

電力機器における絶縁材料技術の横断的評価

Cross-Equipment Evaluation of Material Techniques Based on Electrical Insulation Performance in Electric Power Equipment

大久保仁⁽¹⁾ 岡部成光⁽²⁾ 村瀬 洋⁽³⁾ 羽馬洋之⁽⁴⁾ 匹田政幸⁽⁵⁾ 白坂行康⁽⁶⁾
H. OKUBO, S. OKABE, H. MURASE, H. HAMA, M. HIKITA, Y. SHIRASAKA

Abstract The prospective impact of this paper lies in its contribution to the development of electrical insulating material technology, based on physical mechanisms that dominate discharge phenomena and electrical insulation performance, and the rationalization of insulation design for power equipment by understanding the current limits of size reduction and increased stress. In addition, technological guidelines on decision-making for life extension and refurbishment of future high-voltage power equipment with various kinds of insulating materials are expected to be developed. Concretely, the following contents are described. Common and divergent points on insulation techniques from material and equipment viewpoints were clarified. Especially, internal stresses of insulating materials for power equipment were compared, where the ratio of ac testing stress to operating stress can be used as an index to show the long-term deterioration or the complexity of insulation structure. The relationship between insulating material and electric charge behavior was investigated and systematically interpreted by introducing a new index. When the charge density was analyzed by the surface resistivity of solid insulators, comparative evaluation of insulation characteristics in different power equipment was possible. The relationship between the deterioration processes of the insulating material and insulation design of power equipment was investigated. Factors and evaluation parameters that will determine the life of equipment were analyzed. Then the differences were attributed to the basic insulation structure. The relationship between harmful partial discharge levels and kind of insulating material was discussed. Cross-equipment comparison was made in terms of preferable sensitivity, present possible sensitivity, decision criteria and the level determined by standard. The concept on insulation design stress for different insulating materials and power equipment was systematically summarized, taking into account various factors that appear explicitly in the procedure of determining the design stress, such as statistical data deviation, long-term deterioration, design margin and so on. And cross-equipment comparison was made from the view point of how severe design to carry out. Then the future prospects of the insulation design were discussed.

1. まえがき

UHV 機器, HVDC 機器や CV ケーブルの導入に見られるように, これまで機器の高電界化が進み, 絶縁設計の進歩が加速されてきた。ところが, 変圧器, 開閉装置, ケーブルといった個々の機器に注目した場合, 高電圧化やコンパクト化は限界に達した感があり, 高電圧絶縁技術の飽和感, 閉塞感がある。このような問題を乗り越える一つの有力な解として, 絶縁材料に関する共通技術の各機器間の横断的評価が考えられる。これにより, 特に, 各種の絶縁材料を用いた高電圧電力機器の延命あるいは更新の判断に

対する技術的指針が与えられることが期待される。しかしながら, 従来の絶縁技術は個々の材料や機器に分類され, 垣根を取り払った共通技術という観点からの検討はあまり実施されてこなかった。

このような状況の下で, 本論分では, 放電, 絶縁, 機器診断といった, 広範囲な絶縁材料や, 変圧器, 開閉装置, ケーブルなどの電力機器に共通な技術を相対的に見直し, 機器共通の技術を抽出し, 横断的評価を通して技術を体系化する。

なお本論分は, 国際大電力システム会議 (CIGRE) での発表論文 D1-206 (2006) の和訳版である。

⁽¹⁾ 名古屋大学 エコトピア科学研究機構 (名古屋市)
⁽²⁾ 東京電力 (株) 技術開発研究所 (横浜市)
⁽³⁾ 愛知工業大学 工学部 電気工学専攻 (豊田市)
⁽⁴⁾ 三菱電機 (株) 開閉機器製造部 (尼崎市)
⁽⁵⁾ 九州工業大学 工学部 電気工学科 (北九州市)
⁽⁶⁾ (株) 日本 AE パワーシステムズ 変圧器部 (日立市)

2. 絶縁材料の共通絶縁特性

表 1 に絶縁材料, 絶縁構成別の V-t 特性のパラメータ n, ワイプルの形状パラメータ m, a, およびインパルス比 R を示す[1]。SF₆ ガス (気体絶縁) では, n と m が大きく a が小さい。これは弱点破壊で, 絶縁破壊までの時間のばら

