

ホワイトペーパー



## LumiSun-50™

35波長LEDソーラーシミュレータークラスA+A+A+

20,000時間長寿命 低スペクトル偏差 優れた照射均一性



オプトシリウス 株式会社

## 導入

広いスペクトル範囲と低いスペクトル偏差を備えた、手頃な価格で長寿命のソーラーシミュレーターに対する需要はかつてないほど高まっています。世界のエネルギー使用量に対応するための太陽電池産業の拡大と、材料試験、光化学、生物学、マルチスペクトル、およびハイパースペクトル用途のための人工光の必要性が相まって、洗練された技術の開発を促しています。

実際、環境に優しい光源を求める社会の動きに伴い、発光ダイオード (LED) がアークランプやレーザーの優れた代替品として台頭してきました。Innovations in Optics, Inc. [ IOI ] は、30 年以上にわたり、LED ダイおよびエンジニアリング技術の最新の進歩を組み込んだ LumiSun-50TM (特許出願中) のような新しい設計で、これらのニーズに対応する独自の立場を確立してきました。高出力 LED 技術のパイオニアとして、IOI は 均一性、安定性、寿命を備えた光子の伝達を最大化するために限界を押し広げてきました。イメージングおよび非イメージング光学設計、熱分析、エレクトロニクス技術における IOI の独自の機と LED ダイ技術の急速な向上により、紫外 [ UV ] から近外 [ NIR ] までの広範囲のスペクトルに対して最適化された照明が可能になりました。したがって、IOI LED ソーラー シミュレーターは、従来の技術に比べて効率が高く、運用コストが低くなります。

## 概要

このホワイトペーパーでは、優れたスペクトル一致と長い寿命を備えた高いスペクトルカバレッジを提供するソリッドステートソーラーシミュレーターの設計と選択における重要な考慮事項に焦点を当てます。具体的には、次のものが含まれます。

- (1) LED ソーラーシミュレーターのメリット
- (2) スペクトル範囲と偏差とクラス指定
- (3) 一時的な安定性と長寿命を実現する熱管理
- (4) 均一性の重要性
- (5) アプリケーション

### 1. なぜ LED ソーラー シミュレーターなのか？ 低い所有コストと高精度

従来のソーラーシミュレーターは、キセノンショートアークランプ、QTHランプ、メタルハライド放電ランプなどで構成されることが多かった。それでも、LED などの固体光源には、ランプに比べて多くの利点があります (付録A) LED で構成されたソーラーシミュレーターはエネルギー効率が高く、継続的なグリーンイニシアチブをサポートします。これは世界的なエネルギー需要の増加が予想される中で重要な考慮事項です。

LED は、水銀を含み、オゾンを生じ、UVC を放出するランプよりも環境に優しいです。LED のスペクトル出力はアークランプよりも長い寿命にわたって安定しているため、より信頼性が高く一貫した太陽のシミュレーションが可能です。アークランプとは異なり、LED では電球の爆発による故障がなく、より低い電圧と温度で動作し、耐用年数が長くなります。

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差



ホワイトペーパー

したがって、ダウンタイムが短縮され、生産性が向上します。LED イルミネーターは露光中のみ「オン」になります。ランプに必要なウォームアップ、クールダウン、シャッター、フィルター、高電圧点火装置はありません。

LED のスペクトルは比較的狭いため、フィルタでは困難な大気吸収の影響をスペクトルで厳密に模倣することができます。さらに、個々の波長をマイクロ秒以内に電子的に制御して、ユーザーの場所や用途に応じてスペクトルを調整できます。LED のこのような利点はすべて、所有コストの削減につながります。

### 2. スペクトル範囲、偏差、およびクラスをどのように選択しますか？

LED ソーラーシミュレーターを選択するときは、太陽をどの程度模倣するか、および特定の用途の要件を考慮することが重要です。シミュレータは、定義された周波数と形状で継続的に実行することも、短時間点滅することもできます。また、離散波長範囲にわたるユーザー設定のスペクトルプロファイルも可能になります。シミュレータのサイズ、光出力 (1 Sun = 1 000 W/m<sup>2</sup>)、スペクトル、照射野、均一性、安定性には大きな違いがあります。したがって、ソーラーシミュレータは、IEC 仕様 (IEC 60904-9、60904-3) に従ってクラス評価で分類されることがほとんどです。表 1 を参照してください。スペクトル一致、空間的不均一性、時間的不安定性の3つのクラスがあります。これらは最高の性能で A + として評価され、その後分類 C まで下がります。300 ~ 1200nm のより広い範囲にわたる A + を除くすべての場合、波長範囲は 400 ~ 1100nm です。

IECによる 分類	最小範囲 評価(nm)	スペクトルマッチ 全てのインターバルにて (%)	放射照度の均一性 (%)	時間的不安定性 (%)	
				短期 (STI)%	長期 (LTI) %
A+	300~1200	87.5~112.5	1	0.25	1
A	400~1100	75~125	2	0.5	2
B	400~1100	60~140	5	2	5
C	400~1100	40~200	10	10	10

表 1 : IEC 60904-9 Edition 3.02 020-09 に基づくソーラーシミュレーターの分類の定義。

IOI の LumiSun-50TM のような、クラス A+ 定格と 1.2Sun のソーラーシミュレータは、オペレーターにスペクトルの柔軟性を与え、均一性と時間的安定性に優れています。以下の図 1 は、AM1.5G の太陽光スペクトルと IOI LumiSun-50TM 測定スペクトルを比較しています。LumiSun-50TM 用に選択された 35 個の LED 波長により、300 ~ 1200nm (クラス A+) の最も広い範囲にわたって優れたスペクトル一致が得られます。

