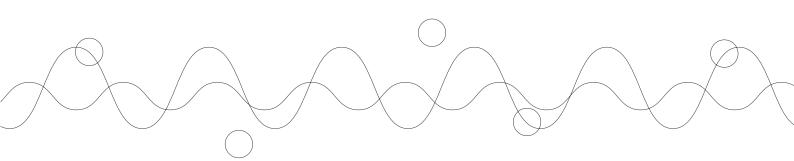
「ナノテクノロジー・材料分野」 俯瞰ワークショップ 報告書

平成18年12月8日(金)-9日(土)開催



Executive Summary

- 2001 年以後、世界各国でナノテクノロジーに対して重点投資が行なわれ、5年余りが経つ。 各国のナノテクノロジーへの国家投資は継続的に増加し、GDPあたりで比較すると日本、 韓国、台湾が米国、EUを凌駕しており、アジアが最大のナノテク投資国となった。材料 科学部門は日本がトップを維持しているが、基礎科学のアウトプットをいかに早くイノベー ションにつなげるか、今後重要となる。それを可能とするシステムが必要との世界的な認 識がある。異分野融合、基礎と応用との垂直融合を促進する政策的誘導を検討することが 特に重要である。
- ●第三期科学技術基本計画では、社会受容への対応など施策内容もかなり改善されたが、実施段階での議論が重要であるう。重要な研究開発課題として、「ナノ物質・材料領域」「ナノエレクトロニクス領域」「ナノバイオ・生体材料領域」「ナノ・材料分野推進基盤」等が上げられており、米国 NNI(国家ナノテク計画)の PCA(研究資金の戦略的配分のための座標軸、Program Component Area)に相当する形となっている。材料科学部門はナノテク材料分野における日本の強みであるが、JST一CRDSではナノテク・材料研究開発分野俯瞰図において米国 NNI の PCA では考慮されていない「新材料設計・探索」を戦略構成分野として取上げ、日本の強みを生かした戦略構築を推進している。
- ●「ナノ物質・材料領域」の目玉としてJST一CRDSが掲げている、「新材料設計・探索」の概念を支える3つの要素として、①深い学術的専門知識に裏打ちされた独自の物質観(勘)を持つリーダーの存在(高度の物質観、暗黙知)、②最先端の計算機実験・モデル計算の高度化と駆使(形式知への変換)、③高効率・広範囲の試料探索・評価手法の開発と活用(絨毯爆撃の効率化)、を掲げる。これらの三位一体により、素早く精確な材料設計探索をおこなうことが可能である。このようなアプローチが適用されるべき「ナノ物質・材料領域」の重要課題として指摘されたものは以下の通りである。①有機デバイスの耐久性問題の解決、②CNTのカイラリティ(6 員環の並び方)制御とキラーアプリの創出、③原子・分子のプログラム自己集合化技術の確立、④界面電極問題の理論的・材料的基礎の確立、⑤ハイスループット評価法(異なる組成の材料特性を一括高速測定)確立。
- ●ナノ本来の特性を生かして新原理、新コンセプトが特に期待され、エレクトロニクス大国からナノエレクトロニクス先進国へと進化すべき時が来ている。「ナノエレクトロニクス領域」の当面の問題としては、低消費電力化、将来にかけては、高スピード化のみならず、スピン、DNA、量子などによるナノエレのコンピュータ実現が目標となる。タイムスケール上では、まずCMOSの進化・多様化(CMOS Evolution)という観点から微細化と材料開発の融合による「More Moore」、そして MEMS やバイオを導入した「More than Moore」が

並行して進み、全く新しい概念による「Beyond CMOS」が将来の「More Moore」に統合されるというシナリオが妥当と思われる。これを効率よく進めていくために以下が重要である。①オンシリコン(on Si)でナノテクを展開、②具体的な応用ターゲットからブレークダウンした個別デバイスの研究、③明確な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点や産学連携コンソーシアムの設立、④公的研究機関や大学院における集積化センター実習教育、Si CMOS とナノサイエンスの融合促進、⑤中長期戦略構築のための議論。

- ●ナノテクノロジーとバイオテクノロジーはお互いの技術専門用語ばかりでなく価値観も大きく異なるので、「ナノバイオ・生体材料領域」はもっとも難しい異分野融合のケースと考えられる。そのため融合を促進するための共用施設や、学生たちの共同オフィスといった共通の物理空間は本質的に重要な意味を持ち、うまく運用すれば融合を大きく加速することも可能である。イノベーションへ向けた出口応用としては、既に連携施策群として進んでいるナノDDS(薬物送達システム)やナノ医療デバイスの研究開発の他に、以下が重要技術領域である。①生命分子機械、自己組織化、②ナノフード(フードナノテク)、③ケミカルバイオロジー。
- ●「ナノ物質・材料領域」、「ナノエレクトロニクス領域」、「ナノバイオ・生体材料領域」を含むナノテクノロジー・材料分野全般における「ナノ・材料分野推進基盤」の課題として、本ワークショップで国際的に遅れを取り戻すために重要と指摘されたものは次の通りである。①融合拠点・共用施設の重点構築、効率運営、充実、②異分野融合・垂直技術融合の推進加速、そして中長期視点で重要なのは、③俯瞰的視野を持つ人材育成・教育システム構築である。共用施設は、ナノエレやナノバイオの例に見る如く、若手研究者やベンチャー起業の参加・参入を誘発する上でも異分野融合を刺激する上でも本質的に重要であり、欧米に 20 年は遅れている。拠点や施設を使用して異分野融合や基礎と応用の垂直技術融合を推進加速するには、トップダウンで政策誘導的に行うことが有効である。同時に研究機関側の自主努力を誘発するシステムを考えるべきである。このような総合推進基盤によって投資が戦略性を帯び、投資効率は飛躍的に改善され、研究開発のアウトプットからイノベーションを経て、将来の社会へのアウトカムが生み出されるものと考えられる。

「ナノテク・材料」科学技術のエネルギー・資源・環境分野への応用は、燃料電池、太陽電池、 触媒、希少資源代替技術(元素戦略)ばかりでなく、今後、広範な研究開発領域へと展開が 図れるべきである。

目 次

Executive Summary

[1]	本ワー	-クショップの趣旨及び問題提起	1
[2]	「ナノ	テクノロジー・材料分野俯瞰」ワークショップの開催にあたり	3
	2.1	趣旨説明と国内外ナノテク戦略比較の説明 /田中一宜 (JST - CRDS) ··········	3
[3]	第一部	3 全体討論/	
	総括二	1ーディネータ:茅 幸二(理研)	7
	3.1	先端ナノ計測/青野正和(NIMS)	7
	3.2	CNT(カーボンナノチューブ) /篠原久典(名大)	10
	3.3	自己組織化/魚崎浩平(北大)	14
	3.4	スピントロニクス/大野英男(東北大)	16
	3.5	ナノサイエンス/樽茶清吾(東大)	18
	3.6	再生・細胞組織化/岡野光夫(東女医大)	21
	3.7	計算科学・シミュレーション/寺倉清之(北大)	23
	3.8	ナノテク社会受容・標準化/阿多誠文(AIST)	26
	3.9	全体討論	31
[4]	第二部	ß グループ討論 ······	35
	4.1	総合・推進基盤/	
		コーディネータ:横山浩(AIST)、コメンテータ:寺倉清之(北大)	35
	4.2	ナノエレクトロニクス/	
		コーディネータ:平本俊郎(東大)、コメンテータ:渡辺久恒 (Selete) ········	44
	4.3	ナノバイオ/	
		コーディネータ:片岡一則(東大)、コメンテータ:堀池靖浩 (NIMS)	52
	4.4	ナノ物質・材料/	
		コーディネータ:細野秀雄(東工大)、コメンテータ:福山秀敏(東理大) …	62
[5]	第三部	3 全体討論/	
	総括二	 ーディネータ:茅 幸二(理研)	71
	5.1	ナノテク試作のこれまでと今後/ナノテクとDNAのこれまでと今後/	
		川合知二(阪大)	71

[1] 本ワークショップの趣旨及び問題提起

本ワークショップは第二期科学技術基本計画重点 4 分野「ナノテク・材料」に関して国内キーパーソンによる 5 年間の学術的・産業的・政策的レビューをおこない、第三期科学技術基本計画を含む今後の中長期研究開発の俯瞰と戦略を議論する。ナノテクノロジー分野は大変広い領域を含むため、「ナノエレクトロニクス」「ナノバイオ」「ナノ構造・材料」「総合」のグループ分けにより総合討論と分科会の組み合わせで構成する。

独立行政法人科学技術振興機構(JST)の「研究開発戦略センター(CRDS)」は研究開発戦略を立案する機能を担う。国内外の研究開発動向の把握、研究開発課題の抽出、関連府省に対する情報の発信等をおこなう。「ナノテク・材料」分野については全技術分野を俯瞰することが重要である。ナノテク・材料研究開発戦略俯瞰図を示す(図 1 – 1)。

- ・ナノテク・材料研究開発戦略俯瞰図の更新。
- ・米国 NNI(National Nanotechnology Initiative)2000 年スタート。欧米亜主要国も2003年までにそれぞれの国家ナノテク計画がスタートし、2004年時点で世界のナノテクへの総投資額は約 US \$ 10B(官 5.6B + 産 4.4B)、
- ・米国では NNI (5 年間) の活動を PCAST (大統領科学技術諮問会議) / NNAP が系統的かつ定量的に評価を実施、それをベースに今後の中長期計画を発表 (国家投資は継続)。台湾では国家ナノテク 6 ヵ年計画の前半 3 年間を国際評価委員会で評価実施、後年の 3 ヵ年計画に反映。EU は FP7 (2007-2013) で中長期戦略。
- ・日本の現状/米国と同額(~1000億円)の国家投資/しかし米国のようなPCAによる戦略的な中長期計画は欠如/第2期科学技術基本計画重点4分野の1つとして5年間(2001~2005FY)の総括および評価未実施(科学技術政策研究所2004年度調査報告書のみ)。第2期のレビューに立脚した第3期計画(2006~2010FY)を含む中長期の戦略的議論が不可欠。との視点から研究開発戦略の策定に向けて議論を行う。

過去と現況を踏まえた未来戦略と同時に、オピニオンリーダーのコミュニティを構築することも将来の我が国の科学技術にとって非常に重要な課題である。戦略論をもった研究者コミュニティと政策立案コミュニティの橋渡しを効果的に行うことも、本検討会の重要な目的である。

過去 5 年間のナノテクの内外の状況、米国、台湾の国家プロジェクト評価などに関する概括的な 資料や討論のたたき台はセンター側がまとめて提示する。中長期の方向やイノベーションにつながる 戦略を出来るだけ具体的に議論を進める。

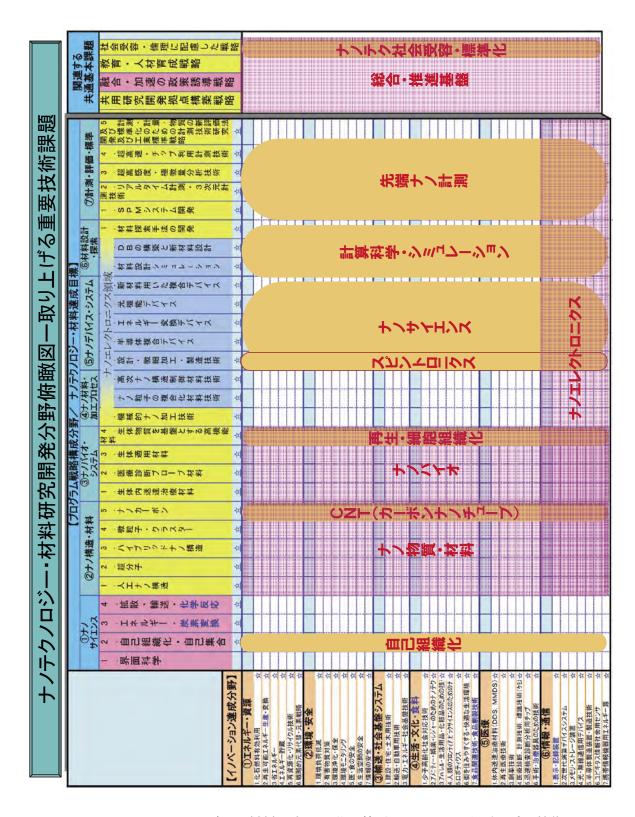


図 1 - 1 ナノテクノロジー・材料研究開発分野俯瞰図 ― 取り上げる重要技術課題

[2] 「ナノテクノロジー・材料分野俯瞰」ワークショップの開催にあたり

2.1 趣旨説明と国内外ナノテク戦略比較の説明 / 田中一宜 (JST — CRDS 上席フェロー)

世界各国でナノテクノロジーに対して重点投資が行なわれ、5年が経つ。5年間に何が起きたのかを横断的に眺望し、今後われわれがどう進んでいくのかを俯瞰するためには、専門家たちの意見を基本とすることが必要不可欠である。今回のワークショップの目的は研究者集団が今後のナノテクノロジーの見通しをどのように考えているかを把握し、国策としてナノテク・材料分野をどのように位置づけ展開していくかについて戦略を練ることである。第一部の「全体討論」ではナノテクノロジーの象徴的研究課題を8課題選び、代表的な研究者による評価と、今後の進むべき方向性を話していただく。第二部の「グループ討論」では「総合・推進基盤」「ナノ・エレクトロニクス」「ナノバイオ」「ナノ物質・材料」の4グループに分かれ、研究課題の今後の見通しならず、成果を問われる今後5年に備え、研究の仕組みをどうしていくかなどに関して議論する。第三部の「全体討論」ではグループ討論の結果を融合させて全体で討論を行なう。

国内外のナノテクノロジー戦略の比較をする。

米国では 2000 年 1 月に NNI(国家ナノテクノロジー戦略、National Nanotechnology Initiative)が開始された。日本では 2001 年 4 月に第二期科学技術基本計画の重点分野の一つにナノテクノロジー・材料が設置され、戦略が開始された。ヨーロッパでは EC(欧州共同体、European Community) 15 か国体制の 2002 年 3 月に戦略が開始され、2006 年 12 月現在は EU(欧州連合、European Union) 25 か国体制に移行している。国別ではドイツが 2002 年 5 月に、イギリスが 2003 年 7 月に戦略を開始している。アジアでは韓国が 2001 年 11 月に国家プロジェクトを開始している。台湾は 2002 年 9 月、中国は 2003 年に開始している。以上の各国は 2000年から国家全体として 100 億円超の大プロジェクトと位置づけている。

年間のナノテクノロジー分野への政府投資額は米国、EU25、日本が上位であるが、各国の GDP あたりの投資額で比較すると、日本、韓国、台湾が上位に位置する(図 2 - 1)。日本は世界の国家年間投資総額約 6,000 億円に比して約 1,000 億円である。日本は 2006 年からの第三期科学技術基本計画で、ナノテクノロジー・材料の分野を継続して重点分野とすることが決定している。





国名 (経済圏)	人口 (百万人)	GDP (1兆Fル)	人口あたり GDP (千ドル/人)	ナノテク 政府投資 (2004) (百万ドル)	ナノテク投資 人口あたり (ドル/人)	GDPあたり ナノテク投資 (ドル/百万ドル)
米国	293	11.0	37.5	989	3.4	90
EU-25	456	11.1	24.3	~950	2.1	86
日本	127	3.6	28.3	~900	7.1	250
中国	1,300	6.45	5.0	~200	0.2	31
韓国	48.6	0.86	18.0	~250	5.1	291
台湾	23	0.53	23.0	~110	4.7	208

出所:Courtesy of M. Roco(NSF) / GDPデータ(2003, ATIP) 為替レート(ルーニ105円, 8.2元, 1100ウォン, 34NTFル)

アジアは最大の投資

図 2 - 1 各国政府ナノテクノロジー研究開発投資(2004)

NSF(米国国立科学財団、National Science Foundation)は、2015年の世界のナノテクノロジー市場を100兆円規模と予想している。一方経済産業省の委託調査は、日本の市場規模を2020年で13兆円、2030年で26兆円と予想している。学術的成果に関しては1994年から2004年までの10年間で、中国、韓国、台湾、シンガポールでナノテクノロジー関連の論文が急増している点が特徴である。NNIが開始されてから5年が経過した米国は2005年と2006年に評価を公表している。ナノテクノロジー研究開発の世界リーダーであると謳っている。ナノテクノロジーの論文インパクトファクターの約50%は米国で占めている。特許に関しても米国内特許の60%は米国で占めている。また世界のナノテクノロジーベンチャーの60~70%が米国で起業されている。しかしながら経済的インパクトの証拠はないとしている。

今後の5年間に関しては基礎(World-Class R&D プログラムの維持発展)、開発(新技術の製品化、公的利益へのトランスファー促進)、インフラ(教育資源、熟練労働力の開発、先端ナノテク機器インフラをサポート)、責任ある研究開発(社会、環境、健康に関係する R&D、市民との対話を通してナノテクの責任ある開発)という4つの柱を計画している。

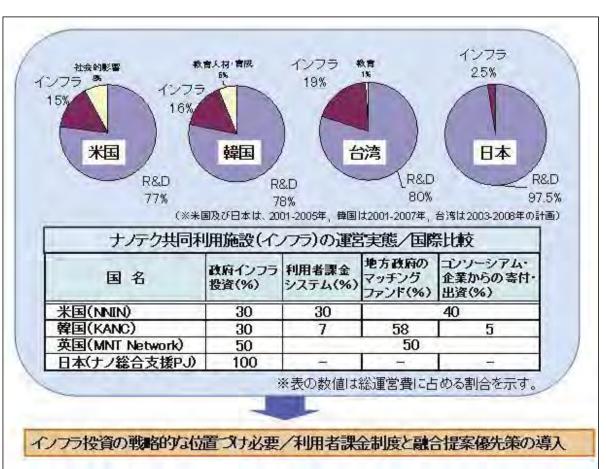
EU では基礎研究成果は良好ながら知的財産化が非常に脆弱だったという自己評価がなされている。2007年から開始される第7次フレームワークプログラムでは、「ナノ科学」「ナノテクノロジー」

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

「材料」「新生産技術」を 4 テーマに挙げている。ヨーロッパの研究活動が分散することを防ぐための 国際協力を強調している。韓国では「研究開発」「インフラ & ネットワーク構築」「教育・人材」の 3 点を重点戦略に挙げている。台湾は戦略の構築法が米国に類似しており、洗練されている。

日本は第二期科学技術基本計画の中で、「ナノテクノロジー・材料」が、重点 4 分野の一つであった。 基礎研究分野や特許分野では着実な成果を上げている。しかしながら技術移転への工夫が必要という 指摘も上がっている。一方ナノテクノロジー総合支援プロジェクトは、有効な役割を果たしているも のの、全体計画の中での戦略的投資をさらに厳しく議論する必要がある。各国のナノテクノロジー戦 略において、政府の全体投資の中で、インフラや社会的影響にどれほど割り当てているかを示す(図 2 - 2)。各国とも約 20%程度であるが、日本には同様の構造が欠如しているため、割り当てが無い に等しい。今後大きな問題となるであろう。

第三期科学技術基本計画では、総合的に施策内容もかなり良くなったと考えるが、実施段階での議論が重要であろう。重要な研究開発課題として、「ナノエレクトロニクス領域」「ナノバイオ・生体材料領域」「材料領域」「ナノ・材料分野推進基盤」等が上げられており、米国 NNI の PCA(研究資金の戦略的配分のための座標軸、Program Component Area)と相当する形となっている。JST — CRDS の研究俯瞰図を米国 NNI の PCA と比較すると、「新材料設計・探索」が米国にはない。新材料設計・探索は日本の強みであるので、当分野に基づいた戦略構築が重要と考える。



CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

図2-2 インフラ共同利用施設(インフラ)の運営実態/国際比較

2.2 討論

●アジア戦略と国際交流

- ・アジア戦略のイメージとしては日本の技術力を向上させるためにも、外国企業を参入させる観点も 重要であると認識している。国側は国家プロジェクトに外国の要因が入ることには躊躇がある印象 である。
- ・外国のことをいかに深く理解するかが戦略の勝敗を左右する。アジア戦略に関しては第三期科学技術基本計画でも記述されているものの具体論に乏しい。台頭する中国、インドなどに対して、今後どう臨み win-win の関係を構築していくかは、戦略として重要な問題である。企業レベルの関係もあるが人材の交換などで外国からさまざまな人を招き、日本に良い印象をもってもらう等の多面的な国際交流がある。

●米国と日本のナノテクノロジーへの投資

- ・NNI 発足当初 5 年間では企業は創業立ち上げ資金を増やすことを考え、NNIN(国家ナノテクノロジーインフラネットワーク、National Nanotechnology Infrastructure Network)を有効に用いた。一般的傾向としてナノテクノロジーが市場に進出する時期が遅すぎるという印象をベンチャーキャピタルは抱いているようである。エレクトロニクス関連を除き日本の大企業も参入は難しい。
- ・ナノテクノロジー分野、原子・分子レベルからの研究という点では、まだ実用化に達していない分野が大部分である。逆にナノレベルの制御を用いて従来の材料の特性を飛躍的に向上させる応用面を考えると、事業化し得る材料はいくつか見受けられる。

●ナノ融合ファンドリー

- ・日本の共同施設として計画されている 14 拠点ネットとは別にナノ融合ファンドリーを形成する動きがあったが、結果的に総合科学技術会議では最低の D 評価が下され予算はゼロとなった。さまざまな材料を組み込んでデバイスを開発するラインを要求する声はこれまでも大きかっただけに、総合科学技術会議が予算をゼロとしたのは残念である。
- ・ナノ融合ファンドリー形成に向けた合意形成がある状況をどのように政策決定側に提示するかを現実的問題として工夫しなければならない。課金制度の導入など運営面に関して前向きに議論をしている。第三期科学技術基本計画では「責任ある研究開発」は戦略重点科学技術に位置し集中投資の対象となっているが、「研究施設」は評価の低い重点領域に位置している。研究施設の点に関して合意形成を提示していく方法を検討していかなければならない。
- ・ナノ融合ファンドリーの形成は誰もが期待していた。国の政策に基づいたファンドリー形成は米国 に比較して立ち後れている。

[3] 第一部 全体討論/総括コーディネータ:茅 幸二 (理研)

3.1 先端ナノ計測/青野正和(物質・材料研究機構 フェロー・ナノマテリアル研究所 所長)

科学技術振興機構の 2004(平成 16)年度ナノテクノロジー分野における採択開発課題のテーマが広範であることからもわかるとおり、ナノ計測は非常に多種多様に渡る。物理学、化学、材料工学、IT(情報技術)、バイオテクノロジー等の共通の底流となっている。ナノ計測の中でも走査型トンネル顕微鏡(STM、Scanning Tunneling Microscope)や原子間力顕微鏡(AFM、Atomic Force Microscope)の発明が、ナノテクノロジーの急速な発展の契機となった。走査トンネル顕微鏡は、ナノテクノロジーの発展の契機となった最も重要な技術といえる。像の観察の他、トンネル分光が可能であるため局所の電子状態を観察することができる(図 3 - 1)。



図3-1 走査型トンネル顕微鏡

単独の技術として走査トンネル顕微鏡は相当成熟してきたものの、まだ様々な発展性が考えられる。例えば、安定性が挙げられる。電気回路的に安定性を徹底的に追求することにより、I-V(電流 - 電圧)特性を非常に正確に取ることが可能である。他にも発展性として、極低温、磁場中、光の照射、X線の照射、探針の複数本化、液中などのさまざまな条件を取り入れる複合化が考えられる。また動的過程を追求するための高速化も発展性として挙げられる。現在安定性が向上し、振動分光やスピンの計測が可能となった。複合化により新現象や元素の分析、あるいは電気計測が可能である。多探針技術の向上に関しては、遅いながらも確実に進歩している。多探針を1個のコントローラーで制御することで、様々な測定が可能となってきている。原子間力顕微鏡は、初期はカンチレバーを接触させること(接触モード)によるたわみで計測をしていたが、試料に損傷を与えるなどの難点があった。その後は周期的にカンチレバーを試料に接触させて(タッピングモード)振動振幅の変化を記録することで、像を撮影している。最近では試料に接触することなくカンチレバーの振動周波数や振動振幅の変化を観察する、非接触モードの技術で、原子分解能の像を撮影することが可能となってきている(図3-2)。

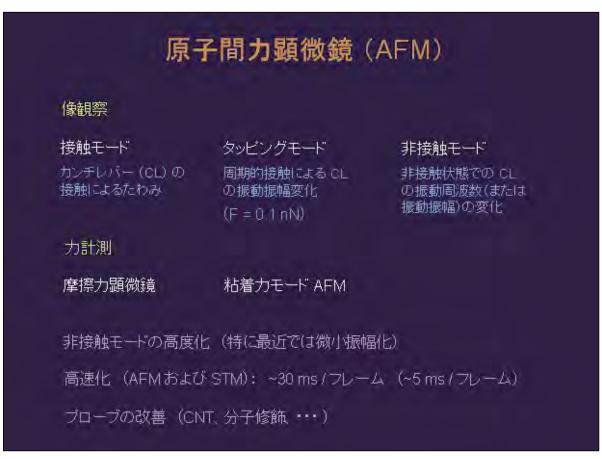


図3-2 原子間力顕微鏡(AFM)

力計測に関しては例えば蛋白質を解きほぐす際にフォールディング状態を観察するといった、接着力モードが使われている。原子間力顕微鏡の課題としては、非接触モードの高度化が挙げられる。非常に微小な振幅で観察できれば、ノイズが減少し高分解能の像を撮影することが可能とな

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

第二部

る。走査トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡の他にも、磁気力顕微鏡(MFM、Magnetic Force Microscope)、スピン偏極 STM、交換相互作用力顕微鏡などの技術向上が挑戦的課題となっている。 高感度化への努力がなされシングルスピンの検出は可能となった。一連の電気力顕微鏡に関しては、表面の電位、電荷分布、接触電位差のマッピングなどの技術が様々なデバイスの研究に利用されている。近接場光学顕微鏡は生体の観察などに有効ではあるものの、10nm の分解能を達成することは容易ではない。

先端ナノ計測の中長期研究開発戦略シートを示す。短期($1\sim5$ 年)ではシステム化されたナノ構造間の信号伝達の解析が今後より重要となるため、各種計測法において動的な計測を可能にすることが戦略としてある。また、電磁的、光学的、力学的計測と比較して少なくとも2電極を必要とするため、複雑なナノ電気計測法の充実をはかることも視野にある。必要性が言われながら進歩が遅いティップ・サイエンスの研究も重要である。中期($5\sim10$ 年)ではナノ構造およびその集団の表面だけではなく、内部構造も観察が可能な状況になっていることが望ましい。断面 TEM(透過電子顕微鏡、Transmission Electron Microscope)像や、劈開面の STM 像と同等な情報を、試料を加工することなく CT(Computer Tomography)スキャンのように得る方法を考えられないであろうか。造型と加工を一体化した方法の開発も重要となるであろう。さらに、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)等を利用して計測法をミニチュア化し、ユビキタスなナノ計測が実現されるとよい。長期(20年以上)に関しては判然としない。生体は構造そのものにセンサ(測定器)を内蔵している。ナノ計測をそれに近づけたい(図3-3)。

中長期研究開発戦略シート 先端ナノ計測 - 各種計測法において動的計測を可能にすること (高速測定): システム化された 短期 ナノ構造の間の信号伝達の解析が今後ますます重要になろう。 (1~5年) ナノ電気計測法の充実:磁気的、光学的、力学的計測に較べて、電気計測は少 なくとも2電極が必要で複雑である. ティップ・サイエンス: 必要性が言われながら進歩が遅い。 - ナノ構造 (およびその集団) の表面だけではなく内部の構造も観ることができる 中期 方法の開発:断面 TEM 像やへき開面の STM 像と同等な情報を試料を加工 (5~10年) することなく CT 法のように得たい. - 造型・加工と計測が一体化した方法の開発: 我々の指は物を作りながら形を測 ることもしている. STM や AFM は一部そのような機能をもっているが不十分. 計測法のミニチュア化: ユビキタス計測。

図3-3 中長期研究開発戦略シート 先端ナノ計測

している。ナン計測をそれに近づけたいものである。

- 20年も先のことはよく判らない。生体は構造そのものにセンサー(測定器)を内臓

CRDS-FY2007-WR-07

長期

(20年以上)

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

3.2 CNT (カーボンナノチューブ) /篠原久典 (名古屋大学大学院 理学研究科物質理学専攻 教授)

範囲をナノカーボンにまで広げ、主にフラーレン (Fullerene) とカーボンナノチューブ (Carbon Nanotube, CNT) に関して述べたい。

フラーレン(C60)は 1990 年に多量合成がなされた。 1991 年にライス大学リチャード・スモーリー教授らがベンチャーキャピタルを設立した際は、フラーレンは非常に高額であった。 現在はベンゼンやトルエンの燃焼法により大量合成が可能となり、 1 グラム 4 ドル程度の価格となった。 実用品もスポーツ用品、眼鏡フレーム、フラーレン入りエンジンオイル、化粧品等が続々と登場している。金属内包フラーレンは 1991 年に多量合成された。 生産量には C60 程には及ばないものの、応用は進んでいる。 例えば MRI(核磁気共鳴画像法、 Magnetic Resonance Imaging)の造影剤への応用が実現している。 造影剤は、 1991 年にドイツでガドリニウムという金属を使用した「DTPA」という商品が最初に発売された。その後金属内包フラーレンが造影剤に応用できると着目され、「DTPA」の 20-30 倍の造影能まで出ている。

カーボンナノチューブは 1991 年に飯島澄男教授が多層のものを発見し、1993 年に飯島教授と IBM が単層のものを独立に発見した。1998 年には 2 層のカーボンナノチューブの合成が実現し、研究者が重視している。

(多層型が発見されたころの) アーク放電によるカーボンナノチューブの合成法は、多量合成には不適当等の問題があった。1994~95年ごろ有機物の触媒金属を用いた熱分解によりカーボンナノチューブを合成する動きがあり、ここ 10年間は CVD(化学気相成長法、Chemical Vapor Deposition)によりカーボンナノチューブを合成する方法が主流となっている。 CVD に関しては近年日本の研究グループにより大きなブレークスルーが起きている。 産業技術総合研究所(ナノカーボンセンター・ナノカーボンチーム、 畠賢治グループ長)が、 CVD として、超高純度で触媒効率が極めて高いスーパーグロース技術を開発した(図 3-4)。同じく産業技術総合研究所(同センター同チーム、斎藤毅研究員ら)が、 CVD として流動法を用いた DIPS 法(直噴熱分解合成法、Direct Injection Pyrolytic Synthesis method)を確立し、 高強度の繊維紡糸を可能にした(図 3-5)。 NASA で構想中の宇宙エレベータでは、 ロープにカーボンナノチューブが必要となるであろう。 CNT の高強度の繊維紡糸技術の開発は基礎となるであろう。

