

〔解説〕

電総研における超電導エレクトロニクス研究戦略

Strategy of Superconducting Electronics Research in ETL

電子基礎部長 清水 肇

§ 1 はじめに

電子技術総合研究所は、超電導のエレクトロニクス分野への出番を長年主張し、低温、高温超電導それぞれに独自の出番があるとの両輪論の立場にたって研究を推進してきた。酸化物高温超電導体が発見されて以降、超電導研究には一時期かなりの追い風が吹いていたが、10年以上の歳月が流れた現在は、むしろ向かい風に変わってきている。必ずしも超電導を専門としない人も含めて、かつてエールを送ってくれた人達からの、技術開発に対する鋭い問題提起や論点にも耳を傾けて、「超電導エレクトロニクスの来し方行く末」を自問しなければならない時期である。今後の超電導エレクトロニクスの戦略を練る上で、研究を担う側が気長な技術開発への可能性を主張しているだけでは、庇護の元での研究開発になりかねず、もはや現実的ではな

い。成果を受け入れる側をも含めた総合的な議論の中から、技術領域や研究ターゲットの設定、目標達成のためのマンパワーや資金源の配分、費やせる時間、組織的な研究に向けての研究拠点の在り方などを精査すべき時期に来ている。以下では、これまでの電総研における研究開発の要約をし、その分析並びに周囲状況を踏まえて、今後重点を置くべきテーマに関し戦略を述べる。

§ 2 これまで果たしてきた役割と何を学んだか

電総研は、電気試験所時代にヘリウム液化機の導入を図り、低温物理の先駆的研究の立ち上げと物性科学の発展に貢献した。その後数々の超電導応用について、低温超電導はもとより、後には高温超電導を含めて研究を実施してきた。その流れを図1に示す。代表的な

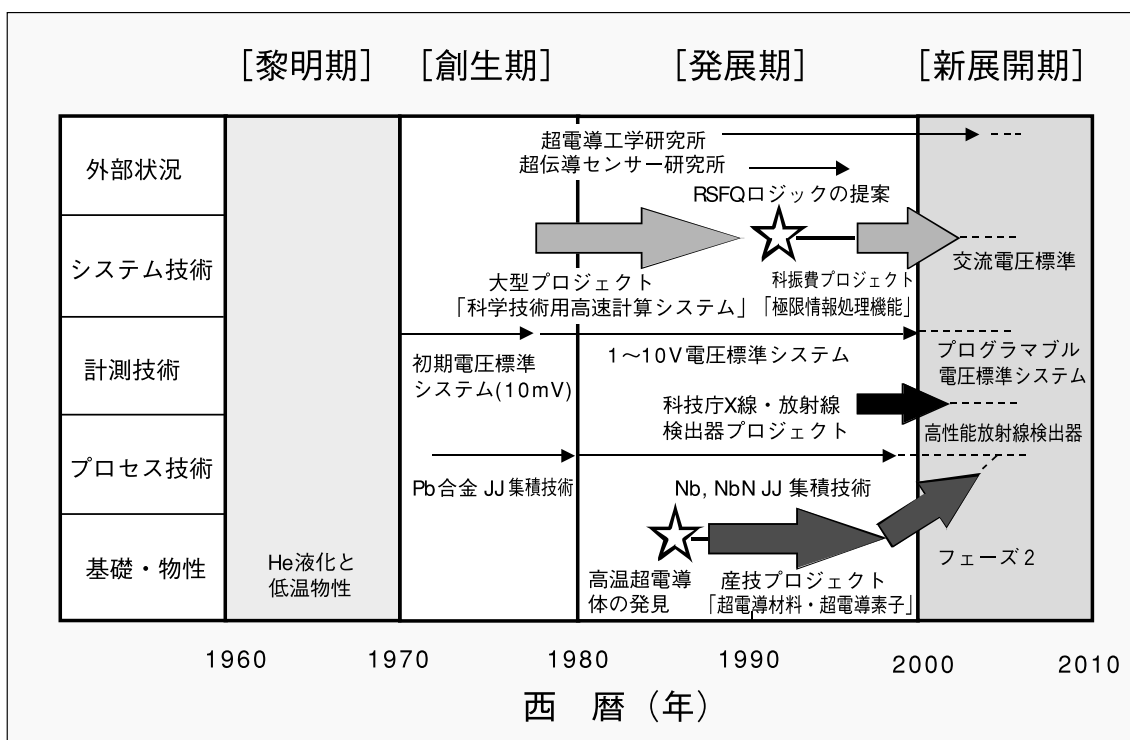


図1 電総研における超電導エレクトロニクス研究の歩み

応用分野である計測技術, エレクトロニクス, エネルギー技術等では, 萌芽的研究を育て, その中からジョセフソン電圧標準システムや電力関連の大規模なシステム研究まで多様な展開を行ってきた。また, 超電導材料研究の広がり, 長期計画に基づく超電導エネルギーエレクトロニクスへの出番を想定しているが, ここでは, 狭義のエレクトロニクスに限って議論を進める。

