

# アメリカにおけるナノテクノロジー産業政策

宮田 由紀夫\*

## An Industrial Policy for Nanotechnology in the United States

Yukio MIYATA

**要旨：**政府が特定の産業を保護育成することで国の産業構造を人為的に変化させることが産業政策である。アメリカでは産業構造は市場での競争の結果決まるもので、政府が産業政策を行うべきでないという意見が根強い。1980年代初めと90年代初めにアメリカ産業の国際競争力の低下が問題になり、また日本の産業政策が過大評価され、アメリカでも産業政策を行うべきだと議論されたが、実際はほとんど実施されなかった。しかし、国防省が中心となり間接的な産業政策は行われてきた。ナノテクノロジーは原子レベルでの操作を可能にする *general purpose technology* である。アメリカは2001年度以降、*National Nanotechnology Initiative (NNI)* を開始し、国をあげて振興している。きわめて例外的な試みであるが、研究成果はあがっても実用化が進んでいない。新しい技術の実用化のための政府の役割は何かという産業政策論争の中で合意に至らなかった課題が依然として残っている。

### **Abstract :**

An industrial policy is defined as a government intervention to change industrial structure of the nation by promoting a specific industry. In the US, there has been an opinion that industrial structure should be determined by the competition in the market rather than an industrial policy. However, the federal government, mainly the Department of Defense, has conducted an indirect industrial policy for semiconductor, computer, and aerospace industries. Since the fiscal year of 2001, the federal government has executed *National Nanotechnology Initiative (NNI)* to promote nanotechnology which, as a *general purpose technology*, would enable the operation of atoms and molecules of materials. This is an exceptional attempt of a federal industrial policy. *NNI* has generated research results but few commercialized fruits. There is not an agreement regarding what the government should and can do for promoting commercialization of new technology. This is the same result as the one obtained through industrial policy debates in the last few decades. Like previous mission oriented projects such as “War on Cancer” and “Strategic Computing Initiative,” *NNI* is expected to generate the basic knowledge which will be utilized by various industries in the long term even though it fails to commercialize the specific technology.

キーワード：ナノテクノロジー、産業政策、イノベーション

---

\*関西学院大学国際学部教授

## はじめに

ナノメートルとは $10^9$ メートルである。原子の直径の10倍に相当するので、ナノテクノロジーは物質を個々の原子や分子のレベルで理解・制御・操作することが可能である。

アメリカでは2001年度に政府がNational Nanotechnology Initiative (NNI)を開始し国を挙げてナノテクノロジーの開発を推進してきた。本稿ではNNIをアメリカのナノテクノロジー産業政策として考察する。連邦政府は特定の産業、民生品技術の開発を支援することを避けてきた。特に共和党と経済学者にはその傾向が強い。その意味でNNIはきわめて例外的なイニシアティブなのである。

本稿の構成は次の通りである。第1節ではアメリカにおける産業政策論争について考察する。第2節ではNNIナノテクノロジーの定義を、第3節ではNNI設立の経緯を考察する。第4節ではNNIとナノテクノロジーの現状について分析する。

### 1. アメリカにおける産業政策論争

産業政策とは産業構造を人為的に変えることである。産業構造とはどの産業が「さかん」(国家経済に対する付加価値での貢献度の比率、就業者数の比率で測ることが多い)かということである。通常、経済が発展すると需要の所得弾力性が高い(所得が1%増加すると需要量が1%以上増加する)産業、他国との貿易の際、比較優位を持ち輸出産業となることができる(技術進歩や天然資源のおかげでコスト低下が著しい)産業が「さかん」になる。特に前者の要因で、経済が発展するにつれて産業構造の中心は第1次産業(農林水産業)から第2次産業(鉱工業)に、さらに第3次産業(サービス業)へと移行する。食糧が足り

れば、工業製品が欲しくなり、ハードウェアが満たされれば、サービス産業への需要が高まるのである。この移行は多くの先進国が経験してきたもので「ルイス・クラークの法則」と呼ばれる。産業政策はこの産業構造の移行を人為的に行うことである。すなわち、まだ農林水産業の段階なのに鉄鋼業を振興したり、逆にサービス産業に移行している段階なのに自動車産業を保護することである。

産業政策支持者は「市場の失敗」の矯正手段として産業政策を支持する。第1が「スピルオーバー効果」である。新素材を開発すれば開発したメーカーが利益を上げるが、ユーザーである自動車メーカー、建設業も利益を得るし、さらに自動車やマンションの購入者も利益を得る。これらの利益のすべてを素材メーカーは回収できない<sup>1)</sup>ので、新素材開発の社会的収益率は企業にとっての私的収益率を上回る。企業の研究開発投資の判断はあくまでも私的収益率に基づくので、社会にとって有用な素材が市場メカニズムの下では実用化されない恐れがある。このような技術を開発し、それに基づく産業を興すには政府が補助金を出すことが求められる。

第2に公共財の問題である。産業の基になる標準化のためのデータや科学技術知識は公共財<sup>2)</sup>である。公共財は他人と共有しても価値が減らないが、得た人は恩恵を得るので多くの人に供給すべきである。しかし、料金を払わない人も利用できる<sup>3)</sup>ので民間企業は供給したくない。したがって、政府が供給する必要がある。

第3が資本市場の短期志向の問題である。株価は理論上は企業の将来収益の割引現在価値である。本来、株式市場において将来有望な産業や企業の株価が上がり、資金が集まり、有望でない産業や企業の株価は下落し資金が引き上げられることで産業構造は変化していく。しかし、経営者は

1) 供給者が消費者に対して消費者が支払ってもよいと思う上限価格(留保価格)まで支払わせる第1種価格差別は交渉が煩雑となり実行が難しいので、供給者は消費者余剰を回収できない。  
 2) 公共財は非競争性と非排除性の2つの条件を満たす財である。非競争性とは他人と一緒に消費しても価値が減らないことで、非排除性とは料金を払わない人を消費から排除できないことである。実際にはこの2つを満たす財は少ない。港湾・道路・空港などのインフラストラクチャーは混雑してくれば他人と一緒に利用することで価値が下がるし、料金を払わない者を排除することはできるので公共財ではない。

