油入変圧器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討

正員 岡部 成光 (東京電力株式会社) 正員 大野 高宏 (東京電力株式会社)
正員 原 隆志 (三菱電機株式会社) 正員 牧野 芳弘 (三菱電機株式会社)

Study on Early Detection of Incipient Faults in Oil-filled Transformers by Analysis of Dissolved Gas in Oil

Shigemitsu Okabe, Member, Takahiro Ohono, Member (Tokyo Electric Power Co., Inc)

Takashi Hara, Member, Yoshihiro Makino, Member (Mitsubishi Electric Corporation)

Analysis of gases dissolved in insulating oil offers the most promising diagnostic method for the faults in oil-filled transformers. This diagnostic method is based on the decomposed gas products, for example H_2 , CH_4 , C_2H_2 etc., from insulating oil due to faults, overheat and discharge, in transformer.

In case of fault in the oil-filled transformer, decomposed products are almost generated from insulating solid-materials without insulating oil. Therefore, it is useful for diagnostic of transformer that the decomposed products from insulating solid-materials in insulating oil are analyzed.

An experimental survey over the decomposed products generated by overheat and discharge in oil-filled transformers was carried out through simplified model tests. Gas chromatography-mass spectrometer and purge/trap extraction were employed in analyses of decomposed products from insulating solid-materials in insulating oil.

Decomposed products characteristic to each solid-materials were identified by the experiment. Above diagnostic method is useful early detection and location of faults in oil-filled transformers.

キーワード：油入変圧器，異常診断，ガスクロマトグラフ質量分析器，油中溶解ガス

1. ま え が き

油中ガス分析は，油入電気機器の内部異常診断技術として，国内外で広く利用されている。通称「電協研法」と呼ばれている油入電気機器診断技術の詳細が1980年に電気協同研究会から報告され，現在約15年が経過する。

また，この15年間に分析手法や分析機器が著しく進歩し，電協研法で推奨されている CH_4 や C_2H_2 などの炭化水素系ガス以外にも，多種類の微量ガス成分が分析できるようになった。

一方，変圧器の分野では，UHV昇圧に向けて，UHV用変圧器が開発され，実証試験が予定されている。そこで，筆者らは，UHV変圧器を対象にして，異常の早期検出および異常部位の判別を目指した新しい内部異常診断技術を開発してきた⁽¹⁾⁽²⁾。

新しい内部異常診断技術では，絶縁油中に溶解している比較的高分子量の異常指標分解物を対象に，最新の分析手法と分析機器とを用いて分析する。

本稿では，過熱および放電モデル実験により，絶縁・構造材料から生成する分解物を解明し，種々の分解物の中から選択した異常指標分解物に基づいた診断方法について検討した結果を述べる。

2. 絶縁材料の分解物

変圧器の内部異常では，絶縁油が放電や過熱などによって分解し，ガスが発生する。異常箇所近傍に絶縁材料や構造材料がある場合には，これらの材料も分解する。電協研法に基づく診断では， CO_2 や CO が固体絶縁材料の損傷を判定する上で，重要な指標となっているが，損傷材料を特定することは困難である。

個々の使用材料について，特徴的な分解物を判明できれば，異常の有無だけでなく，その材料の使用箇所から内部異常の位置を特定することも可能となる。このような観点から，変圧器内部異常を模擬した材料の分解実験を行い，各種材料の分解物を調査した。

また，異常の早期検出の観点からは，異常の初期段階で生成する低濃度の分解物を分析する必要があることから，油中微量成分の高感度分析方法についても検討した。

<2.1>油中の分解物の分析 電協研法のガス分析では，真空法やバブリング法で抽出したガスをガスクロマトグラフで分析する。この方法では，蒸気圧の小さな高分子量の分解物は，ガス化しにくいので，ほとんど検出できない。環境分析の分野で利用されている「コールドトラップ」・ガスクロマトグラフ質

