



じつきょう 理科資料

NO. 52

サイエンス・プラザ

ナノテクノロジーについて

放送大学講師 森谷 正規

幅広く展開するナノテク

この2、3年、ナノテクノロジーが急速に脚光を浴びてきた。ITやバイオテクノロジーに並ぶ革新技術として大きな期待がかけられている。もっとも、ナノテクノロジーは応用の範囲が非常に広い技術であり、ITにもバイオにも、また環境にも深くかかわってくる。21世紀の技術革新の基盤となる有望な技術である。

ナノテクノロジーのナノは、長さの単位である。長さは何についてもあるものであり、したがってナノテクノロジーはあらゆる方向に広がっていく。そのナノは何かといえ、1メートルの千分の一が1ミリ、1ミリの千分の一が1ミクロン、1ミクロンの千分の一が1ナノメートルになる。したがって、十億分の一メートルということになる。

その極微小な長さを実感できる形で示してみると、1メートルの球を地球の大きさに拡大すると、1ナノメートルはビー玉の大きさになる。いかに小さな単位であるか、このたとえでよくわかる。

この極微小な世界に素晴らしい技術が秘められてい

ると講演で大胆に説いたのが、アメリカの物理学者であるリチャード・P・ファインマンであり、1959年のことである。原子、分子を一つひとつ操作することによって、材料の特性を制御できるとし、また、ナノメートルの極微細な回路によって新しいコンピュータが生まれると预言した。

この頃からナノレベルの極微小な世界に至る技術が生まれ始めて、技術への応用の可能性が見えてきた。1974年には、東京工業大学の谷口紀男教授がナノテクノロジーの概念を提唱している。

このナノメートルの世界を切り開く突破口となったのは、ナノレベルの極微小な物質の観察を可能にした超高精度の顕微鏡が開発されたことである。その最初のもは、走査型トンネル顕微鏡であり、1981年にスイスのIBMチューリッヒ研究所で発明された。これはタンゲステンや白金などの固くて安定した金属の先端を極めて鋭く尖らせて、それを探針（プローブ）として試料に近づけて動かし、走査していくものである。その探針と試料の間の距離が数ナノメートル以下になるとごくわずかな電流が流れて、それによって試料の形状をつかむことができる。

◆ も く じ ◆

サイエンス・プラザ ナノテクノロジーについて	1
トピックス 三宅島火山の現状と今後の見通し	8

甲南中高等学校の環境教育について	12
高校生へ私が選んだ1冊の本 Q & A 野菜の全疑問	19

この走査型トンネル顕微鏡は、原子をつけたりはじき飛ばしたりする操作もできるようになり、研究の範囲を広げた。さらに、探針を試料にナノメートルレベルで近づけると原子間引力が生じるが、これを用いて原子間力顕微鏡も開発された。このような探針を用いる顕微鏡を総称して「走査型プローブ顕微鏡」というが、このきわめて高精度の顕微鏡が、各分野でのナノテクノロジーの研究を可能にした。

ナノテクノロジーに具体的に大きな可能性をもたらしたのは、炭素原子で構成される特異な材料の発見である。1985年にアメリカの研究者であるR・E・スモーリーとイギリスのH・W・クロトーが、黒鉛の中からフラーレンを発見した。これは、炭素原子60個がサッカーボール状に結合されて分子となった物質である。サッカーボールは六角形をつなぎ合わせた形になっているが、その六角形の頂点に炭素原子がある。ボールの直径は約0.7ナノメートルである。このフラーレンは、金属よりは高温で超伝導性を持つなどの優れた特性や新たな素材になる可能性があり、注目された。

1991年には、このフラーレンよりも素材としての可能性が一段と大きい炭素原子による材料が、NECの飯島澄男主席研究員（現在は名城大学教授を兼任）によって発見された。これは、炭素原子が六角形をつないだ網目状に結合されていて、その網をグルッと巻いた円筒状になっているという奇妙な形状をしており、それが巨大な分子となっている。その円筒の直径は1～30ナノメートルほどであり、円筒＝チューブであるからナノチューブという。このカーボンナノチューブは、導電性、熱伝導性、電子放射性、強度などに優れた特性を持っており、今その応用に世界中の研究者が懸命にとりこんでいる。

