

ゴム・プラスチック電力ケーブルの最近の動向

Recent Technical Trend of Rubber and Plastic Insulated Power Cables

水上徳五郎* Mizukami Tokugorô

ポリエチレン電力ケーブル、ブチルゴム電力ケーブルに代わって架橋ポリエチレン電力ケーブルが実用化されて十数年が経過したが、その実用化には目覚ましいものがあり、今や66～77kV級はOFケーブルと同様に主幹線路に使用されている。また154kV級も既に一部実用化された。275kV級の実用化検討も進みつつある。この間、絶縁体配合、製造技術、品質管理方式などの開発研究にも著しい成果を挙げている。また、ゴム・プラスチック電力ケーブルの絶縁設計基準の見直しや試験規格の審議などが行なわれた。

本論文ではゴム・プラスチック電力ケーブルの発展過程と現状について紹介する。

1 緒言

ゴム・プラスチック電力ケーブルは固体絶縁体特有の優れた点、例えば取扱いやすい、接続が簡単である、電気的特性が優れている、保守点検が簡単であるなどの点から、近年量的に急激な伸びを示してきた(図1)。また使用電圧の面でも高電圧化の傾向にある。我が国では、特に架橋ポリエチレン電力ケーブル(以下、CVケーブルと略す)が従来油入り(OF)ケーブルの分野であった66～77kV送電線路にも実用化されつつある。また154kV級CVケーブルも電力会社との共同開発研究をはじめ、各所で実用化開発が行なわれ、一部では既に実用化に入っているし、275kV級CVケーブルの実用化開発研究も進められている。海外でもアメリカ、フランスをはじめ

め、各国で高電圧ゴム・プラスチック電力ケーブルの開発研究が盛んに行なわれている(表1)。

以上のようにゴム・プラスチック電力ケーブルの高電圧化は世界的なすう勢である。現在までに多くの開発研究が行なわれてきたが、まだ解決されていない問題も多い。

2 絶縁体材料の開発研究

ゴム・プラスチック電力ケーブルが広く使用されはじめたのは昭和30年代に入ってからである。昭和25年ごろに低圧ケーブルの絶縁体として、まずビニルが採用され、次いで昭和27年ごろにブチルゴム、ポリエチレンが電力ケーブルの絶縁

