

IBAD/PLD 法で作製する RE123 長尺線材の品質向上

Improved quality of long RE123 coated conductors by IBAD/PLD approach

柿本 一臣, 五十嵐 光則, 羽生 智, 菊竹 亮, 須藤 泰範, 森田 克洋, 中村 直識, 鈴木 龍次, 富士 広, 朽網 寛, 飯島 康裕, 齊藤 隆 (フジクラ)

KAKIMOTO Kazuomi, IGARASHI Mitsunori, HANYU Satoru, KIKUTAKE Ryo, SUTOH Yasunori, MORITA Katsuhiro, NAKAMURA Naonori, SUZUKI Ryuji, FUJI Hiroshi, KUTAMI Hiroshi, IJIMA Yasuhiro, SAITOH Takashi (Fujikura Ltd.)
E-mail : kkakimoto@fujikura.co.jp

1. はじめに

フジクラでは、一貫して IBAD/PLD 法による RE123 線材の開発を行っており、特に高 I_c の線材を作製する上で本手法における優位性を実証してきた。また、基板の洗浄を強化することでコンタミの混入を低減させ、歩留りおよび品質の向上に努めており^[1]、300 m 級の長尺において $I_c > 300$ A で均一な線材を定常的に作製できるようになってきた。今回は更なる長尺化、高 I_c 化および均一性の向上を目指して長尺線材を作製したので報告する。また、断面あたりの臨界電流密度である J_c の向上を見込んで金属基板の薄肉化(従来は 100 μm)も検討しているので併せて報告する。

2. 実験方法

厚さが 50, 75, 100 μm と異なる 3 種類の Hastelloy テープ (10 mm^m) を用意した。これらの上に中間層を成膜し、/ PLD-CeO₂(約 300 nm) / IBAD-MgO(約 10 nm) / Y₂O₃ (約 20 nm) / Al₂O₃(約 150 nm) / Hastelloy / という構造の配向基板を作製した。得られた基板の CeO₂ 層の面内配向は $\Delta\phi = 4\sim 5^\circ$ であった。上記基板へ Reel-to-reel の大型 PLD 装置により GdBCO 超電導層を成膜した。1-pass 速度は 40~80 m/h とし、所定の膜厚を狙って繰り返し成膜を行った。超電導層上には Ag を 2~10 μm スパッタ蒸着した後、大型電気炉によって酸素気流中でアニールした。得られた線材の臨界電流特性の評価は、4 端子法による通電測定(閾値 1 $\mu\text{V} / \text{cm}$)、または TapeStar®(ホール素子による線材幅方向の磁化測定から I_c に換算)による測定を液体窒素中(77 K)で行った。

3. 結果および考察

定常的に作製している最近の 300 m 級長尺線材について長手方向の I_c 分布と均一性を Fig. 1 および Table 1 に示す。全長で $I_c > 400$ A の高い特性が得られ、均一性も 2% 未満であり、非常に良質であった。しかし、欠陥や傷などに起因して局所的に I_c が低い部分がわずかながら存在するため、今後はこれらを完全に無くすことを目指して改善を進める。

一方で更なる長尺化の実証のために 800 m 級の線材作製に挑戦した。GdBCO 超電導層を約 3.5 μm 形成して得られた線材の end-to-end 通電における I - V 曲線を Fig. 2 に示す。測定は無誘導巻きにして行った。全長は 816.4 m であったため 81.64 mV が I_c の閾値となり、 $I_c = 572$ A であった。 $I_c \times L$ の値は $572 \text{ A} \times 816.4 \text{ m} = 466.981 \text{ Am}$ となり 2011 年 4 月時点で世界最高の値である。

Fig. 3 には 50 および 75 μm の Hastelloy 基板の屈曲性を示した写真、またこれらを用いて作製した線材の長手方向の通電特性を示す。薄手基板の場合、PLD 法による GdBCO 層形成時に、高温で強いテンションが付加されると変形を生じやすいが、最適条件を見出すことで $I_c > 400$ A で均一な特性が得られるようになってきた。

4. 謝辞

本研究は経済産業省の「リチウム系超電導電力機器技術開発」として独立行政法人「新エネルギー・産業技術総合開発機構」からの受託により実施された。

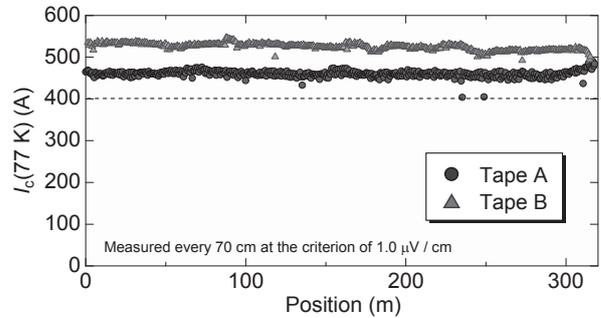


Fig. 1 Longitudinal I_c distribution of long CCs measured by current-conduction.

Table 1 Specification of CCs shown in Fig. 1

	Tape A	Tape B
① Length (m)	317	315
② Thickness (μm)	1.4	2.0
③ Average I_c (A)	460	525
④ STDV (A)	7.6	8.1
⑤ ④/③*100 (%)	1.7	1.5

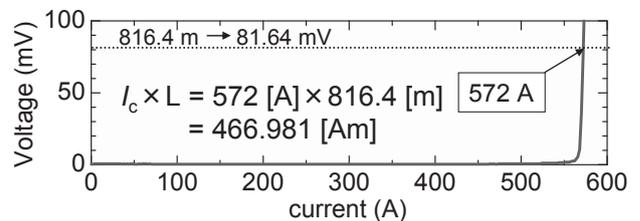


Fig. 2 I - V curve for a 816 m long CC measured by end-to-end current-conduction.

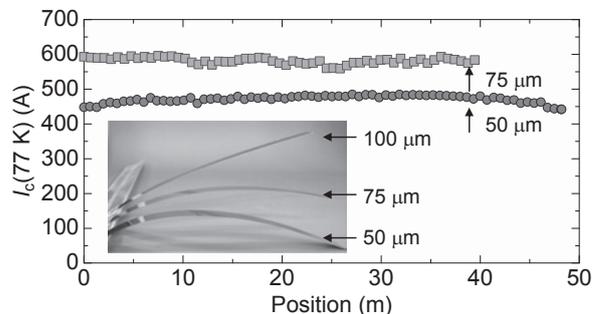


Fig. 3 Longitudinal I_c distribution of long CCs with thin Hastelloy tapes measured by current-conduction.

