

中部電力株式会社奥矢作第二水力発電所向け 275kVアルミ被CVケーブル

275kV XLPE Insulated Aluminum Sheathed Power Cable for OKUYAHAGI No.2 Power Station

中部電力株式会社奥矢作第二発電所の電力引出し幹線、及び起動変圧器回路用に、恒久布設用としては世界で初めての275kVアルミ被架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル6,200mと、終端接続箱30組みを開発し使用した。

このケーブルは、今までにない厚肉絶縁長尺であるため、開発に当たっては長さ方向の均一性に加え、熱機械特性面にも十分検討を加えた。終端接続箱は、油中及びSF₆ガス中の2種類を開発した。特に、ケーブルの径方向の熱膨張収縮対策として、特殊な材料によるストレスコーン及びベルマウスを使用した。これらのケーブル及び接続箱は、約1年間にわたる長期の課・通電試験のほかに各種の特性確認試験を実施し、十分な信頼性のあることが確認された。

篠田 荘太* Shôta Shinoda
丸茂 守忠** Moritada Marumo
逸見 武男** Takeo Henmi
山口 正幸*** Masayuki Yamaguchi

1 緒 言

架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル（以下、CVケーブルと略す。）は、油浸紙絶縁ケーブルに比べて防災特性に優れ、保守が容易で取り扱いやすいことから、近年、高圧はもとより187kV以下の超高压の分野まで使用され始めてきている¹⁾

このような実績と、製造技術の進歩によるいっそうの信頼性向上を背景に、今回、中部電力株式会社奥矢作第二発電所（以下、奥矢作第二発電所と略す。）に275kVアルミ被CVケーブルが大量に採用された。ケーブルは、導体サイズ600mm²、絶縁体厚さ29mmで製造された。

このような厚肉絶縁の場合、どのようにして欠陥のない均一な絶縁体を作るか、使用中の熱伸縮対策をどのようにするか、などの点に難しさがある。これらの問題に対し、幾つかの新しい技術を開発することにより解決した。

ケーブルの布設作業は、昭和55年3月無事完了した。

2 ケーブルルートの概要

奥矢作第二発電所は、愛知県の矢作川系に建設中の純揚水発電所で、最大出力は780MWである。

275kVアルミ被CVケーブルは、この発電所の地下変圧器室と屋外開閉所とを結ぶ電力幹線として3回線分9条、及び起動変圧器回路用として2回線6条が使用された。ルートの概要は図1に示すとおりである。ルート長は、幹線が約650m、起動変圧器回路が約40mである。ケーブルは片端が変圧器に、もう一方は開閉器に直結接続される。

3 ケーブル

3.1 絶縁体厚さの決定

ケーブルの目標性能は、耐用年数を30年とし、各種の劣化要因を加味して次式²⁾で算出した値、すなわち交流耐電圧V_{AC} 711kV/3時間、雷インパルス耐電圧V_{imp} 1,588kV/3回と

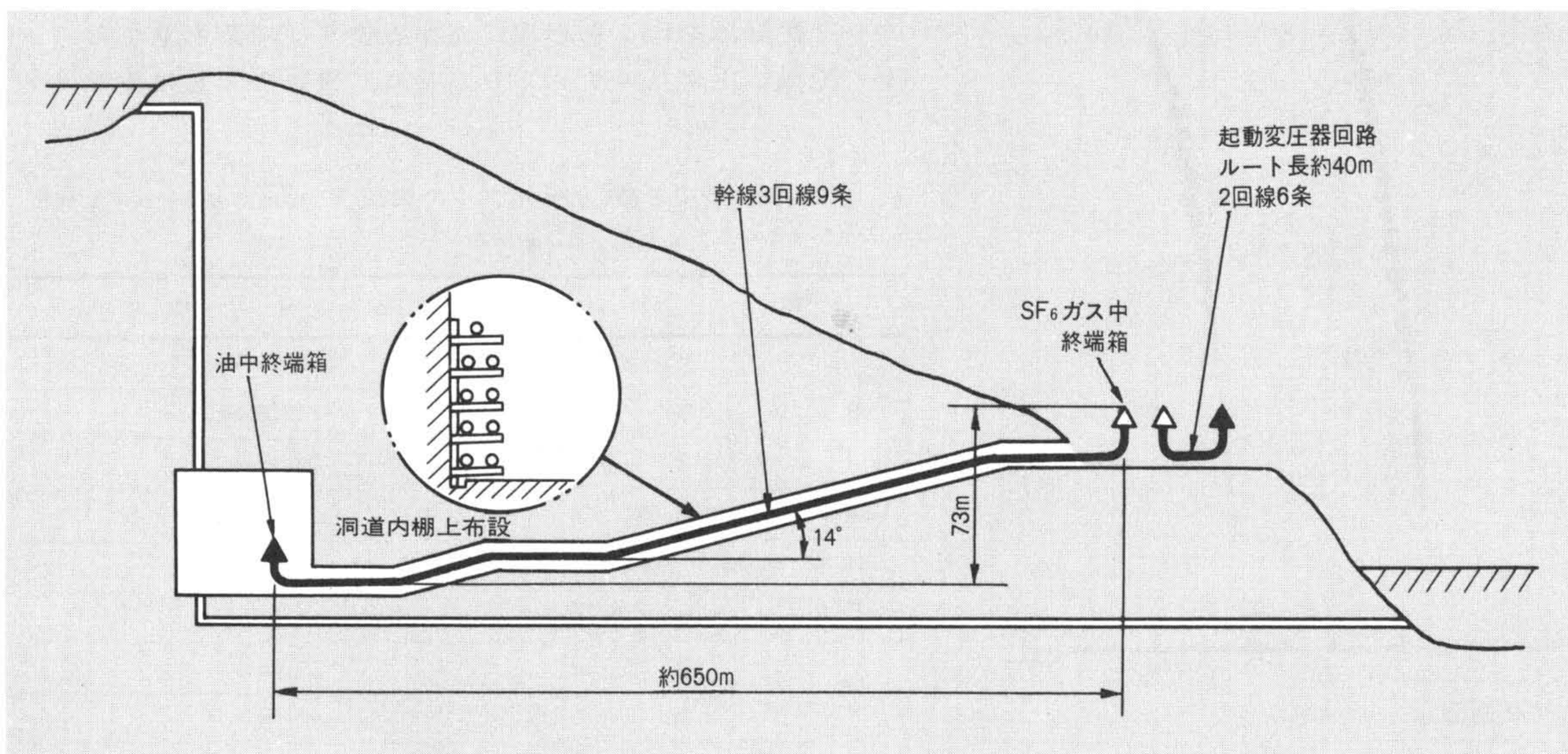


図1 275kV CVケーブル布設ルート
図 ケーブルは片端が変圧器に、もう一方は開閉器に接続される。

* 中部電力株式会社水力部 ** 日立電線株式会社日高工場 *** 日立電線株式会社電線研究所

した。

$$V_{AC} = V_0 \times K_1 \times K_{2AC} \times K_{3AC}$$
$$V_{imp} = V_{BIL} \times K_1 \times K_{2imp} \times K_{3imp}$$

ここで V_0 : 回路最高電圧 $\left(\frac{275}{\sqrt{3}} \times \frac{1.15}{1.1} \text{ kV} \right)$
 V_{BIL} : BIL (1,050kV)
 K_1 : 不確定要素に対する安全係数(1.1)
 K_{2AC} : 9 乗則で算出される経年劣化係数(3.54)
 K_{2imp} : 繰り返し課電を考慮した経年劣化係数(1.1)
 K_{3AC}, K_{3imp} : 常温で試験を行なうことを考慮した
温度係数, $K_{3AC} = 1.1, K_{3imp} = 1.25$

ここで、66kV以上のガス架橋CVケーブルの初期破壊値のワイブル分布をみると、図2に示すように破壊ストレスの最小値は、交流30kV/mm、雷インパルス60kV/mm以上である。そこで、275kV CVケーブルの初期耐電圧設計は、裕度をみて交流25kV/mm (E_{AC})、雷インパルス56kV/mm (E_{imp})を採用した。この結果から、絶縁体厚さは次式で算出される値よりも大きい値として、29mmを採用した。

