

超 高 圧 ケ ー ブ ル の 実 負 荷 試 験

Field Testing of Extra-High-Voltage Cables

安 藤 順 夫*
Nobuo Ando

要 旨

本報告は、ケーブルの長期の寿命を保証するための実負荷試験について述べたもので、とくに 275 kV 級超
高圧ケーブルの実負荷試験が主体的に記述されている。

ケーブルの実際の運転状況を模擬し、しかもその長期の信頼性を短期間に判定するにはかなり過酷な試験条
件を課さなければならず、実負荷試験ではこの条件の設定が重要な項目の一つとなる。

ここに供試ケーブルおよびその付属品の現在までの実負荷試験結果と実負荷試験条件設定に対する考え方を
まとめて報告する。

1. 緒 言

都市内部の集中的な電力需要の急増に対処するため超高圧ケー
ブルが盛んに導入されているが、超高圧ケーブルではその良好な初期
性能とともに長期の安定した性能が重視される。とくにケーブル線
路は現地工事で組み立てられ、超高圧ケーブルになるほど激しい電
氣的、機械的ストレスを受けるため、長期の性能を保証するには運
転中に生ずるさまざまな劣化の要因とその度合いをあらかじめ知
り、探求しておかなければならない。このための試験に寿命試験と
か加速劣化試験とか呼ばれる長期の課電通電試験があり、われわれ
はこれを“実負荷試験”と総称している。

以下に、現在試験中の 275 kV 級ケーブルを主体に実負荷試験設
備の概要、試験経過と結果、および試験条件設定に対する考え方を
述べる。

2. 実負荷試験設備の概要

日立電線株式会社では、すでに昭和 30 年代の前半から OF ケー
ブル、パイプ形 GF ケーブルの特殊な布設条件下における課電、通電
試験が行なわれてきたが、いわゆる超高圧ケーブルの実負荷試験と
いえるものは昭和 37 年から開始された 230 kV、 $1 \times 1,000$ MCM (約
 500 mm^2) のパイプ形 OF ケーブル (以下 POF と略称) が最初であ
った。後述するように、この試験を通じて従来の試験方法では得られ
ない多くのことが明らかになり、実負荷試験の重要性が認識された。
現在は試験機器、試料も増し、実負荷試験場として充実しつつある
が、このうち超高圧ケーブル関係、とくに油浸紙絶縁ケーブル関係
の設備の概略を図 1 に示す。図 2 は試験場の全景写真である。

図 1 に示したように、供試ケーブルの電圧階級により試験場を区
分しているが、運転管理および測定記録は集中して行なっている。
すなわち、中央操作室では全部の課電設備、通電設備を操作すると
ともに電圧、電流それに試料各部の温度を連続自動記録し、またそ
の横の測定室では誘電正接、コロナなどの電気特性を一括して測定
できるようにしている。なお、図 1 でゴム・プラスチックケーブル
関係は試験場のみ示し、その設備は省略したが、ここでは 6~154
kV の各種のゴム・プラスチックケーブルとその付属品を試験して
おり、やはり電圧階級ごとに試験場を区分し、操作、測定は上記の
操作室、測定室に集中している。

3. 275 kV POF ケーブルの実負荷試験

昭和 42 年末に布設し、43 年 1 月から試験を開始した 275 kV、
 $1 \times 1,400 \text{ mm}^2$ POF ケーブルについて述べる。

