前駆現象検出による CV ケーブル 絶縁破壊原因の解明

正 員 遠 藤

桓 (日立電線)

1. ま え が き

架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース電力ケーブル(以下、CV ケーブルと略記)は、昭和30年代後半に6kV級配電用として用いられ始めて以来、既に25年以上が経過し、現在では500kV級ケーブルとしても実用化されている⁽¹⁾。これはCVケーブルが乾式絶縁のため保守管理が容易であり、防災上からも優れているためである。ところが、CVケーブル絶縁体に用いられている架橋ポリエチレンの真性破壊強度は、500kV/mm程度⁽²⁾なのに対し、500kV級CVケーブルの平均破壊電界(G_{mean})の最低値は35kV/mm、最大破壊電界(G_{max})は50kV/mm程度とみられており、試験条件が異なるとはいえ、真性破壊強度と実ケーブル破壊強度との間に大きな違いがある。材料固有の優れた性能を引出し、CVケーブルのより一層の性能向上、信頼性向上を図るためには現状のCVケーブルの絶縁破壊原因を直接確かめ、それに対する解決策を確立することが肝要と考えられる。

CVケーブルの絶縁性能を左右する典型的な要因としては

- (1) 内部、外部半導電層の電極不整
- (2) 絶縁層内のボイド、異物
- (3) 吸湿したケーブルに生じる水トリリー⁽³⁾

などが考えられる。

ケーブルにこれらの局所的な弱点があると課電下でその部分から電気トリリーが生じ、それが次第に進展し、遂には全路絶縁破壊に至る場合があると考えられる。通常の絶縁破壊試験では破壊孔が生じるため、絶縁破壊の起点となった欠陥が焼失し、破壊原因の調査が不可能になってしまうことが多い。

破壊孔を小さくしようとする試みは、これまでも

A Study on Breakdown Triggers of XLPE Cable Insulation using Pre-Breakdown Discharge Detection Method. by Takeshi Endoh, Member (Cable Research Laboratory, Hitachi Cable, Ltd.).

遠藤 桓: 正員, 日立電線(株) 電線研究所

幾つか行われている。例えば、絶縁油の破壊試験において電極の消耗、絶縁油の汚染を軽減するためにダイバータを用いたり⁽⁴⁾、試験変圧器の一次側を短絡する方法⁽⁵⁾、供試ケーブルと直列に抵抗と高圧ヒューズを接続する方法⁽⁶⁾、あるいは試験変圧器の一次側をサイリスタにより1/2サイクル内に限流遮断する方法⁽⁷⁾、などが行われている。著者は以前にCVケーブル破壊孔の焼損を大幅に軽減できる“焼損抑制法”を開発した⁽⁸⁾。そして、この手法を用いて交流破壊試験を行ったCVケーブルの破壊孔を詳細に調査した。その結果、CVケーブルの絶縁破壊原因のおおよそを明らかにすることができた。この“焼損抑制法”は試料長が短く、破壊電界が低い(欠陥も大きい)場合には焼損が少なく、破壊原因の解明法として極めて有効であった。ところが、絶縁性能の向上した最近のCVケーブルは、破壊電界が高いため既報の“焼損抑制法”では焼損が大きくなり、破壊原因となった欠陥の解明には限界のあることがわかってきた。そこで、より微細な欠陥からの破壊をも明確化できる新たな試験法として欠陥部から絶縁破壊する場合に生じることのある電気トリリーに着目し、この電気トリリーが進展し始め全路絶縁破壊の直前に達した状態での検出を試みることにした。このため、電気トリリーの発生に伴って生じる部分放電パルス(P.Dパルスと略記)をトリグとして電源を遮断する“前駆遮断法”の検討を行った。これができるれば欠陥部の焼損という問題は無視できる程度に小さくなり、ほぼ原形状態での欠陥部摘出が可能になる。

