

## CREST「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」 研究領域事後評価報告書

### 総合所見

#### ・研究領域設定の意義

第2期科学技術基本計画(平成13年度から17年度)におけるナノテクノロジー・材料分野の重点化開始から5年を経た本領域の発足時には、ナノ材料やナノデバイス、ナノ加工技術、ナノプロセス技術などのナノテクノロジーの要素技術は実験室での試行段階にあり、高速・大規模に再現性よく実現するまでには技術的に大きな隔たりがあった。この認識に基づいて、その隔たりを埋めうる新しい技術群を支える基礎基盤をナノスケールの現象理解に基づいて創出すること、並びに、ナノスケール科学の適用による製造技術基盤の革新によりこれらのナノテクノロジー製品を生み出す基盤を構築すること、が強く要請された。すなわち、ナノテクノロジーの急速かつ着実な進展、およびその成果の産業応用・社会還元への強い期待を背景として、戦略目標「ナノデバイスやナノ材料の高効率製造及びナノスケール科学による製造技術の革新に関する基盤の構築」が設定されたことは、いわば必然といえる。

本領域の研究総括である堀池靖浩氏は、領域設定の意義を知悉しており、研究領域「ナノ科学を基盤とした革新的製造技術の創成」の公募に際して、ナノ科学と実用化とのギャップを埋める実用化を意識した研究、換言すれば「ナノ科学に根ざした独創性を展開して『具体的もの』の創製という出口を見据え、その結果『使える技術』として諸技術に伝播する波及効果の大きな研究提案を期待する」、とした。必要であれば、産学連携を生かした研究体制の提案も歓迎するとし、研究成果は論文発表だけでなく、実用化にどれだけ近づけたかが大きな評価項目になる、と付言している。

#### ・研究総括の果たした役割

堀池総括は、第3期科学技術基本計画(平成18年度から22年度)にも明記された「True Nano」を強く意識し、ナノテクの出口が見えるテーマを網羅して応募に備えた。平成17年度にナノテクノロジー分野別バーチャルラボにおけるバイオ・医療関係のCREST研究課題が終了し始め、平成18年度以降にはDDSなどのナノバイオ関係の研究課題の応募が確実視されていたこと、また本領域がNEMS/MEMS、ナノエレクトロニクス、有機エレクトロニクスなどのデバイスに携わる研究者にとっては格好の応募分野であったことを事前に予想した。選考に当たっては、独創性に富み、背景にナノ科学解明が不可欠で、しかも研究終了時には実用化などで社会還元できる、という立場を堅持し、この高いハードルを飛び越えるテーマを鋭意選んだ。その際、科研費やNEDOなど他の競争的研究資金を獲得しているほとんど同趣意のテーマの採択を見送る方針を貫いた。このような選考方針に基づいて、領域アドバイザーの人選に当たっては、本研究領域が特定のナノ科学に

特化した研究ではなく、実用化を強く意識しているため、その目利きができる見識ある企業人の参画も実行した。これらの努力の結果として採択された課題 16 件は、ナノプロセス 4、ナノ材料 2、ナノデバイス 3、ナノバイオ 6、ナノ計測 1 となっており、バランスの良い研究体制となった。

領域の運営においては、領域会議やきめ細かなサイトビジット、チーム毎の問題の把握と適切な助言、指導を行い、各チームの研究代表者との信頼関係構築にも努力したことが、順調な研究推進と高い成果に結びついた、といえる。

堀池総括は、エレクトロニクス系企業のプロセス技術分野での就業経験に加え、ナノバイオ研究をパイオニアとして先導した経験も有していたので、研究分野がナノバイオテクノロジー、ナノエレクトロニクス、ナノ粒子・加工・計測と広範囲に亘る本領域の総括として、適任というよりむしろ天職ともいえる適性を持っていた。この点において、研究総括としての選定は極めて適切であった。

以上の 2 点に鑑み、当該 CREST を実施した意義は、ナノテクノロジー分野における日本の産業競争力を維持する観点において極めて大きい、と結論される。

## 1. 研究領域としての成果について

### 1. 研究領域としての研究マネジメントの状況

#### (1) 研究課題の選考方針、領域アドバイザーの構成、採択された課題の構成

選考に当たっては、独創性に富み、ナノ科学解明を主眼とすること、加えて研究終了時には成果を社会還元できること、という高いハードルを飛び越えるテーマを鋭意選んだとする選考方針は領域設定の主旨に適うものである。