表 1 絶縁材料・構成の破壊特性を記述する様々なパラメータの値。括弧内は部分放電(PD)発生モードに対するパラメータの値を示す。

Insulation type	Material/structure	V-t	Weibull shape parameters		Impulse ratio R	Region
		n	m (voltage)	a (time)		
Gas	SF ₆	82.0	25.4	0.31	1.39	B
Liquid	Oil	16.8	8.0	0.49	2.35	A
Liquid/solid	Oil duct barrier	13.2 (35.9)	12.3 (16.1)	0.9 (0.42)	2.49	C
	Section to section	10.9 (39.9)	8.2 (16.0)	0.76 (0.40)	1.95	C
Solid/liquid	Turn to turn	18.1 (46.0)	14.0 (14.0)	0.77 (0.30)	1.74	D
Solid	XLPE	16.0	1.8	0.11	1.52	B
	Epoxy resin	16	6.4	0.40	1.43	B

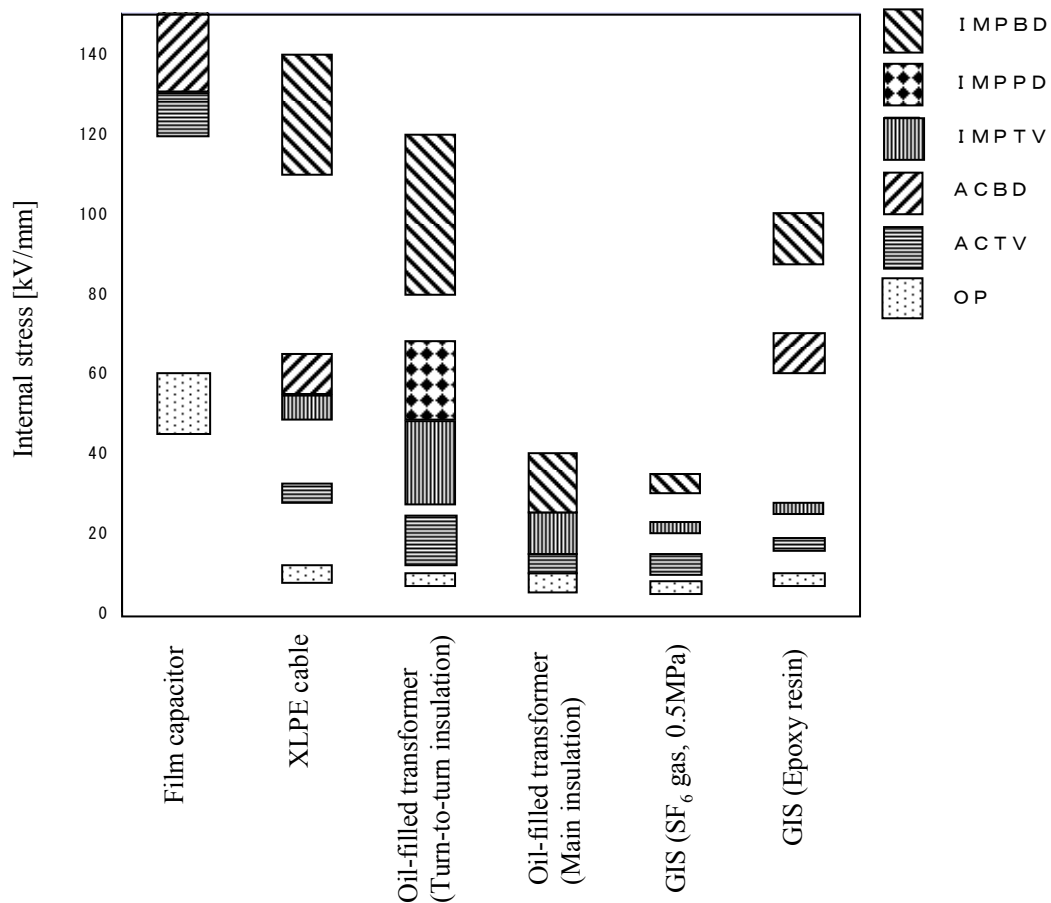


図 1 種々の電圧に対する機器の内部電界。IMPBD : インパルス破壊電圧, IMPPD : インパルス部分放電開始電圧, IMPTV : インパルス試験電圧, ACBD : 商用周波破壊電圧, ACTV : 商用周波試験電圧, OP : 運転電圧

