



酸化物超伝導線材の試作

理工学部・機能創造理工学科

坂間 弘 坂本 治久

研究の背景

超伝導は電気抵抗ゼロ、完全反磁性という特異的な性質を示し、基礎的にも応用的にも注目されている。現時点でもっとも重要な応用例は、リニアモーターカーとMRIである。いずれも極めて大きな磁場を発生させることのできる超伝導コイルを用いていることが特徴である。すなわち、電気抵抗がないためにコイルから発熱しない⇒コイルに巨大な電流を流すことができる⇒大きな磁場を発生させることができる、という理屈である。しかし、今使われている超伝導体は金属ベースの超伝導体であり、臨界温度(超伝導状態を保つことのできる最高温度)が極めて低いため、冷却のためのコストが高いことがネックになっている。1986年に臨界温度が高く液体窒素が冷媒で使える(したがってコストダウンできる)銅酸化物の超伝導体が発見された。

その後、この銅酸化物超伝導体の実用化研究が盛んにおこなわれたが、この材料にはいくつかの大きな問題があることがすぐに明らかとなった。1つは、伸ばしたり曲げたり加工性が悪い(展延性が低い)ということで、1つは臨界電流(超伝導状態を壊さずに流すことのできる電流)が小さいということである。これらはいずれも、銅酸化物超伝導体を使って線材やコイルを作る場合には致命的な欠点になりうるものである。

前者に関しては、ニッケルなどの金属上に薄膜の形で銅酸化物超伝導体を形成することで克服された。しかし、後者に関しては金属超伝導体と比べればまだまだ不十分である。さらに悪いことには、ただでさえ小さい臨界電流密度が、超伝導体に磁場が加わるとさらに急激に減少してしまう。これでは、銅酸化物超伝導体で超伝導電線やコイルを作ることはできない。ただ、銅酸化物超伝導体にはさまざまな物質的バリエーションがある。たとえば、ピスマス系超伝導体は磁場による臨界電流密度の減少傾向が著しいが、イットリウム系超伝導体はそれほど減少しない。銅酸化物超伝導体の中には、さらに減少率の小さいものもありうる。そのようなものを探る努力がなされている。最近、鉄酸化物超伝導体も発見されて注目されている。

研究目的

酸化物超伝導体にはきわだった長所があるものの、線材やコイルへの応用という観点からは解決すべき課題が山積している。その1つにはコストの問題がある。薄膜で線材やコイルを作れば、伸ばしたり曲げたりして作るよりも一般的に製造コストは高くなる。製造技術の低コスト化は、実用化を考える上で極めて重要な課題である。

そこで本研究は、臨界電流密度を向上させるとともに、コストダウンを意識して超伝導線材やコイルの製造技術の開発を行うことを目的とする。

研究プロジェクト

本研究は、2010年度に採択された「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」の一環として行われたものである。研究プロジェクト名は「学際連携による超伝導伝送システムとマグネット開発」である。プロジェクトチームは8名から構成されており、プロジェクトはさらに4つのグループに分かれている。本研究の共同研究員2名は、その中の「線材開発チーム」に属する。

プロジェクト全体は、「低炭素社会を実現して地球温暖化を防ぐためには、化石燃料から、太陽光・太陽熱・風力などの再生可能な自然エネルギーへの転換が必要不可欠である。自然エネルギーには製造する適地というものが存在するため、それらの場所でエネルギーを大規模に生成したのち消費地に大電力を長距離輸送するという方法が検討されている。そのためには、送電網の電力ロスを最小限に抑えることのできる超伝導線を採用することが必要である。研究開発が活発に行われているが、超伝導線による伝送システムの実用化にはまだ多くの問題点がある。解決すべき課題は基礎物性、物質、線材から装置、線材、システムまで多岐に渡るため、要素技術の開発だけでなく全体の整合性を踏まえた包括的な取り組みが求められている。本プロジェクトでは、基礎から応用、基礎物性からシステムまでを網羅する専門分野をもつ研究者が集まって、横の連携を密に保ちつつ研究開発を推進し、研究成果をお互いにカスケードさせることにより、効率的に超伝導伝送システムとマグネットの実用化に向けて着実に進んでいくことを目的としている。

