

火花消去素子としてのシリコンカーバイド・バリスタの特性

The Characteristics of SiC Varistor as a Spark-Suppressor

田 島 喜 平 太* 三 谷 正 一*

Kiheita Tajima

Shoichi Mitani

内 容 梗 概

最近の交換機器の長寿命化に伴い、その寿命を左右する接点の保護が重要な問題となり、放電による1駆動当りの接点損耗がたとえ微少であつても、これを抑制しなければ接点の長寿命は保証できないので、取付面積が小さく、安定で、しかも安価な保護素子が要求され、比較的小電流を開閉する接点の保護としてシリコンカーバイド・バリスタが取りあげられた。

本文では今回、交換機器接点の保護素子として製作したシリコンカーバイド・バリスタについてバリスタの一般的特性ならびに火花消去素子として要求される諸性能に対し、本バリスタの有する諸性能の検討結果ならびにワイヤスプリング・リレーについてその使用効果を検討した結果を述べ、製作したバリスタが火花消去素子として十分使用しうることを示してある。

1. 緒 言

電話交換機に使用される継電器の寿命が接点によつて左右されることは周知のとおりであるが、その寿命をもたらす要因である接点の損耗、移転ならびに接触不良は主として接点開閉時の放電に起因する。近年ベル・システムで開発されたワイヤスプリング・リレー⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾の寿命は40年間、最大駆動回数10億回といわれているが、かかる長期間きわめて多数回の接点開閉に対して接点の寿命を確保するためには、従来無視されたような一回の接点開閉ではごく軽微の損傷しかもたらさない放電に対しても、これを抑制するよう考慮されなければならない。したがつてこのために使用される火花消去素子の使用数が非常に多くなる。しかし、これにすべて従来のCR火花消去器を使用するとなると大きな取付面積を必要とし、また経済的にも高価となる。そこで取付面積をあまりとらず、取り付け容易で、廉価、かつCR火花消去器と同

程度以上の信頼性のある火花消去素子が要求される。

低電圧用シリコンカーバイド・バリスタは対称性非直線抵抗体であり、避雷器として使用された従来の高電圧用のものから、受話回路用、定電圧装置用など他の用途のため開発されたが、これは上記の接点の火花消去素子としての要求をある程度満たすものである。第1図写真はバリスタと、MPコンデンサを使用したCR火花消去素子を対比したものであるが、バリスタはCR火花消去器に比し非常に小さく、取り付けも容易である。今回日立製作所において、このシリコンカーバイド・バリスタを改良し、火花消去素子として十分な性能を有し、種々の周囲条件に対しても所要の条件を満足し、かつ長期間その性能を保つべく検討を加えてきたが、一応の成果を得たので報告し、関係各位の御指導御批判をあおぎたいと思う。

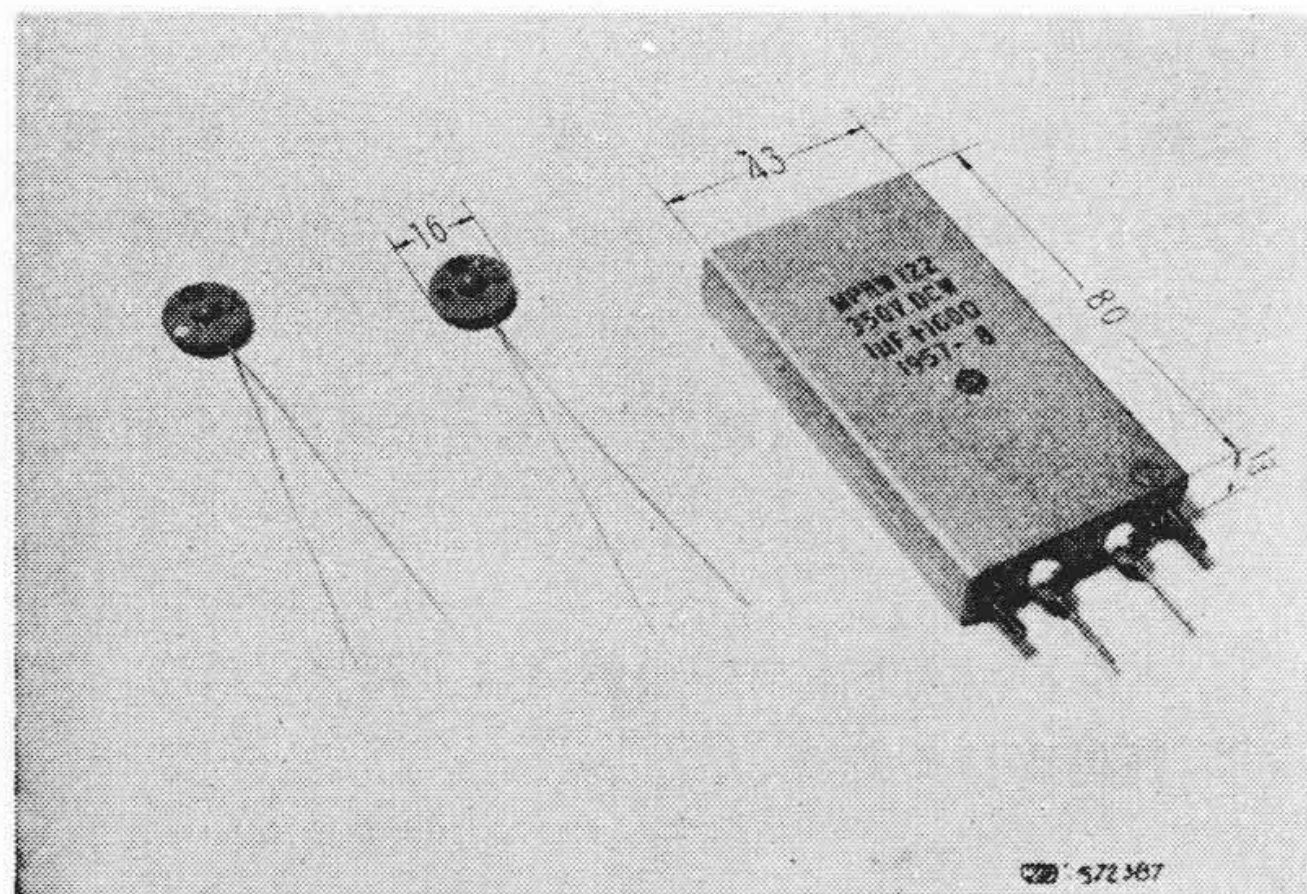
2. シリコンカーバイド・バリスタの一般的特性と火花消去原理

バリスタ (Varistor) とは Variable Resistor すなわち印加電圧の上昇に伴い抵抗値の減少する非直線素子のことで、非対称バリスタと対称バリスタがある。ここで述べるシリコンカーバイド・バリスタは既述のごとく対称バリスタで、しかも従来使用された弁抵抗避雷器に比し抵抗の低い、通信機用接点の火花消去用のものである。

