

ランプ式光源からLED式光源へ移行する際の考慮点

はじめに

ランプベースの放射束光源は、数十年にわたり放射照度とスペクトルの校正のための実用的なソリューションとして機能してきました。広帯域特性を放射照度基準として利用する場合でも、よく特性化され予測可能なスペクトルピークを波長基準として利用する場合でも、ランプベースの光源の正確な出力パラメータは、カメラや画像センサーの校正、環境光センサーの校正、フォトダイオードの応答性の特性評価、照度刺激、診断用医療イメージングなど、さまざまな用途において正確で信頼性の高いツールであることが証明されています。

ソリッドステート照明技術の急速な進歩により、多くの人々がランプベースの標準を捨て、LEDベースのシステムを採用することを検討しています。LED光源の高効率で長寿命な性能、コンパクトな設置面積、瞬時点灯機能に基づけば、LEDは当然の選択です。しかし、強度、強度の安定性、スペクトル性能（多くの場合、同時に）において、ランプベースの標準器の精密な性能を再現することは、LEDベースのシステムに関して、設計とコストに関する多くの課題を提示します。

ここでは、このような応用分野でランプを効果的に置き換えるためにLEDベースの光源が達成しなければならない性能要件と、2つのソリューションのコストポイントを、初期コストと継続的なメンテナンスコストの両面から探ります。

ディスカッション

ランプベースの光源

ランプから放出されるスペクトルは、励起エネルギー準位にある電子が、安定した基底状態に落ちる結果です。準位そのものは、発光源物質の原子特性によって定義されます。この励起と放出はよく理解され、完全に特性化されたプロセスであるため、ランプのフィラメントから放出される波長は絶対的なものであると考えられています。

校正アプリケーションでは、最高の精度を達成するために、ランプベースのソリューションがバンドルされることがよくあります。例えば、タングステン・ハロゲン(図1)のような広範に放射する校正放射照度光源は、安定化されたラジオメトリック電源を内蔵しており、広範なスペクトルにわたって数パーセント以内の出力レベル精度を達成します。これに、既知の波長で比較的狭いスペクトルのピークを放射する水銀(図2)のようなスペクトル線ランプを組み合わせると、スペクトルの校正が可能になります。

多くの場合、これらのシステムは、さらなるスペクトル選択や強度制御のために、光学フィルター、グレーティング、その他のコンポーネントと組み合わせて使用されます。

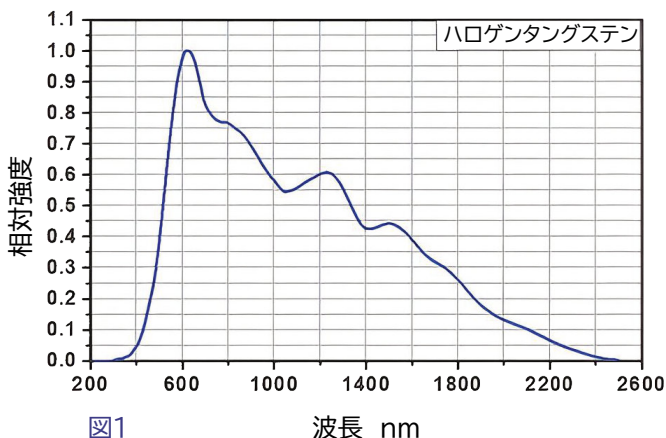


図1

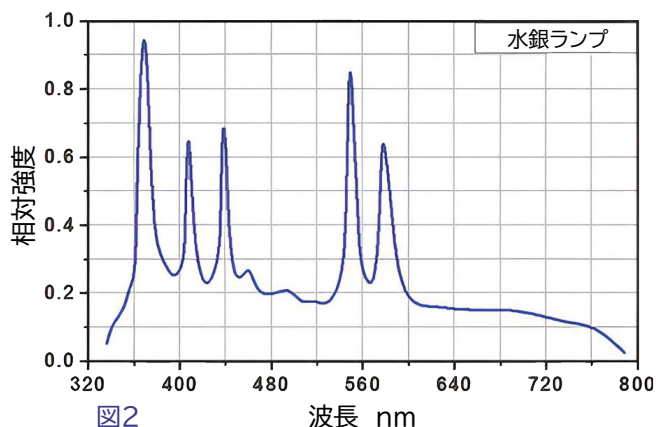


図2

ランプ式光源の利点

ランプ式光源には多くの利点があります。例えば、広いスペクトル範囲を必要とするアプリケーションでは、ハロゲンベースの光源は、紫外線の350nmから近赤外線の2400nmまでの光を照射することができます。このような光源の黒体スペクトル誤差は極めて小さく、ある種のランプをグレーティングやフィルターと組み合わせることで、ユーザーは本質的にあらゆる色温度を達成することができます。

