

高信頼性トリガギャップスイッチにより大気中で発生する 12路並列放電アークの写真観察

相沢 友勝

東京都立工業高等専門学校 〒140-0011 東京都品川区東大井 1-10-40

E-mail: aizawa@mem.iee.or.jp

あらまし このトリガギャップスイッチには、主電極と誘導電界発生用コイルが複数組み合わせられたスイッチング回路がある。この回路は大気中で別のトリガ用放電回路と電磁結合している。トリガ回路を放電するとスイッチング回路に磁束が交差し、誘導電界が発生する。この結果、ギャップスイッチの各主電極間に電圧が発生し、並列12路アーク放電が生じる。充電されたコンデンサ電源からこのスイッチング回路を経て流れる放電電流は、この回路のインダクタンスを打ち消すように流れる。スイッチング回路のコイルは、4ターン巻かれ、すぐ外側に置かれたトリガ用放電回路と電磁結合する。スイッチング回路およびトリガ用放電回路は、各主電極間に加わるコンデンサ充電電圧がなくても、全電極間が放電するよう選ばれる。12路アーク全体写真(静止画像)は露出時間約1秒で撮られる。

キーワード 放電ギャップスイッチ, 高信頼性トリガ放電, 誘導電界, 並列12路アーク放電, アーク観測

Photograph observation of 12-parallel discharge arcs generated in the atmosphere by a reliable trigger gap switch

Tomokatsu AIZAWA

Tokyo Metropolitan College of Technology 1-10-40, Higashi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140-0011, Japan

E-mail: aizawa@mem.iee.or.jp

Abstract This trigger gap switch has a switching circuit that combines multiple main electrodes and induced electric field generating coils. This circuit is electromagnetically coupled to another trigger discharge circuit in the atmosphere. When the trigger circuit is discharged, the magnetic flux intersects the switching circuit and an induced electric field is generated. The resulting voltage is generated between each main electrode of the gap switch, and 12-discharge arcs occur. The discharge current flowing from the charged capacitor bank through this switch flows so as to cancel the inductance of the switching circuit. The coils of the switching circuit are wound for 4 turns and are electromagnetically coupled to the trigger discharge circuit placed just outside. The switching circuit and the trigger discharge circuit are selected so that all main electrodes are discharged even when there is no capacitor charging voltage between each main electrode. The entire 12-arcs photo (still image) is taken with an exposure time of approximately 1 second.

Keywords Spark gap switch, Reliable trigger discharge, Induced electric field, Parallel 12-arc discharge, Arc observation

1. はじめに

放電ギャップスイッチ(多くはトリガ式ギャップスイッチ)は、例えば電圧数kVに充電したコンデンサ電源から、低抵抗の誘導性負荷へ数10kA以上の放電電流を瞬間的に流すスイッチとして使用される。この放電電流は、電気、電子部品用金属材料の電磁圧接(溶接)[1-7]、電磁成形(加工)[8-11]などに利用される。放電回路の負荷に相

当するのは磁束発生用コイルなどである。コイルに発生した磁束を良導電性の金属材料へ急激に加え、発生する電磁力を利用して圧接や成形が行われる。電磁圧接では、低温状態のまま圧接接続できる。部分的に露出したプリント配線板銅箔同士の圧接では圧接部分近くおよび裏側の絶縁被覆が溶けない[4, 7]。電磁力による穴あけ成形加工では、パンチが不要になる[9]などの特徴がある。

放電トリガギャップスイッチの多くは、大気中で対向する主電極対（充電側および接地側）と接地側主電極近くのトリガ用電極から構成される[12-15]．放電前，主電極間にはコンデンサの充電電圧が加わり，電位差が生じる．接地側主電極とトリガ電極間に始動用パルス電圧を加えて小さく放電させ，主電極間の放電を誘発させる．主電極間の間隔は，充電電圧に応じて調整される．