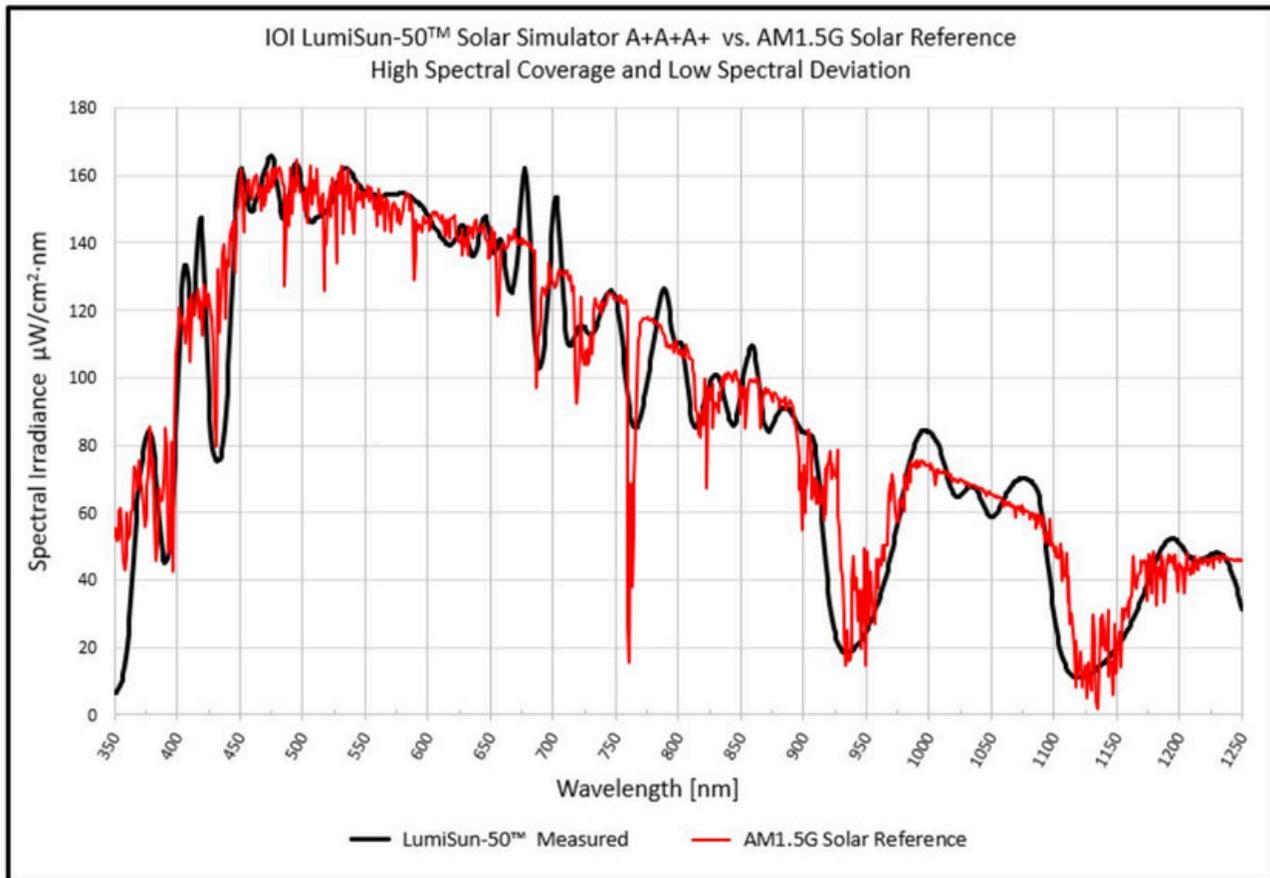


Figure 1: Comparison of AM1.5G Solar Reference Spectrum and IOI's LumiSun-50™ Solar Simulator, Class A+A+A+, illustrates outstanding spectral match obtained with 35 LED wavelengths over 300 to 1200nm.

ただし購入者は注意してください。各分類は6つの広い波長帯域にわたって平均されるため、クラスだけですべてがわかるわけではありません(表2)。幸いなことに、LumiSun-50TMはクラスを超えています。

	波長範囲 (nm)	範囲 300-1200nmにおける総放射照度 (%)	累積積算日射量 (%)
1	300~470	16.61	16.61
2	470~561	16.74	33.35
3	561~657	16.67	50.02
4	657~772	16.63	66.65
5	772~919	16.66	83.31
6	919~1200	16.69	100.00

表2: 6つの波長帯域にわたって計算された、IEC 6 0904-9 第3.0 版2 020-09に基づく世界基準太陽スペクトル放射照度分布

おそらくさらに重要なのは、スペクトル偏差 (低いことが最適) パラメータとスペクトルカバレッジ (高いことが最適) 適パラメータです。重要な質問は、ソーラーシミュレータが太陽のスペクトル参照曲線全体とどの程度一致しているかということです。LumiSun-50™ の答えは「競合他社よりも優れている」ですが、定量的に見てみましょう。

IECは、AM1.5のスペクトルカバレッジ (SPC)とスペクトル偏差 (SPD)を次のように定義しています。

$$SPC = \left( \frac{\sum_{E_{SIM}(\lambda) > 0.1 \cdot E_{AM1.5}(\lambda)} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \right) \cdot 100\% \quad (1)$$

$$SPD = \frac{\sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} |E_{SIM}(\lambda) - E_{AM1.5}(\lambda)| \cdot \Delta\lambda}{\sum_{300 \text{ nm}}^{1200 \text{ nm}} E_{AM1.5}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot 100\% \quad (2)$$

ソーラーシミュレーターで使用されるLEDの総数と波長は、高いSPCと低いSPDを提供するため、テストと研究において高い精度が得られます。たとえば、IOIの最新バージョンのLumiSun-50™には、35の異なる波長を備えた合計76個のLEDが個別に制御されています。その結果、これにより、競合他社の13%と比較して、400～1100nmで9%未満のより高いSPDが可能になります。図2を参照してください。さらに、350～1250nmの広い範囲にわたって、SPDは12%未満で際立っています。これは簡単に達成できるものではなく、LEDダイとワイヤボンディングだけでなく、光学、電気、熱、機械設計においても多大な経験と専門知識が必要です。ソーラーシミュレーターは、あらゆる工学分野の相乗効果が必要な複雑なデバイスです。