カーボンナノチューブのエレクトロニクスへの応用に関しては、当初から電子デバイスへの利用が考えられていた。単層カーボンナノチューブの直径は 1nm であり、原理的にフィールドエミッタのチャネルとして適している。ノリタケカンパニー(株)は 1997 ~ 98 年に三重大学との共同でカーボンナノチューブの蛍光管を開発し、市販に至る。現在は小型で薄型の高輝度ディスプレイの実用化を計画している。

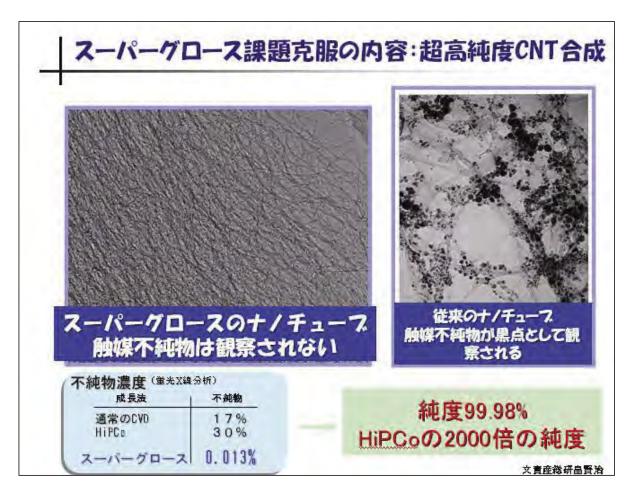


図3-4 スーパーグロース課題克服の内容・超高純度 CNT 合成



図3-5 直噴熱分解合成法の特徴

多層カーボンナノチューブの中でとりわけ注目されているのが、2層カーボンナノチューブである。 単層とほぼ同じ直径でありながら、化学反応や機械的負荷に対して非常に強い。純度のよい2層カーボンナノチューブを効率的に合成することが、挑戦的課題となっている。東レはCVDを用いた2層カーボンナノチューブ合成のベンチプラントを開設してすでに過去3年稼動している。

中・長期的プロジェクトの中で重視されるのがカーボンナノチューブの FET(電界効果トランジスタ、Field Effect Transistor)への応用である。現状のシリコン pMOS(p型金属酸化膜半導体、p-channel Metal-Oxide Semiconductor)の 10 倍以上の相互コンダクタンスをもつ FET が開発されている。2 層カーボンナノチューブで FET を作製すると、p型と n型の両タイプのトランジスタが可能で、立ち上がりが単層カーボンナノチューブ等の FET と比較してシャープになることがわかっている。ただしカーボンナノチューブを用いたトランジスタのロジック回路の実現は、特定の部分にカーボンナノチューブを成長させる技術が必要のため 10~15 年は掛かるであろう(図3-6)。しかしながら着実にカーボンナノチューブによるデバイスの開発は、企業レベルで進展している。日本は人材面での進捗が遅れている。優れた高いモチベーションをもつ若手研究者を育てることも、地道に活動していく必要がある。

ナ	・ノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート
グループ名	ナノカーボン・グループ
短期 (1-5年)	(1)フラーレン関連: C60やC70などの通常のフラーレンは、2002年よりFCC(フロンテア・カーボン・カンパニー; 三菱化学のベンチャーキャピタル)から大量販売が始まり、さまざまな用途に実用化されている。現在、市販価格は4ドル/グラムである。さらに、価格が下がれば、自動車産業を中心にさらに大きな実用化展開を見せるであろう。(2)金属内包フラーレン: MRI造影剤への応用研究などで、高い評価を得ている。水溶性ガドリニウム金属内包フラーレンのMRI緩和能は現在、チャンピオンデーターである。(3)カーボンナノチューブ関連:カーボンナノチューブは電気電子、材料、金属、生体応用などで基礎研究はもとより応用・実用化研究が進んでいる。短期を見据えると、FEDを中心とする電気応用、透明伝導性ポリマーなどの材料応用、あるいは超高感度センサーなどのデバイス応用が実用化に近い。
中期 (5-10年)	(1)フラーレン関連: 中期的な視野でもフラーレンは各種材料にますます実用化されていくであろう。特に、価格が中期的に現在の10分の一程度になれば、カーボンブラックやグラファイトが使われているかなりの部分をフラーレンに置き換わると予想される。(2)金属内包フラーレン関連: 金属内包フラーレンの合成収率が向上し、市販もされるようになれば、X線造影剤やPETへの応用・実用化も進むと思われる。(3)カーボンナノチューブ関連:中期的には、カーボンナノチューブの研究開発の最大の課題である、カイラリテイー制御が行われると期待される。カーボンナノチューブの選択的合成がこのように高度に進むと、FETを中心とするエレクトロニクスデバイスへの本格的な実用化研究のフェーズに突入すると予想される。
長期 (20年以上)	(1)フラーレン関連: 価格も現在の100分の1程度になり、カーボンブラックに代わるタイヤの補強材となり年間数千トンのフラーレンが必要となる。また、リュウマチを治癒する薬などの薬剤への応用も実現されるであろう。(2)金属内包フラーレン関連: MRI造影剤、X線造影剤やPETへの実用化がなされ、高コントラストの各種造影剤として活躍すると思われる。(3)カーボンナノチューブ関連: カイラリテイーが制御されたナノチューブを用いて、カーボンナノチューブのデバイス応用が実現され、デバイスのミニチュアリゼーションが実現される。電気電子産業はもとより、航空機産業や自動車産業への応用も実現される。年間数千トン~一万トンレベルのカーボンナノチューブが必要となる。

図3-6 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート ナノカーボン

3.3 自己組織化/魚崎浩平(北海道大学大学院 理学研究科化学専攻 教授)

ボトムアップが要求されるナノテクノロジーとして、マニュピレーションと並んで自己組織化がある。自己組織化には、「混ぜれば、欲しいものが実現する」という理想的な期待感が強い。2001年3月に発表された経団連 n-Plan21 には、ナノスケールの構造が自発的に形成される自己組織化が活用されれば、10~20年後には生産システムを一変させる可能性を秘めていると記されている。

2002年6月に文部科学省科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会が発表した「ナノテクノロジー・材料に関する研究開発の推進方策について」において提案された25の課題のうち自己組織化が重要な役割を果たすものが9課題含まれており、自己組織化の重要性が認識されている。中でももっとも関係深い「プログラム自己組織化」の課題では、「固体表面上での有機分子、生体分子のプログラム自己組織化メカニズムの解明と応用」「プログラム自己組織化プロセスを用いた人工生体情報材料合成」「多種類原子および分子のプログラム自己組織化とバイオチップへの応用」「自己組織化の時間分解計測」「プログラム自己組織化の理論構築」が目標として挙げられている。この報告を受けて同2002年には科学技術振興機構のCREST(戦略的創造研究推進事業)として、ナノテクバーチャルラボラトリーが発足したが、自己組織化はその3つの戦略目標の内「非侵襲性医療システムの実現のためのナノバイオテクノロジーを活用した機能性材料・システムの創製」に主に関連づけられ、「医療に向けた自己組織化等の分子配列制御による機能性材料・システムの創製」という領域(茅幸二研究総括)が発足し、10の研究チームによって研究が進められている。

2005年1月には、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会ナノテクノロジー・材料委員会が『我が国の中長期的なナノテクノロジー・材料分野の研究開発の方向性』に関する報告書が出されたが、そこでも『プログラム自己組織化』がキーナノサイエンスとして挙げられた。この報告を受け同2005年には「プログラムされたビルドアップ型ナノ構造の構築と機能の探索」との戦略目標が出され、それに基づいて科学技術振興機構「さきがけ」に研究領域「構造制御と機能:プログラムされたビルドアップ型ナノ構造の構築と機能の探索」が設けられ、2005年14件、2006年11件の個人研究が行われている。

ボトムアップ法では原子や分子といった要素からユニット、さらにデバイスへと階層性を超えた自己組織化が必要となり、各段階での技術開発が不可欠である。例えば、チオールを中心とする有機分子(要素)は自己集合(組織化)により金や銅等の金属と結合すると同時に分子間相互作用により整然とした配列をとった単分子膜(Self-assembled Monolayers: SAM =ユニット)が形成可能である。種々の基板上で、Dewetting(ディウェッティング)や散逸構造の一つである対流パターンの固定化によるパターン形成が実現されており、2次元の周期構造ではかなりの発展が見られた。非対称的な、またより高度な構造形成には、プログラムの導入(設計通りのビルドアップ)が不可欠となる。プログラムの導入技術では、DNA ナノテクノロジーの分野が最も発展している。2000年頃から、DNA を用いた分子マシンが情報の導入に利用されている。より複雑なレベルでは、自発的なコンポーネントを表面上に配列し、自発的に並んだ DNA のパターンに沿って金のナノ粒子を配列するといった技術が可能となった。さらには、蛋白質(ビールス)の自己組織化を利用した配線技術なども、研究開発が進められているが、実際のデバイスへの展開に関しては、まだまだ解決すべき

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

問題が多い。2006年3月に『Nature』に、ひも状のDNAから設計したパターンにしたがって複雑な形状が形成可能であることが示されているが、設計図をつくるためには高度な数理科学的なアプローチが必須である。階層を超えた自己組織化によるデバイス構築の困難さを考慮して、近い将来の技術として注目されているのが、トップダウン技術とボトムアップ技術を組み合わせである。

自己組織化に関する中長期研究開発戦略シートを示す(図3-7)。短期(1~5年)としてはプログラム自己組織化の基盤技術の確立、数理科学の導入、トップダウン技術との融合、バイオセンサといった戦略テーマが挙げられる。中期(5~10年)としては階層を超えた自己組織化、自己組織化対応の新規デバイスの概念といった戦略テーマが挙げられる。既存のデバイスにはシリコンが究極的技術として利用されており、その技術を単純に置き換えるのではなく、自己組織化に対応した新規デバイスの概念の考案が必要であろう。長期(20年~)は不明な部分もあり「多様な応用」と記した。

教育に関して米国では国立癌研究所(NCI: National Cancer Institute)と国立科学財団(NSF: National Science Foundation)が連携し、トレーニング・グラント・コラボレーションを実施している。新たに、科学、工学、数学などの分野の博士課程の学生を癌関連のナノテクノロジー研究に組み入れるためのプログラムが2005年から開始され、15億円ほどの資金が投じられている。癌研究にナノテクノロジーを利用するため、異分野の学生を博士課程の段階からトレーニングをさせる積極性がある。日本においても若い内から分野を超えた教育を積極的に実施しないと、ブレークスルーを創出する段階まで至らないのではないだろうか。

短期 (1-5年)	プログラム自己組織化の基盤技術の確立。 数理科学の導入。 トップダウン法との融合。 バイオセンサー。
中期 (5-10 年)	階層を超えた自己組織化。 自己組織化対応の新規デバイスの概念。
長期 (20年以 ト)	多様な応用。

図 3 - 7 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート 自己組織化

3.4 スピントロニクス/大野英男(東北大学 電気通信研究所 教授)

スピントロニクスは電子の電荷とスピンを両方使ったエレクトロニクスで、分野としては半導体物理と磁性の間に位置する。産業としては、半導体デバイスと磁気記録(マグネティック・レコーディング)の間に分類される。

磁気記録は不揮発性で、電気を切っても記録が残る。一方、DRAM (Dynamic Random Access Memory) や SRAM (Static Random Access Memory) などのように、半導体メモリの大部分は電気を切ると記録が消去される。磁気記録の不揮発性と半導体の回路の概念とを取り入れ、新領域を創出すれば、市場的にも学問的にも大きなインパクトを与えられるであろう。

MRAM(Magnetoresistive Random Access Memory)は 2006 年に米国企業から市販されたものの、速度や大きさなどの点で不満があった。だが、それらの問題が解決されつつある。素子は磁気トンネル素子である。片方の磁石が下向きか上向きかにより情報を記録し、トンネル抵抗の変化で情報を読み出す。この原理が発見された 1995 年以来、大容量かつ低コストの磁気トンネル素子の開発が課題となっていたが、第一原理計算に基づき MgO を障壁とした素子の開発が行われブレークスルーが生じた。エピタキシャル構造を形成することにより、非常に大きな MR(磁気抵抗)が出せるようになった点がブレークスルーである(図 3 - 8)。

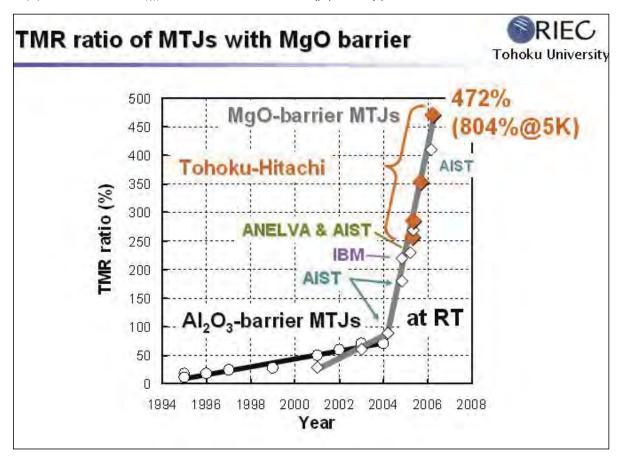


図3-8 TMR ratio of MTJs with MgO barrier

もう一つの課題は磁石の寸法を小さくすると、反転のために必要な磁界が増してしまうというものである。この課題に関しては、スピン流を利用することで磁化反転を起こすという理論が提出され、2000年に米国コーネル大学の研究グループが実験で証明した。当初は電流密度が過大、抵抗変化が小さい等の問題があったが、前述の MgO を使った素子で低電流密度化と抵抗の増大が進み、現在は磁石を利用した RAM の実用化へ向けた開発研究が活発化している(図3-9)。

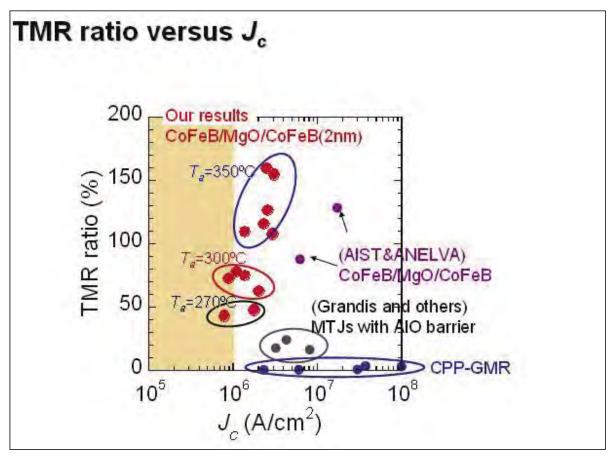


図3 − 9 TMR ratio versus Jc

米国では NNIN(国家ナノテクノロジーインフラネットワーク)がインフラストラクチャーを整備しているため、グランディス社などの小規模ベンチャー企業がそれらのインフラを利用してプロトタイプを作製し特許を取得してマーケティングすることが可能となっている。インフラの整備が重要であることを示している。

その他の最近の研究成果としては米国の共同研究グループが、200nm 程度の微少な素子の磁化反転の様子を時間・空間分解で測定したという成果も上がっている。磁石をどの程度まで小さくすることが可能であるかは、今後の大きな課題であるが、不揮発性メモリになりうる素質を備えた磁石が、現在 10nm 以下の大きさにまでなっている。メモリとして実用化するための課題をクリアしなければならないが、材料としては、半導体のスケーリングが見えない微小領域でも開発可能性があることを磁性体の開発研究は示している。スピントロニクスでは、半導体と磁気記録のそれぞれの技術の集積により、ナノレベルの技術を応用することが可能である。強磁性の半導体に関しては有用性が見出

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

されてきたが、実用レベルの素子を開発するという意味ではまだ初期段階にあるといえる。その他の動向としては、電流を流すだけで非磁性の半導体にスピン電極を生じさせるスピンホール効果が、現在、活発に議論されている。また、量子情報を固体の中で操作することにつながる核スピンへのアプローチが研究されている。以上のような開発に主眼を置いた研究も、第一原理計算の力を利用しなければならない局面が増えている。

スピントロニクス分野に限ったことではないであろうが、非常に質の高い周辺の研究が存在しないと、研究開発を推進することは困難になりつつある。スピントロニクス分野の未来に関しては、発見を計画することは不可能であるため、20 年先を予見することは難しい。予測できない未来に対処する環境をわれわれは用意しなければならない。教育はその一つである。

3.5 ナノサイエンス/樽茶清悟(東京大学大学院 工学系研究科物理工学専攻 教授)

ナノサイエンスのキーワードには、「固体」「低次元」「量子系」「電子」「スピン」「光子」「量子情報」 等がある(ただし古典系の研究は含んでいない)(図3-10)。



図3-10 1990年~2005年のナノサイエンスの動向

1990~2000年頃のナノサイエンスの研究は、量子の干渉性やエネルギーの離散性、あるいは 古典的相互作用に由来する量子現象を「観測・理解」することによって発展してきた。1980年から 1990年代にかけて、電荷の量子化(クーロンブロケード)や金属 - 絶縁体転移、弱局在やコンダク タンスゆらぎ、1 次元コンダクタンスの量子化などの低次元電子系の量子伝導の研究が盛んに行われ

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

[2]

第二部

た。1990 年代には、理論先行の形で「量子情報処理」が注目され、アルゴリズムや暗号理論などの研究が行われてきた。

2000 年頃から新しい動向として、量子であることの意義を厳密に意識した研究が始まってきた。 量子ドットや人工原子を使って電子の量子状態を 1 個の単位で正確に「検出・制御」し、個々の電子 の量子力学的なコヒーレンスをより直接的に「検出・制御」するといった研究がある。量子間の相互 作用についても一次元電子系の相互作用に基づく非フェルミ液体的性質や(超伝導 - 常伝導などの) 異種量子系の作る微小接合の相関効果といった、よりミクロの視点に立った研究がなされている。量 子情報分野に関しては次第に理論から実験へと研究のフェーズが移行し、様々な量子ビットやもつれ 現象が実現されるようになってきた。

このような研究の流れを踏まえて、2000年代のナノサイエンスの注目すべき動向をまとめる。単一量子の分野では、磁性を支配する「スピン」の量子性に関する研究が進められている。単一スピンの研究を経てスピンの相互作用やコヒーレンスの理解が進み、さらにはミクロな立場でスピンの持つ情報の検出やハンドリングが可能となった。例えば量子ドット中の単一スピンが電荷に比べて格段に安定であることが確認され、これによりスピンを使った量子情報の研究が加速された。2つの量子ドットの結合系ではスピンに関するパウリ効果が支配的となり、これを利用して最高感度の電子スピンや核スピンの情報検出、さらには個々のスピンの判定(上向きか下向きか)も可能となった。いずれも量子計算の基本技術要素として重要視されている。量子コヒーレンスやスピン相関の分野でも新しいタイプの研究がなされている。前者に関して1998年にワイツマン研究所が2面性と観測問題に関する報告を行った。不確定性原理に関わる重要な実験である。電子相関については、1998年にMIT(マサチューセッツ工科大学)が、ドットの中の電子スピンを局在磁気モーメントとする「近藤効果」の観測を報告した。近藤効果は、もっとも典型的な量子相関現象であり、その研究熱は現在も続いている。量子統計性に関連して、ショット雑音測定を利用した実験によって、フェルミ粒子系特有のアンチバンチング現象、分数電荷状態の存在が確認された。いずれも画期的な成果である。

量子情報の分野では1994年に素因数分解のアルゴリズムが、1995年にデータベース検索のアルゴリズムが発表されてから、量子計算を実現しようという気運が高まり実験研究が始まった。この勢いはエラー補正の理論発表により加速され、これまでに様々な量子ビットが実現されるに至った。通信分野への応用に関して単一光子や単一光子対の発生を基礎技術として、量子暗号の研究が大学、企業で進められている。低次元相互作用の物理分野では、スピンに関する興味深いテーマが注目されている。2次元系のスピンホール効果やスピン軌道相互作用がその代表であろう。

最後に2006年以後を占うと、恐らくは、電子と原子、光子と電子、電子と原子などの異なる量子間の結合を厳密に制御する研究が進むと考えられる。例えば電子スピンの量子性を中心に光子や原子と結合させることによって、量子メモリや量子中継等の量子通信に不可欠な要素を構築することが可能となる。物理としては量子ドットを単体としてより、その結合系やネットワークとして扱うことによって、全く新しい性質を発現させようとする研究が興味深い。例えばLSIの構成材料であるシリコンを使って、適当な量子ドットの格子を組むことによって、強磁性を発現させることも可能になる。これらの研究は既にその端緒が切られているが、いずれも10-20年先の夢が見られる研究であ

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

ろう。このほかにも微小接合の研究は極めて重要で、これからのナノ技術の発展の鍵を握っている。例えば超伝導体や強磁性体などのマクロの系とナノ構造の接合を考えると、接合の制御の仕方によって、流れる超伝導電流やスピン偏極電流が敏感に変化する。微小接合の性質を自在に制御できれば、研究領域は大きく拡大すると思われる。量子情報に関してナノテク総合支援プロジェクトのロードマップを見ると、ここ5年ほどで量子暗号のテストが行われ、10年ほどで商用化されると記されている。この段階では少なくとも単一光子発生の技術が必要である。その先には量子シミュレーション、量子中継などの技術領域があり、この段階では、複数ビット化と量子もつれの制御が必要となる。ロードマップ上最も困難なテーマが、量子情報通信と量子計算である。この段階では多ビット化、エラー補正、多重もつれ制御など高度な量子制御技術が必要になる。これらを進めていく上では多くの技術課題を克服する必要がある。長期的視野に立った継続的な研究活動が望まれる。

ナノサイエンス分野に関する中長期研究開発戦略シートを示す(図3-11)。

ナノサイエンス

短期 (1-5年)

低次元系スピン相関・コヒーレンス:グラフェン、CNT、ナノ細線、結合系..

マクローナノ接合:超伝導(強磁性...)電極-ドット(細線)

観測問題(量子もつれ)、デコヒーレンス問題

単一量子結合:電子-光子、クーバ対-光子、原子-電子

Scalable量子ピット/ゲート、単一もつれ光子

中期 (5-10年)

人工Hubbard 系・スピン格子

量子変換:もつれ光子-スピン/原子

デコヒーレンス制御

量子もつれ制御、量子エラー補正、もつれ光子伝送(量子暗号)

長期(20年以上)

高自由度スピン格子

多種量子相関:光子電子原子

マクローナノ接合:原子・分子レベルの接合 (無機-有機結合)

量子メモリ・中継、量子計算・通信

図3-11 長期戦略シート ナノサイエンス

短期 $(1 \sim 5 \, \mp)$ ではグラフェンやカーボンナノチューブ、ナノ細線などの材料の出現により、物理、デバイス概念の実験が進むであろう。量子計算では、スケーラブルな量子ビットや量子ゲートを実現することが最も重要となる。中期 $(5 \sim 10 \, \mp)$ では人工 Hubbard 系やスピン格子は、興味深い研究対象となる。量子計算のためには、デコヒーレンスの問題の解決と量子エラーの補正の研究が必須である。長期 $(20 \, \mp$ 以上)では高い自由度のスピン格子、多重量子間の相関、マクロ - ナノ接合自由な制御、量子メモリ・中継、量子計算・通信等の実現が重要なテーマであろう。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

[4]

3.6 再生・細胞組織化/岡野光夫(東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 教授)

細胞は分子の細部にわたり解明されているものの、分子から細胞や組織を人工的に作るには至っていない。今後の治療には、分子レベルで解明すると同時に分子から構造を組み上げることの解明が必要ではないだろうか。

日本の医療は、戦略的に治療する研究が欠如している。日本では、患者を診察・治療していれば 現在治すことのできない疾患を自然に治せるようになるという錯覚がある。米国は戦略的に現在、治 すことのできない疾患を治療するためにテクノロジーを医学の中に取り入れる仕組みが確立されてい る。

糖尿病治療として、インスリンは作れるようになったものの、補充するのみの治療となっている。 細胞や組織を作り、血糖値の高い時にのみインスリンを放出させるようなオートコントロールが可能 な治療系に持ち込まなければならない。対症治療から根本治療の時代に向け、テクノロジーは有機化 学による製薬から、バイオ医療を経過し、遺伝子医薬、細胞医薬、組織医薬に移行していくであろう (図3-12)。



図3-12 再生医療-医薬・先端治療の進化と融合 対症療法から根本治療へ

現在の再建医療では指などの組織を破壊してしまった場合、治療は他の部位を用いて繋いでいるが、 どこかにディフェクトが生じる。しかしながら、細胞で組織が作れるようになれば、現在は不治の病 気が治療可能となるであろう。成長する血管を体内に入れ、血管の入れ替え手術を不要化した治療が 現実に開始している。細胞シートを重層させていく技術を進めている。組織の最小単位は細胞ではな くシートであると考えている(図3-13)。細胞はある一定の量が集合すると高度な機能発現が可 能となる。

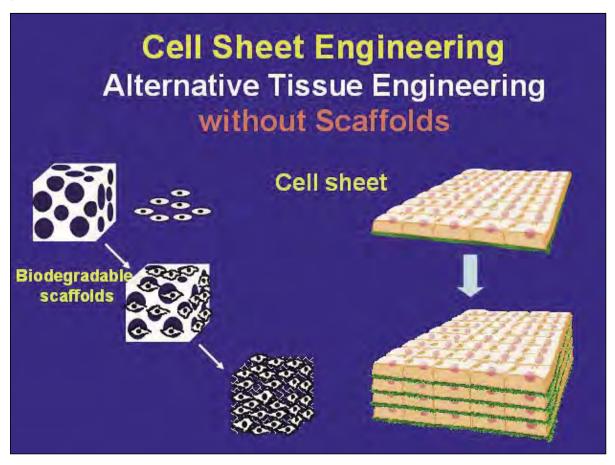


図3-13 Cell Sheet Engineering

部

現在、いろいろな細胞を増殖・培養するテクノロジーが大きく発展している。しかし、増殖させた細胞の剥離・回収には、酵素を使用して細胞膜タンパク質を切断することによっている。このため回収した細胞の機能は低下してしまう。増殖した細胞を剥がすために、接着から脱着への方向で反応する、Deadhesion という技術に挑戦している。細胞が接着する場所と接着しない場所を、光重合で再現する技術が開発されている。この技術を応用すれば、細胞を毒性試験のチップとして活用するといった発展が可能となる。イソプロピルアクリルアミドという高分子に着目をした研究を推進させている。低温では水和し、溶解するが、高温では脱水和して沈殿を起こす。これを固体の表面にナノレベルで固定することに成功した。温度を37℃から20℃に変化させるだけで、疎水性表面が親水性表面に変化し、このため接着した細胞と表面の間に水が入り、細胞を剥がすことが可能となった。温度を下げるだけで、細胞膜蛋白を残し、しかも機能を保持したままで取り出すことが可能である。

口腔粘膜から細胞シートを作り角膜を治療する臨床試験を東北大眼科・西田教授との共同で開始している。細胞シートの片面はフィブロネクチンを主体とするバイオの糊になっているので、細胞シートを移植し、積層化させることが可能である。患者本人の口腔粘膜で、角膜治療をすることが可能な時代が来た。同様に、細胞シートを使用すれば、肺の気胸や歯周病などの治療にも応用可能であり、臨床試験も始められようとしている。細胞シートを積層していけば、組織を作ることも可能である。世界で初めて、心筋のシートを作成することに成功した。積層化させた心筋細胞シートが同期して拍動し、グルコースと酸素の保給でこれを維持することができる。この積層化心筋組織をラットの背中に入れそれが1年以上動いていることを確認した。心筋梗塞では、血液のバイパス手術の際、ステントを入れるなどしていたが、細胞シートを貼ることで代替することが可能であると考え再生治療を追究している。これまでは酵素で処理した細胞を心筋内に注射していたが、そのうち数%しか生きなかった。これに対し細胞シートは100%が生きる。

既存の生物学や医学では以上のようなテクノロジーは無かった。新しい材料を組み合わせることで、 新規の治療が可能となっている。材料と異分野の融合が重要で、その領域での要求がまた新しい材料 設計につながっていくであろう。再生治療は従来の医学、工学のそれぞれの延長線上にその発展を描 くのではなく、医学と工学の融合させた新領域として、その発展を追究することが極めて重要である。

3.7 計算科学・シミュレーション/寺倉清之(北海道大学 創成科学共同研究機構 教授)

次世代スーパーコンピュータは 2006 年から計画が開始され、2011 年に運用開始の予定である。 理論ピーク性能は 10 ペタ Flops で、地球シミュレータの 250 倍の予定である。プロセッサの数は 10 万台以上で、予算総額は 1,100 億円となる。超並列に関しての未踏領域を開拓することとなり、大きな挑戦となる。

計算科学は次世代スーパーコンピュータと関連し重要な課題として扱われるようになり、総合科学技術会議でも国家的な基幹技術に選定されている。研究開発体制の俯瞰を示す(図3-14)。全体の構成としては、文部科学省のプロジェクトだったが、現在は理化学研究所に実質的な運営が移行している。

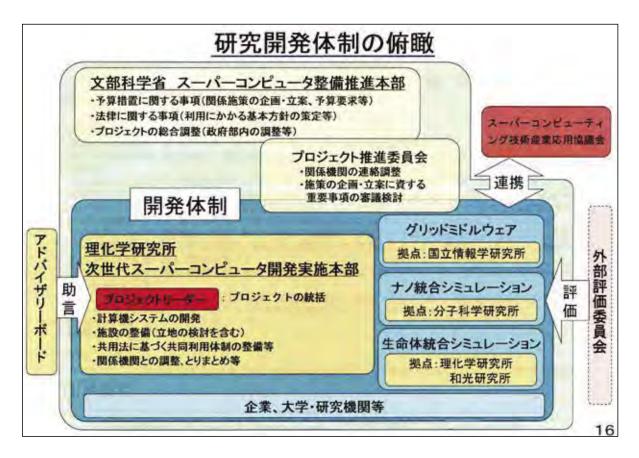


図3-14 研究開発体制の俯瞰

ハードウェアの建設とともにグランドチャレンジとしてナノ統合シミュレーションというプロジェクトがある。「次世代ナノ生体物質」「次世代エネルギー」(以上分子科学分野)、「次世代ナノ情報機能・材料」(物性科学分野)から構成される。ナノ統合シミュレーションと並列関係のプロジェクトとして、生命体統合シミュレーションのプロジェクト(拠点は理化学研究所)がある。ナノ統合シミュレーションプロジェクトの次世代ナノ情報機能・材料分野の中のナノ複合材料の班では、強度材料の構造と特性制御として、実用材料の性能を決定するナノスケールの内部構造制御の研究をしている。ナノ電子デバイスについては、デバイス部品を複合した系の解析などを課題としてある。包括的なシミュレーションを可能にするのが当班の大きな課題である。

