

総 説

(安全工学会提出用)

わたべとしのり
渡部利範

電気製品は、金属、プラスチックを材料とする機械部品と、モータ、コンデンサ等の電気・電子部品等から構成されており、製品寿命を確保するためには、それらの部品の寿命を十分検証して設計することが求められる。製品寿命の設計思想の第一は、電気製品を構成する電気・電子部品や機械部品の故障率の減少である。その方法とは、電気・電子部品、機械部品の定格の意味や背景を理解し、部品の定格への余裕（ディレーティング）をとることである。

第二は、電気・電子部品が壊れて製品に被害が及んだ場合における、危害（感電、発火、怪我等）の程度の減少であり、その方法は部品ごとの特徴を捉えた安全設計思想を採用することである。電源回路には発火しないアルミ電解コンデンサや難燃バリスタを使用し、ヒータやモータ等への電気保護素子を使用する。加えて、電気・電子部品を金属製のカバーで覆う方法も併用し電気製品における製品寿命の安全設計思想を実現する。

キーワード：電気製品、製品寿命、安全設計思想、電気・電子部品、経年劣化、

1. はじめに

扇風機、冷蔵庫、加湿器等の電気製品を長年使用して経年劣化が原因で発生する発火事故は、後を絶たない。ゴム、プラスチックなどの材料の経年劣化、配線の接続部の過熱、電気・電子部品の故障に起因することが多く見受けられる。材料や電気部品は、時間を経るに従って劣化し、あるいは摩耗してその機能を失うか変化する。部品や材料の寿命を超えた電気製品は、いつかは使いものにならなくなる。

電気製品には、安全に使用でき、そして安全に壊れることが要求される。壊れても感電の危険性がないこと、怪我がないこと、製品が発火しないことが必要とされる。電気製品における製品寿命の設計思想は、製品の使われ方、機能、特質を捉えることが基本である。

電気製品の寿命を決定しているのは、材料、電気・電子部品である。それらの寿命の定義は様々であり、これらを十分理解し電気製品との関連を認識したうえで、電気製品として長期間使用できる設計を行い、かつ壊れた場合の製品の危害の程度を見極めて設計することが重要である。

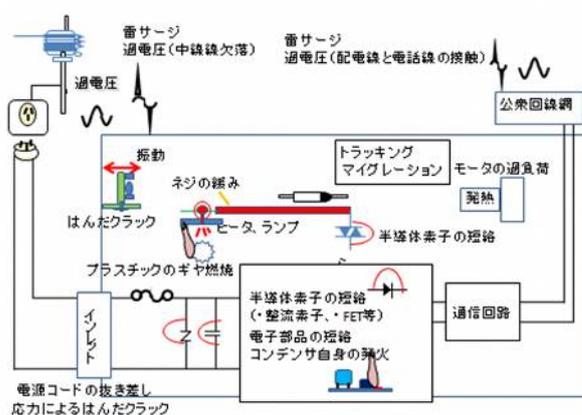


図1 電気・電子部品の壊れ方

図1に電気製品を使用した場合、経年劣化が原因で壊れる電気・電子部品のモデル図を示す。例えば、電源コードを製品のインレットに抜き差しする場合、

(株) テクノクオリティ 代表取締役

359-0024 埼玉県所沢市下安松 15104-605

コードを少し左右にこじりながら抜き差しすることがある。それが繰り返されると、インレットがプリント基板に直接はんだ付けしている場合には、繰り返し応力ではんだクラックが発生する。経年劣化の事例と言える。

あるいは、過電圧や繰り返しサージ電圧が侵入することにより、高電圧から電気・電子部品を保護するバリスタが経年劣化で壊れる場合も考えられる。このように考えると、電気製品は、様々なメカニズムで経年劣化が原因で故障することが予想される。

本報告では、第一に、電気製品の寿命および電気製品を構成する材料や電気・電子部品の寿命の定義を紹介する。第二に、電気製品の一般的な製品寿命の考え方を整理し、材料や電気・電子部品と電気製品との関係を設計思想という観点から述べる。第三に、電気製品を安全に長く使うために故障の発生確率を減少させる設計思想と、加えて電気製品が壊れた場合に発火を防止して安全な状態に導く安全設計思想を提案する。

