

科学技術動向

2004

1

No.34

科学技術トピックス

▶ ライフサイエンス分野

①変異型 APC たんぱく質は大腸がん細胞の染色体不安定化を引き起こしがん化を促進する

▶ 環境分野

①最近の可視光線応答型光触媒の開発状況

▶ ナノテク・材料分野

①新しい有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質

▶ 製造技術分野

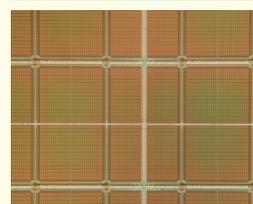
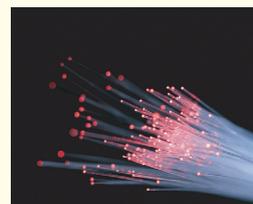
①地域産業発展を目指す、大学と企業との間の包括的な連携

特集 1 米国国立衛生研究所 (NIH) の生物医学研究推進に向けた戦略 (NIH ロードマップ)

特集 2 光ディスク産業の最新動向
— 日本企業の優位性と
中・米連携標準化の新しい動き —

特集 3 発電用ガスタービン高効率化に向けた耐熱材料の開発動向

特集 4 米国「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」における注目点



科学技術トピックス

ライフサイエンス分野

5

①変異型 APC たんぱく質は大腸がん細胞の染色体不安定化を引き起こしがん化を促進する

大腸がんでは、がん抑制遺伝子といわれる APC 遺伝子の変異以外に、高い頻度で染色体の構造異常（染色体不安定化）が生じていることが観察される。しかし、両者の関連性はよく分かっていなかった。カリフォルニア大学の研究者らは、大腸がん細胞の分裂期の様子を観察し、染色体不安定化が生じているがん細胞では、細胞の核分裂の際に形成される微小管の末端に異常があることを報告した（J.Cell Biol., 163:949-961, 2003）。微小管の末端に、APC たんぱく質の一部が欠失した変異型 APC たんぱく質が集積し、これが微小管異常を引き起こしていると考えられる。こうした示唆から、将来的に、変異型 APC たんぱく質は大腸がん治療薬のターゲットの1つになる可能性がある。

環境分野

6

①最近の可視光線応答型光触媒の開発状況

代表的な光触媒である酸化チタンの適用範囲を飛躍的に広げるため、可視光や室内の微弱光で励起させる可視光応答型光触媒の研究が盛んに行なわれている。最近こうした研究で2つの顕著な成果があった。1つは住友化学が開発した触媒で、市販の酸化チタン触媒では全く働かない透明アクリル板を透過させた蛍光灯照射下で、高い光触媒活性を示した。また、産業技術総合研究所は、可視光により水を水素と酸素に完全分解する光触媒の開発に世界で初めて成功した。無尽蔵の水と太陽光を用いて水素燃料を製造する「夢の技術」への実用化への第一歩であり、今後、エネルギー変換効率の向上を目指した取り組みが期待される。

ナノテク・材料分野

6

①新しい有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質

2003年11月に開催された第19回ゼオライト研究発表会において、新しい有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質の合成に関する発表が相次いだ。(株)豊田中央研究所の稲垣伸二氏は、従来の一次元細孔構造に対し三次元の細孔構造を有するメソポーラスベンゼンシリカを、東工大堂免一成教授らは有機基が細孔表面に選択的に導入されたと考えられる有機・無機ハイブリッドメソポーラスシリカを、産業技術総合研究所の木村辰雄氏は、有機基を導入したフォスホン酸アルミニウムメソポーラス物質をそれぞれ合成したと発表した。これらの研究成果は、有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質の可能性を広げるものと考えられ、今後の進展が期待される。

①地域産業発展を目指す、大学と企業との間の包括的な連携

2003年11月28日、広島大学とエルピーダメモリ株式会社は、先端半導体技術と環境保全技術の開発のため、包括的研究協力を進めていくことで合意に達し、覚書を取り交わした。半導体研究に歴史をもつ広島大学と、国内で唯一のDRAM専門メーカーであるエルピーダメモリ株式会社は、目標とする研究分野が一致するのみならず、地理的にも産学連携を進める好条件が揃っている。地域産業の健全な発展と科学技術振興への貢献を両立させうる新しい産学連携の形として注目される。

特集-1

**米国国立衛生研究所 (NIH) の生物医学
研究推進に向けた戦略 (NIH ロードマップ)**

米国国立衛生研究所 (National Institutes of Health; NIH) は、米国厚生省 (Department of Health and Human Services) 管轄下の1機関である。その研究開発予算は、1999年から2003年までの5年間に NIH 予算倍増キャンペーンが打ち出され、大幅な上昇を果たした結果、2004年度予算は、271億ドルである。

このような中、2004年度の開始に向けて2003年9月30日に、「21世紀における医学研究のロードマップ (NIH ロードマップ)」が公表された。NIH ロードマップ作成に至った背景には、予算倍増キャンペーン中に得たポテンシャルを引き続き維持していきたいという意向と、NIH 所長の交代で、新しい方針を打ち出す必要性が生じたことがある。

NIH ロードマップは、数段階の専門家の会合を経て作成された。その結果、NIH が所全体として横断的になすべき3つの大きな主要課題 (テーマ) とその下に28の課題が選ばれた。

このロードマップの課題は、2004年度もしくは2005年度に必要性に応じて開始される。予算や計画の管理は NIH として集中して行い、各課題の実施は、担当するグループが責任を持って行うという方式をとる。2004年度は1.3億ドル、今後5年間で21億ドルを予定している。

この「NIH ロードマップ」は、ロードマップと言うにふさわしい明確なマイルストーンが示されている項目は少なく、今後の方向性の提示という性格が強い。基礎研究ではポストゲノム研究とそのためのツール開発、学際領域の研究が重要課題とされているが、NIH の使命を意識して、何よりも臨床研究の推進を重要視していると言える。2005年度の大統領予算案において、どのような項目が重点化されるか、その後の議会でどのように修正され合意されていくかなどを今後も注目していきたい。

特集-2

光ディスク産業の最新動向

— 12

— 日本企業の優位性と中・米連携標準化の新しい動き —

現在、世界中の消費者に広く普及している CD や DVD などの光ディスクの原理はオランダで発明された。しかし、量産化技術、標準化、ビジネスの全方位で日本の企業がリードしてきており、光ディスク産業で圧倒的な勝ち戦を続けてきた。ところがここ数年間、韓国や台湾のメーカーとの合弁による協力体制が必要となっているとともに、EVD (Enhanced Versatile Disk) という中・米連合からの標準化仕様の提案にも遭遇している。これは、日本企業へのライセンスの支払い料軽減を意図した市場獲得戦略の1つと受け止めることができる。

本特集では、このような事態に遭遇した光ディスク産業の特長を、①技術、②ビジネス、③標準化、そして、④特許ポジションの観点から、日本の持続的な優位性がなぜ可能であったのかを解明し、今後の日本の方策を取り違えれば半導体や液晶で発生したマーケットシェアの大変動が、光ディスクの分野でも起こりかねないことを伝える。

このため、まず日本の特許的な優位性を標準化仕様とリンクさせた形で強化していくこと、すなわち、研究課題をより基本的なテーマに求め、特許の数だけでなく質においても高いポジションを目指し、標準仕様として採用される程の水準に高めて行く必要がある。さらに、中長期的観点からみた施策として、我が国においても自由闊達で創造的な研究者のグループが活躍し、オランダにおける光ディスクの発明のような科学技術の飛躍的進歩の発生を促すような研究の場の充実が今後も一層求められる。

特集-3

発電用ガスタービン高効率化に向けた耐熱材料の開発動向

— 22

地球温暖化対策の一環として現実的な CO₂ 削減策としては、CO₂ 排出源の主要構成要素を占める火力発電の効率を向上させ、効率の低い石炭火力発電を超高効率 LNG コンバインド発電に更新していくことが有効である。超高効率 LNG コンバインド発電では、ガスタービンの入口ガス温度を 1,700℃ に高温化することが計画されているが、そのためにはすぐれた超耐熱材料およびタービンシステム技術の開発が必要となる。

超高温ガスタービン実現には超耐熱材料開発が不可欠であり、Ni 基超合金を始めとする各種耐熱材料の開発が進められている。超耐熱材料はガスタービンなどの先進熱機関の熱効率を大きく左右するキーマテリアルであり、その開発は省エネルギー・省資源の観点から、環境・エネルギー・材料の分野横断的に重要なテーマであり、我が国の技術力の強化を通じた国際競争力の強化が望まれる。

高効率ガスタービンや超耐熱材料の開発では従来から民間企業が果たしてきた役割が大きい。産学官連携が謳われる中で官の役割としては、研究開発の協力体制と役割分担を効果的に機能させるための環境作りとして、学協会等を利用した異分野技術交流の枠組み構築や調整機能への寄与が期待される。また材料評価やシステム要素技術に関してデータベース構築等の技術基盤整備も進める必要がある。開発された超耐熱材料やタービンシステム技術が事業として自立できるよう長期的展望に立った継続的な支援が必要である。

経済活性化の担い手である製造業の国際競争力強化・維持のため、環境負荷最小化のための材料開発を継続して推進することが期待されるが、そのためには民間企業が積極的に省エネルギー・省資源対応の材料・製造技術の開発・利用を行える様なインセンティブを与えることが今後の検討課題である。

米国「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」 における注目点

第108回米国議会上院および下院を通過した21世紀ナノテクノロジー研究開発法案(21st Century Nanotechnology Research and Development Act) (S.189)は、2003年12月3日、ブッシュ米大統領が署名したことで正式立法に至った。

本法は、主に、ナノテクノロジー研究開発への国家的取り組みを国家ナノテクノロジー・プログラムとして具体的に定め、調整事務局や諮問委員会の役割、3年毎の外部評価、歳出予算等を明示したものである。プログラムの最終的な目標は、「ナノテクノロジーの発展によって全米国人の生活水準が向上する」ことにある。したがって、具体的目標および優先課題設定で基準となるのは、「ナノテクノロジーを幅広く実用化するという国家的必要性」である。各論には、ナノスケールの制御および操作への基礎科学から、新興企業を含む民間への普及および実用化を加速し、米国の生産性および産業競争力を向上させることが示されている。また、ナノテクノロジーの研究や教育活動を進めることにより、学際的研究の“風土”が生み出されるように仕向けられている。

本法の特徴は、世相を反映して、社会問題、倫理問題、環境問題に対処する活動を可能な限り取り入れることを明記したことにある。これらナノテクノロジーの負の側面については、ここに対処法が示されているわけではないが、専門の研究プログラムの設定や継続的な一般討論会を通して、米国の考え方を定めていくプロセスが記されている。これを反映して、すでに米国各地では、ナノテクノロジーの倫理問題等に関して話し合いが盛んになってきている。

ナノテクノロジーという研究分野をどう扱っていくかに関して、法を制定した国は米国が初めてであり、本法は各国の今後の方針にも影響を与えられよう。

科学技術 トピックス

以下は科学技術専門家ネットワークにおける専門調査員の投稿（1月号は2003年11月29日より2003年12月19日まで）を中心に「科学技術トピックス」としてまとめたものです。センターにおいて、関連する複数の投稿をまとめ、また必要な情報を付加する等独自に編集するため、原則として投稿者の氏名は掲載いたしません。ただし、投稿をそのまま掲載する場合は、投稿者のご了解を得て、記名により掲載しています。

ライフサイエンス分野

①変異型 APC たんぱく質は大腸がん細胞の染色体不安定化を引き起こしがん化を促進する

大腸がん細胞では APC 遺伝子の変異が高頻度に観察される。また、家族性大腸ポリポーシス (FAP) ①の患者は APC 遺伝子に変異をもっており、多くの場合、大腸がんを発病する。そのため、APC 遺伝子はがん抑制遺伝子であると考えられているが、その詳細な機能はまだよくわかっていない。

大腸がんには、APC 遺伝子の変異以外に、高い頻度で染色体の構造異常（染色体不安定化）が生じていることが観察される。しかし、がん化における APC 遺伝子や染色体不安定化の関連性はよく

分かっていなかった。カリフォルニア大学の研究者らは、大腸がん細胞の分裂期の様子を観察し、染色体不安定化が生じているがん細胞では微小管②に異常があり、微小管のプラス末端がキネトコア③にうまく結合できていないことを報告した (J.Cell Biol., 163:949-961, 2003)。

細胞分裂期における染色体の分配が正常に起こるためには、微小管のプラス端がキネトコアや細胞表層部にきちんと結合できることが必須である。そのため、がん細胞では染色体は細胞内の中央部にうまく配列できなくなり、その結果、染色体の不安定化を引き起こしたと考えられた。これらの染色体不安定化を生じているがん細胞では、APC たんぱく質の一部が欠失していた。しかもこの変異型

APC たんぱく質は微小管のプラス末端に集積しており、これが微小管異常を積極的に引き起こしているのではないかと考えらる。実際、大腸がん細胞で起こっているのと同様の変異体型 APC たんぱく質を他の細胞中で発現させると、微小管がうまく伸びることができず、染色体の異常が観察された。これらの実験結果から、大腸がん細胞で見られる変異型 APC たんぱく質は、微小管の正常な動態を妨げ、染色体不安定化を引き起こして細胞のがん化を誘導している可能性が示唆された。

従って、変異型 APC たんぱく質は、将来的に大腸がん治療薬のターゲットのひとつとして考えられるかもしれない。

用語説明

①家族性大腸ポリポーシス (FAP)

大腸に多数の腺腫性ポリープが存在し、家族性に発生する疾患。常染色体性優性遺伝。

②微小管

細胞の核分裂の際に形成される紡錘糸などを構成し束状構造をと

り、染色体の移動などの運動をつかさどっている。

③キネトコア (動原体)

分裂期の染色体中に形成される直径 0.3 ~ 0.8 μm の構造。分裂極から伸びた微小管がこの部分と結合する。

環境分野

①最近の可視光線応答型光触媒の開発状況

現在光触媒としてよく用いられている二酸化チタン (TiO_2) は、消臭、抗菌、防汚、防曇の4つの機能について実用化され、効率の向上を目指して研究が続けられている。しかし、通常のアナターゼ型酸化チタンのバンドギャップは3.2eVであり、波長400nm以下の紫外光だけしか吸収しないため、太陽光や室内光の利用率が数%以下と低い。酸化チタン触媒が可視光や室内の微弱光によって励起できるようにすれば、効率の向上が期待でき、取り扱いも容易になり、この触媒の適用範囲は飛躍的に広がるため、可視光応答型光触媒の研究が各社で盛んになっている。

住友化学が開発した光触媒は、チタン化合物に添加物を加えて水酸化チタンを析出させ、この水酸化チタンを焼成することにより調

製されたものであり、添加物が可視光型酸化チタン光触媒を製造する上で重要なファクターとなる。この触媒の結晶型はアナターゼ構造で黄色に着色しており、可視光領域の中で青色の光を多く吸収する。この触媒の可視光照射下でのアセトアルデヒド分解活性評価、触媒を分散させた塗料タイプのコーティング剤によるメチレンブルー脱色テスト、抗菌テスト、防黴テストにおいても可視光照射下で良好な結果が得られた。

一方、産業技術総合研究所（茨城県つくば市）は、可視光を使って水を水素と酸素に完全分解できる光触媒の開発に世界で初めて成功した、と発表した。無尽蔵の水と太陽光を用いて、燃やすと水に戻るクリーンな水素燃料を製造する「夢の技術」実用化への第一歩になる。開発した光触媒はニッケルを混ぜた無機酸化物半導体（インジウムタングステン系化合物）の微粉末の一部を金属のニッケル

に置き換えた構造である。この新しい光触媒の粉末を水とともにガラス容器に入れて混ぜ、外から可視光を当てると水が分解し、光触媒の粒子の表面から水素と酸素が2対1の割合で生成する。光で活性化した粒子にプラスとマイナスの電荷を持つ部分ができ、水の分子を分解する。可視光より波長が短い紫外線ではすでに水を完全分解可能であったが、紫外線は太陽光に約3%しか含まれておらず、効率が悪かった。しかしながら、今回開発された光触媒でも照射した可視光のエネルギーのうち水素製造に結びつく割合はまだ低く、触媒0.5グラムを使って1時間当たりわずか213mLの水素をつくった程度の段階である。実用化には触媒構造の改良や触媒の粒を小さくして反応面積を広げ、エネルギー変換効率を100倍以上に引き上げる必要があるが、環境とエネルギーに対応した触媒として今後の研究開発が期待される。

ナノテク・材料分野

①新しい有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質

直径が2～50ナノメートルの均一なメソ細孔を有するメソポーラスシリカが1990年に合成されて以来、種々のメソポーラス材料について、従来のマイクロ細孔（直径が0.3～2ナノメートル）を有する無機多孔体では困難な、嵩高い化合物の合成などを中心に種々の検討がなされている（科学技術動向2001年10月号参照）。また、最近では、メソポーラス物質はナノワイヤやナノ炭素物質を合成す

る際の鋳型としても注目されている。さらに、(株)豊田中央研究所の稲垣伸二氏らのグループは、有機基とシリカが完全に均一に分散した有機・シリカハイブリッドメソポーラスシリカを1999年に初めて合成し、メソポーラス物質を修飾・機能化する新たな手法を示した。その後導入に成功した有機基としてビニレン、フェニレンなどが報告されている（科学技術動向2002年5月号参照）。2003年11月20～21日に金沢市で開催された第19回ゼオライト研究発表会において、新しい有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質の合成に

関する発表があった。

(株)豊田中央研究所の稲垣伸二氏は、合成時に添加する界面活性剤の種類を従来法から変更することにより、枝分かれのある細孔（三次元の細孔構造）を有するメソポーラスベンゼンシリカを合成したと発表した。従来は、枝分かれない細孔（一次元の細孔構造）を有するものしか得られていなかった。稲垣氏は、触媒や吸着剤としての応用を考えた場合、三次元の細孔構造にすることにより反応や吸着分子の拡散が有利になるとしている。また、東工大堂免一成教授らのグループは、反応場や吸

