

Technical White Paper 宇宙用の IC 調達:COTS 部品の追加スクリーニングと宇宙用途向け強化製品 (SEP) の長所と短所



Michael Seidl – Texas Instruments
 Frederik Kuechen and Michael Moesken – TESAT Parts Agency

概要

このホワイトペーパーでは、低地球軌道 (LEO) コンステレーション、中地球軌道 (MEO) および静止地球軌道 (GEO) プラットフォーム、深宇宙、ならびに既存プログラムといった各種ミッションを対象に、COTS 部品の追加スクリーニングと宇宙用認定部品の調達を比較します。また、技術、コスト、スケジュール、およびリスクに関する潜在的なトレードオフを検討し、部品調達戦略の改善に役立つ実践的な意思決定の枠組みを読者に提供します。

目次

1 概要.....	2
2 宇宙 - 電子設計の全体像.....	2
3 単一の管理されたベースラインの重要性.....	5
4 COTS デバイスを追加スクリーニングするための手順.....	7
4.1 ステップ 1 – 候補を特定する.....	7
4.2 ステップ 2 – シングル イベント効果 (SEE) 試験の準備 (開封).....	7
4.3 ステップ 3 – シングル イベント効果 (SEE) テスト.....	8
4.4 ステップ 4 – TID 試験の実施および放射線寿命の評価.....	9
5 リードタイムと歩留まりの責任.....	11
6 まとめ.....	11
7 参考資料.....	12

1 概要

商用宇宙サービスの拡大に伴い、低地球軌道 (LEO) コンステレーションの打ち上げが加速しています。一方、深宇宙、**MEO** (中地球軌道)、**GEO** (静止地球軌道) の各ミッションでは、長期運用にわたる極めて高い信頼性が依然として求められます。このため設計者は、コストの最小化と信頼性の最大化という相反する二つの目標への対応を迫られています。これらは、コストを重視する **LEO** コンステレーション向けの「ニュー スペース」アプローチと、リスク低減を重視する深宇宙、**MEO**、**GEO** 衛星向けの「従来型宇宙」アプローチによって、それぞれ追求されています。

市販標準品 (**COTS**) に追加スクリーニングを実施することで、大量生産される **LEO** コンステレーションの部品表 (**BOM**) コストを削減できる可能性があります。ただし、この手法には固有のリスクが伴うため、そのリスクを定量化し、適切に低減する必要があります。これに対し、宇宙用認定部品は、過酷な宇宙環境下でも予測可能な性能を発揮し、多くの場合、実証済みのフライト実績も備えています。これらの部品は高価ではあるものの、リスクを一切許容できない長期ミッションにおいて、通常、唯一の現実的な選択肢となります。これには、高額な打ち上げコストを長期運用によって償却する必要があり、かつヴァン アレン帯に恒常的に近接することで増大する放射線にも耐えなければならない **MEO** および **GEO** 衛星のほか、深宇宙ミッションや従来型プログラムが含まれます。

メガ コンステレーション (例: ブロードバンド通信、地球観測、**IoT**) の急速な普及により、宇宙用ハードウェアを取り巻く経済性は大きく変化しています。かつて放射線耐性 (**rad-hard**) 部品の採用を正当化していた単機当たりの部品表 (**BOM**) についても、量産効果による低コスト化が期待できる **COTS** 部品との比較を通じて、現在では見直しが進められています。「一度打ち上げたら長期間使い続ける」という考え方は、依然として高価値の **GEO** 衛星に当てはまります。一方、**LEO** コンステレーションでは、迅速な設計サイクル、徹底した低価格化、ならびにハードウェア世代を継続的に改良、更新できる能力が求められます。このホワイトペーパーでは、こうしたコスト効率とミッション保証の間に生じる緊張関係を取り上げます。

このホワイトペーパーでは、ミッション種別の分類 (ニュー スペースの **LEO** コンステレーション、従来型の **MEO** および **GEO** プラットフォーム、深宇宙探査機、ならびにハイブリッド型の従来プログラム) の観点から、**COTS** 部品に追加スクリーニングを実施する方法と、宇宙用認定部品を直接調達する方法の二つを比較します。このホワイトペーパーでは、**IC** を宇宙用途に適させる技術的特性を検討し、スクリーニング計画を実施する際の実務上の考慮事項を整理するとともに、コスト、スケジュール、総保有コストにおける潜在的なトレードオフを定量的に評価します。

主なトピックは以下のとおりです。

- ・ ミッション種別ごとの指針 – ニュー スペースの **LEO** コンステレーション、従来型の **MEO** および **GEO** 衛星、深宇宙探査機、ならびに新旧技術を組み合わせたプログラムにおいて、コスト、信頼性、運用寿命の要件がどのように異なるかを示します。
- ・ 重要なスクリーニング パラメーター – 耐放射線性、温度サイクル耐性、アウトガス、機械的衝撃、その他のハザード固有試験、ならびに各試験が所定のミッション環境について定義されたハザード分析とどのように対応するかを示します。
- ・ スクリーニング計画の経済性 – 一般的に必要な試験設備、ロット サイズに関する考慮事項、エンジニアリング工数、ならびにスクリーニング済み部品一個当たりのコストと宇宙用認定部品の単価との比較を示します。
- ・ リスク低減策 – 冗長化アーキテクチャ、ディレーティング、予備部品の確保、軌道上での健全性監視など、**COTS** 部品を使用した設計で信頼性目標を達成するための手法を示します。
- ・ 宇宙用認定部品の利点 – 過酷な宇宙環境に対する包括的な特性評価、対応するデータシートの提供、実証済みのフライト実績、ならびに故障による損失が許容できないミッションにおけるプログラム全体のリスク低減が挙げられます。
- ・ ライフサイクルおよび総保有コストへの影響 – 初期段階での部品選定が、コンステレーションの経済性、歩留まりおよび供給責任、アップグレード経路、ならびに陳腐化管理にどのような影響を及ぼすかを示します。

本書の読者は、各ミッションクラスに固有のコスト、リスク、スケジュール上の制約に部品調達方針を適合させるための、実践的な意思決定フレームワークを得ることができます。これにより、競争が激化する現在の宇宙市場において、経済性とミッション成功の両立を図るための、十分な情報に基づく判断が可能になります。

