

超高出力レーザーパワー計測器のブレークスルー ～その優れた熱設計と新技術～

レーザーポイント社 Flavio Ferretti、株式会社アストロン 大竹祐吉

1. 高輝度レーザーへの新たな挑戦

高出力レーザーは、レーザー切断や溶接などの様々な用途で、今や欠かせないツールとなっています。過去数十年間、高出力用として実際に利用されていたレーザーの大半はCO₂レーザーでしたが、'90以降は、ディスクレーザーやファイバーレーザーが急激に増えてきています。

従来のレーザーと比較して、最新のレーザーは、ビーム品質に優れているので非常に小さなスポットサイズに焦点を結べるうえに、数KWの高出力を得ることができます。これらのレーザーが急速に開発された背景の1つに優れたビーム品質があります。

レーザー光のビーム品質は、その特性指標であるビームパラメータ積（BPP：Beam Parameter Product）を用いますが、より一般的にはM²が用いられています。BPPは、ビームウェストでのビーム径（ ω ）とビーム拡がり角（ θ ）の積（ $BPP = \omega \theta$ [mm・mrad]）です。どれだけ小さなスポットサイズにビームを絞ることができるかを定量化する指標で、数値が小さいほどビーム品質のよいレーザーとされます。M²は、同じ波長での理想的なガウスビームのBPP₀（ $= \omega_0 \theta_0$ ）と実際のビームのBPP（ $= \omega \theta$ ）の比で、波長依存性はありません。

すなわち、

$$M^2 = BPP / BPP_0 = \omega \theta / \omega_0 \theta_0$$

より高いビーム品質（M²が1に限りなく近いまたは理想的なガウスビーム）は、より高密度（W/cm²）のスポットサイズにレーザーパワーを収束させることができ、レーザー加工に適していることを意味します。同時に、ビーム品質はレーザー加工の運用コストや処理速度、処理品質にも影響を与えます。

レーザーの出力とビーム品質の組み合わせを説明するために、単位面積と立体角あたりのパワーとして定義される『明るさ（放射輝度）』（Brightness：W/(m²*sr)）という概念があります。高輝度とは、「小さな立体角内のパワー密度が高い」ということです。ファイバーレーザーやディスクレーザーは、一般的に高輝度レーザーとして知られています。これらのレーザーによる動作には、レーザー光源側とプロセス側のそれぞれに、高出力および高パワー密度に特有の解決すべき課題があります。

おもな課題には、以下のものがあります；

①光学部品の再設計：

光学部品は、損傷しきい値が高く、熱レンズ変形が小さくなるように設計すること

②レーザ安全性への配慮：

特に短い波長（典型的には約 1070 nm）は人間の目にとってより危険であり、安全性には十分に配慮すること

③レーザシステムのダイナミクスを考慮したコントロール：

より高速のプロセススピードに対応するレーザシステムのダイナミクス（被制御対象の動的特性）を考慮した全体のシステムコントロール（加速度、軌跡の制御、など）とすること

④レーザパラメータの測定：

特にレーザパワーは、継続的にスケールアップしており（今日では 10kW レンジのレーザが一般的）、一貫性のあるプロセス制御を行うためには正確な測定が必要であること

2. 高出力および高輝度レーザ用の測定機器

次世代の高出力レーザ用熱型検出器（サーマルディテクター）は、産業用の数 kW/cm² を超えるパワー密度にも正確に動作する必要があります。この場合、熱除去や高耐性の材料の開発は、たいへん困難な課題です。

カロリメーターおよびサーモパイル（熱電堆）ベースのパワーメーターは、高出力レーザの測定に最も適した計測器と言えます。これらは、レーザ光を吸収した結果として発生する熱による温度上昇を測定するものです。温度上昇は、冷却液中（通常は水）の差動温度計によって、または特定の熱特性を持つマス（質量）に埋め込まれたサーモパイルを利用し、発生した電圧を測定することによって計測されます。いずれの場合も、計測器の出力信号は、吸収されたレーザパワーに相関しています。

