の新規化学物質の届出ルール（商業目的で年間 10 トン以上の新規化学物質を米国において製造または輸入する企業は、製造または輸入の開始の 90 日以内に EPA に製造前届出（PMN）を提出）に従う必要がある。PMN を受け取った EPA は簡易ナリスク評価を実施したうえで、一定以上のリスク（unreasonable risk）をもたらすおそれがあると判断されれば、TSCA sec.5 (e) に基づき、同意指令が出される。この同意指令は PMN 申請者に対して出されるが、当該化学物質を取り扱う全事業者に適用できるように SNUR（重要新規用途ルール）という規制になる。

同意指令においては、1g のサンプルの提出とともに、「曝露後 3 か月の観察期間伴う、ラットを用いた 90 日間吸入試験（気管支肺胞洗浄液（BALF）分析も含む）」を提出することが義務付けられている。ただし、同時に、ナノスケール材料スチュワードシッププログラムの詳細プログラムに参加を通して、他の CNT 製造企業と共同で有害性試験を実施することも勧めている。それが実現すれば、この同意指令での試験要求は撤回すると言っている。

CNT の吸入曝露試験は、濃度が保たれ、適度に分散された材料を安定的に曝露させるためには高度な技術が必要であり、商業的に実施している機関は少ない。これまで公表された 90 日間吸入曝露試験は、Ma-Hock et al. (2009) と Pauluhn (2010) のみであり、「曝露後 3 ヶ月の観察期間」という EPA の要求を満たす試験は後者のみである。

(参考情報)

(1)U.S. Environmental Protection Agency, Sanitized Consent Order for P-08-0177, EPA-HQ-OPPT-2008-0252-0022

(2)<http://www.regulations.gov/search/Regs/home.html#documentDetail?R=0900006480966821>

(3)Ma-Hock L, Treumann S, Strauss V, Brill S, Luiz F, Mertler M, Wiench K, Gamer AO, van Ravenzwaay B, Landsiedel R. Inhalation toxicity of multiwall carbon nanotubes in rats exposed for 3 months. *Toxicol Sci.* 2009 Dec;112(2):468-81

(4)Pauluhn J., Subchronic 13-week inhalation exposure of rats to multiwalled carbon nanotubes: toxic effects are determined by density of agglomerate structures, not fibrillar structures. *Toxicol Sci.* 2010 Jan;113(1):226-42

#### (2) 材料の定義や同一性を巡る議論

ISO の TC 229 では、ナノ物体には、物体の 3 側面のうち少なくとも 1 側面が 1 ~ 100nm という定義が採用されたが、実際に規制文脈で適用するには、粒径分布を考慮した定義が必要になる。そのため、2010 年 7 月、欧州委員会の「新興および新規発見健康リスクに関する科学委員会（SCENIHR）」が、ナノ材料の定義として、サイズの上限を 100 nm と 500 nm の 2 つ置き、次のような判断基準で定義する方法を提案した

- ①サイズ平均が 100 nm より小さければ、ナノ材料とみなす。
- ②サイズ平均が 100 nm より大きく 500 nm より小さい場合、サイズ分布において 100 nm 未満のものが個数で 0.15%以上あれば、ナノ材料とみなす。
- ③サイズ平均が 500 nm より大きければ、ナノ材料とみなさない。

2010 年 9 月までパブリックコンサルテーションにかけられた。この結果を受けて、欧州委員会から、EU の文書や法規制において参照となるべき委員会勧告文書のドラフトが

提案された。ここでは、2つあった上限が100nmに絞られ、個数濃度は0.15%から1%になった。日本の産業界は10%程度を望んでいるようだが、「科学的な根拠に基づいた反論」を作成するために非常に苦労している。

この問題とともに、ナノ材料の同一性を巡る議論も今後活発になると予想される。米国EPAはカーボンナノチューブについて「EPAは、TSCAのもとでの新規化学物質を報告するという目的のためには、異なる製造業者や異なるプロセスによって製造されたCNTは異なる化学物質であると考えられるだろうと認識している」とし、A社のMWCNTとB社のMWCNTは別の化学物質、つまり1つ1つが新規化学物質であると判断している(USEPA 2010)。これに対して、米国の炭素系ナノ材料の製造業者の事業者団体である炭素のためのナノ安全コンソーシアム(NanoSafety Consortium for Carbon : NCC)は6段階の試験制度を提案し、MWCNTとSWCNTで1種類ずつの化学物質とし、代表的な1試料の安全性試験データが他の材料にも適用できるように求めている。

(参考情報)

- (1)SCENIHR, Public consultation on Scientific Basis for a Definition of the Term “Nanomaterial”  
[http://ec.europa.eu/health/scientific\\_committees/consultations/public\\_consultations/scenihr\\_cons\\_13\\_en.htm](http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/consultations/public_consultations/scenihr_cons_13_en.htm)
- (2)European Commission, Proposal for a definition of the term “nanomaterial” that the European Commission intends to use as an overarching, broadly applicable reference term for any European Union communication or legislation addressing nanomaterials  
<http://ec.europa.eu/environment/consultations/nanomaterials.htm>
- (3)U.S. Environmental Protection Agency, Multi-Walled Carbon Nanotubes and Single-Walled Carbon Nanotubes: Significant New Use Rules (final rule). Federal Register: September 17, 2010 (Volume 75, Number 180)  
<http://www.regulations.gov/search/Regs/home.html#documentDetail?R=EPA-HQ-OPPT-2008-0252-0124>
- (4)NanoSafety Consortium for Carbon : <http://www.nanosafetyconsortium.com/>

### (3) 二軸アプローチの適用

物理化学的特性が多様なナノ材料の有害性を評価するためには、物理化学的特性の異なるすべての材料にラットやマウスを使った吸入曝露試験を実施することは現実的でない。そのため、ある1つの材料に対して実施された吸入曝露試験の結果を、それと近い物理化学的特性を持つ材料に外挿するための提案がいくつかなされている。NEDOプロジェクト「ナノ粒子特性評価の研究開発」では、気管内注入試験を用いた「二軸アプローチ」を提案している(中西 2009)。DuPontのWarheit氏も同様に、“Pulmonary Bioassay Bridging Studies”として、気管内注入試験を使って相対評価を行う枠組みを提案している(Warheit et al. 2008)。BASFやBayer MaterialScienceは、短期の吸入曝露試験によって有害性の相対評価を実施することを検討しているようだ(各社の担当者への聞き取りによる)。また、2010年度から始まった経産省プロジェクト「低炭素社会を実現する超軽量・高強度融合材料プロジェクト」では、特性の変化するカーボンナノチューブについて、培養細胞を用いた試験を使って相対評価する手法の開発を課題の1つに挙げている(経済産業省 2010)。

(参考情報)

- (1)中西準子「ナノ材料リスク評価書策定に際しての考え方」NEDOプロジェクト ナノ粒子特性評価手法の研究開発 中間報告版：2009.10.16
- (2)Warheit DB, Sayes CM, Reed KL, Swain KA.. Health effects related to nanoparticle exposures: environmental, health and safety considerations for assessing hazards and risks. *Pharmacol Ther.* 2008 Oct;120(1):35-42.
- (3)経済産業省、平成22年度「低炭素社会を実現する超軽量・高強度融合材料プロジェクト」に係る委託先の公募について：  
<http://www.meti.go.jp/information/data/c100226bj.html>