さらに、違う方向からのナノテクノロジーへの接近もある。それはマイクロマシンであり、1987年に超LSIの技術を応用したミクロンレベルの極小のシリコン歯車が試作されて、研究者たちの関心が高まり、世界中で研究が盛んになってきた。

多くの分野で、既存の技術もナノテクノロジーに入ってきている。その代表が超LSIであるが、回路の線幅が最も細いものは130ナノメートルであり、

表1 ナノテクノロジーの全体像

	材料・デバイス	加工	計測	システム
情報	CNTディスプレイ 単電子トランジスタ 分子素子 ナノガラス 光メモリ素子 量子ビット フォトニック結晶	次世代半導体 超高密度磁気記録 量子ドット		量子コンピュータ 分子コンピュータ
医療	ナノ粒子医薬品 (ドラッグ・デリバリー・システム) バイオセンサー	マイクロマシン DNAチップ 生体適合材料	DNA観察 たんぱく質観測	DNAコンピュータ マイクロ・トータル・アナリシス・システム
環境	ナノ粒子膜 CNT水素タンク 色素増感太陽電池	微結晶太陽電池 ガス分離膜	環境物質の微量分析	
一般	CNT走査型顕微鏡探針 CNT機械部品 ナノ複合材料 テーラーメイド化学	ナノコーティング技術 超高精細印刷	構造・物質の極限理解	

CNT＝カーボンナノチューブ

著者作成

これからさらに細くしていくためにナノテクノロジーが用いられる。

このようにナノテクノロジーはさまざまな分野で進んできている。

2010年に27兆円の市場

ナノテクノロジーはきわめて多様であり、その応用はとても広い。それをまとめると表1のようになる。各応用分野をざっと見てみよう。

まず、情報への応用が最も大きい。これは、大別すれば二つになる。一つは加工をどこまでも小さくしていくものであり、その代表的なものが次世代半導体である。それは基本的には回路の線幅をどこまでも細くして集積度を上げていくのだが、2001年からスタートしたプロジェクト「あすか」では、線幅を100~70ナノメートルに細くするのが目標である。また、50ナノメートルをめざすプロジェクトの「MIRAI」もある。

記憶装置の記憶容量を飛躍的に増大させていく技術もある。磁気ディスクでは、磁気ヘッドを1ナノメートルを切るほどに薄くする技術が進められていて、光ディスクでは、波長が短い紫色や紫外光のレーザーを出す量子ドットの技術が開発されている。これらは、今の技術の延長線上にある技術であり、5年、10年後の実用化が可能であるだろう。

もう一つは、個々の原子や分子を用いて新しいシステムを創り出す技術である。例えば、単電子トランジスタは、たった1個の電子でトランジスタを作動させようという革新的な素子であり、消費電力がごくわずかになる利点大きい。分子一つひとつを素子とする分子素子は、記憶に用いると記憶容量が何桁も増える。

こうした素子を用いて、分子コンピュータ、量子コンピュータが生まれる。量子コンピュータは、10兆年も要する演算が数10分のできるようになるという夢のコンピュータである。もともと、夢であるだけにその実現は20~30年先であるとみられており、これらの技術は全般的に実用化はかなり先のことになる。

医療では、DDS（ドラッグ・デリバリー・システム）の実用化が近づいている。医薬品を極微小なものの中に納めて、患部にまで運んでいってそこで放出するものである。薬の投与がわずかで済むので、副作用が大きく減るという利点がある。また、遺伝

子を用いて病気の診断をするDNAチップも、研究開発が着々と進んでいる。一方、体内に入っていて診断、治療をするマイクロマシンは、実用化は10年以上先になるようだ。こうした診断、治療ばかりではなく、ナノテクノロジーは観察の技術を大きく進めるので、病気の根本的な原因の把握などに寄与して、医学全体を進展させる。

環境では、新型の太陽電池が生まれて、今は高いコストを大きく下げていく期待がある。また、きわめて微小な穴の膜をつくって、ガスを分離することによって環境保全をしていく可能性もある。

その他にもナノテクノロジーの応用は広く、高度な性能、機能を持った材料を生み出していく期待が大きい。

このナノテクノロジーの市場規模がどこまで増えていくのが予測されている。それによると、2005年には2兆500億円ほどであり、それが2010年には27兆3300億円にもなるという見通しである。

