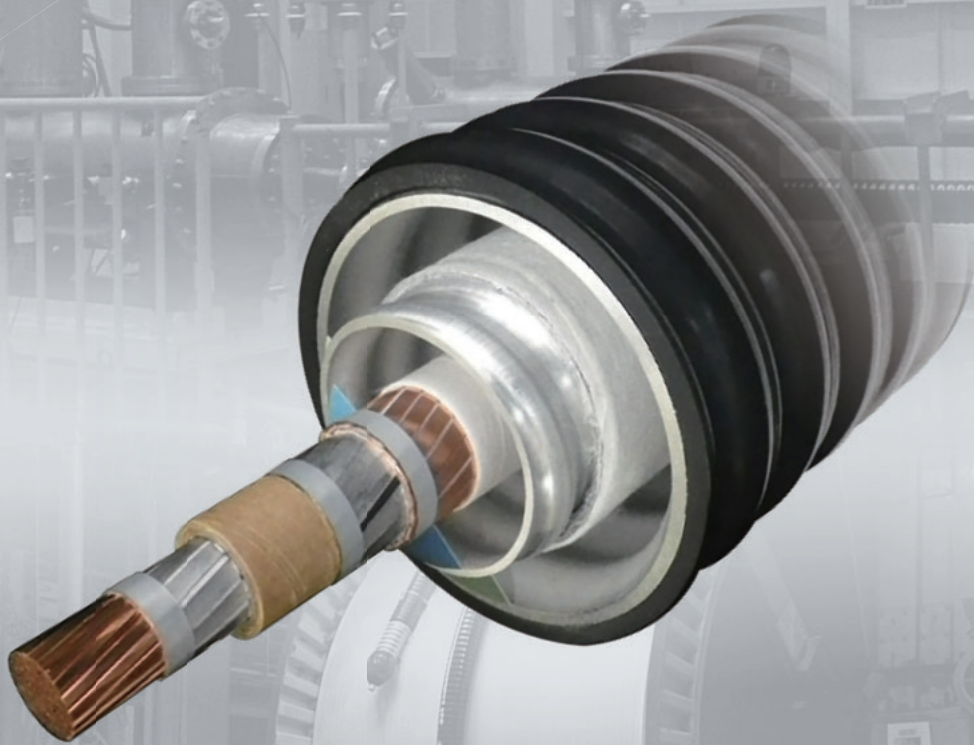


昭和電線 レビュー

2016 VOL.62 通巻118号

SWCC SHOWA GROUP TECHNICAL REVIEW

ISSN 2342-518X



昭和電線ホールディングス株式会社

www.swcc.co.jp/

目 次

〈普通論文〉

- AC35kV 600 A 超電導ケーブルシステムの開発 2 昭和電線ケーブルシステム(株)
- KEMA 型式試験
菅根 秀夫・足立 和久
北村 祐・中西 達尚
青木 裕治・小泉 勉 ... 5
三堂 信博
昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代
- 三相同軸超電導ケーブルの試作と性能検証結果 昭和電線ケーブルシステム(株)
大西 浩樹・中西 達尚
北村 祐・小泉 勉 ... 9
三堂 信博
昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代
- リットリウム系超電導線材の開発 昭和電線ケーブルシステム(株)
広長 隆介・中村 達徳
高橋 保夫・小泉 勉 ... 14
昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代
- 酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの非線形特性を 昭和電線ケーブルシステム(株)
利用した電界緩和技術の開発
箕輪 昌啓・田中 忍
荻島 みゆぎ・川井 二郎
李 鋒・今西 晋 ... 18
伊藤 一己
秋田大学
Mahmudul Kabir
- 154 kV ダイレクトモールド気中終端接続部の開発 昭和電線ケーブルシステム(株)
李 鋒・今西 晋 ... 25
新井 敦宏・伊藤 一己
- ワイヤレス給電用コイルの最適化検討 昭和電線ケーブルシステム(株)
松本 秀樹・三浦 聖
野内 健太郎・大根 田進 ... 30
昭和電線デバイステクノロジー(株)
森 正裕・香月 史郎
- 水平ねじり回転が免震建物用積層ゴムの水平性能に与える影響 昭和電線デバイステクノロジー(株)
佐藤 敬昇・加藤 直樹 ... 40
大成建設株式会社
中島 徹・中村 俊之

〈新製品紹介〉

110 kV 移動変圧器用ダイレクトモールドブッシング	44
X線装置用 直流 300 kV EP ゴム絶縁ポリウレタンシースケーブル (DC300kV XU)	45
抗菌仕様 LAN ケーブル	46
屋外用小勢力回路用耐熱電線 (EM-HFA®-LAP)	47
高耐熱自己融着極細平角線.....	48

〈トピックス〉

盤内配線用 EM-TNC の電線色黄色の追加	49
トンネル分岐用コネクタ ショウタッチ® の改良	50
原子力用ケーブル向け EP ゴム絶縁体の耐熱寿命向上	51
産業用イーサネットケーブルの UL リスティング認証取得	52
防火層付き塗布型制振材ショウダンブ® NH-5 の日本海事協会承認取得	53

〈社外技術発表一覧表〉	54
-------------------	----

SWCC SHOWA GROUP TECHNICAL REVIEW

2016 Vol. 62

CONTENTS

< Regular Papers >

AC 35 kV 600 A Superconducting Cable System -KEMA Type Test -	5
Performance Test of Prototype Triaxial Superconducting Cable	9
Development of Y System Superconducting Coated Conductors	14
Technical Development of the Electric-field Control by Nonlinear Electrical Properties with ZnO/Epoxy Resin Composites	18
Development of 154 kV Direct-molded Outdoor Termination	25
Consideration of Coil for Wireless Power Transfer	30
Performance Test of Natural Rubber Bearing for Seismic Isolation Building under Torsional Deformation	40

< New Products >

110 kV Direct-Molded Bushing for Mobile Transformer	44
DC300 kV Ethylene-propylene Rubber Insulated Polyurethane Jacketed Cable for X-Ray Equipment	45
Antibacterial Cable for LAN	46
Outdoor Type Heat Proof Instrumentation Cable “EM-HFA-LAP”	47
Heat Resistance and Self-bonding Extra Fine Flat Enamelled Wire	48

< Topics >

Addition of Yellow Wire to Lead Wire in the Panel “EM-TNC”	49
Improvement of Connector for Tunnel Lighting “Showtouch”	50
Heat Life Improvement of EP Rubber Insulator for Nuclear Power Cable	51
The Acquisition of UL Listing Certification for Industrial Ethernet Cable	52
Nippon Kaiji Kyokai Approval Acquisition of Damping Material with Fire Protect Layer “SHOWDAMP NH-5”	53

< List of Technologies Published since 2015 >	54
---	----

Published by **SWCC SHOWA HOLDINGS CO., LTD.**
Shiroyama Trust Tower, 3-1, Toranomom 4-chome,
Minato-ku, Tokyo
URL <http://www.swcc.co.jp/>
E-mail:kouho@hd.swcc.co.jp

AC35kV 600 A 超電導ケーブルシステムの開発 2 – KEMA 型式試験

AC 35 kV 600 A Superconducting Cable System -KEMA Type Test -

菅根 秀夫
Hideo SUGANE

足立 和久
Kazuhiisa ADACHI

北村 祐
Tasuku KITAMURA

中西 達尚
Tatsuhisa NAKANISHI

青木 裕治
Yuji AOKI

小泉 勉
Tsutomu KOIZUMI

三堂 信博
Nobuhiro MIDO

長谷川 隆代
Takayo HASEGAWA

昨年度、当社で保有する YBCO 超電導線材と極低温ケーブル技術を用いて超電導ケーブルシステムを開発したことを報告した。今回、第三者認証機関である KEMA 立会の下、CIGRE TB 538 に準拠した型式試験を実施し、要求性能を満たすことを確認した。

Last year, we reported that we had developed a superconducting cable system using a cryogenic cable technology and YBCO superconducting tape produced in SWCC group. Recently, we carried out a type test of our superconducting cable system that complies with the CIGRE TB 538 under the KEMA witness.

1. はじめに

東日本大震災以降、電力供給事情は厳しい状況が続いており、電力消費量の削減が望まれている。

一方、発電においては太陽光や洋上風力などによる再生可能エネルギーを用いる動きが広がっている。しかしながら、再生可能エネルギーは発電地から需要地までの距離が離れていることが多く、送電時におけるロス低減が課題となる。

超電導ケーブルはジュール損失無しで電力を輸送することができるため、理想的な送配電システムである。

昨年、当社は AC 35 kV 600 A の超電導ケーブルシステムを開発し、CIGRE（国際大電力システム会議）による超電導ケーブルの試験推奨案 TB 538 で定められる型式試験項目を満足することを報告した¹⁾。

今回、本ケーブルシステムについて第三者機関である KEMA 立会の下で型式試験を行った。立会を依頼した KEMA（オランダ電気規格協会）は電力ケーブルの型式試験において 90 年の歴史と世界的権威を持つ、公的かつ国際的認証機関である。

本報では上記型式試験の結果について報告する。

2. 超電導ケーブルシステム仕様

試験した超電導ケーブルシステムの写真を図 1 に示す。

KEMA 型式試験に供試した超電導ケーブルと試験用終端の仕様を表 1 に示す。



図 1 超電導ケーブルシステム

表 1 35 kV 超電導ケーブルシステムの仕様

項目	値
定格電圧	35 kV
導体-対地間電圧 (U_0)	21 kV
定格電流	600 A
臨界電流 (I_C)	1200 A
短絡電流	25 kA 2 秒間
運転周波数	50 - 60 Hz
クライオスタット運転圧力	0.3 - 0.4 MPa-G
クライオスタット運転温度	65 - 70 K
冷媒	液体窒素

3. 適用規格と試験項目

今回開発したシステムが上記仕様を満足することを確認するため、超電導ケーブルシステム試験の推奨案である

CIGRE TB 538 “Recommendations for testing of superconducting cables” を参照して型式試験項目を決定した。型式試験項目と要求仕様を表 2 に示す。

表 2 CIGRE TB 538 における要求仕様

試験項目	要求仕様
曲げ試験	曲げ半径 3200 mm 以下で 180° 3 回曲げを経験した後の I_C が、設計 I_C の 95% 以上であること
圧力試験	0.5 MPa·G にて漏れなきこと
長期課通電試験	42 kV 連続課電 600 A 通電 8 時間 on/16 時間 off を 20 回実施後、以降に続く残存試験に耐えること
商用周波耐電圧試験	53 kV 30 分に耐えること
雷インパルス試験	± 200 kV × 10 回の雷インパルスに耐えること
	雷インパルス経験後、53 kV 30 分の商用周波電圧に耐えること
商用周波部分放電試験	37 kV × 10 秒印加後、31.5 kV にて部分放電なきこと

4. 試験方法

試験を実施するため、当社愛知工場のシールドルーム内にケーブル試験回路を構築した。

各試験の試験方法を以下に示す。

4.1 曲げ試験

胴径 3000 mm φ のドラムに超電導ケーブルを巻いて、引き延ばし、180° 回転して再度ドラムに巻く作業を 3 回繰り返した。(図 2)



図 2 曲げ試験風景

その後、次項以降に続く全ての試験終了後にケーブルコアを切り出し、端子を取付けた状態で液体窒素のオープンバスに浸漬して臨界電流値 I_C を測定した。

I_C 測定時の試料形状を図 3 に示す。

4.2 圧力試験

圧力試験はケーブルシステムを密閉した状態で窒素ガスを導入することにより容器内を加圧し、0.5 MPa·G で 10 分間加圧状態を保持した。

4.3 長期課通電試験

長期課通電試験では、以下のプロセスで電流、電圧を印加した。

- ・ $2 \times U_0$ (42 kV) の電圧を連続課電

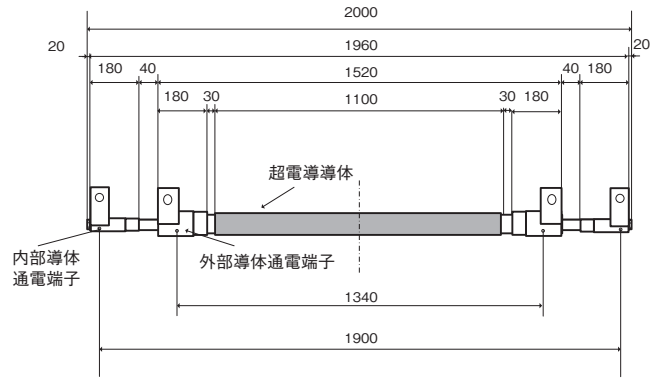


図 3 曲げ経験後 I_C 測定試料形状

- ・ 定格電流 (600 A) を 8 時間通電後、16 時間非通電
 - ・ 上記を 1 サイクルとし、20 サイクル繰り返す
 - ・ この時、試験圧力は最低使用圧力 (0.3 MPa·G) 未満とし、試験温度は最高使用温度 (70 K) 以上とする
- 試験用トランスから回路全体に電圧を印加し、通電用トランス 2 台を用いて通電した。それぞれの印加電圧、通電電流はトランスデューサを介して記録計に接続し、収集した。終端及びケーブルの容器内温度は終端容器内に設置した白金温度計で測定し、同様に圧力は歪ゲージ型圧力計で測定した。それらの結果は記録計に入力し、収集した。

4.4 残存試験

前項の長期課通電試験経験後の試験体に対し、以下の残存試験を行った。残存試験中は容器内の圧力を最低使用圧力 (0.3 MPa·G) 未満、温度を最高使用温度 (70 K) 以上となるよう保持した。

4.4.1 商用周波耐電圧試験

商用周波耐電圧試験の構成を図 4 に示す。

$2.5 \times U_0$ (53 kV) の電圧を印加し、30 分保持した後に降圧した。

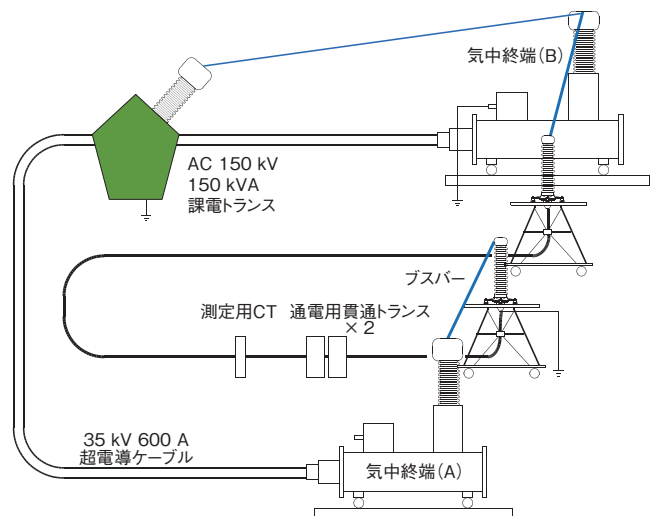


図 4 商用周波耐電圧試験 試験構成

4.4.2 雷インパルス試験

雷インパルス試験の構成を図5に示す。

試験電圧の校正は球ギャップを用いて実施した。試験電圧に対する50%, 65%, 80%の各電圧において昇降法を用いて充電電圧を決定し、その結果から試験電圧である ± 200 kVを得るための各充電電流を3点校正で算出した。試験電圧を各10回ずつ試験回路に印加した。

雷インパルス印加後、本試験の残存試験として4.4.1項と同じ方法で商用周波耐電圧試験を実施した。

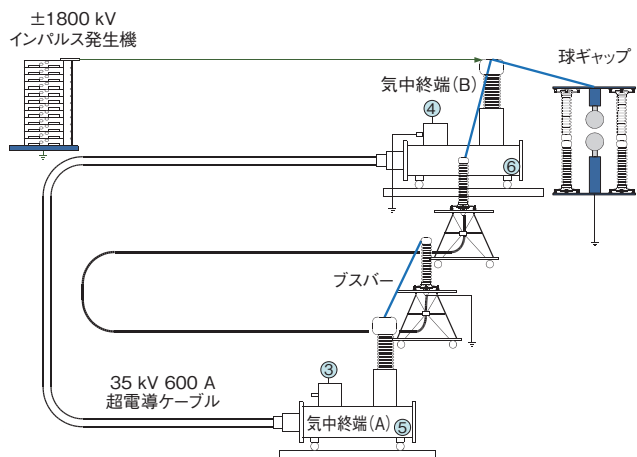


図5 雷インパルス試験 試験構成

4.4.3 商用周波部分放電試験

部分放電試験の構成を図6に示す。

37 kVを10秒印加後、32 kVまで電圧を降圧し、部分放電を測定した。

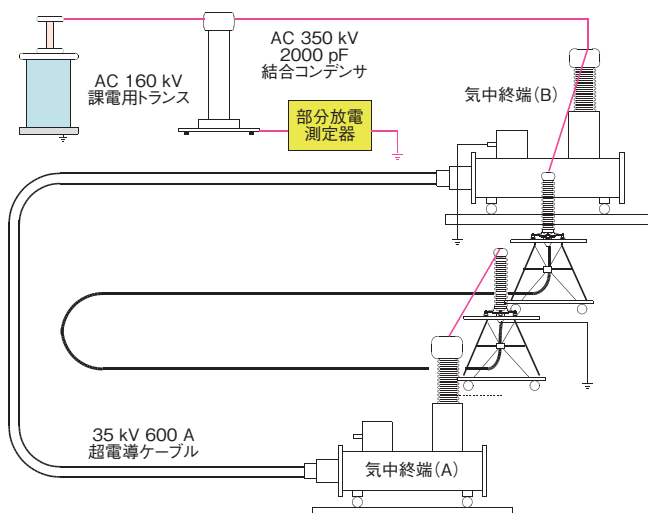


図6 商用周波部分放電試験 試験構成

5. 試験結果

実施した試験の結果を、試験項目ごとに順次示す。

5.1 曲げ試験結果

項4.1に示した方法で曲げを印加し、全ての試験項目を

経験したケーブルのコアを切り出し、 I_C を測定した。

試験結果を図7に示す。

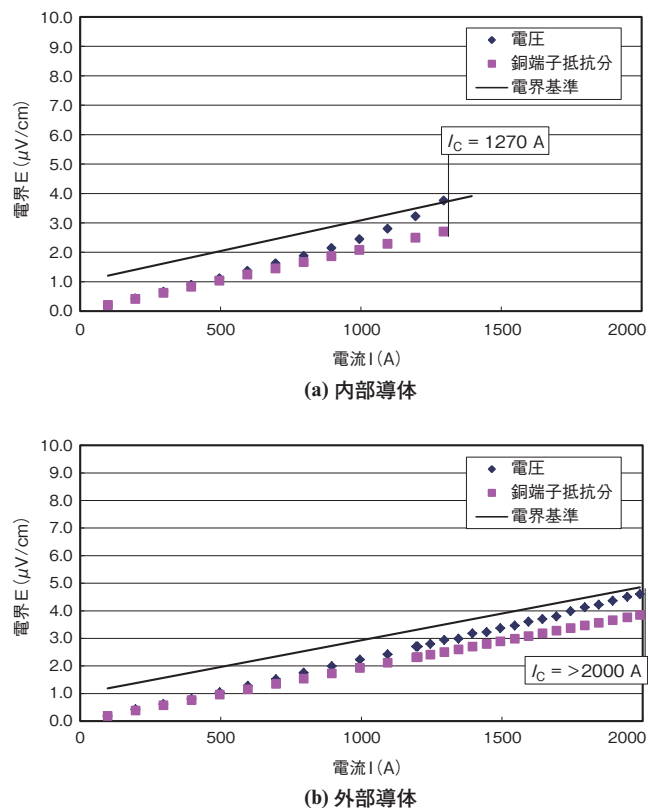


図7 曲げ経験後 I_C 測定結果

図7に示す“電界基準”は、導体抵抗から算出される発生電圧に $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ を加えたプロットである。導体抵抗の値は100 A通電時の発生電圧を元に算出した。この電界基準を超える電流値を I_C とすると表3の通り。

表3 曲げ経験後 I_C 測定結果

測定箇所	設計 I_C	要求 I_C (設計 I_C の95%)	I_C 測定結果
内部導体	1200 A	1140 A	1270 A
外部導体	1500 A	1425 A	2000 A 以上

上記より、外部導体、内部導体共に曲げ試験の要求性能を満たしていることを確認した。

5.2 圧力試験結果

項4.2で示した方法で容器内部を $0.5 \text{ MPa} \cdot \text{G} \times 10$ 分間加圧し、圧力計に変化がなかったことから、漏れがないことを確認した。

5.3 長期課通電試験結果

項4.3の方法に則り、長期課通電を実施した。

結果、22サイクル（規定20サイクル+予備2サイクル）の課通電に耐えることを確認した。

5.4 残存試験結果

長期課通電経験後の残存試験結果を、試験毎に分けて以下に示す。

5.4.1 商用周波耐電圧試験

項 4.4.1 に記載の方法で課電を行い、53 kV×30 分の電圧に耐えることを確認した。

5.4.2 雷インパルス試験

項 4.4.2 に記載の方法で試験を実施した。±200 kV 各 10 回の雷インパルス電圧に耐えることを確認した。

5.4.3 商用周波部分放電試験

項 4.4.3 に記載の方法で部分放電を測定した。

結果、37 kV×10 秒印加後、32 kV 印加時において部分放電がないことを確認した。

6. ま と め

超電導ケーブルおよび気中終端接続部を開発し、KEMA 立会の下で型式試験を実施した。

超電導ケーブルシステム試験推奨案である CIGRE TB 538 に準拠して試験を実施し、要求仕様を満足することを確認した。

試験結果のまとめを表 4 に示す。

表 4 CIGRE TB 538 による試験結果

試験項目	要求仕様	試験結果
曲げ試験	曲げ半径 3200 mm 以下で 180° 3 回曲げを経験した後の I_C が、設計 I_C の 95% 以上であること	良
圧力試験	0.5 MPa・G にて漏れなきこと	良
長期課電試験	42 kV 連続課電 600 A 通電 8 時間 on/16 時間 off を 20 回	良
商用周波耐電圧試験	53 kV 30 分に耐えること	良
雷インパルス試験	± 200 kV×10 回の雷インパルスに耐えること	良
	雷インパルス経験後、53 kV 30 分の商用周波電圧に耐えること	良
商用周波部分放電試験	37 kV×10 秒印加後、31.5 kV にて部分放電なきこと	良

今後、本超電導ケーブルシステムで用いたものと同等の終端及びケーブルを用い、実フィールドにおいて実証試験を行うことを予定している。

参考文献

1) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, Vol.61, No.1, p.15 (2015)

昭和電線ケーブルシステム(株)
菅根 秀夫 (すがね ひでお)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
足立 和久 (あだち かずひさ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主査
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
北村 祐 (きたむら たすく)
工学博士
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主幹
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中西 達尚 (なかにし たつひさ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主査
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
青木 裕治 (あおき ゆうじ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主幹
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
小泉 勉 (こいずみ つとむ)
超電導テクノロジーセンター
線材開発グループ長
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三堂 信博 (みどう のぶひろ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ長
超電導ケーブルシステムの研究・開発に従事

昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
工学博士
取締役 技術企画室 室長
兼 昭和電線ケーブルシステム(株)
超電導テクノロジーセンター長

三相同軸超電導ケーブルの試作と性能検証結果

Performance Test of Prototype Triaxial Superconducting Cable

大西 浩樹 中西 達尚 北村 祐
Hiroki OHNISHI Tatsuhisa NAKANISHI Tasuku KITAMURA

小泉 勉 三堂 信博 長谷川 隆代
Tsutomu KOIZUMI Nobuhiro MIDO Takayo HASEGAWA

発電所で用いられる相分離母線のコンパクト化・低コスト化を実現するため、三相同軸超電導ケーブルの開発を実施している。ケーブルを試作製造し通電性能及び耐電圧性能を調査した結果について報告する。

We are developing a triaxial superconducting cable in order to realize a compact and low-cost isolated phase bus used in power plants. We report test results of the current flow and electrical insulating performance of the prototype cable.

