

275kV ガス架橋ポリエチレンケーブルの開発

Development of 275kV Cross-linked Polyethylene Insulated Power Cables Cured in Inert Gas

架橋ポリエチレン電力ケーブルの製造法において、新しいガス架橋方式を開発し、275kV ガス架橋ポリエチレンケーブルの試作を行ない、十分な性能をもっていることを確かめた。

本稿ではこの経過について述べるとともに、従来の蒸気架橋方式と新しいガス架橋方式との相違について述べた。次に22kVクラスのケーブルで、電気・物理特性を詳細に検討した。また、66kVクラスのケーブルの電気特性の検討を行ない、その結果から、275kVの設計を行なった。この基準を基にしてケーブルの試作を行ない、初期絶縁性能の検討を行なった。結果として、絶縁厚を大幅に低減することが可能であり、更に、高電界下での長期安定性も優れていることが確認された。

高橋憲司* Kenji Takahashi
池田忠禧** Chûki Ikeda
村木浩二*** Kôji Muraki
登守邦明*** Kuniaki Tomori
加藤直義*** Naoyoshi Katô

1 緒 言

最近、架橋ポリエチレンケーブル（以下、CVケーブルと略す）の高電圧化が急速に進められ、154kV級のCVケーブルも既に実用段階に入り、275kV級のCVケーブルの諸検討が開始されている。

CVケーブルの絶縁性能に特に影響する要因を大別すると次のものが挙げられる。

- (1) 導体と絶縁体界面の接着及び凹凸
- (2) 絶縁体に混入している異物
- (3) 絶縁体中に残存する水分及び架橋分解生成物
- (4) 絶縁体の微視的欠陥（マイクロボイドなど）

これら要因について、種々の対策が取られており、要因(1)についてはタンデム タイプの3層同時押出し、更には、コモン タイプの3層同時押出し法などの採用、要因(2)についてはクリーン ルームの採用などにより大きく改善がなされてきた⁽¹⁾。また、従来の蒸気架橋方式では水分及びマイクロボイドが残存することは避けることができない。要因(3)及び(4)は大きな問題点であり、この稿で述べるガス架橋方式はそれらを改善するとともに、CVケーブルを超高電圧用電力ケーブルの分野で拡大使用するための要求条件、(1) 絶縁厚の低減、(2) 長期信頼性の向上を満足することを主目的に開発したものである^{(2)~(4)}。この方式は昭和48年10月より製造ラインで実稼動に入っている。また、この方式に限らず、CVケーブルの分野では従来の蒸気架橋方式に変わる新しい架橋方式の開発がなされている^{(5)~(7)}。

この稿ではガス架橋方式の概要及び66kVクラスまでのデータに基づく275kV CVケーブルの設計並びに試作の概要と得られた絶縁性能について述べる。

2 ガス架橋方式

従来の蒸気架橋方式と新しく開発したガス架橋方式とを対比すると表1に示すようになる。

従来の蒸気架橋方式では、飽和蒸気はケーブル コア表面で凝縮伝達を行なうため、境膜熱伝達係数が他の不凝縮性ガスよりもはるかに大きい。このためにケーブルの加熱には蒸気を用いる方式が抜群の威力を発揮していた。しかし、その反

面、蒸気がケーブル絶縁体中に浸透し、それが主要因となってマイクロボイドを生成するとともに、水分を絶縁体中に残してしまう欠点がある。一方、ガス架橋方式では、蒸気を使用しない点で絶縁体中に水分が浸透せず、水分によって生成されるマイクロボイドがないという大きな利点がある反面、ガスとケーブル コア表面間の境膜熱抵抗が凝縮性の蒸気に比べて格段に大きくなり、境膜熱抵抗を小さくするくふうが必要である。筆者らは高温・高圧力のガスの流れを形成することによって、この欠点の解決を図った。

3 ガス架橋方式CVケーブルの電気絶縁特性

図1は、22kVクラスの蒸気架橋方式及びガス架橋方式のCVケーブル（以下、それぞれをS-CV、G-CVケーブルと略す）の交流、インパルス初期破壊値の分布を示すものである。

G-CVケーブルの交流、インパルス破壊値は従来のS-CVケーブルのそれに比べてともに向上している。その向上率は交流で50~70%、インパルスで20~70%である。

表1 蒸気架橋方式とガス架橋方式の比較 両架橋方式の大きな特徴を比較している。

蒸 気 架 橋 方 式	製 造 工 程	ガ ス 架 橋 方 式
熱伝達特性：良 蒸気の浸透：あり	押 出 成 形 ↓ 架 橋 工 程 ↓ 冷 却 工 程 ↓ ケー ブ ル コ ア	熱伝達特性：不良 蒸気の浸透：なし ↓ ミ ク ロ ボ イ ド： な し