ナノ計算科学関連のプロジェクトは多数存在しているものの、相互の情報の交流と共有が欠如しているのが問題である。次世代スーパーコンピュータプロジェクトの始動を受け、連携強化のために計算物質科学連絡会議の設置を計画している。物質科学シミュレーションの今後の実際的課題として、扱う系のサイズの問題がある。既存の計算手法では扱う系のシステムサイズ N について、最低 N の 3 乗程度の依存性があるために大規模系の計算が困難である。この困難克服のためにはシステムサイズに比例する計算手法の開発が課題となる。本質的な部分を量子力学的に扱い、他は古典力学的に扱うというハイブリッド法に関する課題もある。また時間のスケールを制御するという困難な課題もある。位相空間をどのように探索するかに関して様々な手法が開発されている。最適化、逆問題および設計と関連していくであろう。さらに基本的な課題として、強相関電子系の問題をどのように扱うか

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

[6]

などの精度の問題がある。サイズに関してシステムサイズに比例して計算量が増加するオーダーN 法や、重要な部分のみを量子的に扱うハイブリッド法が、この数年の間に実用化される段階に至った。 オーダーN法では第一原理計算として10万原子程度が扱えればよいと考えている。

量子ドットの問題としてはシリコン上のゲルマ堆積などに関連し、3次元構造の安定化に関するシミュレーションが物質・材料研究機構とイギリスの研究グループで実験されており約2万原子の系を扱っている。

その他の技術の状況としては位相空間探索の技術では、蛋白の折りたたみやクラスターの安定構造、 反応経路の探索などがある。計算精度に関する技術では、強相関電子の分野は最近の数年間で第一原 理計算への展開が大幅に進展した。ただ分散力の分野は最近強い関心がもたれており、今後の重要な 課題となっている。電子励起の分野は量子化学計算の進展が見られたものの、時間依存密度汎用関数 法はやや足踏み状態である。一方 Bethe-Salpeter 方程式による電子・正孔の扱いには進歩があった。 軽原子核の量子効果ではプロトンの拡散が燃料電池や生体の分野で重要であり、経路積分法の研究に 進展があった。動的な振る舞いの解析に関しては、第一原理計算の適用は今後の課題である。

応用問題としてはナノテクノロジーでも最もポピュラーな伝導現象に関しては、日本の他、ヨーロッパや米国が研究を主導しており、急激な進展が見られる。微粒子に関しては理論的な構造決定が困難な問題となっている。第一原理的に確実に計算するのが今後の課題である。TMR(トンネル磁気抵抗、Tunnel Magneto-Resistance)、GMR(巨大磁気抵抗、Giant Magneto-Resistance)、CMR(超巨大磁気抵抗、Colossal Magneto-Resistance)の分野は、ある程度研究が進展したが、本格的段階には至っていない。材料ミクロ内部構造に関しては、第一原理計算から開始し、マルチスケールの計算を矛盾なく行うことが大きな課題となっている。

基本的課題を整理する。将来的には新現象や新概念の創出が必要となる。計算科学の手法としてもアルゴリズムのレベルから開発しなければならない。これらを土台に先端的プログラムの開発を進める必要がある。プログラム普及のためのシステム構築は難しく今後の課題である。基礎科学的重要課題の設定もコミュニティの中で自立的に行うことが必要である。関連コミュニティでの交流の促進は重要な課題である。異なった分野の人の間の密な連携も機密保持などの問題を考慮しつつ推進していきたい。教育プログラムの構築と整備は非常に重要であると考える(図 3 - 15)。

	計算科学
短期 (1-5年)	大規模計算のためのオーダーN法の改良と整備(計算の安定性と精度) 超並列計算技術の向上 バンドギャップ(HOMO-LUMOギャップ)の精密予測 量子伝導における電子・格子相互作用の第一原理計算 量子伝導における電流誘起構造変化の第一原理計算 散逸を伴わないカレントの基礎理論確立 ソフトウエアの整備の仕組みの構築
中期 (5 - 10年)	van der Waals力の計算 原子に働く力の計算可能な電子相関の第一原理計算 電子励起状態と原子緩和 軽い原子核の量子効果を取り入れた第一原理的分子動力学計算 デバイス特性の量子シミュレーション(マルチスケール、マルチフィジックス) 散逸を伴わないカレントの応用研究 ソフトウエアの整備と普及
長期 (20年以上)	解析・予測から設計へ 散逸を伴わないカレントを使うデバイスシミュレーション

図3-15 中長期開発戦略シート 計算科学・シミュレーション

3.8 ナノテク社会受容・標準化/阿多誠文(産業技術総合研究所 東京本部技術情報部門技術政策 調査室 総括主管)

ナノテクノロジーの社会的影響や社会受容の活動は、ナノテクノロジーの負の側面だけに焦点を当てた活動と誤解されることがある。言うまでもなくナノテクノロジーの主要課題は、現行の技術に不連続で飛躍的な技術的発展をもたらし、持続可能な社会を実現するコア技術の研究開発である。しかしながらリスク管理や標準化といった社会的影響に関する研究や対応を取ることは、ナノテクノロジーが正しく管理されたうえで便益をもたらすような、信頼に基づく社会への受容にとって不可欠である。繰り返し述べてきたことであるが負の側面を管理することのみならず、今後展開するナノテクノロジーの産業化戦略の中に位置づけられるべき積極的意味合いと重要性をもった課題である(図3-16)。

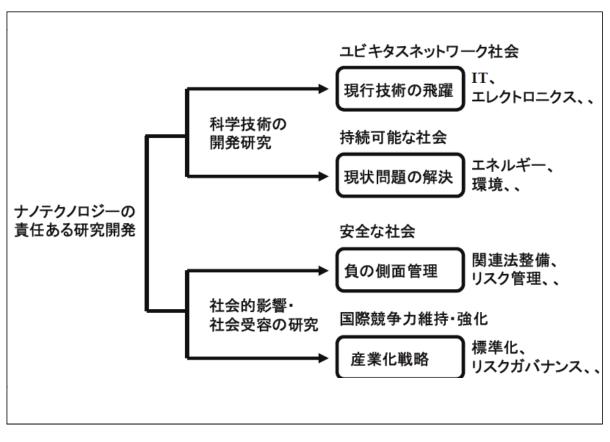


図3-16 ナノテクノロジーの責任ある研究開発

ナノテクノロジーの社会受容にとって大変大事な課題であるナノ粒子の生体影響や環境影響に、欧米や日本はどのように取り組んできたのであろうか。アメリカにおけるナノテクノロジーの社会的影響に関する政策のキーマンである NSF の M. Roco 氏らは、ナノテクノロジーの社会的影響に関するはじめてのワークショップを 2000 年 9 月に開催している。討論の内容は"Societal Implication of Nanotechnology"として纏められている。またヨーロッパ連合も 2001 年ころから NANOSAFE といったナノ材料の安全性に関する包括的研究の枠組みを展開、ワークショップ形式による情報共有もうまく機能していた。

2001年に施行された内閣府総合科学技術会議の第2期科学技術基本計画でもその必要性には触れられてはいたものの、日本ではナノテクノロジーの社会的影響に関する包括的な取り組はなかなか展開しなかった。これには日本特有の二つの大きな理由があったように思う。まず"Risk"が日本語で"危険"と訳されたことが、リスクに対して必要以上に負の潜在意識を作り出した。ナノ材料のリスクはその材料のハザードと曝露量の積として表わされる。[リスク = ハザード * 曝露量] 従ってナノ材料のリスクは曝露量に依存した任意の値を取るし、だからこそ任意のレベルであるリスクを数値化して評価していくことに大きな意味がある。しかしながら実際にはリスクの議論がナノテクノロジーの進展を妨げるといった言葉がいまだに聞かれるし、リスク管理ではなく安全管理が大事だとの意見もある。これではいつまで経っても国際的に展開されているリスクベースの議論に入ってはいけない。日本の対応が遅れたもうひとつの理由は、ナノテクノロジー政策が各省庁の縦割りで進めら

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

れていたことである。分野横断あるいは分野融合の課題として進められなければならないナノテクノロジーの社会的影響や社会受容の課題に対して、省庁の連携施策のようなプログラムが提示されてこなかった。

2006年4月から施行された第3期科学技術基本計画のナノテクノロジー・材料分野戦略では、ナノテクノロジーの責任ある研究開発の遂行と、その健全な育成のための政策が盛り込まれた。具体的にはナノ粒子の特性やリスク評価手法、リスク管理手法の確立、ナノテクノロジー標準化、テクノロジーアセスメント、市民対話、アウトリーチ活動、人事育成・教育活動、等が各省庁の取り組むべき課題として明記された。今後日本でも第3期科学技術基本計画に従ってナノ材料のリスクに係わる研究に資源が投入されていくことになる。より科学的で客観性の高いデータを積み上げ、公正に判断していく必要がある。ナノ材料のリスク研究といってもこれまで毒性学や生理学の研究を続けてきた研究者が、扱いの難しいナノ材料のリスクの研究をはじめることになる。大事なことはどのようなナノ材料なのか、凝集の状態はどうなのか、不純物はどの程度はいっているのか、等の評価するナノ材料が正しく把握されたうえで、ハザード試験や暴露試験が進められることである。そのためには毒性学や生理学の専門家と、ナノ材料の科学技術の専門家との共同作業が必須となってくるであろう。

ナノ粒子のリスク管理策の策定に関して、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)のプロジェクトで、中西準子産総研化学物質リスク管理研究センター長を中心に「ナノ粒子特性評価手法の研究開発」が2006年より5年間の期間で始動した。欧米より少し遅れて出発したとは言え、中西プロジェクトが打ち出した管理策策定へ向けたロードマップは他に例を見ない包括的なものであり、海外からも高い評価を受けている。また経済産業省は2006年度の事業として、各企業でボランタリーに行われているナノ粒子の管理に関するベストプラクティスを収集した。これらのデータはNEDOプロジェクトで具体的にナノ粒子の管理策が決まるまでの当座の管理策情報として有用である。

これらのナノ粒子のリスク評価や管理策を含めて、最終的にはナノテクノロジーの標準化活動に集約しなければならない。最初に動いたのは欧州連合で、2004年に CEN/BTWG-166 (European Committee for Standardization/Technical Board Working Group-166) が開始された。英国王立協会と王立工学アカデミーが EHS の課題への対応策をまとめる過程で、英国規格協会から戦略的に打ち出された活動であることに注目しておく必要がある。米国も同 2004年6月の「第1回責任あるナノテクノロジーの研究開発に関する国際対話」で準備を進めていることを明言し、同年9月から ANSI-NSP (米国規格協会ナノテクノロジー分野の標準化を進める The American National Standards Institute's Nanotechnology Standards Panel)を開始した。翌 2005年には、ISO/TC-229(国際標準化機構専門委員会 229、International Organization for Standardization / Technical Committee-229)が発足した。国際標準という観点ではISOの他、2006年にIEC TC 133(国際電気標準会議技術委員会 133、International Electrotechnical Commission Technical Committee 133)が米国とドイツの主導で発足している。

欧米の動きを受け、日本でも同 2004 年 11 月には日本規格協会ナノテクノロジー標準化調査委員会が設立された。2005 年 8 月、ナノテクノロジービジネス推進協議会(NBCI)に「ナノカーボ

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

[6]

ンの社会的影響と標準化を考える会」が設置され、カーボンナノチューブの分類法や標準化に関して プロトコルの策定を実施してきた。2006年にはナノカーボン標準委員会が設置され、民間のナノ テクノロジー事業者と学際のナノテクノロジー研究者との協力体制が出来上がった(図3-17)。

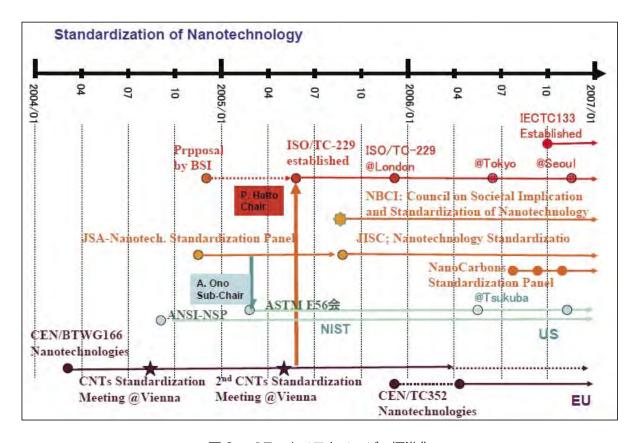


図3-17 ナノテクノロジー標準化

2006年6月、「第2回責任あるナノテクノロジーの研究開発に関する国際対話」が東京で開催され、「環境」、「健康・労働衛生」、「倫理、法、社会的影響」、「教育、人材育成」、「発展途上国支援」および「標準化」のテーマで包括的に議論が展開された。ISOのメンバーシップをもたない台湾などが、議論に参加できたことには大きな意義がある。この国際対話ではアジアナノテクノロジーフォーラムのなかにナノテクノロジー標準化のワーキンググループを作り、これをISO/TC229のリエゾンとすることが合意された。これらの動向と並行して、経済協力開発機構(OECD)の化学品プログラムで人工ナノ材料を取り扱う動きが出ている。標準化の元のプロトコルが構築されるであろう。OECDはナノ材料に関し2004年11月から問題提起をしている。またOECDの工業ナノ材料に関する作業部会も2006年10月に活動を開始しており、ISOとの連携作業が続けられている。

社会受容のプロジェクトの各国動向に関して述べる。米国ではウッドロー・ウイルソン国際セン ター(Woodrow Wilson International Center for Scholars)が新興ナノテクノロジーに関 するプロジェクト (Project on Emerging Nanotechnologies) を開始した。またナノテク製 品 350 商品のインベントリー(目録)作成が開始されている。他に EPA の公聴会をはじめとし て、市民の意見を聞くプログラムが頻繁に行われている。英国では王立協会・王立工学アカデミーが 2004年7月に発表した報告書 "Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties"に対して、英国政府が翌2005年2月、基本的に支持する方針を示した。政府が 直接関るナノテクノロジーの社会的影響にかかわる政策と研究の活動に、ナノ陪審や Small Talk といった市民対話のフレームからの意見を反映させる枠組みを構築して実施している。日本でもコ ミュニケーションやパブリックエンゲージメントの活動に対する機運が高まりつつある。一方でセ ンセーショナリズムありきの報道や書籍も目立つようになってきた。予防原則の適用を求める声が消 費者団体等から政府に対して上がっているが、どのように対応をとっていくかは重要な問題である。 Emerging Technology としてのナノテクノロジーの社会受容のために、今後の展開を示す。ナノ テクノロジーはそれ自体がひとつの技術領域を形成しているわけではなく、様々な技術のナノサイズ の加工や構造制御による機能化を目的とした共通基盤技術である。ナノテクノロジーの発展を包括的 に支えていくためには、様々な技術分野に存在する要素技術の俯瞰と分野の融合が大変重要である。 これを現実のものにするために現時点で最も重要な課題は、関係府省が共同で取り組む連携の施策と しての支援の枠組みづくりである。

5年後の課題はコア技術の研究開発の初期段階からその社会受容を考えていく責任ある研究開発の方法論を確立すること、新しい技術の産業化のためにリスク管理やそれを含めた工業標準化が戦略的に位置づけられていることである。とりわけ後者に関る研究開発には、その目的と受け渡し先を明確にした遂行の努力がもとめられる。10年後の課題としてはリスク評価等が政策に正しく反映されるためのリスクコミュニケーションや、ナノテクノロジーが信頼されて社会に受け入れられていくための科学コミュニケーションがうまく機能している状況の実現が挙げられる。20年後の課題については大変難しいが、以上述べてきた様々な課題が当然のこととして受け入れられ、ナノテクノロジーが我々の社会に大きな便益をもたらしているような状況であればいいと思う。

第

3.9 全体討論

●先端ナノ計測

- ・計測の高速化に関しては二通り展開されている。一点目は、各部分を最適化して達成するオーソドックスな方法であり、もう一点は、得られる情報の質を落としてフィードバックを掛けずに高速化をはかる方法である。データの質を落とすと、1ミリ秒/フレーム程度のオーダーである。
- ・荷電粒子や X 線や光をナノ材料に入射して応答を調べる分野の電子顕微鏡に関する日本の状況は、世界にようやく追いつこうとしている段階にとどまっている。基本技術である収差補正に関しては、日本では研究されておらず、イギリスやドイツなどの世界レベルと比較して 10 年程度の差がある。
- ・SPM(走査型プローブ顕微鏡、Scanning Probe Microscope)は、研究室では利用されているが産業の現場ではさほど利用されていない。原因としては、後発の AFM(原子間力顕微鏡、Atomic Force Microscope)の性能が向上したことが挙げられる。現在、AFM は、STM(走査型トンネル顕微鏡、Scanning Tunneling Microscope)と比較して、圧倒的に多数の台数が使用されている。
- ・AFM が産業に使用されない理由は、デバイスのスケールがまだ広いという点が挙げられる。 2009 ~ 2010 年頃には、1nm、1 Å(0.1nm)レベルの分解能が必要になる段階で、AFM の 重要性が出てくるのではないか。
- ・計測分野の中で、国の政策的支援として弱点を強化すべき分野に関して、弱点を強化することも重要であるが、日本では新規性や固有性のある技術を育てる観点が欠如している印象である。その点に焦点を当てることが重要であると考える。
- ・米国でも AFM はかつて、計測装置として一般的に使用される状況ではなかった。しかしながら 1990 年頃からベンチャー等を介して計測技術を有用なツールであるとして育成する道が機能していたのではないだろうか。日本では大企業の中でしか計測技術が育成されてこなかった。物性研究や物理研究、材料研究等の各研究室が独自にもつ研究ツールや計測ツールを汎用的なものにする意識が低い。意識を高める雰囲気を作り出すためのインフラ投資を、経済産業省には実行してもらいたい。
- ・JSTで先端計測技術機器開発事業が開始される際にインフラ投資等は議論されている。

●自己組織化

- ・現在の自己組織化に関しては、シンメトリー(対称性)のみ強調され、アシンメトリー(非対称性) を取り扱う考え方が少ない。シンメトリーがアシンメトリーと連関していない。
- ・現実的な観点から、対称的なものに踏みとどまっているというのが現状ではないだろうか。ただ、 プログラムを必要とするより高度な階層を超えていかなければ、真の意味の自己組織化にたどり着 かない。誰もが現状に満足しているということではない。
- ・現在の自己組織化では、ディフュージョン(拡散系)に依存しており、大規模な自己組織化は困難 となる。大規模な自己組織化のためのアイディアはあるのか。ブレークスルーが必要ではないだろ

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

うか。

- ・原料をすべて混ぜたら大規模な自己組織化が実現化するということは考えづらい。コンポーネント を作り、それを集合させていくことが考えられる。
- ・英語では、"Self Organization"(自己組織化)と、"Self Assembly"(自己集合)を厳格に区別している。日本ではどちらも「自己組織化」が使用されており、改善されるべきである。
- ・用語の問題に関しては、ISO/TC-229 (国際標準化機構専門委員会 229、International Organization for Standardization / Technical Committee-229) で検討されている。

●スピントロニクス

・スピントロニクスと磁気デバイスの共存に関しては、センサになりそうな部分には不揮発性メモリ 等は用いられないであろう。現在、小型化していく際に、磁化反転がしにくくなる点をどのような 方法で克服するかが問題となっている。スピントランジスタに関しては半導体を使用してスピンを 操作する際に、どのようなことが可能であるかを研究している最中である。スピンを増幅する仕組 みづくりは重要な課題であろう。微細加工技術とスピントランジスタは、並行して必要な技術であ る。前者の技術が向上するほどスピントランジスタの活躍範囲も広がる。

●ナノサイエンス

- ・材料分野の研究者にも理解しやすい言葉で説明してもらえるとありがたい。
- ・自己組織化に特性をもった分子を用いるという観点から、将来的には分子などのものづくりが非常 に重要になってくる。学生の近くにファシリティのある環境を確立してもらいたい。
- ・ナノサイエンスからの発見は計画できないものの、発見の確率を上げることは投資により可能であると考える。そのために分野、人材等に投資するという観点をもつと、科学の新しい部分が出てくるのではないだろうか。

●再生・細胞組織化

- ・他に治療方法がない患者や糖尿病患者には、臓器や組織を移植する方法が最善策として処されているが、そのような方法ができない患者に、組織や細胞を増殖させる方法を処することが一つの要点であると考える。患者自身の身体から採取した細胞を用いる治療法は始まっている。しかしながら、心臓等の臓器を作るまでには至っておらず、その段階までのプロセス作成を研究者は取り組んでいる。組織には多種ある。原始的な組織に関しては、作成が可能となっているが、高度な系の組織に関しては、まだ実現化のための課題が多くある。段階的には、角膜、皮膚、膀胱等の作成が最初で、10年後には別の組織、20年後には膵臓や肝臓等の作成が可能になるのではないか。
- ・JST―CRDSの井村グループ(臨床医学、井村裕夫首席フェロー)では、ICR(迅速統合医薬 実用化研究、Integrative Celerity Research)を総合的に検討している。
- ・ICR 等は重要である。ただ、技術のシーズ(種)のない部分に、構造的欠陥がある。技術を最初に造り出すための仕組みが日本には欠如している。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

- ・米国では国立癌研究所(NCI、National Cancer Institute)と国立科学財団(NSF、National Science Foundation)が連携し、ナノテクノロジーを積極的に利用するためのプログラムが実施されている。
- ・日本の教育では、関連施策のコーディネーションが破綻している。米国の事例で見られるプロジェクトの融合などが日本では成り立っていない。議論の必要がある。

●計算シミュレーション

- ・計算機シミュレーションにおいて、有機材料と無機材料の相互関係は今後重要になる。
- ・金属と有機分子の間の弱い相互作用を記述する計算手法は欠けているが、今後克服されるであろう。 次の問題としては、自己集合や自己組織化の過程をシミュレーションする方法の確立がある。複雑 な系の位相空間探索という、計算科学にとって根源的に困難な問題は、挑戦的であるが進展は期待 できる。
- ・各分子の特性を計算する手法については、古典的な MD(分子動力学法、Molecular Dynamics)を量子力学的計算が代替することまで考えると、大変困難である。
- ・材料設計に使用可能なコンセプトは単純でないと材料研究の現場で活用されない。プロセスの妥当 性を吟味できるような計算手法が出てくることを望む。
- ・基本的なコンセプトを学ぶことは若い人材を育成する際の基本的な原則である。

●社会受容

- ・中国の国際標準化政策について中国はナノ材料の計測に関して独自提案をしているが、それに従わ ないと輸入を受け付けないという段階ではない。
- ・中国版のローズ (RoHS、Restriction of Hazardous Substances) 指令というべきものがあり、 独自路線を示唆している。一方安全面に関しては、研究所が北京大学の中に設置されるなど相当管 理されている。
- ・企業側にとってはナノ物質の安全性は死活問題である。ナノリスクの問題を解決しないとビジネス 判断が容易でないという実情がある。ナノリスクの研究はもっと早い時期から開始すべきだった。 社会許容に関しても早めに展開することが重要ではないか。
- ・規格に関しては日本も指針を明確にして戦うべきである。他国が主張する規格に適用されないと採用されない事態にならぬよう頑張るべきである。
- ・ナノバイオの分野に関して日本では治験の制約が厳しく、海外での治験の事例が輸入される場合が 多い。そうするとコストが高くなってしまう。組織的にも縦割りとなっている。産業衛生面に関し て JST-CRDS では議論を行っている。
- ・安全性の問題にどう対応したらよいか考えていかなければならない。政府の中で全体として取りま とめていかなければならない。
- ・安全面に関しては科学的な知見を蓄積することが重要となるが、安心面に関しては社会受容の努力 を続け理解を得ていくしかない。

CRDS-FY2007-WR-07

●コメント

- ・日本のナノテクノロジー全体としては強い分野に位置する。さらにどのようにナノテクノロジーを 強化していくのかを明確にする点が問われている。強化分野を具体的に事例として挙げられること が望ましい。弱点分野に関しては、切り捨ててしまってもよいと考えている。ただし、弱点分野が 今後本質的な位置を占めるようになれば、取り組まざるをえない面もある。本質がどこにあるのか を一段掘り下げて考える必要がある。ナノテクノロジーの興味深い点を、このワークショップでも 可能なかぎり紹介していただきたい。
- ・化学物質には害の部分とともに益の部分もある。化学者(科学者)が(化学物質等の)機能性を考えていることを理解してもらうことが重要である。今後も取り組むべき課題がある中で、害の部分のみを取り上げることは慎むべきである。フラーレンやカーボンナノチューブのみを研究対象とするような社会が出来つつあることに関しても危惧している。多種多様な機能を考えたときに、アシンメトリー(非対称性)の考えを導入しなければならない。クリエイティブな社会を構築するための議論を行ってほしい。

[4] 第二部 グループ討論

4.1 総合・推進基盤

コーディネータ:横山浩(産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長)

コメンテータ:寺倉清之(北海道大学 創成科学共同研究機構 教授)

●プレゼンテーション・意見表明

横山 浩(産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長)

インフラストラクチャーに関して、融合拠点を既存の組織内で形成するために様々な問題が生じている。金額投資は必要となるが一度既存の組織から切り離して、独立した支援機関を確立することが望ましい。理想に基づいた運営を実現する必要があるのではないだろうか。

青野正和(物質・材料研究機構 フェロー・ナノマテリアル研究所 所長)

共同使用できるような研究施設を形成する場合、人的な手当を施さなければならない。

阿多誠文(産業技術総合研究所 東京本部技術情報部門技術政策調査室 総括主管)

ナノテクノロジーの社会的影響や社会受容に関する課題を社会に示していく過程にポジティブに 関連づけられるような形で、戦略していくことが必要であろう。

茅 幸二 (理化学研究所 中央研究所 所長)

プロジェクトで組織を作り、決められた予算の中で施策していくという形態には困難がある。 J S T のナノテクノロジーに関する連携もうまく機能していない。連携の問題は議論してもらいたい。 施設を外部の(分野にさほど精通していない)人材に利用させるという問題に関しては、余程の支援がないかぎり不可能であろう。

曽根純一(日本電気株式会社 基礎・環境研究所 所長)

「死の谷」をどのように超えるかについて考えたい。研究シーズは企業側とアカデミアとの相互 作用から発生する。研究開発は、事業のための間接費(オーバーヘッド)であり、選択と集中を行 わなければならない。

新製品を出す場合、市場は最初の段階では、さほど製品を受け入れようとしないため、コストが高くなる。初期投資が必要となる。新製品を市場に出す際の障壁を融合ファンドリーで解決できるとよい。

企業やアカデミアが創出したビジネスの種を市場に出す際には、国の支援も重要となる。資金を どのように運用するかを真剣に考えられる人が実行役となる必要がある。(図 4 - 1)。

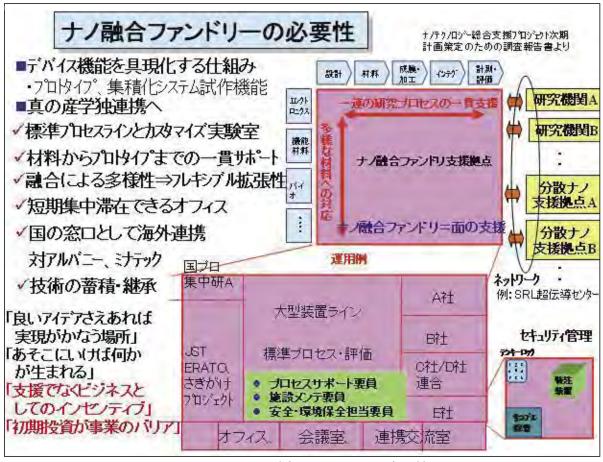


図4-1 ナノ融合ファンドリーの必要性

玉尾皓平(理化学研究所 フロンティア研究システム システム長)

情報、環境、生命科学に資する物質科学という段階から進歩して、物質科学が先導する情報、環境、生命科学という状況にしたい。「元素戦略」の概念を実現させていきたい。物理学と化学間で見られるような融合体制を分野間で構築し興味深い発見等が出た際は、物理学や物性物理学の研究者たちと一体となり研究を進めることが必要であろう(図 4 - 2)。

2015年の世界のナノテクノロジー市場は100兆円規模と予想され(NSF、米国国立科学財団、National Science Foundationによる)、日本の市場規模は2020年で13兆円と予想されている(経済産業省による)。一方で米国NNI(国家ナノテクノロジー戦略、National Nanotechnology Initiative)は、ナノテクノロジーの経済的インパクトの証拠はないと評価している。両者の差異が見られる。

インフラの整備に関しては必要であるという共通認識があるが、その認識をどこに提示すべきで あるか。

[1]

幸二(理研) 学総括コー

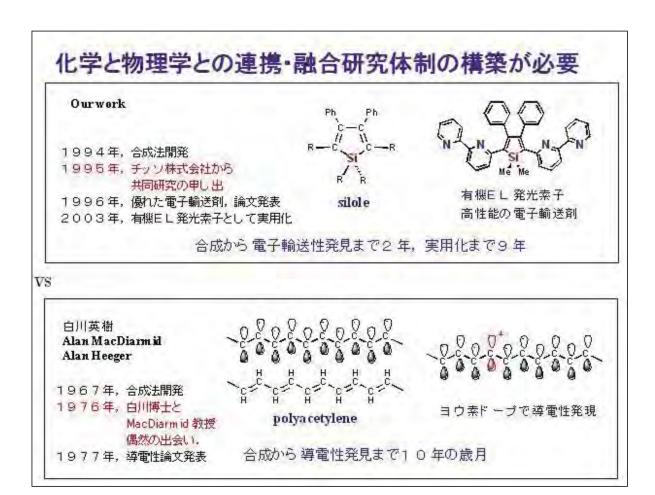


図4-2 科学と物理学との連携・融合研究体制の構築が必要

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)

