

セミプレハブ形管路気中送電線の開発

Development of Semi-prefabricated Type Cable with Compressed SF₆ Gas Insulation

佐藤英男* Satô Hideo

安藤順夫* Andô Nobuo

日立電線株式会社では、超高圧大容量地中送電線として優れた特徴をもっている管路気中送電線の実用化に備えて、これまでに摘出された問題点を克服した新しい構造のセミプレハブ形管路気中送電線を開発した。新形管路気中送電線の開発に当たっては、絶縁の信頼性、現地作業性及び布設寸法裕度の確保に重点を置いた。絶縁性能上最も重要なスペーサ部は、詳細な電界解析に基づいて設計され、十分な性能をもっていることが確認された。また、全長約30mの試験線路により組立て作業性及び電氣的・熱的・機械的特性が総合的に検討され、所期の性能をもっていることが明らかとなった。更に、長期実負荷試験により、これら特性が長期間安定に維持されることも確認された。この結果、開発されたセミプレハブ形管路気中送電線は、将来の大容量地中送電線の発展に寄与するものと期待される。

1 緒言

最近の電力需要の増大に伴いケーブルの大容量化が必須となっており、在来ケーブルに代わって管路気中送電線が次期地中送電線として有望視されている。我が国では、管路気中送電線の優れた特徴に着目し古くから検討されているが¹⁾、まだ実用化されるに至っていない。一方、欧米では試験採用が主体であるが、幾つかの適用例が報告されている²⁾。しかし、これらの管路気中送電線には、現地の作業性や絶縁の信頼性の点で改良すべき点が残されていると考えられる。そこで、日立電線株式会社では従来の管路気中送電線を改良し、早期の実用化を目指した新しい管路気中送電線の開発を進めてきた。以下に新しいセミプレハブ形管路気中送電線の概要と試作線路の諸性能について述べる。

2 セミプレハブ形管路気中送電線の構造と特長

これまで開発されてきた管路気中送電線には、幾つかの問題点が摘出されている。これを要約すると次の3点となる。

(1) 異物の混入に対する配慮が十分ではない。

管路気中送電線を含めガス絶縁機器に異物、特に導電性粒子が混入すると、その絶縁性能が大幅に低下する。過去に発生した事故原因の大半は、現地組立て時あるいは運転中に発生した異物によるものである。

(2) 現地作業性が良好ではない。

一般にシースは溶接により接続され、導体は溶接、チューリップコンタクトあるいはボルト締めにより接続される。溶接箇所が多いと組立てに時間を要し、また溶接くずの混入する危険が増す。また、導体接続をチューリップコンタクトやボルト締めで行なう場合には、構造が複雑になり布設寸法に高い精度が要求される。

(3) 高い布設寸法精度が要求される。

各ユニットを滑らかに接続するには、土木設備の高低差、水平方向の角度ずれなどの寸法に、高い精度が要求される。以上述べたような問題点を見直し、必要な改良を行えばガス絶縁の優れた特徴を生かした管路気中送電線の実用化が可能となる。このような考えから、日立電線株式会社では図1

に示す構造のセミプレハブ形管路気中送電線を考案した。その構造の詳細については後述するが、主な特長は以下に述べるとおりである。

- (1) 本体部の各ユニットは、工場で組み立てられガスが充填された状態で輸送され、現地で差し込み接続されるセミプレハブ構造となっている。このため、現地組立て作業中及び運転中に本体部へ外部から異物が混入する恐れはほとんどない。接続部には、多量の異物が絶縁空間に混入しないように防塵機構が設けてあり(図1⑨、⑩参照)、更に、万一異物が混入しても管路気中送電線全体の性能を低下させないように沿面距離の長いコーンスペーサ(同図⑤参照)が使用されている。
- (2) 現地で10~20ユニット接続後、内部に引き入れられるより線導体が通電導体となっており、この区間(120~240m)の導体接続は不要となっている。また、シース溶接箇所も1箇所(同図⑧参照)だけとなっている。これにより、作業性の向上、時間の短縮、塵埃の発生量の低減などが可能となる。
- (3) 導体接続を省略することで、布設寸法精度に大きな裕度がとれる。例えば、接続部で長さ方向のずれ±50mm、軸ずれ±10mm、折れ角±1度(1,200mmの他端で±200mmの振れ)が許容される。
- (4) その他、導体側の伸縮ジョイントが不要なこと、相分離としてシースに電流を流すことにより、外部への誘導障害や短絡電流による電磁力の問題を軽減していることも特長の一つである。

