

各タスクフォースから提出された最終報告書

2-1	共通課題・推進基盤タスクフォース	田中主査
2-2	ナノエレクトロニクスタスクフォース	中村主査
2-3	材料タスクフォース	馬越主査
2-4	ナノバイオタスクフォース	梶谷主査
2-5	ナノサイエンスタスクフォース	川合主査

共通課題・推進基盤タスクフォース
最終報告書

タスクフォース主査

田中 一宜

平成 21 年 3 月

まえがき

TF1 のミッション

(1) 第三期科学技術基本計画の中間地点(2008 年)におけるナノテク・材料分野全般の世界の潮流と日本の立ち位置を、できる限り定量的に分析し把握する。もって第四期計画(2011 年以降)の立案に資する。この作業過程で各 TF からの報告を集約する。

(2) 推進基盤領域の第三期基本計画における中間フォローアップを行う。以下の項目について実施状況と現状の課題を整備し、国際比較の上、今後に向けて具体的に推進方策を提案する。

- ①研究開発拠点の形成
- ②教育・人材育成 (独立した項目とした)
- ③産学官連携
- ④府省連携
- ⑤ファンディング制度
- ⑥責任ある研究開発の推進
- ⑦国際協調・標準化・知財戦略

(3) データ収集・分析チームを編成する。

ナノテク・材料分野の内外の状況を定量的に把握するための基礎データを府省を横断して収集し、今後の戦略策定に資する。

報告書(案) (以下に添付)

1. 分野全般の国際的動向と我が国の進捗状況 / ミッション(1)に相当
2. 推進方策・推進基盤 / ミッション(2)に相当
 - (1) 第3期科学技術基本計画における進捗と課題
 - (2) 国際比較
 - (3) 推進方策の提案

*ミッション(3) 関連の報告は、横山浩委員から提案予定。

1. 分野全般の国際的動向と我が国の進捗状況

物質研究の極限として 20 世紀後半に花開いた領域のひとつがナノサイエンスであり、それを利用する技術としてのナノテクノロジーである。すべての産業分野におけるイノベーションの鍵と目され、21 世紀に入ってから世界的な規模で研究開発への国家投資が始まった。日本においては、第 2 期(2001－2005)、第 3 期(2006－2010)の重点 4 分野の一つに指定されて戦略的な国家投資行われてきたが、今後第 4 期を見据えてその効果と国際的な状況を俯瞰的に評価する必要がある。以下、この 2、3 年に見え始めたナノテク技術の世代進化を含め、状況の変化を概観する。

(1) 2006 年以降の顕著な状況変化

ナノテクノロジー(以下ナノテク)・材料分野への世界各国の公的な投資が始まってから 5 年以上が経過し、日米では双方とも 8 年目を迎える。ここへ来て、ナノテクを取り巻くグローバルスケールでの状況が大きく変化してきた。

- ① 地球温暖化、資源枯渇という全地球的課題への対策に向けて、新世代の太陽電池などの再生可能エネルギー技術、省エネルギーのための輸送機器部材の軽量化、希少資源の節約・代替など、ナノテク・材料技術によるブレークスルーへの期待。
- ② 関連の最重要課題としての環境浄化技術、水(飲用)、食料(安全)に関しても、高機能触媒、フィルター、センサーなど、新ナノテク・材料開発への期待。
- ③ 高齢化社会における医療や QOL の充実に向けて、大幅に解読時間が短縮されつつある人ゲノム技術への対応や生体関連(生体由来、生体適用、生体組織代替、生体プローブ、生体活性)材料の高機能化を可能とするナノテク・材料技術への期待。
- ④ 微細化限界が間近に迫った CMOS 技術を新しい概念で突破しようとするナノエレクトロニクスに関する欧米の戦略展開。
- ⑤ 日米欧に加え、中国、韓国、台湾、シンガポールの急迫、インド、ロシアの新たなナノテク国家戦略スタートによる、ナノテク産業化へ向けた国際競争の激化。

これらの状況と背景は、次に記すナノテク商業化の兆候とあいまって、これまでよりもはるかに強いニーズと現実感をもってナノテク・材料技術の成熟を促している。象徴的な出来事は、2008 年 12 月、米国の次期大統領(当時)Obama が、DOE のローレンス・バークレー国立研究所所長 Steven Chu (1997 年ノーベル物理学賞受賞者)をエネルギー長官に指名したことである。Steven Chu は、「分子工場」(Molecular Foundry)の提唱者であり、異分野融合とナノテクによって再生可能・代替エネルギー分野にイノベーションを起こすと宣言している著名な科学者である。

(2) 継続的な国家投資とナノテク商業化の兆し

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、日本、韓国、英国をはじめ世界の主要数10カ国が相次いで独自のナノテク国家計画を発表し、公的な研究開発投資額は毎年上昇している。2005年度時点では、民間を含む世界の年間総投資額は8600億円（\$9.5B）であったが、2007年度は1.2兆円（US\$13.5B）に達し、2008年度は約1.35兆円（US\$14.9B）と予測されている。特にこの1、2年は、①米国やEU諸国を中心として政府投資の継続的強化、②新興国（ロシア、アジア、中近東）の新たな参入、③ナノテク市場形成の兆し、などが相乗して政府投資及び民間投資（ベンチャーキャピタル含む）共に急増の傾向となっている。また、2007年以降は、民間投資が政府投資を上回っている。

米国や日本では、2001年度以降の集中的な投資に対して産業へのリターンを期待し始めていたが、ウッドロー・ウィルソンセンターのProject of Emerging Nanotechnology（PEN）の一つの成果としてようやくナノテク関連商品の調査結果が出始めた。それによれば、世界のナノテク関連製品数は2005年以降に急に増え始め、2006年3月の210から2008年8月には800を超え、毎週、世界でナノテク新製品が3～4種産み出されている。日本と台湾の独自の調査では日本国内でもナノテクプロセスまで含めれば2007年12月で既に386が確認され（JST研究開発戦略センター調査）、台湾では200以上のナノマーク製品（2009年2月現在）が公的に認定されている。

明らかに2005年以降、各国のナノテク研究開発投資が製品として結実し始めた兆候であり、ナノテク・材料分野も第一世代（個別分野の先鋭化・極限化：ナノ先鋭化）から第二世代（先鋭化した異分野のナノが融合：ナノ複合化）に移行しつつあると見られている。今後、この分野はさらに、エネルギーを含む地球環境問題などへのイノベーションドライバーとして技術の成熟を目指し、第三世代（各種ナノ技術を構成的に組み上げる：ナノ組織化）に突入すると考えられる。

この2、3年のナノテク製品数の急増を反映して、また、今後のエネルギー・環境分野への長期的な貢献への期待もあって、ナノテク産業の市場予測は大幅に上方修正されている。ナノテク専門の調査機関によると、2007年のnanotech-based goodsは既に8兆円（US\$88B）にのぼり、nanotech-enabled goodsは2015年には280兆円（US\$3.1T）に達すると予想されている。これは、NSFがNNIスタート以後、常に標榜していた2015年時点での市場予測US\$1T（90兆円）の3倍に相当する。

(3) 社会受容関連研究の強化と国際協力

ナノテク産業とその市場規模に関する成長の兆しが明らかになり、また、エネルギー・環境分野において今後のナノテク技術への大きな期待が高まりつつあることから、

米国は、2008 年、ナノテク技術の社会受容を促進するために「21 世紀ナノテク研究開発法」の改正案を下院、上院で議論した。その結果、ナノテク技術・材料の EHS（環境・健康・安全）への影響に関する研究に公的資金をこれまで以上に重点投資する法案が下院を通過している。とくに、EPA 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りつつある。

