油浸絶縁構成における部分放電発生時の金属粒子の挙動

正員 栗田 裕 (三菱電機)

正員 碓井 修 (三菱電機)

正員 長谷川 武敏 (三菱電機)

正員 藤井 治久 (三菱電機)

Behavior of Spherical Metal Particle at Partial Discharge Inception in Oil Immersed Insulating System

Hiroshi Kurita, Member, Osamu Usui, Member, Taketoshi Hasegawa, Member, Haruhisa Fujii, Member
(Mitsubishi Electric Corp.)

Behavior of spherical metal particle was observed with high speed camera at the instance of partial discharge inception in oil immersed insulating system. The polarity of metal particle's charge was evaluated by the behavior of the particle and the direction of electric field. The positively charged particle moves to the press-board on negative electrode to initiate partial discharge. The charge quantity of the particle can be calculated by the behavior of particles and electric fields. The movement of particle is so notable on AC peak voltage that partial discharge initiation can be observed on the peak voltage. The mechanisms of partial discharge is proposed.

キーワード：油浸絶縁、部分放電、粒子、帯電、高速現象

1. まえがき

鉱油の絶縁破壊特性や油浸絶縁構成の部分放電特性に及ぼす油中粒子の影響は古くから研究され、油中粒子が絶縁性能を低下させることが指摘されてきた^{(1)~(4)}。近年、部分放電発生に及ぼす粒子の数や大きさ・材質の影響が明確になりつつある^{(4)~(7)}。一方、油浸絶縁における部分放電現象も研究され、油浸絶縁構成での部分放電は交流電圧のピーク値付近で間欠的に発生するなどの特性が報告されている^{(6)~(8)}。しかしながら、油浸絶縁構成において、部分放電と粒子の挙動の因果関係は報告された例はない。

本報告では、油浸絶縁構成（プレスボード・油隙・プレスボード）の油隙中に置かれた球状銅粒子の挙動と部分放電の関係を調べた。まず、粒子の挙動を高速ビデオと望遠レンズを用いて観察した。ビデオ録画開始を部分放電信号でトリガし、部分放電発生前後の粒子の挙動を観察し、特徴についてまとめた。また、粒子の挙動と運動方程式から部分放電発生前の粒子の帯電量を求め、帯電量と部分放電電荷量について論じた。最後に、観察結果、解析結果から部分放電の発生機構を考察した。

2. 実験

〈2.1〉実験方法

(1) 電極構成 供試した電極構成を図1(a)に示す。電極はステンレス製で電極端部はエポキシ樹脂でモールドした。2枚のプレスボード(PB)の間にガラススペーサ(厚さ2mm)を置き、油隙をつくる構成にした。ガラススペーサの形状を図1(b)に示す。スペーサの中央部分にスリット状の穴(4×1mm)を設けることにより油隙を形成した。このスペーサにより、粒子の挙動範囲を粒子観察に用いた望遠レンズの焦点深度以内に納めることができる。ガラススペーサにはスリット内部に油が入りやすいように、側面からスリットに向けて溝を設けた。電極はクリーンベンチ(クリーン度1000)内で組み立てられた。ここで、プレスボードとは赤松などの植物繊維をプレスして作った板状の絶縁物である。プレスボードは油入り変圧器などの絶縁材料として広く用いられる。

(2) 供試油と混入粒子 鉱油精製メーカーから購入した新油(JIS2号2320)を脱気脱水フィルタリング処理したものを供試した。鉱油のクリーン度は以下のとおりである⁽⁵⁾。

油中浮遊粒子数：直径0.8μm以上の粒子

数個/10⁵mm³

油中水分：2ppm 以下

また、混入粒子は直径500μmの球状銅粒子である。

(a) 電極構成

(b) ガラススペーサ

図1 油浸絶縁構成

Fig.1 Oil immersed insulating system

(3) 粒子挙動の観察方法 図2に粒子挙動の観察方法を示す。粒子の挙動の観察には、高速カメラ（フォトロン社製：FASTCUM-ultima）と望遠レンズ（ニコン社製 Micro-Nikkor200mm, Teleconverter TC-304）を用いた。部分放電は供試体検出方法で計測した⁽⁶⁾。部分放電信号をデジタルオシロ（TEKTRONIX、TSA-544A：トリガ出力、放電電荷量計測 / YHP、5411D：位相検出）に取り込みデジタルオシロからトリガ出力をし、高速カメラを起動した。高速カメラはトリガ前後の現象を記録できるので、部分放電発生前後の粒子挙動が観察可能である。部分放電の計測範囲は25～1000 pCである。高速カメラの撮影速度は27000 駒／秒である。

