

1 はじめに

CIGRE (国際大電力システム会議: Conference Internationale Grands Réseaux Electriques á Haute Tension) には15のSC (Study Committee) があり、この中の一つがSC15 (電力用材料: Materials for electrotechnology)である。SC15は7つのWG (Working group) をもっており、この中の一つがWG01 (WG15-01とも表す、油浸絶縁: Fluid impregnated insulating system) で、この中で油浸絶縁関係のテーマをもった4つのTF (Task force) が活動している。

最近の電力の安定供給については、国際的にも関心が高いためか4つのTFのうち3つまでが絶縁診断に関するものである。WGはTFの報告を受けて討議するとともに、TFの将来方向、新たな検討課題などについて審議する。現在、国内からはこれらTFのメンバーになってはいないが、WG会議の折に活動中のTFに関連した話題の提供、審議参加など積極的に活動している。以下に本WGの最近の活動状況を概説する。

2 WG15-01の構成

SC15は表1に示すようにジョイントを含めて7つのWGをもち、さらに、各WGは幾つかのTFをもつ。W

表1 / SC15のWG

WG	名称
WG15-01	油浸絶縁 Fluid impregnated insulating system
WG15-02	誘電液体 Dielectric liquids
WG15-03	絶縁ガス Insulating gases
WG15-05	コンデンサ Capacitors
WG15-06	固体絶縁材料 Solid insulating materials
WG15-07	マイカ絶縁 High voltage maica base system
WG15/33-08 ^{※2}	絶縁監視 insulation monitoring and life estimation

※2: WG15/33-08はSC33 (絶縁協調: Overvoltage and insulation coordinationと共同)

G01がもつTFは次の通りである。

- TF15-01-01 : Diagnosis by dissolved gas analysis (溶存ガスによる診断)
- TF15-01-02 : Electrical properties of papers removed from aged equipment (経年劣化絶縁紙の電気特性)
- TF15-01-03 : Use of liquid chromatography (液体クロマトグラフィーの応用)
- TF12/15-13-01 : Static electrification materials (静電気帯電-材料)

ほとんどが独自のTFであるが、TF12/15-13-01のようにSC12 (変圧器: Transformers) と協同で構成される場合もある。

3 WG15-01の活動

本WGはスイスのABB社のMr.Bossが主査(Convenor)を、フランスのGEC-Alsthom社のMr.Samatが幹事(Secretary)を務める。下部に4つのTFがあり、TFでは特定テーマに応じた活動をする。毎年のWG会議ではTFの報告を受け討議が行われるとともに、関連話題の発表、WGのこれからの活動などについて意見が交わされる。

WG会議はSC15の内の他のWGと一緒に偶数年はパリで、奇数年は他の国で開催される。筆者は本WGのメンバーとして過去2回(1回は日本で開催)参加している。以下に各TFの活動の概要を述べる。

3.1 TF15-01-01の活動 溶存ガス分析による診断 (Diagnosis by dissolved gas analysis)

油中ガス分析による油入変圧器の異常診断技術は広く採用されている。診断基準としては、国際的には1978年に制定されたIEC Publ.599¹⁾がある。この方法はH₂/CH₄、C₂H₂/C₂H₄、C₂H₄/C₂H₆などの油中ガスの比をとり、この比の組み合わせとアーク放電、部分放電、過熱などの異常を対応させるものである。

※1 技術開発本部

しかし、各国の実情をみるとこの基準が広く採用されている訳ではなく、各国で独自の方法が使われている。理由の一つとしてIEC Publ.559で解釈できないデータが多いと言われる。このような背景から多くのガス分析データを整理しながら診断基準について見直し、IECのPubl.559の見直しの提案を行おうとしている。

このTFは、ドイツのRWE EnergieのDr.Möllmannがリーダー (Secretary) となっており、次のような項目が調査・検討され最終報告が1996年8月までにできあがる。

- (1) 各国で電力用変圧器に採用されている診断基準の比較
 - ① 対象とするガス
 - ② 要注意・異常となる各ガスの濃度
 - ③ 異常となる場合の各ガスの比率
- (2) ガス分析値の解釈の提案
 - ① 正常値、要注意値、異常値の提案
 - ② 異常の種類 (アーク放電、部分放電、過熱、絶縁紙の劣化) に対応したキーガスの種類と濃度の提案
 - ③ 異常の種類 (アーク放電、部分放電、過熱、絶縁紙の劣化) に対応して2種類のガスの比の提案