3 新形管路気中送電線の設計

前述の特長点を最大限に生かすよう、セミプレハブ形管路気中送電線の各部が設計された。

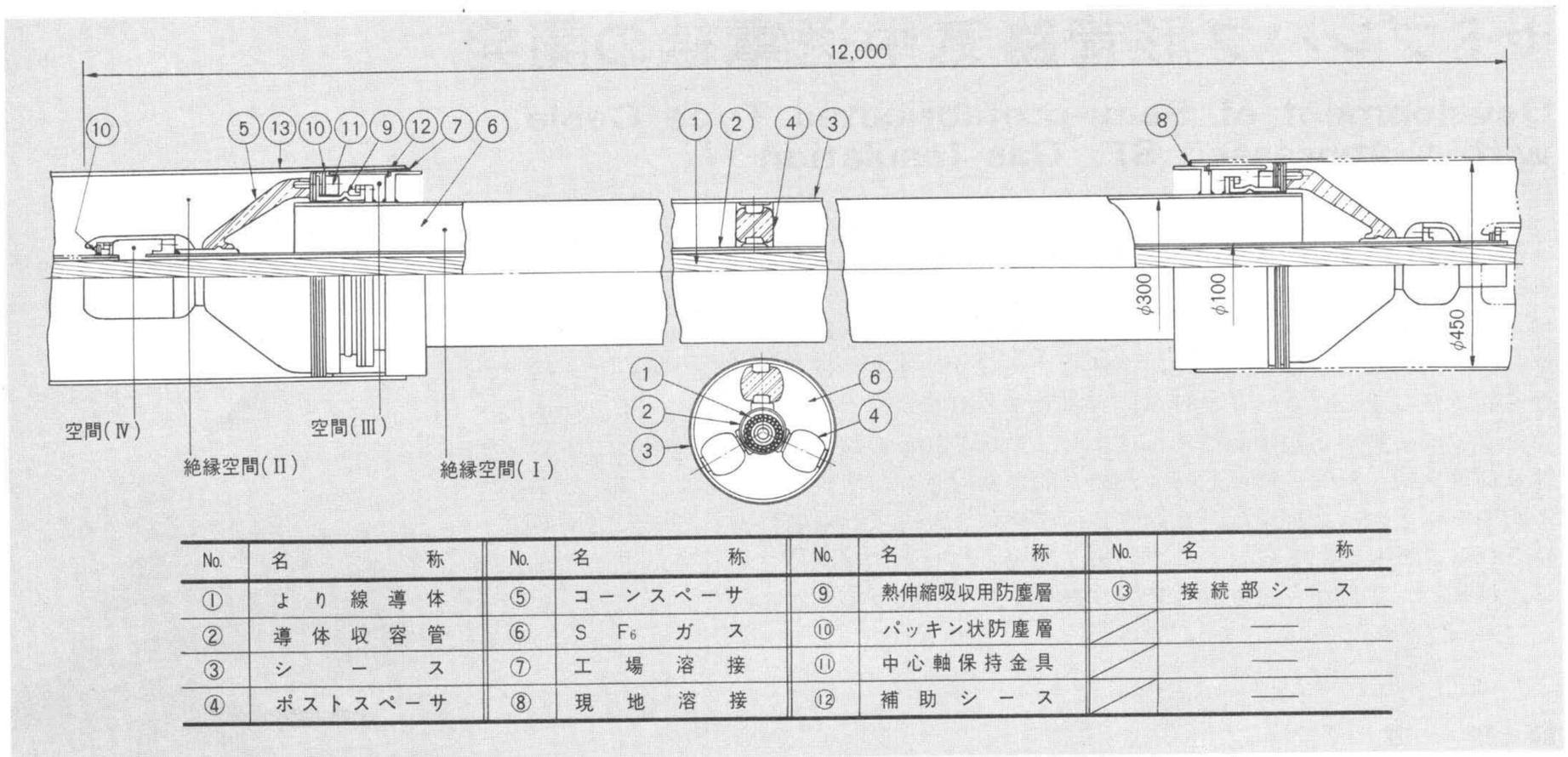
3.1 熱伸縮吸収対策

各部の熱伸縮は次に述べるようにして吸収される。

(1) 導体の熱伸縮

より線の笑い(よりの戻る現象)とスネークにより自己吸収される。

* 日立電線株式会社研究所



No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称	No.	名 称
①	より線導体	⑤	コーンスペーサ	⑨	熱伸縮吸収用防塵層	⑬	接続部シース
②	導体収容管	⑥	S F ₆ ガス	⑩	パッキン状防塵層		—
③	シース	⑦	工場溶接	⑪	中心軸保持金具		—
④	ポストスペーサ	⑧	現地溶接	⑫	補助シース		—

図1 セミプレハブ形管路気中送電線の構造 ⑧の溶接と①のより線引き込みだけを現地作業とし、他はすべて工場組立てとしたプレハブ形構造である。

(2) 導体収容管とシースの相対的な熱伸縮

コーンスペーサとシースの間(図1 ⑪, ⑫参照)のスライドにより吸収される。中央のポストスペーサによって導体収容管とシースを固定し、コーンスペーサは導体収容管にだけ固定されている。

