

154kV 架橋ポリエチレンケーブル用 付属品の開発

Development of Accessories for 154kV Cross-linked Polyethylene Cable

The authors conducted a series of researches for the purpose of developing important accessories for use with newly developed 154 kV cross-linked polyethylene cables, such as joints, SF₆ terminations and outdoor terminations.

To make the cross-linked polyethylene cable display its features to the best possible degree these accessories were designed mainly in the prefabrication type, although oil-filled types were also studied. Particular consideration was paid to make these joints function best in their application to the large-sized cables.

In the tests these trially manufactured joints showed satisfactory performance and insulation characteristics.

坂場正弘* Masahiro Sakaba
池田忠禧** Chûki Ikeda
鶴谷泰洋*** Yasuhiro Tsuruya
井出成夫*** Shigeo Ide

1 緒 言

架橋ポリエチレンケーブルの高電圧系統への適用が進められており⁽¹⁾、66kV級はすでに実用に供されている。最近筆者らは154kV級ケーブルの開発⁽²⁾を進めてきた。154kV級ケーブルは、重要な送電系への適用が主となるため、付属品も含めたケーブル系統としての長期安定性⁽³⁾や現地作業性がいっそう重要となる。

ケーブル付属品はすでに66kV級までは架橋ポリエチレンの特長を生かした直線および終端接続部などが開発されている⁽⁴⁾。しかし、これらを154kV級に拡大するには種々解明すべき点が残されており、この点に検討を加えてきた。

今回、154kV大サイズ架橋ポリエチレンケーブルの試作を機会に、これらに適用する各種付属品について検討を加え、試作した構造により性能確認を行なった。その結果、この級の目標性能とした交流400kV、衝撃1,200kVを十分満たし、実用化への目安を得ることができた。

ここに、試作構造の概要と得られた絶縁性能について報告する。

表1 ケーブル構造 付属品の試験に用いた154kV 1×1,000mm²ケーブルは、絶縁性能にすぐれた充てん剤入り架橋PE(ポリエチレン)絶縁体を採用している。

Table 1 Construction for 154kV CV Cable

導 体	公 称 断 面 積	1,000mm ²
	形 状	5 分 割
	外 径	38.0mm
絶 縁 体 厚 さ (含 内 部 半 導 電 層)		20.0mm (22.0)
外 部 半 導 電 層 厚 さ		1.5mm
しゃへい銅テープ		0.1mm×2枚
レ ー ス 厚 さ		4.5mm
仕 上 り 外 径		約96.0mm
概 算 重 量		16.6kg/m

2 ケーブル

付属品の設計にあたり目標としたケーブル導体サイズは、1,000mm²以上を対象とした。また、試験に用いたケーブルは、衝撃耐電圧1,200kV、交流耐電圧400kVとして設計された表1の構造をもつ1,000mm²の充てん剤入り架橋ポリエチレンケーブルである⁽⁵⁾。ケーブルの絶縁性能は、衝撃破壊電圧1,300~1,450kV、交流長時間破壊電圧420~500kVが得られている。このケーブルは付属品の絶縁性能、作業性などに重要な外部半導電層のはぎ取りが容易にでき、作業時間の短縮と省力化に適している。

付属品の設計目標性能はケーブル系統としてのレベルを統一するため、交流耐電圧400kV、衝撃耐電圧1,200kVに設定した。

3 直線接続部

直線接続部は自己融着性テープ巻と、ポリエチレンテープ巻加熱モールドとの絶縁性のテープ巻付により性能を保持する方式と、あらかじめ成形した絶縁体をそう入、圧着するプレハブ方式が代表的である。

さらに、このクラスで使用実績のあるOFケーブル用普通接続部は、構造上も準プレハブ方式が開発されており⁽⁶⁾、この油浸方式を絶縁混和物の選定によっては架橋ポリエチレンケーブルに適用することが可能である。

ここでは、設計条件とした絶縁性能、作業の簡素化、小形軽量化、構造の共用化などから、加熱モールド、プレハブおよび油浸方式について検討した。

3.1 ゴム・ストレスコーン形構造

この構造は、EPR(エチレンプロピレンラバー)系ゴムで成形されたストレスコーンをケーブルの絶縁補強に用いる方式で、次のような特徴があげられる。

(1)構造は完全乾式となる。(2)プレハブ方式であり省力化、作業時間の短縮が図られる。(3)基本構造が終端接続部などへ応用できる。(4)部品の共用化が図られる。しかし、絶縁構造は界面圧着方式という不確定な要素を含み、直線接続部への

