

誘導電場起動型放電ギャップ・スイッチ (第4報)

——開発経過と応用研究——

相 沢 友 勝

Spark Gap Switch Triggered by Induced Electric Field (4th Report)

——Development and Applications——

Tomokatsu AIZAWA

A new type of spark gap switch triggered by induced electric field is proposed and investigated in our previous reports. The electrodes of the switch are specially designed to compose the secondary circuit to the trigger circuit. In addition, the switch can be composed of a conventional spherical three-electrode spark gap and an induction coil which is used as the secondary circuit. The switch is used as a crowbar switch of a low impedance discharge circuit. Characteristics of the switch and experimental results are summarized to the 25th anniversary of our college.

1. ま え が き

コンデンサに少しずつ蓄えた大きなエネルギーを急激に放出し、大電力パルスとして負荷へ移送する技術を、近年、パルスパワー技術と呼んでいる¹⁻³⁾。この技術は従来、電気工学の基本技術の一つであった。ところが、核融合と関係する高温プラズマ、高出力レーザなどの研究が盛んになるにつれて、パルスパワー技術として確立し、他の分野へ波及するまでになっている。パルスパワー技術関連装置を、これまでのものを含めてまとめると表1のようになる。いずれも充電されたコンデンサを電源としている。

コンデンサ電源から負荷へエネルギーを移すためには、短絡スイッチが必要である。このスイッチは電源と負荷を結ぶ回路素子の一つであるが、従来は安易に扱われていた。新しいパルスパワー技術では、スイッチが非常に重要な役割を演じる。一般に、高電圧、大電流を扱うスイッチとしてトリガ方式の放電ギャップが広く用いられている⁴⁻⁷⁾。電気的トリガギャップとして、トリガトロンギャップ、電界歪形ギャップなどがある。非電気的トリガギャップの例としては、レーザ・トリガギャップがある。これらギャップ・スイッチには使用目的から図1のように始動スイッチ(図1aのS、図1bのSなど)として用いる場合と、クローバ・スイッチ(図1bのS₂)として用いる場合がある。クローバ・スイッ

チは誘導性負荷Zへ流れる電流をその両端で短絡する際に使われる。高温プラズマ発生装置など立ち上がり時間数 μsec の高速放電回路の場合には、負荷以外で回路に残留するインダクタンスを減らすため、コンデンサC及び始動スイッチSを図1cのように多数並列に使用することが多い。高出力レーザ装置など立ち上がり時間が数10nsec以下の超高速パルスパワー装置では、図1dのようにマルクス電源(MG)、パルス成形線路(PFL)、パルス伝送線路(PTL)をギャップ・スイッチ、抵抗性負荷Rとともに用いる。PFLの出力スイッチS₂には、低インダクタンスの多重アーク・ギャップが使用されている。

以上のように使われるトリガギャップ・スイッチには、後で述べるように高い性能が要求される。そのため、ギャップ・スイッチに関する技術開発が必要である。本校においても、高性能なギャップ・スイッチとして誘導電場起動型放電ギャップ・スイッチ——誘導型放電ギャップと略称する——を提案し、昭和52年度から開発を続けている。このギャップ・スイッチには、これまでの電気的トリガギャップにみられない優れた特徴がある⁸⁻¹¹⁾。特に、クローバ・スイッチとして使うとき、その特徴を最もよく発揮する¹²⁾¹³⁾。ここでは、誘導型放電ギャップの特徴、開発経過及び最近の研究成果までを本校創立25周年を記念して報告する。

表 1 パルスパワー技術関連装置

装 置 名	主な内容 (関連するものを含む)
高温プラズマ発生装置	ピンチプラズマ, プラズマフォーカス, プラズマの加熱
プラズマ閉じ込め装置	準定常磁界発生用クローム及びパワークローム回路
プラズマX線装置	パルスX線シングラフィ, 露光用X線源
パルスレーザ装置	各種レーザの放電励起
パルスビーム発生装置	大電流電子ビーム及び軽イオンビームの発生
高速度成形加工装置	電磁成形, 水中での放電成形, 放電爆発溶射
電磁加速装置	電磁推進機 (レールガン), プラズマガン
パルス高磁界発生装置	高磁界中での物性実験, 磁気光学効果の実験
インパルス電流試験装置	放電耐量試験, 耐アーク試験, 劣化試験
しゃ断器用試験装置	電流源回路, クローム回路, アーク延長回路
開放スイッチ用試験装置	しゃ断素子の試験, ヒューズ溶断, 細線放電

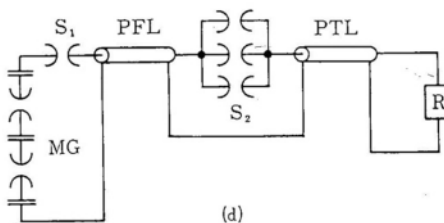
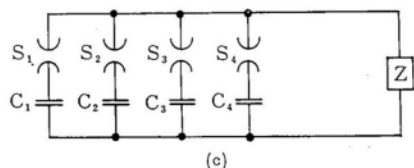
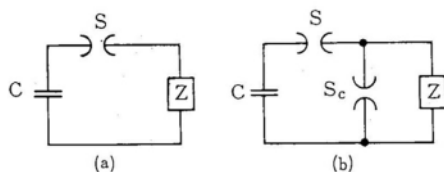


図 1 コンデンサ放電回路 (説明用)

2. トリガ放電ギャップに要求される性能

まず、始動スイッチについて考える。単純な放電回路の始動用ギャップ・スイッチ (図 1 a の S) を起動する際には、放電スイッチ S の主電極間にコンデンサ C の充電電圧 V が印加されている。この電圧 V が、電極間の自爆電圧 V_f に近い場合には、放電スイッチ S は適当なトリガ操作によって起動し、容易に放電短絡する。例えば、図 2 に示すトリガトロンギャップの場合には、接地側電極の中央部に設けたトリガ用電極 N にパルス電圧を与えればよい。しかし、電圧 V が自爆電圧 V_f に比べて

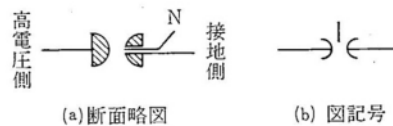


図 2 トリガトロンギャップ (説明用)

低くなると、トリガ操作しても放電短絡しなくなる。一般的なギャップ・スイッチでは、トリガ用パルス電圧を与えて放電短絡させるとき、主電極間に最低電圧 V_{min} を加えておく必要がある²⁾。トリガギャップとして動作する範囲は、 $V_{min} \leq V < V_f$ となる。ギャップ・スイッチの動作範囲は広いほどよい。

トリガパルスを与えてからギャップ・スイッチが放電短絡するまでの時間は、始動時間遅れといわれている³⁾。始動時間遅れとそのバラツキは電圧 V に依存する。これをトリガ特性と呼ぶことにする。ギャップ・スイッチを動作電圧の低いところで使用すると、始動時間遅れとそのバラツキが大きくなり、トリガ特性が悪くなる。スイッチの短絡時刻をなるべく正確に制御したい場合には、動作電圧範囲の高いところで使用すればよい。通常、自爆電圧の 70~80% に選ぶ。

