

ICORP ナノ量子導体アレープロジェクト事後評価報告書

【研究総括】 青野 正和 ((独) 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点/拠点長)
Mark Welland (Director, Nanoscience Centre, University of Cambridge; Director of IRC in Nanotechnology)

【評価委員】(委員はあいうえお順)
寺倉 清之 (委員長; 北陸先端科学技術大学院大学/特任招聘教授)
齊木 幸一郎 (東京大学大学院新領域創成科学研究科/教授)
雀部 博之 (千歳科学技術大学/学長)
白石 誠司 (大阪大学大学院基礎工学研究科/准教授)
村越 敬 (北海道大学大学院理学研究院/教授)

評価の概要

「ナノ量子導体」とは、ナノメートル程度の寸法をもち、したがってその中では量子効果が支配的な、電気を通す導体を意味する。これらを互いに適切な相互作用をもたせて集積する、すなわち「アレー」にすることによって、現状を凌駕する高密度メモリや、新規論理回路に基づくコンピュータの開発など、新しい「ナノエレクトロニクス」の境地が拓けてくると期待されている。

このような期待のもとに、青野正和博士を日本側研究総括とする本 ICORP プロジェクトでは、同氏がこれまでにリーダーを務めてきた ERATO・CREST・SORST において見出された研究シーズを質的に発展させ、エレクトロニクスデバイス創製に繋げるための技術開発が推進された。たとえば、CREST 期に現象が発見された「原子スイッチ」は、近い将来におけるプログラマブルロジック実用化に向けた研究が進められており、今後への期待がふくらむ。また、 C_{60} の重合・脱重合の制御や、連鎖重合反応による PDA の作製など、新奇デバイスの要素技術の可能性を示唆するいくつかの探索的成果も挙げられているが、成果に真の価値や意味が付くためにも、実用化への筋道をつけることと同時に、現象の理解を深め、何らかの共通的指導原理等を打ち出すことが重要である。アカデミック・企業を問わず、多くの研究者が関心を寄せ、次なる研究フェーズへと繋がるような下地を創り出してもらいたい。またナノテクでの要素技術として、多探針走査プローブ顕微鏡 (MP-SPM) の高度化や、クロスバースイッチ構造の作製技術やナノスケールでのスピン計測技術など、多くの技術開発も行われたが、これらの技術が汎用性を持つための取り組みも重要である。以上物質系・計測系での取り組みを総合して、本 ICORP プロジェクトは優秀な研究水準にあると認められ、戦略目標「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」に資する成果が得られたと認められる。

なお本プロジェクトが運営されるにあたっては、青野総括のパートナーであった Welland 総括らとの交流も、その役目を担っていた。ICORP の枠内での交流のみならず、「ナノテクノロジー学生サマースクール」を共同で組織・開催したことは、将来この分野で活躍する人材を育成し、真の意味での交流を果たしたという意味において、ここに特筆しておくべき事実である。

1. 研究プロジェクトの設定・運営、および相手国機関との研究交流実施状況

1-1. プロジェクトの全体構想

青野正和博士を日本側研究総括とする ICORP ナノ量子導体アレープロジェクトは、ナノメートル程度の寸法を持ち、従ってその中では量子効果が支配的な、電気を通す導体を意味する「ナノ量子導体」を、互いに適切な相互作用を持たせて集積する、すなわち「アレー」にすることによって、現状をはるかに凌駕する高密度メモリや、新規なアルゴリズムのコンピュータ・アーキテクチャの実現に繋がるという期待に基づき、「ナノ量子導体アレー」を自在に操ることによって、新しいエレクトロニクス分野を開拓することを目的とし、戦略目標「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」のもと、2003年3月に発足した。それは、青野総括自身がそれまでにリーダーを務めてきた ERATO¹・CREST²・SORST³において伸ばし育ててきた研究のシーズ、すなわち、

- 多探針走査プローブ顕微鏡 (MP-SPM)
- イオン伝導体を利用した、「原子スイッチ」の構想実現と基本実験
- ジアセチレン化合物膜上での、走査トンネル顕微鏡 (STM) による連鎖重合反応の誘起による伝導性高分子ポリジアセチレンの作製