着場として働く細孔表面にのみ有機基を均一に導入することを試みた。シリカ源として、有機基を含まないメソポーラスシリカの合成に使用されるものおよび細孔表面に存在すると見積もられた量の架橋型有機シランを混合して用い、非イオン性界面活性剤と共に加熱すると、有機基が細孔表面に選択

的に導入されたと考えられる新規な有機・無機ハイブリッドメソポーラスシリカが合成できたとしている。堂免教授らは細孔表面の修飾に有効な方法になると考えている。さらに、産総研の木村辰雄氏は、非シリカ系有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質として有機基を導入したフォスフォン酸ア

ルミニウムメソポーラス物質の合成に成功したと発表した。木村氏は無機成分の多様化につながるとしている。

以上の研究成果は、直接実用化につながるものではないが、有機・無機ハイブリッドメソポーラス物質の可能性を広げるものと考えられる。今後の進展が期待される。

製造技術分野

① 地域産業発展を目指す、大学と企業との間の包括的な連携

国公立大学と地方自治体との連携は、2002年の地方財政再建促進特別措置法施行令改正等により促進される傾向にある（科学技術動向2003年5月号）が、近隣の大学と企業の連携により地域発展を期待できる例はまだ少ないのが現状である。一方、人的交流と設備の相互利用という点に関しては、地理的な好条件が整わなければ、連携関係があっても実際の活動は限定的なものにならざるを得ない。特に半導体研究分野では、これまで国内には、研究室単位の小規模な連携が遠隔の企業との間で見られたのみで、個別の大学と地元企業との間の包括的連携の例は無かった。

2003年11月28日、広島大学とエルピーダメモリ株式会社は、先

端半導体技術と環境保全技術の開発のため、包括的研究協力を進めていくことで合意に達し、覚書を取り交わした。半導体研究に歴史をもつ広島大学と、事業統合の結果として日本で唯一のDRAM専業メーカーとなったエルピーダメモリ株式会社は、広島大学の工学部キャンパスとエルピーダメモリ株式会社の国内唯一の生産拠点が同じ東広島市の5km以内という至近に位置し、学際的にも地理的にも産学連携を進める好条件が揃っている。地域産業の健全な発展と科学技術振興への貢献を両立させうる新しい産学連携の形として注目される。特に、半導体研究分野では、個別の企業と大学との包括提携は日本で初めてのケースである。

今回の産学連携では、従来の研究室単位の個別共同研究とは異なり、それぞれの強みを活用した技術・人材・設備などの相互利用を可能とし、シナジーを生み出すこ

とを目標に掲げている。実施する研究協力の内容は、①先端的半導体開発と設計・生産技術の開発に関する分野、②企業活動における省エネルギー、省資源、環境対策及び生産管理技術に関する分野、③その他両者が目的を達成するために必要と認めた分野、とされている。事前協議では広島大学地域共同研究センターの全面的な連携推進支援とコーディネートのもとに研究テーマと推進策の検討がなされ、活動計画と体制が整った結果、今回の包括的な研究協力覚書の調印に至った。今後、長期的な活動が維持されるかどうか注目される。

なお、広島大学はこの他にも、隣接する広島市や三原市に位置する民間企業との間で、紙印刷機械関連技術や新エネルギーに関する研究開発における包括的連携も計画中である。



特集①

米国国立衛生研究所 (NIH) の 生物医学研究推進に向けた戦略 (NIH ロードマップ)

ライフサイエンス・医療ユニット 島田 純子



1. はじめに

米国国立衛生研究所 (National Institutes of Health ; NIH) ¹⁾ は、「生物系の性質と生態 (behavior) に関する基礎知識を追求し、その知識を健康の向上のために活用し、病気の診断・治療・予防のための新たな方法を開発すること」を使命とする、米国厚生省 (Department of Health and Human Services) 管轄下の1機関である。所長事務局 (Office of the Director) と、27の研究所・センターから成っている。所長事務局

は、NIHの方針決定、各プログラムの計画、管理、調整等を担っている。27の研究所とセンターには、国立ガン研究所 (National Cancer Institute)、国立心臓・肺・血液研究所 (National Heart, Lung, and Blood Institute)、国立ヒトゲノム研究所 (National Human Genome Research Institute) などがある。各研究所での所内研究を行うとともに、全米の大学や研究所さらに海外へも研究グラントの助成等を行っている。

NIHは、「生物医学研究推進に向けた戦略」を「NIH Roadmap」と題してまとめ、2003年9月30日に発表した。このロードマップは、研究能力の向上、および、研究成果を基礎から臨床へ展開するスピードの向上を目指して、NIHが優先的に取り組むべき事項について明らかにしたものである。

本稿では、目的、作成プロセス、推進すべき課題等、NIHロードマップの全体像について概説する。

2. NIHの研究開発予算

2004年度の研究開発予算²⁾は、まだ議会で最終決定されていない。2003年12月8日に法案が下院を通過したが、上院を通過するのは2004年1月になるとのことである。この法案では、2004年度の研究開発予算として271億ドル(前年度比3.2%増)が計上されている。米国全体の研究開発予算は1,270億ドル、うち非国防予算は560億ドルであり、NIHが非国防予算の半分近くを占めている³⁾。

1998年度までは、7~8%程度の伸び率で推移していたが、1999年度より大統領主導の「NIH予算倍増キャンペーン」が始まり、毎年14~15%の伸び率を確保して急激に増加してきた(図表1)。しかし、2004年度予算では急速な予算の伸びが終息し、3.2%増とい

う低い数字に抑えられている^{2,4)}。予算倍増キャンペーンの結果は、各研究所の予算増加として反映されてきた。ヒトゲノムプロジェクトが急速に進められ、2001年にゲノム配列の概要が解読された

ことを受けて、1999~2000年度は「ヒトゲノム研究」での増加率が大きい。また、2002年度以降は「アレルギーと感染症」の急速な伸びが目立っている^{5~9)}。

図表1 NIH研究開発予算の推移^{2,4)}

年度	予算 (million \$)	対前年度比 (%)
1998	13,110	7.3
1999	14,995	14.4
2000	17,234	14.9
2001	19,807	14.9
2002	22,714	14.7
2003 [*]	26,245	15.5
2004 ^{**}	27,093	3.2

※ 2003年度最終予算の値
 ※※ 2003年12月8日現在の値

参考文献^{2,4)}をもとに科学技術動向研究センターにて作成

3. NIH ロードマップ作成へ至った背景

NIH が、「NIH Roadmap」と題した重点推進戦略をまとめた背景には、次の2点があげられる。

まず1つ目は、1999年度から

始まった5カ年のNIHの予算倍増計画が2003年度で終了し、この間に得られたポテンシャルを引き続き維持していきたいという意向

である。2つ目は、2002年5月に Dr. Elias A. Zerhouni が新しい所長として就任したことである。

4. 「NIH ロードマップ」の概要

本章では、NIH のホームページ上で公表されている資料をもとに、NIH ロードマップを概説する^{10, 11)}。

4 - 1

目的

NIH ロードマップの目的は、「“人類の健康に貢献する”というNIHの使命を果たし続けていくために、医学研究に大きな進展を与え、かつ、NIH 全体で優先的に取り組むべき事項を明確にすること」である。これまでNIHでは、27の研究所やセンターがそれぞれ、自ら研究を進めたりファンディングを行ったりして事業を進めてきているが、今回のロードマップでは、「NIH 全体として横断的に取り組むべき課題」に焦点を当てている。

NIH ロードマップが作成された理由の1つは、生物医学研究の性質が変わってきたことである。ヒトゲノムプロジェクトの進展によって、大量のゲノム配列情報が得られてきたことなどから、研究の進展が非常に早くなったという変化である。そして、生物の複雑さにはまだ解明すべき事が多く、さらに、科学的知見を国民の利益に変換させることがNIHのミッションであることから、生物医学研究の進め方や、研究成果を臨床へ展開していく方法を見直す必要が生じた。

4 - 2

作成プロセス

現 NIH 所長 Dr. Elias A. Zerhouni

が就任した2002年5月よりロードマップ作成のための検討・協議を始めた。

まず始めに、大学、産業界、政府関係者など300人以上の生物医学の専門家を集めて、5回のミーティングを開催し、医学研究の進展に大きな影響を及ぼす今後10年間において取り組むべき課題について次の3つのポイントをもとに議論した。「緊急性を要する科学的課題・難問は何か?」、「その課題の進展を阻害する要因、およびそれを克服するために必要なものは何か?」、「NIH 全体として取り組むべき課題か?」という3点である。このような検討を経て、3つの主要課題(テーマ)が挙げられた。

その後、NIHのスタッフと外部有識者をメンバーとし、NIHの各研究所長とセンター長を長としたワーキンググループを組織し、NIHの評議会や顧問委員会からの助言をもとに検討を重ねた。

最終的に、資金を投入されるべき重要な課題を以下の視点で選んだ。「今後10年の医学研究の内容やプロセスの改革するものであるか?」、「得られる成果がNIHの研究所やセンターで活用され、各組織の連携を強化するか?」、「特に一般の人々にとって利益をもたらす課題であるか?」、「NIHが取り組まなければならない課題であるか?」である。

そして、選ばれた課題について、2004年度へ向けての具体的活動計画や、短期、長期目標をさらに検

討した。

4 - 3

主要課題(テーマ)

(1) 新たな知見を得るための方針 (New Pathways to Discovery)

この主要課題では、「複雑な生物系の理解」に取り組む。ヒトゲノムプロジェクトでDNA塩基配列の解読が終了し、次のターゲットは、細胞や組織の構成要素を理解することである。そしてさらに、健康時や疾患時に、これらの構成要素がどのように相互作用し、機能を調節しているかを理解することが重要である。したがって、このテーマでは、「構造生物学」、「プロテオミクス(細胞内の全タンパク質を対象とし発現情報・相互作用情報を解析する研究)」、「メタボロミクス(細胞内の全代謝物を対象とする研究)」などを行う。

また、研究を推進させるための基盤となる「“toolbox”の開発」も行う。解読完了したヒトゲノム配列データや、分子生物学や細胞生物学研究から得られている新たな知見を活用できるようなデータベースの整備、さらに、解析技術の開発等の整備である。

ここでは、以下の5つの課題を実施する。

① 生体内の経路・ネットワーク (Building Blocks, Pathways, and Networks)

- 生体内ネットワーク解析技術センターを設立する。そして、タ

ンパク質間の相互作用を動的に解析するためのツール開発を行う。定量的な測定や、測定間隔の細かい測定を可能とする機器、手法、試薬等を開発する。

- メタボロミクスのための技術開発を進める。そこで得られた知見を細胞内の代謝経路やネットワークの解明に役立てる。
- プロテオミクス、メタボロミクスに関するワークショップを開催する。プロテオミクスやメタボロミクス研究におけるデータ標準化を図り、またプロテオミクス研究のための評価指標についての検討を行う。

②分子ライブラリー及び分子画像解析 (Molecular Libraries and Molecular Imaging)

- 生理活性分子ライブラリーおよびスクリーニングセンターを設立し、新たなスクリーニング方法の開発、および、分子ライブラリーの提供を行う。
- 化合物の構造、特性、活性に関するデータベースを構築する。また、化学情報学 (Cheminformatics) のツールの提供や技術開発のための競争的研究資金を創設する。
- 基礎研究のツールとなる化合物の開発や、医薬品となりうる化合物の開発において、ボトルネックを解決する技術を開発する。
- 特異性と感度の高いプローブを開発する。画像解析プローブの検出感度を1,000倍にし、基礎研究・臨床研究への応用を目指す。まずは、5年以内に10～100倍の検出感度を達成する。
- 画像解析プローブの特異性、活性、活用方法等に関するデータベースを構築する。
- 画像解析プローブを提供するとともに、新規プローブの開発を行う中核施設を設立する。

③構造生物学 (Structural Biology)

タンパク質の三次元構造解析に

適するようサンプルを調整する手法を開発し、これを解析困難な膜タンパク質の解析に適用する。

④バイオインフォマティクス及びコンピュータ生物学 (Bioinformatics and Computational Biology)

生物医学コンピュータセンターを設立する。さらに、研究者がどこからでもアクセスでき、情報を共有し解析できるような基盤となるシステムを整備する。

⑤ナノメディシン研究 (Nanomedicine)

2005年度にナノメディシンセンターを設立する。このためのワークショップを2004年度に開催する。このセンターは、生命現象のナノレベルでの定量的測定法の開発、ナノレベルで操作できる工学技術の開発を行う。これらの成果を用いて、ドラッグデリバリーに用いるナノサイズのポンプや、病因を調べるとともに、病気の診断や治療に用いるセンサーの開発を目指していく。

(2) 将来の研究体制 (Research Team of the Future)

このテーマでは、「新たなファンディングシステムの導入」、「学際領域研究の推進」、「産学連携」という、研究体制に関する3つの課題を実施する。

①リスクの高い研究の推進 (High-Risk Research)

新たなファンディングシステム (NIH Director's Innovator Award) を導入し、「失敗の可能性は高いがブレークスルーとなりうる成果を生み出す可能性のある研究」に取り組む。これまでNIHのグラントで行われてきたピアレビュー方式では、詳細な研究計画の内容が評価の対象となるため、独創的な研究は提案されない傾向があった。新しいシステムは、研究者の創造性、独創性、自身のアイデアに対する探求心・洞察力、

生物医学研究に対する先見性などを評価する。すなわち、研究提案よりも研究者の独創性や可能性に重点を置く。

②学際領域研究の推進 (Interdisciplinary Research)

現在の生物医学研究は、規模が大きくなり複雑性も増しているため、研究者は自分が従来取り組んでいた専門分野を越えて、研究チームを形成する必要性が生じてきている。例えば、画像解析研究では、放射線学者、物理学者、細胞生物学者、コンピュータプログラマ等が一緒のチームで働くことが必要とされる。このような生物医学研究の性質の変化に対応するため「異分野融合」に取り組む。具体的には以下に取り組む。

- 新しいアプローチを用いて重要な課題に取り組む学際領域の研究課題に助成を行う。2004年度中に15のグラントを開始する。
- 学際領域における研究者の研修を行う。2004年度中にグラントを開始する。
- 学際領域研究での技術や方法論の開発を行う。
- 学際領域の推進を妨げる制度的な障害を取り除く。
- 学際領域に取り組む研究者への研修や、学際領域研究チームを集めるプログラムのモデルをNIH内部につくり、その実現性や利点を検証する。
- ライフサイエンスと物理学の融合についての会議を2004年度に全米科学財団 (National Science Foundation; NSF) と合同で開催する。「ライフサイエンスの進展のために物理学は何ができるか」ということについて議論する。

③産学連携 (Public-Private Partnerships)

「公的機関と私的機関との協力関係の構築」に取り組み、基礎研究から臨床研究へ向けた動きを加

速させることを目指す。具体的には以下に取り組む。

- 産学連携研究に NIH スタッフを参加させ、産学連携調整に関する内部委員会を設ける。
- 連携機関を探すための機会 (Partnership Meetings)をつくる。

(3)臨床研究体制の再構築 (Re-engineering the Clinical Research Enterprise)

このテーマでは、「臨床研究体制の再構築」に取り組む。

基礎研究の成果は迅速に技術移転されて医薬・治療・予防といった臨床において活用されるべきであり、これはまさに NIH の使命である。いままで、NIH はその役割を果たしてきたが、今後も国民

の健康の向上に引き続き貢献していかなければならない。

ところが、臨床研究は、かつては1つのアカデミックな機関で管理することができたが、最近では患者コミュニティ、臨床医科学者、アカデミックな研究者が連携して行う必要が出てきたために、より困難になってきている。したがって、基礎研究成果からの技術移転の効率を上げ、臨床研究を拡充していくために、臨床研究体制を見直すことが求められている。具体的には以下に取り組む。

- 臨床研究プロセスを調整し、標準化して合理化する。
- 臨床研究ネットワークの構築を促進することによって、臨床研究体制の効率性、有効性の向上

を図る。

- 臨床研究者のトレーニングを行う。
- 標準となるデータシステム (National Electronic Trials and Research Network) を構築し、データやリソースを共有する。
- 基礎研究成果を臨床試験へ展開する研究 (トランスレーショナルリサーチ) を促進する。
- 地域においてトランスレーショナルリサーチセンターを設立し、基礎研究者と臨床研究者の関係を緊密にする。センターには必要不可欠なインフラを整備する。
- 現在定量的に測定することができない、痛み、疲労等を測定する技術を開発し、疾病の重症度の測定に役立てる。

5. おわりに

NIH ロードマップの課題を推進するための予算のために、共通資金が設けられるとのことである。2004年度は13億ドルで、今後5年間では21億ドルの予定である¹²⁾。NIHでは、従来は、各研究所・センターごとに予算が管理されており、共通資金を設けるといのは新しい方法である。予算や計画の管理は集中して行い、各課題の実施は、担当するグループが NIH 全体を代表して行うということである。

現在、NIH のホームページ上で、ロードマップの実施課題に関する競争的研究資金の公募が始まっている。NIH は、各課題のほとんどを2004年度(2003年10月～2004年9月)中に開始するとしている。2004年度の開始と同時に、関連する競争的研究資金の公募がいくつか始まった。公募の数は徐々に増えてきており、NIH ロードマップの実施へ向けて動き出している様子が見受けられる。

2004年度の始まりにあたってロードマップが発表されたのは、新しい研究所長の就任と、2003年度

で5年間にわたる予算倍増キャンペーンが終了したことにより、新しい方針を示す必要が生じたためであろう。

この「NIH ロードマップ」は、ロードマップと言うにふさわしい明確なマイルストーンが示されているというよりは、今後の方向性の提示という性格が強い。基礎研究ではポストゲノム研究とそのためツール開発、学際領域の研究が重要課題とされているが、NIH の使命を意識して、何よりも臨床研究の推進を重要視していると言える。

2005年度の大統領予算案が2004年2月頃に発表されるであろうが、どのような項目が重点化されるか、そしてさらに、その後の議会でどのように修正され合意されていくかなどを今後も注目していきたい。

