電力技術のグローバル化と国際規格

正員 岡本 達希*

International Standard Following to Globalization of Electric Power Technology

Tatsuki Okamoto*, Member

Due to the globalization of electric power technology, international standard becomes more and more important because international standard such as IEC standard is typical international standard and recognized as most wide-spread standard. In this paper, recently revised IEC standard 60505 for thermal endurance test method of electrical insulation system is explained as one of the most basic test methods of electrical insulating materials under electrical, thermal, mechanical and environmental stress.

キーワード：耐熱性，電気絶縁，劣化，規格，IEC

Keywords: thermal edurance, electrical insualtion, degradation, statndard, IEC

1. はじめに

近年ではあらゆる技術のグローバル化が進み、国際的に共通な「物差し」が必要となってきた。IEC規格はその物差しのひとつであり、その中でIEC TC98（電気絶縁システムの耐熱性評価規格委員会）は個々の製品規格に共通した絶縁システムの耐熱性を手早くかつ合理的に評価し、個々の製品規格における共通的な試験方法を規定する規格を策定することが目的で設立された。

この規格の特徴は、電気絶縁材料単体ではなく電極も含めた電気絶縁システムとしての耐熱評価技術を提供し、材料よりも実機に近い条件で電気絶縁システムの耐熱性等を評価できる手法を提案している。その中でも特に絶縁システムの評価に関する基本規格であるIEC 60505 Evaluation and qualification of electrical insulation systemsを絶縁システム評価のバイブルとすべく改訂作業が行われた。そこでここでは本規格の概要とこの規格では直接述べられていないが主な材料劣化機構について解説したい。

2. 60505 規格で考慮される劣化要因

この規格は他の規格同様の書式に従って下記の様に構成されている。

- 1 適用範囲
- 2 規定参考規格

- 3 用語と定義
- 4 劣化機構
- 5 評価方法の準備要素
- 6 電気絶縁システムの性能保証のための機能評価方法
- 7 機能劣化試験
- 8 加速劣化試験
- 9 予備診断条件
- 10 診断
- 11 データ解析
- 12 正規分布に基づく評価手順…数学公式
- 13 試験成績表
- 14 電気絶縁システム分類コード表

これに補則等が加えられて規格全体が構成されている。この目次から想像できる様に、この規格は各種負荷（劣化）要因による劣化機構の解説からはじまり、その評価方法や具体的なデータ処理方法までをカバーしていて、教科書的な役割を果たすことを目指して作成されている。その中で今回の改訂では4章の劣化機構の内の機械的負荷（劣化）や環境的負荷（劣化）、6章の実用データの評価への活用方法、10章の診断方法、12章の統計的データ解析方法の各項目の改訂と補則の大幅な改訂が行われている。

絶縁システムに対する負荷要因あるいは劣化要因は大別すると電氣的負荷、熱（温度）的負荷、機械的負荷、環境的負荷（水分、腐食性ガス、各種化学物質等）があり、さらにこれらの組み合わせによる複合的な負荷がある。この規格ではこれらの負荷（劣化要因）を絶縁システムが使用される環境毎に適切に組み合わせで評価する方法を取っている。以下ではこれらの劣化要因について若干言及する。

* (財) 電力中央研究所電力部
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Electrical Engineering Dept., Yokosuka Research Laboratory,
Central Research Institute of Electric Power Industry
2-6-1, Nagasaka, Yokosuka, 240-0196 Japan

3. 劣化要因

〈3・1〉 電氣的劣化要因 機器素材に電界が印加されていることに起因するもので、次のような各種の原因で生ずる。①伝導電流：ジュール熱として熱的效果を示す以外にイオン伝導においては電気化学効果を起こす。②誘電体積：交流電界下で生じ、熱的效果を起こす。③電磁力、静電力：短絡大電流・高電圧によって生ずる力で機械的效果を示す。④部分放電：高電界で気体、液体の部分放電を起こすと熱的作用、粒子衝撃作用、励起分子、イオンによる化学作用を生ずる。

