

戦略的創造研究推進事業
－CRESTタイプ－

研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づく
ナノデバイス・システムの創製」

研究領域事後評価用資料

平成20年2月12日

I. 戦略目標

1. 名称

情報処理・通信における集積・機能限界の克服実現のためのナノデバイス・材料・システムの創製

2. 具体的な達成目標

2010 年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う新たな情報処理・通信用デバイス・材料・システム開発をめざす。この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方の取組みを実施する。

また、これらデバイス・材料・システムを活用するためのインターフェースとしても有用な各種センシング技術（最先端的計測法・先端センサー素子とセンサー管理システムの開発等）による健康・環境計測法の実現を目指す。

これらの目標達成のため、革新的な物性を有する物質創成からデバイス・システム開発までの総合的な推進を目指す。

- このため、2010 年代に実用化・産業化を図るべく、以下のような成果等を目指す。
- ・現在の半導体よりも演算速度を 2 桁向上するとともに、消費電力を 2 桁以上低減する情報通信用デバイスの探索。
 - ・革新的なナノ素材とナノプロセスの開拓、新機能・新特性を持つ超集積素子の実現及び、医療応用・障害克服などに貢献するための集積システムの生体親和性の飛躍的向上。
 - ・革新機能を付与した単一分子の合成及び高度集積化法の開拓等、機能分子を望むように集積して回路を形成する技術の確立及び分子デバイス・システムへ応用。
 - ・ナノメモリーの原理・素材・方式の解明を通じ、現在のハードディスクの記録密度の 1000 倍程度の記録密度を目指す。
 - ・固体量子ビット素子、超伝導系量子磁束素子、相関電子素子、相関光子素子、スピン制御素子、ナノチューブ・ナノワイヤ素子等、新原理素子の探索及び技術的な壁の打破。
 - ・大容量・超高速の光通信技術に必要な光発生、光変調、光スイッチ、光増幅、光検出、光メモリ、表示などへの革新につながるナノ構造フォトンクスや材料の開発を通じた次世代光技術の創製。
 - ・バイオ分子の自己組織化を利用したナノスケールの新素子、新材料の創製を通じた高集積バイオチップの開発。
 - ・半導体、酸化物や磁性体中の電子の持つもう 1 つの自由度であるスピンを電子デバイスにおける新しい自由度として積極的に活用した、新しいナノ構造を利用したスピントロニクス材料の探索・創製。
 - ・超分子を用いたバイオナノ超分子センサー、導電性超分子スイッチング素子、ナノマシンなどの分子デバイス、ナノ材料の開発。
 - ・フラーレンの集積化、ナノデバイスへの応用に不可欠な CNT 超微細加工技術、コンポジット材料開発。
 - ・フラーレン、ナノチューブに次ぐ新たなナノ集合体材料の創製と開発を通じたクラスター・ナノ粒子集合体をベースにした素子の実用化。
 - ・従来は全く異なる物質・材料として扱われてきた有機物質と無機物質とをナノスケールで融合させた構造を持つ全く新しい物質・材料群による素子の開発。

3. 目標設定の背景及び社会経済上の要請

経済のグローバル化と国際競争の激化等に伴う産業競争力の低下、雇用創出力の停滞といった現下の経済社会の課題を科学技術、産業技術の革新により克服し、我が国の産業競争力を強化し、経済社会の発展の礎を着実に築くことが不可欠である。このような革新的な科学技術、産業技術の発展の鍵を握るものとして、ナノレベルで制御された物質創製、観測・評価等の技術であるナノテクノロジーが、近年急速に注目されている。

具体的には、

- ①半導体を用いた高速・高集積・低消費電力デバイス技術に関し、国際競争力を確保することに加え、
- ②全く新しい原理を用いた次世代のデバイス・材料の礎を確立することが長期的展望にたった我が国の国際的な技術競争力の確保にとり必要不可欠である。

また、これらの実用化・産業化の目標を達成するためには、ナノレベルでの計測・評価、加工、数値解析・シミュレーションなどの基盤技術開発や、革新的な物性、機能を有する新物質創製への取り組みが必須である。

なお、総合科学技術会議分野別推進戦略（平成13年9月）においても、情報通信分野においては、国家的・社会的課題の克服のため、「次世代情報通信システム用ナノデバイス・材料」が5つの重点領域の1つとして位置づけられているところである。

4. 目標設定の科学的な裏付け

情報通信分野における我が国の技術競争力は、欧米に比べて全体的に低下傾向にある。これまで大きな役割を果たしてきた民間の研究開発については、その投資額の日米格差が急速に拡大しており、内容的にも製品開発に重点を移しつつあるため、我が国の競争力強化に向け、リスクの高い研究開発等について国の役割が一層重要となっている。