以下にこの“前駆遮断法”の概要と、それによる実験結果について述べる。

2. “前駆遮断法”の原理

〈2・1〉 前駆部分放電現象 ポリエチレンのブロックに針を挿入し、交流電圧を課電すると針先から樹枝状の放電いわゆる電気トリリーが生じる。このトリリー

が発生すると P.D パルスも検出される⁽⁹⁾。この P.D パルスはトリ－部の放電によるもので、トリ－が進展するにつれて P.D パルスも増大する傾向にある。一般にこのトリ－は絶縁体界面の電極不整部などの局部的高電界部に生じると考えられている。著者は“焼損抑制法”による絶縁破壊原因の調査から⁽⁸⁾、ケーブル絶縁層中では電極不整部はもちろん、異物近傍部などにも高電界が形成され、それらの先端から P.D パルスを伴った電気トリ－が生じ、それが進展して絶縁破壊に至る場合もあると考えている。そこで、ケーブル絶縁層中に異物モデルとして長さ 1mm、太さ 0.1mm のステンレス鋼線をモールドし、それからの破壊現象を調べる実験を行った。図 1 (a) は異物埋込みモデルケーブルの絶縁破壊部である⁽¹⁰⁾。異物を貫通して絶縁破壊が生じているのがわかる。図 1 (b) はその破壊直前の P.D パルスの状況で、破壊の約 5 秒前から 500 pC 程度の P.D パルスが生じて破壊に至ったことがわかる。従って、この実験より絶縁層中の欠陥を起点とした破壊の場合、破壊直前にかなり大きな P.D パルスが生じた段階で電源を遮断できれば焼損のない欠陥部摘出が可能になると言えよう。

(a) SUS線埋込みサンプルの破壊孔

(b) 破壊直前 P.D の状況

図 1 絶縁体中モデル欠陥からの絶縁破壊

Fig. 1. Breakdown started from artificial defect of foreign particle in the insulation.

図 2 前駆遮断試験システム構成図

Fig. 2. Brockdiagram of pre-breakdown cut off system.

〈2・2〉 前駆遮断法 〈2・1〉 節に述べた前駆 P.D パルスを検出して電源を遮断するシステムを試作した。試作した装置のブロックダイアグラムを図 2 に示す。供試ケーブルからの前駆 P.D パルスは発生初期は小さいが、急激に大きくなって絶縁破壊に至るため、前駆 P.D パルスを検出したらできるだけ短時間で電源を遮断することが望ましい。このためサイリスタを用いた高速遮断装置で電源を遮断することにした。P.D パルスの検出は供試ケーブルが絶縁破壊するような高電界課電下で行うため、課電系その他からの局部的放電あるいは外部雑音を極力抑える必要がある。このため、供試ケーブルの P.D 検出用金属電極をケーブル中間部で 2 分割し、両電極間の外部半導電層はそのままの状態にした。これにより両電極間は、外部半導電層部分により商用周波に対する静電遮へい効果はこれまでどおり連続体として作用する一方、P.D パルスなどの高周波成分に対しては分離された部分として作用できるようにした。二つの検出電極の端子は P.D パルス検出用差動トランスに接続した。この差動トランスを用いる方式は外部雑音の抑制効果があるだけでなく、後述する欠陥位置評定のためにも便利な方法である。差動トランス出力の P.D パルスはハイパスフィルタ (10 kHz 以上) を通して増幅し、課電圧波形と共に磁気テープ式のデータレコーダおよびデジタルメモリーに記録する。P.D パルスが検出され、ある時間それが継続すると後述する破壊前駆判別部が動作して、それから電源が高速遮断する。電源遮断後にデータレコーダの波形を調べて供試ケーブルからの前駆 P.D パルスであることを確認する。

図 3 は破壊前駆判別部のブロックダイアグラムである。図 2 に示したアンプ出力の P.D パルスは絶対値増幅回路により単極性パルスに変換され、一方は可変積分回路を通して、もう一方はそのまま AND 回路

図 3 前駆現象判別装置構成図

Fig. 3. Block diagram of pre-breakdown recognizing circuit.

