

275 kV OF ケーブル用接続箱の諸特性

Characteristics of Joint Boxes for 275 kV OF Cable

飯塚 喜八郎*

Kihachirō Iizuka

加藤 勇次郎**

Yūjirō Katō

井出 成夫**

Shigeo Ide

小林 正幸**

Masayuki Kobayashi

沼尻 文哉**

Fumiya Numajiri

要 旨

超高圧大容量地中送電線路の建設に関連する技術的問題の検討が急がれているが、本論文は275 kV 普通(または絶縁)接続箱の寸法縮小実験および275 kV 油止接続箱の開発結果について報告するものである。

普通接続箱に関しては寸法、絶縁体構成、施工方法などに検討を加えた結果、最終的には鉛工間距離1,800 mm、銅管外径220 mmφのもので、また油止接続箱は鉛工間距離3,200 mm、銅管外径400 mmφのものでBIL 900 kV に対して十分満足できる性能をうることができた。

1. 緒 言

大都市における電力需要は年々増加しており、ビルの高層化はこの傾向に拍車をかけている。このような情勢に対処するため、超高圧大容量地中送電線系統の都心部導入が計画され、技術的問題の検討が急がれている。われわれは、275 kV 地中送電系統の都心部導入に関連する一連の系統的研究の一部として、ケーブル本体の特性改善ならびに布設工法上の検討を行なってきたが、このような体勢の実現には要求に合致するケーブル接続法の開発が急務であることは言をまたない。とくに、人孔の寸法縮小を可能にする普通接続箱の開発と安定した性能を有する油止接続箱の開発が接続部の問題の重要点である。

油止接続箱に関しては、イタリアのピレリ社が1958年に400 kV 級のものを試作している。これは全長2,125 mm 外径390 mm のもので、電気的性能としては交流580 kV/50 hに耐え、インパルス1,600 kV でケーブルが破壊した⁽¹⁾。この油止接続箱の構造はエポキシ樹脂中に遮へい電極を埋込んだものであるが、1961~1964年にかけて、Cornell 大学で行なわれた345 kV 地中ケーブルの実負荷試験に使用された油止接続箱は同じくピレリ社製のもので、前述のものと比べるとエポキシ樹脂を使用している割合がかなり減少している⁽²⁾。

国内でも275 kV 級以上のものについてのいくつかの発表例^{(3)~(6)}があるが、これらの構造はエポキシ樹脂を利用したものをはじめ、コンデンサコンを利用したもの、従来の油浸紙とがい管を組み合わせたものなどいろいろである。

日立電線株式会社においてもすでに多くの研究を行なってきたが、本論文では特に普通接続箱の寸法縮小と油止接続箱の性能向上をめざして最近行なった開発研究の結果を報告する。

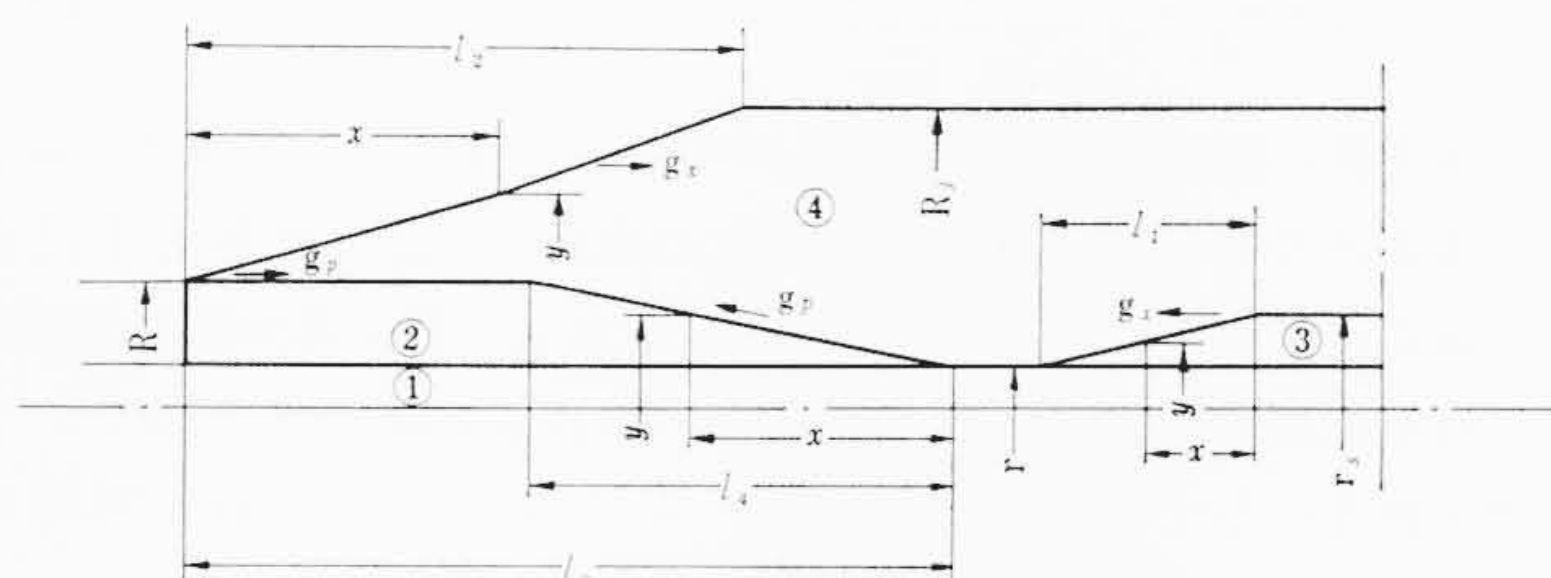
2. 普通接続箱の諸特性

2.1 普通接続箱の寸法縮小実験

275 kV 普通接続箱はすでに数年前に開発研究を終了しているが、その寸法は鉛工間距離が2,100 mm、銅管外径260 mmφであった。しかし、マンホール寸法をさらに縮小させる要求が強く、長さおよび外径を種々変えた普通接続箱を試作し、寸法縮小の可能性を検討することになった。

