

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

平成14年6月

科学技術・学術審議会

研究計画・評価分科会

目次

はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
物質・材料研究開発の推進に関する考え方・・・・・・・・	4
1．物質・材料を巡る現状認識及び推進にあたっての	
基本的な考え方・・・・・・・・・・・・・・・・	5
2．施策の推進方策・・・・・・・・・・・・・・・・	7
3．重点領域の概要・・・・・・・・・・・・・・・・	10
3 - 1 環境保全材料・・・・・・・・・・・・・・・・	10
3 - 2 エネルギー利用高度化材料・・・・・・・・	12
3 - 3 安全空間創生材料・・・・・・・・・・・・・・・・	15
3 - 4 評価・加工等基盤技術・・・・・・・・	17
3 - 5 新機能・高度な機能を生み出す物質・材料の発掘・・・	20
ナノテクノロジー研究開発の推進に関する考え方・・・・・・・・	22
1．ナノテクノロジーを巡る現状認識及び推進に	
あたっての基本的な考え方・・・・・・・・	23
2．施策の推進方策・・・・・・・・・・・・・・・・	28
3．具体的な課題の抽出 - 20年後までの実用化、産業化を	
展望した研究に係る課題の抽出・・・・・・・・	34
(1) 次世代通信用ナノデバイス・・・・・・・・	35
(2) 超集積システム・素子・素材技術の研究・・・	38
(3) 単一分子素子と集積・・・・・・・・	42
(4) テラビット級ナノメモリの原理・素材・方式・・・	45
(5) 新原理・量子デバイスの探索的研究・・・	48
(6) 次世代フォトニクス基礎・・・・・・・・	50
(7) バイオ分子デバイス・・・・・・・・	54
(8) 超高感度知的センサー技術・・・・・・・・	57
(9) IT化医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン・・・	60
(10) ナノソフトマシン・・・・・・・・	65
(11) ナノ組織エネルギー貯蔵・変換材料・・・	68
(12) ナノ構造制御触媒・・・・・・・・	72
(13) ナノ空間材料・・・・・・・・	78
(14) 超分子制御・・・・・・・・	81
(15) ナノチューブ・フラーレン・・・・・・・・	84
(16) クラスタ、ナノ粒子・・・・・・・・	88

(17) ナノコンポジット構造材料・	95
(18) ナノ組織制御・機能材料・	100
(19) ナノ制御高機能表面界面材料・	105
(20) 有機・無機融合ナノ構造体構築・	110
(21) ナノスピントロニクス・	115
(22) ナノ造形・	119
(23) プログラム自己組織化・	123
(24) ナノ新計測・	127
(25) ナノシミュレーション・	131

(参考)

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会名簿・	135
ナノテクノロジー・材料委員会委員名簿・	136
物質・材料ワーキング・グループ委員名簿・	137
ナノテクノロジー・ワーキング・グループ委員名簿・	138
科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会 における審議の過程・	139
ナノテクノロジー・材料委員会における審議の過程・	140
物質・材料ワーキング・グループにおける審議の過程・	141
ナノテクノロジー・ワーキング・グループ における審議の過程・	143

はじめに

平成13年度から5年間にわたる我が国の科学技術の推進に関する総合的な方針を示した第2期科学技術基本計画(平成13年3月30日閣議決定)において、「ナノテクノロジー・材料分野」が「ライフサイエンス分野」、「情報通信分野」、「環境分野」に加え、特に重点を置き優先的に研究開発資源を配分すべき重点4分野の1つに位置づけられているとともに、特に「ナノテクノロジー」については急速に発展し得る領域として機動性を持った的確な対応が求められている。

さらに、平成13年9月には、総合科学技術会議において、各重点分野において重点領域並びに当該領域における研究開発の目標及び推進方策の基本的事項を定めた推進戦略を策定した。このナノテクノロジー・材料分野の推進戦略においては、本分野に対する国家的・社会的要請として、「産業競争力の強化と経済社会の持続的発展」、「環境・エネルギー対応、少子高齢化への対応を通じた豊かな国民生活の実現」、「国民の安全・安心な生活の確保、戦略的技術の保有等安全保障的な観点からの国の健全な発展の実現」が挙げられている。

これら国家的・社会的要請に応えるべく、「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」、「環境保全・エネルギー利用高度化材料」、「医療用極小システム・材料、生物のメカニズムを活用し制御するナノバイオロジー」の3つの領域及び、これらの実現にとって不可欠な基盤技術、材料技術である重点領域として、「計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術と波及分野」、「革新的な物性、機能を付与するための物質・材料技術」の2つの領域の計5領域が重点領域として位置づけられている。

また、平成13年7月11日に決定された「平成14年度の科学技術に関する予算、人材等の資源配分の方針」において、平成14年度は特に、ナノテクノロジー・材料分野では「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」、「ナノレベルを中心とした計測・評価・加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術」、「革新的な物性、機能を付与するための物質・材料技術」に重点的に資源配分することとされた。

なお、同方針の他の重点分野にもナノテクノロジー・材料の活用が期待されており、例えば、ライフサイエンス分野では「ナノバイオロジー」や「再生医療等の新しい治療技術の開発」が含まれている。情報通信分野では「ナノ技術等の新しい原理・技術を用いた次世代情報通信技術」があり、環境分野では「ゴミゼロ型・資源循環型技術研究」などが挙げられている。

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会では、科学技術基本計画と総合科学技術会議における検討を十分踏まえつつ、文部科学省におけるナノテクノロジー・材料に関する研究開発計画の作成及び推進に関する重要事項を検討するため、平成13年5月、その下にナノテクノロジー・材料委員会を設けるとともに、専門的にも十分な

議論を行うべく、委員会の下にナノテクノロジーWG及び物質・材料WGを設け、検討した結果を基に同年8月、「文部科学省におけるナノテクノロジー・材料分野の推進に関する基本的な考え方」を中間報告書としてとりまとめた。

本報告書は、上記中間報告を基礎として、その後の科学技術の進展状況や、総合科学技術会議における問題意識等を踏まえ、ナノテクノロジー・材料分野の今後10年程度を見通した上で当面の5年間程度について、文部科学省において重点的に推進すべき研究開発課題及び推進方策等を示すため、「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」としてとりまとめたものである。

その際、特に、経済活性化への寄与、分野間の融合領域の重視、将来の産業競争力を決定づける技術課題の重視、人材の育成・確保・活用等の観点を考慮し、検討を行った。

また、検討にあたってはナノテクノロジー・材料分野は、ナノテクノロジー分野及び物質・材料分野を包含する広範な分野であるため、それぞれの分野について専門的に検討を行った。この際、両分野に重複するナノマテリアルについては、特にナノテクノロジー分野の中で重点的に検討を行った。

物質・材料研究開発の推進に関する考え方

1．物質・材料を巡る現状認識及び推進にあたっての基本的な考え方

物質・材料科学技術の重点領域、当該領域における研究開発の目標及び推進方策については、現在までに、総合科学技術会議、科学技術庁及び文部科学省において以下のような検討が行われている。

第2期科学技術基本計画の中で、物質・材料分野については、「情報通信や医療等の基盤となる原子・分子サイズでの物質の構造及び形状の解明・制御や、表面、界面等の制御等の物質・材料技術」、「省エネルギー・リサイクル・省資源に応える付加価値の高いエネルギー・環境用物質・材料技術」、「安全な生活空間を保障するための安全空間創成材料技術」に重点を置くこととされた。

一方、文部科学省においては、平成12年6月、科学技術庁（当時）の物質・材料系科学技術の推進方策に関する懇談会において、物質・材料科学技術のあり方及び推進方策について検討し、既に「ナノ物質・材料」、「環境・エネルギー材料」、「安全材料」に重点化することが提言されている。

物質・材料分野の最大の特色をあげるならば、物質・材料における発見がこれまでのほとんどの技術革新を牽引してきたと言って過言ではない。物質・材料科学技術は極めて広範囲にわたり、その特徴を端的に言い表すことは必ずしも容易ではないが、敢えてこれを挙げれば多様性と飛躍性、そして技術支配性が挙げられる。あるニーズに即した機能や性能を達成する材料を開発する場合、材料の組成や組織、あるいは合成、加工、処理、さらには当該材料の使用目的、環境等の諸条件により、開発すべき材料には無数の多様性があり、また、その多様性は物質そのものが持つ多様な特性が基礎となっている。この多様性を見出し、その中から材料を絞り込む試行錯誤の過程で大きな技術の改良の余地が生まれると同時に、従来の技術上の常識では不可能と考えられていたことが、ある思いも寄らない材料技術のブレイクスルーによって突如として実現可能となるという飛躍性が秘められている。また、ある製品の基本性能や機能の上限は材料の特性によって規定されてしまう場合が多く、裏を返せば材料がその製品技術の鍵を支配していることが少なくない。

我が国における物質・材料科学技術研究は、物質そのものの性質を探る基礎的研究から、産業界における製品技術まで極めて裾野が広くかつ多様に展開されており、基礎から応用、実用化に至るまで、世界的にみても質の高い研究が行われている。例えば論文数及び被引用数のシェアで見ると、我が国における科学技術分野別では物質・材料科学技術が最も高く、最も世界に通用する分野であることを裏付けている。米国の調査機関ISI社による2001年の文献引用頻度調査によれば、世界の機関別論文被引用件数において、材料部門で東北大学が世界1位、物理部門で東京大学が2位、化学部門で京都大学が3位にとトップスリーの中にランクされている。材料研究と密

接に係る物理部門、化学部門、および、材料そのものとしての各部門で、その3分の1を日本の機関が占めたことになり、第1期科学技術基本計画の成果がまさにここに現われたと見てよいであろう。論文の引用数は、世界の研究者がその論文にどれだけ注目しているかの指標とされるもので、各学術分野での総合力を示す客観的な指標と考えられる。

産業技術としての材料技術は、鉄鋼、非鉄、化学、セラミックス等の素材産業のみならず、我が国が強い国際競争力を有する情報機器、家電、電子部品、半導体、自動車、精密機械等の「ものづくり」産業にとって欠くことの出来ない基盤技術である。同時に材料産業そのものも、出荷額、従業員数、付加価値額などで製造業全体の約3割を占める基幹産業であり、技術開発水準、品質ともに極めて高く、国際競争力が高い。

このように、20世紀後期における我が国の経済大国としての発展も、高度なものづくり技術による「高信頼性・ハイテク」製品を生み出すことを可能にした、物質・材料科学技術の優位性に支えられたものであると言える。

これまで、我が国では「物質・材料系科学技術に関する研究開発基本計画について」（昭和62年、科学技術会議）に基づき、新しい概念に基づく手法を駆使しつつ革新的な機能を有する物質・材料の創製を目指した研究に重点を置き、また、このための基礎となる原理、現象に立ち返った理論的研究の体系的推進、研究開発のブレークスルーをもたらすような高度な共通・基盤的技術の開発、創製された物質・材料の利用技術や既存材料の高度化を目指して物質・材料科学技術を推進してきた。

こうした1980年代後半以降の基礎的研究を重視した科学技術政策や、第1期科学技術基本計画の下での公募型基礎研究制度の充実等により、大学、国研等においてはナノテクノロジー分野を中心に多くの優れた革新的シーズが生み出されてきている。

また、1980年代、産業界の基礎研究所等においてもいわゆる「新素材ブーム」を背景に豊富な資金と人材をもとに研究開発が活発に行われ、我が国の材料研究開発推進の主要な一翼を担ってきた。これまでの我が国の強さは、材料研究においてこのような知的資源の層が厚いことにある。

物質・材料分野において、我が国の大学や国研の研究は、一例を挙げれば、変圧器用軟磁性部品や軽量・高強度材料として用いられるアモルファス合金、高温超伝導体のケーブルとして用いられるビスマス系超伝導体、防汚タイル等に用いられている酸化チタン光触媒等、近年も多くの産業応用をリードする実績を有している。

こうした積極的な物質・材料科学技術への取組みにより、数多くの優れた研究開発が行われ、我が国の本分野における研究開発水準は飛躍的に高まったが、物質・材料科学技術は一般に成果が得られるまで比較的長期間かかること、さらに最終的な製品技術等の形で我々の生活に利用されるまでのリードタイムも長いことから、大学や国研に豊富に蓄積された研究シーズと産業界が今求めているニーズとのマッチングが容易ではなく、これらが効率的に産業技術へと展開されているとは言い難い面がある。

また、物質・材料研究に取り組む産学官の各機関や研究者は往々にしてその各材料毎の専門分野に細分されてそれぞれ個別に研究に取り組んでおり、ニーズの多様化と急速な時代の変化の下にあってその取組みが概して総花的で非効率な面があることも否定できない。最近では、国際的に科学技術を産業競争力強化の重要な原動力と捉える考え方が顕著になってきているが、我が国における物質・材料科学技術は研究開発段階におけるコンセプト・フォーメーション、つまり何に役立つ研究なのか、社会にどのような効果をもたらすことを目標としている研究なのかについての戦略構想が弱いという一面を有している。

また、物質・材料分野については、欧米より優勢である我が国の研究開発水準を活用して、アジア諸国をはじめとした国際協力を積極的に行い、世界のリーダーシップを握っていくことが求められる。特に、我が国で研究開発された省エネルギーと環境保全の技術は、我が国のみならず、地球規模での役割を果たすことになるとの認識に立ち、これらの研究は国際貢献の一つとしても認識すべきである。

2．施策の推進方策

(1) 文部科学省における重点領域の抽出

総合科学技術会議の議論において、社会ニーズ対応の技術開発の重要性が指摘されており、数多くの研究開発独立行政法人、研究開発特殊法人、大学等を所掌する文部科学省においても、社会ニーズ対応への重点化が求められている。

一方、これら社会ニーズ対応の技術開発を支えるものとして、評価・加工などの基盤技術、新機能・高度な機能を生み出す物質・材料の発掘などの材料技術は将来の技術革新につながる新たな芽を生み出すものであり、大学等においてこれら萌芽的な基礎研究が行われている文部科学省においては欠くことのできない視点である。

そこで、科学技術基本計画、総合科学技術会議の議論を踏まえるととともに、ライフサイエンス分野、環境分野、エネルギー分野での重点化に物質・材料分野としても積極的に貢献する観点から、社会ニーズ対応として、「環境保全材料」、「エネルギー利用高度化材料」、「安全空間創成材料」の3つを重点領域として、これらを支える基盤として、「評価・加工等基盤技術」、「新機能・高度な機能を生み出す物質・材料の発掘」の2つを重点領域として位置づけることとする。それぞれの重点領域についての概要を以下に記す。

なお、物質・材料科学技術を重点的に推進するに際して、研究者の自由な発想に基づく、幅広く、新たな知に挑戦し未来を切り拓く、国際水準の質の高い基礎研究を一層重視するとともに、萌芽的な分野融合領域に対して先見性・機動性を持った対応が望まれる。

（２）人材育成への取り組み

物質・材料分野は物理と化学の融合が極めて重要な分野であり、高温超伝導の展開がそのことを多くの人びとに印象付けた。また、材料の基本的な素養は量子力学から有機・無機物質科学と分析科学、熱力学と速度論、物性論などであるが、この広い知識と激しい変化に応じた知識獲得のためには、技術者のための社会人教育が継続してなされる必要がある。

また21世紀の新たなミッションを考えると、金属、セラミックス、高分子、生体材料などが融合した形で材料学を形成していく必要があり、深さとともに幅の広さが要求される。したがって、大学院レベルの高度な教育や産学連携を通じたOJT的な教育の充実が有効である。語学や情報教育に比較して、材料は幅が広すぎるために純民間による社会人教育を成立させることが難しい。特に新たな分析/観測技術、有機電子材料、環境材料、個別エネルギー関連材料などにおける技術者の素養レベルを高めておくことは、日本の国際競争力における相対優位を保つ上で有用である。

（３）研究成果の実用化への取り組み

産業界においてはバブル崩壊後、材料に係る研究開発部門は急速に縮小されており、物質・材料科学技術におけるシーズ部分のみならずよりニーズに対応した研究部門においても大学、公的研究機関等の役割に対する期待が強まっている。特に、これらの研究機関に存在するシーズを産業界のニーズへ、また、産業界に存在する技術的課題から新たな基礎的研究課題へとつなぐコーディネーターとしての役割が国に対して強く期待されている。また、大学及び公的研究機関には革新的シーズを社会還元するという観点から技術移転促進に向けた取り組みの強化が求められている。さらに、革新的シーズを生み出すように官の運営する大規模研究施設が十分に活用されることが望まれる。加えて、大学及び公的研究機関等の基礎的研究の成果として芽吹かんとしている技術シーズに対し、技術のユーザーたる産業界との連携の下で計画の段階から緊密な連携の下で推進してゆくことが、我が国の産業技術の発展、経済・社会への科学技術による貢献の観点からも重要な取り組みである。

また、物質・材料における研究開発においては、物性における新たな見方や新しい物質発見における進展が、研究全体に大きな影響を与え、また、精神的支柱となる。一方、材料応用における現実的課題はしばしば物性の基礎的理解の不足を感じさせるものであり、そこに基礎研究の大きな課題が隠されている。したがって、中長期的な視点に立った基礎研究、特に萌芽的、先端的な研究等を着実に推進するとともに、このような非常に基礎的な部分の研究者と材料応用研究に携わる研究者との相互理解を促進することが、今後、物質・材料の研究をより多いものにするために重要である。

このような取り組みが期待される具体的な課題として、低コスト太陽電池プロセス、室温・高温各種燃料電池、電力貯蔵・変換用超伝導材料、高効率複合発電用耐熱材料、

熱電変換材料、次世代構造材料、次世代安心安全材料、巨大効果物質探索、極端条件合成、高次構造・多重化機能創出プロセス（組成・機能傾斜、インターカレーション、人工格子、多孔体、自己凝集）などが注目される。

また、環境へ向けたミッションとして、リサイクルのためのプラスチックなどの資源化分解プロセスの研究、バイオマス利用プロセス技術の開発などを付加的に挙げることができる。

一方、最近特に進展の著しい分野として、有機分子・ポリマーEL材料の進展が上げられるが、企業間の激しい開発競争が既に開始されているが、基盤となる大学等における科学の進展が特に求められる。これは燃料電池でも同様なことが言える。

3．重点領域の概要

3 - 1 環境保全材料

(1) 検討者

検討担当委員：山本良一 東京大学国際・産学共同研究センター長
：国武豊喜 北九州市立大学副学長
：遠藤 剛 山形大学工学部教授

(2) 概要

日本では高度経済成長にともなって、大量生産・大量消費・大量廃棄を前提とした生産と消費のパターンが進み、新たな物質・作用源の環境への放出とそれによる環境変動をひきおこし、地球環境問題等環境問題の広域化、拡散、複雑化をもたらした。1993年に制定された環境基本法では、環境への負荷の少ない「持続可能な社会の構築」を目指すことが謳われている。環境の主要課題が個別公害問題から、国内及び国際的社会経済のあり方にかかわるものへと変化してきたことで、環境分野の研究開発には、個別のプロセス研究から、現象解明、影響評価、対策技術の開発と社会への適用性についての評価に至るまでを総体的・俯瞰的にとらえる総合的な研究への展開がもめられている。材料分野の研究においても従来のような新奇な材料物性の発見や材料機能の向上のみ追求する研究から、材料のライフサイクル全体における環境負荷の低減、すなわち環境効率や資源生産性の飛躍的向上が重要な課題となっている。

(3) 現状及び実用化・産業化の具体的目標

廃棄物の最終処分場が逼迫することや鉱物資源が将来的に枯渇するなど、環境制約や資源制約が顕在化し、将来の我が国経済社会の持続的な発展が阻害されることが懸念される。このため、リデュース、リユース、リサイクル(3 R)等が積極的に行われ、かつ廃棄物が適正に処分されることにより、天然資源の消費が抑制され、環境負荷が可能な限り低減される循環型社会の構築を、少なくとも 10 年以内に図ることが必要となっている。

また化学物質など有害物質のリスクに対する内外の関心は、近年ますます高まっている。現代の人々の有害物質に対する不安を払拭し、将来の世代が健やかな暮らしと豊かな環境を享受できる、いわゆる持続可能な社会を形成していくうえで、有害物質のリスクの評価及び管理に関する研究や技術開発に期待される役割は大きい。さらに、人間は様々な環境媒体や家庭用品、水道水、室内空気などを通して有害物質に暴露することから、有害物質の分解、無害化技術、毒性元素等の代替化技術の開発を行うことも重要な課題である。

(4) 研究の概要

1) ゴミゼロ型・資源循環型技術

環境影響評価 (LCA)

材料プロセス、デバイス、機能材料、構造材料の環境影響評価

材料、デバイスの環境パフォーマンス指標に関する研究

低環境負荷プロセス技術

ソフト溶液プロセス等

リデュース指向材料

超軽量構造材料、薄型機能素子、長寿命化・延命化技術等

エコデバイス技術

Pb フリー圧電素子、As、Hg フリー発光素子、低消費電力デバイス等

リサイクル容易化材料設計技術

生分解性材料技術

天然材料有効利用技術

生活、産業廃棄物の再資源化技術

廃棄ポリマーを解重合によりモノマーに変換する化学的リサイクル等

2) 環境浄化・無害化技術

有害物質の分解、無害化技術

ダイオキシン類分解触媒等

毒性元素、枯渇性非鉄金属元素の代替化技術

環境計測技術

微量重金属感知センサー技術等

環境の保全、浄化のための有害物質のリスク評価および管理を適切に行うためには、その前提となる計測データの完備が不可欠である。環境に含まれる物質は、一般にはきわめて多様であり、通常物質計測法をそのまま適用することはできない。与えられた環境に特化した計測技術の開発が求められる。

分離技術

環境中に含まれる有害物質、リサイクルや無害化処理の結果として生じた物質などを分離除去するための方法は、環境保全のための基本技術と位置づけられる。そこで中心的な役割を果たすのは、革新的な分離システムの開発と多様な要求に応えられる分離膜の創造である。

3 - 2 エネルギー利用高度化材料

(1) 検討者

検討担当委員：岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
北澤宏一 科学技術振興事業団専務理事
(東京大学客員教授)
小野田武 三菱化学株式会社顧問
米屋勝利 横浜国立大学大学院環境情報研究院教授
井上明久 東北大学金属材料研究所長

(2) 概要

地球環境の維持向上と豊かな社会の整合に向けて、また、我が国の安全保障を確保する点からも、将来のエネルギー源とその利用システムを自然エネルギーをも含めて多様化するための技術、エネルギーの変換、輸送、貯蔵、利用の高効率化と安全のための技術、および、得られたエネルギーの利用高効率化を図る省エネルギー技術の展開は必須である。

現代の化石エネルギー時代において先進国の国民 1 人当たりの年間炭酸ガス排出量は約 1 トンに達しており、エネルギー源を将来において何に頼るかは地球環境問題における最大の関心事となってきた。このため、人類の叡智が賢い選択を行えるよう、科学技術はその選択肢を準備しておく義務がある。文部科学省としての責務は、常に自由な立場から各種エネルギーシステムに対する評価検討を行い、各時点での将来的ポテンシャルを含めたアセスメントを可能にしておく必要がある。そのためには、各エネルギーシステムの技術レベルを最適なものとする努力がなされておらねばならない。

特に 1 次エネルギー源の選択は高度に政治的な側面をも有しており、国家安全保障の立場からも、多様なシステムのポテンシャルを明らかにしていく研究が急務である。このため、可能な種々の 1 次エネルギー源に対して、材料による革新的な利用高度化技術が期待される研究提案を受け止め、その可能性を試し、それを育成する必要がある。

一方、エネルギーはその生産地と消費地との距離的・時間的乖離が大きな問題であり、その変換、輸送、貯蔵、利用に対する広範な技術への対応も検討されねばならない。文部科学省ではとくに自由な発想に基づく革新的なシステムとその技術的可能性を追求する萌芽的シーズの拾い上げとその育成が求められる。また、産業界において実施される開発研究に対して、それと連携的・相補的になされる協力が要請されるところである。

さらに、全エネルギー消費量を抑える上で省エネルギーの実施は非常に有効である。

その努力は産業・民生の双方において継続的になされる必要があるが、これを有効にする材料技術の役割には依然として大きなものがあり、文部科学省としても、産業界が行う努力に対して、よりリスク度の高い部分に、積極的に取り組むことが期待されている。

エネルギー技術は材料に蓄積されたすべての知見を生かして取り組まねばならない課題であるが、文部科学省においては特に、画期的なエネルギー利用高度化を期待できる新たな提案を拾い上げ、その育成を図るとともに、産業界が取り組もうとしている開発研究に対して、特に基礎的に未知な課題の残る部分、新規材料の開発を必要とする部分などにおいて連携的な協力を築きつつ研究を推進する。特に１）エネルギー源とその利用システムの多様化、２）エネルギー変換、輸送、貯蔵、利用における高効率化と安全性の確保、３）省エネルギーにおける材料的課題に、自由な発想を以って革新的な成果の期待できる研究課題を重点的に選んで取り組むものとする。

（３）現状及び実用化・産業化の具体的目標

- １）１次エネルギー源多様化のための材料関連技術（目標達成時期は５～１５年後）
 - 自然エネルギーの低コスト化と高効率利用に資する技術
 - 低コスト太陽電池プロセス、超高効率太陽光発電、バイオマス利用技術（アルコール化など）光水素製造（変換効率１５％以上）など
 - 燃料電池技術（全固体高分子電解質型：出力１Ｗ／ｃｍ^２程度以上）
（酸化物固体電解質型：５００ で出力１Ｗ／ｃｍ^２程度以上）
燃料電池用高効率変換触媒など
 - 化石エネルギーの無害化利用技術
- ２）エネルギーの輸送、貯蔵、利用の高効率化と安全のための材料関連技術（目標達成時期は５～１５年後）
 - 遠隔地送電用超伝導ケーブル
（液体窒素温度２０万 Ａ／ｃｍ^２ の臨界電流密度をもつ線材の開発）
 - 超伝導電力貯蔵・変換用材料
（２０Ｋ 以上で強磁界１０Ｔで１０万 Ａ／ｃｍ^２ 以上の臨界電流密度をもつ線材の開発）
 - 水素貯蔵材料（室温付近で重量比１０％以上の物質の開発）
 - 化学エネルギー貯蔵媒体材料（化学変換型、熱変換型）
 - 高出力長寿命二次電池（無機全固体型積層電池、有機全固体型積層電池など）
- ３）省エネルギーに資する画期的な材料関連技術（目標達成時期は５～１５年後）
 - 超高効率 LNG 複合発電用材料（熱効率６０％を目標）
 - 次世代高効率複合発電材料の開発（総合熱効率７０％を目標）
 - 省エネルギー高耐性基盤材料（高温、高応力、耐腐食、耐摩擦・摩耗など）

熱電変換材料（SiGe系を超える性能を有する新材料の開発）

新規冷蔵・冷凍材料関連技術

超軽量高強度材料など

3 - 3 安全空間創成材料

(1) 検討者

検討担当委員：岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
松尾陽太郎 東京工業大学理工学研究科教授
相澤益男 東京工業大学副学長

(2) 概要

安全空間創成材料は人類の生活空間を保障するとともに、生活に必要な機器システムがそれぞれの機能を発揮できるよう保護収納されるために使用されている。安全空間創成材料を構築するにあたり物質・材料に期待される役割としては、高信頼性、高強度・長寿命化、リサイクル性、環境保全などに期待するだけでなく、材料自ら損傷劣化を感知・修復する次世代構造材料の開発、さらに人体に有害な紫外線などを可視光化する異種波長変換ガラスのような建築関連材料の開発などを推進する必要がある。

一方、我が国は 2020 年に高齢者が 3300 万人を超え、運動機能障害や感覚機能疾患等の割合が急激に増加する。これに備え高齢者の日常生活を支援するための人体に低負荷な生体適合材料などの次世代安心安全材料の開発を推進することは急務である。

これらの要請に応えるために、材料そのものの性能向上を図ることの他、低環境負荷型製造工程プロセス技術、構造化技術、安全使用を保障する非破壊評価技術や寿命評価技術の開発などを重要課題として推進すべきである。

(3) 現状及び実用化・産業化の具体的目標

20 世紀、人類は快適な生活を求めて資源を大量に消費しつつ、様々な構造物を建設し、機器を製作してきた。その結果、過去数十年の間に高速道路、超高層ビル、鉄道、化学プラント、電力施設および 21 世紀の重要なエネルギー源として位置づけられる原子力施設など社会基盤が急速に整備されてきたが、資源の大量消費・廃棄を前提とした社会・経済は既に限界に近づいており、21 世紀前半には寿命を迎えると予想されている。このような状況を克服するために、地球環境に調和した高信頼性・高強度・高靱性・長寿命化を目指した材料研究開発が必要となっている。高強度、高靱性は相反する性格から全てを満足する大型構造材料の開発には至っていない。さらに、材料劣化を評価する技術や寿命を評価する技術が確立されていない。

一方、環境汚染による人体に有害なダイオキシンや紫外線などの問題に適応した安全空間適応材料の開発や人体に適合した高強度・長寿命な生体適合材料の研究開発が行われているがコスト面と信頼性・安全性を向上する必要がある。

・実用化・産業化の具体的目標

1) 次世代構造材料の開発

高強度・高靱性・長寿命化を目指し、既存の材料の強度及び靱性を2倍に向上させることや、寿命を2倍にする材料を用いることにより、高信頼性を有する安全空間の創成を行う必要がある。建築関連材料としては、高周波電磁波ノイズを遮蔽し安心な空間を作る磁気シールド材、人体に有害な鉛を含まない非鉛系材料の開発、有害紫外線の可視光化のために必要な異種波長変換ガラスの開発などによる安全空間創成が必要である。また航空機や橋などの構造物中の損傷を自己診断し、修復する機能を付加して空間の安全性を高めた材料の開発が必要である。

2) 次世代安心安全材料・技術開発

再生医学的観点から生体組織の機能再生を促進する材料や高齢者が使いやすい生体適応材料の開発により、2020年までに自立した生活が送れる高齢者の数を増加させ、新たな社会参加を可能にする。このことにより、老人医療費(平成11年度12兆円)の大幅な削減及び子世帯の介護負担の軽減を促し、安全空間創成に資する新規産業の創成を促す必要がある。安全設計技術の確立では、リスク情報のデータベースと非破壊評価による材料の寿命評価技術を組み合わせ、航空機、船舶及び原子力等発電プラントなどの構造物の余寿命評価と、そのリスク情報のデータに基づく大事故発生の予防法の確立を目指す必要がある。

我が国の高度成長期に製造された構造物の耐久年数を50年とすると、2010～2020年には続々と老朽化を迎え、次世代安全空間創成材料へ更新する時期を迎えることとなる。さらに2020～2030年には超高齢化社会を向かえることから、ここ10～15年程度のうちに、安全空間創成材料を開発することが非常に重要となってくる。

(4) 研究の概要

・次世代構造材料の開発：軽量構造材料、高強度長寿命構造材料、機能性構造材料、リサイクル鉄、制振性材料、電磁波遮断材料、異種波長変換ガラス材料

・次世代安心安全材料・技術開発：生体適合材料、リスク情報による安全設計技術、非破壊評価技術、余寿命評価技術、原子力安全空間確保のための材料技術

3 - 4 評価・加工等基盤技術

(1) 検討者

検討担当委員：米屋 勝利 横浜国立大学大学院環境情報研究院教授
松尾陽太郎 東京工業大学理工学研究科教授

(2) 概要

日本が、世界最高水準の工業製品を作り続けてこられたのは、優れた製造プロセス技術を有し、とくに高品質の部品・材料を安価に安定かつ大量供給できたこと、部品・材料の品質保証技術に優れていたことが最大要因である。部品・材料は金属、無機、有機高分子、それらを融合した複合材料等広範囲に及ぶため、その種類と構造・機能は多種多様であり、それぞれが先端的システムを支える要として重要な役割を果たしている。

部品・材料の製造法は、物質・材料系と要求される仕様によって異なり、物理的・化学的プロセス×固相・液相・気相化学反応によって創出されるあらゆる反応・プロセスが適材適所用いられている。例えば、金属材料、単結晶、有機高分子、ガラス等における溶融・固化法、粉体を原料とするセラミックスや合金の焼結法、有機高分子における縮合・重合等による合成反応法、薄膜や単結晶の作製法である気相合成法、さらにそれらに付随した種々の成形・加工法が、材料種と目的に応じて設定されノウハウの形で製造ラインがつくられている。我が国の材料技術の強さは、膨大なニーズが求める複雑で高度な部品・材料に応える優れた製造プロセス技術と品質保証技術にあるといわれているが、これらは長年にわたって企業現場の優れた研究者・技術者や中小企業の高度な技能者が努力し蓄積してきたものであり、日本の部品・材料が世界に強い競争力を持つ最大の要因となっている。

しかし、最近では、機能と用途のより一層の多様化や部品・材料の微細化に伴って、ミクロからナノへと格段に高度な機能と精密な設計・加工技術が必須になってきている。これを実現するためには、基盤となるプロセス科学・技術の研究を重点的に推進することが必要であり、この成果が我が国の製造技術ノウハウのさらなる高度化をもたらすものと確信される。

一方、標準化やデータベースに関しても我が国は指導的な立場にあり、セラミックス分野では ISO/TC206 の幹事国を務めている。こうした基盤となる技術を整備・構築することは、我が国が国際的にリーダーシップを維持することにもつながるもので、高い技術競争力とあわせて、21世紀における国際貢献にも資する重要な施策である。

以上の考えに基づいて、次のような基盤技術課題を重点的に推進することが必要である。

製造・加工プロセス技術の科学とその高度化、 高度微細構造解析・分析技術の開

発、 広領域特性評価技術・部材性能保証技術の開発、 計算科学による材料設計および新物質の探索、 知的基盤のデータベース化・標準化

(3) 各研究課題の具体的目標

1) 製造・加工プロセス技術の科学とその高度化

製造および加工プロセス技術の科学は発展途上分野であるといえる。部品・材料の高精度・高機能化を図るためには、例えば微細～極微細粉体を用いて種々の成形体を湿式法で作製する場合の粒子の分散や溶媒のふるまい、メルトの固化に伴う形態と微構造制御、高精度・高信頼性加工、多元系スラリーを用いたニアネットシェイピング、また、ポリマー材料の重合から成形加工を通じての一次構造から高次構造制御等、従来ノウハウとされてきたプロセス分野の科学的な発展が極めて重要である。(目標達成時期は3～15年)