以上の構成により内部構造の熱伸縮は自己吸収が可能となる。

(3) シースの熱伸縮は10~20ユニットごとに設けられる伸縮ジョイントにより吸収される。

3.2 異物の発生と対策

異物、特に絶縁性能に著しく影響する導電性異物の発生は、現地溶接(図1 ⑧参照)、より線引き入れに代表される現地組立作業によるもの及び運転中の熱伸縮によるものと大別される。またその機構から見た場合には、溶接あるいは金属間の摩擦に分けることができる。これらの発生原因に対し、溶接箇所を半減する(従来はシース側を2箇所溶接していたが、1箇所は工場内溶接として現地溶接は1箇所とする)とか、摩擦する金属の材質を選択することによって発生量を抑制しているが、異物の発生を完全になくすことは不可能である。そこで、今回開発したセミプレハブ形管路気中送電線では、3箇所(図1 ⑨及び⑩の2箇所)の防塵機構により、発生した異物が絶縁空間に広がることを防止している。すなわち、溶接くず及び熱伸縮に伴うコーンスペーサ部と接続部シース間の摩擦くずは、図1の空間(III)に発生し、導体引入れ及び導体の熱伸縮による摩擦くずは空間(IV)に発生する。前者の異物が本体部の絶縁空間(I)に絶対に侵入しないよう⑨により完全シャ断されており、また絶縁空間(II)への侵入を抑制するようシース側の⑩が配置されている。一方、後者の空間(IV)に発生する異物は導体側の防塵層⑩によって絶縁空間(II)への拡散が防止されている。絶縁空間(II)には異物の侵入する可能性が皆無ではないので、これを考慮した絶縁設計がとられている。

3.3 スペーサ部の絶縁設計

管路気中送電線では、スペーサ部分の設計が絶縁設計上、

最も重要なポイントとなる。すなわち、スペーサ部分のフラッシュオーバー電圧が管路部分のそれより低くならないように設計する必要があり、このためには、

(1) スペーサを取り付けることによって、スペーサ表面近傍のガス中の最大電界が、スペーサのない場合のガス中の最大電界よりも高くないようにすること。

(2) スペーサ表面と埋込み電極との接触部分に、局所的な電界集中が生じないようにすること。

が必要となる。この2点を基本として、ポストスペーサ及びコーンスペーサが設計された³⁾。今回採用した両スペーサ部の電界解析結果は図2(a), (b)に示すとおりである。これにより、上記(1), (2)の項目が満たされていることが明らかとなった。一方、コーンスペーサ部の電界分布で万一にも異物の混入する恐れのある接続部側の沿面電界は、更に低く抑えられている。このような電界分布と前述の異物対策により、全体として協調のとれた絶縁性能が期待できる。

4 スペーサ部のフラッシュオーバー特性

管路気中送電線のフラッシュオーバー特性はスペーサ部のそれが最も重要である。そこで、スペーサ部を組み込んだ試料でフラッシュオーバー特性を検討した。

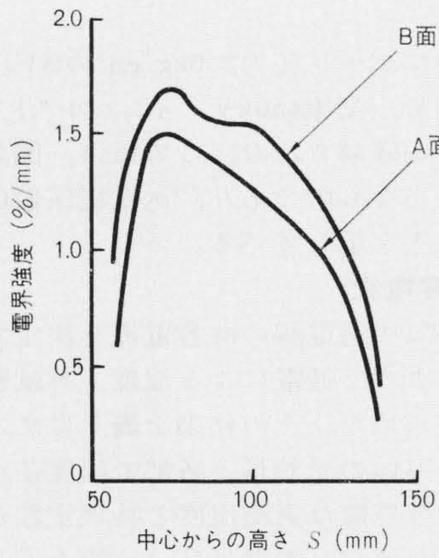
4.1 清浄時のフラッシュオーバー特性

4.1.1 試料

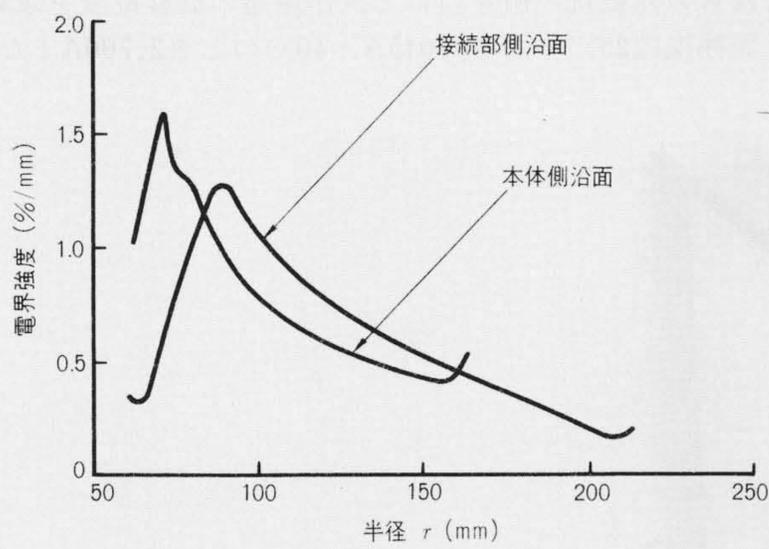
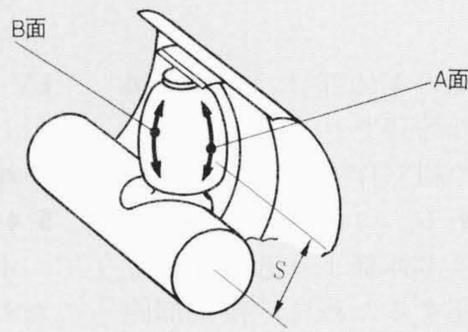
試料は、図1に示す構造及び径寸法の同軸パイプ内にポストスペーサ部と接続部のコーンスペーサ部とを組み込んだ短尺サンプルである。この試料で、インパルス、交流及び直流によるフラッシュオーバー試験を実施した。

