

油中間げき絶縁強度試験法の検討

A New Method on the Switching Surge Test of Insulating Oil

加 藤 勇 次 郎* 沼 尻 文 哉*

Yûjirô Katô

Fumiya Numajiri

要 旨

超高圧系統では絶縁レベルの低減が経済上の理由から必要となり、系統構成要素の開閉サージに対する絶縁耐力が設計上重要となってきた。現在電気学会の高電圧試験専門委員会開閉サージ分科会でも内部絶縁の開閉サージ耐力の調査を各研究所、メーカーの協力のもとに進めている。

内部絶縁の開閉サージ絶縁耐力を正確に求めるためにはまず、試験法を確立しなければならない。本論文はこの目的のための手始めとして、ケーブル絶縁油を対象とし各種の試験法について検討した結果を報告するのであり、最終的には油のかくはんまたは循環により放電履歴現象を取り除かなければならないことが明確になった。

1. 緒 言

開閉サージは電力系統内で遮断器の開閉時に発生する異常電圧であり、開閉の条件により種々の波形の電圧が発生する。その継続時間は雷サージと商用周波数の中間に広く分布している。実際に観測される開閉サージ波形は複雑であるが、試験設備の関係から一般に次の4種類を試験波形として考えている。すなわち(1)緩波頭波(2)単方向減衰振動波(3)減衰振動波(4)方形波である⁽¹⁾。このうち減衰振動波は極性が反転するため、単一極性波とは異なった作用を絶縁物に与えるものと考えられる。

開閉サージは特に近年、超高圧系統が発展するに伴い注目されてきている。275 kV以上の超高圧系統では経済的な理由から絶縁レベルの低減が必要となり、このため実際に発生する開閉サージと衝撃絶縁耐力との差が少なくなり絶縁設計上重要な問題となってくるからである。絶縁体の開閉サージ耐力いかによっては、これがケーブルの絶縁設計の基準となる可能性がある。

開閉サージに関する研究はCIGRÉを始めIEEEにおいて強力に進められているが、国内では電気学会の開閉サージ分科会が中心となって研究を行なっている。

本論文は電力ケーブル付属品の開閉サージ耐力の研究の基礎とする目的で、まず油中間げきの試験法について検討した結果をまとめたものである。

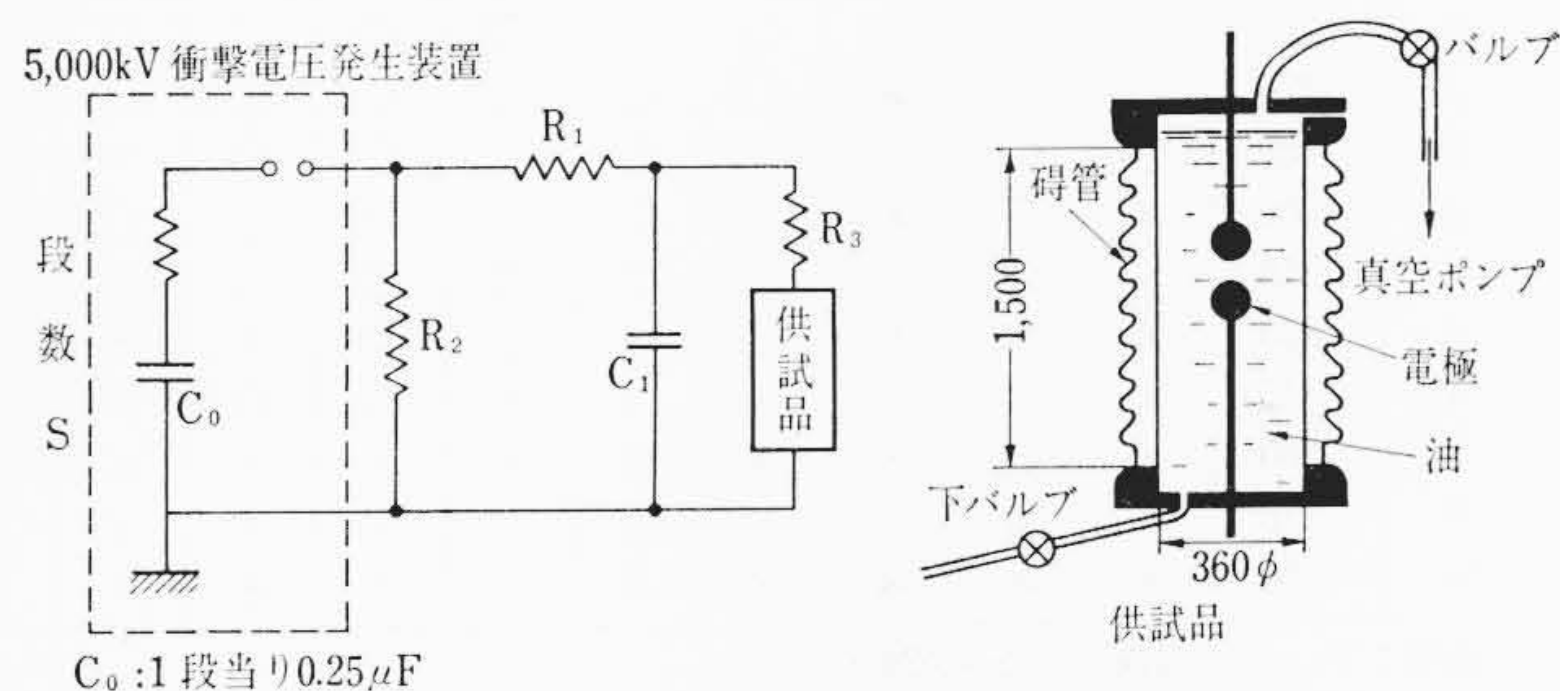
固体絶縁物を含んだ絶縁体の絶縁耐力を求めるときには、電圧印加方法として印加電圧を順次上昇させていく上昇法が用いられている。しかし、気体の場合には絶縁耐力は一定時間後には完全に回復するため、50%せん絡電圧を内そう法によって求め(JEC-106)これより統計的に耐圧値を決定することができる。

固体絶縁物を含まない油自体の耐圧値は上記のいずれの方法によって決定すべきか問題であるが、現在、開閉サージ分科会では気中中間げきあるいは気中沿面せん絡試験において用いられている昇降法(次節で説明する)で行なうことにしている。しかし得られた結果は油の種類、処理の仕方、そのほかの試験条件の違いにより耐圧値の絶対値が違ふことはもちろん、標準偏差〔放電率曲線を正規分布 $N(\mu, s)$ の累積分布曲線に等しいとした場合のその正規分布の標準偏差 S 〕が気中の場合に比べ非常に大きくなっている。この原因を調べるため種々の試験法を検討した。

2. 試 験 方 法

がい管内に電極を取り付け、OFケーブル含浸用の低粘度油(20

* 日立電線株式会社日高工場



回路定数 波 形 μs	R_1 k Ω	R_2 k Ω	R_3 k Ω	C_1 pF	S
1×40	0	4.5	1	0	20
80×2,780	20	∞	5	1,000	10
100×2,000	50	∞	1	1,000	20

図1 試験回路および装置

℃で15cp程度)を充てんして供試物とした(図1参照)。油は真空脱気処理したものであり、電極または波形を変えるごとに油ろ過機でろ過処理をした。

電圧印加法としてはヨハンセン法、これを变形した筆者らの方法、昇降法、上昇法などについて検討した。

3. 各種試験法による試験結果

3.1 ヨハンセン法による試験結果(かくはんなしの場合)

この方法はヨハンセン氏が提案した方法で、内そう法の一つである⁽²⁾。次の手順で試験が行なわれる。

- 適当な回数放電させて0%放電電圧、100%放電電圧を決定する。
- この間を6~8分割し、下から20回ずつ電圧を印加し、各電圧での放電率を求める。
- 上で求めた放電率を正規確率紙に描き、回帰分析を行ない50%放電電圧(V_{50})、標準偏差(S)、信頼限界を求める。
- それぞれの目的に応じ耐圧値($V_{50}-2S$ または $V_{50}-S$)を求める。