#### (4) 欧州 FP7 の研究プロジェクト "ENPRA"

2009年5月に始まった、ENPRAは、正式名称を「工業ナノ粒子のリスク評価 (Engineered NanoParticle Risk Assessment)」と言う。エジンバラの Institute of Occupational Medicine (IOM) の、Computational Toxicology 部門のトップである Lang Tran 氏がリーダーであり、3年半で370万ユーロ(約4億5千万円)の予算規模である。15の欧州の機関と6つの米国の機関(EPA、NIOSH、NIH-NIEHSを含む)と連携している。研究内容は、*in vivo*, *in vitro*, *in silico* を駆使して、工業ナノ材料の環境・健康・安全(EHS)研究を実施するというものである。最初に実施する項目として、1) *in vitro* および *in vivo* 試験に利用してもらうために、工業ナノ材料サンプルを各パートナー機関に配布、2) 工業ナノ材料を分散するためのプロトコルを共通化、が挙げられている。プロジェクトの目的は以下のとおり。

- ・ 観察された毒性に対するクリティカルな物理化学的特性の特定
- ・ 観察された影響の基礎にある細胞あるいは分子レベルのメカニズムの探索
- ・ *in vivo* 試験で検証可能な、ハイスループットな代替毒性試験として用いることができるシステムの開発
- ・ 新規材料のハザードを予測するために構造活性手法の利用
- ・ *in vitro* での結果を *in vivo* や他の関連する職業曝露や消費者曝露に外挿
- ・ すべてのデータを「証拠の重み」としてリスク評価に取り込み

彼らは採用するアプローチを「曝露・用量・反応」パラダイムと呼んでいる。そして、標的は5つ(肺、肝臓、腎臓、心臓血管、発達)、エンドポイントも5つ(酸化ストレス、炎症と免疫応答、遺伝毒性、線維毒性、発達毒性)で、これらを *in vitro* で評価したいと考えている。もちろん *in vivo* での検証を行う。ここでの曝露評価は、曝露してから毒性発現までを、PBPK(生理学的薬物動態)モデルやQSAR(定量的構造活性相関)のような方法でつなげることを指す。さらに決定論的ではなく確率論的なモデルに拡張し、リスク評価を行うとのことである。

(参考情報)

(1)<http://www.enpra.eu/>

## 3.5 ELSI・社会受容

### 3.5.1 概観

ナノテクノロジーの ELSI（倫理的・法的・社会的問題）研究は、おもに欧州のテクノロジーアセスメント（TA）機関と米国の大学・研究機関などがリードしてきたが、ここ 2-3 年、日本、韓国、中国といったアジアでの ELSI 研究も進展がみられ、国際交流も盛んになってきている。日本では、日本学術会議や第 4 期科学技術基本計画にもテクノロジーアセスメントが明記されている。実効性という観点からは、欧州における食品分野、医療分野の ELSI 活動が注目される。今後は、「研究活動」から「政府や企業、そして市民も含めた社会の意思決定」に反映されるような活動にまで、成長していくことが期待されている。

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

日本ではこのような世界的な動向や、2005 年に進められた社会受容に関する科学技術振興調整費プロジェクトの提言を反映して、2006 年 4 月からの第 3 期科学技術基本計画でナノテクノロジーの社会受容に関するナノ粒子のリスク管理や、ナノテクノロジーの工業標準化の課題に取り組んだ。ナノ粒子のリスク管理策や工業標準化への取り組みが具体的な展開をはじめ、経済協力開発機構（OECD）や国際標準化機構（ISO）といった国際的枠組みのなかで日本は積極的に活動を開始し、国際的な枠組みの中で社会受容の課題をリードするところまで展開してきている。テクノロジーアセスメント（TA）の取り組みでは、JST-RISTEX「科学技術と社会の相互作用」プログラムで、東京大学を中心とした TA 手法・実践の研究開発が進められており、その他にも科学技術振興調整費の新興分野人材養成プログラムにおいて、ナノテク応用に関するコンセンサス会議が開催されるなど、パブリックエンゲージメントの取り組みも見られるようになってきた。

### 3.5.2 ELSI・社会受容

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	○	↑	JST/RISTEX 公募研究「先進技術の社会影響評価（テクノロジーアセスメント:TA）の手法開発と社会への定着」（i2TA）プロジェクトにおいて、ナノテクノロジーを対象とするTAが実施された。一方、新聞記事掲載数によると、ナノテクノロジーに関する社会の関心は、2008年をピークに減少気味である。
	実効性	○	↑	ナノテクノロジーの ELSI や社会受容を進める動きは徐々に拡大しつつある。また、日本学術会議提言や第4期科学技術基本計画にテクノロジーアセスメントの位置づけが明記され、日本でも TA の制度化が進む兆しが見えてきている。
米国	取り組み水準	◎	→	政府機関よりも、大学・研究機関・NGO などが推進力となって、ELSI 研究が進められてきている。特に、アリゾナ州立大学におけるナノテク ELSI 研究・教育プログラム、ウィルソンセンターの研究プログラムなどが成果を上げており、2015年までの継続が決まっている。
	実効性	◎	→	ナノテクノロジー研究開発法に ELSI 研究が義務付けられている点が大きく、上記の研究成果は EPA や DOE などの研究開発、あるいは規制政策に徐々に反映され始めている。
欧州	取り組み水準	◎	↑	2007年から EU で進められているナノテクノロジーの安全性に関するステークホルダーとの対話が継続されており、政府が主催する ELSI 活動としては世界の最先端を走っているといえる。特に今年、食品関連での活動が目立ち、Eurobarometer の特別報告書やベルギーにおける国際シンポジウムなどが開催され、成果を上げている。
	実効性	◎	↑	従来の TA 機関を中心とする活動から、規制機関や政府省庁による TA 活動へと拡大している点は、注目に値する。
中国	取り組み水準	×	↑	EHS 研究と比べると、ELSI についての研究活動や成果はまだ見えてきていない。2009年に英国リサーチカウンシルの支援で開催された「ナノ、規制とイノベーション：社会科学と人文科学の役割」ワークショップが中国で報道され、ナノテクノロジーの社会科学研究が推進された。
	実効性	×	—	取組みに準ずる。
韓国	取り組み水準	◎	↑	OECD の WPN（持続可能かつ責任あるナノテクのための政策を議論）が創設されて以来のメンバー国である。EHS や ELSI について国民の意識調査の実施や自ら国際会議などを開催して熱心に取り組み始めた。今後の活動拡大も期待される。
	実効性	◎	—	国立科学政策研究所にテクノロジーアセスメント部門が設立され、活動を開始している。

(参考情報)