ランプ式光源の初期費用は、高額になることもあります。交換用ランプは比較的安価です。また、ランプはどこにでもあるため、供給ベースが広く、設置、校正、サービス機関も多く存在します。

ランプ式光源の欠点

ランプ式光源の主な欠点は、ランプ寿命です。時間単位で表される寿命は、設計電圧と理想的な実験室条件下で計算されます。設計電圧から逸脱すると、ランプ寿命の値が低下します。この偏差によって、消費電流、輝度、色温度の値も変化します。既知の正確な出力パラメーターが鍵となる場合、そして校正関連の用途では通常そうですが、ランプが予測可能な性能を発揮できる期間は限られています。正確な測定が必要な用途では、これは数百時間のオーダーです。それを超えると、分光性能は保証できなくなります。

ランプ式光源では、コールド・スタートアップ時間も課題となります。システムメーカーは通常、使用前に15~30分待つことを推奨しています。これは、ランプの動作温度が通常150~250℃のオーダーであることを考慮すると、熱安定性の達成に大きく関係しています。ランプ自体の温度は数分以内に到達しますが、関連部品や周辺部品はこの温度で安定しなければなりません。

これに関連するのがスイッチング時間です。動作温度が高いため、光学フィルターやアイリスダイアフラムなどがランプと一緒に使用されている場合、新しい部品が光学系に導入されると、再安定化のために何分か必要となります。

上述したように、帯域が狭いことも、ランプベースのシステムでは障害となります。

たとえば、広帯域照明源から狭帯域照明源に切り替えるには外部コンポーネントが必要となり、コストと複雑さが追加されます。可動部品としてのフィルターや減衰器などの追加要素は、ソリューションに潜在的な障害点をもたらします。つまり、狭帯域の要件を達成できるかどうかです。多くの場合、広帯域と狭帯域の光源の両方を必要とするアプリケーションでは複数のランプ式光源が採用され、取得コストとメンテナンスコストが増加し、研究室や生産現場のスペースを消費します。

ランプ式光源の機械的衝撃に対する耐性は、特に動作中の場合には明らかに非常に低いです。破損に関しても、場合によっては廃棄に関しても（水銀ベースの発生源など）、特別な取り扱い要件を遵守する必要があります。

また、ランプ式光源の技術的なさらなる開発にはほとんど投資が行われていないことも考慮する必要があります。特にこれらのランプの一部に使用されている材料と、デバイス全体に対する需要が減少し続けていることを考慮すると、もはや新しい技術ではないことは非常に現実的な脅威です。これは最終的にはコストと可用性の両方に影響を与えます。

最後に、ランプ式光源の消費電力は、少なくともLEDのシステムと比較して非常に高くなる可能性があります。これについては、次の段落でさらに詳しく説明します。

LEDベースの光源

発光ダイオード、つまりLEDは、電流が流れると発光するpn接合ダイオードで構成されています。電子は半導体接合内で正孔と再結合し、光子の形でエネルギーを放出します。放出される波長は、半導体材料のバンドギャップおよび/またはそのドーパント（半導体にドーピングされる不純物）レベルによって決まります。

LEDベースの光源の欠点

LEDの発光波長は基本的に半導体のバンドギャップによって決まるため、特定のLEDが発する波長スペクトルはかなり狭くなります。これは、波長の基準規格を必要とする用途では便利ですが、広帯域出力を必要とする用途では、異なる波長の複数のLEDを組み込む必要があります。さらに、半導体材料とその結果生じるバンドギャップは無限ではありません。言い換えれば、ある波長の光は直下型LEDでは不可能です。これについては、次のセクションで詳しく説明します。

LEDの波長は、動作電流の変化によってもシフトし、接合部温度の変化によっても、少ないながらも測定可能な範囲でシフトします。その結果、接合部温度を制御し、電流による波長シフトを考慮する措置を講じない限り、校正標準器としての使用は厄介なものとなります。