株価が低迷すれば株主総会で解任されてしまうし、(株価の低迷している企業は買収されやすく)買収されれば新しいオーナーによって解任されてしまうので、株価重視の経営を行う。株価は将来の予想収益を反映するはずだが、4半期の業績が株価に影響するので、株価重視の経営者は短期志向になる恐れがある。研究開発投資では成果は長期的に現れ、短期的には費用ばかり発生させるので短期志向の経営者は研究開発投資に消極的になる。将来を担う新しい産業を興すためには株式市場任せにせず、政府が支援する必要があるという考えである。

最後に「戦略的通商政策理論」がある。この理論は「収穫逓増(生産量が多くなると1個当たりのコストが低下する)」と「国際的寡占(世界市場が数社によって支配されている)」を想定する<sup>3)</sup>。これらの産業では政府の補助金でその国の企業が生産を増やせばコストが下がり有利になる。国際的寡占の下では、ある企業のシェアの増加は他の企業のシェアの減少となる「ゼロサムゲーム」となり、政府が補助金を出す国の企業が有利になり、補助金を怠った国の企業は衰退する。「市場の失敗」の矯正よりも積極的な産業政策の正当化である。

一方、産業政策には次のような批判もある。産業構造を変化させるにはある産業は支援して別の産業は支援しないという「メリハリ」をつけないければならない。支援対象になる産業とそうでない産業を峻別する“Picking Winners and Losers”を行う必要があるが、産業政策では政治家・官僚の方が市場メカニズムよりも巧みに“Picking Winners and Losers”を行えることを前提にしている。

経済学者の多くはこれに否定的である。政治家・官僚は、バイオテクノロジー、情報技術、新素材のようなハイテク産業を振興すべきとは言えても具体的にどのような技術や製品の開発を支援すべきかを特定する能力を持っていない。発展途上国ならば先進国の例をみてどの技術・製品を開発すべきか分かるかもしれないが、先進国が横一線の中でどちらに進むべきかは市場の判断に任せるべきと考えられる。市場競争は、誤った判断をすれば自分の懐が痛む個人の意思決定の結果であるので、ベクトルの向きとしては適切な結果を出すのである。また、政治家・官僚は自分の利益のために“Picking Winners and Losers”を行う可能性がある。単純に産業界に取り込まれているだけでなく、政治家は再選、官僚は出世のために判断を行う。「市場の失敗」よりも「政府の失敗」の方が大きくなる恐れがある。

アメリカでは州政府の権限を守り連邦政府の役割は限定的としてきた。軍隊も有事に召集するが平時には縮小していた<sup>4)</sup>。経済政策としても連邦政府は州際事業のみが規制対象であった<sup>5)</sup>。第2次大戦後、マクロ経済については政府がケインジアン財政・金融政策で雇用・物価の安定に介入したが、ミクロ経済については特定の産業を育成する産業政策は行わず、どの産業が発展するのか、どの企業が成長するのかは市場競争の結果であるとの立場を取ってきた<sup>6)</sup>。

第2次大戦をきっかけに科学技術振興に関しては連邦政府各省庁が研究開発予算を組むようになった。研究開発投資の持つスピルオーバー効果や知識の公共財的性格は認識されていたが、それは基礎研究の段階で起こるので、大学や国立研究所

3) 半導体や航空機などが該当するが、この理論モデルは価格でなく生産量で競争するクールノーモデルを想定しているのですべての産業に当てはまるわけではない。

4) 第2次大戦後の冷戦の下では平時であっても常備軍と軍事技術開発が行われるようになった。それでも第2次大戦終結直後の軍備縮小が共産主義勢力の増長を招いたとも言われる。

5) 支社・事業所を持ってなくても製品が複数の州で販売が行われていれば州際事業として連邦政府が介入している。1930年代の大恐慌の時代には連邦政府が農業支援を行おうとしたが、最高裁判所が1936年1月に農業は州内事業だとして政府の介入の基になっている農業調整法を違憲と判断した。連邦政府は土壤保全と言う名目で介入した。

6) マサチューセッツ工科大学教授のサミュエルソン(Paul Samuelson)は1976年のノーベル経済学賞を受賞するトップクラスの学者だが、1948年に『経済学』というベストセラー教科書も執筆し、その中で新古典派ミクロ経済学とケインジアンマクロ経済学を組み合わせた「新古典派総合」の議論を展開した。

での基礎研究の支援が中心で、民生技術の商業化はあくまでも市場メカニズムに任せていた。(軍事技術に関しては国防省が入札で勝った企業に開発段階でも資金援助していた。)

しかし、1970年代末からアメリカの製造業の国際競争力に陰りが見え始めると、日本の通商産業省(現経済産業省)の産業政策が過大評価されたこともあり、アメリカでも半導体、コンピュータなどのハイテク産業は連邦政府が支援すべきだという「産業政策論争」がおきた<sup>7)</sup>。民主党の大統領・議会は労働組合の支持を得ているので、製造業の国際競争力向上のために連邦政府が民生品技術の実用化に近い開発段階にも補助金を出すなどして支援することに賛成する。これに対して保守的な共和党は市場メカニズムを信頼し連邦政府の介入に批判的なので補助金に反対する。共和党の支持母体は企業経営者と富裕層であるが、彼らは企業の株価が高ければ生産は海外で行われていても問題にしない。民主党主導の議会は産業政策を支持したが、共和党のレーガン(Ronald Reagan)とブッシュ(父)(George H. W. Bush)の両大統領が反対した。また、レーガン政権以降は規制緩和、小さな政府、市場万能主義がさかんに主張されたこともあって、産業政策は行われることはなかった<sup>8)</sup>。

1990年代初め日本がバブル景気に沸きアメリカの国際競争力の低下が問題になったので再び産業政策論争が起きた。1992年の大統領選挙では民主党クリントン(William Clinton)候補はハイ

