



技術戦略研究センターレポート

# TSC Foresight

Vol. **10**

## パワーレーザー分野の 技術戦略策定に向けて

2015年11月

<b>1</b> 章	パワーレーザー技術の概要	2
<b>2</b> 章	パワーレーザー技術の置かれた状況	2
	2-1 市場の動向	2
	2-2 論文発表・特許出願の動向	3
<b>3</b> 章	パワーレーザー分野の技術課題	5
<b>4</b> 章	おわりに	8

TSCとはTechnology Strategy Center(技術戦略研究センター)の略称です。

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## 1章 パワーレーザー技術の概要

20世紀後半から、PCやサーバー等のコンピュータ技術、光通信や移動体通信等の通信技術、更にインターネットやクラウド等のネットワーク技術が著しく発展している中で、今後は、人だけでなくIoT (Internet of Things) とよばれるモノのインターネット化が急速に普及していくと考えられている。そのトレンドは製造業においても同様であり、今日のIndustrie 4.0 やIndustrial Internetに象徴されるように、製造に関する様々なステークホルダーがオープンにつながる将来が見通される。

このようなネットワークに繋がった将来の製造業においては、微細加工、遠隔操作及び少量多品種生産が可能なのが付加価値を産み、そのような加工を担う工作機械としてはレーザー加工機（特にパワーレーザー※1）が重要な役割を果たすと考えられる。

レーザー技術は高品質、短時間処理、多品種への対応などの加工ニーズに対して、優れたソリューションを提供するという重要な役割を既に有している。特に、最近のスマートフォンの製造ラインにはレーザーを用いた微細加工技術は必須となっており、その流れは拡大しつつある。また、試作加工用途から始まったパワーレーザーについても、加工用レーザーシステム市場の成長に伴い、今日では量産用途に適用されてきている。

レーザーの種類には、固体レーザー、半導体レーザー（LD）、ファイバーレーザー（FL）、CO<sub>2</sub>レーザーをはじめとする気体レーザー等があり、我が国には、これらのレーザーに関する優れた要素技術が蓄積されている。現在、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」の成果として、1kWを超える高出力固体パワーレーザーが実現されるに至り、高出力パルスのキロワット級パワーレーザーが国産技術でも利用できる状況になってきた。ただし、現状では電気-光変換効率が低いため、コストが高く、装置も高額という課題がある。

近年、加工用レーザーにおいては、CO<sub>2</sub>レーザーなどの気体レーザーよりも固体化されたレーザー光源の利用が進むことが予想されているなど、現状のままでは我が国のレーザー機器の競争力の低下が否めない状況となっている。また、レーザー加工機の重要なユーザーである機械製造業（自動車等）は我が国の基幹産業の一つであり、国際競争力も高い。したがって、こうした日本の特長を活かし、パワーレーザーを活用した先進的な加工に対応していく技術開発を

推進することは、今後の日本の製造業における競争優位の源泉となり得る。

※1 本レポートにおけるパワーレーザーは、おおむね出力1kW以上を対象とする。

## 2章 パワーレーザー技術の置かれた状況

### 2-1 市場の動向

レーザーは指向性や収束性に優れ、波長が一定であることから利用価値が高いため、1917年にアインシュタインが理論的基礎を固めて以来、1950年代からレーザーの実現に向けて様々な技術開発が進められ、今日では多くの産業分野で利用されるようになっていく。レーザーの応用分野には、情報・家電（光ファイバー通信、CD・DVD等のプレーヤー）、加工（切断、溶接、マーキング等）、医療（レーザーメス、歯科・眼科用等）、研究開発（レーザーレーダー、レーザー顕微鏡、分光等）等がある。

レーザーユニット（レーザーを出力する部分）の世界市場は、2014年には90億ドルを超え、2017年には110億ドルに達するとみられる。そのうち、情報・家電分野と加工分野が各々、市場の約1/3を占めている。レーザーシステムは、レーザーユニットとレーザーを利用するための周辺部分を含めた装置である。パワーレーザーが利用されることが多い加工用レーザーシステムの世界市場は、2012年には110億ドルを超え、その後も伸長している。