放電ギャップを始動スイッチとしてコンデンサとともに並列運転する場合 (図 1 c) に移る。並列ギャップ・スイッチ $S_1 \sim S_4$ を同時に起動させても、始動時間遅れは若干ばらつく。そのため、もしスイッチ $S_1 \sim S_4$ の直後で並列に接続するならば、短絡の少し遅れたスイッチの電極を電位差のない状態で放電短絡させるほかない。それ故、確実な並列運転のため、始動時間遅れのバラツキに応じた長さのケーブルが必要である⁷⁾¹⁴⁾。このケーブルは残留インダクタンスを増加させるので好ましくない。高速放電回路では並列数が多くなり、始動時間遅れのバラツキを少なくする必要がある。

超高速パルスパワー装置(図1d)のスイッチについて説明する。分布定数路として構成されているパルス成形線路(PFL)の立ち上がりは、出力スイッチ S_2 のインダクタンスによって制限される。そのため、スイッチ S_2 を多重アーク・ギャップとし、低インダクタンス化する必要がある。多重アーク・ギャップの電極が放電短絡する場合にも、前述の並列運転と同様の問題が生じる。

次に、クローバ・スイッチ(図1bの S_c)について考える。クローバ・スイッチ S_c となる電極は、始動スイッチ S の短絡直後にはコンデンサ C の充電電圧に耐える必要がある。スイッチ S_c を閉じる時点は、誘導性負荷 Z へ流れる電流が最大になったときが多い。このとき、クローバ・スイッチ S_c の電極間電圧はほとんど零である。従って、スイッチ S_c の電極間を放電短絡するのは、始動スイッチ S の場合に比べて困難となる。高速大電流装置では、クローバ・スイッチの両端が低インピーダンスの回路で短絡されており、クローバ・スイッチ S_c の起動はさらに困難となる。クローバ・トリガ用電源の内部インピーダンスを減らすには限度があるので、スイッチ S_c が完全に放電短絡するまでの間、トリガ回路と電源 C - 負荷 Z からなる主放電回路との電気的結合を減らす必要がある。そのため、一般にクローバ・スイッチ S_c を含む枝路(以後クローバ回路と呼ぶ)へ、ディカッブリング素子を直列に挿入する⁶⁾¹⁵⁾¹⁶⁾。このディカッブリング素子には次のような非線形な性質がある。クローバ・スイッチ S_c に過電圧を与える瞬間まで、そのインピーダンスは高く、スイッチ S_c が短絡すると同時にインピーダンスが低下する。しかし、クローバ回路へ、ディカッブル素子を挿入すると、クローバ回路の残留インダクタンスが大きくなる。

クローバ・スイッチを含むクローバ回路に残留インダクタンスがあると、クローバ後の負荷電流にリプル成分が含まれる。このリプルは同じ負荷コイルに対し、残留インダクタンスが小さいほど少なくなる。プラズマ閉じ込め用磁場としては、リプル成分が少ないほど都合よい。そのため、クローバ回路はできる限り低インダクタンスとなるよう設計されている。必要に応じてクローバ・スイッチも並列運転される。

シャ断器の試験設備でもギャップ・スイッチが使われる。特に、合成投入試験では、数百 kV の高電圧に耐え、印加電圧数 kV 以下で放電し、大電流を遅れることなく通電できるギャップ・スイッチが必要である¹⁷⁾。

トリガ放電ギャップに要求される性能についてまとめると以下のとおりである。スイッチの使用目的に応じて、非常に高い性能が要求されている。

(i) 耐電圧が高い。

(ii) 通電容量が大きい。

(iii) 低インダクタンス及び低抵抗である。

(iv) 動作電圧に制限が少ない。

(v) トリガ特性がよい。

(vi) トリガ回路と主放電回路との電気的結合が少ない。

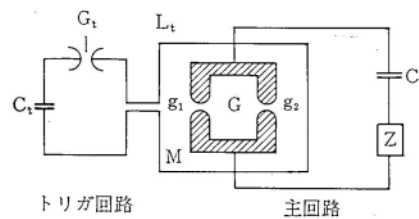
(vii) 電極消耗が少なく、長寿命である。

ほかに、動作が安定している、動作音が小さい、構造が単純である、部品の交換が容易であるなどの一般的な事項も付加される。

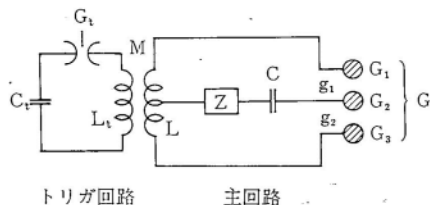
3. 誘導型放電ギャップの原理及び特徴

誘導型放電ギャップは放電の起動を誘導電場で行うトリガギャップ・スイッチである。ギャップ主電極に誘起電圧を発生させるのに、2種類の方法がある¹⁰⁾。その放電回路を図3に示す。この図で斜線部分 G が誘導型放電ギャップの主電極であり、電源コンデンサ C 、負荷 Z とともに主放電回路(主回路と呼ぶ)となっている。コンデンサ C 、トリガトロンギャップ G_t 、コイル L_t からなる回路が主回路の放電を制御するトリガ回路である。トリガ回路のコイル L_t と主回路は相互インダクタンス M で誘導結合している。

あらかじめ、コンデンサ C 、 C_t を充電しておき、トリガ回路を急激に放電すれば、相互誘導作用によって主電極 G の間隙 g_1 、 g_2 に高周波で振動する誘起電圧 v_{g1} 、



(a) トリガ回路と主電極 G が誘導結合している場合



(b) トリガ回路と誘導結合するコイル用をいれる場合

図3 誘導型放電ギャップ概念図及び放電回路(1)

v_{g2} が発生する*。コンデンサ C の充電電圧を V_m とすれば、間隙には $v_1 = V_m + v_{g1}$, $v_2 = V_m - v_{g2}$ なる電圧が生じる。電圧 v_1 が自爆電圧 V_f を越えれば、主電極 G は間隙 g_1 で放電短絡する。間隙 g_1 が短絡後、間隙 g_2 での放電短絡も起こりうる。以上が誘導型放電ギャップの基本的な動作原理である。等価回路及び誘起電圧の計算については、別に報告してある⁹⁾¹⁰⁾¹⁵⁾。

誘導型放電ギャップの特徴について述べる。

<特徴 1> 主電極間の電圧すなわち電源コンデンサ C の充電電圧 V_m がたとえ零のときでも、主電極間の放電短絡が可能である。誘起電圧 v_{g1} 又は v_{g2} をギャップの自爆電圧 V_f 以上にすれば、 $V_{min}=0$ となり、動作電圧に制限がなくなる。

