UDC 621.315.211.015.533: 621.315.616.96
678.742.2

論 文

49-B 47

架橋ポリエチレン電力ケーブルの水トリー

電力中央研究所 福 田 正

電力中央研究所 鈴 木 貞 雄

九州電力株式会社 後 藤 浩 文

1. ま え が き

最近、海底または周囲に水が存在するような環境において数年間使用後回収された定格電圧 3.3~6.6kV 級の架橋ポリエチレン電力ケーブルの絶縁体に、白色または茶褐色の扇形ないしは紡錘形のトリー状のこん跡が発見されている。⁽¹⁾ またアメリカにおいても定格電圧 15kV ないしは 18kV のポリエチレン電力ケーブルに、同様なトリー状のこん跡が発見されたことについての調査結果が発表されている。^{(2)~(4)}

これらのケーブルの使用状態の調査及びその後各所で行なわれているモデル実験などの結果から、このトリー状のこん跡はケーブル絶縁体中に高電界と水とが共存している場合に限り発生するということが判明し、これを一般に水トリーと呼んでいる。

従来、このトリー状のこん跡については、いわゆる電気トリーが唯一のものであり、わが国ではこの電気トリーに関する研究が盛んであり、特にエポキシ樹脂及びポリエチレンをサンプルとした研究結果が多数発表されている。

最近、この電気トリーとは別に、硫化水素のふんい気中に置かれた架橋ポリエチレンケーブルに発生するいわゆる化学トリーについて発表があり、⁽⁵⁾ これは課電されていなくても発生するものである。

水トリーはこれらの電気トリー及び化学トリーとはまた別のもので、水及び高電界が共存しなければ発生

しないことに特徴がある。これまでに水トリーが直接の原因で架橋ポリエチレンケーブルが絶縁破壊事故を起こしたケースは比較的少ないが、⁽¹⁾⁽⁶⁾⁽¹⁴⁾ 架橋ポリエチレンケーブルは現在増々その使用範囲及び使用量が増大しており、したがって、海底ケーブル及び水の存在するところで使用される可能性も増大すると考えられるので、水トリーという新しい形態のトリーが架橋ポリエチレンケーブルの絶縁性能に及ぼす影響について検討しておく必要がある。しかしながら、ポリエチレンなど絶縁材料のシートによる水トリーの実験結果については多少の発表はあるが、実ケーブルについての結果はきわめて少ない。

このため、筆者らは水トリーの発生箇所及び形態などの発生実態を調査するとともに、95°C の温水中で 14,000 時間の連続課電により加速劣化させた定格電圧 6.6kV の実用架橋ポリエチレンケーブルについて劣化時間、水トリーの進展程度及びケーブルの絶縁特性相互間の関係を調べ、さらに、営業運転中に水トリーが発生した搬去ケーブルについて、その絶縁破壊電圧を測定し、水トリーがまだ発生していないものと比較し、あわせて数少ない絶縁破壊電圧のデータからではあるが $V-t$ 特性についても一応検討したので、これらの結果について述べる。

2. 水トリーの発生機構

現在、水トリーの発生ならびに進展機構を解明するために、シートまたはブロック状のポリエチレンについて種々な実験が各所で行なわれているが、まだ十分に解明されていない。

先にも述べたように、水トリーはケーブル絶縁体中の高電界を発生する所に水が存在しなければ発生しな

Water Trees in Cross-Linked Polyethylene Power Cables. By T. FUKUDA, Member, S. SUZUKI, Member (Central Research Institute of Electric Power Industry) & H. GOTO, Member (Kyūshū Electric Power Company).

