

## 〔課程博士〕（博士論文審査及び最終試験の結果要旨）

氏 名： 李 備戰 (LI, Beizhan)

論文題目： Study on the control of vortex pinning in high- $T_c$  bulk cuprates

「高温超電導バルク銅酸化物の磁束ピン止め制御に関する研究」

### 博士論文審査：

高温超電導体 ( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-d}$ , RE: Gd, Nd, Y などの希土類金属元素) を溶融凝固法により結晶化して得られるバルク (結晶の塊) 超電導体 ( $\text{RE-Ba-Cu-O}$ ) は、第二種の超電導体として、静磁場中で超電導臨界温度 ( $T_c$ ) 以下まで冷却することにより超電導体内に侵入した磁束がピン止め中心に捕捉され、臨界電流が向上し低温で磁石として利用できる。電磁石のように電流リードを必要とせず、高いエネルギー密度を保持して高磁束と急峻な磁場勾配を実現するバルク超電導体磁石は幅広い機械システムへの実用の可能性をもつ。バルク超電導体の磁束捕捉特性は、RE サイトの固溶体効果に主として起因する磁場中臨界電流密度のピーク効果や、サブミクロンサイズの常磁性酸化物粒子等の添加による自己磁場領域での臨界電流特性によっており、結晶組織の制御改善とともに、適切な非超電導酸化物の選択添加によりピン止め中心を生成制御することが課題となっていた。

著者は、添加効果を考究する酸化物として  $\text{RE-Ba-Cu-O}$  の結晶構造と類似するペロブスカイト型結晶構造をもつチタン酸バリウム ( $\text{BaTiO}_3$ ) に注目して、この粒子の添加が磁束ピン止めを与える効果を精密に調べた。まず、 $\text{BaTiO}_3$  を  $\text{Gd-Ba-Cu-O}$  バルク体の溶融凝固過程に添加した結果、自己磁場付近での臨界電流の増大が銅イオンと Ti イオンとの部分置換や  $\text{BaTiO}_3$  の析出によっており、1.5 テスラ付近の磁場中臨界電流のピークは Ba 過剰な状態から Gd/Ba イオンの固溶効果によると結論した。さらに、著者は  $\text{TiO}_2$  の添加を詳細に調べた。その結果、Ti イオンは  $\text{RE-Ba-Cu-O}$  格子の銅-酸素の 1 次元鎖部分の銅イオンと置換するが、その周辺に格子歪を生じると推定し、自己磁場領域の臨界電流の増大を得た。さらに  $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{BaO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  それぞれの粒子の添加や  $\text{BaO}_2$  と  $\text{TiO}_2$  の粒子の混合添加による諸条件で添加量を変化させた試料作成を行い、 $\text{BaTiO}_3$  の再結晶化のモデルを提起し、磁束ピン止めによる臨界電流向上の証左を得ようとした。溶融凝固による結晶成長温度をやや低温にすることを試みた結果、磁場中臨界電流値のピーク効果が抑制され、広い領域での臨界電流を向上できることが示唆された。また、臨界温度  $T_c$  の顕著な低下が観測されなかった。この結果を  $\text{BaTiO}_3$  の再結晶化によると考えると磁場中の臨界電流測定の実験結果をかなりの程度説明できることを示した。

以上の結果に加えて、著者は、 $\text{BaTiO}_3$  のナノ粒子を添加した試料の走査電子顕微鏡観察により、溶融凝固過程において、結晶粒界等にナノサイズの粒子が 3 次元的に適切に配置されていることによって、適切なピン止め効果が得られ、自己磁場領域から最大 4 テスラ領域までの幅広い磁場領域での臨界電流を向上させ得ることを指摘している。これらの成果は、バルク超電導材料の作成プロセスの改善と磁束ピン止めによる捕捉磁束のさらなる向上に大きく貢献するものである。以上の内容から、提出された論文は、十分博士の学位に値することを審査委員一同確認した。

### 最終試験の結果要旨：

最終試験は 8 月 20 日に行われた。審査委員一同出席の下、まず、学術論文は 5 編が第 1 著者として公表済み(Beizhan Li, Kun Xu, Shogo Hara, Difan Zhou, Yufeng Zhang, Mitsuru Izumi, “Enhanced pinning effect in air-processed Gd-123 bulk superconductors with  $\text{BaTiO}_3$  addition”, *Physica C* 475, 51-56 (2012) 他 4 編)であるとともに、学会発表は 2012 年応用超電導国際会議(ASC2012)など 2 回行なっていることを確認した。以上から著者は当該専門分野に対し十分な研究能力と英語による発表の資質を有すると評価できる。合同セミナーへの出席回数も 60 時間を越えていることを確認した。論文は英語で書かれ、論文内容について最終確認のための質疑応答を行い、専門知識については公開発表会(8 月 20 日)当日の質疑や予備審査時でのディスカッションを含め十分であると審査委員一同確認した。以上から、本学生について論文審査、最終試験とも合格と判定した。