パワーレーザーを利用する加工分野では、これまで、金属の加工に適したCO<sub>2</sub>レーザーにおいて日本企業が市場で優位に立ってきた。しかし近年、海外企業製のFLがCO<sub>2</sub>レーザーに代わる形で台頭してきており、日本企業は後塵を拝するようになってきている。

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## 2-2 論文発表・特許出願の動向

1991年以降のパワーレーザーに関する論文発表数の推移を調査した(図1)。国別の発表数順位では、米国が最も多く、次いで日本、ドイツと続く(表1)。著者所属先別の発表数順位では、日本からは、大阪大学、浜松ホトニクスが上位10位に入っている(表2)。

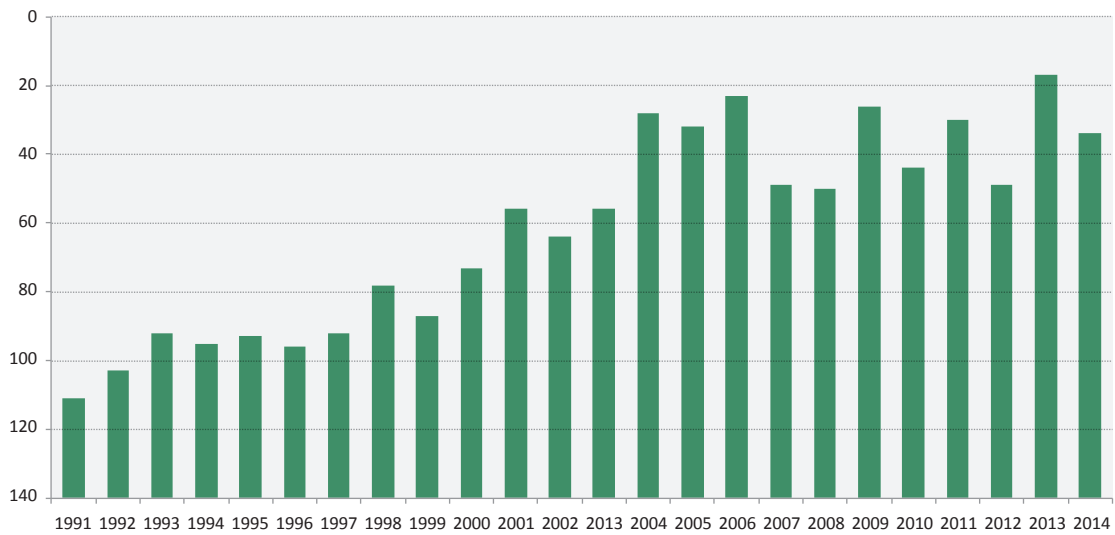


図1 パワーレーザーに関する論文発表数の年推移  
出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

※ Web of Science Core Collectionのキーワード検索で、「(“power laser” or “energy laser” or “intense laser” or “intensity laser”) and (“diode” or “semiconductor”) or DDL or “direct diode laser”」を入力。

表1 国別発表数

フィールド:国/地域	レコード件数	%/1,887
USA	428	22.682%
JAPAN	200	10.599%
GERMANY	188	9.963%
PEOPLES R CHINA	164	8.691%
FRANCE	143	7.578%
BRAZIL	112	5.935%
ENGLAND	103	5.458%
RUSSIA	83	4.399%
ITALY	76	4.028%
CANADA	56	2.968%
SOUTH KOREA	56	2.968%

