

275kV OFケーブル用縮小形油止め接続箱の開発

Development of Midget Oil-Stop Joint for 275kV OF Cable

275kV OFケーブル系統の都内導入に際して、油止め接続箱の大幅な寸法の縮小が必要となり、この要求を満たすと同時に構造の簡易化と作業時間の短縮、及び低熱抵抗化を含めた新形の油止め接続箱を開発した。開発完了後、ただちに実線路への適用を可能とするため詳細な特性チェックを実施し、また、これらの実験的検討と併せて、性能の安定化と信頼性を高めるために接続箱の電界解析及び熱解析の手法を確立した。

今回開発した油止め接続箱は、長さが2,000mm、施工組立て時間が約6時間、接続箱の熱抵抗がケーブル部の約40%であり、電気性能も十分安定しており、所期の開発目標を満足するものである。

小杉欣之助* Kosugi Kinmosuke
大 畠 勝 一* Ōhata Shōichi
佐 藤 英 男** Satō Hideo
安 藤 順 夫** Andō Nobuo
井 出 成 夫*** Ide Shigeo

1 緒 言

最近の大都市における用地難や交通事情などからケーブル接続箱の寸法の縮小と接続作業時間の短縮が強く要望されている。またケーブル本体の大サイズ化や強制冷却方式の開発に伴い接続箱の低熱抵抗化も要求されるようになってきている。これに対処して、66～275kVの新形普通接続箱及び66～154kVの新形油止め接続箱の開発が進められ^{1)～3)}一部実用化されている⁴⁾。更に今回、275kV OFケーブル用油止め接続箱の小形化が必要となり、性能の安定化と低熱抵抗化を含めた縮小形接続箱の開発を実施した。開発に当たっての目標は次のとおりである。

- (1) 接続箱の長さが普通接続箱と同等程度であること。
- (2) 構造が簡単で組立てに長時間を要しないこと。
- (3) 性能が安定しており、作業者の熟練度に影響されないこと。
- (4) 熱抵抗がケーブル部と同等であること。

これまでの各種接続箱を基礎として試作と試験を行なうとともに、理論解析手法を確立し、これら目標を満たす縮小形油止め接続箱を開発した。

2 縮小形油止め接続箱の構造と特徴

縮小形油止め接続箱（以下、SJBと略す）は、図1に示し

た内部構造を持ち、基本的には66kV及び154kV級で開発されている新形SJBと同一である。このタイプのSJBの特徴については詳細に報告されている⁴⁾ので、ここでは従来形のSJBと対比して主要点だけを表1に記した。なお縮小形油止め接続箱の組立途中における内部絶縁の外観を図2に示した。

3 縮小形油止め接続箱の性能

今回開発した縮小形SJBは開発完了後、ただちに実線路への適用が可能であることを前提として、詳細な性能のチェックとその安定性を確認するための長期実負荷試験が実施された。以下に縮小形SJBの諸性能について述べる。なお諸試験に使用したケーブルは、275kV、1×1,400mm²アルミ被OFケーブルである。

3.1 初期電気性能

現地施工方法に準じて工場内で組み立てた接続箱について、初期耐電圧あるいは破壊試験、部分放電及び誘電正接の測定を実施した。試験方法及び試験結果を表2及び図3に示す。