ヨーロッパでも同様の認識の下、EU や英国は独自のプログラムだけではなく米国との共同研究を開始し、国際的には、科学的なリスク評価技術、安全性の合理的な認定法、標準化等の早期確立を目指して、ISO や OECD を巻き込んだ活動が急速に高まっている。

(4) 各国政府の取り組み

欧米各国は、この 1, 2 年のナノテクノロジー・材料分野における商業化の兆しや、エネルギー・環境分野への浸透を期待して、公的投資をさらに強化する傾向が見える。特に、米国においてその傾向は顕著である。

米国は、2007 年 12 月に前回の NNI 戦略プラン(2004 年)を改善した新戦略プラン、2008 年 4 月に PCAST(大統領科学技術諮問会議) による 3 年に 1 回の NNI に対する評価レポートを、相次いで発表した。2009 年度は \$1.5B の概算要求であり、2001 年から積算すると連邦政府の投資額は \$10B (約 1 兆円) に達している。この間、70 の研究センターや共用施設が充実して、連携、融合、教育などの活動に有益に利用されている。USPTO のナノテク関係の特許が 4800 に達していて、多くが NNI のサポートを受けたものである。米国を中心とするナノテクへのベンチャーキャピタル投資額も 2008 年度は \$1000M と予想されている。今後のナノテクは、2007 年に開所した CNSI (California NanoSystems Institute) に象徴されるナノテクのシステム化 (第 3 世代のナノの組織化) に向かうが、PCAST は、エネルギーと医療関係にパラダイムシフトを起こすポテンシャルがあると予測している。戦略面での大きな変化は、NNI の戦略構成要素として従来 7 項目であった PCA(Program Component Area) において EHS(環境、健康、安全)を独立させて 8 項目にしたことである。ナノテク産業の成長を確信して社会受容を加速するため安全性評価に重点を置くとする国の意志のあらわれである。一方、ナノエレクトロニクスにおける話題は、全米に整備された NNIN(ナノテクインフラネットワーク 13 拠点)などの施設を使って展開し始めた SRC (Semiconductor Research Corporation) と NSF の共同プロジェクト NRI (Nanoelectronics Research Initiative) である。2020 年にゴールを置いて 35 大学、21 州が参加する。国際規模での人材吸引戦略とみることもできる。

欧州では、EU の第 7 次欧州研究開発フレームワークプログラム (FP7:2007-2013) が始動し始め、ナノ科学から新生産技術にいたるまで、FP6 (2001-2006) の 2 倍近い年

間予算 5 億ユーロが今後 7 年間投入される。ファンドの 4 割は独に分配されるといわれる。各国は独自の国家計画を走らせていて、日米よりは少ないものの、独、仏、英、蘭、伊の順でナノテクへの大きな国家投資が行われている。独は特にこの分野への強化を図っていて、人材確保のため中国との関係を深めている。共用施設インフラとして欧州全体に 142 の N&N Network があり、58 は国際協力に使われている。ナノエレクトロニクスについては、IMEC(大学間マイクロエレクトロニクスセンター／ベルギー)と MINATEC (マイクロ・ナノテクイノベーションセンター／フランス) の 2 大研究拠点があり、中でも IMEC は規模の拡大と充実が著しく、国際的な研究請負機関に成長しつつある。社会受容への関心は米国同様に高く、EU のプロジェクト NanoImmune 他があり、英国では、Royal Commission of Environmental Pollution がナノテク材料に対する報告書を発表している (2008)。

アジアは、韓国、中国、台湾、シンガポールが基礎から産業化までナノ重点化を継続、台湾と韓国はナノテク国家計画を更新した。韓国の第 2 次科学技術基本計画 (2008-2012) は、生命、素材、ナノなど 8 大分野、100 重点科学技術を含み、科学技術 5 大強国 (米、日、EU、中、韓) を目指す。現在、ナノテク分野リソースは、49 の研究部署、1000 人の研究者である。台湾は、最初の 6 年計画 (2003-2008/\$630M) でナノテク生産額 96.8 億ドル (\$9.68B) を達成、新 6 年計画 (2009-2014) に 7 億 2600 万ドル (\$726M) を計上している。教育、産業化を含め、バランスの取れた計画を進めており、オーストラリアとの産業連携も始めている。中国は、ナノ材料だけでなくバイオナノに注力し、最近、中国科学院の化学研究所でバイオナノの 5 年プロジェクトがスタート、蘇州にはバイオベイという国際ベンチャー拠点が形成されつつある。

ロシアが、2007 年に初めて 8 ヶ年の国家科学技術計画を発表、2010 年には 1000 億円を投資、2015 年までにナノ製品販売 3 兆 2 千億円を目標としている。2008 年からは、ナノテク研究のインフラ整備のため、NNN (National Nanotechnology Network) 計画がスタートした。

(5) 我が国の状況 - 第 3 期科学技術基本計画

ナノテクノロジー・材料は第 2 次、第 3 次科学技術基本計画の中で重点 4 分野の一つと位置づけられ、米国と同様に重点投資開始後 8 年目になっている。この間、日本の国家投資額は順調に伸び、第三期計画においても年毎に増額されたが、米国を筆頭とする他主要国に比較すると伸びが小さく、2008 年度は 856 億円で、米国 (13 億 5000 万ドル) に大きく差をつけられている。また、2005 年度 (第二期最終年度) 972 億円から 2006 年度 (第三期初年度) 762 億円の見掛けの急減は予算費目の分類の違いによる (詳細未公表)。

ナノテク・材料分野の発表論文の質に関して論文の被引用度を用いた解析によれば、

日本はアジアではトップだが米、独、英に比較してまだ低い。しかし、日本国内において IT、環境、ライフサイエンス分野に比較した場合のナノテク・材料分野は最も国際的に高い学術ポテンシャルを有している。

一方、上述のごとく、ようやく世界でナノテクをベースとした新しい技術が市場に始め、日本国内でも 2007 年 12 月時点までで、既にナノエレクトロニクスや生活関連ナノ製品を中心に 386 件が確認され急増中である（JST 研究開発戦略センター）。再生可能エネルギーの中で最も関心の高い太陽電池技術も世界トップレベルにあり、炭素繊維、逆浸透膜、光触媒などの環境産業へのインパクトも国際的な存在感を持っている。

しかしながら、ナノテク・材料分野の中長期にわたる産業貢献を実現するためには、異分野融合を促進し、基礎と応用との会話を演出し、異業種同士の連携交流を図るための共用施設や国際的な研究拠点及び人材育成策がインフラとして必須である。共用施設については文部科学省のナノネット 13 拠点が運営されているが、米国、韓国、台湾などに比較して投資額が一桁近く低く、米国の充実した数十の拠点ネットワーク（NNIN：ナノテクインフラネットワーク、NCN：ナノテクコンピューターネットワーク、NSRC：ナノスケール科学研究センターなど）とは比較にならないほどサービスが貧弱で、かつ、国際的にもオープンにされていない。また、競争の激しいナノエレクトロニクス分野においては 2006－2007 年度に 4 つの大きなプロジェクトがスタートしたものの投資が分散気味の嫌いがある。そのため、一部の企業は、研究リソースを国際的な拠点の ANT（Albany Nano Tech／ニューヨーク）や CNSI（カリフォルニア）あるいは IMEC（ベルギー）に移し、先端的なナノエレクトロニクスの開発競争に備えようとしている。放置しておく、中長期的には、国内の企業研究開発部門の空洞化につながりかねない危機的状況にある。人材育成策はこういった状況と連動していて今後に向けての確たる改善策は明らかにされていない。