つきは大であるが、絶縁破壊電圧のばらつきは小さくなることを意味する。油道バリア絶縁、セクション間絶縁（液体を主体とした固体との複合絶縁）、ターン間絶縁（固体を主体とした液体との複合絶縁）は次の共通した特徴がある。すなわち、絶縁破壊は油浸セルローズ固体絶縁で決ま

るが、 n, m が小さく a が大きい。これは偶発破壊で、破壊電圧のばらつきが大きい現象である。ポリエチレンやエポキシ（純固体絶縁）では n, m, a ともに小さい。これは弱点破壊で、絶縁破壊までの時間も破壊電圧もばらつきが大きい現象である。

この特性を基に機器の寿命中の過電圧を換算し絶縁試験電圧を決定することが行われている。本来の V-t 特性は劣化による変質のない確率現象を表しているが、実際の機器においては長期間使用による特性の劣化を安全係数など現象論とは別に考慮している。また通常の試験では短期間、数時間からせいぜい数ヶ月で特性を求めため印加電圧が高めで小さい n が得られ易く、長期間の試験の実施により製造技術の進歩と相まって n が時代と共に大きくなることもある。

表 1 中のパラメータ a と R を用いた絶縁材料や絶縁構成の分類は興味深い[2]。まずパラメータ a の値を 2 領域に分割する。すなわち 0.5 より小さい領域（初期破壊）と、0.8 より大きい領域（偶発破壊）の 2 領域である。また、パラメータ R についても 2 領域に分割する。1.9 より大きい領域と、1.8 より小さい領域の 2 領域である。この 2 パラメータの分割領域を組み合わせると、4 領域、A,B,C,D を得る。

A 領域は、小さな a と大きな R で特徴付けられる。この領域は初期破壊の特徴を有し、油ギャップ（液体絶縁）が含まれる。大きな R の値は、油中の微粒子のような欠陥の出現時間が印加波形の継続時間に対して長いことによる。

B 領域は、小さな a と小さな R で特徴付けられる。この領域も初期破壊の特徴を有し、SF₆ ギャップ（気体絶縁）や SF₆ ガス中のエポキシスペーサ沿面（気体を中心とした固体との複合絶縁）が含まれる。小さな R の値は、弱点の出現時間が印加波形の継続時間に対して短いことを意味している。

C 領域は、大きな a と大きな R で特徴付けられる。この領域は、偶発破壊の特徴を有し、油浸セクション間や油道バリア絶縁の全路破壊モードが含まれる。大きな R の値は部分放電（PD）のような先行現象が存在することを意味している。

D 領域は、大きな a と小さな R で特徴付けられる。この領域は、偶発破壊の特徴を有し、油浸ターン間の全路破壊

やエポキシの貫通破壊が含まれる。小さな R の値は、放電形成遅れ時間が短い（真性破壊）ことによると考えられる。

ここで、パラメータ R（インパルス比）は設計電界を決定する上で、どの種類の電圧が設計基準に最も影響するかを評価するとき重要となる。

各電力機器の内部電界を相対比較すると、図 1 のようになる[2]。運転電圧（OP）、商用周波試験電圧（ACTV）、商用周波破壊電圧（ACBD）、インパルス試験電圧（IMPTV）、インパルス破壊電圧（IMPBD）のそれぞれによる機器の内部電界が示してある。なおインパルス電圧と商用周波電圧の大小関係を直接比較できるように、商用周波電圧は波高値で表してある。運転電圧による内部電界は、コンデンサ>ケーブル>変圧器≒GIS の順であることがわかる。これは機器内部にかかる各種電界の特徴と内部絶縁構造の複雑さとの関係である。また図 1 より商用周波試験電圧と運転電圧との比が大きいものは、長時間 V-t 特性の傾きが大きい。すなわち n が小さいことを示している。例えば GIS 中のエポキシスペーサの n は 15 から 8 程度であり、SF₆ ガス中の 74~80 に比べて小さく、n を比較すると良く理解できる。図 1 で示したものは一例であるが、このように機器を横断して特性を相対比較することにより、多くの新しい知見が明らかになる。