* 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

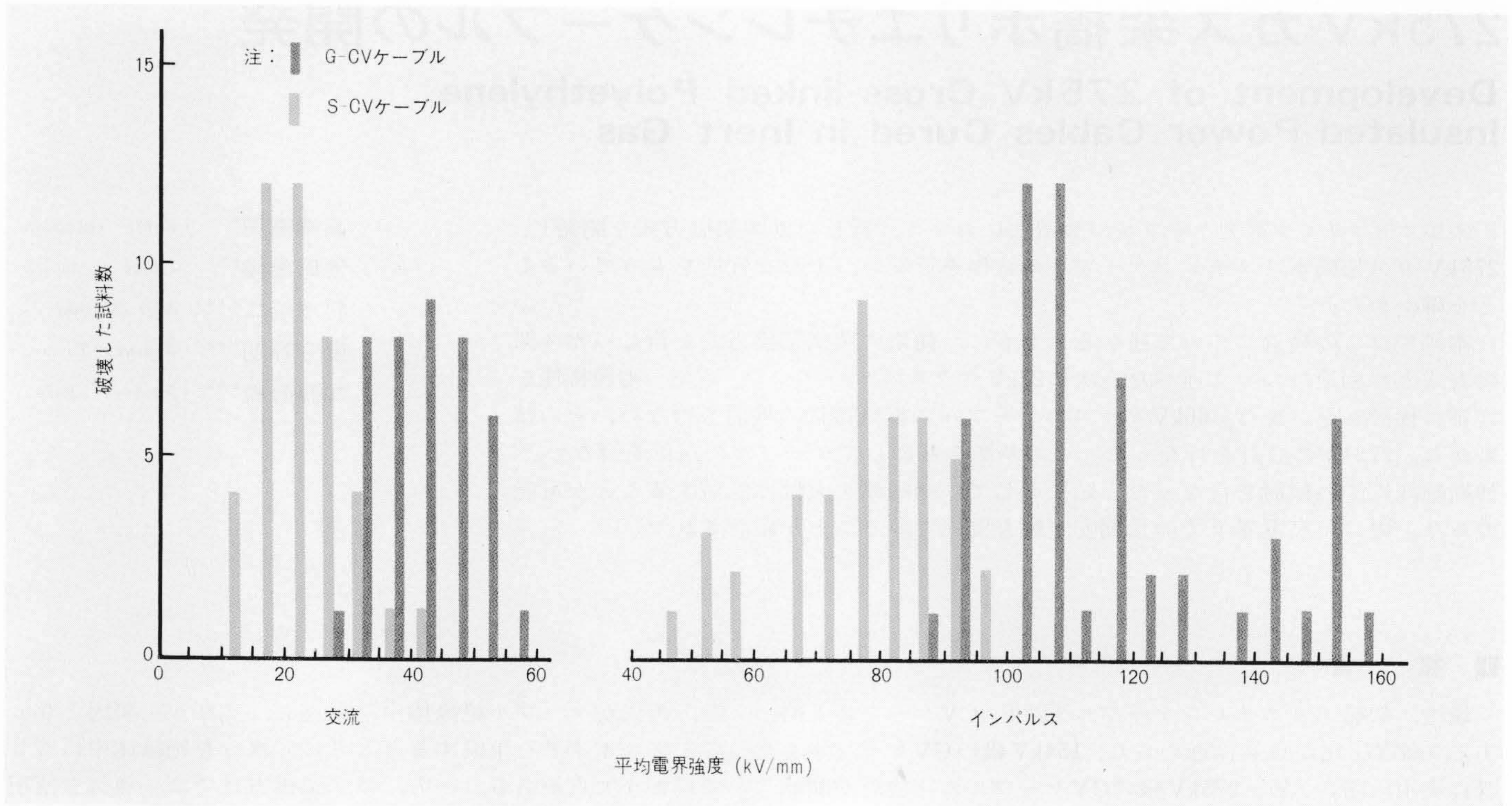


図1 22kVクラスCVケーブルの破壊値分布 明らかにG-CVケーブルのほうが、S-CVケーブルよりも絶縁性能が優れている。

一般に、インパルス破壊強度の向上は添加剤の混入などの手段では難しいが、G-CVケーブルのインパルス破壊値が高いことは興味のあることで、絶縁設計上、絶縁厚低減に大きく寄与する。

図2は、走査形電子顕微鏡で観察したインパルス破壊路を示したものである。主破壊路(図中(a))は、0.5~0.7mmの管となり太くなっているが、その部分から枝分かれしている極く細い破壊路(図中(b))を詳細に観察すると、光学顕微鏡で観察されない欠陥部を経由していることが分かり、インパルス破壊強度と微細構造との密接な関連性がうかがわれる。

次に、66kVクラス(正味絶縁厚11mm)導体サイズ100~250mm²のG-CVケーブルを用いて、常温時の交流、インパルス及び高温時のインパルスそれぞれ課電して破壊試験を行った。その結果は、図3に示すとおりである。常温と高温時のインパルス破壊値の比を見ると、S-CVケーブルの場合と同様の結果が得られ、高温時の低下率は約25%程度となっている。

