

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：53901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420302

研究課題名(和文) Melt-Casting法Bi系バルク超電導体を用いた事故電流限流器の開発

研究課題名(英文) Development of fault current limiter using MCP Bi-2212 bulk superconductors

## 研究代表者

塚本 武彦 (TSUKAMOTO, Takehiko)

豊田工業高等専門学校・電気・電子システム工学科・教授

研究者番号：10217284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：事故電流限流器の母材開発のため、Melt-Casting法により作製したBi系バルク超電導体の輸送特性および超電導-常伝導転移特性を調べ、以下のことを明らかにした。

(1) 炭酸カリウムを添加した結果、2.0[mass%]添加した試料において最も良い特性が得られた。この試料のn値は大きく、また臨界電流密度は液体窒素温度において1平方cmあたり約300Aであった。(2) 試料に通電する交流電流の周波数が大きくなると臨界電流は小さくなる傾向が見られた。これは、半径方向に対する電流密度の不均一性と試料内部に発生する交流損が原因であり、長さ方向に対する不均一性ととも、作製・使用の際は考慮する必要がある。

研究成果の概要(英文)：We have investigated the transport and quench properties of Bi-2212 samples doped with K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and fabricated by the melt casting process (MCP). The critical current and the n values were varied by K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> doping. The Bi-2212 doped with 2.0 mass% K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> was demonstrated to be best suited for current-limiting device applications because it exhibited the largest n value. Furthermore, the critical current was improved by the addition of appropriate quantities of K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. The critical current density J<sub>c</sub> for the best sample is about 300 A/cm<sup>2</sup>. The frequency dependence of the critical current was measured for the MCP sample. The critical current was found to slightly decrease with increasing frequency, owing to the influence of a nonuniform current density distribution in the radial direction of the MCP samples. Then observed critical current and critical temperature had distribution in length direction.

研究分野：超電導工学

キーワード：ビスマス系超電導体 Melt-Casting法 炭酸カリウム添加 臨界電流 n値 クエンチ特性 事故電流限流器

### 1. 研究開始当初の背景

高度情報化の発展に伴い、電力供給に対する信頼度の向上・高品質化の要求は高くなっていく一方である。しかし、雷や地落事故などによって電力系統に発生する事故は増加する傾向にある。したがって、電力系統に事故が発生した場合に流れる異常電流の大きさを制限するための限流器の開発が求められている。

世界各国で様々な原理の限流器の開発が試みられている。しかし、(1)サイリスタは順方向電圧の電圧降下が大き、(2)アーク抵抗は高いインピーダンスがとれない、(3)ナトリウム気化による限流素子は繰り返し使用ができないなど、どの方式にも問題がある。超電導を利用した開発では、薄膜状の Y 系超電導体で限流素子を作製されている。ただ、大面積薄膜がまだ高価であるなど課題も多い。Bi 系超電導線材を巻いたコイルを利用した限流器も作製されているが、高価であり、まだ実証実験段階である。

したがって、これまで我々が研究してきた Melt-Casting 法 Bi2212 バルク超電導体による経済性を考慮した低損失の限流器に関する研究は、電力機器の保護という意味から価値がある。

### 2. 研究の目的

雷や地落事故などによって発生する事故電流から電力機器を保護するための限流器の母材を低コストで開発する。超電導体は電流が臨界電流以上になると常伝導状態へ転移して抵抗を発生(クエンチ現象)する。この現象を利用して電力機器に流れる過電流を制御することが可能である。限流器開発のために、優れた導電特性(臨界温度・電流、交流電流損失)をもつバルク超電導体を Melt-Casting (溶融鋳込成形)法によって作製するための最適な条件を確定する。また、この超電導体の臨界電流の周波数特性などのクエンチ特性を明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) これまでの研究結果をもとに事故電流限流器の母材となる短尺の棒状試料を Melt-Casting (溶融鋳込成形)法 Bi2212 バルク超電導体で作製した[1, 2]。作製には小型電気炉を用い、試料の結晶構造は X 線回折装置で確定した。電気抵抗の温度依存性は直流四端子法で測定した。

(2) 円柱状試料の臨界電流値を現有の測定システムで調べた。その結果をもとに、液体窒素温度における臨界電流値が 70A (臨界電流密度 200A/cm<sup>2</sup>)程度を示す試料の作製条件を確定する。また、試料電圧 V の電流 I に対する立ち上がりの度合いを示す n 値 (V ∝ I<sup>n</sup>) が 10 以上になることを目指す。また、他元素添加効果、特にカリウム添加効果について調べた。

