

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

187kV Cross-linked Polyethylene Insulated Aluminum Sheathed Power Cable for Okukiyotsu Power Station

架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブルは、材料及び製造技術の改良により、高電圧領域での使用が拡大されつつあり、既に154kV地中送電線にも使用されている。

電源開発株式会社奥清津発電所は、信濃川水系清津川に設けられた総出力1,000MWの純揚水発電所である。この発電所の引出し用ケーブルとして、保守が容易なこと、防災対策と付属装置が経済的なことから、世界最高電圧の187kVアルミ被架橋ポリエチレン電力ケーブルが採用された。

このケーブルは、厚肉絶縁、大サイズケーブルであるため、その開発に当たっては電気特性だけでなく熱機械特性面にも十分な検討を加えた。このケーブルの終端接続部としては、油中終端箱及びSF₆ガス中終端箱を開発した。

これらのケーブル・接続部については、3箇月にわたる長期課通電試験を実施し、安定した特性をもつことを確認した。

小島弘司* Kojima Kôji
片上浩三** Katakami Kôzô
逸見武男** Henmi Takeo
岡田建治** Okada Kenji

1 緒 言

架橋ポリエチレン絶縁電力ケーブル(以下、CVケーブルと呼ぶ)は、優れた誘電特性をもち、取り扱いやすく接続が容易で、保守点検が簡単であるなどの点から、77kV以下の送配電線路に広く使用され、ここ数年154kVでも実用化が始まっている¹⁾。

電源開発株式会社奥清津発電所では、4台の290MVA発電機によって発生した電力を500kV送電線2回線で送電するため、187kVケーブルと縮小形開閉装置により、電力の流れを

2回線に統合している。このケーブルとしては、巨長が100m以下と短尺であること、多回線洞道内布設での防災対策、保守の容易さ、そして154kV級CVケーブルの試験及び納入実績に示された高い信頼性から、世界最初の187kV CVケーブルが採用された。

この論文では、ケーブル及び終端接続部の開発と性能確認試験を中心に述べる。

表1 ケーブル及び終端箱の使用電圧と要求性能 設計の基準となる回路電圧には195.5kVを、雷インパルス絶縁強度には750kVを採用した。

項 目	性 能		備 考		
	600mm ²	2,000mm ²			
使用 定 格	公 称 電 圧	187kV		設計の基準となる電圧	
	最 高 回 路 電 圧	195.5kV			
	雷 イン パ ル ス	750kV(140号*)			
	連 続 電 流 容 量	995 A	1,990 A	所要電流容量	
	短 時 間 電 流 容 量	17kA/2s			
	遮 蔽 層 電 流 容 量	17kA/2s			
主 な 要 求 性 能	交 流 耐 電 圧**	220kV/10minに耐えること		終端箱は149kV/50pC以下	
	コ ロ ナ 開 始 電 圧**	220kV/30pC以下			
	交 流 長 時 間 耐 電 圧***	546kV/1hに耐えること		終端箱は410kV/6h	
	雷インパルス耐電圧***	常温	1,134kV/3回に耐えること		終端箱は1,000kV/3回
		90°C	907kV/3回に耐えること		
	誘 電 正 接 特 性**	108kVで0.1%以下			
	誘電正接温度電圧特性	54kV, 108kV, 162kV } 常温, 90°C } で0.1%以下			
防食層雷インパルス耐電圧	50kV/3回に耐えること				

注：* = 直接接地系統， ** = 枠試験， 他は試料試験， *** = 電気学会高電圧試験法専門委員会RPT分科会推奨案に基づいて算出

* 電源開発株式会社 ** 日立電線株式会社日高工場

2 線路設計

2.1 定格事項

ケーブル及び終端箱の使用定格並びに要求性能を、表1に示す。ケーブルと終端箱への要求性能は、絶縁体の温度係数の差などにより、若干異なっている。

2.2 布設条件

ケーブルの布設ルート及び終端箱の明細を、図1に示す。主変圧器から縮小形開閉装置までは600mm²ケーブル4回線(総納入長1,156m)、縮小形開閉装置から連系用変圧器までは2,000mm²ケーブル2回線(総納入長435m)で、いずれも洞道内棚上布設である。終端接続部は、いずれも片端油中、片端SF₆ガス中終端箱である。

3 ケーブル

3.1 絶縁設計

絶縁体厚さは、表1に示した交流及び雷インパルス耐圧値から、次式によって算出した。

$$[\text{絶縁体厚さ}] = \frac{[\text{耐電圧値}]}{[\text{設計ストレス}]} + [\text{内部半導電層厚さ(約2mm)}]$$

表1の耐電圧値は、電気学会RPT分科会の推奨案²⁾に基づくものである。

設計ストレスとしては、図2に示す66~154kVガス架橋CVケーブルの破壊特性より、交流:30kV/mm、雷インパルス:60kV/mmを採用し、絶縁体厚さを22mmとした。