$t_{AC} = V_{AC} / E_{AC}$ (交流電圧に対する必要絶縁厚さ)
 $t_{imp} = V_{imp} / E_{imp}$ (雷インパルス電圧に対する必要絶縁厚さ)

3.2 架橋ポリエチレン絶縁体の劣化要因

架橋ポリエチレン絶縁体の課電劣化は、(電圧)ⁿ×(時間)=一定 とし、 $n=9$ (いわゆる9乗則)を想定した。目標どおりの信頼性を得るためには、 n を9よりも大きくする必要がある。劣化要因として特に配慮が必要な項目は、絶縁体中の異物、ボイド、水分が挙げられる。これらに対し、次のように考えた。

(1) 絶縁体中の異物、突起の大きさ

電気協同研究会の報告³⁾に基づき計算すると、275kV CVケーブルの絶縁体中の異物、突起から使用電圧で電気トリ

発生しないためには、異物、突起の大きさは140μm以下にする必要がある。そこで、この大きさの管理値を100μm以下に設定した。

(2) 絶縁体中のボイドの大きさ

前記報告に基づき計算すると、使用電圧で放電の起きないボイドの大きさは、40μm以下となる。これに対しては、ガス架橋方式の採用で十分達成できる(通常5μm以下)。

(3) 絶縁体中の水分量

実験によると、課電CVケーブルコアの周囲の湿度が70%を超えると、ケーブル絶縁体中のボウタイトリーの発生数が急激に増えることが確かめられている。ガス架橋方式の採用で、絶縁体中の水分量は200ppm以下にできるが、上記のようなケーブルコア周囲の水分の影響をなくすため、アルミ被内には乾燥窒素ガス(水分量10ppm以下)を封入することにした。

3.3 シャへい層及びシースの構造

ケーブルシースは地絡容量30kA 2秒をもつこと、更に外傷防止、しゃ水を図る目的で波付きアルミ被とした。そしてアルミ被とケーブルコアの間には、熱膨張により絶縁体がアルミ被に食い込むことを防ぐため、径で約2.5mmのギャップを設けた。この場合、布設条件によってはケーブルシャへい層がかなりの長さにわたりアルミ被に接触しないことがあり得る。そこにサージが侵入すると、シャへい層のインピーダンスの大きさによっては、ギャップ部で放電が起こる可能性がある。

理論計算によると放電が起こらないようにするには、シャへい層のインピーダンスを非常に小さくする必要がある。そこで、シャへい層として絶縁体の熱伸縮に追従でき、かつインピーダンスが小さくなるよう金属線を織り込んだ半導電性布テープを開発使用した。

3.4 ケーブルの構造

以上の検討により決定したケーブルの構造を表1に、また完成したケーブルの外観を図3に示す。導体サイズは電流容量的には余裕があるが、使用電圧での絶縁体中の最大電位傾度が10kV/mm以下になるように600mm²とした。

3.5 ケーブルの製造

ケーブル絶縁体の製造に当たっては、ボイド発生抑制、含有水分量の減少、電気特性の向上が図れる日立電線株式会社独自のガス架橋方式を採用したほかに、異物、突起がない均一な絶縁体を作るため次に述べるような対策を立てた。

(1) 絶縁体用ポリエチレンレジン

表1 275kVアルミ被CVケーブルの構造 使用時の最大ストレスは、9.7kV/mmとなる。

| 項 目 | | 仕 様 |
|-----------------|-------|--------------------|
| 導 体 | 公称断面積 | 600mm ² |
| | 形 状 | 円形圧縮 |
| | 外 径 | 29.5mm |
| 絶 縁 体 厚 さ | | 29.0mm |
| 外 部 半 導 電 層 厚 さ | | 1.5mm |
| シャへいテープ厚さ | | 1.0mm |
| 波 付 アルミ被 | 厚 さ | 2.6mm |
| | 高 さ | 6.0mm |
| ビニル防食層厚さ | | 6.0mm |
| 仕 上 が り 外 径 | | 132mm |
| 概 算 重 量 | | 18.6kg/m |

