ERATO「細野透明電子活性プロジェクト」追跡評価報告書

総合所見

本プロジェクトは次のような基本構想に基づいて計画され、1999 年にスタートした。大きなバンドギャップを有する酸化物をベースとする結晶とアモルファスを対象物質とし、バンド構造と点欠陥の電子状態や光反応性を明らかにしつつ、それらの制御と活用により、光学的透明性を生かした新しい光・電子及び化学機能を探索するとともに、透明酸化物という古くから知られている物質に state-of-the-art な手法を適用することで、新しい機能材料としての展開を図ろうというものである。

具体的な主要研究課題として、(1) 透明酸化物半導体の研究～新しいフロンティアとデバイス、(2) ナノポーラス結晶（$12CaO \cdot 7Al_2O_3$：C12A7）の欠陥エンジニアリングによる光・電子化学機能発現、(3) 真空・深紫外レーザ用シリカガラスの研究～レーザパルスとの相互作用の解明と応用展開、(4) フェムト秒レーザシングルパルス干渉露光法と透明硬質材料のマイクロ・ナノ加工、などが挙げられた。これらは相互の連携のもとに系統的に新しい科学技術の展開を目指したもので、当初から魅力ある課題であった。

そのときのプロジェクト事後評価では、達成された成果及び将来の展望に対して“Excellent”という評価が与えられたが、その 5 年後の研究成果を見てその評価は全く正しかったことが確認されたと言えよう。いずれのテーマも深化・発展を遂げただけに留まらず、いくつかのテーマは枝分かれしてさらに新たな研究分野の創出へと進展している。それらの中には研究成果が製品化されているかあるいは製品化に向けて進行している。

本プロジェクトは ERATO 終了後の 5 年間で、SORST、学術創成と大型プロジェクトに引継がれ、透明アモルファス TFT、ケージ化合物、鉄系超電導体等で、オリジナリティーが高く、文句なく世界のトップレベルの研究成果を挙げている。特に「材料研究」の破壊力を示し、広いスペクトルの人々にその visibility を挙げた功績は特筆に値する。

今回、ERATO の追跡評価を行って改めて本プロジェクトの研究成果のレベルの高さ、ならびにその広がりに感服させられた次第である。細野プロジェクトリーダーは、マテリアルズサイエンスの分野ではまさに“世界のトップランナー”と言っても過言ではない。今後ともこの分野で先導的な役割を果たして頂きたいと願っている。

１．研究成果の発展状況や活用状況について

プロジェクト終了後の研究の進捗状況であるが、透明酸化物半導体に関する成果が特に著しいが、その他のテーマでも大きな成果が得られている。具体的に示せば以下のようになる。

（1）透明酸化物半導体：プロジェクト終了後の Nature 誌への論文掲載を契機として、TAOS-TFT の高い易動度と製造の容易さにサムスン電子、LG Display、キャノン、凸版印刷、大日本印刷など国内外の企業で実用化が進んでいる。フレキシブルエレクトロニクスの実現に向けてまた一歩近づいた感を抱かせる成果である。また、新しい材料の探索によって新規な鉄オキシニクタイド系超電導化合物の発見へとつながった。この発見は全くのセレンディピティによるが、それを見逃さなかった細野教授は流石である。これは、彼が現象の本質を見極める優れた能力を持っていることを示している。

上記の研究成果では細野教授へのオリジナリティーの所存が極めて明確であり、従来は少し暗い雰囲気のあった「材料研究」に明るい元気な雰囲気を与え、優秀な若手研究者をこの分野へ引きつけた功績は大きいものがある。この点で、NHK などへの TV 出演は効果的であった。

（2）ナノポーラス結晶：ERATO の成果である「活性酸素」「ハイドライド」「電子」を包接するナノポーラス結晶（$12CaO \cdot 7Al_2O_3$）に関し、大量合成法、単結晶薄膜作成をはじめとし、新機能を開拓する研究を精力的に推進し、各々の包接化合物の理解を格段に深めるとともに、機能の発現についても著しい進展を見ている。今後、強力な酸化剤、強力な還元剤（有機化学反応のカップリング剤）として新規化学の制御や優れた電子供給源としての応用が盛んに試みられるものと予想される。また、セメント系超電導体の進展も興味深い。

