

プロジェクト事後評価報告書

評価委員会開催日：平成29年1月17日

評価委員：（敬称略、五十音順）

青柳克信 立命館大学 総合科学技術研究機構 上席研究員

黒田一幸 早稲田大学 先進理工学部 応用化学科 無機合成化学分野 教授

重川秀実 筑波大学数理物質系 教授

確定年月日：平成29年4月7日

プロジェクト名	システム・ナノテクノロジーによる材料の機能創出
研究責任者の所属・役職・氏名	フェロー/国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・拠点長・青野正和
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>最近の20数年間のナノテクノロジーの進展は、材料開発に2つの面において重要な新展開をもたらした。1つは、特異な性質をもつ未知のナノ物質が次々と発見されたこと、もう1つは、既知の物質でもナノ寸法の構造制御によって特異な未知機能を発現することがよく認識されたことである。これらの新展開は、ナノテクノロジーを用いた材料開発の未来に輝かしい夢を抱かせた。しかし、そのような期待に応えた材料開発の実例はまだ少ない。特に、革新的な実用材料の開発にまで至った例は限られている。これは材料開発を支えるナノテクノロジーに何かが不足しているからである。興味深い特異な性質を持つナノ物質やナノ構造も、それらのユニットを単独あるいは単なる集合体として用いる限り、そこから得られる機能は従来の物性論で予測できるものから大きくは脱せない。特徴的な性質を持つナノ物質やナノ構造を互いに有機的に相互作用するよう適切に組織化し、それによってこれまでの常識を超える革新的な機能を発現する新材料を開発しなければならない。本プロジェクトの目的はそれを実現することにある。</p> <p>本プロジェクトによって、21世紀の持続可能な社会の実現に必要なさまざまな革新技術を可能にする新材料の開発を著しく加速することができ、その意義は極めて大きい。</p>
研究内容	<p>（1）情報通信技術および（2）各種センサー技術に革新をもたらす新材料の開発に重点を置く。（1）については、従来の情報通信技術を支えてきたシリコンCMOS（相補型金属酸化膜半導体）デバイスが間もなく限界を迎えることを見据えた“Beyond CMOS”ナノエレクトロニクスの開発に向けた原子スイッチおよび関連するナノイオニクスデバイス、有機/無機複合デバイス、グラフェンデバイス、分子デバイス、超伝導量子情報デバイス、ナノ超伝導デバイス、さらに原子スイッチの学習機能を利用した脳型演算記憶デバイスなどに関わる研究を行う。（2）については、現今の環境の監視と制御の重要性に鑑み、超高感度分子センシング（単分子時空間センシング）、超並列分子センシング、テラヘルツ電磁波の発生と検出、ナノ点光源X線発生によるセンシング、細胞内外の信号伝達の新解析法などの研究を行う。</p>
ミッションステートメント （具体的な達成目標）	<p>重要なミッションは次の2つである：</p> <p>（1）情報通信技術に革新をもたらす新材料を開発し、かつその具体的な応用を実例をもって示す。</p> <p>（2）各種のセンシング技術を革新する新材料を開発し、かつそれを用いた新しいセンシング技術を具体的に示す。</p>