福田 正: 正員, 電力中央研究所
鈴木貞雄: 正員, 電力中央研究所
後藤浩文: 正員, 九州電力株式会社

いものである。架橋ポリエチレンケーブルの内部及び外部半導電層に不整があったり、絶縁体中に異物やボイドが存在すると、これらで高電界を発生することがある。また架橋ポリエチレンケーブル中に水が存在する可能性として以下の三つの場合が考えられる。すなわち

(i) ケーブル製造中にはいったもの。

(ii) ケーブルの端末ないしは接続の処理方法が不十分なため、ここからはいったもの。

(iii) 運転使用中にケーブル外周の水が何んらかの原因でケーブル内部にはいったもの。

このうち、(i)はケーブルを薄く輪切りにした状態で、その絶縁体中にいわゆる白濁リング〔第1図(a)矢印〕として観察されるもので、水を含んでいる部分が白濁のリング状に見えることがある。現在の架橋ポリエチレンケーブルの製造方法ではある程度の水分が絶縁体中に入るとは避けられないが、この程度の水はケーブル運転による温度上昇により外周に散逸することもある。ケーブル絶縁体中に水トリーが発生する原因にはならないとされている。⁽⁷⁾ (ii)はこれにより架橋ポリエチレンの導体内に水が浸入すると、水トリー発生の可能性は増大するが、接続方法を十分注意して行えばこの心配はないはずである。(iii)については、水の存在する側の温度が導体側の温度より高い場合には、温度の低い導体側にケーブル外周の水は浸透しやすいが、営業運転中のケーブルではちょうどこれと反対な温度こう配になっているので、外周の水がケーブル絶縁体に浸透しにくいとされている。⁽⁸⁾ これに対して、外周の水がケーブル絶縁体中に浸透する可能性として水の拡散が考えられるが、定格電圧 6.6kV 級の実用架橋ポリエチレンケーブルの絶縁厚さでは、ケーブル使用年限程度では問題にされていない。ただ、最近になって田中氏は、電界を加えた場合の水の透過の理論的解明について、水トリーの特徴である不平等交番電界における物質の移動を誘電泳動という理論で説明し、かつ実験的にその物質移動を確かめている。⁽⁹⁾ したがって、ケーブル周囲に水が存在していると電圧がかかっている限りは、絶縁体中に水がはいってくることになる。

以上のように運転中の架橋ポリエチレンケーブルでは高電界と水が共存する可能性があることはわかったが、この水と高電界からどんな理由で水トリーが発生しかつ進展するかということについてはまだ定説はない。これについては、現在、内部放電説、異常電界説(絶縁体中の異物・ボイドにおけるものも含む)、電気力説(たとえば、Maxwell Stress)、応力きれつ説(た

えば、Stress Cracking)、温度こう配説、熱破壊説などの諸説が考えられている。

3. 水トリー発生の実態

〈3・1〉発生箇所 架橋ポリエチレンケーブルにおける水トリーの発生箇所は、そのほとんどが内部半導電層からで一部外部半導電層ならびに絶縁体中の異物及びボイドからでているものもある。第1図(a)は内部半導層から、同じく(b)図は外部半導電層からそれぞれ発生している水トリーの拡大写真である。(黒く内、白はん部分) 同じく(c)図及び(d)図は絶縁体中の異物から発生している水トリーの顕微鏡写真である。(この場合、水トリーは透過光で影響すると黒色に、反射光で影響すると白色に写る) また第2図は第1図(a)の水トリーの顕微鏡写真で、水トリーの全長は約 0.6mm である。なお、ボイドからの水トリーについても数は非常に少ないが発見されている。

(a)図及び(d)図に示す水トリーの発生した架橋ポリエチレンケーブルは、定格電圧 6.6kV の海底ケーブル(ビニルシースなし)で3年間営業運転したものである。(b)図及び(c)図に示す水トリーの発生した

(a) 内部半導電層から発生したもの (b) 外部半導電層から発生したもの
(c) 絶縁体中の異物から発生したもの (d) 絶縁体中の異物から発生したもの

第1図 架橋ポリエチレン電力ケーブルにおける水トリー

Fig. 1. Water trees in cross-linked polyethylene power cables.