この構造は、シリコンカーバイド (SiC) の、適当な粒度に粉碎した粒子をセラミック結合剤と混合し、圧縮成形して、高温で焼結した外径約16mm、厚さ約1mmの本体に、メタリコン法で電極をつけて素子としたもので、無半田巻付接続のできる端子を有する。以下に述べるような火花消去素子として所要の諸特性を有する。

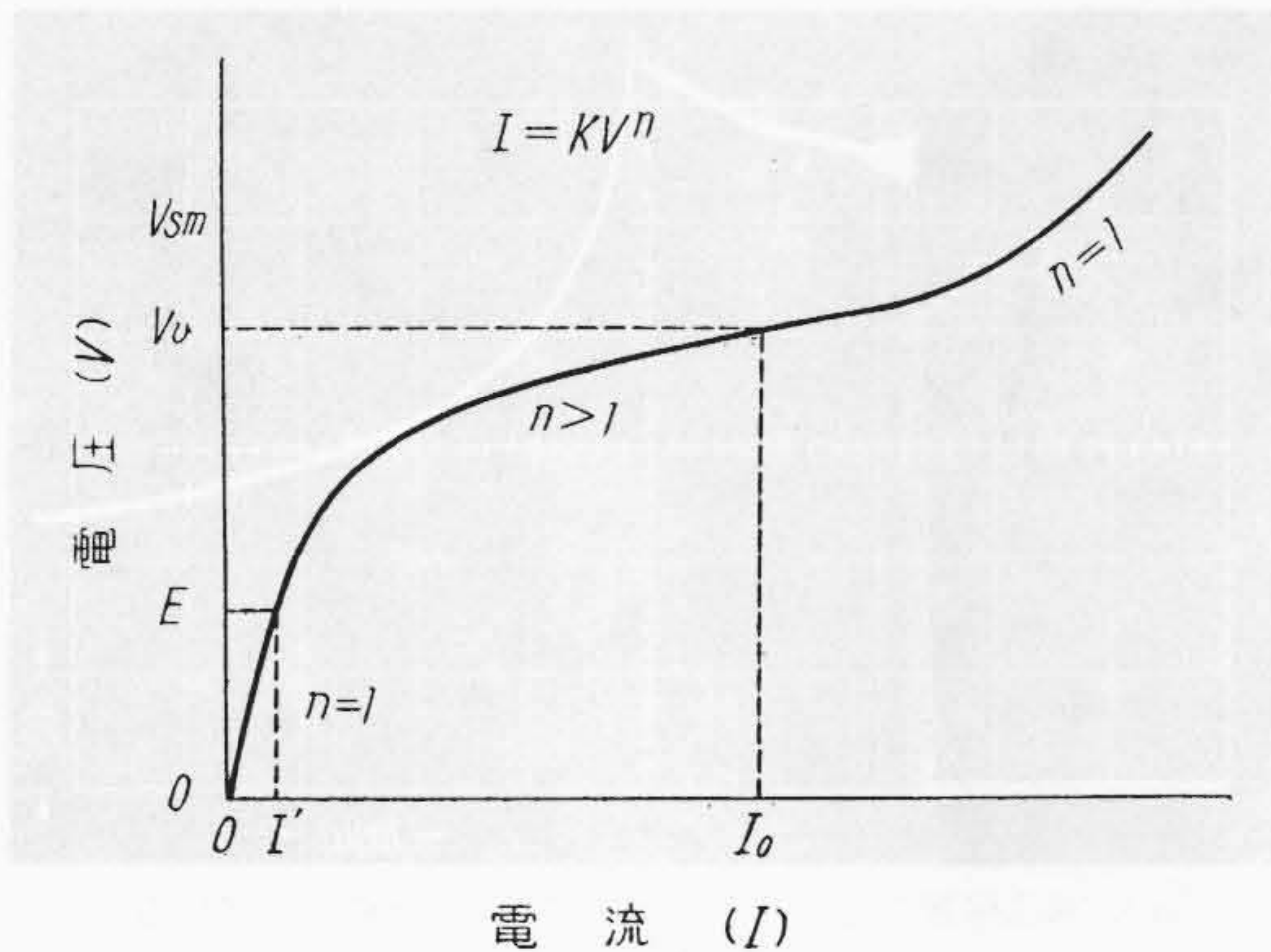
2.1 電圧電流の関係

バリスタに加わる電圧と電流の関係は第2図に示すご



第1図 バリスタとCR火花消去器の比較

* 日立製作所戸塚工場



第2図 バリスタの電圧電流特性

とくであり、印加電圧がある値になるまでは電流はほとんど流れないが、それ以上の電圧では少しの電圧増加で電流は急激に増加する。この領域で印加電圧 V (V) と通電電流 I (A) との関係は次式で表わされる。

$$I = KV^n \dots\dots\dots (1)$$

あるいは

$$V = CI^\beta \dots\dots\dots (2)$$

ここに

n : ある電流領域で1より大なる数で 2.5~4.5 程度である。

K : 印加電圧 1 V のとき A で表わした電流値で示される係数

C : バリスタに 1 A の電流を流すに要する V で表わした印加電圧で示される係数

$$\beta = 1/n$$

2.2 消費電力と温度上昇

消費電力 W は次式によつて与えられる。

$$W = VI = KV^{n+1} \dots\dots\dots (3)$$

上式にしたがつて、少しの電圧増加に対して消費電力は大きく増加し、しかも抵抗が負の温度係数を有するから、少しの電圧変動が消費電力、したがつて温度上昇に大きく影響する。

