

Ⅲ 電子連動装置の耐用寿命に関する検討

2017年8月

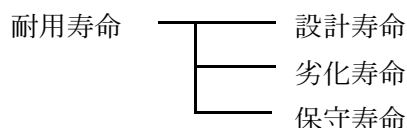
株式会社京三製作所
大同信号株式会社
株式会社てつでん
日本信号株式会社

1. まえがき

1985年に電子連動装置の運用が開始されてからすでに30年以上が経過しており、設計寿命の20年を超えて稼働している電子連動装置も少なくない。連動装置の更新工事は多くの人員、期間、予算を必要とすることから、適切な更新時期がいつであるのかを明確にすることが求められている。このことから、鉄道事業者、鉄道総合技術研究所、および信号装置メーカーにおいて、電子連動装置の寿命評価や適切な更新時期の検討が行われた。本稿ではそれらの検討結果を「電子連動の耐用寿命に関する検討」としてまとめる。

2. 寿命の定義

寿命という概念は、どこからどこまでの期間を指すのか、様々に定義できる。本稿では以下のように整理し、順次解説と検討結果を示す。(各寿命の関係は図2.1参照)



2.1. 装置の耐用寿命

装置における「耐用寿命」とは、ある条件下において装置の機能を維持し続けられる期間のことである。装置の機能が維持できなくなる、すなわち、耐用寿命を迎える状況としては、以下の2つが挙げられる。

- ①：装置を構成している各部品が劣化し、故障が頻発する（物理的要因）
- ②：装置の維持管理を行う環境、人員が保持できなくなる（物的・人的要因）

装置の機能維持は、装置が健全で、なおかつ装置の維持管理に携わる人員を保持できていなければならないため、どちらか一方が欠けた時点でその装置は耐用寿命となる。したがって、上記の2つの条件のうち短いものが耐用寿命を決定づけることになる。

2.2. 装置の設計寿命

装置における「設計寿命」とは、気温・湿度などの環境条件や、装置の動作条件、部品メーカーが示す部品の設計寿命、およびマージン設計を考慮して算出している寿命である。本文に記載している『装置・機器の耐用寿命』は、20年と設定しているが、これは「設計寿命」に基づく値である。環境条件は装置の設置環境により様々であるため、設計寿命は最悪条件を考慮した長さとなっている。そのため、実際の設置環境において設計寿命である20年使用した場合でも劣化が見られないこともある。

