

## 巻頭言 Preface

プロジェクト担当部長 清水 肇  
H.SHIMIZU

超電導現象が、1911年水銀で発見されて以来、超電導研究の世界で3つの挑戦が今日まで行われてきた。最初の挑戦は、超電導発現の機構解明に関するもので、半世紀近くたった1957年にBCS理論が打ち立てられて幕が閉じられた。2番目の挑戦は、超電導の応用に関するもので、規模の小さいものは計測やセンサーの分野、大きなものはエネルギーのシステムなど、今日までたゆみない努力が続けられている。3番目の挑戦は、より高い超電導転移温度 ( $T_c$ ) を持つ物質の探索で、応用への広がりを見ると、液体ヘリウムからの脱却は長年の夢であり、地味ではあるが指導的原理を模索しながら努力が続けられてきた。

多数の単体金属や合金での超電導の発見に続き、1973年には化合物超電導体である $Nb_3Ge$ で23.3Kが確認された。金属系で最高の転移温度で、実に60年以上の歳月がこの発見までにかかっていた、 $T_c$  は3年に1Kの割合で徐々に上昇していたことになる。その後、それより高い転移温度を持つ物質は発見されなかったし、電子-フォノンの相互作用による超電導機構から予測される転移温度は、30Kぐらいが限界であろうとの見方が支配的であった。

このような状況のもとで、1986年にLaBaCuO系で35Kの転移温度を持つ新しい超電導体が発見され、以後高温超電導体という用語が学術の世界ばかりかジャーナリズムでも定着した。この発見がきっかけとなって、何と1年後には、 $T_c$  が液体窒素温度を超えるYBaCuO系が発見されるなど、次々新物質の発見に成功した。当所においても、転移温度の記録をたびたび塗り替えるチャンスに遭遇し、所内においてはしばしば興奮に満ちた研究雰囲気が醸し出されてきた。高温超電導体の転移温度の更新について触れたが、この発見は上記の3つの挑戦すべてに対し、考えを根本から改め直さなければならぬほどの影響を超電導研究に与えた驚異に値する出来事であった。

高温超電導研究や応用に対する期待が高まり、1989年より工業技術院の次世代産業基盤技術研究開発制度の中で、国立研究所と民間、大学への委託研究を組み合わせた産官学の連携による研究開発方式のもとで、「超電導材料・超電導素子」プロジェクトが10年計画で開始された。この特集号は、10年間にわたって、電子技術総合研

究所で実施したプロジェクト研究の成果の集大成である。

このプロジェクト研究では基礎物性、常温超電導材料探索、有機系超電導材料探索、接合プロセス技術の評価、超電導トンネル素子、新機能計測素子、素子化基礎技術などの研究を担当した。高温超電導は、世界的に注目度が高い研究分野で、しかも広い研究領域をカバーするために、それまで超電導に直接携わってこなかった研究者も積極的にこのプロジェクトに参加したことも一つの特徴である。

全体を3期に分けて第1期3年、第2期4年、第3期3年として、各期で自己評価を行いながら、全体としては探索的研究に重点を置いたマネジメントを実施してきた。プロジェクト推進に関わる通常の所内の関連部長会議の実施の他に、研究者の参加による研究班（後に超伝導研究連絡会議）が設定された。主たる活動は、所内外の研究進捗状況の把握と情報交換、研究討論、招聘および訪問研究員による講演会の実施、超電導データベースの作成などの研究支援活動を積極的に進める母体となった。

研究結果の詳細は本文をお読みいただくとして、数多くの成果の中から代表的なものについて触れておく。

(1) 高温超電導の発現機構はいまだに明らかでなく、研究のブレークスルーには物質探索と良質な単結晶の育成、それをういた物性評価と理論物理の連携にかかっている。当所で誕生した良質な単結晶は世界の研究拠点にも供給されていて、互いに研究手法を補完しあいながら研究を進めた。研究情報がくまなくしかも迅速に広がる環境のもとで、世界的なレベルでの研究拠点間の競争と共同研究による協調を進めた。

(2) 高温超電導物質の電場や磁場下での物性研究からは磁気相図が生まれ、下部臨界磁場 ( $H_{c1}$ ) 以上の磁場下で、磁束固体と磁束液体という2つの領域に分かれていることが明らかになった。磁場が関連する応用を考える上では非常に重要な発見である。高磁界下に於ても超電導状態を維持するために必要な、金属系に比べて難しいピン止めの研究を発展させる役割を果たした。