社会受容をめざす工業用ナノテク材料の安全性評価法（NEDO プロジェクト）は世界でトップレベルの成果を出しつつあり、OECD と共同で国際シンポジウムを開催した（2008 年 4 月）。ISO における標準化については 3 つのワーキンググループのうち計測・評価 WG の議長国を日本が担当して活動中である。

(6) 注目される研究成果及び応用

2006 年以降も研究成果は着実に挙がっていて、一部は事業化されつつある。その中から、海外の成果も含め、それぞれ数例、顕著なものを以下に列挙する。

*鉄ニクタイド系新超伝導体の発見と 50K を超える転移点の実現（東工大／JST）。米国 Science 誌 2008 年度 10 大発見の一つに選ばれる。

*DNA を結合手およびスペーサーとして金属微粒子（Au）を自己組織的に 3 次元結晶状

に配列させることに成功 (North-western Univ.、BNL／米国)。

* 白金を使わない燃料電池用無機系及び有機系触媒の開発 (横浜国大・群馬大／NEDO)。

* TiO₂、WO₃ などによる光触媒 (防汚、抗菌、超親水) 材料開発と屋根、壁、日用品への応用、市場の成長 (東大／NEDO)。

* 新概念の透明アモルファス酸化物半導体 (TAOS) の開発と低コスト透明導電膜としての実用化研究 (東工大／JST・NEDO)。SID 特別功労賞受賞 (2009 年度)。

* スピントロニクス of 急進展。酸化マグネシウム (MgO) を介してシリコン結晶上に薄膜トンネル磁気抵抗 (TMR) 素子をエピタキシャル成長させることに成功。HDD や MRAM に応用 (産総研／JST・NEDO)。2007 年度朝日賞、IBM 科学賞など受賞。

* ブロックコポリマーの自己アセンブリー現象を利用したプロセスにより CMOS 用の低誘電率材料 (low-k materials) を作製 (IBM／米国)

* グラフェンのエピタキシャル成長、バンドギャップを持つグラフェンの作製、それを使ったトランジスタ試作 (米国 DARPA)。

上記の例以外にも顕著な成果が出つつあり、それらは、ナノサイエンス、物質・材料、ナノバイオ、ナノエレクトロニクスの領域に亘るが、以下それぞれの項で紹介される。

(7) 学術論文・特許動向

ナノテクノロジーの論文数は米国がトップで中国が 2 位、日本、ドイツと続く。特に、中国、シンガポール、韓国、台湾のアジア勢の論文数急増は顕著である。引用数でみた論文の数については、米、EU、日本の順で上位を占め、アジア諸国を上回っている。

ナノテクに関する公開特許については、2001 年以降の増加傾向はまだ続いていて、1995 年-2006 年 11 年間で 14,000 件を超え、中国が 45% を占める。出願特許数では、中国に次いで、2006 年時点で日本と韓国がほぼ同レベル、第 4 位が米国で、EU 諸国は少ない。11 年間のナノテクの内容内訳を見るとナノ材料 (32%)、ナノ構造 (22%)、医薬・ヘルスケア (18%)、半導体・電子デバイス (14%)、計測機器 (10%)、繊維 (2%)、機械 (12%) となっている。ナノ材料の代表格、カーボンナノチューブ (CNT) については、応用に関する特許が製造・成形・加工特許の 2 倍近くあり、いずれも特許増加曲線 (S 字) の中間点を超えて成熟期に入っている。今後、さらに、製品化が進むと予測されている (経産省)。一方、国際特許出願 (WO)、ヨーロッパ特許出願 (EP) など、自国外への国際特許出願について調べると、米国やドイツは、自国、外国の出願数割合がほぼ同じレベルなのに対して、中国 (98%)、韓国 (77%)、日本 (75%) は外国出願比率が低く、圧倒的に自国出願率が高い。しかし、2003 年から 2006 年にかけて、韓国は国際特許出願を急増させて日本を追い抜いている。中国は 2002 年以降、医薬・ヘ

ルスケア分野とナノ材料分野について大量の特許出願を行い、特に前者については、基礎研究センターの設置、ベンチャー拠点の形成を含めて重点化していることが注目に値する。

日本は、特許分析によって基礎と応用のリンケージ（サイエンスリンケージ）が低いこと、あるいは材料・加工特許が主でデバイスやシステム的な特許が少ないこと（経産省、NEDO）、などと分析されているが、今後の効果ある連携融合促進策や知財戦略の中でクリアされるべき重点課題と考えられる。

2. 推進方策・推進基盤

第三期基本計画においては、ナノテク・材料分野を強力に推進する戦略として推進方を掲げ、諸推進基盤の整備を図っている。第三期スタート後の3年間（平成18年度～平成20年度）の実施状況について「研究開発拠点形成」、「教育・人材育成」、「産学官連携」、「府省連携」、「ファンディング制度」、「責任ある研究開発推進」、「国際協調・標準化・知財戦略」の項目について、（1）実施状況を記し、現状の課題を整理し、（2）国際的な比較もベースにして、（3）今後に向けての提案を行う。

（1）第3期科学技術基本計画における進捗と課題

研究開発拠点形成

第一期ネットワーク計画（2002-2006）は、ナノテクの裾野拡大など一定の役割を果たした。平成19年より第二期ナノテク支援ネットワーク（ナノネット）がスタートし、26機関が参加、共用施設として13センターに拡充・整備されている。しかし、平成19年度は予算18億円で、ナノテク材料分野全予算の2%相当であり、第1期の年間予算30億円に比較してかなり抑えられている。第二期ナノネットの特徴はセンター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、各拠点で運営の工夫が行われている。企業側の共用施設使用のニーズは益々高まっている。一方、測定機器など設備の老朽化が懸念され始めている。

全ナノテク国家投資額の10%～15%を共用施設・拠点形成に充当している他主要国（米国、EU、韓国、台湾）に比較して、日本は極めて投資額が低く、産業界のニーズに応えられる充実した設備にはなっていない。課金制度にしても導入はしたが、制度的な運用上の問題があり、継続的な運営を期待するには解決されるべき課題が山積している。また、ナノエレクトロニクスに見るような特定プロジェクト等を国際的にオープンにして産学で推進する中核的研究拠点もまだ設置されていない。欧米韓に比較してそのような設備を持たない状況は今後の連携融合促進のためにも大きなハンデキャップとなるだろう。

教育・人材育成

ナノテクは、異分野融合と組織連携を促進させて新しい領域や産業技術を生み出すことが期待されている分野で、米国や台湾ではそのための小中高一貫教育システム（K-12）の構築に向けて諸施策が講じられているが、日本にはそうしたプログラムは存在しない。

大学院教育に関しては、21 世紀 COE、グローバル COE が博士後期課程の人材育成に貢献しているもののナノテクに焦点を絞っているわけではなく、また、大学院教育改革支援プログラムなどの教育中心のプログラムも短期的かつ限定的である。一方、テクニシャン育成のための新しいキャリアパス設計や若手研究員の企業におけるインターン制度などが一部の独立行政法人で自主的に施行され始めている。

日本における問題は、若者の理科離れ、工学部志望学生の急減、若手研究者の国内志向など、ナノテク・材料分野の進展にとって大きな障害になりかねない教育・人材育成上の諸課題に対して長期的視野に立った対応策を持っていないことである。文部科学省だけで人材育成に関する総予算は 1,500 億円をはるかに超えるにも拘らず、いずれも一過性で短期的なプログラムである。戦略の体をなしていない。異分野間を横断して俯瞰的な視野を持つ人材を必要とする日本のナノテク分野にとっては、長期的に見て最大の課題と言える。