このケーブルの交流使用ストレスは、平均電界(*G*_{mean})で5.4kV/mm、最大電界(*G*_{max})で7.9kV/mm(600mm²)であり、従

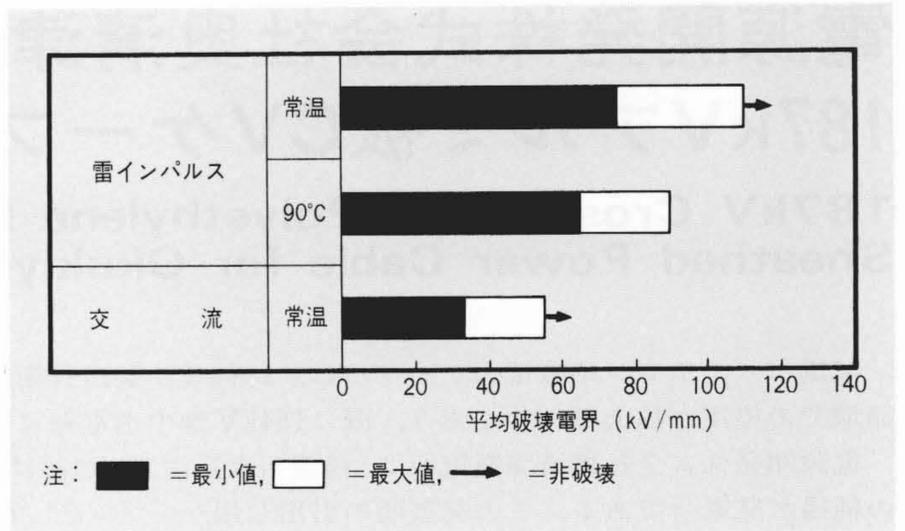


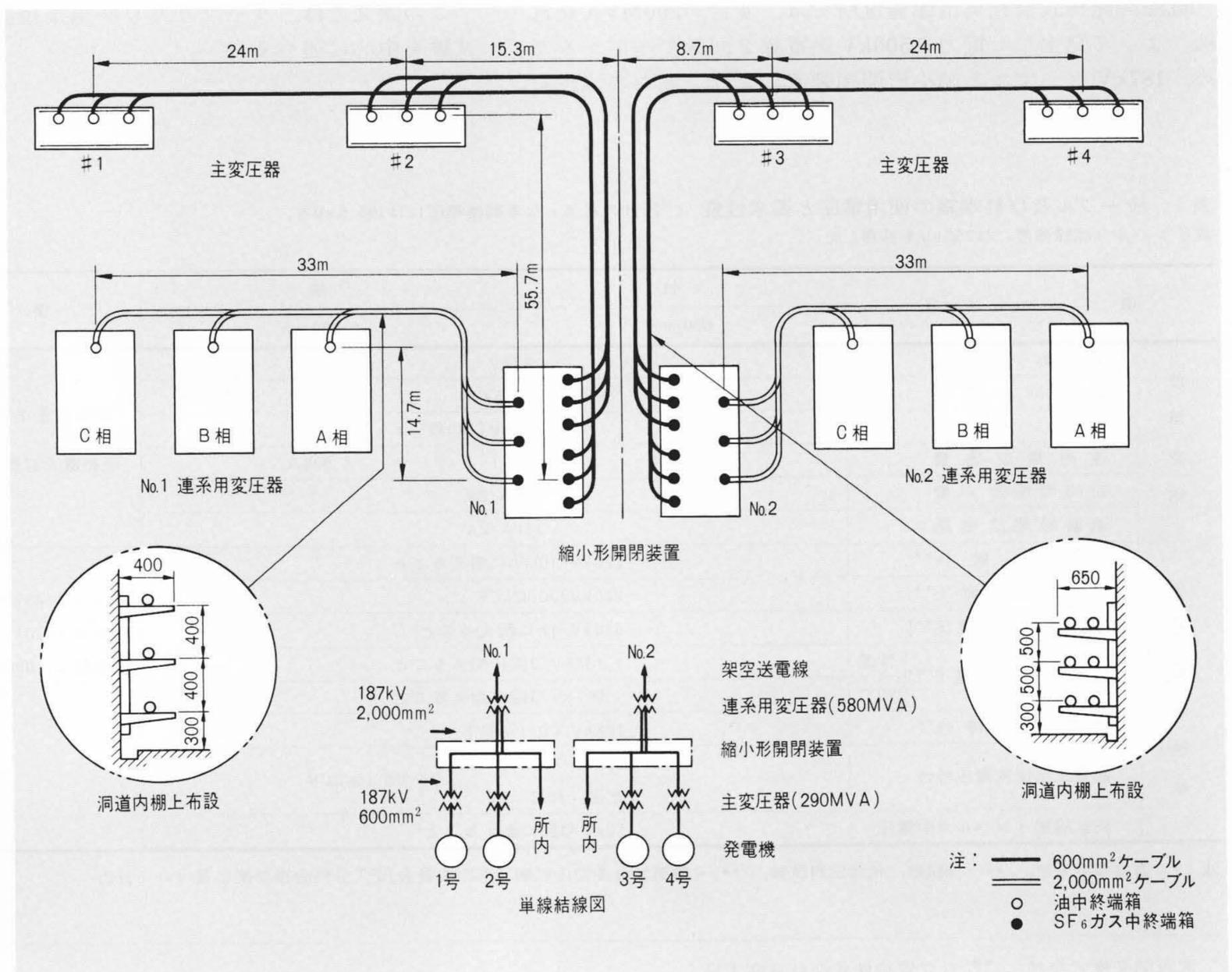
図2 66~154kVガス架橋CVケーブルの破壊特性 設計ストレスとして交流30kV/mm、雷インパルス60kV/mmが採用可能である。

来の実績に比べ約20%高い。これまでの実績からこのストレスは十分許容できるが³⁾、更に長期課通電試験により、高ストレス下での安定性を確認した。

3.2 熱伸縮吸収法とケーブル構造の検討

直接接地系統のため地絡電流が大きいので、アルミ被を採用した。アルミ被は絶縁体を外傷や水分から保護し、高ストレス運転に安全度を付加するとともに、防災上も有利である。