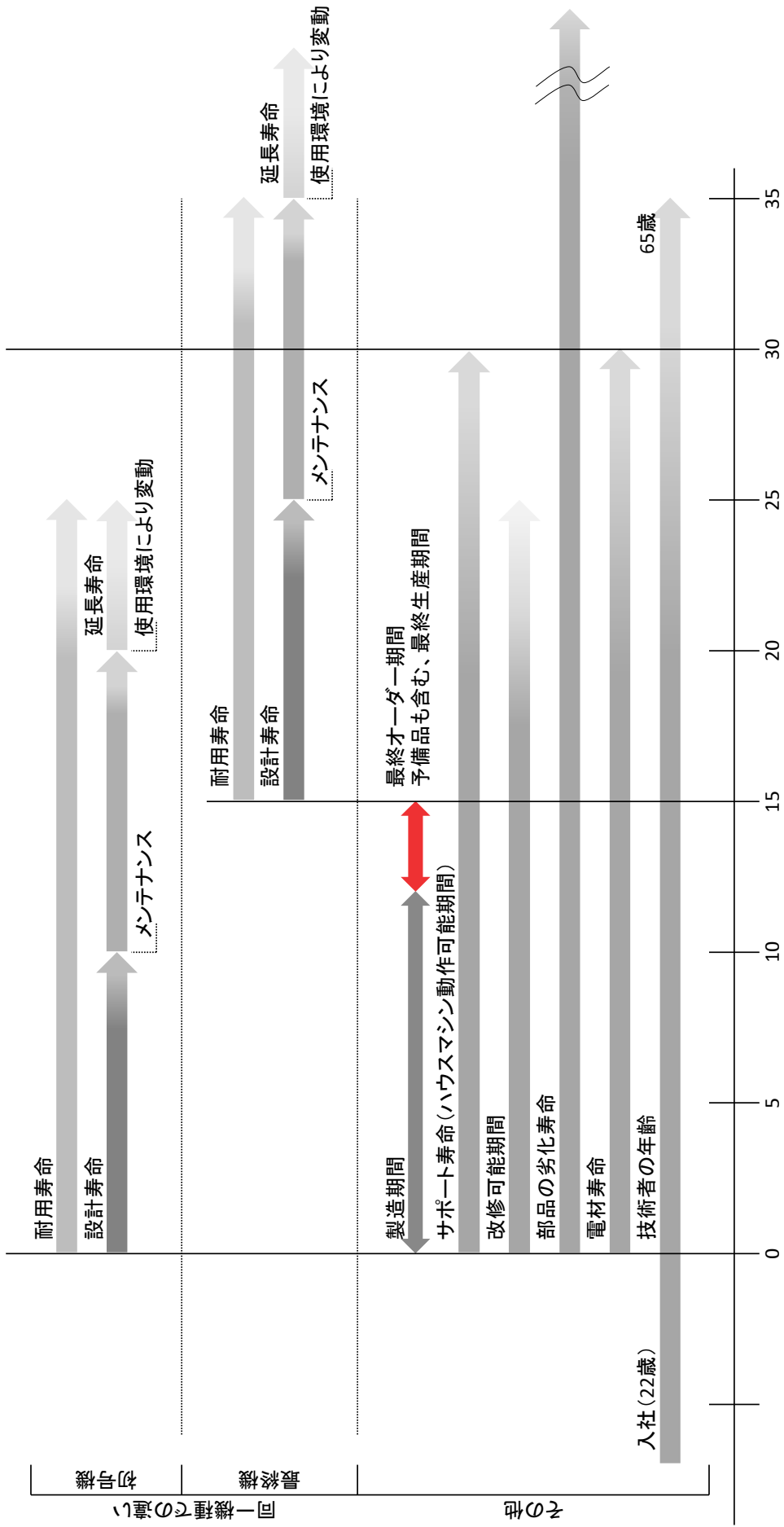


図 2.1 装置の寿命の関係

2.3. 装置の劣化寿命

「劣化寿命」とは、装置を構成する部品の劣化特性から評価される寿命である。部品の劣化特性を決める要因としては、温度・湿度などの環境条件、動作電圧・電流などの設計値、装置電源のオンオフの頻度、装置の稼働時間などの動作シーケンスが挙げられる。下記に劣化特性を決める要因の例を示す。

- ・環境条件の例

温度、湿度、腐食性ガス、振動、粉塵、日光

- ・設計値の例

動作電圧、動作電流、周波数、発熱量、マージン設計

- ・動作シーケンスの例

装置の電源オンオフ、LEDの点滅、フォトカプラのオン時間

2.4. 保守寿命

「保守寿命」とは、装置の機能維持に必要な保守環境や人員を保持できなくなるまでの期間のことである。保守寿命をさらに細分化すると、保守に必要な部品・ユニットを供給できなくなる「供給寿命」と、技術的サポートを行う人員の退職などに起因する「サポート寿命」に分けられる。

2.5. 部品の故障領域

部品の故障は、「初期故障領域」、「偶発故障領域」、「摩耗故障領域」の3つの領域で説明され、それぞれの期間における故障率の変化はバスタブ曲線として知られる。部品の故障領域を図2.2に示す。

初期故障は、部品メーカーで出荷時に実施するスクリーニングや、信号装置メーカーが出荷時に実施する各種出荷試験およびエージング試験、温度サイクル試験により除去された上で出荷される。したがって、信号装置メーカー出荷時には基本的に初期故障領域を通過していることになる。