参考文献

- 1) National Institute of Health (NIH), <http://www.nih.gov/>
- 2) AAAS, "NIH Wins 3 Percent Increase

in Final FY 2004", Dec. 9, 2003

- 3) AAAS, "FY 2004 Federal R&D Climbs to Record High of \$127 Billion", Dec. 8, 2003
- 4) AAAS, "Historical Data on Federal R&D, FY1976-2004", March 7, 2003
- 5) AAAS, "FY 2003 Omnibus Bill Completes NIH Doubling Plan ; Large Increases for Bioterrorism R&D and Facilities", Feb. 25, 2003
- 6) AAAS, "NIH Budget Climbs \$3.2 Billion or 15.7 Percent", Jan. 4, 2002
- 7) AAAS, "Congress and President Clinton Agree on 14 Percent Boost for NIH", Jan. 4, 2001
- 8) AAAS, "Congress Agree on \$2.2 Billion Boost for NIH, But Withholds \$3 Billion Until Next September", Nov. 24, 1999
- 9) AAAS, "NIH Wins \$2 Billion Increase in FY 1999", Nov. 13, 1998
- 10) NIH Roadmap, <http://nihroadmap.nih.gov/>
- 11) Elias Zerhouni, The NIH Roadmap. Science. 302 (5642) : 63 - 72
- 12) Chemical & Engineering News. 81 (40) : 10

特集②

光ディスク産業の最新動向

—日本企業の優位性と中・米連携標準化の新しい動き—



情報通信ユニット 立野 公男

1. 緒言

現在、世界中の消費者に広く普及している CD (Compact Disk) や DVD (Digital Versatile Disk) などの光ディスクの原理はオランダで発明された。しかし、量産化技術、標準化、ビジネスの全方位で日本の企業がリードしてきており、光ディスク産業で圧倒的な勝ち戦を続けてきた。しかし、ここ数年間、韓国や台湾のメーカーとの合弁による協力体制を余儀なくされるとともに、中国の新しい標準化提案にも遭遇している。これは、EVD (Enhanced Versatile Disk) という中・米連合からの標準化仕様であり、中国企業の日本企業へのライセンスの支払い料軽減を意図した市場獲得戦略の1つと受け止めることができる。

本特集では、このような事態に遭遇した光ディスク産業の特長を、①技術、②ビジネス、③標準化、そして④特許状況の4つの観点か

ら論考する。すなわち、①なぜオランダという国で光ディスクのような偉大な発明がなされたのか。②その後、日本の技術がどのようにして世界的な優位性を保つにいたったのか。企業の研究所や公的機関は、光ディスクの将来技術も含めてどのような役割を果たしたか。さらに、③光ディスクは製品としてどのような進化をとげ、日本優位の世界市場シェアがどのように形成され、その形成過程において、標準化のイニシャティブを日本のメーカーがいかにとってきたか。そして、④日本の特許ポジションに優位性はあるか、などを論じる。

そして、今回の中・米連合の新しい標準化の動きとしての EVD 発表の経緯を述べ、このような事態に遭遇した光ディスクの産業構造を 90 年代半ばから始まった日本の半導体産業の世界シェアの衰

退と比較しながら考察する。すなわち、今後の日本の方策を取り違えれば半導体や液晶で発生したビジネスシェアの大変動が、光ディスクの分野でも起こりかねないことを警告する。このため、まず日本の特許的な優位性を標準化仕様とリンクさせた形で強化していくこと、すなわち、研究課題をより基本的なテーマに求め、特許の数だけでなく質においても高いポジションを目指し、標準仕様として採用される程の水準に高めて行く必要がある。さらに、中長期的観点からみた施策として、我が国においても創造的な研究者のグループが活躍し、オランダにおける光ディスクの発明のような科学技術の飛躍的進歩の発生確率が増えるような肥沃な土壌のなお一層の充実が求められることを提言する。

2. 光ディスク技術の進展

2-1

光ディスク技術

光ディスクの基本構成¹⁾は、図表1に示すように、光ピックアップ、デジタル信号を記録した円板(ディスク)と、それらを駆動するメカニクスと制御回路、および、デジタル画像や音声の復号

回路などからなっており、以下の特長を持っている。すなわち、①円板とピックアップの間が非接触であるため、何回再生しても摩擦しない。②大量の複製円板が簡単なプロセスでできるため、値段が安い。③記録密度が高いため、音声のみならず、映画2時間を収録できる。④1台の装置で何種類もの円板を記録再生でき、持ち運び

ができる。

このような特長は、高密度メモリとしての競合技術である半導体メモリや磁気メモリにはない。そのため、光ディスクは音声、映像、そして、コンピュータのデータ用外部メモリとして、家庭用、業務用を問わず世界的に普及していることは周知である。

光ディスクの記録密度は、光の

波動性に起因する回折限界によるスポットサイズで決定される。すなわち、光源の波長を λ 、絞り込みレンズの光ディスク側の開口数をNA (Numerical Aperture= $\sin\theta$ 、 θ は光軸と最外光線のなす角/図表1参照) とすると、スポットの直径 d は、 $d = \lambda / NA$ 、で与えられる。この式によれば、光ディスクの記録密度を向上するには、光源の波長を短くし、かつ、絞り込みレンズの開口数をより大きくすることが必要である。従って、この式を指導原理として、光ディスク用半導体レーザー光源の短波長化とレンズのNAの向上に向けた技術開発が執拗に継続されて来た。実

際、図表2に示すように、半導体レーザー光源の波長は、世代を追う毎に、赤外；CD/波長：780nm、赤色；DVD/波長：650nm、そして、次世代の青紫色；HD (High Definition) DVD /BD (Blu-ray Disk) /波長：405nmと短くなっている。また、開口数も、CD/ (0.45)、DVD/ (0.65)、HD DVD/ (0.65)、BD/ (0.85) と世代を追うごとに大きくなっている。

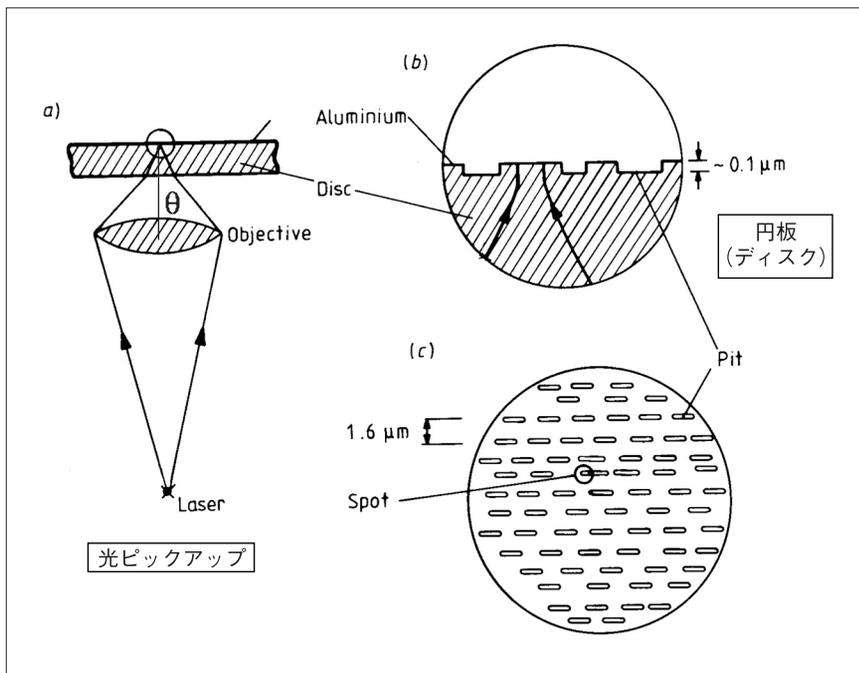
2 - 2
光ディスク技術の将来

図表3は、縦軸に記録容量、横軸に年度をとった光ディスク技

術のロードマップである。CD、DVDに続き、HD DVDやBDの製品化の見通しがいつているが、その先にどのような技術が提案されているかここで紹介する。光ディスクの記録密度を決める半導体レーザー波長のさらなる短波長化をねらうとすると、その波長は、300nm以下の紫外光となる。最近、波長280nmのLED (Light Emitting Diode：発光ダイオード) の発光が報告されており、シーズとしての技術開発の挑戦はとどまらない。しかし、光ディスクの基板であるプラスチックは波長200nm代の光を吸収してしまうため、そのままでは使用できないなど新たな材料開発のブレークスルーが必要になる。また、紫外光はエネルギーが高いため、LEDをLD (Laser Diode；半導体レーザー) にした時に単位面積当たりの光強度が上がるため結晶が損傷を受けやすくなる。そのため、長期寿命の確保、すなわち、損傷の原因となる結晶欠陥数の極限的な削減など結晶の経時劣化を防ぐための技術開発も大きな問題である。

短波長化以外で記録容量を上げる方法の1つは、光ディスクの多層化である。多層化は、面あたりの記録密度は増えないが、ディスクの厚み方向へ記録層を拡張することで記録層の数だけ記録容量を増やすことができる。ここで問題になるのは、層間のクロストーク (隣接層の情報が紛れ込むこ

図表1 再生専用光ディスクの構成



参考文献¹⁾を元に科学技術動向研究センターで作成

図表2 光ディスク技術の進歩

世代	研究段階	0 th	1 st	2 nd	3 rd	4 th (ポストブルー)
年次製品	'62	'72 Video Disk	'82 CD	'94 DVD	'03 ~ '04 BD/HD DVD	('12) (TB Disk)
記憶容量	—	2 - hour (30cm)	0.68GB	4.7GB	15 ~ 20GB	(TeraByte)
LD* 波長	LD 発振	633nm (He - Ne**)	780nm	650nm	405nm	(405/280nm)
レンズ NA	—	0.45	0.45	0.65	0.85/0.65	(0.85/0.65)
カバー厚	—	1.2mm	1.2mm	0.6mm	0.1/0.6mm	(多層化)

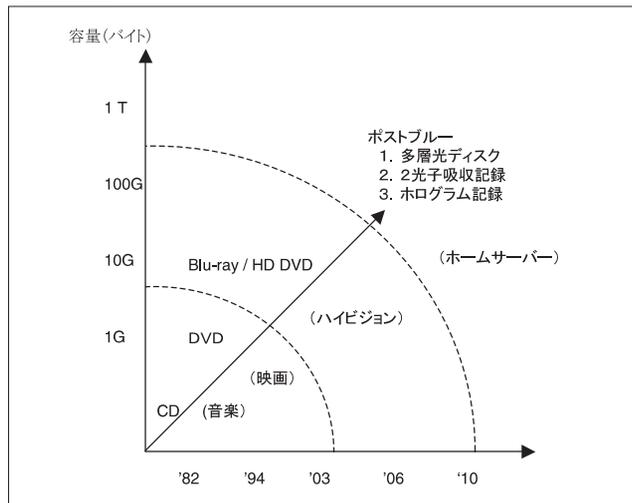
* LD：Laser Diode (半導体レーザー)
** He - Ne：ヘリウムネオン気体レーザー

と)である。この問題を解決するために、記録、あるいは、再生しようとする層を選択的に電圧印加し、着色することでレーザー光が吸収されるようにする方法が提案されている。このような性質を持つ材料はエレクトロクロミズム (Electrochromism) 材料と呼ばれており、電圧が印加されない場合は透明であるため他の層とのクロストークが発生しない。このような構造を持つ多層光ディスクは、青紫色レーザーを用いれば1層当たり20GBを記録できるので、層の数を50層とすれば、1,000GB、すなわち、1 Tera Byte (1 テラバイト) の情報を1枚のディスクに記録することができる。これまで光ディスクの家庭用途は、CD (0.68GB) による60分の音楽記録、DVD (4.7GB) による2時間の映画記録を行う記憶媒体として発展してきた。将来は、各家庭につながっているインターネットの大容量メモリとしての応用が考えられており、多層光ディスクのような、1TBに昇る大容量の記録媒体へのニーズが高まると予想されている。一方、小型化の方向としては、現在普及している直径3.5インチのMO (Magneto Optical : ミニディスク) よりもさらに小さい直径30mmのディスクが開発中であり、PDA (Personal Digital Assistant) や携帯電話への搭載がターゲットとされている。

2 - 3 光ディスク原理発明の土壌

ここで、研究開発の土壌について、本特集のテーマである光ディスクを例に述べる。すなわち、光ディスクの2つの基本的な物理的条件である、①光スポットの径がピットよりも大きいという点、②ピットの深さを光源の波長の4分の1にするという点が、再生専用光ディスクの二大原理とな

図表3 光ディスクロードマップ



っている。これらの原理は、いずれも、オランダのアイントホーヘン (Eindhoven) 市にあるフィリップス (Philips) 社の中央研究所で発明された。この原理は、オランダのノーベル賞受賞者であるゼルニケ (Zernike) の位相差顕微鏡の動作原理 (1935) からヒントを得たと考えられる。さらにその科学技術史的背景を遡ると、光の波動としての回折限界の物理学的モデルは、オランダのホイヘンス (Christian Huygens/1629 - 1695) の波面形成原理に帰着することができる。すなわち、オランダには、光学の歴史的な伝統があり、光ディスクの原理は光学の深い物理学的な知的蓄積が背景にあって、はじめて生まれた発明とすることができる。

すなわち、(株)フィリップス社の中央研究所は、同社をパトロンとする研究グループであり、そこに、科学や技術に覚醒したノーベル賞級の科学者、研究者が集まって発明や発見の土壌が形成されていたと見ることができる。人間は、理解していること以上のことは発明も発見もできない。同じような新しい事象を見ても、ボンヤリした人は本質を見過ごす。しかし、日頃から努力して事象を理解し問題意識が熟成して覚醒している人は、その事象の実体を感じ取り本質を見抜く。それが発見であ

り科学技術と安易な賭け事との相違である。科学技術を深く根付かせるのに安易な方法はない。不断の厳しい努力が要求される。我が国の科学技術水準を最高レベルに高め、世界の最先端に位置しようと思えば、科学に覚醒したノーベル賞級の科学者、研究者を集めて、そこに発明や発見の土壌を形成する必要がある。そして、自信にあふれた若くて優秀な人材を集め、互いに切磋琢磨し研究成果を出しながら成長して頂くことが必要である。このような人材は、本当に科学技術への興味や好奇心の旺盛な人たちでなければならない。組織への忠誠心はあるに越したことはないが、二の次であり、むしろ、模倣を恥と考へ、他人と違うことをやろうとする性格の研究者が望まれる。現に筆者がこの研究所に滞在していた折り、オランダ人の同僚が、「石器時代に石器しか扱わない人に金属器の発見のチャンスはなかった。石器とは別の材料に興味を持った変わり者 (遊び人) がいたから金属器の発見があった。これが研究の真髄である。」というような事を語っていた。このようなやり方は、科学技術の進歩を Increment (漸進的) な進歩で満足している段階では必要無いかも知れないが、ジャンプを伴う飛躍的な進歩を日本においてより多く望むならば、このような施策

が必要であり、こうして初めてインパクトのある発明・発見の確率が上がると考えることができる。最近の不況下にあっては、私企

業にパトロンの役割を求めるのは無理であるから、政府がその役割を担うことが求められる。戦前の理化学研究所²⁾は民間ベ

スの研究機関ではあったが、日本の素晴らしい模範的な伝統の1つであったことを再度思い起こす必要がある。

3. 日本の技術の優位性と世界市場シェアの形成

3 - 1

日本の企業の研究開発部門が果たした役割

以上、述べて来たように、現在のCDやDVDのような、再生専用光ディスクの原理はオランダの(株)フィリップス社で発明され、最初の光ディスク装置が1972年に同社から世界で初めて発売されるに至った。但し、当時のディスク円板の径は300mmと大きく、アナログ方式(FM変調)で映画2時間収録する仕様であった。また、光源は、真空チューブからなる波長633nmのヘリウムネオンレーザーであり、光ディスク装置の小型化は不可能で、現在使われているような省電力、小型、直接変調可能な半導体レーザーの実用化が強く要請されていた。

半導体レーザーは、図表2に示したように1962年にBell研等で世界初の発振が低温で確認された。その後約10年を経た1972年に米国Bell研において林巖博士らの発明によるダブルヘテロ接合技術により室温連続発振が達成され実用化への道が開かれた。当初この技術は、長寿命化が最大の難関であったが、(株)日立製作所や(株)日本電気などの日本の電気メーカーが最重要の開発テーマとして重点的に取り上げて投資した結果、GaAs(ガリウム砒素)半導体の結晶品質の向上技術が完成した。すなわち、損傷の原因となる結晶欠陥の数を極限まで減らす技術が日本において開発され、悲願の長寿命化

が達成された。さらに、半導体レーザーの性能を向上させるための発振モード制御技術、収差補正用の光学技術などが開発され、並行して推進された光ピックアップ技術などの開発においても日本のメーカーが重要な役割を果たしてきた。

光ピックアップの開発で優位性を示した日本の光学技術は、カメラや顕微鏡などの伝統的な日本の光学メーカーが開発した技術に根ざしている。例えば、光ピックアップ用の対物レンズは、当初ガラス製の組みレンズであり、コストネックの1つであった。これに対し、(株)コニカは、プラスチック製でしかも非球面形状の単一レンズの実現に挑戦し、ガラス製の組みレンズと同等の性能を持つ低コストレンズを開発してこの問題を解決した。しかし、光学メーカーの全てが、光ディスク装置そのもののビジネスへ参入できたわけではない。それは、光学技術は光ディスクの原理の根幹にかかわるが、装置全体の部分でしかなく、デジタル信号処理、制御回路などシステム全体をまとめる総合力では、やはり電気メーカーの方に分があった。このような理由で、光ピックアップのような光学技術においても、電気メーカーの光学技術者が重要な役割を演じた。以上のように、日本の伝統的な光学技術が、半導体レーザーや電子回路を含む電子技術、そして、結晶育成技術などの優位性に加わった結果、世界に対する日本の光ディスクの技術的優位性は不動のものとなった。

