

# ICORP「ナノチューブ状物質プロジェクト」 追跡評価報告書

## 1. 総合評価

ICORP「ナノチューブ状物質プロジェクト」の評価は、カーボンナノチューブ研究がまだ個人レベルの基礎研究であった時期に、応用への展開を視野に入れた多岐にわたる基礎研究を推進し、結果として世界的なカーボンナノチューブ研究の大きな潮流を引き起こす事になったとして高く評価されている。

特に、(1) 単層カーボンナノチューブ (SWNT) の合成と成長機構、(2) ピーポッドの構造と物性解明、(3) 単層カーボンナノホーン (SWNH) の発見、(4) 電子顕微鏡技術の高度化では世界トップレベルの研究が実施された。プロジェクト成果が直接的に発展して進められている SORST の他にも、名城大学を拠点とする 21 世紀 COE「ナノファクトリー」や GREST、ERATO プロジェクトの一部、科研費など各方面で多くのファンドを得て研究が続けられて来た。また、ICORP における共同研究の相手先機関 CNRS をはじめ多くの研究機関との共同研究も推進されている。ICORP 終了後も非常に発展的に研究が遂行され、高く評価される成果が得られている。さらには、学術上の新発見、発明や新領域・新概念を創出しただけでなく、技術革新・イノベーションを起こさせ、科学技術、社会経済に多大な波及効果をもたらしている。

ICORP とその後のプロジェクトによりもたらされた特筆すべき発見と新技術としては、(1) 電子顕微鏡技術の改良による個別原子の観察と分析、(2) SWNT を利用した生体関連分子の構造変化、運動状態の透過電子顕微鏡による動的観察、(3) SWNH の発見とその物理化学的性質の追求をあげることが出来る。これらの成果はいずれもナノカーボンを利用したナノテクノロジーに新しい世界的な潮流を形成し、プロジェクトが成功であったことを確信させるものである。さらに、NEDO、企業等によるナノカーボンのエネルギー分野、エレクトロニクス分野への応用と実用化への取組みへと発展している。

## 2. 研究成果の発展状況や活用状況について

### 2. 1 プロジェクト終了後の研究の継続、発展

本プロジェクトで得られた主要な研究成果として、(1) 単層カーボンナノチューブ (SWNT) の合成条件と成長機構に関する知見、(2) ピーポッドと呼ばれるフラーレン/ナノチューブハイブリッド物質の構造と物性解明、(3) 単層カーボンナノホーン (SWNH) の発見とその開口処理による他物質吸着に関する知見、(4) 電子エネルギー損失分光法 (EELS) などの電子顕微鏡技術の高度化による単一原子の元素分析とマッピングの成功が挙げられる。これらの基礎的研究の成果は ICORP 以降の幾つかの後継プロジェクトに効果的に引継がれ、さらに大きく発展したと評価できる。

各テーマいずれもがナノチューブにかかわる研究を推進しているが、プロジェクト成果が直接的に発展して進められている SORST の他にも名城大学を拠点とする 21 世紀 COE 「ナノファクトリー」や CREST、ERATO プロジェクトの一部、科研費など各方面にファンドを得て研究が続けられて来た。また、ICORP における共同研究の相手先機関 CNRS をはじめ多くの研究機関との共同研究も進められている。なかにはメンバーの一部が NEDO のプロジェクトに加わって実用化の研究を手がけている例もある。これらはすべて非常に発展的に研究を遂行し、得られた成果は下記に概略する様に高く評価されるものである。

ICORP の研究代表者（飯島澄男）の所属する名城大学が拠点となる 21 世紀 COE プログラム「ナノファクトリー」（文部科学省）に 2002 年に採択され 2007 年まで実施された。ここではカーボンナノチューブ（CNT）へのポロンドープの効果、ピーポッドから DWNT への構造変化、ピーポッドと DWNT の物性解明など基礎的な研究が展開された。

ICORP の参加研究者であった末永和知氏は 2006 年に CREST の研究代表者として研究課題「ソフトマターの分子・原子レベルでの観察を可能とする低加速高感度電子顕微鏡開発」に採択されて研究を開始した。ここでは SWNT の内部空間あるいは外部表面を利用して生体分子を補足し、生体機能を原子・分子レベルで捉える極限観察に挑んでいる。

以上の通り、ICORP で得られた研究成果の発展状況・活用状況はプロジェクトが成功であったことを確信させる。

## 2. 2 プロジェクトにおける相手国チームとの交流の効果

日本側はカーボンナノチューブの合成・加工と高分解能電子顕微鏡技術を中心として研究を進め、一方のフランス側はヘテロナノチューブと EELS 分析技術に特化する形で、それぞれ他の側に無い部分を補い合いながら研究が進められた。さらに、カーボンナノチューブの近接場超伝導が発現されることを発見し、近接場効果の温度依存性、バイアス依存性を測定し、近接場超伝導が分子の磁性状態に敏感であることを解明した。末永氏をリーダーとする JSPS 日仏 SAKURA プロジェクト（2004～2006）が実施された。日本だけでなく相手国においても多大な好影響を及ぼしている点は高く評価される。