<特徴 2> 放電回路(1)において、電源コンデンサ C —負荷 Z から見て、コイル L_1, L 、主電極 G などが対称に配置、結線されていれば、トリガ回路の起動時に主回路 C — Z 部分には誘導電流が流入しない。すなわち、トリガ回路と主回路は電氣的に絶たれる。

以上の特徴 1 は誘導型放電ギャップを電源コンデンサとともに並列運転する場合、ギャップの直後で並列に接続することができる。始動時間遅れに多少のバラツキが生じても各ギャップを確実に放電短絡させることが可能となる。特徴 1 及び 2 は誘導型放電ギャップをクローバ・スイッチとして使用するとき、極めて有利となる。特に、高速コンデンサ放電回路で使用しても、特徴 2 によりディカプル素子を必要としない。ディカプル素子を挿入しないだけ、クローバ回路の残留インダクタンスを小さくできる。

<特徴 3> 補助電極を設けて、誘導型放電ギャップの性能を高めることができる。補助電極を設ける例を図 4 に示す。補助電極 N は主電極 G_1, G_3 の中心部に極く狭い間隙で取り付けられ、抵抗 R で結ばれている。この部分を補助回路と呼ぶことにする。トリガ回路を放電すると、まず補助電極 N とこれを取り付けた電極との間に絶縁破壊が起こる。次に、主電極間の放電を誘発する。従って、補助電極 N がない場合 (図 3 b) に比べ、ギャップ・スイッチの特性を改善できる。補助電極 N を設けて

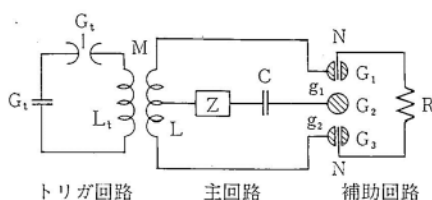


図 4 放電回路(2), 主電極に補助電極を設けた場合

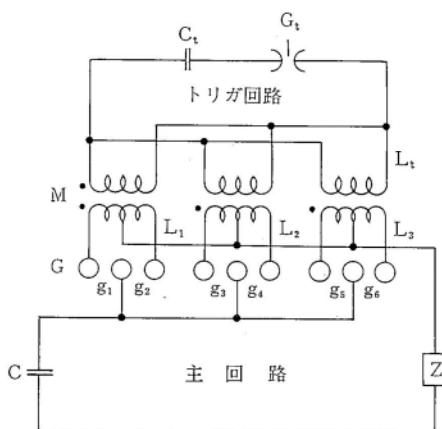


図 5 放電回路(3), 主電極 G を多重アーク化した場合

も、トリガ回路に変更はない。

<特徴 4> 主電極 G を多重アーク化するのが容易である。多重アーク化する場合の放電回路例を図 5 に示す。コイル $L_1 \sim L_3$ とコイル L_t の配置、構造等を工夫してトリガ回路を起動すれば、主電極 G のある間隙が先に放電短絡しても、他の間隙に誘起電圧が残る。トリガ回路の電圧を高めれば、間隙 $g_1 \sim g_6$ すべてが放電短絡し多重アーク化できる。多重アーク放電後、主回路の放電電流はコイル $L_1 \sim L_3$ のインダクタンスをなくすように各コイルを流れる。従って、コイル $L_1 \sim L_3$ の存在がギャップ・スイッチの低インダクタンス化に差し支えることはない。

一般に、数百 A 以上の電流領域ではアークの電圧—電流特性は正の勾配となる¹⁹⁾。始めの起動がうまくでき、各間隙が放電短絡すれば、この領域では多重アークを安定に点弧し続けることができる。多重アークはギャップ・スイッチの低インダクタンス化、低抵抗化及び大通電容量化を可能にする。

4. 実験装置

実験装置の構成を図 6 及び図 7 に示す。図 6 の点線内

* 誘起電圧 (v_{g1}, v_{g2}) の角振動数を ω , 光速を c , 主電極 (又はコイル L) の寸法を d とすると、通常の装置では $\omega \ll c/d$ が成立する。従って、変動電磁場の伝播速度が有限であることを考慮しなくてよい。主電極 (又はコイル L) の両端には誘導電場によって電子が移動し電荷が分布する。これによって間隙に生じる電位差を、ここでは誘起電圧と呼んでいる。誘導電場を積分して求まる電磁誘導起電力の大きさは、主電極 (又はコイル L) の抵抗を無視すれば、誘起電圧に等しくなる。

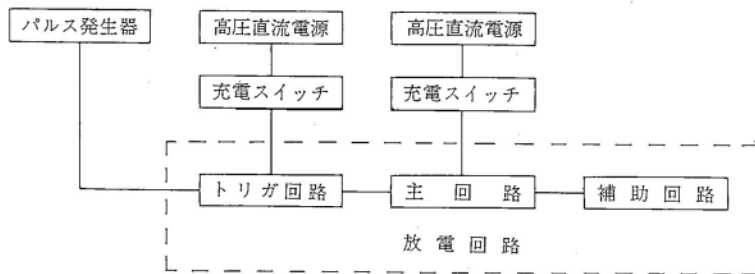


図6 実験装置の構成(1), 誘導型放電ギャップを始動スイッチとして実験する場合

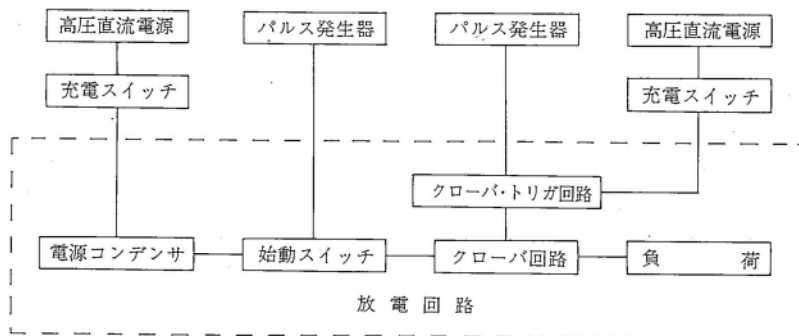


図7 実験装置の構成(2), 誘導型放電ギャップをクロムバ・スイッチとして実験する場合

は図3～図5に示した放電回路部分である。図6で放電実験は次のように行われる。まず、主回路及びトリガ回路のコンデンサをそれぞれ別の高圧直流電源で充電する。充電後、高圧直流電源を放電回路から切り離す。次に、トリガ回路のトリガトロンギャップへ、パルス電圧を送り、トリガ回路を放電させる。この結果、適当な条件で主回路の誘導型放電ギャップが絶縁破壊し、主回路に放電電流が流れる。

図7は誘導型放電ギャップをクロムバ・スイッチとして実験する場合である。クロムバ放電回路として図11, 図13, 図15及び図17が使用される。この場合もクロムバ・トリガ回路を放電させれば、適当な条件で誘導型放電ギャップがクロムバ・スイッチとして動作する。

