

電力用油浸紙コンデンサの 経年劣化について

Properties of Aged Oil Impregnated Paper Power Capacitor

緒志哲郎*	塚尾茂之*
T. Oshi	S. Tsukao
石井正*	板橋悟**
T. Ishii	S. Itahashi
寺尾薫***	神庭勝****
K. Terao	M. Kamba

Synopsis

The oil impregnated paper capacitor had been produced until 1982, and most capacitors are operated still. Because the operated years pass 20 years or more, and the troubles occurred in some operated capacitors, the research of the deterioration mechanism and development of diagnosing method for the operated capacitor have been continued.

In this paper, the chemical composition of the insulating oil and its chemical deterioration under the high electrical field are investigated, and the accelerated life test is carried out by using the miniature capacitor in order to verify the deterioration mechanism.

As the result, it is verified that the wax (deterioration product) is generated from the insulating oil by the high electrical field at the edge of electrodes, and the electrical properties of the capacitor are deteriorated by the wax. In addition the breakdown occurred in the damaged part at the insulating paper. These results lead to construct the flow diagram of the deterioration and breakdown process of the oil impregnated paper capacitor.

1. まえがき

電力用油浸紙コンデンサは昭和57年まで製作され、現在でも多くの機器が調相用として運転されている。しかし、使用年数が20年以上経過し、過温度上昇や絶縁破壊に至った例が散見されるようになってきた。

電力用油浸紙コンデンサの特性劣化については二、三の検討例があり⁽¹⁾⁽²⁾、定性的には油中溶存ガスの発生や部分放電の発生が劣化の進展に影響を及ぼしていると考えられている。

筆者らは、経年劣化した油浸紙コンデンサの劣化診断手法確立のためには、これらの電力用油浸紙コンデンサの経年劣化メカニズムの解明が重要であるとの観点から、経年フィールド品の特性と照らし合わせながら、絶縁油の基本特性の再検討や、モデルコンデンサによる課電劣化試験を実施した。その結果、経年劣化メカニズムと劣化進展フローを提案するに至った。

2. 油浸紙コンデンサ経年品の特性例

長年月使用されてきた油浸紙コンデンサについて調査すると、油中ガス分析例を見ると水素ガスが多く発生しており、CO、CO₂などには特徴的な傾向が現れていないこと、電気特性については高温損失特性の増大や絶縁抵抗の低下が確認され、部分放電についても定格電圧で検出された例もあった。ここでは、いくつかの例を示し、特性劣化項目について述べる。調査した油浸紙コンデンサの経年フィールド品を表1に示す。まず、劣化指標を油中溶存水素ガスとし、劣化の程度が小さいものから大きいものについて例を示した。

部分放電測定結果を表2に、損失率 - 温度特性、絶縁抵抗 - 温度特性を図1、2に示す。

経年フィールド品の電気特性のうち、部分放電については、定格電圧において間欠部分放電が発生することが確認された。損失率は、高温時に増大する傾向があり、絶縁抵抗も全体的に低下している。

* 東京電力株式会社
** コンデンサ事業部 技術グループ
*** 技術開発研究所 材料研究センター 機能材料開発 第1グループ
**** 技術開発研究所 材料研究センター 誘電体材料開発グループ

このようにフィールドで20年以上運転されてきたコンデンサの特性にはバラツキがあるものの、明らかな劣化傾向が認められる。劣化傾向と運転年数との関係を見ると、使用年数42年の製品が最も特性が良く、使用年数22年と27年の製品では、劣化の程度が比較的小

表1 経年フィールド品

記号	油中H ₂ 量	定 格	使用年数
No.1	31ppm	6.6kV 3 50Hz 300kVA	42
No.2	165ppm	6.35kV × 2 1 50Hz 1667kVA	27
No.3	357ppm	6.35kV × 2 1 50Hz 1667kVA	22
No.4	890ppm	6.35kV × 2 1 50Hz 1667kVA	27