産学官連携

制度として注目されているのは NEDO のナノテク・先端部材実用化研究開発（ナノテクチャレンジ）である。この制度は基礎・応用の段階から大学あるいは国立研に加えて企業チームが参加することが必須条件となっていて、3 年後にさらなる実用化のステージに進むか否かのレビューを受ける。つまり、基礎の段階から応用をはっきりとみ定め、途中にステージゲートを設けて出口への展開を効率的に図る制度である。応募件数は極めて多く、最初に 4 分の 1 に絞られ、その次のステージへ進む際にはさらに 6 分の 1 に絞られる。実用化研究のステージが 2〜3 年というのは少し短すぎるとの懸念もあるが、制度として実験中である。また、大学における産学連携（先端融合イノベーション創出拠点／科学技術振興調整費）や異分野融合（ナノテク融合拠点／科学技術振興調整費）の拠点プロジェクトにおいては国立大学法人側が経営責任者として拠点を積極的にサポートする例がいくつか生まれつつある。一方、独立行政法人や国立大学法人には出資機能がないため、大学発ベンチャーへの投資やサイエンスパーク運営が制度的に阻まれている。日本の大学発ベンチャーの企業数は平成 18 年に 1347 社に達したが、上記事情やベンチャーキャピタル活動が貧弱であり、またベンチャーの成果に対して大企業の関心が薄いため、自立して成功する例が少ない。成長過程のテクノロジーに対する米国ベンチャーの投資は 10%ほどであるが、日本はその半分である。また一方、大学工学部を志望する人材が急減しているが（最盛時の 2 分の 1 以下）、この対応策も頭の痛いところである。法人になった国立研や大学と産業界がどのような win-win の新しい産学関係を構築し、若い研究者を吸引していくのが今後の大きな課題の一つである。

府省連携

第二期科学技術基本計画の際、ナノテク材料分野で始まった府省連携プロジェクトが他分野も巻き込んだ科学技術連携施策群（2004 年）という国レベルの政策にまで成長した。ナノテク材料分野においては、現在、医療ナノデバイス関連及び社会受容関連のプロジェクトが連携施策群として走っている。一方、エネルギー関連（水素・燃料電池）のプロジェクトは平成 20 年 3 月に終了している。少なくとも関係府省が参加する毎年のシンポジウムを通して情報が共有されている。今後、この連携施策群を有機的に運営していくためには、府省を横断したコーディネータの権限の強化や個別プロジェクトの期間に左右されない分野全体の継続的なコーディネーション機能の付与などが問題となるであろう。連携施策群ではないが、府省連携プロジェクトの当初から走っている「革新的構造材料を用いた新構造システム建造物」は、国土交通省、文部科学省、総務省、経済産業省、内閣府の連携で成果を挙げつつ平成 20 年度で研究開発を終えようとしている。

他の形の府省連携活動もこの 2、3 年の間にナノテク材料分野に関しては定着しつつある。元素戦略（文科省）と希少金属代替材料開発（経産省）との合同戦略会議、同じく文科省と経産省とのナノエレクトロニクス合同戦略会議が動いていて、合同公募説明会など事実上のオールジャパン戦略を意識しつつ共同作業が行われている。

ファンディング制度

この数年、上述のような異分野融合の拠点形成プロジェクトが発進し、科研費によるボトムアップ型のファンディングと対をなしている。徐々にではあるが、産学の連携や、大学内の学科間、学部間の交流が増え、縦割りであった大学や研究機関内でダイナミックな横の動きが増幅されつつある。戦略として考える場合、トップダウン型とボトムアップ型のバランスが必要であり、中長期的に考えた場合には、短期の大型プロジェクトだけでなく、少額でも長期的・継続的な研究プログラムも必要であろう。基盤に近い領域でのサイエンスは広いスペクトルを維持していることが重要であり、また、そのような基礎領域の研究者とニーズ側の研究者との情報交流とインセンティブが本質的に必要である。

今後、トップダウン型戦略的ファンディングとして、日本が高い学術ポテンシャルを有する物性物理や材料科学の卓越したリーダー達を総動員する地球規模課題の解決のためのプロジェクトも十分考慮されるべきであろう。

拠点形成や共用施設設置のためにファンディングする際には、受け入れ研究機関側の積極的なサポートを求めるようなインセンティブ付与の方式を考えるべきではないか。米国では cost sharing policy としてしばしば使われるし、法人となった大学を含む国立研究機関でもトップ経営者の決断で実行可能になっている。あるいは、最近一部で

試みられ始めたが、異分野融合のインセンティブを与えるために、異分野の研究者同士のチーム編成やプロジェクト提案を優先条件にするファンディング制度も増やすべきである。

国家基幹技術のような大型プロジェクトにおいては、機器の購入だけではなく、実際に何を実行するのかというプロジェクトの内容に関する実施計画についての議論と事前評価を時間をかけて厳正に行うべきである。

責任ある研究開発促進

科学技術連携施策群「ナノテクノロジーの研究開発推進と社会受容」プロジェクトが平成 19 年度にスタートした。また、コーディネータの中西が率いる NEDO プロジェクト「ナノ粒子の特性評価手法の研究開発」（2006 年度～2010 年度／20 億円）の成果が出始め、2008 年 4 月に NEDO-産総研-OECD 合同国際シンポジウム「工業ナノ材料のリスク評価」が開催された。OECD の WP「工業用ナノ材料の評価法」と共同作業をしている。複数の省のファンドによってナノ材料の安全性評価、リスク評価研究が始まっている。

しかしながら、評価法や関連する標準化作業など国際関係機関の動きは急ピッチであり、それらへの対応が滞ることも多く、今後、質量ともに今よりも充実した人材が緊急に必要となってくる。関係府省が横断的な協議をする場としての国際コミュニティーへの窓口を設定する必要があるのではないか。また、広義のナノテクノロジーのリスクガバナンスについては、社会科学者の参加が望ましい。ナノテク材料を作製する事業者が自己の努力、見識でリスク評価をし、国民に伝える能力の獲得と文化の醸成が必要である。

国際協調・標準化・知財戦略

単発的な国際交流フォーラムやシンポジウムは数多く企画されるが、真の意味での国際協調に効果的に繋がっているとは考えにくい。継続的かつ実質的な効果を狙った国際共同研究や国際人材交流は、日本においては非常に少ないのが現状である。

数少ない成功例としては、物質・材料研究機構の ICYS（英語を公用語とする国際若手研究者センター）が将来のテニユアトラックと結び付けて海外研究者の定着を考慮した運営を実施し今後 10 年続く WPI につなげている。一方、産総研が中心になって立ち上げたアジアナノフォーラム（ANF）は、アジア、オセアニアの 13 経済圏をメンバーとして非政治的な運営で活動を続け、昨年 NPO として独立、現在、シンガポールに本部が設置されている。ISO に正式加盟できない台湾は、リエゾンメンバーとしての ANF の代表者として ISO の標準会議に参加し、活動をしている。

標準化に関しては、ISO のナノテクに関する技術委員会（TC229）には WG が 3 つ設置

されていて、そのうちの「測定と評価」WG の議長国として日本は活発に活動をしている。しかしながら、他の 2 つの WG における活動内容が必ずしも日本の関係者に共有されていない現状もあり、関係各省間の調整機能をどう確保するのか、今後の国際対応の一つの課題として認識されるべきである。最近になって第 4 の WG が設置され中国が幹事になっている。

