

超電導工学研究所(SRL)の第IIフェーズ研究 計画

SRLの第IIフェーズも2年目に突入しました。ここで第IIフェーズでの研究計画について紹介いたします。

1. [はじめに](#)
2. [研究開発の内容および目標](#)
 - 2.1 [超電導材料基礎](#)
 - [1] [機構解明](#)
 - a. [高温超電導機構の解明](#)
 - b. [臨界電流メカニズムの解明](#)
 - [2] [新材料探索](#)
 - a. [銅系材料](#)
 - b. [非銅系材料](#)
 - 2.2 [超電導バルク材要素技術](#)
 - [1] [高電磁力バルク材料製造基礎技術](#)
 - [2] [高臨界温度バルク材料製造基礎技術](#)
 - 2.3 [超電導線材要素技術の開発](#)
 - [1] [次世代線材製造基礎技術](#)
 - [2] [次世代多芯線材製造基礎技術](#)
 - [3] [線材用結晶成長機構の解明](#)
 - 2.4 [超電導素子要素技術の開発](#)
 - [1] [素子作製要素技術の開発](#)
 - a. [大型単結晶基板作製技術の開発](#)
 - b. [高品質薄膜作製技術の開発](#)
 - c. [接合形成技術の開発](#)
 - [2] [回路化要素技術の開発](#)
 - a. [回路設計及び回路試作](#)
 - b. [評価技術の開発](#)
 - 2.5 [総合調査](#)
3. [おわりに](#)

1. はじめに

21世紀を目前に控えて、高温超電導実用化の幕は次第と上がろうとしている。発見後10年余りを経過し、多くの新物質の発見とそれらを用いた膨大な基礎研究がなされたにもかかわらず、高温超電導の発現機構は未だ解明されたとはいえず、いわば手詰まりの状態に陥っているが、これは逆に、新しい物理学への突破口となる可能性を意味しており、基礎研究者の忍耐と独創に期待してよいだろう。

一方で、従来の現象論によって、おおまかな高温超電導現象の解明は可能であり、それに基づいた開発研究は、過去10年間に大きな進歩を遂げたといつてよいだろう。さらに常電導状態におけるこれらの物質群の基礎的な諸物性の研究は、飛躍的な進歩を示し、我々はこれらの物質群の全様はほぼ把握したといえる。このような状況は、「基礎と応用の結婚」といわれた1950年代末の半導体研究開発の状況を想起させるものがある。

高温超電導の実用化に関していえば、バルク材の開発、線材の開発、新デバイスの開発

の3分野に分類され、それぞれがまさに本格的な実用化への一步を踏み出そうとしている。

超電導バルクに関しては、YBCOバルクが液体窒素温度で作動する磁気浮上効果を示したため大きな関心を集めたが、実用化に関していえば、フライホイール型電力貯蔵装置が最も可能性が高く、疑似永久磁石(スーパーマグネット)としての応用は、強い磁気保磁力(3T, 77K)の実現により応用範囲が拡大していくものと思われる。フライホイール型電力貯蔵装置についていえば、多段式が開発され、それを並列化すれば、2MW/hの貯蔵能力をもつものが開発される可能性があり、欧米各国でも競って開発されている。

線材の分野では30K以下という低温ではあるが、優れた特性をもつBi系線材の実用化が進んでいる。そしてこれらの材料を用いた様々なモデル機器の開発も行われている。しかし、液体窒素温度(77K)における応用を考えた場合、これらの材料の臨界電流密度(J_c)等の磁界特性が悪く、応用範囲が電力ケーブルなどに限られる。それに対して、123系物質であるYBCOの不可逆磁界は高く、Nd123に至っては77Kにおいて4.2KにおけるNbTi(11T)とNb₃Sn(23T)の間である13Tに達し、現在のところ最も有望な線材用材料であることを示している。123系物質の線材は、超電導線材の応用における最も重要な因子である臨界電流(I_c)の磁界特性においてこのように優れており、その作製に関して結晶粒の面内配向という難しい課題を抱えているが、実用化が進むBi系線材の次の世代の線材として、その開発が急速に進んでいる。近い将来、77K、高磁界で優れた特性をもつ線材が実現すれば、電力エネルギー、交通、産業機械、医療等様々な分野の機器開発が本格的に始まり、環境、資源問題の解決に大きな寄与を果たすものと予測されている。