国内ではガス分析による診断の基準として、電協研法として知られているガイドがあり²⁾、広く使われている。この方法はIEC法と類似の方法と、分析されたガス濃度パターン、 H_2 主導型、 CH_4 主導型、 C_2H_4 主導型、 C_2H_2 主導型などと異常を対応させる方法を併用させるものである。

しかし、次のような特徴をもったデータが散見するようになり、この基準でも解釈できないものがあることが分かった。

- ・ C_2H_2 が検出されないか極端に少ないのに H_2 が非常に多い。
- ・ C_2H_6 主導のパターン。
- ・ COが極端に多い。

これらのデータについては、石油学会絶縁油分科会の油中ガス生成過程調査専門委員会で検討され、これらについて次のような解釈の可能性を示した³⁾。

- ・ H_2 が極端に多いのは必ずしも異常ではなく、ある種の金属 (例えばSUS) の触媒作用による。
- ・ C_2H_6 主導の場合は低温過熱あるいは経年劣化。
- ・ COが極端に多い場合は低温過熱、経年劣化あるいは絶縁油やセルロース系絶縁材料以外 (例えばフェノール樹脂) の材料に起因する。

これについては、1994年のCIGRE WG15-01会議で“油中ガス分析による変圧器絶縁診断の実態 (Actual circumstances of diagnosis of oil filled transformers by dissolved gas analysis)”として紹介してい

る。

さらに、1995年TF15-01-01の報告に日本と米国の活動の状況も加えたいという要請があったことから、“日本における油中ガス分析による絶縁診断の現状 (Present state of diagnosis by DGA in Japan)”としてまとめ、TF15-01-01に提出している。

3.2 TF15-01-02の活動 経年劣化絶縁紙の電気特性 (Electrical properties of papers removed from aged equipment)

長い年月運転されている変圧器が多数ある現在、余寿命推定は重要な課題である。しかし、オーソライズされた余寿命推定の試験法はない。このようなことから運転されている変圧器の絶縁物の余寿命を推定する試験法を選び、その有効性を明確に評価しようとしている。

このTFはイギリスのNGCのDr.Wilsonがリーダーとなっている。経年劣化した変圧器の特性試験と並行して採取した導体や巻線絶縁物の電気・物理・化学的な試験を行い、そのデータ集積により材料劣化の程度をより明確に評価でき、将来の性能も予測できるような試験法を見つけ出そうとしている。

第1回の照合試験 (ラウンドロビン試験) では35年及び40年経過の変圧器の絶縁材料が16機関に送付されたが、思うようにデータが集まらず (新絶縁紙重合度6機関、強制劣化絶縁紙重合度4機関、実器絶縁紙3機関)、しかもばらつきが大きかった。

この事態を打開するために1995年に実器よりの採取試験料による第2回のラウンドロビン試験が新たに計画された。試料提供者はイギリスのNGCほか3機関、試料採取箇所は各変圧器につき8箇所、試験者はスペインのASINELほか4機関、試験項目は電気 ($\tan \delta$, RVM, BDVほか) ・物理 (引張り強さ、破裂強さ、DPほか) ・化学 (GPC, NMR, 酸価ほか) など十数項目である。

精力的に計画は進んでいるが、試料採取条件が不明確であること、試験条件の細部の調整などがないなど問題点は多い。日本はこのラウンドロビン試験には参画していないが考えられる問題点、例えばラウンドロビン試験の場合は試験法の細部の調整が必要なことなどをTF会議席上で主張している。

余寿命推定については、日本でも関心もたれているものの研究としては大きな動きはないが、国内でも考え方をまとめておく時期にきているかもしれない。経年劣化診断の研究はよく行われており、この結果の中から油中フルフルール、若しくは、 $CO + CO_2$ の生成速度が温度により一定であることと、これら生成量が絶縁紙の劣化程度に対応することが分かっており、これらに注目し

て余寿命予測の方法を考えるのも一つの方法である。

3.3 TF15-01-03の活動 液体クロマトグラフィーの応用 (Use of liquid chromatography)

1984年のC I G R Eの会合で油入変圧器中の絶縁紙の劣化によって生成されるフルフラールの量が、絶縁紙の劣化程度と相関性があることがうかがわれ、変圧器の経年劣化診断に使えるのではないかという提案があった。このことにより、フルフラールについて強い関心もたれ⁽⁴⁾、生成過程や劣化診断への応用に関して各方面で研究が進められている。このような背景の中で、フルフラール類の生成量と絶縁紙の劣化程度との関係を明らかにし、劣化診断に役立てようとしている。