以上のことをいまいし定量的に考察してみる。連続消費電力 W (W) とバリスタ表面温度上昇 θ (°C) の関係は近似的に次のごとく表わされる。

$$\theta \doteq \gamma W \dots\dots\dots (4)$$

実測によれば、室温 15~20°C、温度上昇約 60°C 以下において $\gamma = 60 \sim 80$ である。

また前述 C とバリスタ温度 θ との間には次の関係があり、負の温度係数を有する。

$$C_\theta = C_0(1 + \alpha\theta) \dots\dots\dots (5)$$

ここに

C_0 : θ °C における C の値

C_0 : 0°C における C の値

α : C の温度係数 (-0.001~0.002)

(2)(3)(4)(5)より

$$\begin{aligned} \theta &\doteq \gamma \frac{V^{n+1}}{C_0^n (1 + \alpha\theta)^n} \\ &\doteq \gamma (1 - \alpha n \theta) V^{n+1} / C_0^n \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

この式から、近似的ではあるが、(表面) 温度上昇がいかにより印加電圧によつて支配されるかがうかがえる。したがつて連続的に加わる電圧が過大にならぬよう、すなわち消費電力が規格値をこえないよう特に注意が肝要である。

2.3 火花消去原理

バリスタが火花消去素子として使用される場合、第3図(a)(b)に示すように接続される。このときバリスタは等価的に非直線抵抗と小容量のコンデンサ C_s が並列に接続されたものと考えられる。したがつてバリスタの火花消去効果は厳密には複式火花消去回路の原理⁽⁴⁾⁽⁵⁾によつて説明される。

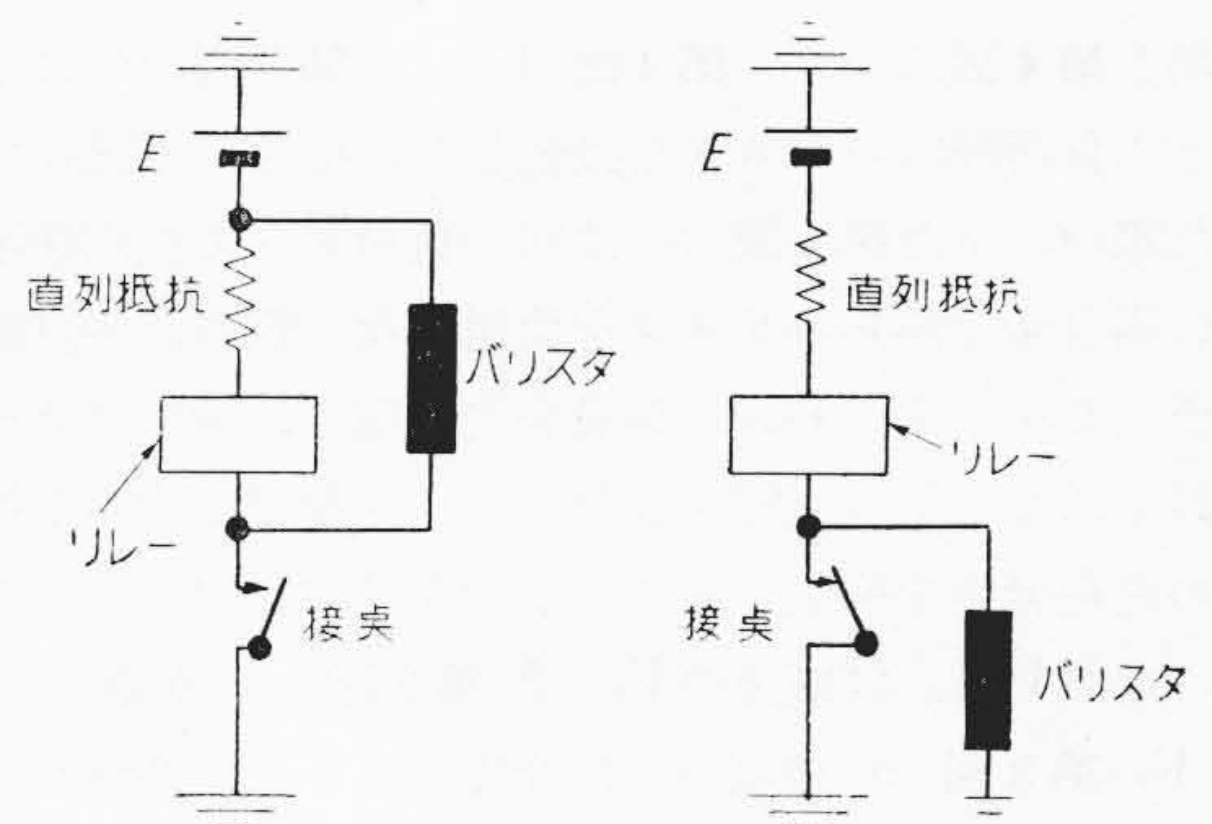
バリスタの比誘電率 ϵ_s は印加電圧、周波数の函数であるが、20~100 とみられる。したがつて本バリスタの静電容量 C_s は次式によつて与えられる。

$$C_s \doteq \frac{S}{d} \times \epsilon_s \times 8.855 \times 10^{-12} [F] \dots\dots\dots (7)$$

本バリスタでは電極面積 $S \cong 2 \times 10^{-4} m^2$ 、電極距離 $d \cong 10^{-3} m$ であり、したがつて

$$C_s = 35 \sim 180 (\text{pF}) \dots\dots\dots (8)$$

すなわち、 C_s は約 100 pF であり、複式火花消去回路の原理に従えばこの程度のキャパシティが接点間に直接的に接続されておれば、接点閉成時の定常回路電流 I_0 のかなり大きい値に対してまで、接点開離直後のアークは抑制される。たとえば Pd 接点では I_0 が 0.5 A 程度まで接点開離直後のアークが出なくなる。それに続く接点間電圧の過渡現象はバリスタの非直線抵抗性によつて制御さ



(a) メーク接点

(b) ブレーク接点

第3図 バリスタ使用法

れ、再放電を生じないような $V-I$ 特性が得られれば、完全に接点開離時の火花発生は抑制される。すなわち第2図において、 I_0 に対するバリスタ電圧降下 V_r 、またはそれに電源電圧 E を加えた $V_r + E$ が最小火花電圧 V_{sm} より小さくなればよい。この条件および電源電圧に対するバリスタ電流の許容値 I' の条件からバリスタの $V-I$ 特性に対する所要条件が定まり、次式によつて与えられる⁽⁶⁾。

