

HALT(高加速寿命試験)による電子計測器の信頼性向上

Reliability improvement of the measurement instrument by HALT

木名瀬純 Jun Kinase, 尾崎智幸 Toshiyuki Ozaki, 岡島寛明 Hiroaki Okajima

[要 旨] 電子計測器の信頼性向上を図るため、HALT(高加速寿命試験)を導入した。HALTは、機器に高いレベルの環境ストレスを加えることで、短時間で潜在的な弱点を顕在化させ、動作限界と破壊限界に対する設計マージンを見つけることができる。さらにその弱点を補強しマージンを拡大することで、製品の信頼性向上、製造工程の安定化によるコスト削減が実現できる。本論では、アンリツにおける HALT 導入の経緯、電子計測器における HALT の事例・改善例を示し、その有効性について報告する。

[Summary] We introduced HALT (Highly Accelerated Life Test) in order to improve the reliability of an electronic measuring instrument. HALT can actualize potential weak links in a short time by applying high level stress on DUT, and can find the design margin to an operating limit and a destructive limit. Furthermore, by reinforcing the weak links and expanding a margin, the cost reduction by the improvement in reliability of a product and stabilization of a manufacturing process is realizable. This article describes the process of the HALT introduction in Anritsu, and some example of HALT and some improvement example of the weak links by HALT, and reports its validity.

1 まえがき

従来、電子計測器は精密機器として位置づけられ、比較的温和な環境で、丁寧に扱われてきた。しかし、電子機器の製造ラインで使用される電子計測器は、24時間連続運転でも故障しない、高い信頼性が求められている。電子計測器の故障は、量産ラインのダウンタイムに直結するためである。

最近では新興国の経済成長に伴い、電子機器の製造ラインの新興国への進出も活発である。そこで使用される電子計測器には、より厳しい環境下での高信頼性が要求されている。

アンリツでは、電子計測器の信頼性向上のため、HALT(Highly Accelerated Life Test: 高加速寿命試験)を導入している。

本稿では、アンリツにおける HALT を活用した製品信頼性向上の取り組みについて、実施例を交えて報告する。

2 HALT の概要

HALT は、製品として保証される環境性能を越え、動作限界および破壊限界までのストレスを加えることで、短時間で設計マージ

ンを確認する、一種の破壊試験である。

動作限界および破壊限界までの試験を行うことで、製品の潜在的な弱点を顕在化することができるため、その弱点を補強することで製品の信頼性を向上させることができる。

試験手順は、図 1 に示すように、冷却ストレス、加熱ストレス、急速温度変化ストレス、振動ストレス、温度と振動の複合ストレスの 5 つのフェーズを実施し、それぞれのフェーズで動作限界に至るまでストレスを強めていく。

試験中、機器になんらかの異常現象が確認された場合、その場で原因箇所を特定し、修復、補強を施した上でさらにストレスを強めて試験を続行する。

このように、HALT は一定の基準値に対する合否判定試験ではなく、試験・分析・改善・試験を繰り返すことで、製品の弱点を補強し、機器の動作マージンおよび破壊マージンを広めていく品質改善活動である。HALT による稼働マージン、破壊マージンの拡大イメージを図 2 に示す。

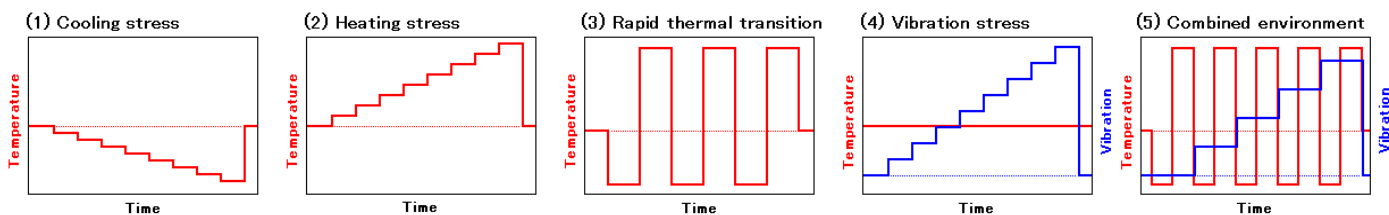


図 1 HALT 実施手順
HALT execution procedure

HALTは1980年代に米国で考案され、当初は軍事品向けに使われた技術である。その後、欧米を中心に航空機、自動車業界に普及した。日本でのHALTの導入は遅く、2000年代になって電子機器、工業製品の信頼性向上のために徐々に普及し始めた。