市場規模に関しては市場の対象範囲や予測方法によって、多様な評価が出される。ナノテクノロジーは分野の融合により、研究領域や産業を開拓していく必要がある。よって融合を促進するインフラは不可欠である。ナノテクノロジー関連の全体予算のうち、インフラの部門に戦略的投資を行うことは重要である。しかしながら日本ではそうした戦略が謳われていない。研究者も短期的な研究資金を求める傾向にある。

総合科学技術会議が戦略的な議論を実施すべきである。日本が現在どのような状況に置かれているのかが見える形で説明する必要がある。

共同施設の利用に関しては、運営方法を抜本的に検討する必要がある。共同施設は継続的運営が必要であるため、期限付きプロジェクトとは別形態で、施設の自立を目指した形式を検討していかなければならない。

高柳邦夫(東京工業大学大学院 理工学研究科物性物理学専攻 教授)

二つの柱のナノテクノロジーを認識する必要がある。一つは現象発見研究であり、最先端の科学を推進するということである。もう一つは重要技術開発研究である。前者が上位、後者が下位と見られる風潮には危惧を抱く(図 4-3)。

ナノテク・材料分野の各領域における中長期的研究開発シート

2 500				
グループ名	総合·推進基盤分野			
短期	(1)要素基盤技術の育成(ファーフィールド技術、ニアーフィールド技術)			
(1- 5年)	高分解能・ハイスループットの要請			
	(例)デバイス用収差補正EM技術(2008年までに、国際レベル達成)			
	32nmデバイス技術支援			
	⇒ 2009年以後のデバイス開発主導権			
	・材料、デバイス、バイオ現象研究(アメリカなど国家提案)			
	⇒ナノテク・材料からシステムエンジニアリングへ			
中期	(1)各種民生機器の急成長			
(5-10年)	•記憶、表示装置、電池、通信機器			
	機械と人とのインターフェース			
	・薬品・医療(デバイス組み込み型治療薬、治療器具)			
長期	(1) 人間生活反応のセンシング技術(健康管理応用)			
(20年以上)	(2) 地球規模での光と水、電磁波の制御			
0	(3) 宇宙エネルギーの受容と放出			

図4-3 ナノテク・材料の各領域における中長期的研究開発シート

寺倉清之(北海道大学 創成科学共同研究機構 教授)

インフラの問題に関しては困難な問題があるということを認識している。どの組織も自らの組織 にとって有益でなければ、共同利用に積極的でなくなる。このような現実を考えるとインフラの形 成はさらに困難を伴うであろう。体制面を入念に検討しないとインフラ形成の実現は難しい。

[2]

●討 論

●インフラの構築

- ・装置を導入して新製品等を開発する意味でのインフラよりも、異分野間の知識や言語を共有しあう ディスカッションのためのインフラの方が重要ではないかと考える。
- ・融合拠点には研究を円滑に進める助力となるハード的な役割と、多種多様なバックグラウンドの人が集合する出会いの場としての役割がある。二重の意味で融合拠点の形成は実現しなければならない。ナノテクノロジー総合支援プロジェクトに参加している機関は、自らの機関にとって有益かどうかという視点が強すぎるのではなかろうか。ナノ融合ファンドリーの形成に総合科学技術会議で最低の D 評価が下された背景には、融合拠点は各研究機関にとって役立つもの程度にしか思えないという不信感があるのではないか。歳月をかけて持続可能性のある戦略モデルを構築した米国と、短期間に大規模な初期投資を行った韓国とでは、両極端ではあるがカルチャーは確立されている。既存の施設、装置、人材に少額の予算を充てる日本の戦略には、カルチャーをかえたり、高い目標を設定したりする意識がない。この点が最たる問題である。
- ・共同利用できる施設の必要性を、ワークショップ参加者の皆が発信していただきたい。既存施設でなく新規施設で運営すると、どのように分野間の融合が進展するか等を具体的に示してもらうと予算の要求がしやすくなる。必要性とポリシーが示されれば2007年度の予算要求を積極的に行いたい。
- ・共同施設に関しては様々な意見を統一・分類して、具体案を示す段階に至っていないが取り組まな ければならない問題である。
- ・日本には他分野の研究領域を受け入れようとする環境が無い。専門分野の異なる人材間では、自分の分野以外の知識レベルが低すぎることが問題である。一方では科学の知識が不足し、一方ではソフトウェアの知識が不足しているといった状況がある。こうした状況をカバーする役割は、研究者よりも営利団体が担うべきであろう。ただしある一定のレベルを超えた部分は、研究者は同じ価値観を共有していなければならない。産学連携をする際には、国の資金が投じられることを前提にしてはならない。産業側も学校側も少なくとも半分ずつ資金を拠出すべきであり、またその代わりに責任も両者が追及すべきであると考える。
- ・融合拠点の二つの役割に関して、ナノ融合拠点には一つの場で様々な技術を融合してプロトタイプを作る機能が必要不可欠である。また多種多様な人材が場に集合して異分野間の融合からイノベーションを生み出すという意味も、融合拠点にはある。人材の融合という点では学問的レベルの高い人材と、市場や事業に対する意識の高い人材の両者が参加することが重要である。「あの場所に行けば夢が叶う、あの場所に行けば何でもできる」といったワンストップの場所が、国内にあることが望まれる。
- ・融合拠点の運営は、強い人事権をもち業務命令を出せる組織でないと成立しない。東レリサーチセンターは一つの参考事例になる。大学による運営は研究者のモチベーションと齟齬するために困難である。

CRDS-FY2007-WR-07

・インフラはそれを利用する側がどのように利用するかの目的意識や戦略を明確化していないと、機能的に構築されないであろう。その意味で利用してもらう人々へのメッセージが重要となる。

●国際競争、国際化

- ・韓国(サムスン)の動向を見ていると、日本の先端技術研究所を短期間で凌駕する勢いを感じる。 日本企業は科学レベルの高さ等で対抗していかないと、衰退するのではないかという危機感がある。
- ・研究開発等の国際化が謳われているが、どの時点までに何を実現するのかを検討することも肝要で はないだろうか。
- ・グローバリゼーションを受けて日本の研究開発等に関するカルチャーは、国際化に合致するような 方向で一部は変えていかざるをえない。

●大学

- ・包括的な人材育成等の大学院教育を行う大学教官は考えていない。工学部の教官等が人材育成など の計画を立て、予算を取り付ける必要がある。
- ・国立大学は独立行政法人化され、ある程度自由に経営する権利を持てるようになった。各大学の学 長には、教育システムに関するメッセージを発してもらいたい。
- ・大学の教官は、連携して学生を教育するモチベーションを持ちづらい状況にあるのだろう。国から の資金援助の状況が改善され、大学の教官は自らのファシリティを確保でき、それで満足してし まっている。学生の教育に注力する共通意識が生まれにくい状況にあるのではないか。
- ・学生のレベルも低下している。とりわけナノテクロジー分野に関しては、技術教育を推進すべきであるう。その上で科学に関する研究の教育をしていく必要がある。二つの段階があることを理解しなければならない。
- ・米国では学長は学長職の訓練を受けるなど様々な経験を積んだ上で就任している。日本の大学でも 学校経営や研究体制に関して、四六時中考えているような人材であることが望ましい。海外からふ さわしい人材を引っ張ってくることも一考としてある。
- ・外国から優れた人材を各機関に招聘しても、力を発揮できる基盤や環境が整備されていないとなら ない。地道な努力の積み重ねが必要であろう。

●キャリアパス、人材

- ・物質・材料研究機構は若手研究者をエンジニア職に 1 ~ 2 年配置させ、独立心を育成している。 今後の成果を見ていきたい。
- ・経済産業省では少子化の中で労働力の確保のために、アジアの人材活用を企業とのマッチングの中で実施している。日本に留学してきた人材をどのように国内に取り込むかの政策を検討している。
- ・人材育成の良い方法があれば、文部科学省だけでなく経済産業省でもその他の省庁でも資金を出せ る仕組みがなければならない。

●総 括

- 海外の研究者等の人材が日本に来る一方で、われわれ日本人も海外にさらに出て行かなければなら ないのではないか。大学もしっかりとした研究活動をすることができる拠点を作ってもよいのでは ないか。研究開発の最先端で海外拠点のような施設を戦略的に計画し活用することも必要であろう。
- ・アメリカンドリームのような夢が日本にはないために、優秀な海外の留学生が日本に集まらない。 大学がプロモーションしなければならない。アジアの人材を日本に定着させるには日本の大学入試 で、外国語1か国語を身につけているかどうかを試験するような制度も考えられる。
- ・共同設備やインフラに関しては、機能や投資額に関する点よりも、どのような人物がその設備に参 画しどのように利用していくかといった点のほうが重要であると考える。研究者がその施設をフル 活用できるような雰囲気があれば、海外からの人材が日本に定着することも実現するであろう。
- ・各分野が連携して日本の固有性を発揮して、優れたシステムを日本なりに構築しなければならない。 日本人として居心地を良くしたいし、海外からはいい国だと思われたい。解決策はかならず存在する。
- ●事前アンケート結果(総合・推進基盤)まとめ(図4-4~8)

- 日本の研究者は、自らの研究以外のことに関して、他力本願傾向。
- 「総合・推進基盤」で議論された多くのことは、研究者コミュニティの主導で推進すべき。
- 政府やファンディング機関は、支援、奨励、あるいは承認。
- 1)融合拠点, 共用施設 研究者コミュニティが主導、民間と協力、官は支援
- 2) 異分野融合, 研究者連携 研究者コミュニティが推進、官は支援・奨励
- 3)教育. 人材育成 完全に学の責任、官は支援
- 4) 実用化, 技術移転
- 多くは研究者自身の問題, 医薬品の認可問題は官に大きな責任, 官は支援 5)研究・教育の国際化
- 研究者コミュニティの問題、 官は支援・奨励
- 6)ナノテクのリスク管理、標準化 官が主導,産学は積極的に参画
- 1)~6)は研究者(大学人)が主導して行うべきであることを認識させる活動:CRDS戦略 WSの狙いの1つに。CRDSが研究コミュニティーの一員として呼びかけ?
- 1)~6)の活動に関して、研究者コミュニティーからの要求に基づいて支援拡大。
- 55歳以上の研究者の一部をもともとの定年までの有期雇用に給与原資上, 切り替え, 1)~6)の専任に。空いた運営交付金による正ポストを若手に。

図4-4 概要

融合拠点,共用施設

「米国のように素晴らしい融合拠点, 共用施設が欲しい。どうして国は(誰か)作ってくれないのか?」

<望まれる融合拠点・共用施設>

- 1)既存組織から独立した機関
- 2)経営意識の高いトップの人事権の下に優秀な技術者
- 3)試作に使える一連の最新装置:アイデアを実現できる場所
- 4)費用対効果の最大化,持続性のある事業
- 5)融合の場
- 研究者同士の草の根, 学科, 部門, 機関などで, 自発的に施設や装置の共用・共同維持はできるはず(本当に必要なら)。
- 「共用施設は欲しいが,自分の装置を買う研究費は減らされたくない。」,「自分の装置は共用に供出したくないが,共用施設は欲しい。」,「支援する側には参加したくない。」などと,研究者コミュニティー内に合意不足。
- 「使える共用施設だったら,使いたい。」程度の漠然としたニーズ。現在は研究費が 豊富で,多くの研究者は自らの装置を確保でき,その中でできることで満足。
- 米国や欧州の拠点・共用施設は、長い歳月をかけて、研究者コミュニティ自身が構築し、維持・発展してきたもの。
- → CSTPでの大形拠点形成D判定の理由

図4-5 融合拠点、共用施設

異分野融合, 研究者連携

「私の研究はまさに融合研究です。」,「独創性を最も重要視している。オンリー・ワンだ。」

- 異分野融合は研究者自身の問題。
- ・ 研究者は現状に満足、融合の必要性乏しい。独創性の大義名分のもと、蛸壺化。
- ・実用化への努力は技術融合のドライバ。
- インセンティブを高める仕掛けの導入。

教育,人材育成

「人材教育システムを是非構築して頂きたい。」(大学教授)

- 教育・人材育成に関して、他人事のように言う、あるいは評論家のごとく言う大学教授。
- 21世紀COEなども、研究要員(良い学生やポスドク)集めが目的に。
- 競争的研究資金で自分の給料を支払えない55歳以上の研究者は、教育・人材育成の専任に。

図4-6 異分野融合、研究者連携、教育、人材

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

実用化,技術移転

「素晴らしい技術を開発したのに、どうして企業は使ってくれないのか?」、「日本にはベンチャー企業がなくて、実用化する場がない。」

- ・ 実用化のための最初の努力は研究者自身の責任。
- ・産業界の理解不足より、研究者自身の努力不足。
- ・ 実用化への努力は技術融合のドライバ。
- 実用化研究のためには、共用施設が重要。共用施設で少量生産も可能。
- ・ 米国では研究者自身がベンチャー企業を企業。
- ・日本にベンチャー企業がないことが新技術を実用化できないことの大きな理由:55歳以上の研究者は、職を若手に譲り、蓄えた技術、人脈、および資産を使って、ベンチャー企業を起業して欲しい。この世代は失敗しても年金がある(若手には安定した職も将来の年金も不十分)。

図4-7 実用化、技術移転

まとめ

- 1)融合拠点, 共用施設
- 2) 異分野融合, 研究者連携
- 3)教育, 人材育成
- 4) 実用化, 技術移転
- 5)研究・教育の国際化
- 6)ナノテクのリスク管理,標準化
- 必要性・重要性に異論なし。
- 研究者自身・大学人自身がやるべきことであるとの認識希薄。
- 5年間の反省: 短期的競争や金銭的満腹感の弊害。
- 上記認識を高める施策と支援の拡大。
- インセンティブを高める仕掛けの導入。

図4-8 まとめ

4.2 ナノエレクトロニクス

コーディネータ: 平本俊郎 (東京大学 生産技術研究所 物質・生命部門 教授)

コメンテータ:渡辺久恒(株式会社半導体先端テクノロジーズ代表取締役社長)

●質問設定とプレゼンテーション

平本俊郎 (東京大学 生産技術研究所 物質・生命部門 教授)

ナノエレクトロニクスのグループ討論をするにあたり、「ターゲットは何か」ということを表明 していただきたい。将来何がどの段階で必要であるかを提示していただきたい。

考えられるターゲットは CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)に関しては、現在の CMOS の延長、CMOS を基本としつつ将来的に違った形となる Extended CMOS、CMOS に置き換わる Beyond CMOS の 3 点がある。CMOS とは異なるターゲットとして、メモリ、配線がある。トップダウンの視点で何が必要とされているかを俯瞰することも必要である。CMOS ベースがあり、その後非 CMOS ベースで電荷を使うターゲットが現れ、その先に電荷以外のターゲットがあるのではないだろうか。もう一つの軸として CMOS にない機能を CMOS に付加する More than Moore がある。メモリは従来の CMOS 技術等を取り入れ集積することができる。配線は現在のカッパー(銅)の low-k(低誘電率層間絶縁膜)材料による配線技術に代わる未来技術が見あたらない。

研究ニーズと研究シーズを明確に区分したほうがよい。将来エレクトロニクスがより発展するためにどのような機能が必要であり、何をするべきかという観点で議論をすることが望ましい。

渡辺久恒(株式会社半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長)

ナノテクノロジーは広範な産業にインパクトを与え、産業構造の変革を誘発させる可能性を秘めている。ナノテクノロジーで伸ばすべき産業として感性産業、ハードウェア産業、高齢社会産業、フロンティア産業、環境産業等が挙げられる。中でも高齢化産業の伸びが目立つ(通商産業調査会「競争力ある多参画社会」では、国内市場規模が2000年39兆円、2025年112~155兆円と試算)。日本はエレクトロニクス大国と言える。「ナノエレクトロニクス」の定義を「デバイスの動作原理の中心となる部分において、あるいはその製造過程において、ナノテクノロジー(物性、構造、製造を包含)の特徴を十分活用したデバイスとその応用システムを対象とする技術体系である」とする。スーパーコンピュータに関しては2015年頃にExa-flopsコンピュータが登場するであるう。バイオ系の研究を完全に理論で解明する際、蛋白質の計算量が膨大になるため電力の問題が生じる。

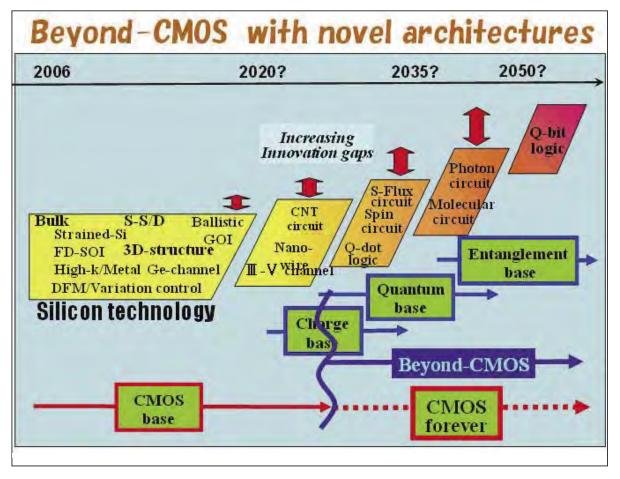
現在のLSI (Large Scale Integration)が直面している課題は駆動力の低下や微細化に伴う "ばらつき"の深刻化、配線の超高電流密度化による信頼性劣化、配線層の超多層化による特性劣化等がある。Si-MOS (Silicon Metal-Oxide Semiconductor)はゲート 5nm でも駆動するが、MOSFET (MOS型電界効果トランジスタ)としてはゲート 22nm が実質上の限界である。高集積化により配線が発熱する問題に対しては、銅の後継としてカーボンナノチューブの使用が考えられている。微細化によりトランジスタ数が増加すると多層化をしなければならないが、48層まで

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

になると中継器(リピータ)の導入が必要となり限界を迎える。その結果電気配線から光や高周波 等の無線配線への移行が検討されるようになる。

以上より課題としては以下の4点である(図4-9)。



 $\boxtimes 4-9$ Beyond-CMOS with novel architectures

- ・既存エレクトロニクスデバイスのどの限界をブレークスルーするのか(速度、消費電力、機能、 信頼性問題のどれを克服するのか)。
- ・個々の素子の微細化(ナノ化)はできるが、集積化はできるのか、その結果性能向上は期待できるのか。配線、発熱、ばらつき、信頼性、シグナルインテグリティ問題はどのように克服するのか。
- ・これらのシリコンテクノロジー限界を超えるには、バイナリーデジタル型情報処理アーキテクチャ から脱却すべきなのか。
- ・自己組織化(ボトムアップ型製造法)が大きなポイントであるが、システム全体をこれでできる のか、シリコンテクノロジーの助けを借りるのか。

開発費を考慮に入れても微細化は可能なかぎり進むと思われる。時間を掛ければコスト問題は抑えることが可能である。ロードマップを遵守する必要はない。トランジスタの微細化に関しては、原子レベルまで到達したらその段階で打ち止めとなるであろう。わずかでも微細化の工夫の余地があれば 20~30年は微細化が進むと予測している人は多い。

CRDS-FY2007-WR-07

大野英男(東北大学 電気通信研究所 教授)

上手にメモリをかえていけばロジック・イン・メモリの実現も可能となる。実現のためには無限 回書き換えが可能で不揮発性の高速メモリが必要となる。

金山敏彦 (産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副センター長)

ナノエレクトロニクスの主ターゲットとしては Extended CMOS を挙げる。ターゲットに制約されず様々な研究を展開していくことが望ましい。ナノ本来の材料特性等を生かした機能構築を考えることが、ナノエレクトロニクスの要点となる。微細化が進んだ先の次の流れを用意しておくことが重要である。シリコン CMOS の発展性を捉えつつ技術や分野の統一に活かせるアイディアや知識を体系的に蓄積すれば、More Moore(半導体微細化の極限追求)を延長させる研究にも貢献できるのではないだろうか。

現在のシリコンベースでの微細化の流れが困難となっても、各種の化合物を本格的に代替するまでには至らないのではないか。代替技術がいつ到来するかに関しては考える必要がある。Beyond CMOS を目指すのであれば、試作とシミュレーションの両面から組織的に様々な知恵を蓄積しておく必要がある。CMOS の延長における複雑化の中でも、単純への回帰(Simplicity Again)は重要である。CMOS 自体の構造変化をデバイスソースとして利用できる可能性があると考える。自己組織的にゲートを構築するようなプロセスが可能となれば、様々なアーキテクチャや回路を組む自由度が増すであろう。

基礎分野研究者とデバイス開発は共通の土俵に乗らないことがあるので、強力なコーディネーションが必要となる(図 4 - 10)。

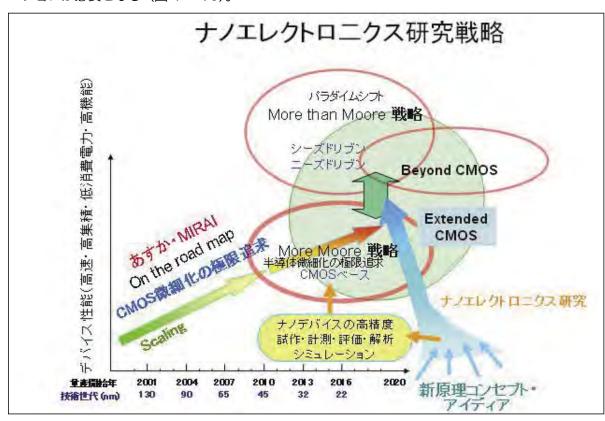


図4-10 ナノエレクトロニクス研究戦略

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

[2]

平本俊郎(東京大学生産技術研究所 教授)

シリコンの分野にはバックアップ技術が豊富にある。バックアップ技術でも優良なものはすぐに 採用され、集積化に見合わないものは採用されない。

知京豊裕 (物質・材料研究機構 半導体材料センター センター長)

米国の戦略は 2002 年の NIST (National Institute of Standards and Technology) によるロードマップ等を見ると、システマチックであることがわかる。以前より現実的かつ効果的な戦略として、シリコンベースのナノエレクトロニクスに重点投資してきた。今後の傾向の予測としてはトランジスタの微細化がゲート 22nm まで進むと新材料が導入されるという点と、その後 3D 構造が導入されるという点を挙げる。当面の課題はメタルゲートとなる。また More than Moore の分野として有機材料をシリコン基盤の上に搭載する研究がある。チャネル材料として、シリコン・クラスレートの研究がある。ターゲットとしては CMOS の延長(Extended CMOS)しかないと考える。このターゲットでの技術的課題としては、背景とメタルゲートを中心とした材料開発や、材料データベースの構築が挙げられる。様々な最先端ナノ分野の融合を心掛けると、課題への答は様々見つかるであろう。ゲートラストと呼ぶトランジスタ作成プロセスにより、特徴を見つけ出すという研究が現在の傾向としてある(図 4 — 11)。

材料に関する特許件数は日本が多く保有しているが、デバイスに関する特許件数は米国のほうが 日本よりも圧倒的に多い。日本は様々な材料を開発しているものの、それらを統合して製品化する 道筋に関しては弱いといえる。米国ではナノテクノロジーの評価装置等が、ベンチャー等により数 多く製造されている。ナノテクノロジーを支えるためのインフラストラクチャー分野での起業が多 い。米国・ヨーロッパと日本との差異は大型設備等のインフラの存在の有無であろう。

研究がある程度の段階まで進展すると米国では実用化への移行が始まるが、日本ではさらに研究を深化させる傾向がある。10 年後等の未来の機器を具体的にイメージして、その機器を実現化するために何が必要であるかを検討し項目化することを提案する。ファンドリー形成の予算を文部科学省は簡単には確保しない。中国をはじめとする多国間での開発推進を戦略に入れることが望まれる。例えば稼働していない国内企業の 200 ミリライン設備を、JSTが年間 10 ~ 20 億円で借り上げてファンドリーにするといった発想があってもよい。教育面に関しては異分野の学生で融合している米国に学生を派遣させる等の策をとってもよいのではないか。

On Siに関して欧州議会及び理事会のRoHS指令(危険物質に関する制限指令、Restriction of Hazardous Substances)の対象に砒素が加えられる可能性が高いため、GaAsは環境面から見て先行きは厳しいがGaAsは研究グループでも取り扱わないようにしている。米国では軍の支援とベンチャーの存在により実験の試行回数は多い。能力が同じであれば試行回数の多さが成功を左右する。強制的異分野融合はオンシリコンでの研究が当てはまる。稼働していない200mmライン設備の活用の体制に関してはオールジャパン体制で臨まなければならない。ファンドリーの対象に関してはオンシリコン以外にはあり得ないと考える(図4-11)。

現実的な手法は何か 世界をまきこむ(日本のペースでは間に合わない)

10年後の携帯機器: 現在のPCと同等の性能、通信周波数帯 10GHz、 消費電力100mW

開発は多国間で(例えば日米欧中 ? 中国の市場は魅力+中国の規格戦略にへの対応)

自国のインフラを利用 (国内の企業の遊休200mmラインを年間20億で確保)

他国のインフラを利用 (IMECの200mmライン、300mmラインを年間20億円で一定時間確保)

人材: アメリカの大学教育を利用

(日本の学生を一定期間 アメリカに派遣して強制的な知的ショックを与える) (アメリカの大学では学部の壁がないことを体験し、それを利用する)

研究 : 強制的な異分野融合を "on Si "と" MOS"進める。

図4-11 現実的な手法は何か 世界をまきこむ

金山敏彦(産業技術総合研究所次世代半導体研究センター 副センター長)

稼働していないラインを活用するには、管理・運営する人材についても資質の面から検討しなければならない。

湯本潤司(NTT 物性科学基礎研究所 所長)

カーボンナノチューブに関しては高純度化が進み物性の解明が大きく前進した。ただし構造制御に関しては課題が残されている。大量生産に向けた取り組みは米国のベンチャーを主軸に活性化している。高純度の価格帯は、1 グラムあたり 500 ~ 2,000 ドルである (金は 1 グラム 2,500 円)。 大型平面ディスプレイ(FPD、Flat Panel Display)用の電子源としての開発をサムソンやノリタケ伊勢電子等が進めている。電界放出ディスプレイ(FED、Field Emission Display)による低消費電力化、高輝度化の実現が目指されている。またカーボンナノチューブの評価法、作製法、用語、リスク評価等に関する標準化が進められている。技術ではなくロビー活動等の戦略が市場を左右する可能性がある。

シリコン単電子デバイスに関しては 1990 年代初期に日立、NTT、東芝、富士通、NEC 等が研究していたがほとんどが撤退し、現在は東京大学、東京工業大学、NTT のみが研究している。単電子機能は実証されたが実用化のためには、既存の論理演算アーキテクチャを越えて数学、情報理論の研究者も巻き込んだ展開が必要である。

量子情報処理用デバイス(qubit)に関しては、この5年間超電導、冷却原子、半導体電荷、

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

半導体スピン、半導体核スピン、半導体励起子等の分野で、研究が大きく前進した。量子計算は2010年代後半に、デモンストレーションが可能な状態までもっていけないかと考えている。ただし現在は出口の議論よりも物理・物性が中心である。日本ではJSTが推進の中核役になっているが、米国、EU、豪州でも国家プロジェクトとして進展中であり標準化戦略の検討が課題となる。

グラフィン(Graphene)に関しては 2004 年に単層でも安定して存在することが証明された。 2005 年には室温で量子ホール効果が観測され、センサへの応用化の流れが出てきている。作製法はテープでカーボン単一層膜を剥がす方法が用いられている。p型、n型ができると FET(Field effect transistor)となる可能性もある。日本では理論重視でまだ実験はほとんどされていない。

以上の各分野は研究としては大きく進展しているものの出口が見えない状況にある。論文はある 程度の費用と時間を掛ければ書くことが可能であるが、その成果を産業に展開しようとすると手間 がかかる等の理由から進展が鈍る。

デバイスとアーキテクチャに関してはこれまではデバイスができないのにアーキテクチャを考えても無意味だという「卵と鶏」の議論になっていた。理論の研究者が単電子デバイス用アーキテクチャにどのように興味を持つかが問題としてある。

デバイス研究とその使い方を総合的にケアできる組織、人材が必要ではないか。科学としての独創性を重視する専門職とは異なり、戦略性、調整力といった総合力を必要とするコーディネータが育っていない。コーディネータ人数は、専門職ほど必要ではない。最近大学では MOT (Management of Technology) が盛んで、学生からの人気がある。博士レベルの専門性をもった上でビジネス的センスを追加することが重要である。若い時期から戦略部門で活動するのではなく、かなりの研究経験を蓄積してからのほうがよい。日本企業はマーケティングが苦手である。研究に対する総括責任者が不在である(図 4 - 12)。

全体として

- デバイス研究とその使い方を総合的にケアできる組織、人材が必要ではないか
 - サイエンスとしての独創性を重視する専門職とは異なり、 戦略性、調整力といった総合力を必要をするコーディネータが育っていない。
 - コーディネータ人数は、専門職ほど必要ではない
 - 研究から開発・商品化への移行役
- MOTとコーディネータ
 - 最近、大学ではMOTが盛んで、また、学生からの人気がある。
 - 博士取得程度の専門性は、不可欠。
 - 若い時期から戦略部門で活動するのではなく、かなりの研究経験を蓄積した後で行う。
 - 企業では、マーケッティングに相当。日本企業は、マーケッティングを苦手。

図4-12 全体として

渡辺久恒(株式会社半導体先端テクノロジーズ)

"三山論"を唱えている。まず気運が盛り上がる(一山目)。その後困難性が指摘され衰退するがしばらくすると新技術等が加わり開発が可能となり、再度気運が盛り上がる(二山目)。最後に衰退するが三度気運が盛り上がった際(三山目)に本物の技術になる場合がある。山が消えても副産物等を残しておくことが重要である。そのような観点からも研究支援は重要である。

●事前アンケート結果(ナノ・エレクトロニクス)まとめ

ナノエレクトロニクス分野に関連した事前アンケート結果に基づき、過去 5 年間の研究開発進展状況と日本の貢献および日本の課題をまとめた。またアンケート結果から抽出された中長期研究開発戦略の視点および本分科会において議論し、提案されたロードマップも下記に示す(図 4 - 13~15)。