* 日立電線株式会社研究所 ** 日立電線株式会社研究所 工学博士 *** 日立電線株式会社日高工場

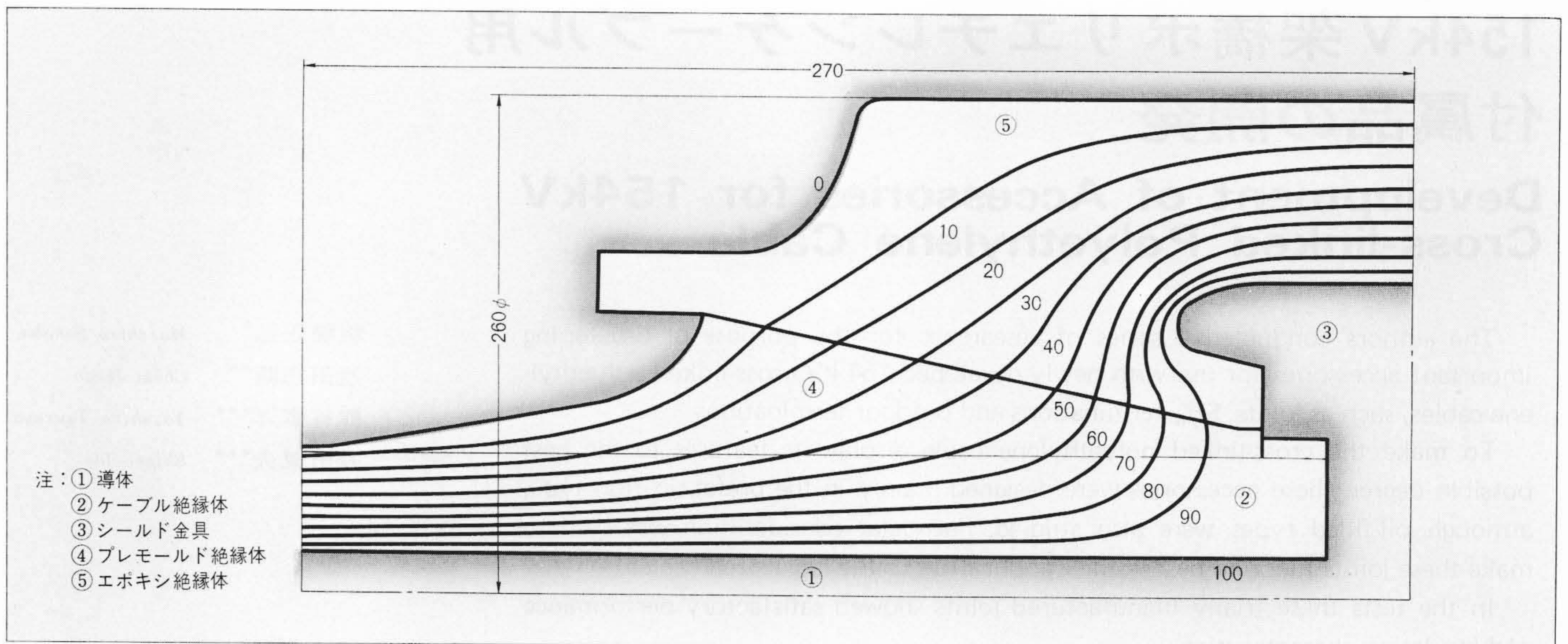


図1 ゴム・ストレスコーン形直線接続部の等電位線分布 電子計算機による電界解析は、付属品の設計にきわめて有意義な方法である。

Fig. 1 Electric Potential Distribution for Pre-fabricated Type Joint

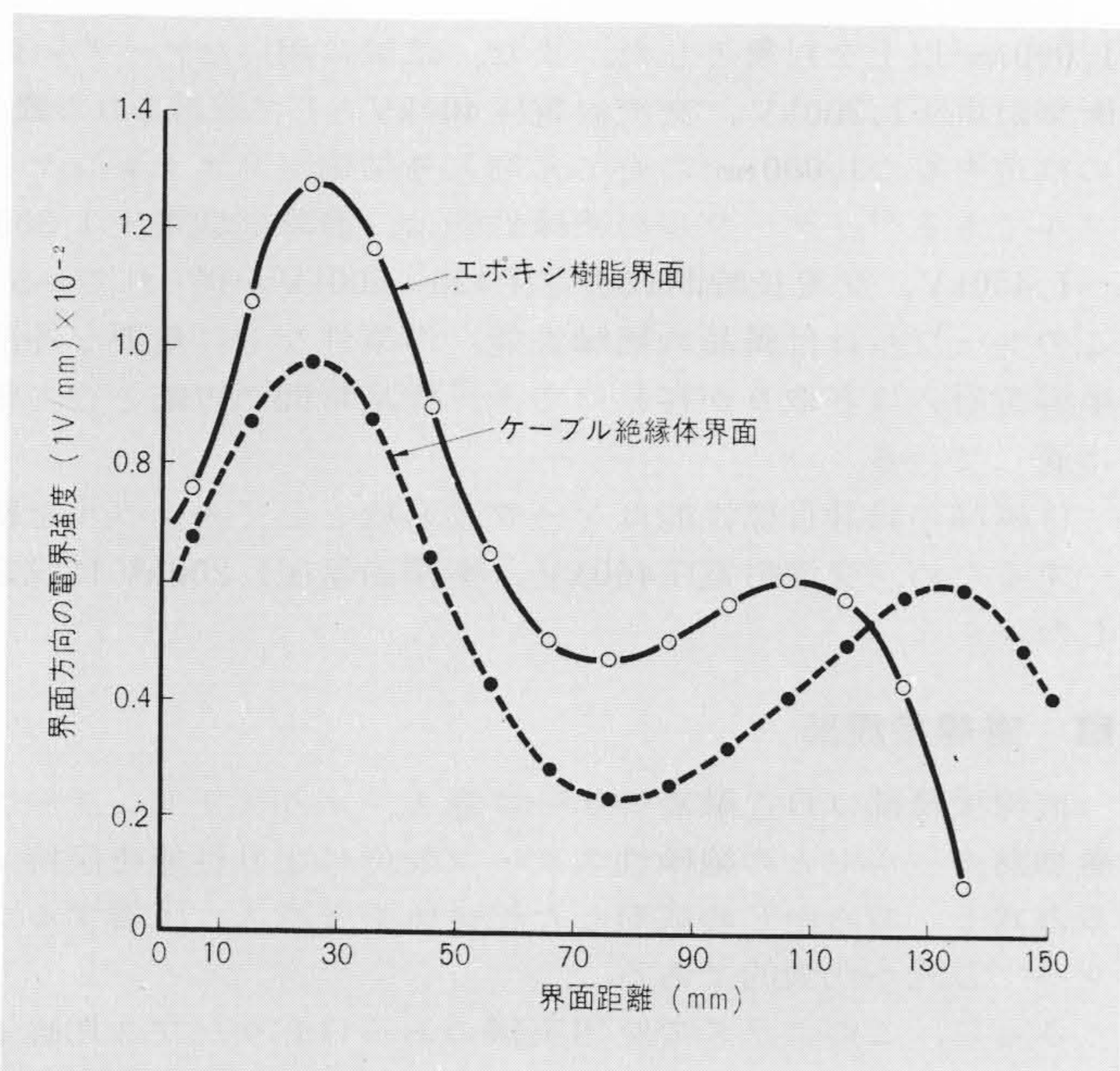


図2 ゴム・ストレスコーン界面の電界強度分布 固体(エポキシ)と固体(ゴム)の圧着絶縁方式は、絶縁性能上界面の電界強度が最も重要で、この電界を低減させる構造を採用した。