参考文献

[1] M Igarashi et al., Abstracts of CSJ Conference, Vol.80 (2010)p107

Y系超電導線材のレーザースクライビング加工の長尺化 Processing of multi-filamentary coated conductors with long length

町 敬人, 中尾公一, 田辺圭一(超電導工学研究所)
Takato MACHI, Koichi Nakao, Keiichi TANABE (SRL-ISTEC)
E-mail: machi@istec.or.jp

1. はじめに

Y系超電導線材を交流電力機器に応用するためには、マルチフィラメント化により交流損失を低減しなければならない。これまで報告したように、我々は従来のレーザースクライビング法を改良して、Shallow laser scribing (浅いレーザー照射) および2段階エッチングにより、フィラメント間抵抗を確保しつつ、溝幅 100-250 μ m, エッチング時間約 1/10, 加工による I_c の低下率は 10-25% という技術を開発した。

前回報告したように、改良型レーザースクライビング法にさらに複数回の洗浄工程を追加することにより、加工の歩留りを 70% まで高めることに成功した。この手法を用いて、100m 長を越える線材の加工を行ったので結果を報告する。

2. 実験方法

加工実験に用いた超電導線材は 10mm 幅で、ハステロイ基板上にバッファ層を介して PLD 法で形成された線材である。

レーザースクライビングの歩留りを向上するために、これまでの改良型のレーザースクライビングに、洗浄工程を追加したプロセスでの加工を行った。その手順を以下に示す。レーザースクライビング加工は 5mm 幅線材に対して行うため、まずレーザー切断により 10mm 幅を 5mm 幅に切断した。この時点で、長手方向の I_c 分布を評価するためにテープスター測定を行った。長手方向に切断後は、切断によって付着したデブリ等が付着しているため、アセトンによる拭き取りを行った。エッチングの際のマスク材料としてポリプロピレンテープを銀層に貼付け、浅いレーザー照射を 2 回 (Start \rightarrow End, End \rightarrow Start) 行った。レーザー照射後に余分な粘着剤の除去を行い、銀層と超電導層の 2 段階エッチングを行った。その後、マスクテープを除去して 3 分割線材を作製した。

3. 実験結果と考察

図 1 上側に示したのは、加工前の I_c の長さ方向分布 (テー

プスターデータ) である。この図から明らかなように I_c が低下する箇所が多かった。そこでまず左端から 60m, 右端から 40m にある欠陥で線材を切断した。中央部分の 204m 長の線材に対して分割加工を行い、作製した線材の各フィラメントの $I-V$ 測定の結果を図 1 左下に示した。0.1 μ V/cm のしきい値ではどのフィラメントも 30A 以上の I_c を有するが、フィラメント 3 (▼) は立上りが早かった。これは欠陥が内在しており、そこを乗り越えるために電圧が発生したと考えられる。そこで、テープスターデータを基に線材を 155m 長に切断して $I-V$ 特性を測定した結果、どのフィラメントもシャープな立上りを示した。切り離れた部分には I_c が 40~50% 程度低下している箇所があり、加工前の評価で細線加工の結果がある程度予測できると思われる。

図 1 とは別の線材の細線加工の結果を図 2 に示す。加工前の I_c の長さ方向分布の結果から、欠陥数がかなり少ないことが分かったので、左端の極端に I_c の低い部分だけを切り取り、残った 282.6m で 3 分割のレーザースクライビング細線加工を施した。図 2 左下に示すように、3つのフィラメントの I_c がほぼ均一であり、加工後のヒステリシス損失は 1/3 以下に低下したマルチフィラメント線材を得ることができた (図 2 右下)。

4. 結論

以上の結果より、事前評価の I_c の長さ方向分布で欠陥がある場合に、その低下率が 50% 未満でかつ欠陥数が少ないもの (10 個未満) であれば、高い確率で細線加工が可能であると結論できる。

5. 謝辞

本研究は、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

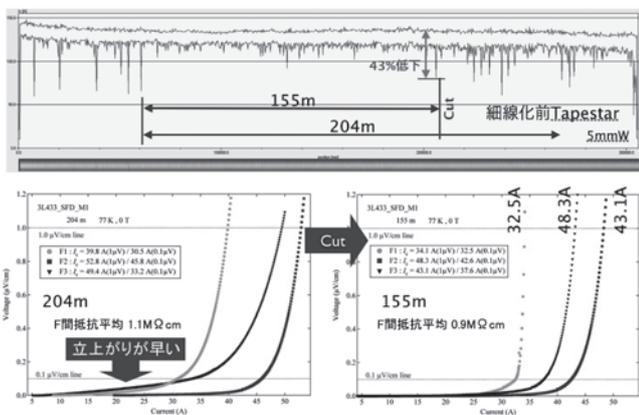


図 1 長手方向で欠陥の多い線材の分割加工結果

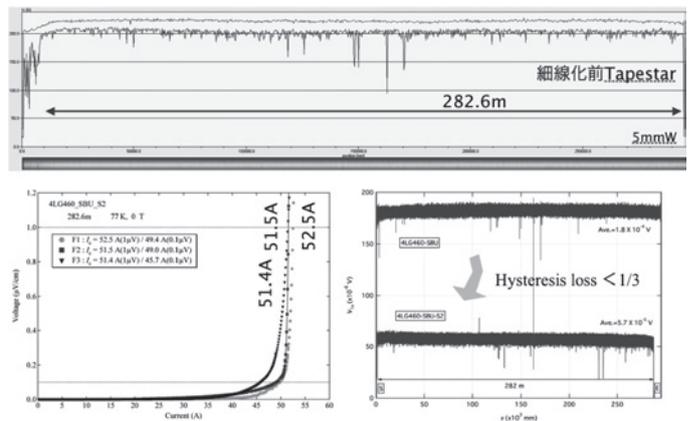


図 2 282.6m 長での 3 分割加工の成功例

フッ素フリーMOD 法による配向 YBCO 厚膜の作製

Synthesis of Biaxially Oriented YBCO Thick Films by Fluorine-Free MOD Method

本田 元気, 中西 毅, 大木 康太郎, 花房 慶, 種子田 賢宏, 永石 竜起, 磯嶋 茂樹(住友電工);
 山口 巖, 日方 威, 近藤 和吉, 真部 高明, 山崎 裕文, 熊谷 俊弥(産総研); 向田 昌志(九大); 下山 淳一(東大)
 HONDA Genki, NAKANISHI Tsuyoshi, OHKI Kotaro, HANAFUSA Kei, TANEDA Takahiro, NAGAISHI Tatsuki,
 ISOJIMA Shigeki (SED); YAMAGUCHI Iwao, HIKATA Takeshi, KONDO Wakichi, MANABE Takaaki, YAMASAKI Hirofumi,
 KUMAGAI Toshiya (AIST); MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.); SHIMOYAMA Jun-ichi (Univ. Tokyo)
 E-mail: honda-genki@sei.co.jp

