

フォトカプラとその他の半導体アイソレータを 電氣的障害に対する保護を目的に使用する 場合の安全性に対する考察



ホワイトペーパー

概要

フォトカプラやその他の技術を用いたアイソレータは、様々な機器において信号分離や電圧レベルシフトの目的で使用されています。また、これらの素子は安全に関する絶縁を目的として使用されることもあります。それら電氣的な問題について検討する場合、フォトカプラまたはその他のアイソレータの安全に関する特性について理解しておくことが必要です。

電氣的安全の基礎

感電により人体を流れる電流が引き起こす電気ショックは、瞬間的な痛み程度のものから心臓麻痺による死までの生理的な影響を人体に与えます。人体に危険を及ぼす電圧レベルは、健康状態、湿度レベル、人体抵抗値などに依存し一定ではありませんが、一般的に安全とされる電圧レベルは、DC（直流）電圧で42V以下、AC（交流）電圧で60V以下とされています。人体がこれよりも高い電圧に曝される可能性があるアプリケーションは、危険性を考慮し十分な電氣的絶縁が必要です。

安全係数の概念

人体に対する安全性を数値化して考える場合、システム設計者は安全係数を考慮しなければなりません。安全係数の目的は、使用者の状態を考慮し、決定論的ではありませんが、事故が起こる可能性を十分に低くすることです。安全係数は、広範な工業技術分野で使用されています。

例えば、土木工学において、ビル建設のスケーリング支持材に用いられる安全係数は、通常2です。材料の品質が良く知られたものでない場合は、より高い係数が適用されます。

航空宇宙用途では、安全係数は通常1.25が用いられます。これらのアプリケーションでは、重さによるハンディキャップが大きく、より高い品質管理と定期的な点検サービスのコストは相当なものです。そのため、この場合はより低い安全係数の使用が認められます。安全のための電氣的絶縁用途（強化絶縁用途）では、安全係数として2が通常用いられています。

連続動作電圧

通常動作の間、フォトカプラまたはその他のアイソレータは、連続した電圧ストレスに曝され続けると考えられます。この電圧は通常、使用電圧（working voltage）と呼ばれます。

電圧ストレスが連続であるため、絶縁破壊を起こした場合に人体への高い危険リスクがあります。このため、フォトカプラやその他のアイソレータは、機器の連続使用電圧の2倍以上の連続電圧絶縁能力を持ったものを用います。

過渡電圧能力

連続した電圧ストレスに加え、フォトカプラやその他のアイソレータは、高い過渡電圧を阻止し、それに耐えなければなりません。過渡電圧は、高エネルギー過渡電圧または低エネルギー過渡電圧のどちらかに分類されます。（Table 1）

高エネルギー過渡電圧の方が、より危険なことは言うまでもありません。低エネルギー過渡電圧は、一般的に人体に危害を及ぼすことはありませんが、絶縁物に損傷を与える可能性があり、それが結果的に安全性を低下させるリスクがあります。

Table 1. IEC60664-1 Impulse rating coordinates.

Nominal Voltage of the Supply System V		Voltage Line to Neutral a.c. or d.c V	Rated Impulse Voltage V			
Three Phase	Single Phase		Overvoltage Category			
			I	II	III	IV
		50	330	500	800	1500
		100	500	800	1500	2500
	120-240	150	800	1500	2500	4000
230/400* 277/480*		300	1500	2500	4000	6000
400/690		600	2500	4000	6000	8000
1000		1000	4000	6000	8000	12000

低エネルギー過渡電圧

ESD（静電気放電）は、特によく知られた過渡電圧で、このカテゴリに分類されます。ESDは容易に15kVを超えるため、フォトカプラやその他のアイソレータの沿面距離や空間距離による絶縁電圧の許容範囲を超える場合がしばしばあります。このため、フォトカプラやその他のアイソレータの入出力間で、フラッシュオーバーが起きます。しかしながら、このフラッシュオーバーでは深刻な危険には至りません。