本方法の欠点は印加回数が多いことである。たとえば電圧が10段階の場合は合計200回の印加を必要とする。

試験結果の一例を表1に示す。各電圧段階の印加回数が10回と少ないせいもあるが、放電率が電圧とともに増加せず、この結果を正規確率紙に描いても50%放電率 V_{50} を求めることはできない。これは極端な例ではあるが、ほかの結果にもこのようなバラツキは多かれ少なかれ含まれている訳である。

表 1 ヨハンセン法による放電状況 油温 23.8℃

段階	電 圧 (kV)	せ ん 絡 状 況										放電率 (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	285	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0
2	300	×	○	○	○	×	×	×	○	○	○	40
3	315	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	20
4	330	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	30
5	345	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	10
6	360	○	○	○	×	○	×	○	×	○	○	30
7	375	×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	30
8	390	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	100

備考：125 mmφ 球-球電極間げき長 10 mm
交流耐圧 64 kV (JIS 法)
波形 -80×2,780 μs
印加法 1 分間隔 かくはんしない

表 2 筆者らの方法による放電状況 油温 23.8℃

段階	電 圧 (kV)	せ ん 絡 状 況										放電率 (%)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	255	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0
2	270	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	10
3	285	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	20
4	300	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○	30
5	315	×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	50
6	330	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	60
7	345	×	×	○	×	×	×	○	○	×	×	70
8	360	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	80
9	375	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	100
10	390	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	100

備考：V₅₀=325 kV, S=42 kV
125 mmφ 球-球電極 間げき長 10 mm
油耐圧 64 kV/2.5 mm
波形 -80×2,780 μs
1 分間隔印加 かくはんしない

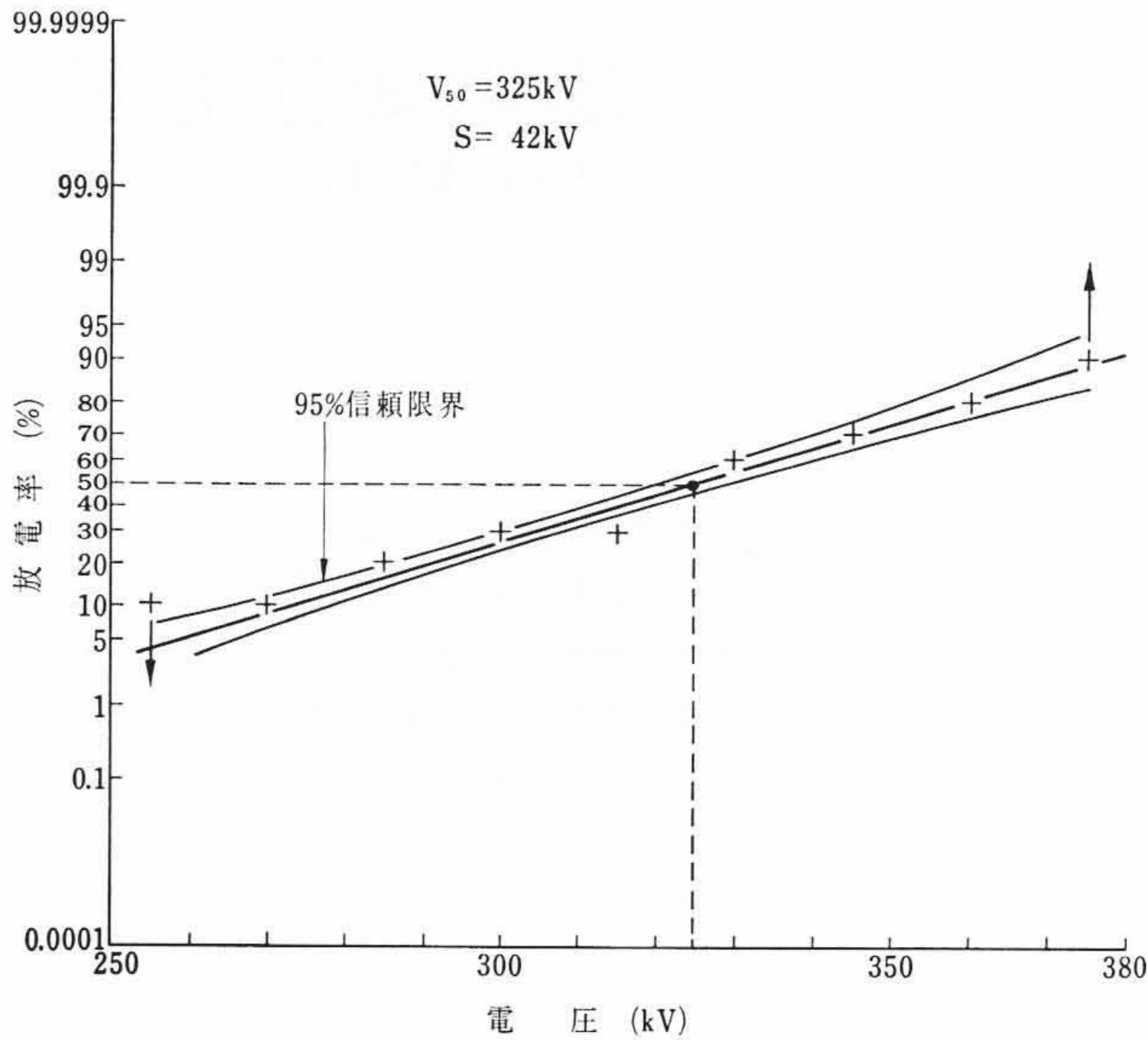
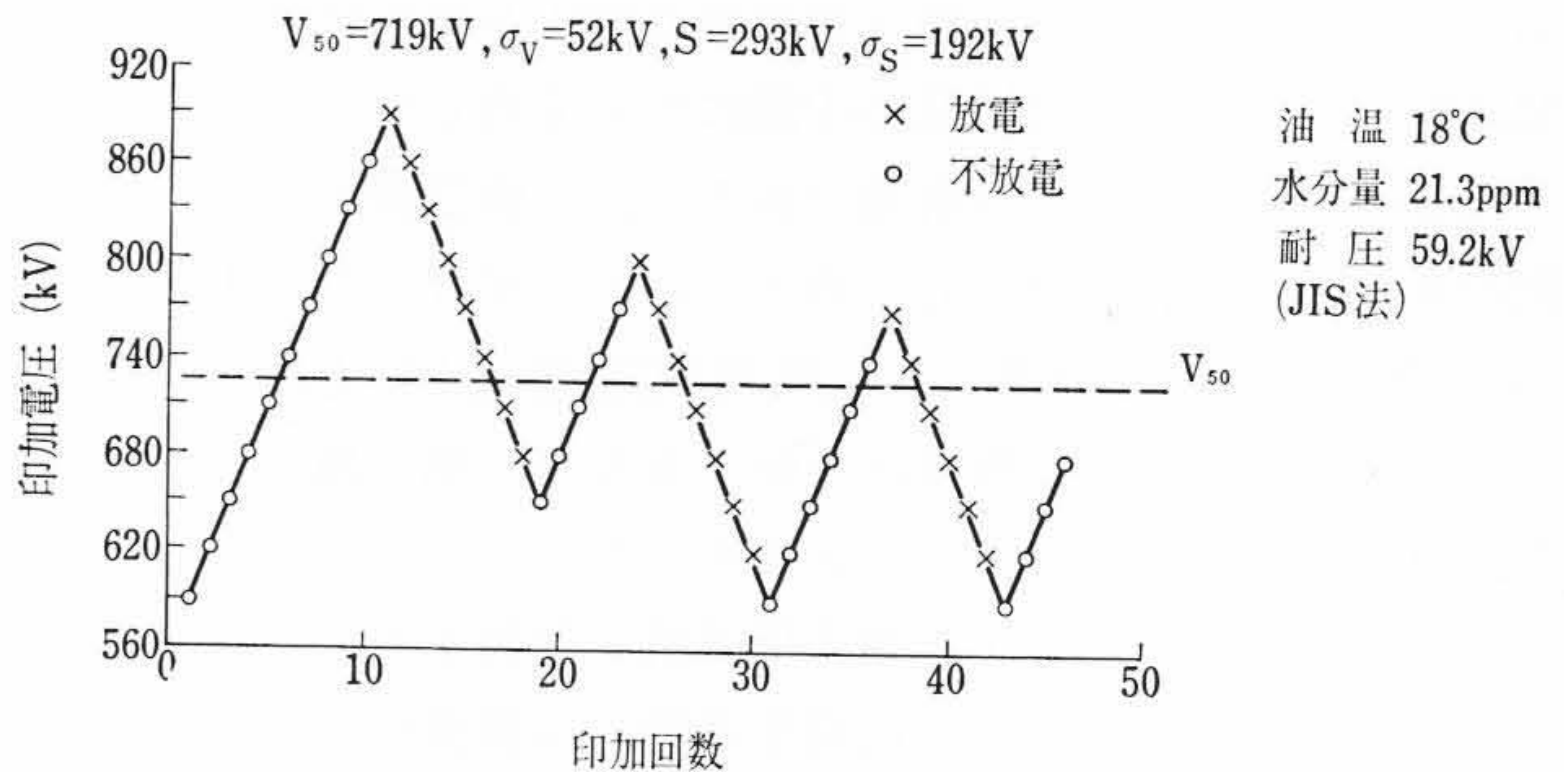
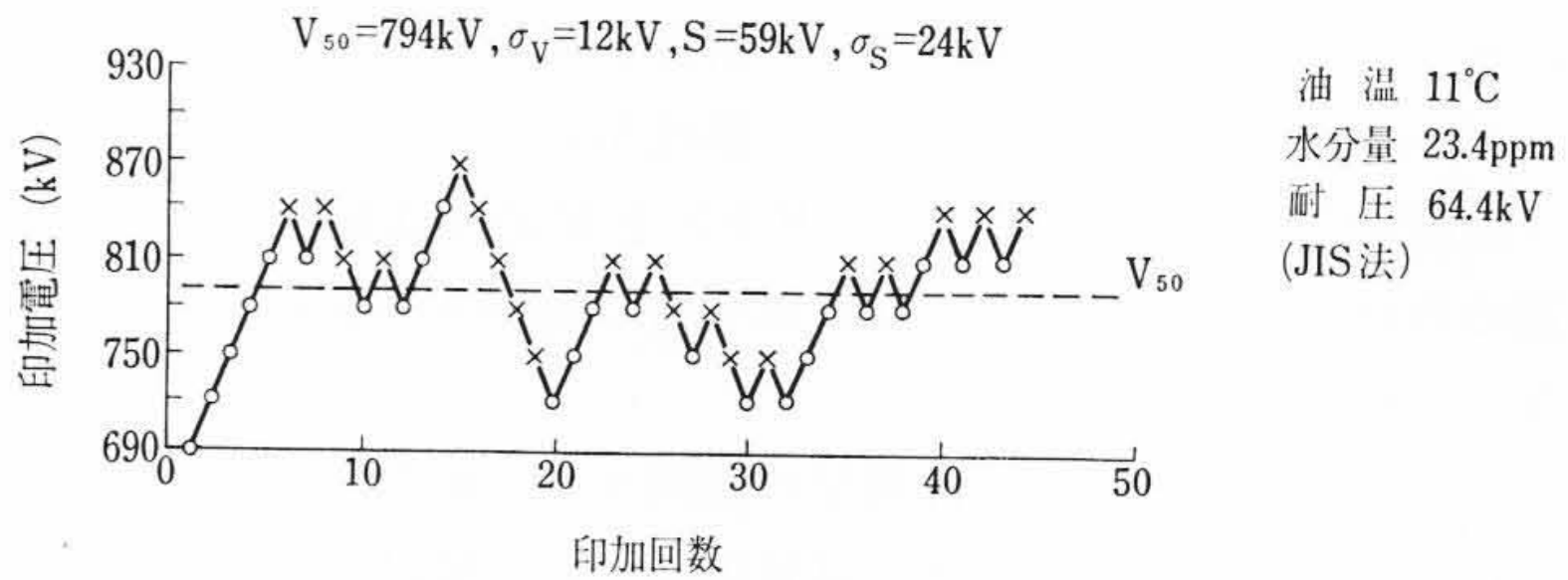