(3) 簡易型任意波形発生器, 交流アンプ(バイポーラ電源), メモリーハイコーダと高性能直流アンプを使って、基本的な波形をもつ大電流を Melt-Casting 法 Bi2212 バルク超電導体に通電し、超電導状態から常伝導状態に転移するときの特性であるクエンチ特性を調べる。特に、臨界電流の周波数依存性を明らかにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 結晶構造と抵抗温度依存性

Melt-Casting 法で作製したバルク超電導体試料(炭酸カリウム 2mass% 添加)の X 線回折パターンを図 1 に示す。試料表面と内部のパターンは少し異なるが、主要な回折ピークは Bi2212 構造に対応していた。また、組成分析の結果は、通常の焼結試料とほぼ同じであった。

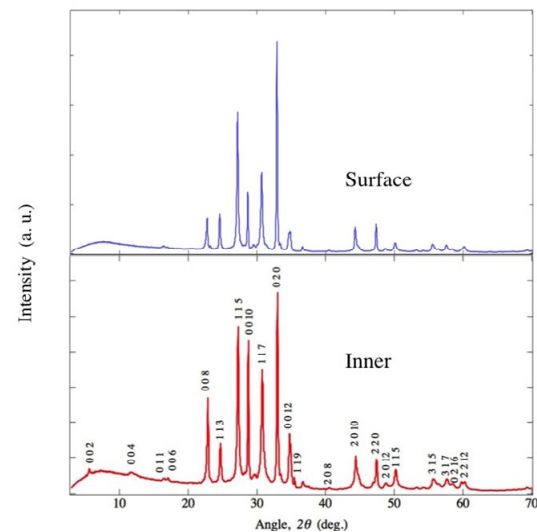


図 1 X 線回折パターン

試料が示す典型的な電気抵抗の温度依存性を図 2 に示す。この図を見ればわかるように、室温から温度が下がると抵抗値は下がるという金属的な振る舞いを示した後、110K 付近から急激な抵抗値の低下が現れ、83K でゼロ抵抗を示した。

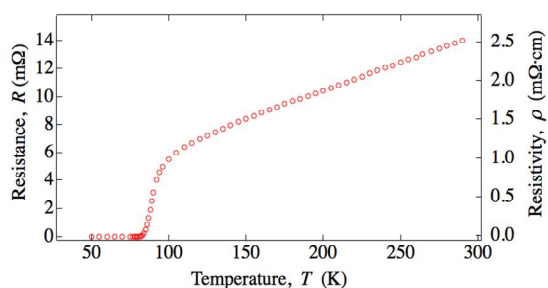


図 2 電気抵抗の温度依存性

## (2) 臨界電流とカリウム添加効果

Melt-Casting 法で作製した Bi2212 バルク超電導体試料に添加する炭酸カリウムの重量比を変化させたときの液体窒素温度における電流 - 電界特性を図 3 に示す。1[ $\mu\text{V}/\text{cm}$ ]の電界が発生した時の電流を臨界電流と定義すると、例えば試料 C (添加量 2mass%)の臨界電流  $I_c$  は 31.36[A]となる。

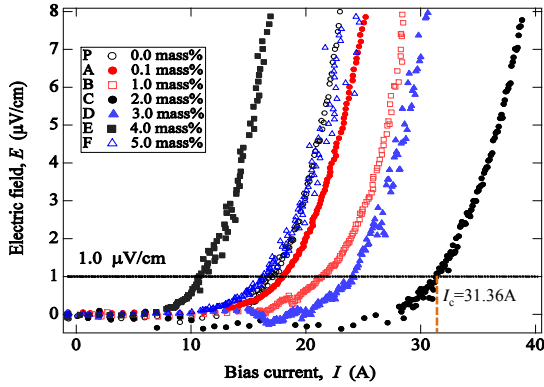


図3 電流 - 電界特性(77K)

炭酸カリウムの添加重量比, 試料形状, 直流臨界電流および臨界電流密度の結果を表 1 にまとめて示す。

表1 臨界電流(77K)に対する炭酸カリウム添加効果

試料	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> [mass%]	直径 [cm]	$I_c$ [A]	$J_c$ [A/cm <sup>2</sup> ]
P	0.0	0.370	16.8	156.2
A	0.1	0.360	18.0	176.3
B	1.0	0.365	21.5	205.3
C	2.0	0.370	31.4	291.7
D	3.0	0.370	24.1	223.7
E	4.0	0.350	10.7	110.9
E	5.0	0.360	16.2	159.4