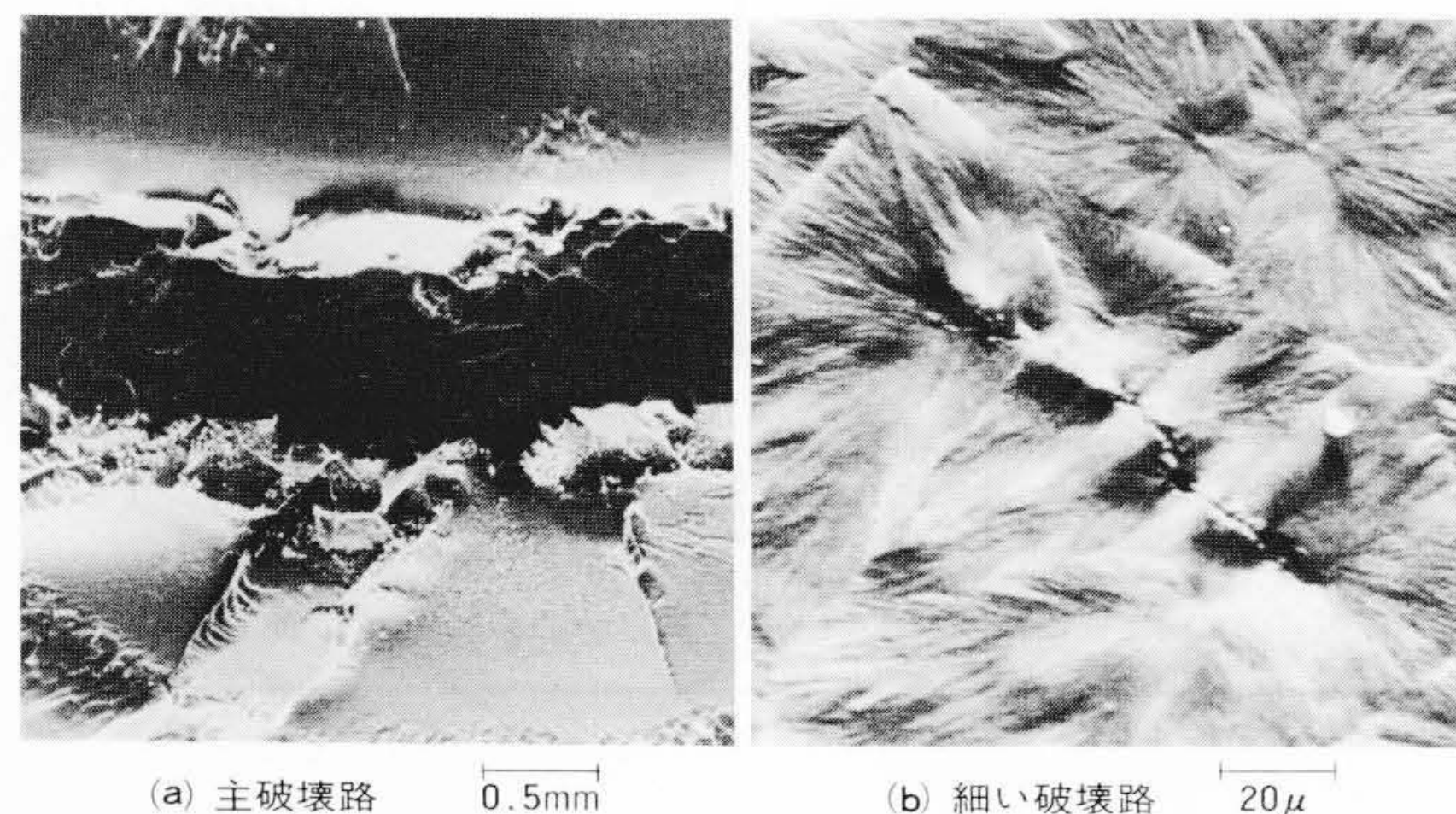


図2 インパルス破壊による破壊路 破壊路の先端部(特に枝分かれした極めて細い破壊路)は、ポリマーの欠陥部を経由して破壊が進んでいる。

4 CVケーブルの微視的構造⁽⁸⁾

図4,5は光学顕微鏡および走査形電子顕微鏡を用いて絶縁体中のマイクロボイド、組織(球晶状構造)などの観察を行なった結果を示すものである。観察を行なった場所は共に絶縁体の外層部である。

両架橋方式の間には大きな相違が見られる。すなわち、S-CVケーブルには多数のマイクロボイドが見られ、特に外層部に多く、内層部になるに従いその密集度合は少なくなっている。一方、G-CVケーブルではマイクロボイドは観察されていない。また、図5(a)を見ると絶縁体中に水分が含まれているために、それが要因となって生成された組織が観察されている。

$\tan \delta$ 、機械的強度、ヤング率、ゲル分率、加熱変形、結晶化度などの物理特性は、両架橋方式共に大きな差異は認められず、同等の値を示している。しかし、密度のみが異なっている。

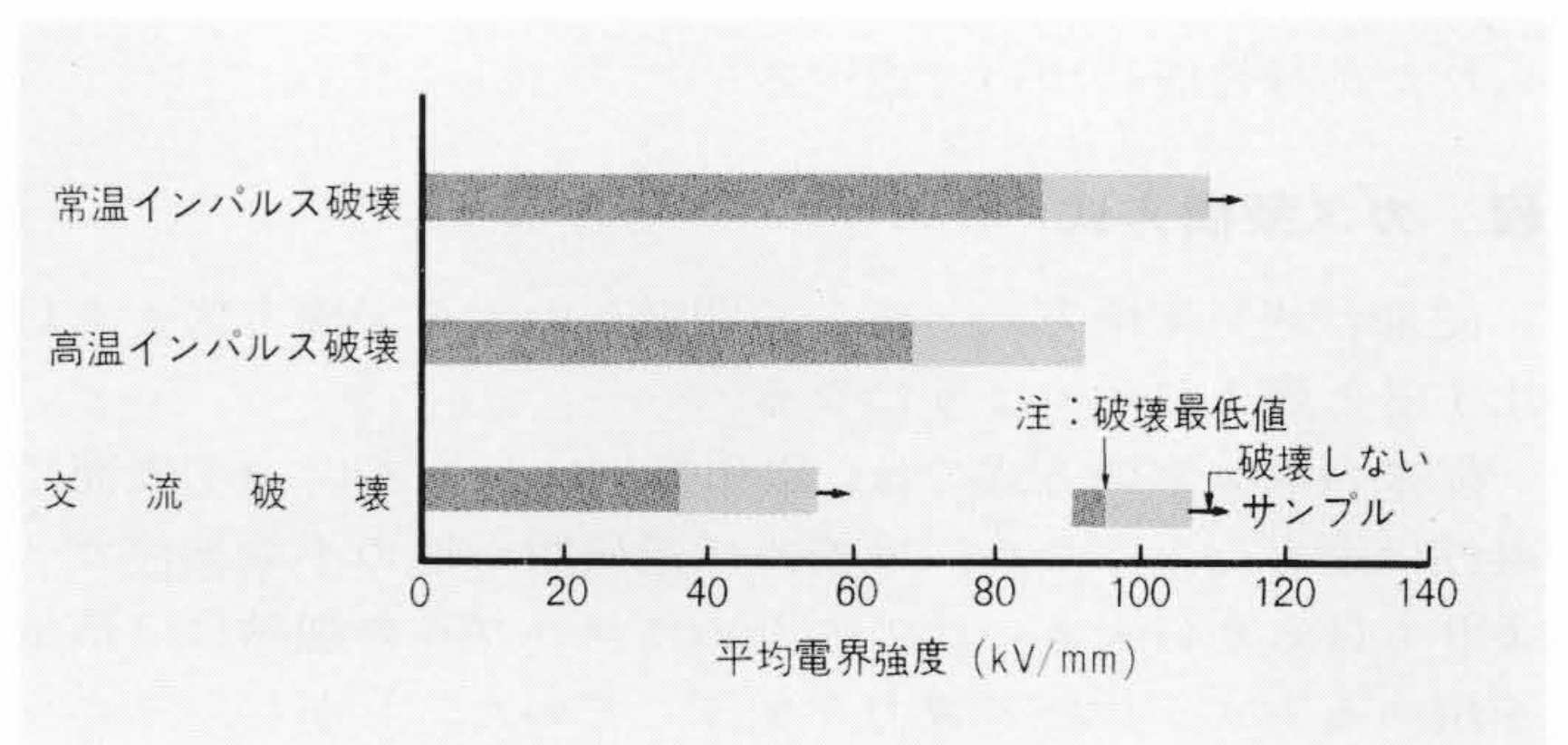


図3 66kV級G-CVケーブルの絶縁性能 交流、インパルス共に破壊値は高いが、高温時のインパルス破壊値は常温時のそれに比べて、約25%低下しS-CVケーブルの傾向と類似している。

いて、G-CVケーブルの絶縁体の密度は0.9185～0.9195g/ccで、S-CVケーブルのそれは0.9170～0.9180g/ccとなっている。絶縁体の密度の増加は、G-CVケーブルのインパルス破壊値の向上の一要因となっている。

5 275kV G-CVケーブル

5.1 ケーブルの設計と製造

275kV G-CVケーブルの開発に当たり、目標性能の設定を次項により行なった。

(1) インパルス破壊電圧目標性能

この性能は系統のBIL(基準インパルス絶縁強度:1,050kV)に安全率として20%(経年劣化、不確定要素に対する裕度)使用時の温度と常温との特性差を25%加味して決定したものである。この考え方は電気学会ゴムプラスチック高電圧試験専門分科会の結論⁽⁹⁾を基準にしたものであり、更に、G-CVケーブルの場合も図3に示したように、温度係数として25%は妥当であるといえる。以上のことから目標性能を次のようにした。