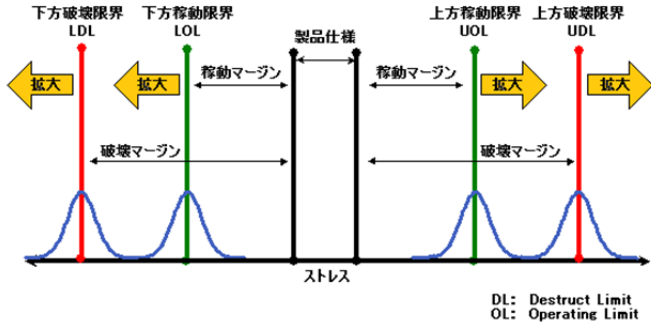


図2 HALTの用語および概念
Term and concept of HALT



図3 HALTチャンバーの外観
External view of HALT chamber

3 アンリツでのHALT導入の経緯

アンリツでは2001年に米国の開発拠点で導入し、日本でも2005年から2007年の外部機関設備による試行期間を経て、開発拠点である厚木本社にHALT設備を設置した。

社内でのHALT設備の設置にあたり、下記の条件を満足するようにした。

(1) 設置場所:

HALTは試験中の異常状態の発生現象をリアルタイムに観測・分析する必要があるため、被試験機器の内部構造に精通したエンジニアの参加が必須である。このため、HALT設備の設置場所を開発部門と同じ建屋内とした。

(2) HALTチャンバー:

机上で使用するスタンドアロンタイプの機器を、余裕をもって搭載できるサイズのチャンバーを選定した。

導入したHALTチャンバーは、米国QUALMARK社製Typhoon 2.5で、主な仕様は以下のとおりである。

- ・ テーブル寸法 : 762 mm × 762 mm
- ・ 振動ストレス
 - 最大加振: 50 Grms (10 Hz ~ 5 kHz)
 - 最大搭載質量: 145 kg
 - 加振方式: 広帯域 6 軸ランダム
- ・ 温度ストレス
 - 設定温度範囲: -100 ~ +200°C
 - 温度可変勾配: 70°C/min
 - 加熱方式: ニッケルクロムヒータ
 - 冷却方式: 液体窒素噴射

社内に設置したHALTチャンバーの外観を図3に示す。

(3) 安全への配慮:

HALTではチャンバー内の冷却および結露防止用パージングのために、大量の液化窒素を使用する。液化窒素は常温で気化した場合、体積が約700倍にも膨張する。窒素漏れは酸欠による人災事故につながる恐れがあるため、酸欠警報機と、それに連動した換気装置を設置し、安全面に十分配慮した。

4 HALTの流れ

4.1 事前準備

HALTを実施するためには、試験中に対象機器の動作状態をどれだけ綿密にモニタリングするか、またモニタリングで得られた結果から、どのように不具合発生箇所を特定するかが重要なポイントとなる。

電子計測器の内部の大半は、電子部品をプリント配線板に搭載したものであり、電子部品数は数千点から数万点に及ぶ。闇雲に試験を実施し、異常現象を発生させても、その発生箇所が特定できなければ、マージン量の評価を行うだけで、HALTの本質である信頼性の改善活動にはつながらない。

不具合発生箇所を、短時間で特定するために、事前の準備が欠かせない。被試験機種種の動作原理、回路構成などを十分に理解し、適切なモニタリングが行えるようにする。

以下にHALT実施前に行う準備の例を述べる。

(1) FMEAの活用

複数の回路ブロックで構成される機器の場合、どのブロッ

クが故障したらどのような現象になるのかを、あらかじめ把握しておく必要がある。このためには FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) が有効である。つまり、回路ブロックごとの想定される故障と、被試験機器で発生する異常状態の関係を、あらかじめ整理しておくことで、不具合箇所の早期発見が可能となる。また、故障箇所の推定を行うことで、各試験フェーズでのチェック項目やモニタリング箇所の最適化を行うことが可能となる。

(2) 内部信号のモニタリング

複数の回路モジュールを経由して信号が伝送されるような機器構成の場合、あらかじめモジュール間の配線をチャンバーの外部に引き出しておくことで、異常発生時に故障した回路モジュールの特定が容易にできるようにする。