4.1.2 試験結果

インパルス、交流及び直流電圧によるフラッシュオーバー電圧とガス圧力との関係を図3に示す。同図中のスペーサ表面フラッシュオーバーは、すべてポストスペーサ表面で生じており、コーンスペーサ表面でのフラッシュオーバーはみられなかった。これはコーンスペーサ表面の電界を低く抑えた効果と考えら



(a) ポストスペーサ



(b) コーンスペーサ

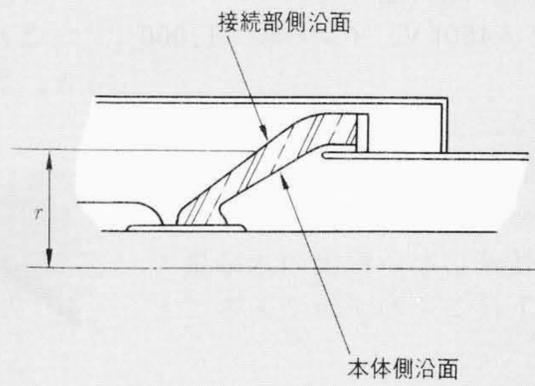
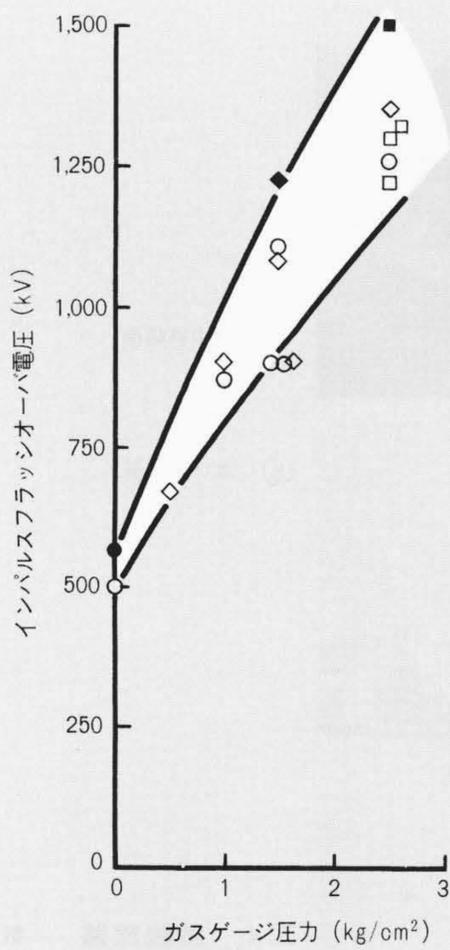
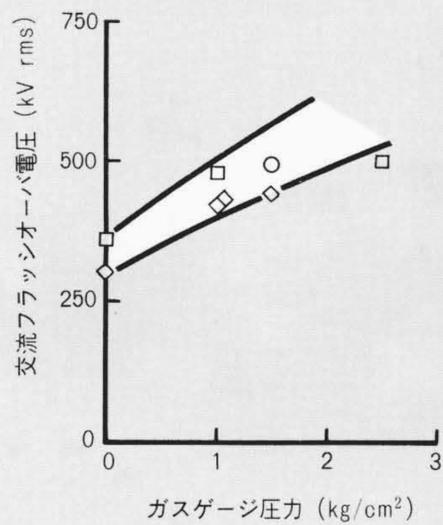


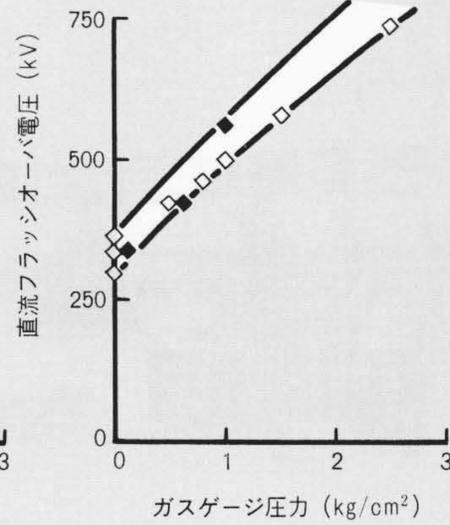
図2 スペーサの表面電界強度 コーンスペーサ接続部側沿面の電界強度が最も低く抑えられている。



