

タスクフォーク中間報告(各主査ご提出資料)

2-1	共通課題・推進基盤TF中間報告	田中主査
2-2	ナノエレクトロニクスTF中間報告	中村主査
2-3	材料TF中間報告	馬越主査
2-4	ナノバイオTF中間報告	梶谷主査
2-5	ナノサイエンスTF 中間報告	川合主査

共通課題・推進基盤タスクフォース(TF1)中間報告

平成 20 年 12 月 25 日

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、今後に向けて具体的に提言する。
 - ① 研究開発拠点の形成
 - ② 産学官連携と人材育成
 - ③ 府省連携
 - ④ ファンディング制度
 - ⑤ 責任ある研究開発の推進
 - ⑥ 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。

【ナノテクノロジー・材料分野】

1. 第三期科学技術基本計画前半における実施状況

(1) ナノテク材料分野－世界の潮流

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 最重要課題に浮上した地球温暖化対策に向けて、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や超断熱建材の開発など、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、大幅に読解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 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。

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2007年で既に200以上が確認され、台湾では100以上のナノマーク製品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。

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両院を通過している。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った。

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。

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NNII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)を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SCR(エレクトロニクスメーカー)とNSFの共同プロジェクトNRI(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(ベルギー)とMINATEC(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カ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。

我が国の状況

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 億円の急減の説明は未だに公開されていない。

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製品が市場に出始め、日本国内でも 2006 年 3 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 214 点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。そのため、一部の企業は、研究リソースを CNSE(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。

注目される研究成果及び応用

- * 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)
- * 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、それを使ったランジスタ作製(米国 DARPA)

* 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)

その他、各タスクフォース報告から補強予定。

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の特許が少ないこと(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策を掲げ、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」、「産学官連携と人材育成」、「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」の項目についての実施状況を記し、現状の課題を整理し、今後に向けての提案を行う。

①事業化の状況と促進のための課題

研究開発拠点形成

第一期のネットワーク計画(2002-2006)が終了後、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、共用施設としての13拠点のセンターに拡充的に整備された。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、特定プロジェクト等を産学で推進するための設備の揃った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足かせとなるだろう。

産学官連携と人材育成

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、途中で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。

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のみ定着しつつある。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、社会科学者の参入が望ましい。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。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、活動を続けている。

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。

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(国家ナノテクインフラネットワーク/NSF)13 拠点、NCN(ナノテクコンピューターネットワーク/NSF)7 拠点、NSRC(ナノスケール科学研究センター/DOE)5 拠点を代表にして分厚いインフラが計画的に整備されてきた。年間 100~150 億円が投入され、異分野融合研究やK-12 教育プログラムの教師養成の目的のために有効に利用されている。NNIN や NCN は基本的に外部に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ダリーセンター)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が国際協力の機会を奪っており、諸外国は積極的に海外の研究グループを研究拠点到誘致している。

産学官連携と人材育成

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。人材育成プログラムについては、最も中長期の計画として、米国と台湾は K-12 という小中高一貫した教育システムをナノサイエンス、ナノテクノロジーをベースとして構築しようとしている。この間、K-12 教育の教官の養成と教科書作りを着々と進め、外国語への翻訳も実施している。

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。人材育成や教育については、小中高から大学院に至るまで、長期にわたる戦略は皆無に近い。

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。

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 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である一方、国際対応の継続的な窓口機能を果たす部署が欠如してい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、この状態を放置しておけば、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。

③推進方策の提案

別紙エクセル表に記述されている TF 委員のコメントを中心に近日中に調整を図る。

内閣府ナノテクノロジー・材料 PT ナノエレクトロニクス TF 中間報告書

2008.12.25

タスクフォースの目的

第三期科学技術基本計画の進捗状況、課題等を分析し、ナノエレクトロニクス分野の研究および産業化を進めるために行うべき国の施策を議論する。この結果を第三期計画のフォローアップへ反映させるとともに、ナノエレクトロニクス分野の将来構想を提案する。

I) 我が国におけるナノエレクトロニクス分野の研究開発進捗状況

第三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の、以下6領域 (a-f) に対して、進捗状況と成果、産業化や各種連携、国際的な位置づけ、環境動向変化を述べる。

a) 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。スピントロニクスの急速な発展、既存のフラッシュメモリーや SRAM の微細化限界が近いこと、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。

b) カーボンエレクトロニクス (カーボンナノチューブ CNT、グラフェン等)

