

平成 2 2 年 4 月 9 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19360126  
 研究課題名（和文） 超電導 - 金属膜積層構造の高度設計に基づく抵抗型限流素子の高電力密度化に関する研究  
 研究課題名（英文） Study of a high power density fault current limiting device based on advanced design of superconductor metal layer structure  
 研究代表者  
 大崎 博之（OHSAKI HIROYUKI）  
 東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授  
 研究者番号：10203754

研究成果の概要： 電力系統に短絡事故等が発生したときに流れる過大な電流を瞬時に抑制する装置である限流器として、高温超電導薄膜を用いて、超電導から常電導への転移にともなう電気抵抗発生を利用した抵抗型の限流器の研究を行った。電磁界・熱伝導場・電気回路の連成現象解析用数値解析ツールを開発し、超電導薄膜と金属保護膜のパターニングや厚さ等、および超電導特性の不均一性が限流特性に与える影響について明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電気機器工学

キーワード：超電導，電力工学，電磁現象，シミュレーション，限流器，有限要素法

## 1. 研究開始当初の背景

限流器は、電力系統において事故電流を遮断器の容量以下に抑制する電力機器である。限流器の導入によって短絡電流の増大の点から制約を受けていた系統構成の自由度が増大し、経済的で信頼性の高い電力系統の実現が可能となる。特に近年電力自由化によって導入が本格化している分散電源の新・増設による短絡電流増大のための対策として、限流器を設置すれば、既設の遮断器等の交換を不要とし、費用対効果大きいことが注目されている。

本研究で対象としている高温超電導薄膜

を用いた抵抗型の限流器では、超電導薄膜のSN（超電導-常電導）転移を利用して、事故電流を抑制する。1素子当たりの容量（通常時に通電可能な電流容量，事故時に印加可能な電圧容量）が比較的小さいため、実用化のためには素子容量増大にむけた研究開発と、複数の素子の直並列接続が必要である。また、超電導特性の素子内のばらつき（不均一性）は限流過程で電流集中による素子破壊などを招く。超電導特性の不均一性と限流特性，素子容量の関係を学術的に捉え，研究することが求められる。

YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>（YBCO）薄膜を用いた抵抗型限

流素子は、図 1 に示すように、基板/超電導層/金保護膜という多層構造になっている。局所的な温度上昇を緩和するため、通常、金保護膜及びシャント抵抗(図 2)により、限流後の電流を分流する。

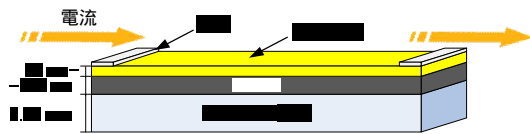


図 1 YBCO を用いた超電導薄膜限流素子の構成図

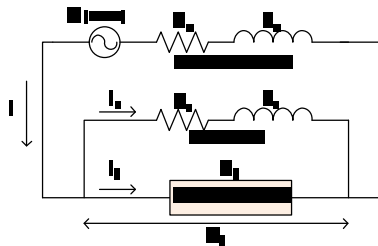


図 2 解析に用いた電気回路

## 2. 研究の目的

本研究は、超電導薄膜限流素子の単位面積当たり容量の増大を目指して、超電導薄膜とその上の金属保護膜のパターニングや厚さ等に関する設計を行うことを主要な目的とする。特に、超電導薄膜の製造コストに密接に関わる超電導特性の不均一性を考慮した設計を実施する。

(1) 限流素子の詳細な設計を可能とする数値解析ツールの高度化を行う。特に、非線形計算の高速化、収束性の向上、超電導特性のモデリング精度の向上を目指す。

(2) 数値解析ツールを用いて、超電導薄膜と金属保護膜の形状と厚さ、超電導特性の不均一性を主要な可変パラメータとして素子の設計を実施する。直線状素子だけでなく、直線状超電導薄膜にミアンダ状金属保護膜を組み合わせたパターンなども検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 直線状超電導薄膜限流素子の限流特性解析

超電導体の電磁特性を適切にモデル化した 2 次元電磁界解析を行い、さらに基板に対して 3 次元熱伝導解析、また外部回路やシャント抵抗を考慮した電気回路解析の 3 連成解析を行う。

電磁界解析は、電流ベクトルポテンシャル未知数とし、薄板近似を適用した有限要素法によって行った。超電導体の電磁特性には、電流-電圧特性をべき乗則でモデル化した  $n$  値モデルを適用した。3 次元熱伝導解析では、材料の比熱や熱伝導率の温度依存性を考慮し、限流素子のジュール発熱や液体窒素によ