特に、次世代情報通信システム用ナノデバイス材料においては、2010年に訪れると予想されている現方式のシリコン集積回路の微細加工限界（ムーアの法則の限界）を越えた、次世代の情報処理・通信を担う多様な新原理デバイス・材料・システムの構築に向け、現在、各国が世界標準の獲得競争のまっただ中にある。我が国として、次世代情報通信用デバイス開発において、世界を凌駕するための取り組みを緊急に準備することが必要であるが、この際、シリコン基板及び非シリコン基板の双方について産業化を見据えながら段階的な目標設定も行いつつ、戦略的に取り組むことが必要である。

ソフトウェア無線等の新規通信方式への転換につれて、通信システムの急速な高速・大容量化が今後とも予想されているが、半導体の集積化・高機能化はムーアの予測に従い、3年で4倍のペースで進んでおり、2005年には素子の最小寸法が100 nmを切り、ナノデバイス時代に突入することとなる。このため、大容量、高演算速度、省エネルギー、高セキュリティその他の画期的な機能を有する新原理デバイス・材料・システムの開発が急がれている。

具体的には、

- ・現在の延長の技術においては、高速化限界、セキュリティ問題、消費電力等の課題の克服に加え、量子効果等により現れる素子の動作や製造技術上の物理的な限界、製造コスト等の問題を回避するための革新的なナノ素材やプロセスの開発、量子ドット、量子細線、ナノチューブ等を取り込んだスイッチ素子の開発が求められる。
- ・現在使われているLSIメモリ、磁気ディスク、光ディスクの性能限界の壁をうち破るとともに、強誘電体メモリなどの次世代メモリの開発が求められている。
- ・更に、現在の方式の集積回路とは全く異なる新たな原理に基づくデバイスとして、単分子素子、各種固体Qビット素子、超伝導系新量子磁束素子、スピントロニクス等の技術開発も次世代の世界標準獲得の観点から積極的に取り組むべき重要な課題である。

- ・加えて、このようなデバイスやシステムの開発に際しては、革新的な物性、機能を有する新物質創製が必須であり、超分子、カーボンナノチューブ、フラーレン、クラスター・ナノ粒子をはじめとした積極的開発が必要である。

5. 重点研究期間

ナノテクノロジー分野については、競争が激しく多くの研究領域を推進する必要があるため初年度のための公募とし、次年度以降には新たに同じ研究領域での公募は行わない。

1 研究課題は概ね 5 年の研究を実施する。(なお、優れた研究成果を上げている研究課題については、厳正な評価を実施した上で、研究期間の延長を可能とする。)

II. 研究領域の概要

「新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製」

(平成 13 年度発足)

この研究領域は、量子系の新しい物理現象や動作原理、およびそれを用いて新しいデバイス・システム等を実現するための研究を対象とする。

具体的には、ナノスケールにおいてはじめて現われる電子系やスピン系の物理的特性を応用して演算、記憶等のアクティブな情報処理機能をもつ新しいデバイスの実現、ナノスケールの局所的特性を対象として電気、機械、光等の物理的手法や動作原理を用いてセンシング、操作、制御等を行うデバイスや新たな情報処理システムの創製を目指す研究等が含まれる。また、既存技術の限界を打破する新しい技術領域の創出に発展する新しい物理現象の発現のためのナノデバイスに係わる構造研究、現在まだ対象とするものの性質の研究にとどまっている現象をデバイスに結びつける研究等も含まれる。

III. 研究総括

梶村 皓二 (機械振興協会副会長、技術研究所所長)

IV. 採択課題・研究費

採 択 年 度	研究代表者	所 属、役 職	研 究 課 題	研究費 (百万円)
H13	猪俣 浩一郎	物質・材料研究機構フェロー	スピン量子ドットメモリ創製のための要素技術開発	606
	岩佐 義宏	東北大学金属材料研究所教授	ナノクラスターの配列・配向制御による新しいデバイスと量子状態の創出	468
	大串 秀世	産業技術総合研究所ナノテクノロジー研究部門招聘研究員	高密度励起子状態を利用したダイヤモンド紫外線ナノデバイスの開発	485
	河田 聡	大阪大学工学研究科教授	非線形ナノフォトニクス	558
	小森 和弘	産業技術総合研究所グループリーダー	光量子位相制御・演算技術	496
	三澤 弘明	北海道大学電子科学研究所教授	量子相関光子ビームナノ加工	591
H14	石原 一	大阪府立大学工学研究科教授	光電場のナノ空間構造による新機能デバイスの創製	627
	板谷 謹悟	東北大学工学研究科教授	固液界面反応のアトムプロセスの解明とその応用	535
	高柳 英明	東京理科大学理学部教授	超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現	311
	松本 和彦	大阪大学産業科学研究所教授	カーボンナノチューブ単一電子・スピン計測システムの確立	699
H15	赤穂 博司	産業技術総合研究所強相関電子技術研究センター副研究センター長	強相関界面エンジニアリングによるスピントンネル機能の巨大化	473
			総 研 究 費	5,849

