

ICORP「ナノ量子導体アレープロジェクト」追跡評価報告書

総合所見

本プロジェクトは、実施期間において優れた学術的成果を上げプロジェクトを終了したが、その後においても応用を指向した展開が図られ、関連分野へ大きな波及効果を及ぼした。それらの発展的な研究は、24の競争的資金プロジェクトで採択され、発表論文数や特許出願件数もプロジェクト後はかなり増加している。

期間終了後に精力的に展開された研究テーマには、[1]多探針走査トンネル顕微鏡によるナノ構造体の特性解明、[2]原子スイッチのプログラマブル集積回路への応用、[3]原子スイッチ原理に基づく3端子型アトムトランジスタの開発などがある。これらは、いずれも大型の公募研究のプロジェクトに採択されて推進された。

具体的にのべると[1]においては、プロジェクト期間内に開発された多探針走査トンネル顕微鏡が、材料・物性研究を支える主要技術として、新材料や新環境下での測定など新しい基礎物性探索へと展開されている。例えば、この技術から発展した4探針原子間力顕微鏡により絶縁基板上超薄膜の電気伝導計測が可能となり、グラフェンの量子的電気伝導の計測などで成果が挙げられた。さらに、期間内に開発したナノ計測技術を基に、スピン偏極電流の増感や磁性分子識別用のラマン散乱測定法が開発され、また原子スケール金属材料におけるプラズモニクスという新分野も開拓された。ただし、多探針STMを用いた定量的な電気伝導計測には、コンタクト抵抗など原理的に難しい問題があったのではないかと想像される。本プロジェクトでスタートされた基礎研究(4端子STMや導電性高分子の配線など)は、今後も長期的なスタンスで取り組む必要がある。

[2]においては、「原子スイッチ」関連の研究が注目される。近年、抵抗変化素子の研究開発が盛んになされているが、本ICORP(およびそれに先立つCREST)で発明・開発されたクロスバー型原子スイッチは、低電圧動作や長期間の信頼性などを有し、非常に優れたものである。連携先であった企業の研究所において集積回路応用の実証研究が進められ、CMOS上に集積化してプログラマブルロジックアレイとしての機能が検証された。現在、NEDOの超低電圧デバイスプロジェクトの一環である「不揮発性スイッチデバイス(原子移動型スイッチデバイス)」として、2014年に信頼性を含めた集積化実証が計画されている。CREST、SORSTでの基礎的な発見が本ICORPプロジェクトでの展開を基に製品化への道を歩んでいることは特筆すべき成果と言える。本成果はIFの高いNature誌に掲載され、被引用数も388と、その後の研究に非常に大きなインパクトを与えたことがわかる。

[3]においては、イオン電導層に Ta_2O_5 を用いて高性能の原子スイッチが実現できることを見出し、ゲート電圧により揮発性または不揮発性オン状態を制御可能にできる原子スイッチ構造を創製した。この研究は現在も活発に進んでいるが、原子スイッチを利用したシナプス類似の学習回路の形成への展開など、脳型計算など新分野への広がりも見え新しい発展の可能性が生まれている点が評価できる。

国際共同研究活動に関しては、実施期間中、日英若手研究者の交換・交流によりそれぞれの得

意分野を共有しあう研究協力が行われた。本研究の成果は必ずしも、ICORP における国際研究支援という側面が無ければ得られなかったというものではないけれど、長期的な観点では、若い研究者に国際共同研究の経験を与えたことは極めて重要な効果があると言える。国際共同研究活動の一貫として開催された「日英ナノテクノロジーサマースクール」は、現在は UCLA も加えた 3 機関での日米英サマースクールに発展しているなど、国際交流の場も拡大している。また、研究総括は、NIMS の国際ナノアーキテクニクス研究拠点 (MANA) 長として国際的な活躍を続けており、国際化の推進という点で本プロジェクトは一定の役割を果たしたと言えよう。

青野総括の表面科学における牽引力は世界的にも評価されるべきであり、ファイマン賞の受賞等もそれを物語っている。プロジェクトに参加したメンバーの期間後の活躍は、大型研究費の獲得、国際会議での招待講演、論文の出版数、などの客観的なデータにより示されている。若手研究者においても科研費、JST のさきがけなどを獲得して研究を発展させている。上記の研究者について職位が判明した 25 人のうち 11 人が、プロジェクト終了時に比べてキャリアアップしている。以上のことから、本プロジェクトは人材育成という視点でも、その意義を十分に果たしたと判断される。