カーボンナノチューブは万能の素材

この広汎なナノテクノロジーの中から、カーボンナノチューブに焦点を当てて詳しくみてみよう。

このカーボン、つまり炭素はありきたりの素材のように思えるが、千変万化の不思議な素材である。カーボンと言えば炭だが、炭には面白い性質がある。固形であるが柔らかく、紙などに押し当ててこすると黒い跡が残る。炭素の原子がブロックで容易に剥がれるのであり、しかも剥がれたものは紙にこびりつく。

一方で、炭素はきわめて硬くもなる。ダイヤモンドは成分が炭素だが、結晶になっていて、物質の中で最高の硬度を持っている。したがってダイヤモンドは、硬い金属を削る工具になる。しかも炭とは全く違って無色透明であり、屈折率が大きいので光り輝いている。

炭素は繊維にもなる。合成繊維のポリアクリロニトリルを焼いて炭化させると、強度が非常に大きい炭素繊維になるものである。それを中に入れてプラスチックを強化したものがCFRP（炭素繊維強化プラスチック）であり、ゴルフのブラックシャフトに使われている。

そのカーボンからフラーレン、カーボンナノチューブが生まれたのである。発見した飯島主席研究員は、フラーレンの物性を調べる研究を行うためにア

ーク放電法でフラーレンを作っていて、その中に奇妙な糸状のすすのようなものがあることに気付いた。それを調べていて、フラーレンとは構造がまったく異なっている物質を見つけ出した。そして、そのチューブ状の奇妙な物質の物性を調べる実験を続けて、さまざまな特性を持つ有用な新物質であると確信を持ったのである。

まず、導電性、熱伝導性は銅よりも優れている。ところが、半導体の特性を持たすこともできる。その程度も自由にできる。また電子放射性がとてもいい。強度は銅よりはるかに大きい。やがて水素を吸着する能力があることもわかってきた。カーボンナノチューブは万能の素材なのである。

もっとも、このようなさまざまな特性は、一つの種類のカーボンナノチューブが併せ持つものではない。さまざまな形状のものがつくれるのであるが、その形状によって特性の現れようが違ってくるのだ。

飯島氏が発見したのは、径が異なるチューブが同心状に入れ子になっている多層ナノチューブであった。やがて単層のナノチューブもつくれるようになった。また、円筒の形を変えてラッパ状にして先を広げたり、全体に膨らみを持たせるものも生まれた。このように直径を変え、形状を変えて、何かの優れた特性を得るのである。もっとも、それをいかにつくり出すか、製造法が容易ではなく、さまざまな工夫をこらすことになる。

カーボンナノチューブを生産する場合、こうした円筒状のものが1本1本整然と並んでつくり出されるわけではない。できたものを見ると、繊維状のものが複雑にからみ合っていて、見た目には、ただのすすのかたまりである。ゆするとそれが空中にふわふわと浮いてくる。

今は、生産コストが非常に高い。1グラムが数万円もしていて、生産できるのはわずかな量である。何とかして安く大量につくる製造法の開発に大きな力が注がれているのだが、コストはこれから1桁も2桁も下げていかねばならない。

新しいディスプレイが登場

このカーボンナノチューブの応用は、すでに一部では始まっている。それは走査型プローブ顕微鏡のプローブである。これはごく微量を用いるので、高価であっても使えるのである。この新しいプローブによって、従来ものでは見えなかったDNAのら

せん形状をかなり鮮明に見ることができるようになった。らせんの周期も3.5ナノメートルと計測できた。こうした観測が可能になることが、DNAとたんぱく質の関係の解明に役立ち、医学を大きく進めることになる。

また、実用化に近いのが、優れた電子放射性を活かした薄型ディスプレイである。超大画面の薄型ディスプレイとしてはPDP（プラズマ・ディスプレイ・パネル）があるが、とても高価であり、また消費電力が大きいという問題点がある。そこで、FED（フィールド・エミッション・ディスプレイ）という新しいタイプのものの開発が続けられているが、そのFEDにカーボンナノチューブが応用できる。

このFEDは、原理は基本的には今のテレビのブラウン管と同じである。電子を飛ばして発光体に当てて光らせるのだが、ブラウン管が一つの電子銃を発信源としているのに対して、FEDはガラス基板を設けて、その上に無数の微小な電子銃を配置している。画面上の一つの点である画素ごとに電子銃を設けるのであり、その電子で直前の発光体を光らせるのであるから、距離はほとんどいらぬ。そこで薄型になる。