第3図(a)回路では

$$\beta < \frac{\log V_{sm} - \log E}{\log I_0 - \log I'} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{V_{sm} - E}{I_0^\beta} > C > \frac{E}{I'^\beta} \quad \dots\dots\dots (10)$$

第3図(b)回路では

$$\beta > \frac{\log V_{sm} - \log (E - RI')}{\log I_0 - \log I'} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{V_{sm}}{I_0^\beta} > C > \frac{E - RI'}{I'^\beta} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに

V_{sm} : 最小火花電圧

$I_0 = E/R$

I' : 許容漏洩電流

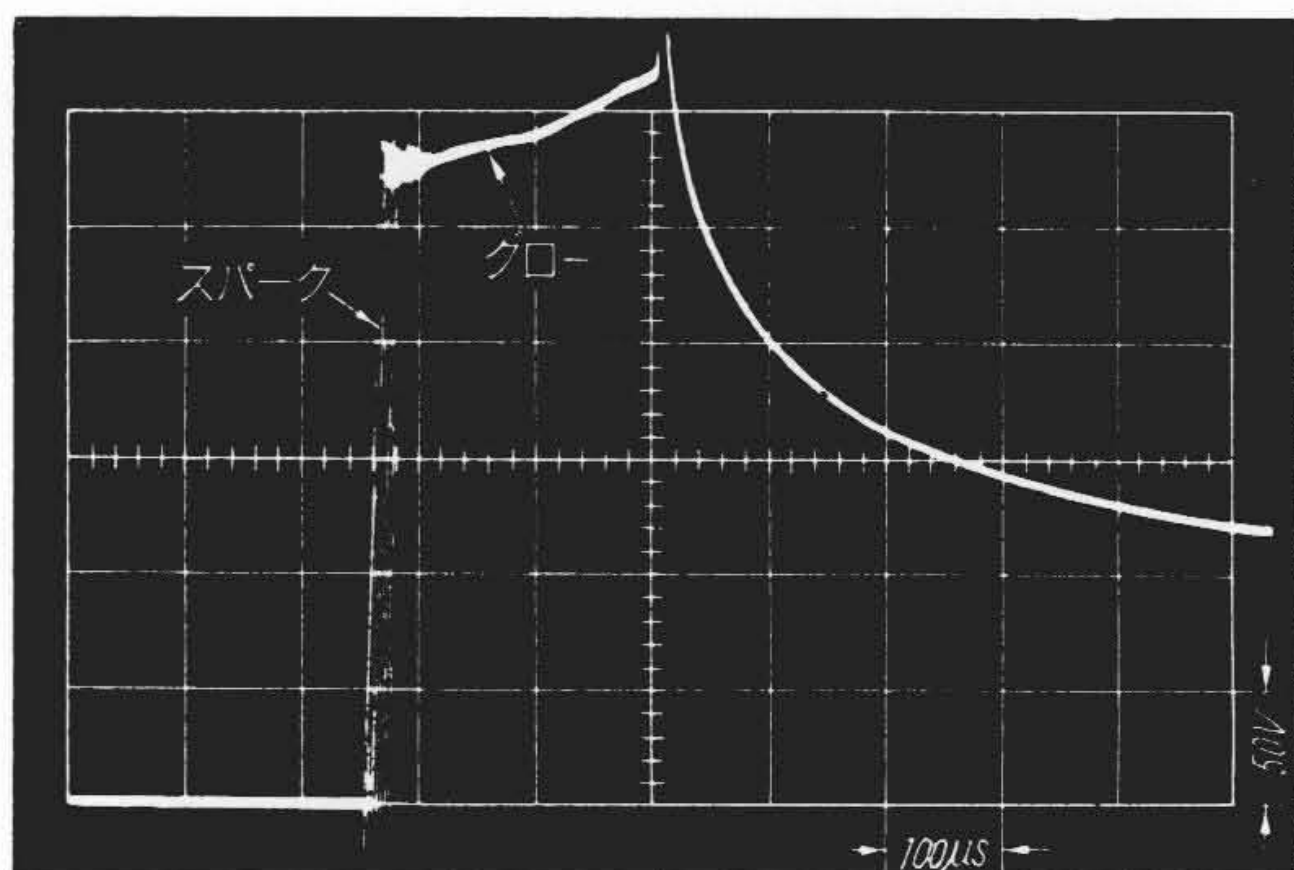
R : 回路の負荷抵抗

文献(6)における最小グロー電圧 V_g に対して V_{sm} をとつたのは、最小火花電圧は近年の研究により、かなり低い場合がありうること⁽⁷⁾⁽⁸⁾、および接点開離直後は高周波間歇放電ののちグロー放電にうつり⁽⁹⁾、そのため高周波間歇放電を抑制するように特性を選んでおけば、グロー放電は必然的に抑制しうるためである。

