

## SF6ガス絶縁機器の オンライン露点計測

ガス絶縁高圧機器内の水蒸気および水分の移動について説明し、正しい設置プロセス、設置場所、コネクタおよびシーリング材の選び方について検証します。あまり知られていない、ガスの流れがない環境で行う信頼性のあるオンライン計測について解説します。

SF6の絶縁性を維持し、SF6の分解生成物が水または空気と反応して非常に腐食性の高い生成物になるのを抑えるためには、ガス絶縁高圧機器内の水蒸気量を最小限に保つ必要があります。機器

内には乾燥したガスを高圧充填して密閉し、外部にガスが流出しないようにしますが、水分子には高浸透性があるため、機器が古くなること等が起因して水分レベルが上昇することがあります。

従来、水分レベルはガスの定期的なサンプリングによってチェックされてきましたが、近年では、SF6の露点をオンライン計測する常時監視が次第に普及してきました。しかし、このSF6計測は、産業界で行われる一般的な露点計測や、SF6絶縁機器内の圧力・温度計測とはまったく異なる課題があることが明らかになってきました。とりわけ、設置方式、計測システムに使用されている材質、コネクタの種類は、正確な計測に影響を与えます。

### 水蒸気圧と露点

水蒸気圧はあらゆる所に存在し、それぞれの気体圧力(分圧)の合計で出されるガス圧力(大気圧やガス絶縁機器内のシステム圧力など)にも含まれています。

露点/霜点 ( $T_{d/t}$ ) は、気体の水蒸気圧 ( $p_w$ ) が飽和水蒸気圧 ( $p_{ws}$ ) と等しくなる温度です。

言い換えれば、露点とは、水蒸気が結露または凍結する温度であるといえます。

$$\text{frost} \rightarrow p_w = p_{ws}(T_{d/t})$$

露点は温度に依存しないパラメータであるため、システム温度とは異なる温度でガスをサンプリングしても計測できます。しかし圧力に大きく依存するため、本体のガスと同じ圧力で計測するか、正確な圧力値を把握して、正しい換算(4バルブでの露点や、大気圧における露点など)が必須となります。

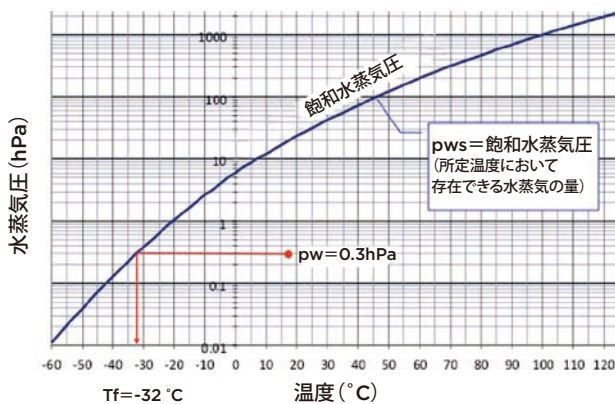


図1: 水蒸気圧0.3hPa (mbar) 対露点の例

+20°C		
	4バルブにおけるSF6	外気
露点	-40°C	+9.3°C
相対湿度	0.6%RH	50%RH
水蒸気圧 (p <sub>w</sub> )	0.13mbar	11.7mbar
+35 °C		
露点	-40°C	+31°C
相対湿度	0.2%RH	80%RH
水蒸気圧 (p <sub>w</sub> )	0.13mbar	45mbar

表1: 2つの異なる温度(+20°Cおよび+35°C)と湿度(50%RHおよび80%RH)における、ガスタンク内と外気の露点、相対湿度、水蒸気圧の例。水分子(H<sub>2</sub>O)は、平衡に達しようとして水蒸気圧が高い所から低い所に移動する傾向があります。



## 蒸気拡散

蒸気相(気体)においては、水分子は固定しておらず、分子のサイズが小さいため容易に動き回ります。水蒸気は異なる相の間で平衡に達する傾向があるため、水分子は密閉リングなどのポリマー素材を通り抜けたり、接合点の金属面に沿って、蒸気圧が高い所から低い所に移動します。この作用は、低いガス圧力から高圧のシステム圧力の間(外気と高圧機器内SF6の間など)でも起こります。そのため、耐圧であるからといって耐水蒸気であるとはいえません。拡散効果は非常に遅く、少量の静止気体のオンライン計測でしか観察できません。

## 水分の移動

密閉されたガス・システム内の水蒸気圧は、たとえ拡散が起こらなくても、厳密に一定の状態が保たれることはありません。システム内の温度差は、2つの相(気体と、その気体に接触している固体)の間の水分(蒸気)を移動させます。温度が上昇すると、2つの異なる相は水分平衡

(平衡相対湿度)に達しようとして、固体が気体中に蒸気を発します。その逆の現象が、温度が下降する場合に起こります。金属面の微細孔のほか、スペーサーや密閉リングなどの有機素材が、ガス絶縁機器(GIE)システム内の湿度源となります。固体物質の表面積が気体の体積に比べて大きくなればなるほど、蒸気移動が露点に及ぼす影響が大きくなります。

