

DGA の世界とその不確かさ

溶解ガス分析（DGA）は変圧器内部のさまざまな種類の異常を検出できる唯一の手法です。DGA は精密科学ではありませんが、変圧器の状態の評価には統計に基づいた評価と解釈が長年用いられてきました。

1990年代後半から DGA 常時監視が可能になり、現在ではさまざまな常時監視装置が市場で販売されるようになりました。それぞれに独自の技術仕様があるため、さまざまなオプションを比較して評価することが困難といえます。電力会社に関しては、試験所の DGA も関係してくることで、事態がさらに複雑になっています。このホワイトペーパーでは、監視装置の技術仕様の分析と性能評価、特に試験所の DGA 結果に対して評価を行う際に考慮すべきさまざまな要素について説明します。主な問題は、DGA に関するしっかりした国際基準が存在しないことです。それどころか、すべての手法に計算とオイル固有のパラメータがあります。さらに、DGA の観点から見ると鉱物油によっても違いがあります。

常時監視装置は、ガスのトレンド監視や異常時の急速なガスの変化を検出することにおいて、オイルサンプルより優れていることが実証されています。一方で、正確度も必要です。DGA 結果が不正確な場合、特にガスの比率が異常ゾーンの境界に近い場合に、異常診断を誤る可能性があります。また、濃度値が設定されている警報値に近い場合には、不正確な結果が、変圧器での誤った対処につながる可能性があります。

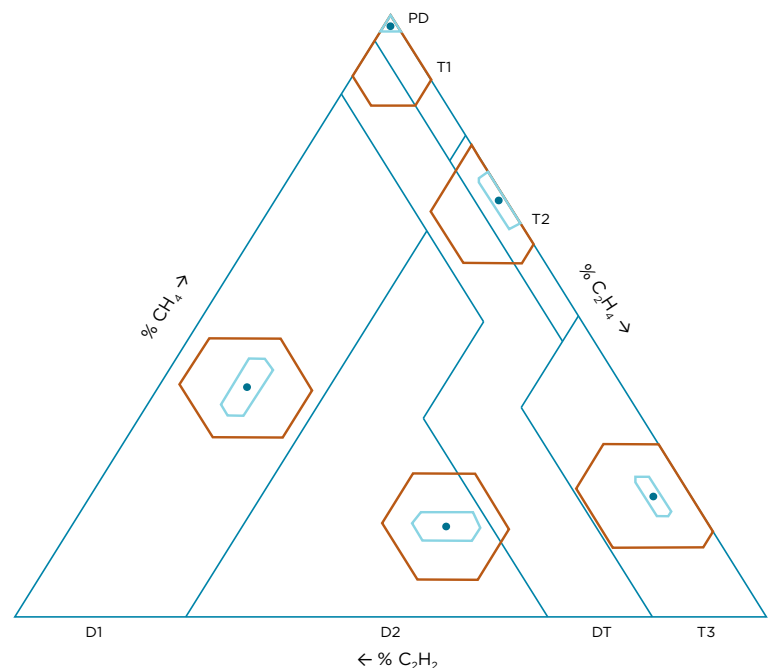


図 1 Duval トライアングルを使用した場合に精度が変圧器の異常診断の不確かさに与える影響^[7]。青色が精度 $\pm 15\%$ 、赤色が精度 $\pm 30\%$ 。

計測の精度

計測機器の品質を評価する際、多くの場合に判断基準となるのが「計測は正確か」というシンプルな問いです。この問いは非常にシンプルですが、答えはそう単純ではありません。最適な計測機器を選択するためには、計測の不確かさにつながる要素を把握する必要があります。これにより初めてメーカーの仕様を理解できます。

計測性能は、計測範囲、応答時間、精度、安定性（経年劣化や過酷な環境に対する耐久性）といったダイナミクスによって定義されます。その中で、精度は品質にとって最も重要とされることが多く、何がよい精度かを理解することは最も難しい項目でもあります。

計測出力の変化と計測量の変化との関係を感度といいます。理想的には、この関係は線形になりますが、実際には、どの計測にも不完全な部分や不確かさがあります。計測値と真値の一致度を「精度」と呼ばれることが多いものの、それでもいくらか曖昧さが残る言葉です。DGA においての問題は、計測値も真値も正確にはわからないことであり、どちらの値にも特有の不確かさがあります。計測パラメータの真値は、通常は試験所の DGA によって決定されますが、不確かさが報告されることはめったになく、定義されることがすらありません。