第 2 図 水トリーの顕微鏡写真

Fig. 2. Microscope photograph of water trees.

第 3 図 加速劣化によりより線導体の先端から発生している水トリー

Fig. 3. Water trees from top of conductor segments in developed laboratory.

架橋ポリエチレンケーブルは、定格電圧 3.3kV で、ケーブル周囲に多量の水が存在していた化学工場構内の直埋ケーブル（ビニルシースあり）として 10 年間使用したものである。

このうち、水トリーが内部半導電層から発生している場合は、そのすべてが電極不整の箇所から発生している。電極に不整がなければ、研究室での加速劣化試験結果によると非常に高い電圧（たとえば、運転電圧 E_0 の 4 倍）を印加した場合、第 3 図に示すようにより線導体の各凸部から水トリーが発生している。したがって、いずれの場合にも電界強度が最も高いと考えられる所から水トリーが発生していることが推定される。

〈3・2〉形状 水トリーの形状は、前掲の写真からもわかるように、だいたい扇形もしくは紡錘形である。これは従来から電気トリーとして知られているトリー及び最近発見された化学トリーで見られるいわゆるブッシュ状のトリーとは明らかにその形状が異なっている。

〈3・3〉水の存在の確認 水トリーの中に水分が存在することは、ケーブル絶縁体中の水トリーの発生していない部分と発生している部分とを、第 4 図に示すように赤外線吸収スペクトルでしらべて確かめた。

第 4 図 赤外線吸収スペクトルによる水トリーの有無の比較

Fig. 4. Comparison by infrared spectra of specimen with water trees.

すなわち水トリーの発生しているものは、矢印の所に水分が検出されている。

さらに、水トリーの発生している部分を、厚さ 0.5 mm の試料片としてケーブル絶縁体から切り取り、これをデシケータ中に入れて 1mmHg 以下で 1 週間真空に引いた後この試料片を観察した所、水トリーのこん跡はほとんど消えていたが、引続きこの試料片を水中に浸漬した状態で 1 時間真空に引いた後、そのまま常圧にもどしてから 2 日間放置すると、再び水トリーのこん跡が最初と同じ位置に現われてきた。

以上のような結果から、水トリーの中には水分が存在することが確かめられた。

4. 水トリーがケーブルの絶縁性能に及ぼす影響

〈4・1〉加速劣化ケーブルによる水トリーと絶縁性能との関係 第 5 図(a)～(d)までは、定格電圧 6.6kV、 $1\phi \times 60\text{mm}^2$ の架橋ポリエチレンケーブルのコア（外部しゃへい銅テープ及びシースを除いたもの）を 95°C の温水中に浸漬し、15kV ($\approx 4E_0$) の連続課電による強制加速劣化を行なわせた場合の、加速劣化時間それぞれ 3,000, 5,000, 8,800 及び 14,000 各時間における水トリーの発生ならびに進展の状態の一例を示したものである。この場合の水トリーは第 3 図に示したようにより線導体の各凸部から発生しており、第 5 図(a)～(d)まではケーブルの長さ方向に平行に絶縁体を 2mm 程度そいで上から見たものである。水トリーの数及び大きさは加速劣化時間とともに大きくなっているが、飽和する傾向がみられる。

第 5 図 加速劣化時間経過による水トリーの発生状態

Fig. 5. Water trees developed in laboratory.