図2 粒子挙動の観察方法

Fig.2 Observation method of particle motion

〈2.2〉実験結果

(1) 印加電圧と部分放電電荷量の関係 図3に印加電圧と部分放電電荷量の関係を示す（ステップ状昇圧、2 kV rms / 1分）。図には同一の試験を4回行った結果を示す。試験1から4により、25 pC以上の部分放電は印加電圧70 kV rms（油隙電界：18.9 kV rms / mm）付近から発生し、70 kV rmsから100 kV rmsで油隙の絶縁破壊に達することがわかる。

(2) 粒子の帯電極性 図4に粒子の移動が観察された

図3 印加電圧と部分放電電荷量の関係

Fig.3 Voltage dependence of charge quantity of partial discharge

(a) 印加電圧：80 kVrms 部分放電：46 pC

(b) 印加電圧：80 kVrms 部分放電：43 pC

図4 粒子の移動する位相と帯電極性

Fig.4 Polarity of particle's charge evaluation with movement of particle

位相と粒子の移動方向を示す ($t = 0$ を部分放電発生時とする)。粒子の移動方向と電界の方向から粒子の帯電極性が判断できる。粒子は部分放電がなければ正極性に帯電しているが、部分放電直後に負極性に帯電する。そして、部分放電後の移動により陽極側プレスボード上で再び正極性を帯びる。この時は部分放電は観察されない。

(3) 部分放電発生前後の粒子挙動のパターン分類 発生電荷量 $25 \text{ pC} \sim 1000 \text{ pC}$ の部分放電発生時の粒子挙動を 14 回観察した。図 5 に粒子の挙動観察結果の例を示す。また、粒子の垂直方向の移動距離と部分放電発生前後の経過時間の関係を図 6～図 10 に示す。図 6～図 10 では部分放電発生時を 0 ms としている。このような観察結果から、粒子の挙動は放電の大きさなどにより、いくつかのパターンに分類できる。

放電の大きさが $25 \text{ pC} \sim 100 \text{ pC}$ 程度までは、次の 2 つの移動パターンが観察される。

パターン A：陽極側のプレスボードから移動した粒子が、陰極側のプレスボード上に到着し、到着の瞬間に放電する。

放電後粒子は陽極側のプレスボードに向かい移動する (図 6)。

パターン B：陽極側のプレスボードから跳ね上がった粒子が、陰極側のプレスボード上に到達する。到達後しばらく陰極側のプレスボード上で停滞し、放電する。そして、陰極側のプレスボードから陽極側のプレスボードに向かい移動する (図 7)。

放電の大きさが数百 pC を越えるようになると、挙動パターンは次のようになる。

パターン C：陽極側プレスボードから跳ね上がった粒子は、陰極側のプレスボード方向に移動し、対向側のプレスボード近傍で放電する。粒子は放電後そのまま対向電極に直進し、プレスボードに到着後、跳ね返る (図 8)。

パターン D：放電が起きるまではパターン C と同様である。粒子は放電後、逆向きに移動する (図 9)。

パターン E：陽極側のプレスボードから跳ね上がった粒子は、陰極側のプレスボードで部分放電せずに一往復し、陽極側のプレスボード上で放電する (図 10)。

図 5 粒子の挙動観察例

Fig.5 Example of particle motion in oil

部分放電電荷量：45pC 印加電圧：80kVrms

図6 部分放電発生前後の粒子の挙動
(パターン A)

Fig.6 Behavior of particle at the instance of partial discharge :pattern A

部分放電電荷量：25pC 印加電圧：80kVrms

図7 部分放電発生前後の粒子の挙動
(パターン B)

Fig.7 Behavior of particle at the instance of partial discharge :pattern B

部分放電電荷量：1000pC 印加電圧：86kVrms

図8 部分放電発生前後の粒子の挙動
(パターン C)

Fig.8 Behavior of particle at the instance of partial discharge :pattern C

部分放電電荷量：500pC 印加電圧：86kVrms

図9 部分放電発生前後の粒子の挙動
(パターン D)

Fig.9 Behavior of particle at the instance of partial discharge :pattern D

部分放電電荷量：360pC 印加電圧：86kVrms

図10 部分放電発生前後の粒子の挙動
(パターン E)

Fig.10 Behavior of particle at the instance of partial discharge :pattern E

(4) 部分放電発生位相 図11に部分放電発生位相例を示す。挙動パターンに関係なく、部分放電は印加交流電圧のピーク値付近で観察される。これは、粒子の移動が印加電圧のピーク値付近で発生するためである(図4参照)。

(5) 極性効果 パターンA、Bでは、部分放電の発生は粒子が陰極側プレスボードに存在する時に発生するのが特徴である。11回の測定を行い、すべてこの傾向の極性効果が観察された。また、パターンC、Dでも粒子が陰極側のプレスボード近傍に存在するときに発生している。パターンEは陽極側プレスボードに到着したときに放電した。このようにパターンEを除きすべて、部分放電は粒子が陰極側のプレスボード上か近傍に存在するときに発生している。測定した部分放電の電荷量と挙動パターン及び極性の