- [1] Andre Nel, Tatsujiro Suzuki, "Summary of results from Nano2 Workshop Breakout Session," Tsukuba Nano2 Workshop, July 26-27, 2010.
- [2] Andre Nel, David Grainger et.al, "Chapter 4, Nanotechnology Environmental Health and Safety Issues: Nanotechnology Long Term Impacts and Research Directions, 2000-2020," Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020. Retrospective and Outlook. <http://www.wtec.org/nano2/docs/PdfPresentations/07-Nel-Nano-EHS-NSF%20final.pdf>
- [3] Special Eurobarometer 354 on food-related risks, November 2010. <http://www.efsa.europa.eu/en/factsheet/docs/sre-portsen.pdf>
- [4] International symposium, "NANOTECHNOLOGY IN THE FOOD CHAIN: OPPORTUNITIES & RISKS," 24th November, 2010, Brussels, Belgium.
- [5] JST/RISTEX 公募研究プロジェクト「先進技術の社会影響評価手法の開発と社会への定着」（I2TA） <http://www.i2ta.org/>
- [6] 日本学術会議、「日本の展望—学術からの提言 2010」、2010年4月5日、<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-tsoukai.pdf>
- [7] 総合科学技術会議、「科学技術に関する基本政策について」(答申)、(第4期科学技術基本計画(案))、平成22年12月24日、[http://www8.cao.go.jp/cstp/output/touushin11\\_2.pdf](http://www8.cao.go.jp/cstp/output/touushin11_2.pdf)
- [8] 「韓国の研究開発、最新動向」PEN Newsletter, vol.1, no.5, August 2010. [http://unit.aist.go.jp/nri/nano-plan/pen2010/PEN\\_2010\\_August\\_vol.1\\_no.5.pdf](http://unit.aist.go.jp/nri/nano-plan/pen2010/PEN_2010_August_vol.1_no.5.pdf)
- [9] Liu Li, "Nanotechnology and society in China: Current position and prospects for development", 2<sup>nd</sup> Manchester International Workshop on Nanotechnology, Society and Policy, Manchester, 6-8 October 2009. <http://research.mbs.ac.uk/innovation/LinkClick.aspx?fileticket=iDeZ7oMdMr8%3D&tabid=128&mid=505>

(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]

### 3.5.3 注目すべき研究開発動向

#### 海外 TA 機関の活動

欧州における TA 機関を中心とした積極的な展開、米国における大学・研究機関を中心とした非政府機関による TA 活動、そして日本や韓国にみられる試験的な TA 活動が活発化している。

欧州では、EU が中心となって行ってきたステークホルダーとの対話活動や市民の意識調査が着実に進んでおり、特に 2010 年は食品・医療分野での活動が目立った。食品分野では、Food Safety Authority の委託により、Eurobarometer の食品リスクについての特別報告書が公表されている。さらに、食品分野におけるナノテクノロジーについては、ベルギー政府が中心となって、2010 年 11 月に国際会議を開催した。その内容が実質的には食品分野におけるナノテクノロジーの TA 報告書として位置づけられる。

米国では、独立研究機関のウィルソンセンターにおける先進ナノテクノロジーに関するプロジェクト、アリゾナ州立大学ナノテクノロジーと社会センターなどが、この分野を先導してきている。また、NSF / 国際技術評価センター (WTEC) の主催する Nano2 ワークショップが、シカゴ (米国、2010 年 3 月)、ハンブルグ (欧州、同 6 月)、東京 (日本、韓国、台湾、同 7 月)、シンガポール (中国、インド、オーストラリアなど、同 7 月) と、世界中で開催され、11 月にはワシントンでまとめの報告がなされた。その中でも ELSI 研究が重要分野として位置づけられ、世界各地でのこの分野での交流が促進された。

韓国では、2009 年に国家戦略の中核となる 5 分野を選定した政策「ナノ融合 2.0」を策定し、積極的な研究開発の推進を行っている。2010 年 8 月には IEEE 共同シンポジウムが開催され、ナノテクノロジーの研究開発とその市場化が社会や経済に及ぼす影響について議論するためのテクニカルセッションが設けられた。ただし、韓国におけるナノテクノロジーの EHS や ELSI の課題への取り組みの歴史は比較的浅く、自ら国際会議などを開催して熱心に取り組み始めたのはここ 2 年ほどのことである。台湾 (台北・中国) のナノテクノロジー製品認証制度である NanoMark System のように、EHS や ELSI の課題をナノテクノロジー研究開発の産業化や製品化を進めるうえでの重要な戦略的要素としてとらえる視点は、現時点では希薄である。

日本では、産業総合研究所、物質・材料研究機構といった、国立の研究機関が ELSI 研究を先導してきていたが、2 年前から科学技術振興機構 (JST) 社会技術研究開発センター (RISTEX) の公募研究として、「先進技術の社会影響評価 (テクノロジーアセスメント) の手法開発と社会への定着」と題する公募研究が東京大学を中心にして立ち上げられ、ナノテクノロジーを対象とした TA プロジェクトが、医療 (ナノ DDS)、食品 (フードナノテク全般)、エネルギー (省エネ住宅) の 3 分野でパイロットプロジェクトとして実施された。また、日本学術会議の提言「日本の展望—学術からの提言 2010」や、政府の第 4 期科学技術基本計画に、テクノロジーアセスメントが明記されるなど、国内の制度化への第一歩として注目される。

## 3.6 国際プログラム・国際連携

### 3.6.1 概観

米国は NSF、欧州は EC が国家機関を代表して国際プログラムを展開しているのに対し、日本はそれらに相当するアクティブな国家代表機関の顔が見えない。また、国際協力に関する国としての中長期スコープが希薄であり、具体的かつ骨太のシナリオは発表されていない。この状況は、国際的な孤立を免れない懸念がある。一方、産業技術総合研究所が中心になって立ち上げたアジアナノフォーラム (ANF) は、アジア、オセアニアの 15 経済圏をメンバーとして非政治的な運営で活動を続け NPO として独立、現在、シンガポールに本部が設置されている。ISO に正式加盟できない台湾は、リエゾンメンバーとしての ANF の代表者として ISO の標準会議に参加し、活動を続けている。

米国は、NSF と EU とが共同出資する国際プロジェクトが制度化されたなどの明確な国家プログラムだけではなく、共用施設・プロジェクトの海外へのオープン化をはじめ、海外研究者へ研究環境・場を提供することによる積極的受け入れ、研究参加を通じた種々の国際ネットワークに伴う協力が推進している。CNSE (College of Nanoscale Science and Engineering, NY)、CNSI (California NanoSystems Institute) など、積極的な連携を図っている。米国最大のナノテクノロジー研究開発拠点であるニューヨーク州アルバニーで、中東からの投資を受けた研究開発施設の設置が進んでいる。研究開発のグローバル化と投資のグローバル化が一段と進み、他国と比較して圧倒的な資金力で研究開発を推進してゆく点は注目される。また、DOD (米国防総省) が日本にオフィスを設置し、大学に最先端技術での共同研究、委託研究を打診している。特にロボット技術やナノテクノロジー技術に着目して打診が行われているケースが多いようである。公的研究機関では輸出管理規定において、軍事に関わる技術の研究は禁止されているが、大学や民間企業はその対応については内規に拠っており、今後表面化してくる可能性がある。

欧州は、FP7 において海外との連携を積極的に奨励している。ベルギー IMEC (Inter-university Microelectronics Center) 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。IMEC は、600 社もの企業パートナーと連携し、半導体に関わる研究開発を行っていることが実績の面でも目立っているが、従来のデバイス開発、プロセス開発を中心とした研究開発プログラムから、ライフサイエンス分野、エネルギー分野といったソリューションのテーマを掲げての連携プログラムを立ち上げている。ソリューションの将来像を FP7 のロードマップとリンクして、明確な出口戦略を描いていることが特徴である。企業連携においても、Intel と次世代のプロセッサアーキテクチャを含めた連携をベルギー 5 大学とともに開始し (2010 年 6 月)、システム志向を強めている。ドイツは、Fraunhofer Microelectronics Alliance や、中国国内に研究所を設立するなど、将来の人材確保、標準化戦略を念頭においた積極的施策が目立つ。