このTFはスペインのAS INELのMr.de Pabloがリーダーとなっている。8機関が参加して5種類の条件でラウンドロビン試験が行われ、次のような結果が得られており、この結果は実器にも適用が試みられようとしている。詳細の報告は1996年8月までにできあがる。実験データのばらつきは大きい、フルフラールの生成量と絶縁紙の劣化度合いとの関係が見いだされている。

- (1) 2 F A L (フルフラール) と 5 H M F (ヒドロキシシメチルフルフラール) が劣化の指標として使えそう。
- (2) 2 F A L と平均重合度 (DP) の間には次の関係がある。

$$\log(2FAL) = A \times DP + B$$
 ここに、A : 0.00183 ~ 0.0061
 B : 1.75 ~ 6.27
- (3) 5 H M F は吸着の影響が大きい。
- (4) 105°C から 120°C の間では 2 F A L / 5 H M F の比は 3 ~ 4 まで。
- (5) その他

フルフラールに関しては、国内でも幾つかの研究がありデータは充実している⁽⁵⁻¹⁵⁾。これらの研究結果をまとめて、1995年のWG 15-01会議において“日本におけるフルフラールに関する研究 (Investigation on furfural in Japan)”として、フルフラールの生成量、安定性、劣化診断への応用などについて紹介している。

変圧器の運転温度の範囲では 2 F A L の生成量が圧倒的に多く、その他は 1/10 以下であること、2 F A L は吸着しやすくこのことを考慮して劣化診断に適用しなければならないこと、データのばらつきが比較的小さいなどTFと異なった部分がある。

この報告の中には、日本で行われたラウンドロビン試験の結果も引用されている。日本でのラウンドロビン試験の場合、試験法の細部にわたっての統一が図られる場

合が多い。これがTFの結果とやや異なった結果を出す一因である。

3.4 TF12/15-13-01の活動 静電気帯電一材料 (Static electrification materials)

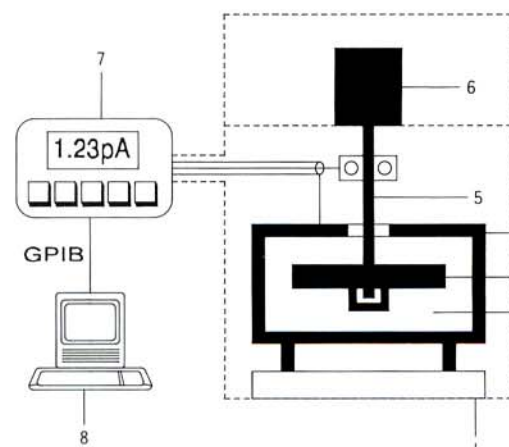
国内では1970年代に500kV変圧器で流動帯電による内部閃絡の問題が起こり、対策のための多くの研究が行われた。欧米ではこの問題が顕在化するのが遅れたためか1990年に入ってTFに取り上げられた。当初の目的は変圧器に使われる材料面から帯電現象を理解しようとするものであり、このため、ECT (Electrostatic Charging Tendency) の評価方法の検討に力が注がれた。

このTFは、オーストリアのグラーツ大学のProf.Praxl がリーダーを務め、図1、図2に示すようなC I G R E法とフィルタ方式のMini static testerが検討された。

C I G R E法では金属の回転円板に貼られたクラフトボードと絶縁油の間で起こる静電気を金属の回転軸からリーク電流として取り出すものであり、Mini static testerは金属フィルタを加圧された絶縁油が通過するときに生ずる静電気をリーク電流として取り出すものである。

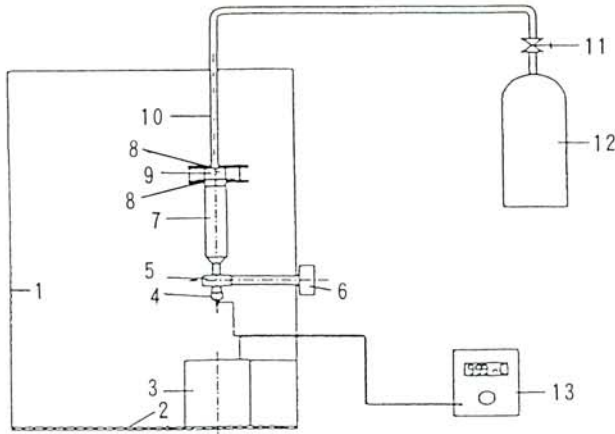
1995年までに最終デザインを決め、装置の評価をした。その結果、次のような問題点が指摘された。