誘導型放電ギャップが放電短絡するかどうかは、基本的に誘起電圧の大きさによって決まる。そのため、トリガ回路の残留インダクタンスをできる限り小さく、主回路との誘導結合をできる限り強くすることが必要である。また、トリガ回路にマルクス電源を使用するのが効果的である。

実験に使用するコンデンサは表2のとおり準備されている。主回路のコンデンサCには比較的に容量の大きい

表2 電源コンデンサー一覧

定 格	数 量	製造会社
200 μ F 5 kV	2	ニチコン榜
100 μ F 10 kV	4	米 国 M 社
40 μ F 5 kV	4	ニチコン榜
25 μ F 20 kV	4	米 国 M 社
7 μ F 20 kV	2	米 国 G 社
1.6 μ F 50 kV	2	米 国 M 社
0.5 μ F 30 kV	4	ニチコン榜
0.06 μ F 50 kV	2	米 国 M 社
0.05 μ F 30 kV	6	錦指月電機
0.01 μ F 30 kV	6	ニチコン榜

ものを使用し、トリガ回路のコンデンサC₁には容量0.06 μ F以下のものを使用した。また、トリガ回路のコンデンサには、アルミニウム箔とPETシートを重ね合わせて自作したものも使用した⁹⁾。

放電電流波形の観測には、ロゴスキーコイル、RC積分器、オシロスコープ及びシールド室を使用した。オシロスコープの同期には光伝送トリガ系統を用いた。コンデンサの放電実験では、短時間に大きなエネルギーが発

生するので、波形観測に必要なノイズ対策をしてある。

多重アークを観測する際には、シャッタ速度の遅いカメラ（静止カメラと呼ばれている）及び減光フィルタを使用した。

なお、装置定数など詳細について及び応用研究に関する部分については、各文献を参照していただきたい。

5. 開発経過及び研究成果

5.1 始動スイッチとしての実験

<1> 放電特性^{9)10)20~24)}

昭和52年度から基本的な放電特性が調べられた。放電回路(1), (2)などを用い、主回路コンデンサ C の充電電圧 V_m を1kV, トリガ回路コンデンサ C_t の充電電圧を2kVごとに変え、各5回ずつ前章で述べた放電実験を繰り返した。便宜上、5回の放電を観測し、誘導型放電ギャップの放電率を求めた。典型的な放電特性を図8に示す。補助電極 N を設け、 N を結ぶ抵抗 R を変えたときの放電特性を表している。各点を結んだ線より上側では、放電率5/5となる。抵抗 R を開放（無限大）にした場合の放電特性は、補助電極 N のない場合の特性とほぼ同じであった。

始動スイッチとしての放電特性について、次のことが明らかにされた。

- (i) 放電回路(1), (2)に示すトリガ回路によって、主回路の起動を制御できる。
- (ii) トリガ回路の電圧を高くすれば、主電極はたとえその間の電圧 V_m が零でも放電短絡する。
- (iii) 補助電極 N を設け、抵抗 R の値を選ぶことにより、主電極間を放電短絡させるのに必要なトリガ回路の電圧を低くできる。
- (iv) トリガ回路のコンデンサ C_t の値を小さくすると、

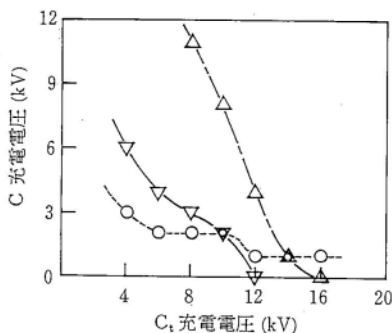


図8 放電特性（放電率5/5となる最低電圧を示す）、放電回路(2)を使用、 $C_t=0.03\mu\text{F}$, ○: $R=1\Omega$, ▽: $R=10\text{k}\Omega$, △: R 開放

起動を制御できる領域は電圧の高いほうへ移動する。

(v) コンデンサ C_t 及び抵抗 R がともに小さい場合、コンデンサ C の充電電圧が低い領域で、起動の制御が不可能となる。

<2> 並列運転特性⁹⁾²⁵⁾

昭和54年度から電源コンデンサ及び放電ギャップの並列運転を試みた。トリガ回路を含めて誘導型放電ギャップ全体を並列に使用することもできるが、ここではトリガ回路を共通にして主電極だけを並列運転した。基本となる概念図及び放電回路を図9に示す。図のaとbでは、主電極 G の構造、配置だけが異なる。いずれも、2台のコンデンサ C_1, C_2 が主電極 G とともに並列に放電し、共通の負荷へ放電電流が流れる。主電極 G を並列接続するとき、始動時間のバラツキに応じた長さのケーブルは、使用されなかった。各コンデンサ及び負荷 Z へ流れる電流を測定し、並列放電していることを確かめた。同様の方法により、4台のコンデンサを並列放電することができた。

<3> 多重アーク特性²⁾²⁷⁾

昭和61年度に図5に示すような放電回路を使用して、6及び8路の多重アークを発生させることに成功した。典型的な多重アークの観測写真を図10に示す。主回路の

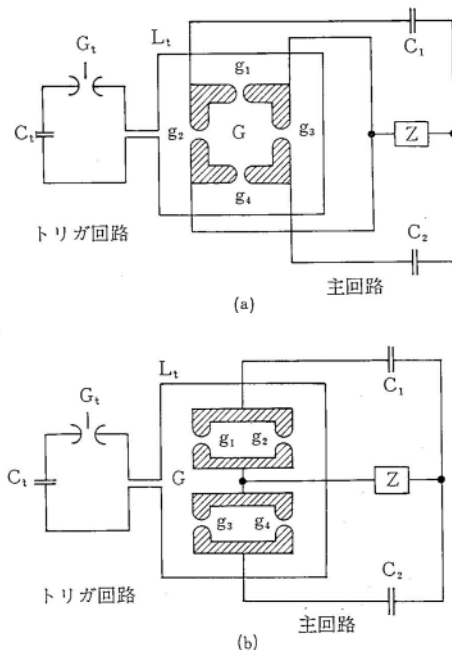


図9 放電回路(5)、主電極 G をコンデンサとともに並列運転した場合

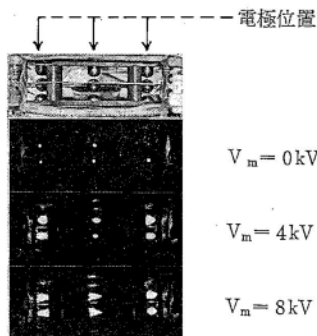


図 10 6路アークの静止写真, 放電回路(3)を使用

コンデンサ C の充電電圧 V_m が零のときでも, 6箇所の間隙が放電しているのが分かる。各アークの光の強さについては, 一様でなかった。アークの数(6)については, 常に再現性がよかった。負荷 Z へ流れる電流値は, $V_m = 8 \text{ kV}$ のとき最大 11 kA であった。電極の消耗は多重アーク化することによって, 従来から使っていたものに比べて数倍少なくなった。多重アーク形成時, ギャップ・スイッチのインダクタンスは, 後述するクローバ・スイッチとしての実験から, 4アーク路の場合で約 10 nH と推定されている。

