

対地30kV同軸架橋ポリエチレン電力ケーブル および付属品の開発

Development of 30kV Co-axial Type Cross-linked Polyethylene Insulated Power Cable and Accessories

This report deals with the development of a 30 kV (voltage to ground) coaxial type cross-linked polyethylene power cable and its accessories. This cable has been planned for use in supplying power to the railway networks around Tokyo which are expected to face severe power shortage when Tohoku and Joetsu Shinkansen lines are completed. Its interior and outer conductors are connected to trolley and rail respectively. In spite of the complexity of construction that combines AC 30 kV and 6 kV systems the trially manufactured cable gave very satisfactory performance in the tests.

大槻国秋* Kuniaki Ôtsuki
小野寺忠** Tadashi Onodera
竹内義夫*** Yoshio Takeuchi
寺崎治雄**** Haruo Terasaki
市毛敏明***** Toshiaki Ichige
森屋克男***** Katsuo Moriya

Ⅰ 緒 言

現在、東海道新幹線のき電方式は吸上変圧器（ブースター変圧器：以下BTと略す）方式であり、電車線～軌条間電圧の交流30kV電源は変電所より架空線で供給されている。しかし、東北、上越新幹線開通に伴う東京駅付近のき電系統の新設区間は過密都市部を横断することになるので、従来の架空線では電力を供給することが困難であり、ケーブルを採用せざるを得ない状況となっている。ケーブルとした場合、電車線および軌条用として各30kV、6kVのケーブルが必要となって、単心2条方式あるいは同軸電力ケーブル方式が考えられる。表1はこれら2方式の比較を示すものであるが、同軸電力ケーブルは次のようなすぐれた特長を有するので、上記BT方式へのフィーダ線として採用されることになった。

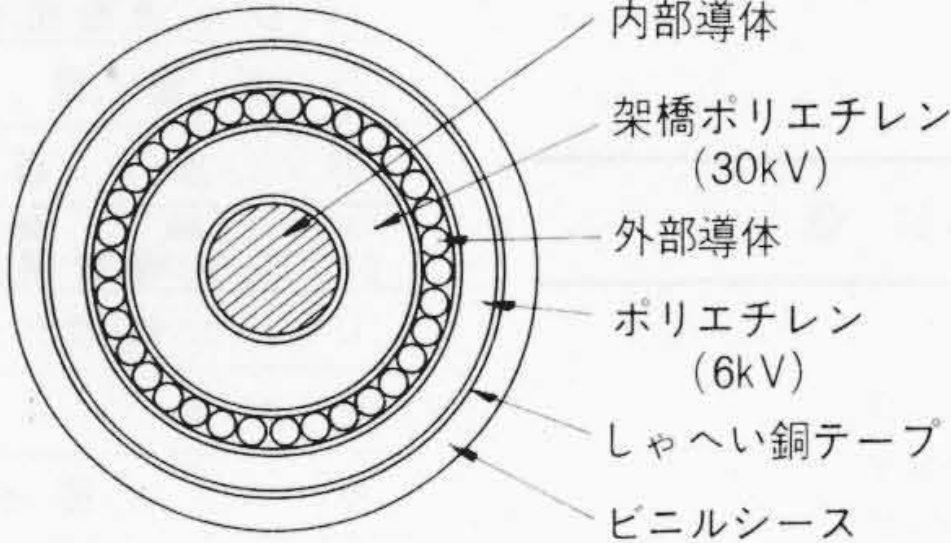
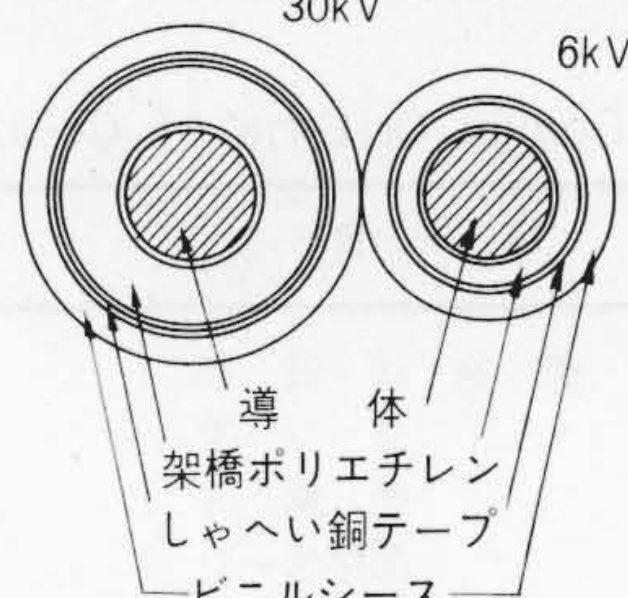
- (1) リアクタンスが小さいために電圧降下が少ない。
- (2) シャーヘイ層誘起電圧がゼロであるので自由に接地をとることができ、長尺布設に適する。
- (3) 隣設する通信回線への誘導障害がない。
- (4) 布設条数が1/2となるので、布設スペースが小さくて済む。

同軸ケーブルは通信ケーブルの分野で広く採用されているが、電力ケーブルとしては東海道新幹線のBT引出線にごくわずかに使用されている程度であって、フィーダとしての同軸電力ケーブルの適用例はわが国においては初めてである。また諸外国の例を見てもイギリス交流鉄道（25kV）においてその例⁽¹⁾⁽²⁾が見られる程度である。

本稿は、同軸架橋ポリエチレン電力ケーブルおよび付属品の開発経過について述べたものである。

表1 対地30kV架橋ポリエチレンケーブル総合比較 同軸形ケーブルおよび単心2条方式を総合比較の結果、対地30kV同軸形ケーブルが選択された。

Table 1 Comparison between Co-axial Cable and Two-Single Conductor Cable

比較項目		同軸電力ケーブル	単心ケーブル2条
ケーブル構造 (导体サイズ1,000mm ²)			
ケーブル外径 (mm)		105	79(30kV), 57(6kV)
ケーブル重量 (kg/m)		25.5	13.5(30kV), 10.7(6kV)
許容電流 (A)	空中布設 (2回線)	1,140	1,310
	管路布設 (2回線)	840	960
インダクタンス (mH/km)		0.19	0.61
シャーヘイ銅テープ誘起電圧 (V/km/kA)		0.0	49.8

* 日本国有鉄道東京給電管理局長 ** 日本国有鉄道仙台鉄道管理局電力課長 *** 日本国有鉄道電気局電力第2課
**** 日立電線株式会社本社 ***** 日立電線株式会社日高工場

