

〈一般研究課題〉 再生可能エネルギーの高効率利用に向けた  
高温超電導ケーブルに関する研究  
助成研究者 名古屋大学 土屋 雄司



## 再生可能エネルギーの高効率利用に向けた 高温超電導ケーブルに関する研究

土屋 雄司  
(名古屋大学)

## Research on high-temperature superconducting cables For highly efficient use of renewable energy

Yuji Tsuchiya  
(Nagoya University)

### Abstract :

In recent years, development of the renewable energy has been remarkable. However, the development of technology for connecting energy sources such as the solar power generation and the wind power generation to the power grid has been delayed. Superconducting cables have advantages such as large capacity, compactness, and zero loss. Therefore, they are the key technology for the grid connection toward the early spread of renewable energy. Research and development on cost reduction and high efficiency are needed to the high-temperature superconducting cables. Our group has developed a technology that dramatically improves the characteristics of superconductors by using the vapor phase growth method and nanotechnology. In this research, we aimed to improve the superconducting characteristics by introducing a multi-laminated structure, and to make a high-temperature superconducting tapes and scale it up by making it into a cable to improve the efficiency of transport current of the high-temperature superconducting cable.

### 1. はじめに

再生可能エネルギーの普及に向けた技術開発が近年著しいが、太陽光発電や風力発電などの天候により変動するエネルギー源を、既存電力系統へ接続する技術の開発が立ち遅れている。たとえば

昨年、九州電力では太陽光発電の供給過剰により大規模停電へつながる恐れがあるとして出力制御を行っており、現状では、再生可能エネルギーを完全には生かしきれていない。今後、低炭素社会を実現し、かつ安心できる生活環境を実現するためには、電力系統同士の接続方法の開発が必須となる。このような中、超電導ケーブルは大容量・コンパクト・ゼロ損失といった利点を持ち、再生可能エネルギーの早期普及に向けて系統接続のキーテクノロジーとなり得る技術である。高温超電導送電ケーブルは、国内外で産学官の連携により活発に研究・実証が行なわれている。例えば、ドイツでは2014年に「Ampacityプロジェクト」にて市街地での1km級の送電網への組み込みが成功している。高温超電導ケーブルの普及のさらなる後押しとなるコスト削減や高効率化に関する研究開発が必要である。我々のグループではこれまで、気相成長法とナノテクノロジーを用いることで、超電導体の特性を飛躍的に向上する技術を世界に先駆けて開発してきた[1]。しかし現状では、数mm程度の小さい試料での再現のみ得られている。そこで本研究では、テープ状の高温超電導線を作製し、さらにケーブル化することでスケールアップを行い、高温超電導ケーブルの輸送電流高効率化を目指した。

高温超電導送電ケーブルの課題として、以下の2点が挙げられる。

- ① ケーブルに流れる大電流により、自身が発生した磁場を受け超電導特性が低下する
- ② 原料、冷却コストを下げため、超電導領域の空間電流密度の増強

本研究では、両課題に対して、磁界の向きを制御することで特性が向上する**縦磁界効果**を用いる。縦磁界効果とは電流の磁界の向きを揃えることで量子化磁束にかかるローレンツ力をゼロにする効果である。図1に、縦磁界を利用した超電導ケーブルの模式図を示す。

## 2. 実験方法

高温超電導薄膜のナノ構造を制御することで超電導ケーブルに適した超電導特性を発現させる。さらに、強磁場中での特性評価測定と組み合わせることで、特性向上を目指して研究を行った。

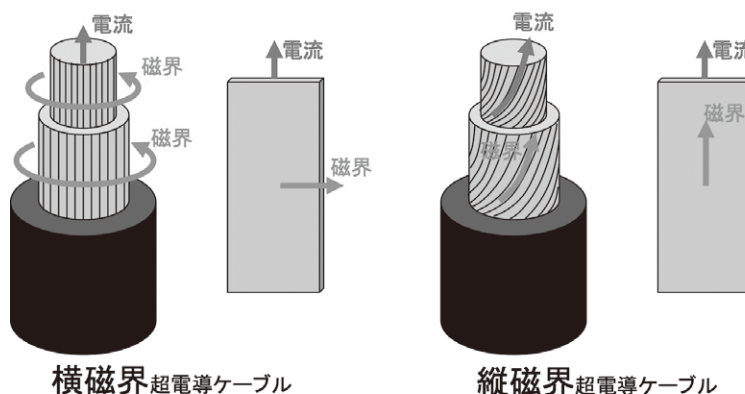


図1. 縦磁界効果を用いた超電導ケーブルの模式図。

表1. BaHfO<sub>3</sub>添加 SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 多層薄膜の成膜条件。