2.1.1 設 計

ストレスコーン部の傾斜、ケーブル絶縁のステッピング部の傾斜の設計法はすでにH. D. Short氏が研究し⁽⁷⁾、近似式を提案し



- | | |
|------------------------------------|--------------------------------|
| ①: ケーブル導体 | l_1 : 導体接続スリーブテーパ部長さ |
| ②: ケーブル絶縁体 | l_2 : ストレスコーン部全長 |
| ③: 導体接続スリーブ | l_3 : ストレスコーン立ち上り部と導体露出部間の長さ |
| ④: 補強油浸紙 | l_4 : ステッピング部長さ |
| r : 導体外径 | R : ケーブル絶縁体外径 |
| r_s : 導体接続スリーブ外径 | g_x : 横方向電位傾度 |
| R_j : 補強油浸紙巻き上げ径 | x, y : 基準位置からの距離と径 |
| g_p : ストレスコーン立ち上り部と導体露出部間の平均電位傾度 | |

図1 普通接続箱設計用記号図

ているが、さらに加賀谷氏はこの近似式を導体接続スリーブ形状の設計にも応用している⁽⁸⁾。この近似式は図1にしるした記号を用いて次のように表わされる。

(1) ストレスコーン部

設計法としては横方向電位傾度 g_x の取り方によって二つに分けられる。

一つは $y=R$ における g_x を一定にする場合で、 x と y の関係は

$$x = \frac{V}{g_x} \left(1 - \frac{\log \frac{R}{r}}{\log \frac{y}{r}} \right) \dots\dots\dots (1)$$

であり、ほかはすべての y の値に対し、 g_x を一定にする場合で、 x と y の関係は

$$x = \frac{V}{g_x} \log \left(\frac{\log \frac{y}{r}}{\log \frac{R}{r}} \right) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 V は印加電圧(kV)

となる。したがって、ストレスコーンの全長 l_2 は(1)式または(2)式で $y=R_j$ とおいて求められるが、(1)式で求めた l_2 は(2)式で求めた l_2 よりも短い。本実験では(2)式を用いて計算した。

(2) ステッピング部

ステッピング部において x と y との間の関係は

$$x = \frac{V}{g_x} \left(\frac{\log \frac{y}{r}}{\log \frac{R_j}{r}} \right) \dots\dots\dots (3)$$

* 東京電力株式会社

** 日立電線株式会社日高工場

であり、全長 l_4 は $y=R$ とおいて求められる。

(3) スリーブ形状

スリーブのテーパ部の長さ l_1 は

(4)式において $y=r$ として求められる。

$$x = \frac{V}{g_x} \log \left(\frac{\log \frac{R_j}{y}}{\log \frac{R_j}{r_s}} \right) \dots\dots\dots (4)$$

なお、ストレスコーン立ち上り部と導体露出部間の距離 l_3 は近似的に(5)式により計算される。

$$l_3 = \frac{V}{g_p} \dots\dots\dots (5)$$

本実験の設計基準を次のように考える。まず、ストレスコーンの横方向の電位傾度(g_x)をすべての場所で一定になるようにある値に選ぶ。次に、ストレスコーン立ち上り部と導体露出部間の平均電位傾度(g_p)を現在の接続箱の設計基準に用いられている値を参考にして3種類に選んだ。これはそれぞれ鉛工間距離にして2,100, 1,800および1,500 mmに相当する。ステッピング部の長さは横方向電位傾度が g_p と同じであるようにする。

また、導体接続スリーブ上の電位傾度も変化させて2種類のものを試作した。すなわち、銅管外径190 mmφおよび220 mmφのものである。

図2に鉛工間距離1,800 mm、銅管外径220 mmφの接続箱の構造を示す。

2.1.2 試験結果

表1に試験結果を示す。試番1~3は外径を一定にして長さを順次変えていった接続箱の破壊試験の結果である。試番2と3を比較すると長さの効果がみられるようである。長さの効果は試番7と試番5および9との比較においてもみられる。長さ1,800 mm以下のもので十分な性能を有するものを得るために試番5以下、絶縁体の材質、ステッピングの方法、スリーブ上半導電層および施工方法などに検討を加えた結果、いずれも実用に供し得る性能のものがえられた。しかし、裕度を考えると鉛工間距離1,800 mm、銅管外径220 mmφのものが最終寸法として選ばれた。

接続箱内で破壊した場合の破壊径路は導体接続スリーブ上から油浸紙中を横方向に破壊し、ストレスコーン部の中間に破壊口を作る接続箱の破壊の一般的な傾向にしたがっているが、一例として導体側にも遮へい層側にも破壊口が2箇所あり途中で枝分かれしている場合があった。

施工は2日かかりで十分に時間をかけて行なっているが、熟練と治具の開発によりさらに短縮できるものと考えられる。

2.2 温度上昇試験

イギリスの400 kV OF ケーブルに関する報告⁽⁹⁾によると、直埋の場合ケーブル導体温度上昇よりも接続部の導体温度上昇のほうが大きい。すなわち計算上ケーブル導体温度55℃のとき、接続部のそれは85℃であり、なんらかの対策を講じなければ、許容電流は接続部で制限されることになる。直埋の場合には日本のように接続部がマンホール内に布設される場合と多少条件は違うであろうし、また絶縁体構成、接続スリーブの種類も異なると思われる。いずれにしても接続部の温度上昇は許容電流の点で重要と考えられるので、最終決定の寸法の普通接続箱について温度上昇試験を行なった。

