

地絡事故による配電用Fケーブルの発火モード

菊 地 光 一・河 村 鴻 允*

Ignition Mode Caused by Accident of Ground Fault Current in Distribution Cable
of the Flat Type Pole-Vinyl Chloride

Kōichi Kikuchi, Kōin Kawamura
(昭和54年10月31日受理)

The purpose of this paper is to describe ignition mode and progress by accident of ground fault current in distribution cable of the flat type-pole-choloride which is gave spicial damage.

1. ま え が き

ポリ塩化ビニル(以下PVCと呼ぶ)は汎用樹脂としての歴史も古く、一般の配電用ケーブルの絶縁材料原樹脂としても広範囲に使用されている。その中で600Vビニル絶縁平形外装ケーブル(Flat type polyvinyl chloride sheathed cable,記号JIS-C-3342VVF-----以下Fケーブルと呼ぶ)は配線工事に関する施行が簡単で、作業能率が良く、経済的である等の理由から屋内用電線ケーブルとして多用されている。

PVCの製造方法はいずれも重合温度40~70℃のラジカル重合であり、その一次構造は重合法によっても大差がなく、骨格は $-(CH_2-CHCl)_n-$ の正規構造をとっている。

Fケーブルの絶縁被覆材料はPVCモノマーに可塑剤としてエステル類等を25~30%程度含み、更に耐久性を増すために安定剤・難燃剤や着色用の顔料を配合し潤滑材としてステアリン酸、ステアリン酸鉛、等が用いられている。

PVCはその分子構造内にClを有していることから、何等かの原因で発火した場合、分解生成物のClの作用で自己消火性があるというのが一般的通念であった。ところが近年このFケーブルの電氣的発火、火災事故が報告され、スイス・ミュールベルグ原子力発電の火災⁽¹⁾や米ブラウンズフェリー原子力発電所の火災⁽²⁾など大火災に発展した例もあり、その発火メカニズムの究明に関心が高まり、電氣的発火現象の

機構がある程度明らかになったが、詳細については不明な点が多い。ケーブルの発火原因としては、ケーブル自体が発火源となる場合と外部からの火源による場合に大別されるが、前者の場合、火災発生原因は多面的でケーブルが外力を受け、地絡、短絡した場合、ケーブル導体接続の不完全による場合、ケーブルの絶縁体が長期の使用のため劣化して絶縁破壊を起こした場合や、ケーブルに過大電流が流れた場合等考えられるが、その他に特殊な場合として単3式の異常電圧による火災⁽³⁾等も報告されているが、漏電火災の事例についても多くのケースがある。⁽⁴⁾
⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾漏電火災における漏電経路は漏電点・発火点及び接地が同一の建物である場合が多いが特異な場合もあることも報告されている。⁽⁹⁾

また漏電による発火の機構の一例としてFケーブルがトタン板等の接地金属体に触れ、電流が心線から被覆を通じて、地面に流れる過程で被覆が発火し、板や柱等の可燃物に燃え移った事例があり、木下氏等はFケーブルの発火原因として、PVCがグラファイト化して発火することを述べておられる⁽⁴⁾が実際の発火パターンは木下氏等の報告のような単純なものとは違って複雑な様態を示し、PVCがグラファイト化しなくとも発火に至る場合も考えられる。

またPVCの発火原因一例として筆者の一人河村氏等はトラッキング現象を取りあげ、IEC推奨法により人工的にトラッキングを発生させPVCの発火と燃焼過程の検討を行い、Fケーブルの劣化部が常に外

*秋田大学鉱山学部電気工学科助教授

地絡事故による配電用Fケーブルの発火モード

気に接するような試料形状ではドライバンドが形成され易く、アークのくりかえしによって試料が発火すると述べている⁽⁵⁾。ここで松浦氏⁽⁶⁾や河村氏⁽⁵⁾等のトラッキング現象からの発火原因の追求は主として二心線間の表面洩漏電流を問題とし、木下氏⁽⁴⁾や金原氏⁽⁷⁾によるケーブルの発火原因は主として二心線間の貫通洩漏電流が問題となる。

本報告は後者の場合を問題とし、従来の報告で究明されていない漏電火災の電氣的発火現象の本質を追求するため、Fケーブルに特定の損傷を与えたものを供試料とし、FケーブルとL字形のトタン板を断続的な接触した場合に限定して、漏電発火のモードを追求し、発火に至るプロセスを明らかにしようとするものである。