(3) 高温超電導性を担う $CuO_2$ 面は、これまで均一かつ

平坦な面と信じられてきたが、局所的な格子歪みを持つドメインとそうでないドメインとが、共存するストライプと呼ばれる構造を持つ不均一系であることが、当所で開発したX線吸分光法(EXAFS)で明らかにされた。これらの構造が超電導発現機構とどのような関係にあるかの解明は、今後の重要な研究課題である。

(4) 材料分野に目を向けると、転移温度の記録を塗り替える新しい物質の探索の研究は、世界的な競争で実施されおびただしい酸化物超電導体が発見された。その中で技術開発の世界で現在生き残っているものはそれほど多くはない。材料としての評価指数は転移温度だけでなく、応用面から来る条件下で対象が絞り込まれてきていることを示している。当所で発見されたCu1234系酸化物は、ab面内とc軸方向の伝導性の間で異方性が小さく、一般の銅酸化物超電導体とは異なる特色を持ち、応用分野へのインパクトが期待されている。物性科学の面からも低異方性の本質の解明に期待が持たれている。

(5) 応用を切り拓く上では材料プロセスが重要で、多元系酸化物という扱い易くない物質を母材料とし、薄膜化の研究やその評価を実施してきた。スパッタ法、蒸着法、レーザーアブレーション法、化学蒸着法(CVD, MOCVD)などあらゆる薄膜作製技術が研究されたと言ってもよい。膜厚の均一性、結晶性、表面固有の偏析問題、酸素欠損などのパラメーターの制御性向上が焦眉の課題である。

(6) エレクトロニクスへの応用に関しては、ジョセフソン素子の開発を進めた。本研究では接合の集積化に備えたバラツキの問題に焦点を当てて議論を進めた。また、酸化物超電導体の表面や界面での電子状態の理解は、接合の制御性を高めるうえで不可欠な研究成果である。ジョセフソン接合2個で構成されるSQUIDの研究は、実用レベルにまで発展し材料の非破壊検査などの分野を切り拓き始めている。

この10年間に新しい現象や物質の発見、緊迫した議論が進み、近年まれに見るほど高温超電導研究者達を「ワクワクさせる」研究意欲を駆き立てた。物性科学分野での進展は目覚ましいものがあり、世界中の勢いをもってすれば高温超電導発現の機構解明は、比較的早い時期に可能であろうと予想されていたにもかかわらず、今なお「解った」という実感が得られる状況ではない。しかし、研究の裾野に多様な広がりをもたらした。高温超電導体の機能発現には、電子の多体相互作用が重要である。「強相関電子系」という従来から地道に研究がなされてきた研究分野が急激に脚光を浴び注目され、超電導以外には巨大磁気効果などの従来の物性科学の枠を越

えた発見がある。強相関電子系の物質では、わずかのドーピングで、金属から絶縁体まで物性が大きく変化するものもあって、その特色を生かす酸化物エレクトロニクスに向けての新しい芽も育ちつつあり、今後の展開が期待されている。

超電導エレクトロニクスについては、目的意識をかなり明確化する必要があるし、技術の社会的受容性の立場から、周辺技術との接点について議論しなければならない。たとえば、デジタル回路では、トータルのスペックにおいてSi系エレクトロニクスを越えた高速性の実現に向けて研究展開への戦略が必要である。半世紀以上かけて発展してきたSi系エレクトロニクスが辿った集積化の路を、超電導エレクトロニクスはもっと短期間で歩まなければならないし、身内の低温超電導との競合関係にも十分議論が必要である。いずれにしろエレクトロニクスの中で、超電導はどのような期待に応えられるかの議論を十分しなければならない。

電総研では、基礎物性、材料、接合の分野の研究を進めてきたが、今後これらの研究の相互のクロスオーバーによる新たなブレークスルーの誕生に繋げるためにも、この特集号でまとめた成果を大いに活用して行きたい。この特集号を公にすることで、所外との連携活動が一層進展することも我々のねらいである。関係各位からの忌憚の無いご意見や議論をお願いする次第である。

最後に、本プロジェクトの推進に当たって、電総研の研究にご理解とご支援を賜った工業技術院関係各位の他、多くの方々へ感謝する。特に、超電導関連の文献についてのデータベースの作成や光電子分光装置を用いた共同研究については、国際超電導産業技術研究センターからの強力な支援をいただいたことをここに記して、謝意を表わす。工業技術院RIOデータベースとして公開されている「超電導データベース」は、充実した貴重な書誌情報として、全世界から頻りにアクセスされて学術振興に大変貢献している。