Fig. 2 Distribution of Field Strength along the Interface between the Rubber Stress Cone and Epoxy Mold Unit

応用が最もきびしいと考えられる。絶縁設計上はこの界面電界が最も重要となり、構造決定にあたり十分な電界解析を行った。この一例として等電位線分布を図1に示した。

図ではエポキシ絶縁体中のシールド電極先端部が最も高い電位傾度を示しているが、絶縁性能は使用エポキシ材質の選定と設計および製造条件の工夫で保障される。一方、ゴム・ストレスコーンの界面絶縁は界面の処理や作業条件により直接影響を受けるため、できるだけ低い電界強度であることが望ましい。界面方向の電界分布は図2のような傾向を示し、ケーブルとの界面よりエポキシ絶縁体との界面が高く、絶縁

性能は後者により決定される。

したがって、ゴム・ストレスコーン形の絶縁設計は、このエポキシ絶縁体との界面の最大電界強度が界面の破壊強度以下になる構造が基本となる。電界解析によりシールド電極の形状、大きさとゴムおよびエポキシ絶縁体の形状、材質を適切に選択した結果、各部の電界は大幅に低減できた。

これらの検討結果を基本として設計したゴム・ストレスコーン形直線接続部の構造は図3に示すとおりである。おもな構造上の特徴は次のとおりである。(1)導体接続は大サイズ用なので締付方式ではなく、圧縮方式としてある。(2)エポキシ絶縁体にはシールド電極を内蔵させ、導体接続部の圧縮後の仕上げを不要とした。(3)エポキシ絶縁体は800~1,600mm²程度のケーブルが共用できる寸法とした。(4)ゴム・ストレスコーンは界面電界を配慮して、界面方向の長さを増し、そう入性を悪くしないように、径方向の厚さは66kV級と同等である。(5)接続部は外傷防止と水密性から金属ケースを採用している。なお、組立作業にあたり個人差のない処理方法を確認し、絶縁性能向上と安定化を図っている。

3.2 モールド形構造

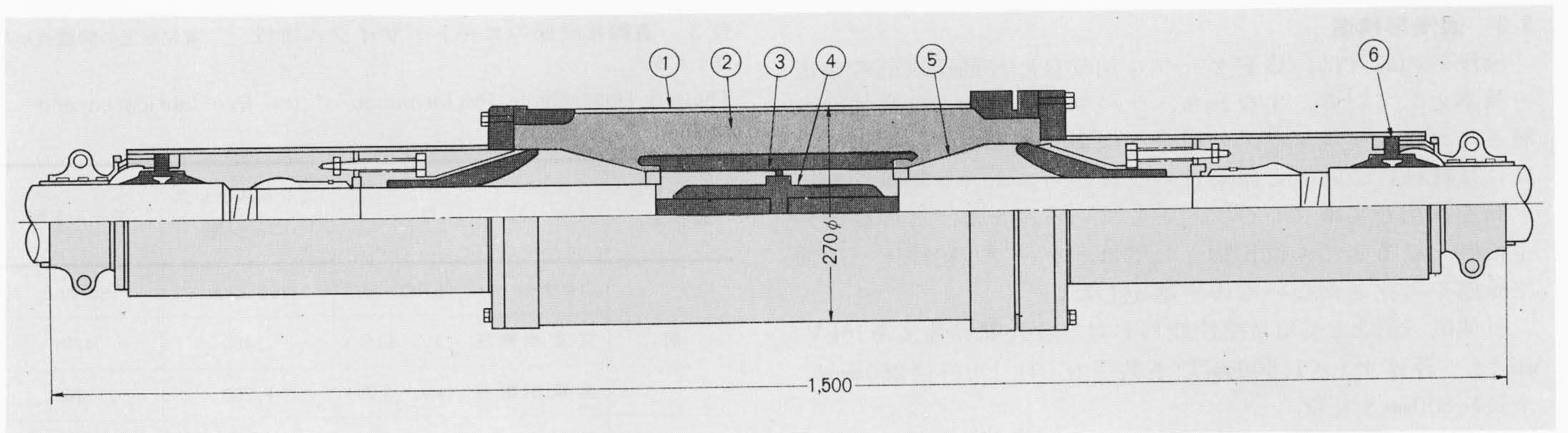
モールド形構造は、照射ポリエチレンテープを巻き加熱してテープ相互とケーブル絶縁体とを溶融一体化させるものである。したがって、構造上は最も簡素で軽く、ほぼケーブルと同径までに小形化できるため許容曲げ半径もケーブルに近いから、海底ケーブルなどへの使用実績も多い。

しかし、この構造は高電圧、大サイズケーブルに適用した例は少なく、技術的に次のような問題点がある。

- (1) 導体と絶縁体の熱容量増加に伴う温度分布の変化
- (2) ケーブル絶縁体とモールド絶縁体の接着性および熱劣化
- (3) 電氣的な欠陥ができない作業法の確立とその確認法

絶縁性能向上には、使用材料と設計条件の選定とともに製造工程の詳細な標準化が必要となる。図4はこれらに関して得た結果の一例を示すものである。

検討の初期においては、界面や内部半導電層の欠陥に起因する絶縁破壊が発生したが、これらはケーブル表面などの微量水分や汚損、絶縁層の流れなどの相互作用によることが判



注：① 接続箱本体 ② エポキシ絶縁体 ③ シールド金具 ④ 導体接続管 ⑤ プレモールド絶縁体 ⑥ パッキン

図3 ゴム・ストレスコーン形直線接続部構造 絶縁性能の向上とともに省力化，作業時間の短縮なども配慮している。

Fig. 3 Construction for Pre-fabricated Type Joint

明した。面状発熱体と適切な断熱層の採用によりこれらを防止するとともに，特別な界面接着処理方式を採用した結果，図のような結果が得られ，破壊最大電界強度はいずれも $20\text{kV}/\text{mm}$ 以上を示した。

