

審査の結果の要旨

氏名 江尻 開

電力輸送技術の環境調和性向上には、真空遮断器の電圧階級の引き上げや小型低廉な直流遮断器を実現することが必要であり、そのためには真空遮断器中で生じる絶縁破壊現象やアーク放電現象の基礎物理の把握が重要な課題である。本論文は、真空遮断器中で生じる絶縁破壊現象やアーク放電現象の物理解明を目的として、微小粒子に起因する絶縁破壊の発生機構や直流遮断下における真空アーク放電の特性を検討したもので「真空遮断器中の絶縁破壊現象とアーク放電現象」と題し、全 11 章から構成されている。

第 1 章「序論」では近年の電力系統を取り巻く社会情勢や真空遮断器の研究動向について示し、本研究の位置づけと意義をまとめている。

第 2 章「直流下における粒子挙動と微小粒子起因の絶縁破壊現象」では真空ギャップ中に微小粒子を意図的に注入し直流電圧を突印することで微小粒子挙動と絶縁破壊の様相を測定した結果を述べている。微小粒子の挙動や微小粒子に起因する絶縁破壊を分類し、特に絶縁破壊については粒子径と絶縁破壊の様態の関係を示し、さらに電界電子放出電流の照射による電子吸収や二次電子放出から帯電量の変化と挙動の物理を述べている。

第 3 章「電流遮断時に生じる微小粒子の挙動及び遅れ絶縁破壊現象」では大電流の通電中や通電後に電極から放出される微小粒子の特徴、電流ゼロ点後に電圧を印加することで発生した微小粒子に起因する絶縁破壊の様相を測定した結果を述べている。さらに微小粒子の放出機構と放出された微小粒子により引き起こされた絶縁破壊の物理が示されている。また、第 2 章と第 3 章の結果から、これまで広く知られていた微小粒子起因の絶縁破壊モデルの修正を要することが述べられている。

第 4 章「粒子衝突時に生じる絶縁破壊現象の有限要素法解析」では微小粒子の接近に伴う電界の強調や電界電子放出、微小粒子帯電量の変化とカソード上に存在する微小突起の温度上昇を統合的にシミュレートし、微小粒子に起因する絶縁破壊の描像が示されている。微小突起の温度は微小粒子の飛行速度と微小粒子半径の二乗の積に対して指数的に増加すること、発生する微小粒子の径を抑制することが重要であることが述べられている。

第 5 章「微小粒子挙動のモンテカルロシミュレーション」ではギャップ間での微小粒子の挙動をシミュレートすることで微小粒子が電極間から除去される過程が示されている。微小粒子が除去されるまでに要する時間を印加電圧のピーク値や周波数、電極の直径やギャップ長の関数として表し、製造時に混入する可能性のある微小粒子を出荷前に除去する

簡易的な手法が述べられている。

第 6 章「真空中の絶縁破壊進展の Particle-In-Cell シミュレーション」では電界電子放出などによりカソードの局所的な温度上昇が発生した状況から絶縁破壊に至る過程がシミュレートされている。特に温度上昇した領域の半径が大きくなるほど絶縁破壊が発生しやすくなること、電界に沿った線積分中性粒子密度が一定以上であるという条件を用いることで真空ギャップの絶縁破壊特性が飽和する現象を説明可能であることが述べられている。

第 7 章「多結像光学系を用いた真空アークの励起温度測定」では直流遮断時の速い立ち下がり電流が電極間で点弧する真空アークの基礎特性に与える影響について、空間分解能と時間分解能の高い光学系を用いて測定した結果が示されている。電流ピーク時と電流減少時では電極の配合比率に伴う励起温度の変化傾向が異なることが述べられている。

第 8 章「衝突輻射モデルに基づくプラズマパラメータ推定」では第 7 章で求めた励起温度の正確さや緩和の時定数を検証するために励起準位間遷移をシミュレートし、励起温度の測定に使用した準位は緩和の時定数が波形の時間オーダやカメラの露光時間と比較して十分に短く、また測定対象とした拡散モードの真空アークでは中性粒子全体の励起温度を良く表していることが示されている。加えて分光測定の結果と数値計算により算出できるスペクトルを比較することで、電子温度と電子密度を推定し、この電極材料依存性がカソードスポットの流し得る電流値に起因していることが述べられている。

第 9 章「直流遮断後の過渡回復電圧」では機械接点と逆電流重畳方式に基づく直流遮断器が直流電力網での事故を遮断した際に電極間に発生する過渡回復電圧の解析式を回路解析により求め、文献から得られる実測波形と比較した結果が示されている。単純化した直流遮断回路の過渡回復電圧は一次関数と減衰振動の和で表せ、等価回路の構成要素として電流ゼロ点後にギャップ間に残存するプラズマに起因する抵抗成分を加えることで文献値と解析値が良く一致することが述べられている。

第 10 章「直流遮断後の絶縁破壊特性」では直流遮断を模擬した電流波形で点弧したアークの電流ゼロ点後に正極性と負極性の電圧を印加し、負極性より正極性が耐電圧の回復に長時間を要することが示されている。電圧の印加に伴い流れる電流波形から、正極性ではカソードスポット縁の高温金属部の熔融が耐電圧の回復を支配していることが述べられている。これらの結果と第 9 章で求められた過渡回復電圧の理論式を比較して直流遮断器周囲の回路設計の指針が述べられている。

第 11 章「結論」では、本論文を総括し、今後の研究の方向性について述べている。

以上これを要するに、本論文は、環境対応の観点から適応範囲が急拡大する真空遮断器を対象として、その高耐圧化や大容量化に必須である絶縁破壊現象とアーク放電の物理の解明に関して、特に微小な粒子に起因する絶縁破壊の機構とアーク放電の基礎特性や直流遮断下で生じる現象に関する有益な知見を得ている点で、電気工学、特に高電圧工学、大電流工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。