

超高出力ファイバレーザーによる切断加工の進歩

ロウズベール・サラフィ、ジェイソン・ジア、ジン・ジャン、マルコ・メンデス

超高出力ファイバレーザーは、空気アシストを使った鋼材の切断など、高速で高品質な厚材切断が可能で、他の切断手段に勝る多くのメリットがある。

10～40kWレベルの超高出力 (ultra-high power : UHP) ファイバレーザーは、この数年間で切断用に急速に普及しており、切断に適用される最大レーザー出力は、ますます高まることが予想される。本稿では、この出力レベルの切断加工結果を紹介し、UHPファイバレーザーの利用を促進している多くの要因について解説する。その要因とは、生産性の面で顕著なメリットがあること、切断品質が高いこと、切断可能な厚さ大きいこと (本稿では厚さ230mmの鋼材を40kWで切断する例を紹介) である。

ここでは、出力が10kW以上のものをUHPレーザーと定義する。UHPレーザーは、新しい加工方式を可能にして、レーザー切断の新たな市場への拡大を促進

するものである (例えば、最大50mmの鋼材を、空気アシストガスを使用することによって、高出力プラズマよりも4倍高速に切断する)。応用結果からは、UHPレーザーが、窒素や酸素を使う切断プロセスを、空気アシストによる高品質で高速で経済的な切断に置き換えて、鋼材の切断方法を変えていることがうかがえる。

レーザー切断は、約50年前に誕生して以来、目覚ましい技術的進歩を遂げてきた。商用レーザー切断機が登場して、いち早く導入した企業によって量産に使われ始めたのは、1970年代のことである。1980年代には二酸化炭素 (CO₂) レーザー切断システムの利用が拡大し、1990年代終盤から2000年代初頭にかけては、高出力ファイバレーザー

が登場した。2000年代終盤には、kWレベルのファイバレーザー切断機が開発されて、レーザー切断は、ニッチな特殊用途に適用されていた状態から、主流の製造プロセスへの移行を果たした。ファイバレーザー切断は、板金のレーザー切断市場の大半を占めている。組み込みが容易、信頼性が高い、メンテナンスの必要性が低い、資本コストと運用コストが比較的低い、切断スループットが高い、出力調整が可能というのが、その主な理由である。

2010年代終盤から2020年代初頭には、レーザー切断の市場成長が2つの方向に分岐し始めた。1つは市場の低出力側で、資本設備コストの削減を目的に、1～3kWの切断機の需要が急増していることである。その一方で市場の高出力側においても、UHPレーザーの需要が増加している。こちらは、経済的なコストで高い生産性と技術的能力が得られることがその要因である。この期間にレーザー切断は、他の板金製造プロセスではあり得ないほどの著しいペースで、出力が増加した。製造業向けの展示会に出展される切断機の最大レーザー出力は、2015年の6kWから2022年には40kWと、7倍近い増加が見込まれている (図1)。この3年間だけでも、システム出力は15kWから40kWへと2.5倍も増加している。