* 日立電線株式会社研究所

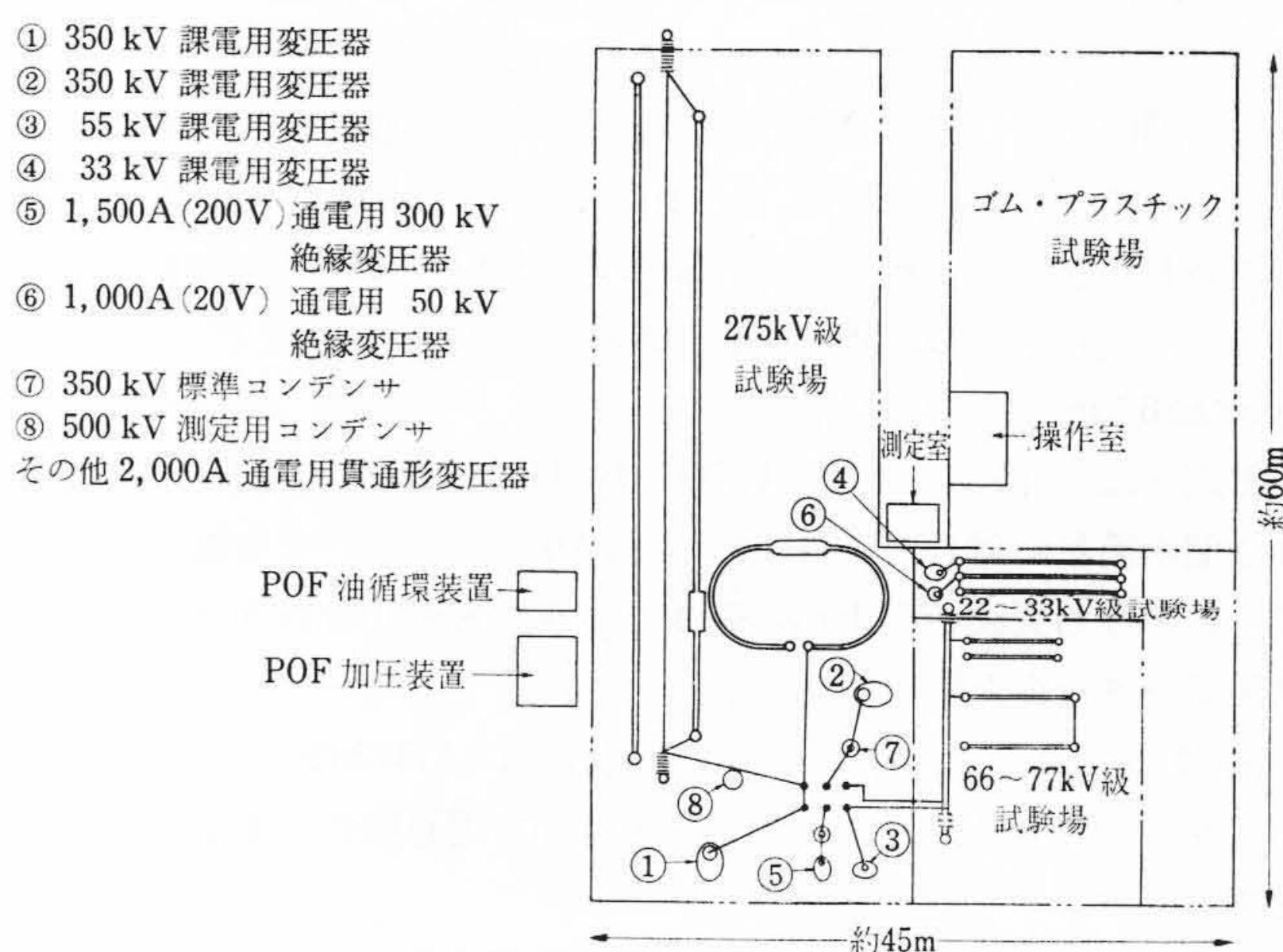


図 1 超高圧ケーブル関係の実負荷試験設備