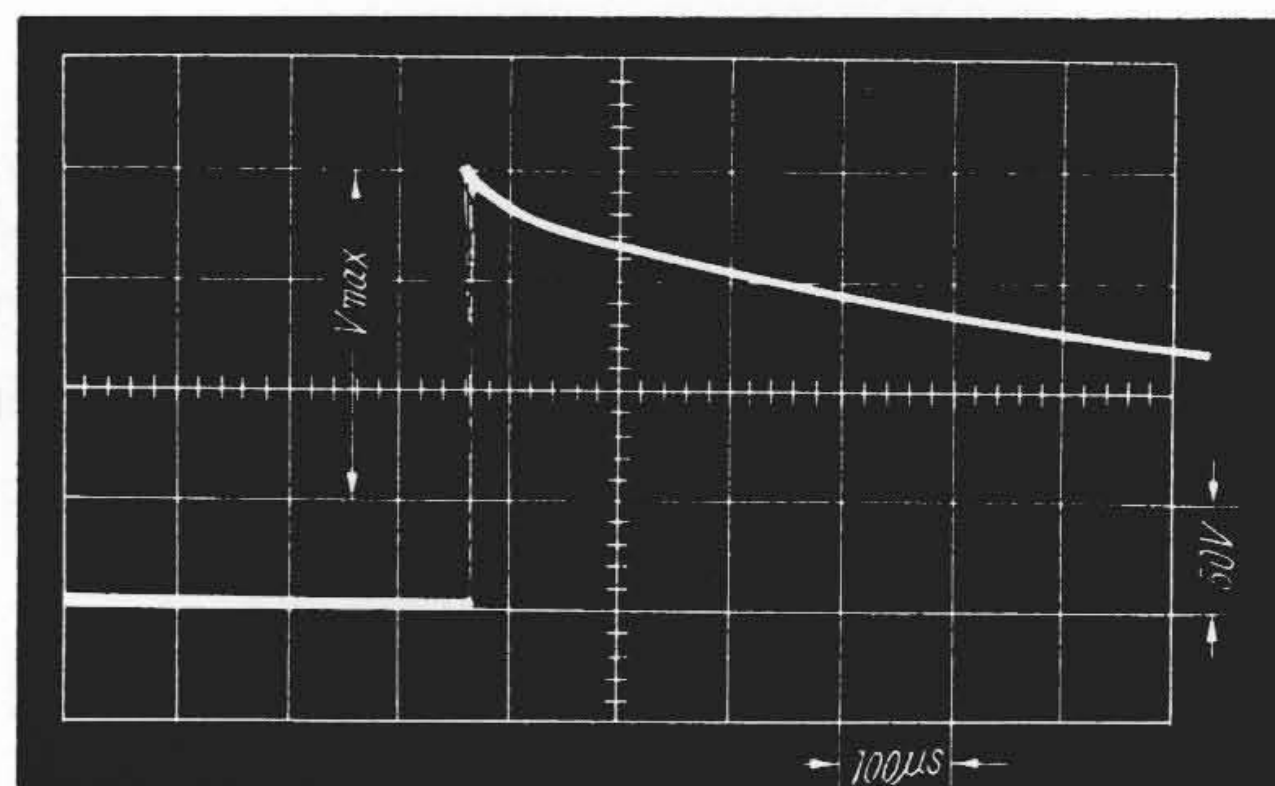
なお C_s の効果は接点に直接的に接続された場合であり、電源、導線などのインダクタンスに蓄えられたエネルギーがバリスタによつて吸収されえないような接続になつている場合には上述の理論は成立しない。

所定の使用条件において火花の発生をよく抑制しうる事が陰極線オシロスコープによつて確められる。その一例を第4図に示す。第4図(b)は、第3図(a)に示すように負荷間にバリスタを接続して、接点で電流を切断した際の、また第4図(a)は同一負荷条件で接点保護のない場合すなわちバリスタを使用しない際の、接点間の電圧波形を示す。 V_{max} が最小火花電圧、最小グロー電圧以下になるよう選定されたバリスタを使用すると接点間の火花発生を抑制することができることを示している。なお V_{max} は既述の $V_r + E$ (第3図(a)の場合) または V_r (第3図(b)の場合) と合致し、 $V-I$ 特性から算定されることが確められた。

さらに、接点閉成時の火花消去素子から接点へのエネルギー供給は非常に小さく、この点 CR 火花消去器より



(a) 接点保護のない場合(スパークグローが発生している)



(b) バリスタ V-3 を負荷間に接続した場合
(放電はおこらず $V_{max} = 200V$)

第4図 $E = 48V$, 負荷コイル抵抗 400Ω の回路を切断したときの接点間電圧波形

すぐれている。

しかしその $V-I$ 特性から理解されるとおり、 C_s によるアーク抑制能力以上にはアーク放電の抑制はできず、したがって単体では、接点切断電流が複式火花消去回路 (CR): $C^{(4)}$ で C_2 が 100 pF 程度のときの最小アーク電流より小さい回路電流 I_0 のときのみ完全な火花消去素子として使用される。

3. バリスタの性能

3.1 要求される性能

バリスタが電話交換機用接点の火花消去素子として使用されるために要求される性能は2.3に述べた火花消去能力を有しなければならないことはもちろんであるが、実用するに当つては電氣的、機械的に諸種の問題がある。

3.1.1 電氣的条件

(1) $V-I$ 特性

2.3に示した火花消去能力を十分に有し、しかもその回路への適用により回路機能が阻害されないような $V-I$ 特性を有することが望まれる。そのため次の二項が常時測定される。

(i) 抵抗……規定印加電圧に対する抵抗が所定の範囲にあること。すなわち、定常時の漏洩電流が許容

値をこさないこと(第1表参照)。

- (ii) 電圧係数……抵抗の非直線性が十分であることが要求され、下記で定義される電圧係数 n_0 が十分大きいことが望まれる(第1表参照)。

$$n_0 = 10 \log(I_{50}/I_{40}) \dots\dots\dots (13)$$

ここに

I_{50} : DC 50V 印加時電流

I_{40} : DC 40V 印加時電流

なお n_0 は、 $V-I$ 特性の非直線性が 50V 付近においてもそのまま保たれているならば、(1) 式の n とほとんど等しい。

(2) 温度特性

- (i) 温度上昇特性……2.2 でふれたごとくバリスタは温度上昇をおこしやすいが、接触面の酸化防止、処理保護などの見地から、許容温度は制限されており、したがってバリスタの消費電力は制限される。あるいは消費電力が定められるとバリスタの大きさが規定される。なおバリスタの許容動作温度は 100°C 程度とされている。

- (ii) 温度係数……2.2 の所論から明らかなように温度係数の小さいことが望まれる。また室温の変動による抵抗変化の大きいことは回路機能に障害をもたらすであろう。

3.1.2 機械的条件

本体の破損、端子の剥奪あるいは折損などの機械的損傷が取り付けおよび使用中におきかないよう十分機械的強度をもつことが要求される。

3.1.3 寿命

緒言でもふれたように交換機器の長寿命化が要望され、各種機器について多大の努力が払われているが、バリスタについても別ではなく、それを取り付ける機器と同程度あるいはそれ以上の寿命が要求される。これをいかなる方法で保証するかには多くの問題があるが、次の三項が考えられる。

- (1) 湿度特性試験
- (2) 連続加電圧試験
- (3) 実負荷寿命試験(パルス試験)

これらの試験によつて長期間使用してもその電氣的諸特性が変らないことが確められる。

以上に述べた諸条件を満足し、第1表に示した日本電信電話公社指定の使用基準を満足するバリスタ4種を検討した。なお第1表には日本電信電話公社指定の各バリスタの所要抵抗および電圧係数を付記した。