LEDは指向性が高いため、通常、必要な領域で均一な強度を得るためには複数のLEDデバイスが必要です。これらの複数のデバイスは、システムのコストとサイズを増加させる可能性があり、また、所望の視野にわたって良好な均一性を達成するために、複数のエミッターからの光を統合するための措置を講じる必要があります。

LED式光源の利点

急速な技術進歩は、LED技術の主な利点です。LEDの光出力は、1960年代から36ヶ月ごとに実質的に倍増しています(詳しくはハイツの法則を参照)。スペクトル強度、ウォールプラグ効率、寿命、コストの面で、今後何年も急速な進歩が続くと予想されます。

LEDデバイスの特定の欠点の1つが、重要な利点にもなっていることが判明しました。それは、発光波長が比較的狭いことです。青色発光LEDは、蛍光体でコーティングされた光学系に照射されると、スペクトル発光が広がります。これらのデバイスでは、Y3Al5O12:Ce (「YAG」) 蛍光体コーティングが青色発光の一部を吸収し、特定の配合に応じて黄色、緑色、または赤色の光を生成します。得られた混合物には基本的な青色の波長が含まれており、演色性の面で照明に優れています。

ソフトウェアを通じて、個々のLEDデバイスをアドレス指定して調整し、広帯域出力、特定の基準波長を生成したり、任意の数のランプベースの光源をエミュレートしたり、光学的にフィルターされた光源をシミュレートしたり、ユーザーが独自のスペクトル出力を設計したりすることもできます。これは、光学フィルターや光機械コンポーネントを使用せずに実現されるため、可動部品、それに関連するサイズとコストが排除され、潜在的な故障点が削減されます。以下の図3と図4は、広帯域またはカスタムスペクトルモードで動作するGamma Scientific LED式光源 RS-7 SpectralLED®光源で表示されたスペクトル出力画面です。

図3
D65光源のSpectralLED®
エミュレーション。
青い線はターゲットスペクトルを
表し、白い線は実際の出力を
表します。

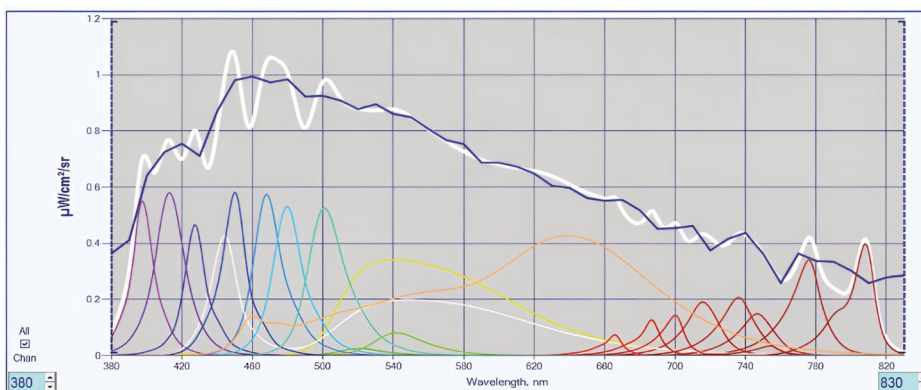
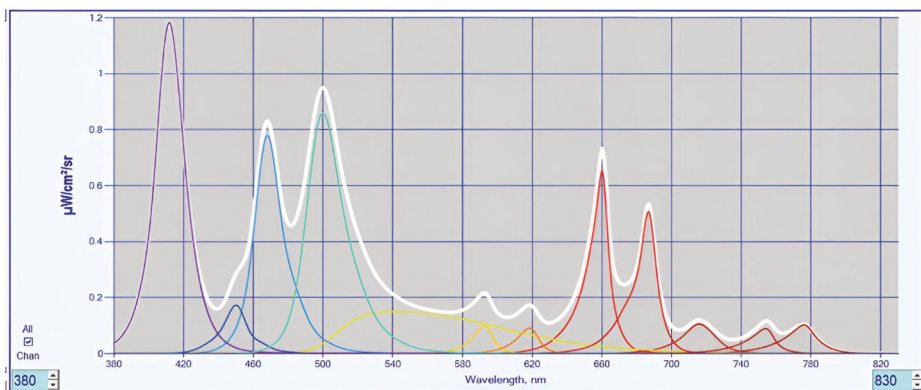