高電圧ストレスが去った後は、フラッシュオーバーは自己完結し、絶縁のストレスは低減されます。その後、再度フラッシュオーバーが発生する過渡電圧レベルは、まだ非常に高いところにあります。実際にフラッシュオーバーが始まる電圧は、標高、湿度などの環境条件により大きく変わります。フォトカプラ以外のアイソレータは、比較的低いレベルのESDでも、絶縁に深刻な損傷（進行性の損傷または、直ちに起こる損傷）を受ける可能性があります。これに続く結果として、連続使用電圧が安全とされる範囲内に収まっていても、絶縁破壊に至る可能性があります。

フォトカプラの場合、この破壊のシナリオは、絶縁物の厚さを調整することにより回避されます。特に、厚い絶縁材料を使用することにより、内部絶縁耐圧が外部フラッシュオーバー発生電圧よりも十分高いことを保証しています。しかし、そのような高電圧保護は、動作と絶縁を非常に薄い絶縁膜に頼っている他のアイソレーション技術では極めて困難です。

これらのタイプの素子は、ESD破壊に対し特に脆弱です。フォトカプラ以外のアイソレータ技術には、次の2つのタイプの構造があります。タイプ1は、スピン・コーティングされたポリイミドを主絶縁に使用しており、タイプ2は、シリコン酸化膜（SiO₂）が主な絶縁物です。

タイプ2のアイソレータの場合、SiO₂絶縁は特にESDによる損傷を受け易い傾向があります。実際、集積回路の設計者の多くは、SiO₂構造へのESDによる損傷を制限するための保護構造に、極めて長い内部配線を設けています。

この保護には通常、電圧クランプ素子が用いられます。絶縁を目的とした素子の場合、絶縁バリアをまたいで電圧クランプ素子を接続することは、極めて現実的ではありません。このことは、タイプ2のアイソレータが、必然的にESDによる損傷を受け易いことを表しています。

高エネルギー過渡電圧

高エネルギーの過渡（サージ）電圧は、電力配電システムでよく見られます。このような電力サージは、同じ配電システムに接続された重機械の動作や、稀に雷によっても引き起こされます。

そのような過渡電圧は、直接生命を脅かす可能性があるため、絶縁部品の構造と寸法を適切に選び、確実な保護を行なうことが重要です。この問題については、機器レベルの安全規格の中で、絶縁カテゴリ或いは、過電圧クラスとして規定されています。各アプリケーションに対し、対象となる機器の安全規格は、それらの用途において絶縁が保たれるべき最大の過渡電圧を規定しています。

部品に対する高電圧試験

連続的および過渡的電圧ストレスからの保護を目的とするフォトカプラやその他のアイソレータの絶縁能力に対する試験は、通常、構造的な要件と電気的試験との組み合わせで行われます。

絶縁試験

この試験の主な目的は、絶縁部品が短い時間、通常1分間、高電圧に耐えることのできる能力があることを確認することです。

この試験を採用している安全規格の一例は、UL1577です。合格・不合格は、漏れ電流を測定することにより判定されます。これはまた、絶縁部品が組み込まれた機器に対する絶縁試験に耐え得る能力を試験していることにもなります。

しかし、この試験定格の適用は限定的です。特に定格は、連続的な安全動作電圧を規定していません。

部分放電試験

部分放電試験は、一種の絶縁性能試験方法ですが、高い過渡電圧に対する絶縁能力を試験するだけでなく、通常動作電圧での絶縁性能の完全性も試験しています。この試験では特に、絶縁物中の微小空洞（マイクロポイド）の存在を調べます。電圧ストレス下では、微小空洞内で発生するコロナ放電が絶縁能力を低下させ、絶縁破壊を引き起こします。

この試験では、通常の動作電圧程度の試験電圧を印加し、部分放電が発生しているか調べることにより、通常動作条件下での潜在的な劣化の可能性を調べることができるという利点があります。これにより、安全な連続動作電圧を保証することが出来ます。

この試験方法の2つめの利点は、低い試験電圧での試験が可能なことです。機器の用途に近い電圧を用いて試験することにより、試験電圧ストレスが絶縁性能を低下させてしまう可能性を低くしています。部分放電試験の究極の目的は、絶縁物の中が無空洞であることを保証することです。