表2 経年フィールド品の部分放電発生状況

記号	定格電圧での部分放電発生状況
No.1	検出されず
No.2	僅かな間欠放電が発生
No.3	検出されず
No.4	間欠部分放電発生

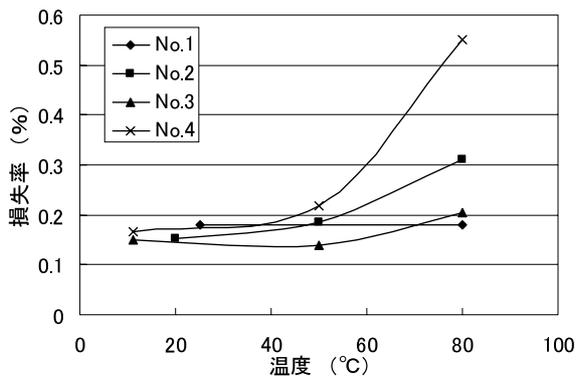


図1 経年フィールド品の損失率 - 温度特性

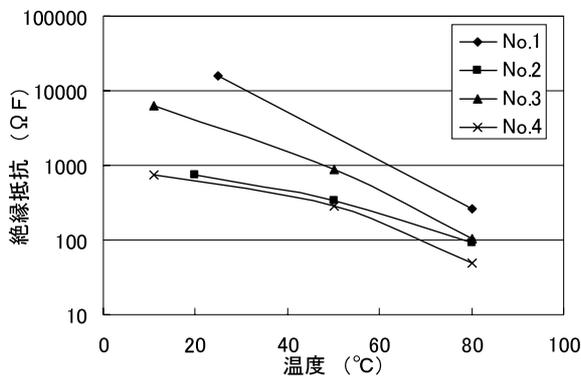


図2 経年フィールド品の絶縁抵抗 - 温度特性

さな場合や大きい場合があり、使用年数との相関はない。一方、油中溶存水素ガス量と特性劣化との相関については、発生ガス量の多いものほど特性低下が大きい傾向がある。

これら経年劣化について、そのメカニズムを探るため、絶縁油の特性検証および、モデルコンデンサでの試験を行った。

3. 使用絶縁油の特性

油浸紙コンデンサに使用されていた鉱物油は、国産油の枯渇問題等により、原産地が変更されるなどの変遷を辿っている。表3に鉱物油の変遷を古い順に記し、代表特性を示した。鉱物油のベースとなる原油は、国産油から南方系油、中東系油と変わってきており、それに伴って絶縁油成分が変化したため、水素ガス吸収性の向上や流動点改善のためにアルキルベンゼン (AB) を添加した混合油が用いられてきた経緯がある。なお、油浸紙コンデンサは1987年に製造中止となっており、中東系油は使用されていない。

コンデンサ用絶縁油に求められる性能として最も重要視している項目として水素ガス吸収性があるため、表3の絶縁油について試験を行った。その結果を図3に示す。

図3より、水素ガス吸収性は従来から報告されているように%Caと相関があり、南方系油が優れており、国産油が劣っている。

一方、経年フィールド品の調査の結果では、コンデンサの劣化は国産油が最も進行が遅く、南方系油の進行が速いことが確認されている。例えば、表1において42年を経年した製品 (No.1) には国産油が使用されているが、22年、27年を経過した製品には南方系油が使用されており、水素濃度に歴然とした差が認められる。すなわち、劣化速度は水素ガス吸収性の良否に依存していないこととなる。