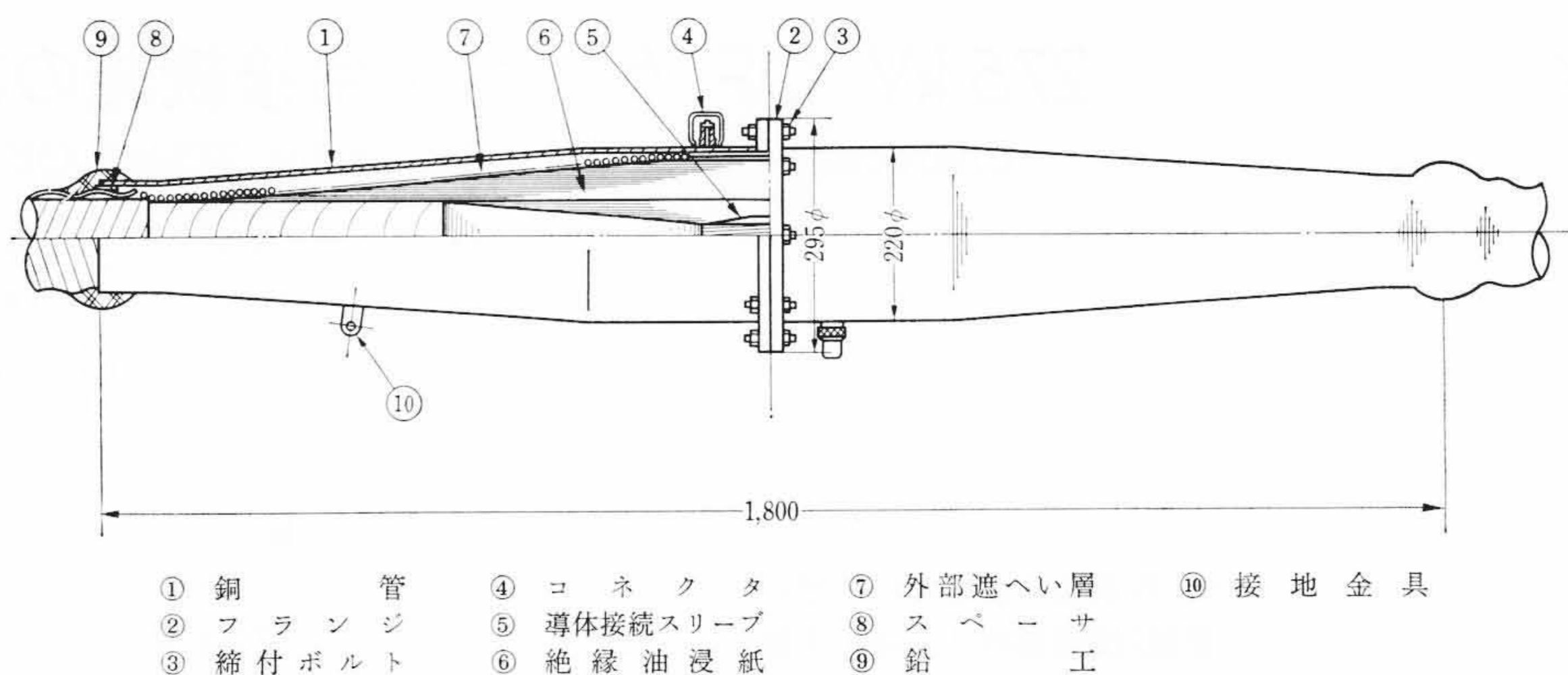


図2 普通接続箱の構造

表1 普通接続箱寸法縮小実験試験結果
275 kV 1×1,200 mm² OFAVZ 用

試番	接続箱寸法		*2 施工時間 (時間分)	破壊電圧		破壊点その他
	鉛工間距離	銅管*1 外径		インパルス	交流長時間	
1	1,500 mm	190 mmφ	10.00	1,200 kV/2回	520 kV/3h	接続箱内スリーブ上
2	1,800	190	9.30	1,300 /2回	—	接続箱内スリーブ上
3	2,100	190	11.30	1,600 /2回	—	接続箱内スリーブ上
4	2,100	190	14.00	1,650 /1回	—	接続箱内スリーブ上
5	1,800	220	16.00	1,650 /3回	—	絶縁体外径を減らし試番6とする
6	1,800	190	14.30	1,500 /3回	—	接続箱内アルミシース端
7	1,500	220	14.30	1,450 /2回	—	接続箱内スリーブ上
8	1,800	220	13.30	—	610/2h15 min	接続箱内スリーブ上
9	1,800	220	15.00	1,650 /2回	—	ケーブル
10	1,800	220	14.30	—	640/23 min	ケーブル

