

**超伝導研究特別プロジェクト TRiP**  
**研究領域「新規材料による高温超伝導基盤技術」**  
**追跡評価報告書**

## 総合所見

本研究領域の成果が高く評価された結果、研究領域終了後も多くの研究代表者や研究グループに属していた研究者は他の大型研究プロジェクトに代表者や共同研究者として参加した。さらに国内外の研究者ネットワークが形成され、新たな研究グループが、国際的にも質の高い研究成果を生み出した。研究期間中の全出版論文数が 550 報（共著論文は一報とカウント）に対し、終了後も現状で 593 報が出ていることから、TRiP のアクティビティの継続、あるいは発展したことが明らかである。この意味で、TRiP は十分に超伝導分野の発展に貢献したといえる。本研究領域が鉄系超伝導材料発見直後にタイムリーにプロジェクト化され、将来に続く研究成果の創出や、研究を支える人材育成がなされたのは、それまでの銅酸化物系超伝導研究が土壌となり、理論的研究、様々な測定技術や高品質単結晶・薄膜製造・高圧合成技術などが、世界的レベルにあったことが大きな理由の 1 つであり、この種のプロジェクト研究の継続性の重要性を改めて示している。

TRiP では超伝導機構については、「スピン揺らぎ」と「軌道揺らぎ」の異なる考え方の研究者が互いに「切磋琢磨」しながら研究を精緻化、高度化し、プロジェクト全体の研究が活性化された。このことは、プロジェクトを推進する研究者の選択の重要性を示している。

銅酸化物系超伝導研究では若手だった研究者の多くが、TRiP では主体的に研究をリードし、終了後にも研究を継続し、大きな成果とともに国際的研究者としての地位を確立した。さらに、彼らのもとで次世代を担う多くの若手研究者が輩出されたことも重要な成果である。

多軌道有効モデルを用いた第一原理バンド計算など、鉄系超伝導体の振舞いだけでなく銅酸化物超伝導体のペアリング描像をも包括的に説明する統一的理論が提唱されると共に、キャリアドーピングされた熱電材料の熱電変換性能指数の高精度の予測にも発展し、高効率熱電材料という新たな研究領域や潮流の創出に貢献するなど、研究成果の科学技術の進歩への貢献も大きい。TRiP がスタートした当初は、結晶構造の類似性などから、鉄系超伝導のみならず希土類系の超伝導との対比研究や統合的研究が期待されたが、今後は、TRiP の研究、その後の発展研究や、連携ネットワークで育った若手人材が、新規超伝導の総括的、包括的研究に継続して取り組んでいくことが期待される。

研究成果の実用材料化や応用に関しては、現段階では企業が積極的に実用化に向けた開発に関与するには至っていない。しかし高磁場マグネットへの応用可能性を示す高い磁場中臨界電流密度をもつ鉄系超伝導線材やデバイス応用に必須となる高品質薄膜が作製されるなど、応用に向けての着実な進展が見られ、銅酸化物超伝導体でも、線材など実用化研

究が本格的に加速されたのが発見から 20 年程度を要したことを考慮すれば、継続的研究による今後の進展が期待される。

以上より、研究領域終了後も TRiP からこのような大きな成果が出された。その要因を、我が国におけるプロジェクト研究のあり方から分析すれば、JST における速やかな研究領域の立ち上げの重要性と、このような立ち上げが可能であることが示された点が大きいと考えられる。

## 1. 研究成果の発展状況や活用状況

本研究領域の材料探索・合成、理論研究、物性研究、薄膜・線材合成などに関する研究成果の大部分はその後の JST やその他のプロジェクト、科研費研究などに受け継がれ大きく発展している。現在に至るまで、フラットバンド系、トポロジカル絶縁体、磁気相との競合系、フラストレーション系など、ユニークな物質群とその物性にとりくみ、主に物性物理基礎分野において、国際的に高い水準にある日本の同分野の発展に寄与している。

高野は、TRiP に参画した他の研究チーム（谷口、神原、黒木ら）と共に研究を継続し、CREST・さきがけ複合領域「微小エネルギーを利用した革新的な環境発電技術の創出」（2015-2022）に採択され、超伝導研究のリーダー的地位を築いた。

黒木は理論的研究で、多軌道有効モデルを用いた第一原理バンド計算など、鉄系超伝導体の振舞いだけでなく銅酸化物超伝導体のペアリング描像をも包括的に説明できる新たな理論を提唱した。これはキャリアドーピングされた熱電材料の熱電変換性能指数の高精度の予測へと展開し、高効率熱電材料という新たな研究領域の創出に貢献するなど、研究成果の科学技術の展開への貢献は大きい。黒木グループはさらに、細野グループや、宮坂グループが見つけた、超伝導のダブルドームや第 2 反強磁性相を理論から説明した。この結果は元素置換ドーピングそのものが、系のバンド構造を変化させることを強く示唆しており、将来の物質開発にも重要な指針を与えた。