（3）真空・深紫外レーザ用シリカガラス：F_2エキシマレーザ（157nm）とシリカとの相互作用をさらに詳細に調べて DUV 照射による欠陥構造の生成機構を解明し、以前開発されたフッ素系ドープシリカガラスを水素処理することにより、DUV 域から可視・赤外域までの光を透過する光ファイバーの開発に成功した。また、上記の研究結果は将来の F_2 レーザステッパの実用化に向けて大きな影響を与えるとともに現用の ArF レーザステッパにも大きな効果をもたらすものと思われる。

（4）干渉 fs レーザパルスによる透明酸化物の微細加工：ERATO の成果をさらに発展させ、シングルプリパルスと一対の干渉パルス間に時間差をつけて透明酸化物に照射することにより、一光子過程でマイクロ回析光子を形成させる技術を開発した。

２．研究成果から生み出された科学技術的、社会的および経済的な効果・効用および波及効果について

2.1　研究成果は科学技術の進歩にどのように貢献しているか

ERATO、SORST と引継がれ、税金からの大きな投資が切れ目の無い追加サポートでさらに展開し世界のトップレベルの研究として還元された最も優れた例と言える。「世界に尊敬される科学技術立国日本」に貢献した研究成果は対費用効果や５年という短い期間を考慮すれば十分な成果と言えよう。プロジェクトから生み出された特筆すべき成果をまとめれば以下のようになる。

（1）透明酸化物半導体：独自の作業仮説と設計指針に基づく「絶縁体から縮退半導体まで広範囲に電子キャリア濃度を制御できる複合酸化物（$InGaO_3 \cdot nZnO$）」、「p 型高伝導オキシカルコゲナイド（LaCuOSe）」など透明酸化物半導体の発見と、それらを用いた機能性デバイスの試作は、透明酸化物エレクトロニクスのまさしくパイオニアとしての地位を確立した。特に、成膜に高温を必要とする結晶性薄膜に比べ、低温で成膜可能な非晶質の a-IGZO（InGaZnO）の発見は工業的デバイスの作製の観点からすばらしい成果である。すなわち、大面積化が可能になり、プラスティックなど耐熱性のない基板上にも成膜可能となった。また、a-Si:H よりも一桁大きい～$10cm^2/V \cdot s$ 程度の電界効果易動度を有するという事実もこれまで信じられていた「乱れた構造を有する非晶質の電子物性は結晶のそれに比べて劣る」という既成概念を覆すものである。従来の半導体の常識を覆し、新たな分野を切り開いた本研究の成果は世界のトップレベルであると言える。細野教授の指導で、世界中の大学、研究機関、パネルメーカが研究開発を行い、ここ１年で理論面、実験面で著しい進歩が見られている。

また、p 型透明半導体は LaCuOSe 関連の材料探索過程で、同一構造のオキシニクタイド化合物 LaTMOP(TM=Fe,Ni)に元素の種類を拡大した結果、新規な超伝導物質 LaFeOP、LaNiOP の発見という新分野の創出をもたらし、世界的大ブレイクにつながった。物質・材料研究の奥の深さ、興味を明ら

かにして夢を与えていることへの貢献は計り知れないものがある。
（2）ナノポーラス結晶（$12CaO \cdot 7Al_2O_3$）：セメントと同質のこの物質は「ユビキタス元素戦略」の原点となる化合物である。エレクトライドの大量合成法が確立されたことにより今後の進展がいっそう加速されるものと思われる。「活性酸素」、「ハイドライド」、「電子」各包接化合物の生成機構、機能が徹底的に調べられ、多くの応用可能性が拓けてきた。例えば、強力な酸化剤である O-イオンの酸化反応への利用、電子を包接する室温大気中で安定な固体エレクトロライドの有機化合物のカップリング反応への利用、冷電子・熱電子源としての応用、電子線リソグラフィー、単電子トランジスタなどへの応用はいずれも大ブレイクを起こす可能のあるインパクトのある成果である。セメント超伝導体もこれからの進展が楽しみである。
（3）真空・深紫外レーザ用シリカガラス：DUV 域から可視・赤外域までの幅広い波長の光を透過するシリカガラス光ファイバーの開発に成功し、日本の企業 2 社が製品化している。
（4）上記のように本プロジェクトの研究はオリジナリティー、レベルの両方が非常に高く、他の追随を許さない世界のトップレベルであるといっても過言ではない。