(a) インパルス



(b) 交流



(c) 直流

極性	負	正
フラッシュオーバー場所		
スペーサ沿面	○	●
ガス空間	◇	◆
試験対象外又はフラッシュオーバーせず。	□	■

図3 スペーサ部のフラッシュオーバー特性をもっている。

スペーサのないガス空間のフラッシュオーバー特性と同等の特性

れる。この試験結果により、スペーサ部のフラッシュオーバー特性はスペーサのないガス空間部分のフラッシュオーバー特性とほぼ同等であることが確認された。

4.2 汚損時のフラッシュオーバー特性

前述のように本稿の管路気中送電線の本体部は、布設、接続作業中あるいは運転中に異物により汚損される恐れがほとんどない。しかし、接続部には現地の組立作業時に異物や溶接くずによって汚損される可能性がある。このため、防塵機構を設けるとともに、接続部の電界は本体部より低くなるように設計されている。この効果を確認するために、接続部内を人工的に汚損しフラッシュオーバー電圧を求めてみた。その結果、かなりの汚損があっても接続部内のフラッシュオーバー電圧が本体部のフラッシュオーバー電圧より低下する恐れのないことが確認された。例えば、最も厳しい場合、数百ミクロン大のアルミ切粉をコーンスペーサ表面に0.5g付着させたが、ガスゲージ圧力2.5kg/cm²の状態、交流450kV、インパルス1,000kV以上の耐電圧性能を示した。

一方、本体部では、ガス中の水分によるポストスペーサ部のフラッシュオーバー電圧の低下が検討された。その結果、ガス中に水分が混入するとスペーサ表面でのフラッシュオーバーが生じやすくなるが、スペーサ表面に結露しない程度の水分量であれば、フラッシュオーバー電圧の低下はごくわずかであることが判明した³⁾。

5 試作線路の諸特性

新しい管路気中送電線の改良点の検証を主目的として、試験線路を試作し各種試験を実施した。

5.1 試作線路の概要

試作線路は、図1に示したユニット二組みと直角曲り部、気中終端部、ガス中終端部各々一組みから成っており、その外観を図4に、内部構造を図5に示す。

今回試作した気中終端部は、大容量管路気中送電線用として設計されたもので、導体には銅パイプ(断面積3,000mm²)、絶縁体には油浸コンデンサが採用されている。

5.2 試作線路の組立て

実用性能を把握するため、特殊な防塵室などは設けず、通常の雰囲気中で各ユニット及び線路が組み立てられた。組立作業性は良好であり、なんらトラブルは生じなかった。図5(a)にポストスペーサの取付状況を、同(b)に接続部の内部構造

を示す。

5.3 耐電圧性能

組立て終了後の試験線路にゲージ圧力2.5kg/cm²のSF₆ガスを充填して耐電試験を実施し、交流450kV、インパルス1,000kVの性能をもっていることが確認された。この値は、図3に示した試験結果からみて妥当なものであり、送電電圧220kVの線路に十分通用できることを示している。