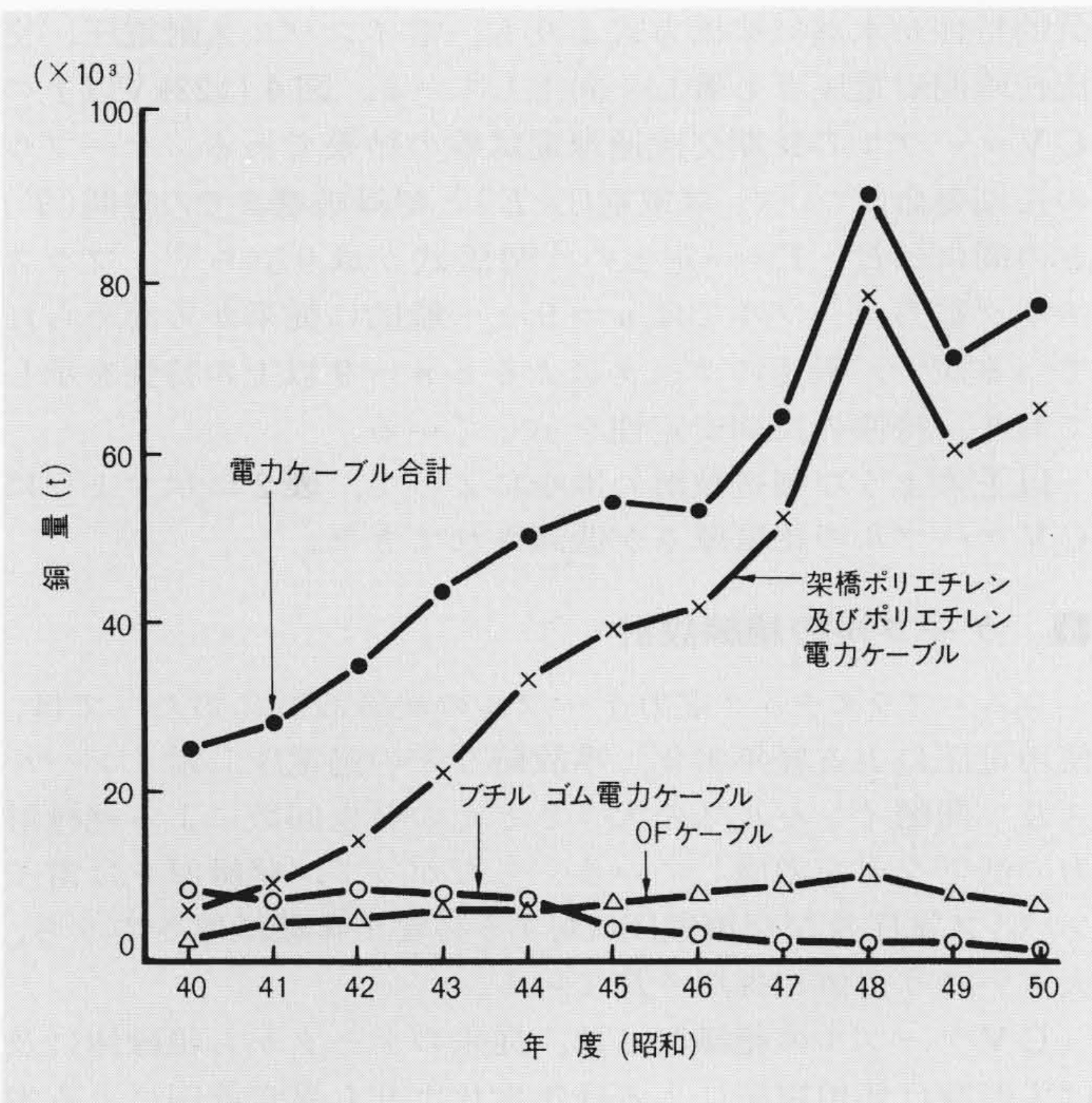


図1 我が国における電力ケーブルの生産量(銅量) 架橋ポリエチレン及びポリエチレン電力ケーブルは、ほぼ電力需要の伸びに追従してその需要が伸びてきた。

表1 諸外国におけるゴム・プラスチック電力ケーブルの開発状況
ゴム・プラスチック電力ケーブルの高電圧化は世界的なすう勢である。

国名	開発ケーブル	実用化状況
フランス	225kVポリエチレン電力ケーブル	1969年から実用化 ¹⁾
オランダ	150kVポリエチレン電力ケーブル	開発研究中
イタリア	150kVエチレンプロピレンゴム電力ケーブル	開発研究中
西ドイツ	110kVポリエチレン及び架橋ポリエチレン電力ケーブル	1970年から実用化
スウェーデン	145kV架橋ポリエチレン電力ケーブル	1973年から実用化
	245kVゴム・プラスチック電力ケーブル	1972年から長期実証試験中
アメリカ	138kVポリエチレン電力ケーブル	1964年から実用化 ²⁾
	138kVゴム・プラスチック電力ケーブル	1970年から長期実証試験中 ³⁾ 1969年から一部実用化
	230kVゴム・プラスチック電力ケーブル	1978年開発完成目標
	345kVゴム・プラスチック電力ケーブル	1981年開発完成目標

* 日立電線株式会社 専務取締役

体として採用され、ゴム・プラスチック電力ケーブルの高電圧化が始まった。昭和35年ごろにポリエチレンを化学架橋する技術が開発され、我が国では架橋ポリエチレン(以下、XLPEと略す)が高電圧ゴム・プラスチック電力ケーブルの絶縁体の主流を占めるようになった。ブチルゴム電力ケーブルは経済性、電流容量、電気的特性、耐水性などの点で、またポリエチレン電力ケーブルは、耐熱性、電流容量の点でCVケーブルよりも劣るため、しだいに使用されなくなってきた。昭和39年ごろにエチレンプロピレンゴム電力ケーブルが開発されたが、経済性の面から可撓性、耐コロナ性及び耐トラッキング性を必要とする特殊な用途に限り使用されている。

XLPEの欠点として、耐コロナ性、耐トリッキング性が劣ることが挙げられる。CVケーブルの高電圧化に伴い、XLPEに添加剤や充てん剤などを配合し、耐コロナ性、耐トリッキング性、耐熱変形性の向上を図り、ケーブルの長期寿命の安定性を改善する研究が進められた。^{4), 5)}

絶縁体材料自体の開発・改善のほかに、 N_2 ガスや SF_6 ガスのような電気的負性ガスをXLPEに含浸させることにより絶縁特性の向上を図ることも考えられた⁶⁾。