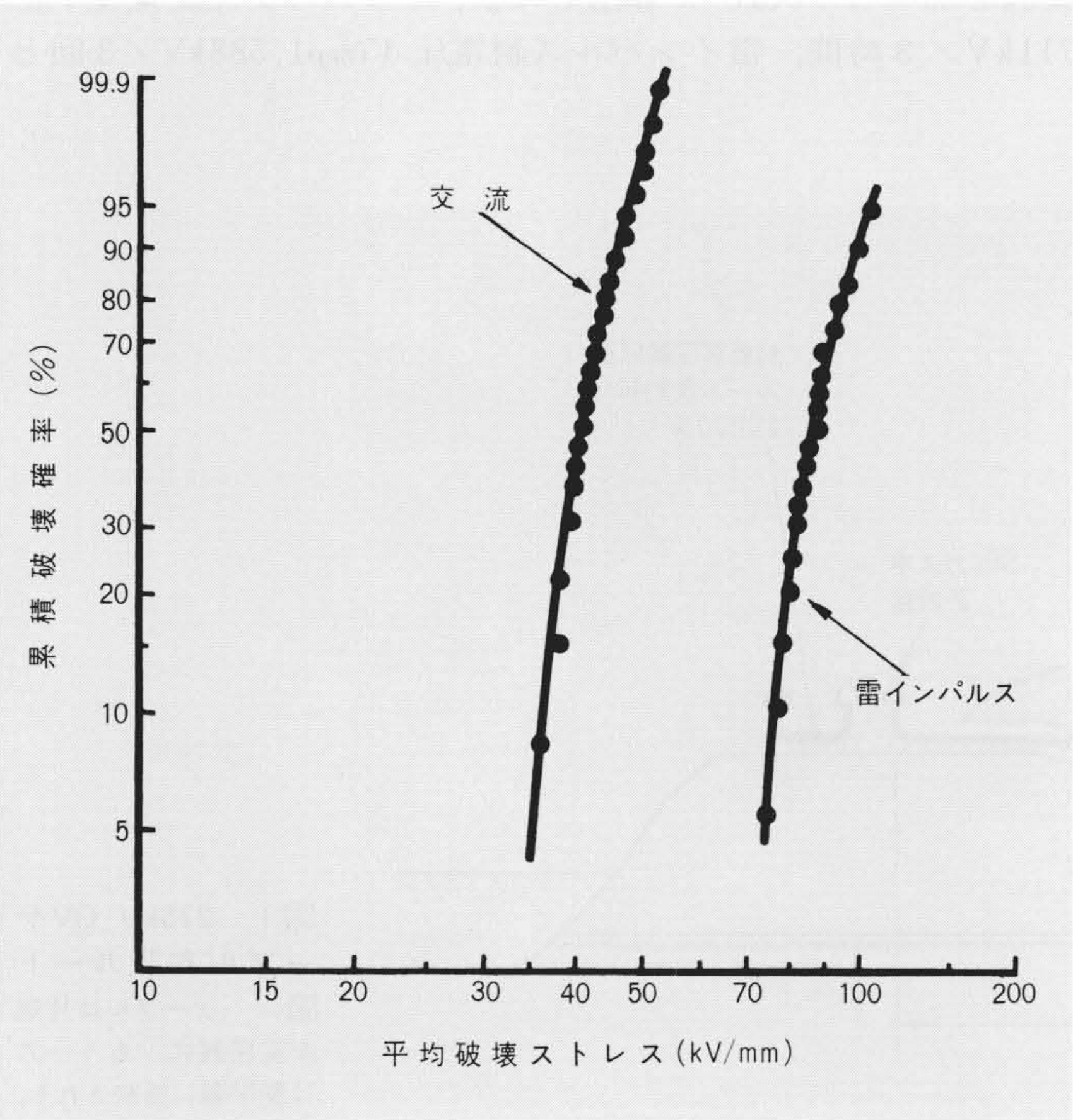


図2 66kV以上ガス架橋CVケーブルの破壊ストレス分布 破壊ストレスの最小値として、交流30kV/mm、雷インパルス60kV/mmが採用可能である。

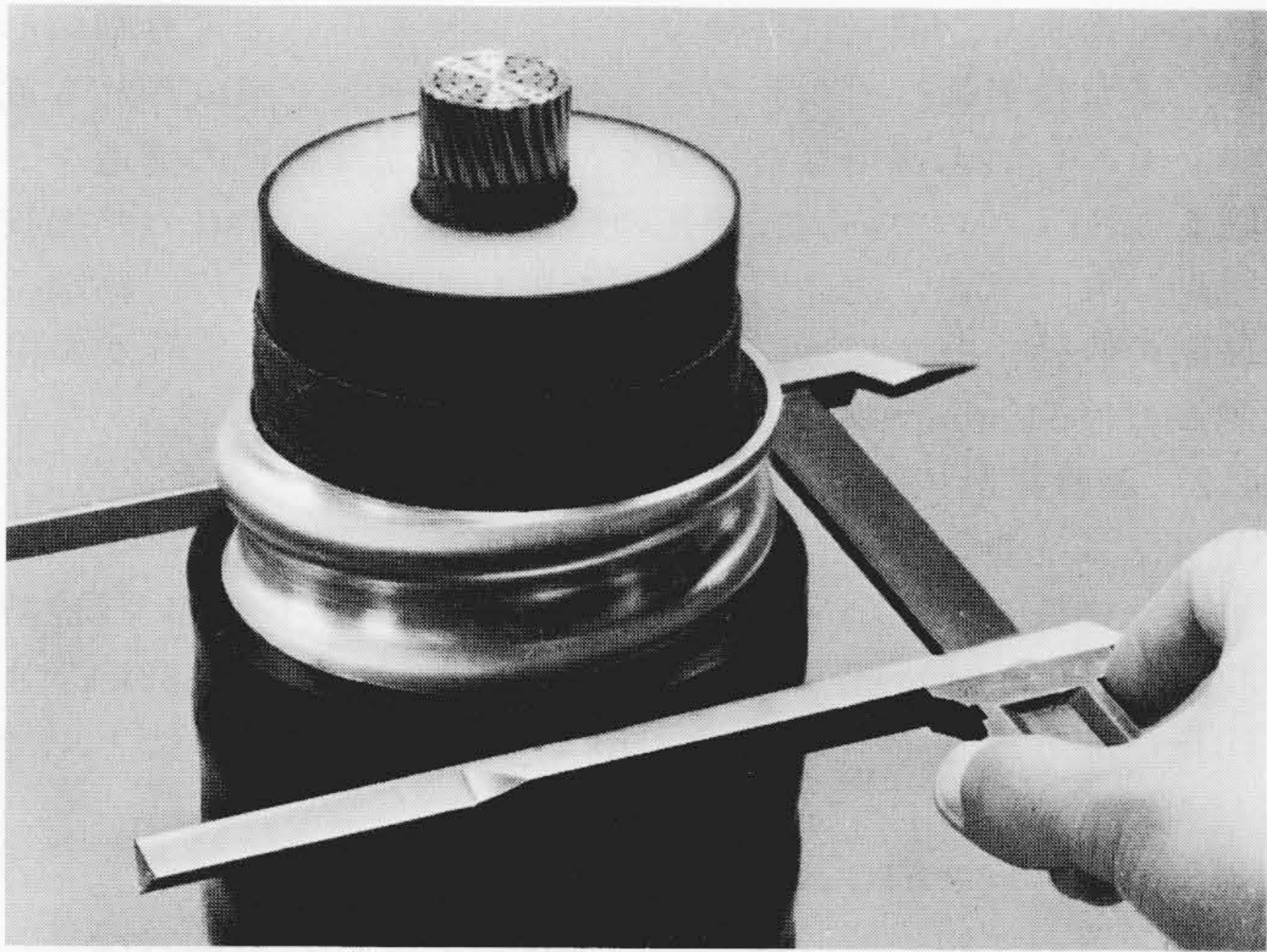


図3 275kVアルミ被CVケーブル 絶縁体の熱伸縮対策として、コアとアルミ被の間に径で2.5mmのギャップを設けている。

- ーパークリーンタイプのものを、レジンメーカーと共同で開発し使用した。
- (2) 絶縁体コンパウンドは、各種添加剤を添加後500メッシュのスクリーニングを行なった。
- (3) 絶縁体、内外部半導電層コンパウンドの製造は、完全に密閉したクリーンルーム内で行なった。
- (4) 絶縁体、内外部半導電層を、3層同時押し出しする方法を採用した。
- (5) 絶縁体が押し出しダイの中に停滞し架橋してしまう、いわゆるヤケの発生を防止するため、絶縁体の流れをコンピュータで解析し適切なダイ設計を行なった。