常温時のインパルス電圧目標値……………1,575kV

高温(90℃)時のインパルス電圧目標値……………1,260kV

(2) 交流破壊電圧目標性能

交流電圧に対する目標性能は、電圧-時間特性(いわゆるV-t特性)を基準に、ケーブルの寿命を30年として対地最高電圧に耐え得る初期値を求めた。この場合、従来からいわれている「9乗則」を採用すると劣化係数は4.0となる。この時の目標値は次のようになる。

交流電圧目標値:663kV

なお、最近気中条件の場合、劣化はかなり緩やかであるという報告もあり、後述するG-CVケーブルのV-t特性から余裕を見ても劣化係数は3.0(「12乗則」)を採用すれば十分といえる。この時の目標値は次のようになる。

交流電圧目標値:500kV

(3) 絶縁厚の算定

許容設計ストレス(平均電界強度)は3層同時押し出しガス架橋仕様である図3に示した66kVクラスG-CVケーブルの破壊平均ストレスの最低値を基にして次のとおりとした。

常温時のインパルス設計ストレス:85kV/mm

高温時のインパルス設計ストレス:65kV/mm

交流設計ストレス:35kV/mm

これらの値は22kVクラスのG-CVケーブルのデータ(図1)と比較してもほぼ妥当な値と考えられる。

以上の要求性能及び設計ストレスから、正味有効絶縁厚は高温時のインパルス設計から決まり、20.0mmを得る(目標値(1,260kV)/設計ストレス(65kV/mm)=19.4mmこの場合、内部半導電層を含んだ絶縁厚は22.0mmとなる)。このとき、導体サイズは1,200mm²として最大電界強度(Gmax)は11.6kV/mmとなり、後述するG-CVケーブルの仮想V-t特性からは安全側といえるが、かなりの高ストレスであることから実負荷試験による長期安定性を中心に今後も十分検討を進めたい。

以上の結果をまとめて、先に開発した275kV S-CVケーブル⁽¹¹⁾と比較して表2に絶縁設計を、表3にケーブル構造をそれぞれ示した。絶縁体材質は無添加、無充填の架橋ポリエチレンである。

(4) ケーブルの製造

今回のケーブル製造に当たっては次の3点が最大のポイントとして挙げられる。

ガス架橋方式:絶縁体内への水分浸入、マイクロボイド発生
の阻止。

3層コモンヘッド方式:絶縁体と内・外部押し出し半導電層界面の異物付着、電極不整発生
の阻止。

クリーンルーム方式:材料の混練り、押し出し工程共にクリーン
ルーム化し、異物侵入の阻止。

これら方式の開発により無欠陥CVケーブルの実現に大きく一歩前進し、将来、更に高電圧へのCVケーブルの適用に対し明るい見通しが立ったものと考えられる。

図6は、完成したCVケーブルの断面写真を示すものである。G-CVケーブルの優れた絶縁性能により、従来のS-CVケーブルのものより絶縁厚を20%低減した設計になっている。