電力用機器中に使用されている高分子材料のうちで、電圧ストレスを被るのは電気絶縁に適用されるときである。電圧ストレスによって起きる最も激しい劣化のひとつに放電による劣化がある。機器構造によっては理想的な平等電界の状態に電圧を印加することが必ずしも可能ではなく、部分的に電界強度が大きくなる部分が生じるのが普通である。このような場合に、電圧を印加すると破壊電圧の低い気体あるいは液体中で部分破壊を生じ、これら放電が高分子を攻撃して劣化を生ずる。この現象を放電劣化といい電圧ストレス劣化の主要因である。沿面放電で両電極間が全路破壊される形式のものは電源容量によってはグロー放電にとどまらず、エネルギーのさらに大きいアーク放電に移行し、放電による熱作用が劣化の主体となる。これをアーク劣化という。他の放電形態では放電はあくまで絶縁系の一部に止まり、直列に健全な絶縁部分が入っている形をとるので、放電は抑制されてグロー放電形式をとることが多い。これらは絶縁系の一部の破壊であるので部分放電と称し、これによる劣化を部分放電劣化という。このほか、高

分子表面が水分、電解質などで汚損された状態では後述されるトラッキング劣化を生ずる。

固体絶縁に付随する表面雰囲気とか、内部微小ボイドの存在を完全に除去することは技術上、常に可能であるとはかぎらない。この状態で高電圧が印加されると、固体に比して破壊電圧の低い気体中で放電が生じ、そこに豊富な自由電子、イオン、励起原子などが生成され、光、熱作用を伴って、種々の劣化作用を固体に及ぼす。このとき有機高分子は無機物質に比して劣化を受けやすい。部分放電による劣化を現象的にみると、まず放電の発生による部分放電の固体の全面的侵食が起こり、ついで放電が局部に集中してこの部分の放電エネルギー密度が増加し、侵食穿孔速度の上昇を引き起こし、ついに全路貫通破壊に至る。これらの劣化様相をフローチャートにしたのが図1で本規格の付録となっている。

〈3・2〉 熱的劣化要因 化学反応を促進する温度上昇は、劣化の速度を増大し、素材の寿命を短縮する最も一般的な劣化要因である。機器の温度上昇限界も素材の熱劣化の観点から決定される場合が多い。熱劣化反応が進行し、高分子素材に対する最低要求性能に低下すれば、それ以上の使用は不可能となる。したがって、これら劣化の進行速度は素材の実用寿命を支配する重要な因子である。また、これらの温度に対する関係が明らかになれば、高温における加速劣化試験から使用温度における寿命を推定することができる。反応物質の濃度を C 、反応速度定数を K 、反応活性化エネルギーを E とすると次の関係が成立する。この劣化ベースに電気絶縁システムの劣化様相をフローチャート

図1 電氣劣化フローチャート

Fig. 1. Flow chart of electrical deterioration.

図2 熱劣化フローチャート

Fig. 2. Flow chart of thermal deterioration.

にしたのが図2でやはり本規格の付録となっている。

$$\frac{dC}{dt} = -K \cdot \phi(C)$$

$$K = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

この式を用いて加速率等の計算を行う。

〈3・3〉機械的劣化要因 機械適応力、振動などが中心で、これらは外来的な機械力以外に、熱膨張係数の相違による熱ひずみ力、短絡大電流による電磁応力などから誘発される。絶縁材料は耐電圧材料であるとともに、多くの場合、構造材料でもあるので機械的ストレスを受ける。したがって、高分子主鎖の切断などに起因する機械特性の低下が生じるが、これを機械的劣化という。機械的劣化のプロセスとして①クリープ応力緩和、②繰返し応力による疲労の2種類が考えられる。高分子は機械的性質として粘弾性体であるので、一定の荷重がかかるとレオロジカル変形(クリープ)を起こし、ついに破壊したり、一定の変形が持続すると、内部応力が緩和(応力緩和)して反発力がなくなったりする。これらの速度は速度過程論に従い、熱劣化と同様なアレニウス式が成立する場合が多い。

高分子の応力緩和は大別して物理的緩和と化学的緩和がある。前者は分子鎖の再配列に対応している。後者はメカノケミカルな反応が関与しているもので、化学反応として主鎖や側鎖の切断反応、交換反応および架橋反応がある。例として、高分子がメカノケミカル反応で微小なクラックやボイドが形成されることがポリエチレンなどで確認され

ているが、応力下の巨大分子が始めに熱的ゆらぎで切れて、二つの末端遊離基と安定末端グループをつくる。内部遊離基の切断によって安定原子グループと末端基を生成する。

巨大分子の鎖劣化の結果、サブマイクロボイドができる。これはストレス・クラッキングの一種であるが、表面で起こるときは酸素のほか、化学薬品などで促進されることが確認されている。

