

称号及び氏名	博士（工学） 皆川 忠郎
学位授与の日付	令和3年3月31日
論文名	「ガス絶縁機器の SF <sub>6</sub> ガス封止用ゴム O リングの劣化予測 ならびにガス絶縁機器の予測保全システムに関する研究」
論文審査委員	主査 安田 昌弘 副査 武藤 明德 副査 荻野 博康

## 論文要旨

ゴム材料は、弾性(エネルギー貯蔵)と粘性(エネルギー損失)という2つの異なる性質を巧みに制御してエントロピー弾性を発現することによって、他の無機および有機材料には無い大変形が可能な粘弾性を発現する。また熱や圧力で変形しても塑性変形をせず、長期にわたって繰り返し使用可能であることから、日用品から産業用途まで幅広く活用されている。重要な社会インフラである電力システムでも、ガス遮断器 (GCB) やガス絶縁開閉装置 (GIS) などのガス絶縁機器において、絶縁・消弧媒体である高圧の六フッ化硫黄 (SF<sub>6</sub>) ガスを機器内部に密封するために、ゴム O リングが多数利用されている。ガス絶縁機器は、数十年にわたる高い信頼性での運転継続が求められるため、使用される材料にも長期間の安定性が不可欠であり、その開発に当たってはこれらゴム部品についても、長期的な信頼性検証が行われている。

しかし一方、電力自由化にともなう電力会社の経営環境変化と相まって、近年では高経年設備の更新を含む投資が抑制的となる傾向があり、ガス絶縁機器についても、当初想定した設計寿命 (30 年) を超えて運転継続されているものが増加し、その健全性確保が課題となっている。特にガスシール性能の劣化予測は、ガス絶縁機器の必須機能である絶縁性能の維持に関わるとともに、地球温暖化係数の大きい SF<sub>6</sub> ガスの大気放出防止の観点からも重要性が高まっている。しかしながら、ガス絶縁機器のガスシール性能の劣化予測については、未だ体系的な方法が確立しているとは言えず、継続的な調査・研究を通じて、合理的保全方法の模索が続いている状況である。

本研究は、ガス絶縁機器におけるガスシール機能を担うゴム O リングの劣化特性を明らかにするとともに、経年ガス絶縁機器における SF<sub>6</sub> ガスリークを防止するための監視、診断システムを導入する保全方法の確立を研究の目的としている。

第 1 章では、本研究の背景および本研究に関連する世界的な技術動向ならびに既往の研究について述べるとともに、本論文の目的と構成について述べた。

第 2 章では、ガス絶縁機器に適用されるゴム O リングの長期性能寿命を推定するため、国内の 8 箇所の変電所に設置された GCB および GIS のクロロブレンゴム O リング劣化調査を実施した。その結果、経年に伴う劣化の状況は、O リングメーカーによる長期加熱実験の結果と概ね傾向は一致するものの、長期加熱実験の 25°C での結果と比べて全体的に劣化が低く、かつばらつきが非

常に大きい結果が得られた。そこで大きなばらつきを前提としたガスリークリスクの評価として、実測されたゴム O リングの圧縮永久ひずみに基づく統計解析による寿命推

定を提案し、調査したゴム O リングの寿命推定を行った。その結果、変電所ごとにばらつきが認められたが、 $+3\sigma$  上限で概ね 30 年程度の推定寿命を得た。

また採取したゴム O リングについて、機械特性変化を調べるとともに赤外分光分析を行い、ゴム O リングの劣化メカニズムを考察した。内部に  $\text{SF}_6$  ガスが充填された GCB に適用されるゴム O リングでは、無酸素の  $\text{SF}_6$  ガスと接する内側の酸素による劣化が抑制されていると推定されること、使用環境温度のばらつきに加えて、フランジ幅の違いなどによる酸素供給の違いが影響している可能性が推測されることを示した。

次に O リングメーカーによる長期加熱実験の結果を用いて、ゴム O リングの劣化メカニズムの検討を行い、劣化速度が温度の影響を強く受けることがわかった。またゴム O リングの劣化過程では、ゴム O リング中での酸素の拡散とその酸素が酸化防止剤により消費される過程が並行して進みながらゴム分子と反応しており、その見かけの拡散速度が劣化の律速となっている可能性が考えられることを述べた。また温度が刻々と変化するガス絶縁機器のゴム O リングの劣化を、より精度良く予測するため、周囲環境および通電負荷による発熱に伴う温度上昇に対応した温度変化から、ゴム O リングの劣化への寄与を反映した等価温度を算出して適用する方法を提案した。