「実用化を見据えたナノ製造技術を達成する」という本領域の性格上、研究分野がナノバイオテクノロジー、ナノエレクトロニクス、ナノ粒子・加工・計測と広範囲に亘るため、これら分野に精通し、かつ実用化についても見識ある領域アドバイザーを選ぶ、とする堀池総括の方針も適切である。本戦略がナノ科学自体ではなく実用化を目指した戦略であることから、(元)産業界を含めた幅広いキャリアを持つ有識者を配置しており、的確であったと評価できる。中でも、最先端研究開発支援プログラム(FIRST)に採択された中心研究者が 2 名(江刺正喜氏、横山直樹氏)含まれており、最先端の立場からのアドバイスを期待できる体制であった、と評価できる。特に、本研究領域と同一戦略目標下で推進されたさきがけ研究領域の研究総括(横山直樹氏)をアドバイザーとすることで連携を図った点は極めて有効であった。一方、バイオ分野の課題も多かったので、臨床医学も含めた医学関係者が含まれていたほうがベターであったとの医学者のコメントがあったことを付記する。

採択された課題、ナノプロセス 4、ナノ材料 2、ナノデバイス 3、ナノバイオ 6、ナノ計測 1 の 16 件は前述のごとく広範な分野に亘っており、現在考え得る有望応用領域に展開可能な製造技術領域を網羅し的確に選定している。

## (2) 有為な人材の参加、国内外の顕彰・受賞等

チーム毎の業績に多少の多寡はあるものの、国内外の著名な受賞が多数有り、Nature 系などの著名ジャーナルへの掲載論文数や顕彰・受賞歴、招待講演数、特許出願数、新聞などへの掲載数、参画企業の数などの実績を勘案すると、いずれの研究もおおむね国内外で高い評価を受けており、全体として有為な人材の参加を適切に得た、と評価出来る。

発表論文の第一著者名をみると、日本人以外の外国人名が多数みられるので、日本人研究者のみではなく、外国人研究者も多く雇い入れて研究を行った結果であり、国際的に有為な人材の育成にも大いに寄与したと評価する。

## (3) 研究領域の運営方針、研究進捗状況の把握と評価、それに基づく指導、課題間の連携の推進、研究費の配分上の工夫

研究会・サイトビジットを 106 回も開催していることは驚異的な数字であり、研究総括の本研究課題成就に対する並々ならぬ熱意と誠意を感じる。この実績を背景として堀池総括は、成果の出ていないサブテーマの中止とそれに代わるテーマ設定などによって実用化に近い実績を上げさせるなど、企業経験者ならではの指導力を発揮した。

研究の進捗状況(成果の質や費用の使われ方)を見て、必要性の高い領域に集中して投資するなど、選択と集中を進めた領域運営は、マネジメント面においても的確であったと評価できる。例えば、JST からの追加配分があった場合には、成果の上がっているチーム(例：片岡チーム)に厚く配分して、ビデオレート共焦点顕微鏡の開発の成功に繋げるなど、メリハリの効いた予算の配分が本研究課題を成功に導いた大きな要因であると思われる。

また、中間評価で指摘された問題点を領域に持ち帰って、真摯に検討した結果がその後の成果に繋がった点(宇田チーム：対象疾患を狂犬病から、インフルエンザや癌にシフトさせ、スーパー抗体酵素の薬理効果を立証)も高く評価できる。

一方、16 チームを 3 つのテーマに分けた領域会議を開催し、テーマ内でのシナジー効果に配慮した連携による成果も得られたが、ナノテクノロジー特有の分野の幅広さゆえに 3 つのテーマ間を跨ぐ研究例は少なかった。イノベーションは、異分野間の協働によってこそ推進されるので、今後この領域で構築されたネットワークによる研究の展開に期待する。