パラメータ	条件
成膜方法	PLD 法
レーザー波長	248 nm (KrF)
レーザー繰り返し周波数	10 Hz
エネルギー密度	1.6 J/cm <sup>2</sup>
酸素分圧	400 mTorr (53 Pa)
成膜基板	IBAD-MgO 金属基板
ターゲット	SmBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> BaHfO <sub>3</sub> 混合 SmBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub>
成膜基板温度	840°C
ターゲット-基板間距離	50 mm
BaHfO <sub>3</sub> 添加量	5 vol%
膜厚	ML: 140-315 nm Pure: 400 nm
積層数	30, 32, 48
積層界面密度	100-228 planes/μm

## 2.1 積層構造をもつBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜の作製方法

金属基板に積層構造を持つBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜を作製し、縦磁界中で超電導特性測定を行った。表1に示すように、総膜厚及び積層数(積層界面密度)を変化させて薄膜を作製した。液体N<sub>2</sub>中における縦磁界中超伝導特性を測定した。超伝導特性は薄膜に幅 100 μm、長さ 1 mm 程度のブリッジ加工を施し、直流四端子法により測定した。

## 2.2 量産が容易なY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜の作製方法

2.1項で示した積層構造は、構造が制御しやすい利点がある一方、構造の複雑さから量産には適していない。そこで、本項目では量産に適したY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>を導入したSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における臨界電流密度の向上について研究を行った。金属基板上に作製した高温超伝導薄膜に対して、強磁場中での超電導特性評価を行なった。超伝導特性は薄膜に幅 100 μm、長さ 1 mm 程度のブリッジ加工を施し、直流四端子法により測定した。

表2. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及びSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>添加 SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 薄膜の成膜条件。

パラメータ	条件
成膜方法	PLD 法
レーザー波長	248 nm (KrF)
レーザー繰り返し周波数	10 Hz
エネルギー密度	1.6 J/cm <sup>2</sup>
酸素分圧	400 mTorr (53 Pa)
成膜基板	LaAlO <sub>3</sub> (100)
成膜基板温度	860°C
ターゲット-基板間距離	50 mm
APC 添加方法	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 修飾ターゲット Sm <sub>2</sub> BaCuO <sub>5</sub> : 修飾ターゲット BaHfO <sub>3</sub> : ターゲット交換 48ML: ターゲット交換 Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 5 area% Sm <sub>2</sub> BaCuO <sub>5</sub> : 5 area% BaHfO <sub>3</sub> : 3 vol% 48ML: 3 vol%/layer
APC 添加量	
膜厚	300-400 nm

## 2.3 BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>線材の作製およびケーブル化

リールトゥリールパルスレーザー蒸着(PLD)成膜装置を用いて、10 cm級のBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>テープ線材を作製した。また、テープ線材の巻き角度を変化させてケーブル化を行った。並行して、超電導ケーブルの評価装置の立ち上げを行なった。電流源および液体窒素容器を購入し、液体窒素中での200 Aまでの超電導特性評価装置を立ち上げた。図2に、BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>テープ線材を用いた(左)横磁界ケーブルおよび(右)縦磁界ケーブルの外観を示す。

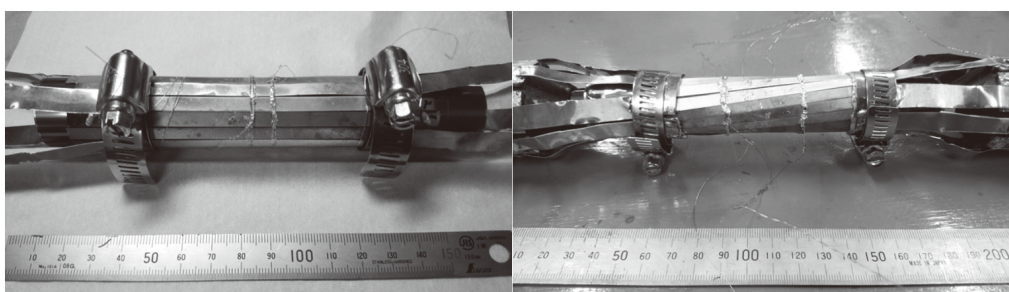


図2. BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>テープ線材を用いた(左)横磁界ケーブルおよび(右)縦磁界ケーブルの外観。