直流、交流及びインパルス電圧に対する耐電圧試験は2回実施しており、いずれも275kV級接続箱としては十分な裕度を持つ性能が得られている。

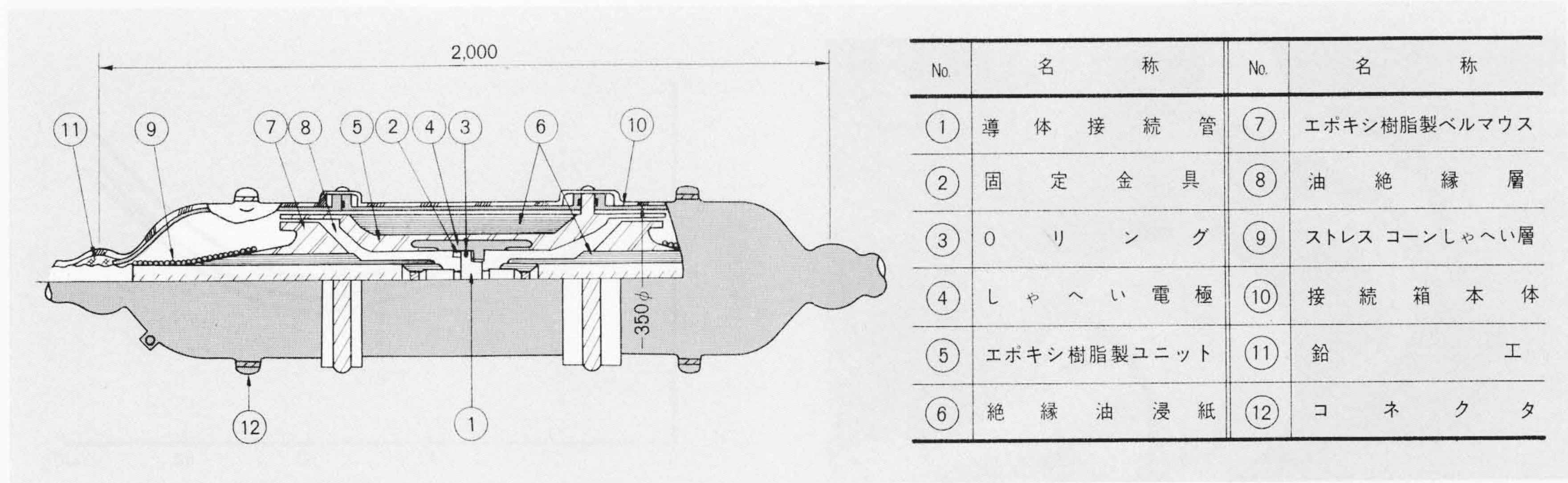


図1 縮小形油止め接続箱の構造 ①、④、⑤、⑦、⑧などにより本接続箱の特徴が発揮される。

* 東京電力株式会社 工務部地中線課 ** 日立電線株式会社研究所 *** 日立電線株式会社日高工場

表1 縮小形油止め接続箱と従来形油止め接続箱の比較 エポキシ樹脂製ユニットの採用により、従来形と比較して長さが約60%、外径が約80%に縮小されている。

接続箱 タイプ 項目	縮 小 形	従 来 形	従来形と比較した 縮小形の利点
導体接続	圧縮後の仕上げ 不要	圧縮後、グライン ダなどで仕上げ	作業時間の大幅な短 縮 銅粉などによる 汚損防止
油止め機構	エポキシ樹脂製ユ ニットの採用	磁気がい管を左右 対称に2個使用	寸法縮小と作業の簡 略化
現地作業の 補強油浸紙 巻き	エポキシ樹脂製ベ ルマウスの下の油 浸紙のみ	大量の油浸紙巻き が必要	作業時間の短縮 性能の安定化
寸 法	外径：350mm 長さ：2,000mm	外径：420mm 長さ：3,200mm	長さが約60%に縮小 普通接続箱と同等
その他	金属しゃへい電極 がエポキシ樹脂製 ユニット内へ埋め 込まれている。	金属しゃへい電極 上に直接現地で油 浸紙を巻く。	熟練度による性能の ばらつき小
	大幅な油絶縁部の 導入	油絶縁部は小	低熱抵抗化

これら耐電圧及び破壊試験に使用したエポキシ樹脂製ユニットは、ユニット単体としてヒート サイクル試験（－30～90℃ 4サイクル）を経ているが、更に過酷な熱履歴を与える冷熱試験（試験方法については後述する）を行なった場合の性能チェックとして、部分放電試験と耐電圧及び破壊試験を実施した。

冷熱試験を経たユニットを用いて接続箱を組み立て、まず交流240kV（ $\div 275/\sqrt{3} \times 1.5$ ）で部分放電の発生しないことを確認した後、交流420kVの耐電圧試験を6時間行ない、再び240kVで部分放電の測定を行なった。その結果、全く異常は認められず、過酷な冷熱試験による埋込み電極上のはく離やクラック発生のないことが確認できた。なお、引き続き交流耐電圧555kV/3h及びインパルス破壊試験を実施し、1,620kVでストレス コントロール コーン立上り部が破壊した。こ