しかしながら、「無空洞」ということは正しい言い方ではありません。どんな絶縁物でも「100%空洞が無い」ということはなく、試験の絶対分解能は、常に測定システムにより制約を受けます。高精度の部分放電試験は、分解能を1pCまで上げて行いますが、量産出荷試験において安定的に試験可能な分解能は、通常5pCまでです。

部分放電試験を用いてフォトカブラの高電圧に対する安全性を検査する規格の一例として、VDE0884があります。この安全規格は、今日ではフォトカブラの国際安全規格IEC60747-5-5に統合されています。

フォトカブラのパッケージは、光学的に透明な絶縁物と、不透明なエポキシ外部モールドからなる複合構造を持っています。

IEC60747-5-5の部分放電試験で試験している対象が、外部モールドなのか、内部絶縁物なのかという疑問が呈されることがしばしばあります。

広義には、両方ということになります。（Figure 2）

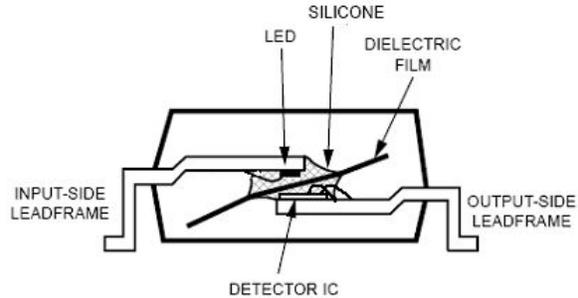


Figure 2. Optocoupler Double Insulation Construction

絶縁物内の微小空洞を検査する際、絶縁物に蓄えられた電荷を考慮に入れて、部分放電の合格基準値を妥当なものにする必要があります。仮に電界が均一であると考えられる場合、蓄えられた電荷は、絶縁物を介して均一に分散されるため、部分放電測定は、あらゆる絶縁構造に適用することが可能です。標準的なフォトカブラの総パッケージ容量は、おおむね0.7pF以下です。実際の電界は完全には均一ではなく、絶縁構造内には部分的に僅かながら電荷の不均衡が存在しますが、それでも部分放電試験の結果は、外部モールドによる絶縁とフォトカブラ内部の光学絶縁の両方に対して十分な有効性を持っています。

フォトカブラと似通った部分放電試験方法が、しばしば磁気絶縁方式や容量絶縁方式のアイソレータに適用されることがあります。この場合、それらの構造内における電界の分布が、フォトカブラ構造に比べてきわめて均一でないため、部分放電試験の有効性は著しく限定的なものとなります。

一例として、100fFという小さな容量を持った微小な容量式絶縁構造を用いたアイソレータがあったとします。このような絶縁構造に1,000Vの試験電圧を印加した時、蓄えられる電荷はおよそ100pCです。

この状況では、5pCという部分放電試験の合格基準は、相当に緩いレベルとなります。もし5pCの放電がそのような小さな絶縁構造内で実際に発生した場合、すぐに雪崩降伏が発生する可能性が極めて高いと考えられます。

部分放電試験は、フォトカブラ以外のアイソレータにおいても、外部モールド材料に内在する空洞欠陥を検出するには適しますが、それらのアイソレータにとって、ほぼ間違いなく最も高電圧に弱い部分である、主要な絶縁構造中の微小空洞を検出するには適していません。

絶縁部品の電氣的安全に関する構造要件

安全に関する構造的要件は、パッケージ内部構造に関するものと、パッケージ外部寸法に関するもの2つがあります。

1. パッケージ内部構造

内部構造要件を決定する前に、基礎絶縁 (Basic insulation) や強化絶縁 (Reinforced insulation) といった、絶縁を行う目的を明確にする必要があります。

