



赤外線サーモグラフィ： ソーラーパネルを迅速・確実にテストできるツール

品質保証は、ソーラーパネルにとって極めて重要です。効率的な発電、長寿命、そして高い投資収益率を実現するためには、パネルが故障せずに動作することが前提条件となります。このような動作を保証するには、生産プロセスの最中だけでなくパネルの設置後にも、ソーラーパネルのパフォーマンスを迅速・簡単・確実に評価できる必要があります。

赤外線サーモグラフィを使ってソーラーパネルを評価する場合、いくつかのメリットがあります。赤外線サーモグラフィでは、鮮やかな赤外線画像で異常をクリアに確認できるだけでなく、他のほとんどの手法と異なり、設置済みで通常運転中のソーラーパネルをスキャンできます。また、赤外線サーモグラフィは、大きな面積を短時間でスキャンすることができます。

研究開発 (R&D) の分野では、赤外線サーモグラフィは既に太陽電池やソーラーパネルを評価するためのツールとして確立されています。このような高度な測定では、通常、管理された実験室条件下で、冷却検出器を搭載した高性能カメラが使われています。

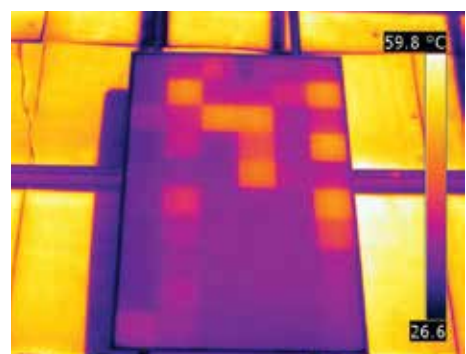
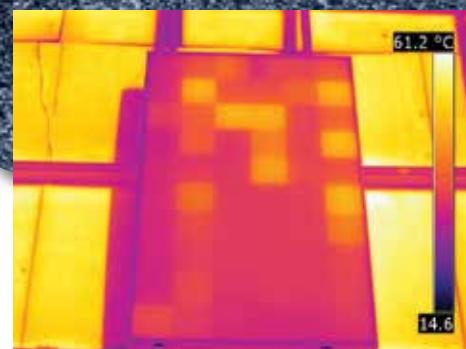
しかし、ソーラーパネルを評価するために赤外線サーモグラフィが使用されているのは、研究分野だけではありません。現在では、ソーラーパネルの設置前の品質管理、およびパネル設置後の定期的な予知保全検査の際に、非冷却赤外線サーモグラフィが使われるケースが増えていきます。これらの手頃なカメラはハンディタイプで軽量なため、現場でとても柔軟に使うことができます。

赤外線サーモグラフィを使用すれば、実際の問題や障害が起きる前に、潜在的な

問題領域を検知し、修理することができます。しかし、すべての赤外線サーモグラフィが太陽電池の検査に向いているわけではありませんので、効率的な検査を実施し、適切な結論を導き出すためには、一定のルールやガイドラインに従う必要があります。このテクニカルノートでは、太陽電池モジュール (結晶太陽電池) を例として取り上げています。しかし、基本的なサーモグラフィのコンセプトは同じであるため、関連するルールやガイドラインは薄膜モジュールの赤外線検査にも適用できます。

赤外線サーモグラフィを使った ソーラーパネルの検査手順

開発・生産プロセスでは、太陽電池に電気を流すかフラッシュランプを用いて性能を確認します。これにより十分な熱コントラストが得られ、正確な赤外線測定が可能になります。しかし、この方法は、