2) 高度構造解析・分析技術の開発

材料の高度機能発現を目指すためには、点欠陥や転位、粒子境界やマイクロクラック、不純物、スピノーダル分解やミクロ相分離、原子構造・化学組成・電子状態解析に資する、物質の高度構造解析技術、種々の物質量・物理量の高度分析技術、さらには革新的物性評価技術など材料の特性評価とプロセス開発に直結する技術を開発することが不可欠である。(目標達成時期は5～15年)

3) 広領域特性評価技術・部材性能保証技術の開発

部品・材料の特性はミクロ領域における因子だけではなく、ナノ、ミクロ、メゾおよびマクロ領域における種々の因子が複雑にからみあって発現する。したがって、部材性能の保証を行うには、ナノ、ミクロからマクロまでの特性評価技術を統合した性能保証技術を開発することが急務である。(目標達成時期は5～15年)

4) 計算科学による材料設計および新物質の探索

コンピューター性能の飛躍的向上とアルゴリズムの長足の進歩を背景として、計算状態図の高度化や量子力学、分子動力学等の計算科学による実用材料の材料設計や新物質の探索に関する国際競争はますます熾烈となっている。この分野の発展を加速させることは優先性の高い重要研究課題の一つである。(目標達成時期は10～15年)

5) 知的基盤のデータベース化・標準化

研究者の叡智の結晶である科学情報(知的基盤)は、通常の文献には現れない詳細な情報を付加することによって初めて有効な知的基盤となる。これら知的基盤はデータベース化することによって、我が国のみならず人類共通の財産とすることができる。

また、知的基盤を背景にしてその国際標準化を進めることは、知的先進国の責務でもある。(目標達成時期は5～15年)

3 - 5 新機能・高度な機能を生み出す物質・材料の発掘

(1) 検討者

検討担当委員：国武豊喜 北九州市立大学副学長
高野幹夫 京都大学化学研究科教授
福山秀敏 東京大学物性研究所長

(2) 概要

物質の性質とそれを活かした機能は、組成、構造、かたち（丸いか針状かなどの形態、サイズ、さらに単一物質か複合体かなど）により決まる。炭素だけからなる物質であっても、構造により、グラファイト、ダイヤモンド、フラーレン、ナノチューブがあり、グラファイトとダイヤモンドでは、性質・機能が大きく分かれるのはあまりにもよく知られている。磁気記録材料としてオーディオテープやビデオテープに用いられる酸化鉄や金属鉄は、針状の微粒子である。機能を最大限に引き出すには、形態とサイズの制御が重要であることを示す例である。異なる物質を複合化することにより初めて有効な機能が生まれる例も多い。金属アルミニウムの中に微細な酸化アルミニウム粒子を分散させると、機械的な強度が増し、アルミニウムの用途が大きく広がる。

どのような組成と構造をもつ物質が存在し得るか、手に入れた物質がどのような物性を示すか、機能を最大限に引き出すかたちがどのようなものかを予測することは、実のところ、なかなか難しい。単一元素物質であるフラーレンとナノチューブですら、発見されて未だ10年程度にしかならない新物質であることからそれがうかがえる。

画期的な新物質は、しばしば個々の研究者により偶発的に発見されるようにみえるが、実際には、多くの研究者により長期にわたって絶え間なく行われた試行錯誤の蓄積に基づいている。我が国の物質・材料研究が大きな成果を挙げ、世界的にも高く評価されているのは、このような長期間にわたる努力と投資の成果である。

さらに成果を挙げて、競争的国際関係を有利に展開するにはどうすればよいであろうか。基本的には、目標とするに足る物性・機能を予め明確に提示できる理論・計算科学を開発すること、合成法と物性測定法を充実・革新して、手に入れることの出来る組成・構造・かたちの多様性を広げ、そこから新しい物性・機能を効率よく探し出すこと、そしてその新物質を、速やかに、材料化のための原料・合成・加工/集積に関するプロセスにのせることが必要である。予測困難性から来る底なしの非効率を避けるためには、理論・計算科学の開発、ターゲット機能、合成法の開発、物性測定法の開発のいずれについても、10年程度を単位とする年限を設けた集中投資がよいと思われる。

目標とすべき機能と対象物質は数限りない。以下には具体例を幾つか挙げる。

(3) 物質・材料・機能の例

1) 強相関電子系

銅酸化物における高温超伝導の衝撃的な発見は、理論的な取り扱いの難しい強い電子間相互作用(「強相関効果」)の重要性を浮き彫りにした。強相関効果は、遷移金属酸化物のみならず分子性結晶でもみられ、したがって、当然、生体物質においても期待される。これら広い範囲の物質を強相関電子系と捉える新しい観点に立って、新物質・新機能を探索する。

より具体的には、高温超伝導、巨大磁気抵抗、大きい熱電効果など、巨大な効果・特性を示す新物質の探索、それらを活かしたエレクトロニクス・オプトエレクトロニクスの展開、分子性結晶、とくに d 系(有機分子-遷移金属ハイブリッド系)の機能探索、DNA や分子モーターなど生体機能物質の物性科学的な見方の確立とそれに基づく物質・機能の開発、その他である。

2) 高次構造の構築と外場による制御

最近、伝導性ポリマーや有機 EL 素子の例に見られるように、優れた分子特性の実用化が始まったが、有機分子(ポリマーを含む)の組成と構造の多様性を考えると、さらに多彩な化学的・物理的機能が期待できる。計算化学による物性予測の進歩と分子合成技術の高度化が、そのような研究開発に拍車をかけている。

機能性分子を組織化した高次構造からは、質的にさらに高度の機能が期待できる。生体はその典型例である。機能単位の高次構造化は、当然、金属、無機物にもあてはまる。金属磁性体/非磁性体積層膜の弱磁場磁気抵抗効果は、既に読み取りヘッドとして利用されているし、抗ガン剤を層状無機化合物にインターカレートしてガン細胞に注入する研究も最近報告されている。さらに一歩進んで、磁場や電場のような外場による高次構造の制御も興味深い。

金属、無機物、有機物、ポリマー及びこれらの複合系を対象にして、一次構造の精密制御、高次構造の構築・制御とシステム化をキーワードとする機能開発を行う。

3) 最先端プロセスの開発

探索研究、材料化いずれの段階でも必要となる、下記のような試料作製プロセスの拡充・革新を図る。

純度制御プロセス、最適組成探索プロセス(コンビナトリアル法など) 極端条件下での合成プロセス(高圧、超強外場、超急冷、微小重力など) 高次構造・多重化機能創出プロセス(各種スケールでの組成・機能傾斜、インターカレーション、人工格子、多孔体、自己凝集など) その他。

ナノテクノロジー研究開発の推進に係る考え方

1．ナノテクノロジーを巡る現状認識及び推進にあたっての基本的な考え方

原子数個から分子レベルというナノメートル（10億分の1メートル）のスケールで物質を制御するナノテクノロジーは、単に従来の科学技術が解明し利用してきた機能を微細化し集積化した以上の、限りない機能を発揮する可能性を持っている。例えば、生物体はDNAというナノレベルでデザインされた構造を根源とし、さまざまなナノレベルの構造が機能する究極のナノ機械と言えるが、このような生体が発揮する機能は人類がこれまでマイクロのスケールまでの構造制御によって人工的になしえたものに対し、大きく異なった原理に基づいたはるかに高度で多様なものである。このような機能に学ぶことができれば、大きな技術的革新が可能となる。また、物質はナノのスケールでは量子的な性質を発現するようになる。このような量子的な性質はいまだ人類が本格的に利用できていない新たな機能である。ナノのスケールで構造を制御することができれば、このような量子的な性質の利用という大きな技術的革新が可能となる。

ナノテクノロジーは、このように、従来の技術にはない新たな技術体系を築くものである。人類は、ナノテクノロジー利用の門をくぐったばかりに過ぎない。上記のようなナノテクノロジーがもつ大きな可能性を考えれば、相当長期かつ広範囲な科学技術上の取組みが必要であると考えられる。

一方、これまでの科学技術は、微細化、精密化の道を歩んできた。その結果、一部では、構造のコントロールがナノスケールで可能となる段階にきている。既に研究の成果から多くの製品が生み出されるとともに、研究の進展に伴い、常に改良された新製品が生まれている。このように、ナノテクノロジーは、革新的に成果を世の中に適用することのできる科学技術であり、原理を追及する基礎研究から製品を開発する開発研究までの研究開発の取組みが深くつながり、絡み合っていて進められる性質を濃厚に持ったものである。

以上のような、ナノテクノロジーの意義と特質を念頭に、研究開発を戦略的に進めていくことが必要である。研究開発を進めるにあたっては、具体的に、以下の点に留意することが必要である。

微細化、精密化をナノメートルの極限まで追求していくいわゆる「トップダウン(Top Down)」方式の取組み、原子や分子を1個1個組み上げたり、組織配列を精密に制御して新たな機能を発現させ、革新的な物性を有する物質材料を創製する「ボトムアップ(Bottom Up)」方式の取組み、DNAにより予め与えられた情報に基づいて生命体が特定の構造を極めて巧みに効率よくくみ上げていくような「自己組織化」のメカニズムの開発の取組みを総合的に行っていくことが必要である。

ナノテクノロジーは、物理、化学、生物、工学（エレクトロニクスなど）をは

じめとした非常に多岐にわたる科学の融合により原理原則を明らかにすることにより、技術の開発が可能となる分野である。

これらの成果は、「ライフサイエンス」、「情報通信」、「環境」をはじめとした広範な分野に適用され、それらの発展を支えるものである。産業競争力の強化と経済社会の持続的成長、環境エネルギー問題への対応、少子高齢化への対応、安心・安全な生活の確保など、科学技術による社会的・経済的ニーズが高まる中で、これらの課題を克服し、新たな知を創造する上で不可欠である。

上記のように、基礎研究から製品開発までが極めて深くつながっていることから、「基礎研究」から「応用研究」、「開発研究」へという取組みのみでは適時性のある成果の利用が行えない。このため、特に、大学等における研究に対して、基礎研究のみならず、実用化・産業化を展望した研究への貢献が高く期待されている。

このような究極の技術の実現のためには、極微細領域での観測・評価・加工といった基盤技術が不可欠であり、これらの技術の発展がナノテクノロジー、ひいては我が国の科学技術・産業技術の発展の鍵を握るものである。これら共通基盤技術への取組みにあたっても、これまでの学問分野を超えた取組みが必要となっており、この点でもナノテクノロジーは特に総合的な分野融合が求められるものである。

我が国の科学技術政策上の位置づけとしては、第2期科学技術基本計画において、「ナノテクノロジー・材料分野」が、特に重点を置き、優先的に研究開発資源を配分すべき分野として位置づけられている。さらに、「ナノテクノロジー」は、急速に発展し得る領域としても位置づけられるとともに、機動性を持った的確な対応が求められている。また、特にナノテクノロジーについては、科学技術会議（当時）において戦略的推進の方策が検討され、平成12年12月には、政府レベルでの我が国最初の報告書である「ナノテクノロジーの戦略的推進に関する懇談会報告書」が取りまとめられるとともに、産業界においては、平成13年3月に経済団体連合会が「ナノテクノロジーが作る未来社会 - n-Plan21」を発表している。特に、経済団体連合会の報告書によれば、2010年のナノテクノロジーの市場規模は国内で約27兆円と試算しており、ナノテクノロジーが産業界に大変大きな影響を与えるものと期待している。

これらの報告書では共に、ナノテクノロジーについては、我が国の産業競争力の強化を図るとともに、我が国が世界の科学技術に貢献できる研究ポテンシャルを維持する点から、研究を大括りに「5～10年後の実用化・産業化を目指したニーズ対応研究」、「10～20年先を展望した挑戦的な研究開発」及び「個人の独創性を重視した萌芽的研究」にわけて推進の方策を示している。

総合科学技術会議においては、平成13年7月11日に「平成14年度科学技術に

関する予算、人材等の資源配分の方針」を策定するとともに、9月には、ナノテクノロジー・材料のより具体的な推進方策を盛り込んだ推進戦略を取りまとめた。本推進戦略においては、今後5年間に重点を置くことが求められる重点事項として、他の重点3分野への実用化のアウトプットを意識した「次世代情報通信システム用ナノデバイス材料」、「環境保全・エネルギー利用高度化材料」及び「医療用極小システム・材料、生物のメカニズムを活用し制御するナノバイオロジー」の3領域並びに、これらの3領域の実現にとって不可欠な技術である「計測・評価・加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術と波及分野」及び「革新的な物性、機能を付与するための物質・材料技術」の2領域の合計5領域を挙げている。

我が国の物質・材料の研究開発水準は、既存材料技術では欧米より優勢であるとの評価を第2期科学技術基本計画において得ている。科学的・学術的な具体的指標としては、1991年から2000年の間に発表されたナノテクノロジー関連の学術論文に関し、被引用件数の高い論文、著者、研究機関、国等についてISI社が上25位までを順位付けした結果によると、被引用件数の多い著者として5名の日本人研究者、4機関の日本研究機関が占めており、国別比較では、アメリカに次ぐ第2位となっている。また、産業化の指標である特許については、Derwent社の発表によると、1991年から2000年のナノテクノロジー関連特許出願数トップ25のうち、我が国の研究開発機関が9機関ランクされている。

ナノテクノロジーは、既存の科学技術の微細化・精密化を通じて革新的に発展する面がある。我が国は、これまで微細加工技術や精密合成、精密制御といった分野において、大学、国立試験研究機関等における研究の成果を活かし、下記に例示するように世界をリードする様々な実績を残す高い競争力を有している。

- ・ 携帯電話やタッチパネル等に用いられている導電性ポリマー
- ・ 医療品をはじめとした各種有用物質の工業生産に用いられる不斉触媒をはじめとした触媒
- ・ 高速FET、レーザ、トンネル素子や赤外検出器に用いられている超薄膜
- ・ ディスプレーに用いられる有機半導体電界発光素子（有機EL素子）
- ・ 電球や蛍光灯に比べて格段に寿命が長く、電力消費量が少ない利点を活かし、表示機・信号、医療照明等に用いられている発光ダイオード

一方、米国は、2000年1月に、国家ナノテクノロジー戦略（NNI）を発表し、ナノテクノロジーは、バイオテクノロジーとともに今後、長期にわたる戦略的な取り組みが必要な分野であるとの認識に立ち、国家戦略として強力に推進することを内外に表明するとともに、当該分野関連予算を、2000年度270百万ドル、2001年度422百万ドル、2002年度604百万ドルと大幅に拡充し、来年度予算にも710百万ドルを要求

しているところである。また、NNI における初年度 は基礎研究やグランドチャレンジと称する 10 ～ 20 年後を展望した挑戦的な研究に重点をおいており、このことから長期的視野にたった施策の推進を図ろうとしていることが明白である。

ナノテクノロジー関連分野は、我が国が長年基礎的に取り組んできた分野であり、様々な蓄積を有するとともに、多くの産業化・実用化をもたらした、いわば「日本の生命線」である。我が国が、今後、この分野において世界をリードし、次代の科学技術革命を導くとともに、産業競争力の強化につながる画期的な成果をあげるためには、物質創成から材料・素子開発までの全体を見据えるとともに、真に斬新で挑戦的かつ旧来の分野を越えた研究に対して、総合的かつ戦略的な取組みを長期的な視点に立って行うことが求められる。

特に、大学、独立行政法人、特殊法人等を擁し、広範な研究開発を展開している文部科学省が果たすべき役割は計り知れない。経済活動に本務をおいて産業技術に直結してゆく研究開発に重点を置く事業官庁に対し、文部科学省は、社会的なニーズ、つまり実用化・産業化への展開を視野に入れつつも研究者の自由な発想を尊重し、電子、原子、分子に基づく原理・原則を明らかにしつつ、学術的に非常に興味深い分野に対する長期的な取組みについて着実に推進するとともに、基礎的な研究から得られた研究成果についての効果的な社会・経済への活用を推進すべきである。加えて、大学等、幅広い教育の機能を有する機関を担う文部科学省は、我が国のナノテクノロジー人材の育成について、初歩から高度な段階に至るまで多大な役割が期待される。

また、総合科学技術会議の分野別推進戦略におけるアウトプットを意識した3つの領域については、文部科学省としては、実用化・産業化を展望し、それぞれ以下のような観点に特に留意することが必要である。

次世代情報通信システム用ナノデバイス材料においては、2010 年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバイス・材料・システムの構築に取組み、世界標準の獲得を目指すことが求められる。この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方について産業化を見据えながら段階的な目標設定も行いつつ、戦略的に取り組むことが必要である。

産業界においてもその取組みの強化が図られている環境保全・エネルギー利用高度化材料については、既存の材料分野を越えた多機能・多段階に機能する触媒等の環境保全材料、革新的にエネルギー変換効率を向上させた燃料電池材料等のエネルギー利用高度化材料をはじめとした各種のナノ構造制御材料開発により積極的な取組みを行うことが期待される。

ナノバイオテクノロジーは、米国においては、2000 年から コーネル大学を拠点としてナノバイオテクノロジー・センター・プロジェクトを開始している他、英国でも、オックスフォード大学、ケンブリッジ大学を中心としたナノバイオテクノロジーへの

総合的な取組みが開始されている等、昨今、欧米における取組みの強化が目立つ分野である。ナノバイオテクノロジーについては、バイオテクノロジーと物理、化学、電子技術などの融合が次代の科学技術革命を拓くものとして期待が高く、我が国においてもこのような新たな分野において、世界のトップを目指すべく、緊急かつ戦略的な取組みを開始すべき領域である。

これらの、社会・経済へのアウトプットを意識した領域の実現にあたっては、科学技術分野や研究機関を超えた取組み、計測・評価・加工等の先端的共通基盤技術開発や革新的機能を有する物質・材料創製への確固とした取組みが必要である。また、ナノテクノロジーについては、昨今、各国における国家戦略としての取組みが開始されているところであるが、我が国のナノテクノロジーについての高い水準を活用して国際協力を積極的に行い、世界のリーダーシップを握っていくことが求められる。さらに、現在、急速に発展しつつある中国を初めとしたアジア諸国との協力については、その地理的近接性を考えれば、我が国が特にパートナーとすべき相手として十分配慮を払うべきである。

これらの基本的考え方にたって、文部科学省として今後期待される役割及び具体的な推進方策について以下のように取りまとめた。

2. 施策の推進方策

(1) 研究開発への取組み

前述のように、ナノテクノロジーは、極微細計測・評価・加工等といった極めて特殊な技術に立脚した分野であり、この技術がナノテクノロジーの発展の鍵を握ること、また、産業技術に深く影響を与える技術であり、実用化・産業化を展望した研究が非常に重要であること、さらに、長期的な観点に立ち、技術のシーズを生み出すことへの期待の高い基礎的な研究への取組みが必須であることから、我が国が戦略的に本分野の研究開発を推進するべく、研究を大括りに、「共通的な先端基盤技術開発」、「実用化・産業化を展望した研究」及び、「個人の独創性を重視した萌芽的な研究」にわけて考察を行った。

共通的な先端基盤技術開発への取組み

走査型トンネル顕微鏡の開発による材料表面の微細構造観察技術革新が、ナノテクノロジーの発展に多大なる貢献をしたように、計測、評価、加工等の共通的な基盤技術の革新が科学技術の発展を導くとともに、科学技術の発展が更なる基盤技術の革新を生み出す。このように、科学技術は基盤技術と表裏一体となって発展しており、特に、極微細を扱うナノテクノロジー分野については、共通的な先端基盤技術開発は、将来の基盤技術となり、世界標準を生み出すなくてはならない重要な研究開発の1つである。総合科学技術会議における分野別推進戦略においても、ナノテクノロジー・材料分野の重点領域の1つとして位置づけられている。

なかでも、電子顕微鏡や走査型トンネル顕微鏡、レーザー等のナノメートル領域での計測・評価・加工手法を飛躍的に発展させる技術開発、ナノメートル領域で生じる現象を理論的に解明するものとして数値解析やシミュレーション技術の開発への取組みが求められる。

これらの共通基盤技術開発にあたっては、巨大な装置や特殊な装置を用いるものが多く、公的研究機関等において従来より取組みがなされてきた。特に、物質・材料研究機構においては、超高圧電子顕微鏡や物性計測に用いる超強磁界マグネット群等の大型機器の開発・供用を行ってきており、今後もこれらをはじめとした共通基盤技術開発が特に期待される。理化学研究所においては、ナノスケールでの物質操作及び、物性計測・観測技術等に関する共通基盤の開発に取り組んでいる。

さらに、大学及び大学共同利用機関においては、学術研究の拠点という特性を活かしつつ、各機関の特徴を最大限に生かした独創的な基盤技術の芽を創出し、発展させていくことが特に期待される。

これらの共通基盤技術開発を発展させるためには、科学技術の進展に対応した

施設・設備を整備していくこととともに、各機関が有機的な連携の下で取り組むことが肝要である。

共通基盤技術開発の中でも、20年後までの実用化・産業化を展望した研究課題の抽出結果については、3.に示す。

実用化・産業化を展望した研究への取り組み

ナノテクノロジーは、既に述べたように、実用化・産業化への応用により経済・社会への多大なる貢献が期待される分野であるとともに、基礎研究がすぐに実用化につながるものの多い分野でもある。このため、萌芽的な研究と並行して、実用化・産業化を展望した研究が重要となる。本報告書においては、総合科学技術会議のナノテクノロジー・材料分野推進戦略に示された5領域を踏まえつつ、具体的に期待される目標を目指した研究として、「20年後までの実用化・産業化を展望した研究」について、産学官の延べ150人を超す研究者の協力を得て抽出した結果を3.に示す。

また、実用化・産業化を展望した研究の推進にあたっては、その実現までの時間軸により、次のように具体的な推進を図ることが求められる。

a) 10～20年後の実用化・産業化を展望した挑戦的な研究への取り組み

10～20年後の実用化・産業化を展望した挑戦的な研究については、実現へのリスクはあるものの、その目標が達成された場合には、科学技術及び産業技術に対して非常に大きな波及効果をもたらすと期待されるものである。このフェーズの研究は、単に従来の手法を改善させるのみではなく、新たな原理や手法の開拓が求められると共に、分野を越えた取り組みが飛躍的発展の鍵となる。従来の学問分野間では、それぞれ用いる術語や手法が大きく異なっていたが、ナノメートル領域においては、異なった学問領域がナノテクノロジーの共通の言葉や手法でつながることができるとの大きな期待が寄せられている。

ナノテクノロジー・ワーキング・グループにおいて実施した、文部科学省傘下の研究機関からのヒアリングの結果、ナノテクノロジー分野に関しては、特定の研究機関又は組織に研究ポテンシャルが一極集中しているのではなく、それぞれの大学及び研究機関等が、それぞれの特色を有しつつも、各大学、各研究機関内においても、広範な分野にポテンシャルを有する研究者が多数存在し、それらの研究者が、多角的な取り組みを実施していることが明らかになった。

これらを踏まえ、本フェーズの研究について国としての総合的な取り組み方を考えると、ポテンシャルを有する大学、大学共同利用機関、独立行政法人及び特殊法人において各機関の特性を活かした個々の取り組みを着実に推進することに加え、分野や所属組織を越えて協力体制を構築することも非常に有効な手

段である。このような取組みにあたっては、競争的資金等を活用しつつ人を中心とした戦略的な連携体制を構築することが有効であると考えられる。特に、ナノテクノロジーは、産業技術への展開が大いに期待されることから、産学官の区別なく研究者が参画することが期待されるとともに、海外の研究者についても積極的な参画を促すことが求められる。

このような研究の推進にあたっては、ナノテクノロジーが分野の融合から新たな発想の創出、飛躍的な発展への期待が高いこと、明確な目標に向けて集中的に取組みが必要であることから、1研究領域あたり、十分な予算、人材等の研究規模を確保することが必要である。同時に、領域毎に研究を統括する研究領域の長が、戦略本部としての機能を十分に果たし、研究領域長の強力なイニシアティブの下に、各研究領域への参画研究者間の緊密な連携が行われ、研究領域における総合性、戦略性が十分に発揮されることが求められる。したがって、研究のマネジメントに関する評価を導入する。さらに、各研究領域の研究期間は概ね5年とすることが適当であり、十分な中間評価を行い、研究計画の軌道修正や参画研究者についての見直しを行うことも検討すべきである。加えて、特によい成果をあげた研究に対しては、研究の延長を認める等、研究評価結果の次の取組みへの適切な反映についても検討すべきである。また、ナノテクノロジーに関して実施される各研究領域が互いに連携をとり、全体として我が国の国家戦略に沿った取組みとなるような工夫が求められる。

ナノテクノロジーは、製造技術と密接に関わっており、成果の実用化・産業化が特に期待される分野であることから、研究成果の帰属については、研究の開始時に詳細を決めておくことが必要である。また、研究成果を事業官庁や産業界への積極的な技術移転に結びつけることが重要である。

なお、ナノテクノロジーについての取組みは緒についたばかりであるため、研究の推進にあたっては、柔軟かつ弾力的な対応が必要であり、研究プロジェクトを同時並行的に立ち上げるなど、様々な取組みを検討すべきである。また、研究参画者についても、研究開始時からのみならず、途中からの参画も認めることなどが求められる。

b) 5～10年後の実用化を目指した研究

ナノテクノロジーは、実用化指向の研究のみならず、基礎的・萌芽的な研究についても、成果がベンチャー的に即、実用化・産業化につながる大きな可能性を秘めた分野でもある。

特に、5～10年後の実用化を目指した研究開発のうちでも、ニーズ指向の強い研究開発に関しては、主に事業官庁及び産業界における研究開発プロジェクトにより推進されているところである。しかしながら、大学、独立行政法人、

特殊法人等、文部科学省傘下の研究機関の研究者が、これらのプロジェクトに関しても中核的なプレーヤーの一翼を担い、積極的に参画し、産学官連携により我が国の産業競争力の強化に貢献してゆくことが求められる。また、特にこの分野においては、基礎研究から製品開発までが深くつながり、しかも絡み合っており、基礎研究、応用研究、実用化研究といった段階的な発展だけではなく、基礎研究が即、実用に結びつく場合も多い。したがって、大学、独立行政法人、特殊法人等の研究から得られた技術シーズを、技術のユーザーたる産業界との連携の下で、計画の段階から緊密な連携の下で推進してゆくことが、我が国の産業技術の発展、経済・社会への科学技術による貢献の観点からも重要な取組みである。さらに、文部科学省傘下の研究者が、実用化を強く意識した研究をも行うことにより、基礎的な研究開発、基盤的な研究開発自体の発展にもつながることが期待される。

個人の独創性を重視した萌芽的な研究への取組み

萌芽的な研究は、将来、実用化・産業化につながるかの予測は現時点では立たないものの、そこから生まれ得る研究成果は、次代の科学技術革命を導く可能性を秘め、次期科学技術基本計画において示されるべき重点分野の源泉となり得るものである。また、ナノテクノロジー関連の萌芽的研究については、非常に基礎的な研究が即実用化につながるケースがみられるという大きな特色を有する。

萌芽的な研究の推進にあたっては、個々の研究者の自由な発想と旺盛な好奇心に基づいて行われる学術研究がもたらすブレークスルーに期待し、萌芽的な研究に対する競争的資金の充実と、それを活用した独創的、創造的な基礎研究の推進を図るべきである。具体的には、学術的な観点から科学研究費補助金を活用し、研究者の主体的、独創的提案に基づく、いわゆるボトムアップ型の研究の支援を行うべきである。なお、選定にあたっては、学際性にも十分留意することが望まれる。

さらに、我が国のナノテクノロジーの裾野を広げるこれらの研究を着実に実施するためには、大学、大学共同利用機関、公的研究機関等における独創的・先端的研究のための組織及び施設面での基本的な整備が重要であるとともに、各機関が連携をとりつつ研究を進めていくことも重要である。

(2) 人材育成への取組み

ナノテクノロジーの飛躍的発展のためには、従来の学問領域を越えた分野融合的な取組みが必要であり、そのための人材育成が必須である。具体的には、大学等においては、学部学生、大学院生といった若手研究者の育成を行うと共に、産業界の研究者

に対して、ナノテクノロジーという観点からの再教育に期待される役割が大きく、ナノテクノロジーという切り口で融合された研究所、センター等を拡充することも望まれる。

さらに、公的研究機関においても、共同研究等を通じて、企業の研究者に対する人材育成を図ることが求められているとともに、最先端の研究施設等を活用した研究に、学部学生、大学院生が参画することにより、これらの若手人材を育成することも重要な役割である。また、ナノテクノロジーは、極微細加工・計測・評価等といった特殊な技術を必要とする分野でもあり、これらの技術の取得が重要である。

また、若手研究者及び今後ナノテクノロジーを通じて新たな研究分野に取り組む研究者に対して、未知の分野への道案内にも資するべく、セミナー等の機会を提供することが求められている。

加えて、海外の研究者にとっても魅力のある研究拠点を育成し、ナノテクノロジー研究の場としても世界一流のものとなるよう我が国の研究機関の国際化への努力が求められる。

（３）機関、分野を越えた横断的研究サポート機能の構築

ナノテクノロジーは、従来の学問分野を越えた広がりのある学際的分野であるとともに、近年特にめざましい発展をしてきた分野であることから、これまで、我が国において、組織的な取組みが十分になされていたとは言い難い。本分野の研究開発を効率的に進展させるためには、機関、分野を越えた、研究基盤や知的基盤等の横断的研究サポート機能を構築し、本分野におけるポテンシャルを有する国内外の研究者を有機的にネットワークでむすぶことが肝要である。

具体的には、以下の機能の構築により、研究支援を包括的開始することが緊急に求められる。

情報支援

ナノテクノロジー特有の領域横断的な研究を生み出すための総合的かつ戦略的なデータベースの構築、研究者、技術ユーザー及び一般国民をそれぞれ対象とした我が国の総合的なナノホームページの開設、海外情報収集のための体制整備、シンポジウムの開催等を通じ、情報交流を促進する。

施設の共同利用支援

大型施設や特殊実験機器の供用の促進及びインターネットによる遠隔操作システムの構築、並びにナノテクノロジー研究に必須の極微細計測や極微細加工サービスの提供等により、限られた施設や高度な技術を持つ人材を有効に活用する。

技術移転・人材育成支援

産学官の研究機関からの要請に応えて、ポテンシャルを有する研究者、技術者を派遣し、技術移転や人材育成を行う。

しかしながら、このような支援業務については、個々の研究現場に委ねることは困難であり、政府としての組織的な取り組みが必要である。このため、傘下に多種多様な機関や豊富な人材及び大型・特殊施設を有する文部科学省が、研究支援機能を緊急に構築し、我が国産学官の研究者の総合的な支援を開始することが効果的である。

3. 具体的な課題の抽出

- 20年後までの実用化、産業化を展望した研究に係る課題の抽出

(順不同)

- (1) 次世代通信用ナノデバイス
- (2) 超集積システム・素子・素材技術の研究
- (3) 単一分子素子と集積
- (4) テラビット級メモリの原理・素材・方式
- (5) 新原理・量子デバイスの探索的研究
- (6) 次世代フォトリソの基礎
- (7) バイオ分子デバイス
- (8) 超高感度知的センサー技術
- (9) IT化医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン
- (10) ナノソフトマシン
- (11) ナノ組織エネルギー貯蔵・変換材料
- (12) ナノ構造制御触媒
- (13) ナノ空間材料
- (14) 超分子制御
- (15) ナノチューブ・フラーレン
- (16) クラスタ・ナノ粒子
- (17) ナノコンポジット構造材料
- (18) ナノ組織制御・機能材料
- (19) ナノ制御高機能表面界面材料
- (20) 有機・無機融合ナノ構造体構築
- (21) ナノスピントロニクス
- (22) ナノ造形
- (23) プログラム自己組織化
- (24) ナノ新計測
- (25) ナノシミュレーション

(注) 各課題の具体的な研究要素については重複するものも存在する。これは、実用化・産業化の目標を多角的にとらえてゆくべきであるとの観点から、研究要素の重複は排除すべきではないとの方針によるものである。

また、(21) ~ (25) は、共通基盤技術としての性格を有するものである。

1．分野名 （１）次世代通信用ナノデバイス

2．検討チーム

検討担当委員：北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事
（東京大学客員教授）
榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授
意見聴取者：長我部信行 日立製作所基礎研究所長
和田 恭雄 日立製作所基礎研究所
ナノテクノロジー研究プログラム主任研究員
小川 正毅 NECラボラトリーズ研究企画部長
田原 修一 NECラボラトリーズ
シリコンシステム研究所部長
横山 直樹 富士通研究所
ナノテクノロジー研究センター長
今井 元 富士通研究所基盤技術研究所長代理
森田 雅夫 NTT 物性科学基礎研究所企画部長
平山 祥郎 NTT 量子物性研究部
主幹研究員、グループリーダー
豊田 信行 東芝研究開発センター副所長
江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授
舩本 泰章 筑波大学物理系教授

3．当該分野の概要

（１）情報伝達の超高速・広帯域化と超省電力性に向けた新規デバイスの材料・構造作製、デバイス物理を展開するとともに、量子暗号などで情報伝達の安全性を確保するための可能性を追求する。

（２）情報通信の需要はビジネス間のいわゆる B to B からビジネス-消費者間の B to C、C to C へそして、個人間の P to P に進むにつれて爆発的に増大しようとしている。情報が行き交う量、いわゆる通信の総量（情報トラフィック）は現在半年で２倍という凄まじい増大を示しており、これこそが情報革命が現実になっていることを如実に示す指標と考えられるものである。情報化社会の基本は、コンピュータの発展とそれら相互を結ぶ通信技術の発展によって支えられる。今後の通信技術の発展の基本は大容量化・高速化・無線化・ソフトウェア化などによって支えられる。このためには、それを担うデバイスの高速化・大容量化が同

時に達成されねばならない。一方、通信技術の高度化に伴って、通信に必要な電力の増大が社会問題として顕在化し始めており、超省電力化がさらにこれに伴う必要がある。本プロジェクトは、民間企業 - 通産省などの共同で推進される通信技術の研究開発とは相補的に、その先を見越して、新たなデバイスの実証とその実現を志向するものである。

4．概要説明

(1) 現状

ソフトウェア無線などの新規通信方式への転換につれて、通信システムの急速な高速・大容量化が今後とも予想されている。これに対し、半導体の集積化・高機能化はムーアの予測に従い3年で4倍のペースで進んでおり、2005年には素子の最小寸法が100nmを切り、ナノデバイス時代に突入する。さらにP to Pの時代における通信需要を満たし、新しい価値観を創造するネットワーク社会を実現するためには、ナノオーダのデバイスの量産化に成功する必要がある。しかしながら、現状のデバイス技術は、まだ「ナノ」以前の量産加工技術の課題を残す段階にあるといわざるを得ない。このため、現在の延長技術としての研究開発は必須であり、これは民間企業と経産省のプロジェクトによってなされる。