厚肉絶縁体は温度上昇による熱膨張が大きく、外径が2mmほど膨張する。アルミ被内径はこれを吸収できる寸法とし、外部半導電層上には銅テープを巻いて充電電流を負担させる構造とした。



ケーブルの長手方向の熱伸縮吸収は、ルート長が比較的短く、かつ曲りが多いので、この曲りで負担させる分散オフセット方式とした。この場合各曲り部には、熱伸縮による繰返し曲げが加わるとともに、アルミ被と中のコアの熱膨張量の差による両者間の摩擦が発生する。このため、アルミ被の許容ひずみを考えたオフセット設計を行なうとともに、後者については耐摩耗性に優れたテープ材料を開発した。

3.3 ケーブルの仕様

以上の検討により決定したケーブル構造を表2に、また、完成したケーブル外観を図3に示す。

基底温度 35°C、電圧 168.3kV (揚水時受電最低電圧) で 290 MVA、580MVA 1 回線 2 機分の容量を得るため、導体サイズは各々 600mm² (円形圧縮)、2,000mm² (4 分割圧縮) を採用した。アルミ被は、内圧はほとんど掛からないが、コアとの間にギャップがあるための曲げ特性を考え、OF ケーブルと同じアルミ被厚を採用した。

2,000mm² ケーブルは仕上り外径が 136mm、重量が 30.4kg/m

表2 187kVアルミ被CVケーブル構造 絶縁厚22mm、このクラスで初めてアルミ被を採用したCVケーブルである。

項	目	仕	様
導 体	公 称 断 面 積	2,000mm ²	600mm ²
	形 状	4 分割圧縮	円形圧縮
	外 径	53.8mm	29.5mm
絶 縁 体 厚 さ*		22.0mm	22.0mm
外部半導電層厚さ		約1.25mm	1.25mm
遮蔽軟銅テープ		0.2mm×1枚	0.2mm×1枚
押えテープ厚		0.5mm	0.5mm
波付アルミ被	厚さ	2.7mm	2.2mm
	高さ	約6.0mm	約4.8mm
ビニル防食層厚さ		4.5mm	4.5mm
仕上り外径		136mm	107mm
概 算 重 量		30,440kg/km	13,770kg/km
最大直流導体抵抗 (at 20°C)		0.00933Ω/km	0.0308Ω/km
最大静電容量		0.255μF/km	0.168μF/km
最小絶縁抵抗		2,500MΩ-km	3,500MΩ-km

注：*は内部半導電層厚さを含む。

表3 187kVアルミ被CVケーブルの初期特性 破壊電圧をはじめ、各項目とも安定した良好な値を示している。

試験項目	サイズ	2,000mm ²		600mm ²	
		破壊電圧(kV)	Gmean**(kV/mm)	破壊電圧(kV)	Gmean**(kV/mm)
交流耐電圧(枠長)		220kV/10min 良		220kV/10min 良	
絶縁抵抗		213,000MΩ-km 以上		342,000MΩ-km 以上	
静電容量		0.255μF/km		0.164μF/km	
コロナレベル		220kV/10pC以下		220kV/10pC以下	
誘電正接(枠長)		0.5~1.5E ₀ *にて0.025%以下		0.5~1.5E ₀ *にて0.025%以下	
誘電正接温度特性(試料)	常温	0.011~0.018%	0.5~1.5E ₀ *にて	0.015~0.017%	0.5~1.5E ₀ *にて
	90°C	0.020~0.028%		0.024~0.029%	
試料破壊電圧		破壊電圧(kV)	Gmean**(kV/mm)	破壊電圧(kV)	Gmean**(kV/mm)
雷インパルス	常温	1,554~1,704以上	77.7~85.2~	1,644~1,704以上	82.2~85.2~
	90°C	1,344	67.2	1,374	68.7
交 流	常温	651~711以上	32.6~35.6~	681~711	34.1~35.6

注：* E₀=対地電圧(187/√3 kV) ** Gmean=平均破壊強度



図3 187kV 1×2,000mm² (右)及び 1×600mm² (左)アルミ被 CV ケーブル 2,000mm² ケーブルの外径は 136mm で、275~500kV OF ケーブルの外径に相当する。

と、CVケーブルとしては記録的な大きさとなった。

3.4 ケーブルの製造

絶縁体には純架橋ポリエチレンを用い、水分、ボイドを除去し均一な組織をつくるガス架橋方式⁴⁾と、半導電層と絶縁体界面の密着を良くし突起の発生を防ぐ三層同時押出方式⁴⁾によりケーブルを製造した。交流使用ストレスが高いため、異物の混入防止には特に注意を払った。

3.5 ケーブルの性能

ケーブルの初期性能は、表3に示すように要求性能を十分満足するものであった。

また、ケーブル曲げ試験の結果、アルミ被外径の20倍径までの曲げは、問題なく許容できることが判明した。

4 終端接続部

終端接続部として、油中終端箱及びSF₆ガス中終端箱を納入した。

4.1 終端箱の構造

図4、5に油中終端箱及びSF₆ガス中終端箱の構造を示す。油中終端箱には磁器がい管を使用した。後者については、耐SF₆分解ガス特性に優れたエポキシ樹脂製がい管とした。