*1 ただしフランジ外径は銅管外径に75 mm たしたのもの

*2 アルミシースはぎから鉛工完了までの時間

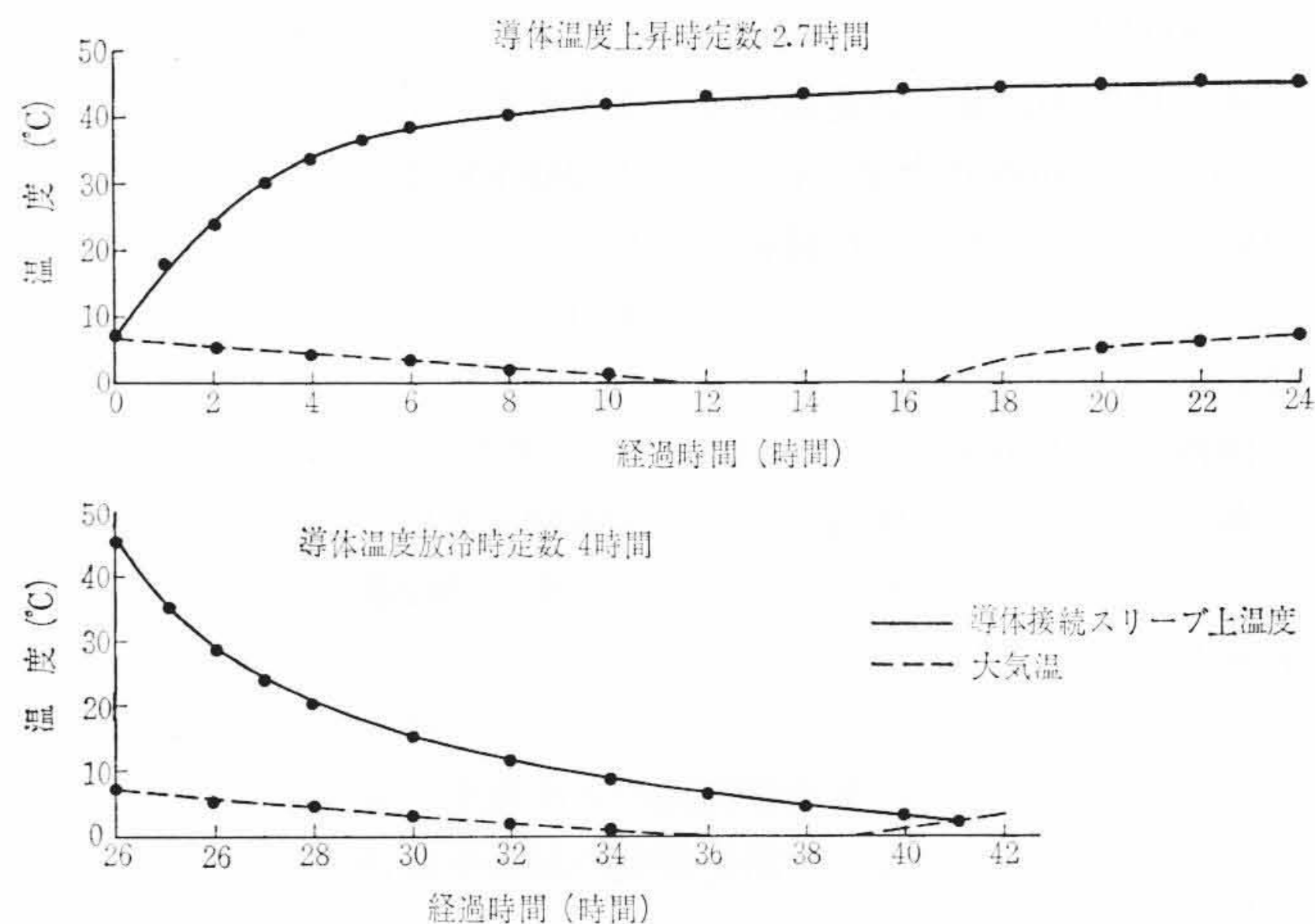


図3 普通接続箱温度上昇試験結果

図3に温度上昇試験の結果を示す。通電電流は1,500 A で気中布設である。通電開始より24時間後のスリーブ上の温度は45℃(大気温7℃)であり、この値はエタニットパイプ内布設のケーブル導体温度42℃(大気温3℃)と比べてほとんど同じである。14時間後にはスリーブ上の温度は飽和している。スリーブ上の温度は20時間後に再び上昇しだしているが、これは大気温が上昇してきたためであり、スリーブ上の温度と絶縁体表面の温度との差が17時間後から29℃と一定の値であることからすでに飽和しているものと考えられる。