原子スイッチの集積回路デバイスへの展開は、基礎原理発見から実用技術まで至った稀有の例であり、高く評価できる。しかし、メーカーが商品化を行ってマーケットに打って出るかは、その営業判断によることであり、科学技術の展開とは別のフェーズになる。マーケットと可能性の高い科学技術の成果との溝をいかに埋めるべきか？ 国の施策面での対応が極めて重要である。本研究で得られた成果は、単にエレクトロニクス分野にとどまらず、生命科学・先端医療など異なる分野への展開も大きく期待される。特に原子スイッチのニューロン・シナプスのスイッチ機能の発現は、これからの画期的展開の可能性がある。このような異分野との協働の場が必要と思われる。

1. 研究成果の発展状況や活用状況

1.1 プロジェクト終了後の研究の継続、発展

プロジェクト期間内では十分に応用面に展開しきれない課題もあったが、終了後においてこのような研究も大きく発展して、新しい応用領域を展開していく状況が見られる。本プロジェクトから派生した各種の新規研究は、24 の競争的資金プロジェクトで採択され、発表論文数はプロジェクト中に 103 であったが、プロジェクト後には 297 と増加し、特許出願件数もプロジェクト中に 15 であったものが、プロジェクト後には 48 へと増加した。発表論文の平均引用数が 15 という数字は非常に大きく、プロジェクト期間中およびその後の成果がインパクトのあるものであったことを物語っている。なかでも原子スイッチに関する Nature 誌の論文の引用数は 388 と非常に大きく、高く評価される。このようなデータは、プロジェクト終了後においても研究が大きく展開し、特に応用面を中心に関連分野へと波及していることを裏付ける。

科研費や JST 「さきがけ」などの競争的資金により推進され顕著な成果を挙げた例をあげると、以下のようなものがある。スピン検出多探針システムの完成によるスピン偏極電流の増感、

多探針原子間力顕微鏡の開発による超薄膜の局所電気伝導評価、原子スケールの金属細線におけるプラズモン検出、ZnS ナノベルト構造の解明と新規発光ピークの発見などである。しかし、特筆すべき成果は、原子スイッチに関する取り組みである。プロジェクト以前に見出された物理現象を、プロジェクトの2年で集積化を目指したデバイス技術に高め、プロジェクト終了後は、CRESTや科研費を獲得し不揮発メモリや不揮発ロジック応用の研究を推進し、プロジェクト終了後の2年後には、経産省(その後 NEDO に移管)のプロジェクトとして超低電圧デバイス技術研究組合(LEAP)で集積実用化の研究まで発展させている。実用化研究の出口については不透明な部分もあるが、企業との連携を ICORP の期間に強化し、基礎研究から実用研究への橋渡しをスムーズに行った模範的な成功例と言えよう。

プロジェクト終了後、研究テーマの変更や新しいチャレンジに移行している例も見られるが、いずれの研究者も、ナノ構造作製・評価を中心に活躍を続けており、プロジェクトで培われた技術や知識が生かされていることが容易に想像できる。さらに脳のシナプス類似の学習ネットワークの研究への展開など、基礎、応用の両面で大きな展開が認められる。

研究組織の面では、プロジェクトの主要拠点であった MANA が WPI 全国 5 拠点の一つとしてプロジェクト後期に設立され、青野研究総括が拠点長、主要メンバーが主任研究者として研究を継続的に発展させている。資金的にも主要メンバーの多くが JST の CREST・さきがけ、科研費基盤研究(A)、同若手研究(S)などの大型研究費を獲得している。

本研究で得られた成果は、単にエレクトロニクス分野にとどまらず、生命科学・先端医療など異なる幾つかの分野への展開が大きく期待されるものである。特に原子スイッチのニューロン・シナプスのスイッチ機能の発現は、これからの発展が大きく期待できるものである。今後は、このような異分野との協働の場を国として積極的に作って、国の施策としてこうした優れた研究を大きく実らせる必要があると思われる。