高出力レーザ用の測定器には次のものがあります。

a) 連続フローのカロリメーター

この種の計測器では、レーザ光が吸収され、ヒートシンクに向かって連続的かつ定常的な熱流束が放出されます。熱流束は、吸収されたレーザ放射に相関し

ており、カロリーメーターへの給水温度とカロリーメーターからの排水温度の差（ ΔT ）を測定することによって得られます（図1参照）。

すなわち、レーザーパワーは次式に従って計測されます。

$$P = C_p * \phi * \Delta T / K_c$$

ここで、

P = レーザのパワー (J/s)

C_p = 流体の比熱 (J/kg $^{\circ}$ C)

ϕ = 質量流量 (kg/s)

ΔT = 温度差 ($^{\circ}$ C)

$K_c < 1$ = キャリブレーション係数（アブソーバーの歩留まりに密接に関連）

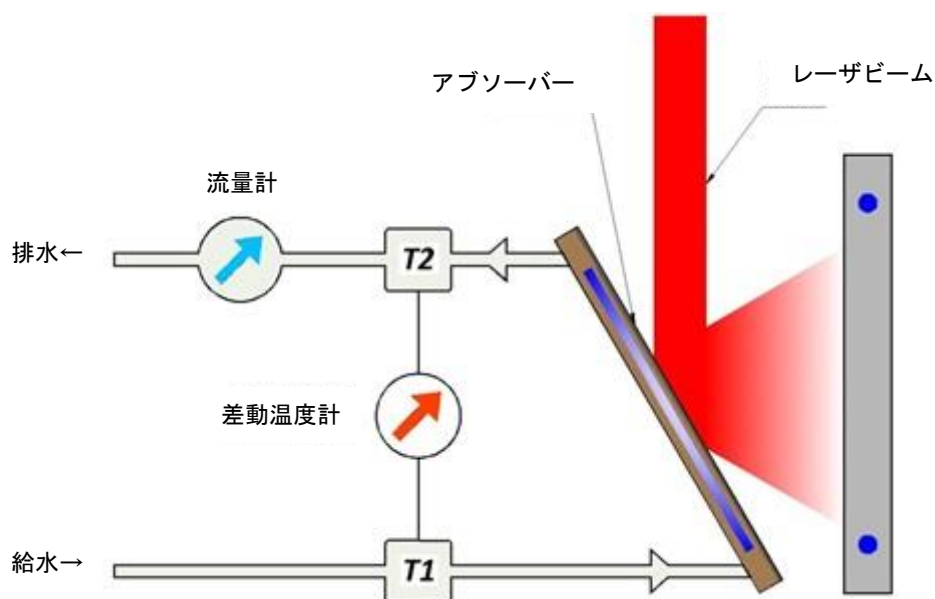


図1 連続フローカロリーメーターの概念図：

超高出力測定用（10kW以上）として、一般的に使用されています。

b) サーモパイルベースのパワーメーター

この計測器では、レーザー光は材料の層内に吸収されて熱に変換され、次いでゼーベック効果によってサーモパイルのアレイで電圧に変換されます。起電力は、レーザーが吸収されたホット領域と冷却ヒートシンク間の温度差に比例します。

レーザー吸収によって誘起される熱勾配は、レーザーパワーと相関しています。サーモパイルは、単純に高温と低温のすべての接合部間の合計電圧を提供します。

サーモパイルは、熱がどのように流れるかによって軸方向と放射状方向の2つのカテゴリに分けることができます。高出力測定用の放射状サーモパイルでは、レーザー光はセンサーディスクの中央部分に当たり吸収されます（図2参照）。