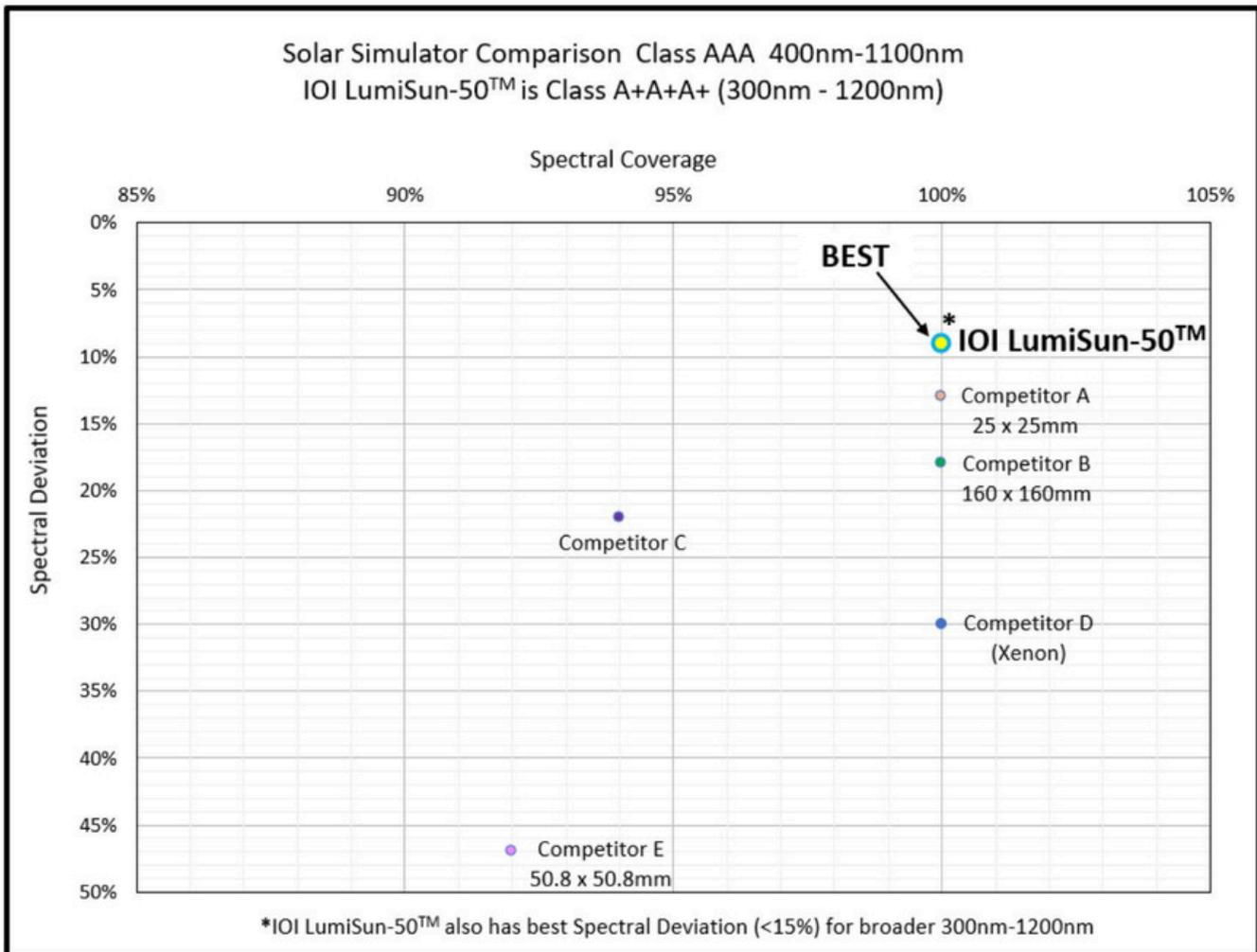


Figure 2: IOI LumiSun-50™ has excellent spectral coverage (100%) and spectral deviation (< 9%) which ensure high accuracy in testing and research.

IOIの特許技術により、裸の銅基板に直接取り付けられ、戦略的にワイヤボンディングされた最密充填LEDアレイが可能になります。すべての社内作業は裸のLEDダイを使用して行われます。したがって、IOIはLEDアレイの密度を最大化し、より多くの光を収集し、各波長に対して適切な数のLEDを最適化できます。すべてのLEDダイが同じように作られているわけではありません。電力、帯域幅、許容駆動電流は異なります。しかし、IOIは独自の熱管理により、長寿命を維持しながら最もパフォーマンスの高いLEDさえも向上させることに成功しています。さらに、LED技術は進歩を続けており、より正確な太陽光シミュレーションを可能にする幅広い波長が利用可能になっています。IOIは、世界中で入手可能な最高のLEDの入手とテストを専門としています。

人工光の品質が高ければ高いほど、より優れた研究がより迅速に行われることとなります。したがって、アプリケーションのニーズは異なりますが、スペクトル偏差が最も低く、スペクトル範囲が最も高く、A+A+A+ の最高評価を備え、スペクトルを制御し、CWまたはパルスで動作する機能を備えたLED ソーラー シミュレーターを選択することで、研究者や実験者の測定の再現性や精度、信頼性が高まります。

### 3. 時間的安定性と長寿命を達成するには、熱管理が重要です。

熱分析および制御システムを含む高出力LED テクノロジーにおける 30 年以上の経験を持つ IOI は、競合他社の性能を上回るソーラーシミュレーターの設計における多くの要素を認識しています。クラス A+A+A+のソーラーシミュレーター (IOI LumiSun-50TM など) は、長期時間的不安定性 (LTI) < 1% および短期不安定性 (STI) < 0.25% に関する IEC 要件を満たしている必要があります。実際、LumiSun-50TM は STI < 0.1% で A+ を超えています。これにより、研究者にとって精度と再現性が向上します。

適切な熱管理を行うことで、LED ダイをより高い電流 (多くの場合 1 ダイあたり最大 3A) で駆動できます。CW、高い時間的安定性と波長安定性を備えた、より多くの光放射照度を取得します。これは、テストを高速化したいアプリケーションにとって特に重要です。十分な太陽が利用可能であれば (1 太陽 = 1000 W/m<sup>2</sup>)、1年かかるテストを数週間に短縮できます。さらに、調整可能なLEDを使用すると、ユーザーは全体のスペクトルをニーズに合わせて調整し、波長の範囲を制限して、特定の帯域内の太陽の数を増やすことができます。

LEDソーラーシミュレーターの安定性と寿命を実現するには、多くの考慮事項があります。LEDの波長の選択、LEDダイのサイズ、電圧特性、極性、効率、帯域幅、経時的な動作はすべて重要な役割を果たします。熱管理は特に重要です。

温度の上昇はLEDの性能に多くの悪影響を及ぼします。ピーク波長がシフトする可能性があり、ソーラーシミュレーターでのテストに重大な影響を及ぼします。表 3 は、1Aの固定駆動電流で1つの赤色LEDダイの基板温度が上昇すると、光パワーが約 26% 減少し、ピーク波長が10nmシフトし、半値全幅 [FWHM] が増加します。波長が長いLEDは、接合部温度の変化により損失とスペクトルシフトが大きくなる傾向があります。

## LED Die Bin 645-650nm

Drive Current [A]	Board Temp. [°C]	Radiometric Flux [mW]	Decrease in flux vs. 20°C case	Peak $\lambda$ [nm]	Center $\lambda$ [nm]	FWHM [nm]
1	20	917	0%	645.4	644.1	17.8
1	25	889	3%	646.1	644.8	18.1
1	30	877	4%	646.9	645.6	18.4
1	40	845	8%	648.7	647.0	19.0
1	50	813	11%	650.0	648.4	19.6
1	60	777	15%	651.7	649.9	20.2
1	70	739	19%	653.1	651.3	20.7
1	80	699	24%	654.7	652.7	21.3
1	85	676	26%	655.7	653.5	21.6

Table 3: As board temperature increases, LED die output decreases, wavelength shifts longer, and FWHM broadens.