テク産業振興政策を明確に主張したが、対日競争力の低下に危機感をいだいていた企業経営者の中には、それまでの共和党支持からクリントン支持にまわる者もいたので勝利した。しかし、1994年の中間選挙で共和党が上下両院で多数を占めると政権の提案したハイテク産業政策の予算は縮小された。今度は大統領が産業政策を推進したいのに議会が反対する構図になった。ただ、日本経済がバブル景気の崩壊に苦しむ一方でアメリカ経済は好調であったのでクリントン大統領はハイテク産業政策に固執せず、議会共和党の意見を取り入れることで彼らの存在価値を薄める戦略をとり1996年に再選を果たした。その後もクリントン政権は産業政策に積極的な立場をとらないでいたが、第2期政権の終わりにナノテク振興に関しては新たな取り組みを計画した。それがNational Nanotechnology Initiative(NNI)である。これは共和党の支持も得てその後も継続されていくことになった。連邦政府が民生品技術の開発に直接関与した例外的政策を言えるであろう。

## 2. ナノテクノロジーの起源

1965年のノーベル賞受賞者のファインマン(Richard Feynman)が1959年の全米物理学会での講演で小さなスケールで物質を操作・制御できるようになることを予言した。1981年にIBM社のチューリッヒ研究所のビーニッヒ(Gerd Binnig)とローラー(Heinrich Rohrer)が走査型トンネル顕微鏡を開発した。微弱な電圧をかけた金属

7) 日本では政権与党自由民主党の支持基盤は農村と財界であった。財界はさまざまな産業の大企業の団体であるから、特定の産業を育成することは好ましくなかった。そのため、日本の産業政策はメリハリの利いたものでなかった。通商産業省は鉱工業全体の育成を目指したが、うまく行った分野もあるし行かなかった分野もある。コンピュータのハードウェアメーカーの育成には成功したが、石油化学、航空機などは成長できなかった。また、通商産業省は将来有望な企業を予測できなかった。1953年に東京通信工業という会社がウェスタンエレクトリック社からのトランジスタのライセンスの認可を求めたのに許可をせず、社長の説得に折れて6か月後ようやく認めた。同社は翌年にトランジスタラジオを製品化し急成長し社名をソニーに改めた。1961年、通商産業省は日本の乗用車メーカーはトヨタと日産だけで充分なので他社には新規参入しないよう求めたが、オートバイで成功していたホンダはこの要請を無視して1969年に参入した。戦後日本で最も成功したベンチャー企業であるソニーとホンダの将来性を通商産業省の官僚は予測できなかったのである。

8) 半導体・コンピュータ・航空機産業では国防省が研究開発のスポンサーであるとともにユーザーでもあった。国防省が買ってくれるので企業は生産経験を積むことができ習熟効果によって品質・コストを向上させた。また、インターネット、GPSなど国防省が支援した軍事技術が民生品として利用されているケースもある。さらに、医薬品は長年にわたる連邦政府の基礎研究成果を製薬会社が利用している。このような間接的な隠れた産業政策(Hidden Industrial Policy)は行われてきたとの主張もある(Mazzucato 2015)。

探針を試料表面に1ナノメートル近くまで近づけると突然電流が流れるが、このトンネル電流は探針と表面との距離によって変化するので、電流の大きさを測定することで原子・分子レベルで形状がわかるのである。同じくIBMのアイグラー(Donald Eigler)は35個のキセノン原子を並べて“IBM”と綴ることに成功した。

一方、マサチューセッツ工科大学(MIT)の宇宙システム研究所の研究者だったドレクスラー(Eric Drexler)は1986年に『創造する機械』(ドレクスラー 1992)を出版し自己複製の機能を持つ分子組立マシンを提唱した。(アイデアを最初に発表したのは1981年である。)どんなものでも作り出す「アセンブラー」とそれを複製するコピーマシンである「レプリケータ」という概念を構築したが、同時に自己増殖するナノマシンの暴走によって地球が覆いつくされる「グレイ・グー」といったSF的要素も含まれていたため、話題になると共に主流派科学者からの批判も大きかった。

1950年代に材料科学・工学では生物学からヒントを得て分子を理解した上で新しい材料を設計する分子工学という分野が生まれていた。ドレクスラーは1986年当時は航空宇宙学での修士号しか持っていなかったが、自らコンピュータシミュレーションを行い、コンピュータプログラミングの観点から分子工学を解釈しながら自己増殖の概念に結びつけたわけで、決して科学を軽視していたわけではない。ソフトウェアエンジニアの中にはドレクスラーの支持者もいたし、MITの認知科学・人工知能の分野で著名な研究者であるミンスキー(Marvin Minsky)は細胞は自己増殖するナノマシンであるから、ナノテクノロジーを否定することは生命を否定することだとして、ドレクスラーを支持し指導教授としてドレクスラーに1991年に分子ナノテクノロジーで博士号を授与した。

一方、1996年のノーベル化学賞受賞者でナノテクノロジーの先駆者の1人とも言えるライス大

学のスモーリー(Richard Smalley)はドレクスラーを批判した。2001年ごろの活発な論争で、スモーリーは多数の原子を驚異的な速さで目標の位置に置くことができなければアセンブラーは不可能だと主張した。ハーバード大学のホワイトサイズ(George Whitesides)も、確かに自己組織化は自然観の営みとしては存在するが、そのことは人工的に行うことが可能であることを意味しないとして、ドレクスラーを批判した。

スモーリーは1985年にクロトー(Harold Kroto)とカール(Robert Curl)とともにサッカーボール上の炭素分子フラーレン(C<sub>60</sub>)を発見してノーベル賞を受賞した。1991年には日本の日本電気の飯島澄男が直径1ナノメートルのカーボンナノチューブを開発した。これは、コロイド化学の流れである。ナノ粒子は極微小なので体積に対する表面積が大きく特異な性質が現れることが期待されていた。

したがって、ナノテクノロジーの研究には、コロイド化学からの流れ、走査型顕微鏡による原子・分子走査の流れ、(ドレクスラーの)自己組織化分子の開発の流れがある(五島 2014, pp.179-192)。ドレクスラーによって市民のナノテクノロジーへの関心は高まったが、グレイ・グーのような不安もかきたてた。スモーリーやホワイトサンズら主流派の学者との論争によって市民の不安は鎮まっていっていった。NNIでは、主流派はドライスラーを市民の関心を喚起するためには利用したが、研究テーマとしては軽視した。