アジアでは、中国が在欧米の中国系研究者を介して欧米の研究資源を誘導している。先進国への人材供給国としての中国は将来大きな国際ネットワークを確保する可能性がある。韓国では、研究機関や大学の主要ポストに外国人を積極的に登用するなどの取り組

みがあり、公的研究機関である KAIST は、すでにヨーロッパに研究拠点をもち、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。

近年の世界の国際プログラムの動向で最も大きな変化があったのは、日本の「つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー研究拠点 (TIA-nano)」であろう。世界の国際産学官連携拠点の潮流～オープンイノベーション、テクノロジーコンバージェンス (技術融合)、アンダーワンルーフ (共創)、社会・経済への成果還元～を織り込み、なおかつ日本の伝統的な強みである、材料・デバイスから装置、製品に到る「垂直連携」、「部材・装置ドリブン」、「性能評価、安全、標準化」を付加した、オープンイノベーションハブである。米アルバニー、仏 MINATEC (Micro and Nanotechnologies Innovation Campus)、ベルギー IMEC とも包括連携協定 (MoU) を締結し、国際的な連携を行うとともに、技術研究組合制度、連携研究体等の制度を駆使して民間とも連携した研究開発を行っているのが特徴である。

### 3.6.2 国際プログラム・国際連携

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	評価の際に参考にした根拠等
日本	取り組み水準	△	↑	相手国の事情を十分考慮した連携戦略がなく、結果的に米国、ドイツ等、R&Dポテンシャルの高い国以外は概して受け身で付き合っている。 筑波大学、物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、経団連による「つくばイノベーションアリーナナノテクノロジー拠点 (TIA-nano)」(2009年度創設)が2010年度より本格稼働開始。政府の「新成長戦略」にも記載され、イノベーションを核とした日本の経済成長の一翼として期待されている。また、太陽電池については、NEDOとEUの合同プロジェクトがスタートした。
	実効性	△	↑	合同WS、研究者交流等のプログラムは多く、人的ネットワークは広がった。しかしヒト・カネの追加投入がないと、新たな共同研究の立ち上げは難しいと考える。実効性が高いのは海外若手研究者・学生受け入れプログラムと考える。反面、研究者派遣はなかなか促進されない。共用施設施策である「ナノネット」も国際的にオープンになっていない。NIMSのMANA(WPI)は数少ない成功例になりそうである。 2009年度に改正された技術研究組合法を適用した、企業、独法研究機関にインセンティブのある制度、米アルバニー、仏MINATEC、ベルギーIMEC等の海外研究機関との連携、材料・デバイスから装置、製品に至るまでの垂直連携といった、オープンイノベーションを指向した研究体制により、成果を社会に送出する枠組みを構築中。
米国	取り組み水準	○	↑	元来国際的に開かれた国であり、国内拠点の海外オープン化等に対しては積極的であるが、能動的に米国外に出ていくことを指向した共同プロジェクトはあまり多くない。一方インターナショナル等の、若手研究者、学生の外国の派遣プログラムは徐々に定着している様子である。ニューヨーク州アルバニーのナノテクノロジー研究拠点を拡充している。研究施設への中東の投資を呼び込む等、国内経済の低迷による研究開発投資意欲の低下を海外からの投資で補う。大学の研究では、中国、インドとの連携が増加傾向。米国では全体にバイオ・メディカル系へ研究開発投資がシフトしているため、ナノテクノロジー領域においてもナノバイオの比率が他地域よりも高い。
	実効性	◎	→	政府が特別なプログラムを設定しなくとも、海外の研究機関や企業と多くの共同研究が実施されている。中東からの投資の効果はまだ評価段階にはないが、アルバニーでの連携プログラムでの成果は、主要企業であるIBM、AMD等では着実にファウンドリーに展開され、成果を挙げている。基礎的な分野ではナノエレクトロニクス、ナノデバイスよりもナノバイオの成果が相対的に多い。 研究者は人材獲得目的以外の国際連携には関心が薄いという印象がある。
欧州	取り組み水準	◎	↑	ECが国際連携促進のため、EU外で活発に動いている様子である。駐日EU代表部の動きもその一つで、以前と比べて格段の差を感じる。 欧州FP7プログラムの描く将来像を産業ニーズとリンクさせたIMECの研究プログラム等、よりシステム指向、応用指向の強い研究プログラムが提案されている。従来デバイスレベルでの研究が主であったIMECも、プロセッサアーキテクチャ研究をインテルとの共同で開始する等、デバイスの出口を見据えた研究開発で企業パートナーを拡大
	実効性	○	↑	ECのイニシアチブが強まる背景には、ナノテク先進国(ドイツ、フランス、英国、スイス、オランダ、ベルギーなど)以外の財政状況が(ユーロ危機により)悪化し、FP7への依存度が増していることも挙げられるだろう。ベルギーIMEC、仏MINATECともFP7プログラムとリンクして将来のロードマップを示し、連携パートナーを獲得する等、積極的な展開がなされている。
中国	取り組み水準	○	↑	中国科学アカデミーが国際プレゼンスを高めるべく、各種の国際会議主催に積極的である。また主要大学が外国研究機関の中国拠点招致活動を推進している様子である。他国からの研究開発投資を呼び込むことに成功し、欧米のアジアでの研究開発拠点の魅力度は日本を上回る評価。直近のANF(Asia Nano Forum)では、ナノテクノロジーの標準化においてもリーダーシップを取ることに注力。
	実効性	△	↑	全国を横断するプログラムがなかなか見えにくいのが、欧米の企業の研究開発拠点が次々に設置される等、進出企業数は増えている。国際連携プログラムとして協調関係が明確に見えるものは多くは無い。しかし標準化においては市場規模の点からの影響力は大きい。

韓国	取り組み水準	◎	↑	以前から積極的であった外国人幹部登用に加え、最近では外国研究機関の韓国拠点招致活動も推進している。また世界、アジアの中でのプレゼンスを高めるための、国際組織への貢献も近年目立っている。韓国は第2次科学技術基本計画（2008～2012）で総額5兆円規模の政府研究開発投資を行っている。ナノエレクトロニクス分野では、NNFC（国立ナノファブセンター）を設置して米スタンフォード大学と連携。
	実効性	○	↑	李明博政権発足以来、国際連携の取り組みが加速している。韓国の研究開発は民間企業との連携は、サムソン、LG等韓国大企業と行うことが多く、海外企業が直接連携パートナーとなることが少ない。オープンイノベーションへの対応が鍵である。

(参考情報)

- [1] 欧州：国際連携促進のために、FP7情報サービス事業（BILAT）を実施している（日本ではJ-BILAT）。
- [2] 韓国：外国研究機関とのジョイントラボを韓国内（仁川）に設立するというプログラムを立ち上げた。現在審査の段階である模様。
- [3] 韓国：Korea Nanotechnology Research Society (KoNTRS) の Hak-Min Kim 会長が2009年10月、Asia Nano Forum (ANF) の会長に就任した。それまで傍観者的な参加姿勢と比べると180度の転換である。
- [4] 韓国：OECD ナノテクノロジー作業部会（OECD Working Party on Nanotechnology (OECD-WPN)）でも拠出金を出してビューローメンバーとなり、プロジェクトを自ら提案し、国際ワークショップ開催など、運営に積極的である。
- [5] 韓国：Korea Institute for Advanced Technology (KIAT) が2009年5月に設立された（知識經濟部傘下の複数機関が合併）。国際連携促進がミッションの一つである。ただし、活動が軌道に乗っているとは言えないかもしれない。例えば、KIATによる韓国人研究員国外研究機関派遣プログラムは開始して1年も経たないうちに資金不足のため中止された。