以下の図 3は、基板温度の上昇に伴うスペクトルの変化を示しています (LEDダイのジャンクション温度の上昇を示していません)。940nmLEDダイは20nmシフトし、基板温度が20°Cから85°Cに上昇するにつれてFWHMが広がります。LEDダイとワイヤボンドも加熱による応力を受け、致命的な故障や寿命の低下を引き起こす可能性があります。LEDダイのジャンクション温度を低く (<65°C)安定に保つことで、LEDの寿命が延び、スペクトルのシフトが最小限に抑えられます。経験則の1つは、ジャンクション温度が10 °C低くなると、LEDダイの寿命が2倍に増加するという事です。

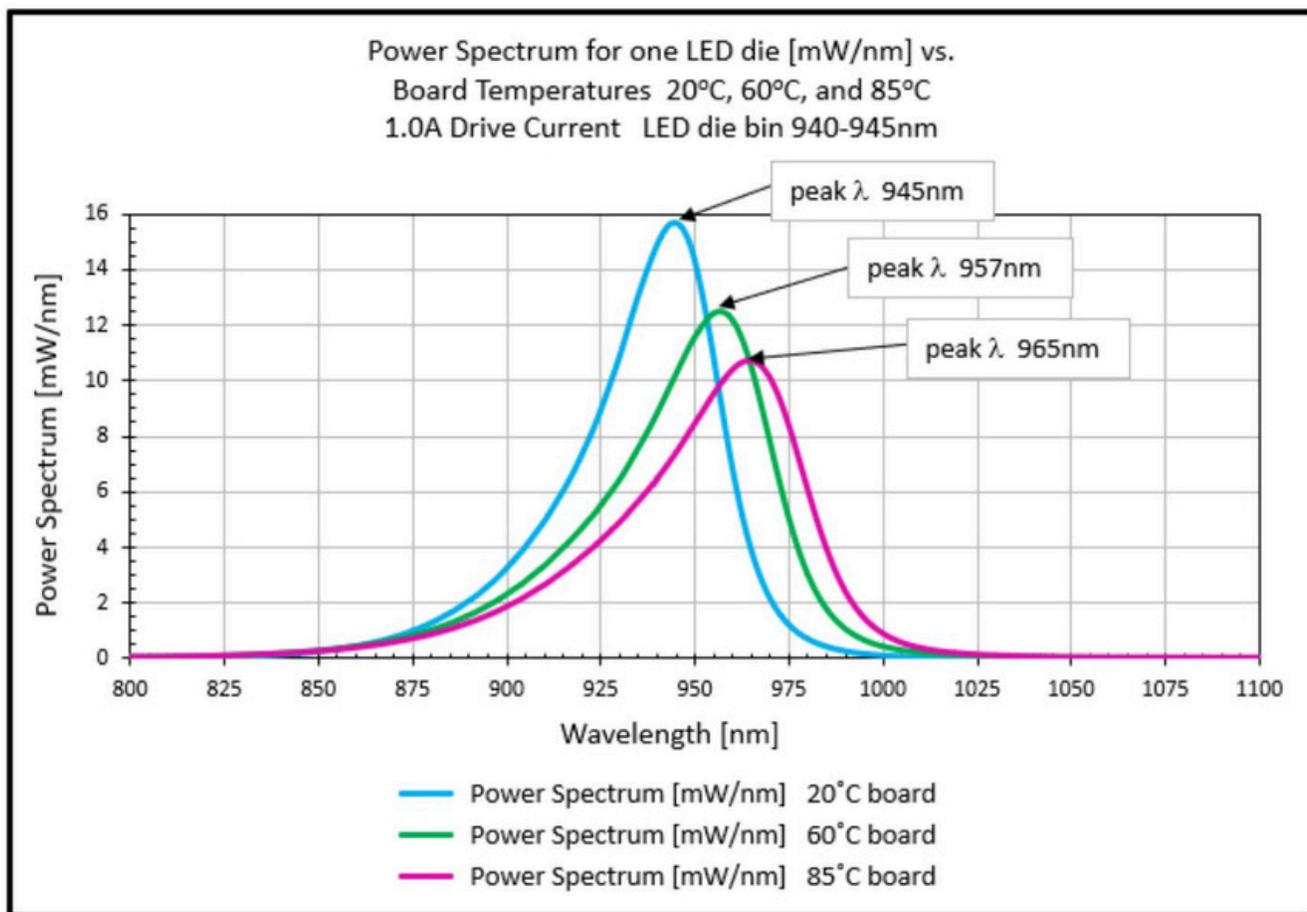


Figure 3: Peak wavelength shifts longer with increase in board temperature for this 940nm LED die. This illustrates the need for good thermal management to achieve spectral stability.

不十分な冷却によるスペクトルシフトに加えて、LEDダイの波長に応じて、より高い駆動電流の下でLED波長が長くまたは短くシフトします。図4は、20°Cの安定した基板温度での0.05A、0.50A、および1.00Aの駆動電流下での1つのUV LEDダイ（短波長）と1つのNIR LEDダイ（長波長）の変化を示しています。