図3は、2010年秋にフィンランドにて設置された装置の、水分移動の影響を示しています。小型ブロックに取り付けられたセンサには、本体のガスから長く伸びた管と複数の接合点があるため、センサ周辺のガスは必ずしもガスタンク本体内の露点の状態を表してはなりません。

探知された水分移動が本体のガスで起きていたのか、センサが置かれているガスサンプリング管で起きていたのかは、明らかではありません。本体のガスタンクには追加のセンサを設置する接合点がないため、基準計測を本体で直接行うことは不可能でした。

このような設置におけるもうひとつの重要な点は、温度です。センサが離れた場所に設置されていると、センサ設置場所における温度が本体のガスの温度と大幅に異なる可能性があります。そのため、本体のガスタンク内とガス管内での水分移動により、ガスの水分レベルが大幅に異なってしまいます。静止気体における蒸気拡散は非常に緩やかであるため、計測された露点値は本体のガスの状態を表していない可能性があります。これは絶えず温度差がある場合に起こりがちで、活発な水分移動が継続することになり、平衡には達しません。

この設置の方法は、圧力や密度の計測では問題になりませんが、露点計測の場合には誤った結果につながる恐れがあります。ガス管内の水分移動に伴う水蒸気は極めて少量ですが、少量の静止気体でオンライン計測を行えばはっきりと分かります。



図2:「センサ・ブロック」に取り付けられた屋外での設置

## オンライン露点センサの設置

SF6絶縁機器内の露点センサ用のオンライン計測をする際には、正確な計測で有効な結果を導き出すために、前述の水蒸気の基本的な性質を考慮する必要があります。これまで、SF6の露点はタンクからガスのサンプルを取り出して計測されてきました。これは、計測の間に常にガス流が起きていたことを意味します。ガス流があると、非常に緩やかな拡散や、気体・固体間の水分移動の影響は把握できません。

これまで、露点センサを圧力リレーや密度センサと同じセンサ・ブロックに取り付けるのは、ごく一般的なことでした。また、そうしたブロックが本体のガスタンクに直接取り付けられておらず、ポリマー管や金属管でタンクにつながっていることもよくありました。そうしたさまざまな接合点や配管は蒸気拡散を起こす空間となり、水分移動の媒体となる恐れがあります。比較的少量の静止気体では、こうした影響が著しく現れます。前述のような方法で露点センサを設置すると、大切な高電圧機器管理のための正確なデータが得られなくなります。

SF6絶縁システム内で最適のオンライン露点計測を行うためには、本体のガスにできるだけ近い場所にセンサを設置すべきであり、タンク壁に直接取り付けることが好ましいと考えられます。接合点の数を最小にして、計測セルの近くではプラスチックやゴムの材質の使用を避けることも、大きな効果があります。可能な場合は、金属対金属によるシーリングを推奨します。

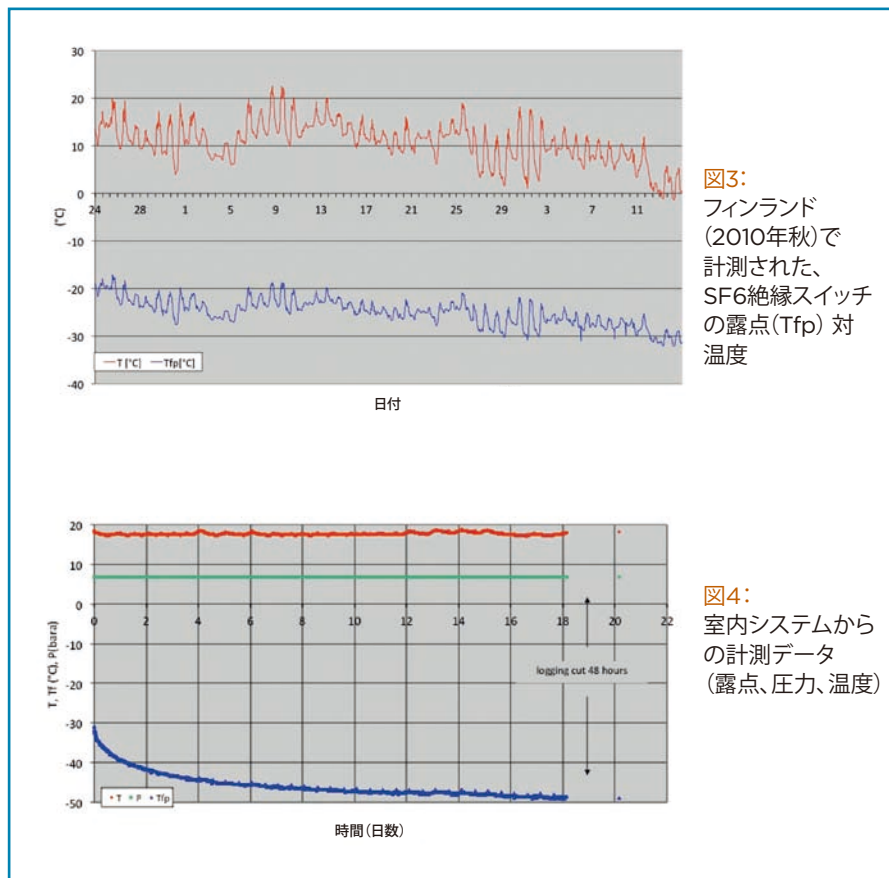


図3: フィンランド(2010年秋)で計測された、SF6絶縁スイッチの露点(Tfp)対温度

図4: 室内システムからの計測データ(露点、圧力、温度)