<p>平成23年度～平成27年度までの主な研究成果(アウトプット)及び研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト)</p>	<p>1) 主な研究成果(アウトプット) :</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子スイッチの実用化(NEC AtomSW-FPGA)が達成された。これは我が国が世界に向けて発信する独創的で革新的なエレクトロニクスデバイスである。 ・固体表面の巨視的な超伝導電流を世界で初めて観測した。これは、世界の超伝導の分野の研究者からきわめて高い評価を受けている。その理由は、新しい超伝導デバイスの開発に大きい一歩を踏み出すものだからである。 ・プラズモニクスの赤外線領域への拡張とその利用に成功した。これは、光-熱エネルギー変換の観点から非常に重大な意味をもつ。 ・新しい高感度分子センサー(MSSセンサー)の開発に成功し、実用化に向けての研究を着々と進めている。全国的なコンソーシアムの形成にまで至ったことは、今後の分子センシングに重大な波及効果を及ぼすものである。 ・ナノテクノロジーの研究を強力に推進するためのナノスケールでのマルチ走査探針法の開拓が予想以上に進展した。これは、ナノ計測の将来に明るい展望を拓くものである。 ・新超伝導物質の発見(BiS₂系新超伝導体など)は、まだまだ新しい超伝導物質の発見がありうることを強く示唆している。 <p>2) 研究成果から生み出された(生み出される)効果・効用(アウトカム)、波及効果(インパクト) :</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子スイッチは、それがサイズおよびエネルギー消費量において小さいだけでなく、電磁ノイズおよび放射線に対して強いがゆえに、NEC AtomSW-FPGAとして実用化された。これは、IoTの世界に革新をもたらす可能性が大きい。 ・固体表面の超伝導(巨視的な超伝導電流)を初めて観測したことは、新しい超伝導デバイスの開発に明るい未来を拓くものである。 ・プラズモニクスの赤外線領域への拡張が可能であることを示したことは、我々の社会の光と熱エネルギーの変換の技術に革新をもたらすであろう。 ・新しい高感度で並列形式の分子センシング法としてのMSS法の開発は、それが全国的でかつ企業を含むコンソーシアムの形成につながったことから分かる通り、この方法の社会へのインパクトに大きい期待がかけられる。 ・ナノスケールでの計測のためのマルチ走査探針法の開発は、研究開発の基礎を支える地味なものであるが、それだけにむしろ波及効果は大きい。
<p>プロジェクトの目標の達成度合い及び自己点検・評価</p>	<p>プロジェクトの目標の達成度合い :</p> <p>本プロジェクトでは、ナノスケールの特異な性質を示す物質を組織化して、ナノスケールでシステムとしての新機能を発現せしめることを目指してきたが、5年間の研究を経て、その目標を達成するとともに、予期しなかった成果がいくつも得られており、目標を十分に上回ったといえる。</p> <p>自己点検・評価 :</p> <p>予期しなかった成果として、原子スイッチが最も進化した集積回路であるFPGAとして実用化されたこと、新しい分子センサーが臭いセンサーとして実用化に近づき全国的なコンソーシアムの形成に至ったこと、赤外線という長波長領域でのプラズモニクスの開拓が予想を上回って進展したことなどが挙げられる。これらは高く自己評価できると思う。</p>
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント</p>
<p>①研究計画、実施体制、マネージメント、連携 (事前・中間評価の結果を受けて、ロードマップに問題はなかったか、実施体制は十分だったか、マネージメント)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・極めてチャレンジングな目標を掲げてのロードマップであり、ロードマップ自体に問題はない。 ・そもそも左記評価項目において、このような基礎研究並びにそれから発生する応用研究においてロードマップの概念を入れ込むことに問題がある。 ・本来の意味においてのロードマップは年度ごとの数値目標を想定するものであり、研究計画とは異なったものである。