4 終端接続箱

4.1 構造

終端接続箱としては、変圧器直結形油中終端接続箱とガス開閉装置直結形SF₆ガス中終端接続箱の両者を開発し使用した。

内部絶縁構造は、実績の豊富な275kV OFケーブル用終端接

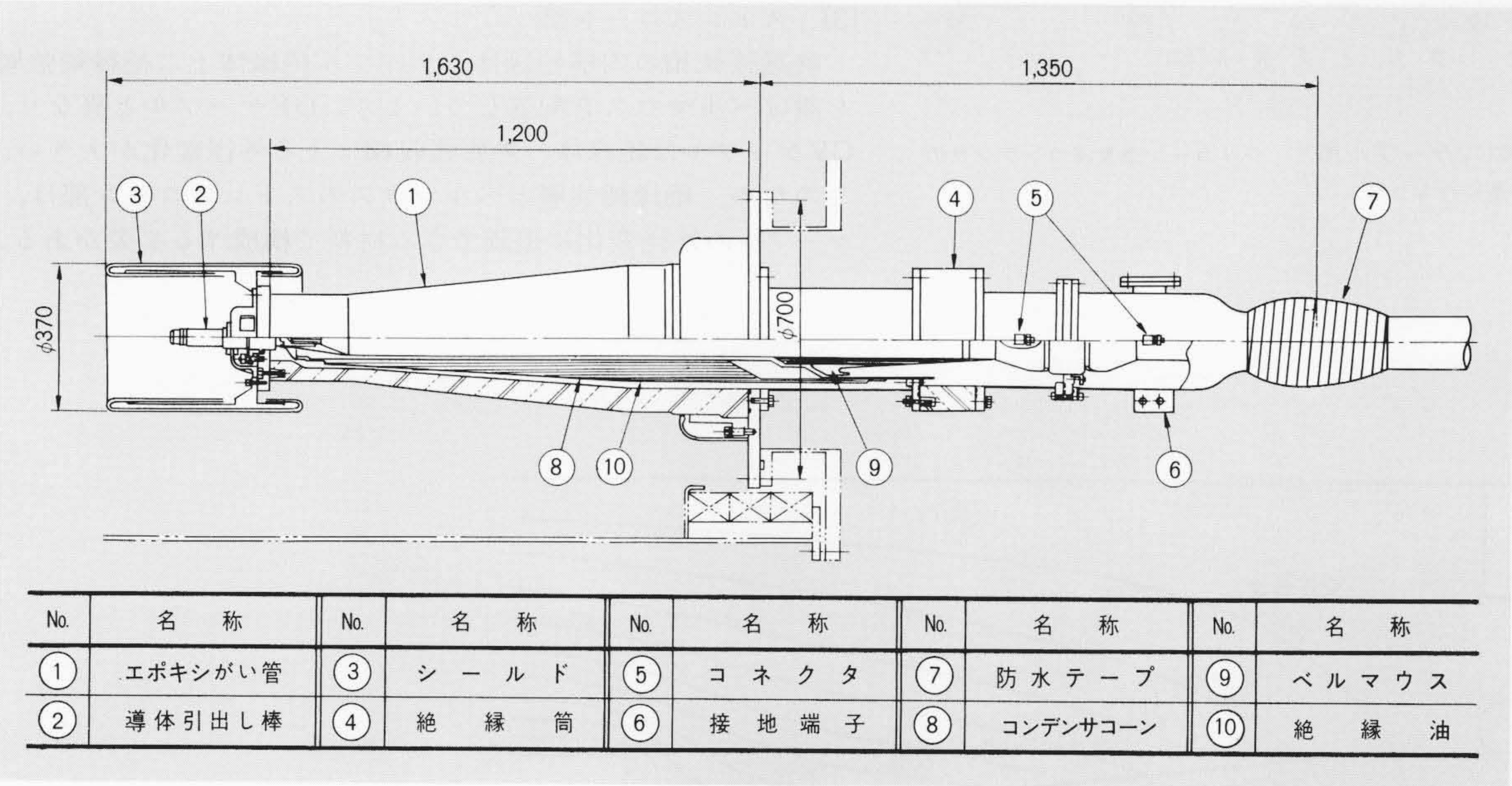


図4 275kVアルミ被CVケーブル用油中終端接続箱 ケーブル絶縁体の熱伸縮対策として、プラスチックベルマウスを採用した。

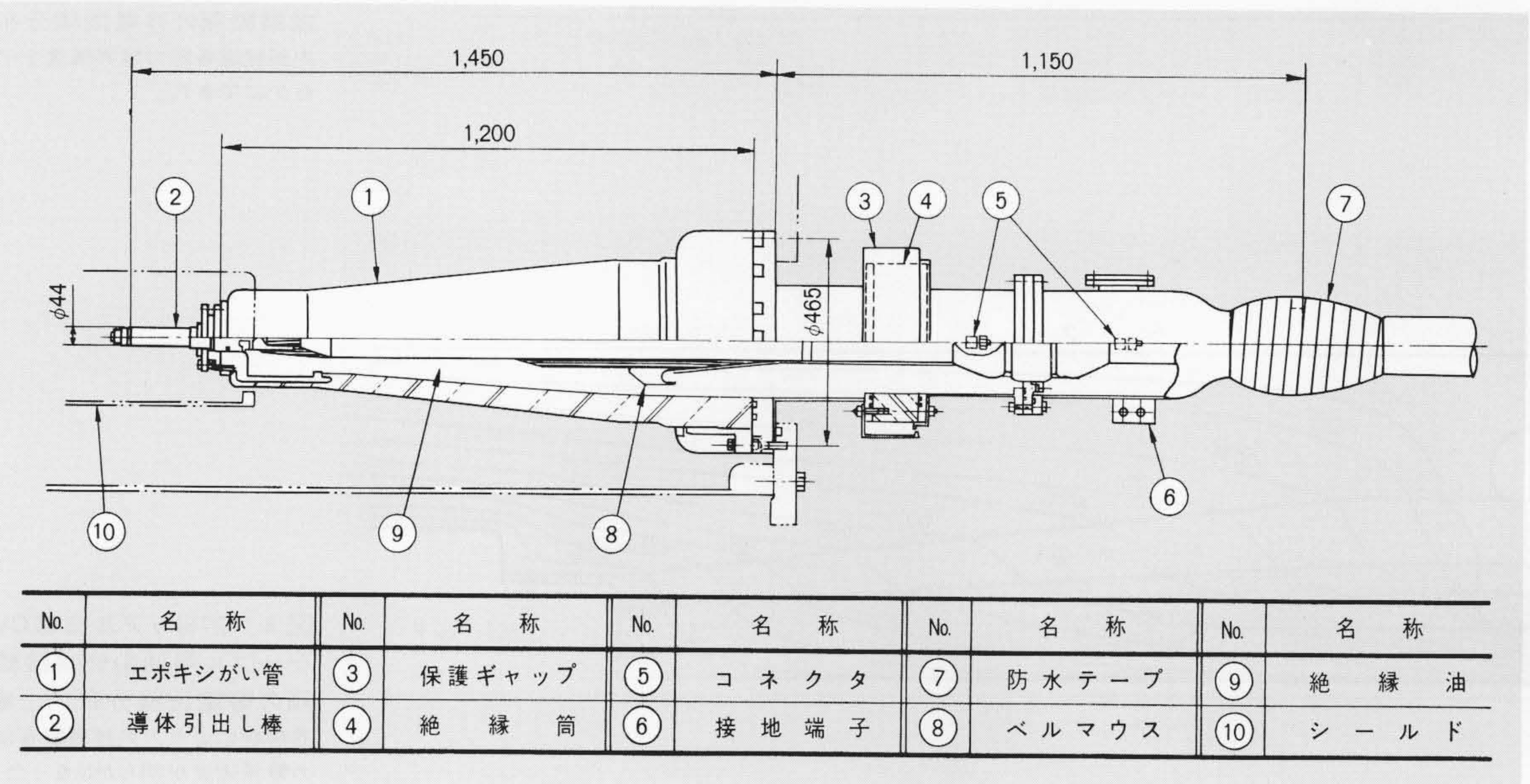


図5 275kVアルミ被CVケーブル用SF₆ガス中終端接続箱 油中終端箱に比べケースが小さく、ベルマウス先端のストレスが低いので、コンデンサコーンを使っていない。

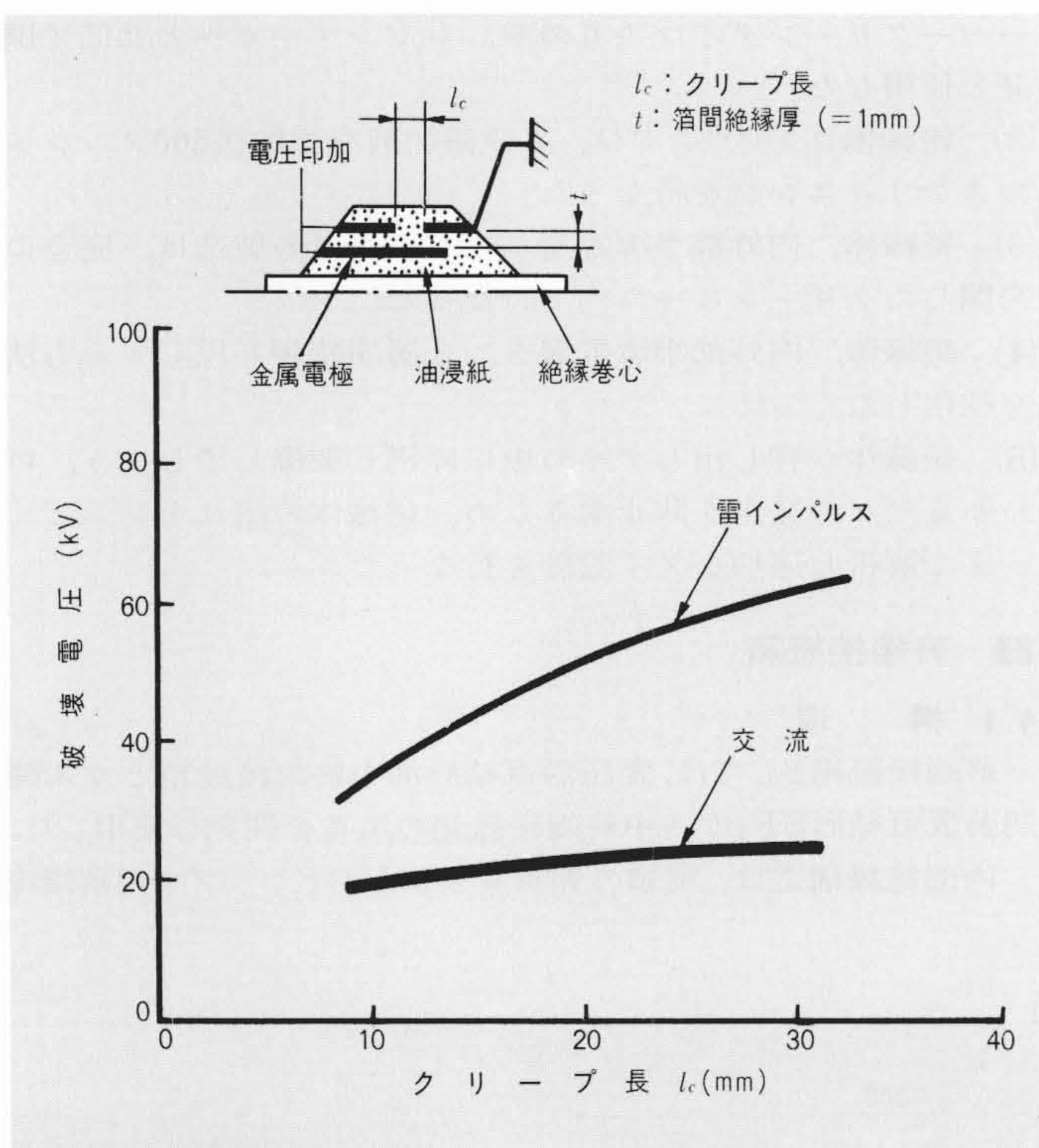


図6 275kVアルミ被CVケーブル用 シリコン油含浸コンデンサの絶縁設計は、この結果を基に行なった。

続箱に準拠し、前者には油浸コンデンサを用いた電界制御形を、また後者にはベルマウスと補強絶縁層とで構成される電界しゃへい形を採用した。図4に油中終端接続箱の構造を、図5にSF₆ガス中終端接続箱の構造を示す。いずれの終端接続箱にもエポキシ樹脂製がい管を用いた。ちなみに、終端接続箱の収納ケース径は、油中側が直径1,000mm、SF₆ガス中側が直径640mmである。