2. プラスチック、電気・電子部品の寿命と電気製品の関係

2.1 電気製品の寿命

電気製品の寿命を考えた場合、モノとしての寿命のデータは様々な文献で様々な調査方法で調査され報告されているが、その形式は統一されていない。例えば、国立研究開発法人資源循環・廃棄物研究センターからは、製品が作られてからリサイクルやゴミとして処理されるまでの「製品寿命」という定義に従いモノの平均寿命が報告されている¹⁾。一方、家電業界では買い替え期間をベースに製品寿命を考えている会社も見受けられる。これらはいずれも市場の状況から製品寿命の定義を考えた例である。

電気製品は、金属、プラスチック、電気・電子部品から構成されるので、電気製品の寿命を考える場合には、それらの集合体として捉えて製品寿命を定義することができる。本報告における電気製品の寿命は、金属、プラスチック、電気・電子部品、それ

ぞれの集合体としての寿命と定義する。

2.2 プラスチックの寿命と電気・電子部品

プラスチックの耐久性、寿命は個々の電気製品の安全性と信頼性に関連している。一般的には、機能的には問題ないが、変色を生じるなどの理由で商品としての価値が下がる商品限界寿命と、機能が低下し動作不良などを起こしてトラブルを生じる機能限界寿命の二つに分けられるが、ここでは電気製品の安全性と密接に関係する機能限界寿命を取り上げる²⁾。

例えば、UL746Cでは、使用される材料の耐熱温度を、10万時間（約11.5年）使用後でも初期性能の1/2を保っている温度（保持温度）と定めている。初期物性値の1/2以上と言うボーダラインが対象製品にとって適格かどうかは、設計者が製品機能に応じて判断すべき内容であるが、要は寿命の決定には常に残存寿命を残しておく状態の保障と余裕を持つ必要があるということである²⁾。

保持温度の特性値は、熱可塑性樹脂の場合には、機械的強度は引っ張り試験、電気的強度は絶縁耐圧試験で評価される。この特性値は、電気製品に使われる端子台、電源スイッチ、サーモスタット、プリント基板などの電気・電子部品にとっては、必ず確認すべき温度に関する仕様の項目である。

プラスチックが熱による経年劣化で故障する事例としては、電気ストーブのヒータを支えるプラスチック製の端子部が脆弱になりヒータ端子を固定できなくなる場合が考えられる。

2.3 電気・電子部品の寿命と電気製品

電気製品には、様々な電気・電子部品が使用されている。電源コード、電流ヒューズ、電源スイッチ、バリスタ、フィルムコンデンサ、アルミ電解コンデンサ、ダイオード、プリント基板、コネクタ、抵抗、積層セラミックコンデンサ、モータ、サーモスタット等である。

電気製品の故障率と使用期間については、一般的に図2のようなバスタブ曲線が設けられている。しかし、市場の電気製品の電気・電子部品の具体的な

故障率を把握し、電気製品の摩耗故障期間を考慮して電気回路を設計することは極めて困難である。

残存寿命を残しておきながら、定格値に余裕を持たせた状態で寿命が尽きたと定義して、製品全体の設計をするというのが現実的な設計手法である。

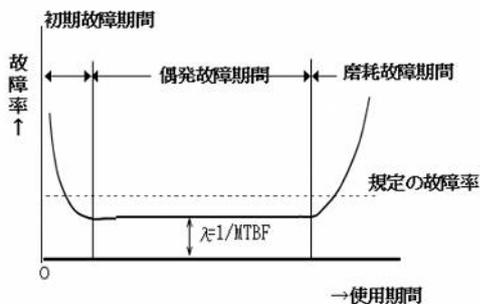


図2 バスタブ曲線

結果、電気・電子部品は、業界基準あるいは、製造メーカーなどが独自に故障の判断基準、定義を設けている。電気・電子部品の定格値（電圧、電流、静電容量、抵抗値等）から一定の数値を超えた場合、それらの電気・電子部品が搭載される電気製品が故障する可能性が高いので、その時点で寿命が尽きたと定義している。

寿命を考える事例として、有限寿命の電子部品であるアルミ電解コンデンサと、軸受により寿命が決定する駆動モータの例を挙げる。

2.3.1 アルミ電解コンデンサの寿命

アルミ電解コンデンサの構造を図3に示す。アルミ電解コンデンサの寿命は、使用される環境温度に依存する。陽極箔と陰極箔にしみ込んだ電解液が徐々に封止部から飛散してコンデンサとしての性能が著しく変化する。