量分析法は、水中の微量物質を非常に高感度で分析できる⁽³⁾。本研究では、絶縁油中の微量溶解成分の分析法として、上記の分析方法を検討し、これを適用した。

図1に、この分析装置の構成を示す。装置は、試料油を収納するバブリングチャンバー、抽出成分を濃縮およびガス化させるためのコールドトラップ／気化室およびガスクロマトグラフ質量分析器から成る。コールドトラップ／気化室には、冷却用の液体窒素槽と加熱用のヒータとを装備している。

抽出に際して、最初に10～30mlの試料油中にヘリウムガスを一定時間バブリングし、抽出した溶解微量成分をヘリウムガスと共に、-100℃以下に冷却した室に導く。冷却室では、冷却温度以上の成分だけが濃縮するので、これに該当する油中溶解成分を濃縮できる。次に、凝縮濃縮物を急速加熱して、再度ガス化させ、直ちにガスクロマトグラフ質量分析器に導き分析する。

このような抽出・分析方法で、絶縁油中に溶解している高沸点・高分子量の分解物を非常に高感度で分析できる。本分析における分解物の検出感度の一例を表1に示す。この結果は、後述の材料分解実験で検出された分解物の中から、比較的高沸点・高分子量のものを選んで示した。

図1 分析装置の構成

Fig.1. Construction of analyzer for decomposed products in insulating oil.

表1 分解物の検出感度

Table1. Detection sensitivity of decomposed products.

成分	沸点(℃)	検出感度(vol. ppb)
酢酸	118	0.8
フルフラール	162	0.9
パラクレスオール	202	2.0
フェノール	182	0.6

<2.2>過熱分解実験 変圧器内部異常については、発生頻度の高い内部箇所と故障モードが報告されている⁽⁴⁾。このような箇所に使用されている代表的な絶縁・構造材料を選択して分解物を調べた。表2に、供試材料を示す。

表2 分解実験に供した絶縁・構造材料

Table2. Insulating materials for experiment.

	JIL絶縁	JIL構造物	リード	鉄心
故障モード	過熱 放電	○ ○	○ ○	○ ○
材料	JIL絶縁紙 接着紙 ワス処理アルミナド	アルミナド ワス処理紙	ケープルカーボン紙 耐熱紙 綿テープ アルミナド 積層品	加工材 ガラスエポキシ板

材料から生成する分解物は、次のようにして調べた。まず、材料と絶縁油とを充填した金属製容器を200℃で最大3日間加熱して分解物の生成を確認した。検出された多種類の分解物の中から、次に述べる局部過熱分解実験で分析の対象とする成分を選択した。

図2に、局部過熱分解実験で使用するモデルを示す。モデルの仕様および実験条件を以下に示す。採油分析は、各昇温前に実施したが、250℃以下では分解物の生成が少ないことから、主に250℃/30分の加熱後の分析結果について検討した。

- ・容器の容積：約1.7 l
- ・供試絶縁油：JIS 7種4号
- ・絶縁油の初期特性：水分5ppm以下、ガス量0.5%以下
- ・絶縁材料の量：約0.6 g
- ・絶縁材料の前処理：110℃、約16時間乾燥
- ・局部過熱時の油温：最高約60℃
- ・加熱条件：100℃/30分→150℃/30分→200℃/30分→250℃/30分でステップアップ

図2 局部過熱モデル

Fig.2. Experimental model for overheat of materials.

＜2.3＞放電分解実験 内容積が約450mlのガラス製の容器内に図3に示す針－平板電極を配置し、電極間に厚さ0.5mmのプレスボードを挿入して部分放電を発生させた。課電時には、放電波形を観測した。

主な実験条件を以下に示す。

- ・供試絶縁油：JIS 7種4号
- ・絶縁油の初期値：水分5 ppm以下、ガス量0.5%以下
- ・絶縁材料の前処理：110℃、約16時間乾燥
- ・電極間距離：約4mm
- ・印加電圧：30 kV
- ・放電回数：2000回
- ・放電エネルギー：約2 J

図3 針－平板電極

Fig. 3. Electrode of discharge model.

