

超高压送電線用防絡具の大電流アーク実験

Experiments of Heavy Arc Current on Arcing-Horns in Extra-High Voltage Transmission Lines

林 潔* 永野 宏 郎**
Kiyoshi Hayashi Hiro Nagano

内 容 梗 概

超高压送電線では線路絶縁を異常電圧より守り、安全に送電を行うことがきわめて重要である。防絡具は送電線に異常電圧が到来した場合、線路絶縁体である碍子連装置を保護するものである。すなわち異常電圧で発生する碍子の沿面閃絡を防絡具によって防止し、たとえ碍子の汚損や急峻な波形の雷撃のため碍子の表面閃絡を起しても閃絡に続いて起る送電源よりの続流アークをできるだけ速く碍子面より遠ざけ、碍子の破損を防ぐことである。

最近の超高压送電線は直接接地を採用し、送電系統の連繫によって地絡時のアーク電流はますます大きくなる傾向にある。しかし一方高速度遮断の発達によって続流によるアーク時間が短くなった。そのため碍子の破損が少なく雷を考慮した場合は特に大きな防絡具を必要とするなどの理由で、米国などの超高压送電線では防絡作用を考慮せず、単にシールドのために電線側に小さな遮蔽環を取り付け、地線側には何も取り付けない形のものを使用している例が多いので、この点について研究した。

すなわち、種々な防絡具を試作し、150 MVAの大容量短絡発電機によって約10,000Aおよび20,000A各6サイクル(0.1秒)程度のアークを碍子表面に発生させ、アークの状況と、碍子の破損状況を調査した。

この結果、電源開発株式会社只見幹線用防絡具の大電流アーク特性について基礎資料をうる事ができた。

1. 緒 言

最近のわが国の電力需要は年々増加の一途をたどり、これに対処するため、送電電圧の超高压化が論ぜられている。超高压の幹線では線路絶縁を雷などの異常電圧から守り、たとえ故障を起してもただちに送電を再開しなければならない使命をおびている。

防絡具は送電線に異常電圧が到来した場合、碍子連装置を閃絡による破壊より守り、さらに閃絡後の続流アークが遮断されるまで、碍子が破壊されないようにし、続流アークの遮断後は、遮断器再投入によって安全に運転を続行できるようにすることが目的である。しかし、送電線の碍子は塩分や煙害などによって汚損することも考えられ、これによって碍子表面に閃絡が発生することもあるが、この場合でも碍子表面に発生したアークをすみやかに防絡具に移行させ碍子の破壊を防ぐことも必要である。

従来の送電線は系統の中性点接地方式としてリアクトル、あるいは高抵抗を採用し、地絡電流を減少させているが、超高压送電線は機器の絶縁を経済的に行うため直接接地系となっている。このため地絡時の電流は大きく、送電系統の連繫によってこの値はますます大きくなる傾向がある。このため特に防絡具の研究が必要であるが、従来の超高压送電線の防絡具の形状は懸垂装置では、電線側は x_p (電線側防絡具の碍子中心線よりの横広がり) を 500~540mm の楕円形状で接地側の x_c は 400mm 前

後のなす形である。また耐張装置は上面のみについたもので x_p は懸垂装置と同様 500~540 mm のものを使用している⁽³⁾。しかし最近、欧米ではリレーおよび遮断器の発達により地絡電流の遮断時間が短くなったため、続流によるアーク時間が短く碍子の破損はあまり考えられず、また雷により閃絡が起る場合は現在用いられている程度の横広がりや間隔能率ではいずれにしても沿面閃絡を防ぎきれないとの理由で防絡作用を考慮せず単にシールドのために電線側に小さな遮蔽環を取り付け、地線側には何も取り付けない形のものを使用している例がある。この場合、実際碍子の破損は苛酷な大電流アークでどの程度の損傷をうけるか、あるいはこのように極端に考えなくとも小さな防絡具でどの程度の効果が期待されるであろうか、などを実験することにし、電源開発株式会社で建設中の只見幹線用防絡具設計の基礎資料をうることにした。

防絡具は $x_p=300\sim540$ 程度のもの7種試作し、接地側防絡具のない場合、極端な場合として防絡具のない場合も実験し、アークの発生は150 MVAの大容量短絡発電機を使用し、防絡具および碍子にとって苛酷な条件で碍子表面に大電流アークを発生させた。アークは将来系統容量増大を考慮して10,000Aおよび20,000A各6サイクル(0.1秒)を目標とした。