3 製造技術の開発

ゴム・プラスチック電力ケーブルの製造技術の面では、ケーブルの長期寿命の安定性に重要な影響を及ぼすコロナ劣化の要因を除去する努力が行なわれている。

3.1 絶縁体中の異物

絶縁体中の異物については、ポリエチレン樹脂、架橋剤、酸化防止剤、添加剤、充てん剤などを混練し、ペレット状に切断した材料を押出機に供給する全工程で防じん対策を施し、異物の低減に努力し、効果を挙げている。しかし、異物の管理については単に電線メーカーだけの問題でなく、樹脂メーカーをはじめ材料メーカーとも関連するため、難しい問題が内在している。絶縁体中の異物はケーブルの長期寿命に影響を及ぼすことは明らかであり、有害異物の大きさについては今後検討すべき課題である⁷⁾。現在、11~77kV CVケーブルを対象に許容最大異物を $250\mu m$ としているが、66kV、77kV級に対する異物の大きさの規定値を $100\mu m$ とするための種々の対策が計画されている。アメリカのAEIC^{*1}規格では5~69kV CVケーブルを対象に $250\mu m$ を最大許容異物としている。

3.2 内部及び外部半導電層の不整

内部及び外部半導電層のはく離、突起などの不整については、製造条件の適切・確実な制御を行ない、半導電層と絶縁体間の接着をよくする努力が払われている。また外部からの異物の混入や半導電層の突起の原因となる機械的損傷を避けるため、内部及び外部半導電層と絶縁体の三層を同時に押出し架橋する方式が開発され、高電圧CVケーブルの絶縁体押出しに採用され、CVケーブルの電気的特性、長期寿命の安定性は向上した。

3.3 絶縁体中の微小ボイド

絶縁体中の微小ボイドについては、絶縁体架橋時の加熱加圧媒体に不活性ガスを使用するガス架橋方式が開発され^{8)~10)}、微小ボイドの除去に大きな効果を挙げている。