この結果から, Bi2212 バルク超電導体にカリウムを添加する際は, 添加量を 2mass%とすると最も高い臨界電流密度(292A/cm<sup>2</sup>)が得られることがわかった。この値は硫酸ストロンチウムを添加して Melt-Casting 法で作製した過去の試料の臨界電流密度よりも高かった。

次に, 表 1 に示した試料の臨界電流密度と n 値の関係を図 4 に示す。この図からわかるように, この 2 つの値には強い正の相関があることがわかった。

また 炭酸カリウム添加量 2mass%の試料 C の n 値は 11.7 であり, 目標としていた直流臨

界電流密度と n 値を示す Bi2212 バルク超電導体試料を Melt-Casting 法で作製することができた。学術論文誌( IEEE Transaction on Applied Superconductivity 25 )などでこれらの成果を発表した。

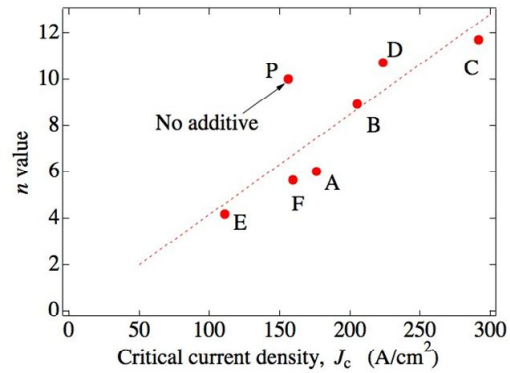


図4 臨界電流密度と n 値との関係

## (3) クエンチ特性

交流電流を試料に通電した場合の典型的なクエンチ特性を図 5 に示す。赤点線が電圧端子間の電圧波形であり, インダクタンス分の波形と抵抗分の波形が重なった波形となっている。この電圧波形から抵抗性の電界波形を求めたものを黒線で示す。交流電流通電時の電圧波形は, 直流の場合と比較してノイズが大きいので, 交流臨界電流値を電界が 10[ $\mu\text{V}/\text{cm}$ ]発生した時の電流値と定義して解析を行った。

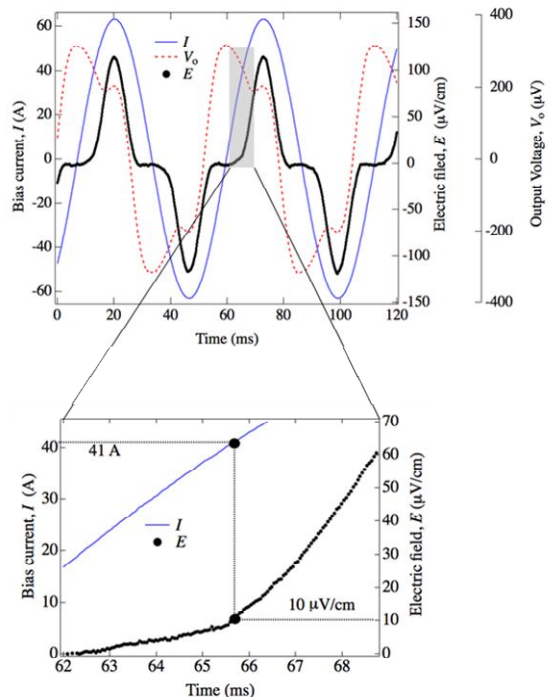


図5 交流電流通電時のクエンチ特性

交流電流の周波数を 10 ~ 180Hz の範囲で変化させた場合の試料 C (表 1) における周波数 臨界電流特性 ( $I_c$ :  $10\mu\text{V}/\text{cm}$  の時の電流値) を図 6 に示す。

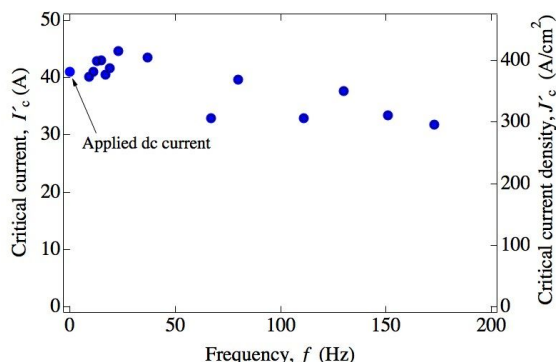


図 6 臨界電流の周波数依存性

この図から、周波数が高くなると交流臨界電流値は小さくなると言える。その原因として、交流電流損と熱による影響が考えられる。

また、銅製の型に流し込んで作製したバルク試料を上部・中部・下部に 3 分割すると、臨界電流特性と抵抗温度特性は試料下部において最も良くなった。また、円柱状試料の場合は、中心軸に近い試料内部の方が外部に比べ臨界電流密度が小さくなった。限流器を作製・使用する際には、これらの不均一性を考慮する必要があることも明らかにした。超電導関係の国際会議 (International Symposium on Superconductivity 2015) と平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会でこれらの成果を発表した。