3.2 バリスタの特性の実測値

火花消去素子としての諸条件を満足するよう、今回日立製作所で製作したバリスタにおいて、最近の5ロットについて試験検討した結果を以下に述べる。

第1表 バリスタ使用基準

バリスタ品名	V-1	V-2	V-3	V-4
切断前の接点電流	40mA以下	70mA以下	120mA以下	200mA以下
DC 50V 印加時抵抗	60kΩ±40%	30kΩ±40%	15kΩ±40%	7.5kΩ±40%
電圧係数	2以上			

第2表 バリスタ特性実測値(1) $V-I$ 特性

バリスタ品名	V-1	V-2	V-3	V-4
C	370~500	350~410	290~370	250~320
β	0.29~0.38	0.29~0.40	0.29~0.36	0.29~0.36
$V_v(V)$	165	170	175	175

第3表 バリスタ特性実測値(2)

バリスタ品名	V-1	V-2	V-3	V-4
抵抗 $R_{50}(k\Omega)$	40~80	22~40	11~20	5~9
電圧係数 n_0	すべて2~4であるが3の付近に集中している			

第4表 バリスタ特性実測値(3)

項 目	測 定 法	結 果
抵抗飽和特性	DC 50V 印加時のバリスタの自己加熱による抵抗の飽和に至るまでの時間を求めた。	抵抗飽和に達するまでの時間は下記のようなものである。 V-1 約2分 V-2, V-3 約3分 V-4 約5分
極性による抵抗の変化	印加電圧の極性を切りかえて抵抗の極性による変化をみた。	大多数が5%以内ですべて10%以内にすることが可能である。
温度上昇特性	消費電力に対する温度上昇を表面温度計で測定した。	温度上昇 θ と消費電力 W との間に一次の関係がある。 $\theta = \gamma W$ 実測によれば $\gamma = 60 \sim 80 (^{\circ}C/W)$ である。 連続消費電力は 0.5 W 以下とすることが必要である。
温度係数	周囲温度を 0°C 40°C として抵抗、電圧係数を測定してその変化率をみた。	抵抗温度係数は 1°C 当り $- (0.002 \sim 0.005)$ であつた。 電圧係数はほとんど変化しない。
引張り強度	バリスタの本体を固定し各端子に荷重を端子の方向に徐々に増し、機械的損傷のおこる限界を求めた。	破損は各端子に 3kg 以上を加えないとおこらない。

3.2.1 $V-I$ 特性

交流電圧印加による測定も可能であるが、火花消去素子として使用時の温度上昇および方向性を考慮して、バリスタに 50, 70, 100V の短い矩形波パルスを加えたときのバリスタに流れる電流をブラウン管で観測した。その結果、(2) 式で表わされるバリスタの特性定数 C, β は第2表で示される。

このような非直線素子は本来特性値の変動が大きいですが、本バリスタはその特性値をほぼその目標とする値にすることが可能である。

第2表には同時に、第1表に示した各バリスタの使用基準の上限電流を対応するバリスタに流したとき、それに生ずる電圧降下 V_v を実測の C, β の平均値から算定した値を示した。

3.2.2 抵抗および電圧係数

温度 20~23°C 湿度 50~70% で、DC 50V 印加 5 秒

後の、したがって DC 50V での抵抗を測定した。また同条件で DC 40V 印加時の抵抗を測定して電圧係数を算定した。それらの結果を第3表に示す。

以上の実測結果および第4表に示した抵抗飽和特性、極性による抵抗の変化および温度特性、ならびに機械的強度は所期の条件を満足し、火花消去素子として使用しうることが認められる。

3.3 寿命

長期使用に対する性能保証試験の結果は次のとおりである。

3.3.1 高温高湿試験

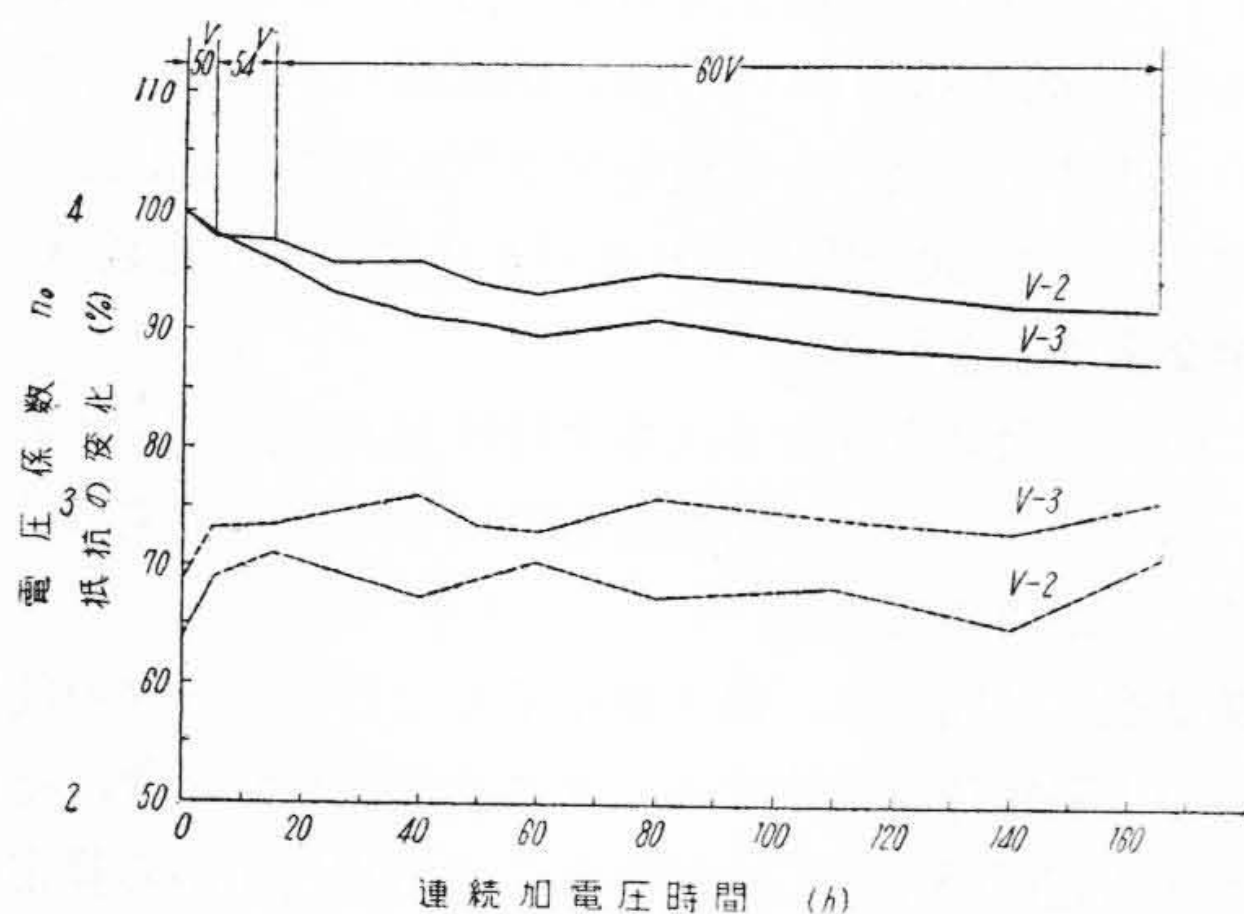
温度 $40 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度 90%以上で連続放置したのち抵抗特性を測定して、その変化を見たが、連続100、250時間後の抵抗変化は少なく、支障のない程度である。

