UDC 621.315.211.2.015.5: 678.742.2

論文

49-A 39

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

日立電線株式会社

日立電線株式会社

日立電線株式会社

日立電線株式会社

水上 徳五郎

依田 文吉

加藤 直義

池田 忠禧

高橋 憲司

1. ま え が き

架橋ポリエチレンケーブル（以後、CV ケーブルと呼ぶ）の高圧化が最近急速に進められている。すでに 66~77kV 級においては実用化がなされており、東京電力・東東京変電所大容量地中実証試験場において中央電力協議会と電線メーカーの間で 154kV 級の実証試験が行なわれている。さらには、275kV 級の CV ケーブルの開発が進められている。

ポリエチレン絶縁体は固体絶縁物中では誘電損失が小さく、材料自身の絶縁耐力も非常に高い点から超高電圧、超々高電圧ケーブルの絶縁体として適していると考えられる。しかしながら、実際に製造されたケーブルの絶縁性能は材料自身の絶縁性能から期待される水準よりも低い。超高電圧級 CV ケーブルの実用化を望むためにはケーブルとしての絶縁耐力を高め、長期信頼性を向上するとともに絶縁厚低減が必要である。

現在までに、絶縁性能の向上を目的として充てん剤、ポリエチレンコンパウンドなどの材料配合面での検討、押出技術の改良、特に三層同時押出法の採用などが行なわれ、大きな成果が得られてきた。さらに、ポリエチレン絶縁体中の微視的欠陥の解消に着目して

SF₆ ガスを絶縁体中に拡散浸透させ、絶縁耐力の向上を図り大きな成果を得た^{(1)~(4)}。次にケーブルの連続架橋工程において、従来の水蒸気を用いた加熱加圧方式によると水分がポリエチレン中に浸透し、光学顕微鏡で観察される数 μm オーダのボイド（以後、マイクロボイドと呼ぶ）を形成することにも注意が向けられ、水蒸気を用いない架橋法が取り上げられた。これらの方法によると水分の浸透は皆無であり、マイクロボイドが観察されないことが報告されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾。

筆者らは高温高圧力の不活性ガス（N₂, SF₆）気流中におけるケーブルの架橋方式を開発した⁽⁷⁾。この方式により作成したケーブルの物理、化学的性質、電気特性を詳細に検討した結果、ポリエチレンの密度が高まり、従来残存していた水分、マイクロボイドは観察されず、電気絶縁性能が著しく向上することがわかった。

2. 高温高圧力の不活性ガス気流中における ポリエチレンケーブルの加熱架橋方式

〈2・1〉 基本原理 超高電圧用 CV ケーブルの製造にあたっては導体上に内部半導電層、ポリエチレン絶縁層、外部半導電層をそれぞれ連続押出機により押出する。押出されたコンパウンド中に混練されている化学架橋剤（通常、ディクミルパーオキサイド：DCP が使われている）で架橋反応を起こす。架橋反応は押出機から下方に向かって垂直あるいはカテナリー状に伸びている架橋筒内をケーブルが連続的に通過する際に行なわれ、そこではケーブルを架橋反応に必要な温度まで加熱すると同時に、架橋反応の分解生成ガスな

Insulation Properties of Cross-Linked Polyethylene Cables Cured in Inert Gas. By T. MIZUKAMI, Member, B. YODA, Member, N. KATO, Member, C. IKEDA, Member & K. TAKAHASHI, Member (Hitachi Cable Ltd.).

水上徳五郎：正員，日立電線株式会社

依田文吉：正員，日立電線株式会社

加藤直義：正員，日立電線株式会社

池田忠禧：正員，日立電線株式会社

高橋憲司：正員，日立電線株式会社

どによる発泡を防ぐため適当な圧力で加圧している。この架橋筒内におけるケーブルの加熱加圧方式には広く水蒸気が用いられており、高温を得るために約 13 kg/cm² 以上の圧力に保たれている。