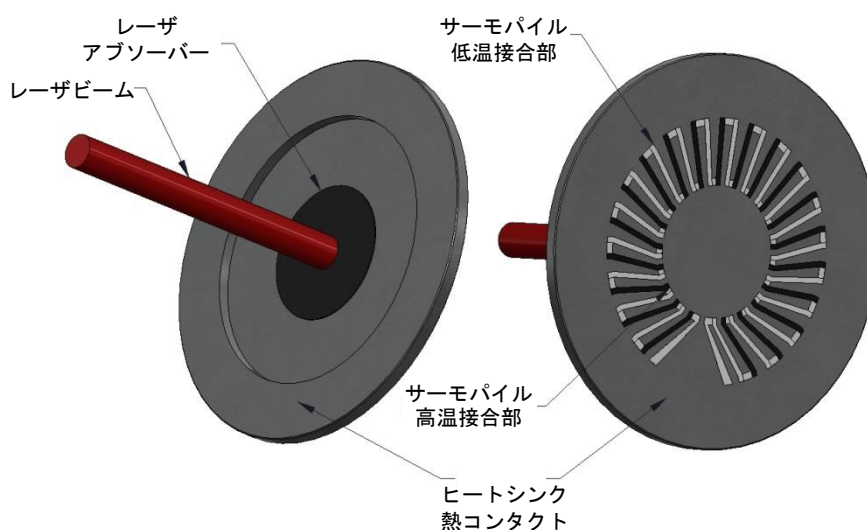


図2- 放射状サーモパイル: 高出力測定用として最も一般的に使用されています

3. スーパーハードアブソーバーと熱設計による性能強化

3-1. 全体の熱設計に依存する信頼性と耐久性

高輝度レーザー用の検出器は、全体の熱設計を劇的に改善して、ユニット自体の安定性や測定の信頼性、耐久性を大幅に向上させる必要があります。計測器に使用されるすべての材料および異なる材料間の遷移層に使用される材料は、熱設計を行ううえで、厳密に分析しなければなりません。

LaserPoint 社では、サーモパイルベースのレーザー計測器は、実質的に3つのサブシステムで構成されていると考えています。それらは、吸収体のコーティング、センサーディスク基板、およびヒートシンクの3つです。同じように、カロリメーターのサブシステムは、吸収体のコーティングと、流体自体または流体の持つ熱伝達特性の2つです。

これら2つのタイプの計測器は、システム全体を注意深く設計し、最適化しなければな

りません。特に、材料がどれほど速く温度変化に反応するかを表わす『熱拡散率』(Thermal Diffusivity) は、冷却過程を予測したり温度領域をシミュレーションして材料開発や熱設計を行う場合に、特に重要なパラメータの1つとなっています。

熱拡散率は以下の式で示されます。

$$\text{熱拡散率} = \text{熱伝導率} / (\text{密度} \times \text{比熱容量})$$

熱拡散率の最大化は、熱設計によって達成することができます。この熱設計では、熱容量が非常に小さくなるように、高い吸収係数を持つコーティング層自体の厚みを非常に薄くします。

熱検出器(水冷および空冷デバイスの両方)の大きな技術的な問題は、基板とヒートシンクの境界面で発生します。2種類の物資間での熱エネルギーの伝え易さは『熱伝達率』と呼ばれます。水流路または放熱フィンを特別な幾何学的形状にすることによって、この値を最大化することが可能です。

検出器の熱設計では、吸収コーティング、基板およびヒートシンクとして使用されるすべての材料に誘起される熱機械的応力および変形にぴったりと適合するように予測しなければなりません。例えば、ヒートシンクの熱排出能力が低下すると、アブソーバーの損傷しきい値も低下します。実際には、設計や最適化が不適切なヒートシンクは、ヒートシンク自体の定常動作温度を増加させ、結果として、熱平衡状態にあるアブソーバーの損傷しきい値を低下させてしまいます。

3-2. レーザアブソーバーに求められる厳しいニーズ

カロリメーターやサーモパイル検出器では、高耐性アブソーバーは、検出器の正しい動作に不可欠で、高性能や高信頼性に寄与する極めて重要な必須コンポーネントです。

カロリメーターの吸収コーティングは、熱交換器として使用される水冷素子にコーティングされるのに対し、サーモパイル検出器の吸収コーティングは、熱電対が取り付けられている同じ基板上に堆積されます。

