

Technical White Paper

IEC 62380 と SN 29500 による機能安全の FIT ベース故障率推定の理解

Bharat Rajaram, Senior Member, Technical Staff, and Director, Functional Safety, C2000™ Microcontrollers, Texas Instruments

概要

IEC (国際電気標準会議) 61508¹、ISO (国際標準化機構) 26262² などの機能安全規格は、半導体デバイス・メーカーが決定論的原因によるハードウェア故障とランダムな原因によるハードウェア故障の両方に対処することを求めています。以下の厳格な開発プロセスにより、決定論的原因故障の管理と軽減が可能になります。ハードウェア安全インテグリティ・レベル (SIL) や車載 SIL (ASIL) への適合のために、ランダム・ハードウェア故障は規定の定量的指標を遵守する必要があります。そのため、決定論的原因故障はランダム・ハードウェア故障指標の計算から除外されます。

目次

1 はじめに.....	2
2 故障のタイプと定量的なランダム・ハードウェア故障指標	2
3 製品寿命にわたるランダム故障と BFR の推定	3
4 BFR の推定手法	4
5 Siemens SN 29500 FIT モデル	5
6 IEC TR 62380	5
7 BFR 計算の推奨前提条件	7
8 過渡故障に関する特別な考慮事項	7
9 IEC TR 62380 と SN 29500 の間の BFR の差異 (パッケージ起因)	7
10 BFR に対する電源投入期間の影響	8
11 TI 製品として期待できるもの	8
12 まとめ	8
13 関連資料	9

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

基本故障率 (BFR) は半導体部品に固有の信頼性を定量化するとともに、通常的环境条件下でも機能します。BFR は通常、温度、電圧、動作時間数などの要因を乗算することにより、部品の品質に対応する定量的尺度を提供します。

機能安全規格で要求されるようなランダム・ハードウェア指標を計算するための主要な入力の一つが BFR です。BFR はさまざまな手法で推定できます。BFR の推定手法は、故障モードの前提条件に依存するため、これらの根本的な前提条件が異なると BFR 推定も異なります。

このホワイト・ペーパーでは、広く受け入れられている 2 つの半導体部品 BFR 推定方法として IEC Technical Report 62380³ および SN 29500⁴ に基づく推定値を取り上げています。BFR 推定は、以下を含む定量的ランダム・ハードウェア指標計算の基礎となります。

- SFF (Safe Failure Fraction: 安全側故障割合)
- 高需要モードでの PFH (Probability of Failure per Hour: 1 時間あたりの故障率)、または低需要モードでの PFD (Probability of Failure per Day: 1 日あたりの故障率)
- SPFM (Single-Point Fault Metric: 単一点障害指標)
- LFM (Latent Fault Metric: 潜在故障指標)
- PMHF (Probabilistic Metric for random Hardware Failure: ランダム・ハードウェア故障率指標)

このホワイトペーパーでは、BFR に影響を及ぼす要因の概要についても説明し、各種手法を比較対照しています。

2 故障のタイプと定量的なランダム・ハードウェア故障指標

図 2-1 に示すように、本来ハードウェア故障は決定論的原因とランダムのどちらにもなり得ます。決定論的原因故障は、設計、開発、製造プロセスの不備に起因し、通常は開発プロセスのギャップから生じます。シリコン・バグは、開発の設計検証段階中に検出できるため、決定論的原因故障です。たとえば、自動車を設計する際、四角形の車輪を取り付けるように指定することは決定論的原因故障と見なされます。なぜなら、そのような形状の車輪では自動車は機能しないためです。厳格な開発プロセスを順守することで、決定論的原因故障は管理および軽減できます。そして、プロセスを継続的に改善することで、これらの故障を完全に排除することさえできます。