図 2 筆者らの方法による放電率曲線



(a) 1 分間隔で印加



(b) 1 分間隔で印加、放電した場合は印加電圧の約80%以下の電圧を4回印加し、放電しないことを確めてから所定の電圧を印加
電極：125mmφ球-球電極 間げき長 20mm(+1×40μs 波)

図 3 昇降法による放電状況

3.2 筆者らの方法による試験結果（かくはんなしの場合）

この方法は前記ヨハンセン法あるいは後述する昇降法による試験を行なっている際、一度放電すれば次も放電しやすく、またいったん放電しなくなると電圧が高いにもかかわらず放電しない状態が続くという履歴現象が見られたことから考えたものであり、確率化されたヨハンセン法と呼べるものである。

これは次の手順で試験された。

- (a) 適当な回数放電させ0% 放電電圧，100% 放電電圧を決定する。
- (b) この間を6～8分割し、各電圧段階を乱数表によりランダムに選びおのおの1回ずつ印加する。この操作を20回くり返し、各電圧段階での放電率を求める。
- (c) 上で求めた放電率を正規確率紙に描き、回帰分析を行ない、50% 放電電圧(V₅₀)，標準偏差(S)，信頼限界を求める。

試験結果を表2に示す。ここでは(b)の操作を10回行なっている。表からもわかるように放電率は電圧の上昇とともに増加し、この結果より求めたV₅₀，Sなどの信頼限界はきわめて狭い(図2)。これは放電履歴の影響が印加順序をランダムにすることにより均等に分散されるからと考えられる。しかしこの方法でも放電履歴を認める限り、V₅₀または耐圧値を本来の値とは違う値に見積るのではないかという疑いは残る。

放電履歴の存在は次の実験事実から認められた。すなわち10回の連続印加で放電しない電圧V₁と、10回とも必ず放電する電圧V₂とを交互に1分間隔で印加した場合、V₁の電圧でも40%の放電率を示した。その後V₁を連続10回印加しても1度も放電していない。V₁とV₂を交互に5分間隔で印加した場合、V₁の放電率は30%であった。このように放電履歴現象が存在すること、および5分間放置してもこの履歴は取り除かれないことがわかった。

履歴の原因として電圧印加または放電による空間電荷の生成およびカーボン粒子の発生が考えられるが、時間間隔をどれだけ取ればこれらが再結合または拡散して、元に近い状態に戻るかということは油の種類、温度などにより異なり規定しにくい。また印加時間間隔を長くすれば試験に要する時間が長くなり不利な面も存在する。

3.3 昇降法による試験結果（かくはんなしの場合）

本方法は少数回の印加回数でV₅₀，Sを推定する統計的方法であり、文献⁽³⁾にも詳しく紹介されているのでここでは実験の手順のみ簡単に述べる。

- (a) V₅₀ およびSの大略の値を推定する。
- (b) 推定されたV₅₀ 付近の値を中心に一定間隔で印加電圧を階段的に変化させるよう準備する。間隔はできるだけSに近いほうがよい。