2 宇宙 - 電子設計の全体像

宇宙用電子機器の設計環境は、低コストの **LEO** コンステレーションから、長期運用を前提とする **MEO**、**GEO**、さらには深宇宙探査機に至るまで、あらゆるミッションにおいて部品を選定する際に考慮すべき、いくつかの重要な環境要因および材料要因によって左右されます。

耐放射線性は、製造プロセスに大きく依存します。同じ半導体プロセス ノードで製造されたデバイスであっても、回路トポロジや使用される特定のモジュールの違いが放射線への感受性に影響するため、その放射線応答は大きく異なる場合が

あります。さらに、耐放射線性に関する一般論の多くは、誤解を招くおそれがあります。**65nm** プロセスは、一般にシングルイベントラッチアップ (SEL) の影響を受けないと考えられていますが、その耐性が当てはまるのは、約 **1.1V** 以下で動作する低電圧回路に限られます。製品により高電圧で動作する回路ブロックが組み込まれている場合、それらの部分は SEL の影響を受けやすくなります。さらに、エピタキシャル (epi) 基板またはシリコン オン インシュレータ (SOI) 基板を採用しているからといって、**CMOS** デバイスの SEL 耐性が自動的に保証されるわけではありません。大半の **CMOS** 製品では、エピタキシャル基板が SEL 感受性に与える影響はほとんどありません。また、**SOI** が SEL に対する保護効果を発揮するのは、フィールド酸化膜 (シャロートレンチ分離) が活性層を完全に貫通し、埋め込み酸化膜に達している場合に限られます¹。さらに、耐放射線性は、ウェハ製造工場における標準的な工程管理項目ではありません。ロット間でパッシベーション膜の厚さや化学量論組成がわずかに変化するだけでも、総電離線量 (TID) 耐性が大幅に変動することがあります。同じ製造工場で生産された製品でも、あるロットは **100krad (Si)** に耐える一方、別のロットはわずか **10krad (Si)** で故障する場合があります。したがって、宇宙用途に使用されるあらゆる部品について、放射線ロット受入試験 (RLAT) を実施することが不可欠です。したがって、信頼性の高い適格性評価を行うには、シングル イベント効果 (SEE) を評価するための重イオン試験、変位損傷 (DD) 試験、および累積線量に対する性能を評価するための総電離線量 (TID) 試験を含む、包括的な試験体系が必要です。

極端な温度がもう一つの大きな課題です。宇宙船は大きな温度変動にさらされるため、堅牢な動作を確保するには、おおむね **-55°C ~ +125°C** までを設計温度範囲とする必要があります。この温度範囲は、一般的な民生用規格 (**0°C ~ +70°C**) や車載用グレード 3 規格 (**-40°C ~ +85°C**) と比べて、はるかに広いものです。多くの **COTS** 部品や車載用部品は、限定された民生用温度範囲内でのみ性能が保証されているため、宇宙環境での信頼性の高い動作を確保するには、想定される全温度範囲にわたって部品を評価する必要があります。

スズ ウィスカのリスクは、コスト重視の多くの **COTS** 部品や車載用デバイスで一般的に採用されている、純スズ (Sn) 端子に起因します (図 2-1)。宇宙環境における熱的および機械的ストレスによってスズ ウィスカが成長し、隣接する端子間で短絡を引き起こすことがあります。また、ウィスカが折れて他の回路に接触すると、断続的な短絡が生じる可能性もあります。コンフォーマル コーティングによってリスクをある程度低減することはできますが、完全に排除することはできません。したがって、信頼性が求められる宇宙用設計では純スズ仕上げを避け、代わりにスズ・鉛 (Sn-Pb) 合金、ニッケル・パラジウム・金 (Ni-Pd-Au) めっき、またはウィスカの発生を抑制する同等の端子表面処理を採用します。