### 3. 実験結果

#### 3.1 積層構造をもつBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜の微細構造及び超伝導特性

図3に、多層構造をもつBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜の断面透過電子顕微鏡像を示す。暗い領域が、非超電導であるBaHfO<sub>3</sub>が結晶化した領域であり、磁束ピンニングを増強する役割を持つ。同様の構造を持つ薄膜について、積層回数や膜厚を変化させることで、構造最適化を行った。

図4(左)に、多層構造BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における磁場中臨界電流密度の磁場依存性を示す。赤い四角で示した多層構造を持つ試料において、縦磁界下における臨界電流密度の増強を確認した。他の構造を持つ試料では、臨界電流密度は磁場の増加に対して単調減少した。図3(左)に、多層構造の一覧を示す。丸および星は、単結晶基板および金属基板を示している。黒丸または赤い星で示した試料でのみ縦磁界下における臨界電流密度の増強を示した。図の左上ほどBaHfO<sub>3</sub>粒の密度が高いことを示している。結果から、BaHfO<sub>3</sub>粒の密度と縦磁界下における臨界電流密度の増強に強い相関があることが示された。特に、金属基板上の高温超伝導体における縦磁界効果を制御した結果は世界初である。

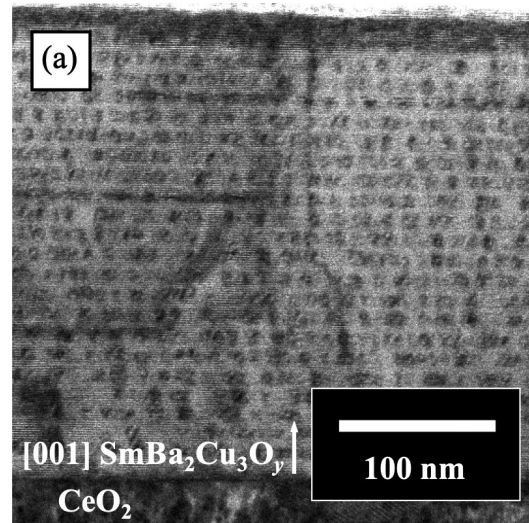


図3. 多層構造BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜の断面透過電子顕微鏡像。

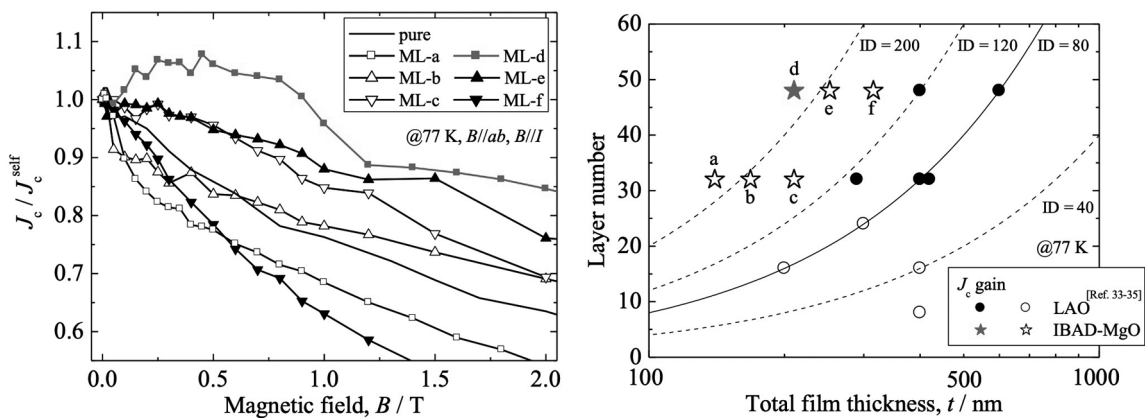


図4. (左) 多層構造BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における磁場中臨界電流密度の磁場依存性。  
(右) 試料の膜厚および層数の一覧。黒丸および赤星はJ増強の現れた試料を示す。