そこで、南方系油の成分比に着目すると、%Cp (パ

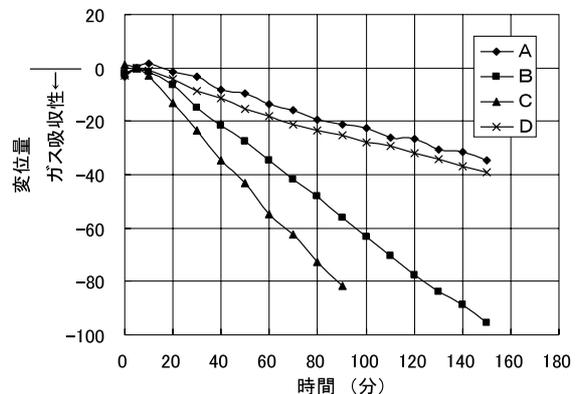


図3 鉱物油の水素ガス吸収性

表3 鉱物油の変遷と特性

		国産油	国産油 + アルキルベンゼン	南方系油 + アルキルベンゼン	中東系油 + アルキルベンゼン
記号		A	B	C	D
比重		0.889 ~ 0.891	0.877 ~ 0.886	0.875	0.849
動粘度 (cst)	30	12.45 ~ 12.95	10.00 ~ 13.50	11.04	7.28(at 40)
	75	3.30 ~ 4.18	3.20 ~ 3.80	3.22	2.11(at 100)
引火点()		137 ~ 138	136 ~ 142	134	152
流動点()		- 40 ~ - 52.5	- 32.5 ~ - 40	- 32.5	- 30
at 80		-	2.14 ~ 2.24	2.18	2.12
tan (%)at 80		-	0.003 ~ 0.04	0.002	0.003
(cm)at 80		9.1 × 10 ¹⁴ ~ 1.2 × 10 ¹⁵ (at 50)	3.0 × 10 ¹⁴ ~ 5.0 × 10 ¹⁵	6.73 × 10 ¹⁵	9.6 × 10 ¹⁵
破壊電圧(kV/2.5mm)		54.2 ~ 55.6	60 ~ 70	59.8	70以上
全酸価(mgKOH/g)		0.003 ~ 0.005	0.002	0.002	0.002
安定度 120 75H	スラッジ(%)	-	0.16 ~ 0.18	0.13	0.01
	酸価 (mgKOH/g)	0.009 ~ 0.050	0.20 ~ 0.30	0.21	0.05
成分比	%Ca	11.8	17.2	16.8	8.3
	%Cn	41.7	34.8	28.8	29.1
	%Cp	46.5	48.0	54.4	62.6
現行規格		JIS 1種1号	JIS 7種1号	JIS 7種1号	JIS 7種1号

ラフィン成分)が多い特徴が上げられ、流動点が他よりも高いことから、分子量の大きいn-パラフィンが多いことが予想される。なお、中東系油では、脱ロウ処理が施されているため分子量の大きなn-パラフィン成分は少ないとされている。これらの成分が課電劣化と関係があるとの仮説を立て、試薬を用いて、既知の化学構造を有する物質での検討を試みた。

4. 絶縁油の化学構造と高電界反応性

課電劣化は、高電界下による脱水素反応が基本となっていると想定され、水素ガス吸収性試験において吸収性が認められない場合、すなわち「水素ガス発生性」を測定することで検討した。

絶縁油成分の内、ガス発生が考えられる成分は、n-パラフィン、iso-パラフィン、ナフテンの三種でありそれぞれの試薬を入手して検討した。試験結果を図4に示す。同図において、n-パラフィンの脱水素反応が最も起こり易い結果が得られており、次いでナフテン、iso-パラフィンの順となった。

一般に炭化水素系化合物において、分解反応は結合解離エネルギーで整理されることから、3級炭素結合水素を有するiso-パラフィンの反応性が高くなるはずであるが、結果は逆となった。

この様に、試薬を用いた試験によってn-パラフィン

の水素ガス発生性が高いことが確認でき、n-パラフィン成分を多く含む南方系油を使用した油浸紙コンデンサの劣化との相関性が得られた。

鉱物油の分解ガスとしては、400 以下の熱エネルギーが加わった場合には、プロパンやプロピレンが発生し易く、これよりも温度が高くなるほど低分子量のエチレン、エタン、メタンや水素が多く発生すると報告がある。経年フィールド品では水素ガスが多く発生していることから、コンデンサの電極端部の高電界部分での部分放電によって高いエネルギーが与えられ、鉱物油が分解して水素が発生したのと考えられる。