初期の静電容量値からの変化が規定範囲（一般的には±20%～±30%）を越えた場合に寿命に達したと定義する。あるいは、損失角の正接が規定範囲（初期の1.5～3.0倍）を超えた場合を言う。漏れ電流が規格値を超えた場合も寿命に達したとする。これらの指標の一つでも規格値を超えたら寿命が尽きたと

する。しかし、寿命が尽きたとしてもアルミ電解コンデンサとしての機能は保っている³⁾。

このようにメーカー自身が故障の定義を定め、これを寿命と定義している部品は多い。例えば、バリスタ、フィルムコンデンサ、抵抗等多数の電気・電子部品に見うけられる。

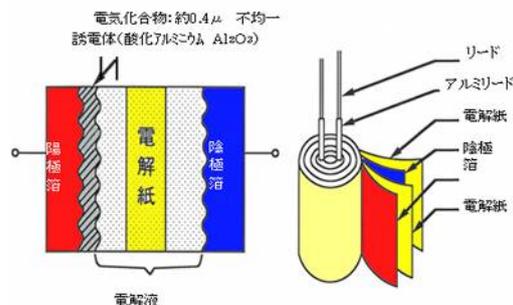


図3 アルミ電解コンデンサの原理図と素子構造

2.3.2 駆動モータの寿命

駆動モータは、電気部材の巻線、回転部の軸受、ギヤ等の機構部品から構成される。モータの設計寿命を大きく左右するものが軸受と絶縁物である。絶縁性能は、その曝されている温度が高いほど消耗が早くなる。絶縁物の温度が8～10℃高くなると寿命が半分になるので、その場合には、絶縁階級をA種からE種に変更して耐久温度を上げて対応するか、あるいは使い方を工夫するなどで対応することが必要である⁴⁾。

通常は軸受の寿命がモータの寿命と考えられる。軸受の寿命は、以下の2種類で表すことができる。

- ① グリースが熱により劣化するグリース寿命
- ② 転がり疲れによる機械的寿命

モータの場合、軸受に加わる荷重に起因する機械的寿命の影響よりも発熱によるグリース寿命への影響が大きいため、①のグリース寿命が支配的となる。この軸受グリース寿命に最も影響を与える要因は温度であり寿命が大きく左右される。

軸受の温度が15℃上昇するごとに、軸受グリース寿命が半減する。このようにベアリングやレールを使用した機械部品には、業界で広く流布している寿命の考え方がある。



図4 掃除機のモーターの軸受

3. 電気部品、機械部品を設計する人の立場から考えた部品寿命の設計思想

機械部品を設計する場合は、想定される負荷に対しての安全率を考えて設計する。材料から設計する部品の場合も基本的には同様であり、それらを組み合わせる場合は、根幹に近い部品ほど安全率は積み重ねられ、より大きな安全率を考えることが必要とされる。

電気部品の寿命について完成品メーカーでは仕様やコストを考慮して最適設計をすることができるが、電気・機械部品メーカーは、完成品の負荷や部品構成などを想定することは困難であるため、安全率や寿命を最大限にする設計が重要となる⁵⁾。

安全率や寿命が最大限になるように設計されていれば、電気製品（完成品）を設計する立場から見れば、余裕を見た部品を選択することが可能となり、部品メーカーは完成品メーカーに最適な部品を提供することができる。図5に示すように、完成品が部品A, B, Cから構成されている場合には、完成品の余裕度 $+ \alpha$ は、部品A, B, Cの余裕度の $+ \alpha$ により決まり、それらは部品の特性により決まる。

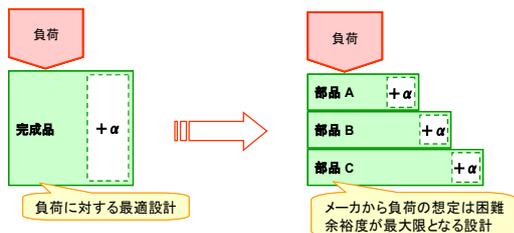


図5 完成品と部品の余裕度

4. 電気製品を設計する人の立場から考えた製品寿命の設計思想

電気製品を設計する人の立場から考えた場合、適切な材料、電気・電子部品の選定をして電気製品の寿命を長く保つ設計をする。電気・電子部品が壊れるメカニズムは、電気・電子部品の様々な定格（電気、温度、湿度、繰り返し等）と密接な関係がある。電気・電子部品を使う時は、定格に対して余裕をもって部品選定をする。この考え方をディレーティングという。