なぜ今なのか

信頼性の高い高出力ファイバレーザーは、UHP切断が普及し始める数年前から存在し、2013年には既に、100kW

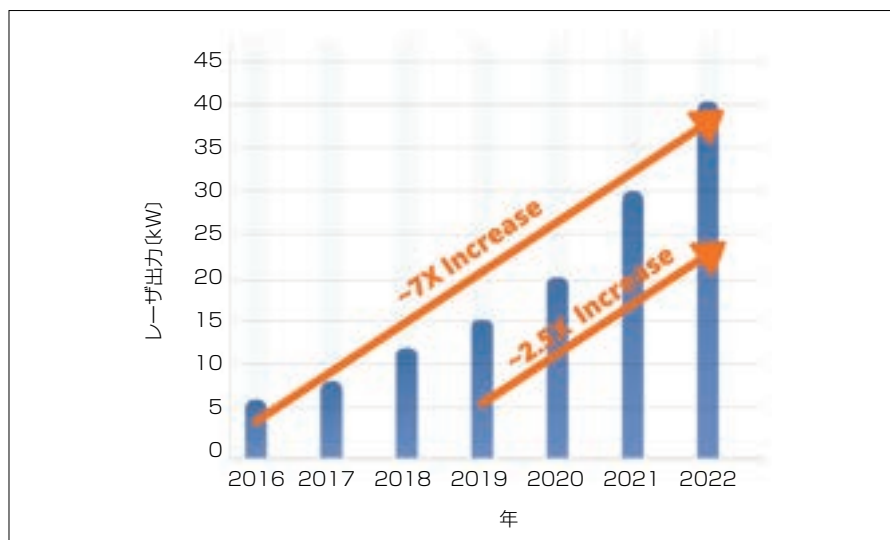


図1 切断システムに使用されるファイバレーザーの最大出力の2016年以降の推移

の産業用ファイバレーザが提供されていた⁽¹⁾。しかし、ここ数年でレーザの1kWあたり価格が急速に低下したことでようやく、UHPレーザ切断を導入するハードルが引き下げられることになった。それだけの光出力レベルを過酷な切断環境で確実に処理するための切断ヘッドや、UHP切断システム用の切断ライブラリも、提供されるようになった。

テスト設定

本稿のテストでは、40kWの「IPG YLS-40000」と30kWの「IPG YLS-30000-ECO²」という、高電力変換効率(Wall-Plug Efficiency : WPE)のファイバレーザを使用した。ファイバコア径は100 μ m、切断ヘッドには「IPGCut-HP」を使用して、さまざまな金属の切断速度と品質を評価した。筆者らの知る限り、100 μ mのファイバコア径で40kWのレーザ出力というのは、産業用レーザ切断にこれまでに適用されたレーザ光源の強度として最高レベルである。100 μ mのファイバコア径を選択したのは、150 μ mのコア径よりも切断速度がさらに10～25%高くなるためである。

高い切断速度

この実験により、ステンレス鋼、炭素鋼、アルミニウムというテスト対象のすべての金属に対して、レーザ切断速度は、40kWまでの平均出力の増加に伴って増加することが示された。図2は、厚さ6～40mmの炭素鋼に対し、空気アシストガスを使用して12～40kWのレーザ出力を適用した場合の切断速度の増加を示したものである。金属の厚さが大きいほど、速度の増加率は高くなる。例えば、厚さ12mmの炭素鋼に対して出力を15kWから40kWに上げると(出力の増加率は270%)、切断

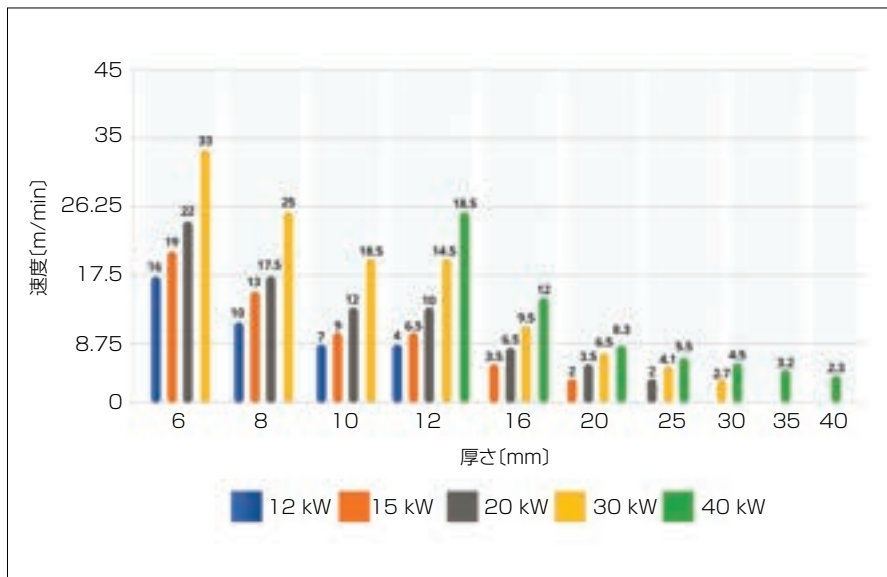


図2 炭素鋼に対する空気アシストを使用したドロスフリー切断の速度と出力の関係

速度の増加率は280%であるのに対し、厚さ20mmの炭素鋼の場合は、切断速度は420%増加する。厚さ30mmの炭素鋼の場合は、出力を30kWから40kWに上げると(出力の増加率は33%)、切断速度は66%増加する。これは、さらに高出力のUHPレーザによって、厚材切断の生産性がさらに高まる可能性を示唆している。