内部絶縁方式は、特殊加工ポリエチレンシートによる絶縁

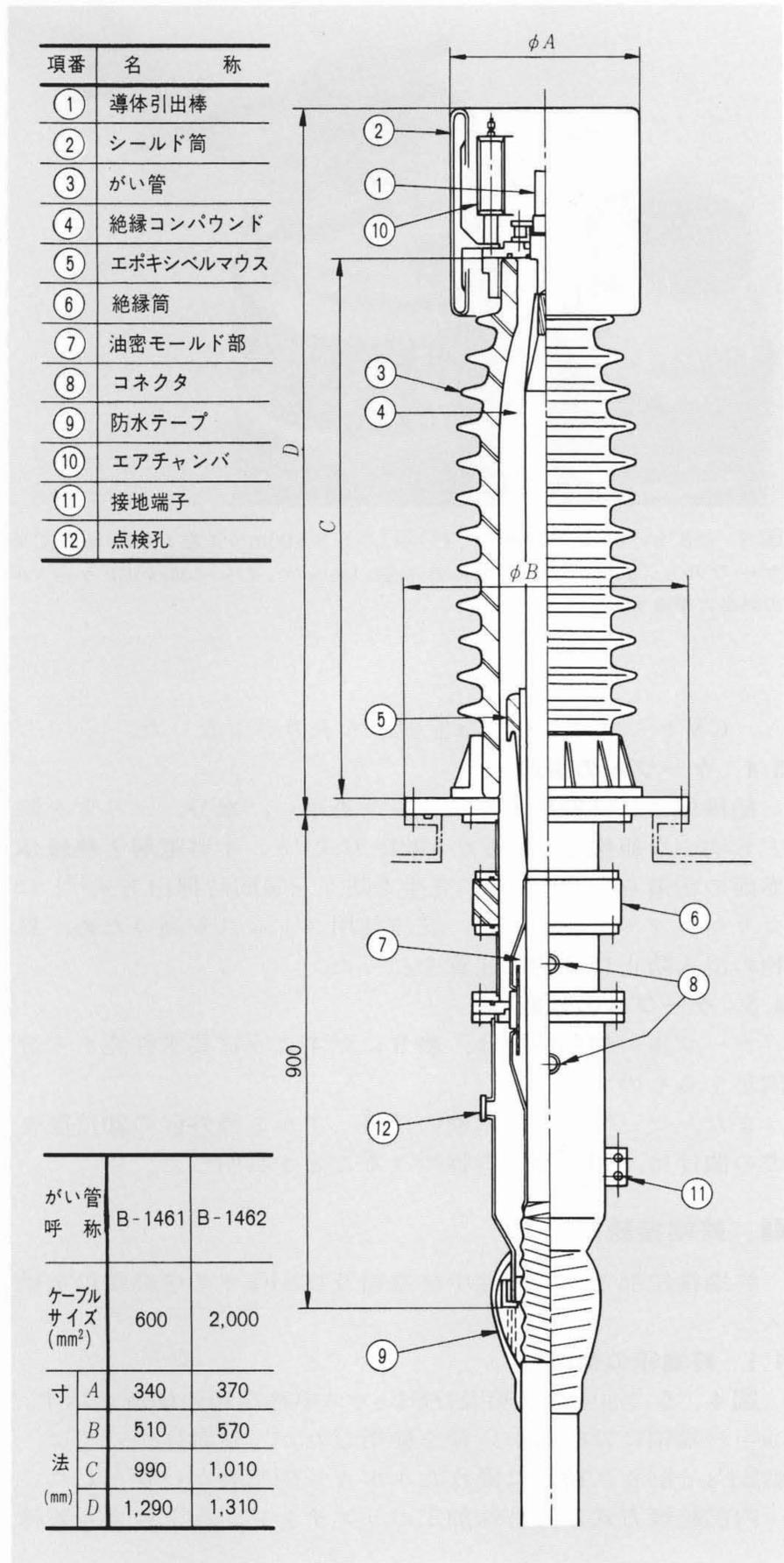


図4 187kV単心CVケーブル用油中終端箱 内部絶縁は、エポキシベルマウスによる遮蔽形である。

補強体とエポキシベルマウスとによる遮蔽形とし、がい管内部に絶縁コンパウンドを充填した。

終端箱の構造上重要なポイントは完全な油密性であり、このため、下部金具とケーブルコア間のシールはモールド方式を採用した。導体通電時の温度上昇によるケーブル絶縁体、及び絶縁コンパウンドの熱膨張分を吸収する方法としては、終端箱内部にエアチャンバを設け、空気層の容積変化により吸収させるコンパクトな方式を採用した。

アルミ被と下部金具との接続は、OFケーブルでは一般に鉛工方式が用いられているが、作業時の熱の絶縁体への影響を避けるため、無鉛工方式を開発した。この部分は大きな地絡電流に耐える必要があり、アルミ被との接触抵抗が十分低くなる構造とした。