4.2 絶縁設計

(1) 保証性能

終端接続箱の保証性能は、交流端電圧(V_{AC})値610kV/12時間($K_{2AC}=3.04$)、雷インパルス耐電圧(V_{imp})値1,588kV/3回及び部分放電特性試験で216kV/30pc以下となること、である。

(2) シリコン油含浸コンデンサの設計

コンデンサの絶縁設計に対しては、シリコン油含浸コンデンサの電気絶縁性能を把握しておく必要がある。図6はシリコン油含浸モデルコンデンサによる交流、雷インパルス破壊電圧を示したものである。この結果に基づき、コンデンサの絶縁設計を行なった。

(3) ストレスコーン部

終端接続箱の内部絶縁は、ケーブル絶縁体上に絶縁補強層を設けベルマウスを配置しているが、OFケーブルと異なり、CVケーブルは絶縁体の熱膨張収縮による外径変化が大きい。このため、絶縁補強層とベルマウスのストレスコーン部は、ケーブルの外径変化に追従できる材料で構成する必要がある。

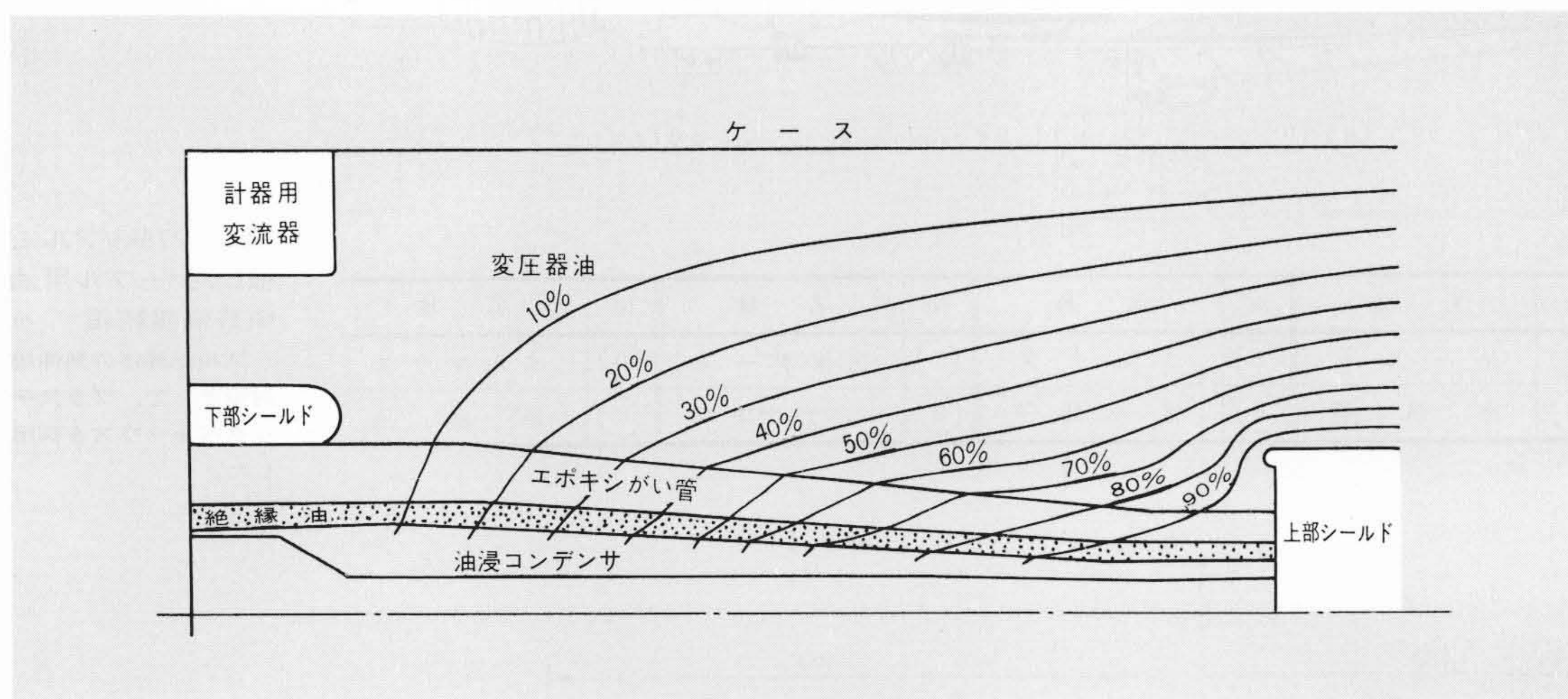


図7 275kVアルミ被CVケーブル用SF₆ガス中終端接続箱の等電位線分布 内部絶縁各部の電界強度を明らかにできた。

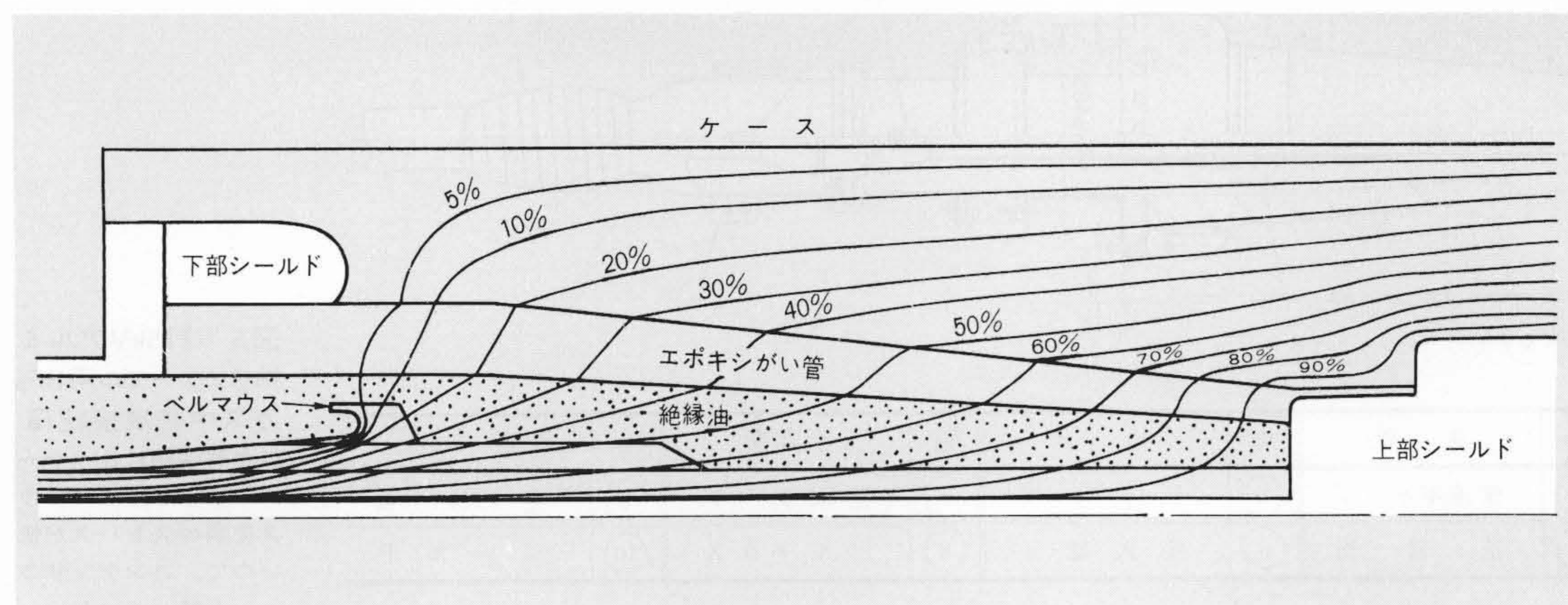


図8 275kVアルミ被CVケーブル用油中終端接続箱の等電位線分布 電界解析により、内部絶縁各部の電界強度が明らかになった。

このことを考慮し、絶縁補強層、ベルマウスとも各種の絶縁材料を組み合わせ、通電ヒートサイクル試験による検討を行ない、最適構成を決定した。なお、絶縁補強層のスロープ長さは沿層方向の設計電界強度を0.2kV/mmとして決めた。