3. 電荷蓄積現象

電力機器の縮小化やコンパクト化により内部電界の増大は避けられず、その結果として交流機器でも絶縁物への帯電現象が問題となる場合がある。この典型的な例として、GIS スペーサの帯電、油入変圧器の流動帯電、真空遮断機のセラミック絶縁物の帯電などが挙げられる。たとえば GIS の固体絶縁物表面に電荷が蓄積された状態で印加電圧の極性が反転すると、耐電圧が低下する場合がある。文献[3][4]には、40nC/cm²の電荷蓄積で約 60%の耐圧低下が報

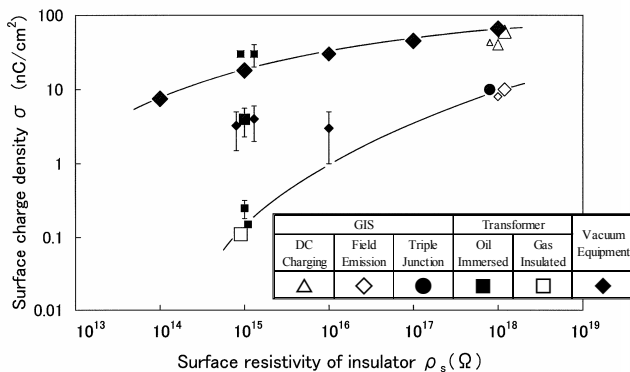


図 2 GIS, 変圧器, 真空高電圧機器の固体絶縁物への帯電電荷密度 σ と絶縁物表面抵抗率 ρ_s との関係。

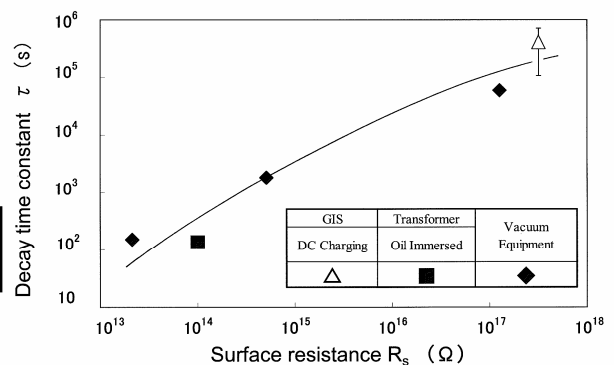


図 3 帯電電荷の減衰時定数 τ と固体絶縁物の表面抵抗 R_s との関係。

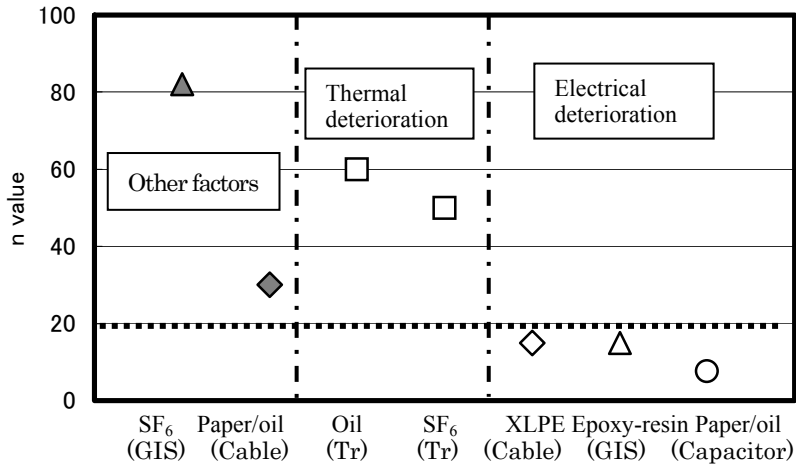


図 4 V-t 特性の n の値と機器の寿命を決定する劣化要因。

告されている。電荷の発生原因としては、電界電子放出やトリプルジャンクション部での電界集中が考えられる。

図 2 に GIS, 変圧器, 真空高電圧機器を対象として, 各機器で適用されている固体絶縁物への帯電電荷密度 σ と絶縁物の表面抵抗率 ρ_s との関係を示す。図 2 の上方の曲線は, 各固体絶縁物の表面抵抗率での最大帯電電荷密度を近似していると考えられる。図 3 は, 帯電電荷の減衰時定数 τ と表面抵抗 R_s との関係を示したものである。ここでは, 図 2 の元データを示す実験のうち τ が測定されているものすべてをプロットした。