1. はじめに

ケーブルやマグネット等の超電導応用機器への適用を目指し、REBCO (RE:希土類元素)系薄膜超電導線材の開発を進めている。超電導薄膜の形成手法の一つである有機金属塗布熱分解(MOD)法は、組成制御が容易であり、レーザーや真空装置等の高価な設備を必要としないことから、低コストプロセスとして知られている。中でも、フッ素フリーMOD法は、フッ化水素ガスが発生しないために環境負荷が低く、低コスト化により有利であると期待される。本研究では、フッ素フリーMOD法を用い高い臨界電流値(I_c)を有する超電導薄膜を実現するため、YBCO膜の厚膜化を検討した。

2. 実験条件

まず、配向金属基板上へ RF スパッタ法で Y_2O_3 、YSZ、 CeO_2 の 3 層配向中間層を成膜した。この基板上へ、Y、Ba、Cu のアセチルアセトナート錯体を出発原料として作製した溶液を塗布し、有機物の分解熱処理(仮焼)、YBCO 結晶化熱処理(本焼)を経て、配向 YBCO 膜を作製した。塗布から本焼までの工程を複数回繰り返すことにより、YBCO 膜の厚膜化を行った。得られた膜については、XRD、SEM、断面 S-TEM により結晶性を評価し、液体窒素中(77K)自己磁場下で直流 4 端子法による I_c と、誘導法による超電導臨界温度(T_c)の測定を行った。

3. 結果

塗布から本焼までの工程を 6 回繰り返し、 $4.7 \mu m$ 厚さの配向 YBCO 膜を得ることに成功した (Fig.1)。 I_c は $254 A/cm$ 、 T_c は $90.8 K$ であった。断面 S-TEM 観察からは中間層との界面から膜表面まで高い結晶性を維持していることが (Fig.2)、表面 SEM 観察からは平坦な表面が形成されていることが示された (Fig.3)。

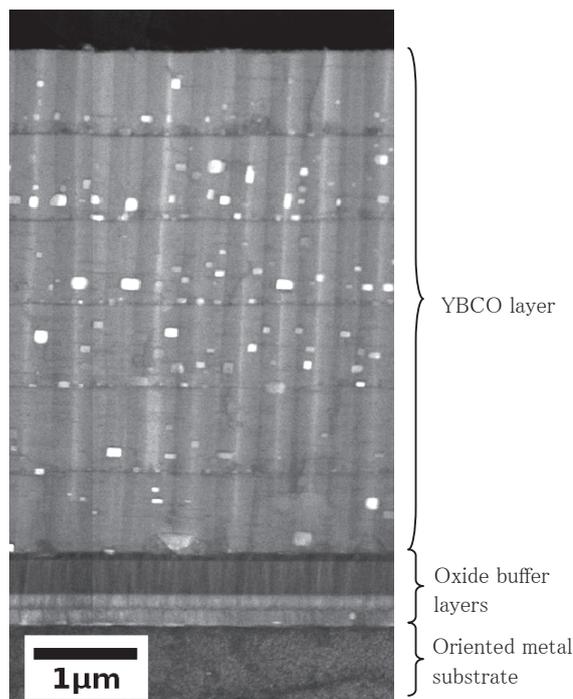


Fig.1 S-TEM cross-sectional bright field image of YBCO film by fluorine-free MOD method

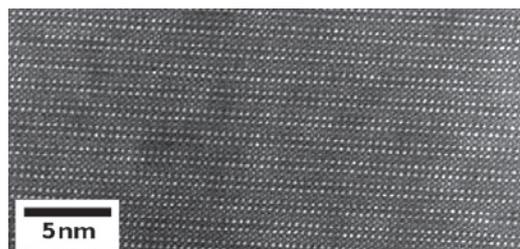


Fig.2 High magnification S-TEM lattice image of near surface

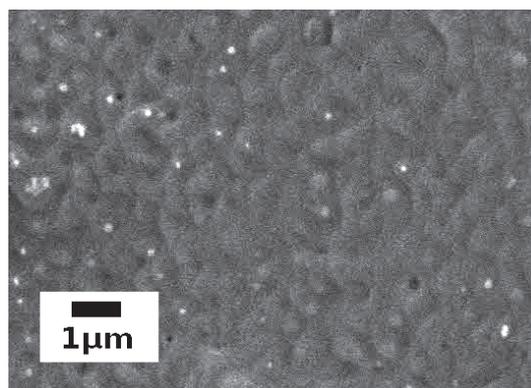


Fig.3 Secondary electron image of YBCO surface

ZrドーピングしたCVD法GdYBCO線材の磁場中特性

In-field I_c properties of Zr-doped CVD-GdYBCO coated conductors

笠原 正靖, 中井 昭暢, 中崎 竜介, 坂本 久樹(古河電工); 渡部 智則, 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)
 KASAHARA Masayasu, NAKAI Akinobu, NAKASAKI Ryusuke, SAKAMOTO Hisaki(Furukawa Electric); WATANABE Tomonori,
 KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo(Chubu Electric Power)
 E-mail: kasahara.masayasu@furukawa.co.jp

1. はじめに

我々はCVD法を用いた超電導線材の作成を行っている。Y系の超電導線材に期待される点に、Bi系超電導体に比べて、磁場中における通電特性が優れているという点がある。コイルなどへの応用を考えると、さらなる特性の向上が求められる。Y系超電導線材の磁場中特性向上のためは、超電導相中へ非超電導相などの異相を人工的に導入する方法(人工ピン)が有効である。我々は、線材の磁場中特性向上のために、人工ピンとしてBaZrO₃を導入するため、Zrドーピングした(Gd, Y)Ba₂Cu₃O₇膜の作成を行った。

2. 実験方法

超電導体は、Hot-wall-CVD法により成膜した。

超電導層の膜組成は、MO原料 { Gd(DPM)₃, Y(DPM)₃, (Ba(DPM)₂, Cu(DPM)₂, Zr(DPM)₄ } の混合比を任意の割合で混合することで調整した。Zrドーピング量は、超電導層の構成元素(Gd, Y, Ba, Cu, Zr)に占めるZrのmol%比で定義し、Zrドーピング量を0-4mol%としたサンプルを作製した。サンプルの磁場中における I_c 特性は、印加磁場3[T]中・77[K]において、サンプルに対する印加磁場角度と I_c の関係性を評価した。