その電子銃にカーボンナノチューブを用いるのである。多層のカーボンナノチューブが繊維状に絡み合ったものを、基板に塗ればいい。その無数な繊維の中で、端が正面を向いているものから電子が飛んで、発光体を光らせる。

ブラウン管は電子銃を温めて電子を打ち出すのだが、カーボンナノチューブは低電圧で電子を放射するので、温める必要がない。したがって、省電力のディスプレイになるのであり、その面ではPDPに対して非常に有利である。

このカーボンナノチューブを用いたFEDによるテレビは、すでに試作機が発表されている。最大の問題はやはり価格である。PDPのように高価ではないものができるのかどうか。

また、超大画面テレビに限らず、FEDはより小型のディスプレイに利用される可能性もある。携帯電話機やPDA（携帯情報端末）などのディスプレイであり、FEDは明るさの面で今の液晶ディスプレイより優れており、液晶にみられる応答性が少々悪いという問題点もない。さらに消費電力が液晶より少ないというのが、携帯機器に向いている。カー

ボンナノチューブの低コストでの大量生産が進めば、新しいディスプレイとしてFEDが登場してくるだろう。

素子にも配線にもなる

カーボンナノチューブは、トランジスタにも応用できる。先に述べたように半導体の特性を持たせることができるのだが、電子を叩き出すのに必要なエネルギーの大きさであるバンドギャップを、カーボンナノチューブは直径を変えることによって自由に変えられる。しかも、その値はゼロに近いもの、つまり導体である金属から、今の半導体材料であるシリコンと同じくらいギャップが高いものまで、その間のどの値でもとれるのである。このようにバンドギャップを容易に変えられる素材は他にない。

したがって、カーボンナノチューブを用いて、今までにないトランジスタをつくる可能性がある。

そのトランジスタは、すでに試作されている。シリコン基板の上につくったもので、半導体の性質を持たせたナノチューブで二つの電極をつなぎ、近くに置いた第三の電極に電圧を加え、ナノチューブの中を流れる電流をコントロールするのである。今のシリコンのトランジスタと原理はまったく同じであるが、その大きさは、今の超LSIの中にあるトランジスタ1個と比べて、わずか100分の1ほどである。

この試作に用いたカーボンナノチューブには、じつは金属の性質のものと半導体の性質のものが混じっている。今入手できる材料は、各種のものをつくり分けするのがなかなかできない。そこで、このトランジスタをつくった後で、一瞬だけ大電流を流して、金属の部分を焼き切るということを行った。

このように、今はたった一つの素子をつくるにもいろいろと工夫をし、大変な苦労がある。絡み合っているカーボンナノチューブを切断し、配列しなければならない。適当な長さに切って適当な場所に置かねばならない。こうしたナノメートルの大きさのものを組むには、走査型プローブ顕微鏡が必要になる。見ながら組む操作をするのである。

カーボンナノチューブによるトランジスタには、性能についてさまざまな期待がある。きわめてわずかな電力での作動が可能になり、また非常に高速にもなる。そして、1桁も2桁も小型になるのである。

ただし今は、1個のトランジスタをつくるのも大変である。今の超LSIは100万、1000万個ものトラ

ンジスタなどの部品の集積があるのだが、それに近づくには非常に長い年月を必要とするだろう。

バンドギャップを自由に変えられることから、トランジスタの他にもさまざまな素子の可能性がある。金属の性質を持つカーボンナノチューブと半導体のカーボンナノチューブを接合して、電気を一方だけに流すダイオードができる。レーザーを発振する素子としても使えるだろう。

またカーボンナノチューブは、配線にも用いられる。これから素子がどこまでも小さくなると、いかに配線するかが大変な難題になる。今の金属の配線をさらに細くすると、いろいろと困難な問題が生じる。一つは発生する熱の除去が難しくなることであり、一つは流れる電子が金属にしばしばぶつかって、断線する恐れがある。だがカーボンナノチューブは熱伝導性がとても高いので、熱の除去に問題はない。また炭素同士の結合は、金属よりもはるかに強いので、断線することもない。

このように、素子と配線の両方に用いることができるのが、カーボンナノチューブである。

素子ではなく、電気的な素材としての応用にも、さまざまな可能性が言われている。

まず、導電性プラスチックがある。これは白川英樹博士のノーベル賞受賞でよく知られるようになったが、電気を全く通さない性質であるプラスチックに、導電性を持たせようというものである。銅よりも導電性が高いカーボンナノチューブを、プラスチックの中に含有させればいいのである。