一方、繰返し反応による高分子の破壊を疲労破壊あるいは単に疲労という。回転振動や電磁振動を受ける電気機器の絶縁にとって重要なプロセスである。多くの高分子では疲労限界は一般に静的引張り強度の20~30%の間にある。これらの機械ストレスによる劣化様相をフローチャートにしたのが図3で本規格の付録となっている。

〈3・4〉環境的劣化要因 原子炉内、放射性元素あるいは粒子加速器による高エネルギー放射線(中性子線、γ線、X線、電子線など)環境下においては物理的、化学的劣化が促進される。また、反応性物質、吸湿による加水分解、さらに微生物による侵食も注目されている。

極性基をもつ高分子、とくにOH基やNH基などをもつ高分子は吸湿性が高く、親水性高分子とも呼ばれる。他方、ポリエチレンやポリ四ふッ化エチレンのように無極性高分子は、一般に吸湿性が低く疎水性高分子と呼ばれる。吸湿された水は、固体表面に吸着した吸着水と固体内部に浸透した吸収水に大別されることもある。このような吸湿によって、高分子材料はその密度とか機械的、電気的性質などの物理的変化を生ずるほかに、加水分解などによる化学的変化を生じ、一般にそれらの総合的性能が劣化してくる。さらに、前述したような浸水課電によって水トリ現象のような劣化も生ずる。

(1) 吸湿による密度変化 一般に、高分子は吸湿により膨張し、その密度が変化する。乾燥高分子密度が1g/cm³以上の材料では、吸湿率が小さいときには吸湿によって密度増加をきたすが、やがて極大値を示し、減少する傾向を示す。これは小さい吸湿率では、水は高分子に含まれる自由体積を埋めることによって密度上昇をきたすが、大きい吸湿率では高分子鎖間を押し広げて密度の小さな水が入りこむため、密度低下をおこすことによる。

(2) 吸湿と機械的性質の変化 例えばアクリル(PMMA)は吸湿によりヤング率が低下する。これは低分子の水が高分子鎖間に入って分子間隔を広げ、分子間相互作用を減少させたことによる。吸湿による機械的特性の低下は一般的なものではあるが、詳細な影響の検討には高分子の機械的緩和現象を調べるのが有効である。

(3) 吸湿による電気的性質の変化 水の比誘電率は約80(25℃)と大きく、また水分子は1.83DUの双極子モーメントを有するので、吸湿は電気的性質に大きな影響を与える。吸湿による電気的性質への影響は一般に①誘電率ε', 誘電率ε'' (=ε'・tanδ)の増大, ②水分子による可塑化効果による誘電損失の最大値を示す周波数の低周波側への移動, ③イオン伝導の増大による表面および体積抵

図3 機械劣化フローチャート

Fig. 3. Flow chart of mechanical deterioration.

抗率の低下, ④絶縁破壊の強さの低下などがあげられる。

(4) 加水分解 加水分解が, 最初に調べられた高分子はタンパク質とセルローズであるが, 近年多くの合成高分子たとえばポリアミド, ポリアクリレート, ポリウレタンなどに拡張された。加水分解速度は高分子中の水の量に比例するが, その様子は高分子の結合や配向性などの固体状態, 誘電率, 水の PH などによって左右される。

〈3・5〉複合劣化 一般に, 前記の各要因が単独で作用する劣化に比して, これらが複合して作用する場合が多い。このときの劣化は近似的に単独の時の劣化の重ね合わせになる場合と, 単独の場合の単純な重ね合わせより大きく劣化が促進される場合がある。とくに, より大きく劣化が促進される場合には複合劣化として特別な取り扱いをする。2 種以上のストレスで絶縁物の性能が低下することを複合要因劣化という。実際, 多くの劣化過程が複合要因劣化である。前述の熱ストレス劣化, 電圧ストレス劣化, 機械ストレス劣化, 環境ストレス劣化は一応単一ストレス劣化と考えることにする。ここでとりあげる劣化は, 複合ストレス劣化の中でも比較的研究の進んでいるもので, 水トリリー劣化, 放射線・熱劣化, 電圧・機械・熱劣化である。XLPE ケーブル絶縁体に発生する水トリリーは電圧と水の 2 要因が原因となる劣化過程であり, 原子力発電所用ケーブルの放射線・熱劣化, 回転機巻線絶縁の電圧・機械・熱劣化は語句の示すように 2~3 要因が原因となる劣化過程である。水トリリーは 2 要因がそろわなければ起こらない現象であるが, 他は独立でも劣化する。