1. はじめに

当社では、発電所等で用いられる低電圧大電流母線の省エネ化を目的とし、イットリウム系線材を用いた低コスト型超電導ケーブルを開発している。発電機で発電された電力は、相分離母線や閉鎖母線、水冷ケーブルによって昇圧変圧器に運ばれた後、送電系統に連系される。これらのケーブルには大型の銅導体を使用されており、主としてジュール発熱による熱損失を伴うとともに、広い設置スペースを必要とする。これらのケーブルを超電導化することにより、大電流通電による熱損失を大幅に低減させることが可能であり、大きな省エネルギーにつながる。また、超電導線を交流で使用した場合に交流損失が発生するが、超電導層を薄膜化した方が交差する量子化された磁束侵入量が減り、交流損失を減らすことができる。従って、超電導線材には、ピスマス系線材に比べ膜厚の小さいイットリウム系線材を使用すると交流損失が低減できる。また三相同時に冷却できるため冷却負荷を低減でき、コンパクトな低コストケーブルの作製が可能となる。

本開発では、基礎データを取得するために、定格電圧を 22 kV、定格電流 3 kA の回路母線を想定した三相同軸超電導ケーブルの導体コアを試作した。試作した導体コアの通電性能検証試験及び絶縁性能検証試験を実施し、母線への適合性を検討した。

2. ケーブルの要求性能及び構造

本開発における三相同軸超電導ケーブルに関する代表的な要求性能を表 1 に示す。

表 1 ケーブルの要求性能一覧表

項目	単位	要求性能
定格電圧	kV	12
商用周波数耐電圧	kV	50
雷インパルス耐電圧	kV	125
定格電流	kA	10
短時間電流	kA	70

当該回路母線では、使用電圧（定格電圧）は 12 kV だが、22 kV クラスの性能が要求されている。従って、日本電機工業会規格である JEM 1425「金属閉鎖形スイッチギア及びコントロールギア」に準じ、要求性能（22 kV クラス）に相当する商用周波数耐電圧は 50 kV、雷インパルス耐電圧は 125 kV とした。上記の要求性能を満たすケーブルの設計を検討した。図 1 に三相同軸超電導ケーブルの概略図を示す。

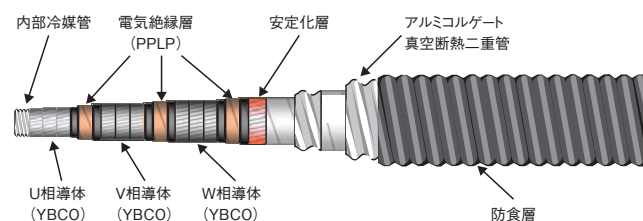


図 1 ケーブル概略図

ケーブルは導体部、真空断熱部の二つのコンポーネントで形成される。まず、導体部分の中央には内部冷媒管が配置される。これはステンレスを材料とした波付コルゲート管であり、この内部はケーブルを液体窒素で冷却する際の往路側の冷却路となる。この上に、超電導線材が配置される。これは厚さ約 0.2 mm、幅約 4 mm の超電導線材を複数本巻き付けている。超電導線材を巻き付ける本数はケーブルの定格電流に応じて設定される。本導体は U 相、V 相、W 相の交流三相を同時通電するため、三相分の導体が配置される。また、導体間に所定の絶縁性能を持たせるために、PPLP などの半合成紙を巻き付け絶縁層とする。また、絶縁層の上下には電界緩和層を形成する。本開発では半導電性を有するカーボン紙を採用する。W 相絶縁層の上部に遮へい層を形成する。これはケーブルに静電遮へい機能を付与するものである。

3. 絶縁設計

三相同軸超電導ケーブルに定格電圧を印加すると、導体間の絶縁層に電界ストレスが加わる。この電界ストレスに耐えうる絶縁強度を絶縁層に付与する必要がある。そこで、表 1 に示す定格電圧を母線に印加した際にかかる電界ストレスを計算により求めた。ケーブルの絶縁体部分の概要図を図 2 に示す。

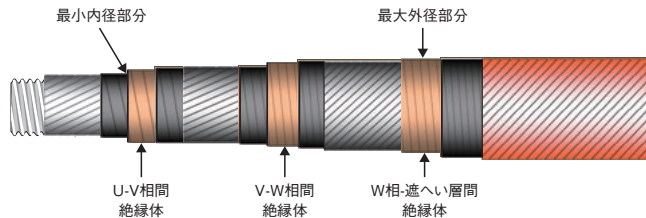


図 2 絶縁体部分の概要図

ケーブルの絶縁体に電圧を印加すると、導体内側との界面付近において最も電位傾度が大きくなり、導体外側との界面付近では最も電位傾度が小さくなる。同時に絶縁体の外径が大きくなるにつれて電位傾度が大きくなる。この二つの傾向から、絶縁体の最小内径部分と最大外径部分の2か所で、電界ストレスを求め、この値が材料の持つ最小破壊電界 (E_L) を上回らないように絶縁設計する必要がある。

そのための検証として、絶縁厚を 3.3 mm としてケーブルの構造設計を行ったうえで電界計算を行った。上記の構造のケーブルに対して交流破壊電圧 52 kV、インパルス破壊電圧 125 kV を印加した際の電界計算結果を表 2 に示す。

表 2 電界解析結果

絶縁部位	項目	記号	単位	商用周波数 試験耐電圧	雷インパルス 試験耐電圧
		試験電圧	V_t	kV	52
U 相-V 相	導体外径	d_1	mm	56.6	
	絶縁厚	t_1	mm	3.3	
	絶縁外径	D_1	mm	63.2	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max1}$	kV/mm	33.3	80.1
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min1}$	kV/mm	29.8	71.7
V 相-W 相	導体外径	d_2	mm	65.4	
	絶縁厚	t_2	mm	3.3	
	絶縁外径	D_2	mm	72.0	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max2}$	kV/mm	33.1	79.5
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min2}$	kV/mm	30.1	72.2
W 相-遮へい層	導体外径	d_3	mm	74.2	
	絶縁厚	t_3	mm	3.3	
	絶縁外径	D_3	mm	80.8	
	最大電界ストレス×2	$2 E_{max3}$	kV/mm	32.9	79.1
	最小電界ストレス×2	$2 E_{min3}$	kV/mm	30.2	72.6

U 相-V 相間の最大電界ストレス E_{max1} 及び最小電界ストレス E_{min1} は以下の式で与えられる。

$$E_{max1} = \frac{2V_t}{d_1 \ln(D_1/d_1)} \quad \dots (1)$$

$$E_{min1} = \frac{2V_t}{D_1 \ln(D_1/d_1)} \quad \dots (2)$$

安全率を考慮するため、ストレス値は計算値である E_{max1} 及び E_{min1} に対し 2 を乗じた値とする。

V-W 相間及び W 相-遮へい導体間の最大電界ストレス及び最小電界ストレスについても上式と同様に求められる。三相同軸ケーブルの各絶縁層にかかる電界ストレスは表 2 の通りとなり、この電界ストレスを上回る E_L を有する絶縁材料を選定する必要がある。

3.1 絶縁材料の選定

当社における油浸紙 (OF) 電力ケーブル、超電導ケーブルの製造実績をもとに、三相同軸超電導ケーブルに適用する絶縁材料の選定を行う。表 3 に絶縁材料候補リストを示す。

表 3 絶縁材料候補リスト

材料	PPLP	タイベック	クラフト紙
主原料	セルロース+PP	ポリエチレン	セルロース
電気特性	◎	△	○
加工性(当社設備によるケーブル製造)	○	未知	○
超電導ケーブル実績(当社)	○	×	×
浸透性	×	○	△

上記の一覧表から、本開発においては使用実績があり電気特性に優れる PPLP と、浸透性に優れるタイベックの二種類の材料を候補に絞り込み、ケーブル特性に関し重要な性能評価試験を実施することとした。電気特性試験として絶縁材料のシートによる交流破壊試験、雷インパルス破壊試験を行い、材料としての E_L を求める。次に絶縁層の厚さ

1.2 mm のモデルケーブルを製造し、交流破壊試験、雷インパルス破壊試験を行い、材料としての E_L を求めた。

3.2 シート電気試験

PPLP 及びタイベックのシート状の絶縁材料を用いて以下の通り電気試験を行った。80 mm 角のシート状サンプルを $\phi 25$ mm, 75 mm の二枚の電極にはさみ、これを液体窒素中に浸漬し電圧を印加する。圧力は常圧とした。交流破壊試験については、0.5 kV ステップで破壊電圧まで電圧印加する。雷インパルス破壊試験では 1.5 ~ 1.7 kV ステップで破壊電圧まで電圧印加する。計測サンプル数は各 10 とした。上記の条件で 10 点破壊試験を行った。それらの結果をおのおのワイブルプロットし、 E_L を求める。上記の結果から求められた各 E_L 値を表 4 に示す。

表 4 シート試験 E_L 値

材料	単位	交流破壊試験	雷インパルス破壊試験
PPLP	kV/mm	80	95
タイベック	kV/mm	40	60

表 4 より、PPLP の E_L がタイベックと比較して 30 ~ 50% 程度高くなっていることがわかる。PPLP はクラフト紙でポリプロピレンフィルムを挟んだ三層構造の絶縁紙である。高分子材料であるポリプロピレンフィルムが優れた電気絶縁特性を持つため、PPLP の E_L が高くなったと考えられる。

3.3 モデルケーブル電気試験

図 3 のような構造のモデルケーブル（絶縁厚：1.2 mm）を作製し、交流破壊試験及び雷インパルス試験を行い、ワイブルプロットを行うことによりそれぞれの試験の E_L を求めた。ケーブル長は PPLP が 500 mm, タイベックが 1000 mm である。

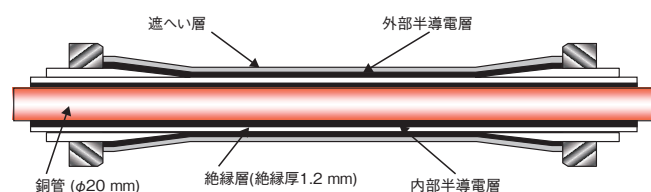


図 3 絶縁モデルケーブル構造

課電条件として、交流破壊試験の昇圧条件は、10 kV/10 分に耐えることを確認後、各 5 kV/5 分で絶縁破壊まで昇圧した。雷インパルス試験は +40 kV × 3 回耐えることを確認後、各 +10 kV × 3 回で絶縁破壊まで昇圧を継続した。サンプル数はそれぞれの試験で 10 (PPLP) 及び 5 (タイベック) として実施した。冷却条件については、クライオスタット内の気体部分の気圧は大気圧、液体窒素での冷却時間は 4 時間とした。上記の結果から求められた各 E_L 値を表 5 に示す。

表 5 モデルケーブル試験 E_L 値

材料	単位	交流破壊試験	雷インパルス破壊試験
PPLP	kV/mm	36.9	87.4
タイベック	kV/mm	13.0	30.0

表 5 の結果より、PPLP はシート試験の結果と同様にタイベックに比べ 2 倍以上の値となった。これはシート試験の原因と同様であると考えられる。

シート及びモデルケーブルの試験結果から PPLP を用いて絶縁層を形成した場合、3 項（絶縁設計）で検討した三相同軸ケーブルの各絶縁層にかかる最大電界ストレスは、 E_L を上回らないことを確認した。従って、本開発の三相同軸超電導ケーブルの絶縁材料には PPLP を選定した。

4. 導体設計

三相同軸超電導ケーブルの通電能力を付与する導体部分の設計を行った。導体には幅約 4 mm, 厚さ約 0.2 mm のテープ状のイットリウム系超電導線材を複数本同心円状に巻き付ける。各層の導体の電流容量は概ね巻き付ける超電導線材の臨界電流 × 本数となる。ケーブルの基礎データを取得するために、試作品の設計臨界電流は 3 kA とした。超電導線材 1 本の臨界電流値が 100 ~ 150 A のため、各相に使用した線材本数は表 6 のようになる。

表 6 各相の線材使用本数

相	単位	本数
U 相	本	32
V 相	本	36
W 相	本	40

5. 三相同軸超電導ケーブルの導体コアの設計・試作

本開発における三相同軸超電導ケーブル試作は当社の製造設備を使用し、導体及び絶縁層の形成を実施した。

5.1 三相同軸超電導ケーブル導体コアの設計仕様

導体コアの試作製造を撚線機及び紙巻機を使用して実施した。試作導体コアの主な設計仕様を表 7 に示す。

表 7 試作導体コア設計仕様

項目	厚さ (mm)	外径 (mm)	
フォーマ	ステンレスコルゲート管	—	53
押さえ巻	不織布	1.6	56.2
U 相導体	Y 系超電導線材 32 本	0.2	56.6
U - V 相絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	57.2
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	63.8
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	65
V 相導体	Y 系超電導線材 36 本	0.2	65.4
V - W 相絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	66
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	72.6
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	73.8
W 相導体	Y 系超電導線材 40 本	0.2	74.2
W 相 - 遮へい層絶縁層	内部半導電層 カーボン紙 2 枚	0.3	74.8
	絶縁層 PPLP 紙 28 枚	3.3	81.4
	内部半導電層 カーボン紙 4 枚	0.6	82.6
遮へい層	銅テープ 40枚 × 2	0.6	83.8
押さえ巻	不織布	0.2	84.2

5.2 導体コアの試作

表7の仕様に基づき、導体コアを試作した。試作長は7 mとした。超電導線材及び銅テープの撚合工程は撚合機、カーボン紙及びPPLP紙の紙巻工程は紙巻機で行った。

リールサプライから供給された超電導線材は、撚り口付近に設置された目板盤にて集線され、所定本数の線材が整列される。この状態で目板中央を通る導体に線材が巻き付けられる。巻き付けられた導体上に保護テープが巻き付けられ、次工程の紙巻工程に進む。図4に紙巻工程の状況を示す。



図4 紙巻状況

紙巻機は図のようなテーピングヘッドを4台使用する。図中手前方向に導体を送られ、その周囲をテーピングヘッドが回転する。ヘッドの中に取り付けられた材料パッドから絶縁紙が供給され導体上に巻き付けられる。各製造工程において、導体、絶縁体が設計仕様値通り巻き付けられているか工程内検査を行って管理した。最終工程で、設計通り導体コアが完成したことを確認した。

6. 性能検証試験

前項で試作した三相同軸超電導ケーブル導体コアの各相における通電性能検証試験、耐電圧性能検証試験を実施した。検証試験結果から当該相分離母線の要求性能を満たすことを確認した。

6.1 通電性能検証試験

測定方法は直流四端子法によって行った。また、本試験は超電導ケーブルの試験法に関する国際規格推奨案 CIGRE TB 538「WG B1.31 Testing of superconducting cable systems」に準拠して実施した。試験時の等価回路図を図5に示す。図中外側からU相、V相、W相の通電端子及び電圧端子を取り付ける。相ごとに電源を切り替え通電特性を計測するので、図中の回路線は点線で標記した。通電時の電流値は並列に配置したシャント抵抗器の電圧を読み取り電流値に換算した。各相の電圧端子間距離は、U相：173 cm、V相：133 cm、W相：96 cmとした。各層ごとに通電用のバスバーと電圧端子を取り付け、電流値を0 Aから3 kAまで100 A毎のステップで通電し各電流での発生電圧値を読み取った。通電電流3 kAで3分ホールドし、発生電圧に異常がないか確認した後、最大4.5 kA

まで通電し発生電圧値を読み取り、臨界電流値を算出した。

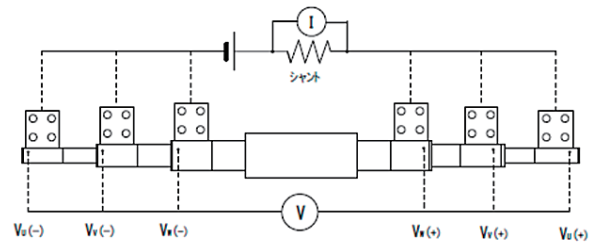


図5 通電試験等価回路図

上記の結果から得られた、各相の臨界電流値を表8に示す。通電時に各相の電圧端子間で $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 以上の発生電圧が生じたときの電流値を臨界電流値とした。

表8 各相臨界電流値

相	単位	臨界電流値
U相	kA	4.3
V相	kA	4.3
W相	kA	3.8

表8より、各相とも設定臨界電流3 kAに対し、約1 kAのマージンを持った臨界電流値であることを確認できた。

6.2 耐電圧性能検証試験

6.1項と同様に本試験は超電導ケーブルの試験法に関する国際規格推奨案 CIGRE TB 538に準拠して実施した。試験用モデルケーブルは絶縁厚3.3 mm、サンプル長1000 mmとした。要求性能を満たす課電条件は表9に示す通りであり、交流耐圧試験、部分放電試験、雷インパルス耐圧試験を実施した。冷却条件については、クライオスタット内の気体部分の気圧は0.3 MPaに加圧し、液体窒素での冷却時間は約72時間とした。耐電圧性能検証試験の結果を表9に示す。

表9 耐電圧性能検証試験条件及び結果

項目	試験条件	U-V相	V-W相	W相-差へい
交流耐圧試験	52 kV/30分間に耐えること	○	○	○
部分放電試験	36 kV 10秒間昇圧後 31.5 kVにて発生しないこと	○	○	○
雷インパルス耐圧試験	±125 kV 各10回に耐えること	○	○	○

表9より、要求性能を満たすことを確認した。今後は各相の絶縁破壊強度を取得し、要求性能に対する安全率をどの程度まで下げられるか検討を進めていく。

7. まとめ

発電所で用いられる相分離母線をコンパクトな低コストケーブルとするため、三相同軸超電導ケーブルの開発を実施した。三相同軸超電導ケーブルの基礎データを取得するために、定格電圧を22 kV、定格電流3 kAを想定した三相

同軸ケーブルを試作した。試作したケーブルの通電性能検証試験及び耐電圧性能検証試験を実施した。

通電性能については、各相とも設定臨界電流 3 kA に対し、約 1 kA のマージンを持った臨界電流値であることを確認できた。耐電圧性能については、各相で要求性能である課電試験の規格を満たすことを確認した。今後、各相の絶縁破壊強度を取得し、要求性能に対する安全率の検討を進めていく。

今回は当社設備で問題なくケーブルの導体コアを製造できることを確認し、通電特性及び耐電圧特性の評価を実施した。今後、真空断熱層としてアルミコルゲート管を製造し、実際にケーブルを敷設し型式試験の実施を検討している。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業の結果得られたものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 足立和久，他：“Design of 22kV-10kA HTS Triaxial Superconducting Bus”，24th International Conference on Magnet Technology (2015)
- 2) 足立和久，他：「AC 35 kV 600 A 超電導ケーブルシステムの開発」，SWCC レビュー vol. 61, No.1, p15-19 (2015)
- 3) 武祐一郎：「最近の合成絶縁紙」，電気學會雑誌 92 (10)，p995-1002 (1972)
- 4) 深沢正名，永野宏郎：「高電圧極低温ケーブル用液体窒素含浸絶縁の開発」，日立評論 Vol.56, p.49~54 (1974)

昭和電線ケーブルシステム(株)
大西 浩樹 (おおにし ひろき)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ
ケーブル開発及び絶縁性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
中西 達尚 (なかにし たつひさ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主査
導体性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
北村 祐 (きたむら たすく)
工学博士
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ 主幹
ケーブル設計・開発，性能評価に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
小泉 勉 (こいずみ つとむ)
超電導テクノロジーセンター
線材開発グループ長
超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三堂 信博 (みどう のぶひろ)
超電導テクノロジーセンター
ケーブルシステム開発グループ長
主任研究者補佐，ケーブル設計，システム設計に従事

昭和電線ホールディングス(株)
長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
工学博士
取締役 技術企画室長
兼 昭和電線ケーブルシステム(株)
超電導テクノロジーセンター長

イットリウム系超電導線材の開発

Development of Y System Superconducting Coated Conductors

広長隆介 中村達徳 高橋保夫
Ryusuke HIRONAGA Tatsunori NAKAMURA Yasuo TAKAHASHI

小泉 勉 長谷川隆代
Tsutomu KOIZUMI Takayo HASEGAWA

高温超電導線材を用いた電力ケーブルや変圧器、限流器、モーター等の応用機器の実用化に向けた研究開発が様々な機関にて行われている。我々は、三相交流 35 kV-70 MW 高温超電導ケーブル用線材として、有機酸塩塗布熱分解法（TFA-MOD 法）を用いた Y 系超電導線材の量産を行った。本報では、原料溶液に用いる材料及び本焼条件の最適化を行い、線材特性及び歩留り向上について検討した結果を報告する。120 m 長線材において、均一な I_c 値をもつものが得られた。

Various authorities performed with research and development for the practical use of the applied equipment such as an electrical power cable, transformer, a fault current limiter, and a motor using the high temperature superconductor. We fabricated trifluoroacetate metal organic deposition (TFA-MOD) process by the production of the REBaCuO (RE: Rare Earth elements) coated conductors (CCs) to use for the AC 35 kV-70 MW coaxial superconducting cable. In this study, we improved characteristics of the REBaCuO CCs of optimizing raw material solutions and the conditions of crystallization. In addition, we investigated performance and yield of the REBaCuO CCs. In 120 m-class CCs, we could obtained uniformity I_c value.

1. はじめに

我が国は、エネルギー資源の大半を海外に依存しているため、世界のエネルギー需給動向に大きく影響を受ける。そのため、より効率的なエネルギー活用の方策が求められている。中でも電力に関しては、生活・社会基盤エネルギーであるため、より安定で且つ効率的な系統を構築する必要がある。国内の送変電システムは世界トップレベルの高効率を有しており、送変電時の損失は総発電電力量の約 5% で飽和状態にある。つまり、更なる損失低減には、超電導技術等の革新的技術の適用が必要とされる。

現在、様々な機関にて高温超電導線材を用いた電力ケーブルや変圧器、限流器、モーター等の応用機器の実用化に向けた研究開発が行われている。高温超電導線材の中で RE (RE: 希土類元素) 系超電導線材は、Bi 系超電導線材に比べ、液体窒素温度において磁場中での臨界電流密度が高いことや材料に用いられる貴金属が少量であり低コストでの作製が可能とされることから、実用線材として期待されている。我々は数ある RE 系超電導線材の作製方法の中

で、低コストでの線材作製が可能である有機酸塩塗布熱分解法（TFA-MOD 法）を用い、本焼工程にバッチ式プロセスを適用した線材開発を行ってきた¹⁾。今回、超電導応用機器への実用化を目指し、臨界電流、長尺安定性及び製造歩留りの向上を課題とし、量産技術の確立を行った。

本報では当社における、100 m 長の三相交流 35 kV-70 MW の高温超電導ケーブル実証試験²⁾に向けた導体用線材の作製状況について報告する。



図 1 三相交流 35 kV-70 MW 高温超電導ケーブル

2. 線材作製方法

線材作製方法は以下の通りである。RE 及び Ba 金属元素はトリフルオロ酢酸塩 (RE-TFA, Ba-TFA)、銅金属元素はナフテン酸塩 (Cu-Naph) あるいはオクチル酸塩 (Cu-Oct) を用い、金属元素組成比が所定量になるように原料溶液を調製した。調製した原料溶液を、Ni 基合金 / Al₂O₃ / LaMnO₃ / MgO / LaMnO₃ / CeO₂ で構成される高配向中間層付金属基板上に、Reel-to-reel (RTR) 式の塗布・仮焼装置にて複数回塗布・仮焼を繰り返して、所定の膜厚の超電導前駆体膜 (仮焼膜) を形成した。そのテープ状の仮焼膜をバッチ式焼成炉にて、水蒸気を含む減圧低酸素雰囲気中で本焼成を行った³⁾。その後、銀安定化層を形成し、酸素雰囲気中においてポストアニールを行った。更に銅安定化層を電気めっきにて形成し、RE 系超電導線材を得た。図 2 に RE 系超電導線材の線材構造模式図を示す。今回作製した線材には、YBa₂Cu₃O_y (YBCO) 超電導体を用いた。

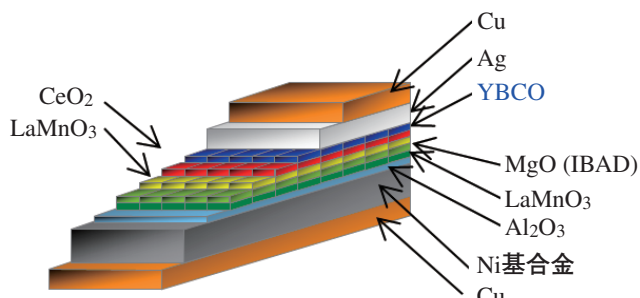


図 2 RE 系超電導線材の線材構造模式図

3. 原料溶液の最適化

これまで、Y-TFA, Ba-TFA 及び Cu-Naph を用いた原料溶液を調製し、線材を作製していたが、臨界電流 (I_c) 値の均一性及び I_c 値向上のための超電導層の厚膜化に課題があった。図 3 (a) に示すように、Cu-Naph を用いた場合、各層間にうねり及び空隙が数多く確認され、上述の課題を改善するためには、うねり及び空隙の低減が必要となる。各層間に存在するうねり及び空隙は、環状構造を持つ Cu-Naph 及びその遊離酸が仮焼工程内で不均一な分解を起こし、炭素成分が残ることが原因と考えられた。また、その後の本焼工程にて改善を試みたが、うねり及び空隙は改善されることはなく、線材の臨界電流 (I_c) 値の向上には至らなかった。そこで、その対策として、原料溶液に用いられていた Cu-Naph を低級炭素化合物に変更し改善を図った。低級炭素化合物を含む塩として Cu-Oct を選択した。Cu-Oct は、Cu-Naph に比べ炭素数が少なく、炭素が直鎖構造であるため、低温で熱分解し炭素の残渣が減少する。加えて Cu-Oct は、人工塩のため原料溶液としても安定化を図ることが可能となる。図 3 (b) に示すように、原料溶液に Cu-Oct を用いた場合、仮焼膜の各層に存在していたうねり及び空隙が改善していることがわかる。

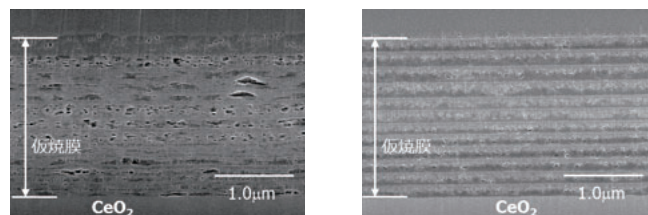


図 3 原料溶液の違いによる仮焼膜横断面 SEM 観察結果

上記結果より、原料溶液に用いる銅塩を Cu-Naph から Cu-Oct に変更することとした。

4. 本焼条件検討

前項で作製した Cu-Oct を用いた仮焼膜について、本焼条件の適正化を行った。条件検討には、短尺試料 (幅 5 mm, 長さ 50 mm) を用いた。本焼プロファイルを図 4 に示す。図のように本焼は昇温、結晶化処理、冷却の単純なプロファイルであり、本焼条件を表 1 に示す。

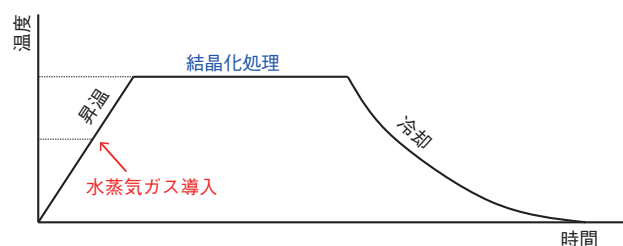


図 4 本焼プロファイル

表 1 本焼条件

結晶化温度 (T_{max})	740 ~ 760°C
結晶化温度保持時間	5 時間
炉内圧力	50 torr

結晶化処理温度 (T_{max}) について適正化を図った。試料の幅は 5 mm とした。図 5 に臨界電流結晶化処理温度依存性を示す。なお、臨界電流 (I_c) の測定は直流四端子法にて電圧端子間距離 1 cm で液体窒素 (77 K) に浸漬させて行った。図からわかるように、 $T_{max}=750^\circ\text{C}$ の試料において I_c 値の最大値が得られた。

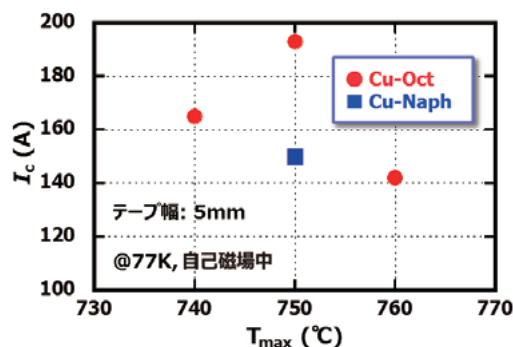


図 5 臨界電流結晶化処理温度依存性

これまでの結果から、本焼条件が同条件にも関わらず I_c 値が向上した要因について調査するため、Cu-Naph 及び Cu-Oct 試料について断面組織観察を行った。図 6 に各々の本焼後の横断面 SEM 写真を示す。

