

外 97-16

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

油浸絶縁構成における部分放電発生  
に及ぼす粒子の影響

### 申請者

栗田 裕

HIROSHI KURITA

1997年10月

電力需要の増加に対する電力の安定供給に向けて、21世紀初頭に我が国初の1000kV送電が計画されている。この送電開始に先立ち、機器の諸特性・信頼性について十分な検討を行うため、1000kV変電所機器と同一設計の変圧器・GISでの実証試験が開始されるなど、さまざまな開発と研究が行われている。1000kV変圧器では輸送を考慮して1相を2分割した2タンク構成とする。したがって、1タンクの容量は500kV器と同じになるが、定格電圧・試験電圧は当然増加する。特に、主絶縁（鉄心とコイル間の絶縁）に関して、信頼性を維持したうえでの絶縁寸法の低減が変圧器の作製にあたって必須である。

変圧器の絶縁強化は、電界解析精度の向上などによる絶縁構造の改善によりなされてきたが、さらに信頼性を向上させるためには主絶縁材料である鉱油自身の絶縁特性の改善も必要である。鉱油の絶縁性能は油中に浮遊する塵埃に大きく影響を受ける。したがって、変圧器製造工程で発生する塵埃や部品に付着している塵埃の管理が不可欠であるが、管理の指標となる塵埃の大きさ・密度・材質・形状が油中部分放電発生に及ぼす影響は、詳細には検討されていない。また、変圧器の高電界部分を模擬し電極をプレスボードで覆った油浸絶縁構成において、粒子に基づく部分放電発生機構も明確にはされていないのが現実である。

本研究では、まず粒子混入のベースとなる鉱油として工業的に可能な限界まで粒子を除去した超清浄油を製造し、この絶縁特性を調べた。次に、電極をプレスボードで覆った油浸絶縁構造における部分放電開始電界に及ぼす粒子の材質・形状・大きさ・数の影響を調べた。また、部分放電発生前後の粒子の挙動について調べ、特に、球状金属粒子については部分放電発生機構についての仮説を立て、この仮説と実験結果を比較検討した。最後に、これらの研究をもとに明らかとなった変圧器の製造工程で特に注意して管理すべき粒子について述べた。以下に各章の概要と主な結論を列挙する。

第1章は、序章として、本研究の目的・背景などを述べた。

## 「第2章 超清浄油の絶縁破壊特性」

鉱油の絶縁破壊は電極の面積や電圧の印加される油の体積の影響を受けることが知られている。この章では、直径 $0.8\mu\text{m}$ 以上の粒子密度が数個/ $10^5\text{mm}^3$ と工業的に可能な限界まで清浄化した鉱油について、この絶縁破壊電界のスケール効果について調べた。スケール効果が電極面積に依存したものであるか、あるいは電圧の印加される体積に依存したものであるかをワイブル分布を用いて論じ、鉱油の絶縁破壊電界に及ぼす油中粒子の影響を実験的に調べた。試験に用いた印加電圧は交流と雷インパルスとした。この結果、超清浄油の絶縁破壊は、交流では面積効果で、雷インパルスでは体積効果で決定されており、鉱油の絶縁破壊電界は広い範囲にわたり、粒子除去により改善されることを明らかにした。

## 「第3章 球状金属粒子に基づく部分放電の発生機構」

第3章～第5章では、第2章で述べた超清浄油を用い、電極をプレスボードで被覆した油浸絶縁構造で実験及び解析を行った。第2章より超清浄油の交流絶縁破壊のスケール効果は面積効果で決定されたことが分かった。本章では、この結果を基に油中部分放電は粒子近傍の高電界部分で発生すると仮定し、球状金属粒子の数と大きさの影響を調べた。まず、粒子表面を微小に分割し、微小面積とその部分に印加される電界から微小面積部分の破壊確率を求めた。このとき、ワイブルパラメータとして超清浄油の交流破壊特性から求めた値（第2章の結果）を適用した。そして、微小面積を一つの要素と考えた最弱リンク理論を再び適用し、粒子数・粒子サイズに対応した破壊確率を求めた。さらに、油隙の電界を変化させ破壊電界の分布を求めた。このようにして、超清浄油のワイブルパラメータから油浸絶縁構成中の金属粒子の直径と数に対応した部分放電の開始電界の分布が計算できた。計算は粒子がプレスボード上に存在する場合に粒子近傍が高電界となることから、この場合について行った。以上の仮説を第4章と第5章で実験的に検証する。

