

報告番号	甲 第 13302 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 **SF₆ ガス遮断器におけるノズルアブレーション現象とその促進による熱的遮断性能向上に関する研究**
(Study on Nozzle Ablation Phenomena in SF₆ Gas Circuit Breaker and Thermal-Interruption Performance Improvement by Its Promotion)

氏 名 佐藤 基宗

論 文 内 容 の 要 旨

電気は現代社会を支える基盤エネルギーであり、その重要性は世界的に高まっている。電力送変電網では、SF₆ ガス遮断器(GCB: Gas Circuit-Breaker)が設置され、その責務の一つは送変電網の事故時に大電流を遮断することである。GCB は、電流遮断時に生じるアーク放電へ高圧力の SF₆ ガスを吹き付けて消弧し、電流を遮断する。GCB はパuffァシリンドとピストンで作られる空間(パuffァ室)を備えており、高圧力の SF₆ ガスはパuffァ室の機械的圧縮およびパuffァ室へのアークの熱エネルギーの取り込みなどによって作られる。消弧タイミングである電流零点前後数 μ s において、上記ガス吹付けによるアーク冷却で導電性を消失させる能力を GCB の熱的遮断性能と呼んでいる。熱的遮断性能は、パuffァ室に遮断過程で蓄積された SF₆ ガスの圧力に依存する。電流遮断過程において、アークは高分子 PTFE(Polytetrafluoroethylene)製のノズル内部で発生する。そのため、ノズルはアークによって活発に溶発(アブレーション)して蒸気を生じ、これがアークへのガス吹付け圧力の上昇へ寄与する。

本研究は、この電流遮断過程における GCB ノズルのアブレーション現象に着目して遂行したものであり、下記事項を達成することによる GCB の熱的遮断性能向上を目的とした。

- ・ SF₆ アークによる PTFE アブレーション要因の解明とノズルアブレーション質量予測式の導出

- ・ノズルアブレーションの効果を考慮した GCB パuffァ室でのガス圧力の過渡推移予測法の開発
- ・ノズルアブレーション現象を活用した GCB の熱的遮断性能向上手法の提案

第1章では、研究の背景、目的、および研究方針を述べている。

第2章においては、SF₆アークによる PTFE アブレーション要因を見出すことから着手した。小型実験装置を用いて PTFE テストピースを SF₆アークへ暴露させ、テストピースのアブレーション質量を測定した。次に、温度 20,000 K に達する SF₆アークからの輻射流束パワーを振動子強度の面から波長分析し、さらに Lambert-Berr 法則の適用によって PTFE の光吸収率を導出した結果、PTFE が吸収する全輻射強度と PTFE アブレーション質量が比例することを見出した。このことから、PTFE アブレーションが、アークからの熱伝導パワーではなく、アーク輻射流束パワーの吸収によって生じることを伝熱物理に基づいて実証した。

次に、アーク周辺空間に高密度で存在する SF₆分子の輻射吸収を考慮して、輻射パワー \dot{F}_{Ra} とノズル表面への到達パワー ϕ_w に関する輻射方程式を構築した。この方程式の解析解を解き明かし、その結果、輻射吸収に起因するアブレーション質量 M_1 を、電流 I およびノズル半径 R_w により定式化することに成功した。得られた関数式はアブレーション質量の実測値を誤差 10%程度の高精度で説明できた。

第3章においては、ノズルアブレーションの効果を考慮した GCB パuffァ室でのガス圧力の過渡推移予測法開発に取り組み、まず第2章で定式化した PTFE アブレーション質量予測式を、ノズル半径 R_w およびアーク電流 i の経時変化を考慮する形に拡張した。

次に、パuffァ室を具備したモデル SF₆ ガス遮断器で大電流 30 kA の遮断実験を行い、PTFE 製ノズルアブレーションの質量を測定したところ、上記拡張されたノズルアブレーション質量予測式が測定質量を誤差 20%以下で予測できることを示した。これにより、ノズルが吸収する輻射パワーの解析解から導出されたノズルアブレーション質量予測式が、特定のアーク装置に依存しない汎用性の高い式であることを検証した。

さらに、ここで導出されたアブレーション質量予測式とガス流速式などを組み合わせることによって、GCB 遮断過程におけるパuffァ室圧力上昇プロセスの計算手法を提案した。電流遮断過程で生じるノズルアブレーション蒸気の質量とエンタルピーを上記質量予測式によって表現し、7つの空間から構成されていると見なした GCB 消弧室モデル内部のガス圧力計算式に展開させた。その結果、計算によって得られた圧力上昇値は電流遮断過程で測定されたパuffァ室圧力の過渡推移を十分に説明できた。これにより、PTFE アブレーション蒸気質量および蒸気エンタルピーの消弧室内部空間への入力式が実現象を表現する上で正しいことが示された。加えて、モデル SF₆ ガス遮断器の電流遮断過程では、パuffァ圧力上昇値の約 40%がノズルアブレーションの効果によることがわかった。

上記計算手法は、通常ノズルアブレーション現象を考慮する際に使用される2次元や3次元の消弧室解析モデルを必要としない。したがって、GCB 消弧室設計のために行うアーク挙動解析における計算リソースの削減と開発効率向上に貢献できると考えられる。

第4章においては、ノズルアブレーション現象を活用したGCBの熱的遮断性能向上手法の開発に取り組み、同手段を実現するのに適したポリエーテル(GPE)を見出した。

第3章での検討結果は、電流遮断過程におけるノズルアブレーションのパuffァ室圧力への寄与が大であることを示している。すなわち、アークへのガス吹き付け圧力に依存しているGCBの熱的遮断性能の向上には、ノズルアブレーション促進によるパuffァ室圧力増大が効果的である。この考えの基に、アークによってアブレーションしやすい樹脂を探索し、その結果としてGPE(GCB-PolyEther)と名付けたポリエーテルを見出した。GPEはポリマー分子の主鎖にエーテル結合(-C-O-C-)を持つとともに、ポリマー分子構造にH原子を含まない。特にH原子を含まないことが特徴であり、これは大電流遮断過程でのフッ化水素(HF)の生成を防止できる。

このGPEのアブレーション質量を第2章の検討に用いた小型実験装置で測定し、さらにSF₆アーク暴露時の周囲空間のガス圧力上昇効果、およびアブレーション質量のアーク電流などに対する依存性を評価した。その結果、GPEアブレーションによる周囲空間のガス圧力上昇効果は、従来のノズル材料であるPTFEより1.3倍高くなった。加えて、同じアーク暴露条件であればGPEのアブレーション質量はPTFEの約2倍多くなることを明らかにし、GPEアブレーション質量が第2章で定式化した輻射パワー ϕ_{rw} に比例することを見出した。最後に、GPEのアブレーション質量が輻射パワー ϕ_{rw} に比例する特性に基づいて、GPEアブレーションによってパuffァ室圧力向上効果を得やすいGCBノズル構造を提案した。

第5章では、本研究の成果と今後の展望について総括する。