NNIの支持者は予算獲得のために、ナノテクノロジーは蒸気、電力、内燃機関、情報技術のように広範に産業を支えるGeneral Purpose Technology(GPT)であると強調した。Lipsey, Bekar and Carlaw(1998)によれば、GPTとは次の4つの必要条件をすべて満たすものである<sup>9)</sup>。第1に改善・改良の可能性が大きい。コストが下がり価値があがるのである。第2に用途が多様である。第3に社会に普及している。電球やねじ回しは普及しているが用途が多様でない。一方、風車・水車

9) 必要条件ということはGPTならばこの条件を満たすということである。充分条件ではないので、これらを満たしても必ずしもGPTとは言えない。

は回転動力源として製粉・揚水・発電など多様に利用できるが、それぞれの分野で競合するエネルギー源がある。この点、汎用技術 (Generic Technology) は利用の多様性にのみ注目しており、狭義の GPT に当たる。第 4 に既存や将来の技術と補完性があることである。ナノテクノロジーは GPT として次世代のさまざまな応用分野の基となることが期待されている<sup>10)</sup>。

一方、ナノテクノロジーは微細加工技術の発展の延長線上にあるという見方もある。実際、ナノテクノロジーという言葉が最初に使ったのは、1974 年の国際生産技術会議における日本の東京理科大学の谷口紀雄だとされる (五島 2014, p.131)。彼は純粋にマイクロ ( $10^6$  メートル) の加工技術のさらに 1000 分の 1 の精度をナノテクノロジーと称したのである。この伝統から日本ではナノテクとは新製品の開発というよりも生産方法における微細加工技術との解釈が強い。

### 3. NNI 設立の政治経済学と成果

1970 年から 2000 年までに生命科学 (医学、農学、生物学) への連邦政府による研究支援はインフレを考慮した実質額で 3 倍以上に増加したが、物理科学 (物理学・化学・地球科学)・工学は横ばいであった。生命科学を支援するのは厚生福祉省内の国立衛生研究所 (National Institutes of Health) である。NIH は自身が大きな研究施設を持つが大学の研究支援でも重要な役割を果たしていた。オバマケアが成立するまで国民皆保険は議会で議論されてきたが実現しなかった。議会は国民皆保険だけでなく医学研究の予算にまで消極的だとさすがに有権者の反発を招くので共和党も含めて医学研究支援には積極的だった。1974 年に遺伝子組換え技術が開発されバイオテクノロジーが勃興すると生命科学はますます注目されるようになった。一方、物理科学・工学は日本の文部

科学省に相当し大学への研究支援を主務とする全米科学財団 (National Science Foundation, NSF)<sup>11)</sup> と国防省が支援していたが、冷戦終結後に国防省の予算が減少すると、大学への支援も減少することになっていた。NSF は大学への研究支援で NIH の後塵を拝していたので物理科学・工学での新しいプロジェクトで巻き返しを狙っていた (ペルーベ 2009)。

1996 年 11 月にいくつかの省庁の有志がナノテクの研究開発についてインフォーマルな議論を開始した。1998 年 9 月に正式なワーキンググループとして認められ、1999 年 8 月に作成されたプロジェクトの提案書が大統領府に承認され 2000 年秋からの 2001 年度分から予算化された。

クリントン政権の副大統領となるゴア (Albert Gore) は上院議員時代の 1992 年にリオデジネイロで開催された国連地球サミットから帰国後、“New Technologies for a Sustainable World” という公聴会を開いた。ドレクスラーも発言し分子レベルの制御による生産方法は環境にやさしく効率も高い (省エネルギー) だと主張し注目を集めた。

レーン (Neal Lane) は原子・分子物理学者でクリントン政権で 1993 年に NSF 長官、1998 年に科学技術政策局長 (科学アドバイザーの役割) を務めた。彼が 1998 年 4 月に議会でナノテクは画期的なイノベーションとなる可能性を証言した。(ただし、ドレクスラー的な過大な期待も含まれていた。) 1998 年から 2004 年まで NSF 長官だったコウウェル (Rita Colwell) も NIH に伍する予算を求めている。彼女は後述のワイデン (Ron Wyden) 上院議員の支持を得た。

NSF のナノテク担当顧問で 1993 年に創設された国家科学技術会議 (National Science and Technology Council, NSTC) の初代の長でもあったロコ (Mihail Roco) は機械工学 (材料) の研究者であり、1990 年に NSF に入るとナノサイズ粒子

10) GPT は多様な用途があり社会に普及しているので、のちに他の特許が申請される際に引用される。Schultz and Joutz (2010) はナノテクノロジー関連特許の被引用回数が多いことを明らかにしており、GPT であることを実証している。

11) 「財団」という名称だが連邦省庁機関である。第 2 次大戦前、大学の間には連邦政府から研究資金を受け取るに干渉も受けるとの懸念が強かった。大学は連邦政府資金でなく非営利財団からの資金を頼った。第 2 次大戦後にこの組織が提案されたとき大学の研究者の警戒感を和らげるためにあえて財団という名称を用いた。

の剛性を研究するプログラムを立ち上げた。ナノテクは情報技術、バイオテクノロジーともにアメリカの産業競争力のために国策として支援すべきと考えた。基礎研究の成果は日本やヨーロッパの企業によって利用されてしまうので、国家安全保障でなく産業競争力を意識した科学政策の重要性を主張した。1997年にロコはレンセラー工科大学のシーゲル (Richard Siegel) 学長とカリフォルニア大学サンタバーバラ校のヒュー (Ebelyn Hu) 学長を招いてコンファレンスを開催した。ハイテク技術の進歩の動向が議論されたが、ナノテクについても触れられた。1999年3月にロコがレーンとクリントン大統領の技術経済政策担当補佐官だったカ ril (Thomas Kalil) に NNI について説明した。