アーク路数の増加と大通電容量化に向けて実験を続けている。アーク路数が多くなると, 放電しやすい間隙と, しにくい間隙が固定して観測される傾向が強くなった。光の強さの非一様性を気にしなければ, 12路程度の多重アークを発生することは可能であった。

<4> トリガ特性²⁸⁾²⁹⁾

トリガ回路及び主回路負荷へ流れる電流波形を同時に測定し, 両波形の立ち上がり部分の時間差から, 始動時間遅れを求めることができる¹⁴⁾³⁰⁾。誘導型放電ギャップの始動時間遅れについては, 昭和53年度, 放電率 5/5 の状態で $0.1 \mu \text{ sec}$ 以下であることを明らかにした²⁸⁾。しかし, 詳しい特性については調べてなかった。昭和59～昭和60年度に, 測定し易い放電回路(2)を用いて, トリガ特性(始動時間遅れ)を調べる実験を行った。補助回路を使用し, 補助電極 N を結ぶ抵抗 R を変えて得られた特性を表3～表5に示す。始動時間遅れは, トリガ回路及び主回路のコンデンサ充電電圧の組み合わせに対して示されている。この実験でも, $0.2 \mu \text{ sec}$ 以下の値は求まらなかった。表中, *印はトリガ回路を放電させても, 主回路が放電しなかった場合を表している。

始動時間遅れは, トリガ放電しない電圧(*印)に近づくときと大きくなる傾向を示した。また, 補助回路の抵抗値によって結果に違いが生じることが分かった。トリガ

表 3 トリガ(始動時間遅れ)特性
放電回路(2)を使用, $C_t = 0.03 \mu \text{F}$, $R = 1 \Omega$
(単位: $\mu \text{ sec}$)

C 充電電圧 (kV)	4	6	8	10	12	14
9						
8						
7	0.3					
6	0.6	0.4	0.4			
5	0.8	0.8	0.5			
4	1.6	1.8	0.7	1.2	0.3	0.4
3	3.4	4.6	1.8	2.3	1.5	0.9
2	*	*	4.2	2.8	2.0	3.1
1			*	*	*	3.6

C_t 充電電圧 (kV)

表 4 トリガ(始動時間遅れ)特性
放電回路(2)を使用, $C_t = 0.03 \mu \text{F}$, $R = 10 \text{ k}\Omega$
(単位: $\mu \text{ sec}$)

C 充電電圧 (kV)	4	6	8	10	12	14
9						
8	≤ 0.2					
7	0.4					
6	0.7					
5	1.2	≤ 0.2	≤ 0.2			
4	*	1.0	0.3			
3		*	1.0	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2
2			*	0.3	≤ 0.2	≤ 0.2
1						

C_t 充電電圧 (kV)

表 5 トリガ(始動時間遅れ)特性
放電回路(2)を使用, $C_t = 0.03 \mu \text{F}$, R : 開放
(単位: $\mu \text{ sec}$)

C 充電電圧 (kV)	4	6	8	10	12	14
9	≤ 0.2					
8	0.4	≤ 0.2				
7	*	0.4				
6	*	0.7	≤ 0.2			
5		*	0.3			
4			0.6	≤ 0.2		
3			*	≤ 0.2	≤ 0.2	
2			*	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 0.2
1				*	*	≤ 0.2

C_t 充電電圧 (kV)

特性に関する測定はまだ不十分であり, 実験が引きつづき行われている。

5.2 クローバ・スイッチの開発

<第1段階> 昭和53～昭和54年度¹²⁾³¹⁾

誘導型放電ギャップに関する研究は、主としてクローム・スイッチを開発するために始められた。誘導型放電ギャップを図11のように使って実験したのが第一歩であった。電源コンデンサC—始動ギャップ・スイッチ g_s —誘導性負荷Zからなる回路が主回路である。誘導型放電ギャップの主電極G(斜線部分)がクローム・スイッチとなっている。コンデンサ C_t —ギャップ G_t —コイル L_t からなる回路はクローム・スイッチ(G)のトリガ回路である。

実験は、まずコンデンサC、 C_t を充電し、トリガトロンギャップ g_s を起動し、コンデンサCから誘導性負荷Zへ放電電流を流す。次に、負荷電流が最大に達した時点で、クローム・トリガ回路を放電する。その結果、クローム放電用の電極Gが放電短絡し、誘導性負荷Zに準定常的な電流が流れ続ける。典型的な負荷電流波形を図12に示す。クローム放電後の負荷電流波形(b)にはリプルが見える。このリプルの大きさから、クローム回路の残留インダクタンスを予想することができる⁶⁾⁷⁾。この場合、負荷Zのインダクタンスが $1.3\mu\text{H}$ なので、クローム回路のインダクタンスは $\leq 0.07\mu\text{H}$ となる。ここでは、始動用ギャップ g_s とクローム放電用ギャップGと

が離れていた。両ギャップを一体化した構造のギャップ・スイッチが望まれた。

<第2段階> 昭和54～昭和55年度¹²⁾³²⁾³³⁾

始動及びクローム両スイッチを一体化して実験した。実験に用いた放電回路を図13に示す。斜線部分はスイッチの主電極部であり、電源コンデンサC、誘導性負荷Zとともに主放電回路を形成している。針状の補助電極 N_s はトリガトロン型の起動用電極である。間隙 g_s 部分が始動用ギャップ・スイッチとして働く。間隙 g_1 が放電短絡すれば、コンデンサCから負荷Zへ放電電流が流れる。その後、間隙 g_1 、 g_2 がクローム放電用ギャップ・スイッチとして動作する。クローム・スイッチの起動については図11の場合と同様に説明できる。

実験で得られた負荷電流波形の例を図14に示す。クローム放電するとき、二つの間隙 g_1 、 g_2 はともに放電短絡した。負荷Zのインダクタンスは $0.6\mu\text{H}$ であり、負荷電流波形に生じるリプルの大きさから概算したクローム回路のインダクタンスは $\leq 0.03\mu\text{H}$ であった。図14に示される電流波形の減衰が図12に比べて速いのは、放電回

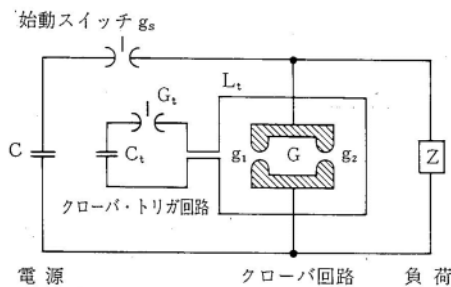


図 11 クローム放電回路(1)