出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

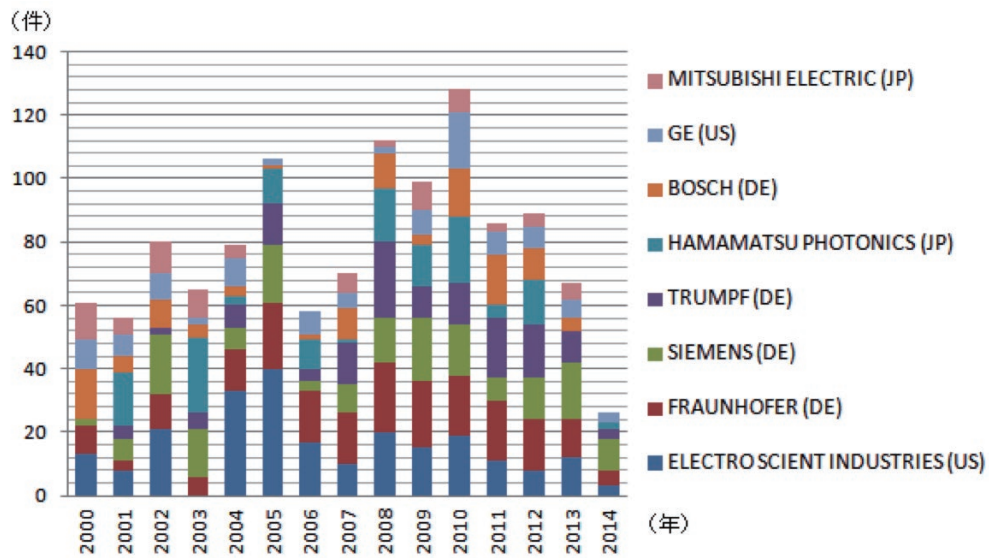
表2 著者所属先別発表数

フィールド:著者所属	国	レコード件数	%/1,887
RUSSIAN ACAD SCI	RUSSIA	48	2.544%
CHINESE ACAD SCI	CHINA	43	2.279%
UNI V SAO PAULO	BRAZIL	40	2.120%
CUMHURIYET UNIV	TURKEY	37	1.961%
DOKUZ EYLUL UNIV	TURKEY	33	1.749%
OSAKA UNIV	JAPAN	25	1.325%
HAMAMATSU PHOTON KK	JAPAN	23	1.219%
INST PASTEUR	USA	23	1.219%
HARVARD UNIV	USA	21	1.113%
NCI	USA	18	0.954%

※ NCI:National Cancer Institute (米国)  
出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

レーザービームに関する海外特許出願件数（上位8機関）を調べた図2に示すように、累積出願件数の1位は Electro Scientific Industries（米国）である。これにFraunhofer（ドイツ）やSiemens（ドイツ）、Trumpf（ドイツ）が続き、日本からは浜松ホトニクス、三菱電機が5位と8位に入る。また、図2の出願件数年推移を国別にみると、ドイツの追い上げが著しく、上位機関の年間特許件数に占める近年のドイツの割合は過半数となっていることがわかる。



※特許検索システムSRPARTNERを用いて調査。国際特許分類 (IPC) 「B23K 26/00 (レーザービームによる加工, 例. 溶接, 切断または穴あけ)」(2000年以降) が付与され、要約・請求・発明名に「power/energy/intense/intensity」を含む特許を検索。検索対象国は、米国、欧州及び欧州各国、ロシア、中国、韓国、インド、ブラジル等。

図2 レーザービームによる加工に関する特許出願件数（上位8機関）の年推移（2000-2014年）  
出所:NEDO技術戦略研究センター作成（2015）

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## 3章 パワーレーザー分野の技術課題

レーザーはその発振媒質によって固体レーザー、LD、FL、液体レーザー、気体レーザー、自由電子レーザーなどに分類される(図3)。各レーザーの波長・出力とその応用分野を図4に示す。横軸はレーザーの波長、縦軸はレーザーの出力である。図4中の領域の色分けは用途分野の区別を示す。我が国は固体レーザーのレーザー媒質や、通信用レーザーで培ったLD技術など、レーザーの個々の構成部品の技術力は高く、競争力がある。