1.2 相手国チームとの交流の効果

英国チームとの交流については、プロジェクト期間中に研究者の派遣や技術交流が行われ、英国側の技術である電子ビームを利用したナノ加工、カーボンナノチューブなどのナノ構造作製が活用されているが、プロジェクト全体の規模からすると連携研究のテーマ自体はやや限定的と思われる。しかしながら、研究者の派遣により英国側でナノワイヤーの作製法など試料調製技術と MANA 側の測定技術の交流、英国の研究者によるユニークな試料の MANA における測定など、ICORP でないと困難な研究者の交流が実現した。そのような交流が契機となって、研究総括の所属する NIMS とケンブリッジ大の「日英ナノテクノロジーサマースクール」が 2004 年にスタートし、その後 UCLA も加わり、発展的に実施された。これはプロジェクトで培った交流の発展であり、ナノテクノロジー分野の国際協力、グローバルな若手研究者の育成に有益であり、本事業がその土台作りに寄与したと判断される。国際的な展開という意味では、プロジェクトで培われた情報や技術の交流に基づいて、その後、ドイツ、英国の研究グループと研究を発展させるための 2 国間共同研究がいくつかスタートしている。一方、プロジェクトのテーマの継続に関しても、不揮発性

アトムトランジスタや固体電解質原子スイッチに関する JST 国際科学技術協力推進事業として採択され、更なる展開が図られている。

本研究の成果は必ずしも、ICORP における国際研究支援という側面が無ければ出なかったというものではない。しかし、長期的な見方をすれば若い研究者に国際共同研究の経験を与えたことは、極めて重要な効果があると言える。また参加した研究者の視野が大きく広がったということも重要である。

2. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な効果・効用及び波及効果

2.1 科学技術の進歩への貢献

プロジェクト期間内に明らかにされた多探針走査トンネル顕微鏡によるカーボンナノチューブにおける弾道的電気伝導、フラーレン C_{60} の局所的電圧印加による可逆的な重合・脱重合反応などは基礎科学の成果として革新的であり、特に後者は将来の高密度メモリ実現の可能性を示したもののといえる。多探針 STM を用いた定量的な電流特性計測技術においては、コンタクト抵抗の問題など原理的な、かつ興味深い問題があったのではないかと想像するが、それらの完全な解明は今後の興味ある基礎物性科学の問題となるであろう。プロジェクト後に報告された 4 探針原子間力顕微鏡の電気伝導計測への応用は、絶縁基板上の超薄膜の局所的電気伝導計測を可能とし、グラフィエルの弾道的電気伝導計測などの重要な成果を挙げている。

プロジェクトメンバーであった長尾氏は 1 nm 幅のシリコン上の金属細線におけるプラズモン検出に成功し、原子スケール金属材料におけるプラズモニクスという新分野を開拓した。これもプロジェクトで開発されたナノ計測、ナノ構造作製に基づく成果である。また、プロジェクトメンバーであった関口氏らによる ZnS ナノベルト構造の解明、ZnS/ZnO ナノベルトの新規カソードルミネセンスピークの発見などは、ICORP での計測法開発の成果をナノ電子工学材料へと展開させた研究である。一方、STM 探針による C_{60} 分子の重合操作の研究は、基板上での導電性高分子とフタロシアニン分子の間の化学的ハンダ付(共有結合の形成)に成功し、個々の有機分子に導線を配線して単分子デバイス実現への基礎技術研究へと展開している。

本プロジェクト研究の特筆すべき成果は、原子スイッチならびにその不揮発メモリ応用である。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原子スイッチは、前身となる CREST、SORST で見出したものである。本プロジェクトにおいては、これを発展させてクロスバー構造の作製、 Ag_2S や硫化銅スイッチの基本的特性の理解を得たが、さらにシリコン CMOS-LSI のプロセスと親和性の高い材料として Ta_2O_5 をイオン電導層に用いる手法を考案し、集積化デバイス技術として高めていった。ナノテクノロジーの基礎研究の中には、動作原理の確認のみにとどまり、実用化で重要となる再現性や制御性といった視点が抜け落ちているものも多く見受けられる。しかしながら、本プロジェクトの取り組みでは、シリコン CMOS-LSI との整合性を念頭に、新しい材料にシフトし、プロジェクト終了 2 年後に実用化研究のフェーズに移行させた。