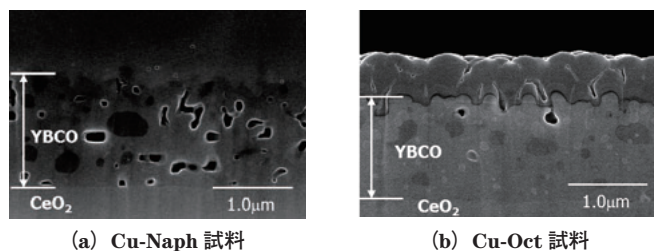


図 6 本焼後の横断面 SEM 写真

図から、Cu-Oct を用いた試料について、超電導層内に存在する空隙が減少し改善されていることがわかる。このことから、図 3 に示した仮焼膜の改善に伴い、本焼後の超電導層の組織が改善され、結果として I_c 値が向上したと考えられる。

更なる I_c 向上を図るため、Cu-Oct を用いた試料について、厚膜化を試みたところ、Cu-Naph 試料では超電導膜厚 $1.5 \mu\text{m}$ が限界であったのに対し、Cu-Oct 試料では超電導膜厚 $2.0 \mu\text{m}$ まで作製可能であり、図 7 に示すように厚膜化による I_c 向上が可能であることが確認された。上記結果より、量産技術確立のため、Cu-Oct を用いた溶液を用いて開発を進めることとした。

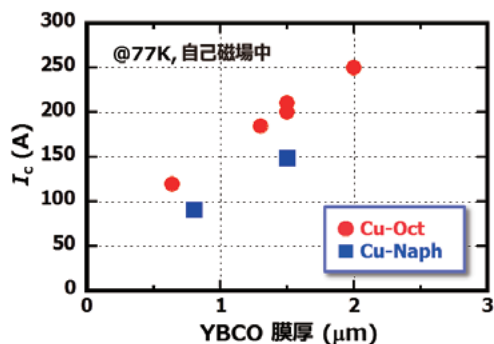


図 7 異なる原料溶液による臨界電流膜厚依存性

5. 長尺線材の作製

前項の検討によって得られた結果をもとに、バッチ式焼成炉を用いた長尺線材の本焼条件について最適化を行った。最適化を行う際、図 8 に示すような、長尺線材を模擬した模擬線材を用いた。模擬線材は 120 m 長とし、 0 m 、 30 m 、 60 m 、 90 m 、 120 m 位置に 150 mm 長の Cu-Oct 溶液を用いた仮焼テープを入れ、その他には本焼条件を模擬可能なダミーテープを配した。本焼条件は、前項で得られた条件を用いた。また、本試験においては、本焼後の超電導層厚を $2.0 \mu\text{m}$ 、線材幅を 5 mm とした。

図 8 に試験結果を示す。本試験は再現性を確認するため

2 度にわたり実施した。図から、模擬線材 120 m 長全域において、 77 K 、自己磁場中での I_c 値は $173 \sim 207 \text{ A}$ であった。また、再現性についても確認することができた。

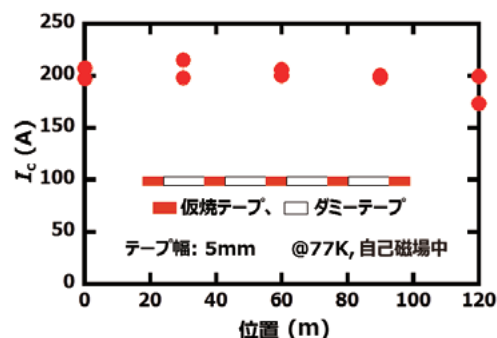


図 8 模擬線材を用いた長尺試験結果

これらの結果を踏まえ、 120 m 長線材の本焼を行った。図 9 に本焼結果を示す。本結果は、ホール素子法を用いて測定した結果で、ホール素子法は磁性を用いることで非接触での測定を可能とし、 I_c 値及び均一性を確認するためには有効な方法である。図より、長尺線材においても模擬線材試験と同様、均一な I_c 値が得られたことがわかる。Cu-Oct 溶液への変更は、長尺線材にも有効であることが確認された。

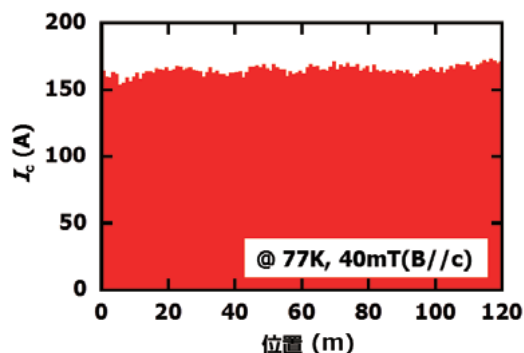


図 9 120 m 長線材の本焼結果

6. 量産化と製造歩留り

これまでに得られた線材作製法を用いて、三相交流 35 kV-70 MW 高温超電導ケーブル用超電導線材を含む量産試作を行った。量産試作を行った線材長は総長 $11,000 \text{ m}$ となった。図 10 に各線材ロットの I_c 値を示す。

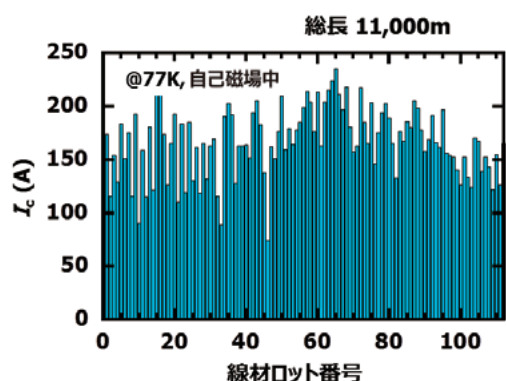


図 10 各線材ロットの I_c 値

今回の量産試作において、有効となる I_c 値を 100, 130, 150 A とした歩留り (有効ロット数 / 作製ロット数) は各々 97, 84, 76% であった。

7. ま と め

今回、三相交流 35 kV-70 MW 高温超電導ケーブル用超電導線材の量産試作を行った。仮焼工程の改善として、原料を Cu-Naph から Cu-Oct に変更を行ったことにより、仮焼膜組織の改善及び I_c 値の向上が確認された。

120 m 長線材において、均一な I_c 値を有するものが得られ、三相交流 35 kV-70 MW の高温超電導ケーブル用としての I_c 値 (>100 A) を有効とした製造歩留りは、90% 以上であった。

今後、REBCO 線材の実用化に向け、さらなる線材 I_c の向上ならびに低コスト化が必須となる。そのために、より高 I_c 側での歩留り向上に加え、ロット間の特性均一性向上について開発を進める。

参 考 文 献

- 1) 小泉 勉, 他: 昭和電線レビュー, vol.57, No.1, p45 (2007)
- 2) 足立和久, 他: 昭和電線レビュー, vol.61, p15 (2015)
- 3) 青木裕治, 他: 昭和電線レビュー, vol.56, No.1, p47 (2006)

昭和電線ケーブルシステム(株)
 広長 隆介 (ひろなが りゅうすけ)
 超電導テクノロジーセンター
 線材開発グループ
 高温超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
 中村 達徳 (なかむら たつのり)
 博士 (工学)
 電力システムユニット
 品質保証部 品質保証 2 課
 高温超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
 高橋 保夫 (たかはし やすお)
 超電導テクノロジーセンター
 線材開発グループ 主査
 高温超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
 小泉 勉 (こいずみ つとむ)
 超電導テクノロジーセンター
 線材開発グループ長
 高温超電導線材の研究・開発に従事

昭和電線ホールディングス(株)
 長谷川 隆代 (はせがわ たかよ)
 工学博士
 取締役 技術企画室長
 兼 昭和電線ケーブルシステム(株)
 超電導テクノロジーセンター長

酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの非線形特性を利用した電界緩和技術の開発

Technical Development of the Electric-field Control by Nonlinear Electrical Properties with ZnO/Epoxy Resin Composites

箕輪昌啓
Masahiro MINOWA

田中 忍
Shinobu TANAKA

荻島みゆき
Miyuki OGISHIMA

川井二郎
Jiro KAWAI

李 鋒
Feng LI

今西 晋
Shin IMANISHI

伊藤一己
Kazumi ITO

Mahmudul Kabir*

電力用接続機器の小型・軽量化を実現するために必要な電界緩和技術の一つとして、非線形特性を有する酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの適用を検討した。酸化亜鉛粒子をエポキシ樹脂に分散させたコンポジット材料でも、バリスタ特有の非線形特性が発現することが確認された。このコンポジット材料のキャラクターゼーションについて検討し、バリスタ粒子の分散状態と電気的特性の相関について基本的な知見を得ることができた。得られた非線形特性を積極的に利用することで、これまでよりも小型・軽量の機器設計が可能となり、製品性能においても酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジット適用の効果が確認できた。

The electric-field relaxation is important to reduce the size and weight of the power equipment. ZnO/Epoxy composites with non-linear I-V properties were attempted to reduce the electric field. ZnO/Epoxy composites that ZnO micro varistor particles are dispersed in the epoxy resin, indicated unique non-linear I-V properties as the varistor. From characterization of composites, the fundamental relationship between the dispersed state and electrical properties was revealed.

1. はじめに

表1 構造比較³⁾

2011年の東日本大震災以降、電力用接続機器においても安全・安心に配慮した製品開発が求められている。また、環境配慮の側面から絶縁油やSF₆ガスを使用しない固体絶縁構造の機器に対するニーズは大きい。こうした背景から当社ではエポキシ樹脂を絶縁材料に、シリコンゴムを外被にそれぞれ使用した完全固体絶縁のダイレクトモールド貫通ブッシングや気中終端接続部を製品化してきた。これらの機器は従来の磁器がい管を使用した機器と比較して環境低負荷であり、更に小型・軽量で耐震性能に優れるといった特徴を有している。また、電力機器の設置やリプレースの際、小型・軽量なこれらの機器は施工が容易であり現地作業の省力化やメンテナンス性の改善にも寄与している。例として154 kV 機器用ダイレクトモールドブッシングと従来磁器がい管タイプの構造比較を表1、図1に示す^{1)~3)}。

固体絶縁を利用したこれらの機器の設計に際しては、課電時における内部構造の局所的な電界集中をできるだけ排

項目	ダイレクトモールドタイプ (154D-H)	磁器がい管タイプ (PC-227FR)
質量	約 120 kg	約 450 kg
最大直径	310 mm	515 mm
気中側全長	1860 mm	2765 mm
汚損区分	~ 0.12 mg/cm ²	



図1 従来ブッシングとの比較³⁾

* 秋田大学大学院

除することが必要である。その為、電界緩和技術は機器の小型化を実現するために欠かすことのできない要素技術となっている。当社では非線形の電流－電圧 (I-V) 特性を有する酸化亜鉛をエポキシ樹脂と混合し、酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットとして利用することにより局所的な電界集中を緩和し、機器の小型化を図ってきた。本報では酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの基本的な電気特性、電力機器応用に際して検討したキャラクタリゼーションの試み、更に製品応用の事例について紹介する。

2. 酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの特性

非線形の I-V 特性を有しバリスタとして利用されている酸化亜鉛はビスマス、アンチモン、マンガンといった金属元素が添加された酸化亜鉛粒子 (ZnO マイクロバリスタ) により構成されている⁴⁾。この ZnO マイクロバリスタを焼結して得られるバリスタ素子は電力機器の避雷器や電子機器のサージアブソーバとして広く用いられている。当社ではこの ZnO マイクロバリスタをエポキシ樹脂に高充填し、機器の高電界部に適時配置することにより電界緩和を図っているが、狙った性能を得るためには ZnO マイクロバリスタのみならず、エポキシ樹脂と混合したコンポジット材料の電気特性を把握することが重要である。

2.1 酸化亜鉛 (ZnO) マイクロバリスタの特性

ZnO マイクロバリスタは一般的に図 2 に示すような非線形の I-V 特性を有している。すなわち、低い電圧では絶縁体に近い高抵抗特性を有しほとんど電流を流さないが、ある電圧を超えると急激に抵抗が低下し導電性に近い特性を発現する。この I-V 特性が急激に変化する電圧をバリスタ電圧と呼び、電流が $1\mu\text{A}$ 流れる時のバリスタ電圧を $V_{1\mu\text{A}}$ 、 1mA 流れる時のバリスタ電圧を $V_{1\text{mA}}$ と表記する。また、I-V 特性は式 (1) により表すことができる。

$$I = KV^a \quad (1)$$

ここで I はバリスタに流れる電流値、 V は課電電圧、 a は非線形係数である。バリスタ電圧における a は式 (2) により得ることができる。一般的に ZnO バリスタ素子の a の値は 20 ~ 100 程度である。

$$a = \frac{d \ln I}{d \ln V} \quad (2)$$

この非線形性は ZnO 粒界における二重ショットキー障壁 (Double Schottky Barrier, DSB) により発現すると言われている。また、バリスタの静電容量 C は DSB の空乏層に起因し、式 (3) の関係が知られている。

$$C^{-2} = \frac{1}{q\epsilon_0\epsilon_rNd} (\phi_0 + V) \quad (3)$$

ここで ϵ_0 は真空中の誘電率、 ϵ_r は ZnO 粒子の比誘電率、

q は電荷、 N_d は ZnO 粒子のドナー濃度、 ϕ_0 は “schottky barrier height”, V は課電電圧である。よって、バリスタの静電容量 C は課電電圧 V とともに減少することがわかる⁴⁾。

この ZnO マイクロバリスタの特性を確認するために特殊な装置 (図 3) を利用して ZnO マイクロバリスタ単粒子の I-V 特性、R-V 特性、及び C^{-2} -V 特性 (10 kHz, 100 kHz, 1000 kHz) を評価した結果を図 4 に示す。これより求められたバリスタ単粒子の $V_{1\mu\text{A}}$ は 19.4 V、 a は 18.1、 ϕ_0 は 0.47 V、 N_d は $1.26 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ であった⁵⁾。

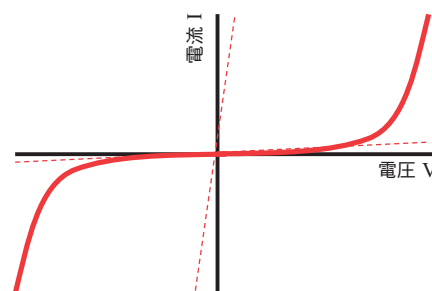


図 2 ZnO マイクロバリスタの I-V 特性

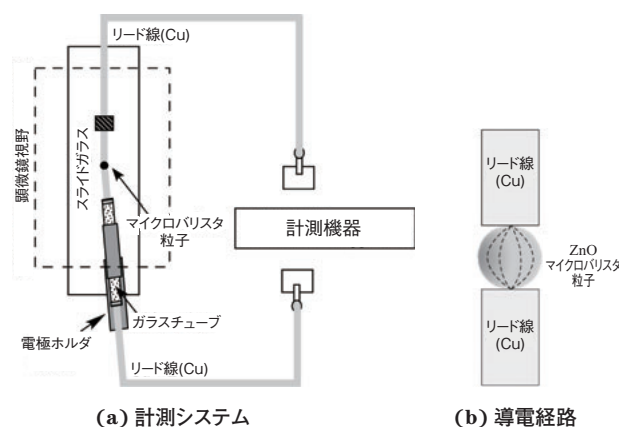
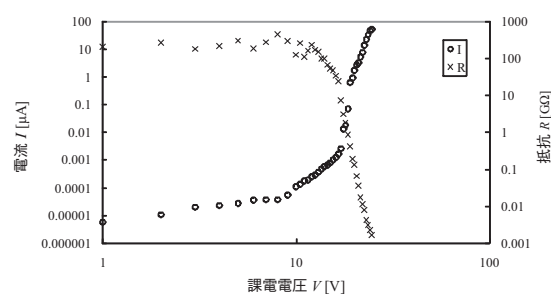
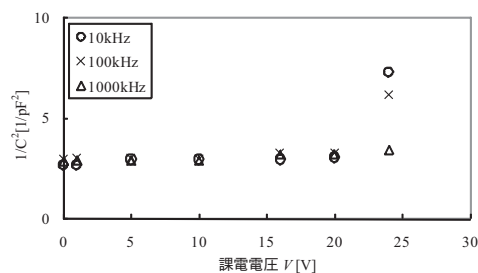


図 3 測定装置⁴⁾



(a) I-V, R-V 特性



(b) C^{-2} -V 特性

図 4 ZnO マイクロバリスタ単粒子の I-V 特性⁵⁾

また、粒径のほかエポキシ含浸の有無、通電履歴、熱処理の条件が異なる ZnO マイクロバリスタ単粒子の I-V 特性を表 2、図 5 に示す。これより、粒子径が 2 倍になった場合、 α は変化せず、 $V_{1\mu A}$ のみが 2 倍に大きくなるのがわかる。更に粒径 50 μm の ZnO マイクロバリスタを 2 個直列に接続したときの I-V 特性を図 6 に示す。この時の $V_{1\mu A}$ は単粒子の約 2 倍となり、 α は単粒子と同等であった⁴⁾。また、課電履歴など粒径以外の試料処理条件による I-V 特性への影響はほとんど認められなかった。これは ZnO マイクロバリスタの単粒子同士が接触している場合の特性を理解するうえで非常に重要な情報である。

表 2 粒径の異なる ZnO マイクロバリスタ単粒子の特性⁴⁾

試料*	エポキシ含浸	通電履歴 (1 mA, 8900 h)	熱処理 (600°C)	$V_{1\mu A}$ [V]	α
A25	○	○	○	22.5	12.1
B25	○	-	○	19.6	21.1
C25	-	-	○	19.4	18.1
D25	-	-	-	20.9	16.8
A50	○	○	○	44.5	18.7
B50	○	○	○	40.3	18.8
C50	-	-	○	43.4	12.2
D50	-	-	-	41.8	16.4

* 試料名の数値は粒径 (μm) を示す。

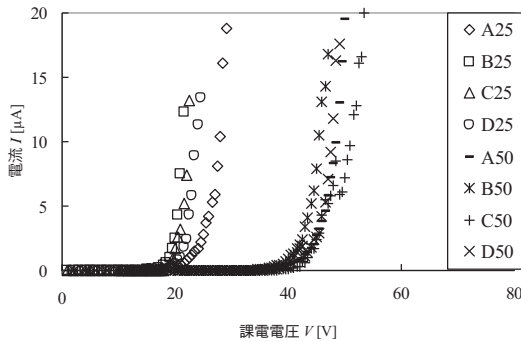


図 5 粒径の異なる ZnO マイクロバリスタ単粒子の I-V 特性⁴⁾

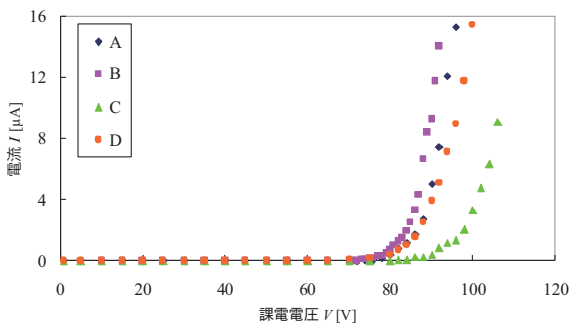


図 6 ZnO マイクロバリスタを 2 個直列に接続したときの I-V 特性⁴⁾

2.2 酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの非線形 I-V 特性

ZnO マイクロバリスタをエポキシ樹脂と混合した系ではバリスタ粒子間の接触状況が ZnO マイクロバリスタ単体の系とは異なることから、当然、電気特性にも差異が生じることが予測される。そこで、エポキシ樹脂に ZnO マイ

クロバリスタを高濃度で混合した酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの I-V 特性を評価した。評価には厚さ 1 mm のシート試料を使用した。非線形 I-V 特性の評価システムを図 7 に示す。本システムにより試料に加える電圧を徐々に増加させながら、電流波形を計測した評価結果を図 8 ～ 図 10 に示す。図 8 より ZnO マイクロバリスタ単体の時と同様、ある電界を境に抵抗値が急激に変化し電流密度が急上昇する傾向が酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットでも認められた。また、図 9 より低電界領域においては主に容量性の電流が観測されたのに対し、高電界領域では図 10 に示した通り伝導性の電流が観測された。また、この I-V 特性から非線形係数 α を算出した値は 19 であった。このことから、本コンポジットがバリスタ特性を有する非線形材料として十分な特性を有することが確認された。

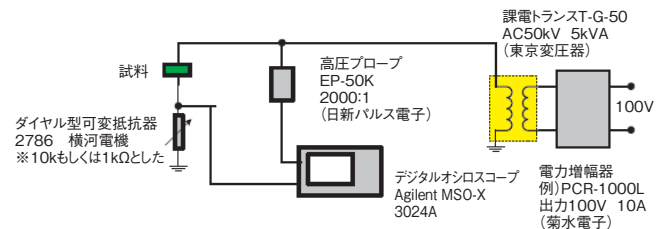


図 7 評価システム

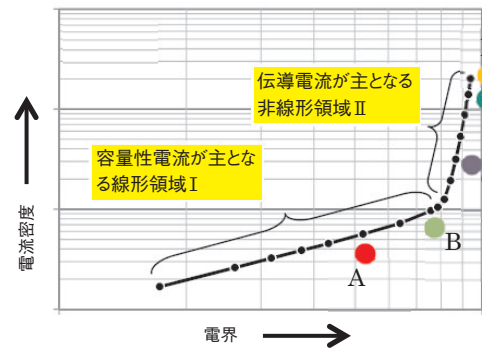


図 8 I-V 特性評価結果

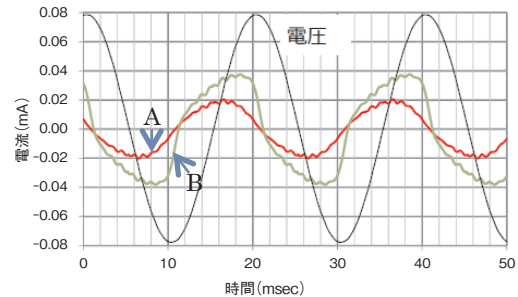


図 9 低電界領域 (図 8 の領域 I の A,B) での電流波形

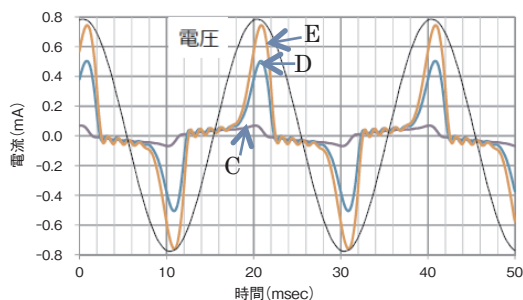


図 10 高電界領域 (図 8 の領域 II の C,D,E) での電流波形

3. 非線形 I-V 特性のキャラクタリゼーション

ZnO マイクロバリスタ粒子の非線形 I-V 特性は個々粒子の電気特性により説明できると考えられ、同組成の場合、粒径による特性の変化は 2.1 項で述べたとおりである。エポキシ樹脂と ZnO マイクロバリスタ粒子を混合した系においてはバリスタ粒子単体の特性に加え、樹脂中における粒子の濃度や分散状態が当然のことながらコンポジットの非線形 I-V 特性に影響する。そこで、酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの非線形 I-V 特性を特徴づけるモデルの検討を行った。

3.1 ショットキー型エネルギー障壁モデルによる解析

バリスタの非線形伝導機構を説明するモデルとして式 (4) で示されるショットキー注入伝導がある^{6),7)}。

$$J = AT^2 \exp\left(\frac{\beta_s \sqrt{E} - \phi_D}{kT}\right) \quad (4)$$

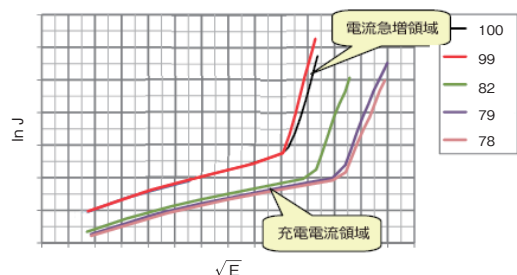
ここで、 J は電流密度、 A と β_s は定数、 T は絶対温度、 E

は電界、 ϕ_D は金属の誘電体に対する実効仕事関数、 k はボルツマン定数である。これより電界 E の平方根と電流密度 J の対数は直線で示されることがわかる (ショットキープロット)。エポキシ樹脂に対する ZnO マイクロバリスタの濃度を変化させて酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットを作成し、これらの I-V 特性からショットキープロットを行った結果を図 11 に示す。図 11 の凡例の数値は最も高濃度の試料比重を 100 としたときの相対値を示している。電流密度が急上昇する高電界領域において、各々のショットキープロットはおおむね直線で示されており、このことから ZnO マイクロバリスタの特性に起因する非線形伝導特性が酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットでも得られていることが確認された。また、比重の大きな (ZnO マイクロバリスタ濃度の高い) コンポジットほど低電界側で電流密度が急増する傾向が得られており、ZnO マイクロバリスタ粒子間に存在するエポキシ樹脂が試料の非線形伝導特性の抑制に寄与しているものと考えられる。

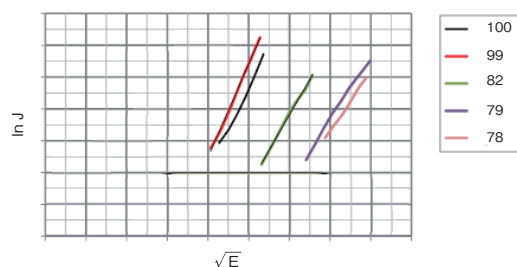
3.2 等価回路モデルによる解析⁸⁾

ZnO マイクロバリスタとエポキシ樹脂の等価回路を設定し (図 12)、エポキシ樹脂内における ZnO マイクロバリスタの濃度を変化させたときの電気特性を回路シミュレータ (LTSpice) により算出した例を示す。ここでは標準雷インパルス波形 (図 13) をモデルに印加した際、モデル内の各部位において、どの程度の電界が発生するかを時系列的に算出した。印加電圧は 5 kV、10 kV、15 kV の 3 水準とした。

エポキシ樹脂に対する ZnO マイクロバリスタの濃度を低濃度としたときの結果を図 14、同じく高濃度としたときの結果を図 15 にそれぞれ示す。各グラフは試料面の電界分布をヒストグラムとして示している。ZnO マイクロバリスタの濃度が低濃度ときには印加電圧に応じた広範囲の電位分布が得られ、 10×10^6 V/m を超えるような電位も認められたのに対し、ZnO マイクロバリスタの濃度が高濃度の時には電位分布は明らかに低電位側にシフトし、 6×10^6 V/m を超える電位は発生しないという結果が得られた。これより、一定以上の ZnO マイクロバリスタ濃度を確保することにより電界緩和効果を期待できることが予測される。