(2) 国際比較

研究開発拠点形成

共用施設や研究開発拠点の形成については、米国、韓国、台湾、独、英、仏、ベルギーなどで戦略的な投資が行われている。特に米国においては、NNIN（国家ナノテクノロジーネットワーク／NSF）13 拠点、NCN（ナノテクコンピューターネットワーク／NSF）7 拠点、NSRC（ナノスケール科学研究センター／DOE）5 拠点を代表にして分厚いインフラが計画的に整備されてきた。年間 100～150 億円が投入され、異分野融合研究や K-12 教育プログラムの教師養成の目的のために有効に利用されている。NNIN や NCN は基本的に外部にオープンにされた共同利用施設であり、NSRC はプロジェクトあるいはプログラムを実施するための研究拠点である。これらの充実した施設を利用して、米国では大学の若い研究者やベンチャービジネスが研究開発活動を活発に行っている。欧州においても、独、英、蘭などが共用施設のネットワークを自国に持っているだけでなく、EU としての大きなネットワーク N&N Network（142 のセンター）が形成されている。欧州における巨大研究拠点としては、IMEC（ベルギー）と MINATEC（仏）の 2 つが有名である。また、欧州の IMEC（ベルギー）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、日本の企業の研究センターを誘致している。韓国の NNFC（国家ナノテクファウンドリーセンター）は課金制度を運用して、既に 3 億円で自主運営に入っている。

日本と諸外国との大きな差は、投資額の差ばかりではない。日本のセンターが国際的に開かれていないことで国際協力の機会が奪われているのに対し、諸外国は積極的に海外の研究グループを研究拠点に誘致している。

教育・人材育成

米国は、過去 10 年近くに亘って蓄積し充実させてきた共用施設のネットワーク NNIN、NCN、あるいは NSF の他のナノテクセンターを利用して、小中高の一貫の科学技術教育 K-12（大学学部も含めた K-16 も含む）をナノサイエンスをベースに構築する計画を進めている。K-12 教育の教師の養成や教材の作成も行い、Nanotechnology Center Learning and Teaching（2004-）には 5 年間で約 100 万人の生徒が参加している。ま

た、ナノテク人材の養成も兼ねる教養利用施設についても、NNINの利用者が2007年だけで4,500人、NCNは2008年だけで7万人に達している。台湾においても、類似のナノテクによるK-12教育システムの構築を目指した教科書作りや、英語、日本語への翻訳が進んでいる。EUではビデオや映画により、ドイツではナノトラックを使ってアウトリーチが盛んである。

日本においては、教材作りにまで踏み込んだ教育システムプログラムは存在しない。共用施設の利用者は1,000名を越えているものの、人材育成という視点からは、各研究機関の自主努力に依存していて継続性の担保が難しく、効果も限定的である。

産学官連携

上記の共用施設や研究拠点を利用して、各国は異分野融合や産学官連携を活発に展開している。最近最も目立つものとしては、ナノエレクトロニクスの新しい戦略NRI（ナノエレクトロニクス研究イニシアティブ）が米国35大学21州にまたがって展開し始めていることである。この計画は、アメリカ半導体関係企業とNSFとの2020年を目指した共同プロジェクトであり、多くの人材を海外から吸引しようとしている。台湾においては、ナノテク産業を振興するためにNanomarkシステムを導入し、申請のあったものに対して真のナノテク技術であるか否かを公的機関が認定している。

日本においては、NRIのような長期を見据えた規模の大きい産学連携計画は2011年以降には全く用意されていない。大学発ベンチャーにおいても、大学に出資機能がなく、ベンチャーキャピタルにインセンティブを与える方策の工夫が必要である。一方、徐々にではあるが、経済産業省のステージゲート型ナノテク研究開発プログラムや文部科学省の先端融合イノベーション創出領域拠点形成プログラムなどを通じて、新しい産学連携の形を模索し始めている。

府省連携

米国ではナノテクノロジー国家計画（NNI）を各省横断研究プライオリティー（Inter-Ministry Research Priorities）として位置づけ、現在、25関係省庁を横断した各種調整をNNCO（国家ナノテクノロジー調整局）を通じて行っている。そこでは、各省庁の分担テーマと予算配分がリストアップされて、権威あるコーディネータによって調整が行われる。

日本で始まった連携施策群や他の府省連携活動は、現在、関係者による運営実験中であり、コーディネーション機能が米国に比較するとまだ数段非力と見える。今後の継続的運営努力が必要である。

責任ある研究開発推進（社会受容）

前述のように米国では 21 世紀ナノテクノロジー開発法が一部修正され、ナノテク材料の EHS（環境、健康、安全）への影響を調べる研究に重点投資されることが決定している（2008 年）。米国の EPA（環境保護局）が NMSP（Nanoscale Material Stewardship Program）を制定し、事業者自身による有害性評価の流れを作った。また、TSCA（有害化学物質管理法）による CNT（カーボンナノチューブ）の規制開始で有害性評価の一つの方向が提示されている。化粧品等に含まれる銀粒子の安全性に対する関心が高まっている。

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。英国は米国と共同でナノ材料の環境への影響に関する研究を推進することになっている。

ナノ材料の安全性の評価や将来の規制の問題に関しては、国際的なスケールで多様な議論がされていて、標準化の問題とも関係して今後の動きが加速されるものと予想される。その意味では、日本のナノ材料安全性評価法に関する NEDO プロジェクトは世界をリードする質の高さを誇る一方、国際対応の継続的な窓口機能を果たす部署が欠如していて今後が不安である。

国際協調・標準化・知財戦略

ナノテクノロジー、特にナノエレクトロニクスに関しては国際的な研究開発拠点が少数の地域に集約されようとしている。欧州では IMEC（ベルギー）、米国では CNSE（ニューヨーク）、CNSI（カリフォルニア）、Fraunhofer Microelectronics Alliance（独）である。アジアでは、韓国や台湾にファウンドリーがあり、いずれも国際的に開かれていて国際協調と人材獲得の場として機能している。共用施設であれ、プロジェクトであれ、国際化に慎重すぎる現状を放置しておけば、日本は孤立を免れないだろう。抜本的な戦略策定が必要である。

標準化でもっとも大きな問題は、工業用ナノ粒子の安全性評価法に関する標準化であろう。どこまで科学的な手法で安全性の合理的な記述が可能で、どの段階で予防的措置としての規制に持ち込むのか、そのコンセンサスを築く上でどのような方法で社会と対話を実行して行くのか。このような総合的なリスクガバナンスのプロセスシミュレーションと、国際的な枠組み作りが欧米を中心に始まっている。安全評価法の標準化はその中心課題であり、日本の活動は活発で、技術的にも質が高い。問題は、自国に有利な国際規制を構築しようとする欧米の動きに如何に先行して科学的な根拠に基づいた評価法を世界に発信するかということだろう。

グローバル経済化に対応する各国の特許審査情報の共有や審査方法の実質統一を可能とする「世界共通特許」制度が、平成21年3月から10カ国（日、米、独、英、加、豪、韓、シンガポール、デンマーク、フィンランド）の間で試行される。複数の国で迅速に特許を取得し易くなる利点を考慮した新たな知財戦略が必要である。

（３）推進方策の提案

日本のナノテク・材料分野は学術的にも産業技術的にも世界のトップレベルを維持しており、ほぼ全産業分野に貢献している。特に今後、世紀の課題であるエネルギーや環境分野においてもナノテク・材料技術は最も期待されている。中長期に亘ってナノテク分野の合理的な発展を支える推進方策の充実の本質的に重要であり、戦略的な投資、ファンディング方法、システム構築が急がれる。

研究開発拠点形成

- ①拠点ネットワークおよび中核的拠点構築予算の戦略的枠取り（基本計画書に明記）。
- ②継続的な自立運営のための課金制度、法人側のマッチングファンド。キャリアパスの確立したテクニシャンの常雇用。その他財政・人事上の柔軟性を促進するための制度的阻害要因の除去。
- ③拠点は国際的に開かれた組織とし、アジア諸国や世界から人材を吸引。