このようなスイッチは，構造が単純であるが信頼性が低い．例えば，通電するエネルギーが増加すると，電極の消耗が激しく，保守，調整などの回数が増える．対策として，スイッチの電極対を並列に使用し，並列にアーク放電（通電）できれば，各電極対あたりの通電エネルギーが少なくなり，電極の消耗が減少し，信頼性が向上する．また，スイッチを低インダクタンス化できる．

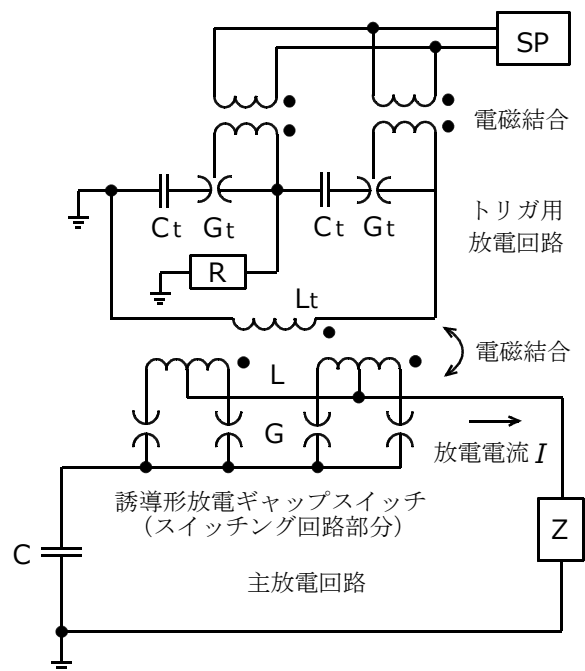
ところが，一般的に，主電極対（トリガ電極を含む）を大気中で複数並列に接続し，充電された各主電極間にトリガ用パルス電圧を同時に加えても，主電極間の放電が同時に起こりにくい．1 対の主電極が先に放電短絡すると，この主電極間とは同電位となり，電位差がなくなる．これが放電短絡していない他の電極対へ瞬時に伝わり，この放電していない電極間も電位差がなくなり，放電しにくくなるからである．電極対が複数並列に接続された放電スイッチの各電極間を全て放電短絡させるには，各主電極間の相互干渉を防いだり，主電極（トリガ電極を含む）を放電し易い真空中に設けるなどの工夫，改良が必要である[16-25]．

本報告の目的は，誘導形放電ギャップスイッチ[26-28]と呼ばれる高信頼性トリガギャップスイッチを用いて12路の並列放電アークを大気中で発生し，写真観察することである．このスイッチには，トリガ用電極がない．代わりに各主電極間を大気中で放電させるスイッチング回路部分がある．このスイッチング回路は，主電極と誘導電界発生用コイルが大気中で複数組み合わせられ，共通のトリガ用放電回路と電磁結合している．各主電極間は，電磁結合による誘導電界で発生する電圧で放電短絡する．例え，各主電極間に電位差がなくても，全主電極を放電短絡し，複数の並列アークを発生できる．スイッチ構造，並列アーク発生法，発生アークの写真観察（写真撮影）方法，結果などを報告する．

2. 誘導形放電ギャップスイッチの動作原理，特徴

2.1 並列4路アークを発生する場合

まず，誘導形放電ギャップスイッチで4路アークを発生させる放電回路の概略図を図1に示す．各コンデンサの充電回路は省略されている．主放電回路はコンデンサ



SP 始動パルス発生器
Ct トリガ用放電回路のコンデンサ
Gt トリガ用放電回路のトリガ電極式ギャップスイッチ
Lt トリガ用放電回路の等価的なインダクタンス
R 高抵抗
C 主放電回路のコンデンサ（主電源）
G 誘導形放電ギャップスイッチ（4路アーク発生用）
L 誘導電界発生用コイル
Z 主放電回路の負荷（コイルなど）
I 主放電回路に流れる放電電流

