

OF ケーブルの高電圧試験法に 関する技術問題

木 原 登 喜 夫

Some Technological Problems of “High Voltage Tests on Oil-filled, Paper-insulated, Metal-sheathed Cables” Standardized as JEC-3401

Tokio KIHARA

In 1985, “high voltage tests on oil-filled, paper-insulated, metal-sheathed cables” was standardized as JEC-3401. This standard is composed of a. c. high voltage routine tests made on all manufactured cables, and both lightning impulse voltage and long term a. c. high voltage special tests made on approximately 20 m long samples of completed cables.

The withstand values of the high voltage tests are decided on the bases of how to estimate the overvoltage occurred in the power transmission systems and the voltage-time characteristics of the cable insulation composed of oil and paper.

Since synthetic paper like polypropylene or polymethylpentane laminated cellulose is recently used as a better insulation of OF cable, it shall be required, not only to get the lightning impulse voltage withstand characteristics of these insulation materials, but also to confirm the voltage-time characteristics ranged from 0.1 second order to 10 minute order for the a. c. high voltage routine tests and ranged from 1 hour order to 30 year order for the long term a. c. high voltage special tests.

In this paper, the above technological problems are mainly discussed by using some typical tables and figures related to the standardization of JEC-3401.

1. ま え が き

OF ケーブルがわが国に技術導入されたのは昭和初期であったが、わが国の電気学会標準規格 (JEC) として制定されたのは昭和40年である。それまでの導入技術を模倣するレベルから漸く西欧技術に比肩して独自の技術が芽生えた時代である。

電気学会内に初回のケーブル高電圧試験専門委員会が設置されて以来、幹事または委員として電力ケーブルの標準規格化に関与して来た立場から、今なお問題であると思われる技術問題の2, 3について報告する。

OF ケーブルに限らず一般の電力機器の電気試験は、結局つぎの2点に集約されて決められると言っても過言でない。

- (1) その機器が使用される期待寿命期間(30~40年間)にどのような電氣的責務を果さねばならぬか。
- (2) 過去の責務の実績または考えられる電氣的責務の各々に対して、その機器が必要充分な応答をするか。

一方、技術進歩により第1点の電氣的責務は、数年後には電力システムの改善、並列運用機器の性能向上などによって、減少されるかも知れない。また第2点の機器の応答特性についても、設計や材料の改善によって数年後には向上する可能性が大きい。最も問題とされるのは、系統電圧を例えば275 kV から500 kV のように1ランク上げて新電圧階級を採用する場合の上記問題点(1), (2)の評価決定である。技術後進国時代では先進国の実績を参考にし得たが、先進国になったわが国の現状では経験実績がどこにもない。当然外挿法と精々1~2年間の短期試験で30~40年後の寿命を期待することになる。

このような見地から、全ての標準、規格類は数年に1度見直されることになっているが、技術的に最も問題なのはその標準、規格類の数値の根拠になっている基本データに溯及して、十分な調査研究がなされる時間的余裕がないことである。

これらの技術問題に関し、275 kV および500 kV の有効接地系送電線に使用される OF ケーブルの具体例について、以下に述べる。

2. OF ケーブルの雷インパルス耐電圧試験の問題

2. 1 現状の試験法

先ず試験条件としては、雷インパルス波形は JEC¹⁾ で別に規定されている標準波 1.2/50 μ s で、使用最高許容温度 85 $^{\circ}$ C または便宜上常温のケーブル試料約 20 m について、絶縁体内油圧を最低許容油圧(ゲージ圧力 0.1 Atm.) 付近にして、試験を行なう。試料は出荷枠45枠(枠=ドラムのこと)ごとに1本採り、予め布設完了までの機械的損傷を見込んだ曲げ処理を行なう。このケーブルに加える耐電圧試験値は表-1の通りで、電圧極性はケーブルおよび中間接続部では負極性3回、終端接続部では正負両極性を各3回である。^{2, 3)}