2. 実験回路と実験方法

2.1 実験回路

実験回路は [Fig 1] のとおりで、Fケーブルの

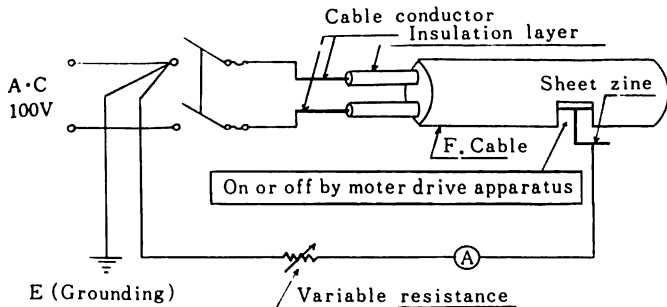


Fig 1 Sape of specimen and experimental circuit.

心線の一本が $35 \times 30 \times 0.3$ [mm³] のL字形のトタン板に接触し、これと電源側の第二種接地工事の接地線とで閉回路を構成する。

2.2 供試料

供試料は単相用Fケーブルで、その断面は(Fig 2) のとおりで、Y社製のものである。

またFケーブルの損傷モデルは [Fig 3] のとおりである。亜鉛鍍金の $30 \times 35 \times 0.3$ [mm³] のトタン板を高さ15 [mm] となるよう直角に折り曲げたものを使用する。

2.3 実験方法

昭和55年 2月

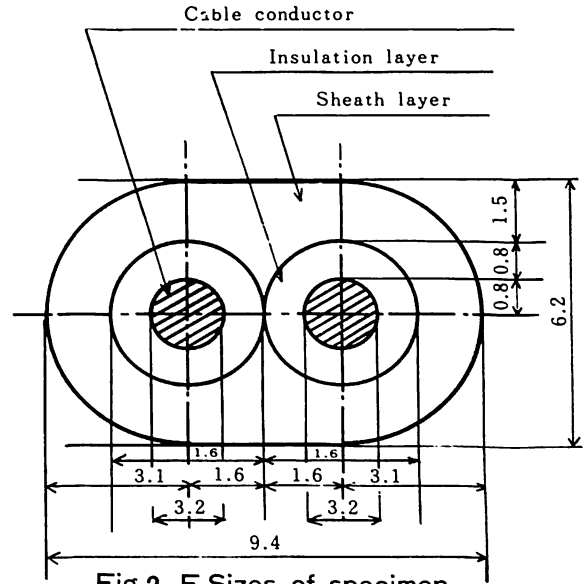


Fig 2 F.Sizes of specimen

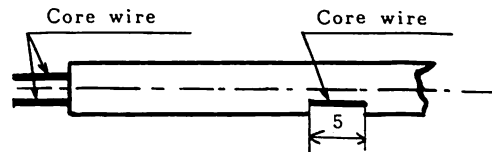


Fig 3 Damage model of F.Cable

本実験装置はFケーブルとトタン板との接触、開離が周期的に行なわれるようモータとカムを用い、観察し易いようにトタン板取付個所の下に反射鏡(ステンレス板)を置く。

Fケーブルのアース側の心線とトタン板との接触は1.03秒、開離は0.3秒とし44回/分で繰り返すことが出来るようモータドライブ装置が構成されている。

地絡電流が14 A 以内の値になるよう抵抗を調整し、それぞれの電流値に対して、トタン板と心線との接触・開離を繰り返しFケーブルの発火モードを検討し、発火の原因を追求するため次のような実験を行なう。

①実験装置のモータを回転させ、心線とトタン板が接触開離を繰り返えし、それぞれの地絡電流に対して発火するか否かを確認する。またこれとは別に接触・開離を繰り返し、心線とトタン板の接点か、赤熱した時点で、接触・開離を停止し、更にトタン板と心線との接触状態が継続するよう維持し、発火するか否かを確認する。いろいろのモードが考えられるので実験の結果を整理してその類型を図に示す。

②発火した場合、何故発火するかの機構を追求する為発火Fケーブルの断面を心線と直角または平行に切断し、絶縁層の損傷状態と炭化の状態を調査する。特に金原氏の言うグラファイト化現象⁽⁷⁾が起っているかどうかを検討する。