カ ril はそれ以前から議会に対して予算獲得の陳情を行っており、共和党のギングリッチ (Newt Gingrich) の協力も得た。彼は下院議長時代には市場万能主義の強硬な保守派でクリントン政権の技術開発支援策に反対してきた人物であったが、ナノテクに関しては支持者になった。ギングリッチ自身が 1997年2月に下院の科学委員会に長期的な科学技術政策の提言を求めており、翌年の報告書は、科学政策は冷戦時代のような国家安全保障よりも産業競争力のために活用されるべきと結論したが、ギングリッチも賛成していた。

議会では上院科学委員会委員長のワイデン議員 (民主党・オレゴン州選出) と 2003年以降の同委員長のアレン (George Allen) 議員 (共和党・バージニア州選出) が支持者になった。バージニア州にはすでにナノテクの研究施設が創設されていたのでアレンはそこに NNI の予算をまわしたかった。ワイデンは地元オレゴン州に NNI を通して研究施設を設立させたいと考えていた。彼らは科学委員会委員長であるが、ナノテク・イノベーションによる雇用創出、経済競争力強化を強調していた。

クリントン大統領は 2000年1月に (ファインマンに敬意を払って) カリフォルニア工科大学で NNI を発表した。現実には予算を審議するようになると議会からは慎重な意見も出されるようになった。しかし、陳情・説得の成果が出て 2000

年夏になると議会では NNI 支持が広がった。4億 9500万ドルの要求のうち 4億 6500万ドルが認められた。3分の1が NSF にまわったが、多くの省庁が参加するプログラムになった。そのため多くの選挙区の大学・企業・国立研究所に恩恵が行き渡ることになり議会は支持した。ドレクスラーは NNI の研究テーマがこれまでの研究の延長線上にあり凡庸だと批判した。NNI 支持者の主流派科学者は議会・市民の関心を惹くためにドレクスラーが主張するナノテクの空想的な恩恵を主張したが、実際にはそれを支持してはならず NNI では手堅いテーマを選んだのである。

ブッシュ政権の商務省はクリントン政権下での政府による民生技術開発支援プログラムを縮小・廃止していたのだが、ボンド (Phillip Bond) 商務長官は NNI に関しては支持した。規制緩和を主張する共和党の方針により、ボンドはナノテクに関わる規制の緩和に積極的であった。ナノテクに関してはグレイ・グーよりも現実的な懸念として微細粒子が人体や環境に及ぼす影響が考えられており、規制を求める声もあった。バイオテクノロジーにおける 1974年に発表された遺伝子組換え実験はどのような弊害が生じるかわからなかった。一時的にすべての研究者が実験を停止して安全性を確認してから再開したが、ブッシュ政権はナノテクノロジーでの同じような中断は起こしたくなかった。その代わり NNI の中に「環境」というテーマが含まれた。また、ブッシュ政権は 2001年の同時多発テロで再び国家安全保障が重視するようになったので、ナノテクにその分野での貢献を期待し支持を続けた。The 21<sup>st</sup> Century Nanotechnology Research and Development Act of 2013 は下院を 405 対 19、上院を満場一致で可決されブッシュ大統領が 2003年12月3日に署名したが、NNI を法的に支えるものである。この法律は明記はしていないが 2008年度までのものであった。その後はいくつかの法案が提案されたが成立はしなかった。それでも NNI はブッシュ以後の民主党オバマ (Barak Obama) 政権、共和党トランプ (Donald Trump) 政権でも存続した。アメリカの科学技術政策は分権的であり、NSF は当初想定された科学技術政策を統括する役割を

持てなかった。科学アドバイザーの立場も弱い。各省庁は自分の省の利益になる研究開発を行い、大学に対しても当該分野の研究資金を提供していた。NNI では多くの省庁が参加したが、自分たちの利益に関係するナノテクノロジー研究開発を行った。したがって、NNI の研究開発支出は各省庁の支出の合計にすぎない。前述の大統領府の科学技術審議会の中に科学委員会と技術委員会があるが、後者の下にナノスケール科学・工学・技術小委員会 (Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee, NSET) が設置され省庁間の研究開発活動の調整を行うことになった。科学委員会とはインフォーマルな関係にあった。各省庁が NNI からの予算の一部を供出するナノテク調整室 (National Nanotechnology Coordination Office, NNCO) が設置されて NSET 小委員会に助言をすることになった。それでも NSET 小委員会のコーディネーション機能には限界があり、結局、NNI の予算も省庁の NNI 研究開発予算が総計されたものであった。

#### 4. ナノテクノロジーの現状

表1は NNI における省庁別の支出である。NNI の開始から積極的な役割を演じていた NSF の支出が多い。国防省は 2013 年以降低下しており、代わって保健福祉省が増加して現在は一番多

くなっている。この点で物理科学の生命科学に対する巻き返しという当初の目的は果たせなかったことになる。もっとも NNI 初期の 2003 年でも 2015 年のナノテク関連製品の市場予測として、新素材が 33%、電子が 30% に次いで医薬品が 18% であったので、生命科学への応用は重要視されていた (Roco 2003)。総額としては 2013 年度から 17 年度は頭打ちであった。

図1は NNI における基礎研究 (fundamental research) の金額と NNI 予算の中での比率である。2013 年度に分類の仕方が変わったので厳密には連続的でない。2013 年度までは基礎研究の比率は 30% 前後である。表2が示すように 2013 年度以降、Nanotechnology Signature Initiatives という項目を設けて、ナノ製造技術、ナノエレクトロニクスなど特定の目的を持った分野での研究開発を

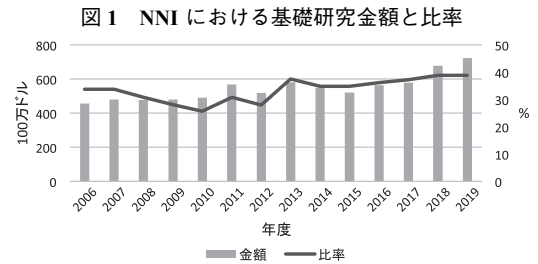


図1 NNI における基礎研究金額と比率  
出所：National Nanotechnology Initiative (various years) Supplement to the President's Budget