教育・人材育成

- ①異分野知識の吸収・融合、グローバルな視点での社会ニーズの把握、急変する環境に対応した状況判断力の養成、等を促進する高等教育の抜本的な改革。そのインセンティブを国立大学法人に与える継続的な施策。一過性の施策の原則廃止。
- ②海外研究者との交流の機会を現状よりも圧倒的に増やすシステムの構築。
- ③上記を実現するため、20-30年スケールの中長期戦略シナリオを作成する常設チームの設置（リーダーは5年任期）。

産学官連携

- ①産学連携を促進する現行のシステム（例えば経済産業省のステージゲート型ナノテク研究開発プログラム、文部科学省の先端融合イノベーション創出領域拠点形成プログラム）の有識者による評価および育成。
- ②研究拠点形成、人材育成と連動させた新しい国際的な産学官連携システムの府省連携による構築。
- ③ベンチャーキャピタル、ベンチャー企業にインセンティブを与える政府、大学法人、

独立行政法人サイドの支援制度の構築。

府省連携

- ① 連携施策群全体を統括する常設の調整局を総合科学技術会議内に設置。総合コーディネーターの任命。
- ② 府省を横断したコーディネータの権限の強化と個別プロジェクトの期間に左右されない分野全体の継続的なコーディネーション機能の担保。

ファンディング制度

- ① 広い研究スペクトルを担保する基礎領域への長期的・継続的投資、および重点研究領域への加速的集中投資を含む複眼的投資戦略シナリオの作成。
- ② 受け入れ研究機関(大学法人、独法)側に共同投資のインセンティブを与えるファンディング制度の構築。

責任ある研究開発（技術の社会受容）の推進

- ① 散発的な有害性研究ではなく、リスク評価という目的に向けた継続的な研究が可能なファンディングの仕組み、政策的な経費で府省横断の共同研究が可能な仕組み構築。
- ② 国際協調、国際競争のための窓口機能を果たす常設機関の設置と人材確保。

国際協調・標準化・知財戦略

- ① ナノテク共同研究施設、中核研究拠点の国際オープン化。国際共通語としての英語公用語化、インターナショナルスクールの設置。
- ② 大学法人トップマネジメントの奨励による大学教官(教授を含む)の10年に一度のサバティカルリープ実施(教官自身の国際的な俯瞰視野の涵養)。

共通課題・推進基盤タスクフォース

主査

田中一宜 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター
上席フェロー/(独)産業技術総合研究所フェロー

データ収集・分析チーム 統括リーダー

横山 浩 (独) 産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門
主幹研究員

構成員

中西準子 (独)産業技術総合研究所安全科学研究部門 部門長
本田国昭 大阪ガス株式会社 技術開発本部 理事
潮田資勝 (独) 物質・材料研究機構 フェロー
片岡一則 東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻
教授
河田 聡 大阪大学大学院工学研究科応用物理学専攻 教授
/大阪大学フォトニクス先端融合研究センター長
十倉好紀 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻 教授
武林 亨 慶応義塾大学医学部 教授
曾根純一 日本電気(株) 中央研究所 支配人
大林元太郎 東レ株式会社研究本部 理事
佐野睦典 イノベーション・エンジン 代表取締役

ナノエレクトロニクスタスクフォース
最終報告書

タスクフォース主査

中村 道治

平成 21 年 3 月

エレクトロニクス産業界の実情把握と分析

エレクトロニクス産業の世界生産額は、新興国市場に牽引されて成長率 10%前後の堅調な伸びを示していたが、世界同時不況の影響により 2008 年以降はマイナス成長へ推移しつつある。世界生産に比べ国内生産の伸び率は小さく、海外への生産移転が進んでいる。それでも日本の電気機器生産額が GDP に占める割合は 16%と米国の 12%より高い。

国内製造業におけるエレクトロニクス産業は、自動車産業と並び日本の中核的産業と位置づけられる。自動車も電子化が進み、電子部品の比率が 2015 年には製造コスト比で 40%にも達すると予測されることから、ますます主要な製造業としての位置づけが大きくなる。2020 年以降を予測すると、エレクトロニクス産業がナノテクノロジー分野で最大の市場規模となることが見込まれる。環境・エネルギー・健康など様々な社会的課題を解決するために、ナノエレクトロニクスによる技術革新が期待されている。

半導体産業に関して日本企業の競争力を分析すると、シェアや生産能力などで半導体製造企業の地位が低下傾向にある反面、半導体製造装置や電子材料は高い競争力を保っている。半導体製造に必要な設備投資額が急増する状況下、日本企業の設備投資額はむしろ減少傾向にあり、Samsung や Intel のような海外企業に及ばない水準に留まっている。

半導体生産は、世界的に 3 つ程度の企業連合に分かれて投資を集約する傾向にあり、日本国内も含めて統合・再編途上にある。研究開発に関しても、IBM や IMEC などを中心として外部連携やグローバルな研究体制構築が進んでいる。日本企業は、上記研究開発連合へ参加する傾向もある一方で、国内研究機関では外国籍研究者の比率が極端に小さく、また企業の研究費に占める社外委託分の比率が小さいなど、グローバル化やオープンイノベーション化で遅れている傾向が見られる。

① 第 3 期科学技術基本計画における進捗と状況変化

ナノエレクトロニクス分野への国としての投資状況を以下に示し、表 1 に進捗状況をまとめる。2006～07 年にかけて 4 つの大きなプロジェクトが開始された。投資金額は、周辺材料・計測加工プロジェクトを含めると、2007 年で総額約 100 億円に達する。主要研究拠点は、Selete、産業技術総合研究所の「次世代半導体研究センター」、13 拠点のナノテクノロジー・ネットワークである。なお、複数のプロジェクトが並行に存在するために研究投資が分散気味の傾向もある。

表 1: 第 3 期科学技術基本計画におけるナノエレクトロニクス分野 (6 領域) の進捗状況と成果、産業化や各種連携、国際的な位置づけ、環境動向変化

先端半導体技術	先端半導体の研究では学術的に高い成果が得られており、世界のトップ集団に位置している。しかし、研究開発の段階から量産化技術の開発へと進めるには巨額の資金が必要となっており、企業単独での開発は困難になっている。現在、この役割は海外の 3 拠点に集中し始めており、日本としてどうするか議論が必要となっている。一方で内外の半導体ファブが利用できるようになったことから、主要学会での国内の大学や独立法人の発表が増加傾向にある。その反面、学会において韓国、台湾、シンガポールなどアジアの台頭が見られる中、日本の企業からの発表が低調になっている。
---------	--