## 3. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的効果・効用及び波及効果について

### 3. 1 研究成果の科学技術の進歩への貢献

本プロジェクトが世界にアピールすべき発見と新技術として下の成果があげられる。

(1) ピーポッド内に保持された金属原子を原子レベルで個別に観察・分析・マッピングすることに成功したことは物質のサブナノメータレベルでの構造評価と分析技術に大きな進歩をもたらすものであり、この技術の他の材料への応用により物質科学の発展ばかりでなく自然現象に対する人間の理解も深めることに貢献するものと期待できる。

(2) 単層カーボンナノチューブを利用し、生体関連分子の構造変化、運動状態を透過電

子顕微鏡によりその場観察することに成功したことはソフトマターの運動状態の可視化および一次元ナノ空間内での特異な挙動の解明を可能とする新しい研究手法を提示し、今後の顕微鏡技術と分子科学の発展を飛躍的に発展させると期待される。

(3) 生体関連分子の直接観察により有機化学や生物科学分野に新たな展望を導入した。さらにはここで得られた指導原理を適用することにより、さらに新たな材料を創製できる可能性を示すものである。

また、研究成果の学界への影響度を示す論文の被引用件数を見みると被引用件数が 400 を超えるものがあり、世界のナノカーボンの研究者へ与えた影響が大きいことがわかる。本プロジェクトが終了する 2002 年あたりで報文数が急速な伸びを示しており、本プロジェクトの影響を受けてカーボンナノチューブの研究が世界的に活性化され、大きな流れが形成され事を示すものである。科学技術の進歩への大きな貢献が高く評価される。

### 3. 2 研究成果の応用に向けての発展

今後期待されるノベーションとしては IT0 代替材料としての SWNT 超薄膜(透明導電膜)の創製があげられる。抵抗値が高いなどのポイントを克服する必要があるが、実用化へのブレークスルーが期待できる。また、一酸化窒素の酸化反応等ナノ空間を利用した新規化学反応は、新たな化学工業に発展する可能性を秘めていると評価されるが、実現までには時間がかかるかも知れない。

今後は、以下の関連プロジェクトに期待したい。産総研での 2 つの NEDO プロジェクトの実施(2002~2006:「ナノカーボン応用製品創製プロジェクト」、2006~2011「カーボンナノチューブキャパシタープロジェクト」)、将来的にはフッ化ウランへの適応が期待される信州大での SWNH によるフッ素の貯蔵、NEC における「触媒担持 SWNH による燃料電池用電極の開発」や「SWNH を用いた DDS の構築」など企業における活発の取り組み、産総研と企業による CREST「STM/EELS 改良装置の開発と製品化」、NEDO「電子顕微鏡実用化補助プロジェクト」による超高性能電子顕微鏡の製品化などである。

関連分野としては、SWNT 透明導電膜、電界放出型電子源、電気 2 重層キャパシタ、ビア配線などエレクトロニクス分野への応用は大変有望な応用である。これらの中には実用に近い段階に入っている応用もあるが、実用化されるまでにはまだしばらくの努力が必要であると思われる。また、本プロジェクトが名城大と共同開発した APJ 法による SWNT の生産販売を行う大学発ベンチャーを設立(2005)したことも研究成果の社会還元として評価できる。

### 3. 3 参加研究者のプロジェクト後の活動状況

プロジェクトリーダーの飯島澄男氏の受賞歴、招待講演数などは突出しており、世界的に傑出した業績を上げられていることを示している。国内の日本学士院恩賜賞や文化功労者顕彰のみならず学会からの受賞も数多い。また、国外からは米国炭素学会、米国物理学

会からの受賞やフランクリンメダル、バルザンメダルなどの国際的に最上級の賞の授与がある。参加研究者の末永和知氏は ICORP とその後の研究業績が評価され、最近賞を受け、招待講演も多くなっている。しかし、他方で ICORP で実質的に中心となって研究を行ってきた中堅および指導的研究者に受賞がなく、招待講演が少ないことが惜まれる。

ICORP 当時の 13 名の研究員のうち 7 名が大学教員、1 名が民間研究所主任研究員、2 名が産総研チーム長として現在活躍しており、ICORP での経験がキャリアアップに活かされていることを示している。参加メンバーの当時の職は助手、研究員やポスドククラスが大半を占めていたが、今や国内外の教授、チーム長等となっており、大きな昇進が認められる。

#### 4. その他

世界的な研究拠点が得意技（たとえば世界最先端の計測技術と世界最先端の物質創製技術など）を出し合って密接に共同研究をすることは、世界最高レベルの基礎研究と応用研究を生み出すことは明白である。特に、基礎研究においては、目先の成果のみに惑わされずにプロジェクト成果をきちっと評価・提言することが必要と思われる。研究のブレークスルーは意外なところにあることがほとんどなので、この点を強調したい。一方、応用研究においては「出口」が見える形で成果が生まれることを期待したい。

以 上