エポキシ樹脂とその複合材料の耐放射線性

正 員 園 田 克 己 (三菱電機)

正 員 林 修 (三菱電機)

正 員 田 中 譽 郎 (三菱電機)

正 員 平 林 庄 司 (三菱電機)

准 員 天 川 正 士 (早稲田大)

正 員 矢 作 吉之助 (早稲田大)

1. ま え が き

最近の増大する一方の電力需要に対して、エネルギーの供給安定性、経済性などから、原子力発電の果たす役割は増大しており、これと共に原子力発電所の安全性、信頼性の確保がますます重要視されている。このような中で、IEEE では 1E 級電気機器の品質認定基準を定め、格納容器内設計基準環境が模擬されている。また我が国においても、最近 IEEE の基準についての問題点が調査、検討され⁽¹⁾、そして環境試験推奨案が提案されている⁽²⁾。

一方、原子力発電所の格納容器内に設置されている電気機器としては、動機機器（モータ、バルブアクチュエータ）、計装機器（各種伝送器類）、電路（ケーブル、電気ペネトレーション）などがある。電気機器の絶縁材料には、例えばモータのコイルにおいては、エポキシ樹脂など熱硬化性樹脂が多く使用されているが、現実には数多くのエポキシ樹脂・硬化剤の組合せがあり、これらを機種、用途に応じて複数種組合せて工業的に利用している。こうしたことから電気機器に用いる絶縁材料は、耐放射線性およびそれに関連した環境について、実際の環境に適合できるように開発し、また実証する問題が重要となっている。

エポキシ樹脂に関する耐放射線性の検討は、以前に電気学会技術報告などにまとめられているが⁽³⁾⁻⁽⁵⁾、昨今の高分子工業の発展により種々のエポキシ樹脂が開発され、より高度な特性を有した材料が出現している。一方、絶縁材料は前述したように種々の環境にさらされるため、そうした環境下でも十分な特性を有している必要がある。とりわけ、原子炉冷却材喪失事故（Loss of Coolant Accident, LOCA と略記）時環境下での検討結果は、ゴムケーブルなどではいろいろ検討されているが、エポキシ樹脂についてはほとんど報告されていない。また、実際の機器に用いられるエポキシ樹脂複合材料のデータは皆無である。

以上のことから、本論文では実機に適用可能と考えられるエポキシ樹脂に関して、LOCA 時に想定される被曝線量についての放射線照射効果および LOCA シミュレーションについての検討結果を示す。

3 種類のエポキシ樹脂について、2 MGy 照射、LOCA シミュレーション後の電氣的、機械的特性について検討した。実験に使用したエポキシ樹脂は、以下の 3 種のものである。

(1) 代表的なエポキシ樹脂であるビスフェノール A 系エポキシ樹脂

(2) 耐湿性を向上させることを考慮して、ノボラック系エポキシ樹脂

(3) 耐放射線性ならびに耐湿性、耐熱性を付与することを目的とし、トリアジン系エポキシ樹脂

トリアジン系エポキシ樹脂は耐放射線性、耐 LOCA 性に優れ、ほとんど特性の変化は見られなかった。また、トリアジン系エポキシ樹脂／ノーマックス複合材料についても、放射線照射、LOCA シミュレーション後の電氣的、機械的性質が優れており、寸法安定性

Radiation Resistance of Epoxy Resins and their Composites.
By *Katsumi Sonoda*, Member, *Osamu Hayashi*, Member,
Takao Tanaka, Member, *Shoji Hirabayashi*, Member (Mitsubishi Electric Corporation), *Tadashi Amakawa*, Associate &
Kichinosuke Yahagi, Member (Waseda University).