従来の水蒸気架橋方式では、加熱加圧媒体として $200^\circ C$ 、 $15\sim 20 kg/cm^2$ 程度の高温高压の水蒸気を使用するため、絶縁

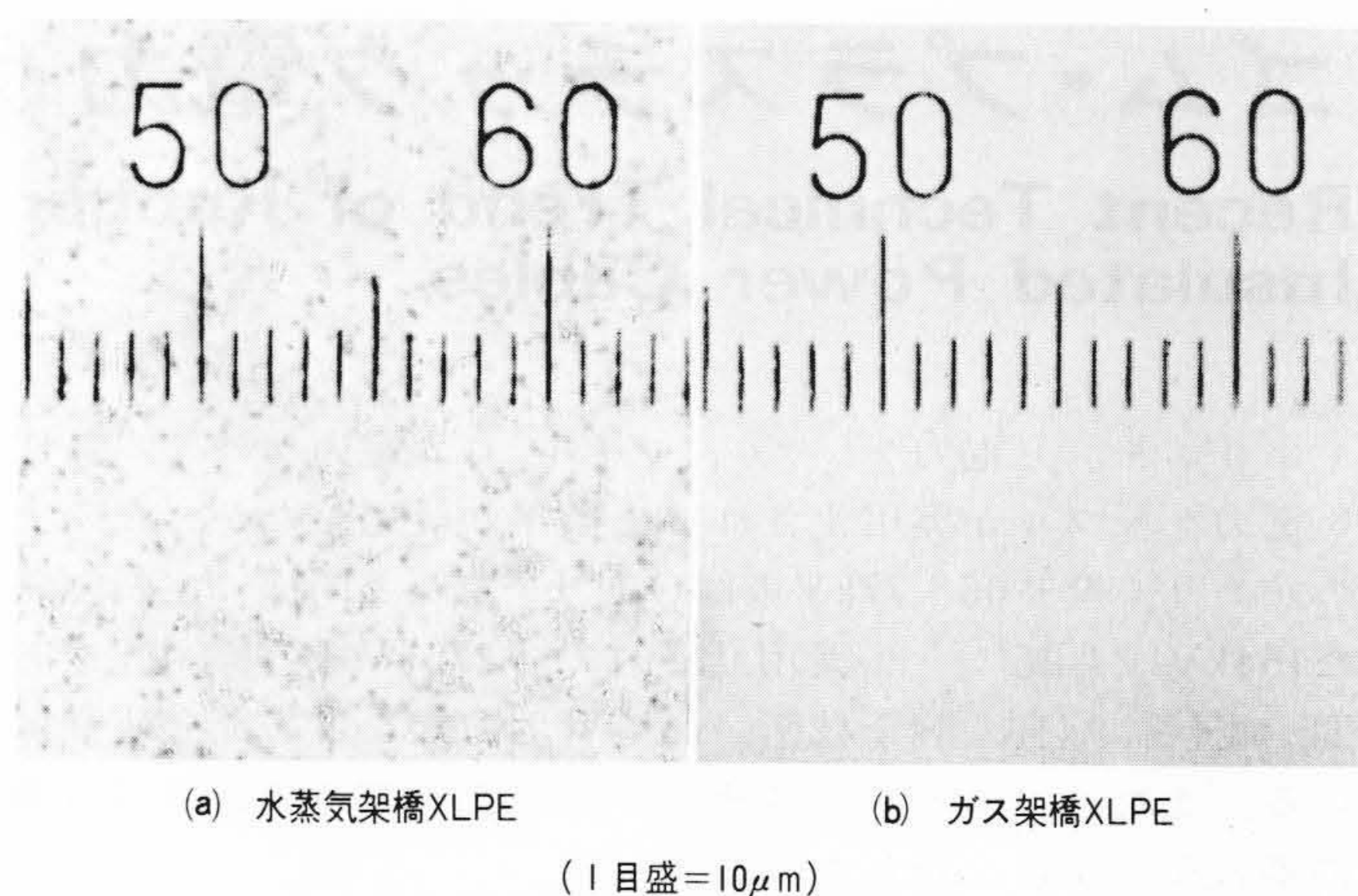


図2 微小ボイドの観察 (a)には数ミクロン以下の微小ボイドが観察されるが、(b)には微小ボイドが観察されていない。

体の架橋反応時に水蒸気が絶縁体中に拡散・浸透し、冷却時の飽和水蒸気の凝縮によって微小ボイドが形成される欠点がある。この微小ボイドは高い電位傾度で使用するケーブルでは、ケーブルの長期寿命に影響を及ぼすことが懸念される。

ガス架橋方式は、加熱加圧媒体として水蒸気の代わりに N_2 ガスのような不活性ガスを使用して絶縁体を架橋するので、絶縁体中の微小ボイドは皆無であり(図2)¹¹⁾、絶縁体中の含有水分量も極めて少ない¹²⁾。また絶縁体の再吸水量も非常に少ない¹²⁾。絶縁体の微細組織も水蒸気架橋方式では絶縁体内層と外層とでは著しく異なっているが、ガス架橋方式では均一である¹¹⁾。

3.4 ケーブルの特性

図3は水蒸気架橋方式とガス架橋方式によるCVケーブルの初期電気的特性を示す。ガス架橋方式によるケーブルの電気的特性が水蒸気架橋方式よりも、雷インパルス耐電圧、交流長時間耐電圧とも著しく向上している。図4は22kV以上のCVケーブルの長期交流通電試験の結果である。ケーブルの長期寿命について、課電電圧(E)と絶縁破壊までの時間(T)との間には $E^n \cdot T = \text{一定}$ という関係式が成り立ち¹³⁾、プラスチック電力ケーブルでは $n=9$ と一般的に従来から認められているが¹⁴⁾、最近のデータによると $n=9$ 以上の特性を示しており、特性の長期安定性を示している。

以上のような製造技術の進歩によって、表2に示すようにCVケーブルの絶縁厚さが低減されてきた。

4 ケーブルの絶縁設計

ゴム・プラスチック電力ケーブルの絶縁設計に当たっては、使用電圧による経年劣化、事故時などの過電圧、雷インパルス及び開閉インパルスの大きさとその発生回数による絶縁耐力の低下などを考慮している。したがって、絶縁厚さは雷インパルス電圧及び交流電圧に対する必要正味絶縁厚さのうち、大きいほうの値が採用されている。

CVケーブルの絶縁厚さは、従来のデータから絶縁体に及ぼす影響は使用電圧による経年劣化よりも異常電圧による劣化のほうが過酷であるという考え方から、雷インパルス電圧によって決定されている。

また、従来ゴム・プラスチック電力ケーブルの絶縁設計は、破壊ストレスの分布は正規分布に適合すると仮定して行なわれてきたが、破壊ストレスの分布は正規分布よりもむしろワイブル分布によく適合することが明らかになり¹⁵⁾、最近では