## LED ソーラーシミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

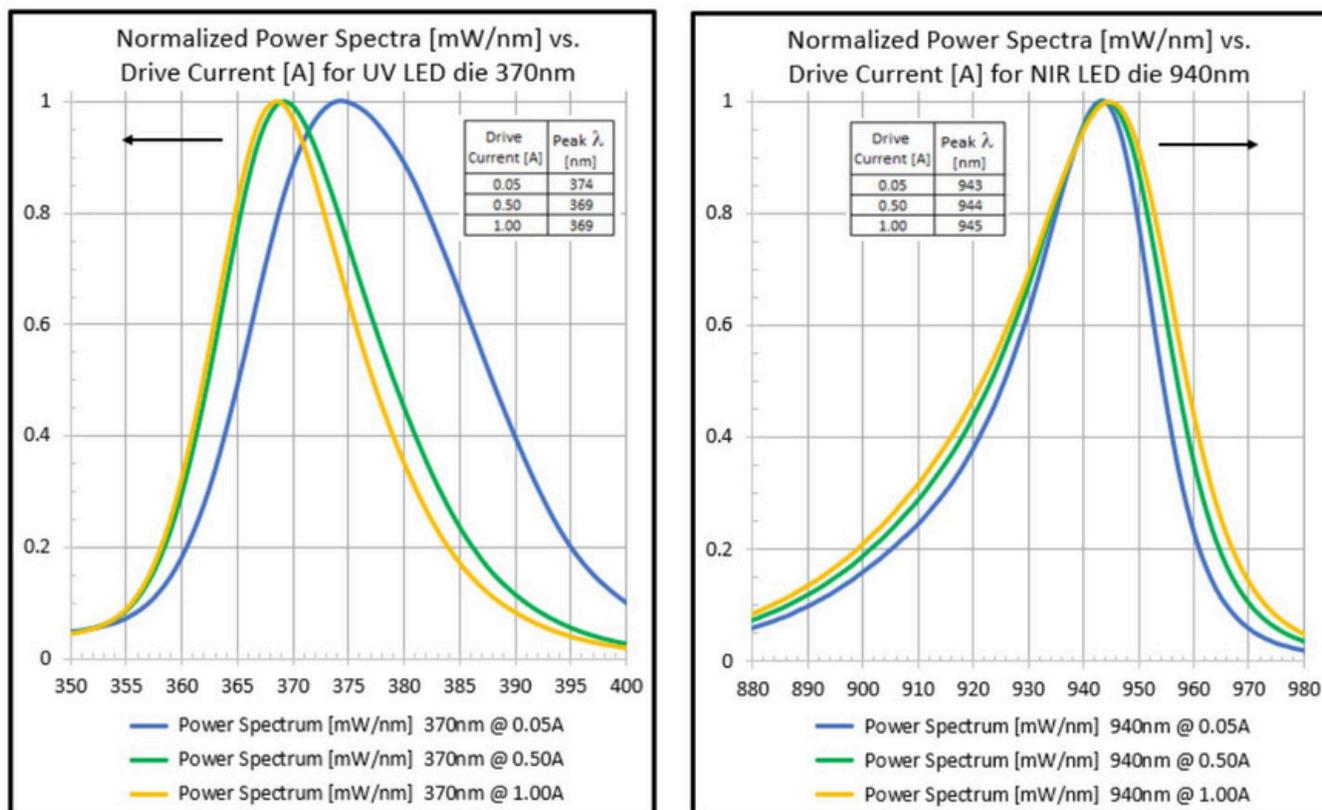


Figure 4: Spectral shift as a function of drive current for UV LED die and NIR LED die. Higher drive currents cause a shift to shorter peak wavelength for the UV and a shift to longer peak wavelength for NIR.

重要なのは、設置面積を小さくし、操作を容易にし、低コストで効率的に冷却することです。ソーラーシミュレーターは使  
いやしく、メンテナンスも簡単である必要があります。基板を設計し、LEDダイを実装する必要があります。最適に熱を素早  
く伝導します。さらに、製造プロセスには多くの手順と品質管理が含まれます。光出力の品質と大量生産のための製造能力が  
重要であるため、LEDダイの位置は十分に分析されたプロセスです。複雑な自動ダイボンダープログラム、特にソーラーシ  
ミュレーターなどの多波長光エンジン向けは、IOIに特有のLEDダイアレイの複雑さをサポートします。

LEDダイとワイヤボンディングの最適化に加えて、光パワー出力、安定したスペクトル、LEDダイの寿命を最適化するた  
めの熱に関する考慮事項も必要になります。熱管理の専門知識により、LumiSun-50™のように多数のLEDダイを使用できる  
ようになります。

これにより、スペクトルの一致と均一性が向上するだけでなく、LumiSun-50™の1.2Sunなどの高い光出力を維持しなが  
ら、各LEDダイの定格電流以下での動作が可能になり、長寿命が促進されます。

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

熱分析は、LEDダイのジャンクション温度を低く保つために必要な冷却システムの種類を決定する上で重要です。SolidWorks FLOWなどのソフトウェアは、数値流体力学 (CFD) を使用して、複雑なシステムの熱性能をモデル化、最適化、予測します。IOIの場合と同様に、LumiSun-50™のこの分析は、構成成分と材料特性の正確なモデリングにより信頼性が高くなります。図5は、熱電冷却器 (TEC)、高効率ヒートシンク、強制対流、周囲温度変化を組み込んだ IOI による熱解析の例です。

さらに、ドライバーボードとシステムの電気設計と同様に、エンクロージャーの正確なモデリングと機械設計も重要です。したがって、IOIはすべての光学、機械、熱、電気的设计と分析を社内で行い、一貫した高品質のシステムを保証します。

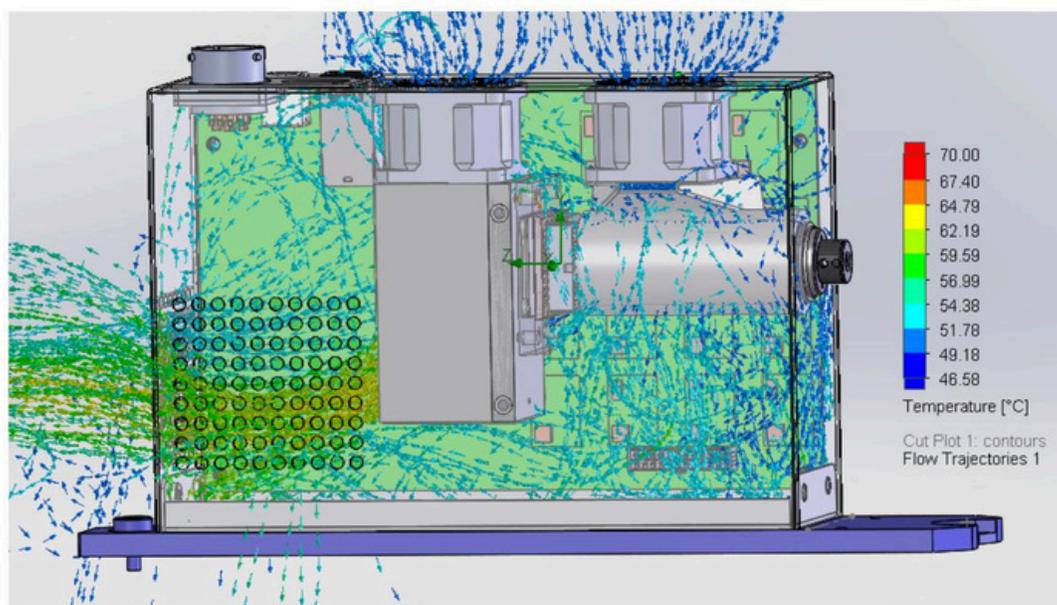


図5 : 専門家が日常的に使用する SolidWorks FLOW を使用した複雑な熱解析のIOIで安定した温度とLED照明器の長寿命を保証します。

熱管理には、IOIがUVLED DMD イルミネーターに頻繁に使用する液体熱交換器も含まれます。ただし、LumiSun-50™の場合、IOIはTEC温度制御を統合し、スペクトル強度安定性の優れた性能と20,000時間 (L70)の予測寿命を保証します。

