

ナノテクノロジー最前線

Frontiers of Nanotechnology

石内 秀美

伊藤 義康

稲葉 道彦

■ ISHIUCHI Hidemi

■ ITOH Yoshiyasu

■ INABA Michihiko

ナノテクノロジーの進展に伴い、多くの応用が開拓されてきた。東芝は、エネルギー分野では、ナノ構造を持つセラミックスやナノ結晶を用いた発電システム、エレクトロニクス分野では、ナノメートル (nm) サイズの素子を使った半導体集積回路、量子ドットや単一電子デバイスなどのnmサイズの半導体素子などを開発した。また、これに伴いnmサイズの計測技術も進歩している。物理・化学的な計測技術に加えて、DNA (Deoxyribo Nucleic Acid : デオキシリボ核酸) 分子を利用した生化学的手法も開発している。

ナノテクノロジーには、今後のイノベーションの源泉として大きな期待が寄せられている。

A wide variety of applications have been developed as outcomes of the nanotechnology revolution. Examples in the energy engineering field include nanostructure ceramics, power generation systems using nanocrystals, while examples in the electronics field include the development of semiconductor integrated circuits with a feature size in the sub-hundred nm range, and nanosize semiconductor devices such as quantum dots and single-electron transistors, and so on. Measurement techniques are progressing as well. In addition to physical and chemical methods, biochemical methods using DNA molecules as probes have also been developed.

Nanotechnology is expected to become a major driver of innovation in the near future.

ナノテクノロジーとは

ナノテクノロジーとは、ナノメートル (10億分の1メートルのこと、以下、nmと表記) のサイズの物質を制御する技術の総称である。

最近、数十 nm から1 nm 以下のスケールで物質の構造を形成する技術が数多く開発され、現実にもこのスケールの構造を作製して、その性質を実験的に調べることができるようになってきた。原子の大きさは0.1 nm (1オングストローム) 程度であり、ナノテクノロジーが対象とする寸法は、原子数個分から数千個分に相当する。

このような nm サイズの構造を作製する方法は、あらかじめ決められた構造を形成するトップダウン手法と、原子間・分子間力をうまく使って自然に所定の構造を形成するボトムアップ手法に二分される(囲み記事参照)。