*1 Association of Edison Illuminating Companies

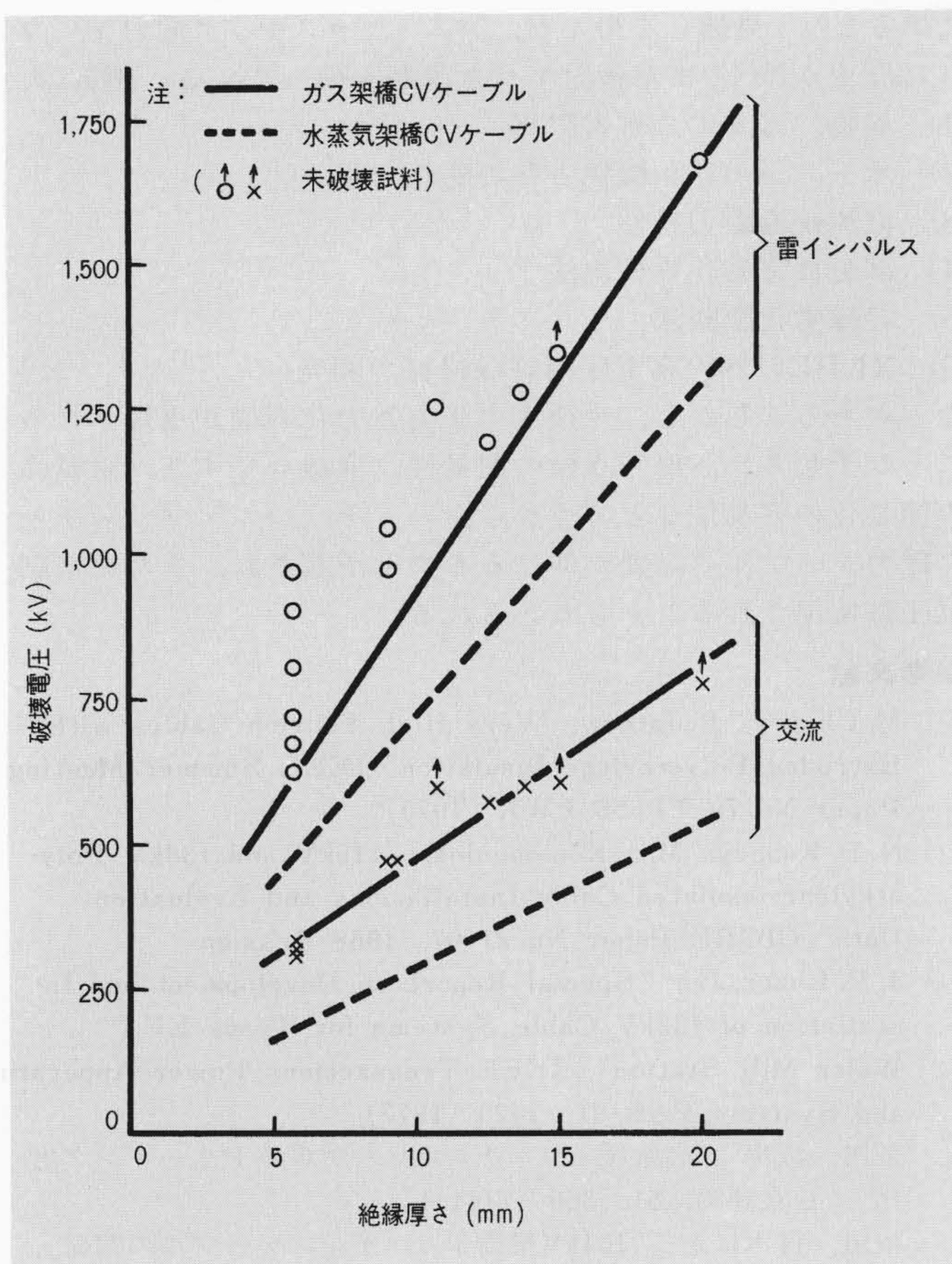


図3 初期電気的特性 ガス架橋CVケーブルは、水蒸気架橋CVケーブルに比べて交流では約60%、雷インパルスでは約30%絶縁耐力が向上している。

ワイブル分布を使用した絶縁設計が行なわれている。

ゴム・プラスチック電力ケーブルの絶縁設計上の重要な問題の一つに半導電層と絶縁体との界面条件がある。絶縁体材料の開発研究と相まって、半導電層材料として、

- (1) カーボンブラックが均一によく分散しており、ケーブルの長さ方向に均一に安定した性能をもっていること。
- (2) 半導電層の表面が平らで、凹凸のない押出し被覆が可能で、絶縁体との接着が良好であること。
- (3) 使用中の膨張収縮によって半導電層の体積抵抗率が変化したり、ひび・割れが生じたり、発熱のないこと。
- (4) 見かけの $\tan \delta$ が小さいこと。
- (5) 雷インパルス電圧の分担電圧がかかったとき、半導電層で破壊が先行しないこと。

などの条件を満足する配合を開発し、適用している。

現在、22kV級以上のCVケーブルは二層同時押出し架橋、あるいは三層同時押出し架橋で製造されているが、終端及び中間接続処理での省力化という面から、22～33kV級CVケーブルの押出し外部半導電層にはぎ取り容易性を要求されるようになった。また6kV級CVケーブルでは、従来内部半導電層に半導電性布テープを使用していたが、水トリ対策、ケーブルの性能向上などの面から押出しタイプに変わりつつある。