V. 研究総括のねらい

当該研究領域は平成13年度、CRESTのナノテクノロジー2領域のひとつである物理系として設定された。公募に当って領域運営の意図をII. 研究領域の概要として示した。

この領域の研究の向かう先は4重点分野（ライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテク・材料）のいずれにもあるとの認識に立って、特に初年度の募集では、単に物理現象のみではなく化学、生物現象をあわせ利用することも含め、既存の領域を越えた融合的でブレークスルーをもたらす研究提案も含めた。優れた提案課題を進めていく過程で、他分野に滲み出したものを促進することも当該領域の存在意義と考えた。

VI. 選考方針

1. 物理系全般にわたるスペクトル（一部化学系、生物系との境界・融合領域を含む）の応募に対応するため、後述するアドバイザーボードを構成して選考に当たった。
2. 新分野の開拓、技術限界の突破、挑戦的長期テーマの原理検証、ナノデバイス応用基盤技術の育成、基礎科学へのインパクトなどの観点から、総合的にナノテクノロジーを牽引する期待のある群と、リスクは高いが成功すれば強いインパクトを持つ群に分けて検討した。最終的に前群と後群を合わせて総合的に選考した。
3. 採択後に研究代表者との議論を深め、研究の進展に応じてデバイス化への道筋の議論の機会を増やせるよう、JST戦略的創造事業本部、領域アドバイザーと協議の上、採択課題を前もって適正な数に絞りこんだ。その結果、平成13年度6課題、14年度4課題、15年度1課題（15年度の1課題はナノテクノロジー分野別バーチャルラボ10領域の合同審査で選び、当領域に組み込んだ）の計11課題を採択した。

VII. 領域アドバイザー

領域アドバイザー	所 属	役 職	任 期
青野 正和	物質・材料研究機構 ナノシステム機能センター	フェロー センター長	H13.9～
板生 清	東京理科大学専門職大学院 総合科学技術経営研究科	教授 研究科長	H13.9～
片山 良史	筑波大学産学リエゾン共同研究 センター	シニア・コー ディネーター	H15.9～
川辺 光央	筑波大学 物質・材料研究機構 ナノマテリアル研 究所 ナノデバイスグループ	名誉教授 リーダー 特別研究員	H14.9～
榑 裕之	豊田工業大学	副学長	H13.9～
早川 尚夫	国際超伝導産業技術研究センター 超電導工学研究所 名古屋大学	グループリー ダー 名誉教授	H13.9～
堀池 靖浩	物質・材料研究機構	フェロー	H13.9～
前川 禎通	東北大学金属材料研究所	教授	H14.9～
横山 直樹	株式会社富士通研究所 ナノテクノロジー研究センター	フェロー センター長	H13.9～

大学、国研、産業界で今日のナノテクノロジーの礎を築いてきた研究者で、深耕経験、先見性、総合判断力を持つアドバイザー9名の助言を得ることとした。システムそのものについての課題採択は想定していなかったが、システム化も視野に入れた課題への取組みに有益な助言を得るため造詣の深い研究者の参画も得た。採択課題決定後も、的確なアドバイスを全課題に対して充実させるべく陣容を増強した。上表のうち榊裕之氏、板生清氏、堀池靖浩氏は後に CREST の研究総括に、横山直樹氏はさががけの研究総括に就き、青野正和氏と前川禎通氏は他領域の研究代表者となったが、引き続き当該領域の運営に協力を得た。

VIII. 研究領域の運営について

1. 運営の基本方針

- (1) [目的基礎研究] ナノテクノロジーへの期待から出口論だけに傾斜し過ぎないようにする。研究代表者の構想実現に向け、組まれたチームの目的志向型の研究成果が戦略目標に資するよう、研究総括が適切に運営するという CREST の基本精神を遵守する。
- (2) [ナノサイエンスの深耕] 将来新しいロードマップを生み出せる実用デバイス群につないでいくためにナノサイエンスの理解を深める。
- (3) [若手研究者の育成] 社会の要請を先取りし、次世代を切り開く研究リーダーの視野拡大の道場とするとともに、次代を担う若手研究者の育成の場としても位置づける。
- (4) [分野融合] 研究の向かう先はライフサイエンス、情報通信、環境、ナノテク・材料のいずれにもあるとの認識のもとに分野融合基礎研究を推進する。