ナノテクノロジーにより多様な構造を作り出すことができ、今まで知られていなかった新しい現象が発見され、その

応用分野が広がっている。

ここでは、エネルギー、半導体集積回路、及び医用・環境分野を例に、ナノテクノロジーの最近の発展を概観し、その方向性を述べる。

エネルギーとナノテクノロジー

現在、地球規模で進行している環境問題の発生要因を図1に示す⁽¹⁾。すなわち、地球環境問題の発生原因は、人口

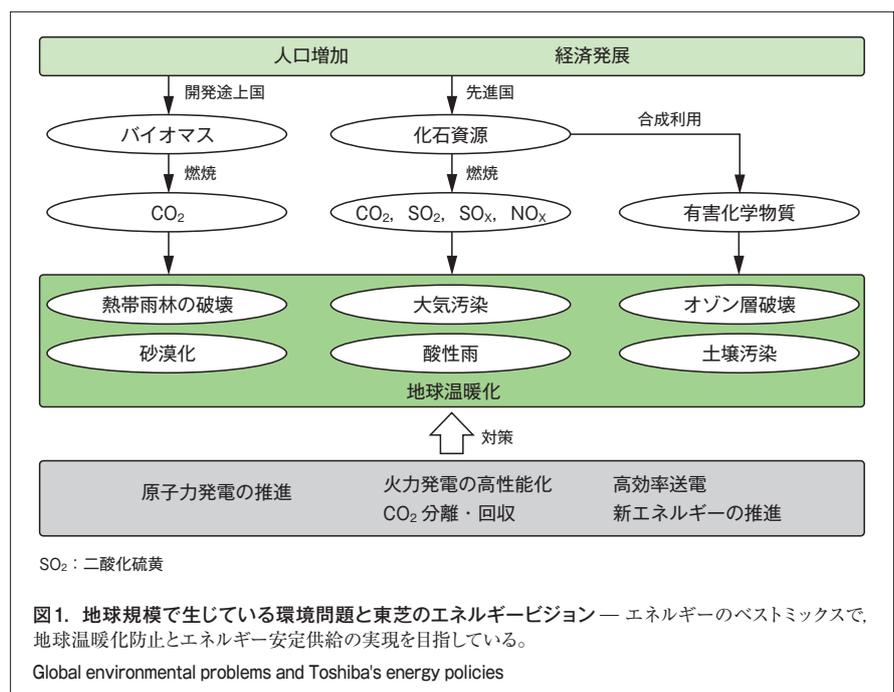


図1. 地球規模で生じている環境問題と東芝のエネルギービジョン — エネルギーのベストミックスで、地球温暖化防止とエネルギー安定供給の実現を目指している。

Global environmental problems and Toshiba's energy policies

トップダウンとボトムアップ

ナノテクノロジーの手法には、一般的に二つの方法があると言われている。一つは、主に表面から材料をnmレベルまで切断と加工をする方式で、これをトップダウン方式と言う。もう一つは、原子や分子をnmサイズで積み上げたり集合させたりする方法で、これをボトムアップ方式と称している。

トップダウン方式では、シリコン(Si)のLSIを中心としたリソグラフィに代表される微細加工技術が挙げられ、既に多くの技術が確立されている。フォトマスクを用いて感光樹脂の露光を行い、このパターンを基に、エッチングにより微細な作製を行い、これを繰り返すことで微小回路を積層する技術である。金属又は半導体、酸化物の膜

の加工に用いられ、32 nm程度までの光によるリソグラフィ^(注1)は可能とされている。

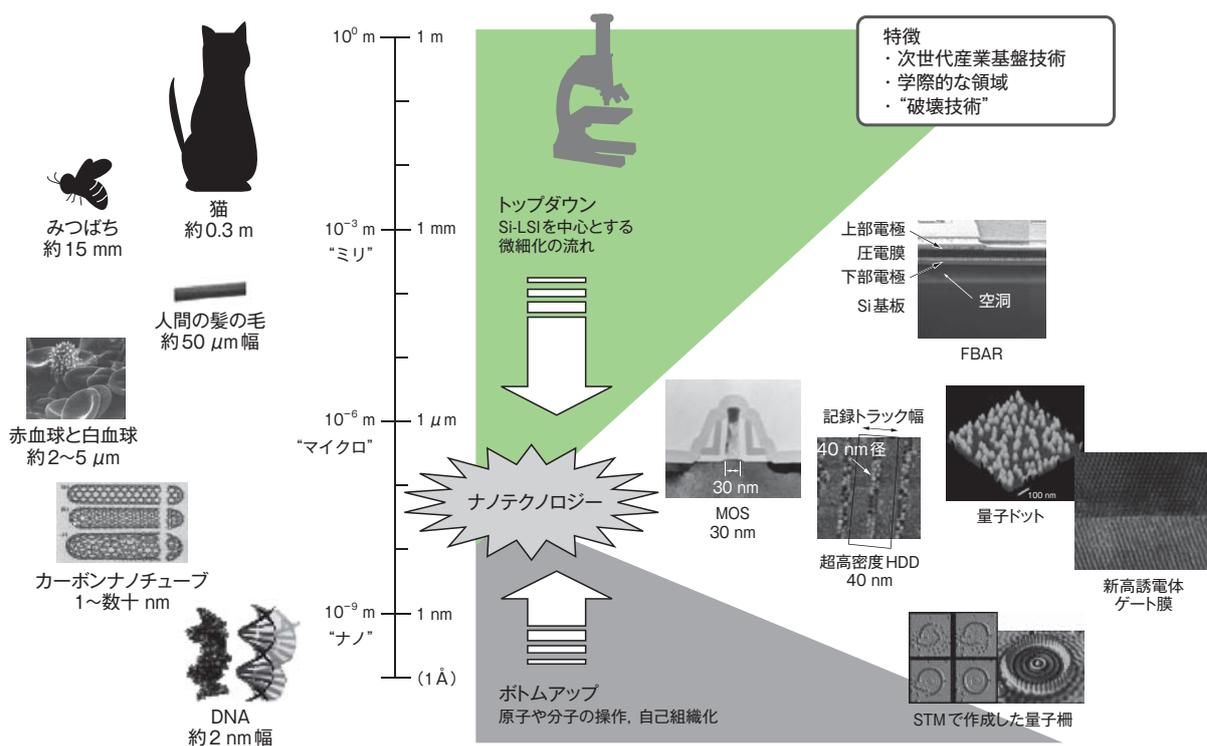
もう一方のボトムアップ方式は、主に有機物に利用される方法で、分子間に働く力を設計し制御することにより、分子が組み上がるものである。自分の力で組織を作り上げることから自己組織化と言われている。遺伝子であるDNAはボトムアップの典型的な分子で、DNAを設計することにより様々なナノ構造が提案されている。また、分子や原子を走査型のプローブ^(注2)を用いて、あたかもピンセットでつまむように表面上に配置する技術も、究極のボトムアップ技術として開発されている。