(註1) 現状について [◎：非常に進んでいる、○：進んでいる、△：遅れている、×：非常に遅れている]\*

\*我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

(註2) 近年のトレンド [↑：上昇傾向、→：現状維持、↓：下降傾向]

### 3.6.3 注目すべき研究開発動向

#### (1) 国際会議

ナノテクノロジーにおける国際会議は、半導体の分野では IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM) が著名であり、世界トップレベルの研究成果の報告がなされている。また、ナノテクノロジー全般に亘る代表的な会議には、国際ナノテクノロジー会議 (INC: International Nanotechnology Conference on Communication and Cooperation) がある。ナノ材料、ナノデバイスから、水処理等のテーマもあり、非常に幅広い分野での最先端の研究の報告、政策関係者の報告等がなされ、欧米企業のトップクラスのマネジメントも参加する一大会議となっている。日本の実行組織には物質・材料研究機構、産業技術総合研究所の研究実施機関をはじめ、内閣府、文部科学省、経済産業省の各省、JST、NEDO のファンディング機関、民間企業の団体である JEITA (電子情報技術産業協会、NBCI (ナノテクノロジービジネス協議会)、東京大学、筑波大学等の大学が参加し、産学官の総力を挙げた会議となっている。

アジアにおける国際会議は、日本が ANF (Asia Nano Forum) をリーダーシップをとって開催している。2010 年度は 11 月にベトナムで開催されたが、中国の標準化での積極的な取組み、オーストラリアのナノ安全への取組み等、標準化リーダーシップでの新たな動きが注目されている。

いずれの国についても、国際会議、合同 WS、研究者交流などのプログラムの開催は続いているが、なかなか共同研究の立ち上げにまで至らないように見える。各地域の状況を見ると、ナノテクノロジー・材料分野であっても全体にオープンイノベーション志向、ソリューション志向の傾向が見られる。また、台湾、シンガポール、香港等での堅調な研究開発投資の推進、インド、中東等での研究開発投資の拡大傾向が見られる。

オープンイノベーションの場、共創の場となる国際産学官連携研究拠点の設置の拡大が、近年の傾向の一つである。

# 付 録



## 海外の政策動向

### 米国

米国におけるナノテクノロジー・材料分野における研究開発は、2001 年以来国家ナノテクノロジー・イニシアティブ (NNI : National Nanotechnology Initiative) として省庁横断的に取り組まれている。NNI は、①世界クラスのナノテクノロジー研究開発の推進、②商品や公益のための技術移転への助成、③ナノテクノロジー発展のための教育投資、熟練労働力の確保、インフラ・機器の整備、④環境や安全の課題に対処するためのナノテクノロジーの発展の支援、を戦略目標としており、以下の 8 つを重点課題 (PCA : Program Component Area) として掲げている。(1) ナノスケールにおける基礎的現象 (2) ナノ材料 (3) ナノスケールデバイス (4) 計測と標準化 (5) ナノ加工 (6) 研究設備の利用 (7) 環境・安全・健康 (8) 教育と社会受容。

2010 年 3 月には大統領府科学技術政策局 (OSTP) が、立ち上げから 10 年が経過した NNI について 3 度目となる評価報告書を発表した。報告書は、米国をナノテクノロジー分野のトップに押し上げた成果を高く評価しつつ、中国や韓国、EU などの競争相手の激しい追い上げによって米国の優位性が脅かされていると指摘している。さらに、今後は製品の商業化に重点を置くとともに、向こう 5 年間でナノ製造への投資を倍にすることなどを提言している。

また、2011 年 2 月に改定された「米国イノベーション戦略」においては、重点項目として「ナノテクノロジーを加速化する」との表現が盛り込まれ、特にナノエレクトロニクスへの投資の必要性が謳われている。

2012 年度予算案における NNI は、対 2010 年度実績比 10.4% 増の 21.32 億ドルが要求されており、緊縮財政を強いられているオバマ政権においても引き続き戦略的な重点投資が行われる。これは、OSTP・行政予算管理局 (OMB) 共同で出された 2012 年度科学技術優先事項についての覚書 (2010 年 7 月) で、「NNI を支援する」と明記されたことに符合するものであり、米国政府のナノテクノロジー分野への高いコミットメントが伺える。

NNI に横断的に関与している 25 省庁における予算配分を見ると、DOD (国防総省)、NSF (全米科学財団)、DOE (エネルギー省)、HHS (厚生省)、DOC (商務省) が従来通り多くの割合を占めている。省庁別の伸び率では DOE が 63% と大きな伸びを示しているが、予算増の大部分は DOE のエネルギー高等研究計画局 (ARPA-E) に対する要求 1.8 億ドルによるものである。また PCA 別に予算をみると、従来トップ項目であった PCA1 (基礎研究) を PCA3 (ナノスケールデバイス) が逆転しており、基礎研究の進展をデバイスやその他の応用に転じる狙いが見て取れる。また、2012 年度予算案によれば、NNI 参加各省庁は、① 2020 年以降のナノエレクトロニクス: 持続可能な製造業、② 未来の産業創出、③ 太陽エネルギー集積・変換のためのナノテクノロジー、という 3 つの新たな取組みも開始するとされている。

また、2011 年 2 月には 3 年ごとに改定される NNI 新戦略計画 (NNI Strategic Plan) が発表された。4 つの戦略目標と 8 つの重点課題は維持しつつ、それぞれの戦略目標をブレイクダウンした下位項目「目的」が新しく設定され、25 省庁が協力して戦略目標を達

成するためにより具体的な道筋が描かれている。NNI では、今次戦略計画に従って、ナノテクノロジーによる環境・健康・安全（Environmental Health and Safety : EHS）への影響や、倫理・法律・社会面における影響についても研究が進められることになる。

（参考情報）

- [1] PCAST 報告書 2010年3月25日  
<http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast-nni-report.pdf>
- [2] 上記に関する記事  
<http://crds.jst.go.jp/watcher/data/20100408-001.html>
- [3] NNI Strategic Plan 2011年2月  
<http://www.nano.gov/nnistrategicplan211.pdf>

## 欧州

2007年から2013年のFP7では、研究開発へ欧州委員会から投資される資金の総額は505億ユーロ（7年間）となっている。そのうち「共同研究」への助成が323.65億ユーロあり、「ナノサイエンス・ナノテクノロジー・材料・新製造技術」への研究にFP6の2倍近い35億ユーロが配分される予定である。具体的な助成方針は、毎年発行される「ワークプログラム」に記載されている。

また欧州委員会のナノテクの基本となる政策文書には、「EU ナノテクノロジー政策（2004-2008）」、「ナノサイエンス & ナノテクノロジー：欧州アクションプラン 2005-2009」がある。上記以外の関連文書として、2008年に「ナノ粒子の健康および環境への影響に関する欧州ナノテクノロジー研究開発」を、2006年に「ナノテクノロジーの経済発展」、2005年に「ナノテクノロジー：欧州の将来のための重要技術」などを発表している。

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

「ヨーロッパ・テクノロジー・プラットフォーム（ETP）」では、すべての利害関係者が参画し、特定分野（現在30以上）の研究開発投資戦略を立案しており、その中に、「ナノエレクトロニクス」、「ナノ医薬」、「金属技術」、「先端エンジニアリング材料」などがある。

