

新しい275kV OFケーブル用普通接続箱の開発

Development of New-Type Normal Joint for 275kV OF Cables

大電力送電用275kV OFケーブルの大都市内部への導入に関して、ケーブル本体の大サイズ化や強制冷却方式の開発が進められており、並行して接続箱についても低熱抵抗化、作業の簡易化が要求されている。これにこたえて、油のみの部分と油浸紙の部分から成る複合絶縁の採り入れ、並びに成形仕上げした導体接続管とエポキシベルマウスの採用による新しい接続箱を開発した。この接続箱は、電気的には複合絶縁による電界の緩和、熱的には対流による熱抵抗の低減を目指している。試作と試験の結果、期待どおりの性能が得られ、接続箱の低熱抵抗化(熱抵抗 $115^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$:現用の84%)並びに組立時間の短縮(作業時間4時間:現用の $\frac{1}{2}$)が可能となった。また初期にも長期的にも電気的性能が非常に安定していることが確認された。

前野 頴彦* Toshihiko Maeno

五味 善昭* Yoshiaki Gomi

安藤 順夫** Nobuo Andô

井出 成夫*** Shigeo Ide

1 緒 言

275kV OFケーブルは、我が国の地中送電線路の基幹系統として既に多くの実績があり、ケーブル本体はもとより各種接続部も安定した性能を発揮している。電力需要の増加につれて、275kV OFケーブル系統は更に拡大される傾向にあり、またいっそうの大容量化が計画されている。

電力会社とケーブルメーカーは協力して大サイズケーブルの製造、布設工事及び冷却などの問題を検討しその解決に当たっているが、接続部についても大容量送電を可能にするとともに、予想される膨大な工事量に対処できるものを開発する必要に迫られている。一つはケーブル部分の送電容量を強制冷却により増大させたとき、熱的なネックとならないよう接続部の熱抵抗をケーブルと同程度に低減することであり、また他の問題は、厳しい道路使用条件や熟練接続員の不足に対処して組立てが簡単で、しかも性能の安定した接続箱を開発することである。

2 設計上の考え方

新しい形の接続箱の開発に当たって、設計上次の考え方を採用した。

熱抵抗を下げるためには、

(a) 接続部の油浸紙補強絶縁層の厚さを薄くすること。

(b) 補強絶縁層に固有熱抵抗の小さい絶縁体を用いること。の二つの方策があり、また組立てを簡単にし性能を安定にするためには、各使用材料を部品化して高度の技術を要しない組立作業を多くするよう、全体をプレハブ化することは当然であるが、

(c) 使用材料を選んで接続作業の技術のばらつきを材料の特性の裕度で補うこと。

(d) 各部のストレスを緩和し、部分的なミスが全体の性能に結びつかないようにすること。

などを考えなければならない。

日立電線株式会社では、既に66~154kV OFケーブル用新形接続箱として油絶縁を用いた前記(b)、(d)の考え方による接続箱を開発しており⁽¹⁾⁽²⁾、電気的、熱的に良好な性能をもつことを確認している。そこで、今回の275kV OFケーブル用

接続箱も同様な考え方で進めることにした。

詳細は3.において述べるが、その主な特長は次に述べるとおりである。

(1) 内部絶縁は油浸紙、油及びエポキシが組み合わされており、現用の接続箱と比較して導体側の高ストレスが緩和されている。

(2) 油を主絶縁体の一部に用いるとともに、その対流効果により熱抵抗を下げている。

(3) 導体接続管、エポキシベルマウス及び油浸絶縁筒など部品組立作業を多くし、高度の技術を要する成形作業を省略している。これにより組立時間が短縮され、また、組立技術の差による性能のばらつきも抑えられる。

このような接続箱では全体的に電気ストレスが緩和される反面、これまでの接続箱に比べて径方向の寸法が大きくなる傾向にある。従って、内部の電界分布を調整して、寸法をどこまで小さく抑えられるかが開発上の一つのポイントとなる。

なお、前記(a)、(c)の方式により寸法を縮小した接続箱も設計検討したが、組立時間の短縮や作業の簡易化の点でかなり難しいことが予想されたため、今回の検討では除外した。