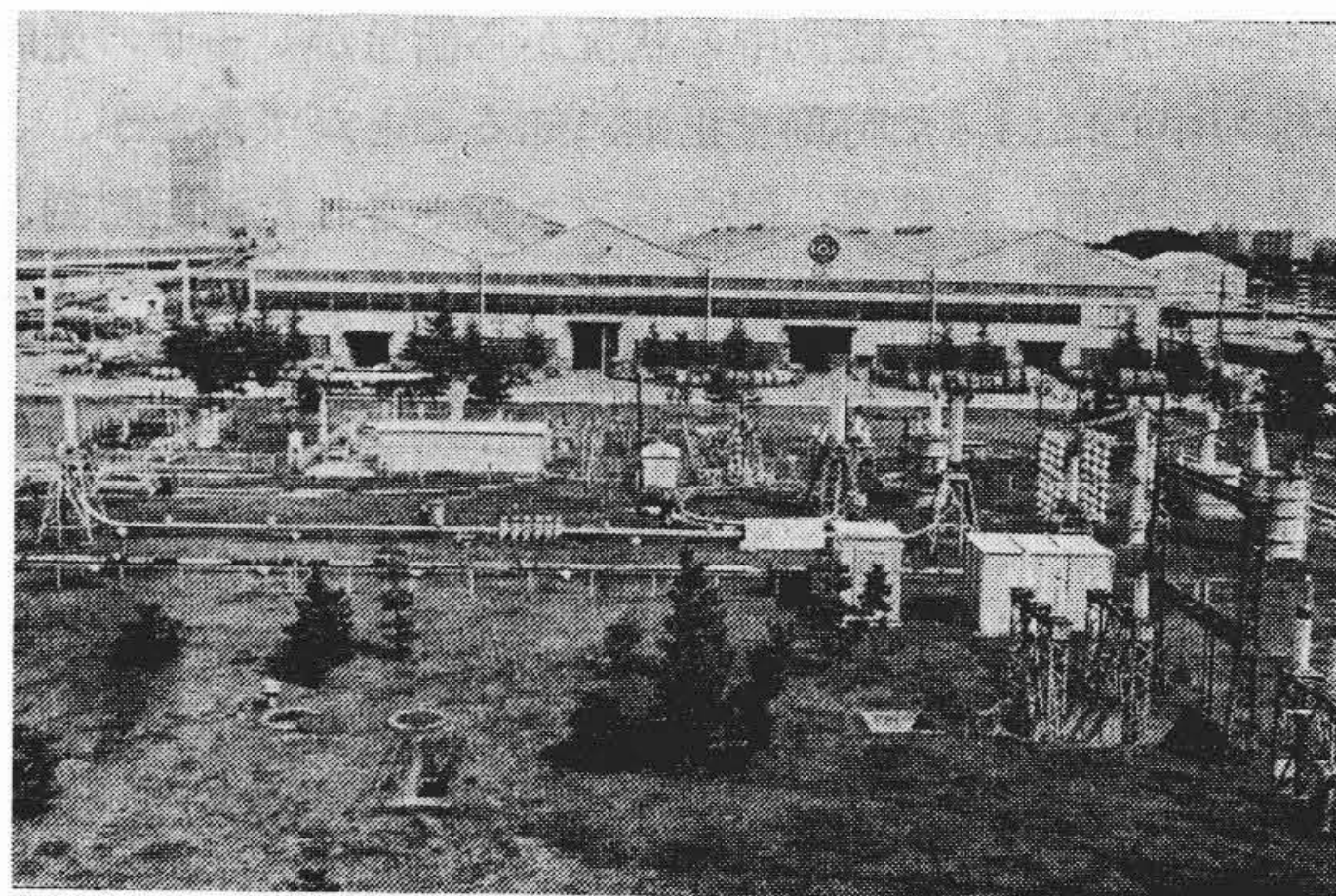
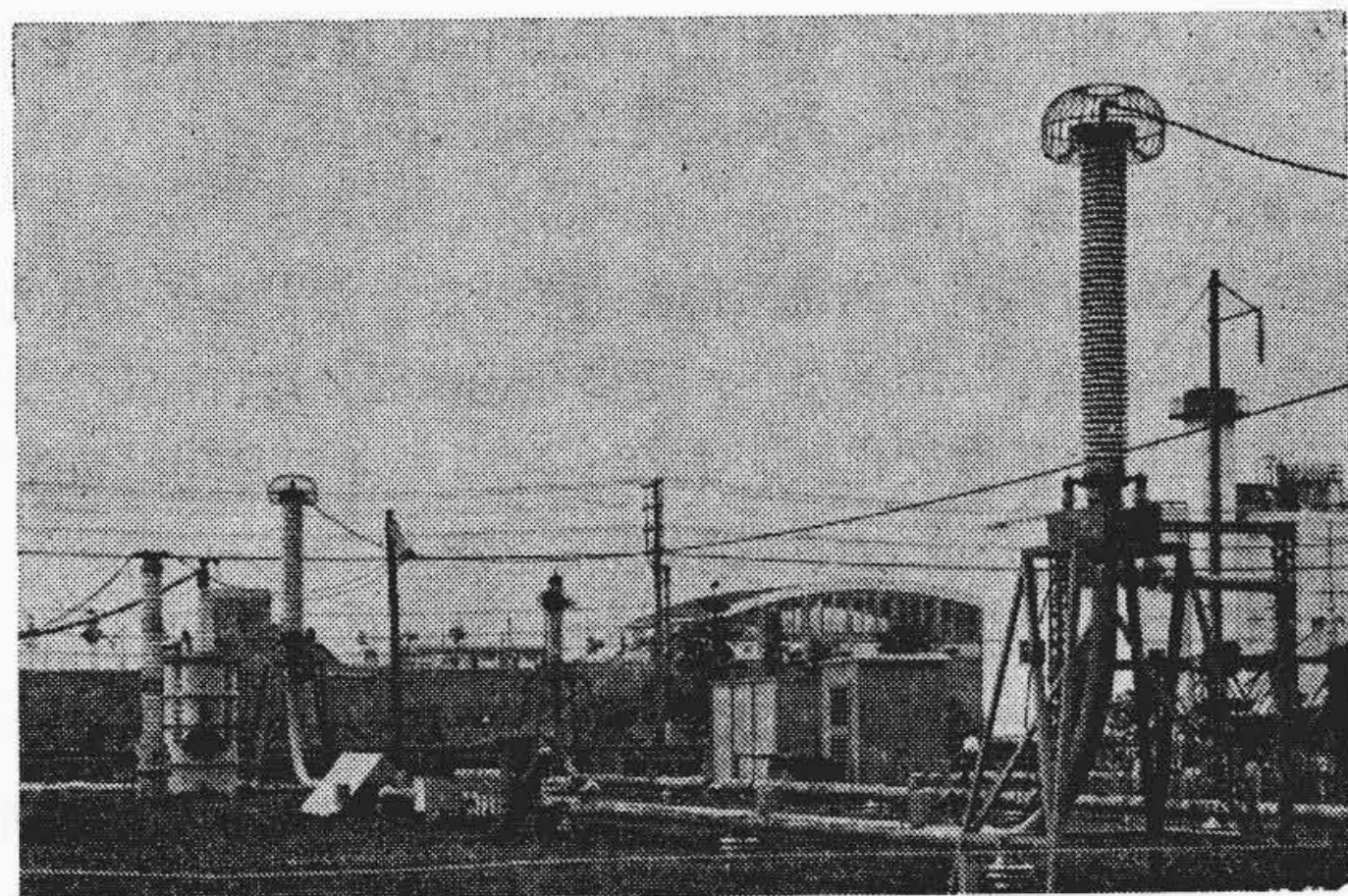