図4
SpectralLED® 光源から
ユーザーが選択したスペクトル



もう一つの大きな利点は、動作寿命がランプに比べてLED技術に大きく有利なことです。信頼性項目に関する議論はここでは割愛しますが、LEDのL70/B50寿命性能は10000～40000時間の範囲か、それ以上であることが多いです。(参考までに、L70/B50は、デバイスの半分が元の強度の70%まで低下した時点です) 特に、設置や再校正に伴うシステムのダウンタイムが重要なコスト要因となる場合、この寿命係数は所有コストに多大な影響を与えます。

複数の発光体を使用し、適切な制御と監視システムを備えたLEDベースのソリューションには、所望の出力強度とスペクトルプロファイルを迅速に調整し、正確に維持する能力が備わっています。これと同様に、幅広い強度範囲にわたって所望のスペクトルプロファイルを維持したり、幅広いスペクトルプロファイルにわたって一貫した強度を維持したりすることができます。LED式光源 RS-7 SpectralLED®のような適切な制御インターフェースでは、この切り替え時間は通常数十ミリ秒です。

LEDはランプよりも約1桁低い動作温度で安定するため、コールドスタートアップ時間は通常1～2秒のオーダーです。また、ウォールプラグ効率が高いため、廃熱が少なく、精密試験環境では大きな利点となります。LED式光源のこの迅速な起動時間は、光出力が不要なときにデバイスの電源を落とすだけで、使用時に素早く再始動できるという点で、動作寿命を劇的に延ばすためにも利用できます。これは、ランプ式光源では不可能です。

ほとんど言うまでもないことですが、LEDデバイスの機械的衝撃に対する耐性はランプよりもはるかに優れています。具体的には表1を参照ください。光源がシステム内で最も破損しやすい部品である代わりに、LEDベースの光源は多くの場合、最も破損しにくい部品です。

比較要因のまとめ

市場には数多くのランプ式光源やLED式光源が存在するため、一概に比較することは困難です。しかし、表1では特定の用途(画像センサーの校正)を選択し、LED式光源 RS-7 SpectralLED®と、この用途でこれまで使用されてきたハロゲンランプベースのランプ式光源を比較しています。

表1

	プログラマブル LED光源 RS-7	ハロゲンランプ式光源
動作寿命時間 (L70 / B50または校正保証に基づく)	2万5000時間	300時間
コールド・スタートアップ時間	<2秒	15～30分
テストイベント間のパワーダウン能力 (寿命の延長)	有	起動時間が長い ため可能性は低い
強度の安定性	0.01%以上	2.5%
色温度の精度	10K以内	20～50K
自己校正	自動、最大2年間 ⁽¹⁾	無
校正失敗アラート	有	極めて限定的
分光波長範囲	380～1000nm または 900～1700nm	350～2400nm
サービス停止時間	～4時間/10000稼働時間	～6時間/300稼働時間
切り替え時間	<50ミリ秒	5分
狭帯域能力	擬似モノクロメーター	追加コンポーネントが必要
機械的衝撃に対する耐性	1500G、0.5ミリ秒	10G、15ミリ秒
社会的責任	消費電力を66%低減	
必要な光学機械アクセサリ	無	フィルター、アイリス、シャッター
必要な電気アクセサリ	無、自己完結型	高精度電源装置
エミッター温度	通常25～40度	通常150～250度
光源技術の製品ライフサイクル	成長段階	成熟期から次第に新しさを失う期間

最も重要な比較 - コスト

ランプ式光源とLED式光源のコスト比較は、単に新しいすぐに使えようとするソリューションの「販売価格」を調べるだけの問題ではありません。使用プロファイルは非常に重要な変数であり、他の多くの重要な要因も同様です。

ダウンタイムコストは、所有コストの最も大きな要因であることが多く、例えば、イメージセンサー製造工場では、試験装置のダウンタイムは1時間当たり数万ドルになることがあります。校正用光源が数百時間ごとにランプ交換とその後の再校正を必要とする場合、そのコストはあっという間に膨れ上がります。

