UDC 621.3.015.533: 621.3.015.333: 621.315.616.96
678.742.2

論 文

53-A29

ポリエチレン中のトリー発生に及ぼす空間電荷効果とその消滅時間

正 員 吉 村 昇 (秋田大)

准 員 佐 藤 英 信 (秋田大)

正 員 西 田 真 (秋田大)

正 員 能 登 文 敏 (秋田大)

1. ま え が き

最近直流送電の実用化計画に伴い、直流あるいは衝撃電圧印加時の高分子材料のトリーイング破壊に関する研究が、空間電荷効果との関連の上において活発に進められている^{(1)~(8)}。特にトリーの発生と空間電荷効果については、ポリエチレンの場合、緩波頭衝撃電圧波形を用いた空間電荷形成時間の温度依存性⁽⁹⁾、直流電圧を前課電（トリー発生電圧以下の電圧をあらかじめ針電極に印加し、針端近傍に空間電荷を形成させることを目的に印加する電圧）することによる空間電荷の極性および注入深さ⁽¹⁾、空間電荷効果の消滅時間⁽²⁾⁽¹⁰⁾、電極材質の効果⁽¹¹⁾⁽¹²⁾、極低温領域における電界発光⁽²⁾⁽¹³⁾など多くの研究成果が報告されている。空間電荷の形成については、トリーイング試験におけるような不平等電界条件のほか、フィルム状ポリエチレン試料における平等電界条件の場合にも検討結果が二、三報告されている⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかしながら、針電極近傍に形成された空間電荷が、どの程度の休止時間でトリーの発生に及ぼす効果を失うかについての検討は比較的少ない。平等電界条件下では、Bradwell氏らがレセス形（ 型のように半球-平板電極構成に

した形）ポリエチレンで約 10 ms と報告している⁽¹⁶⁾。一方、針-平板電極構成を用いたトリーイング試験の場合、縄田氏は負極性直流電圧 -30 kV を 15 分間前課電した場合で約 50 分、正極性の場合の同一印加条件では約 27 時間と報告している⁽¹⁰⁾。また筆者らは、さきに正極性直流電圧 25 kV、負極性直流電圧 -25 kV を 10 分間前課電した場合で約 30 分と報告した⁽²⁾。これらはいずれも 10~15 分と比較的長い前課電時間の場合であり、ms オーダの短い時間前課電した場合のトリー発生に及ぼす空間電荷効果についての検討はまだなされていない。そこで本論文では、立上り時間が 1 ms 程度のパルス電圧あるいは 1 分の印加時間を持つ直流電圧を前課電することによる、針電極近傍ポリエチレン中に形成された空間電荷の、トリーの発生に及ぼす効果およびその消滅時間について検討した。

2. 実験装置、方法および試料

〈2.1〉 実験装置および方法

(1) パルス電圧を前課電する場合 パルス電圧を発生させるために高電圧ダブルパルス発生装置を用いた。高電圧ダブルパルス発生装置の構成図を第 1 図に、電圧波形例を第 2 図に示す。正極性および負極性前課電パルス電圧のピーク値を $(+V_{1p})$ および $(-V_{1p})$ 、第 2 番目の正極性および負極性パルス電圧（以下、トリー発生用パルス電圧と記す）のピーク値をそれぞれ $(+V_{2p})$ および $(-V_{2p})$ とする。第 3 図は正極性前課電パルス電圧 $(+V_{1p})$ 印加後、負極性トリー発生用パルス電圧 $(-V_{2p})$ を印加した場合の状態を

Effect of Space Charge and its Life Time on Tree Initiation in Polyethylene. By Noboru Yoshimura, Member, Eishin Satō, Associate, Makoto Nishida, Member & Fumitoshi No-to, Member (Faculty of Mining, Akita University)

吉村 昇: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科助教授
佐藤英信: 准員, 秋田大学大学院修士課程(現在, 日立製作所)
西田 真: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科助手
能登文敏: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科教授

第 1 図 高電圧ダブルパルスの発生装置の構成図
Fig. 1. Block diagram of high voltage double pulse generator.