また，実負荷試験において得られた長期安定性と良好な作業性は高電圧，大サイズケーブルへも十分適用できることを示している。図5はモールド形直線接続部の構造例を示すものである。図の構造は下記に述べる特徴から特に導体接続法としてCad Weld方式を採用しているが，圧縮スリーブ方式でも問題はない。

(1) 導体とはほぼ同径の接続ができ，接続後の表面仕上げが簡

単である。

(2) 接続スリーブがないため電界的にはケーブルと同等と考えられる。

(3) 接続部の寸法短縮がはかれる。特に仕上り外径はケーブル外径の120%以下で設計可能である。

Cad Weld方式は銅合金を用いるため局部的に導体抵抗の増加となるが，通電試験によればケーブル部より温度上昇は $2 \sim 4^\circ\text{C}$ 高い値を示し，局部的発熱は見られない。また機械的な引張り強度も $14 \sim 17\text{kg}/\text{mm}^2$ を得ており，これらの問題から制限を受けることはない。

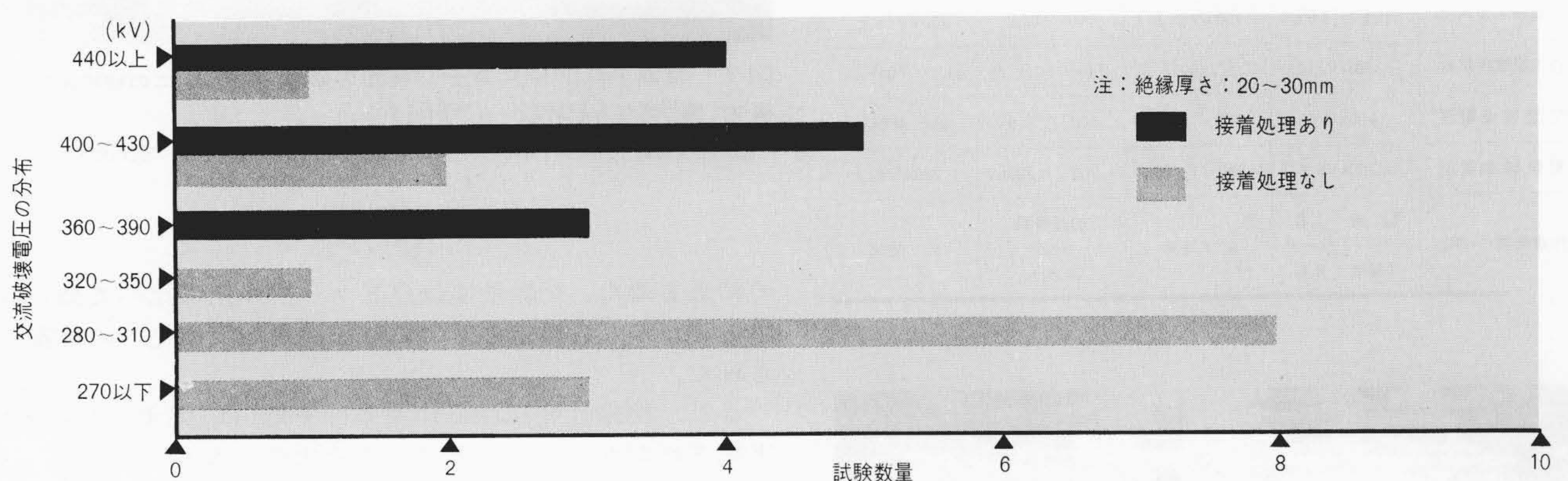


図4 モールド形直線接続部の交流破壊電圧分布 ケーブルの界面処理は絶縁性能向上にきわめて効果的である。

Fig. 4 Distribution of AC Breakdown Voltage for Molded Type Joint

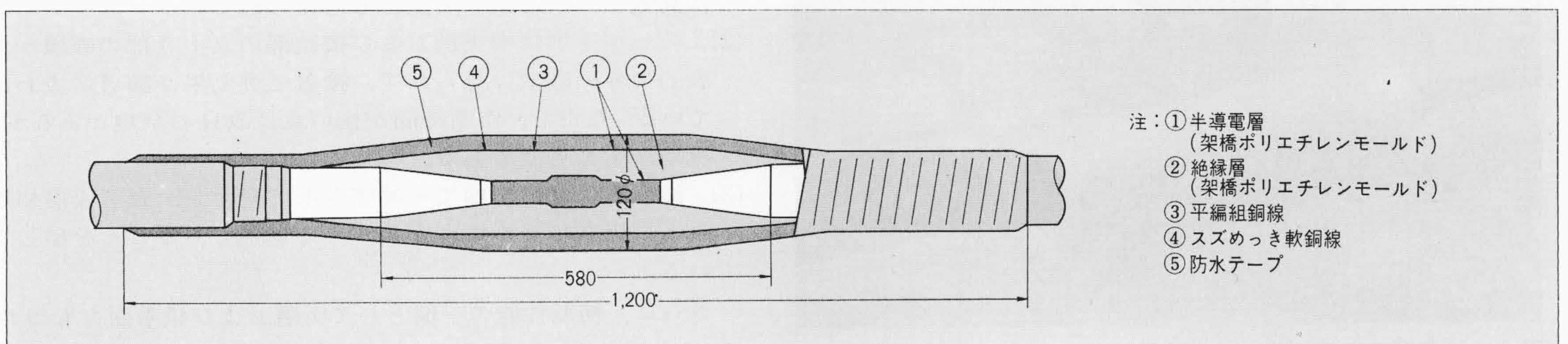


図5 モールド形直線接続部構造 ケーブルとはほぼ同等の取扱いができる。

Fig. 5 Construction for Molded Type Joint

3.3 油浸形構造

油浸形の設計は、OFケーブル用改良形普通接続部の構造を基本としている。すなわち、ケーブル補強構造は補強絶縁層とエポキシベルマウスの組合せにより小形化し、接続部中央には絶縁性能向上と作業性の改良からエポキシ絶縁シールド筒を採用して準プレハブ形としている。また、この構造の主絶縁となる充てん混和物としては、ケーブル絶縁体や補強絶縁層を劣化させないものを選定した。