上記のデータから接続箱内導体スリーブ上の温度上昇はケーブル導体の温度上昇とほぼ同じであり、許容電流に関し前述のイギリス

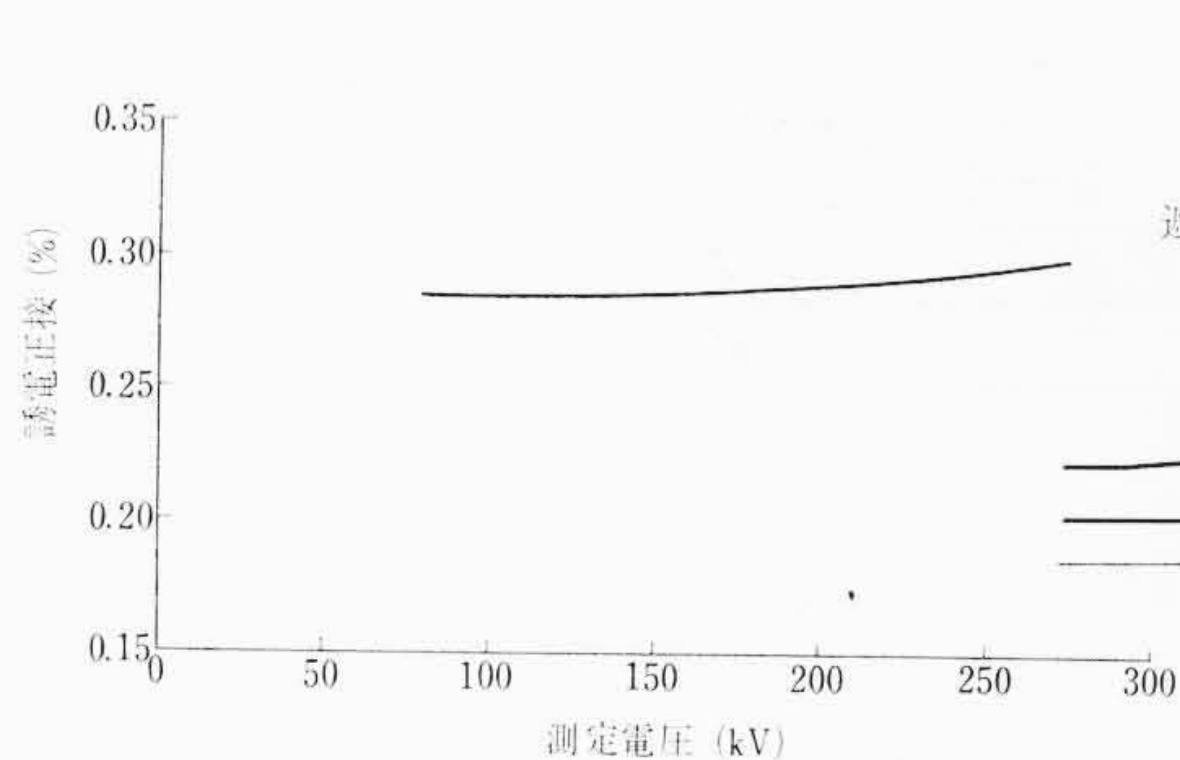


図4 普通接続箱の誘電正接電圧特性

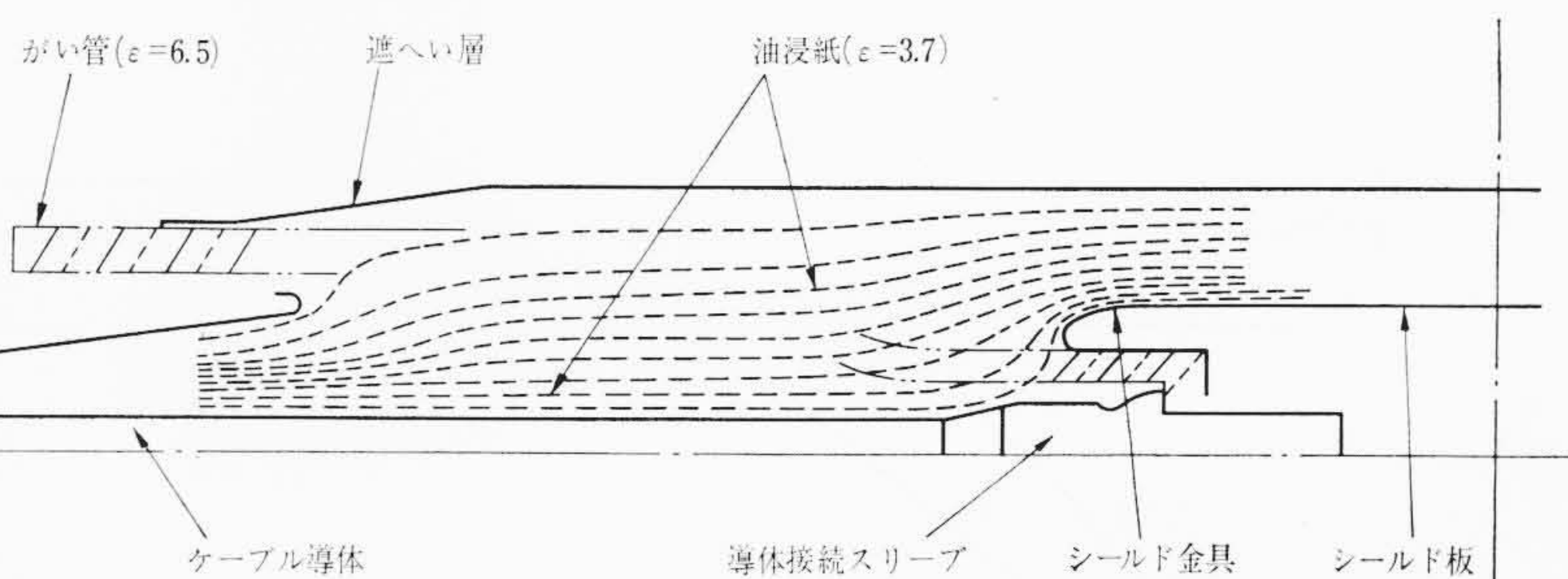


図5 油止接続箱内の電位分布

のような問題は起こらないと考えてよい。

また直流抵抗測定の結果、導体スリーブ部分の抵抗は $275 \text{ kV } 1 \times 1,200 \text{ mm}^2 \text{ OFAVZ}$ の導体抵抗と同じであった。

2.3 誘電正接測定

誘電正接測定結果を図4に示す。常規運転電圧 159 kV で 0.283% であり、ケーブル本体に比べ大きい。これは絶縁紙に低損失紙を使用していないことと手巻きのため、水分量がケーブル絶縁体よりも多くはいることが原因と考えられる。いずれにしても、接続箱の誘電体損による発熱のために許容電流が制限されることはない。

3. 油止接続箱の諸特性

3.1 油止接続箱の電気的性能

従来、種々の文献に新しい合成樹脂材料、たとえばエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂をおもな絶縁体として使用した超高压ケーブル用付属品が紹介され、油止接続箱についても小寸法のものが得られると言われている。日立電線株式会社においても同様の研究を行なった結果、 275 kV の重要幹線に使用するには初期の電気的性能は満足できて、まだ実績が少なく信頼して使えるところまでいっていないことがわかった。この原因はおもに金属導体と樹脂絶縁体との接着に問題があるようであり、接着部分をうまく避けて利用すれば、ヒートサイクルによるクラックの発生もなく、安定な絶縁体として活用できると考えられる。

超高压重要回線に使用するという見地から、基本的な考え方として油止接続箱は従来の 154 kV 級以下の OF ケーブルに使用され実績のあるがい管と油浸紙を組み合わせたものを主体とし、これに新たな改良を加えたものとした。

最終的には油止接続箱の寸法は鉛工間距離 $3,200 \text{ mm}$ 、銅管外径 $400 \text{ mm}\phi$ (フランジ外径は $475 \text{ mm}\phi$) となった。

3.1.1 電界解析結果

絶縁体を有効に利用するためには、接続箱内の電位分布を検討し、電極表面上の電位傾度ができるだけ一定になるように設計しなければならない。このため電界解析を行なった。

電界解析には種々の方法がある。まず第一にラプラス方程式を解析的手段で理論的に解き電位分布を求める方法があるが、本論文で述べる油止接続箱内のように簡単な数式で表わせない境界条件をもっている場合には不可能に近い。つぎに、デジタル的方法として電子計算機を使用して解く方法がある。これはもとの微分方程式に境界条件を与えて直接数値解として解く方法であり、演算時間と記憶容量の少なくてすむ種々の方法 (extrapolated Liebman method, successive overrelaxation method, Peaceman-Rachford iterative method その他⁽¹⁰⁾) が考えられている。しかし、ある程度以内の誤差に収めるためには多くの記憶容量が必要であり、求める電場を分割して実質的に記憶容量を増せば、演算に非常な時間が必要である。

以上の点を考えて、今回はアナログ的方法の一つである傾斜形電解液槽法を使用して解析した。

傾斜形電解液槽法は回転対称の場の電位分布を求めるもので、この原理および装置に関してはいままでも種々の文献⁽⁸⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾に記載されているので詳細は省略する。測定法の誤差についてはいろいろなものが考えられるがおもなものは次の誤差である。

(1) 模型製作上の誤差

木製の箱にパラフィンを流し固まらせ、それに銅板を埋め込んで電極とした。しかし、板が部分的に曲ったり傾斜したりして、図面通りの模型を作るのはむずかしい。これによる誤差は倍尺した模型を使えば軽減される。また主要な電極、たとえば中央のシールド電極、導体接続スリーブなどは機械加工したものを使用すれば、銅板による模型製作の不便、不正確は除くことができる。