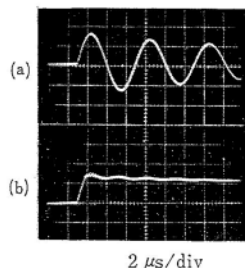


図 12 負荷電流波形(1)、クローム放電回路(1)を使用、負荷インダクタンス $1.3\mu\text{H}$
(a)クローム放電しない場合
(b)クローム放電した場合

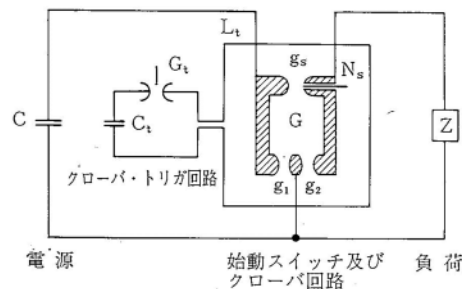


図 13 クローム放電回路(2)、始動及びクローム両スイッチを一体化した場合

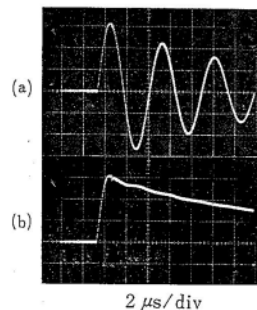


図 14 負荷電流波形(2)、クローム放電回路(2)を使用、負荷インダクタンス $0.6\mu\text{H}$
(a)クローム放電しない場合
(b)クローム放電した場合

路のインダクタンスが減少したためである。

〈第3段階〉 昭和55～昭和56年度³⁴⁾

クロンバ回路のインダクタンスをさらに減らすため、クロンバ・スイッチとなるギャップを多重アーク化して実験した。始動スイッチはクロンバ・スイッチの一部に組み込まれて一体化されている。スイッチ及び放電回路を等価的に示すと図15のようになる。主電極 G は間隙 g_1, g_2, g_3, g_4 から構成されている。間隙 g_1 が始動スイッチとして働く。間隙 g_2 を起動、短絡させれば、電源コンデンサ C から低インピーダンスの誘導性負荷 Z へ放電電流が流れる。クロンバ放電したいときに、クロンバ・トリガ回路 ($C_t - G_t - L_t$) を放電すれば、間隙 $g_1 \sim g_4$ が放電短絡する。クロンバ回路にコイル L_1, L_2 が存在するが、放電電流はコイルのインダクタンスを打ち消すように流入するので、クロンバ回路の低インダクタンス化に差し支えることはない。

実験では、クロンバ放電するとき四つの間隙 $g_1 \sim g_4$ がすべて放電短絡した。負荷インダクタンス $0.14 \mu\text{H}$ のと

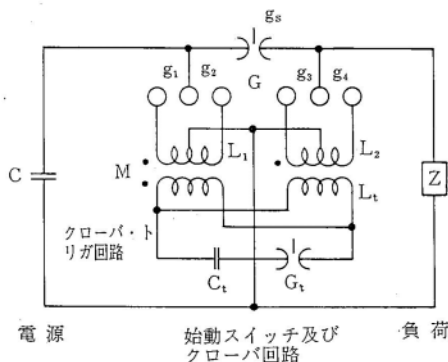


図 15 クロンバ放電回路(3), クロンバスイッチを多重アーク化した場合

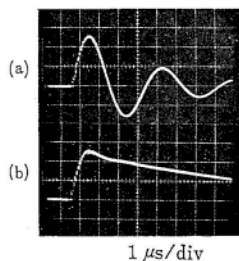


図 16 負荷電流波形(3), クロンバ放電回路(3)を使用、負荷インダクタンス $0.14 \mu\text{H}$
(a) クロンバ放電しない場合
(b) クロンバ放電した場合

き得られた典型的な負荷電流波形を図16に示す。クロンバ回路のインダクタンスはリブルの大きさから $\leq 0.01 \mu\text{H}$ と概算された。クロンバ・スイッチの電極数をさらに増加して多重アーク化すれば、クロンバ回路の残留インダクタンスも小さくなる。従って、クロンバ放電後、負荷電流に生じるリブルの大きさも必要に応じて小さくできる。

この段階で、クロンバ・スイッチに関する基本的な開発は終わった——と考えられた。クロンバ回路におけるリブルは原理的に無くせないというのが常識であった。しかし、ここで妥協せずに、リブルを無くせないかという新しい課題に取り組んだ。

〈第4段階〉 昭和56～昭和58年度^{35～37)}

負荷電流にリブルの乗らないクロンバ放電回路として図17に示す回路を提案した。電源コンデンサ C —始動スイッチ g_1 —コイル L_1 —誘導性負荷 Z —コイル L_2 — C からなる回路が主放電回路である。コイル L_1 と L_2 は図の極性で密に誘導結合している。始動スイッチ g_1 を起動して主回路を放電させたとき、コイル L_1, L_2 は放電電流に対して無誘導となっている。間隙 g_1, g_2 がクロンバ・スイッチである。クロンバ・トリガ回路 ($C_t - G_t - L_t$) を放電すれば、間隙 g_1, g_2 が放電短絡する。クロンバ放電後の負荷電流に対しても、コイル L_1, L_2 は無誘導となる。リブルの原因となる電流分は、コイル L_1, L_2 及び間隙 g_1, g_2 の働きで負荷 Z へ流入しなくなる。

この場合も、誘導型放電ギャップの特徴²⁾があり、クロンバ・トリガ回路と主放電回路 $C-Z$ 部分とは電気的に絶たれる。また、図17に示す放電回路ユニットを誘導性負荷に対して並列に運転する場合、コイル L_1, L_2 がディカップリング素子として働くので並列運転上の利点も生じる。

実験によって、リブルが乗らないことを確かめた。負

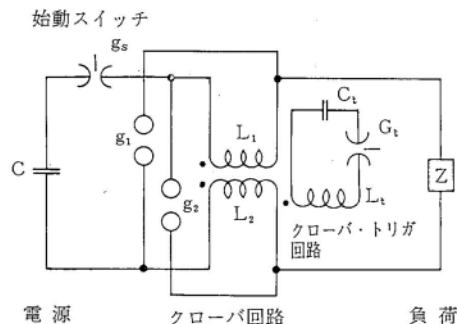


図 17 クロンバ放電回路(4), 負荷電流にリブルを乗らなくした場合

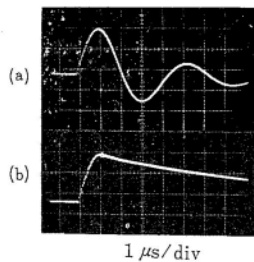


図 18 負荷電流波形(4), クローバ放電回路(4)を使用,
負荷インダクタンス $0.14\mu\text{H}$
(a)クローバ放電しない場合
(b)クローバ放電した場合