示したものである。本実験では、このほかに第 2 図の電圧波形に見られるように、 $(+V_{1p})$ 印加後 $(+V_{2p})$ 、 $(-V_{1p})$ 印加後 $(+V_{2p})$ 、 $(-V_{1p})$ 印加後 $(-V_{2p})$ についても検討した。なお、前課電パルス電圧のピーク値から、トリ-発生用パルス電圧のピーク値までの時間（以下、パルス間時間と記す）を t_{pp} とする。またパルス電圧の 0 電位からピーク値までの時間を t_f 、ピーク値から 0 電位にもどる時間を t_r とすると、本実験で用いたパルス電圧波形は、前課電用およびトリ-発生用いずれも $t_f = 0.8 \text{ ms}$ 、 $t_r = 0.8 \text{ ms}$ である。

(2) 直流電圧を前課電する場合 前課電として直流電圧を用いる場合の実験回路を第 4 図に示す。最初スイッチ (s) を ① 側に倒し、正極性および負極性直流電圧を 1 kV/s の速度で所定の電圧値 $((+V_{1DC})$ あるいは $(-V_{1DC})$) まで昇圧し、その後引き続いて正極性および負極性直流電圧を 1 分間課電後直流発生電源をシャ断すると同時に、トリガギャップで針電極の電位を 0 (V) にする。その後、手でスイッチ (s) を ② 側に倒し、所定の休止時間 (t_p) 後、高電圧ダブルパルス発生装置を用いてトリ-発生用パルス電圧 $((+V_{2p})$ あるいは $(-V_{2p})$) を印加し、トリ-発生の有無を確認する。第 5 図は負極性直流電圧 $(-V_{1DC})$ を前

第 3 図 ダブルパルス波形の定義

Fig. 3. Definition of double pulse wave form.

第 4 図 直流電圧を前課電する場合の実験回路

Fig. 4. Experimental circuit for DC prestressing.

第 5 図 直流電圧前課電の場合の電圧波形の一例

Fig. 5. Typical voltage wave form for DC prestressing.

$V_{2p})$ あるいは $(-V_{2p})$ を印加し、トリ-発生の有無を確認する。第 5 図は負極性直流電圧 $(-V_{1DC})$ を前

第 2 図 ダブルパルス電圧波形例

Fig. 2. Typical voltage wave forms produced by double pulse generator.

課電し、引き続いて正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した場合の状態を示したものである。直流電圧前課電の場合にもパルス電圧前課電の場合と同様、第5図の ($-V_{1DC}$) 印加後 ($+V_{2p}$) を印加する場合のほかに、 ($-V_{1DC}$) 印加後 ($-V_{2p}$)、 ($+V_{1DC}$) 印加後 ($+V_{2p}$)、 ($+V_{1DC}$) 印加後 ($-V_{2p}$) 印加についてもそれぞれ検討した。

〈2・2〉 試料 試料としては、低密度ポリエチレン (DFD 2005) (以下、PE と記す) を用いた。試料の作成方法は前報⁽⁹⁾と同様である。試料および電極の形状を第6図に示す。針電極の先端曲率半径は $3\mu\text{m}$ 、先端角度は 30° 、針端と接地平板電極間は 4mm である。試料はいずれもトランス油中に浸せきし、針電極側に電圧を印加した。なお、トリ－発生の確認には100倍の顕微鏡を用いた。

3. 実験結果

トリ－発生に関する評価規準としては、従来と同様50% トリ－発生電圧を採用した⁽²⁾。まずトリ－発生用パルス電圧 (t_f/t_i : 0.8/0.8ms) のみを針電極に印加して50% インパルストリ－発生電圧 (正極性: $+V_i$, 負極性: $-V_i$) を求めた。第7図(a)は正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) のみを針電極に印加した場合のトリ－発生率を示している。第7図(a)の結果から、トリ－発生率が50%になる印加電圧値を ($+V_i$) とすると、($+V_i$) = 21.5kV となる。負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) のみを電極に印加した場合の50% インパルストリ－発生電圧 ($-V_i$) は、($-V_i$) = -32.0kV が得られた。以下本論文では、このトリ－発生用パルス電圧のみを印加した場合の50% インパルストリ－発生電圧 ($+V_i$ および $-V_i$) を規準にとり、前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$, $-V_{1p}$) および前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$, $-V_{1DC}$) 印加による影響を次のような観点から求めた。すなわち、前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$, $-V_{1p}$) あるいは前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$, $-V_{1DC}$) を印加後 ($+V_{2p}$) もしくは ($-V_{2p}$) を印加して得られる50% トリ－発生電圧 (正極性: $+V_{2pi}$, 負極性: $-V_{2pi}$) をパルス間時間 (t_{pp}) あるいは休止時間 (t_p) を種々変化して求め、($\pm V_i$) と ($\pm V_{2pi}$) とをそれぞれ比較した。そして、($\pm V_i$) と ($\pm V_{2pi}$) の電圧とが同じ値になるまでの t_{pp} あるいは t_p を、前課電により PE 中に注入形成された空間電荷のトリ－発生に及ぼす空間電荷効果消滅時間 (t_e) とした。