しかしながら、現在のデバイスの延長上においては、高速化限界、情報のセキュリティ確保など諸課題が顕在化するとともに、通信の電力消費が問題となりつつあり、高速化と省電力といった相反する課題に抜本的解決を得ることは難しい。このような諸問題に対処するための、新たな素子や方式に対する提案や実証がかなり散見されるようになった。また、その中には我が国が提案する新規デバイスなども多数含まれている。

一方、通信技術の進展に連れて顕在化した大きな課題は情報のセキュリティ確保に関するものである。これに抜本的解決を与えるものとして量子暗号による通信が提案された。しかしながら、それを担うデバイスなどのハード面はまだ今後の実証を待たねばならない状況である。

(2) 将来目標

現在の半導体デバイスの延長においても、今後とも、上記課題を解決する方向での努力が継続される必要があり、主として民間企業によってなされるが、このような連続的な努力に併行して、超高速性、超省電力性の観点から、現行の速度や消費電力性能を2桁以上凌駕する革新的な機能を持つ非従来型新規デバイスを実証し(5 ~ 10年後目標) その集積回路実現のための材料的課題、デバイス作

製技術の課題を追求し、デバイス作動の物理を確立する（１０～

１５年後目標）。また、量子的情報制御の実用技術としての可能性を探るために、単一光子発生・検出素子の作製とその原理作動を含めて、量子的情報制御素子に関する新たな試みを推進する（１０～１５年後目標）。

５．研究の概要：

（１）テラヘルツ・ナノ構造 FET、HBT 素子素材技術

（２）超省電力単一電子素子素材技術

（３）超高速・超省電力単一量子磁束集積回路技術

（４）超高速・超多重光通信用素子素材技術

（５）超高速通信用実装技術

（６）新規通信用ナノ構造素子素材（ナノメカニクスを含む）

（７）量子暗号通信およびテレポーテーション用素子・伝送技術の実証

（単一光子発生・検出素子、量子ドット素子、超伝導コヒーレンス素子など）

上記（１）から（６）のデバイスは全体として競合的に開発され、動作速度、省電力性、回路集積度等の総合評価によって徐々に優劣、あるいは棲み分けが決まるであろう。（３）は既に現在の半導体デバイスに比較して速度、省電力性ともに現状性能を２桁以上凌駕することが実証されたが、集積度において非常に遅れている。したがって、集積度向上に向けた挑戦的な試みが重要である。（６）はさらにその他の新たな可能性追求のための研究を支援する。

６．留意事項

次の世代を担うべき通信用新デバイスが何になるかは、現時点ではっきりと予想できる状況にない。また、それらはいずれ優劣がついていくのか、それとも、相補的に用いられるのかについても、明らかではなく、非常にリスクな課題であるため、民間企業では挑戦的取組みが難しい課題でもある。

しかしながら、それら素子の特色は、集積度を上げた回路として始めて明らかになる場合も多く、その意味で早期から産学官の情報流通と連繋が緊密に取られつつ、研究が推進されることが望ましい。また、人材的にも回路のアーキテクチャーまでを含めた統合的な人材の確保や育成も重要な課題である。

1 . 分野名 (2) 超集積システム・素子・素材技術の研究

2 . 分野別計画検討者

検討担当委員：榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授
：江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授
意見聴取者：長我部信行 日立製作所基礎研究所長
和田 恭雄 日立製作所基礎研究所主任研究員
小川 正毅 NEC ラボラトリーズ研究企画部長
田原 修一 NEC ラボラトリーズ SiSystem 研究所部長
横山 直樹 富士通研究所
ナノテクノロジー研究センター長
森田 雅夫 NTT 物性科学基礎研究所企画部長
平山 祥郎 NTT 物性科学基礎研究所主幹研究員
豊田 信行 東芝研究開発センター副所長
北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事
(東京大学客員教授)
舩本 泰章 筑波大学物理学系教授

3 . 当該分野の概要

(1) 専門的な概要

情報処理の基幹技術である集積回路システムや素子では、微細化が進み、その寸法が 10nm 領域に突入したため、種々の限界に面しつつある。本研究では、こうした極微素子システムの物理的な限界を打破するために、革新的なナノ素材やプロセスを開発活用するとともに、新構造素子での物理機構の解明と制御により、更なる進展を確保する。また、生体との優れた親和性や過酷な環境への耐性を持つ新超集積システム技術などを開発し、体内での医療計測、画像認識や視覚障害克服、環境計測と制御など新しい適用領域の開拓を目指す。

(2) 一般向け概要

LSI など集積回路システムは、主としてトランジスタや配線の微細化により高性能化を実現してきた。その最小寸法は 10nm 領域に近づきこれ以上の進展はデバイスの動作面でも、製造技術面でも大きな壁に面しつつある。このような限界を打破するには、極微な構造のデバイスの物理的な解明と制御法を開拓するとともに、ナノスケールの新規の半導体・金属・誘電体の素材を活用した革新的な素

子構造やプロセス技術の開発が不可欠である。本研究では、まずこのような微細化に伴う限界の打破の研究を進める。さらに、体内での医療計測、視覚障害克服、環境計測と制御技術などのために、生体との親和性や耐環境性の高い新しい集積システムの開拓も目指す。

4．現状および実用化・産業化の具体的目標とその達成予定時期

LSI など集積システム技術は、最小寸法が 100nm 以下の領域に突入し、50nm や 20nm 級の素子の試作も進みつつある。こうした領域では、素子の動作や、製造技術上の物理的な限界が次々と登場するとともに、製造のためのコストの上昇によって今後の発展は困難となる見通しである。この困難を回避するには、2つの知恵ある取組みが重要となる。そのひとつは、(A)革新的なナノ素材やナノプロセス技術の開発によって、10nm 級の素子実現の技術的課題を解決することである。特に (A-1) 極短かつ極薄状あるいは極細線状の伝導チャネルを持つ素子の形成技術や (A-2) ナノ構造を制御した新規誘電体や配線用金属材料の開発や (A-3) 効率のよい革新的なナノリソグラフィ技術の開発が不可欠である。これらについては、恒常的に改善が進むため、5年～20年にかけて継続的な成果が期待される。なお、この分野の技術には、種々の選択肢があり、リスクの高い手法については継続的な学術的研究を礎にする技術的ブレークスルーが求められる。

もうひとつは (B) 10nm 級の各種の極微構造素子の考案と実現ならびに動作物理の解明と性能改善の研究である。特に、自己形成の量子ドットや量子細線やナノチューブなどの新ナノ素材を取り込むことによる新しいスイッチや検出器など新機能素子などの研究開発が重要となる。この領域での研究の見通しは難易度によって異なる。早いものでは約7年後から実用的な構造として利用されることとなる。多くのテーマでは10年後には可能性と課題の双方に関し見通しがかなり明らかになり、15～20年後には実用化の目途が立つものと思われる。

さらに、(C) 生体親和性や耐環境性などの高い新しい集積システム技術による医療計測制御、画像認識や視覚障害克服、環境計測や制御技術への展開については、約10年後から許容度の高い応用分野から段階的に結実するものと思われる。

5．研究の概要

本研究分野は、以下に記す3つのサブ領域 (A、B、C) から構成する。

A 領域では、10nm 級超微細システムやデバイスの実現の鍵となる革新的なナ

ノ素材とナノプロセス技術の開発活用に関する研究を進める。特に

A1．微細トランジスタ用極薄伝導チャネル

（超薄 SOI やナノチューブなど新構造と新素材）

A2．超集積システム用の新規の誘電体およびナノ配線・電極技術

（ナノポア誘電体やナノ粒子・ナノチューブ）

A3．超集積システム用ナノリソグラフィー・ナノプロセス技術

などを研究する。

第2のB領域においては、超集積システムに適した10nm級の極微構造を持つ各種素子の探索的研究を進め、動作物理を解明し、これを制御して、素子の設計とプロトタイプ素子の実現を図る。特に

B1．極短（10nm以下）・極薄（2nm以下）チャネルを持つFET素子の研究

B2．量子細線やナノチューブをチャネルとするFETや単電子トランジスタの制御性向上と高性能化の研究

B3．5nm以下の量子ドットなどを取り込んだ新構造素子の探索研究

などを進める。

C領域では、オフィス機器から携帯機器へと広がった集積回路システムの適用範囲を体内や過酷な環境などまで拡大し、これにより新応用領域の技術開発を目指す。特に

C1．体内での種々の医療計測を可能とする生体親和性と安全性の高い集積システムの探索

C2．高度の画像認識や視覚障害克服のために人工網膜と視神経などとの情報の授受や情報処理などに関する基礎的研究

C3．高い温度など過酷な環境で動作可能な素子技術を活かした、生体内の計測・制御と環境の計測や制御に有用な集積システムの開発

などを進める。

6．留意事項

集積回路システム・素子技術は、その要素技術の多様さや社会への影響の大きさから見ても、例外的に巨大な技術である。これに対しては、各企業における短期的な投資戦略、中期的な開発戦略のみでは十分な対応ができない。特にナノメートル領域での物理限界への対応や新領域の応用展開では、総合的・基礎的・長期的な取組みが不可欠である。この状況に対して、経済産業省を中心として「あ

すか」プロジェクトや「みらい」プロジェクトが進みつつある。しかし、いずれも現時点で最有望と思われる技術を選択し、集中的に取り組む方式の開発プロジェクトとなっている。文部科学省の研究プロジェクトは、こうしたプロジェクトとは異なり、学術性に重点を置き、産業界のプロジェクトとは相補的な役割を果たす思想で計画されている。特に、ナノ素材やナノ素子に関して学術的に深い研究を推進するとともに、リスクの高い革新的手法にも果敢に取り組んで、独創的で競争力の高い技術の実現を目指す。また、当初は大きな市場の期待できない生体親和性や耐環境性の高い集積システムなど新応用領域の開発を目指すなど、産業界とは相補的な役割を果たすことを徹底する。

1．分野名 （3）単一分子素子と集積

2．分野別計画検討者

検討担当委員：川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
玉尾 皓平 京都大学化学研究所教授
意見聴取者：松重 和美 京都大学国際融合創造センター長
和田 恭雄 日立製作所（株）基礎研究所主席研究員

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

革新機能を有する単一分子とその超高密度集積からなる新デバイス開発を目指す。優れた導電性、スイッチングやメモリ機能を有する分子の合成、および、プログラムされた自己組織化によるこれら分子の高集積化法を開発し、多様なデバイス機能を有する超高集積分子素子を構築する。新しい情報処理システムとしての分子デバイス・システムの礎を築く。

（2）一般向け概要説明

現在のトランジスタ高集積化を可能とした「微細化(トップダウン)」手法は、加工技術の限界、量子効果の顕在化等の技術的問題に加えて、経済的な負担も大きく、次世代を担う革新的ナノテクノロジーの創成が大きく期待されている。「微細化」とは異なるデバイス作成手法が必須である。その有力候補が、多様な機能・情報を有する“分子”という素材であり、また、自己組織化を含むボトムアップの手法である。分子には意図した機能が付加でき、分子1個で回路としての機能を発現できる可能性がある。これら分子を設計図にしたがって回路として集積する手法を開発することが大きな目標となっており、ボトムアップの手法により単一分子の超高集積化を目指す

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目的達成時期の目途

（1）現状

有機分子のエレクトロニクス応用は、光伝導性や有機発光素子などで実用化され始めている。しかし、これらは薄膜としての応用であり、1分子固有の特性を直接利用するという段階にはなっていない。“単一分子素子と集積”分野では、現在、様々な機能分子の設計・合成およびそれらの組織化の研究が行われ、機能計

測も STM 等により行われ始めているが、真に優れた導電性、特異なスイッチングやメモリ機能を有する単一分子の合成および分子系デバイスとしての高度集積化法は未開拓である。特に、機能分子を望むように集積して回路を形成する手法の科学と技術が今後のキーテクノロジーである。

(2) 実用化・産業化の具体的目標、並びに目的達成時期の目途

超小型、超軽量なナノスケール分子集積プロセッサの開発

ナノリソグラフィーにより作製された電極群に高度に集積化した単一分子、又は少数分子群において、論理演算を可能とした分子ロジック回路、さらには分子 CPU を開発する。現在の Si デバイスに比較して回路密度が 10,000 倍以上の分子デバイス、プロセッサの開発。そのプロトタイプ開発の目標達成時期は 15 ~ 20 年、実用化にさらに 5 ~ 10 年を目安とする。

超高密度分子メモリの開発

単機能としてのメモリ分野の実用化は早期に実現可能と思われる。単一分子において、分子分極、コンフォメーション、スピンなどを情報記憶単位として用い、その高度集積化により超高密度な記憶素子を創成する。現在のコンパクトディスクに比較して約 10,000 倍以上の密度・容量を有する記憶メディア創成を目指す。目的達成時期は 8 ~ 13 年、実用化にさらに 5 ~ 10 年を目安とする。目標達成により超小型、超軽量の記憶素子が可能となり、現在の携帯電話の記憶素子部に国立図書館分の情報が記憶され、情報交換可能となる。

極薄、軽量、フレキシブルな単一分子ディスプレイ

単一分子にてホール/電子注入、発光を可能とする分子を集積化することによる超高効率・極薄ディスプレイの開発。現行の多層膜 EL ディスプレイを改良し、かつ有機 TFT との組み合わせにより超軽量フレキシブルディスプレイ創成を試みる。移動情報端末等への民生品応用が考えられ、その目標達成時期は 10 ~ 15 年。

単一分子センシング素子

視覚、嗅覚、聴覚、味覚、触覚などを付与した超小型、超軽量ナノセンサーの研究開発。単一分子及びその効率的な集積化によりヒューマンインターフェースとして、また生体適合性に富む分子センシング素子の開発。目標達成時期は 10 ~ 15 年、実用化にさらに 5 ~ 10 年を目安とし、電気・情報・医療分

野への応用が期待される。

5. 研究の概要

単一分子素子実現には、導電性、半導体性、絶縁性、およびスイッチングやメモリ機能などを有し、かつナノリソグラフィーに適合したサイズ/形状を有した新規分子の合成、それら個々分子の機能を論理的に組み合わせ、目的とするデバイス機能発現を可能とする高度なナノレベルでの集積化技術、観測による特性変化の影響を最小限度に抑えつつ、単一分子や集積化した分子集合体の機能、形状を高感度計測するナノスケール分子評価・制御技術、の三つが相伴って発展していくことが必要となる。

本研究では、次のような項目を具体的課題として設定し、研究を展開する。

- (1) 特徴的な電子伝導、蓄積、記憶、光応答などの機能を有する多機能超分子の設計と合成
- (2) 分子と親和性を有する微細加工法および機能分子群のプログラム自己組織化による集積回路形成技術の開発
- (3) 単一分子の状態制御、およびその電子・光機能計測を可能とするナノ計測・制御技術の開発
- (4) 単一・少数分子系の電極を含む電子状態・伝導の理論的解析・シミュレーション、電子波干渉、強相関、協同運動などの新規な物理現象の解明
- (5) 電界・コンフォメーション・光等による伝導スイッチング素子、共鳴トンネル電子デバイス等の新規分子電子デバイスの開発
- (6) 室温動作単一分子トランジスタ、分子ロジック回路および分子集積 CPU の製作
- (7) 将来の分子コンピューター構築に関するアーキテクチャーの検討

6. 取組みにあたっての留意事項

本分野は化学・物理・電子工学・ナノ工学分野の研究者がその専門性の融合により、また産学官の協同によりその進展が始めて可能となる分野である。次世代の革新デバイス・新コンピューター創成に対する社会的要請も強く、実際本研究の内容は次世代の産業創成へ寄与するところも大きく、またその実現性も高い。この分野への取組みが世界各地で開始されている状況もあり、早急にしかも強力に本分野の研究推進を計るべきである。

1．分野名（４）テラビット級ナノメモリの原理・素材・方式

2．分野別計画検討者

検討担当委員：江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授

意見聴取者：田原 修一 NEC シリコンシステム研究所研究部長

有本 由弘 富士通研究所シリコンテクノロジー研究所主席研究員

鈴木 孝雄 豊田工業大学大学院研究科教授

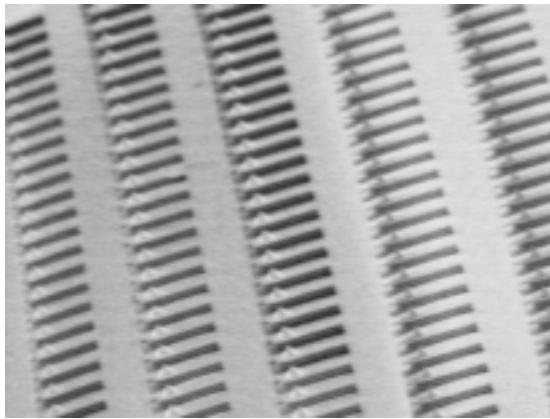
3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

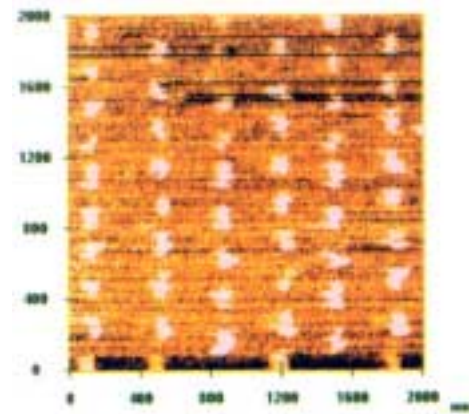
現在使われている LSI メモリ、磁気ディスク、光ディスクは急速な進歩が続けているが、その性能限界の壁を打ち破るとともに、強誘電体メモリなどの次世代メモリ、また特に極限的なマルチナノプローブメモリや光閉じ込めメモリのような将来方式のメモリデバイス・システムに向け、ナノメモリの原理・素材・方式に関する基礎的研究を行う。

（２）一般向け概要説明

高度情報化社会を進めるには、ネットワーク技術やプロセッサ技術の進歩と共にデータストレージ(メモリ)技術の進歩が不可欠と言える。LSI メモリも磁気ディスクも記憶密度が10年で100倍程の割合で進歩してきた。現在の記憶密度は $10^9 \text{ bit(1 Gbit)/cm}^2$ 程であるが、これは300nm角(0.3 μm 角)の面積に1bitの情報が記憶されていることに相当する。これを現在の1000倍程の記憶密度、すなわち $10^{12} \text{ bit(1Tbit)/cm}^2$ 程にすることが目標である。これは10nm角すなわち原子が10個程度並んでいる所に1bitの情報を記憶させることに相当する。走査型トンネル顕微鏡(STM)などのプローブ技術を用いて原子1個を取ったり付けたりすることも可能になっており、原子レベルの高密度メモリも実現できるが、書込み読出し速度など実用的面では多くの問題が残されている。図の例は多数のプローブで並列に書込み・読出しを行うことで高密度・高速化した次世代用マルチナノプローブデータストレージの試作品と、それを用いてDVD-RAMに使われる相変化記録媒体に記録した例である。



先端 30nm のナノヒータプローブを配列した次世代マルチナノプローブデータストレージ

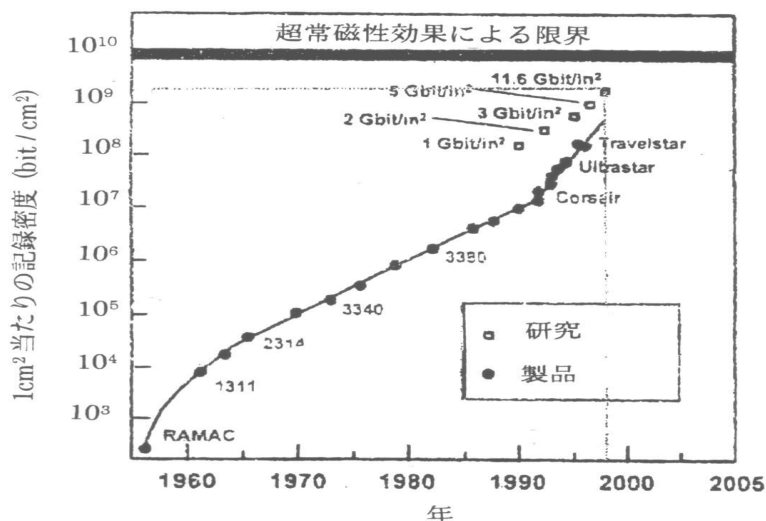


マルチナノプローブデータ
データストレージで相変化
記録媒体(GeAsTe)に記録した例

このようなナノメモリ技術を基礎から研究し、超高記録密度や高速性、電源を切っても記憶し続ける不揮発性や超低消費電力のような性能を持つ、将来の携帯情報端末などに期待される次世代メモリへの道を開拓する。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

動画像の蓄積をはじめ、画像や音声の認識、外国語翻訳など情報処理技術を飛躍的に進展させるため、次世代のメモリ技術を開発する必要がある。磁気ディスクにおける記録密度は図のように急速に進歩してきたが、超常磁性効果(情報記録の単位であるビットを形成する原子の磁気スピンのエネルギーが熱エネルギーと同程度になるために記録情報に誤りが生じる現象)による記録密度の限界に近づいている。これを越えるためには、10nm 領域の記憶の基礎物理（多体効果、安定性や揺らぎなど）、10nm 領域記録媒体の素材や物質の科学、記憶と演算の結合による高機能化など総合的な学問研究が必要である。



磁気ディスクでの記録密度の進歩

5．研究の概要

メモリには LSI メモリ素子の延長上で、電子レベルの究極の高密度メモリ素子である量子ドット・単電子メモリ素子、集積回路のチップ上で強誘電体材料や磁性体材料を用いる高性能不揮発性メモリデバイスである FeRAM や MRAM などの次世代メモリ素子が研究対象になる。また磁気ディスクのような記録媒体に記録するデータストレージの延長上で、原子・分子レベル高密度メモリとしてのナノプローブデータストレージ、さらには光閉じ込めによる新しいメモリなどが考えられる。このようなデータストレージでは、磁気、光、熱、電界などのいろいろな記録・読出し方式、ヘッドやその精密制御、ナノ構造を持つ記録媒体などの課題があるが、この研究では特にナノメートル領域での磁化特性や磁化反転メカニズム、および信頼性向上のための新規記録材料探索など、記録限界に着目して研究する。

6．取組みにあたっての留意事項

ナノメートル領域での現象の発見や解明が新しいメモリに応用できる点で基礎研究が直接的に実用に役立つ。経済産業省などでの実用レベルでのプロジェクトと、文部科学省での基礎研究が相補的に進められることが望ましい。

1．分野名 （５）新原理・量子デバイスの探索的研究

2．分野別計画検討者

検討担当委員：榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授
舩本 泰章 筑波大学物理学系教授
意見聴取者：長我部信之 日立製作所基礎研究所長
和田 恭雄 日立製作所基礎研究所主任研究員
小川 正毅 NEC ラボラトリーズ研究企画部長
田原 修一 NEC ラボラトリーズ SiSystem 研究所部長
横山 直樹 富士通研究所
ナノテクノロジー研究センター長
森田 雅夫 NTT 物性科学基礎研究所企画部長
平山 祥郎 NTT 物性科学基礎研究所主幹研究員
豊田 信行 東芝研究開発センター副所長
北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事
(東京大学客員教授)
江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授

3．当該分野の概要

(１) 専門的な概要説明

ナノスケールの物質や構造で発現する種々の量子力学的な効果を制御・活用し、量子的な情報処理や伝達機能および超高感度の計測機能など、従来の手法では実現の困難な機能を持つ素子の原理の探求と実現法の開発を目指す。

(２) 一般向け概要説明

ナノスケールの物質や構造の中で起きる種々の量子的な効果や新現象を活用すると、高い安全性と優れた情報処理能力を持つ量子的情報処理や量子通信技術に不可欠な素子を生み出せる可能性がある。さらに、こうした現象を制御すれば、超高感度で磁場や電場などを計測する技術が誕生する可能性もある。本研究分野では、こうした可能性を明らかにするために、その動作原理の探索解明と技術的課題の解決策を探り、新しい素子群の実現を目指す。

4．現状および実用化・産業化の具体的目標とその達成予定時期

ナノ構造における量子効果の研究は、これまでは 10nm 級の半導体超薄膜構造

を中心舞台として大きく発展し、各種の素子利用の道が開かれてきた。最近では、各種の量子ドットや細線やナノチューブ構造のような構造や、磁性元素を含む新素材などにも、探索の対象が拡大しつつある。これらの新ナノ構造や新ナノ素材では、より多くの現象と機能が現れて来つつある。本研究では、次項に述べる種々の現象や構造を調べて、量子的な情報処理や伝達技術の可能性を開くとともに、超高感度なセンシング技術の開発を目指す。

達成の予定は、10年後の時点で実現の期待できそうなもの(例えば、一部のスピン制御素子や細線応用素子)から、10年以上の研究により学術上及び技術上のブレークスルーを探索することで、はじめて応用可能性が高まるものまで、様々である。

5．研究の概要

ナノ構造中の量子現象は極めて多岐にわたるが、具体的には以下の諸構造や諸現象を中心に探索的な研究を進める。

- (1) 量子ドット系を含め各種の固体 Q ビット素子の可能性を探る
- (2) 超伝導系の新量子磁束素子の可能性を探る
- (3) 相関電子素子・相関光子素子で量子もつれ状態などを探る
- (4) スピン制御用の各種の新構造素子を研究する
(新素材・新構造 TMR、GMR、TMR 素子、電氣的光学的スピン制御素子)
- (5) 量子細線・ナノチューブ系の構造で新原理素子を探索する
- (6) ナノメカニクス構造や超分子など他の新原理素子の可能性も探る

6．留意事項

まず、スピンエレクトロニクス素子、量子情報通信素子、高感度センサー素子などの研究分野との、補完性や相補性を確保する必要がある。

量子計測・通信システム・ナノ物性計測やナノ素子形成技術などの異分野の専門家が、有機的な協力体制を作る必要がある。なお、これらの素子の応用は通信・光や磁気素子からメモリー素子分野まで様々な広がりを持つ。

1．分野名 （6）次世代フォトニクス基礎

2．分野別計画検討者

検討担当委員：舩本 泰章 筑波大学物理学系教授

榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授

意見聴取者：横山 直樹 富士通ナノテクノロジー研究センター長

長我部信行 日立製作所基礎研究所長

平山 祥郎 NTT 物性科学基礎研究所グループリーダー

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

光技術 フォトニクスの将来は
超大容量通信ネットワークの基幹技術として
各種の画像情報の取得手段として
各種の画像情報の表示手段として
空間・時間・エネルギー分解能を持つ分光計測技術として
照明・加熱・殺菌・ピンセット・造形など多様な光ビーム応用技術として
多様な展開が期待される。

広い波長領域をカバーする光をこれらの多様な分野で格段に有効利用するため次世代フォトニクスの基盤を作る。具体的には、通信、情報処理や分光計測技術の質を格段に向上させるため光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などの高性能化を可能にさせる新しいナノ構造フォトニクスの基礎研究や材料の開発、また光ビーム応用技術の開発を行い、次世代光技術の基盤を作る。

（2）一般向け概要説明

人間は情報の大部分（70%以上）を眼、すなわち光を通じて得ている。このフレーズは、情報の取得と光との密接な関係を端的に示しているが、現代・未来の情報通信のブロードバンド化により、人間の生活における超高速光通信の重要性がますます増してくる。大容量・超高速インターネットの実現により、なめらかな動画の送受信が可能なテレビ電話、高品質の映画や音楽のオンデマンド配信、さらにこれらの超高速通信を利用した在宅総合教育、在宅医療、介護が実現するなどライフスタイルまで変化してくると思われる。

これらの情報通信のブロードバンド化に必要な基盤技術は大容量・超高速の光通

信の技術であり、これに必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの新しいナノ構造フォトニクス基礎研究や材料の開発を行い、次世代光技術の基礎を作る。

光技術 フォトニクスの革新は、科学の発展を促す分光計測技術の進歩となり科学上の新しい発見や技術上の革新に繋がる可能性があり、波及効果が大きい。また、光のビームとしての応用技術の進歩にも、科学上の進歩だけでなく工学・医学・産業上の新たな利用技術の革新に繋がり新しい産業の芽となる可能性がある。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

フォトニクス材料の研究は光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示など、現在まで様々な分野で進められており、今日の情報通信の基盤技術となっている。今後、情報通信の分野ではブロードバンド化に拍車がかかり、新しいナノ構造フォトニクス材料の開発による格段の高性能化が必須・急務の課題である。分光計測技術や光ビームの応用技術の進歩は常に新しい科学の芽・産業の芽となる可能性がある。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

ナノ構造フォトニクス材料の基礎研究

新しいナノ構造フォトニクス材料の基礎研究は、光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などの質を格段に向上させるため、現在も活発に行われている。低消費電流高効率の量子ドットレーザーは量子井戸レーザーを凌駕するレベルに達しており着実な進歩が期待できるが、実用化にはさらに5～10年を要する。10～20年後の実用化・産業化をめざした挑戦的基礎研究としてはサブバンド間遷移を利用したテラヘルツの周波数で応答する光変調や光スイッチ、様々な波長領域で動作する超高感度検出器、光非線形素子、光多重メモリや輝尽性光メモリ、面発光素子を視野にいったナノ構造フォトニクス材料や原理的研究が対象となる。

テラヘルツ電磁波の発生と検出の研究

テラヘルツ電磁波の発生器、検出器の探索や構造の最適化の研究により、テラヘルツ帯電磁波の送受信が可能になる可能性があるのは10～15年後、実用化にはさらに5年から10年が必要であろう。

フォトリック結晶による光波の制御

3次元光導波路は5年から10年で実用化され、光波の3次元閉じ込め構造によるレーザーや光非線形素子の実用化には10～15年が必要である。

環境にやさしい高輝度ナノ発光材料の研究

InGaN、ZnO、シリサイドなどの環境にやさしい高輝度ナノ発光材料の開発研究は既に一部が実用化レベル、他に材料を探索中という状況である。目標達成時期は10～15年、実用化にさらに5年から10年を目安とする。

5．研究の概要

ここでは考えられる研究内容を例示する

(1) ナノ構造フォトリックス材料の基礎研究

光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などの質を格段に向上させるため、新しいナノ構造フォトリックス材料の基礎研究の開発を行い、次世代光技術の基礎を作る。低消費電流高効率の量子ドットレーザー、サブバンド間遷移を利用したテラヘルツの周波数で応答する光変調や光スイッチ、様々な波長領域で動作する超高感度検出器、光非線形素子、光多重メモリや輝尽性光メモリ、面発光素子を視野にいったナノ構造フォトリックス材料や原理的研究が研究の対象となる。

(2) テラヘルツ電磁波の発生と検出の研究

テラヘルツ電磁波とはサブテラヘルツから数テラヘルツの周波数の電磁波を指す。この周波数領域の電磁波は弱い発生器、感度の低い検出器しかない光と電波の間の暗黒領域であった。しかし、最近の研究により、半導体、超伝導体、酸化物等をフェムト秒レーザーで励起しピコ秒オーダーの過渡電流を流すことで高効率のテラヘルツ電磁波が発生できることが明らかになり、また同時にテラヘルツ電磁波を微小ギャップ電極から構成されるアンテナで過渡電流として受信することで検出できることが明らかになった。今後、発生器、検出器の探索や構造の最適化の研究により、テラヘルツ帯電磁波の送受信が可能になれば、電波よりもはるかに高速の通信や天文学や物質科学などの基礎科学への応用が期待できる。

(3) フォトリック結晶による光波の制御

波長程度の周期をもつ屈折率の変調構造により、光波を反射したり、曲げたり、閉じ込めたりすることができる。この技術の利用により直角に曲げる3次元光導

波路や光波の 3 次元閉じ込め構造を作成することができる。光波を狭い空間に閉じ込めることが活性媒体中にできることから、レーザーや光非線形素子で格段に性能を上げることができ、近い将来から実用になる可能性が高い。

(4) 環境にやさしい高輝度ナノ発光材料の研究

InGaN、ZnO、シリサイドなどの環境にやさしい高輝度ナノ発光材料の開発研究は重要であり、推進すべき課題である。

6 . 取組みにあたっての留意事項

本分野は物理・応用物理・電子工学・物質科学の専門家が連携を取り研究開発を行う必要がある。フォトニクスあるいは光エレクトロニクス分野の連携研究を強力に推進すべきである。

1. 分野名 (7) バイオ分子デバイス

2. 分野別計画検討者

検討担当委員：川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
猪飼 篤 東京工業大学大学院生命理工研究科教授
意見聴取者：山下 一郎 松下電器産業(株)先端技術研究所主任研究員

3. 当該分野の概要

(1) 専門的概要説明

DNA、プロテインなどのバイオ分子を用いた生体に近い情報処理能を持つ素子やDNA、プロテインを載せた五感機能補助装置や高性能診断用チップを創製するとともに、それらの基本動作原理ならびに作製・加工技術を確立する。

(2) 一般向け概要説明

生物の自己組織化を模倣することで、ナノスケールのサイズで制御を行い、新しい動作原理を持つデバイスや超集積素子を開発する。例えば、DNAに適切なプログラムをすることで自動的に電子回路を作製、修復、あるいはスイッチする知的回路の開発を目指す。例えば、手のひらサイズのスーパーコンピュータの開発を目指す。さらにナノスケールでDNA、プロテインを微細なチップ上に高密度に集積させ、疾患の予防と診断、医薬品の開発に新しい道を開く新技術の開発を行うとともに、それらの基礎技術の確立を行う。

ナノテクノロジーを産業に結びつけるには、大量生産することが不可欠であり、一方、材料のサイエンスはもはや使い捨ては許されず、環境に優しいエコマテリアルの研究開発が要求されている。バイオ分子デバイスは自己組織化により大量生産を可能にし、酵素により効率よく分解されるため、最も有望な環境調和型の新規機能性材料の開発が期待される。バイオ分子デバイスは、今後、

IT、材料、医療、環境・エネルギー等、さまざまな分野への応用が期待され、一般社会に多大な利益をもたらすことが期待される。

4. 現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

バイオ分子の自己組織化を利用して、ナノスケールの領域を制御することで、新しい素子や材料の開発を行い、産業に応用した例は、まだほとんど見られない。一方、DNA、プロテインを集積させたバイオチップは実用化されているものの、製造装置や解析装置にコストがかかるため、研究室使用レベルをこえた汎用性に乏しいのが現状である。バイオ分子デバイスの開発による新原理素子の確立、高集積化、高コストパフォーマンス化、生産技術革新が急務の課題である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