2.1 低温超電導エレクトロニクス

今日のエレクトロニクスの潮流であるデジタル応用分野の研究では, システム技術として「高速」, 「大容量」, 「低消費パワー」はクリアすべき最も重要な性能課題である。この中で「高速性」と「低消費パワー」については, 「シリコン系エレクトロニクス」が今後発展したとしても, 素子の動作原理上は超電導の方に有利な出番があると考え, 所の戦略として超電導エレクトロニクスの研究を進めてきた。

1981年電総研でジョセフソンコンピュータに向けての研究を開始し, 1982年から始まった工業技術院大型プロジェクト「科学技術用高速計算システム」の中で発展させ, 1989年にETL-JC1として実証した。これらの成果は, まだ物性物理学の対象であった超電導研究を, エレクトロニクス技術分野に押し上げて, 研究に夢を与える牽引車の役割を果たした。所内においては, それまでの主流であった鉛(Pb)系から信頼性の高いニオブ(Nb)系, さらに転移温度が高い窒化ニオブ(NbN)系を扱う新しい材料プロセスを開拓し, 回路技術等の基盤を整えて, 超電導研究を波及させる効果をもたらした。

しかし超電導エレクトロニクスを取り巻く状況としては(1)プロジェクト開始前段階で既に予想されていた, シリコン系エレクトロニクス技術の高度化への見通しがあり (2)開発段階では市販のコンピュータの高性能の予想を上回る長足の進歩があった。ETL-JC1は, 1チップあたりの有効素子数が数千個レベルまで集積化された回路レベルで, コンピュータに必要とされる機能をすべて持つなど, 完成度の高い装置で世界的にも規模としては進んだ研究成果であった。残念ながら, 追究すべき課題の一つである高速性(ラッチ型, kHzのクロック)に関しては, ライバル陣営を唸らせるレベルには達しなかった。プロジェクト終了時点において

実用化への展望はもとより, 次の研究戦略を立てることの困難さを痛感した。さらには, 1986年には高温超電導体が発見され, マンパワーのシフトが生じたため, Nbを素材とする低温超電導デジタル回路開発は一時停滞した。

その後, 磁束量子(Single Flux Quantum:SFQ)を情報の単位として利用する論理回路が提案された。SFQを使う回路にはやはりジョセフソン接合を用いるが, それまでのラッチ型に比べて素子動作速度が桁違いに速く, 高速性に対する展望が開けた。1997年には, 科学技術庁の振興調整費総合研究制度で「単一磁束量子を担体とする極限情報処理機能」の研究が取り上げられた。電総研, 産学および超電導工学研究所(SRL)が参加し, 超電導デジタル回路開発に向けての新たな挑戦をすることになった。

このテーマの運営面における重要な特色は, 電総研に独自のプロセス設備整備を継続する一方, 産学については民間企業1社への集中投資によりNb系集積回路プロセスの一本化を進め, 研究グループの連携の強化と研究資源配分の重点化を図ったことにある。電総研ではこれまでに(1)接合数100個レベルの3ビットカウンタ, シフトレジスタ等基本的な回路部品の動作確認と(2)極めて小規模な回路(1ビットカウンタ:接合数8個)の高速動作(100GHz)の検証をしており, 次節で述べる計測分野への応用を目指した研究に踏み出した。

2.2 高温超電導エレクトロニクス

高温超電導体は, 物性科学や材料科学分野における基礎研究として極めて魅力的なものであった。液体窒素温度下での動作条件は, 低温環境に対する心理的負担を軽くし, 実用化に対しての距離感を大きく縮めた効果も大きく, 所内の様々な分野からも参入した研究者は多かった。1988年からスタートした工業技術院次世代産業基盤研究開発(後に産業技術研究開発)制度「超電導材料・超電導素子」プロジェクトにおいて, 物性, 材料, 接合, 素子の4分野で探索的研究が総合的に実施され, 足踏みしていた超電導研究に対して追い風を与えたことは確かである。

当所においては, 高い転移温度を持つ物質や低異方性銅系超電導体の発見など活気ある研究が進められた。世界の研究趨勢をもってすれば, 超電導の機構解明にも早晚手が届くと思わせるものがあったが, 当初の予