多くの超伝導体の発見が TRiP を踏み台として行われたことも、研究領域終了後の研究の継続による波及効果として特筆される。野原は、中国の圧倒的な物量作戦研究に伍して、独自のフィロソフィーと信頼性が高い実験によって、多くの新超伝導体を合成した。なかでも鉄白金系超伝導体  $\text{Ca}_{10}(\text{Pt}_4\text{As}_8)(\text{Fe}_{2-x}\text{Pt}_x\text{As}_2)_5$  は、転移温度が鉄系超伝導体と同程度で、大きな注目を集めた。さらに大串、高橋らの、はしご型格子をもつ鉄系化合物の超伝導化など材料探索の裾野は研究領域終了後も着実に広がっている。生田、内藤らによる薄膜合成研究は、JST 戦略的国際共同研究プログラム (SICORP) における、in-situ 1111 系超伝導薄膜の合成や接合の試作などデバイス応用に向けた大きな一歩となる成果に発展した。また、室町らによる 122 系パウダー・イン・チューブ (PIT) 線材の開発は、FIRST プログラムにおける当時世界最高の高磁場臨界電流密度 (25 T で  $5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ) の達成という鉄系超伝導体のマグネット応用への可能性を示す成果に発展している。また、高野らによる鉄系化合物における試料合成とキャリア制御の研究は、その後のダイヤモンド薄膜の高 T<sub>c</sub>

化や高伝導性のカーボンナノチューブの合成等に発展している。

## 2. 研究成果から生み出された科学技術や社会・経済への波及効果

### (1) 研究成果の科学技術の進歩への貢献

研究領域の研究者を中心とし、我が国の第一線の研究者間のネットワークが形成された。国際共同研究プログラム (SICORP) ではドイツを中心とする欧州の研究者とのネットワークにまで発展し、鉄系超伝導体に関する薄膜や物性の研究で多くの成果が生み出された。これは TRiP の国際的波及効果として大きく評価できる。2011 年から 2014 年に実施された JST-SICORP 超伝導国際共同研究に採択された 3 件のうち 2 件が TRiP のメンバーからなるチームであったことも、TRiP のアクティビティの高さを象徴的に示す事例である。これら多くの研究成果は、国際学会等において招待講演となり、また Nature 系、Phys. Rev. Lett. 等のサーキュレーションの高い雑誌等に掲載されるなど、世界の注目度も高い。

科学技術の進歩に貢献する特筆すべき成果として、黒木らによる理論研究があげられる。多軌道有効モデルを用い、鉄系超伝導の様々な性質を説明した。特筆すべきは、銅酸化物超伝導体を含め、実空間での電子の動きから波数空間のペアリング描像を統一的に説明したことで、今後新規高温超伝導体探索のヒントになりうる成果と考えられる。さらに、キャリアドーピングされた熱電材料の第一原理バンド計算により、プリン型バンドをもつ材料が大きな熱電変換性能指数をもつ可能性があることを示した。また野原らが発見した PtPn<sub>2</sub> 系熱電材料の性能指数が As 置換で大幅に上昇することを理論予測し、それが実験で実証されるなど、今後の高効率熱電材料探索への可能性を示し、CREST の新研究領域など新分野創出に貢献した。本研究領域およびその成果を一部継承したプロジェクトで、ヒ素の価数の変化に着目し、鉄系超伝導体の一連の新物質発見や T<sub>c</sub> 上昇を達成すると共に、高性能の熱電材料を発見した野原らの研究も、今後の新物質発見や新分野創生に繋がる可能性のある成果として特筆される成果である。最近の新超伝導材料では高圧力下で 200 K の T<sub>c</sub> を示す硫化水素等が注目されているが、高野らの超伝導ダイヤモンド電極を用いたダイヤモンドアンビルセルの開発は、今後の新超伝導体探索に貢献し得る特筆すべき技術的成果として評価できる。また下山らによる鉄系超伝導体の一連のホモログスシリーズの発見、生田、内藤らによる 1111 系高 T<sub>c</sub> 薄膜の合成等は、鉄系超伝導体及び材料に関する国際的に見て高い水準の成果と認められる。

永崎らに代表されるように、本研究領域の成果は Phys. Rev. Lett.、Phys. Rev. B 等の被引用率の高い論文出版や、日本物理学会での受賞等に繋がっており、科学技術の進歩に大きく貢献している。永崎は超伝導研究の成果が認められ、2014 年に、Clarivate Analytics 社が選ぶ「世界で影響力を持つ科学者 (The World's Most Influential Scientific Minds 2014)」に選ばれ、我が国を代表する超伝導研究者の 1 人となった。

### (2) 研究成果の応用に向けての発展状況

本研究領域の研究対象である鉄系超伝導体については、 $T_c$ が室温を超えていないこと、ヒ素などの有害元素を含んでいること、線材化の困難さなどにも起因して、実証や応用展開という部分では、現状では企業が積極的に実用化に向けた開発に関与するには至っていない。しかし研究領域終了後の FIRST プロジェクトで、4.2 K、高磁場で  $5 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> の高い臨界電流密度をもち、異方性の小さな 122 系 PIT 線材が開発され、高磁場マグネットへの応用の可能性が示されている。銅酸化物超伝導材料でも、超伝導体の発見から実用線材の開発まで 20 年以上を要したが、鉄系超伝導体では高磁場マグネット応用への可能性を示す高い磁場中臨界電流密度をもつ超伝導線材やデバイス応用に必須となる高品質薄膜が作製されるなど、応用に向けての着実な進展が見られる。具体的なビジョンを明確化しつつ、実証や応用に向けて研究開発を継続することで、高磁場用の実用線材として社会的・経済的なインパクトを与える下地は十分ある。その際、本研究領域の成果として生み出された理論や材料探索指針に基づき、より広い視点からの取組が、より高い  $T_c$  や小さな異方性をもつ新超伝導物質の発見に重要な役割を果たす可能性がある。