3 新形接続箱の構造

図1に新形と現在実用されている普通接続箱の内部構造の比較を示す。組立順序に従って構造の特長を次に述べる。

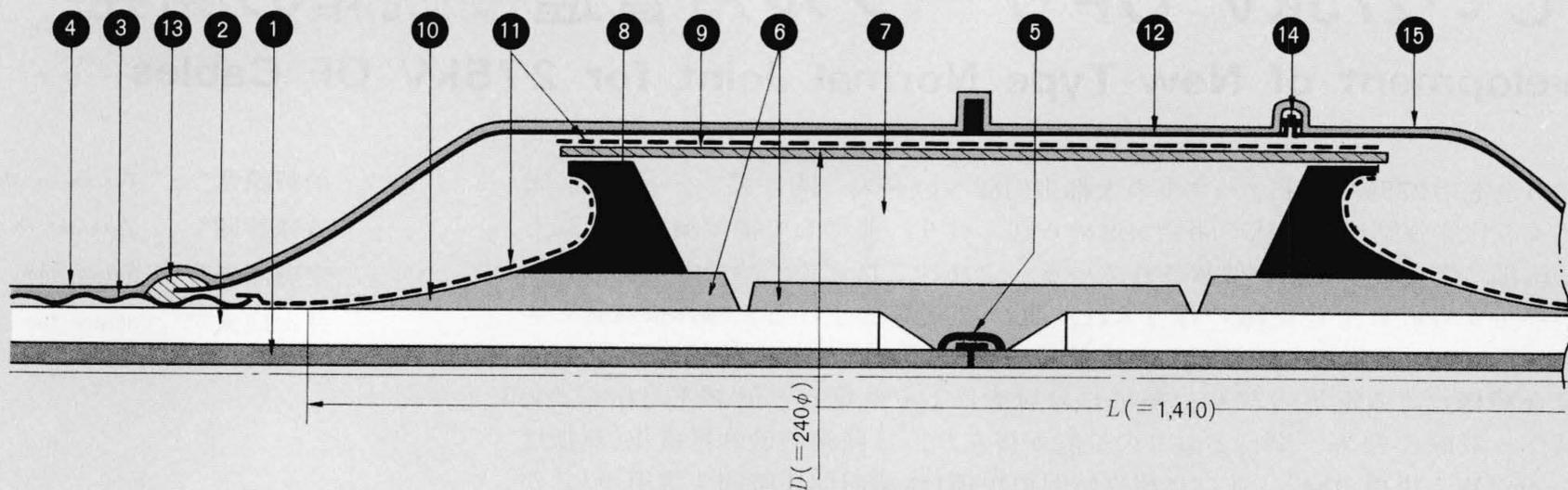
3.1 導体接続

導体接続部は機械的ストレスと電気抵抗の点でケーブルの導体と同等以上の性能をもつとともに、接続箱の絶縁耐力を保つために滑らかな表面でなければならない。従来は、1個の導体接続管でこの目的を果たしていたので、圧縮接続後の接続管の表面仕上げに多くの時間を要していた。そこで新形接続箱では、2個の部品を用い、一つは機械力と電気抵抗を維持するため圧縮接続し、その上にあらかじめ機械成形された二つ割りの別の接続管をかぶせる構造としている。