③供試料がグラファイト化しているかどうかの検

地絡事故による配電用Fケーブルの発火モード

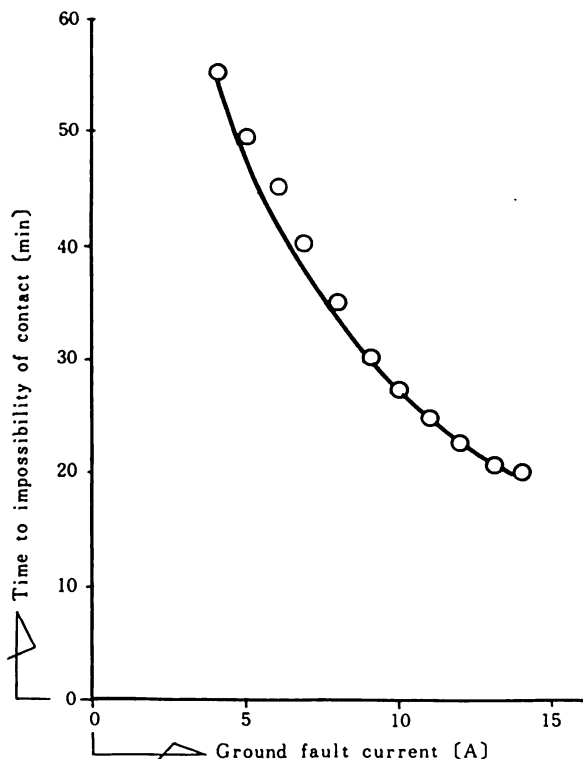


Fig 5 Relation between ground fault current and time to impossibility of contact

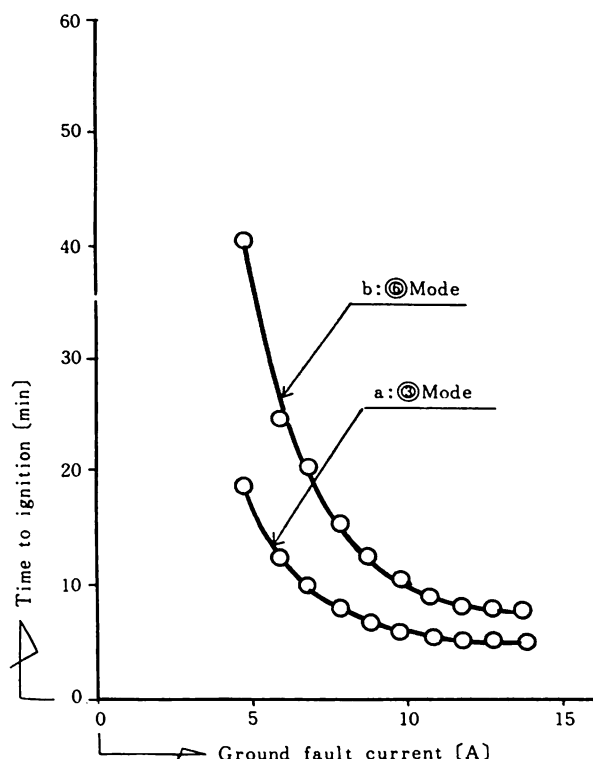


Fig 6 Relation between ground fault current and time to ignition

討はX線回析法等による。X線回析装置は島津製の自記X線回析装置で供試料より炭化されている部分を削り取り、それと標準グラファイト(Regular spectroscopic graphite electrodes)との回析強度を比較して検討する。X線回析装置の測定条件は次のとおりである。

- X線管-----陽極 F_e (F_e の陰極管)
 電圧 30KV
 電流 8mA
- 検出管-----G.M計数管
 電圧 1500V
 フルスケール 1000C.P.S
 時定数 1.25sec
 計数管走査速度 $2^\circ/\text{min}$
 ゴニオメータ半径 170mm
 ソーラスリット開き角 2.2°
 分散スリット 1.5mm
 空気散乱防止スリット 1.0mm