UHPレーザの高い切断速度を利用して、サイクルタイムを大幅に短縮するには、特に厚みのある材料の場合、高い加速度で部品を切断することが重要である。近年、一般的な切断機の最大加速度は、さらに高いレーザ出力に対応するために、1gから3gに引き上げられている。ハイエンド側では、6gもの加速度を備えたUHPレーザ切断機が登場しており、切断パスが大きくずれることがないようにそれだけの力を支える機械設計が採用されている。

部品あたりコストの低下による投資回収期間の短縮

UHPレーザ切断は、(低出力の場合と比べて)部品あたりコストがはるかに

低く、投資回収期間の短縮と収益性の増加につながる。レーザ切断において、運用コストの大きな割合を占めるのは、ガスの消費で、ガスのコストは部品の厚さとともに著しく増加する傾向にある。

UHPレーザ切断に必要なガス圧力とノズルサイズは、低出力切断と同等かそれ以下である。しかし、切断速度が著しく増加するため、部品あたりの切断時間が短くなり、ガスの消費量は大きく減少する。例えば、一般的な厚さ16mmのステンレス鋼を30kWのレーザで切断すると、15kWのレーザと比べてサイクルタイムは半分になるため、ガスの消費量は半分になる。

レーザとチラー(冷却装置)の消費電力は一般的に、出力に比例して増加する。しかし、切断機のそれ以外の部分の消費電力は、ほぼ変わらない。従って、上記の例のように部品あたりのサイクルタイムが半分になると考えると、レーザ出力の増加によって、部品あたりの全体的な電気コストは低下することになる。継続的な進歩に伴って、高出力ファイバレーザのエネルギー効率は

高出力レーザーによる炭素鋼切断に使用するガスの比較

	酸素	窒素	高圧空気
ガスの装置コスト	低	低～高 ¹	高 ²
ガスの運用コスト	低 ³	高 ⁴	非常に低い ⁵
スループット	低	非常に高い	非常に高い
ドロス	なし/低	中	なし/低
製造時品質の 長期的再現性	中/高	非常に高い	非常に高い
材料表面状態に対する 感度 ⁶	中	低	低
材料組成に対する感度	高	低	低
熱影響部	中	小	小
複雑または高アスペクト比の 形状を切断する能力	中	高	高
切断面の酸化	非常に大きい	なし	中程度
切断面の粗さ (Rz)	低	中	中/高
切断面の美的外観性	高	中	低
カーフ幅	大	小	小
ドロスフリーの結果を 得るために必要なレーザー出力	低	N/A	中

- 1 製造規模による
- 2 空気を圧縮して水分と油分を除去するための装置
- 3 酸素切断には、低圧 (通常は5～20psi) と小さなオリフィスノズルが使用される
- 4 窒素切断には、高圧と大きなノズルが使用される
- 5 切断ガス資源としての空気にコストがかからない
- 6 酸化レベルとスケール厚さ

図3 炭素鋼の切断に酸素、窒素、空気を使用する場合の利点と欠点

50%を上回っており、電気コストのさらなる削減が期待できる⁽²⁾。

UHPレーザーには、高い切断速度以外にも、ガスの消費量の減少につながる要因がある。UHPレーザーは高圧空気によって厚みのある炭素鋼を、よりコストの高い窒素を使用する場合やはるかに低速な酸素切断よりも、高速にドロスフリーで切断することができる。窒素と空気のどちらを使用する場合も、UHPレーザーは、ドロスフリー切断に必要なガス圧力を低くすることができる。例えば、厚さ20mmの炭素鋼に対する15kWでのドロスフリー切断には、16バール以上の空気圧力が必要

であるのに対し、出力が20kW以上になると、10～12バールで十分になる。ガスの使用量は、圧力にほぼ比例するため(ノズルサイズが同じ場合)、圧力の大きな低下は、ガス消費量の削減と、ガス発生装置の仕様の緩和につながる。

高出力レーザー切断システムは、低出力の場合と比べて生産性が2倍になっても、価格は2倍にはならない。レーザー出力の増加に伴って、1kWあたりのコストが低下するためである。また、レーザーコストの増加が、切断機全体のコストに吸収されるため、低出力レーザー機との価格差はわずかになる可能性がある。従って、高いレーザー出力によ