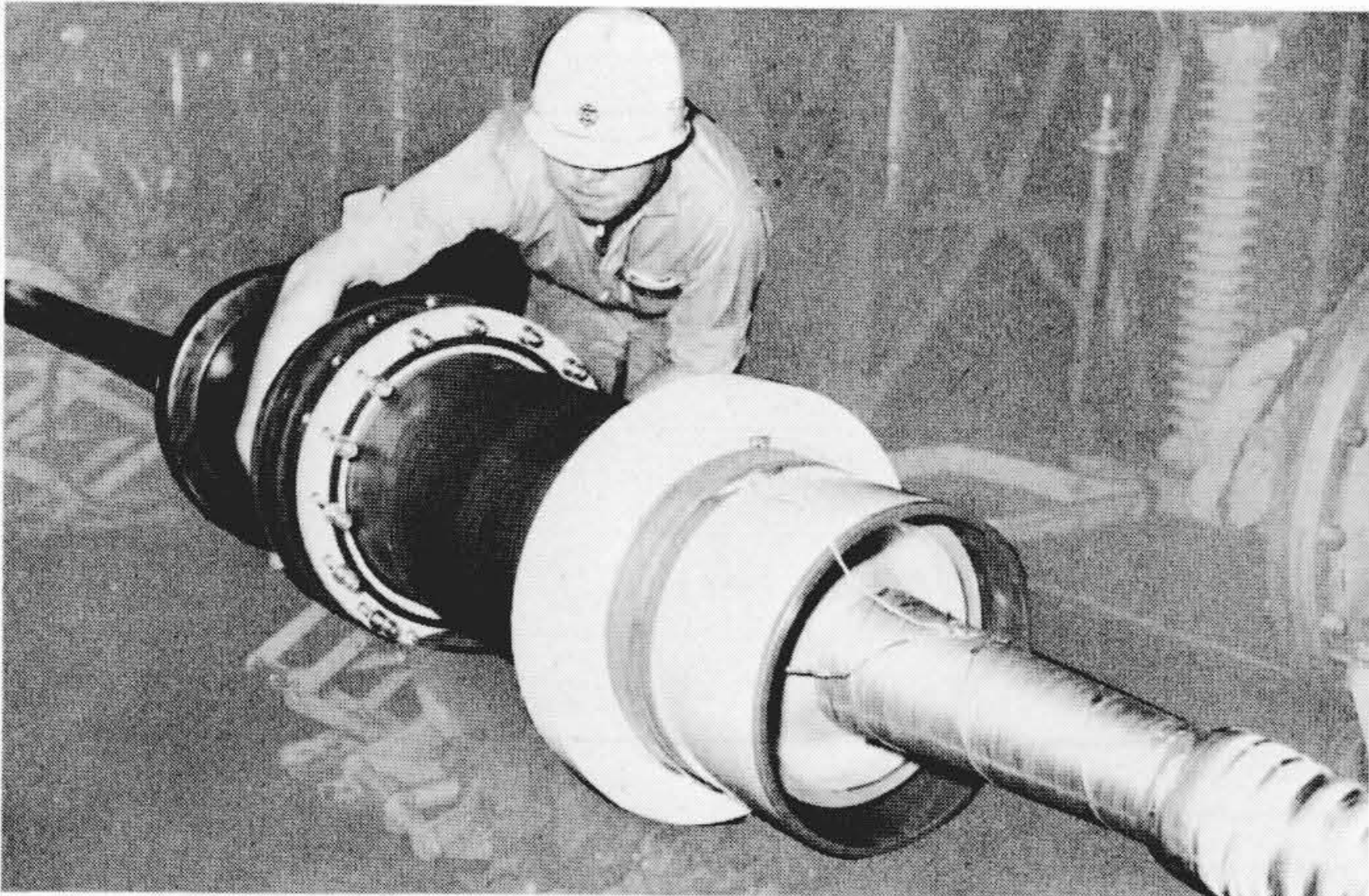


図2 縮小形油止め接続箱の内部絶縁 中央にあらかじめ油浸紙が巻かれたエポキシ樹脂製ユニット、その内側にエポキシ樹脂製ベルマウス及びすずめっき軟銅線でしゃへいされたストレス コントロール コーンが見える。

表2 縮小形油止め接続箱の初期電気性能 275kV級として十分裕度のある性能である。

試験項目	試験電圧、課電時間 (又は課電回数と結果)	要求耐電圧 その他	試験法、その他
直流耐電圧	1. $\ominus$ 600kV/30min 良 2. $\ominus$ 600kV/30min 良	414kV/1h	—
交流耐電圧	1. 555kV/3h 良 2. 600kV/3h 良	420kV/6h	420kV/6h後、 15kV/3hで昇圧
インパルス耐 電圧(破壊)	1. $\ominus$ 1,620kV/1回 破壊 2. $\ominus$ 1,705kV/3回 良	$\oplus$ 1,260kV $\ominus$ /各3回	$\oplus$ 1,260kV/各3回後、 $\ominus$ 極性のみ15kV/3回 で昇圧
部分放電測定	1. 交流240kVで発生 せず。 2. 交流420kV耐電圧後 交流240kVで発生 せず。	交流240kV で発生せず。	測定感度30pC
誘電正接測定	常温～95℃ 154～378kV	0.5%以下	外部均一加熱測定 結果は図3に示さ れている。

注：直流、交流及びインパルス試験は1.、2. 別試料について各々2回実施した。

の値は、表2に示すとおりである。

次に、275kV ケーブル用接続箱として、誘電体損の小さいことも要求されるので、組み立てた接続箱について誘電正接の温度、電圧依存性を測定した。その結果を表2及び図2に示す。なお、接続箱は外部から均一温度に加熱され、また両側ストレス コントロール コーン部を含めた部分が測定されている。

誘電正接の値は、ケーブル本体部よりやや大きくなっているが、これはエポキシ樹脂製ユニットが主絶縁部を形成しているためで、後述する本接続箱の低熱抵抗性を考慮すると275kV ケーブル用接続箱として問題のない値である。