## 2. 研究領域としての戦略目標の達成に資する成果

### (1) 得られた研究成果の科学技術への貢献

16 チームの成果は中間評価時点ではかなり差があったが、最終的には論文数、国内外の特許出願数とも増加し、領域全体として数的には他の CREST に比べて遜色ないレベルに達した。また、各チームの代表者が当該課題に関する基調講演、招待講演を国際会議で行ったことも、ナノバイオ、ナノ粒子、ナノエレクトロニクス、ナノ計測分野において研究成果が評価された証左といえる。

著名な学術誌への掲載や招待講演の多さという観点では、ナノバイオ関係の 6 チームの

成果は、いずれも高い水準にあることがわかる。特に、片岡チームに関しては、国際誌への論文発表が 327 件と群を抜いて多く、Nature 系の雑誌を含んでいる。独フンボルト賞をはじめとして受賞も多く、国際的に高く評価されている。本研究が、「FIRST」に引き継がれていることからその評価の高さが認められる。明石チームの成果も国際的にも高く評価されている論文誌に数多く掲載されている。

圧倒的な知名度の雑誌等への掲載数が多いわけではないので、この点に関する研究領域全体の成果は標準的であるが、この研究領域の本領は、「実用化を見据えたナノ製造技術を達成する」という本領域の性格上、むしろ次項のイノベーション創出において発揮された、といえる。

## (2) 得られた研究成果の科学技術イノベーション創出への貢献

16 チームの成果は、基礎的知見の集積段階に止まっているものから医療への適用を目指した臨床試験段階に至ったものまで、幅広く存在するが、分野毎に特筆すべき成果があるので、全体としては大きな社会的インパクトを与えたと言えよう。成果を産業や社会へ展開・実装するための努力は分野を問わず認められる。

ナノバイオ関係の 6 チームの成果は、著名な学術誌への掲載や招待講演の多さからいずれも高い水準にある。また、多くのチームの成果が具体的で、計測器メーカーや創薬メーカーとの協働が実用化に近い段階にまで進んでいることも評価できる。以下、代表的な成果を列挙する。

高分子ミセル型ナノデバイスを創製した片岡チームは遺伝子治療の実用化に取り組み、製薬会社が実用化に取り組み、前臨床試験に至っている。片岡チームの成果の特徴の一つは、特許を切れ目なく出願し(国内 81、海外 33)、海外でも登録されている点である。これらは、産業イノベーションの段階での競争力の源泉となる。すでに、民間企業にライセンスし科学技術イノベーションに十分に寄与し得る研究であったと言える。

明石チームのナノ粒子ワクチンは、大阪大学において臨床試験の準備段階に入っている。これに注目した製薬会社との共同研究講座も設置されており、実用化の観点からイノベーション創出につながる可能性は高いと評価できる。

ヒト型スーパー抗体酵素の開発を進めた宇田チームは、中間評価のアドバイスを受けて、対象疾患を狂犬病からインフルエンザやがんにシフトし、本研究の臨床的価値を大いに高めた。

小寺チームは MEMS/NEMS を用いたハンドリング技術やナノマイクロバイオデバイスを再生医療に応用するという意欲的な研究を行い、組織・細胞を対象とした先駆的研究として関連の国際会議等において注目を集めた。

下村チームの進めたバイオミメティック・ナノ表面創製技術開発については、特に、ウジ虫に学ぶ“ナノスーツ”が高真空内で生物を保護するため、SEM や TEM 環境でのリアルタイム生体観測を実現した点において大きなインパクトを示した。

一木チームは有用酵素の創出を目指し、野生型遺伝子に変異を導入して得た DNA ライブラリーに対し、1 対 1 に対応付けされた変異体タンパク質ライブラリーアレイを作製し、人工的淘汰・選択を行う高速進化システムを開発した。

ナノ粒子関係には 3 チームが属し、ナノ粒子合成に関して着実な成果を挙げた。

高井チームは液中低温プラズマを利用して合成した新材料をリチウム空気電池に応用し、その有効性を実証するに至っている。これらの成果は韓国表面工学会での功績賞などに結びついている。

前田グループはマイクロリアクターを使ったナノ粒子の高機能合成装置を完成させ、Cu 配線用材料や新型蛍光体の合成にも応用されている。成果の特許化、企業との契約も進むなど実用化に貢献している。