想に反して、高温超電導の発現機構は依然として謎に包まれている。現在も理論と物性実験との間には厳しいやり取りが続いている。

高温超電導エレクトロニクスに話を戻すと、世界的には物質科学や、材料、プロセスの分野で探索的な研究が進められ、応用に結びつける話は小規模のベンチャー企業が得意な出番を目指す活動が主体であった。ところが、我が国では対照的に応用技術に対する期待が驚くほど大きく、フィーバとも呼ぶべき現象が起き、上記のプロジェクト内では超電導回路を目指した能動素子の開発が進められた。電総研では、積層型ジョセフソン接合の集積およびそのパラッキ評価、極低温STS (Scanning Tunneling Spectroscopy)による超電導表面における電子状態の観察、接合特性の制御性を高めるための電極表面の電子状態の解析等基礎的課題を担当して1998年に終了した。

以上の経緯を振り返ってみると、新しい発見によって大きな応用に繋がるストーリーが創られ、市場規模の議論にも発展したが、それにはかなり楽観的な期待が含まれていたことが、エレクトロニクス応用の研究を実施した結果明らかになった。高温超電導フィーバ現象は、すべてのフィーバがそうであるように、やがて終熄の時を迎えた。なぜだろうか？簡単に言えば、焼き固めるだけで誰にでも超電導を確認でき、超電導を身近に感じさせた物質も、薄膜や接合向けのエンジニアリングマテリアルとして扱った途端に自然は行く手を執拗にさえぎってきた。多元系でしかも超電導発現には結晶性を要求する物質のハンドリングが大変なことは、化合物半導体の研究への長い道のりを考えれば想像に難くないことである。欧米における高温超電導研究開発戦略の立て方への論点の差異は、このあたりの見通しにあると見るべきである。低温超電導を高温超電導で置き換えるという企てはそう簡単ではない。

これら物質群が持つ高い転移温度や物性に由来する高速応答性などの優位性は、デジタルエレクトロニクスの技術開発からは確かに魅力的である。しかし、今後の戦略を検討する上では、この物質の超電導物性がまだ十分に明らかでないことを、「単に物性研究の世界の話」として見過ごしてはならない。エレクトロニクスのキーテクノロジーであるジョセフソン接合の制御性を高めてゆくためには、ひたすらプロセスや材料についてより高度な技術を駆使して、探索的研究を引き続

き進めるだけでは不十分である。ブレイクスルーを生むことを目指して、既知の知見を活用してかなり絞り込んだ指針を取るべきである。そのためには、物質、材料、プロセスをつなぐ研究として、表面・界面での超電導特性や素子物理に対する新しい視点や議論が必要である。

なお、高温超電導は固体内電子の多体電子相互作用によって発現し、これら「強相関電子系」と呼ばれる物質群は高温超電導以外に、従来の物性の枠組みを越えた種々の性質を示す。たとえば、巨大磁気抵抗効果などの新しい発見が多々あり、この物性の奥の深さを見せている。酸化物エレクトロニクスなど超電導とは異なる新しい方向性を示した研究分野の芽が育つ動きも有って、我々は周囲の研究の広がりにも目を向けるべきで、研究者のフレキシブルな発想や感受性をますます研ぎ澄まさなければならない。

§ 3 我々は中期的目標として何をを目指すか

3.1 デジタル応用

以上述べた様に、超電導エレクトロニクスの研究環境の変化の中で、ここまで到達した数々の業績は先輩及び関係者のたゆみ無い努力の恩恵によるもので、高く評価されるべき事柄である。これからは、長年の成果を活用し、ギャラリーを説得して我々自身が追い風を起こしながら、もしかしたら名脇役に徹してでも、超電導がキラリと光る出番への道筋を示してゆく役割を担わなければならない。

(a)低温超電導

超電導エレクトロニクスが克服すべき高速性は、磁束量子(SFQ)を用いた回路技術の研究を基本とし、システムのトータルな評価につながる、高速のパルス信号を伝送する実装技術、低温と室温動作の素子をつなぐインターフェース技術などを融合した技術開発を目指す必要がある。

米国では、現在もベタフロップス級コンピュータ用CPUとしてのSFQ回路の応用を目指し、大規模な回路(数万~数十万接合)技術やそれらを作製するための集積プロセスなどを集約化したRSFQ (Rapid Single Flux Quantum)技術の開発が進められつつある。関連のある技術陣営に対して超電導の出番を語って説得し、支援を取り付けて夢や希望を研究陣営に与えながら、目標

達成に向けて牽引する米国の研究グループの姿勢に我々は学ぶべき点が多い。

しかし、現状および今後のシリコン系エレクトロニクスの進歩を考慮すれば、日本のコンピュータ産業界では、省エネルギーや高速性の点に注目して5年以内に超電導ペタフロップスコンピュータや、超電導電子交換機に対するニーズが喚起される可能性は低いと予測する。なおかつ、そのレベルの目標達成には相当の技術的詰めや克服すべき課題が必要とされ、フラグシップマシン開発への適切なスポンサーを探すことも容易でないと考えられる。