3 - 2

日本の大学や公的機関の役割

一方、日本の光学技術の分野で大学や公的研究機関が果たした学術的、教育的に重要な役割は看過できない。すなわち、東京大学生産技術研究所や大阪大学工学部応用物理学科における、幾何光学応用のレンズ設計技術や波動光学に基づく光計測技術、そして、東京工業大学理工学部におけるホログラフィ技術などの応用光学技術である。これらの大学では、光学を理論的に深く掘り下げる仕事や、企業に取り上げるにはリスクの大きい将来テーマに取り組んできており、世界的な学術水準を保持している。また、企業における応用研究に対しても、より基礎的なテーマに興味を向かわせるとともに、応用研究の理論的基盤を大学が提供して優秀な論文に対して博士号を与えることで企業に働く研究者らのインセンティブを高め、企業の研究水準を向上させるという役割を大学が果たして来たことも事実である。

現在、大学で行われている光ディスクの将来技術の研究としては、例えば、近接場光学を応用した超高密度光メモリや、ホログラフィックなメモリがある。これらの研究テーマでは、大阪大学工学部や東京工業大学理工学部がそれぞれオリジナリティに富む研究を展開している。これらのテーマは、投資回収の見通しが不透明なため、企業で研究テーマとして取り上げるのは困難であり、大学や公

的な研究機関が重要な役割を担っている。

さらに、大学や公的研究機関の役割として学会活動がある。光ディスク分野での世界水準の国際学会としては、日本主催の ISOM (International Symposium on Optical Memory) が、1987年に発足し、その後毎年、アジアの各地で開催され、最新成果の発表の場として重要な役割を演じている。そして、3年に1回は米国光学学会 (Optical Society of America) 主催の ODS (Optical Data Storage) と joint で開催されている。

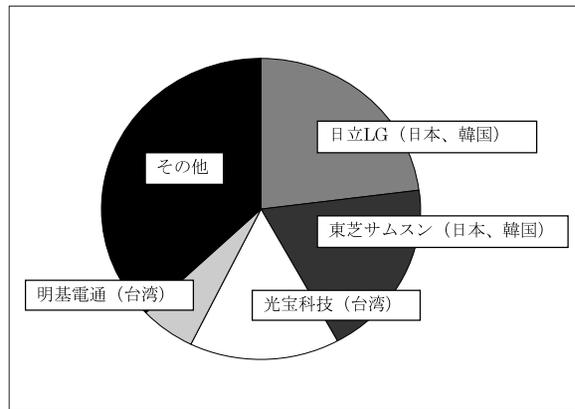
3 - 3

世界市場シェアの形成

以上のように、本格的な光ディスク装置の普及は、音声用の CD (Compact Disk) からはじまり、(株)ソニーや(株)日立製作所をはじめとする日本の電気メーカーは、光ディスクの生みの親である前述の(株)フィリップス社と連携し、いずれも高い市場シェアを獲得してきた。特に、(株)ソニーは、当時、光ディスク装置におけるエラーコレクションコード (Error Correction Code: 誤り率補正コード) の優れた技術を開発し、前述のフィリップス社の光ディスクの原理的発明と相互に技術収支バランスを取りながら標準化仕様を確立し、いわゆる、Compact Disk Digital Audio の黄金時代を築いた。このように大成功を納めた音声応用の CD に続き、パソコンの普及に合わせた外部メモリ、すなわち、CD-ROM (Read Only Memory)、CD-R (Recordable)、CD-RW (Rewritable) などとして、コンピュータ応用の光ディスク装置のビジネスも急激に立ち上がった。

一方、光ディスク装置の開発者にとっては、映画2時間を CD サイズ (直径 120mm) に記録することは長年の夢であった。そこへ、

図表 4 光ディスク装置の世界シェア (出荷台数ベース)



日本経済新聞 2003年9月23日の記事をもとに科学技術動向研究センターで作成

(株)東芝の技術陣³⁾は、赤外波長 (波長: 780nm) から赤色波長 (波長: 650nm) へと短波長化が進んだ半導体レーザを活用するとともに、レンズの NA を 0.45 から 0.65 に向上することで光ディスクの記録容量を 7 倍向上し、前述の DVD として映画 2 時間を収録することに成功した。NA を 0.65 に向上できたのは、光ディスクのカバーの厚みを 1.2mm から 0.6mm に薄くすることでレンズの収差に起因する誤動作を防ぐことができた結果である。それは、カバーの厚みが厚いと収差が発生しやすいからである。これは、まさに「コロブスの卵」的発想であった。つまり、CD におけるゴミ対策のカバーの厚さ 1.2mm は、ゴミに対して慎重しすぎる仕様 (オーバースペック) であったことが判明した。

そして、米国ハリウッドの映画会社は世界最大のコンテンツ提供者としてこれを歓迎し、(株)東芝をはじめとする日本の電気メーカーと手を結んだ。すなわち、光ディスクの音楽用途、映画用途、そして、コンピュータ用途の全てにおいて、日本の電気メーカーが圧倒的な世界市場シェアを獲得するに至った。この高いシェアは、80年代から 90年代にかけての日本経済のバブル期は当然のことながらバブル崩壊後も続いており、半導

体や液晶で起こったシェアの大変動は少なくとも名目上は発生していない。しかしながら、実体としては韓国や台湾の企業との合弁による協力体制によって成立しているシェアであり今後の動向には目が離せない状況である。

実際、図表 4 の世界シェアに示すように、(株)韓国 LG 電子と統合した(株)日立製作所や最近、(株)サムスン電子と統合した(株)東芝などの日本と韓国の合弁企業が健闘している。因みに 2002 年の光ディスク装置の世界市場規模は、1 兆円強であり、高いシェアを獲得している日韓合弁企業は、2 千億円規模の売り上げを確保した。これに対し、米国の光ディスク産業はかつての雄であった、IBM、ゼロックス、Kodak、Bell 研など研究開発力を含めて減退している。欧米企業としては、唯一、オランダの(株)フィリップス社が老舗としての面子を保持している状況である。

さらに日本で、GaN (ガリウムナイトライド) 半導体からなる青紫色 (波長: 405nm) の半導体レーザが開発され、記憶容量が DVD の 4~5 倍の光ディスク実現の技術的目処が立ち、第 3 世代光ディスク標準化の二大陣営のイニシャティブ競争が始まった。一方の陣営は、(株)ソニー、(株)松下電器などが率いる BD

(Blu-ray Disk：20GB)であり、他方は、(株)東芝、(株)日本電気などが率いるHD DVD (15GB、旧名AOD/Advanced Optical Disk)である。BDは、HD DVDよりも記録容量が、約33%大きい。しかし、BDで使われている対物レンズのNAは、0.85と高く、組み立て時や動作中に生じるレンズの傾きに

起因する収差が問題となる。このため、ゴミ対策のためのカバーの厚みを0.1mmと薄くして収差の発生を抑えている。しかし、カバーの厚み0.1mmはゴミ対策としては不十分であるためディスクをゴミから保護するためのカートリッジを必要とし、HD DVDよりもコスト高となったり、使い勝手に

に不利が生じる懸念がある。いずれの標準が普及するかは現段階では見通せないが、消費者にとってのコストや使い勝手が優先されるべきであり、消費者不在の標準化や、国内メーカー間の内紛が加熱し過ぎて海外の他の標準化団体に先を越されるようなことにならないことが望まれる。

4. 標準化イニシャティブと特許状況

4-1

標準化イニシャティブ

以上述べてきたように、CDでは、(株)ソニーと(株)フィリップス社のリーダーシップで標準化が進められたが、記録可能型光ディスクでは、市場が十分受け入れていない時期は数社が集まって標準化で意志を統一し、LSIなどの開発経費の削減に役立てたということもあった。エラーコレクションでは米国開発のロングディスタンスコードに対抗して日本提案もされたが、米国の強い意志に欧州が賛同し、日本案は破れた経緯もある。それでもすぐには諦めない執拗でしたかな闘いが長らく続いた。実際、CDでも、DVDでも記録型に関しては、-RAM、-R、-RW、+R、と多種の標準仕様が競合しており、各社は、標準化ではなく市場が最適仕様を選択するのに任せたいという現実もある。しかし、技術競合で技術が切磋琢磨されることは好ましいが、ユーザの迷惑や無駄なエネルギーを使うことは事実であり、消費者にとっても企業にとっても納得の行く解が見つかることを期待する。

以上のように、国際舞台での標準化のイニシャティブの取り合いで、企業間の生き残りをかけた熾烈な戦いが続けられて来た。ここで日本の企業の標準化活動のまとめ役となった旧電総研(現、産

総研)や光協会(財光産業技術振興協会)が果たした役割は重要である⁴⁾。実際、図表5に示すようにISOの下部組織であるSC23(Special Committee)は、第1回目東京で開催されており、本年まで、通算17回の国際会合が重ねられ、いずれの会合でも、日本のメーカーの発言は重みを持って受け止められて来た。その背景には、DVD仕様を見れば明らかのように日本の企業の卓越した技術開発力と後述の特許戦略があったことは言うまでもない。そして、現在、青紫色の半導体レーザを光源とする第3世代光ディスクの標準化競争が展開されており、前述のBD陣営対HD DVD(旧AOD)陣営の厳しい主導権争いが続いて

いる。

一方、DVDに適用されているデジタル動画の帯域圧縮技術は、光ディスクに限らず、放送や通信を含めた広範囲な分野で活用されている技術である。この技術は、MPEG(Moving Picture Experts Group)と呼ばれる標準化団体で推進されており、映像信号の帯域圧縮技術の標準化活動が活発に行われている。MPEGは、ISO/IEC JTC1/SC29の下部組織であり、SC29の委員長は、東京大学の安田浩教授である。図表6に、各MPEGフェーズのデータ転送レートと主なアプリケーション、および、標準化発効時期をまとめる。

最近、電器製品や通信技術など

図表5 光ディスク標準化委員会の開催実績³⁾

ISO/TC97/SC23			
1.	1985年5月29～31日	Tokyo	Japan
2.	1986年9月22～24日	Geneva	Switzerland
3.	1987年10月13～16日	Washington DC	USA
ISO/IEC JTC1/SC23			
4.	1988年11月29日～12月1日	Maastricht	Netherlands
5.	1989年10月25～27日	Tokyo	Japan
6.	1990年10月22～24日	Washington DC	USA
7.	1991年9月12～13日	Sofia	Bulgaria
8.	1993年4月22～23日	Eindhoven	Netherlands
9.	1994年11月3～4日	Geneva	Switzerland
10.	1995年10月26～27日	Seoul	Korea
11.	1996年10月24～25日	Berlin	Germany
12.	1997年10月16～17日	Washington DC	USA
13.	1999年10月29日	Beijing	China

の国際標準規格を決める各国際機関のトップとして、ISO（国際標準化機構）の田中正躬⁵⁾氏、ITU（国際電気通信連合）の内海善雄氏、IEC（国際電気標準会議）の高柳誠一氏がそれぞれ就任した。標準化委員会は産業競争力という国益に直結する問題を扱う国際舞台だけに主導権を握ろうとする各国の様々な思惑が渦巻いている。公平を保ちながら国際標準をどう決定するかトップに就任した日本人の手綱さばきに注目が集まっている。

図表6 MPEGの概要と標準化時期

フェーズ	データ転送レート	主たるアプリケーション	発効時期
MPEG-1	1 Mbps 程度	ビデオ CD	'93年3月
MPEG-2	4～10Mbps 程度 (SDTV) 数十 Mbps (HDTV)	DVD 地上波・BS・CS・ケーブル放送	'95年3月
MPEG-4	～384Kbps (QCIF) 128Kbps～2Mbps (CIF) 15Mbps 程度 (SDTV) 38.4Mbps (HDTV)	TV 電話、移動体通信 インターネット、 放送用途	'99年5月
MPEG-7	—	電子番組表 (EPG) ホームサーバ応用	'01年9月

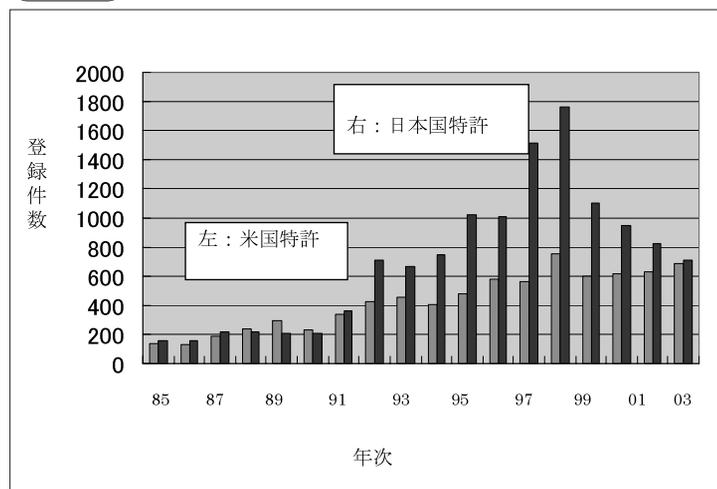
パイオニア社 HP をもとに科学技術動向研究センターで作成

4-2

光ディスク産業における日本の特許状況

図表7は、日本、及び、米国の特許庁に登録された光ディスク技術の特許登録件数の年次推移を示すものである。91年以前や最近の登録件数は、日本と米国ではほぼ同数であるが、'98前後は日本での登録件数が米国での登録件数を凌駕している。日本の特許庁への出願の大部分は日本の機関からの出願で占められているので、日本の企業の登録特許件数が多いと考えられる。次に、米国の特許庁への出願は、日本を始めとする米国以外の国々からも数多く出願されている。これらの事実から、日本の機関が有する特許登録の件数は、少なくとも全登録件数の半数以上を占めており、日本の特許ポジションは少なくとも数においては相当高いと推測できる。実際に筆者の

図表7 日本、および米国の光ディスク特許登録件数の推移



特許庁 HP 公開データを基に科学技術動向研究センターで作成

出願経験からしても、日本から米国への特許出願に対する公知例として米国の特許庁から出される引例の国別の割合は、日本からの引例が半数以上を占めている。

従って、このような特許的な利点を標準化仕様とリンクさせた形での標準化体制の強化が考えられる。すなわち、研究課題をより基本的なテーマに求め、新製品の基

本となるような特許を取得する方向に向かい、特許の数だけでなく質においても高いポジションを目指し、標準仕様としての位置を確保して行く必要がある。また、現状では、他の国々への特許活用を個々の企業がばらばらに展開しているが、各企業が互いに連携を取りながら補強しあうという戦略も必要になる可能性がある。

5. EVD：米中連合の新しい標準化の動き

5-1

EVD 発表の経緯

以上、光ディスク産業における日本の企業の優位性を技術、ビジネス、標準化、そして、特許ポジションについて述べて来た。しか

し、日本の企業もここ数年は、急速に力を付けてきた韓国や台湾の企業との統合合併という形でビジネスを展開せざるを得ない事態になっている。このような状況にあつて、昨年秋、中国の企業団体が中国独自の標準仕様による光ディスク、EVD を発表した。EVD は

Beijin E - World 社などが、米国の On2 Technologies 社からハイビジョン信号の帯域圧縮技術である VP5、VP6 と称される技術の移管を受け、DVD (4.7GB) と同じ記録容量で高品位画像の映画を収録可能と表明している。すなわち、DVD 陣営では、MPEG 標準によ

る DVD の高品位版が現在提案されているが、EVD はその対抗版と推測される。これら両者の画質比較は現在のところ確認の術がなく、いずれが優位とは言い難い。しかし、これまで一本化されてきた MPEG ベースの DVD 路線とは違った土俵でのビジネス展開をはかろうとしていることは事実のようである。

前章までに詳述してきたように、DVD は、映画 2 時間以上を収録する記録媒体として現在世界的に普及しつつしているビデオカセットテープよりも、画質も使い勝手も優れており、その置き換えが米国をはじめとして日本でもここ数年、急速に進んでおり、日本の電気メーカーにとって益々魅力のある製品として育てている。実際、DVD 映像ソフトの小売り市場も急拡大を続けており、業界予測では、今年の販売額は 1 兆 3 千億円と初めて映画の北米興業収入を追い抜く勢いと報じられている。

ところが、DVD プレーヤの実際の生産現場は中国にあり、中国製の家庭用 DVD プレーヤは世界市場の最大 70% を占めており、昨年は 3,000 万台以上の DVD プレーヤが中国で生産され、主として米国でかなりの廉価で販売されている。そして、中国製品の販売に対して相当のライセンス料が日本やオランダなどのメーカーに支払われていると伝えられている (USA Today Nov.18, 2003)。

今回発表された中国の EVD 戦略は、ライセンス料の減額を目指し、生産現場における光ディスク装置の外国産技術への依存度を減らそうと言うもくろみである。EVD の記録容量を決める光源は、赤色の半導体レーザー (波長: 650nm) であり、記録容量は、DVD と同じ 4.7GB である。EVD は、技術的な優位性をハイビジョン映像の帯域圧縮技術の方に

求めようとしており、これまでの MPEG に準拠する次世代ハイビジョン DVD に対抗しようとする標準仕様である。ここで、看過できないことは、米国のベンチャー On2 社の帯域圧縮技術を中国企業に移管して EVD を完成させようとしていることであり、中国が On2 へ支払うライセンス料は、現在の額よりも低額と報道されている (USA Today Nov.18, 2003)。中国の EVD プロジェクトにおいて実際に核となって動いている開発者は、中国から米国に派遣されている数多くの優秀な留学生であると推測される。中国市場の特徴として、画質が多少劣ってもより安価なものが受け入れられることも事実で、映像用の光ディスクの標準化について、過去も現在もいろいろな試みがなされてきた。これまで、IEC の JTC1 ではなく、IEC の TC100 (家電) への提案もあり、今回の EVD 発表は、そうした流れである。現時点では、ハイビジョンのディスプレイ装置が普及している段階ではないので、今回の中・米の標準化戦略がそのままの形で効を奏するとは限らない⁴⁾。しかし、日本の光ディスク産業陣が方策を誤れば、今後の脅