- 基礎絶縁は、電圧レベルシフトなどのいわゆる機能絶縁には有効ですが、感電からの保護には用いることが出来ません。
- 強化絶縁は、感電からの保護を目的とした絶縁が必要な場合に用いられます。強化絶縁という言葉はまた、2重絶縁 (Double insulation) と言い換えられる場合もあります。
 - 2重絶縁とは、文字通り定格電圧の2倍の絶縁能力を有することです。2重絶縁の物理的な実現方法もやはり文字通りで、例えば、各々所定の絶縁能力を持った絶縁物を2層重ねた構造などにより実現します。強化絶縁はまた、1層の固体 (solid) 絶縁物によっても実現可能です。
 - 単層の固体絶縁物による安全を目的とした絶縁は、安全規格により要件が異なる場合があります。例えば、機器レベルの規格であるIEC60950では、厚さ0.4mm以上の単一の絶縁物は、強化または2重絶縁構造として有効とされています。固体絶縁物の定義に関しては、単に物質そのものだけでなく、物質の形成方法も関係します。例えば、厚いポリイミド・フィルムは、固体絶縁物として十分に有効ですが、液体ポリイミドから形成されたポリイミド膜の場合は、その限りではありません。

2. パッケージ外部寸法

パッケージの外部寸法もまた、安全に関する絶縁の要件として重要です。この場合、外部空間距離 (clearance) と、外部沿面距離 (creepage) の2つが大切です。(Figure 3)

外部空間距離 (clearance)

外部空間距離は、入出力端子間の空間を介した最短距離です。十分な空間距離を確保することにより、入出力端子間でのフラッシュオーバーを防ぐことができます。

実際にフラッシュオーバーが発生する電圧は、高度と湿度の影響を受けます。高度が高く湿度が低いほど、フラッシュオーバーが起き易い傾向があります。

フラッシュオーバーを防ぐために必要とされる空間距離は、IEC60664などの絶縁協調規格から参照することが出来ます。この規格の中では、種々の動作電圧毎の表が示されています。それらは、実験により得られたデータと、フラッシュオーバーに関する理論の両方に基づいたものです。強化絶縁の要件を満たすには、示された空間距離に安全係数2を乗じた値を用います。

絶縁部品自体の構造のみならず、その部品が使用された機器全体としての機械的な絶縁も考慮する必要があります。特に、プリント基板上での半田や配線により、絶縁距離が短くなる場合があるので注意が必要です。

外部沿面距離 (creepage)

もう1つの重要な外部寸法が、外部沿面距離です。これは、パッケージ表面に沿った入出力端子間の最短距離です。この距離が重要とされる理由は、入出力間の導電トラッキング経路が、絶縁物表面を伝わって形成される場合があるからです。これに関係する要因は、湿気や埃などの外部汚染と、絶縁物表面がそれらを引き寄せたり保持したりする性質です。外部沿面距離の要件は、機器の使用環境、即ち汚染度 (pollution degree) や、部品の外部モールド材料の材料カテゴリ (material category) により異なります。種々の使用環境に対する外部沿面距離の要件は、IEC60664中の表に示されています。

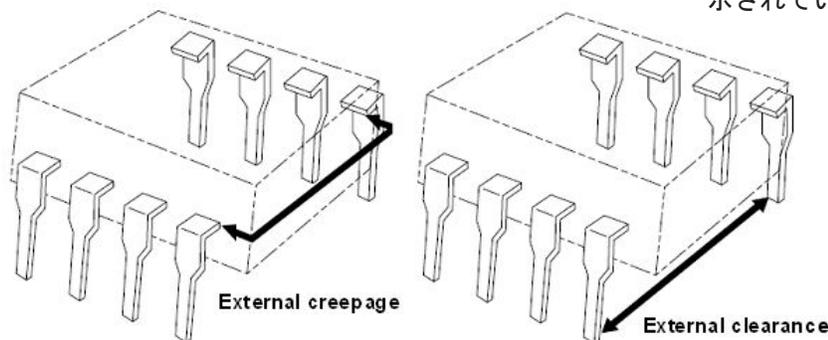


Figure 3. External package isolation distances

絶縁寿命

フオトカプラやその他のアイソレータを使用した多くの機器は、定期的な絶縁品質の検査が行われない場合が多いため、絶縁能力は、使用者によるメンテナンス無しにその機器の生涯に渡って安全を確保でき得るものでなくてはなりません。