同様にして他の素材と組み合わせると、放熱材、電磁波吸収材、帯電防止材などができる。例えば、携帯機器の放熱をするのに、熱伝導性が良いカーボンナノチューブを含んだ素材を用いるのである。

燃料電池自動車にも

電子的な応用の他にも、カーボンナノチューブはさまざまな用途に広がろうとしている。今、研究開発が盛んに行われているのが、燃料電池自動車に向けた水素タンクである。なぜ水素を貯めることができるのか、その仕組みはよくわかっていないのだが、冷やして水素を吸収させて、加熱して放出する。

飯島教授がこの水素タンクの開発に力を注いでいるが、チューブの片方が広がったホーン型のものをつくり出して、成果を上げている。今は重量比で3%ほどの水素を吸蔵させることができるが、その

吸着率を7%ほどに向上させると実用化の可能性が生じてくるという。水素タンクとしては水素吸蔵合金の開発が早くから行われているが、それに比べるとカーボンナノチューブの水素タンクは、格段に小型化、軽量化される。ペットボトルほどの大きさで、燃料電池自動車500km走るタンクをつくるというのが目標である。

この燃料電池自動車は、トヨタとホンダが年内にも市販すると発表した。もっとも今は、燃料電池がきわめて高くて、車1台がおそらく数千万円もするので、わずかな台数をレンタルにするのであり、試験的なものといえる。いつ本格的な実用化に入るかは見通しがなかなか難しいが、世界中の自動車メーカーが力を注いでおり、環境に好ましい車として、いずれは大きく伸びていく。その燃料としては、メタノールやガソリンを解質して水素を得る方法と、水素をそのまま用いる方法がある。長期的には水素燃料になると予想されるが、その場合に水素タンクはとても重要なものになる。

また、燃料電池自体にもカーボンナノチューブが用いられる。ごく最近、超小型の燃料電池が携帯機器の電源用に開発されているが、その電極材料にカーボンナノチューブを用いている。カートリッジにメタノールを詰めて燃料にするのであり、そのカー

トリッジを取り替えればよいのだ。この超小型燃料電池は、2年後には実用化されるであろう。

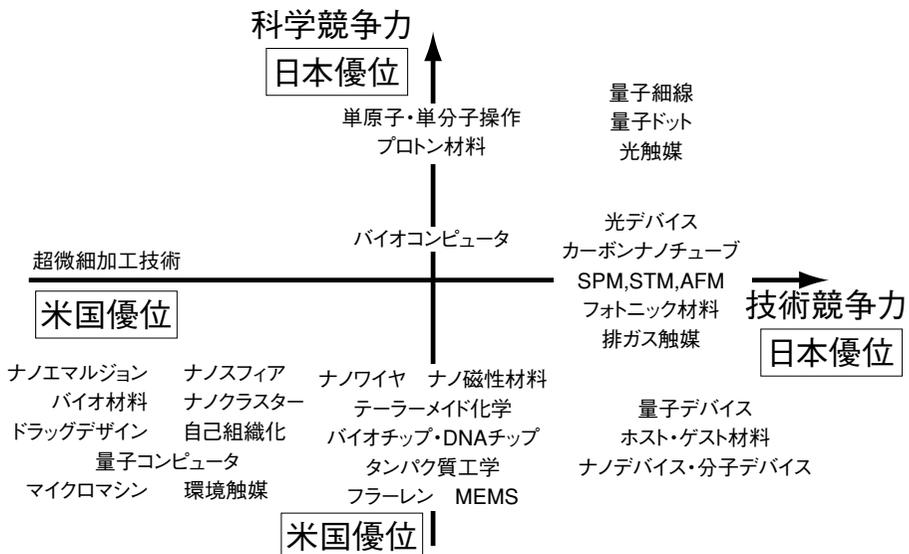
自動車の部品にも、カーボンナノチューブが用いられよう。プラスチックに混ぜた複合材であり、強度が非常に大きく、しかも帯電しないという利点がある。したがって、自動車の燃料回りの部品に用いると、スパークして火災を起こすおそれがなく、理