とくに機器の外部で確認できる特性を観測しても、動作異常が認識できないフィードバック系回路では、フィードバックループ内の状態をモニタすることで、キーデバイスの特性変動、再現性の確認が可能となる。

フィードバック系回路の代表的なものとして、図 4 に示す PLL (Phase Locked Loop) シンセサイザ回路が挙げられる。PLL シンセサイザは回路の構成要素である VCO (電圧可変発振器) の特性が変化しても、ループの作用によって自動的に周波数ロック状態を維持するため、出力信号をモニタしているだけでは回路の異常が発見できない。そこで、VCO のチューニング電圧をモニタすることで、VCO の特性変化量が確認できるようにする。

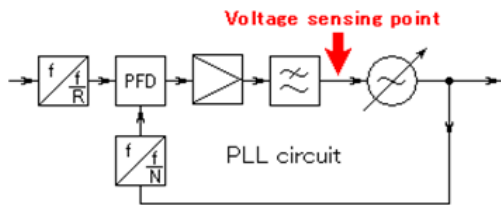


図 4 PLL 回路におけるモニタリング例
Monitoring example of PLL circuit

図 5 は、HALT のために、各ユニットからモニタリング配線を引き出した状態の被試験機器の一例である。

(3) 操作部の動作確認

HALT チャンバ内部は、試験中の急激な温度変化による、機器の結露防止のため、窒素ガスで充填される。そのためにチャンバは密閉構造となっており、試験中に機器に触れることはできない。

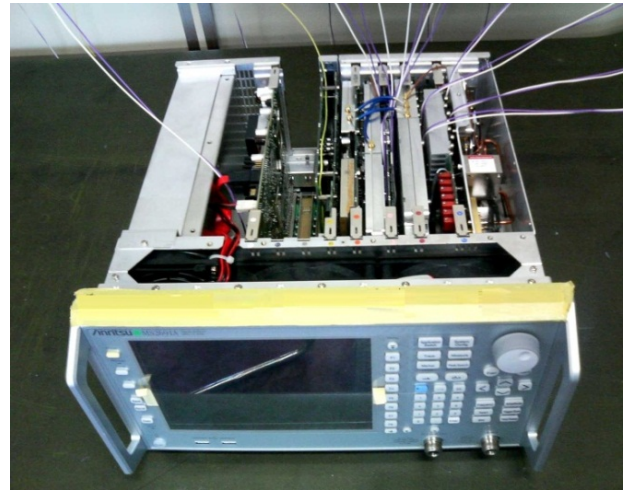


図 5 被試験装置のモニタリング出力例
Monitoring example of DUT

機器のパネルキーなどの操作機能を確認するには、遠隔操作の仕組みが必要となる。この仕組みも、被試験機器同様に HALT チャンバー内での過酷な温度、振動ストレスにさらされるため、構造的に堅牢でシンプルなものが必要とされる。図 6 は、ワイヤーを用いたパネルキー遠隔操作治具の例である。



図 6 パネルキーの遠隔操作
Panel key operation equipment

(4) HALT のストレスに耐えられないデバイスへの配慮

市販の電源や CPU ボードなどのユニット品は、過剰ストレスを検知して動作を制限させるものがある。このようなものが機器内に存在する場合、試験の障害とならないように、あらかじめ保護回路の動作を停止させる加工が必要がある。

また、ハードディスクや液晶ディスプレイなど、印加ストレスに対して動作不良や破損することがわかっているものは、HALT チャンバーの外に出すなどをして、ストレス印加の対象としないことも必要となる。

4.2 HALT の実施と不具合箇所の特定

HALT は 1 章で述べたとおり、一連の試験を行う上で、数 10 回におよぶ被試験機器の動作確認を行うことになる。できるだけ多くの回路ブロックの状態を確認できる手順を決め、可能な部分は自動化する。

動作試験の結果、なんらかの異常が認められた場合は、機器の動作設定を変えたり、モニタリング状態を詳細に観察し、動作異常が発生している箇所を特定する。また、印加しているストレス(温度、振動)を緩和し、正常状態に復帰するか否かを確認する。

4.3 HALT 結果からの改善判断

HALT で発生した異常現象をすべて改善する必要はない。製品の使用させる環境などの加味し、改善の必要性を判断する。

判断基準例を下記に示す。

(1) 改善すべきもの:

- ・ ストレス印加による特性変化が非可逆的で、その変化量が回路の設計仕様に対し十分なマージンがないもの。
- ・ 異常状態に至るまでのストレス印加が製品の仕様範囲に対しマージンがなく、部品などのばらつきによっては、機器の通常使用環境でも発生する可能性のあるもの。

(2) 改善する必要のないもの:

- ・ 異常状態の発生が製品の仕様に対し十分なマージンがあり、一時的なストレス印加で機能、性能が損なわれても、ストレスを取り除けば正常状態に復帰するもの。
- ・ デバイスのストレス許容量があらかじめ明確となっており、顧客に対する使用上の注意事項として喚起できる、あるいはシステムにより保護できる構造であるもの。

5 HALT で発見された弱点と改善策

HALT の各試験フェーズでは、下記のような現象の発生が想定される。

- ・ 低温・高温ストレス: デバイスの特性ドリフト、異常動作
- ・ 温度急変ストレス: 熱膨張・収縮による物理的破損
- ・ 振動ストレス: 部品脱落、破損、はんだ接合部クラック発生、接触構造部品(コネクタ、リレー)の接触不良

以下に、これまで実際に計測器の HALT を実施し、顕在化できた現象の具体例と、その改善例を示す。

(1) 時定数回路の特性変化

冷却ストレス-30°Cでモノマルチ IC の時定数回路(図 7)に使用していたアルミ電解コンデンサの等価直列抵抗

(ESR)が増大した。そのため、モノマルチ IC のリセット時にコンデンサが十分に放電されず、パルスが出力されなかった。ここではアルミ電解コンデンサを、等価直列抵抗の温度変化が小さい高分子有機半導体タイプに変更した。

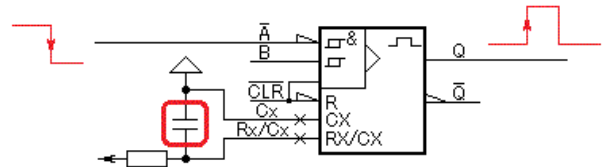


図 7 モノマルチ IC の時定数回路
Monostable multivibrator IC

(2) PLL シンセサイザ回路の周波数ロック外れ

冷却ストレス-55°Cで、100 MHz の PLL(Phase Locked Loop)方式のシンセサイザ回路で周波数ロックがはずれた(図 8)。このシンセサイザの基準信号発生部に使用していた 100 MHz 水晶振動子が周波数ドリフトを起こし、PLL ループの引き込み範囲を外れてしまったのが原因だった。機器の使用温度範囲に対し十分なマージンがあること、常温で発振周波数が元に戻ることから、対策不要と判断した。

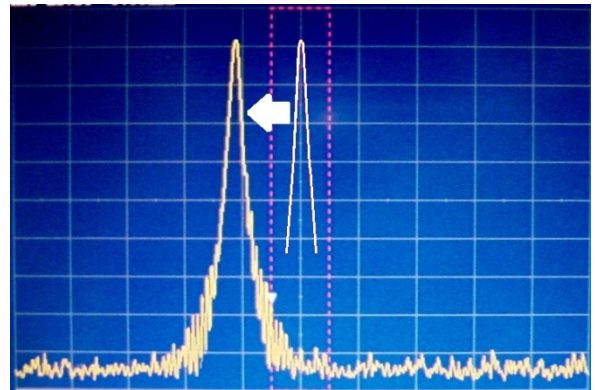


図 8 ロックはずれた信号(Span=5 kHz 相当)
Unlocked signal

(3) アクリルパネルの膨張によるキー操作不能

冷却ストレス-60°Cで、機器正面のアクリル製パネルが収縮し、パネルキーと接触して、操作不能となった。この現象は機器が通常で使用、保管される環境では発生しない現象であるため、製品への対策は不要と判断した。

(4) ロジック回路設計ミスの発見

冷却ストレス-20°Cで、ロジック回路が設計どおり動作しなくなった。FPGA の 3.3 V 系ロジック信号入力に、5 V の電圧を印加する回路設計ミスが発見された。FPGA のロジック入力回路には、電源との間に寄生ダイオードが存在しており、通常はこの寄生ダイオードには電流は流れない。しかし