現在、不揮発メモリの研究開発競争は、世界でしのぎを削る状態になっている。抵抗変化型ランダムアクセスメモリ (ReRAM) に分類されるものとして、相変化メモリ、イオン移動を利用した酸

化還元メモリなど様々な原理のものが提案され、研究の対象となっている。クロスバー型原子スイッチは、低電圧動作や長期間の信頼性などを有し、非常に優れたものであり、プロジェクトの連携先であった日本電気研究所グループが研究を継続し、実用化に向けて前進した。プロジェクトで取り組まれた原子スイッチとそのメモリ応用に関する研究は、日本初のメモリ技術であり、世界レベルの成果として高い評価を獲得している。

このように原子スイッチの成果は、技術イノベーションの前進に重要な一石を投じたと言える。本成果は IF の高い Nature 誌に掲載され、被引用数も 388 と、その後の研究に非常に大きなインパクトを与えた。

さらに、原子スイッチについては、その特性に神経シナプスとの類似性があることが見出され、新たな発展として原子スイッチの配列により脳神経回路を模したネットワークの構築の研究がおこなわれている。当該分野の専門家との協力により新たな学問分野の形成も期待される。

2.2 応用に向けての発展

原子スイッチをプログラマブルロジック集積回路に応用する研究は、本プロジェクト期間内に始められ、イオン電導層に酸化物材料を用いて安定性を向上させ、シリコンテクノロジーとの整合性が示された。この研究は連携研究先の日本電気基礎・環境研究所のメンバーによって継続され、10年以上の保持が可能な低電圧動作3端子型原子スイッチとして発表された。さらに、65 nm の CMOS 上に集積化し、プログラマブルロジックアレイの機能検証の成功が発表された。NEDO の超低電圧デバイスプロジェクトの研究開発項目「不揮発性スイッチデバイス(原子移動型スイッチデバイス)」は本プロジェクトのテーマの展開であり、2013 年度にマクロレベル集積化実証、2014 年に信頼性を含めた集積化実証が計画され、最終目標の「再構成可能ロジック集積回路動作実証」に向けて着実な進展を見せている。今後は信頼性に加えてコスト面からもバランスの取れた製品化に向けての検討が必要な段階に入っている。

このように CREST、SORST での基礎的な発見が本プロジェクトでの展開を基に製品化への道歩んでいることは特筆すべき成果と言える。これらの展開に関しては、業界新聞紙のみならず一般新聞紙において多数掲載されており、持続可能な技術への社会的な関心の増大の中で注目すべき技術と目されている。

その他、フラーレン分子膜を用いた超高密度メモリ、導電性高分子の「化学的はんだづけ(共有結合形成)」による2端子型ナノ配線技術などに関しては、まだ産業的にインパクトをもたらす段階に至っていないが、デバイス原理として優れた可能性を有しており、継続的に研究を進めるべきであろう。また脳の記憶作用で重要なシナプスの長期可塑性と短期可塑性の挙動を、パルス入力の時系列によって操作できる Ag_2S のギャップタイプ型原子スイッチで実現した。このように、脳型アーキテクチャなど新しい情報処理システムとの組み合わせも念頭にいた研究の展開にも期待したい。

2.3 参加研究者の活動状況

青野総括は2010年のファイナマン賞受賞をはじめとして、プロジェクトメンバーの受賞など科学技術開発の継続的貢献に評価を得ている。プロジェクトのグループリーダー、研究員の多くもMANAのユニット長、グループリーダーとしてプロジェクトの成果を発展させ、あるいはそこで培ったナノ計測、ナノ構造物性評価の技法を他の物質系に対して応用し新たな展開に取り組んでいる。そのレベルに関しては、メンバーの多くがプロジェクト後に受賞したり、PIとして多くのプロジェクト・競争的研究をスタートしており、大型研究費の獲得、国際会議での招待講演、論文の出版数などの客観的なデータにより示されている。プロジェクト後の競争的研究資金の獲得状況も良好であり、1千万円以上ものについて、12名のプロジェクト参加研究者で24件を獲得し、プロジェクトメンバーが高い競争力を有した研究者として活躍している状況が示されている。