レーザパワー測定用の新しいデバイスを設計する場合、アブソーバーとして選択した材料には、調査すべき厳格なパラメータがあり、絶対にクリアしなければなりません。まず、その損傷しきい値の性能に影響を与えるいくつかの化学的、物理的、構造的パラメータについて評価し、テストしなければなりません。これらのパラメータは、アブソー

バーごとに、またはメーカーごとに異なります。

損傷しきい値は、『レーザ光を吸収後に、材料に化学的および物理的特性の不可逆的変化が生じた場合、それを用いたレーザパワーの測定で、変化量>1%を超える変化をもたらすパワー密度 (W/cm²)』と定義されています。

これらのパラメータの中で、材料の融点と熱伝導率 (W/(m·K)) の2つは、極めて慎重に検討し、可能な限り最高の値にしなければなりません。材料は、温度変動があっても一定の動作を維持しなければならず、そのうえで、小さなガウスビームの場合や局所的なレーザ照射 (ホットスポット) の場合に起こる極端な熱応力に対して劣化や剥離することなく耐性を保持しなければなりません。数 kW のレーザパワーが照射されたとしても、レーザによる対象領域が 250°C以下に維持される場合には、熱寸法安定性 (温度が変化しても材料の寸法が変化しないこと) と材料選択は最適化されているといえます。

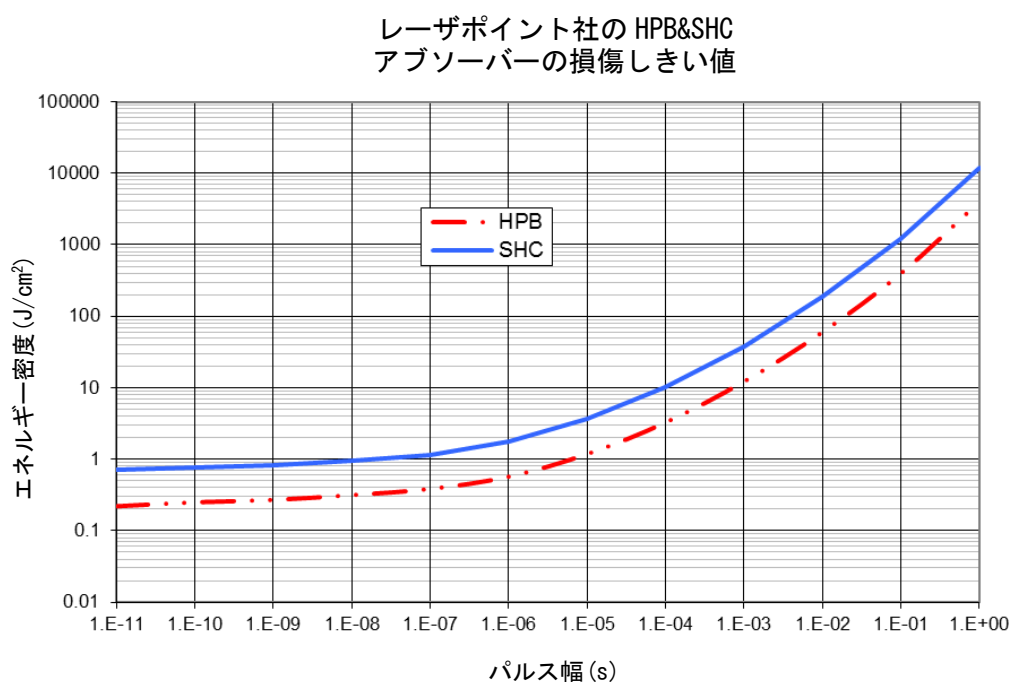


図3 2種類の高パワー用レーザアブソーバーにおけるパルス長と損傷しきい値

パルスレーザの場合、パルス幅も損傷しきい値に確実に影響を及ぼします。損傷が発生するメカニズムは、非常に短いパルス (<100 ナノ秒) によるアブレーションを原因とするものです。すなわち、この時間的な状態では、材料内で発生した熱の拡散時間は、レーザのパルス幅よりもはるかに長いので、局所的な強いエネルギーとアブソーバー原