第 3 章では、ゴム O リング加速劣化試験用の装置を新たに製作し、実験室的なゴム O リングの劣化メカニズムのより詳細な解析と、劣化モデルの実験式による相関を行うことを目的として、クロロプレンゴム O リングに接する雰囲気中の酸素の有無を考慮した加速実験を実施した。その各種物性の変化を評価することにより、劣化過程におけるゴムの物理的変化と化学的変化の寄与について考察をするとともに、ゴム O リングの寿命性能の指標である圧縮永久ひずみの経年変化に関する実験式を提案して評価した。圧縮永久ひずみを指標として、ゴム O リングの推定寿命の評価を行ったところ、過去の研究で把握された温度依存性が再現されるとともに、ゴム O リングに接する雰囲気として酸素の有無、または酸素供給の抑制の効果の影響が強く観察され、さらにゴム O リングの線径、適用時の圧縮率の影響も認められ、これらは同じく酸素供給の状況の違いに依存している可能性が推察された。

120°C での加速劣化試験において、ゴム O リングの両側が酸素の無い条件 ( $\text{SF}_6/\text{SF}_6$ ) と、両側が空気の条件 (Air/Air) を比較すると、ゴム O リングの気密性能上の寿命と考えられている圧縮永久ひずみ 80 % に到達するまでの時間は、それぞれ 300 d および 71 d と 4 倍を超える差が生じるとともに、空気と接触する条件では、酸化に起因すると推定されるクラックの発生が認められた。

またゴム硬度、引張伸び、引張強度を指標とする評価においても、同様の事象が確認されたことに加えて、各種実験条件に対する傾向より、ゴム O リングの劣化過程が、塑性変形による応力緩和、ゴム中の残余架橋剤および酸化反応を起因とする新たな架橋の生成に伴うゴム粘弾性の低下、同じく酸化反応によるゴム分子の化学結合切断が並行して生じており、雰囲気等々の条件によってそれぞれの速度が変化することがわかった。

これらの考察に基づいて、加速劣化過程におけるクロロプレンゴム O リングの圧縮永久ひずみの変化についてのモデル化を提案し、実験室的なデータを用いた近似解析を行っていくつかの条件下での実験式を検討して、物理的塑性変形に起因する項と、分子結合の切断および酸化反応に起因する項を含むゴム O リングの寿命性能の指標である圧縮永久ひずみの経年変化に関する相関式を提案し、その実用性を実証した。

第 4 章では、本論文の第 3 章で評価したゴム O リングの寿命性能の指標である圧縮永久ひずみの経年変化に関する相関式では、長期間にわたる使用されたゴム部品に対する酸素の影響について十分な相関ができないと考え、ゴム O リング加速劣化試験の結果について、酸素の浸透および拡散に着目したゴム物性変化の分析を通じて劣化メカニズムを考察した。

ゴム O リングの経年変化を予測する物理化学的モデルの構築を目的に、クロロプレンゴム O リングの加速劣化試験を実施し、ガスシール性能に関する直接的指標である圧縮永久ひずみについ

て、ゴム O リングと酸素との接触面積の大きさと劣化速度に一次の相関性のあることを確認した。またゴム O リングのガスシール性能に対応する直接的指標となる圧縮永久ひずみの経時的な増加について、スプリングとダッシュポットで表現される物理的モデルを提案した。

圧縮永久ひずみの増加として初めに進行する物理的応力緩和過程については、スプリングとダッシュポットを直列に接続した Maxwell モデルでの変位により表記し、残余架橋剤および浸透する酸素による新たな架橋形成については、スプリング要素を追加する並列スプリングモデルにより表記した。またこのモデルを雰囲気異なる 3 通りの条件での加速劣化試験により実測したクロロプレンゴム O リングの圧縮永久歪率データに適用して評価を行うことにより、その妥当性が確認された。

第 5 章では、実フィールドにおける高経年ガス絶縁機器の詳細なガスシール劣化状況を把握することを目的に、経年 32 年の GIS について解体調査を実施し、フランジの腐食の様相の調査を行うとともに、ガスリークの監視方法の検証を目的として、GIS 実機のガス圧力を 1 年間にわたって監視した。フランジの腐食調査では、フランジ接合面およびボルト穴の防水施工の状態に応じて、水の浸入によるフランジ面腐食が進行する可能性の高まることを確認し、フランジに適用されている防水技術に対応した腐食発生リスク評価が有効であることを示した。