3.2 長期実負荷試験

長期課・通電による安定性を検証するため、日立電線株式会社の実負荷試験場で接続部を組み立て、課・通電試験を実

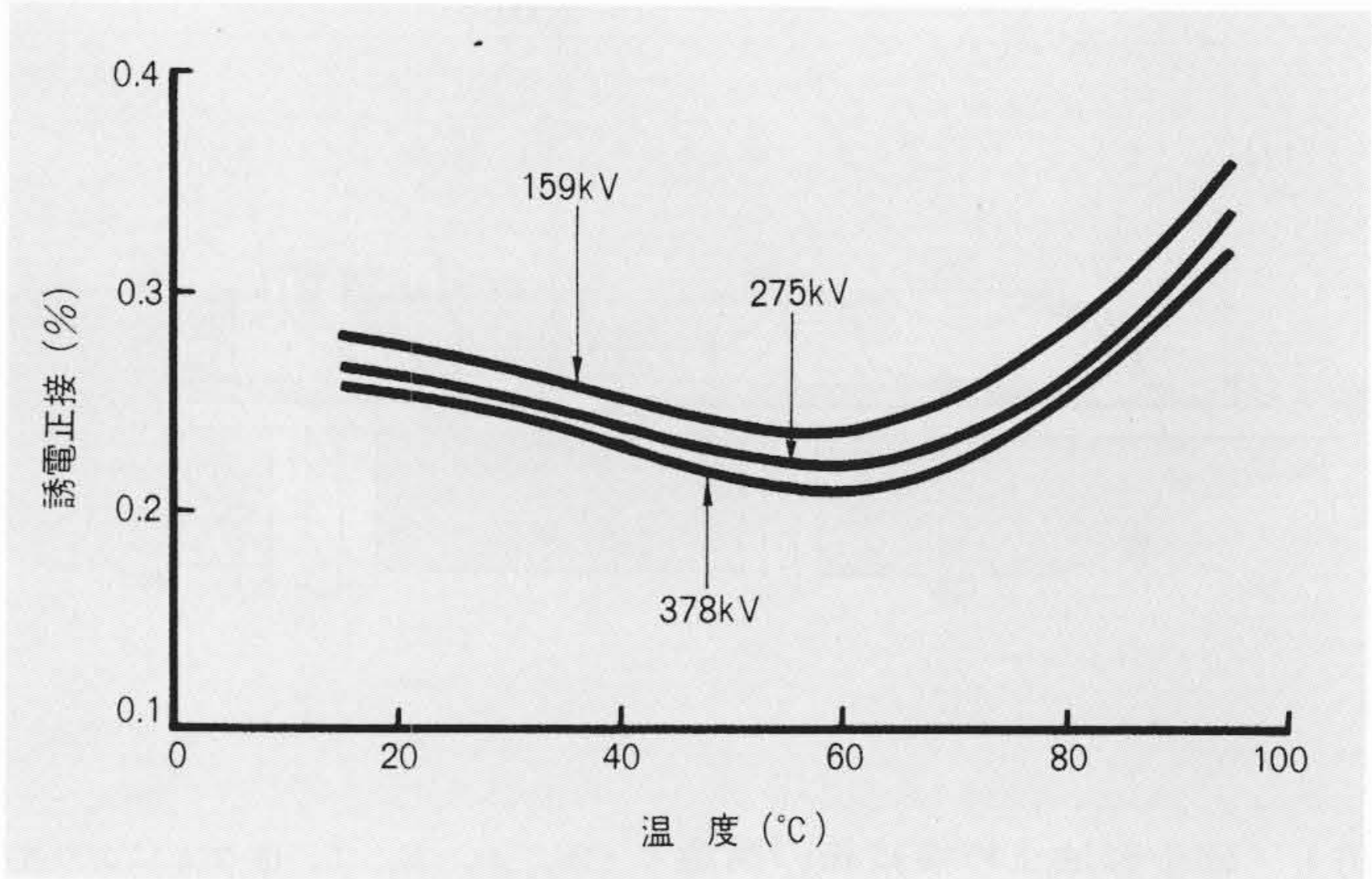


図3 誘電正接温度特性 長期実負荷試験の前後で、ほぼ同一の特性が得られており、性能が安定している。

施した。この試験に供したエポキシ樹脂製ユニットもあらかじめ冷熱試験が行われた。接続箱組立て後、部分放電試験（交流240kV）及び直流耐電圧試験（414kV/1h）、更に、外部均一加熱による誘電正接温度特性を測定した後、昭和51年2月に課・通電試験を開始した。

課・通電試験の条件は次のとおりである。

- (1) 印加電圧：240kV 連続
- (2) 通電電流：1,600A 8時間通電、16時間しゃ断（ケーブル本体部分の導体温度が85℃になるように外部保温している）。このような条件で30サイクルのヒート サイクルを問題なく完了した後、誘電正接温度特性の測定と直流耐電圧試験を実施した。ヒート サイクル30サイクル前後の誘電正接温度特性は図3に示した初期の特性と変わりなく劣化は認められなかった。更に、引き続いて同一条件で実負荷試験を継続し、その後、課電正接温度特性の測定、交流長時間耐電圧試験（420kV/6h）及びインパルス電圧破壊試験を実施する予定である。