子の直接アブレーションを伴います。それに対して、アブソーバー内の熱拡散を可能にするのに十分に長いパルス幅 (> 1 ミリ秒) の場合、損傷は熱効果によって発生します。

材料について考慮すべきその他の重要なパラメータは、レーザの波長範囲での吸収係数で、以下の一般的な特性を持つ必要があります。

- ① コーティングが非常に薄くても、放射光を効率的に吸収し、任意の波長で最小の反射となるように、できるだけ高くすること (典型値的>70%)
- ② レーザ波長の広い範囲をカバーするスペクトル応答特性を持っていること
- ③ どのような入射角であっても、可能な限り反射が少ないこと
- ④ 上記の一般的な挙動は、時間の経過とともに、おそらく検出器の寿命が続く限り (誤用を除く) 持続しなければならず、吸収面の化学的および光学的特性が変化する (酸化など) 経時変化やその他の特性の変化に影響を受けてはならないこと

上記の制約を考えると、高出力で高輝度なレーザの厳しい環境向けのアブソーバーとしてその潜在的な候補となり得る材料の多くは、適切なコーティングとは相容れない1つまたは複数の特性を持っています。

新しい技術と材料を組み合わせ、本文に記載したいろいろな制約や困難を克服することで到達した技術的な成功例が LaserPoint 社のスーパーハードコーティング (SHC) です。効率的かつ迅速な熱伝達を可能にするその特性は、非常に高いパワー密度にも対応する能力を持ち、高出力レーザ用に設計された最新検出器の開発を成功に導くなど、実際の推進力となっています。

4. 最適な設計と新しい技術

すべての技術要件を満足し、かつ、今日の極端に高いパワー密度にも安全に対応する2つの新しい検出器をご紹介します。それぞれの計測器は、SHC の開発によって高損傷しきい値を達成し、非常にコンパクトサイズ (特にカロリメーターの場合) ながら、高い絶対パワーの測定を可能にしました。

4-1. LaserPoint 社の 1200W 用空冷検出器



ファイバーレーザ市場向けの 600W (短期測定では 850W) 用空冷検出器で、業界の技術的なトップランナーであった LaserPoint 社は、このたび 1200W 用強制空冷式計測器 (モデル A-1200-D60-SHC) を

発表しました。これは、熱管理、コーティングの改良および設計の最適化において、先進的な飛躍を追求し続けた結果です。

この検出器は、フルスケールで直線性が±1.5%（図7参照）を有し、PTB（ドイツ国立理工学研究所）/NIST（米国立標準技術研究所）標準に準拠し、キャリブレーション精度±3%です。また、開口径は60ミリメートル、寸法は140(L) x 140(W) x 140(H) mm、重さ4.4kgです。

