

ERATO 安達分子エキシトン工学プロジェクト事後評価（最終評価）報告書

【研究総括】 安達 千波矢（九州大学 最先端有機光エレクトロニクス研究センター
／教授・センター長）

【評価委員】（敬称略、五十音順）

近藤 高志（委員長；東京大学 先端科学技術研究センター／教授）

仲田 仁（山形大学 有機エレクトロニクスイノベーションセンター
／センター長代理・産学連携教授）

水戸 郁夫（日機装技研株式会社／顧問）

山口 茂弘（名古屋大学 トランスフォーマティブ生命分子研究所／教授）

山田 容子（奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科／教授）

評価の概要

ERATO 安達分子エキシトン工学プロジェクト（2013年12月発足）は、電子と正孔の束縛状態である励起子（エキシトン）の有機半導体中でのふるまいを制御して効率的な発光に結びつける分子エキシトン工学の学理の確立と、それによる革新的有機光デバイスの創成を目標としたプロジェクトである。安達研究総括は、2010年3月から2014年3月までに実施した FIRST プロジェクト（最先端研究開発プログラム「スーパー有機 EL デバイスとその革新的材料への挑戦」）の中で2012年に、熱活性化遅延蛍光（TADF）を利用した高効率発光に成功した。しかし、有機光エレクトロニクスがより一層社会で活用されるようになるには、未だ実現されていない電流励起有機半導体レーザー等の新たなデバイスの創成が重要である。本プロジェクトは、この観点から出口デバイスを念頭に置いた“Zero to One”型の大変挑戦的な戦略的基礎研究プロジェクトである。

安達研究総括のリーダーシップのもとプロジェクトの構想の実現へ向け、化学、物理学、電子工学に関するトップクラスの専門家が国内外から集まり、全員一丸となって新規な科学技術イノベーションのための多くのシーズ技術を産み出したことは評価に値する。最大の成果は、これまで成功例のなかった電流励起有機半導体レーザーの実現である。この成果は、材料、構造、プロセス等への総合的取り組みの結果として生み出されたものであり、有機光材料の応用可能性を一段引き上げた歴史的な成果である。加えて、極端な高密度電流励起下での励起子生成・失活過程と材料耐性というこれまでにない研究対象に初めて光を当てることになるという意味で、学術的な意義も極めて大きい。同じく重要な成果として、室温長寿命有機蓄光の実現が挙げられる。分子間電荷移動と電荷分離のプロセスにより電子・正孔再結合寿命を格段に引き延ばす蓄光技術の発見は TADF の考え方を大きく発展させる可能性があり、学理として重大な意味を持つ。また、従来の無機蓄光材料を大きく越える応用領域の広がりが見込まれ、実用上の意味も大きい。これら二つの成果に加え、一重項励起子開裂（Singlet Fission: SF）の赤外発光への活用やペロブスカイト材料の発光デバイスでの利用においても、応用デバイスを念頭に置き、その根本で TADF から始まるエキシトンの学理をさらに発展強化させて課題を突破しつつある点も重要なポイントである。

海外招聘研究者を含めた若手研究者が生き生きと活躍する研究体制の整備、国際共同研究体制の構築、世界的な国際研究拠点へ向けた学会活動など、本プロジェクトはグローバルな戦略的研究プロジェクトとして良いあり方を示したと認められる。アドバイザーによる的確な助言や研究者に負担をかけない迅速な知財出願システムの構築なども含めて、良い先例となる研究体制を構築した。

予備評価終了後（2017年度実施）も、基本機能の実現により見えてきた具体的な課題に挑戦し大きな成果をあげつつある。電流励起有機半導体レーザーでは、電流閾値の低減が進められて安定な動作が実現されつつある。またその成果の実用化を目指して、プロジェクトに参画していた Ribierre Jeab-Charles 研究員と Bencheikh Fatima 研究員が独立して CEO と CTO を務める、研究開発型ベンチャ

一企業 KOALA Tech 社が 2019 年 3 月に設立された。また、室温長寿命有機蓄光はそのメカニズムが詳細に解明され、この成果は、嘉部グループリーダーが沖縄科学技術大学院大学の准教授となり、継続して実用化を目指すことになっている。