表 1 課電圧位相と P.D 極性の関係

Table 1. Relation of phase of imposed voltages and partial discharge polarity.

課電圧位相 (ラジアン)	$0 \sim \frac{\pi}{2}$		$\frac{\pi}{2} \sim \pi$		$\pi \sim \frac{3}{2}\pi$		$\frac{3}{2}\pi \sim 2\pi$	
P.D パルス極性	正	負	正	負	正	負	正	負
発生電極側	左	右	右	左	右	左	左	右

入力端に接続される。この状態で 2 pC 以上の P.D パルスが毎サイクルに 1 発以上継続するとほぼ 0.3 秒後に AND 回路が動作してトリガパルスを発生し、電源遮断制御回路が動作して電源が半サイクル以内に高速遮断する。このようにして試験場近くで使用しているスイッチの開閉などで発生する単発性外部雑音により、遮断装置が誤動作するのを防いでいる。しかし、それだけ判別時間が費やされ、遮断に動作遅れが生じてくることになる。

〈2・3〉 前駆放電位置の標定 前駆放電の発生を確認したら次に発生個所の位置標定を行う。表 1 は差動法で検出した P.D パルスの極性と P.D 発生側電極の例を示したもので、P.D パルス極性と発生側電極の関係を事前に確めておけば、各電圧位相での P.D パルス極性から発生側電極が求まる。

P.D 発生側電極を確認したら発生側電極を 2 等分して接続し（非発生側電極は接地）、再び課電して P.D を発生させ、上述した方法と同じ要領で発生側電極を標定する。このような標定作業を 10 回前後行って P.D 発生位置を 20~30 mm の範囲に追い込み、その部分を切出す。切出したケーブル絶縁層をスライスして顕微鏡観察し、破壊前駆状態を示す電気トリの生じた欠陥部を摘出する。

3. 前駆遮断実験

〈3・1〉 針状欠陥を設けたケーブルによる予備実験 ケーブルの前駆遮断実験に先立ち、ケーブルの外部半導電層側から針を刺して電極不整モデルを作った試料（針刺しケーブル）による前駆 P.D パルスの検出実験を行った。

供試ケーブルは絶縁体厚さ 4 mm、導体サイズ 38 mm²、内部、外部半導電層押出式の 6 kV 級試作 CV

(a) 20 kV における P.D

(b) 針先からの電気トリ発生

図 4 針刺し 20 kV 課電サンプルの状況

Fig. 4. Specimen stick with a needle and tested at 20 kV.

ケーブルで絶縁体内径 11 mm、外径 19 mm である。供試ケーブル長は 10 m とした。このケーブルに 20 kV を課電したところ P.D パルスが発生し、1 分間経過後に電源が遮断した。このときの P.D パルス発生状況を図 4 (a) に、針挿入部絶縁体を図 4 (b) に示す。同図よりわかるように針先から電気トリが進展し、破壊前駆状態になっている様子が観察された。これより、試作した本実験システムは予想どおりの動作をすることが確認された。