時間当たりの修理人件費も考慮に入れます。つまり、サービス技術者の人件費です。内部リソースを使用する場合は、同じ担当者が行う可能性のある他のこと(たとえば、歩留まりや生産性の向上)に関する機会費用とともに、その個人の付随的利益の追加コストを考慮する必要があります。

機器の使用状況プロファイルは、考慮すべき複数の要素です。たとえば、光源を1日あたり8時間、週に5日使用する場合、ランプは約6週間ごとに交換する必要があります。

資本設備の減価償却率も考慮する必要があります。LED式光源は初期コストが高いですが、このコストは数年で償却できます。一方、ランプ式光源を使用したシステムの初期コストが低いことも償却に繋がりますが、ダウンタイムや修理工賃に関連するコストは、装置の使用可能な全寿命期間を通じて繰り返し、収益に影響を与えます。

どちらのソリューションでも年に一度の再校正が必要であると想定されています。これは、元の購入価格の償却を除けば、LED式光源 RS-7 SpectralLED[®]システムの唯一継続的なコストです。

LED式光源の壁コンセントの効率ランプ式光源の効率よりもはるかに優れていますが、どちらの場合でもエネルギー消費は重要な運用コスト要因ではないため、ここでの分析ではそれらのコストを無視していることに注意してください。

RS-7 SpectralLED®光源初期コストは、同等のランプ式光源の2倍以上ですが、ランプ式光源の再校正費用は、わずか2年の使用で、それを3倍以上、迅速かつ恒久的に上回ります。

ランプ式光源が依然として最良の選択となるのはどのような場合でしょうか？答えは、特定のアプリケーションにとって最も重要な要素によって異なります。たとえば、ランプ式光源が月に数時間しか使用されない場合、同等のLED式光源より高いコストを回収するには数年かかる可能性があります。一方、柔軟性が重要な場合、RS-7 SpectralLED®光源からの照明シミュレーションという点でほぼ無限の可能性を提供しますが、これはランプ式光源では不可能です。さらに、低デューティサイクルの使用プロファイルでは、数か月間アイドル状態にしておいた後にランプが完全に調整されているかどうかを知るのは困難です。一方、RS-7 SpectralLED®光源は、ユニットにインストールされている監視オプションに応じて、各起動時にナノメートルの何分の1以内で自己校正を行います。

まとめ

ランプ式光源は、数十年にわたり校正標準の主力として機能しており、特定の使用プロファイルの下では、費用対効果が高く、実行可能なソリューションであり続けています。出力スペクトルは既知であり、特性化されており、交換用ランプは比較的安価です。しかし、ランプを使用するシステムの運用には、設置の労力や、さらに重大なこととしてランプ交換や校正時のダウンタイムコストなど、隠れたコストがかかることがあります。強度とスペクトル出力の両方における柔軟性はLED式光源と比べ制限され、追加のコンポーネントが必要で、長期的な運用に関してリスクを生じる可能性を持ちます。

LED技術は急速に進化しています。光源の出力をエミュレートするには複数のLEDエミッターが必要ですが、統合ソリューションは強度とスペクトル制御の点で非常に価値のある柔軟性を提供します。LEDの寿命が長く安定した性能を確保するには措置を講じる必要がありますが、制御エレクトロニクスの専門知識は十分に確立されています。Gamma ScientificのRS-7 SpectralLED®光源などのLEDベースソリューションの初期導入コストは、ランプ式光源よりも高くなりますが、特に実稼働環境では、長い動作寿命と最小限のサービスコストにより、すぐに最もコスト効率の高いソリューションになります。使用プロファイルが低い実験室環境であっても、単一のRS-7 SpectralLED®光源で多数の光源出力をエミュレートできるため、単一のユニットで複数の光源を置き換えることができます。ランプ式光源が引き続き最適なソリューションであるという稀なケースですが、Gamma Scientificは引き続きさまざまな高精度ランプベースのソリューションの販売とサポートを行っています。

Gamma Scientificについて

50年以上にわたり、光源、センサー、ディスプレイ等のメーカーやユーザーに、非常にユニークで最先端の測定ソリューションを提供してきました。製品には、高精度分光放射計、校正用光源、ゴニオフォトメーター、積分球、薄膜測定システム、LEDテスター、ソーターなどがあります。また、ISO/IEC 17025、NVLAP認定試験所(NVLAP試験所コード200823-0)を運営し、校正・試験を行っています。