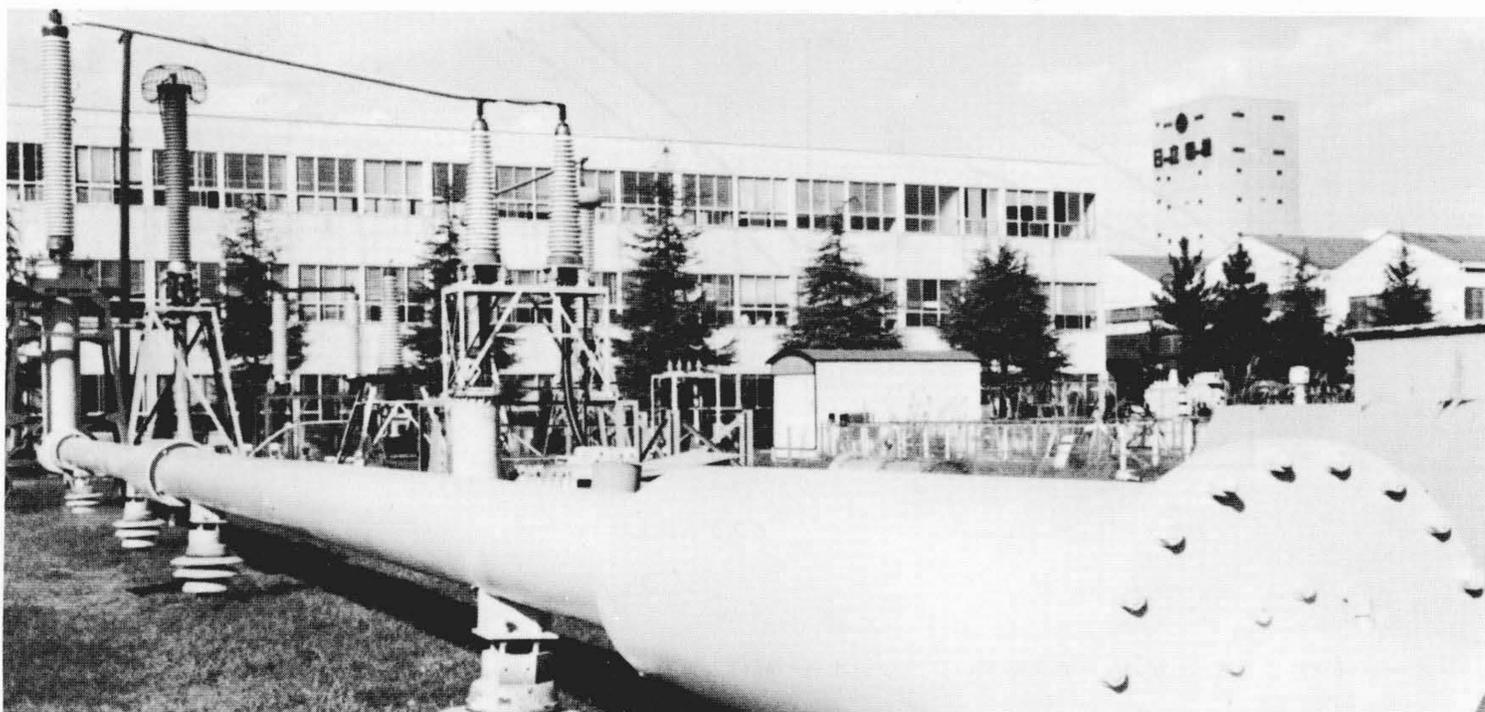
5.4 本体部の熱抵抗と許容電流

本体部の熱抵抗は、管路気中送電線の許容電流を決定するために重要な値である。そこで、通電による温度上昇試験を実施し、本体部の熱抵抗を求めた。その結果を表1にまとめて示す。同表の実測値は、導体の発熱量と各部の温度差から計算された値であり、理論計算値は実測温度と物理定数から理論式⁴⁾を用いて算出された値で、両者は良い一致を示している。