なお、第7図(b)に負極性パルス電圧 ($-V_{1p} = -20\text{kV}$) を前課電した場合の ($+V_{2p}$) とトリ－発生率の

第6図 試料および電極の形状

Fig. 6. Arrangements of specimen and electrode.

第7図 トリ－発生率と50% トリ－発生電圧の関係

Fig. 7. Relation between ratio of tree initiation and 50% tree initiation voltage.

関係を示す。 t_{pp} が 1.6ms の場合、トリ－発生率が50%になる印加電圧値 ($+V_{2pi}$) は 17.0kV である。

〈3・1〉 パルス電圧前課電の場合

(1) 正極性前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$) 印加後正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加する場合 正極性前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$) としては、10.0, 16.0kV の2種類を用いた。まず ($+V_{1p}$) を印加後パルス間時間 (t_{pp}) を設定して任意の正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した。第2図(b)は $t_{pp} = 1.6\text{ms}$ に設定した場合の電圧波形の一例である。そして試料を取り出し針端近傍に生ずるトリ－の発生の有無を確認して、同極性のパルス印加に伴う50% トリ－発生電圧 ($+V_{2pi}$) を求めた。第8図

第8図 パルス間時間 (t_{pp}) と50% トリ－発生電圧の関係

Fig. 8. Relation between t_{pp} and voltage to initiate tree in 50% of samples.

は実験結果を示している。同図において点線で示したのは、正極性トリ－発生用パルス電圧単独印加時の 50% インパルストリ－発生電圧 ($+V_i$) である。このように ($+V_{1p}$) を前課電し、引き続き ($+V_{2p}$) を印加する同極性印加においては、いずれも ($+V_i$) よりわずかに高いトリ－発生電圧を示した。また ($+V_{1p}$) がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は、($+V_{1p}$) = 10.0 kV 印加において約 20 ms, ($+V_{1p}$) = 16.0 kV 印加において約 200 ms となった。

(2) 負極性前課電パルス電圧 ($-V_{1p}$) 印加後正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した場合 負極性前課電パルス電圧 ($-V_{1p}$) としては、-6.0, -10.0, -16.0, -20.0, -25.0 kV の 5 種類を用いた。($-V_{1p}$) を印加後パルス間時間 (t_{pp}) を設定して任意の正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した。第 2 図 (c) は t_{pp} = 1.6 ms, (d) は t_{pp} = 24.0 ms に設定した場合の電圧波形である。第 8 図は実験結果を示している。($-V_{1p}$) を前課電し、引き続き ($+V_{2p}$) を印加する異極性印加においては、($-V_{1p}$) = -6.0 kV を除いていずれも ($+V_i$) より低いトリ－発生電圧を示した。また ($-V_{1p}$) がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は ($-V_{1p}$) = -10.0 kV 印加において約 5 ms, ($-V_{1p}$) = -16.0 kV 印加において約 70 ms, ($-V_{1p}$) = -20 kV 印加において 1.5 ~ 2.0 s, ($-V_{1p}$) = -25 kV 印加において 5 ~ 7 s となった。