- (1) 回転円板の端部及び表面の流れが複雑である。
- (2) リーク電流が安定するまでの時間があまりにも長い。
- (3) 感度が十分ではない。



- | | |
|---------------------------|---------------|
| 1 試験容器 | 7 エレクトロメータ |
| 2 金属容器 | 8 パーソナルコンピュータ |
| 3 絶縁油 | |
| 4 回転円板 (金属を芯にしたクラフトボード張り) | |
| 5 回転軸 | |
| 6 モータ | |

図1 / CIGRE test cell



- | | |
|--------------|-------------|
| 1 ファラデーケージ | 8 固定治具 |
| 2 P T F E 板 | 9 シリコンゴム |
| 3 油受け容器 | 10 圧力配管 |
| 4 金属フィルターホルダ | 11 圧力調整器 |
| 5 バルブ | 12 窒素ポンペ |
| 6 バルブ操作 | 13 エレクトロメータ |
| 7 油容器 | |

図2/Mini static tester

(4) 準備の時間が長すぎる。

このようなことからC I G R E法は、E C Tの評価法としてはあまり適しておらず、Mini static testerの改良形が良いのではないかと提案されている。Mini static testerのマニュアルでは低帯電油の測定で不安定であるが、自動測定では安定な測定ができるという結果が得られている。

このT Fは1年以内に報告書が作成され、終了の方向となる。

4 新しいT F

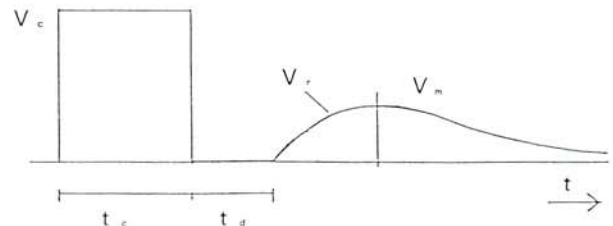
W G 15-01の4つのT Fの内T F 15-01-01, T F 15-01-03, T F 12/15-13-01の3つのT Fが近く終了になることもあり、2件の新しいT Fの設立が提案されている。1件は部分放電に関するもの、もう1件は誘電応答に関するものである。

1995年のW G 15-01の会議で新しいT Fを念頭に置いたWorkshopが開催された。

Workshop 1 Partial discharge

ここでは、部分放電検出、標定、データ処理に関する次の4件の発表が行われた。

- (1) D.Allan-Queensland Electricity Commission (オーストラリア)
"Summary of University of New South Wales R&D activities related to the detection and location of partial discharges in power transformers"



- | | |
|-------------------|-----------------|
| V_c : 誘電体への印加電圧 | V_r : 回復電圧 |
| t_c : 電圧印加時間 | V_m : 回復電圧最高値 |
| t_d : 短絡時間 | |

図3/Recovery voltage method

- (2) J.Fuhr-ABB (スイス)
"On-site PD-measurements on power transformers"
- (3) P.Morshuis-Delft Univ.of Tech. (オランダ)
"Diagnostic PD tools for condition monitoring of the insulation of the high voltage equipment ; proposal for a new task force"
- (4) J.Poittevin-GEC Alsthom (フランス)
"Up dated partial discharges measurement in transformers"

1960年に変圧器のコロナ放電の計測が行われ、 μC , μV などでの表示のみであったが、時代とともにロケーションが行われ、現在では、デジタルのデータ処理までできるようになっている。運転中の変圧器のコロナ検出、ロケーションをより正確にできるようにするとともにエージングプロセスも追跡できるようにし、診断に役立てたいという内容である。

これらの発表及び審議により"Characterization of the different types of discharges and their harmfulness on the transformer insulation"という目的で新しいT Fが発足するもようである。

Workshop 2 Dielectric response

ここでは、図3に示すようなR V M法(Recovery Voltage Method)⁽⁶⁾⁽⁷⁾の変圧器絶縁システムへの応用に関する次の4件の発表が行われた。

- (1) Ph.Guinic-EDF (フランス)
"EDF results and hypothesis regarding polarization method"
- (2) G.Csepes-Hungarian Power Company Ltd. (ハンガリー)
"Use of the dielectric response to identify aging or other effects on the insulation of the power transformers"

(3) Th.Heizmann-Swiss Federal Institute of Technology
Zurich (スイス)

“Measurements and analysis of dielectric response
in oil-paper insulation system”

(4) A.Wilson-NGC (イギリス)

“Condition assessment techniques for large power
transformers”

