

戦略的創造研究推進事業(CREST)における 研究領域「極限環境状態における現象」追跡評価報告書

1. 総合所見

本領域の21課題のうち、9課題が高温超伝導体に関する研究で、新物質探索、メカニズム解明に向けての先端観測手法の開発、さらにデバイス応用に至るまで広い領域を包括した、総合的な研究推進であり、その後のこの研究分野の方向性を決める重要な成果が数多く輩出されたことは大変意義深い。

本領域の発足時(1995年)、研究代表者及び研究参加者の多くが高温超伝導研究の第一線で活躍していた。銅酸化物のTcは1993年にピークを向かえ、新たな物質の発見も一段落した頃であったが、このような状況下での研究目標は必然的に次の3つの課題であった: 1) 銅酸化物の高温超伝導発現に必要な条件を追求するための、より簡単な構造の物質開発・合成、2) 超伝導機構解明を目指して、銅酸化物およびその類縁物質の電子状態をより詳細に調べるための新しい分光法の開発、3) 高温超伝導体応用を目指した磁束状態、磁束ピン止め機構の解明と新しい現象の開拓。

課題1)から産まれた成果の代表は、梯子型銅酸化物の合成(高野チーム)とRu酸化物での3重項超伝導状態の発見(石黒チーム)である。前者は、高温超伝導を示す2次元銅酸化物の電子状態の理解を促進させるとともに、「量子スピン系の物理」という新しい分野を開拓した。後者は、3重項超伝導が固体物質でも実現することを実証し、その特殊な超伝導状態研究で1分野をつくるとともに、国際研究ネットワークづくりに成功している。秋光によるMgB₂高温超伝導体の発見は、「瓢箪から駒」ではあるが、本領域の力強い研究の流れから生まれたものである。研究に参加した多くの若手研究者は、その後、数々の新物質、新超伝導体を世に送り出し、次世代の物質科学の担い手として成長している。

2)の成果は、電子線干涉顕微鏡(北澤チーム)、SPring8における共鳴X線非弾性散乱(遠藤チーム)、角度分解光電子分光、走査型トンネル顕微分光といった最先端の分光法の開発と発展である。これらは、運動量空間の電子情報の取得と、原子スケールの微細空間の電子状態の探査を可能にし、物質科学の新しい地平の開拓の一翼を担った。応用を志向した課題3)の成果の1つは、高温超伝導体の磁束ダイナミクスと磁束ピン止め機構に対する理解を深めたことである(門脇、北澤、高野、戸叶、本河チーム)。現在のBi系物質を用いた超伝導線材開発の発展の基礎となるデータとなっている。高温超伝導体特有のジョセフソン・プラズマの研究からは新しい超伝導デバイスが提案され(山下チーム)、テラヘルツ波発信の実証とテラヘルツ光源開発の研究を進展させた。高温超伝導体のテラヘルツ発信は研究総括(立木)により理論的に提案されたものである。研究期間終了後、テラヘルツ波のコヒーレント放射が観測され、将来、社会的、経済的に大きなインパクトを与える技術として期待されている。本領域研究者は、1995

年当時の高温超伝導研究の勢いを維持したまま CREST の研究に参加した。本領域研究は、研究者の勢いそのままに、いくつかの新しい分野を切り開くとともに次の研究につながる多くの成果を挙げ、次世代の物質科学を担う多数の研究者の養成・輩出に成功した。

また、結晶、アモルファス固体と並ぶ準結晶の概念が普遍的なものになったことは本領域の誇れる成果の一つである。多くの準結晶が発見されたことにより、準結晶の探索指針が見つかり準結晶がなぜ安定相として存在するかという問題解明への糸口が与えられたり、従来の結晶構造解析では決めることのできなかった準結晶中の原子位置が初めて完全に解明されたりした。蔡 CREST は、準結晶分野の試料と人材を日本中に提供し、日本は世界における準結晶研究の最大の拠点に発展した。

2. 研究成果の発展状況や活用状況

本領域は極限環境下における物質についての研究を対象とするもので、研究課題の学問分野は理学、工学、農学と多岐にわたっているが、21 課題のうち、9 課題が高温超伝導体に関する研究で、新物質探索、メカニズム解明に向けての先端観測手法の開発、さらにデバイス応用に至るまで広い領域を包括した、総合的な研究推進であり、その後のこの研究分野の方向性を決める重要な成果が数多く輩出された。本 CREST 領域は研究開始から既に 14 年、終了後 7 年が経過しており、研究代表者の多くは引退し、あるいは研究の第一線を離れたため、研究は彼らの後継者、またはこの CREST に参加した研究者に引き継がれていて、個々のプロジェクトの終了後の研究継続およびその成果の発展状況は順調である。