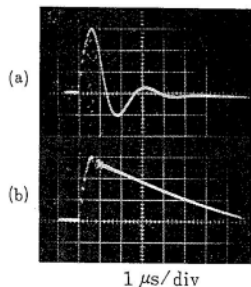


図 19 負荷電流波形(5), クローバ放電回路(4)を使用,
負荷インダクタンス 37nH
(a)クローバ放電しない場合
(b)クローバ放電した場合

荷インダクタンス $0.14\mu\text{H}$ 及び 37nH のとき得られた負荷電流波形例を図18及び図19に示す。クローバ回路の定数を調整すれば、負荷インダクタンス 37nH の単一放電回路でリプルが現れなかった。リプルの乗らない条件は等価回路の計算から求められた³⁸⁾。この条件に関する研究は引きつづき行われている³⁹⁾。

5.3 応用研究

誘導型放電ギャップを用いて負荷電流にリプルの乗らないクローバ回路ができたので、その応用研究を行った。以下に代表的なものを紹介する。

<1> 誘導性負荷電流のさい断⁴⁰⁾

コンデンサ電源から抵抗性負荷へ流れる電流をさい断するには、負荷の両端を単に放電短絡すればよい。ところが、同じように誘導性負荷へ流れる放電電流をさい断するのは容易でない。我々は次のようにして波高値 3kA の誘導性負荷電流を $1\mu\text{sec}$ 以下の時間でさい断することができた。

- (i) コンデンサ電源から負荷へ放電電流を流す。
- (ii) 負荷電流の最大値近くで、負荷電流と逆方向の高

周波振動電流を負荷へ重畳して流す。負荷電流は急激に減衰し、零へむかう。

(iii) 負荷電流が零になったとき、負荷の両端を誘導型放電ギャップ及び負荷電流にリプルの乗らないクローバ回路を用いて短絡する。クローバ回路の働きで、負荷で電流零の状態が持続し、さい断波形となる。波形例を図20に示す。

<2> 単一パルス大電流の発生⁴¹⁾

コンデンサを電源とした低インピーダンス大電流放電回路の電流は、一般に減衰振動波形となる。この波形を整形して誘導性負荷へ単一パルス大電流を流したいことがある。それには次のような方法が考えられる。

- (i) 放電回路へ直列に非線形抵抗を挿入する⁴²⁾。

(ii) 別のコンデンサ電源を用いて負荷電流の第2半波以後の部分を相殺する⁴³⁾。

(iii) シャ断スイッチを用いて半波し シャ断電流を得る⁴⁴⁾。

(iv) 一般的なクローバ・スイッチを第1半波終了時に動作させる⁴⁵⁾。

しかし、(i)、(ii)は効率的でなく、(iii)には高周波大電流に対して限界があり、(iv)ではリプルが生じるなどの欠点がある。我々の研究では、誘導型放電ギャップ及びリプルの乗らないクローバ回路を用い、放電電圧 15kV でパルス幅が約 $1\mu\text{sec}$ 、電流波高値 50kA のパルス電流を効率よく発生できた。電流波形例を図21に示す。

<3> 真空アークの高速し シャ断⁴⁶⁻⁴⁹⁾

真空し シャ断器で直流電流をし シャ断する方法として、開極後の真空アークに振動性の逆向き電流を流し、強制的

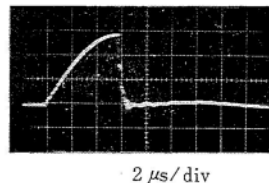


図 20 誘導性負荷電流のさい断波形、さい断時の波高値 3kA

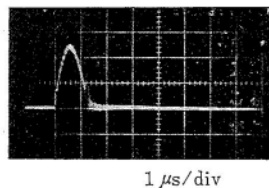


図 21 単一パルス電流波形、波高値 50kA

に電流零点を作る方法がある。振動電流の周波数を高くすれば、高速で電流零点を作ることができる。しかし、零点近傍の電流変化率が大きいと、アークは再発弧しやすく、同じ電流を高速で断するのに限界が生じる。スイッチ自身性能を変えず、高速で断するためには、転流回路や転流方法に工夫が必要となる⁵⁰⁾。我々は、次のようにして電流波高値 2.2kA、アーク時間約 200 μ sec の真空アークを転流時間(転流開始から電流零点までの時間)約 0.5 μ sec で断することに成功した。

- (i) コンデンサ電源及び真空トリガギャップを使用し真空アークを発生させる。
 - (ii) アーク電流の最大値近くで、転流回路に立ち上りの速いパルス電流を流す。
 - (iii) 真空アークに電流零点が生じたとき、転流回路に設けた誘導型放電ギャップ及びリブルの乗らないクロージャ回路を動作させる。
 - (iv) パルス電流は真空アーク部分へ流入しなくなるとともに、アークの電流零状態が短時間続く。この間に残留粒子が速やかに拡散消滅し、絶縁が回復する。
- 典型的なアーク電流及び回復電圧波形を図22に示す。回復電圧の測定には、高電圧プローブ及び電圧—光—電圧変換器を使用した。

<4> 立ち上りの速い長周期振動電流の発生

前述した真空アークの高速断実験では、転流回路に立ち上りの速い長周期振動電流が流れる⁴⁸⁾。このような電流は次のようにして作ることができる。転流回路以外への利用も可能である。

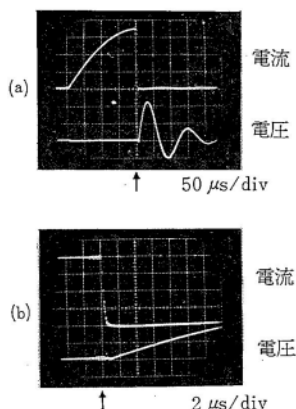


図 22 真空アーク断時の電流、電圧波形、(b)は(a)の断時点(↑印)近くを拡大したもの、断電流波高値はいずれも 2.2 kA

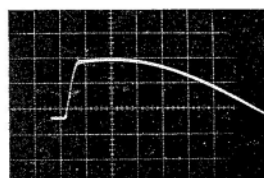


図 23 立ち上りの速い長周期振動電流波形

- (i) 容量が大小 2 種類のコンデンサ、放電ギャップ及び誘導性負荷を直列に接続し、両コンデンサを適当に充電し同時に放電する。
- (ii) 負荷へは立ち上りの速い電流が流れる。
- (iii) この電流が最大になったとき、容量の小さいコンデンサの両端を誘導型放電ギャップ及びリブルの乗らないクロージャ回路を動作させて短絡する。
- (iv) 負荷へは容量の大きいコンデンサから引きつづき電流が流入する。すなわち、負荷へは立ち上りの速い長周期振動電流が流れる。

コンデンサ容量 200 μ F, 1.6 μ F, 負荷インダクタンス 8 μ H のとき得られた負荷電流波形を図23に示す。コンデンサ容量と充電電圧を選べば、波形をかなり自由に變えることができる。

6. あとがき

最近になってパルスパワー技術が多くの分野で利用されるようになり、放電ギャップを中心としたスイッチ技術の開発が盛んに行われている。この論文では、本校で開発した誘導型放電ギャップの特徴、開発経過及び研究成果の一部を報告した。紙面の都合で詳しく報告できなかった部分については続報で述べたい。