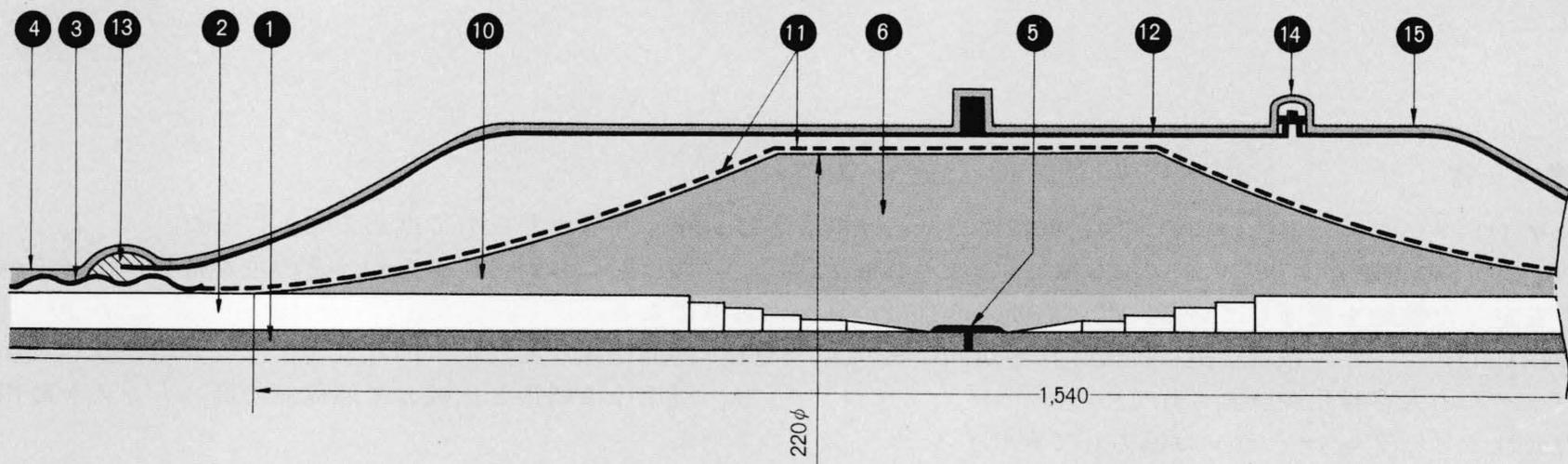
3.2 絶縁層

現用のOFケーブル用の接続箱は図1(b)に示すように、ケーブルコア、ペンシリング部、ストレスコーン及び外部シ

* 中部電力株式会社工務室 ** 日立電線株式会社研究所 *** 日立電線株式会社日高工場



(a) 新形接続箱の内部構造



(b) 現用の接続箱の内部構造

No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称
①	ケーブル導体	⑥	補強油浸紙	⑪	しゃへい層
②	ケーブル絶縁体	⑦	油絶縁層	⑫	銅管ケース
③	ケーブルアルミシース	⑧	エポキシベルマウス	⑬	鉛工
④	ケーブル防食層	⑨	油浸絶縁筒	⑭	コネクタ
⑤	導体接続管(新形では2個の部品で構成)	⑩	ストレスコーン	⑮	防食層

図1 275kV OFケーブル用普通接続箱の構造 新形接続箱は、部品組立作業を主体としており⑤、⑦、⑧、⑨が特長である。

しゃへい層で囲まれた部分をすべて油浸紙で絶縁補強している。油浸紙は絶縁破壊強度が高く補強絶縁体として優れているが、現場での手巻き作業にはかなりの技術と時間が必要である。この点を改善するため、今回の新形では油絶縁層を用い、両側のエポキシベルマウスと外部の油浸絶縁筒(いずれも工場で成形、加工されており現場では装着するだけでよい)で囲まれた空間を油で満たしている。中央に誘電率の小さい油層を置くことにより、油浸紙でおおわれた導体、及び導体接続管上の電界は緩和される。接続箱の絶縁性能は、導体接続管付近の局部的なストレスに微妙に影響されるので、前述の機械成形された接続管の滑らかさと相まって、接続箱の性能向上と安定化が可能となる。

一方、両側に用いられたエポキシ樹脂は、油浸紙層とは違って方向による絶縁耐力の極端な差はないので、ベルマウスを形成した場合、長手方向の電界を高くとることが可能である。新形接続箱では、導体付近とケーブルコア上の半径方向高電界部には油浸紙を用い、その上にエポキシベルマウスを

用いて長手方向の電界に耐え得るようにしている。

更に、エポキシ樹脂は固有熱抵抗が低く、油部分には対流が生じて熱放散が良くなるので、寸法は若干大きくなっても全体の熱抵抗は低くなる。

3.3 しゃへい層

エポキシベルマウスの使用により、ストレスコーン長が短くなること、中央部は油浸絶縁筒の上にあらかじめしゃへい層を形成していることなどのため、現場でのしゃへい層形成時間は極めて短時間で済む。

3.4 その他

上記以外の特長は次に述べるとおりである。

- (1) 補強絶縁層の厚さが薄く、中央部は空間となっているので、短時間に内層部まで真空引きができる。
- (2) 外部しゃへい層は、中央油浸絶縁筒部分とストレスコーン部に分離できるので、絶縁接続箱への適用が容易である。