高野チームの秋光は現在、我が国の新超伝導物質開発のリーダーシップを取っており、酸化物を主とする新物質開発は、廣井、東（両名とも高野チーム）、高木（北澤チーム）に引き継がれて、多くの物質を世に送り出し、物性物理分野の隆盛に寄与している。日立基礎研の外村（北澤チーム）は、他の追従を許さない電子線干渉顕微鏡の更なる高性能化、発展を目指して次世代の装置開発を計画しているし、STM では花栗（北澤チーム）が理研（高木グループ）において、世界最高水準の装置を稼働させ、高温超伝導体の特異な電子状態のミクロな観測に成功している。山下チームが目指した高温超伝導体を用いたテラヘルツ波発信は、2007 年になって、アルゴン国立研と門脇（立木）によって実証され、現在、その原理の探求、テラヘルツ応用への展開がなされている。また、門脇、北澤、高野、戸叶、本河チームが取り組んだ、高温超伝導体の磁束状態、そのピン止め機構に関する研究成果は、現在の Bi 系物質を用いた超伝導線材開発の発展の基礎となった。

準結晶の蔡チームは、その後 SORST に繋がり、CREST 期間中よりも CREST 期間終了後の発表論文数が増えているなど、プロジェクト終了後の発展は著しい。不良土壌での穀物生産を目指した森チームは、後任の西澤直子東京大学教授らの研究グループが研

究を継承し、文科省科研費特定研究「植物の養分吸収」、農水省「環境耐性・修復作物の開発」、生研センター「作物のカドミウム吸収・蓄積」研究に発展している。

3. 研究成果から生み出された科学技術的、社会的及び経済的な波及効果について

3.1 研究成果は科学技術の進歩にどのように貢献しているか。

本領域からは、世界トップレベルの研究成果が数多く得られた。以下にいくつかを列挙する。

1. $T_c=40\text{K}$ の高温超伝導体 MgB_2 の発見。

MgB_2 は元素構成、結晶構造ともに単純であり、しかも $T_c=40\text{K}$ は冷媒を使わず、簡便な冷凍機で到達可能な温度である。更に、超伝導の異方性が銅酸化物に比べかなり小さいことから、MRI や超伝導線材への応用が現実味をもって検討されてきた。我が国でも、NIMS、日立等で製品化に向けた努力が継続されている。

2. 高温超伝導体ジョセフソン・プラズマを用いたテラヘルツ波発信。

銅酸化物高温超伝導体がジョセフソン接合の積層超格子であることから研究総括(立木)が理論的にテラヘルツ波の発信を提唱したもので、実際、2007年にコヒーレントなテラヘルツ波の放射が観測された。強力かつ簡便なテラヘルツ波光源は広汎な応用の可能性を秘めており、将来の我が国がリードすべき基幹技術の1つであると認識されている。ジョセフソン・プラズマレーザーは有力なテラヘルツ光源候補となっている。

3. 先端分光手法の物性物理研究への展開。

電子線干渉顕微鏡、放射光を利用した共鳴X線非弾性散乱、角度分解光電子分光、走査型トンネル顕微分光といった最先端の分光法の物性物理研究への展開は本領域研究が生み出した成果である。これらは、運動量空間の電子情報の取得と、原子スケールの微細空間の電子状態の探査を可能にし、物質科学の新しい地平開拓に寄与した。

4. 梯子型銅酸化物の合成。

この物質は、高温超伝導を示す銅酸化物と基本的に同じ結合からできているが、より簡単な1次元的な構造になっている。そのため理論的な検討が容易で、理論、実験の多くの研究者にインパクトを与えた。Nature, Science等の主要学術誌に多数の論文が掲載され、研究が急速に拡大した。また、「量子スピン系の物理」という新しい分野を開拓した。

5. 合金系の準結晶

現在、世界で研究されている100以上の準結晶の合金系の、ほとんどすべてを本領域により発見された。これにより、結晶、アモルファス固体と並ぶ準結晶の概念が普遍的なものになった。

6. 新規3価鉄還元酵素遺伝子、ニコチアナミンアミノ基転移酵素遺伝子のイネへの導入

この研究を基礎として、植物の鉄栄養制御の分子機構を解明、具体的には金属元素輸

送におけるニコチアミンの必須性とその生理的機能を解明し、分子育種に応用できる遺伝子の単離に成功した。また、アルカリ土壌耐性植物作出技術を応用して鉄分含有量の高いコメの作出に成功した。(CREST「植物の機能と制御」領域の研究課題「植物の鉄栄養制御(西澤直子)」)

3.2 研究成果はどのような形で応用に向けて発展しているか

高野チームの秋光により発見された $T_c=40\text{K}$ の MgB_2 超伝導体は、 T_c はそれほど高くないものの、銅酸化物に比べ組成や構造が単純なこと、異方性が大きくないことから、MRI や線材としての応用が模索された。現在、NIMS および日立で製品化を目指した技術開発が進展している。