などを研究の基盤技術とし、これらをどのように活かし質的发展を成し遂げたか、またそれらに加わる独創的な技術が本 ICORP の枠組みの中で新たに生まれたか、といった観点を今回の事後評価において盛り込むこととする。

さて、本 ICORP プロジェクトにおける全体の研究構想は、以下 4 つの研究要素のもとに推進された。

- (1) 原子・分子操作：単に操作ができるというのではなく、意図するような配列を可能とし、さらに配列したものどうしの相互作用を制御すること。
- (2) 自己組織化：(原子・分子の力を借りて) 単に秩序だった構造を作るのではなく、適切なテンプレートを準備することにより、その配列を自在に制御すること。
- (3) 化学的知見・技術の導入：アボガドロ数の反応を扱うのではなく、適切なユニットを的確かつ確実に反応操作させること。
- (4) 物質制御の新たな可能性：電場・磁場など外場による、ナノ構造および機能を制御すること。

1-2. プロジェクトの枠組みや研究体制、および研究活動の状況

上記 4 つの研究要素に取り組むために、日本側の研究はナノ量子導体研究グループ (茨城県つくば市) および有機薄膜研究グループ (大阪府吹田市：大阪大学大学院工学研究科) が構成され、特にナノ量子導体研究グループに関しては、多探針計測研究サブグループ (物質・材料研究機構；以下、NIMS)、クロスバー配列研究サブグループ (NIMS)、ナノ加工技術研究サブグループ (NIMS)、デバイス加工研究サブグループ (NEC 基礎・環境研究所) の体制を敷いた。

¹ 青野原子制御界面プロジェクト (1989 年度～1994 年度)

² 人工ナノ構造の機能探索 (1995 年度～2000 年度)

³ 新しい量子効果スイッチの機能素子化 (2000 年度～2003 年度)

ここからも明らかなように、研究を進めるための4つの研究要素と、このグループ構成とは1対1とはなっていない。敢えてこうしなかったことにより、グループ間連携の促進を図るといふ青野総括のねらいがあったと考えられる。また全体的に新たな科学技術シーズを生み出すという基礎的研究の色彩が強い中、デバイス加工研究サブグループ（原子スイッチをプログラマブルロジックに応用するための、実用デバイス開発に取り組む）の存在が、他のサブグループの研究者らにとっても良い刺激を与えるなどの効果があったとうかがえる。その一方で、個別のサブグループに分けたことにより、研究プロジェクトとしての大目標に対する個々の研究活動の意義付けをどのように設定するかなど、効率面での難しさが多少あったようにも見受けられる。新規現象の探索と新しいデバイス原理の構築との間には、非常に慎重かつ大胆なバランスが必要であるが、今後、プロジェクトで見出された基礎的知見が、デバイス応用・創造へと導かれる事例をより多く対外的に示していくことで、本 ICORP プロジェクトが存在した意義を知らしめてもらいたい。

1-3. 相手国機関との研究交流実施状況

相手国機関である英国・ケンブリッジ大学ナノサイエンスセンターの Mark Welland 教授のグループとは、日本側が MP-SPM や STM 発光を中心としたナノ計測技術を、英国側がカーボンナノチューブ取扱技術や電子ビームリソグラフィなどのナノ加工技術を強みとし、互いにそれを補完する枠組みであった。英国グループが得意とする固体電解質内包カーボンナノチューブを、多探針計測サブグループが走査トンネル顕微鏡 (STM) で観察・分光するなどの研究成果を上げているが、こうした「有形の」成果とは別に、人的交流や装置の移動、および互いの研究成果が互いを刺激しあうなど、「無形の」成果も随分とあったようである。例えば、Welland 総括は我々委員の行ったインタビューに対し、今後クロスバー配列サブグループが手がけているクロスバー素子化を、異なった物質系で取り組むとのことである。また ICORP という枠内ではないが、青野総括および Welland 総括が中心となって毎年夏に日英交互で開催されている、「ナノテクノロジー学生サマースクール」は将来へ向けての有力な研究者人材を育てていくという観点において、非常に重要な取り組みである⁴。こうした交流が可能になったことは、青野グループの研究実績の国際的認知度・信用度を証明しており、またこのような若手研究者のための国際的イベントは、さらに国を挙げたネットワークのもとで動かすなど、なお一層こうした活動に期待するところが大きい。