図1 誘導形放電ギャップスイッチによる4路アーク発生用放電回路

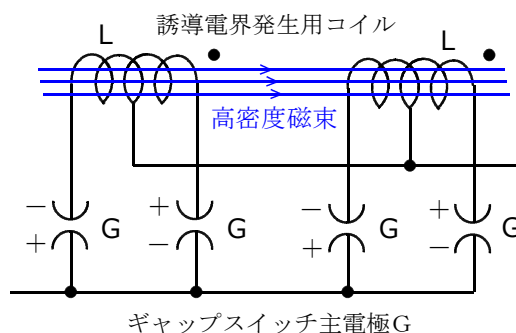


図2 誘導形放電ギャップスイッチのスイッチング回路部分

C，ギャップスイッチ主電極Gおよび負荷Zから構成される．このギャップスイッチ主電極Gには，トリガ用の電極がない．代わりに4対の主電極Gと2つの誘導電界発生用コイルLが組み合わせられたスイッチング回路部分がある．この回路は図1上方にあるトリガ用放電回路と大気中で電磁結合している．

スイッチGの各主電極を放電させる原理，方法を，図

1 および図2を用い順に説明する.

- (1) トリガ用放電回路のコンデンサ C_t を充電する.
- (2) 始動パルス発生器 SP を起動し, トリガ用放電回路のトリガ電極式ギャップスイッチ G_t を放電させ, このトリガ用回路へ放電電流を急激に流す.
- (3) トリガ回路と電磁結合するスイッチング回路のコイル L に磁束が急激に交差し, この部分に誘導電界が発生する.
- (4) 誘導電界でスイッチング回路(主にコイル L) 内の電子が移動して4対の主電極間にそれぞれ電荷分布が生じ, 電圧(電位差) V_g が発生する. この電圧はコイル抵抗を無視すれば, 主電極間に発生する誘導起電力(電圧)の大きさに等しくなる.
- (5) コンデンサ C が充電されない場合, 主電極間に発生する電荷分布の様子(極性)を図2に示す. コンデンサ C が電圧 V_c に充電される場合, 4対の同じ主電極間には, 電圧 $V_g + V_c$ または $V_g - V_c$ が発生する.
- (6) 各主電極間はこのようなように発生する電圧で放電する.
- (7) このとき, コンデンサ C を充電しても, しなくても, 各主電極が, 発生する電圧(電位差または誘導起電力)で放電するように実験条件などを選ぶ.

誘導電界発生用コイル L には, 各主電極間の相互干渉を防ぐ特徴がある. また, 充電されたコンデンサ C から負荷 Z へ流れる放電電流は, コイル L のインダクタンスをなくすように流れる. 放電電流 I が流れるとコイル L が低インダクタンスになることは, 電流波形などの測定結果で示されている[8, 9].

2.2 並列12路アークを発生する場合

次に, 誘導形放電ギャップスイッチで12路アークを発生させる放電回路の概略図を図3に示す. 12路アークの動作原理は4路アークの場合と同様である. ただし, このスイッチ G には12対の主電極がある. 基本的にトリガ回路の構成なども同様である. 12路アークの場合, スイッチ G の主電極および誘導電界発生用コイル L が多いので, これらに番号を付けてある. このスイッチ G には, 各主電極を後で示すように狭い範囲に配置できる特徴がある. スイッチ G 全体のインダクタンスを減らせる.

3. 放電装置および12路アーク発生部分

3.1 コンデンサ放電装置

放電回路(図3)の主な定数は, 主放電回路のコンデンサ容量 $C = 200 \mu\text{F}$, 充放電電圧 $0 \sim 5 \text{ kV}$, 最大充電エネルギー 2.5 kJ , 主放電回路全インダクタンス約 $0.2 \mu\text{H}$ などであり, トリガ回路のコンデンサ容量 C_t 約 $0.06 \mu\text{F}$,