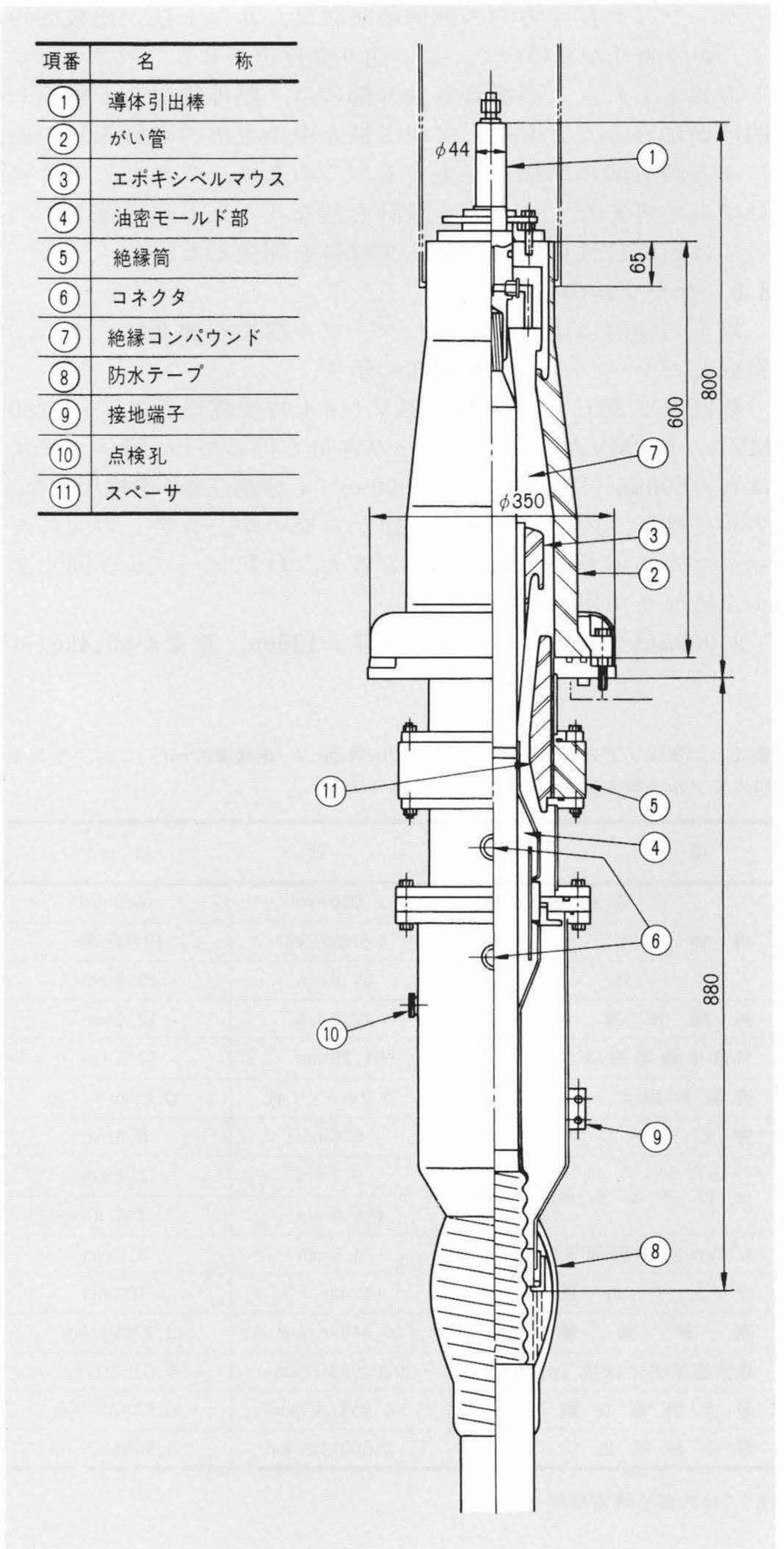


図5 187kV単心CVケーブル用SF₆ガス中終端箱 アルミ被との接続には、無鉛工方式を採用している。

4.2 終端箱の性能

終端箱の初期電気特性は表4に示すような値で、表1の要求性能を十分満たしている。このほか、がい管及び油密モールド部の気密性も、ガス圧5 kg/cm²、油圧11 kg/cm²に対し良好な結果を示した。

5 長期安定性確認試験

開発したケーブル及び終端箱の長期安定性を確認するため、両サイズについて30年相当以上の長期課通電試験を実施した。図6に試験のレイアウトを、図7に試験実施状況を、また試験プログラムを図8に示す。ケーブルのV-t特性(電圧9乗則)から64日間で実使用30年相当の試験となる。

600mm²については課通電試験後、残存性能試験を行ない、

表4 終端接続部の初期特性 要求レベルに対し、十分な特性を示している。

項目	試料	SF ₆ ガス中終端箱	油中終端箱
コロナレベル		149kV/50pC以下	149kV/50pC以下
破壊電圧	雷インパルス	1,270kV	1,240~1,270kV
	交流	560~575kV	560kV