電気製品に使用される電気・電子部品に余裕を与えて偶発的な過大ストレスによる故障の可能性を低減し期待寿命を長くするだけでは、製品寿命の設計思想としては十分とは言えない。

使い方を工夫しても市場では、経年劣化による発火事故、想定外の外的ストレスの製品への浸入、思わぬ使い方などが原因で製品の事故が発生している。

電気製品における製品寿命の設計思想とは、第一にディレーティングの考えを用いて電気・電子部品の故障率を低減する方法を採り、第二に電気・電子部品が壊れた場合、その危害の程度を下げることである。

5. 電気・電子部品の故障率を低減する設計思想

基本は、定格（電気、温度、湿度等）の意味を正確に理解して電気・電子部品の正しい使い方をするのである。定格とは、電気・電子部品に対し指定された諸条件のもとで安全度ももり込んだ部品の使用可能な限度である。

5.1 電気・電子部品の定格

電気・電子部品の定格は、基本的には電気・電子部品を設計、製造するメーカーが決める。電源コード、スイッチ、ノイズ防止用のコンデンサ等の安全規格の認証制度が存在している場合、UL、VDE、JET

等のそれぞれの認証機関が定める基準に従い定格は決定される。

例えば、電源スイッチの UL1024 では、室温にて 250VAC、抵抗負荷で 16A を流し 1 分間に 6 回～10 回の ON-OFF を 6000 回繰り返して試験することが求められる。しかし、普通に電気製品に電源スイッチが使用される場合には、1 分間に 6 回～10 回の ON-OFF を繰り返すモードは考えられない。

UL、VDE、JET 等で認証された電気部品は、実際の製品の実装状態と異なることもあるので、認証条件を理解したうえで、実際の負荷を接続して耐久試験をする必要がある。

一方、アルミ電解コンデンサ、トライアック・トランジスタ等の半導体部品は、安全規格の認証制度がないので、定格は業界基準に従い電気・電子部品を設計・製造するメーカーが決めるのが通例である。

ここでは市場で故障が多いコンデンサと、定格の正しい理解が重要な半導体の使い方を挙げる。

5.2 コンデンサのディレーティング

コンデンサには様々な種類があるが、基本は誘電体である。コンデンサの陽極と陰極の間は、誘電体で構成されている。ディレーティングは、誘電体の材料の特性と厚みおよびコンデンサの製造の工程管理等による絶縁構造に依存する。コンデンサの誘電体の種類と厚みにより電圧ディレーティングが決まり、温度ディレーティングは誘電体の劣化や減少の形で表面化する。表 1 に電気メーカーが使用しているコンデンサのディレーティング表を示す。

表 1 コンデンサのディレーティング

コンデンサの種類	例)定格電圧 定格温度	ディレーティング基準		基準設定の背景	基準設定の背景
		電圧	温度	電圧	温度
フィルムコンデンサ	<500Vac,<8000V dc ~100°C(ac,dc)	80%	70%	電圧変動、回路内のノイズ、誘電体の厚みのバラつき	製品のファン停止の場合、製品内の温度が30%上がる。
アルミ電解コンデンサ	<650V 85°C、105°C	80%	70%~ 80%	誘電体の厚みが均一ではない、リップル、ノイズの重畳	上記に同じ温度と寿命計算は大切。
積層セラミックコンデンサ	16Vdc~250Vdc -55°C~125°C	80%	90%	電圧変動、回路内のノイズ、誘電体の厚みのバラつき	定格で使用OK。測定誤差、ばらつきを考慮した。
タンタルコンデンサ	2.5vdc~100vdc -55°C~105°C	33%	70%	誘電体の構造が不均一。インラッシュ電流に弱い。	NASAのアプリケーションブックは50°C~60°C推奨。

5.3 半導体部品のディレーティング

間違えやすいのは最大定格の意味である。半導体部品のせん頭電流の定格値は、その値を 1 回限り耐えうる数値である。繰り返しサージ、繰り返しパルスを含めた突入電流を想定していない。ヒータ、モータ等の負荷の ON-OFF を繰り返すトライアック、SSR 等の素子の選定の際の注意事項である (図 6)。

