特集概説

NECグループのナノテクノロジーへの取り組み

NECでは快適なIT社会の実現に向けて、高度なIT・ネットワークシステム構成の革新技術としてナノテクノロジー(ナノテク)の開発に80年代後半から取り組んでいます。本特集では、ナノ構造特有の物理現象を革新的なナノデバイスに結びつけるNECの開発戦略、外部連携によるオープンイノベーションの活用、世界最先端のナノ材料，ナノ加工，ナノ評価，ナノシミュレーション技術などの保有基盤技術、代表的なナノデバイス技術を紹介します。

基礎・環境研究所
エグゼクティブエキスパート
馬場 寿夫

1 はじめに

近年、携帯電話やパソコン、インターネットの爆発的な普及により、コミュニケーションや世界中からの情報収集が簡単にできるようになっています。今後はさらに高速なネットワークやモバイル環境での利便性、それと同時に高い情報セキュリティが求められるようになってくると考えられます。これらに対しては、従来以上に高性能で低消費電力、小型で低価格なネットワーク機器やIT・モバイル機器が必要になります。一方、電子機器の高性能化を担ってきた半導体の微細化の限界や高機能化するモバイル機器の電池容量不足の問題が顕在化するようになってきており、従来の技術を革新する新しい材料，デバイス，装置の開発が望まれるようになっています。このような革新技術を創出するためには、新たな物理やサイエンスに根ざした技術開発が必要と考えられ、それを生み出す可能性を多く持っているのが、ナノの世界で現れる現象をうまく操るナノテクノロジー(ナノテク)です。ナノテクは、図1に示すようにITネットワーク分野だけでなく、医療分野，環境・エネルギー分野など色々な分野での課題の解決に利用できると期待されています。なお、ナノテクノロジーという言葉は、2000年の米国のNational Nanotechnology Initiative (NNI) により有名になり、現在ではかなり広い概念として使われていますが、ここでは通常の世界とは違っていてナノメートル(nm)の領域で現れる特有な現象を利用する技術として定義しておきます。

本稿では、将来のネットワーク機器やIT・モバイル機器の飛躍的な高性能化や低電力化、それらを使ったサービスの高度化に繋がるような技術にフォーカスし、NECにおけるナノテクノロジーへの取り組みについて紹介します。以下、NECのナノテク開発戦略、ナノテク基盤技術について述べ、これまでに研究開発

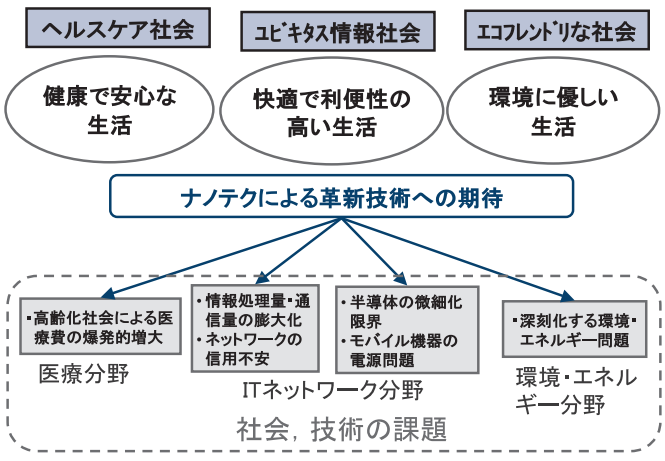

図1　将来の社会におけるナノテクへの期待

してきたデバイス技術について紹介します。

2 ナノテク開発戦略

NECは図2に示すような安心・安全で快適なユビキタス情報社会の実現に向けて、現在よりもさらに安全で高速なネットワークがシームレスに張り巡らされて快適なアクセス環境を提供する次世代ネットワーク(NGN)や、その上での高度なサービスを提供するための様々な技術開発を進めています。そのなかで、ナノテクに対してはITネットワーク・インフラおよびモバイル機器の飛躍的な高速化、低消費電力化、小型化などを実現する革新技術として大きな期待を寄せて研究開発を進めています。ここでは、その開発戦略を簡単に紹介します。

図3にNECにおけるナノテクの開発戦略の概念図を示します。将来のユビキタス、ヘルスケア、エコフレンドリIT社会の実現をめざして、①世界をリードするナノテク基盤技術をベースに、②ナノ構造特有の物理現象をデバイスに結びつける斬新なアイデアを創出し、③従来性能を大幅に凌駕するデバイス、プロダクトを開発することを考えています。