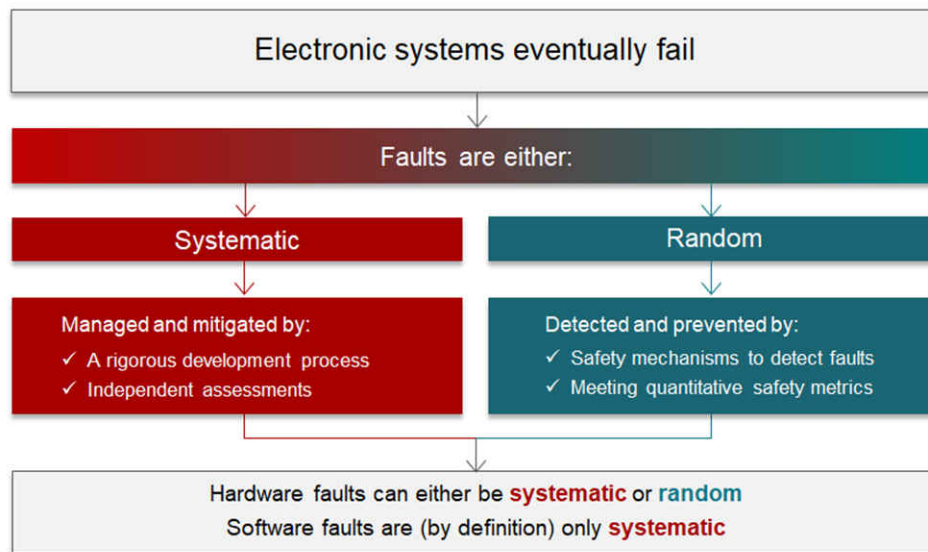


図 2-1. 決定論的原因故障とランダム故障の概要

一方、ランダム・ハードウェア故障は排除できません。ランダム・ハードウェア故障は、すべての電子システムは最終的には故障するという事実に起因しています。そのため、ランダム・ハードウェア故障に対処する能力は、ランダム・ハードウェア故障を検出し、可能な限りそれを防止することに限定されます。車載用の電気、電子、プログラマブル電子システムの場合、問題に注意するようにドライバに警告することで、ランダム・ハードウェア故障による影響をある程度制御できます。

表 2-1 と表 2-2 に、それぞれ ISO 26262 と IEC 61508 の要件に従った、各 ASIL または SIL 値に対するランダム・ハードウェア故障指標の許容値を示します。

表 2-1. ISO 26262-5 によるハードウェア故障指標

ASIL レベル	SPFM	LFM	PMHF (単位:FIT (Failures in Time))
ASIL B	≥90%	≥60%	≤100 FIT
ASIL C	≥97%	≥80%	≤100 FIT
ASIL D	≥99%	≥90%	≤10 FIT

表 2-2. IEC 61508-3 によるハードウェア故障指標

SIL レベル	SFF	PHF (単位:FIT (Failures in Time))
SIL 2	≥90%	≤100 FIT
SIL 3	≥99%	≤10 FIT

IEC 61508 と ISO 26262 はどちらも、ランダム・ハードウェア指標を計算する際に決定論的原因故障を除外しています。したがって、BFR は、故障モードの区分とランダム・ハードウェア指標の計算にのみ適用できます。

3 製品寿命にわたるランダム故障と BFR の推定

図 3-1 に、半導体製品の寿命の主要な 3 つの期間にわたるランダム・ハードウェア故障の代表的な表現であるバスタブ曲線を示します。それらを以下に示します。

- 初期故障:** 比較的高い初期故障率を特徴とし、急速に低下します。テキサス・インスツルメンツ (TI) の工場での出荷検査の一部として加速寿命試験 (バーンインまたは I_{DDQ} 試験など) を実行することで、初期故障をさらに抑えることができます。初期故障はおもに、効果的にスクリーニング (選別) されなかった製造上の不良に起因します。不良は常に発生します。効果的なスクリーニングを開発し、継続的に改善することは必須です。
- 偶発故障:** これは、故障率が比較的低くかつ一定であるバスタブ曲線の領域です。BFR 推定は、半導体部品のライフサイクルのこの部分を扱います。この故障率は FIT (Failure In Time) 単位で定量化されます。FIT は、その製品が 10 億 (10^9) 累積時間動作する間に発生する可能性がある故障数の推定値です。
- 摩耗故障:** 本質的な摩耗故障が優位を占め、故障が指数関数的に増加する製品ライフサイクル期間です。製品の耐用年数は、摩耗故障が始まる時間として規定されます。これらのタイプの故障は、チャネル・ホット・キャリア効果、エレクトロマイグレーション、TDDB (Time-Dependent Dielectric Breakdown: 絶縁膜経時破壊)、NBTI (Negative Bias Temperature Instability: 負バイアス温度不安定性) などのよく知られた要因によって引き起こされます。ISO 26262、IEC 61508 などの機能安全規格は、一定でない故障率に基づくランダム・ハードウェア指標の計算をサポートしていません。そのため、製品寿命にわたって一定の (しかし悲観的な) 近似を使用して BFR を推定します。