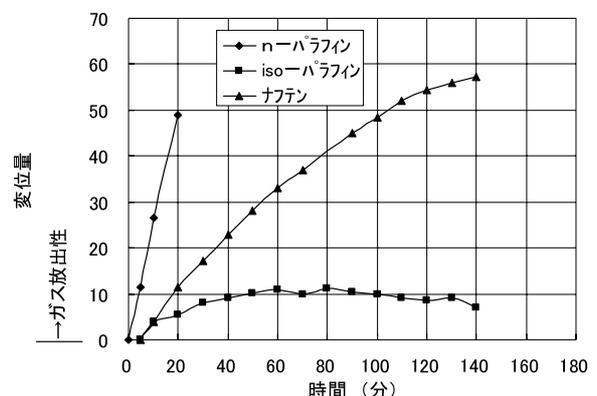


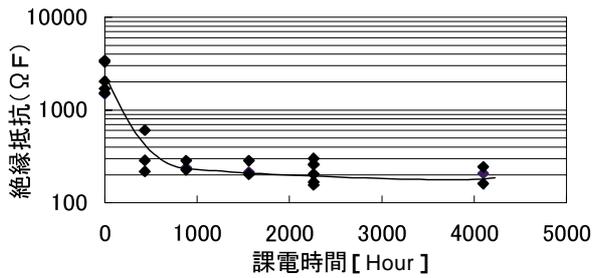
図4 炭化水素系試薬の水素ガス発生

5. モデルコンデンサによる課電劣化試験

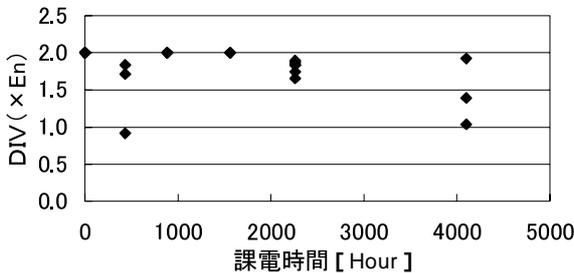
5.1 モデルコンデンサの仕様

経年フィールド品の劣化状況が鉱物油の変遷に依存している傾向を再現するため、モデルコンデンサによる課電を実施した。モデルコンデンサは、幅75mm長さ200mmの絶縁紙10枚にアルミ箔電極箔2枚を重ね合わせて巻回し、ガラス板で圧縮した扁平素子構造とした。有効電極面積は35mm×140mm、絶縁構成は5枚であり、油浸後の容量は約1nFである。静電容量を小さくし、部分放電検出感度を向上させると共に、電極端部の影響が現れ易い構造となっている。

含浸した絶縁油は、製造当時と同等な新油を入手することが出来ないため、経年フィールド品から採取した絶縁油を脱気処理して使用した。絶縁紙については、製造当時と同等材料を入手して使用した。また、検証目的に応じて、経年フィールド品からサンプリングした絶縁紙やアルミ箔を用いた試験も実施した。



(a) 絶縁抵抗の推移



(b) 部分放電開始電圧の推移

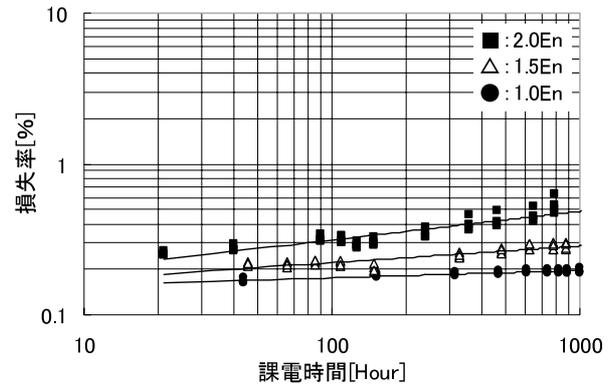
図5 モデルコンデンサの1.8En課電による特性変化

5.2 課電劣化試験結果

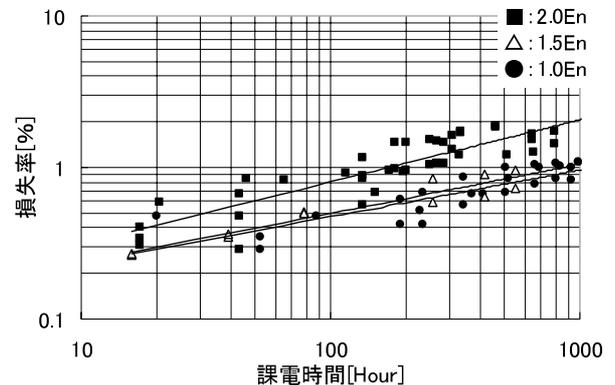
劣化要因については、主として熱的劣化と電氣的劣化が考えられるが、経年フィールド品の調査結果より油中溶存水素ガスの増加が見られ、電氣的劣化の可能性が高いことが確認されている。このため、課電劣化試験を実施した。