(3) 負極性前課電パルス電圧 ($-V_{1p}$) 印加後負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した場合 負極性前課電パルス電圧 ($-V_{1p}$) としては、-16.0, -20.0, -25.0 kV の 3 種類を用いた。($-V_{1p}$) を印加後パルス間時間 (t_{pp}) を設定して任意の負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した。第 2 図 (e) は t_{pp} = 2.2 ms, (f) は t_{pp} = 24 ms に設定した場合の電圧波形である。第 9 図は実験結果を示している。同図において、点線は負極性トリ－発生用パルス電圧単独印加時の 50% インパルストリ－発生電圧 ($-V_i$) である。($-V_{1p}$) を前課電し、引き続き ($-V_{2p}$) を印加する同極性印加においては、いずれも ($-V_i$) より高いトリ－発生電圧を示した。また ($-V_{1p}$) がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は ($-V_{1p}$) = -16.0 kV 印加において約 200 ms, ($-V_{1p}$) = -20.0 kV 印加において約 7 s, ($-V_{1p}$) = -25.0 kV 印加において約 40 s となった。

(4) 正極性前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$) 印加後負極

第 9 図 パルス間時間 (t_{pp}) と 50% トリ－発生電圧の関係

Fig. 9. Relation between t_{pp} and voltage to initiate tree in 50% of samples.

性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した場合

正極性前課電パルス電圧 ($+V_{1p}$) としては、10.0, 16.0 kV の 2 種類を用いた。第 2 図 (g) は t_{pp} = 1.6 ms に、(h) は t_{pp} = 24 ms に設定した場合の電圧波形である。第 9 図は実験結果を示している。($+V_{1p}$) を前課電し、引き続き ($-V_{2p}$) を印加する異極性印加においては、いずれも ($-V_i$) よりわずかに低いトリ－発生電圧を示した。また ($+V_{1p}$) がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は ($+V_{1p}$) = 10.0 kV 印加において約 10 ms, ($+V_{1p}$) = 16.0 kV 印加において約 20 ms となった。

〈3・2〉 直流電圧前課電の場合 直流電圧を 1 分間印加し、その後トリガギャップで電極間を短絡した際に発生する 50% 直流短絡トリ－発生電圧 (正極性: $+V_{DC}$, 負極性: $-V_{DC}$) は、($+V_{DC}$) = 25.7 kV, ($-V_{DC}$) = -21.5 kV であることより、直流前課電電圧値 (正極性: $+V_{1DC}$, 負極性: $-V_{1DC}$) としてはそれぞれ ± 16.0 , ± 10.0 , ± 8.0 , ± 6.0 kV の 4 種類を適宜用いた。

(1) 正極性前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$) 印加後正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した場合 正極性前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$) としては、6.0, 10.0, 16.0 kV の 3 種類を用いた。まず ($+V_{1DC}$) を印加後休止時間 (t_p) を設定し、任意の正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した。そして同極性の直流電圧印加に伴う 50% トリ－発生電圧 ($+V_{2pi}$) を求めた。第 10 図は実験結果を示している。同図において点線で示したのは、正極性トリ－発生用パルス電圧単独印加時の 50% インパルストリ－発生電圧 ($+V_i$) である。このように ($+V_{1DC}$) を前課電し、引き続き ($+V_{2p}$) を印加する同極性印加においては、($+V_{1DC}$) = 6.0 kV を除いて ($+V_i$) よりわずかに高いトリ－発生電圧を示した。また ($+V_{1DC}$) がトリ－

第 10 図 直流電圧前課電時の休止時間 (t_p) と 50% トリ－発生電圧の関係

Fig. 10. Relation between t_p and voltage to initiate tree in 50% of samples in DC voltage prestressing.

発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は, $(+V_{1DC}) = 10.0, 16.0 \text{ kV}$ いずれの印加においても約 100 s となった。