園田克己：正員，三菱電機（株）生産技術研究所
林 修：正員，三菱電機（株）生産技術研究所
田中譽郎：正員，三菱電機（株）生産技術研究所
平林庄司：正員，三菱電機（株）生産技術研究所
天川正士：准員，早稲田大学理工学部電気工学科
矢作吉之助：正員，早稲田大学理工学部電気工学科

の優れた高耐熱性の絶縁材料であることがわかった。

2. 試 料

表 1 に使用した樹脂板および複合板の種類を、図 1 に樹脂の化学構造を示す（以下、各試料については表中の記号で記すことにする）。試料 B, N はイミダゾール系 (3pph) の硬化剤を用い、試料 T はトリアジンが 90%、ビスマレイミドが 10% のものを用い、加熱硬化させた。複合板は所定の形状になるように基材量を調整し、樹脂を真空含浸し、その後加熱硬化させたものを用いた。基材には集成マイカ（ガラス裏打集成マイカテープ）と、ノーマックス (Nomex. アラミッ

表 1 試 料

Table 1. Samples of epoxy resins and their composites.

形 態	試 料 名	略号
樹脂板	ビスフェノール A 系エポキシ樹脂	B
	ノボラック系エポキシ樹脂	N
	トリアジン系エポキシ樹脂	T
複合板	トリアジン系エポキシ樹脂/集成マイカ	MC
	トリアジン系エポキシ樹脂/ノーマックス	TC

(a) 試料 B

(b) 試料 N

(c) 試料 T

図 1 試料の化学構造

Fig. 1. Molecular structure of the sample.

ド紙, タイプ 424) を使用した。

3. 実験方法

〈3・1〉放射線照射方法 放射線照射は、大阪府立放射線中央研究所所有の ^{60}Co によるガンマ線の線源を用いた。照射は室温、大気中で行ない、線量率は 10^4 Gy/h で実施した。

〈3・2〉蒸気暴露試験方法 試験条件は、IEEE Std. 323 (1974) に準じ高温水蒸気暴露を行なった。化学スプレは、国内の PWR プラントでは使用していないことを考慮し、今回は除外した⁽²⁾。その試験条件を図 2 に示す。

〈3・3〉LOCA シミュレーション方法 〈3・1〉節の放射線照射 (ガンマ線照射を 2 MGy 照射) 後、〈3・2〉節に述べた蒸気暴露試験を行なった。本方法を、以下 LOCA シミュレーションと総称する。

〈3・4〉各種電氣的・機械的測定方法 電氣的特性測定は、誘電正接、絶縁破壊電圧 (以下、BDV と略記)、導電率について検討した。導電率、誘電正接測定は、試料に放射線照射、蒸気暴露、LOCA シミュレーションを行なった後、金を真空蒸着し、三端子法にて測定した。主電極の直径は 1 cm である。導電率測定は $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ の直流電界印加の下で、振動容量型微小電流電位計 (TR-84 M, タケダ理研製) を用いて行ない、大気中および飽和水蒸気圧における温度依存性 ($40 \sim 170^\circ\text{C}$) を検討した。導電率は電圧印加後、大略一定値に達した 3 分値を用い、また試料 T では、導電率の値がかなり小さいことから、測定性能の限界を超えるため 30 秒値により評価した。誘電正接測定は、誘電正接測定装置 (三菱電機製) を使用し⁽⁷⁾、その温度特性測定は熱風循環式恒温槽中で実施した。BDV 測定は、シリコン油中で行ない、球対平板電極構成とし、絶縁破壊自動測定装置 (三菱電機製) により交流 (60 Hz) BDV の実効

図 2 蒸気暴露試験条件

Fig. 2. Profile of exposure of saturated vapour.

表 2 各種測定用試料の形状
Table 2. Dimensions of test samples.