本プロジェクトの一連の成果は、現在までに Nature2 報、Nature 姉妹紙 7 報を含めた論文 138 報、書籍・総説 13 編、会議発表 432 件を通じて積極的に外部に発表されつつある。また、プレス発表、アウトリーチ活動を通じて専門分野以外の一般に対してもその成果が適切にアピールされている。研究成果の実用化を目指した特許出願は 47 ファミリーあり、その多くは外国出願を行っている。その中で、有機半導体レーザー、TADF 材料の高度化、有機蓄光に関する 32 ファミリーの特許が既に譲渡およびライセンスされている。

以上を総合し、本プロジェクトは、有機半導体中のエキシトンを制御して効果的な発光に結びつける分子エキシトン工学の学理の確立と、電流励起有機半導体レーザーや室温長寿命有機蓄光材料等の革新的有機光デバイスの創成を行っており、戦略目標「環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築」の達成に資する十分な成果が得られたと評価する。

1. 研究プロジェクトの設定および運営

1-1. プロジェクトの全体構想

近年、有機 EL ディスプレイの実用化が本格期を迎えるなど、有機光エレクトロニクスの応用が広がりつつある。安達研究総括は第 1 世代の蛍光分子、第 2 世代の室温りん光分子、第 3 世代 TADF 分子の創出を世界に先駆けて進め、多くの成果を上げてきた。特に、有機 EL デバイスに関して、様々な有機化合物の多様な特性を積極的に活用して正孔輸送層、発光層、電子輸送層からなる有機ダブルヘテロ構造を提唱した成果や、FIRST プロジェクトにおいて第 3 世代の TADF 分子での三重項励起子から一重項励起状態への変換を利用して 100% の量子効率で発光させた成果は、有機光エレクトロニクスの新たな研究領域を産み出しただけでなく、産業への展開を産み出している。しかし、有機光エレクトロニクス材料・デバイスの社会への導入はいまだ限定的で、その適用を飛躍的に拡大していくためには、無機材料・デバイスを凌駕する性能、遜色のない信頼性の実現が必須である。

このような状況の中、安達研究総括は有機光エレクトロニクスの更なる展開に挑戦すべく、本 ERATO プロジェクトにおいて、FIRST プロジェクトの成果である TADF の学理を一層深化させ、FIRST よりもさらに先へ進む目標として世界で未だ誰も実現していない“有機半導体レーザーの実現”を中心とする複数の大胆で挑戦的な出口デバイスを目標として掲げた。そしてそのデバイスを実現すべく、材料（有機光化学）、デバイス（電子工学）、プロセス（ナノ微細加工技術）の研究者が融合して研究を推進する構想を提案した。これは、ERATO らしい科学技術の潮流を作りつつ社会・経済の変革にも繋がる成果を産み出そうとする研究構想であり、十分に先進的、かつ創造的なものであると認められる。

この構想の中で、ブレークスルーを産み出す中核となる基盤は TADF を中心とする有機材料中のエキシトンの学理の発展であると想定されている。例えば、レーザーでは、従来の有機エレクトロニクスでは考えられなかった高密度電流励起下の励起子の基礎過程に焦点を当て、新規デバイスを実現するための新材料創製、分子励起状態の放射・熱失活制御、電子、励起子、光子の統合シミュレーションなどに取り組むことをプロジェクトの柱とした。

本プロジェクトの基本構想の特徴は、“有機半導体レーザーの実現”等の明確な目標を掲げ、様々な専門分野のプロジェクトメンバー全員が一丸となって、基礎から応用までをカバーした多面的な研究に取り組むところにある。FIRST の設備、人材、知財を引き継ぎつつ、特色あるプロジェクト型研究の遂行を通じて社会・経済への波及効果も十分に見込めるインパクトのある成果を目指す研究構想であった。