(2) 負極性前課電直流電圧 ($-V_{1DC}$) 印加後正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した場合
負極性前課電直流電圧 ($-V_{1DC}$) としては, $-6.0, -8.0, -10.0, -16.0 \text{ kV}$ の 4 種類を用いた。 $(-V_{1DC})$ を印加後休止時間 (t_p) を設定し, 任意の正極性トリ－発生用パルス電圧 ($+V_{2p}$) を印加した。そして, 異極性の直流電圧印加に伴う 50% トリ－発生電圧 ($+V_{2pi}$) を求めた。第 10 図は実験結果を示している。 $(-V_{1DC})$ を前課電し, 引き続き $(+V_{2p})$ を印加する異極性印加においては, いずれも $(+V_i)$ より低いトリ－発生電圧を示した。特に $(-V_{1DC}) = -16.0 \text{ kV}$ の場合には, 前課電効果が大きく, $t_p = 10 \text{ s}$ では $(+V_{2pi})$ が 10 kV まで低下した。また $(-V_{1DC})$ が $-10.0, -16.0 \text{ kV}$ の場合には $t_p = 1,000 \text{ s}$ で直線に折れ曲りを生じ, 1,000 s より短い時間での $(+V_{2pi})$ の変化は小さく, 1,000 s 以上で大きい傾向を示している。 $(-V_{1DC})$ がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は, $(-V_{1DC}) = 6.0 \text{ kV}$ 印加で約 100 s, $(-V_{1DC}) = -8.0 \text{ kV}$ 印加で約 400 s, $(-V_{1DC}) = -10.0 \text{ kV}$ 印加で約 2,000 s, $(-V_{1DC}) = -16.0 \text{ kV}$ で約 4,000 s となった。

(3) 負極性前課電直流電圧 ($-V_{1DC}$) 印加後負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した場合
負極性前課電直流電圧 ($-V_{1DC}$) としては, $-6.0, -10.0, -16.0 \text{ kV}$ の 3 種類を用いた。 $(-V_{1DC})$ を印加後休止時間 (t_p) を設定し, 任意の負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した。そして同極性の直流電圧印加に伴う 50% トリ－発生電圧 ($-V_{2pi}$)

第 11 図 直流電圧前課電時の休止時間 (t_p) と 50% トリ－発生電圧の関係

Fig. 11. Relation between t_p and voltage to initiate tree in 50% of samples in DC voltage prestressing.

を求めた。第 11 図は実験結果を示している。同図において点線で示したのは, 負極性トリ－発生用パルス電圧単独印加時の 50% インパルストリ－発生電圧 ($-V_i$) である。同図の結果から, $(-V_{1DC})$ を前課電し, 引き続き ($-V_{2p}$) を印加する同極性印加においては, $(-V_i)$ よりわずかに高いトリ－発生電圧を示した。また $(-V_{1DC})$ がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は, $(-V_{1DC})$ が $-6.0, -10.0, -16.0 \text{ kV}$ いずれの印加においても約 100 s となった。

(4) 正極性前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$) 印加後負極性トリ－発生用パルス電圧 ($-V_{2p}$) を印加した場合
正極性前課電直流電圧 ($+V_{1DC}$) としては, $6.0, 8.0, 10.0, 16.0 \text{ kV}$ の 4 種類を用いた。第 11 図は実験結果を示している。 $(+V_{1DC})$ を前課電し, 引き続き ($-V_{2p}$) を印加する異極性印加においては, いずれも $(-V_i)$ より低いトリ－発生電圧を示した。また $(+V_{1DC}) = 16.0 \text{ kV}$ 印加では $t_p = 400 \text{ s}$, $(+V_{1DC}) = 10.0 \text{ kV}$ 印加では $t_p = 700 \text{ s}$, $(+V_{1DC}) = 8.0 \text{ kV}$ 印加では $t_p = 100 \text{ s}$ でそれぞれ直線に折れ曲りを生じ, 各々の折れ曲り点より短い休止時間 (t_p) での ($-V_{2pi}$) の変化は小さく, 長くなると大きくなる傾向を示している。 $(+V_{1DC})$ がトリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は, $(+V_{1DC}) = 6.0 \text{ kV}$ 印加で約 100 s, $(+V_{1DC}) = 8.0 \text{ kV}$ 印加で約 1,000 s, $(+V_{1DC}) = 10.0 \text{ kV}$ 印加で約 4,000 s, $(+V_{1DC}) = 16.0 \text{ kV}$ 印加で約 10,000 s となった。

4. 実験結果の検討

第 3 章で得られた実験結果から, トリ－発生に及ぼ

第 1 表 パルス電圧および直流電圧の前課電効果

Table 1. Effects of pulse and DC voltage prestressing.