2 設計条件および問題点

表2は、同軸電力ケーブルの基本的な設計条件を示したものである。ここで内部絶縁は電車線と軌条間の絶縁、外部絶縁は軌条とアース間の絶縁をそれぞれ示している。軌条の電位は通常常時電源端でも400V以下程度であるが、事故時の異常電圧上昇に対し電源側で5kVの放電ギャップを通して接地していること、さらには電車線側、電源側の各機器の絶縁が6号絶縁で統一されていることから同軸電力ケーブルの外部絶縁は6号絶縁とすることになった。

同軸電力ケーブルおよび付属品の開発にあたっての問題点は次のとおりであった。以下これらの検討結果について述べる。

- (1) ケーブル外部導体（銅線横巻き）の作業性の把（は）握
- (2) 外部絶縁体材質の検討
- (3) 付属品における外部導体の接続法および外部6号絶縁の処理方法
- (4) ケーブルの布設特性、温度上昇特性、インピーダンス特性などの諸特性の確認

3 ケーブル

同軸架橋ポリエチレン電力ケーブルの開発実用化のために導体サイズ600mm²を試作した。ここでは試作ケーブルの結果、さらには納入品（導体サイズ1,000mm²）で得た特性について述べる。図1は、納入品の外観を示すものである。

3.1 ケーブル構造の検討

表3は、試作品および納入品のケーブル構造を示すものである。これらの構造仕様を決めるにあたっての特記事項は次のとおりである。

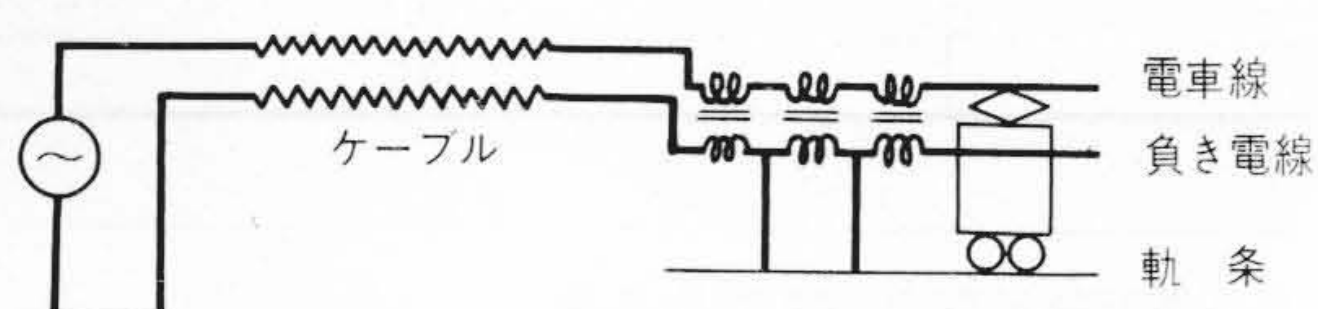
- (1) 内部絶縁体は架橋ポリエチレンとし、絶縁体厚さは系統の異常電圧による劣化を考え、一般66kV架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル（以下CVケーブルと略す）と同じ厚さとした。
- (2) 外部導体は銅線1層横巻きの構造とし、銅線径、本数はその抵抗値が内部導体の導体抵抗値以下となるように選定した。今回の試作品の銅線径はそれぞれ3.5mm、5.6mmと太かったが、横巻きのピッチ、押えテープなどを検討した結果、作業性に問題ないことが確認できた。

表2 設計条件 同軸形ケーブルの絶縁階級は内部30kV、外部6kVとなっている。

Table 2 Design Criteria of Co-axial Cable

項 目	設 計 値
内 部 絶 縁 設 計 交 流 衝 撃 波 開閉サージ	30kV 200kV 200kV
外 部 絶 縁 設 計 交 流	6kV
短 絡 電 流	13kA 0.2秒

注：回路条件



- (3) 外部絶縁体材質は架橋ポリエチレンとポリエチレンの2種について比較検討を行なった。架橋ポリエチレンはポリエチレンより耐熱性がすぐれているために、電流容量を大きくとることができるが、次の二つの問題点があげられる。第一に、一度加熱架橋された内部架橋ポリエチレン絶縁体が再び加熱されることによるひずみ、変形の問題、第二に、ケーブル径が90mm程度と大きいために作業がむずかしくなってくる問題がある。試作ではこれら2種について実施しており、電気特性上有位差は認められなかった。したがって納入品は作業性の良いポリエチレンとした。



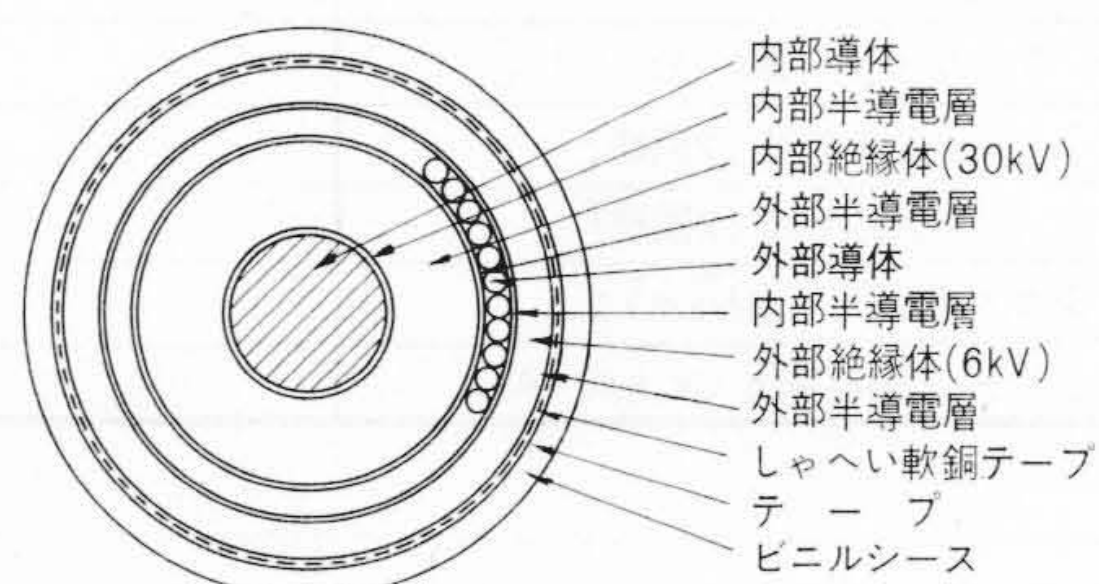
図1 同軸電力ケーブルの外観 内部導体、外部導体いずれも1,000mm²であり、ケーブル外径は105mmである。