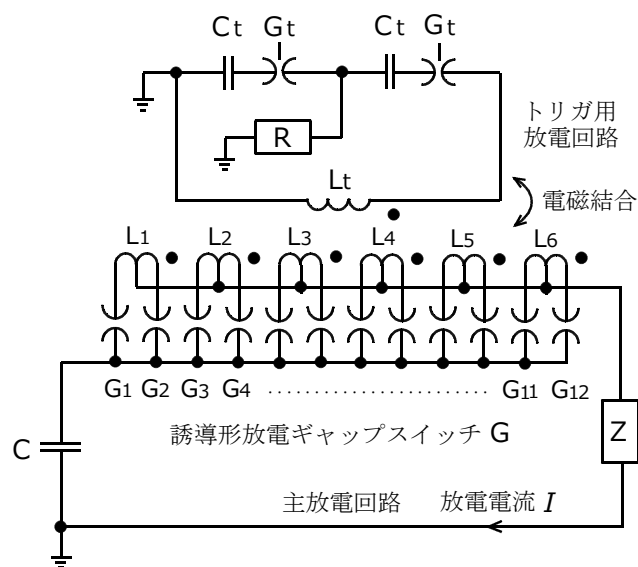


図3 誘導形放電ギャップスイッチによる12路アーク発生用放電回路

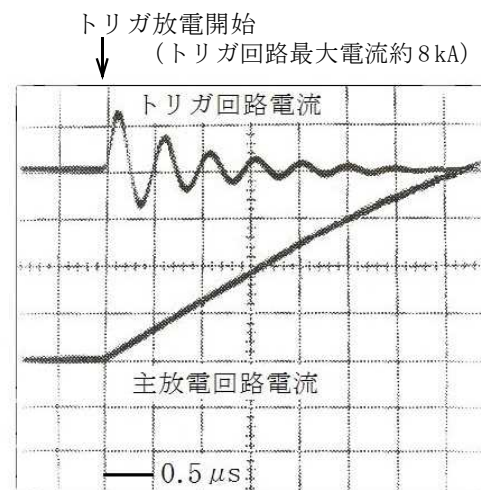


図4 トリガ回路および放電回路(図3)の電流波形例

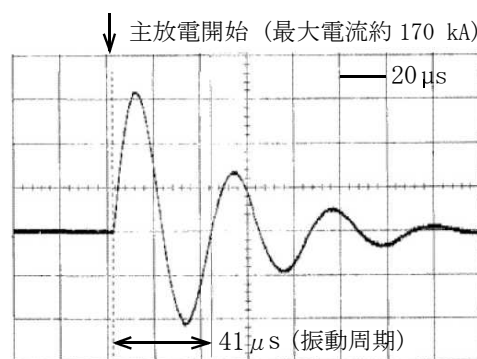


図5 主放電回路(図3)に流れる電流波形例

充放電電圧10数 kV , トリガ回路全インダクタンス約 $0.2 \mu\text{H}$ などであった. 放電前の誘導電界発生用コイル($L_1 \sim L_6$)のインダクタンスは約 $2 \mu\text{H}$ であった. 負荷 Z として低抵抗の誘導性負荷が使われた.

トリガ回路には図4のように最大約8kAで減衰振動する電流が約 $3\mu\text{s}$ 流れた。主放電回路には図5のように最大約170kAで減衰振動する電流が約 $200\mu\text{s}$ 流れた。各回路に流れる電流波形は2つの電流測定用サーチコイルを各回路近くに置いて文献[29]と同様に測定された。両電

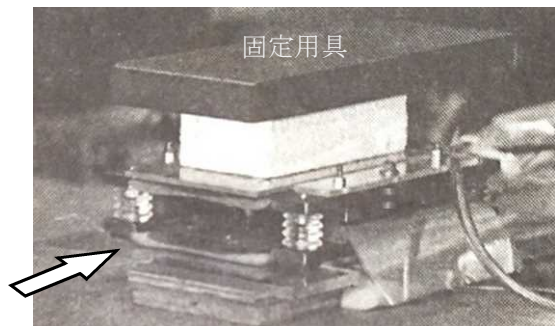


図6 誘導形放電ギャップスイッチの外観
(矢印方向から12路アークを観察する)