高温超伝導体のジョセフソン・プラズマ励起を利用したテラヘルツ波発信の実証、テラヘルツ光源への応用は、本領域 CREST が提唱し、実際、理論、基礎実験、微細デバイス試作等様々な面からの研究が展開されたものである。CREST 期間内には実証できなかったものの、2007 年に米国アルゴンヌ国立研で初めて発信が実証された。これには、門脇、立木が寄与している。現在、NIMS、筑波大等の研究機関で更なる発展へむけての研究が行われている。強力かつ簡便なテラヘルツ波光源の開発と、その様々な診断/センシングへの応用は、将来の我が国の重要な基幹技術の 1 つとして提言されており、社会的、経済的インパクトが高いと期待されている。

準結晶の合金は、コーティング材、準結晶分散構造材料、触媒、熱電材料、等、応用が期待される萌芽的な成果が出ている状況である。社会的・経済的インパクトをもたらす技術に発展するまでには、もう少し時間がかかるであろう。

森研究代表者らの特許出願/成立数がいずれも本プロジェクトグループ中で最多であることから分かるように、技術の応用に向けて企業との製品共同開発などに積極的に取り組んだ結果、アルカリ土壌向けの被覆鉄系肥料、葉面散布剤の開発に成功すると共に、プロジェクト終了後は、アルカリ土壌耐性イネの創出、カドミウム吸収植物による環境浄化、さらには異分野のニコチアミンの機能性食品研究へと発展している。アルカリ土壌耐性イネの創出、カドミウム吸収など植物による環境浄化は、今後、社会的・経済的インパクトをもたらす技術として期待される。

今中研究代表者らの課題では、基礎的研究から、超好熱始原菌 KOD1 の新規耐熱性 DNA ポリメラーゼを海外で商品化したことが評価される。

3.3 参加研究者はどのように活動しているか

高温超伝導関連研究チームは、研究代表者の多くが、既に第一線の研究から離れているが、本 CREST に参加した研究者は、その後継者として、あるいは、新たな分野の開拓者として、とりわけ、我が国の新物質開発の原動力となっている。例えば、秋光は 2004-2008 年特定領域研究(学振)の代表者として、超伝導体を中心とする新物質開発

をリードした。佐藤、門脇、高木、廣井らは、それぞれの機関において新物質・新材料開発チームを率いている。

物性測定、分光測定技術開発においては、常に世界のトップランナーである外村の電子線干渉顕微鏡だけでなく、光電子分光（高橋）、STM（花栗・高木）、共鳴X線非弾性散乱分光（Baron・遠藤）等でも、手法・技術を進展させ、世界に比肩しうる水準の測定を我が国においても可能にした。これにより、多くの国際的共同実験が進行している。

蔡チームは、研究代表者を始めとして、物質・材料研究機構の1つのチームの若いメンバー全員が、東北大多元研、東大工学系、東大物性研、北大応用理工学系の、教授または准教授に抜擢された。その他の参加グループのメンバーも、北大、東北大、東大、理科大、中央大、名大、Spring-8などに展開しており、蔡CRESTが、準結晶分野の試料と人材を日本中に提供し、日本は世界における準結晶研究の最大の拠点に発展した。

森チームは、研究代表者は、2007年3月に東京大学を定年退職後、NPO法人植物鉄栄養研究会を立ち上げ、社会的貢献を目指している。後継者の西澤直子教授は森プロジェクトを継承すると共に、文科省特定研究、農水省ゲノムプロジェクト研究、生研センター環境浄化研究へと大きく発展させさせている。また他の共同研究者も日本農学賞・読売農学賞など多くの受賞につながる研究成果を挙げている。

今中チームは、研究代表者が本研究プロジェクトに関わる日本生物工学会賞（2001）を受賞し、2008年3月に京都大学を定年退職後、立命館大学でさらに研究を継続している。

4. その他

新物質、新材料開発において米国が長らく世界をリードし、覇権を握っていた。高温超伝導発見を契機に、新超伝導物質開発に注目が集まり、既に「特別研究」（文部省）によって研究者集団・ネットワークを作っていた我が国に覇権が移ったことは関係者の間では良く知られていることである（このことに対する米国の危機感は *Physics Today*(2007年8月号)の記事でわかる)。大学を中心とする研究者の研究力の向上と人材養成に、今日まで殆ど途切れることなく続いた文科省の科研費(特定領域、特別推進、COE)による支援が大きく寄与したことは疑いない。科研費は上記の名前とは裏腹に、一種の横並び支援であり、全体の底上げを必要とする発展期には有効な制度であった。しかし、覇権の維持、新物質開発の持続的発展を期す「成熟期」には、その退嬰を促進しかねない。現在、成熟期に向かっているとすれば、CRESTのような、練られた「戦略」のもとに、真の「戦士」を集結させる制度こそ有効であろうと思われる。上述の科研費システムは、今にして考えると、世界にはない独特なものであった。CRESTのシステムは他の国にも類例をみることができであろうが、「独創性」などというお題目に惑わされない「日本」独特のシステムとしての進化を期待する。