Fig. 1 Cutout View of Co-axial Cable

表3 ケーブル構造 外部導体は試作品3.5mm径61本より、製品5.6mm径40本より、となっている。外部絶縁体はポリエチレンに最終決定した。

Table 3 Construction of Cable

項 目	単 位	標 準 値		
		試 作 I	試 作 II	納 入 品
公 称 電 圧	kV	30		
公 称 断 面 積	mm ²	600		
構 造	—	分 割 圧 縮		
外 径	mm	29.5		
架橋ポリエチレン絶縁体厚 (内部半導電層を含む)	mm	17.0		
外 部 導 電 層 厚	mm	2.0		
外 部 導 体	mm×本	3.5×61		
絶 縁 体 厚 (内部半導電層を含む)	mm	架橋ポリエチレン 7.0	ポリエチレン 5.0	ポリエチレン 5.0
しゃへい軟銅テープ厚	mm	0.1	0.1	0.1
ビニルシース厚	mm	4.5	4.5	5.5
ケーブル標準外径	mm	99	95	105
概 算 重 量	kg/m	17,510	16,890	25,450



3.2 ケーブル特性

3.2.1 電気特性

表4は、おもな電気試験結果を示すものである。試作品、納入品ともに一般の66kV CVケーブルと同等以上の特性を得ることができた。特に屈曲試験前後で部分放電電圧、ケーブル解体結果も異常は見られず当初懸念された屈曲特性も一般CVケーブルと同等の結果が得られた。さらに納入品についてはヒートサイクル試験（内部導体90℃ 8時間通電、16時間停止を1サイクルとし30サイクル）を実施し部分放電電圧に変化がないことを確認している。

3.2.2 布設実験

実際のケーブル布設にあたっては許容側圧をどの程度に設定するかが重要な問題となる。そのため半径1.5mのシーブを用い同軸電力ケーブルの側圧を検討した。表5は、その結果を示すものである。側圧1,500～1,670kg/mのときビニルシースに把(は)持力がないために移動してしまったが、本現象はビニルシースを外部導体直上にバインドすることにより解決できた。表5の結果から同軸電力ケーブルの許容側圧としては、一般CVケーブルで採用している1,500kg/m程度以下が妥当であると思われる。なお、この場合はなめらかな実験用シーブで行なっているため、管路など接続部に段ちがいがある想定される場合にはもっと小さく側圧を設定する必要があるだろう。

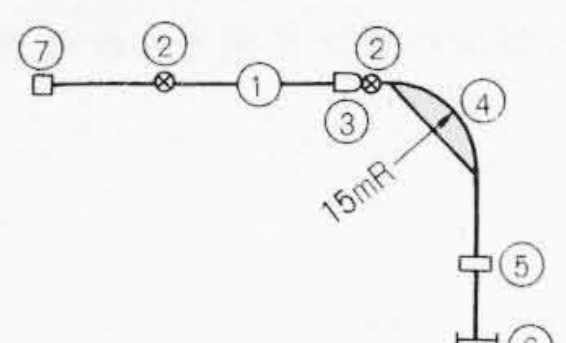
表4 ケーブルのおもな電気特性 ケーブルの破壊値は交流280kV以上、衝撃波870kV以上の一般66kV CVと同等の特性が得られている。

Table 4 Electrical Characteristics of Cables

項目	絶縁体種別	単位	特性値		備考
			試作品	納入品	
交流長時間破壊電圧	内部	kV	280	280, 290	160kV/1h後10kV/1h昇圧
	外部	kV	90, 95	70, 75	35kV/1h後5kV/30分昇圧
衝撃破壊電圧	内部	kV	870, 930	970, 1,010	550kV/3回後20kV/3回昇圧
	外部	kV	—	395, 445	95kV/3回後10kV/3回昇圧
部分放電電圧	内部	—	良	良	感度(90kV/5pc)
誘電正接	内部	%	0.031	0.024	常温 76kV
屈曲試験	—	—	異常なし (屈曲半径=ケーブル外径×5で2往復屈曲)	異常なし (屈曲半径=ケーブル外径×7.5で3往復屈曲)	屈曲後部分放電およびケーブル構造に異常のないこと

表5 同軸ケーブルの布設実験 同軸ケーブルの許容側圧は1,500kg/m程度が妥当である。3,000kg/mになるとビニルシースにしわが発生した。

Table 5 Experiment of Compressive Force to Cable

実験方法	最大引入張力(kg)	側圧(kg/m)	実験結果
 注：① 同軸ケーブル 600mm ² ② よりもとし器 ③ プーリングアイ ④ 実験用シーブ ⑤ 張力記録計 ⑥ ウインチ ⑦ バックテンション	2,250	1,500	プーリングアイ取付部 ビニルシースに把持力が なく移動する。
	2,500	1,670	1. プーリングアイ部の ビニルシース押え方 法を変更 2. 試験後コロナ試験 (90kV/5pc)良 3. 解体結果異常なし
	4,900	3,250	1. ビニルシースにしわが 発生した。 2. 試験後コロナ試験 (90kV/5pc)良

3.2.3 ケーブル温度上昇

同軸電力ケーブルの許容電流計算方法は、アルミ被ケーブルなどシース損失を持つケーブルに準じて求めることができる。すなわち、全熱抵抗を次式で求めればよい。

$$R_{th} = R_1 + (1 + P) R_2$$

ここで、 R_{th} ：全熱抵抗(°C・cm/W)

R_1 ：内部絶縁体熱抵抗(°C・cm/W)

P ：内部、外部導体の発生損失比(1.0)

R_2 ：外部絶縁体より外部の熱抵抗(°C・cm/W)

図2は1,000mm²による温度上昇試験結果を示すものであるが、ほぼ実測値と計算値は合致している。電流はケーブル片端の内部、外部導体を接続し往復電流を通電している。なお同軸電力ケーブルと単心2条の許容電流を比較すると、気中、管路布設ともに、同軸電力ケーブルのほうが10～15%低下する結果となる。

3.2.4 インピーダンス特性

同軸電力ケーブルの顕著な特長として通信ケーブルと同様にケーブルインダクタンスが小さいことがあげられる。たとえば、同軸ケーブルのインダクタンスは単心2本方式に比較し1/4～1/6の値となる。今回の場合、電源高周波による共振現象のチェックも兼ねケーブルのインピーダンス周波数特性の測定を行なった。図3はその結果を示すものである。特性

