

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16日

評価委員：（敬称略、五十音順）

下山淳一 青山学院大学 理工学部 物理・数理学科 教授
 田中雅明 東京大学 大学院工学系研究科 電気系工学専攻 教授
 田中陽一郎 山形大学大学院 理工学研究科 教授
 山部紀久夫 筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授

確定年月日：平成29年4月7日

プロジェクト名	先端超伝導材料に関する研究
研究責任者の所属・役職・氏名	機能性材料研究拠点・副拠点長・宇治進也
実施期間	平成23年度～平成27年度
研究目的と意義	<p>超伝導研究は、電力輸送や超伝導磁気エネルギー貯蔵、核融合炉利用などの高効率次世代エネルギー分野、省電力超高速デバイス（超伝導デバイス）で代表されるエレクトロニクス分野、リニアモーターカーや高効率モーターなどの環境低負荷輸送分野、画像診断や治療用粒子線加速器などの次世代医療分野等、幅広い分野で日本が現在抱える技術的課題を根本的に解決できるポテンシャルを持ち得る一大基幹研究分野である。その一方で、1980年代の銅酸化物高温超伝導体の発見が引き起こした世界的スケールの超伝導研究フィーバー以来、日本は超伝導物質開拓、物性解明、さらに応用研究の幅広い分野で常に世界をリードしてきた実績を持っている。</p> <p>本プロジェクトでは、NIMSの超伝導研究の高いポテンシャルを最大限に生かすため、NIMS組織内で分散していた第一線の超伝導研究者を糾合し、新超伝導物質開発、超伝導機構解明、デバイス・線材応用に関する基礎研究を総合的・包括的に実施する。それにより、日本が現在抱える上記（特に環境・エネルギー分野における）技術的課題の根本的解決に貢献することを目的とする。本プロジェクトはNIMSのスケールメリットを最大限に活用する大規模な超伝導基礎研究であり、本プロジェクト遂行により、現在の日本の超伝導研究の優位性をさらに確固たるものとする。</p>
研究内容	<p>本プロジェクトは、下記の4つのサブテーマについて、相互に協力しながら総合的・包括的に研究を実施する。（1）「<u>物質開発と基礎物性評価</u>」では、超伝導研究の根幹となる新規超伝導物質の開発とその基礎物性評価を行い、新規超伝導体の将来応用まで見据えた“材料”としてのポテンシャルを評価する。（2）「<u>電子構造解析と超伝導メカニズム解明</u>」では、超伝導メカニズムの解明を目指し、電子構造の精密解析を狙う。（3）「<u>超伝導磁束量子ダイナミクスとデバイス基礎</u>」では、新規磁束量子現象の発現とそのメカニズム解明を行い、次世代量子デバイス動作原理の提案までを狙った磁束研究を行う。（4）「<u>線材化プロセスと応用基盤</u>」では、省エネルギーに多大な貢献をなし得る超伝導線材応用を目指した基礎研究を行う。</p>
ミッションステートメント（具体的な達成目標）	<p>1) 超伝導科学の進歩の原動力となる新規超伝導物質を発見する。その基礎物性を評価し、材料としてのポテンシャルを評価する。 2) 磁気量子振動測定等や強相関理論を駆使し、既存・新規の超伝導体の電子構造を精密に決定し、超伝導メカニズムを実験的・理論的に解明に貢献する。</p>