5 ケーブル試験法の検討

ゴム・プラスチック電力ケーブルが急速に高電圧化されているにもかかわらず、11kV以上のケーブルに対する試験法が十分に検討されておらず、従来の油浸紙絶縁ケーブルの試験

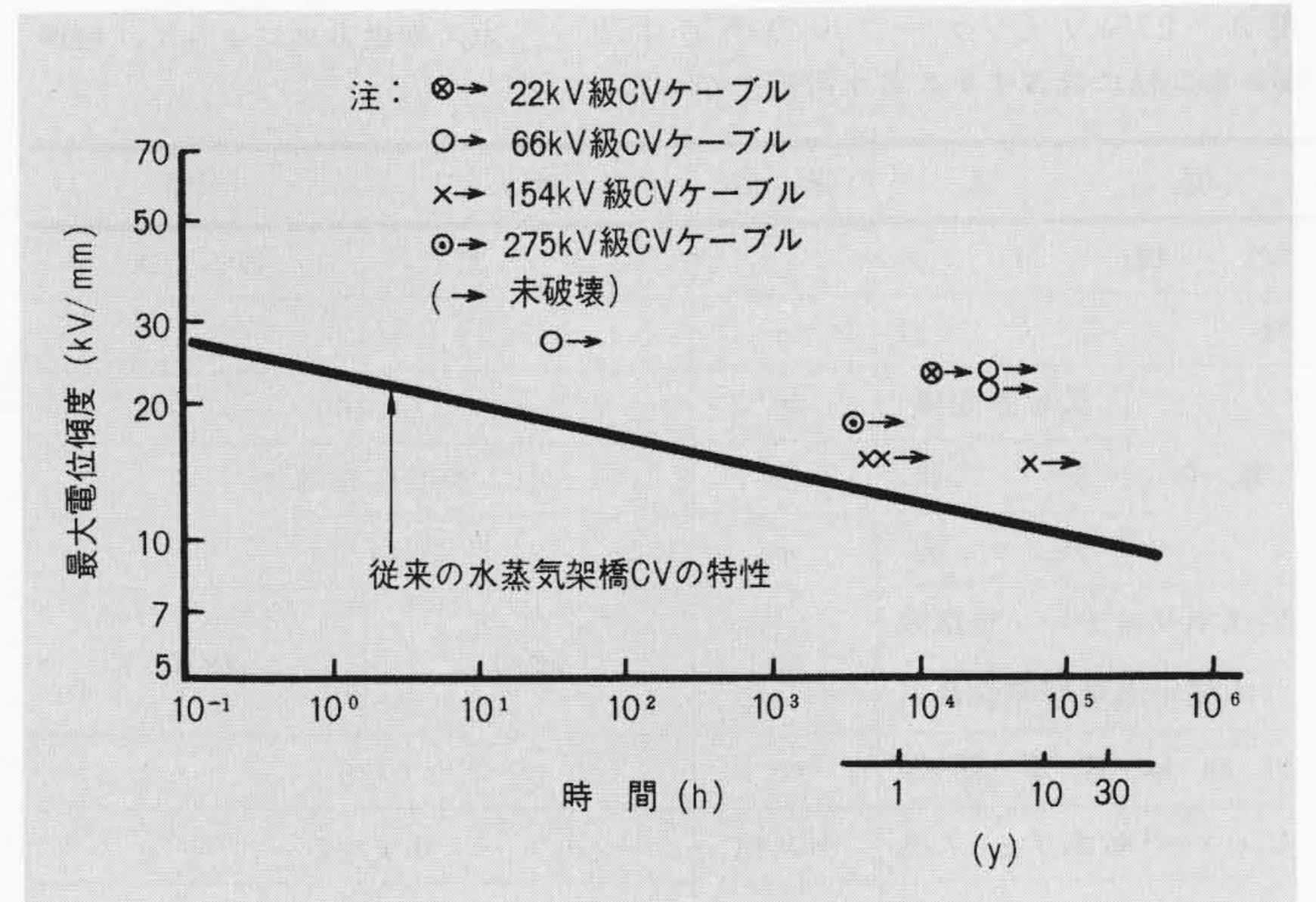


図4 長期交流通電特性 十分な長期信頼性を示している。

表2 CVケーブルの絶縁厚さ低減の推移 製造技術、絶縁材料の開発によって将来更に絶縁厚さが低減されることを示唆している。

電圧階級	絶 縁 厚 さ (mm)
22kV	8 → 7
33kV	11 → 9
66kV	15 → 14 → 12
77kV	18 → 16

注：内部半導電層厚さを含む。

法が準用されていた。しかし、ゴム・プラスチック絶縁体にはそれ固有の問題点、例えばコロナ・トリ劣化、異物、ボイド、雷インパルス繰返し課電劣化、温度依存性などがあるため、これらを試験法に考慮する必要がある。電気学会ゴム・プラスチックケーブル高電圧試験専門分科会で新しい立場からこれらを検討し、送配電システムでのケーブルに対する必要性能をも考慮して、特高圧(11～77kV)CVケーブルに関する試験推奨案が報告された¹⁶⁾。この推奨案に基づき、現在、規格化の審議が行なわれている。