表-1 雷インパルス耐電圧試験値

単位 kV

| 公称電圧 | 66 | 77 | 110 | 154 | 187 | 220 | 275 | 500 |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| B I L | 350 | 400 | 550 | 750 | 750 | 900 | 1050 | 1550 |
| BIL \times 1.1 | 385 | 440 | 605 | 825 | 825 | 990 | 1155 | 1710 |
| BIL \times 1.21 | 420 | 480 | 660 | 900 | 900 | 1080 | 1260 | 1880 |

OF ケーブルの高電圧試験法に関する技術問題

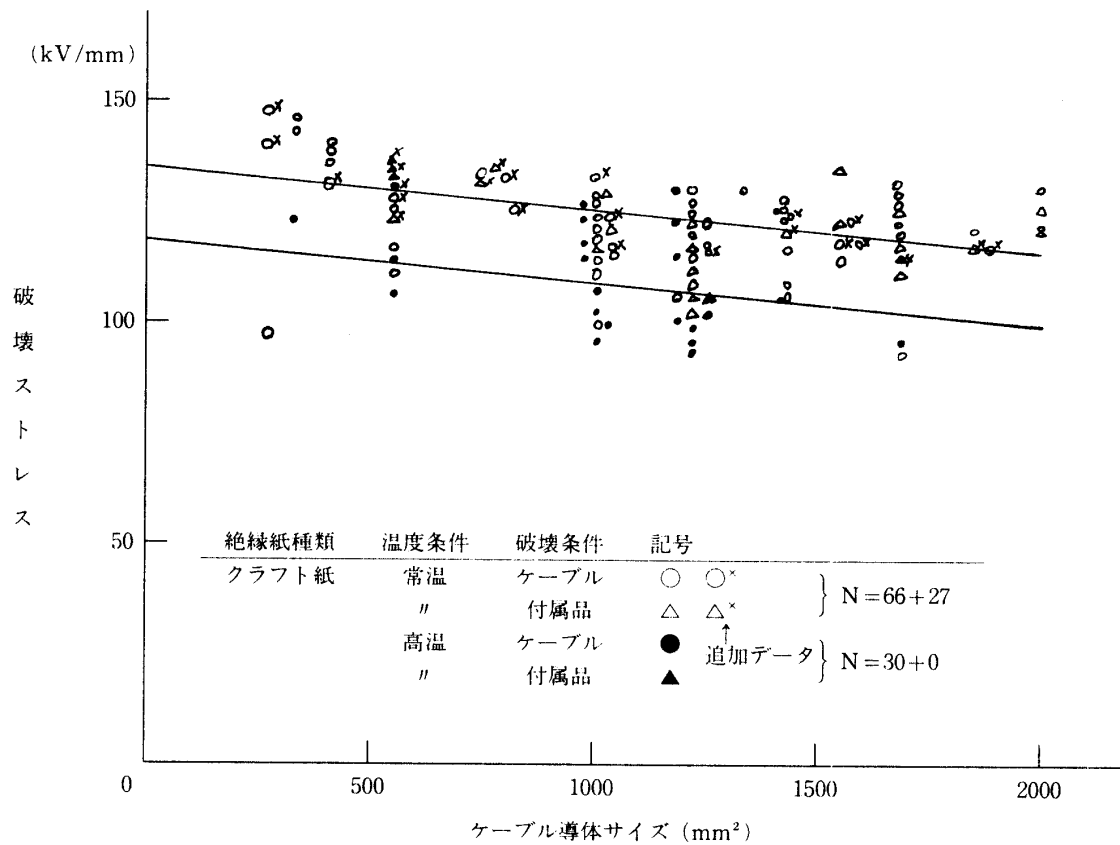


図-1 275kV OF ケーブルの雷インパルス破壊特性

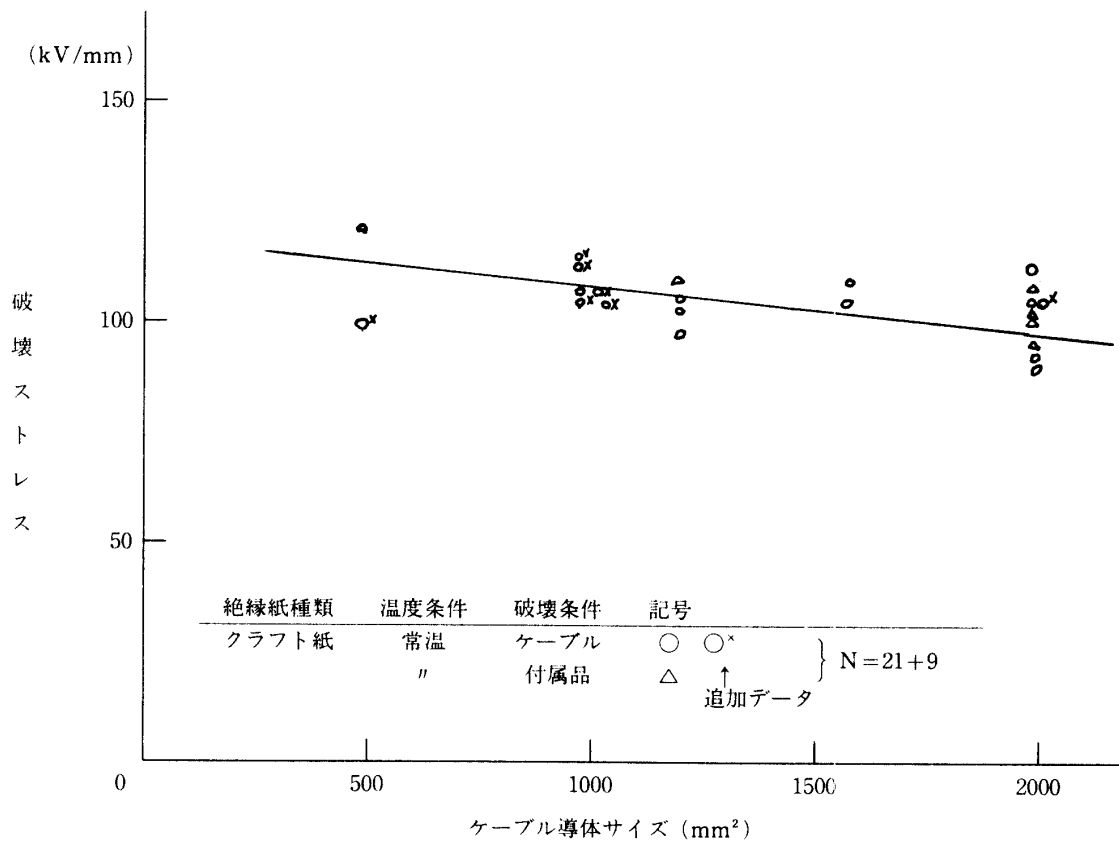

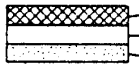
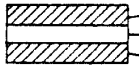
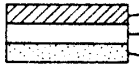
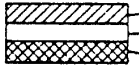


図-2 500kV OF ケーブルの雷インパルス破壊特性

2. 2 絶縁体の雷インパルス耐電圧特性

現行の OF ケーブルの高電圧試験法²⁾に考慮された 275 kV および 500 kV OF ケーブルの雷インパルス破壊特性は図-1 および図-2 に例示されている。⁴⁾これから判るように、油浸クラフト紙絶縁では破壊ストレスは 100 kV/mm 以上あり、導体サイズが大きくなると弱点分布理論が適用されて、破壊ストレスが減少する。

表-2 PPLP の構成例 (厚さ全体で125 μ m)

| 略称 | 構 成 |
|-----|--|
| CPC |  C: Cellulose paper P: Polypropylene binder C: Cellulose paper |
| CPF |  C: Cellulose paper P: Polypropylene binder F: Film |
| SPS |  S: Synthetic paper P: Polypropylene binder S: Synthetic paper |
| SPF |  S: Synthetic paper P: Polypropylene binder F: Film |
| SPC |  S: Synthetic paper P: Polypropylene binder C: Cellulose paper |