表1 NNI 省庁別支出 (100 万ドル)

省庁	年度	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020 (推定)	2021 (要求)	省庁合計
全米科学財団		150.0	204.0	221.0	256.0	335.0	359.7	389.0	409.0	408.6	428.7	485.1	466.3	421.0	464.5	489.8	510.4	465.7	568.0	520.7	475.7	453.5	8481.7
国防省		125.0	224.0	243.0	291.0	352.0	423.9	450.0	460.0	459.0	439.6	425.3	426.1	170.1	189.6	143.0	149.3	143.3	145.9	160.1	184.3	172.0	5776.5
エネルギー省		88.0	89.0	133.0	202.0	208.0	231.0	236.0	245.0	332.6	373.8	346.2	313.8	314.2	309.4	312.5	333.5	341.2	338.4	385.0	362.5	352.8	5847.9
保健福祉省 (国立衛生研究所)		40.0	61.0	67.0	106.0	168.0	195.4	222.0	312.0	356.0	472.6	428.5	479.6	485.4	430.3	385.8	420.5	472.3	565.6	676.4	710.4	647.1	7701.9
商務省		33.0	77.0	66.0	77.0	79.0	77.9	88.0	86.0	93.4	114.7	95.9	95.4	91.4	97.8	83.6	82.5	80.7	75.1	70.2	65.5	58.4	1688.5
航空宇宙局		22.0	35.0	33.0	47.0	45.0	50.0	20.0	17.0	13.7	19.7	17.0	18.6	16.4	22.4	14.3	13.4	9.5	9.4	9.0	9.9	10.0	452.3
農務省		0.0	0.0	1.0	2.0	3.0	6.2	7.0	11.0	15.3	20.3	20.0	18.3	19.5	15.6	21.1	28.4	24.2	24.1	22.7	22.4	25.3	307.4
環境保護省		5.0	6.0	5.0	5.0	7.0	4.5	8.0	12.0	11.6	17.7	17.4	17.5	14.6	15.5	15.1	13.9	10.7	10.6	10.6	5.5	2.0	215.2
法務省		1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	0.3	2.0	0.0	1.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.0	2.2	0.9	1.6	1.6	20.3
国土安全省		0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.5	2.0	3.0	9.1	21.9	9.0	18.7	14.0	25.0	28.4	1.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.0	136.2
運輸省		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	1.0	0.9	3.2	1.0	1.0	2.4	2.1	0.8	1.5	0.3	0.3	1.5	0.5	0.5	18.9
消費者保護庁		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.5	1.8	2.0	1.3	2.0	2.0	2.0	1.9	1.0	0.9	0.2	0.1	15.9
内務省		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	1.2	0.0	1.7
年度計		464.0	697.0	770.0	989	1200	1351.2	1425	1554	1701.5	1912.8	1847.3	1857.3	1550.2	1574.3	1496.3	1557.8	1552.3	1740.9	1858.3	1839.7	1723.2	30662.1

出所：National Nanotechnology Initiative (various years) Supplement to the President's Budget



表2 各省庁の研究開発分野（2018年度、百万ドル）

省庁	重点テーマ合計	重点テーマ					水質	コンピュータ能力	基礎研究	応用・デバイス・システム	研究インフラ	環境・健康・安全	合計
		ナノ製造技術	ナノ電子技術	ナノ知識基盤	ナノセンサー								
全米科学財団	167.7	35.9	74.5	20.2	14.2	11.6	11.4	292.3	49.9	45.6	12.5	568.0	
国防省	33.8	0.4	22.9	1.3	1.0	2.3	5.9	85.4	21.1	2.1	3.5	145.9	
エネルギー省	1.5	0.0	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	181.2	18.6	137.1	0.0	338.4	
保健福祉省	29.3	0.0	0.4	1.8	27.1	0.0	0.0	100.3	365.3	23.4	47.3	565.6	
商務省	22.3	3.7	10.0	0.9	0.8	0.3	6.6	11.4	4.6	34.1	2.8	75.1	
航空宇宙局	2.5	0.4	1.3	0.0	0.8	0.0	0.0	4.3	2.5	0.0	0.1	9.4	
農務省	10.3	6.3	0.0	0.0	3.0	1.0	0.0	2.2	8.3	1.0	2.3	24.1	
環境保護省	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	10.6	
法務省	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	0.1	0.0	2.2	
国土安全省	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	
運輸省	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.3	
消費者保護庁	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	
内務省	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	
合計	267.6	46.7	109.0	24.2	48.6	15.1	24.0	677.1	472.7	243.3	80.1	1740.9	

出所：National Nanotechnology Initiatives (2019) Supplement to the President's 2020 Budget, p.4

表3 ナノテク論文のシェア (%)

地域	2000年	2017年
アメリカ	27	18
中国	9	32
ヨーロッパ	38	24
日本・韓国・台湾	19	12
インド	2	8
カナダ	2	2
その他	3	4

出所：National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2020, p.64)

行っている。しかし、基礎研究の部分も組み込まれたりしたので、2013年度以降、基礎研究の比率はむしろ増加し30%代後半になっている。NNIを通して（おもに大学が担い手の）基礎研究が重視されている。科学が発展すれば技術が発展するという「リニアモデル」は単純すぎると批判されている。しかし、科学の研究が技術の開発に移行していかないと実用化は難しい。一方、後述するように政府のプロジェクトはしばしば基礎的な科学知識が不十分な中で目に見える成果を達

表4 地域別・分野別の論文（本数とシェア (%)）

分野	全体		アジア		ヨーロッパ		北米	
	合計	シェア	本数	シェア	本数	シェア	本数	シェア
情報技術	809,820	45.4	419,031	51.7	255,411	31.5	166,130	20.5
生産技術	286,447	16.1	158,468	55.3	84,476	29.5	51,245	17.9
医療	266,741	15.0	112,740	42.3	87,452	32.8	71,418	26.8
エネルギー	197,539	11.1	116,294	58.9	51,263	26.0	41,353	20.9
光学	112,378	6.3	56,012	49.8	36,215	32.2	29,711	26.4
環境	66,100	3.7	28,683	43.4	21,595	32.7	14,915	22.6
運輸	22,803	1.3	8,767	38.4	9,090	39.9	6,353	27.9
建設	21,648	1.2	7,124	32.9	8,652	40.0	4,042	18.7
総計	1,783,476	100	907,119	50.9	554,153	31.1	385,167	21.6