具体的設計としては目標性能における最大電界強度を10kV/mmとし、導体サイズ1,600mm²以下共用から仕上り外径260mmφ、全長1,600mmとした。

図6は組立後の外観を示したものであるが、内蔵した油圧緩衝器により外部からの加圧装置を省略した。

この構造に用いた補強絶縁層は、ケーブルの熱特性、充てん混和物の含浸性と耐油性など長期の安定性を考慮した材質を選定するとともに、絶縁上からは充てん混和物の電界を低減させるため使用材質の誘電率と寸法の調整を図った。

なお、ここで用いたケーブル補強構造は後述するSF₆ガスおよび気中終端部に共用できる寸法としてある。

3.4 直線接続部の絶縁性能

試作した直線接続部の初期絶縁性能は、いずれもコロナレベルの測定および直流耐電圧試験後に破壊試験を実施し、表2

表2 直線接続部の絶縁性能 初期絶縁性能はいずれも十分であり、使用にあたり最適構造が選択できる。

Table 2 Insulation Characteristics of Joint

項	目	目標性能	ゴム・ストレスコーン形	モールド形	油浸形
1	コロナ・レベル	116kV, 5PC	150kV以上	150kV以上	150kV以上
2	直流耐電圧試験	⊖ 360kV/10分	400kV/60分 良	400kV/60分 良	440kV/60分 良
3	交流破壊電圧	400kV/60分	440～520kV	460～510kV	430～460kV
4	衝撃破壊電圧	⊖ 1,200kV/3回	1,280～1,400kV	1,260～1,320kV	1,220kV以上
5	作業時間(一相)	監督: 1名 作業: 4名	約4時間	約25時間 (4.5日)	約7時間



図6 油浸形直線接続部の組立状況 ケーブルの熱特性を考慮した補強絶縁層の採用により長期安定性が得られる。

Fig. 6 View of the Oil Filled Type Joint

表3 直線接続部のヒート・サイクル特性 実使用上の問題点が把握できる。

Table 3 Heat Cycle Performance of the Pre-fabricated and Molded Type Joint

ヒート・サイクル	項 目	ゴム・ストレスコーン形	モールド形
前	コロナ・レベル (5PC, kV)	150 以上	150 以上
	交流耐電圧 (kV, 60分)	400	420
	衝撃耐電圧 (kV, 3回)	1,200	1,200
後	コロナ・レベル (5PC, kV)	150 以上	150 以上
	交流破壊電圧*1 (kV)	440, 460	410*2, 470
	G _{max} (kV/mm)	12.2, 13.3	26.1, 29.8