3. 絶縁材料分解実験の結果

＜3.1＞過熱分解物 表3に、容器加熱実験で得られた11種類の絶縁・構造材料の代表的な分解物を示す。各材料の分解物については、ガスクロマトグラム上の比較的大きなピークを対象に同定した。表3には、53種類の分解物を示すが、実際にはこれよりも多くの分解物が検出されている。

図4および図5に、ガスクロマトグラフ質量分析におけるクロマトグラムの一例を示す。同定された分解物は、アルコール、ケトン、酸、エステル、アルデヒド、硫黄化合物、窒素化合物など多岐にわたっており、沸点の高い高分子量分解物も多種類検出されている。この結果は、コールド・トラップ/ガス・クロマトグラフ質量分析法の有効性を示唆している。

材料固有の分解物としては、耐熱処理紙からアンモニア、1,3 ジアジン、ワニス処理紙からブタノール、ガラスエポキシから2メトキシエタノールが特徴的に検出された。固有な分解物は、これらの材料の損傷を判定する上で有用となる。コイル絶縁紙、プレスボード、耐熱処理紙などのセルロース系材料からは、メタンチオールおよびジメチルサルファイドなどの硫黄化合物が検出されたが、同じセルロース系材料である綿テープおよびカバ材からは、これらの硫黄化合物は検出されていないことが特徴である。

表3 絶縁・構造材料の過熱分解物

Table3. Decomposed products from insulating solid-materials.

No	成分名	沸点(℃)
1	アセトアルデヒド	20
2	メタノール	64
3	ギ酸メチル	32
4	エタノール	78
5	アセトン	56
6	イソプロピルアルコール	82
7	フラン	32
8	ギ酸エチル	54
9	酢酸メチル	56
10	2メチルプロパノール	65
11	ジアセチル	87
12	メチルエチルケトン	79
13	2メチルフラン	64
14	プロピオン酸メチル	80
15	2ブテナール	105
16	酢酸	118
17	2, 3ペンタンジオン	108
18	3ペンタノン	102
19	アセトイン	143
20	2, 5ジメチルフラン	94
21	2ヒドロキシプロピオン酸メチル	—
22	プロピオン酸	144
23	4ペンテン2オン	—
24	2, 3ヘキサジオン	—
25	ジヒドロ2メチル3フラン	—
26	フルフラール	162
27	1, 2エタンジオールジアセテート	—
28	3メチル3ペンテン2オン	130
29	ブチラクトン	—
30	ジヒドロ5メチル2フラン	—
31	5メチルフルフラール	187
32	2フランメタノール	170
33	ヒドロキシアセトン	150
34	テトラヒドロフラン	65
35	アリルアルコール	97
36	トルエン	92
37	パラクレゾール	202
38	フェノール	182
39	ブタノール	75
40	1-ブタノール	117
41	2メトキシエタノール	124
42	3メチル2ペンタノン	116
43	メタンチオール*	6
44	ジメチルサルファイド*	37
45	アンモニア**	-33
46	N-Nジメチルメタンアミン**	—
47	アセトニトリル**	82
48	プロパニトリル**	96
49	1, 3ジアジン**	123
50	ピリジン**	116
51	1Hピロール**	130
52	2メチルピリミジン**	—
53	Nメチルメタンアミン**	—

*：硫黄系化合物 **：窒素系化合物

図4 ガスクロマトグラムの一例(コイル絶縁紙)

Fig. 4. Gas chromatogram of decomposed products from kraft paper.

図5 ガスクロマトグラムの一例(耐熱処理紙)

Fig. 5. Gas chromatogram of decomposed products from heat-resistant paper.

一例として、図6にコイル絶縁紙およびカバ材を分解させた油から検出された各種分解物の濃度を、表4に両材料の局部過熱実験において検出された分解物の種類を示す。

図6から明らかなように、容器加熱実験で、コイル絶縁紙およびカバ材から多く検出されている成分は、酢酸メチル、アセトン、フラン、シアセチル、2メチルフラン、フルフラールなどである。これらの分解物は、局部過熱実験でも明確に検出されている。

以上の結果から、変圧器内部における局部過熱異常を検出する方法として、油中に溶解する絶縁材料分解物を分析する方法が有効であることが明白である。因みに、コイル絶縁紙およびカバ材の局部過熱実験において、電協研法による油中ガス分析で検出された主成分は、CO₂およびCOである。表5に、その結果を示す。

図6 各種検出分解物のピーク面積

Fig. 6. Concentration of decomposed products.