安全寿命の定義

何をもちて安全とするかということは、しばしばメーカーの主観による場合があります。例えば、あるアイソレータのメーカーは、安全に使用することができる寿命を、定格電圧で連続的に動作し、1%の故障が発生するまでの時間としています。この定義方法の問題点は、1%の使用者が生命の危険に関するリスクに直面する可能性があるということです。また、過渡的な過電圧の影響や、安全係数についても考慮されていません。

更に慎重で安全な考え方をするならば、次の何れかが統計的に見て殆ど発生しない範囲を寿命の定義とすることです。

1. 定格過渡過電圧により絶縁性能が低下し、永久的な絶縁破壊に至るポイント。
2. 絶縁性能が低下し、定格電圧の2倍の電圧を継続的に絶縁する能力がなくなるポイント。

2通りの故障モードが考えられることから、寿命に対しても各々個別にメカニズムを考えます。また、それらは各々排他的な関係にあるわけではない事も考慮する必要があります。

1. 過渡過電圧に対する寿命

過渡過電圧の定格は、UL1577の絶縁試験規格および、IEC60747-5-5の過渡過電圧定格で各々規定されています。しかし、それらには、機器レベルでの予測寿命全体に渡る過渡電圧能力の詳細について、直接触れていません。とりわけ、定格過渡電圧での試験時間が非常に短い点が問題であると言えます。

過渡過電圧は、コロナ劣化やその他のメカニズムによる絶縁劣化の原因となる可能性が高く、例えば短時間の過渡過電圧でもそれが繰り返されれば、機器の寿命全体から見ると、絶縁の損傷が蓄積するので問題となります。機器が通常稼動している時間内に受ける過渡過電圧の時間の和は、定格過渡過電圧の試験時間を超えるであろうことは容易に想像できます。

機器レベルでの寿命における安全な対過渡過電圧能力を実現するには、絶縁構造を適切なものにするにも必要です。この絶縁能力を確かめるには、UL1577で行われるような高電圧試験を、更に長時間延長して行う方法があります。

フオトカプラとその他のアイソレータのような異なった技術を長時間の高電圧絶縁試験によって比較すると、多くの性能の違いが見られます。例えば、フオトカプラ以外のアイソレータは、UL1577絶縁試験において15分以内の時間であれば、高電圧に耐えます。これに対しフオトカプラは、UL1577絶縁試験において、100時間を超える対高電圧能力を見せます。この性能の大きな違いは、機器レベルの対過渡過電圧寿命に対し、直接的な影響を与えることは明らかです。

2. 通常動作電圧に対する寿命

寿命を決定するもう1つのメカニズムは、定格負荷で連続した動作電圧が印加されている間に起こります。

主な懸念は、経時的劣化を伴うような明確な磨耗故障メカニズムがなく、製品の想定動作寿命の範囲内で絶縁故障を起こす場合です。

絶縁物内部に微小空洞があることにより、部分放電が発生して絶縁劣化を起こすことがないようにすることが大切です。その他の考慮すべき経時劣化メカニズムもあります。高電圧ストレスに曝されたポリマ絶縁材料の場合、重要な経時劣化メカニズムは、空間電荷劣化です。(Figure 4)