水蒸気の持つ利点は、ケーブル表面で凝縮伝熱を行なうため境膜熱伝係数が他の不凝縮性ガスよりもはるかに大きく、ケーブルの加熱を容易に行なえることである。しかしながら、この高温高圧力の水蒸気は高温熔融状態にあるポリエチレン中に拡散浸透し、ケーブルの冷却後ポリエチレン中で凝縮してマイクロポイドを形成する原因となり、さらに電気絶縁特性をも大幅に低下させることがわかってきた。筆者らは、これらの難点を除去するために高温高圧力の不活性ガスでケーブルを加熱加圧する方法を試みた。不活性ガスの自然対流による境膜熱伝係数は凝縮性の水蒸気に比べ著しく小さいので、高温高圧力のガスの流れを作り境膜熱伝係数を大きくする方法を取った。第 1 図に筆者らの高温高圧力ガス強制対流によるポリエチレンケーブルの架橋方式の概念図を示す。

〈2・2〉 熱伝達特性 架橋筒とケーブルとで形成される同心円筒空間を高温高圧力のガスが流れる際に内部円筒であるケーブル表面における対流熱伝達係数は(1)式で与えられる⁽⁸⁾。この場合、外筒からの熱放射は考えに入れていない。

$$\frac{h}{C_{pb} G_b} \left(\frac{C_{pb} \mu_b}{k_b} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu_w}{\mu_b} \right)^{0.14} = \frac{0.023}{\left\{ (D_2 - D_1) \frac{G_b}{\mu_b} \right\}^{0.2}} \quad (1)$$

第 1 図 装置の概念図

Fig. 1. Gas cure process.

ただし、 h : 熱伝達係数 (cal/cm²・s・°C), C_p : ガスの定圧比熱 (cal/°C・g), k : ガスの熱伝導度 (cal/cm・s・°C), μ : ガスの粘度 (g/s・cm), G : ガスの質量速度 (g/cm²・s), サフィックス b : ガスの温度における物性値, サフィックス w : 管壁の温度における物性値, D_2 : 外部同心円筒内径 (cm), D_1 : 内部同心円筒外径 (cm)

ケーブル絶縁体の加熱を考える場合には、ケーブル表面における境膜熱抵抗とケーブル表面から絶縁体最内層までのポリエチレン中の熱抵抗の両者を考える必要があり、それぞれの熱抵抗は次式で与えられる。

ケーブル表面における境膜熱抵抗

$$R_s = 1/\pi D_1 h \quad (2)$$

ケーブル絶縁体の熱抵抗

$$R_c = (1/2\pi k_0) \log(D_1/D_0) \quad (3)$$

ただし、 D_1 : 絶縁体外径 (cm), D_0 : 絶縁体内径 (cm), k_0 : ポリエチレンの熱伝導度 ($\approx 0.7 \times 10^{-3}$ cal/cm・s・°C)

(1)式からわかるとおり、熱伝達係数は流速およびガスの比重のそれぞれ 0.8 乗に比例して増加することから、気体の密度が大きく、流速が速いほど熱伝達係数は大きくなり、境膜熱抵抗は小さくなる (第 2 図)。

次に、(2)、(3)式から N₂ ガスの場合の R_s, R_c の関係を図示すると第 3 図になる。ケーブルを加熱する場合には両者の和が重要となる。従来の蒸気架橋方式の場合には、境膜熱伝達係数は 0.14~0.68 cal/cm²・s・°C と非常に大きいことから、境膜熱抵抗 R_s はポリエチレンの熱抵抗 R_c に比べて非常に小さく、全熱抵抗はポリエチレン絶縁体の熱抵抗 R_c にほぼ等しい。一方ガス架橋方式の場合にはケーブルの絶縁厚が薄いほど境膜熱抵抗 R_s は大きく、全熱抵抗は蒸気架橋の場合よりもかなり大きい。絶縁厚が厚くなると

第 2 図 ガスの流速と熱伝達係数の関係

Fig. 2. Coefficient of heat transfer in gas flow.

第3図 ケーブル表面における境膜熱抵抗とケーブルの熱抵抗の絶縁厚依存性

Fig. 3. Dependence of heat resistance on insulation thickness.