## 英国

英国では、2002年に旧貿易産業省から英国のナノテク戦略の基礎となる「製造の新しい方向性：英国のナノテクノロジーのための戦略」が発表されナノテクの研究開発がスタートした。2010年にはビジネス・イノベーション・技能省（BIS）から「英国ナノテクノロジー戦略（UK Nanotechnologies Strategy）」が発表された。政府は同戦略により、ナノテクノロジーから英国国民が安全に得られる社会的・経済的利益を確保するために政府がとるべき行動について明示した。

更にBISは2009年に、複合材料開発を推進するための戦略である「英国複合材料戦略（The UK Composites Strategy）」を発表している。同戦略は、英国が目指す低炭素社会の構築に向けて、より耐久性が高く軽量かつ高性能な複合材料を開発し、加えて同分野の産業を競争力の高いものに確立していこうとするものである。

科学技術会議（CST）が2007年に発表した、政府による大規模な取り組みが5年以内に利益を拡大させると予想される技術分野には、「メディカルデバイス」と「プラスチック・エレクトロニクス」が含まれている。またCSTは2007年に「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：政策公約に関する政府の進捗状況の評価（Nanoscience and Nanotechnologies: A Review of Government's Progress on its Policy Commitments）」というレポートを発表している。これは、2004年に王立協会と王立工学アカデミーが発表した「ナノサイエンス・ナノテクノロジー：機会と不確実」というレポートに応える形で2005年に発表された政府公約について、進捗状況を評価したものである。

英国政府が出資するナノテク・材料分野の研究費は、主に工学・物理科学研究会議（EPSRC）、バイオテクノロジー・生物科学研究会議（BBSRC）、技術戦略審議会（TSB）、高等教育資金会議から拠出されている。RCでは、優先研究分野のうちの1つに「エンジニアリングから応用へのナノサイエンス」を挙げており、その研究を進めるために、EPSRCをはじめ同じ研究会議のBBSRC、経済・社会研究会議（ESRC）、医学研究会議（MRC）、自然環境研究会議（NERC）、科学技術施設会議（STFC）と協力して「ナノサイエンス」プログラムを立ち上げている。

また材料分野については、「材料、機械、医療技術」プログラムとして研究に2008年度で6,000万ポンド、トレーニングに2008年度で1,800万ポンドが配分されており、同プログラムへの予算配分はEPSRC全体予算の16.4%を占めている。そのうちの研究テーマ別では、医療技術24%、製造技術17%、デザイン技術11%、マイクロシステムを含む機器11%、機械技術10%、構造材料（ポリマー・複合・セラミック）7%等となっている。

TSBでは、「先端材料」および「ナノテクノロジー」を重要技術領域として選定し、助成を行っている。また、国内各地にマイクロ・ナノテクノロジーセンターを拠点として整備し、企業や研究機関にサービスを提供している。その他研究から調達・規制も含めて戦略的なプログラムの推進を検討し実践するイノベーションプラットフォームの1つに「環境に配慮した建築」があり、その中で商業的に可能かつ環境に優しい材料の開発を目指している。

（参考情報）

- [1] UK Nanotechnologies Strategy  
<http://www.bis.gov.uk/assets/BISPartners/GoScience/Docs/U/10-825-uk-nanotechnologies-strategy>
- [2] The UK Composites Strategy <http://www.bis.gov.uk/~media/BISCore/corporate/docs/C/Composites-Strategy>
- [3] Nanoscience and Nanotechnologies <http://www.bis.gov.uk/assets/bispartners/cst/docs/files/whats-new/07-830-nanosciences-nanotechnologies-review.pdf>

## ドイツ

連邦政府は2006年8月に、イノベーション創出に向けた「ハイテク戦略」を打ち出し、17の将来分野の1つとしてナノテクノロジーが挙げられている。これを受けて政府は、連邦研究教育省（BMBF）をはじめとする7省横断プログラムとして産業へのナノテク応用を主眼においた「ナノイニシアティブ・アクションプラン2010」を発表した。現在までに連邦研究教育省から資金が投じられたプロジェクトとしてはNanoMobil（自動車産業）、NanoLux（光学産業）NanoFab（電気電子産業）Nano for Life（ライフサイエンス）などがある。また今後ナノテクの産業への応用が期待される分野で実施が予定されるプロジェクトは、Nanotechnology enters into production（生産技術）、Volume Optics（生

産技術)、NanoTex (織物産業)、NanoTecture (建築)、Biomicrosystem technology (医薬) などがある。

また 2004 年から推進されている「産業・社会のための材料イノベーションフレームワークプログラム」では、10 の重点分野を設定し助成を行っている。

主な研究機関は、基礎研究に重点を置いたマックスプランク協会、応用研究を主に行うフランホーファー協会、大型研究施設を持つヘルムホルツ協会、そして大学、州政府管轄研究所など多岐にわたる。また大学における研究拠点を設立する「エクセレンスイニシアティブ」を立ち上げ、ナノテク・材料関係の拠点も多数設立されており、例としてミュンヘン大学の「ミュンヘンナノシステムイニシアティブ」、カールスルーエ大学の「機能的ナノ構造」などのプロジェクトがある。

## フランス

フランスでは、2009 年に研究・イノベーションに関する初めての国家戦略「研究・イノベーション国家戦略 (Stratégie nationale de recherche et d'innovation : SNRI)」が策定されており、同戦略において、2009 年から 2013 年までの 4 年間ににおける 3 つの優先分野が定められている。

同戦略において、ナノテクノロジーは、第四次産業革命の原動力との認識のもと、「第三優先分野：情報・通信・ナノテクノロジー」として位置づけられており、特に、エレクトロニクス、材料、医療用技術、再生可能エネルギー分野への注力が強調されている。

フランスでは、ナノテクノロジーによるイノベーション創出に向け、産学官の連携・協力を加速させることを目的とした「Nano-INNOV 計画」を推進しており、グルノーブル、ツールーズ、パリ近郊のサクレの 3 つの拠点に技術統合センターを設置する予定。特に、サクレには、大規模な研究開発施設を新たに建設中である。さらに、同計画には、ナノ材料が持つ潜在的リスクについて国民へ情報発信を行い、社会受容を推進していくことが盛り込まれている。

2010 年にサルコジ大統領が発表した、国債を原資とした重要課題に対する総額 350 億ユーロに上る大規模投資「将来への投資 (Investissements d'avenir)」では、「Nano-INNOV 計画」に対し 7 千万ユーロを充当することが決定された。

## ロシア

ロシアでは、国家の社会経済発展に寄与することが期待される科学技術分野に、限られた国家予算を重点的に配分することを目的に選定された 8 つの優先的科学技術分野 (2006 年 5 月承認) の一つに「ナノシステムと材料産業」が挙げられている。

2006 年に政府決定された連邦目的プログラム (Federal Targeted Program) 「2007 - 2012 年のロシア科学技術コンプレックス発展の優先的方向性における研究・開発」(教育科学省が主管) の中で、科学技術優先分野への予算配分、学術論文や特許数、経済効果等の目標指数が明記されている。同プログラムが対象とする優先的研究領域は、ライフサイエンス (Living System)、ナノシステムと材料産業、情報通信システム、天然資源・自然の合理的利用、エネルギー・省エネである。本プログラムで規定されている 2007 -

2012年の総研究開発費は1696億8800万ルーブル、うち連邦予算からの支出は1283億9000万ルーブルである。ナノシステムと材料産業に関しては、本プログラムの枠内での2007年連邦予算からの研究開発費は42億4600万ルーブルであった。