桑畑チームがイオン液体の生物系試料への塗布により、電子顕微鏡観察による「反応や生物表面のナノレベルでの見える化」に成功したことは、医学、生物学をはじめとして多くの関連分野の研究・開発への波及効果が極めて大きい、と評価できる。

ナノエレクトロニクス関係の 6 チームは、単層カーボンナノチューブ SWCNT の高純度精製法、ナノシートの合成、液晶材料の膨大なデータベース構築、プラスチックエレクトロニクスの性能向上、新材料および新構造を用いる回路動作の確認など、ナノ構造体形成による次世代エレクトロニクス、IT 技術に役立つ新材料・技術の創出を目指した。多くは基礎研究の成果を元に企業との連携を探っている段階である。

堀チームのプラズマ内部パラメータによるプロセス特性定量化は精密プラズマモニタリング装置として結実し、すでに企業への導入も行なわれている。その成果により本チームはプラズマ科学研究における世界のセンターとして機能しつつある。

片浦チームは SWCNT の画期的な高純度精製法の確立、異なるドーパント内包による p 型、n 型作製と CMOS インバータ特性実現により、応用研究への基盤を築いた。

佐々木チームは、多様な酸化物ナノシートの作製を行い、誘電率 300 を超える誘電体材料や強誘電体などを使った高性能キャパシタなどを実現して企業連携を進めている。

半那チームの液晶性有機半導体材料技術に関しては、多くの民間企業が関心を寄せ、共同研究などにより技術移転が進みつつある。

一方、塚越チームは有機トランジスタの高接触抵抗は界面乱れと考え、約 1nm の不完全な酸化膜の導入で激減させ、また、フレキシブル基板に親水・疎水表面を使い分けることにより、溶塗布のみでトランジスタ作製に成功した。

真島チームは、無電解 Au メッキによるナノギャップ製作法を 96%収率で確立し、ポリフィリン保護 Au ナノ粒子島により常温 SET 動作に成功した。更に、常温で高繰り返しの新ナノギャップメモリ素子を開発した。

ナノ計測を担当した松尾チームは、生体や有機などのソフト材料の分析・計測に適した重イオンやクラスタービームを用いるユニークな SIMS 法を開発した。

いずれの研究課題も独創的で応用への道筋も意欲的に指向されており、研究成果の技術的インパクトは高い。また、いずれの成果も産業化に結び付く基盤技術となる可能性がある点では評価できる。しかし、本領域が目指した「実用化」を厳密に捉えると、大量生産に結びつく製造装置の萌芽がみられるものの、今後さらに研究成果を市場に展開するためには、コスト、生産性、環境負荷などの観点で、企業との連携による実用化のプロセスが必要である。課題によってばらつきはあるものの、上記に必要な特許等知的財産権の取得はある程度意欲的に行われている。

### 3. 評価

#### (1) 研究領域としての研究マネジメントの状況

適切であった

#### (2) 研究領域としての戦略目標の達成に資する成果

##### (2-1) 得られた研究成果の科学技術への貢献

高い水準にある

##### (2-2) 得られた研究成果の科学技術イノベーション創出への貢献

科学技術イノベーションに寄与する成果となっている

#### (3) 総合評価

十分な成果が得られた

### 4. その他

科学技術イノベーションに寄与する卓越した成果を結実させるためには「継続」が必要であり、この点は政策として配慮願いたい。

## II. 研究領域の活動・成果を踏まえた今後の展開等についての提言

### 1. 科学技術イノベーション(成果の社会・産業への実装)へと展開させるための方策

#### (1) 「Translational」な研究開発を行う仕組みの必要性

本領域の総括は元来企業出身であるため、研究終了時には成果を社会還元できることに強い意欲を持ち、領域の運営においても多大な努力をされた。しかし、その成果は商業化という観点でのイノベーション創出にはまだ遠い印象を受ける。

真の実用化には産業界との連携が不可欠であり、最先端の研究と実用化研究とのギャップを埋める「中間的産学共同研究を推進するための柔軟かつ継続的な資金確保を行える体制」が求められる。文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業のような施設、設備の共同利用によるナノテクノロジーの基盤強化に加えて、プロトタイプを商品にまで仕上げる機能を有する空間と制度の整備が不可欠である。