〈3・2〉 絶縁体厚さ 4 mm の試作 CV ケーブルの前駆遮断実験

(1) 未劣化ケーブル（実験 No. 1~No. 3）

実験 No. 1: 供試ケーブルとして〈3・1〉節の予備実験の場合と同じ絶縁体厚さ 4 mm の試作 CV ケーブルを用い、長さは 40 m とした。課電圧は 10 kV/10 分の昇圧ステップとした。このケーブルは 110 kV ($G_{\text{mean}} = 28 \text{ kV/mm}$) 課電中に P.D パルスが生じて前駆遮断された。データレコーダに記録された波形を調べた結果、図 5 (a), (b) に示すように P.D パルスが生じて 4.4 秒後に電源が遮断されたことがわかった。P.D パルスは 10 サイクルに 1 発程度の間欠的なもので、最大電荷は 50 pC であった。〈2・3〉節に述べた要領であらかじめ調べておいた課電圧位相と P.D パルス極性との関係から P.D パルス発生側を求め、発生側電極を 2 等分して差動検出回路に接続し、非発生側電極は接地した。再課電したところ、50 kV で再び P.D パルスが発生したので電源を遮断した。このような発生位置標定作業を 10 回繰返し、最終的に前駆放電発生部を長さ 25 mm の範囲に追い込み、その部分のケーブルを切出した。切出したケーブル片をスライスカットして顕微鏡観察したところ、図 5 (c) に示すような破壊前駆状態の電気トリが観察された。この電気トリは絶縁体厚さの 40% まで進展

図 5 4 t, 110 kV 前駆サンプルの状況
Fig. 5. Pre-breakdown of 4 mm thickness specimen at 110 kV.

図 6 4 t, 140 kV 破壊サンプル前駆 P.D パルス

Fig. 6. Pre-breakdown P.D pulses at 140 kV of 4 mm thickness specimen.

していた。トリ発生起点になった欠陥は図 5 (d) に示すような繊維状の異物であった⁽¹¹⁾。

実験 No. 2: 全長 6.5 m の供試ケーブルによる実験を行った。この試料は 140 kV ($G_{\text{mean}}=35 \text{ kV/mm}$) 課電中に P.D パルスが生じて絶縁破壊した。この試料の P.D パルスの状況を図 6 に示す。P.D パルス発生後約 2 サイクルでの絶縁破壊であった。破壊直前の P.D パルスの大きさは 120 pC であった。この実験により、高電界課電下では前駆部分放電の継続時間は非常に短い場合のあることがわかった。前駆放電の継続時間が短い場合、前駆遮断のためには高速遮断が不可欠であり (通常遮断では約 10 サイクル要す)、破壊

図 7 位置評定ワーク中の破壊例

Fig. 7. An example of breakdown during localizing process.

前駆判別部の動作も極力高速化する必要があることがわかった。

実験 No. 3: 全長 50 m のケーブルによる実験を行った。このケーブルは課電圧 70 kV ($G_{\text{mean}}=18 \text{ kV/mm}$) で P.D パルスが生じ前駆遮断した。この場合の P.D の状況を図 7 (a) に、また遮断直前の状況を図 7 (b) に示す。遮断は P.D パルス発生 6.7 秒後であった。P.D パルス発生位置標定作業のため再課電したところ、50 kV で P.D パルスが間欠的に生じ、データレコーダへの記録が済んだので電圧を降下させていたところ、降下中の 40 kV で絶縁破壊してしまった。この値は最初の P.D 発生電圧の 60% 程度であり、このように低い電圧でも短時間で絶縁破壊に至ってしまったことになる。このサンプルの破壊孔を図 7 (c) に示す。この場合、高速遮断であったが静電エネルギーが大きかったため破壊孔が図のように太くなり、破壊原因は確められなかった。

(2) 浸水課電劣化ケーブル (実験 No. 4) 未劣化ケーブルに 60°C のヒートサイクルを加えつつ課電圧 50 kV (50 Hz)、期間 1 年間の浸水課電劣化試験を行ったケーブルに対する前駆遮断実験を行った。

実験 No. 4: 供試ケーブルとして全長 8 m の上記浸水課電劣化ケーブルを用いた。このサンプルは 70 kV 昇圧直後に前駆遮断した。P.D パルスの発生状況を図 8 (a), (b) に、摘出した P.D 発生部を図 8 (c) に示す。同図から明らかなように P.D の発生は、内部

図 8 4 t, 70 kV 前駆遮断サンプルの水トリー
Fig. 8. Water tree at 70 kV pre-breakdown of 4 mm thickness specimen.