自己組織化を利用したバイオ分子デバイスの開発

シリコンデバイスとは異なる動作原理、超高速化・超集積化・超低消費電力化・

超軽量化された素子の研究開発。現在の微細加工技術では 10 nm 周辺が限界と言われており、回路の幅が 2nm の DNA を用いれば集積度は数十～数百倍と飛躍的に向上される。さらに 4 つの塩基に異なる種類の粒子あるいは分子を付加させアドレスを打つことで、4 ビット論理回路の構築が可能になる。また、自己組織化を用いてプログラムされた電子回路が自動的に形成・修復される知的素子の創製、酵素で効率的に分解される環境調和素子の創製する。目標達成時期は 10 ～ 15 年、実用化にさらに 5 ～ 10 年を目安とする。

目標達成により、超集積システム、超高速情報処理システム、環境循環型生産技術システムの創製等、高度 IT 化、省エネルギー化に多大な貢献があるものと期待できる。

ナノバイオ分子・シリコン素子インテグレーションデバイスの開発

既存の電子デバイスとバイオ分子をナノスケールで複合化し、複合化によって初めて発現する機能を有する新原理デバイスの開発。実用化で求められる高耐久性、高強度、高安定性を付加した機能調和材料の開発。目標達成時期は 10 ～ 15 年、実用化にさらに 5 ～ 10 年を目安とする。

目標達成により、超集積システム、超高速情報処理システム、環境循環型生産技術システムの創製、革新的ボトムアップ-トップダウン融合技術の創製等、高度 IT 化、省エネルギー化に多大な貢献が期待される。

ナノスケール制御された高集積バイオチップの開発

非標識 DNA、プロテインを用いた検出法の開発。ナノスケールで DNA、プロテインを高集積させたバイオチップの開発。現在の市販されている DNA チップは、1 平方センチメートルに約 25 万の DNA が集積されているが、新検出法と微細加工技術を組み合わせることで約 1 億まで集積度を向上させることが可能である。目標達成時期は 10 ～ 15 年、実用化にさらに 5 ～ 10 年を目安とする。

目標達成により、迅速かつ簡便な新診断法の開発、新治療技術の開発・確立等、医療・創薬に多大なる貢献が期待される。

5 . 研究の概要

DNA エレクトロニクスの開発

現在の半導体の回路幅は 100 ～ 200nm だが、微細加工技術では 10nm 近辺が限界とされており、数 nm で動作する素子の開発が強く求められている。そこで、nm の幅を持つ DNA の電導性をナノスケールで制御し、実用化可能なナノ素子を開発する。具体的には塩基対、分子サイズと電導性の相関関係を実験的、理論的に明確にし、DNA 単一分子の量子物性を確立するとともに、その結果を利用して分子ワイヤー、p 型、n 型半導体、ダイオード、トランジスタの創製を行う。さらには塩基対に磁性粒子あるいは磁性分子を付加することで、ナノスケールのメモリを開発する。

生体分子の自己組織化を利用したデバイスの開発

DNA、プロテインが自己組織化を行うメカニズムを解明するとともに、生体分子に適切なプログラムを組み込む原理・方法確立し、プログラムに従って電子回路が自動的に形成されるようなデバイスの開発を行う。例えば、DNAが自らネットワーク構造を形成することを利用してナノスケールで電子回路を制御し、高集積、低消費電力化したデバイスの創製を行う。

ナノバイオ分子とシリコン素子が融合したデバイスの開発

大きな部品から微細加工技術により微小な部品を作るトップダウン技術と、一方、原子や分子を組み上げるボトムアップ技術の融合化を行い、バイオ分子とシリコン素子の両方の特性がナノスケールで複合したデバイスを開発する。例えば、バイオ分子は多彩な機能を単一分子で完結させることが可能であり、これを微小な半導体チップに集積させ、半導体の電圧 - 電流特性に対応してバイオ分子の機能をスイッチするデバイスの開発が考えられる。またシリコンデバイスと脳細胞のインターフェースをとることにより脳の老化にストップをかける埋め込み型補助記憶装置の開発を行う。

ナノスケール制御バイオチップの創製

現在のバイオチップは蛍光標識しレーザーで検出するため作業的、價格的、携帯的面から汎用性に乏しい。そこで蛍光認識を用いない新たな検出法確立し、さらに微細加工技術によりナノスケールでDNA、プロテインを集積した高感度、高密度、低コスト、携帯性で優れたバイオチップを開発する。

6．取組みにあたっての留意事項

本分野は化学・固体物理・生物・医学の学際領域に位置付けられるため、各専門家が密に連携して開発を推進することが強く望まれるとともに、学際領域に従事してきた研究者を中心に、多角的なアプローチを強力に推進すべきである。

1．分野名 （８）超高感度知的センサー技術

2．分野別計画検討者

検討担当委員：川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授
意見徴収者：山崎 弘郎 横川総合研究所元会長（東京大学 名誉教授）
井上 恵太 コンボン研究所 所長
濱川 圭弘 立命館大学副総長

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

人間の五感に匹敵する、または五感を越える感度を持つ高感度な外場応答材料などによるインテリジェントなセンサー技術の開発を行う。情報処理機能を持つ使いやすいマンマシンインターフェースとして、高感度かつ知的なセンサーを開発する。

（２）一般向け概要説明

今日、センサー技術が関与するニーズは、医療、公害防止、災害防止、ロボットなどあらゆる分野に渡っている。今後さらに急激に発展していくと考えられる高度情報化社会では、従来からの単に情報を検知するセンサーだけではなく、多様な情報を超高感度で検知し、かつ情報を処理・伝達できる知的センサー・材料の開発が、より一層重要となる。この要請に対し、生体の五感（嗅覚（分子）、触覚（圧力）、視覚（光）、聴覚（音波）、味覚（分子））を模倣し、また人間の五感でも感じられない現象（磁場、電場）を検出する超五感センサー、必要な情報をセンサー自身が取捨し、通知・対応できるインテリジェントセンサーを開発する。

具体的には現状で使用されるセラミックセンサー、半導体センサー、高分子センサー、金属センサー材料の原子・分子配列制御による超高機能化・新材料開発、非線形な応答を示す材料を用いた自己情報判断機能の開発、ナノレベルでの複合化によるセンサーの多機能化・超小型化を行う。今後、ウェアラブル健康診断チップなどの医療分野、ロボットによる宇宙開発、公害監視、設備安全診断、省エネルギーなど非常に多くの分野への応用が期待され、その社会的意義は非常に大きい。

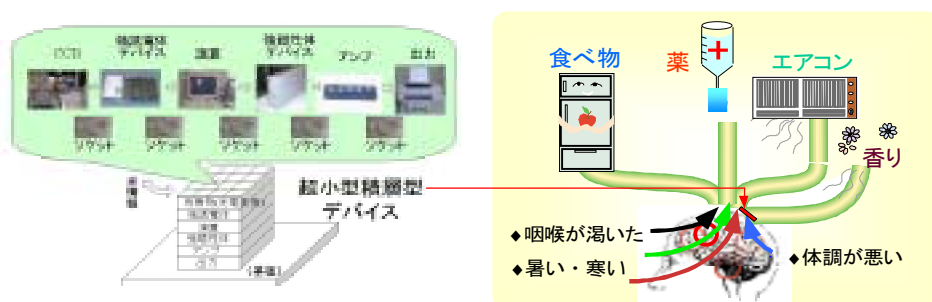
4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成の目途

（１）現状

ロボットや医療などへの用途で高感度な知的センサーの開発が始まりつつある。単一の情報を検出するセンサーとして優れたものは存在するが、必要とされる情報は多岐にわたる。また得られた多くの情報から必要なデータを得るためには、非常に煩雑な情報処理を必要とし機器も大型化するため限られた用途にしか使用できないのが現状であり、国民生活に広く普及させるためには超小型で扱いやすい超高感度、多機能な知的センサーを開発する事が急務である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

将来目標として安全、快適な生活環境や人間型ロボットに用いられる、五感に匹敵する、あるいは五感を越える高感度、多機能センサーの開発、および得られた情報に基づき脳の様に適切な出力・応答を示す知的センサーの開発を行う。暑いと感じるとその情報を受けとり、好みの温度になるようにクーラーに信号を送り部屋を適温に冷やすなど、多くの情報を超五感センサーで受けとり、適切な反応をメモリ自身が判断する。システムを分子、ナノ単位で小さな薄膜チップの中に集積し、万能でしなやかな情報処理ができるコンピューターを耳のうしろにつけて持ち運びができる(ウェアラブルなデバイス)までの小型化を実現する。



超高感度センサー・材料の開発

材料的には現在、セラミックセンサー、半導体センサー、金属センサー、高分子センサー等が利用されている。これらの原子・分子配列制御、さらに薄膜化、ナノ粒子化、繊維化などの形態化する事により感度を現在の 1000 ~ 10,000 倍に高める。また目標達成は 5 ~ 10 年、実用化にさらに 5 年を目安とする。

知的・脳型センサー・材料の開発

重要な情報のみを出力として取り出す "判断" 機能、"学習記憶" に対応する可塑性をセンサーに持たせることにより、しなやかな情報処理を材料・デバイスレベルで行う。

目標達成は 10 ~ 15 年、実用化にさらに 5 年を目安とする。

ナノレベルセンサー集積技術の開発

上記、のセンサー群を分子・ナノレベルで集積する薄膜・人工格子作製技術の開発、またはナノアレイ作製技術の開発。単に小さくするだけでなく、各センサー材料の持つ情報入力に対する物性変化が、相互に関連するよう工夫し積層・配線した、情報伝達機能調和センサーを作製する。

目標達成は 10 ~ 15 年、実用化にさらに 5 年を目安とする。

5. 研究の概要

(1) 超五感センサーの開発〔臭覚、触覚、視覚、聴覚、味覚〕

光に対しては適切なバンドギャップを持つ有機分子、ガス検出機能を持つ半導体等、対象は多岐に渡る。これらの原子・分子配列制御、さらに薄膜化、ナノ粒子化、繊維化などの形態化により感度を現在の 1000 ~ 10,000 倍に高める。

(2) 人工生体情報型のセンサー創成技術

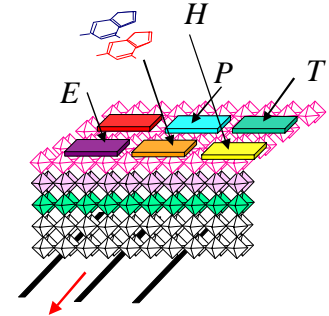
人が持つ知的な情報処理機能を持つ、人に近い DNA、プロテインなどを用いた自己発展、自己修復を行うセンサーを開発する。

(3) 微細構造制御による超感度センシング技術とナノ力学センサー

極端に微細な構造を用い分子レベルの力などの超高感度なセンサーを開発する。

(4) センサー対応機能調和人工格子作製技術

多くのセンサー材料・素子をナノスケールで集積するための、薄膜多層構造、ナノアレイ構造を作製する技術を開発する。さまざまなセンサー機能をナノスケールで集積した素子により、多くの情報を同時に検出することが可能でかつ非常に小さな（ウェアラブル）センサーデバイスを作製する。



(5) 脳の持つ知的な機能（判断や学習機能）を備えた、インテリジェントなセンサー

たとえば、ある閾値以上の電場があるとシグナルが得られる反強誘電体等の判断機能材料や、電場を受け続けるとシグナルが大きくなる強誘電体材料の ” 知的センサー・材料 ” 開発を行う。さらに各種の超高感度センサーと融合しインテリジェントセンサーを作製する。

6 . 取組みにあたっての注意事項

本分野は、物理現象、化学反応、生物メカニズムなどを上手く利用して情報を検知するものであり、有機、無機、金属材料工学および物性物理分野の緊密な連携のもとに推進すべきである。

1. 分野名 (9) IT化医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン

2. 分野別計画検討者

検討担当委員：	猪飼 篤	東京工業大学大学院生命理工学研究科教授
	江刺 正喜	東北大学未来科学技術共同研究センター教授
意見聴取者：	細木 茂行	日立製作所 中央研究所先端技術研究部主任研究員
	浜 祐子	旭硝子(株)ASPEX 事業推進部リーダー
	大川 隆	大研化学工業(株) 研究開発部長
	半田 宏	東京工業大学フロンティア教授
	林 利彦	東京大学大学院総合文化研究科教授
	伊藤 嘉浩	徳島大学工学部教授
	中元 隆明	獨協医科大学心血管肺内科学助教授
	下河 遼明	東京工業大学精密工学研究所教授
	中山 喜萬	大阪府立大学大学院工学研究科教授

3. 当該分野の概要

(1) 専門的概要説明

ナノテクノロジーのバイオ分野展開ではトップダウン型及びボトムアップ型双方を基調とするナノ領域操作機器及び医療用ナノマシン開発を目指す。すなわち、トップダウン型ナノテクノロジーデバイスとして、1) 培養幹細胞の遺伝的性質を精密操作により変換し、よりよい臓器の育成を可能とするナノテクノロジーデバイス、またボトムアップ・トップダウンハイブリッド型デバイスとして 2) 身体各部の病因細胞をターゲットとして正確に治療用医薬を配送し、患部情報を収集しつつ病因細胞内への医薬注入を行い、超精密化MRI援用の外部指示を受けつつ現場での自動駆動ロボット作用により病因細胞除去手術を施すことのできる医療用ナノデバイス及びナノテクマシンの開発。これと並び病変部状況とこれに対する治療効果の監視・追跡結果を患者体内と医療技術者を双方向的に結んで高度IT化通信を行う統合システムの開発を行う。

(2) 一般向け概要説明

将来の臓器移植は自分の細胞から育てた自分の臓器を使う、という明るい希望をもたらす幹細胞医療において、ナノテクノロジーを利用した単一細胞手術により安全で正確な遺伝子治療を培養初期段階に実施し、培養臓器の遺伝的特質を高める細胞手術用ナノテクノロジーを発展させる。また、経口投与される医薬品は、病因部への配送過程で不要なものとして分解されたり、健康な細胞に配送されて副作用を生み出したり、長期間体内に残って害をなすなど、今後ますます高価になる医薬品の無駄と病人の消耗を生み出す場合が多い。本研究課題は治療における無駄と患者の苦痛を省くため、医薬配送の標的特性が格段に良く、疾患部到達後は単一細胞レベルの可視化と周辺生化学指標の分析結果に基づく医薬の細胞内注入を行うナノデバイス、またこれと並んで単一細胞レベルの選択性をもって動作する病因細胞除去手術用等のナノテクマシンの開発を行う。上記の治療には例えば、高精度MRI等によ

る外部監視下に、電磁場の作用で医薬カプセルを開閉するなど疾患部と医療技術者間での双方向IT化通信に基づく医療及びドラッグデリバリーを行うマシン等の開発が重要となる。また治療過程とその効果を監視・追跡する双方向通信システムの開発により公開医療を可能とし、医療ミスを減少させ患者の負担を軽減する。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

細胞手術に関する基礎研究が一部研究室でやっと開始されている段階である。細胞から染色体を取り出す方法、染色体から引き出した遺伝子DNAに分子手術を施す方法、そのDNAを染色体の戻し、さらに染色体を細胞に戻す方法など多くの開発段階において、個々のDNA分子に対して自由に人工操作を加えるトップダウン型ナノテクノロジー的方法の開発が急務である。また、ドラッグデリバリーシステムとしては、人工脂質膜を利用したリポソームや無毒化したウイルス、あるいは高分子を素材としたカプセルが利用されている。機能としては長時間にわたり医薬が放出される徐放型、体温や血中グルコース濃度に反応して医薬放出を行うインテリジェント型、ガン細胞に特有な膜抗原を目印として病巣を攻撃する標的型などが開発されている。また血中グルコース濃度に応答して自動的にインスリンを放出する体内用ポンプの例は将来のナノマシンによる治療につながる思想を持つ。将来構想としては、標的細胞を間違いなく攻撃するが他の細胞に影響を与えない高度なターゲット精度、放出医薬が患部の細胞等に対してどのように働いているかを位置精度良くモニターする方法、人体各部にナノメートル精度で位置制御しながら医薬等を搬送し必要な手術をする無痛システム、遺伝子治療を確実に行うナノマニピュレータの開発が待たれている。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

単一細胞手術を可能とするナノテクノロジー機器の開発

幹細胞の染色体・ミトコンドリアに対して直接的な加工によりその遺伝子機能を変換し、手術後の細胞機能の変化を記録する高精度遺伝子手術機器の開発。幹細胞からの臓器育成の初期段階でその性質を変える医療をナノテクノロジー及びIT関連技術を連携して開発する。基礎技術に3年、実用化に10年を要する。

高精度ターゲット特性を持つITドラッグデリバリーデバイス及び素材開発

高精度ターゲット特性を持ち、病因細胞にのみ治療用薬物を配送し、患部の生化学的指標をモニターしつつ病状に相応しい医薬放出を行うドラッグデリバリーデバイスとその作製を可能とする材料の開発。基礎技術に5～7年を要し、実用化・産業化には3～5年を要するであろう。

疾患部細胞手術を可能とする無痛ナノテクマシン開発

アクチュエータ付きナノメートル領域マニピュレータによる痛みを伴わない病因細胞（微小ガン組織等）の限定切除を目的として、超精密化MRI、CTスキャン等による観察下に外部指示と自動駆動操作による細胞手術を行う複合化ナノテク手術マシンの開発。基礎ナノテクノロジー技術開発に7～10年を要し、実

用化・産業化にはさらに5年を要するであろう。

治療効果発信のためのIT化病巣モニターシステム

医薬の確実な効果を各微小病巣レベルで評価でき、その結果を外部に非接触で発信できるIT化モニター通信システム開発し、医療行為支援を強化すると同時にこれを公開して医療ミスに関する患者の不安を解消する。モニター開発に5 - 10年を要し、人体埋め込み実験による安全確認にさらに5年を要するであろう。

5．研究の概要

(1) 幹細胞レベルの高精度遺伝子置換治療を可能とするナノテクノロジー

細胞培養による器官再生が可能となりつつある現状から、将来は培養初期細胞の染色体を摘出し、その遺伝子DNAに対する直接的置換手術を行えるシステムを開発する。この目的に最も重要な要素技術はナノチューブを利用したナノピンセット、ナノカッター、ナノ接着などの技術革新であり、トップダウン型ナノテクノロジーの発展成果を大いに活用する。

(2) 高精度IT化ドラッグデリバリーデバイス開発のためのナノテクノロジー

病巣へのターゲット性を格段に向上させるために、病因細胞の表層特性を詳細に記憶し、複数のターゲット因子の多重認識によりターゲット精度を格段に高めたドラッグデリバリー用デバイスを開発する。このデバイスは生体患部の生化学的分析状況をモニターしつつ自主的判断と外部からのIT通信・電磁場・光刺激等の制御により適量の医薬を放出する。デバイス開発の基本となる素材・材料開発と生体試験が重要な課題となり、生分解性高分子、ポーラスシリコン、ナノチューブ素材等を検討する。放出医薬としては細胞内に直接注入され、免疫的な副作用を持たない低分子量キャリア型を開発する。

(3) 病因細胞除去手術を可能とする自動マシンの開発とナノテクノロジー

あらかじめ同定された病巣患部までの誘導後、精密位置制御をマシンが自身の持つ病因細胞認識機構と超精密化MRI、CTスキャンによる外部支援を受けつつ行った後、微小ガン化病変部等を除去及び投薬治療するナノテクマシンを開発する。今後予測されるターゲット性の高い幹細胞移植等の高度手術を行うには、外部指示を受けて行うIT化手術マシンの部分とナノテクマシンの自動駆動操作で行う部分を高度に複合化した最適化システムを完成する。

(4) 治療効果モニター用双方向通信ナノデバイス開発用ナノテクノロジー

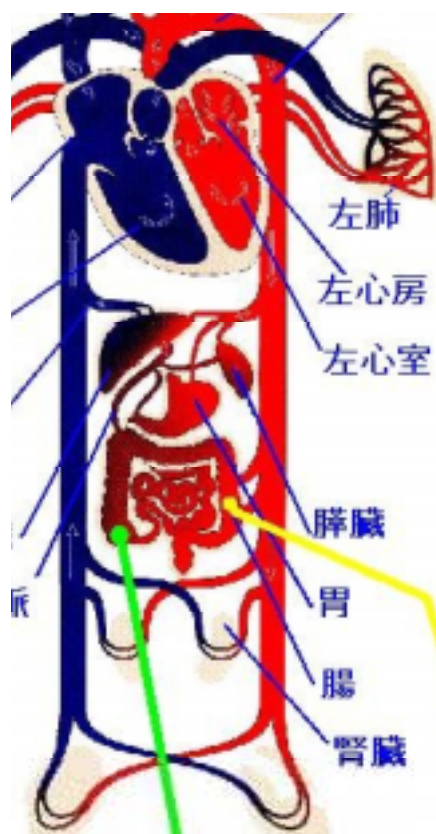
ドラッグデリバリーシステムによる投薬及び病変部手術による治療効果を現場において連続的にモニターし、発信受信機構を通じて外部に高度IT送受信するシステムをナノテクノロジーの技術を用いて開発する。この開発には手術現場に留まり周辺部の観察と生化学分析を常時行うオプティコバイオケミカルな分析システムと、体内外へ非接触的にデータの送受信を行う通信システムからなる。

以上の4課題を推進し、ドラッグデリバリーと病因細胞除去の標的精度を単一細

胞レベルに高め、安全・無痛・高効率医療効果を得るデバイス及びIT通信化ナノテクマシンの開発をトータルシステムとして行い、国民生活に資する研究開発成果をあげ、医療の信頼性を高め、日本を世界の医療産業の一大中心とする。

6．取組みにあたっての留意事項

この分野の研究開発にはナノテクノロジー分野全体の進展が関わり、(1)ナノテクマシンとしての最適材料開発、(2)ナノテクマシン設計作成技術とその駆動機構開発、(3)生化学的に高度なターゲット認識システム開発とMRIによる標的確認機構、(4)体内で動作し外部へ発信する超高度集積型生化学分析・化学センサーシステム開発、(5)病巣の単一細胞レベルでの映像化及び高度IT利用型通信デバイス開発等を共同開発作業として進める必要がある。



- 2) 疾患部における細胞診断データに基づいて医療技術者及び医師はナノマシン内の医薬カプセルから細胞内へ医薬を注入する。
- 3) 薬剤注入を受けた病因細胞の状態を映像及び生化学的分析データとしてナノマシンが現場から外部に送信する。
- 4) 病因細胞及び疾患部のその後の推移を定期的に疾患部より送信し、医療技術者が次に行う診療方針の決定を助ける。

以下は体内のナノマシン (M) と外部医療技術者 (G) の間での通信状況を言葉で表してみた、架空通信状況です。

G: 9号機応答せよ。
M: 9号機応答中。
G: 9号機は疾患部へ接近せよ。
M: 疾患部の大腸内位置を知らせてください。
G: MRIデータ転送中。

M: 発見。接近中。
G: 生化学的データ送信せよ。

M: 疾患部で病因細胞確認。
G: 医薬注入準備開始せよ。
M: 準備完了。
G: 注入ハッチを開け。注入開始。
M: 医薬注入終了。ハッチ閉め。
G: 引き続き映像を送って下さい。
M: 了解。状況はOKです。
G: 病因細胞探索を続けて下さい。
M: 了解。

医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン概念図

1. 分野名 (10) ナノソフトマシン

2. 分野検討者

検討担当委員：柳田 敏雄 大阪大学大学院生命機能研究科長
猪飼 篤 東京工業大学大学院生命理工学研究科教授
意見聴取者：難波 啓一 松下電器産業(株)
先端技術研究所リサーチディレクター
茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所長
魚崎 浩平 北海道大学大学院理学研究科教授

3. 当該分野の概要

(1) 専門的概要説明

ナノ物質として従来取り上げられてきたものの大半は、半導体あるいは金属といった個体物質の延長線上であった。一方、分子性物質は化学結合の様式、構造などが多様であるため、その組み合わせで構築されるナノ集合体は様々な自由度をもった「柔らかな系」である。生命体は、原子、分子を自在に組み合わせたナノ集合体を単位として機能を発揮しつつ、さらに集合して階層構造を創り上げている。生体の中で自己の柔らかさを利用して自己組織化し秩序ある運動をすることは、柳田らの研究によって知られてきた。このような運動は人工物の機械的な秩序運動におけるエネルギー変換・供給機構とは全く異なり、室温における熱ノイズ程度の極微小エネルギーがその供給源である。生命体でのナノ分子集合体の秩序ある運動が生命活動の根源であることを考えると、このように熱による無秩序運動を秩序ある仕事に効率よく変換する機構の解明こそが、ナノ領域の機能発現機構を考察し体系立てて人工ナノマシンを設計する根元的な基盤となることに疑問の余地はない。

そこで、ナノソフトマシン分野は、タンパク質等の生体分子ナノマシンの自己構築・動作原理を解明し、生体分子に学んだ医療、工学、産業応用ナノマシンを実用化することを目的とする。人体を含め、いかなる生命体も個々の細胞が生命活動の基本単位であるが、そのたった $10\mu\text{m}^3$ 程の小さな体積の中に数万種類の生体分子ナノマシンが高度に集積し、信号やエネルギーをやりとりする膨大でかつダイナミックなネットワークを形成している。その機能集積度は100メートル立法のハイテク工場にも勝る。それは、100mを $10\mu\text{m}$ に対応させる1千万倍という縮小率が1mmの部品サイズを原子のサイズ 0.1nm に対応づけることから明らかなように、蛋白質分子ナノマシンでは原子1つ1つが機能部品として使われ、組み立てられているからに他ならない。これはまさに究極のナノテクノロジーである。そして、水素結合と呼ばれる弱い結合力のネットワークによる特異な立体構造構築原理のゆえに、人工機械とは全く異なる物理原理により、エネルギーロスのほとんどない高効率エネルギー変換や、ダイナミックな超並列信号伝達処理が実現されており、それが生命機能の柔軟で良く制御された精緻なしくみを支えている。その究極の姿が、現在のコンピューターが及ぶべくもない高次脳機能である。

(2) 一般向け概要説明

生命機能は、すべて自然の創り上げたナノテクノロジーに支えられており、その基本原理を学び技術応用展開に結びつけることに大きな夢と期待がかかるナノテクノロジーの宝庫である。その成果技術は、例えば人の病気疾患の原因を単一細胞レベルで短時間に解析しその治療法を生命の基本的機構に基づいて論理的に開発すること、現在の人工機械では不可能な高効率エネルギー変換システムの構築、人の脳を越える超大容量インテリジェントメモリやプロセッサの実現等々、今までの技術では全くの不可能を可能にするであろう。このナノテクノロジーによって、石器時代から半導体LSIによる高度情報化時代へと人類が上ったステップと同程度の大きなステップを、我々は極めて短時間に踏み越えようとしている。

4. 現状および実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 個々の蛋白質ナノマシンの動態を観察、操作し、分析するための1分子テクノロジーはほぼ確立している。これを発展させ、細胞内での個々の生体分子ナノマシンの動きを立体的に、高時間分解能、高空間分解能で観察して、その機能解明と相互作用ネットワークの把握によって単一細胞診断・手術や新薬の開発およびスクリーニングなどを行う技術は、現在の技術を基盤として数年から10年以内に実現する。その結果は医療の方法を根本から変えたと期待される。

(2) 個々の生体分子複合体ナノマシンの動作機構をより深く理解して、例えばそれを制御するドラッグデザインを精度良く行うためには、動作中のナノマシンについて構成原子の立体配置を高分解能で求めることが必要で、X線結晶解析やNMRには不可能な1分子立体構造ナノイメージングを実現する必要がある。そのため、蛋白質ナノマシン専用の極低温超高分解能電子顕微鏡の開発が望まれている。これも十分な研究投資さえあれば、10年以内に実現可能であろう。この装置は電子線トモグラフィー細胞診断法にも活用する事ができ、(1)と同様に医療、医薬開発にも威力を発揮すると期待される。

(3) 上記のナノマシン動態観察および構造、相互作用解析技術を駆使して、細胞分化や細胞死など細胞生物学的重要問題や、分子モータのエネルギー変換機構などの物理学的重要問題にアプローチし、生命機能の基本的解明を成し遂げた上で、それを基盤に論理的医療技術、医薬開発の効率的推進を図り、また、高効率高密度エネルギー供給装置、超高集積度情報処理装置の開発を目指す。20年以内の実用化・産業化を目指す。

(4) 蛋白質ナノマシンの動態観察および構造・相互作用解析によって得られるこのダイナミックなナノ構造体の構造設計原理を基盤とし、また、球状、棒状、リング状、チューブ状など、既知の蛋白質立体構造をナノ構造ユニットとして組み合わせることにより、複雑な機能を持つ人工ナノマシンやナノ構造を高集積度で立体的に組み上げ、超高集積デバイスとして応用することも可能である。これらも20年以内の実用化・産業化が期待される。自己組織化機能に基づいた量産技術が確立しているからこそ、実現が有望視される技術分野である。

5．研究の概要

目標（１）は個々の分子ナノマシンの動態を高時間分解能で立体的に追跡し操作する技術開発、目標（２）は個々の分子ナノマシンの立体構造と相互作用を高空間分解能で解析する技術開発、目標（３）と（４）はそれらの解析技術を活用して生体内のナノスケールシステムの機能と動態からその動作原理を明らかにし、細胞診断・手術などの医療応用に役立て、また高効率のエネルギー供給、エネルギー変換、超並列ダイナミック信号処理システムの構築など、工学的応用を目指そうとするものである。理学、工学、医学など、さまざまな研究分野の横断的かつ融合的な協同作業が必要とされる。また、装置や方法論の開発に際しても、適切な観察および解析対象となる生体系ターゲットを選ぶことが重要となる。

ただし、ナノテクノロジーでもっともハードルが高い大量生産技術の問題が、蛋白質ナノマシン立体構造の非常に高効率、高精度の自己構築能力を利用することですでに解決されており、この点が実用化・産業化に際して、他の硬い材料を用いたナノテクノロジーに対して、最も有利で注目すべき点である。

6．取組みにあたっての留意事項

この分野のアプローチでは、開発目標に挙げられた解析法や解析装置が幅広い産業分野で有効利用される期待とともに、目標達成のために生命のしくみをナノスケールで観察し解明する必要性から、ゲノム塩基配列情報を基盤としたライフサイエンスにおける最重要問題をも解決する可能性を秘めており、さらには複雑系システムの挙動の基本的理解といった物理学的重要問題にも関わって、既存の工学的概念を根本から覆すデバイス動作原理の発見につながる可能性も秘めている。よってこの研究分野を、十分な投資によって積極的に推進することが強く要望される。これらの計画はすくなくとも５年で芽がでるものであるが、芽がでて５年後には今後の科学技術の要となると確信できる。おそらく１０年後には現在の固体物性の「伝導性」「磁性」「超伝導」などと同格に「情報伝達性」などが定量的な物性として扱われるものと確信している。本分野の成功には、生物、物理、化学、情報科学などの分野を超えた連携と、さらには社会科学との連携が必要不可欠なものである。さまざまな研究分野の横断的、融合的、かつ日常的な協同作業が必要とされるだけに、研究拠点整備にあたっては物理的な研究者間の相互作用が十分に得られるような配慮が重要である。

1. 分野名 (11) ナノ組織エネルギー貯蔵・変換材料

2. 分野別計画検討者

検討担当委員：岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事
(東京大学客員教授)
意見聴取者：櫻井 庸司 NTT通信エネルギー研究所
エネルギーシステム研究部主幹研究員
飯島 澄男 名城大学教授・NEC 主席研究員
産総研新炭素系材料開発研究センター長
石原 達己 大分大学工学部助教授
秋田 調 電力中央研究所部長

3. 当該分野の概要

(1) 専門的概要説明

原子レベルにおいて制御された界面構造、単一原子層構造、ドメイン構造及び欠陥構造の設計技術を確立することにより、高効率太陽電池、二次電池、高密度水素貯蔵ナノチューブ、低温作動型燃料電池及び超伝導小型エネルギー貯蔵素子(マイクロ SMES)などの性能を飛躍的に向上させたエネルギー貯蔵・変換材料の開発を行う。

(2) 一般向け概要説明

原子のレベルで、結晶構造などの微細構造を設計することで、従来難しいとされた発電/蓄電の両立による太陽エネルギーの有効利用(利用効率2倍以上の向上)、苛性ソーダ製造プラントから膨大に発生する水素の高密度貯蔵と低温発電用酸化物型燃料電池材料や全固体高分子型燃料電池材料を組み合わせた次世代発電材料、高効率発電・貯蔵システム用の高性能超伝導材料などの開発を目指す。

本研究領域では、物質が本来持つ構造を適切な形に作りあげることにより、従来のエネルギー貯蔵・変換材料が有していた性能の限界を2倍から10倍に引き上げることを目指す。こうした次世代ナノ組織エネルギー貯蔵・変換材料の開発は、情報通信、医療、環境(二酸化炭素発生抑制、資源の有効利用など)をはじめとする、あらゆる分野への応用が期待され、その社会的波及効果は極めて大きい。

4. 現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

エネルギー貯蔵・変換材料としては、太陽電池、二次電池、水素貯蔵材料(合金、ナノチューブ)、酸化物型・高分子型燃料電池、超伝導を利用した発電・貯蔵用線材の検討がなされているが、効率や性能が不十分であることから、従来記述に比較してコスト競争力に欠ける。

太陽電池は、太陽光に含まれる特定波長域の光のみを利用するため、エネルギー利用効率は10%程度と低い状態にあり、二次電池は無機材料による全固体化が達成されておらず、積層化時における信頼性の確保、半導体デバイスとの集積化が困

難な状況にある。

燃料電池においては、 1 W/cm^2 級の高い発電効率を示す全固体高分子型固体電解質（自動車への応用）や摂氏 500 度以下の温度で同程度の発電効率を示す酸化物型燃料電池用固体電解質（分散型自家発電、自動車への応用）の開発を行うことが強く望まれているが、その為には、革新的な材料開発の視点が必要とされている。加えて、高分子型燃料電池開発においては、燃料である高純度水素の安定供給のための高密度水素貯蔵材料の開発無くしては実用化が難しく、高密度水素貯蔵材料の研究が強く望まれている。