測定の種類	試料形状 厚さ (mm) × 横幅 (mm) × 縦幅 (mm)
導電率測定	1 × 50 × 50
誘電正接測定	0.5 × 50 × 50
絶縁破壊測定	0.5 × 200 × 200
曲げ強度測定	3 × 10 × 100
粘弾性測定	0.5 × 5 × 50
熱機械的測定	0.5 × 50 × 50

値を測定した。電圧上昇速度は 1.5 kV/s とした。

機械的特性測定は曲げ強度、粘弾性測定について検討した。曲げ強度測定は JIS 法に準じて、三点曲げ法で行ない、支点間隔 50 mm、クロスヘッドスピード 2 mm/min とし、オートグラフ (IS-5000, 島津製作所製) を使用して行なった。

粘弾性測定は REOVIBRON DDV-Ⅲ 形 (東洋ボールドウィン社製) により周波数 110 Hz、昇温速度は 1°C/min で測定した。なお、各種電氣的、機械的特性の測定用試料形状を表 2 に示す。

各測定は 5 個の試料の測定を行ない、その平均値をプロットし、またその標準偏差も示した。

4. 実験結果および検討

〈4・1〉 エポキシ樹脂の放射線照射効果と LOCA シミュレーションについて

(1) 放射線照射効果 蒸気暴露試験を実施する際に、図 2 からわかるように、その試験条件は最高 150°C に達するため、各試料について種々の特性の温度依存性を検討することは重要である。図 3 に BDV の温度依存性を示す。試料 B について、BDV の温度依存性は 100°C 以下ではほぼ一定の値を示すが、120°C 付近で急激な低下を示す。試料 N については、120°C 以下では一定の値を示し、130°C 付近で BDV 値は低下する。一方、試料 T は試料 B、N と比較して高温側 (150°C) まで一定の値を示し、150°C 以上でもそれほど BDV 値は低下しない。図 4 に各試料の BDV の室温と 155°C における線量依存性を示す。室温での BDV 値については、試料間での差異は認められるが、線量依存性についてはほとんど観測されないことがわかる。

これらのことより試料 B, N, T は、ともに BDV の耐放射線性について 2 MGy までは安定した特性を有することがわかる。また図 4 からわかるように、試料 B について 155°C 下での特性は、室温における傾向

図 3 BDV の温度依存性

Fig. 3. Temperature dependence of BDV.

図 4 室温と 155°C における BDV の線量依存性

Fig. 4. Dose dependence of BDV at RT and 155°C.

と同様な傾向を示し、線量依存性としては線量が増大しても BDV 値はほとんど変化しない。しかし、BDV 値は室温と比較して 1/3~1/4 程度となることがわかる。また、試料 N では試料 B と同様な傾向を示し、線量依存性はほとんど認められず、また BDV 値は室温での値の 1/3~1/4 程度になる。一方、試料 T に関しては室温と 155°C 下での BDV 値の差はほとんどなく、また線量依存性もほとんど認められない。

次に、各試料の機械的性質の温度依存性と、その放射線照射効果を調べるために測定した動的粘弾性の結果を図 5 に示す。試料 B について未照射の場合、力学

図 5 動的粘弾性特性(放射線照射効果)

Fig. 5. Dynamic mechanical properties after gamma-radiation.

的 $\tan \delta$ (以下, $\tan \delta$ と略記) のピーク温度は 121°C を示す。しかし, 2 MGy 照射後, $\tan \delta$ のピーク温度は若干増大することがわかる。また, 弾性率も上昇していることがわかる。このことは 2 MGy 照射により, 分子鎖の橋かけ密度が増大したことによるものと考えられる。また, 試料 N は未照射の場合, $\tan \delta$ のピーク温度は 132°C を示し, 試料 B と同様に $\tan \delta$ のピーク温度は 2 MGy 照射により増大し, また弾性率も上昇する。

一方, 試料 T は未照射の場合, $\tan \delta$ のピーク温度は 168°C と高い値を示し, また $\tan \delta$ の値は試料 B, N と比較して大きい値を示す。そして 2 MGy 照射後 $\tan \delta$ のピーク温度は増大し, また弾性率も上昇する。このことは, 放射線照射により橋かけ密度が増大したことによるものと考えられる。この動的粘弾性の結果を考慮すると, 図 3 において BDV の値が低下し始める点は, $\tan \delta$ のピーク温度と対応していることがわかる。すなわち, ピーク温度以下では試料がガラス状態であるため BDV 値は一定の値を示し, ピーク温度以上ではゴム状態であるため, BDV 値は低下したものと推定される。