新超電導デバイスについては、超電導特有のジョセフソン効果を利用したSQUID(超電導量子干渉素子)を基本とするデバイスとその回路化(単一磁束量子デバイス, SFQ)が最も有望であろう。一方で確固とした半導体産業が存在し、半導体技術もまた進歩しつつある現在、その壁を克服することは容易ではない。しかし、半導体チップの性能向上とともに、発熱問題が深刻化し、チップの低消費電力化に大きな努力が払われている。しかし、低消費電力化と高速化は本質的に相対立するものであり、5年後位にはその限界が明らかになると予測される。そして、低消費電力化と高速化を両立させるデバイスとしては、今誕生しつつある超電導SFQデバイス以外には、現在のところ存在しない。超高速通信と、超高速情報処理を基幹とする将来の情報化社会を展望すれば、多くの課題を抱えつつも、超電導SFQデバイスの実現を推進することが必要であり、これはまた社会の省エネルギー化にも大きく貢献するものと信じている。

第IIフェーズ研究開発は、1988年度に発足した通商産業省・新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の超電導材料・超電導素子プロジェクト(以下第Iフェーズ)における、新材料探索・材料加工技術・評価技術等の超電導材料技術や接合技術・回路技術等の超電導素子技術での成果をベースに、高温超電導材料および素子に関する基盤技術を開発し、様々な応用に実質的に使える材料・素子の実現を目指すものである。具体的なテーマは以下のとおりである。

- (1) [超電導材料基礎](#)
- (2) [超電導バルク材要素技術の開発](#)
- (3) [超電導線材要素技術の開発](#)
- (4) [超電導素子要素技術の開発](#)
- (5) [総合調査](#)

2. 研究開発の内容および目標

2.1 超電導材料基礎

高温超電導体の実用化および応用面の飛躍的發展を図る上で基礎物性の解明が有効であることはいうまでもなく、超電導特性を支配する物性基礎パラメータや材料デバイス物理

の確立が強く望まれている。 I_c や臨界磁界 (H_c) 等の特性の改善には、 I_c に及ばず磁束の挙動やナノスケールの微細構造の影響、 また新材料探索を行うためには超電導発現機構や臨界温度 (T_c) を決定している結晶化学的要因の解明を必要とする。

本研究は、高温超電導体の発現機構、臨界電流機構の研究および新材料の探索を行い、超電導バルク材料要素技術、超電導線材要素技術、素子応用基盤技術等の開発に共通する基礎物性面での課題の解決を目指す。

[1] 機構解明

a. 高温超電導機構の解明

BCS理論でほぼその特性が説明できる従来の低温超電導と異なり、高温超電導は既存の理論では理解できない新しい現象である。これまでの研究によって調べられてきた数多くの高温超電導体の物性は、従来金属と同様に理解できる性質、従来金属に比べると異常であるが他の遷移金属酸化物などにも見られる性質、他のどんな物質にも見られない異常な性質の三種類に分けられる。高温超電導機構の解明には、三番目の“他の物質にない異常な性質”の起源を明らかにすることが最も重要である。

解明すべき異常な性質としては、常伝導状態においては“キャリア閉じ込めと呼ばれる伝導機構の異常”、“スピングャップ(擬ギャップ)と呼ばれる超電導転移温度以上の高温で起こる電子状態の変化”、“格子(原子)振動と電子やスピンの相互作用の異常”などが挙げられ、超電導状態においては“超電導ギャップの性質”や“超電導対破壊機構”などが挙げられる。

b. 臨界電流メカニズムの解明

高温超電導体は、 T_c が従来の超電導材料よりはるかに高いため、臨界温度付近での磁束の振る舞い(ダイナミクス)は低温超電導材料に適用できるモデルの範囲を越えており、新しい概念がいくつも提案されている。その代表例は、実用材料として使える限界の磁界を示す不可逆磁界である。低温超電導体の不可逆磁界は、上部臨界磁界にほぼ等しいが、高温超電導体では、その大きな異方性と高い動作温度による熱ゆらぎ効果で磁束線が動きやすく、上部臨界磁界よりかなり低い。しかし、この不可逆磁界を決める磁束のダイナミクスについては詳しい理解が得られていない。これを明らかにすることにより、不可逆線を高温、高磁界側に上げるための指針を得ることが可能となる。