他方、全てのエネルギー貯蔵・変換材料に不可避の要素として内在する損失を、限りなくゼロにできる超伝導線材を利用したエネルギー貯蔵装置(SMES)は、究極の技術としてその実用化が切望されている。高温で使用出来るほど超伝導化のメリットは大きい、現在 20 K 以上の高温で利用出来る信頼性の高い高性能超伝導線材は開発されていない。

（２）実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

太陽電池並びに２次電池用材料開発における目標

太陽電池においては、その効率を２倍以上に高める目的で、発電２次電池を用いたエネルギー貯蔵機能を組み合わせた素子の開発と高効率素子作製のための構成部材界面構造の原子レベルでの制御。２次電池の高密度化においては、無機全固体型電池の開発とその積層化による高密度電池の開発。目標達成は 10 年以内、実用化は 15 年後を目指す。

高密度水素貯蔵材料並びに高性能燃料電池用材料開発における目標

高密度水素貯蔵材料では、単一原子層からなるナノチューブを作成し、水素貯蔵能力として、 6 重量%以上を目指す。

燃料電池においては、 1 W/cm^2 以上の発電効率を示し、電解液を必要としない全固体型高分子固体電解質（安全性の飛躍的向上）や原子レベルにおけるドメイン構造を制御し、摂氏 500 度以下の温度においても 1 W/cm^2 以上を示す酸化物型燃料電池材料の開発を目指す。これにより、セパレーターの合金化が可能となり、システムの飛躍的な高効率化が可能になる。目標達成時期は $15\sim 20$ 年後を目指す。

高臨界温度超伝導材料を利用したエネルギー貯蔵装置

効率的な冷凍機冷却が可能な温度（ 20 K 以上）あるいは液体窒素（ 77 K ）中でSMES、発電、電動機などに使用可能な高性能線材を開発する。具体的にはそれぞれの温度で、 10 T の磁界中、 10 万 A/cm^2 以上の臨界電流密度をもつ線材の開発。適切なナノスケールの欠陥導入による高温・磁界中での磁束ピン止め強め、臨界電流密度の大幅な改善が必要となる。目標達成時期は $15\sim 20$ 年後を目指す。

５．研究の概要

（１）太陽電池並びに２次電池用材料開発

太陽電池の高効率化においては、図 1a に示すような太陽電池と 2 次電池機能を組み合わせた新型電池の試作を行う。その際、高性能化の鍵を握るのは、半導体/電極/固体電解質の界面構造の設計（図 1b）である。

さらに、2 次電池用固体電解質の全固体化により安全性を確保したうえでの積層化も可能となり、高効率エネルギー変換と高密度エネルギー貯蔵の両立が可能となる。

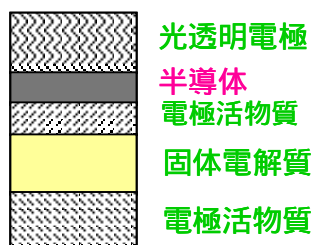


図 1a. 新型電池材料の概念図

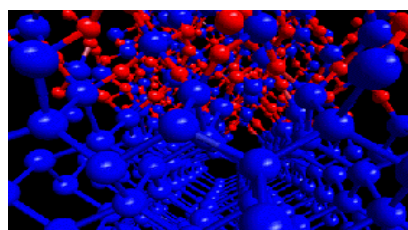


図 1b. 界面構造の設計

（ 2 ）高密度水素貯蔵材料並びに高性能燃料電池用材料開発

高密度水素貯蔵材料の開発では、図 2b、c に示す単一原子層からなるナノチューブを合成することで、水素貯蔵能力が飛躍的に向上（1 6 重量%以上）する。この材料開発により、燃料電池の実用化開発が加速される。低温型燃料電池の開発では、酸化物中に数原子レベルで存在する秩序構造（マイクロドメイン）とその界面構造の設計や、高性能全固体高分子型固体電解質の開発、さらには、高密度水素貯蔵素子との組み合わせによる、小型・高効率システムの開発等が期待される。

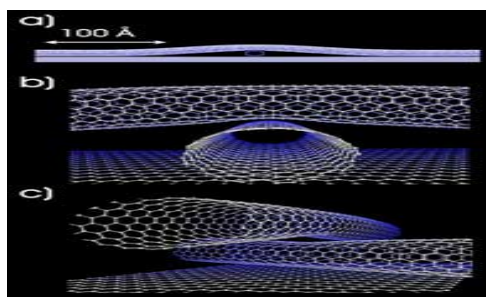


図 2. 単一原子層からなるナノチューブ

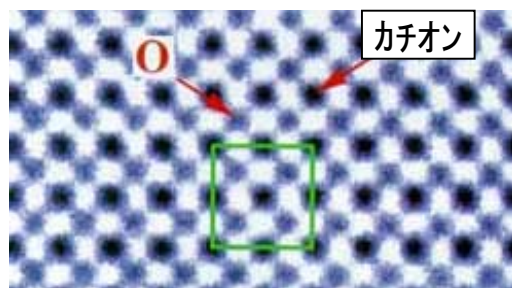
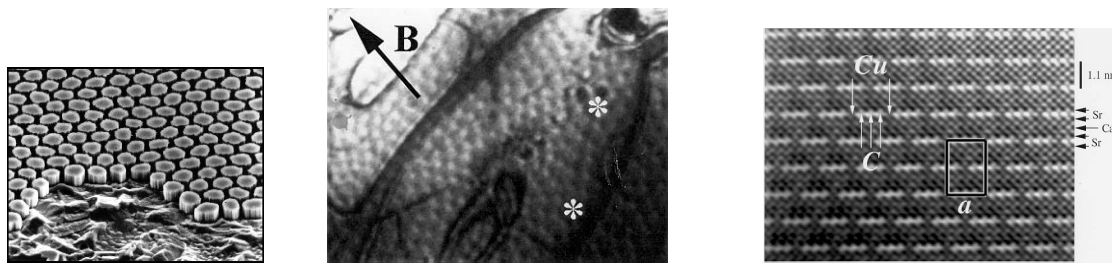


図 3. 酸化物固体電解質の格子像

（ 3 ）高臨界温度超伝導材料を利用したエネルギー貯蔵装置の開発

実用的には、高温、磁界中で十分に高い臨界電流密度を達成する必要があり、ナノレベルでのピン止め力の大幅な改善が必要である。具体的には、各種欠陥構造によるピン留め効果（図 4b）を原子レベル(図 4c)において設計することで、臨界電流密度の飛躍的向上を目指す。そのための基盤技術として、超高圧などの極限環境を用いた原子レベルでの欠陥構造設計技術の構築を行い、交流損失や機械的特性など実用性能の評価・解析技術を確立したうえで、実際にマイクロ SMES 等のシステムを試作して性能の実証を目指す。



a)線材のミクロ構造 b)欠陥によるピン留め c)線材の原子構造

図4．超伝導線材中の欠陥構造と高性能化

6．取組みにあたっての留意事項

本領域の課題遂行にあたっては、無機及び有機化学の専門家と物性・解析の専門家が有機的な連携をとり新材料開発に取り組む必要がある。

1．分野名 （１２）ナノ構造制御触媒

2．分野別計画検討者

検討担当委員：魚崎 浩平 北海道大学大学院理学研究科教授

茅 幸二 岡崎共同研究機構分子科学研究所長

川合 真紀 理化学研究所主任研究員

意見聴取者：岩本 正和 東京工業大学資源化学研究所教授

今成 真 三菱化学(株)執行役員

科学技術研究センター長

北海道大学触媒化学研究センター教授

（朝倉 清高、市川 勝、大澤 雅俊、上田 渉、

大谷 文章、高橋 保、辻 康之、松島 龍夫）

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

触媒反応は、１種類の活性サイトのみで進行しているとは限らず、異なる働きを持つ様々なサイトが物質・エネルギーの移動を介して有機的に結びつき、進行している。触媒の活性や選択性を飛躍的に向上させるために、活性点を原子・分子レベルで設計・制御するのみならず、ナノ～ミクロン領域で組成や形といった高次構造を規定したナノ構造制御固体触媒を設計・構築する。また、精密有機合成化学の手法を駆使し、完全にナノ構造を制御することによって、分子認識能など従来の触媒系では達成できない画期的な機能を有する分子触媒を創出する。

（２）一般向け概要説明

物質を高速・高効率かつ高い選択性をもって転換し、資源・エネルギーの有効利用を達成することは、エネルギー・環境・材料の広範な分野に関連した、循環型社会実現のための非常に重要な課題であり、触媒がまさにその鍵となる。生体内では、酵素（分子）に始まり、細胞内組織、細胞、組織、生命体という高次構造をもち、全体として統一のとれた生体反応が営まれている。これと同様、人工触媒系においても多くの化学過程が同時に進行し、触媒上の多くの部分がオーケストラの各パートのように協力しあって、特定の物質が生成される。ナノ構造制御触媒では、分子よりも大きなサイズ、すなわちナノメートル領域における高度な構造制御により、従来にない高い性能を有する触媒が実現される。ナノ構造制御触媒を用いることにより、副生成物がなく生成物のみを作り出す反応系、有

機溶媒を用いず水中で反応が加速される反応系、分子認識能を有する極めて高い選択性を有する反応系、太陽光を使って水を分解し、水素を発生させる光触媒、超高効率・長寿命燃料電池用触媒、医薬品などの精密合成用触媒、アミノ酸・糖などのセンサーなどが実現可能となり、環境保全、エネルギー消費抑制、および対外競争力の回復など極めて大きい社会的意義がある。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

高効率生産、環境浄化、エネルギー変換用など触媒は現在でも人間社会のあらゆる場面で重要な役割を果たしており、多大の進化をとげてきた。これまでの触媒設計は、主に固体表面において反応分子と相互作用する分子・原子レベルの「活性点」という考え方に基づいて行われており、原子レベルでの構造制御に関する研究は非常に進んでいる。しかし、ナノ構造制御固体触媒の研究はまだ途についたばかりである。高次構造制御に関しては、ミクロ・メゾ細孔をもつ多孔性物質の利用や自己組織構造形成、モレキュラインプリンティングなどの化学的な手法が取り上げられているが、規則構造の設計・調製は明確な指針がないままに研究されており、もっとも多くの研究者が携わっている、「ナノ細孔をもつ材料」の合成とその応用においても、分子よりもずっと大きいナノメートルサイズの空孔をもつ材料が、高速・高選択的な触媒として機能した例はない。また、ナノメートルサイズの構造を規制した光触媒についてもほとんど検討されていない。

分子触媒は現在すでに医薬品や機能材料などの合成に広範に用いられているが、ナノ構造を完全制御した触媒系の開発例は今だない。また、環境負荷低減のために不可欠な水を溶媒とする触媒反応系も実現されていない。

(2) 実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

究極の目標は、化学反応のエネルギー効率・原単位の飛躍的向上と不要副生物の発生0(選択率100%)の実現にある。具体的目標は以下の通り。

三次元的にナノ構造制御(複合機能集積化)した触媒系の開拓

1つの触媒上に、酸点 塩基点、酸化活性中心 還元活性中心、親水性 疎水性など互いに相いれない反応部位を組み込むことで複合機能集積化を実現する。例えば、不斉合成反応は医薬品、農薬等の化学工業において極めて重要であり、これまでは均一系触媒でのみ可能であるとされてきた。均一系触媒を利用する多くの不斉合成反応が提案されてきたが、反応の複雑さにとまなう分

離やプロセスコストの関係で、現時点で実用化されている反応系はごくわずかである。これに対し、三次元的にナノ構造制御し、必要な機能を単一の触媒上に付与する（複合機能を集積する）ことによって、廃棄物を出さない新しい触媒プロセスの実用化など、現在の生産工程が革新的に変革され、計り知れない経済的効果が期待される。対象とするプロセスの複雑さにより目標達成および実用化の時期は異なるが、3～5年後には目標が達成され、実用化にはその後さらに2～5年程度必要であろう。

多段階合成プロセスを一回の操作で達成可能なナノ触媒チップ（ナノファクトリー）の構築

上述をより複合化したものであり、原子レベルで構造を制御した触媒をリソグラフィなどの手法で、その高次構造（位置や形）を制御・配列し、高機能化する。同一 chip 上の CPU などの電子部品とバルブ、センサーなどの機械・化学部品と共同し、能動的、自律的に反応の制御をはかる。さらに、各 Chip を通信回線で結びつけ、各 Chip を有機的に結合するとともに、外部指令に基づき、多段階化学反応の制御を実現する。プロトタイプの完成に7～8年、実用化にさらに5年程度が必要であろう。

循環型エネルギーシステムの実現

太陽光の照射により、光触媒を用いて水を分解し、水素を得る。この水素を燃料電池に用いることによって、太陽光だけをエネルギー源とし、環境汚染物質を一切放出しないクリーンなエネルギーシステムが実現できる。このためには高効率・長寿命の光触媒と燃料電池用触媒の開発が不可欠である。いずれも、複合的な機能が要求され、ナノメートルサイズの構造制御が鍵となる。技術的な問題に止まらず社会構造の大幅な変化を伴うため、開発期間は10年、産業化にさらに10年程度を要するものと考えられる。

5．研究の概要（課題の例）

（1）高選択的ファインケミカルズ合成用ナノ構造触媒

これまで、光学活性体（鏡像体）のうち一方だけを合成するために用いられる触媒は、一方の光学活性体とだけ相互作用する活性点を表面に配置するという、活性点と反応原料分子の一对一相互作用を基本にして設計されてきた。上記の目標達成のためには、このような一对一相互作用ではなく、表面の二次元あるいは三次元周期構造と反応原料分子の特異的な相互作用系の開発が必要となる。触媒

表面に単に光学活性分子を付着させるのではなく、デンドリマーなどの高度に三次元ナノ構造が制御された配位子を利用した分子の配列構造そのものが光学活性であるような新規な触媒の開発を目指す。

（２）集積ナノ触媒チップ（Integrated Catalyst Nano-Chip：ICNC）

現在高次構造制御法として広く用いられている化学的な手法はエネルギー消費が少ないソフトプロセスであるという優位性をもつ反面、構造制御という観点では問題がある。一方、リソグラフィー法に代表される物理的手法は、三次元高次構造を自由に形成可能であり、エントロピー的に不利な構造構築も行うことができる。ここでは両者の特徴を利用した新しいナノ触媒チップ構築法を確立し、ナノファクトリーへの展開を目指す。具体的には活性構造の原子レベルでの構築とリソグラフィー法によるその配列、構造の制御による高効率・高選択触媒の開発、高次構造による触媒作用制御の原理の確立、電気・光等による化学反応の能動制御、半導体デバイス・マイクロメカニクスを組み込みによるナノ触媒チップの作製と触媒作用の自律コントロールの確立、ICNCの組織化とコントロールソフトウエアの開発を行い、ナノファクトリー・ナノコンビナートの実現・実用化を図る。

（３）水完全分解用ナノ構造光触媒

これまでの光触媒材料のほとんどはナノメートルあるいはマイクロメートルサイズの微粒子が集合した多結晶体である。一方、学術的な観点から、単結晶が用いられることもあったが、その比表面積が極端に小さいために実用的ではなかった。効率低下の最大要因である「励起電子 正孔の再結合」は結晶欠陥や粒界などで進行することが知られており、結晶面の構造を制御したナノメートルサイズ微粒子を調製することにより、再結合を抑制し、高効率な光触媒ナノ粒子を調製可能である。

（４）新規ナノ構造体の合成手法の確立

金属または半導体のナノ構造体（細線、粒子）は、既存の材料とは異なる材料特性を発現するものとして期待されており、触媒材料としての可能性も高い。しかし、これら材料の大量合成技術はまだ確立されていない。ここでは、メソ細孔シリカなどの多孔体物質を鋳型として、その細孔内にナノ細線やナノ粒子を合成する。メソ細孔シリカ FSM-16 や HMM-1（細孔径 3 nm）の粉体に金属化合物を導入し、光や水素で酸化還元を行い金属または半導体ナノ細線とナノ粒子を作

り分ける。また、メソ細孔薄膜でも同様に光還元により薄膜内ナノ細線・ナノ粒子を作成する技術開発を行う。

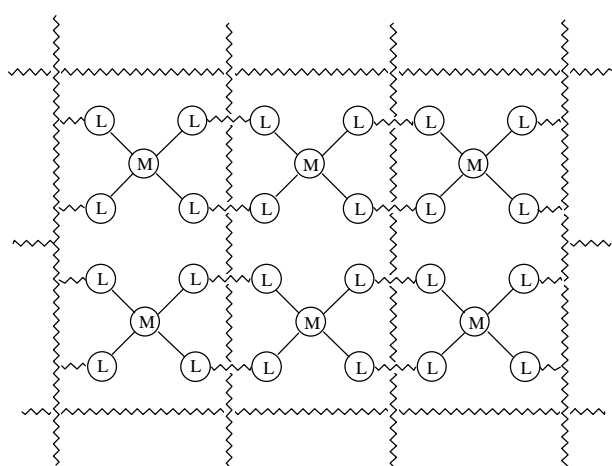
(5) 携帯電子機器用マイクロ燃料電池の開発

現在水素を燃料とする自動車用燃料電池の開発が急速に進められているが、電子機器用電源としては水素を直接燃料とすることは安全上問題があり、石油などの改質により水素を得ることも、改質器が小型軽量化を妨げ、高温を必要とするなどの問題がある。したがって、超小型化のためには、エネルギー密度が高く、保管運搬が容易なメタノールを直接燃料とするダイレクト・メタノール型燃料電池の開発が望まれる。このための最大の課題は高性能かつ安価な触媒の開発にあり、複合機能の集積化が必要である。

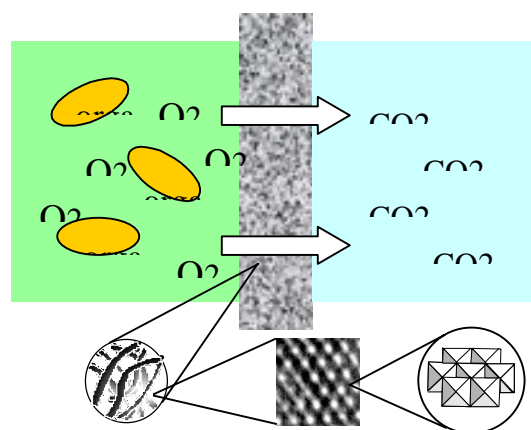
6. 取組みにあたっての留意事項

本分野では、材料合成、構造評価、反応設計、あるいは触媒特性評価などの幅広い分野の研究を統合的に推進することが必須であり、また、金属、ミクロ/メソ多孔体(ゼオライト)、触媒、物性物理の材料関連分野の連携が不可欠である。また、ある程度研究が進行した段階では企業との共同研究を積極的に行っていくべきであろう。

・高次ナノ構造制御触媒

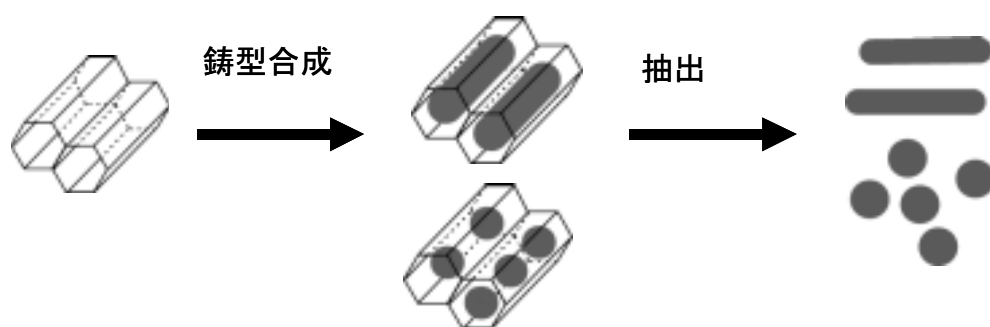


有機金属ナノ構造触媒

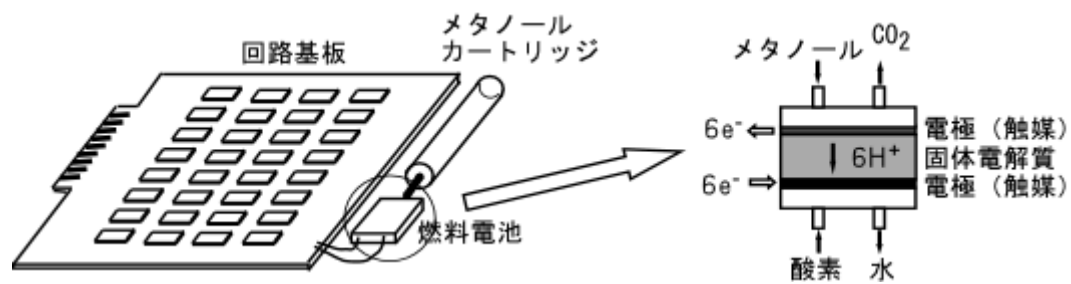


メソポア構造組織と複合金属酸化物クラスター分子で構成される水浄化触媒

・ ナノ細線・ナノ粒子の調製法



・ 携帯電子機器用マイクロ燃料電池



1．分野別（13）ナノ空間材料

2．検討チーム

検討担当委員：	臼井 勲	科学技術振興事業団理事
意見聴取者：	寺崎 治	東北大学大学院理学研究科助教授
	黒田 一幸	早稲田大学理工学部教授
	稲垣 伸二	（株）豊田中央研究所主任研究員
	青山 安宏	京都大学大学院工学研究科教授
	藤田 誠	名古屋大学大学院工学研究科教授
	相田 卓三	東京大学大学院工学系研究科教授

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

ナノポア系材料とは、口径十～数千の微小な空間を持つ様々な物質のことを言う。この研究領域は、ナノポア系材料の持つナノオーダーの空間に着目し、新材料や新機能発現を得ようとするものである。

これまでナノポア系材料として、ゼオライト、シクロデキストリン、クラウンエーテル等が知られていた。例えば、ゼオライトは、石油精製・脱硫触媒などとして不可欠な材料として知られ、これまでにさまざまな分野に利用されている。近年になり、より大きな空間や空孔率等を有する多孔体が、機能向上と、新しい機能の発現の期待から追究され、多くの努力の結果、1990年には多孔質シリコン（ポーラスシリコン）の室温高効率可視発光の報告(英国)があり、一方早稲田大学黒田教授の研究グループおよび Mobil の研究者がシリカ・メソ多孔体の合成に初めて成功した。また、有機材料においてもシクロデキストリン等と比べ、より大きな空間を持つ新しい物質が作られる等、新しい展開が考えられてくる段階になってきた。

ナノポア材料は無機から有機、タンパク質等、多種存在し、またその原子配列においても、結晶、アモルファス、超分子等と多様である。近年、物理的または化学的な新しい合成技術の進展に伴い、空間の大きさ、形状等にも多様なものが得られつつある。ナノポア材料はその特殊な構造により、様々な用途が期待される。例えば、吸着・分離材(特定の分子を空間に吸着し、分離する働きを持つ材料)や、触媒、界面活性剤等の工業材料として活用が期待される。また、空間にさまざまな原子や分子の集合体(規則的に配列した各種金属クラスターや薬等)を導入するなどして、新しいデバイスやDDSの担体としての利用も可能になる。さら

には、空間に特定の原子や分子を閉じこめ、通常の気相、液相反応では合成が不可能な新しい化学合成や不安定な化学物質の保持、新しい機能の発現等が期待される。空間が数千 オーダーになると、光の波長領域と重なるため、光の閉じ込めや回折効果等による新たな光特性を持つ材料の創出が考えられ、フォトンクス材料や光デバイス等が期待される(ポーラスシリコン等)。

(2) 一般向け概要説明

ナノポア系材料とは、ナノオーダーの微小な空間を持つ材料の総称である。近年、新しい材料の作製技術が進歩したことにより、様々なナノポア系材料が得られるようになってきている。ナノポア系材料は、その特異な構造により、従来の材料にない様々な特徴を有し、この特徴を応用することで新しい技術の創出が可能となる。(例えば、吸着剤、触媒、光学材料、医薬などへの応用)

本テーマでは、多様なナノポア材料の合成、構造や物理・化学特性の解析等を、様々な専門分野における研究者の協力の下に進め、それらの合成法、物性に関する知識を取得することをめざす。

さらに、その結果をもとに、新規にナノポア材料の設計、合成を行う手法の確立を行い、それにより合成された有用なナノポア材料応用の可能性の検討を行う。また、ナノポア材料を用いた新たな合成技術についての検討も行う。

4 . 現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 1 0 年後：新規な低誘電率材料開発の見通しが得られる。

新規な触媒開発の見通しが得られる。量子エレクトロニクス、光エレクトロニクス、フォトンクスの新規な概念が得られる。

(2) 1 5 年後：新規燃料電池開発の見通しが得られる。

3次元量子細線等による新デバイス開発の見通しが得られる。新規分子篩の開発の見通しが得られる。ナノケミストリー工場(新規の化学合成、不安定材料の安定保持)の見通しが得られる。

(3) 2 0 年後：各種 DDS、GDS(DDS:drug delivery system、GDS:gene delivery system)を利用した治療技術の開発の見通しが得られる。

5．研究の概要

(1) 各種ナノポア系材料の合成法の研究(ナノポア制御と機能制御)

自己組織化・界面活性材・ブロックコポリマー・ゾルゲル・陽極化成・シップ・イン・ボトル鑄型合成法ほか

(2) ナノポア系材料の 3 次元構造解析・機能解析

電子線・X線・中性子線解析、NMR解析、誘電率、バンド構造ほか

(3) ナノポア系材料の応用

合成法や機能の最適化

(4) 新材料の応用展開

水素・メタン吸蔵材(燃料電池用等)、固体電解質膜、ガス分離膜の検討

6．取組みにあたっての留意事項

ナノテクノロジーの推進は、各々の既存専門分野に捕らわれない分野横断的な融合が必要である。そのためにも、産学官の有機的な連携や長期的な展望を持って推進することが必要である。また、ナノテクノロジーは、ライフサイエンス、情報通信、環境等の重点分野をはじめ広範な分野において利用が期待されることから多くの共同研究チーム参加や国際的な取組みも必要である。

特に本テーマにおいては、これまで自然界に存在していたゼオライトやクラウンエーテル等のナノポア材料の利用から新たな展開とし、自らナノポア材料の設計・解析やポアの導入物質による機能化を図る研究を推進が必要である。

具体的には、ナノメートル領域における界面やポア、粒子等を含む微細構造を制御(構造と機能の解析をし、新しい材料設計をする。)することで、新たな触媒や分離膜、物質担体(水素・メタン、薬、DNA、RNA等)、光デバイス、電子デバイス等の創製を図る研究を推進することが望まれる。

1．分野名 （ 1 4 ）超分子制御

2．分野別計画検討者

検討担当委員：玉尾 皓平 京都大学化学研究教授

茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所長

意見聴取者：高原 淳 九州大学有機化学基礎研究センター教授

井上 俊英 東レ株式会社化成品研究所長

藤田 誠 名古屋大学研究所長

3．当該分野の概要

（ 1 ）専門的概要説明

超分子科学とは、2個以上の分子が非共有結合性の分子間力で相互作用する結果形成される高次の分子集合体に関する科学であり、単一分子の概念を超えた科学と定義されている。超分子では有機低分子、高分子、たんぱく質、核酸、多糖類、金属、無機分子などの様々な分子がその構成単位となる。超分子と呼ばれる分子集団では、構成単位からの予想を越えた特有の機能を示す。現在のトップダウン方式によりナノ加工することには、様々な困難が存在するが、分子レベルからナノレベルのボトムアップ方式により、分子の自己組織化を用いてナノ構造を構築することは、原理的に比較的容易である。超分子のナノ構造の新しい構築原理や超分子構造の固定化方法が開拓され、さらにナノ素子としての性能評価ならびに機能設計の手法が開発されることにより、電子情報材料、生体機能材料、医療デバイス、ナノマシンなどの広い応用分野で無限の可能性を秘めている。

（ 2 ）一般向け概要説明

超分子は、異なる分子が化学結合よりも弱い力で互いに認識し結びついた分子の集まりで、分子の組み合わせにより様々な構造と機能が期待される。現在の半導体加工技術のように、大きなものを加工して、微細なものを作るのではなく、超分子及びその集合体の構造、機能制御は物質の基本単位である分子を組み合わせで新しい材料を作り出そうとするナノレベルでの材料を組み立てる技術である。超分子を組み立てるための方法確立することにより、いろいろな性質の分子を様々な形で結びつけることが可能となり、今までに無かった電子情報材料、生体機能材料などの新機能材料やナノマシン、ナノデバイスを作り出すことが可能となる。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

超分子科学は 1978 年に Lehn 教授によって提案されたものであり、ここ数年でこの分野には急速な発展が見られている。超分子科学の概念が提案されたときには、我が国ではすでに分子認識化学や合成二分子膜の研究分野でのイニシアチブをとっており、現在では大学における研究を中心にホスト分子を用いた分子認識、自己組織化単分子膜、ラングミュア・ブロッジェット膜、デンドリマー、錯体・金属ナノ集合体、自己集積性物質、人工酵素、液晶などの分野で国際的水準は極めて高い。超分子の応用例で実用化されているあるいは実用化に近いものとして、自己支持型液晶デバイス、有機 EL 素子、フォトクロミック分子メモリ、バイオセンサーなどがあげられる。内外ともに大部分の研究は超分子を組み立てるための基本的な原理を確立しつつある段階であるが、実用化への潜在的なポテンシャルは大きく、情報・環境・バイオ・エネルギー関連の技術を根底から革新するのは確実である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

革新的な機能特性を持つ超分子材料開発

高速応答性の超分子液晶素子の開発、高密度の超分子メモリの開発、超分子ポリマーによる循環型材料の創製、エネルギー変換超分子素子の開発、バイオチップ、ドラッグデリバリーへの応用を目的としたナノバイオ材料の開発等。目標達成時期は 5 ～ 10 年、実用化にさらに 5 年を目安とする。

目標達成により、情報伝達の大容量・高速化、高効率エネルギー変換、環境調和材料、高効率の医療システム等、省エネルギー・環境保全・健康の維持に多大なる貢献があるものと期待できる。

その他超分子材料

超分子を用いた分子機械、超分子を用いた分子コンピューター等。10 年～20 年後の実用化を目標。

5．研究の概要

ここでは考えられる研究内容を例示する

(1) 超分子の構築技術の開発

原子・分子からスタートして超分子組織構造を構築するための、新しいナノ構築技術を開拓する。分子～ナノレベルにおけるナノ構築は、原子間力、分子間力

を精密に制御するとともに、階層構造的な自己組織化現象を実現することが鍵となる。またボトムアップの構造形成による完全結晶材料のような高性能材料の可能性も期待できる。超分子形成の基礎理論の確立、分子認識を解析するための手法の確立、分子認識化学を駆使したナノマテリアルデザイン、高分子の自己組織化による新規高分子ナノ組織体の設計、自己組織性を有する有機ならびに有機無機超構造の開発を行う。

(2) 超分子素子の開発

超分子素子の設計手法を確立する。新規超分子液晶素子の開発、超分子の光学的・電気的特性を光や磁場により制御する手法の開発に基づく超分子メモリの開発、外部エネルギーにより輸送を行う分子機械やエネルギー変換超分子の開発を行う。また蛋白質・酵素・核酸などの生体分子を、目的に合わせて超分子化することでセンサー、環境浄化、分離剤への応用のための分子認識ナノ素子、バイオチップ、デリバリーへの応用のためのナノバイオ材料あるいはバイオと人工系のナノハイブリッドによる分子サイボーグを構築する。

(3) 超分子構造解析・物性評価・加工技術の開発

超分子の構造や性質の開発のためには従来のマクロな解析手法では限界があるので新しい技術の開発が必要不可欠である。そのためには構造、物性評価のためのナノプローブ技術や高速の分光法の確立を行う。また超分子素子のナノ加工のための光、電気、機械的ナノプローブ技術を確立する。

(1) (2) (3) は互いに密接に関連しており、各研究分野の情報を互いにフィードバックしながら成果を活用することにより、短期間で大きな成果をあげることが可能となる。

6 . 取組みにあたっての留意事項

本分野は化学、物理、材料、生物、エレクトロニクスの専門家が学際的に新材料開発に望むに最適であり、全材料分野連携のアプローチを強力に推進すべきである。我が国がこの分野でイニシアチブをとるためには基盤技術確立と実用化のためのバランスのとれた組織と先端的な装置・設備の整備が必要不可欠である。

1．分野名 （１５）ナノチューブ・フラーレン

2．分野別計画検討者

検討担当委員：玉尾 皓平 京都大学化学研究所教授
茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所長
意見聴取者：篠原 久典 名古屋大学大学院理学研究科教授
田中 一義 京都大学大学院工学研究科教授
井上 俊英 東レ株式会社化成品研究所所長

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

ナノテクノロジー研究においては、フラーレンとカーボンナノチューブ（以下、CNTと略）を代表とする新規ナノ炭素物質は、シリコン、化合物半導体と並ぶ第3の基盤材料になることは間違いなく、材料、エレクトロニクス、環境の分野において次世代の大きな産業になりうる。この分野の挑戦的研究により、材料ナノテクノロジーが急速に発展し、ナノメートルスケール領域のエキゾチックマテリアルの創製が加速し、新たな産業が生まれる波及効果がある。また、フラーレン・CNT分野の研究の多くが、我が国の研究者独自の発想に基づくものであり、国際的水準は極めて高い。

（２）一般向け概要説明

ナノテクノロジーのトップランナーであるフラーレンとCNTは、今後10～20年の間に、我が国が世界に先陣を切って発展させなければならないナノテクノロジーにおける最も重要なキーマテリアルである。シリコン半導体に基づく電子技術では、もう数年の内にそのダウンサイジングや高効率化が限界にくることが明確である。フラーレン・CNT状物質はナノスケール炭素物質として、電気特性に大変に優れ、分子として半導体、金属あるいは超伝導体になる唯一のナノ物質である。これらのナノ炭素物質を用いることにより、パソコンと同程度の性能を持つ、角砂糖大の大きさのコンピュータを作ることが可能となる。

フラーレン・CNTの実用を目指した研究開発は急速に行われており、超微細電子線放出源、フラットパネル・ディスプレイ、燃料電池、水素吸蔵体、医療用ナノカプセルなどへの応用に期待が高まっている。フラーレン・CNT物質はナノテクノロジー分野だけでなく、ITやバイオの分野でもブレークスルーをもたらす。フラーレン・CNT物質は炭素物質なので、従来の半導体物質や金属物質

と異なり、環境にやさしい、まさに 21 世紀を担う理想的なナノ炭素物質であり、その社会的意義は極めて大きい。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