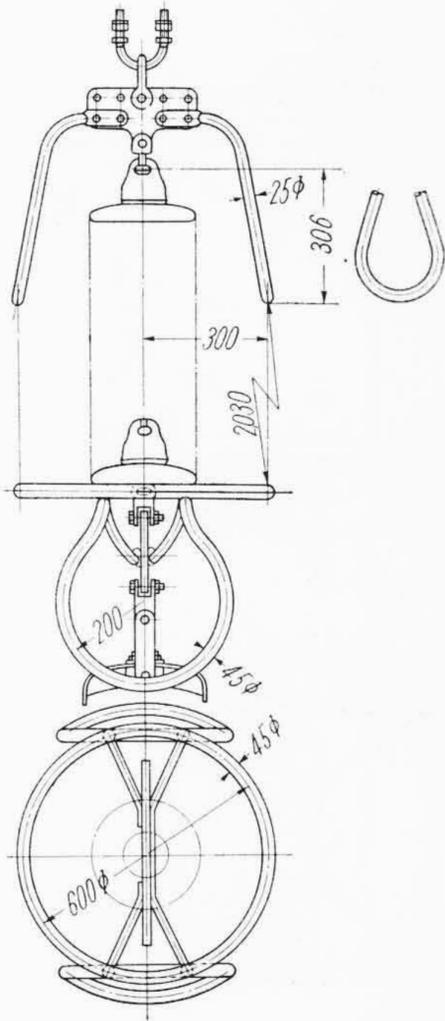
2. 実験の概要と測定

2.1 防 絡 具

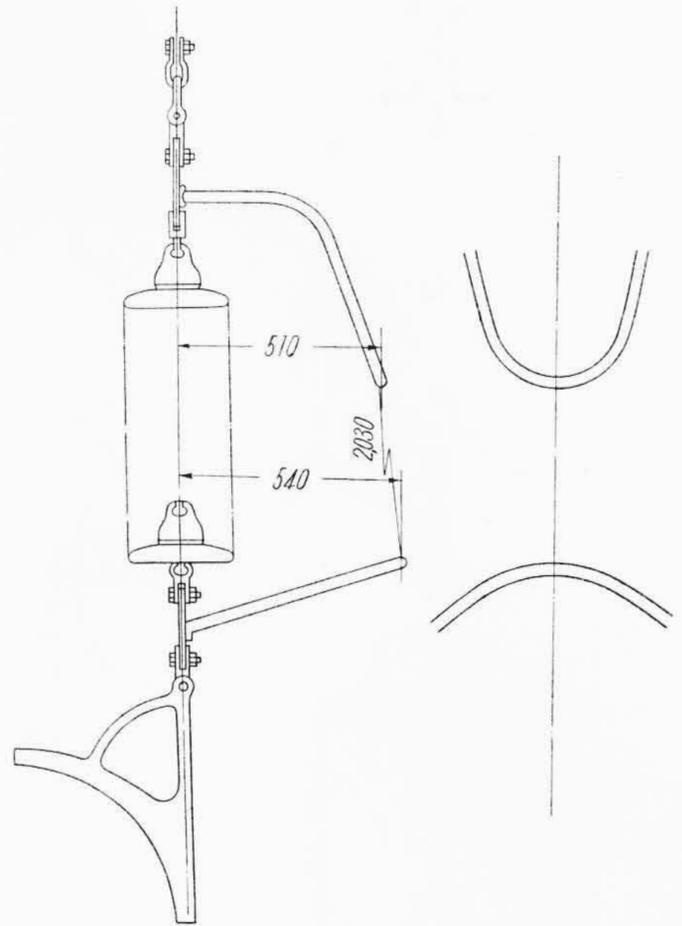
試験を行った防絡具は第1~7図に示すようなもので、送電線は 275 kV, 330 mm² 複導体用で、懸垂形の場合

* 電源開発株式会社

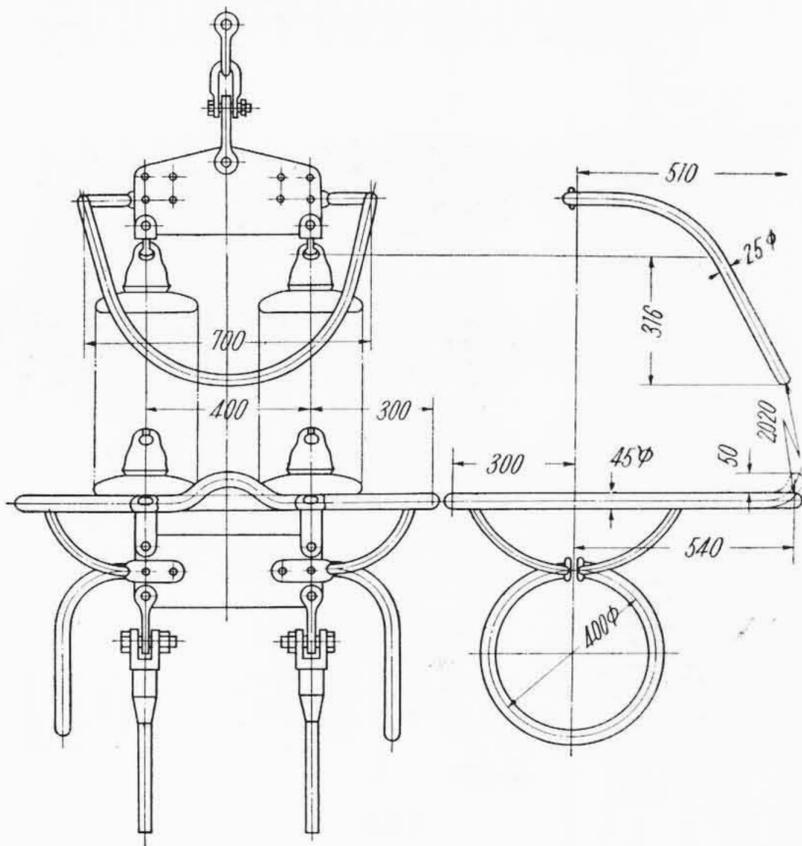
** 日立電線株式会社電線工場



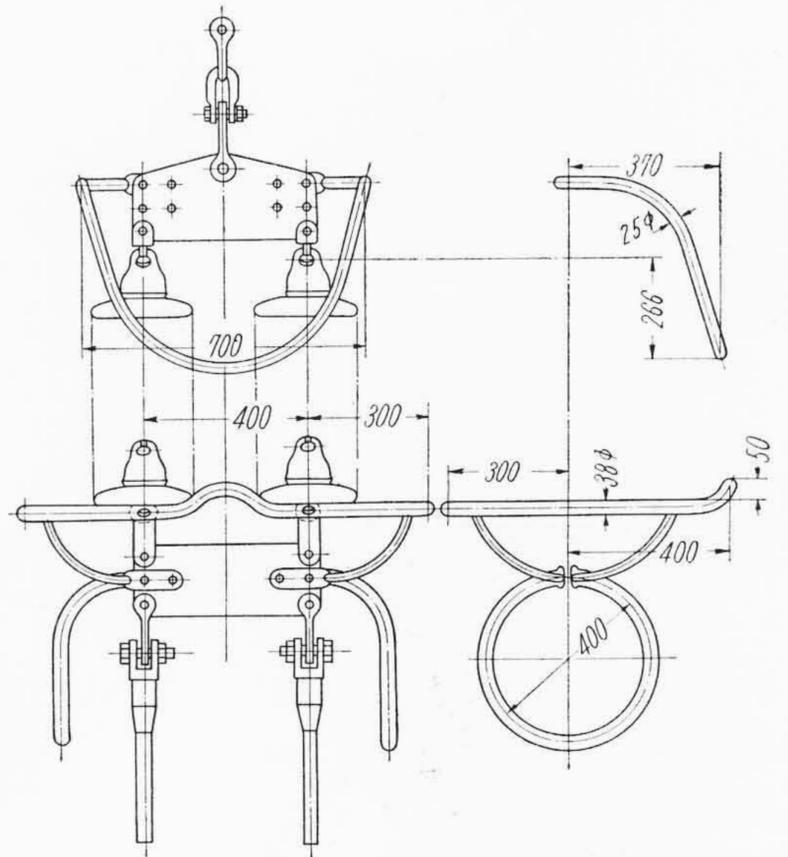
第1図 円形リング形防絡具
(複導体連懸垂形 $x_p=300$)



第3図 佐久間形防絡具
(佐久間幹線用複導体2連耐張形 $x_p=540$)