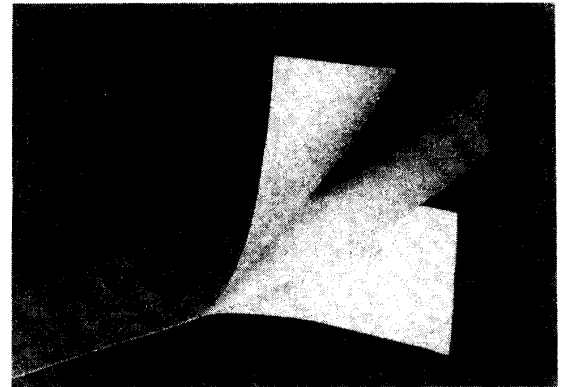


図-3 ラミネート合成紙の実例
(表-2 の CPC 構成のもの)

然るに、昨年敷設された本四架橋 500 kV OF ケーブルのように、最新の絶縁体はポリプロピレンラミネート紙 (PPLP) またはポリメチルペンテンラミネート紙 (PMLP) と称して、誘電率や誘電体損失のより小さいプラスチックファイバーをクラフト紙の間に挟んだ構造のものになっているので、⁵⁾ 厳密には上記データは使えないことになる。表-2、図-3 および図-4 参照。

このようなラミネート合成絶縁紙についての経時劣化を考慮した雷インパルス耐電圧特性のデータの蓄積は重要な今後の課題である。

2. 3 IEC 規格 (International Electrotechnical Commission Standard) との整合性

表-3 は IEC 規格における開閉インパルス耐電圧および雷インパルス耐電圧の試験値を示したものである。⁶⁾これを表-1 と較べると、試験の手順や条件に相異があるものの、わが国の試験がより苛酷であることが判る。

特に西欧諸国が他の電力機器と同様の試験値をケーブルに採用しているのに対し、わが国では試料試験と全長保証との関係、常温試験で全負荷通電時の高温検証を考慮して、それぞれ BIL の 1.1 倍および 1.21 倍に規定しているのが目立つ。公共事業に関する信頼性がそれぞれ国民性によっても、国際化時代のわが国で IEC 規格との調整問題は避けられないと考える。



図-4 275kV 1 \times 2,000
mm² PPLP
絶縁 OF ケーブル

表-3 Standard insulation levels for $U_m \geq 300$ kV

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--|---|--|------|--|--|
| Highest voltage for equipment U_m (r.m.s.) | Base for p.u. values $U_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (peak) | Rated switching impulse withstand voltage (peak) | | Ratio between rated lightning and switching impulse withstand voltages | Rated lightning impulse withstand voltage (peak) |
| kV | kV | p.u. | kV | | kV |
| | | | | — 1.13 — | 850 |
| 300 | 245 | — 3.06 — | 750 | — 1.27 — | |
| | | — 3.47 — | | — 1.12 — | 950 |
| 362 | 296 | — 2.86 — | 850 | — 1.24 — | |
| | | — 3.21 — | | — 1.11 — | 1050 |
| 420 | 343 | — 2.76 — | 950 | — 1.24 — | |
| | | | | — 1.12 — | 1175 |
| | | — 3.06 — | 1050 | — 1.24 — | |
| 525 | 429 | — 2.45 — | | — 1.11 — | 1300 |
| | | — 2.74 — | 1175 | — 1.36 — | |
| | | | | — 1.21 — | 1425 |
| | | | | — 1.10 — | |
| | | — 2.08 — | 1300 | — 1.32 — | |
| | | | | — 1.19 — | 1550 |
| | | | | — 1.09 — | |
| 765 | 625 | — 2.28 — | 1425 | — 1.38 — | |
| | | | | — 1.26 — | 1800 |
| | | | | — 1.16 — | |
| | | — 2.48 — | 1550 | — 1.26 — | 1950 |
| | | | | — 1.47 — | 2100 |
| | | | | — 1.55 — | 2400 |