フラーレン・CNT は電子エミッター、量子細線、導電性ポリマー、2 次電池負極材、高性能触媒、水素吸蔵材料、ドラッグデリバリー、造影剤など、現在まで様々な分野で進められており、フラーレン・CNT を用いた高電圧型蛍光表示管やリチウムイオン電池は、1～2 年の内に実用品が市場に出ると予想されている。一方、フラーレン・CNT の実用化・産業化で最も重要視されている、ナノ電子デバイス（ナノダイオード、ナノトランジスター、量子細線）や水素吸蔵体による電池エレメント、あるいはドラッグデリバリーへの研究開発は、製造コストの問題やナノ微細加工上の問題等が十分に解決できないのが現状である。ナノ複合化技術革新による高コストパフォーマンス化とナノ機能化技術の開発が急務の課題である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

高品質フラーレン・無欠陥 CNT の超低コスト工業的製造法の確立

フラーレン・CNT の新素材創出、電子・情報新材料、エネルギー、医薬などの分野において、実用化・産業化のキーポイントは高品質フラーレン・CNT の低コスト工業的製造法の開発にかかっている。現在、フラーレン・CNT はグラファイトのアーク放電法で合成するのが主流であるが、この方法はコストパフォーマンスが低く、工業化には適さない。フラーレン・CNT の工業的製造法に適する合成方法として、炭化水素を原料とする、化学蒸着法 (CVD) 法と燃焼法が注目されている。CVD 法や燃焼法による高品質フラーレン・CNT の工業的製造法の確立を目指す。

目標達成時期は 5～10 年を目安とする。目標達成により、現在グラム 1 万円（フラーレン）から数万円（CNT）の価格を、グラム当り数百円程度までのコスト低下が期待できる。

CNT の超微細加工技術の深化による次世代電子情報材料の創出

フラーレン・CNT 特有の材料・電子物性（半導体、金属、超伝導）を期待されるナノデバイス産業に直結させるためには、これらの切断・接合などの超微細加工技術の研究開発が不可欠である。直径 1nm～100nm のフラーレン・

CNT 状物質の微細加工技術の研究開発を行い、新たなナノトランジスタ構造、スピンドバイス構造、テラビットメモリなどのナノデバイスの実用化・産業化を目指す。目標達成時期は10～15年、実用化にさらに5～10年を目安とする。目標達成により、ナノチューブアレイ形成技術が確立され、得られた知見と技術を有機的に結合したナノメートルレベルのエレクトロニクス計測技術による、次世代ナノエレクトロニクスの根幹技術の創出に多大なる貢献が期待できる。

フラーレン・CNTと炭素繊維・高分子技術の融合による新材料創出

高品質のフラーレン・CNTと既存のポリマー加工技術を融合した、高強度・高靱性化・高信頼性を付与したナノコンポジット材料の研究開発。電気特性に優れたフラーレン・CNTは従来にない、伝導性に優れ、フレキシブルな高分子複合材料を創生できる。また、CNTによる強化型プラスチック等新素材を用いた新たなコンポジット材料開発を推進する。

10～20年後の実用化を目標とする。製造と応用の連帯が重要であり、製造から応用まで一貫して検討できうる企業の参加により、研究開発は加速できる。

5．研究の概要

ここでは考えられる主な研究内容を例示する

(1) 高品質フラーレン・CNTの低コスト精製法と工業的製造法の開発

単純な炭化水素を利用した化学蒸着法(CVD)と燃焼法による高品質・低コストのフラーレン・CNTの多量合成の研究開発を行う。特に、CNTの生成後の分離・生成は困難なため、CVDによる高純度・無欠陥CNTの合成法の確立がキーポイントとなる。

(2) フラーレン・CNTの高機能コンポジット材料の創製

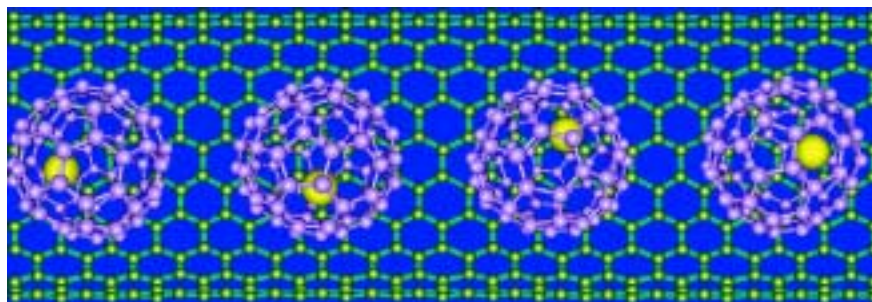
高品質フラーレン・CNTと高分子加工技術を融合することにより、超高強度、軽量、高信頼性を付与した新規のナノコンポジット材料の研究開発を行う。フラーレン・CNTは電気・機械特性に特に優れた、究極の炭素繊維とも言える材料であり、その表面構造の制御、高次加工および用途開発には、日本で開発された炭素繊維分野で蓄積された技術との密接な連携が必須である。

(3) フラーレン・CNTによる微視的(ナノ)デバイスの創製と開発

限界に達しつつあるシリコン情報技術に代わりうるフラーレン・CNTを、基礎、物性、デバイスの面から学際的・総合的に研究開発し、新たな科学技術体系を確立すると共に新規ナノエレクトロニクス情報技術の創出を目指す。デバイス製作には自由度の高い集束イオンビーム(FIB)技術や走査プローブ技術のすいを集めた斬新な方法を用い、フラーレン・CNTの超微細加工を行う。これにより、単一電子トンネル素子(SET)、ナノダイオード・トランジスターなどからなるナノデバイスの創製と開発を行う。

(4) フラーレン・CNTの反応場・吸着場としての利用による新分野開拓

CNT内部のナノスケール極微小空間を反応場(ナノリアクター)として利用することにより、原子・分子レベルでの制御可能な新プロセス化学を開拓する。CNTの内部空間は高効率のナノスケールの反応空間であり、フラーレンを内包したハイブリッド物質を始め、各種分子の非常に効率の高い共重合性、立体選択性、位置選択性が見出されている。従来のプロセス化学では実現できなかった、新規の高機能物質を創出することが可能となる。こうした研究開発はナノサイズ領域の新材料創製、ナノテクノロジーの高精度化という、21世紀の物質・材料科学の展開に必要不可欠である。



図．金属内包フラーレンをカーボンナノチューブ内部に取り込んだ新規ハイブリッド物質

6．取組みにあたっての留意事項

本分野は化学、物理、材料、エレクトロニクスの専門家が学際的に新材料開発に臨むに最適であり、全材料分野連携のアプローチを強力に推奨すべきである。

1．分野名 （１６）クラスター、ナノ粒子

2．分野別計画検討者

検討担当委員：茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所長

井上 明久 東北大学金属材料研究所長

早稲田嘉夫 東北大学多元物質科学研究所長

意見聴取者：隅山 兼治 名古屋工業大学材料工学科教授

西 信之 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所教授

小林 速男 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所教授

井上 隆敬 コンボン研究所（株）常勤顧問

小田 正明 真空冶金（株）開発研究部長

近藤 保 豊田工業大学 客員教授

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

クラスター・ナノ粒子は、原子・分子が数個から数千個集合して作る「超分子」様のナノ物質であり、ミクロな基本物質の一つである。その構成粒子の種類と数（サイズ）を制御することにより、革新的な物質機能を発現・制御することが可能である。例えば、バルク特性が反強磁性であるマンガンを、ある原子数のクラスターにすると超強磁性を示す。また、遷移金属の中で特定原子数のクラスターは、バルク状態から外挿できない画期的な反応性を示すものがあり、超高性能の触媒とすることができる。一方、このナノ物質を要素として構造体を組み上げ、それをさらに大きな構造体へと組みあげていくと、最終的に現実のマクロ物質を作ることが出来る。このような階層性を持つメソ構造体は、階層の数と部分構造間の相互作用、出発部品のナノ物質の特質によってその特性と機能を変える。この階層性を制御することにより、新規な特性と機能を持つ人工機能材料が合成できる。

クラスターやナノ粒子の機能発現の起源や最小単位を解明し、ナノ物質の「電子・スピン状態」を制御することにより、またメソ構造体の「階層構造」を制御することによって、革新的機能を持つナノ物質やメソ階層構造体を開発、構築し、先進のエレクトロニクスデバイス、光機能デバイス、医薬品の合成、システム化を目指す。

（２）一般向け概要説明

原子・分子が数個から数千個集合した系は、クラスター・ナノ粒子と呼ばれ、ナノメートルサイズの大きさを持つ。それを構成する原子・分子の種類と数を制御することにより、その性質が、１個の原子や分子とも、あるいは固体・液体とも異なる革新的な機能を持つ物質を作ることが出来る。さらに、このクラスター・

ナノ粒子を部品として次々と階層的に組み立てると、新規な機能を持つ階層構造体（メソ階層構造体）が出来る。本プロジェクトでは、原子分子1個を操作できる高い科学技術を駆使し、ナノサイズのレベルで制御されたクラスター・ナノ粒子や、メソ階層構造体を構築し、その特異な新機能を利用した機能性デバイスを築きあげる基盤を提供することを目的としている。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

（１）現状

ナノ粒子、クラスターに関する 1960 年代の久保理論（久保効果として世界的に通用している）及び上田らの物性研究は、我が国が世界に誇る先駆的な業績である。その後、物理によるトップダウン、化学からのボトムアップ手法によって日欧米で活発に研究が展開され、その安定性、物性、階層構造などが理解されてきた。原子の集合数が比較的小さなクラスターにおいては、原子1個の違いにより著しく機能が相違する現象やその起源、金属クラスター超格子、生体分子機能と関連の深いナノ液滴の研究などが進行しつつある。我が国同時に単一分子検出、質量数 10 万を超える生体分子などの単離、STMなどによる1原子操作などが可能となっている。

粒径が数 nm 以下のクラスターでは、超微小サイズによる量子効果が現れ、画期的な性能を発現することが種々実証されており、将来の革新的な製品開発のシーズとして応用面から期待される。ただし、ドイツ、アメリカなどでも、クラスターを単位とした新規機能物質を開拓する開発研究が行われ、我が国が従来からもっていたポテンシャルが侵食されている感があるので、この分野の研究投資を緊急に拡大すべきである。

一方、我が国では、粒径が 10nm 以上の比較的大きなナノ粒子を単位とした着色材料、金属ペースト、磁気記録塗料、センサー薄膜などの実用化が図られている。しかし、特徴的な機能を持つクラスター・ナノ粒子を組織的に開発し、それを戦略的に組み上げて 10nm 以上のメソ構造体に組み上げ製品に仕上げる技術開発はこれから緊急に行うべきことである。

本研究は、「革新的な物性、機能を付与するための物質・材料技術」の研究であり、具体的な応用製品について目標を掲げることができないが、以下に、応用可能な分野について述べる。

(2) 実用化・産業化への応用可能な分野

ナノ粒子の実用化：

ナノ粒子を用いた着色塗料やディスプレイ、ナノペーストの電子工学プロセスへの応用（低温ハンダ、金属薄膜形成など）、磁性体ナノ粒子による超高密度ハードディスクなどを実現させる。ナノ粒子間のメモリーネットワークを構築するために必要な、素子間の相互作用を解明する。

新しい集合形式をもつナノ分子金属、分子磁石、分子超伝導体の開発とバルク材料への展開：

スピン・電子状態を考慮して機能設計された分子を単位としてナノ領域での構造制御を行い、伝導性、磁性、超伝導性などに画期的な新機能を有するナノ材料を階層的に構築し、次世代のナノデバイスの基本物質として提供する。また、ナノレベルで制御したバルクレベルの階層構造材料を作り上げる。

クラスター液滴：

液体中のナノ構造の解析、超臨界流体による化学合成、液体中での情報伝達機構の解明を行う。クラスター液滴界面からの強い場と、空間が非常に狭いことを用いて、新規の特性を引き出し応用する。例えば、細胞器官特異的ナノドラッグデリバリー、超臨界クラスター液滴中の特異的化学反应、クラスター液滴中に入る分子の種類と数を制御する反応分子デリバリー、分子数と時間を制御する情報伝達分子デリバリー、超微量空間反応場を利用した化学反应、などが考えられる。情報伝達分子間で高次の情報伝達ネットワークを構築するための方法論を研究する。

クラスターレベルで制御した階層磁性体の開発と応用：

巨大磁気モーメントを示すクラスターのサイズや構造の解明、クラスター間の磁氣的相互作用の制御・最適化を行う。その結果を総合して、磁気記録媒体、マイクロマグネティクス用微小磁石や薄膜トランス材料への応用を図る。

半導体クラスターの電子、光、触媒素子への応用：

化合物半導体の優れた電子的、光学的、半導体的、触媒化学的諸特性がナノメータ尺度で一層顕著となることに着目し、超微細高機能電磁素子、光学素子、情報通信素子、環境反応素子、医薬用プローブ素子への応用を図る。それら素子間に関連を持たせて、階層的素子ネットワークを作る。

新規クラスター、ナノ粒子の探索、ナノ・メソ階層構造を意識した結晶材料の創製：

金属、金属酸化物、合金クラスターや分子 金属複合クラスターなど、機能発現の最小単位の準安定粒子を構成要素とした新機能ナノ結晶材料を設計、製作する。

クラスターによる表面加工、表面反応：

従来、半導体の基板表面へのデポジション、エッチング、イオン注入は単原子のイオンビームにより行っているが、原子の集合体であるクラスターイオンビームを用いることにより、高速・低エネルギー・低損傷などの加工が期待できる。また、クラスター衝突時の固体表面が超高温・超高压とすることができるので、従来では得られない反応が生じ新たな物質合成の可能性がある。

付記＊クラスター・ナノ粒子の応用例（ケース・スタディ）

（１）超高密度磁気記憶素子

数個の原子で構成される遷移金属クラスターの中で、電荷の印加状況により磁性が著しく変化するものがあり、記憶素子への可能性がある。このクラスターの大きさは数 ㎎ なので単純計算すると 10^{14} ビット / in^2 となる。現在の磁気記録の記憶容量はギガ (10^9) ビット / in^2 レベルなので、クラスター素子にすると一気に 5 桁も性能が向上する。過去 10 年間の記憶容量向上が 2 桁弱であることと比べると画期的なことである。

（２）次世代型超廉価触媒

現在、自動車の排ガス浄化触媒には粒子径 10nm 前後の白金やロジウムなどの貴金属が使用されている。今までの研究で金属クラスターの 10 量体以下で反応性が急激に向上する例が報告されているので、もし数量体の白金クラスターに置き換えることができれば、白金の使用量を少なくとも 1/10、上手く行けば 1/100 に激減できる画期的な触媒ができる。

（３）超微細電磁素子

磁性材料による磁心を必要とするコイルやトランスなどのインダクタンス部品は、現在の半導体 IC に混載されていないが、もしそれが可能となればより総合的な IC となり、情報通信機器の小型・薄型化に大きく貢献できる。しかし、

ICパッケージに収まるように磁心を小さくすると磁気特性が低下するので実用に至っていない。そこで微小サイズにしても透磁率特性に優れた磁性材料の開発が望まれる。例えば、磁気特性に優れた金属クラスターを研究し、クラスター集合磁性体とするか、あるいは高周波特性の良いナノグラニューラー磁性体の磁性粒子（粒径：数 nm、サイズ不揃い）を、サイズが小さく粒径の揃ったクラスター磁性体に置き換えて用いることなどが考えられる。

5．研究の概要

（１）要約

革新的な物性や反応性などの特異な機能を発現するクラスター・ナノ粒子の探索、創製を行うために、まず、特異な物性や反応性を発現する機構の解明を行う研究が必要である。。次に、クラスター・ナノ粒子の生成素過程の解明と効率的な生成方法及び安定化処理法の研究を行う。さらに、クラスター・ナノ粒子を基板上に配列・固定する方法の研究が必要である。

一方、メソ階層構造物質を創製をするために、階層構造の構成状態、構造体間の相互作用あるいは情報伝達や交換などを多面的に研究する必要がある。この研究は、ミクロからマクロの物質領域に渉る未踏分野の研究であり、革新的手法による物質の創製、分子レベルのミクロな反応過程とマクロな輸送現象などが同時進行する現実の反応の解明に繋がるものである。また、蛋白質の階層的構造・機能の研究や物質の相転移ダイナミクスに応用できる。

（２）研究テーマの概要

革新的な物性をもつクラスター・ナノ粒子の探索・創製

・クラスター・ナノ粒子の物性とその発現機構の解明

構成元素：単一元素系、多元系、金属/無機/有機複合系

革新的な反応性をもつクラスター・ナノ粒子の探索・創製

・クラスター・ナノ粒子の反応性とその発現機構の解明

反応場：気相中、液相中、液滴中、固体表面

クラスター・ナノ粒子生成法の研究

・生成素過程の解明と最適化

・汎用的、高効率、高精度サイズ選別

クラスター・ナノ粒子の基板への堆積、配列方法の研究

- ・ソフトランディング
- ・クラスター・ナノ粒子ドットの自己配列制御

工業材料化の基礎研究

- ・クラスター・ナノ粒子の安定化

ナノ・メソ階層構造体の探索・創製

- ・階層構造体の構成状態、構造体間の相互作用
- ・階層構造体の合成の基本プロセス

ナノ・メソサイズ領域での計測技術、理論計算

- ・単一分子検出技術
- ・ナノ・メソ階層構造体のキャラクタリゼーション技術

このような研究を通して得られた成果が、次世代情報通信システム用ナノレベル制御のデバイス創製や環境保全・エネルギー利用高度化材料を実現するための不可欠な基盤技術となる。但し、これらの研究は、デバイス化・製品化の探索ないし基礎研究であって、研究成果の中で、実用化の可能性のあるものから順次、応用研究チームを編成し、応用・開発研究へと進むことになる。その時期はおおよそ5年後以降から技術移転が行われると考えられる。

6．取組にあたっての留意事項

クラスター、ナノ粒子は、サイズに応じた階層構造が存在し、それらの知見を活用することなしには、有効な研究開発が遂行できない。金属を例に取れば、数 nm 程度までは、井戸型ポテンシャルが適用された電子の殻模型で説明され、表面原子の占める割合が物性を左右する。それ以上では、幾何学的安定性（表面原子を考慮しつつ）が問題となり、さらに大きくなると長周期的構造が支配的になる。これらの条件に配慮しつつ、ナノ構造を制御し、目に見えるサイズのデバイス化を達成するためには、ナノサイエンスの基礎から機器やシステムの専門家までの広い分野をカバーする協力体制とネットワークが必要不可欠である。但し、100 nm 程度を単位とする素子の開発は、従来の知見をもとに研究開発を推進する必要がある。

前述のように本研究は、産業化できる製品を生み出すために、革新的な物性、

機能を付与するための物質・材料技術の研究、すなわちシーズ創出段階にあたる。本研究成果を実用化に結びつけるためには、得られたシーズ技術をトランスファーする適切な製品開発者を選ぶことと、その後の連携作業により、実用化のためのさらなる研究課題を発掘し研究者側にフィードバックすると同時に、製品開発者側で担当すべき課題を設定することが重要である。したがって、研究の進行状況、学術的成果を如何に実用化に結びつけるかという観点からの研究マネジメントが大きな鍵を握ると考えられる。

1．分野名 （１７）ナノコンポジット構造材料

2．分野別計画検討者

検討担当委員：岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
井上 明久 東北大学金属材料研究所長
早稻田嘉夫 東北大学多元物質科学研究所長
意見聴取者：梶山 千里 九州大学長
正木 彰樹 石川島播磨重工業株式会社航空宇宙事業本部
技術開発センター材料技術部長

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

母相中へ配置する繊維や粒子、それに伴い生じる界面をナノから原子レベルで制御し、複合化する技術を確立するとともに、強度・寿命・靱性・耐熱特性等の機械的特性を飛躍的に向上させた構造材料開発を行う。

（２）一般向け概要説明

数種の材料を複合（コンポジット）化して、その組織や材料間の界面をナノレベルで制御することで、各々の材料単体では現れない革新的な特性を持つ材料を開発し、建築物や自動車等構造物に用いられる材料（構造材料）に応用する。例えば、熱効率70%（現状ではせいぜい50～55%）を可能とする超高効率ガスタービン用材料や片手でも持ち上がる自動車ボディー材の開発を目指す。

構造材料として最も多く使われているのは、ねばり強く、割れない、信頼性の高い金属材料である。他方セラミックスは、優れた耐熱性、耐食性、超硬度など魅力ある特性が多々あるが、一般にもろく、信頼性に乏しい。しかしながら金属とセラミックスの複合化によって、両者の「いいところ取り」をした新規材料開発が期待できる。また、金属・セラミックに加え、高分子や有機物を含めたさまざまな材料の複合化による新構造材料開発への期待も大きい。具体的にはナノパウダー（ナノフィラー）複合体、ナノ制御傾斜機能材、ナノ粒界制御複合材、分子複合材（モレキュラーコンポジット）等の設計開発が挙げられる。ナノコンポジット構造材料は、今後、航空・宇宙、環境・エネルギー、医療・生体等、様々な分野への応用が期待され、材料開発の社会的意義は極めて大きい。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

複合材の研究は MMC(金属系コンポジット材料)、CMC(セラミック系コンポジット材料) PMC(高分子系コンポジット材料)等、現在まで様々な分野で進められており、テニスラケット、自転車のフレーム等、特にスポーツ用材料としての実用例が多い。他方、大型構造部材として例えば火力発電ガスタービン用 W 強化型 Ni 基複合耐熱合金を例にとると、製造コスト、製造時や使用時の内部反応による特性劣化の問題等が解決できないのが現状である。ナノ複合化技術革新による高性能化、高コストパフォーマンス化が急務の課題である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

革新的な耐熱特性を持つ高温コンポジット構造材料開発

セラミック系コンポジット材では 1,500 の温度領域(現状では 1,350 程度)において利用可能で、クリープ寿命が従来セラミック焼結材と比べて 3 桁以上長い材料の開発。金属系コンポジット材では現状より 100 から 200 以上高温の、1,200 レベルで使用可能な材料開発。その他現状と比して 50 ~ 100 以上の高温にて使用可能で、比強度が 1 . 5 ~ 2 倍のコンポジット材料開発。目標達成時期は 10 ~ 15 年、実用化にさらに 5 年から 10 年を目安とする。

目標達成により超高効率タービン発電システム、超高燃費自動車等の創製など、省エネルギー・環境保持への貢献は計り知れない。例えば、ガスタービンの運転効率を 1 %改善すると、1 兆円に匹敵する経済効果があるという試算があるが、1,200 級材料の実用化により 20 %以上の効率向上が期待できる。

革新的な機能特性を持つナノコンポジット構造材料開発

金属に匹敵する高靱性、高快削性、超塑性変形性を付与した構造用セラミックス材料の研究開発。ナノコンポジット組織を用いて水素環境で強度が維持できる革新的鉄系高強度材料の創製、強磁場利用システムで求められる強度 2,000MPa 以上と伸び 5 %以上を有する非磁性新合金の創製、高強度、耐熱性に優れた Al ならびに Mg 系軽金属材料の創製等。目標達成時期は 10 ~ 15 年、実用化にさらに 5 年から 10 年を目安とする。

目標達成により、燃料電池発電プラント用材料開発、超軽量輸送機システム(省エネルギー)等、省エネルギー・環境保持に多大なる貢献があるものと期待できる。

その他超高比強度ナノコンポジット材料

高強度・高靱性化・高信頼性を付与した生体適合ナノコンポジット材料の研究開発。金属・セラミックス・高分子材料の複合化。分子レベルで強化分子を複合化させた分子複合材料（モレキュラーコンポジット）。カーボンナノチューブ強化型プラスチック等新素材を用いたコンポジット材料開発等。

10年～20年後の実用化を目標。

5．研究の概要

ここでは考えられる研究内容を例示する

（１）ナノ制御界面を持つ耐熱金属系コンポジット材料開発

金属母相(Ni、Ti 基超合金等)中にセラミックス繊維(SiC 等)を適切に配置して得られる耐熱コンポジット材料において、製造時や使用時の内部反応、特に界面反応による劣化の問題を解決し、実用化可能なコンポジット構造材料、具体的には 1,200 レベルで使用可能な材料を開発する。例えばセラミックス繊維表面にナノスケールのコーティングを施しさらにその上に金属母相をコーティングすることで、繊維 1 本ずつが既にコンポジットであるいわゆる「モノコンポジット」を作製し、それを配列してバルク材を作製する技術を開発する。

（２）構造をナノレベルで制御したセラミック系コンポジット材料の研究開発

セラミックス系材料の結晶粒内や粒界に積極的にナノサイズの第 2 相粒子や欠陥などを導入することで、その構造や組織をナノから原子レベルまで制御して材料の破壊強度や靱性の向上や、長寿命化を目指したナノコンポジットの研究開発を行う。例えば、結晶粒内や粒界に第 2 相粒子あるいは欠陥を導入し、粒界でのき裂の進展を抑制することで、高靱性材料を開発する。

（３）非平衡合金微粉末の固化成形によるナノ高強度材料の創製

メカニカルミリングやガスアトマイズ法などで高度に非平衡状態にある微粉末を作製し、それを固化成形し、ナノ結晶粒、第 2 相ナノ粒子が分散したナノコンポジット組織を造り出すことで、水素環境で強度が維持できる革新的鉄系高強度材料の創製、強磁場利用システムで求められる強度 2000 MPa 以上と伸び 5 % 以上を有する非磁性新合金の創製、高強度、耐熱性に優れた Al ならびに Mg 系軽金属材料等の創製を試みる

(4) モレキュラーコンポジットの開発

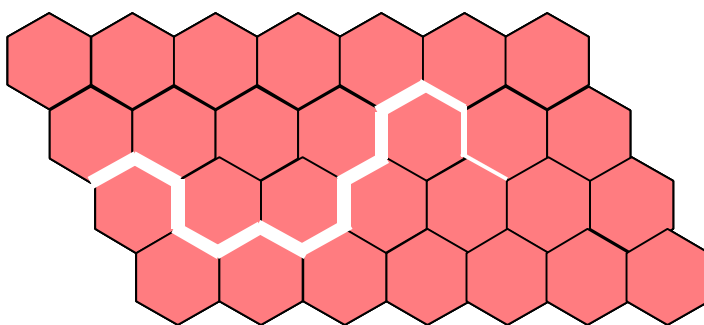
剛直な強化分子を屈曲性のマトリクス高分子に分子状に分散させたモレキュラーコンポジットを開発する。マクロな強化材を用いないので力学的な欠陥が少なく、高強度・軽量の複合材料が実現できる。

(5) カーボンナノチューブ強化型プラスチックの開発

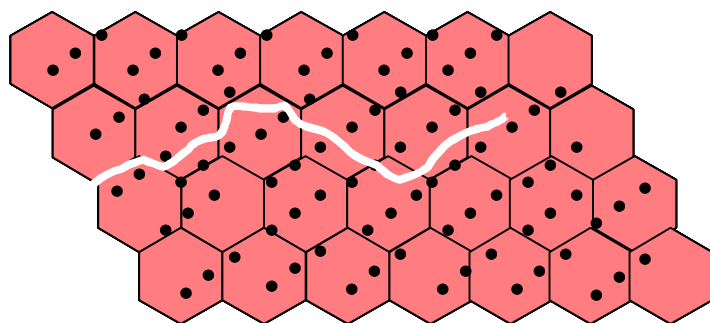
プラスチックを強化し、また導電性を付与させるために充填されている炭素繊維を、アスペクト比が大きくて電氣的・機械的に優れた特性を有するカーボンナノチューブに置換することで電気・機械的特性を改善する。

(6) ナノ構造のモデリングと物性評価技術確立

例えばき裂進展のメカニズムをモデル化することで、高靱性ナノコンポジット材料開発に資す。図(a)に示すようにセラミックス材料のき裂は一般的に粒界破壊によって進展するが、結晶粒内や粒界に第2相粒子あるいは欠陥を導入することによって、図(b)に示すように粒界でのき裂の進展を抑制できると考えられる。このような結晶粒内や粒界の構造のモデル化をナノレベルで行い、高強度・高靱化・長寿命化発現メカニズムを解明する。また、ナノコンポジット界面の構造と力学・電氣的特性を評価するためのナノプローブ測定法と分光分析法、非破壊検査法等を開発する。以上の研究成果を、金属・無機・有機物質を融合した新ナノコンポジットの開発に資す。



(a)セラミックスの破壊モデル



(b)ナノコンポジットの破壊モデル

6．取組みにあたっての留意事項

本分野は金属・セラミックス・高分子の専門家が連携を取り新材料開発に望むに好適であり、全材料分野連携のアプローチを強力に推奨すべきである。

1．分野名 （ 1 8 ） ナノ組織制御・機能材料

2．分野別計画検討者

検討担当委員：井上 明久 東北大学金属材料研究所長

岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長

意見聴取者：松原英一郎 東北大学金属材料研究所教授

牧野 彰宏 秋田県立大学システム科学技術学部教授

田中 良平 （株）超高温材料研究センタ - 技術顧問

金山 幸雄 YKK（株）技術開発本部長、常務

3．当該分野の概要

（ 1 ） 専門的概要説明

金属材料の機械特性や磁性など多くの物性は、その組織によって敏感に変化する。我々は製造、加工、計算科学、材料解析・計測などの技術を結集し、ナノ組織形成機構を理解し、ナノ組織と諸物性の関係を解明し、金属材料の高機能・多機能化を目指したナノ組織を設計・実現し、地球温暖化防止、低環境負荷型、省エネルギーなどを目指す環境材料や、より高度な情報通信社会実現のための磁性材料、社会基盤整備を目的とする構造材料を創製する。

（ 2 ） 一般向け概要説明

原子オーダーの金属結晶やアモルファスをナノスケールで3次元的に分布させた組織を構築することで、金属材料の様々な性質は飛躍的に改善する。例えばアルミニウム合金中の組織をナノ組織に制御することで、倍以上の高強度と伸びを兼ね備えた材料を作り出すことができる。また、ナノ組織制御により高性能永久磁石の開発も可能である。電力消費の約半分以上が駆動モータなどによって消費されることを考えると、1%の効率向上でも小規模の原子力発電所1基分に相当する膨大なエネルギーの節約ができる。さらに電気自動車の電池の軽量化にもつながる。このように、軽くて強いナノ金属構造材料やナノ組織高性能磁石の開発は、地球温暖化防止のための炭酸ガス排出量削減が急務である現代社会において、材料開発に携わる研究者および技術者が地球環境保全に貢献できる方策のひとつである。すなわち、我々は金属材料のナノ組織制御による高機能・多機能化により、構造敏感な材料の性質を根本から変革し、革新的金属材料の創製を目指す。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) ナノ粒子分散超高強度構造材料の開発

軽くて強い高比強度材料の開発は、省エネルギーのための重要な課題である。高比強度化が期待できる金属として、Al、Mg、Ti が挙げられるが、資源の豊富さと価格の点で Al が最も有望視される。従来型の強化方法によって得られる最大強度は、実用上必要とされる 5 % 以上の伸びを有する場合、650 ~ 700MPa である。現在の環境問題、エネルギー問題を解決するためには、1,000Mpa を上回る超高強度 Al 基合金の開発が目標とされる。この目標達成のために、急冷凝固などによって作製した非平衡状態にあるアモルファス金属を利用し、材料組織をナノ組織に制御する方法が有望であり、300 程度の高温でも従来の Al 合金の約 20 倍の高温強度が得られることも分かってきている。これらの研究成果を踏まえ、ナノ組織制御により従来の高強度材料の 3 倍以上の引張り強さを示し、高温でも十分な強度を持つ軽量、高強度バルク金属材料を開発し、10 年後の実用化を目指す。

(2) 高度ナノ組織分散高臨界電流密度超伝導材料の開発

生体の断層映像撮影のための MRI 用超伝導磁石は広く普及している。しかし、さらに高分解能で水素以外のリンや炭素も分析できる 10 T 以上の MRI、環境対策用の強磁場磁気分離、タンパク質構造解析用の強磁場 NMR、強磁場中での新材料創製プロセスなどの応用には、革新的な超伝導マグネット線材の開発が必要である。そのために、ナノスケールでの析出物、結晶粒界などを 3 次元空間で高度に組織制御することにより、金属系および金属酸化物系実用超伝導材で、10 ~ 15 年を目処に、温度 10 ~ 20 K、磁場 20 ~ 30 T、応力 300 ~ 400 MPa までの範囲でナノ組織分散高臨界電流密度超伝導材を開発する。

(3) ナノ組織方位・界面制御高温耐熱材料の開発

凝固あるいは再結晶時の結晶核あるいは再結晶核の形成・成長を利用し、高融点金属、金属間化合物、金属高融点化合物などのナノ組織の結晶方位および異相界面構造を高度に制御し、1,200 度で 300MPa を超える強度を持ち、熱衝撃特性、熱疲労特性に優れた高温耐熱材料を、10 ~ 15 年を目処に、航空宇宙用や高温ガスタービン用材料などとして実用化が期待される。

(4) ナノ組織方位・界面制御磁性材料の開発

高性能永久磁石の開発は、モータによるエネルギー変換効率を改善し、省エネ

ルギー・低環境負荷型社会の実現に大きく貢献する。ナノコンポジット磁石は、現在最高性能の永久磁石 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を越えることができる可能性がある。目標はエネルギー積 $1\text{MJ}/\text{m}^3$ という理論値であり、ナノコンポジット磁石の研究が既に 10 年近いことを考えれば、10 年以内に達成されるべきである。ソフト磁性材料は、トランスなどのエネルギー変換デバイスその他、記録用ヘッドやノイズフィルターなど情報通信機器に不可欠である。現在 5 年程度での実用化を目途に、低損失高磁束密度トランス材料、GHz の高周波フィルターやインダクターとして、ナノ組織ソフト磁性材料の研究が行われている。また、10 ~ 15 年を目処に、1.5 T 以上の高飽和磁束密度と絶縁体の高比抵抗を持つナノ組織方位・界面制御ソフト磁性材料の開発を目指す。

5. 研究の概要

(1) ナノ組織制御強化機構の解明によるナノ粒子分散実用高比強度材料の開発
Al、Mg、Ti 非鉄材料および鉄鋼材料について、ナノ組織と金属材料強度の関係を調べ、その機構を理解することによって、高強度バルク材料製造技術を確立し、5 %以上の伸びと従来最高合金強度の 2 ~ 3 倍の強度を持つ、耐熱性にも優れたナノ粒子分散実用高比強度材料の開発研究を行う。