一方、新しい炭素同位体として、強度や導電性、熱伝導性にも優れたカーボンナノ

チューブや、分子の閉込めなどでもできるフラーレン^(注3)などが注目されている。これらの同位体は、元素を変えることにより新たな機能を発現させてきた従来の研究方法を根本的に変化させる可能性もある。

ナノテクノロジーの分野では、これらの方法や新しい物質を組み合わせることにより、今後も多くの新機能発見の可能性がある。また、既に数々の応用が提案されている。

ナノテクノロジーが破壊的技術として工業分野で開花し、一方で環境や健康に対しても正しく働くためには、物理学、化学、生物学、電子工学、精密機械工学、環境工学、エネルギー工学、医学などの研究者が英知を結集し、学際的な技術分野としてその課題に取り組むことが必要である。



MOS：金属酸化膜半導体 FBAR：Film Bulk Acoustic Resonator HDD：ハードディスク装置 STM：走査型トンネル顕微鏡

*平成13年3月22日 第3回総合科学技術会議 月例科学技術報告“ナノテクノロジー・材料分野の最近の動向”を元に作成⁽²⁾。

“トップダウン”と“ボトムアップ”— ナノテクノロジーの分野では、トップダウンは決められた形状に材料を加工する技術で、通常、表面(トップ)から下(ボトム)に向かって加工を進める。半導体集積回路の形成に使われるフォトリソグラフィは、その典型例である。また、ボトムアップは分子間力などを利用して自然に構造を形成する技術で、自己組織化はその典型例である。

(注1) マスクに描かれた回路パターンをウェーハ上に露光転写する工程又は技術。

(注2) 温度や、圧力、電磁場、原子の種類などを測定するために使われる探針、原子、及び粒子線などの総称。この箇所では、探針を指す。

(注3) 炭素原子から成る球状の集合体。

増加と経済発展に伴うエネルギー消費の増大が大きな影響を及ぼしている。開発途上国ではバイオマス^(注4)の異常消費、また、先進国では化石資源の異常消費が進むことで、窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、炭酸ガス(CO₂)、更には有害化学物質などを生み出し、様々な地球環境問題を引き起こしている。

このような状況を踏まえ、東芝グループは、地球と調和した人類の豊かな生活の実現に向けて“環境ビジョン2050”を策定した⁽³⁾。東芝グループは“地球内企業”との認識の下、“より良い地球環境の実現”と“エネルギーの安定供給”に向け先導的な役割を果たすため、様々な取組みを開始している。特に、エネルギー供給分野では、高信頼性原子力発電の推進と、火力発電の高性能化及び炭酸ガス分離・回収技術の開発を

中心に、更に高効率な電力流通の実現や新エネルギーの実用化を推進し、エネルギーのベストミックス^(注5)を目指している。

エネルギーのベストミックスを実現するためには絶えざるイノベーションが必須で、**図2**に示すように、ナノテクノロジーはこれを支える基盤技術として大きな役割を担っている。ナノテクノロジーは環境・エネルギー分野にも幅広く応用されている。