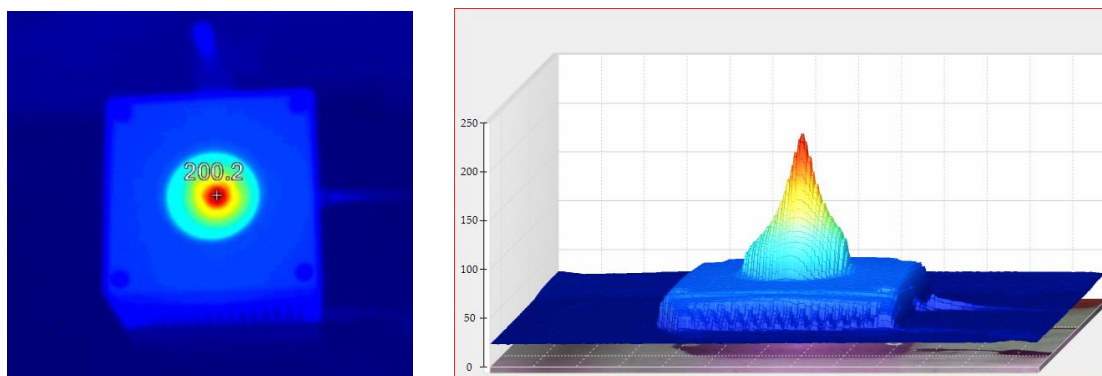


図6 モデル A-1200-D60-SHC: 最大 1200W での表面吸収 (左) と、コーティング面が最大 200°C (右) のイメージ (レーザーは IPG 社製ファイバーレーザー YLS 2000)

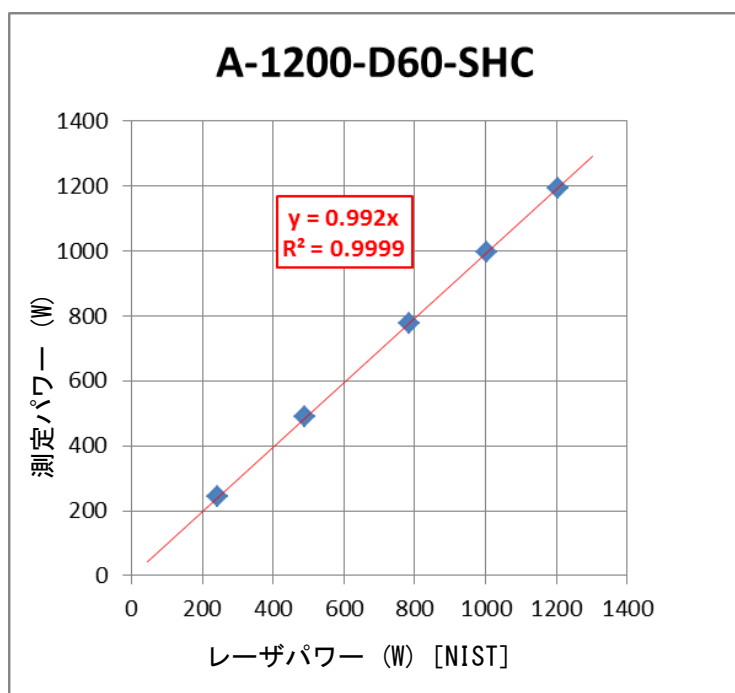


図7 モデル A-1200-D60-SHC の直線性

4-2. LaserPoint 社の 12KW 用カロリメーター

LaserPoint 社では、最大 12kW まで計測できる水冷式カロリメーターを発表しました。これは、新素材を探求し、熱設計と革新的な製品を追求し続けてきた努力の結果です。

新しいカロリメーター（モデル W-12K-D55-SHC-USB）は、同じクラスの他の計測器に比べて非常にコンパクトかつ軽量であり、吸収キャビティ内にいかなる非焦点用の光学系も用いていません。



この検出器は、フルスケールで±1.5%の直線性を有し、PTB/NIST 標準に準拠し、±5%の較正精度です。開口径は 55 ミリメートル、寸法は 140 (L) x 200 (W) x 180 (H) mm、重量は 6kg です。