規定される精度に再現性が含まれているかどうか分かりません。再現性とは、一定の条件下で計測を繰り返したときに計測機器が同様の結果をもたらす度合いを表します。計測機器の計測値には何らかのランダム変動が含まれることが多く、平均化を用いることでその影響を最小限に抑えることができます。多くの場合、再現性自体が計測の不確かさにつながる大き

な原因になることはありませんが、再現性の性能が低い場合、DGA に基づいた診断の意味が薄れることには注意しなければなりません。こうした診断ではガス発生のトレンドとパターンの識別度に依存しているためです。

精度の仕様にヒステリシス、温度依存性、非直線性、長期安定性が含まれることはほとんどありません。精度の仕様にその他不確かさが含まれていない場合は、実際の計測性能について誤った印象を与える可能性があります。

精度が、計測条件、校正後の経過時間、ガス濃度、オイルの種類など、特定の計測状況に常に関連しているということについては注意が必要です。精度については、対象の状況も明確にする必要があります。DGA 常時監視装置の精度仕様は、校正時点にのみ規定されたものです。しかし、実際の使用状況において性能や精度の情報を得られることはめったにありません。たとえば、+40°C で非常に古いオイルを使用して、校正から5年が経過している変圧器の設置環境でどうなるかという情報は無いのです。