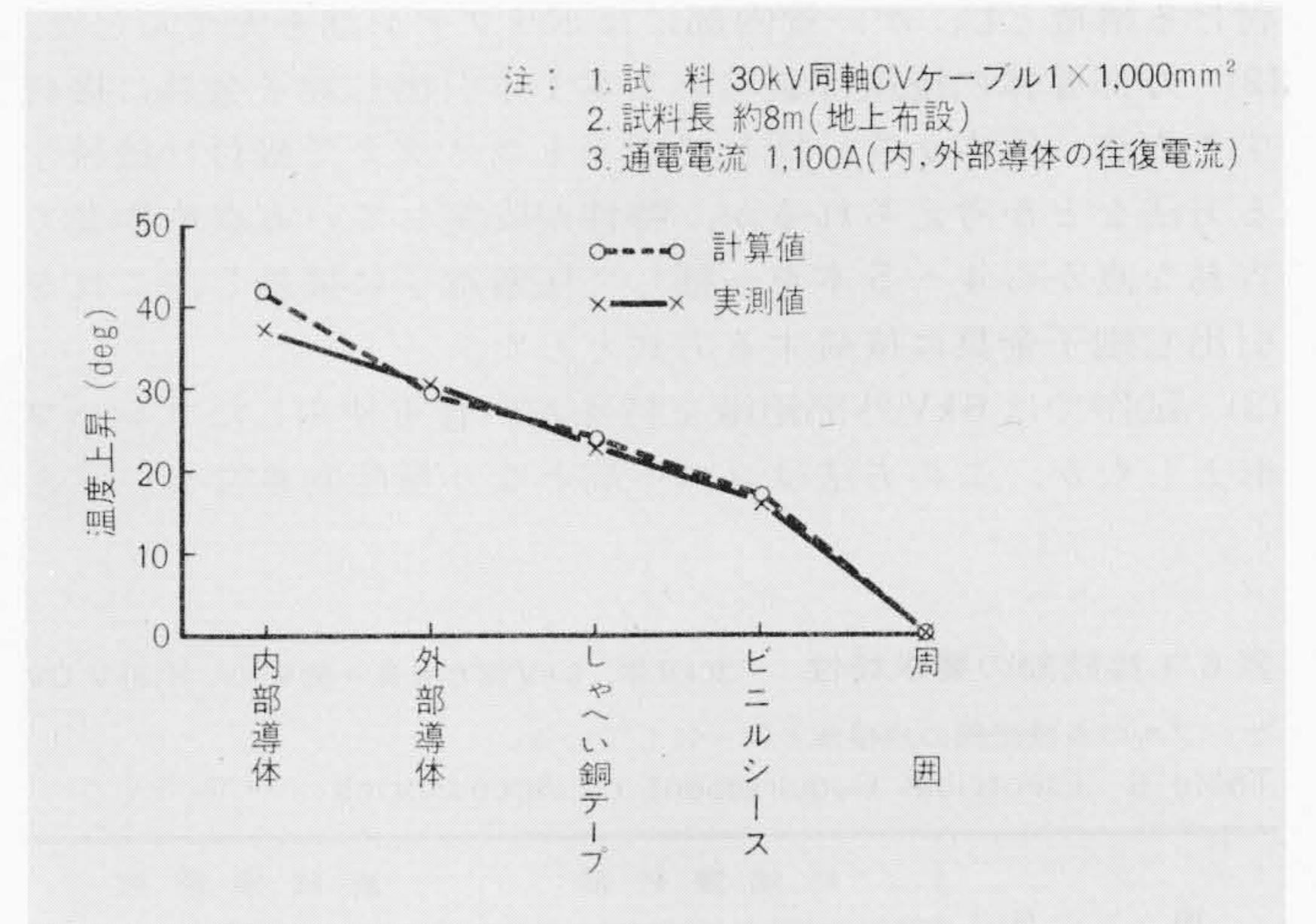


図2 ケーブルの温度上昇特性 温度上昇の実測値と計算値はよく合っている。

Fig. 2 Temperature Rise of Co-axial Cable

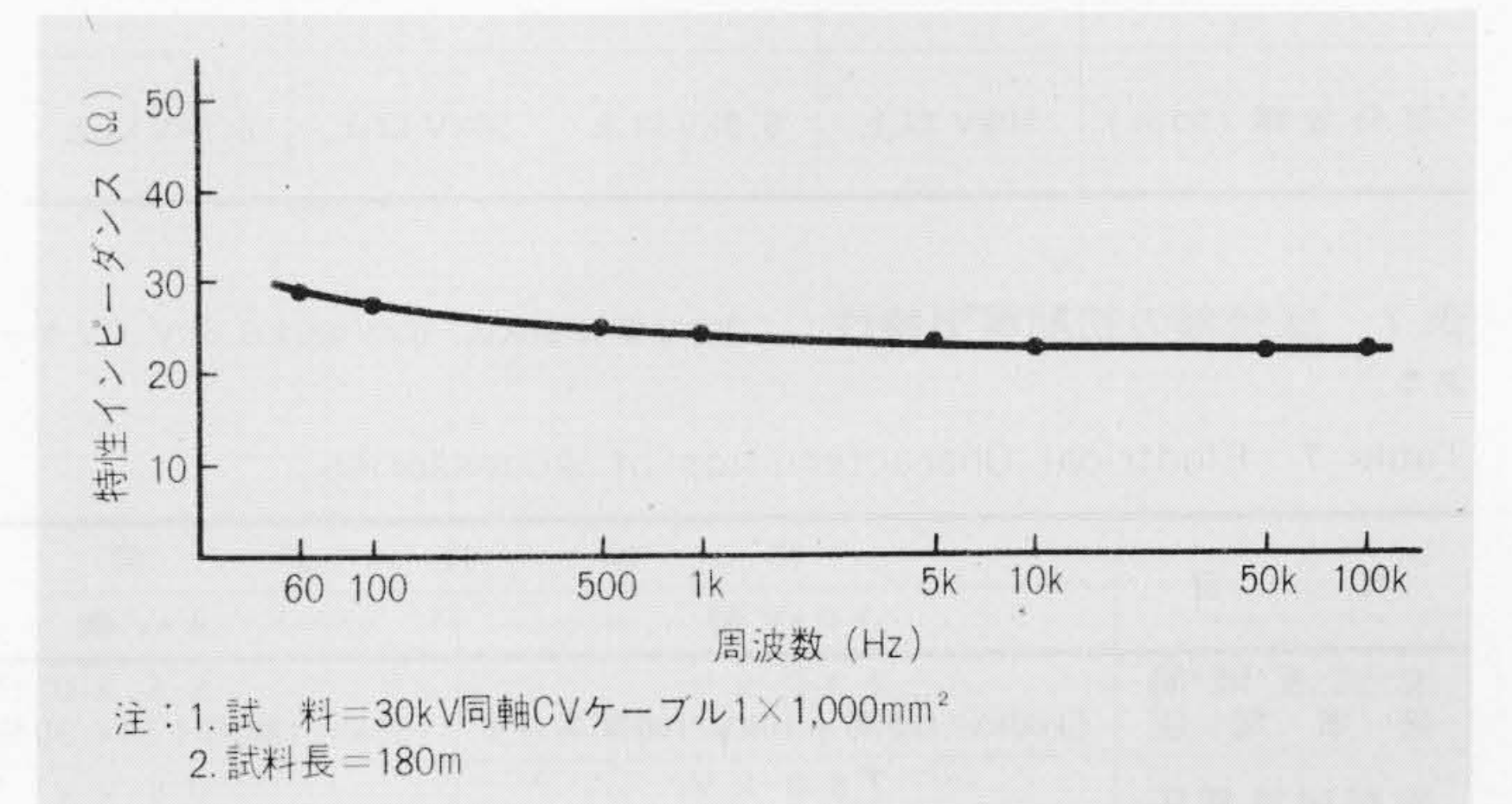


図3 インピーダンス周波数特性 同軸ケーブルの特性インピーダンスは、22～29Ωと非常に小さい値となる。

Fig. 3 Characteristics of Impedance V. S. Frequency

インピーダンスは周波数による変化も少なく、22～29(Ω)と非常に小さい値が得られた。

4 付 属 品

同軸電力ケーブル用付属品としては、終端接続部、直線接続部および分岐接続部がある。これらのうち終端接続部および直線接続部について試作開発を行ない納入品を製作した。各接続部の設計条件は表6に示すようにケーブルと同一とした。ただし、終端接続部の衝撃耐電圧値は温度係数を考慮しない値とした。

4.1 終端接続部

終端接続部の構造として、導体引出しは内部導体を上部から、外部導体を下部から引き出し、絶縁は30kV内部、6kV外部とも絶縁テープ巻きストレスコーンを作り、がい管内に絶縁コンパウンドを充てんする方式あるいはゴムモールドストレスコーンを使用する方式などが考えられる。試作では接続作業の簡略化および特性の安定を図って、両絶縁方式ともゴムモールドストレスコーンを使用したプレハブ構造とした。試作品の特性は要求性能を十分満足するものであった。この結果に基づき、各部の構造について検討を加え、納入品の仕様を決めた。

- (1) 30kV内部絶縁がい管は重汚損地区用として60kV級標準がい管(B-854)を使用し、絶縁処理はい管内に組み込んだエポキシハウジングにゴムモールドストレスコーンを押し付ける構造とし、がい管内部にはポリブデン油を充てんした。