(2) 電極材料による誤差

表面インピーダンスの小さいもののほど電極材料としては良い。黒鉛はインピーダンスが小さく適しているが、実用上不便な点があるので銅板をみがいて使用している研究者もいる。筆者らはさらに電極表面に銀粉を塗布して表面インピーダンスを下げた。探針は鋼である。

(3) 電解液の表面張力による誤差

電界液には水道水を使用した。電極と水との境界に生ずる凹面は表面インピーダンスによる誤差とは反対方向に働く。すなわち、等電位線は電極から離れようとする。水深が浅い場合にはこれがより大きく影響してくるから、傾斜角を6度くらいにしてできるだけ深くとるようにした。

そのほか平衡点検出上の誤差があるが、これら誤差の原因となる要因を検討して実用上十分な精度をもたせることができた。

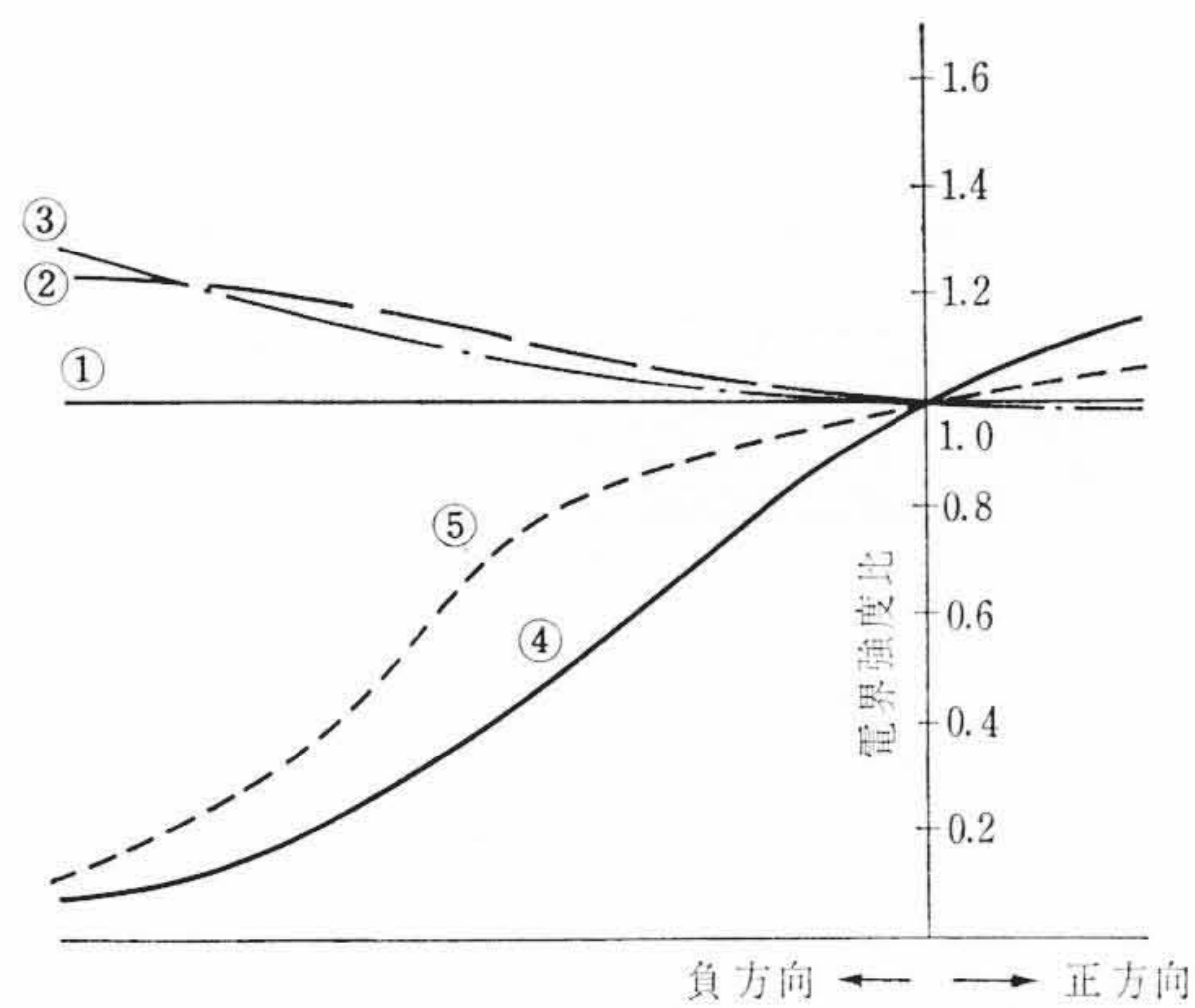
油止接続箱内の電位分布の測定結果を図5に示す。電気的に最も重要な部分はシールド金具近辺であり、この先端付近では軸方向の電界強度が半径方向のそれとほぼ同程度になり、絶縁に対して十分な考慮をしなければならないことがわかる。シールド金具と導体接続スリーブとの空間には90%の等電位線でもあまりはいり込んでいないので、導体接続スリーブ上の絶縁にはあまり電圧がかからないと考えられ、絶縁構成上この部分は楽にできる。

図6はシールド金具の位置を軸方向に変えた場合に各点の電界強度がどのように変化するかを調べた結果である。図6はシールド金具のある位置 x_1 における電界強度を基準にして描いてある。

シールド金具がスリーブをおおいかくすような位置であれば、スリーブ上の電界強度はきわめて小さくなり、スリーブの仕上げの程度、絶縁などに裕度ができ施工上非常に楽であるが、反面シールド金具上の電界は先端付近で強くなる。逆にシールド金具がスリーブの肩点より引込んだ位置にあるとスリーブの肩の点の電界は強くなるが、シールド金具の先端付近の電界は弱められる。