巨大システムである原子力発電や火力発電では、高性能化とともに高い安全性が要求されている。そのため、材料構造をnmオーダーで制御することにより優れた高温強度や高耐食性を実現したナノ材料は、高温・過酷環境下で運転される機器の構造材料として不可欠である。例えば、高温ガス炉温度での原子力

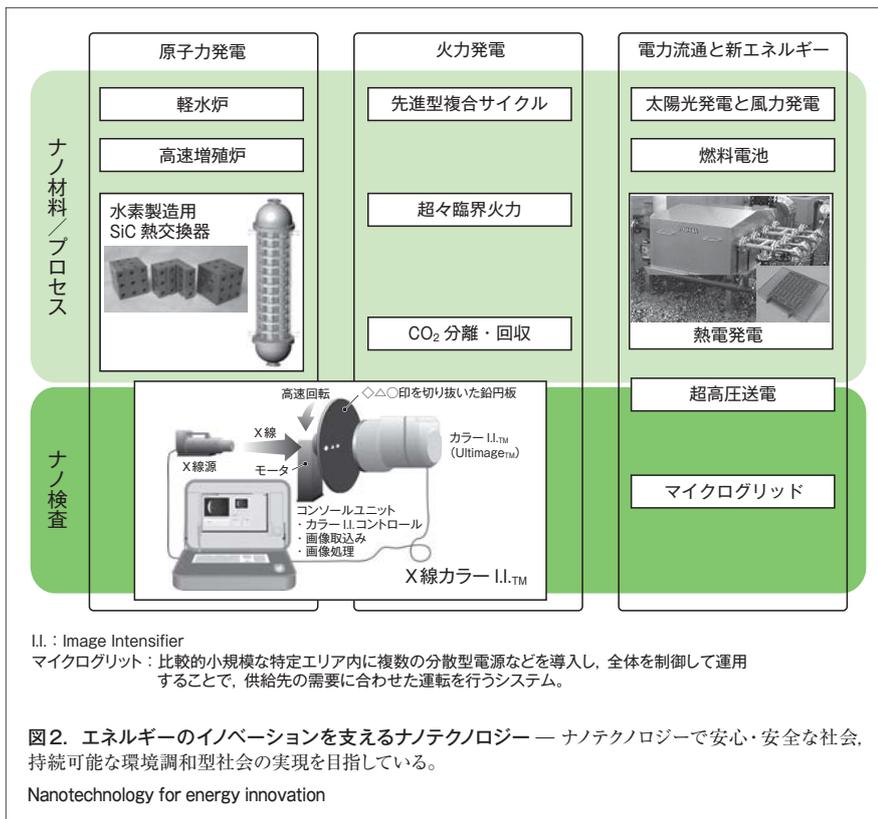
水素製造には高温耐食性に優れたセラミックス熱交換器が必要である。東芝は、ナノ構造を持つ高強度反応焼結炭化ケイ素(SiC)を開発する⁽⁴⁾とともに、優れた接合強度と熱安定性を持つナノ接合技術を開発している。

また、発電プラントの高い信頼性を保証し、安定運転維持と稼働率向上を目指すためには、高精度の非破壊検査技術は必須である。当社は、高感度と高速応答を可能にしたX線カラーシンチレータ^{(5)(注6)}によるナノ検査技術を開発し、原子力発電をはじめ様々な分野への適用拡大を進めている。