る冷却効果を境界条件として与えた。

解析条件を表 1 のように設定し、臨界電流密度  $J_c$  分布とシャント抵抗が限流特性に与える影響を解析した。

表 1 解析条件

YBCO 層サイズ	3 cm × 30 cm × 300 nm
短絡電流 $I_0$	$V/R_c = 2150$ A
素子電圧 $V_d$	600 V
$J_c$ 基準値	4.0 MA/cm <sup>2</sup>
$J_c$ 不均一正規乱数	1, 2, 5, 10 %
金保護膜厚さ	20, 50, 80 nm
シャント抵抗 $R_s$	0.6, 1.2, 1.8, 2.4

(2) ミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流実験

図 3 に実験に用いたミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の基本構造を示す。基板全体に作製された超電導薄膜の上に、ミアンダ形状に金保護膜を蒸着している。通常動作時は超電導層全体を定常電流が流れ、限流動作時には金保護膜に分流した電流がミアンダ形に流れる。通常の限流素子の金保護膜に比べて電気抵抗が大きく、高電圧化の可能性がある。

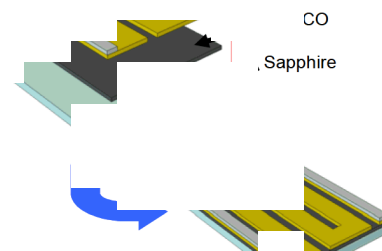


図 3 金保護膜ミアンダ形超電導薄膜限流素子の構造

超電導素子は、(独)産業技術総合研究所の熊谷俊弥氏の研究グループに提供していただいた。表 2 と図 4 に使用した超電導薄膜サンプルの諸元と構造を示す。素子電流は電流プローブにより、電圧は四端子法によりそれぞれ測定した。電圧の測定点は、図 4 の 1-1' 間、2-2' 間、3-3' 間、4-4' 間であり、そこで測定される電圧をそれぞれ  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  とする。

表 2 実験に使用した超電導限流素子の諸元

幅	40 mm
有効長	40 mm
超電導薄膜の厚さ	200 nm
金保護膜の厚さ	100 nm
サファイア基板の厚さ	0.55 mm

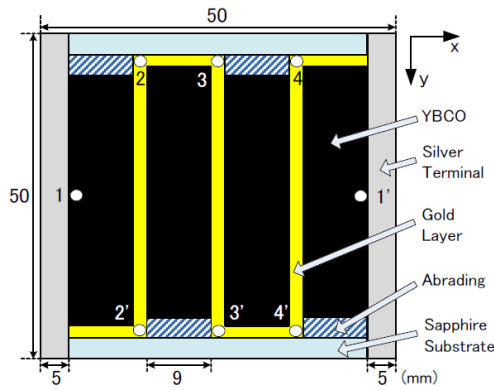


図4 実験に使用した超電導素子の構造

### (3) ミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流特性解析

数値解析ツールは(1)で説明したものをを用いた。超電導限流素子構造の解析モデルを図5に示す。また、モデルの臨界電流密度  $J_c$  分布は、実験で使用した超電導薄膜サンプルの実測値から、図6に示すように設定した。

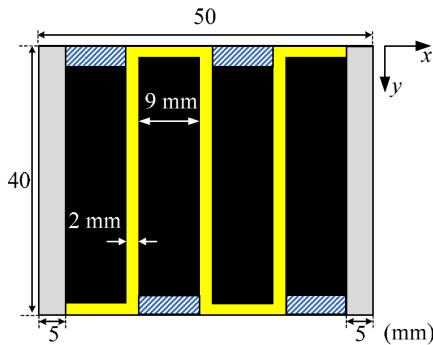


図5 超電導限流素子構造の数値解析モデル

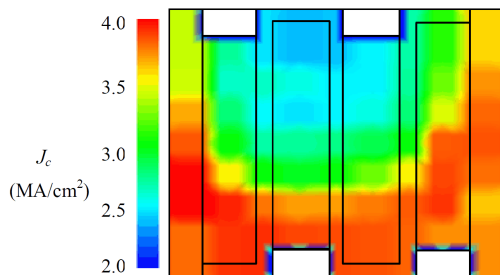


図6 数値解析に用いた臨界電流密度  $J_c$  分布

## 4. 研究成果

### (1) 直線状超電導薄膜限流素子の限流特性解析

解析の結果得られた限流素子の温度変化および抵抗発生過程への臨界電流密度  $J_c$  分布の影響とシャント抵抗の影響を図7から図10に示す。 $J_c$  分布の不均一が強くなると、 $J_c$  が低い部分で、抵抗がより早く上がり始めるが、 $J/J_c$  が大きくなると  $n$  値が下がり、抵抗は上がりにくくなる。一方、発熱による温度上昇が進み、局所的な S N 転移が起き、常電