3. OF ケーブルの商用周波耐電圧試験の問題

3. 1 現状の試験法

試験条件としては、50 Hz または 60 Hz の電源を使い、誘電体損失の発生を考慮して常温で、

最低許容油圧（ゲージ 0.1 Atm.）付近にして、試験する。出荷する全棒に対して棒耐電圧試験（10分間課電）を行ない、別に形式試験として出荷棒45棒ごとに約20mのケーブル試料を採って、長時間耐電圧試験（3時間課電）を行なう。試験値は表－4の通りである。²⁾

表－4 商用周波耐電圧試験電圧値 単位 kV

| | | | | | | | | |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 公 称 電 圧 | 66 | 77 | 110 | 154 | 187 | 220 | 275 | 500 |
| 棒試験耐電圧値 | 90 | 100 | 140 | 200 | 200 | 240 | 280 | 420 |
| 長時間耐電圧値 | 130 | 150 | 210 | 300 | 240 | 280 | 350 | 660 |

棒耐電圧試験の目的は、使用するケーブル全長が所定の耐電圧レベルにあることを確認することにある。そのためケーブルに損傷を与えない程度の試験電圧値で、しかも期待寿命30～40年間に発生を予想される最も高い商用周波過電圧（ V_m ）を基準とした電圧（ $V_{10\min}$ ）を加える。500 kV OF ケーブルに例をとれば

$$V_{10\min} = V_m \cdot K_1 \cdot K_2 = 420 \text{ kV} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに K_1 = 他の電力機器（主に変圧器）と協調させた耐電圧試験倍率

$$= k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 = 0.69 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$k_1 = \text{一線地絡時の健全相電圧上昇係数} = 1.3/\sqrt{3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$k_2 = \text{課電時間（10分間）と故障継続時間（0.4秒）との絶縁耐力の時間換算係数} \\ = 0.59 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$k_3 = \text{全負荷しゃ断時の電圧上昇係数} = 1.3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$k_4 = \text{変圧器耐電圧試験値裕度} = 1.2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$K_2 = \text{工場内試験時から使用時までの性能低下裕度} = 1.1 \quad \dots\dots\dots (7)$$

一方、雷インパルス試験と同様約 20m の試料について行なう長時間（3時間）耐電圧試験の目的は、常規電圧に対して期待寿命期間充分安定した絶縁性能をもっていることを確認するために、実用可能な長時間（3時間、以前は6時間）課電して、場合によってはその限界性能まで求めることにある。そのために長時間耐電圧試験値（ V_{3h} ）は、油浸紙絶縁の耐電圧時間特性を考慮して、つぎのように決められている。500 kV OF ケーブルを例にとれば、

$$V_{3h} = \frac{V_m}{\sqrt{3}} \times 1.5 \times 1.1 \times 1.25 = 660 \text{ kV} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに 1.5 = 時間換算係数〔一定電圧（V）課電下でのケーブルの寿命（t）を求めた V—t 特性は $t \propto 1/V^n$ という形で近似される。油浸紙絶縁のコロナ開始電圧でみた V—t 特性は数時間以下では主として油に支配される $n=25$ 程度の傾きであり、これより時間の長いところでは $n=50\sim80$ とほとんど平坦となる。そこで、これらを1つの V—t 特性に代表させて、数時間から30年までを表わすとすれば $n=30$ で充分安全側になる。この場合30年を6時間に換算すると1.43倍、3時