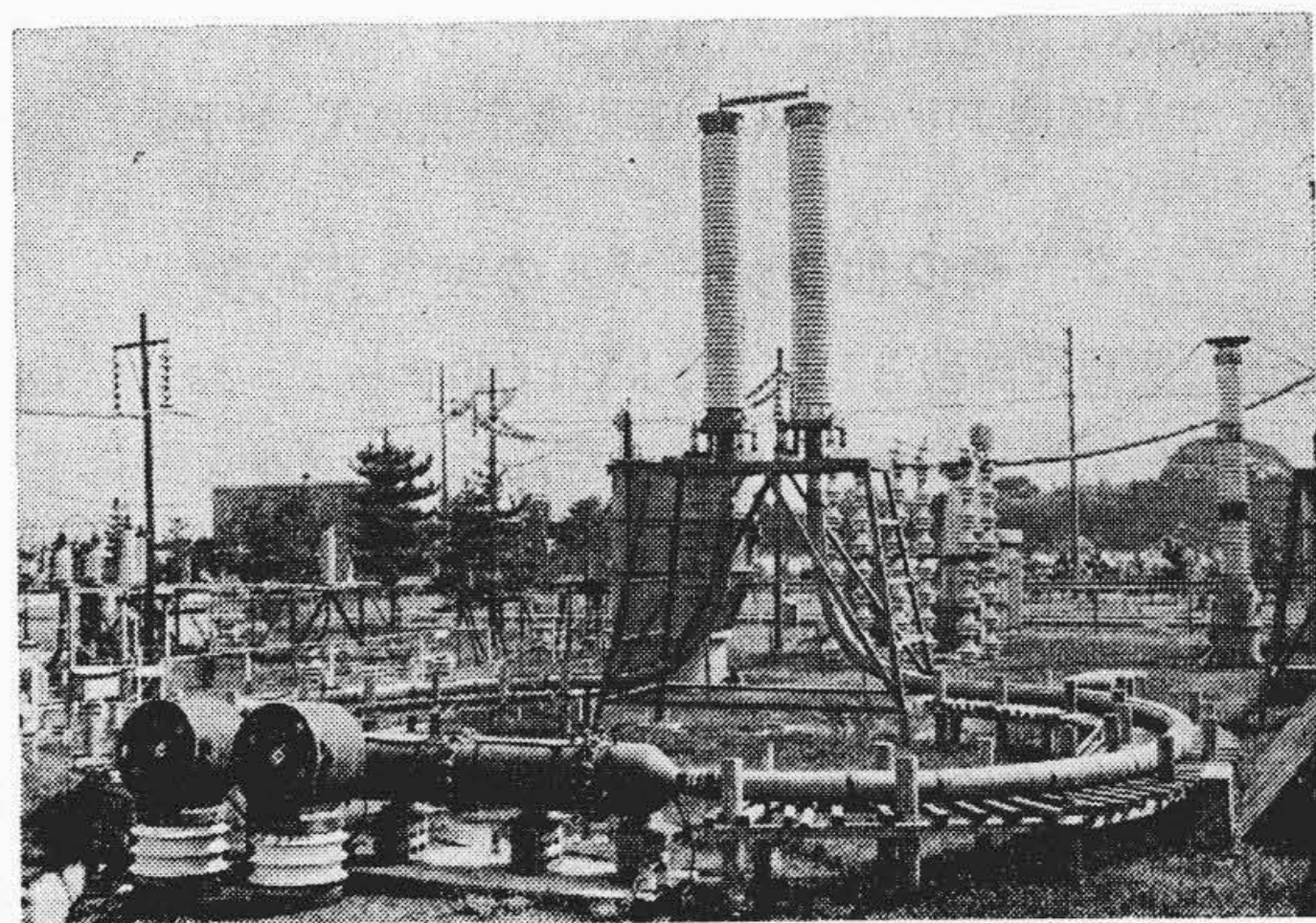
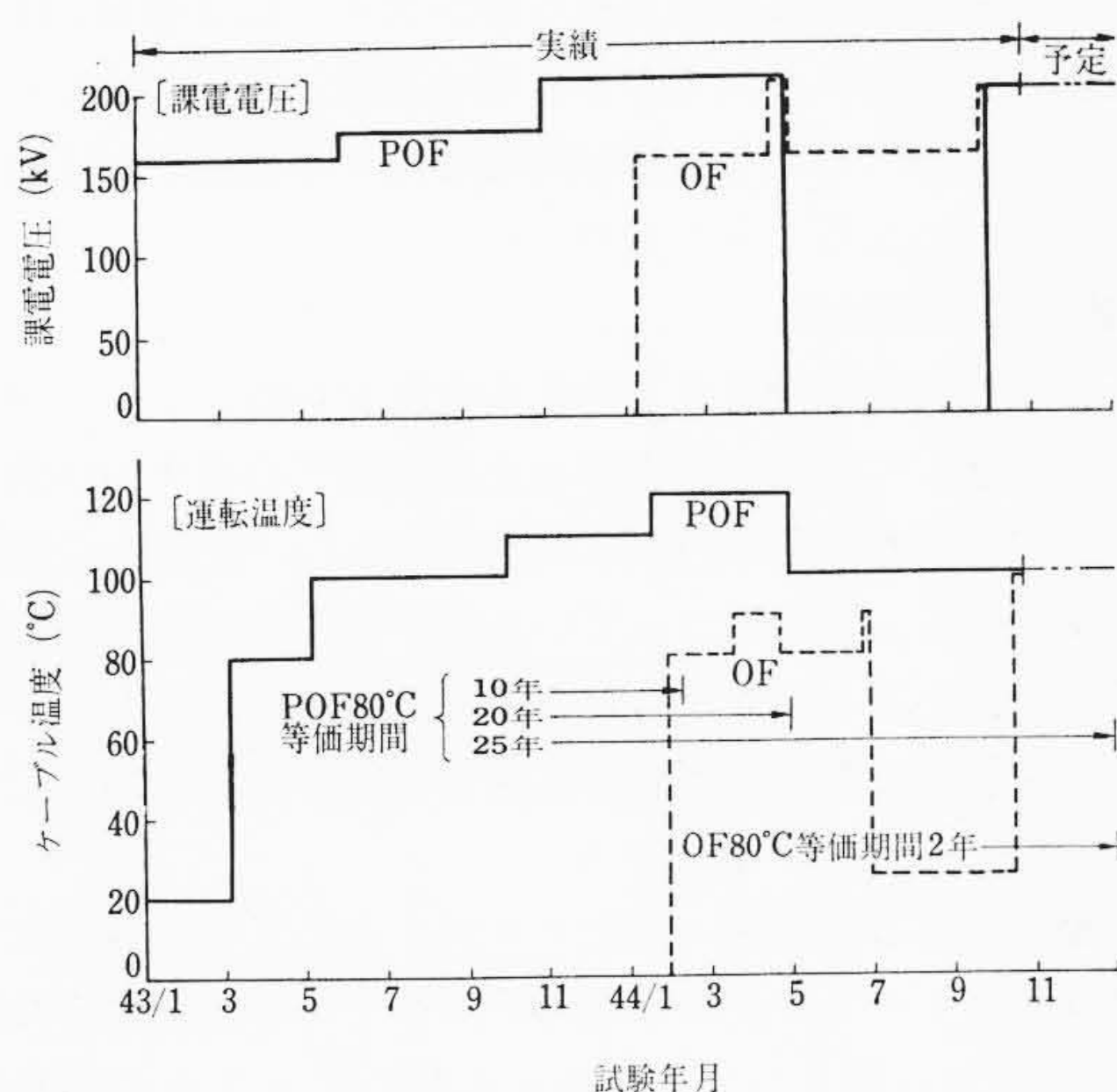