Si 技術への新材料導入による高機能化	Si-LSI に新材料を導入し、CMOS 回路のみでは実現できない機能を実現しようとの動きが活発化している。代表例に MRAM、ReRAM、ナノブリッジ（原子スイッチ）、PRAM、FeRAM などがあり、フラッシュメモリーの限界を打破する不揮発高速・大容量メモリーや、再構成可能論理回路などへの応用を狙っている。スピントロニクス急速な発展、既存のフラッシュメモリー、DRAM や SRAM の微細化限界が近いと感じられること、微細化に伴うマスク費用急騰のため再構成可能論理回路の必要性が増大していること、などが研究活発化の背景にある。
カーボンエレクトロニクス	カーボンナノチューブ(CNT)の材料基盤技術、配線やトランジスタへの応用技術では世界最高水準の研究を推進しているが、韓国の追い上げが急である。新たに登場したグラフェンに関しては、欧米が研究先行している。 この分野は、例えば CNT のビアホール配線応用では銅並みの低抵抗率、トランジスタ応用では半導体と金属相の分離が課題であり、共に CNT 材料制御技術の確立が必須となっている。
パワーエレクトロニクス	地球温暖化とエネルギー問題の解決には、パワーエレクトロニクスを活用した機器の高効率化が重要であり、SiC、GaN デバイスへの注目が高まっている。SiC デバイスの実用化はダイオード等への応用は始まったがトランジスタやこれを用いたインバータなどへの応用はこれからであり、基板コスト、信頼性が課題となっている。SiC 基板の供給は米国の一社独占のため高価格であり、普及を妨げている。日本の基板メーカーも技術水準は高いが、コスト的に量産できる水準には至っていない。米国は軍資金を導入して研究開発を加速している。一方で、Si 基板上 GaN の成長技術が進みつつあり、GaN デバイスのパワーエレクトロニクス応用が進む可能性がある。
光エレクトロニクス	量子ドットや Si フォトニクスの研究が大きく進展している。日本は量子ドットの開発では世界的にトップレベルにあり、産学連携によるベンチャーも起業した。応用市場はまだ見えないが量子カスケードレーザーが THz 光源として有望視される。その反面、フォトリソグラフィの研究は若干低調である。フォトリソグラフィは米国企業企業が牽引しており、日本でも研究を先導する仕組みが必要となっている。近接場光、プラズモンの研究は基礎段階で着実に進展しているが、応用はまだ先である。緑色レーザーは依然、実現できておらず、応用上、その開発は重要である。有機デバイス、特に有機 EL の進展は目覚しく、照明用には GaN-LED と並んで有力技術となっている。太陽電池の研究も活発化しており、有機材料も含め、材料系も多様化している。量子ドットの太陽電池応用も注目される。
MEMS ファブ	半導体 LSI チップと MEMS との集積化が付加価値を高める上で重要である。応用は車、計測、情報端末の入出力等、多様に広がりつつある。研究開発や小規模試作では、東北大のマイクロシステム融合研究開発拠点で MEMS ファブとしてうまく機能しており、ひとつのモデルになり得る。一方で、先端 MEMS デバイスの事業は欧米企業が世界をリードしており、日本は事業面では立ち遅れている。この立ち遅れを挽回するためには、システム設計からデバイス先行試作までの、一貫した MEMS の基盤プロセス技術を備えた開放型研究施設が必要である。

②事業化の状況と促進のための課題

はじめに述べたように、エレクトロニクス産業は今後も日本の主要産業と位置づけるべきであるが、特にその中核である半導体生産に関して、日本の地位は明らかに低下している。そこで、エレクトロニクス産業で再び世界の主導的立場をとるためには、半導体産業で一定以上の地位を維持しつつ、さらに今後中心的役割を担うと予想されるナノエレクトロニクスによる技術革新と、

それに呼応した新しいエレクトロニクス産業の創出が必要である。環境・エネルギー・安全・健康など 21 世紀の社会的課題を考慮するに、まさにこのことが、技術立国日本の国益につながるものと考ええる。

ナノエレクトロニクス分野がカバーする範囲は極めて広いが、上述のとおり研究分野では量子ドット等の光応用、カーボンナノチューブ等のナノエレクトロニクス材料、および MEMS 応用などは世界的にも極めて強い。ところが、極めて強い研究分野であっても、日本はその技術を事業化するしくみが充分でなく、いわゆる「死の谷」の問題を抱えている。日本市場が圧倒的な強さを誇る民生エレクトロニクス応用分野がごく身近に存在するというメリットを十分に活かし切れていない。また、事業分野においても、電子材料、電子部品、半導体製造装置、民生用の応用製品などは世界をリードし続けているものの、これらを製造する個々の企業が必ずしも有機的に連携を行っておらず、ナノエレクトロニクス産業全体の底上げに至っていない。このため、もともと日本が強い分野においては、引き続き日本が競争力を維持できるよう相応の資源を投入すべきであり、かつ、「死の谷」の克服や事業間の連携を進めやすい仕組みが必要である。

メインストリームである先端半導体に関しては、生産のみならず、デバイス技術においてもまた回路設計技術においても日本の競争力は低下しつつあり、また、MEMS デバイス事業化でも欧米に遅れを取っている。ナノエレクトロニクスの将来構想を考える際、日本が競争力を失ったこれらの分野の立て直しと、ナノエレクトロニクスあればこそその新産業創出が急務である。

③国際比較

(1) 研究開発投資の比較

ナノエレクトロニクス分野での日本の投資額は、2007 年で総額約 100 億円に達する。また、投資の分散傾向も見られる。以下に、米国と欧州の状況を比較して示す。

米国では、Nanoscale Device & System へ全体の 21%にあたる 327 百万ドルの予算を配分(2009 年度予定額)している。主要研究拠点は CNSE (College of Nanoscale Science and Engineering, Albany)と CNSI (California NanoSystems Institute) で、ニューヨーク州とカリフォルニア州がそれぞれ 50 百万ドル (2001 年設立時)、100 百万ドル (2000 年設立時)を拠出している。特に Albany には IBM、SEMATECH に加えて日本の装置メーカーなど、合わせて約 250 社が参画しており、ナノエレクトロニクスの一大拠点となりつつある。

欧州では、ナノエレクトロニクスがナノテクノロジーの中心的な研究分野であり、ENIAC (European Nanoelectronic Initiative Advisory Council) が EU の第 7 次研究枠組み計画 (FP7) の基に 2007~13 年にかけて、ナノ構造とエレクトロニクス研究のための汎欧州研究インフラ、PRINS (Pan-European Research Infrastructure for NanoScience)を整備した。これは、IMEC (ベルギー)、CEA-Leti (仏)、Fraunhofer Microelectronics Alliance (独) の 3 拠点を傘下にいれ、7 年間で 11 億ユーロを投資するものである。

この中でも特に、IMEC が一大研究拠点となっている。IMEC には約 50 カ国 500 社におよぶ企業が参画しており、2007 年度の研究予算約 2.3 億ユーロのうち 80%が企業との契約や技術対価

により充てられており、公的資金に 100%頼るのでなく IMEC の主導権を保つ仕組みとなっている。日本からも、半導体メーカー数社と独立行政法人などが参画している。また米国同様、装置メーカーとの連携が進んでおり、日本の装置メーカーとの連携が進む可能性もある。

このように、日本は投資規模や集約性の点で見劣り傾向があることは否めない。日本国内での研究開発では、前述のように、グローバル化やオープンイノベーション化で遅れている傾向も見られる。

(2) 競争力の比較

・先端半導体：シェアや生産能力などで半導体製造企業の地位が低下傾向にある反面、半導体製造装置や電子材料は高い競争力を保っている。半導体製造設備の投資額は、日本企業では減少傾向にあり、Samsung や Intel のような海外企業に及ばない水準に留まっている。技術開発面で、日本は学術的には高い成果が得られており世界のトップ集団に位置しているが、企業からの学会発表が低調になってきている。最先端微細半導体の基盤技術および量産化技術の開発は、海外の 3 拠点に集中し始めている。

・Si 技術の高機能化：主に新メモリーの開発に関して、先端半導体製造メーカーを中心に、今後も激しい技術開発競争が続くと予想される。

・カーボンエレクトロニクス：CNT の材料基盤技術、配線やトランジスタへの応用技術では世界最高水準の研究を推進しているが、韓国の追い上げが急である。新たに登場したグラフェンに関しては、欧米の研究が先行している。

・パワーエレクトロニクス：SiC 基板の供給は米国の一社独占のため高価格であり、普及を妨げている。日本の基板メーカーも技術水準は高いが、コスト的に量産できる水準には至っていない。また、米国は軍資金を導入して研究開発を加速している。