(a) 測定全電界域



(b) 高電界部を拡大

凡例の数値は試料の比重 (相対値) を示す。

図 11 ショットキープロット

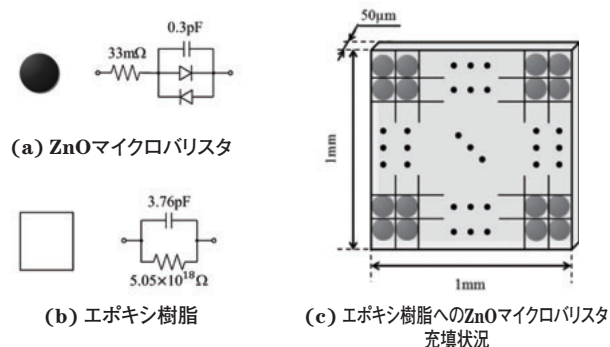


図 12 コンポジットの等価回路モデル⁸⁾

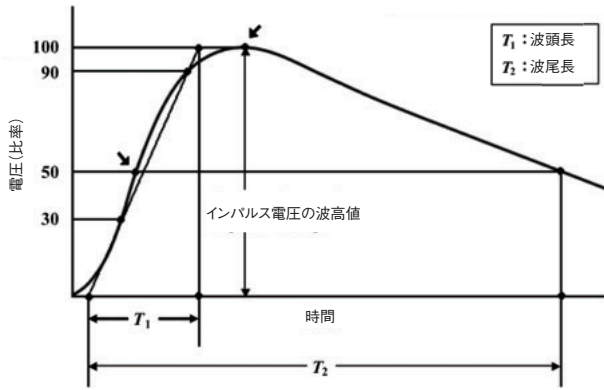


図13 標準インパルス波形⁸⁾

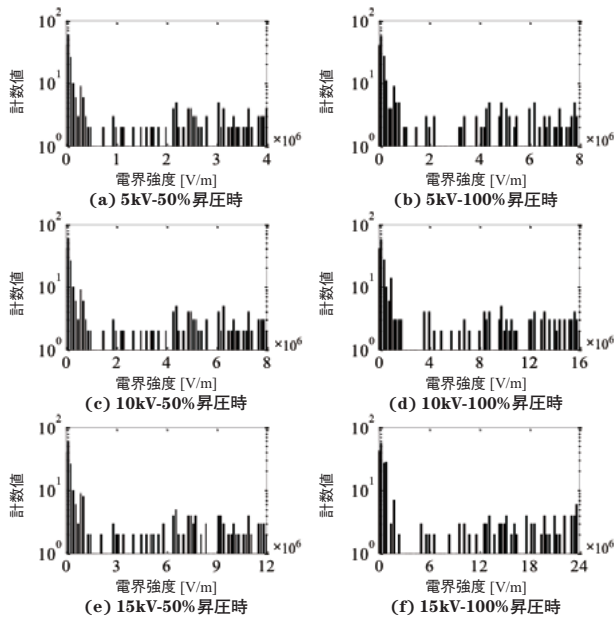


図14 試料中の電界分布 (低濃度)⁸⁾

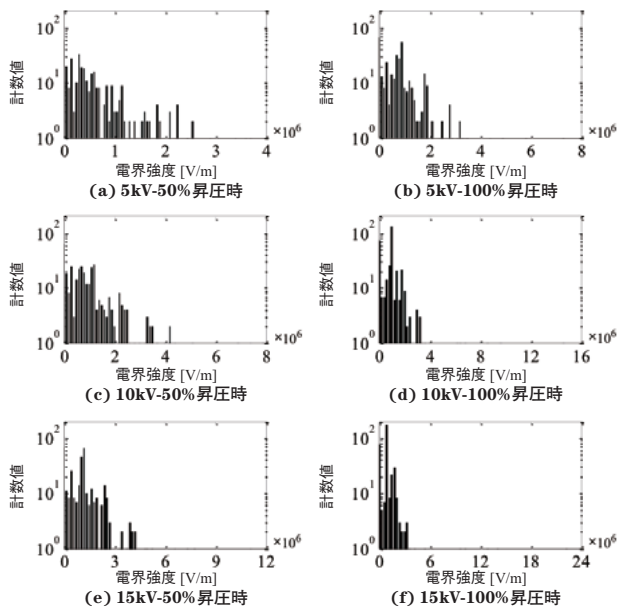


図15 試料中の電界分布 (高濃度)⁸⁾

3.3 誘電スペクトルによる解析⁹⁾

複合体を含めた様々な物質の微小構造や化学的性質を解析する手段として、誘電スペクトル解析が知られている。広帯域の誘電スペクトルを測定し、これを既知の誘電緩和関数に適合させることにより、ZnO マイクロバリスタがコンポジットの誘電特性に与える影響を評価した。

酸化亜鉛/エポキシ樹脂コンポジットシート試料を用いて誘電スペクトルを計測した例を図16に示す。測定にはインピーダンスアナライザー (Solartron1260) と誘電率測定用インターフェイス (Solartron1296) を使用した。この計測結果より式(5)を用いて“electric modulus”を算出し、さらに Havriliak-Negami 型緩和関数(式6)にフィッティングした結果を図17と表3に示す。

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 - \epsilon''^2} + j \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 - \epsilon''^2} = M' + jM'' \quad (5)$$

$$\epsilon^*(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{(1 + (j\omega\tau)^{1-a})^\gamma} \quad (6)$$

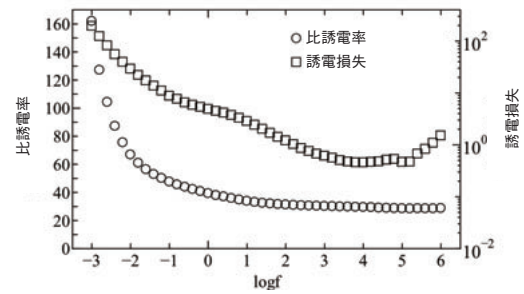


図16 酸化亜鉛/エポキシ樹脂コンポジットの比誘電率と誘電損失⁹⁾

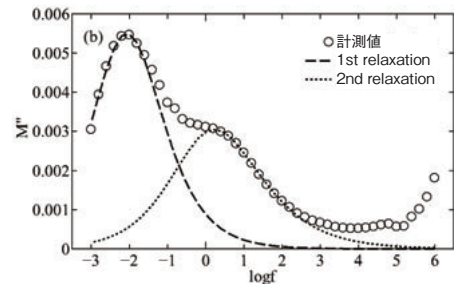
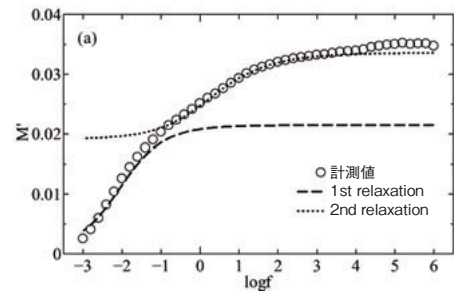


図17 “electric modulus” と緩和関数へのフィッティング⁹⁾

表3 Havriliak-Negami 型緩和関数のフィッティングパラメータ⁹⁾

	M_{∞}	M_s	ΔM	$1-a$	γ	τ
1st relaxation	0.0215	0.00157	0.0199	1	0.609	15.92
2nd relaxation	0.0336	0.0191	0.0145	0.569	0.774	0.100

ここで、 M^* は複素誘電率の逆数、 ε^* は複素誘電率、 ε' は比誘電率、 ε'' は誘電損失、 M' は“electric modulus”の実部、 M'' は“electric modulus”の虚部、 ε_s はごく低周波における比誘電率、 ε_{∞} はごく高周波における比誘電率、 τ は緩和時間、 ω は角周波数、 a と γ はDebye型緩和式からの緩和時間の分布をそれぞれ示す。

本報では述べていないが、ZnO粒子を含まないエポキシ樹脂では M'' は0.019の程度の値を示した。一方、今回測定したZnO粒子を含んだコンポジットでは M'' は最大値で0.005程度と4分の1程度であった。試料の温度が同じ場合、充填するフィラーが多くなると M'' は減少する。これはMWS(Maxwell-Wagner-Sillars)型緩和の特徴であり、得られた誘電スペクトルの緩和はZnO粒子が影響した界面緩和であると考えられる⁹⁾。

Havriliak-Negami型緩和関数はDebye型緩和から逸脱した歪んだ誘電緩和スペクトルを表現できる。よって、ZnOマイクロバリスタのような非線形の誘電特性を有する粒子を含んだ系の誘電緩和特性を表現するのに適していると考えられる。あらかじめ粒子性状を把握したZnOマイクロバリスタをエポキシ樹脂に混合し、これらの誘電緩和特性を測定し、緩和関数との相関をデータベース化することにより、任意の酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットにおけるZnOマイクロバリスタの分散状態が推定可能になると期待される。また、応用製品の要求性能を満たすために必要な酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの材料設計に利用できると考えられる。

4. 電力機器部品への応用

当社では主絶縁にエポキシ樹脂を使用し、シリコーンゴムの外被をかぶせた完全固体絶縁タイプのブッシング(ダイレクトモールドブッシング)をシリーズ化しており、これらの一部の製品では本報で述べてきた酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットを部分的に適用することにより、機器の大幅な軽量・コンパクト化を実現している^{2) 3)}。

4.1 ダイレクトモールドブッシングへの適用例

酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットを適用した場合の電界緩和効果を確認するためにダイレクトモールドブッシングの表面電界分布を解析した(図18)。絶縁体の中で他の部位よりも高電界となるブッシング下部に酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットを適用することにより、当該部位における表面電界を低減できることが確認された。

また、この効果を確認するために154 kVクラスのダイレクトモールドブッシングについて、酸化亜鉛／エポキシ

樹脂コンポジットを用いた時と用いなかった時の交流閃絡電圧を比較し、その効果を確認している。その他の製品性能に関しては本レビュー誌内の別報「154 kVダイレクトモールド気中終端接続部の開発」を参照されたい。

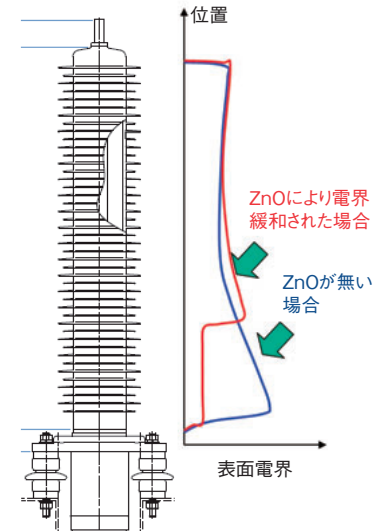


図18 ダイレクトモールドブッシングの表面電界分布

5. まとめ

電力用接続機器の小型・軽量化を実現するために必要な電界緩和技術の一つとして、非線形特性を有する酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジットの適用を検討した。酸化亜鉛をエポキシ樹脂に分散させたコンポジット材料でも、バリスタ特有の非線形特性が発現することが確認された。このコンポジット材料のキャラクタリゼーションについて検討し、バリスタ粒子の分散状態と電気的特性の相関について基本的な知見を得ることができた。

得られた非線形特性を積極的に利用することで、これまでよりも小型・軽量の機器設計が可能となり、製品性能においても酸化亜鉛／エポキシ樹脂コンポジット適用の効果が確認できた。

今後は有限要素法を利用したより詳細な製品設計技術の推進、また、コンポジット材料の更なる性能の向上に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 今西 晋, 他: 昭和電線レビュー, Vol.56, No.1, pp.15-19 (2006)
- 2) 昭和電線レビュー, Vol.58, No.1, p.69 (2008)
- 3) 昭和電線レビュー, Vol.61, p.64 (2015)
- 4) Mahmudul Kabir, 他: 電気学会論文誌 A, Vol.132, No.11, pp.938-943 (2012)
- 5) Mahmudul Kabir, 他: IEEJ Trans, No.7, pp.107-108 (2012)
- 6) 電気学会 誘電体現象論, pp.230-233
- 7) 電気学会 放電ハンドブック, 下巻, p.178
- 8) 小野結太, 他: 電気学会論文誌 B, Vol.133, No.11, pp.882-887 (2013)
- 9) 加藤 宗, 他: 電気学会研究会資料, DEI-15-072, pp.13-16 (2015)

昭和電線ケーブルシステム(株)

箕輪 昌啓 (みのわ まさひろ)

技術開発センター デバイス開発グループ長

新製品の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

田中 忍 (たなか しのぶ)

技術開発センター デバイス開発グループ 主任

新製品の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

荻島 みゆき (おぎしま みゆき)

電力システムユニット 品質保証部 品質保証2課 主査

電力ケーブル・機器の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

川井 二郎 (かわい じろう)

電力システムユニット 嘱託

電力ケーブル・機器の研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

李 鋒 (り ほう)

電力システムユニット 電力機器技術部 主査

電力機器の開発・設計に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

今西 晋 (いまいし しん)

電力システムユニット 電力機器技術部 主査

電力機器の開発・設計に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

伊藤 一己 (いとう かずみ)

技術開発センター長

秋田大学

Mahmudul Kabir (カビール ムハムドゥル)

博士 (工学)

大学院工学資源学研究所 電気電子工学専攻 講師

154 kV ダイレクトモールド気中終端接続部の開発

Development of 154 kV Direct-molded Outdoor Termination

李 鋒
Feng LI

今西 晋
Shin IMANISHI

新井敦宏
Atsuhiko ARAI

伊藤一己
Kazumi ITO

ダイレクトモールド気中終端接続部は、主絶縁にエポキシ樹脂を使用してシリコンゴムの外被をかぶせた完全固体絶縁タイプの終端接続部である。今回、酸化亜鉛の電界緩和技術を適用し、従来の磁器がい管、絶縁油を使う気中終端接続部に比較して軽量・コンパクト化した 154 kV クラス重汚損用の気中終端接続部を開発した。開発品は東日本大震災以後に高まっている地震対策のニーズに応え、優れた耐震性、安全性も有する。また、各種電気試験、機械試験を実施し、JEC-3408 規格の要求性能を満足することも確認した。

Direct-molded outdoor termination is a completely solid insulator type product, which is achieved by the structure composed of epoxy resin as a main insulator and silicone rubber as an outer cover. In this time, compared with conventional design by using of porcelain tube and insulation oil, we developed a light-weight and compact 154 kV class outdoor termination for heavy pollution level by application of the electric field mitigation technology using ZnO material. To meet the increasing needs of seismic performance after the Great East Japan Earthquake, developed product also has excellent performance of earthquake resistance and safety. Furthermore, it was confirmed that new product satisfied with the requirement of JEC-3408 standard by various electric tests and mechanical tests.

1. はじめに

従来の 154 kV CV ケーブル用気中終端接続部は磁器がい管を使い、内部絶縁にはシリコン油などの絶縁油を注入していた。これらの部品組み立てを現地で行っていたため、工期短縮と工事の省力化が望まれていた。ダイレクトモールド気中終端接続部は主絶縁にエポキシ樹脂を使用し、シリコンゴムの外被をかぶせた完全固体絶縁タイプであり、絶縁油を使用しないことから軽量・コンパクトを実現した製品である。また、軽量・コンパクトであるが故に気中終端の固有振動数が地震の卓越振動数範囲 (0.5 ~ 10 Hz) よりも高く耐震性に優れていること、その構造から口開きが発生しないことなどから、東日本大震災以後ますます地震対策として脚光を浴びている。我々は既に 66/77 kV, 110 kV クラスの製品をラインナップしており^{1), 2)}、今回、154 kV クラスの気中終端を開発したので、ここに報告する。

2. 構造

重汚損用 154 kV ダイレクトモールド気中終端接続部と従来品の構造比較を図 1 に示す。主絶縁にエポキシ樹脂、外被にシリコンゴムを用いて完全固体絶縁構造としたこと、更に非線形材料—電圧・電流特性に非線形性を持つ材料—を電界緩和層として用いたことにより³⁾、従来の磁器がい管を使用した気中終端に比較して大幅な軽量・コンパ

クト化を実現した (表 1 参照)。

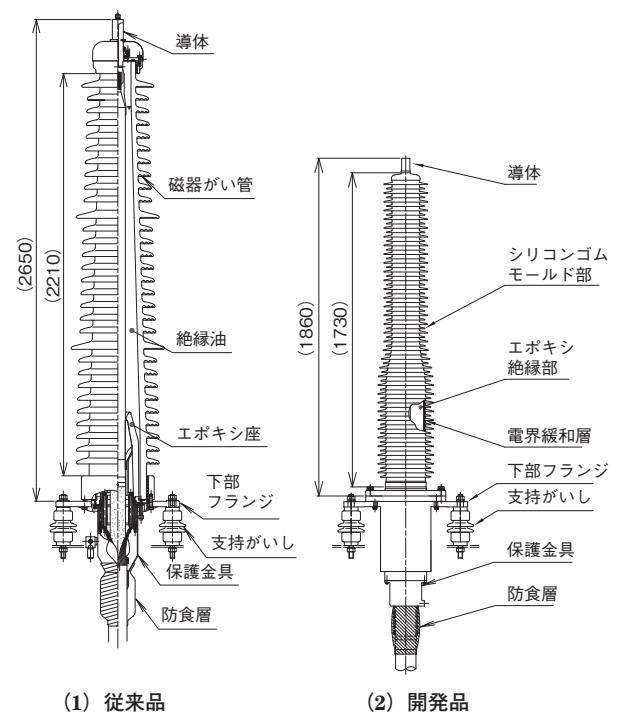


図 1 開発品と従来品の構造比較

表1 気中終端接続部の比較

項目	磁器がい管品 PC-227FR (重汚損)	開発品 (重汚損)
質量 (本体)	約 520 kg	約 140 kg
平均直径	320 mm	210 mm
全長	約 2650 mm	約 1860 mm

3. 特 長

開発した 154 kV ダイレクトモールド気中終端接続部は次の特長を有している。

①完全乾式化

エポキシ絶縁部の表面にシリコンゴムを直接モールドした固体絶縁構造の完全乾式の気中終端接続部である。絶縁油やガスを使用しないことから、メンテナンス性向上と環境調和を実現し、現場にて特別な設備を使用しなくても、水平、斜め、逆さ取付け等自由な設置形態が可能である。

②プラグイン化

あらかじめ工場で組み立てた本体材料（がい管部）に接続材料を差し込むだけで接続できるプラグイン構造を採用したことから、信頼性が向上し、現地での組立工程が簡略化できる。また新しいタイプの接触子を使用することで、大サイズケーブル用通電性能を確保できる。

③軽量・コンパクト化

がい管部は磁器ではなく、ポリマー材料を適用し、軽量化することで、重機を使用せずに組み立てが可能となり、取り扱いが容易で作業性が大幅に向上する。更に、エポキシ絶縁部の外層に非線形材料を適用して電界を緩和することより、コンパクトサイズで高い絶縁性能を実現した。

④汚損性能

磁器がい管品と同様の設計思想で平均直径を細くすることにより、コンパクト化しても従来の重汚損用磁器がい管品と同等の汚損性能を有する。

⑤耐震性能

軽量・コンパクト化により、気中終端本体の固有振動数が地震の卓越振動数範囲（0.5～10 Hz）よりも高く耐震性に優れる。

4. 設 計

4.1 電界設計

154 kV ダイレクトモールド気中終端接続部の気中部において、構造上電界が高くなるのは気中部下部の遮へい金具近傍である。内部導体と遮へい金具の位置・形状、エポキシ絶縁部外径を最適化することで遮へい金具近傍の内部電界を抑えるとともに、シリコンゴム外被表面の電界を下げて運転電圧時にコロナ放電が発生しないよう各部の構造を決定した。

また、気中部下部のエポキシとシリコン外被の間には、非線形材料（酸化亜鉛）を用いた電界緩和層を設けている（図1参照）。電界緩和層の電界-電流特性（図2）の通り、設定電界以上になると電流が流れてその場所の電界を一定に保とうとする特性を持つ³⁾。このように電界緩和層は高電界の領域で電界抑制効果を持つ。過電圧時や雷サージ進入時などの異常時の過大な電圧が終端接続部に印加された場合には、気中部下部の高電界となる部分の電界を抑制するため、終端の気中部全長をコンパクト化できる。

電界緩和層の動作電界を超える電圧が印加された場合の等電位線分布を図3に示す。(1)は電界緩和層がない場合で、下部遮へい金具先端近傍の外被表面の等電位線が密になっている。これに対し、電界緩和層がある(2)では電界抑制効果により外被表面の等電位線が疎になっていることがわかる。

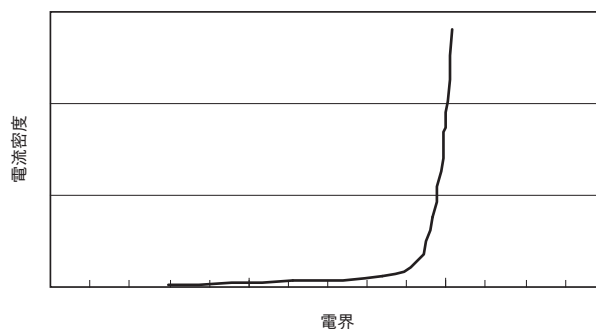


図2 電界緩和層の非線形電界-電流特性

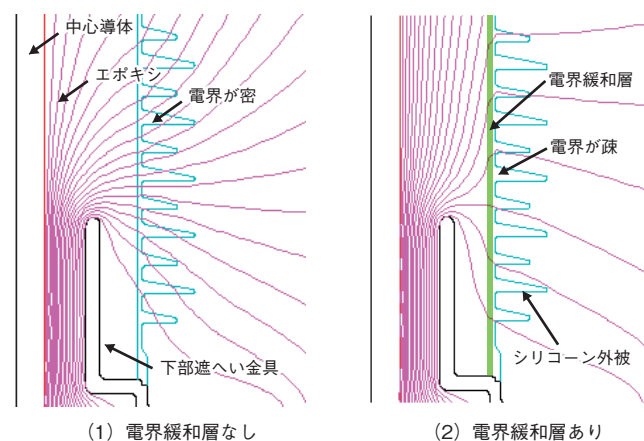


図3 等電位分布図

4.2 汚損設計

外被に使用しているシリコンゴムは、撥水性を有することから一般的に汚損性能に優れるといわれている。しかしながら、ダイレクトモールドブッシングでは、臨海部など急速汚損の発生する環境で撥水性が有効に作用しない可能性⁴⁾を考慮して、磁器がいし・がい管の汚損設計を踏襲し、

その設計基準曲線⁴⁾から重汚損に必要な表面漏洩距離を計算し、気中部高さを決定した。

従来の気中終端部は電界緩和のためのストレスコーン、エポキシ座などががい管内部にあることから、がい管直径が大きくなる。一方、ダイレクトモールド気中終端接続部のストレスコーン部はがい管の外部に配置させているため、がい管の平均直径を小さくでき、更に、非線形材料を電界緩和層として用いたことにより、短い漏洩距離で対応可能となる。計算した汚損設計曲線⁵⁾を図4に示す。154 kVクラスの場合、汚損耐電圧目標値は161 kV (JEC-5202)であるが、図4より重汚損（等価塩分付着密度：0.12 mg/cm²）の汚損耐電圧値が161 kV以上を満足していることがわかる。

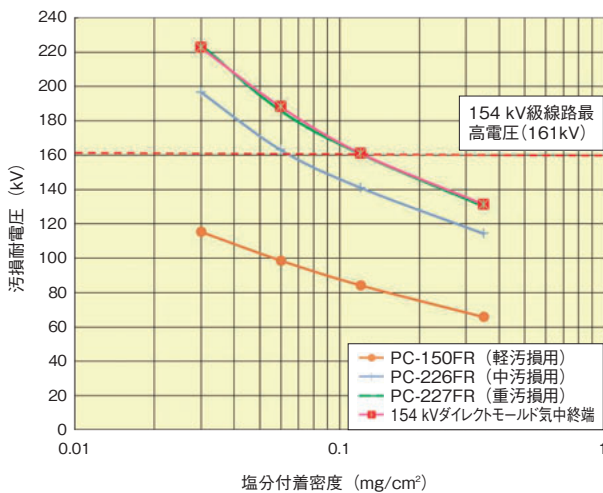


図4 汚損設計曲線

4.3 接続部設計

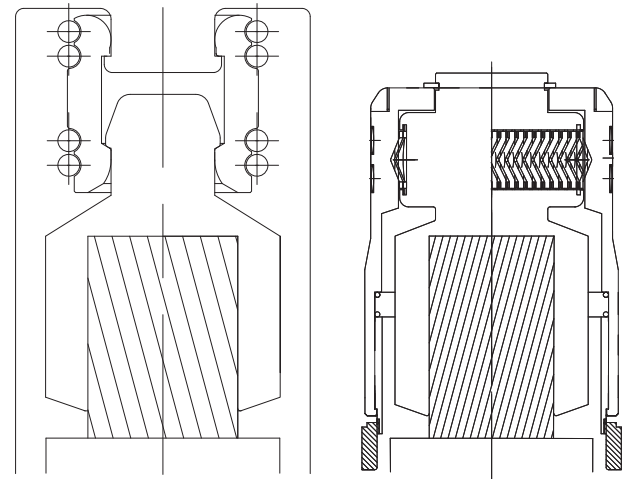
ケーブル接続口側の設計は、既存のスマートガス中終端接続部の設計⁶⁾を踏襲した上、従来のチュリップコンタクタープラグイン構造から大サイズケーブルの挿抜が容易なマルチバンド接触子を利用する新プラグ構造を採用した。従来構造の固定部と通電部を共用することによる通電の不安定および挿抜し難い問題に対し、新構造は通電部と固定部を分離することで組立工事の便利性および大電流にての通電安定性を向上させた(図5)。更に、新型マルチバンド接触子の適用により、大サイズケーブル導体を圧縮する時の曲がりを吸収することもでき、現地組立の信頼性も確保した。

ストレスコーン、圧縮装置および保護金具などの接続材料は当社従来のスマートガス中終端、移動用終端に使われる接続材料と共通設計することで、移動用ケーブルの共用化や緊急時の部品対応が容易になった。

5. 検証試験

5.1 電気試験

開発品はJEC-3408「特別高圧(11 kV～275 kV)架橋ポリエチレンケーブルおよび接続部の高電圧試験法」に基



(1) 当社従来構造

(2) 開発品構造

図5 プラグイン構造比較

づいて絶縁抵抗試験、商用周波乾燥耐電圧試験、雷インパルス乾燥耐電圧試験および曲げ耐荷重試験を実施した。また、固体絶縁としての健全性を確認するために、200 kVまでの部分放電試験を実施した。試験の状況を図6に示す。試験結果はいずれも良好であった。更に、開発品の長期安定性能を確認するため、6ヶ月間長期課通電試験も実施した(図7)。

5.2 曲げ耐荷重試験

開発品の気中エポキシがい管はJEC-5202規格に基づいて、曲げ耐荷重試験を実施した。終端先端に3600 N・1分間の荷重を印加後、外観及び部分放電試験(200 kV・10分)にて異常のないことを確認した。試験の状況を図8に示す。検証試験結果は表2の一覧表にまとめて示す。