表4 検出分解物の比較

Table 4. Comparison of decomposed products.

No	成分	コイル絶縁紙		カバ材	
		タンク加熱	局部加熱	タンク加熱	局部加熱
2	メタノール	○	○	○	○
3	酢酸メチル	○	○	○	○
4	エタノール	○	○	○	○
5	アセトン	○	○	○	○
6	イソプロピルアルコール	○	○	○	○
7	フラン	○	○	○	○
8	酢酸エチル	○	※	※	※
9	酢酸メチル	○	○	○	○
10	2メチルプロパノール	○	※	○	※
11	シアセチル	○	○	○	○
12	メチルエチルケトン	○	○	○	○
13	2メチルフラン	○	○	○	○
14	プロピオン酸メチル	○	※	○	※
16	酢酸	○	○	○	※
18	3ペンタノン	○	○	※	※
19	アセトイン	○	※	○	※
20	2,5ジメチルフラン	○	○	○	※
25	ジヒドロ2メチル3フラン	○	※	○	※
26	フルフラール	○	○	○	○
27	1,2エタンジオールシアセテート	○	※	○	※
43	メタンチオール*	○	○	※	※
44	ジメチルサルファイド	○	○	※	※

※: 未検出成分

表5 油中ガス分析の結果

Table 5. Analytical results of dissolved gas in oil.

油中ガス成分	試料	コイル絶縁紙	カバ材	実器	
				A-1	B-1
O ₂		1578	653	1676	1993
N ₂		3993	4415	16834	25101
CO ₂		2445	1679	143	499
* CO		1552	243	48	74
* H ₂		22	41	31	19
* CH ₄		29	66	13	28
* C ₂ H ₂		0	0	0	0
* C ₂ H ₄		1	1	0	Trace
* C ₂ H ₆		2	5	17	63
* C ₃ H ₆		1	2	0	5
* C ₃ H ₈		1	3	18	57
* 可燃性ガス総量 (ppm)		1608	381	127	246

Trace: 微量検出(痕跡あり)

＜3.2＞放電分解物 放電実験で特徴的に検出された分解物は、2メチル1,3ブタジエン、メチルビニルアセチレンおよびベンゼンである。3成分のうち、ベンゼンは、新油にも存在していた。上記の分解物は、絶縁物が介在しない放電でも検出されたことから、絶縁油の分解物であることが判明した。

また、これらの分解物は、250℃程度の過熱実験では全く検出されないことから、過熱と放電とを識別する有力な指標成分として利用できると考えられるが、高温の過熱でも生成することが推測されるので、更なる検討が必要である。因みに、電協研法において重要な放電指標成分である C_2H_2 は、高温の過熱でも生成することが知られている。

図3に示すような放電分解実験では、絶縁油の分解が支配的となり、絶縁物の分解を模擬することが難しく、絶縁物からの分解物は確認できなかった。微小放電により絶縁物が分解する場合の分解物の解明は、今後の課題である。

4. 経年劣化物の調査

＜4.1＞実験および調査 絶縁材料は、経年劣化でも分解物を生成する。経年劣化物と異常時の分解物との識別を図るため、材料の低温長期加熱実験および実器調査を実施し、油中の分解物を調べた。低温長期加熱実験では、変圧器の高温運転に近い80℃で絶縁材料を油中で長期間加熱し絶縁材料からの生成物を調べた。実験条件を以下に示す。

- ・供試絶縁材料：表2に示す11種類の材料を共存で加熱
- ・供試絶縁油：JIS 7種4号
- ・油と材料との比率：ほぼ実器と同等
- ・絶縁油の初期値：水分10ppm以下、ガス量0.5%以下
- ・絶縁材料の前処理：110℃、約16時間乾燥

また、稼働中の正常変圧器から絶縁油を採取して、油中の微量成分を新しい分析法で調べた。併せて、電協研法の油中ガス分析も実施した。表6に、調査した正常変圧器の仕様を示す。

表6 変圧器の仕様

Table 6. Specification of normal transformers in service.