以上ここまで、日本側プロジェクトの設定や運営ならびに相手国機関との交流実施状況について述べてきた。まず、「新しいナノエレクトロニクスの領域を開拓する」という大きな目標のもとに設定されたプロジェクト、およびその研究体制（相手国との交流を含めて）は、的確かつ効果的に運営されたというのが、我々評価委員の一致した意見である。また、新しい概念に基づく原子スイッチの創製・応用の端緒を掴んだことをはじめとして、良好な研究展開を示したことも事実である。あえて云えば、ナノエレクトロニクス分野全体に何らかの特筆すべき新規指導原理を付与したり、応用展開へ向けてのより強い具体的方向性を指し示したりすることができれば、より望ましいことであった。青野グループのもつナノ計測技術は世界的に見ても独創性が高

⁴ NIMS と IRC Nanotechnology が主催し、日本からは NIMS および筑波大学連携大学院が、英国からはケンブリッジ大やブリストル大、ユニヴァーシティ・カレッジ・ロンドンがそれぞれ参加。

いので、今後物質系への着眼をより強くすること、現象の本質のより深い理解を得るなど、この分野のさらなる発展のために取り組むことを、我々からの強い期待および提言として付け加えたい。

〔研究プロジェクトの設定および運営〕 a (的確かつ効果的であった)

〔研究活動の状況〕 a (良好な研究展開を示した)

2. 研究成果

2-1. 多探針計測サブグループ (ナノ量子導体研究グループ)

多探針計測サブグループでは、青野グループの得意とする MP-SPM を主体とした計測技術などを背景に、(i) MP-SPM に必要な技術開発および、(ii) 種々のナノ量子導体の量子伝導度測定やスイッチング機能の探索などを推し進めてきた。まず (i) の技術開発については、タングステン探針上に導電性酸化タングステンナノロッドを直接エピタキシャル成長させることにより、非常に尖鋭な探針の作製を可能とし、更に電気伝導測定用には、数ナノメートル (nm) 厚さの白金をナノロッド上に蒸着することも可能とした。また (ii) の、こうした計測技術を用いた主な研究成果としては、

- 1) MP-SPM によるナノ量子導体 (金属シリサイド細線やカーボンナノチューブ) の量子伝導度計測
- 2) フラーレン (C_{60}) の重合・脱重合の制御
- 3) 固体電解質内包カーボンナノチューブの低温電子状態計測
- 4) 原子スケールテンプレートを用いた 1 次元的金属薄膜の作製

などが挙げられる。ここで 3) は、前章 1-3. でも述べたように、相手国機関との ICORP の枠組みを活かした成果であり、また 4) については、1-1. でも述べた、青野総括のもつ基本コンセプトである「自己組織化」のコンセプトを反映するものであり、このように、サブグループ名に冠せられている「多探針」には必ずしもとらわれない、いくつもの探索的成果を挙げていることが特徴的である。

さて 1) の量子伝導度計測については、例えばカーボンナノチューブ (CNT) の電気抵抗を、2 探針 STM を用いて、その針間距離の関数として測定している。その結果、電気抵抗の振る舞いが、約 450 nm 以下では電気抵抗が距離に依らないこと、またそれ以上では、距離の増加とともに電気抵抗も増加することを見出し、このことから、当該 CNT では、450 nm までは弾道的 (バリスティック) 伝導、それ以上では拡散的伝導を示すと結論している。この興味深い研究は中間評価⁵でも報告されたが、その解釈についてはより詳細な検討が必要であると考えられる。実際、この実験で観測された電気抵抗値は、弾道的伝導にしては一桁以上も大きい。これは STM 探針と CNT 間の接触抵抗によるものと推論されるが、理論計算による解釈を行うことで、この研究のさらなる理解が深まることを期待したい。

また 2) の C_{60} の重合・脱重合制御に関しては、 C_{60} からなる薄膜 (例えば 3 分子層の薄膜) に、STM 探針によって局所的に電圧をかけると、その極性に依存して、上下の C_{60} の間に重合反応、脱重合反応が可逆的に生じることが見出された。STM 技術の向上により、膜内の C_{60} 分子ごとに、この可逆反応を起こさせることが可能となり、