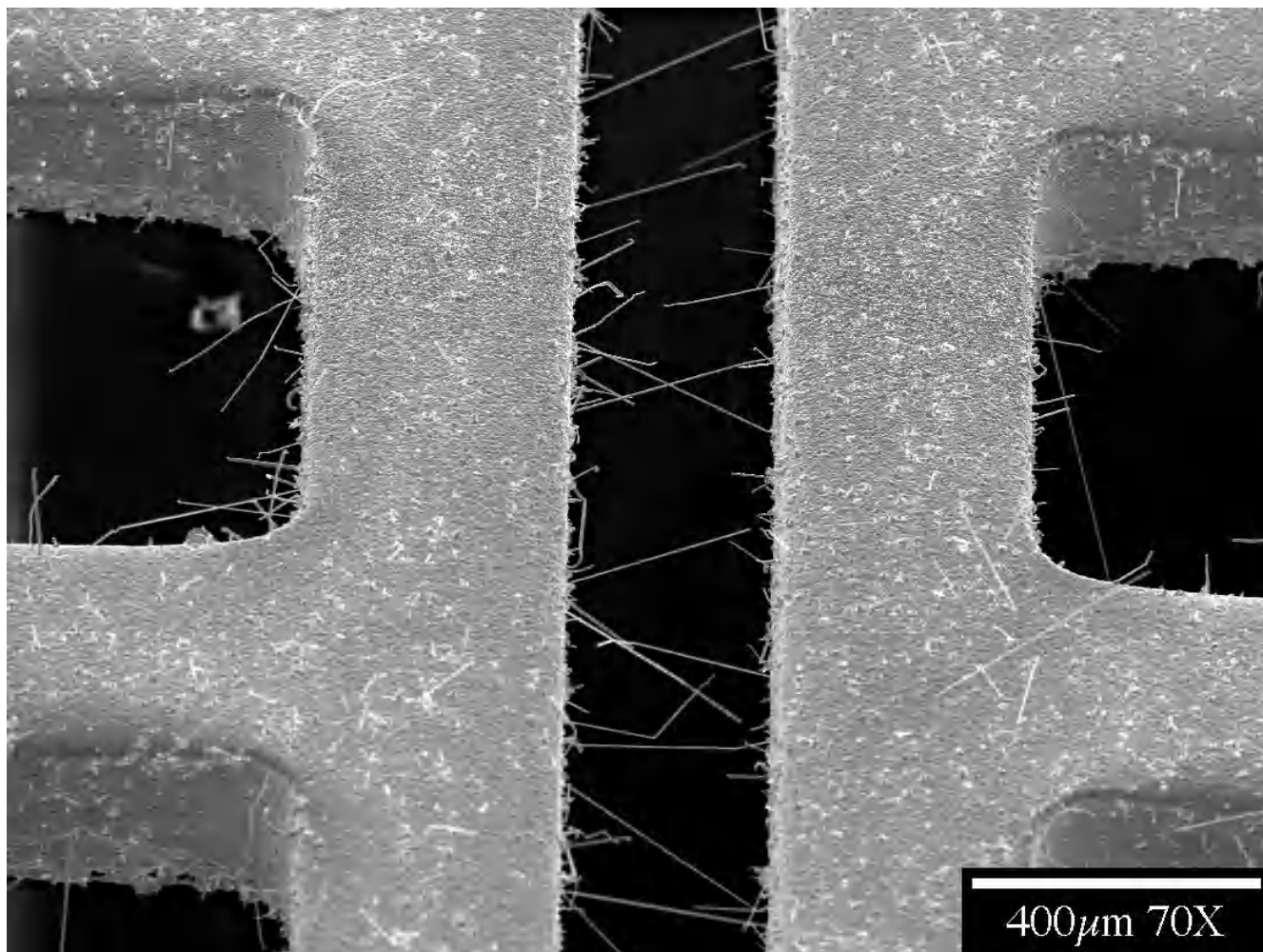


図 2-1. スズウィスカの開発

ボンドワイヤの材料選定も、信頼性に影響を及ぼします。金 (Au) ボンドワイヤは、温度係数が小さく耐食性にも優れているため、繰り返しの温度サイクル下で良好な性能を発揮し、一般に推奨されます。銅 (Cu) ボンドワイヤは、コスト削減のために採用が増えていますが、より厳格な工程管理が必要です。銅 (Cu) ワイヤは温度係数が高いため、LEO で一般的に生じる急速な温度サイクル下では、ネック部の断線故障が発生しやすくなります。過酷な宇宙環境では、ボンディング接合部の健全性に関わる故障を最小限に抑えるため、金ボンドワイヤが引き続き推奨されます。

プラスチックからの気体排出と吸湿性も、さらなる懸念事項となります。プラスチック封止部品のパッケージ材料には、一般に有機系モールド樹脂が使用されています。これらの材料は水分を吸収するだけでなく、真空環境や極端な温度条件にさらされると、揮発性有機物を放出する可能性があります。吸収された水分はパッケージの絶縁耐力を低下させ、早期故障を引き起こす可能性があります。一方、放出された汚染物質は、周辺の部品、特に光学系、イメージセンサ、高インピーダンス回路に凝縮、付着し、性能と信頼性を低下させるおそれがあります。

総質量損失 (TML) が 1% 未満、凝縮性揮発物質量 (CVCM) が 0.1% 未満の低アウトガス材料を使用したパッケージを選定し、長時間のバークアウトおよび適格性評価試験を実施することで、これらのリスクを低減できます (1)。

これらの考慮事項をまとめると、包括的な危険分析の概要となります。放射線ハザード (TID、SEE、DD) に対しては、対象となる製造プロセスについて放射線特性が評価され、RLAT によって妥当性が確認された部品を使用する必要があります。また、必要に応じて、放射線遮蔽やディレーティングを追加で適用します。極端な温度環境に対応するには、 -55°C ~ $+125^{\circ}\text{C}$ の温度範囲に対応した部品を使用し、全温度範囲にわたって動作を検証する必要があります。スズウィスカの懸念に対しては、純スズ (Sn) 端子を避け、合金仕上げまたはめっき仕上げを採用します。ボンドワイヤの信頼性を確保するには、金 (Au) ワイヤを選定します。銅 (Cu) ワイヤを使用する場合は、厳格な工程管理を徹底するとともに、寿命

試験を実施する必要があります。最後に、アウトガスおよび吸湿に関する問題は、TML と CVCM の低いモールド樹脂を選定し、適切なベークアウトおよび適格性評価手順を実施することで低減できます。

これらの一般的な考慮事項は、宇宙用電子機器設計の基盤を成すものであり、スクリーニング済みの COTS 部品から完全な宇宙用認定部品まで、商用 LEO コンステレーション、長期運用を前提とする MEO および GEO ミッション、さらには深宇宙探査に至る幅広いミッションにおける部品選定の指針となります。

3 単一の管理されたベースラインの重要性

COTS 部品または車載用部品を宇宙用途向けに調達する場合は、単一ロットから必要数量をまとめて購入することが望ましい戦略です。しかし実際には、メーカーは複数のウェハ製造工場や組立拠点にまたがって生産を行うことが少なくありません。各ウェハ製造工場では、使用する装置、プロセス条件、材料レシピがわずかに異なる可能性があり、各組立工場でも、異なるモールド樹脂やボンドワイヤ材料が使用される場合があります。こうしたばらつきは、部品がデータシートの規定範囲内で動作する限り、通常は性能に影響しません。しかし、部品をその規定範囲を超えて使用する場合、特に宇宙の過酷な放射線環境下では、重大な影響を及ぼす可能性があります。