2. 具体方策

- (1) それぞれの研究開始時点で、研究代表者の拠点を訪問し運営の方針を個別にも伝えた。その際、領域のアクティビティーが見えるようにするために「これまでも増して機会を捉えて PR を」との督励もした。その一環として領域事務所のホームページを領域活動開始時に開設するとともに各研究代表者のホームページ開設も依頼した。
- (2) 当該領域は延べ 11 チーム、44 グループ、560 名余の研究者が参加した大きなプロジェクト研究集団であり、かつバーチャルラボであることから、全員の意思疎通は容易ではない。CREST の基本は誰が研究し、誰が総括するかといった属人的なものであるとの認識のもと、機会を捉えて研究代表者と議論することに加えて、拠点でのチーム研究会やグループ研究会にも極力参加してきた。
- (3) 研究の方向性は代表者と議論を尽くした上で、代表者の挑戦意欲と嗅覚に任せた。しかし大きく方向性を変えざるを得ない状況に立ち至った場合は臨時のアドバイザリーボードを開催し、そこでの結論に沿って運営した。
- (4) 予算配分は研究計画を精査し研究代表者納得の上で決定した。これとは別に総括プールを設け、研究の進展を見て研究加速に充てるべく追加配賦を適宜実施した。予算が逼迫してプールが取れない年度や、緊急配賦が有効と判断した場合は本部の協力を得て手当てした。上記を基本としたものの、後述する研究者交流会でホットな進捗報告が重要な方向と判断された場合は、特別予算として使途を指定してグループに配賦し、同時に拠点を訪問して討論するなど柔軟な運営も心がけた。
- (5) 研究予算に恵まれ、研究パワーが拡大することで成果も出るが、展開も拡大、分散する傾向も出る。課題ごとに研究の進捗と時期を見ながら、時には鋭い絞り込みを要請し、研究代表者が納得した修正計画に沿って推進した。

- (6) 実用デバイスを5年の期間内に作り上げるプロジェクトは、必ずしもCRESTに合致するとは考えない。しかし、特許と無縁の研究者も多かったことから、啓蒙し出願を奨励した。企業での高度な経験を持つ技術参事による特許講習会やチーム研究会で発表された成果の特許化などを具体的に要請してきた。
- (7) 領域運営の考え方が理解されるようにすると共に、相互啓発の場として研究者交流会（通称「梶村塾」）を定期的に関いた。計15回開催し、延べ200人を超える研究者が参加した。運営の考え方をすべての領域研究者とじかに討論するのは困難であることから、3回実施した領域シンポジウムの概要集巻末に激励、要望、警告を含む「梶村語録」をつけ、領域運営に資するよう心がけた。
- (8) 民間企業からの提案を期待していたが、応募件数も極端に少なく、採択が叶わなかった。しかし課題の中に重要な役割を果たしている企業のグループもあり、産学連携の一形態として望ましい方向に進むように支援した。折に触れて研究代表者には産学連携に限らずポストCRESTを意識してもらうような運営上の工夫も行った。
- (9) 当該領域では研究推進に必要な連携を以下の4カテゴリーに整理して効果を見極めながら推進した。すなわち ①チーム内グループ間、②領域内チーム間、③CREST内領域間、④国内外の研究者・産学官研究機関との連携など多岐にわたるメニューを組み合せ、各々のチームに特色を持たせて推進した。
- (10) 特に後半では、平成17年度の研究領域中間評価における指摘事項「今後、産学連携を一層強化すると共に、研究成果を分かり易い公開講演会などの形で広く社会に公開するようなことも検討していただきたい。これらを通じて、多方面の関係者に刺激を与え実用化に向けてトリガーをかけることになれば、本研究領域の目的は達成されたと言える」（文部科学省第3期ナノテクノロジー・材料委員会（第6回）配付資料7による）を受けて、新聞発表や学会誌以外への解説記事投稿も積極的に取り組み、科学技術の理解増進活動の幅を広げることを督励した。
- (11) 課題別中間評価は、平成13年度採択課題に対し平成15年度末に、平成14年度と15年度採択課題に対し平成16年度末に行って、特に分散、拡大傾向にあるものについて実りのある目標に向け収束化した。課題別事後評価は、平成13年度採択課題に対し平成18年度に、平成14年度と平成15年度採択課題に対し平成19年度に行った。