6 275kV級CVケーブルの開発

110～154kV級CVケーブルが実用線路に徐々に適用されるすう勢にあり、日立電線株式会社でも国内では日本鋼管株式会社京浜製鉄所へ154kV CVケーブルを約1,600m、海外では西ドイツKabelwerke der AEG-Telefunkenに110kV CVケーブルを約7,000m納入したのをはじめ、国内外に110～154kV級CVケーブルを数多く納入している。また電源開発株式会社では昭和53年に運転を開始する同社奥清津発電所に187kVアルミ被CVケーブル約1,600mを使用する予定になっており、日立電線株式会社がこれらのケーブルを納入することになっている。

このようなすう勢をかんがみ、日立電線株式会社では既に昭和47年から275kV級CVケーブルの実用化開発研究に着手^{17)～19)}し、実用化が可能であるという見通しを得た。表3にそのケーブルの構造寸法を、図5に断面写真を、また表4に初期電気的特性を示した。

表3 275kV CVケーブルの構造寸法 ガス架橋方式によって、絶縁厚さを大幅に低減することが可能となった。

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 (内部半導電層厚含む)		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

表4 275kV 1×1,200mm² CVケーブルの初期特性 ガス架橋CVケーブルは、水蒸気架橋CVケーブルよりも絶縁厚を約20%低減しているにもかかわらず、ほぼ同じ破壊特性を示している。

特性 区分	水蒸気架橋CVケーブル			ガス架橋CVケーブル		
	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)
雷イン 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
G max = 最大電位傾度
G mean = 平均電位傾度