出所：National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020, p.71)

成しようとして失敗する。

表3は2000年と2017年におけるナノテク論文の国別シェアであるが、アメリカ、ヨーロッパ、日本・韓国・台湾がシェアを減らす中で中国がシェアを急増させている。中国は工業生産だけでなく科学研究の分野でも躍進が著しいがナノテクノロジーも例外ではない。表4は地域別・分野別の論文である（全体は縦に合計すると100%、地域別は横に合計すると100%となる）が、欧米は保健、輸送機械での論文が多く、アジアはエネルギー、生産技術、情報技術が多くなっている。ナノテクノロジーは応用分野が多岐にわたるので1つの国がすべての分野でトップになることは難しく、棲み分けが行われつつある。

NNIにおいてナノテクノロジーの研究成果は着実にあがっているが、実用化にはまだ至っていない。NNIは2003年の時点で専門家への聞き取り調査の結果として、2015年にはアメリカのナノテク関連市場は1兆ドルとの予想を発表していた（Roco 2003）。しかし、2021年でも132億ドルで予想をかなり下回っている。中国は論文数ではアメリカを上回っているが市場規模としては2026年に51億ドルになると予測されており、アメリカが最大市場であることに変わらない（Intrado 2021）。実用化が進んでいないという点では、ナノテクノロジーではなく、ナノサイエンスではないかという指摘もある。また、研究開発の担い手が大学であることも実用化への途がまだ遠いことの原因でもあり結果でもある。大学に資金に渡っている限り実用化は難しいが、まだ実用化が難しいので企業でなく大学に資金援助せざるを得ないのである。実用化のためには企業が本気になってくれなければ困るのだが、そのためには企業に知的財産の専有権を与えなければならず、技術の公開が行われにくくなるという問題がある。

ドレクスラーが提唱し「SF的」と批判されてきた自己増殖素子であるが、パイロットプラントレベルでは開発に成功している。半導体の微細加工技術が進み、回路の線と線の間隔が小さくなりすぎてしまい加工が難しくなった。回路は同じパターンの繰り返しが多いので、材料が同じパターンの穴をあけるようにさせて、そこに導体を流し

込み、周りを除去することで線を残すことができるようになってきている。

バイオテクノロジーでは大学の研究成果を基にベンチャー企業が設立され、ベンチャーキャピタルからの投資や国からの研究補助金を受け入れて、実用化に向けた研究開発を行った。しかし、新薬のための臨床試験は資金とノウハウが必要で大手製薬会社が優位である。したがって、ベンチャー企業がトップ企業にまで成長するIT産業とは異なり、バイオベンチャーが創業企業になることはまれである。バイオベンチャーは大手製薬会社と提携したり身売りする。大手製薬会社も自分で様々な研究開発を行うのは負担が大きいため、研究動向を俯瞰して有望なバイオベンチャーに接近するというWin-Winの関係を築くことで、バイオテクノロジーは発展した。

ナノテクノロジーはバイオテクノロジー以上に多岐にわたる応用が期待され、特定の「産業」ではなくあくまでも「技術」であり、既存の製品の性能を著しく向上させたり、製造技術に革新をもたらす。この点で、製品を作っている大企業の役割は無視できない。いかに大学の研究成果を企業に移転するかが重要である。バイオテクノロジーでも近年はコンピュータシミュレーションを行うための大型コンピュータが重要になってきたが、一般的にナノテクノロジー企業は電子顕微鏡や焼成のための炉のようにバイオテクノロジー以上に施設費がかかる。大学の研究成果を産業界に移転する大学と企業との間の中間組織が求められているが、ベンチャー企業がかなり資金を獲得しないとこの役割を果たせないかもしれない。また、実験室レベルでの操作や試作品を工場レベルでの操業や大量生産に結び付けるための研究開発やそれを行うインフラの整備が重要になる（National Sciences, Engineering, and Medicine 2020）。20世紀前半に化学の成果を製品化・量産化できるように化学工学という学問が発展したように、量産化を試行錯誤任せにせず学問的に考える必要がある。

連邦政府は直接的な産業政策を行ってはこなかったが、特定の技術を開発する「アポロ計画」「戦略的コンピューティング（Strategic Computing

Initiative, SCI)「がんと戦い」などの大型プロジェクトを行ってきた。1960年代に有人月着陸を目指した「アポロ計画」は冷戦の中でソ連に対する科学技術の優位性を成果に示すとともに国威発揚のために経済力を駆使して目標を達成した。ケネディ政権の科学アドバイザーのワイズナー (Jerome Weisner) は世界の人々に貢献することとしてアメリカが国をあげて海水淡水化に取り組むことを提言したが、政治的アピールの理由で大統領は月着陸を目指した (Roland 2002, p.84)。民生品イノベーションは副産物でしかなかった。豊富な経済力を背景にコストよりも性能を重視して成功させたが、その後の宇宙開発は財政難のため縮小せざるを得なくなった。