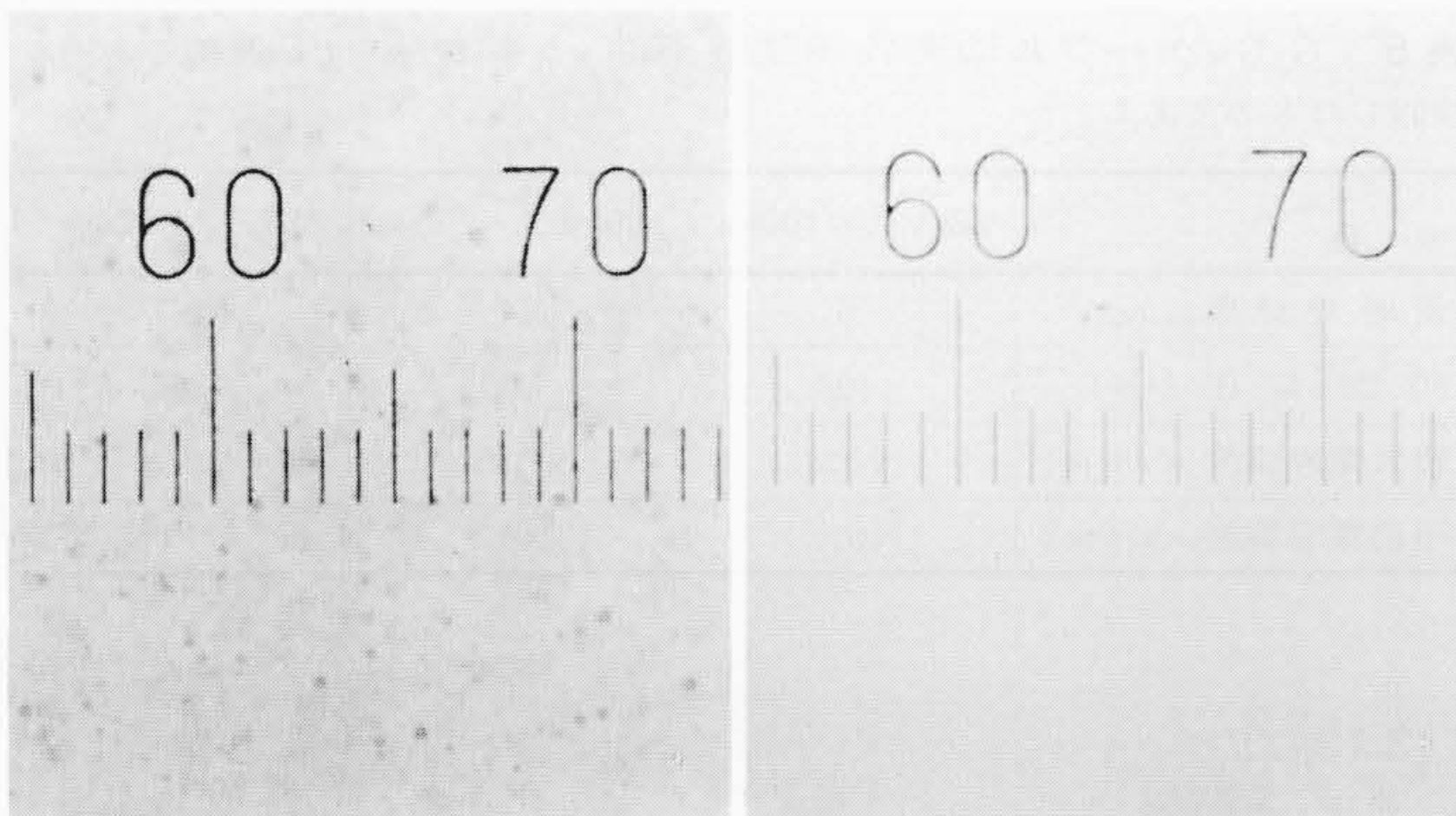


図4 ミクロボイドの観察 S-CVケーブルにはミクロボイドが観察され、いずれも数ミクロン以下のものである。一方、G-CVではミクロボイドが観察されていない。

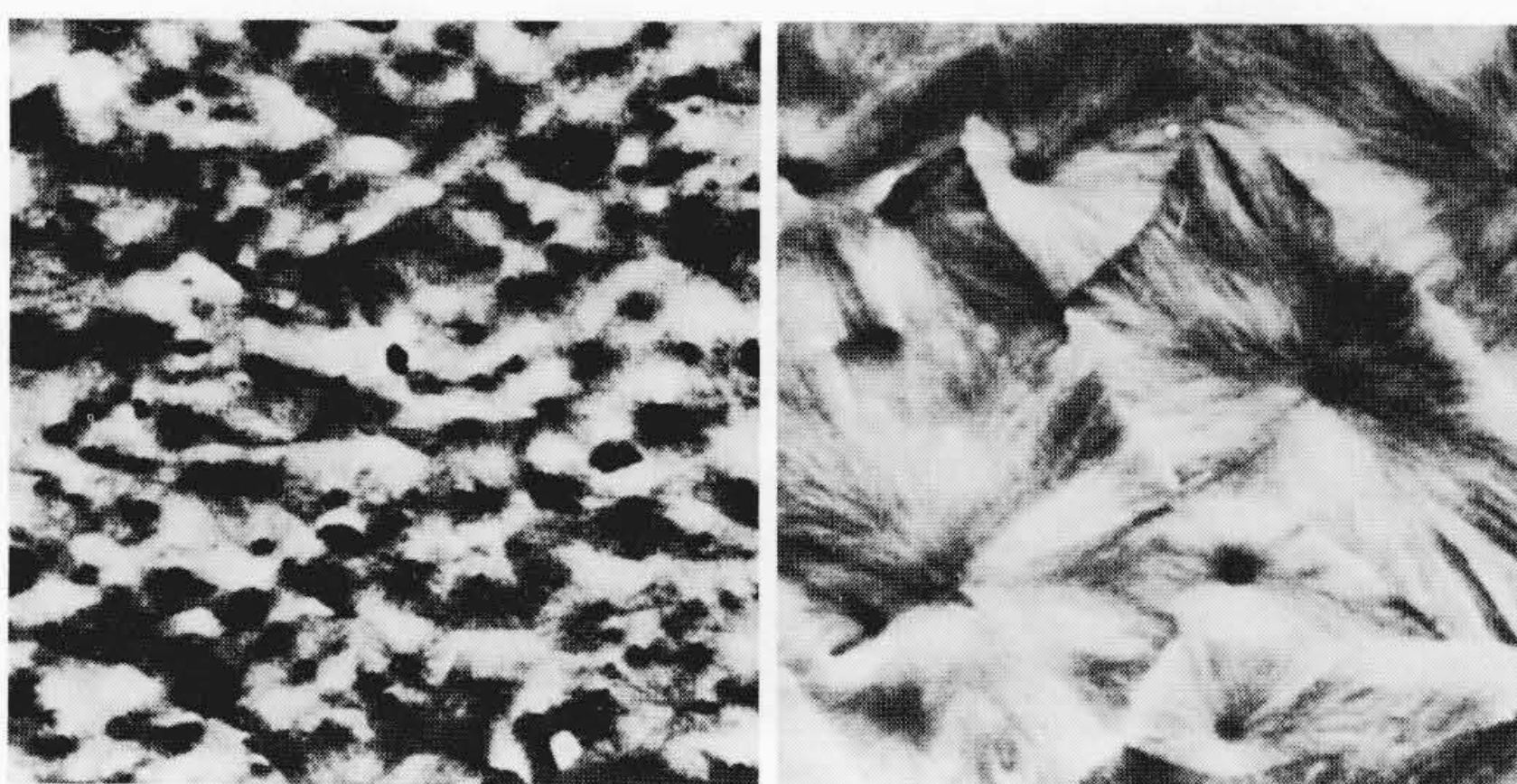


図5 絶縁体組織の観察 S-CVケーブルとG-CVケーブルでは、組織の形態が大きく異なっている。

表2 275kV CVケーブルの設計基準 G-CVケーブルでは、要求電界強度が高くなっている(図3に準拠している)。

項目		架橋方式		蒸 気	ガ ス
		単位			
目 標 性 能	常温インパルス	kV/3回	1,575		
	高温インパルス	kV/3回	1,260		
	交 流	kV/1h	663		
インパルス 設計 ストレス	常温インパルス	kV/mm	60	85	
	高温インパルス	kV/mm	—	65	
	設 計 ベ ー ス	—	154kV大サイズ S-CV ケーブルデータ		図 3
使用電圧に		平 均	kV/mm	6.1	8.3
おけるストレス		最 大	kV/mm	9.2	11.6

5.2 ケーブルの電気特性

表4は、上述を基にして試作した275kV 1×1,200mm²のCVケーブルの交流、インパルス破壊値の初期性能を示すものである。

両架橋方式のCVケーブル共に、交流、インパルス破壊は目標値を満足している。G-CVケーブルの絶縁厚がS-CVケーブルのそれよりも約20%低減されているにもかかわらず、G-CVケーブルと同程度の破壊値を示している。すなわち、この方式は緒言で述べたところの要求条件(1)の絶縁厚の低減を十分に果たしている。

6 長期安定性

G-CVケーブルの高電界下における寿命を検討するために、G-CVケーブルの長期課電を行なっている。22kV、66kV両クラスのG-CVケーブルでは既に数千時間を経過しており、275kVも長期課電を開始した。現在行なっているケーブルの種類及び条件は、表5に示すとおりである。また、実負荷試験状況の一部を図7に示し、それぞれのG-CVケーブルの経過時間を図8に示した。22kV、66kV両クラスのG-CVケーブルについて、初期値を基にして9乗則の仮想直線を引いて見ると、図中の点線のようになり、実負荷試験中の22kV、66

kV両G-CVケーブルの実績点はその線に近づいてきている。またこの実績点は、従来のS-CVケーブルのV-t直線よりはるかに高い領域にある。

7 結 言

新しいCVケーブルの架橋方式を開発し、ケーブルの電気・物理特性を検討し、275kV 1×1,200mm² G-CVケーブルの試作及び試験を行なった。これらを以下に要約する。