具体的には、TECは温度を安定させて、CdTe と Si の両方のバンド エッジ、および開発中の他の材料システムのバンド エッジ 付近のスペクトルシフトを防ぐことができます。

#### 4.高い均一性の実現

空間均一性は、サンプル全体にわたって一貫したテストを可能にするため、ソーラーシミュレータにとって重要なパラメータです。IECは、それを不均一性の観点から定義しており、LumiSun-50™などのクラスA+シミュレータのように1%未満の低い値が優れていることを表します。ソーラーシミュレータの照明野のサイズはさまざまで、50 x 50mm未満から100 x 100mm または 300 x 300mm 以上の大きな領域のものもあります。

用途やサイズに関係なく、デバイスがどの領域で不均一性を満たすのか、またそれに関連する太陽の数 (1 Sun = 1000W/m<sup>2</sup>) を認識することが重要です。一部のシミュレータには大きな領域の出力がありますが、不均一性が低いのはその領域のサブセットのみです。

さらに、特に小さなサンプルまたは大きなサンプル内のサブセットをテストする場合、もう1つの重要な考慮事項は、均一性をどのように定義するかに関連しています。ほとんどのソーラーシミュレータは非常に小さなサンプルに対して精度の問題を抱えていますが、LumiSun-50™には問題がありません。IEC 文書 60904-9 第 3.0 版 2020-09 セクション 3.9 では、放射照度の空間的不均一性を次のように定義しています。

$$\text{Non-uniformity (\%)} = \left( \frac{\text{max. irradiance} - \text{min. irradiance}}{\text{max. irradiance} + \text{min. irradiance}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

セクション 5.3.2.3 で指定された検出器サイズは、テスト領域の最小寸法の 1/5 以下です。したがって、5x5 グリッドには 25 個の検出器領域があります。所定の単位領域内の照明は均一性が低下する可能性があります。これは、テストサンプルサイズが規定の総面積よりも小さい場合、均一性が不確実であり、仕様の範囲内に収まらない可能性が高いことを意味します。たとえば、定義された照明領域の合計より小さい太陽電池をテストする場合、局所的な変動は平均化されません。ユーザーは不均一性のレベルに関して誤解を招き、データが不均一になる可能性があります。

LumiSun-50™にはこの問題がなく、最小の太陽電池や材料サンプルに対して優れた性能を発揮します。

優れた均一性を得るには、光学設計、熱管理、LEDダイ技術、電気設計と制御、機械設計、および材料科学に関する広範な知識が必要です。ソーラーシミュレータの主なコンポーネントは照明源であり、複数の波長に対して光学設計は複雑になる可能性があります。IOI は、イルミネーターのLEDダイの数を最大化し、均一性を最適化するためにLED基板上のLEDダイの位置を決定します。

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

LumiSun-50™およびOEMバージョンの76 LED ダイのような多数のLEDダイは、太陽電池テスト (1100nm ~ 1.1eV = シコンのバンドギャップ) に重要な CdTeおよびSiバンドエッジ付近の構造を最小限に抑えるために選択されています。LEDは1250nmを 超えて存在しており、スペクトルのIR 拡張が役立つ可能性があります。システムのエテンドュ、光学系のサイズとオーバーフィル領域の許容差、光の均一化、焦点深度が考慮されます。図6は、均一性に対する最小の影響と、LumiSun-50™の焦点深度は、安定性と位置合わせの容易さのために設計されています。予想どおり、公称値からの距離が増加するにつれて強度は減少し、固定グリッドの場合、距離が近くなると画像サイズが小さくなり、不均一性が増加します。公称照明面から +/- 10mm の距離の範囲にわたって、不均一性の変化は5% 未満、強度の変化は10% 未満であり、すべて A+ クラス内にあります。