研究シーズ 進		進捗	ナノ・サイエンス	エンジニアリング	
			0	・金属ゲート/ゲート酸化膜界面/Si のGCNLモデル理論。	・HfO2系ゲート酸化膜のリーク原因は粒界ではなく、酸化物中の空孔。
High-k/ メタルゲート		課題	- 界面状態の理解と制御。	-ゲート酸化膜やメタルゲート、界面制御、構造に関する研究。 ・新材料の独創的な発想やアイデアの実証において、欧米の後塵を拝す。サポートする施設・組織がない。	
			0	・パリスティック電導等、物性解明と構造制御。 ・高純度・大量生産技術の確立。	·自己集合化技術。
	CNT	課題	・カイラリティーの制御。	・界面制御・電極とのコンタクト技術。・低コスト化技術。	
- E	ᆺᆍᆡ	0	・巨大トンネル磁気抵抗の理論的な予測を実験により確認。・高い強磁性転移温度を持つ強磁性半導体創製。	-Fe/MgO/Fe のエピタキシャル構造で巨大トンネル磁気 抵抗効果。	
		課題	・スピン流ナノ物理の確立。	- 低電流駆動スピン注入磁化反転。	
	צ	量子 現象	0	・量子井戸構造、量子ドット構造におけるスピン現象の解明と制御。・単一スピン間の交換相互作用の制御、スピンホール効果と理論的貢献。	
_		有機半導体	0		・材料開発からデパイス化まで日本が牽引。
	有		課題	・動作機構の理論的理解が不十分。 ・機能設計を中心とした新しい有機材料領域の創成。	・デバイスの耐久性の解析が不十分。 ・知識の共有化も進んでいない。
			o	-超巨大電界誘起抵抗変化(CER)効果。	- 不揮発性高速メモリ(Resistance RAM)。
	強	相関材料	課題		・界面デザイン技術の確立を実現するための界面エンジニアリング。・酸化物デバイス作製に向けた、微細加工技術。
			0		・ブルーレーザーの実用化。
		化合物 半導体	課題	・融合領域に関するロードマップが描かれていない。 様々なイノベーションが起きる可能性が高い領域。	・オンシリコンで、選択的な無欠陥薄膜結晶の作製。

図4-13 過去5年間の進展状況と日本の貢献

過去5年間の進展状況と日本の課題

1. デバイス化技術

- ・ひずみ Si: 微細化に頼らずCMOS性能を向上させる技術。IntelのPentiumに搭載済み。 極めて短時間に実用化され、微細化一辺倒のCMOS開発の流れを一変。
- ·三次元構造 MOSFET:

日本発のアイデア、しかし開発では日本の企業は出遅れた。米欧が先行。

- ・半導体や超伝導を用いた量子コンピュータ用デバイス(qubit)の物理解明。
 - 出口問題:デバイス/アーキテクチャを総合的に管理できる人材育成の遅れ。
- ・有機太陽電池の開発に出遅れた。欧州が先行、巨大なファンディング。
- ・量子ドットレーザの特性向上と、そのビジネス化の進展。

2. 半導体事業

- ・半導体そのものよりも、エレクトロニクス消費大国である状態は維持・継続。
- ・マーケットニーズを把握できず、適格なデバイスを市場に供給できない。
- ・半導体技術と経営戦略のミスマッチ、戦略的連携関係は弱い、地に着いた国家開発 戦略が必要。

図4-14 過去5年間の進展状況と日本の課題

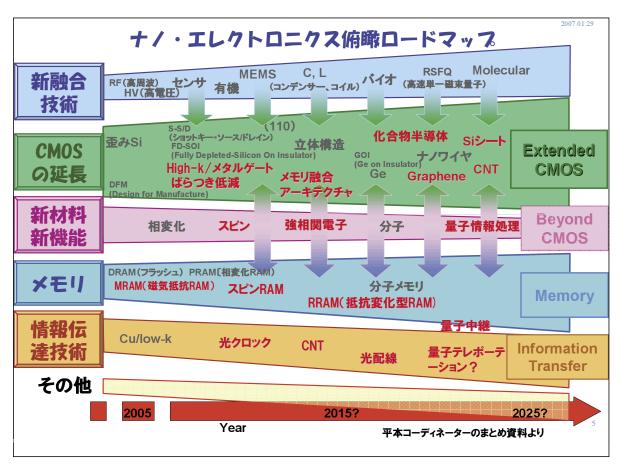


図4-15 ナノエレクトロニクス俯瞰ロードマップ

4.3 ナノバイオ

コーディネータ: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)

コメンテータ:堀池靖浩(物質・材料研究機構 生体材料研究センター フェロー)

●議題設定とプレゼンテーション

堀池靖浩(物質・材料研究機構 生体材料研究センター フェロー)

日本の医療をどのようにイノベーションで改善し、そのために何を果たすべきかを考えるべきである。それをナノテクノロジーで実現するためにどのような制度で実施すべきかを考えたい。

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)

バイオの領域全体に該当するテーマと、ナノバイオという特殊性に該当するテーマがある。後者を取り扱わないと議論が散発してしまいかねない。出口の部分のイメージを明確にしなければならない。20年後の目標として、遠くが開けたイメージで誰もが想像できるような「ブルースカイターゲット」を示したい。

松村光雄(科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー)

バイオテクノロジー産業は 2001 年時点での産業規模が 1.3 兆円であり、2010 年時点では 25 兆円程度になることが展望されている。資金が投入されている以上その数値に近づくよう策を

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

立てていかなければならない。環境や物質資源にナノバイオが利用できるのであれば、今回の議論は医療だけに限定する必要は無いのではないだろうか。出口の部分がどのようなものかに関する議論もすべきである。ナノテクノロジーを医療や物質生産、環境等に役立てていく技術から出口を求めるリニアーモデル志向の考え方と、医療や物質生産、環境等に関する課題の目標達成のためにナノテクノロジーを含めた基礎から応用にわたる研究をするというノンリニアー目的志向の考え方とがある。

岡野光夫(東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 教授)

医療というと保健医療をイメージしがちであるが、検査や予防、健康管理等に関してもテーマとして扱えるであろう。ナノバイオにどのような新しい出口があるのかを見据えて議論すればよい。 保険医療のみに議論の焦点をあてる必要はないと考える。

山下一郎(松下電器産業株式会社 主幹研究員、奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 客員教授) ナノバイオは手段としての名前であり目的にはなっていない。ナノの構造を利用し最終的に医療 に役立てばよいのではないか。微細化やコスト低下化を実現できるナノテクノロジーの構築方法 (ファブリケーション)を目指す考え方(ナノ蓄財での構築方法)と、新しい機能に期待する考え 方とがある。前者を中心に議論したい。企業に所属する立場として注目しているテーマは脳や、認 識の方法、ロボットイズム、家庭内の機器が人間的に反応することができるようになるか等である。

●プレゼンテーション 1

山下一郎(松下電器産業株式会社 主幹研究員、奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 客員教授)

脳の動きをするデバイスの実現には確率的挙動素子が必要であり、蛋白質分子を利用する方法を研究している。現在の自己組織化の研究はシンメトリー(対称性)にとどまっている。生物がもつより高次の機能を模倣することで、新機能の付加を実現していきたい。自己組織化の原因を追究し新規の機能をもつような非対称構造のユニットを研究する必要がある。鞭毛モーターの研究を中心に自己集合を支える理論面とものつくりの実際面を研究している。自己組織化を利用することで例えば燃料電池において電極上に触媒金属を固定的に露出させるのではなく、発電力変化に対応して露出・被覆が動的に伝播する現象が生じるような構造を設計していきたい(図4-16)。

グループ名	バイオジルージ	
短期 (1-5年)	平衡状態を利用するだけの自己集合ではなく、生物自己組織化の原理を学ぶ。 バイオ分子の自己組織化を利用してナノ構造構築を作製に応用する。	
中期 (5-10 年)	自己集合を利用してナノ構造を作製する。(人工タンパク質等の利用) ナノ構造に起因する熱雑音を利用した確率的動作をする情報処理素子の実現	
長期 (20年以上)	脳と同じ振る舞いをするプロセッサの実現	

図4-16 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート

静的状態が動的状態に変化することが自己組織化とどう関係するところに関しては、ナノの構造 を作ることが研究の出口の部分である。脳の解明から作られたデバイスを低エネルギーで実現させ ることを最終目標としている。

芝 清隆 (癌研究会癌研究所 蛋白創製研究部 部長)

人工蛋白質の分野では自己集合的なものは比較的容易に設計することが可能であるものの、実際の生物における複雑な構造や機能で人工蛋白質を作り出す段階には至っていない。生体高分子の分野では分子間の相互作用による複雑な機能の仕組みが解明されることを予想して、人為的に相互作用を天然の蛋白質の中に導入し新規の構造や機能を実現化する研究が行われている。現状としては実際の生物と比較して、自己組織化として物足りない部分がある。どのような相互作用を導入すると、どのような構造や機能が実現するかに関してはまだ未解明である。

短期($1\sim5$ 年)の戦略としては天然蛋白質を改変して人為的に天然蛋白質間の相互作用を導入することにより、高度で複雑な機能を創発させることが展望される。中期($5\sim10$ 年)の戦略としては相互作用を導入するとどのような構造機能が創発するのかを合理的に設計できるレベルに達していることが望まれる。長期(20年以上)の戦略としては人工進化系等とカップルさせ時間的・空間的に構造・機能が相転移や創発をしていくような、複雑な自己組織システムが開発されていることを俯瞰している(図 4-17)。

グルーブ名	パイオグループ			
短期 (1-5年)	天然タンパク質を改変して人為的なタンパク質間の相互作用を導入することにより要素タンパク質の曽和にとどまらない、質的に異なる高度で複雑な構造・機能が創発させることができ、ナノデバイス構築に利用される。要素タンパク質の改変技術は成熟しているので、どのようなナノ構造体が必要とされるか、出口側からの目標設定が重要。			
中期 (5-10年)	生体高分子の超分子構造解析やシステムパイオロジーの、特に合成生物学分野から得られる知識に基づき、どのような相互作用を導入すると、どのような構造機能が創発するかを合理的に設計できるレベルに達する。生体高分子を用た研究から導き出された自己組織化の原理は、そのままモノ(化学化合物や無機材料)にトランスレートし、産業化にななげる。			
長期 (20年以上)	複雑実験系や人工進化系とカップルさせ、時間・空間的に構造・機能が「相転移」「創発」してくような自己組織化システムが開発される。真にバイオミメティックなナノ構造体が自由に作れるようになり、デバイス、ナノ医学分野で利用される。			

図4-17 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート

竹内昌治(東京大学 生産技術研究所マイクロメカトロニクス国際研究センター 助教授)

若手研究者の間では「細胞を創る」という話題がホットである。エンジニアリングにより細胞の機能をもつウェットな機械を創りたいという動機がある。各領域で焦点を当ててきた個々の知見をネットワークとして解明するのがシステムバイオロジーであり、システムが解明された成果により胞を発現させる研究がシンセティックバイオロジーといえる。これらの分野で MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) は重要になる。細胞のシステムを構築することにより再構成して初めて解明されるような蛋白質の機能や遺伝子の機能があるだろう。細胞の設計が可能となれば、再生医療への応用やドラッグデリバリーの素子を設計することも可能になると考えられる。鳥を見て飛行機が作れたように、細胞を見て原理を抽出し機能を再構成する(図 4 - 18)。

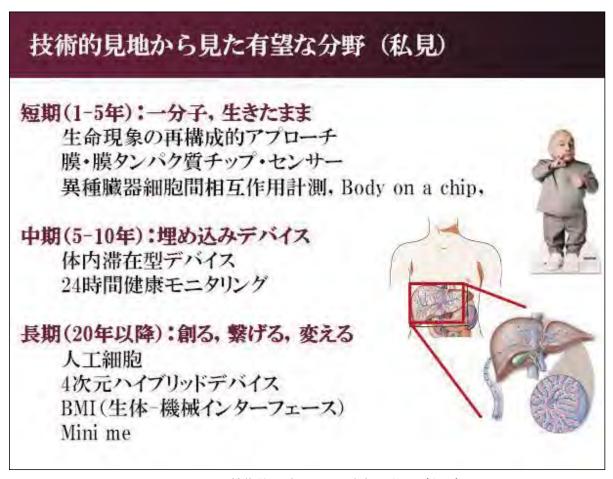


図4-18 技術的見地から見た有望な分野(私見)

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)

細胞の形をただ模倣するのではなく模倣により分析(アナリシス)をし、そこから重要なものが何であるかを原理的に抽出し、それを統合(シンセシス)するということではないか。5年で分析し、次の5年で原理を抽出し、その後の10年で統合をするという流れではないだろうか。

上田太郎(産業技術総合研究所 ジーンファンクション研究センター 副研究センター長)

蛋白質の自己組織化や自己集合の原理が解明されていれば、高度な蛋白質の開発ができるが、現状はその段階に至っていない。蛋白質は普通に使っているとすぐに変質してしまうという問題点がある。高次機能を発揮するような高度な構造を、自己集合や自己組織化により設計する方法が発見されていない。蛋白質による機能素子の作成が困難であれば、天然に存在する蛋白質がもつ機能素子を利用する方が効率的であるというアプローチもとっている。マイクロプラズマというバクテリアを使った研究をしている。同様に生物を利用して有用なデバイスを作成するという研究は、国内外で行われている。生物に由来したシステムは大量生産が容易であり、また安定性があるといった長所がある。だがバクテリアの利用に関しては、何が起きるかわからないという未知性を伴う点が問題である。蛋白質を人工的に組み立てて自己組織化させるとなると、20年後でも可能であるとは言いづらいが、生物そのものを利用すれば有用な応用が可能である。

蛋白質の不安定さに関しては、DNA(デオキシリボ核酸、Deoxyribonucleic acid)を用いる方法が考えられる。自己組織化や自己集合の技術を蛋白質や DNA を使って確立していくことが目指される。自己組織化や自己集合の仕組みが解明されれば、自立走行型の医療用マイクロマシンの実現も中・長期的な目標になるのではないだろうか(図 4-19)。

グループ名	ナノバイオグループ(上田)		
短期 (1-5年)	蛋白質ナノコンボーネントを用いたデバイスのプロトタイプ完成 DNA - ベースのアクチュエータの開発、scaffold化技術の確立 さまざまな生物由来素子の探索 (広く薄く)		
中期 (5-10年)	上記短期目標のさらなる発展 関連他分野の進歩もとりこみつつ、ハイブリッドアプローヂにもとづく具体的な開発 目標を絞り込む。 体内埋め込み・自立走行型マイクロマシンプロトタイプ		
長期 (20年以上)	製品実用化 (製造原理の転換を伴う様は真こ革新的なナノバイオ開発に関しては、現時点で具体的な目標を設定することは困難)		

図4-19 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート

三宅 淳 (産業技術総合研究所 セルエンジニアリング部門 副部門長、東京大学大学院 工業系研究科 応用化学専攻 客員教授)

バイオシステムインテグレーションに関して述べる。ナノテクノロジー自体でものを作るよりナ ノテクノロジーがもつ潜在能力 (ポテンシャル) を様々な面に応用することまで、ナノテクノロジー の領域を拡大して考えてみてはどうか。その場合の要点はほぼ計測機器の問題である。

生命科学(ライフサイエンス)のみならず生命科学が関わる機械産業や情報産業も含めて考えるべきだろう。バイオシステムインテグレーションの研究課題を取り組むことにより、どのような社会還元を実現することが可能かを考える。個々人の特性に対応した健康管理・維持・治療の技術を目指したライフサイエンス、情報工学、ナノテクノロジー等の統合応用といった新規器機装置等の実現。基幹産業に発展できる技術開発。さらに世界標準・スタンダードの創成。これらのことが可能となる。傾向としてはハイスループット(高速処理能力、High Throughput)から、ハイコンテンツ分析(High Content Analysis)に移行している。細胞の巨大情報から分子同士がどのような関係をもっているかを解明しようとしている(図 4 - 20)。

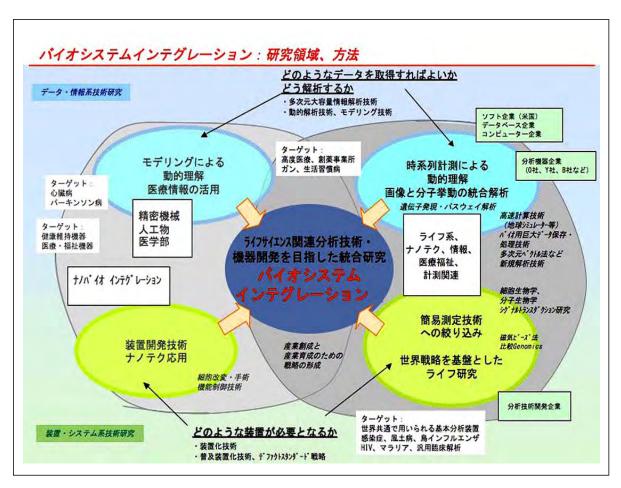


図 4 - 20 バイオシステムインテグレーション:領域研究、方法

相田卓三(東京大学大学院 工学系研究科化学生命工学専攻 教授)

シャペロンの中に一つのナノドットを入れ ATP(アデノシン三リン酸、Adenosine TriPhosphate)を導入することで、シャペロンの機能を人為的に利用する研究を行っている。シャペロンの直径は内側が $4 \sim 5$ nm、外側が $14 \sim 15$ nm である。ドラッグ・デリバリー・システムに応用できないかを考えている。蛋白質が用いられている部分を合成した人工物を用いたい。蛋白質には電気を通さないというデメリットがある(図 4-21)。

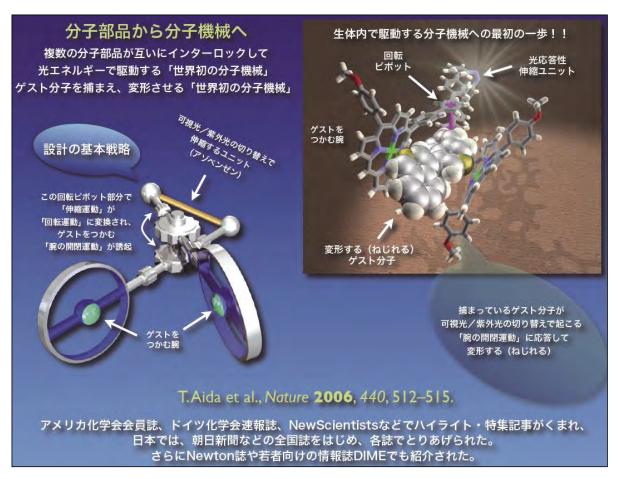


図4-21 分子部品から分子機械へ

●討 論

●縦型から統合型への体制の移行

・現在の方法論は縦型に分けられているが限界に達している。健康や医療と関連したテクノロジーが 要求されている以上統合型でなければ不可能である。トップダウンの見方とボトムアップの見方の 両方を設計しなければ問題を突破できない時代になっている。ナノバイオでは新規の機能を設計し 横断型のアプローチで問題を乗り切っていくべきではないだろうか。

●教 育

・米国で現在の新産業を牽引している人材は、30年前にバイオエンジニアリングの教育を受けた。 日本でも同様に教育を行わないと韓国や中国に凌駕されてしまう。

●学問体系

- ・生化学はすべて海外からの輸入である。日本は学問領域を創始して海外に定着させたことがない。 学問大系がないと新産業は生まれない。
- ・「ナノバイオ」と名づけるかは別であるがある体系を構築しそれにより新産業を創出するということが重要である。
- ・ナノバイオの出所としてシステムデバイス設計、薬物キャリア(ドラッグ・デリバリー・システム)、 再生医療、診断デバイスの4分野が今後、重点的に取り組むべき分野である。

●事前アンケート結果 (ナノ・バイオ) まとめ

ナノバイオ関連した事前アンケート結果に基づき、過去 5 年間の研究開発進展状況と日本の貢献 および日本の残課題テーマと要因をまとめた。またアンケート結果から抽出された中長期研究開発戦 略を示す(図 $4-22\sim24$)。

過去5年間の研究開発進展状況と日本の貢献

- (1)基礎
 - ①ナノ空間科学:
 - ・メソポーラスシリカ、高分子ナノ空間(デンドリマー等)、自己組織化ナノチューブ
 - ②ナノカーボン科学;
 - ・カーボンナノチューブ、カーボンナノホーン、カーボンコイル、フラーレン
 - ③一細胞操作、細胞内一分子操作;
 - ・ナノサージャリー(中村ら、猪飼ら)
 - ④システムバイオロジー:
 - ・現状主導的だが研究者層が薄く国際競争対応に不安
- (2)デバイス化技術
 - ①パイオ分子を用いた自己組織化能と無機材料の接点(パイオミネラリゼーション):
 - ・固体表面上に蛋白質二次元結晶の作成(笹部、永山)。
 - ・チタン・ナノカーボン・酸化亜鉛に結合するペプチド選別と基礎物性解析(芝ら)。
 - ・半導体への応用(山下ら、バイオ分子を用いナノ粒子導入によるメモリー作成と動作確認)
 - ・天然ナノサイズ籠状蛋白中に金属、半導体結晶を形成させる技術が開発
 - ②DNAの自己組織化による二次元パターニング(パターン上に分子を配置する技術の重要なブレークスルー); ・日本の貢献なし
 - ③実運動のアクチュエーターの実証;
 - ・心筋細胞シートを用いた微少ポンプダイアフラム(北森ら)。
 - ・微小管の一次元一方向微小輸送系(上田ら、微小ベルトコンベア)。
 - **④DNAチップ、血液診断等生体物質の分析、** Lab on a Chip、μ-TAS;
 - ・微細加工技術で日本が牽引(研究は盛んだが実用化に遅れ) ⑤飲み込みチップ(イスラエル、消化器系イメージング診断);
 - ・潜在的には多くの企業が着手
- (3)マテリアル
 - ①バイオアフィニティーマテリアル;
 - ·DDS用高分子ミセル。
 - ・細胞接着・剥離制御シート

図 4 - 22 過去 5 年間の研究開発進展状況と日本の貢献

過去5年間の残課題テーマと要因

- (1)マテリアル
 - ①OLED、FET、SC等に有機材料をベースとするリフトマテリアルを用いた試み
 - 耐久性等の実用部分
 - ②燃料電池膜:
 - ■抜本的な戦略不在
 - ③抗血栓材料
 - 難易度の高い材料、地道な研究と研究支援体制
- (2)デバイス
 - ①実運動アクチュエーターの具体的商品イメージが出てこない
 - •基板技術の蓄積段階
 - ②μ-TAS,Lab on a Chip製品が大きな市場形成に至らずイノベーションにつながっていない
 - 企業にとって市場が顕在化しておらず製品化が困難なため大きな投資が出来ない。
 - ・現状分析手法の置き換えで、集積度、信頼性、only one、独創性が明確でなく市民権を得がたい
 - ③DNA解析が十分でない
 - ■マイクロフルイディクスの物理と化学がよくわかっていないためのS/N比が大きい
 - ④埋め込み型人工臓器、体内自走型マイクロマシン
 - 概念先行で走りすぎ。生物学的センスと工学的センスの融合が必要
- (3)自己組織化
 - ①ボトムアップの構造作成技術(自己組織化の過程理論・シミュレーション・設計の統合的研究)
 - ・出たとこ勝負の実現に走りすぎ、分子設計・理論展開等の自己組織化の階層構造解明研究 の欠如

図4-23 過去5年間の残課題テーマと要因

中長期研究開発戦略

- 1. 短期(1~5年)
 - ①出口からの目標設定による天然タンパクの改変による構造/機能創発
 - ②蛋白質ナノコンポーネントデバイス開発
 - ③生命現象の再構成的アプローチ
 - ④異種臓器細胞間相互作用計測
 - ⑤生体分子細胞の動的機能挙動の統合的解明機器開発(短・中・長)
 - ⑥生体アフィニティーマテリアル開発(DDS、抗血栓材料、非特異的相互作用制御の表面設計、分化制御を可能にする表面設計)
 - ⑦細胞培養の加速化
 - ⑧生物自己組織化解明
- 2. 中期(5~10年)
 - ①有用生体分子構造機能創発のための合理的設計手法開発
 - ②体内埋め込み自走型マイクロマシンプロトタイプ開発(治療、診断)
 - ③薬物放出の外部制御可能DDS
 - ④3Dパターン細胞組織構築
 - ⑤薬物活性評価チップ
 - ⑥自己組織化によるナノ構造作成技術
- 3. 長期(20年以上)
 - (1)自己組織化の制御によるバイオミメティックナノ構造体の作成技術開発
 - ②埋め込みマイクロマシンの実用化
 - ③人工細胞
 - ④BMI(生体一機械インターフェース)
 - ⑤外部信号による制御可能生体分子材料
 - ⑥微細表面構造構築による生体特性制御
 - ⑦脳と同等作動のプロセッサ

図 4 - 24 中長期研究開発戦略

4.4 ナノ物質・材料

コーディネータ:細野秀雄(東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター・応用セラミック研究所 教授)

コメンテータ:福山秀敏(東京理科大学 理学部応用物理学科 教授)

●プレゼンテーション 1

畠 賢治 (産業技術総合研究所 ナノカーボンセンター ナノカーボンチームグループ長)

単層カーボンナノチューブがナノテクノロジーの本命と考えられている。ナノカーボンへの産業化ではクラシックカーボンが最大の競争相手である。ナノカーボンにはクラシックカーボンで実現できなかった新しいニッチへの開拓が望まれる。ただし時間はかかるであろう。日本がクラシックカーボンからナノカーボンへのパラダイムの移行を乗りこえられるかが焦点となる。国の継続した支援が必要である。単層カーボンナノチューブは、リチャード・スモーリー氏が開発した HiPCO (High-Pressure Carbon Monoxide) 法による標準品が商業的に成功しているが産業を興すには至らない。2002 年経済産業省主導でナノカーボン技術プロジェクトが開始され、スーパーグロース法を開発した。カーボンナノチューブの大量生産の課題等が一気に解決し、工業化に向かっての期待がもたれている。同プロジェクトは予算額50億円規模で多くの成果を生んだ国家プロジェクトであった。スーパーグロース法では通常のCVD (化学気相成長法、Chemical Vapor Deposition) に水分を添加することで、触媒の寿命と活性を大幅に改善させる。

カーボンナノチューブを成型・加工する際に損傷が与えられ、本来の特性が失われる。われわれの研究グループは、スーパーグロースを利用したカーボンナノチューブ固体を提案している。スーパーグロースを使用した用途開発がさかんに展開されている。カーボンナノチューブを量産し成型・加工して利用するといったロードマップにより産業化を実現しようとしている。カーボンナノチューブを利用して半導体等のデバイスを作成するためには制御構造技術や成長制御技術が必要になる。JSTや大学が主導し20年間のスパンで取り組むべきである。量産技術は10年程度の短期・中期的スパンで、経済産業省や独法、企業等が主導で推進しなければならない。

カーボンナノチューブの大きな課題をまとめると中期的には単層カーボンナノチューブの工業的 量産、用途開発、成型・加工技術が挙げられる。長期的には構造制御成長技術、金属 - 半導体の分離、直径や配向性やカイラリティ制御が挙げられる。カーボンナノチューブは特段に万能ではない。 クラシックカーボンも競争相手として存在する。既存のコンポジットに混合して導電性を付与する ことがまず考えられる。メカニカルな性質を利用する用途は時間がかかるであろう(図4-25)。

[1]

幸二(理研) 学総括コー

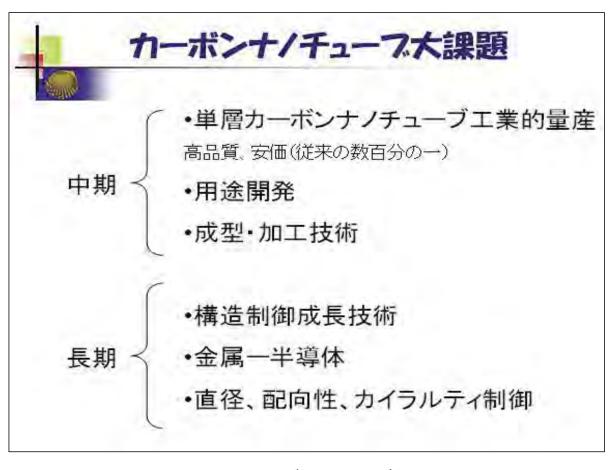


図 4 - 25 カーボンナノチューブ大課題

●プレゼンテーション 2

中山喜萬(大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 教授、大阪府立大学 工学研究科 特任教授)

カーボンナノチューブの強度に着目した研究を行っている。カーボンナノチューブをカートリッジ化し個々に取り出せるようにする前段的な部材の研究開発と、走査型電子顕微鏡を操作しカーボンナノチューブによる AFM(原子間力顕微鏡、Atomic Force Microscope)探針を作成する開発をしている。また TEM(透過電子顕微鏡、Transmission Electron Microscope)による制御で、コイル状のカーボンナノチューブを電流で直線状にするといった現象を発見している。一本のカーボンナノチューブを共振器として質量を量るといった応用を研究している。フラットなシリコンの上に特殊なナノカーボンを作る方法を発見した。鉄と基板との間に ITO(酸化インジウムスズ)を挿入し、"ビーズ"が付いたナノカーボンを創出した。各国の軍や自衛隊からサンプル提供の申込があった。ただしわれわれは社会生活に役立つ電磁は吸収材としての展開を主眼に置いている。

2001 年から 3 年間ナノカーボンに期待される次世代技術を創出する目的のもと、プラザ大阪で研究活動をした。その成果により現在単層カーボンナノチューブの大量合成を進めている。 2005 年 1 月から 5 年間、ブラシ状とコイル状のカーボンナノチューブと大量合成と応用展開のためのプロジェクトが、JSTの地域結集型共同研究事業(地域 COE)として開始している。

CRDS-FY2007-WR-07

カーボンナノチューブの応用範囲は、エレクトロニクス、エネルギー・環境、MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)、高機能材料などの各分野に及ぶ。

中長期研究開発の見通しを示す。短期的 $(1\sim5$ 年)にはナノカーボンの長尺は数十センチとなっているであろう。中期的 $(5\sim10$ 年)にはナノカーボンの合成に関しては数メートルの長尺化が実現しているであろう。またカイラリティ制御の課題を挙げる。ナノカーボンの加工・アッセンブル技術に関しては塑性変形や接合の領域を追究していきたい。エネルギーデバイスでは実用的な電子回路や発電デバイスの研究開発が展開されるであろう。長期的(20年以上)には宇宙エレベータ構想等がある。強度を活かしたロープや電磁波吸収剤等をターゲットとして研究している(図4-26)。

