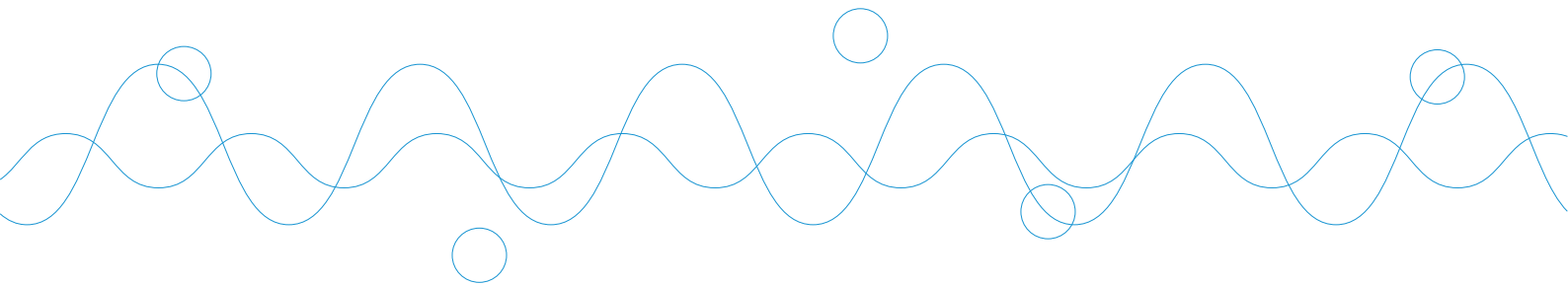


CRDS-FY-2011-IC-04

ATTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGCC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC CTCAGACC

ナノテクノロジー・材料分野
科学技術・研究開発の国際比較
2011年版

0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1
0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0
0 1 0 1 0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1
0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1 1 0
0 1 0 1 1 1
0 0 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 0 0 1 0 1 0 1 0 1 1



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
2. 基盤科学・技術	105
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 (μ 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

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。

(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]

(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の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、x :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. 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、欧州は主としてデンドリマー、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、CO₂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	○	↗	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、x :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
- [4] S.Bae et al., Nature Nanotechnology, 5, 574 (2010).
- [5] 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、x :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言い難い。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目まぐるしく進められている。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積極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>

(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、x: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]

2.1.3 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SiO₂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。

3.3 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 TC 229 に形成された。ISO/TC 229 および IEC/TC 113 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

(注1) 現状について [○ : 非常に進んでいる、 ◎ : 進んでいる、 △ : 遅れている、 × : 非常に遅れている]
 我が国の現状を基準にした相対評価ではなく、絶対評価である。

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

3.3.3 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が特徴であり、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

[3] 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
- [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
- [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、 x :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]