図2 NGNによる将来のライフスタイル革新への期待

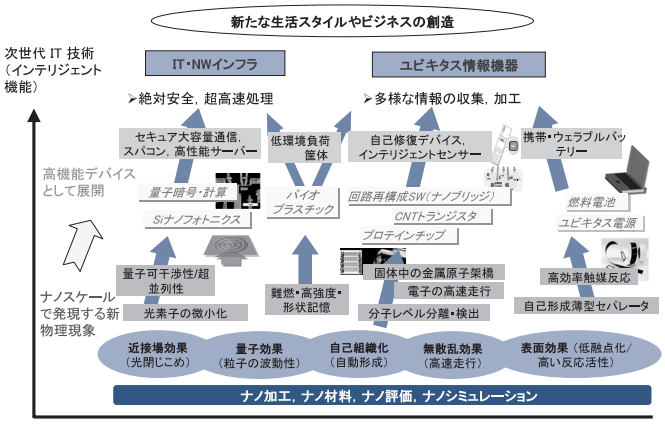

図3 NECにおけるナノテクの開発戦略

NECではナノテクの基盤技術開発に1980年代後半から取り組み、カーボンナノチューブに代表されるナノサイズの材料形成技術、高解像度のレジストを用いた電子ビーム露光技術による10nmレベルのパターン形成技術、高分解能の透過電子顕微鏡技術、走査型トンネル顕微鏡などのナノレベルの評価技術、ナノサイズの物理現象や化学変化を原子や分子のレベルから科学計算により明らかにするコンピュータシミュレーション技術など、世界最先端の強い技術を保有しています。このため、ナノの現象を深く理解するとともにナノの材料や構造を自由に作り出すことができます。

ナノスケールになると、単に物が小さく軽くなるだけではなく、我々が経験している世界とは異なる振る舞い(物理的性質，化学的性質等)が出てきたり、新たな現象が現れたりします。これらのナノ特有の現象は、行き詰まった従来技術の限界を打破できるものとして期待されます。ナノスケールで現れる現象としては、光が閉じこめられる近接場効果，粒子の波の性質が顕著となる量子効果、形を自動的に作る自己組織化，電子が衝突なしに高速走行できる無散乱効果，融点が大きく下がったり高い反応活性を示したりする表面効果などがあります。ナノ評価やナノシミュレーションなどのナノテク基盤技術を用いてこれらの現象を実験や計算から深く理解し、それを新たな材料やデバイスに結びつけるアイデアの創出を行っています。

アイデアの実現に向けては、ナノ材料とナノ加工の基盤技術を利用して実際にデバイスの試作を行い、その動作を実証していきます。たとえば、通常の半導体製造プロセスでは不可能な高性能なカーボンナノチューブ(CNT)トランジスタの試作は、ナノ加工技術とCNT成長技術を組み合わせて実現しています。この試作により、現在のLSIで使われるSi材料を用いたトランジスタより10倍以上高速な動作を実証しています。

一方、ナノテクを利用した新たな材料やデバイスをNECだけで考えて開発していくにはやはり限界があります。特に、広いナノテクの技術分野で新たなシーズを見つけて育成していくことが重要ですが、限られたリソースのなかで行うことは大変難しいことです。このため、ナショナルプロジェクトに積極的に参加するとともに、図4に示すような産学独の連携によるオープンイノベーションの戦略的な活用も積極的に進めています。広範囲な分野で、多様なシーズ研究が遂行されている大学や公的研究機関(独立行政法人)と積極的な連携を図り、自社の研究開発にとって魅力的なものに対しては企業の立場でより実用化に重点を置いた目的指向の研究開発を早急に立ち上げて行こうというもの