モデルコンデンサによる課電劣化特性を把握するため、新しい絶縁紙に南方系油を含浸したモデルコンデンサを1.8Enで課電し、絶縁抵抗、部分放電開始電圧の変化を測定した。その結果を図5(a)(b)に示すが、課電時間と共に絶縁抵抗の低下と部分放電開始電圧の低下が認められ、経年フィールド品と同様の現象が再現できた。

更に損失率について国産油と南方系油の違いを確認するために、それぞれの絶縁油を含浸したモデルコンデンサを課電して検討した。課電は、1.0En、1.5En、2.0Enで実施した。試験結果を図6(a)(b)に示す。



(a) 国産油ベース鉱物油



(b) 南方油ベース鉱物油

図6 鉱物油の種類による損失率増加の違い

同図において、それぞれの絶縁油共に、課電により損失率が増加しており、両対数グラフ上で直線的な増加傾向を示している。絶縁油の種類による違いを比較すると、国産油よりも、南方系油の方が損失率の悪化が速い。また、課電電圧による違いでは、課電倍率が高いほど、損失率の増加傾向が速い。この様に、課電によって損失率が増加し、南方系油の方が国産油よりも劣化速度が早いことが再現できた。

モデルコンデンサにより、経年フィールド品の電気特性の低下状況と、絶縁油の種類による劣化進行速度の違いが再現できたため、絶縁破壊の最終形態についてもモデルコンデンサで検討することとし、更に高い課電倍率での試験を実施した。その結果、いくつかのサンプルが絶縁破壊した。その破壊品を解体すると、劣化生成物がアルミ箔電極表面や絶縁紙に多量に付着していた。この劣化生成物は、アセトン溶剤に不溶でトルエン溶剤に溶解性のあるもので、粘着性のものから固形物まで幅広い形態を示した。

この劣化生成物の成分特定のためにFT-IR分析やGPC分析を行った。図7に劣化生成物のFT-IRスペクトルを示す。同図のスペクトルおよびGPC分析の結果、劣化生成物は、僅かに酸化した高分子量パラフィン、即ちワックスであることが判明した。

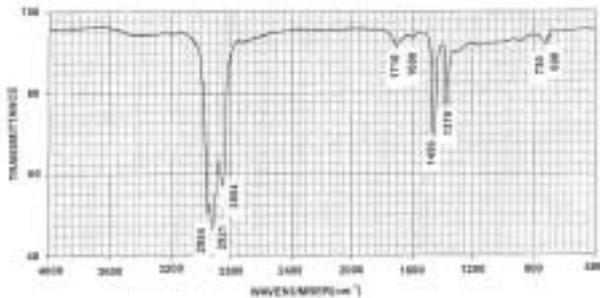


図7 劣化生成物のFT-IR分析結果

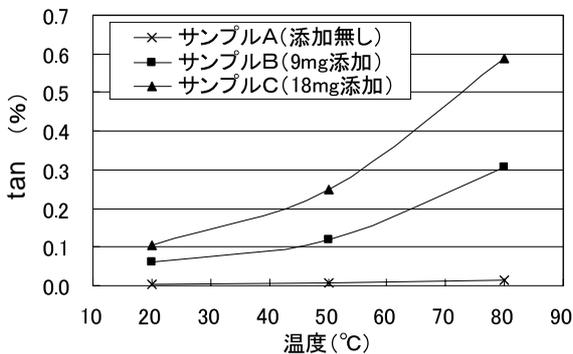


図8 劣化生成物添加鉱物油のtan

5・3 劣化生成物（ワックス）のコンデンサ特性への影響

モデルコンデンサの高課電倍率試験によって、劣化生成物（ワックス）が発生することが確認された。劣化生成物がコンデンサ特性にどのような影響を及ぼすかを確認するため、回収した劣化生成物を混入させた絶縁油やモデルコンデンサを作製し、電気特性を測定した。

(1) 絶縁油のtan δ への影響

劣化生成物を添加した鉱物油（基油は現行油）のtan δ - 温度特性を測定した結果を図8に示す。なお、添加量は絶縁油80gに対し9mg (112ppm)、18mg (225ppm) とした。