⁵ 2005 年 11 月に実施。報告書は、<http://www.jst.go.jp/icorp/jpn/evaluation/20060314/arrey.pdf>

説明によれば、この技術を駆使すれば、非常に高密度の(200 テラビット/平方インチ)のメモリに応用できる可能性があるとのことである。この研究については、第一原理計算によって電子状態を計算し、電荷注入あるいは引き抜きによる化学結合の安定・不安定を論じることで、反応機構の一端を説明しているが、さらに実験・理論の両側面で詰めるべきことがあると見受けられる。上記1)もそうであるが、基礎的知見獲得の端緒を切り拓いた点は、我々委員の全てが評価することであり、今後の進展に期待したい。

以下に、本サブグループへの今後への提言を述べたい。探索した基礎的知見の価値を真に高めるには、得られた興味深い現象を掘り下げて理解することが必要不可欠であり、それが応用展開へのブレークスルーへと繋がるのはいうまでもない。1)への所見でも述べたように、ユニークな観測事実や物性値に意味を付与するひとつの方法は、理論計算との組み合わせである。また2)については、メモリへの応用という観点において、 C_{60} 単分子への書き込み条件(電圧など)がどのような要因(STM探針・真空ギャップ・試料の3次元的空间電位分布や伝導度異方性)で決まるのかという検討を行うことで、さらなる物質系の探索や制御因子の多様化が可能となるだろう。またメモリへと応用する際の究極的な要望としては、いかにして読み込みを速くするかという課題を克服することなどがある。

2-2. クロスバー配列サブグループ(ナノ量子導体研究グループ)

このサブグループの研究を行う上で重要となるのが、「原子スイッチ(固体電気化学反応により金属原子架橋の形成と消滅を制御して動作させる)」であり、青野グループ自体がCREST(およびSORST)で研究を行う中で見出したものである。またこの「原子スイッチ」という要素を使うためのひとつの技術としてクロスバー配列があり、新しい演算回路の構築を目指した研究に取り組んできた。

この方向に沿った主な研究成果には、以下を挙げることができる。

- 1) 原子スイッチのクロスバー構造の作製: 1nmの間隙をナノワイヤ間に作製する巧妙な作製プロセスが考案された。
- 2) 原子スイッチ特性の電極材料依存性: 硫化の程度を制御しつつ、原子スイッチ機能が現れる条件を調べた。その結果、過飽和状態で存在する銅イオンが重要であることが分かった。また、スイッチング動作には、金属原子の析出反応が律速となっていることが分かった。スイッチング電圧0.5電子ボルトで、1ギガヘルツ程度の高速動作が可能となった。
- 3) イオン伝導体ナノ結晶の生成: 陽電極酸化アルミニウムをテンプレートとして、 Ag_2S (硫化銀)のナノワイヤアレーを作製した。ナノワイヤと金属電極を2次元的に配列し、クロスバー型の演算回路の開発に向けた基礎技術を磨いた。
- 4) 分子定規法と電子線描画法との複合化により、細線状のナノギャップ電極構造を作製し、そのギャップの中に、有機分子で被覆された金微粒子を配置した。この構造により単一電子デバイスとしてのクーロンギャップの存在が確認された。直径1.6nmの金微粒子の場合には、クーロンギャップが室温でも観測された。

1)は、「原子スイッチ」の将来的な応用のための、具体的なクロスバー構造の作製として重要な基礎的知見の獲得である。また2)は、硫化銀や硫化銅を用いる原子スイッチの基本的な特性の理解として、重要な結果である。3)は、イオン伝導体の応用の可能性を広げる試みである。4)は、「原子スイッチ」として用いられる可能性

も秘めたナノ構造である。

CREST での「原子スイッチ」という研究シーズを、ICORP の研究期間の中で素子化・集積化に可能性を見出すまでに至らしめたことは、非常に研究が進展したことの現れである。デバイスへの展開に関しても、デバイス加工研究技術サブグループ (NEC) との連携が調和し、さらに材料探索を行うことで将来的なこの研究領域の発展の基盤となる、知見の広がりを目指した点に好感が持てる。現状では、ある一定の指導原理の構築まで行われており、今後スイッチング速度の評価を精緻に行うなど、期待する点が多い。また 1-3. でも記述したように、Welland 総括のグループがこれらの取り組みに刺激を受け、自国でも研究に着手しようとしていることは、ICORP 研究 (および評価) の側面からは、忘れてはならないことである。