3.3 油污損に対する絶縁強度

このSJBはエポキシ樹脂製ユニットとエポキシ樹脂製ベルマウスの間大きな油絶縁層（図1の⑧）があり、何らかの理由で油が汚損された場合の性能を確認しておく必要がある。このため、油污損時の性能試験を実施した。強制的な油の汚損は以下の方法によった。すなわち、接続箱施工時に発生が予想される汚損として、ケーブル切断時の切粉（銅粉）、導体スリーブ圧縮後スリーブ端などをグラインダで仕上げたときに生ずる銅粉（今回開発したSJBではスリーブの仕上げが不要であり、銅粉の発生する可能性は少ない）、各部のはんだ付けに必要なペーストなどを全く清浄することなく接続箱内の油に混入させた。この油污損時の接続箱は直流電圧600kV/30minに耐え清浄時と変わらなかった。また、交流長時間破壊試験の結果、エポキシ樹脂製ユニットに沿った油層部分で490kV/45minで破壊した。

これらの結果から、通常起こり得ないほどの汚損下でも交流耐電圧試験値420kV以上の性能を持つことが確認された。

3.4 エポキシ樹脂製ユニットの油密及び圧力破壊試験

SJBの油止め機構の油密性を調べるため、1kg/cm²G対9kg/cm²Gの差圧試験を実施したが、全く異常は見られなかった。

また別途作製した治具を使用して、エポキシ樹脂製ユニットの内圧破壊試験（図1に示すエポキシ樹脂製ユニットの右内側から圧力を加える）を実施した。その結果、78kg/cm²Gでフランジの付け根の部分でエポキシが破壊した。破壊するまでの間、油漏れは認められなかった。これらの値は中油圧ケーブルの常時最高使用圧力6kg/cm²Gに対して十分な裕度を持っている。

3.5 エポキシ樹脂製ユニットの冷熱試験

ヒート サイクルに対するエポキシ樹脂製ユニットの安全性を確認するため、100℃及び20℃の液体を使用し、各1時間保持5サイクルの急冷、急熱のヒート ショック試験を実施した。目視による判定及び前述の接続箱組立て後の部分放電試験のいずれでも異常は認められなかった。

3.6 組立て施工時間

前述の各試験で組立て施工時間の実測を行なったが、その平均値は5人で約6時間であった。従来形SJBの工場内組立て施工時間は8人で20時間程度要していたことを考えると、大幅な短縮がなされていることが分かる。ただし、この組立て施工時間の中には段取り、真空引き及び注油の時間は含まれていない。

4 縮小形油止め接続箱の理論解析

上述のように、新形SJBの試作と試験を行ないその性能を確認するとともに、よりいっそうの性能の安定化と信頼性向上のために理論解析を採用入れた。

4.1 電界解析

接続箱の電気特性、特に絶縁破壊強度をある値以上に保つためには課電時における接続箱内各部の電界強度を知り、これをそれぞれの材料の破壊強度に対応したある値以下に抑えなければならない。このために、接続箱内の電界解析は有効かつ重要な手段である。特に今回のように縮小寸法が与えられ、なおかつ性能の安定化を図るためには各部の材料特性をもとにそれらの配置と寸法を変えて理論解析し、最適形状を決定する必要がある。

ここで行なった電界解析の手法は、一般に差分法と呼ばれている方法であり、電子計算機を利用して解析したい空間を格子状に分割し、各格子点でラプラスの式に基づく差分方程式を導き、両電極側の境界条件を与えた後、各点の電位が所定の誤差内に収まるまで繰返し計算させる方法である。

このようにして各部の電位と電界が計算されるが、電界分布は複雑となるためここでは省略し、等電位分布だけを図4に示した。実際の開発に当たっては、これらの計算値と材料の許容電界強度を比較し、裕度のある部分で寸法を縮小するという方法で設計を進めた。

4.2 熱解析

強制冷却の採用などにより地中送電線の大容量化が行なわれ、これにより接続箱の低熱抵抗化が強く要望されている。低熱抵抗化を図るためには接続箱内の温度分布を正確に知る必要があり、接続箱の温度上昇の実測と合わせて熱解析を行なった。従来から行なわれてきた熱解析の手法は接続箱内をかなり粗く分割し、各部の熱抵抗を与えて等価回路を組立て連立方程式を解く方法であった。この方法では、SJBのように複雑な熱流のあるものには適さない。このため、正確な理論解析の手法を開発し、今回のSJBに適用した。

4.2.1 熱解析の手法

熱解析は基本的に電界解析と類似している。電界解析は電位に対するラプラスの方程式を基本にしているが、熱解析では各部の発熱を考慮した温度に対するポアソンの方程式を基本にしている。

温度に対するポアソンの方程式を円筒座標で表現すると軸対称の場合、次のようになる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = w \dots \dots \dots (1)$$