### (3) その他の特筆すべき波及効果

人材のキャリアアップとしては、銅酸化物超伝導研究では若手だった研究者の多くが、TRiP では主体的に研究をリードし、大きな成果をあげて国際的研究者としての地位を確立した。さらに、彼らのもとで次世代を担う多くの若手研究者が産み出されたことも重要な成果であり、TRiP をベースとして階層的な人材育成が円滑に行われた。

黒木チームの有田（現在理化学研究所）は、複雑なバンド構造から物理的本質を担う簡単なバンド構造に落とし込むダウンフォールディングや、超伝導転移温度の第 1 原理予測などの理論スキームを次々に開発し、若手のホープとして育てている。また野原は、まさに TRiP の中で飛躍を遂げた人物で、独自のフィロソフィーと信頼性の高い実験によって、多くの新超伝導体を合成し、この分野での我が国のリーダーの一人となった。さらに野原は、TRiP には参加していない研究者との連携を進め、ネットワークの拡大と共に研究を発展させた。例えば理化学研究所の花栗と Fe(Se, Te)系の STM 実験を行い、ペアリングの対称性に関する重要な結論を得た。超伝導体研究には不可欠となった超高分解能の角度分解電子分光 (ARPES) では、佐藤と吉田の 2 チームが採択されたが、彼らはともに、世界をリードする結果を発表し、我が国のアクティビティの重要な一翼を担う研究者として育った。

さらに鉄系超伝導の発見と同時期に設立された連携大学院制度を活用し、高野チームでは、次世代を担う多くの学生や若手研究者が、多くの超伝導研究を通して育ち、大学の助教や講師に転身し、その後の超伝導や材料研究で活躍している。

産業界とのネットワーク形成については、まだ目に見えた形に現れていないが、高い磁場中臨界電流密度をもつ超伝導線材や、高品質薄膜が作製されるなど、応用に向けての着実な進展が見られており、今後新たなネットワーク形成が期待できる。

当初想定されていなかった新たな研究展開としては、黒木らの理論と野原らによる材料

合成等が強く結びつき、新しい高効率熱電変換材料研究開発への新しい潮流が創成されたことがあげられる。また大串と高橋らは新たに発足した科研費の研究プロジェクトで、はしご型格子を持つ鉄化合物の高圧下の物性研究展開の中で、 $\text{BaFe}_2\text{S}_3$  が、鉄系超伝導体の母物質と類似のストライプ型反強磁性秩序を示すモット絶縁体であることを提唱し、さらに圧力印可による絶縁体-金属転移と金属化と同時に起こる超伝導転移を発見した。これは、金属、あるいは半金属反強磁性体とされていた鉄系超伝導体の母物質をどう捉えるかという、鉄系超伝導の位置付けなどとも関連する新たな発見であり、モット絶縁体を母物質と考えるホールドープ型銅酸化物超伝導体との関係や、最近活発に研究されている“ノンドープ” T' 型銅酸化物超伝導体の母物質との関係など、銅酸化物超伝導体も包含する総括的研究に発展する可能性を示唆している。

### 3. その他

本研究領域の成果は、その後のプロジェクトや科研費研究に主として引き継がれているとはいうものの、新超伝導材料が実用化され社会的・経済的に大きなインパクトを与えるまでには、継続した材料改良や応用研究が必要で、まだしばらく時間がかかると予想される。特に産業界の余力がなくなっている中、新しい材料をいかに応用に結びつけていくかという点については、今後の国の支援のあり方を考えていく必要がある。そのためには、本研究領域のような、国としてのタイムリーかつ長期スパンでのファンディングが維持されていくことが望まれる。この点に関して JST の果たすべき役割は大きいと考えられる。今回、公募型の TRiP は、既設戦略目標を用いて緊急的に立ち上がった最初の公募型研究領域として、十分な成果を世界に発信することに成功したと位置づけられる。近年では、既設と新設の戦略目標を組み合わせた研究領域（例えば、さきがけ「理論・実験・計算科学とデータ科学が連携・融合した先進的マテリアルズインフォマティクスのための基盤技術の構築」（常行真司研究総括）など）が立ち上げられるなど、フレキシブルな運用が可能になっているようである。この意味で、TRiP の成果は、研究成果もさることながら、既存のさきがけや CREST の研究領域でも、迅速かつフレキシブルな領域を設定する重要性を示したことはないだろうか。そのような研究領域を増やすことで、日本初の新分野を再び創出し、社会のイノベーションに貢献できるのではないか。