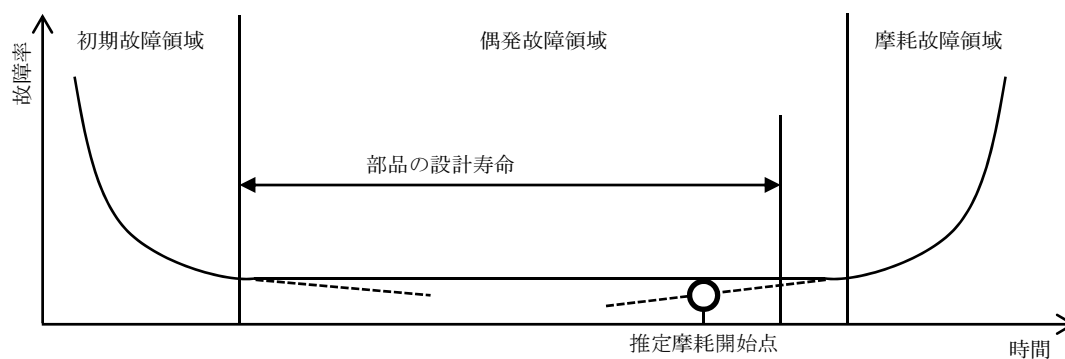


図 2.2 部品の故障領域

2.6. 部品の設計寿命

部品の設計寿命は、部品メーカーが示す(公表している)部品の寿命である。個々の部品に対する寿命算出は、加速試験等により行っているが、一部の部品を除いて摩耗故障領域に至るまでの試験は行っていない。そのため、部品の設計寿命は摩耗故障領域に至る時点よりも以前に設定されている。比較的余裕のある環境で使用した部品は、設計寿命を超えても劣化などが見られないことが多いが、部品メーカーが使用時間を定めている場合、その期間を逸脱することは不適切である。

2.7. 部品の劣化寿命

部品の劣化寿命とは、化学的・物理的な変化により部品としての性能が損なわれる(摩耗故障)までの期間である。摩耗故障領域では、故障率が著しく上昇してしまうため、装置の稼働期間において、摩耗故障を発生させないことが重要になる。

2.8. 推定摩耗開始点

本稿では新たに、偶発故障領域から摩耗故障領域に切り換わる時期として「推定摩耗開始点」という概念を追加し、装置の耐用寿命の定量的評価に適用する。推定摩耗開始点は、電子連動装置に使用されている各部品の累積故障確率と、部品の総数(電子連動装置の導入数に比例)とを積算し、確率的に摩耗故障が現れる時期である。

推定摩耗開始点を求め、装置の耐用寿命の定量的評価を行うためには、以下の故障確率の概念が必要となる。

- ①信頼性試験データ
- ②形状パラメータ(ワイブル係数)
- ③部品の累積故障確率

部品の信頼性試験データとは、部品メーカーが実施している信頼性決定試験、もしくは信頼性適合試験に関するデータである。信頼性決定試験とは、部品の故障率や寿命を決定するための試験である。一方、信頼性適合試験は部品の信頼性が規格で定める基準を満たしているかを判定する試験である。

形状パラメータ(ワイブル係数)とは、部品の寿命のばらつきの大小を表す係数であり、部品の累積故障確率の時間的な変化を両対数グラフ上にプロット(ワイブルプロット)したときの傾きとなる。形状パラメータの値が大きいほど寿命のばらつきが小さく、故障がある時期に集中して発生することになる。部品の累積故障確率は、ある時点において、同種の部品のうち、どれだけの割合が故障したのかを表す。

推定摩耗開始点は、信頼性試験データと、装置の動作条件、形状パラメータから部品の累積故障確率の変化を推定し、その累積故障確率が一定の基準を上回った時点を目指す。基準となる累積故障確率は、電子連動装置の導入台数や故障発生時の影響、経年による故障率の上昇などを考慮し、故障によるリスクをどの程度許容できるのかによって決まる。

2.9. 有寿命部品と長寿命部品

部品は、その寿命の長短により有寿命部品と長寿命部品とに分けることができる。

例えば、アルミ電解コンデンサは有寿命部品であり、その寿命は長いものでも 10～15 年程度である。多くの有寿命部品はオーバーホールの対象となっており、劣化する前に交換を行う必要がある。オーバーホールの考え方については 7 項に記載する。

一方、IC や受動素子は長寿命部品とされており、装置の使用期間中においては、摩耗故障による影響をほぼ無視することができる。ただし、長寿命部品であっても、偶発故障が発生することは考慮しておく必要がある。また、たとえ部品そのものが長寿命だとしても、使用されている個数が多くなると、前述の推定摩耗開始点が早まることに注意が必要である。

部品の製造方法や構造、材質は時代とともに変化しており、それにより寿命も変化する。例えば、半導体部品は微細化・高密度化が現在も進んでおり、寿命は短くなる傾向にある。また、新しい種類の部品が登場した場合、その部品の寿命や劣化特性を明らかにする必要がある。したがって、有寿命部品と長寿命部品の分類については、定期的に見直すことが望ましい。