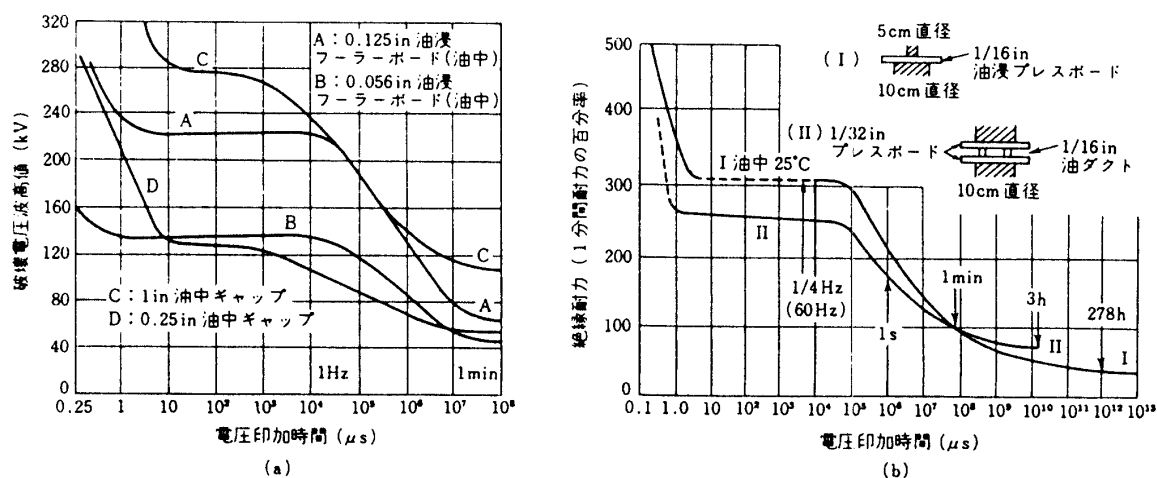
間に換算すると1.46倍となる。また変圧器の長時間耐電圧試験（試験時間30分～2時間）で1.5倍の電圧を加えている実状も参考にして決めた係数である。]

..... (9)

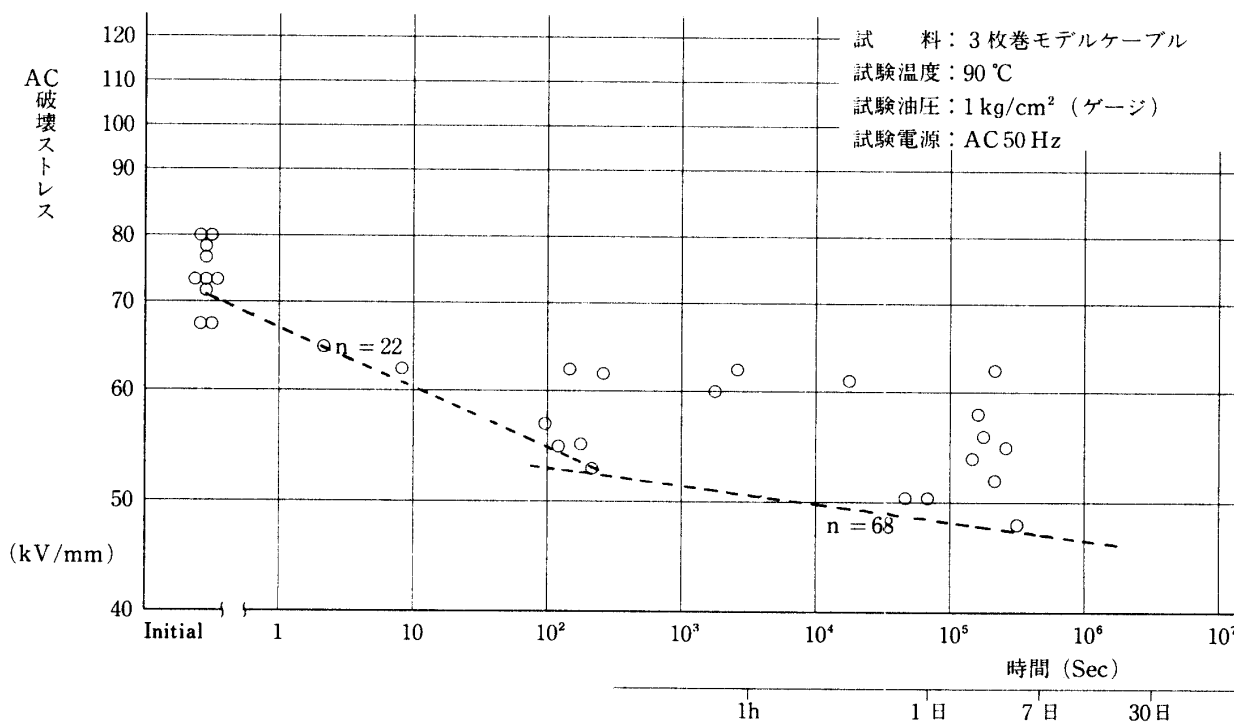
1.1 = 抜取試験で出荷ケーブル全体の性能を評価するための安全率..... (10)