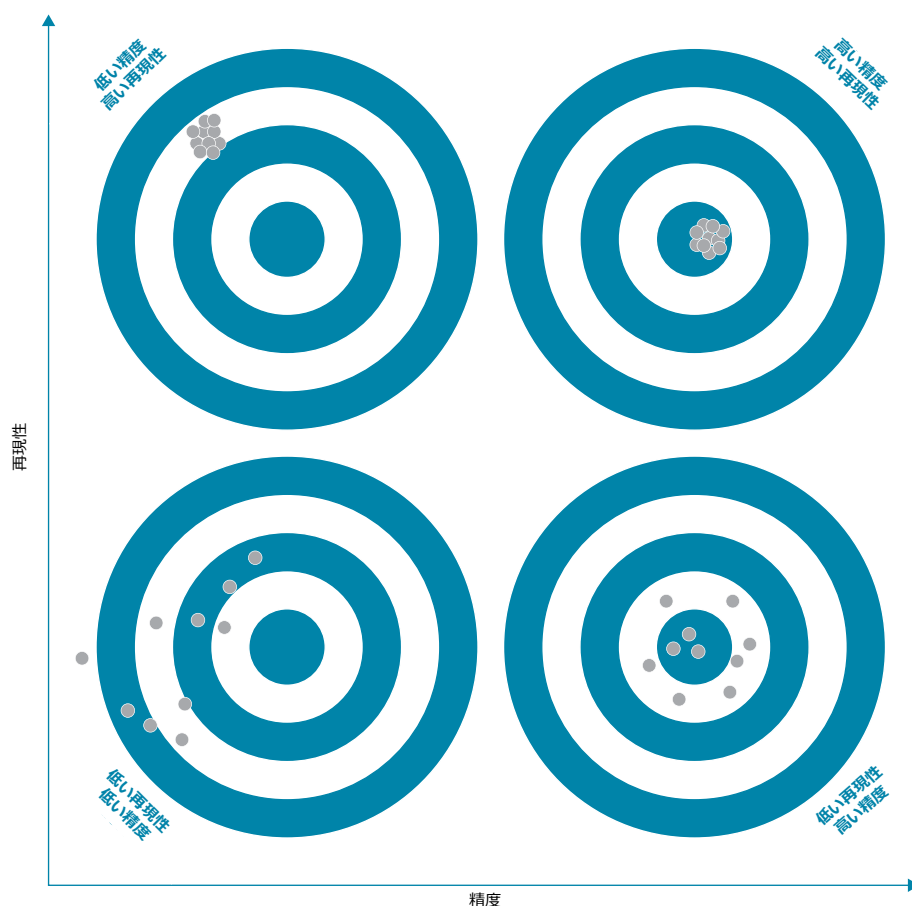


図 2 精度と再現性のマトリクス図

計測性能に関するもう1つのパラメータは、検出下限 (LDL) です。これは計測機器がゼロと確実に区別できる濃度の下限値です。「確実に」というのもやはり曖昧な言葉ですが、たとえば信頼度を95%とするなどして規定できます。計測の再現性と LDL の間には関連性があります。平均化することで計測のランダム変動が抑えられ、再現性が向上し、LDL が低下します。実際には、LDL の仕様は、たとえば0ppm のガスレベルにおける計測値の標準偏差の2倍になります。計測デバイスがこの数値よりも高い値を示している場合は、真値が0ppmである確率は約2.5%になります。ガス濃度が非常に低い基準サンプル (たとえば1ppm未満のサンプルなど) を作成するのは非常に困難であり、LDL を実際に計測することはほとんど不可能です。そのため、LDL は再現性に基づいて理論的に定義する必要があります。

試験所の DGA

異なる手法の分析結果を比較する場合、それら両方の手法に関係する不確かさを認識する必要があります。不確かさにつながる最も一般的な要因としては、たとえば、オイルサンプリングの手法と品質、ガス抽出手法、使用されている分配係数、使用されている規格の差異などがあります。また、校正時に適用された基準以上の精度では計測できないことも理解しておく必要があります。

試験所の DGA とそれに関連する不確かさ

試験所の DGA は、オイルサンプルの品質や機器、分析に使用された規格、試験所の手動作業における担当者ごとの差異など、さまざまな要素の影響を受けます。

試験所の分析で起こる不確かさの要因には、次のようなものがあります。

- サンプルの準備と GC 信号の再現性
- 校正と校正サンプルの準備の不確かさ
- 分配係数の不確かさ (K)
- バイアルの容積の不確かさ
- サンプルの質量の不確かさ
- オイル密度の不確かさ

オイルサンプリング

不確かさの最大の要因は、たいていはサンプルの品質に関連するものです。サンプルの収集方法、サンプルの収集に使用した機器の状態、サンプルの保管方法、サンプルの輸送方法がすべて品質に影響します。H₂ や CO などのガスのかなりの量がオイルから抜けたり、湿気や酸素などの大気ガスがサンプルに混入する可能性があるため、試験所での分析が不正確になる可能性があります。そのため、サンプル収集中のどの時点においてもオイルが空気に触れないようにし、サンプル容器に適切な手順でオイルが完全に充填されるようにする必要があります。これを実現するための最も実用的な解決策は、高品質のシリンジとアルミボトルを使用することです。これらは空輸の際の気圧の変動に耐えることができます。

試験所での分析作業

DGA の結果を表示する際や、常時監視装置からのデータと結果を比較する際には、試験所での作業の不確かさも考慮する必要があります。試験所での最初のステップは、サンプリング容器から少量のオイルをガスクロマトグラフィー (GC) バイアルに移すことです。多くの試験所ではこの作業を全部、あるいは少なくとも一部を手作業で行っているため、人的

要因が関係してきます。オイルサンプルへの空気などの混入を起こす人的ミスは、結果にも必ず現れます。試験所の再現性 (同一のサンプルを使用して何日も DGA を繰り返したときに、オペレータに関係なく結果を再現できる度合い) は、試験所のプロセスの品質を判断するのに非常によいパラメータです。

IEC 60567 では、すべての試験所に自身の正確度を割り出すように推奨しています^[2]。これが実際には不確かさを意味します。この情報は、試験所のサービスユーザーに公開する必要があります。認定を受けた試験所は、認定要件として公開するように定められています。不確かさに関する公式な数字が公表されていない場合、その試験所が国際的な試験所間比較テスト (ラウンドロビンテストと呼ばれる) に参加しているかどうか、その結果が公開されているかどうかを尋ねてください。そうすると、想定される不確かさのレベルを表す大まかな指標となります。

IEC 60567 規格では、全体試験手順を用いた場合に得られる正確度の例を示しています。これらの値は世界中にある44か所の試験所が参加した、2つの油中ガス規格についてのIECとCIGREによる試験所間テストに基づいて定義されたものです。試験所のDGAの不確かさは、使用されているガス抽出手法、ガスの種類、ガス濃度レベルによって変わります。ヘッドスペース (HS) 法は、真空法やストリッピング法より高い不確かさがあります。他の不確かさのデータが公開されていない場合は、試験所のDGA結果を評価する際やその結果を常時監視装置と比較する際に、±15%の平均値を使うことができます。特定の試験所の数字は特に大きいかもしれませんが、高品質な分析の場合はいくぶん低くなります。