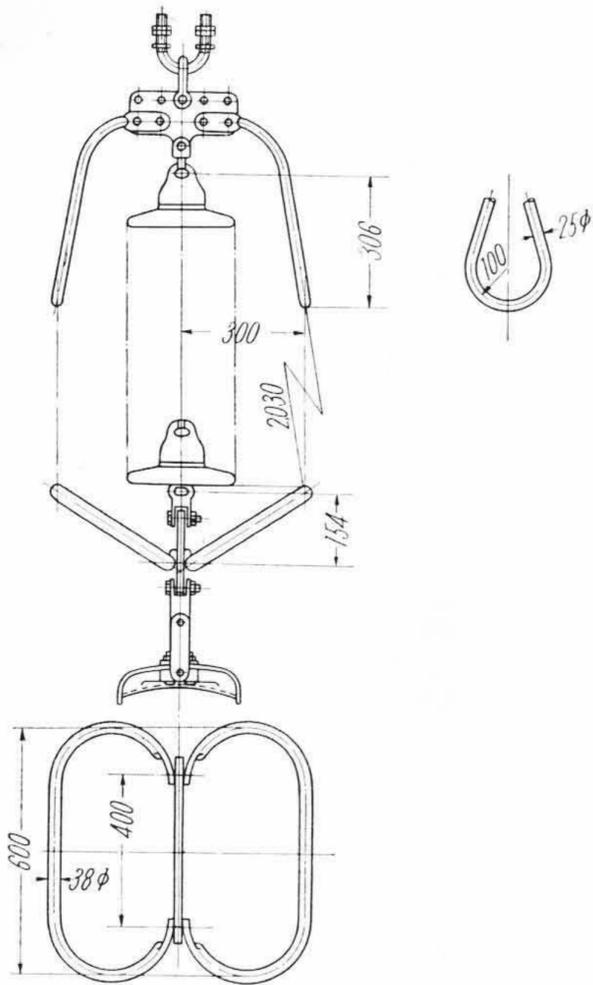
第2図 △形リング防絡具
(複導体2連耐張形 $x_p=540$)



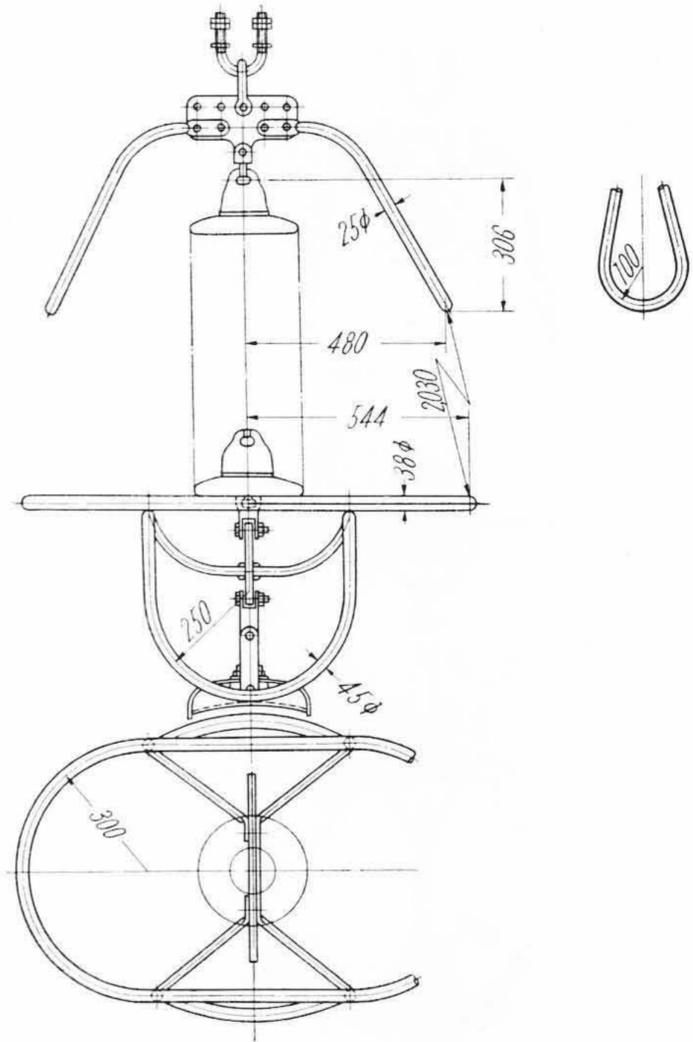
第4図 △形リング防絡具
(複導体2連耐張形 $x_p=400$)

は碍子1連16個、耐張形の場合は碍子2連32個である。これらの防絡具は次のことを考慮して設計されている。すなわち、従来の防絡具は臨界通絡電圧に重点をおき、電線側の碍子中心線よりの横広がり(これを通常 x_p と

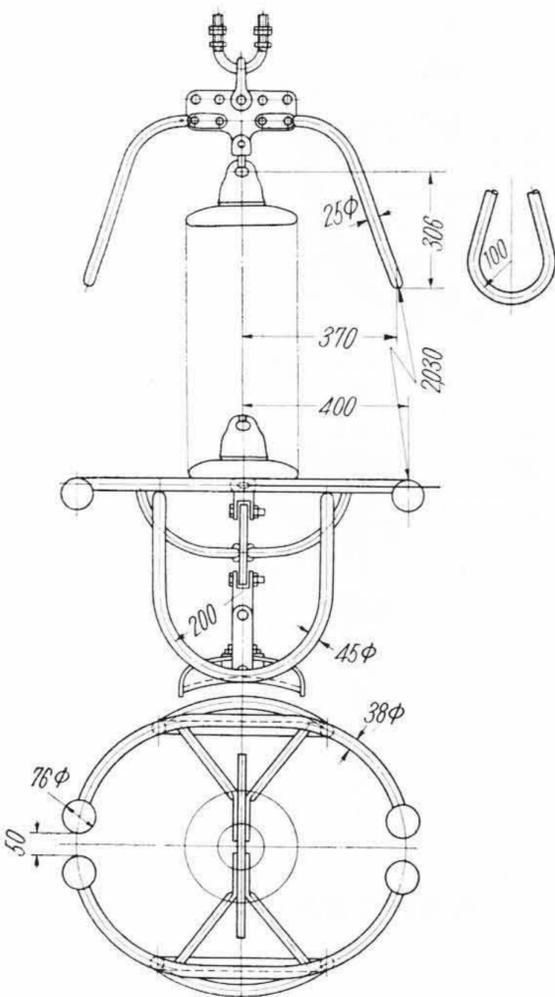
いう記号で表わす)を540~600mmとして設計されていた。只見幹線は高速度再閉路方式を採用する予定で、これはすでに電源開発株式会社の佐久間幹線において良好な成績を示しているので、今までに発表されている碍子の雷、続流にたいする耐アーク強度⁽¹⁾⁽²⁾より推定して臨界通絡電圧は低下しても、碍子の破損をまぬがれる限



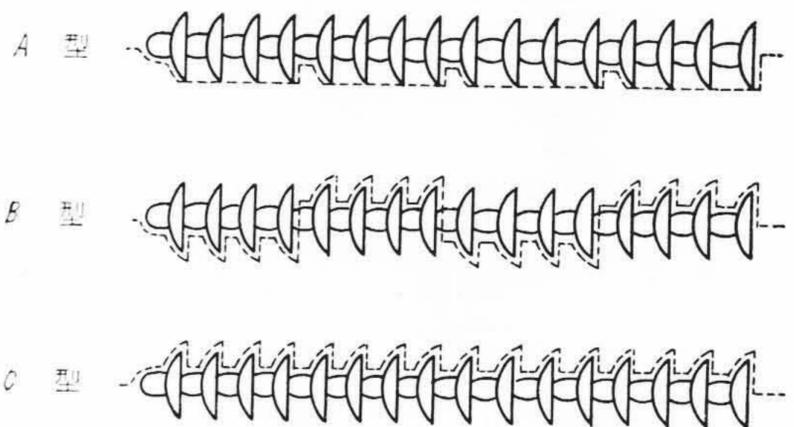
第5図 蝶形防絡具
(複導体1連懸垂形 $x_p=300$)