(4) 電界解析

各終端接続箱の各部の電界強度を把握するため、有限要素法に基づく電界解析を行なった。図7は油中終端接続箱の、図8はSF6ガス中終端接続箱の等電位線分布を示すものである。この結果から各部の電界強度が明らかとなり、終端接続箱の構造が適切であることが確認された。

4.3 絶縁油

各終端接続箱の充填絶縁油には、架橋ポリエチレンに対し影響が少なく、かつ電気特性の優れたシリコン油を用いた。シリコン油は電気特性が含有水分に著しく影響されるため、充填に際しては専用のクリーニング装置により脱気処理を行なった。また充填した絶縁油は加圧装置により加圧した。

表2 275kVアルミ被CVケーブルの初期電気特性 各項目とも良好な特性を示している。なお、610kV 84時間は、9乗則で実使用200年以上に相当する。

| 試験項目 | | 結果 | 試料数 |
|------------------------------------|-----|------------------|-----|
| 交流耐電圧(810kV/1時間*)後、 雷インパルス破壊 | | 1,800kV/3回 良 | 18 |
| | | 1,800kV/3回(90℃)良 | 1 |
| | | 2,150kV/2回** | 1 |
| 交流耐電圧(711kV/3時間)後、 雷インパルス破壊 | | 1,800kV/3回 良 | 2 |
| | | 2,228kV/1回 | 1 |
| 雷インパルス耐電圧(1,588kV/3回) 後、交流破壊 | | 810kV/1時間 良 | 2 |
| | | 906kV/1時間 良*** | 1 |
| 交流長時間耐電圧(610kV/84時間) 後、雷インパルス破壊 | | 1,800kV/3回 良 | 1 |
| 高温(90℃)交流耐電圧 | | 810kV/3時間 良 | 1 |
| 枠長交流耐電圧 | | 281kV/10分 良 | 10 |
| コロナレベル(枠長) | | 281kV 3pc以下 | 10 |
| 誘電正接 159kV, 318kVにて | 室温 | 0.011~0.022% | 1 |
| | 90℃ | | |

注：* 810kV/1時間は、9乗則で711kV/3時間に相当する。
** 試験端末破壊
*** この後、雷インパルス2,120kV/2回で破壊

表3 275kVアルミ被CVケーブル用終端接続箱の初期電気特性 610kV12時間は、9乗則で実使用30年に相当する。

| 試験項目 | 結果 | |
|-----------|--------------|-----------|
| | 油中終端箱 | SF6ガス中終端箱 |
| コロナレベル | 216kV 3pc以下 | |
| 雷インパルス耐電圧 | 1,588kV/3回 良 | |
| 交流耐電圧 | 610kV/12時間 良 | |
| 交流破壊 | 760kV/4分* | 715kV/8分* |

注：* 試験用ケースへ閃絡

5 試験結果

5.1 初期電気特性

ケーブル及び終端箱について実施した各種の電気試験結果を表2、3に示す。すべてのケーブル、接続箱ともに目標性能を満足した。特に、ケーブルは交流610kV、84時間という厳しい試験をクリアしたこと、更には交流810kV、1時間及び雷インパルス1,800kV 3回の耐電圧試験に大量のケーブルが耐えたことは、課電劣化がほとんどないことを示唆するものである。

5.2 長期課・通電試験

約60mのケーブルとガス中及び油中終端箱を使い、約1年間にわたって、9乗則で30年相当及び50年相当の長期課・通電試験を実施したが、全くトラブルは起こらなかった。この試験条件を図9に、試験状況を図10に示す。また、30年相当の課・通電試験後のケーブル及び終端箱の特性を表4に示す。こ