使用している標準手法による変動

世界中の試験所の DGA で最も一般的に使用されている規格は、IEC 60567 と ASTM D3612 です。いずれにも、ガス抽出手法（真空、ストリップング、HS）に関するサブセクションがあります。IEC、CIGRE、ASTM およびオランダの Institute for Inter-Laboratory Studies は、標準抽出手法の異なる分析間の変動を評価する RRT を多数実施しています。表3では、試験所で使用されている手法の差異を示しています。この結果から、HS 法では正確な結果を得ることが難しいことが明らかに見えて来ます。

表の「平均精度」とは、計測されたオイルサンプル内の各ガスに対する精度の平均です。「不正確な試験所の数」とは、RRT に参加していて IEC の精度要件 (100 ppm超で±15%) を満たせなかった試験所の割合です。

ASTM と IEC はそれぞれ異なる温度（それぞれ0°Cと20°C）でのガス体積を計算していることに留意してください^[2, 3]。それだけで、理想的なサンプルに対して定義されている濃度において8%の差異になります。監視装置と試験所からの DGA 結果を比較する際には、このことを考慮する必要があります。計測された ppm 値はすべて、まず先に同じ条件、20°C (IEC) または0°C (ASTM) のいずれか希望する方に変換する必要があります。

表 1 IEC 60567 第4版 (2011 年) ^[2]から引用した、さまざまな抽出手法の精度レベルの例

抽出手順	精度（定格値に対する割合）	
	中濃度	低濃度
デブラー	13	35
部分脱気	13	30
ストリップング	18	23
ヘッドスペース	18	37
デブラー（水銀不使用）	15 ¹	14 ¹
部分脱気（水銀不使用）	11 ¹	
シェイクテスト	15	44

限られた回数の分析に基づく。

表 2 HS 法を使用している ISO 17025 認定の試験所と IEC 60567:2011 とのさまざまなガス濃度レベルにおける比較

	低濃度での精度 (%)	中濃度での精度 (%)	高濃度での精度 (%)
H ₂	15.6	9.5	5.9
CH ₄	13.9	8.3	6.7
C ₂ H ₄	26.7	10.6	3.8
C ₂ H ₆	26.2	22.3	6.3
C ₂ H ₂	33.6	18.8	8.3
CO	26.5	14.1	8.9
CO ₂	10.7	11.3	11
試験所の平均	21.9		10.4
HS に対する IEC 60567:2011	37		18

表 3 ガス抽出手法 A（部分脱気）、B（ストリップング）、C（HS）を使用している試験所の精度。IEC 仕様を最下行に記載^[7]

手法	試験所の平均精度 (%)		不正確な試験所の数 (参加者に対する割合)	
	100ppm 超	8ppm 未満	100ppm 超	8ppm 未満
A	12	18	17	0
B	19	65	60	63
C	28	51	75	42
IEC 仕様	15	30		

分配係数とガス抽出

試験所であるか常時監視であるかによらず、溶解ガス分析では、オイルからガスを抽出して計測する必要があります。抽出を完璧にすれば、濃度の計算に関係する不確かさが少なくなります。抽出効率は使用する手法によって異なります。たとえば、テブラー法ではほぼ100%の効率ですが、最も効率の悪い HS では30%の効率です。

HS 法では、抽出されたガスの比率は次と等しくなります。

$$\frac{1}{1+K \frac{V_{\text{OIL}}}{V_{\text{GAS}}}}$$

ここで、 V_{OIL} はオイルの体積、 V_{GAS} は GC バイアル内の気相の体積、 K はガス固有の分配係数です。

標準的な HS 法では、GC バイアル内の体積比は一般に10:12になります。

オイルと気相の濃度 (C) の関係は、抽出容器内のガスとオイルの体積比 ($V_{\text{GAS}}/V_{\text{OIL}}$) に依存します。

$$C_{\text{OIL}} = C_{\text{GAS}} \left(K + \frac{V_{\text{GAS}}}{V_{\text{OIL}}} \right)$$