	ナノ材料	グルー	プ
短期 (1-5 年)	ナノカーボン(こついて 1)ナノカーボンの合成 ・数十センチメートル級長尺化 ・直径、層数制御したONTの低価格化 ・螺旋性制御ナノコイルの大量合成 2)ナノカーボンの高機能化,複合材化 ・CNT高機能複合材 ・紡糸燃糸によるCNT繊維 ・コイル複合材:電磁波吸収材 3)ナノカーボンの加工・アッセンブル技術 ・マニピュレーション、計測技術の進展 ・ナノカーボンの精密な加工技術、アッセンブル技術 4)電子デバイス ・電子エミッター(ランプなど) ・センサデバイス 5)エネルギーデバイス ・高容量と高速充放電特性を備えた電気二重層キャバシター	中期 (5-10 年)	1)ナノカーボンの合成 ・数メートル級長尺化 ・カイラリティ制御 2)ナノカーボンの高機能化、複合材化 ・耐候性高強度CNT繊維,ローブ、バネル 3)ナノカーボンの加工・アッセンブル技 術 ・自己組織化的な加工、アッセンブル 4)電子デバイス ・実用的な電子回路 5)エネルギーデバイス ・発電デバイス
		長期 (20年以上)	1)ナノカーボンの合成、高機能化 ・超長尺化(キロメートル級) ・超軽量で〜Tpaの強度をもつCNT部を 2)ナノカーボン応用 ・高集積CNT電子バイス ・ナノカーボンを用いたナノロボティクス ・ナノカーボンを用いた巨大建造物

図 4 - 26 ナノテク・材料分野の各領域における中長期研究開発戦略シート

●プレゼンテーション3

清水敏美(産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトニクス研究センター センター長)

カーボンナノチューブの分野で分子ボトムアップの研究をしている。ナノ空間を作り大量の水やナノ構造を閉じ込める研究をしている。有機ナノチューブからなる白い粉末状固体を約 100 グラム合成することに成功した。量の豊富さは産業的な観点等から重要である。

1993 年 NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のアトムプロジェクトで、分子ボトムアップ創製技術を提案した。その後 1995 年より産技・独創的高機能材料プロジェクトを行い、

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

CRDS-FY2007-WR-07

幸二(理研) 学総括コー

研り

2000年にJSTのCREST(戦略的創造研究推進事業)で研究をした。現在はSORST(戦略的 創造研究推進事業 発展研究、Solution-Oriented Research for Science and Technology) で研究を進めている。

化学・バイオ分析機器の微小化と集積化動向として、現在まで約 1020 ~ 1025 個の分子を閉じ込めることが可能である。10nm 程度の精度でチューブの内径を制御する技術を目指している。一方で個々のチューブを組織化、配列化することも課題である。最終的には単一細胞の分析が可能なマイクロキャピラリーに詰まるナノチューブの作成(トップダウン技術とボトムアップ技術を融合したナノ・アット・マイクロ)を念頭においている。

中・長期研究開発戦略シートを示す。短期($1\sim5$ 年)では原子や分子に組織化のための設計図をプログラムさせたボトムアップ技術が重要となる。ナノ・アット・マイクロに関してはトップダウン構造でつくられた構造の中で分子組織化をする。テーラーメイド型分子組織体は実現した。電子顕微鏡から光学顕微鏡への移行も考えられる。中期($5\sim10$ 年)ではマイクロ構造中に高度に配列化・集積化する手法の最適化を目指す。研究の対象が分子から生体分子、遺伝子、ニューロンへと移行していくであろう。脳を作るという研究に近づくのではないだろうか。長期(20年以上)では 1 個の細胞で達成する超極微量分析や高分解能分離を可能にしていたい。"Brain is a complex tissue of dense interconnected cells consisting of diverse intelligent molecules." という言葉の示す通り、分子群の階層的組織化の最終産物としての脳研究の分野に自己集合が関わっているのではないだろうか(図 4-27)。

AIST

界面ナノアーキテクトニクス研究センター



中・長期研究開発戦略シート

短期 (1~5年)

半導体微細加工技術の着実な進歩によりコンピュータ用チップの集積度は著しく増大している。同様に、生体分子等のバイオ分析デバイス、例えば中空シリンダー状の分析装置の大きさも数cmのカラムクロマトグラフィー用ガラスカラム、数mmの高速液体クロマトグラフィー用ステンレスカラム、100mmのガラスキャピラリーやマイクロチップデバイスといった具合に、上記の微細加工技術の進歩と同調してデバイスサイズの微小化が進んでいる。現在ではフェムトモルあるいはアトモルレベルの極少数の分子種が分析可能となっている。しかし、トップダウン手法に基づく微細加工技術では物理的な制御限界(Red Brick Wall)のために最小加工寸法が数十nmと言われ、バイオ分析デバイスにおいても 1 mm以下の一次元中空シリンダー構造を直接微細加工するに心医界がある。コンピュータ用チップの更なる集積度の増大化と分析デバイスの更なる微小化と集積化のためには、プレークスルーとなる革新的手法の確立が求められている。ボトムアップ手法はその先鋒的手法であり、原子や分子に創版化のための設計図をあらかじめプログラムさせ、それを制度化して10~100mmサイズのナノ構造を組み立てる技術である。以上の背景から、自己組織化技術を代表とするボトムアップ手法の特性を利用した新たな技術革新を行う。

中期 (5~10年)

各種の一次元有機ナノ構造を分子篩として実装したキャビラリー電気泳動を実際に行い、DNA、RNA、タンパク質に対する分離挙動を既存の分子篩と比較する。そのために、目的とする官能基を内外表面に自在に配置した有機ナノチューブやナノファイバー類の一次元中空シリンダの空間サイズを2005年には50nmレベル、2010年には10nmのサイズ領域で自在に制御できる自己組織化技術を目指す。同時に、それらナノ構造をマイクロチップやガラスキャビラリーなどの100mmスケールでのマイクロ構造中に高度に配列化・実積化する手法の最適化を目指す。

長期(20年以上)

自己組織化(ボトムアップ)で形成したナノ構造を、微細加工技術(トップダウン)で加工したマイクロ構造中に固定化、実装したデバイスシステムの開発を行うことにより、新たな技術革新を図りたい。こうして、現在ナノバイオ分野で用いられている微小分析システムやマイクロチップデバイスなどと比較して、(1)約1000億以上のナメ構造要素の愚葉積化、(2)1000億以上のマイクロチップの短時間、省エネ作成、(3)対象分子の検出・同定における10。倍以上の高感度化を達成する。これにより、期待されるアウトカムは、1)単一細胞の成分分析が現状では106個の細胞(容積にして1μ)が必要であるのを、たった1個の細胞(容積は1p))で達成する過程調量分析や高分解修分離が可能に、2)マイクロ・ナノチップ類の高集積化、超配列化、高速化、バイスループット化が可能に、3)DNAやタンパク質などの生体物質の超高感度検出と同定分析が可能になる。

1000000人和美技術総合研究所

図 4 - 27 中長期研究開発戦略シート

CRDS-FY2007-WR-07

細野秀雄(東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター・応用セラミックス研究所 教授)

透明酸化物機能材料という自然界の構造を利用する研究をしている。人類はありふれた元素を使用して、文明を創ってきた。豊富な資源を使い透明性を生かしたアクティブ機能の開拓を目指している。石灰とアルミナと水で電子機能材料を創ることが目標である。セメント鉱物 CA12A7 は 1 トン 1 万円のコストにすぎない。この物質に電子を $5 \times 10^{20} \sim 2.3 \times 10^{21}$ 入れると、絶縁体は半導体へ変化する。エレクトロエミッションでの仕事関数 (ワークファンクション) は 0.6 となる。水、酸素、カルシウム、アルミニウムからなる平行平板でこれだけの能力をもたせることが可能である。

TFT (薄膜トランジスタ、Thin Film Transistor) のジャイアントマイクロエレクトロニクスに、n型の AOS (アモルファス酸化物半導体、Amorphous Oxide Semiconductor) を用いたフレキシブルトランジスタを開発し、有機材料を用いた場合よりもはるかに高い移動度を実現している。移動度等の性能の高さのみならずプラスチックの上に付加できる容易さ等の理由で、企業等から数多くのオファーを受けている。優良な技術は(大学ではなく)企業が注目をする。

中・長期研究開発戦略シートを示す。短期($1\sim5$ 年)ではフレキシブルディスプレイの産業化に使える半導体材料が材料分野に閉じない形で出現することが重要である。照明に使える面発光材料(有機に限定しない)も求められる。ITO(酸化インジウムスズ、Indium Tin Oxide)膜の代替材料への取り組みや非白金系燃料電池触媒の開発も重要である。プロセス技術は低温プロセスでなければならない。無機固体物質の表面あるいは異種物質の界面の理解と制御・応用、さらには無機半導体・有機界面の理解と制御にも取り組まなければならない。酸化物の励起状態の緩和過程を活用した新現象の開拓も視野に入る。中・長期(5年以上)では希少元素を使うことで実現していた機能をありふれた元素を使って実現を目指す研究が最も重要であろう(図 4-28)。

基礎研究と応用研究が相互作用しあいながら進めていくべきであろう。アモルファスシリコン研究開発の事例を鑑みると、実用化された後も 10 年間産業や分野が成長するような科学的側面の支援が必要である。海外との競争に関して日本の企業には国際間で競争をさせなければならないと考える。競争の中で強い企業が残るシステムにしなければならない。

研究開発戦略シート

- □ 短期(1-5年)
 - ●フレキシブルディスプレイの産業化に使える半導体材料 (材料屋の中で閉じたら駄目)
 - ●照明に使える面発光材料(OLEDに限定しない)
 - ITO代替材料、
 - ●非白金系燃料電池触媒
 - 低温プロセス(デバイス応用が可能な化学反応プロセス)
 - ●無機固体物質の表面/異種物質の界面の理解と制御・応用
 - ●無機半導体・有機界面の理解と制御
 - 酸化物の励起状態の緩和過程を活用した新現象の開拓
- □ 中·長期(5年以上)
 - ●希少元素を使うことで実現していた機能をありふれた元素を使って 実現を目指す研究(ナノ構造、欠陥構造、界面・表面制御と物性予測)
 - ●セラミックス超塑性の新しいアプローチ(電子励起)
 - 室温超伝導

図 4 - 28 研究開発戦略シート

●プレゼンテーション 5

大林元太郎 (東レ株式会社 滋賀事業場 理事)

素材を使ってものを作る立場で述べる。産業応用にはナノ構造を創ることによる応用、ナノ物質の入手による応用、表面構造のナノレベル制御による応用といった考え方がある。

極電材料に関しては繊維の薄膜化、フィルムの重層化、従来樹脂のナノレベルでの材料混合といった技術が挙げられる。カーボンナノファイバーの表面欠陥を抑制すると強靭なファイバーが実現する。またフィルムで5nm程度の積層板を作り上げると強度が格段に上がる。さらに異なるポリマーを分散する技術等を用いると、ナノレベルまで混合したり入り組んだ構造がつくったりするナノアロイ技術を推進している。ポリ乳酸を用いた技術では物体が白濁するが、ナノアロイ技術では透明な物体を作成できる。また連続アロイにすればフレキシブルなフィルムも実現する。粒子を完全に凝集させずに分散させる技術もセンサ上のレンズ等に応用されている。温度が変化しても屈折率が変わらない材料を同様の手法で実現化させていきたい。表面上に孔の空いた膜を開発し水道水中のホウ素を遮断する技術を研究している。農薬や砒素の遮断にも応用が可能である。燃料電池の分野では非フッ素系の膜の実現を5年以上の視野に入れている。

優れたナノ物質を提供してもらい従来にない新規の材料を開発していきたい。材料を量産する場合に質が振れることがある。その場合は原形を復帰する必要がある。そのためには原理原則の把握が必要である。量産しても一定の質が保たれる物質を提供してもらいたい。

企業にとってナノ製造技術は基本的には企業の力で実行する。ただし機械が高価である等、リスクが高い場合は国の支援を請うことも考えられる。また物理学や新規のナノ材料の創出等の面にも期待をする。

CRDS-FY2007-WR-07

●プレゼンテーション 6

福山秀敏(東京理科大学 理学部応用物理学科 教授)

総合科学技術会議の分類では「ナノテクノロジー・材料」となっているが、「ナノサイエンス・ナノテクノロジー・物質材料」とすべきである。科学があって技術があると考える。材料とは役に立つようになった物質のことと捉えている。基礎的な物質科学があればこそ、誰もが信頼できる材料ができる。中心テーマとして「強相関」「分子」「界面」を挙げたい。分子系の物性や界面は、基礎科学の観点から非常に興味深い。同時に材料分野の研究としても非常に重要である。表面・界面では「電極問題」は、「物質」から「材料」への発展の際に避けて通れない問題である。解決すれば工学分野に大きな影響がある(図 4 - 29)。

[Material Scienceにおける大きなテーマ]

1)「表面・界面」:象徴的には「電極問題」

「物質」が「材料」に進化する際に避けてとおれない。基礎科学と工学双方の視点から重要かつ 興味ある問題が多い。

2)「分子系の物性」: 周期的な分子性結晶の研究 の自然な延長上にある非周期的分子凝縮系の 物性研究。典型例が「生体関連物質」。 基礎科学である物性物理学・化学・生物学の接

を破付子である物性物理子・14子・12物子の接点。

図 4 - 29 Material Science における大きなテーマ

分子系の物性分野で肝要な点は、周期的な分子性結晶の研究の自然な延長上にある非周期的分子 凝縮系の物性研究である。典型例が「生体関連物質」と言える。「電極問題」には二つの側面がある。 構造が安定になるかという側面と、電気が流れるかという側面である。表面にある金属原子の結晶 面の状態等は極めて重要となるため、その段階まで立ち返って電子状態を検討すべきである。

物質的な問題は基礎科学としてはさらに大きい。蛋白質の電子状態の究明等といった物性論は、物理学のみで閉鎖的にならずに、化学やバイオの分野と連携しなければならない大きな挑戦的テーマであろう。 JSTの CREST (戦略的創造研究推進事業) の活動として、月一回異分野間での勉強会を開催している。また 2007 年 4 月には、理化学研究所 (分子アンサンブル) 主催の研究会「分子系の物性ー構造と電子状態」を実施する。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

●グループ発表へ向けてのコンセンサス

- ・以下の3点である。「1、日本固有のナノテク材料戦略があったと思うか」「2、日本は現在、ナノ テク材料の分野で世界の何位であるか」「3、その傾向は5年後も保つことができるか」。
- ・日本は資源枯渇の国である。日本固有の問題として考慮されるべきである。

●事前アンケート結果(ナノ物質・材料)まとめ

過去5年間の研究開発進展状況・残課題等

- ①自己集合化・分子ボトムアップ技術 (バイオ関連は、ナノバイオ分野でより詳しく)
 - ・有機系ナノチューブ、ナノチャネルでは、日本の有機合成伝統が生きて世界を牽引。
 - ・まだ何か出来るところまで行っていない。多くは、基礎固めと、応用の可能性を探る段階。
- ②異種物質・状態間の界面機能の基礎研究、⑥理論・シミュレーション手法の深化(マルチスケール、マルチフィジックス)
 - 重要性が認識されていながら、解決されていない界面問題、電極問題。
 - ③次世代エレクトロニクスのためのナノ構造材料 (→特に有機デバイス)
 - ・有機EL:材料開発からデバイス化まで日本牽引。しかしコスト競争で韓国に負ける可能性大。
 - ・今後は有機トランジスタへ。有機太陽電池は日本遅れる。
 - ・既存の無機エレと本当に戦えるのかを真剣に考えるべきとき。LCD超えられるのか、耐久性は?
- ④省エネ・省資源・環境対応の希少元素、規制元素の代替・減量技術
 - ・「ユビキタス元素戦略」として、スタート。日本オリジナルの発想。最重要課題の一つ。 透明酸化物半導体等。
- ⑨日本が世界をリードしてきた革新機能材料
 - ・繊維のナノサイズの欠陥制御による炭素化繊維複合材料の高強度・高弾性率化
 - ・強相関電子材料、TiO。光触媒、ZnO薄膜等、世界をリード。
 - ・分子性結晶、強相関系研究は世界トップ。
- (10)ナノカーボン
 - ・フラーレン、CNT: 多量合成で日本は大きな寄与。ただ、ナノカーボン(特にCNT)の キラーアプリケーションがはっきりしない。カイラリティ制御等の困難な問題も山積。
 - ・CNT-FEDは完全な失敗。LCD, PDP等に勝てない。

図4-30 過去5年間の研究開発進展状況・残課題等

中長期研究開発戦略

1. 短期(1~5年)

- 組織体。 ・フラーレン:低価格による自動車産業等への実用化。金属内包フラーレンのMRI造影剤への応用
- ・プローン:に価格による自動単度業等への美用化。金属内包プラーレンのMRI道彰剤への心用。
 ・CNT:実用化:CNT複合材料の開発。導電性付与。熱伝導性付与。透明導電性CNTフィルム。電磁波吸収材料。CNT一FED:情報表示灯。ヘリカル電磁波吸収剤、紡糸撚糸高張力繊維。基礎研究:CNT電子デバイス基礎プロセス。半導体電子デバイス、光学デバイス、CNT一MEMS等の製造基礎プロセス開発。CNTーVIA配線。合成法:単層CNT工業的量産の実現(従来よりも価格を数百分の一、量はトン/年単位)。半導体一金属作り分け技術。長さ、カイラルティを評価する技術開発。直径、品質、長さ等を制御して合成する技術。数十センチメートル級長尺化。直径、層数制御したCNTの低価格化。螺旋性制御ナノコイルの大量合成。
- ・フレキシブルディスプレイの産業化に使える半導体材料。照明に使える面発光材料(OLEDIC限定しない)。ITO代替材料。非白金系燃料電池触媒。低温プロセス(デバイス応用が可能な化学反応プロセス)。無機固体物質の表面/異種物質の界面の理解と制御・応用。無機半導体・有機界面の理解と制御。酸化物の励起状態の緩和過程を活用した新現象の開拓。

2. 中期(5~10年)

- ・階層を超えた自己組織化(例えば、分子→生体分子→遺伝子、ニューロン)。自己組織化対応の新規デバイスの概念。10nmのサイズ領域で自在に制御できる自己組織化技術。同時に、それらナノ構造をマイクロチップやガラスキャピラリーなどの100mmスケールでのマイクロ構造中に高度に配列化・集積化する手法の最適化。
 ・フラーレン:価格が現在の10分の一程度に。カーボンブラックやグラファイトの多くをフラーレンに置換。金属内包フラーレンの合成収率向上、市販化と、X線造影剤やPETへの応用・実用化。
- ・CONT:実用化:低集積CNTフレキシブルデバイス。CNTディスプレイ。CNT導電性フィルムを電極として用いた電子デバイス。CNT小型蓄電デバイス。基礎研究:CNT MEMS等のCNT電子デバイス製造プロセス開発。合成法:複数の構造を制御したCNT合成。数メートル級長尺化。カイラリティ制御。
- ・希少元素を使うことで実現していた機能をありふれた元素を使って実現を目指す研究(ナノ構造、欠陥構造、界面・表面制御と物性予測)。

3. 長期(20年以上)

- ・自己組織化(ボトムアップ)で形成したナノ構造を、微細加工技術(トップダウン)で加工したマイクロ構造中に固定化、実装したデバイスシステムの開発。1)1個の細胞(容積は1pl)の成分分析(超極微量分析や高分解能分離)、2)マイクロ・ナノチップ類の高集積化、超配列化、高速化、ハイスループット化、3)DNAやタンパク質などの生体物質の超高感度検出と同定分析。脳は分子群の階層的組織化の 最終産物。
- ーレン:価格が現在の100分の1程度に。カーボンブラックに代わるタイヤの補強材(年間数千トン)。 リュウマチを治癒する薬などの 薬剤への応用。
- ・CNT: 実用化: CNT高集積化電子、MEMSデバイス。CNT VIA配線。基礎研究: 研究 カーボンナノチューブ電子デバイスの製造プロセスの確立。集積化技術。大面積カーボンナノチューブウェハーによる製造技術。合成法: カイラルティ制御。超長尺化(キロメートル級)。・セラミックス超塑性の新しいアプローチ(電子励起)。室温超伝導。

図4-31 検討すべき重要課題

[5] 第三部 全体討論/総括コーディネータ:茅 幸二(理研)

5.1 ナノテク施策のこれまでと今後・ナノテクと DNA のこれまでと今後/川合知二(大阪大学 産業科学研究所 所長、教授)

これまでのナノテクンロジー施策を振り返る。最大の転機は 2000 年 1 月 23 日に米国が発表した国家ナノテクノロジー戦略であった。しっかりとした基礎的研究をもちながらの挑戦的研究で、よい形の施策をとっていた。米国の同戦略は日本にも影響を及ぼした。2001 年 4 月に開始された第二期科学技術基本計画では、「ライフサイエンス」「情報通信」「環境」「ナノテクノロジー・材料」が重点 4 分野として決定された。それまでに総合科学技術会議の前身である科学技術会議(吉川弘之座長)は、ナノテクノロジー重要研究領域マップを作成していた。「5 ~ 10 年後の実用化、産業化を目指す研究開発」「10 年~ 20 年先まで展望した挑戦的な研究課題」「個人の独創性を重視した萌芽的研究」を区分けし、分野では「情報通信」「環境」「ライフサイエンス」「材料」とした。5 年経過した現在、このマップを俯瞰すると、相当部分がこの方向性で推進されていることがわかる。その後科学技術会議は、2001 年 4 月より総合科学技術会議に移行し、ナノテクノロジーを重点領域に設置し第二期科学技術基本計画の重点 4 分野が成立したわけである。

以上のような背景のもと、文部科学省は、ナノテクノロジーの推進体制を、分野別、目的別、フェーズ別に整理した。他にナノテクノロジー総合支援プロジェクトで全体制を整えるなどのネットワークづくりも行った。大学や大学院には、運営費交付金や学術費が予算措置されている(図 5 - 1)。

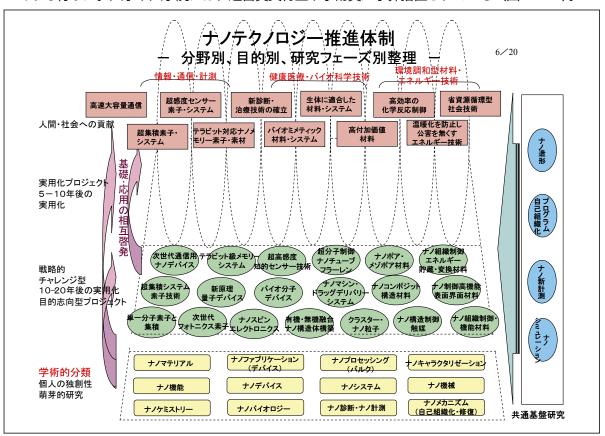


図5-1 ナノテクノロジー推進体制-分野別、目的別、研究フェーズ別整理

CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

一方経済産業省も COE(卓越した研究拠点、Center Of Excellence)とネットワークを充実させる施策を推進している。NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)でも NBCI(ナノテクノロジービジネス推進協議会、Nanotechnology Business Creation Initiative)と連携し関連350 社を集合させている。

今後の重要課題について述べる。重視される課題の一つとしてユーザーズファシリティが考えられる。日本の現在のファシリティは小規模である。試作品まで作製可能な施設が望まれるであるう(図 5 - 2)。また研究の方向性として重視される課題は技術だけが先走りしないよう、人間や地球のことを考慮したナノテクノロジーといえるであるう。ヒューマンフレンドリーなナノデバイスの開発は重要な切り口となる。環境・エネルギー問題を解決するためのナノ材料も今後さらなる発展が必要である。これらの点からリスクマネジメントの問題も重要視し、市民に情報を伝えていくことが求められる。

ナノテクノロジーとバイオテクノロジーの関係も大きな方向性として発展していくであろう。トップダウン型とボトムアップ型の技術では、後者の方が学問体系として未熟な点が多い。ナノテクノロジーと材料の視点で俯瞰すると、自己組織化に関しては、現在は(自己集合的なボトムアップ構造の形成という「第1ステージ」を超え)、階層を超えたナノ構造形成の創発という「第2ステージ」の育成が始まっている。しかしながら創発構造の相転移を利用した機能性ナノ構造体を研究する「第3ステージ」には達成していない。ボトムアップ技術の研究として自己組織化の理論、分子素子の設計、構造体の構築が重要となる。

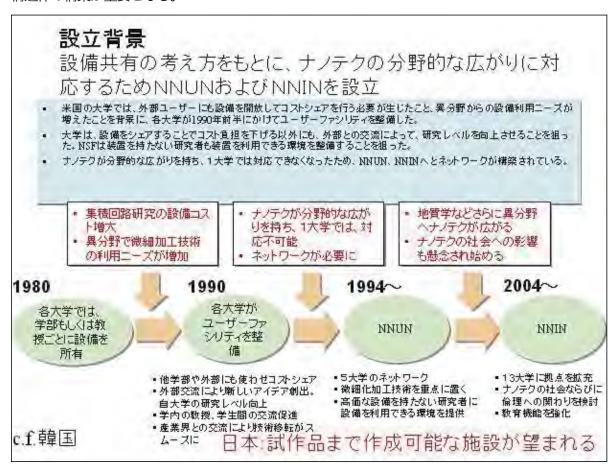


図5-2 試作品まで作成可能な施設が望まれる

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

●質疑・討論

●医療分野における横断的システム

- ・医療分野は厚生労働省の担当という縦型行政の構造が続いており、ナノテクノロジーと医療との関連性についてはシステム的な欠陥が存在している。学問体系の再編成のような問題に対応する点を含め、横断的なプログラムをどうするのか検討していかなければならない。
- ・2002年に内閣官房が主導し政府一丸を目指したタスクフォース(ナノテクノロジー・材料戦略 策定タスクフォース)に出席した印象では、担当領域に固執しがちな厚生労働省よりも、経済産業 省や文部科学省が柔軟に対応していくべきだという認識をもっている。大学内部ではたとえば大阪 大学では、ダブルメジャーといった教育形態をとっている。大学間での人材教育連携のほうがより 重要であるが、進捗していない現状がある。
- ・JST一CRDSでは井村裕夫主席フェローのグループが、ICR(統合化迅速研究、Integrative Celerity Research)を推進している。

●ナノテクノロジーとバイオテクノロジーの融合

- ・半導体技術では欠陥が無いことが前提であるが、バイオテクノロジーでは欠陥があるという前提である。両者の前提の差異をどのように克服していくかが大きな技術的課題となっている。解決策としては面積をローカライズする方法と、欠陥が存在しても機能するような製品を作製する方法とが考えられている。
- ・デバイス分野では精密に機能するプロセッサと、全体を判断するコープロセッサ(補助処理装置) を統合させれば、まず全体を捉え次に大事な箇所を処理するという形態をとれるという考え方があ る。トップダウン技術もボトムアップ技術も両方が重要だが、ボトムアップ技術には階層を超えた 自己組織化の発展が必要だと考える。

●自己組織化の研究

- ・自己組織化を、材料面から研究する集団と統計力学などの物理学的側面から研究する集団との間に は、溝がありいまだに交流がほとんどない。
- ・アプローチの異なる研究集団の会合を根気強く継続していけば、問題意識や問題点も共有できるようになると考える。

5.2 第二部グループ討論まとめ

5.2.1 ナノエレクトロニクス/平本俊郎 (東京大学 生産技術研究所 物質・生物部門 教授)

ナノエレクトロニクスはナノテクノロジー分野の市場規模で半分以上を占めるといわれている重要 な部分である。MOS (金属酸化物半導体、Metal Oxide Semiconductor) トランジスタのデバイ スサイズは微小化しており、2006 年には 28nm のゲート長になるとされている。シリコンそのも のがナノテクノロジー領域に含まれる。 1980 年代後のデバイスには CMOS (相補形金属酸化物 半導体、complementary MOS)の他バイポーラトランジスタや化合物半導体などの技術が進展 しており、これらが集積化をしてRAM(Random Access Memory)やロジック回路が作成された。 現在は CMOS の完成度が非常に高いので独走している状態である。 現在のナノテクノロジー研究に はトップダウン的思考が欠如している。将来の状況を考えて必要な技術を求める見地が欠落している。 ワークショップの第二部の討論では研究ニーズと研究シーズのマッチングを計画した。CMOS の領 域では将来自己組織化などを利用してプロセスが変わる可能性がある。さらに先の未来へ進むと非 CMOS で電荷を利用して「1・0」を記録する方法は残されるだろう。その先の未来へ進むと、電荷 の有無から離れ別の機能を演算に利用する道筋が開かれると予想される。現在の研究では CMOS の 伸張を目指す CMOS 延長線上の研究、CMOS とは異なる形態を目指す Beyond CMOS の研究、 さらに CMOS と非 CMOS を融合させる欧米で More than Moore と呼ばれている考え方に近い 研究の3つの軸が存在する。メモリはメモリーセルにナノテクノロジーや新材料が導入されるため、 CMOS と区別して考える必要がある。メモリの周辺には CMOS が使われるのが前提であるので、 メモリは新技術と CMOS との融合技術である。演算は CMOS が行なうので、技術開発での飛躍的 段差はない。配線は研究が進んでいない分野である。Cuの low-k(低誘電率層間絶縁膜)材料によ る配線技術の延長線上にある技術が見あたらない。

第二部の議論の末、グラフを作成した(図 $5-3\sim6$)。

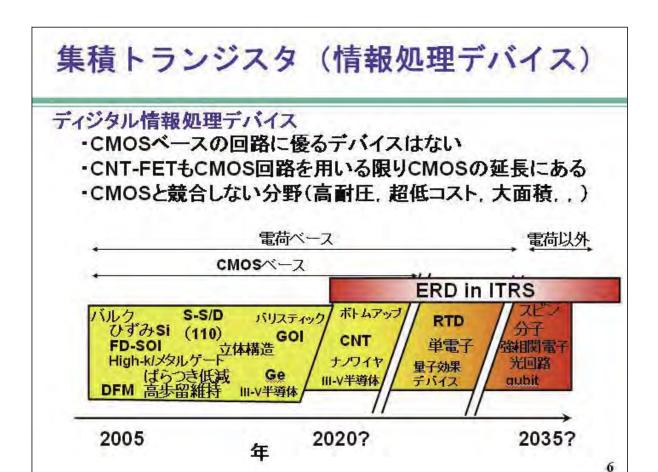


図5-3 集積トランジスタ(情報処理デバイス)-1

最重要項目は CMOS 延長線上の技術である。ただし CMOS に More than Moore 的発想で様々な MEMS やバイオテクノロジー技術などが融合してくるものと予想される。シリコンベースでありながらそのベースの上に様々な技術が載るであろう。Beyond CMOS の技術はスピンや強相関量子情報等の技術が、最終的には CMOS と融合すると予想される。これらの融合された技術は CMOS 延長線上の技術となるが、一方で CMOS と融合されない技術は Beyond CMOS の技術として残されるであろう。