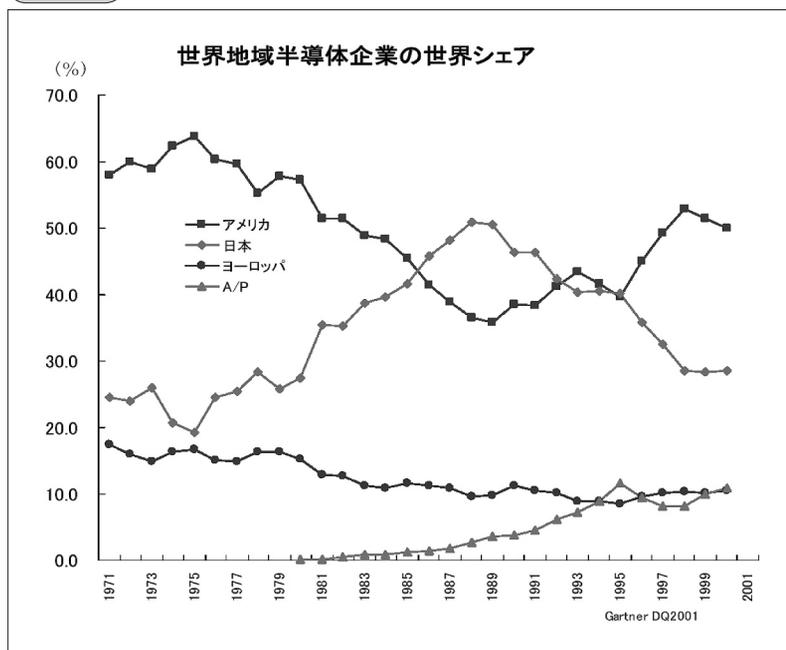
威となる可能性が全くないとは言えない。関連のあるケースとして、第 3 世代携帯電話にも「中国規格」を導入する方向であり、中国は独自規格に関する特許を確保して日米欧との知的財産権交渉を有利に運ぼうとしている事実もある。

5 - 2

日本の半導体産業の衰退との比較考察

半導体産業では、世界シェアの大変動が 90 年代に発生したが、この場合と光ディスク産業の場合とを比較してみることは興味深い。すなわち、図表 8 にみられるように、日本の半導体の世界シェアは、90 年代半ば以降減少した^{7, 8)}。その理由は、80 年代の日米経済摩擦が原因の 1 つと言われている⁹⁾。日米半導体協定によって、日本は米国製品の 20% シェア確保を要請され、反ダンピング法で対米輸出価格を規制された。この動きがきっかけとなり、日本のシェア低下が始まった。それに対し、ライバル会社は、それぞれの得意分野に投資を集中した。米国の(株)インテル社は、DRAM を放棄という大決断を実行し、CPU (中央演算処

図表 8 半導体の世界シェアの劇的な変動



理装置)に特化して成功した。米マイクロソ社は、DRAM生産に使うマスクのコストが大きく影響すると分析し、マスクの枚数を減らすことで大きなコスト競争力を付けた。また、サムスン社など韓国勢はDRAM自体に集中して投資し、台湾勢は製造技術に特化して日本を追い抜いた。韓国、台湾いずれの場合も米国で学んで祖国に帰った優秀な留学生達が重要な役割を果たしたことは良く知られている。さらに、CPUの仕様は、(株)マイクロソフト社のPC設計仕様に左右されるため、(株)マイクロソフト社と(株)インテル社の垂直統合が自然に形成され、この垂直統合が日本にとっていつの間にか参入障壁となり日本のメーカーが将来に向けて明確なビジョンを描けなくなって益々シェアを減らすことになったという見方もある。

そこで、半導体産業で起こった

図表9 ハリウッド、あるいは、マイクロソフトを頂点とし部品(Commodity)を底辺とする光ディスク、あるいは、パソコンの産業システム構成

	光ディスク		パソコン
コンテンツ	映画会社(ハリウッド)		マイクロソフト社
キーデバイス	DVDディスク復号器(LSI)(MPEG標準)	EVDディスク復号器(LSI)(VP6標準)	Windows CPU(LSI)(インテル標準)
装置	DVDプレーヤ	EVDプレーヤ	PC
	相互互換なし		
共通部品(Commodity)	光ピックアップ、半導体メモリ、制御回路、メカニクス		メモリ(HDD、DRAM)

図中、上ほど知的集約度が高いことを意味する

世界的なシェア変動現象と光ディスク産業の場合を比較してみる。すなわち、図表9に示すように(株)マイクロソフト社は、コンテンツメーカー、すなわち、知的集約度の高いハリウッドの映画会社に対応する。最近、ハリウッドの映画製作のコスト削減のために映画の制作現場を中国に移しているという事実もある。従って、もし仮

にハリウッドにとって、巨大な中国市場における映画コンテンツの普及のためには、DVDではなくEVDを採用する方が有利となるような事態が発生すれば、日本の光ディスクメーカーが供給できるのは、共通部品(Commodity)だけという状況にもなりかねない¹⁰⁾。

6. 結 言

以上述べてきたように、現在世に普及しているCDやDVDなどの再生専用の光ディスクの原理はオランダの(株)フィリップス社で発明され開発された。しかし、日本の企業は、80年代から今日までの20数年間、卓越した量産化技術を武器として、技術、ビジネス、標準化の全方位的にリードしてきており、光ディスク産業は日本企業の圧倒的な勝ち戦を持続して来た。さらに、日本で開発された波長405nmの青紫色半導体レーザーを光源とし、記録容量が20GB以上におよぶBDや15GBのHD DVDが次世代標準仕様として日本メーカー主導で牽引されており、次世代においても日本の光ディスク産業の優位性は続くと期待される。

しかし、日本のメーカーがトップシェアを維持するためには、韓国や台湾の企業との合併による協

力体制を余儀なくされていることは事実であり今後の動向には目が離せない。現時点では、ハイビジョンのディスプレイ装置が普及している段階ではないので、今回の中・米の標準化戦略がそのままの形で効を奏するとは思えない⁵⁾。しかし、今後の方策を誤れば、半導体や液晶で発生したマーケットシェアの世界的な大変動が、光ディスクの分野でも起こらないとは限らない。関連するケースとして、第3世代携帯電話にも「中国規格」を導入する方向であり、中国は独自規格に関する特許を確保して日米欧との知的財産権交渉を有利に運ぼうとしている事実もある。

さらに懸念されるのは、日本国内において、BD陣営とHD DVD陣営が内紛をしている事態である。そして、次世代のハイビジョン世代の光ディスクの標準化過程で、現世代のDVDのコンテンツ

を支配しているハリウッドがどう動くかにも注意が必要である。

日本の企業の今後の方策として、これまで技術、ビジネス、標準化の全方位で維持してきた優位性を活用し、日本の特許的な利点を標準化仕様とリンクさせた形で標準化体制を強化していくことが考えられる。すなわち、研究課題をより基本的なテーマに求め、製品の基本となるような特許を取得する方向に向かい、特許の数だけでなく質においても高いポジションを目指し、標準仕様として採用される程の水準に高めて行く必要がある。また、現状では、他の国々への特許活用を個々の企業がばらばらに展開しているが、各企業が互いに連携を取りながら補強しあうという戦略も必要になる可能性がある。

さらに、中長期的観点からみた施策として、我が国においても自

由闊達で創造的な研究者のグループが活躍し、オランダにおける光ディスクの発明のような科学技術の飛躍的進歩の発生を促すような研究の場の充実が今後も一層求められる。戦前の理化学研究所はそのような研究の場として模範的であったと伝えられているが、そのパトロンは民間資本であった。最近の不況下にあっては、私企業にそのような場を提供するパトロンの役割を全面的に期待するのは困難である。従って、政府にその補助的役割を求めることができないだろうか。

最後に、本稿を執筆しながらの感想を述べる。5 - 2節で述べた半導体や液晶の世界規模のシェアの大変動を起こしたような米国企業のアジアの企業へのCommodity 封じ込め戦略、すなわち、システムの頭脳や心臓部は米国企業が掌握し、末端の部品はアジアで生産させるという戦略があるのではないか。そしてさらに、日本を韓国や台湾そして中国などのアジアの新興国と同一のレイヤーでとらえ、アジアのいずれの国をも部品レベルの生産工場とし、互いにコスト競争させるという戦略の線上に日本の企業が追い込ま

れる事態になってしまわないだろうか。日本としては、このような事態を避けねばならない。すなわち、日本は、単なるCommodity 生産国となってこれに甘んじることなく、もの作りという強さを保持しながら、より付加価値が高く知的集約度の高い製品へ指向し、より多様な構造を持ったポスト工業化社会への脱皮を計るべきではないだろうか。そして、世界の人口を擁する中国をはじめとするアジアという未開拓の巨大市場を今後の日本経済の持続的発展と諸外国との共存共栄のために生かす道を探らねばならないと思う。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、標準化の経緯について貴重なご意見を頂いた(株)科学技術振興機構の三橋慶喜氏、光ディスク全般について貴重な情報とご意見を頂いた、科学ジャーナリストの馬場錬成氏、(株)ソニーの小笠原敦氏、そして(株)日立製作所の寺尾元康博士に感謝いたします。

参考文献

1) K. Bowhuis 編：“Principles of Optical Disk Systems” (Adam

Hilger)

- 2) 朝永振一郎：江沢洋編：「科学者の自由な楽園」(岩波文庫)
- 3) 山田尚志：「DVD—技術と業界ニーズの結合による成功—」電子情報通信学会誌；Vol.87, No.1, pp.10 - 15, 2004年1月
- 4) 三橋慶喜：ISOM2000 (International Symposium on Optical Disk) 記念DVD - ROM, “Chronicle of ISOM”
- 5) <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0004519/>；「ISO次期会長選挙の結果について」
- 6) http://j.peopledaily.com.cn/2004/01/09/jp20040109_35725.html；「プレーヤー発売は2社“EVD連盟”」
- 7) 生駒俊明：Proceedings；“The Second International Conference on Technology Foresight”，2 - 2 (Feb. 27 - 28, 2003, United Nations University Headquarters)
- 8) 奥和田久美：「科学技術動向」2003年4月号、No.25「シリコン半導体デバイス研究に対する大学の関わり」
- 9) 坂本幸雄：“日経4946 File”，2003年12月号「日本のDRAMはなぜ衰退したか」
- 10) 副島隆彦：「預金封鎖」(祥伝社)



特集③

発電用ガスタービン高効率化に向けた耐熱材料の開発動向



材料・製造技術ユニット 玉生 良孝

1. はじめに

1997年の京都会議（COP3：気候変動枠組条約第3回締結国会議）において、日本の地球温暖化ガス削減目標として「1990年比6%減を2008～2012年に達成」が議定書に盛り込まれた。我が国は2002年にこれを批准した。地球温暖化防止の観点から、CO₂排出削減のため、革新的技術の開発が求められている。

発電所等のエネルギー転換部門に由来するCO₂排出は火力発電を原子力発電に代替することで著しく削減できることが知られているが、昨今の状況から原子力発電所の増設は困難に直面している。このような状況下において、現実的なCO₂削減策として電力の主要構成要素を占める火力発電の効率向

上が期待されている。

ガスタービンやジェットエンジンなどの熱機関は、カルノーサイクル^(注1)の高温側をより高温で運転することにより、最も有効に効率を上昇させられることが知られているが、そのためにはすぐれた耐熱材料が必要となる。

総合科学技術会議では、ナノテクノロジー・材料分野の重点領域として「環境保全・エネルギー利用高度化材料」を挙げ、達成目標に「COP3目標実現に必要な総合的なCO₂排出量削減のための材料の実現と実社会への浸透」を掲げている。技術的目標の一例としては、「火力発電の単位電力当たりのCO₂の30%削減を実現する高温強度・耐食性を向上した金属材

料の実現」が示されている。具体的には、タービン入口温度を現行の1,500℃から1,700℃に高温化するために必要な超耐熱金属材料およびタービンシステム技術の開発が求められている。

本稿では、超高温ガスタービン実現に不可欠な超耐熱材料に焦点を当て、その技術開発を概観し今後の動向を述べる。

(注1) 気体に、等温膨張、断熱膨張、等温圧縮および断熱圧縮を行わせる熱機関。その効率 η は、 $\eta = 1 - T_L/T_H$ で表される。ここで、 T_L 、 T_H はそれぞれ低温、高温熱源の絶対温度。

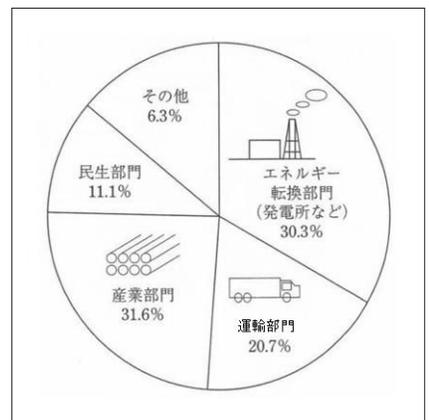
2. CO₂ 排出量削減対策としての耐熱材料開発

温暖化を始めとする地球環境問題への対応は耐熱材料を取り巻く状況にも影響を与えた。日本国内のCO₂総排出量の内訳を部門別に見ると図表1に示される様に、発電所などのエネルギー転換部門が最も多く約30%を占める。発電に関して見れば、図表2に示される様に、電力供給量の55%を賄う火力発電が、発電に由来するCO₂の殆ど全てを排出している。このような状況において、電源構成の主軸を担う火力発電プラントでは、高温高压化、とりわけ超々臨界圧

による発電効率向上の取り組みと共に、カーボン量の少ない天然ガスの使用や、コンバインドサイクル発電（後述）の採用等の取り組みが進んでいる。

現状、石炭や石油等の火力発電の平均熱効率は約40%（HHV基準^(注2)）である。即ち、大量に燃焼された化石燃料の半分以上は熱的に有効利用されずにCO₂を排出している。近年、石炭、石油等の従来の燃料に比べて単位熱量当たりのCO₂発生量が少ない液化天然ガス（LNG：Liquefied Natural

図表1 国内CO₂総排出量の内訳¹⁾



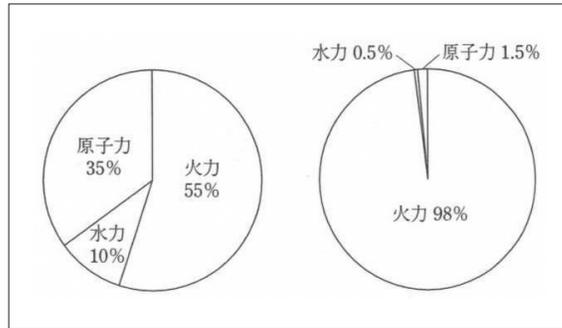
Gas) を燃料として用いる LNG 火力が注目されている。中でも、ガスタービンの発電に加え、その廃熱を有効利用してつくった蒸気によって蒸気タービンを駆動して発電する LNG 複合 (コンバインドサイクル) 発電は、熱効率が高く、火力発電の中では CO₂ 発生量が最も少ない。図表3に示される様に、石炭火力を LNG コンバインドサイクル発電に更新することにより、単位発電電力量 (kWh) 当たり約 47% の CO₂ 削減効果を発揮しうる。太陽光、風力等の自然エネルギーによる発電で、基幹エネルギーを代替することは困難であり、LNG コンバインドサイクルが発電部門における CO₂ 削減策の切り札的存在となっている。

120 万 kW 級の大型の石炭火力発電 1 基当たりの CO₂ 発生率は国内総排出量の 0.7% に相当する。これを次世代の超高効率 LNG 複合発電 (タービン入口ガス温度 1,700℃、熱効率 60%) に更新すれば、燃料転換と高効率化によって CO₂ 発生率は 0.3% まで削減することが可能と考えられている。国内の主要な石炭火力発電所は 12 基 (出力 90 万 kW 以上) で、その合計出力は 1,713.5 万 kW (H13 年 3 月末現在) に相当する⁵⁾。これは国内 CO₂ 総排出量の約 10% を占める。超高効率発電導入による CO₂ 削減効果は十分に大きいと考えられる。

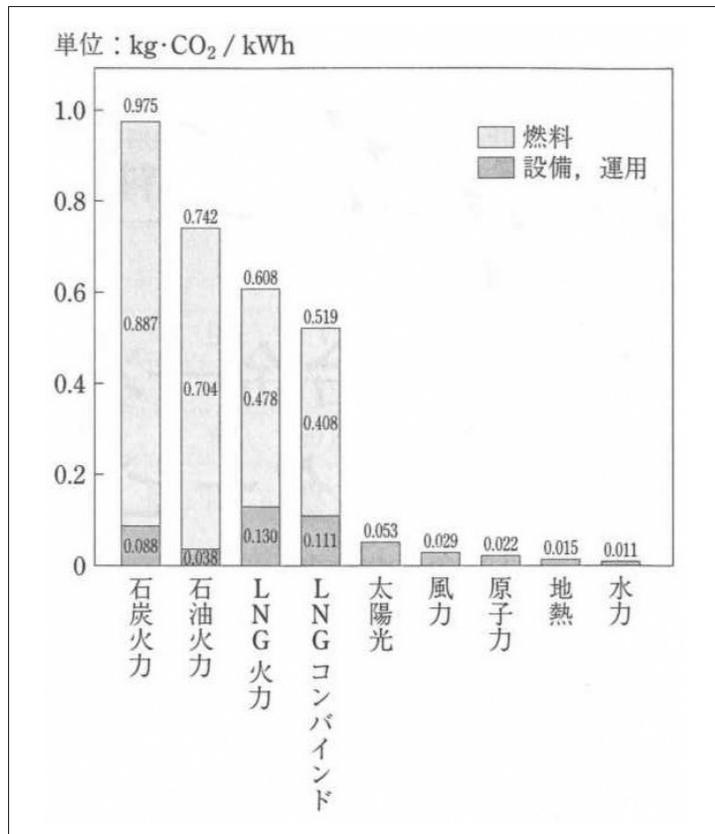
コンバインドサイクル発電については、まず 1,100℃ 級 (タービン入口ガス温度) 機が本格的に導入された。1990 年代後半からは、より高い熱効率、環境性、機動性を兼ね備えた 1,300℃ 級 ACC (Advanced Combined Cycle) 発電設備が LNG 火力の主流となってきた。さらに熱効率 52~54% (HHV 基準) を実現する 1,450~1,500℃ 級のコンバインドサイクル発電設備の開発も既に実用化の段階に入っている^{6,7)}。