って生産性が2倍になるUHPレーザー切断機の資本コストが、30～40%しか高くないとしても、意外ではない。

はるかに高い生産性を実現するUHPシステムは、1台で複数の低出力システムを置き換えることが可能であるため、必要な設置面積は小さくなり、オペレータの人数は少なくなり、施設の準備作業も少なくなる。その一方で、生産性を維持するためにUHPファイバレーザの光源と切断ヘッドに求められる信頼性の要件は、高くなる。具体的には、ファイバレーザの光源に対しては、半導体、コンポーネント、光学系の高品質な統合によって、長期にわたって安定した出力とビーム品質を維持することが求められる。UHP切断ヘッドに対しては、高い光出力、高圧ガス、粉塵、加工熱、高い加速度に対応して、確実に動作することが求められる。

鋼材切断のための新しいプロセス

炭素鋼は、酸素、窒素、または空気をアシストガスとして使用して、切断することができる。図3は、各アシストガスを使用する場合の利点と欠点をまとめたものである。酸素切断は、酸化反応による追加のエネルギーにより、低いレーザー出力で厚みのある炭素鋼を切断する場合に有効だが、レーザー出力を上げて速度はあまり増加しないため、生産性の面で制約がある。一方、炭素鋼の空気切断では、出力の増加に伴って速度が増加する(図2)。例えば、厚さ16mmの炭素鋼に対する酸素切断の速度は、出力を10kWから30kWに上げて毎分2m程度で変わらないが、空気切断の場合は、出力を30kWに上げると速度は毎分9m以上に増加し、酸素切断よりも4.5倍高速になる。

低い出力と速度の酸素切断でしか切

断できなかった厚さが、今ではUHPレーザと空気を使用して、数倍の速度と良好な品質で切断できるようになっている。低出力レーザの場合、空気切断では、除去が困難なドロスが形成され、所望の表面品質は得られない。生産性の高いUHPレーザという新しい選択肢が開発されたことは、建設機器製造や重工業など、厚みのある鋼材を多用する業界において、熱狂的に受け入れられている。

厚材切断の範囲、スルーブット、品質の向上

テストでは、切断可能な厚さは、UHPレーザの出力の増加に伴って増加することが示されている。例えば、図4は、厚さ70mmのステンレス鋼に対する30kWでの窒素切断と、厚さ230mmの炭素鋼に対する40kWでの空気切断を、どちらもパルス切断モードで行った結果を示している。

フル速度の連続波(Continuous Wave: CW)切断モードでは、ドロスフリーの空気切断を、厚さ20mmの炭素鋼の場合は20kW、30mmの場合は30kW、40mmの場合は40kWで行うことができた(図2と図5a)。ステンレス鋼は、炭素鋼よりもドロスフリーの結果が得やすいため、厚さの限界はさらに高くなる(図5bとc)。CWモードの窒素切断と空気切断では、どの出力においても一定の厚さまでしか、ドロスフリーの切断結果と良好な切断面は得られない。その厚さを超える場合は、パルスモード(CWモードよりも低速)を使用して許容できる品質を達成するか、レーザ出力を上げる必要がある。一般的に、切断速度が毎分2m未満になる場合は、その材料をCWモードで最適な品質で切断するための十分なレーザ出力が足りていないと考えられる。



図4 UHPレーザを使用して非常に分厚い鋼材をパルスモードで切断した結果。(a)は、厚さ70mmのステンレス鋼に対する30kWでの窒素切断、(b)は、厚さ230mmの炭素鋼に対する40kWでの空気切断

炭素鋼の酸素切断では、出力の増加に伴って、所望の「光沢のある表面仕上げ」が得られる厚さの限界は高くなる。例えば、厚さの限界は4kWでは6～8mmだが、15kWになると30mmになる。図5dは、厚さ30mmの炭素鋼を15kWで切断した例である。

高速でクリーンな穴あけ

UHPレーザの高いピーク出力をパルスモードで使用することにより、過剰なスパッタを生成することなく、厚い金属材料に高速に穴あけを行うことができる。厚さ16mmのステンレス鋼の穴あけ時間は、6kWの1秒以上から、10kWでは0.5秒、20kWでは0.1秒と

急激に短縮する。0.1秒以下の穴あけ時間は、すべての実用的な用途において「一瞬」と一般的にみなされる長さである。ピーク出力が高いほど溶融池のアスペクト比は大きくなり、横方向に大きく溶融することなく、高速に厚さを貫通することができる。横方向の材料溶融が少なければ、上面のスパッタも最小限に抑えられる。