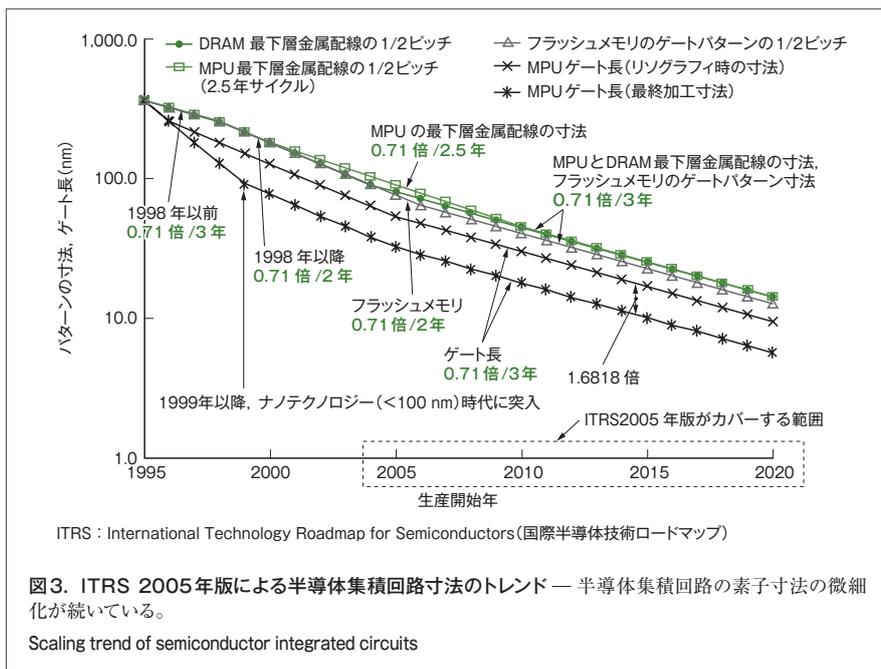
一方、新エネルギーである燃料電池システムや熱電発電システムでは、高効率化と経済性向上、並びに高信頼性が要求されている。一例として当社は、モバイル機器用の小型電源として、メタノールを直接酸化させて発電するダイレクトメタノール燃料電池(DMFC)において、ナノオーダーの触媒層を電解質表面に形成することにより高効率化を進めている。また、回収が困難な150℃以下の排熱を直接電気エネルギーへ変換できる熱電発電システム⁽⁶⁾に関して、熱電素子のナノ結晶構造制御により高い変換効率を実現するとともに、温泉熱電発電システムを開発して長期実証試験を進めている。

半導体集積回路の微細化と ナノテクノロジー

過去30年にわたり、半導体集積回路の素子寸法の微細化が続いている。**図3**に示すように2000年ごろには、MPU(マイクロプロセッサ)に使われるトランジスタのゲートの寸法は100nm以下となり、名実ともにナノテクノロジーの領域に入った⁽⁷⁾。ナノテクノロジーのエレクトロニクスへの応用は、ナノエレクトロニクスとも呼ばれている。素子寸法は今後も3年ごとに0.7倍のペースで微細化を続けると予測されていて、ゲート寸法は2015年には10nmとなり、2020年



(注4) 一定量集積した生物体 (biomass) を意味し、エネルギー源として利用できる動植物から生まれた有機性の資源。
 (注5) 火力発電、水力発電、原子力発電、及び新エネルギーなどのそれぞれの長所を生かし、バランスよく組み合わせで発電すること。
 (注6) X線やγ(ガンマ)線の線量に応じて、赤(R)、緑(G)、青(B)の発光割合が変わるシート状のカラー蛍光板。



ごろには、現在の方式のトランジスタは、その微細化限界を迎えることになる。

nm領域のパターン形成が現実の技術として使えることになったことで、量子力学的な効果を考察することが素子設計においても重要となってきた。より積極的に量子効果を使うことも提案されており、単一電子トランジスタや量子ドットによるメモリなど応用に向けた研究が進んでいる。現在の方式のトランジスタ微細化が限界を迎えても、新たな原理に基づくこれらの素子では、いっそうの微細化を実現できる可能性を秘めている。そのためには、新しい材料や新しい素子構造の探索が重要で、これらの研究開発が進んでいる。

半導体加工技術は、いわゆる“トップダウン手法”で形成されてきた。今後は、自己組織化をはじめとする“ボトムアップ手法”による加工技術を併用することで、より効率的に微細パターンを形成することになる。