<p>の是非、連携の範囲や連携課題、連携の成果はどうだったか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ロードマップは研究を一つの方向に縛り付ける意味合いを持っており、基礎研究は研究の実行段階において、そこから発生する研究の必然的な進展、また、そこから派生的に出てくる多くの成果がむしろ重要で、期待されるものである。 ・このような問題の設定者は、すぐロードマップはそれに伴う数値目標を期待するが基礎研究並びにそれから発生する応用研究においてはこのロードマップという概念は研究者に自由な発想を妨げるもので百害あって一益なしである。この課題の設定者に熟考をお願いしたい。 ・以下ここでいうロードマップを研究計画と読み直す。 ・研究課題（ここでは評価説明資料の表（2）に記入されているロードマップ）においては、ナノテクノロジーの研究の中で新たなナノアーキテクトロニクス概念のもと、単に世界でよく行われているナノテクノロジー、ナノサイエンスにとどまらずその上位概念であるナノ構造、材料に機能を持たせようとする新たな概念で、NIMSに置かれた人材と環境の中で最大限に力を発揮できる課題選択となっている。 ・特にナノシステム、原子エレクトロニクスシステムに対応する原子スイッチは特筆すべきものでそれ自身を産業化することに成功し、また新たに、脳回路のシミュレーションにも成功していることからきわめて妥当な課題であり、それを可能とした研究計画はきわめてよく練られている。 ・他の研究課題もきわめて優れた成果を出しており、これは逆に言うと妥当な研究計画であったといえる。 ・人員、研究費も相当程度投入してのプロジェクトで、リーダーの意思がプロジェクト内に共有され、適切なマネジメントであったと評価できる。 ・外部グループとの共同研究も推奨され高質の成果が多く発表された。 ・他の課題との連携は中間報告でも指摘されよく言われることであるが、サブテーマの1（ナノシステム構築）、2（原子エレクトロニクスシステム）、3（有機/無機複合デバイスシステム）の連携はきわめて大きくそれに伴って優れた成果が生み出されている。 ・中間評価で指摘があったグループ間の連携については、異分野融合プロジェクトを公募して資金提供するなど、興味深い試みが進められ、それにより実際に多くの成果が出ている。 ・他のテーマ間の連携は青野プロジェクトリーダーの努力もあり、中間報告から発展していると評価されるが、研究の性格上直接的な連携はさほど大きくない。 ・中間評価で指摘のあったサブテーマ間の連携による相乗効果については、リーダーの働き掛けで成果が生まれつつあるようだが、より目に見える形でのアウトプットがあれば、さらに高く評価されたであろう。 ・CRESTをはじめ、毎年、2億円ほどの外部資金を獲得しており、成果の発信を含め、全体のマネジメントは良好と考える。 ・むしろテーマ間にとらわれず、他の日本や世界の研究機関との共同研究が進んでおり、それがCRESTや外国との共同研究等の外部の研究者も抱き込んだ新たな研究組織として発展していることはその分野で妥当な連携がなされていると考えられる。
<p>②プロジェクトの具体的な達成度 （目標は達成されたか、学術的価値、社会的価値、経済的価値の創造につながったか、技術レベルの向上につながったか）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・多くの画期的成果が生まれ、当初目標は達成されたと判断する。 ・学術的価値も高く、プロジェクト開始時に基本的な原理は発明・解明されていたテーマからも、この5年間に学術的に極めて優れた多くの成果を発信している。 ・本研究は国際的にもまた産業的にも際だった成果を上げている。 ・特に原子スイッチの実用化にむけてはマテリアル開発がこの5年間に進展したことによるもので、プロジェクトの成功を示す象徴的な例である。 ・従来のFETを想定したスイッチの概念とは全く異なって、アトムスイッチはきわめてオリジナリティの高いものであり、それを、NECを通して産業化ま