表1 粒子挙動パターン分類と粒子帯電極性

Table1 Pattern classification of particle behavior and polarity of particle charging

放電電荷量 (pC)	25	42	43	45	46	61	71	75	86	100	114	356	500	1000
挙動パターン分類	B	A	A	A	A	A	B	A	B	B	A	E	D	C
極性	負	負	負	負	負	負	負	負	負	負	負	正	負	負

関係を表1に示す。極性は放電時に粒子が存在する側の電極の極性で示した。

(6) 部分放電電荷量と粒子の移動時間 粒子の挙動はいくつかのパターンに分類されたが、いずれの場合も放電前に粒子のプレスボード間の移動が観察される。移動時間と放電電荷量の関係を図12に示す。粒子の移動時間は放電量が大きいほど短い傾向がある。すなわち、放電前の粒子スピードが速い方が、部分放電電荷量が多い。

部分放電：
45 pC

印加電圧：
80 kV rms

図11 部分放電発生位相例

Fig.11 Wave form of applied voltage and partial discharge pulse

図12 粒子のギャップ間移動時間と部分放電放電電荷量の関係

Fig.12 Relation between the charge quantity of partial discharge and particle moving time from one press-board to the other

3. 粒子の帯電電荷量と放電電荷量の関係

〈3.1〉粒子の帯電電荷量の算出

平等電界中の帯電粒子の運動は、粒子に及ぼされる力がクーロン力、重力、浮力、粘性抵抗力のみによると仮定すると、次式で与えられる。

$$m \frac{dv}{dt} + 6\pi\eta av = qE - g(m - \frac{3}{4}\pi a^3 \rho) \quad (1)$$

$$L = \int_0^T v dt \quad (2)$$

ここで、 v ：粒子速度、 t ：時間、 L ：粒子の移動距離、 m ：粒子の質量、 a ：粒子半径、 ρ ：油の密度 ($0.88 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)、 η ：油の粘性係数 ($0.129 \text{ Pa}\cdot\text{s}$)、 E ：電界、 T ：粒子がプレスボード間を移動する経過時間

(1) 式を速度 v について解くと、

$$v(t) = \frac{qE - g(m - \frac{3}{4}\pi a^3 \rho)}{6\pi\eta a} (1 - \exp(-\frac{6\pi\eta a}{m} t)) \quad (3)$$

(3) 式を (2) 式に代入し電荷量 q について解くと

$$q = \frac{1}{E} \left\{ \frac{6\pi\eta a L}{T - \frac{m}{6\pi\eta a} (1 - \exp(-\frac{6\pi\eta a}{m} T))} + g(m - \frac{3}{4}\pi a^3 \rho) \right\} \quad (4)$$

注) 今回の報告範囲では (4) 式の大括弧内の第2項は第1項に比較し小さく無視できる。たとえば、 $T = 0.74 \text{ ms}$ で計算した場合、第2項は第1項の800分の1程度の値である。

粒子の速度は交流周波数周期に比較して速く、また電圧の変動が少ないピーク値付近で部分放電が発生することを考えると、パターンA、C、D、Eなどの粒子挙動が部分放電発生直前で起きる場合には、(4) 式の電界値 E は印加電圧のピーク値での電界を採用しても大きな誤差にはならない。そして、(4) 式の T (粒子がプレスボード間を移動するのにかかる時間) と L (時間 T の間に移動した距離) は各計測において実験的に求まるので、実験結果と (4) 式から粒子の電荷量が算出できる。求められた q と (2) (3) 式により、粒子の速度と移動距離が計算できる。

粒子の移動距離を以上の手順にしたがって計算し、実験値と比較した結果を図13に示す。粒子の挙動は理論値と良く一致し、部分放電発生前の粒子の挙動や電荷量は式 (1) ~ (4) を用いて考えて問題のないことが分かる。

〈3.2〉帯電電荷量と放電電荷量の比較

A、C、D、Eについて、(4) 式から求まる帯電電荷量と部分放電電荷量を比較して図14示す。放電がプレスボード上で起こるパターンA、Eについては放電電荷量と放電直前の粒子帯電電荷量が良く一致することが分かる。

図13 粒子移動時間と移動距離の関係 (理論値と実験値の比較)

Fig.13 Relation between particle moving time and moving distance :comparison of experimental and theoretical value

図 14 粒子帯電電荷量と部分放電電荷量の関係

Fig.14 Relation between particle charge and the charge quantity of partial discharge

4. 部分放電の発生機構の考察

陽極側プレスボード上で正極に帯電した粒子は、主に油隙の電界と帯電電荷で形成されるクーロン力により陰極側プレスボード方向に移動する。粒子は電極と逆極性に帯電しているので、粒子と電極間に形成される電界⁽⁶⁾は粒子とプレスボードの接触点付近などで増強され、放電はより発生しやすくなる。この電界により粒子電荷の放電が起これらと思われる。