2-3. ナノ加工技術研究サブグループ (ナノ量子導体研究グループ)

ナノ量子導体アレー構造素子を実現するために必要な要素技術の構築を目的に、原子・分子スケールの分解能を持つ計測装置の開発や、金属・半導体・有機分子ナノワイヤの作製技術などの研究を推し進めてきた。

本サブグループの主立った研究成果は、以下のとおりである。

- 1) STM 誘起発光によるスピン計測技術の開発：ガリウムヒ素 (GaAs) 表面に磁性物質の薄膜を蒸着し、薄膜表面のスピン偏極の情報を STM の空間分解能で得ることを可能にした。
- 2) 酸化亜鉛 (ZnO) ナノワイヤの作製と評価：種々の形状の ZnO ナノワイヤの作製技術を開発し、それらの電気伝導特性を測定した。また、Ga のドーピングによりキャリア濃度を上げる試みがなされた。

1) は、基本的なアイデアには必ずしも新規性はないが、実際の試料におけるスピン分極の空間分布を、非磁性探針を使って観測したという技術を確認したことに高い評価が与えられる。一方、基板が GaAs であるという価電子バンドトップの特殊性を使っていることに起因して、対象とする試料に制約があるという点や、室温での測定のみであるという現状、さらに金属磁性体のスピン偏極率自体は概ね既知であることなどを踏まえると、今後の興味や研究の発展性は何かを検討した上で、次なる方向性を探ることが望ましい。2) の ZnO ナノワイヤ作製については、成長機構の制御など、要素技術の面で興味ある知見が得られたように見られる。肝心の「評価」、すなわち物性測定については、今後の研究の進展を待ちたい。

なお本サブグループは、上記を含めて 4 つの研究課題を 3 人の構成員 (いずれも NIMS との兼務) により推進されてきたが、他のサブグループに比べての数的不足が否めない。どの課題も高い研究水準にある一方で、非常に多くのエフォートがかかるものであると見受けられるので、ICORP 終了後の研究展開の戦略立案には、十分に配慮されるのが望ましいのではないだろうか。

2-4. デバイス加工技術研究サブグループ (ナノ量子導体研究グループ)

ナノ量子導体アレーの実用デバイスの開発を目的として、固体電解質中で起こる電気化学反応と原子移動に基礎をおく原子スイッチの素子化・集積化を行うために必要な、素子作製プロセス、加工技術、集積化技術の開発を行うとともに、プロトタイプ回路作製や動作検証を推し進めた。現在のシリコンテクノロジーの枠内での実用化を狙うため、論理回路にかかる電圧によってスイッチのオン・オフが乱されないこと、

また消費電力を抑えることが重要な鍵を握る。具体的には、

- スイッチング電圧の高電圧化：現在の 2 端子構造の硫化銀や硫化銅を使った原子スイッチでは、オン・オフの制御電圧はせいぜい 0.2 ボルト程度であるが、これを 1 ボルト程度にする。
- スイッチング時のプログラム電流を低減する。

これらに対して、本サブグループでの主立った研究成果は以下のとおりである。

- 1) 3 端子原子スイッチ構造の採用：ここでは、ソースとドレインの間における金属ブリッジの生成と消滅の制御をゲート電圧によって行う。この間接的な制御方式にすることにより、オン・オフの制御電圧を上げられる。
- 2) イオン伝導体として、硫化銀や硫化銅に比べて構造の安定性が高く、現在のシリコンテクノロジーとの相性もよい Ta_2O_5 を 2 端子原子スイッチに採用した。
- 3) ロジック回路に用いる場合、 Ta_2O_5 を使った原子スイッチは 10 年以上であるという寿命予測を見積もった。また、同様の現在使われているスイッチと比較して、このスイッチはサイズで約 30 分の 1、消費電力で約 10 分の 1、スピードでも約 10 倍速いとも見積もられた。