- (1) 適当なガス及び流速を選ぶことによって、ガス中でケーブルを架橋することが可能である。
- (2) ガス架橋方式により、交流及びインパルスの初期絶縁性能を大きく向上させることができた。
- (3) 66kVクラスまでの検討結果を基にして、20%絶縁厚を低

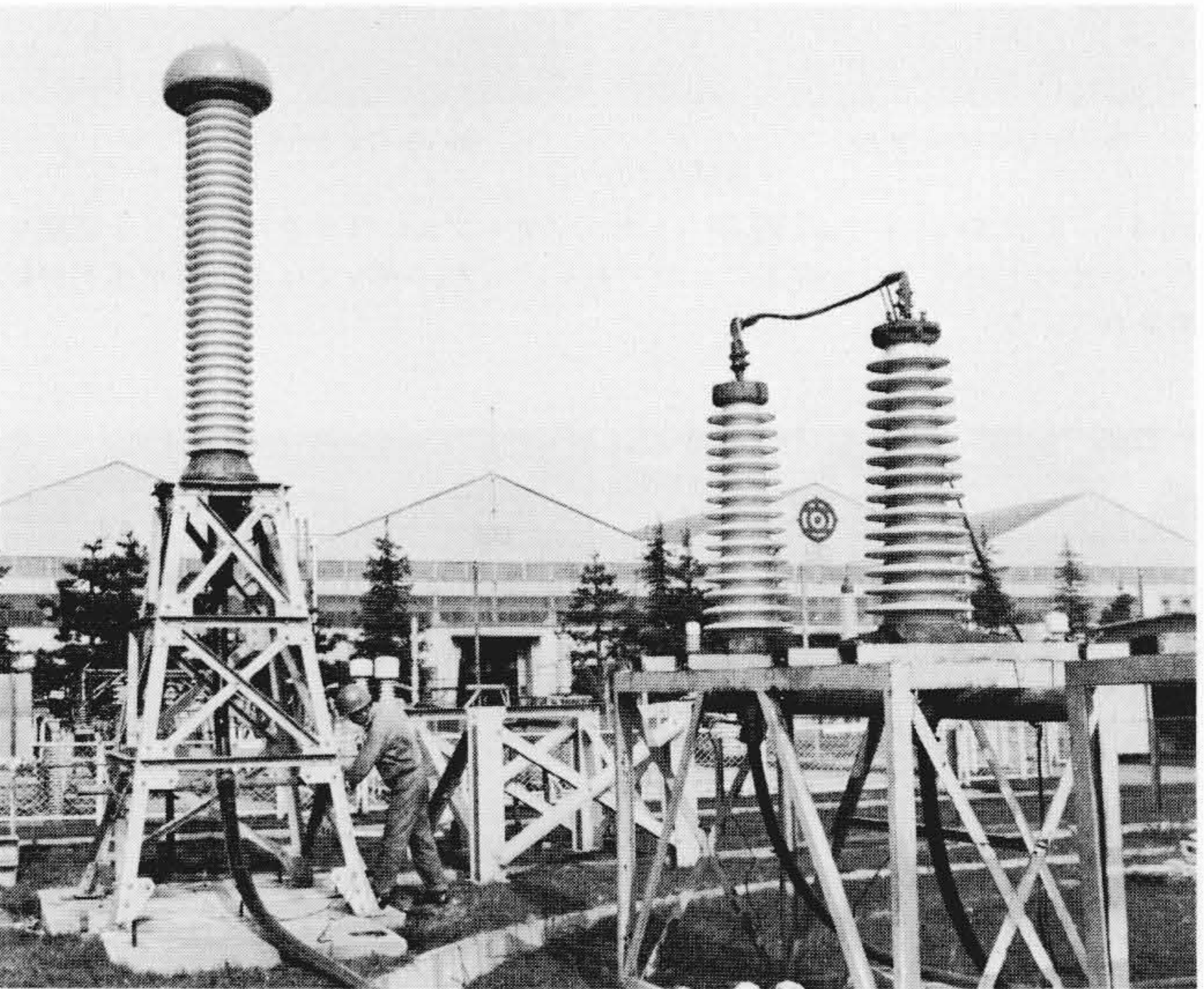
表4 275V 1×1,200mm² CVケーブルの初期特性 いずれも要求性能を満足しており、275kVクラスのケーブル製造技術が確立された。

特性 区分	S-CV			G-CV		
	破壊電圧 (kV)	G max (kV/mm)	G mean (kV/mm)	破壊電圧 (kV)	G max (kV/mm)	G mean (kV/mm)
インパルス	1,800/3回	103.4	69.2	1,800/3回*	125.4	90.0
	1,850/1回	106.3	71.2	1,750/3回	122.0	87.5
交流	700/30分*	40.2	26.9	780/30分*	54.4	39.0
	760/30分*	43.7	29.2	740/12分	51.6	37.0

注：* 端末部破壊

表5 G-CVケーブルの実負荷試験条件 高電界下での長期安定性を検討したものである。

項 目	22kV 1×100mm ²	66kV 1×250mm ²	275 1×1,200mm ²
正味絶縁厚 (mm)	6	11	20
印加電圧 (kV)	100	200	200
最大電界強度 (kV/mm)	22.3	25.5	13.9
平均電界強度 (kV/mm)	16.7	18.2	10