	パルス電圧前課電	直流電圧前課電
同極性印加 (正→正, 負→負)	やや効果あり	やや効果あり
異極性印加 (負→正)	効果大	効果大
正極性前課電→負極性パルス印加	やや効果あり	効果大
空間電荷効果の消滅時間	短(数 ms~数 s)	長(100~10 ⁴ s)

す空間電荷効果およびその消滅時間について要約すると第 1 表に示すようになる。

パルス電圧, 直流電圧いずれの前課電の場合にも共通する事項としては,

(1) 前課電電圧とトリ－発生用パルス電圧が同極性の方が, 異極性の場合に比較して前課電効果は小さい。

(2) 前課電として負極性電圧 ($-V_{1p}$, $-V_{1DC}$) を印加した場合の前課電効果は顕著である。

一方, パルス電圧, 直流電圧前課電で著しく異なる事項としては,

(1) 正極性パルス電圧を前課電 ($+V_{1p}$) した場合, 前課電効果は少しより認められないのに対し, 正極性直流電圧を前課電 ($+V_{1DC}$) した場合には顕著に認められる。

(2) トリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) は, パルス電圧前課電の場合, 数 ms~数 s ($(+V_{1p}) = 10.0 \sim 16.0 \text{ kV}$, $(-V_{1p}) = -6.0 \sim -25.0 \text{ kV}$ 範囲), 直流電圧前課電の場合, 数十 s ~ 10,000 s ($(\pm V_{1DC}) = \pm 6.0 \sim \pm 16.0 \text{ kV}$ 範囲) と著しく異なる。

〈4.1〉前課電パルス電圧のトリ－発生に及ぼす効果

パルス電圧を前課電した場合には, 正極性に比較して負極性の前課電効果が大きく, 針端近傍におけるトリ－発生に及ぼす空間電荷の形成量は負極性 > 正極性と考えられる。負極性電圧印加時には, 針端から電界放出機構により PE 中に電子が注入され, トラップ準位に捕獲されて同極性空間電荷を形成する^{(1)~(5)}。一方, 正極性電圧を印加した場合には, PE 中に存在する自由電子, あらかじめトラップ準位に捕獲されていた電子, PE 中に存在すると考えられる不純物中の電子などが, 針端近傍に形成された高電界により抽出され, それらが衝突電離を行ない, 同極性空間電荷を針端近傍に形成するものと考えられる⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。しかし第 8 図, 第 9 図の実験結果から, 1 ms 程度の前課電時間を有する正極性パルス電圧では, 負極性パルス電圧印加時の電子注入に比較して正極性空間電荷の針端近傍 PE 中での形成量は少なく, それだけ前課電効果は小さいものと考えられる。

〈4.2〉前課電直流電圧のトリ－発生に及ぼす効果

直流電圧を前課電した場合には, パルス電圧前課電の場合と異なり, 正極性でも顕著な前課電効果が認められるようになる。この事実はトリ－の発生に効果を持つ程度の正極性空間電荷を針端近傍 PE 中に形成させるためには, 比較的長い時間正極性電圧を印加する必要があることを示唆している。またパルス電圧の場合と同様, 負極性の方が正極性に比較して前課電効果は大きい。例えば, 異極性電圧印加条件である ($+V_{1DC} \rightarrow (-V_{2p})$, $(-V_{1DC}) \rightarrow (+V_{2p})$) において, $(\pm V_{1DC}) = \pm 16.0 \text{ kV}$, $t_p = 10 \text{ s}$ の場合について比較すると, 第 10 図, 第 11 図に示したように $(+V_{1DC}) \rightarrow (-V_{2p})$ の場合で $(-V_{2pi}) = -26.0 \text{ kV}$, $(-V_{1DC}) \rightarrow (+V_{2p})$ の場合で $(+V_{2pi}) = 10.0 \text{ kV}$ となる。これらの値と 50% インパルストリ－発生電圧 ($+V_i = 21.5 \text{ kV}$, $-V_i = -32.0 \text{ kV}$) の差は $(|+V_i| - |-V_{2pi}|) = 11.5 \text{ kV}$, $(|-V_i| - |+V_{2pi}|) = 6.0 \text{ kV}$ となり, $(-V_{1DC})$ の前課電効果が $(+V_{1DC})$ の場合よりも大きい。 $(\pm V_{1DC}) = \pm 10.0$, ± 8.0 , $\pm 6.0 \text{ kV}$ をそれぞれ前課電した場合にも同様の傾向があることより, 直流電圧の場合にも針端近傍に形成される空間電荷量には負極性 > 正極性の関係があるものと推測される。