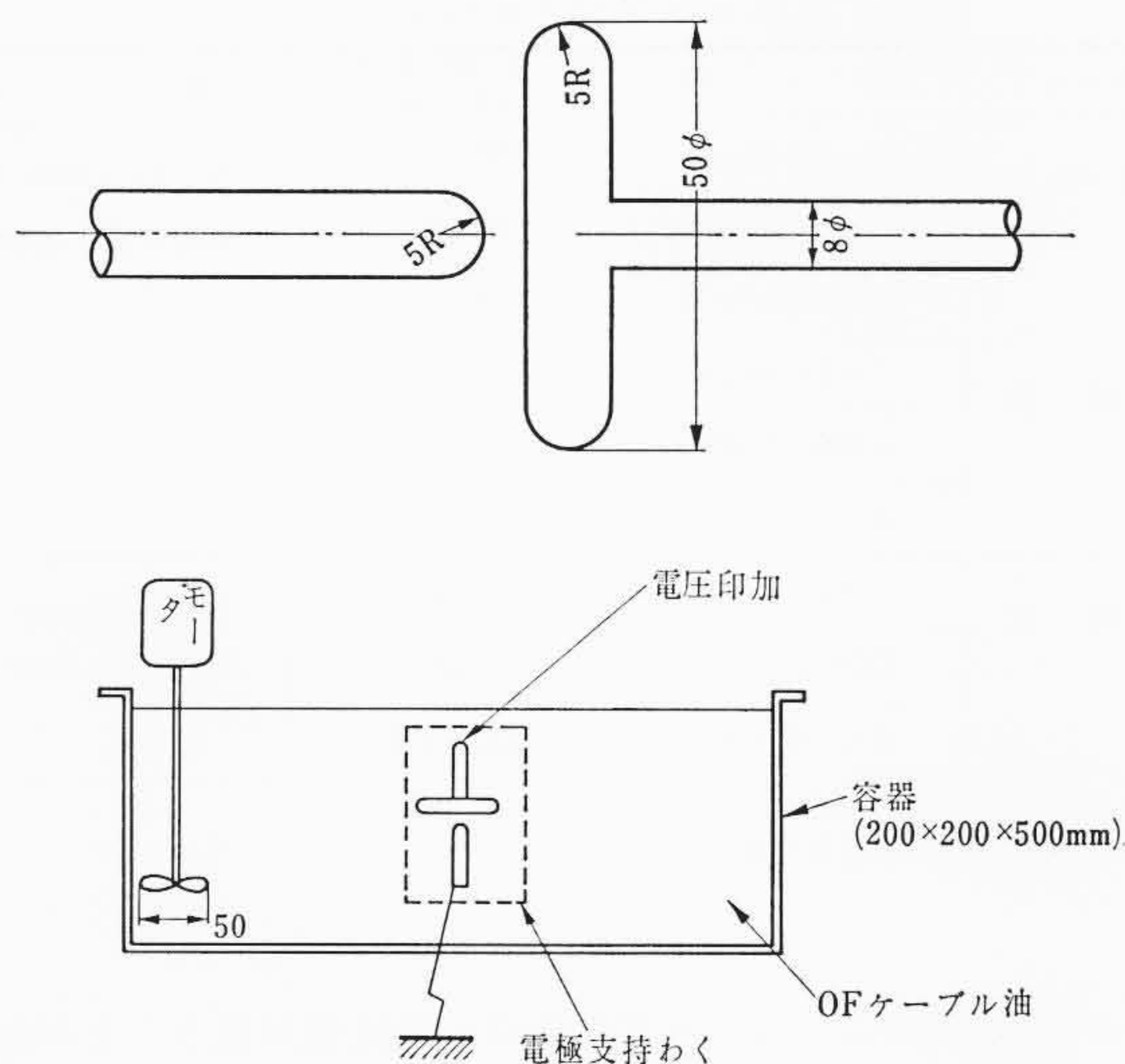


図4 かくはん装置図

(c) 第1回目にある電圧を印加し、放電すれば第2回目は1段階下の電圧を印加する。もし放電しなければ1段階上の電圧を印加する。この操作を40～50回以上繰り返す。

(d) 計算式により V_{50} , S およびそれらの信頼限界を推定する。

図3に結果を示す。(a)は印加時間間隔はすべて1分である。一度放電すると続いて放電しやすく、いったん放電しなくなると再び上昇するという傾向がみられる。

そこで、放電後、放電が起こらないような低い電圧を印加することにより、油は元に近い状態にかえるのではないかと想像される。このことを確かめるため、次の方法で昇降法の試験を行なった。すなわち、時間間隔は1分で、放電した場合は次の印加電圧の約80%以下の電圧を4回印加し、放電しないことを確かめてから所定の電圧を印加する方法である。この結果を図3(b)に示す。

(a)の結果に比べ、 V_{50} は上昇し、 S も約1/5となっている。この差異の原因ははっきりしないが、低電圧により空間電荷その他がはじき飛ばされて放電履歴の影響がある程度取り除かれたと考えられる。

ほかに棒対平板電極で行なった結果では、標準衝撃波を印加した場合には放電履歴はあまり認められなかったが、開閉サージを印加した場合には認められた。このように放電履歴は電極の形状、波形によっても違って来る。

3.4 油のかくはんの影響

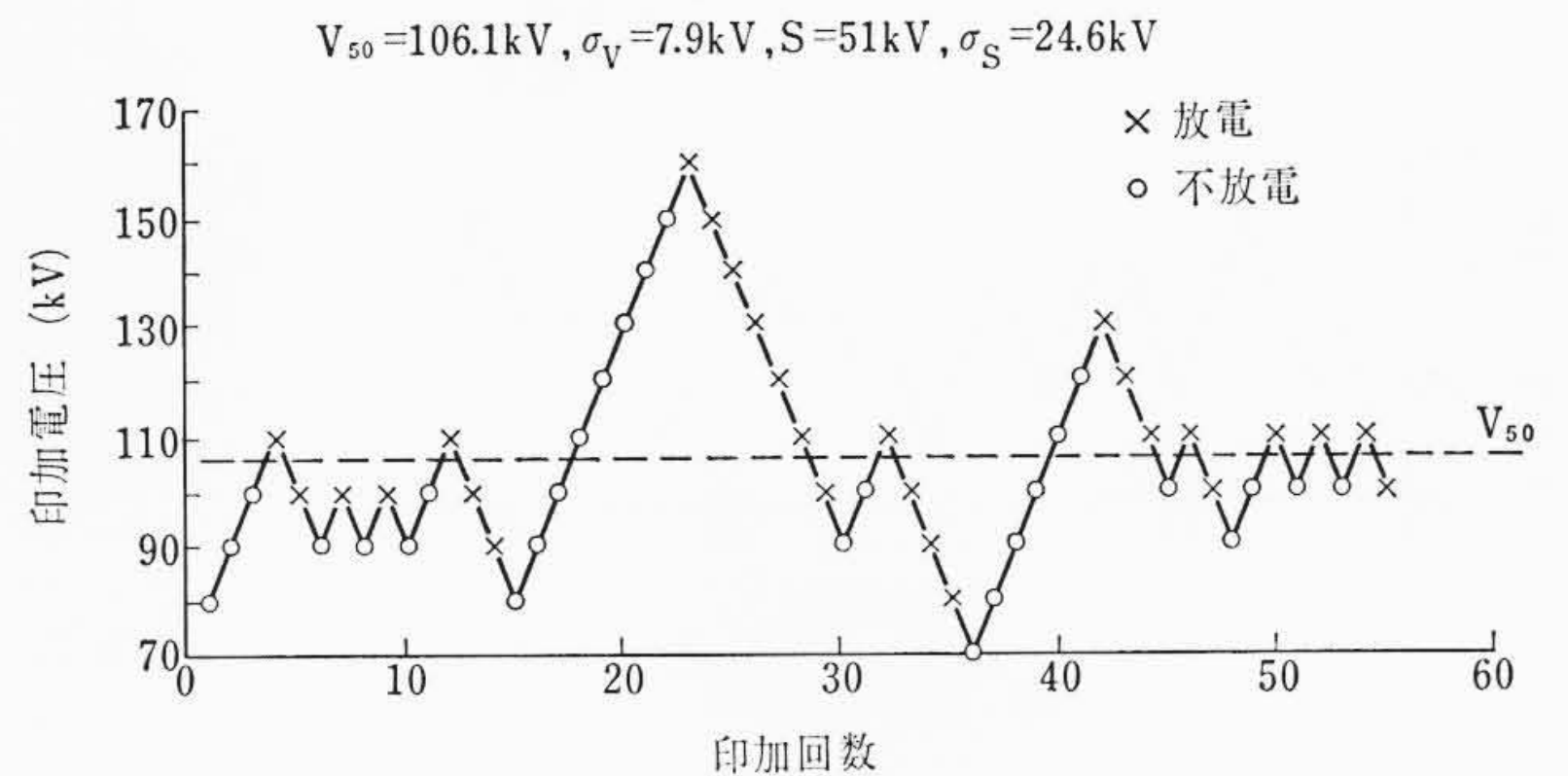
以上の試験では油の循環またはかくはんを行なわなかった。これはかくはん装置をつけると実験がめんどろになるため省略したいのであるが、しかし結果は放電履歴の影響があり、 S が V_{50} の50%に達する場合もあった。そこで小形な装置によりかくはんの効果を調査した(図4参照)。