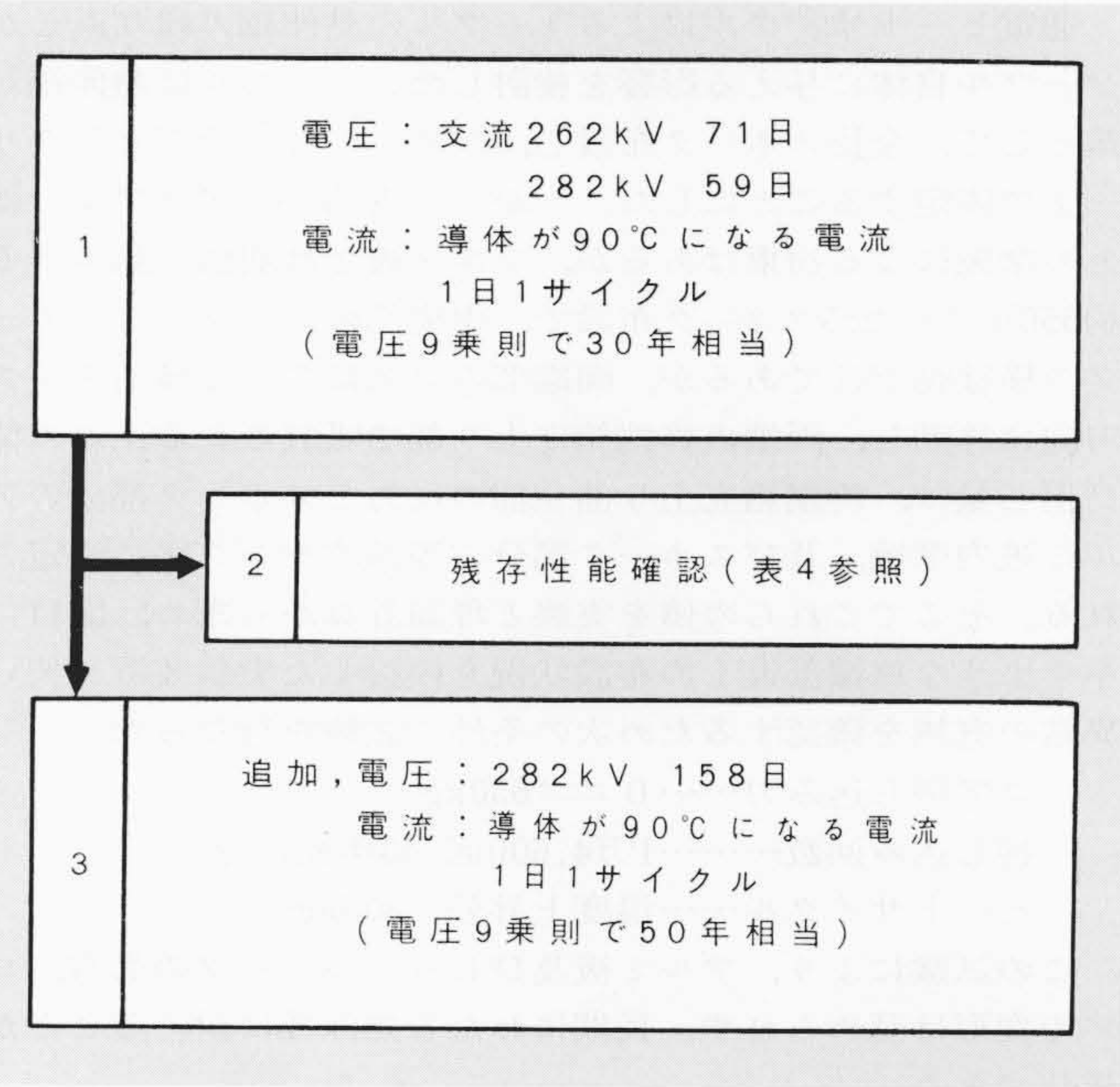


図9 長期課・通電試験条件 約1年間の試験期間中、トラブルは全くなかった。

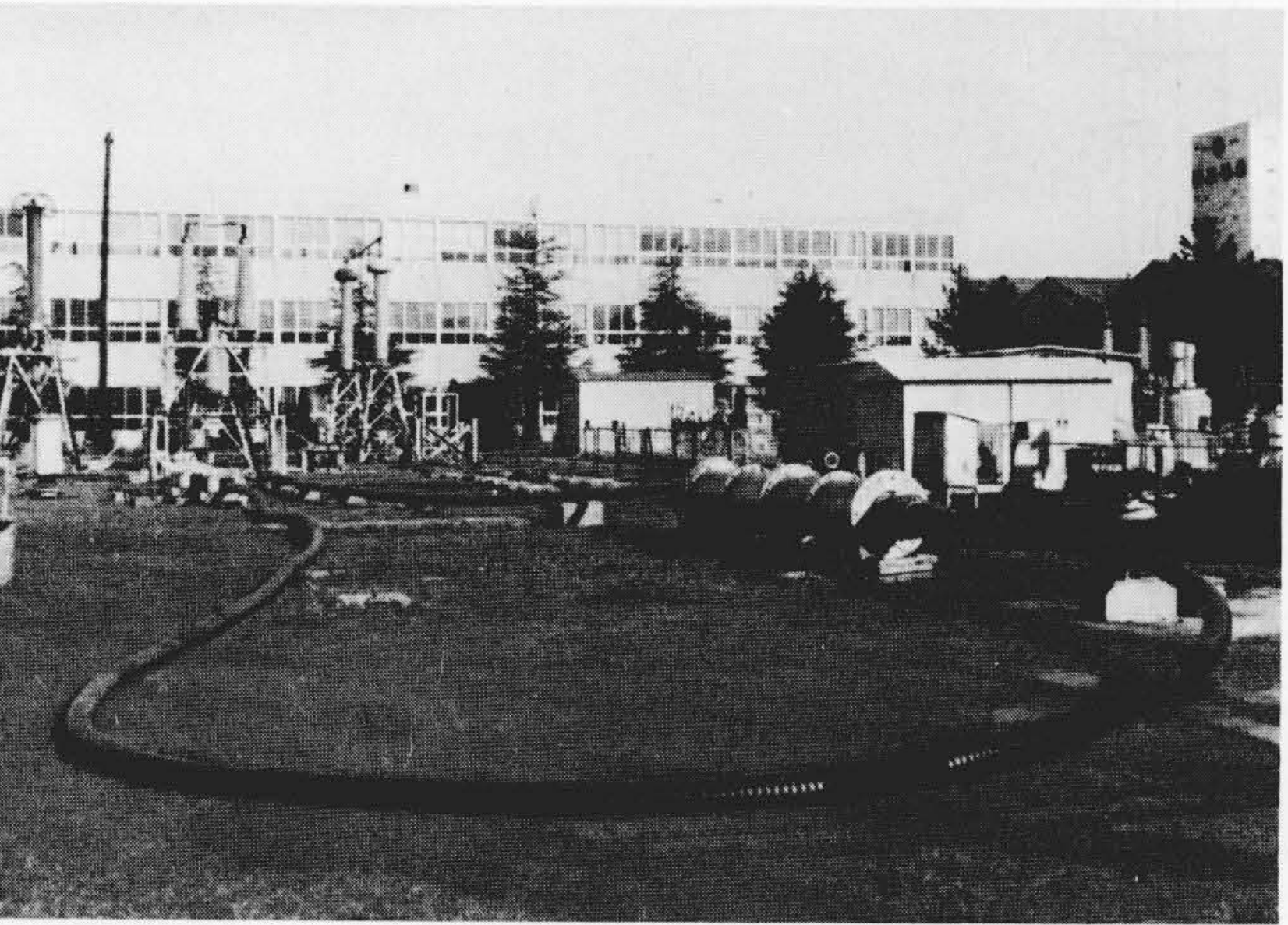


図10 長期課・通電試験状況 ケーブル長さは約60mである。油中終端箱、SF6ガス中終端箱は、右側タンクの中にそれぞれ組み込まれている。

表 4 30年相当長期課・通電試験後の特性 ケーブル、終端箱とも、初期とほとんど変わらない特性を示した。

| 試 験 項 目 | 結 果 | | |
|-------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|
| | ケーブル | 油中終端箱 | SF ₆ ガス中終端箱 |
| コ ロ ナ レ ベ ル | — | 281kV 5 pc以下 | |
| 交 流 耐 電 圧 | 281kV/30分 良 | | |
| 雷インパルス耐電圧 | 1,444kV/ 3 回 良 | | |
| 交 流 破 壊 | 880kV/8分 試験端末破壊 | 680kV/5分 試験用ケースに 閃絡 | 700kV/3分 試験用ケースに 閃絡 |

これらの試験により、ケーブル及び終端箱とも課・通電による劣化はほとんど認められず、十分な長期信頼性のあることが確認できた。

5.3 ケーブルの熱機械特性

通電ヒートサイクルによるケーブルの熱伸縮の繰り返しがか、ケーブル自体に与える影響を検討した。ケーブルは熱伸縮対策として、全長スネーク布設し、スネークピッチごとにクリートで固定することにした。しかし、内部のコアはアルミ被との摩擦による拘束はあるが、アルミ被とは別個に動き得る。約650mにわたるスネーク布設で、中央部のケーブルはスネークの横移動だけであるが、両端部のコアはアルミ被内を長さ方向に移動し、両端の終端箱立上り部で吸収される。この伸び出し量は、終端箱立上り曲り部の反力とスネーク部分のアルミ被内摩擦、及びスネーク部分の等価的ヤング率で決定される。そこでこれらの値を実験と理論計算から求め、図11に示すような終端部近くの布設状況を模擬した実験装置を使い、異常の有無を確認するため次の条件で試験を行なった。