ここで、 V_{OIL} はオイルの体積、 V_{GAS} は GC バイアル内の気相の体積、 K はガス固有の分配係数です。

ガスによって、オイルに溶解した状態が保たれやすい傾向は異なります。溶解した状態が保たれるガスもあれば、条件が合えばすぐに「抜ける」ガスもあります。この傾向は、オイルへのガスの溶解度と呼ばれ、いわゆる分配係数 (K) によって定義されます。これは、ガス、オイルの種類、オイルの品質、温度などによって変わります。鉱物油の種類が変わると K の変動がとても大きくなる可能性があります。オイルから抽出して計測できるのはガスの一部だけであるため、オイル内

の当初のガス濃度を計算するために、これらの係数が必要です。HS を使用した場合のように、抽出されたガスが少なければ、結果は計算、つまり係数への依存度が高くなります。

分析試験所と DGA 常時監視装置の大半では、HS 法か、HS 法から派生したメンブレンまたはチューブを使用する手法を使用しています。こうした手法は複雑でなく、費用対効果が高いためです。しかし、異なるところから取得したオイルの分配係数の違いを考慮しているケースはほとんどありません。その違いがエラーの重大な要因となる可能性があります。

ガスクロマトグラフィー

GC (ガスクロマトグラフィー) は、ガスを特定し、混合ガス中に含まれるガスの量を計測する従来の手法です。ガスサンプルは、サンプルバイアルから薄い GC カラムに注入され、ヘリウム (He) キャリアガスによって押し出されます。ガスの成分の分子サイズに応じて、カラム内でガスが分離されます。保持時間は各成分に固有であるため、小さい分子が先に通過し、

大きな分子が後に通過します。カラムを通ると、ガスは検出器に向かいます。ガスの同定は、カラムを通過する保持時間に基づいて行われます。各ガスの量は、検出器の信号の強さで時間の関数 (ピーク面積) として定義されます。

GC は、保持時間または信号強度が汎用である基礎的な分析手法ではなく、機器に特化した校正が必要です。GC 校正用に一般的によく使用されている手法は、トレーサブルな混合標準ガス調製法と、油中標準ガス調製法 (ガス濃度調製法とも呼ばれる) の2つです。校正によって、各ガス成分の固有の保持時間が定義され、検出器信号からのピーク面積が校正基準のガス濃度に比例します。

油中標準ガス調製法の場合の問題は特定のオイルを使用することであり、HS 抽出法が使用されている場合は特に、そのオイルがさまざまな変圧器からのオイルサンプルのガス溶解度値 (分配係数) をどのくらい表しているのかという疑問が残ります。校正における基準ガスにも、分析結果が各ガスの分配係数に依存するという同じ問題があります。

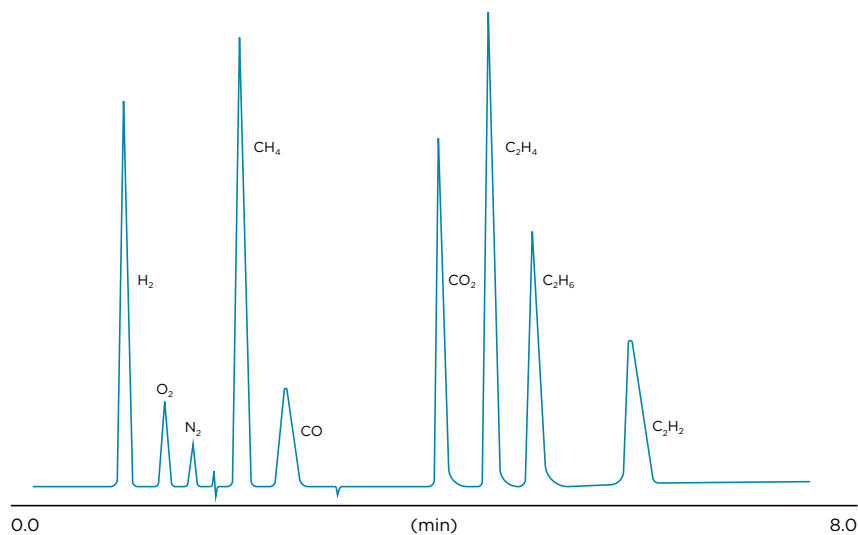


図 3 GC クロマトグラムの例

(分)