導部が伝播する間に、初期に S N 転移が起きた部分での温度上昇が大きくなる。このように過渡的な抵抗発生過程は限流特性に影響を及ぼす。分流抵抗も、その大きさが全体の発生抵抗値の上昇速度や温度上昇に影響を与える。シャント抵抗の値が大きいと発生抵抗が大きくなり、S N 転移が素早く起きるため、全体で S N 転移が起きるまでの時間が短く、 $J_c$  分布が不均一な場合の局所的な温度上昇を緩和することができる。

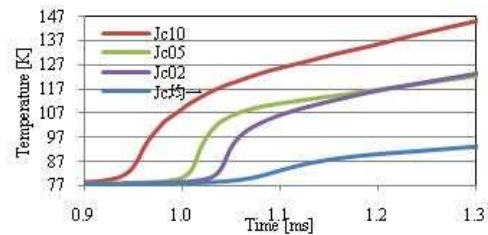


図7 温度変化への  $J_c$  分布の影響

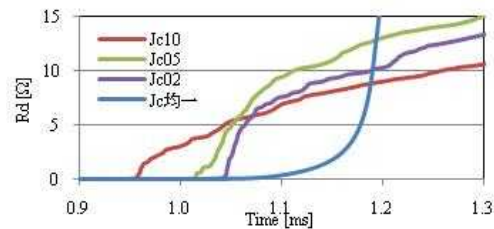


図8 抵抗発生過程への  $J_c$  分布の影響

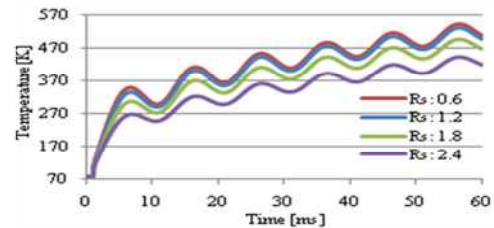


図9 温度変化へのシャント抵抗の影響

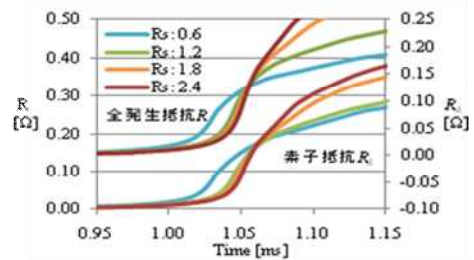


図10 抵抗発生過程へのシャント抵抗の影響

### (2) ミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流実験

素子に電圧が発生し始めた条件での電流波形と電圧波形を図11に示す。まだ電流は落ち始めてはいないが、電流がピークに達する付近で電圧が立ち上がっているのがわかる。さらに、V2, V3, V4 を比較すると、V2とV3が比較的大きくなっており、図4に示した薄膜の中央及びやや左側の領域において、部分的に電圧が発生していると考えられ

る。その後、薄膜が損傷し、特性が劣化してしまっただので、金保護膜ミアンダ形限流素子の有用性を十分に実証することはできなかったが、数値解析により実験結果について考察を行った。

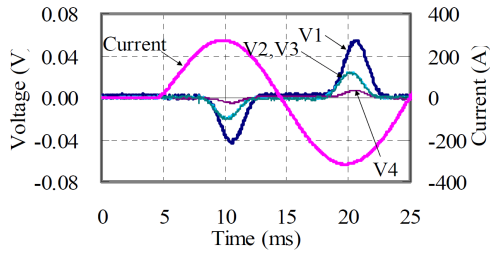
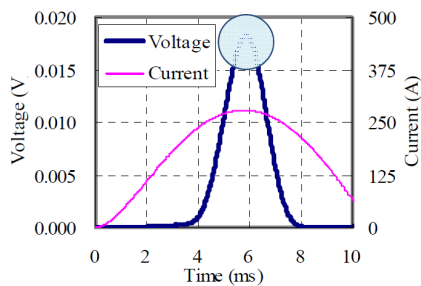