1.25 = その他係数（コロナ試験で欠陥検出できない現状で耐電圧試験を以って代行するための裕度。また従来発電所引出し等、短距離ケーブルで長時間耐電圧値として660 kV ないし 690 kV が採用されている事実を配慮した係数。）..... (11)

3. 2 絶縁体の10分間および3時間耐電圧特性



図－5 モデル絶縁構造の V-t 特性



図－6 油浸紙の90℃(1 kg/cm² 油圧) V-t 特性

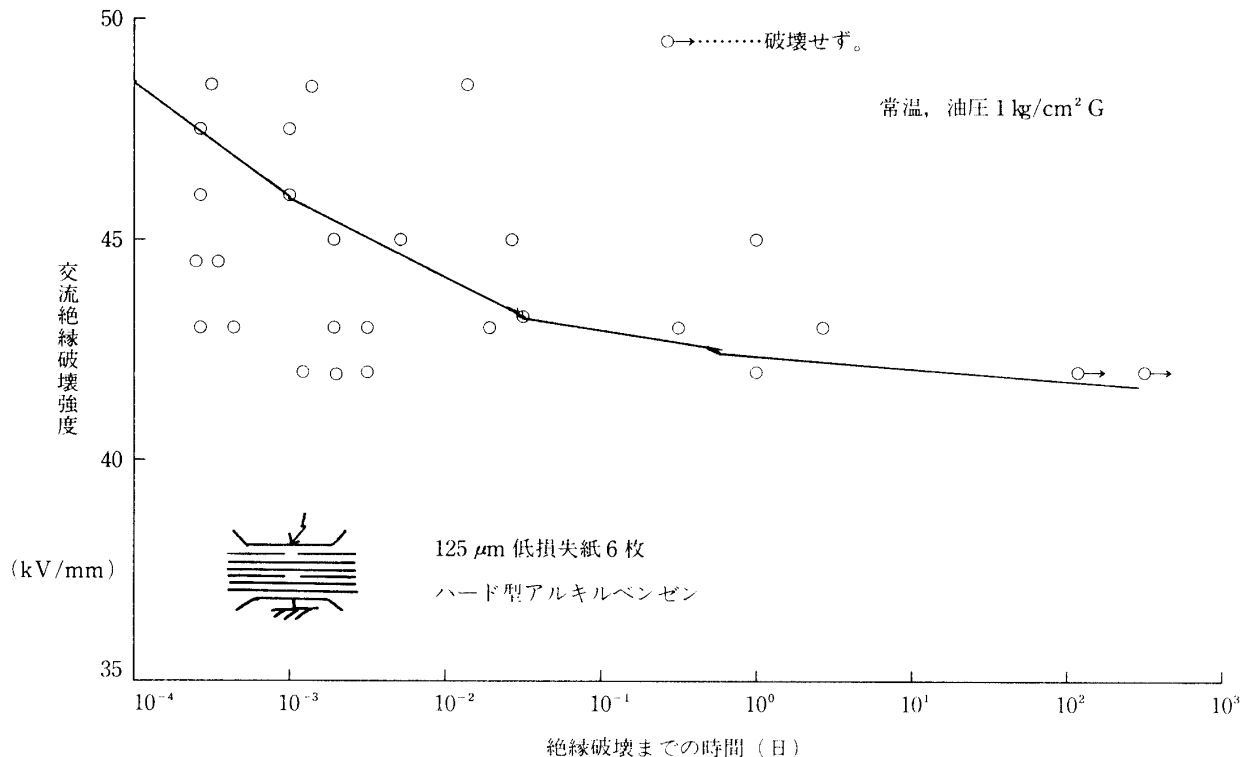


図-7 常温における油浸紙の長期交流 V-t 特性

OF ケーブルの商用周波耐電圧試験における表-4 の試験値は、図-5^{7,8)}、図-6⁹⁾、図-7⁹⁾等のデータを基にして、課電電圧 V とケーブル寿命 t との関係が、 $t \propto 1/V^n$ という形で近似されるとして、 n 値を推定して式(4)の $k_2 = 0.59$ 、または式(8)の1.5を決めたものである。特に従来規格との関連性から図-5の特性を重視しているが、これは発表後長期間を経た古いデータであるので現用の材料、製品、および技術水準に適用できるかはなはだ疑問のある処である。この視点から、どうしても現用の材料、製品および技術水準についての信頼性ある V-t 特性のデータの確立が待望される。¹⁰⁾ すなわち、

(1) 枠耐電圧試験値の選定根拠となった $k_2 = 0.59$ に関しては、現用合成絶縁紙および架橋ポリエチレン押出し絶縁について、系統の故障継続時間0.1秒程度から枠耐電圧印加時間10分間に至る V-t 特性の時間換算係数のデータを蓄積して、統計的に処理した信頼性ある値を確立する。

(2) 試料による長時間試験値の選定根拠となっている式(9)の係数1.5に関しても、上記新種絶縁体について、長時間耐電圧印加時間1時間程度から期待寿命30~40年に至る同様のデータを確立する。