自動モード (上) と手動モード (下) のレベル/スパン

現場のソーラーパネルをテストする際には使えないため、オペレーターは、太陽からの十分なエネルギー入力があることを確認する必要があります。

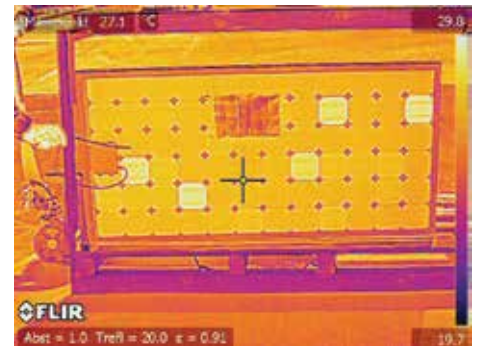
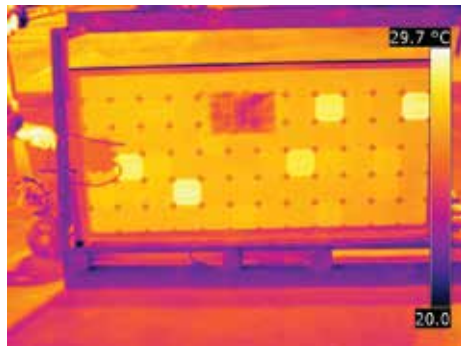
現場では太陽電池を検査する際に十分な熱コントラストを得るためには $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上の太陽放射照度が必要です。最大の結果を得るためには、 $700\text{W}/\text{m}^2$ の太陽放射照度が推奨されます。太陽放射照度は、表面上の瞬時入射電力を kW/m^2 の単位で表し、これは全天日射計 (全天日射) または直達日射計 (直接日射) を使って測定できます。結果は場所と現地の天候によって大きく変わります。また外気温が低いと、熱コントラストが増大します。



どんな種類のカメラが必要か？

一般に、予知保全検査用のハンディタイプ赤外線サーモグラフィには、8-14 μm の波長帯を検知できる非冷却マイクロボロメーター検出器が搭載されています。しかし、この波長帯ではガラスは透明ではありません。赤外線サーモグラフィを使って太陽電池を前面から検査すると、ガラス表面の熱分布は間接的にしか知ることができません。そのため、ソーラーパネルのガラス表面上で測定・観察できる温度差は小さいということになります。これらの温度差が見えるようになるためには、検査に使用する赤外線サーモグラフィの温度感度が $\leq 0.08\text{K}$ 以下でなければなりません。赤外線画像内のわずかな温度差を明確に視覚化するには、カメラでレベルとスパンを手動調整できる必要もあります。

太陽電池モジュールは、一般に、反射率が高いアルミフレームに取付けられています。この部分は、空からの熱放射を反射するので、赤外線画像内では冷たい領域として表示されます。つまり、実際の赤外線サーモグラフィの記録では、フレームの温度が 0°C をはるかに下回ることもあります。測定気温の最高・最低値には赤外線サーモグラフィのヒストグラム機能が適用されるため、ほとんどの場合、わずかな温度異常は直ちに確認することができません。高コントラストな赤外線画像を得るためには、レベルとスパンを連続的に手動補正する必要があります。



コントラスト補正 (DDE) なし (左) とあり (右) の赤外線画像。

いわゆるコントラスト補正 (DDE) 機能が、これに対するソリューションとなります。コントラスト補正は、ハイダイナミックレンジの画像コントラストを自動的に最適化するので、赤外線画像を手動で調整する必要がなくなります。そのため、コントラスト補正に対応している赤外線サーモグラフィは、ソーラーパネルの検査を迅速かつ正確に行なうのに適しています。

便利な機能

赤外線サーモグラフィで役に立つもう一つの機能は、GPS (位置情報) データを使った赤外線画像のタグ付けです。これにより、例えばソーラーファームなどの大規模な敷地内で、欠陥のあるモジュールを簡単に特定できます。またレポートなどのために、赤外線画像と設備機器の関連付けも容易に行なえます。

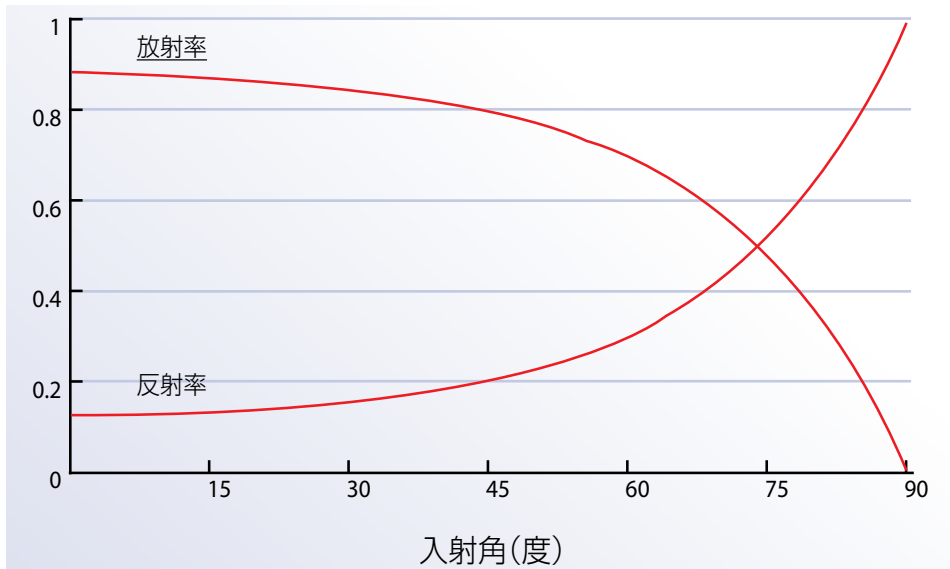
赤外線画像と関連する可視画像 (デジタル写真) を一緒に保存できるようにするため、赤外線サーモグラフィにはデジタル