表2 ナノテクノロジーの日米欧競争力比較

	日本	米国	欧州
ナノ物質の合成 組み立て	△	◎	○
生物学的な研究 と応用	○	◎	◎
ナノ粒子の分散・ コーティング	○	◎	◎
高表面積材料・ 触媒	△	◎	○
ナノデバイス	◎	△	○
ナノ複合材料	◎	○	○

出所 世界技術評価センター資料

図1 ナノテクノロジーの日本と米国の競争力



注 SPM—走査型プローブ顕微鏡
STM—走査型トンネル顕微鏡
AFM—原子間力顕微鏡

MEMS—マイクロ・エレクトロ・メカニカル・システムズ
(出所) 三菱総合研究所 米国ナノテクノロジー分野研究
開発の推進戦略に関する調査

想的である。

車体への応用も考えられないわけではない。車体に用いると強度がとて強く、非常に軽くなる。しかし、最大の問題はコストであり、現在はとて高くなるのであまり現実的ではない。

いずれにしろ、これからカーボンナノチューブを大量生産し、コストを大幅に下げなければならぬ。

このカーボンナノチューブは、どのようにしてつくるのか。それには三つの製造法がある。

第一は、化学的気相成長法と呼ばれるもので、信州大学の遠藤守信教授が開発した。これは炭素を含んでいるメタンやベンゼンなどを水素ガスに混ぜたものと、金属系触媒を水素ガスに混ぜたものを原料にし、約1000度に加熱した反応塔で反応させる方法である。ガスが分解して炭素原子が放たれ、再結合してカーボンナノチューブを合成する。触媒の微粒子に炭素がついて成長していくのである。

この方法の長所は、大量生産に向いていることであり、収率も100%に近いものが得られた例がある。しかし、つくられるカーボンナノチューブはほとんど多層のものであり、欠陥が少なからずあるという問題点がある。

第二はアーク放電法であり、大型の反応器の中に2本の炭素電極を数ミリほど離して設けて、炭素を含んだ原料を入れて放電させると、電極の間に火花が飛び高温のプラズマが生じ、炭素が蒸発する。その蒸発した炭素の一部が、カーボンナノチューブになる。反応器の中にできたすすの中から、ふるいにかけて選り出すと、収率はあまりよくなく30%ほどである。

放電法の長所は、金属触媒を加えることによって、単層も多層もつくれることにある。また、構造的な欠陥はほとんどない。しかし比較的短いものができて、さまざまなサイズのものが無秩序に堆積するという問題点がある。

第三は、レーザー蒸発法である。開発したのは、フラーレン C_{60} の発見者スモーリー教授である。日本でのカーボンナノチューブ発見のニュースが世界に知れわたった頃、スモーリーは、変わった金属分子をつくらうと、強いレーザーで金属を叩く実験をしていた。その装置でカーボンナノチューブをつくれるはずとひらめき、金属の代わりに黒鉛棒を入れレーザーで叩き、高温の炭素蒸気をつくり出してみ

た。その後、触媒をいろいろと変えて、単層ナノチューブを合成することに成功したのである。

この方法では、単層ナノチューブができるのであるが、反応温度を制御することによって径を変えることが可能である。したがって、求める直径のカーボンナノチューブを合成できる利点がある。しかし、生産コストは最も大きい。

このような各種の生産方法があるが、それぞれ大きく進歩しており、生産コストも大幅に下がっていくであろう。

デバイス、複合材料に強い

最後に、ナノテクノロジーにおける日本の実力はどうか見てみよう。

その全体は、前頁表2・図1のように示される。

日本が強いのは、ナノデバイス、つまり電子部品への応用である。その代表である次世代半導体では、このところ超LSIでアメリカ・韓国に劣勢となっていた状況を変えていくことが可能であろう。量子ドットでも日本がリードしている。また、光触媒は日本に生まれた技術である。

また、カーボンナノチューブなどを用いた混合材料でも日本が強い。そのカギとなるのが生産技術の向上であるが、日本はいま大きな力を注いでいる。

バイオテクノロジーへの応用では、日本はあまり強くはない。バイオ自体でアメリカに大きく遅れているので、やむを得ない。また、量子コンピュータなどの革新技術でもアメリカがリードしている。

総じて言えば、近未来の技術に日本は大きな力を注いでいて卓越しており、これから大きな期待をかけることができる。

1990年代に入って、日本の技術、産業はかつての勢いを失っているようであるが、強い力を取り戻していくのに、ナノテクノロジーは大きな基盤となるであろう。