図 2, 3 より, 表面抵抗が低いほど帯電電荷密度は低下し, また電荷の減衰も早いという傾向が伺える。これは, 固体絶縁物で帯電が進行する際に表面での漏えい電流による電荷の消滅も生じており, 両者の平衡状態に達したときに帯電電荷密度が決定されることを示唆している。また, 文献[5][6]で提案されている固体絶縁物への低抵抗コーティングを適用すると, 各機器で帯電の抑制に有効となる可能性がある。

油入変圧器の場合は, 主絶縁媒体である鉱油の体積抵抗率は, 油中で使用されるプレスボード, 混抄ボードや PET などの固体絶縁物より低い。一方 GIS では, 主絶縁媒体である SF₆ ガスの体積抵抗率はほぼ無限大で, 使用される固体絶縁物であるエポキシ樹脂の体積抵抗率より非常に高い。このことから GIS の場合では, 一度固体絶縁物に帯電が生じると電荷は固体絶縁物を通してしか減衰せず, 非常に電荷が逃げにくいことを示している。

従って, GIS をはじめ, 同様に主絶縁媒体の体積抵抗率が固体絶縁物に比べて非常に高いガス絶縁変圧器や真空高電圧機器では, 上記で示した固体絶縁物への低抵抗コーティングが特に有効と考えられる。しかしながら, 今回の評価ではデータ数が十分ではないことから, 今後より多くの詳細データを用いた横断の評価が必要である。

4. 劣化現象

寿命に大きく影響する長時間領域の絶縁劣化を評価する V-t 特性から, 各機器が絶縁性能評価に採用している代表的な n の値をまとめると図 4 に示すようになる [7][8][9][10]。n が 20 前後で大きく区分され, n が 20 以上の領域では寿命に影響する主要因は絶縁劣化以外の項目であり, 逆に n が 20 以下のものは絶縁劣化が寿命そのものを決定していると考えられる。

これらの絶縁構造を比較してみると, スペーサ内部や CV ケーブルのような固体または固体と電極の界面のような微小ギャップまたはボイドなどの欠陥が固定される絶縁構成では, その欠陥での絶縁特性が支配的となり, 劣化の大きな絶縁特性になっているものと推定される。一方, 気体または液体との複合絶縁では, 気体および液体に絶縁の回復特性があるのと固体絶縁物との境界に欠陥が難しい, または油浸絶縁のように微小領域での境界が相互に融合したように鮮明でない構成は, その絶縁特性に悪化要因が少ないために劣化特性が比較的良いものと推定される。従って, 前述の固体絶縁においても境界条件を改善するなど欠陥を低減することにより, 絶縁劣化特性を向上させる可能性を持っていると推測される。

ただし, キャパシタは様相が異なる。すなわち, n が極端に小さいにもかかわらず油入紙キャパシタは微小領域での油と紙の境界が融合したように鮮明でない構成を持っている。この相違として次の 2 点が挙げられる。1 点めは, 箔電極端部の電界集中である。2 点めは, 開閉サージのような過電圧が起因する部分放電による生成物が同一場所に残留する点である。このような絶縁構成では, 箔電極端部の電界集中を緩和することが重要となる。

5. 部分放電測定および診断技術

欠陥により誘起される絶縁劣化には, 部分放電現象という兆候がある。この放電の生成物と欠陥を取り巻く絶縁物質との相互作用により, さらなる劣化が進展する。部分放電の有害性は, 高エネルギーで高温度の部分放電生成物に