第 6 図は常温で試験電圧直流 9kV における ΩF 表示（一般にケーブルの長さ、外径絶縁厚さにより絶縁抵抗が変化するので、長さ、外径厚さが異なるケーブルの絶縁抵抗は直接比較するのに便利のように ΩF 表示にすることがある）による絶縁抵抗-劣化時間特性を、第 7 図は同じく常温で試験電圧 6.6kV における $\tan \delta$ -劣化時間特性を、さらに第 8 図は、常温で最初 30kV を 1 時間印加し、引きつづき 35kV を 30 分印加し、以後 30 分に 5kV の割合で上昇する課電方法による交流長時間絶縁破壊強度と、劣化時間との関係を示したものである。

これらの結果から、いずれも加速劣化時間とともに特性が悪くなっていくことがうかがえる。したがって、これら絶縁特性の低下は水トリーの発生、進展と関係があることが予想される。

〈4・2〉 撤去ケーブルによる水トリーと絶縁破壊電圧との関係 第 9 図及び第 10 図は定格電圧 6.6kV $3\phi \times 14mm^2$ の海底架橋ポリエチレンケーブルの、3 年間使用して水トリーの発生していたもの〔第 1 図写真 (a) と同じケーブル〕と 3 箇月使用してまだ水トリーの発生していないものについて、それぞれ交流長時

第 6 図 絶縁抵抗-劣化時間特性

Fig. 6. Insulation resistivity vs. deterioration time.

第 7 図 $\tan \delta$ -劣化時間特性

Fig. 7. $\tan \delta$ vs. deterioration time.

第 8 図 交流長時間絶縁破壊強度-劣化時間特性

Fig. 8. AC long-time beakdown strength vs. deterioration time.

間絶縁破壊電圧及び正極性インパルス ($1 \times 40 \mu\text{s}$) による絶縁破壊電圧について比較したものである。この場合、試料は三相を各相ごとにばらばらにして別々に、交流は試料長 50cm、インパルスは試料長 5m でそれ

第 9 図 6.6kV 海底架橋ポリエチレンケーブルの交流長時間絶縁破壊電圧

Fig. 9. AC long-time breakdown voltage of 6.6kV cross-linked polyethylene submarine power cables.

第 10 図 6.6kV 海底架橋ポリエチレンケーブルの正極性インパルス ($1 \times 40 \mu\text{s}$) による絶縁破壊電圧

Fig. 10. Positive polarity impulse ($1 \times 40 \mu\text{s}$) breakdown voltage of 6.6 kV cross-linked polyethylene submarine power cables.

第 1 表 交流長時間絶縁破壊電圧

Table 1. AC long-time breakdown voltage.

水トリー	なし	あり
使用年月	3 箇月	3 年
交流長時間	55	25 25
絶縁破壊	50	45 30
電圧 (kV/5mm)	60	25 30
同上平均値	55	30

ぞれ破壊電圧を測定した。なお、3年間使用した CV ケーブルよりとった試料にはすべて水トリーが発生していた。電圧印加方法は交流の場合は、30kV を 5 分間課電した後、5kV 5 分間のステップアップで、インパルスの場合は 106kV より始めて同一電圧を 3 回つづ印加し引続き 6kV づつ昇圧するというステップアップ方式である。交流絶縁破壊電圧は試料長が短いことや各ステップの電圧印加時間が短いことなどにより高目になることが予想されたので、同じ試料について数は少ないが、試料長さ 5m、電圧印加方法は 20kV を 30 分間課電した後、5kV 30 分間のステップアップ方法で測定した結果を第 1 表に示す。

これらの結果から、水トリーが発生しているといずれの破壊電圧も低下していることがわかる。

〈4.3〉 結果についての考察

(1) 水トリーの発生条件 第 2 図に示した水トリーは、前述のように 3 年間海底ケーブルとして使用していた架橋ポリエチレンケーブルの絶縁体から発見されたものであるが、このケーブルを布設している近所の海水中に同時に無課電で 3 年間保管してあった全く同種のケーブルからは水トリーは全く発見されていない。また、空气中で架橋ポリエチレンケーブルに長

時間課電しても、これらのケーブルの絶縁体に水トリーが発生したということ一度も聞いていない。以上のことから、水トリーは高電界と水の両方が共存しなければ発生しないことがわかった。ただし、同じ海底架橋ポリエチレンケーブルでも3箇月の営業運転では水トリーは発生していないが、3年で発生していることからみて、水トリーが発生するまでには若干の時間が必要のようである。