ると境膜熱抵抗 R_s はポリエチレンの熱抵抗 R_d に比べて小さくなり、全熱抵抗は主としてポリエチレン絶縁体の熱抵抗 R_e に支配されるようになる。このように使用するガスの比重を考え、ガスの流速を適当に選ぶことによって、ガス架橋方式を効率よく行なうことができる。

3. 物理、化学特性

高温高圧力の N_2 ガス気流中で架橋した CV ケーブル (以後、 N_2 ガス架橋 CV ケーブルと呼ぶ) の物理、化学的な性質を従来方式の蒸気中で架橋した CV ケーブル (以後、蒸気架橋 CV ケーブルと呼ぶ) と対比し検討する。

〈3.1〉 物理的性質 両 CV ケーブルの物理的機械的性質を第1表に示す。引張試験、加熱変形は JIS-C-3606 に準じて行ない、動的粘弾性率⁽⁹⁾は直読式動的粘弾性測定器により求め、密度は密度勾配管 (ASTM-D-1505-68 に準じる。測定精度小数点以下4けた) に投入して求めた。結晶化度は X 線による方法⁽¹⁰⁾から求めた。

引張強度、加熱変形など機械的強度は両 CV ケーブルともに同程度の値を示している。また、動的粘弾性率、結晶化度などにおいても差異は認められなかった。しかし、密度においては差異が認められた。なお密度の算出方法は次のとおりである。同一ケーブルロットに対して、たとえば絶縁厚 6mm (12mm) の場合、径方向に6等分 (12等分) し、その各層に対し2片の密度を測定し、その全部の平均値を算出する。表中の範囲はロットの違いによる平均値のばらつきを示している。CV ケーブルの密度の低下の要因として、

第1表 ケーブルの物理特性

Table 1. Physical properties of CV cable.

項 目		N_2 ガス架橋ポリエチレンケーブル	蒸気架橋ポリエチレンケーブル
引張強度	常 温		
	T. S (kg/cm ²)	2.23	2.25
	T. E (%)	477	470
	老 化 後		
加 熱 変 形	T. S (kg/cm ²)	2.10	2.17
	T. E (%)	487	483
加 熱 変 形 120°C, 30min W=6kg (%)		11.9	11.8
動的弾性率 E' (dyn/cm ²)*		2.4×10^9	2.4×10^9
動的損失率 E'' (dyn/cm ²)*		2.9×10^8	2.9×10^8
密 度 (g/cc)		0.9185~0.9195	0.9170~0.9180
結 晶 化 度		64~68	65~68

*: 20°C, 110 Hz で測定

(1) ポリエチレンの架橋化および熱履歴, (2) ケーブル中に残存する架橋分解生成物, 水分, ミクロボイドなどが考えられる。

〈3.2〉 ケーブル絶縁体内の架橋分解生成物および水分の分布 CV ケーブル絶縁体中に残存する物質は、架橋分解生成物および水分が主であると考えられる。架橋分解生成物の大部分はアセトフェノンであるから⁽¹¹⁾、アセトフェノンの $C=O$ 基の赤外吸収スペクトルに着目し、その定量を行ない、両 CV ケーブルについて層別にアセトフェノンの残存量を比較した (第4図)。これによると両 CV ケーブルの間には差が認められず、その分布は絶縁体の内外層で小さく、中央付近でピークを描いている。

水分量の測定にあたっては赤外分光器を用い、固体水分計で校正を行ない定量した。 N_2 ガス架橋 CV ケーブルでは絶縁体全層にわたって H_2O 特有の幅広い赤外吸収スペクトルを検出することができなかったことから、絶縁体中に水分が含まれていないと考えられ

第4図 ケーブル内の架橋分散残査(アセトフェノン)の分布

Fig. 4. Distribution of decomposition residue of cross linking agent (Acetophenone) in a CV cable.

第 5 図 蒸気架橋ポリエチレンケーブル内の水分の分布

Fig. 5. Distribution of water in a CV cable.

る。一方、蒸気架橋 CV ケーブルでは第 5 図に示すように絶縁体の全層にわたって水分が検出され、特に絶縁体の外層部に多いことがわかった。

〈3・3〉 ケーブル絶縁体の顕微鏡観察 両 CV ケーブル絶縁体内部を光学顕微鏡および走査形電子顕微鏡を用いて観察した。観察方法は次のとおりである。光学顕微鏡を用いるときには、絶縁体をスパイラルカットした後、その薄片の内部を観察する。走査形電子顕微鏡を用いるときには、絶縁体を液体窒素中で十分冷却した後、絶縁体を径方向または長手方向に破断し、その表面に金蒸着を行ない、その表面を観察する。