UHPレーザ切断の競争力

この6年間の複数の技術的進歩が、レーザの切断性能の向上に寄与している。1)可変コリメータまたはマルチコアファイバによる、集光スポット径の選択、2)高速ビーム回転による、一部

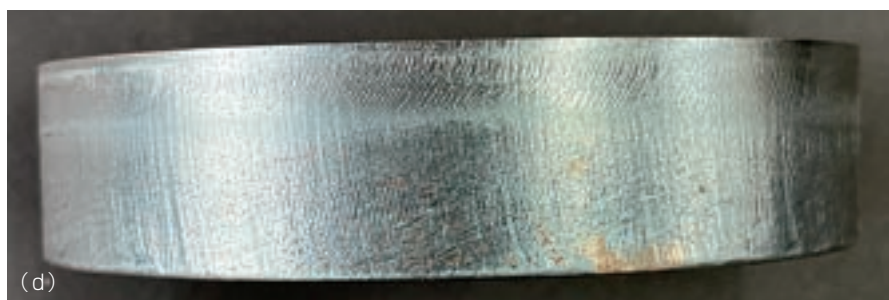
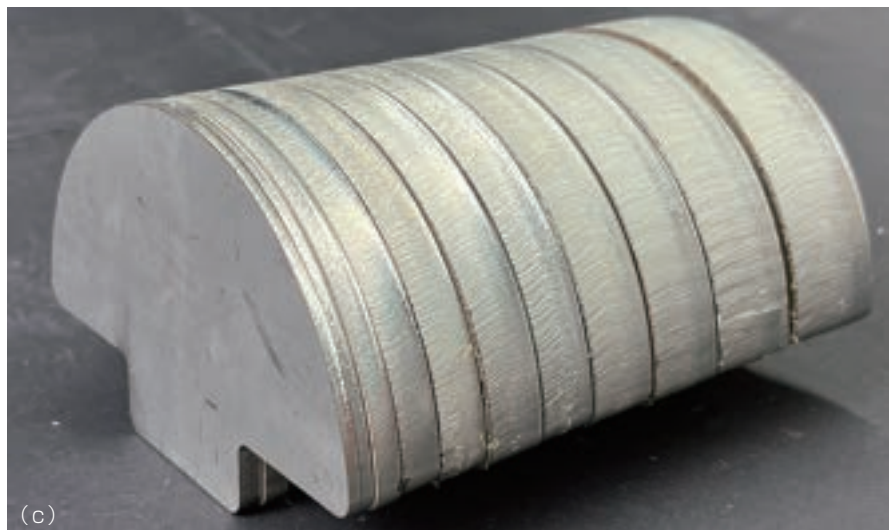
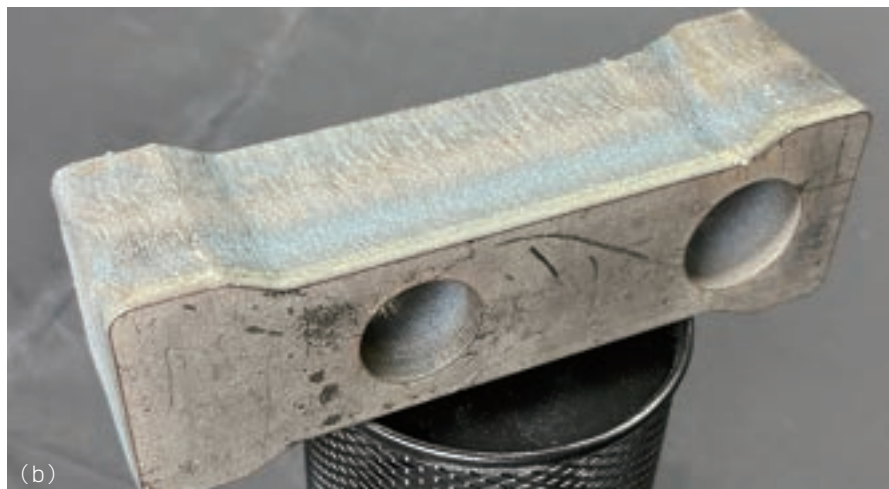


図5 CWモードによるフル速度の切断結果。(a)は、厚さ28mmの炭素鋼を40kWのYLS IPGレーザで毎分4.5m(177ipm)で空気切断、(b)は、厚さ40mmのステンレス鋼を40kWのYLS IPGレーザで毎分2.3m(90ipm)で空気切断、(c)は、厚さ3~25mmのステンレス鋼片を30kWのIPG YLS-ECOで窒素切断、(d)は、厚さ30mmの炭素鋼を15kWで酸素切断したもの