なお, 直流電圧を 1 分間印加し, その後トリガギャップで電極間を短絡した際に発生する 50% 直流短絡トリ－発生電圧 ($+V_{DC}$, $-V_{DC}$) は, $(+V_{DC}) = 25.7 \text{ kV}$, $(-V_{DC}) = -21.5 \text{ kV}$ となり, $(-V_{DC})$ の方が $(+V_{DC})$ に比較して小さい。直流短絡トリ－の場合, 直流電圧印加により針端近傍に形成された同極性空間電荷が短絡時に針端との間に高い逆電界を作り, これが PE の絶縁破壊の強さを超えてトリ－の発生に至ることが考察されている⁽¹⁾。本実験の場合, 負極性直流電圧を 1 分間印加した際, 針端近傍に形成される空間電荷量が負極性と同一大きさの正極性直流電圧印加の場合に比較して多いことを考慮すると, 短絡時の逆電界は正極性の場合より大きくなる。従って, 短絡トリ－を発生するために必要な電界強度を作るためには, 印加電圧の間に $(+V_{DC}) > (-V_{DC})$ の関係が生ずるものと考えられる。

〈4.3〉トリ－の発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間

トリ－発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) については, パルス電圧前課電の場合に数 ms~数 s であるのに対し, 直流電圧前課電の場合には数十 s ~ 約 10,000 s と極めて長い。

1 ms 程度の前課電時間を持つ負極性パルス電圧印加の場合には, 縄田氏らにより報告された⁽¹⁾ように飛程近傍に空間電荷が形成される。一方, 1 分程度の比

較的長い前課電時間を持つ負極性直流電圧印加の場合には、飛程近傍での空間電荷の形成とそれに引き続いての拡散、再捕獲の過程により広い範囲にわたって空間電荷が形成され、また形成量も多くなる⁽¹⁾。一方、正極性の場合、パルス電圧では印加時間が短いため、〈4.1〉節で述べたように針端近傍高電界部分での PE 中からの電子の抽出と、それに引き続いての衝突電離による正極性空間電荷の形成が考えられる。直流電圧印加の場合には、パルス電圧印加の場合と同様の空間電荷の形成と、更に時間の経過とともに空間電荷電界による PE 中からの電子の抽出、衝突電離を繰返ししながら、形成範囲を拡大することが考えられる。従って、空間電荷の形成量もパルス電圧印加に比較して多い。このようにして PE 中に形成された空間電荷は、休止時間 (t_e) の間に拡散および再捕獲を繰返ししながら徐々に移動するため、トリー発生に及ぼす空間電荷効果も徐々に弱められ、またその消滅時間 (t_e) も長くなる。この場合、正極性直流電圧を印加した場合の方が負極性の場合よりも t_e は長い、例えば、第 10 図、第 11 図に示したように異極性印加条件の $(+V_{1DC}) \rightarrow (-V_{2p})$, $(-V_{1DC}) \rightarrow (+V_{2p})$ の場合 $(+V_{1DC})=16$ kV では約 10,000 s であるのに対し、 $(-V_{1DC})=-16$ kV では約 4,000 s であり、約 2.5 倍程度正極性の t_e が長くなっている。また $(\pm V_{1DC})=\pm 10.0$, ± 8.0 kV の場合にも約 2 倍程度正極性の t_e が長い。この原因については、針端近傍 PE 中に形成される正極性空間電荷の種類 (正孔, 正イオン, 正孔-正イオンの混在) と密接に関係しているものと考えられるが、今のところ明らかでない。

一方、パルス電圧前課電の場合には、飛程近傍に空間電荷が形成され、また形成量も直流電圧印加の場合に比較して少ないため、トリー発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間 (t_e) はそれだけ短くなるものと思われる。