第 6 図、第 7 図は乾燥処理前の両 CV ケーブルの外層部（第 5 図中番号 5、6 の間の位置）のマイクロボイドの密集状態（光学顕微鏡による）と、内層部（第 5 図中番号 1、2 の間の位置）および外層部の球晶構造⁽¹²⁾⁽¹³⁾（走査形電子顕微鏡による）を示している。

第 8 図は十分乾燥処理した蒸気架橋 CV ケーブルの外層部の光学顕微鏡および走査形電子顕微鏡写真を示す。ガス架橋 CV ケーブルの場合には乾燥処理前後で変化が見られなかった。これら顕微鏡観察結果と前項とを合わせると次のことがわかる。

(1) ミクロボイドはガス架橋 CV ケーブルの場合絶縁体全層にわたって観察されなかった。一方、蒸気架橋 CV ケーブルの場合には径方向でミクロボイドの密集状態が異なり、その度合いは絶縁体中に残

第 6 図 絶縁体中のミクロボイドの光学顕微鏡観察 (倍率 100)

Fig. 6. Optical micro-photograph of the micro-voids of CV cables. ($\times 100$)

N₂ ガス架橋 CV ケーブル 蒸気架橋 CV ケーブル

第 7 図 絶縁体の球晶の走査形電子顕微鏡観察 (倍率 500)

Fig. 7. Electron scanning micro-photograph of the spherulites of CV cable. ($\times 500$)

光学顕微鏡 ($\times 100$) 走査形電子顕微鏡 ($\times 500$)

第 8 図 乾燥処理後蒸気架橋 CV ケーブルの外層部

Fig. 8. Optical and electron scanning micro-photograph of steam-cured CV cable after drying.

存する水分量の分布と対応している⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。さらに、このケーブルを高温で十分に乾燥処理するとミクロボイドの多くは光学顕微鏡で観察されなくなる。

(2) 球晶構造はケーブルの径方向、長手方向とも同一形状をしており変化が見られない。

(3) 球晶構造については、ガス架橋 CV ケーブルでは絶縁体全層にわたって同一形状のものが観察されるが、蒸気架橋 CV ケーブルでは絶縁体の内層部と外層部で大きな違いが見られる。この内層部の球晶構造はガス架橋ケーブルの場合と類似している。一方、外層部の球晶構造は非常に細かいものとなり、形状も前者と異なっている。さらに、このケーブルを高温で十分に乾燥しても球晶の形状は変化しないで中心部(核)の様相が変化している。

(4) ミクロボイドと球晶の密集度合いは水分量の分布と対応しており、アセトフェノン量の分布とは関係なさそうである。

(5) ミクロポイドなどは球晶の核となっているようであり、ミクロポイドを生成する主要因として、ケーブル架橋時の蒸気が考えられ、絶縁体中に浸透した水蒸気がケーブルの冷却過程で水滴となり、ミクロポイドを生成するものと思われる⁽¹⁶⁾。

4. 電気特性

N₂ ガス架橋 CV ケーブルの絶縁破壊特性と $\tan\delta$ 特性について、蒸気架橋 CV ケーブルと対比し検討する。

〈4.1〉 供試ケーブルおよび課電方法 従来の蒸気架橋 CV ケーブルの 22~154kV 級相当の絶縁厚の N₂ ガス架橋 CV ケーブルの絶縁性能を調べるために次のケーブルを製造した。

22kV-60, 100mm ²	絶縁厚	6mm
33kV-100mm ²	"	9mm
66kV-80, 100, 150, 250mm ²	絶縁厚	11.5~15.5mm
154kV-1, 200mm ²	"	20mm

上記ケーブルの内外半導電層、絶縁体の材質はそれぞれ同一のものをを用い、特に絶縁体には材料の影響を避けるため、無添加、無充てんのものをを用いた。ケーブルへの課電方法は第2表に示すとおりであり、破壊に供する試料の多くはそれぞれ 4~6 本である。

〈4.2〉 インパルス破壊特性 試験は常温で実施した。供試ケーブルは両架橋 CV ケーブルともに、乾燥処理前後のものである。インパルス破壊値の絶縁厚依存性を第9図に示す。図中の○印は破壊値の平均値を示し、上限、下限をも合わせて示す。

図から次項のことがわかる。

(1) N₂ ガス架橋 CV ケーブルの破壊平均電界強度は 80~105kV/mm 以上であり、最高 160kV/mm に達するものもある。

(2) 乾燥処理前後の絶縁性能の比較を行なうと、ケーブルを十分乾燥することによって、N₂ ガス架橋 CV ケーブルの場合、性能は若干向上するが、その差

第2表 課電方法 (初期値)

Table 2. Method of voltage application.