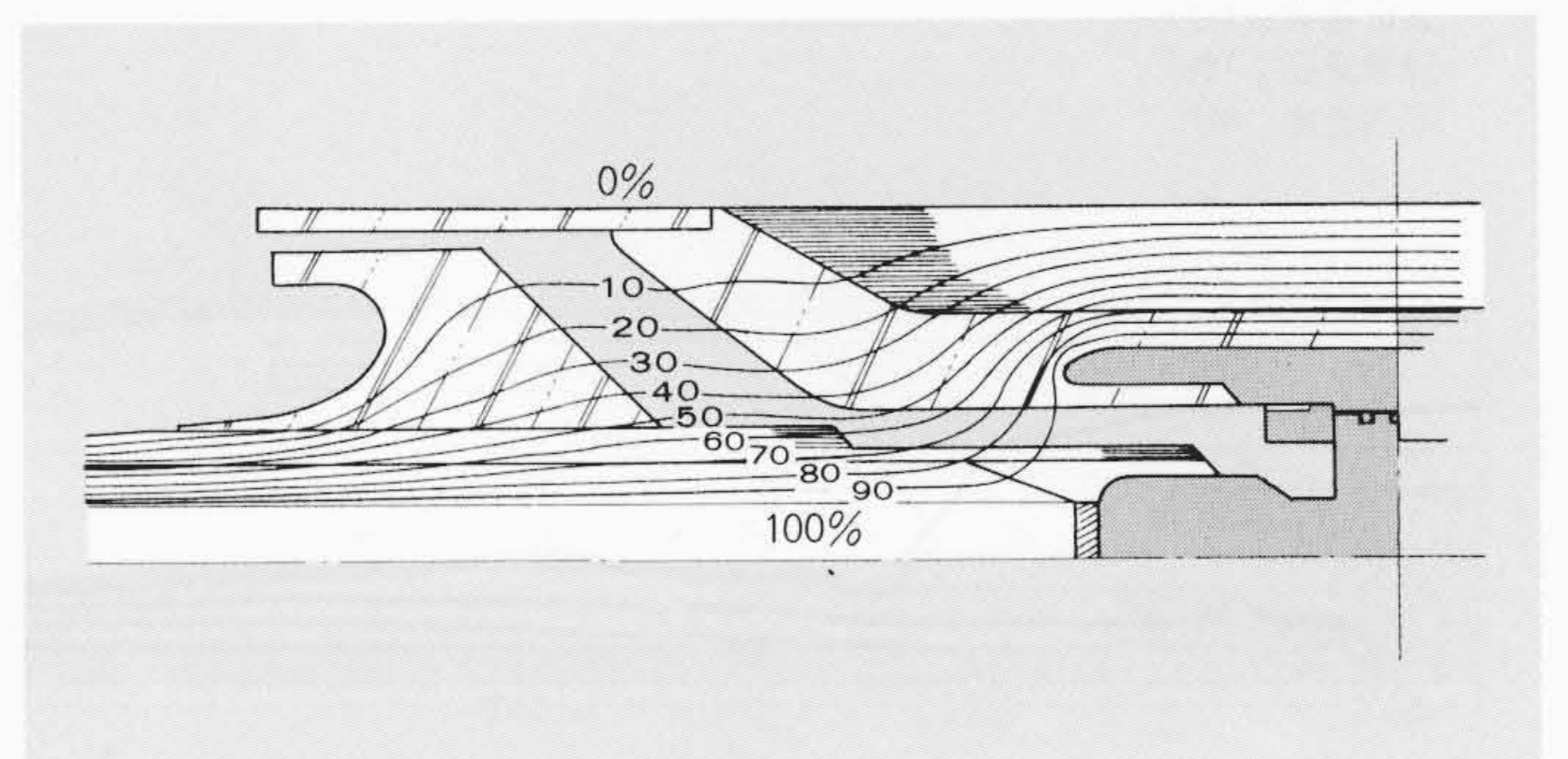


図4 縮小形油止め接続箱の等電位分布 エポキシユニットに埋め込まれたシールド電極により、導体接続管近傍の電界が緩和されている。

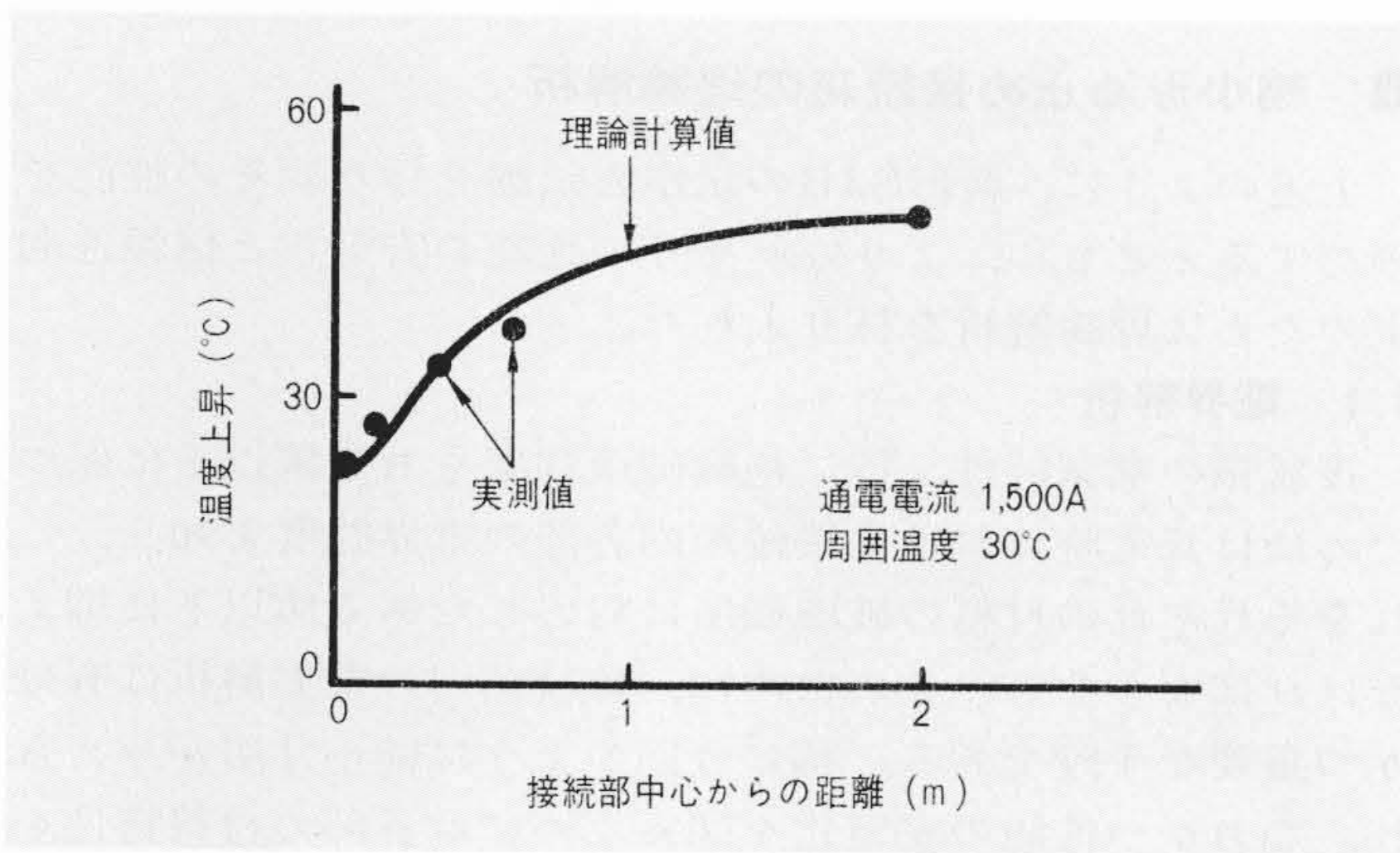


図5 154kV 1,000mm²用油止め接続箱の温度上昇 理論計算値と実測値とが良い一致を示している。

ここで、

T : 温度 (°C)

ρ : 体積固有熱抵抗 (°C・cm/W)

w : 発生熱量 (W/cm³)

計算領域の各格子点で隣接する格子点の温度の関係式を(1)式の差分式として表現する。境界条件としては大気温を所定の値とし、更に導体内面、接続箱中央断面及び無限遠点のケーブル断面の熱流が0として与える。なお、発生熱としては導体損、誘電体損及びシース損を考慮した。このようにして、境界条件と(1)式の差分式の連立方程式を繰返し計算することにより各格子点の温度を求めることができる。

4.2.2 熱解析結果

SJBにこの計算手法を適用する場合の要点は対流のある油の等価的な固有熱抵抗をいかに選定するかという点にある。今回開発した275kV用SJBと類似の構造を持つ154kV用SJBを用いて温度分布を実測するとともに、油部分の固有熱抵抗を種々変えて計算した結果、次のような値を採用することにより、図5に示すように実測値と良い一致を示すことが分かった⁵⁾。

- (1) 対流の大きい部分の油の等価固有熱抵抗：0.6°C・cm/W
- (2) 対流の少ない部分の油の等価固有熱抵抗：50°C・cm/W
- (3) 導体と油が接触する部分の固有熱抵抗（厚さ0.5mm）：800°C・cm/W

これらの値をもとに275kV SJBについて周囲温度40°Cの人孔内で、負荷電流1,600Aを通電したときの等温分布の計

算結果を図6に示す。同図から分かるように、SJB中央の導体接続管の温度は約55°Cであり、温度上昇は15°Cとなる。一方、ケーブル部の温度上昇は38.6°Cであるから、等価的な接続部の熱抵抗（温度上昇/単位長の発生熱量）はケーブル部の約40%である。したがって、ケーブル部に強制冷却が適用されてもSJBは非冷却で十分対処できるものと考えられる。