また、超電導状態を磁界や電流を加えた状態で安定に保ち、高い J_c を実現するためには、磁束線を捕捉(ピン止め)し、動き出さないようにする必要がある。第IIフェーズではY-123や次世代材料として期待されるRE-123系(RE: Nd, Smなど)バルク材や線材のピン止め中心および磁束ピン止め機構の解明を目指す。

[2] 新材料探索

a. 銅系材料

元素置換や圧力印加による構造の変調が T_c に与える影響を調べることにより、 T_c 決定要因を抽出する。次にこれらの知見を基に高 T_c をもつ新材料の構造設計を行うと共に、高圧合成や気相急冷合成(薄膜人工格子合成)などの第Iフェーズにおける特殊合成法を基盤とし、その合成手法を検討する。また、液体窒素温度以上の高温(例えば液化天然ガス温度110K)で使用可能な高 H_c ・高 J_c 材料の開発を目指し、まず T_c が高いHg系超電導材料に対し、元素置換等による低異方化を検討すると共に、第Iフェーズで立ち上げた配向厚膜・薄膜合成技術を発展させ金属基板上の2軸配向膜の合成を検討する。

b. 非銅系材料

銅系材料において高温超電導をもたらす要因としてこれまで、強い電子相関、大きなスピン交換相互作用、低次元性などの特徴が明らかになっている。遷移金属酸化物や一部の有機材料は強い電子相関をもつ材料系であり、これら非銅系材料において高い T_c をもつ材

料を探索することは、高温超電導の機構解明のみならず、銅系材料を超える高い T_c のブレークスルーとなる可能性がある。第IIフェーズでは、遷移金属酸化物、有機材料などの強相関係材料において、元素置換や配向制御による相関の強さの制御、多層化による次元性の制御やキャリアドーピングの物性に与える効果を解明することにより、その超電導化を検討すると共に、第Iフェーズで超電導化に成功した有機材料系については、その T_c 決定要因を解明する。

2.2 超電導バルク材要素技術

液体酸素温度での超電導バルク応用は、熱容量が小さく値段の高い液体ヘリウム(4.2K)冷却に比べ、熱的安定性やコストが大幅に改善されることが期待され、超電導リニアモーターカーや電力貯蔵用フライホイールなどの輸送関係およびエネルギー関係の応用面からその実用化が期待されている。

第Iフェーズでは、RE123型超電導バルク体(RE; La, Nd, Sm, Eu, Gdなど)の T_c , J_c , H_c などの基本特性を飛躍的に向上させることのできるMPMG(Melt-Powder-Melt-Growth)法、OCMG(Oxygen-Controlled-Melt-Growth)法などの熔融法を開発した。これにより、NdBCOおよびSmBCOが良好な超電導体であり、かつYBCO(92K)に比べ T_c も高い(NdBCOで96K, SmBCOで95K)ことが見い出された。さらに高磁界において高い J_c や強い捕捉磁界が得られることも証明され、バルク材応用に新しい展望が開けたのである。また、1-2-3系におけるREイオンとBaイオンの置換がバルク材の超電導特性に極めて大きな役割を果たすことを発見したことも大きな成果と言える。第IIフェーズでは、これらの成果をベースに、より高温(液体酸素温度および液体空気温度)での使用を可能とする高 T_c バルク材料製造基礎技術と、より高度な材料プロセス技術を用いて、通常の磁性材料では達成できない高磁界を発生するバルク超電導マグネットの作製を可能とする高電磁力バルク材料製造基礎技術の開発を行う。

目標:高電磁力バルク材料として、温度77Kにおいて、3Tの磁界中で J_c が $10^5 A/cm^2$ 以上、3T以上の磁界を発生(捕捉)するバルク材料を開発する。また、高 T_c バルク材料として、温度90K(液体酸素温度)で $J_c=5 \times 10^3 A/cm^2$ が実現可能なバルク材料を開発する。

[1] 高電磁力バルク材料製造基礎技術

第Iフェーズでは、Y123系において、第2相であるY211相の分散制御による J_c の向上、また、結晶成長時における温度勾配や種結晶を用いることにより、直径が5cmを超える結晶方位のそろった大型バルク超電導体を開発した。