3. 実験結果

図1に、Zr-2mol%ドーピングした(Gd, Y)BCOサンプル(1.4 μ m厚)とZrドーピングしていない(Gd, Y)BCOサンプル(1.3 μ m厚)の3T中における I_c の磁場角度依存性を示す。Zrドーピングしたサンプルでは、Zrドーピングしないサンプルに比べて、磁場中 I_c 特性が向上していることがわかる。また、Zr量の増加に伴って、B//cとなる磁場角度を中心に磁場中 I_c 値が向上する結果が得られた。図1中の2つのサンプルのXRD- $2\theta/\theta$ 測定結果を図2に示す。Zrを加えたサンプルではBaZrO₃に起因するピークが観察され、ドーピングしたZrが膜中でBaZrO₃として存在していると考えられた。Zrドーピングして作製した(Gd, Y)BCOサンプルの断面TEM像を図3に示す。TEM観察の結果からは、超電導層中に幅10nm程度の柱状BaZrO₃結晶がGdYBCOの成長軸方向に沿って存在していることがわかった。当日は、Zrドーピングして作成したL50m線材の特性なども報告する。

4. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、新エネルギー・産業技術開発機構(NEDO)からの委託を受け実施したものである。また、TEM観察は、JFCC殿のご協力のもと行われました。

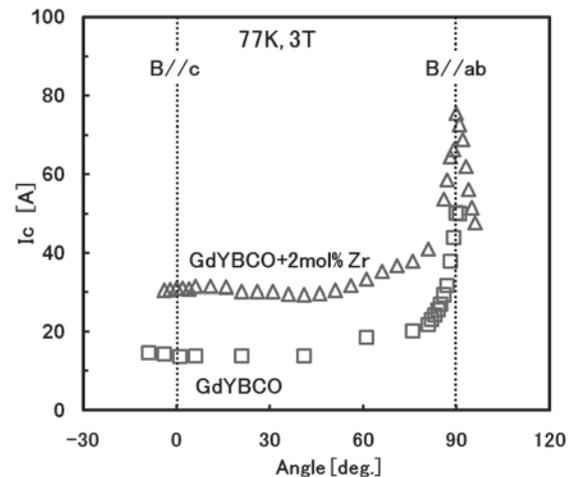


Fig.1 Magnetic field angular dependence of I_c of GdYBCO coated conductors

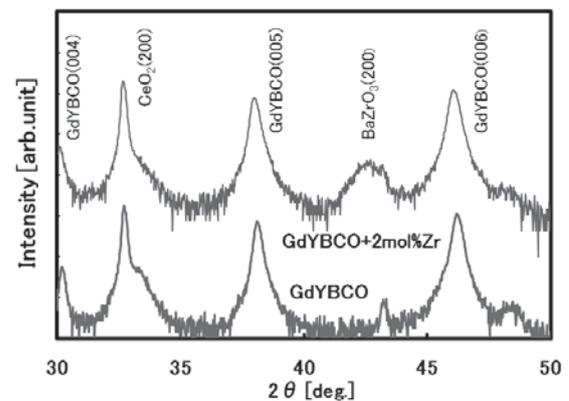


Fig.2 XRD patterns of GdYBCO-coated conductors

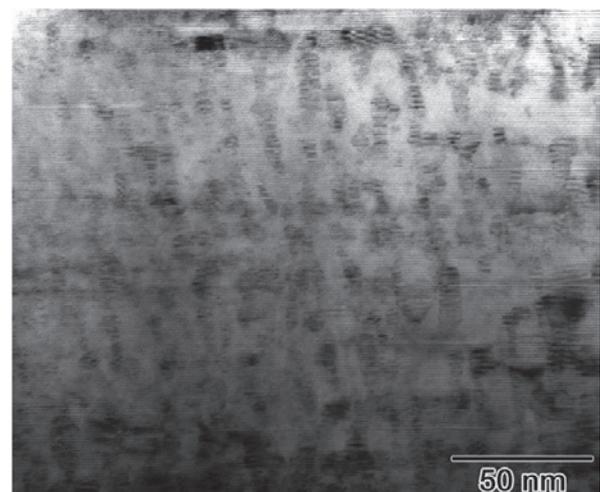


Fig.3 Cross sectional TEM image of Zr-doped GdYBCO coated conductor

66kV/5kA 級三心一括型薄膜高温超電導ケーブルの開発

Development of 66 kV/5 kA Class "3-in-One" HTS Cable with RE123 Wires

大屋 正義, 豊谷 和晃, 広田 博史, 増田 孝人 (住友電工);
雨宮 尚之 (京都大学); 丸山 修, 大熊 武 (ISTEC-SRL)

OHYA Masayoshi, TATAMIDANI Kazuaki, HIROTA Hirofumi, MASUDA Takato (Sumitomo Electric Industries, Ltd);
AMEMIYA Naoyuki (Kyoto University); Osamu Maruyama, Takeshi Ohkuma (ISTEC-SRL)

E-mail: ohya-masayoshi@sei.co.jp

1. はじめに

平成 20 年度より、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「イットリウム系超電導電力機器技術開発」プロジェクトがスタートし^[1]、住友電工では薄膜超電導線を用いた 66kV/5kA 級三心一括型超電導ケーブルの開発を実施している。ケーブルの主要な開発目標は以下の通りである。

- ・ 定格容量: 66kV/5kA
- ・ 交流損失: 2W/m/ph@5kA 以下
- ・ 短絡電流: 31.5kA、2 秒の過電流に対してダメージ無し
- ・ 外径: 150mm φ 管路へ収容可能

特に交流損失の低減が重要な課題であり、これまでに 5kA 級の 4 層導体を作製し、1.5W/m@5kA の損失を検証した^[2]。今回は、シールド層付きの 5kA 級ケーブルコアを作製し、交流損失特性を評価したので、その結果について報告する。

2. ケーブルコアの諸元

使用した薄膜線材の仕様を表 1 に示す。30mm 幅の Clad 基板の上に $\text{CeO}_2/\text{YSZ}/\text{CeO}_2$ の中間層を積層した後、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ の超電導層を PLD 法により成膜したものである。上記線材は、Ag 安定化層をスパッタリングした後に 4mm 幅にスリットし、全周に銅メッキを施してある。

試作したケーブルコアの諸元を表 2 に示す。サンプルは導体 4 層とシールド 2 層で構成され、各層のスパイラルピッチは、交流電流が均等に分流するように調整を行っている。サンプルの有効長は約 2m であり、77K における導体層およびシールド層の臨界電流値 (I_c) は 6300A および 6100A である。

Table1 Specifications of the RE123 wires.

Items	Details
Width (mm)	4.0
Thickness (mm)	0.17
I_c (A) at 77 K	110~170

Table2 Specifications of the HTS cable core.