変電所	号器	電圧 (kV)	容量 (kVA)	製造年月	油量 (l)	油温 (℃)
A	1	66/6	20,000	1989-11	11,500	26
	2			1990-03	11,500	29
B	1	147/66	150,000	1968-03	43,000	27
	2			1967-01	43,000	25
	3	147/22	45,000	1977-02	17,660	29
	4			1967-03	21,000	29

＜4.2＞実験・調査結果 表7に、長期加熱油、稼働中の正常変圧器油および新油の分析で検出された成分を示す。分析対象成分のうち、80℃の長期加熱油から14成分、変圧

器油から12成分、新油から6成分が検出されている。検出成分の種類および濃度比率については、図7に示すように、長期加熱油と実器油とはよく一致している。

主な経年劣化物は、イソプロピルアルコール、メチルエチルケトン、アセトン、メタノールなどのアルコール類やケトン類である。これらはセルロース系材料からの劣化生成物と考えられる。表7には示していないが、長期加熱油からはトルエンが顕著に検出された。これは新油からも多く検出されていることから、劣化生成物とは考え難い。

なお、調査した変圧器の油中可燃性ガス濃度は127ppm～246ppm、 CO_2 濃度は143ppm～780ppm、 CO 濃度は48ppm～91ppmであり、これらの変圧器については、過去に異常がなかったことが確認されている。

表7. 経年劣化生成物の調査結果

Table 7. Result of survey related to degraded products.

No	成分名	加熱 実験	実 器						新油
			A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	B-4	
2	メタノール	○	○	○	○	○	○	○	○
3	ギ酸メチル	○	※	○	○	○	○	※	※
4	エタノール	○	○	○	○	○	○	○	○
5	アセトン	○	○	○	○	○	○	○	○
6	イソプロピルアルコール	○	○	○	○	○	○	○	○
7	フラン	○	○	○	○	○	○	○	※
9	酢酸メチル	○	○	○	○	○	○	○	※
11	ジアセチル	○	○	○	○	○	○	○	※
12	トルエン	○	○	○	○	○	○	○	○
13	2メチルフラン	○	○	○	○	○	○	○	※
26	フルフラール	○	○	※	○	○	○	○	※
37	パラクレゾール	○	※	※	※	※	※	※	※
38	フェノール	○	○	○	○	※	※	※	※
47	アセトニトリル	○	○	○	※	※	※	※	※

※：未検出成分

図7 検出成分の比較

Fig. 7. Comparison of detected products.

5. 新しい診断法の構築

異常模擬実験と実器の調査結果で、過熱や放電で生成する分解物や経年劣化生成物について、多くの成分が分明できた。多種類の分解物の比較から、経年劣化生成物には無く、過熱や放電時のみ検出される成分について検討した結果、下記の11成分が異常の検出に有効と考えられた。

損傷材料の識別については、それぞれの材料に固有な分解物に着目する方法が最も簡単で確実である。材料過熱実験を実施した11種類の材料中、耐熱処理紙、ワニス処理紙およびガラスエポキシについては、材料に固有な分解物が判明した。固有な分解物が無い絶縁材料については、検出された成分の種類や濃度などを比較して、損傷している絶縁材料を識別する方法が有効である。このような診断法では、できるだけ共通の分解成分を選択して、各成分の濃度比率を見るパターン法も有効である。パターン診断に使用する成分の選択は、今後の課題である。

表8に、絶縁・構造材料の各種分解物について、異常検出および損傷材料識別に有効な分解物をまとめた。図8に、成分の濃度比率を基に行なった材料識別の一例を示す。診断の検討に用いたのは、局部過熱実験のコイル絶縁紙、カバ材および実器油(表6の変圧器B-1)のデータである。濃度比率は、対象成分の総濃度に対する各成分濃度で示した。この3種類については、濃度比率のパターンに差が見られ、このような方法で異常の検出と損傷材料の識別とが可能である。図9に、異常模擬実験、実器調査などの結果を基にして構築した新しい内部異常診断手順の一例を示す。表中に示す成分については、短期間の調査、実験を基にして選択したものであり、更なる改善が必要と考えられる。

表8 診断に有効な分解物

Table8. Decomposed products for diagnosis.