原子スイッチの特徴を維持しながら、現存の素子要求に合致する性能を有する新しい系の開拓に成功しており、この点を高く評価したい。また、動作原理を支配する環境や外場の影響も精査されており、原子スイッチング現象を素子応用に繋げるという強い意欲と信念のもと、それが一步現実味を帯びてきたことは、研究員らへの敬意を表したい。NEC 環境・基礎研究所という応用化・実用化を指向する研究グループとの連携・グループ編成が、このような進展をもたらした要因であろうが、ICORP が終了後も、引き続き協調関係が保たれることが望ましい。

今後に向けての提言を述べるとすると、そのひとつはやはり素子性能を検証していく上での周辺現象の詳細な詰めを行うことである。本系は、エネルギーと空間にそれぞれ一定の分布を有する状態が、酸化・還元反応速度の交換によるバランスによって形成されており、それは素子の微細化と安定性向上の本質的問題として取り扱われるべきである。酸化還元状態という非平衡状態を扱っているからには注意深い問題点の抽出とその解決法の呈示が、本技術で世界のブレークスルーを引き起こすには重要となる。いうまでもなく、新しい系を開拓した成果は高く評価されるので、今後の研究の進め方・考え方が、素子を現実に市場に出していけるかの鍵を握っていると思われる。

2-5. 有機薄膜グループ

本グループは大阪大学大学院工学研究科に設置され、分子単位で制御した有機分子によるナノスケール機能構造構築とその機能制御、有機薄膜の局所領域での電気伝導特性・光学的特性評価などを行うことで、ナノスケール有機薄膜デバイスの構築を行うための基本技術を開発することを目標として研究を推し進めてきた。

主な研究成果は、以下の通りである。

- 1) グラファイト上に作製されたポリジアセチレン (PDA) に、STM による電荷注入あるいは電界印加により、金属-絶縁体転移が観測された。
- 2) 2 探針 STM による有機薄膜の電気伝導特性の評価：PDA 薄膜では、PDA の主鎖に沿った 1 次元伝導を示すことが分かった。ポリ 3-オクチルチオフェン薄膜 (P3OT) では、2 次元平面でほぼ等方的な伝導を示す。
- 3) 平坦電極の作製とそれを用いた PDA 分子鎖の電気伝導特性の測定：電極と絶

縁体の間に段差がない構造を作ることにより、有機分子の構造を安定化させた状態で伝導特性が測定できるようにした。それによって、PDA の電気抵抗を測定したところ、PDA 薄膜の単一ドメインが両側の電極に架橋している場合、本来の PDA の電気伝導特性が測定されることになるはずであり、その場合には PDA・1 本の抵抗は 1.5 テラオーム/ナノメートル という従来値の一桁以上小さい値となった。

- 4) 放射光 STM によるナノスケール表面分析：内殻励起に基づくフェルミ準位近傍の状態変化をトンネル電流の変調によって捉えることにより、内殻励起の元素固有性による元素分析を行った。

これらの中でも、1) については、何よりもまず興味深い現象を見出した点を評価する。その上で、本実験系が PDA の鎖に垂直に STM の電場がかけられ、その方向に STM と基板の間に流れる電流を見ているのであって、鎖に沿った電流を見ているのではないことを踏まえて、さまざまな角度からの検証を加えることで、本結果の結論部分への一助としてもらいたい。また 3) の結果は、今後の技術の洗練が必要であるが、現時点での 2) における PDA 測定との関係からすると興味深い側面を持っている。つまり、STM 探針を電極に使う場合と、ここでの平坦電極を使う場合で、試料と電極の間の接触抵抗にかなりの違いがあることが予想されるからである。4) については、元素分析をナノスケールで行うユニークな技術として位置づけられる一方、今後どのような系に対してこの測定法を適用することが、十分なインパクトをもたらさうのかを十分に検討されることが必要である。

また他のサブグループでも述べたように、探索した基礎的知見の価値を真に高めるには、得られた興味深い現象を掘り下げて理解することが必要不可欠である。グループでの研究目的として標榜する「デバイス構築」へ向けた、着実な進展を期待したい。例えば 3) の平坦電極に関連する研究では、見出された現象等のさらなる洗練を行うことで、本電極構造の優位性が既存のものより如実である物質系の発見へと繋がる可能性がある。