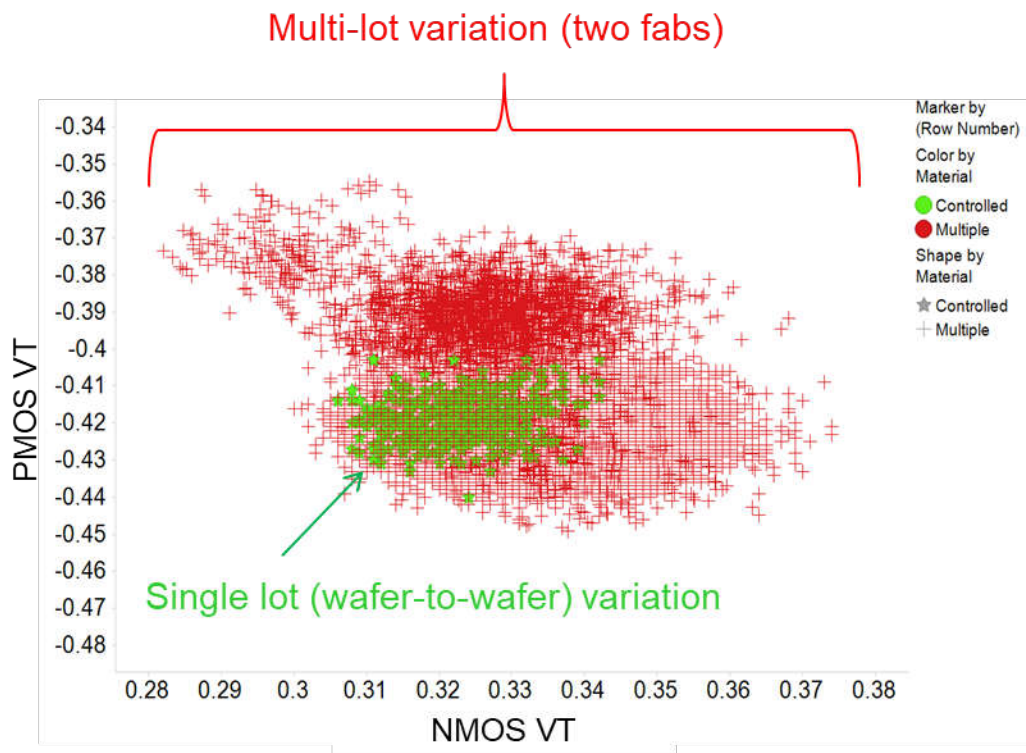


図 3-1. 複数ロット間におけるトランジスタのスレッシュホールド電圧のばらつきは、放射線 (TID) による予想ドリフトと相まって、個々のユニットの宇宙環境における寿命を大幅に損なう可能性があります

宇宙プログラムで複数ロットが混在している可能性のある部品を購入した場合、ロット認定または試験の対象となったロットと、実際の打ち上げに使用されるロットが異なる可能性があり、潜在的な信頼性リスクが生じます。さらに深刻なのは、飛行実績によって有効性が実証された設計を、需要の拡大に対応するために増産しなければならない場合です。新たな生産ロットでは、歩留まりの向上やコスト削減を目的として、製造プロセスの最適化、材料の変更、設計上の微調整が加えられる場合があります。これらの変更により、元のロットが備えていた耐放射線性や信頼性そのものが低下し、新しいロットが当初の認定基準を満たさなくなる可能性があります。サプライヤーは製造プロセスを継続的に改良するため、このリスクは時間の経過とともに増大し、当初のフライト実績を有する構成が入手できなくなる可能性があります。その結果、長年にわたるフライト実績を蓄積した部品、基板、またはモジュールであっても、当初とまったく同じバージョンを調達できなくなった場合には、再設計および再認定、または差分認定が必要となる可能性があります。これにより、それまで蓄積されたフライト実績の価値が失われます。

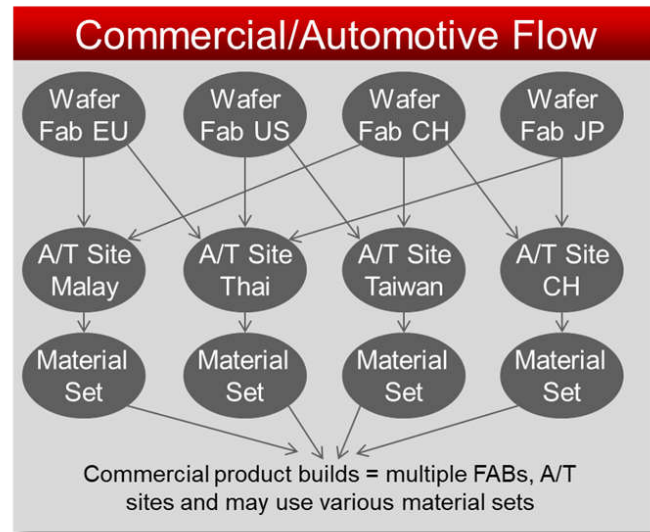
特に車載用部品は非常に大量に生産されており、コスト削減や歩留まり向上を目的とした変更が頻繁に行われます。また、供給の強靭性を維持するため、複数の製造経路が用いられることも少なくありません。これらの部品は絶えず変更さ

れるため、製造プロセスの安定性とトレーサビリティが不可欠な宇宙用途への追加スクリーニング対象としては、むしろ適性が低い場合があります。上記のリスクには、二つの方法のいずれかで対処できます。一つは、追加コストが発生する可能性を受け入れたうえで、単一ウェハまたは単一ロットによる製造が保証された生産分に投資する方法です。もう一つは、生産品が均質であることを前提として部品をリール単位で一括調達し、内在するリスクを受け入れる方法です。

Single Baseline Controlled Flow

Continuous optimization:

Yield, material usage, energy, cost ...



Holding the recipe:

Single baseline

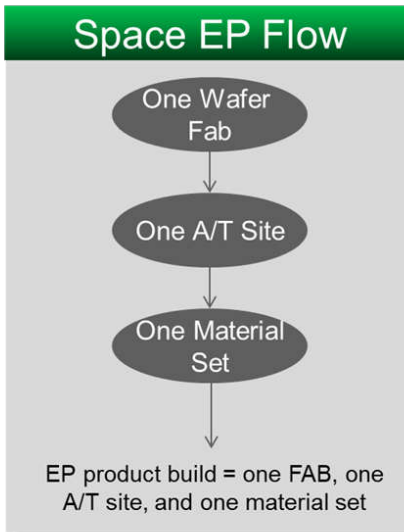


図 3-2. 宇宙用 EP (SEP) 製品を含む TI の宇宙用グレード製品は、単一の管理されたベースラインに基づく製造フローに従います

したがって、ウェハ製造工場、組立拠点、および材料構成 (モールド樹脂やボンドワイヤの種類を含む) を固定し、新たに生産されるすべてのロットに対して放射線ロット受入試験 (RLAT) を実施することで、単一の管理されたベースラインを確立することが不可欠です。これにより、宇宙システムで使用されるすべての部品を認定対象品と同等に保ち、プログラムのライフサイクル全体を通じて信頼性とフライト実績を維持できます。

