

## CREST 研究領域「高度情報処理・通信の実現に向けたナノ構造体材料の制御と利用」 追跡評価報告書

### 総合所見

本領域は、バルクとは異なるナノ構造体の構造・組織を制御することで、新規物性・高機能・新機能をもつ材料を創製し、その利用を図る研究を基礎科学の立場から進め、高度情報処理・通信の実現への可能性を探ることを目的として策定されたものであり、2002年度から2期にわたり合計9件の研究課題が採択されたものである。将来的な目標としては応用を視野に入れつつ、まずは波及効果の大きな基本学理・物質創製の新原理の確立という観点から研究を進める戦略は JST のナノテク戦略においてユニークかつ有意義なものであった。各研究課題の研究代表者は物理分野(5名)と化学分野(5名)から優れた研究者がほぼ同じ重みで採択されている点もこの領域を独特のものにしている。研究領域終了後の事後評価においては、「研究成果は質量ともに高い水準にあり、基礎的成果はナノ構造体分野の発展大きく寄与するものであり、研究で得られた多くの材料開発の『種』は材料・デバイス分野の開発に生かされることが期待できる」という趣旨の高い評価が与えられている。

研究領域終了後(5年間)の研究代表者の発表論文数は期間中の433報と比較すると475報へと1割増加しており、研究領域終了後も研究が活発に推進されたことが窺える。また、各研究代表者のほとんどが、研究終了後も積極的に大型の科研費(基盤研究(S)(A)、特定領域研究、新学術領域研究)、JST の CREST や ERATO、NEDO などの研究助成金を獲得して研究の継続・展開を図り、戦略目標である「高度情報処理・通信の実現に向けた新機能材料の創製やナノデバイス・システムへの利用」を目指した研究へと発展させている。実際、「スピン流やトポロジカル電流など無散逸の効果を用いて高集積・超低消費電力デバイス実現の基礎学理の構築と実証」、「遷移金属と有機分子の複合的な超分子の物質創製指針の確立」、「分子磁石を用いた単分子メモリーの実現の基礎原理の実証」、「カーボンナノチューブを用いた機能性材料の創製」、「超伝導体  $MgB_2$  の特性を利用した中性子検出器」、などに関連する研究が推進された。これらの活発な研究活動を反映し、研究領域期間中に申願され登録された特許が20件(国内17、国際3)、研究領域終了後も出願が10件(国内8、国際2)あり、基礎研究をベースにしている割には(国際特許の数をもっと多ければより良かったが)善戦していると言えよう。さらに、多くの研究代表者が研究課題終了後に各種の賞を受賞していることは、研究成果およびその後の研究成果・インパクトが高く評価されていることを示す。

これらの研究は、本領域の戦略目標の意図する「サイエンスの発展を通して長期的には波及効果の大きな応用に結びつくことをめざす」という観点に沿ったものであり、各研究分野のトップ研究者の参画を得て実施された。そして、今後の物理、化学の学術の潮流を先導する研究が行われた。さらに、特筆すべきは、研究成果が応用に結実した例、「カーボンナノチューブを用いたタッチパネルの透明電極の製品化」が挙げられる。また、中期的

には、 $MgB_2$ の特性を利用した中性子検出器の成果が実用化されることが期待される。

以上のように、本研究領域の科学技術への貢献及び長期的に見た材料・デバイス分野への波及効果は大きく、本領域が CREST として設定されたことは大変有意義であった。研究代表者個々のフレキシブルな発想を自由に伸ばすといった研究総括の運営手腕も評価されるべきであろう。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

研究領域の目標は「バルクとは異なるナノ構造体において、微細な構造・組織等の制御により高度情報処理・通信の実現に向けた、これまでにない特徴的な物性・高機能・新機能を有する材料等の創成・利用」であり、「すでにバルクとして存在している物質のナノ化」、「新機能材料の創成、ナノデバイス・システムへの利用」の2つの方向性で研究が行われた。各々で大きな成果が挙げられ、それらが研究期間終了後も基礎研究および産業応用の双方の面で発展している。各グループの研究成果はサイエンスとして優れており、研究期間終了後も当該分野で重要な研究課題として発展している点は高く評価できる。各研究成果の利用という面からは、実用との距離が研究により異なることは当然で、実用に近い研究成果を上げているグループも、多少、実用から距離があるグループも存在しているが、いずれの研究グループの成果も、基礎研究に止まらず、産業応用への可能性を秘めている。また、各研究グループとも、研究課題終了後も積極的に研究助成金を獲得して研究の継続・展開を図り、戦略目標である「高度情報処理・通信の実現に向けた新機能材料の創製やナノデバイス・システムへの利用」を目指した研究へと発展している。

研究領域終了後5年間に発表された論文は、期間中に発表されたものより1割増加し継続研究がさらに発展していることを示している。また、「Science」、「Nature」、「Nature Chemistry」、「Nature Communications」などの著名誌にも多く掲載されたほか引用数が、既に187回、155回、110回に達するものがあるなど、本領域は研究を国際的に牽引する成果を上げている。さらに、大型の科研費(基盤研究(S)(A)、特定領域研究、新学術領域研究)、JSTのCRESTやERATO、NEDOなどの競争的研究資金を獲得して研究を展開している。特に、産業応用につながるNEDOプロジェクトに採択されたグループでは、カーボンナノチューブの内部を利用した新物質開発を進め、二層ナノチューブを用いた透明電極の製品化に成功しており、本領域から発芽した特筆される成果と言える。