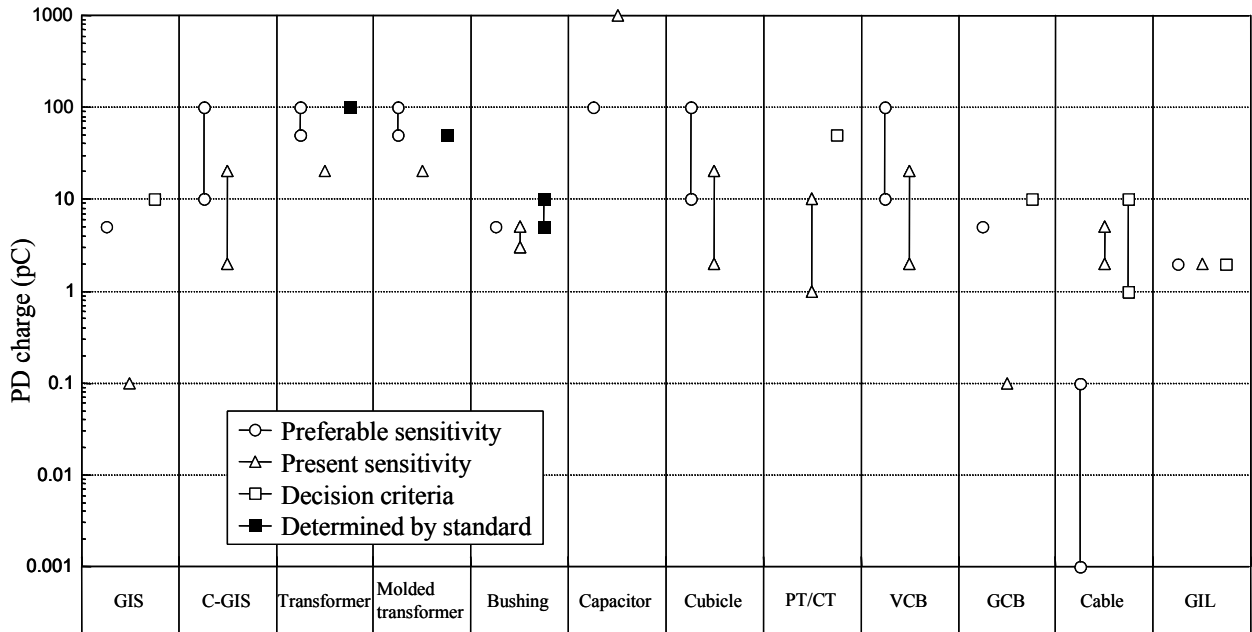


図 5 部分放電測定・診断の 望ましい感度，現実に達成可能な感度，判定基準感度，および規格に記載されている感度の各機器間の横断的比較。

より決定され、部分放電にさらされている絶縁物の誘電的特性を永久的に変化させたり、劣化させたりする。部分放電の有害性に対する材料の耐性は、材料の種類により大きく異なる。有機絶縁材料では、耐部分放電性が低く、本質的な劣化に至る。一方、マイカやセラミックなどの無機材料は耐部分放電特性が相対的に高く、有機材料に比較して、より高い部分放電許容レベルとなる。例えば、大きな高電圧回転機の場合にはマイカをベースとした絶縁構成となるが、この場合には、数千 pC レベルの部分放電があっても、運転には影響がない。一方、ケーブル絶縁の場合には、数 pC 以上の部分放電レベルで絶縁が耐えられない。

機器を横断して眺めるとき、測定原理や測定方法は同じであっても機器の特異性から必要な検出感度や測定技術が異なる場合がある。こうした各機器に対する部分放電測定の対比を基に、機器を横断して共通に使用されている部分放電測定技術である検出インピーダンス法 (IEC60270 に記載の方法) を用いた場合の判定基準、望ましい感度、現在得られている最高感度などを関連規格とともにまとめたのが図 5 である。

部分放電試験は多くの規格で採用されているが、そのほとんどは検出インピーダンス法であり、試験時の印加電圧を系統電圧の 1.1 倍から 2 倍程度で測定される場合が多い。判定基準としては IEC 等の規格ではその許容値を変圧器 100pC、ブッシング 5~300pC などと明記している場合もあるが、多くの場合測定時の許容ノイズレベルを規定し [11] 部分放電は検出されないこととされている。機器の絶縁健全性を判断するのに必要な検出感度は、絶縁材料の劣化、絶縁性能低下と電荷量や発生部位との関係から決定さ