## 「第4章 部分放電発生に及ぼす粒子材質、形状、大きさおよび数の影響」

粒子の材質の影響について実験を行った。混入した粒子は銅、シリカ、紙繊維およびプレスボード粒子である。直径 $5\mu\text{m}$ から $500\mu\text{m}$ 程度までの粒子を精度良くカウントしながら油浸絶縁構成の電極に混入し、部分放電発生電界を計測した。これらの実験結果を第3章の計算結果と比較検討した。銅粒子については粒子の形状の影響も計測した。さらに、実際の鉱油中に存在する粒子の材料分析も行った。その結果、金属粒子の方が誘電体粒子よりも部分放電発生電界に及ぼす影響が大きく、粒子の数や大きさが増加すると部分放電発生電界は低下し、また、同一の大きさ（体積）の粒子においても粒子が細長くなる、あるいは平たくなると部分放電発生電界が低下することが分かった。また、誘電体粒子も高密度状態になると、部分放電発生電界が極端に低下することがある。さらに、実験結果は第3章で計算した結果と良く一致した。これらの結果から、粒子とプレスボード及び超清浄油で形成されるトリプルジャンクションが部分放電に寄与していると結論した。

## 「第5章 部分放電発生時の粒子の挙動」

本章では直径 $500\mu\text{m}$ 級の粒子の部分放電発生時の挙動を観察した結果について述べている。部分放電信号で高速ビデオ（27000駒/秒）を駆動し、望遠レンズを用い部分放電発生前後の粒子の挙動を録画した。観察した粒子は銅粒子とプレスボード粒子である。銅粒子については、粒子の挙動と電界の方向から粒子の帶電極性を求める、また、粒子に働く力を考慮した微分方程式から粒子の帶

電電荷量を求め、放電電荷量と比較検討した。プレスボード粒子については粒子が高密度で存在する場合について、粒子の運動や架橋現象と部分放電の関係について考察した。その結果、銅粒子は電界の印加された油隙中で正極性に帶電し、主に帶電電荷と電界のつくるクーロン力により力を受け運動すること、部分放電は正極性に帶電した粒子が陰極側プレスボード上か近傍に達したときに発生すること、誘電体粒子は高密度で存在すると低電界で架橋状態になるが、架橋が持続している状態では部分放電は観察されず、部分放電が発生するのは粒子が運動しているときに限られ、とくに、正帶電粒子が負極側プレスボード上か近傍に飛来した瞬間に発生することを明らかにした。

#### 「第6章 変圧器製造工程における塵埃管理の向上」

本章では前章までの結果をふまえ、変圧器製造工程で、特に注意して管理すべき事柄を粒子別に列挙し説明を加えている。纖維状の金属粒子は低電界で部分放電発生のもとになり、極めて危険な異物である。その他、形状の歪な金属粒子も比較的低電界で部分放電を発生させ、危険である。一方、球状金属粒子は形状の歪んだ金属粒子に比較して部分放電発生に及ぼす影響は小さいが、粒子の大きさや密度が増加すると危険な因子になる。また、誘電体粒子は、金属粒子に比較して部分放電の発生に及ぼす影響は小さいが、高密度で存在すると比較的低電界で連続的な部分放電の発生因子となる。最後に実規模変圧器の絶縁性能改善効果について言及し本論文の締め括りとした。