3.1.2 破壊試験結果

電界解析の結果を考慮して設計し破壊試験を行なった。結果を



(a) 各点の電界強度の変化
x₁における各点の電界強度を
それぞれ基準にとった

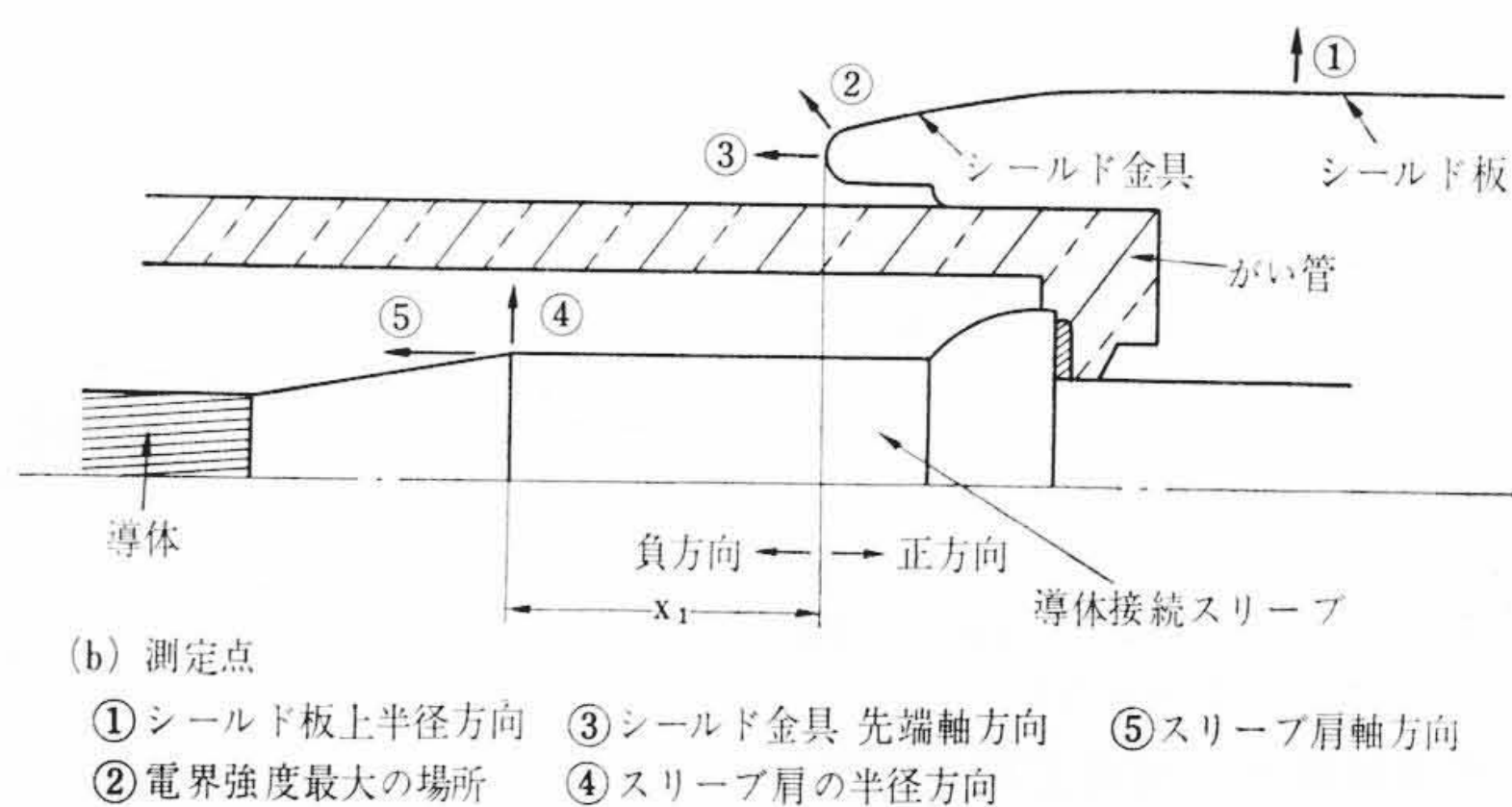


図 6 シールド金具の位置による電界強度の変化

試番	施工時間*1 (時間分)	破 壊 電 圧		破 壊 点
		インパルス	交流長時間	
1	28.45	1,450 kV/1回	—	接続箱
2	29.25	—	570 kV/1 h 45 min	接続箱
3	28.15	1,650 kV/2回	—	接続箱
4	22.50	—	630 kV/1 h 21 min	接続箱
5	28.50	—	640 kV/昇 圧 中	ケーブル
6	26.30	試 験 中	—	

*1 アルミシースはぎから鉛工完了までの時間

表 2 に示す。試番 1 および 2 は同一設計のものであり、以後はこれに改良を加えていったものである。接続箱内で破壊した場合の破壊経路はすべてシールド金具から油浸紙中を軸方向に破壊し、かい管表面に沿って接地側に達するものであった。

施工時間は普通接続箱の項で述べたと同様、熟練と治具の開発により短縮できるものと考えられる。

その他の電気特性として温度上昇試験を行なったが、ケーブル本体と同等の温度上昇であることを確認している。

これらの結果からこの油止接続箱は十分実用に供し得るものと考えられる。

3.2 ラジアルパワーファクタ(R. P. F)と水分量測定結果

表 2 中試番 4 の接続箱の解体の際、試料を採取して R. P. F と含有水分量を測定した。結果を図 7 に示す。これらの測定は試料採取の仕方、測定法によりかなり影響を受ける。試料は大気にできるだけ触れないように接続箱内にあった油中で切断採取した。水分量測定はカールフィッシャー法によった。この結果からでは R. P. F、水分量と施工時の気温、湿度あるいは施工時間との相関は明確にはできなかったが、湿度の高いときに施工した部分は水分量も多いようである。

油浸紙片を一定湿度ふん囲気中に暴露して吸湿率、誘電正接、体積抵抗率、破壊電圧などを測定した結果では、吸湿時間とそれら特性値との間には一定の関係が存在するが、実際の施工時には、油浸紙の同一部分を長時間大気にさらしておくことはほとんどなく、次々に重ねて巻いてゆくため、露出時間との関連が複雑になるものと考えられる。