温度、湿度、電圧、電流、電力等のストレスは、すべてのストレスが、同じ様な効果を持つわけではなく、ストレスの影響が部品によって異なる。過大なストレスが定格値を超えその部品本来の機能を破壊するので、温度、湿度、電圧、電流、電力等の定格に対するディレーティングを遵守する。表 2 は最大定格に対する繰り返し耐えられる半導体部品のディレーティング仕様である。

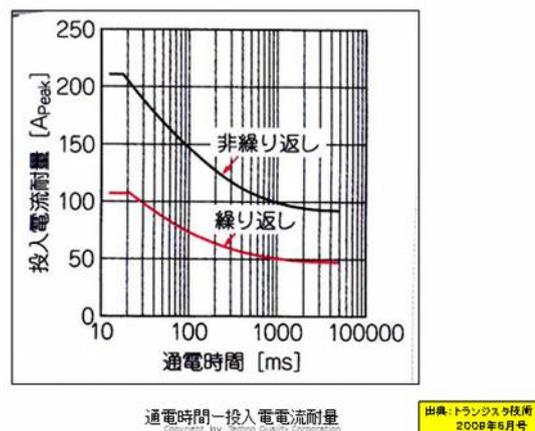


図 6 トライアックの非繰り返し電流と繰り返し電流

表 2 半導体部品のディレーティング

トランジスタ、ダイオード、トライアック、パワーIC、ロジックIC等

ディレーティング要素	ディレーティング基準	ディレーティング基準の詳細
電圧	最大定格: 80%	サージ、静電気、繰り返しパルス等の最大定格の80%以下。
電流	せん頭電流: 80% 平均電流: 50%	せん頭電流は、サージ、繰り返しパルスを含めた最悪時の電流が最大定格の80%以下。
電力	平均電力: 50%	サージを含めた最悪時の電力が最大定格の50%以下
温度	接合部温度(Tj) 70%~ 80% ケース温度(Tc) 65% 周囲温度: 70%	サージ電流の集中を含めた動作最大接合部温度が、最大定格の接合部温度の70%~80%にする。

5.4 ディレーティング基準を設計に活かす

ディレーティング基準は、標準的な値であり、製品の環境等により一元的に定めることはできない。自社の製品にあったディレーティング基準を決める必要がある。半導体部品について例を挙げれば、ディレーティングは、同時に満たすことが原則であり、接合温度、動作周囲温度、自己発熱、電圧、電流、電力、パルス、湿度、振動、衝撃、保存温度等、様々な定格値に留意する。

しかし、多種多用の半導体部品に対し電圧、電流、電力、温度をそれぞれ測定してディレーティング基準を検証することは困難である。そこで、まず多数の半導体部品をサーモビューアあるいは熱電対で温度を測定して限度値を超えそうな半導体部品を洗い出して精査する。ディレーティングは、部品の寿命・故障率を検証する時の限界値として利用する。

6. 電気・電子部品の壊れる危害の程度を低減する安全設計思想

6.1 壊れる危害の程度を低減する電氣的な対策

電気製品の安全に関連すべき部分を製造直後から廃棄されるまで安全性が保障されるように、本質的安全設計方針により発生確率を低減して長寿命設計することは極めて難しい。安全の設計思想としては、電気・電子部品は、壊れても電気製品が安全な状態になるような設計思想で臨むことが求められる。電気部品の個別の対策では、部品ごとの構造、特性を考えた対策コンセプトを考えることが必要である(表3)。

表3 電気・電子部品の個別の対策

発火源	対策の例
光源、熱源 (100w~1kw)	二重保護回路(温度ヒューズ+サーミスタ回路)
バリスタ	難燃バリスタ(発火時の炎が1cm以下)
Xコンデンサ	DC3kvの絶縁耐圧に耐えるコンデンサ
アルミ電解コンデンサ	発火しにくいコンデンサ
トランジスタ、FET、抵抗	電流ヒューズ、ヒューズ抵抗等
DC-DCコンバータ	電源回路のフの字特性

その場合、どの部品、どの材料、構造が経年劣化による外的要因で壊れる状況になるかを正しく把握する。危害の程度を低減する場合、炎の広がりや延焼時間を軸に発火防止を考え、電気・電子部品が発火した場合、近傍のプラスチックへの着火に至るまでの発火の連鎖を断ち切る。燃え出すと大きな炎をあげる電子部品は、バリスタ、フィルムコンデンサ、アルミ電解コンデンサであり、図7に示す電気・電子部品が電気製品の発火事故を引き起こす例が多い⁶⁾。