GIS のガス圧力監視では、ガス圧力センサで測定したガス圧力データと、温度ロガーにより収集した GIS 表面の温度データを用いてガス圧力の温度補償を行い、温度補償したガス圧力について擾乱因子の影響を軽減するためのデータ処理方法を考案して評価を行った。データフィルタリングとして、(1)日中の温度変動、(2)日射影響、(3)気象の影響に対してフィルタリングを行った結果、補償ガス圧力の分布は、約 1/5 に低減できていることが確認できた。またフィルタリングを行った補償ガス圧力データを使用して 1 年間のガス圧力の勾配の確率分布を求めることで、GIS のガスリークとして規格で規定された許容限界である 0.5%/年を超えるガスリークの有無を判定する方法を考案して、判定方法としての有効性の評価を行った。また、測定した GIS 表面の温度データから、ゴム O リングの劣化の等価温度を試算して評価を行った。最終的には、ゴム O リングの推定寿命とフランジ腐食の可能性よりガスリークのリスクを評価し、そのリスクに応じてガスリーク監視を導入する保全の考え方を提案した。

第 6 章では、本論文の総括を行い、得られた成果を要約した。

## 審査結果の要旨

本論文は、ガス絶縁機器におけるガスシール機能を担うゴム O リングの劣化特性を明らかにするとともに、経年ガス絶縁機器における SF<sub>6</sub> ガスリークを防止するための監視、診断システムを導入する保全方法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

(1) ガス絶縁機器に適用されるゴム O リングの長期性能寿命を推定するため、国内の変電所に設置されたガス遮断器 (GCB) やガス絶縁開閉装置 (GIS) の実測されたゴム O リングの圧縮永久ひずみに基づく統計解析による寿命推定を提案し、調査したゴム O リングの寿命推定を行い、+3 $\sigma$  上限で概ね 30 年程度の推定寿命を得た。次に、ゴム O リングの劣化過程では、ゴム O リング中での酸素の拡散とその酸素が酸化防止剤により消費される過程が並行して進みながらゴム分子と反応しており、その見かけの拡散速度が劣化の律速となっている可能性を明らかにした。また、周囲環境および通電負荷による発熱に伴う温度上昇に対応した温度変化から、劣化への寄与を反映した等価温度を算出して適用する方法を提案した。

(2) ゴム O リング加速劣化試験用の装置を新たに製作し、実験室的なゴム O リングの劣化メカニズムのより詳細な解析と、劣化モデルの実験式による相関を行った。劣化過程におけるゴムの物理的変化と化学的変化の寄与について考察をするとともに、ゴム O リングの寿命性能の指標である圧縮永久ひず

みの経年変化に関する実験式を提案して評価した。実験室的なデータを用いた近似解析を行っていくつかの条件下での実験式を検討して、物理的塑性変形に起因する項と、分子結合の切断および酸化反応に起因する項を含むゴム O リングの寿命性能の指標である圧縮永久ひずみの経年変化に関する相関式を提案し、その実用性を実証した。さらに、長期間にわたる使用されたゴム部品に対する酸素の影響について、酸素の浸透および拡散に着目したゴム物性変化をモデルに組み込み、スプリングとダッシュポットで表現される物理的モデルを提案した。このモデルを雰囲気異なる 3 通りの条件での加速劣化試験により実測したクロロプレンゴム O リングの圧縮永久歪率データに適用して評価を行うことにより、その妥当性を確認した。

(3) 実フィールドにおける高経年ガス絶縁機器の詳細なガスシール劣化状況を把握することを目的に、経年 32 年の GIS について解体調査を実施し、フランジの腐食の様相の調査を行うとともに、ガスリークの監視方法の検証を目的として、GIS 実機のガス圧力を 1 年間にわたって監視した。フランジの腐食調査では、フランジに適用されている防水技術に対応した腐食発生リスク評価が有効であることを示した。GIS のガス圧力監視では、(1)日中の温度変動、(2)日射影響、(3)気象の影響に対してフィルタリングを行った結果、補償ガス圧力の分布は、約 1/5 に低減できていることが確認できた。また、測定した GIS 表面の温度データから、ゴム O リングの劣化の等価温度を試算し、ゴム O リングの推定寿命とフランジ腐食の可能性よりガスリークのリスクを評価・監視する保全の考え方を提案した。

以上の諸成果は、経年ガス絶縁機器の監視、診断システムを導入する保全方法に関する重要な知見を与えており、本分野における学術・産業上の発展に大きく貢献するものである。また、申請者が今後自立して研究活動を行う上で必要とされる能力と学識が備わっていることを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。