R V Mで測定される $V_m/s - V_m$ 特性, $V_m - t_c$ 特性
(V_m : Recovery voltage, t_c : 電圧印加時間)は変圧器
の劣化状態, 水分の多い状態などとよく対応し, 劣化診
断に役立つという内容である。

これらの発表及び審議により“Assessment of usefu-
lness of the dielectric response for characterization
of the moisture content and aging of transformer
insulation”という目的で新しいTFが発足するもよう
である。

5 むすび

C I G R E W G 15-01の最近の活動状況を概説したが,
現在活動している4つのTFの内3つのTFが油入変圧
器の診断技術に関するものである。また, 4つのTFの
内3つのTFが間もなく終了となり, この中には診断技
術関係のTFが2つ入っている。しかし, 新たに発足が
計画されている2つのTFは変圧器の診断技術関係であ
ることから今後もWGでは診断技術関係が大きな比重を
占めることになる。

S C 15の内をみてもWG 15-05, WG 15-06, WG 15/33-
08などで診断技術が取り上げられており, この技術が電
力関係での大きな関心事の一つであることが言える。

参考文献

- (1) International Electrotechnical Commission :
“Interpretation of analysis of gases in transfor-
mers and other oil-filled electrical equipment in
service”. IEC Publ.599, 1978.
- (2) 電気協同研究 : 「油中ガス分析による油入機器の保
守管理」, Vol.36, No.1, 1980
- (3) 石油学会 : 「油中ガス生成過程調査研究報告」, 絶縁
油分科会技術資料, No.94025, 1994.
- (4) P.J.Burton, J.Graham, A.C.Hall, J.A.Lave, A.
J.Olver : “Recent development by CEGB to
improve the prediction and monitoring of
transformer performance” . CIGRE, 12-09, 1984.
- (5) 後藤, 張替, 太田, 月岡 : 「油入変圧器に使用され
る絶縁紙の劣化とフルフラールの関係」, 電気学会全
国大会, 826, 1990.
- (6) 張替, 後藤, 太田, 月岡 : 「絶縁紙の劣化とフルフ
ラールの関係—フルフラールの絶縁紙への吸着につ
いて」, 電気学会全国大会, 930, 1991.
- (7) 張替, 後藤, 太田, 月岡 : 「フルフラールによる油
入変圧器の経年劣化診断の実用化検討」, 電気学会全
国大会, 872, 1992.
- (8) 張替, 後藤, 太田, 月岡 : 「フルフラールによる油
入変圧器の経年劣化度診断の研究」, 電学論A,
Vol.112, No.6, p.589 (1992)
- (9) 宮本, 牧野, 難波, 原 : 「フルフラールと炭酸ガス
による変圧器の寿命診断」, 電気学会静止器研究会,
SA-90-58, 1990.
- (10) 難波, 宮本 : 「フルフラールの絶縁紙への吸着現象
(変圧器寿命診断の基礎検討)」, 電学論A, Vol.112,
No.2, p.139 (1992)
- (11) H.Kan, T.Miyamoto, Y.Makino, S.Namba,
T.Hara : “Absorption of CO and CO₂ gas and
furfural in insulating oil into oil-impregnated
transformers” . 1994 Intern.Symp.on Electr. Insul.
p.41, 1994.
- (12) 高橋, 月岡 : 「最新の油入変圧器経年劣化度診断技
術」, 電気学会誘電・絶縁材料/電線・ケーブル研究
会, DEI-93-98/EC-93-21, 1993.
- (13) 中田, 柴田, 張替, 後藤, 石井, 月岡 : 「開放型変
圧器の経年劣化度診断」, 電気学会全国大会, 969,
1994.
- (14) 石油学会 : 「実器変圧器油中フルフラールの分析と
フルフラールの熱安定性」, 絶縁油分科会技術資料,
No.95026, 1995.
- (15) 山本, 河野 : 「油中フルフラール濃度の経年増加—
実変圧器採取油の実態調査」, 第14回石油学会絶縁油
分科会研究発表会, p.51, 1994.
- (16) A.Bogner, L.Kalocsai, G.Csepes : “Diagnostic tests
of high voltage oil-paper insulating systems (in
particular transformer insulation) using dielectrometrics” .
CIGRE 1990 Sesion 15/33-08, 1990.
- (17) O.Cohard, P.Guunic, C.Legrand, P.Luccion ,
G.Sanchis : “Power transformer diagnostics-An
on-site evaluation programme, using four methods
for a new inspection policy” . CIGRE Symposium
Berlin 110-18, 1993.