表2 検証試験結果

項目	要求特性	結果
外観・寸法検査	異常なきこと	良
絶縁抵抗試験	2000 MΩ以上	良
部分放電試験(参考)	200 kVにて発生しないこと(感度: 5 pC以内)	良
商用周波乾燥耐電圧試験	295 kV 1時間	良
雷インパルス乾燥耐電圧試験	気中絶縁部: ±900 kV 各3回	良
	固体絶縁部: ±1035 kV 各3回	良
直流耐電圧試験	425 kV 1時間	良
曲げ耐荷重試験	下部フランジを固定し、気中側ブッシング先端に対して垂直方向に3600 Nの荷重を1分間加え、異常のないこと	良
長期試験	AC130 kV×183サイクル, 8時間 ON, 16時間 OFF, 常時導体許容温度 90℃, 短時間導体許容温度 105℃	良

6. まとめ

乾式化、軽量・コンパクト化を目指し、エポキシ主絶縁とシリコンゴム外被を用いた完全固体絶縁構造の154 kVダイレクトモールド気中終端接続部を開発し、JEC-3408



図6 部分放電試験

の規格で規定している各種特性を満足していることを確認した。

本終端接続部を適用することより、組立時間の短縮、耐震性とメンテナンス性の向上が実現できる。またすでに電力会社で採用されているスマートガス中終端接続部の接続材料と完全互換性があるため、緊急時の部品供給も容易になっている。本製品が電力の安定供給に寄与することを期待する。

参考文献

- 1) 戸谷 敦, 田中 敦, 他:「66/77 kV ダイレクトモールド気中終端接続部の開発」, 平成 16 年電気学会全国大会, No.7-138 (2004)
- 2) 新館 均, 足立和久, 他:「110/132 kV ダイレクトモールド気中終端接続部の開発」, 平成 18 年電気学会電力・エネルギー部門大会, No.127, pp.4-1-4-2 (2006)
- 3) 品川潤一, 足立和久, 他:「非線形材料を使用した気中ブッシングの検討」, 平成 19 年電気学会全国大会, No.7-128 (2007)
- 4) 畔柳, 他:「送電用高分子がいしの急速汚損時の塩分付着特性と霧中耐電圧特性」, 電力中央研究所報告, H08018 (1999)
- 5) 「変電設備の耐塩設計」, 電気協同研究, 第 35 巻, 第 3 号 (1979)
- 6) 高安央也, 瀬間信幸, 他:「IEC 規格準拠 123/170 kV スマート終端接続部の開発」, 平成 19 年電気学会電力・エネルギー部門大会, 129 (2007)



図7 長期課通電試験



図8 曲げ耐荷重試験

昭和電線ケーブルシステム(株)

李 鋒 (り ほう)

電力機器技術部 主査

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

今西 晋 (いまにし しん)

電力機器技術部 主査

電力ケーブル接続部の開発・拡販に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)

新井 敦宏 (あらい あつひろ)

電力機器技術部

昭和電線ケーブルシステム(株)

伊藤 一己 (いとう かずみ)

技術開発センター長

ワイヤレス給電用コイルの最適化検討

Consideration of Coil for Wireless Power Transfer

松本 秀樹
Hideki MATSUMOTO

三浦 聖
Kiyoshi MIURA

森 正裕
Masahiro MORI

野内 健太郎
Kentaro NOUCHI

大根田 進
Susumu OHNEDA

香月 史郎
Shiro KATSUKI

当社は、リッツ線およびIH用コイルの製造を行ってきた知見を基に、ワイヤレス給電用コイルの商品化に取り組んできた。本稿では、スパイラルコイルの特性を理論解析や有限要素法による数値解析と実測値を比較することにより、数値解析がコイルの諸特性を推定するのに有効であることを明らかにした。また、ワイヤレス給電用コイルに求められる性能を明らかにし、その最適なリッツ線やコイルの特性について数値解析にて検討した。そして、ワイヤレス給電用コイルの最適化設計の指針を明らかにした。

SWCC Showa Group has been working on coils for wireless power transfer (WPT) based on our production knowledge of litz cables and IH coils. In this work we compared the experimental results with the calculation result by theoretical or numerical analysis using finite element method, and then clarified that these analysis are useful for considering the specifications of the spiral coil for WPT. We also clarified the characteristics required of coil for WPT, and examined by a numerical analysis regarding for the optimal characteristics of litz cables or coil. Then, we revealed guidance of optimal design of the spiral coil for WPT.

1. はじめに

近年、情報携帯端末の充電方式として Qi 規格を代表とするワイヤレス方式が実用化され、家電などへの適用も検討がなされるようになってきた。一方、環境保全に対する規制が厳しくなり、排気ガス規制の強化に対応するため、自動車メーカはプラグインハイブリッド車 (PHV) や電気自動車 (EV) の市場投入を加速させている。しかし、充電に要する時間が長い、手間が煩わしいなど給電方式に課題があるため、その普及のスピードはあまり上がっていないのが現状である。その給電方式の課題克服策の一つとしてワイヤレス給電が注目され始めてきた。

ワイヤレス給電システムの普及には、送電側と車載の受電側とのインターオペラビリティの確保や無線に関する法整備が必要となり、標準化が欠かせない。これまで、IEC や ISO、更には米国の SAE (Society of Automotive Engineers) において EV 向けワイヤレス給電システムの標準化作業がなされてきたが、2016 年 5 月 SAE より技術上のガイドライン「SAE Technical Information Report (TIR) J2954 Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Alignment Methodology」

の発表がなされた。これにより、ワイヤレス給電システムの普及が進むことが期待されている。

本報告書では、ワイヤレス給電のベースとなっている磁界共鳴方式ワイヤレス電力伝送方式について解説し、その最適なコイル仕様について検討結果を報告する。

2. ワイヤレス電力伝送技術の概要

2.1 ワイヤレス電力伝送方式と特長

主なワイヤレス電力伝送には、電磁誘導方式と磁界共鳴方式がある (表 1)。

電磁誘導方式は、トランスの原理と同様、送信側コイルに高周波電流を流すことにより受信側コイルに誘起電力が生じる原理を利用した方式である。位置ずれや伝送距離の制限から近接させて給電を行う必要があり、携帯情報端末

表 1 ワイヤレス電力伝送方式と特長

伝送方式	電磁誘導	磁界共鳴
伝送距離	< 10 cm	< 1 m
特長	大電力を高効率に伝送可能	結合係数が小さくとも高効率に伝送可能
課題	送受信コイル間距離や位置ずれにより伝送効率が落ちる	送受信コイル間距離や位置ずれによりシステムの調整が必要

やシェーバーなどのアプリケーションで利用されている。

磁界共鳴方式は、電磁誘導方式において送信側と受信側の共振周波数および伝送周波数を同じとしたものである。送受信コイル間の位置がずれたり、伝送距離が大きいといった結合係数の小さい条件においても、高効率で大電力の伝送が可能である。ただし、後述するように、送受信間の共振周波数や負荷の大きさにより、伝送効率や伝送電力が変動するため、これらを制御する工夫が必要となる。

2.2 ワイヤレス電力伝送方式の回路モデル

図1にワイヤレス電力伝送の回路モデルを示す。磁界共鳴方式(図1(b))は、電磁誘導方式(図1(a))に補償コンデンサを付加することなどにより送信側と受信側の伝送周波数 f_1 、 f_2 および共振周波数 f_0 を同じにした方式である。すなわち、磁界共鳴方式は式(1)の条件が成り立っている特殊な電磁誘導方式であるといえる。

磁界共鳴方式は図2のように変換可能であり、送信回路の入力電圧を V_{in} 、電流を I_p 、インピーダンスを Z_p 、インダクタンスを L_p 、補償コンデンサの容量を C_p 、抵抗を r_p 、受信回路の負荷電圧を V_o 、電流を I_s 、インピーダンスを Z_s 、インダクタンスを L_s 、補償コンデンサの容量を C_s 、抵抗を r_s 、送受信コイル間の相互インダクタンスを M 、伝送角周波数を ω とすると、この回路は式(2)のように表すことができる。

$$f_0 = f_1 = f_2$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad \text{式(1)}$$

$$\begin{bmatrix} Z_p & -j\omega M \\ -j\omega M & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{式(2)}$$

$$Z_p = r_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}$$

$$Z_s = r_s + R_{o_ac} + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s}$$

$$I_p = \frac{Z_s V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 M^2}$$

$$I_s = \frac{j\omega M V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 M^2}$$

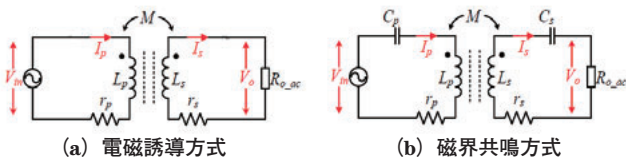


図1 ワイヤレス電力伝送方式の回路モデル

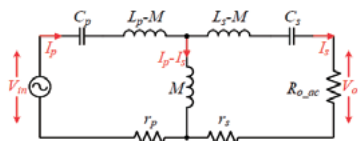


図2 磁界共鳴方式の等価回路

2.3 磁界共鳴方式の送信電力と伝送効率

式(2)から、負荷 R_{o_ac} へ出力する電力 P_{out} 、および入力電力に対する負荷に伝送できる電力の比である伝送効率PTEは、式(3)および式(4)で表すことができる。

$$P_{out} = |I_s|^2 R_{o_ac} \quad \text{式(3)}$$

$$PTE = \frac{|I_s|^2 R_{o_ac}}{|I_p|^2 r_p + |I_s|^2 (R_{o_ac} + r_s)} \quad \text{式(4)}$$

更に、送受信コイル間の結合係数 k は、式(5)で定義されるため、 I_p および I_s はそれぞれ式(6)および式(7)のように表すことができ、式(3)の出力電力 P_{out} と式(4)の伝送効率PTEは結合係数 k をパラメータとして算出することが可能である。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad \text{式(5)}$$

$$I_p = \frac{Z_s V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 k^2 L_p L_s} \quad \text{式(6)}$$

$$I_s = \frac{j\omega k \sqrt{L_p L_s} V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 k^2 L_p L_s} \quad \text{式(7)}$$

EV向けワイヤレス給電の標準化では、伝送周波数を85kHz帯とする案が有力であることから、図1(b)の磁界共鳴方式の各パラメータを表2とし、式(3)および式(4)を使って、結合係数 k と伝送周波数 f の違いにより出力電力 P_{out} が変化の様子(図3)、結合係数 k と伝送周波数 f の違いにより伝送効率PTEが変化の様子(図4)、結合係数 k と負荷抵抗 R_{o_ac} の違いにより出力電力 P_{out} が変化の様子(図5)、結合係数 k と負荷抵抗 R_{o_ac} の違いにより伝送効率PTEが変化の様子(図6)を求める。なお、図5および図6では、結合係数と負荷抵抗の違いによる出力電力および伝送効率の変動が大きいため、結合係数を0.01~0.09の範囲で求めた。

表2 磁界共鳴方式の各パラメータ

項目	記号	値
負荷抵抗 [Ω]	R_{o_ac}	40
送信側自己インダクタンス [μH]	L_p	120
受信側自己インダクタンス [μH]	L_s	120
共振周波数 [kHz]	f_0	85
送信側コイル抵抗 [Ω]	r_p	0.3
受信側コイル抵抗 [Ω]	r_s	0.3

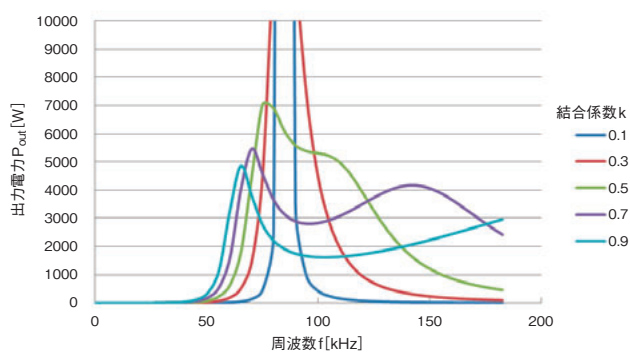
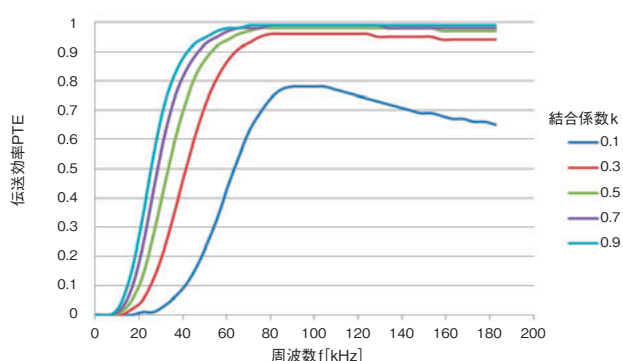
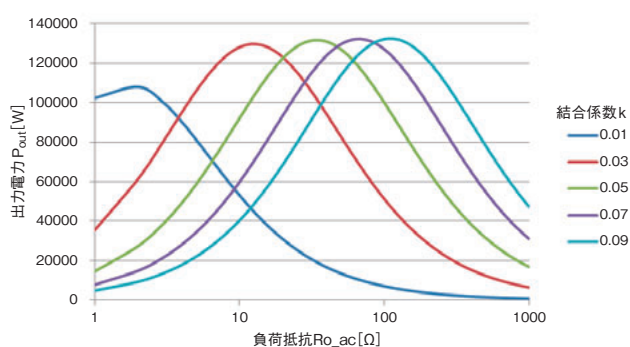
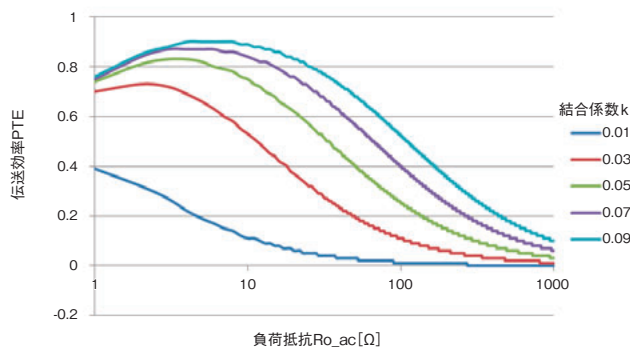
図3 送受信コイルの結合係数 k と出力電力 P_{out} 図4 送受信コイル間結合係数 k と伝送効率 PTE図5 負荷抵抗 R_{o_ac} の違いによる出力電力 P_{out} 図6 負荷抵抗 R_{o_ac} の違いによる伝送効率 PTE

図3～図6より、磁界共鳴方式では、その出力電力 P_{out} および伝送効率 PTE は結合係数 k や負荷抵抗 R_{o_ac} によって異なる振る舞いをするのがわかる。特に出力電力は、結合係数が大きくなると共振周波数から離れた両サイドの周波数においてピークが表れたり（図3）、負荷抵抗の大きさによってピークとなる周波数が大きく変動したり（図5）する。すなわち、送受信コイル間の位置によって結合係数が変化したり、バッテリーの残量により負荷抵抗値が変動するなどした場合、伝送する電力や効率が変動することになる。そのため、磁界共鳴方式では、これらを調整、最適化することが必要となる。

以上のようにワイヤレス電力伝送においては、システム設計を行うに際し、伝送効率や伝送可能な電力を最適化するために送受信コイルの結合係数を知ることが重要となる。

2.4 ワイヤレス電力伝送用コイルに求められる要件

ワイヤレス電力伝送における伝送効率の低下は損失が増えるだけでなく、発熱の原因となる。そのため、そのシステム設計において伝送効率を上げることが最優先の課題となる。

磁界共鳴方式のワイヤレス電力伝送では、最大効率となる負荷抵抗の値は式(8)で示され、この時の伝送効率は式(9)で示される¹⁾。この式より、伝送効率を上げるためには、送受信コイル間の結合係数 k を上げること、コイルの Q 値を大きくすることが必要であるとわかる。更に、送受信コイルの Q 値は式(10)および式(11)で示されることから、 Q 値を大きくするためには、そのインダクタンスを大きくする、または抵抗を小さくすることが必要となる。すなわち、伝送効率を上げるためには、決められたコイル形状において、抵抗を上げることなくインダクタンスを大きくすることが肝要となる。

$$R_{o_ac,PTE_max} = \sqrt{\frac{\omega_0^2 M^2 r_s}{r_p} + r_s^2} \quad \text{式(8)}$$

$$PTE_{opt} = \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})^2} \quad \text{式(9)}$$

$$Q_p = \frac{\omega_0 L_p}{r_p} \quad \text{式(10)}$$

$$Q_s = \frac{\omega_0 L_s}{r_s} \quad \text{式(11)}$$

3. リッツ線とその特長

3.1 リッツ線の概要

リッツ線は、線径 0.05 mm から数 mm のエナメル線を数十本から数千本撚り合わせた電線（図7参照）であり、IH 電磁調理器用コイルや高周波トランスなどに利用され

ている。

要求される耐電圧によりエナメル線の絶縁被膜の厚みが異なるほか、耐熱温度により絶縁材の種類も異なる。更に、撚り方も様々である。図8にリッツ線の構成例を示す。図8に示すリッツ線は、①多数の素線を孫撚り→②孫撚り7束を子撚り→③子撚り7束を親撚り、と3回の撚りを行った例である。

リッツ線は、素線径、素線数、撚り方により交流抵抗の特性が異なり、その選択はとても重要である。



図7 リッツ線

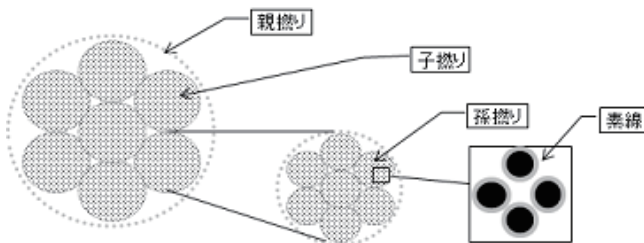


図8 リッツ線の構成例 (3段撚り)

3.2 高周波における導体損失

ワイヤレス電力伝送では高周波帯で電力伝送を行うことから、そのコイルの損失を低減するためリッツ線が利用される。それは、以下のような表皮効果損失と近接効果損失を低減させる効果が期待できるからである。

導体の抵抗は、周波数の増加とともに大きくなる。これは、周波数が高くなるとともに電流が導体表面近くに偏る

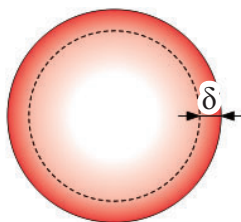


図9 導体の表皮効果

表皮効果が原因である。電流密度が導体の表面の $1/e(0.73)$ となる距離 δ を表皮厚といい (図9)、導体の抵抗 R_s は式(12)で示される。

$$R_s \approx \frac{\rho l}{\pi(d_w \delta - \delta^2)} \quad \text{式 (12)}$$

ρ : 抵抗率 (銅の抵抗率は $1.27 \times 10^{-8} \Omega m$)

d_w : 導体径

l : 導体長

表皮効果による抵抗増を低減させるためには、導体の表面だけでなく中心部でも電流密度を高くすることが有効である。従って、表皮厚よりも細かいエナメル線を撚り合せたリッツ線を利用すると高周波の抵抗損失を小さくすることが可能となる。

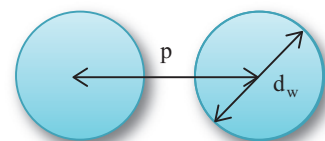
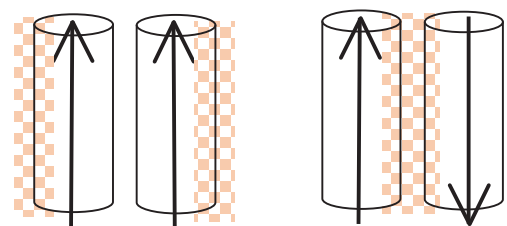
しかし、導体が近接するとそれぞれの電流によって生じた磁界により、他方の導体に渦電流を生じさせ、電流密度に偏りを生じることになる (電流の向きにより図10のようになる)。これを近接効果といい、これも抵抗増加の原因となる。平行導体の導体抵抗 R と近接効果による抵抗の増加 R_0 の比は、式(13)のようになることが示されている²⁾。

$$\frac{R}{R_0} \approx 1 + [(1/r'_1) - (1/r'_2)] \quad \text{式 (13)}$$

$$r'_1 = (2p/d_w + 0.5d_w/p - 1)$$

$$r'_2 = (2p/d_w - 0.5d_w/p + 1)$$

リッツ線の近接効果の低減には、リッツ線の撚り構成を工夫し、リッツ線を構成する素線がリッツ線内の一定の位置に留まることのないようにすることが肝要である。更に、コイルを形成すると、近接効果損失はその磁界の影響により増加するため、コイル化した後の交流抵抗の値にも留意が必要となる。



p : 導体間距離

d_w : 導体径

図10 平行導体の近接効果による電流密度の偏り

3.3 リッツ線の交流抵抗

図 11 に、同一の導体断面積となる銅単線と 2 種類のリッツ線の交流抵抗の測定例を示す。導体断面積を 4.0 mm^2 とした① $\phi 2.26 \text{ mm}$ の銅単線、②素線径 $\phi 0.1 \text{ mm}$ 素線数 510 本のリッツ線、③素線径 $\phi 0.07 \text{ mm}$ 素線数 1,038 本のリッツ線の交流抵抗を測定したものである。交流抵抗の測定には、KEYSIGHT 製 Precision LCR Meter を使用し、線材は中央で折り返して測定している。そのため、図 11 に示す交流抵抗はその近接効果損失が付加されている。

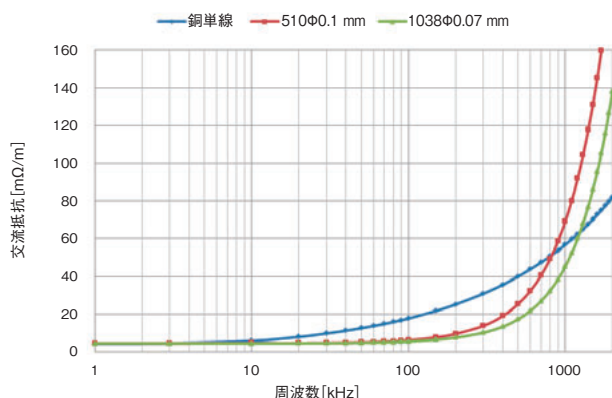


図 11 導体断面積 4.0 mm^2 の銅単線とリッツ線の交流抵抗

図 11 に示されているように、リッツ線は銅単線に比べ周波数 10 kHz から 1 MHz の範囲で交流抵抗が小さくなっている。1 MHz を超えると近接効果損失の方が支配的となり、リッツ線の優位性が無くなっている。また、細い素線径を多数撚り合せたリッツ線の方が、交流抵抗が小さくなり、この傾向はより高い周波数において顕著となる。

4. ワイヤレス給電用コイルの電磁界解析方法

4.1 ワイヤレス給電用コイルの概要

ワイヤレス給電に利用されるコイルには、ソレノイド型、スパイラル型（サーキュラー型）、更に、複数の角形スパイラルを組合せものなどがある。ここでは、最も一般的なタイプである図 12 に示すようなスパイラルコイルについて検討を行う。先に示したとおり、ワイヤレス給電において、このスパイラルコイルに求められる特性としては、インダクタンスと交流抵抗比を表す Q 値と送受信コイル間の結合係数 k があり、これらの諸特性を明らかにする必要がある。



図 12 ワイヤレス電力伝送用スパイラルコイル

4.2 スパイラルコイルのインダクタンス

スパイラルコイル間の相互インダクタンスは、図 13 に示す同軸上の 1 ターンループコイルの相互インダクタンスを求める理論式 (14) を展開することによって求められる³⁾。スパイラルコイルは半径の異なる 1 ターンループコイルの集合体と考えることができ、相互インダクタンス M_{total} は、それらコイルの相互インダクタンスを積算する式 (15) によって求めることができる。ここで M_{ij} は i 番目のループコイルと j 番目のループコイルの相互インダクタンスであり、 n_1 、 n_2 はそれぞれのスパイラルコイルのターン数である。

更に、自己インダクタンスについては、相互インダクタンスを求める式 (14) の x に替わって自身の幾何学的平均距離 (GMD) 式 (16) を用いることによって求めることができる。

$$M = \frac{8\pi\sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{\kappa_1}} [K(\kappa_1) - E(\kappa_1)] \quad \text{式 (14)}$$

$$\kappa_1 = \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2}$$

$$x_1 = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x^2}$$

$$x_2 = \sqrt{(r_1 - r_2)^2 + x^2}$$

・ $K(\kappa_1)$ 、 $E(\kappa_1)$ は、それぞれ第 1 種完全楕円積分と第 2 種完全楕円積分

・ x_1 、 x_2 はそれぞれ円形コイルの最小距離と最大距離

$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} M_{ij} \quad \text{式 (15)}$$

$$\text{GMD} = r \exp(-1/4) \quad \text{式 (16)}$$

r : 同一コイル内のループコイル間の距離

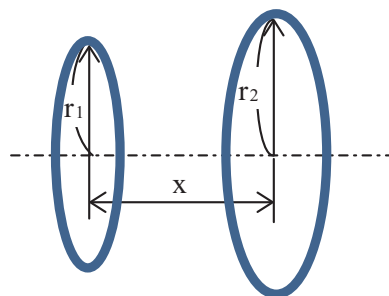


図 13 同軸上 1 ターンループコイル

4.3 スパイラルコイルの交流抵抗と Q 値

素線径 d_s 、素線数 N_s のリッツ線を用いて形成した多層スパイラルコイルの交流抵抗 R_{ac} は式 (17) となることが報告されている⁴⁾。また、コイルの性能を示す Q 値は、角周波数を ω 、インダクタンスを L 、抵抗を R とすると式 (18) で示されることから、コイルの自己インダクタンスと交流

抵抗により求めることができる。

$$R_{ac} = R_{dc} \left(1 + \frac{f^2}{f_h^2} \right) \quad \text{式 (17)}$$

$$f_h = \frac{2\sqrt{2}}{\pi(d_w/2)^2 \mu_0 \sigma \sqrt{N_t N_s \eta \beta}}$$

- ・ R_{dc} : 直流抵抗
- ・ f : 周波数
- ・ μ_0 : 真空の透磁率
- ・ σ : 導電率
- ・ N_t : コイルの巻き数
- ・ η : コイルの形状によって決まるパラメータ
- ・ β : 巻線断面積に占める導体の割合

