

## CREST「二次元機能性原子・分子薄膜の創製と利用に資する基盤技術の創出」

### 研究領域中間評価報告書

#### 総合所見

本研究領域は、戦略目標「二次元機能性原子・分子薄膜による革新的部素材・デバイスの創製と応用展開」のもと、世界的にも発展期の段階に入った二次元材料を軸として、予想を上回る性能・想定外の機能を期待し、デバイス創成を最終目標とする意欲的研究テーマを掲げた研究領域である。典型的な二次元物質であるグラフェンは、2010年にノーベル物理学賞対象物質であり、今日に至るまで関連物質の研究が世界的に行われている視点からも、研究領域の設定はタイムリーであり、基礎学理の構築とデバイス応用の双方の視点を包括する研究を推進しようとする点も評価できる。研究課題の選考方針も明確であり、「二次元材料」に関する多様な分野からバランスよく採択され、各研究課題はいずれも高い実績のある研究チームで構成されている。採択率 6%という激戦の中から採択されただけあって、いずれの研究課題も科学的・技術的に興味深い内容となっている。

研究マネジメントは良好に行なわれている。研究総括の発信した、研究の開発の基軸はあくまでもサイエンスベースでの原理追究や指導原理の確立であり、どのようなニーズをめざすのかは継続して検討する、という明確なスタンスに基づいた自主性・寛容性がそれぞれの研究代表者に確実に伝達され、研究領域内には提案以上に果敢なテーマに挑戦するという雰囲気が醸成されており、優れたマネジメント効果を発揮していると評価できる。領域アドバイザーは各分野の専門的および産業的視点ともにバランスよく配置されている。各研究課題に対し少なくとも年に1回の研究代表者と領域アドバイザーによるサイトビジットを着実に行之、進捗状況を確認しながら深い議論の場を設けている。さらに、EU Graphene Flagship とのワークショップを3回にわたって開催している。この開催に当たっては、研究総括のみならず卓越した領域アドバイザーらの支援が大きかったと推察されるが、世界動向把握、世界に向けて迅速で効果的な研究成果の発信、国際共同研究の積極的推進に向け精力的に行われたことから、研究マネジメントは戦略的、計画的に実施されており、大いに効果的であったと考える。

本研究領域の研究成果の水準は世界的に見ても高い水準にあり、多くの学術論文が発表されている。殆どの研究課題で著名な国際誌に数多く論文が掲載されており、全体では国際論文が406報、国際招待講演が336件、さらに、国内外の重要な受賞17件と量・質において十分な成果が上がっており、中間段階での戦略目標達成へ向けた進捗としては満足なものと言える。しかしながら、この分野の世界における投資額は日本と比べようもない。したがって、研究領域の目標である「二次元薄膜材料をベースにデバイス機能化」に軸足を絞る中で、研究総括のねらいである「従来技術では到底実現できない圧倒的な性能改善を目指す」ために、後半での更なる大胆な取り組みを期待する。また、論文数に対し特許出願件数が少なめである。まだ中間段階でもあるが、研究の出口をデバイス創成と掲げている以上、後半

の期間では特許出願も重要な運営マネジメントの指針として念頭に置かれることを期待する。基礎研究の課題であっても、次世代の技術となり得る可能性を意識し、プラットフォームとなり得る特許戦略を研究領域全体で心掛けて行かれることが望まれる。一方、特許出願に関しては、各大学に温度差がある上に、大学単独で保有し辛い環境が多くあることなどから、今後は JST の知財支援事業を活用することも必要と考えられる。

以上を総括し、本研究領域は総合的に優れていると評価できる。

## 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

今日、二次元関連物質の研究が世界的に精力的に実施されている視点からも、戦略目標、及び研究領域の設定はタイムリーかつ、適切であったと考えられる。また基礎学理の構築とデバイス応用の双方の視点を包括する研究を推進しようとする点も評価できる。研究総括が掲げた 6 項目の具体的な研究課題の選考方針は大変明快であり、排除条件を示すなどの配慮もなされている。二次元材料の研究状況を踏まえた研究領域の設定には説得力があり、数多くの応募に繋がったと考えられる。特に当初は、研究開始からおよそ 3 年後までに目指すアプリケーションを想定できることを採択の条件としていたが、応用に固執すると新たなアイデアを狭めるという考えで、サイエンスベースでの原理追及や指導原理の確立を前提に、新しい技術のシーズがどのようなニーズに応えていくのかという運営姿勢を基本スタンスとしている点も評価できる。採択された研究課題の構成も物理系を主軸として置き、化学系、さらに生物系も取り入れるなど、二次元膜の多様性を確保した配慮が十分なされている。また応用分野軸として、「新たな機能創成」と「画期的性能改善」にすみ分けて採択している点でも、指導方針が明確になっている。今後も「基礎学理の構築とデバイス応用の双方の視点を包括する」という本研究領域の考え方を具現化するように研究を推進して頂きたい。