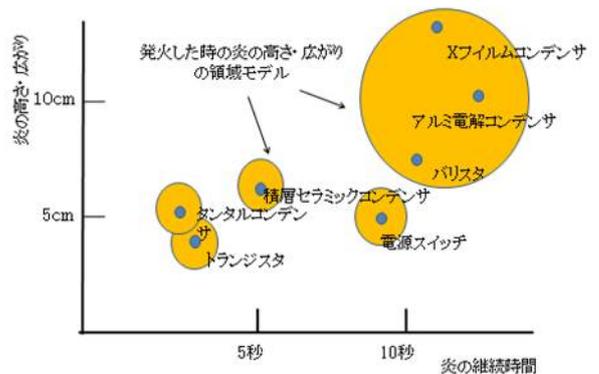


図7 電子部品の発火時の炎の高さと継続時間のモデル

6.2 難燃性の酸化亜鉛バリスタの実現

バリスタは、過電圧が印加されると、バリスタに電流が流れ、ジュール熱で局部的に過熱する。はんだが溶け始め、バリスタは次第に高熱になる。バリスタ素体は、特定の部分に電流が集中し発熱して約 1300℃から 1400℃になり、スパーク、発火する。炎が発生する要因は、外装樹脂の耐熱温度 800℃のエポキシ樹脂が燃焼するためである。

バリスタの炎によるプラスチックへの着火の可能性を減少させるため、バリスタの発火に対する仕様は次の2点である。第一に、IEC60950 4.7.3.2では、発火源と可燃性のプラスチックの隔離距離は、13mm未満と定められているので、バリスタが発火した場合の炎の高さを10mm以下にすることで、バリスタの炎がプラスチックに到達せずプラスチックに着火しない設計指針とする。

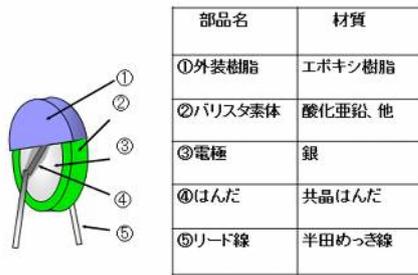


図 8 円板型バリスタの構造

第二に、ポリアセタールや ABS 等の可燃性プラスチックの鋭利部分は、1.0sec 以下の炎の暴露では着火しないことを実験で確認したので、バリスタの炎の継続時間は 1.0sec 以下に低減させる。この二つの数値目標を同時に達成して、バリスタの発火による電気製品への延焼を確実に防止する。炎が発生する要因は、外装樹脂のエポキシ樹脂が燃焼しているため、外装樹脂の材料と量を変更することで、炎の高さと継続時間を低減することができた。図 8 に市販されている難燃バリスタを示す。



図 9 炎の高さ 10mm 以下、1sec 以下のバリスタの難燃バリスタ

6.3 発火しないアルミ電解コンデンサの実現

AC 電源の一次側平滑用のアルミ電解コンデンサの原理図と構造を図 3 に示しているアルミ電解コンデンサの両極は、陽極箔と陰極箔から構成され、電解紙により両極がセパレートされている。電解液としては、エチレングリコールを主溶媒とし、ホウ酸アンモニウム等が溶質として使用される。両極箔と電解紙を巻き取り、中央の両極箔からアルミリード線（あるいは平板）をひきだし、素子の外側をテープで固定する。その後、素子を