1-2. プロジェクトの目標・計画

前記の挑戦的な構想に基づいて成果をあげるべく、本プロジェクトは①電流励起有機半導体レーザー

の実現、②室温長寿命有機蓄光デバイスの実現、③量子効率 100%を超える OLED の構築に具体的に取り組んだ。いずれも難易度が極めて高いが、大変に明快かつ魅力的で研究者の意欲を掻きたてる目標である。いずれも具体的な応用デバイスを視野に入れた研究目標を設定した。一方、この目標を達成するには、分子エキシトン工学をはじめとする基本原理の理解との深化、それに基づいた材料設計や薄膜構造制御といった基礎学理上のブレークスルーが必要であった。このため、本プロジェクトにおいてはこの基礎学理と応用の両立が鍵であり、これに対する緻密な計画を立てた。

例えば、電流励起有機半導体レーザーの研究では考えられ得るかぎりの多角的なアプローチが取られた。具体的には、良好な光学特性を有する有機材料や電流注入可能な材料の設計・探索および合成、薄膜多層構造やレーザー共振器構造の設計および作製、レーザー発振に必要な高密度励起時の励起子生成・失活過程の分析、利得媒質内での励起子と光子を統合したシミュレーションなどである。これらの一連の最先端の研究、技術開発を統合・集約して実際に動作するデバイスの実現を指向した。

本プロジェクトの目標は極めて挑戦的であるが、いずれも研究グループの持つ知見を基盤とした学理の上に成り立った合理的なもので、これを実現するための研究計画は大変緻密であったと評価できる。有機材料分野、半導体レーザー分野などでの豊富な経験を有する学識者をアドバイザーとして迎えたことも総合力としてプラスに作用したと評価できる。

また、研究成果をイノベーションへ結実させる計画として、電流励起有機半導体レーザーにおいて、レーザー発振が確認された段階から実用化プランを計画し、ベンチャー企業を立ち上げる資金を自ら獲得して知財の譲渡・ライセンスを進め、イノベーションに向けて切れ目なく次の手を打っていく手法は、他の後継 ERATO プロジェクトにも影響を与えつつあり、良い先行例として高く評価される。

1-3. プロジェクトの運営

上記の目標と計画を実行するために、「分子設計・合成グループ」、「バイオデバイスグループ」、「物性・解析グループ」、「応用デバイスグループ」の4つのグループが設けられた。前記の目標達成のためには相互の連携が重要であり、3つの目標ごとに、それぞれの分子設計・物性解析・デバイス作製の側面から互いに協力して研究が進められた。新規な光デバイスを実現するためには、必要な光学特性と電子物性を明確にしてそれに適した有機半導体材料の設計と合成を進め、それらの材料の特性を考慮して素子構造を決定して最適設計を行い、適切なプロセスでデバイスを作製する必要があるが、これらの一連の研究、技術開発を効果的に連携しながら進めるために、実験物理・デバイス研究者、プロセス工学研究者、有機合成研究者、計算化学研究者が互いに協力し合える体制を構築した。また、共同研究機関にも理論物理、計算化学などの専門家が必要に応じて配置される体制を構築した。これら専門の異なる研究者を集めて研究を遂行することは通常の研究室体制では難しいことである。この取り組みを成功に導いた安達研究総括の手腕を高く評価したい。

さらに、トップクラスの研究者を集積するだけでなく、将来の福岡における国際的な研究開発拠点の形成を意識し、研究者の半数以上を外国人としているのも本プロジェクトの特徴である。研究全体会議は全て英語で行い、普段のミーティングやオペレーションについても英語によるコミュニケーションを基本とした。国際会議やシンポジウム（福岡および海外連携先で開催）を積極的に行い、また異分野も含めた国内外からの招聘研究者セミナーの積極的な開催、海外の先端研究者との交流を活発に行うことで、新しい研究の切り口や異分野の視点を研究者が常に持てるように配慮されている。有機半導体レーザーに関する国際学会の設立や九州大学を有機エレクトロニクスの国際的な拠点とするための準備も進められており、長期的展望と幅広い視野を持って展開された。また、明確な目標に向けてチームや若手研究者に自由度を与えて活動している点も評価すべきであろう。若手の人材育成という面でも十分な成果をあげているのはその結果と考えられる。