3. 実験結果

3・1 Fケーブルの発火モード

モータドライブ装置でトタン板とFケーブルの心

線が接触、開離を繰り返すと、トタン板とFケーブル心線が断続的な接触により、その接触部がスパークとジュール熱による損傷を受け、接触抵抗が増加する。そのトタン板と心線が接触している間は接触抵抗を流れる地絡電流によるジュール熱によって接点が赤熱する場合が多い。この状態で更に接触、開離を繰り返すと [Fig 4]¹⁰⁾のようなモードが現われる。

①のモード-----このモードを経過した場合は心線とトタン板とは溶着して本装置の場合には発火には至らない。

②のモード-----このモードでは心線とトタン板とは溶着しないが、断続的開離により、火花とジュール熱により接触面は損傷し、PVC被覆は炭化されるが、トタンの損傷部は漸次大きくなり、遂に心線とトタン板は接触不能となって、発火には至らない。

③のモード-----赤熱が生じた時、そのまま心線とトタン板の接触を継続した場合で、PVCの被覆はジュール熱によって低圧側の心線側より炭化が進み、炭化が進むにつれて被覆は溶融変形し、遂に低圧、高圧側の二心線間が短絡状態となり発火する。

④のモード-----②のモードと同じように火花、ジュール熱等で被覆が炭化し、接触面が損傷されながらも、接触を繰り返す場合で、この場合は発火に至

[Table 1] Occurrence rate of mode ignition for ground fault current

Mode Kind Ground fault current [A]	Occurrence rate of mode [%]					
	① Deposition	② Impossibility of contact	④ Ignition	⑤ Impossibility of contact	③ Ignition	⑥ Ignition
4 A	1	98	1		0	100
10 A	50	45	5		40	60
14 A	80	10	10		60	40
Less than 4A				100		
	A field			C field	B field	

note

- ①, ②, ⑤.....no Ignition
- ④, ③, ⑥.....Ignition

る。

⑤のモード-----地絡電流が4 Aより小さい場合はその接点は肉眼では赤熱が判明出来ず、主に開離時の火花により、接触面が損焼して遂には接触不能となり発火しない場合である。この場合低圧側心線付近は若干炭化するが、発火するまでにはかなりの時間が必要である。

⑥のモード-----このモードは③のモードと同じように炭化が進み被覆が溶融変形し二心線間の絶縁抵抗が低下し漏洩電流が漸次増大し、その漏洩電流のジュール熱によって発火する場合である。

3・2 地絡電流と接触不能になるまでの時間との関係

②のモードで接触不能となって発火しない場合、接触不能までの接触時間と地絡電流との関係を〔Fig 5〕に示す。地絡電流が大になるに従って、接触不能までの時間は減少する。

3・3 発火までの時間と地絡電流との関係

③のモードは発火する場合で、赤熱の生じた時点で接触状態が継続され、二心線短絡により発火する。発火迄の接触時間と地絡電流との関係を〔Fig 6〕(a)で示し、接触開離により発火に至る⑥のモードの場合は〔Fig 6〕(b)で示す。