また, 図 4 において試料 T は 155°C ではガラス状態を示すため, 室温における値とほとんど差が認められなかったものと考えられ, 試料 B, N は 155°C ではゴム状態を示すと考えられるため, 室温における値より低い値を示したものと考えられる。一方, 線量依存

性については, 橋かけ密度が 2 MGy 照射により若干増大するが, 曲げ強度とか交流 BDV 値などの弱点分布破壊を示す物理量にはあまり反映されなかったものと考えられ, このことより線量が増大してもほとんど曲げ強度, BDV 値が変化しなかったものと考えられる。

(2) LOCA シミュレーション LOCA シミュレーションの検討には, 蒸気暴露試験について検討しておく必要がある。図 6 に蒸気暴露試験後の動的粘弾性特性の結果を示す。試料 B, N とともに, 未処理の場合と比較して $\tan \delta$ のピーク温度が低下していることがわかる。また, 弾性率も減少している。このことより, 試料 B, N では高温水蒸気暴露により分子鎖の運動が容易になったものと考えられ, 例えばエーテル結合の加水分解による分子鎖の切断が生じている可能性が考えられる。試料 T では, 蒸気暴露後の特性は, 未処理の場合と比較してピーク温度, 弾性率ともに若干増加していることがわかる。このことより, 試料 T はエーテル結合が少ないため加水分解が少なく, 分子鎖の切断が比較的少ないものと考えられ, 高温水蒸気暴露に対して安定した特性を有する。

LOCA シミュレーションの検討では, 想定される LOCA シミュレーション環境での電気的特性の変化を評価する手段の一つとして, 高温水蒸気中での導電率評価の検討も行なった。また試料 B, N, T の導電率について, LOCA シミュレーションを行なった後の

図 6 動的粘弾性特性(蒸気暴露試験)

Fig. 6. Dynamic mechanical properties after exposure of saturated vapour.

- (1) 2MGy 照射, 蒸気暴露後の試料Bの大気圧下測定
- (2) 2MGy 照射, 蒸気暴露後の試料Bの飽和蒸気圧下測定
- (3) (1)と同一条件での試料Nについての値
- (4) (2)と同一条件での試料Nについての値
- (5) (1)と同一条件での試料Tについての値
- (6) (2)と同一条件でのT試料についての値

図 7 導電率の温度依存性

Fig. 7. Temperature dependence of electrical conductivity.

図 8 σ_0 と ϕ の相関

Fig. 8. Compensation law in three epoxy resins.

大気圧中と、飽和水蒸気圧中での導電率の温度依存性について検討した。図 7 にその結果を示す⁽⁶⁾。図からわかるように、各導電率 (σ) は近似的に次式

$$\sigma = \sigma_0 \exp(\phi/kT) \dots \dots \dots (1)$$

で表わすことができる。 σ_0 は pre-exponential term, ϕ は活性化エネルギー, k はボルツマン定数, T は温度を示す。 ϕ と σ_0 の値は、大気圧下での値と比較して、飽和蒸気圧中では増大していることがわかる。また試料 T は、試料 B, N と比較して最も小さい値を示す。

図 8 に σ_0 と ϕ の相関性について示す。図から σ_0 は ϕ に比例していることがわかる。これは試料中を移動するイオンの活性化エネルギー ϕ の増大が、試料構造のエントロピーに関係する項 σ_0 の増大に起因していることによるものと考えられ、試料のバルク構造の無秩序性が多ければ、それだけイオンは移動しやすいと考えられる。しかし、バルク構造の無秩序性が増えれば、それに伴いイオンの移動に必要なポテンシャル・バリアが増大することを示すものと推定される。