3. 耐用寿命の評価対象

電子連動装置は、いくつかのサブシステムから構成されるシステム機器である。電子連動装置 I 形および II 形を例に挙げると、以下のサブシステムから構成されている。

- A：処理装置、電子端末、装置内蔵電源
- B：リレー架
- C：扱所機器（データ伝送装置、表示制御盤）、汎用 OA（ファクトリコンピュータ）
- D：OT/FT 架、配線類
- E：現場機器
- F：電源機器

本稿において評価対象となる機器は「A:処理装置、電子端末、装置内蔵電源」とする。

4. 電子連動装置の耐用寿命の検討

第2項で述べたとおり、耐用寿命は「劣化寿命」と「保守寿命」によって決定される。本稿では、電子連動装置 I 形および II 形を対象にした劣化調査の結果および保守寿命の検討結果についてまとめる。

4.1. 電子連動装置の劣化調査

電子連動装置 I 形および II 形を対象にした劣化調査を実施した。本調査では、電子連動装置の劣化調査と、高温の環境中で劣化を促進させる加速劣化試験を実施した。

劣化調査では、運用開始から 20～25 年経過した装置の外観および機能の評価を行った。

加速劣化試験では、運用開始から 25 年間経過した電子連動装置 I 形を高温で稼働させることで劣化を促進し、装置の状態がどのように推移するかを確認した。また、加速劣化試験中に発生した故障の解析を実施した。調査結果を以下にまとめる。

4.1.1. 劣化調査の結果

劣化調査では、電子連動装置としての機能に異常は確認されなかったが、IC のリードに腐食が見られた。腐食はリードの表面部分のみであり、部品としての性能に影響しないことが分かった。しかしながら、腐食の進行具合は設置環境に依存することも考えられるため、個別の状態確認などが必要である。

4.1.2. 加速劣化試験および故障調査の結果

25 年稼働した電子連動装置に対し、15 年相当の加速劣化試験を実施し、合計 40 年が経過するまでの状態の変化を調査した。

試験中に発生した故障としては、IC の故障が 3 件確認されたほか、マザーボードのはんだ不良、汎用小型反応リレーのコイル絶縁不良が確認された。また、電子連動装置としての主要な機能に影響しない事象として、LED の明るさの低下と樹脂部品の劣化および破損が発生した。

発生した故障はいずれも故障部位の交換で回復できる事象であり、IC の故障 3 件についても、故障解析により偶発故障領域の範囲であることが判明したことから、機能の継続維持は良好であった。しかしながら、実施したサンプルが 1 駅のみであることから、他の装置も同様に評価できるかを確認するため、4.2 項の劣化寿命評価手法と合わせて検討を行った。

4.2. 装置の耐用寿命の評価手法

装置の耐用寿命の評価手法の概要について記載する。

4.2.1. 装置の使用環境の把握

設計寿命で考慮される環境条件を下記に示す。

- ①温度：JIS E3019（地上）、JIS E4035（車上）
- ②湿度：JIS E3017
- ③振動：JIS E3014（地上）、JIS E4031（車上）

装置の設計では、これらの環境条件（あるいは個別に仕様として定めた環境条件）の中でとりうる最悪条件においても設計寿命を満たすように設計を行っている。一方、今回の電子連動装置の耐用寿命評価では、サンプルとした駅の実使用環境より、空調管理された 25℃一定の温度下で終日運転していることを前提として評価した。

4.2.2. 主機能に影響する電子部品の抽出

電子連動装置を構成する部品は、その部品がどの回路やユニットに使用されているのかによって故障の影響度が異なる。そのため故障の影響度を段階的に分け、主機能に影響するものを抽出する。

部品の故障による影響度を表 4.1 に示す。部品の故障が装置の機能に影響を与えるものと与えないものがあるが、装置の劣化寿命を評価するに当たっては、機能に影響がある部品の寿命を装置の劣化寿命ととらえることが可能である。したがって、影響度がレベル 2 以上であれば劣化寿命の評価対象となる。また、レベル 1 のような故障は顕在化しないことが多く、故障が劣化寿命に結びつくとは断定できないが、部品の種別を考慮した上で寿命の評価対象とするか判定を行う。