(2) 水トリーと電界 水トリーの発生・進展と電界の強さとの関係についてはまだはっきりしたことはわからないが、営業運転で水トリーが発生していることからみて、内部半導電層に不整などがあれば少なくとも1mmあたり0.8kV程度(定格電圧6.6kV、絶縁厚さ5mmの海底架橋ポリエチレンケーブルの場合)の課電で水トリーが発生し得ることになる。ただし、実際に水トリーが発生する電極不整部の先端における電界強度はこの値よりも相当大きいことが予想される。

さらに、除去した海底架橋ポリエチレンケーブルと実験室において加速劣化したケーブルから発見された水トリーを比較すると、温度条件が多少異なるが、課電電圧の高いほうが、水トリーの発生が早くかつその個数も多い。

(3) 水トリーと温度 水トリーの発生、進展と温度との関係についても、現在確実なことは不明である。しかし、実験室での加速劣化による95°Cの温水中ではもちろん、導体温度60°C程度以下と推定される営業運転中の海底ケーブルでも水トリーは発生しているしまた、常温におけるポリエチレンケーブルのブロックによるサンプル試験でも水トリーの生成に成功していることなどから考えて、温度は水トリーの発生、進展には大きな影響がないということも考えられる。ただし、温度こう配がある場合については先に述べたとおりである。

(4) 水トリーと電気トリー 水トリーが発生している架橋ポリエチレンケーブルを絶縁破壊させた後にケーブル絶縁体を顕微鏡で観察すると、絶縁破壊による貫通孔とは別に、発生している大多数の水トリーの先端から電気トリーが伸びているのが見られた。第11図は交流電圧を印加した場合で、各水トリーの先端から電気トリーが導体方向とシース方向の両方に樹枝状に伸びているのが判る。(右端は絶縁破壊の貫通孔である)

これに対して、第12図(a)及び(b)はそれぞれ正極性及び負極性インパルス印加した場合で両極性にトリー形状の多少の差はあるが、いずれも水トリーの

第11図 交流電圧を印加した場合の水トリーの先端から発生した電気トリー

Fig. 11. Trees from top of water trees applied to AC voltage.

(a) 正極性の場合 (b) 負極性の場合
第12図 インパルス(1×40μs)を印加した場合の水トリーの先端から発生したストリーマ状の電気トリー

Fig. 12. Streamer type trees from top of water trees applied to impulse (1×40μs) voltage.

先端からストリーマ状に発生している。また、インパルスを印加した場合の電気トリーの形状は、交流課電の場合のように樹枝状にはならない。

以上の結果から水トリーが存在する場合の絶縁破壊は水トリーの先端から起こったものと予想されるので第1表、第9図及び第10図において水トリーの発生しているケーブルの絶縁破壊電圧が水トリーの発生していないケーブルよりも低いのは、水トリーが発生しているケーブルの有効絶縁厚さは水トリーの長さの部分だけ薄くなっており、かつこの部分の電界強度が水トリーの先端のために非常に高くなっていることによると考える。

(5) ケーブル導体の水の影響 先に述べたように、架橋ポリエチレンケーブルの端末部あるいは接続

部の接続処理が完全でないと、そこからケーブルの導体内に水が浸入してくる場合がある。この場合を模擬して、研究室において供試ケーブルの導体内に常時水を供給しながら、浸水課電による加速劣化試験をもあわせて行ない、導体に水を入れない場合と比較した。得られた結果の一例として、交流長時間絶縁破壊強度と加速劣化時間との関係を第8図に示したが、導体に水を入れない場合とほとんど変わらない。また、水トリの発生及び進展状態については、加速劣化3,000時間では導体に水がはいっているケーブルのほうが、水の入っていないケーブルに比べて水トリの発生個数がやや多かったが、加速劣化8,800時間以上では両者の差はほとんど認められなかった。以上の結果から導体に水がはいってもいなくても、ケーブル外周に水が存在している限り高電界にさらされるとやがて水トリが発生して絶縁特性が低下することが明らかになった。ただし、ケーブル外周に水が存在しない場合でも、ケーブル導体に水が浸入すると水トリが発生して絶縁破壊に至る例もあるので、注意を要する。