これらの熱抵抗の値を用いて試作線路の許容電流を求めると、周囲温度25°Cのとき3,045A、40°Cのとき2,700Aとなる。

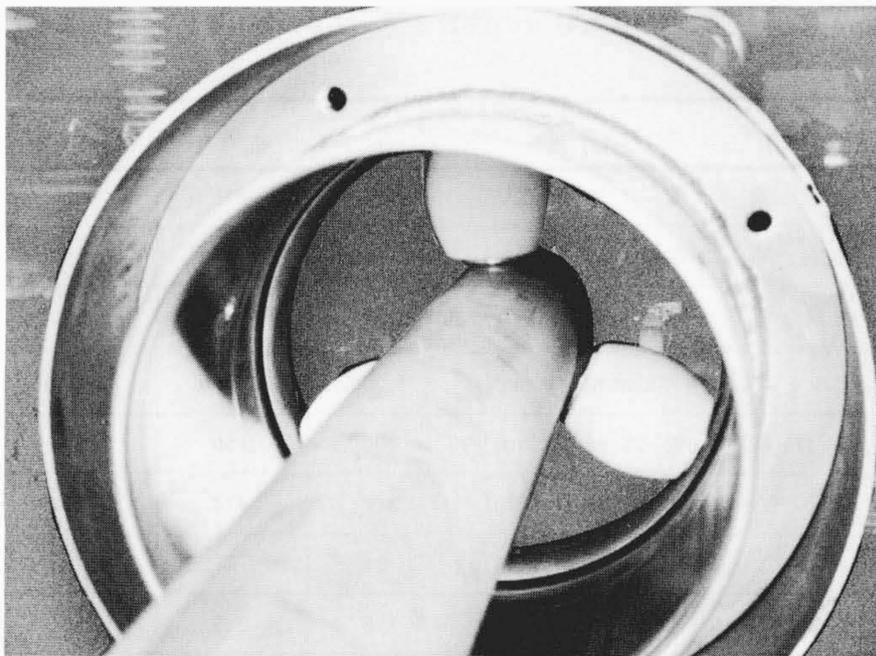


(a) 気中終端側

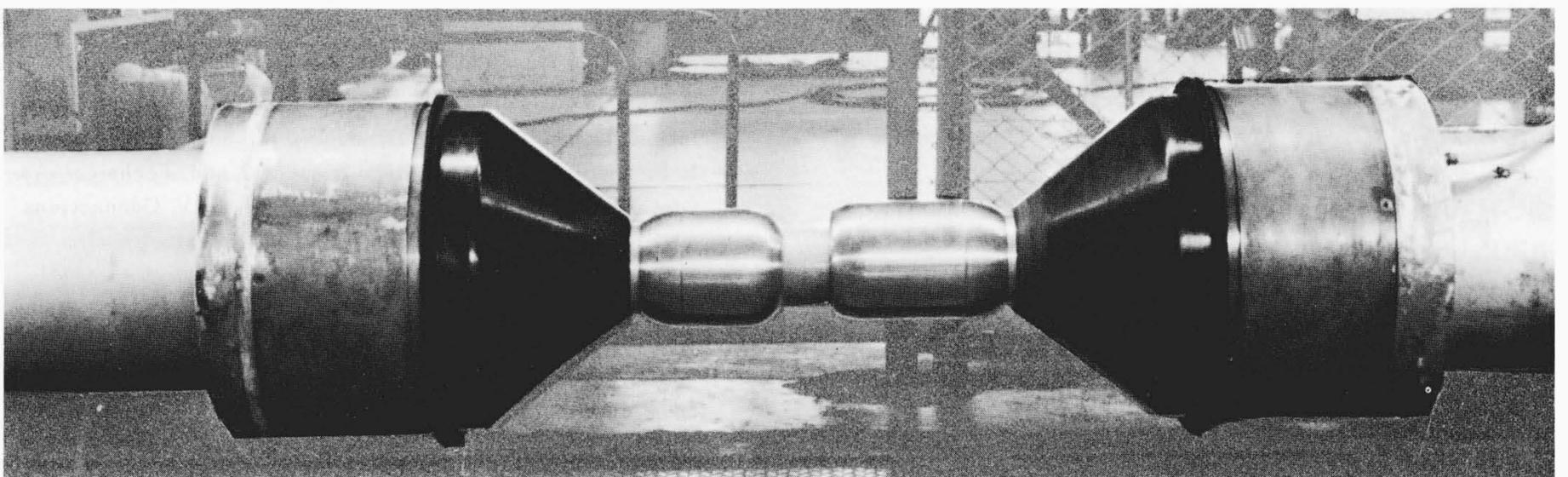


(b) 本体側

図4 試験線路 気中終端部、直角曲り部、2ユニット及びガス中終端部から成っており、ガス中終端部でOFケーブルと接続されてループを形成している。



(a) ポストスペーサ取付け状況



(b) 接続部組立て状況

図5 組立て状況 ポストスペーサ部(組立て途中)及び接続部のコーンスペーサ、導体収容管シールド金具などを示す。

表1 各部の熱抵抗 計算値と実測値がよく一致している。

項目	ガスゲージ圧力 (kg/cm ²)	0		2.5		
		1,500	2,000	2,000	2,500	3,000
実測値	導体収容管-シース	59	57	40	37	34
	シース-大気	15	17	13	12	14
理論計算値 (導体収容管-シース)		58	52	40	37	34

注：単位 °C・cm/W

表2 導体収容管とシースの相対的な伸縮量(1ユニット) 伸縮量は片側分の値である。

項目	値		
導体収容管の温度上昇 (°C)	11	53.5	66.5
シースの温度上昇 (°C)	4.5	11.5	14
相対的な伸縮量(実測) (mm)	1.8	3.7	4.2
相対的な伸縮量(計算) (mm)	1.4	3.4	4.3

5.5 気中終端部の温度上昇

気中終端部には油浸絶縁方式を採用したため、過度の温度上昇が懸念されたので、通電による温度上昇試験を実施した。その結果、油の自然対流効果が十分に発揮され、3,000A通電時の最大温度上昇は25°C、4,000A通電時の最大温度上昇は47°Cであり、この気中終端部は日射などの悪条件を考慮しても3,000A以上の電流容量をもっていることを確認した。

5.6 本体部の熱伸縮

管路気中送電線の機械的特性を知り、これを設計に反映させるためには温度上昇に伴う熱伸縮量や応力を知る必要がある。そこで、導体収容管とシースの相対的な伸縮量と、より線導体に発生する力を実測した。

表2に、導体収容管とシースの相対的な伸縮量の実測値と計算値とを示すが、両者はほぼ一致している。

一方、導体には温度上昇に伴った軸方向の熱応力が発生す

る。表3に示すものはその実測結果であり、等価的なヤング率は導体材料の約1/3となっている。これは導体の伸びが、より線の笑いやすネークによって吸収されることを示しており、発生する力は十分許容できる値に抑えられている。

5.7 長期実負荷試験

試験線路の長期安定性を立証するため、課通電による長期実負荷試験を約1箇年間実施し、良好な結果を得た。試験条件は200kV連続課電、3,000A 8時間通電及び16時間しゃ断の繰返しである。このとき、導体最高温度は110°Cを超え、日間温度変化は約70°Cとなる。なお、実負荷試験の初期及び最終段階には直流420kV/1hの耐電圧試験が実施されており、試験線路がこれに耐えたことから金属粉などの異物が絶縁空間に混入した形跡はほとんどないといえる。

表3 導体に発生する力 導体の等価的なヤング率は、材料のヤング率の約1/3で、より線導体の効果が見られる。

項目	値		
導体の温度上昇 (°C)	35.5	54	78.5
シースの温度上昇 (°C)	9	15	24
導体に発生する力 (kg)	2,400	2,370	3,010
当価的なヤング率 (kg/mm ²)	1,310	880	800

注：導体断面積 3,000mm²

6 154～500kV級セミプレハブ形管路気中送電線の設計

以上の検討から新形管路気中送電線を超高圧大容量地中送電線として実用化できる見通しが得られた。そこで今回、得られた諸データをもとに、154～500kV級セミプレハブ形管路気中送電線を設計したところ表4の結果が得られた。なお送電容量は、周囲温度を40℃として算出したものである。寸法、構造面では従来形のものよりかなり小形、簡易化されており、このことは管路気中送電線の経済性を増し、よりいっそう実用化に適しているといえよう。

7 結 言

これまでの管路気中送電線の問題点を見直し、新たな構造のセミプレハブ形管路気中送電線を設計、製作し諸試験を実施した。その結果、実用化できる性能をもっていることが実証できた。主な結果を要約すると次に述べるとおりである。

- (1) 絶縁の信頼性が高く現地組立て作業が容易で、布設時の寸法裕度の大きいセミプレハブ形管路気中送電線を開発した。
- (2) 電界解析によるスペーサの最適形状の設計、及びモデルによるフラッシュオーバ実験を実施し、優れた絶縁性能をもつスペーサを得た。
- (3) 試験線路により各種初期性能の確認及び長期実負荷試験を実施し、所期の性能をもっていることを実証した。
- (4) 電氣的、熱的及び機械的な要求性能に対する設計手法が確立され、将来の超高圧大容量地中送電線への実用化に寄与するものと確信する。