第IIフェーズでは、Y123系での、この J_c 向上や大型化を図るとともに、RE123系(RE; La, Nd, Sm, Eu, Gdなど)にその適用を拡大させる。さらにバルク超電導体を磁石化するために、高磁界を捕捉させ持続させる励磁技術の開発を行う。

[2] 高臨界温度バルク材料製造基礎技術

第Iフェーズで開発したOCMG法は、熔融時の酸素分圧を抑制することにより高 T_c を示すRE123超電導体の作製を可能としたものである。この他、熔融時の温度、相組成、熱処理条件によっても T_c が変化することも明らかにしている。

第IIフェーズでは、これらの知見をもとに、実験的に上記各条件のより最適化を図り、液体酸素温度および液体空気温度で使用可能な高 T_c バルク材料を製造するための基礎技術を開発する。この開発により、 T_c は、液体酸素で使用可能な、98K(Nd123系)、100K(La123

系)に到達できる可能性がある。これを目標として、熱処理条件や熱処理温度、相組成の最適化に関する研究を行う。

2.3 超電導線材要素技術の開発

酸化物超電導体が発見されてから10余年が経過し、超電導線材については、銀シース法Bi系線材でキロメートルスケールでの生産が可能な段階にある。しかしながらこの線材はミクロな構造に由来する限界から、液体窒素温度での磁界特性が悪く、高磁界応用は不可能と見られる。

これに対し、RE123系材料(RE:Y, Nd, Gdなど)は、液体窒素温度(77K)においても高磁界特性に優れており、超電導の主たる応用であるマグネット等の高磁界応用さらには低交流損失電力用ケーブル導体としての利用が可能な材料と考えられている。

しかし、Y123系線材はBi系で用いられた銀シース法(PIT法; powder in tube)を用いることができず、配向金属基材上に気相法によって超電導層を成膜する方法が行われている。数cm程度の短尺では 10^6 A/cm^2 をこえる J_c を記録しているが、成膜速度が遅く生産性、厚膜化の点で欠点がある。既に、これらの欠点を回避する方法として液相エピタキシャル法を検討し、プロセス温度が高いという難点はあるものの、従来法にない簡便さと高速にY123系高 J_c 厚膜を作製できることを示した。

第IIフェーズでは、高磁界下で使用可能なY123系及びRE123系超電導線材を作製するための要素技術として、基材、中間層、超電導層それぞれに最適な材料を探索するとともに、酸化物単結晶及び配向性金属による基材形成技術、クラック発生防止層及び種結晶層の役割を果たす中間層の形成技術、液相法及び気相法を用いた高品質で厚い超電導層の高速厚膜形成技術を開発し、液体窒素温度で利用可能な次世代線材の製造基盤技術を確立する。

また、高磁界下で大容量電流の通電が可能で且つ I_c に対して熱伝導率が小さいY123系及びRE123系超電導多芯線材を作製するための要素技術として、ゾーンメルト法により非超電導相分散技術、結晶高配向化技術、細線化技術及び多芯化技術等を開発する。

目標: 測定端子間距離20cm程度の測定で、温度77K, 5Tの磁界中の J_c

が、 $3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 以上の特性を実現する次世代線材の製造基礎技術を開発する。また、長さ30cm程度、2mm径の試料で温度77K, 3Tの磁界中の I_c が $3 \times 10^3 \text{ A}$ 以上の特性をもつ熱伝導率の小さい多芯線材を実現する製造基礎技術を確立する。

[1] 次世代線材製造基礎技術

第IIフェーズでは、線材構成要素(基材、中間層、超電導層)の高性能化、プロセスの複合化及び材料の複合化により、RE123系高温超電導線材を安定に製作する製造プロセスの基礎技術を確立する。長尺金属基材等に関しては、薄体基材の強度化、集合組織配向度の長尺均一化を図る。また、金属基材や酸化物単結晶上への液相エピタキシャル法による超電導膜成長を可能とするために、液相エピタキシャル法の一層の低温化を図るとともに、液相エピタキシャル法に適した配向金属基材の探索と開発を行う。中間層については、RE123系酸化物超電導材料の線材化にはクラック発生防止及び超電導層/基材の反応抑制等に有効な緩衝層及び高度に配向したエピタキシャル成長を促進するための種結晶層としての役割を有する最適中間層の開発を行う。また、超電導層については、高 I_c 化、液相プロセスの低温化、気相プロセスの高速化を目指して成膜条件の検討を行う。