れるべきであろう。しかしながら、こうした論文は極めて少なく、先に記した機器の規格でも判定基準は測定環境下で実現し得るバックノイズの大きさから決定されているのが実状のようである。

6. 絶縁設計の将来展望

機器を設計するとき、我々は設計基準を必要とする。絶縁設計では基準は一般に「設計電界」で与えられる。この設計電界は許容され得る電界値の上限を与える。上限値は、基本的にはそれぞれ運転電圧 (OP)、商用周波試験電圧 (ACTV)、インパルス試験電圧 (IMPTV) に対して与えられるべきものである。しかしながら、この上限値をどれか一種類の電圧に対して与えておけば、他種の電圧に対しては自動的に上限値が満たされることが多い。この一種類の電圧に対する上限値をここでは「設計電界」と呼ぶことにする。また「設計電界」を与える電圧の種類を「支配的な電圧」と呼ぶことにする。

E_{50} (50%破壊電界) に対する設計電界の比率と設計電界を決定する要因 (設計電界決定要因) の割合を図 6 に示す [12][13][14][15][16][17]。2 重枠が E_{50} で規格化した設計電界である。また、 E_{50} と設計電界の間の空間を、設計電界決定要因の割合に従って分割してある。図中、XLPE(CV) は例外で、支配的な電圧が 2 種類存在する。

E_{50} に対する設計電界の割合は、どの程度厳しい設計基準を設けているかという観点で興味深い。しかし、IMPTV と OP との直接的比較は不可能である。従って、OP が支配的な電圧となる場合には、ACTV の値も同時に記載した。

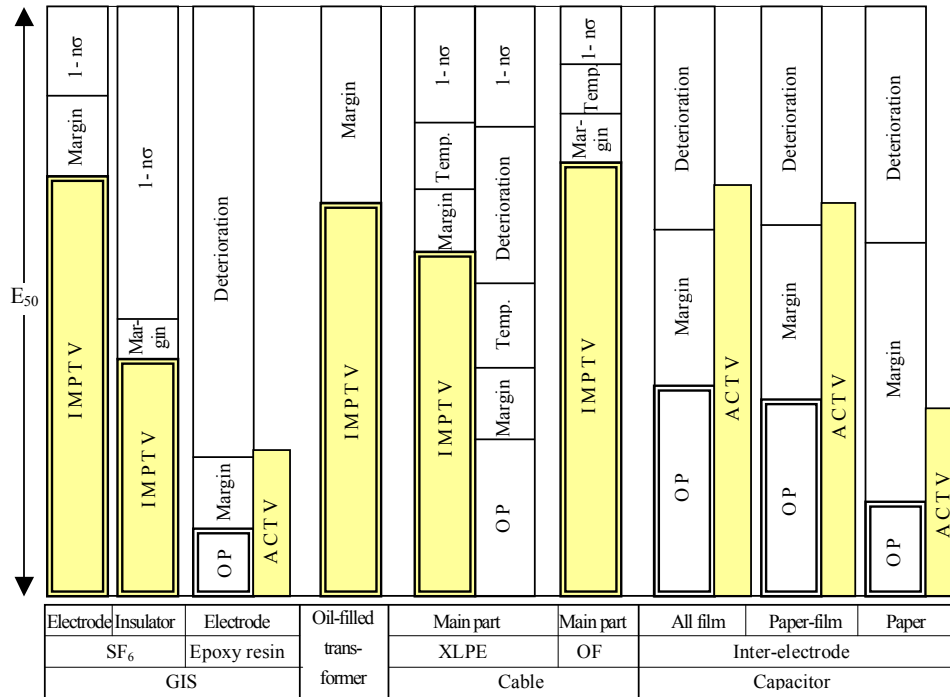


図 6 50%破壊電界 (E_{50}) で規格化した設計電界 (2 重棒) と設計電界決定要因の相対的比重。設計電界と E_{50} の間の空間を決定要因の比重に従って分割している。