図5は半球対平板電極で行なったかくはんのありなしの結果を示すものである。 V_{50} はかくはんありなしで差はないと考えてもよいが、 S はかなりの差が生じていることがわかる。

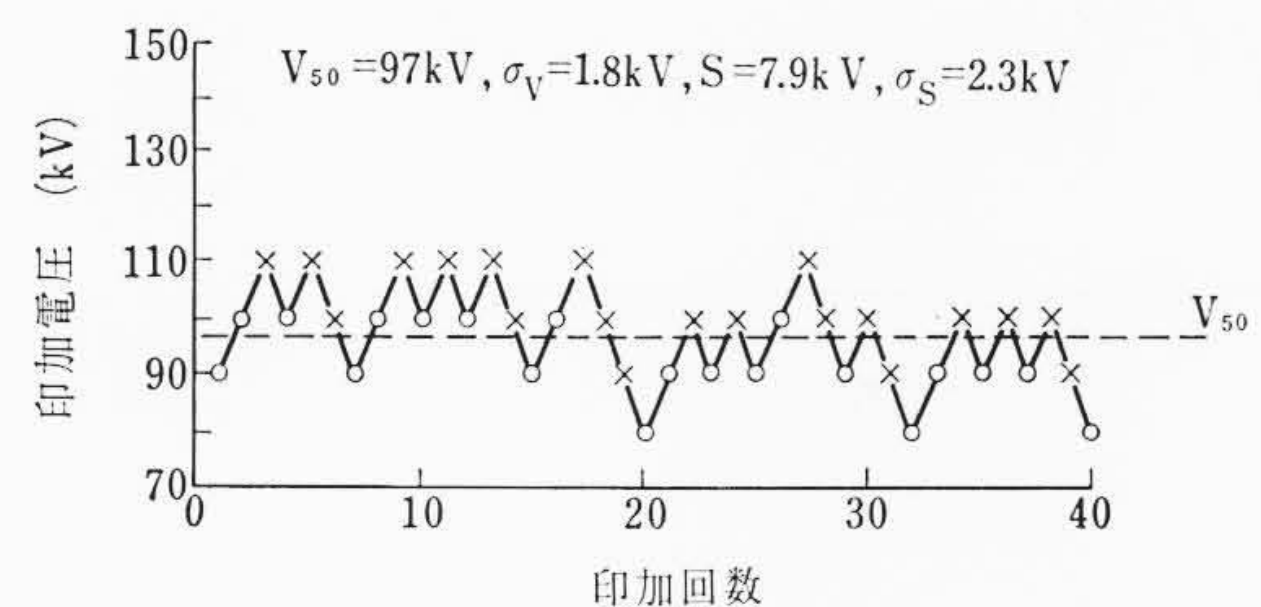
かくはんありの場合には110 kVでは必ず放電しているが、かくはんなしの場合には150 kVでも放電しないことがある。この原因は明らかでないが、空間電荷の効果と推測している。

3.5 かくはんした場合の各種方法の比較

前節でかくはんした場合には履歴現象もみられず、 S も小さく出ることから、絶縁油本来の特性が得られているものと考えられる。もしこれが正しければ各種試験法で得られる結果の違いは同じ放電率曲線から理論的に推定されるものに等しくなるはずである。



(a) かくはんなし



(b) かくはんあり

半球—平板電極 間げき長 3 mm
波 形: $-1 \times 40 \mu s$ (平板側負)

図5 昇降法による放電状況

表3 ヨハンセン法と昇降法による結果
(半球—平板電極, かくはんあり)

方 法	V_{50} (kV)	S (kV)
ヨハンセン法	146	18
昇 降 法	145 (2.6)	11.8 (3.7)

() 内はそれぞれの標準偏差

(注) ヨハンセン法の放電率データ

電 圧 (kV)	130	135	140	145	150	155	160	165	170
放 電 率 (%)	0	30	50	40	30	70	80	90	100

表3はヨハンセン法と昇降法の結果を示したものである。 V_{50} は両者とも一致しているが S はヨハンセン法のほうが大きく出ている。しかしバラツキ範囲まで考えれば一致しているといえる。シミュレーションによれば一般に昇降法よりもヨハンセン法によるほうが S が大きく出る。ここで使用したヨハンセン法は各電圧とも10回の印加であり印加回数が少ない。かくはんを行なっても放電率は電圧とともに一様に上昇しておらず、さらに多数回の印加が必要と考えられる。

上昇法で試験した場合の破壊電圧の分布は次式で計算できる⁽⁴⁾。

$$Q(V) = P(V) \prod_{n=0}^{N-2} [1 - P(V_s + nV_d)] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $P(V)$: 電圧 V を印加したときの放電率