知的財産に関しては、ERATO のヘッドクォーター機能の一つとして効率よく特許を出願するためのスペシャリストが配置されている。研究者は研究に専念しつつ、必要な場合には迅速に特許出願する体制が整備されている。

〔研究プロジェクトの全体構想〕 〔研究プロジェクトの目標・計画〕 〔研究プロジェクトの運営〕
a+（十分に的確かつ効果的である）

2. 研究の達成状況および得られた研究成果

2-1. 有機半導体レーザーの実現

従来の有機半導体レーザー研究においては、パルス光励起によるレーザー発振は報告されているが、光励起による連続(CW)発振や電流注入による電気励起有機半導体レーザーは実現されていなかった。

最重要テーマである電流励起有機半導体レーザーについては、本プロジェクトにおいて以下の成果が実現された。(1) BSBCz:CBP を活性層に用いた混合次数 DFB 共振器形素子で、光励起による疑似 CW 発振を達成した。(2) BSBCz を活性層に用いた混合次数 DFB 共振器形素子で、電流励起によるレーザー発振(閾値電流密度は 600 A/cm^2)を確認した。(3) BSBCz:DCNP を活性層に用いて、さらに 100 A/cm^2 まで閾値電流密度を低減する兆候を確認した。(4) 1st オーダーの 2 次元リング状 DFB 構造と 2 次元格子状 DFB 構造によりエッジ面からレーザー光を取り出す構造において、それぞれ閾値電流密度 102 A/cm^2 、 202 A/cm^2 と良好な結果を得た。

今後、(3)、(4)の成果を論文として公表するとともに、閾値電流密度のさらなる低減に取り組んでもらいたい。なお本プロジェクトで実現されたレーザーの動作に関して、一部の評価委員より、当初想定したものと異なるメカニズムによるものでないかとの指摘があった。メカニズムの解明とその理解に基づくデバイス構造最適化によって閾値低減が可能となるかもしれないので、参考にしてもらいたい。

これらの成果は、有機光デバイスの分野におけるマイルストーンとなる重要な成果である。特に電流励起有機半導体レーザーの実現はきわめてインパクトが大きい。優れた材料を採用したことに加えて、無機半導体レーザーの知見に基づいて DFB 共振器構造を採用したことが有効であったと思われる。実用化へ向けて長寿命化という高い障壁を越える必要があるものの、高密度電流注入という極端な条件下でも有機材料が機能することが示されたことは歴史的な意味がある。

なお、今後の課題となる劣化メカニズムの解明とその知見に基づいた有機半導体レーザーの長寿命化については、ジュール熱による電極等の破壊については上記の閾値電流の低下により解決される部分もあるだろうが、高い共振器性能により高キャリア密度が維持されるのであれば材料を含めた対策がさらに必要であろう。

有機半導体レーザー材料についても大きな進展があった。BSBCz は高電流密度化で励起三重項及びポーラロン損失を示さず、またジュール熱に伴う励起子消光を示さない優れた材料であることからスタートしたが、その BSBCz についても電気化学的に劣化する問題が発見され、スチルベン骨格を改良する提案が複数なされた。また三重項励起子の失活過程抑制のための消光材を発見した成果があった。BSBCz 以外の材料探索については、外部研究機関提供のクルクミン誘導体や、励起状態分子内プロトン移動型材料などにより厚みが増してきている。また、将来の溶液塗布型材料への展開へ向けて、BSFCz がトルエン等の汎用溶媒に可溶であることが見いだされた。

2-2. 室温長寿命有機蓄光の実現

電子ドナーである TMB 分子と電子アクセプターである PPT 分子の混合膜で長寿命発光(室温で発光継続時間 1 時間)を実現した。ドナー分子とアクセプター分子の間での電荷移動後に電荷分離状態が形成され、その結果として発光性再結合の時定数が著しく長くなることがこの長寿命発光の基本メカニズムである。この分子間電荷移動と電荷分離・再結合を用いる長寿命発光は、室温で動作する蓄光材料に直結する新規な過程である。これに蛍光分子を添加して電荷トラップによる高性能化を実現した。