- (2) 外部導体の接続は素線を1本1本引出し端子金具に接続する方法、何本かを一括してボルトコネクタで締付け接続する方法などが考えられるが、特性が安定している点や作業も容易な点から4～5本を一括して圧着端子に接続し、これを引出し端子金具に接続する方式とした。
- (3) 試作では6kV外部絶縁を特殊がい管を使用したプレハブ形としたが、この方法はコスト高となり量産向きでない

表6 接続部の要求特性 30kV側、6kV側とも各一般66kV、6.6kV CVケーブルの各接続部の規格値と同一にしている。

Table 6 Electrical Requirement of Accessories

項 目	終 端 接 続 部		直 線 接 続 部	
	30kV側	6kV側	30kV側	6kV側
交流長時間耐電圧	160kV/1時間	35kV/1時間	160kV/1時間	35kV/1時間
衝 撃 耐 電 圧	460kV/3回	78kV/3回	550kV/3回	95kV/3回
部分放電(50pc)	50kV以上	6.9kV以上	50kV以上	6.9kV以上

表7 接続部の初期電気特性 30kV側は66kV、6kV側は6.6kV CVケーブルの各接続箱と同等の特性である。

Table 7 Electrical Characteristics of Accessories

項 目	終 端 接 続 部		直 線 接 続 部	
	30kV側	6kV側	30kV側	6kV側
交流長時間破壊電圧	230kV (160kV/1時間+10kV/1時間昇圧)	55kV* (35kV/1時間+5kV/30分昇圧)	210kV (160kV/1時間+10kV/1時間昇圧)	45kV (35kV/1時間+5kV/30分昇圧)
衝撃破壊電圧	780kV (460kV/3回+20kV/3回昇圧)	98kV* (78kV/3回+10kV/3回昇圧)	730kV (550kV/3回+20kV/3回昇圧)	125kV (95kV/3回+10kV/3回昇圧)
部分放電(50pc)	80kV以上	6.9kV以上	70kV以上	6.9kV以上