Items	Details	Diameter (mm)
Former	FRP pipe	21
HTS Conductor	4 layers	23
	RE123 wires, 59 pcs	
Electric Insulation	PPLP [®] (6 mm ²)	36
HTS Shield	2 layers	38
	RE123 wires, 50 pcs	
Protection layer	Kraft Paper	40

3. 交流損失測定結果

各液温における交流損失測定結果を図 1 に示す。液温の低下にともなって交流損失は減少し、64K において目標値以下の 1.8W/m/ph@5kArms の交流損失値を検証した。

図 2 は、京都大学にて実施した数値シミュレーション^[3]の結果と測定結果との比較を示している。導体層とシールド層の I_c が異なる場合に、ケーブルコアの全損失をどのように規格化するかにについては今後議論が必要であるが、ここでは、全損失に対して導体層損失が占める割合が非常に大きいと想定

しており、導体層の I_c を用いて損失の規格化を行っている。なお、規格化の際に用いた I_c は、各温度における I_c 測定結果ではなく、それぞれの測定温度および通電電流ごとに、線材の J_c - B - T 特性と印加磁場を考慮して算出した I_c 計算値を用いている^[4]。図 2 に示すように、規格化した損失測定値は解析結果とよく一致しており、設計どおりの損失特性を有するサンプルが作製できていることが確認された。

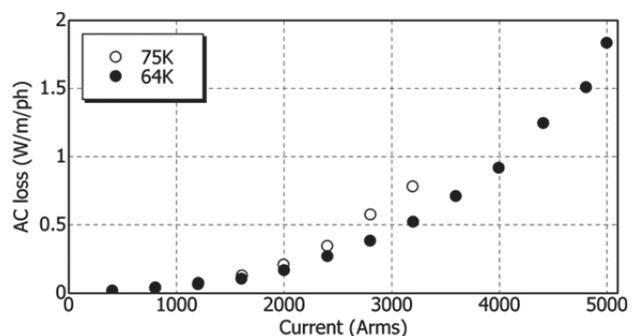


Fig.1 Measured AC loss of the HTS conductor.

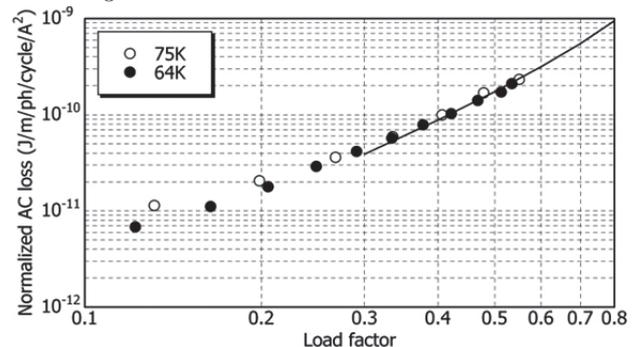


Fig.2 Measured and calculated AC loss (Normalized).

4. さいごに

本プロジェクトは 5 年計画 (H20-24) のうち当初 3 年間を終了し、低損失化や耐短絡電流特性などの中間目標を達成した。今後、15m 長の検証ケーブルの製造を行い、平成 24 年度にケーブルシステムの長期課通電試験を予定しており、高密度・高効率な超電導電力送電技術の検証を行っていく。

謝辞

本研究は NEDO からの委託により実施したものである。

参考文献

1. N. Fujiwara, et al.: Abstracts of IEEJ Technical Meeting, (2009) Vol.5, p.183-184.
2. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 83 (2010) p.270.
3. N. Amemiya, et al.: Supercond. Sci. Technol. 24 (2011) 065013.
4. 大屋正義 他: 電気学会超電導応用電力機器研究会資料 (2011) ASC-11-003.

三相同一軸高温超電導ケーブルにおける交流損失の低減化の検討

Investigation of AC Loss Reduction in Tri-axial HTS Cable

大野 真, 戸田 雅久, 胡 南南, 渡邊 臣人, ヌリ オズジバン, 宮城 大輔, 津田 理, 濱島 高太郎(東北大)
 ONO Shin, TODA Masahisa, HU Nannan, WATANABE Takato, OZCIVAN Nuri A, MIYAGI Daisuke, TSUDA Makoto,
 HAMAJIMA Takataro (TOHOKU Univ.)
 E-mail: s-ohno@ecei.tohoku.ac.jp

1. はじめに

近年都市部では電力需要が増大している。しかし、地下は混雑化しており、送電ケーブル用管路の新設は困難な状況であるので、低損失・大容量・小型な超電導ケーブルが注目されている。超電導体は交流磁界を受けると交流損失を発生するため、実用化に向けては、冷却機動力低減のために交流損失の減少が重要な課題である。本研究では、超電導線材を大幅に減少でき、かつ漏洩磁界の少ない三相同一軸ケーブルについて、撚りピッチに注目して交流損失の低減化の検討を行った。

2. 平衡モデルと不平衡モデル

三相同一軸ケーブルは各相を同一軸上に配置した構成であるため、相半径の差によってインダクタンスが非対称となり、本質的に三相不平衡となる。この状態のモデルを不平衡モデルと呼ぶ。不平衡モデルでは、三相不平衡ではあるものの、任意の撚りピッチを選択することができる。

三相不平衡という問題に対し、これまで筆者らは、三相同一軸型ケーブルを長手方向に2分割したモデルを用いて、各セクションの撚りピッチを調節することで三相平衡を実現した。このモデルを平衡モデルという。[1]

3. 不平衡モデルの損失

三相同一軸型ケーブルの不平衡モデルにおいて、各相の通電層が1層の場合について述べる。不平衡モデルにおける損失は、超電導線材の交流損失とシールド層の損失の合計となる。以下の計算結果は66 kV/3 kA, 全長10 kmのケーブルを想定したものである。また、交流損失は開発した交流損失のプログラム[2]を用いて計算し、冷却機動力を考慮した。

交流損失について、最外層であるc相の撚りピッチ p_c を変化したときの計算結果を Fig. 1 に示す。軸方向磁界による損失 Q_z は $p_c = 1000$ mm において最小値となり、周方向磁界による損失 Q_θ はほぼ一定値となることから分かる。これは、軸方向磁界が撚りピッチの逆数の関数であるためであり、周方向磁界は通電電流によるためである。よって、不平衡モデルにおいて交流損失を最小化するためには、軸方向磁界による損失を最小化することが有効である。

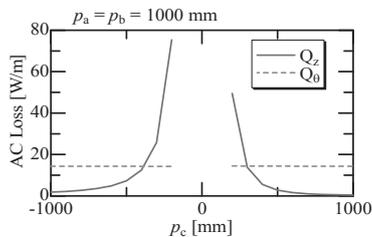


Fig. 1 AC Loss as a function of p_c

シールド層の損失 Q_s は、電流の不平衡によって銅シールド層に流れる遮蔽電流によるジュール損失である。電流不平衡率は、正相電流に対する零相電流の比として定義される。シールド層の損失について、電流不平衡率が変化したときの計算結果を Fig. 2 に示す。シールド層の損失は、電流不平衡率の増大に伴い増加するが、Fig. 1 の交流損失に比べて非

常に小さい値であることが分かる。これにより、不平衡モデルの総損失の低減化には、交流損失の最小化が重要であると言える。そのため、各相の撚りピッチを軸方向磁界による損失を低減するために $p_a = p_b = p_c = 1000$ mm とすると、電流不平衡率は Fig. 2 中の星印となるため、シールド層の損失は非常に小さい。しかし、軽負荷・長距離送電となると電流不平衡率が増大するため、検討が必要である。

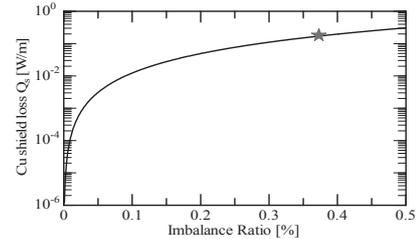


Fig. 2 Imbalance ratio dependence of Cu Shield Loss.