図 2 実負荷試験場全景

3.1 供 試 試 料

試験状況を示す図 3 (a) の左からコンデンサコーン形終端部—
ケーブル—準油止接続箱—ケーブル—エポキシ樹脂製ストレ
スコーン形終端部が並んでおり、全長約 50 m である。

超高圧 POF ケーブルでは、すでに 230 kV ケーブルの実負荷試験
を完了し、アメリカロスアンゼルス電気局向けに製造、納入して
いるが、これと並行して、POF ケーブルに関する脱油と吸湿⁽¹⁾、合
成絶縁油の諸特性⁽²⁾、凍結工法⁽³⁾、負荷しゃ断時の過渡油圧変化⁽⁴⁾、
漏油点検出法⁽⁵⁾など多くの問題を総合的に研究してきた。275 kV、
 $1 \times 1,400 \text{ mm}^2$ POF ケーブルはこれらの成果を生かして設計、製造
されたものでその構造は後述の 275 kV、 $1 \times 1,200 \text{ mm}^2$ OF ケー
ブルと合わせて表 1 に示されている。

図 3 (a) 1×1,400 mm² POF ケーブルおよび準油止接続箱図 3 (b) 1×1,200 mm² アルミ被 OF ケーブル
および油止接続箱図 4 275 kV POF ケーブルおよび OF ケーブルの
実負荷試験条件

絶縁紙としては、低損失であるとともに機械的特性も良好なものを採用し、絶縁油としては長期安定性のすぐれたポリブデン油（絶縁体含浸油）およびポリブデン油と重質アルキルベンゼンの混合油⁽²⁾（パイプ充てん油）を使用した。

一方、準油止接続箱の絶縁設計には、先に開発した 275 kV, 1×1,200 mm² OF ケーブル用普通接続部⁽⁶⁾の諸データを活用し、ほぼこれと同一設計とした。

また、終端接続部には、すでに多くの実績を持つコンデンサコーン形と今回の試験のために採用したエポキシベルマウス製のストレスコーン形の二つを用いた。

なお、ケーブルおよび準油止接続箱の電気特性をまとめて表 2 に

表 1 275 kV 1×1,400 mm² POF ケーブルおよび
275 kV 1×1,200 mm² アルミ被 OF ケーブルの構造

項 目	単 位	数 値	
		POF ケーブル	OF ケーブル
油通路	内 径	mm	16.0
	厚 さ	mm	0.8
導 体	公 称 断 面 積	mm ²	1,400
	形 状	—	4 分 割 圧 縮
	計 算 断 面 積	mm ²	1,200
絶 縁 体	外 径	mm	48.4
	絶 縁 厚 さ	mm	19.5
	絶 縁 紙	—	脱イオン水洗紙
絶 縁 体	カーボン紙構造	—	特 殊 構 造
	し ゃ へ い 層 厚 さ	mm	0.55
	防 湿 層 厚 さ	mm	—
	補 強 層 厚 さ	mm	—
	スキッドワイヤ	幅×高 (mm)	—
	アルミ被厚さ	mm	2.5
	ビニル防食層厚さ	mm	4.5
	概 算 外 径	mm	120
	概 算 重 量	kg/km	23,500

表 2 275 kV ケーブルとその付属品の電気特性

項 目		275 kV, 1×1,400 mm ² POF				275 kV, 1×1,200 mm ² OF				
		ケーブル		準油止接続箱		ケーブル		油止接続箱		
交流長時間破壊電圧 (kV)		680		640		660		640以上		
インパルス 破壊電圧 (kV)	常温	1,680		1,660 以上		1,660		1,650		
	80℃	1,560		—		1,580		—		
誘電正接 (%)	測定電圧 (kV)	159	318	159	318	159	318	159	318	
		0.190	0.203	0.209	0.218	0.165	0.177	0.302	0.311	
	測定温度 (℃)	40	0.178	0.190	0.193	0.202	0.156	0.171	0.282	0.291
		60	0.166	0.179	0.176	0.186	0.155	0.169	0.288	0.297
		70	0.164	0.177	0.173	0.182	0.156	0.171	0.303	0.311
		80	0.165	0.177	0.175	0.185	0.174	0.190	0.318	0.327
		90	0.172	0.186	0.191	0.202	0.197	0.212	0.340	0.348

示した。

実際の POF ケーブルでは、ケーブル本体や接続部の 3 相分を一括して 1 本の鋼管内に布設し、周囲の鉄損の低減を図っているが、今回の実負荷試験では、ケーブル部は 6 インチ鋼管、接続部は 9 インチ鋼管内に 1 相分のみ布設し、導体通電による導体損と周囲の鉄損を併用して加熱している。

ケーブルの布設ならびに接続部の施工にあたっては、とくに過酷な条件を想定し、ケーブル引入れ時の乾燥窒素ガスの吹き流し、あるいは接続工事時の調温調湿などは行なわなかった。

3.2 試 験 条 件

6. に述べる実負荷試験条件設定の考え方に沿って試験条件を決定したが、現在までの運転実績を図 4 に示した。図 4 は簡略化して示しており、実際には課電約 50 日、加熱約 90 日の休止期間を含んでいる。なお 1 日の温度変化は、43/1～43/7 の間は気温変化のみで約 10°C、その後現在までは通電電流 (500 A) の ON—OFF により約 18°C となっている。図 4 には運転温度を 80°C に換算した等価期間を書き添えた。