右の図は、オイル固有の分配係数を考慮せずに定義もしなかった場合に、GC 校正に油中標準ガス調製法を使用したときの影響を示す例です。異なる分配係数が使用されているとすると、メタンの DGA 結果はどうなるでしょうか。2つの異なる DGA 結果のうち、どちらか一方が正しいのでしょうか。それとも両方とも不正確なのでしょうか。これは異なる分析の計測値がどのように変わるかを示すほんの一例です。この例で使用されている分配係数は、IEC60567 第3版 (2005 年) [4] からのものです。

試験所の GC を高い信頼性で実行するには、オペレータが適度な校正を維持して、機器の全体的な性能を高く保つことができるように、高度な専門知識が必要です。また、カラムの内面は、サイズの大きな炭化水素による汚染などによって、経年的に変化します。カラムの状態は、小さい分子を分離する能力を確認することでモニタリングできます。ピークに過剰なテールが発生し始めた場合は、濃度を判定する際の解釈が不安定になっている可能性があります。また、経時的に検出器がドリフトする場合があります。大量のサンプルを直後に次々と実行した場合は、短期間でもそうなります。これは、実際の分析シリーズの中に基準サンプルを入れることで検出できます。

DGA 常時監視装置

世界中で DGA 常時監視の使用実績が増加している背景には、DGA 常時監視を使用することで、通常のオイルサンプリング間隔の間に見過ごされてしまう可能性がある、変圧器内部のあらゆるタイプの異常を初期段階で特定できることがあるといえます。

変圧器の状態評価を行うために役立つ入力を得るためには、数年おきなどのサンプリングについて考え直す必要があります。常時監視装置は試験所に比べて柔軟性が高く、平均化とオフセット補正を使用することで診断用の信頼性の高いデータを確保することもできます。また、急速に進展する異常を診断するために、データを平均化せずに保持して応答時間を短縮することもできます。試験所

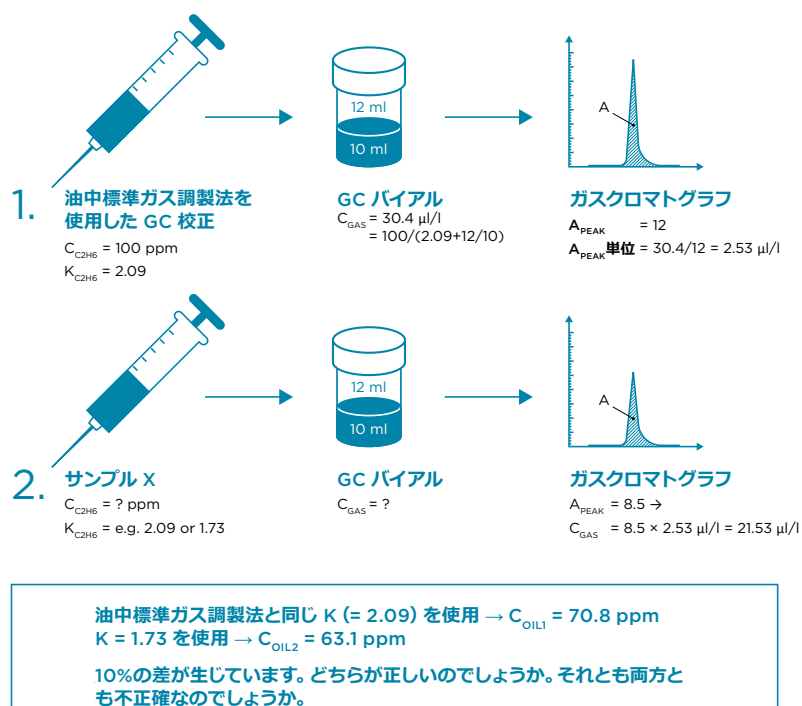


図 4 校正に油中標準ガス調製法を使用した場合の例 (1) サンプル分析に対する分配係数の影響 (2)

のサンプルを使用するよりも、常時監視によってガスの変化率を把握する方が信頼性が高くなります[5]。

監視装置の仕様データシート

ほとんどの監視装置には、校正の時点でトレーサブルな基準ガスに照らして規定された精度があります。あるいは、一部の監視装置では基準として油中標準ガス調製法を使用しています。DGA 監視装置には常に、その監視装置を使用して計測された結果と基準値とのずれが望ましい範囲内に入っていることを示す校正証明書がある必要があります。また、校正証明書には、使用している基準方法と、校正が国際基準に対してトレーサブルかどうか明確に示されている必要があります。