本研究の結果、事故電流から電力機器を保護するのに必要な超電導特性を有する限流器の母材となる Bi2212 バルク超電導体を Melt-Casting 法によって低コストで作製することができた。

#### <引用文献>

- [1] T. Tsukamoto et al., Alternating-current transport losses of melt-cast processed Bi-2212 bulk superconductor bars, Superconductor Science and Technology, 16(2003), pp.1246-1251
- [2] T. Yamaguchi, T. Tsukamoto et al., Effect of metal oxide and lithium perchlorate addition on the superconducting properties of Bi-2212 bulk superconductors prepared by melt-casting process, Proceedings of 22th International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference 2008, pp.989-994

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文] (計 3 件)

Akihiro Miura, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Toko Sugiura and Takehiko Tsukamoto,

Effect of Pr Additions of Li-doped Bi2212 Bulk Superconductors Sintered at Low Temperature, Physics Procedia, 81(2016), 37-40, 査読有  
DOI:10.1016/j.phpro.2016.04.016

Dai Oikawa, Shinya Iwatsuka, Toko Sugiura, Hiroya Andoh and Takehiko Tsukamoto, Heating Effect of Mesa-Type Intrinsic Josephson Junction Stacks using Pulse Current Measurement, Physics Procedia, 81(2016), 137-140, 査読有  
DOI:10.1016/j.phpro.2016.04.028

Dai Oikawa, Yu Higashi, Hideaki Murotani, Hiroya Andoh, Toko Sugiura and Takehiko Tsukamoto, Transport Properties of Melt-cast Processed Bi-2212 Bulk Superconductor Bars, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, (2015), 6800304, 査読有  
DOI:10.1109/TASC.2014.2360584

##### [学会発表] (計 5 件)

Dai Oikawa, Yu Shimoie, Toko Sugiura, Hiroya Andoh and Takehiko Tsukamoto, Quench Properties of Bi-2212 Bulk Superconductors Doped with  $\text{K}_2\text{CO}_3$  Using Melt Casting Process, 28th International Symposium on Superconductivity, Program Number: PCP-53, (2015.11.18), タワーホール船堀(東京)

Akihiro Miura, Dai Oikawa, Hiroya Andoh, Toko Sugiura and Takehiko Tsukamoto, Effect of Pr Additions of Li-doped Bi2212 Bulk Superconductors Sintered at Low Temperature, 28th International Symposium on Superconductivity, Program Number: PCP-52, (2015.11.18), タワーホール船堀(東京)

下家優, 及川大, 杉浦藤虎, 安藤浩哉, 塚本武彦, Melt-Casting 法 Bi 系超電導体に対する炭酸カリウム添加効果, 平成 27 年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, I3-7, (2015.9.29), 名古屋工業大学(名古屋)

三浦亮弘, 及川大, 安藤浩哉, 杉浦藤虎, 塚本武彦, 低温焼結した Bi2212 超電導体の組成分析とプラセオジウム添加効果, 平成 27 年度 電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, I3-6, (2015.9.29), 名古屋工業大学(名古屋)

Dai Oikawa, Yu Higashi, Hideaki Murotani, Hiroya Andoh, Toko Sugiura and Takehiko Tsukamoto, Transport Properties of Melt-cast Processed Bi-2212 Bulk

Superconductor Bars, Applied  
Superconductivity Conference 2014,  
2MPo2C-05, (Charlotte, USA),  
(2014.8.12-14)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塚本 武彦 (TSUKAMOTO, Takehiko)  
豊田工業高等専門学校 電気・電子システム工学科・教授  
研究者番号：10217284

### (2) 研究分担者

及川 大 (OIKAWA, Dai)  
豊田工業高等専門学校 電気・電子システム工学科・助教  
研究者番号：40707808

### (3) 研究分担者

杉浦 藤虎 (SUGIURA, Toko)  
豊田工業高等専門学校 電気・電子システム工学科・教授  
研究者番号：70206407

### (4) 研究分担者

安藤 浩哉 (ANDOH, Hiroya)  
豊田工業高等専門学校 情報工学科・教授  
研究者番号：30212674