電総研は、研究開発の時間展開を考慮して超電導特性を生かした確実な出番のある路線として、「産業計測」分野の育成に向けての戦略を当面採用する。エイジェンシー化に向けた施策を具体化する中で、開発スケジュール的に可能な超電導デジタル技術の具体的な応用への早急な提示が、研究開発への支援を取り付けるためには重要と判断している。図2に、電総研における今後の超電導エレクトロニクス技術開発の展望を示す。図3にはそれらの技術要素の難易と技術開発への社会的期待度としてのインパクトをやや主観的に整理した。

「産業計測」分野での当面の具体的ターゲット、「高精度電圧発生用DA変換器」や「超高速AD変換器」など標準・計測用デバイスの開発に置く。その基礎として3年以内にRSFQ回路をベースとするDA変換器用チップの開発を行い、その後交流電圧標準への応用を具体化する。同時に、AD変換器チップの開発を進め、極限的計測技術への応用を図る。

このために、2001年のエイジェンシー化に際して、デバイス開発の基盤を整えたデバイスセンター(仮称)の中で、Nb系デジタル回路の設計、作製、評価を中心とする超電導エレクトロニクス用プロセスラインを充実させ、外部にも開かれた研究を進め、日本における超電導エレクトロニクス研究の拠点となることを目指す。

上記の目標設定は、コンピュータや電子交換機への超電導の出番を否定したものではない。2005年以降、シリコン系エレクトロニクスの発展の中で、消費電力の問題が次第に顕著になることは明らかである。当然、システム全体の機能の評価、競合技術や相補的な技術の改良や発展への見通しの中で、優位性を我々が主張出来れば、10年後あるいは20年後になるかの議論は別にして超電導に出番が来る可能性が高い。そのために

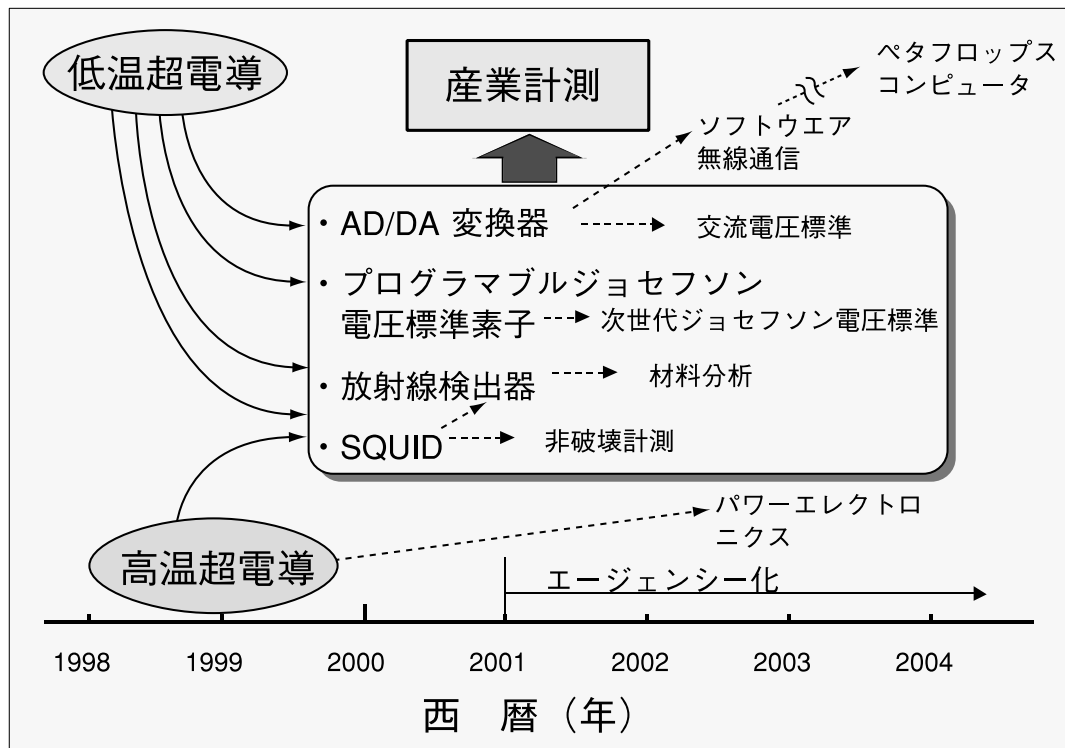


図2 電総研における超電導エレクトロニクス技術開発の展望

は、現在のシリコンテクノロジーが、半世紀かけて辿った集積化回路技術、アーキテクチャーなどの面で、低温超電導の優位性の具体的実証をシリコン系エレクトロニクスのロードマップの中で示さなければ、念願の目標に超電導が顔を出す機会には永久に生まれない。