(3) 系統保護関係者側の問題としては、式(3)の k_1 、式(5)の k_3 をより正確に把握し、かつその値を減少させるため、系統運用技術の改善乃至信頼性の向上を図ることである。

以上の技術問題をより明確に解明することが、規格値の低減に繋がって電力ケーブルの経済性を高め、送配電線の地中化を促進する要因になると考えられる。

4. む す び

500 kV OF ケーブルの試験規格が、このたび正式に JEC の中に採用された。各電力会社で独自の規格値を採用していた従来の慣習を改善して、実用上今までの試験値より低減された値で、ケーブルの高電圧試験が合理化された経済的効果は大きい。

しかし、なおデータ不足またはデータが古いため、審議の課程で安全側の推計をして取りまとめた技術項目も数ヶ所あり、本論文ではその内容について専門的考察を行なった。これらの問題を関係の研究者が協力して近い将来解決されることを望むものである。

参 考 文 献

- 1) JEC-187-1973 (インパルス電圧電流試験一般)
- 2) JEC-3401-1985 (OF ケーブルの高電圧試験法)
- 3) JEC-193-1973 (試験電圧標準)
- 4) 電気学会 OF ケーブルの高電圧試験法標準特別委資料：インパルス WG-11-2 (昭和60年2月)
- 5) 例えば、久保他：住友電気 V.117, P.214, (昭和55年9月)
- 6) IEC Publication 71-1 (Insulation co-ordination), (1976)
- 7) P.L.Bellaschi, et al.: Elect.Engng. V.56, P.164 (1937)
- 8) V.M.Mentsinger: Elect.Engng.V.54, P.1300 (1935)
- 9) 電気学会 OF ケーブルの高電圧試験法標準特別委資料：AC WG-3-3 (昭和59年2月)
- 10) 木原：昭和61年電気関係学会北陸支部連合大会 A-29, P.37 (昭和61年10月)