	<p>で持って行ったことは高く評価される。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・原子スイッチが新しい仕組みに展開し、ノイズの影響を受けることが少ないデバイスとして、既に実用化されたり、各種センサーの実現など、いずれも社会的な価値を持ち、基礎的な研究だけでなく最終的には実用化を目指す本プロジェクトの成果が表に現れる点で、大きな成果である。 ・またこのアトムスイッチの開発の原点となったSTMにおいてマルチプローブSTMの開発に成功し、基板表面での興味ある分子の導電性の測定、表面での分子配列の制御とその電気的特性の観測等今まで不可能であった計測を可能にしており高く評価される。 ・いくつかの研究機関でも最近同様の多探針STMを作り表面の電気的特性の計測がなされ始めており、本研究の先駆性がうかがわれる。 ・また、高感度分子センサーの開発、プラズモニクスの赤外線領域への拡張、固体表面での巨視的超伝導の観測、BiS₂の新たな超伝導体の発見等、際立った成果を上げており、それぞれは全国的なコンソーシアムへの発展、国際共同研究への発展、CREST等への共同研究を主体として予算の獲得へと発展しており、日本並びに世界の学術的、社会的、経済的価値の創出に大きく貢献している。 ・今後も社会的経済的価値の創造と増大に繋がる成果が生み出されるものとの期待が高い。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果は、世界レベルで比較して高いか、予算に見合った成果が得られたか、将来の新しい研究の芽が得られたか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・一流のジャーナルに多数の論文を発表し、文句なしに高い世界レベルにあり、影響力のある成果発信が十分に行われたものと評価できる。 ・この研究の成果は著名な論文誌への多くの掲載、著名な国際会議への多くの招待講演、国際的な総説記事、特許、国際共同研究としてあらわれており、十分な成果を得ていると評価される。 ・本プロジェクトは世界レベルの研究所の評価軸の上でトップクラスにある。 ・世界トップにあるとする意味はその評価軸だけでなく、独自の尺度でも必要であると思うが、その意味でも本プロジェクトは非常に高いレベルの成果を挙げるとともに、新たな太い流れを創り出すきっかけを示したと判断する。 ・本研究の成果は新たな分野創出に成功しているか、その分野の中で学術的なもの、産業的なもの、波及的なものの成果を出しているか、将来の新たな芽を出しているかが予算との関連において評価されるべきである。 ・新たな概念の創出はWPIのナノアーキテクトロニクスという新概念にリードされ研究が実行される中でその概念は世界に定着していった。 ・その中で得られた成果はアトムスイッチの実現を始めそれを用いた脳回路のシミュレーションの実現等をはじめとして世界的に顕著な成果を上げており、またアトムスイッチの産業化に成功した。 ・原子スイッチの展開としてシナプスと関連した結果は、新しい世界を拓く研究の成果であろう。 ・またアトムスイッチを用いたシナプス動作は将来の脳型素子の実現の芽を与えるものであり、多探針AFMはこれからの分子、原子レベルでの表面電気的特性の評価にはなくてはならないものとなろう。 ・マルチ走査探針法は、世界的に見て成功例が少ない技術であり、非常に困難な手法であるマルチ走査探針法の技術開発・実現は、それ自体、今後、幅広い分野で活用されていくことが期待されるが、材料開発の新たな芽を生む可能性を持つ点でも意義ある成果である。 ・波長選択型マイクロ赤外センサー、分子センサー、新規電気二重層トランジスタ開発、原子スイッチの実用化など、新たな技術開発が進んだことは、高く評価される。 ・本研究の予算は新たに提案されたシステムナノテクノロジーによるナノ材料の機能創出という、ナノテクノロジーのしかるべき次のステップを的確に捉えたプロジェクトにおいて、そのやるべき項目の重要性和多さの中でNIMSが持ちうる人材と施設を最大限生かした研究計画と実施体制となっており、