その他に、規模はコンピュータより小さくて比較的早い出番が期待されるものとして、ソフトウェア無線通信が名古屋大学より提案されている。SFQ回路を基本部分に採用することにより、大きなダイナミックレンジと広帯域特性を備えた超電導AD変換器の開発が提案の骨格である。チップの作製規模は $10^3 \sim 10^4$ JJ/チップ程度と推測されるので、現在の技術力の進展時間軸を外挿した点に、ターゲットを設定することは十分可能である。実現にあたっては、スペック的な優位性と互換性、開発への時間軸などを明確にすることは勿論として、常に高い信頼性が要求されるシステムに対する代替技術としての保証を、超電導研究者側が実証することが必須である。さらに、低温環境への心理的バリアの払拭といった、超電導研究者が今まで経験したことの無い新たな役割への厳しさが要求される。

電総研における超電導エレクトロニクスのロードマップの中では、先に述べた「産業計測」の目標達成に当面注力し、今後の展開に伴う研究ポテンシャル、

マンパワー並びに外部協力体制を踏まえながら、図3に示したソフトウェア無線やコンピュータへの出番を判断すべきと現在考えている。

(b)高温超電導

高温超電導のデジタルエレクトロニクス向け研究戦略を、時間軸まで加味して立てることは今のところ極めてむずかしい。これまでに最小限の数のジョセフソン接合を用いて、SFQを応用したフリップフロップ回路動作の確認が民間で行われている。1998年よりISTECと民間企業との参加のもとにニューサンシャイン計画「超電導応用基盤技術研究開発(いわゆるフェーズ2)」がスタートし、高速エレクトロニクスの基礎としてSFQ応用を目指している。低温超電導のNb系集積回路技術に相当するものが、高温超電導では小規模ですらネックになっている。ボトルネックの解消を目指して、少なくとも1000個の接合をチップ上に集積し、その時の臨界電流(Ic)のばらつきの標準偏差として5%以下にすることを目指している。さらに、その成果に基づいて集積化回路技術を進めることをプロジェクトの研究開発目標として設定している。

接合技術の高度化には、今後現われるブレースクルーの発見にかかっているとんでもない過言ではなく、

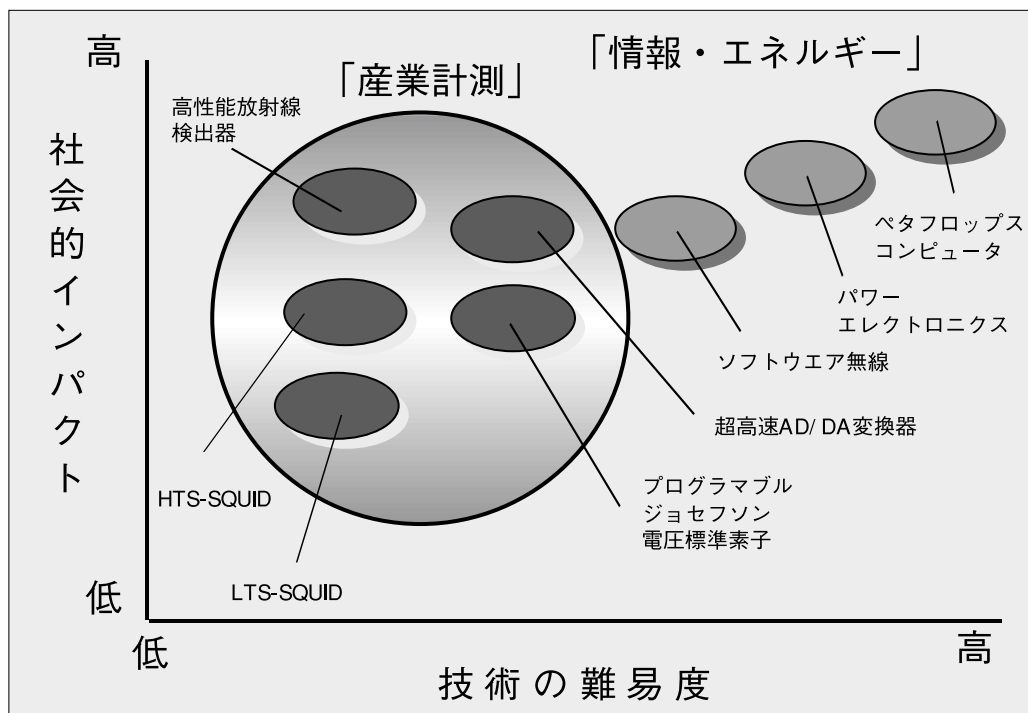


図3 超電導を利用する様々の技術の位置づけ

2000年度より同プロジェクトに電総研が参加するにあたっては、研究進展の節目々々において、当所において層の厚い物性物理、材料プロセス等の研究者間の議論を通して、「素子物理」という視点からの接合研究の指針をまとめて行く。プロジェクトの目標達成に向けて材料やプロセスの研究が不可欠であるが、主目的でなく、動作する回路技術の実証を目指すプロジェクトの目標達成に民間と共に歩調を合わせる責任がある。