半導電層界面から約 0.3 mm の位置にあった絶縁体中異物から生じたボータイ状水トリーからのものであった。

〈3.3〉 絶縁体厚さ 6 mm の試作ケーブルの前駆遮断実験 絶縁厚さ 4 mm のケーブルによる実験に続いて絶縁厚さ 6 mm, 導体サイズ 100 mm², 内外半導電層押出タイプの 22 kV 試作 CV ケーブルを用いて実験を行った。課電圧は 15 kV/10 分の昇圧ステップとした。

(1) 未劣化ケーブル (実験 No. 5)

実験 No. 5: 全長 4.5 m の供試ケーブルを用いて実験した。この試料は 170 kV 課電時に前駆遮断した。P.D パルスの発生状況を図 9 (a) に示す。遮断直前の P.D パルスの大きさは約 90 pC であった。摘出した欠陥部を図 9 (b) に示す⁽¹²⁾。電気トリーの起点になった欠陥は大きさが約 150 μm の異物であった。

(2) モデル欠陥ケーブル (実験 No. 6~No. 7)

ケーブルに人工的欠陥を設けた場合の破壊前駆現象を調べる実験を行った。実験は〈3.3〉節(1)項に述べた絶縁厚さ 6 mm の CV ケーブルを用いて行った。

実験 No. 6: ケーブル外部半導電層を削除し, 絶縁層外面に擦過傷をつけてモデル欠陥とし, その外側に未架橋の導電性テープを巻いてから加熱架橋させ

図 9 6 t, 170 kV 前駆遮断サンプル
Fig. 9. 170 kV pre-breakdown of 6 mm thickness specimen.

た。このモデル欠陥部を含むケーブルの前駆遮断実験を行った。このサンプルは 160 kV で前駆遮断した。その P.D パルス発生状況を図 10 (a) に示す。P.D パルスが生じてから 17 秒後の遮断であった。遮断直前の P.D パルスを図 10 (b) に示す。

P.D パルスの大きさは約 60 pC であった。この図よりわかるように半サイクルに 1 発の P.D パルスが生じており, 放電の発生頻度はかなり多かった。摘出した欠陥部を図 10 (c) に, またその拡大を図 10 (d) に示す。電気トリーの起点は外傷模擬モデル欠陥部であった。

実験 No. 7: 供試ケーブルの絶縁層を内部半導電層の表面までテーパ状に削り取り, その表面に突起を模擬したモデル欠陥を作り, その外側に未架橋ポリエチレンテープを手巻きして絶縁層とし, これを加熱モールドして絶縁層とした。この内導モデル突起を含むケーブルを試料として試験を行った。その結果, 90 kV において前駆遮断した。P.D パルスの状況を図 11 (a) に示す。小さい P.D パルスが次第に増大している様子がわかる。遮断直前 P.D パルスは約 60 pC で, その発生状況を図 11 (b) に示す。摘出した欠陥部を図 11 (c) に示す。前駆トリーの起点はモデル欠陥として設けた内部半導電層界面の突起であった。

〈3.4〉 絶縁体厚さ 11 mm の供試ケーブルの前駆遮断試験 (実験 No. 8) 絶縁体厚さ 6 mm のケーブルによる実験に引続き, 絶縁体厚さ 11 mm, 導体サイズ 100 mm² の 66 kV 級試作 CV ケーブルに対する前

図 10 6 t, 160 kV 前駆遮断サンプル

Fig. 10. 160 kV pre-breakdown of 6 mm thickness specimen.