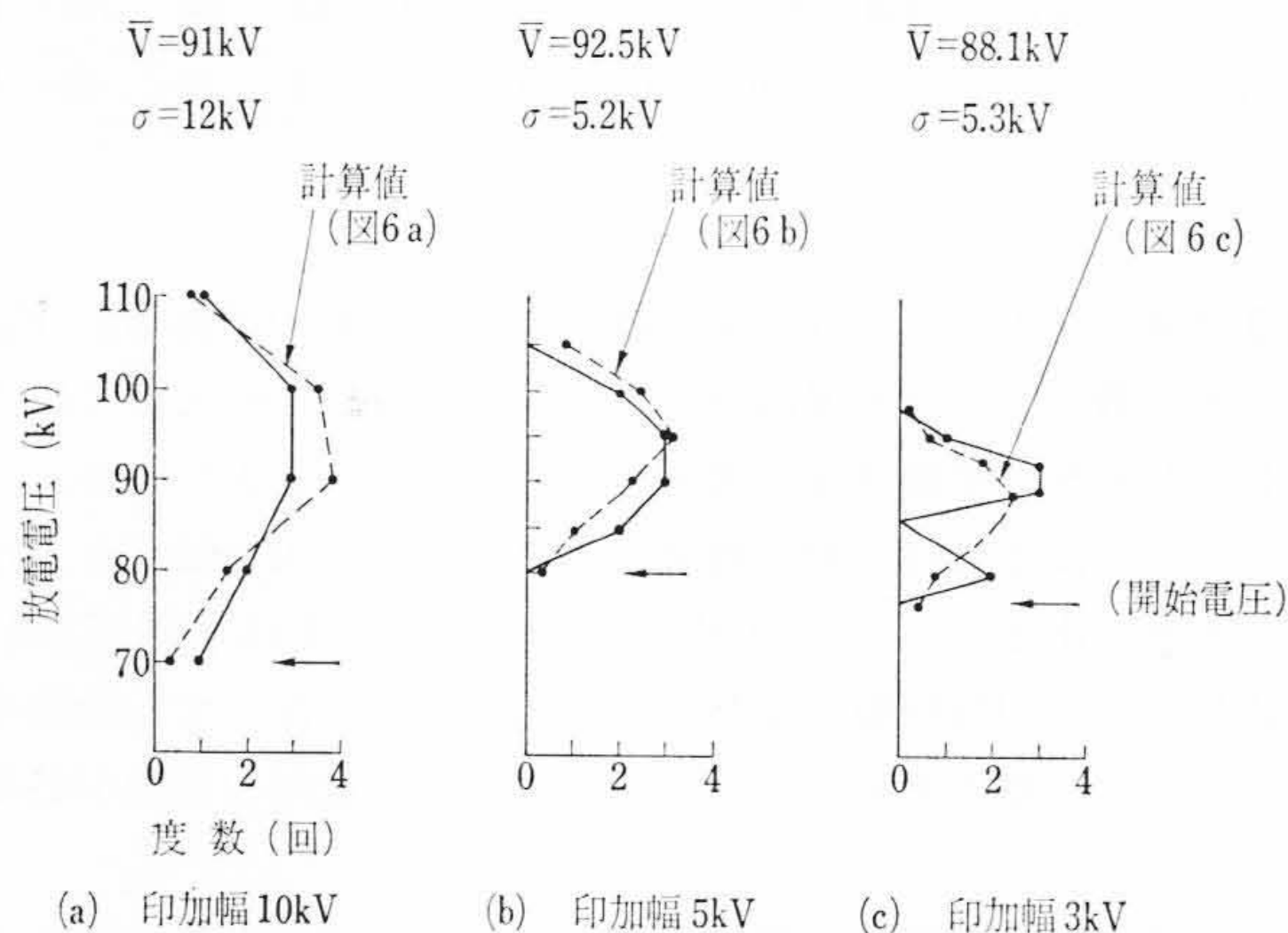
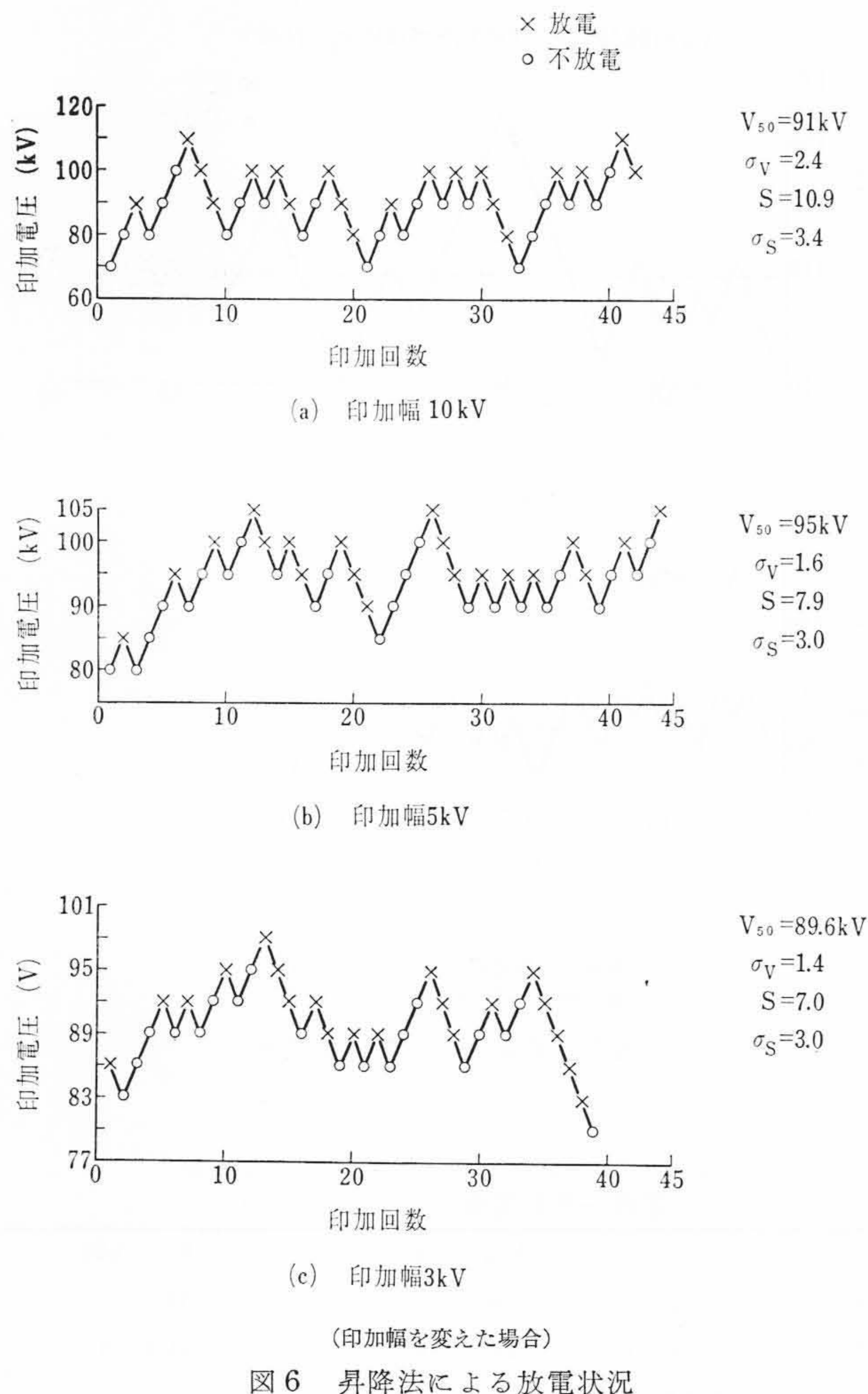
$Q(V)$: 電圧を上昇させていったとき電圧 V で放電する確率

V_s : 印加開始電圧

$$V = V_s + (N-1)V_d$$

いまは放電率曲線を正規累積分布に等しいと仮定しているので、この式を用いれば昇降法で得られた特性値を使用して上昇法で試験した場合の放電電圧の分布を計算することができる。

図6に昇降法による結果を、図7にその直後に行なった上昇法での結果を示す。図6の昇降法は印加幅を変えたときに特性値がどのように変化するかをみたものであるが、印加幅による傾向は特に



みられない。シミュレーションによる結果でも電圧印加幅が S の 0.5~1.5 倍の間では特別な傾向はみられていない。図 5 は上昇法による放電電圧の分布である。(1) 式による計算値と実測値はほぼ一致しているといえる。上昇法の場合、理論的には印加幅が小さくなれば放電電圧の平均値は下がり、標準偏差は小さくなる。したがって上昇法で各種の試験をする場合には印加幅などについても考慮しなければならない。

4. 考 察

電極間隔の大きい領域を試験する場合には装置も大きくなり、油のかくはんの装置が複雑になるが、かくはんしない場合は履歴現象

表 4 各種油中間げき絶縁耐力 (上昇法)

供試ギャップ	波 形	電 位 傾 度 *2 (kV/cm)	備 考
棒 対 平 板	$-1 \times 40 \mu\text{s}$	36~44	棒 : 12.5 mm 角 間げき長 10 cm の データ
	$-100 \times 2,000 \mu\text{s}$	32~50	
	AC 50 c/s *1	24~30	
棒 対 棒	$-1 \times 40 \mu\text{s}$	50~60	
	$-100 \times 2,000 \mu\text{s}$	44~58	
	AC 50 c/s	31~40	
球 対 球	$+1 \times 40 \mu\text{s}$	350	球 : 125 mm ϕ 間げき長 2 cm の データ
	$230 \times 2,200 \mu\text{s}$	290	
	AC 50 c/s	250~275	

*1 25 kV/s の連続上昇
*2 放電電圧を間げき長で除したもの

が現われ、試験法によって放電率曲線の特性値が違うことが示された。この履歴現象は電極形状、電極配置または波形によっても異なる。棒対棒または棒対平板電極において標準インパルス波に対しては履歴はほとんどみられないが、開閉サージに対してはみられる。球対球の場合は垂直配置より水平配置のほうが履歴現象は少ないようである。履歴現象がある場合には昇降法による結果から計算した S は大きくなり、したがってこれより計算した耐圧値は無意味なほど低くなってしまふ。さらに各段階 20 回ずつの上昇法では V_{50} 以上になっても 1 回も放電しないということがあり明らかに不合理である。3.3 で述べたように昇降法において 1 回放電したなら、かなり低い値を適当回数印加し放電しないことを確かめてから所定の電圧を印加するという方法を採用すれば S は小さく出るが、低い電圧を印加する回数の規定の仕方にも問題があり試験法として採り入れるのがむずかしい。