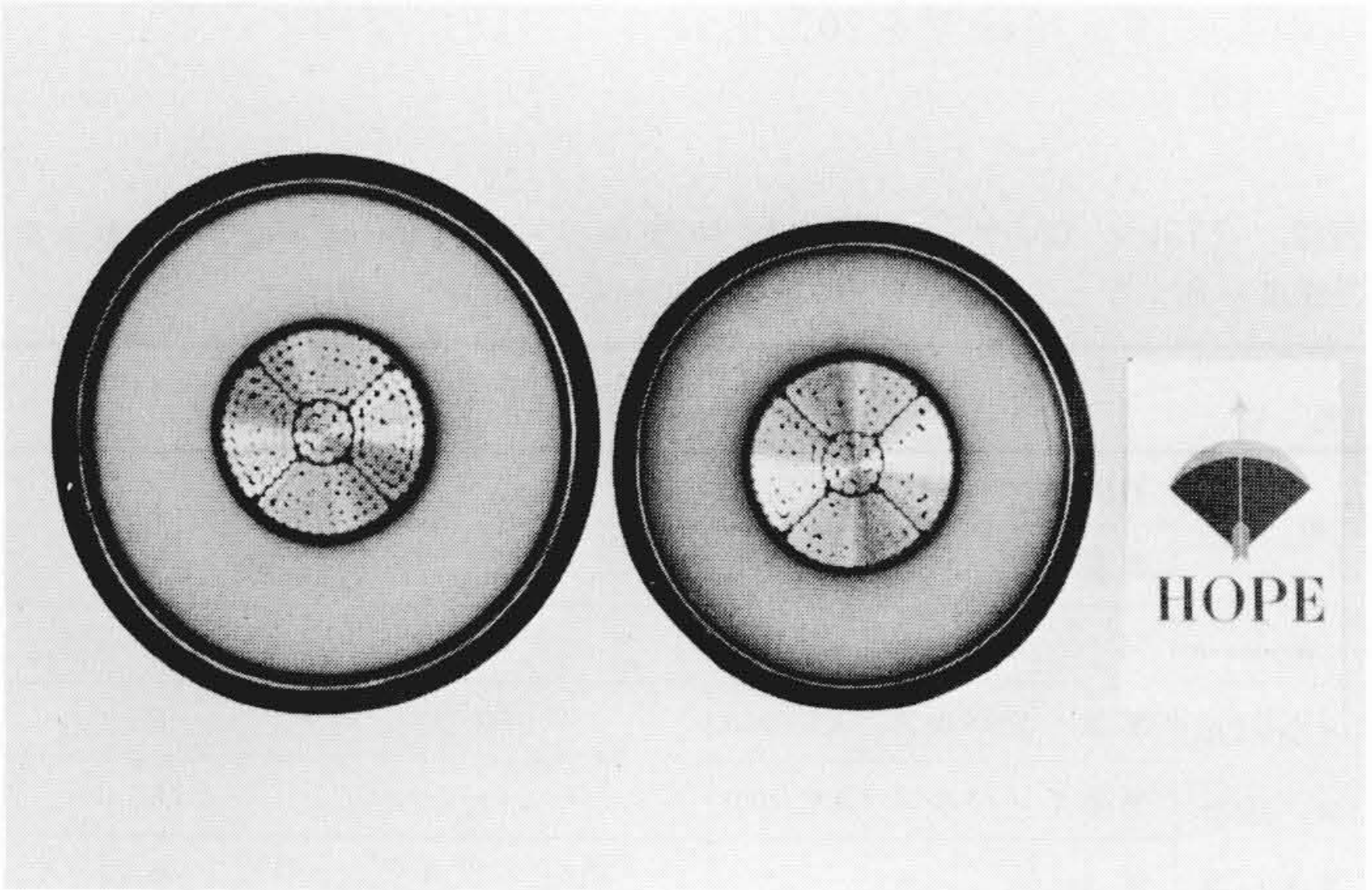


左側：275kV 1×1,200mm² G-CVケーブル， 右側：66kV 1×250mm² G-CVケーブル

図7 G-CVケーブルの実負荷状況
275kVケーブル66kVケーブル共に200kVが課電されている。

表3 275kV CVケーブルの構造寸法 G-CVケーブルの絶縁厚は、約20%低減してある（絶縁厚の大幅な低減が可能となった）。

項 目	単 位	仕 様	
架 橋 方 式	—	蒸 気	ガ ス
線 心 数	—	1	
導 体	公称断面積	mm ²	1,200
	形 状	—	分割圧縮導体
	外 径	mm	41.7
架橋ポリエチレン絶縁厚 (内部半導電層含む)	mm	28.0	22.0
外 部 半 導 電 層 厚	mm	1.5	
しゃへい軟銅テープ厚	mm×枚	0.1×2	
ゴム引き布テープ巻厚	mm	0.25	
ビニルシース厚	mm	5.4	4.9
仕 上 り 外 径	mm	115	100
概 算 重 量	kg/km	22,000	18,200



左側：S-CV 右側：G-CV

図6 275kV 1×1,200mm² CVケーブルの断面 ケーブル外径が大きく異なる(電氣的破壊値は、両者共に同程度である)。

減した275kV 1×1,200mm² G-CVケーブルの設計試作を行ない良好な結果を得た。

(4) 66kVクラスまでのG-CVケーブルについては、既に高電界下での長期課電安定性試験を行っており、275kV 1×1,200mm² G-CVケーブルについても過電圧の長期課電を開始した。

最後に、この研究を通じ、激励、指導をいただいた日立電

線株式会社水上専務取締役、及び木村研究所所長並びに指導、討論をいただいた工場・研究所の関係各位に対し感謝する次第である。

参考文献

- (1) 佐藤，村木ほか「CVケーブルの有害異物についての一考察」昭49電学会全国大会 No.856
- (2) 高橋，佐藤ほか「超高電圧用ガス架橋ポリエチレンケーブルの特性」昭48電学会全国大会 No.1134
- (3) T. Mizukamiほか「Insulation Properties of Cross-linked Polyethylene Cables cured in Inert Gas」IEEE T74 394-3 (Jul 1974)
- (4) 水上，依田ほか「ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能」電気学会誌，A 論文誌 94-A No.7,9 (昭49-7)
- (5) 金子，春田ほか「MDCVプロセスによる超高圧架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性」大日本時報 No.57, 59 (昭49-4)
- (6) 長崎，川崎ほか「米国PPL納入，138kV PEXケーブルおよび付属品について」住友電気 No.106,1 (昭47-5)
- (7) 「特集：架橋—その物性とプロセスの最近の進歩」プラスチック 25, No.5 (昭49-5)
- (8) 高橋，川神ほか「架橋ポリエチレンケーブル中のマイクロボイドの絶縁性能に及ぼす影響」：第7回電気絶縁材料シンポジウムIII 4 (昭49-9)
- (9) 電気学会編「ゴムプラスチックケーブル高電圧試験推奨案」技術報告（現在，取まとめ中）
- (10) R. Jocteurほか「Research and Development in France, In the Field of Extruded Polyethylene Insulated High Voltage Cables」CIGRE 21-07 (Aug~Sep 1972)
- (11) 登守，村木ほか「275kV 架橋ポリエチレン電力ケーブルの開発」昭49電学会全国大会 No.869