4. 平衡モデルと不平衡モデルの損失比較

先程と同条件となる66 kV/3 kA, 全長10 kmのケーブルにおいて、不平衡モデルと平衡モデルの損失比較を行った。Fig. 3 に平衡モデルの交流損失を、Fig. 4 に不平衡モデルの交流損失とシールド層の損失を示す。平衡モデルの全損失は28.5 W/m, 不平衡モデルの全損失は14.9 W/m となり、不平衡モデルを用いることで損失を大幅に低減できていることが分かる。特に、軸方向磁界を大幅に低減することができた。

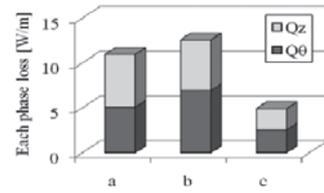


Fig. 3 Balance model Losses

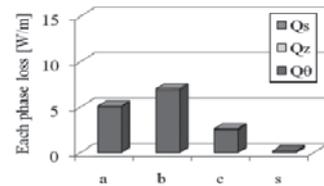


Fig. 4 Imbalance model Losses

これにより、シールド層の損失を考慮したとしても、損失の観点からみると不平衡モデルは有利であると言える。しかしながら、送電距離や負荷の変化によって不平衡率やシールド層の損失が増大する場合には、平衡モデルを用いる必要がある。

参考文献

1. T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai and N. Harada: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 15 (2005) p.1775-1778
2. T. Hamajima, M. Tsuda, T. Yagai, S. Monma, H. Sato and K. Shimoyama: IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol. 17 (2007) p.1692-1695

短絡事故に対する 66kV 系統 GdBCO 超電導ケーブルの電流裕度特性 -ケーブルの伝熱条件を模擬した超電導線材の耐過電流試験-

Current Margin Characteristics of 66kV GdBCO Superconducting Cable against Fault Current -Overcurrent Experiments of Coated Conductors Under Cable Thermal Ambient Condition-

琴寄 拓哉, 王 旭東, 石山 敦士(早稲田大学); 大屋 正義, 大松 一也(住友電工); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC)

KOTOYRI Takuya, WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda University);

OHYA Masayoshi, OHMATSU Kazuya (Sumitomo Electric Industries .Ltd); MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC)

E-mail: atsushi@waseda.jp

1. はじめに

66 kV 系統超電導送電ケーブルの開発において、突発的な短絡事故によって最大で 31.5 kA_{rms}, 2 s の短絡電流の流入が想定されている。それ故、短絡事故に対して線材が特性劣化、焼損しない電流の限界値を調査する必要がある。今回は 66 kV 系統 GdBCO 超電導ケーブルの実設計に基づいたモデルケーブルを製作し、開発した計算機シミュレータ[1]を用いてケーブル内部の各超電導線材に流れる短絡事故電流を解析評価した。そして、このシミュレーション結果を用いてモデルケーブルに対して過電流通電試験を行い、電流裕度特性を評価したので報告する。なお、本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 超電導ケーブルの素線に流れる短絡電流

本研究で用いたシミュレーションモデル、プログラムは参考文献(1)にて報告したものである。66 kV 系統超電導ケーブルの構造を Table 1 に示す。フォーマ断面積は 140 mm², 4 mm 幅線材を使用した超電導層 4 層(総数 51 本)で外径 22 mm, 絶縁層厚さは 6 mm で外径は 34 mm, 超電導シールド層 2 層(総数 45 本)で外径 37mm, 銅シールド保護層は 4 層で外径 42mm である。31.5 kA_{rms}, 2 s の短絡電流を通電した時に超電導層の各素線に流れる電流の解析結果を Fig. 1 に示す

3. 実験方法

実験に用いた線材の諸元を Table.1 に示す。実験はモデルケーブルを液体窒素で浸漬冷却しながら行った。モデルケーブルは実際の 66 kV 系統超電導ケーブル構造とほぼ同様に構成した。Fig. 2 に実際のケーブルとモデルケーブルの断面図を示す。モデルケーブルにおいて、断面積 140 mm² の銅撚線フォーマにスパイラルピッチ 150 mm で 3 本の超電導線材が巻きつけられている。実験手順は以下の通りである。

- (1)初期 I_c を測定(1μV/cm 基準)
- (2)過電流通電
- (3) I_c 測定, I_c 劣化の有無を確認。

I_c が劣化するまで I_{peak} を上げながら(2), (3)を繰り返した。

Table 1 Specifications of model Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former(140 mm ²)	18
HTS conductor layer(4 layers, width 4 mm/tape)	22
Electrical insulation(thickness 6 mm)	34
HTS shield layer(2 layers, width 4 mm/tape)	37
Copper shield layer(4 layers, 100 mm ²)	42

4. 実験結果とまとめ

実験結果を Fig. 3 に示す。同図より I_{peak} が 324 A, 340 A, 370 A で劣化が確認された。想定される短絡電流がそれぞれ初期 I_c に対して 1.87 倍, 2.17 倍, 2.10 倍であるのに対し、線材の最大裕度は 2.14 倍, 2.78 倍, 2.55 倍となった。

Table 2 Specifications of GdBCO sample tapes

Sample	1	2	3
I_{c0} @ 77 K	158.6 A	115.2 A	122.2 A
Width	4 mm		
Thick ness	Cu	20 mm	
	Ag	5 mm	
	GdBa ₂ Cu ₃ O _x	2.7 mm	
	Buffer	0.4 mm	
	Substrate	120 mm	