表5に示す結果を得た。ケーブル、終端箱とも初期からの特性低下はほとんど見られず、高ストレスでの使用も問題のないことが確認された。

2,000mm²については、同じ条件下で6箇月課通電を行ない、現在なお継続中である。

これらの試験によって、開発したケーブル及び終端箱が十分な長期安定性をもっていることが確認された。

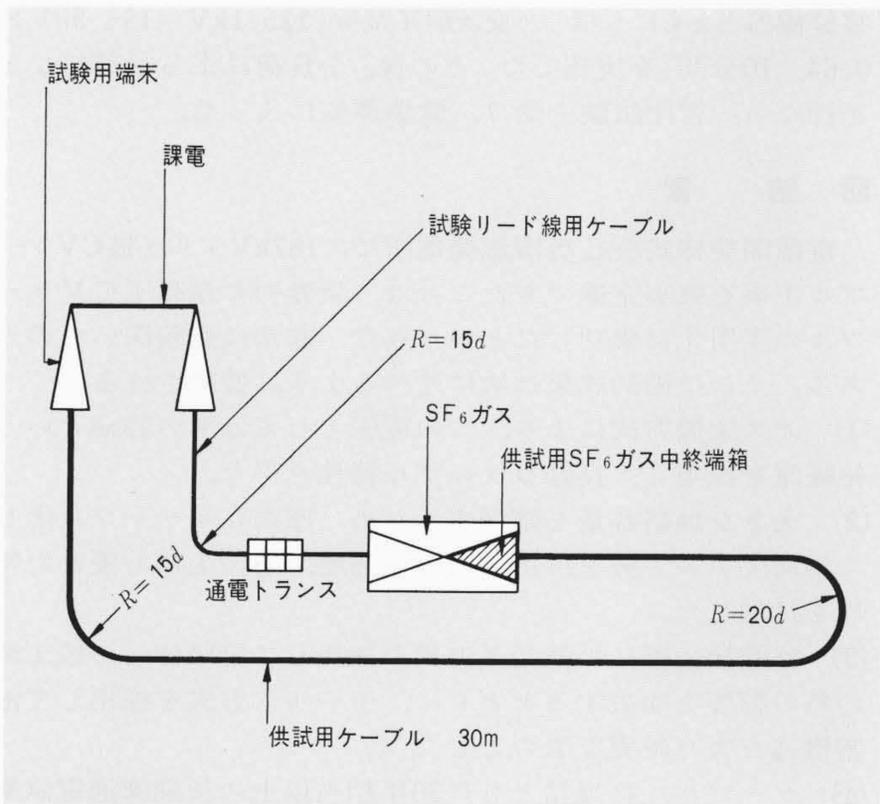


図6 長期課通電試験レイアウト 供試品としてはケーブル30m、SF₆ガス中終端箱を使用した。

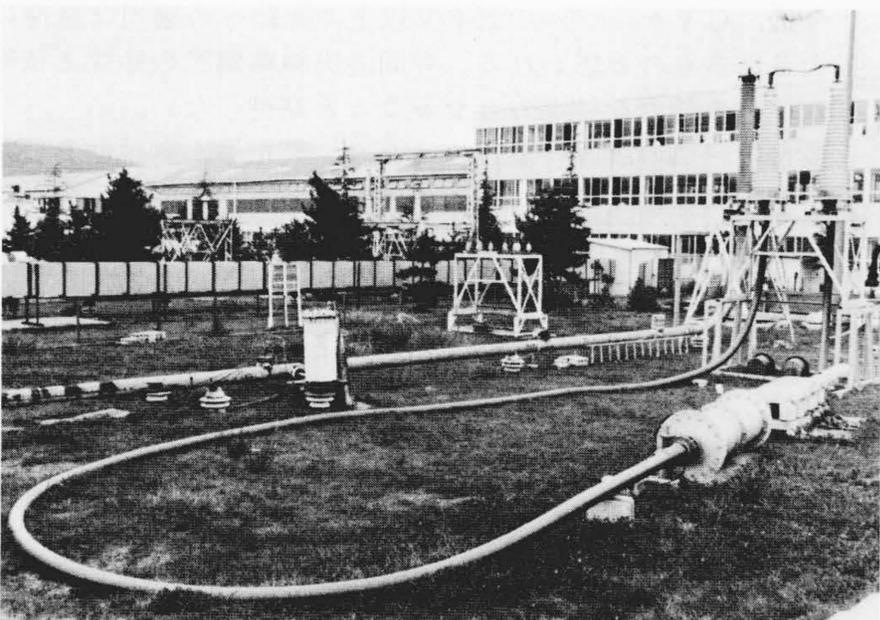


図7 長期課通電試験実施状況 供試 SF₆ガス中終端箱は、地上の金属タンク内に収容されている。

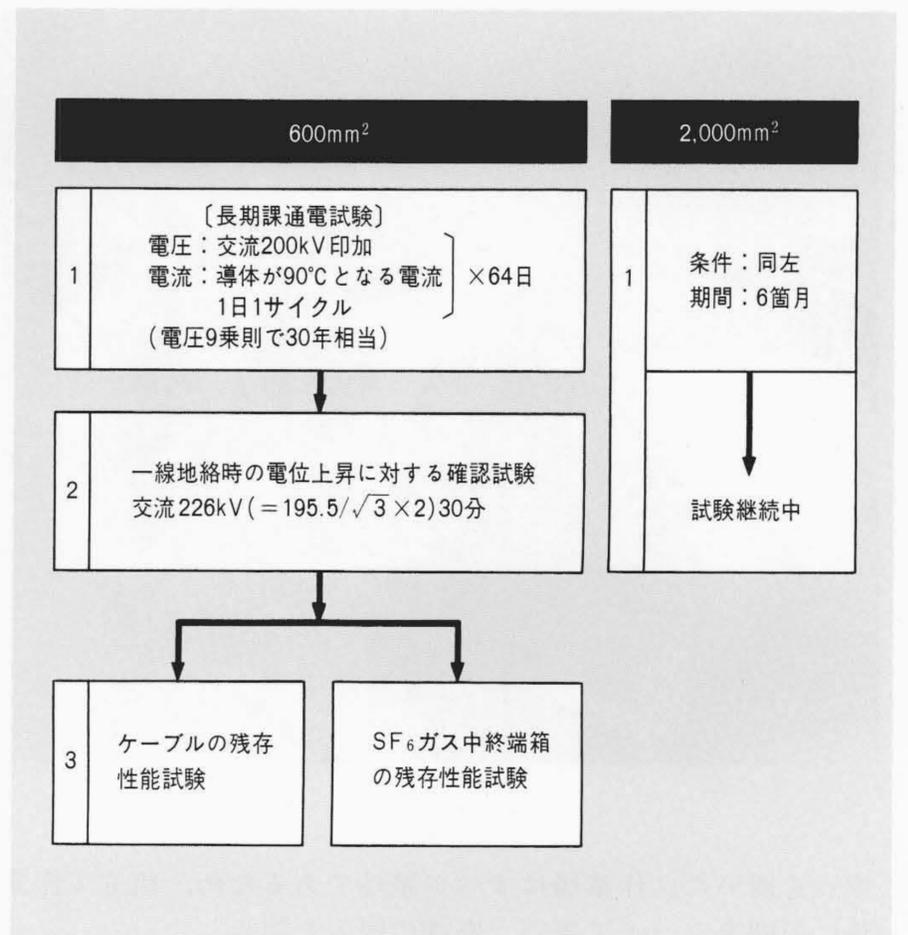


図8 長期課通電試験プログラム 600mm²については30年相当試験後、残存性能試験を実施し、2,000mm²については課通電を継続中である。

表5 長期実負荷試験後の残存性能(600mm²) ケーブル、終端箱とも初期に比べ劣らない値を示し、これにより長期安定性が立証された。

項目	試料	ケーブル	SF ₆ ガス中終端箱
コロナ試験		149kV/5pC以下 良	149kV/50pC以下 良
		220kV/30pC以下 良	
雷インパルス破壊試験	常温	⊕⊖1,032kV 良	⊖1,120kV 外部閃絡 (ガス中破壊)
	90°C	⊖1,000kV/1回	⊕1,200kV以上 (端末破壊)
交流破壊試験		700kV/55分 良	540kV/30分 良

6 現地布設工事及び試験