(注2) 高位発熱量基準。燃料のもつエネルギー (発熱量) を表示する際の条件を示すもので、高位発熱量基準 (HHV) では燃料中の水分および燃焼によって生成された水蒸気の凝縮熱 (蒸発潜熱) を発熱量として含む。低位発熱量 (LHV) 基準では蒸発潜熱を加算しない。従って発電効率は高位発熱量基準の方が、低位発熱量基準よりも低い値になる。

図表2 国内の発電方式による電力供給比 (左)²⁾ および CO₂ 排出比 (右)³⁾



図表3 国内の電源別 CO₂ 排出原単位¹⁾



このような最新鋭のガスタービンの開発では、燃焼ガスを高温化するため Ni 基超合金に代表される耐熱金属材料においては、一方 向凝固材、単結晶材などが開発され耐用温度が向上しており、材料開発が大きな役割を果たした。また、耐熱金属材料の開発と共にタ

ービン翼の冷却技術や外面の遮熱セラミックコーティング材料が開発されてきた。

図表4に耐熱材料の耐用温度とコンバインドサイクルの熱効率の関係を、実用技術レベルおよび各国のプロジェクトの開発目標値についてまとめて示す⁴⁾。普及型

LNG コンバインドではタービン入口ガス温度が1,100～1,300℃で熱効率が43～49%程度であるが、1,500℃級では50%を超える熱効率が達成されており、今後タービン入口ガス温度を1,700℃にすれば熱効率は60%まで高効率化すると試算されている。実効的CO₂削減策として超高効率ガスタービン実現のため、新しいタービン動・静翼材用超耐熱材料の開発が求められている。

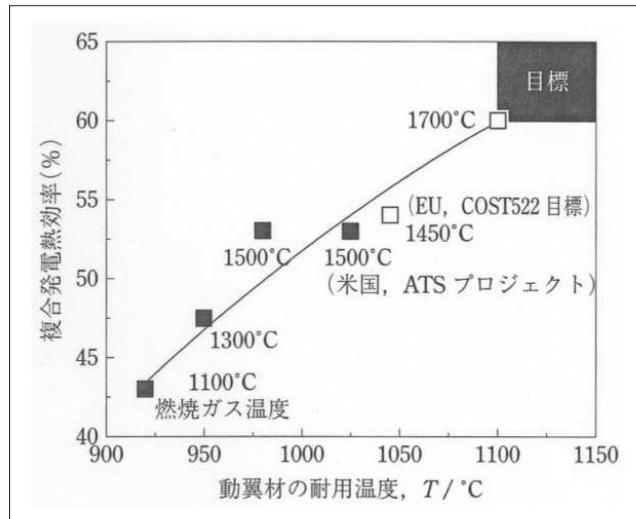
図表4中、米国ATSプロジェクトは、DOEの先進タービンシステム(ATS)プロジェクトで、1,500℃級のガスタービンがGEを中心に開発され実用化されている。欧州では1998年からCOST-522プロジェクトで1,450℃級の発電タービンを目標に研究が進んでいる。我が国においても、電力産業用高効率ガスタービンの開発に向けて、タービン入口ガス温度を1,700℃へと高温化することが計画されている。

欧米における耐熱材料開発が、戦略的技術である航空機用ジェットエンジン開発を牽引役として産学官一体となって開発されているのに対し^{8,9)}、日本では耐熱材料は民生用ガスタービン主体に開発されており、その開発の背景は大

きく異なる。

エネルギー・地球環境問題が深刻になる今世紀においては、耐熱材料は航空技術の側面からだけでなく、エネルギー高度利用の観点からも、戦略的な重要性を今後増すものと考えられる。

図表4 空冷翼として用いる場合のタービン動翼材の耐用温度と複合発電熱効率⁴⁾



図中右上の目標は、文部科学省/経済産業省/物質・材料研究機構等で計画立案中のプロジェクトの開発目標

3. Ni 基超合金の開発の経緯

耐熱材料に要求される基礎的な特性としては、高温での強度、耐酸化性、耐腐食性等が重要である。超耐熱合金(超合金)にはニッケル基、鉄基、コバルト基等の種類があるが、産業用ガスタービンやジェットエンジンの出力や効率を決定づける高温部、特に燃焼器、高圧タービンには、各種Ni基超合金が多用されてきた。図表5に、Ni基超合金の耐用温度向上の経緯を示す¹⁰⁾。縦軸は耐用温度として、応力137MPaにおいて1,000時間でクリープ(注3)破断する温度を示している。ガスタービンでは、高温ガスと耐熱材料の間に数百℃の温度勾配があるが、耐熱材料の耐用温度を向上させられればそれに応じてタービン入口ガス温度を上昇させることが可能になる。

1999年度からはじまった新世

(注3) 材料を高温に保ち、ある一定の応力をかけた場合、瞬間的には破断しないが、長時間にわたって材料が徐々に変形し最終的には破断に至る現象。ガスタービンやジェットエンジン、ボイラーなど、高温で長時間用いる機器の構造材料部材にとって最も重要な特性。

(注4) 中空な鋳物を作る場合に主型の中空部にはめ込む鋳型

紀耐熱材料プロジェクトでは、材料温度を100℃向上させることによりガス温度を200℃向上させ、1,700℃級の超高効率ガスタービンを実現するための研究が進められている。

Ni基超合金は、鍛造合金から普通鋳造合金、一方向凝固合金、単結晶合金へと進化してきた。1940年代に開発された鍛造(Wrought)合金N80等がタービンの動・静翼に適用され、析出強化等により強度を上げてくると、鍛造成形が次

第に困難になってきた。これに替わって、1950年代半ばに真空溶解技術が開発され、Al、Ti等の活性元素を多量に含む合金組成を、中子(注4)を用いた普通鋳造(CC: Conventionally Cast)鋳物として精密鋳造することが可能となり、析出強化や固溶強化がさらに進んだ。しかしながら、得られた合金は結晶粒が多数集合した多結晶であり、結晶粒界が破壊の起点になることが課題であった。特にタービンプレードの場合、高温で高速

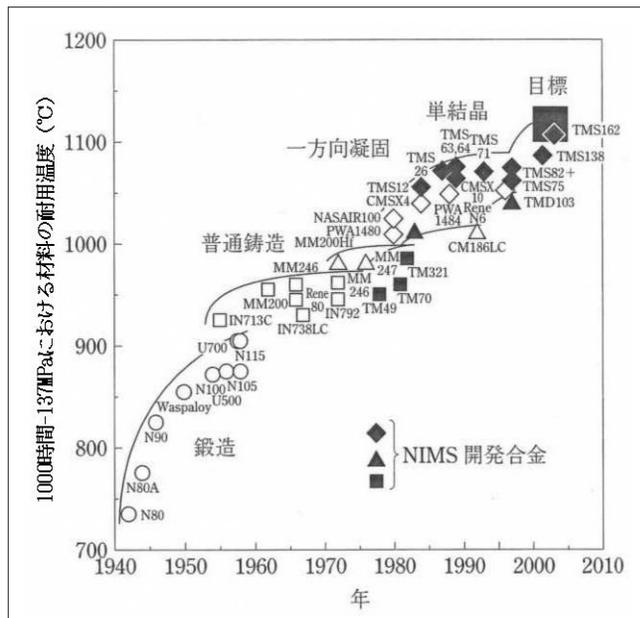
回転しているため長時間使用すると遠心力によって結晶粒界に沿って割れが生じてしまうという問題があった。

これに対して結晶制御により、一方向凝固合金や単結晶合金による鋳造材で、疲労とクリープ破壊が発生しやすいタービン翼の長手方向に垂直な結晶粒界を無くした合金が開発された。1970年頃に米国で一方向凝固（DS：Directionally Solidified）プロセスの適用が開始されると、長手方向にかかる遠心力とほぼ平行に結晶粒界をそろえることにより、タービン翼の長手方向のクリープ強度と延性、および疲れ特性が大幅に向上した。さらに、1980年頃には、結晶粒界を全て無くし高温強度を大幅に向上させた単結晶（SC：Single Crystal）合金が開発された。図表6に普通鋳造、一方向凝固、および単結晶凝固によるタービン動翼を示す。方向性凝固により優先的に成長する結晶方位は、クリープ強度に優れ、熱疲労に強いという特性を持つ¹¹⁾。

また、単結晶超合金を越えるクリープ強度を有する超合金として酸化物分散強化（ODS）超合金が開発されている^{11, 12)}。この合金は、機械的合金（メカニカルアロイ）化→押出加工→一方向再結晶という一連のプロセスで製造される。酸化イットリウム（ Y_2O_3 ）のような長時間での高温下使用でも安定な微細酸化物が均一に分散されているため、特に1,000℃を越える様な高温のクリープ強度に優れている。この合金は、シートに鍛造、圧延が可能なものは燃焼器などの高温部材として用いられているが、延性が不十分なことや空冷翼製造が困難であることなどによりタービン動翼への本格的実用化には至っていない。材質の安定化・均質化と製造加工コストの低減も課題である。

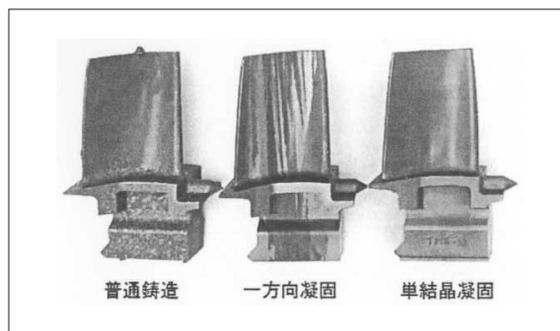
1940年代初頭の開発直後の合

図表5 Ni 基超合金の耐用温度向上の歴史¹⁰⁾



耐用温度は137MPaの応力下でのクリープ破断寿命が1000hとなる温度。
 ○：鍛造（Wrought）合金、□：普通鋳造（CC）合金、△：一方向凝固（DS）合金、◇：単結晶（SS）合金。黒塗りのNIMS開発合金は、物質・材料研究機構（旧金属材料技術研究所）における開発合金を表す。
 図中の目標は新世紀耐熱材料プロジェクトにおける開発目標

図表6 普通鋳造、一方向凝固、および単結晶凝固によるタービン動翼¹²⁾



金の耐用温度が730℃程度であったものが、最近では1,100℃まで開発が進んできた。350～400℃近い耐用温度の向上に約60年を費やしており、構造材料開発の典型的な例として、時間をかけて徐々に特性を向上させてきたことが伺われる。

代表的なタービン翼用Ni基超合金の組成を図表7に示す¹²⁾。何れの合金も10種類程度の構成元素を含む複雑な組成になっているが、強度、耐腐食性、耐酸化性、鋳造特性や熱処理特性等を考慮して合金元素が添加されている。合金組成に応じて、初期の第1世代合金、Re（レニウム）を

3 mass%程度含む第2世代合金、Reを5～6mass%含む第3世代合金、さらに最近ではRu（ルテニウム）などの貴金属を含む第4世代合金と区別される。

開発合金の内、旧金属材料技術研究所で開発されたTMS以外は民間で開発されたことは特筆される。PWA、Rene、CMSX等は米国、MCはフランス、MDSCは日本のメーカーで開発された合金の商標である。特に欧米では航空宇宙産業においてエンジン開発が盛んであったため、政府が民間企業を支援し、官民一体となって耐熱合金の開発が加速された⁹⁾。

図表7 代表的なタービン翼用 Ni 基超合金の組成 (mass%, 残 Ni)¹²⁾

種類	合金名	合金組成														備考
		Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Hf	Re	C	B	Zr	Others	
CC	IN738	8.5	16	1.7	2.6	3.4	3.4	-	1.7	-	-	0.17	0.01	0.1	-	-
	IN792	9	12.4	1.9	3.8	3.1	4.5	-	3.9	-	-	0.12	0.02	0.2	-	-
	Rene' 80	9.5	14	4	4	3	5	-	-	-	-	0.17	0.015	0.03	-	-
	MarM247	10	8.5	0.7	10	5.6	1	-	3	-	-	0.16	0.015	0.04	-	-
	TM - 321	8.2	8.1	-	12.6	5	0.8	-	4.7	-	-	0.11	0.01	0.05	-	-
DS	GTD111	9.5	14	1.5	3.8	3	4.9	-	2.8	-	-	0.1	0.01	-	-	1st
	CM247LC	9	8	0.5	10	5.6	0.7	-	3.2	1.4	-	0.07	0.015	0.01	-	1st
	TMD - 5	9.5	5.8	1.9	13.7	4.6	0.9	-	3.3	1.4	-	0.07	0.015	0.015	-	1st
	PWA1426	12.0	6.5	1.7	6.5	6	-	-	4	1.5	3	0.1	0.015	0.03	-	2nd
	CM186LC	9	6	0.5	8.4	5.7	0.7	-	3.4	-	3	0.07	0.015	0.005	-	2nd
	TMD - 103	12	3	2	6	6	-	-	6	0.1	5	0.07	0.015	-	-	3rd
SC	PWA1480	5	10	-	4	5	1.5	-	12	-	-	-	-	-	-	1st
	Rene' N4	8	9	2	6	3.7	4.2	0.5	4	-	-	-	-	-	-	1st
	CMSX - 2	4.6	8	0.6	8	5.6	1	-	9	-	-	-	-	-	-	1st
	MC2	5	8	2	8	5	1.5	-	6	-	-	-	-	-	-	1st
	MDSC - 7	4.5	10	0.7	6	5.4	2	-	5.4	-	0.1	-	-	-	-	1st
	TMS - 26	8.2	5.6	1.9	10.9	5.1	-	-	7.7	-	-	-	-	-	-	2nd
	PWA1484	10	5	2	6	5.6	-	-	9	-	3	-	-	-	-	2nd
	Rene' N5	8	7	2	5	6.2	-	-	7	0.2	3	-	-	-	-	2nd
	CMSX - 4	9	6.5	0.6	6	5.6	1	-	6.5	0.1	3	-	-	-	-	2nd
	TMS - 82	7.8	5	3.4	8.7	5.2	0.5	-	4.4	0.1	2.4	-	-	-	-	2nd
	YH61	1	7.1	0.8	8.8	5.1	-	0.8	8.9	0.25	1.4	0.07	0.02	-	-	2nd
	Rene' N6	12.5	4.2	1.4	6	5.75	-	-	7.2	0.15	5.4	0.05	0.004	-	0.01Y	3rd
	CMSX - 10	3	2	0.4	5	5.7	0.2	0.1	8	0.03	6	-	-	-	-	3rd
TMS - 75	12	3	2	6	6	-	-	6	0.1	5	-	-	-	-	3rd	
ODS	MA6000	2	15	2	4	4.5	2.5	-	2	-	-	0.05	0.01	0.15	1.1Y203	-
	TMO - 20	8.7	4.3	1.5	11.6	5.5	1.1	-	6	-	-	0.05	0.01	0.05	1.1Y203	-

種類の CC は普通鑄造、DS は一方向凝固、SC は単結晶、ODS は酸化物分散強化を表す。また、備考の 1st, 2nd, 3rd は合金開発の世代を表す

4. 実用化が期待される新材料の開発¹²⁾

Ni 基超合金を遙かに上回る耐温度を発現する可能性があるとして新しい材料系の開発が進んでいる。これらの材料は、実用的な耐熱材料としては Ni 基超合金を代替する程の信頼性は未だ得ていないが、将来を担う革新的耐熱材料として実用材料の開発が囑望されている。

●セラミックス

金属を凌ぐ耐熱材料としてセラミックスが期待されている。特に

窒化珪素(シリコンナイトライド)系セラミックスは自動車用エンジン部品等の機械部品に使われており、1,000℃以下の温度範囲では、耐食性、強度、靱性に優れた信頼性の高い材料として評価されている。しかしながら 1,000℃以上の高温では強度が低下するため、ガスタービン用の材料として使用するには問題があった。最近の研究で、高温での強度低下の原因である粒界相の組成を制御することにより耐熱性を向上させて、1,500℃まで

強度低下の少ない材料が得られたとの報告もある。今後靱性等の一層の向上により高温での使用における信頼性向上が期待される。

●金属間化合物合金

金属間化合物は一般に室温での延性に乏しいが、TiAl 金属間化合物は、比重が Ni 基合金の約 1/2 で、比強度、比クリープ強度が Ni 基合金と同等、比剛性が高いなどの特徴を有しており、TiAl 基合金は、比較的軽量、高比強度で、

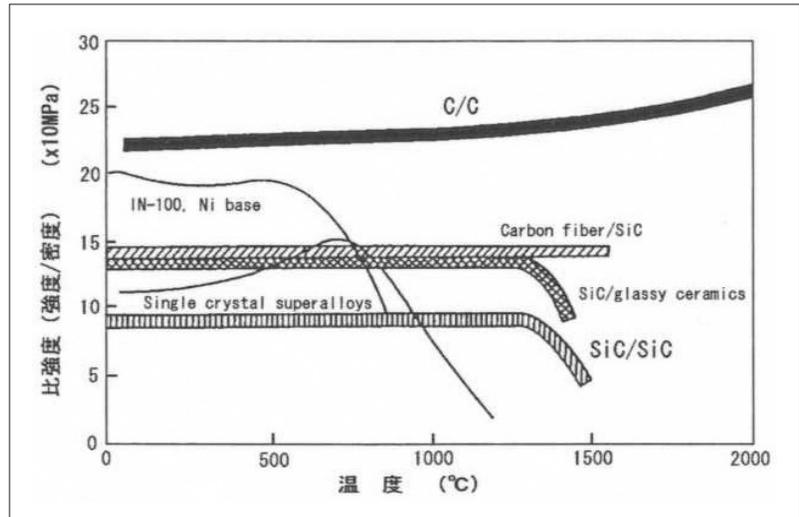
ある程度の室温延性を有していることから実用に近い合金である。コストパフォーマンスなどの点に課題は残るが、経済産業省の「環境適合型次世代超音速推進システム (ESPR)」では低圧タービン翼や静止部材への適用が検討されている。一方向凝固法による TiAl 系合金の結晶方位や金属組織制御により、優れたクリープ強度と室温引張り延性の両立等の研究成果も得られている。現在では、複雑形状を可能にする成形技術の確立や高温強度の向上を図る研究開発が進められている¹¹⁾。