a, bいずれの場合も地絡電流が大になると発火迄の接触時間は減少するが、約12[A]程度で飽和する傾向がある。

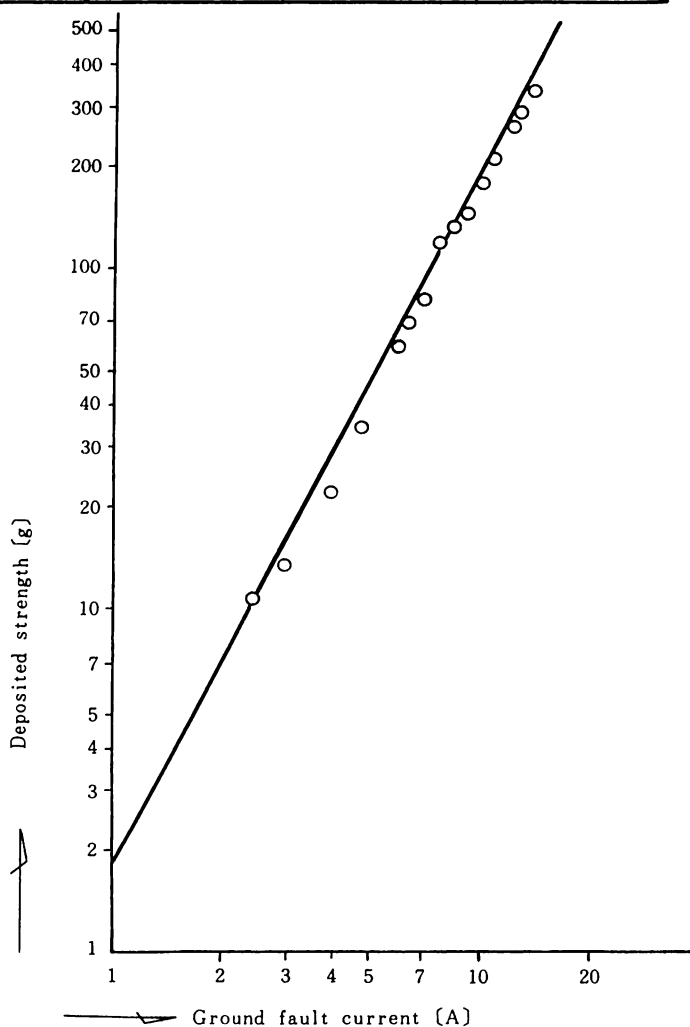


Fig 7 Relation between ground fault current and deposited strength

3・4 各モードの発生率

各モードの発生率は〔Table 1〕のとおりである。このモードは三つの領域にわかれる。Table 1のモードの種類で◎は発火に至る場合で、○は発火に至らない場合である。