(2) ナノ結晶成長機構の解明に基づくナノ組織制御技術の確立

異方性ナノコンポジット磁石、ナノ組織分散高臨界電流密度超伝導材料、ナノ組織制御高温耐熱材料などの開発に不可欠なナノ組織制御技術確立のための研究を行う。ここでは、過飽和固溶体からの結晶晶出過程、急冷アモルファスや過飽和固溶体などの非平衡物質からの析出過程におけるナノ結晶核形成、成長過程を明らかにし、ナノ結晶の組成、原子構造、界面構造、3次元分布、成長方位などの制御方法を研究する。これらの研究に基づいて、磁石、超伝導材における高臨界電流密度、高温強度、耐熱衝撃性、高温クリープ抵抗実現のためのナノ組織制御技術进行研究する。

(3) 高度ナノ組織制御ソフト磁性材料作製の技術

高い飽和磁束密度を示すソフト磁性相と、強磁性あるいはフェリ磁性絶縁体相とのナノ界面構造を高度に制御して複合化し、革新的なソフト磁性を示す材料創製のための研究を行う。

(4) 高粒界密度比ナノ結晶組織形成による低弾性率・高弾性限・高強度金属材料の開発

ガスアトマイズ法やメカニカルアロイング法を用いて、高度に形状、粒径、サイズ分布、構造、組成を制御したナノ結晶粒を製造し、それらを固化・成形することで得られる高粒界密度比ナノ結晶組織材料を作製するための技術を開発する。

6. 取組みにあたっての留意事項

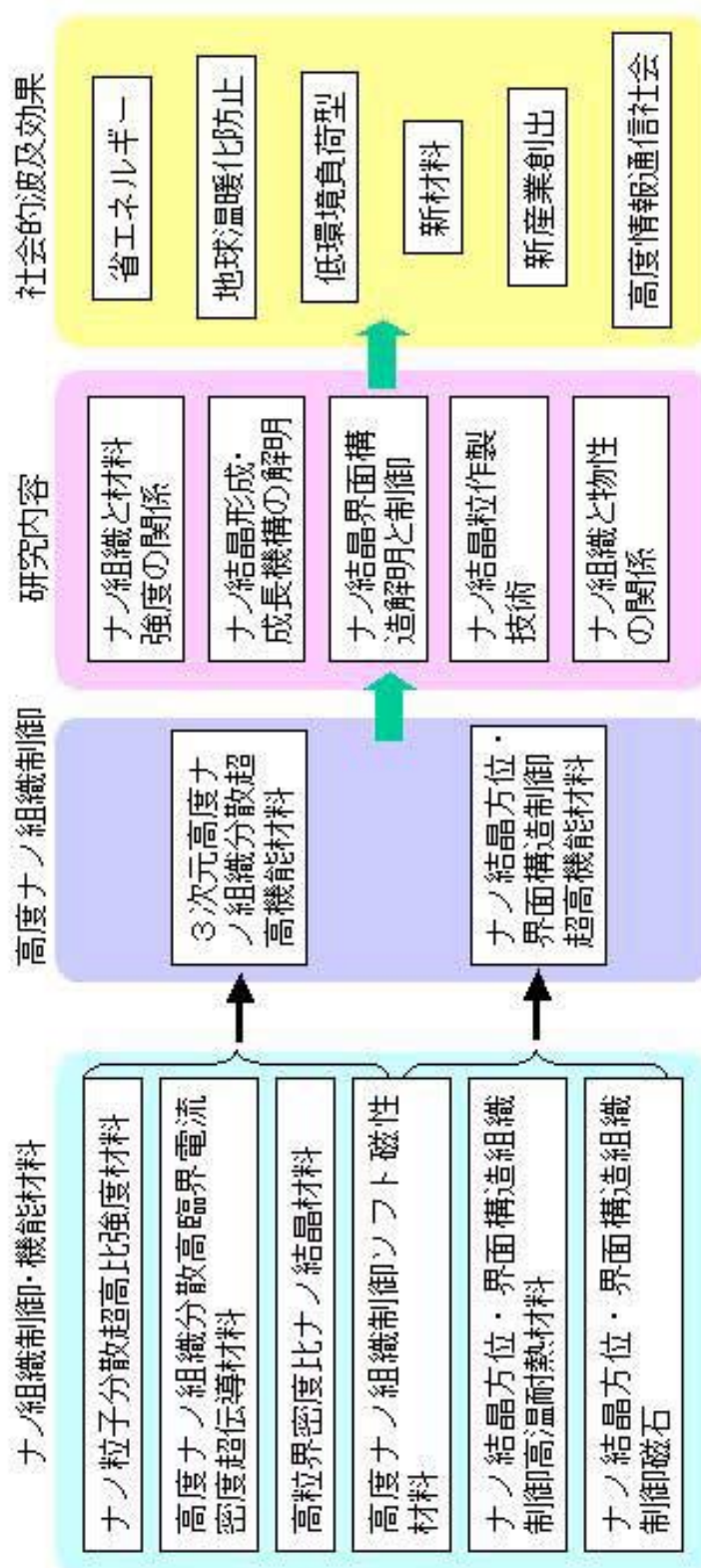
本分野は金属材料の製造、加工、評価、理論・シミュレーションの各分野の研究者と技術者が連携し開発に臨むことが不可欠である。したがって、これまでより、より密接かつ自由な連携のための研究組織を構築する必要がある。

ナノ組織制御・機能材料

高度ナノ組織制

金属材料の組織敏感な物性の高機能・多機能化

(強度、靱性、加工性、耐疲労強度、耐衝撃性、超伝導高臨界電流密度、磁性、など)



1．分野名 （１９）ナノ制御高機能表面界面材料

2．分野別計画検討者

検討担当委員：川合 真紀 理化学研究所主任研究員

魚崎 浩平 北海道大学大学院理学研究科教授

意見聴取者：有賀 哲也 京都大学大学院理学研究科助教授

青野 正和 大阪大学大学院工学研究科教授

原 正彦 理化学研究所

フロンティア研究機構チームリーダー

橋詰 富博 日立製作所（株）基礎研究所主任研究員

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

電子デバイスのダウンサイジングが進むにつれ、ナノメートルという微細な領域から機能を引き出す時代が目前に迫っている。一つのチップ上に１～３次元のナノ構造を作りわけ、様々な機能を持たせる技術が必要となるが、そのための、原子スケールで材料の次元性を制御する技術の開発を行う。ナノチューブや、DNA鎖をナノデバイスに応用するには、必要な場所に、望む方向、必要な長さだけこれらの分子鎖を成長させたり繋げたりする技術を開発する必要がある。無機物質からなる、ナノデバイス上にこれらの分子を制御性良く反応成長させるには、ナノデバイス表面をオーダーで制御し、化学反応の場を用意する必要がある。ナノバイオの世界にも、無機・有機物質との接合制御が有効である。将来のドラッグデリバリーなどにも生体材料と無機・有機材料の接合技術が欠かせない。さらには、それらのデバイス構造へ電極を配置するアクセス手法が重要である。

また、表面や界面の特質を生かした新物質の探索も重要である。表面電荷密度波、表面超伝導など新たな表面・界面材料の創生や、次元性を制御した低次元機能材料の作成など、固気相界面、固液界面、さらには固固界面に形成される物質層の制御とその物性研究が急務である。

（２）一般向け概要説明

電子デバイスのダウンサイジングが進むにつれ、ナノメートルという微細な領域から機能を引き出す時代が目前に迫っています。そこでは、材料を様々な微細な形状に加工する技術が必要となります。極微細な構造から機能を引き出すには、物質の表面や異種物質の界面の構造を原子スケールの精度で意図する形に整形す

ることが求められます。このように、薄膜や厚膜さらには粒子の形を表面や界面で制御して、ナノ構造の化学的、物理的機能を向上させる、あるいは新しい機能を発現させる科学技術は、ナノテクノロジーの基礎となる材料創生であって、全ての科学技術に通じるものです。これからのナノテクノロジーには、生体材料を電子デバイスの部品として用いることが求められていますが、無機物質を中心として発達した既存の電子デバイスと生体材料を繋ぎ合わせるには、これらの材料を有機的に結合させる為の技術開発が不可欠となります。

4.現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

表面界面を制御して形成する技術は、半導体技術として目覚ましい進歩を遂げてきた。特にヘテロジャンクションの形成する為の技術開発を通じ、表面を原子スケールで平坦にする技術、原子スケールで精度良く薄膜を形成する技術などが発達してきた。これは主として無機材料を対象としたものであり、有機材料やバイオ材料の表面・界面制御法の確立が急務である。これら異種材料を原子レベルで良好な接合を作る技術、材料の次元性(1～3次元)を制御し、特定の機能発現を狙った物質形成など、ナノテクノロジーの基盤となる技術開発が望まれている。

ナノテクノロジーの部品として、バイオ材料を含めた多様な材料の活用が検討されているが、その実用化には、バイオ材料と無機・有機材料との接合技術の開発など、異なる材料間の接合研究が重要な鍵となる。このような材料表面界面のナノ構造制御は、高機能デバイスや複合材料の特性向上に不可欠な基盤研究として精力的に推進されるべき対象である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

表面界面のナノ構造を制御し、構造的、機能的に格段に優れた材料、デバイス、システムを作り出すために、以下の研究項目を推進する。

表面・界面アクティブ制御

無機材料の2次元成長では、サーファクタントの存在下でのシリコンのステップフロー成長など、積極的に加えた元素により、表面超構造が解消され、原子レベルの平坦性を保ったまま、結晶を成長させる方法があるが、これがまさにアクティブ制御の例である。これをさらに進めて、カーボンナノチューブや、DNA鎖をナノデバイスに応用するために、必要な場所に、望む方向、必要な長さだけこれらの分子鎖を成長させたり繋げたりする技術を確立する。目標達

成期間は 10 年後、実用化にはさらに 5 年必要である。

次元性の制御

表面界面での 1 ～ 3 次元制御

インフォメーションテクノロジー（IT）で要求される次世代ナノデバイス例えば、量子素子、フォトニック結晶素子、光コンピューティング回路、次世代バッテリーやディスプレイなどには、ナノスケールにおける 1 ～ 3 次元の構造制御が必須である。それらの構造のナノスケールで生じるであろう新しい物性もさることながら、デバイス - システムとしてインテグレートすることを目指とした次元性の制御は実用化の重要課題である。目標達成期間は 10 年、実用化はさらに 5 年が必要である。

バイオ・有機材料の表面・界面制御

現在注目されている DNA チップにおける、生体 / 無機の接合界面制御は、塩基配列認識や生体反応をモニターするセンサーとしての応用のみならず、分子計算を行う場としても重要な研究対象になるであろうと考えられている。活性を維持したまま、生体物質に対して入出力を行う界面設計が急務である。DNA やタンパク質、さらには神経細胞そのものを電子材料としての利用する試みもあり、今後のナノテクノロジーの発展には、バイオ材料と無機・有機材料表面との接合を様々な形で実現する技術開発が望まれている。目標達成期間は 10 年、実用化にはさらに 5 年が必要である。

5．研究の概要

研究内容の例示

（１）分子膜自己組織化構造の制御技術の研究

分子ナノエレクトロニクス、分子認識センサー、光機能材料など多くの分野において、分子配列を制御した分子膜を自己組織化によって作成する技術の開発が急務となっている。しかしその制御パラメーターに関しては個々のケースについての断片的な知識しか得られていない。新しい制御パラメーターの開拓を含めた分子膜組織化構造における制御技術の系統化の研究を行う。

（２）有機・無機材料界面の原子スケール接続

電子材料としての有機材料はこれまでキャリア濃度の調整の自由度が小さいことが実用化を阻む大きな原因であったが、近年になり無機誘電体材料との接合を

利用した電界効果トランジスタとの組み合わせにより、外部電位によりキャリア密度が調整できることが示され、次世代の電子デバイスの旗手として注目されている。均一なキャリア注入には、有機・無機材料の接合や、接合界面での欠陥を低減する技術開発研究が重要となる。本研究では、無機・有機材料のナノ構造デバイスを集積化して脳のシナプス接合のような相互配線網を実現するために、無機・有機材料のナノ構造及びバイオ材料の相互接合を様々な形で研究する。さらに、ナノ構造デバイスを多数配列するために、原子スケール構造と 100nm レベル構造の中間サイズで特徴つけられる融合領域での複合材料研究を行う。

(3) バイオとナノデバイスの融合

これからの科学の新しい発展が期待される大きな分野である。DNA あるいは神経とナノデバイスを融合する事によりバイオ機能をナノエレクトロニクスで制御、計測する新たなデバイスを構築する。上述のように生体マクロ分子の活性を失わず、固体基板上に幾何学的に制御されたパターン化を行い、電気生理学的活性の検出を実現する。また複数の電極が微細加工された記録素子アレイ上で培養され、幾何学的に制御された生体マクロ分子からの長時間活性検出を持続する系のデザインが大切である。それらを用いて、例えば組合せ最適化問題(経路探索)の情報伝達処理系や超並列計算を行う数学的モデル化、連想機能をもたらす確率共鳴的情報処理技術を開発する。

(4) 表面・界面での量子構造の制御

未来の固体量子コンピューターを目指した、結合ナノ構造システムの構築や、電子スピン、核スピンあるいは電子電荷を用いその基本ユニットである量子ビット、量子相関ゲートを構築するための表面・界面制御の基礎を確立する。

(5) カーボンナノチューブの表面形成制御

ナノチューブを電子部品としたデバイスの実現に向け、望む位置に、望む方向に、望む長さだけ、カーボンナノチューブを化学成長させるための研究を展開する。この技術が確立すると、ナノチューブを基本単位とする新しい機能性材料が構築される。さらに多くの機能出現を期待し、炭素フラーレン以外でのフラーレン構造を固体の表面で制御形成する。

(6) 表面界面における単原子層単位の新機能物質の探索

表面界面の単原子層機能物質にもとづく新しいデバイス構築すべく、以下のよ

うな機能発現を狙った研究を展開する。

- ・ 表面超伝導、固-固界面超伝導の探索。
- ・ 表面界面電荷密度波の制御による情報変換・伝達。
- ・ 表面界面に生成する低次元強磁性体。単原子層の磁気輸送特性。
- ・ 表面界面相転移現象の制御（超高密度記録）。

6．取組みにあたっての留意事項

金属、無機化合物、有機化合物、生体物質などの接合界面において、原子スケールの厚さ領域に局在した新たな物性、機能を探索するには、信頼性の高い界面構造（原子レベルおよびメゾレベル）の計測手法の確立が不可欠である。また、固固界面に局在するナノ物性計測の手法は、表面に比べると著しく遅れているが、実際のナノデバイスでは非常に重要である。表面界面における新しい物性発現にはそれに適した計測手段の開発が必要となる。さらに、ナノデバイスを利用するためのアクセス手法の確立が重要である。従って、ナノメートル領域の計測手法の開発とは常に情報を交換し、効率のよい技術開発、開発研究を推進すべきである。

1．分野名 （20）有機・無機融合ナノ構造体構築

2．分野別計画検討者

検討担当委員：早稲田嘉夫 東北大学多元物質科学研究所長

玉尾 皓平 京都大学化学研究所教授

意見聴取者：佐村 秀夫 産業技術総合研究所イノベーションズ副代表

松宮 徹 新日鐵（株）フェロー

横山 正明 大阪大学工学研究科教授

横尾 俊信 京都大学化学研究所教授

中西 八郎 東北大学多元物質研究所副所長

藤木 道也 NTT 物性科学基礎研究所主幹

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

有機および無機物質を、化学結合またはナノスケールでの構造構築により融合させた新規な物質群を創製するための基盤技術確立する。さらに、それらの物質の機能を目的にあわせて組織化し、材料化する技術と、総合的な構造・物性・機能の解析・評価技術を開発・確立する。同時に、有機・無機融合ナノ構造（以下、融合ナノ）物質・材料に特有の応用を多々実証し、産業界への橋渡しを実現する。

（2）一般向け概要説明

我々の身の回りの材料は、ナイロン、プラスチック、液晶、タンパク質などの有機物質と金属、半導体、セラミックスなどの無機物質とに区別されています。20世紀には、それぞれが、学会、産業界なども分かれて、独自分野として進展する中で、情報関連を中心とする社会の発展を支えてきました。しかしながら、従来の物質・材料に依存する技術の延長線上の進展では、情報関連は勿論いずれの応用分野においても、10年ほどで限界に達するとされています。そこで、本研究開発では、物質を構成する元素は数十種類にものぼること、物質機能の発現の単位がナノメートルであることから、従来の物質・材料分類の枠を越えたいろいろな物質の組み合わせによるナノ集合体を作製し、未踏の優れた機能を発揮させることで、上記の限界を打破します。同時に、次世代表示素子としてのフラットパネルディスプレイをはじめとして、極微メモリ、ナノフォトリック加工技術、種々の新IT素子、高性能水素製造光触媒、固体酸化物燃料電池、超高感度

医療センサー、細胞レベル以下での検査が可能な軟X線医療カメラへも応用できる解析技術などの新技術を数多く誕生させ、21世紀の豊かな社会形成に貢献できる。特に、次世代表示素子としてのフラットパネルディスプレイに関しては、鋳型法による種々の炭素系融合ナノ材料の作成（後段の例（3）-1参照）研究の中で、すでに、二次元に配列したナノサイズの細孔中に炭素を析出させることにより、同ディスプレイ開発の鍵となる高輝度電子銃の実現の可能性が産学官連携により明らかにされており、今後の連携強化により、5年後には実用化される可能性がある。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

（1）現状

有機、無機、金属など異なる分類の物質をマイクロメートル以上のサイズで複合することによる機能・性能の向上を目指した研究開発、商品化は多々行われてきた。それらは、既にバルクとしての性質を発揮しているサイズでの混ぜ合わせであり、バルクの特性から見て、互いの長所を生かす、または欠点を補うことを基本にしている。本研究課題のように、ナノスケールで融合させることにより、バルクの性質を超えた新しい個性の発現を目指す研究は緒に付いたばかりであり、今後世界中で、研究開発競争が必至の分野である。特に、化学結合により無機元素を積極的に導入した融合ナノ分子材料の創成が重要と考えられる。

（2）目標及び達成時期の目途

本研究開発で対象とする基盤技術の分類は、多くの参画が可能なように、融合ナノ分子材料技術、融合ナノ新素材技術、融合ナノ高次構造技術、融合ナノ表面・界面技術、融合ナノ構造解析・評価技術とし、これら全てを早期（10年以内）に確立し、それらの応用技術開発への展開については、個別研究内容毎に定める具体的目標と達成時期に向けて、産業界への橋渡し（指導・協働による実用化）を達成する。

5．研究の概要

以下の個別テーマは例示です。

（1）融合ナノ分子材料技術の開発と応用展開

（例（1）-1）融合ナノ分子設計による革新的電子・光 材料の創製

化学結合により無機元素を適切に導入した有機－無機融合ナノ分子材料を開発し、シリコン半導体を凌駕するキャリアー高移動度（室温で $10^3 \text{cm}^2/\text{Vsec}$

以上)を5年を目途に達成し、それを用いた新表示デバイスの実用化を10年を目安として行う。また、光学バンドギャップの低減と簡便なpn制御を実現し、単一分子エレクトロニクス素子の開発を10～20年後の実用化を目標として展開する。21世紀の高度ITを支える基幹材料であり、実用化の波及効果は大きい。

(2) 融合ナノ新素材技術の開発と応用展開

(例(2)-1) 融合ナノ用鋳型素材の製造

ナノやメソサイズのポア構造並びに層状構造を有する無機を中心とする新鋳型素材を設計・合成する。現状は、天然産物とポーラスアルミナなど、限られたナノサイズ中心であるが、高純度、サイズ可変を可能な限り早期に達成し、量産、提供することを目標とする。後述(3)-1のように本研究開発で用いられるのみならず、種々の応用に供し得るため、波及・経済効果は多大である。

(例(2)-2) 融合ナノ結晶の作製と材料化

色素、共役高分子などの簡便なナノ結晶作製技術およびそれらと半導体や金属との融合ナノ結晶の作製技術を創製、確立する。現在、研究レベルとしては、我が国が諸外国に比べて優位であり、ナノサイエンスとしても未知の現象に遭遇するので、サイズ可変、単分散化、量産プロセスの確立こそが重要課題である。まず、有機ナノ結晶汎用製造技術を早期に確立し、機能性色素・顔料の製造プロセスでの実用化を図りつつ、ハイブリッド化による次世代フォトンクス技術に不可欠な超高速光スイッチ素子の実現は10年後の達成を目指す。医薬、農薬、化粧品など幅広い分野へ波及効果は大きいと想定される。なお、上記の機能性色素・顔料の製造プロセスでの実用化に関しては、インクジェット・カラー印刷に用いられている3原色の顔料の製造プロセスを、現行の微粉碎・硫酸処理法から、より簡便で環境に優しい方法に変えるニーズが高まっている。この点については、我が国の大学の研究により、超臨界最沈法でサイズ、形状、晶型を制御した顔料ナノ結晶を作成できることが明らかにされており、今後、産学連携した展開が可能になれば5年後をメドとした実用化が見込まれている。

(3) 融合ナノ高次構造技術の開発と応用展開

(例(3)-1) 鋳型法による種々の炭素系融合ナノ材料の作製

無機化合物の鋳型を用いる、3次元網目構造など種々の炭素構造の作製と、

さらにその隙間に磁性金属などを析出させて融合ナノ材料を作製する技術を確認する。現在世界中で研究開発競争が過熱しているが、この領域では我が国が最先端、最高水準の成果をあげている。応用開発では、磁性体をナノメータスケールで２次元配列させた磁性極微メモリ材料は１０年後に企業化へ橋渡しを実現する。本技術は、有機色素アレーによる光極微メモリ、超高性能キャパシター開発にもつながるため、その経済効果は数十兆円と見積もられ、大きな波及効果が期待できる。

（例（３）－２）ゾル－ゲル構築による光導波路、フォトニクスガラスの創製

有機－無機融合という新しいアプローチにより無機ガラス材料と高非線形光学特性を有する有機材料とのゾルーゲルナノ複合化を実現する。同時に、フォトニックナノ加工技術の確立に努め、高度ＩＴ光技術に不可欠の低損失（０．０１dB/cm以下）な光導波路・素子の実現を１０年以内に目指す。経済効果は十兆円以上。

（４）融合ナノ表面・界面技術の開発と応用展開

（例（４）－１）融合ナノ界面における液体構造の評価と自在制御技術

無機固体と有機液体の界面における液体のナノ構造を評価する新技術及びその構造の自在制御技術を創製する。既に、例えばナノずり共振法の開発で、界面における新規なナノ液体構造が発見されており、汎用装置化が課題となっている。液晶ディスプレイや潤滑制御、ナノコーティングなどへの応用展開は、汎用化技術の確立直後から行う。摩擦の制御によりG N Pの０．５～２．６％が節約できるので、自動車の摩擦を１０％減らせば５％燃費が節約できるとされているように、波及効果は大きい。

（５）融合ナノ構造解析・評価技術の開発と応用展開

（例（５）－１）光学ナノ多層構造による軟Ｘ線波面エンジニアリング

厚さ数ナノメータ以下の超平滑均質な光学薄膜を軟Ｘ線の干渉膜として機能させ、現在より１００倍以上の反射増強、波面制御を可能にし、従来の解析の狭間となっている５０ナノメータ分解能での元素デジタル顕微鏡を早期に完成して有機・無機融合ナノ構造体の解析に供する。本手法は、次世代リソグラフィーステッパ開発への展開ニーズも強いが、諸外国に比べて我が国が具現化に最も近い水準にあると考えられるので、早期実用を目指す。応用展開では、上記に加え、超短パルス化により被爆のない顕微カメラの１０年以内の実現は、現状を数桁上回る分解能での生体や細胞の検査・治療に用いるため、医療応用でも大きく社

会に貢献できる。

6．取組みにあたっての留意事項

プロジェクトのメンバーは、原則として、“物質創製基盤技術の開発”からスタートし、それらを確立しつつ、有用性を実証する“応用技術開発への展開”に移行する形で、両方に参画することを基本とするべきである。また、基盤技術に係る横断的新分野であることから、他テーマとの関連も深く、したがって、知見の交換、データベースの構築も重要であり、適宜連携を遂行すべきである。

1．分野名 （21）ナノスピントロニクス

2．分野別計画検討者

検討担当委員：舩本 泰章 筑波大学物理学系教授
川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授
意見聴取者：横山 直樹 富士通ナノテクノロジー研究センター長
長我部信行 日立製作所基礎研究所長
平山 祥郎 NTT物性科学基礎研究所グループリーダー

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

半導体、酸化物や磁性体中の電子のもつもう一つの自由度であるスピンを電子デバイスにおける新しい自由度として積極的に活用し、既に応用の展望のある磁気センサー、磁気メモリや光アイソレーター性能の格段の高性能化に加えて、大きな可能性のある超高速光スイッチ、スピントランジスタ、さらには、量子情報処理・量子情報通信デバイスなどとして利用する基盤を作る。加えて、新しいナノスピントロニクス材料の探索も行い、これらによって新しいナノ構造を利用したスピントロニクスの展開を推進して、次世代情報処理技術の基礎を作る。

（2）一般向け概要説明

スピンは光アイソレーター以外ではこれまでほとんど実用電子デバイスに使われてこなかった電子の自由度であったが、半導体中を電子がスピン状態を保ったままマクロなスケールで伝播したり、長い時間電子がスピン状態を保ったままになることがあるケースが見出されて、スピントランジスタ、新たなスイッチや超高速光スイッチ、量子情報処理キュビットなどとして利用する可能性が指摘されている。特に量子情報処理はコンピューターの性能の飛躍的向上には必須で、半導体中の長いコヒーレンス時間をもつ電子スピン状態や核スピンは量子情報処理キュビットとして有力である。このため多くの可能性のある新しいナノ構造を利用してスピントロニクスの展開をはかり、次世代情報処理技術の基礎を作る必要がある。

一方、基礎研究レベルでは最近大きな進歩があり、より実用化に近いものとしては、巨大磁気抵抗効果の高密度磁気メモリや高感度磁気センサーへの応用、大

きな磁気光学効果を示す新ナノ素材があり、現用の磁気メモリ、光磁気記録、光アイソレーターを飛躍的に高度化する可能性が高い。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

スピントロニクスはごく最近になって多くのブレイクスルーが我が国の研究者によってなされ世界的に注目され始めた分野である。情報技術を支える半導体産業と磁性体産業の接点にあり、その両方の産業に極めて大きなインパクトを与える可能性がある。10～20年後に実用化・産業化が期待される。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

電子スピンのコヒーレント制御の研究

半導体中を電子がスピン状態を保ったままマクロなスケール伝播したり、電子のスピンや核のスピン緩和が長いコヒーレンス時間を持つことがあるケースが見出されて、新たなスイッチや超高速光スイッチ、量子情報処理キュビットなどとして利用する可能性が指摘されている。電子や核のスピンがコヒーレントである長い時間、フェムト秒光パルスにより上向きスピンと下向きスピンの任意の線形結合状態を形成し、これをコヒーレント制御することができることで、光パルスの時間幅だけで決まる超高速の光スイッチ、量子情報処理キュビットにすることができる。こうした研究は、10年から20年後の実用化・産業化をめざした挑戦的基礎研究で、実用化には更にその後に5年から10年を要する。

巨大磁気抵抗を示す物質の研究

磁性イオンを含む磁性半導体や磁性酸化物で巨大磁気抵抗を示す物質やナノ構造物質が見出されている。こうした物質は磁気センサーや磁場による伝導スイッチとして有用で、物質の探索や構造の最適化の研究により、実用になる可能性があるのは10～15年後であろう。

大きなファラデー回転を示すナノ構造の研究

ファラデー回転は光アイソレーターとして使える他にない特性であり、ファラデー回転を利用した光アイソレーターは光通信のあらゆるシステムに組み込まれている。光情報通信の波長に応じた大きなベルデを持つ磁性半導体ナノ構造は特に注目すべき材料で、優れた特性をもつ材料が見つければ数年のうち

に実用化される。

ナノ構造におけるスピン量子物性の研究

電子がスピン状態を保ったままマクロなスケール伝播するとスピン偏極電子の注入と制御を用いた各種のスピントランジスタなどの新素子の可能性がある。また、単電子動作する磁性体ナノ構造では、電子スピンの状態が電気伝導を支配してくる。この現象は極めて敏感な磁気センサーや磁気メモリを可能にする。こうした課題は、10～20年後の実用化・産業化をめざした挑戦的基礎研究である。

新しいナノスピンエレクトロニクス材料の探索

希薄磁性半導体、有機分子、金属ナノ構造のネットワークや量子ドットのネットワークにおいて新しいテラヘルツ帯光素子や磁気記録媒体などに使えるナノスピンエレクトロニクス材料が見出される可能性がある。こうした課題も、10～20年後の実用化・産業化をめざした挑戦的基礎研究である。

5．研究の概要

ここでは考えられる研究内容を例示する

(1) 電子スピンのコヒーレント制御の研究

半導体中を電子がスピン状態を保ったままマクロなスケールを伝播したり、電子のスピン緩和が長いコヒーレンス時間を持つことがあるケースが見出されて、新たなスイッチや超高速光スイッチ、量子情報処理キュビットなどとして利用する可能性が指摘されている。電子のスピンがコヒーレントである長い時間、フェムト秒光パルスにより上向きスピンと下向きスピンの任意の線形結合状態を形成し、これをコヒーレント制御することができることで、光パルスの時間幅だけで決まる超高速の光スイッチ、量子情報処理キュビットにすることができる。

(2) 巨大磁気抵抗を示す物質の研究

磁性イオンを含む磁性半導体や磁性酸化物で巨大磁気抵抗を示す物質やナノ構造物質が見出されている。こうした物質は磁気センサーや磁場による伝導スイッチとして有用で、物質の探索や構造の最適化の研究が必要である。

(3) 大きなファラデー回転を示すナノ構造の研究

ファラデー回転は光アイソレーターとして使える他にない特性であり、ファラデー回転を利用した光アイソレーターは光通信のあらゆるシステムに組み込まれている。光情報通信の波長に応じた大きなベルデを持つ磁性半導体ナノ構造は特に注目すべき材料で、優れた特性をもつ材料を見出す必要がある。

(4) ナノ構造におけるスピン量子物性の研究

電子がスピン状態を保ったままマクロなスケール伝播するとスピン偏極電子の注入と制御を用いた各種のスピントランジスタなどの新素子の可能性がある。また、単電子動作する磁性体ナノ構造では、電子スピンの状態が電気伝導を支配してくる。この現象は極めて敏感な磁気センサーや磁気メモリを可能にする。こうした課題は、可能性の大きな重要な研究であり、推進すべき課題である。

(5) 新しいナノスピンエレクトロニクス材料の探索

希薄磁性半導体、有機分子、金属ナノ構造のネットワークや量子ドットのネットワークにおいて新しいテラヘルツ帯光素子や磁気記録媒体などに使えるナノスピンエレクトロニクス材料が見出される可能性がある。

6 . 取組みにあたっての留意事項

本分野は物理・物質科学・応用物理・電子工学・情報科学の専門家が連携を取り研究開発を行う必要がある。

1 . 分野別 (2 2) ナノ造形

2 . 検討チーム

検討担当委員：		北澤 宏一	科学技術振興事業団専務理事 (東京大学客員教授)
		岸 輝雄	物質・材料研究機構理事長
意見聴取者	:	長我部信行	日立製作所基礎研究所長
		和田 恭雄	日立製作所基礎研究所 ナノテクノロジー研究プログラム主任研究員
		小川 正毅	N E C ラボラトリーズ研究企画部長
		田原 修一	N E C ラボラトリーズ シリコンシステム研究所部長
		横山 直樹	富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター長
		今井 元	富士通研究所 基盤技術研究所長代理
		森田 雅夫	NTT 物性科学基礎研究所企画部長
		平山 祥郎	NTT 量子物性研究部 主幹研究員、グループリーダー
		豊田 信行	東芝研究開発センター副所長
		江刺 正喜	東北大学未来科学技術共同研究センター教授
		舩本 泰章	筑波大学物理系教授

3 . 当該分野の概要

(1) 数十 nm の限界を突破し、次世代の超微細加工・組上げ技術に向けた材料的課題、加工・組み立て技術の課題、評価技術の課題を解決するための挑戦的・探索的あるいは融合的な研究を行う

(2) ナノテクノロジーにおける基盤技術は、数十 nm 以下のサイズでの造形技術とそのプロセス・モニタリング技術である。現在の半導体技術はホトリソグラフィという同時多発の量産性の高いミクロ加工技術によって成功がもたらされた。将来のナノテクノロジー時代の基盤となるのは、したがって、現在のホトリソグラフィの微細加工限界を突破し、かつ、量産性を確保できる新たな加工技術が育てられねばならないが、それは従来の加工 (トップダウン型プロセス) と、原子

レベルからの組み立て（ボトムアップ型プロセス）の両者の融合によってなされていくと考える。しかしながら、このような技術には学問的に未解明な点が多く、ナノ物理・化学といった新学問領域が同時に形成されていく必要がある。その芽としての我が国の蓄積はすでに大きなものがあるが、本プロジェクトの趣旨は、今後、数年間の超微細集積回路などの連続的な技術進展の基盤を支えるとともに、その後に予想される本格的なナノテクノロジー段階のプロセスを先導的に開拓することを目指すものである。

4 .