・光エレクトロニクス：量子ドットや Si フォトニクスなどは、基礎研究段階で日本の水準は極めて高いが、応用開発は世界的にもこれからである。太陽電池生産量は、長く日本が首位を保ってきたが、2007 年には欧州が、導入優遇策の効果もあって首位となった。米国はまだ少ないが、グリーンニューディール政策による増加が予想される。有機 EL は、今後も激しい技術開発競争が続くものと考えられる。

・MEMS：研究開発や小規模試作では、東北大の MEMS ファブがうまく機能している。一方で、先端 MEMS デバイスの事業は欧米企業が世界をリードしており、日本は事業面では立ち遅れている。

④分野内での領域融合

ナノサイエンスや材料との融合領域での研究開発状況を以下に示す。まだ研究段階のものが多いため、この融合領域における新技術の種を早く製品競争力へとつなげる仕組みが求められる。

・量子ドットや Si フォトニクスの研究が大きく進展しており、量子ドットでは世界的にトップレベル。

・太陽電池の研究も活発化しており、有機材料や量子ドットなど、材料系も多様化している。

- ・近接場光、プラズモンの研究は基礎段階で着実に進展。
- ・グラフェンに関しては、欧米が研究先行。
- ・有機 EL の進展は目覚しく、照明用には GaN-LED と並んで有力技術となっている。

⑤成果の他 7 分野への展開

ナノエレクトロニクスによる技術革新は、情報通信分野にとどまらず、環境・エネルギー・安全・健康など様々な社会的課題を解決するものとして期待が大きい。特に、環境・エネルギーに関しては、半導体および半導体応用製品の低消費電力化を進める一方、SiC、GaN などのパワーデバイスの進展による電源利用効率の向上が重要である。また、安全・健康などに関連する応用分野の開拓をさらに進めるべきである。

ものづくり分野の強化は、日本の産業競争力の源泉となる。エレクトロニクス分野は今後も日本の中核的産業となることから、特に半導体生産技術におけるものづくり力の強化策が求められる。また、製品付加価値を高める上で、半導体 LSI チップと MEMS との集積化技術など、半導体とナノテクノロジーを融合した新製品分野を創生して、幅広い応用製品へと波及させることが必要である。

⑥推進方策の提案

これまで述べたナノエレクトロニクス分野の状況を踏まえ、今後、技術力・製品競争力・ものづくり力の向上、新応用分野の開拓などを推進してゆくためには、国を挙げての抜本的な研究開発体制の見直しと、戦略的な資源投入に対する合意形成が不可欠である。従来は、ナノエレクトロニクス分野における研究開発のあり方において個々の企業および研究機関の意見は必ずしも一致しておらず、それが戦略的な政策の実施を遅らせてきた側面がある。世界的な共同の激化や企業の基礎研究投資が減少する中で、ナノエレクトロニクス分野を国家戦略と位置づけて短時間のうちに十分な議論を行い、将来構想に向けた施策をオールジャパンで推進すべきであろう。産と学が連携し、ナノエレクトロニクスの新たな可能性を追求できる場を提供しないと日本はこの分野で空洞化する危険がある。

このために必要な方策は、ナノエレクトロニクス研究拠点の立ち上げである。各研究機関のアイデアを実証し、研究成果を一箇所に集めて産業化に結びつける仕組みを作ることにより分野融合と人材融合を同時に進める。このように、日本の誇る研究開発インフラと、世界をリードする研究テーマを持つ拠点を作ること、海外の拠点へと流れつつある日本企業の意識を日本あるいはアジアに向け、外からの優秀な人材を集めることが必要となる。

研究拠点の位置づけは、前に触れた海外の拠点とは異なるものとすべきである。半導体の微細化継続、いわゆる **more Moore** 路線を主とするものではなく、また単に、日本で弱体化しつつある半導体デバイス製造分野のみの強化を主眼とするものでもない。広く半導体技術を基盤としながら、日本が得意とする技術分野を中核とし、かつ外部からも積極的に新技術を取り入れる仕組みをもって、新しい産業を育成できる組織、垂直統合と異分野連携を同時に推進できる組織で

なければならない。また、この組織は、自立的な運営が可能であって、ナノエレクトロニクス分野の産業構造が変容を遂げる、少なくとも今後 10 年以上は永続できるものでなければならない。投資面では、初期段階での設備投資のみに重点を置くのではなく、常に最新の研究開発設備として機能し続けるための追加投資と運転経費の確保が必要である。民間各分野からの参画は勿論であるが、日本の新産業創出という位置づけを明確化することにより国民の理解を得つつ、国として責任を持って投資を継続する必要がある。

研究開発拠点を求心力あるものとするためには、中核となるべき骨太のテーマを持ち、それにナノテクノロジー分野の多様性あるテーマを組み合わせる構成をとるべきである。ナノエレクトロニクス分野は、今後もシリコン集積回路技術基盤の上に成立することは疑問の余地がなく、**more Moore** 路線を主とするものではないものの、ある程度の規模を持った集積回路技術との組合せが可能なものでなければならない。例えばナノ CMOS、シリコンフォトニクス、カーボンエレクトロニクスなどを中核テーマの候補として立ち上げて行くのが良い。また、エレクトロニクス産業の付加価値が、システムやソリューションといった上位階層に移りつつあることを考慮すると、新技術を事業化する際には、あくまでも応用からの視点で小規模な実証試作が出来て、製品設計力を高められる場を提供することが重要な機能である。更に、新しいプロセス、デバイスの開発と製造・検査装置や関連材料の開発が、一体となって展開されることが望ましい。小規模のシャトルサービスのような運用に関しても拠点の人材が柔軟に対応できるような仕組みも求められる。このように、拠点で実施されるテーマは、密接な連携により、材料・プロセス・デバイス・システム・装置研究開発の垂直統合を図り、効率的な新デバイス・システム開発が行われるものとするべきである。集中的なナノエレクトロニクス研究拠点設置の意義はそこにある。

ナノエレクトロニクス分野の技術の進歩は極めて速いが、個々の将来技術に対する評価は様々であり、実用化に向けた世界的な技術開発の方向性はまだ定まっているわけではない。日本の叡智を結集したナノエレクトロニクス研究拠点から欧米にはない新しい技術潮流をいち早く作り出し世界に向けて発信し、さらにエレクトロニクスの新産業を創出することができれば、日本がアジア、ひいては世界から人材と技術を惹き付けることが十分に可能であり、将来のナノエレクトロニクス分野で日本は再びリーダーシップを発揮できるものと考えられる。

ナノエレクトロニクスタスクフォース

主査

中村道治 (株) 日立製作所 取締役

副査

平本俊郎 東京大学生産技術研究所 教授

曾根純一 日本電気 (株) 中央研究所 支配人

横山直樹 株式会社富士通研究所ナノテクノロジー研究
センター長

構成員

荒井滋久 東京工業大学 量子ナノエレクトロニクス研究
センター 教授

荒川泰彦 東京大学先端科学技術研究センター 教授

石内秀美 株式会社東芝 研究開発センター 次長

江刺正喜 東北大学原子分子材料科学高等研究機構 教授

大野英男 東北大学電気通信研究所 教授

金山敏彦 (独) 産業技術総合研究所ナノ電子デバイス
研究センター長

谷口研二 大阪大学大学院工学研究科 教授

知京豊裕 (独) 物質・材料研究機構 半導体材料
センター長

益 一哉 東京工業大学 統合研究院 教授

渡辺久恒 株式会社半導体先端テクノロジーズ 社長