IX. 研究を実施した結果と所見

1. 研究領域全体としての特筆すべき研究成果

この領域は物理系全般のナノテクノロジーをスコープとしてスタートしたこともあって、専門分野が極めて広がり、運営上に工夫を必要とした。結果について、総括としての狙いは達成できたと判断している。採択後の進展と結果は5つのカテゴリー (1) 新たな分野開拓（河田チーム、石原チーム）、(2) 技術限界の突破のための研究の流れ創成（猪俣チーム）、(3) 挑戦的長期テーマのマイルストーン構築（小森チーム、三澤チーム、高柳チーム）、(4) ナノデバイス応用の基盤技術確立（岩佐チーム、松本チーム、赤穂チーム）、(5) 基礎科学へのインパクト（大串チーム、板谷チーム）に整理できる。しかし各チームの内部をより詳細に見ると複数のカテゴリーを含んでいるのは言うまでもない。

以下に特筆すべき成果を示す。

- (1) 新たな分野を開拓する
 - (a) 非線形ナノフォトニクス分野：近接場コヒーレントアンチストークスラマン顕微鏡による分子イメージング（河田チーム）
 - (b) ナノ光マニピュレーション分野：ナノ物質の量子力学的個性を反映した光と物質の新しい結合様態を開拓し、ナノ物質による光の操作や、光によるナノ物質の力学的

- 操作を可能にする（石原チーム）
- (2) 技術限界を突破し研究の流れを創る
 - (a) MRAM 大容量化基盤技術（スピン注入磁化反転、低電力化、フルホイスラー合金によるトンネル磁気抵抗効果の増強など）（猪俣チーム）
 - (3) 挑戦的長期テーマのマイルストーンを築く
 - (a) 励起子結合の光制御での多ビット化実証（小森チーム）
 - (b) 高効率もつれ合い多光子ビーム発生確認（三澤チーム）
 - (c) 超伝導磁束量子ビットでの多光子及び和周波、差周波ラビ振動ならびに真空ラビ振動観測（高柳チーム）
 - (d) 紫外域量子もつれ光子対を半導体で生成（石原チーム）
 - (4) ナノデバイス応用の基盤技術を確立する
 - (a) 有機 FET 制御技術（自己組織化界面構成による閾値電圧制御、両極性伝導技術など）（岩佐チーム）
 - (b) 材料機能拡大（有機内包伝導タイプ制御、ハイドレード化など）（岩佐チーム）
 - (c) カーボンナノチューブデバイス作成制御技術（ n 型半導体、カイラリティー制御、ヒステリシスフリー、電流安定化技術など）（松本チーム）
 - (d) CNT 応用バイオセンシング基盤技術（FET 構成、電気化学方式など）（松本チーム）
 - (e) 電場誘起抵抗スイッチングの機構解明（赤穂チーム）
 - (f) ダイヤモンド pn 、 pin 接合技術確立と深紫外発光の実証（大串チーム）
 - (g) 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET 開発とテラヘルツ素子への応用（小森チーム）
 - (h) 金属ナノ構造による多光子反応増強場の設計技術（三澤チーム）
 - (i) 光波と素励起波の空間相関による超高速スイッチ効果と巨大輻射結合による、非線形効果と超高速応答の両立化技術（石原チーム）
 - (5) 基礎科学へのインパクト
 - (a) 超高品質ダイヤモンド薄膜における高密度励起子状態の理解（高温でのボーズ・アインシュタイン凝縮発見の期待）（大串チーム）
 - (b) 液相からの完全有機半導体単結晶成長（固液界面反応場）と電子特性の発現（板谷チーム）
 - (c) ナノ粒子中のスピン緩和時間の増大（バルクの 1 万倍）の発見（猪俣チーム）
 - (d) アイスナノチューブの発見、CNT 内の水とガスの交換転移の発見、有機 FET でホール効果測定に成功（岩佐チーム）
 - (e) 極微弱光（光子数平均 1 個以下）による位相シフト計測（石原チーム）
 - (f) CNT のコヒーレント伝導による単一電荷検出（松本チーム）
 - (g) スピントンネル機能の巨大化のための界面観察技術（赤穂チーム）