この発光材料は 2 つの有機材料(電子ドナー材料と電子アクセプター材料)を偏りのある比率(1 対 100)で混ぜるだけで作製でき、従来の無機蓄光材料と比較してはるかに簡便かつ安価なプロセスで製造できることは重要である。無機蓄光材料で不可欠なレアメタルを一切含まないことも本技術の強みである。また、添加された蛍光材料における TADF assisted fluorescence (TAF) によって添加材料に応じた発色も実現された。色調を変化させるのは有機材料の得意とするところであり、応用の可能性を広

げる成果である。TADF の関係する過程が関与した現象を発見した点も、学理の面から非常に重要な成果であると評価できる。

有機蓄光材料は添加する蛍光材料によって白を含めた様々な色を作れるだけでなく、大面積化や柔軟性、透明性が付与できることなどの特徴があり、今後、塗料や繊維への新たな応用を含め、様々な応用展開が期待される。例えば、大面積非常灯や光源を必要としないバイオセンサーへの応用も期待されるし、ディスプレイや人工光合成など、さらにアプリケーションの幅が広がる可能性がある。

予備評価以降においては、様々なドナー・アクセプタ材料の組み合わせについて、蓄光に至るメカニズムが詳細に解明された。ドナーからアクセプターへの電荷移動によるエキサイプレックスの形成と発光、電荷分離と再結合、ドナー分子の三重項励起状態を経由したりん光などが材料の組み合わせに応じた異なった発光挙動、光強度変化、スペクトルとなって現れるメカニズムが明確となった。

蓄光の発光時間は、メルトキャスト法、スピコート法、真空蒸着法などの成膜方法には依存せず、電荷を保持できる分子数から膜厚に依存することが確認された。蓄光の性能指数の定義は、一般的な発光量子収率とは異なり励起光持続時間にも依存する上、上述のように複雑な発光メカニズムの組み合わせであることから、発光減衰挙動全体から計算する必要があり、残課題となった。今後も継続して検討してほしい。

現状の有機発光の性能は、無機蓄光と比較して約 1/100 に留まっている。この原因は、無機蓄光では賦活剤にキャリア蓄積を行っているのに対して、有機蓄光では同様の深いトラップがまだ実現されていないためと安達研究総括は推測している。この点の解決も今後の課題であり、沖縄科学技術大学院大学の准教授となった嘉部グループリーダーの今後の研究に期待したい。

2-3. Singlet Fission による高効率 OLED の実現

近年の OLED 素子において内部量子効率ほぼ 100%に到達している。本プロジェクトでは、一重項励起子開裂 (Singlet Fission: SF) 過程を適用することで励起子生成効率が 100%を超える OLED 素子を目指した研究を展開した。TADF 過程により三重項励起子を全て一重項励起子に変換し、この一重項励起子が全て一重項開裂すれば 200%の内部量子効率が実現されるはずである。

その実現へ向けた第一歩として、SF を示す有機半導体分子 (rubren:ErQ₃) を OLED の発光層中のホスト材料として用いることで、SF 過程と TADF 過程を融合し、励起子生成効率 112.5%に相当する近赤外発光を世界で初めて実現した。また予備評価終了後は、TADF 層と SF 層の間に三重項ブロッキング層を挿入して三重項励起子の移動を防止する効果を確認した。また、SF 効率を向上する材料の探索のため、分子内に複数の発色団 (一例としてテトラセン) を有する分子内 SF 材料を量子化学計算の手法で検討し、振電相互作用の強さが SF に及ぼす影響の検討を進めた。

SF 自体は既に太陽電池分野では研究が進められている状況にあるが、これを発光デバイスに適用する場合でもエネルギー利用効率が向上するわけではなく、むしろ、効率的な赤外 OLED を実現するところに社会・経済的な価値が見いだされる可能性がある。そのためには近赤外発光材料の効率向上も課題であるし、無機赤外 LED や従来の OLED と比較したベンチマークも必要となろう。