Aの領域は〔Fig 4〕の①, ②, ④の場合を含み、

地絡事故による配電用Fケーブルの発火モード

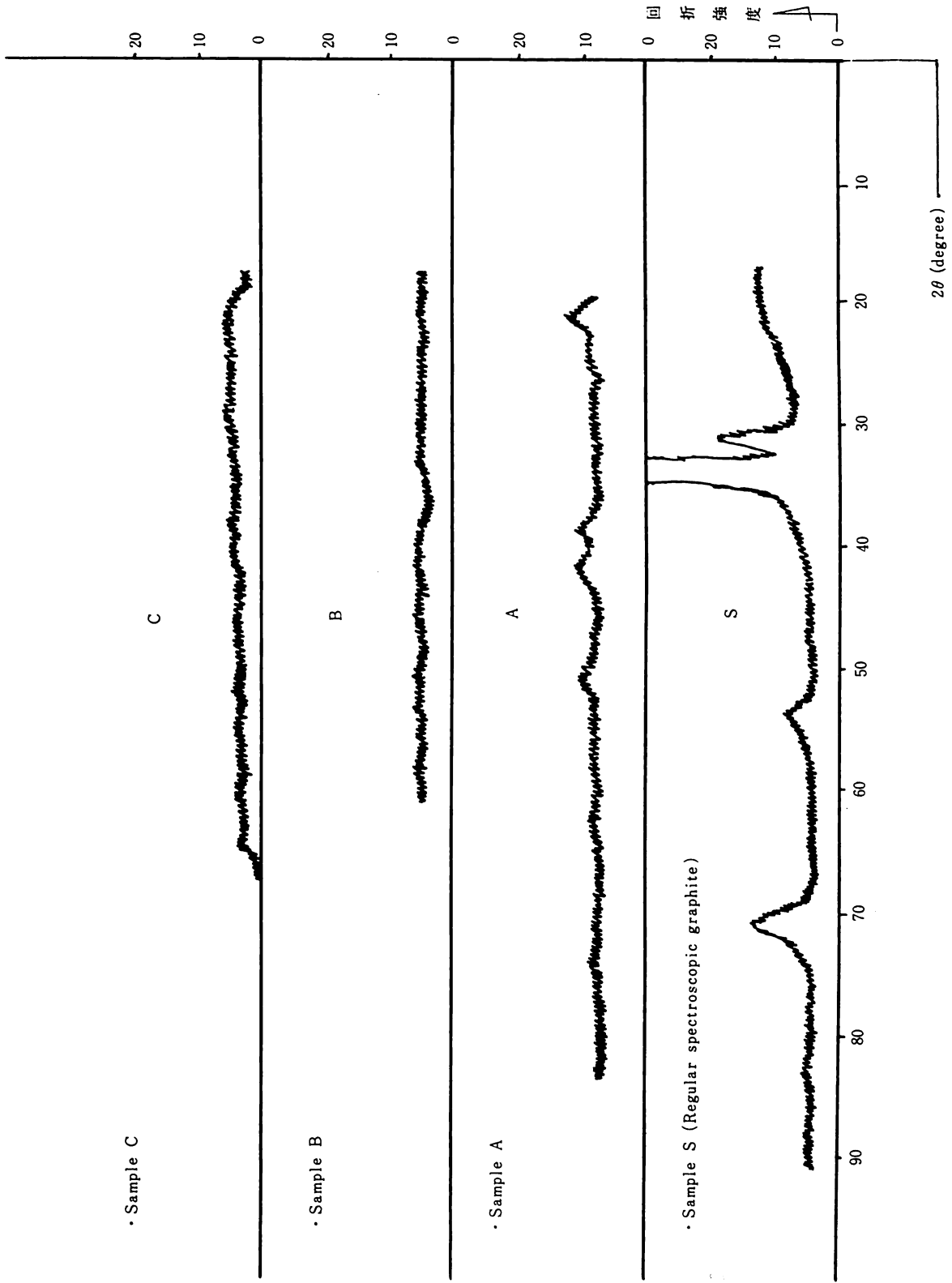


Fig 8 X-ray diffraction of various samples and regular spectroscopic graphite.

②の発生率は地絡電流の増大に伴って減少し、①と④の発生率は地絡電流の増大に伴って増加する。

Bの領域は③、⑥の場合で、このモードは接点が赤熱した時点で人工的に接触状態を継続し、ジュール熱によって炭化が進み、絶縁層が熔融変形して発火した場合が⑥の場合で、熔融変形の後に二心線が短絡して発火する場合は③の場合である。③の場合は地絡電流の増加に伴って発生率が増加し、⑥の場合は地絡電流の増加に伴って発生率が減少する。地絡電流が4 A以下の場合はCの領域で赤熱は肉眼では観察出来ず発火には至らない。

3・5 地絡電流と溶着力との関係

この実験で溶着とは実験装置が自力で開離出来ない場合を言い、その開離出来る力の限界は約280[g]である。

溶着力は溶着したものを開離するに要する力を棒秤で測定した。溶着力は同じモードについて5回測定して、その平均を取り、各地絡電流に対する溶着力とした。地絡電流と溶着力との関係は〔Fig 7〕に示す。地絡電流が大きい程、溶着発生率が高く、溶着力も大きくなる。

溶着力は次の実験式で示される。

$$F = K \cdot I^n = 1.8 \times I^{2.08} [g]$$

F：溶着力 [g]

K：PVCの定数

I：地絡電流 [A]

電流14 [A]で360 [g]の溶着力となり、実験式による計算値と実験値はほぼ一致する。

3・6 炭化粒子のX線回析結果

炭化粒子が無定形炭素か、それともグラファイト化しているかを検討するため前述の自記X線回析装置を用いた。

あらゆる結晶は、その成分たる原子、分子などの種類が異なれば、当然その結晶中の原子配列も異なり、単位格子の大きさ、各面の傾き、面間隔等も異なるので、物質の結晶によるX線回析は、その物質固有のものである。本実験では純粋な標準グラファイトとの回析強度の角変化比較で、供試料中の炭化物にグラファイトが含まれているかどうかを検討したが、その実験結果を〔Fig 8〕に示す。

S曲線は標準グラファイトで、A曲線は発火した供試料より炭化部を削り取って測定したものであるが、炭化部には5%以上のグラファイトが含まれて

いると推定出来ない。又B曲線は溶着して発火に至らない場合の炭化部を削り取ったものの曲線であるが、B曲線、C曲線は発火直前の炭化部を削り取ったものであるが上記同様グラファイトの存在は認められない。Bにも5%以上のグラファイトはないと推定される。

4. 実験結果の考察

現在屋内配線工事に広く使用されているFケーブルの絶縁層であるPVCは『損傷しても剥離しにくく、絶縁耐力もあり、心線短絡によっても発火しにくく、高濃度の酸素環境、又は丸めて使用する場合は発火する⁰⁰⁾』ことが述べられている。また電線被覆等の有機絶縁材料自体が発火源となる場合は何等かの原因によりグラファイト化現象を起し、その部を流れる電流によるジュール熱により発火することが報告されている。⁽⁴⁾⁽⁷⁾