2. 研究成果の科学技術・国民生活・社会経済等に対する効果への展望

革新的デバイスは一朝一夕にしてならないとの認識から物理の理解を深めるよう運営すると同時に継続的、蓄積的でストーリー性のある革新的技術シーズこそが次につなぐ武器になることを訴え続けた。そのベースは高いアクティビティの継続であるとの認識が共有化された結果、CREST の成果を発展させ、NEDO へ 5 件、CREST へ 5 件、さがけへ 8 件、科研費へ 15 件が採択され、応用から一層の基礎固めを目指して研究が展開された。企業との共同研究 5 件、大学発ベンチャー 2 件 [ナノフォトン（河田チーム）やレーザーシステム（三澤チーム）] を加え社会貢献を視野に着実に前進してい

ると判断している。当該研究領域 11 課題の採択直後に、各研究チームにあらゆる機会を捉えて外部への PR と特許マインドの高揚を督促してきた。新聞報道や著作に加え、特に領域中間評価での指摘に応じて科学技術の理解増進活動（市民講座や中学・高校生対象の講演など）でも実績を残した。特許は国内 155 件、PCT 40 件と前向きに取り組んだ。

当該研究領域が主として目指す、情報処理・通信における集積・機能限界の克服のためのナノデバイス・材料・システムの創製に向けて生み出されていく基礎研究成果が産業界に技術移転されるまでは、いくつかのブレークスルーが必要である。上記のように基礎を固め、次への展開を図る発展的スパイラルを身近で体感した若手研究者がさらに意欲的に取り組んでいくことで基礎研究の成果が社会へ展開していくと期待している。

さらに、一部のプロジェクトは、総括の狙いとして先に述べた情報通信分野以外にも発展し（後述）、超高感度のバイオセンシングや、バイオマテリアルの分子イメージングでは企業との連携が始まっており市場への入り口に立つ成果といえる。

3. 今後の期待や展望、懸案事項

- (1) 河田チームは近接場コヒーレントアンチストークスラマン顕微鏡を開発し 15 nm の空間分解能で DNA や単層カーボンナノチューブの分子イメージングに成功し、1 nm を切る空間分解能達成を目指し更に研究が進んでいる。また松本チームはカーボンナノチューブ電界効果トランジスタの電気的検出により 1 fmol/l の最高感度で、DNA のハイブリダイゼーションを観察している。このチームの単一電子計測プローブは、通常の電界効果トランジスタの 100 倍を超える感度達成が見込まれている。これらの研究進展によって、細胞や DNA、たんぱく質でこれまで見ることはできなかった、特に生理条件下の動的でナノレベルの世界を見ることが現実になると想定される。
- (2) 当該領域で推進しているナノデバイス・システムの向かう先は主として情報処理・通信である。しかし、物理の理解をベースにしたナノテクノロジーが、バイオ分野を下支えする意義も大きいと見ている。特にナノテクノロジー分野別バーチャルラボが終了することで、日本のナノテクノロジーの基盤が弱体化しないよう、地球規模の基本課題解決を視野に入れた研究に対しても積極的な支援を継続することが重要である。
- (3) 量子情報処理の基盤技術である 2 ビット演算は将来の多ビット化に有利な方式では世界中が壁に突き当たっている状況にある。量子計算の前に量子通信の実用化が期待されているものの、まだいくつかのブレークスルーを必要とする。社会還元を意識を高めることは大事であるが、出口志向が極端に強まらない研究マネジメントの維持も必要である。

X. 総合所見

1. 研究領域としての成果

- (1) 領域の設定（Ⅱ．領域の概要、Ⅴ．総括の狙い）は、広いスコープにもかかわらず、アドバイザーの協力もあり重要な分野の課題を採択でき、着実に運営され、領域全体としてインパクトのある成果を出せたと判断している。代表的な研究成果は「研究を実施した結果と所見」で述べたように、基礎科学へのインパクトがあるものから近い将来産業界に展開されることが期待されるものまでバラエティーに富んだ優れた成果であると考えている。
- (2) 外部に発信された成果のうち特許出願、新聞発表、解説記事や総説等には無縁または消極的であったチームも、これまでも増してアクティビティーが見える形

で示す努力の成果が数字になって現れたものと考えている。プロジェクト期間内の成果として評価している（特に JST 出願分は 70 %が委員会決裁を受け国際出願している）が、むしろマインドが醸成されたため今後持続的貢献を期待できることの方が大きい。

- (3) 課題別中間評価では、戦略目標に照らしたゴールの設定について議論した。具体的に研究代表者と研究総括とで最終的に共有化したゴールの成果が、将来社会に対してメッセージ性のあるものとなるようアドバイザーからの意見も得ながら進めたことで、成果が累進的に増大したチームが多くを占めた。
- (4) 領域中間評価では、産学連携を一層強化すると共に研究成果をわかりやすい形で広く社会に公開することを検討するよう要請があった。