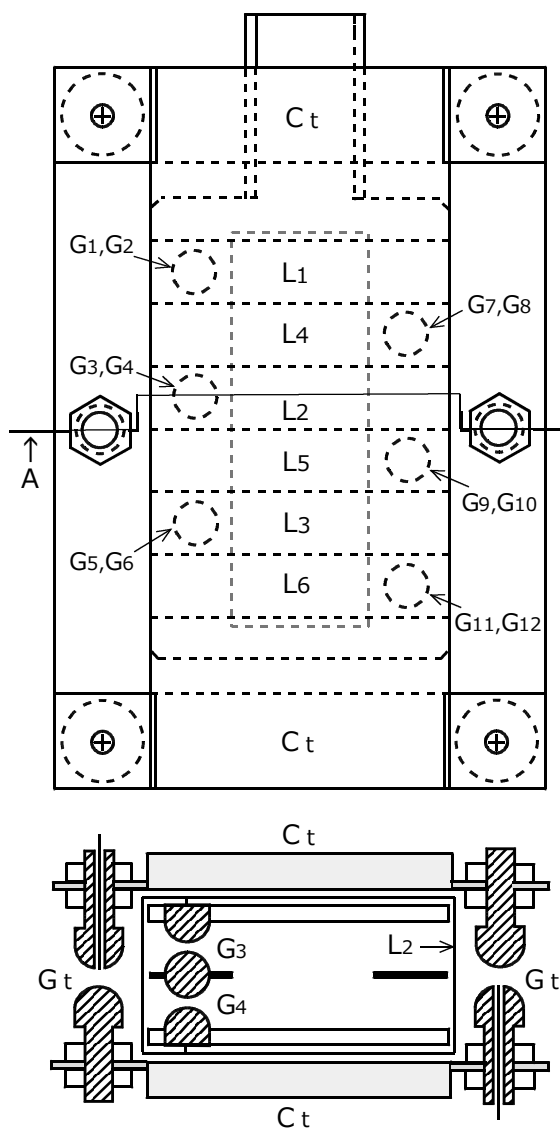


図7 並列12路アーク発生部分の平面配置概略図(上)および断面(A-A)配置概略図(下)

流波形に生じる遅れ時間は $0.1\mu\text{s}$ 以下であった。

3.2 並列12路アーク発生部分

12路アークを発生用誘導形放電ギャップスイッチの外観を図6に示す。トリガ用放電回路(コンデンサ C_t など)はここに含まれていた。トリガ用放電回路の上下(主に上側)に固定用具が置かれた。固定用具などを省略したスイッチの平面配置概略図および中央部分の断面配置概略図を図7に示す。平面配置図および断面配置図は実際より縦長に描かれた。内部に設けた固定柱、固定板などは省略された。平面配置部分の大きさは約 $300\text{mm} \times$ 約 200mm であった。

電極対(G_1, G_2)などは直径約 20mm で図7(上図)のように6箇所配置された。各電極対の中央部は同じ直径の球状電極であり、6箇所に配置され、これらは主放電回路のコンデンサ電源 C に接続された。各電極対の間隙は約 3mm 、自爆(自然に放電する)電圧は約 9kV であった。各電極の材質は銅であるが、対向する部分に銅タングステン合金が溶接され、通電による消耗を防いだ。

誘導電界発生用コイル($L_1 \sim L_6$)は図7(上図)のように横並びで平行に配置された。各コイル(L_2 など)は厚さ 0.1mm 、幅 20mm の絶縁銅薄板を各電極対(G_3, G_4 など)の周囲に4巻きされ、図7のように配置された。各コイルの中間点は主放電回路の負荷 Z に接続された。

各コイル($L_1 \sim L_6$)の外側には、電磁結合が強くなるようにトリガ回路(C_t および G_t)が配置された。コンデンサ C_t はアルミニウム箔とポリエステルシートを重ねて自作された。厚さは約 15mm であった。