〈4.2〉 エポキシ樹脂複合材料の放射線効果および LOCA シミュレーションについて 前節での検討結果より、試料 T は耐放射線性についても湿熱的にも安定した特性を示した。これらのことから、試料 T の樹脂系を用いた複合材料についての放射線照射効果および LOCA シミュレーションの検討を行ない、その結果を次に示す。

(1) 放射線照射効果 図 9 に試料 MC についてのガンマ線吸収線量をパラメータとしたときの、誘電正接の温度依存性を示す。図からわかるように、吸収線量の増大と共に誘電正接のピーク温度が若干上昇していることがわかる。これは図 5 (c) の結果を考慮すると、マトリックス樹脂 (試料 T と同じ) の橋かけ密度の上昇によるものと推定される。しかし、2 MGy 照射した試料は 160°C 付近以上で誘電正接は急増し、測定不能に近いような大きな値を示した。また、この試料の外観を検討したところ、“ふくれ現象”が生じていることがわかった。このことは 1.5 MGy についても観測され、線量の大きい試料ほど多くの、また大きい、ふくれ現象が認められた。このふくれ現象を呈する試料の断面について、走査顕微鏡により顕微鏡観察を行なった。その結果を図 10 に示す。

(a) 図は未照射の試料であり、ふくれ現象がない試料の断面写真であり、(b) 図はふくれ現象が観測された試料の断面写真である。ふくれ現象の位置は、(i) マイカーエポキシ樹脂界面のはく離、(ii) マイカ自体のへき開によるはく離、(iii) マイカ裏打材-エポキシ樹脂界面のはく離が想像されるが、写真結果からはふくれが大きく、明確な同定は困難である。こうした現象は、シリコン樹脂-はがしマイカ系でも観測されることが報告されており⁽¹⁾、高線量の放射線を受けたマイカー樹脂複合系特有の現象であると考えられる。

以上のことから、ふくれ現象は放射線照射により発生した分解ガスの圧力上昇によるものと推定される。また分解ガスの発生は、含浸樹脂、マイカバインダーなどの放射線劣化が起因しているものと考えられ、ふ

図 9 試料 MC の誘電正接の温度依存性

Fig. 9. Temperature dependence of dielectric loss tangent in sample MC after gamma-radiation.

図 10 試料 MC の断面

Fig. 10. A cross section of sample MC.

図 11 試料 TC の誘電正接の温度依存性

Fig. 11. Temperature dependence of dielectric loss tangent in sample TC after gamma-radiation.

くればマイカ-樹脂接着力、マイカ自体のへき開力と分解ガスの圧力との関係によるものと考えられる。また図 9 より、誘電正接の急増する温度、また図 5 (c) の $\tan \delta$ のピーク温度 (168°C) を考慮すると、樹脂のガラス転移温度に密接に関連しているものと考えられるが、今後の検討課題としたい。

一方、試料 TC について、誘電正接の温度依存性を図 11 に示す。図からわかるように、温度と共に誘電正接は増大し、未照射の場合、ピーク温度は 170°C 付近に観測される。また 2 MGy 照射後の試料では、若干ピーク温度が上昇することがわかる。これは前述した試料 T の粘弾性挙動を考慮すると、マトリックス樹脂の橋かけ密度の増加によるものと考えられる。

以上のことから、試料 MC と TC を比較すると、耐放射線性において試料 TC は試料 MC よりも寸法、安定性に優れていることがわかる。従って、以下には試料 TC についての検討結果を示す。

〈4・1〉節 (1) 項での樹脂の特性の温度依存性の検討と同様に、LOCA シミュレーションを検討する場合、図 2 からわかるように、その試験条件は最高 150°C に達するため、試料 TC についても各特性の温度依存性を検討することは重要である。

図 12 試料 TC の BDV の温度依存性

Fig. 12. Temperature dependence of BDV in sample TC.

図 13 試料 TC の曲げ強度の温度依存性

Fig. 13. Temperature dependence of flexural strength in sample TC.