この図 6 から次の結論を得る。(1) 多くの場合, IMPTV が支配的となる。従って, LIWV の低減は絶縁設計の合理化にとって効果的となり得る。(2) GIS のエポキシスペーサのバルク絶縁は極端に大きな設計電界決定要因として, 劣化を考慮している。今後の検討によりこの状況が改善され得る。(3) 本章で記述する設計基準は 3 章で議論した帯電現象を設計電界決定要因として含んでいない。裕度 (Margin) なる要因に含まれているものと考え。もし, すべての未知なる帯電現象が解明されれば, この裕度の割合は減少し得る。(4) 設計基準は 5 章で議論した部分放電測定, 診断技術による効果を含まない。もしこの技術が確立されれば, 劣化する要因に伴う大きな設計電界決定要因を低減し得る。

7. むすび

本論分では, 様々な絶縁材料や, 変圧器, 開閉装置, ケーブルといった電力機器に共通の放電技術, 絶縁技術, そして機器診断技術に注目し, 様々な検討を展開した。特に, 電力機器の電気絶縁特性, 絶縁設計, 材料技術などを相対的に見直し, 機器共通の技術を抽出し, 横断的評価を通して技術を体系化した。また, それら技術の将来展望も要約した。

本議論により, 各種の絶縁材料を用いた高電圧電力機器の延命あるいは更新の判断に対する技術的指針が与えられることが期待される。さらに, 機器の横断的共通材料技術の評価は, 絶縁設計の最適化と, 将来の電力機器設計のブレークスルーに貢献するものと期待する。

参考文献

- [1] 電気学会技術報告 518 号「試験電圧と機器の絶縁に関する諸特性」, (1994).
- [2] S.Okabe, N.Hayakawa, H.Murase, H.Hama and H.Okubo, "Common Insulating Properties in Insulating Materials," IEEE Trans. DEI Vol. 13, No.2, pp.327-335 (2006)
- [3] H.Fujinami, T.Takuma, M.Yashima and T.Kawamoto, "Mechanism and Effect of DC Charge Accumulation on SF₆ Gas Insulated Spacers", IEEE PES Winter Meeting, 89 WM 076-1 PWRD (1989).
- [4] 長谷川川まか, 「直流ガス絶縁技術」, 三菱電機技報, 57, No.10, pp.698-701 (1983).
- [5] Fujii, "Control of Charge on Insulating Glass in Vacuum by Plasma Processing", IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, 9, No.2, 230 (2002).
- [6] F.Messerer et al., "Enhanced Field Calculation for HVDC GIS", Gaseous Dielectrics IX, pp.473-483 (2001).
- [7] 電気協同研究, 第 55 巻, 第 2 号, 「OF ケーブルの保守技術」, (1999).
- [8] 電気協同研究, 第 44 巻, 第 3 号, 「絶縁設計の合理化」, (1988).
- [9] 電気学会技術報告第 668 号, 「特別高圧 CV ケーブル絶縁劣化形態と絶縁診断技術の動向」, (1998).
- [10] JEC 規格, 「OF ケーブルの高電圧試験法」, JEC-3401-1986, (1986).
- [11] JEC 規格, 「部分放電測定」, JEC-0401-1990 (1990).
- [12] H.Murase, S.Okabe, T.Kumai, H.Takakura, M.Takahashi and H.Okubo, "Systematization of Insulation Design Technology for Various Electric Power Apparatus," IEEE Trans. DEI Vol. 13, No.2, pp.400-407 (2006).
- [13] H. Aoyagi, H. Koyama, H. Murase, I. Oshima and H. Kanno, "Study of Electrical Breakdown Characteristics over the Surface of Insulator in SF₆ Gas", 8th ISH, Paper No. 34.04 (1993)
- [14] M. Honda, H. Aoyagi, M. Koya, N. Kobayashi and M. Tamura, "V-t Characteristics of Epoxy Mold Insulation for Sustained AC Voltage", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.5, pp.1017-1023 (1984)
- [15] M. Ikeda, T. Yanari and H. Okubo, "PD and BD Probability Distribution and Equi-probabilistic V-t Characteristics of Oil-Filled Transformer Insulation", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.8, pp.2728-2735 (1982)
- [16] 電気協同研究, 第 51 巻, 第 1 号, 「CV ケーブルおよび接続部の高電圧試験法」, (1995).
- [17] 電気学会技術報告 (II 部) 第 224 号, 「最近の油浸絶縁と将来展望」, (1986).

(受理 平成 20 年 3 月 19 日)