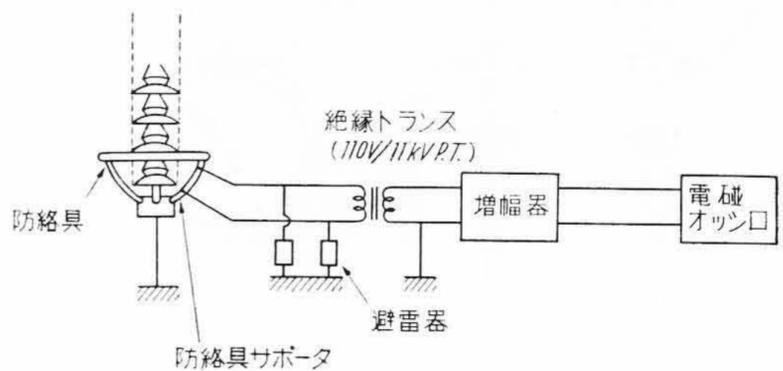
第7図 楕円リング防絡具
(複導体1連懸垂形 $x_p=544$)



第6図 玉付リング形防絡具
(複導体1連懸垂形 $x_p=400$)



第8図 フェーズの張り方の形式

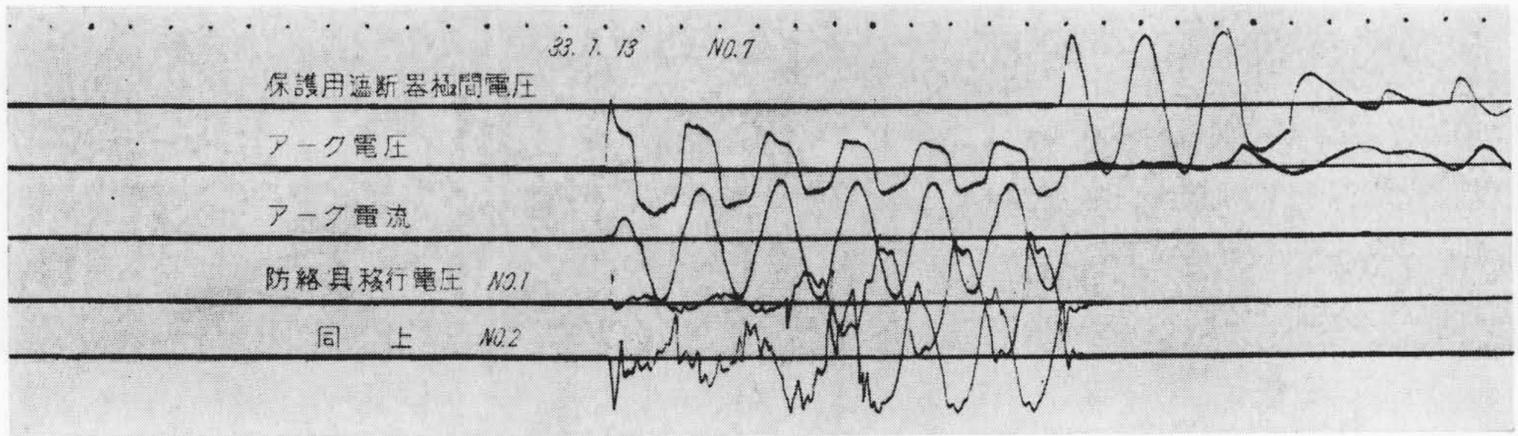


第9図 P.D.法による招弧時間測定回路

度として、 x_p をどの程度まで小さくして経済的なもの
 できるかという点である。

2.2 実験の方法

臨界通絡電圧の低下を予想して x_p を小さくしている
 ので、これ以上の異常電圧ではアークは碍子表面に発生
 することを考慮しなければならず、また、碍子汚損の場
 合ではもちろん碍子表面にアークが発生する。これらの



第10図 防絡具へのアーク移行時間測定オシロの一例

場合、いずれもすみやかにアークを防絡具に移行させ、碍子面よりアークを遠ざけて碍子の破損をまぬがれることが必要である。

碍子表面のアークの発生は碍子表面に沿ってフェーズを張り、第8図のようにした。フェーズは初め5A定格の熔融フェーズを用いたが、フェーズの蒸発量が大きく短絡時の発煙が大きいから写真撮影には不適で、したがってなるべく蒸発量を小さく、しかもアークがただちに消えないものとして種々予備試験をした結果0.12mmφのメッキ銅線を使用した。