## センサ設置後のシステム応答

ガス絶縁機器内の露点計測の応答時間は、センサそのものの応答時間(通常、数秒または数分単位)ではありません。設置後の絶縁機器内が安定するまでの時間が主要要因となります。センサを設置する際、外気からの水分がシステムの接合点に入り込みます。SF6の総量を考えると、この蒸気量は取るに足らないものです。しかし、計測セル内センサの観点からは、その影響は明白で、計測可能です。計測セル内の蒸気圧が本体のガスと平衡に達するには、かなりの時間がかかります。本体のタンクに極めて近い所にセンサが設置されていたとしても、蒸気圧、そして露点が、本体のガスと等しくなるには数時間から数日を要します。

絶縁機器内が安定するまでの時間は、設置後に計測セルが本体のSF6と同じ蒸気圧になるまで、どれだけ迅速に乾燥するかで決まります。つまり、セル内で水分子がどれだけ迅速に固体物質からガスに移動し、セルからタンクに拡散し、最終的に平衡に達するかで決まることになります。とりわけ静止気体内では、ガスが乾燥していればいるほど、固体物質および表面の乾燥に時間がかかります。この2つのガス間の距離とSF6の乾燥度が、セルからタンクへの拡散率に影響を与えます。距離が長く、ガスが乾燥しているほど、100%正確な応答を得るのに時間がかかります。配管や接合点を通じた拡散が多すぎる場合、計測セル内の水蒸気圧はいつまでたっても本体のガスと平衡に達せず、タンク内の正確な状態を示す計測結果が得られません。



図5: 本体のガスタンクに直接取り付けられた、露点・圧力・温度センサ (DPT145) (2010年3月25日～4月14日)。計測セル内のガス量は約20ml。

これまで述べたように、取り付けの際に、当初の水分の流入を最小限に抑えることが非常に大切です。水滴がセンサのコネクタに入り込むのを防ぐため、雨天の設置作業は不適です。また、シーリングの表面にちりやほこりの粒子が残らないよう、細心の注意を払わなくてはなりません。なぜなら、これらは後に水分子拡散の媒体となる可能性があり、計測を台無しにするばかりか、最悪の場合はSF6を湿潤化するためです。屋外の設置では、水が接合点にたまり蒸気拡散を増加させることがないよう、雨よけを取り付ける必要があります。

### 運用時のシステム応答

センサ設置直後のシステム応答にはかなり時間がかかるため、本体のSF6ガス

の露点が増し始めるような場合に、センサがきちんと反応するのかを疑問に思うのは当然のことです。

この最初の応答時間の遅さを左右する主な要因は、ガス流がある場合でも長時間かかる、固体表面(微細孔)の乾燥です。静止気体内では、乾燥時間が著しく長くなります。

この現象は、本体のタンクからより多くの水分を含むガスが、乾燥した計測セル(露点計測ポイント)に向かって拡散する場合には、わずかな影響しか与えません。

考慮すべきもうひとつの要因は、大量のSF6内では、シーリング材や金属表面からの拡散による露点の上昇は非常に緩やかであるということです。センサが本

体タンクに十分近い場所に設置されていれば、本体のタンクで露点が増し始めると計測セルでも上昇が起こり、ほぼ同時に感知されることは間違いありません。

最近の傾向としては、露点の変化がないことを確認するだけでなく、露点の急速な変化を捉え、万一の漏出を素早く捉えることが大事とされています。

またその急激な変化は露点計測及び圧力計測の両方で探知される必要があります。

露点の急速かつ大幅な変化は漏出を示すもので、露点計測および圧力計測の両方で探知される必要があります。

### まとめ

絶縁機器内計測が、不確かさを最大限に排除した、信頼性の高い有効な露点データを提供できるようにするには、露点センサの設置場所、作業そのものに細心の注意を払うことが極めて重要です。使用するセンサの品質および長期安定性も、重要な要因になります。最適な計測結果は、センサを本体のガスタンクに直接取り付けることで得られます。センサ付近のコネクタおよびシーリングには、高品質の金属材質のみを使用することが適切です。設置後にセンサの指示値が本体のSF6の露点値に達したことを確認することで、コネクタや配管を通して発生する余分な拡散から影響を受けることなく、長期的に信頼のおけるデータを得られ、誤認警報を回避できます。