プロジェクト参加研究者の多くは、NIMSにおけるアソシエイトディレクターからユニット長へ(2名)、ディレクターまたは主任研究員からグループリーダーへ(4名)、大学における助手または職員から准教授または中国の大学で副教授へ(2名)、研究員から助教へ(3名)など、キャリアアップしている。

特に本プロジェクトのグループリーダーであった中山知信氏は、MANA ナノシステム・機能集積ユニット長として、青野総括の研究成果を継承発展させる研究を行っている。また主要研究員であった長谷川剛氏はMANA ナノシステム・原子エレクトロニクスユニット長として、原子スイッチを実用化するための競争的資金のプロジェクトを率いている。また研究員の長尾忠昭氏は、MANA ナノシステム光学グループリーダーとして、本プロジェクトの発展形としての、原子スケール材料におけるプラズモンで先駆的な研究を行っている。このように、本プロジェクトに参加した多くの若手研究者は終了後もキャリアアップしながら、本プロジェクトの更なる発展に活躍している。

3. その他

[1]ERATO、CREST、SORSTと展開されてきた独自性の高い研究成果が、国際的にもより認知度が高まる形で展開され、新規な研究展開につながるなど継続的な支援が生かされており意義深い。プロジェクト終了時には基礎研究としての側面により高く評価された原子スイッチが、追跡調査の時点においては企業において実用化に向けての研究開発が進められ、かなりの段階まで来ていることを知り、本ICORPプロジェクトの価値を再認識した。

[2]国際共同研究というのは、宇宙、加速器、核融合などの巨大プロジェクトは別として、ナノサイエンスの場合には研究者の個人的な繋がりによる側面が大きいので、何をミッションにするのかのイメージが掴みにくい。今後、ICORP的な枠組みを作る場合にはその点の検討を事前におこなう必要があると思われる。

[3]“ICORPが有ったから出てくる成果”とは、他の国際共同研究と比べて、どのような定性的違いを期待されているのかがわかりにくい。例えば2国間共同研究(日独など)とICORPで求められているものがそれほど変わらないのであれば、将来的には統一してもいいのではないかと思う。

[4] ナノ量子導体プロジェクトで取り組まれた研究は、その将来の出口としてメモリや演算などエレクトロニクス回路応用を強く意識したものになっていたと見受けられる。一方で、回路応用は、高集積化、歩留まりなど技術的に乗り越えないといけない壁が多いのも事実である。ナノサイエンスやナノテクノロジーは、集積回路応用以外にも様々な応用の可能性を秘めていると思われる。化学産業、材料産業、エネルギー産業などにも視野を広げて頂き、引き続き優れた基礎研究ならびにイノベーションの種の創出に向けた営みをぜひ継続して頂きたい。

[5] 本研究は基礎研究に重点が置かれた研究ではあるが、一方、応用への出口も常に意識して研究が実施された。とりわけ原子スイッチの集積回路デバイスへの展開は、基礎原理発見から実用技術まで至った稀有の成功例であり、高く評価できる。基礎研究と技術イノベーションは車の両輪の様なもので、どちらか一方だけでは科学も技術も、ましてや、「科学技術」は成り立たない。両者の連携をいかに図るか、国の施策として工夫が必要と思われる。

[6] メーカーが基礎研究の成果をどのように商品化して行って、マーケットに打って出るかは、その営業判断に多分によることであり、科学技術の展開とは別のフェーズになる。マーケットと可能性の高い科学技術の成果との溝をいかに埋めるべきか？ 国の施策面での対応が極めて重要である。

[7] 以下は、JST への提言である。本プロジェクトは、基礎研究から実用化研究につながった成功例なので、その原因や境界条件を分析し、今後の JST の事業に活用して頂きたい。実用化に向けた研究開発では、産業界との連携は不可欠である。産業界が「お付き合い」で行う産官学連携に陥ることなく、産業界を誘引できるような研究体制の構築やそのための支援を進めて頂きたい。

[8] 本研究で得られた成果は、単にエレクトロニクス分野にとどまらず、生命科学・先端医療など異なる分野への展開も大きく期待される。特に原子スイッチのニューロン・シナプスのスイッチ機能の発現は、これからの画期的展開の可能性がある。このような異分野との協働の場が必要と思われる。異分野協力研究、異業種協力の場を支援するような枠組みが欲しい。

以 上