- コア押し込み力…… 0 ⇔ 650kg
- 押し込み回数………1万4,600回(40年相当分)
- ヒートサイクル……温度上昇分 80deg

この試験により、アルミ被及びしゃへいテープの異常、コアの変形は認められず、長期にわたる熱伸縮に耐えることが確認できた。

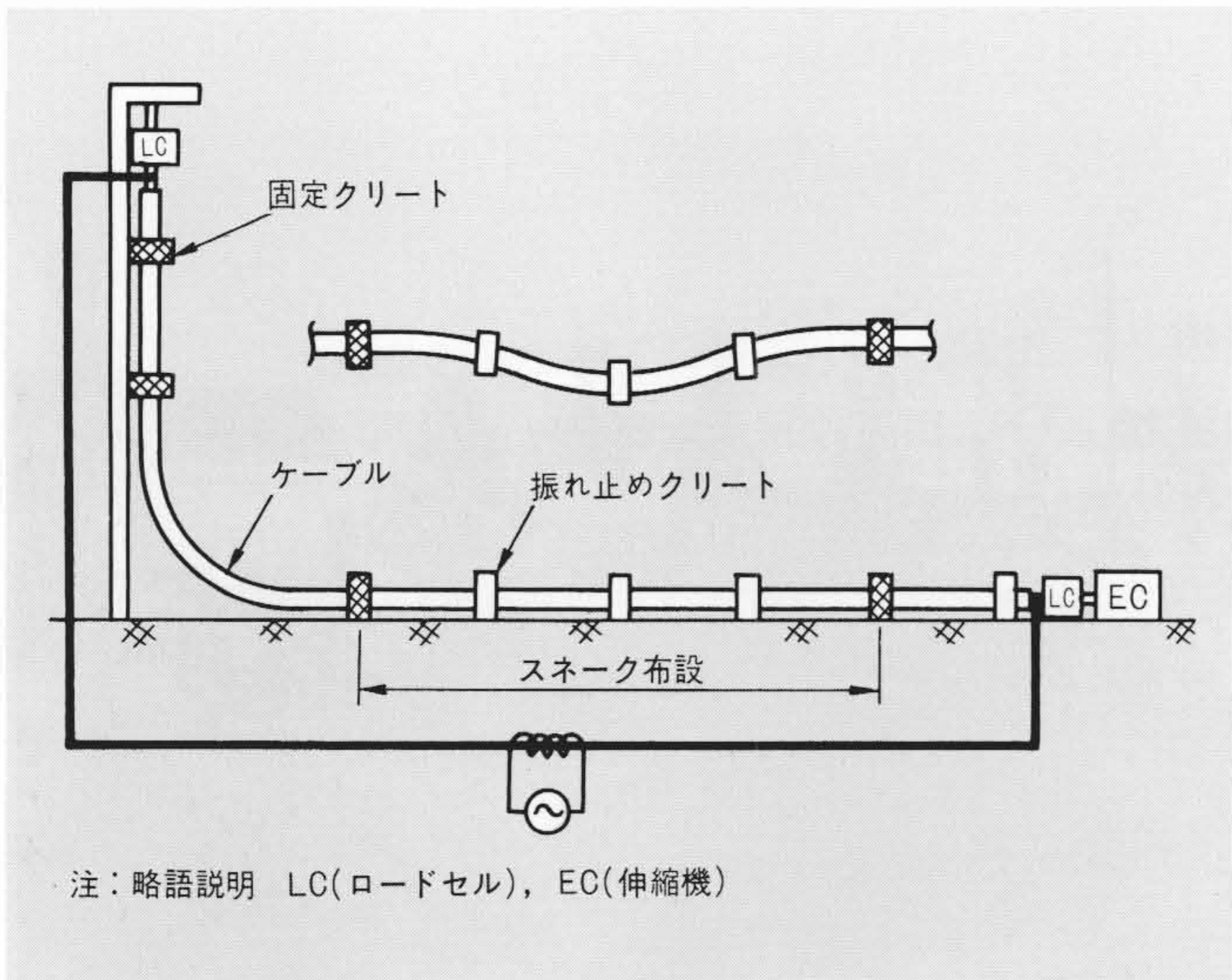


図11 ケーブル熱伸縮実験装置 40年相当分の繰り返し伸縮を行ない、問題のないことが確認できた。

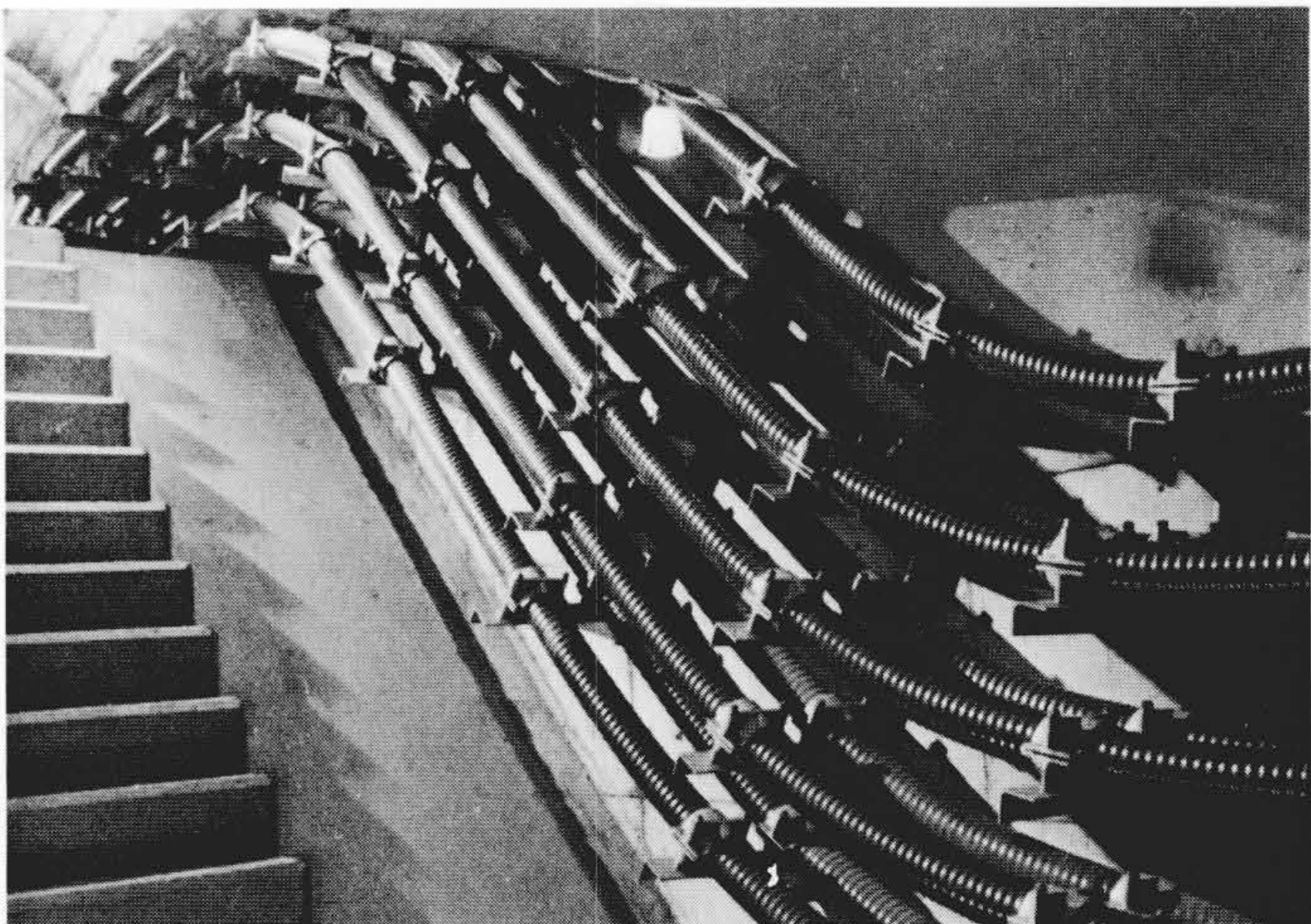


図12 275kVアルミ被CVケーブルの布設状況 ケーブルは洞道内の棚上にスネーク布設され、6mごとにクリートで固定された。

6 布 設

ケーブルの布設は、屋外開閉所のトレーラ上から変圧器室に引き込む車上延線方式を採用した。途中14度傾斜部では制動用三方向キャタピラを配し、滑落防止を図るとともに、多数の電動ローラを配し短時間のうちに引き入れを完了した。ケーブルは洞道内の棚上に全長スネーク布設し、6mごとにクリートで固定した。図12に布設状況を示す。

7 結 言

中部電力株式会社奥矢作第二発電所に、恒久布設用として世界で初めての275kVアルミ被CVケーブルを布設した。その技術的特長を要約すると、次のとおりである。

- (1) 絶縁厚さ29mm、単長650mという記録的な厚肉長尺ケーブルに対し、徹底的な絶縁体中への異物混入防止、及び絶縁体のヤケ防止を図ることにより、良好なケーブル特性を得た。
- (2) 厚肉絶縁体の熱伸縮に追従でき、かつアルミ被と良好な電氣的接触をもつ金属線入り半導電性テープを開発し採用した。
- (3) 終端接続箱では、ケーブル絶縁体の熱膨張収縮に伴う外径変化に追従できる材料を使用して、ストレスコーン及びベルマウスを形成した。
- (4) ケーブル、終端箱ともに80年相当の長期課・通電試験を行ない、両者の優れた長期信頼性を確認した。
- (5) 単長約650m、総長6,200mの大量ケーブルを、機械力を駆使した延線方式で短時間のうちに布設した。

今後、275kV級線路へのCVケーブルの適用が増えることが予想されるが、今回の布設がその推進力となることを期待する。

終わりに、この計画の遂行に当たり御指導、御援助をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 小島、外：電源開発株式会社奥清津発電所向け187kVアルミ被CVケーブル、日立評論、61、151～156(昭54-2)
- 2) 電気学会高電圧試験法専門委員会RPT分科会、特高圧(11～77kV)架橋ポリエチレンケーブルの高電圧試験法に関する推奨案、電気学会技術報告(I部)、第112号(昭50-6)
- 3) 特別高圧架橋ポリエチレンケーブル及び接続部の高電圧試験法、電気協同研究会(昭53-7)