産学連携については関係省庁、JST、ナノテクノロジー関連製造企業、コンサルティング企業、国研、大学の関係部署との事例検討会なども踏まえ領域運営を工夫し、チーム構成グループには含まれていない 10 社を越える企業との共同研究に発展し、一部は製品設計に進んだものも生まれた。

成果公開についても、市民講座、高校生対象の講演会、大学低学年層対象の「教授と語ろう会」、企業での講演などで成果普及に努力し科学技術の理解増進活動に対しても積極的に参画してきた。

- (5) 当該領域は、発足の経緯もあり物理系のナノテクノロジーの一領域としては JST のナノテクノロジー分野別バーチャルラボのミニ版の課題集合体として融合展開も視野に入れて運営してきた。バラエティーのある課題構成は、チーム構成にも現れている。そのことが領域の特徴でもあると認識して柔軟な運営を心がけた。

領域内のコラボレーションとして光技術をベースにした国際会議を開催したが、これに参加した領域外の研究者を後にチームに迎えチーム力強化を図った例や、早期に理論グループを強化した例、研究の進展の過程でバイオ系の民間企業の参画により展開が広がるなどのチーム型研究推進上の成功事例を積みあげた。

- (6) 研究推進に必要な多岐にわたる連携のメニューを組み合わせ、各々のチームに特色を持たせて推進した。喫緊と思われる連携をチーム内グループ間連携に注力しているため、領域内チーム間連携と CREST 内領域間連携の件数は相対的に少なくなっているが、対象集合の圧倒的に大きい産官学研究機関・国内外の研究者との連携では論文、解説、著書、特許などで多くの具体的成果を公表するまで連携が進んだ。アクティビティーの件数は、添付資料の 2-1 外部発表（参考資料：外部発表成果へ与える各種の連携の効果）に示したが、連携様態は資料には表れにくいのでここに詳述する。

(6-1) チーム内グループ間連携

成果は各チームが、所属機関や研究分野を原則異にする複数のグループ（11 チームのグループ総数は 44）から成り、重要な連携をここに集約してきたことから生じている。すなわちチームによって提案された国内外複数グループとの連携が、課題目標に照らして不可欠か、適切なチーム構成になっているかを採択時に注意深く確認し、その後の進展に応じても連携者間にとって引き続き意義があるか、より実績の上がる追加・変更はないかを点検し、チーム内グループの増減、対象機関・研究者の変更等の措置を講じてきた。

(6-2) 領域内チーム間連携

当該領域内では複数チームの研究者（若手研究者を中心としたが研究代表者やグループのリーダーの参加も含む）に集まってもらう研究交流会や領域内シンポジウム、特定課題での議論を通し行ってきた。

(6-3) CREST 内領域間連携

JST の関連 10 研究領域から成るナノテクノロジー分野別バーチャルラボ（以下バーチャルラボ）では、相互啓発、有機的連携、分野融合を期して、全体の統括の任に当る相澤益夫東京工業大学学長（当時、研究総括）に初めの 3 年間、続いては茅幸二理化学研究所中央研究所長（研究総括）を主査として、10 領域が交流を図ってきた。すなわち①バーチャルラボ領域横断企画として行う分野横断的ワークショップ（計測関連、DNA 関連等）、②領域横断企画支援のシンポジウム（異なる領域で推進している特定の課題をトピックスとした部外者を含む国際シンポジウム、国内ワークショップ等）、③バーチャルラボ成果報告会、④ナノテクノロジー総合シンポジウム（JAPAN NANO：主催文部科学省ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター）等において、研究交流の機会増大に努め、当該領域のチームも参画して具体的な連携も進めてきた。

(6-4) 産官学研究機関・国内外の研究者との連携

バーチャルラボ全領域のほかに、国内外に関連研究活動の巨大なコミュニティがある。各研究チームが設定した目標に向けて質の高い成果を得るよう、産官学、国内外を問わない連携のダイナミズムを督励してきた。各チームおよびそれを構成するグループは、国内外の研究者を訪問、招聘し、諸外国機関との国際協力を含めて学際領域に目を配り、成果を充実させる共同研究を進めてきた。さらに、直接共同公表の形をとらなくても研究成果に繋がる有益なチーム外研究者との議論も多く実践してきた。