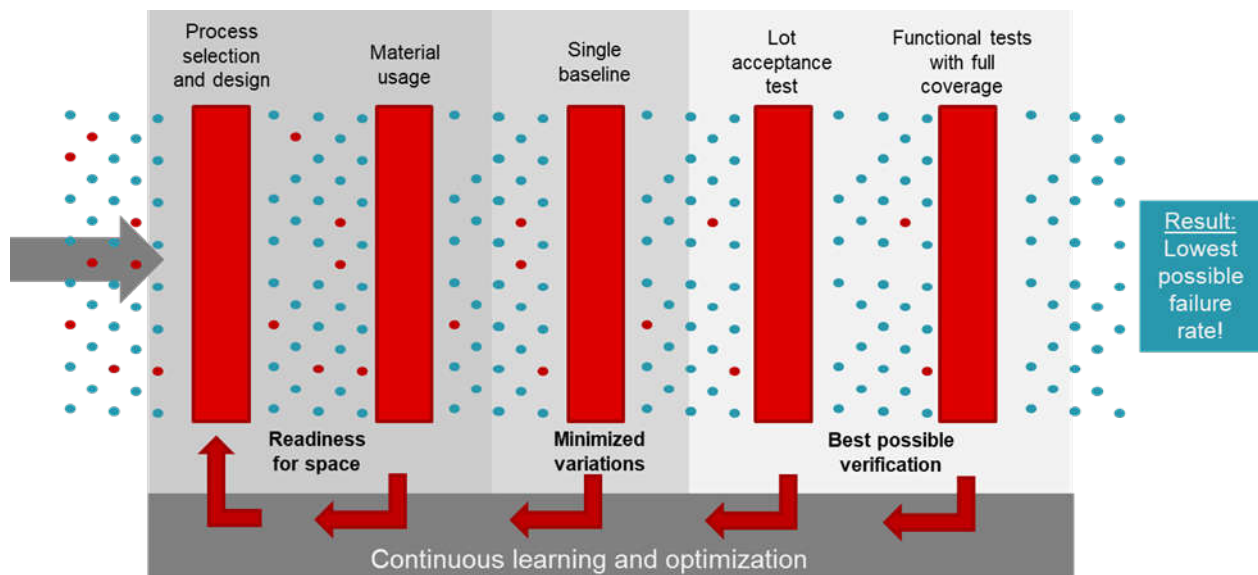


図 3-3. 品質保証 (QA) は、基礎から積み上げる体系的なプロセスです

4 COTS デバイスを追加スクリーニングするための手順

これまでの議論では宇宙用グレード部品が強く推奨されていますが、市販標準品 (COTS) デバイスの追加スクリーニングという可能性を無視するのは現実的ではありません。市販部品を宇宙飛行用途向けに評価する主な動機は、次の二つです。

1. 単位あたりのコスト
2. 所定の SWaP-C 制約内での性能

宇宙分野への民間資本の投入が拡大する中、投資収益率 (ROI) は重要な要因となります。最も安全な選択肢を採用すると、革新的な新規宇宙衛星プログラムの事業性を満たすには、部品のコスト、重量、サイズ、消費電力が過大となったり、性能が不十分となったりする可能性があります。

このような場合、COTS 部品の追加スクリーニングが実行可能な代替策となり得ます。以下のセクションでは、オープン、ロジックゲート、バッファ デバイスなど、比較的単純で複雑度の低い市販部品を対象として TESAT が実施する、一般的な追加スクリーニング キャンペーンの概要を示します。このセクションでは、こうしたキャンペーンに伴う一般的なコスト、スケジュール、および残存リスクを設計者が理解するための目安を示します。これは、TESAT が 200 品種を超える市販部品および AEC-Q 部品を宇宙用途向けに評価して得た知見に基づいています。

4.1 ステップ 1 – 候補を特定する

TESAT では、特定の機能に対して比較的多くの候補デバイスを選定することを推奨しており、通常は五つの候補を選びます。ミッションプロファイル (放射線環境、ミッション期間、軌道、および許容可能な残存リスク) に基づき、TESAT は、テクノロジー ノードや全体的な成功確率に影響するその他の要因を評価してきた経験を活用します。平均すると、候補の約 10% がこの初期段階で除外され、4 ~ 5 品種を対象とする試験キャンペーンへと進みます。

4.2 ステップ 2 – シングル イベント効果 (SEE) 試験の準備 (開封)

SEE 試験の目的は、宇宙空間の重イオンや陽子、地上の中性子、あるいはパッケージ材料から放出されるアルファ粒子など、単一の粒子がデバイスに衝突した際に、デバイスがどのような反応を示すかを明らかにすることです。

SEE 試験は通常、高エネルギーの重イオンまたは陽子を生成できる加速器施設で実施されます。被試験デバイス (DUT) には電源を投入し、デバイスにおける通常のバイアス条件および機能動作条件で動作させます。試験中は、電源電流や出力状態などの主要パラメータを継続的に監視します。DUT にイオンビームまたは陽子ビームを照射している間、電流や出力に生じる一時的な変化を記録します。

宇宙用途では、重イオン照射下における性能が重要な懸念事項となります。デバイスが低エネルギー重イオンに対して感受性を示す場合、高エネルギー陽子に対しても感受性を示す可能性が高いと考えられます。そのため、宇宙用途の認定プログラムでは通常、重イオンビームまたは陽子ビームが使用されます。研究目的では、パルスレーザーなど、局所的に電荷を注入するその他の線源も使用できます。

重イオン試験では、DUT をイオンビーム内に直接配置し、DUT の動作をリアルタイムで観察します。ビームは、粒子加速器 (例えば、サイクロトロンやヴァン デ グラフ加速器) によって生成されます。軌道上では、重イオンがパッケージ化された IC や周囲の遮蔽材を貫通するのに十分なエネルギーを有する場合があります。しかし、ほとんどの試験施設で生成できるイオンのエネルギーは、シリコンを 40μm ~ 400μm 程度貫通できる水準に限られており、完全に封止されたパッケージを貫通するには不十分です。したがって、デバイスの機能を維持したままダイを露出させるために、パッケージを開封する必要があります。