注：*支持がい子表面閃(せん)絡

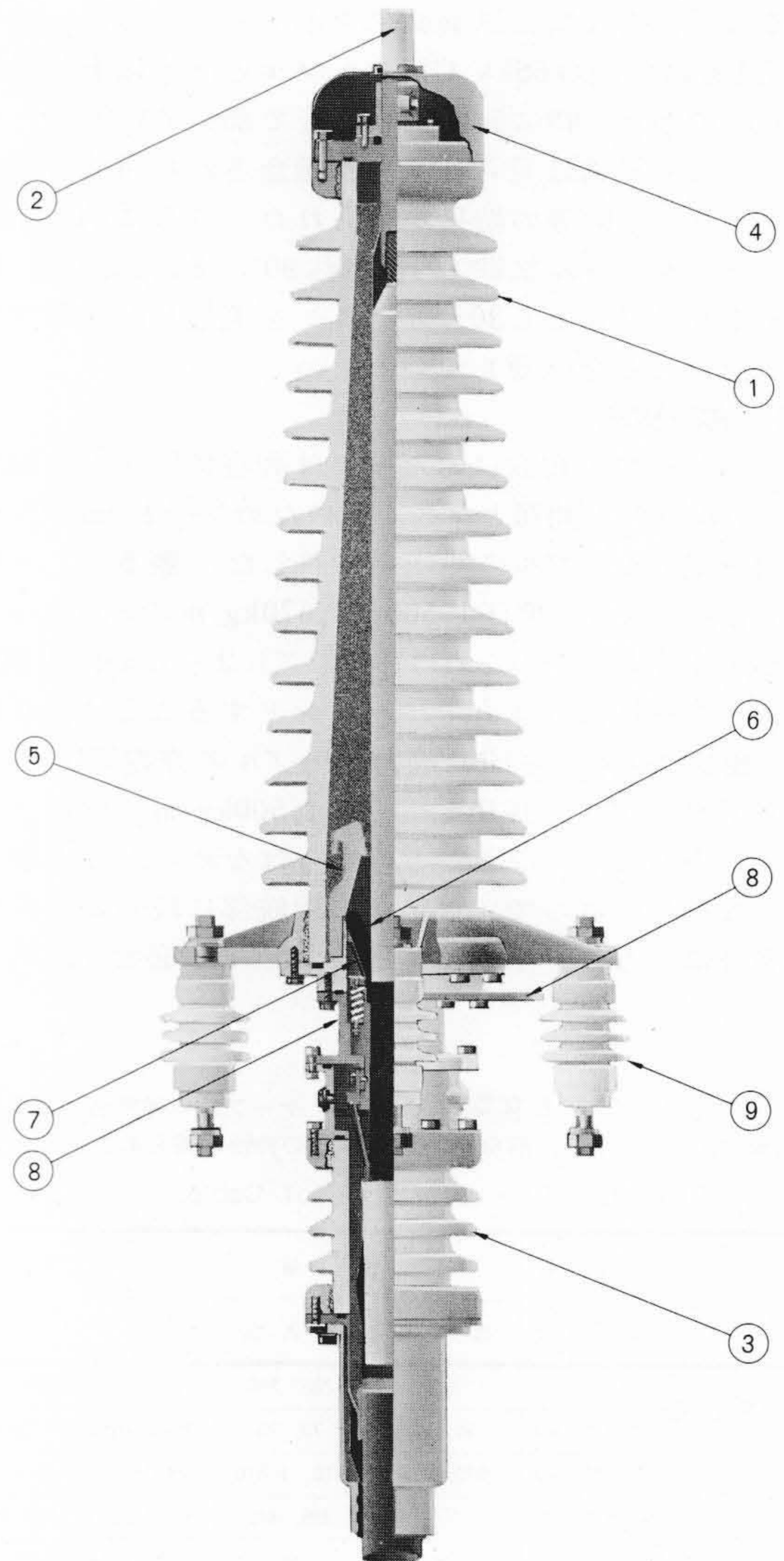


図4 終端接続部の構造 30kV側は66kV CVケーブル用とほぼ同一、6kV側はテープ巻きストレスコーンと常温硬化絶縁コンパウンド充てんから成る。

Fig. 4 Construction of Termination

に、ケーブルが太いため寸法公差が大きくなりゴムモールド品とのかん合調整がむずかしくなってくる。そのためプレハブ方式に代わってテープ巻きストレスコーンを作り10kV級標準がい管(B-103)を使用し、がい管内に絶縁コンパウンドを充てんする構造とした。

図4は、終端接続部の最終仕様を示すものである。また最終仕様品の組み立てた状態での電気試験結果は、表7に示すとおりである。

4.2 直線接続部

直線接続部の30kV内部絶縁処理方式は絶縁テープ巻き方式、プレハブ方式あるいは加熱モールド方式がある。試作では前二者について行ない、6kV外部絶縁はストレスコーンを内蔵したゴムモールドカバーをかぶせる構造とした。これらの試作品により製作上の問題点や現地組立作業性など種々把握することができた。この経験をもとに直線接続部の細部について検討を加えた。

(1) 30kV内部絶縁は一般66kV CVケーブルの直線接続部と同一構造とし、絶縁テープ巻き方式、プレハブ方式を検討することとした⁽³⁾。

(2) 外部導体の接続は内部絶縁が絶縁テープ巻き方式の場合は導体素線を1本1本突合せスリーブで圧着接続する方法、プレハブ方式の場合は終端接続部と同様に4～5本を一括し

圧着接続する方法とした。

(3) 6kV外部絶縁方式はガラス繊維強化プラスチック(以下FRPと略す)の絶縁筒をかぶせて絶縁を行ない、空間部にコンパウンドを充てんする簡易なプレハブ方式とした。FRP絶縁筒は、比較的安価で作業性が良好なために選定された。これに対しゴムストレスコーン使用のプレハブ方式は終端接続部と同じ問題点があり、また絶縁テープ巻き方式は外部導体接続部の表面凹凸(おうとつ)が激しく、さらに外径が大きいためにテープ巻き作業がむずかしく、長時間を要する欠点がある。このFRP絶縁筒はボイドの少ない特殊な絶縁パイプから製造したもので、一般FRPの吸湿性、電気特性を改良したものである。また充てんするコンパウンドは外部絶縁体がポリエチレンのために常温硬化性のものを選んだ。さらにこのコンパウンドは20～30kgと多量に注入するために発熱が少なく、かつ長期の使用で割れその他の欠点が生じないものを開発した。絶縁筒の具体的設計は図5に示す試料を用い、交流長時間、衝撃破壊特性、部分放電特性などを検討して決定した。

以上おもな検討点について述べたが、製作した内部絶縁テープ巻き方式による直線接続部の構造は、図6に示すとおりである。この構造による電気特性は表7に示すとおりで終端接続部とともに十分な性能を得た。