3.3.2 連続加電圧試験

バリスタ各種について一定電圧を長時間連続印加し、その抵抗および電圧係数の変化を測定した。抵抗および電圧係数の測定は常にバリスタが室温まで冷却してから行つた。V-2ならびに V-3 バリスタについてのこの種試験結果の一例を第5図に示す。これは最初 DC 50V、5時間、つづいて DC 54V 10時間さらに DC 60V、150時間連続印加したときの抵抗および電圧係数の変化を示す。第5図および同時に行われたほかのバリスタの試験結果から、傾向として、印加電圧が DC 54V 程度までは長時間連続印加しても性能はほとんど変化せず、60Vになると抵抗は少し減少するが一定値に落ち着くことがいえる。抵抗減少の程度は V-1、V-2、V-3、V-4 の順に大きくなる。

3.3.3 実負荷寿命試験(パルス試験)

バリスタの使用により、誘導回路を開閉する接点かどの程度保護されるかは最終的には寿命試験によつて判定される。そこで第3図(a)あるいは(b)の回路において



(実線：抵抗の変化、点線：電圧係数)
資料数各バリスタ10個、グラフはその平均を示す

第5図 連続加電圧試験結果の一例

負荷、接点ともワイヤスプリング・リレーを使用して各種バリスタについて試験中であるか、現在までバリスタはなんら支障をおこしておらず、また接点の保護性能については次のようにいえる。