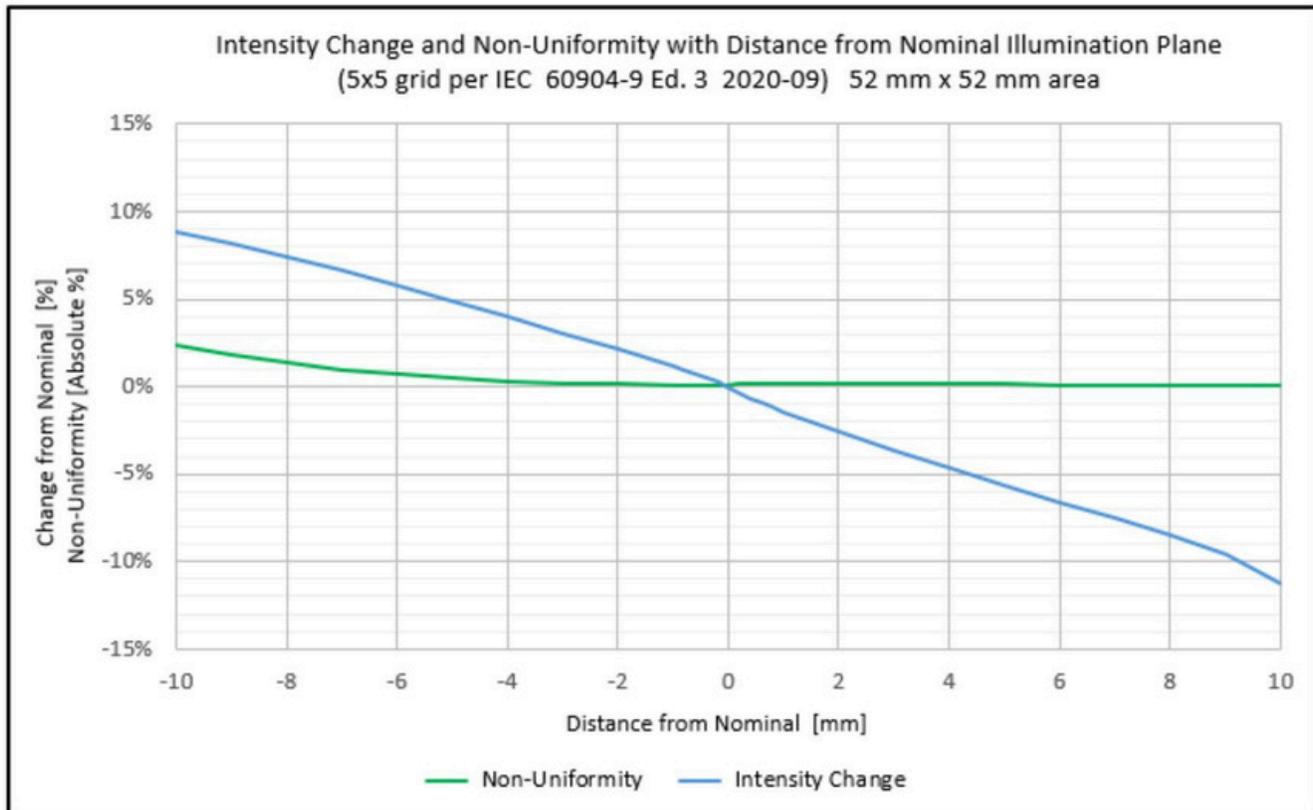


図6: 公称画像面からの距離に応じた均一性の最小限の劣化を示します  
これにより、アライメント公差が緩和され、測定精度が向上します。

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

300~1250nmなどの広範囲の波長にわたる多波長光源の場合、時間の経過とともにUV からIR まで劣化しないように、適切な材料とコーティングを使用する必要があります。さらに、LEDダイの特性をよく知っておく必要があります、LEDダイの故障は均一性やスペクトル偏差に影響を与える可能性があるため、LEDダイの寿命テストを行う必要があります。たとえば、順方向電圧定格が高いLEDダイは、一般的により多くの熱を発生します。したがって、必要な出力電力と均一性を得るには、その波長で複数のLEDダイを使用する必要がある可能性がある、より低い電流でそれらを動作させることが重要です。

IOIのLumiSun-50™は、すべての波長でクラス A+ より優れた不均一性を示すだけでなく、個々の波長でもクラス A+ (<1%) です。これにより、サンプル全体にわたってすべての波長が均一に照射され、より正確な測定が可能になるため、他のソーラーシミュレーターとは異なります。図7は、50x50mmの照明フィールド全体にわたって測定された不均一性 (0.76%) を示しています。

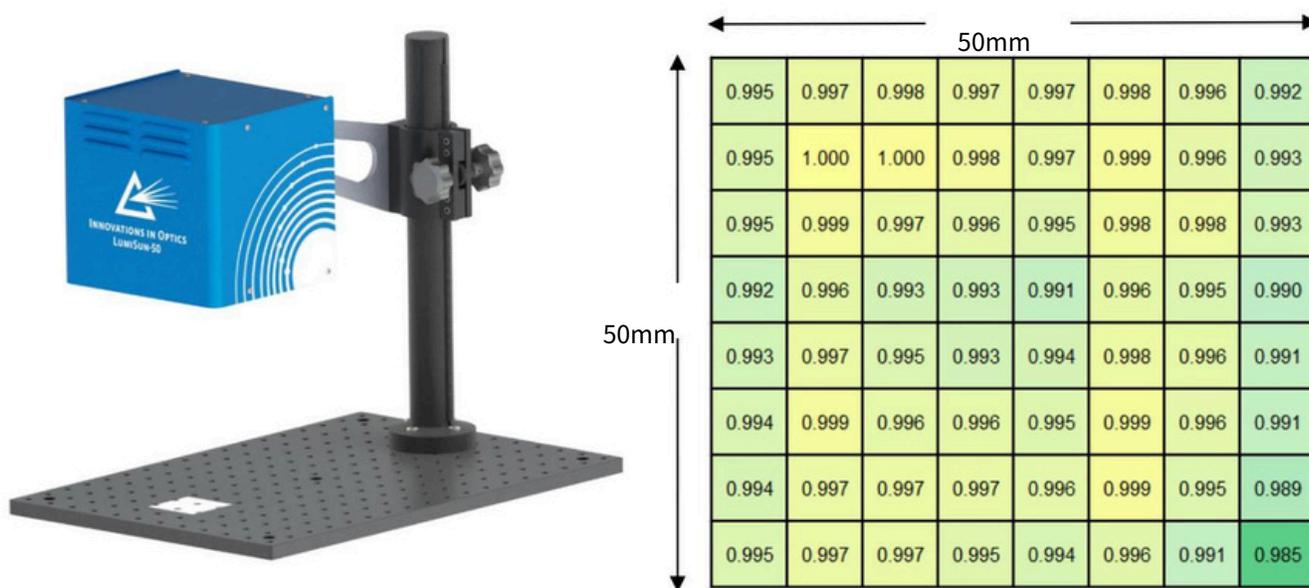


図7: LumiSun-50™ はクラス A+ よりも優れたパフォーマンスを示し、測定された不均一性はすべての波長で 0.76% (各波長で個別に <1%) でした。

## 5. ソーラーシミュレーターの応用

「太陽光」への曝露を必要とし、屋内でのテストや高速な方法でのテストを必要とするアプリケーションは数多くあります。ソーラーシミュレータは太陽電池（両面構造やペロブスカイトなど）の認定と研究、日焼け止めやプラスチックなどの材料試験、光に敏感な生物、化学物質、生物学的現象の研究によく使用されます。図8は、スペクトルの安定性、精度、再現性に依存するソーラーシミュレータの使用法を簡単に視覚的に示しています。