システム・インテグレータは、摩耗故障の開始だけでなく、通常の耐用年数の間のランダム・ハードウェア故障に取り組む必要があります。このため、システムインテグレータは安全機構に頼る必要があります。安全機構は、特定の診断機能を備え、リスク(重大度、影響度、制御可能性によって決定されます)を許容可能な値に下げます。

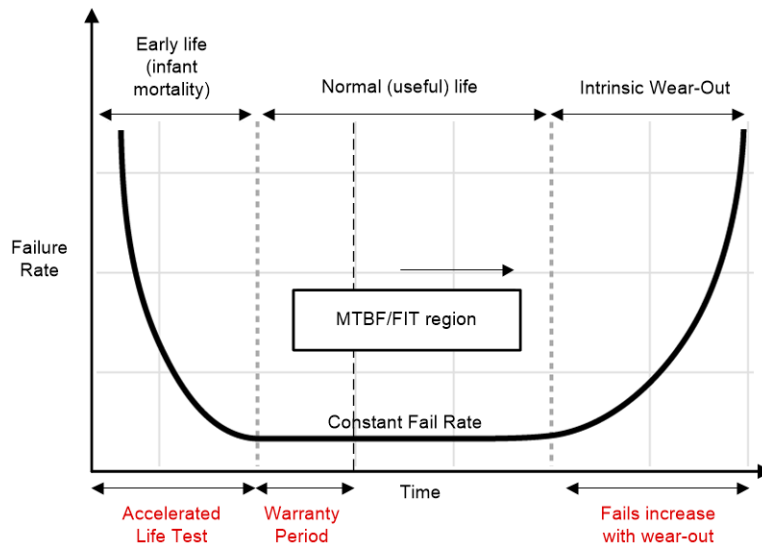


図 3-1. ランダム・ハードウェア故障の代表的な表現としてのバスタブ曲線

4 BFR の推定手法

BFR の推定にはさまざまな手法があります。たとえば、実験に基づいた手法、インシデントおよび顧客返品 / フィールド故障の現場観測から求める方法、業界で認められた信頼性ガイドと何らかの技術的判断に基づく推定があります。

実験に基づく手法の例を以下に示します。これらは内因性(シリコン)の故障のみを考慮しており、シリコンとパッケージの相互作用の寄与を無視しています。

- 温度バイアス動作寿命試験
- 高温動作寿命試験
- 長期寿命信頼性試験

一方、現場での観測には、正確で広範な記録管理が必要ですが、新製品を市場に投入する時点では、それは不可能です。また、多くの半導体メーカーは顧客返品のみを入手しているわけではないため、BFR を推定するための正確かつ広範な記録の要件を満たすのは不可能です。

業界で認められた以下の信頼性ガイドを使うと、機能安全分析のための推定が可能です。

- IEC 技術報告書 (TR) 62380 および IEC 61709⁵
- SN 29500 (電子および電気機械部品の信頼性予測のための Siemens 社規格)
- 軍のハンドブックまたはその他の信頼できる情報源の文書などの FIDES

本ホワイト・ペーパーの残りの部分では、IEC TR 62380 と SN 29500 を使って BFR を見積る方法を中心に説明します。

5 Siemens SN 29500 FIT モデル

SN 29500 では、以下のような各種コンポーネントの標準的な FIT 率と温度を求めるためにルックアップ・テーブルを使用しています。

- 集積回路 (IC)
- ディスクリート半導体
- 受動部品
- スイッチ、リレー、ランプ、コネクタなど

IC の FIT 率を推定するには、基準の FIT 率の値と基準のダイ温度の値を表から調べます。これらの表は 3 つのタイプに分かれています。第 1 の表は集積回路、第 2 の表はディスクリート半導体、第 3 の表は受動部品のためのものです。これらの 3 つの表はさらに IC / 部品タイプのサブカテゴリに分かれており、その上 IC またはディスクリート半導体部品に含まれるトランジスタ数の範囲によっても分かれています。

図 5-1 (バイポーラ・オペアンプ向けの TI 機能安全 FIT 文書から抜粋) で、 λ_{ref} FIT 率は 12 FIT、基準のダイ温度は 55°C です。この情報は SN 29500 規格から引用されています。