校正の種類にかかわらず、高純度標準ガス調製法と油中標準ガス調製法のどちらの手法も、分配係数を通してオイルの種類と使用期間に依存します。これは、チューブやメンブレンの有無にかかわらず HS 法を使用してガス抽出を行う場合に特に顕著になります。つまり、報告されている精度の仕様は、運用中の実際の変圧器に対して適切でないということにな

ります。変圧器内のオイルとその分配係数は、監視装置の校正に使用されていたオイルとその分配係数とは同一でない可能性が非常に高いためです。

DGA 常時監視装置の購入仕様書を作製する際は、こうしたことをすべて念頭に置いておくことが重要です。公益事業者の実際の要件とニーズを特定するために時間をかけるだけの価値があります。書類上で数値が一番小さいからといって、変圧器の監視に最適で最も有用な選択肢であるとは限りません。特に、多数の変圧器に使用する常時監視装置を購入する場合は、検討中のデバイスを実際の条件でテストすることを検討する必要があります。運用における監視装置の性能の実態を知る一番の方法は、稼働中の変圧器に対して長期間、たとえば6か月間テストすることです。そうすると、計測の安定性について初期の兆候を把握できます。同時に少なくとも3つから5つオイルサンプルを取り、可能であればそのオイルサンプルを、自己のプロセスの不確かさの値を提供できる独立した試験所2か所に分析してもらいます。サンプルは、テスト期間全体を通して、たとえば月に一度などの頻度で取得する必要があります。

計測範囲

市販されている常時監視装置は、計測範囲の仕様が異なります。最も広い計測範囲が必要かどうかについては、たとえば起こり得るガスの濃度と可燃性ガスの爆発限界を検討することで評価できます。また、爆発する危険性のあるガスが非常に高濃度な場合に、監視装置で本当にテストできるのかどうかという安全性の問題もあります。たとえば、オイル内の H_2

濃度20,000ppmをテストする場合は、爆発下限界（LEL 4%）を大幅に上回る水素36%でガスシリンダーを使用することになります。爆発の危険性がありかつ非常に高濃度のガスをテストする必要がある場合は、この条件がさらに厳しくなります。この場合、油中ガスの準備をする際に ATEX 認証を受けた機器を使用するなど、テストを実施する施設では追加の安全対策を講じる必要があります。

さまざまなソースから90パーセンタイル値を求めた場合、規定された計測範囲より比較的低い値を示します。しかし、一部のまれなケースでは、オイル内の T_3 異常の場合にメタン、エタン、エチレンで非常に高い濃度が報告されています^[6]。通常、こうした状況は、変圧器のオイルが少なくなっている場合に起こります。

表 4 正常に稼動している変圧器で見つかった90パーセンタイル代表値^[6, 7, 8]

ソース	DGA 数	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	CO	CO_2
CIGRE TB771	300,000 超	118	85	111	56	5	700	6,300
IEEE C57.104*	800,000 超	40-100	20-110	15-150	25-90	2	500-900	3,500-9,000
IEC 60599	該当なし	50-150	30-130	20-90	60-280	2-20	400-600	3,800-14,000

*変圧器の使用期間と O_2/N_2 の比率でデータを除算

表 5 オイル内のガス濃度と、油中標準ガス調製法を準備するために気相に必要な濃度の例。ガスの爆発下限界も記載。

ガス	油中ガス濃度 (PPM)	ガス中ガス濃度 (PPM) (+70°C での K、IEC 60567)	LEL PPM (空气中)
メタン	20,000	45,455	50,000
エタン	20,000	9,569	30,000
エチレン	20,000	13,605	27,000
アセチレン	20,000	21,505	25,000
一酸化炭素	20,000	166,667	125,000
水素	20,000	270,270	40,000

常時監視装置と試験所のDGAの比較

試験所の基準値と比較して常時監視装置を評価する場合、サンプルの品質と試験所の手順の不確かさを考慮する必要があります。さらに、試験所が常時監視装置に関係なく、すべての分析方法にはそれぞれの不確かさがある点に注意することが重要です。結果を比較し、監視装置の性能について結論を出す際には、これらを考慮する必要があります。

結論として、溶解ガス分析に関係するさまざまな不確かさによって、常時監視がそうでないかにかかわらず、サンプルとサンプリング手法が理想的であったとしても、結果には何らかのずれが生じます^[1]。また、手法が別の規格に従ってい