アークは150MVAの大容量短絡発電機を使用して発生させ、碍子連が長い場合は電源電圧を昇圧して、アークの持続を容易にした。

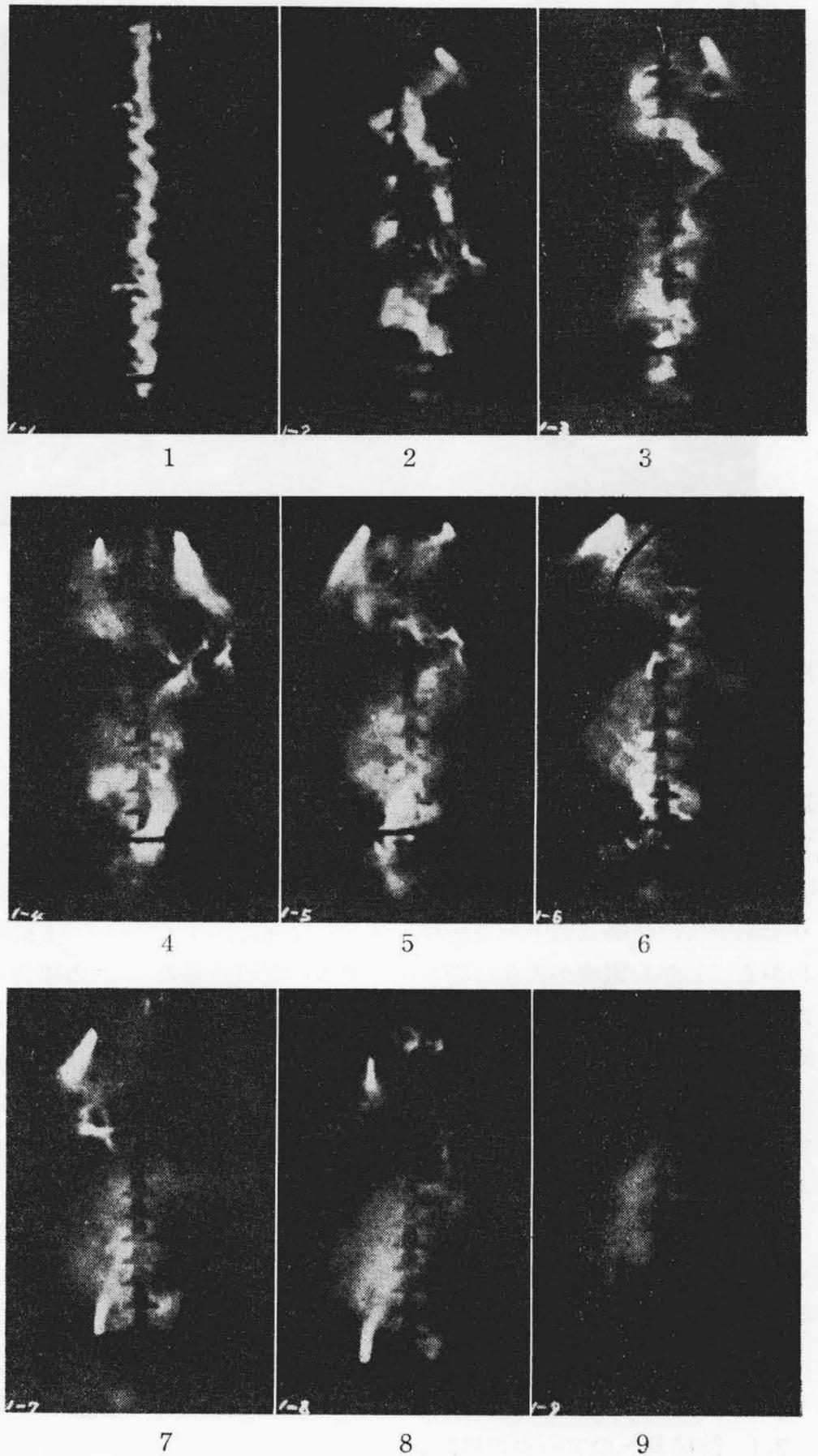
防絡具装置はクランプ、電線は取り付けず、碍子連と防絡具のみとし、短絡時にアークの電磁力によって碍子装置が振動し、写真撮影には不都合であるので、懸垂形の場合は上端からホイストでつるし、300kg程度の重量をかけ、また耐張形の場合には水平に碍子連を装置して約1.8tの張力を加えた。これらの実験はすべてアーク移行の点より、危険性のないピットの中で行った。

2.3 測定

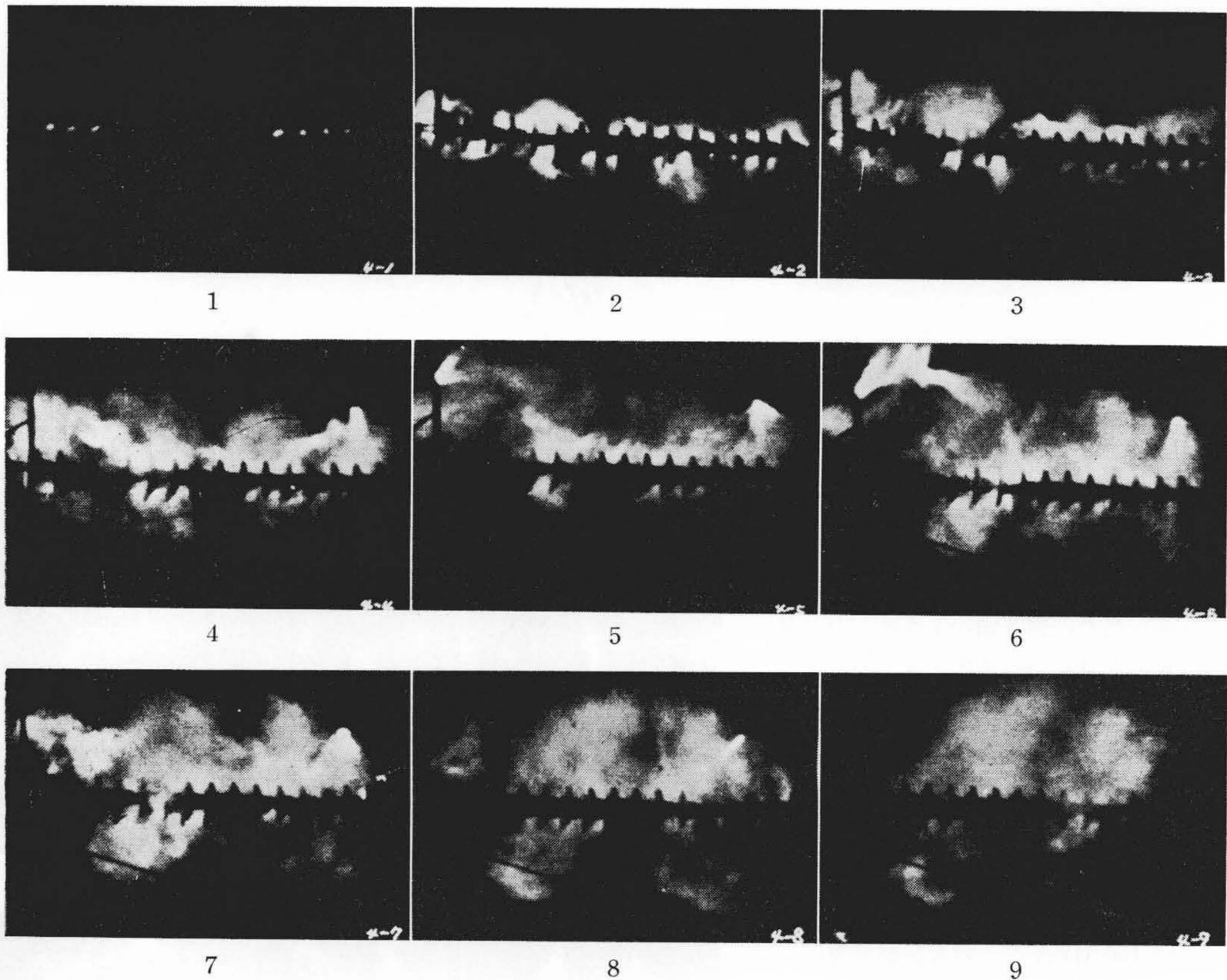
アーク通電時間が0.1秒前後であるので、アークの状況は次の方法により総合的見地より判定した。

- (a) P.D法(後述)による電線側防絡具の招弧時間の測定
- (b) 500駒/秒の高速度映画撮影
- (c) 64駒/秒による映画撮影
- (d) アーク試験後の碍子および防絡具の損傷状況の調査

上記測定項目中「(a)P.D法による電線側防絡具の招弧時間の測定」は第9図のように



第11図(a) 64駒/秒 映画によるアークの移行状況 (第1表試験 No.1)



第11図(b) 64駒/秒映画によるアークの移行状況(第1表試験 No.4)