[2] 次世代多芯線材製造基礎技術

電流リードとしての酸化物超電導材料の応用は、短尺ではあるが高磁界下の I_c が高く、機械的強度を有し、且つ熱伝導率の低い導体の作製及び導体端子部における常電導体金属

との接合が重要である。このため、Y, Nd, Sm及びそれらの合金系RE123酸化物等の超電導細線のゾーンメルト法による結晶高配向化合成技術、高磁界下電流密度向上のための第2相粒子分散制御技術、多芯化等による高強度化技術の開発及び金属/酸化物のリード端部接続技術の開発を行う。

[3] 線材用結晶成長機構の解明

RE123系酸化物超電導材料を使用した超電導線材及び超電導細線の開発を効率良く進めるため、磁界中の J_c 向上、交流損失低減に有効な磁束ピン止め中心としての第2相粒子の均一微細分散機構、導体の高強度化のための金属粒子の均一分散機構、RE123超電導体の高 J_c 達成のためのマトリックス123相の結晶配向化フアセット成長機構を解明する。

2.4 超電導素子要素技術の開発

半導体集積回路の高速化は、素子の微細化による高速化によって達成されてきたが、微細化に伴う配線抵抗の増大による配線遅延がシステムの性能を制限するようになった。その性能向上のために、素子の単体性能の見ならず、配線遅延や実装遅延など総合的な性能向上が大きな課題となっている。

この中で、最近、単一磁束量子回路がその高速動作と低消費電力の観点から注目されている。単一磁束量子は単一電子とならび電磁気学の最小単位のひとつで、その本質的なスイッチング速度は $\phi_0/\sqrt{V_g}$ (ϕ_0 : 単一磁束量子の大きさ, $2.07\text{mV}\cdot\text{psec}$, V_g : 磁束量子の出入りのゲートの役割をはたすジョセフソン接合のギャップ電圧)で記述される。従って酸化物超電導体を用いて高い V_g が実現すればサブピコ秒のスイッチング速度が実現されることになる。また、ジョセフソン接合の両端には非常に幅の狭い電圧パルスしか発生しないため、消費エネルギーも従来の半導体素子に比べ2桁から3桁小さくなる。

さらに、単一磁束量子を用いた超電導回路では、超電導配線により配線遅延を無視できること、低消費電力のため発熱が少なく高実装密度が可能であることなどから、素子単体の超高速性と合わせ、従来の性能を大きく凌駕した特性を示す回路・システムを作ることができるであろう。そして将来的には、超高速の情報処理システムやペタフロップス・コンピュータの実現も期待される。

[1] 素子作製要素技術の開発

酸化物高温超電導体を単一磁束量子(SFQ)論理回路等の超高速、低消費電力集積回路に幅広く応用できるか否かは、要素技術である薄膜・積層技術や接合技術の高度化が重要な鍵となる。磁束量子素子の超高速性、低消費電力特性を活かすには、目的に則した高品質基板およびその上に成膜した平坦かつ高性能(高 T_c 、高 J_c)な超電導薄膜はいうまでもなく、低誘電率層間絶縁膜やバリア層、抵抗薄膜などとの積層構造の形成や微細パターンの加工が不可欠である。従来試見られてきた MgO や SrTiO_3 などの基板上への酸化物高温超電導体薄膜の成長では、基板と薄膜の格子長の違いによる歪みにより、表面の粗さを 5nm 程度以下にすることができず、この粗さが接合特性のばらつきの一因にもなっている。この問題を解決するためには、123系単結晶基板上への成膜(ホモ・エピタキシャル成長)も可能にする高品質基板作製技術と高品質薄膜作製技術を確立しなければならない。

また、高温超電導体を用いたジョセフソン接合については、これまでに、液体ヘリウム温度において 1mV 以上の出力電圧($I_c R_n$ 積: I_c はジョセフソン接合を流れる最大の超電導電流, R_n は I_c 以上の電流を印加した時に発生する抵抗値)を有し、かつ電流-電圧特性にヒステリシスを生じないなど、SFQ論理回路を構成する上で極めて好都合な特性を持つ事が明らかになっている。しかし、 $I_c R_n$ 積に代表される現状での接合の性能は、理論的に予測される値($\sim 10\text{mV}$)に比べれば依然として低い状況にある。また、集積回路の開発に不可欠