最後に、この開発に当たり種々御助言をいただいた電力会社の関係各位に対し厚くお礼申しあげる。

表4 新形管路気中送電線の設計例 必要送電容量により、各部寸法は変わる。

項 目	値		
送 電 電 圧 (kV)	154	275	500
送 電 電 流 (A)	2,650	3,340	6,350
送 電 容 量 (MVA)	707	1,590	5,500
アルミより線導体断面積 (mm ²)	3,000	4,500	12,000
導 体 収 容 管 外 径 (mm)	100	150	250
シ ー ス 外 径 (mm)	312	434	720
シ ー ス 厚 さ (mm)	6	7	10
運 転 ガ ス ゲ ー ジ 圧 力 (kg/cm ²)	2.5	2.5	2.5

参考文献

- 1) S. Fukuda : EHV Cables with Compressed SF₆ Gas Insulation, IEEE Trans. PAS, 86, 60 (January 1967)
- 2) R.F. Swoish et al : The Enviromental and Technical Aspects of Terminating External HV to UHV Connections at Substations, CIGRE paper 23-08 (1976)
- 3) 佐藤, ほか2名 : ポスト形スペーサのフラッシュオーバ特性, 放電研究会資料ED-76-61 (1976)
- 4) 例えば, A. Eidinger and J. Dobsa : Efficiency of Direct and Indirect Cooling of Underground Transmission Systems Having Solid or Gaseous Insulation, CIGRE paper 23-04 (1976)



ケーブル接続部

増岡信雄・森屋克男・他1名
登録実用新案第1111165号 (実公昭50-13735号)

本考案は、ケーブル接続部にかかわり、端子部の結合力に優れ、したがって、ケーブルへ張力が作用したとしてもこれに十分耐えることができ、しかも構造が簡単で組立が容易であり、そして課電の有無を外部から検知することのできるケーブル接続部の提供を目的とするものである。

すなわち、図1に示すように、一対のケーブル挿入口①とラップ状開口部②とを互いに交さす方向に設けた弾力性絶縁材料製の接続部本体③のケーブル挿入口①内に、先端に穴(若しくは欠載部)付導体端子④を取り付けたケーブル⑤を上記導体端子④が互いに重ね合わさるまで挿入するとともに、ラップ状開口部②内に、先端にボルト付導電部材⑥を取り付け、更に、内部に検電端子⑦を埋入させた絶縁ブロック⑧を、上記導電部材⑥のボルト⑨が前記導体端子④の穴⑩を貫通して、この端子④を越えた側に設けられたナット⑪に係合するまで挿入することにより構成するものである。

このような本考案によれば、導体端子同士はボルトを介して確実に結合され、そしてその組立は導電部材のボルトをナットへ

係合させるだけで極めて簡単であり、しかも検電端子を介して簡単に課電の有無を検知することができる。

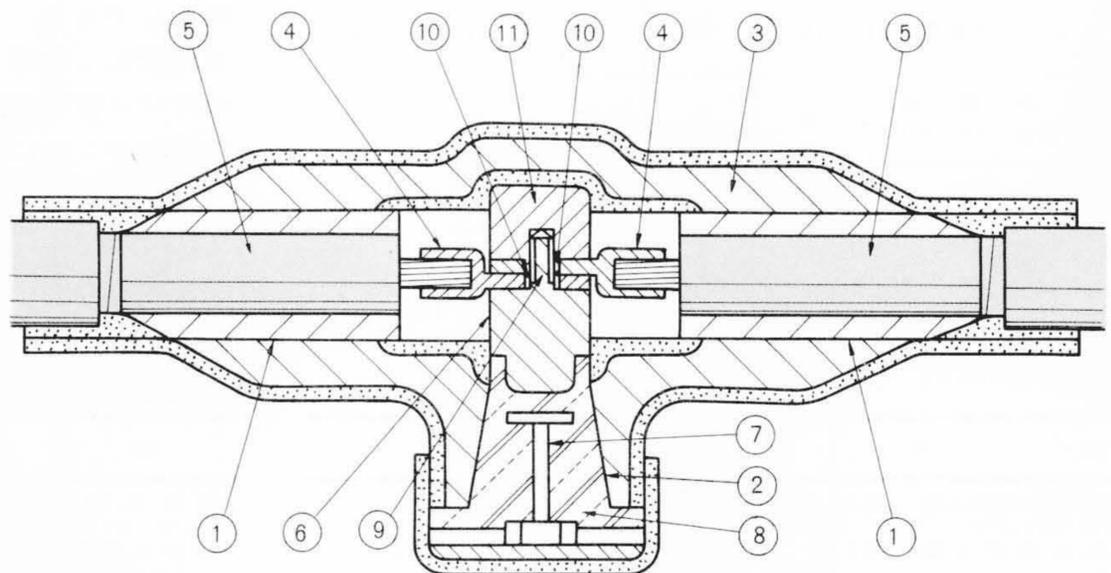


図1 ケーブル接続部断面