の金属のスループットと品質の向上、3)高ピーク出力のCWレーザによる、高速でクリーンな穴あけ/複雑形状切断、4)UHPレーザが、その例である。

各種業界のニーズは多種多様で、すべての実現技術が特定の分野で有効に活用されているが、UHPレーザ切断は、レーザ切断性能の向上を促進する主要な技術トレンドである。このことは、UHPレーザを採用するレーザ切断機が世界中で増加していることに表れている。UHPレーザに触れる機会が増えたことで、アプリケーションエンジニアは、UHP切断のスループットと品質が多用途で得られること、また、低いレーザ出力を使用する他の実現技術よりも高速である場合が多く、複雑さも低いことを、実感し始めている。

特に15kW以上のUHPレーザは、厚材切断の範囲、品質、費用対効果が高まっており、高電流プラズマに勝る手段となっている。比較テストにより、厚さ50mmまでのステンレス鋼に対して、20kWのファイバレーザは高電流(300A)プラズマ切断機よりも1.5~2.5倍高速であることが示されている。炭素鋼の場合は、厚さ15mmまでの切断で2倍以上高速である。1mあたりの合計切断コストもそれに比例して低下し、厚さ15mmの炭素鋼を切断する場合で計算すると、20kWのレーザはプラズマの約2分の1になる。40kWのレーザになると、厚さ12~50mmのステンレス鋼片の切断速度は高出力プラズマの3~4倍、厚さ12~30mmの軟鋼片では3~5倍になるため、生産性の差はさらに顕著になる。

UHPレーザの採用

切断加工に対するUHPレーザの採用を促す最大の要因は、低出力レーザや、プラズマ切断などの他の切断プロ

セスと比べて、生産性が高く、部品あたりの切断コストが低くなることである。UHP レーザによる速度の増加は、メーカーにスケールメリットをもたらす。例えば、出力が30kWから40kWに33%増加すると、切断速度は最大66%増加する。

UHP レーザは、空気アシストによる高品質で高速な鋼材切断を可能にする。その処理は、それよりもはるかに低速な酸素切断やコストの高い窒素切断よりも、優れている。厚さ50mmまでの鋼材に対し、40kWのレーザによる空気アシストの切断は、高出力プラズマよりも3~4倍高速であることが、筆者らのテストによって示されている。

UHP レーザは、厚材切断(厚さ

230mmまでの切断)の範囲と品質の向上、(ドロスの最小化による)後処理コストの削減または除去、設置面積の縮小とファシリティコスト(施設費用)の削減、人員要件の緩和、穴あけの品質とスルーットの向上など、他の多くの面においても、レーザ切断の競争力

を高めている。

UHP レーザの出力とエネルギー効率がさらに増加するにつれて、さまざまな業界にわたる切断加工を迅速かつ経済的に転換するその能力は向上し、これらのメリットはさらに魅力的なものになるだろう。

参考文献

- (1) E. A. Shcherbakov et al., "Industrial grade 100 kW power CW fiber laser," Advanced Solid-State Lasers Congress (2013).
- (2) See <https://bit.ly/3BwOdIS>.

著者紹介

ロウズベール・サラフィ (Rouzbeh Sarrafi) は、米 IPG フォトニクス社 (IPG Photonics) のシニアアプリケーションサイエンティスト、ジェイソン・ジア (Jason Jia) は、同社アプリケーションエンジニア、ジン・ジャン (Jing Zhang) は、同社アプリケーション部門マネージャー、マルコ・メンデス (Marco Mendes) は、同社レーザアプリケーションエンジニアリング担当ディレクター。
e-mail: rsarrafi@ipgphotonics.com URL: www.ipgphotonics.com

LFWJ

THE FUTURE DEPENDS ON OPTICS™

BEAM EXPANDERS

Scorpi™
低価格

Vega™
回転式ピント調節機能

Draconis™
非回転式ピント調節機能

Arcturus™
He-Ne レーザー用

Canopus™
反射型

Edmund optics | japan

詳しい情報はこちらへ：
www.edmundoptics.jp/013-8158

エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社
〒113-0021 東京都文京区本駒込2-29-24
パシフィックスクエア千石 4F
TEL: 03-3944-6210 E-mail: sales@edmundoptics.jp