電極対の一部が断面手前側(正面)から見えないので、12路アーク発生を観察するとき、観察用の小さな鏡を図8のように配置し、全アークを同時に観察(撮影)した。

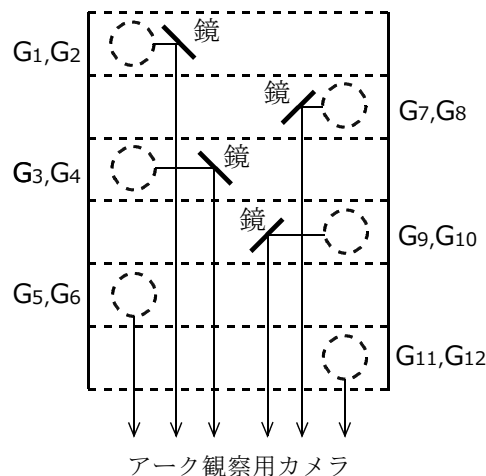


図8 並列12路アーク観察用鏡の配置およびアーク観察方向へ向かう光線路

3.3 並列12路アーク観察(写真撮影)方法

観察は、図6に示したアーク観察方向から、普通のカメラ、高感度白黒フィルムなどを使用し、静止画(写真)を撮影して行われた。カメラからアーク発生地点までの平均距離は約0.4mであった。発生したアークの写真は、放電直前にシャッターを開き、放電直後にシャッターを閉じて撮影された。露出時間(シャッタースピード)は約1秒であった。この間、約 $3\mu\text{s}$ にわたり流れるトリガ放電電流および約 $200\mu\text{s}$ にわたり流れる主放電電流で発生するアークを撮影した。アーク形状、光度、反射光などは時間と共に変化するが、その全てを1枚の写真に重畳して記録した。

4. 並列12路アーク観察結果

12路アーク発生前、発生後に撮影した3枚の実測写真を図9(上)、図9(a)、図9(b)に示す。

アーク発生前の写真(図9(上))は、鏡を利用した12路アーク発生部分である。この写真中央に12路アーク発生用電極が横並びで見られる。この部分に12路アークが発生する。また、この写真上方および下方にトリガ回路のコンデンサ C_t (端部)が、写真左右には絶縁用碍子が写っている。アーク発生前写真下の6本の矢印(↓)は各アークの発生場所に対応している。

12路アーク発生後の写真(図9(a))は、主放電回路のコンデンサ C を充電しない状態でトリガ回路のコンデンサ C_t を放電させて撮られた。この状態で、12路アーク発生用電極が誘導電界で放電することを確認した。撮影されたアーク光(図9(a)では、薄白色の小さな点)は非常に弱かったが、12路のアーク光(薄白色点)が再現性よく確認できた。アーク光が弱い理由はトリガ回路に流れる電流最大値が小さく、継続時間も短いからと言える。

12路アーク発生後の写真(図9(b))は、コンデンサ C を電圧5kVに充電して同様にトリガ回路のコンデンサ C_t を放電させて撮られた。この場合、撮影されたアーク光(写真では、白色の横長部分)は強かった。光が強すぎて反射光などが複雑な経路で重なって写っているようであった。図9(b)と同じ条件で12路アークを撮影した写真の再現性を図10(c)、(d)に示す。反射光などによる再現性はないが、12路アークは再現性よく観察された。