カメラも内蔵されている必要があります。フュージョンという便利な機能では、赤外線画像と可視画像を重ね合わせることができます。また、赤外線画像と一緒に音声とテキストのコメントをカメラに保存できる機能は、レポート作成時に役立ちます。

反射と放射率を考慮したカメラの位置取り

8-14 μm の波長帯ではガラスの放射率は0.85-0.90ですが、ガラス表面上での温度測定は容易ではありません。ガラスは鏡面反射するため、周囲にある様々な温度の物体も赤外線画像にはっきりと映し込みます。最悪の場合、これは解釈ミス (偽の「ホットスポット」) や測定エラーにつながります。

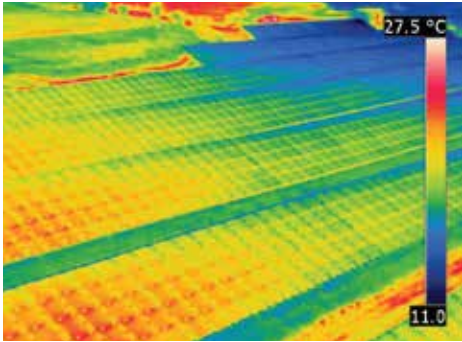
赤外線サーモグラフィのオペレーターがガラスに反射するのを避けるため、検査対象のモジュールとカメラを直角の位置関係にしてはいけません。カメラが直角の位置にある時に放射率は最大となり、角度が大きくなると減少します。視野角5-60°が良い妥協点となるでしょう (直角は0°)。



ガラスの放射率の角度依存性



赤外線画像の際に推奨される視野角 (緑) と推奨されない視野角 (赤)。

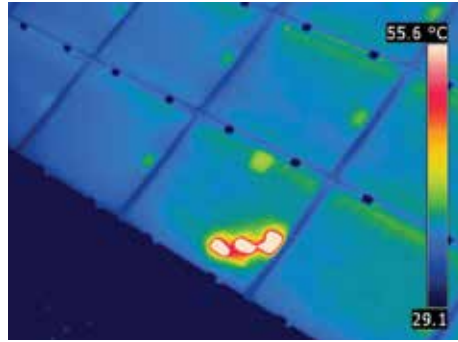


誤った結論を出さないようにするため、ソーラーパネルを検査する際は、赤外線サーモグラフィを適切な角度で持つ必要があります。

遠くからの観察

実際の測定時には、適切な視野角が簡単に得られるとは限りません。ほとんどの場合、三脚を使用すれば、視野角の問題は解決できます。しかし、困難な状況下では、可動式の作業構台を作ったり、場合によっては上空をヘリコプターで飛んだりしなければならぬこともあります。このように遠くからターゲットを見られることにはメリットがあります。大きな面積を一目で見られるからです。遠距離から撮影する場合は、赤外線画像の質を確保するため、角度が少なくとも320 x 240ピクセル、できれば640 x 480ピクセルの赤外線サーモグラフィを使うことが推奨されます。

また赤外線サーモグラフィのレンズは交換可能であることが望ましいと言えます。ヘリコプターなどの遠距離から観察する場合は、オペレーターがレンズを望遠レンズに交換します。しかし、望遠レンズを使用することが推奨されるのは、高解像度の赤外線サーモグラフィのみです。低解像度の赤外線サーモグラフィでは、望遠レンズを使ってもソーラーパネ



ソーラーファームの上を飛び、FLIR P660を使って撮影した赤外線画像。(画像提供: Evi Müllers, IMM)