領域アドバイザーについても高い専門性と豊富な経験を兼ね備えた専門家を揃えている。専門的視点では物性物理、化学分野、有機材料、デバイスとバランスが計られており、産業的視点でも大学関係者と同数の 5 名の企業からの領域アドバイザーを配し、学理の追及と新規デバイス創成の双方を見据えた目標達成に向けての体制が打ち立てられている。この中間折り返しの時期に、糖質二分子膜や配位ナノシート等の化学分野のデバイス化をより一層進展させる意図から、その分野に精通する領域アドバイザーを新たに参画してもらうのも、今後の戦略の一つと考えられる。

研究進捗状況の把握と評価を行うために、キックオフミーティング、サイトビジット、領域会議を研究者間での相互刺激を工夫するなど適切に行っている。2017 年度から領域アドバイザーを課題担当としてアサインし、サイトビジットに同行して頂くことで、専門的な議論を深めており、マネジメントは概ね良好に実施されていると判断できる。領域会議の際に領域アドバイザーがファシリテータとして参加した点は、議論の活性化や深化に繋がった

と推察される。また、EU Graphene Flagship とのワークショップを3回に亘って開催したり、EDTM 国際会議を利用するなど、効率的な世界動向の把握、世界に向けての迅速で効果的な研究成果の発信が実施されている。また、国際強化支援を活用した国際的な共同研究の積極的な推進活動を精力的に行われたことから、研究マネジメントは戦略的で計画性があり、大いに効果的であったと言える。中間期の現時点では、研究課題毎の偏りが若干認められるが、今後は他課題においてもシンポジウム開催を予定されており、今後も研究領域として積極的に国際化強化やシンポジウム開催などの継続した実施が望まれる。

以上により、本研究領域の研究マネジメントは優れていると評価できる。

## (2) 研究領域としての戦略目標の達成に向けた状況

### ① 研究成果の科学的・技術的な観点からの貢献

本研究領域は、世界でもトップクラスの実績を有する研究チームによって構成されており、イノベーション創出への貢献、特に研究成果の科学的・技術的な貢献は引き続き大きく、すでに多くの学術論文が発表されている。殆どの研究課題のチームで著名な国際誌に数多く掲載されており、全体では国際論文が406報、国際招待講演が336件、さらに国内外の重要な受賞17件と、量・質において十分な研究成果が上がっていることから、科学的貢献度は十分高いと評価される。

#### (i) 具体的なデバイスイメージを有するもの：

鳥海課題は、二次元材料を対象とする本研究領域の研究スキームとはやや趣を異にするが、電荷の振る舞いに立脚した負性容量電界効果トランジスタのモデルを提案し、これまでの各研究機関の試作結果をめぐる混沌とした状態の收拾に向けた重要な提案をできたという点で大変意義のある研究成果であり、科学的にも大きく貢献している。論文においても、電子デバイスの著名なIEDM国際会議に昨年3件採択されている上、国際的に著名な学術誌に掲載され、被引用数も多く、高く評価されていると考えられる。また佐藤課題のグラフェンナノリボンに関しても第一原理計算で最適な前駆体の形状を解析し、世界発の合成に成功したという点で、技術的な貢献が非常に大きいと考えられる。一方、ナノグラフェンの重要課題である位置制御、エッジ構造に依存したバンドギャップの検証、及び磁性の検証に早くたどり着くことが求められる。他の研究チームにおいては、現在のところ基礎的な検討を実施していてこれからの進展に期待するという課題も見受けられるので、早期にデバイス化、産業化に近づく一歩を踏み出していきたい。

#### (ii) 新規物性の発現で新規機能を目指すもの：

町田課題ではファンデルワールス超格子で10層以上の二次元結晶を積層できるという極めて独創的な技術を有しており、世界的に注目されている。著名な国際誌に掲載され、被引用数も高いことから、その技術的貢献は大きい。一方で、多くの世界の研究者と共同研究を進めるあまり、採択時の目標に据えていた量子カスケードレーザー技術を含めたオリジナルなデバイス化への取り組みが決して後手にならないように鋭意アンテナを張って進めて