このような新規技術を取り込んでいくことで、半導体集積回路の微細化及び高密度化は今後とも続き、高度情報化社会の発展に貢献していくことが期待されている。

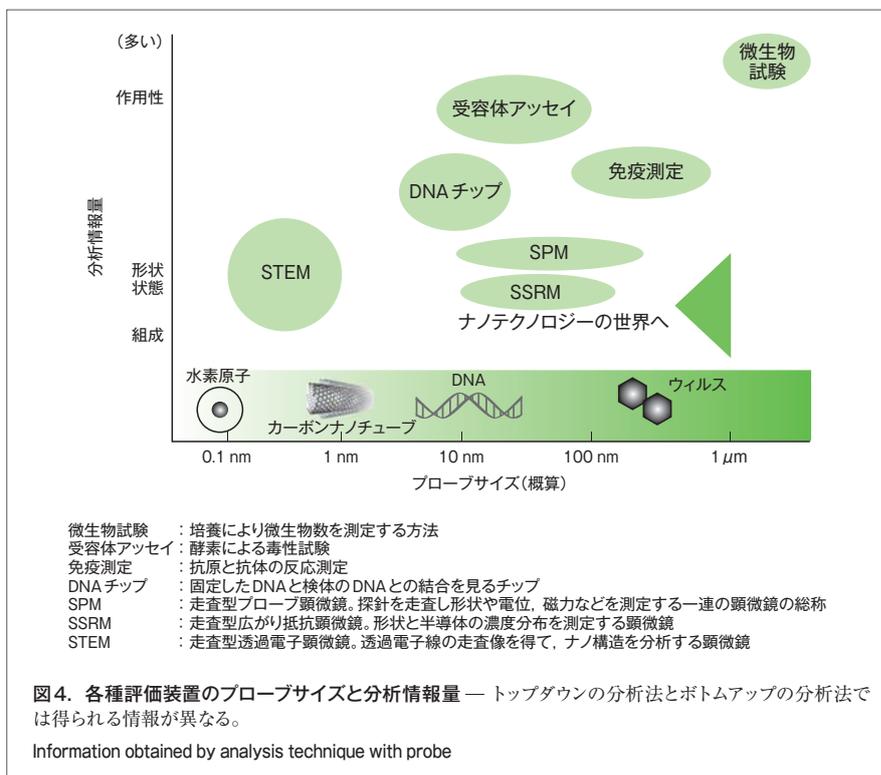
医用・環境分野でのナノ計測技術

ナノテクノロジーは、バイオ・医療分野や環境分野にも応用が期待されている。医用分野では、患部に直接投薬ができるドラッグデリバリーシステムや長期の生体親和性を持つナノ組織材、環

境分野ではガスや水、土壌の汚染除去を行う光触媒及び分離膜などが、ナノ材料の応用として考えられている。経済産業省が取りまとめた「技術戦略マップ2007」⁽⁸⁾も参考にされたい。

これまで、材料やデバイスでは、ナノテクノロジーが積極的に実用化されているが、医用・環境分野ではやや進展が異なると思われる。つまり、生体への直接の影響や環境中への拡散に関して、十分な安全性や適合性が確認されるまでは、治療や大規模な環境修復には使われず、計測技術として比較的早くその長が発揮されると予測される。

nmサイズの計測では、半導体のプロセス技術とともに1990年代に物理又は化学計測が発展してきた。主に走査電子線や、SPring-8に代表される放射光などの電磁波、高速イオンビームなどの一次プローブにより対象物に相互作用を起こさせ、二次的に発生する粒子を測定することで、物質の μm からnmサイズの組成、化学状態、構造などを調べることができる。多くが非接触で、真空中での測定も可能なため、固体を相手に