FIT Siemens Norm SN29500 (2)			
Table	Category	Ref FIT λ_{ref}	Ref Virtual Tj $\theta_{vj,1}$
4	Bipolar Op Amp	12 FIT	55 C

図 5-1. TI の標準的な機能安全 FIT 文書 (SN 29500 規格から引用)

SN 29500 規格には、基準条件の FIT 率を実際に想定されるシステム動作条件の FIT 率に変換するための計算方法が含まれています。想定温度プロファイルと基準値を数式に単純に代入し、目的のアプリケーションでその部品を使用した場合の FIT 率を計算します。

以下に、すべてのタイプの部品のための一般式を示します。

$$\text{アプリケーションの FIT 率} = \text{基準 FIT 率} \times \text{温度} \times \text{温度係数} \times \text{電圧係数} \times \text{電流係数} \times \% \text{ 時間ストレス係数}$$

システム・インテグレータは、自分のアプリケーションの特有の TI 製部品の FIT 率を求めるために SN 29500 規格の情報を参照する必要があります。

6 IEC TR 62380

IEC 62380 規格は、機能安全分析で BFR を推定する際にも広く使われています。この規格は、電子部品、プリント基板 (PCB)、機器の信頼性を予測するための普遍的モデルの概要を記載した信頼性データ・ハンドブックです。本書は 2004 年に発行され、その後廃止されました。しかし、ISO 26262 規格 (現在は第 2 版、2018 年改訂) は、新しく発行された『Part 11 – Guidelines on Application of ISO 26262 to Semiconductors』の一部として IEC 62380 規格を取り込んでいます。

IEC TR 62380 の IC 故障率は、ダイ、パッケージ、電氣的オーバーストレス (EOS) に関連する故障率の合計としてモデル化されています。ここで、

- ダイに関連する故障率の式には、IC のタイプとテクノロジー、トランジスタ数、熱的ミッション・プロファイル、接合部温度、動作および非動作寿命の項が含まれています。
- パッケージに関連する故障率の式には、熱膨張による機械的ストレス、熱サイクル、熱的ミッション・プロファイル、パッケージ・タイプ、パッケージ材料の項が含まれています。
- EOS 故障率の式には、外部インターフェイスおよび電氣的環境を備えた特定のシステムの項が含まれています。

式 1 に、IEC TR 62380 の BFR の式を示します (元の規格から抜粋)。システム・インテグレータは、BFR の計算に必要な情報を得るために IEC 62380 規格を参照する必要があります。

$$\lambda = \underbrace{\left\{ \lambda_1 \times N \times e^{-0.35 \times \alpha} + \lambda_2 \right\} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i \times T_i}{T_{on} + T_{off}} \right]}_{\lambda_{die}} + \underbrace{\left\{ 2.75 \times 10^{-3} \times \pi_\alpha \times \left(\sum_{i=1}^z (\pi_n)_i \times (\Delta T_i)^{0.68} \right) \times \lambda_3 \right\}}_{\lambda_{package}} + \underbrace{\left\{ \frac{\pi_1 \times \lambda_{EOS}}{\lambda_{overstress}} \right\}}_{\text{EOS FIT}} \times 10^{-9} / h$$

Total FIT = Die FIT + Package FIT + EOS FIT

(1)

式 2 に、IEC TR 62380 によるダイの FIT を示します。

$$\lambda_{die} = \left\{ \lambda_1 \times N \times e^{-0.35 \times \alpha} + \lambda_2 \right\} \times \left[\frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i \times T_i}{T_{on} + T_{off}} \right]$$

(2)

- ここで、 N はタイプ別のトランジスタ数、 λ_1 はトランジスタ・タイプの倍率、 λ_2 はテクノロジーに基づく FIT 率、 α は製造年の係数です。

式 3 に、IEC TR 62380 によるパッケージの FIT を示します。

$$\lambda_{package} = \left\{ 2.75 \times 10^{-3} \times \pi_\alpha \times \left(\sum_{i=1}^z (\pi_n)_i \times (\Delta T_i)^{0.68} \right) \times \lambda_3 \right\}$$

(3)