	それを実現する努力の跡が見て取れる。
<p>④見込まれる直接の成果(アウトプット)、効果・効用(アウトカム)や波及効果(インパクト) (質の高い論文・特許が多く出たか、新技術や実用材料につながるか、思いがけない成果があったか、他分野への波及効果はあるか)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 極めて質の高い成果が論文・特許として公開され、それらが新技術・実用材料に結実している点は高く評価できる。 ・ 年100件以上(全571件)の招待講演、Nat. Mater. など年100編程度(全487編)の高レベルの発表論文、特許約150件、受賞約40件は、世界的にも高水準で卓越した成果と言える。 ・ 本プロジェクトの最大の成果は従来の半導体スイッチとは全く概念を異とするアトムスイッチの発明と実用化である。 ・ アトムスイッチの基本的な概念自身は本プロジェクトの代表者である青野によってSTMをもちいて本プロジェクトが開始される前に発明され原理実証されていたが、それをTa₂O₅等の材料でSTMを用いることなく半導体プロセスの中で実現可能にし、それを実用化までこぎ着けたことが最大の成果である。 ・ このアトムスイッチはノイズに強く、ロボットやスペースへの応用等が開始されており、さらにこのアトムスイッチをいくつか構成することにより脳型のデバイスを作り上げたことは世界的にも高く評価される。 ・ 原子スイッチでも脳型コンピュータ実現に向けての展開が期待される。 ・ また新たな高感度分子センサーを開発しその実用化に成功しこのセンサーを中心に全国的なコンソーシアムが形成され、さらにその発展が進んでいることは特筆に値する。 ・ またマルチプローブAFM、STMの開発は今後の表面関連の電気的特性を明らかにする上で強力な武器となると考えられる。 ・ また固体表面の巨視的超伝導電流の観測、プラズモニクスの赤外領域への拡張等、トップレベルの成果が多く出されておりそれはNature Materials、やNature Nanotechnology等著名な雑誌に出版され、また多くの仕事はAdvanced Materialsに代表されるようなIFの高い雑誌に掲載され多くの引用がなされており、これらは本プロジェクトがきわめて高い質を持ちつつ、活発な研究活動がなされたことを示している。 ・ 得られた成果は、理論、モデリングや材料開発の両面で強いインパクトを与えており、他分野への波及効果も認められる。 ・ またナノテクノロジーと化学の融合、ナノテクノロジーと基礎物理の融合、理論との融合もなされており、異分野間の融合という点でも高く評価される。 ・ これらの結果は将来の量子コンピュータを念頭に置いた新量子ビット形成の可能性、BiS₂の新超伝導体材料の開発にともなう新たな未来の材料系の先駆けを示しており、本プロジェクトの成果は多大であると評価できる。
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>9.3点 (小数第二位四捨五入)</p>
<p>その他 研究全体に対する総合的な所見、①～④に入らない所見、問題点、あるいはプロジェクトに対する印象など自由にご記入ください</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 総合的に極めて優れた成果が得られており、NIMSを代表するプロジェクトといえる。 ・ 研究における完全性は存在しないものであって、評価すべきはいかにこの研究が世界のトップレベルにあって大きな波及効果、成果を学問的、産業的に与えたかでもって評価すべきであって、それがそのトップに位置している限りは10点をつけるべきものと考えられる。 ・ この観点から、研究の完全性ではなく、この研究プロジェクトが10年間になし得た価値がほぼ満点に相当するかどうかもって評価した場合、結果的にはこのプロジェクトはほぼ満点に近い点(~9.5)と考えてもよいのではないかと思われる。 ・ 物理的な観点からナノテクノロジーの開拓を推進し、多くの新しい成果が得られている。

	<ul style="list-style-type: none"> ・これに加えてさらに予期しない成果が将来どのように評価されるかは将来の歴史が決めていくことである。 ・外部資金の獲得も十分に達成されており、高い評価を行って問題ないプロジェクトであった考える。 ・今後は若手研究者の育成にも注力されてより強靱な組織としての展開されることを期待する。 ・世界の研究機関とは同じ価値観の上で競争する必要はなく、真に革新的な原理、新概念の発見や物質研究に注力されればよく、国際的なトップ拠点として独自の歩みを進めて頂きたい。 ・いろいろな大きなプロジェクトにおいてすべての点において模範的に優れていたのを10点とするという今回提示されている判断基準はプロジェクトの完成度が完全でなければ10点でないということを暗に示唆しており、これは、10点はつけてはならないということをいっているのに等しく、誤った評価を与えることとなる。
--	---

第3期中長期計画プロジェクトの事後評価基準

評価点	評価	評価基準
10	S	全ての点において模範的に優れていた。 多くの点において模範的に優れていた。
9		
8	A	総合的に優れていた。 顕著な成果が出た優れたプロジェクトであった。
7		
6		
5	B	平均的なプロジェクトであった。 一部の計画の見直しが必要であった。
4		
3		
2	C	期待されたほどではなかった。 計画を大幅に見直して実施すべきであった。
1		