本実験ではFケーブルの発火のモードを調査するとともに、Fケーブルの発火に関して、ある限定された条件のもとで上記の従来からの定説に対する疑問を確かめることが主目的である。

本実験の結果を要約すると次のようである。

(1) 発火モードについて

発火のモード〔Table 1〕に示されるようにA、B、C三つの分野に分けて考えることが出来る。

① Aの分野……トタン板とFケーブル高圧側心線が接触、開離を繰り返す、接触部に赤熱を発生した場合Table 1の①、②、④のモードが考えられるが発火に至るのは④のモードのみで、これは地絡電流が大となるに従って発生率が大となるが、14Aの地絡電流でA分野中10%の発生率にすぎない。

② Bの分野……赤熱を生じた時、そのまま強制的にトタン板とFケーブルの高圧側心線の接触を継続した場合でTable 1の③と⑥のモードがあるが、いずれも発火に至る。⑥のモードはまず高圧側心線の絶縁層が炭化し、その炭化が低圧側心線の方向に進み、両心線間が炭化導電路を形成すると、そのジュール熱で発火する。

③のモードは高圧、低圧側の二心線間の絶縁層が強く熔融変形し、二心線が短絡して、その短絡電流によって発火する。

④ Cの分野……地絡電流が4A以下の場合は殆ど100%、その接触箇所には赤熱部が観測出来ず、開離時のスパークのみによって高圧側の心線絶縁層は炭化

地絡事故による配電用Fケーブルの発火モード

するが低圧側心線の絶縁層は炭化せず、心線間の漏洩電流は流れない。この場合トタン板は損傷して接触不能となって発火しない。

この場合接点に生じた熱量が少ないので、トタン板の酸化には、時間がかかり、トタン板の損傷がめだつまでには相当時間を要する。

(2) 炭化部のグラファイト化について

炭化部はX線分析法の結果では5%以上のグラファイトは検出出来ず、大部分が無定形炭素と思われる。金原氏はグラファイトが表面層を形成し、それが導電路を形成して発火する。⁽⁷⁾と述べておられ、グラファイトが少量なのは、それが表面に発生しても燃焼して空气中に逃げるためであると推論されている。⁽⁷⁾

本実験では発火直前の供試料10組についても、その炭化部が5%以上のグラファイトの存在は認められなかった。(X線分析法では5%以下のグラファイトは検出出来ない。)

発火現象は炭化部のグラファイト化が前提であると言う考え方については発火の本質ともかかわって今後も更に追求したい。

(3) 溶痕について

電気配線が何等かの原因で発火源となる場合、溶痕の存在が鑑識上重要な意味を持つとされている。

本実験の供試料からは一次痕(火災前に生じた溶痕または火災の原因となった溶痕を言う。)は一般に言われているように溶着部の組織は密で光沢を帯びているものは発見出来なかった。

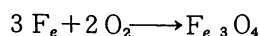
また二次痕(通電状態にあった配線が火災時の熱によって被覆が焼失し、短絡した場合に生ずる溶痕である。)は一般に溶痕に光沢がないと言われているが、本実験の結果は、殆どの供試料に発見される溶痕は光沢のない溶痕であった。

本実験ではFケーブルの発火と同時にスイッチを切るので一般的に光沢のある溶痕を生ずるまでには至らないものと思われる。

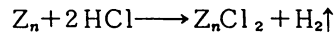
(4) トタン板の損傷について

前述のようにトタン板とFケーブルの接触・開離の際の火花による熱によってトタン板は酸化して、炭素または酸化物を発生する。

更にトタン板とFケーブルの接触点は漸次損傷が大となり、接触抵抗が増し、接触中はそこを通るジュール熱によっても接触部は加熱、酸化する。トタンの加熱酸化部の化学変化は次のようになる。



PVCは火花やジュール熱によって加熱されている時空气中の酸素と反応して H_2 、 CO 、 H_2O 、 HCl の揮発性生成物を生じて炭素が残る。この塩化水素がトタンの Z_n と反応して次のようになる。



Z_nCl_2 はもろいので、接触、開離時の機械的振動で振り落され損傷部は拡大していく。

(5) 着火機構について

本実験で発火するのは〔Fig 4〕の④、⑥、③の場合で、それぞれの発火のモードは相違している。

PVCのASTM D 1929 Setchkin 試験では引火温度は 391°C で発火温度は 454°C である⁽⁸⁾から発火のモードはいずれの場合も発火温度を維持するエネルギーの供給速度が要求される。