今後も誘導型放電ギャップの優れた特徴を生かし、始動スイッチ及びクロージャ・スイッチとしての開発を続ける。現在まで、小規模での実験が行われてきた。コンデンサ電源が充実したのを機会に実用規模での実験に移りたい。手始めとして、アルミニウム円管の電磁成形加工実験を行っている⁵¹⁾。効率よく加工するためには、放電ギャップを含む放電装置の改良などが必要である。

次に、誘導型放電ギャップの応用面を考えたい。トリガ回路によって主電極間のアーク抵抗を制御できる⁴¹⁾。この特徴についてはまだ十分に調べてないが、応用面で生かしたい。多重路アークギャップとしての応用⁴²⁾、スイッチ試験装置での高耐圧、低電圧始動ギャップとしての使用、高気圧で高速気流中など悪条件下での放電点火装置⁵²⁾への応用も考えられる。負荷電流にリブルの乗らないクロージャ回路については、高速断装置の転流回

路⁵⁴⁾などへ適用した研究を続けたい。

パルスパワー技術に必要なスイッチとしては、ギャップ・スイッチなど短絡用スイッチのほか、シャ断用スイッチがある。高速シャ断スイッチに関する研究は、短絡スイッチに比べて遅れており、今後の開発が大いに期待されている。これまでの成果を基礎にして、シャ断スイッチなど新たな課題にも取り組みたい。

謝 辞

誘導型放電ギャップの開発にあたり、有益な助言をしてくださった日本大学宮本徹教授、ご支援ご協力くださった本校、八田龍太郎元校長、大谷健三元教授、渡辺厚元教授そのほかの皆さんに深く感謝いたします。また、引きつづきご支援くださった本校、杉原猪佐雄校長はじめ多くの皆さんに感謝いたします。特に、小山内行雄博士、岡川啓悟助教授、辺見信夫助教授及び実験を行った学生諸君にお礼申しあげます。学生のなかには、我々が気づかなかったことを指摘してくれた者もあり、研究の進展に非常に役立ちました。

なお、本研究には昭和52～昭和61年度東京都研究奨励費を使用しました。関係各位にお礼申しあげて報告を終わります。

参 考 文 献

- 1) 電気四学会：昭56連合大会講演論文集[1]、パルスパワー技術とその応用
- 2) 電気学会：昭60全国大会S.5フラッシュエネルギー応用パルスパワー技術
- 3) 電気学会：技術報告(Ⅱ部)第228号44(昭61)
- 4) 電気学会：「放電ハンドブック」p.257(昭49)
- 5) 御所：「放電」玉河元編 p.363(共立出版、1975)
- 6) 北川：「プラズマ・核融合」伏見康治編 p.135(共立出版、1979)
- 7) 電気学会：技術報告(Ⅰ部)第72号23(昭41)
- 8) 相沢、渡辺、宮本：核融合研究40, 632(昭58)
- 9) 相沢、大谷、渡辺：都立工業高専研究報告16, 37(昭56)
- 10) 相沢、岡川、辺見：都立工業高専研究報告21, 47(昭61)
- 11) 相沢：電気学会論文誌A106, 346(昭61)
- 12) 相沢、大谷、渡辺：都立工業高専研究報告18, 9(昭58)
- 13) 相沢、渡辺、宮本：核融合研究44, 別冊7, 85(昭55)
- 14) 杉浦、池田、井口、竹田：電総研報告第713号9(昭46)
- 15) 相沢、岡川、辺見、八巻：昭56電気学会東京支部大会 No.38
- 16) 平野：電気学会誌88, 1473(昭43)
- 17) 電気学会：技術報告(Ⅱ部)第131号20(昭57)
- 18) 岡川、相沢：昭55電気学会全国大会 No.124
- 19) 河野：「高電圧工学」p.63(朝倉書店、昭60)
- 20) 相沢、宮、宮本：物理学会32回年会12 pK 6(1977)
- 21) 相沢、尾崎、武田、宮、宮本：昭52電気学会東京支部大会 No.24
- 22) 相沢、尾崎、武田：昭53電気学会全国大会 No.82
- 23) 相沢、辺見、大谷：昭53電気学会東京支部大会 No.5
- 24) 辺見、岡川、相沢：昭56電気学会全国大会 No.180
- 25) 相沢、伊藤、宇佐美、森谷：昭54電気学会東京支部大会 No.31
- 26) 相沢、早戸、中村、本郷：昭61電気学会東北支部大会 No.2C20
- 27) 相沢、大木、早戸、中村：昭62電気学会全国大会 No.44
- 28) 相沢、辺見、灰野、渡辺：昭60電気学会東京支部大会 No.19
- 29) 辺見、灰野、相沢：昭61電気学会全国大会 No.149
- 30) 林、妹尾：電気学会誌86, 581(昭41)
- 31) 相沢、渡辺、宮本：物理学会秋分科会 6pCN14(1978)
- 32) 相沢、曇、遊佐、佐藤：昭54電気学会全国大会 No.46
- 33) 相沢、大谷、岡川、辺見：昭55電気学会全国大会 No.74
- 34) 相沢、吉沢、森：昭56電気学会全国大会 No.179
- 35) 相沢、星合、坂本、八巻：昭56電気学会東京支部大会 No.39
- 36) 相沢、伊沢、黒部：昭58電気学会全国大会 No.45
- 37) 相沢：電気学会論文誌B102, 186(昭57)
- 38) 星合、岡川、相沢：昭57電気学会東海支部大会 No.31
- 39) 岡川、相沢、久住、小島、菅崎、田中：昭62電気学会全国大会 No.43
- 40) 相沢、星合、坂本、八巻：昭57電気学会全国大会 No.165
- 41) 吉沢、小黑、近藤、相沢：昭58電気学会東京支部大会 No.28
- 42) K. Sato, R. Akiyama, Y. Osanai, T. Aizawa, I. Kawakami: Nuclear Fusion 21, 1015(1981)
- 43) 入沢、平野：名大プラズマ研 IPPJ-DT-15,62(1969)
- 44) 板垣、喜多村：電気学会論文誌B97, 391(昭52)
- 45) 池田、長田、田丸：電気学会論文誌A99, 345(昭54)
- 46) 相沢、高見、富樫：昭58電気学会東京支部大会 No.114
- 47) 相沢、富樫、鶴岡：昭59電気学会全国大会 No.1198
- 48) 相沢、小谷、鶴岡、島川：昭60電気学会全国大会 No.1236
- 49) 相沢：電気学会論文誌B105, 407(昭60)
- 50) 柳父、金子、玉川、相馬、奥村：電気学会論文誌B100, 649(昭55)
- 51) 相沢、小山内、五十嵐、石橋：38回塑性加工連合講演会 No.243
- 52) 相沢：電気学会論文誌B107, 516(昭62)
- 53) 饒満、増田：電気学会誌81, 1769(昭36)
- 54) 相沢：プラズマ核融合学会2回年会 7aC6(1985)