防絡具が招弧した場合、防絡具のサポータに流れる電流によってできる電圧降下を検出する方法である。

この電圧降下を検出する箇所は防絡具のサポータ全部に取り付け、アークがどのように防絡具上に移行したか判定できるようにした。

この方法で測定されたオシロの一例は第10図のとおりであって、防絡具にアークが移行する時間遅れがよくわかる。しかし電流が大きい場合などでは、電磁誘導のため、明瞭でない場合があった。この場合は、高速度映画より判定した。

アークが碍子連中央部で碍子にからまり、碍子を破損するので、これらの状況をみるため、高速度映画フィルムを一駒ずつ写真にして詳細に観察することができた。

第11図は64駒/秒で映画撮影したものを写真にしたものの一例である。500駒/秒の場合も写真にしたが紙面の都合で割愛する。

3. 実験結果

3.1 防絡具へのアークの移行状況

第1表は防絡具試験結果一覧表である。すなわち試験は17回行ったが、特に接地側防絡具のない場合と全然防

絡具を省略した場合も含まれている。短絡発電機の周波数は62 c/sで、表中の値はこの周波数を基準にして通電サイクル、および防絡具へのアーク移行遅れを表わしている。フェーズ位置と碍子の状況は簡単な記号で表わしているが、これは第8図の(A)(B)(C)に相当するものである。

実験は碍子の数に制限があったので途中より2連耐張の場合を先に行い、破損碍子のみ新しいものと取り換えていく方法をとった。

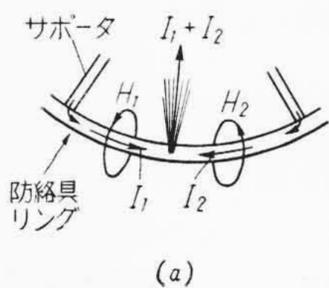
第1表に示したように防絡具の招弧時間はフェーズの張り方によって異なる。しかし、一般的にいえることはアークを防絡具に短時間に移行させるには防絡具と碍子の距離が少ないこと、すなわち、 x_p が小さいことである。しかしあまり小さいとインパルスに対する防絡性能が急激に低下することが想像されるので、 x_p は300mm程度が限度になるのではないかとと思われる。

次にアークが防絡具に移った後は第12図のように防絡具の電流によってできる磁界によってアークが移行することが考えられ、この点については第13図(a)(b)に示すように防絡具のリングを切断するか、防絡具の電磁力を有効に利用する方法が考えられる。

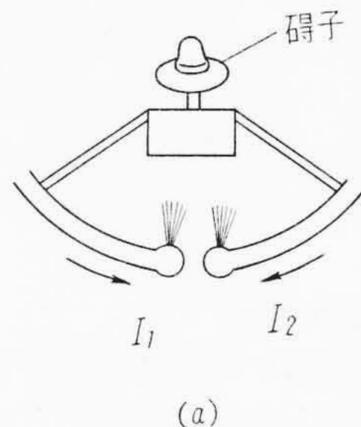
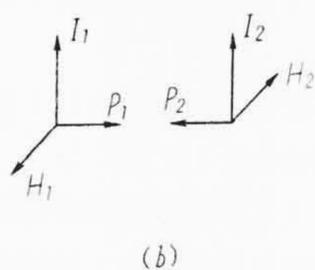
第1表 防絡具実験結果一覧表

| 試験順番号 | 碍子 | 防絡具 | 実測通電電流値 (kA) | 実測通電サイクル | フューズ位置と試験結果 | | | | |
|-------|------|------------------|--------------|----------|-------------------|------------|--------------|-------------|------------------------|
| | | | | | 防絡具へのアーク遅れ (サイクル) | アーク電圧 (kV) | フューズ位置と碍子の状況 | 防絡具のアーク移行位置 | 備考 |
| 1 | 一連懸垂 | 円形リング $x_p=300$ | 10.0 | 6.95 | 0.48 | 4.03 | | | 碍子破損なし |
| 2 | 一連懸垂 | 円形リング $x_p=300$ | 9.4 | 6.44 | 0.72 | 4.66 | | | ひだかけ碍子2個取り替える |
| 3 | 一連懸垂 | 円形リング $x_p=300$ | 19.6 | 5.92 | 0.25 | 4.03 | | | 傘かけ碍子2個取り替える |
| 4 | 二連耐張 | △形リング $x_p=540$ | 10.6 | 6.38 | 1.38 | 3.18 | | | |
| 5 | 二連耐張 | △形リング $x_p=540$ | 9.7 | 5.95 | 0.31 | 3.82 | | | ひだかけ碍子2個取り替える |
| 6 | 二連耐張 | 佐久間形 $x_p=540$ | 10.0 | 5.95 | 1.17 | 3.05 | | | 碍子破損なし |
| 7 | 二連耐張 | 佐久間形 $x_p=540$ | 10.3 | 5.93 | 2.32 | 2.96 | | | ひだかけ碍子は下方に2条の亀裂あり取り替える |
| 8 | 二連耐張 | 佐久間形 接地側防絡具なし | 9.1 | 6.40 | 0.55 | 5.09 | | | 碍子破損なし |
| 9 | 二連耐張 | △形リング $x_p=400$ | 10.0 | 6.43 | 0.59 | 4.13 | | | 碍子破損なし |
| 10 | 一連懸垂 | アルミ製蝶形 $x_p=300$ | 10.6 | 6.50 | 1.00 | 33.9 | | | 傘かけ碍子1個取り替える |
| 11 | 一連懸垂 | アルミ製蝶形 $x_p=300$ | 9.7 | 5.96 | 0.57 | 4.45 | | | 碍子破損なし |
| 12 | 一連懸垂 | アルミ製蝶形 接地側防絡具なし | 19.3 | 6.45 | 3.86 | 4.75 | | | 碍子破損なし |
| 13 | 一連懸垂 | アルミ製蝶形 接地側防絡具なし | 19.0 | 6.95 | 0.50 | 4.40 | | | ひだかけ碍子1個取り替える |
| 14 | 一連懸垂 | 玉付リング $x_p=400$ | 9.4 | 5.96 | 0.48 | 4.91 | | | 碍子破損なし |
| 15 | 一連懸垂 | 楕円リング $x_p=544$ | 10.0 | 6.44 | 1.22 | 33.9 | | | ひだかけ碍子1個取り替える |
| 16 | 一連懸垂 | 接地側電線側とも防絡具なし | — | — | — | — | | — | アーク持続しなかった |
| 17 | 一連懸垂 | 接地側電線側とも防絡具なし | 10.0 | 5.45 | — | 3.81 | | — | フューズを太くしてアーク持続に成功 |