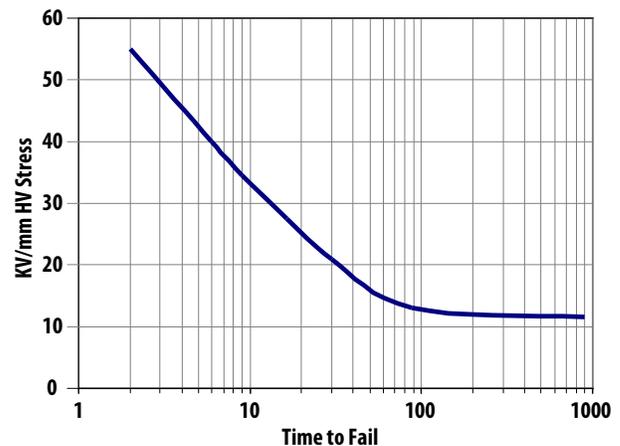


Figure 4. Typical Polymer Space Charge Degradation Characteristics

空間電荷は、高電圧が印加された絶縁物中に注入される電荷です。注入された空間電荷は、内部電界を変化させ、絶縁物へのストレスを増加させます。注入される空間電荷の量は、主に絶縁物の厚さと印加された電界により決定され、kV/mmのストレス・ファクタとなります。その他の有意な要因として、動作温度、波形タイプや周波数などがあります。

ポリマ材料の空間電荷による経時劣化は、現在でも盛んに研究されているテーマです。しかしながら、この劣化現象は未だ解明されたとはいえない状況にあります。空間電荷による劣化に関し、寿命を予測するために有用ないくつかの明確で安定的に観測される特性があります。絶縁寿命を試験した結果を印加した電圧に対してプロットすると、低kV/mmストレス領域での経時劣化の様子は、明らかな漸近線となります。

このことは、あるレベル以下の印加電圧では、予測寿命が急激に長くなることを意味しています。

このレベル以下の電圧ストレスでは、空間電荷による影響は問題とならない程度まで低減されるからです。

フォトカブラの場合、使用されている絶縁物が厚く、kV/mm電圧ストレス・レベルが低くなるため、空間電荷による絶縁劣化は必ずしも問題とはなりません。

空間電荷による絶縁劣化は、薄いポリマ・コーティングを用いたアイソレータでは深刻な問題となります。この場合、高kV/mmストレスが空間電荷による絶縁劣化を引き起こす元となります。高印加電圧での絶縁寿命試験でこの現象を見ることができですが、それよりも通常動作電圧に近い電圧での長時間試験が問題となり、機器レベルの通常の動作寿命時間以内にも関わらず、絶縁故障が見られることがあります。

結論

フォトカブラは、電気的安全に関する広範な用途において、長年に渡り使用されてきました。それにも関わらず、機器レベルと部品に関する安全規格が、絶対的な安全使用を保証する要件を明確にしていないうち、しばしば議論の対象となります。

議論は、主に高電圧印加時の絶縁寿命と、高過渡電圧による絶縁の損傷についてです。しかしながら、これらはフォトカブラ本来の構造により既に対処されているため、机上の懸念に過ぎないことが、実験と現象論の両方から証明されています。一方、フォトカブラ以外の半導体アイソレーション技術においては、この机上のリスクは、現実的な安全上の危険要因となり得ます。

多くの場合、機器レベルの安全規格は、その定義においてフォトカブラ以外の半導体絶縁技術を、強化絶縁に使用することを構造面から禁じています。

しかし、すべてがそうではありません。旧来の機器レベルの規格において、フォトカブラ以外の半導体絶縁技術に関するリスクは、不明瞭に規定されているか、或いは全く示されていません。この状況は、フォトカブラの安全規格を用いることが技術的に有効でないにも関わらず、フォトカブラ以外の半導体アイソレータの安全性を評価するためにしばしば適用されるという、一層現実離れした状況を作り出しています。

参考文献

- 1) A Space-charge Life model for ac electrical Aging of Polymers. G. Mazzanti, G.C. Montanari, L.A. Dissado. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- 2) Contribution of Partial Discharges to Electrical Breakdown of Solid Insulating Materials, C. Mayoux and C. Laurent. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.
- 3) IEC60950-1 Second Edition 2005, Information Technology Equipment Safety.
- 4) IEC60664-1 Insulation coordination for equipment within low-voltage systems.

For product information and a complete list of distributors, please go to our web site: www.avagotech.com

Avago, Avago Technologies, and the A logo are trademarks of Avago Technologies in the United States and other countries. Data subject to change. Copyright © 2005-2009 Avago Technologies. All rights reserved. AV02-1909JP - August 11, 2009

AVAGO
TECHNOLOGIES