6.1 布設

ケーブルの延線は、縮小形開閉装置側にドラムを置き、各変圧器側に向かって行なわれた。外径が太く、重量も大きく、また剛性も大きな大形ケーブルであるため、キャタピラ1台、電動ローラ7台を分散配置し、布設能率を上げるため、図9に示すように、工場からの直送トレーラ上からの車上延線を行なった。曲り部は半径3mとし、可撓ポリエチレンパイプ及びシーブコロによってケーブルを保護、ガイドした。

ケーブル支持は、分散オフセット方式としたため、途中6mおきにふれ止めを設けた他はがい子受けとした。

図10に洞道内の布設完成状況を示す。

6.2 接続

ケーブルが太く剛性が大きく、かつ端末長が短いため、終端箱の組立てに先立ちケーブルのくせ取りを慎重に行なった。終端箱の組立てに当たっては、がい管内部の気密性確認に

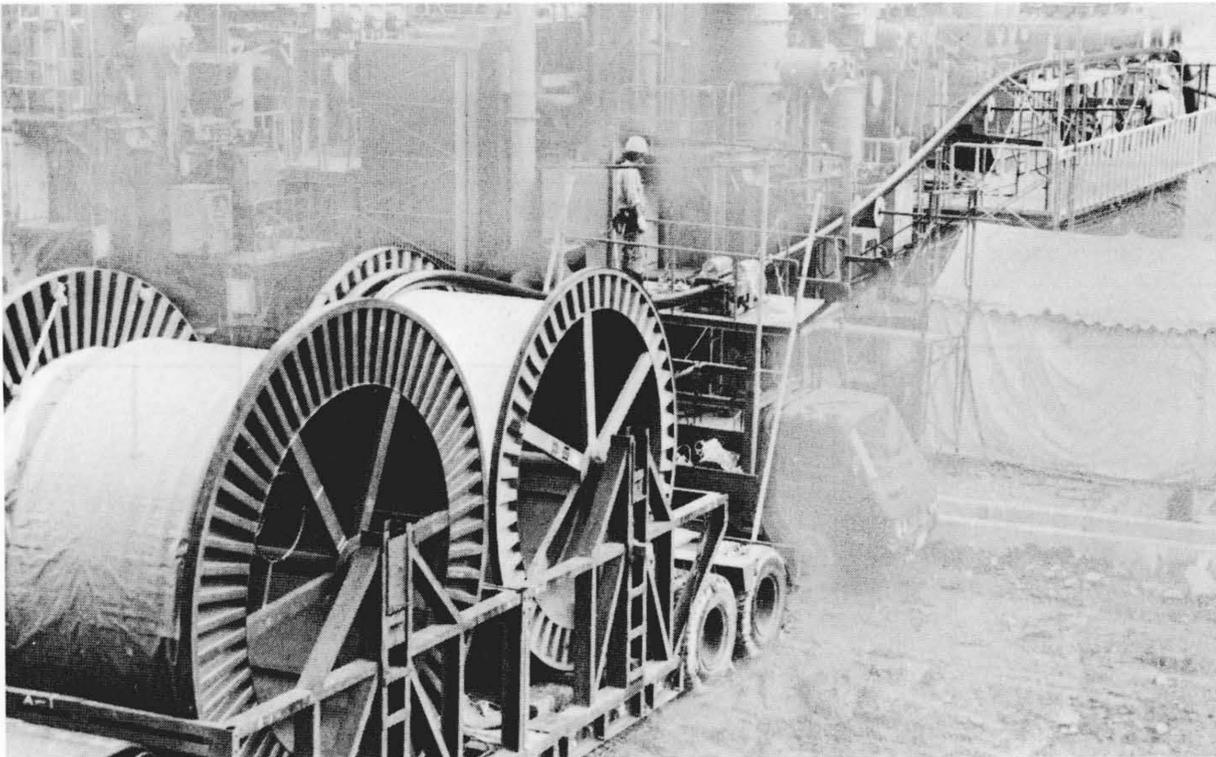


図9 車上延線方式による187kVアルミ被CVケーブルの布設 ケーブルは、工場から直送されたトレーラ上から電動キャタピラにより送り出されて行く。

重点を置いた。作業場はすべて屋外であるため、組立て作業時は周囲をシートで覆い、塵埃の侵入を防止した。

端末数の非常に多い工事であったため、並行して進められる作業はできるだけ同時に行なうなどの工夫をして、工期の短縮に努めた。

6.3 現地試験

布設工事完了後、昭和52年10月末現地で関係者立会のもとに、

接続機器とともに一括して交流耐圧試験(125.1kV=195.5kV×0.64, 10分間)を実施した。その後、全負荷による試運転などを行ない、官庁試験を受け、営業運転に入った。