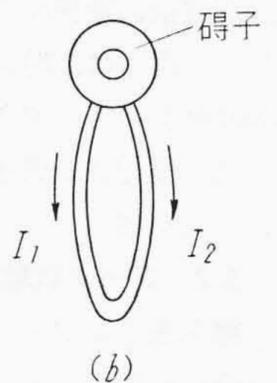
- 注: 1. 実測電流値は通電3サイクル目の実効値。
 2. 実測通電時間は62c/s基準(防絡具へのアーク遅れも同様)
 3. アーク電圧は通電3サイクル目の波高値を示し、アーク電圧は時間的に増減して変動している。
 4. フューズ位置①, ②, ③は第8図のA, B, C形を示す。
 5. 風は東→南で微風。

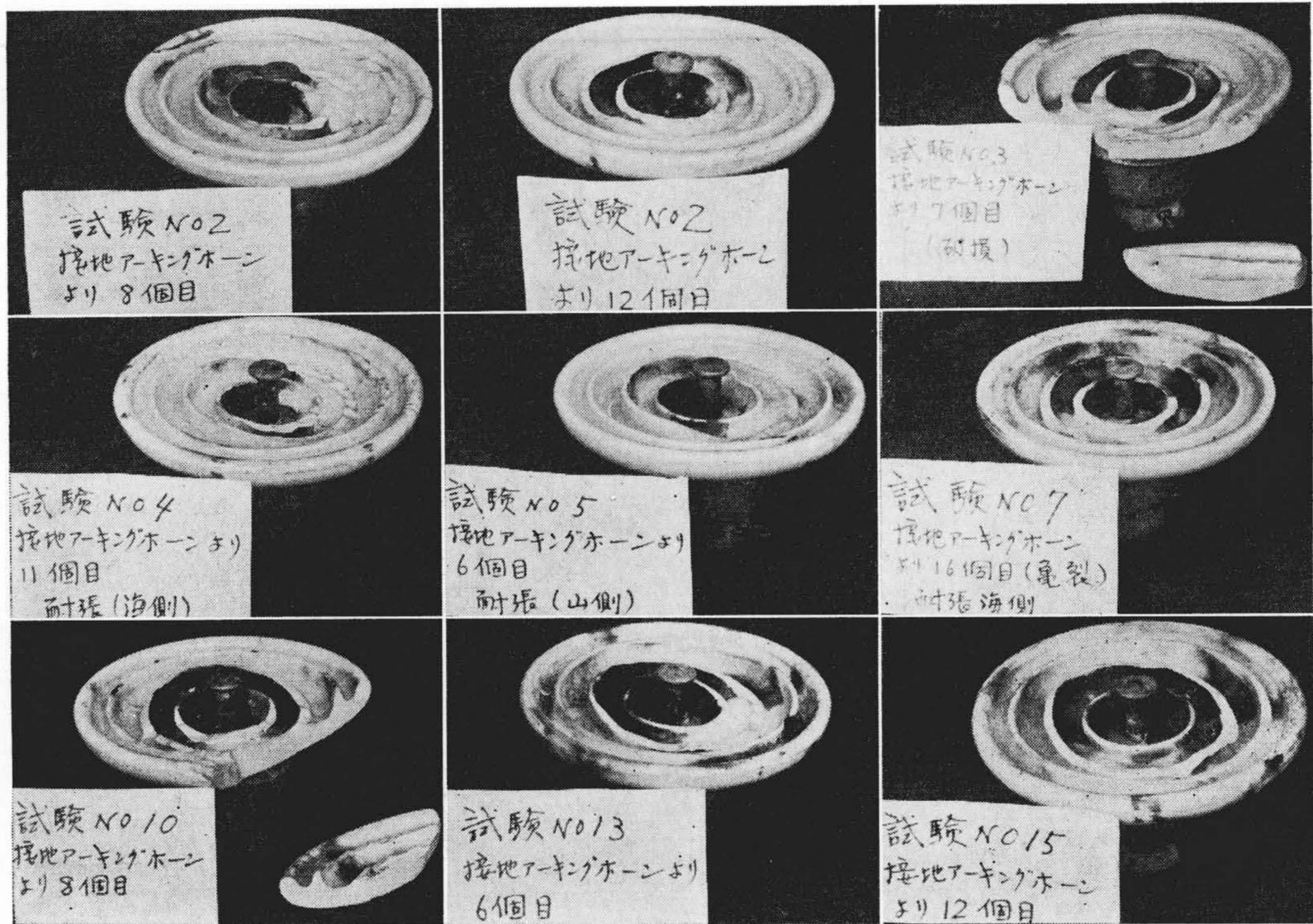


第12図 アーク電流の電磁界によるアークの移動



第13図 アーク移動性を考慮した防絡具





第14図 アーク実験後の碍子の損傷状況

防絡具より離れた碍子連中央では、アークの通路はフェーズの張り方によって複雑である。しかし定性的には次のことが考えられる。すなわち、アークは交流の半サイクルごとにいったん切れるが、次の半サイクルでは前サイクルの終りにできたイオン化ガスの密度の状態によってアーク通路が決まる。イオン化ガスは発熱による上昇気流と風などによって移動する。碍子がアークによって破損するのはアークによる碍子の偏熱によって熱膨脹差で割れることと、空気の瞬間的膨脹による衝撃圧が前者の効果を大にすると考えられる。

アークの高速映画を詳細に観察した結果、1サイクルの時間程度アークが碍子面から離れたのみでは、碍子の釉薬がはげる程度であって必ずしも破損しないことを考えると、アークが碍子にからみついている時間の累計が破損に関係するものではないかと考えられる。したがって碍子は短時間(推定1~2サイクル程度)ならば20,000Aのアークでも破損しないから、防絡具にアークを速く移行させ碍子面の同一箇所にはアークを集中させない工夫が望ましい。

3.2 アーク試験後の碍子の損傷状況

第1表中にフェーズの位置と関連した碍子の破損箇所とその状況を示した。碍子の破損した場所はフェーズが碍子連を横切って反対側に張った箇所で、これはアーク通路が通電最後まで移動せず碍子にからまっていたこと