項 目	交流破壊試験	インパルス破壊試験
ケーブル		
22 kV 級	200 kV/1 h	⊖400 kV/3 回
33 kV 級	300 kV/1 h	⊖500 kV/3 回
66 kV 級	400 kV/1 h	⊖700 kV/3 回
154 kV 級	500 kV/1 h	⊖900 kV/3 回

昇圧法 交流破壊試験: 10kV/1h
インパルス破壊試験: ⊖50kV/3回

第9図 インパルス破壊特性

Fig. 9. Dependence of impulse breakdown strength on insulation thickness.

はわずかである。一方、蒸気架橋 CV ケーブルの場合には性能は約 15~35% 向上し、ケーブルの乾燥処理の効果が大きい。

(3) 蒸気架橋 CV ケーブルの破壊値 (平均値) と比較すると、N₂ ガス架橋 CV ケーブルのそれは乾燥処理前後の状態では約 45~50% 以上、乾燥処理後の状態で 20~25% 以上向上している。

〈4.3〉 交流破壊特性 試験は常温で実施した。供試ケーブルはインパルス破壊試験のときと同様に両 CV ケーブルの乾燥処理前後のものである。交流破壊値の絶縁厚依存性を第10図に示す。図中の記号は第9図と同じである。図から次項のことがわかる。

(1) N₂ ガス架橋 CV ケーブルの破壊平均電界強度は 40~55kV/mm である。

(2) 乾燥処理前後の絶縁性能の比較を行なうと、ケーブルを乾燥することによってガス架橋 CV ケーブルの場合は若干低下しているが、その差はわずかである。しかし、蒸気架橋 CV ケーブルの場合には約 20~30% 低下しており、乾燥の影響が顕著に現われている。

(3) 蒸気架橋 CV ケーブルの破壊値 (平均値) と比較すると、N₂ ガス架橋 CV ケーブルのそれは乾燥処理前の状態で約 30~50% 向上し、乾燥処理後で 60~100% 向上している。

〈4.3〉 $\tan\delta$ 特性 66kV 級の両 CV ケーブルの $\tan\delta$ を比較すると第3表のようになる。N₂ ガス架橋 CV ケーブルの $\tan\delta$ は小さく、ケーブル中の残存するガス、架橋分解生成物の影響は認められな

第 10 図 交流破壊特性

Fig. 10. Dependence of AC breakdown strength on insulation thickness.

第 3 表 $\tan \delta$ 特性

Table 3. Dielectric loss.

ケーブル	電 圧	
	38 kV	76 kV
N ₂ ガス架橋ポリエチレンケーブル	0.009 (%)	0.009 (%)
蒸気架橋ポリエチレンケーブル	0.015	0.017

い。一方、蒸気架橋 CV ケーブルでは残存する水分の影響のため $\tan \delta$ は大きくなっている。

5. SF₆ ガス架橋 CV ケーブルの電気絶縁性能

絶縁耐力が N₂ ガスの約 2 倍強である SF₆ ガスを用いて架橋した SF₆ ガス架橋 CV ケーブルは、架橋工程中に SF₆ ガスが絶縁体中に拡散浸透するために、さらに絶縁性能が向上すると思われる。そこで、22kV-100mm² の SF₆ ガス架橋 CV ケーブルを製造し検討した(第 4 表)。表から次項のことがわかる。

(1) インパルス破壊値は N₂ ガス架橋 CV ケーブルのそれと同程度であり、ガスの種類の影響は認められない。

(2) 交流破壊値は N₂ ガス架橋 CV ケーブルのそれよりも高く約 25% 向上している。

6. 絶縁性能に及ぼす要因

第 9 図、第 10 図に示すとおり、N₂ ガス架橋 CV ケーブルは蒸気架橋 CV ケーブルと比較して大幅に絶縁性能が向上している。CV ケーブルの絶縁性能に特に大きく影響する要因として、大別して次項のことが考