履歴現象をなくすためには、放電した場合休止時間を長くするという方法もあるが、これは全体の試験の長時間化を招き、油と外気とが接触しているような試験のやり方ではその間のガス吸収、水分吸収、ゴミ混入などにより油の特性自体に変化が起こることも考えられるので好ましくない。したがって、装置は多少複雑になるが、油を循環またはかくはんさせるのが一番確実である。かくはんを行えば各種試験法から得られた結果は形式上異なるが本質的には同じ放電率曲線から予想されるものとなるようである。

次にかくはんした場合の各種試験法の特長を記す。

(1) ヨハンセン法は 100 回程度の印加回数ではかくはんを行なっても、なお放電率が電圧とともに一様に増加しない。正規には各段階 20 回ずつの印加であるが印加回数が多く、ほかの試験法に比べ電極の損傷、試験時間の点で不利である。

(2) 昇降法は 40 回前後の印加回数で、ある程度の精度のものが得られる簡便な方法である。放電回数は印加回数の約半分の 20 回程度であり電極損傷も比較的少なくてすむ。

(3) 上昇法は印加回数の点で開始電圧、放電値の個数の選び方によっては必ずしも昇降法より有利であるとはいえないが、10 個の放電値をうるときはほぼ昇降法と同じ程度にすることができる。印加幅により平均放電電圧、標準偏差が異なってくるので、この点をデータ処理の際には考慮に入れなければならない。将来固体絶縁物を含む試料の開閉サージ試験を行なうことを考えれば、油の段階から上昇法で行なったほうが結果の比較には適当という考え方もある。

(4) 筆者らの方法(確率化されたヨハンセン法)は印加回数の点ではヨハンセン法と同じように多いので不利であるが、多少放電履歴が存在してもそれらは平均化されて結果のバラツキを少なくする。

5. 結 言

以上油中間げき絶縁強度の試験法に関する検討結果について述べた。油の絶縁耐力を決定するには放電履歴現象を取り除くために油のかくはんまたは循環をしなければならない。またデータ取り扱いの際には各試験法の特徴を考慮に入れなければならない。

表4は油の絶縁耐力の一例を示したものであるが、これは上昇法で行なった結果である。球対球間げきの絶縁耐力は棒対棒または棒対平板のそれに比べ10倍程度高い。開閉サージ耐力は球対球間げきを除き標準インパルス耐力とほとんど変化ない値を示している。

油の開閉サージ耐圧の標準インパルス波または交流耐圧に対する

比を決定するには、さらに多くのデータの集積が必要であり今後に残された課題である。

終わりに、ご意見ご指導を賜った開閉サージ分科会の広瀬主査ならびに関係各位、日立電線株式会社研究部依田主任研究員および実験に当たってご協力いただいた各位に感謝する次第である。

参 考 文 献

- (1) 尾崎： オーム，85（昭38-2）
- (2) 電気学会技術報告 第70号，15（昭40-8）
- (3) 笈川： 日立評論 38，667（昭28-5）
- (4) R. Hancox： IEE Monograph No. 293（Feb. 1958）



特 許 の 紹 介



特許 第487089号（特公昭41-12974号）

小松原 毅 一・黒 野 浩 和

半 導 体 発 振 素 子

p形，n形不純物を多量に含み，しかも再不純物でその作用が互いに補正されているGeあるいはSi素子は77°K以下の極低温度に保つと，急しゅんな電流制御形負性抵抗特性を示す。このような特性を示す素子はクライオーサと呼ばれ，スイッチング素子または記憶素子として有望視されている。

この発明はクライオーサに磁界を印加して発振作用を生ぜしめるもので，図1のようにクライオーサの電流方向に対し直角方向に適当な磁界を加える簡単な回路で，発振出力を取り出すことができる。この発振の理由は明らかでないが，発振周波数が磁場の強さ，試料

の大きさおよび不純物濃度などに依存する点から考えて，絶縁破壊現象に同期的な何らかの不安定性の発生によるものと推測されている。

図2は図1の装置でクライオーサ素子としてInを 10^{15} atoms/cc，Sbを 0.8×10^{15} atoms/cc添加したGe単結晶角棒（ $2.7 \times 2.7 \times 5.15$ mm³）を使用し，液体ヘリウムの温度で，素子に磁界を印加した場合の磁界の強さと発振周波数との関係を示すもので，図から明らかなように周波数と磁界とは直線的関係にあり，1Kエルステッド以上の磁界の印加によって発振の生ずることを示している。（志村）