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad \text{式 (18)}$$

4.4 フェライトの影響

ワイヤレス給電では、コイルによって発生する磁界により電力伝送を行うが、一方でこの磁界は近接する金属に渦電流を発生させ、伝送電力の損失や発熱につながる。これを防ぐため、高透磁率、低導電率の材料であるフェライトを配置することが行われる（図 16 参照）。そのためフェライトを配置した場合のコイルのインダクタンスやコイル間の結合係数を知る必要がある。

一般に、フェライトを配置した場合、結合係数を求めるには、理論的に求めることが困難なため有限要素法などの手法を用いることが必要である。今回の解析では、有限要素法を用いた電磁界シミュレーションソフト FEMM4.2⁵⁾ を用いた。本シミュレーションソフトは、回転軸座標によるシミュレーションが可能であり、スパイラルコイルのような円形コイルのシミュレーションに適している。

5. 電磁界解析と実際との比較

5.1 コイルのインダクタンスおよび Q 値の検証

表 3 に示すスパイラルコイルについて、理論式 (14) から式 (18) により、インダクタンス、交流抵抗および Q 値を求め、実測値と比較した。その結果、表 4 のとおり各値ともその差はわずかであり、これらの理論式を用いた推定が可能であることが確認された。

更に電磁界シミュレーションソフト FEMM4.2 を用いて、フェライト (表 6) をコイル (表 5) の背部に配置した場合について磁束分布とそのインダクタンスを求めた。磁束分布のシミュレーション結果を図 14 に示す。また、インダクタンスの実測値とシミュレーション値の比較を表 7 に示す。表 7 より、シミュレーション値と実測値は良く一致しており、フェライトを配置したコイルのインダクタンスの推定においても FEMM4.2 を用いたシミュレーションが有効であることを確認した。

表 3 検証用スパイラルコイル仕様

項目	値
リッツ線素線径 [mm]	0.07
リッツ線素線数	705
リッツ線径 [mm]	3.7
コイル外径 [mm]	300
コイル巻き数	22
コイル巻線スペース [mm]	0
入力リード線長 [mm]	200
出力リード線長 [mm]	200

表 4 Q 値検証結果

項目	理論値	実測値
インダクタンス [μH]	127.5	115
交流抵抗 @85 kHz [$\text{m}\Omega$]	73.9	71.9
Q 値 @85 kHz	921	854

表 5 FEMM シミュレーション用コイル仕様

項目	値
リッツ線径 [mm]	1.3
コイル外径 [mm]	80
コイル内径 [mm]	38
コイル巻き数	18
コイル巻線スペース [mm]	0

表 6 FEMM シミュレーション用フェライトの仕様

項目	値
導電率 [S/m]	1
透磁率	1,200
厚み [mm]	1.7

表 7 インダクタンスのシミュレーション結果

形態	インダクタンス [μH]	
	シミュレーション	実測値
コイル単体	23.1	23.1
コイル+フェライト	41.7	41.4

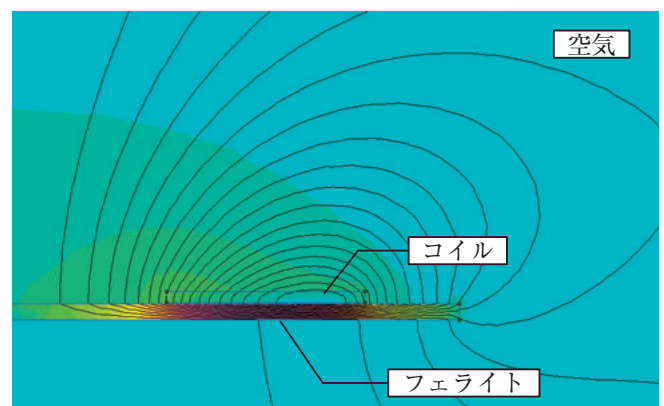


図 14 FEMM4.2 による検証用スパイラルコイルの磁束分布シミュレーション

5.2 スパイラルコイル間の結合係数の検証

スパイラルコイル間の結合係数について、理論式 (14)、式 (15) および式 (5) を用いた理論値と、FEMM4.2 シミュレーション値および実測値とを比較した。送受信コイルとも表 5 に示すコイルを使用した。比較した結果を、表 8 お

よび図 15 に示す。この結果より、コイル間の垂直距離が小さい位置において、実測値がシミュレーション値に比べ小さな値となったが、測定環境や測定誤差の影響がでているものと推測でき、結合係数 k についてもこれらを使って推定可能であると判断した。

表 8 結合係数検証結果

コイル間の距離		結合係数 k		
垂直 [mm]	水平 [mm]	理論値	FEMM	実測値
10	0	0.54	0.52	0.48
18		0.35	0.34	0.30
26		0.23	0.24	0.20
34		0.16	0.17	0.14

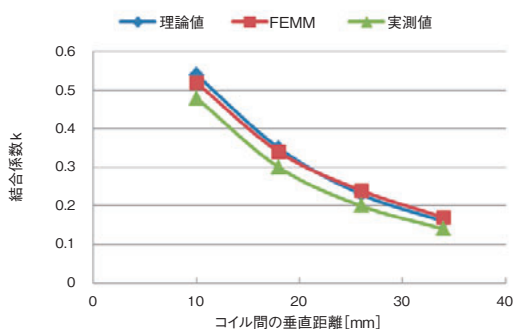


図 15 結合係数検証結果

続いて、図 16 のようにフェライトにサンドイッチされたコイルの結合係数について、FEMM4.2 を用いた算出結果について検証を行った (図 17)。その結果、表 9、図 18 に示すように、シミュレーションと実測値は良く一致し、フェライトにサンドイッチされたコイル間の結合係数の推定に FEMM4.2 によるシミュレーションが有効であることを確認した。

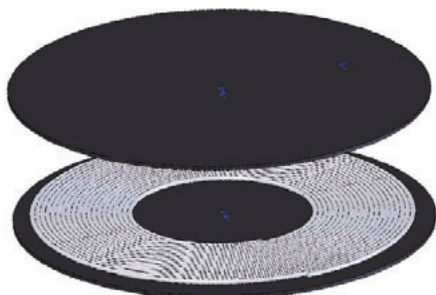


図 16 フェライトにサンドイッチされたコイル

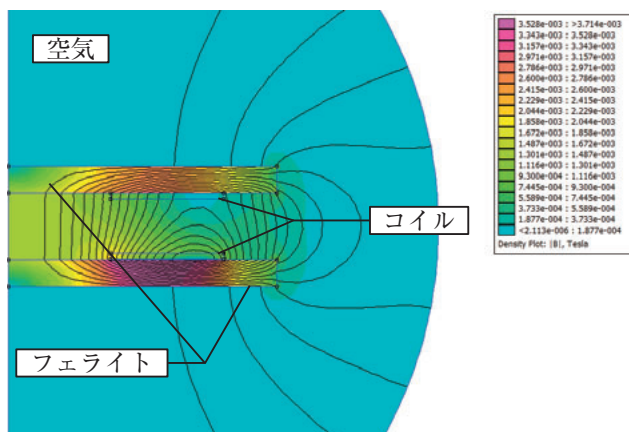


図 17 フェライトにサンドイッチされたコイルの磁束分布シミュレーション

表 9 フェライトでサンドイッチされたコイル間の結合係数検証結果

コイル間の距離		結合係数 k	
垂直 [mm]	水平 [mm]	FEMM	実測値
10	0	0.74	0.72
18		0.51	0.50
26		0.35	0.33
34		0.24	0.23

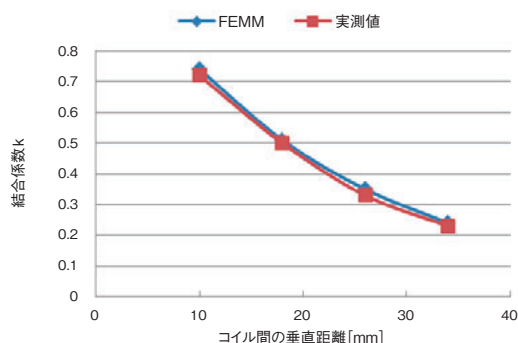


図 18 フェライトにサンドイッチされたコイル間の結合係数

6. ワイヤレス電力伝送用コイルの最適化検討

5 項において理論式および電磁界シミュレーションソフト FEMM4.2 により、コイルの Q 値と結合係数の推定が可能であることが示された。そこで、図 19 に示すような、コイル外径 W_o 、コイル内径 W_i 、巻線間スペース s 、リッツ線径 d_w のスパイラルコイルについて、ワイヤレス給電用コイルに求められる、より大きな Q 値となるコイルの仕様とそのコイル間の結合係数を検討した。

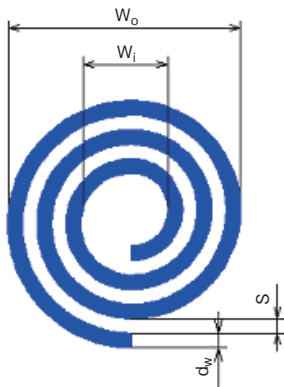


図 19 スパイラルコイル

6.1 コイルの巻線間スペースおよびリッツ線の構成と Q 値

表 10 に示すコイル①とコイル②は、スパイラルコイルの外径 W_o と巻き数が同じで、巻線間のスペース s が 1.3 mm (コイル①) と 0 mm (コイル②) であり、コイル②とコイル③は、コイルの形状は同じだがリッツ線の種類が異なり、②は素線径 0.07 mm 素線数 2,100 本、③は素線径 0.05 mm 素線数 4,200 本のコイルである。これらのコイルの Q 値を比較し、コイルの巻き方やコイルを構成するリッツ線の種類によりどのようなコイルの Q 値が大きく、ワイヤレス給電用コイルとして良好な特性を示すか推定した。

表 11 に示すように、コイルの外径と巻き数が同じ場合、巻線間のスペースを空けたコイルは、密巻きのコイルに比べ、Q 値が悪化した。巻線間のスペースを設けることで、近接効果による交流抵抗は低減することができるが、インダクタンスの減少も大きく、Q 値は小さくなった。また、外径 W_o と内径 W_i が同じコイルの場合、細い素線を数多く束ねたリッツ線を使用したコイルのほうが、交流抵抗が小さくなり Q 値が大きくなった。ワイヤレス給電用コイルでは、素線径の細いリッツ線を用い、スペースを空けることなく巻いたコイルの Q 値が大きくなることが示された。

表 10 検討用スパイラルコイルの仕様

項目	コイル①	コイル②	コイル③
リッツ線素線径 [mm]	0.07		0.05
リッツ線素線数	2,100		4,200
リッツ線径 [mm]	4.6		4.9
コイル外径 [mm]	258		
コイル内径 [mm]	73	112	101
コイル巻き数	16		
コイル巻線スペース [mm]	1.3	0	

表 11 コイルの巻線間スペースと Q 値

項目	コイル①	コイル②	コイル③
リッツ線長 [mm]	8,313	9,293	9,012
インダクタンス [μ H]	41.2	55.8	51.2
交流抵抗 @85 kHz [m Ω]	22.1	26.4	21.8
Q 値 @85 kHz	997	1,128	1,251

6.2 コイルの巻線間スペースと結合係数

続いて、表 10 に示したコイル①およびコイル②について、結合係数にどのような差が生じるか推定した (表 12 および図 20)。

その結果、コイル間の垂直距離が小さい場合、巻線間のスペースを設け内径の小さいコイル①の結合係数はわずかに大きいですが、垂直距離が大きくなると、その差はほとんどなくなった。内径が小さく巻き幅が広いコイルの結合係数が大きくなることが予想されたが、あまり変わらない結果となった。一方、コイルの外径とコイル間の水平距離は結合係数に密接に関係し、送受信コイルがコイルの半径を超えて離れると両コイルの磁界の方向が逆転し、表 12 の水平距離 200 mm での結合係数のようにマイナスに転じてしまう。そのため、コイル間のアライメント誤差や伝送効率の規定より、コイル形状の外径が決定されることになることが予想される。

表 12 コイルの内径と結合係数

コイル間の距離		結合係数	
垂直距離 [mm]	水平距離 [mm]	コイル①	コイル②
50	0	0.39	0.38
	40	0.34	0.33
	80	0.22	0.22
	120	0.09	0.10
	160	0.00	0.01
	200	-0.03	-0.03
100	0	0.18	0.18
	40	0.16	0.16
	80	0.11	0.12
	120	0.06	0.07
	160	0.02	0.03
	200	0.001	0.00
150	0	0.09	0.09
	40	0.08	0.08
	80	0.06	0.07
	120	0.04	0.04
	160	0.02	0.02
	200	0.01	0.01

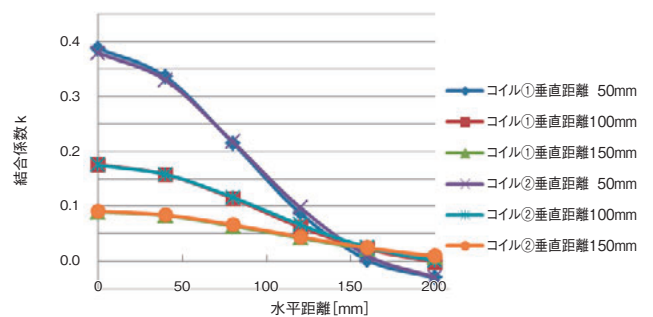


図 20 コイルの巻線間隔と結合係数

6.3 コイルの巻数と Q 値

表 13 に示す、内外径が同じで巻き数が 16 ターンのコイル④と 20 ターンのコイル⑤について Q 値を算出した。

Q 値の算出結果は表 14 のとおりであり、巻き数の多いコイル⑤の Q 値のほうが大きくなった。この場合も巻き数の増加に伴いインダクタンスと交流抵抗が増加するが、インダクタンスの増加の方がより大きく Q 値が大きくなった。

表 13 検討用スパイラルコイルの仕様

項目	コイル④	コイル⑤
リッツ線素線径 [mm]	0.07	
リッツ線素線数	2,100	
リッツ線径 [mm]	4.6	
コイル外径 [mm]	258	
コイル内径 [mm]	73	
コイル巻き数	16	20
コイル巻線スペース [mm]	1.3	0

表 14 巻き数と Q 値

項目	コイル④	コイル⑤
リッツ線長 [mm]	8,313	10,468
インダクタンス [μ H]	41.2	55.8
交流抵抗 @85 kHz [m Ω]	22.1	26.4
Q 値 @85 kHz	997	1,128

6.4 コイルの巻数と結合係数

表 13 に示す形状が同じで巻き数の異なるコイルについて、結合係数に違いが生じるか検討した。

検討の結果、表 15 に示すように結合係数はコイルの巻き数やインダクタンスに関係せず、コイル形状が同じであれば同じ結合係数となった。

表 15 巻き数と結合係数

コイル間の距離		結合係数	
垂直距離 [mm]	水平距離 [mm]	コイル④	コイル⑤
100	0	0.18	0.18
	40	0.16	0.16
	80	0.11	0.11
	120	0.06	0.06
	160	0.02	0.02
	200	0.00	-0.00

6.5 フェライトの結合係数への影響

FEMM4.2 を利用し、コイルをフェライトでサンドイッチした場合の結合係数の変化を検討した。コイル仕様は表 16 に示したように、コイル⑥とコイル⑦は外径と巻き数が同じで内径が異なり、コイル⑦とコイル⑧は内外径が同じで巻き数が異なっている。

FEMM4.2 によるシミュレーションより導いた結合係数を表 17 に示す。フェライトでコイルをサンドイッチすることにより、漏れ磁束を大幅に低減し、結合係数が増加した。また、結合係数はコイルの内径や巻き数に影響されなことが確認された。

表 16 検討用スパイラルコイルの仕様

項目	コイル⑥	コイル⑦	コイル⑧
リッツ線素線径 [mm]	0.07		
リッツ線素線数	2,100		
リッツ線径 [mm]	4.6		
コイル外径 [mm]	258		
コイル内径 [mm]	118	69	
コイル巻き数	16		20
コイル巻線スペース [mm]	1.3	0	1.3
コイルの厚み [mm]	4.6		

表 17 フェライトの結合係数に与える影響

コイル間の距離		結合係数					
垂直 [mm]	水平 [mm]	コイル⑥		コイル⑦		コイル⑧	
		無	有	無	有	無	有
50	0	0.39	0.59	0.39	0.58	0.39	0.58
100		0.17	0.25	0.17	0.25	0.17	0.25
150		0.08	0.11	0.08	0.14	0.08	0.11

*無：フェライト無し，有：フェライト有り

7. ま と め

磁界共鳴方式のワイヤレス給電に利用されるコイルには、大きな Q 値であること、結合係数を大きくすることが求められることを示し、これらの推定に各理論式および電磁界シミュレーションソフト FEMM4.2 が利用できることを検証した。

更に、これらのツールを用いて、種々のコイルについて Q 値と結合係数 k を推定し、①巻線間隔を詰める、巻数を増やすなどにより Q 値が高くなる、②より細い素線を多数束ねたリッツ線を使用した方の Q 値が高くなる、③送受信コイルの結合係数はコイルの形状に依存し、インダクタンスの大きさに依存しない、④フェライトでサンドイッチすることにより漏れ磁束を小さくし、結合係数を大きくすることができる、ことが確認された。

ここでは、送受信コイルの形状が同じものとし、検討を行った。しかし、車載用コイルにおいては、より小型・軽量であることも求められる。今後は、標準化作業の進展に伴い、コイル形状の規格化も行われると思われ、これらの要件を含めた最適化の検討をすすめたい。

参 考 文 献

- 1) K. Van Schuylenbergh and R. Puers : "Inductive Powering: Basic Theory and Application to Biomedical Systems", 1st ed. Springer Science (2009)
- 2) Alan Payne : "Skin Effect, Proximity Effect and the Resistance of Circular and Rectangular Conductors", 2016. <http://g3rbj.co.uk>
- 3) James Clerk Maxwell : "Treatise on Electricity and Magnetism", Oxford, Clarendon Press (1873)
- 4) Zhi Yang, Wentai Liu, and Eric Basham : "Inductor Modeling in Wireless Links for Implantable electronics", IEEE Transactions on Magnetics, vol.43, Issue 10, p. 3851-3860 (2007)
- 5) D. C. Meeker : Finite Element Magnetics Method. Version 4.2. <http://www.femm.info>.

- 6) K. B. Baltzis : “The FEMM Package: A simple, Fast, and Accurate open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering” , Journal of Engineering Science and Technology Review 1, p.83-89 (2008)

昭和電線ケーブルシステム(株)
松本 秀樹 (まつもと ひでき)
産業機器電線事業開発プロジェクト 主幹
非接触給電用コイルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
三浦 聖 (みうら きよし)
産業機器電線事業開発プロジェクト 主幹
非接触給電用コイルの研究・開発に従事

昭和電線デバイステクノロジー(株)
森 正裕 (もり まさひろ)
精密デバイス事業部
技術・品質保証部 技術2課 主幹
非接触給電用コイルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
野内 健太郎 (のうち けんたろう)
産業機器電線事業開発プロジェクト 主査
非接触給電用コイルの研究・開発に従事

昭和電線ケーブルシステム(株)
大根田 進 (おおねだ すずむ)
産業機器電線事業開発プロジェクト長

昭和電線デバイステクノロジー(株)
香月 史郎 (かつき しろう)
精密デバイス事業部
技術・品質保証部長

水平ねじり回転が免震建物用積層ゴムの水平性能に与える影響

Performance Test of Natural Rubber Bearing for Seismic Isolation Building under Torsional Deformation

佐藤 敬昇
Takanori SATO

加藤 直樹
Naoki KATO

中島 徹*
Toru NAKAJIMA

中村 俊之*
Toshiyuki NAKAMURA

近年、免震工事の施工の簡易化や工期短縮を目的とした取組が増えてきている。そのなかの事例として、免震装置の上部基礎のプレキャスト化や鉄骨造での鉄骨柱を直接免震装置に設置するメタルタッチ工法がある。これらの施工方法は強制的に免震装置に変形を与える可能性がある。今回、免震装置に負荷されると考えられるねじり回転を模擬して実験を行った。これにより水平剛性の変化が小さいことと限界変形でも大きな影響がないことを確認した。

In recent years, there has been an increasing number of initiatives for the purpose of simplifying and shortening the construction period of base isolation work. As an example of among them, there is a metal touch method to be installed directly to the seismic isolation device steel columns in precast reduction and steel frame of the upper base of the seismic isolation system. These methods of construction is likely to give forced deformation in seismic isolation devices. This time, an experiment was conducted to simulate the torsional rotation is believed to be a load to the seismic isolation device. As a result it was confirmed that there is no major impact in and limit deformation that the change in horizontal stiffness is small.

1. はじめに

免震工事の施工の簡易化や工期短縮を目的とした免震上部基礎のプレキャスト化や鉄骨造の場合、鉄骨柱を直接免震装置に設置するメタルタッチ工法が採用されるケースが増えてきている。

しかし、これらの場合、梁ブラケットも一体で設置されるため、設置後の梁の誤差吸収が困難となる。

一方、設置精度は水平位置及び高さについては管理基準値が定められているが、水平面のねじり回転角度は管理値が定められていないため、異なる製作工場で作られた積層ゴム、鉄骨、基礎を組み立てた際にそれぞれの製作寸法誤差が重なって生じるずれが積層ゴムにねじれを生じさせる。

そこで、天然ゴム系積層ゴム支承の水平面にねじり回転を与えた状態で水平性能を測定して、天然ゴム系積層ゴム支承の水平基本性能に与える影響を調査した。

2. 試験体

試験体は表1に示す天然ゴム系積層ゴム φ600を用いた。

表1 試験体

項目	仕様
ゴム外径 [mm]	600
フランジ外径 [mm]	1000
せん断弾性率 [N/mm ²]	0.39
ゴム構成	4.5 mm×26層
形状係数 S_1/S_2	31.7/5.1
割線剛性 [$\times 10^3$ kN/mm]	0.95
数量	3

3. 試験条件

3体の試験体を表2に示すとおり、せん断ひずみ2水準、ねじり回転角度3水準で水平剛性を評価した。ねじり回転の角度は実際の施工精度で想定される回転角度を参考に設定した。ねじり回転時の限界変形試験は、加振履歴の蓄積を考慮して試験体を分けて実施した。限界変形性能を確認するため、最大3.3°（フランジ側面で約28 mm）の更に大きな回転を与えて実施した。

* 大成建設株式会社

表2 試験条件

試験順序	試験体			ねじり回転角度	評価項目			評価項目		
	No. 1	No. 2	No. 3		水平剛性		限界変形			
					鉛直面圧 (鉛直荷重)	せん断ひずみ ×3 サイクル (水平変位)	せん断ひずみ ×1 サイクル (水平変位)			
1	○		○	0°	15 N/mm ² (4231 kN)	±100% (±117.0 mm)	-	基本性能		
2		○	±250% (±292.5 mm)							
3	○		±100% (±117.0 mm)			回転角度による 水平剛性の変化				
4		○	±250% (±292.5 mm)							
5		○	2.0°							
6	○		2.6°			-		±400% (±468.0 mm)	限界変形による 外観・履歴曲線 の異常の有無	
7		○	3.3°							
8	○		0°			±100% (±117.0 mm)		-	-	試験1～7を 経過後の水平 剛性の変化
9		○				±250% (±292.5 mm)				

4. 試験方法

試験は当社保有 35 MN 圧縮せん断試験機を用いて実施した。まず試験機上部加圧板に取付けプレート、積層ゴムの上フランジをボルトで締結した。次に下側取付けプレートに取付けた反力プレートと下フランジに取付けた回転負荷プレートとの間に挟んだ油圧シリンダー2台でねじり回転を与えたあとに、鉛直荷重を負荷して、ボルトで締結した。なお適正にねじり回転を与え、かつその状態を保持する各種プレートやスペーサー及び設置箇所を図1に示す。

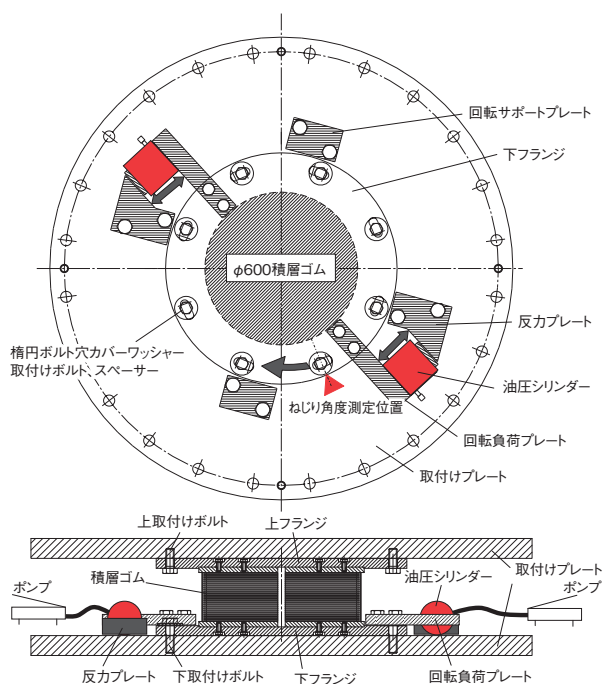


図1 積層ゴム回転負荷方法

ねじり回転角度目標値に対する実際のねじり回転角度を表3に示す。ほぼ目標とするねじり回転を与えた状態で加振試験ができることを確認した。

表3 ねじり回転角度管理結果

評価項目	ねじり回転角度 目標値	回転変位 [mm]	ねじり回転角度 測定値*
剛性確認	0.3°	4.0	0.46°
	0.7°	5.5	0.63°
	1.4°	11.0	1.26°
限界変形	2.0°	18.0	2.06°
	2.6°	20.5	2.35°
	3.3°	28.0	3.21°

*ねじり回転角度 = \tan^{-1} (回転変位/フランジ半径 (500 mm)) より算出した。

5. 試験結果

(1) 水平剛性

水平剛性測定結果を表4、履歴曲線を図2、図3に示す。水平剛性は履歴曲線の3サイクル目から求め、せん断ひずみ100%加振時は荷重・変位の最大～最小値間の傾き(割線剛性)、せん断ひずみ250%加振時はせん断ひずみ100%間傾き(接線剛性)の正・負平均値から算出して、初期値との変化率を示している。

ねじり回転角度0.3°～1.4°では初期値との変化率は最大3.7%と小さいものであった。なお、最終の水平剛性が初期

表4 水平剛性測定結果(せん断ひずみ100%, 250%)