注: *1 400kV/60分後+10kV/60分上昇, *2 端末破壊

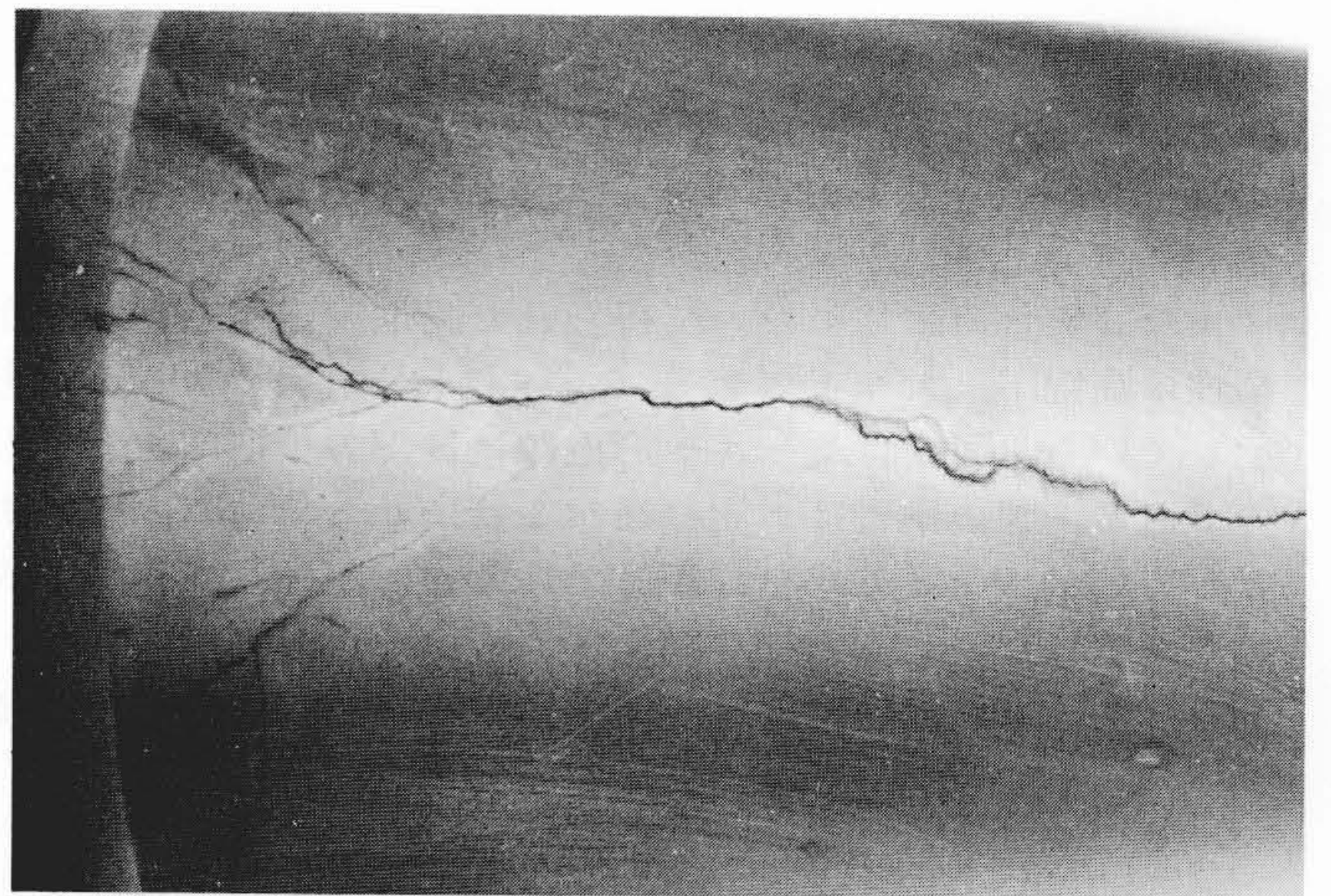


図7 ゴム・ストレスコーン表面の破壊状況 この種絶縁方式の破壊は、電界的にも統計的にも界面が多い。

Fig. 7 View of Breakdown Path for the Rubber Stress Cone

の結果を得た。絶縁性能はOFケーブル用に比べて高い目標値としたが、各構造ともにこれを満足し実用化への目安が得られた。

また、絶縁性能試験は作業条件を把(は)握するため多数回実施されたが、破壊状況はおよそ次のとおりである。

- (1) ゴム・ストレスコーン形はゴム・ストレスコーン半導電層の立上り部およびエポキシ絶縁体との界面破壊が多く発生した。図7は界面破壊の一例を示すものである。また、試験を通してエポキシ絶縁体の貫通破壊は全くなく、さらに高電圧への応用の可能性も考えられる。
- (2) モールド形は中央部および接続部の立上り部の破壊が代表的で界面破壊は見られず、接着処理効果が顕著に表われている。ただし、作業時間が長い点に改良の余地があるが、現地作業も可能である。
- (3) 油浸形はほぼすべてが油げき部で発生し、充てん混和物および組立て後の処理がきわめて重要であることを示している。