含浸して電解液を電解紙に含ませて素子全体を完成させケースの中に固定する。爆発を防止するため、アルミケースに切り込み（防爆弁）を入れる。

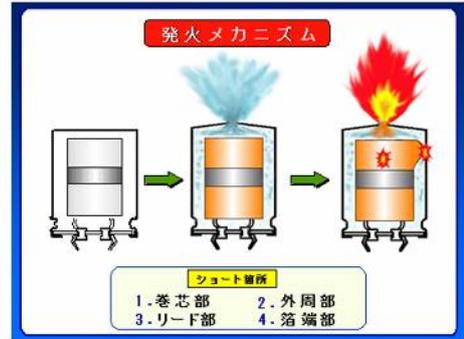


図 10 アルミ電解コンデンサの発火メカニズム

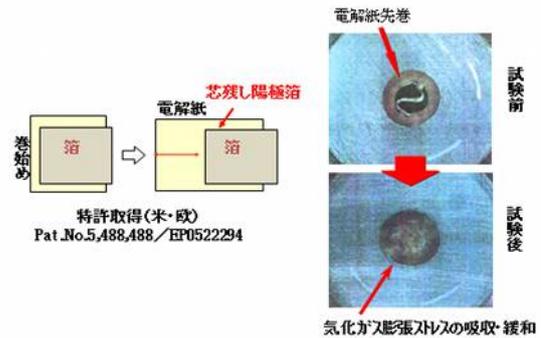


図 11 巻き芯部への対策

発火のメカニズムを図 10 に示す。配電盤の中性線の欠落、あるいは電気設備が原因の過電圧でアルミ電解コンデンサに定格電圧の 1.5 倍以上の DC 過電圧が印加された場合、酸化皮膜にクラックが生じ、その部分に電流が集中して絶縁破壊に至り、電流が流れる。電解液と電解紙で構成される内部抵抗でジュール熱が発生し電解液が気化し、素子の膨張と共にその気化ガスでアルミケースの内圧が上昇し防爆弁が作動する。

気化ガスは素子の巻芯部の空洞部から開弁した防爆弁の中心部に向かって瞬時に吹き抜ける。防爆弁作動と同時に内部の 4 箇所（あるいは複数箇所）でショートおよびスパークすると、電解液が気化したガスに着火してアルミ電解コンデンサの発火

気・電子部品からの炎とプラスチックを隔離する場合は、炎の継続時間と高さ・広がり数値を量的に把握する。第二に電気・電子部品とプラスチックの間に難燃材あるいは金属を設置する。思わぬ隙間を作らないようにする。第三に電気・電子部品を難燃材あるいは金属で覆う方法がある。内部温度上昇による部品の寿命への影響を考慮する。

表 5 電氣的・機械的対策の課題

1.電氣的対策

対策方法	課題
発火しない電気部品の選定	構造上不可能の電気部品あり
電気保護回路	回路を構成する電子部品の信頼性
電流ヒューズ、サーモスタット	ロットごとの信頼性の確保

2.機械的対策

対策方法	課題
電気部品とプラスチックの隔離	隔離距離の数値、検証方法
難燃材使用	難燃性と機能のバランス、コスト
電気部品を板金で覆う	カバーの隙間、内部温度

7. おわりに

電気・電子部品、機械部品は、様々な電気製品、産業機器などに使われるので、部品メーカーは十分な安全係数や余裕を持たせた設計をする。

故、電気製品メーカーや産業機器メーカーは、それらの部品の設計思想を理解しようとする意欲が大切である。

電気製品メーカーや産業機器メーカーは、部品の基礎的な知識をベースに、定格値の意味を理解し、ディレーティング数値の遵守等の設計のステップを踏んで、故障を減少させる製品寿命の設計思想を確立する。

しかし、電気製品の使い方を工夫しても経年劣化による発火事故、想定外の外的ストレスの製品への浸入、思わぬ使い方などが原因で、製品の事故が発生する。電気製品、産業機器を発火させない、人的被害が出ないように電気・電子部品の危害の程度を極限まで下げる安全設計することが原則である。

参考文献

- 1) 資源循環・廃棄物研究センター :モノの寿命
<http://www-cycle.nies.go.jp/jp/kiban1/index.html>
- 2) 大武義人、ゴム・プラスチック材料のトラブルと対策—劣化と材料選択、日刊工業新聞社(2005)、p 315— p 316
- 3) エルナー株式会社、信頼性、
<https://www.elna.co.jp/capacitor/alumi/trust/index.html>
- 4) オリエンタルモーター株式会社、技術資料
<https://www.orientalmotor.co.jp/tech/reference/>
- 5) 日本能率協会、第一次耐用寿命研究会、p 18- p 29、 p 48- p 49
- 6) 渡部利範、電子機器の発火防止の設計思想, 電子情報通信学会技術報告書, pp. 9-12 (2011)
- 7) 渡部利範、藤原義親、竹内学、アルミ電解コンデンサの発火メカニズムと対策、 p p .797-809、日本信頼性学会、Vol.25、No. 8、2003年11月