ところで、当所が取っている両輪論の中で、主役が高温超電導か低温超電導かの問題は重要では無くなりつつある。詳細な議論は省くが、高温超電導体の動作温度をどの程度に設定するかは、回路設計に必要なマージンや熱雑音の問題と関連しているため、単純には温度のメリットを主張できない。その上、今後ギャラリーが注目する点は動作温度の優位性だけでなく、小規模の回路であれ具体的応用への出番に向けた目標設定と、目指す技術の完成度である。低温超電導エレクトロニクスや、シリコン系エレクトロニクスでは実現困難なことを目指さなければならない。

3.2 超電導カロリメータ

ますます微細化・高密度化が進む半導体産業およびバイオ産業、環境技術などにおける極微量元素材料分析、状態分析へのニーズに応えるものとして、超電導カロリメータ(TES)を利用するX線・放射線検出器の研究が大きな注目を集めている。その理由は、半導体や超電導トンネル接合(STJ)を利用する検出器よりもはるかに高いエネルギー分解能が得られることにある。超電導転移端を利用することにより、従来の極低温超電導カロリメータに比較して応答速度を数桁向上出来、さらに、簡便な冷却システムによって用意が可能な0.1 K近傍において動作させても、高エネルギー分解能を保つことができる。X線領域に話を限れば、従来の結晶分光法の高いエネルギー分解能性と、半導体検出器の迅速性の利点を兼ね備えている。さらに、高温超電導体を利用することでは、様々な温度で高感度のポロメータとしての利用も可能である。このため、超電導カロリメータの開発は、超電導エレクトロニクス分野では、初めて大規模市場の開拓につながる可能性が期待されている。当所では、「産業計測」において重要な材料分析技術になるとの認識から、その実用化に向けて周辺技術まで含めた超電導カロリメータの研究

開発を開始した。

一方、これまでの半導体検出器に比較して優れた性能を有することから、超電導トンネル接合を利用したX線・放射線検出器の研究開発を既に行って来た。「産業計測」の戦略を進める観点から、競合技術である超電導カロリメータの出現に対して、単体素子が持つ性能面と、素子の集積化やシステム化も含めて応用上の出番に対して、それぞれの技術のどこに具体的優位性があるのかの議論を、早急に詰める必要がある。電総研の置かれている限られた条件下では、多様な可能性を追求することは得策ではなく、当所の研究が産業の世界で使われる競争力を持った技術としての出番を目指すためには、戦略を詰めるべき時期に来ている。図2に要約した論点に基づき、所内研究体制と、産業界との連携の最適化が焦眉の課題である。

3.3 ジョセフソン電圧標準

電総研では、これまでに直流ジョセフソン電圧標準システムの開発を進め、素子集積技術や周辺技術を含め、日本はもとより世界的にも大きな貢献を果たしてきた。今後は交流まで含めた新たなジョセフソン電圧標準の確立を目指す。「産業計測」分野における高精度電気精密測定の新技術の確立(例えば、高精度AD/DA変換器の校正等)を目指す。これらの目標達成のために、先に述べたRSFQ回路をベースとするDA変換器の開発を行うとともに、任意の大きさの電圧を短時間(秒レベルから1/1000秒レベルに改善)で発生が可能なプログラマブルジョセフソン電圧標準素子の開発を実施する。後者は、従来のジョセフソン電圧標準素子では、動作電圧の設定に長い時間を要していた問題の解決を目指して、近年米国のNIST(National Institute of Standard and Technology)のグループによって提案されたものである。電総研では独自に開発したオーバーダンブ型ジョセフソン接合を採用し、NISTとの共同研究により、実用的に有用な数Vの電圧発生を目指す。最終的には、3万個以上の接合を集積した標準素子チップを作製する。

3.4 SQUID

高温超電導体を利用したSQUID(Superconducting Quantum Interference Device)センサは、高温超電導体の実用的な応用の有力な候補として期待されている。冷