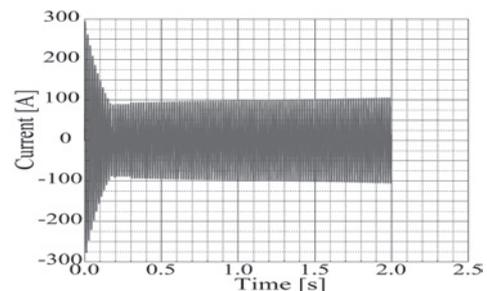


Fig. 1 Typical current waveform obtained by numerical simulation

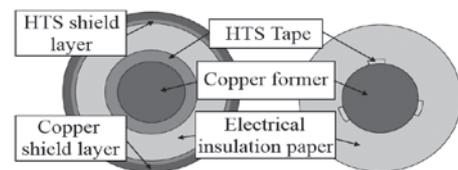


Fig. 2 Cross sections of real cable and model cable

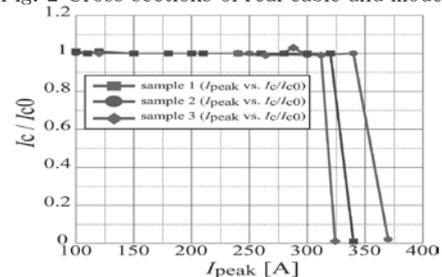


Fig. 3 Experimental results

参考文献

1. X. Wong, A. Ishiyama et al.: Abstracts of CSJ, (2011)

66 kV 系統 REBCO 超電導モデルケーブルの過電流通電試験と数値解析

Over-current Experiments and Numerical Simulations on 66 kV REBCO Superconducting Model Cable

王 旭東, 石山 敦士(早大); 大屋 正義(住友電工); 丸山 修, 大熊 武(ISTEC-SRL)
 WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.); OHYA Masayoshi (Sumitomo Electric Industries, Ltd.);
 MARUYAMA Osamu, OHKUMA Takeshi (ISTEC-SRL)
 E-mail: wan-x-don@ruri.waseda.jp

1. はじめに

66 kV 系統の電力ケーブルは最大で 31.5 kA_{rms}, 2 s の短絡事故電流が流入する恐れがある。それゆえ、短絡事故電流による突発的な温度上昇が超電導ケーブルの劣化を引き起こさないよう、保護層としての線材安定化層、銅フォーマや銅シールド層を設計することが必要となる。これまでに筆者らは保護層の最適化設計のための計算機シミュレータの開発を行い、超電導線材や超電導モデルケーブルの過電流通電試験を行うとともに、計算機シミュレータの開発および妥当性の検証も行った[1-3]。今回は、試設計した 2 m 級 REBCO 超電導モデルケーブルに対して過電流通電試験を行い、超電導ケーブル内の温度上昇と電流分布について数値シミュレーションの結果と比較検討を行ったので報告する。本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」の一部として NEDO の委託により実施したものである。

2. 実験

実験で使用した超電導モデルケーブルの諸元を Table.1 に示す。モデルケーブルは、銅フォーマの断面積が 140 mm², HTS 導体層が 4 層, HTS シールド層が 2 層, 銅シールド層の断面積が約 100 mm² である。線材は 4 mm 幅で、安定化層として銀層に加え銅層がメッキ加工されている。試験回路は、2 本のモデルケーブルの導体層(銅フォーマ, HTS 導体層)を電源と直列接続し、シールド層(HTS シールド層, 銅シールド層)は 2 本同士で短絡接続して、導体層からの誘導でシールド電流が流れるように構成した。過電流通電によるケーブル内の温度上昇を測定するため、ケーブル長手方向の中央部の各層に熱電対温度計を、電流計測用にログスキーコイルを設置した。実験は液体窒素浸漬冷却(77.3 K)で行い、交流過電流として約 10, 20, 31.5 kA_{rms} を通電した(60Hz)。

3. 数値解析

3 次元有限要素法と回路方程式に基づく電流分布・熱伝導連成解析の計算機シミュレータを開発した。電流分布解析は式(1), (2), 熱解析は式(3)を用いて定式化した。超電導線材は 3 次元有限要素法を用いてモデル化し、I-V 特性には n 値モデルを採用した。境界条件として、超電導線材は銅フォーマが端部のみで電氣的に接触し、ケーブルの最外層の保護層の表面が液体窒素に触れていると仮定し、飽和液体窒素の非線形熱伝達特性を考慮した。また、インダクタンス L, M は円筒モデルで近似し、集中定数とした。

$$\nabla \cdot \sigma(\nabla \phi) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} R_{cond} & 0 \\ 0 & R_{shield} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{cond} & M \\ M & L_{shield} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} I_{cond} \\ I_{shield} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} V_{cond} \\ V_{shield} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{cond} \\ \theta \end{Bmatrix} \tag{2}$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_j \tag{3}$$

式(1)の ϕ はスカラーポテンシャル、 σ は導電率である。式(2)の I は電流、 V は式(1)から得られる超電導線材の電圧降下、 E は両端電圧である。添え字の cond は導体層, shield はシールド層を示す。式(3)の ρ は密度、 c は比熱容量、 k は熱伝導率、 Q_j は電流分布から求めるジュール発熱を意味する。

4. 結果とまとめ

31.5 kA_{rms} 通電時の各層の温度上昇を Fig. 1 に、電流分布を Fig. 2 に示す。Fig. 1 において実験値がプロットで、解析値は実線である。実験結果の HTS 導体層と HTS シールド層の温度上昇は約 130 K であり、超電導特性の劣化は観測されなかった。これにより、設計したモデルケーブルの耐過電流特性が実証できたと考える。また設計時の解析結果は実験結果とよく一致しており、開発した計算機シミュレータの妥当性を確認できた。今後は 66 kV 超電導ケーブルの耐過電流保護設計に加え過電流に対する裕度特性や経年劣化特性について評価する。

Table.1 Specifications of Superconducting Model Cable

	Outer diameter (mm)
Copper former	18 (140 mm ²)
HTS conductor layer	22 (4 layers)
Electrical insulation	35
HTS shield layer	36 (2 layers)
Copper shield layer	42 (100 mm ²)

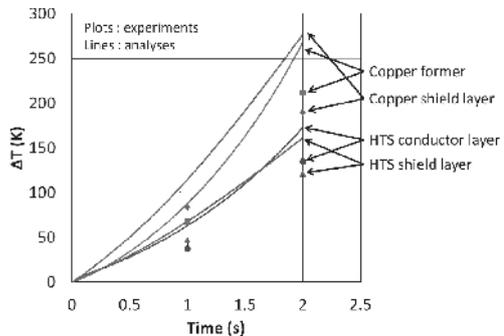
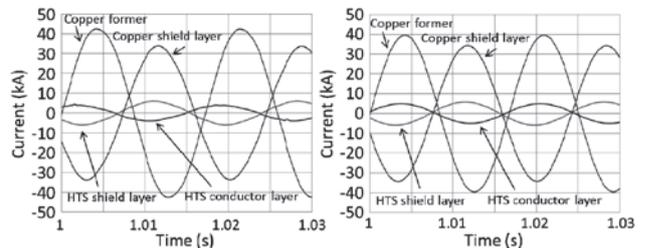