る場合は、偏差が大きくなる可能性があります。不確かさに影響する要因には次のものがあります。

- 校正方法
- ガス抽出手法
- ガスの分配係数
- オイルサンプルの品質
- 人的要因
- 使用されている規格

残念ながら、現場で常時監視装置の性能をテスト、評価する際に役立つ規格はありません。しかし、最近の CIGRE ワーキンググループ D1/A2.47 で、そのようなテストを実施できる手順が公開されました。技術資料 783『DGA monitoring systems』の付録 F、「Procedure for evaluating the accuracy of gas

monitors and laboratory results」^[1]という資料です。この手順には、試験所の性能の評価も含まれています。理想的なテストの記述ではないかもしれませんが、独立した組織が発行した、常時監視装置に関する最も包括的な現場評価の基準であることには間違いありません。

装置の評価するには、ほかの方法もあります。データのモニタリングは、1つのポイントだけの計測値を見るのではなく、長期間にわたって評価されます。たとえば、次のケースでは、ガスとメタンそれぞれ1種類のみを例にとっています。ヴァイサラ OPT100 DGA 監視装置のデータは、2年半にわたって $\pm 10\%$ の精度仕様で設定されています。この場合、試験所の不確かさは未知のため、IEC 60567^[2]に掲載されている平均的な試験所正確度の例に基づいて、 $\pm 15\%$ としています。試験所と DGA 常時監視装置と比較するには、実際の計測値ではなくトレンドを比較するのが適切です。また、その2つ間で考えられる偏りも考慮します。トレンドが類似していて、不確かさの範囲が重なっている場合、2つの異なる方法が概ね一致していると判断できます。

参考資料：

- 1 CIGRE 技術資料 783
- 2 IEC 60567 第4版 (2011年)
- 3 ASTM D3612
- 4 IEC 60567 第3版 (2005年)
- 5 CIGRE 技術資料 409
- 6 CIGRE 技術資料 771
- 7 IEEE C57.104
- 8 IEC 60599 第3版 (2015年)

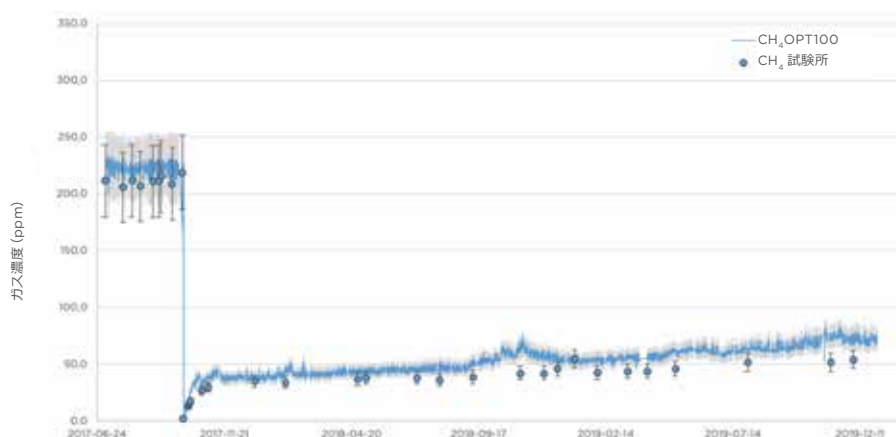


図 5 ヴァイサラ OPT100 監視装置と試験所の基準から、2年半以上にわたって取得したメタン (CH_4) のデータ。グレーでプロットされている監視装置の仕様は10%で、試験所の不確かさは15% (平均^[2])。

VAISALA

www.vaisala.com

詳細は以下よりお問い合わせください。
www.vaisala.com/contactus

Ref. B212007JA-A ©Vaisala 2021

本文書は著作権保護の対象となっており、すべての著作権はヴァイサラと関連会社によって保有されています。無断複写・転載を禁じます。本文書に掲載されているすべてのロゴおよび製品名は、ヴァイサラまたは関連会社の商標です。私的使用その他法律によって明示的に認められる範囲を超えて、これらの情報を使用（複製、送信、頒布、保管等を含む）をすることは、事前に当社の文書による許諾がない限り、禁止します。技術的仕様を含め、全ての仕様は予告なく変更されることがあります。