さらに、初期性能の一環として圧着および接着面をもつゴム・ストレスコーン形とモールド形についてヒート・サイクル試験を実施した。

表3はこの結果を示したもので、試験条件は導体目標温度

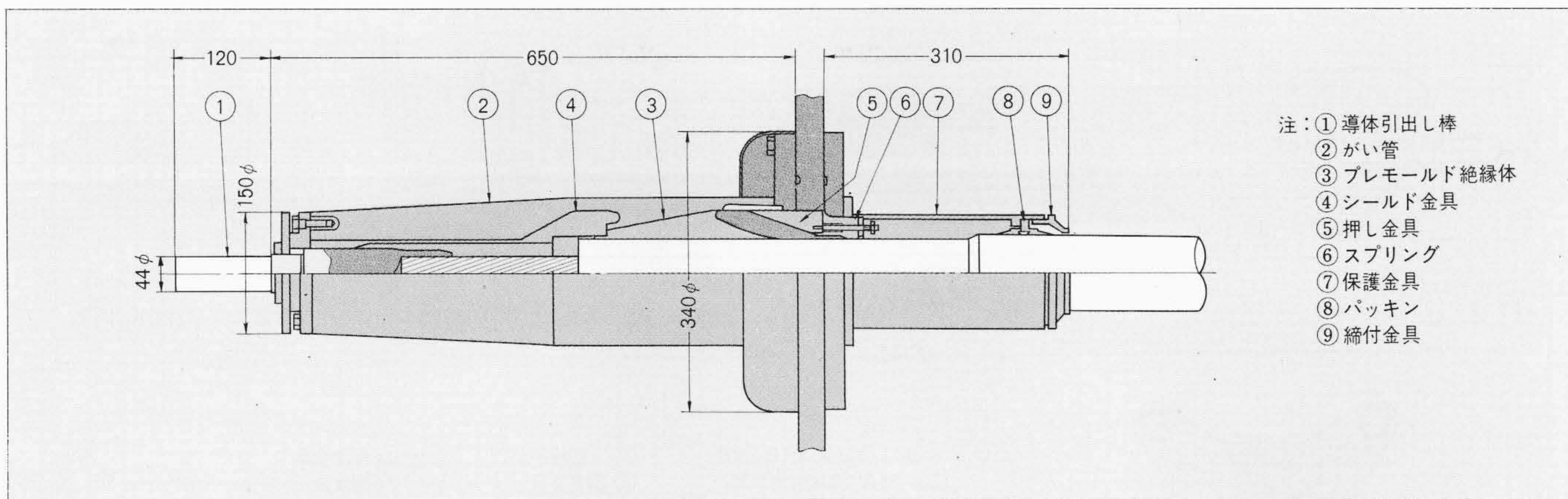


図8 ゴム・ストレスコーン形SF₆終端接続部の構造 作業時間が短いのが構造上の特徴である。

Fig.8 Construction of Pre-fabricated Type SF₆ Termination

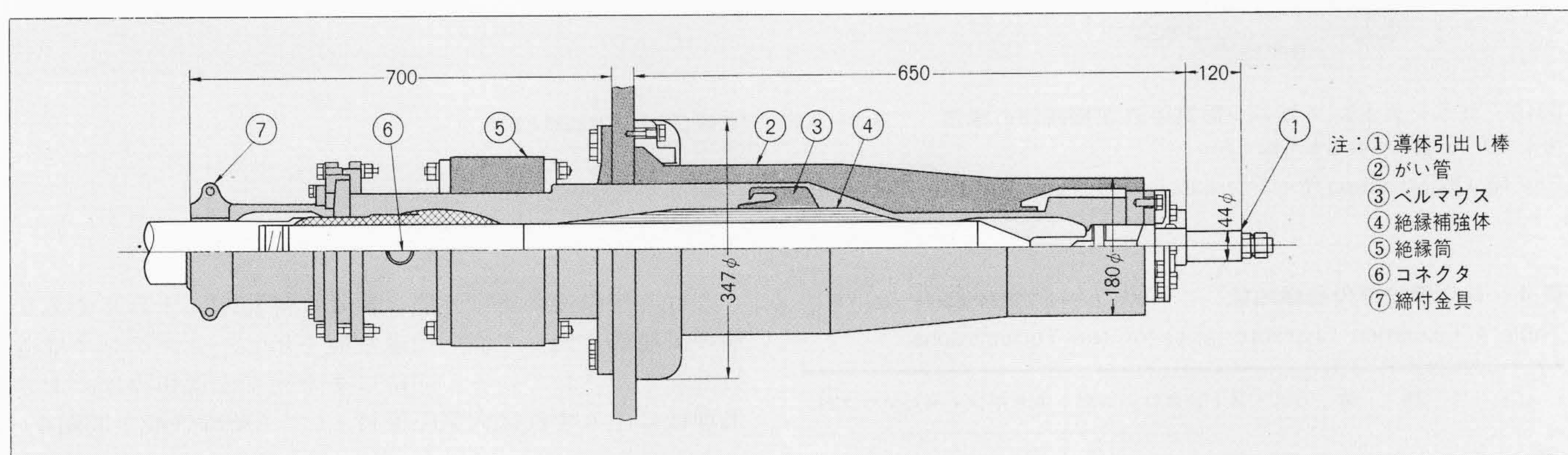


図9 エポキシ・ベルマウス形SF₆終端接続部の構造 絶縁設計はOFケーブル用と全く同じと考えてよい。

Fig.9 Construction of Epoxy Bell-mouth Type SF₆ Termination

を90℃とし、1,400～1,600 A 通電による8時間ON-16時間OFFを連続して30回加えた。

ケーブルの熱伸縮による性能低下はこの試験では見られず、また解体時にも異状は観察されないことから、長期安定性の第一段階の保障ができたと考える。

4 SF₆ガス終端接続部

この級のSF₆ガス終端接続部は、OFケーブル用としてしゃへい形構造が実用化されており、基本的には同じとして問題ないが直線接続部のゴム・ストレスコーン形を共用する構造も特徴的である。

4.1 ゴム・ストレスコーン形構造

基本絶縁設計は直線接続部と全く同じである。ただし、SF₆ガス終端接続部では大地電位のケースが離れているため、ゴム・ストレスコーン界面の電界強度分布は直線接続部に比べて均等化される傾向にある。したがって、絶縁設計は有利となるが、エポキシとう管金具とゴム・ストレスコーンの相対位置を適切にすることが重要となる。

図8は設計構造例であるが、下記の条件を満たすものとした。

- (1) 機器取付寸法は、OFケーブル用と同じとし互換性を持たせた。
- (2) ゴム・ストレスコーンは直線接続部と共用である。
- (3) 導体引出し棒は圧縮形である。
- (4) 接続部内部は完全乾式である。

- (5) エポキシとう管はシールド電極内蔵形で、一体モールド構造をもち、表面仕上げは不要である。

また、作業方法などは直線接続部と同じ技術でよく、接続部としては最も短時間で完成する構造といえる。

4.2 エポキシ・ベルマウス形構造

OFケーブル用として開発したしゃへい形構造⁽⁷⁾は小形かつすぐれた絶縁性能を示しており、今回の設計構造もこれによった。

図9はこの構造を示すものである。エポキシとう管の上部に外部から金属シールドをつけると、ケース内SF₆ガス空間でせん絡が起きやすいのでこれをやめたが、導体引出し棒の圧縮部および充てん混和物の圧力緩衝空気室を完全に電氣的にしゃへいすることを目的としてシールド電極をエポキシ樹脂中に内蔵した。ケーブル絶縁補強構造は油浸形直線接続部と同様である。また、外部からの給油装置を省略するため完全な漏油対策が必要で、溶着方式による油密処理を採用し確実性を図った。組立作業は、この油密処理をのぞき従来のOFケーブル用と全く同じ技術でよい。

4.3 SF₆ガス終端接続部の絶縁性能

表4はSF₆ガス終端接続部で得た絶縁性能を示すものである。これらの試験には、直径400mmφのケースを用い、SF₆ガス圧2.5kg/cm²(ゲージ圧)を保持して求めたものである。