ルの障害を示すわずかな温度異常を遠距離からの測定でとらえることはできないでしょう。

異なる視点から見る

ほとんどの場合、赤外線サーモグラフィを使って、設置済みの太陽電池モジュールの裏面も検査することができます。この方法では、太陽や雲からの反射による干渉を最小化できます。さらに、ガラス表面を通してではなく、電池を直接測定するため、裏面で測定する温度の方が高くなる傾向があります。

大気・測定条件

赤外線検査を行なう場合は、雲があると太陽放射照度が低下し、反射による干渉も生じるため、晴天であることが望ましいと言えます。しかし、曇天でも、使用する赤外線カメラが十分な感度さえ備えていれば、有用な画像を得られることができます。ソーラーモジュールの表面上に気流が生じていると、対流冷却がおき、温度勾配が減るため、無風の方が良いです。

気温が低いほど、潜在的な熱コントラストは増大します。そのため、早期に赤外線検査を行なうのも良いかもしれません。

熱コントラストを高めるもうひとつの方法は、電池の負荷をなくして電流の流れを防ぎ、太陽放射照度のみによって加熱させることです。その後、負荷をかけ、加熱段階の電池を観察します。

しかし、通常は、標準的な稼働条件下、つまり負荷のかかっている状態で、システムを検査すべきです。電池や障害・故障の種類に応じ、負荷のない状態や短絡状態で測定すれば、負荷的な情報が得られる場合もあります。

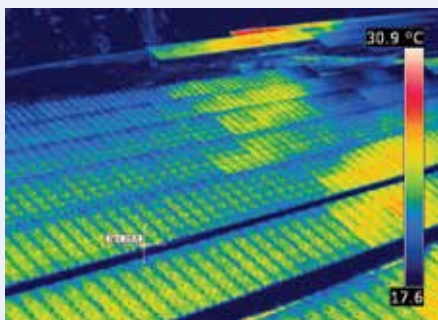
測定エラー

測定エラーは主に、カメラの位置取りや大気・測定条件が悪い場合に起こります。一般に、測定エラーには以下のような原因があります:

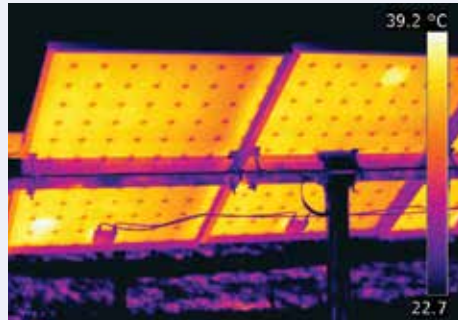
- 視野が浅すぎる
- 時間の経過に伴う太陽放射照度の変化(例えば天気の変化など)
- 反射(例えば太陽、雲、周囲の高い建物、測定環境など)
- 部分的な影(例えば周囲の建物、その他構造物など)

赤外線画像で見えるもの

ソーラーパネルのある部分が他よりも熱い場合、その領域は赤外線画像でははっきり示されます。これらのホットスポットやホットエリアは、その形状や場所から、様々な欠陥の存在を教えてください。モジュール全体が通常よりも熱い場合は、相互接続に問題があることが考えられます。個別の電池や一連の電池がホットスポットまたは熱を持った「バッチワークパ