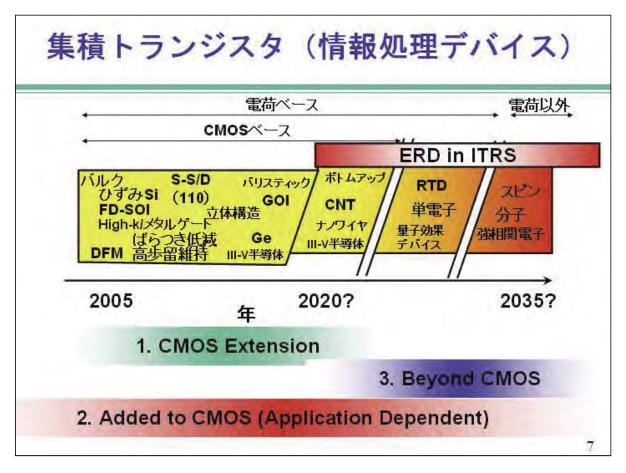


図5-4 集積トランジスタ(情報処理デバイス)-2

メモリに関しても新技術が導入されさらに発展するだろう。配線技術に関してはカーボンナノ チューブなどの技術が入ることが予想される。すべてのエレクトロニクスで共通的に重要な点は処理 速度がありながら非常に低パワーでありかつ低コストであるという状態である。

第二部のグループ討論ではロジック回路とメモリが完全に融合され、トランジスタの付近にメモリがある形態をとると基本設計が大きく変わる可能性も話された。ナノエレクトロニクス分野を俯瞰して日本の方針を決めていくためには、研究ニーズに関して議論していくことが非常に重要となる。今後ナノエレクトロニクス技術を推進させる理由のひとつに、ユビキタス社会の到来を考え消費電力を格段に下げる必要性がある。

ナノテクノロジー研究体制の方向性に関しては、米国ではベンチャーを起業し製品化を目指す風潮があるが、日本では研究がある程度成熟してもさらに研究を深化させる点に差があるという話が出された。ベンチャー起業の推進に関して内閣府やJSTから強く働きかけてもらうことが望ましい。数多くベンチャーが起業されれば、そのうち何社かは成功するであろう。コーディネータの不足を解消することも重要である。ファンドリーやファシリティに関してはシリコンに様々なデバイスを載せるオンシリコン型の施設が望ましい。



図5-5 メモリ (情報記憶デバイス)

年

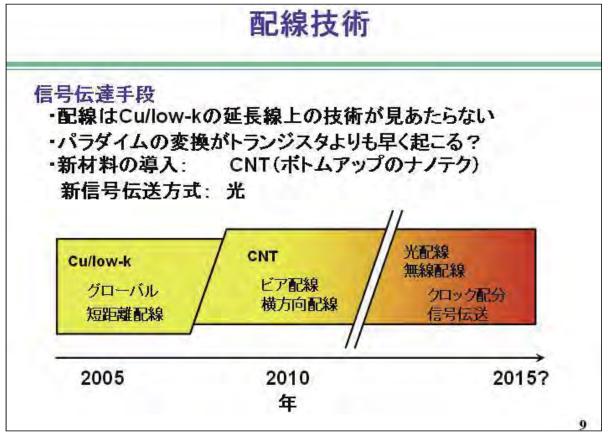


図5-6 配線技術

●質疑・討論

●シリコン技術

- ・シリコン材料中心の体制は今後長いスパンで続くのか。
- ・シリコン半導体を超える技術の出現は一朝一夕には実現しづらい。シリコン技術が不得手だった分野の技術がシリコンに導入されれば、全体的にエレクトロニクスは発展していくであろう。
- ・シリコン材料は演算、通信、記憶には有用だが、今後の社会はそれ以外の多数の機能も必要になるであろう。また、シリコン材料は光との相性はよくない。光の優れた技術をどのように組み込むかは重要な課題である。分子センシングや光などの機能が、シリコンと融合することで付加価値を与えている。その点に注目する必要もあるのではないだろうか。新機能を付加するファンドリーには柔軟性をもたせることが重要である。
- ・シリコンはバルクサイズとナノサイズではさほど性能に違いはない。ナノサイズならではの特長を 活かすためにも、カーボンなど様々な材料との融合を図るべきである。

●ファンドリー

- ・ファンドリーが機能するためには、シリコン分野の研究開発者の本気ぶりが重要である。ファンド リーなどにおいて援助者として働くといった風潮ができないと状況は改善しない。ファンドリー等 の施設を必要としている団体や研究者に開放し手助けするような温かいマインドが醸成されなけ ればならない。
- ・外部の人たちに有効にセンターを利用してもらうことを考えている。シリコン基板の上に種々の材料等を載せるとなると、汚染にはとりわけ注意をしなければならない。シリコンのラインを維持しつつどのように柔軟に材料を導入するかを議論している。

5.2.2 ナノバイオ/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)

「ナノバイオ、知る、操る、つくる」というグループ討論の演題から出された研究戦略を紹介する。「ナノバイオロボティクス」というテーマを挙げる。分子を掴んで操作するナノマシンなどが研究開発されている。分子に工夫を施すことにより、新しい成果を得ることができるようになるだろう。「細胞を知るナノバイオ」というテーマを挙げる。表面細胞に分子が結合した際に蛍光する現象を進歩させ、1分子の細胞の中で起きている現象をFET(電界効果トランジスタ、Field Effect Transistor)により電気信号として取り出すことも可能である。細胞に関する知見を増やすことができるであろう。「細胞を操るバイオ」というテーマを挙げる。非常に微細な針を用いて細胞核の中に遺伝子を注入したり、バクテリアの力により歯車を回転させたりといった技術は可能となっている。現在ネットワーク解析の研究が進められている。たとえば肝細胞から分化誘導する際に、様々な分化誘導因子のネットワークが解明されており、これらのネットワークを細胞操作に組み込むことも可能であろう。「細胞を創るナノバイオ」というテーマを挙げる。まず細胞を人工的に作ってみて解析しそこからさらに知見を蓄積していけば、最終的に本当に細胞を作ることも可能となるであろう。「組織・臓器を創る

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

ナノバイオ」というテーマを挙げる。細胞の作成などに関しては、すでに実現化されている。技術を進展させることにより 10 年や 20 年先の将来には、組織・臓器を作ることも可能となるのではないだろうか。「病気を治すナノバイオ」というテーマを挙げる。社会的な問題やニーズに対応することも重要である。21 世紀は、病気を治して長生きをしたいという要求がある。たとえば DDS(ドラッグ・デリバリー・システム、 Drag Delivery System) からの筋道では、局所治療から遺伝子治療へと発展し、最終的にはセルテラピーまでたどり着く経路が考えられる。診断と治療を同時に実施するセラノスティクスのシステムが確立され、細胞内サージェリーや細胞内マニュファクチャリング、さらには希望する部位に遺伝子を導入する技術なども確立してくるであろう。ピンポイントでの診断・治療の一体化が可能になるのではないだろうか。「病気を見つけるナノバイオ」というテーマを挙げる。微細加工技術を突き詰めていくと、新しいアミノ酸分析技術が実現するのではないだろうか。またシリコンを使わないエレクトロニクスや、従来の理論とは異なる自己組織化をベースにしたデバイスなども実現化されるのではないか、といった議論もなされた。最後に「環境を守るナノバイオ」というテーマを挙げる。安価で場所を問わない診断装置が必要である。診断チップなどの装置は世界的には必要とされているものである。

ナノバイオ分野での世界貢献のためにも、新しい学問領域を創設すべきとの意見がグループ討論では出された(図5-7)。「ナノバイオ学」は成立するものという信念をもって議論をしていかなければならない。21世紀型学問システムとしてナノバイオを体系化しなければならず新産業の創出にもつながるであろう。教育・研究体制の改革が望まれる(図5-8)。

ナノバイオ分野からは離れるが、欧米諸国との国際研究のマッチングをはかるため、JSTが調査をしたらどうかという提案があった。また医療制度に関しては、実績の少ない技術に対しては寛容なシステムの構築が必要である(図 5 - 9)。

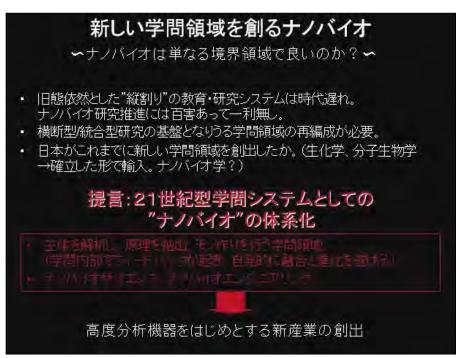


図5-7 提言:21世紀型学問システムとしての"ナノバイオ"の体系化

CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

ナノバイオ成功の鍵を握る制度改革(1)

教育·研究体制改革

- 研究の国際化ためのシステムの国際化。欧米諸国のシステムを調査、フィロソフィーを研究。ルール、インフラ、仕組みをグローバルスタンダードに完全に準拠させる。
- グローバルナノバイオネットワークの形成。近視眼的なナショナリズムから脱却した支援体制の確立。教育の国際連携も重要。外国人受け入れの際に見られる、出島的制度も一掃。
- 学問領域横断型、統合型大学院の設置。大学院を単なる学部の延 長線上に位置づけないことが肝要。
- 奨学金をはじめとする学生のサポート体制の拡充。もう、親のスネは かじらせない。
- 新産業の創出を促す仕組みを構築し、ポスドクの雇用を創出。食えない仕事は、必ずや業界の裾野が狭まり、先細りを迎える。

図5-8 ナノバイオ成功の鍵を握る制度改革(1)

ナノバイオ成功の鍵を握る制度改革(2)

医療制度改革

- 医療のグローバル化。自由診療の拡大で、海外から患者を歓迎。
- 新しい医療を積極的に受け入れることが可能なシステムの確立。認可を与える側の初重を早くし、シーズの段階からガイドラインを設定して"長きに渡って育てる"。
- 研究者が新技術を効率的に伝達、普及させる体制作り。リスクを超えた先端医療の価値を社会全体で共有する。さんざん税金を納めているのに、先端医療を全く享受できない不幸さを国民にアピールし、社会運動を引き起こす。
- 治療してバナを見る既存のシステムを野放しにする限り、問題は解決しない。実績の少ない新技術に対し寛容的なシステムの構築が不可欠。
- 医師とエンジニアのスムーズな橋渡し、医工連携、

図 5 - 9 ナノバイオ成功の鍵を握る制度改革(2)

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

●質疑・討論

●ナノバイオ教育

・JST—CRDSでもアドバイザリー委員会の評価の際、ナノバイオ教育の必要性があることを知った。個人的には大学のトップマネジメントの見識として運営に取り組んでいただきたいと考えている。当センターの中で教育にも取り組むべきかに関しては、議論の必要性が意見として出ている。

●物理量以外の量的センシング

- ・毒や不快さなどを機能量としてはかる場合、細胞を利用して実現するとよいであろう。われわれの 生活に危害を加えたり毒性を有したりしている対象物をセンシングするという意味も含め、計測に 細胞あるいは組織を利用する方法は効果的になるかもしれない。
- ・バイオは種々の量が定量化されていない点が問題である。情報伝達度を定義・定量化されるようになれば、科学として極めて有用となる。
- ・定量することができない可能性もあるがネットワーク解析には余地がある。個々の箇所でなく全体で 判断しないとわからない点もある。パターン解析的に定量できる可能性はあるのではないだろうか。
- ・ネットワークの時間変化などをすべて定量化のための要素として取り入れると、処理不可能なほど の情報が出てくる。細胞研究の計算も処理できるコンピュータの開発が望まれる。
- ・定量化のためには、コンピュータに揺らぎの要素を取り入れることが必要となる。アトラクター選 択等に関しては複雑系の領域でかなり発展している。

●ナノバイオの統合テクノロジー

・バイオロジー、エレクトロニクス、光技術などを縦割りにせず統合テクノロジーを導入することに より、現在不可能な技術が実現化するのではないだろうか。

●コアファシリティ

・コアファシリティの問題についてはナノバイオでは情報や動物やプライマリーセルなど、取り扱う対象物が様々である。個々人の研究者に資金を交付する方法よりも、共通の場所やたとえば動物バンクなどのシステム作りが重要となる。また小さな組織や異分野の組織がナノバイオに参加する場合を考慮し、限られた研究費をそのような組織に上乗せすればよいかを考え仕組みを作る必要がある。

●倫理・安全性の問題

- ・生命倫理の問題に関して市民は敏感である。どのように進めていくか。
- ・安全面ではナノトキシコロジー(ナノ分野の広義での毒性学)に関しては、われわれ自身が安全か どうかを考え調べ社会に発信していくことが必要である。

●塩基配列の直読技術

- ・DNA 塩基配列の直読に関する今後の見通しについては、現在 DNA が見えるまでに至った段階である。DNA を一個ずつ切っていき 2nm のホールに詰まる・詰まらないによる抵抗の変化から、DNA の塩基配列を読んでいく。基本的なアイディアはハーバード大学のダニエル・ブラントンによるものである。
- ・世界中の研究者が研究を進めているが、まだ分解能は向上していない。
- ・バイオの領域は実現できないと決め付けてしまったら研究は進展しなくなる。目標達成とは別に実 行すれば様々な成果が導き出されると考える。

5.2.3 ナノ物質・材料/細野秀雄(東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター・応用セラミックス研究所 教授) 第二部グループ討論では、次の3つの設問の答に関して合意がとれた。

第一は「第2期科学技術基本計画に日本固有のナノテク材料戦略はあったか。あったとすれば有効に機能したか」という設問である。材料分野で半導体は独自の計画をもっていたが4分野(ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテクノロジー・材料)の選択に勝ち残るため、アメリカの国家ナノテクノロジー戦略(NII)に習い、ナノテクノロジーを重点分野の一つとしたという認識という認識であった。またトップダウンアプローチの半導体に集中的に(支援を)投下した戦略は独自的であったという認識があった(図5-10)。

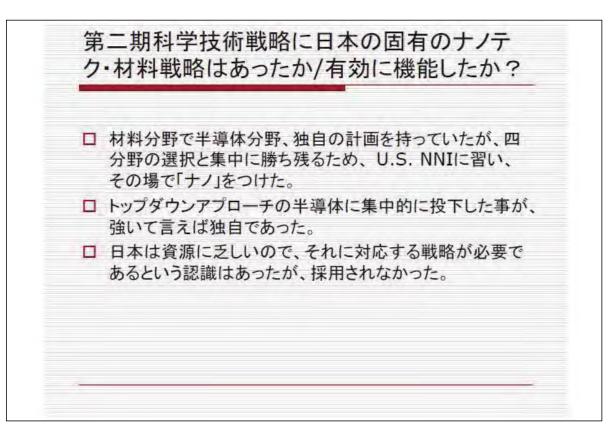


図5-10 第二期科学技術戦略に日本の固有のナノテク・材料戦略はあったか/有効に機能したか?

第二は「現在、日本はナノテク材料分野で世界第何位か」という設問である。基礎研究に関してはカーボンナノチューブ等が特徴的で、1位に位置しているという認識の討論参加者が多かった。総合力に関しては上位ではあるが、トップであるとは言いがたい。日本、ヨーロッパ、米国、中国の4グループしかない中でトップでないとなると難しい状況にある。また基礎の分野に関しては1位であるという合意があった。材料の範疇では製造技術に関しては1位であるが、太陽電池や有機エレクトロルミネッセンス(有機 EL)の事例のように基礎の原理は外国由来の場合が多い。金属分野に関しては原理と製造の両面で世界がリードしているという討論参加者の意見があった(図5-11)。

現在、日本はナノテク・材料分野で世界第何位か? □ ナノテク: 産業になっていない。基礎研究としては、カーボンナノチューブなどを始め、上位にあるが、総合力ではトップであるとは言い難い。 □ 物質科学: 世界一 □ 材料(=役に立つもの): 製造技術では世界一であるが、基礎原理は外国由来の場合が多い。金属分野では原理・製造とも日本がリードしている。

図5-11 現在、日本はナノテク・材料分野で世界第何位か?

第三は「第三期科学技術基本計画の終了後、日本はこれらの領域で現在の地位を維持しているか」という設問である。物質科学に関しては現在までの研究の蓄積などから現在の地位を維持しているであるう。その他の分野に関しては5年後の未来は暗いと予想せざるを得ないという合意であった。研究が迅速でないことや「官」と「学」で有望な技術を創出しても、企業がただちに参入しないからといった理由である。教育に関しては日本では材料分野の人気は下火であり、優秀な人材はバイオテクノロジーに流れているといった深刻な問題の指摘があった。インフラに関してはうまく機能していないという認識だった。企業は国の支援としてインフラ整備を要望している(図5-12)。

第三期終了の5年後、日本は、現在の地位を 維持していますか?

- □ スピード: 官学で有望な技術を出しても、企業が直ぐに参 入しない。(会社の決済が直ぐに降りない?韓国は、エレ クトロニクスに賭けている。)
- □ 教育: 米国の大学院では、直ぐにナノテクに関する一通りの計測技術などが会得できる。中国での材料・ナノテク分野の力の入れ方はものすごい。更に米国組が戻ると怖い。日本は、材料分野は下火であり、優秀な人材はバイオに流れている。
- □ インフラ: うまく機能していない。企業では、国の支援として、ナノ計測インフラ整備を要望している。
- □ 以上から、5年後は、暗いと予想せざるを得ない。物質科学は維持しているであろう。

図5-12 第三期終了の5年後、日本は、現在の地位を維持していますか?

以上3点以外に討論されたことを述べる。

ナノ物質・材料分野の基礎的問題は表面・界面研究の問題がある。象徴的な例は電極に関する問題である。分子系の物性の分野では、化学、物理学、生物学の融合を前提とした巨大分子の物性科学をどのようにしていくかという基礎的問題が指摘された。物質・材料の分野のみで考えるのは不十分で部材まで踏み込まなければ役立つ研究になりにくいという意見があった。使用後分解して無害となる材料が必要であり、見える、あるいは計測できるという点が、ナノテクノロジー材料の研究では重要ではないかという意見があった。基礎研究から応用研究へという直列モデルのみでなく、両者が相互にやりとりをしながら有機的に研究を進展させていく並列モデルが有効な場合が多いのではという意見があった。生産の観点からは製品のばらつきが生じているのは、製品製造の到達点に向けた(共通の)原点が得られていないからではないかという指摘があった。

以下はグループ討論でのカーボンナノチューブに関する内容である。カーボンナノチューブに資力を集中する理由が明確ではない。カーボンナノチューブのキラーアプリケーションのみに注視せず広範囲にどのような分野に利用できるかを試してみて、どのような結果となるかを着目するという姿勢のほうがよいのではないかという意見がある。NASA(米国米航空宇宙局)にも構想はあるが、将来の夢として宇宙エレベータにカーボンナノチューブを利用することも予想されている。またカーボンナノチューブの5年以内の実用例として、グラッシーカーボンが挙げられた。ボトムアップアプローチのナノテクノロジーの重要性に関しては、諸方面からの指摘がある。ナノテクノロジーではありふれた材料から新規性のあるものが作成されれば有用性を感じることができる。膨大な自然界の物質の構造をうまく利用すれば、ありふれた物質から新規性に富むものを創出することが可能ではないだろうか。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

●質疑・討論

●カーボンナノチューブとその他の材料

- ・カーボンナノチューブは一つの理想的な物質であるがその応用面を考えすぎるあまりに、カーボンナノチューブ分野と他の材料分野との間でのギャップが発生している。カーボンナノチューブ以外でも自由に研究開発を進めつつ、カーボンナノファイバーという材料の構造を制御する形で連関させていくという流れが現実的ではないかと考える。カーボンナノファイバーは、中身を観察するとファイバーの内部でカーボンナノチューブのような構造が形成されている。カーボンナノチューブとカーボンナノファイバーでは、研究等でもスムーズに連関している。
- ・材料という分野には興味深い部分が多くある。カーボンナノチューブにも興味深さがある。興味深 さを感じる研究を行なわないと分野が活気付かないし材料分野全体が沈滞する。
- ・カーボンファイバーにはガラスファイバーと同様、外側部分に欠陥を有していたために"ちぎれ"等が生じていた。カーボンファイバーをナノレベルで制御することで、飛行機の材料として適用できるようになった。ナノレベルで出てきた原理原則や観測法を利用し材料をより有用なものにしていくというアプローチが考えられる。カーボンナノチューブが発明されたときも実用化までには非常に苦労を伴った。商品開発を重ねた末に工業材料にまで到達した経緯がある。材料開発の立場からは新しい物質を発見し、提供してもらうことが望ましい。新規性のある機能を有した物質を様々な方法で試していきながら、キラーアプリケーションに到達するという手順が順当ではないだろうか。
- ・カーボンナノチューブのポテンシャルの高さを誰もが理解しているからこそ資力が集中されるとい う点も理解してもらいたい。

●材料の見た目の魅力

・企業側は材料を「量」で見せないと関心を示さない。ナノテクノロジーは非常に小さな世界での技術 だが、いっぽう魅力を伝えるには臭いであったり、量であったり、色であったり、物質的な点である。

●物質科学の好奇心と「出口」

・研究開発が出口まで到達するには、研究への好奇心が大事である。端的な事例はただちに有用性はないが、出口にはつながっており、社会的にもインパクトのあった超伝導分野である。好奇心で行なった研究の結果が、出口へつながることが起こりうる点も、物質科学や基礎科学の興味深い部分である。こうした観点からJSTがすぐには役に立たない分野にもファンディングをしてくれるのでとても幸せなことが多い。今後もその方針を継続してもらいたい。

●米国の事情

・米国では材料開発に関するリスクヘッジをしている。有用な材料を世界中から取り寄せるためのネットワークを構築している。戦略的なプログラムを NSF(米国国立科学財団、National Science Foundation)が計画しているという点は認識しておく必要がある。

CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

・米国では凝縮系(Condensed Matter)と、材料物理(Materials Physics)が独立しており、 化学と物理学の共同研究推進の意識が希薄である。日本では化学者と物理学者との間の相互作用が かなり行なわれている。協力関係をさらに推進し生体関連物質の物性的研究につなげていけば、世 界に例のない活動になるのではないだろうか。

●インフラ整備

・グループ討論で日本のナノテクノロジー総合力が | 位ではないとした大きな理由の一つに、教育を含めたインフラストラクチャーの整備が進捗していない点があると考える。

5.2.4 総合・推進基盤/横山浩 (産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長)

日本のナノテクノロジーでは、技術面・研究面は健全な状況を保持している。一方で、周辺的、基盤的な面は脆弱、あるいは不健全であり、改革を要する部分があるのではないだろうか。グループ討論の論点となるテーマは多岐にわたるが、大きく「拠点」を中心に、「人材」、「国際化」の3点について議論をした。

米国のファンドリー的支援機能は NNIN(国家ナノテクノロジー・インフラ・ネットワーク、National Nanotechnology Infrastructure Network)が担っており、アジアや韓国に研究拠点が成立している。米国では、NNIN の前身 NNUN(国家ナノ加工利用者ネットワーク、National Nanofabrication Users Network)などを含め 30 年以上の歴史があるため、運営の体制が成熟し、支援機能の必要性が共通認識として存在している。台湾や韓国では米国を参考にしつつ、集中投資をして急速に支援体制を構築している段階である。

種々雑多な材料のナノ構造を整理し、デバイス開発までプロトタイプ作りを推進するという基本コンセプトを忘れてはならない。米国では約4分の1のナノテクノロジー関連予算をインフラや社会影響に充てている。韓国、台湾もほぼ同様の比率である。対して日本はインフラにはほとんど予算を投入していない。現状では国からの支援として文部科学省のナノテクノロジー総合支援プロジェクトが存在するのみである。優れた日本の研究面を長期的に支援するインフラの存在がないと将来が不安になる。

日本において企業とアカデミアの間のつながりはまだ希薄である。現在の希薄な関係を大きな領域として太くしていくことがファンドリーやインフラ、拠点形成の役割としてある。アカデミアは先端的技術開発や科学を探求する中で、社会への有用性が見えてきた研究の成果を、様々な経路を通じて社会に展開していく必要がある。その資源・資力(リソース)を提供する役割がファンドリー、インフラ、拠点にはある。アカデミアと社会とのつながりの様態としては、ベンチャーや技術移転などがある。現状では魅力的で新規性のある発見や発明を上部構造に連関させていく構造が日本には欠落している。日本には国際的な競争力を伸ばしていく必要があり、その競争力を入力する部分として、ファンドリーや拠点の存在意義がある。

インフラには二つの役割がある。一つは研究を推進する側を手助けするという役割である。研究開発機器の共有化が進まない日本においては、速やかな研究開発が可能となる場としてインフラが必要である。もう一つは研究者の融合を促進する場を果たすという役割である。日本の拠点形成などの現状を俯

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

瞰すると、いくつかの意味での不信感が散見される。政策的効果に関して合意がまだ十分ではない。ファンドリーや拠点の有効性がまだ理解されていない部分がある。また研究者側にもインフラなどでなく研究費として資金を充てるよう望んでいる研究者が多い点も、拠点形成が進まない一因であろう。

ナノテクノロジー総合支援プロジェクトは(2002 年度の発足から)5 年近くが経過する。大学、研究機関がサービスを行なう上で、実施や運営の体制、方法などについて未熟な部分が露呈されている。研究機関に支援体制を持ち込んだために、支援よりも研究を優先する気分が抜けきれない。また微細加工に不慣れな人物に対して、技術的指導などをしたがらない風潮もあるがぜひ温かい気持ちで指導してもらいたい。また支援にあたる技術者のキャリアをどのように構築していくかは現在まで軽視されがちであった。キャリアパスの問題をしっかりと考慮に入れていく必要がある。コストの問題もある。政策決定者、研究管理者、研究現場、すべて未熟であるがゆえ、支援の規模に比べてコストが掛かりすぎている。時間を掛けて丁寧に解決していかなくてはならない。ファンドリー形成に関しては実際に運用してみないとその試みがよいか判断しづらい部分が多々ある。実施してみて初めて様々な問題に答えられるのではないだろうか。運営の具体面では、国が全額を提供し続ける発想を捨てファンドリーが自立できるような形に転換を図っていくべきであるという意見が討論参加者からあった(図5-13)。

人材に関して誰もが人材育成に力を入れなければと考えているが、「総論賛成、各論反対」といった風潮がある。解決を阻んでいるのは自身の研究を追究したい研究者のエゴが最も大きいのではないだろうか(図5-14)。

国際化に関して技術や社会構造、生活の変化の中で国際化が必要となっている。(日本語のように日本だけで閉じた)文化を抜本的に国際化の方向に変えながら、国際環境に適応するという柔軟性も必要であろう。アジアの一因としてどのような役割を果たすのかなど考えるべき課題は様々ある。研究機関、大学、企業各自が実行可能な部分を確定していく必要がある。研究開発面でも教育面でもイノベーションをはかる必要がある(図5-15)。

拠点、インフラ、支援

- ●インフラには二つの役割 研究の推進と融合の場の提供。
- ●支援の現状は、さまざま。不信感→融合拠点が受け入れられなかった一つの原因ボトムアップでは実現できないトップダウンで施策として進めなくては実現不能
- ●米13拠点で政府イントラの投資が30%、 課金、コンソーシアム等でまかなっている。 その結果、約3倍の規模の運営を実現。 30年以上の長い歴史

図 5-13 拠点、インフラ、支援

CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

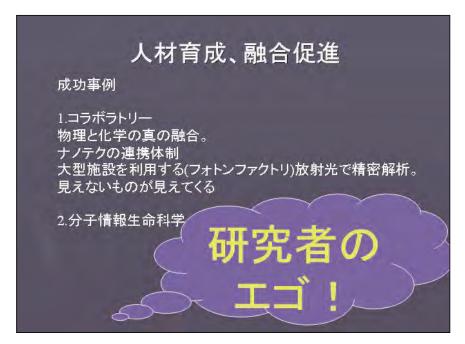


図 5-14 人材育成、融合促進

国際化を進めるには

- カルチャーを変える必要がある。←→日本のカルチャーを残すべき(米国の真似でなく)
- 学長クラスではなく、下のレベルで海外から人事を導入する
- 成功事例を作る必要
- 沖縄に国際大学構想。
- バンコク、Asia Institute of Technology 国連の事業。工科系の大学
- 外務省の仕事。もっとてこ入れして、戦略的に活用すべき。
- 定着しない理由:

良い海外人材を採るには日本にはアメリカンドリームがない。 教授にはなれない。一定数は確保するべき。 一方、アジアナノフォーラム(13国)で定着支援には ネガティブレスポンスがある。

図 5-15 国際化を進めるには

5.3 全体討論

- ・技術開発を支援する役割の技術者のキャリアパスについては非常に重要であると認識している。研究者が技術指導などの支援をする仕組みになっているために、技術に未熟な人に教えたがらないという研究者のエゴが生じる。米国では技術者や支援者のキャリアパスが確立されており、レベルの高い人物が役割を果たしている。
- ・日本ではアカデミアと産業の間の連携が完全には確立していない。組織論として具体的にどのよう なファンドリーが成立すればよいか、そのアクションプランはどのようなものであるか。新規の組

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

部

織を形成し、アカデミアと産業の両者が参画するという形式は一つのプランであると考える。また日本の研究者には科学面でどのような研究が重要で、技術面でどのような研究が重要であるといったことをボトムアップ的に集約し、行政に渡すという仕組みが欠落している。アカデミアが意見を整理して行政側に臨むべきであろう。米国のNRC(全米研究委員会、National Research Council)のような役割をCRDSが果たす状況にあると考える。