両設計構造ともに実用可能な絶縁性能といえるが、省力化、作業時間の短縮などの面ではゴム・ストレスコーン形がすぐれている。

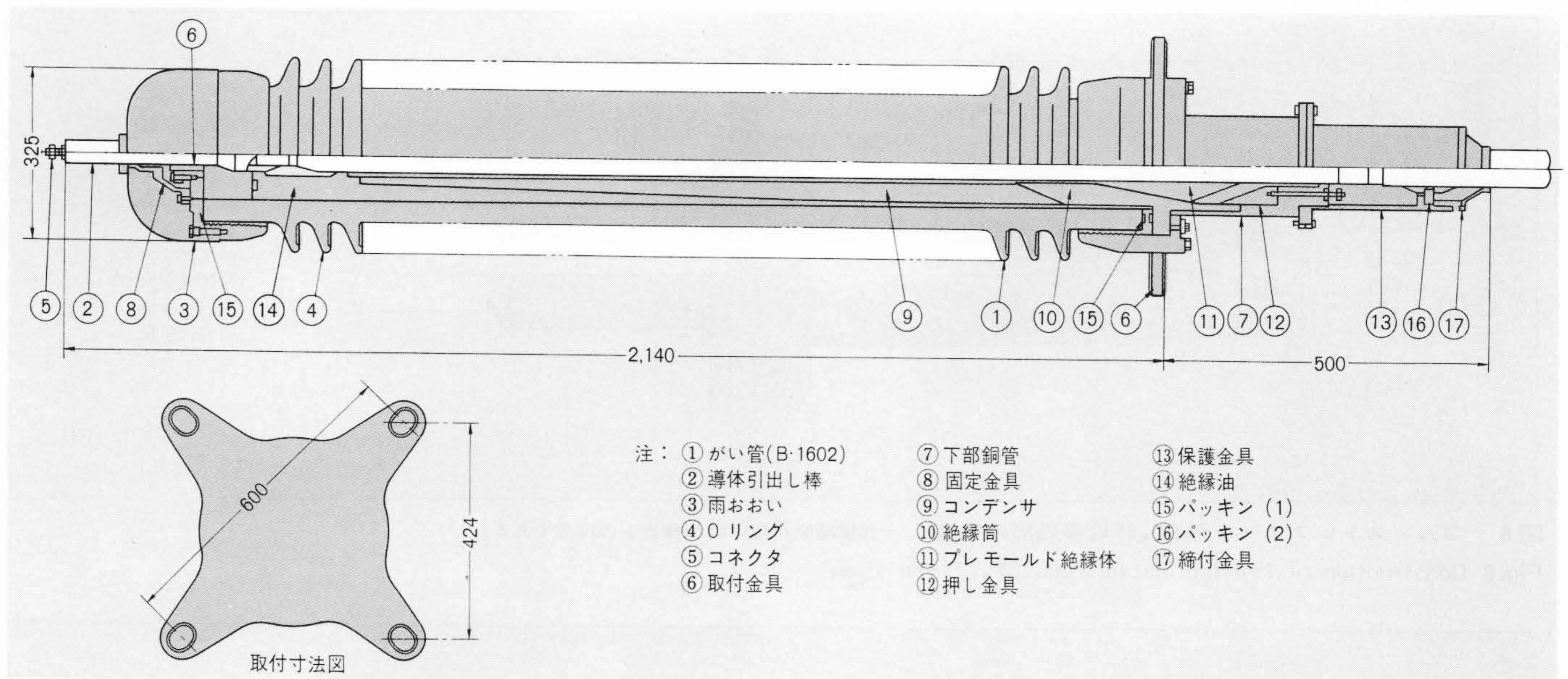


図10 ゴム・ストレスコーン形気中終端接続部の構造 基本絶縁設計は直線SF₆終端接続部と同じ
 考えでよく、部品の共用も可能である。

Fig. 10 Construction for Pre-fabricated Type Outdoor Termination

表4 終端接続部の絶縁性能 いずれも十分な信頼性を持っている。

Table 4 Insulation Characteristics of the Terminations

項 目	構 造		エポキシ・ベルマウス形	
	SF ₆ 終端	気中終端	SF ₆ 終端	気中終端
交流破壊電圧 (kV)	440~500	480~540	440~480	490<
衝撃破壊電圧 (kV)	1,260~1,360	1,340<	1,240~1,320	1,280<
作 業 時 間 (一相)	約3時間	約6時間	約8時間	約10時間

5 気中終端接続部

5.1 ゴム・ストレスコーン形構造

絶縁の主要構造は、直線接続部のケーブル絶縁補強方式にコンデンサ補強体を組み合わせ混和物を充てんしたものである。すでに述べたようにゴム・ストレスコーン部の絶縁性能については十分確認しており、コンデンサ補強体の採用により界面の電界強度は前二者より最も低くなり、絶縁設計上最も有利となる。

図10はこの主要設計構造を示すものであるが、がい管にはB-1402を使用したコンデンサ補強体は、OFケーブルと同じ設計としてある。

5.2 エポキシベルマウス形構造

主要構造はエポキシベルマウス形SF₆ガス終端接続部にコンデンサ補強体を組み合わせ、混和物を充てんしたもので絶縁設計上の問題点はない。

また、コンデンサ補強体は基本的にはゴム・ストレスコーン形と共用可能であるが、作業性、経済性からは共用の必要性はない。

5.3 気中終端接続部の絶縁性能

気中終端接続部には、衝撃電圧による外閃(せん)防止からB-1421のがい管を用いた。

これら両構造の絶縁性能は表4に併記したとおりであり、他の接続部に比べて高い絶縁性能を示し、コンデンサ構造の特徴が生かされている。同時にまた充てん混和物は、十分な処理後に注入すれば大気圧保持としても絶縁性能上問題ない。

6 結 言

154kV 級架橋ポリエチレンケーブル用付属品として直線およびSF₆ガス終端接続部を試作し、初期絶縁性能を検討した。

(1) ゴム・ストレスコーン形補強構造は、きわめてすぐれた絶縁性能を示し、このクラスにプレハブ形接続部の採用を可能とした。

(2) エポキシ・ベルマウス形補強構造は、すでに実負荷試験で13,000時間以上の実績を得ているが、大サイズへの適用もなんら問題ないことが確認できた。

(3) モールド形直線接続部は作業時間が長いという短所を持っているが、ケーブルとほとんど同径で可とう性がありケーブルと同等の諸性能が得られることから、今後も海底ケーブルなどに好適である。

現在、これらの付属品について長期安定性の確認試験を実施している。

終わりに、本開発研究にあたり種々ご指導をいただいた電力会社関係各位にお礼申し上げますとともに、ご協力いただいた日立電線株式会社日高工場ならびに研究所の関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) M. A. CHAROY, R. F. JOCTEUR: IEEE, Tr. PA & S, 90 (2) 777 (1971)
- (2) 依田, 村木, 加藤, 小椋, 池田: 日立評論 54, 365 (1972)
- (3) J. P. Lozes: I. E. E. E SUMMER POWER MEETING, 71C58-PWR (1971)
- (4) 佐藤, 熊谷, 浜田, 森屋, 目崎: 日立評論 53, 155 (1971)
- (5) 依田, 橋本ほか: 日本電気協会第51回研究会講演論文 (昭47-5)
- (6) 金子, 佐藤ほか: 日立評論 54, 361 (1972)
- (7) 林, 金子, 池田ほか: 日立評論 53, 263 (1971)