第 4 表 SF₆ ガス架橋 CV ケーブルの絶縁性能 (22kV-100mm²)Table 4. Insulation properties of SF₆ gas-cured CV cables. (22kV-100mm²)

	破壊値 (kV)	破壊平均電界強度 (kV/mm)
交 流	408	68
インパルス	728	121.3

(注)：4～6 点の平均値

えられる。

- (i) 電極と絶縁体界面の接着および凹凸
- (ii) 絶縁体材料に混入した異物
- (iii) 絶縁体中に残存する水分、架橋分解生成物
- (iv) 絶縁体の微視的構造(マイクロボイドなど)

本論文で問題にしている架橋方式は要因 (iii)、(iv) に主眼が置かれたものである。要因 (iii) の絶縁体中の水分あるいは架橋分解生成物は、乾燥処理を行なうことによってケーブル中から大部分取り除ける。そこでまず始めに (iv) の要因について考察する。

〈6・1〉 ポリエチレン絶縁体の微視的構造と絶縁性能 第 9 図、第 10 図で乾燥処理を十分行なった後の両 CV ケーブルを比較すると、インパルスで 20～25% 以上、交流で 60～100% 程度ガス架橋 CV ケーブルの破壊値が高い。これは絶縁体の微視的構造の差によるものと思われる。第 8 図に示すとおり、蒸気架橋 CV ケーブルに観察されるマイクロボイドは乾燥処理を行なうと光学顕微鏡ではほとんど観察されなくなるが、球晶構造にはほとんど変化が見られず、空けきが残っているようである。この残存するマイクロボイドなどの欠陥部と、さらには第 2 表に示す密度の差が絶縁性能に影響しているものと考えられる。これらの影響について、おのおの事例で考察する。

(1) マイクロボイドの影響 マイクロボイドの影響を直接的に検討することはむずかしいため、筆者らは SF₆ ガスを絶縁体中に拡散浸透させる方法で検討した。

蒸気架橋 CV ケーブルの場合には、ケーブルを十分乾燥した後、SF₆ ガスを絶縁体中に拡散浸透させる。ガス架橋 CV ケーブルの場合には、架橋工程中に SF₆ ガスを絶縁体中に拡散浸透させる方法をとった。

絶縁体中に SF₆ ガスが含まれているかどうかは、前者は重量変化および赤外吸収スペクトルで、後者は赤外吸収スペクトルで確認し、絶縁体全層にわたって SF₆ ガスが含まれていることを確認した。これらケーブルの絶縁性能を第 11 図に示す。供試ケーブルは次のとおりである。(a) 乾燥処理した 11 kV-150mm²

第 11 図 SF₆ ガスの効果Fig. 11. Effect of SF₆ gas.

蒸気架橋 CV ケーブル (絶縁厚 5mm)⁽¹⁷⁾, (b)(a) のケーブルに SF₆ ガスを含浸させた SF₆ ガス含浸蒸気架橋 CV ケーブル, (c) N₂ ガス架橋 CV ケーブル (22kV-100mm², 絶縁厚 6mm), (d) SF₆ ガス架橋 CV ケーブル (22kV-100mm², 絶縁厚 6mm)。(c), (d) は乾燥処理前のものである。

各種ケーブルの絶縁性能を比較すると、次の順になる。

交流破壊強度 (d) > (b) ≈ (c) > (a)

インパルス破壊強度 (d) ≈ (c) > (b) ≈ (a)

このことから、前述したように蒸気架橋 CV ケーブルではマイクロボイドなどの欠陥部があり、材料の絶縁性能に比してケーブルではまだ十分な性能を発揮し得ないものと思われる。また、ガス架橋 CV ケーブルにおいても SF₆ ガス中で架橋したケーブルのほうが N₂ ガス架橋ケーブルよりも交流の絶縁性能が良いことから、まだ欠陥部を含んでいると考えられるが、蒸気架橋 CV ケーブルを比較すると大幅に欠陥部は改善されていると考えられる。