パターンAでは粒子の帯電電荷はプレスボード上に到着するまで保持され、トリプルジャンクション（粒子／プレスボード／油が接触する部分）で粒子の帯電電荷がプレスボードと粒子間で放電したと思われる。パターンC、Dでは粒子がプレスボード付近に到来した時に、粒子近傍の電界が放電電界を越え部分放電に至ったのだと思われる。パターンBにおいては、粒子の移動が交流電圧のピーク値よりも少し（0.5ms～2.7ms）前までに起こり、正極性帯電粒子が陰極側プレスボード上で電圧がピーク値に達するまで停滞し、ピーク値で放電したのだと思われる。これは粒子移動がパターンAよりも少し速く起こった例である。

ところで、粒子が正極性に帯電しやすい理由は、プレスボード上粒子からの電界放出やプレスボード上の電気2重層の影響などが考えられるが、今回の研究では明確にできなかった。

5. まとめ

油浸絶縁構成に置かれた球状銅粒子の部分放電発生時の挙動を高速ビデオにより観察し、特徴についてまとめた。そして、粒子の帯電や部分放電発生機構について考察を加えた。得られた結果を以下に列挙する。

(1) 粒子は部分放電がなければ正極性に帯電しているが、部分放電により負極性に帯電する。そして、部分放電直後に陽極側プレスボードへ移動し再び正極性を帯びる。正極性帯電の瞬間には部分放電は検出されない。

(2) 部分放電発生前の粒子の挙動は、放電の大きさなどにより、いくつかのパターンに分類できるが、概ね次に述べる挙動を示す。すなわち、正極性に帯電した粒子が帯電電荷と油隙の電界で形成されるクーロン力により移動し、主に陰極側プレスボード上か近傍で部分放電にいたる。

(3) 部分放電は印加電圧のピーク値付近で発生する。これは、粒子の挙動が交流のピーク値付近で顕著なためである。

(4) 部分放電直前の粒子のプレスボード間移動時間は、部分放電電荷量が大きいかほど短い傾向がある。

(5) 粒子の帯電電荷量は粒子の挙動から計算可能である。粒子がプレスボード到着時に部分放電が発生する場合には、部分放電電荷量と粒子帯電電荷量が良く一致する。

(平成9年1月16日受付、平成9年3月5日再受付)

参考文献

- (1) K.N.Mathes & J.M.Atkins: "Influence of Particles on Partial Discharge and Breakdown in Oil", IEEE Int. Symp. on Electrical Insul., p751(1978)
- (2) K.Miners: "Particles and Moisture Effect on Dielectric Strength of Transformer Oil Using VDE Electrode" IEEE Trans., PAS-101, No.3, p226(1982)
- (3) Claier Vincent & Jean-Pierre: "Evaluation in Service Transformer Oil Condition from Various Measurement" IEEE Int. Electrical Insul., p310(1986)
- (4) 青野一朗、岸章夫: 「変圧器油の油中粒子数と絶縁破壊特性」、電気関係学会関西支部連大、G3-12(昭和63年)
- (5) 栗田裕、長谷川武敏、木村健: 「超清浄油の絶縁破壊特性」電学論B、113、p939～943(平成5-8)
- (6) 栗田裕、碓井修、長谷川武敏、藤井治久、仲西幸一郎: 「油浸絶縁構成における部分放電開始電界に及ぼす球状金属粒子の数と粒径の影響」電学論B、115、p985～991(平成7-8)
- (7) 碓井修、栗田裕、長谷川武敏、藤井治久: 「油浸絶縁構成における部分放電開始電界に及ぼす混入異物の影響」電気関係学会関西支部連大、G6-16(平成6)
- (8) 井関昇: 「交流油中コロナの特性」電学誌、81-874、14～20(昭和36-7)
- (9) A.H.Sharbaugh & J.C.Devins: "Electrical Breakdown in Solids and Liquids", Electro-Technology Science & Engineering Series, p98-116(1961)

栗田 裕 (正員)

昭和35年12月23日生。59年3月早稲田大学理工学部電気工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所にて、油浸絶縁およびガス絶縁の研究に従事。

碓井 修 (正員)

昭和45年3月7日生。平成4年3月室蘭工業大学工学部産業機械工学科卒業。同年三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所にて、モールド絶縁及び油浸絶縁の研究に従事。

長谷川 武敏 (正員)

昭和24年5月16日生。43年三菱電機(株)入社。現在、同社先端技術総合研究所にて、モールド絶縁及び油浸絶縁の研究に従事。工学博士。

藤井 治久 (正員)

昭和27年7月7日生。55年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在、同社先端技術総合研究所にて、絶縁材料の研究に従事。工学博士。