以上ここまで、計 5 つのグループおよびサブグループの研究成果および所見を記述してきた。クロスバー配列サブグループにおける、原子スイッチの要素技術的側面の多くは、ICORP 以前の成果ではあるが、それらを配置して、関連させて複合化し、デバイスに向けた基礎技術の進展を遂げたのは、本 ICORP 期間での取り組みであり、また相手国グループへもたらした影響も踏まえて、評価できる点である。加えて ICORP の中で、C₆₀ の STM による重合・脱重合など、いくつもの良質な探索的成果を上げたのも事実である。

さて研究成果の 10 年、15 年先を予測することは、決して容易ではない。ただひとつ確実にいえることは、次の研究フェーズへと確かに進め繋げるかということであり、5 年間にわたって JST の枠内で新たに大型プロジェクトを遂行してきた、ある意味「使命」でもある。それは繰り返すいうまでもなく、原子スイッチを含め、見出された探索的現象をいかに深掘りして理解できるかということであり、そうすることで物質系の選択など、さらなるバリエーションが見えてくるはずである。原子スイッチについては、NEC との連携が調和しているように、今後に向けて非常に有望であるが、その他の本プロジェクトから上がった多くの成果についても、後継研究において「研究成果の選択と集中」のもとに戦略的に取り組み、真の価値を創造してもらいたい。

世界の分子デバイス研究全般に視野を広げてみると、確かに「原理上こうすれば

デバイス化できる」という考えがあるにもかかわらず、そうは現実には容易でないために、皆が苦悶しつつ知恵を絞り、道を切り拓こうとしている状況である。そうした中で、将来に向けての指導原理を今後早い段階で数多く打ち出していくことも、青野グループの水準からして期待するところである。

- 〔研究成果（科学技術的側面）〕 a （成果として良好である）
 〔研究成果（産業・社会的側面）〕 b （成果として多少不足である）

3. 総合評価

「ナノテクノロジーは、失敗である」ということを言う人がいる。世界中で騒いで研究予算がついた割には、実用化への隔たりがなかなか大きいというのが、その理由のひとつのようである。確かに、個別には興味深い現象が見出されても、それらが有機的に相関し、複合化され、実用に至る機能を発揮し、それを自在に制御する一と段階を経て追究される例は少ないものの、それらが一方で早計の考えであることもまた否めない。

こうした状況において、本 ICORP プロジェクトでは、新規の構成要素や基盤的な新現象の発掘も行われたが、これまでの ERATO・CREST・SORST で開拓された要素を質的に発展させ、エレクトロニクスデバイス創製に繋げるための技術開発が、確かに推進されたという印象を我々に与える。この点は、ERATO・CREST・SORST・ICORP と続いてきた一応の区切りとしては、評価されるべきことである。このことは、イオン拡散現象を利用した「原子スイッチ」に現れている。近い将来におけるプログラマブルロジック実用化に向けた研究が進められており、今後への期待がふくらむ。

また、C₆₀の重合・脱重合の制御や連鎖重合反応による PDA の作製などは、まだ萌芽的段階にあるが、後継研究において、現象の機構解明、条件の明確化を一層進めることにより、新奇デバイスへの筋道をつけることを期待する。また、ナノテクでの要素技術として、MP-SPM の高度化や、クロスバースイッチ構造の作製技術やナノスケールでのスピン計測技術など、多くの技術開発も行われたが、これらの技術が汎用性を持つための取り組みも、ICORP プロジェクトの使命として重要である。

以上の点を総合して、本 ICORP プロジェクトは優秀な研究水準にあると認められ、戦略目標「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」に資する成果が得られたと認められる。

なお本プロジェクトが運営されるにあたっては、青野総括のパートナーであった Welland 総括らとの交流も、その役目を担っていたことを付け加えておきたい。ICORP の枠内での交流のみならず、「ナノテクノロジー学生サマースクール」を共同で組織・開催したことは、将来この分野で活躍する人材を育成し、真の意味で交流を果たしたという意味において、ここに特筆しておくべき事実である。

- 〔総合評価〕 A （戦略目標の達成に資する成果が得られた）