図2に組立途中の接続箱の内部を示す。

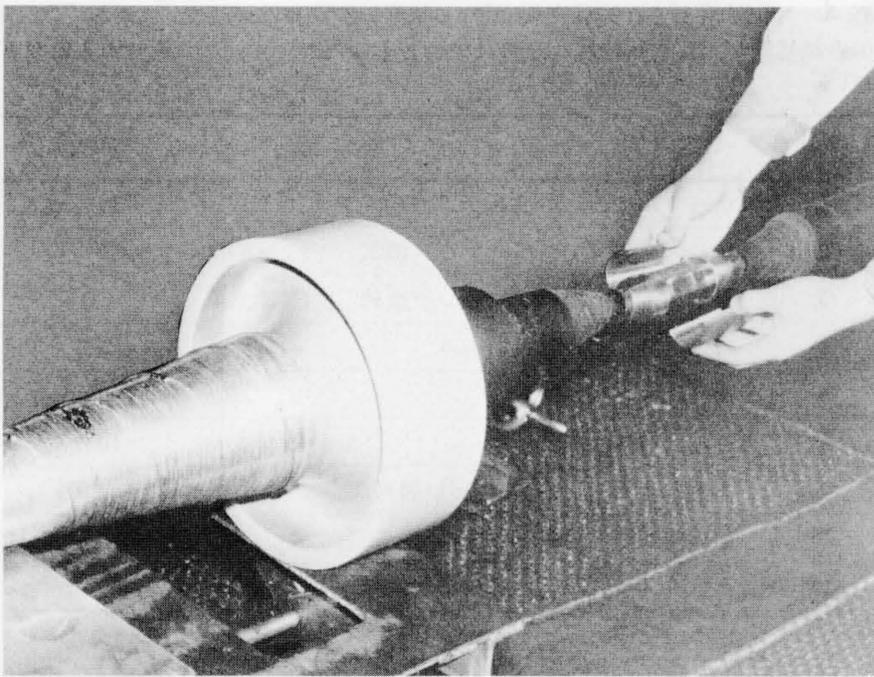


図2 組立中の新形接続箱 写真中央がエポキシ ベルマウス。左がストレス コーン部のしゃへい層、右がペンシリング部及び成形導体接続管である。

4 新形接続箱の諸性能

新形接続箱の性能を調べるため、各種寸法の新形接続箱を試作し、耐圧試験、温度上昇試験、組立作業性及び長期化・通電試験を実施した。ケーブルには、275kV 1×400mm²アルミシースOFケーブルを用いた。

4.1 初期電気性能

新形接続箱の開発に当たって、その電気性能は200号絶縁ケーブルのAC、インパルス耐圧値と同等であるだけでなく、更にAC破壊電圧550kV/3時間以上、インパルス破壊電圧1,600kV/3回以上になることを目標とした。

図1(a)に示す絶縁筒外径 D と補強絶縁の全長 L を種々変えた接続箱を試作して、AC、インパルス破壊試験及びDC耐圧試験を実施した。その結果、主なものを表1にまとめて示す。破壊経路は、AC課電時には中央油層部の油中破壊が多く、インパルスの場合には、導体→ペンシリング→補強絶縁層→油中→エポキシ ベルマウス表面→しゃへい層の経路を辿って破壊することが多い。なお、表1中の破壊電圧欄の「以上」とあるのは、接続箱以外のケーブル、又は終端箱で破壊したことを示している。

次に組立施工時の汚損を模擬した電気試験を実施した。今回開発した接続箱では、導体接続管は工場成形されており、現場では加工されていないので極端な汚損は考えられないが、組立途中になんらかの汚損が生じた場合を想定して性能の確認を行なった。混入汚損物は絶縁特性上、最も過酷な導電性微粒子とし、空気中での密度が1.2g/cm³の銅の細粉を用いている。これを0.25g/l(合計約6g)の割合で油中に混入し、その油を真空引き後の接続箱に満たした。銅粉は油中に浮遊した状態となっている。

同じ汚損方法で2種の寸法の接続箱の試験を行ない、その結果を表2に示す。

表1から $D \geq 240\text{mm}$ 、 $L \geq 1,410\text{mm}$ あれば初期破壊性能として十分な値をもつ。また表2から、極度の汚損があっても $D \geq 260\text{mm}$ あればよく、普通に考えられる軽度の汚損であれば $D \geq 240\text{mm}$ でよいことが分かる。従って、接続箱の内部寸法は $D \approx 240\text{mm}$ 、 $L \approx 1,400\text{mm}$ であれば275kV OFケーブル用接続箱としての性能を満足する。