表 4.1 部品の故障による影響度

レベル	影響度	事例
0	影響なし	機能に影響を与えない故障（表示 LED）
1	動作不安定	ユニット動作が不安定になる故障（IC のバイパスコンデンサ）
2	部分機能停止	回路ブロックが機能停止となるが、ユニットや装置の機能は継続する故障（通信、入出力回路）
3	ユニット停止	ユニット基板が機能停止となるが、装置の機能は継続する故障（CPU、ローカルバス）
4	当該系停止	系全体が機能停止となるが、装置の機能が継続する故障（WDT 回路）
5	連動全機能停止	連動装置全体が機能停止となる故障

表 4.2 半導体部品の故障モデルと故障時間の算出例

No.	故障モデル	加速モデル式	計算結果
1	エレクトロ マイグレーション	$L = L_0 \left(\frac{J_1}{J_0} \right)^{-n} \exp \left\{ -\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$	694 年
2	TDDB (酸化膜経時破壊) (膜厚 5nm 以上)	$L = L_0 \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) - \gamma (E_{ox1} - E_{ox0}) \right\}$	1,768 年
3	TDDB (膜厚 5nm 以上)	$L = L_0 \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) + G \left(\frac{1}{E_{ox1}} - \frac{1}{E_{ox0}} \right) \right\}$	21 万年
4	TDDB (膜厚 5nm 以下)	$L = L_0 \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) - \gamma' (V_{G1} - V_{G0}) \right\}$	92 年
5	TDDB (膜厚 2nm 以下)	$L = L_0 \left(\frac{V_{G1}}{V_{G0}} \right)^{-n'} \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$	2 万年
6	NBTI (負バイアス温度不安定性)	$L = L_0 10^{-\beta(E_1 - E_0)} \exp \left\{ \frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$	3 万年

4.2.5. 得られた累積故障確率に基づく耐用寿命の設定

累積故障確率の変化から耐用寿命を設定する。耐用寿命は一意に求められるものではなく、電子連動装置の導入台数や、使用年数を延長する際の故障率の増大をどこまで許容できるかによって異なる。

4.3. 個別環境確認とカルテ化（診断レポート）

本項で述べた電子連動装置の劣化調査および劣化寿命評価手法は、いくつかの前提条件のもとに評価を行っている。しかしながら、実際の使用環境はそれぞれ異なるため、この前提条件をすべての電子連動装置に適用することはできない。したがって、個々の電子連動装置ごとに、温度等の設置環境条件や機器の状態を確認し、想定外の問題が発生していないかを確認するプロセスが必要である。

4.3.1. 実使用環境の確認

環境条件の確認は、機能確認ではなく、目視を主体にした装置の状態および周囲の環境の確認となる。例えば、機器室の温度の高低や変動の有無、サブ機器室の条件、器具箱内分散方式を採用しているか等を確認する必要がある。

稼働中の装置の状態を把握することは、故障による障害の予防に有効である。さらに、劣化状態から予備品等の必要数を算出することで、部品の生産中止を見据えた計画的な部品確保などにも役立てることができる。したがって、実使用環境の確認結果や、装置の状態を定期的に記録し、事業者とメーカーがデータを共有することも重要である。

4.3.2. 設計寿命を超える期間における故障調査

電子部品の劣化寿命はばらつきが大きいことから、設計寿命を超えた期間に発生する故障は、調査時に再現しない事象が多くなる。また、近年の電子回路は小型化・高密度化が進んでおり、電氣的な調査に必要な電極が隠れてしまうような構造の部品も増えていることから、今後は調査そのものが困難になりつつある。したがって、故障調査のあり方を見直す必要がある。

設計寿命を超えて使用されている電子連動装置の故障は、設計不良や初期不良が原因でないことが明らかである。なおかつ、長期にわたって稼働している装置の場合、摩耗故障領域がどこであるのか（あと何年使えるのか）を統計的に判明させることが重要である。したがって、初号機の設計寿命が近づいてきた時点（おおむね 15～20 年）以降の故障調査については、個別調査ではなく、統計的な手法を用いることが望ましい。