7 結 言

電源開発株式会社奥清津発電所での187kVアルミ被CVケーブル工事を無事完遂できたことは、世界初の超高压CVケーブルの実用化に成功したという点で、非常に意義深いものがある。その技術的成果は次に述べるように要約される。

- (1) ガス架橋方式により、この電圧としては薄い22mmという絶縁厚を採用し、良好なケーブル特性を得た。
- (2) 大きな地絡容量を確保するため、厚肉CVケーブルとして初めてアルミ被を採用し、機械強度、防災上にも優れた特性を付加した。
- (3) 終端接続部には無鉛工方式を採用して絶縁体への鉛工時の熱の影響を除去するとともに、モールド方式を採用して油密構造をより確実なものとした。
- (4) ケーブル、終端箱ともに30年相当以上の長期課通電試験を行ない、両者の優れた長期安定性を確認した。
- (5) 外径136mm、重量30.4kg/m(2,000mm²)という大形ケーブルであるが、機械力を駆使した延線方式の採用と、周到な工事計画とによって無事工事を完了した。

今後、CVケーブルの154kV以上の線路への適用は急速に拡大されるものと思われる。今回の実線路建設の経験と技術とが、その強力な推進力となることを期待したい。

最後に、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) 熊倉, 逸見ほか1名: 最近の154kV級以上のCV架橋ポリエチレンケーブルと実用例, 電気評論, 62, 488(昭52-6)
- 2) 電気学会高電圧試験法専門委員会RPT分科会, 特高压(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) 池田, 登守, ほか3名: 66kV以上CVケーブルの長期課電特性, 昭51電学会全国大会, No. 1095
- 4) 水上: ゴム・プラスチック電力ケーブルの最近の動向, 日立評論, 58, 777(昭51-10)

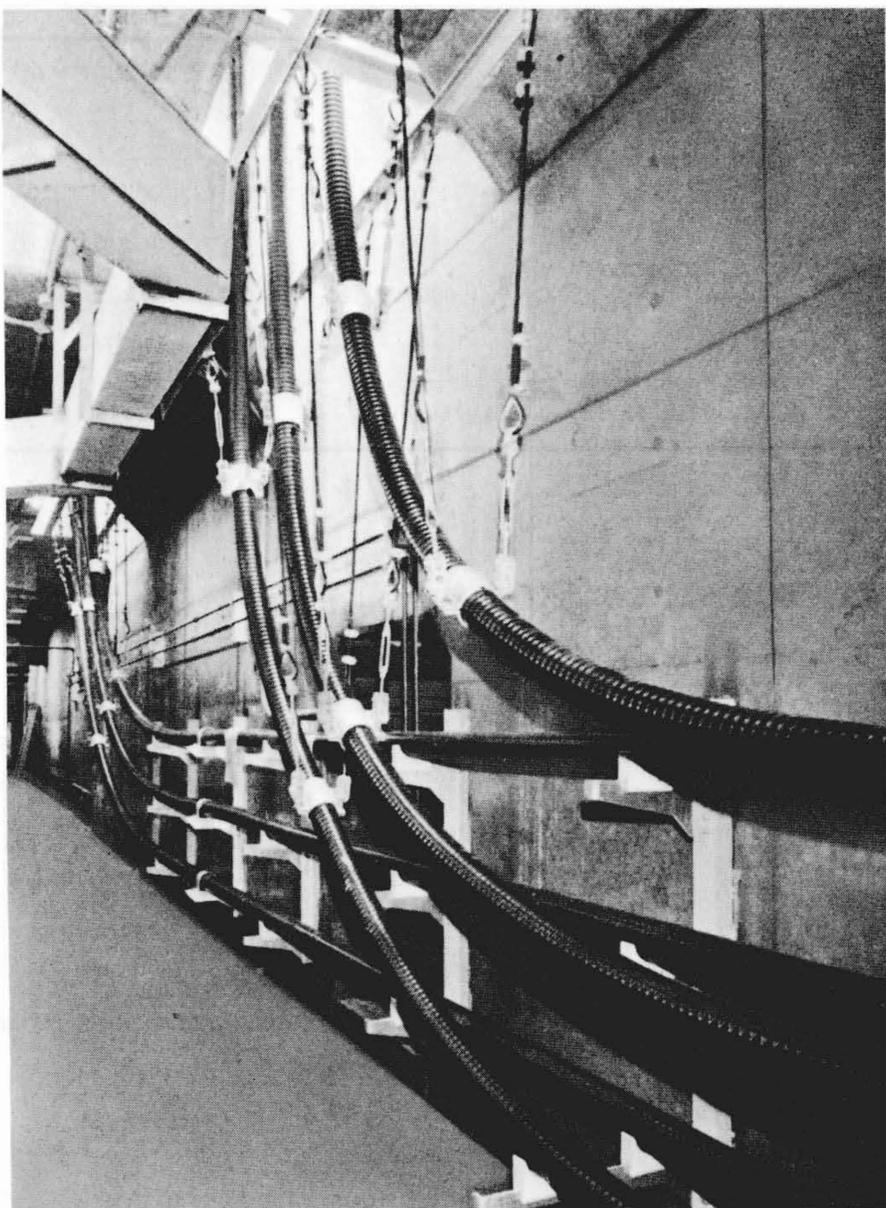


図10 187kVアルミ被CVケーブルの布設状況 洞道内は棚上布設とし、ケーブルヘッド立上り部は懸垂装置で支持している。