しているところが特徴である⁽⁹⁾。

一方、これらの物理的なプローブと異なり、生物的なプローブは、溶液や有機物の検体に直接接触させ、作用性を中心とした情報を得ることに長らく主眼が置かれてきた。図4は、プローブ径と得られる情報の種類を、物理的手法と生物的手法のいくつかを例に挙げて簡単に比較したものである。この図から、nmサイズの代表格であるDNAをプローブとして自在に扱えるようになると、遺伝子に直接作用することにより遺伝子情報を分析するだけでなく、遺伝子と結合しやすい有害物質を選択的に分析することができる。また、発光遺伝子などを結合させたりするなどして検出も簡単に行うことができる。これらのプローブは、先の高価な半導体物理分析と異なり、コピーが作りやすく、二次元のアレイ状にプローブを並べることで、短時間に分析を行うだけでなく、有害性や病気との関連性などの作用性までも調べることができる。DNAをプローブとして使う技術は、ボトムアップの分析とも言え、今後とも、医用・環境分野での利用が期待される。また、それと同時に、DNAを用いたボトムアップの加工技術も多く利用されてくると考えられる。

ナノテクノロジーへの期待とイノベーション

ナノテクノロジーによって人類は、原子や分子を操作する新たな技術を手に入れた。この領域では、量子力学が本質的に重要な役割を果たす。この分野

の探索は始まったばかりで、これから開拓すべきフロンティアが広がっている。nmの大きさの材料を加工し、構造を形成する技術が発展することで、新しい科学的知見が得られ、それを技術として応用することにより、まったく新しい製品を生み出すという好循環が期待される。

ナノテクノロジーといっても、その内容は多様で、大きな広がりがある。物理、化学、生物学をはじめとする基礎科学のバックグラウンドを持ち、エレクトロニクスやエネルギーから医学、薬学に至る多くの分野への応用が期待される。

ナノテクノロジーは、今後のイノベーションの主たる源流の一つである。この特集では、当社におけるナノテクノロジーの研究開発の一端を紹介する。

文 献

- (1) 伊藤義康. パーソナル分散型エネルギーシステム. 東京, 養賢堂, 2005, 197p.
- (2) 総合科学技術会議. “ナノテクノロジー・材料分野の最近の動向”. 平成13年3月2日第3回総合科学技術会議 月例科学技術報告. <<http://www8.cao.go.jp/cstp/siryo/haihu03/siryo4.pdf>>, (参照2008-01-10).
- (3) 東芝ホームページ. “東芝グループ環境ビジョン2050”. <http://www.toshiba.co.jp/about/press/2007_11/pr_j0602.htm>, (参照2007-11-06).
- (4) Suyama, S., et al. "Development of high-strength reaction-sintered silicon carbide. Diamond and Related Materials. 12, 3-7, 2003, p.1201 - 1204.
- (5) Nittoh, K., et al. Development of multi-scintillator based X-ray image intensifier. Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res., section A. 535, 2004, p.686 - 691.
- (6) Nakatani, Y., et al. Mechanical aspect of structural optimization in a Bi-Te thermoelectric modules for power generation. Mater. Rec. Soc. Sympo. Proc. 842, 2005, p.S4.7.1 - S4.7.6.

- (7) ITRS International Roadmap Committee編. “ITRS 2005 Edition”. <<http://www.itrs.net/>>, (参照2007-12-10).
- (8) 新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ. “技術戦略マップ2007”. <http://www.nedo.go.jp/roadmap/2007/data/nano_1.pdf>, (参照2007-11-29).
- (9) 味岡恒夫, 稲葉道彦 編集. ULSI製造のための分析ハンドブック. 東京, サイベック, 1994, 427p.



石内 秀美
ISHIUCHI Hidemi

研究開発センター次長。半導体の研究・開発に従事。応用物理学会, 日本物理学会, IEEE 会員。Corporate Research & Development Center



伊藤 義康
ITOH Yoshiyasu, D.Eng.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター首席技監, 工博。エネルギー機器全般の材料開発に従事。日本機械学会フェロー, 日本セラミックス協会会員。Power and Industrial Systems Research & Development Center



稲葉 道彦
INABA Michihiko, D.Eng.

研究開発センター技監, 工博。環境技術, 材料応用・評価技術, 及び研究・開発の品質向上の企画・推進に従事。日本金属学会, 廃棄物学会会員。Corporate Research & Development Center