このとき接続箱の外部の寸法は、銅管直径260mm、鉛工間

表1 新形接続箱の初期電気性能 絶縁筒外径240mmφ、補強絶縁長1,410mm以上であれば、目標性能を上まわっている。

No.	内部絶縁寸法		破壊電圧または耐電圧	
	絶縁筒外径 $D(\text{mm}\phi)$	補強絶縁長 $L(\text{mm})$	AC (kV)	インパルス (kV)
1	210	1,610	480	—
2	220	"	—	1,540
3	240	1,410	585	1,620以上
4	"	1,510	570以上	1,620
5	"	1,610	600	1,600
6	285	1,410	570以上	1,600以上
7	"	1,510	615	"
8	283	1,610	630以上	1,680以上

注：1. No. 3, 4についてはDC耐圧を実施し、600kV20分耐圧良の結果が得られている。
2. AC課電法；420kV/6h耐圧後、15kV/3hで昇圧。
3. インパルス課電法；1,260kV/3回耐圧後20kV/3回で昇圧。

表2 人工汚損時の電気性能 極端な汚損があっても、 $D \geq 260$ であれば性能は良好である。また普通の汚損では $D \geq 240$ であれば、十分であると考えられる。

No.	内部絶縁寸法		破壊電圧あるいは耐電圧	
	絶縁筒外径 $D(\text{mm}\phi)$	補強絶縁長 $L(\text{mm})$	DC耐圧 (kV/min)	AC破壊 (kV)
1	240	1,410	600/20	480
2	260	"	"	570

注：1. 課電法は表1と同じ。
2. AC破壊は中央油部分での放電。
3. 汚損方法は本文参照。

距離1,700mm程度となり、これは現用の接続箱(直径240mm、長さ1,800mm)に比べると、径はやや大きい長さは短いものとなる。

なお、前述したように、ACやインパルスの破壊路はほぼ決まっており、組立作業による性能のばらつきは見られず非常に安定した性能であることも分かる。

4.2 温度上昇試験による熱抵抗の確認

接続箱の熱的性能を知るため、新しい接続箱と現用の接続箱とを直列につなぎ、同一条件のもとで導体電流を通電して各部の温度を測定した。

通電電流が650A、830A及び1,000Aの場合について実験した。1,000A通電時の温度上昇が十分飽和した状態での導体温度分布を図3に示す。また、飽和時の導体最高温度から各接続箱とケーブルの導体～周囲大気間の熱抵抗を求めると表3に示すようになる。すなわち、新形接続箱の熱抵抗は、ケーブルと比べて94%、現用の接続箱と比べて84%に低減されている。このことは、接続箱部分もケーブルと同じ熱特性とみなした強制冷却の設計が可能であることを示している。強制冷却線路の具体的設計上、ケーブル部を強制冷却し、接続部は保守面から非冷却ということも検討されており、本接続箱は、場合によってはこのようなケースにも実用化が可能

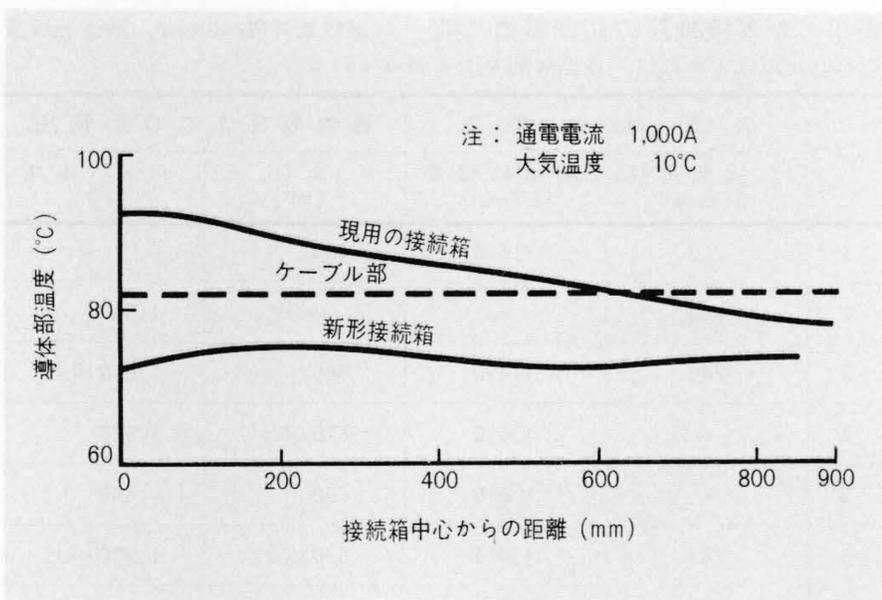


図3 接続箱内部の導体温度分布 新形接続箱の温度上昇は、現用接続箱よりも約15%、ケーブル部よりも6%それぞれ低くなっている。油絶縁層の熱放散が良いためである。

表3 ケーブル及び接続箱の熱抵抗 新形接続箱の熱抵抗は、現用の接続箱はもちろんケーブル部よりも低くなっている。実測値と理論値はよく一致している。

項目	電流 (A)	650	830	1,000	平均	理論値
	ケーブル		119	125	122	
現用接続箱		138	137	135	137	138
新形接続箱		115	117	113	115	114