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。

c) 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。

d) 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、フォトニック結晶の研究は若干低調である。フォトニックルータは米国ルーター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。

e) 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、東北大学のマイクロシステム融合研究開発拠点が 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。

f) 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。

II) エレクトロニクス産業界を取り巻く環境と現状認識

II-① エレクトロニクス産業界の実情把握と分析¹

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。世界的にも3つ程度の技術開発集団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/TSMC など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、欧米企業と比べて外国籍研究者の比率が極端に小さく、また研究費に占める企業の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。

II-② ナノエレクトロニクス分野への国としての投資状況の分析¹

日本国内では、2006～07年にかけてナノエレクトロニクスに関する4つの大きなプロジェクトが開始され、周辺材料、計測加工プロジェクトを含めると、投資金額は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。複数のプロジェクトが並行に存在して研究投資が分散気味になっている。

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年度予算額)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。

II-③ 教育機関・人材育成の状況²

エレクトロニクス産業を含め、ビジネスを取り巻く環境は近年激しく変化してきている。具体的には、グローバルな競争の激化、IT化が招いた知識経済化、ビジネスのスピードア

* 但し、他に Fundamental Nanoscale Phenomena, Nanomaterials, Nanomanufacturing 等のナノエレクトロニクスを含むと考えられる分野にも多額の予算が配分予定である。

ップなどである。このような状況で、企業内での人材育成は、従来と同じように長期的視野に立ち、すべて自前で行うことが困難になりつつある。また、製品の高付加価値化やデジタル化に伴う製品技術の融合等により、技術者が習得すべき知識・技術の水準・範囲は一層高度化する傾向にある。このため産業界は、大学・大学院に対して企業が求める教育、すなわち実践的な知識やスキルの習得を望む傾向にあるが、大学の専門教育はこの要求に十分な対応が出来ていないとの指摘がある。

上記状況の変化を踏まえると、例えば、技術力とマーケティング能力を兼ね備えた人材、グローバルに考えられる人材、意欲や好奇心に支えられ、差別化イノベーションを生み出せるような人材、他の分野とも深いレベルでつなげていくことのできる人材、素早い判断力とリーダーシップを備えた人材が必要となってきた。これらはいずれも高度成長期に特に活躍したエレクトロニクス産業における人材には必ずしも求められてこなかった能力である。

我が国における理工系の卒業生の絶対数は、中国やインド等と比較して少なく、大きな格差が生じている。また、我が国の電気・電子・情報系の学科・専攻に対する学生の人数は、かつてのように突出した状況ではなくなり、むしろ低下傾向を示している。一方で、この分野が、現在も「最先端」かつ「夢のある」分野であり、「学問としてのステータス」も高いことは、学生の間でも広く認知されており、この産業が今後も我が国を支える重要な産業であるのと認識は強い。

Ⅲ) 主要な課題

上述のように、日本の中核産業と位置づけるべきエレクトロニクス産業の地位は、明らかに低下している。今後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、その中心的役割を担うナノエレクトロニクスによる技術革新と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・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られる。

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。また事業分野でも電子材料、電子部品、半導体製造装置等、民生用の応用製品などは世界をリードし続けている。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る。

ところが、日本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、電子材料、電子部品等の分野でも、個々の材料、部品では日本企業は極めて強いが、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。また、メインストリームである先端半導体技術では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、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。

人材育成面では、産業界の人材ニーズが大学・大学院に十分伝わっていないことに加え、企業が学生に自らの将来像・ビジョンを明確に伝えられていない問題がある。一方、産業界から見て、学生の持っている知識やスキルがわかりにくく、また、自分の興味や好奇心をベースに目標を明確にできておらず、自らの能力を十分に発揮できていない若手人材が見受けられることも問題である²。

上記に関連し、教育機関あるいは公的研究機関において推進すべき課題として、第三期科学技術基本計画の施策である大学院教育の重点化、学際プログラムの実行、海外交流の推進などはより強化が必要である。さらに国立大学法人における学生定員の柔軟な取扱い、他分野習得促進のための省庁・分野間の協力や人材流動性の推進、人材流動に対するインセンティブの付与、国内のみならず国外での学位取得者、留学生や女性の積極的受入れ、教員・社会人の再教育、初等中等教育の充実など、積極的な施策が必要である。

IV) ナノエレクトロニクス分野の将来構想

以上述べた課題の解決には、国を挙げての抜本的なナノエレクトロニクス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。ナノエレクトロニクス分野における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。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することで、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。

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。

¹社団法人 電子情報技術産業協会(JEITA) 技術政策委員会/ナノエレクトロニクスWG資料引用

²社団法人 電子情報技術産業協会 (JEITA) 産学人材育成パートナーシップ 電気・電子分子科会中間とりまとめ報告書 (平成 20 年 3 月) より、内容抜粋。