●高融点合金

高融点金属は無冷却翼材として期待されている。中でも Nb (ニオブ) は融点が 2,468℃ と高温であるだけでなく、比重が超合金と同程度であり、延性にも優れている。1,500℃ 程度まで使用可能な高温強度を有しているが、耐酸化性が悪いことが実用化の障害となっていた。Nb に Si を添加して Nb 固溶体と Nb シリサイドの複合組織とすることによって、1,200℃ 付近で Ni 基超合金に匹敵する耐酸化性を持つ合金が得られている。経済産業省の「高融点金属系部材の高度加工技術」でも Nb 合金の研究開発が行われ、高温強度の大幅な向上が報告されてはいるが、現状では耐酸化性と強度を両立させるには至っていない。

Nb 合金以外でも、高融点金属をベースメタルに用いて Ni 基超合金と同様の組織を再現した高融点超合金が開発されている。融点 2,447℃ の白金族元素 Ir (イリジウム) をベースとして用いる Ir 合金は、融点が高く、室温での弾性係数が非常に高いことから、耐熱材料としての可能性を備えている。耐酸化性も従来の高融点合金に比べ改善されてはいるが、高温強度以外の比重や価格等の要求特性がバランスせず実用のレベルに

図表8 各種複合材料の高温強度¹⁴⁾



IN-100, Single crystal superalloys はいずれも Ni 基超合金

は達していない。Ir 以外にも Rh (ロジウム)、Pt (白金) 等をベースとした白金族基超合金が開発されている¹³⁾。これらの合金はすぐに実用化に結びつくものではないが、ここで得られた知見が Ni 基超合金への合金元素添加効果やコーティング材料としての予察に活用されている。

Cr 合金は従来延性に課題があり、延性を向上させると強度が低下するという問題があったが、超高純度溶解法により従来材と同等以上の強度と、室温での優れた延性、加工性が得られたことが報告されており、最近再び注目されている。また、通常溶解法で作製した Cr-W 合金あるいは Cr-Re 合金において、1,100℃ を越える高温域で Ni 基単結晶超合金を上回る高温強度が得られたとの報告もある。Cr 合金には高温で窒素の侵入による脆化が起こるといった問題があり、改善が待たれる。

●複合材料

耐熱性向上および軽量化の観点から、金属基複合材料 (MMC)、セラミック基複合材料 (CMC)、C/C (Carbon Carbon Composite) 等の複合材料が新たな耐熱材料として開発が期待されている。

金属基複合材料 (MMC) は、

軽量化や比強度向上の観点から研究が進み、Al 基、Ti 基、金属間化合物基等の材料が開発されてきた。「環境適合型次世代超音速推進システム」において部材化プロセスなどの研究が進められているが、実用化のためには、製造コストの低減と同時に、設計のための材料データベースの充実も求められている。

図表 8 に SiC 系複合材料と炭素系複合材料の温度に対する比強度の関係を、Ni 基超合金と対比して示す。これら複合材料は Ni 基超合金と異なり、1,000℃ を越える高温域においても比強度が良好な値を維持していることがわかる。

セラミック基複合材料 (CMC) は、比重が Ni 基合金の約 1/3 ~ 1/4、耐熱温度が 1,200℃ を越えるセラミックスと、SiC 等の強化繊維を組み合わせた材料であり、通常のセラミックに比べて破壊抵抗が格段に大きく、超軽量・超高温域対応の耐熱材料として燃焼器ライナー、高圧タービン静翼、シュラウドなどへの適用が期待されている。日本には優れた SiC 系繊維があるため、この分野における国内の技術レベルは高い。実用化を進めるにはコストの低減が最重要課題ではあるが、繊維と母相間の界面の組織制御技術や耐環境性向

上のためのコーティング技術などプロセス技術の開発も求められている。

C/C (Carbon Carbon Composite) は、2000℃に達する超高温まで強度が増加し、軽量耐熱材料として期待されている。しかしながら高温ガス雰囲気での耐酸化性が実用化の障害になっているため、コーティング技術の開発等により実用環境下における信頼性を高めることが重要課題である。

これらの複合材料はいずれも開発途上であり、複雑形状の成形や、高温下での耐環境性などに課題が残っており、現状では実用化までには至っていない。今後は材料特性の向上だけでなく、成形加工技術の確立や信頼性の向上等が期待される。

●遮熱コーティング (TBC)

ガス温度が向上し、ガスタービ

ンの運転条件が過酷になるにつれて、タービン翼、燃焼器など特に高温に曝される Ni 基超合金部材は、殆どが耐腐食、耐酸化、遮熱等の観点からコーティングを行って使用されるようになってきている。ガス温度の上昇に伴って特に重要性を増してきたのが遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating) である。合金層の上に溶射または電子ビーム蒸着 (EB-PVD) によりイットリア安定化ジルコニア (YSZ) をコーティングし、動静翼の強制空冷による内部冷却と合わせて用いることによって、コーティング層中に大きな温度勾配を作りメタル温度の上昇を抑えている。コーティング材としての酸化物には、熱膨張係数が比較的大きく (金属に近く)、熱伝導率の小さい材料が望ましい。長時間の使用中に徐々に特性が劣化したり剥離することが無い様な材料の開

発・探索が行われている。

最新鋭のガスタービンには、Ni 基超合金の一方向凝固 (DS) 材、単結晶 (SS) 材、遮熱コーティング (TBC) 材等が採用されており、冷却技術の開発と共に、ガス温度の大幅な向上、発電効率の高効率化に貢献してきた。燃焼室等の一部部材にはセラミックス等の新材料も適用が試みられているが、新材料に関してはどの材料が将来本格的に実用化されるかは未だ不確定である。広範な新材料に対して網羅的な研究開発が継続される必要があるが、将来の本格的採用を見通して、新材料の特性に合わせたシステム設計の検討も必要と思われる。過酷な運転条件での長時間の組織安定性や信頼性向上等においてシステム側と連携した材料技術開発を行うべきである。

5. おわりに

本稿では CO₂ 削減策としての観点から、耐熱材料の技術開発動向を概観した。耐熱材料はガスタービンやジェットエンジンなどの先進熱機関の熱効率を大きく左右するキーマテリアルであり、その開発は省エネルギー・省資源の観点からも、環境・エネルギー・材料の分野横断的に重要なテーマである。

耐熱材料は元来、ジェットエンジン等に使用される戦略的材料であり、欧米では軍事目的から材料開発が進められてきたという経緯があり、民生中心の日本とはその開発の背景を異にする。従来我が国の耐熱材料開発は、旧金属材料技術研究所 (現独立行政法人物質・材料研究機構) が先導してきたが、世界的に見れば高効率ガスタービンや超耐熱材料の開発では民間企業の果たしてきた役割が大きい。欧米ではジェットエンジン開発を国策として、国が民間企業を支援

して耐熱材料開発を推進してきたという経緯があり、その意味では日米欧何れでも耐熱材料開発に果たした国の役割は小さくない。

耐熱材料が、エネルギー高度利用の観点から戦略的重要性を増してきた今日、地球規模での環境問題解決のために、耐熱材料・ガスタービンの世界市場に対して、我が国の技術力の強化を通じた国際競争力の強化が望まれる。現在、日本製のタービンの耐用温度は世界最高レベルに達している。今後、より耐用温度の高い超耐熱材料を早期に開発することにより、次世代ガスタービンシステムの開発、実用化において我が国が指導的役割を果たすことが期待される。

地球環境保全という命題に対する日本発のメッセージとして、国が研究開発を推進し、研究開発の成果を速やかに事業化・産業化することが求められているが、材料

開発に時間がかかることは、今までの超合金開発の歴史が物語っている。次世代のガスタービンは耐熱材料として Ni 基超合金が使用されると考えられるが、将来的にはより高い耐用温度を有するセラミックスや高融点超合金等が本格的に実用化される可能性もあり、これら新材料の開発も並行して推進する必要がある。技術の継続的発展のためにも、長期的展望に立った継続的な支援が求められる。

(社)日本金属学会の材料戦略委員会で議論されている耐熱材料技術戦略のロードマップでは、CO₂ 削減目標達成のための方法論とタイムスケジュールが示されており、その中で高効率ガスタービンの開発、超耐熱材料開発の必要性が述べられている。新しい技術開発が実用化されるためには、システムと材料が密接に連携して開発を推進していく必要があり、今後さら

に産学官が連携して具体的な開発計画づくりを進めていく必要がある。2004年度から着手が計画されている、経済産業省主導の「高効率ガスタービン実用化要素技術開発」と、文部科学省主導の「超耐熱材料の実用化開発」においては、システムと材料が連携をより密にして開発を推進し、超高効率火力発電技術の開発を官民協力して進めるべきである。

産学官連携が謳われる中で、これからの耐熱材料開発における官の役割としては、研究開発の協力体制と役割分担を効果的に機能させるための環境作りとして、学協会等を利用した異分野技術交流の枠組み構築や調整機能への寄与が期待される。また材料評価やシステム要素技術に関してデータベース構築等の技術基盤整備を行う必要がある。

依然として厳しい経済情勢が続くなか、経済活性化の担い手である製造業の国際競争力強化・維持のため、環境負荷最小化のための材料開発を継続して推進することが期待されるが、そのためには民間企業が積極的に省エネルギー・省資源対応の材料・製造技術の開発・利用を行える様なインセンテ

ィブを、税制等も含めて検討することがこれからの課題と思われる。

謝 辞

本稿は、科学技術政策研究所において2003年9月11日に行われた物質・材料研究機構材料研究所超耐熱材料グループ原田広史ディレクターによる講演会「超耐熱材料の実用化戦略とエネルギー産業分野への波及効果～ジェット機からパワーエンジニアリングまで～」をもとに、科学技術動向研究センターによる調査を加えてまとめたものである。本稿をまとめるにあたって、原田氏にはご指導をいただくとともに関連資料を快くご提供いただきました。文末にはなりますが、ここに深甚な感謝の意を表します。

参考文献

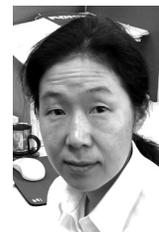
- 1) 電機事業連合会ホームページ：
<http://www.fepc.or.jp/menu/kankyo/kankyo1.html>
- 2) 資源エネルギー庁ホームページ：
<http://www.enecho.meti.go.jp/energy/japan/japan02.htm>
- 3) 新田明人：学振耐熱金属材料第123委員会創立40周年記念特集号，(1999.11)，p.157.

- 4) 原田広史、横川忠晴：「Ni基超合金一次世代ジェットエンジン・ガスタービンへの適用の期待―」まてりあ，42 (2003)，621.
- 5) 電機事業連合会ホームページ：
<http://www.fepc.or.jp/menu/hatsuden/hatsuden6.html>
- 6) 桜井隆：「電力設備の高効率・高耐久性化と材料」まてりあ，41 (2002)，74.
- 7) 野田俊治：「自動車および発電用タービンで用いられる耐熱材料」まてりあ，42 (2003)，271.
- 8) J.-C. Zhao and J. H. Westbrook：MRS BULLETIN，28 (2003)，622.
- 9) 前間孝則：「日本はなぜ旅客機をつくれないのか」草思社 (2002).
- 10) 原田広史：日本ガスタービン学会誌，28，No.4 (2000)，278.
- 11) 「進化するジェットエンジン」ふえらむ，8 (2003)，705.
- 12) 原田広史、横川忠晴：「ガスタービン用耐熱材料の進歩と将来への展望」日本のガスタービンの歩み 解説，(社)日本ガスタービン学会 (2002)，147.
- 13) L. A. Cornish, B. Fischer and R. Völkl：MRS BULLETIN，28 (2003)，632.
- 14) 香川豊：新素材，Vol.2 (1991)，No.3，p.48.



特集④

米国「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」における注目点



材料・製造技術ユニット 奥和田久美

1. はじめに

第108回米国議会上院および下院を通過した21世紀ナノテクノロジー研究開発法案(21st Century Nanotechnology Research and Development Act)(S.189)は、2003年12月3日、ブッシュ米大統領が署名したことによって正式立法に至った。米国議会に

おける本法案の審議はイラク戦争等の影響で延び延びになってきた感があるが、その分、より世相を反映し、社会問題、倫理問題、環境問題に対処する活動を可能な限り取り入れることを明記したものとなった。

ナノテクノロジーという研究分

野をどう扱っていくかに関して、法を制定した国は米国が初めてであり、本法は各国の今後の方針にも影響を与えると考えられる。ここではその注目点を述べ、法文概要を添付する。

2. 米国「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」¹⁾の注目点

2-1

立法までの経緯

本法案はまず2002年度の第107回米国議会上院に提案されたが、同会期中には成立せず、2003年度に改めて提案し直されたものである(米国議会では次年度は新提案扱いとなる)。

当初の提案意図は、議会が大きな予算決定権を握る米国の科学技術行政の中でナノテクノロジー研究開発に長期的予算を安定的に確保することと、硬直化した科学技術の研究体制の再編を加速することにあると考えられる。米国におけるナノテクノロジー研究開発は、2000年のクリントン前大統領による宣言以降、着実な予算増額を享受してきたと言えるが、それでも省庁間調整役として設けられたNNI(National Nanotechnology Initiative)²⁾の立場はそれほど強いものとは言えず、予算確保も連

邦政府の財政事情に左右されやすい立場にあった。今回の法制定により、少なくとも2008年までの研究開発予算と施策が確定し、比較的長期と言える期間にわたってナノテクノロジー研究開発を行っていくことが明らかになった。

1年半にわたる審議の間に、米国のナノテクノロジーへの見方が大きく変化した。当初、ナノテクノロジーは、バイオ関連の科学とは違い、倫理面等の問題が少ないとされて、法案成立も楽観視されていた。ところが、炭素菌等バイオテロへの対策、SARSの流行、イラク戦争の勃発などの緊急課題が山積し、審議がこれら緊急課題の後回しにされる間に、否が応でも、野放しのままナノテクノロジーを発展させることには危険性が伴う、ということに気付かざるを得ない状況になった。この結果、本法案に、社会問題、倫理問題、環境問題等を強調する大きな修正が入ることになったと考えら

れる。

審議の途中経過については他のレポートに詳しいので、そちらもご覧いただきたい³⁾。

2-2

本法の注目点

本法は主に、ナノテクノロジー研究開発への国家的取り組みを具体的に定め(第2条:国家ナノテクノロジー・プログラム(National Nanotechnology Program))、調整事務局(National Nanotechnology Coordination Office)や諮問委員会(National Nanotechnology Advisory Panel)の設置およびその役割(第3、4条)、3年毎の外部評価(第5条)、歳出予算(第6条)等を明示したものである。予算以外の戦略的計画は、制定後12ヶ月以内に国家科学技術会議(National Science and Technology Council)によって作成され、3年毎に見直される。調整事務局や

諮問委員会の設置に関しては、これまで機能してきたNNIや既存の委員会が引続き中心となっていくものと推測される。プログラムの外部評価には、全米科学アカデミーの全米研究評議会 (National Research Council) があたる。

中心となる国家ナノテクノロジー・プログラム (第2条) は、大統領責任において、①目標、優先課題、評価基準の設定、②目標達成のための資金投入、③省庁間調整を実行するものである。プログラムの最終的な目標は、「ナノテクノロジーの発展によって全米国民の生活水準が向上する」ことにある ((b)(10)(c)節)。したがって、具体的目標および優先課題設定で根本的な基準となるのは、プログラム運用で最初に述べられているように、「ナノテクノロジーを幅広く実用化するという国家的必要性」である ((c)(1)項)。

プログラムの各論では、ナノスケールでの制御および操作に関する基礎科学を推進するとともに、新興企業を含む民間への普及および実用化を加速し、米国の生産性および産業競争力を向上させることが示されている。興味深い特徴のひとつは、ナノテクノロジーの研究や教育活動を進めることにより、「真の意味での学際的研究の“風土”が醸成されるようにする」と記載されている点である ((b)(9)項)。施設設備の設置や安定的資金投入、あるいはプロジェクトや協力関係構築は、この風土作りのための具体策である。もうひとつの特徴は、倫理面、法律面、環境面等の社会的問題の勘案・考慮が詳しく述べられていることで ((b)(10)項)、負の側面への対処法が示されているわけではないが、可能な限り各研究開発にこの問題を取り入れ、専門の研究プログラムの設定 (第9条の準備センターが中心になると思われる) や継続的

な一般討論会 (市民パネル、合意形成集会、教育イベント等) を通じて、米国の考え方を定めていくプロセスが記されている。これを反映して、すでに米国各地で、ナノテクノロジーの倫理問題等に関する話し合いが盛んになってきている。もちろん、各論には「米国の全世界における指導的地位の確保」も掲げられてはいるが ((b)(5)項)、日本でこれまでよく言われてきたような、諸外国 (日本を含む) の優れたナノテクノロジー技術に米国が対抗する、というようなニュアンスはあまり感じられない。2000年時点では、そのようなプロパガンダが多少はあったかもしれないが、すでにそのようなフェーズではないということであろう。諸外国との比較分析においても、米国が首位を占めるべき重要研究分野の明確化が必要とされている (第5条(a)(12)項)。