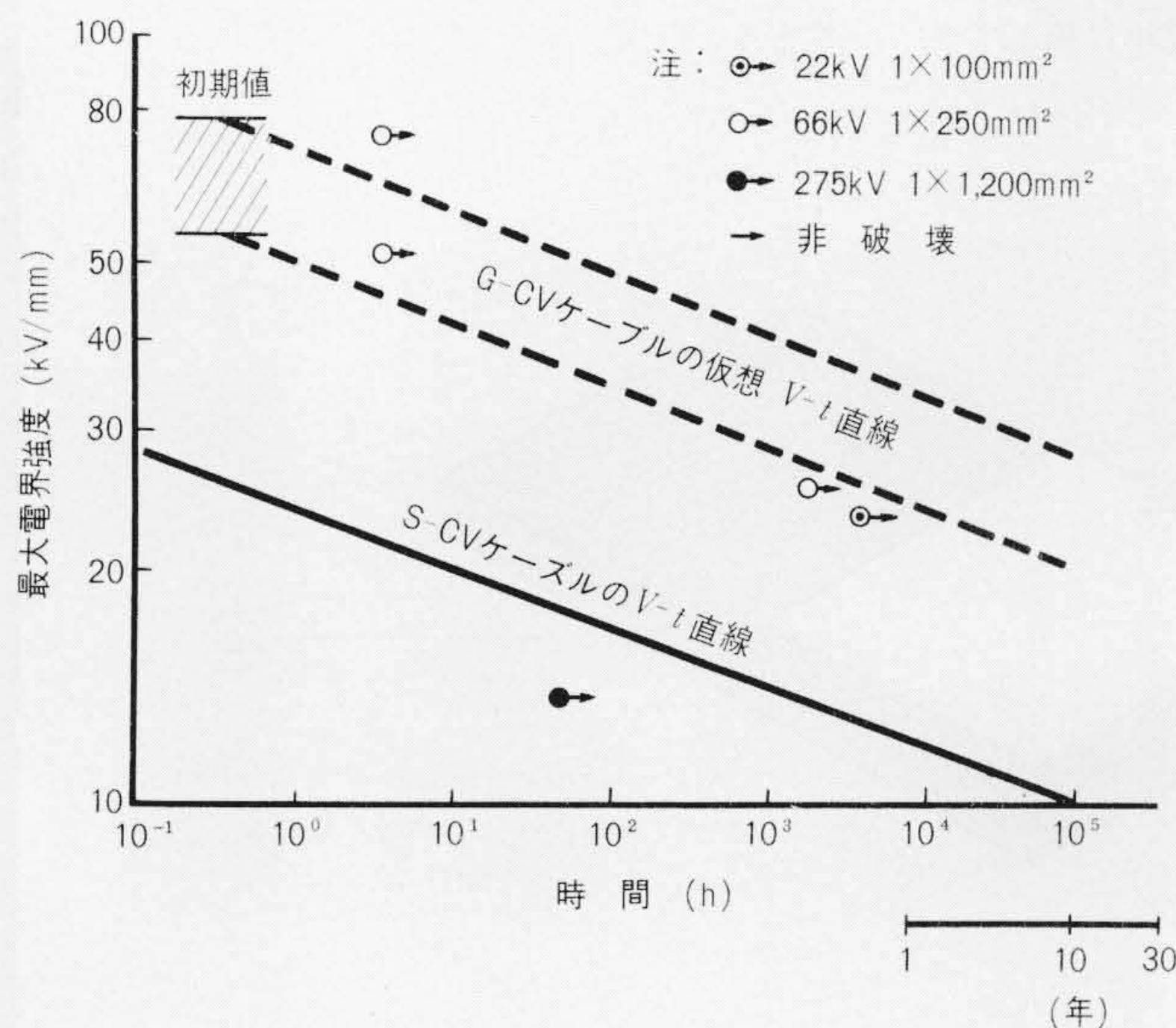


図8 G-CVケーブルのV-t特性 十分な長期信頼性を示している。

論文抄録

ガス架橋法による架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能

日立電線株式会社 水上徳五郎・依田文吉 他3名
学気学会誌 49-A39, 281 (昭49-7)

架橋ポリエチレンケーブル（以下，CVケーブルと略す）の高電圧化が進められ，154kVクラスの実用化，275kVクラスの開発が行なわれている。このような情勢下において，これからのCVケーブルに対して，絶縁厚の大幅な低減と，それに伴う高電界下での長期信頼性の向上が要求されている。

従来のCVケーブルにおいて絶縁体中に残存する水分，それにより生成されるマイクロボイドなどが電氣的に悪影響を及ぼすことが研究を進めていくに従って分かってきた。そこで，一般に広く用いられている蒸気架橋方式に代わり，筆者らは水分の浸透がなく，マイクロボイドを生成しない方式として，不活性ガス（N₂又はSF₆ガス）を用いたガス架橋方式を開発した。

ガス架橋方式の優れた点は蒸気を用いていないため，水分がポリエチレン中に残存せず，水分によって生成されていたマイクロボイドも皆無であることと，ポリエチレンの密度が高まり電気絶縁性能が著しく向上することである。しかし，ガスとケーブル

コア間の熱伝達係数は，ガスが不凝縮性のため小さく，そこでの熱抵抗を無視することができない。従って，ガス架橋方式ではガスとケーブルコア間の熱抵抗を小さくする工夫が必要となり，高温高圧力のN₂ガスを循環する方式を採用した。

新しく開発したガス架橋方式によるCVケーブル（以下，G-CVケーブルと略す）と従来からある蒸気架橋方式によるCVケーブル（以下，S-CVケーブルと略す）とを種々の面で比較検討を行なった。

電気絶縁破壊特性の結論を述べると，

- (1) 交流・インパルス破壊値ともに，G-CVケーブルはS-CVケーブルよりも飛躍的に向上し，交流破壊値は約60～100%，インパルス破壊値では20～25%以上向上している。
- (2) 電氣的負性ガス（SF₆ガス）を用いたG-CVケーブルでは，交流破壊値は更に25%向上していて，S-CVケーブルと比較すると2倍強の向上率を示している。

これら電気特性の向上する要因について，

他の物理量と対比して述べる。

- (1) S-CVケーブルでは多数のマイクロボイドを含み，水分が要因となって生成されたと考えられる絶縁体組織（球晶状構造）をもっており，これら微視的欠陥が大きく交流，インパルスなどの絶縁性能を阻害している。
- (2) ケーブル中に残存する水分は，インパルス絶縁性能に対して更に悪影響を与える。
- (3) 多くの物理量（例えばヤング率，結晶化度，引張強度，加熱変形率などはG-CV，S-CVケーブルの間で大きな差異は認められないが，絶縁体の密度はG-CVケーブルのほうがS-CVケーブルよりも大きく，インパルス絶縁性能を向上させる一要因となっている。

新しいCVケーブルの製造方式を確立することにより，従来，明らかにされ得なかったS-CVケーブルの絶縁性能に及ぼす前述の要因が究明され，更には，大幅な絶縁厚の低減が可能となり，CVケーブルの超高電圧化への大きな足掛りを見いだした。