1970年代初めの「がんと戦い (War on Cancer)」とは月着陸を成功させた科学の力でがん治療法を獲得しようという、ニクソン (Richard Nixon) 大統領のアイデアである。大統領は保守派であったが、1972年の大統領選挙に民主党からケネディ (John Kennedy) 大統領の弟 (Edward Kennedy 上院議員) が出馬しそうで、彼は医学研究重視を提案していたのでニクソンが先手を打ったのである。NIH 中にある国立がん研究所 (National Cancer Institute, NCI) を独立させ NCI だけで1972年度から1976年度までに10億ドルの研究予算をつけようとした。議会は NCI は独立させなかったが、NIH の予算は内部使用分も大学への資金提供も増加させた。がん研究以外にも含めた NIH 全体の予算は1972年度の9億9000万ドルから1976年度の15億5000万ドルに増加した。「がんと戦い」に関しては基礎研究を充分に行わずに治療法の開発だけ急いでもうまくいかないという批判があった。基礎的な知識が不十分なまま実用的な目に見える成果を求めたのである。NIH は基礎研究の重要性を認識していたので成果を求める圧力の中、基礎研究に回る比率は減したが金額としては増加させた。大学にまわる基礎研究は1971年度から1976年度で80%以上も増加した。「がんと戦い」ではがんの治療法は開発することができなかったが、がん細胞の変異や発がん遺伝子の研究など長期的には有効な研究が行われた (Stokes 1997, p.138、宮田

2007, p.41)。

SCI は国防先端研究計画局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) が1983年から93年に10億ドルを使って、人間のように推論でき自然言語を理解し、音声・視力を認識できる人工知能の開発を目指した。民間でも軍用でも活かせる技術の開発を目指したが、予算を獲得するためには陸海空軍に直接役立つ技術の開発を目指した。陸軍には視覚認識を活かした無人軍用車両、海軍には戦場でアドバイスできるエキスパートシステム、空軍には自然言語・音声認識技術を組み込んだコックピットの開発を目指した。次第に大学での研究よりも軍需メーカーへの委託研究となり、研究成果も企業が取り込むものとなりコンピュータの研究者の中で広く共有されることは難しくなった。さらに、目標は技術的にあまりに高すぎたので達成できなかった。それでも視覚認識は当時では難しかったが、音声認識、並列処理、エキスパートシステムなどの要素技術の発展には寄与した (Roland 2002, Stowsky 1992)。

NNI は多くの省庁が参加し、単独の目的があったわけではなく、広範なテーマで研究開発が行われた。結果としては、「がんと戦い」と同様に要素技術を進歩させることになっている。発展した技術の中からいくつかが長期的には実用化されるであろう。

## おわりに

アメリカでは特定の産業を保護育成する産業政策は行われてこなかった。NNI は例外的な試みと言える。ただし、NNI では科学研究が技術開発よりも主流である。その点、ナノテクノロジーでなくナノサイエンスの段階といえる。基礎研究だけでなく開発段階でも「市場の失敗」はおこるので政府が支援すべきか、ナノテクの中でどの分野が有望かはわからないので、資金配分の際には“Picking Winners and Losers”を行わなければならないのか、それとも市場に任せるべきか、など産業政策論争でのテーマは NNI においても議論が続いている<sup>12)</sup>。

参考文献

- Intrado (2021) *Global Nanotechnology Market to Reach \$70.7 Billion by 2026*. Intrado Report Linker, June 23, 2021.
- Knight, C. P. (2011) Failure to Deploy : Solar Photovoltaic Policy in the United States, In Block, F. and Keller, M. R. (eds.) *State of Innovation : The U.S. Government's Role in Technology Development*, London : Routledge.
- Lipsey, R. G., Bekar, C., and Carlaw, K. (1998) What Requires Explanation, In Helpman, E. (ed.) *General Purpose Technologies and Economic Growth*, Cambridge, Massachusetts : The MIT Press.
- McCray, W. P. (2006) Will Small Be Beautiful? Making Policies for Our Nanotech Future, *History and Technology*, Vol.21 (2) : 177-203.
- McCray, W. P. (2013) *The Visioneers : How a Group of Elite Scientists Pursued Space Colonies, Nanotechnologies, and Limitless Future*, Princeton : Princeton University Press.
- Mazzucato, M. (2015) *The Entrepreneurial State (revised edition)*, New York : Public Affairs.
- Morris, E. M. (2016) The Irrelevance of Nanotechnology Patents, *Connecticut Law Review*, Vol.49 (2) : 499-551.
- Moskowitz, S. L. (2009) *The Advanced Materials Revolution*, Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020) *A Quadrennial Review of the National Nanotechnology Initiative : Nanoscience, Applications, and Commercialization*, Washington, D.C. : The National Academies Press.
- Nordmann, A. (2009) Invisible Origins of Nanotechnology : Herbert Gleiter, Materials Science, and Questions of Prestige, *Perspectives on Science*, Vol.17 (2) : 123-143.
- Roco, M. C. (2003) *The Future of the National Nanotechnology Initiative*, Washington, D.C. : National Science Foundation.
- Roland, A. (2002) *Strategic Computing : DARPA and the Quest for machine Intelligence, 1983-1993*, Cambridge, Massachusetts : The MIT Press.
- Schultz, L. I. and Joutz, F. L. (2010) Methods for Identifying Emerging General Purpose Technologies : A Case Study of Nanotechnologies, *Scientometrics*, Vol.85 : 155-170.
- Stokes, D. B. (1997) *Pasteur's Quadrant : Basic Science and Technological Innovation*, Washington, D.C. : Brookings Institution Press.
- Stowsky, J. (1992) From Spin-Off to Spin-On : Redefining the Military's Role in American Technology Development, In Sandholtzi, W., Borrus, M., Zysman, J., Conca, K. Stowsky, J., Vogel, S., and Weber, S. (eds.) *The Highest Stakes : The Economic Foundations for the Next Security System*, New York : Oxford University Press.
- 五島綾子 (2014) 『「科学ブーム」の構造』みすず書房。
- ドレクスラー、K. E. (相澤益男訳) (1992) 『創造する機械』パーソナルメディア。
- ベルーペ、D. M. (五島綾子監訳、熊井ひろ美訳) (2009) 『ナノ・ハイブ狂騒 (上・下巻)』みすず書房、(ページ番号は上下巻通番)。
- 宮田由紀夫 (2017) 『プロパテント政策と大学』世界思想社。

12) 太陽電池は宇宙での電力源として航空宇宙局 (NASA) と空軍の支援で開発されたが、民間向けの実用化では連邦政府が支援せず州政府・自治体・地域電力会社任せだったので、普及が進まず結果としてアメリカの太陽電池メーカーの競争力も低下してしまった (Knight 2011)。