	<p>3) 新機能を有する超伝導デバイス構造の開発、新規量子機能の探索、次世代デバイス動作原理の提案、そして磁束量子の直接観察による超伝導電子状態の解明、THz 発振デバイス開発を行う。</p> <p>4) プロセス技術の高度化など次世代高性能超伝導線材製造に関する技術開発を行う。これにより、ビスマス系線材の電流輸送能力を現在の2倍に向上させる。また、Nb₃Al線材の不可逆歪を倍増させる。</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"> ・ 6つの新超伝導物質を発見し、さらに多くの高品質試料を合成し、これらを外部機関に提供し、超伝導物性解明に貢献した。 ・ Fe系超伝導体、有機超伝導体などの電子状態を詳細に調べ、その超伝導特性を明らかにし、超伝導メカニズムの解明、新奇の強磁場超伝導状態の発見、解明に大きく貢献した。 ・ Bi系酸化物高温超伝導体のナノサイズスケール構造体において、磁束量子ダイナミクスを実験的に観測し、渦糸格子融解転移に基づく物理現象を発見した。さらに固有ジョセフソン接合によるTHz発振の研究を発展させ、小型超伝導テラヘルツ光源などのデバイスを開発した。 ・ ビスマス系薄膜(Bi, Pb-2223)で線材中の超伝導体よりも1~2桁高い臨界電流密度を得た。長尺線材の機器適用を積極的に進めた。Nb₃Al線材開発では、目標とした0.6%を超える0.8%程度の不可逆歪を実現できた。また、MgB₂や鉄系超伝導体についても線材化に取り組み、優れた特性を示す線材の作製に成功した。 <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"> ・ 新超伝導物質の世界への発信、高品質単結晶の育成、それらを様々な研究機関へ提供することにより、全世界的に超伝導研究を活発化させ、その進展を支えることができた。 ・ また新しい実験測定手法の開発、新規理論計算手法、新奇現象の発見は、超伝導分野のみならず他分野に波及し、その発展を促すことになった。 ・ 固有ジョセフソン接合や、磁束量子現象に基づいたデバイスの動作原理の提案は、新たな超伝導応用や、省エネ素子などへの応用が期待される。 ・ ビスマス線材き電ケーブルを用いた電車の走行試験や理研他との共同研究による超伝導磁石として世界最高の27.6Tの磁場発生につながった。電力向け直流ケーブルや1.3GHz超高磁場NMRマグネットの将来的な実現へ向けた大きなステップと位置づけできる。
<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> <ul style="list-style-type: none"> ・ 新超伝導体開発、超伝導体の電子状態の解明、実験手法の開発、理論計算の発展、新規磁束デバイス原理提案、ポータブルTHz発振デバイス開発など、多くの点に関して、目標を超える成果を上げることができた。線材開発では、ビスマス系超伝導線材開発では、臨界電流密度(400A/mm²へと向上させる)の数値目標が達成できなかったが(原因は説明資料に記述)、Nb₃Al線材においては、目標とした0.6%を超える0.8%程度の不可逆歪を実現できた。さらに予測以上に実用機器の応用へと繋がった。
<p>【評価項目】</p>	<p>コメント(記入に従い、コメント欄枠は下に広がります)</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</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 研究計画、実施体制等妥当なものであり順当な成果の獲得につながっている。 ・ 実施体制、マネージメントも適切である。

<p>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"> ・ 中間報告で指摘された関連の強いサブテーマ間の連携について、特にサブテーマ 1 (物質開発と基礎物性評価), 2 (電子構造解析と超伝導メカニズム解明), 3 (超伝導磁束量子ダイナミクスとデバイス基礎) 間で積極的に推進したことが評価される。 ・ 大震災や He 不足による障害は仕方がないが、成果への影響は上手く抑制されていたと見られる。 ・ 具体的なデバイスイメージは、研究を加速するとともに関連企業の増加、共同開発の創出につながり、本テーマそのものの拡がりにつながる。 ・ 研究者間の情報交換もしくは得られた成果 (特に新物質や理論) を基にした実用デバイスのアイデアの創出をするべき。 ・ 物質開発と基礎物性評価, 電子構造と超伝導メカニズム, 磁束量子ダイナミクスとデバイス, 超伝導線材への応用にいたるまで、基礎から応用まで幅広く多様な成果を挙げている。 ・ 高効率の電力輸送とエネルギー技術分野, 省電力高速デバイス等のエレクトロニクス分野, 医療分野への貢献を目指し、基礎物質・物性の解析評価技術, 電子構造解析と超伝導メカニズム解明, デバイス化への挑戦を目標に掲げており、国研としての研究の幅の観点で妥当である。 ・ 一方で、実用化に近いサブテーマ 3-4 (線材化プロセスと応用基盤) における事象発見から、材料・物性解析側のサブテーマ 1, 2 側に対する課題提起のアクションがあれば、プロセス化して活用して頂きたい。 ・ 問題点は研究者の年齢層が偏っており、40才未満の人材が非常に少ないことである。
<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"> ・ 総合的に見れば、目標レベルの成果が得られたと見ることができる。 ・ 新物質の発見と作製、新しい超伝導機構の発見などすぐれた成果がある。 ・ しかし、直ちに社会経済的な価値につなげることは難しいだろう。 ・ Liq. He (液体ヘリウム) 問題から研究停滞する可能性もある中、新しい現象やメカニズムの超伝導があり、予想外の成果が出たと言える。 ・ 元々目的がその通りに達成できる課題ではなく、想定しなかった進捗があるテーマが生まれる反面、注目されるような成果に至らないテーマがあつて当然と考える。 ・ 新超伝導材料では鉄系超伝導物質のウィスカー合成に世界初の成功を収めた。 ・ アスペクト比も大きく 22K で臨界磁場 50T を達成した。 ・ これらを通して超伝導臨界温度 T_c を高める物理メカニズムの解明を期待したい。 ・ 特に、磁場印加で超伝導が発現する物質は学術的に興味深く、その機構の解明が待たれる。 ・ 超伝導メカニズム解明では、Fe 原子の 3d 電子軌道間の軌道揺らぎや、BCS から BEC (ボーズ・アインシュタイン凝縮) へのクロスオーバーの関与などを発見し、量子振動測定に成功するなど、超伝導発現のメカニズム解析を裏打ちする成果と考えられる。 ・ デバイス開発では、発振周波数 THz 目標に対してサブ THz 領域ではあるが検証が進んだ。 ・ 発振源技術として、他技術とのベンチマークも実施しつつ、今後の開発の方向性を逐次レビューして頂きたい。 ・ 線材化テーマでは、臨界電流密度の目標 $400\text{A}/\text{mm}^2$ には到達できず、$280\text{A}/\text{mm}^2$ に留まった。 ・ 一方、Nb_3Al 線材では目標を超える不可逆歪 0.8% を実現した。 ・ In-Situ 評価が不十分だった課題に対策を施し、今後の研究フォーカスに織り込む必要がある。
<p>③研究開発の進捗状況 (研究により得られた成果)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎研究 (サブテーマ 1~3) については世界レベルの成果が挙げられている。 ・ NIMS は高い物質科学研究レベルにあり、物質科学をいかに展開させるかの