5. 水トリが発生しているケーブルの寿命

絶縁体に印加したストレス V と、破壊するまでの時間（寿命） t との間には両対数紙上で直線関係があるとする次の経験式がよく知られている。⁽¹⁰⁾

$$t = KV^{-n} \quad (\text{ただし, } K: \text{定数})$$

ここで、 n の値はポリエチレン電力ケーブルでは、Kreuger などにより9とされている。⁽¹¹⁾

この $V-t$ 特性は一定電圧課電下での寿命推定可能ということで意義がある。しかしながら、水トリが発生した架橋ポリエチレンケーブルの $V-t$ 特性についてはほとんど知られていない。

そこで筆者らは、架橋ポリエチレンケーブルについて加速劣化のための過電圧から、営業運転中の常規電

圧までの範囲内の $7 \sim 1.1 \text{ kV/mm}$ （最大電位傾度）をそれぞれ長期間課電した後の絶縁破壊電圧特性を、数少ないデータから第13図に示すような $V-t$ 特性に画いた。同図において曲線 A は第8図及び文献(12)、(13)からとったもので、印加電圧（最大電位傾度） 7 kV/mm より 2.4 kV/mm までの加速劣化のための課電によるものであり、この場合の最大破壊電位傾度は測定値数点の平均値である。これらの印加電圧の範囲内では課電圧値による差は余り認められず、だいたい同一曲線上に乗っている。これに対して曲線 B は印加電圧 $1.4 \sim 1.1 \text{ kV/mm}$ の実際に運転中のケーブルであり、この場合の最大破壊電位傾度は第1表及び文献(1)、(6)、(14)からとった最小値である。ただし、運転中絶縁破壊したものは、破壊直前まで運転電圧で加速劣化しておき、その後破壊試験を行ないちようど運転電圧で破壊したと考えれば、第13図に示す各点はすべて加速劣化試験後における破壊電圧とみなすことができる。

従来の $V-t$ 特性は両対数目盛でだいたい直線になったが、この図では曲線 A、B ともに右下りの下方にわん曲した曲線となっている。曲線 A では加速劣化2,000時間以上、曲線 B では26,000時間以上でいずれも水トリが発生しているので、これは水トリによるものと考ええる。なお、 $V-t$ 特性において、最大電位傾度をとるか平均電位傾度をとるかは議論の分れるところであるが、水トリはそのほとんどが内部半導電層より発生していることから、ここでは最大電位傾度を採用することにした。

先に述べたように、曲線 A は平均値を曲線 B は最小値をそれぞれ結んだ線であるから、たとえば曲線 B を平均値として引き直せば、もっと右上方に移動すると思われるので、曲線 A と B とでは加速電圧による差があるということが推定される。すなわち、課電圧値が高いと水トリの発生、進展さらにこのための絶縁耐力の低下は早くなることがわかる。

次に、水トリが発生している架橋ポリエチレンケーブルの寿命の推定に、第13図の曲線 B を利用することが考えられる。しかしながら、寿命推定の基準をどこにとるかということについては種々な考え方があり定説がない。そこでいま仮りに、使用中のケーブルは常に持続性異常電圧に耐えることを必要条件とすれば、⁽¹⁵⁾たとえば 6.6 kV 、 $3\phi \times 14 \text{ mm}^2$ あるいは 6.6 kV 、 $1\phi \times 38 \text{ mm}^2$ などの架橋ポリエチレンケーブルに水トリが発生しかつ進展すれば、その寿命は第13図において曲線 B が $2E/\sqrt{3}$ （ただし、 E ：ケーブルの定格電圧）を最大電位傾度で表わした線（上記の

第13図 水トリが発生している架橋ポリエチレンケーブルの $V-t$ 特性

Fig. 13. $V-t$ curve in cross-linked polyethylene power cables with water trees.