図 14 ノーメックスの引張強度の温度による変化

Fig. 14. Temperature dependence of tensile strength in Nomex.

試料 TC について、図 12 に交流 BDV の温度依存性を示す。図からわかるように、温度の増加と共に BDV は漸減している傾向を示す。また、図 13 に曲げ強度の温度依存性を示す。図 12 と同様に、温度の増加と共に曲げ強度は漸減していることがわかる。

一方、試料 TC の基材であるノーメックスの単体の特性は、図 14 に示す引張強度の温度依存性が報告されている⁽⁸⁾。図からわかるように、引張強度は温度の増加と共に漸減している。また、試料 TC のマトリックス樹脂である試料 T の曲げ強度の温度依存性を図 15 に示す。図からわかるように、温度の増加と共に曲げ強度は低下している。これらの結果から程度の差こそあるが、ノーメックス単体、樹脂単体ともに、温度の増加と共に強度は低下していることと、図 5 (c) で弾性率が温度と共に漸減していることより、図 13 の結果はノーメックス、樹脂両成分の性質を反映して

図 15 試料 T の曲げ強度の温度依存性
Fig. 15. Temperature dependence of flexural strength of sample T.

図 16 試料 TC の BDV の線量依存性
Fig. 16. Dose dependence of BDV in sample TC.

いるものと考えられる。

一方、エポキシ樹脂複合材料は十分エポキシ樹脂を含浸したにもかかわらず、微小なボイドが存在することは否定できない⁽⁹⁾。この微小なボイドの周辺に電界印加により空間電荷が生じる。この空間電荷の堆積により印加電界が緩和される。このことより、図 3 (c) の T 試料のみの場合の値と図 11 の値を比較すると、室温ではこの空間電荷の効果により、試料 TC は試料 T よりも BDV が高い値を示す。また高温では、試料 T の導電率の上昇により空間電荷が解放され、電界緩和がほとんど生じなくなり、試料 TC の BDV 値が図 3 (c) の試料 T のみの場合の値に近い値を示すようになるものと考えられる。

次に、温度をパラメータとしたときの試料 TC について、BDV の線量依存性を図 16 に示す。図からわかるように、試料 TC の照射効果としては線量が増加しても、BDV 値はほとんど変化しない。このことは図 4 (c) の結果、そしてノーマックス自体の耐放射線性が安定した特性を示すことを考慮すると⁽⁸⁾、十分理解できる。また、図 17 に曲げ強度の線量依存性についての結果を示す。曲げ強度の照射効果についても図 16 と同様な傾向を示し、安定した耐放射線性を示すことがわかる。

(2) LOCA シミュレーション 図 18 に試料 TC の LOCA シミュレーションについての検討結果を示す。図中、A は未照射、B は 2 MGy 照射、C は LOCA シミュレーションに暴露した試料 TC の曲げ強度を示す。B は A と比較してほとんど曲げ強度値

図 17 試料 TC の曲げ強度の線量依存性
Fig. 17. Dose dependence of flexural strength in sample TC.

図 18 試料 TC の各種試験暴露後の曲げ強度
Fig. 18. Flexural strength in sample TC after testing of various conditions.

の変化が認められない。また C は、A、B と比較して若干の強度の低下が見られることがわかる。これは、〈4.1〉節の(2)項の検討結果を考慮すると、加水分解が比較的少ないが、若干、分子鎖の切断が生じたことによるものと考えられる。しかし、A の値と比較して 80% 程度の値を示し、十分な残存強度を有していることがわかる。

5. あとがき

エポキシ樹脂およびその複合材料での放射線照射効果、LOCA シミュレーションについて電気的、機械的特性を中心として検討した。その結果をまとめると以下のようになる。

(1) ビスフェノール A 系エポキシ樹脂、ノボラック系エポキシ樹脂、トリアジン系エポキシ樹脂は、ともに耐放射線性に優れ、2 MGy ガンマ線照射に対してもほとんど特性の変化は見られなかった。