発生確率の高い③、⑥の場合について、その発火機構を考察する。いずれの場合もトタン板と心線の断接の継続で接触部の接触抵抗が増加し、開離時はスパークが発生する。接触している間はエネルギーの供給があるので、ジュール熱を発生し、スパーク熱との相乗作用で地絡電流4A以上の場合は接触部が赤熱してくる。その時点でトタン板と心線の接触を継続すると、まずシース層が溶融変形し、部分的には燻焼のような状態で炭化部が構成され、それが漸次拡大していく。電源より供給されるエネルギーは継続されるのでシース層のみでなく低圧側心線の絶縁層も漸次溶融変形し、ゴム状弾性から塑性流動状態となり、炭化部も拡大されて二心線間の絶縁抵抗も低下し、また漏洩電流も増加し、その漏洩電流によるジュール熱も加わって分解によって生じたガスが発生し、それ等の相乗作用によって発火する場合が⑥である。

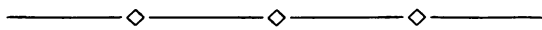
③の場合は〔Fig 4〕から明らかなように溶融変形し塑性流動状態となってから、二心線間の絶縁層が溶出して直接心線短絡を起こし、短絡電流によるジュール熱が相乗的に加わって発火する場合である。短絡を生じた時に心線が溶融して、丸い金属球となって遊飛して付近の物質に付着する場合もあるが一般的な短絡事故の場合のような溶着部の組織が密で光沢のある一次痕は発見困難であった。

またシース層は心線の絶縁層よりも発火し易く、なおPVCは自己消火性があり、酸素指数も24%程度必要⁽⁹⁾とされているので、発火してもすぐ消える場合もあるし、スイッチを切ってエネルギーの供給を止めると消火する。

5. あ と が き

特定の損傷を与えた配電用Fケーブルに限定した条件を与え、地絡事故を模擬した本実験において得られた結果の要旨は次のとおりである。

- (1) 発火に至るモードは三つのモードに類型化することが出来、それぞれの分野は地絡電流の大ききで発火発生率は異なる。
- (2) 地絡電流4 A以下の場合は100%発火危険性はない。
- (3) 接触部に赤熱が発生してから接触を継続した場合、二心線間が直接短絡をする場合、または二心線間が絶縁層を流れる漏洩電流によって間接的に短絡する場合、いずれの場合も発火する。この場合電路を形成する炭火層はX線回析の結果5%以上のグラファイトの存在は確認出来なかった。



この研究にあたりいろいろとご助言をいただいた秋田大学鉱山学部能登文敏教授ならびに金属分析についてご指導をいただいた佐々木金一助教授に深謝する。

参 考 文 献

- 1) Von H. Christon, H. Grop : Der Maschinenshaden 45(3)111 (1972)
- 2) G. Kaplan : IEEE Spectrum 13(10)54 (1976)
- 3) 東京消防庁調査課 : 日本火災学会誌29(1)P28~29 (1979)
- 4) 木下勝博, 荻原隆一, 金原寿郎 : 日本火災学会誌28(3)P30~P37 (1978)
- 5) 河村鴻允, 佐藤忠雄, 能登文敏 : 日本火災学会大会学術講演梗概集 (1978)
- 6) 松浦正博 : 日本火災学会誌 28(3)P17~23 1978
- 7) 金原寿郎 : 日本火災学会誌 28(6)P10~15 1978
- 8) 川崎消防局予防課 : 日本火災学会誌 29(1)P30~32 (1979)
- 9) 原実 : 日本火災学会誌 28(4)P31~34 (1978)
- 10) 片山史郎, 江口一正, 西浦蒼生外 : タツタ電線技報 10 P17~38 (1977)
- 11) NP. Setchkin et al : J. Res. Nat. Bur. Standards 43 P591~608 (1949)
- 12) 菊地光一, 小玉美一, 河村鴻允, 能登文敏 : 電気学会東北支部連合大会 IC 7 (1979)
- 13) 清水正夫, 藤原正夫外 : 藤倉電線技報 59 P24 (1978)