Fig. 1 Results of temperature rise



(a) Experiments (b) Simulations

Fig. 2 Results of current distribution

参考文献

- X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19 (2009), no. 2, pp. 1722-1726
- X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Physica C: Supercond., vol.470 (2010), no.20, pp.1580-1583
- X. Wang, H. Ueda, A. Ishiyama, et al.: Abstracts of CSJ Conference, vol. 82 (2010) p.88

275 kV-3 kA YBCO 高温超電導ケーブルの設計と特性評価

Design and Properties of 275 kV-3 kA YBCO HTS Cable

野村 朋哉, 八木 正史, 藤 軍, 三賢 隆治 (古河電工); 雨宮 尚之 (京都大);

青木 裕治 (昭和電線); 齋藤 隆 (フジクラ); 大熊 武, 丸山 修 (超電導工研)

NOMURA Tomoya, YAGI Masashi, TENG Jun, MITSUHASHI Takaharu (Furukawa Electric); AMEMIYA Naoyuki (Kyoto Univ.);

AOKI Yuji (SWCC); SAITO Takashi (Fujikura); OHKUMA Takeshi, MARUYAMA Osamu (ISTEC-SRL)

E-mail: nomura.tomoya@furukawa.co.jp

1. はじめに

YBCO 線材を用いた 275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブルの開発を進めている。開発目標として、耐電圧性能は IEC, JEC の電力規格や他の超電導試験を参考にして AC 300 kV 部分放電フリー、雷インパルス $\pm 1,155$ kV 各 3 ショットクリア、損失は交流損失と誘電損失を合わせ 0.8 W/m 以下、形状は外径 $\phi 150$ mm 以下、耐過電流は 63.0 kA-0.6 s クリアとした。

これまで 325 mm² 銅線丸撚りフォーマを基に構成した超電導ケーブルで実績を残してきたが[1]、定常時の冷却特性向上と短絡事故時の温度上昇抑制の観点から、ケーブル構造の最適化の検討をした。そこで伝熱特性向上を見込める内部冷却通路付の 400 mm² 中空銅撚り線フォーマを基に構成した超電導ケーブルを作製評価し、275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブルの設計を行ったので報告する。

2. 試験用超電導ケーブルの詳細

275 kV 級高温超電導ケーブル設計に必要な耐電圧及び誘電特性は、超電導模擬線を含む絶縁モデルケーブルで評価した。このモデルケーブルは導体遮蔽外径 $\phi 35.4$ mm 上に PPLP-C (PP 比率 60%) を 22 mm 厚に巻き付けた構造である。絶縁厚はこれまでの試験結果に基づき設計した[2]。

一方、3 kA 級の超電導特性は、2 層の超電導導体で評価した。この超電導導体の遮蔽外径は $\phi 35.4$ mm である。超電導線材は、5 mm 幅の TFA-MOD YBCO 線材を使用した。この超電導線材をレーザーにより 3 mm 幅に細線化し、その後 Fig. 1 に示す様に銅メッキを行った。Fig. 1 から均一にメッキ処理が行われ、レーザー切断面も銅で覆われていることが分かる。超電導の出来上がりの線幅は平均 3.15 mm であった。この加工した超電導線材を 1 層目に 30 本、2 層目に 31 本巻き付けた。

3. 特性評価試験と 275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブル設計

超電導絶縁モデルケーブルを用いた耐電圧試験の結果、AC300 kV 部分放電フリー、雷インパルス $\pm 1,155$ kV 以上であり、誘電損失は 0.60 W/m である事を確認した。

次に超電導導体を用いた交流損失試験の結果、77.3 K と 73.7 K での臨界電流 I_c はそれぞれ 6,270 A と 9,020 A であり、3 kA の交流損失 (50 Hz) はそれぞれ 0.311 W/m と 0.124 W/m であった。Fig. 2 に 73.7 K の交流損失と数値解析の結果を示す。数値解析では細線化した線材の臨界電流密度 J_c が両端部で低下する事を考慮に入れた。Cal-1 と Cal-2 は両端部の J_c 低下領域がそれぞれ端部から 0.10 mm、0.27 mm であると仮定した。測定結果は Cal-1 とほぼ一致することから細線化に伴う J_c 低下領域は端部から 0.10 mm 程度と考えられる。また、低電流領域で若干の差異がある事から、 J_c 低下領域は 0.10 mm よりやや小さいとも考えられる。

上記の試験結果に基づく、275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブルの設計を Table 1 に示す。交流損失は 73.7 K の値を使用

すると 0.124 W/m、誘電損失は 0.60 W/m、その結果、ケーブルの全損失は 0.72 W/m と目標の 0.8 W/m 以下になる。さらにケーブル外径は目標の $\phi 150$ mm 以下になり、275 kV-3 kA 級高温超電導ケーブルの設計解を得た。

4. 謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発研究機構 (NEDO) の委託により実施したものである。



Fig. 1 Cross section of YBCO tape after Cu plating

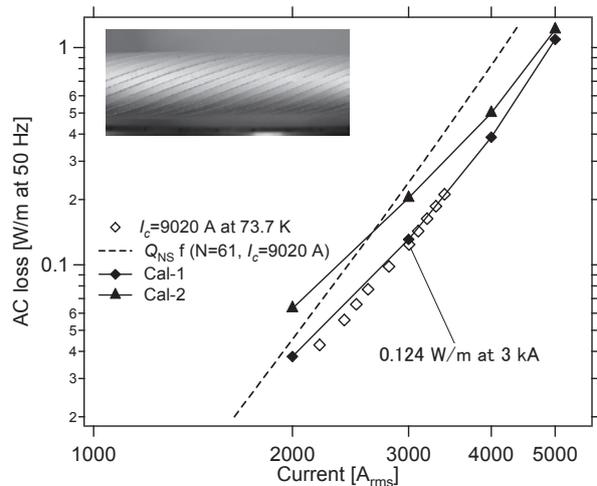


Fig. 2 Comparison between measured and calculated AC loss

Table 1 Specification of 275 kV-3 kA HTS Cable

Structure	Specification	Diameter (mm)
Former	400 mm ² hollow stranded copper	35.4
HTS conductor	2-layer YBCO, Total $I_c > 6,000$ A	
Insulation	22 mm PPLP-C (PP ratio 60%)	81.0
HTS Shield	1-layer YBCO, Total $I_c > 6,000$ A	
Cu Protective	200-350 mm ² copper tape	88.0
Protection	Insulation paper	
Cryostat pipe	SUS and PVC sheath	150

参考文献

1. M. Yagi, *et al.* Abstract of CSJ Conference, vol. 81 p.26 (2009)
2. M. Yagi, *et al.* 平成 22 年度電気学会 B 部門, p.284 (2010)
3. M. Yagi, *et al.* Abstract of CSJ Conference, vol. 82 p.30 (2010)