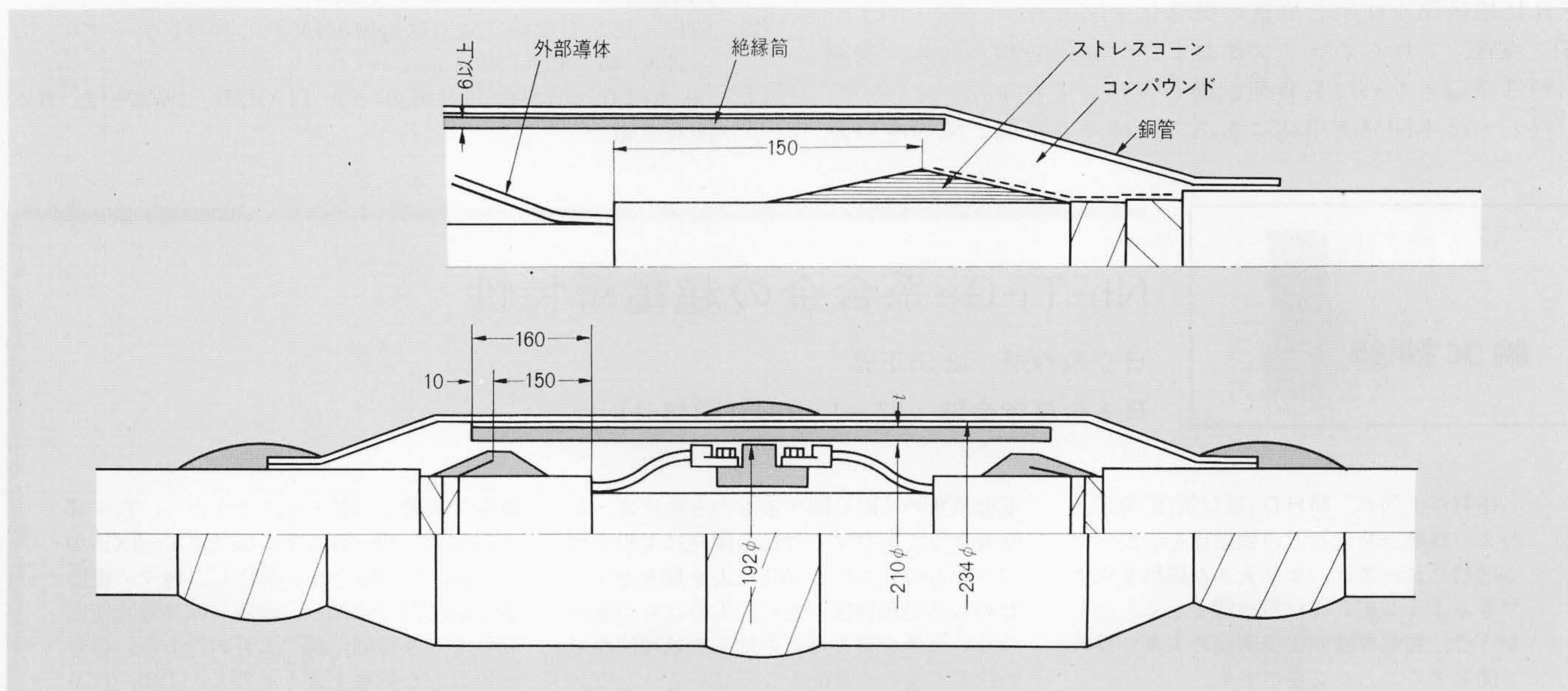


図5 外部絶縁筒試験試料 外部絶縁はFRP筒と絶縁コンパウンドより成る。

Fig. 5 Test Pieces for Outer Insulation

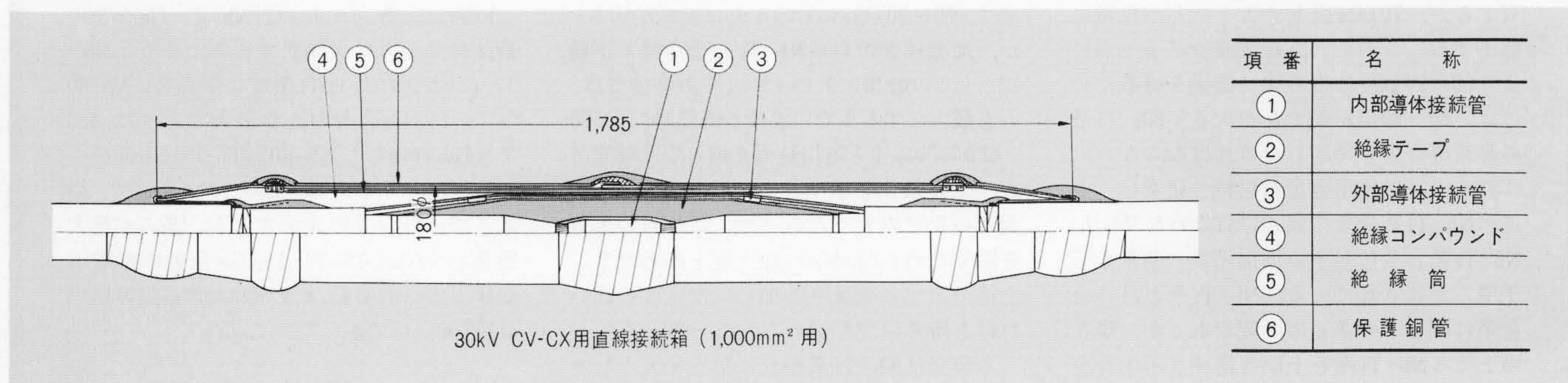


図6 直線接続部の構造 30kV側絶縁テープ巻, 6kV側FRP絶縁筒の組合せとなっている。

Fig. 6 Construction of Joint

5 長期実負荷試験

以上の検討結果をもとに決定した仕様によるケーブル(600 mm²) 終端接続部および直線接続部の長期安定性を確認するため、課通電試験を行なっている。その試験状況は図7に示すとおりである。ここでは試験設備の関係上、内部および外部導体に分けて電流回路を作り、それぞれ約840Aを8時間通電、16時間停止のサイクルで通電している。電圧は内部導体—大地間95kV、外部導体—大地間6kVを連続課電している。今後、定期的に絶縁抵抗、誘電正接など電気特性を測定してゆく予定である。

6 結 言

新幹線電車線への電力供給用として対地 30kV 同軸架橋ポリエチレン電力ケーブルおよび付属品を開発し良好な結果を得ることができた。

- (1) 外部導体は銅線横巻き構造としたが、作業性および電気特性上も問題ない結果が得られた。
- (2) 6kV外部絶縁体材質は内部絶縁体への熱の影響、作業性からポリエチレンとした。
- (3) 端末接続部の構造は 30kV 内部絶縁—プレハブ方式、6kV 外部絶縁—テープ巻き方式とした。
- (4) 直線接続部の構造は 30kV 内部絶縁—プレハブ方式、テープ巻き方式のいずれかとし、6kV 外部絶縁方式は新たにFRP絶縁筒を使用し構造の簡略化を図った。
- (5) 現在、これらのケーブルおよび付属品を組み込み、長期信頼性確認のために実負荷試験を実施している。