2.2 研究成果はどのような形で応用に向けて発展しているか

まず、アモルファス酸化物 TFT 研究が実用化に向かって進んでいることを最も高く評価したい。例えば実用可能域にある特性を有する p 型 LaCuOS を開発し、それを用いて pn 接合デバイスを試作して発光を観察している。また、非晶質 a-IGZO 薄膜の開発も実用化にとって極めて重要な発見である。すなわち、大面積の均質な大面積薄膜を得ることが容易となった。さらに、キャリア濃度も絶縁体から縮退半導体まで自在に制御可能であることも示しており、実際に PET 基板上に a-IGZO を用いて TFT(TTFT)を試作し、その特性についても報告している。

現在 10 兆円の規模にまで成長した FPD(Flat Panel Display)は、今後発展を遂げ 2015 年には 13 兆円の規模に、2025 年には 20 兆円の規模にまで成長すると予測されているが、この内 30%は本プロジェクトの研究成果を反映したものとなることが推定され、経済的インパクトは極めて大きいと言える。HP、サムソン電子、LG Display、キャノン、凸版印刷、旭硝子、昭和電線等国内外の企業が研究成果を実用化していることを見ても波及効果は大きく、今後の発展が楽しみである。

上記のような研究成果は他のテーマでも得られており、それがために被引用件数 100 件以上のプロジェクト報文がどの分野も万遍なくあり、13 件以上にも及んでいる。当該プロジェクトの成果の世の中への波及は今後ますます増大することは疑いないものである。

2.3 参加研究者はどのような形で活躍しているか？

今回のプロジェクトは物質の本質を見抜く鋭い洞察力と並はずれた理解力を持つ細野プロジェクトリーダーの下で、透明電気伝導性酸化物 TCO をはじめ数多くの未踏の課題に取組んで極めてチャレンジングな研究プロジェクトであった。当該プロジェクトにおける研究のモチベーションは非常に高く、これまで得られた成果は質・量ともに並はずれている。新しい材料科学のフロンティアを拓く可能性のある成果が一つや二つでなく、プロジェクトの各グループに少なくとも一つはそのような成果が見られる。良いテーマが選定され、才能ある研究者が集まっており、また、各グループの素晴らしい素質、そして全てをまとめるプロジェクトリーダーの先見性、指導性どれをとっても

申し分ない。

また、十分な人材育成がなされている。若手の何人かは既に他大学に移籍し、第一線ですばらしい活躍をしている。太田裕道氏(名古屋大学准教授)、梶原浩一氏(首都大学東京准教授)、神原陽一氏(慶應義塾大学専任講師)などがその例で、彼らは文部科学大臣賞、日本セラミックス協会進歩賞や各種論文賞などを受賞しており間違いなく人材は育っていると見受けられる。

３．その他

日本は資源が乏しく、世界を支配できる経済力もないので、教育により人材の資質を向上し、研究開発によって技術立国とすることが極めて重要である。しかし、昨今は、日本の製造業は韓国、台湾、中国、インドの台頭により、競争優位を失いつつあり、もはや単純労働では日本を支えることは困難である。そこで今後の日本は、製造そのものは新興国に展開し、国内では優れた科学技術を創出し、そこから生まれる知的財産によって国益を図っていく他はない。ところが、基礎研究の初期段階では効果が見えにくく、誰もお金を出さないのが実情である。そこで、ERATO のような独創技術のインキュベーション制度は極めて重要である。幸いなことに、このような基礎研究は独創性を持つ優れた研究者とそれを支える豊富な研究陣のいる日本及び欧米でなければなし得ない。今後共、ERATO を拡充して行くことが、日本の発展のために重要であると考える。

評価者の一人は細野プロジェクトにつき、ERATO、SORST と 10 年間に亘りその進展を見てきたが、ここ数年の研究成果には目を見張るものがある。すなわち、TAOS-TFT、C12A7 機能素子、鉄オキシニクタイド系超電導体の３本のホームランである。当初本プロジェクトは間口が広すぎて研究成果に一抹の懸念もあったが、10 年経てみて大成功であったと言えよう。当時リーダーは 40 歳代の実績も殆どない若手であったが、今や材料の分野では世界一の業績を挙げている。思い切った若手の起用が功を奏した例である。今後も第二、第三の成功例を期待したい。しかし、成果を要求される研究を長く続けると、リーダーには疲れが出てくることが心配される。報告書を要求しない勝手な研究に研究費を出すことも御検討頂きたい。