図 11 素子に流れる電流と各端子電圧の波形

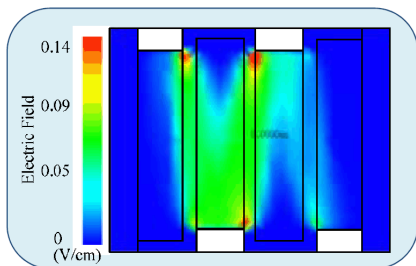
### (3) ミアンダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流特性解析

#### 実験と解析との比較

実験に近い条件で限流特性の数値解析を行い、図 12(a)に示すような波形が得られた。図 11 の実験結果と比較すると（図 11 の V1 が図 12 の Voltage にあたる）、電流はほぼ同じで、電圧値も、解析結果の方がやや低いものの、ほぼ同様な結果が得られた。図 11(a)の青い丸で囲んだ電圧ピークにおける電界分布を図 11(b)に示す。薄膜の中央及び左側で部分的に比較的大きな電界が発生している。これは実験結果とも一致する。薄膜サンプルにおいて  $J_c$  の低い領域が、電界発生領域とほぼ重なっていて、 $J_c$  の不均一による部分的な電界発生及び発熱がある。また、ミアンダ形状の折り返し部で大きな電界が発生していて、金保護膜の形状が部分的な電界発生及び発熱にかなり影響している。



(a) 電流・電圧波形



(b) 電圧波形の青丸の時間における電界分布

図 12 実験条件と同様の条件で行った数値解析結果

### $J_c$ 分布の限流特性への影響に関する数値解析

$J_c$  分布の影響について解析を行った。 $J_c = 3.5 \text{ MA/cm}^2$  で均一な条件を Case A とし、図 13 のように Case B から Case E までを設定した。Case B が実験に用いた薄膜サンプルの  $J_c$  分布とほぼ同じであり、Case C はそこからさらに図 13 に示す Area 1 の部分の  $J_c$  を下げた条件、Case D と Case E はそれぞれ Area 2, Area 3 の  $J_c$  を下げた条件である。

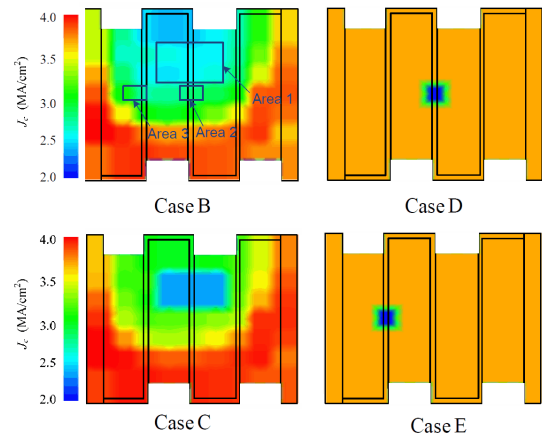
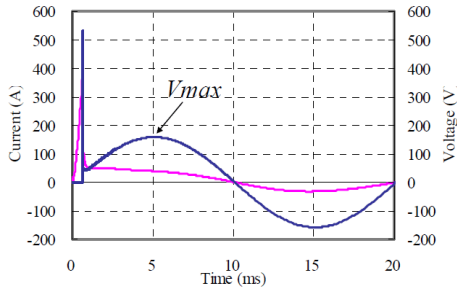


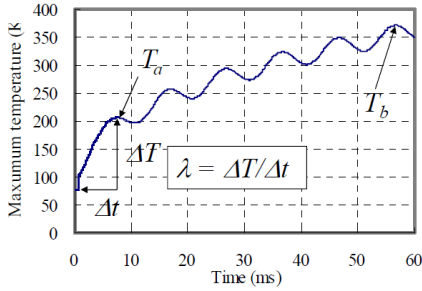
図 13 数値解析に用いた  $J_c$  分布条件

Case A の電流波形と電圧波形、及び最大要素温度の変化の結果を図 14 に示す。ここで、素子電界は、図 14(a)に示す  $V_{max}$  を限流素子の長さ  $L$  で割った値で定義する。また、図 14(b)の温度変化において、限流動作後の第 1 ピークを  $T_a$ 、第 6 ピークを  $T_b$  とし、限流動作開始から  $T_a$  に至るまでの温度変化の傾きを  $\alpha$  とする。図 15 に、 $T_a, T_b, \alpha$  を縦軸に、限流素子にかかる電界  $V_{max}/L$  を横軸にとって、各条件で解析した結果を示す。 $J_c$  分布が不均一な条件（ここでは Case B と Case C のみ）での結果は、白抜きの点で示している。 $J_c$  分布が均一な条件では、限流素子にかかる電界と温度上昇はほぼ比例関係にあるが、 $J_c$  分布が不均一な場合は、それ以上に温度上昇が大きくなっている。 $J_c$  分布が不均一な場合、限流動作時に発生する電界も不均一になり、その影響を受けていると考えられる。