- ・既存の大学に拠点を形成するよりも既存の組織に属さない新規の拠点を形成しないと、キャリアパスの問題やメンタリティの問題は解決しにくいと考えている。第二期ナノテクノロジー総合支援プロジェクトによる公募が近々出される予定だが、既存の機関からの公募を前提にしており、新規の拠点といった方向には至っていない。
- ・ナノテクノロジー総合支援プロジェクト内では、第二期に向けてファンドリーの運営に関しては、 前向きに議論してもらっているようだ。しかし総合科学技術会議でファンドリーに関する評価が低 かったという問題がある。新規のファンドリーを形成するという問題に関しては、挙げられた具体 的提案を基本にして、われわれ自身がトップダウン方式で推進していかなければならない問題であ ると考えている。今後議論を詰めて行きたい。米国 NRC の役割をJSTが行なうという提案に関 して、CRDSが役割を果たせば構造的問題が解決するわけではない。構造的な問題を意識しつつ 少しずつ変えていくより仕方がないのではないだろうか。
- ・日本にも日本学術会議がありシステムは構築されているが、一般的な印象として日本は研究者の意見が集約された形で反映されていない。CRDSは、科学技術基本計画を遂行する目的のもと、文部科学省が予算を計上しているためトップダウン型といえる。今回のワークショップであげられたような提言を、総合科学技術会議に伝達することは可能である。
- ・例えば東レリサーチセンターにはナノテクノロジーの最前線を研究している体制の中で、異分野をも受け入れるという文化を作りたいという意図がある。ただし研究者がセンターでの管理・運営を行なうという段階では、問題が起きたと記憶している。根本的な問題は、日本における研究支援の体制が崩壊しているという点にある。例外的に国立天文台では最先端の技術開発を目指し、技術支援の人材を助教授や教授クラスにまで育成した。新規のナノテクノロジーファンドリーを形成する問題に関しては、新規のナノテクノロジー研究分野を創造するという意味をもつほどの研究所を作る必要がある。
- ・技術を未熟な人に教えたがらないというような研究者のエゴの問題に加え、研究機関としてのエゴも存在している印象がある。米国の支援体制では間接経費を上手に活用している。大規模大学であれば相当ある間接経費を使い、支援をする人のキャリアパスを終身雇用でつくることも可能となる。問題は行政よりも大学や研究機関にあるのではないだろうか。産業の有無に関係なくポスドクのポストが増えてしまっている。論文を多く出したポスドクが勝ち残るといった構造を再考しなければならない。
- ・ナノテクノロジー分野を日本がどのように推進していくか、その長期戦略を確立することがとりわけ重要であると考える。ファンドリー的支援にとどまらずさらに進んだ支援をするかどうかの決断は、長期戦略としてナノテクノロジーをどのように推進していくかに掛かっているであろう。研究と教育の区分を再度明確化して研究体制システムを再構築することが必須だと考える。今回のワークショップで議論されなかったが研究者支援の問題がある。現場の研究者たちは従来の領域を守りながら先端分野にも手をつける

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

ということでは疲弊してしまう。JSTには再度長期戦略の観点から研究支援と研究者支援の方法を考えてもらいたい。日本がリーダーシップをもち、国際共同を推進することは可能であると考えている。国際競争に関してはどの機関において国際的協力が可能であるかを調査し、科学的観点から見据えていく必要があると考える。研究者と行政側が長期戦略を立てつつ、とりわけ材料分野を中心にナノテクノロジー分野で再度新しい問題を切り開けるよう、問題を整理し次の時代の基盤を構築していくことが望まれる。

- ・ファンドリーの必要性は2年ほど前から議論がされているが形成されていない。JSTの CREST (戦略創造研究推進事業)のようなモデルで、科学技術振興機構が窓口役となり IMEC (Interuniversity Microelectronics Center)等から有償でラインを借り、デバイスを開発するようなプログラムを公募・審査するという提案をする。IMEC には世界各国から多種多様の企業が訪れている。ナノテクノロジーの最先端の知見を習得した人物が日本に見聞を持ち帰るという行為を何年か続けていけば、どのようなファンドリーが最適であるか見えてくるのではないか。
- ・アポロ計画では大きな出口を掲げそのために欠如している技術を推進していった。人を月に立たせるという目標達成後、技術が各方面に広がっていった。日本でも同様の強烈なイニシアチブをもった方法を一つのやり方として行なってみたい。
- ・研究資金の提供期間終了後ポスドクたちはどこに職を求めたらよいのかといった問題がある。現在バイオテクノロジーブームで多くの研究者がバイオテクノロジーを研究しているが、彼らを受け入れる産業がない。このまま行けば結局人材が霧消してしまう。最終的には人をどのように大切にしていくのかに掛かっているのであろう。国が長期展望をもとにチャレンジ分野を計画しその中でポスドクをつくるといった方法が望ましいが、実際例を考えると容易ではない。米国の場合ベンチャーが新産業創出の役割を果たしているが、日本の場合実際の製品などがない限り、ベンチャーに投資しないという傾向がある。
- ・研究者集団の意見を集約し研究推進の基盤にするという仕組みを構築しなければならないだろう。 トップダウン型研究に関しては、どのような原理原則でどのように予算等を配分したかを一般の 人々に説明するプロセスがないのが大きな問題であると考える。

5.4 総括コーディネータのまとめ/茅 幸二 (理化学研究所)

今回のワークショップでは、ナノテクノロジーよりもマテリアルサイエンスを検討するといった意味合いが強かった。その中でライフサイエンスが重要な意味を持ってきた。ナノテクノロジーには多額の予算が投じられており、われわれは責任を背負っている。ファンドリーなどの拠点形成の問題に関しては、現在まで拠点が各地に分散し各々が責任をもつという体制であったが再検討が必要であるう。体制の再検討をするにあたりバルク製品まで至る道筋をつくるナノテクノロジーの研究所を形成することとなり、大きな議論が必要となる。

ナノテクノロジーをよい意味での材料化学に変えていく仕組みを構築し、その体制を科学技術振興機構やワークショップ参加者たちが提案し、数年後に成果を出せるかは重要な問題である。しかしながらワークショップで様々な分野の人が集まっても、ほとんど意見が国の政策として通らないということには問題を感じる。

今回のワークショップの参加者が集団の形成や運動の展開など、ナノテクノロジーの世界に大きな 運動を起こすことを期待している。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

[6] まとめ

<WSの構成>

本WSは、今後我が国のナノテクノロジー・材料分野の科学技術戦略構築に向けて、主として 2000 年以後の 5 年間について内外のナノテクノロジー・材料分野の進展を俯瞰することを目的と した。そのためのセッション構成を次のようにデザインした。

- (1) 各国ナノテクノロジー国家投資戦略の国際比較と効果についての予備的ベンチマーク (研究開発戦略センター側からの発表)
- (2) ナノテクノロジーを象徴する8研究領域の技術現状と日本の貢献 (有識者による発表と分析) 先端ナノ計測、CNT(カーボンナノチューブ)、自己組織化、スピントロニクス、ナノサイ エンス、再生・細胞組織化、計算科学・シミュレーション、ナノテク社会受容・標準化
- (3)「ナノエレクトロニクス」、「ナノバイオ」、「ナノ物質・材料」、「総合・推進基盤」の4つに分けて部分俯瞰したのち全体討論。

以下、それぞれについて概要をまとめ今後の展開についてコメントを付す。

<各国ナノテクノロジー国家戦略の国際比較と日本の課題>

- ・2001 年以降、米国、日本、アジア、ヨーロッパの順で国家ナノテク計画がドミノ的にスタートした。投資は継続的に増加している。
- ・各国のナノテクノロジーへの国家投資は、GDPあたりで比較すると日本、韓国、台湾が米国、EUを凌駕しており、アジアが最大のナノテク投資国である。
- ・中国はナノテク基礎科学への貢献が過去 10 年に急進し、論文発表件数については米国に次いで世界第 2 位、質は未熟ながら日本(第 3 位)を追い抜いた。材料科学部門は、日本がトップを維持。
- ・基礎科学のアウトプットをいかに早くイノベーションにつなげるか。それを可能とするシステムが 必要との世界的な認識がある。異分野融合、基礎と応用との垂直融合を促進するシステムは特に重 要である。
- ・融合・連携を促進するナノテク共同利用施設への投資については、米、欧、アジア(特に韓国、台湾)が自国ナノテク総予算の 15%~ 20%を投資しているのに対し、日本は 2~3%で、戦略上の位置づけが弱い。
- ・ナノテクノロジーに関するEHS(環境・健康・安全)やELSI(倫理的、法的、社会的課題)の問題は、新技術の社会受容性を検証する上で不可避である。第2次科学技術基本計画スタート時には日本は無計画に等しかったが、第3期科学技術基本計画では、戦略重点科学技術の1つとして位置づけられた。欧米だけでなく、アジアでも台湾及び中国では早くからスタートしている。
- ・ナノテクノロジーを中心にして、小中高一貫した教育カリキュラム(K -12)を構築する国家プログラムが米国、台湾でスタートしている。日本では、この方面の施策は一過性のものしか存在しない。
- ・国際戦略については、EU-25、米国、独が積極的である。日本は具体策未整備である。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

くナノテクノロジーを象徴する8研究領域の現況と今後>

先端ナノ計測

走査型プローブ顕微鏡についての進展は著しく、ダイナミック測定、単一スピン計測など機能が拡大され、今後さらに機能増強が期待される。一方、電子顕微鏡は収差補正技術が英独に比べ遅れているため、極限計測の観点からは今後問題となろう。先端計測としては、表面だけでなく、生体内の三次元的な原子・分子解像力を持った計測法が欲しい。

自己組織化

自己組織化を用いた超分子(ナノ空間材料)など新しい材料創製の成果がいくつか出ている。また、バイオ材料を使った半導体プロセスも試行されているが、階層的自己組織化にはまだ成功していない。 米国においても同様の現状にあり、階層性を上げてシステムにまで組み上げると位置や構造の精度が保証されなくなる。DNA折り紙が話題になったが、日本は遅れている。理論的基盤構築のために数理科学の導入が必要である。

スピントロニクス

トンネル磁気抵抗素子(TMR)の基礎研究及びMRAMや磁気ヘッドへの応用については日本の活躍が目立つ。強相関電子材料も日本の研究陣がリードしている。今後、スピントロニクスにおけるデバイス化においては研究環境としてナノファブセンター(共用施設)などの充実が必要になろう。

ナノサイエンス

量子関連では、量子計算、量子暗号、量子通信、量子もつれ・中継など理論と実験の着実な進展がある。物質としては、グラフェンは少なくとも重要な研究対象である。超分子のナノ空間構造制御に向けてプログラムされた階層的自己組織化についての物理化学的かつ数理科学的なアプローチによる解明及びシミュレーションが必要である。

ナノカーボン

フラーレンは大量生産技術が確立し、構造材や金属内包フラーレンの造影剤への利用など各種応用が始まっている。CNTについてはスーパーグロースなど大量生産技術に近づきつつあり、各種デバイス応用やピーポッド(フラーレン内包のCNT)の基礎的研究も盛んである。技術的な大問題としては、CNTのカイラリティ制御が残されている。グラフェンの研究は、唯一、日本が立ち遅れている材料研究課題である。

再生・細胞組織化

細胞シートによる細胞接着技術の画期的開発により、組織や細胞を増殖させる基礎的な実験が日本で成功している。角膜、皮膚の再生等への応用が試みられている。原始的な系から高度な系への応用が将来にわたって期待される。

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発センター

計算機シミュレーション

コンピュータ演算能力の向上と計算手法の進展により、かなり大規模な計算が可能になってきた。 今後、オーダーN法のさらなる改良や超並列計算技術の向上によって、たんぱく質のフォールディン グや、より巨大な系の挙動のシミュレーションが可能となるだろう。バンドギャップの精密予測や量 子伝導の第一原理計算も今後の課題である。次世代スーパーコンピュータの使用計画については全日 本的な研究体制で検討が進んでいる。

技術の社会受容

ナノテク・材料分野の戦略重点科学技術として第3期基本計画中に位置づけられ、重点投資の方針が確定した。ナノ粒子の生体吸収や環境拡散に関する安全性の評価、あるいはまったく新しい技術に対する漠然とした不安の除去は、科学的系統的なデータ蓄積・分析に基づいて開かれた体制での議論が必要となる。一方、平行して今後、標準化をスコープに入れた国際戦略が急がれる。

以上、全体としては、順調に進んでいると総括できる。今後の継続的な投資は必要であるが、同時に、個々の技術成果は適当なレビューを受け、選択と集中が必要な時期に来ている。特に、出口を意識した研究の位置づけや、研究成果の効率的な技術移転システムが必要である。

<分科会形式による 4 つの戦略分野の俯瞰>

ナノエレクトロニクス、ナノバイオ、ナノ物質・材料、総合・推進基盤の4つの戦略分野について俯瞰した総合討論のまとめは以下の通りである。

1. ナノエレクトロニクス

議論を総括してナノエレの中長期戦略の視点をまとめた(図 6 - 1)

2007 01 29

「ナノ・雷子情報材料」の開発戦略

More Moore

- ・CMOSトランジスタ動作原理の微細化限界:異種材料超高集積システム。
 - ・微細化技術と異種材料集積化・界面制御と基礎物性解析等の技術融合。
 - ・低消費電力と低コスト化を目指したCMOS設計(アーキテクチャ)。
 - ☆ CMOS Evolution (CMOSの進化型)をめざして
 - ·Beyond CMOS→CMOSを凌駕・補完できる技術に注力。
 - ・More Than Moore(X on Si)/シンセシス型研究によるCMOSの多機能化に注力。
 - ・蓄積されたMore Mooreによる知見・技術を適宜融合。
 - ・府省連携で異分野間の学際研究システムの構築及び促進させる政策的誘導。
 - ・エレクトロニクスに的を絞った共同利用施設(ファシリティ)の構築。
 - ・"XonSi"による異種材料・異分野融合のためのコンソーシアム。
 - ・スピン融合不揮発性・超低消費電力ロジック。
 - ・省電力技術、さらに低コスト化、高速化、高集積化の追及。
- ・機能の多様性を目指した要素材料技術開発。
- ・材料物性基礎開発研究との融合。サイエンス、ナノ構造、電子輸送、界面制御。

More than Moore / Beyond CMOS

図6-1「ナノ・電子情報材料」の開発戦略

ハードウェア開発を通じて、感性、高齢化社会、環境分野への貢献が期待される。ナノ本来の特性を生かして新原理、新コンセプトが特に期待され、エレクトロニクス大国からナノエレクトロニクス先進国へと進化すべき時が来ている。当面の問題としては低消費電力化、将来にかけては高スピード化のみならず、スピン、DNA、量子などによるナノエレのコンピュータ実現が目標となる。タイムスケール上では、まずCMOSの進化・多様化(CMOS Evolution)という観点から、微細化と材料開発の融合による More Moore、MEMS、バイオを導入した More than Moore が並行して進み、全く新しい概念による Beyond CMOS が将来の More Moore に統合されるというシナリオが妥当と思われる。これを効率よく進めていくためには、

- ① on Si でナノテクを展開、
- ②具体的な応用ターゲットからブレークダウンした個別デバイスの研究、
- ③明晰な「ものづくり」の目標を設定した研究拠点、産学連携コンソーシアムの設立、
- ④公的研究機関、大学院における集積化センター実習教育、Si CMOS とナノサイエンスの融合促進、
- ⑤中長期戦略構築のための議論がさらに必要、

といった議論が大勢を占めている。

2. ナノバイオ

ナノテクノロジーとバイオテクノロジーの接点である本領域は、ナノテクノロジーにおける融合を 象徴する研究領域である。具体的には、

- ①分野融合による機能性ソフトマテリアル開発、
- ②材料科学、細胞科学、医学に関するバイオアフィニティー材料開発、
- ③自己組織化や階層構造の理論的解析やウェットナノテクを含む外部環境に応答する動的自己組織化 研究、
- ④μ-TAS の診断・治療デバイスの研究、
- ⑤生体内を無侵襲で観るイメージングナノ計測技術の格段の向上、

等をカバーしている。一方研究を推進する際には、以下のことが十分に検討されるべきであり、その ための支援システムが必要である。

- ①産業を見据えた研究開発を重視すべきで、しっかり出口を見据えたプロジェクト体制が重要(医工連携におけるエのリーダーシップ等)、
- ②裾野を拡げ誰でも参入できる分野づくりが重要(基礎から応用まで、異分野融合、若手参入)、特に大学院学生への幅広い支援制度が必要、
- ③異分野融合研究拠点構築、国際ネットワーキング支援(特にアジアの力を結集)、
- ④ナノ、バイオ、情報の領域をカバーする研究者の育成(ダブルメジャー教育の必要)、 等である。

ナノテクノロジーとバイオテクノロジーはお互いの技術専門用語ばかりでなく価値観も大きく異なるので、もっとも難しい異分野融合のケースと考えられる。そのため融合を促進するための共用施設や、学生たちの共同オフィスといった共通の物理空間は本質的に重要な意味を持ち、うまく運用すれば融合を大きく加速することも可能である。日本ではこの種の工夫がまだ不十分であるが、文科省科学技術振興調整費のプログラムでナノバイオの融合拠点の運用実施が始まっている。

以上を総括して抽出した中長期重要研究課題をナノバイオ・システム俯瞰図として表現した(図 6 - 2)。

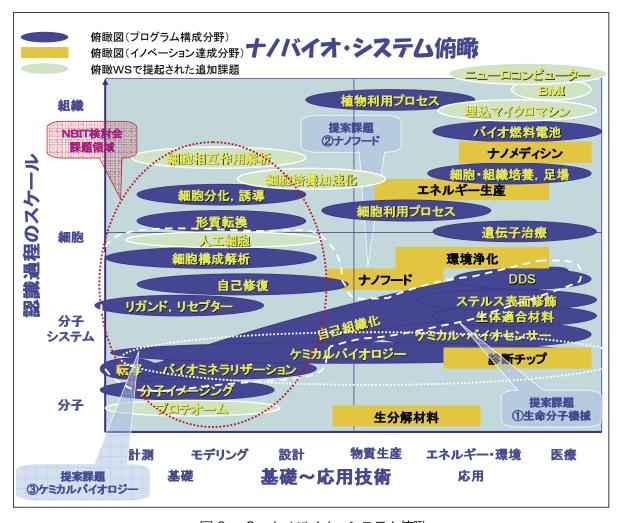


図6-2 ナノバイオ・システム俯瞰

イノベーションへ向けた出口応用としては、

- ①生命分子機械、自己組織化、
- ②ナノフード (フードナノテク)、
- ③ケミカルバイオロジー、
- が重要技術領域と考えられる。

3. ナノ物質・材料

日本がもっとも得意とする材料科学、世界をリードするエレクトロニクス、素材工学を中心としたナノテク・材料分野の一つとして、CRDSでは「新材料設計・探索」を掲げている。この概念を支える3つの要素として、

- ①深い学術的専門知識に裏打ちされた独自の物質観(勘)を持つリーダーの存在(高度の物質観、暗 黙知)、
- ②最先端の計算機実験・モデル計算の高度化と駆使(形式知)、
- ③高効率・広範囲の試料探索・評価手法の開発と活用 (腕力の効率武装)、

を掲げ、これらの三位一体により、素早く精確な材料設計探索をおこなうという基本的な考え方である。具体的に議論に上がった研究課題としては、

- (1)自己組織化・分子ボトムアップ技術、
- ②異種物質・状態間の界面機能の基礎研究 (→主に理論的観点から)、
- ③次世代エレクトロニクスのためのナノ構造材料 (→特に有機デバイス)、
- ④省エネ・省資源・環境対応の希少元素、規制元素の代替・減量技術、
- ⑤新エネルギー技術を目指した触媒や電池電極用のナノ構造材料、
- ⑥理論・シミュレーション手法の深化(マルチスケール・マルチフィジックス)、
- ⑦マテリアル・インフォマティクス(探索の高速化・高効率化)、
- ⑧材料データベースの戦略的構築、
- 9日本がリードする革新機能材料(超伝導・強相関電子系材料含む)、
- ⑩ナノカーボン、グラフェン等ナノテクを象徴する材料、

がある。これらの中で重要課題として指摘されたものは、

- ①有機デバイスの耐久性問題の解決、
- ②CNTのカイラリティ(6員環の並び方)制御とキラーアプリの創出、
- ③原子・分子のプログラム自己集合化技術の確立、
- ④界面電極問題の理論的・材料的基礎の確立
- ⑤ハイスループット評価法(異なる組成の材料特性を一括高速測定)確立 である。

4. 総合・推進基盤

ナノエレクトロニクス、ナノバイオ、ナノ物質・材料を含むナノテクノロジー・材料分野全般における共通基本課題として、本ワークショップで重要指摘された課題は次の通りである。

- ①融合拠点・共用施設の構築と充実、
- ②異分野融合・垂直技術融合の推進加速、 そして中長期視点で重要なのは、
- ③俯瞰的視野を持つ人材育成・教育システム構築である。

共用施設は、ナノエレやナノバイオの例に見る如く、若手研究者やベンチャー起業の参加・参入を誘発する上でも、異分野融合を刺激する上でも本質的に重要であり、欧米に 20 年は遅れているとの認識が議論を通して共有された。またナノエレクトロニクスを中心とした拠点構想や見識あるリーダー選出の重要性についても議論があった。融合拠点、共用施設の必要性あるいは欧米亜に比較して戦略的位置づけが弱いことについては、既に上記「各国ナノテク戦略国際比較」の項で記した通りである。拠点や施設を使用して異分野融合や基礎と応用の垂直技術融合は、トップダウンで政策誘導的に行うことが重要である。同時に研究機関側の自主努力を誘発するシステムを考えるべきである。このような総合推進基盤によって投資が戦略性を帯び、投資効率は飛躍的に改善され研究開発のアウトプットからイノベーションを経て、将来の社会へのアウトカムが生まれる筈である。

Appendix

1. 本ワークショップの開催日時・場所

日時: 平成18年12月8日(金)13時00分~12月9日12時00分

会場:研究開発戦略センター 2階大会議室

2. 本ワークショップのプログラム、参加者の構成について

表 1 本ワークショップのプログラム

1日目

プロローグ	13:00~13:40
開会の挨拶及び趣旨説明並びに国内外ナノテク戦略比較の説明	コーディネーター: 茅 幸二/田中 一宜
第一部「全体討論」	13:40~16:40
	総括コーディネーター:茅 幸二
「先端ナノ計測」	青野 正和
「CNT」	篠原 久典
「自己組織化」	魚崎 浩平
「スピントロニクス」	大野 英男
「ナノサイエンス」	樽茶 清悟
「再生・細胞組織化」	岡野 光夫
「計算科学・シミュレーション」	寺倉 清之
「ナノテク社会受容・標準化」	阿多 誠文
全体討論	_
第二部「グループ討論」	18:40~21:40
「総合・推進基盤」	コーディネーター:横山 浩
	コメンテーター:寺倉 清之
「ナノエレクトロニクス」	コーディネーター:平本 俊郎
	コメンテーター:渡辺 久恒
「ナノバイオ」	コーディネーター:片岡 一則 コメンテーター:堀池 靖浩
「ナノ物質・材料」	コーディネーター:細野 秀雄 コメンテーター:福山 秀敏
グループ内発表 '中長期研究開発戦略'	_
討論	_
第三部「全体討論」 8:30~12:00 総括コーディネータ:茅 幸二	
「ナノテク施策のこれまでと今後/ナノテクと DNA のこれまでと今後」	川合 知二
グループ発表	
「ナノエレクトロニクス」	平本 俊郎
「ナノバイオ」	片岡 一則
「ナノ物質・材料」	細野 秀雄
総合・推進基盤 G 発表	横山 浩
全体討論	
総括コーディネーターのまとめ	茅幸二

表 2 本ワークショップ参加者一覧

(a)発表者

氏名	所属・役職(いずれもワークショップ開催当時)		
相田 卓三	東京大学大学院工学系研究科 化学生命工学専攻 教授		
青野 正和	(独)物質・材料研究機構 フェロー・ナノマテリアル研究所 所長		
安達 千波矢	九州大学 未来化学創造センター 教授		
阿多 誠文	(独)産業技術総合研究所 東京本部技術情報部門技術政策調査室 総括主管		
上田 太郎	(独)産業技術総合研究所 ジーンファンクション研究センター 副研究センター長		
魚崎 浩平	北海道大学大学院 理学研究科化学専攻 教授		
大野 英男	東北大学 電気通信研究所 教授		
大林 元太郎	東レ(株) 滋賀事業場 理事		
岡野 光夫	東京女子医科大学 先端生命医科学研究所 教授		
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		
金山 敏彦	(独)産業技術総合研究所 次世代半導体研究センター 副研究センター長		
茅幸二	(独)理化学研究所 中央研究所 所長		
川合 知二	大阪大学 産業科学研究所 所長/教授		
岸村 顕広	東京大学大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 助手		
篠原 久典	名古屋大学大学院 理学研究科物質理学専攻 教授		
芝 清隆	癌研究会癌研究所 蛋白創製研究所 部長		
清水 敏美	(独)産業技術総合研究所 界面ナノアーキテクトニクス研究センター センター長		
東京工業大学大学院理工学研究科 付属像情報工学研究施設、総合理工学研究科 菅原 聡			
曽根 純一	物理電子システム創造専攻 助教授		
高柳邦夫	日本電気(株) 基礎・環境研究所 所長東京工業大学大学院 理工学研究科基礎物理学専攻・物性物理学専攻 教授		
竹内 昌治	東京大学生産技術研究所マイクロメかトロニクス国際研究センター 助教授		
玉尾 皓平	(独)理化学研究所 フロンティア研究システム システム長		
樽茶 清悟	東京大学大学院 工学系研究科物理工学専攻 教授		
知京 豊裕	(独)物質・材料研究機構 半導体材料センター センター長		
寺倉 清之	北海道大学 創成科学共同研究機構 教授		
	大阪大学大学院工学研究科 機械工学専攻 教授		
中山 喜萬	大阪府立大学 工学研究科 特任教授		
畠 賢治	(独)産業技術総合研究所 ナノカーボンセンター ナノカーボンチーム グループ長		
林 克郎	東京工業大学 応用セラミックス研究所 セキュアマテリアル研究センター 助教授		

平本 俊郎	東京大学生産技術研究所 物質・生命部門 教授
福山 秀敏	東京理科大学 理学部応用物理学科 教授
細野 秀雄	東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター・応用セラミックス研究所 教授
堀池 靖浩	(独)物質・材料研究機構 生体材料研究センター フェロー
水谷 亘	(独)産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 分子ナノ物性グループ グループ長
三宅 淳	(独)産業技術総合研究所 セルエンジニアリング部門 副部門長 東京大学大学院工学系研究科 応用化学専攻 客員教授
山下 一郎	松下電器産業(株) 主幹研究員 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科 客員教授
湯本潤司	NTT 物性科学基礎研究所 所長
横山 浩	(独)産業技術総合研究所 ナノテクノロジー研究部門 部門長
渡辺 久恒	(株)半導体先端テクノロジーズ 代表取締役社長

(b) その他の参加者

	氏名	所属・役職(いずれもワークショップ開催当時)
内閣府	藤居 俊之	内閣府総合科学技術会議事務局 上席調査員
	矢ヶ部 太郎	内閣府総合科学技術会議事務局 研究員
	猿田 紀子	内閣府総合科学技術会議事務局 参事官補佐
文部科学省	氏原 拓	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 室長補佐
	田村 元紀	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 文部科学省調査員
	野田 武司	文部科学省 研究振興局 基礎基盤研究課 ナノテクノロジー・材料開発推進室 科学技術・学術調査員
	河本 洋	文部科学省 科学技術政策研究所 特別研究員
経済産業省	岩野 宏	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ファインセラミックス室/ナノテクノロジー・ 材料戦略室 課長/室長
	渡辺 隆史	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ファインセラミックス室/ナノテクノロジー・ 材料戦略室 課長補佐
	穂積 篤	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ナノテクノロジー・材料戦略室 産業技術企画調査員
	稲垣 勝也	経済産業省 製造産業局 ファインセラミックス室/ナノテクノロジー・材料戦略室 ファインセラミックス専門職/係長
	大江 朋久	経済産業省 製造産業局 非鉄金属課/ナノテクノロジー・材料戦略室 技術係
	新居 勉	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 研究開発専門職(ナノテク・材料)
	高島 浩	経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 研究開発専門職(新製造・ナノテク・材料)
	浅野 晃司	経済産業省産業技術環境局研究開発課 情報通信担当
新エネルキ'ー・産業技 術総合開発機構	福井 徹	(独)新エネルキ'ー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロシ'ー・材料技術開発部 主査

	林 和志	(独)新エネルキ'ー・産業技術総合開発機構 ナノテクノロシ'ー・材料技術開発部 主査
	小嶋 典夫	(独)物質材料研究機構ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 副センター長
- 物質·材料研究機構 -	平原 奎治郎	(独)物質材料研究機構ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター 企画部門長
	黒澤景	(独)物質材料研究機構 企画調査室 運営主席
理化学研究所	大須賀 壮	(独)理化学研究所・研究プライオリティー会議 研究政策企画員
	山田 鏡司	(独)理化学研究所・基礎基盤・フロンティア研究推進部・基礎基盤研究推進課課長
	亘理 誠夫	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長
ナノテクノロジービジネス 推進協議会	大屋 朝夫	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局次長
	佐藤 進	ナノテクノロジービジネス推進協議会 事務局長代理
松下電器産業 株式会社	瀬恒 謙太郎	松下電器産業(株) コーポレート R&D 戦略室 先端技術総括担当
科学技術振興機構	北澤 宏一	(独)科学技術振興機構 理事
	落合 幸徳	(独)科学技術振興機構 科学技術振興調整費業務室 プログラム主管
	野村 治	(独)科学技術振興機構 連携施策群支援業務室 主監補佐
	野口 義博	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 調査役
	金子 博之	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営室 調査役
	生嶋 達史	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 主査
	荒岡 礼	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 主査
	今村 恭子	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 主査
	古川 雅士	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 主査
	松村 郷史	(独)科学技術振興機構 研究領域総合運営室 主査
	三吉 威彦	(独)科学技術振興機構 特別プロジェクト推進室 技術参事
	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
	江口 健	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	波多腰 玄一	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
-	松村 光雄	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター シニアフェロー
	村井 眞二	(独)科学技術振興機構 研究成果活用プラザ大阪 館長 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	木村 茂行	(社)未踏科学技術協会 理事長 (独) 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	田中 秀治	東北大学大学院 工学研究科 ナノメカニクス専攻 助教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	宮本 宏	(独)産業技術総合研究所 評価部 主席評価役 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー
	村上 正紀	京都大学大学院 工学研究科 材料工学専攻 教授 (独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー

	雄山 泰直	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	中山 智弘	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー
	永井 康介	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター フェロー 東北大学 金属材料研究所 助教授
	伊東 義曜	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター 主任調査員
	横田 修	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシェイトフェロー
	岡山 純子	(独)科学技術振興機構 研究開発戦略センター アソシェイトフェロー

研究開発戦略センター報告書

「ナノテクノロジー・材料分野」俯瞰ワークショップ 報告書 CRDS-FY2007-WR-07

独立行政法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター 平成19年4月 田中グループ (ナノテクノロジー・材料分野担当)

> 〒102-0084 東京都千代田区二番町3番地 電話 03-5214-7483 ファクス 03-5214-7385 http://crds.jst.go.jp/

平成19年4月 Copy right ©2006 JST/CRDS

許可なく複写・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。