ダイを露出させる一般的な方法には、以下があります。

- ジェット エッチングまたは選択的化学エッチング。
- ダイがほぼ視認できる厚さまで、パッケージを事前に薄化する方法。
- 三次元構造に対して、エッチングと薄化を組み合わせるハイブリッド手法。
- ダイ表面が下向きとなるフリップ チップでは、イオンビームがデバイス前面の活性領域に到達できるよう、ダイの裏面を露出させ、十分に薄化する必要があります。

表 4-1. SEE 試験の準備におけるダイ露出の一般的な方法

方法	説明	一般的な適用対象
ジェット エッチング 選択的な化学エッチング	パッケージ材料を局所的に除去してダイを露出させる方法	小型ダイかつ少ピン数の部品に広く使用

表 4-1. SEE 試験の準備におけるダイ露出の一般的な方法 (続き)

方法	説明	一般的な適用対象
事前薄化	試験前にパッケージを数 μm の厚さまで薄化	薄膜デバイスまたは MEMS デバイスに適用
ハイブリッド アプローチ	三次元構造に対するエッチングと薄化の組み合わせ	積層型またはヘテロジニアス IC に必要
フリップ チップの準備	基板を除去し、ダイを試験基板に直接接合	高性能デバイスまたは多ピン デバイスに使用

各手法には固有の専門技術が必要です。場合によっては特定の手法を適用できず、また、三次元積層などのデバイスアーキテクチャによっては、機能を維持したままダイを露出させることが不可能な場合もあります。TESAT によると、これまでに評価した候補の約 10% は、この理由により除外せざるを得なかったとのこと。図 4-1 に、開封したデバイスの例を示します。

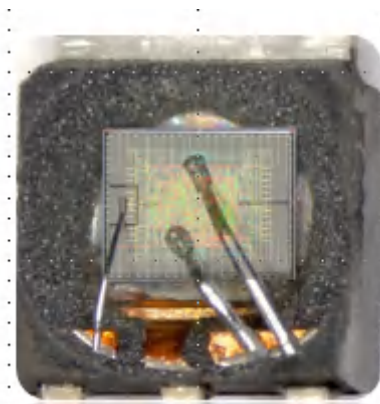


図 4-1. ダイの露出は決して容易なタスクではありません

4.3 ステップ 3 – シングル イベント効果 (SEE) テスト

実際の 60MeV での SEE 試験では、典型的な候補の脱落パターンは次のとおりです。

- 残りの候補の約 25% が完全に不合格となります。
- 約 50% は合格しますが、電圧や温度範囲の制限、パラメータ変動などの制約が伴います。
- 約 25% は制約なしで合格し、当初想定した五つの候補のうち、通常三つのデバイスがさらなる評価対象として残ります。

注

パワー FET を含むパワー デバイス全般では、成功率が大幅に低くなります。

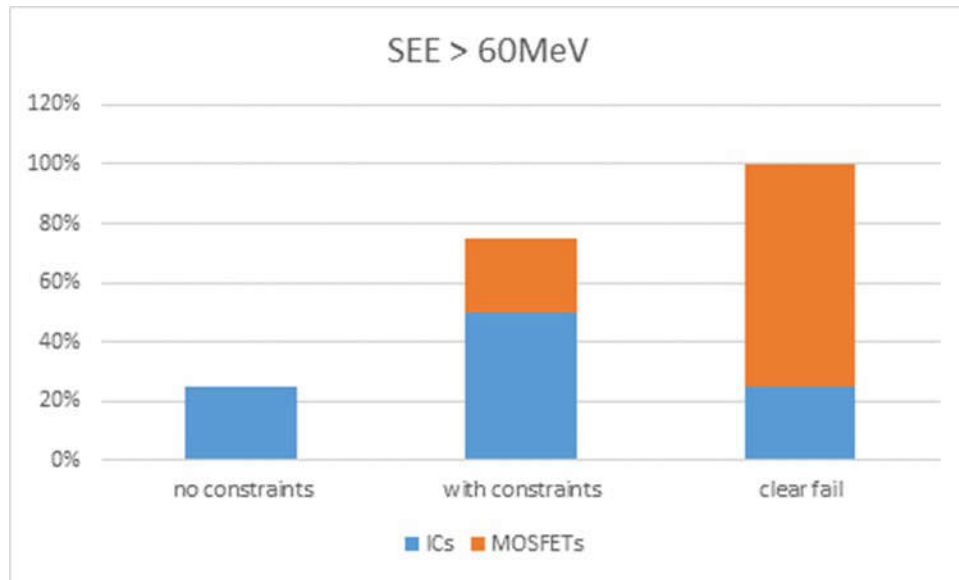


図 4-2. パワー FET (MOSFET) を含むパワー デバイス全般では、成功率が大幅に低くなります

さらに、マイコンや ADC など、設定オプションが多数ある複雑な IC には、高度な試験ソフトウェアが必要です。実際には、包括的な試験プログラムの開発に投入する労力と、不完全な試験カバレッジによって生じる所要時間および残存リスクとの間で、トレードオフを図る必要があります。通常、試験プログラムは特定のユースケースに大きく依存するため、その結果を将来の設計や別のユースケースにも適用する際には、この点を考慮する必要があります。

4.4 ステップ 4 – TID 試験の実施および放射線寿命の評価

次のステップでは、デバイスが軌道上で蓄積すると予想される総電離線量 (TID) の影響を評価します。TESAT の顧客は通常、最低 15krad ~ 30krad の耐性を要求しており、さらに、デバイスの重要パラメータが完全に規格外となる線量についても把握することを求めています。

一般的な目安として、さらに約 25% の候補がこの試験に合格しません。

全体として、表 4-2 に要約されているように、TESAT では、電源系以外で比較的複雑度の低いデバイスの適合成功率を約 40% と見積もっていますが、多くの場合、大幅なディレーティングが必要となります。