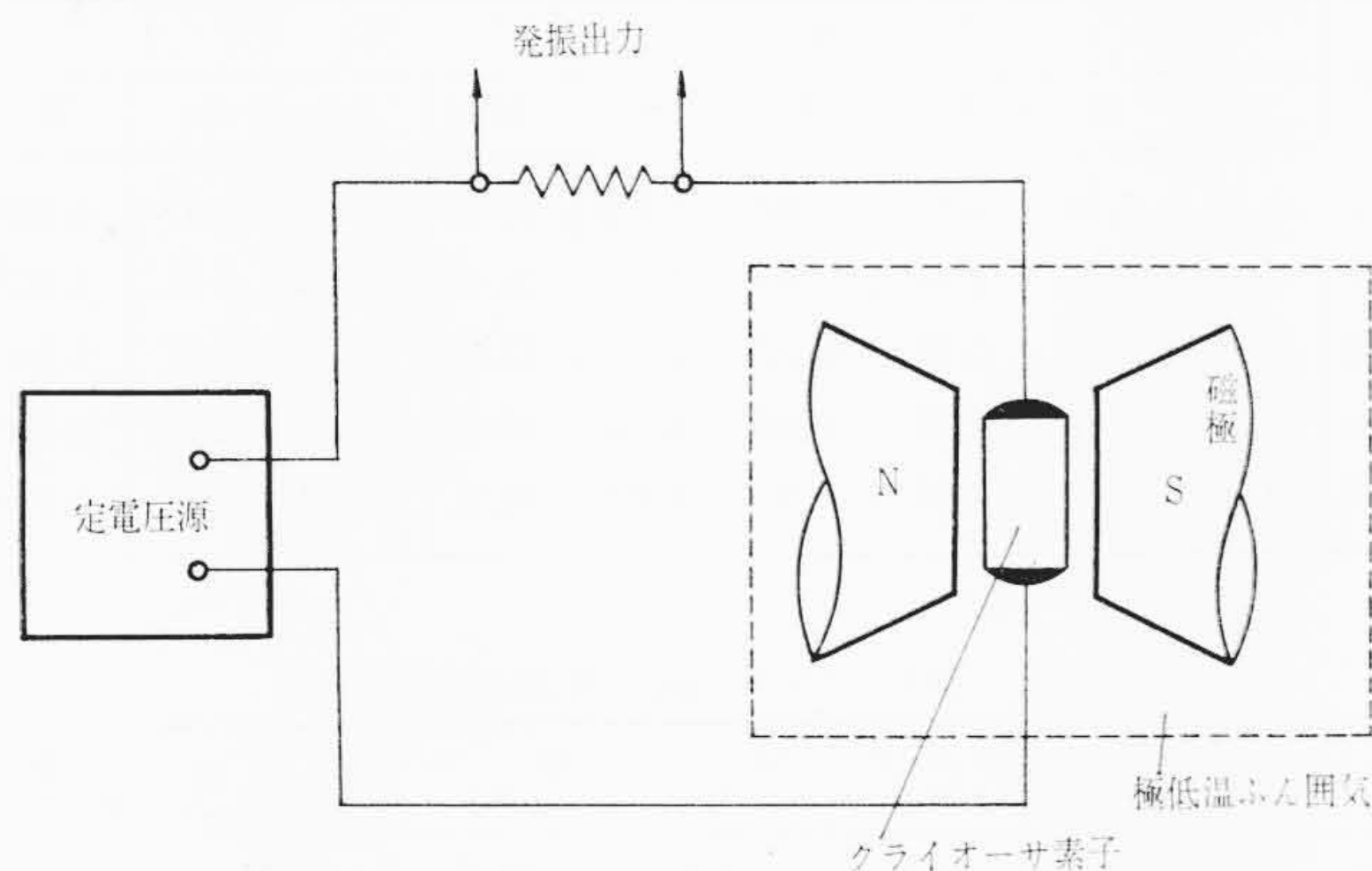


図 1

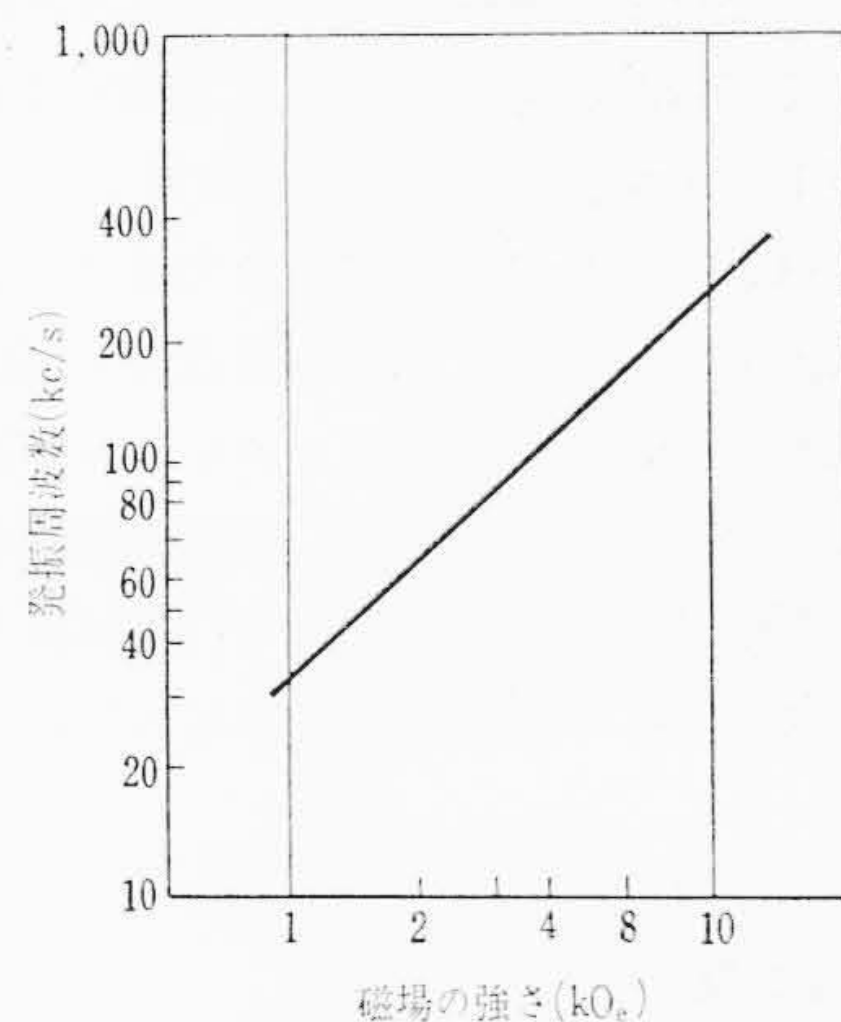


図 2

特許 第476692号（特公昭40-24292号）

永 田 穰

ダ ー リ ン ト ン 接 続 ト ラ ン ジ ス タ 回 路

ダーリントン接続回路は種々のトランジスタ回路に用いられている。たとえば，直列制御式のトランジスタ安定電源装置の制御用トランジスタとして用いた場合，負荷の短絡などにより過大電流が流れ，トランジスタが破損する場合がある。このような過電流の流入を防止するには入力電圧を遮断すればよいが，このためには特別のスイッチを設ける必要がある。

本発明はこのような欠点を除去するためにダーリントン回路自体をスイッチとして使用するもので，図1および図2に示すように個々のトランジスタのエミッタとベース間，あるいは個々のトランジスタのエミッタと等価ベースBとの間をスイッチにより短絡するようにしたものである。

このように構成すると回路構成上も有利であり，かつE—C間の耐圧がきわめて大きくなり，有効に過電流を防止することができる。（井沢）

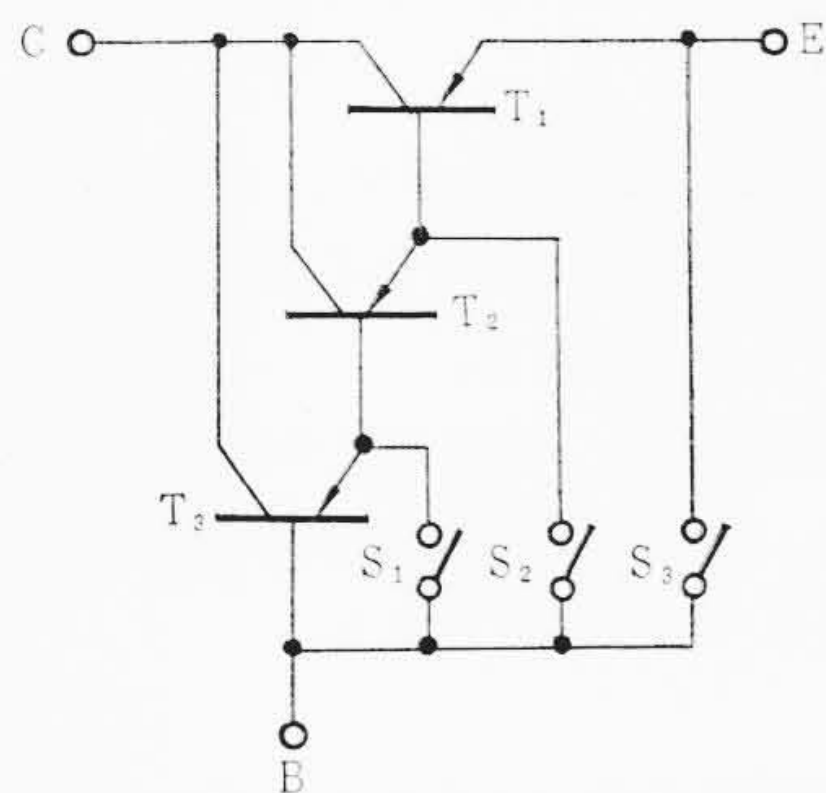


図 1

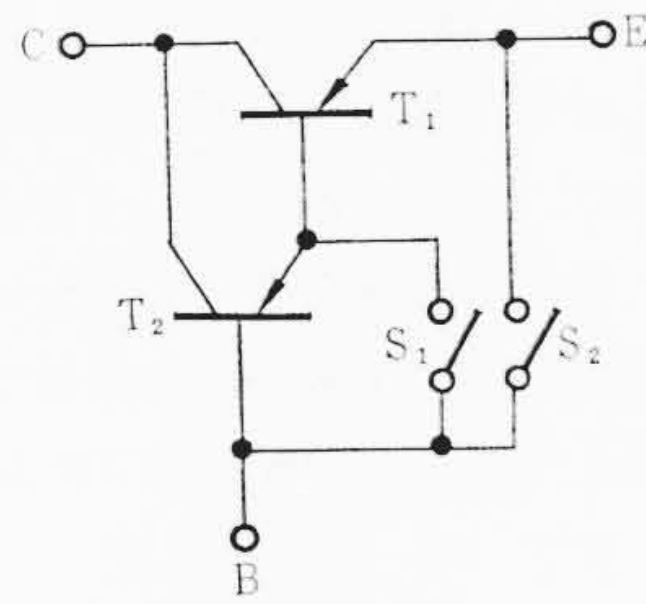


図 2