- ここで、 π_α は IC と PCB の熱膨張係数の差、 λ_3 はパッケージのタイプとサイズによるパッケージ倍率です。

式 4 に、IEC TR 62380 による EOS FIT を示します。

$$\lambda_{overstress} = \frac{\pi_1 \times \lambda_{EOS}}{\lambda_{overstress}}$$

(4)

- ここで、デフォルトの前提条件は $EOS = 0$ です。

IC のアプリケーションが表に記載されており、システムが回路基板上の IC と外部環境との間の外部接続を持つ場合、システム・インテグレータは必要に応じて EOS 値を追加できます。

表 6-1 に、IEC TR 62380 に基づく自動車用ミッション・プロファイルの表を示します。この表によると、自動車用モーター制御アプリケーションの総稼働時間は年間約 500 時間であり、1 日あたり 4 回の日中の起動、2 回の夜間の起動、年間 30 日の不使用が想定されています。

表 6-1. IEC TR 62380 による代表的なアプリケーションのミッション・プロファイル

ミッション・プロファイルのフェーズ	温度 1		温度 2		温度 3		オン / オフ比		2 回の夜間の起動		4 回の日中の起動		使われない車両	
	(t _{ac})1 °C	t ₁	(t _{ac})2 °C	t ₂	(t _{ac})3 °C	t ₃	t _{on}	t _{off}	n1 Cycles/year	ΔT ₁ °C/cycle	n2 Cycles/year	ΔT ₂ °C/cycle	n2 Cycles/year	ΔT ₃ °C/cycle
アプリケーションの種類														
モーター制御	32	0.020	60	0.015	85	0.023	0.058	0.942	670	$\frac{\Delta T_j}{3} + 55$	1340	$\frac{\Delta T_j}{3} + 45$	30	10
乗員室	27	0.006	30	0.046	85	0.006	0.058	0.942	670	$\frac{\Delta T_j}{3} + 30$	1340	$\frac{\Delta T_j}{3} + 20$	30	10

7 BFR 計算の推奨前提条件

- 1 つの手法のみを選択し、その手法を一貫して使用します。以下に例を示します。
 - 実験に基づく手法
 - フィールド・データに基づく手法
 - フィールド・データから故障率を求めるのに使うモデル (ワイブルまたは指数分布) を明示します。
 - 信頼性ガイドに基づく手法 (TI 製品は、信頼性ガイドから導き出された BFR を使用しています。)
- 使用プロファイルを仮定します。以下に 2 つの例を示します。
 - 産業用: 定期的な予防保守サイクルまで年中無休で常時稼働
 - 車載用モーター制御: IEC TR 62380 で規定されているように、1 日あたり 2 または 4 回起動、1 日あたり 4 時間使用
- 推定で使用する基礎的な統計の信頼区間 (75%、80%、90%) を選択 (および明示) します。
- BFR の推定に取り込まれたすべての倍率または低減係数を明確に記録します。
- 非動作時間とはんだ接合に基づく故障を考慮に入れます。

すべての半導体サブライヤが同じ BFR 推定の前提条件を使用している限り、または少なくともその前提条件を明示している限り、2 つの異なるメーカーの同等な半導体部品の BFR を比較できる可能性があります。

8 過渡故障に関する特別な考慮事項

ランダム・ハードウェア故障を引き起こす可能性がある放射線イベント (内部または外部) によるソフト・エラーは、BFR 推定で考慮する必要があります。しかし、電磁干渉またはクロストークに起因するソフト・エラーは決定論的原因故障として分類されるため、BFR 計算に含めることはできません。これは、良好な設計慣行を順守することで管理できます。以下のような属性を使用して、過渡的な故障を調節できます。

- 使用テクノロジー
- 故障の影響、該当する場合
- パッケージのモールド・コンパウンドのタイプ (標準、低アルファ、超低アルファ)

AVF (Architectural Vulnerability Factor: 構造的ぜい弱性係数) は、ソフト・エラーによる設計構造の故障がその機能の最終出力に目に見えるエラーをもたらす確率です。ISO 26262 によれば、ソフト・エラーの BFR を、AVF または EDAC (Error Detection And Correction: エラー検出および訂正) 回路などの安全機構に基づいて低減することはできません。そのため、半導体部品内のランダム・アクセス・メモリとロジック・ブロックに対して個別にソフト・エラーの BFR に計算することが最適です。