表 4-2. TESAT が確認した電源系以外、低複雑度 IC の一般的な適合成功率

実績に基づく一般的な成功率 – IC 候補 5 品種		
ステップ	一般的な成功率	残りの候補
技術評価	90%	4
開封	90%	4
SEE	75%	3
TID	75%	2
その他 (T&C、商用など)	95%	2
合計	43%	5 点中 2 点

これらの試験キャンペーンを成功裏に実施するには、資本と時間の双方を十分にアロケーションする必要があります。意思決定者は、約 20 週間のプロジェクト期間を見込む必要があります。総投資額は、専用試験装置、カスタム アダプタ、および必要な治工具の入手性によって変動します。これらのコストを抑制し、試験処理能力を向上させるため、TESAT で導入されているような自動試験ステーションを活用することが強く推奨されます。これらのシステムでは複数部品の並列試験が可能となり、大規模な追加スクリーニング工程において、拡張性と効率の面で大きな利点が得られます。単価の高い宇宙用グレード部品を購入する場合と比較した追加スクリーニングの損益分岐点は、約 1,000 個です。宇宙市場では、これは比較的大きな数量に相当するため、TESAT と TI はいずれも、スクリーニング キャンペーンを開始する前にベンダーと価格交渉を行うことを推奨しています。これは、多数の同一仕様の衛星で構成されるコンステレーションなどの宇宙インフラ計画において特に当てはまります。宇宙産業では量産方式の導入が進められており、上記の部品数量に達し得る規模となるためです。

部品の追加スクリーニングや EEE (電気・電子・電気機械) 部品向けサービスの詳細に関心のある宇宙機器メーカーは、[TESAT Parts Agency](#) のウェブ サイトをご覧ください。

TESAT のシニア エンジニアおよび EEE 専門家が実施する [TESAT CAMPUS](#) のオンサイト研修では、さらに詳しい知見が得られます。

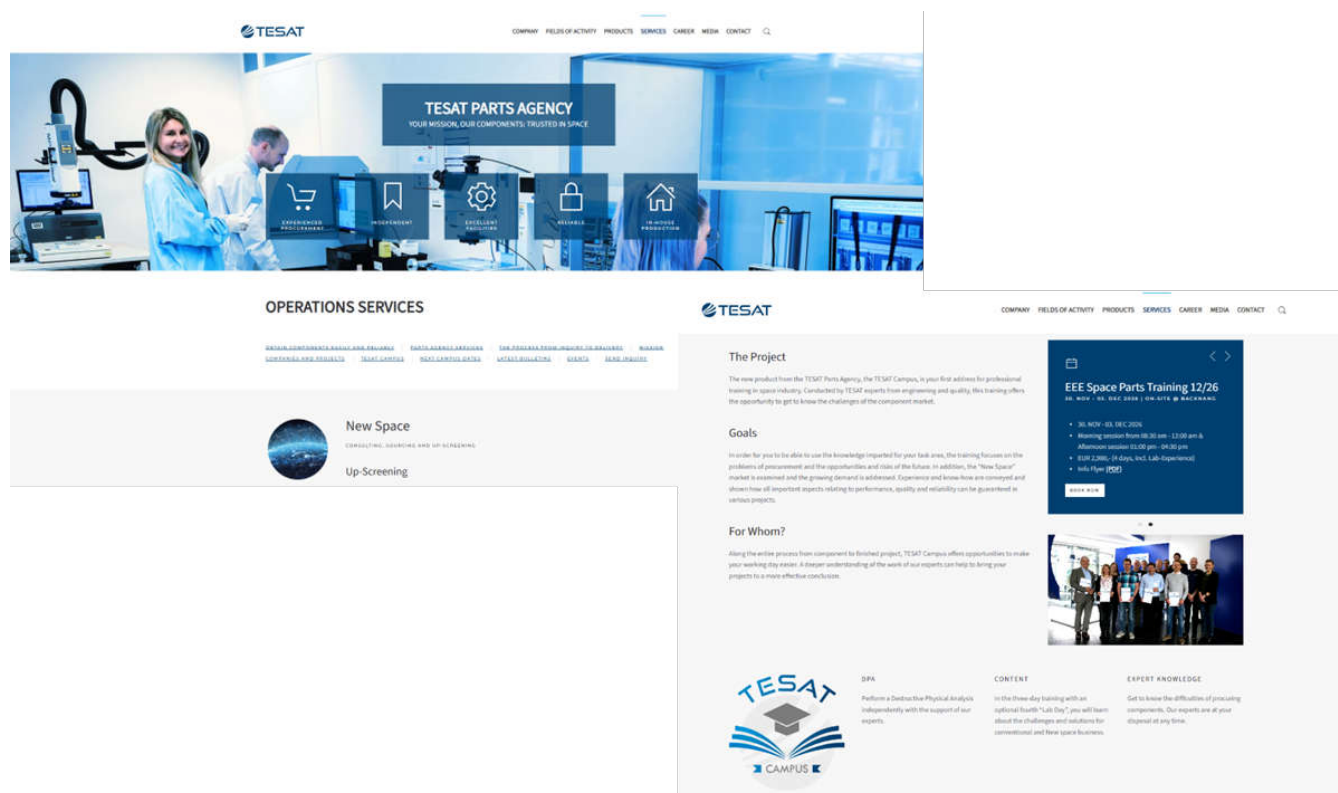


図 4-3. 部品の追加スクリーニングおよび EEE (電気・電子・電気機械) 部品向けサービスに関する詳細情報と知見は、TESAT のウェブサイトでご覧いただけます

5 リードタイムと歩留まりの責任

もう一つの重要な要因は、希望する宇宙用グレード デバイスのリード タイムです。高信頼性 (HiRel) 部品は、調達に長期間を要する場合があります。この課題を軽減するため、TI は宇宙用グレード部品のバッファ在庫を確保し、TI のオンライン ストアで在庫数量をリアルタイムに表示しています。これによりお客様は在庫状況を確認し、プログラムの早い段階で部品を確保できます。在庫が表示されない場合、TI は今後の在庫補充予定について問い合わせるよう顧客に案内しています。また、TI と直接連携している TESAT などの部品代理店に相談することもできます。