(i) 接点の接触抵抗の変動は小さくおさえられ、CR火花消去器を使用した場合に劣らない。

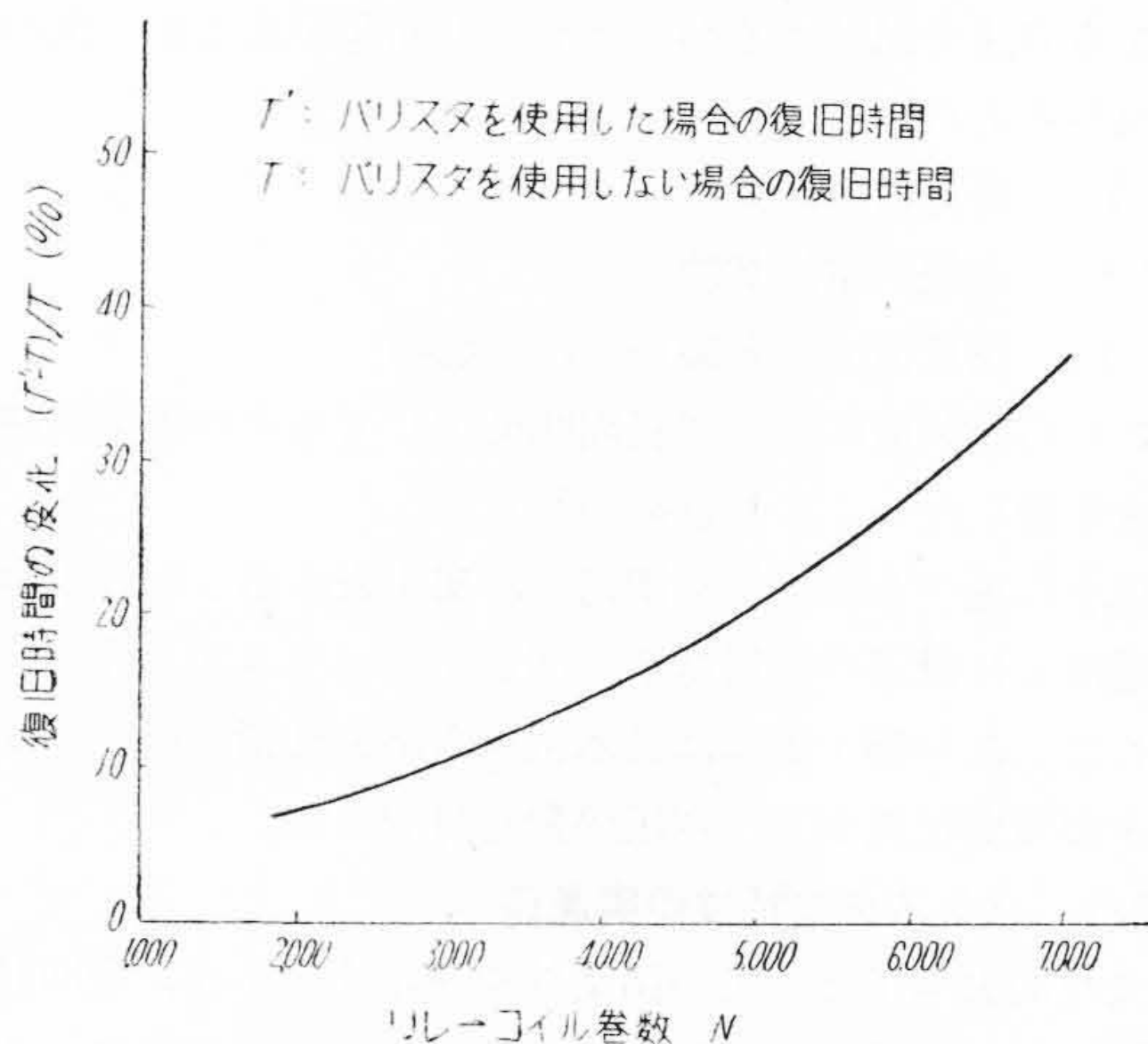
(ii) 接点損耗状況も CR 火花消去器を使用した場合とほとんど変わらない。

なおバリスタの抵抗の変化状況は DC 60V程度を連続印加した場合の抵抗変化の傾向とよく似ている。

4. リレーの作動時間に及ぼす影響

バリスタを第3図に示すように接続した場合、リレーの作動時間が変化することが考えられる。この変化が回路機能に支障をきたさない程度でなければならない。換言すれば、バリスタによりリレーの作動時間があまり大きく変化するならば、バリスタ使用上の大きな制限となるであろう。これを検討するためにワイヤスプリング・リレーについてコイル巻数、接点对数、励磁アンペアターンを種々変えて各種バリスタの、リレーの作動時間に及ぼす影響を検討した。

その結果は、容易に推測されるように、リレーの動作時間にはなんら影響せず、復旧時間は長くなることが確められた。復旧時間に関する実測結果の一例を第6図に示す。本図は接点对数12の負荷ワイヤスプリング・リレーの励磁アンペアターン NI を 300 A とし、コイル巻数 N から算定される接点電流 I に対して、この接点を保護するのに所要のバリスタを負荷間に接続した場合のリレーの復旧時間 T' の長くなる程度を、バリスタを使用しない場合の復旧時間 T に比較して表わしたものである。これからわかるようにバリスタを負荷間に接続する場合



(バリスタを負荷間に接続、コイル励磁300 A)

第6図 バリスタのリレー復旧時間に及ぼす影響

は、リレーの復旧時間に及ぼす影響はさほど問題にならないであろう。しかし接点間に接続する場合は T' はかなり長くなることがあるので注意を要する。

5. 結 言

以上火花消去用バリスタについて概述したが、一応 C R 火花消去器に比して遜色のない、火花消去素子として使用しうるバリスタを製作しうるようになった。

なお実負荷試験、連続加電圧試験などの続行によつて、どの程度まで寿命が保証できるかは今後の検討が必要である。

終りに御指導いただいた日本電信電話公社電気通信研究所米沢、桜井氏、日立製作所日立研究所中戸川主任研

究員、また御協力いただいた石塚電機製作所に深謝する。

参 考 文 献

- (1) A. C. Keller: B. S. T. J. 31, 1023 (Nov. 1952)
- (2) 小林, 篠原: 通研月報 10, 315(昭32-8)
- (3) 小林, 田島, 三井, 鈴木: 日立評論 40, 3 (昭33-3)
- (4) 鳳, 大山, 三谷: 電学誌 76, 1176(1956)
- (5) 鳳 誠三郎: 電気接点と開閉接触子 231 (昭31. 金原出版)
- (6) 鶴見, 川俣, 笠井: 電気三学会連合大会(昭29-5) 62
- (7) M. M. Atalla: B.S.T.J. 32, 1493(1953)
- (8) M. M. Atalla: B.S.T.J. 33, 535(1954)
- (9) 田島, 三谷: 通信学会全国大会(昭32-11)80

日立製作所社員社外講演一覧

(その1)

(昭和32年12月受付分)

講演月日	主 催	演 題	所 属	講 演 者
2. 7~9	日本学術会議日本 原子力研究所およ び関係学協会共催	ジリコニウムの引抜聚合組織の研究	日立工場	添 野 浩
2. 7~9	日本学術会議日本 原子力研究所およ び関係学協会共催	ウ ラ ン の 二, 三 の 性 質	日立工場	飯 塚 富 雄
12.17, 33. 1.14	東 京 大 学	水車製作技術の現状について	日立工場	深 栖 俊 一
5. 上旬	電 気 四 学 会	低ガス圧ケーブルの自己回復作用(続報)	日立研究所	加 子 泰 彦
5. 上旬	電 気 四 学 会	電力用半導体整流器の温度上昇について	日立研究所	岩 田 幸 二
5. 上旬	電 気 四 学 会	水銀整流器による交流発電機の電圧制御	日立研究所	小野田 芳 光
5. 上旬	電 気 四 学 会	空気遮断器等価試験の新方式	日立研究所	山 崎 精 二
5. 上旬	電 気 四 学 会	高速度連続シュリーレン撮影装置	日立研究所	高 砂 常 義
5. 上旬	電 気 四 学 会	4.16 kV 250 MVA 磁気遮断器の遮断特性	日立研究所	早 瀬 俊 一 郎
5. 上旬	電 気 四 学 会	高性能湿式電気集塵装置	日立研究所	諫 早 典 夫
2. 7~9	日 本 学 術 会 議	アルミニウムおよびジルコニウムの高温水による腐蝕	日立研究所	斎 藤 弘
5. 上旬	電 気 四 学 会	高電圧セレン整流装置の電圧分布について	日立研究所	諫 早 典 夫
5. 上旬	電 気 四 学 会	200 MVA 組立輸送型変圧器	国分工場	森 山 昌 和
5. 上旬	電 気 四 学 会	刷子電圧降下補償装置による精密速度制御	国分工場	小 川 毅 郎
				栗 田 健 太 郎
				藤 森 和 夫
				山 腰 喬 泰 司
				石 塚 好 治 一
33. 4	日 本 鉄 鋼 協 会	湯止めレンガの損傷について	水戸工場	礧 野 孝 一
12. 6	日 本 水 道 協 会 関 東 支 部	最近のポンプの自動運転	亀有工場	本 多
1. 27	日刊工業新聞社	合理的な図面管理の方法について	亀有工場	江 守 忠 哉
33. 4	日 本 機 械 学 会	ころがり軸受のクリープについて(第1報)	亀有工場	江 川 正 也
33. 4	日 本 機 械 学 会	輪圧を受けるガーダーの局所的な圧縮応力分布	亀有工場	吉 武 博 之
12. 1	大阪府X線技師会	日立 X 線装置について	亀戸工場	和 田 正 脩
12. 11	関 西 電 気 協 会	IC モータルならびにブレーキモータルについて	亀戸工場	益 田 貞 三
12. 11	関 西 電 気 協 会	機 械 設 備 の 自 動 化	亀戸工場	居 駒 恒 雄

(第103頁へつづく)