9 IEC TR 62380 と SN 29500 の間の BFR の差異 (パッケージ起因)

SN 29500 は (IEC TR 62380 と比較して)、シリコンとパッケージの相互作用に起因する故障を考慮していません。そのため、機能安全規格では以下を推奨しています。

- 半導体部品メーカーは、パッケージ材料とのシリコンの相互作用と、シリコンとパッケージの接続点 (ピン) に起因する故障を推定します。
- システム・インテグレータは、半導体部品と基板の間の接続点 (はんだ接合) に起因する故障を明らかにします。これらの故障は通常、エレメントまたはシステム・レベルで分析されます。

- ISO 26262 は以下のように定義しています。
 - エLEMENT: システム、コンポーネント (ハードウェアまたはソフトウェア)、ハードウェア部品、ソフトウェア・ユニット
 - システム: 少なくともそれぞれ 1 つのセンサ、コントローラ、アクチュエータを相互に関連付ける一連のコンポーネントまたはサブシステム

IEC TR 62380 は、シリコン・ダイとリード・フレーム / 基板の間の相互作用と、はんだ接合間の接続の両方を考慮しています。それに対して、SN 29500 のパッケージ故障率は、ダイとパッケージの間の相互作用のみを考慮しているため、SN 29500 を使用して BFR を推定すると本質的に楽観的な結論が導かれます。

10 BFR に対する電源投入期間の影響

ISO 26262 では、BFR の計算値のスケーリングまたは不当な減少を最小限に抑えるために、以下の属性を適用することを推奨しています。

- 正確なミッション・プロファイル
- ミッション・プロファイルで指定した動作条件での故障モードの妥当性の評価
- ユニットあたりの故障率の算出 (システムが動作する時間、日、月、年あたり)

IEC TR 62380 の BFR の式は T_{ON} と T_{OFF} を考慮している一方、SN 29500 は T_W を考慮しています。

11 TI 製品として期待できるもの

TI には、以下の 3 つの種類の機能安全製品があります。それは、機能安全準拠、機能安全品質管理、機能安全対応です。TI の機能安全製品の詳細は、[こちら](#)をご覧ください。機能的に安全なシステムに適用可能な TI のすべての機能安全製品では、機能安全 FIT 率と故障モード分布 (FMD) を提供しています。

マイクロプロセッサ、マイクロコントローラ、アナログ・シグナルチェーン製品などの最も複雑な TI 製品の場合、IEC TR 62380 に従って推定された BFR に基づく FMD を含む包括的な FMEDA (Failure Modes, Effects and Diagnostics Analysis: 故障モード、影響、および診断分析) をシステム・インテグレータは入手できます。

低ドロップアウト発振器、オペアンプ、電圧スーパーバイザなどのあまり複雑でない TI アナログ製品の場合、機能安全性 FIT、ピン故障モード分析、標準的な TI フォーマットに準拠した FMD (故障モード分析) レポートをシステム・インテグレータは受け取ります。

この情報の概要を示すレポート例へのリンクを以下に示します。

- テキサス・インスツルメンツ、[『Functional Safety FIT Rate, Failure Mode Distribution TPS7A16A-Q1』](#)
- テキサス・インスツルメンツ、[『Functional Safety FIT Rate, Failure Mode Distribution TPS3851-Q1』](#)

12 まとめ

システム・インテグレータは、TI の製品、工学的専門知識、設計リソースを利用することで、より安全で信頼性の高い設計を迅速に行うことができます。また、システム・インテグレータは、IEC TR 62380 と SN 29500 のどちらかに基づく BFR を持つ製品を選択することで、ISO 26262、IEC 61508 などの機能安全規格の厳しい要件を満たすことができます。

13 関連資料

1. [IEC 61508: 第 2 版 2010-04](#): 電気 / 電子 / プログラマブル電子安全関連システムの機能安全。
2. [ISO 26262: 第 2 版 2018-12](#): 自動車 – 機能安全、ISO 26262、国際標準化機構 (2018)
3. [IEC/TR 62380:2004\(E\)](#): 信頼性データ・ハンドブック – 電子部品、PCB、機器の信頼性を予測するための普遍的モデル
4. SN 29500: Siemens Norm SN 29500 / 2010-09 版
5. [IEC 61709: 第 3 版 2017-02](#): 電子部品 – 信頼性 – 故障率の基準条件および換算のためのストレス・モデル

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022, Texas Instruments Incorporated