以上のようなアーク観察結果は、並列6路アークギャップの場合、並列8路アークギャップの場合でも各アーク数が同様に観察された[27, 28]。

5. まとめ

誘導形放電ギャップスイッチと呼ばれる構造が比較的

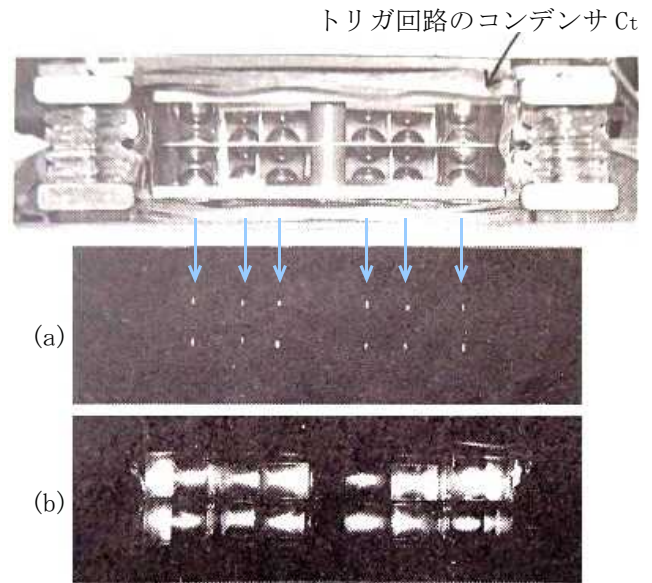


図9 並列12路アーク発生前および発生後の写真
(a) アーク発生後、コンデンサ C を充電しない場合
(b) 同じく、コンデンサ C を電圧5kVで充電した場合

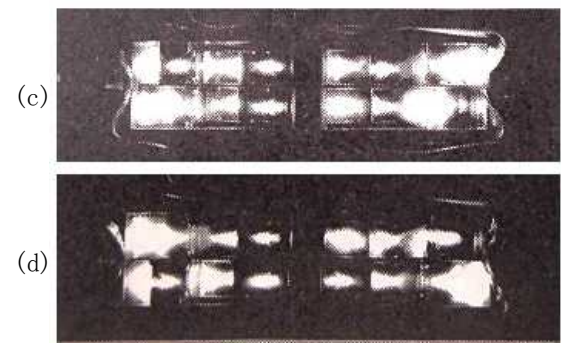


図10 並列12路アーク発生写真の再現性
コンデンサ C を電圧5kVで充電した場合

に複雑なトリガ式ギャップスイッチを用いて12路の並列放電アークを大気中で発生させ、写真観察した。スイッチには12組の主電極間があり、同時にトリガ放電させると、合計して12路の放電アークが再現性よく発生、観察できた。放電用コンデンサ電源 C を充電せずに各主電極間をトリガ放電させても各主電極間に12路の放電アークが再現性よく発生した。これは、このトリガ方式の信頼性が高いことを示したと言える。コンデンサ電源 C を充電した場合は、電源から各主電極へ放電電流がそれぞれ流れ、12路アークが再現性よく観察された。

このように誘導電界(電磁誘導)を利用したトリガギャップスイッチには、大気中で多数の並列アークを確実に発生できる優れた特徴がある。各主電極に流れる放電電流最大値を減少でき、電極の消耗、保守回数が減る。ギャップスイッチ部分に残留するインダクタンスも減るなどの利点がある。