駆遮断実験を行った。試料長は 8.5 m である。これは 280 kV, 6 分課電後に前駆 P.D パルスが生じた。前駆 P.D パルスの状況を図 12(a) に示す。遮断直前の P.D パルスの様子を図 12(b) に示す。P.D パルスは 3.8 pC であった。このサンプルの課電履歴を図 12(c) に示す。摘出した欠陥部を図 12(d) に、またその欠陥部拡大を図 12(e) に示す。欠陥は繊維状異物であった。

4. 実験結果の検討

〈4・1〉 CV ケーブルの破壊原因について 数種の試作 CV ケーブルを用いて前駆遮断実験を行った結果について述べた。

図 13 は〈3・3〉節に述べた絶縁体厚さ 6 mm のケーブルについて“前駆遮断法”と従来の“焼損抑制法”とによる“破壊孔”の太さを比較したものである。“破壊孔”の性状には明確な差が現われており、前駆遮断法で検知されるような微細な欠陥は従来の焼損抑制法では焼失してしまい、検知不可能であることが容易に

図 11 モデル内導突起からの前駆トリート

Fig. 11. Pre-breakdown tree started from artificial uneven electrode.

推定される。

今回の一連の前駆遮断実験によりケーブルの破壊原因の幾つかを直接解明できたが、本実験の結果によると、破壊原因は絶縁層中の異物あるいは水トリートであった。絶縁層中の異物の有害性については従来からその可能性が言われてきたが、今回の実験によりそれを明確にすることができた。本実験に用いたケーブルは汎用の CV ケーブルに比べて破壊電圧の低い試作ケーブルであり、本実験で得られた結果が汎用ケーブルの破壊原因と対応するの可否かは明らかでない。

しかし、いずれにしても絶縁体中の異物が原因で CV ケーブルが絶縁破壊する場合があるということが確認され、絶縁層中の異物除去が重要なことが再確認された。

〈4・2〉欠陥部の挙動 本前駆遮断実験により P.D パルスの挙動が明らかになってきた。また P.D パルスについて幾つの特徴も認められた。すなわち、図 5, 図 9, 図 12 に示したように絶縁層内異物からの電気トリート発生に伴う P.D パルスは発生頻度が少なかった。一方、半導電層（電極）からの P.D パルス（図 4, 図 8, 図 10 のサンプル）はそれより若干発生頻度が多かった。このように欠陥によって P.D

パルスの発生頻度の特徴があるので、P.D パルスの解析から欠陥の種類を推定できる可能性がある。

図 12 11 t, 280 kV 前駆遮断サンプル
Fig. 12. 280 kV pre-breakdown of 11 mm thickness specimen.

図 13 6 t サンプルの破壊孔比較
Fig. 13. Comparison of breakdown parts of 6 mm thickness specimen.

図 14 は前駆 P.D パルスが発生し始めてから絶縁破壊までの前駆期間と、そのときの平均電界との関係を示したものである。絶縁破壊しなかったサンプルの場合には正確な期間は求まらないが、その傾向は表れていると言えよう。同図よりわかるように、前駆期間が 1 秒以上（平均電界強度がほぼ 25 kV/mm 以下）の場合には前駆遮断にはほぼ成功している。しかし、ばらつきが大きく、例えば 66 kV CV ケーブルの場合、同じ破壊電圧 (32 kV/mm) でも 0.02 秒 (1 サイクル) で絶縁破壊してしまう場合と 12.6 秒でも破壊しない例があった。これは絶縁層中の欠陥位置とか欠陥の種類、形状などの特徴が反映されているためと考えられる。なお、今回の実験では供試ケーブルの絶縁体厚さが 4 mm から 11 mm までほぼ 3 倍異なっているが、前駆期間に明確な差はみられなかった。

なお、実用 CV ケーブルの運転電界は 10 kV/mm

図 14 絶縁破壊強度と前駆期間との関係
Fig. 14. Relation between dielectric breakdown strength vs pre-breakdown period.

図 15 異物の大きさと破壊電界との関係
Fig. 15. Relation between magnitude of foreign particles and dielectric breakdown strength.