4. 結 言

以上 275 kV OF ケーブル用接続箱の諸特性について述べてきたがおもな結論は次のとおりである。

- (1) 普通接続箱の寸法は鉛工間距離 1,800 mm、銅管外径 220 mmφ、フランジ外径 300 mmφ となる。

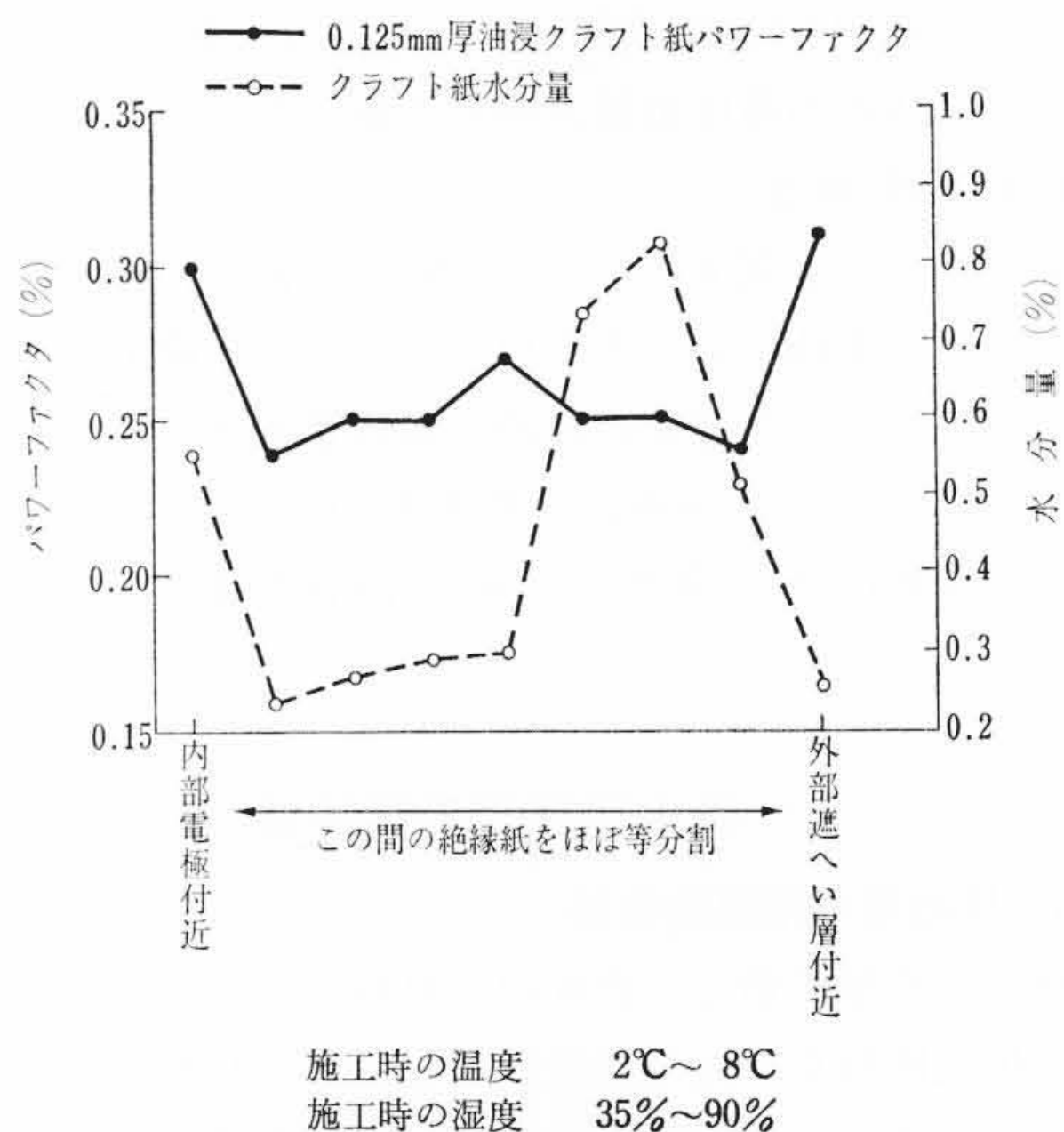


図 7 油止接続箱内絶縁紙のラジアルパワーファクタと水分量測定結果 (室温)

- (2) 油止接続箱の寸法は鉛工間距離 3,200 mm、銅管外径 400 mmφ、フランジ外径 475 mmφ となる。
- (3) 上記の寸法のものでいずれも都心導入地中送電線路の BIL 900 kV に対して何ら問題ない性能がえられた。
- (4) 温度上昇試験、誘電正接測定の結果は実用上とくに問題とする点のないことがわかった。

今後の問題としては人孔内接続作業方法の検討と現地施工による接続箱の電気特性のは握がある。接続部としては現地布設状態で BIL 900 kV に対して適切な裕度を持つ性能のものでなければならないわけであり、この点を現在検討中である。

終わりに、ご意見ご指導を賜わった東京電力株式会社工務部地中線課の方々ならびに日立電線株式会社日高工場高橋部長、橋本課長および依田主任研究員、また実験に当たってご協力いただいた内田、柴田両氏に感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) P. G. Priaroggia: CIGRE, No. 216 (1960)
- (2) J. J. Walker: IEEE Summer Power Meeting 31C5 (1965)
- (3) 井上ほか 2: 電四連大, No. 909 (昭 36-4)
- (4) 落合ほか 2: 電気学会東支大, No. 289 (昭 36-11)
- (5) 満井ほか 2: 電四連大, No. 1036 (昭 38-4)
- (6) 加賀谷ほか 6: 電四連大, No. 1037 (昭 38-4)
- (7) H. D. Short: TAIEE, 68, 1275 (1949)
- (8) 加賀谷: 超高圧送電(送電工学講座②) 283(昭 36 日刊工業)
- (9) F. J. Miranda: TAIEE Paper No. 31 TP 65-681
- (10) E. F. Beckenbach: Modern mathematics for the engineer P 373~419 (1962)
- (11) D. Mc Donald: PIEEE 100 pt II, 145 (1963)
- (12) 武藤: 電力, 43, 4号~14号 (昭 34) 44, 2号~4号 (昭 35)