欲しい。川崎課題と笹川課題は、トポロジカル絶縁体をテーマとしており、それぞれインパクトの高い学術的研究成果を多く上げている。特に川崎課題では、トポロジカル絶縁体における磁壁界面でのエッジ流制御や、アクシオン絶縁体状態を初めて実現するなど、トポロジカル絶縁体のデバイス化に向けた高度な要素技術を積み上げており、科学的・技術的貢献が高いと考えられる。富永課題は、構造相転移を用いたマルチフェロイック機能デバイスの創製を目的としており、カルコゲン化合物超格子における室温での大きなスピン伝導の発現、抵抗変化モデルの第一原理計算による検証、バイポーラ電圧動作によるディラックコーンの開閉の検証など、重要な学術的研究成果が得られている。上述のように新規物性の発現に関する研究は、本研究領域の根幹とも言うべき研究テーマであるが、順調に研究成果が得られていると認められる。

(iii) 医工学、化学分野から新規機能を目指すもの：

この分類の課題はいずれも、本研究領域の中でも挑戦的な研究テーマである。平野課題の脂質二分子膜イオン・電子ナノチャネルの創成、西原課題の配位ナノシート (CONASH) の創製と機能創出の研究は、ともにデバイス化を意識して実施されており、本研究領域の主旨と合致しており、実現すれば大きなインパクトが期待できる。特に、平野グループにおける脂質二分子膜を二次元系機能性物質として見立てた電子デバイス応用への発想は独創的であるのみならず、膜質の安定化、二分子膜の分子配向性の制御という材料的観点から、自立型脂質二分子膜をナノ絶縁膜とみなし、可視光照射による光変調効果の可能性にまで漕ぎ着けている点は非常に高く評価できる。現時点で、糖質二分子膜や配位ナノシート等の化学分野のデバイス化路線を、より一層拍車をかけて進展させる意図から、この分野に精通する領域アドバイザーに新たに参画してもらうのも一案と考えられる。今後の戦略の一つとして検討頂きたい。松本課題は、グラフェン FET をバイオセンサーに応用するという内容であり、すでに糖鎖で捕獲されたウイルスでグラフェン FET のディラック・ポイントの変化を検出する基本原理は確認できている。ばらつきなどの課題はあるものの応用的に極めて興味深い研究成果を上げている。

以上、物理系に関しては、国際的に著名な論文誌に掲載され、多くの被引用数が得られているという点からも顕著な研究成果が得られていると考えられる。化学・生物系においても、上述したように既存技術とは異なる興味ある研究成果が得られており、研究領域全体としては科学的、技術的に高い水準にあると評価できる。世界に先駆けた尖った研究成果を、後半においても引き続き期待する。

以上により、研究成果の科学技術への貢献については高い水準が期待できると評価できる。

## ② 研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献

二次元原子・分子膜研究は世界的に激しい競争が繰り広げられているが、歴史的には新しく、未成熟の分野であることから工業的なベースに乗せることは未だ遠く、社会的・経済

的価値の創造に貢献することを性急に求めることは難しい。そのような観点からも、デバイスへの応用にも軸足を持ちつつ、基礎的な学理構築を中心とした研究課題、産業化に近い研究課題、さらに新領域の挑戦的な研究課題までバランスよく構成されている点は適切である。したがって、その目標が達成されれば産業や社会へのインパクトは非常に大きいと考えられる。例えば、松本課題でも実用化されれば、ウイルス感染の基礎研究から世界流行阻止という医療応用に生かされ、社会的に影響は計り知れないと考えられる。

一方、論文数に比して特許出願の件数が全体的に少なめである。特許に対する研究総括の考え方や学術的研究において特許出願にこだわり過ぎないこと、あるいはデバイス特許においては市場で使われる時期を想定した適切なタイミングも重要であることなどもある程度理解できるが、欧州のみならず、韓国や中国をはじめとしたアジアでのこの分野への投資は日本を圧倒しており、応用に向けた展開は意外に早まる可能性も少なくない。たとえ基礎研究の課題であっても、次世代の技術となり得る可能性を意識し、次世代技術のプラットフォームとなるような特許戦略を領域全体で心掛けて行かれることを切に期待する。

以上により、研究成果の社会的・経済的な観点からの貢献については、高い水準が期待できると評価できる。

## 2. その他

概ね順調に研究が進んでいるように見受けられ、二次元材料でしか達成できない新しい機能を持つデバイス実現への道標になるような研究成果を期待している。数々の興味深い研究成果が得られているが、産業化に近い研究課題でやや苦戦している印象を受ける。特に、産業化に近い研究課題においては、本当に二次元材料は利用できるのか、本当にシリコンに代わるような材料になる可能性はあるのかなど、材料そのものの特性を、電気的特性だけでなく機械的特性や安定性、耐環境性なども含めて、エレクトロニクス応用という観点から再考するという視点も必要と考えられる。