3.3 誘電正接測定結果

試験開始後、約 2 个月に 1 度の割合でケーブルおよび準油止接続部の誘電正接を測定しているが、現在のところ目だった変化は見ら

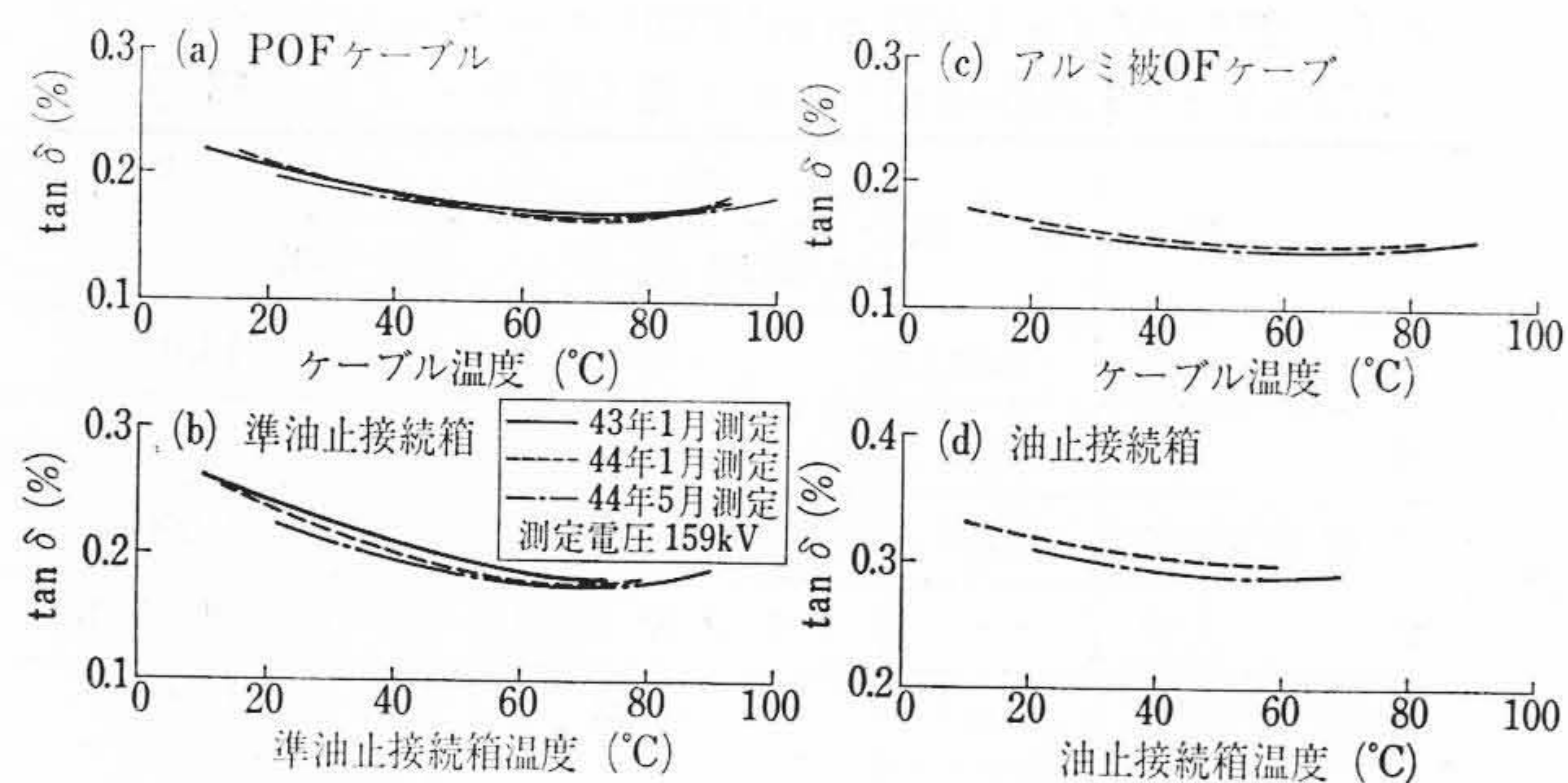


図5 275 kV, $1 \times 1,400 \text{ mm}^2$ POF ケーブルと
準油止接続箱および 275 kV, $1 \times 1,200 \text{ mm}^2$
アルミ被 OF ケーブルと油止接続箱の誘電正接

れない。測定結果の一部を示したのが図5である。測定電圧はいずれも 159 kV ($=275/\sqrt{3} \text{ kV}$) であり、また温度としては各部分の絶縁体の平均温度をとっている。

3.4 今後の試験予定

後述するように、加熱劣化の点では、供試ケーブルはすでに実線路での20年以上を経過したことになるが、この段階でも誘電正接特性は安定しており、とくに劣化の傾向は見られない。したがって当ケーブルは実線路においても長期間安定した性能を維持するものと期待される。

今後当分の間は、課電電圧 200 kV 、ケーブル温度 100°C の条件で運転を継続し、その後さらに試験条件を過酷にして当ケーブルの使用限界なども見極めたいと考える。

4. 275 kV OF ケーブルの実負荷試験

275 kV POF ケーブルに引き続いて昭和44年1月からは275 kV $1 \times 1,200 \text{ mm}^2$ アルミ被 OF ケーブルと油止接続箱の実負荷試験を開始した。試験開始後、まだ1年を経過しておらずじゅうぶんなデータは集積されていないがここにその経過を報告する。

4.1 供試試料

図3(b)は試験状況を示したものである。油止接続箱を中心として両側に、275 kV $1 \times 1,200 \text{ mm}^2$ アルミ被 OF ケーブルおよび終端接続部が配置されており、全長約35 m である。全体をループ状に布設し、導体通電のみで加熱するためケーブル部分には保温材が巻き付けられている。

275 kV アルミ被 OF ケーブルの実負荷試験としては、超高压電力研究所武山研究所において武山試験線として実施されており、日立電線株式会社も合成油(アルキルベンゼン油)を使用したケーブル本体、ならびに絶縁接続部、終端接続部の試験に参加している⁽⁷⁾。したがって社内における実負荷試験としては、以下の2点に主体をおいた。

(1) 鉱油を使用した275 kV, $1 \times 1,200 \text{ mm}^2$ アルミ被 OF ケーブル

(2) 油止接続部

すなわち、図3(b)の布設状況で右側はアルキルベンゼン油、左側は鉱油を用いたケーブルで、2種の絶縁油を中央の油止接続箱で分離している。ケーブルの構造はPOFケーブルと対比して表1にまとめられている。絶縁紙には特殊低損失紙を用いるとともに、誘電正接の電圧特性の改善のために遮蔽(しゃへい)層を特殊構造としている。