な接合特性の再現性、均一性に関しても、現状のジョセフソン接合作製技術では I_c 等の特性ばらつきが大きいなどの問題点が存在する。

第IIフェーズでは、高温超電導体を用いたSFQデバイスを中心にした高速情報処理用デバイスを実現するために不可欠な、集積化が可能なY123系及びRE123系超電導素子を作製するために、以下の要素技術を開発する。

- ・高品質基板として、25mm角以上の超電導単結晶を作製する大型単結晶基板作製技術
- ・超電導層及び非超電導層(層間絶縁層等)それぞれに最適な材料を探索するとともに、これら両層を積層しエピタキシャル薄膜構造等の高品質多層構造を実現する高品質薄膜作製技術

- ・高品質ジョセフソン接合を実現するために、バリア層形成技術及び微細パターン形成技術を開発すると共に、接合特性の一層の改善を図るため、界面制御技術等の接合形成技術

目標:大型単結晶基板作製技術、高品質薄膜作製技術および接合形成技術を開発し、 $I_c R_n$ 積(I_c と常電導状態の抵抗との積)が、20Kにおいて1mV以上、60Kにおいて0.3mV以上であって、 $I_c R_n$ 積の標準偏差が8%以下となる1000個のジョセフソン接合を同一基板上に実現する。

a. 大型単結晶基板作製技術の開発

高温超電導体の素子応用の展開にあたっては、超電導層や絶縁層を形成する基板材料の選択が重要であり、このためには界面の無欠陥化が可能なホモエピタキシャル成長を可能にするRE単結晶基板材料への移行が最も有効な方法と考えられる。結晶性の向上、超電導材料との格子定数の整合、大面積化等を実現し、高品質大型単結晶基板を作製するための基盤技術の開発を行う。

b. 高品質薄膜作製技術の開発

超電導磁束量子素子・回路は超電導層、抵抗層、各層間の絶縁層から構成される。さらに超電導層はグランドプレーン、電極層、配線またはクロスオーバー層など複数の層が必要になり、素子・回路の構造は最少でも6層(超電導単結晶基板を用いると5層)になる。特にインダクタンスが回路設計の重要パラメータである磁束量子素子・回路では配線の長さ、幅に制限が生じるが、超電導薄膜の多層化は素子構造及び回路設計に多大の自由度をもたらすため、多層構造形成技術は必要不可欠の技術である。

酸化物高温超電導体をこのような多層構造に適用するための薄膜プロセスにおいては、大面積、高品質の超電導薄膜、絶縁体薄膜からなる積層構造を形成し、各層の結晶性をエピタキシャル成長により制御することにより、層間の反応、薄膜の凹凸に起因した電氣的短絡を防止することが必要である。そのために、まず、薄膜成長機構を解明し、再現性の高い成膜法を確立しなければならない。また、層間絶縁層に関しては、素子の高速性の確保の観点から誘電率や誘電ロスが小さな材料が望ましく、かつ超電導膜との良好なエピタキシャル成長が可能な材料を探索する必要がある。

次に、すでに作製が試みられている123系単結晶基板を活用したホモエピタキシャル構造を基本とするもの、および、比較的大型の単結晶が育成できるペロブスカイト系材料を基板とした、ヘテロエピタキシャル構造を基本とするものに分けて薄膜形成・積層技術の開発を進める。

c. 接合形成技術の開発

酸化物高温超電導体を用いたジョセフソン接合の開発は、この材料の発見直後から精力的に行われてきた。これまで、電流-電圧特性にヒステリシスをもたないSNS接合や粒界接合では、液体ヘリウム温度で1mV以上の $I_c R_n$ 積をもつ単体接合が作製されてきているが、SFQ論理素子・回路等の集積回路の開発に不可欠な小さな特性ばらつきをもつ接合を多数形成する技術は未だ確立されていない。一方、SFQ論理素子の速度は基本的には接

合の $I_c R_n$ 積に比例して早くなる。また、SFQ回路の高速動作特性などの評価のためには、半導体測定回路で検出可能な電圧レベルにまで信号を昇圧する必要があり、現状より大きな出力電圧をもつ接合の開発が望まれる。