劣化生成物添加油のtan δ は、添加量に依存して増大しており、高温になるほどその差が大きくなっている。この傾向は、経年フィールド品の損失率 - 温度特性と一致している。劣化生成物は先に述べた様に高分子量で粘性の高い物質であることから、温度上昇により低粘度化して導電損失が大きくなり、高温での損失率が特に大きくなるものと考えられる。

(2) モデルコンデンサの損失率への影響

劣化生成物をモデルコンデンサのアルミ電極端および、絶縁紙に付着させた場合の損失率特性を測定した結果を図9に示す。

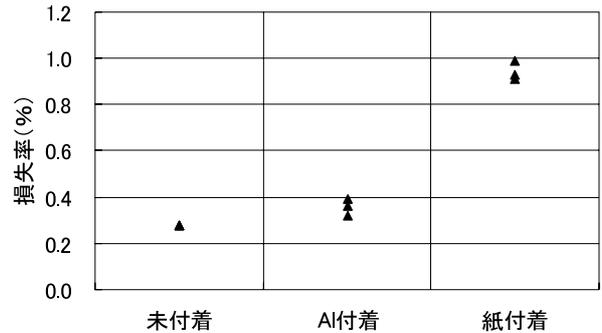


図9 劣化生成物混入モデルコンデンサの損失率

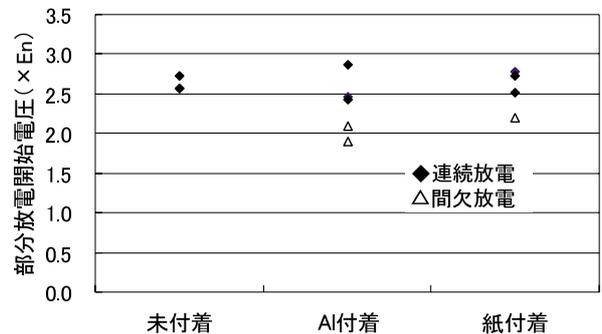


図10 劣化生成物混入モデルコンデンサの部分放電

アルミ電極端に付着させた場合には損失率の増加は比較的少ない。絶縁紙に付着させた場合には、損失率が著しく増大している。損失率は誘電体全体の平均値として現れるので、絶縁紙の広い範囲に渡って劣化生成物が付着することによって損失率を上昇させているものと考えられる。

したがって、実器での損失率の増大はアルミ箔電極の電極端のみならず、素子内部の絶縁紙部分へ劣化生成物が拡散・付着しているものと想定される。

(3) モデルコンデンサの部分放電特性への影響

損失率への影響を調査したサンプルにおいて、部分放電特性を測定した。その結果を図10に示す。

アルミ箔端部および絶縁紙に付着させた場合の両者において、間欠部分放電が発生した。ただし、連続放電発生電圧は劣化生成物が付着しても低下せず、ほぼ初期特性を維持する結果となった。

以上の結果から、劣化生成物が絶縁油中に発生した場合や、アルミ箔端部や絶縁紙に付着した場合に損失率が増大することが確認された。また、部分放電特性については、アルミ箔電極端に劣化生成物が付着すると間欠部分放電が発生することが確認できた。この様に、劣化生成物によって、経年フィールド品の特性劣化と同様の現象を再現させることができた。

5・4 モデルコンデンサの絶縁破壊の様相

経年フィールド品では、高温時の損失率の増大と定格電圧での部分放電発生があり、運転中の過温度上昇で絶縁破壊に至る場合や、投入時の過電圧により絶縁破壊に至る二通りのケースが発生した。

前者においては劣化生成物が生成・蓄積されて、損失率が悪化し、温度上昇に至ることで理解できる。一方、後者については、その進展について不明確な部分が多い。

そこで、経年フィールド品から、部分放電による劣化痕跡と考えられる部位（アルミ箔端で絶縁紙にスジ状変色部がある箇所、アルミ箔の一部が欠損した部分）を切り取り、モデルコンデンサを製作して課電劣化試験を行った。課電時には、間欠部分放電の発生が常時確認できる1.7Enで行った。

図11に絶縁破壊したモデルコンデンサの一例を示す。絶縁破壊した部分の周辺には、劣化生成物（ワックス）が多量に発生していた。劣化生成物は固形物に変化しており、重縮合反応が進行した様子がうかがわれた。