5 結 言

以上述べたように、新しく開発された275kV縮小形油止め接続箱は、所期の要求性能を十分満足し、実線路への適用に当たって何ら問題のないことが立証された。その要点を記すと次のとおりである。

- (1) 接続箱の寸法：長さ2,000mm、外径350mm
- (2) 組立て施工時間：約6時間×4人（ただし、工場内組立て）
- (3) 電気性能：交流耐電圧550kV以上、インパルス耐電圧1,600kV以上、直流耐電圧600kV以上、コロナ開始電圧240kV以上(30pC)及び誘電正接0.25%(常温)
- (4) 熱的性能：接続箱の等価熱抵抗はケーブル部の約40%
- (5) 機械的性能：エポキシ樹脂製ユニットの内圧破壊試験78kg/cm²Gで破壊、冷熱試験で異常なし
- (6) 長期安定性：240kV連続課電、1,600A 8時間通電（導体温度85°C）—16時間しゃ断、30サイクル異常なし

長期課・通電試験は、現在も継続中である。なお本油止め接続箱は、東京電力株式会社京北巢鴨線に6組み採用されることが決定している。

最後に、本油止め接続箱の開発に当たり、終始御指導をいただいた東京電力株式会社及び日立電線株式会社の関係各位に対し厚くお礼申しあげる。また、研究推進に御協力いただいた日立電線株式会社研究所の皆藤順一氏、及び電力ケーブル部の鯉淵澄男氏にも併せて感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 金子、深沢ほか：「66kV OFケーブル用簡易形接続箱の開発」日立評論、53、576（昭46-6）
- 2) 金子、佐藤ほか：「154kV OFケーブル用改良形普通接続部」日立評論、54、361（昭47-4）
- 3) 前野、五味ほか：「新しい275kV OFケーブル用普通接続箱の開発」日立評論、57、713（昭50-8）
- 4) 金子、橋本ほか：「154kV OFケーブル用新型油止め接続箱の開発」日立評論、55、603（昭48-6）
- 5) 大畠、佐藤ほか：「275kV OFケーブル用低熱抵抗化付属品」昭51電気学会全国大会1072（昭51-4）

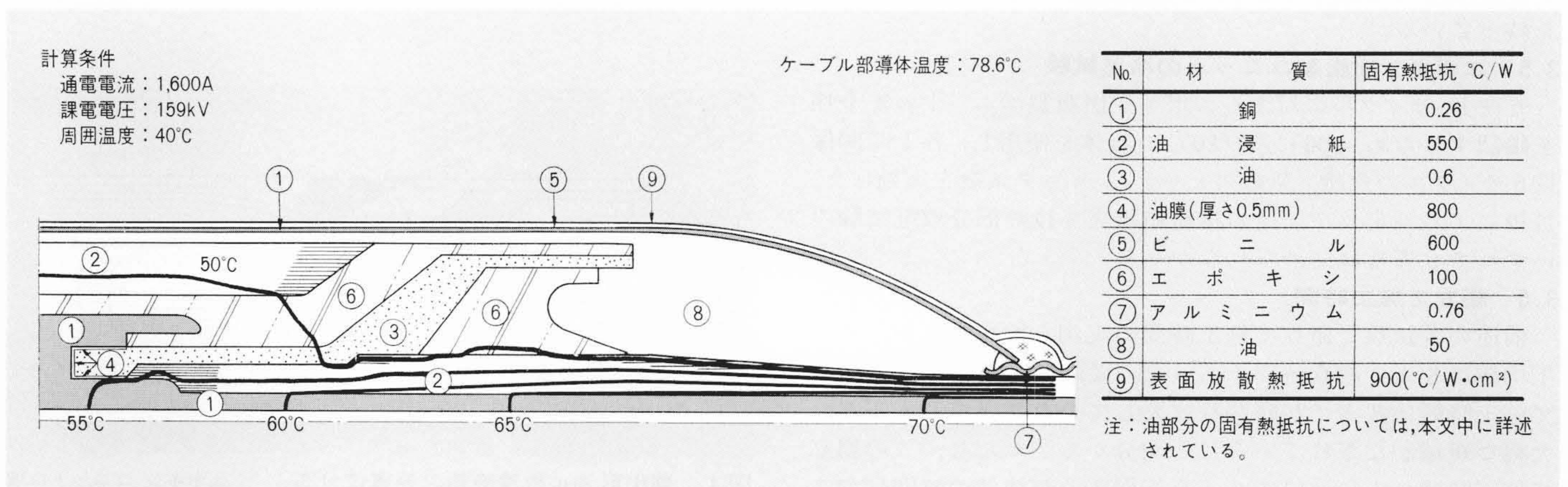


図6 接続箱内の温度分布 50°Cの等温線から明らかなように、発生熱は油③を通して外部へ放散されている。