その後、2007年に「ナノ産業発展戦略」が大統領(当時はプーチン現首相)の承認を受け、ナノテク重視の方向性が明確に打ち出され、同年にナノテク分野の国家政策の実現のため100%国が出資する「ロスナノ(RUSNANO)」社が設立された。メドヴェージェフ大統領は、2009年のナノテク国際フォーラムにおいて、ロシアは2015年までにナノテク分野で世界最大規模の国家投資(3180億ルーブル:約1兆円)を行い、同時点でロシアのナノ産業の製品売上高は9000億ルーブル(約2.7兆円)に達し、そのうち4分の1は輸出向けとする旨述べている。

「ロスナノ」は、設立に当たってロシア政府から50億米ドル(約5900億円)相当の資産譲渡を受け、ナノテク関連プロジェクトを製造業につなげるための投資を行うという役割を担っている。同社は、2015年にはおよそ3兆ドルの世界市場規模となることが予測されているナノテク製品に関して、ロシア企業の世界シェアを2015年までに4%以上とすることを目標としている。したがって、「ロスナノ」の投資条件の最重要項目は産業化時のインパクトの大きさであり、研究開発のみの投資は行わないとしている。2009年から実質的な活動を開始し、2010年末までに94のプロジェクトが承認された。

また、前述の「ナノ産業発展戦略」では、政府直轄の国家研究センターで、核・原子力分野の研究で有名なクルチャトフ研究所(National Research Centre Kurchatov Institute)をナノテク研究のコーディネーターに指定している。

更に、教育科学省が主管する連邦目的プログラム(Federal Targeted Program)「ロシア連邦のナノ産業インフラの発展」プログラムが2007年に政府決定され、国内ナノ産業のポテンシャルの発展と実現のための現代的なナノテク・ネットワーク・インフラの創設を目的に、2008-20011年にかけて273億1555万ルーブルの資金投入(うち連邦予算から245億2715万ルーブル)が行われる。

## 中国

中国の科学技術政策は国家中長期科学技術発展計画綱要(2006~2020年)に基づき展開されている。同計画では、次世代のハイテク及び新興産業発展の重要な基盤を構成し、ハイテクイノベーション能力を総合的に体現する先端技術8分野の1つとして「新材料技術」分野を含めている。

具体的には、ナノテクノロジーの研究を基礎として、ナノ材料とナノ素子を研究するとともに、超伝導材料やインテリジェント材料、エネルギー材料等のほか、きわめて優れた特殊機能材料や新世代の光通信材料を開発するという目標を掲げた。

また、①インテリジェント材料・構造の技術、②高温超伝導技術、③高効率エネルギー材料技術を重点基礎研究テーマとして設定した。このうち①については、インテリジェント材料の調整・加工技術、インテリジェント構造の設計・調整技術、中核設備の監視測定技術等を重点的に研究するとしている。

高温超伝導技術については、材料・調整技術や超伝導ケーブル、超伝導素子を重点的に研究するとしている。高効率のエネルギー材料技術に関しては、とくに太陽電池材料と中

核技術、燃料電池の中核材料技術、大容量の水素貯蔵材料などが重点研究テーマに挙げられた。

また、基礎研究分野の重大科学研究のテーマとしてもナノテクノロジー研究が盛り込まれている。具体的な重点研究課題は以下の通りである。

- ・ ナノ材料の制御可能な調整・自動組立・機能化
- ・ ナノ材料のメカニズム、特性及び制御メカニズム
- ・ ナノ加工と集積原理
- ・ コンセプト及び原理段階のナノデバイス、ナノエレクトロニクス、ナノバイオ・医学
- ・ 分子集合体と生物分子の光学的、電子的、電磁的特性と情報の伝達
- ・ 単一分子の挙動と制御
- ・ 分子マシン、ナノスケール計測

## 韓国

韓国は基礎から産業化まで幅広くナノテクの重点化を継続している。韓国の第2次科学技術基本計画（2008～2012年）では、主力基幹産業技術、知識基盤サービス、グローバル課題対応、基礎・基盤・融合技術等の7大研究開発分野を定め、さらに新政権が打ち出した方針「緑色成長」で環境・エネルギー関連技術にナノテクの融合研究を取り入れることによってブレークスルーを起こそうとしている。

### ○科学技術基本計画 2010年度施行計画で指定された重点育成技術

- ・ 主力基幹産業技術高度化：ナノメカトロニクス技術、
- ・ 国家主導核心技術：ナノ融合商用化プラットフォーム建設
- ・ 懸案関連特定分野（Risk Science）：次世代素材成型技術、部品素材産業技術
- ・ 基礎・基盤・融合技術開発活性化（National Platform Technology Initiative）：ナノ素材技術開発

### ○新成長動力ビジョン

- ・ 先端融合産業：新素材・ナノ融合技術

### ○緑色成長戦略

- ・ 放射線技術と NT との融合でグリーン素材の開発

韓国政府の研究開発予算のうち、ナノ・材料分野への投資は6772億 Won(4.9%)である。

最近の大きなニュースは韓国のNSTC(国家科学技術委員会)が大統領直下で研究開発予算の配分権を獲得したことであり、これは世界最強の科学技術戦略システムといえることができる。



## 執筆協力者一覧 (五十音順 / 分野毎、敬称略)

(※所属・役職は本調査実施の時点)

### 《 1. ナノテクノロジー・材料の応用 》

#### ■ 1.1 グリーンナノテクノロジー

一木 修	(株) 資源総合システム 代表取締役社長
乾 晴行	京都大学 大学院工学研究科 教授
井上 晴夫	首都大学東京 大学院都市科学環境研究科 教授
河本 邦仁	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
北野 彰彦	東レ(株) 複合材料研究所 所長
近藤 道雄	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
佐藤 謙一	住友電気工業(株) フェロー
瀬恒謙太郎	大阪大学 大学院工学研究科 教授
高木 英典	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
田中 裕久	ダイハツ工業(株) 先端技術開発部 エグゼクティブ・テクニカル・エキスパート
谷岡 明彦	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
津崎 兼彰	物質・材料研究機構 新構造材料センター センター長
堂免 一成	東京大学 大学院工学系研究科 教授
徳田 君代	九州工業大学 大学院情報工学研究院 教授
長井 龍	日立マクセル(株) 開発本部 副本部長
西村 睦	物質・材料研究機構 燃料電池研究センター センター長
羽田 肇	物質・材料研究機構 センサ材料センター センター長
原田 幸明	物質・材料研究機構 材料ラボ ラボ長
福岡 淳	北海道大学 触媒化学センター 教授
辺見 昌弘	東レ(株) 地球環境研究所 所長
本間 格	東北大学 多元物質科学研究所 教授
町田 正人	熊本大学 大学院自然科学研究科 教授
桃井 恒浩	シャープ(株) LED 照明事業推進センター 副所長
森塚 秀人	電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員
柳下 立夫	産業技術総合研究所 バイオマス研究センター 主任研究員
横山 伸也	東京大学 名誉教授
渡辺 政廣	山梨大学 クリーンエネルギー研究センター センター長
石原 聰	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

#### ■ 1.2 ナノバイオテクノロジー

大串 始	産業技術総合研究所 健康工学研究部門 招聘研究員
杉山 滋	農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所 ユニット長
田畑 泰彦	京都大学 再生医科学研究所 教授
民谷 栄一	大阪大学 大学院工学研究科 教授
鄭 雄一	東京大学 大学院工学系研究科 教授
都甲 潔	九州大学 大学院システム情報科学研究院 主幹教授