(2) 密度の影響 種々の物理量を検討した範囲では密度のみが異なっている。そこで、ケーブルと同一材質のポリエチレンを用いて密度の異なるシートサンプルを作成し、インパルス破壊強度を調べると第 12 図のようになる。(図中の ○ 印は 6 試料の平均を併せて上下限を示す)

サンプルの作成方法は次のとおりである。試料を一定条件下でプレス架橋した後、熱処理を行なって密度を変化させる。熱処理は次の 3 とおりである。

140℃ で 30 分間保持した後、(a) 氷水中に投入、(b) 5℃/h で 40℃ まで降温、(c) そのままの状態

第 12 図 架橋ポリエチレンの密度とインパルス破壊強度の関係

Fig. 12. Dependence of impulse breakdown voltage on density of cross-linked polyethylene.

冷却。

冷却時間を比較すると、(a), (b), (c) の順に長くなっていて、密度も順次大きくなっている。

グラフから密度の大きいほうがインパルス破壊強度も高くなっていることがわかる。

密度と結晶化度の間には直線関係⁽¹⁸⁾があるが、X線による結晶化度の求め方は精度がたりず、筆者らの密度変化範囲における結晶化度の変化を明確にすることができない(第 2 表参照)。一般に高密度と低密度ポリエチレンの比較がなされているが、製造方法の違い、実験者の違いなどにより比較しにくい⁽¹⁹⁾。同一材質を用いて種々の結晶化度を持った試料を作成して、結晶化度の影響を直流破壊試験で矢作氏ら⁽²⁰⁾が報告しているが、常温付近の破壊強度の傾向は課電波形の違いがあるが、筆者らの傾向と異なっている。

以上のおおのの考察から、マイクロボイドなどの絶縁体構造上の欠陥部分は主として交流破壊強度と密接な関係があり、密度と関連した絶縁体の組織はインパルス破壊強度と密接な関係があると思われる。

〈6・2〉 絶縁体中に残存する水分および架橋分解生成物(主成分アセトフェノン)の影響

(1) 架橋分解生成物の影響 第 9 図、第 10 図からわかるとおりガス架橋 CV ケーブルの場合、乾燥処理前後で絶縁性能には有意差が認められない。この乾燥処理によって変化するものはケーブル中に残存している架橋分解生成物(主としてアセトフェノン)である。このことから、アセトフェノンはガス架橋 CV ケーブルの破壊強度に影響していないと考えられる。

速水氏⁽²¹⁾はシート実験において、アセトフェノンの効果を詳細に検討して下記の結果を得ている。アセトフェノンをポリエチレンに吸収させると、(a) インパルス破壊強度は変化しないが、交流では向上し、直

流では低下する。(b)交流に対するその効果は主として電極と絶縁体界面にあり、そこでの放電を抑制し絶縁体内でのその効果は少ない。また、(c)一般に針電極からの交流トリートメント開始電圧はアセトフェノンにより大きく上昇することが知られている。

上記三つの事実を総合すると下記の考察が可能である。アセトフェノンは電極と絶縁体との界面あるいは絶縁体中のマイクロボイドなど構造上の欠陥部分で微小な放電が生ずるような場合には放電抑制効果により交流破壊強度を向上させる。しかしながら、内部外部半導電層と絶縁体を同時に押し出し、かつ、マイクロボイドなどの構造上の欠陥部分が大幅に削減されたガス架橋CVケーブルにおいては、そのような微小な放電を生ずる部分が少ないため、インパルス、交流ともにアセトフェノンの効果は期待できない。

(2) 水分の影響 第9図、第10図からわかるとおり、蒸気架橋CVケーブルでは乾燥処理によってインパルス破壊強度は約15~35%上昇し、交流破壊強度は約20~30%低下する。この乾燥処理によって水分と架橋分解生成物の両方が絶縁体より飛散しており、その両者の影響を考えなければならないが、前節の所論からアセトフェノンのインパルス破壊強度の影響は少ないと考えられるので、蒸気架橋CVケーブルのインパルス破壊強度が乾燥により上昇するのは絶縁体中の水分がなくなるためであろうと考えられる。一方、交流破壊強度の低下はマイクロボイドなどの構造上の欠陥部から、アセトフェノンが飛散することが大きく影響していると思われ、水分がこれにどう作用しているかは説明できない。しかし、他の研究者によって絶縁体中の水分の影響について議論されている。たとえば、シートサンプルを用いて、矢作氏ら⁽²²⁾は直流で、会田氏ら⁽²³⁾は交流で検討し、水分を含んでいるポリエチレンでは前者の場合約20%、後者の場合約30%ともに低下する。岩田氏ら⁽²⁴⁾はケーブルを用いて検討し、交流で約30%、インパルスで若干低下することを報告している。