(2) トリアジン系エポキシ樹脂は、他の 2 種のエポキシ樹脂と比較して、耐 LOCA 性に優れていることがわかった。これは樹脂の分子鎖の切断が比較的少ないことによるものと推定される。

また導電率の検討結果から、LOCA シミュレーションは湿熱効果により樹脂のバルク構造の無秩序性を増し、またイオン伝導のための活性化エネルギーを増大することがわかった。また試料 T は、飽和蒸気圧中

での導電率が最も小さいことから、3種のエポキシ樹脂のうち、この効果を最も受けにくいことがわかった。

(3) トリアジン系エポキシ樹脂/マイカ複合材料は、2 MGy ガンマ線照射後の加熱により、ふくれ現象が観測され、寸法安定性が良くないことがわかった。これはマイカ複合材料特有の現象と考えられ、今後の検討課題であらう。

(4) トリアジン系エポキシ樹脂/ノーマックス複合材は、ふくれ現象は認められず、また安定した耐放射線性を示すことがわかった。一方、室温での BDV は、樹脂単体の特性を考慮すると若干高い値を示した。これはノーマックス、樹脂両成分の特性、あるいは微小ボイドの存在による空間電荷効果によるものと推定されるが、今後の検討課題である。

また、LOCA シミュレーションは、2 MGy ガンマ線照射よりも曲げ強度を低下させるが、また 80% 程度の残存強度を有していることがわかった。

(5) LOCA 時を想定した放射線照射効果、耐 LOCA シミュレーションに対して、トリアジン系エポキシ樹脂/ノーマックス複合材料は、優れた電氣的、機械的性質をもつ絶縁材料であることがわかった。

終りに、本研究を遂行するに際し、放射線照射に御協力をいただいた大阪府立放射線中央研究所 岡本主

任研究員をはじめ、関係各位に深謝いたします。また、本実験に協力された当所 越中昌夫氏および絶縁技術部の諸氏、本学理工学部 多田ノボル氏に感謝いたします。

(昭和 58 年 10 月 11 日受付, 同 59 年 2 月 20 日再受付)

文 献

- (1) 絶縁材料放射線試験調査専門委員会:「絶縁材料の放射線劣化と耐放射性試験法の現状」, 電気学会技術報告 (II 部), No. 86 (昭 54-12)
- (2) 原子力発電所用電線・ケーブル調査専門委員会:「原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼性試験方法に関する提案」, 同上 (II 部), No. 139 (昭 50-11)
- (3) 絶縁照射専門委員会:「絶縁照射専門委員会報告(基礎編)」, 同上 (I 部), No. 74 (昭 41-8)
- (4) 絶縁材料照射専門委員会:「絶縁材料照射専門委員会報告(応用編)」, 同上 (I 部), No. 79 (昭 42-6)
- (5) 美藤・榎本・田中・平林:「エポキシ樹脂の放射線照射による物性変化」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-79-99 (昭 54)
- (6) K. Yahagi, T. Amakawa, N. Tada, K. Sonoda, O. Hayashi, T. Tanaka & S. Hirabayashi: "Electrical and Mechanical Properties in Epoxy Resin After Gamma-Radiation and LOCA Simulation", IEEE Annual Report of CEIDP, 240 (1982) (IEEE Service Center, Single Publication Sales Dept. 445 Hoes Lane Piscataway, NJ 08854 U. S. A)
- (7) 玉越・渡辺・北村・渡部・平林:「高電圧機器絶縁特性自動計測システムの開発」, 電気学会絶縁材料研資, EIM-78-6 (昭 53)
- (8) デュボンファーマー東日本支社:「新しい耐熱電気絶縁材料」, 工業材料, 11, 45 (昭 38-8)
- (9) 木村・平林:「マイカ-エポキシ複合材の絶縁破壊」, 電学論 A, 97, 230 (昭 52-5)