		過熱異常	放電異常
異常検出	稼働中の正常変圧器および新油からは検出されない成分を利用	<ul style="list-style-type: none"> ・酢酸 ・3ペンタノン ・ブタナール ・アンモニア ・2,5ジメチルフラン ・1,3ジアジン ・2メチルイタノール ・メタンチオール ・ジメチルサルファイド 	<ul style="list-style-type: none"> ・2メチル,3ブタジイン ・メチルニルアセチン
損傷材料	耐熱処理紙	・アンモニア	・1,3ジアジン
	ワニス処理紙	・ブタナール	
	ガラスエポキシ	・2メトキシエタノール	
識別	セルロース系の8種類の材料:表2に示す材料から上記材料を除く材料	<ul style="list-style-type: none"> ・辛酸メチル ・エタノール ・フラン ・酢酸メチル ・シアセチル ・2メチルフラン ・ジメチルサルファイド

図8 局部過熱による診断例(濃度比率法)

Fig.8. An example of diagnosis. (pattern method)

図9 新しい内部異常診断手順の一例

Fig.9 An example of flow chart for new diagnosis.

6. まとめ

本研究では、最新の分析手法を駆使し、絶縁油中の微量成分を基にして、油入変圧器の内部異常を検出する新しい診断方法を構築した。新しい異常指標成分を選択するための材料分解実験においては、検出された多種類の分解物の中から、過熱異常の検出に有効な分解物および損傷材料の識別に有効な分解物を選択した。

また、絶縁油の分解で生成する2メチル1,3ブタジエンおよびメチルビニルアセチレンは、放電固有の分解物であることが判明した。これらの成分分析を電協法のガス分析と併用することにより、異常の検出、異常様相の識別および異常箇所の特定について精度向上が期待できる。

本研究については、引き続き実器調査および異常模擬実験を計画しており、診断手法の更なる検討を行なう。

(平成8年2月19日受付)

原 隆志

(正員)1955年7月4日生。1974年3月島根県立出雲工業高等学校工業化学科卒業。同年4月三菱電機(株)伊丹製作所に入社。主として、ガス分析による油入変圧器の保守管理業務に従事。現在、赤穂製作所で変圧器材料の開発に従事。

牧野 芳弘

(正員)1944年9月7日生。1964年3月兵庫県立兵庫工業高等学校工業化学科卒業。同年4月三菱電機(株)伊丹製作所に入社。主として、ガス分析による油入変圧器の異常診断技術の開発に従事。現在、赤穂製作所で変圧器材料の開発に従事。

文 献

- (1)大野高宏・岡部成光・原・牧野：「油入変圧器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討」，平7電気学会全国大会，講演No. 1099
- (2)岡部成光・大野高宏・原・牧野：「油入変圧器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討」，平7電気学会電力・エネルギー部門大会，講演No. 48
- (3)公害対策技術同友会：「最新環境微量物質分析マニュアル」
- (4)電気学会技術報告(Ⅱ部)第344号 1990年8月：変圧器予防保全技術の現状とその動向」

岡部 成光

(正員)1958年9月18日生。1981年3月東京大学工学部電気工業科卒業。1986年3月同大学大学院博士課程終了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器の診断技術および絶縁協調の研究に従事。現在、電力技術研究所絶縁・機器研究室。工学博士。1993年電気学会論文賞受賞。

大野 高宏

(正員)1964年10月9日生。1988年3月北海道大学工学部電気工学科卒業。1990年3月同大学院修士課程終了。同年4月東京電力(株)入社。主として、変電機器診断技術の研究に従事。現在、電力技術研究所絶縁・機器研究室。