絶縁破壊箇所はワックスに囲まれた部分の平滑部で確認でき、局部的に絶縁紙5枚を貫通していた。また、アルミ箔端部の欠損部分を詳細に調査すると、炭化痕が1枚目の絶縁紙を貫通し、2枚目の絶縁紙に進展し

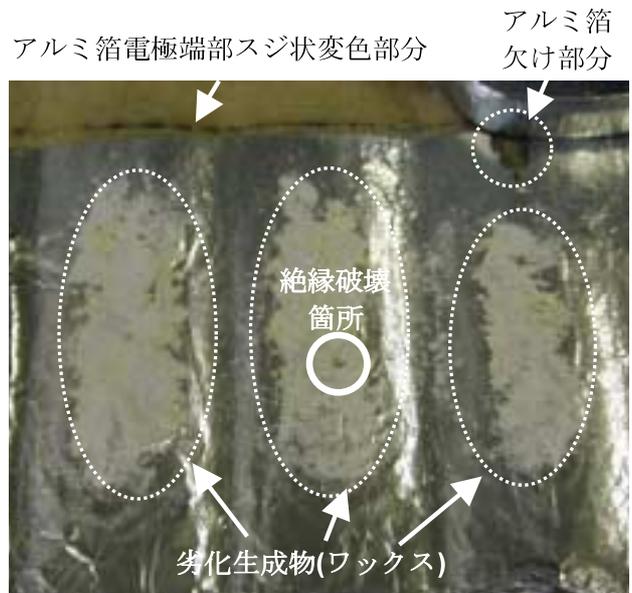


図11 経年フィールド品から採取した絶縁紙とアルミ箔を用いたモデルコンデンサ破壊サンプル

ていることが確認できた。これは、間欠部分放電劣化により、絶縁紙が貫通方向に損傷していく状態を示すものである。

6．経年フィールド品の解体調査例

経年フィールド品についても、素子解体調査を実施している。経年フィールド品では、図11の劣化部位に見られる様に、アルミ箔電極端にはスジ状の変色部位があり、アルミ箔の一部が1～2mm程度欠損した部分や、アルミ箔の欠損部分の絶縁紙に炭化痕跡が確認できる場合もあった。

スジ状の変色部位については、顕微FT-IRによる分析を実施した結果、モデルコンデンサの劣化生成物と同等のスペクトルが得られており、経年フィールド品の劣化物とモデルコンデンサの課電劣化生成物との共通性が確認できている。

電力用油浸紙コンデンサは、数十個のコンデンサ素子で構成されているが、その中には劣化痕跡の少ないものや、炭化痕跡が多く発生しているものなどバラツキがあった。モデルコンデンサの結果から、劣化は課電により進行し、部分放電によって加速されることが明らかとなった。このため、製品内素子の劣化様相のバラツキは、間欠部分放電の発生バラツキに支配されていると考えられ、劣化判定の際には部分放電特性の把握が重要と云える。

7. 油浸紙コンデンサの劣化進展フロー

以上、経年フィールド品の調査結果、絶縁油の検討結果、およびモデルコンデンサの課電劣化試験結果から油浸紙コンデンサの劣化フローを検討し、図12に示した。

油浸紙コンデンサの経年劣化は、定格運転時に電界集中するアルミ箔電極端部で始まり、絶縁油の成分であるn-パラフィンから劣化生成物であるワックスが重縮合反応により生成されることから始まる。

ワックスが電極端部に堆積すると、コンデンサ投入時の過電圧により、電氣的に検出できるような間欠部分放電が発生し、ワックスの生成と水素ガスの発生が更に加速される。それに伴って、部分放電特性が更に低下し、ワックスの増加により油浸紙の損失率が増加する。

運転が継続されると投入時の過電圧で発生した部分放電によりアルミ箔電極が損傷、部分放電が更に発生し易

くなり、ワックスや水素ガスが増大し、特性が更に悪化する。

定格電圧でも間欠部分放電が発生し始め、絶縁紙が貫通方向に損傷される。最終的には部分放電が拡大して極間の絶縁破壊に至る。一方、蓄積されたワックスによる損失率の悪化により、過温度上昇に至って発熱と放熱のバランスが崩壊して熱暴走破壊に進展するケースもある。温度が120 以上になると連続部分放電開始電圧が低下し、140 では定格電圧でも連続放電が発生するようになり絶縁破壊が発生する。