第IIフェーズにおいては、小規模のSFQ実証回路の試作・評価に不可欠な特性のばらつきの小さな標準的接合の形成技術と、SFQ回路の高性能化や半導体とのインターフェース用回路の実現に結びつく高 $I_c R_n$ 積や高出力電圧特性などの特徴をもつ先端的接合の形成技術を並行して進める。

[2] 回路化要素技術の開発

単一磁束量子回路は超高速パルス信号の伝搬技術やこれら高速パルス信号に対するタイミング信号の生成技術(同期技術)等の、半導体集積回路では未体験の新たな課題に直面している。これら課題の解決のために、小規模の回路を設計・試作し、設計の妥当性、高速動作性等を実証することが不可欠である。

第IIフェーズでは、超高速・低消費電力で動作する単一磁束量子素子等の超電導素子を回路化する際の要素技術として、シミュレーション技術及び回路設計技術を開発し、論理回路、記憶回路、インターフェース回路、高周波回路等の各種小規模実証回路を試作する。また、超電導回路の構成要素(投合、インダクタンス、抵抗等)の諸特性を測定する素子特性測定技術及び超高速・微弱信号の回路動作を測定する回路特性測定技術を開発する。

目標:単一磁束量子回路等の小規模超電導回路を試作し、動作周波数10GHz以上において、1接合当たりの消費電力1nW程度の超電導回路動作を確認する。

a. 回路設計及び回路試作

単一磁束量子回路の高速性と低消費電力特性を確認するために、100接合規模の回路を設計・試作し、回路動作の解析により技術的課題を明らかにする。これにより、将来のペタフロップスコンピュータや超高速大容量通信などへの超電導回路の応用展開に向けた回路化技術の基盤構築を目指す。

b. 評価技術の開発

単一磁束量子回路は情報担体として極限の単一量子を用いるため、信号エネルギーが小さい。加えてジョセフソン接合を用いるため動作速度が速い。したがって、これらの回路動作を測定するには、半導体回路を用いた従来システムでは、計測は極めて困難であり、新しい評価技術を開発する必要がある。

2.5 総合調査

高温超電導材料は、この10年の間にその作製、加工技術に着実な進展があり、様々な応用へどのように使えるか否かを検討できるほどの段階を迎えた。その中で、日米を中心に世界各国が物性研究、材料開発および応用分野の開拓に凌ぎを削っている状況がある。このように世界的に競合している先端技術分野で、効率的に研究開発を推進するためには、研究開発状況や競合技術の迅速な情報入手が不可欠となる。また、理論的にも多くの未解決な課題を抱えるこの分野では、理論や物性研究者との幅広いネットワークの構築も有用である。さらに、研究開発成果の各分野への応用展開を促進するために、大学・企業等との連携も必要である。

国内外の研究機関、大学・企業等の第一線の研究者等との密接な連携、ネットワーク構築により、超電導材料の物性評価、新超電導材料の開発、バルク・線材作製プロセス技術の開発、単結晶育成プロセス技術の開発、薄膜形成プロセス技術の開発、接合加工技術の開発、電子デバイスの開発等の各分野およびその相互関連性について調査し、それぞれの研究の新たな発展方向を探ることも重要と考えている。

また、上記の研究で得られた研究成果の各分野への応用展開を図るために、大学・企業等との「共同研究」を積極的に行う計画である。

3. おわりに

超電導工学研究所が通商産業省プロジェクトとして第IIフェーズに計画している研究開発の目標、内容および背景を紹介した。バルク、線材、電子デバイスのそれぞれについて多くの重要課題を抱えており、これらがいつ克服され産業化の道を歩むか、予測することは難しいが、日米をはじめとして世界各国がこの開発に注力しているので、2005年前後には産業化の目処がつくものと考えている。半導体を例にとれば、Geに着目されたのが1945年であり、トランジスタが発明され、さらにSiのLSIへと進み、現在の情報革命の引き金となったIBMの360コンピュータが出現したのが1965年であり、その間20年の歳月を要している。我々が予測しているように、超電導産業が離陸するのが2005年頃とすれば、これも高温超電導発見以来20年ということになる。このことは高温超電導の研究開発は、半導体のそれとほぼ並行的に進んでいるといえるのではなかろうか。エネルギーや環境問題が次第と深刻さを増している世界で、超電導産業の果たすべき役割は極めて大きいと信じている。