また、プロジェクトの実施により、「再生可能な自然エネルギーに立脚する低炭素社会を実現させるには、自然エネルギーを大量に得る技術と同時に、それを効率的に輸送する技術が必要である。利用し易いエネルギー形態として電気エネルギーを仮定したとき、自然エネルギーは安定供給が難しいこと、広範な場所からの送電が必要であり、現在の伝送システムは自然エネルギーと両立し得ない。この点でブレークスルーをもたらすのが、超伝導を利用したシステムである。本プロジェクトは、まさにその実現に向けて参画する研究者が一丸となって協力するものである。従って、研究の具体的な成果は、超伝導伝送システムとマグネットの早期実用化に寄与できることを期待している。

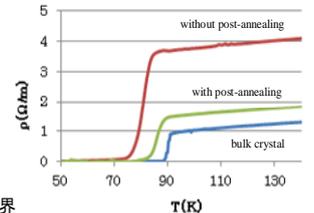
さらに、「線材開発チーム」の研究内容は「酸化物超伝導体を用いた超伝導線材における無磁場及び磁場印加時の臨界電流密度の増大を目指して、金属基板上の中間層と超伝導層の結晶性、配向性を向上させる成膜プロセス及び改質プロセス開発を行う。ピン止め中心を超伝導層に導入する方法を検討する」ということである。そして、「線材開発チーム」の目標は、「銅酸化物超伝導線材の高臨界電流密度の達成、ピン止め中心をもつ超伝導材料や新規超伝導材料の薄膜化・改質プロセスの開発(定量的目標: 77Kでの臨界電流密度10,000A/mm²以上)」である。

共同研究員2名の役割は、坂間が成膜プロセスを、坂本が改質と高効率化を担当する。

研究結果

STO(100)上のYBCO

酸素分圧: 17Pa
温度: 760°C
膜厚: 1600nm
レーザーパワー: 520mJ
レーザーパルス: 6Hz
ポストアニール: T=760°C 12時間



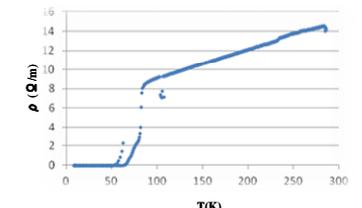
ポストアニールによって臨界温度は上昇し臨界温度以上での抵抗値も減少する
⇒ ポストアニールによって薄膜中の酸素が補充されたため

The resistivities of YBCO thin films and bulk crystal

Cu クラッド基板上-中間層CeO₂- YBCO

CeO₂ 中間層
真空度: 3.5 × 10⁻⁴Pa
温度: 654°C
膜厚: 300nm
レーザーパワー: 400mJ
レーザーパルス: 4Hz

YBCO 層
酸素分圧: 18Pa
温度: 654°C
膜厚: 800nm
レーザーパワー: 520mJ
レーザーパルス: 6Hz
ポストアニール: T=654°C 12時間



The resistivities of YBCO thin films

Cu クラッド基板上のYBCOは超伝導転移しなかった
Cu クラッド基板上に中間層であるCeO₂を挟むことでYBCOは超伝導転移した

塗布熱分解法による高温超伝導体の厚膜配線形成の試み

原料物質: Y, BaおよびCuの有機化合物溶液

スピンドットによる塗布

炉内加熱による溶媒乾燥

レーザー加熱による酸化物形成

レーザー加熱機構の構成

基材SUS304の含有物

(a) レーザ加熱前の塗膜の元素組成

成膜部の断面観察(SEM)

成膜部の観察(光学顕微鏡)

レーザー加熱による結晶性の変化(XRD分析)

レーザー加熱により有機化合物が除去され、Y, BaおよびCuの酸化物が形成されている。

シンプルな工程により厚さ10μmオーダーのY, BaおよびCuの酸化物厚膜を高効率に形成できた。しかし、ペロブスカイト構造にいたっておらず、加熱工程およびプロセス条件に改善の余地を残している。

研究の成果

銅酸化物超伝導体を用いた良質な線材を開発する目的で、銅あるいはステンレスなどの配線基板上に所定の厚さの銅酸化物超伝導薄膜層を形成する技術の開発を行った。現時点での問題点としては、必ずしも安定的に超伝導層の形成ができていない、線材として十分な臨界電流密度が得られていないという点が挙げられる。

今後は、製造条件の最適化により実用に足る銅酸化物超伝導線材を開発していく予定である。

The cuprate high-T_c superconductor films for electric wires were successfully fabricated using thin film growth technique and reforming process. However, a further improvement in critical current density is needed for the future practical application.