終わりに本開発実用化にあたり、種々ご指導ご協力をいた

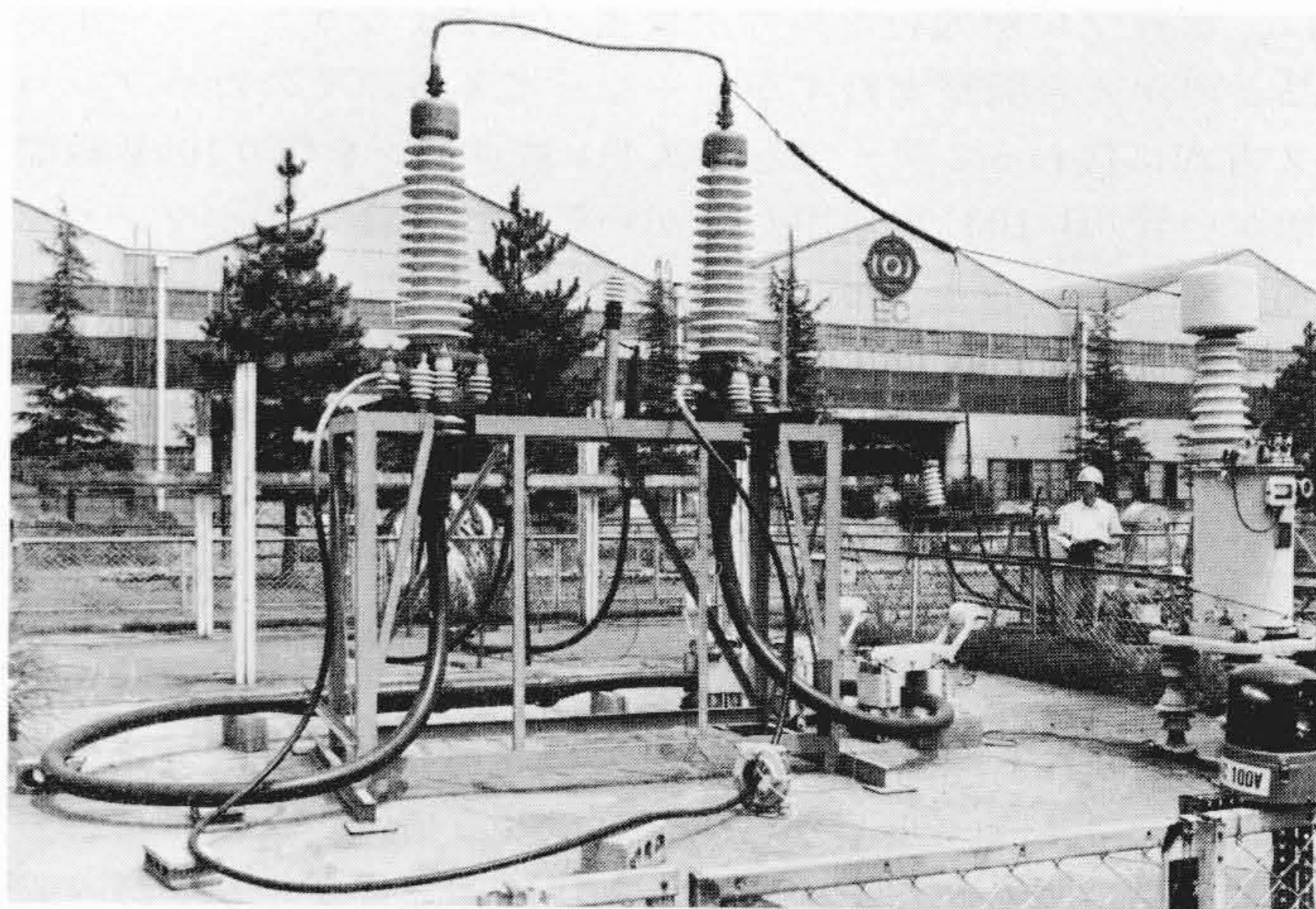


図7 実負荷試験状況 内部導体95kV、外部導体6kV連続課電されている。

Fig. 7 View of Field Test

だいた日本国有鉄道の関係各位ならびに日立電線株式会社日高工場、同研究所の関係各位に深謝する次第である。

参考文献

- (1) W. J. Webt "The Power Supply" British Railway Electrification Conference Paper (1960)
- (2) 依田、比企野ほか:「鉄道電化用30kV 共心形OFケーブル」日立評論 46, 829 (昭39-8)
- (3) 「日本国有鉄道規格JRS36304-8A-14AR2B」(昭47-12, 日本国有鉄道)

論文抄録

Nb-Ti-Ge系合金の超電導特性

日立製作所 北田正弘

日本金属学会誌 37—1, 104 (昭48-1)

磁気浮上列車, MHD (磁気流体) 発電, 将来の核融合発電などの強磁場を必要とする応用においては, より大きな磁場を発生できるような超電導材料が望ましく, したがって, 超電導臨界電流密度の大きな材料を開発することが必要である。

Nb-Zr系あるいはNb-Zr系にTiを添加したNb-Zr-Ti合金は70kOe付近の磁場発生用材料としては十分な臨界電流密度 J_c を有するが, 70kOe以上ではその J_c が急激に低下する。このため, 超電導マグネットにより80~90kOe程度の強い磁場を得るためには, 80~90kOeまで J_c が大きいNb-Ti系の超電導合金を使用しなければならない。これらの高磁場用合金系材料の研究は, 上述のNb-Ti系合金で盛んに行なわれており, Nb-Ti系合金に対する添加元素の効果も若干明らかにされている。Nb-Ti系以外の合金系に関しても多くの研究があるが, 現在のところNb-Ti系を上回る特性を示す合金は見いだされていない。これらの研究は超

電導現象の基礎に関するものを除けば, より大きな J_c を有する材料の開発に主眼を当てているが, これと同時に J_c を最大とするための熱処理特性の改善, J_c のばらつきの少ない合金を得るための加工熱処理法などの探索も大きな目的となっている。

筆者らの研究を含めた従来の研究から, 70~90kOeにおいても大きな J_c を有するNb-Ti系合金は, Tiを55~75wt%程度含む合金で, 70~90kOeにおける J_c は比較的大きいが, 反面純度の高いNb-Ti合金, 特に不純物としての酸素が0.1wt%以下の合金では, J_c を最大とするまでに要する時効時間が500~800時間以上と実用範囲を越えた長時間であったり, 酸素を添加しても J_c のばらつきが大きくなるなどの欠点があった。これらの欠点を除くために時効前の加工度を高めたり, 上述のように酸素を添加して安定度の高い材料を得る研究も進められている。

本研究はNb-Ti系合金に第三元素としてGeを添加したもので, 上述のような特性の

改善に顕著な効果を示すことから, Tiを55~75%含むNb-Ti合金にGeを0.5~2%添加したNb-Ti-Ge合金を製作し, 種々の温度および時間で時効し, 磁場—臨界電流密度特性などを詳細に調べたものである。得られたおもな結果をまとめると, (1)Nb-Ti系合金の J_c はGe添加量の増大とともに増大し, 1%Geで最大となる。また, J_c が最大値に達するまでの時効時間はNb-Ti合金の1/10~1/50に改善される。(2)Nb-Ti-Ge合金の最適時効温度は450°Cである。また, Nb-Ti-Ge合金の J_c はTi濃度に依存し, Nb-60%Ti-1%Ge合金の J_c が最大であった。450°C×10h時効したNb-60%Ti-1%Ge合金の80kOeにおける J_c は $\sim 7 \times 10^4$ A/cm²で, 従来のNb-Ti合金の3倍である。(3) J_c が最大値を示すNb-60%Ti-1%Ge合金の超電導転移温度は9.6°K, 4.2°Kにおける臨界磁場は約120kOeであった。