

氏名	水野 康太
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第388号
学位授与の日付	平成27年3月25日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	電力用油入変圧器における硫化腐食メカニズムの解明と診断技術の開発
論文審査委員	主査 教授 匹田 政幸
	〃 三谷 康範
	〃 小森 望充
	准教授 大塚 信也
	准教授 豊田 和弘

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

近年、主に海外に設置されている電力用油入変圧器において、絶縁紙上に析出した硫化銅が原因となって絶縁不良を引き起こす不具合が報告されている。この硫化腐食問題による機器の品質問題は深刻化し、International Electrotechnical Commission（国際電気標準会議、以下、IEC）のTC10会議では硫化腐食問題に関する状況と検討結果の報告がされ、International Council on Large Electric System（国際大電力システム会議、以下、CIGRE）では硫化腐食のメカニズム、診断方法、抑制方法とリスクアセスメントのガイドラインを作成すべく、国際大電力システム会議CIGRE A2-32が設立された。本論文は、CIGRE活動の一環として、電力用油入変圧器の硫化腐食の原因究明および診断方法の開発に取り組んだ結果をまとめたものである。

第1章は、『序論』であり、電力用油入変圧器の硫化腐食問題に対するこれまでの研究動向と課題について記述する。硫化銅生成の原因物質は金属不活性剤として絶縁油へ添加されたジベンジル・ジスルフィド Dibenzyl disulfide（以下、DBDS）であることが報告されている。硫化銅生成反応は、DBDSがコイル銅と反応してCu-DBDS錯体を形成し、この錯体は絶縁油へ溶解して絶縁紙へ移行する。その後、ラジカル反応によりベンジルラジカルとベンジルスルフェニルラジカルが放出されて絶縁紙上で硫化銅に分解するという反応メカニズムも明らかとなっている。しかしながら、絶縁油にDBDSが添加されていてもコイル銅上には確実に硫化銅が析出するものの、硫化銅が絶縁紙に析出する油とそうでない油が存在することが分かった。本論文の1つ目の課題は、絶縁紙での硫化銅析出を促進する影響因子を明確にし、硫化腐食メカニズムを解明することである。

絶縁油の硫化腐食性試験方法として、IEC 62535 が規定されている。この試験方法は絶縁油へ紙巻銅板を浸漬して加熱した後、絶縁紙と銅板の目視観察で硫化銅析出の有無を判断する方法である。この硫化腐食性試験方法は、絶縁油への DBDS 添加の有無を簡易的に判別する手法として非常に有効である。しかしながら、絶縁油へ添加された DBDS はコイル銅と反応することで消費されるので、既設器では DBDS が枯渇している場合がある。この場合、既設器から採取した絶縁油の硫化腐食性は診断することができなくなる。本論文のもう 1 つの課題は、既設器から採油した絶縁油についても硫化銅生成の有無を診断する手法を提供することである。

第 2 章は、『絶縁紙への硫化銅析出メカニズムの解明』について記述した。絶縁紙への硫化銅析出の影響因子を明確にするため、絶縁油が曝され雰囲気と酸化防止剤である 2,6-Di-tert-butyl-p-cresol (以下、DBPC) の絶縁油への添加の影響を検証した。その結果、酸素と DBPC の影響で絶縁紙上の硫化銅析出が促進されることが明確となった。先に述べた硫化銅生成反応では Cu-DBDS 錯体はラジカル反応で硫化銅へ分解するが、錯体が分解しラジカルを放出した瞬間に他のラジカルがあれば、硫化銅にならず錯体へ戻ることができる。DBDS は酸素によってラジカルを放出して DBPC ラジカルへと変化するため、Cu-S-DBPC 錯体が形成すると考えられる。その結果、絶縁油中での錯体寿命が長くなることで絶縁紙へ硫化銅が移行しやすくなると解釈された。

第 3 章では、『既設器における硫化銅生成の診断技術開発』について記述する。本診断方法は、先に述べた Cu-DBDS 錯体と Cu-S-DBPC 錯体が硫化銅へ分解する際に放出されるベンジルラジカルとベンジルスルフェニルラジカルから生成される硫化銅副生成物を絶縁油から検出する方法である。IEC 62535 を模擬した硫化銅生成試験を実施し、生成される硫化銅生成物の種類を調査した。その結果、ベンジルラジカル同士の反応生成物である Bibenzyl (以下、BiBz) が、ベンジルラジカルとベンジルスルフェニルラジカルの反応生成物である Dibenzyl sulfide (以下、DBS) が酸素非存在下で生成することが分かった。また、酸素存在下ではベンジルラジカルがベンジルペルオキシラジカルへ酸化され、その結果、ベンジルアルコールが生成されることが明らかにした。その後、一般的なアルコールの酸化過程を経てベンジルアルコールはベンズアルデヒド、安息香酸の順に変化する。さらに、絶縁油中に DBPC が添加されている場合では、ベンジルラジカルと DBPC ラジカルの反応生成物が硫化銅副生成物として検出されることを明らかとした。これらの硫化銅副生成物は DBDS が枯渇した後も絶縁油から長期間検出可能であるため、既設器の硫

化銅生成を診断する指標となる。

第5章には、『結論』として本研究で得られた成果をまとめ、硫化腐食に対する電力用油入変圧器のメンテナンス手法を提案する。第1ステップとして、絶縁油へのDBDS添加有無を確認するため、既設器から絶縁油を採取してDBDS、もしくは硫化銅副生成物を分析することを提案する。これらの化合物のいずれかが検出された場合には、機器内で硫化銅が生成していると診断できる。検出されなかった場合は、硫化銅生成の危険性が皆無と診断できる。第2ステップでは、絶縁紙への付着リスクを判定する。絶縁油にDBPCが添加されている変圧器や酸素の影響を受けやすい開放型変圧器では、絶縁紙への硫化銅析出リスクが高まると推測する。これらのステップを経て硫化銅生成のリスクを判断することで、第3ステップでBTA(Benzo-tri-azole)を添加した絶縁油への油の入れ替えを提案している。

学位論文審査の結果の要旨

以上示した通り、本論文は、電力用油入変圧器において新しいタイプの硫化腐食による変圧器の不具合を引き起こしている絶縁紙上における硫化銅析出メカニズムを解明し、これを展開して、既設の油入変圧器における硫化腐食に対して、酸素の有無や酸化防止剤の影響および硫化銅副生成物の発生などを明らかにしており、学術的な価値を有している。さらに、解明した硫化腐食メカニズムに基づいて新たな診断手法および硫化腐食抑制法を提案し、変圧器のメンテナンスフローを構築しており、産業応用面からも高い価値を有し、博士学位論文として十分であると判定された。

また、審査会および公聴会において、変圧器のメンテナンスフロー時の酸素の有無の影響、硫化腐食抑制剤減少時の役割・抑制効果持続時間、現状の変圧器油に混入している硫化腐食の主原因となるDBDSの量、硫化銅が付着する場所など（IEC試験法は過熱のみを与えるが電気的作用の硫化腐食に与える影響、過熱試験後の硫化銅の付着の分析・定量評価など）について多くの質問がなされたが、いずれも適切な回答がなされ、質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。