西山 伸宏	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
馬場 嘉信	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
馬渡 和真	東京大学 大学院工学系研究科 講師
宮原 裕二	東京医科歯科大学 生体材料工学研究所 教授
島津 博基	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 1.3 ナノエレクトロニクス

安達千波矢	九州大学 未来化学創造センター 教授
粟野 祐二	慶応大学 理工学部 教授
安藤 功兒	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
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
大橋 啓之	日本電気(株) ナノエレクトロニクス研究所 主席研究員
笠原 二郎	北海道大学 触媒化学研究センター 特任教授
木村紳一郎	(株)日立製作所 中央研究所 主管研究長
高木 信一	東京大学 大学院工学系研究科 教授
二瓶 瑞久	産業技術総合研究所 連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター 主任研究員
藤巻 朗	名古屋大学 大学院工学研究科 教授
藤原 聡	日本電信電話(株) 物性科学基礎研究所 グループリーダー
屋上公二郎	ソニー(株) 主任研究員
河村誠一郎	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー／エキスパート

## ≪ 2. 基盤科学・技術 ≫

### ■ 2.1 新物質・新材料

安藤 恒也	東京工業大学 大学院理工学研究科 教授
伊藤 耕三	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
香川 豊	物質・材料研究機構 フェロー
黒田 一幸	早稲田大学 理工学術院 教授
鯉沼 秀臣	物質・材料研究機構 特別顧問
下山 淳一	東京大学 大学院工学系研究科 准教授
高橋 浩	早稲田大学 理工学術院 客員教授
田中 雅明	東京大学 大学院工学系研究科 教授
寺西 利治	筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授
西 敏夫	東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 教授
福山 秀敏	東京理科大学 副学長
宝野 和博	物質・材料研究機構 フェロー
細野 秀雄	東京工業大学 フロンティア研究センター 教授
松田亮太郎	京都大学 物質・細胞統合システム拠点 特任准教授
松永 是	東京農工大学 副学長
水野 哲孝	東京大学 大学院工学系研究科 教授
魚崎 浩平	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー／物質・材料研究機構 主任研究者

島津 博基 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー  
 平野 正浩 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

## ■ 2.2 ナノサイエンス

安藤 泰久 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 グループ長  
 石井 由晴 科学技術振興機構 CREST 技術参事  
 (大阪大学 大学院生命機能研究科)  
 栗原 和枝 東北大学 多元物質科学研究所 教授  
 蔡 兆申 理化学研究所 巨視的量子コヒーレンス研究チーム チームリーダー  
 佐野 伸行 筑波大学 大学院数理物質科学研究科 教授  
 白石 賢二 筑波大学 大学院数理物質科学研究科 准教授  
 田中 一義 京都大学 大学院工学研究科 教授  
 十倉 好紀 東京大学 大学院工学系研究科 教授  
 長谷川修司 東京大学 大学院理学系研究科 教授  
 長谷川 剛 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 主任研究者  
 馬場 嘉信 名古屋大学 大学院工学研究科 教授  
 宮本 明 東北大学 未来科学技術共同研究センター センター長  
 森田 清三 大阪大学 大学院工学研究科 教授  
 山口 智彦 産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 副部門長  
 魚崎 浩平 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー／物質・材料研究  
 機構 主任研究者  
 品田 賢宏 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー／早稲田大学 准  
 教授  
 渡辺 正裕 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

## ■ 2.3 ナノ加工プロセス

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  
 酒井 真理 セイコーエプソン (株) 富士見事業所生産技術センター  
 下村 政嗣 東北大学 多元物質科学研究所 教授  
 廣島 洋 産業技術総合研究所 集積マイクロシステムセンター 研究チーム長  
 前田龍太郎 産業技術総合研究所 集積マイクロシステムセンター 研究センター長  
 宮内 昭浩 (株)日立製作所 材料研究所 ユニットリーダー  
 宮下 永 科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

## ■ 2.4 計測・評価・解析

新井 正敏 日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター ディビジョン長  
 川越 毅 大阪教育大学 教育学部 教授  
 小林 慶規 産業技術総合研究所 計測標準研究部門 室長  
 末永 和知 産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センター 研究チーム長  
 田原 太平 理化学研究所 基幹研究所 主任研究員  
 堀内 伸 産業技術総合研究所 ナノシステム研究部門 主任研究員  
 松林 信行 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	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 主任研究員
三宅 康博	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授
森田 清三	大阪大学 大学院工学研究科 教授
山下 幹夫	北海道大学 大学院工学院 特任教授
中本 信也	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

## 《関連共通課題》

### ■ 3.1 共用拠点・研究開発拠点

小出 康夫	物質・材料研究機構 ナノテクノロジー融合センター 統括マネージャー
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 3.2 教育・人材育成

伊藤 正	大阪大学 ナノサイエンスデザイン教育センター センター長
村上 浩一	筑波大学 大学院数理工学物質科学研究科 教授
安田 哲二	産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門 グループリーダー
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 3.3 国際標準・工業標準

藤本 俊幸	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 室長
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 3.4 リスク評価、EHS

岸本 充生	産業技術総合研究所 安全科学研究部門 グループ長
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 3.5 ELSI・社会受容

鈴木達治郎	内閣府 原子力委員会 委員長代理
吉澤 剛	東京大学 公共政策大学院 特任講師
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

### ■ 3.6 国際プログラム・国際連携

小笠原 敦	産業技術総合研究所 イノベーション推進本部 総括主幹
竹村 誠洋	物質・材料研究機構 企画部国際室 室長
永野 智己	科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー

## [全体監修]

田中 一宜	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー
-------	----------------------------

## ■国際比較企画メンバー■

田中 一宜	上席フェロー
石原 聰	フェロー
河村誠一郎	フェロー／エキスパート
島津 博基	フェロー
永野 智己	フェロー
中本 信也	フェロー
中山 智弘	フェロー／エキスパート
平野 正浩	フェロー
宮下 永	フェロー
渡辺 正裕	フェロー
魚崎 浩平	特任フェロー
大泊 巖	特任フェロー
川合 知二	特任フェロー
品田 賢宏	特任フェロー
曾根 純一	特任フェロー
田中 秀治	特任フェロー
村井 眞二	特任フェロー

CRDS-FY-2011-IC-04

**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 2011年版

平成 23 年 6 月 June 2011

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・材料ユニット  
Nanotechnology/Materials Science Unit, Center for Research and Development Strategy  
Japan Science and Technology Agency

---

〒 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

U R L <http://crds.jst.go.jp/>

© 2011 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission.

Application should be sent to [crds@jst.go.jp](mailto:crds@jst.go.jp). Any quotations must be appropriately acknowledged.

---

ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
CT CTCGCC AATTAATA  
TAA TAATC  
TTGCAATTGGA CCCC  
AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC  
ATAAGA CTCTAACT CTCGCC  
AA TAATC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT  
CTCGCC AATTAATA  
ATTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
CTCGCC AATTAATA  
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC  
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT  
ATTAATC A AAGA C CT  
GA C CTA ACT CTCAGACC  
0011 1110 000  
00 11 001010 1  
0011 1110 000  
0100 11100 11100 101010000111  
001100 110010  
0001 0011 11110 000101