2. 本研究領域を設定したことの意味、科学技術に対する貢献、問題点等

- (1) 当該研究領域はナノテクノロジー分野別バーチャルラボ 10 領域発足の 1 年前にスタートした。ナノテクノロジーとは何かが必ずしもクリアでない状況であったことから、物理系のナノテクノロジーの方向性を的確に捉えることを目指したアドバイザー体制（ナノテクノロジーは専門外であるというアドバイザーにも、システムの視点から鋭く切り込んでもらった）をとって、多くの研究者が本領域に応募した時代背景と状況に対応した。90 件近い応募の中には、基礎研究の課題として優れたものも少なくなかったが、領域のスコープを理解していないと思われる提案も含まれていた。選考過程での評価や議論、応募者へのフィードバック等により、ナノテクノロジーの理解が進んだ。そのことはナノテクノロジー・材料を重点分野として推進するという国の決定が、JST においてナノテクノロジー分野別バーチャルラボの形で展開されていく上で意義があったと考える。
- (2) バーチャルラボの 1 領域として広いスペクトルがその後も維持されたことで、本領域を設定したために採択された融合テーマもある。また物理系のナノテクノロジーのあり方について、研究推進の過程で実践を通じての具体的な議論が深まり、理解が増進したこともメリットである。この議論は基礎研究の社会への還元につながる実践的な議論として次代を拓く研究リーダーにとっては意味があった。本領域での活動を通して知財に関するマインドを持った研究者が増えてきていることも、社会が期待する基礎研究のパワーアップにつながったと考える。
- (3) ナノデバイスや、既存のデバイス原理をナノテクノロジーにより飛躍させることを狙った基礎研究において、要素研究成果の組み合わせで可能性を議論している段階から一歩実証の世界に踏み込む努力は今後も継続し、産業界とのギャップを狭める必要がある。

11 チームの各チーム運営は研究代表者の個性の多様性を見事に反映し、その個性を尊重した領域運営により、結果的に多様な連携のあり方を示すこともできた。

- (4) 革新的デバイスの実証には到っていないが、将来性のある技術シーズは数多く蓄

積され、産業界との連携が新たな展開に入ったものもある。しかし、CREST から次への展開についてみると、社会還元を意図した制度の充実がある一方、ナノテクノロジーの基盤強化には基礎と応用の双方向刺激が欠かせないことから、過度に焦点を絞ったスコープの制度運営に偏らないバランスが必要と考える。

3. 感想

- (1) 科学技術基本計画における政策課題対応型研究開発における重点化を担う「重点推進4分野」の1つであるナノテクノロジー・材料について推進してきたが、同時に基本計画の理念1「人類の英知を生む～知の創造と活用により世界に貢献できる国の実現に向けて～」の目標1「飛躍知の発見・発明－未来を切り拓く多様な知識の蓄積・創造」である①新しい原理・現象の発見・解明、②非連続な技術革新の源泉となる知識の創造、及び目標2「科学技術の限界突破－人類の夢への挑戦と実現」の世界最高水準のプロジェクトによる科学技術の牽引、並びに科学技術システム改革のための「人材の育成、確保、活躍の促進」についても成果を上げることができたと考えている。
- (2) 現実の研究所であれば、取れた運営上の判断や措置がバーチャルラボゆえ通用しないといった限界はある。その条件を受け入れた上で、研究のフリーダムを侵さない範囲で、時に厳しい議論をしながらも、基本的には研究者を激励する運営に携わることができたのは喜びである。
- (3) 現時点でJSTが担っているナノテクノロジーの基礎研究は強力である。領域横断のワークショップのひとつにDNA対象のワークショップがある。そこに参加して感じたのは、研究協力や共同研究はあっても、本質的な融合には大きなエネルギーが要るということである。日本の研究者が経験不足の融合研究課題は、ナノテクノロジーによって新しい産業分野を生み出す上で厳しい国際競争にさらされる。ナノテクノロジーに期待する経済効果に対して様々な予測が発表されているが、それらを現実に近い上でもナノテク融合は本質に迫るものでなければならない。日本でこの分野の基礎研究を推進するに最もふさわしい、知的資産と運営ノウハウを蓄積してきたのはナノテクノロジー分野別バーチャルラボであったといえよう。これを踏まえて、ナノテクノロジーによるイノベーションシーズ創出を目指しての継続進化が特に望まれる。
- (4) JSTは、独立行政法人化、推進体制の変更（CRESTタイプは研究事務所を持たないなど）などにより変貌しつつある。研究拠点として最大の基礎研究パワーを抱える大学も改革の途上にある。流動しているもの同士の整合を取るの簡単ではないが、中長期的な視点を合わせて基礎研究の国際競争力強化と、特に産学の若手研究者に対し人材の国際循環ができる環境整備に取り組むしてほしい。