注：接続箱の熱抵抗理論値は、本文5.に示すように温度分布を理論計算により求め、その最高導体温度と発生損失から求めた。

であると考えられる。

なお、表3中の理論値は、ケーブルについては同軸円筒として簡単に求めることができるが、接続箱については長手方向の熱流が生ずるため複雑な計算が必要となる。これについては、5.において述べる。

4.3 組立作業性

電気性能を確認するため、10回以上の組立を行なったが、その平均的な作業時間は、表4に示すとおりである。従来の接続箱を工場内で組み立てた場合、7～8名の接続員で約8時間を要するので、同表の4名×4時間と比較すると作業量は約1/4になっている。この大幅な低減は、3.において述べたように、導体接続管の成形、油浸紙の巻付け、しゃへい層の形成作業の簡易化によるものである。

なお、組立後の真空引き時間も約3時間で終了しており、現場での接続時にはこの効果も大きい。

4.4 長期課・通電試験による長期性能の確認

長期運転後の性能の安定性を確認するため、最終開発品(D=240mm, L=1,410mm)を2個組み立て、約1年間の課・通電試験を実施した。試験条件は以下のとおりである。

課電電圧：200kV (≒1.3×275/√3)

通電電流：800～1,100A (9時間/1日通電)

接続部最高導体温度：77～88°C

試験途中に接続箱の誘電正接(tan δ)を測定し、全期間を通して、0.21～0.22%(80°C)で安定していることを確認した。また、長期試験後の試料そのものについて、AC、インパル

表4 新形接続箱の組立時間 現用の接続箱と比べて、④、⑤、⑦項の作業時間が大幅に短縮され、合計で約1/2となっている。また真空引き時間も短い。

No.	項目	時間 (min)
①	ケーブル切断, シースはぎ取り	15
②	ケース, 絶縁筒, ベルマウス挿入	30
③	導体むき出し, ペンシリング成形	"
④	導体接続, 成形管はめ込み	15
⑤	油浸紙巻き	50
⑥	ベルマウス セット	10
⑦	ストレス コーン部しゃへい層形成	20
⑧	絶縁筒セット	10
⑨	ボックス セット, 鉛工	60
合 計		240 (4 h)
(真空引き時間)		(3 h)

ス破壊試験を行ない、AC:630kV, インパルス:1,600kVの破壊値が得られている。これは表1に示した初期性能と変わりなく、長期課・通電による劣化は全く生じていないといえる。

5 試験結果の解析

以上のように、本接続箱は電気性能、熱的性能及び組立作業性のいずれをも目標を満たしており、十分実用可能である。このうち、電気的性能と熱的性能については、理論的にも解析でき、その結果は他の接続箱の設計や開発に役立つ。そこで、両者について詳細な解析を試みた。但し、接続箱の形状から長手方向の電界や、熱流を考慮しなければならず、電子計算機を用いて解析されるので、次に得られた結果のみを述べる。

(1) 電位分布は各部の誘電率を与え、ラプラスの方程式を解くことにより、また温度分布は各部の固有熱抵抗と発生熱量を与え、ポアソンの方程式を解くことによって解析できる。方程式の具体的な解法には差分法を用いた。

(2) 電位分布の計算結果の一例を図4に示す。同時に得られた電界分布から接続箱中央の導体接続管上の電界は、AC600kVに対して12.4kV/mm、同じく油中の最大電界は9.6kV/mmとなる。油中の最大電界が10kV/mm前後となれば、AC破壊が生ずることは154kV級簡易接続箱の場合と一致している。また、現用の接続箱を同一外径で組み立てたとすると、導体接続管上の電界はAC600kVに対して16.2kV/mmとなる。すなわち、新形接続箱では電界が約80%に低下しており、これが性能の安定化につながっている。

(3) 温度分布の計算結果の一例を図5に示す。同図中に示した導体温度と図3の実測値とを比較すると、ほぼ一致しており、各部の固有熱抵抗と形状から接続箱内部の温度分布が計算で求められることが裏付けられる。