参考文献

- [1] 相沢, M. Kashani, 花崎: “アルミニウム端子板および電線の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2005-100, pp. 19-124, 2005.
- [2] 特許: “導体モジュール及び電磁圧接方法”, 登録番号5274944, 出願日2008年9月8日.
- [3] 相沢, 岡川, 町田: “銅薄板の金属柱(銅バンブ)への電磁圧接”, 信学技報, EMD-2009-107, pp. 7-10, 2009.
- [4] 杉山, 花崎, 相沢, 岡川: “電磁圧接を用いた自動車用FPC回路の重ね合せ溶接”, 溶接技術(日本溶接協会誌), 57巻6号, pp. 87-92, 2009.
- [5] 相沢, 松澤, 岡川: “積層アルミニウム箔の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2011-65, pp. 25-28, 2011.
- [6] 相沢, 松澤, 網谷: “金属ガラス薄帯へのアルミニウム薄板の電磁圧接”, 信学技報, EMD-2015-18, pp. 41-46, 2015.
- [7] 相沢, 杉山: “リジッド及びフレキシブルプリント配線板銅箔の電磁圧接(第2報)”, 信学技報, EMD-2016-15, pp. 39-42, 2016.
- [8] 村田, 早坂, 鈴木, 相沢: “直接通電電磁成形による板材成形”, 日本機械学会論文集(C編), 55巻514号, pp. 1526-1530, 1989.
- [9] 張, 村田, 相沢, 鈴木: “直接通電方式を用いた電磁力による薄板の穴あけ加工”, 日本機械学会論文集(C編), 62巻599号, pp. 2872-2877, 1996.
- [10] 相沢: “プリント配線板銅箔の電磁除去”, 信学技報, EMD-2001-83, pp. 9-12, 2001.
- [11] 相沢, 岡川, 宮崎, 下條: “平板状態に縮む電子部品用円錐ばねの電磁成形”, 信学技報, EMD-2009-113, pp. 7-10, 2010.
- [12] 柳父: “クロージングスイッチ”, パルスパワー技術とその応用, オーム社, pp. 45-62, 1992.
- [13] 電気学会大電流応用技術調査専門委員会編: “ギャップスイッチ”, 大電流工学ハンドブック, コロナ社, pp. 163-170, 1992.
- [14] Frank Früngel: “Modern High Power Switching Gaps”, Capacitor Discharge Engineering, Academic Press, New York, pp. 69-74, 2014.
- [15] J. Lehr, P. Ron: “Spark Gap Switch”, Foundation of Pulsed Power Technology, Jon Wiley & Sons, New Jersey, pp. 148-171, 2017.
- [16] R. Fitch, N. McCormick: “Low-inductance switching using parallel spark-gaps”, Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering, Vol. 106, No. 2, pp. 117-130, 1959.
- [17] 平野, 北川, 大井: “気中ギャップスイッチの並列点火”, 電気学会雑誌, 87巻940号, pp. 125-132, 1967.
- [18] P. Barnes, J. Gruber, T. James: “The parallel operation of low-inductance high-current spark gaps without transit time isolation”, Journal of Scientific Instruments, Vol. 44, No. 8, pp. 599-605, 1967.
- [19] 杉浦, 井口, 池田: “気中および圧力ギャップスイッチのトリガ特性とその応用”, 電気学会雑誌, 88巻956号, pp. 936-943, 1968.
- [20] G. Kovacs and S. Szatmari: “Parallel operation of gas-filled switches using current-balancing transformers”, Measurement Science and Technology, Vol. 4, No. 9, pp. 962-967, 1993.
- [21] H. Samaulah, K. Itagaki, A. Sugawara, T. Maruyama, H. Kitamura: “Switching Characteristics of Two Parallel-Connected Triggered Vacuum Gaps”, 電気学会論文誌B, 117巻3号, 1997.
- [22] A. Kim et al.: “Multi gap, multi channel spark switches”, Digest of Technical Papers, 11th IEEE International Pulsed Power Conference, Vol. 2, Baltimore, MA, USA, pp. 862-867, 1997.
- [23] 古谷: “パルスパワー電源のための高速高電圧スイッチングに関する研究”, 長岡技術科学大学博士論文, 平成17年度, 2005.
- [24] Z. Liu, K. Yan, G. Winands, A. Pemen, E. M. Van Heesch, D. Pawelek: “Multiple-gap spark gap switch”, Review of Scientific Instruments, Vol. 77, No. 7, 073501, 2006.
- [25] J. Lehr, P. Ron: “Current Sharing in Spark Gaps”, Foundation of Pulsed Power Technology, Jon Wiley & Sons, New Jersey, pp. 172-176, 2017.
- [26] 相沢: “誘導形放電ギャップの特徴”, 電気学会論文誌A, 106巻7号, p. 346, 1986.
- [27] 相沢: “誘導形放電多重路アーク・ギャップスイッチ”, 電気学会論文誌B, 107巻10号, p. 516, 1987.
- [28] 相沢: “誘導電場起動型放電ギャップ・スイッチ(第4報)”, 都立工業高等専門学校研究報告, 23号, pp. 35-46, 1988.
- [29] 相沢, 松澤, 明渡: “金属薄板の電磁圧接用放電回路に使う高速機械式クローバスイッチ”, 信学技報, EMD-2020-1, pp. 1-6, 2020.