図 8 モデル W-12K-D55-SHC-USB

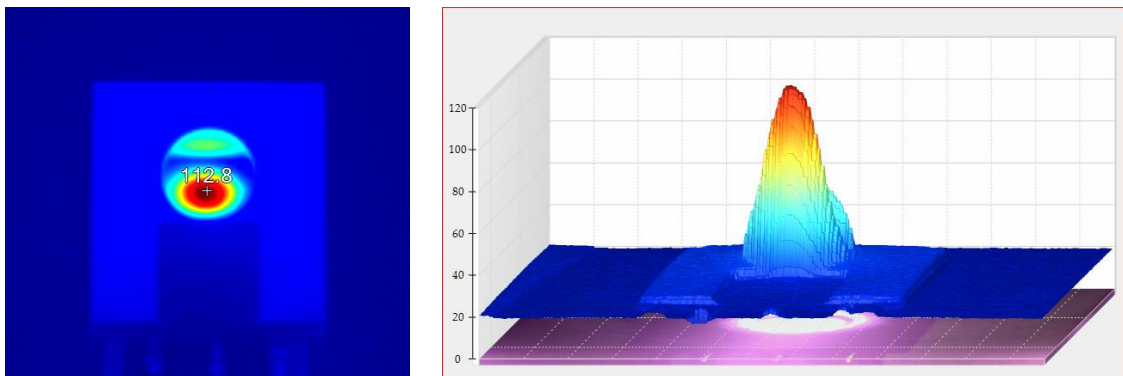


図 9 モデル W-12K-D55-SHC-USB: 最大 10kW でのアブソーバー表面の熱分布 (左) と、コーティング温度が 113°C (右) のイメージ (IPG 社ファイバーレーザー YLS 10000)

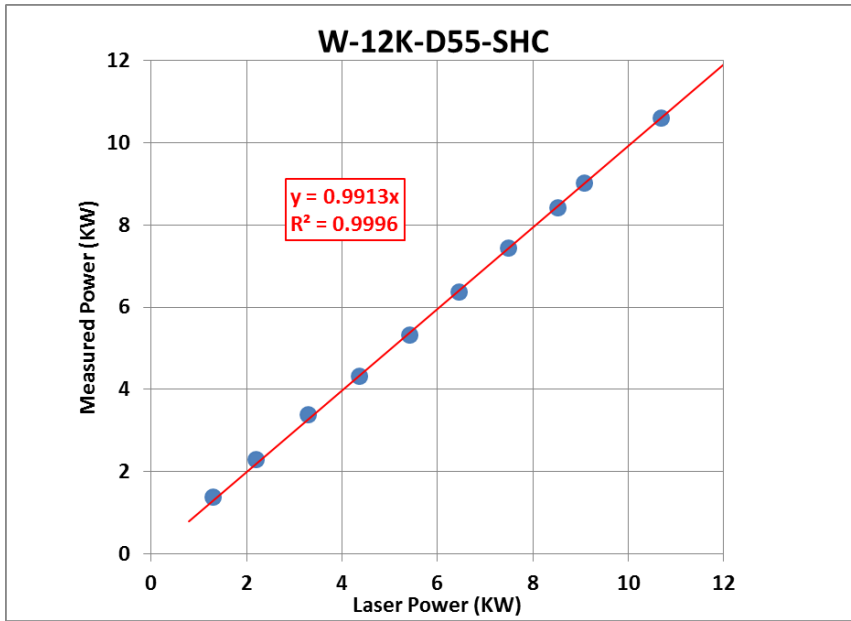


図 10 モデル W-12K-D55-SHC-USB の直線性

<著者>

Flavio Ferretti
Marketing and Sales Director
Laser Measurement Systems

大竹 祐吉
代表取締役

Laserpoint srl
Via Burona, 51
20090 Vimodrone (MI) Italy
Phone: +39 02 27400236
E-mail: ferretti@laserpoint.it
www.laserpoint.eu

株式会社アストロン
東京都足立区加賀 1-4-1 4-2 0 5
電話 : 0 3-5 6 4 7-6 5 4 1
FAX : 03-5 6 4 7-6687
Eメール : ohtake@astron-japan.co.jp
<http://laserpoint.astron-japan.co.jp>

(和訳)

フラヴィオ フェレッティ
マーケティング&セールス・ディレクター
レーザ計測システム事業部

レーザポイント有限会社
ヴィア ブローナ, 51
20090 ヴィモドゥローネ ミラノ イタリア
電話: +39 02 27400236
Eメール: ferretti@laserpoint.it
URL : www.laserpoint.eu