次に、 $J_c$  分布の低い領域の位置と温度上昇の関係を調べるため、Case D と Case E の限流特性を比較する。図 16 に最大要素温度が  $T_a$  (第 1 ピーク) となった時の温度分布を示す。Case E の方が、特に下側の領域において温度上昇が激しくなっている。これは、 $J_c$  の低い領域において、局所的に電界が発生して生じた熱が、熱伝導によって伝播する際、Case E の方が境界面に近いため、熱が広がりやすく、より温度上昇が激しくなったためと考えられる。



(a) 電流・電圧波形



(b) 温度変化

図 14 Case A ( $J_c$ 分布均一)における解析結果

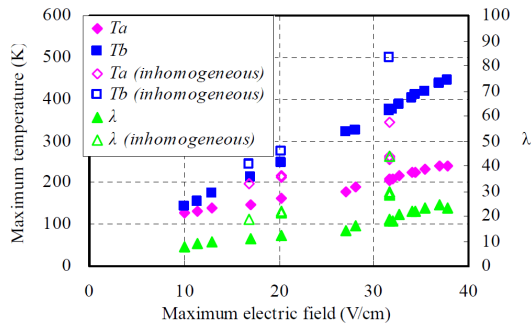


図 15  $T_a$ ,  $T_b$ ,  $\lambda$  の、限流素子にかかる電界  $V_{max}/L$  依存性 (解析結果)

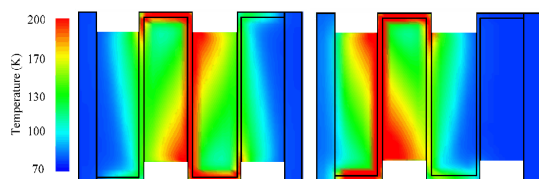


図 16 最大温度が  $T_a$  の時の温度分布 (左: Case D, 右: Case E)

金保護膜形状の限流特性への影響に関する数値解析

金保護膜の形状と限流特性の関係を整理する。解析条件としては、 $J_c = 3.5 \text{ MA/cm}^2$  で均一、限流素子を挿入しない場合の電流のピーク値は  $4000 \text{ A}$ 、限流動作時に素子にかかる電圧は約  $158 \text{ V}$ 、シャント抵抗は  $0.2 \Omega$  とし、表 3 に示すように Case A から Case M まで、金保護膜の厚さ、経路幅、ミアンダの間隔(ピッチ)、及びミアンダ形金保護膜の経路長さを変化させて解析を行った (図 17)。

表 3 金保護膜形状を変えた解析の条件設定

	厚さ (nm)	幅 (mm)	長さ (mm)	ピッチ (mm)	備考
Case A	50	2	170	9	基本
Case B-E	20-80	2	170	9	厚さ変化
Case F,G	33 25	3 4	170	8 8	幅変化
Case H-J	50	2	150 160 180	4 6 11	ピッチ変化
Case K,L	50	2	210 250	6.8 5.3	長さ変化
Case M	80	2	170	11	長ピッチ

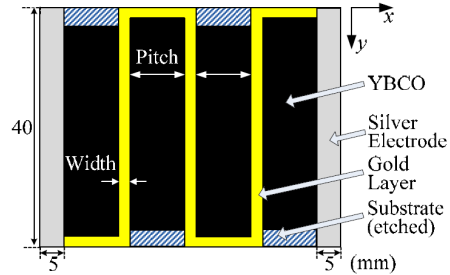


図 17 数値解析モデル

Case A の場合の限流動作直後における温度分布を図 18 に示す。丸で囲んでいる領域では電界が集中し、温度も高くなっている。超電導薄膜に電流が流れる場合、偏流により  $y$  方向端部において電流が大きい。そのため  $y$  方向端部で、超電導層の抵抗の発生が生じやすく、金保護膜に電流が流れ始める。その時に、電流が金属薄膜の折り返し部付近に集中して、その部分で電界の発生が進むことと、また、回路のインダクタンスの影響で電流が  $x$  軸方向に流れ続けようとして、丸で囲んでいる領域において、電界が大きくなりやすい。