4.4. 保守寿命

長期にわたって装置を使用する場合、装置の耐用寿命を決定する要因は劣化寿命のみならず、装置の保守が困難になる「保守寿命」も考慮する必要がある。保守寿命は、部品の入手が困難になる「供給寿命」や、技術的なサポートが困難になる「サポート寿命」に分けられる。劣化寿命が個々の装置ごとに定まるのに対し、保守寿命は同じモデル全体で共通して定まる。そのため、同じ型式でも使用開始の時期によって保守寿命の影響が変わってくることに注意が必要である。

4.4.1. 供給寿命

部品の生産中止等により、保守に必要な部品やユニット、モジュール等が供給できなくなると、そのモデルの保守は予備品を使用することになり、さらに予備品が枯渇すると耐用寿命を迎えることになる。

一般的には 15 年経過すると、部品の入手性の問題から同モデルの電子連動装置が生産不可となるケースが生じる。したがって、メーカは早期に事業者へ最終リリースのアナウンスと情報の共有を行い、最終リリース時に充当する予備品の最終生産を計画的に実施することが望ましい。予備品の数量は偶発故障領域を想定し、MTBF の概念を用いて必要な予備品の数量を算出し、最終生産量を決定・調整する。

運用が終了し撤去された装置の部品を保持しておくことも、予備品の確保と経済的な負担軽減という観点から有効であるといえる。

4.4.2. サポート寿命

技術的サポートを行う人員には限りがあり、いずれは退職することを考慮する必要がある。技術的サポートの例としては、返戻修理、ソフトウェア改修、技術問い合わせが挙げられる。

サポート寿命は技術者の欠乏と技術継承の終了によるものである。また、サポートに必要なメーカの設備（ハウスマシン等）も寿命があり、永久的に設備保有することはできない。

一例として、耐用寿命を 30 年と設定した場合を検討する。検討結果については 2 項および図 2.1 も合わせて参照されたい。

初号機をリリースしてから 15 年にわたって同一の型式の電子連動装置を生産したとすると、最後にリリースした装置、すなわち初号機のリリースから 15 年後にリリースされた装置が耐用寿命を迎える頃には、初号機のリリースから合計 45 年が経過することになる。これはあくまで初号機のリリースを基準としているが、電子連動装置の開発期間についても考慮すると、およそ 50 年にわたって人員や設備を保持する必要があるが出てくる。

したがって、最終モデルについては、仮に劣化寿命が 30 年以上期待できる環境で使用したとしても、サポート寿命を 30 年とすることは現実的でない。

5. 装置内蔵電源

装置内蔵電源の劣化寿命を決定する部品は「アルミ電解コンデンサ」である。電子連動装置の劣化調査の結果より、約 15 年でアルミ電解コンデンサの諸特性の劣化が見られたことから、電源装置の耐用寿命は約 15 年と考えられる。

電子連動装置においては、装置内蔵電源は交換が可能であり、オーバーホール対象として整理することができる。

6. 扱い所の機器および汎用機器

現場で経験的に故障が観測される機器として、扱い所の機器、汎用機器（パソコン関係）が挙げられる。一般的にもプリンタ、記憶装置（FDD、HDD、光ディスク）、ディスプレイは有寿命部品として知られている。

これらの機器は、代替可能な機器と位置づけられることで、耐用寿命の評価対象とはならないと整理されることが多い。

理由としては、主とする機能が保全支援や表示であり、電子連動装置として最も重要な部位ではないからである。しかし、これらの装置が無いと事業者もメーカーも保守していくことが難しく、電子連動装置を稼働、運用させることが困難となる。

事実、代替機器の供給性不良が生じた事例は多く、開発コストの問題や、当該モデルの廃止の一因となる事態が発生している。したがって、4.4.1 項で述べたとおり、最終リリース時の充当予備を計画的に実施することが望ましい。

7. オーバーホール

オーバーホール（Overhaul）とは、一般的に「分解検査する」「徹底的に見直す」という意味の言葉である。具体的には、新品時の性能に戻したり近づけたりするために、製品を分解して掃除や調整、点検等を行い、再度組み立てることを意味する。

オーバーホールを一言でいうと、「すべてを分解しての検査・修理」となるが、電子連動装置の場合、装置の動作を止める時間は最小限にして作業を行う必要があり、その特異性から一般的なオーバーホールの考え方を踏襲できないことも多い。このことから、電子連動装置のモデルや信号装置メーカーごとに定義が異なるため、オーバーホールについては事業者と信号装置メーカーの間で考えを共有し、計画的に実施することが望ましい。