各ケーブルでは 2.8kV/mm) を通る点から求めると約 6.5 年ということになる。この寿命はあくまで前述の条件の下における、水トリーが発生かつ進展している架橋ポリエチレンケーブルについての推定でありすべての架橋ポリエチレンケーブルにあてはまるものではないことは当然である。

以上の結果から、水トリーが存在している架橋ポリエチレンケーブルについての $V-t$ 特性は、現状ではデータが少ないので断定的なことはいえないが、 n の値が 9 よりはかなり小さくなることが予想される。

6. 水トリーの対策

水トリーの発生及び進展機構が明確にされていない現状では、水トリーに対する抜本的な対策は望むべくもないが、先に述べたように水トリーは高電界と水との共存が条件であることから、さしあたり以下のことが考えられる。

(i) 端末部もしくは接続部から絶対に水が入らないようにする。

(ii) 内外半導電層に電極不整がないようにする。

(iii) ケーブル絶縁体中にできるだけ異物やボイドが入らないようにする。

(iv) ケーブルに何んらかの方法でしゃ水を考える。

7. あとがき

水トリーが直接の原因で架橋ポリエチレン電力ケーブルに絶縁破壊事故が生じたケースはまだ少ないが、水トリーが発生していると、ケーブルの絶縁性能が低下することがあるので、今後周囲に水が存在する所に

布設する地中ケーブル、もしくは海底ケーブルとして架橋ポリエチレンケーブルを使用する場合には、水トリーについて注意する必要がある。

今後架橋ポリエチレン電力ケーブルの使用電圧階級及び使用量が増々拡大されることが予想されるに際して、水トリーの発生、進展機構の解明、異物やボイドができるだけ少ないようなケーブル製造技術の改善ならびによりすぐれた新しいケーブル絶縁材料の開発が期待される。

(昭和 48 年 6 月 27 日受付, 同 49 年 4 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 福田, 他: 電力中央研究所技術第一研究所報告 71061 (1972-2)
- (2) Wallace Vahlstrom, Jr.: 1971 IEEE Underground Distribution Conference 222 (1971-9)
- (3) J.H. Lawson & W. Vahlstrom, Jr.: 1972 IEEE Summer Meeting T 72, 502-3 (1972-7)
- (4) W. Vahlstrom, Jr.: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena C-20, 91 (1972-10)
- (5) T. Tabata, et al.: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91, 4, 1354 (1972-7)
- (6) 加寛: 鉄道電化協会絶縁電線委員会資料 47-25 (昭 47)
- (7) 児島, 他: 昭和電線電機レビュー 23, 1 (昭 48)
- (8) T. Tabata, T. Fukuda & Z. Iwata: IEEE Trans. Power Apparatus Syst. PAS-91, 4, 1361 (1972-7)
- (9) T. Tanaka, Y. Nitta & T. Fukuda: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Session III, C-15, 69 (1972-10)
- (10) 井関, 他: 第 4 回絶縁材料シンポジウム III-4, 39 (昭 46-9)
- (11) F.H. Kreuger & J.M. Oudin: IEEE Winter Power Meeting 69, CP 99 (1969)
- (12) 西浦, 他: 昭 46 電気学会関西支部連合大会 G4-4 (昭 46)
- (13) 井上, 他: 電気学会絶縁材料研究会資料 IM-72 (昭 47-8)
- (14) 中: 絶縁劣化研究懇談会資料 36-11 (昭 47-5)
- (15) 堀井, 他: 電気学会高電圧試験法専門委員会 ゴム・プラスチックケーブル高電圧試験専門分科会中間報告書 3-16 (昭 47-9)