以下の場合が多く、この場合には電気トリートが生じてから絶縁破壊までの時間が day のオーダーとなりうるとみられ、本手法を絶縁破壊の予知技術として応用することも考えられる。

図 15 はこれまでに焼損抑制法および今回の前駆遮断法により得られた絶縁破壊部の欠陥の大きさと、その位置における周囲電界強度との関係をまとめたものである。同図よりわかるように異物の大きさに対する破壊電界のばらつきはかなり大きい。これは異物の種類、形状、電界方向に対する影響度合い（異物先端の電界集中度合い）などが各々異なるためであろう。

5. ま と め

以上、前駆遮断法による CV ケーブルの絶縁破壊原因説明の実験結果について述べた。これらをまとめると次のようになる。

(1) CV ケーブルの局部的欠陥から交流破壊直前に破壊前駆現象としての部分放電パルスの発生と、それによる電気トリート発生のため短時間で絶縁破壊に至る現象のあることを確かめた。

(2) 上述した破壊前駆部分放電パルスを検出して、電源を遮断する前駆遮断法を開発した。また部分放電パルスの差動検出を繰返すことにより、約 20 mm の精度で欠陥部位置標定できることを確かめた。

(3) 本前駆遮断法は破壊前駆部分放電パルスを検出する方式のため、電気トリートが生じて破壊直前になっている欠陥部を摘出することになる。このため電気トリートを伴ったその部分の有害性は明白である。

(4) 絶縁層中の異物の有害性を明らかにし、異物が大きいほど破壊電界が低下することを定量的に確かめた。

(5) 前駆部分放電が生じてから破壊に至るまでの前駆期間は絶縁体の平均電界強度に強く依存し、交流の平均破壊電界 (G_{mean}) が 25 kV/mm で約 1 秒で、電界上昇により急激に短くなることがわかった。

(6) 本前駆遮断法により摘出されたケーブル中の欠陥部には単に、数 μm の電気トリートの発生こん跡があるだけでほとんど損傷しておらず、このため更にその欠陥部の詳細分析を行うことが可能である。

最後に本研究に関し御指導、御援助をいただいた日立電線(株)技術開発本部 依田常務、電線研究所 永野所長に、また電線研究所第 1 部 関井部長、第 3 部 安藤部長、日高工場電技部 池田部長に感謝いたします。

(昭和 62 年 12 月 14 日受付)

文 献

- (1) OHM 社:「世界初の 50 万 V CV ケーブルを実用化」OHM, p. 11 (昭 62-9)
- (2) 家田:「高分子物質の絶縁破壊」, 固体物理, 6, 19 (昭 46-10)
- (3) 遠藤・関井:「浸水課電劣化 CV ケーブルの破壊原因」, 昭 54 電気学会東京支大, No. 151
- (4) R. R. Opoku & J. H. Mason: "A solid state current diverter for AC electric strength tests", *J. Phys.*, E5, 750 (1972)
- (5) 小野・小島:「瞬時遮断耐電圧試験装置による CV ケーブルの破壊試験」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-77-2 (昭 52-7)
- (6) F. H. Kreuger & Bentrelsen: "Breakdown Phenomena in Polyethylene Insulated Cable", CIGRE, No. 21-05 (1972)
- (7) 清水・小椋:「サイリスタによる短絡電流抑制効果について」, 中部電力(株)総合技術研究所研究報告書電気第二(研) No. 89 (昭 56-6)
- (8) 遠藤:「新しい焼損抑制法による CV ケーブルの破壊原因の解明」, 電学論 A, 103, 29 (昭 58-4)
- (9) 井上, 他:「ポリエチレン類の耐トリート性」, 大日本電線時報, 第 44 号, p. 29 (昭 45-3)
- (10) 遠藤:「埋込み欠陥によるポリエチレンの絶縁破壊現象」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-83-44, p. 83 (昭 58-5)
- (11) 遠藤:「CV ケーブルの破壊前駆現象の検討」, 電気学会電気絶縁材料シンポジウム, 19, 265 (昭 61-10)
- (12) 遠藤:「CV ケーブルの絶縁破壊現象」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-87-31, 87 (昭 62-3)