<p>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>	<p>道作りに対する社会の期待は大きい。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 予算に見合った成果であり、外部資金も有効に使われている。 ・ デバイス開発テーマでは、半導体レーザーや量子カスケードレーザーなどと比較し、THz 発振デバイスの位置付けをレビューした上で応用形態を意識した開発の方向付けを期待する。 ・ 線材化テーマでは、産業界の実用化枠組みとの整合を高め、国研としての学理と実践工法とのバランスを良く検討し、産官の強みを束ねる施策に繋げることを期待する。 ・ 鉄系超伝導ウィスカー合成で $T_c=33K$ を達成するなど、物質・基礎物性解析では世界的レベルの成果を出している。 ・ NIMS の強みである高圧技術、解析技術、結晶作成技術を更に強化し、他機関に対する技術優位性を維持している。 ・ 超伝導体の開発はエネルギー対策にも大きく貢献し得るものであり、芽ばえた研究を加速してほしい ・ 今後は超伝導転移温度や臨界電流密度を上げ、一步でも実用に近づける努力を続けてほしい。 ・ 物質研究は世界の産業、技術の変革をもたらし得るとの意識を各研究者が持つことが重要である。 ・ サブテーマ2のメカニズム解明との連携を更に深化させて、今後の研究方針策定に繋げて頂きたい。 ・ 但し、個々の成果については、外から見て注目度や発展度が顕著でないものが多く、新奇現象や新超伝導体についての将来性なども十分に示せていないので、今後の研究における育成や選択と集中に期待したい。
<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"> ・ 論文等の内容は、NIMS らしく堅実な高いレベルにあり、研究機関としてのステータスは保たれている。 ・ 定年制研究職員ひとりあたり 20 件を超す論文発表は、成果の出し方として大いに評価したい。 ・ 特許については、新奇現象発見の機会を捉えて、さらなる積極提案を期待する。 ・ テラヘルツ発振素子については、量子カスケードレーザなど半導体素子との差別化、明確化が必要であろう。 ・ テラヘルツ発振素子と線材応用については実用化に向けてさらなる検討が必要であると思われる。 ・ 他分野などにも大きな影響を与える大ヒットは無かったようだが、今後の芽が生まれていると考えたい。 ・ Liq. He 問題にめげず、新規物質開発の芽を発掘した成果は大きい。
<p>総合評価点平均 (10点満点)</p>	<p>8.0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"> ・ 厳しい研究環境の下、成果はほぼ目標レベルにある。 ・ 常に大ブレイクスルーの気配が漂う課題であり、計画的な取り組みが必ずしも良い結果につながらないが、この5年間はこのマネジメント体制で一定以上の成果に至ったと思われる。 ・ 地道な基礎研究も、学術的に重要なものは長期的視野で続けてほしい。 ・ 国研として、マテリアルインフォマティクスの活用に向けた準備アプローチに期待したい。 ・ 基礎研究と実用の芽作りのバランスを各研究者が持つことが必要である。 ・ グループ間の連携、特に基礎研究と応用研究の担当者との連絡や共同研究をもっと進めるとさらに良い成果が得られるかもしれない。 ・ 但し、この分野は常に夢のある成果が期待されているのに対し、計画が着実に堅実な方向に向かって見えるのはやや残念である。 ・ 特許マインドの育成などのため、自由な発想で議論する場を設けてよいのではないかと。

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		