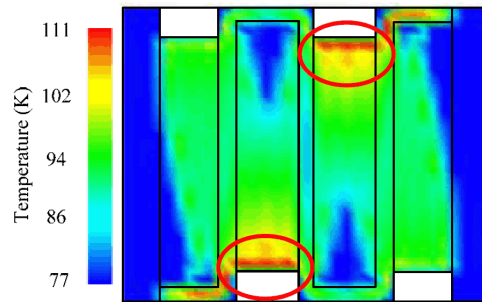
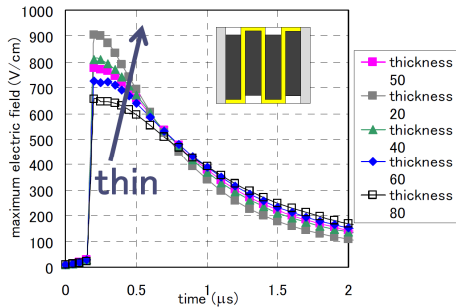


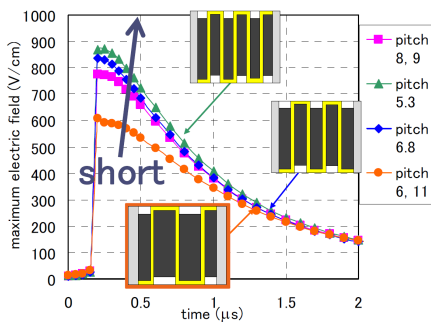
図 18 限流動作直後の温度分布

図 19 に限流動作の前後における最大電界強度の時間変化を示す。ここで、最大電界強度とは、最も電界強度が強い要素の電界強度のことである。図 19(a) に示すように、膜が厚い方が電界集中は弱いのが、発生抵抗も落ちてしまうため、あまり厚くすると温度上昇が大きくなり過ぎてしまう。ミアンダ間隔幅を小さくした場合や経路幅を大きくした場合には、電界集中は強まる結果となった。そこ

で膜厚は温度上昇が大きくなる範囲で厚くし、ミランダ間隔は大きく、経路幅は小さくした Case M では、図 19(b) に示すように比較的電界集中が弱い結果が得られた。しかし、それでも急激な電界発生は避けられない。



(a) 金保護膜の厚さ依存性



(b) 金保護膜のミランダ間隔依存性

図 19 限流動作直後における最大電界強度の時間変化

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

H. Ohsaki, M. Sekino, S. Nonaka, Characteristics of Resistive Fault Current Limiting Elements using YBCO Superconducting Thin Film with Meander shaped Metal Layer, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 19, 2009, pp. 1818-1822

H. Ohsaki, Y. Ichiki, M. Sekino, Verification of metal layer design for large capacity superconducting fault current limiting elements using YBCO thin film, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol.97, 2008, 012305

[学会発表](計6件)

野中壮平, 超電導薄膜限流素子の電流分布の測定と解析, 第21回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2009年5月21日, 長野市

野中壮平, 超電導薄膜を用いた限流素子

の設計, 第79回2008年秋季低温工学・超電導学会, 2008年11月12日, 高知市

S. Nonaka, Design Study of Superconducting Thin-film Fault Current Limiting Elements with a Meander shaped Metal Layer, 21th International Symposium on Superconductivity, October 28, 2008, Tsukuba, Japan

S. Nonaka, Characteristics of Resistive-type Fault Current Limiting Elements using YBCO Superconducting Thin Film with Meander shaped Metal Layer, 2008 Applied Superconductivity Conference, August 18, 2008, Chicago, USA

野中壮平, ミランダ形金保護膜を持つ超電導薄膜限流素子の限流試験, 第78回2008年度春季低温工学・超電導学会, 2008年5月27日, 日野市

M. Sekino, Verification of metal layer design for large capacity superconducting fault current limiting elements using YBCO thin film, 8th European Conference on Applied Superconductivity, September 18, 2007, Brussels, Belgium

[その他]

ホームページ

<http://www.ohsaki.k.u-tokyo.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大崎 博之 (OHSAKI HIROYUKI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授  
研究者番号: 10203754

### (2) 研究分担者

関野 正樹 (SEKINO MASAKI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・助教  
研究者番号: 20401036

### (3) 研究協力者

野中 壮平 (NONAKA SOHEI)  
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・修士課程学生