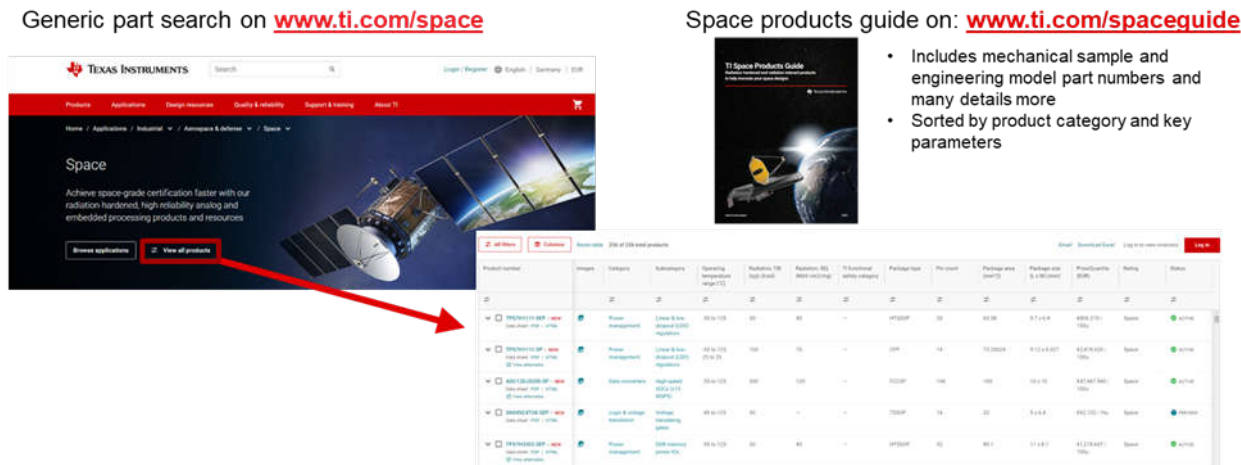


図 5-1. TI.com での宇宙用認定部品の検索: 関連文書、レポート、参考価格、在庫数量を含みます

追加スクリーニングキャンペーンでは、設計エンジニアが歩留まりについても責任を負う必要があります。実際には、これは次の二つの変数を予測することを意味します。

- プログラムに必要なデバイスの総数。
- スクリーニング検査に合格できる機器の割合。

予測の精度は極めて重要です。不足が生じると、スケジュールとコストに直接影響するためです。

COTS 部品の追加スクリーニングには、常に多面的なリスクと機会が伴います。各段階で貴重なリソースを投入することになるため、設計から製造に至るまで、リスクを慎重に管理し、機会を十分に評価する必要があります。これらの課題を軽減するため、TI は、米国国防兵站局 (DLA) の QML-V-RHA 規格に適合した完全認定済みの耐放射線デバイスだけでなく、宇宙用途強化製品 (SEP) ファミリーも提供しています。SEP の接尾辞で識別される SEP 部品は、コストと残存リスクのバランスに優れており、設計者は、スクリーニング キャンペーンに伴う長いリードタイムや不確実性を回避しながら、一般的な低地球軌道 (LEO) 衛星ミッションの要件を満たすことができます。業界では一般的に、この品質レベルを放射線耐性として分類しています。したがって、すべての技術要件および環境要件を満たす耐放射線部品が入手可能であり、かつ商業的に採用可能である場合、一般にその部品が優先的な選択肢となります。

6 まとめ

半導体製品を宇宙飛行用として認定することは、極めて複雑な取り組みです。意思決定に際しては、部品代理店および半導体メーカーの専門知識を活用してください。追加スクリーニング済み部品とカタログ掲載の宇宙用グレード部品は、効果的に相互補完できるためです。

技術面または商業面での強い要因により追加スクリーニングが必要となる場合は、それに伴うリスクを十分に認識し、先手を打って対応します：

- ・ パラメータの変動、歩留まり、および追加デバイスやロット全体の適時評価を継続的に監視します。
- ・ 品質保証に関する責任は自社にあることを認識します。
- ・ 最も効率的な追加スクリーニング手法を追求します。
- ・ お客様の特定のプログラム要件および品質要件に適合した調達戦略を策定するため、TESAT Parts Agency などの EEE 専門家と部品サービスについて協議してください。

適切な宇宙用グレード デバイスが存在する場合は、通常、そのデバイスが優先的な選択肢となります。宇宙グレードの部品には、次のような利点があります。

- 実績に裏付けられた、基礎段階からの品質保証。
- 再注文可能で、将来の設計に再利用可能。
- 長期的なプロセス安定性により、フライト実績を継続的に蓄積できます。

コストが懸念事項となる場合、特に 1,000 個以上の大量調達では、テキサス インスツルメンツなどのサプライヤと協議し、価格のオプションを検討してください。

覚えておくべき点: 試験によって部品に品質を後付けすることはできません (Staerk, 2000)。

7 参考資料

1. Deming, W. E. (2018). Out of the crisis (Kindle 版)。The MIT Press。(原著は 1982 年に発表)。
2. Kruckmeyer, Kirby, (2022)。「宇宙用途向け強化プラスチック製品で低地球軌道ミッションのリスクを低減」アプリケーション ノート、テキサス インスツルメンツ。
3. Kuechen, Frederik and Seidl, Michael (2025)。宇宙用の IC 調達: 品質や安全性を犠牲にせずにコストを削減する方法 ON24 ウェビナー。
4. Staerk, Daniela Dr. (2000)。TESAT の EEE 関連事項および関連技術担当チーフ エンジニア。W. Edwards Deming の言葉を引用。Out of the Crisis – 第二版、Kindle 版。The MIT Press。
5. テキサス インスツルメンツ (2019 年)。電子機器向け放射線ハンドブック、電子書籍 (TI のオンライン情報サービス myTI™ のアカウント ID を通じてアクセス)。
6. ニューヨーク州立大学バッファロー校 (2019 年)。図 1: マット錫めっき IC-02 の写真、写真提供: Peter Bush、NASA 基礎情報、FAQ ウェブページ。

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、TI は一切の責任を拒否します。

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](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](https://www.ti.com) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。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。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日：2025 年 10 月