2-4. ペロブスカイト材料の活用

ハロゲン化金属ペロブスカイト型材料については、最近、太陽電池分野で実用化に向けた研究が加速度的に進展している。本プロジェクトにおいては太陽電池の耐久性向上に取り組んだだけでなく、ペロブスカイト材料を用いた発光素子の研究にフォーカスした。ペロブスカイト材料は有機材料と比較して高い電子・正孔移動度を有し、有機材料と同様の低温プロセスが適用可能であることなどを有効に活用した新しいアイデアであり、有望な展開と期待できる。

第一の成果は、高キャリア移動度のペロブスカイト半導体 CH₃NH₃PbCl₃ を電子・正孔輸送層に用いて、TADF 材料(4CzIPN)やりん光材料 (Ir(ppy)₃) を発光層に用いる新構造を採用した有機発光分子/ペロブスカイト積層有機 EL を実現し、有機発光層から内部量子効率 100%の発光を実現したことである。輸送層の膜厚は、従来の常識よりも 10 倍厚い 1 μm であるが、高移動度であるために十分な発光強度

を得ることができている。電荷輸送層の厚膜化は、電極表面の傷や異物等に起因する漏れ電流の低減につながり、OLED の耐久性向上に大きく寄与することから、産業への展開も期待できる。また、厚膜化により干渉による発光色の角度依存性も抑制された。

擬二次元ペロブスカイト膜において、一重項励起状態と三重項励起状態のエネルギー差が小さい場合には、TADF 性有機分子のように逆系間交差によって非発光性の三重項励起状態が発光性の一重項励起状態に変換され、その結果、遅延蛍光として高効率で発光していることを見いだしたことが第二の成果である。

第三の成果は、ペロブスカイトトランジスタの移動度向上である。二次元ペロブスカイト半導体 PEASnI_4 をチャンネルに用いた FET でホール移動度 $26 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を実現した。さらに結晶性向上や溶液冷却法を用いた粒界密度低減を進めた結果、 $50\sim 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高いホール移動度と電子移動度が実現された。結晶性ではないペロブスカイト膜としては世界トップクラスの移動度である。

レーザー発振に関しては、光励起での発振の兆候（発光スペクトルの狭線化）が確認されているが、素子の劣化や消光の問題をかかえており、電流励起レーザーの実現にはまだ多くの課題が残されている。今後もハロゲン化金属ペロブスカイトの高いキャリア移動度および成膜性を利用して、電荷輸送層やホスト層に活用した電流励起型ペロブスカイトレーザーの実現を目指してほしい。

〔研究の達成状況および得られた研究成果〕 a+（十分に高い水準にある）

3. 研究成果の科学技術、社会・経済への貢献

3-1. 科学技術への貢献

電流励起有機半導体レーザーの発振は、世界初の成果であり極めてインパクトが大きい。有機材料が高密度電流注入で機能することを実証した功績は大きく、この点だけでも本プロジェクトの成果として十分な内容である。これまで無理であろうと思われてきた技術の可能性を示唆するものであるため、今後の有機光エレクトロニクス分野の新たな潮流を作り出すものである。技術史的にも、電圧印加で動作する液晶、低電流密度の電流励起で動作する OLED に続いて、有機材料の能力を一段引き上げたエポックメイキングな成果として高く評価する。このことから、科学技術の新しい潮流を産み出す新技術シーズを創出したという点で ERATO らしい成果と認定できる。今後も引き続きこの領域を先導し、この成果を実用化可能な技術へ発展させて行くことが期待される。

室温長寿有機蓄光体は、TADF メカニズムと分子間電荷移動・電荷分離のメカニズムを組み合わせた新たな技術シーズである。分子のエネルギー状態とその遷移の観点から有機蓄光に至るメカニズムを詳細に解明できた学術的成果は非常に重要で、特に、蛍光、りん光、TADF 等に電荷分離を加えた現象を、蓄光により長時間スケールに拡大して共通理解としたことは、エキシトン系の学理の展開の幅を広げる成果であると言える。今後は、無機蓄光を含めた他の様々な技術とのベンチマークを行いつつ、より強力なテクノロジーに発展させさせてほしい。