電源電圧を超える電圧が入力されことにより、この寄生ダイオードに電流が流れてダメージを与え、リーク電流が増大していた(図9)。当該製品の動作保証温度範囲ではこのリーク電流は微小なため、動作不良とならず、回路設計ミスが発見されなかった。しかしHALTで冷却ストレスを加えたことによりリーク電流が増大し、“High”レベル状態に固定されてしまった。本回路ミスは開発段階に実施したHALTで発見されたため、早期に設計ミスを是正することができた。

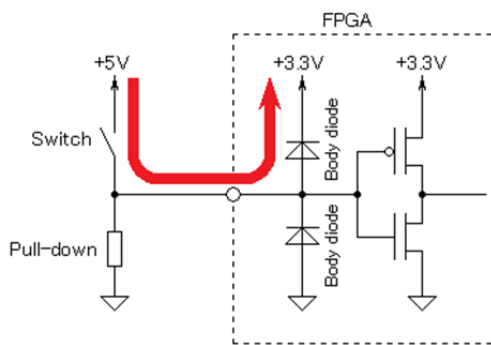


図9 FPGA入力回路
FPGA Input Circuit

(5) 面実装電解コンデンサの脱落

振動ストレスで、プリント板に搭載した表面実装タイプのアルミ電解コンデンサが脱落した。破損箇所はハンダ部分ではなく、部品のリード部分の破断であった(図10)。全機種で同様の現象がみられるが、破損した振動ストレスが実使用状態では起こりえないレベルであることから、製品に対しては補強対策は不要と判断した。ただし、HALT試験を実施する場合は、脱落により試験の障害となるため、あらかじめ接着補強するようにしている。

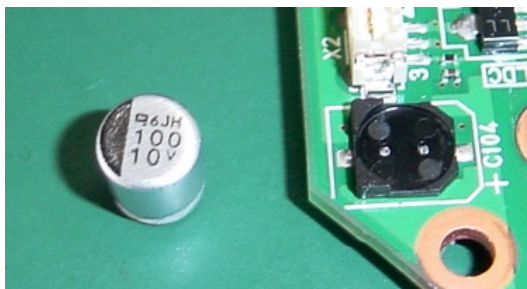


図10 脱落したアルミ電解コンデンサ
Detached aluminum electrolytic capacitor

(6) バックアップ用一次電池のリード破断

振動ストレス45Grmsで、プリント板に搭載したバックアップ用一次電池のリードが破断した(図11)。前述のアルミ電解コンデンサと同様であるが、電池が脱落した場合、機

器内でショートする恐れがあり、とくにハンドヘルドタイプの機器では電池の接着固定を実施するようにした。

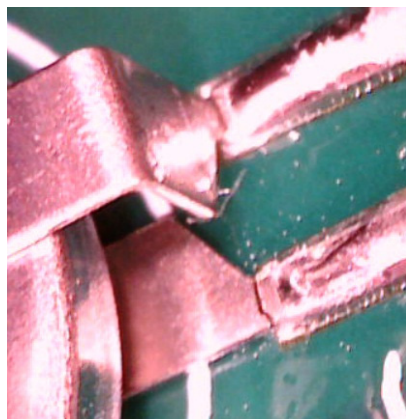


図11 リードが破断したバックアップ電池
Backup battery which the lead fractured

(7) コンパクトフラッシュメモリの接触不良

振動ストレス25Grmsで、機器内部でのデータ保持用に用いていたコンパクトフラッシュメモリカード(以下CFカード)が、コネクタ嵌合部分で接触不良を起こした(図12)。CFカードのコネクタは嵌合長が短く、わずかなコネクタ抜けでも接触不良を起こすことが判明したため、ほかのCFカード使用機種にも脱落防止策を水平展開した。

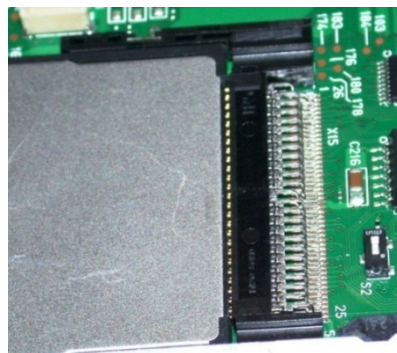


図12 コネクタから脱落しかけたCFカード
CF card which was escaping from the connector

(8) 水晶振動子の破損

振動ストレス50Grmsで、機器の測定周波数がシフトした。基準周波数源として使用していたOCXO(温度制御型水晶発振器)の水晶振動子保持部分で破断が生じていた(図13)。このOCXOは、多数の製品で使用されているが、これまで同様の故障事故は発生したことがないことから、補強対策は実施せず、部品の弱点として記録にとどめるのみとした。