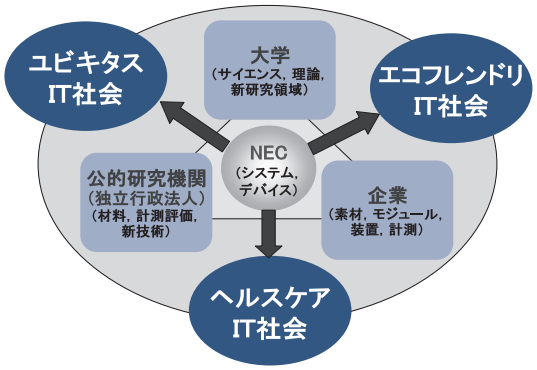

図4　オープンイノベーションの実践

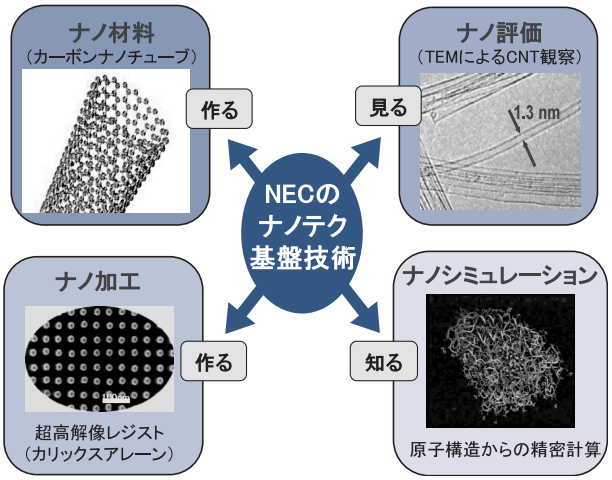

図5　NECのナノテク基盤技術

です。

たとえば、LSI作製後でもその回路を自由に変えられるデバイスとして研究開発を進めているナノブリッジ(Nanobridge™)は、オープンイノベーションに沿った考えで、物質・材料研究機構(NIMS)と共同研究を遂行しています。また、エアロゾルデポジション法を用いた高品質なセラミック薄膜形成においては産業総合研究所(AIST)と共同研究を実施しており、この技術を利用して高性能な光素子や電磁界検出素子の開発をめざしています。

3 ナノテク基盤技術

次にナノテク基盤技術について簡単に紹介します。ナノテク基盤技術としては**図5**に示すように、世界トップレベルのナノ材料、ナノ加工、ナノ評価、ナノシミュレーション技術を保有しています。ナノ材料技術としては、1991年の飯島博士によるカーボンナノチューブの発見に始まるカーボンナノチューブ(CNT)やカーボンナノホーン(CNH)の成長技術があります。また、ナノ粒子の強固な結合をつくるエアロゾルデポジション法によるセラミック薄膜形成技術もこのナノ材料技術として位置付けられます。

ナノ加工としては、20年近くの技術蓄積のある電子ビームによる直接描画露光技術と、NECと(株)トクヤマで開発した8nmのパターン形成が可能なカリックスアレーン・レジストの利用技術があり、これらの技術により10nmレベルの加工が自由に行えるようになっています。

優れたナノ評価として、原子レベルの構造や動きを捉えることができる世界最先端の透過型電子顕微鏡技術を保有しています。直径が数nmでグラファイトシートを丸めた構造のカーボンナノチューブ(CNT)の発見は、まさにこの技術によりなされたものです。また、触媒からCNTが成長していく動的な過程も観測することができ、CNTの成長メカニズムの解明にもつながる重要な技術となっています。

ナノシミュレーションは原子、分子のエネルギー状態からそれらが集まったときの状態を計算する第一原理計算技術や、原子間の電気伝導を計算するシミュレーション技術です。NECでは1990年からSiやCNTなどに関する多くのナノシミュレーション技術を保有しています。これらの計算には膨大な計算リソースが必要となっていますが、NECが製品化しているベクトル型のスーパーコンピュータを利用して大規模で高速な計算ができるようになっています。

このように、世界トップレベルのナノテク基盤技術を保有しており、新規なナノデバイスの研究開発で世界をリードしていくことが可能になっています。

4 ナノデバイス技術

図6にこれまでにNECで開発してきたナノデバイスの例を示し、これらのナノデバイスの動作と応用について概要を紹介します。

カーボンナノチューブ(CNT)中を流れる電子は散乱を受けることなく走行できることが理論的に予測されており、高速動作トランジスタへの応用が期待されています。NECではカーボンナノチューブ・トランジスタを試作し、LSIで使われているSi-MOSFETの10倍の相互コンダクタンス(高速性を示す指標)を実証しています。この素子はどんな基板上にも形成できるため、極微細プロセスを要しなくとも高速な電子回路を安価に作ることが可能と考えられ、LSI応用だけでなく大面積で安価な電子回路が要求されるディスプレイや集積センサなどへの応用が期待