例として電子連動装置 I 形を挙げると、ユニットについては、実装されている部品を取り外し、原則 1 回を限度として新しい部品に交換するという手法をとった。しかし、近年開発されている電子連動装置とそのユニットに対してこのような手法をとるのは困難である。電子連動装置 I 形に使用されているユニットは、現在と比較して部品の実装密度が低く、交換作業に必要なスペースが残されていたためである。また、主として挿入部品が使用されていたため、取り外しや実装が容易に実施できたこともこのようなオーバーホール手法が実施できた理由である。

近年のユニットは、高機能・省スペース化が求められていることから、部品が高密度に実装されており、使用されている部品も専用の機械での実装を前提とした構造・形態をしていることから、部品を手作業で交換することは困難である。したがって、「部品を交換する」こと一つでも電子連動装置のモデルによって異なってくる。

8. その他

電子連動装置を所望の期間にわたって安定的に稼働させるためには、故障や寿命だけでなく、災害発生時のリスクについても考慮する必要がある。

また、電子連動装置をあまりにも長期間にわたって稼働した場合、設計時に想定していない、破局的な故障が発生するリスクを無視することはできない。

参考文献

- 1) 野上和典・伊東和彦・山野井隆・宮瀬昇一郎・川原敬治・大串裕郁：「鉄道電気設備における電子機器の劣化に関する調査」，平成25年電気学会産業応用部門大会, Vol.5, No.11, pp.143-144(2013)
- 2) 和田哲英・宮瀬昇一郎・伊東和彦：「鉄道電気設備における電子機器の劣化に関する調査」，鉄道と電気技術, Vol.25, No.2, pp.26-30(2014)
- 3) 和田哲英・伊東和彦・山野井隆・宮瀬昇一郎・志田洋・川原敬治・大串裕郁：「鉄道電気設備における電子機器の劣化に関する調査（その2）」，平成26年電気学会全国大会, Vol.5, No.96, pp.168-169(2014)
- 4) 宮瀬昇一郎・和田哲英・伊東和彦・山野井隆・志田洋・川原敬治・大串裕郁：「鉄道電気設備における電子機器の劣化に関する調査（その3）」，平成26年電気学会産業応用部門大会, Vol.5, No.12, pp.173-176 (2014)
- 5) 柳ヶ瀬, 鈴木, 加藤：電子連動装置の劣化メカニズムについての研究, 平成27年電気学会全国大会, Vol. 5, p. 206, 2015
- 6) 鉄道総研：藤田 浩由：「電子連動装置の使用環境を考慮した劣化・寿命評価」
- 7) 鉄道総研：「電子連動装置の劣化・寿命評価手法」
- 8) 「故障物理入門」：塩見 弘 著
- 9) ルネサスエレクトロニクス：信頼性ハンドブック
- 10) 東芝：半導体製品の品質・信頼性保証
- 11) SONY 半導体デバイスの信頼性検証
- 12) LSI アルミ配線の劣化機構に関する研究（静岡大学：平岡一則 論文）
- 13) LSI アルミニウム配線のエレクトロマイグレーション（日野出 憲治）
- 14) AVAGO：フォトカプラのLED 寿命特性を予測する方法
- 15) ルビコン：技術資料 アルミニウム電解コンデンサ
- 16) ニッケミ：テクニカルノート（アルミニウム電解コンデンサ）
- 17) ニチコン：アルミニウム電解コンデンサ
- 18) ELNA：テクニカルノート アルミ電解コンデンサ
- 19) 村田製作所：電子部品の信頼性
- 20) JEITA：半導体デバイスの加速寿命試験運用ガイドライン, EDR-4704A, 2007
- 21) エヌ・デイ・エス：「高分子の寿命予測と長寿命化技術」

電子連動装置の劣化調査委員会

○初版作成時（2017年8月）委員

株式会社京三製作所	赤窄 学、 鈴木 邦彦、 吉田 博公
大同信号株式会社	篠原 誠、 尾崎 亮介、 白石 芳一、 吉田 智仙
株式会社てつでん	原田 英幾、 小椋 正史
日本信号株式会社	田場 啓、 佐々木健一、 勝俣 翠

「社名は五十音順」