このように油浸紙コンデンサの絶縁破壊は、熱暴走と絶縁紙の耐圧低下によるもののどちらかとなるが、劣化は同じメカニズムで進行し、最終破壊形態のみが異なるとのフローを導くに至った。

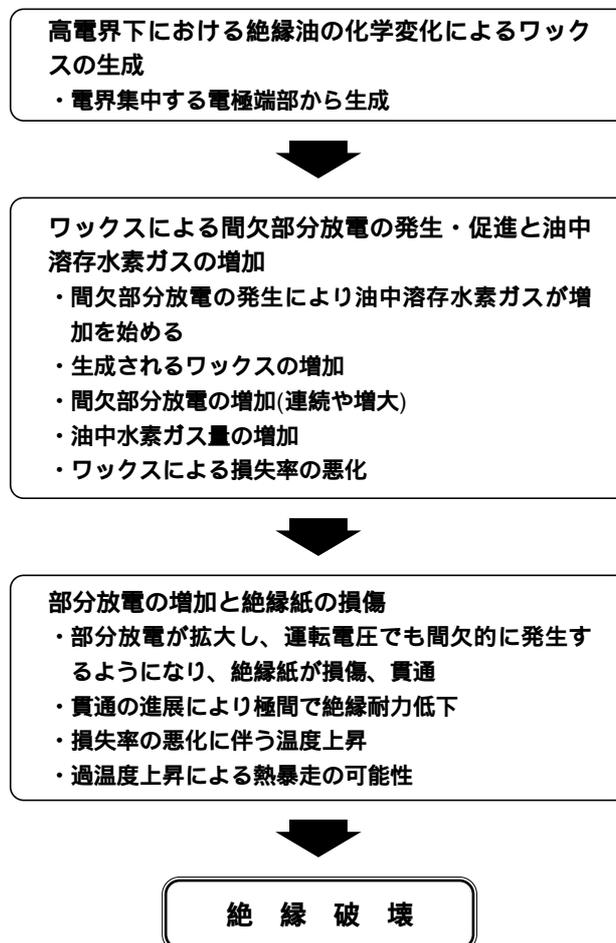


図12 油浸紙コンデンサの劣化進展フロー

8. まとめ

経年劣化した油浸紙コンデンサの劣化診断手法の確立のために、経年フィールド品の調査、絶縁油の基本特性の再検討およびモデルコンデンサによる課電劣化試験を実施した。その結果、油浸紙コンデンサでは、絶縁油、特に南方系油に多く含まれるn-パラフィン成分が、課電による化学変化によってワックスを生成し、ワックスの増加による損失率の悪化と部分放電特性の低下により劣化が進行し、最終的には、損失率の増大による熱暴走や、部分放電による絶縁紙の損傷によって絶縁破壊に至ることが明らかになった。

この様に、油浸紙コンデンサの劣化メカニズムと進展フローが明らかとなったため、現地劣化診断技術の開発

を精力的に進めている。現地劣化診断手法としては、従来からの絶縁油中ガス分析に加え、超音波センサー(AEセンサー)による部分放電測定技術を開発中⁽³⁾で、この両者を組み合わせた劣化診断手法を検討しており、別途報告する予定である。

参考文献

- (1) 萬屋、高須他：平成2年電気学会B部門大会No.239
- (2) S.Okabe, M.Koto, T.Muraoka et al.: IEEE, PE-345-PWRD-0-12-1996
- (3) 石井、緒志、板橋他：平成13年電気学会B部門大会No.479

執筆紹介

緒志 哲郎	東京電力株式会社 技術開発研究所 送変電技術グループ 主管研究員
塚尾 茂之	東京電力株式会社 工務部 変電グループ 主任
石井 正	東京電力株式会社 技術開発研究所 送変電技術グループ 主任
板橋 悟	コンデンサ事業部 技術グループ
寺尾 薫	技術開発研究所 材料研究センター 機能材料開発 第一グループ
神庭 勝	技術開発研究所 材料研究センター 誘電体材料開発グループ グループリーダー