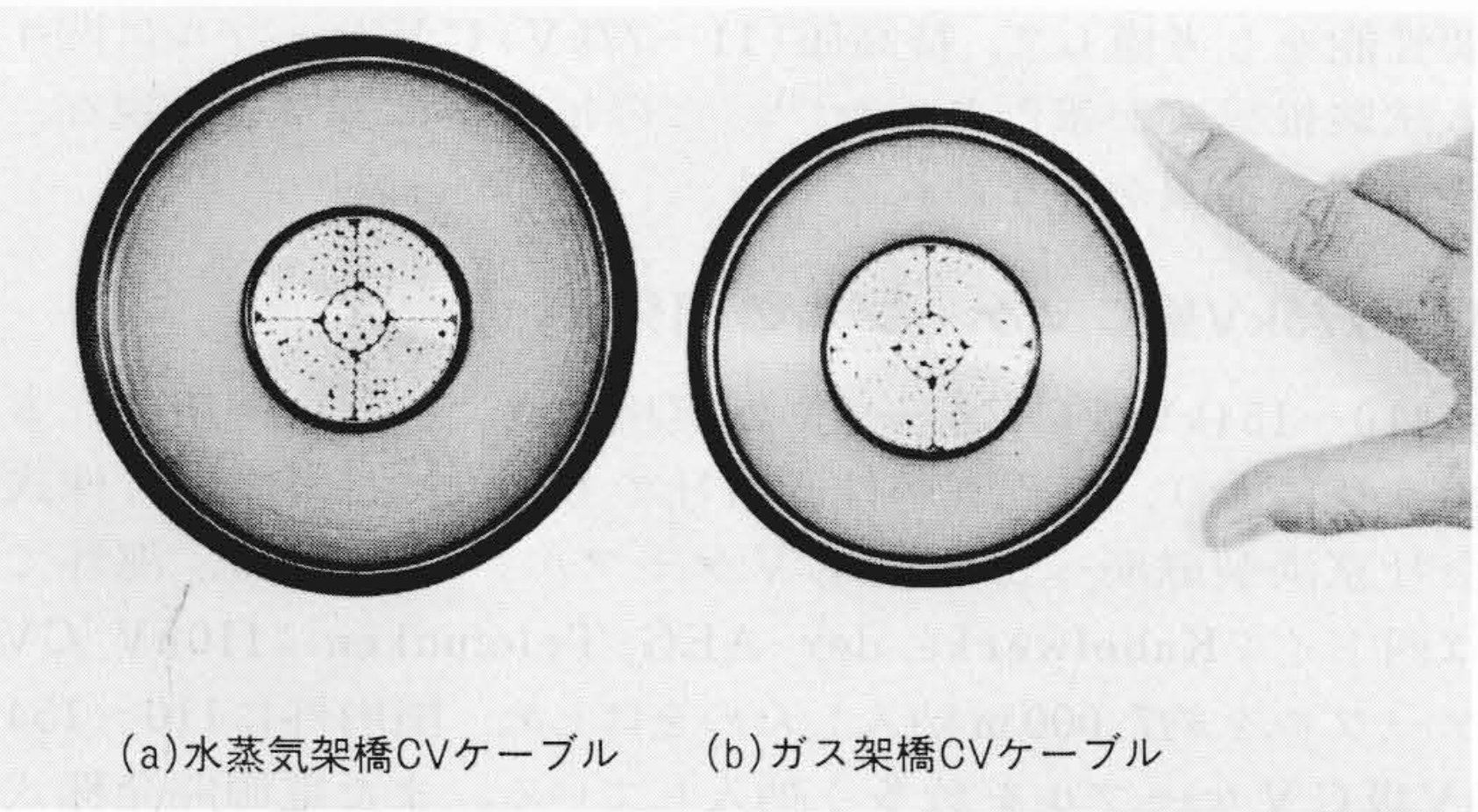


図5 275kV 1×1,200mm² CVケーブルの断面 ガス架橋CVケーブルのケーブル外径が著しく縮小されたのが分かる(電氣的破壊特性は両者ともに同程度である)。

7 結 言

絶縁材料及び半導電層材料の改善、架橋方式を含めた製造技術の開発によって、275kV級CVケーブルの実用化が可能

であるという見通しを得たが、ゴム・プラスチック電力ケーブルは歴史が浅く、まだ検討すべき課題も残っている。例えば、

- (1) 異物、ボイドの有害限界
- (2) 水トリーの発生機構とその防止対策
- (3) 直流絶縁耐力特性
- (4) 部分放電劣化の検出法
- (5) 絶縁劣化診断法
- (6) XLPE以外の高電圧用絶縁材料の開発

などがある。しかし、今後ますます省力化の面が重視されることが予想され、保守点検の簡易性、取扱いやすさ、附属品の簡易化の容易性などの点から、いっそうゴム・プラスチック電力ケーブルの需要が伸びるものと予想され、また更に高電圧に使用されることも考えられる。

参考文献

1) M. Charoy, R. Joteur, "Very High Tension Cables with Extruded Polyethylene Insulation", IEEE Summer Meeting Paper No. 70 TP556-PWR (1970)

2) N. D. Kenney, M. J. Koulopoulos, "115kV and 138kV Polyethylene-insulated Cable Installations and Evaluation Data", CIGRE Paper No. 21-07, 1968 Session

3) J. P. Lozes, Jr., "Special Report on Development and Installation of 138kV Cable Systems for Tests EE1 Waltz Mill Station", IEEE Transactions, Power Apparatus and Systems, PAS-91, 1420 (1972)

4) 依田, 坂場:「高電圧ポリエチレンケーブルのトリーイング劣化」, 日立評論, 51, 366 (昭44-4)

5) 依田, 村木ほか:「154kV架橋ポリエチレンケーブルの開発」, 日立評論, 54, 365 (昭47-4)

6) 池田, 高橋:「SF₆ガス含浸架橋ポリエチレンケーブルの絶縁特性」, 日立評論, 54, 370 (昭47-4)

7) 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

8) 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

9) T. Mizukamiほか: "Insulated Properties of Cross-linked Polyethylene Cables Cured in Inert Gas", IEEE T74 394-3 (Jul. 1974)

10) 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, 49-A39, 281 (昭49-7)

11) 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)

12) 柚, 関井ほか:「ガス架橋・水蒸気架橋ポリエチレンケーブルの吸水現象」, 日立評論, 57, 893 (昭50-10)

13) J. M. Oudin, C. A. Flamand, "The Use of Thermoplastic Insulation in the Manufacture of High Voltage D. C. and A. C. Cables", CIGRE Report No. 209 (1962)

14) F. H. Kreuger: "Endurance Tests with Polyethylene Insulated Cables, Methods and Criteria", CIGRE Report No. 21-02 (1968)

15) E. Occhini: "A Statistical Approach to the Discussion of the Dielectric Strength in Electric Cables", IEEE Trans, Power App. Syst. Vol. 90 2671 (1971)

16) 電気学会・技術報告〔I部〕, 第112号, 「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」(昭50-6)

17) 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

18) 登守, 村木ほか:「ガス架橋方式による275kV CVケーブルの開発」, 昭50電学会全国大会, No. 1157

19) 高橋, 池田ほか:「275kVガス架橋ポリエチレンケーブルの開発」, 日立評論, 57, 449 (昭50-5)