## (2) 社会ニーズからのトップダウンの戦略策定の必要性

文部科学省や JST が推進する殆どのプロジェクトは、産業界との橋渡しを意図する研究であっても、結局、シーズからの産業化の芽生えを期待してのファンディングである。このボトムアップ方式のファンディングだけではなく、アメリカのエネルギー政策に見るように、社会ニーズの分析から要素課題の抽出、要素課題毎の問題点の発掘を経て、最終的に基礎研究課題に至るトップダウンの戦略策定が日本にも必要である。また、そのためのマネジメントを行える人材育成も急務である。

## 2. 科学技術の進歩へと展開させるための方策

### (1) 実用化に向けての課題抽出と基礎的課題の絞り込み

本領域の成果は、研究総括の熱心な指導により実用化が視野に入ってきた成果も少なくないので、産業界の目利きを動員して成果を精査、実用化に向けて改めて取り組むべき基礎研究課題を明らかにし、その研究を支援する必要がある。新材料を用いるデバイスの電極界面特性の理解と制御などがその一例である。

### (2) 優れた研究同士を有機的に結び付けるネットワーク構築

個別テーマごとに世界的なレベルのトレンド分析と国際競争力比較を行い、優れたテーマ及び研究グループを発掘してそのネットワーク化を進めることを提言する。

その理由は、グローバルな大競争時代には、ナノテクノロジーのような普遍的かつ基幹的な技術基盤に関しては、細かいテーマ毎の課題設定に基づく競争的資金制度の運用では、世界に勝てないからである。これからの国家戦略として、国家の基幹的な技術に関しては、オリンピックのようなナショナルチーム作りを進める必要がある。その際、既存の機関、組織等に人材を集めて中核的拠点とすることは、参画する研究者、技術者の loyalty を期待しにくいので、ドイツのマックスプランク協会のようなアンダーワンルーフの名称を冠するのが良いと思われる。

### (3) 高度技術支援者の処遇と社会的認知度向上

Ⅱ-1 項で「ナノテクノロジープラットフォーム(NPF)事業のような施設、設備の共同利用によるナノテクノロジーの基盤強化に加えて、プロトタイプを商品にまで仕上げる機能を有する空間と制度の整備が不可欠である」と提言したが、このような空間及び制度の事業推進には、NPF 事業同様、研究者以外の高度な専門技術者の協力が不可欠である。このような人材は、日本では研究者のサポート要員として低い地位に置かれがちであるが、欧米では研究者と同格の高い処遇と社会的尊敬を受けている。日本においても、このような人材の育成、能力に値する処遇、社会的認知の向上、が不可欠である。これが成れば、若者たちのキャリアパスが新たに創成されたことになるし、役割分担と協働、という新しい研究文化が醸成されることになる。

#### **(4) JST の事業に参画する技術参事他の企業出身者への期待**

JST の事業に参画する技術参事他の企業出身者の役割は、文部科学省及びその関連機関という基本的にシーズ畑の人材を抱える組織、体制の中にあつて、出口にこだわる企業的センスに基づく意見開陳や行動を行うこと、と期待される。およそ組織や事業は多様な人材にそれぞれの異なる能力を発揮してもらうことによって発展すると思われるので、企業出身者がもっと率直かつ自由に活動できる風土を構築することが望まれる。

### **3. その他の提言**

#### **(1) 領域アドバイザーとの密度の高いコミュニケーションがとれる体制**

広範かつ専門的な課題を多く抱える事業では、研究総括の指導が及ぶ範囲が限定されるので、チーム毎に担当アドバイザーを委嘱し、より重い責任の元で助言、指導を行う体制構築を検討されたい。

#### **(2) 知財保護強化及び戦略性強化**

研究開発の良い芽を他国の研究成果に見出し、それらを融合して実用化するという「水平統合型」研究スタンスをとっている国々にとって、成果の公開を原則とする JST の事業、例えば CREST やさきがけ、は格好の標的になりやすい。JST には、知財の保護だけでなく、複数の成果を融合して新しい成果を創造し、実用化に向けてコーディネートする役割も期待したい。

以 上