ハロゲン化金属ペロブスカイト材料については、太陽電池分野では既に実用化に向けた研究が進みつつあるが、この材料を有機エレクトロニクスや発光の観点から有機材料と組み合わせて活用する取り組みには新規性があった。厚膜 OLED という実用レベルの成果を含めて複数の研究成果が出ているが、今後は研究チームの強みを考慮してターゲットを絞り込み、次につながるアウトプットをまとめることを期待する。

Singlet Fission も、太陽光発電関係では既に登場している技術ではあるが、発光の観点からエキシトン分裂現象の効果を部分的に実証した成果は意義がある。赤外発光への展開に期待したい。

また、基礎的な研究成果として、TADF 発光における励起状態ダイナミクスの解明、Light-emitting Electrochemical Cell (LEC)、コンビナトリアル DFT 計算による青色 TADF 材料の開発等において、TADF 分野の国際的な研究をさらに先導していく成果が得られた。安達研究総括は、Clarivate Analytics 社の Highly Cited Researcher に 2019 年 1 月に選出されている。

これらの成果を産み出す体制として、電流励起有機半導体レーザーにおける分野融合の国際チームの

形成、新規発光材料や量子化学計算において諸外国のスペシャリストと行った国際共同研究等については、本科学技術分野の国際的な活性化と、日本のリーダーシップの発揮の点で大きな貢献があったと認められる。

最後に、安達研究総括は ERATO でのエキシトンの知見を元に新たな挑戦的な研究テーマを設定しようとしており、是非、有機材料の可能性をさらに広げてより太い科学技術の潮流に発展させてほしい。

3-2 社会・経済への貢献

安達研究総括が ERATO 以前から明確な実用化ターゲットを睨みつつ TADF 等の基礎研究を積み上げてきたことに敬服する。ERATO プロジェクトにおいてもデバイスターゲットを明確にして社会・経済に貢献できる新たな成果を産み出した。まず、電流励起有機半導体レーザーについては、予備評価の時点では産業界が興味を持つ成果ではなかったが、閾値電流低減等の技術課題を解決しつつ、ビジネス領域を明確化してベンチャー資金を獲得することにより、国際的な研究メンバーを CEO/CTO として 2019 年 3 月に KOALA Tech 社を立ち上げた。このリーダーシップには敬意を表したい。

室温長寿命有機蓄光については、現段階では新たな蓄光メカニズムを発見しその現象の詳細を解明しただけであるが、その将来的な社会・経済的な波及範囲は広い。有機材料ならではの加工性やコストから、無機蓄光材料で制約となっていた領域へアプリケーションを広げることが期待される内容である。性能も含めると、現時点では無機蓄光材料と用途毎にベンチマークを行った上で、さらなる研究開発により強みのある用途が具体的に示せるようにする必要であろう。

ハロゲン化金属ペロブスカイト材料の活用に関して報告された成果のいくつかは、今後、産業界が興味を持つ可能性のある内容であり、早期に交流を進めることを勧めたい。ペロブスカイト材料自身の発光機能を活かしたレーザーをはじめとする発光デバイスへの展開も、中長期的な視野を持って進めてほしい。

本プロジェクトの成果である 47 ファミリーの知財成果のうち 32 件は、ライセンス先や譲渡先が出口戦略を考慮して明確に決められており、社会・経済への成果展開シナリオとしてユニークな手法として評価できる。大規模プロジェクト終了後の外国出願費用の増加が研究機関の負担となり特許放棄となる例が散見されるが、逆に知財を生かしたベンチャー企業の実立により好循環を産み出す取り組みとなっている。

有機エレクトロニクスは無機に比べて歴史が浅いが、有機導電性材料の発見、導電性高分子の発見などが社会・経済に与えたインパクトは決して小さくない。本プロジェクトは、TADF を中心とした新規有機材料が有機光エレクトロニクスの分野に革新を引き起こし、ひいては社会・経済に貢献できる可能性があることを示したプロジェクトとなった。今後、本プロジェクトの成果に触発された国内外の産官学の研究者を集結してさらに大きな成果を生み出すことを期待する。