試験内容	せん断ひずみ 100%			せん断ひずみ 250%		
	回転角度	温度補正後 水平剛性 [$\times 10^3$ kN/m]	対初期値 [%]	回転角度	温度補正後 水平剛性 [$\times 10^3$ kN/m]	対初期値 [%]
基本	0.0°	0.845	-	0.0°	0.699	-
	0.3°	0.876	3.7	0.3°	0.708	1.3
回転試験	0.7°	0.854	1.1	0.7°	0.699	0.0
	1.4°	0.858	1.5	1.4°	0.698	-0.1
	2.6°	限界変形(400% 1サイクル)		2.0°	限界変形(400% 1サイクル)	
	基本	0.0°	0.794	-6.0	0.0°	0.616

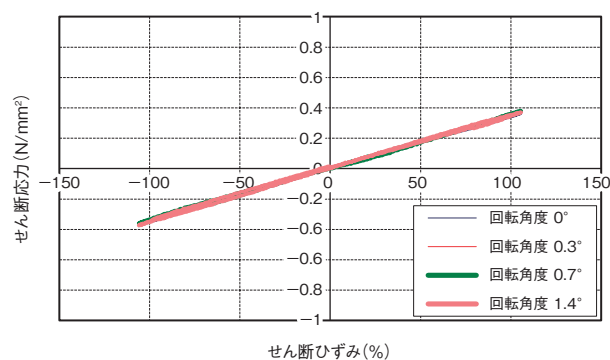


図2 せん断ひずみ100%履歴曲線

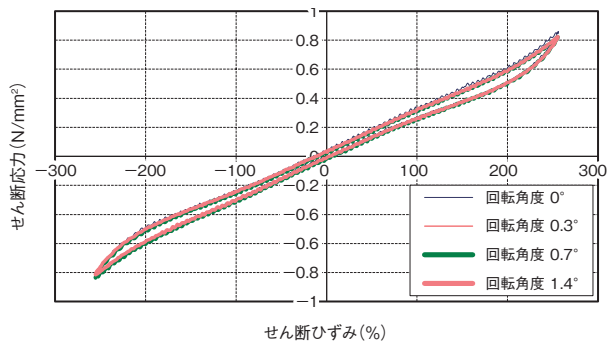


図3 せん断ひずみ 250% 履歴曲線

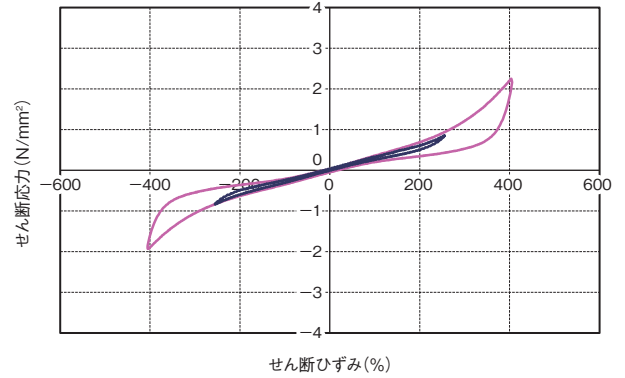
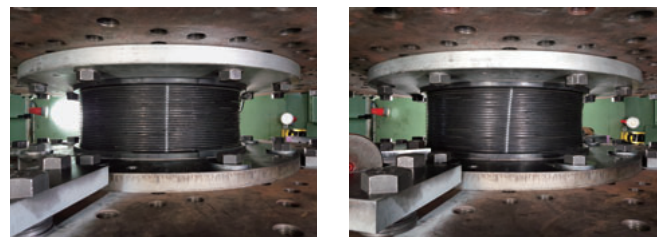


図6 せん断ひずみ 400%履歴曲線 (回転角度 3.3°)

と比較し -11.9% と低下しているのは、せん断ひずみ 400% 変形を経験した影響と考えられる。

(2) 限界変形

限界変形試験の履歴曲線を図4～図6、試験状態を図7、図8に示す。なお、図4～図6には参考にせん断ひずみ 250% (回転角度 0°) の履歴を重ねている。ねじり回転角度 2.0°～3.3°を与えた状態でせん断ひずみ 400%を加振し、外観及び履歴曲線に異常は認められなかった。



(a) 回転角度0°

(b) 回転角度3.3°

図7 ねじり回転状態

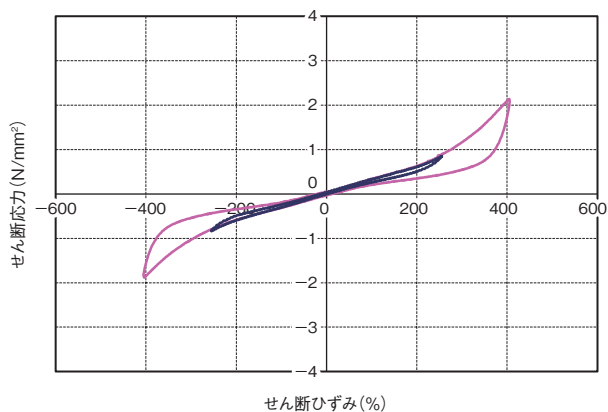


図4 せん断ひずみ 400%履歴曲線 (回転角度 2.0°)

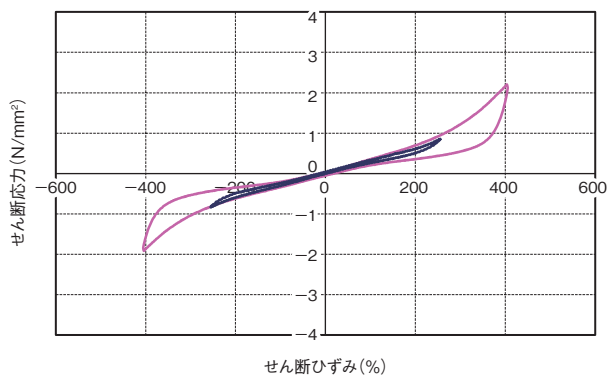


図5 せん断ひずみ 400%履歴曲線 (回転角度 2.6°)

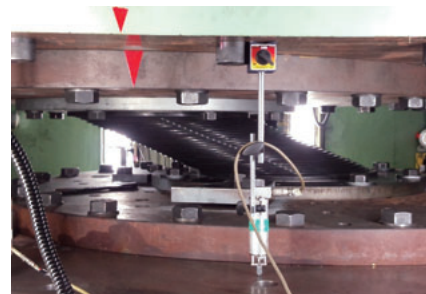


図8 限界変形試験 (回転角度 3.3° せん断ひずみ 400%)

6. まとめ

積層ゴムの水平面にねじり回転を与えた状態で水平性能を測定した。その結果、ねじり回転角度 0.0°～1.4° (実測 1.26°) の範囲における水平剛性の変化は小さかった。また更に大きな回転を与えて実施した限界変形でも大きな影響を与えないことが確認された。

本実験が免震構造のさらなる普及に寄与することを期待する。

昭和電線デバイステクノロジー(株)
佐藤 敬昇 (さとう たかのり)
免制震制音事業部 免制震部
技術・品質保証課

昭和電線デバイステクノロジー(株)
加藤 直樹 (かとう なおき)
免制震制音事業部長

大成建設株式会社
中島 徹 (なかじま とおる)
設計本部 構造設計第三部設計室 (服部)
シニア・エンジニア

大成建設株式会社
中村 俊之 (なかむら としゆき)
建築本部 技術部建築技術室 課長



110 kV 移動変圧器用ダイレクトモールドブッシング

110 kV Direct-Molded Bushing for Mobile Transformer

1. 概要

ダイレクトモールド（以下DM）ブッシングは主絶縁にエポキシ樹脂を使用し、シリコンゴムの外被をかぶせた完全固体絶縁タイプのブッシングです。従来品と比較し軽量で、耐震性に優れるなどの特長から 66/77 kV 級を中心に広く適用されています。

一方、電力の安定供給設備は最も重要なインフラであり、事故等の緊急対応や設備点検時には、移動用変電設備を用いて対応しています。これらの設備は、短時間での布設を可能とするため、機動性が求められています。

そこで今回、110 kV 級の移動用変圧器のコンパクト化、軽量化による機動性の向上を目的とし、非線形材料を適用して電界緩和層を設けた 110 kV 移動変圧器用 DM ブッシングを開発・実用化しました。

2. 構造

110 kV 移動変圧器用 DM ブッシングの構造を図 1 に示します。構造は 66/77 kV の DM ブッシングと同型で、内部に非線形材料を電界緩和層として付加することで外部絶縁の電界を平準化させ、大幅なコンパクト化を実現しました。

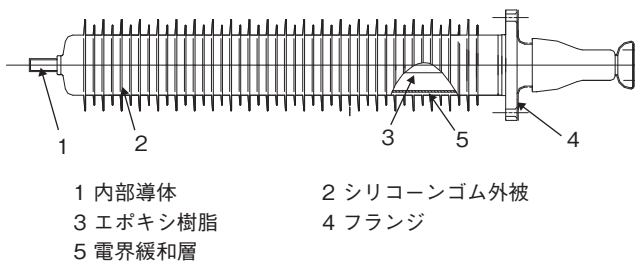


図 1 110 kV 移動変圧器用 DM ブッシング構造

3. 特長

今回の製品の特長を以下に示します。（表 1、図 2 参照）

①軽量・コンパクト

移動用変圧器に採用するにあたり、中汚損用に限定し、従来品と比べ高さを抑え、軽量・コンパクト化を実現しました。

②高耐震性能

高剛性かつ軽量化した構造により、地震の揺れに共振せず耐震性に優れています。

③環境調和

絶縁油を使用しないことから、植物性絶縁油等を使用した環境調和型機器に最適です。

表 1 従来品との構造比較

項目	磁器製ブッシング	DM ブッシング
質量（本体）	約 285 kg	約 60 kg
平均直径	295 mm	195 mm
全長	2855 mm	1585 mm
漏洩距離	4410 mm	3988 mm
汚損区分	中汚損	中汚損

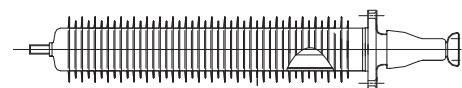
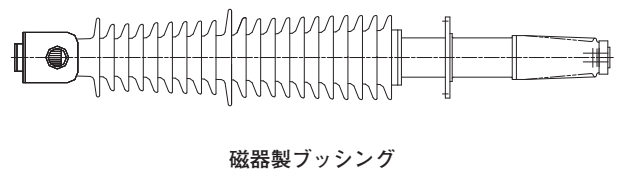


図 2 従来品との比較

問合せ先：〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
昭和電線ケーブルシステム(株)
電機・情報システム営業部 電機システム機器グループ
電話(03)5404-6967 FAX(03)3436-2583



X線装置用 直流 300 kV EP ゴム絶縁ポリウレタンシースケーブル (DC300kV XU)

DC300 kV Ethylene-propylene Rubber Insulated Polyurethane Jacketed Cable for X-Ray Equipment

1. 概要

当社ではこれまで、医療用や産業用として 30 kV ~ 250 kV の直流ケーブルを製造・販売してきました。従来の直流ケーブルのシースには一般的にクロロブレンゴムや PVC が使用されてきましたが、近年、環境負荷物質の規制等でハロゲンフリーシースの要求が高まっています。

また、300 kV クラスの直流ケーブルの需要も増えており、このような要求に応えるためハロゲンフリーの 300 kV 直流ケーブルを製品化しました。

2. 用途

・ X 線装置や電子ビームなどの産業用高圧直流ケーブル

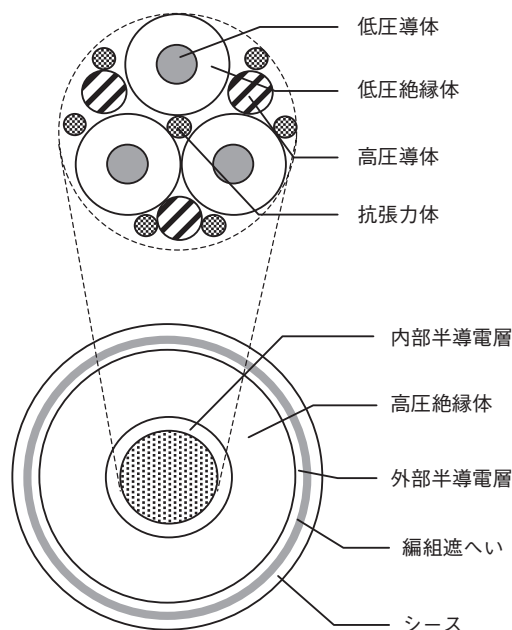


図1 断面図(例)

3. 特長

- (1) 定格電圧 DC300 kV
- (2) ハロゲンフリーシース
- (3) 3層同時押出によるコロナ抑制
- (4) 優れた可とう性

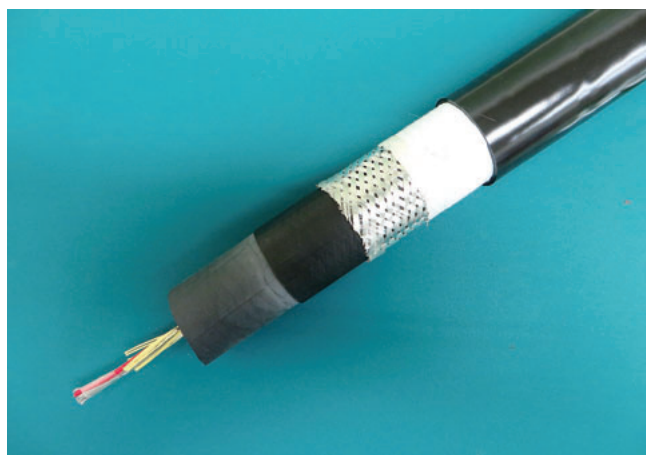


図2 外観

表1 構造例

線心数	低圧導体 3心	高圧導体 3心
導体サイズ	1.5 mm ²	1.25 mm ²
低圧線心絶縁体厚さ	0.4 mm	
高圧絶縁体厚さ	14 mm	
シース厚さ	2.0 mm	
仕上り外径	45 mm	
概算質量	2240 kg/km	
静電容量	0.115 μF/km	

問合せ先：〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
昭和電線ケーブルシステム(株)
電機・情報システム営業部 産業・交通システムグループ
電話(03)5404-6968 FAX(03)3436-2583



抗菌仕様 LAN ケーブル

Antibacterial Cable for LAN

1. 概要

現在の医療業界では、急速に増え続ける医用画像データの外部保管、遠隔医療や地域連携に向けたネットワーク環境の整備等、ITの活用が進みつつあります。

医療機関内の安全性確保、院内ネットワーク構築、クラウドを活用した医療情報システム基盤の構築等、医療ITを推進することを目的とし、抗菌仕様LANケーブルの開発を行いました。

2. 用途

医療業界(病院・医療施設関連)や介護施設の安全性確保、ネットワーク構築、情報システム基盤の構築に最適な、抗菌仕様LAN用ツイストペアケーブルです。

3. 特長

- ・外被材料(鉛フリーPVC)に抗菌剤を配合しており、細菌の増殖を抑制します。
- ・JIS Z 2801「抗菌加工製品-抗菌性試験方法・抗菌効果」を準用した抗菌性能試験(1/50濃度普通ブイヨン培地を使用)において、抗菌活性値2.0以下(細菌の増殖割合が無加工製品の1/100以下)を満足します。
- ・一般社団法人抗菌製品技術協議会(SIAA)が定める3つの基準(抗菌性・安全性・適正な表示)を満たしており、抗菌のシンボルマークである「SIAAマーク」の表示が可能な製品です。
- ・Cat.5e～Cat.6A(UTP, ScTP)まで対応可能です。

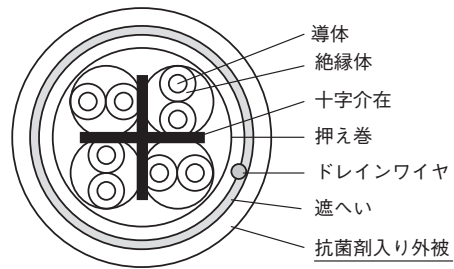


図2 ケーブル断面図(例: FS-TPCC® 6A (抗菌))



- 無機抗菌剤・練込 ← 抗菌剤の種類・加工方法
- 外被 ← 抗菌加工している場所
- JP0112281A0001R ← SIAA登録番号

SIAAマークは、抗菌製品技術協議会ガイドラインで品質管理・情報公開された製品に表示されています。

図3 SIAAマーク

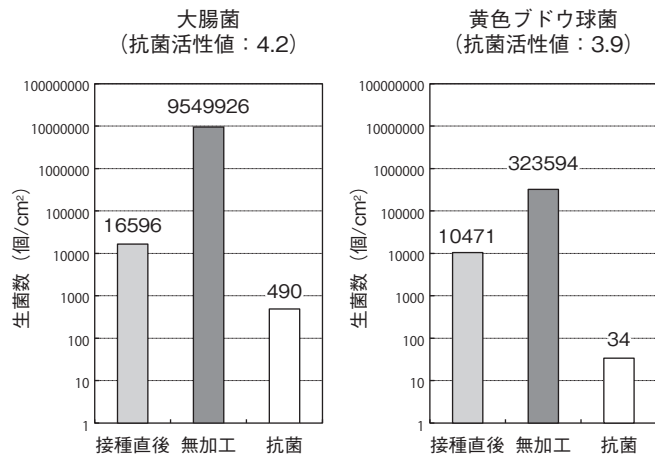


図4 抗菌性能試験結果(耐水区分2(水温50±5°C, 浸漬時間16hr))

TPCCは富士電線株式会社の登録商標です。

問合せ先: 〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目18番13号 (内神田中央ビル2階)

富士電線(株) 営業本部 営業企画部

電話(03)5217-0911 FAX(03)5217-0920

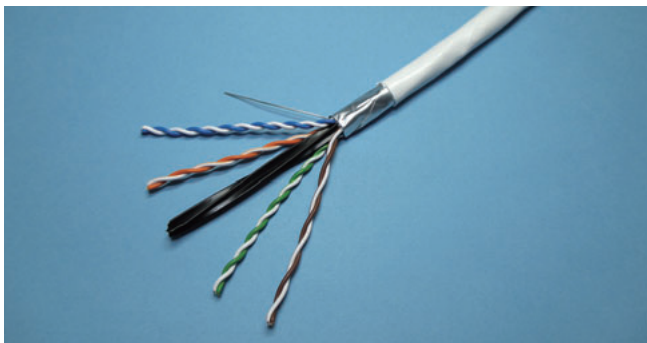


図1 抗菌仕様LANケーブル(例: FS-TPCC® 6A (抗菌))



屋外用小勢力回路用耐熱電線 (EM-HFA®-LAP)

Outdoor Type Heat Proof Instrumentation Cable “EM-HFA-LAP”

1. 概要

従来、消防用ケーブルについて、水の影響がある場所への敷設に対しては、全てコルゲートシースケーブルを推奨してきました。

しかし、コルゲートシースケーブルは、価格、納期、また取扱い性の面でお客様に負担を強いることから、防滴レベルの要求に対応する製品として、より安価で短納期対応が可能、かつ取扱い性に優れた屋外用ケーブル (LAP シースケーブル) の開発を行いました。

2. 用途

防災設備配線で、耐熱性能を必要とする小勢力回路において、屋外や管路といった水等の影響が懸念される場所に適した屋外用の小勢力回路用耐熱電線 (60 V 以下) です。

3. 特長

- (1) 通常の耐熱電線にアルミラミネートテープを施したことで防滴性能を付加したケーブルです。
- (2) 通常のケーブルシースの上から LAP シースを施した構造となっているため、LAP シースを除去しても通常のケーブルとして使用できます。
- (3) 防滴性能に優れるため、水の影響が懸念される場所への配線に使用できます。
- (4) 耐熱性能は、登録認定機関 (JCT) で行う、認定試験に合格した認定品です。
- (5) シース材料には、ポリオレフィン系材料を使用しており、燃焼しても有害なハロゲン系ガスを発生しません。

表 1 耐水特性面から見たシース構造選定の目安^{*)}

雨水等の影響		シース構造
屋内	影響無し	ビニル (PVC)
		耐燃性ポリエチレン (FR-PE)
屋外	影響が少ない	ポリエチレン (PE)
	影響が考えられる	ラミネートシース (LAP)
	直埋・常時浸水	コルゲートシース (MA)

着色部：当該ケーブルを示します。

*)：日本電線工業会 技術資料 技資第 117 号 A



図 1 屋外用小勢力回路用耐熱電線 (EM-HFA®-LAP)

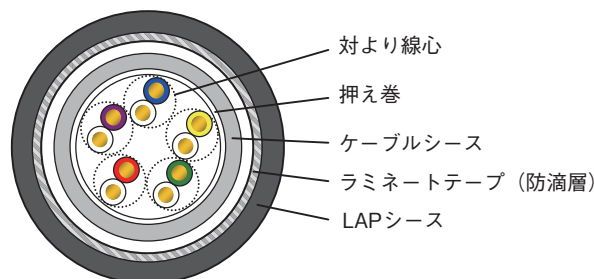


図 2 ケーブル断面図 (例：5P ケーブル)

HFA は富士電線株式会社の登録商標です。

表 2 ケーブル仕様

サイズ：1.2 mm の場合

項目	EM-HFA®-LAP		
	1.2 mm×3P	1.2 mm×5P	1.2 mm×10P
シース (外被)	黒色耐燃 PE		
仕上外径 (約)	14.5 mm	16.5 mm	18.5 mm
概算質量	180 kg/km	245 kg/km	380 kg/km

問合せ先：〒101-0047 東京都千代田区内神田1丁目18番13号
(内神田中央ビル2階)

富士電線(株) 営業本部 営業企画部

電話(03)5217-0911 FAX(03)5217-0920



高耐熱自己融着極細平角線

Heat Resistance and Self-bonding Extra Fine Flat Enamelled Wire

1. 概要

(株)ユニマックでは、丸線径 $\phi 0.45 \sim 1.7$ mm 相当の断面積を有する細物平角線を製造しています。さらに、細物平角線よりも細い丸線径 $\phi 0.08 \sim 0.30$ mm 相当の極細平角線を開発、量産してきました。

近年、電子機器の高性能・小型化が進んでおり、巻線への極細サイズ化の要求が高まっています。特に多機能携帯機器（スマートフォン、タブレット等）は需要拡大を背景に、巻線の使用量が増加傾向にあります。コイル加工の際に求められる巻線への要求特性として、従来の可とう性と密着性に加え、新たに耐熱性が求められてきています。

そこで当社では、極細平角線でこれまでの耐熱皮膜であるポリアミドイミド（耐熱 220℃クラス）より耐熱性の高いポリイミド（耐熱 240℃クラス）を使用した自己融着極細平角線を開発しました。

2. 用途

スマートフォンやタブレット、電子機器（ノート PC やデジタルカメラなど）に使用されるインダクタコイル。

3. 特長

- ・耐熱性および可とう性、密着性全てを満足する極細平角線です。
- ・高耐熱性を有しながら小さな曲げ径でのコイル加工でも皮膜割れを起こさず、加熱処理後のコイル形状を維持できる密着性を有します。
- ・フラット部、エッジ部いずれも均一な皮膜を形成でき、電気絶縁性も良好です。
- ・標準絶縁皮膜厚は 0.005 mm ですが、0.010 mm 程度までの厚膜化も可能です。

表 1 構造、特性例

特性	従来品 SFT-BA-NV	開発品 SFT-BI-NV
サイズ mm	0.025×0.25	
絶縁皮膜厚 mm	0.005	0.005
ボンド厚 mm	0.002	0.002
耐熱性	220℃クラス	240℃クラス
可とう性	○	○
密着性	○	○
ピンホール 個 /5 m	0	0
絶縁破壊電圧 V	800	800



図 1 製品断面

問合せ先：〒406-0003 名古屋市中区錦1-13-26

(名古屋伏見スクエアビル6F)

株式会社ユニマック 西日本営業グループ

電話(052)219-8160 FAX(052)201-9556



盤内配線用 EM-TNC の電線色黄色の追加

Addition of Yellow Wire to Lead Wire in the Panel “EM-TNC”

1. 概要

盤内配線・口出線用の電線として、当社では可とう性及び耐熱性に優れた架橋ポリエチレンを絶縁体に使用した EM-TNC の製造・販売を行っています。盤内配線で多く使用する黄色のニーズがあり、性能はそのままにした黄色の EM-TNC を開発し販売することとしました。

2. 用途

主として配電盤や制御盤等の盤内配線、及び発電機、電動機及びその他の電気機器等の口出線として用います。

また、黒色は JRIS (日本鉄道車両工業会) 規格にも対応しているため、鉄道車両用 (WL/HFWL) としても使用することが可能です。

3. 特長

本製品の特長は下記の通りです。

(1) 盤内配線用に電線色黄色にも対応^{*1}

JEM 1122「配電盤・制御盤の盤内低圧配線用電線」では、一般用には黒又は黄色の電線を使用することとなり、黄色の電線の需要があることから、EM-TNC の黄色をラインナップしました。

*1 JRIS 規格は黒色のみの対応 (WL 表示なし)。

その他の特長につきましては、従来の黒色 EM-TNC と同等となります。

(2) 耐熱性に優れる

耐熱温度は非常に高く、120℃^{*2}まで耐えられます。そのため、許容温度が大きく、導体のサイズダウンが望めます。

*2 120℃は CMJ 暫定登録中 (登録 No.Z118AC0801)。

表 1 許容電流比較 (一例)

製品 (許容温度)	600 V EM-TNC (120℃ ^{*2})	IV (60℃)
2 mm ²	44	22
8 mm ²	100	50
38 mm ²	265	133
100 mm ²	485	244
200 mm ²	760	385
325 mm ²	1055	533

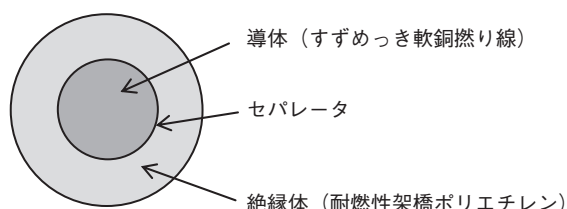


図 1 EM-TNC 断面図



図 2 EM-TNC 外観

(3) 柔軟性が良好

許容曲げ半径が 4D^{*3} (電線固定時) であり、狭い盤内などの取り回しに有効です。

*3 D: 仕上外径

(4) 剥ぎ取り性が良好

ワイヤーストリッパーでの剥ぎ取りが良好なため、作業性の向上が望めます。

問合せ先: 〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
昭和電線ケーブルシステム(株)
産業電線営業部 第1営業グループ
電話(03)5404-6972 FAX(03)3436-2592



トンネル分岐用コネクタ ショウタッチ® の改良

Improvement of Connector for Tunnel Lighting “Showtouch”

1. 概要

昭和電線ケーブルシステム(株)と行田電線(株)は、高速道路等のトンネル照明用のケーブルとして分岐ケーブル（ショウブランチ®L）、分岐線の端末用コネクタとしてショウタッチ®を開発し、10年間製造してきました。