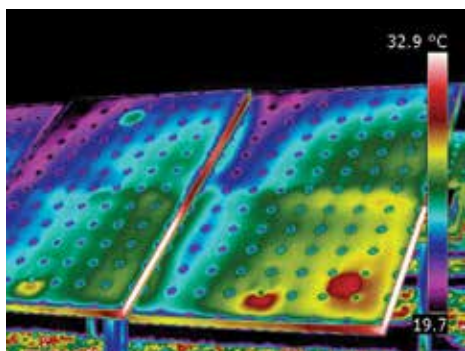


この赤外線画像の大部分のパネルは、高温になっています。より詳しい情報がなければ、これらが温度異常であるか、影や反射によるものであるか判断することができません。

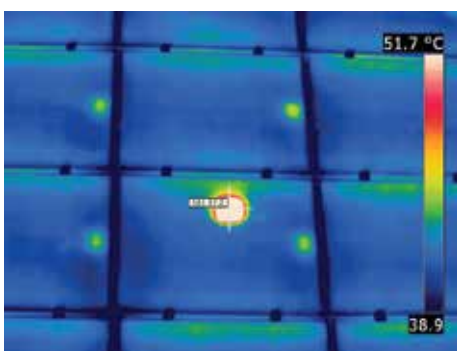


赤外線サーモグラフィFLIR P660で撮影されたソーラーモジュール裏面の赤外線画像。右は対応する可視光画像。

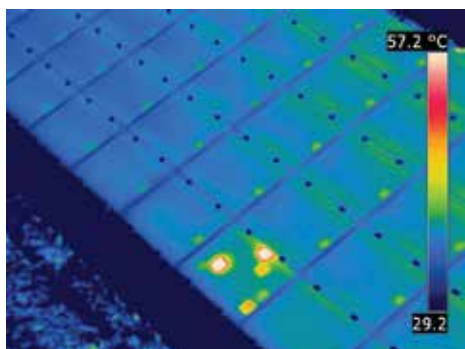




これらの赤い点は、この部分のモジュールが他よりも常に熱く、接続に問題があることを示しています。



この太陽電池内のホットスポットは、電池が物理的に撮影していることを示しています。



この赤外線画像は、いわゆる「パッチワークパターン」の例を示しており、このパネルのバイパスダイオードに欠陥があることを意味しています。

ターン」として浮かび上がっている場合は、バイパスダイオードの欠陥、内部の短絡、電池の不整合などの原因が考えられます。

電池には、影や亀裂ができると、赤外線画像上ではホットスポットや多角形のパッチとして表示されます。電池の全部または一部に温度上昇が見られた場合は、電池に欠陥や影があることを意味します。負荷のかかっている状態、かかっていない状態、そして短絡状態の赤外線画像を比較する必要があります。モジュールの表面と裏面の赤外線画像を比較すると、貴重な情報が得られる場合があります。もちろん、問題を正確に特定するには、異常がみられるモジュールを電気的にテストし、目視検査する必要があります。

結論

太陽電池システムの赤外線検査を行うことで、潜在的な欠陥を電池・モジュールレベルで迅速に特定し、電気的な相互接続の問題を検知することができます。検査は通常の稼働条件下で実施し、システムのシャットダウンは不要です。

適切で有用な赤外線画像を得るためには、以下のような一定の条件や測定手順に従う必要があります。

- 適切な赤外線サーモグラフィと適切なアクセサリを使用する
- 十分な太陽放射照度が必要
(少なくとも500W/m²~700W/m²以上を推奨)
- 視野角は安全な範囲内に設定する
(5~60°の間)
- 影や形成や反射を避ける

赤外線サーモグラフィは、主に欠陥を見つめるために使用します。検知された異常を分類し、評価するにはソーラー技術に関する深い理解、検査対象システムに関する知識、そして追加的な電気測定が必要です。もちろん、適切な記録の作成が必要で、あらゆる検査条件、追加的な測定の内容、その他関連の情報を記載する必要があります。

赤外線サーモグラフィを使った検査—設置段階の品質管理から定期検査まで—により、システムの状態監視を強化しつつ、ソーラーパネルの機能を維持し、寿命を延ばします。そのため、ソーラーパネルの検査に赤外線サーモグラフィを使用すれば、運営会社の投資収益率を改善することができます。

エラーの種類	例	赤外線画像上での表示
製造上の欠陥	不純物、プロホール	「ホットスポット」 または 「コールドスポット」
	電池の亀裂	電池の加熱、形状の伸長
損傷	亀裂	電池の加熱、形状の伸長
	電池の亀裂	電池の一部が熱をもつ
一時的な影の形成	汚染	ホットスポット
	鳥の糞	
	湿気	
バイパスダイオードの欠陥（短絡の原因、回路保護が不十分）	なし	「パッチワークパターン」
相互接続障害	モジュール または 一連のモジュールの不接続	モジュール または 一連のモジュールが常に熱い

表1：一般的なモジュールエラーのリスト（出展：ZAE Bayern e.V著、「Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen」 「赤外線カメラを使った太陽電池モジュールの品質テスト」、 年）

赤外線カメラに関する詳細については、弊社までお気軽にお問い合わせください。:

フリアーシステムズジャパン株式会社
〒141-0021
東京都品川区上大崎2-13-17
目黒東急ビル5F
☎ : 03-6721-6648
Fax : 03-6721-7946
e-mail : info@flir.jp
www.flir.com