〔科学技術への貢献〕 〔社会・経済への貢献〕 a+（十分な貢献が期待できる）

4. その他特記すべき事項

4-1. 若手研究者支援

若いメンバーが生き活きと楽しそうに研究していることを高く評価する。これは日本の科学技術の将来を考えると非常に大事なことである。若い研究者の意欲を掻きたてる有意義かつ挑戦的な研究課題を設定し、自発的に研究を行える環境を整えたことは、安達研究総括の指導力はもちろんのこと、各グループリーダー、プロジェクトヘッドクォーター各位の努力の賜物である。関係した若手研究者は、中国の浙江大学や韓国の梨花女子大学、Samsung 電子、スリランカのサバラガムワ大学、ポーランド Lodz 大学などへ転出しており、海外で幅広いキャリア展開が見られる。これに対して国内では、アカデミックポジションの獲得として沖縄科学技術大学院大学への准教授としての転出はあるが、大学内部での昇格や国内企業での活躍が比較的目立たない。これは本プロジェクト固有の問題というよりは現在のわが国の抱える問題と捉えるべきであるが、今後の課題であろう。

4-2 グローバルな研究連携体制

研究人材の受け入れに関して、国内では九州大学内部はもとより北陸先端科学技術大学院大学、早稲田大学、京都大学、山形大学、物質・材料研究機構、産業技術総合研究所、九州先端科学技術研究所、福岡雙葉学園、沖縄科学技術大学院大学、サムスン日本研究所などから研究者を受け入れている。また、海外からもエクス・マルセイユ大学、梨花女子大学などから研究者を受け入れている。このような人材を活用する上で、英語を公用語として日常の研究活動を進めるスタイルは、国際化時代のプロジェクトとして手本になるものである。

また、海外との共同研究も積極的に行い、海外研究機関と交流を活発に行うとともに、国際シンポジウム（福岡、スリランカ、中国で開催し、フランス、オーストラリアに引き継がれた）を開催し、この研究領域の国際協力を一層緊密なものとした。フランス国立科学研究センター（CNRS）の Dr. Anthony Daleo とは TADF 材料に関連して連携成果が生まれ、オーストラリアのクィーンズランド大学と国際的な研究アライアンスの構築を進めたことなど、ERATO の枠を越える体制を構築したことは顕著な成果であると言える。

5. 総合評価

材料、物性からデバイスまで、有機発光デバイスの新展開をもたらす重要な成果が得られており、高く評価できる。特に、電流励起有機半導体レーザーの発振の成功は、有機材料を光エレクトロニクスの世界で新たなステージへ押し上げる歴史的な成果である。この1点だけでも十分な成果と評価してよい。また室温長寿命有機蓄光の実現も“Zero to One 型”の成果と位置づけられる。

安達分子エキシトン工学プロジェクトは、研究総括の強力かつバランスの取れたリーダーシップのもと、国内外からその分野のエキスパートを招聘し、化学、物理、電子工学の専門家が連携する研究体制を構築した。その結果として、前記のインパクトの高い研究成果だけでなく、各種励起子の基礎課程のさらなる解明、新材料の創出等においても光科学における基盤的な研究成果の蓄積もなされた。また研究組織の運営の観点でも、若手研究者が生き生き活躍できるプロジェクトとして模範となる取り組み方法が示された。さらに、立ち上げたベンチャー企業へ成果の実用化を引き継ぐ体制を構築した。

以上を総合し、本プロジェクトは、有機半導体中のエキシトンを制御して効果的な発光に結びつける分子エキシトン工学の学理の確立と、電流励起有機半導体レーザーや室温長寿命蓄光技術等の革新的有機発光デバイスの創成を行っており、戦略目標「環境・エネルギー材料や電子材料、健康・医療用材料に革新をもたらす分子の自在設計『分子技術』の構築」の達成に資する十分な成果が得られていると評価する。

〔総合評価〕 A+（十分な成果が得られた）

以上