お客様からのご意見を取り入れ、作業の正確性、確実性を向上させたショウタッチ®をリリースしました。

2. 用途

トンネル照明用の分岐線の端末コネクタとして使用されます（図1）。現場作業時間の短縮、長期間にわたる品質維持が可能な点、LED照明でのコネクタ仕様標準化などの影響で、コネクタの需要は高まっています。

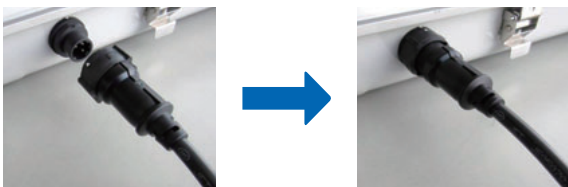


図1 ショウタッチ®取付例

3. 特長

従来のショウタッチ®と比べ、下記の改良を行いました。

①剛性向上

ロック部の溝（図2）、照明器具取付部のネジ（図3）の剛性を向上させました。過剰な力が加えられても変形せず、より安定した施工品質が確保できます。



図2 ロック部の溝

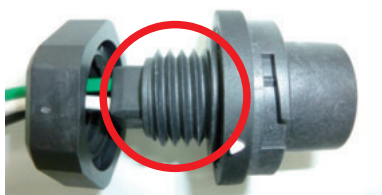


図3 照明器具取付部のネジ

②電気特性の向上

コネクタかん合部に凹凸を設けることにより、耐電圧特性を向上させました（図4）。



図4 かん合部 凹凸追加

③作業性向上

コネクタの正面に突起を追加し、トンネル内の暗所でも挿入方向が判別しやすくなりました。またロック部品を右回転させるとロック完了時にはクリック感があり、白色△印が重なるので、より確実なかん合が可能となりました（図5）。

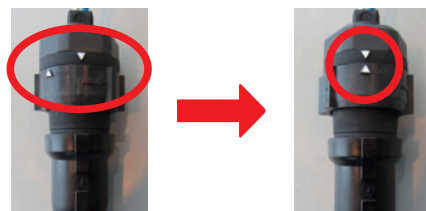


図5 表示追加（左：ロック前、右：ロック完了）

④調光回路用の灰色コネクタ追加

電源回路と調光回路を識別可能とするため、調光回路用の灰色コネクタをラインナップに追加しました（図6）。

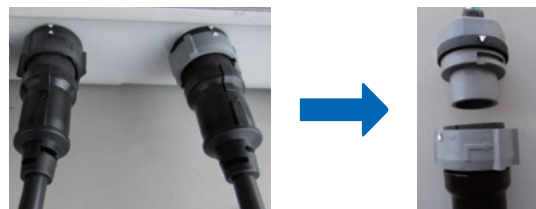


図6 左：黒色（電源回路用） 右：灰色（調光回路用）

※ 注意点

従来品と新設計品の互換性はありません。

直付タイプの灯具にあける穴は、従来品と新設計品で共通ですので、コネクタ一式を交換することは可能です。

ショウブランチ、ショウタッチは昭和電線ケーブルシステム(株)の登録商標です。

問合せ先：〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)

昭和電線ケーブルシステム(株)

営業本部 開発営業部

電話(03)5404-6964 FAX(03)3436-2582



原子力用ケーブル向け EP ゴム絶縁体の耐熱寿命向上

Heat Life Improvement of EP Rubber Insulator for Nuclear Power Cable

1. 概要

近年、震災等の影響から原子力発電所に使用するケーブルにおいて、より優れた耐熱寿命が求められています。当社では絶縁体を使用する難燃性 EP ゴム材料を改良し、従来品と比較し大幅に耐熱寿命を向上させました。

2. 用途

原子力発電所建屋内部に布設される難燃性 EP ゴム絶縁体を用いたケーブル全般に使用します。ケーブルの種類は、FR-PN 等の動力用ケーブルや FR-CPN 等の制御用ケーブル、WCC-FR-PN-S 等の補償導線、FR-KMPN-S 等の計装用ケーブルになります。

3. 特長

本材料を使用したケーブルの特長は下記の通りです。

- (1) 耐熱寿命が大幅に向上
難燃性 EP ゴム絶縁体について、配合剤の種類、組合せ、添加量を見直しました。その結果、熱・放射線による同時劣化試験において、寿命を従来品の倍以上に向上させています。
- (2) 高難燃性を有する
本難燃性 EP ゴムを使用したケーブルは、IEEE 1202 垂直トレイ試験及び UL 1581 (VW-1) 一条燃焼試験に合格しており、高難燃性に優れたケーブルとなっています。

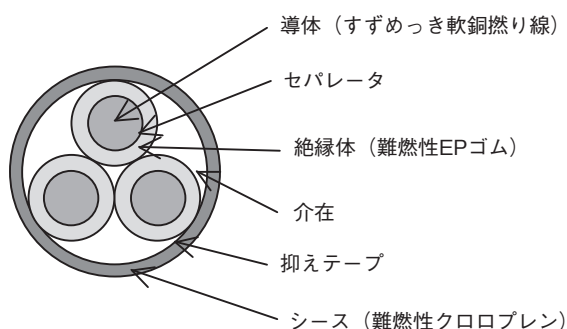


図1 製品構造例 (FR-PN 3心)

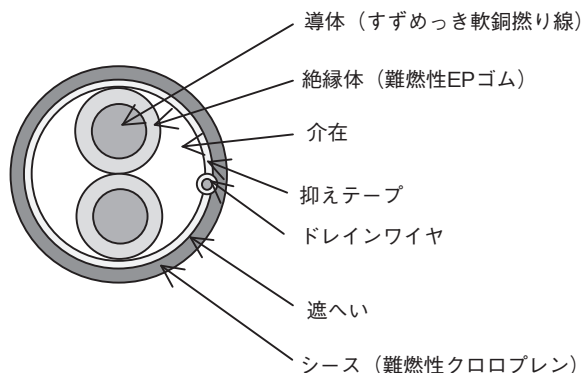


図2 製品構造例 (FR-KMPN-S 2心)

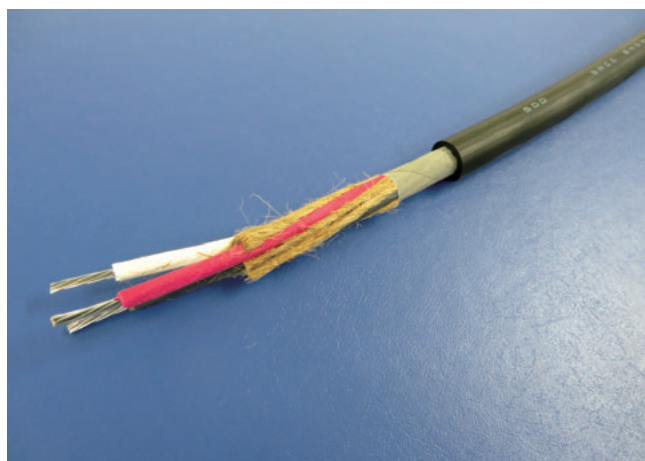


図3 製品外観 (FR-PN)

問合せ先：〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
昭和電線ケーブルシステム(株)
電機・情報システム営業部 産業・交通システムグループ
電話(03)5404-6968 FAX(03)3436-2583



産業用イーサネットケーブルのULリスティング認証取得

The Acquisition of UL Listing Certification for Industrial Ethernet Cable

1. 概要

当社は産業用オープンネットワークに使用される Category 5e に対応した高速イーサネットケーブル FAE-5002 (22AWG×2P) において、UL 444 及び CSA C22.2 NO.214 に適合した Communicatins Cables Type CM 規格 (温度定格: 90℃) を取得し、製品ラインナップしました。

2. 用途

FA (Factory Automation) や PA (Process Automation) 分野における PLC (Programmable Logic Controller, 制御装置) 間及び PLC 上位層間等のイーサネット配線に適しています。

3. 特長

- (1) ANSI/TIA-568-C.2, Category 5e に対応した伝送特性を持つケーブルです。ケーブル構造及び仕様を表 1 に、断面図を図 1 に示します。
- (2) 産業用シールド付 RJ45, M-12 コネクタに適合します。
- (3) UL 1685, IEEE 383 の垂直トレイ燃焼試験に合格します。
- (4) 二重遮へい構造のため耐ノイズ性が良好です。
- (5) RoHS に適合した鉛フリーの耐油耐熱ビニルをシースに使用しています。
- (6) NFPA70, NFPA79^{*1)} に従い、ケーブル単体で製品として配線可能です^{*2)}。

*1) NFPA70, NFPA79: アメリカ防火協会 (National Fire Protection Association) 規格。

*2) UL 758 AWM 規格で認証されたケーブルは、UL リスティング規格認証された最終製品の一部品として使用されますが、UL リスティング規格認証されたケーブルは単体で最終製品として使用が許されます。

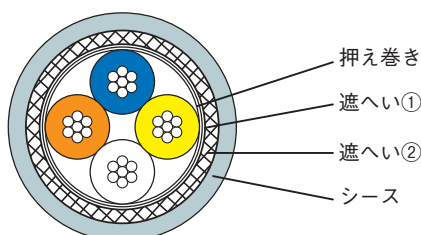


図 1 ケーブル断面図

表 1 ケーブル構造, 仕様

項目		仕様	
導体	サイズ	22AWG (7本 / 0.26 mm)	
	材質	軟銅線	
絶縁体	材質	ポリエチレン	
	標準外径 (mm)	1.50	
各対色別	対番号	1	2
	第一種心線	青	黄
	第二種心線	白	橙
遮へい①		アルミポリエステルテープ	
遮へい②		錫めっき軟銅線編組	
シース	材質	耐油耐熱ビニル	
	標準外径 (mm)	6.3	
最大導体抵抗 (Ω/km)		9.38	
導体抵抗不平衡 (%)		5 以下	
静電容量 (nF/100 m)	1 kHz	5.6 以下	
静電結合 (pF/100 m)	1 kHz	330 以下	
特性インピーダンス (Ω)	1 ~ 100 MHz	100±15	
	1 ~ 10 MHz	20+5log(f) 以上	
	10 ~ 20 MHz	25 以上	
リターンロス (dB)	20 ~ 100 MHz	25-7log(f/20) 以上	
	1 ~ 100 MHz	1.967√f+0.023f+0.050/√f 以下	
挿入損失 (dB/100 m)	1 ~ 100 MHz	1.967√f+0.023f+0.050/√f 以下	
近端漏話減衰量 (dB)	1 ~ 100 MHz	35.3-15log(f/100) 以上	
電力和近端漏話減衰量 (dB)	1 ~ 100 MHz	32.3-15log(f/100) 以上	
遠端減衰対漏話比 ACRF (dB/100 m)	1 ~ 100 MHz	23.8-20log(f/100) 以上	
電力和遠端減衰対漏話比 PSACRF (dB/100 m)	1 ~ 100 MHz	20.8-20log(f/100) 以上	
伝播遅延時間 (ns/100 m)	1 ~ 100 MHz	534+(36/√f) 以下	
伝搬遅延時間差 Skew (ns/100 m)	1 ~ 100 MHz	45 以下	



図 2 製品外観

問合せ先: 〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
 昭和電線ケーブルシステム(株)
 営業本部 開発営業部
 電話(03)5404-6966 FAX(03)3436-2573



防火層付き塗布型制振材シヨウダンプ® NH-5 の日本海事協会承認取得

Nippon Kaiji Kyokai Approval Acquisition of Damping Material with Fire Protect Layer “SHOWDAMP NH-5”

1. 概要

2012年、国際海事機関（IMO）にて開催された第91回海上安全委員会（MSC91）において、海上における人命の安全のための国際条約（SOLAS条約）に規定されている船内騒音コードの改正が採択されました。

SOLAS 船内騒音コード改正概要

- ・適用対象船舶：総トン数1600トン以上の船舶は、義務コードとして適用（強制）※従来は奨励
- ・総トン数1600トン未満の新造船、現存船については、コードの要件に適合することを奨励（非強制）
- ・総トン数10000トン以上の船舶の居住区域については、現行コードより一律5 dB低い値へ強化
- ・居住区域の隔壁 防音特性の強化
- ・適用 ①2014年7月1日以降の建造契約
②2015年1月1日以降の起工（建造契約がない場合）
③2018年7月1日以降の引渡し
のいずれか該当する新造船。

本コードの改正に伴い、制振材の需要は従来の特定の船舶（艦船、巡視艇、各種調査船等）を中心とした限られたものから、一般商船を含む幅広いものに変化していくことが予想されます。そこで、従来のNH-2、NH-3より施工自由度、材料保管方法、コスト面において汎用性を高めたシヨウダンプ®NH-5を開発し、防火用材として国土交通省（JG）の型式承認に加えて、日本海事協会（NK）の型式承認を取得しました。

2. 用途

船体の壁、床に塗布することで鋼板を伝わる振動を減衰させ、固体伝搬音を抑制します。これにより、居室の騒音低減に効果を発揮します。

3. 構成

(A) 制振材

主成分 主 剤…エポキシ樹脂
硬化剤…ポリアミドアミン
混合比（質量比）主剤：硬化剤 = 2：1
比 重 1.4

(B) 防火層

耐熱グラスフェルト、アルミ箔の積層構造

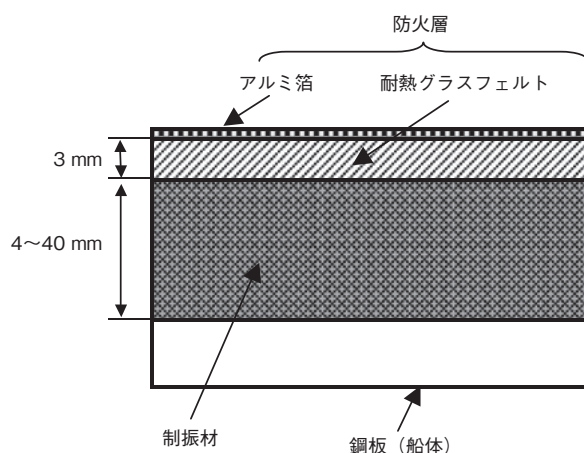


図1 防火層付き塗布型制振材「NH-5」構成図

4. 特長

1. 100～5000 Hzの幅広い周波数範囲にわたり、優れた振動減衰性能を有しております。
2. 塗布型であるため、凹凸や曲面にも施工が可能です。
3. 鋼板（船体）の厚さに応じた制振材厚さで施工することができます。
4. 床に施工する場合、表面の仕上げ材料を防火層の上に施工することができます。
5. 主剤・硬化剤とも「指定可燃物・可燃性固体」となり、消防法による保管数量制限が従来品よりも軽減されます。
6. 次の船級承認を取得しております。

国土交通省（JG）表面仕上材
（上張り材）型式承認番号 第F-524号
（一次甲板床張り材）型式承認番号 第F-524号
日本海事協会（NK）
（難燃性上張り材）認定番号 15FPA11CV
（一次甲板床張り材）認定番号 15FPA12DC

シヨウダンプは昭和電線ケーブルテクノロジー(株)の登録商標です。

問合せ先：〒105-6012 東京都港区虎ノ門4-3-1(城山トラストタワー)
昭和電線デバイステクノロジー(株)
営業部 制振制音営業課
電話(03)5404-6983 FAX(03)3436-2587

社外技術発表一覧表

(2015. 11 ~ 2016. 10)

[光ファイバ応用技術研究会(OFT)]

(2015年12月11日)

医療機器向け光アクティブケーブルの開発

…………… 田邊賢吾¹⁾, 佐野義昭²⁾, 鈴木修司²⁾, 村瀬知丘¹⁾,
金子貴皇¹⁾

[平成28年 電気学会全国大会]

(2016年3月16日~18日)

硫化銅など銅化合物による課電劣化における
絶縁油中への銅溶解について (その2)

…………… 川井二郎¹⁾, 中出雅彦³⁾, 松井健郎³⁾

[平成28年 電気学会全国大会 シンポジウム]

(2016年3月16日~18日)

昭和電線における超電導線材の開発状況

…………… 小泉 勉¹⁾, 広長隆介¹⁾, 中村達徳¹⁾, 高橋保夫¹⁾,
引地康雄¹⁾, 長谷川隆代¹⁾

[日本電設工業協会 月刊 電設技術]

(2016年3月号)

電力線による誘導障害

…………… 野中健司¹⁾

並行多回線における各線での電流不平衡

…………… 外館孝昭¹⁾

(2016年8月号)

固体伝搬(騒音・振動)の遮断対策 防振装置及び浮床

…………… 三宅清市⁴⁾

コンサートホールの施工 電気室からの騒音

…………… 三宅清市⁴⁾

[2016年度日本建築学会大会(九州)]

(2016年8月24日~26日)

水平ねじり回転が積層ゴムの水平性能に与える影響

…………… 佐藤敬昇⁴⁾, 加藤直樹⁴⁾, 柿澤雅彦⁴⁾,
中島 徹⁵⁾, 中村俊之⁵⁾

錫プラグ入り積層ゴムの水平二方向加振試験

その1: 楯円加振および真円加振

…………… 清水美雪⁴⁾, 福田滋夫⁴⁾, 鈴木良二⁶⁾, 安永 亮⁷⁾,
古橋 剛⁸⁾

錫プラグ入り積層ゴムの水平二方向加振試験

その2: 地震応答波加振

…………… 齊木健司⁶⁾, 朴 紀衍⁶⁾, 清水美雪⁴⁾, 安永 亮⁷⁾,
古橋 剛⁸⁾

不整形免震構造校舎の地震応答特性

その1 地震応答観測及び常時微動計測による検討

…………… 片岡奨太⁹⁾, 山下聡史⁴⁾, 隈澤文俊⁹⁾

不整形免震構造校舎の地震応答特性

その2 常時微動計測及び応答解析による高次振動モードの分析

…………… 山下聡史⁴⁾, 片岡奨太⁹⁾, 隈澤文俊⁹⁾

免震用オイルダンパーに接続する不感帯機構の開発

その1 不感帯機構の概要と地震応答解析

…………… 得能将紀¹⁰⁾, 太田行孝¹⁰⁾, 稲井慎介¹⁰⁾,
露木保男¹¹⁾, 安藤智紀¹¹⁾, 三須基規⁴⁾, 加藤直樹⁴⁾,
白井宏和⁴⁾

伝統構法による新築木造五重塔の鉛直変位の測定

…………… 佐藤信夫¹²⁾, 花里利一¹³⁾, 内田龍一郎¹⁴⁾, 三須基規⁴⁾,
坂本 功¹⁵⁾

風揺れに対する長時間振動と長周期地震動における

高摩擦弾性すべり支承性能変化

…………… 柿澤雅彦⁴⁾, 加藤直樹⁴⁾, 福田滋夫⁴⁾, 三須基規⁴⁾

杭頭回転角を考慮した免震部材の構造性能

その3 弾性すべり支承の傾斜付水平加力試験

…………… 原 博¹⁶⁾, 樋渡 健¹⁶⁾, 土田亮章¹⁷⁾, 牧田敏郎¹⁸⁾,
山崎康雄¹⁹⁾, 中岡章郎²⁰⁾, 三須基規⁴⁾, 小林正人²¹⁾

[2016 Applied Superconductivity Conference (ASC2016)]

(2016年9月4日～9日)

New Controlling Process for Size and Distribution of Nanoparticles
in Coated Conductors Fabricated by TFA-MOD

…………… Teruo Izumi^{22), 23)}, Koichi Nakaoka^{24), 22)},
Kazunari Kimura^{24), 22)}, Takato Machi^{24), 22)},
Ryuji Yoshida²⁵⁾, Takeharu Kato²⁵⁾,
Yuh Shiohara^{24), 22)}

Development of 22kV HTS Triaxial Superconducting Bus

…………… Kazuhisa Adachi¹⁾, Hideo Sugane¹⁾,
Wang Tianlong¹⁾, Hiroki Ohnishi¹⁾,
Shigeki Sano¹⁾, Kei Shiohara¹⁾,
Tasuku Kitamura¹⁾, Nobuhiro Mido¹⁾,
Takayo Hasegawa¹⁾, Masayuki Konno²⁶⁾,
Masataka Iwakuma²⁷⁾

Scaling law of ac loss in stacked REBCO superconducting tapes
with temperature

…………… T. Ueno²⁷⁾, M. Iwakuma²⁷⁾, K.Yun²⁷⁾,
Kazuhisa Adachi^{1), 27)}, K. Yoshida²⁷⁾, S. Sato²⁷⁾,
Teruo Izumi^{22), 23)}, A. Ibi²²⁾

[電気学会 電力・エネルギー部門大会]

(2016年9月7日～9日)

154kV ダイレクトモールド気中終端接続部の開発

…………… 李 鋒¹⁾, 今西 晋¹⁾, 新井敦宏¹⁾, 伊藤一己¹⁾

[2016年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会]

(2016年9月20日～23日)

医療機器向け光アクティブケーブルの開発

…………… 田邊賢吾¹⁾, 佐野義昭²⁾, 鈴木修司²⁾, 村瀬知丘¹⁾,
金子貴皇¹⁾

- 1) 昭和電線ケーブルシステム株式会社
- 2) ヒロセ電機株式会社
- 3) 東京電力株式会社
- 4) 昭和電線デバイステクノロジー株式会社
- 5) 大成建設株式会社
- 6) 株式会社免制震デバイス
- 7) 住友金属鉱山シボレックス株式会社
- 8) 日本大学
- 9) 芝浦工業大学
- 10) 戸田建設株式会社
- 11) カヤバシステムマシナリー株式会社
- 12) 松井建設株式会社
- 13) 三重大学
- 14) 内田建築構造コンサルタント
- 15) 東京大学
- 16) 東亜建設工業株式会社
- 17) 青木あすなる建設株式会社
- 18) 株式会社安藤・間
- 19) 西松建設株式会社
- 20) 株式会社長谷工コーポレーション
- 21) 明治大学
- 22) 産業用超電導線材・機器技術研究組合
- 23) 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- 24) 公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
- 25) 非営利・一般財団法人ファインセラミックスセンター
- 26) 富士電機株式会社
- 27) 九州大学

昭和電線グループ会社アドレス

昭和電線ホールディングス株式会社 〒105-6013 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)

■直轄事業子会社(連結)

昭和電線ケーブルシステム株式会社 〒105-6012 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)
昭和電線デバイステクノロジー株式会社 〒105-6012 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)
昭和電線ビジネスソリューション株式会社 〒105-6013 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)
富士電線株式会社 〒259-1146 神奈川県伊勢原市鈴川110番地
株式会社ダイジ 〒567-0012 大阪府茨木市東太田三丁目7番7号
株式会社SDS 〒105-6008 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)
株式会社アクシオ 〒105-6008 東京都港区虎ノ門四丁目3番1号(城山トラストタワー)
株式会社ユニマック 〒511-0427 三重県いなべ市北勢町麻生田1326番地の1

■その他事業子会社(連結)

青森昭和電線株式会社 〒038-0031 青森県青森市大字三内字丸山394番地105
株式会社エステック 〒210-0852 神奈川県川崎市川崎区鋼管通四丁目13番12号
昭光機器工業株式会社 〒143-0002 東京都大田区城南島四丁目3番4号
株式会社昭和サイエンス 〒140-0011 東京都品川区東大井五丁目12番10号(大井朝陽ビル)
昭和リサイクル株式会社 〒252-0253 神奈川県相模原市中央区南橋本四丁目1番1号
多摩川電線株式会社 〒989-2111 宮城県亶理郡山元町坂元字堤入32番地1
株式会社ロジス・ワークス 〒210-0843 神奈川県川崎市川崎区小田栄二丁目1番1号
SWCC SHOWA (VIETNAM) CO., LTD. Plot B8, Thang Long Industrial Park, Dong Anh Dist., Hanoi, Vietnam
嘉興昭和機電有限公司 中国浙江省嘉興市中環西路2121号
昭和電線電纜(上海)有限公司 中国上海市長寧区仙霞路137号 盛高国際大廈2501室
天津昭和漆包線有限公司 中国天津市西青経済開発区賽達世紀大道10号
東莞昭和機電有限公司 中国広東省東莞市莞龍路段獅龍路 莞城科技园
福清昭和精密電子有限公司 中国福建省福清市融僑技術開發区(清華路南側)
香港昭和有限公司 香港九龍尖沙咀科学館道1号康宏広場南座701室

■その他のグループ会社

エヌエスティ・グローバルリスト株式会社 〒171-0014 東京都豊島区池袋二丁目43番1号(池袋青柳ビル4F)
株式会社ケイ・エス・デー 〒813-0034 福岡県福岡市東区多の津一丁目1番3号
SWCC SHOWA (S) PTE. LTD. 64, Sungei Kadut Street 1, Singapore 729365
愛科秀(上海)信息技術有限公司 中国上海市普陀区中江路879号天地軟件園17棟4楼
華和工程股份有限公司 台湾高雄縣仁武郷高楠公路30号 華榮電線電纜股份有限公司 高楠廠内
特変電工昭和(山東)電纜附件有限公司 中国山東省新泰市新汶工業園区
富通昭和線纜(杭州)有限公司 中国浙江省杭州富陽区富春街道金秋大道富通科技园9号楼
富通昭和線纜(天津)有限公司 中国天津市滨海新区滨海科技园惠新路399号

昭和電線 レビュー

第62巻 (通巻118号)

昭和電線レビュー編集部会

部会長 長谷川 隆代
委員 西岡 淳一 横溝 博次
森下 裕一 足田 靖成
鴨狩 之裕 稲庭 康之
岡下 稔 秋谷 安司
野地 悠 舘山 雄一
秋葉 拓也 森 純一朗
香月 史朗 長谷川 聡
内田 順之 生方 通夫
(順不同)

編集・発行人 舘山 雄一

発行 2016年12月

発行所 昭和電線ホールディングス株式会社
〒105-6013
東京都港区虎ノ門四丁目3番1号

制作 株式会社栄光舎

[禁断転載・複製]

©2016 SWCC SHOWA HOLDINGS CO.,LTD.



昭和電線ホールディングス株式会社 / SWCCグループの持株会社

昭和電線ケーブルシステム株式会社 / 電線・ケーブル、電力機器部品、光ファイバケーブルの総合メーカー

昭和電線デバイステクノロジー株式会社 / 精密デバイス、免震装置、振動制御機器

昭和電線ビジネスソリューション株式会社 / e-ソリューション

富士電線株式会社 / LANケーブル、消防用電線、通信ケーブル、ビニル電線

株式会社ダイジ / 機器用電線、ワイヤハーネス

株式会社SDS / SWCCグループの総合商社

株式会社アクシオ / ネットワークソリューション

株式会社ユニマック / エナメル線、横巻線