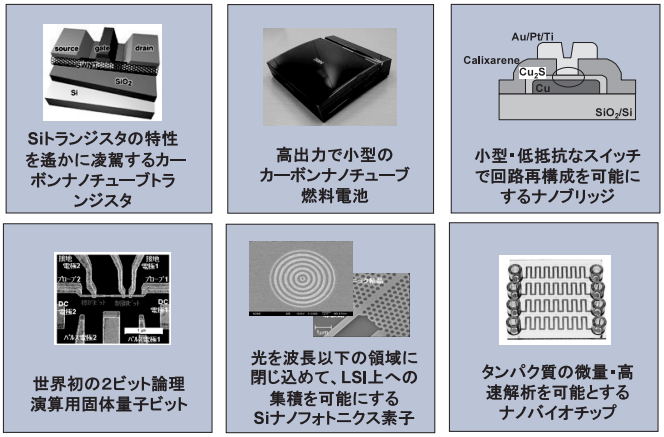

図6　NECで開発してきたナノデバイスの例

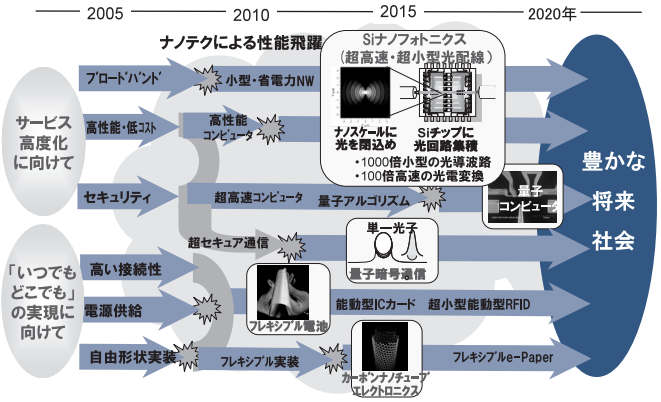

図7　ナノテク材料・デバイスの開発計画

されます。

カーボンナノチューブの一形態であるカーボンナノホーン(CNH)は円錐状の構造が集合したその特異な形状により、ナノサイズの白金触媒を均一に高密度に分散させることが可能であり、携帯用の燃料電池の電極材料として有望です。これまでに、この電極材料を用いた燃料電池を試作し、100mW/cm^{2}の高性能特性を実証するとともに、ノートPCへの搭載もデモしています。

ナノブリッジ素子は固体電解質(Cu_2S)膜中をナノサイズのCuの細い針が伸び縮みすることにより、配線間で電気抵抗の大きな変化を起こすデバイスです。また、電気を切ったときもその状態を保持することができます。このデバイスの基本動作を確認するとともに、LSI上にテスト回路を形成し、不揮発メモリや回路切り替えの基本動作まで確認しています。このデバイスの応用としては回路再構成用の不揮発スイッチが最も魅力のあるものと考えられます。

固体量子ビットは通常のコンピュータでは何年もかかるような複雑な計算を一瞬のうちに計算してしまう量子計算用の基本素子です。NECでは超伝導素子で構成し、固体素子としての量子ビットの動作を初めて実証し、2量子ビットまでその動作を確認しています。さらにビット数を増やすとともに量子計算のアルゴリズムを開発して実用的な技術とすることをめざしています。

Siナノフォトニック素子は光を波長以下の領域に閉じ込めて小型化，低消費電力化を狙ったものです。すでに、Siの細線が光導波路や波長合分波素子として使えることや、NEC独自のプラズモンアンテナを設けた微小なSiナノフォトダイオードで50GHz以上の動作ができることを確認しています。また、高性能・小型・低電力・低コストの通信用光素子としてだけでなく、ボード間やLSIチップ間の光インターコネクト応用、LSI内の光配線応用など広い範囲の応用が考えられています。

ナノバイオチップは蛋白質の同定を目的に開発を進めているものです。長い流路上に多数の細い柱(ピラー)が形成されており、これにより蛋白質の化学的な性質による分離と、質量分析器を用いた測定を効率的に行うことが可能になっています。すでに基本動作は確認しており、次のステップとして臨床場面に適用して課題の抽出や改善を行っていく予定です。

5 まとめ

ここでは、NECのナノテク開発戦略、ナノテク基盤技術について述べ、これまでに研究開発してきたナノデバイス技術について概要を紹介しました。ナノテク開発戦略としては、オープンイノベーションを推進するとともに、①世界をリードするナノテク基盤技術をベースに、②ナノ構造特有の物理現象をデバイスに結びつける斬新なアイデアを創出し、③従来性能を大幅に凌駕するデバイス，プロダクトを開発することを実践しています。基盤技術としては、世界的に注目されるナノ材料，ナノ加工，ナノ評価，ナノシミュレーション技術を保有しています。これらの基盤技術を利用してナノ領域で現れる特異な現象の深い理解とそれを利用する斬新なアイデアの創出を図り、新たな機能を持つナノデバイスを開発しています。

図7に代表的なナノ材料，ナノデバイスの開発線表を示します。いくつかのデバイスについては本特集のなかで詳細に紹介します。NGNのインフラ技術やIT・モバイル機器への革新技術の提供をめざして、これらのナノテク技術，ナノデバイス技術が少しでも早く実用化できるように外部連携を強化して研究開発を進めていきます。