(1) 水トリリー ポリエチレンを水中に浸漬し, 交流電圧を長時間印加するとポリエチレン層に生ずる白濁したリングは直径数 [μm] の微小ボイドの集まりで, その中に水が入っている。ポリエチレンにおける水トリリーの発生状況はボータイ状トリリー以外に内側導体から発達するものも見いだされている。このように, 水トリリーは電極と高分子の境界における不整部や高分子内の異物, ボイドなどの不整部を起点として発生する。その進展機構として, ボイドやクラック中に水が侵入し, 局部高電界を生じ, これらによる電気・熱破壊, 水の気化に伴う応力破壊あるいは繰返し静電応力による機械的な破壊で生ずることが考えられている。水トリリーはポリエチレン以外にもシリコン樹脂, エポキシ樹脂, ポリプロピレン, ポリ塩化ビニル, エチレン酢酸ビニル共重合体などにおいても観測されている。

(2) 放射線・熱劣化 原子力発電所に用いる電線・ケーブルは, 通常の条件以外に特殊な環境にさらされる。実際には放射線ばかりでなく, 同時に熱, 湿気あるいは化学薬品にさらされる複合要因劣化が発生する。放射線劣化の基礎プロセスは高分子に放射線が照射されるとラジカルが発生し, 架橋や酸素反応が起こることである。したがって, ポリエチレン, ポリスチレン, ポリアミド, 天然ゴム, シリコン樹脂などは架橋, ポリイソブチレン, PMMA,

PTFE, セルローズ等は切断形である。

(3) 電圧・機械・熱劣化 高電圧回転機巻線絶縁はマイカ箔 (はく) を主絶縁とし, エポキシ樹脂などを含浸・重合したものであるが, これらに高電圧, 機械力, 熱などのストレスが同時にかかる複合要因劣化を起こす。各劣化要因には直接相互作用と間接相互作用があり, $V \cdot t = C$ (一定) を一般化した life capacity の考え方がある。ここで直接相互作用とは, 影響要因が同時に作用した場合のみ現れる相互作用で, 例えば (電圧 + 熱) 複合要因劣化で, 熱劣化が実質的に起こらない温度および時間の範囲でも $V-t$ 特性が温度上昇とともに短寿命側に平行移動する現象のように, 一つの要因で (ここでは温度) が単独では劣化を促進しないにもかかわらず, 他の劣化に直接影響を及ぼすものである。また間接相互作用とは, 影響要因が同時に作用した場合でも, 逐次的に作用した場合でも本質的に変わらない相互作用で, 例えば, (機械 + 熱) 複合要因劣化において, 機械的劣化によって絶縁内部に層はく離が起これば, 実効的な熱伝導率の低下によって局部温度は上昇し, さらに酸素の供給速度も増大して熱劣化が促進される現象のように, 第 1 の劣化要因が第 2 の劣化要因に直接作用するものではなく, 第 1 要因によって劣化が起こり, それが第 2 要因劣化に影響を及ぼすような過程に対応する。

4. おわりに

本稿ではシステムの比較評価に使用される各種規格の基本的な考え方を述べた IEC 60505 規格中での絶縁システムの劣化要因の概要を紹介した。従来から絶縁材料単体の劣化機構はかなり研究されているが, 実際の機器の中では当然絶縁システムとして使用されているため, 絶縁材料単体の劣化とはかなり異なる場合も考えられることは十分注意する必要がある。そのために 60505 は, 機器中の絶縁材料が絶縁材料単体としてだけでなく絶縁システムとして十分な性能を有しているか, すなわち電極構成を考慮した上でどう劣化して行くかを評価することを目的としている。

この規格が新しく開発した機器に使用される絶縁システムの適切な評価や, 研究のグローバル化に役立てば幸いである。

(平成 15 年 4 月 18 日受付)

岡本達希 (正員) 1976 年 3 月名古屋大学大学院電気工学専攻修士課程修了。同年 4 月 (財) 電力中央研究所入所。現在電力部長。98 年より 01 年 3 月まで名古屋大学理工学研究センター寄附研究部門客員教授。主として電気絶縁材料に関する研究に従事。工学博士。83, 94, 99 年電気学会論文賞受賞。IEEE 会員。