また、油止接続箱はすでに開発を終えており⁽⁶⁾、これをそのまま供試試料とした。

供試試料と同種のケーブルおよび接続部の初期電気特性は表2に示すとおりである。

OF ケーブル油止接続部の組立には3日間(8時間 $\times$ 3)を要したが、この場合にもとくに、調湿は行なわなかった。

4.2 試験条件

通電設備の都合により加速劣化を生ずるようなじゅうぶんな加熱を行なうことができなかったが、その経過は図4に併記したとおりである。1日間の温度変化は、44/2~44/5の4ヶ月間は 20°C で、その後は気温変化のみによる 10°C 程度となっている。

4.3 誘電正接測定結果および今後の試験条件

現在までに得られた誘電正接温度特性測定結果を図5(c), (d)に示した。油止接続箱の特性が初期よりもかなり低下し、改善されているが、ケーブルはほとんど変化していない。現段階ではまだケーブルについても、接続部についてもはっきりした結論を出すことができないので引き続き検討する。

なお、今後は課電電圧は 200 kV としてPOFケーブルと並列に運転するが温度は $110 \sim 120^\circ\text{C}$ 、温度変化は 20°C を予定している。

5. その他のケーブルの実負荷試験

代表的な実負荷試験として275 kV POF ケーブルおよびOF ケーブルの試験を紹介したが、これらの超高压ケーブルを開発するにあたって、66~77 kV 級ケーブルで種々の基礎的な検討を行なってきたので、それらについても付記する。

5.1 合成油 OF ケーブル

昭和40年から合成油(アルキルベンゼン油)を含浸した77 kV, $1 \times 250 \text{ mm}^2$ OF ケーブルの実負荷試験を開始した。現在も試験継続中であるが、この試験により合成油は高温、高電界下においても非常に安定した特性を維持し、超高压OFケーブル用絶縁油として最適であることが実証された。また、誘電正接の電圧特性(測定電圧が上昇するにつれて誘電正接の値が大きくなる傾向)は導体および絶縁体の遮蔽層によっており長期の課電、加熱によりしだいに改善され、実線路においても運転開始後約2年経過すればほとんど無視できる程度になることが判明した。

5.2 新形油止接続箱

超高压油止接続箱の簡易化と性能安定化を目的としてエポキシ樹脂を主絶縁体として採用した新形油止接続箱⁽⁸⁾の実負荷試験を実施している。この試験は昭和43年3月に開始し、定期的に誘電正接と内部放電のチェックを行なっているが、現在まで良好な特性を保っている。今後、さらに異なったタイプの油止接続箱を試作し、お互いの特性を比較しながら実負荷試験を行なう予定である。

5.3 プラスチック OF ケーブル

将来の超高压あるいは超々高压ケーブルとして有望視されているプラスチックフィルムを使用したOFケーブルを開発するため、すでに昭和39年から種々のプラスチックOFケーブルの実負荷試験を行なっている。

第1回の試作ケーブルは、ポリエチレン、ポリカーボネート、絶縁紙を組み合わせ、鉱油を含浸したもので、初期電気特性は、耐電圧、誘電正接の点で従来の油浸紙ケーブルよりはるかにすぐれていたが、加速劣化条件のもとで試験開始後約2年で劣化の徴候を見せたため試験を中止した。

また第2回の試作ケーブルは、ポリカーボネートとポリプロピレンを組み合わせ、鉱油を含浸したものであったが、やはり途中で試験を中止した。

解体調査の結果これらのケーブルの劣化の原因は、プラスチックフィルムの溶解とクラック発生にあることが判明した。このため改めてフィルム材料と絶縁油の組み合わせが検討され、現状ではPPO(ポリフェニレンオキサライド)フィルムとシリコン油が最適であることが明らかにされている⁽⁹⁾。

表 3 超 高 圧 ケ ー ブ ル の 劣 化

劣化の原因		ケーブルに生ずる劣化
電 圧	交 流	常時使用電圧程度の課電による劣化はないとみなす。
	異 常 電 圧	異常電圧の繰り返し印加によりケーブルの耐電圧特性はいくぶん低下すると思われるがその度合いは明確ではない。
温 度		ケーブルなどの誘電正接は課電加熱により若干低下する。絶縁紙が熱劣化を受け、物理特性は低下する。
温 度 変 化		布設ケーブルの熱伸縮により、機械的なストレスが加わり、金属シースなどが疲労する。また極端に大きい伸縮は絶縁体の損傷を引き起こす。

6. 実負荷試験条件設定に対する考え方

実負荷試験を行なう場合には、実線路で長期間にわたって生ずる劣化をできるだけ短期間に模擬できるような試験条件を選ばなければならない。

ケーブルの劣化はシート材料やモデルケーブルなどによって検討されているがまだ明確な解答は得られていない。しかし、実負荷試験を行なうにあたっては、不じゅうぶんではあってもある根拠に基づいて試験条件をあらかじめ設定しておく必要があると考えられる。

現在、われわれは今までの試験経験と文献によって以下のような考え方で試験条件を決定している。ただし、これはあくまで超高压の油浸紙ケーブルに適用するものであって、ゴム・プラスチックケーブルには別の考え方が適用されるであろうし、今後の研究によって逐次改良が行なわれるであろう。

6.1 ケーブルの劣化とその原因

実線路に布設されたケーブルはいろいろのストレスによって劣化するが、これを原因別に分類して示すと表 3 のようになる。

実負荷試験ではできるだけこれらを模擬することを考えるが、そのうちでも重要なものは絶縁体の電気特性の変化である。一方、実用上からケーブルの移動と繰り返しひずみによる金属シースの疲労などの機械的問題も無視することができない。