却技術が簡単になるばかりでなく、試料とセンサの距離を小さくできる利点も大きい。このため、素材製造工程での欠陥の検出などの小規模なものから、航空機のフィールド試験を対象にした大規模なものまで、高温超電導SQUIDセンサーの様々な応用が欧米を中心に検討されている。また、微小磁気ビーズと組み合わせた抗原抗体反応量計測など、バイオ工学分野における分析技術としての小規模研究開発も進められている。電総研では、金属疲労に伴う余寿命検査など、これまでとは質の異なる材料評価技術としての非破壊検査技術を中心に研究を進める。非破壊計測技術の開発には、素子の研究開発ばかりでなく、システムレベルの研究や利用ソフトウェアの開発が必要であり、その点においては市場ニーズの把握と外部機関との共同研究が重要である。

低温SQUIDについては、電総研はこれまで超電導センサー研究所を通じ、わが国における生体磁気計測システムの開発に貢献してきた。今後は、「産業計測」のために必要な技術開発を進めると同時にその移転を図る。当面具体的には、(2)項で述べた超電導カロリメータの付属デバイスとして不可欠である高感度SQUID増幅器の開発を民間企業と共同して進める。

§ 4 おわりに

電総研においては、高温超電導と低温超電導の研究を両輪論の立場から進めてきたが、現時点での低温超電導、高温超電導両研究のポテンシャル、将来の技術開発の展開へ寄与の仕方についての分析し次期目標と戦略の議論をした。

超電導エレクトロニクスの研究開発には、今後も引き続き何らかの公的な支援を要請してゆかなければならない。その際、庇護のもとでの研究推進でなく、研究開発の社会的受容性にも踏み込んで、「超電導でしか出来ない」、「超電導ならなお良い」という出番を見据えて、研究戦略を主張すべき時期と、我々は考えている。超電導エレクトロニクスの実用化に向けた当所の戦略は、21世紀の高度に発達した「半導体」、「バイオ」、「材料」、「計測技術」などの主要産業に対し、超高速信号処理技術、高精度・高感度センサー技術、電圧標準技術などのいわゆる「産業計測」向けの競争力のある技術を開発し、提供することにある。

低温超電導研究に関しては、磁束量子(SFQ)を扱う回路技術開発に取り組み、高速デジタルエレクトロニクス分野では、DA変換器などの応用目標を設定しする。センサー技術として放射線検出器の開発の研究を促進する。

高温超電導研究のデジタルエレクトロニクス応用については、基礎的な視野で接合制御の問題にターゲットを集約する。フェーズ1の成果を活用し、素子物理の視点を取り入れて研究すべきと考える。超電導カロリメータ、SQUIDには独自の出番があると期待される。長期的な視点で、基礎物性研究の発展や酸化物を扱う新しいエレクトロニクスの萌芽的研究の育成には引き続き注力するが、所外との連携を一層強めホットな議論の場に出番があるよう心がけなければならない。

ここに述べた超電導エレクトロニクスへの戦略をもとに、周囲の研究の進展を視野に入れて、今後何をすべきかの議論に我々ももっと時間を使い、ささやかでも、追い風を自ら巻き起こして研究の発展を目指す。

最後に、「近藤効果の発見」で著名な当所の誇る世界的な理論物理学者である近藤淳博士(当所顧問、学士院会員)の言葉を引用して締めくくる。「何を研究のテーマに選ぶかを良く考えることが研究の最も重要な過程で、それが決まれば研究はかなり進んだとも言える。研究には粘りが必要で、自分は研究は好きだが、いつも楽しいと思ったことはなく、日々苦しみながら進めてきた。」

用語の説明

(1) SFQ回路とラッチ型回路

超電導デジタル回路方式。SFQ回路では、磁束量子(Single Flux Quantum: SFQ)の有無が二値情報に対応づけられる。磁束量子は、永久電流として超電導ループ中に記憶され、微小電圧パルスとして回路内を伝播する。この回路原形は我が国で研究され、近年米国で「RSFQ(Rapid Single Flux Quantum)回路」として体系化された。低消費エネルギー性と高速性からシリコン系エレクトロニクスに優位性を持ち現在の超電導デジタル回路方式の主流となっている。

ラッチ型回路ではジョセフソントンネル接合素子のゼロ電圧とギャップ電圧状態が二値情報に対応する。ラッチ型回路では、ギャップ電圧状態からゼロ電圧状

態へのリセットが必要となるため、SFQ型回路の方が消費電力が小さく、また高速動作可能である。

(2) 米国におけるペタフロップス級コンピュータ開発複雑系システム、宇宙航空システムの流体力学モデル、長期天気予報、遺伝子データ管理、世界経済ダイナミクスモデル、核物質管理等に関する大規模な計算を短時間で行うことを目的に米国で行われているペタフロップス級コンピュータ開発プロジェクト。HTMT(Hybrid Technology Multi-Thread)プロジェクトと呼ばれる。マシン全体は、RSFQ回路から作られるCPU、超電導キャッシュメモリ、フォログラムメモリ、光ネットワーク等によって構成される。最終モデルでは、10万JJ規模のRSFQ回路チップを作製し、それらを50個マルチチップモジュール上に集積し、さらに、512個のモジュールを直径0.9m、高さ0.8mほどの空間に集積することによってCPUが構成される。CPUと超電導メモリの冷却は液体Heによって行われる。