プログラムの具体策として挙げられている「学際的ナノテクノロジー研究センター」や「ネットワーク」の設置、「学際的プロジェクトおよび協力関係」に関しては、諸条件が設定されている。これらの選定に際しては、これまでの実績評価や競争力が考慮され、既存の手法や技術も使い、設備等に関しても新設というよりは既存のマイクロレベル施設や遊休設備等を見直すことが推奨されている。具体的に、いくつかの募集および選考はすでに始まっているようである。例えば、NNIN (National Nanotechnology Infrastructure Network) ⁴⁾ は、このセンターあるいはネットワークに相当するものである。NNINの公募に対しては、本法に記載された諸条件を満たすように米国大学が自主的に組んだ3チームが応募し、最終的にコーネル大学およびスタンフォード大学を中心とする13大学から成るチームが選定され、すでに長

期的安定財源が約束された。

その一方で、本法では特定の研究分野への言及は極めて少ないと言える。本法成立をアナウンスするホワイトハウスからのプレスリリース⁵⁾では、ナノテクノロジーの研究テーマを例示して報道されたため、一部には誤解を招いているようだが、本法の中にはそのような個別課題はほとんど記載されていない (個別プログラムの中には多少の例示がある (第8、9条))。ただし、早めに決着を付けておきたい以下の事項が挙げられており、3年毎の外部評価の第1回目 (2005年6月) に判断を行ない、以降はその判断を覆さないというような強いニュアンスになっている (第5条)。

そのひとつは、分子の自己組織化に関する調査であり、分子スケールでの材料および装置の製造技術に対して、自己組織化技術を実用化できるか否か、という点を判断する。自己組織化はナノテクノロジー中での注目技術のひとつである⁶⁾が、米国の研究者にとっては、早く実用化の目途を示さなければならない技術になったとも言える。この技術のみが取り上げられていることの根拠は明確ではないが、ナノテクノロジー実用化の最初のモデルとしたいという意図があるのかもしれない。

もうひとつは、ナノテクノロジーの責任ある開発活動に関する調査であり、次の6つの判断対象に関して、国として基準・指針または戦略を設けなければいけないか、あるいは研究者あるいは研究団体の自発性に任せておけばよいかを見極めたいというものである。その判断対象の例は、①自己増殖するナノレベルマシン、②当該マシンの自然環境への放出、③暗号化、④国防技術の開発、⑤人間の知能強化におけるナノテク利用、⑥人工知能の開発におけるナ

ノテク利用である。すなわち、これら研究課題に関しては、野放しの研究開発では危険性があると考えられており、前述した負の側面が生じ得る例として挙げられているものと考えられる。テロ行為や感染症の拡大を見るにつけ、能力ある研究者がその気になればSFホラー映画も現実味を帯びてくる、といった米国民の危機感が推察される。

2003年5月の下院通過時点では、自己組織化技術の実用化については制定後3年以内、責任ある開発活動の指針等は6年以内というように、より長い調査期間が提案されていたが、成立法では実質的な調査期間が15年に短縮されている。

歳出予算(第6条)については、2005～08年度の間総額約37億米ドルを投資することが示され、比較的長期間にわたって安定的に増加させる指針が示されている(2004年度までは別審議)。ただし、ここには、米国の科学技術予算全体の大きな割合を占めるDOD(Department of Defense)およびNIH(National Institutes of Health)等が含まれていない(これらの省庁は、関係はするが、別プログラムとなっている:第2条(c)(3)項)。このため、ナノテクノロジー全体に投入される政府資金総額に関しては、本法のみでは正確な議論ができないが、少なくともここに示された2倍以上になるであろう。最終案には盛り込まれなかったが、2003年5月の下院審議では社会的および倫理的問題等へ予算配分に関して明確な割合を

記すという修正案も出た。また、省庁に関して言えば、2003年1月の法案提出時にはNIH、司法省、農務省、運輸省の予算も記述されていたが、これらも最終的には含まれない形となった。

最後の第10条には、用語の定義が示されている。ここで、「ナノテクノロジー」とは、「新しい分子構造、属性及び機能を有する材料、デバイスおよびシステムを作り出すことを目的として、原子レベル、分子レベル、超分子レベルでの理解、計測、操作および製造を可能にする科学技術」と定義されている。この記述に関しては、日本国内で現在一般に考えられているナノテクノロジーと大きな相違は無いであろう。また、「プログラム対象分野」は、第2条に記載されたプロジェクトおよび活動のすべてを指し、広い範囲を包含する曖昧な表現にとどまっている。

本法は、少なくとも2008年度までは有効である。特に、諮問委員会についてのみ、サンセット法(法令等が一定期間をもって自動的に廃止されること)の適用除外が明記されており(第4条(f)項)、その後については、この諮問委員会が鍵を握ることになると考えられる。また、別プログラムとなっている省庁(DODは国防ナノテクノロジー研究開発プログラム(Defense Nanotechnology Research and Development Program)、NIHはナノメディシンセンター(Nanomedicine Centers)設立計画等を持つ)との間の調整は、国家科学技術会議の監督の下に行われることになっている(第2条(c)

(3)項)が、これらの省庁の担当分野もナノテクノロジー発展にとっては極めて重要と考えられ、国家科学技術会議の監督機能の行方も気になるところである。

全体として、重要な戦略的計画や判断が2005年中には行なわれることになっており、ここ1～2年は米国のナノテクノロジー発展のひとつの節目となるであろう。

謝 辞

法文和訳に関してご協力をいただきました平河総合法律事務所福本修也弁護士に深く感謝いたします。

参考文献

- 01) Nanonet : <http://www.nanonet.go.jp/japanese/info/overseas/index.html>
- 02) NNI : <http://www.nano.gov/>
- 03) NEDO 海外レポート、No.907 (2003.5.19)、No.923 (2004.1.14)
- 04) NNIN : <http://www.nnin.org/>
- 05) The White House : <http://whitehouse.gov/news/releases/2003/12/20031203-7.html>
- 06) 科学技術動向、2003年12月号、製造技術分野トピックス

《添付資料》科学技術政策研究所は、ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンターと共同で本法の和訳を作成し、同支援センターのホームページに掲載した¹⁾。以下はその概要であるが、詳しくは掲載した全文を参考にされたい。

《添付資料》 法文概要

第1条 略称—この法律を「21世紀ナノテクノロジー研究開発法」(21st Century Nanotechnology Research and Development Act)と呼ぶ。

第2条 国家ナノテクノロジー・プログラム (National Nanotechnology Program)

(a)大統領は、関連省庁・関連委員会・調整事務局を通じて、(1)目標、優先課題、評価基準の設定、(2)目標達成のための資金投入、(3)省庁間調整、を実行する。

(b)同プログラムの活動に含まれるもの。

(1)ナノスケールにおける制御および操作を可能にする事項の基本的理解の推進

(2)個人研究者及び学際的研究チームに対する助成金交付

(3)先端技術共有施設 (advanced technology user facilities) およびセンターから成るネットワークを構築

(4)実績評価及び競争力を考慮して、学際的ナノテクノロジー研究センターを設置

付記:同センターは、技術情報および模範例に関する意見交換活動、他研究機関や産業界等との提携、既存知識や既存研究活動の活用、地理的分散と少数民族教育機関等の参加、などの諸条件を満たすこと。

(5)開発および実用化において、米国の全世界における指導的地位を確保

(6)長期的研究活動への安定資金投入により、米国の生産性および産業競争力を増進

(7)新興企業を含め、民間への普及および実用化を加速

(8)プログラム提案の募集・評価プロセスにより、学際的プロジェクトおよび協力関係を促進

(9)学際的知見に精通した研究者および専門家を対象に実効的教育および研修を提供、真の意味で学際的研究の風土を醸成

(10)倫理面、法律面、環境面等の社会的問題の勘案・考慮(人間の知能強化、あるいは人間の能力を上回る人工知能の開発に用いる可能性など)

施策付記:これらの研究プログラム設定と公表、上記(4)の学際的センターへ対処活動の義務付け、全米国人の生活水準向上への寄与、一般向けの情報提供と市民パネル等の一般討論会開催

(11)既存の手法及び技術を活用した研究促進

(c)プログラムの運用—国家科学技術会議 (National Science and Technology Council) は、本プログラムの企画立案活動、運用および調整活動を監督し、傘下団体を通じて以下を行なう。

(1)ナノテクノロジーを幅広く実用化するという国家的必要性に鑑みて、本プログラムの目標および優先課題を設定

(2)上記目標および優先課題を反映する形で対象分野を定め、具体的目標を盛り込む

(3)国防ナノテクノロジー研究開発プログラムと国立衛生研究所の活動との関係で、省庁間調整活動を監督

(4)制定後12ヶ月以内に戦略的計画を策定、3年毎に改訂、成果の実現を図る

付記:研究成果を社会に有益な形で実用化する方法、学際的研究開発活動への長期的資金支援、省庁間プロジェクトへの資金配分

(5)省庁間予算案調整、行政管理予算局への提出、研究バランスおよび水準確保

(6)学界、産業界、州政府、地方自治体等との情報交換

(7)連邦政府の施策(中小企業技術革新、中小企業技術移転等)の活用計画策定

(8)各省庁の対応が不十分な研究分野を把握および対処

(9)既存の製造設備及び産業インフラを通じてプログラム活動を前進(未使用の製造設備利用など)

(10)諮問委員会や一般討論会等からの提言、学会、州政府、産業界等の意見も考慮

(d)年次報告書—国家科学技術会議は年次報告書を策定し、予算要求を行う際に上院商業科学運輸委員会及び下院科学委員会等に対して提出(報告書内容を付記)

第3条 プログラムの調整

(a)総則—大統領は、国家ナノテクノロジー調整事務局 (National Nanotechnology Coordination Office) を設け、下記の事項を行なう。

- (1) 国家科学技術会議および諮問委員会に対して技術面及び行政面の支援提供
- (2) 連邦政府の活動の窓口としての役割（技術および関連情報の交換）
- (3) 必要に応じて、一般向け広報活動の出先機関の役割
- (4) 関連部局および制度全般、米国産業界（新興企業も含む）に対して、得られた技術、新機軸および専門知識を利用できるよう便宜を図り、その早期実用化を促進
- (b) 財源一同調整事務局への資金供給（該当公法明記）
- (c) 報告書—制定後 90 日以内に、科学技術政策局長は調整事務局の財源に関して報告書を提出（報告書内容を付記）

第 4 条 諮問委員会

- (a) 総則—大統領は、国家ナノテクノロジー諮問委員会（National Nanotechnology Advisory Panel）を新規設立または指名。
- (b) 資格要件—同諮問委員会は、主に学術研究機関および産業界関係者により構成（研究開発、実験、教育、技術移転、実用化、社会的・倫理的問題に関して助言および情報提供できる人材）。選任または指名には、連邦議会、産業界、科学界、国防関係者、州政府・地方自治体、地域的プログラム等の関連団体の提言を考慮。
- (c) 職責—諮問委員会は、同プログラムに関して大統領及び連邦議会に対して以下の評価を含む助言を行なう。
 - (1) ナノテクノロジー関連科学技術分野における動向および展開
 - (2) 同プログラムの実施面における進捗状況
 - (3) 同プログラムを改訂する必要性
 - (4) 財源水準等を含む構成要素のバランス
 - (5) 米国の指導的地位を確保するうえで、対象分野、優先課題および技術的目標が寄与しているか否か
 - (6) 同プログラムの運用状況、調整状況、実施状況および活動内容
 - (7) 社会面、倫理面、法律面、環境面および労働面の問題への対応が適切か否か
- (d) 報告書—同プログラムの改善方法案について 2 会計年度に 1 回以上の頻度で、大統領に対して報告書を提出。第 1 回目の報告書は、制定日から 1 年以内。
- (e) 連邦政府職員以外の出張旅費に関する規定
- (f) サンセット法からの適用除外

第 5 条 国家ナノテクノロジー・プログラムに対する 3 年毎の外部評価

- (a) 総則—調整事務局長は、科学アカデミーの全米研究評議会（National Research Council）との間で、3 年毎に評価を行なう協定を結ぶ。当該評価は下記を含む。
 - (1) プログラムの技術的成果の評価（目標を達成しているか否かの評価も含む）
 - (2) 各省庁および関連分野における同プログラムの運用および調整状況の検討
 - (3) 各省庁の財源水準の検討、当該財源で各省庁が目標達成できるか否かの検討
 - (4) 民間部門への技術移転の面における同プログラムの成果
 - (5) 学際的な研究開発活動促進において成功を収めているか否か
 - (6) 倫理面、法律面、環境面およびその他関連の社会的問題が考慮されている程度
 - (7) 同プログラムの目標を新しく設けるべきか改訂すべきかに関する提言
 - (8) 設けるべき新規研究分野、提携先、調整・運用または計画に関する提言
 - (9) 研究開発活動に関する政策、計画および予算の変更についての提言
 - (10) 目標の達成状況を評価するうえで、評価基準改善の可否に関する提言
 - (11) 調整事務局の活動内容の検討（成果利用の便宜、早期実用化の促進など）
 - (12) 諸外国との比較における米国の相対的地位の分析（首位を占めるべき重要研究分野の明確化）
 - (13) 米国経済に及ぼす影響の分析、その影響を強化していくための提言
- (b) 分子の自己組織化に関する調査—第 1 回審査の一環として、全米研究評議会（National Research Council）が 1 回限りの調査を行なって、分子スケールでの材料および装置の製造技術に分子の自己組

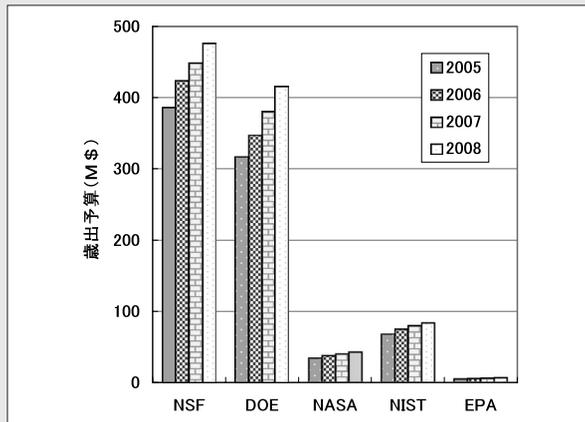
織化を実用化できるか否かを判断。

(c)ナノテクノロジーの責任ある開発活動に関する調査—第1回審査の一環として、全米研究評議会が1回限りの調査を行なって、責任ある開発活動を確保するうえで、基準・指針または戦略を設ける必要があるか否かについて評価。判断対象の例として、(1)自己増殖するナノレベルマシンの機構または装置、(2)自然環境に対する当該機構の放出、(3)暗号化、(4)国防技術の開発、(5)人間の知能強化におけるナノテクノロジーの利用、(6)人工知能の開発におけるナノテクノロジーの利用。

(d)連邦議会への評価伝達—調整事務局長は、評価結果を諮問委員会等へ報告。第1回目は2005年6月10日、その後は3年毎。

第6条 歳出予算の認可

図表1 21世紀ナノテクノロジー研究開発法案で認可された年度別歳出予算



NSF : National Science Foundation
 DOE : Department of Energy
 NASA : National Aeronautics and Space Administration
 NIST : National Institute of Standards and Technology
 EPA : Environmental Protection Agency

法案内容に基づいて科学技術政策研究所にて作成

第7条 商務省 (Department of Commerce) のプログラム

(a)NIST プログラム—製造に関する基礎研究プログラムの設定および中小製造業への技術普及パートナーシップ・プログラムの活用。

(b)クリアリングハウス—技術情報局の資源を活用してクリアリングハウスを設置 (情報内容付記)。

第8条 エネルギー省 (Department of Energy) のプログラム

(a)研究コンソーシアム (複数)。実績評価及び競争力に鑑みて、システムバイオロジーと分子イメージングを用いて新開発のナノテクノロジーと微小流体ツールを統合する学際的なナノテクノロジー・コンソーシアム (複数) を支援 (充当予算等を付記)

(b)研究センターおよび主要機器—特殊機器・施設等の開発・運営・支援等のプロジェクト実施

第9条 その他のセンター

(a)米国ナノテクノロジー準備センター (American Nanotechnology Preparedness Center)。

社会面、倫理面、環境面、教育面、法律面の影響および労働人口に及ぼす影響を研究。ナノテクノロジーの責任ある研究開発活動及び実用化に関して予想される問題点を明確化、問題点の防止・対応に向けて提言。

(b)ナノマテリアル製造技術センター (Center for Nanomaterials Manufacturing)。

新しい形で諸特性を組み合わせることにより、材料、装置及びシステムに関する新しい製造技術を研究し、米国産業界に移転するメカニズムを考案。

(c)報告書—主管団体を6ヶ月以内に、センター設立経緯を18ヶ月以内に報告。

第10条 定義

諮問委員会、ナノテクノロジー、プログラム、国家科学技術会、先端技術共用施設、プログラム対象分野を、それぞれ定義

SCIENCE & TECHNOLOGY TRENDS

January 2004
(NO.34)

Science & Technology Foresight Center

National Institute of Science and
Technology Policy (NISTEP)
Ministry of Education, Culture, Sports,
Science and Technology

※このレポートについてのご意見、お問い合わせは、下記のメールアドレスまたは電話番号までお願いいたします

なお、科学技術動向のバックナンバーは、下記の URL にアクセスいただき「報告書一覧 科学技術動向・月報」でご覧いただけます。

科学技術政策研究所は、平成 16 年 1 月より
文部科学省ビル（旧三菱重工ビル）5 階へ移転しました。

文部科学省科学技術政策研究所 科学技術動向研究センター

連絡先：〒 100 - 0005 東京都千代田区丸の内 2 - 5 - 1

電話 03 - 3581 - 0605 FAX 03 - 3503 - 3996

URL <http://www.nistep.go.jp>

Email stfc@nistep.go.jp

- ▶ Life Sciences
- ▶ Information & Communication Technologies
- ▶ Environmental Sciences
- ▶ Nanotechnology & Materials
- ▶ Energy
- ▶ Manufacturing Technology
- ▶ Infrastructure
- ▶ Frontier