6.2 試験条件の決定

6.2.1 課 電 電 圧

交流電圧を長時間課電したとき、ケーブルが破壊に至るまでの時間は一般に電圧上昇とともに減少する。すなわち課電電圧の上昇により劣化が促進される傾向にある。しかし、超高压ケーブルとして採用されている OF ケーブル、POF ケーブルなどの油圧形ケーブルでこのような現象が見られるのは破壊電圧に近づいた場合であり、正常なケーブルであれば使用電圧付近の電圧では劣化の傾向は見られない。この意味では実負荷試験の課電電圧を使用電圧に等しくしておけば良いことになる。しかし、接続部などの内部には局部的な高電界が発生する個所もあり、またこれらはすべて現地で組み立てられるため、わずかな欠陥が破壊事故に結びつくこともありうる。このような欠陥を短い試験期間中に見出すには実際の運転電圧よりも高い電圧を課電しなければならない。

以上の考え方を基として、現在実施中の 275 kV ケーブルでは使用電圧の 1.3 倍を、また 66~77 kV 級のケーブルでは使用電圧の 1.5 倍を課電している。

なお衝撃電圧や開閉サージなどの異常電圧は試験設備の面から制約を受けるので任意に課電することができず、試験前と終了後にサンプル試験として衝撃電圧試験を実施するにとどめている。

6.2.2 ケーブル温度

油浸紙は材料自体に欠陥がなく、とくに過酷な温度に長時間さらされないかぎり電気特性はほとんど変化しない。たとえば、誘電正接のみを劣化の指標としているとケーブルは高温でも劣化しないことになる。しかし、実際は絶縁紙の物理特性は高温状態でしだいに変わるのでこれに着目して劣化を検討する。

絶縁紙の物理特性の変化は化学的な熱分解反応によっており、その反応速度は化学反応速度論にあてはまると考えられる。すなわち物理特性の変化にはいわゆる“ $T^{\circ}\text{C}$ 半減則”が適応でき、加熱温度が $T^{\circ}\text{C}$ 上昇するにつれて、同じ変化を生ずるのに必要な期間は半減していくものとみなされる。

油浸紙の高温における劣化にこのような考えを適用することは古くから試みられている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾が、これらを総合的にみると、油圧形ケーブルの絶縁紙の加熱劣化に対しては 7°C 半減則が導かれる。すなわち、実線路のケーブルが最高許容温度 80°C で 30 年間使用されるものとする、実負荷試験の試験条件は次式によって決定される。

$$\sum_i t_i \times 2^{\frac{T_i - 80}{7}} \geq 30$$

$$\sum_i t_i = t_{\text{total}}$$

ここに、 T_i : 実負荷試験時のケーブル温度

t_i : T_i で運転される期間

t_{total} : 実負荷試験の全期間

ただし、ケーブルの熱破壊現象の検討結果⁽¹²⁾から、 T_i の最高値は 120°C 以下としなければならない。

一方、温度変化はケーブルの機械的特性に関係し、現実が発生するケーブルの事故原因から考えると絶縁体の加熱劣化よりも重要となる場合が多い。しかし、実線路と試験線路では布設状態や条長が異なり、機械的ストレスの厳密な対比が困難となるため、実負荷試験で加速劣化を生ずるような温度変化を一定の法則で求めることはできない。したがって、現在われわれは、実線路の日間の温度変化が $6 \sim 10^{\circ}\text{C}$ であることから、これよりやや過酷な $10 \sim 20^{\circ}\text{C}$ の温度変化を与えるようにしている。

実際の試験では、以上の考え方に基づいて試験条件を決定し、その条件をできるだけ忠実に実行し、間欠的に誘電正接を測定したり絶縁油の特性をチェックして運転を続行している。

7. 結 言

実負荷試験は、試験設備、試料施工、運転管理に多くの費用と労力を要し、敬遠されがちな試験であるが、その結果得られる成果は大きく超高压ケーブルの開発に欠くことのできない試験方法となりつつある。アメリカの電力会社の一部には、ケーブルの納入にあたり長期の実負荷試験を条件としているところもあり、今後ますます安定した性能のケーブルが要求されるようになるだろう。

ここに、現在実施中の 275 kV POF ケーブル、OF ケーブルとその付属品の実負荷試験を中心として、実負荷試験状況と試験条件設定に対する考え方をまとめ、今後の超々高压ケーブルの開発とその実負荷試験への足がかりとした。

なお、本報告は、現在油浸紙ケーブル関係の実負荷試験を担当しているということで筆者がとりまとめたが、日立電線株式会社電力ケーブル部および研究所の関係者の協力による所産であり、ここに関係各位に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 千葉ほか 2 名: 電気学会東京支大, No. 284 (昭 43-10)
- (2) 遠藤ほか 2 名: 日立評論 50, 725 (昭 43-8)
- (3) 依田ほか 3 名: 日立評論 51, 747 (昭 44-8)
- (4) 安藤, 沼尻: 日立評論投稿中
- (5) 安藤: 電気学会連合大会, No. 1056 (昭 44-3)
- (6) 飯塚ほか 3 名: 日立評論 49, 563 (昭 42-5)
- (7) 飯塚ほか 4 名: 電気学会連合大会, No. 1099 (昭 42-4)
- (8) 加藤, 沼尻: 日立評論 50, 1107 (昭 43-12)
- (9) 佐藤ほか 3 名: 日立評論 51, 351 (昭 44-4)
- (10) 下山田, 常松: 日立評論 36, 1823 (昭 29-12)
- (11) M. Kurtz: Ontario Hydro Research Quarterly, Second Quarter, 1 (1967)
- (12) 安藤, 沼尻, 依田: 電気学会東京支大, No. 366 (昭 42-10)