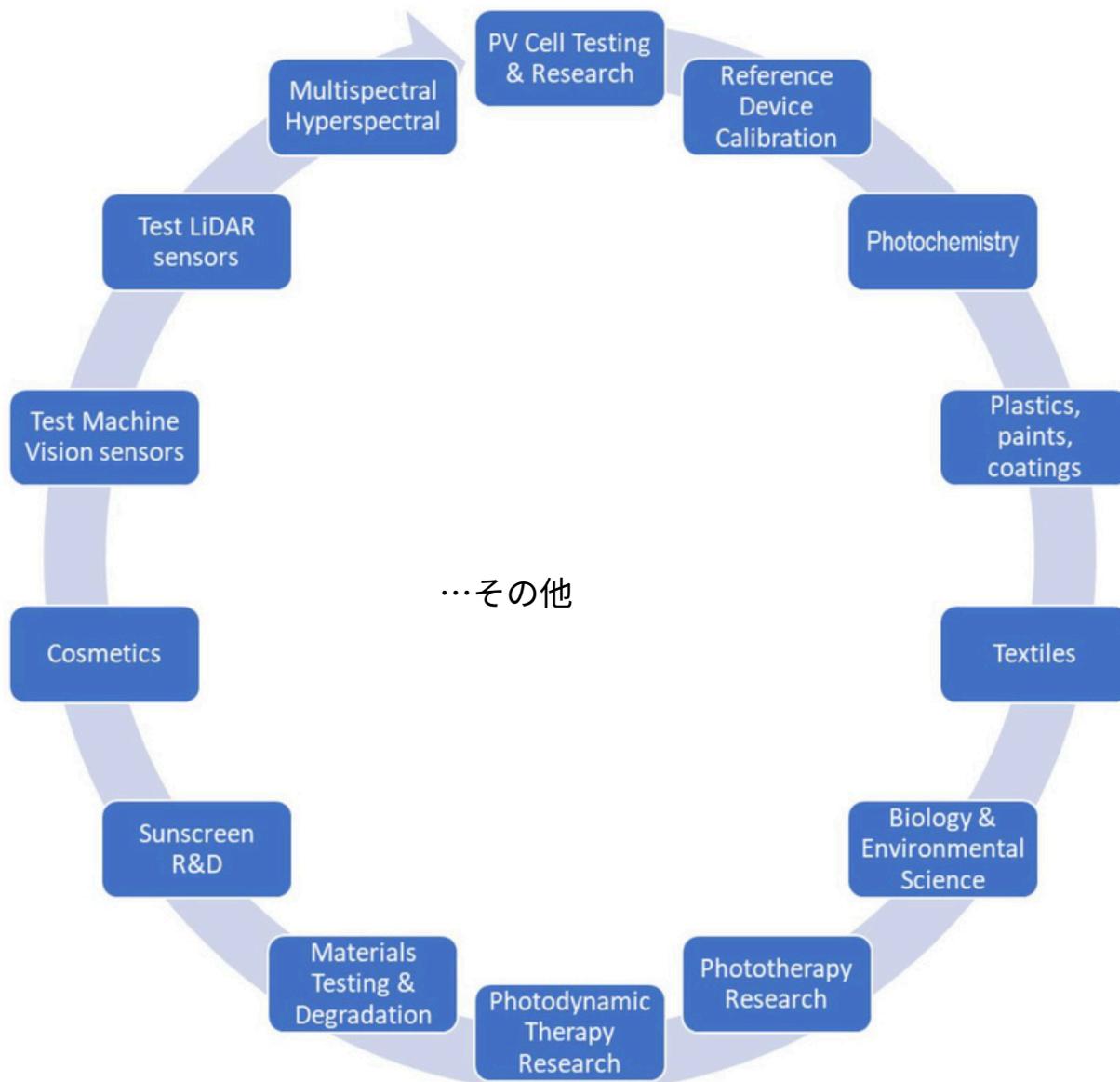


図 8: LED ソーラーシミュレーターアプリケーション。

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

### 結論

LEDソーラーシミュレータは、アークランプバージョンより効率的で低コストの代替品を提供します。LEDソーラーシミュレータは、あらゆる工学分野間の相乗効果を必要とする複雑なデバイスですが、急速にランプに取って代わりつつあります。エンドユーザーは、スペクトルの柔軟性、操作の容易さ、シンプルな冷却方式、および競争力のある価格で長い動作寿命を提供するデバイスを探する必要があります。UVからIRまでのLEDダイの急速な開発と、専門的な光学設計、熱管理、および電気制御の組み合わせにより、最小限のスペクトル偏差で A+A+ のパフォーマンスが可能になります。たとえば、Innovations in Optics, Inc. [ IOI ] の LumiSun-50™ は、キセノン アークランプで必要な 300W 以上と比較して、50 x 50mm の照明野で 1 Sun の放射照度を生成するのに消費する電力は 75 ワット未満です。その熱電温度安定化により、優れたスペクトル強度安定性が実現され、クラス A+ の時間的不安定性を超えています。LumiSun-50™ は、不均一性が 1% 未満で 1.2 Sun を出力できるため、劣化テストの迅速化に役立ち、研究者にとって正確で再現性のある結果が得られます。

さらに、IOIの特許取得済みおよび特許出願中の技術は、大面積のソーラーシミュレーターやソーラーソーカーに簡単に拡張できます。

世界の将来は、太陽光発電や無害技術などのクリーンエネルギーにかかっています。LEDソーラーシミュレーターは、この責任ある道を切り開くのに役立ちます。



付録A: LED ソーラーシミュレータの利点

低コスト	各LEDを個別に 制御可能	希望のスペクトル に調整可能
A+A+A+ 準拠	均一な 照射エリア	安定した 出力
電子冷却で 冷却	20,000時間 長寿命	安価な ランニングコスト
35波長 76個のLED	フィルター 不使用	高い 信頼性
高い エネルギー効率的	爆発的な電球の 故障がない	シャッターがなく 光学部品が少ない
レーザーを使った 焦点調整	ウォームアップ/ クーダウン 不要	パルス駆動/ CW で動作
環境に優しい (水銀、オゾンを排出しない)	高速制御	コンパクトで 場所を取らない

## LED ソーラー シミュレーターの新しい最先端 長寿命かつ低スペクトル偏差

### 注記/参考文献

1 I E A (国際エネルギー機関) による世界エネルギー見通し2023  
国際エネルギー見通し 2 023 D O E/EIA 米 国エネルギー情報局

2 G . L eary, G. S witzer, G. K untz, および T . K aiser, 「キセノン ラ ンプベースと L E D ベ ースのソーラ  
ー シ ミュレーターの比較」、IEEE 太 陽光発電スペシャリスト会議で発表、2016 年、16 ページ。 3062~3067。

3 I E C 6 0904-9 第 3 .0 版 2 020-09 太 陽光発電デバイス - パート 9 : ソーラーシミュレーターの分類  
特徴。9 ~12ページ

4 I E C 6 0904-9 第 3 .0 版 2 020-09 太 陽光発電デバイス - パート 9 : ソーラーシミュレーターの分類  
特徴。11~13ページ

5 I E C 6 0904-9 E dition 3 .0 2 020-09 太 陽光発電デバイス - パート 9 : ソーラーシ ミュレータ特性の分類。セクション 3 .10、ページ  
10-11。時間的不安定性の式は、 $(\text{最大}I - \text{最小}I)/(\text{最大}I + \text{最小}I)$  です。

6 I E C 6 0904-9 第 3 .0 版 2 020-09 太 陽光発電デバイス - パート 9 : ソーラーシミュレーターの分類  
特徴。セクション 3.9、ページ10、17 テスト面内の放射照度の空間的不均一性。