(3) ソフトウェア無線

通常の無線通信では、ある通信方式にのみ対応した機器を用いて、送信・受信を行なっている。これに対して、ソフトウェア無線では、プログラム可変のデジタル信号処理により、一つの機器でプログラムを書換えるだけで任意の通信方式の取り扱いが可能で柔軟性から将来性が期待されている。

(4) 熱雑音とSFQ

熱ゆらぎによってジョセフソン接合の位相が回転する現象は「位相すべり」とよばれる。これが、超電導回路中のジョセフソン接合で発生すれば、回路の誤動作となって現れる。熱雑音に起因する誤動作確率 p は、

$$p = A \exp[-B I_c/T]$$

と近似的に表わせる(I_c : 接合の臨界電流、 T : 動作温度、 A 、 B : 回路構成に依存する定数)。通常的应用に対しては、 $I_c/T > 25$ 程度(例えば、 $T=4.2\text{K}$ において $I_c=105\mu\text{A}$)にとれば誤動作確率は無視できるとされている。高温超電導体においてもSFQの動作原理は同様であるが、動作温度を高く設定できることの優位性と熱雑音による回路の誤動作の問題はトレードオフとなるため、応用を想定するうえで回路規模や回路の仕様への制約となる。

(5) 半導体、超電導を比較した、AD、DA変換器現状と超電導の優位性

計測・標準用超電導DA変換器のねらいは、ジョセフソン効果を利用して任意の波形を高精度に合成することで、これを半導体素子で行なうことは原理的に不可能である。

AD変換器の民生用としての主たる用途はオーディオ用で、市場規模のある超電導の応用はほとんどない。レーダー技術ではコストを無視しても、より高い性能が求められる特殊分野として期待されている。ソフトウェア無線基地局のAD変換器は新しい狙い目といえるが、システムにおける冷凍機の評価が重要になる。ただし、化合物やSi/Geという強力な競争相手が存在する。

(6) 直流ジョセフソン電圧標準システムとプログラマブルジョセフソン電圧標準素子

ジョセフソン素子にマイクロ波を照射すると、素子の電流/電圧特性曲線上に、一定の間隔で定電圧ステップが発生する。この電圧間隔は、照射するマイクロ波の周波数のみに依存し、素子の材質や形状等の他のパラメータには依存しないため、精密直流電圧測定における基礎標準として広く用いられている。現在、数千個から数万個の素子で構成されるジョセフソンアレイを利用して1~10Vの直流電圧を発生させている。最近になって、バイナリー方式、パルス駆動方式、RSFQ方式等の任意の電圧波形を発生させることの可能なプログラマブルジョセフソン電圧標準が提案され、交流電圧標準等への応用を目指して、電総研、米国NIST、ドイツPTB等の国立研究機関で実用化研究が進められている。

(7) 超電導放射線(X線)検出器

超電導を利用したX線検出器には、トンネル接合検出器(STJ)と熱量計型検出器(ボロメーター、カロリメーター)がある。前者は、半導体検出器同様にX線によって超電導ギャップを越えて励起される準粒子の数を数えることにより、吸収されたX線のエネルギーを分光する。後者は、X線を吸収した吸収体の温度変化を、大きな温度・抵抗変化を有する超電導転移端を利用して測定するものであり、1995年に新動作原理が発表され注目を浴びることとなった。性能(6keV - X線

の半値幅と計数効率)としては,トンネル接合素子がおよそ27 eV,数千cps,超電導カロリメーターの場合が7 eV,数百cpsが報告されている。動作温度はいずれも,0.1 K付近である。

(8) SQUID

光波の干渉を利用することにより高精度距離測定が可能となると同様,電子波の干渉を利用して磁場の高感度・高精度測定を可能とするセンサー。超電導リングの一部に数個のジョセフソン接合素子を含む構造を有する。数10フェムトテスラ(地磁気の約10億分の1)の磁場計測可能。微小磁気,電流,電圧,変位計測などに応用されている。非侵襲計測手段として数百チャンネルのSQUID脳磁システムが市販され,脳機能診断のために使用されている。今後,高温超電導体を利用したSQUIDに置き換えられることが期待されており,そのための技術開発が重要である。

(1999.6.4 受付)

著者紹介



清水 肇

Hazime SHIMIZU

電子基礎部長

E-mail:hsimizu @etl.go.jp

表面科学, 極高真空の発生と計測の研究に従事。