以上を総合すると、ケーブル絶縁体中に水分がないのみならず、構造的にはマイクロボイドがなく、密度が大きいためにガス架橋CVケーブルの絶縁性能は蒸気架橋CVケーブルよりもすぐれていると考えられる。

7. む す び

これまで述べてきたことを要約すると、

(1) 適当なガス、流速を選ぶことにより、高温高圧のガス気流中でケーブルを架橋することが可能である。

(2) 蒸気架橋CVケーブルが十分な絶縁性能を発揮できなかった主要因は、ケーブル製造時に絶縁体中に浸透する水分と、これによって形成されるマイクロボイドが残存しているためと思われる。

(3) 絶縁性能を乾燥した状態で蒸気架橋CVケーブルと比較すると、交流で約60~100%、インパルスで約20~25%以上、N₂ガス架橋CVケーブルは向上しているため絶縁厚の低減が可能と思われる。

(4) 高電界における長期安定性について検討中であり、他の要因についても検討すべき点は多々存在しているが、初期性能から見るかぎり、CVケーブルの超々高圧化への適応は十分可能であろうと考えられる。さらに、ガス架橋CVケーブルを密閉パイプ中でSF₆ガスを加圧した状態で用いることは、水分および浸食性化学物質の絶縁体への浸透を防止するとともに、光学顕微鏡で観察し得ない欠陥部分および異物からの放電劣化を防ぐことが可能と思われるので、長期信頼性を高める重要な意味があると考えられる。

最後に、この研究を通じ激励とご指導をいただいた木村研究所長、ならびにご指導、ご討論をいただいた研究所ならびに関係各位に厚くお礼申し上げる。

(昭和48年9月3日受付、同49年4月18日再受付)

文 献

- (1) F. H. Kreuger: CIGRE No. 21-02 (1968)
- (2) 池田・高橋: 電気学会論文誌 92-A, 120 (昭47-3)
- (3) 池田・高橋: 日立評論 54, 370 (昭47-4)
- (4) T. Kojima, et al.: IEEE Trans. Paper, T 73-501-4 (1973)
- (5) 不破, 他: 昭47電気学会大会 No. 331
- (6) 長崎, 他: 住友電気 No. 106, 1 (昭47-5)
- (7) 高橋, 他: 昭48電気学会大会 No. 1134
- (8) 日本機械学会編: 機械工学便覧 p. 11 (昭43)
- (9) たとえば, 高柳論文集: Report Research Using "Vibron" Model DDV-II Vol. 31 (1966)
- (10) J. L. Matheus, et al.: Acta. cryst 2, No. 85, (1949)
- (11) 森田, 他: 昭和電線電纜レビュー 19, 31 (昭44)
- (12) R. A. Fave: J. Polymer Sci. Part-D Macromolecular Reviews 5, (1971)
- (13) P. R. Fitchmun, et al.: J. Polymer Sci. Part A-2, 8, 1545 (1970)
- (14) B. Yoda & K. Muraki: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-92, 506 (1973)
- (15) H. Yamauchi, et al.: IEEE Trans. Paper, C-72-504-9 (1972)
- (16) 岡田, 他: 昭48電気学会大会 No. 246
- (17) 高橋・池田: 昭46電気学会東京支大 No. 291
- (18) 大田, 他: ポリエチレン(プラスチック材料講座) p. 123 (昭36) 日刊工業
- (19) たとえば, 家田, 他: 第6回電気絶縁材料シンポジウム予稿集 (昭48-9)
- (20) 宮内・矢作: 電気学会論文誌 92-A, 36 (昭47-1)
- (21) 速水: 絶縁材料研究会 IM-71-14 (昭46)
- (22) 石原・矢作: 昭44電気四学会連大 No. 266
- (23) 会田, 他: 昭48電気学会大会 No. 278
- (24) 岩田, 他: 同 上 No. 243