（１）現状

現在の超微細加工はホトリソグラフによって支えられ、その量産性の優秀さによって、当面の情報化社会実現を可能にした。光を用いる加工方式には本質的に波長という限界があり、このため、可視光から更に波長の短い紫外光へと技術は進んできた。将来に予想される高度情報化社会に向けて、さらに抜本的な微細化が必要とされてきており、より波長の短いX線や電子ビーム・リソグラフィが原理的にはスケールの壁を打ち破ってきている。しかしながら、これらの方法は現時点ではまだ量産性という壁に突きあたっている。

一方、ナノスケールでは、量子力学的な問題、界面と表面における原子の振る舞いや結晶成長・物質の安定性に関わる問題、少数電子となるための統計熱力学的問題、などが顕在化してきており、物理的・化学的な基礎学問の確立の必要性が感じられる。また、ナノ造形のスケールに対応した新たな評価技術がまだ未発達な状況である。

これらに関する世界の研究状況は、個々の芽は散発的に出つつあり、我が国は米国とともにそれをリードする立場にあるが、それらを組織体系化して、実際の将来プロセスに向けて体制を組むことはまだできていない。

（２）将来目標

ナノ構造をトップダウン型に作り出すX線、電子ビームなどの新リソグラフ技術のスループットを向上させる新たな技術の探索、およびボトムアップ型の加工・組み立て技術のリソグラフ技術との融合により、ナノ造形の基盤分野を開拓する（10～15年後に導入開始を目標）。また、このためのナノ構造を有する表面、界面における原子・分子の振る舞いを記述し、その領域での結晶成長と物質の安定性を記述する物理化学をその背景基礎基盤として確立する（5年後からの有効性発揮と15年後完成を目標）。これにより、電子デバイス作製だけでなく、

我が国の「ハイテク・高信頼性技術」の根幹をなす幅広い技術分野に対する波及的な基盤形成を目指す（１０～２０年後を目標）。また、研究機関の間に共通的なナノ造形先端プロセスに対するサービスを供給できるセンタなどナノ造形技術インフラの充実を志向する（５年後を目標）。

５．研究の概要：具体的研究テーマ例

- （１）新型リソグラフィの限界（特にスループット）を突破する新規提案
- （２）ビーム・プローブ誘導型組み立て技術
- （３）リソグラフィ－自己組織化融合技術
- （４）ナノ構造における物理化学（表面・界面原子ダイナミクス、ナノ結晶成長、ナノ熱力学、ナノ現象学、ナノ材料設計学）
- （５）超精密転写技術
- （６）ナノプロセス・モニタリング技術
- （７）ナノ造形融合・総合技術（ナノ造形ルームなどを含む）

ナノの形を作るにあたって、大きな材料を削り取って加工していくトップダウン型の方法、ビームやプローブなどにガイドされて物質を堆積する方法、周囲環境によって物質自身が誘導されて望みの形状に至るボトムアップ型の方法など、いくつかの原理とまったく異なる方法が考えられるが、それらは競合的・相補的に用いられ、融合されることになると考えられる。その意味で、これらの領域は相互に密接なコミュニケーションがなされつつ、あるいは、融合されて研究が推進されることが望ましい。ナノ造形における最大の課題は、スケールとともに飛躍的なスループット向上が必要とされる点である。これはトップダウンとボトムアップ両プロセスの融合によってなされると考えられ、このためには、同時多発型のボトムアップ・プロセスに対するナノ物理化学の解明・確立がその基盤として必須であり、さらに、次のフロンティアを切り開いていくものである。また、これらナノプロセスを実施するにあたり、それに適したモニタリング技術の進展が必須であり、そのための、新たな提案が重要である。

６．取組みにあたっての留意事項

ミクロ加工にとって、特殊クリーンルームが必要であったように、ナノ造形においても特殊ルームが必要となることが考えられる。その設計から周辺技術に関する問題が同時に総合的に考慮され、対処されていかねばならない。そして、それは共通センタとして全国のサービスに供される必要が出てくる可能性が高い。このようなセンタについても本領域における配慮が必要である。

一方、ナノ造形はホトリソグラフィ並みのスループットを上げようとしなければ、現在でもある程度のことはできるようになってきた。したがって、将来へ向けての発展は原理的に量産に耐えられる技術に支えられねばならない。このためには、ボトムアップ型の技術との融合が必須であるが、その制御のための表面での原子のダイナミクスや結晶成長などの物理と化学の理解に代表される基礎学問の進展が重要視される必要がある。

1．分野名 （２３）プログラム自己組織化

2．分野別計画検討者

検討担当委員：川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
魚崎 浩平 北海道大学大学院理学系研究科教授
柳田 敏雄 大阪大学大学院生命機能研究科長
意見聴取者：山下 一郎 松下電器産業（株）
先端技術研究所主任研究員

3．当該分野の概要

（１）専門的概要説明

DNA の遺伝プログラムによってタンパク質が合成され、これらが相互作用を通して自己組織化することで生体が形成される。このようなプログラムにもとづく自己組織化現象をコンセプトとした、ナノ構造制御の物質・材料構築の新概念を創出するとともに、これらに基づいた素子、システム創成を目的とする。

個人の DNA の遺伝情報をチップに埋め込んだ DNA チップやバイオチップによるオーダーメイド医療の実現や、これらのチップを利用して生体が行っているような遺伝情報（プログラミング）に従った自己組織化により、生体を越える分子モータ、分子デバイス、分子構造体を構築することを目指す。

（２）一般向け概要説明

人間は、たった１つの細胞（受精卵）から出発し、細胞分裂を繰り返して成長していく際に遺伝子にインプットされたプログラミング情報に基づき、目や心臓や手足が作られて、約 60 兆の細胞で構成される高機能かつ精緻な構造体となる。このように優れた物質構築機能を見習い、プログラミングに従って原子・分子単位で制御された物質（材料）合成（ボトムアップ）により、生体を凌ぐ分子モータや分子デバイス、あるいは五感センサーや脳型デバイス等の人工生体情報材料を作る。

DNA チップやプロテインチップをより発展させたバイオチップにより、オンチップに個々の生体の機能を築いていく。これらは検査や診断に留まらず、検出した遺伝情報等をもとに論理判断・予測等のインテリジェントな機能を併せ持つ。チップ上に個々人の情報がインプットされており、メディカルな情報、嗜好情報等が組み込まれており、個人に適したオーダーメイド、オンデマンドの快適な生

活環境が享受できる。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

一端をチオール化したアルキル鎖を持つ分子の金表面上への自己組織化単分子膜 (Self-assembled-monolayer:SAM) など単一種類の原子・分子の固体表面上での自己組織化や、最近は複数の分子種を構造制御しながら配列しようとする研究がなされている。

一方、半導体や機能性酸化物の分野では、物理的な設計指針から決定されたプログラミングに基づき、原子層レベルでの薄膜結晶成長技術により人工格子が形成されている。この時の各層における2次元結晶成長は、個々の原子のもつ自己組織化特性に従っている。これらの技術は現在、磁気ヘッド用の巨大磁気抵抗素子や衛星通信用の HEMT 素子に適用されている。

(2) 「実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途」

分子モータ、分子デバイス、分子構造体の開発

タンパク質複合体や人工分子を機能デバイスとして発展させていくためには、必要最小限の要素を高密度に集積していく必要がある。この際に自己組織化特性を活用する。生体が行っているようにプログラムに沿った自己組織化で、生体を構成する機能部品を人工的に作る。目標達成時期は8～10年、実用化にさらに5～10年を目安とする。目標達成により、生体を越える分子モータ、分子デバイス、分子構造体が期待される。

人工生体情報材料の開発

我々生体は、目で光情報を認識し、電気的・化学的信号により情報が脳に伝達することにより、判断、記憶している。無機・有機物質の高機能物性を利用し、それら部品をある順序に沿って原子・分子スケールで組み合わせるプログラム自己組織化にもとづき、人工生体材料、超五感センサー・脳型メモリを構築する。目標達成時期は8～13年、実用化にさらに5～10年を目安とする。目標達成により、高機能マン・マシンインターフェースの実現や高性能ロボットへの搭載が期待される。

バイオチップ、ヘルスケアチップの開発

ゲノムの塩基配列の個人差で、1,000 塩基に 1 カ所以上、ゲノム全体では数百万カ所以上あると考えられており、この差が主種の病気へのかかりやすさや、薬の効き方に影響を与えている。ポスト SNP として、遺伝情報を DNA チップやバイオチップより発展させ、オンチップに個々の人の情報を構成する。目標達成時期は 5 ～ 10 年、実用化にさらに 5 ～ 10 年を目安とする。目標達成により、オーダーメイド医療や日常生活の個別管理等が期待される。さらに、これらの情報等をもとに論理判断・予測等の機能や、塩基相補性・酵素反応を利用した演算やメモリ機能等の知能を持ったインテリジェントバイオチップ開発へと発展させていく。

5．研究の概要

(1) 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

タンパク質複合体を機能デバイスとして発展させていくためには、必要最小限の要素を高密度に集積していく必要がある。この際に時間的空間的スケールでのプログラムに沿った自己組織化特性を活用する。生体が行っているようにプログラム自己組織化で、生体を越える分子モータ、分子デバイス、分子構造体を作る。

(2) 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

光機能に優れた分子や、適応学習、メモリ機能を有する強誘電体等、無機・有機物質を原子・分子スケールで組み合わせるプログラム自己組織化にもとづき、人工生体材料を合成し、五感センサー・脳型メモリへ適用する。

(3) 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

遺伝情報をはじめとした個人のデータがプログラミングされているだけでなく、演算やメモリ機能までも有するような、知能を持ったバイオチップ（インテリジェントバイオチップ）の合成

(4) 自己組織化の時間分解計測

原子レベルの空間分解能を有するプローブ顕微鏡を用いて、分子等が自己組織化形成過程を時間分解で計測する技術を確立する。

(5) プログラム自己組織化の理論構築

有効な機能を持つ物質の発現（生体形成等）を担う自己組織化を支配するプログラミングを理解するためのモデル形成、遺伝的アルゴリズム等に変わる理論を構築する。

6 . 取組みにあたっての留意事項

本分野は生物・物理・化学および微細加工・集積化技術に代表される半導体工学分野等の研究者が、その専門性を融合させることが求められる。また産学官が各々の得意分野を生かし、共同によりその進展が初めて可能にある分野である。次世代の DNA チップ、バイオチップに対する重要性、社会的要請も強い。ゲノム分野で欧米に遅れをとった日本の命運をかけて、今後のオーダーメイド医療、高齢化社会における、中枢分野となる本分野の研究推進を強力に推進すべきである。

1. 分野名 (24) ナノ新計測

2. 分野別計画検討者

検討担当委員：川合 真紀 理化学研究所主任研究員

塚田 捷 東京大学大学院理学系研究科教授

意見聴取者：青野 正和 大阪大学大学院工学研究科教授

蔡 兆申 日本電気(株)基礎研究所主管研究員

3. 当該分野の概要

(1) 専門的概要説明

構築された個々のナノ構造の機能を計測するための方法を確立し、ナノテクノロジーに共通な計測基盤を供する。ナノメートル領域から、単一分子や分子内構造、さらには単一原子を対象とし、原子配置、元素検出、電子状態、振動状態、スピン状態、量子状態などに加え、ナノ構造の機能そのものを計測する手法を開発する。さらに機能の動的現象の検出を対象に、個々のナノスケール構造の短い時間応答の検出法を確立する。

(2) 一般向け概要説明

微細なナノメートル領域で、意図した機能を発現する構造をつくる方法は大きな発展を見たが、個々のナノ構造や結合ナノ構造の状態や機能を直接計測する新たな手法開発が必要である。ナノ構造の伝導特性、磁性、誘電特性、個々の原子の元素分析など、計測方法を開発し、つくられたナノ構造の状態を把握すると同時に新たなナノ構造創成に寄与する。走査トンネル顕微鏡の開発により、原子・分子単位での物質操作が広く進展したように、新しい測定法の開発は物質科学の新たなブレイクスルーに繋がる重要な研究分野である。

4. 現状及び実用化・産業化の具体的目標並びに目標達成時期の目途

(1) 現状

走査トンネル顕微鏡に代表される、局所プローブ法は、その発明以来急速な進歩を遂げ、固体表面上に固定された個々の分子の姿を直接観測できるだけでなく、その電子状態の空間分布やさらには個々の分子の振動スペクトルまでも観測できるようになってきた。1990年代前半には、個々の分子の姿を実空間で捕らえ、ひとつひとつの分子の観測を通じて固体表面での吸着位置や、分子軌道の広がりが議論できる程度であった。1990年代後半では、分子内の電子状態の空間分布を捕

らえ、吸着分子系の電子状態の広がりや対称性を議論できるようになり、さらには、吸着分子系の振動状態との共鳴トンネル現象を空間的に捕えることができるようになり、原子スケールでの物性議論に新しい展開が期待されるようになった。一方、原子間力顕微鏡の応用展開も目覚ましい発展をとげ、探針と試料との間に生じるピコニュートン程度の小さな相互作用の変化を捕られるようになった。探針の素材を工夫することにより、原子間に生ずる微小な相互作用を原子レベルの位置分解能で検出できるようになった。

このような技術革新を背景に、原子・分子を単位とした操作技術は発展し、現在のナノテクノロジーの基礎をなしている。今後さらに、ナノメートル領域の機能を直接計測する手法や、高速過程の検出法、原子レベルでの元素同定法などの開発が望まれる。また、既の実現している技術に関しても、ナノテクノロジーの実用化に向けこのような極限技術の全てが汎用的に使えるようになるにはさらなる技術開発が必要である。

(2) 実用化・産業化の具体的目標及び達成時期の目途

これまでのナノテクノロジーの研究を強力に牽引してきた最重要基盤技術としてのプローブ顕微鏡は、今後のナノテクノロジーの急速な発展に対応して質的に進化することが要求されている。プローブ顕微鏡に限らず、位置及び時間の分解能を飛躍的に高めたナノスケール計測法の開発や、単一スピン状態の検出、ナノ構造の機能を直接計測する手法の開発など達成すべき課題は多い。

ナノメートル領域の機能計測

ナノテクノロジーにおいて、様々な意図した構造を構築する方法は大きな発展を見たが、構築されたナノ構造の物性や機能を計測する方法の開発が急務である。多探針 STM の開発など、既に開始され国際的な開発競争にある試みもあり、研究推進が急務である。

非接触原子間力顕微鏡の応用は、さまざまな機能計測の道をひらくだろう。機能探針による複合機能計測や極微力場を検出する顕微鏡の開発により、小さな相互作用を検出できるようになれば、各種の機能評価が可能となろう。また、プローブ顕微鏡以外の各種顕微測定法の開発も望まれる。これによって、ナノ構造の機能を直接計測できるようになり、有用な機能発現に適したナノ構造の物質設計も可能となる。目標達成時期は10年後、実用化にはさらに5年必要である。

高分解能ナノスケール計測

サブオングストロームの空間分解能で引力や反発力を検知する計測法が開発されると、絶縁性の材料に対しても、STM の空間分解能に匹敵する微細構造の情報が得られるようになり、バイオ材料がデバイス素材として計測にかかるようになる。また、微小なエネルギー差を検知するシステムにより、単一スピンの計測などが可能になる。このような高精度のナノスケール計測が実現すると、これまでの電荷を媒介としたデバイスを越えたシステムの創成に寄与する。目標達成期間は 10 年、実用化はさらに 5 年

極短時間分解能ナノメートル領域計測

原子や分子のダイナミクスはピコ秒、電子のダイナミクスはフェムト秒の時間分解能で観測できる。ナノ構造電子ダイナミクスや、光応答など、様々な機能を解明するための道具だてが揃うことになり、機能解明に大いに寄与できる。目標達成期間は 10 年。

5．研究の概要

研究内容の例示

(1) 多探針走査プローブ顕微鏡 (SPM) の開発と利用

独立に駆動できる 2、3、4 本の導電性の探針を持つ SPM の開発である。これによって、ナノ構造、ナノデバイス電気特性の評価(4 端子評価)、またそれら素子の局所ゲート電圧特性や局所磁場特性の評価(3 端子または 5 端子)を行うことができ、ナノ構造に注入された電子の拡散の速度や、分布の計測、ナノ構造の能動的機能の計測、化学反応の伝播の観測など、様々な計測が可能になる。

(2) ナノスピン顕微鏡 (スピン分布)

スピンの空間分布をナノスケールから原子スケールの空間分解能で観測できる顕微鏡の開発。感度も 1 個のスピンを検出できることが望ましい。幾つかのスピン偏極走査トンネル顕微鏡が開発されているが、信頼性、安定性、操作性、感度などの点でまだ不十分であり改良が必要である。さらに、それらとは異なる新しい方法の開拓を積極的に進めるべきである。

(3) ナノオプティカル計測研究

ナノスケール領域において極短時間分解能のオプティカル計測を行いうる方法の開発とその利用に関する研究を行う。電子デバイスの周波数特性を支配する

電子の散乱時間と散乱長に匹敵する、フェムト秒の時間分解能およびナノメートルの空間分解能で電子状態を計測することを目的とする。さらに、電子遷移によって誘起される光の直線偏光ならびに円偏光を計測して電子状態の軌道対称性やスピンに関する情報を得る方法も確立して利用する。

(4) ナノ力学顕微鏡による機能計測研究

非接触原子間力顕微鏡は絶縁基板や、その上に吸着した分子、原子ワイヤなどの原子尺度構造や力学的特性を測定するのに極めて有力である。STM、SNOMなどとの複合探針により、電子的、光学的、誘電的性質などに関連する物性および、原子尺度構造や力学的性質が観測できる上、単分子電子デバイスの解析、さらにカンチレバーの振動エネルギーの散逸測定から、ナノ構造の動力学的性質の原子尺度情報がえられ、これを用いた構造制御も可能となる。また探針の構造と原子種に選択的に敏感なことを利用して測定対象の原子種、官能基などの同定が可能となります。これらは生体分子の3次元構造と機能制御に係わるバイオインフォマティクスとう分野の強力な実験観察手法になる。

(5) 新しい顕微鏡システムの開発研究

微細なナノメートル領域の機能を検出する新しい顕微鏡システムの開発研究は、将来のナノテクノロジー研究の発展に大いに寄与するものである。X線顕微鏡を利用した元素分析、微細領域からの磁気共鳴など、材料機能を検出する上で有用な情報を得る手法となる。

6. 取組みにあたっての留意事項

ナノ計測は、ナノテクノロジー全ての発展の根源に関わる共通基盤研究である。新しいナノ構造や機能が開発されると、それに伴い必然的に新しい計測方法の開発が臨まれるようになる。したがって、研究対象も常に他の分野の発達状況に併せ柔軟に対応すべきである。また、STMの発明がそうであったように、新しい計測法が開発されると新しい物質科学分野が開けてくる。したがって、双方向の情報発信が大変重要である。

1．分野名 （25）ナノシミュレーション

2．分野別計画検討者

検討担当委員：塚田 捷 東京大学理学系研究科教授
岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
茅 幸二 岡崎国立共同利用機関分子科学研究所長
意見聴取者：大西 梢平 日本電気（株）基礎研究所主席研究員
押山 淳 筑波大学 物理学系教授

3．当該分野の概要

（1）専門的概要説明

ナノテクノロジーに必要なナノ構造材料は、望みの性質を発現する様に原子尺度で構造制御された系である。このような構造を創製する生成方法、実現し得る原子尺度構造、および期待される物性や機能の理論的な予測と解析を、コンピューターを駆使した数値シミュレーションによって実行する。ナノ構造においては量子効果が支配的になるので、これを定量的に記述する第一原理計算を中核にしたハイブリッドシミュレーション法を開発し、原子配列構造、生成反応、諸物性の理論解析と機能探索を行う。

（2）一般向け概要説明

極微なナノメートル領域での材料開発では、実験的な手法のみで材料の内部構造や性能を解析・評価することは難しい。近年発達の著しいコンピューターを駆使し、ナノ構造物の生成反応や原子尺度での構造を予測、期待される性質と機能をシミュレーションする。こうした理論シミュレーションの方法によって、ナノテクノロジーの開発を効率的に進めることができる。本課題ではそのために必要な各種シミュレーション技術の開発と、その応用研究を行う。

4．現状及び実用化・産業化の具体的目標と目標達成時期の目途

（1）数千原子までの系についての第一原理計算法の開発と実用化

ナノテクノロジーを実現するには、ナノ材料の原子配列構造に基づく物性と機能の理論解析を行い、生成法や制御法を解明しなければならない。実験的計測が困難なスケールである一方、理論計算では様々な環境下で自在な原子の組み合わせについて正確に予測できることから、計算科学に対する期待は大きい。原子尺度系の理論予測には密度汎関数法による第一原理計算が最適だが、現在の手法と

コンピュータの性能では高々数百原子が実用的な限界。ナノ構造系では少なくとも数千程度の原子からなる系についての計算が必要である。このため並列分散処理、プログラムの高効率化など計算アルゴリズム、ソフトウェアなどの開発と、非平衡開放系の第一原理法など、種々の計算物理の方法論の開拓が必須である。目的の達成時期は10～15年後、実用化普及化のためにさらに5年が必要。

(2) 数百万原子の系の分子動力学とモンテカルロシミュレーション

半導体、セラミックス、金属、高分子、それらの複合材料について、ナノスケールでの構造、発現機能などを解析・予測するためのシミュレーション法を構築する。固液界面の性質、材料の生成過程、破断、疲労、摩擦、エネルギー伝達に係わるプロトンの挙動などナノスケール現象の解析には、数百万以上の原子からなる系のマイクロ秒程度にわたる時間発展を追うシミュレーションが必要。このため、現象論的な原子間力モデルに基づく理論シミュレーション法を開発する。モデルに関する系統的理論の構築、第一原理計算を基礎にする原子間力などのデータベースの完備、大規模計算に特化した並列分散処理型専用計算機の開発などが急務。目的の達成時期は10～15年後、実用化普及化のためにさらに5年が必要。

(3) ナノ材料設計プラットフォームの構築

第一原理計算、古典分子動力学、モンテカルロシミュレーション、および統計力学的処理を組み合わせたナノ材料解析・設計のための総合的シミュレーションプラットフォームを構築。計算機資源としては公的研究機関、主要大学の大型計算機を高速通信回線で結んだものなどを使用。またこれをネットワーク上で民間研究者を含む多数のユーザーに使用可能とし、理論・実験、産業界・大学・研究機関の多様なユーザーがインタラクティブに利用できるシステムを開発。このナノ材料設計プラットフォームによるシミュレーション結果の知識データベース化を図り、異分野のシミュレーション結果をデジタルコンテンツとして有効利用、ナノ材料設計を効率化する。これにより情報・通信、環境保全、バイオなどの各分野におけるナノテクノロジーの実現を加速し、豊かな社会の構築に貢献する。プラットフォームとデータベースの知識ベース化システムの製作のために10～15年、一般に普及するためにさらに5年必要。

5. 研究の概要 (課題の例)

(1) 大規模系の第一原理計算のためのアルゴリズム開発

従来型のアルゴリズムでは、計算規模は原子数 N の3乗に比例し大規模系への

適用は困難である。これを克服しオーダ（N）法のアルゴリズムを開発する。試験計算で実証された有力な方法は実空間有限要素法で、密度汎関数法計算を高効率で並列処理できる。時間発展問題や非平衡開放系に適用可能で、系の階層構造に応じた最適化に適し、ナノ材料系の計算ですぐれた特長を発揮する。これをさらに発展させ、アルゴリズムの最適化、ソフトウェアの標準化、普及化、専用計算機などの開発を行う。

（２）走査型プローブ顕微鏡の理論シミュレーション

走査トンネル顕微鏡、原子間力顕微鏡などは、ナノ材料の原子スケール構造を解析する重要な実験法である。実験結果を解析するための第一原理的シミュレーション法を開発、標準化して、普及型ソフトを製作。原子間力顕微鏡のパイロットプログラムは開発されたが、計算規模が大きく普及し難い。これを解決して信頼度のある普及型ソフトウェアを開発する。さらにこの理論解析法の発展として、吸着分子を用いた力学センサー、ナノマシーン、分子モータなどについて研究し、新しいナノ力学デバイスの基礎を探索する。

（３）籠型炭素ナノ構造と基板表面を用いた回路網

フラーレンやカーボンナノチューブと基板表面との複合系の物質設計と機能予測を行う。これらのナノ構造と基板表面との相互作用、表面上に導入したナノ電極との接合構造、これらを要素構造とするデバイスの理論設計、デバイス特性解析、望みの機能を実現する構造の生成法などを探索するためのシミュレーションを行う。

（４）プロトニックスの基礎シミュレーションシステム開発

プロトン運動の量子論的シミュレーションを可能にする計算アルゴリズムを開発する。エネルギー関連は燃料電池における触媒活性と溶媒と電極のシミュレーション、バイオ系では金属錯体近傍のプロトンの役割、環境関連は不純物イオンを囲んだ水クラスターにおける励起状態の様子を定量化できるシミュレーションを行う。

６．取組みについての留意事項

ナノ構造の理論シミュレーションには、（１）基礎理論の構築、試行的シミュレーションプログラムの開発、（２）その効率化標準化と実用的プログラム開発という２つの異なるフェーズがあり、そのいずれもが車の両輪のように欠かせない。

(1)は大学、公的研究機関で実施できるが、(2)については民間やベンチャーなどの役割を期待したい。

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会名簿

分科会長	澤 岡 昭	大同工業大学長
分科会長代理	土 居 範 久	慶應義塾大学理工学部教授
	池 上 徹 彦	会津大学長
	板 井 昭 子	株式会社医薬分子設計研究所代表取締役社長
	今 井 通 子	株式会社ル・ベルソー代表取締役社長
	大 崎 仁	国立学校財務センター所長
	大 谷 繁	株式会社荏原製作所部長
	小野田 武	三菱化学株式会社顧問
	片 山 恒 雄	独立行政法人防災科学技術研究所理事長
	加 藤 寛一郎	東京大学名誉教授
	金 澤 一 郎	国立精神・神経センター神経研究所長
	川 崎 雅 弘	科学技術振興事業団顧問
	菊 田 惺 志	財団法人高輝度光科学研究センター理事
	北 澤 宏 一	科学技術振興事業団専務理事
	國 井 秀 子	株式会社リコー執行役員 ソフトウェア研究所長
	郷 通 子	名古屋大学大学院理学研究科教授
	平 啓 介	東京大学海洋研究所教授
	高 久 史 磨	自治医科大学長
	武 田 英 次	株式会社日立製作所半導体グループ理事・CTO
	田 村 和 子	社団法人共同通信社客員論説委員
	西 岡 秀 三	独立行政法人国立環境研究所理事
	野 依 良 治	名古屋大学大学院理学研究科教授
	垣 生 園 子	東海大学医学部教授
	原 早 苗	埼玉大学経済学部非常勤講師
	山 地 憲 治	東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

ナノテクノロジー・材料委員会名簿

(主査) 澤岡 昭 大同工業大学長

井上 明久 東北大学金属材料研究所所長

小野田 武 三菱化学株式会社顧問

茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所長

川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長

岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長

北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事(東京大学客員教授)

榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授

柳田 敏雄 大阪大学大学院生命機能研究科長

物質・材料ワーキング・グループ名簿

(主査) 北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事(東京大学客員教授)

相澤 益男 東京工業大学学長

秋元 勇巳 三菱マテリアル株式会社取締役会長

阿部 光延 元新日本製鐵株式会社顧問

井上 明久 東北大学金属材料研究所所長

遠藤 剛 山形大学工学部長

小野田 武 三菱化学株式会社顧問

岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長

国武 豊喜 北九州市立大学副学長
(理化学研究所グループディレクター)

米屋 勝利 横浜国立大学大学院環境情報研究院教授

高野 幹夫 京都大学化学研究所長

福山 秀敏 東京大学物性研究所長

松尾陽太郎 東京工業大学理工学研究科教授

山本 良一 東京大学国際・産学共同研究センター長

早稲田嘉夫 東北大学多元物質科学研究所長

ナノテクノロジー・ワーキング・グループ名簿

- (主査) 岸 輝雄 物質・材料研究機構理事長
- 猪飼 篤 東京工業大学大学院生命理工学研究科教授
- 井上 明久 東北大学金属材料研究所所長
- 魚崎 浩平 北海道大学大学院理学研究科教授
- 臼井 勲 科学技術振興事業団常勤理事(基礎研究担当)
- 江刺 正喜 東北大学未来科学技術共同研究センター教授
- 茅 幸二 岡崎国立共同研究機構分子科学研究所所長
- 川合 知二 大阪大学産業科学研究所
産業科学ナノテクノロジーセンター長
- 川合 真紀 理化学研究所主任研究員
- 北澤 宏一 科学技術振興事業団専務理事(東京大学客員教授)
- 榊 裕之 東京大学生産技術研究所教授
- 玉尾 皓平 京都大学化学研究所教授
- 塚田 捷 東京大学大学院理学系研究科教授
- 中村 道治 株式会社日立製作所常務研究開発本部長
- 舩本 泰章 筑波大学物理学系教授
- 柳田 敏雄 大阪大学大学院生命機能研究科長
- 早稲田嘉夫 東北大学多元物質科学研究所長

科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会における審議の過程

第1回（平成13年2月27日）

- ・ 分科会長・分科会長代理の選任について
- ・ 研究計画・評価分科会運営規則について
- ・ 研究計画・評価分科会の審議内容の公開について
- ・ 科学技術・学術審議会及び同研究計画・評価分科会の概要について
- ・ 新科学技術基本計画の検討状況について
- ・ 科学技術振興調整費について

第2回（平成13年5月9日）

- ・ 科学技術基本計画の閣議決定について
- ・ 平成13年度科学技術振興調整費について
- ・ 大型放射光施設（SPring-8）プロジェクトの中間評価について
- ・ 総合科学技術会議の審議状況について
- ・ 下部組織の設置について

第3回（平成13年8月27日）

- ・ 重点4分野及び防災分野の研究開発について
- ・ 当面の研究計画・評価分科会の審議について

第4回（平成14年3月18日）

- ・ 文部科学省における研究及び開発に関する評価指針について
- ・ 平成13年度科学技術振興調整費による研究実施課題等の評価結果及び平成14年度科学技術振興調整費の新規課題等の募集について
- ・ 委員会の検討状況及び今後の検討予定について
- ・ 主要5分野の研究開発委託事業について（新世紀重点研究創成プラン（RR2002））
- ・ 総合科学技術会議等をめぐる最近の動向

第5回（平成14年5月29日）

- ・ 文部科学省における研究及び開発に関する評価指針について
- ・ 分野別研究開発推進方策について
- ・ 戦略的創造研究推進事業の平成14年度の戦略目標について
- ・ 総合科学技術会議等をめぐる最近の動向

ナノテクノロジー・材料委員会における審議の過程

第1回（平成13年5月18日）

- ・ ナノテクノロジー・材料委員会について
- ・ ナノテクノロジーWG及び物質・材料WGの設置について
- ・ ナノテクノロジーを巡る検討の現状について
- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー・材料に係る取組みの現状及び平成14年度の施策の検討にあたってのポイントについて

第2回（平成13年8月27日）

- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー・材料分野の推進に関する基本的な考え方

第3回（平成14年2月12日）

- ・ 前回会合以降の進捗状況について
科学技術・学術審議会における検討
総合科学技術会議における検討
- ・ 文部科学省における平成14年度ナノテクノロジー・材料分野関係予算案について
- ・ ナノテクノロジー総合支援プロジェクトについて
大型・特殊施設・設備の共同利用、技術支援機能について
情報収集・発信機能について

第4回（平成14年5月20日）

- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー材料分野の推進に関する基本的な考え方（中間報告書）の改訂について
- ・ その他

物質・材料ワーキング・グループにおける審議の過程

第1回（平成13年5月28日）

- ・ 物質・材料ワーキング・グループについて
- ・ 物質・材料科学技術を巡る検討の現状について
- ・ 文部科学省における物質・材料科学技術に係る取組みについて

第2回（平成13年6月14日）

- ・ 総合科学技術会議における議論について
- ・ 物質・材料分野の研究開発の現状及び重点事項に関するヒアリング
井上明久（東北大学金属材料研究所長）
岸輝雄（物質・材料研究機構理事長）
佐久間健人（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）
北澤宏一（東京大学大学院新領域創成科学研究科教授）

第3回（平成13年6月29日）

- ・ 物質・材料分野の研究開発の現状及び重点事項に関するヒアリング
小林英男（東京工業大学大学院理工学研究科教授）
牛尾誠夫（大阪大学接合科学研究所長）
牧正志（京都大学大学院工学研究科教授）
遠藤剛（山形大学工学部教授）
- ・ 物質・材料分野の研究開発の重点事項について

第4回（平成13年7月18日）

- ・ 物質・材料分野の重点領域について

第5回（平成13年8月13日）

- ・ 物質・材料分野の重点領域について

第6回（平成13年8月27日）

- ・ 「物質・材料科学技術の推進に関する基本的考え方」（物質・材料ワーキンググループ中間報告書）について

第7回（平成14年4月26日）

- ・ 前回会議以降の進捗状況
- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー材料分野の推進に関する基本的な考え方（中間報告書）の改訂について

ナノテクノロジー・ワーキング・グループにおける審議の過程

第1回（平成13年5月18日）

- ・ ナノテクノロジー・ワーキング・グループについて
- ・ ナノテクノロジーを巡る検討の現状について
- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー・材料に係る取組みの現状及び平成14年度の施策の検討にあたってのポイントについて

第2回（平成13年5月24日）

- ・ 文部科学省傘下の機関におけるナノテクノロジーへの取組みに関するヒアリング
東北大学（井上明久委員、江刺正喜委員、早稲田嘉夫委員）
岡崎国立共同研究機構（茅幸二委員）
大阪大学（川合知二委員、柳田敏雄委員）
物質・材料研究機構（古屋一夫企画室長）
理化学研究所（川合真紀委員）
日本原子力研究所（安岡弘先端基礎研究センター長）
科学技術振興事業団（臼井勲委員）
京都大学（玉尾皓平委員）
筑波大学（舩本泰章委員）
- ・ 経団連におけるナノテクノロジーへの取組みに関するヒアリング（中村道治委員）
- ・ 文部科学省における取組みについての検討

第3回（平成13年6月7日）

- ・ 文部科学省傘下の機関におけるナノテクノロジーへの取組みに関するヒアリング
北海道大学（魚崎浩平委員）
東京大学（榊裕之委員、塚田捷委員、北澤宏一委員）
東京工業大学（猪飼篤委員）
広島大学（山西正道副学長）
九州大学（梶山千里工学府長）
- ・ 10～20年後の実用化・産業化を目指した挑戦的研究として重要な分野の抽出について

第4回（平成13年7月6日）

- ・ 「ナノテクノロジーの推進について」検討のポイント
- ・ 10～20年後の実用化・産業化を目指した挑戦的研究として重要な分野の抽出について

第5回（平成13年8月10日）

- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジーの推進に係る基本的な考え方について
- ・ 10～20年後の実用化・産業化を目指した挑戦的研究として重要な分野の抽出について

第6回（平成14年2月4日）

- ・ 前回会合以降の進捗状況について
科学技術・学術審議会における検討
総合科学技術会議における検討
- ・ 文部科学省における平成14年度ナノテクノロジー・材料分野関係予算案について
- ・ 機関、分野を越えた横断的研究サポート機能の構築について
情報収集・発信機能について
大型・特殊施設・設備の共同利用、技術支援機能について

第7回（平成14年4月16日）

- ・ 前回会議以降の進捗状況
- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー・材料分野の推進に関する基本的考え方（中間報告書）の改訂について

第8回（平成14年5月10日）

- ・ 文部科学省におけるナノテクノロジー材料分野の推進に関する基本的な考え方（中間報告書）の改訂について