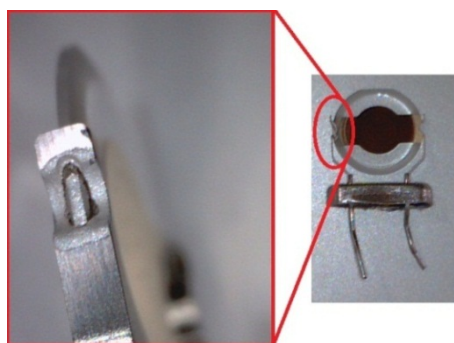


図 13 破損した水晶振動子
Damaged crystal resonator

(9) Serial-ATA コネクタの接触不良

振動ストレス 20Grms で、ハードディスクドライブとの接続に用いる Serial-ATA タイプコネクタが振動で接触不良を起こし、機能停止となる。コネクタの接点材質および構造に問題があったため、他のメーカー品に変更した。

6 HALT による製品信頼性向上の効果

アンリツではこれまでに 20 機種以上の HALT を実施してきた。HALT で顕在化した異常現象を、ストレスフェーズごとに分類した結果を図 14 に示す。冷却ストレス、加熱ストレス、振動ストレスがほぼ同じ比率で大半を占め、急速温度変化と複合ストレスのみで顕在化する異常現象は、ごくわずかである。

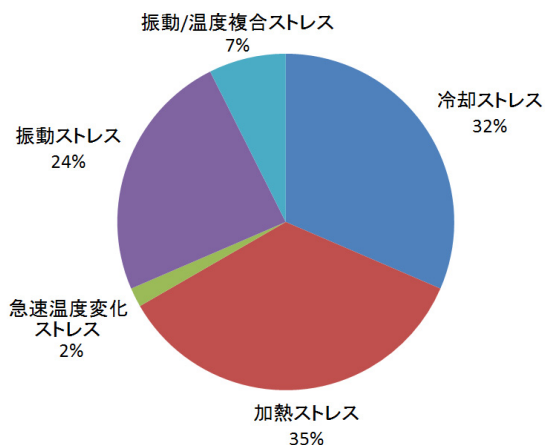


図 14 HALT で顕在化した異常現象

冷却ストレス、加熱ストレスでは、電気的な弱点のほか、素材の特性(熱膨張率など)に起因する構造的な弱点も顕在化している。振動ストレスでは構造的な弱点がほとんどであり、破壊に至るものが多い。

HALT で顕在化された異常現象のうち、原因箇所が特定でき、改善を製品に反映できたものは、およそ 20%である。そのほかは製品の通常の使用環境では発生する可能性が低く、対策を施す必要がないと判断した。

HALT は、このように製品の弱点を補強を行うことで信頼性を高めることが目的であるが、あらかじめその製品の弱点を認識しておくことで、市場で発生した不具合の原因究明が容易となる。

また、HALT で顕在化した弱点は、次世代の製品開発における信頼性設計のノウハウとして、フィードバックさせることで、設計品質を高めることができる。

7 むすび

アンリツで導入した HALT の概要を、実例を交えて紹介した。

HALT は、その実施手順について定型化されているが、HALT で発生した異常現象をどのように解析し、製品の信頼性向上に結び付けていくかは、試験を実施する機器の種類によって異なる。

従って、HALT を導入しても、機器の信頼性を即座に向上させられるとは限らない。異常現象の原因特定、補強の必要性有無の判断、補強の手法など、継続して HALT を実施し、ノウハウを構築することで、その有効性が発揮できる。

今後、家電、産業機器など広い分野で HALT が普及することを期待し、本論文が HALT を有効活用するための一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Gregg K Hobbs : ACCELERATED RELIABILITY ENGINEERING HALT AND HASS
- 2) 木村雅秀:“機器は壊して強くする 新試験手法 HALT が離陸”,日経エレクトロニクス 2008,12,1
- 3) 木村雅秀:”壊して作る HALT 活用設計 コスト競争力の源泉に”,日経エレクトロニクス 2011,10,17

執筆者



木名 瀬 純
SCM 本部
生産技術部
技術支援チーム



尾崎 智 幸
SCM 本部
生産技術部
技術支援チーム



岡島 寛 明
アンリツ計測器カスタマサービス(株)
EMC センター

公知