第2表 破損碍子の特性試験

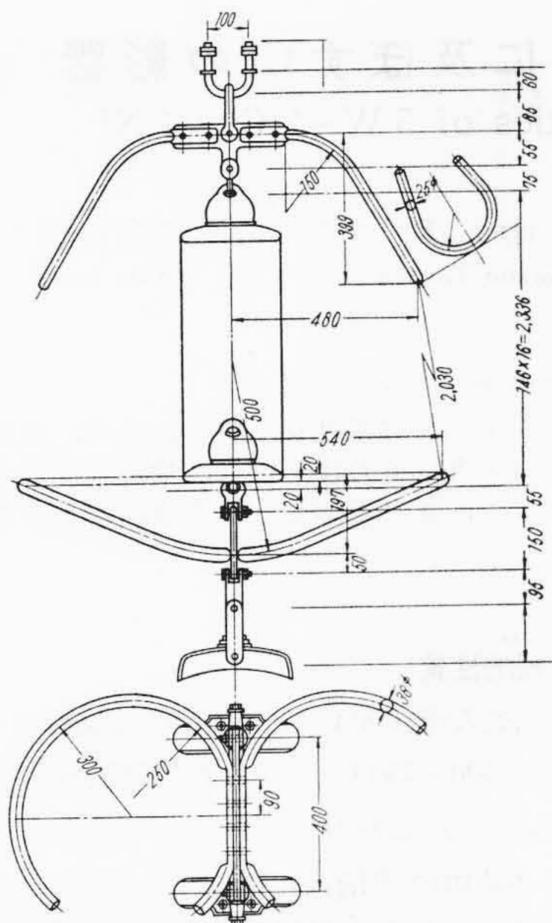
| 試験番号 | 碍子位置 (接地側より) | 絶縁抵抗 | 引張り破断荷重 (kg) | 備考 |
|-------|-----------------|-----------|--------------|-------|
| No. 2 | 8 個目 | 5 MΩ以下 | 11,950 | |
| No. 2 | 12 個目 | 約 300 kMΩ | 17,700 | 金具で破断 |
| No. 3 | 7 個目 | 5 MΩ以下 | 11,900 | |
| No. 4 | 11 個目 | 5 MΩ以下 | 10,300 | |
| No. 5 | 6 個目 | 約 300 kMΩ | 18,650 | 金具で破断 |
| No. 7 | 16 個目 | 5 MΩ以下 | 12,600 | |
| No.10 | 8 個目 | 5 MΩ以下 | 11,750 | |
| No.13 | 6 個目 | 約 300 kMΩ | 18,400 | 金具で破断 |
| No.15 | 12 個目 | 約 300 kMΩ | 15,600 | |

注：試験番号は第1表参照のこと。

を示すものである。

これらの傘かけ、ひだかけ碍子は第14図のように、そのひび割れが碍子のセメント付部にまで達しているのではないかと想像されるので、それを調べるため、碍子を約3時間浸水し、引き上げた後、表面漏洩抵抗を少なくするため碍子表面を乾布で清浄にし絶縁抵抗を測定した。

また碍子が損傷し1個でも機械的に弱い場合は、碍子連全体として弱くなり、大事故を起すので、アークによってどの程度機械的特性が劣化しているかを調べるため引張試験を行って破断荷重を求めた。これらの結果は第2表のようである。一般に碍子はセメント付部で破壊するが、ボールクレビス金具で破断するものもあった。こ



第15図 只見幹線用一連懸垂用防絡具

これは備考欄に示してある。

第2表によりわかるように絶縁抵抗の低いものはほとんど機械的強度が低く、相互に関連性がある。したがって送電線碍子の絶縁抵抗管理は機械的にも意味があると思われる。

以上、碍子の破損状況は 10,000~20,000 A 6 サイクル程度のアークではわずかであり、第1表でもわかるように、接地側防絡具を省略しても碍子破損は少ないことがわかった。

なお防絡具としてアルミ製のものも試験したが、鉄製のものに比べアークスポットによる損傷が大きいように思われた。

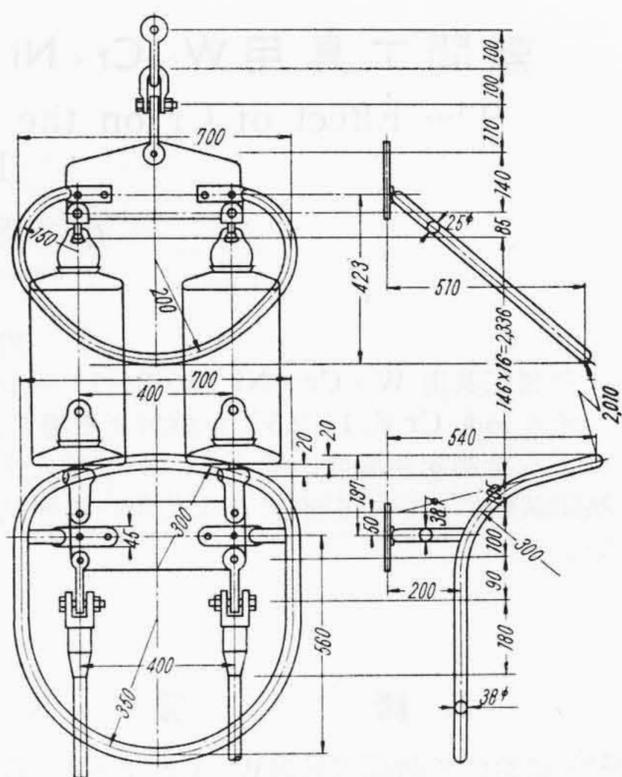
4. 結 言

以上防絡具の大電流アーク実験の概要とこの結果よりみた防絡具の特性について述べた。

防絡具の設計には閃絡値との協調、通絡特性の向上、コロナ開始電圧の上昇などを考え合わせて経済的見地より決定する必要がある、この種の実験については多方面で十分検討されている。しかし最高 20,000 A におよぶアーク実験について例が少なく、只見幹線用防絡具の設計には特にこのデータを必要としたため、この実験を実施した。

今回の実験も参考にし下記理由から只見幹線の一連懸垂用防絡具は第15図、二連耐張用防絡具は第16図のように決定することとした。

- (1) 大電流試験の結果では通絡すれば碍子の破損の恐れがあるので、このため x_p の値は従来使用されて



第16図 只見幹線用二連耐張用防絡具

いる防絡具の寸法通り懸垂、耐張とも 540mm とした。しかし今回実験を行ったとき悪条件の通絡の起る確率がどの程度のものであるか、またこのような通絡を生じる場合は x_p を大とすることにより碍子の破損を防ぎ得るものかどうかにつきなお研究を要する。

(2) 最近防絡具の設計については碍子面上のアークを電磁力により防絡具へ移す形状のものが多く使用されているが、10,000 A 以上の大電流になると電磁力は非常に強いかなる形状のものでも 2~3 \sim で防絡具へ移るため特に複雑な形状のものを使用せず経済的なものとする事とした。また小電流の場合は只見幹線のように 5 \sim 遮断をすればアークにより碍子の損傷する恐れはないものと想像される。

(3) 懸垂装置の場合通絡特性はリング形より蝶形が良く、またコロナ試験結果もこの形状で十分であった。

(4) 耐張装置の場合はジャンパー線のコロナ防止効果を利用することとし上記のみのコロナシールドを行うこととした。

本実験では未だ満足な結果を得るには不十分であるが、最高 20,000 A におよぶアーク実験については例が少ないと考えられ、以上の実験がなんらかの参考になれば幸いである。

最後に本実験に関し御指導と御協力をいただいた日立製作所日立研究所牧部長、山崎主任、日立電線株式会社大和、久本両部長、実験を手伝っていただいた相田、遠藤両君に厚く御礼申し上げる。

参 考 文 献

- (1) 沖崎：日碍レビュー No. 8 p.1(昭 30-4)
- (2) 藤村：日碍レビュー No. 13 p.1(昭 31-10)
- (3) 新宮：日碍レビュー No. 19 p.13(昭 33-4)