5. むすび

ポリエチレン中のトリー発生電圧の変化から、針端近傍に形成されたトリー発生に及ぼす空間電荷効果の消滅について検討した。得られた結果を要約すると次のようになる。

(1) パルス電圧, 直流電圧両方に共通した事項として

(i) 前課電電圧の大きいほど 50% トリー発生電圧の変化は大きい。また前課電電圧から次のトリー発生用パルス電圧印加までの時間の短いほど前課電効果は大きい。

(ii) 同極性電圧印加 $(+V_{1p} \rightarrow +V_{2p}, -V_{1p} \rightarrow$

$-V_{2p}, +V_{1DC} \rightarrow +V_{2p}, -V_{1DC} \rightarrow -V_{2p})$ での前課電効果は小さく、異極性電圧印加 $(-V_{1p} \rightarrow +V_{2p}, +V_{1DC} \rightarrow -V_{2p}, -V_{1DC} \rightarrow +V_{2p})$ で大きい。

(2) パルス電圧, 直流電圧で著しく異なる事項として

(i) パルス電圧では正極性電圧を前課電してもその効果は小さいのに対し、直流電圧では顕著な効果を示す。

(ii) トリー発生に及ぼす空間電荷効果の消滅時間は、パルス電圧の場合数 ms~数 s であるのに対し、直流電圧では数十 s ~ 10^4 s と極めて長く、正極性空間電荷の方が負極性空間電荷より消滅時間は長い。

最後に、本研究に対し御討議いただいた電気学会絶縁材料耐電界性専門委員会委員各位に厚くお礼申し上げる。また本研究に対しご援助下された本学電気工学科高橋重雄技官、試料を提供下された藤倉電線 (株) の関係各位に謝意を表す。

(昭和 52 年 2 月 25 日受付, 同 52 年 10 月 31 日再受付)

文 献

- (1) 純田・河村・家田:「直流電圧によるポリエチレンのトリーイング破壊現象」電学論 A, 95, 423 (昭 50-10)
- (2) 吉村・太田・佐竹・能登:「衝撃電圧および直流電圧によるポリエチレン中のトリー発生」同上 A, 96, 433 (昭 51-9)
- (3) 小崎・香月・清水・堀井:「極低温領域におけるポリエチレンのトリーイング現象」同上 A, 95, 292 (昭 50-7)
- (4) 中山・永田・吉田・大石:「ns パルスによるエポキシ樹脂の Treeing 破壊」同上 A, 95, 95 (昭 50-3)
- (5) 田中:「ポリマーへの電荷注入とその抑制法」第 9 回電気絶縁材料シンポジウム, II-2 (昭 51-9)
- (6) 鈴木・工藤・田中:「脱分極電流による PMMA エレクトレット中の直流トリーの検討」同上, II-4 (昭 51-9)
- (7) Y. Saito, M. Fukuzawa & H. Nakamura: "On the Mechanism of the Tree Initiation", Conference Records of 1976 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p. 201 (1976-6)
- (8) 松葉・丸山:「種々の電圧波形による架橋ポリエチレン絶縁の破壊特性」絶縁材料研資 EIM-76-56 (昭 51-10)
- (9) 吉村・佐藤・佐藤・能登:「直流および衝撃電圧によるポリエチレン中のトリー発生電圧の温度依存性」電学論 A, 97, 317 (昭 52-6)
- (10) 純田・河村・家田:「ポリエチレンの空間電荷形成に関連した直流トリーイング破壊の極性効果」同上 A, 96, 495 (昭 51-10)
- (11) 吉村・佐藤・福園・能登:「直流および衝撃電圧によるポリエチレン中のトリーの発生と進展」絶縁材料研資 EIM-76-57 (昭 51-10)
- (12) 田中:「ポリエチレンの不平等電界部分絶縁破壊(I)」電力中研報告 No. 176026 (昭 52-1)
- (13) 清水・小崎・堀井:「極低温領域におけるポリエチレン中への電荷注入と電界発光」電学論 A, 97, 6 (昭 52-1)
- (14) D. B. Watson: "The impulse electric strength of polythene as a function of voltage rise time", J. Phys. D, 4, L 19 (1971)
- (15) 天川・森内・吉田・大石:「ポリエチレンの電気伝導と絶縁破壊」電学誌, 84, 129 (昭 39-1)
- (16) A. Bradwell, R. Cooper & B. Varlow: "Conduction in polythene with strong electric fields and the effect of prestressing on the electric strength", Proc. Instn Elect. Engrs, 118, 247 (1971)