## 2. 研究成果の科学技術的および社会・経済的な波及効果

### 2.1 科学技術の進歩への貢献

本研究領域では、「既に存在する物質のナノ化」、「新機能材料の創製とナノデバイスシステムへの利用」、「測定技術、シミュレーション法の開発」の3つの切り口で、各々科学技術の進歩に貢献している。

「既に存在する物質のナノ化」においては、いくつかの新しい物質創製法が開発された

のは重要な成果である。特に、「ソフトランディングによるナノ表面デザイン法」、「汎用性の高い自己集積型物質創製法」が開発され、物質そのものの興味と応用性の高い機能の開発の両面で今後の発展が期待される。いずれの方法も自己集積化の更なる制御の方法が見つかれば、一層の発展が期待される。既存の物質の新しい機能の発見も重要な成果として上げられる。各々の研究グループで新しい興味ある機能と現象を見出した。たとえば、記憶素子や外部応答物質として期待される単分子磁石など、ナノデバイスへの応用が期待される。

一方、理論的観点から二人の研究代表者を中心に研究の新たな潮流が形成されたのは、「トポロジカル物理」と「スピントロニクス」であろう。これらはそれぞれ理論家が主導し、実験家がそれに参画する形で行われた物性研究である。これらの研究課題は、シリコンを基盤とする半導体物理学とは全く異なる原理のエレクトロニクスを志向する意味で共通している。すなわち、「スピンホール効果の予言と実証」に象徴される、トポロジカル電流やスピン流などを用いて、高集積・超低消費電力デバイスを実現しようとする試みであり、今後の飛躍的な発展が期待される。

「新機能材料の創製とナノデバイス・システムの利用」については、カーボン材料の創製が特筆される。水溶性カーボンナノチューブを DNA などとの複合化で達成したことや金属内包フラーレンのピーポッド創製は独創的で高く評価される。有機合成による機能材料の創製も注目される。これらの物質の機能と電子状態の関連、それに基づいた新しい材料物質の更なる創製は今後の物質科学分野での大きな課題になり得るだろう。

「測定技術およびシミュレーション技術」についても多くの成果が得られた。超伝導体  $MgB_2$  の高精度中性子検出への応用は実用化の可能性が高い。スピン起電力を用いた磁気検出技術は高感度高精度磁気測定への応用展開が期待される。その他にも、「界面状態を評価する振動分光法(現在のホットな研究対象である界面へのアプローチとして有効)」、「分子性微小結晶の熱分析法(これまで測定が困難であった基本的な情報を与える)」、など重要な測定法が開発された。いずれも広い利用が期待される。また、デバイス開発やナノ物質の物性に関連する理論的方法が開発された点も評価される。

## 2.2 社会・経済的な波及効果

本領域の戦略目標が情報処理・通信における集積・機能限界の克服・実現という比較的長い時間を要するものであるうえ、本領域が基本原理・物質からアプローチするという戦略を取っているため、社会への波及効果は長期的なものになることが予想される。本領域で得られた多くの成果はほとんどが基盤的な技術であり、現時点では実用化されていないけれども今後、社会・経済的な波及効果が期待される。そのためには、今後は産業界との連携という視点も追及されるべきではないか。しかし、既に実用化され大きな波及効果をもたらしつつある次の事例は本領域の成果として特徴的である。

「新世代カーボンナノチューブの創製、評価と応用」チームは、研究課題期間中は、二

層カーボンナノチューブ(DWNT)、ピーポッド(フラーレン内包カーボンナノチューブ)など特徴的なナノ物質(材料)の創製と高純度化、FETデバイスの作製・評価など非常に基礎的な研究に注力し、研究課題終了後に東レなど企業との共同研究を本格化させた。研究期間中にDWNTの製造方法を開発し、その終了後、東レとの共同研究によってスケールアップし、ベンチプラントからパイロットプラントに展開してゆくやり方は、一つのプロトタイプとなり得るのではないかと考えられる。DWNTのフレキシブル透明電極への製品化は驚異的な成功例である。うえ、ナノチューブのトランジスタ応用、金属内包フラーレンを用いた金属ナノワイヤの合成、さらには金属内包フラーレンの造影剤としての応用は非常に期待が持てる。この成功例は、材料基礎研究から見て極めて画期的なものと考えられる。本領域は、基礎学術への大きな寄与だけでなく、実用化においてもきわめて重要な寄与があったと言える。この成果については研究領域期間中および終了後合わせて74件の報道があったが、CRESTとしてもその成果をもっとアピールしてもよいのではないかと考えられる。

### 3. その他特記すべき事項

以下、評価委員の所感をまとめる。

本領域の各研究課題を通して、どのような若手人材が育ったかという点も大事なポイントで、資料からは各研究グループともポスドク、助教レベルの研究者の多くが上のポジションを得て移動しており、若手人材が活躍していることが窺える。

本領域の各研究代表者は全て実績ある研究者であったことで、研究成果は着実に上がり、領域として成功した。一方、一般論として、大きな実績はないがCRESTを通じて飛躍が期待される若手研究者を少数採用するという観点もあり得るのではないだろうか。

物理分野では実験、観測と理論解析のインタープレイ、共同研究が一つのグループの中で、良い形で行われているのが印象的であった。

特許に関して、論文のインパクトの大きさに比べて、国際出願数、登録数が少ないことが少し気になる。海外に技術を公開して特許は取られるといった、今後の産業化におけるリスクを感じる面もある。デバイス・システムを想定した特許化など、産業界も巻き込んで早目の戦略構築が必要ではないだろうか。

以 上