(4) 今回のデータを基に、275kV, 1×2,000mm²アルミ被OFケーブル用接続箱を設計すると、油浸絶縁筒外径280mm, 補強絶縁長1,410mmとなる。このとき、電気的性能は、今回と同等か又はそれ以上であり、温度分布は、2,000mm²という大サイズ導体による熱流が大きいため、長手方向に平均化される。更に、誘電体損とケーブルのアルミシースの損失による温度上昇を考慮すると、接続箱の最高温度上昇はケーブル部の約90%になる。

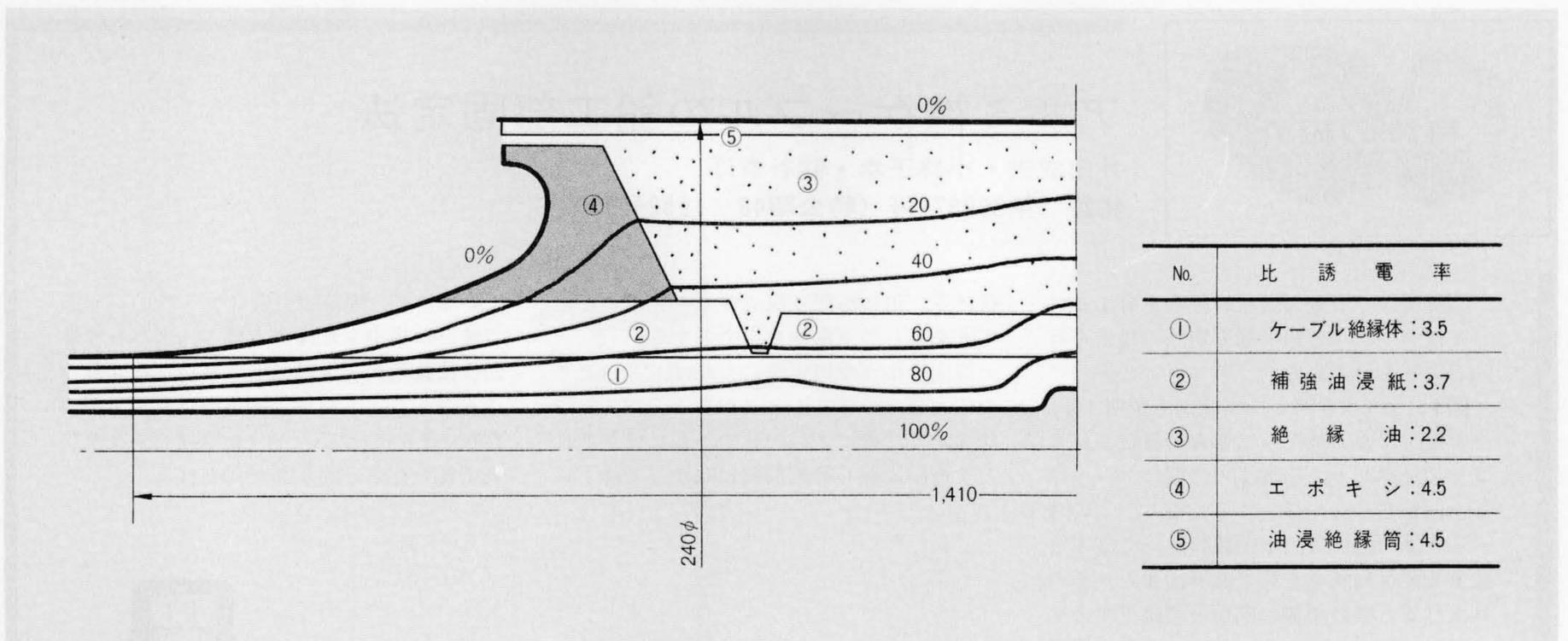


図4 接続箱内の等電位分布 誘電率の小さい油部分の電圧分担が大きくなり、その分だけ導体と導体接続管上の電界が弱められている。このため性能が安定になる。

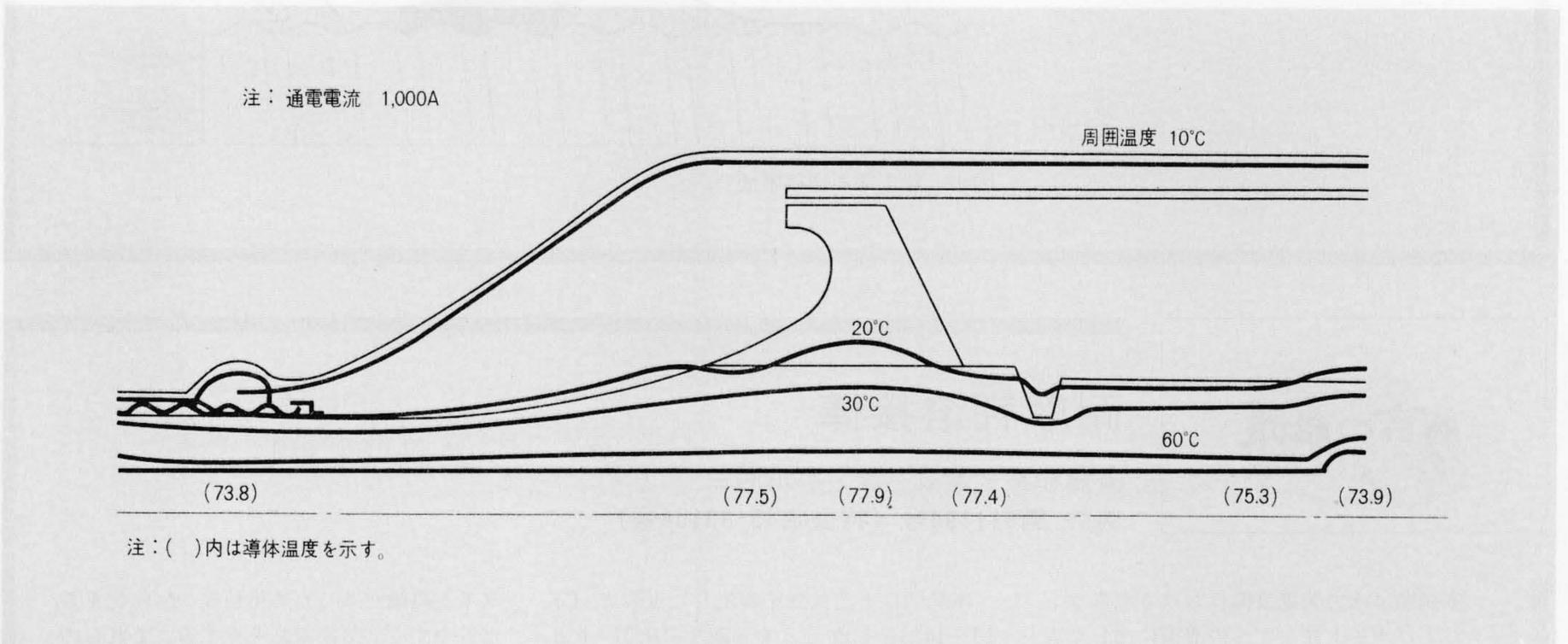


図5 接続箱内の温度分布 油部分の熱抵抗が小さいので、発生熱の大部分はここを通して流れ、中央部導体の温度上昇は低く抑えられる。

6 結 言

近い将来、大容量275kV OFケーブルシステムに必要となる新形の普通接続箱を開発し、その性能を確認した。得られた結果は、次に述べるとおりである。

- (1) 本接続箱の特長は、成形導体接続管、油のみの絶縁、及びエポキシ ベルマウスを用いている点にある。
- (2) 接続箱を試作し、試験したところ次の結果が得られた。
 - (a) 初期電気性能は目標を十分満足している。また、長期性能も安定している。
 - (b) 熱抵抗は現用のものより15%、ケーブル本体に比べても6%低い。このことは、本接続箱が大電力送電用275kV OFケーブルシステムに十分実用可能であることを示していると考えられる。特に熱抵抗がケーブル部よりも低いという点は、強制冷却線路の設計に当たって接続部だけは非冷却

という方式を採り得ることを示している。

(c) 組立作業性は良好で、作業時間は現用の1/2で済む。

(3) 接続箱内部の電界と温度について理論的解析を行ない、いずれも試験結果とよく合致することが確認された。これを基に、理論的に妥当な接続箱の設計が可能となる。

終わりに、本開発研究に当たって終始御指導いただいた中部電力株式会社工務室 安生部長並びに日立電線株式会社研究所 沼尻主管研究員、同電力ケーブル部 渡辺部長及び実際の組立てと試験に当たられた中山、皆藤の両氏をはじめ関係各位に対し厚くお礼申し上げます。

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)