#### 3.2 量産が容易なY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における超伝導特性

本項では、量産に適したY<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>を導入したSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における臨界電流密度の向上について研究を行った。図5に、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>を導入したSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜における縦磁界中での臨界電流密度の磁場依存性を示す。結果、Sm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>を導入した試料がもっとも縦磁界中での特性が高いことが示された。この結果は、3.1項で得られた非超電導相の密度に関する議論と同様に、非超電導Sm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>粒がSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>薄膜中で微細に分散していることを示し

ている。しかし、各試料において縦磁界中での臨界電流増強は観測されなかった。これは、多層構造を持つSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>薄膜において、非超電導粒との界面がすべて面内に揃っているのに対し、本研究項目の試料はランダムに配置した非超電導粒が存在している差によると考えられる。

### 3.3 BaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>線材をケーブルの通電試験

本項では、金属テープ基板上に作製したBaHfO<sub>3</sub>添加SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>線材において、液体窒素中にて3 Tまでの外部磁場を印加しながら通電特性を測定した。図6は、作製した縦磁界ケーブルの外観を示す。電圧端子はケーブル内の1本の線材にハンダ付けを行い、電流を均一に通電するために電流端子の銅板を銅線を用いて圧着した。テープ線材は電磁界計算に基づき10°の角度で巻き付けた。

図7に、液体窒素中での0.1 Tまでの磁場を印加した中での通電試験の結果を示す。液体窒素冷却中で20 A以上の臨界電流を示した。0.1 Tまでの磁場下で、超伝導特性が10%低下することを明らかにした。

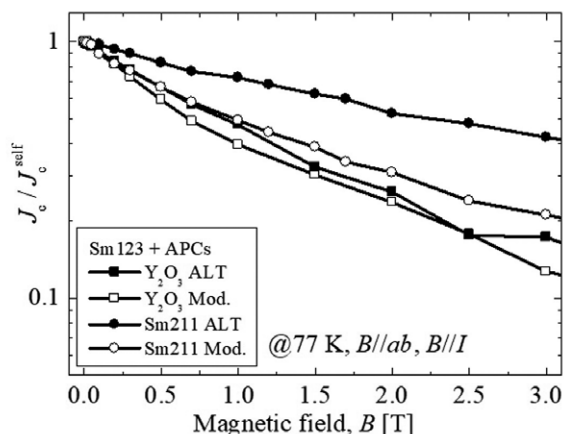


図5. Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>またはSm<sub>2</sub>BaCuO<sub>5</sub>を導入したSmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>薄膜における縦磁界中での臨界電流密度の磁場依存性。

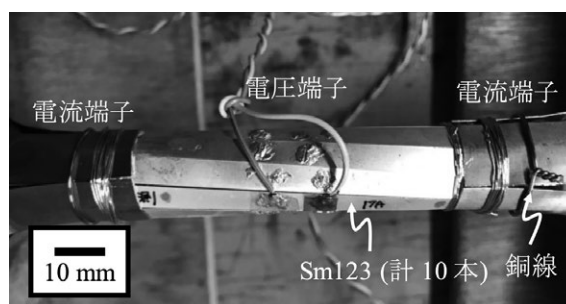


図6. 作製した縦磁界ケーブルの外観。

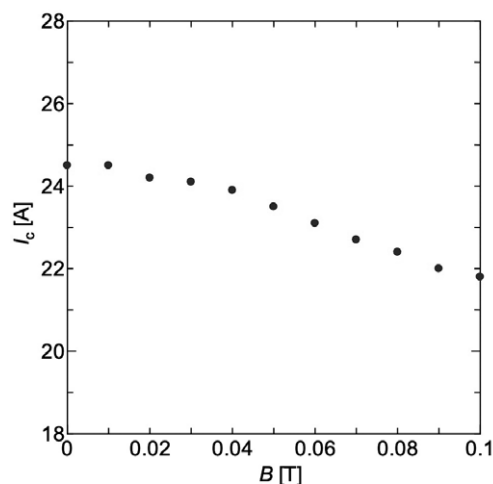


図7. 作製した縦磁界ケーブルの臨界電流I<sub>c</sub>の磁場依存性。

### 参考文献

- [1] K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Tsuchiya, A. Ichinose, Y. Yoshida, “Investigation of the longitudinal magnetic field effect in SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> films with various shaped artificial pinning centers”, Supercond. Sci. Technol., 32 035004 (2019).