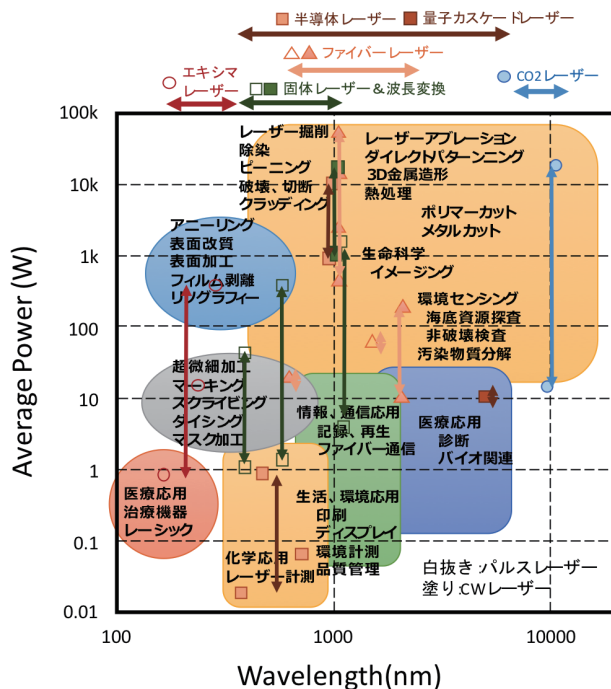


図4 レーザーの波長・出力とその応用分野

出所:大阪大学の図を基に NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

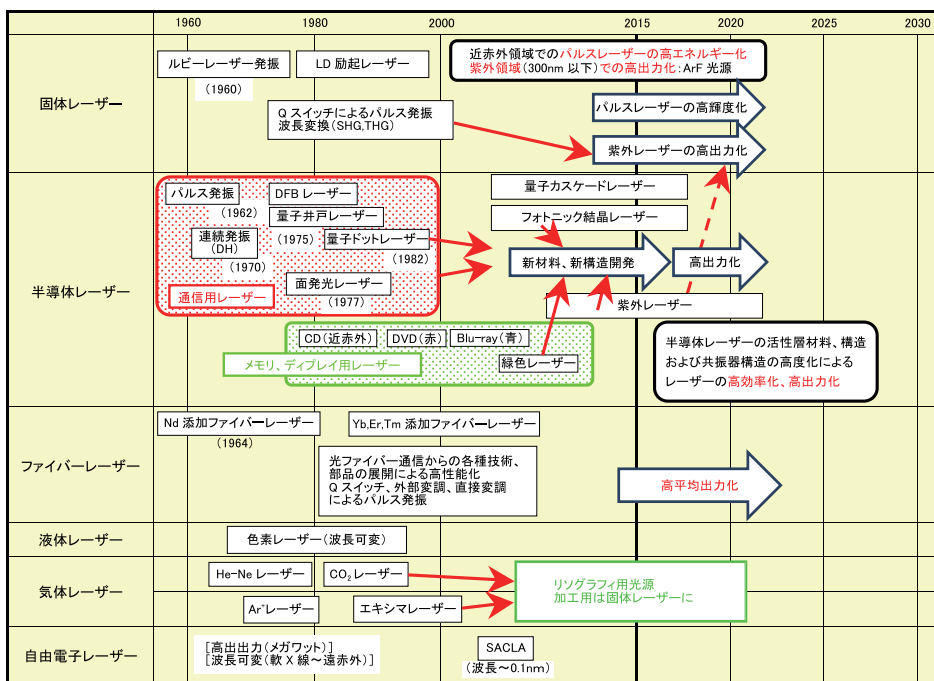


図3 発振媒質によるレーザーの分類

出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## (1) 固体レーザー

固体レーザーは、図5に示すように発振媒体に固体を用いたものである。すべてのレーザーの中で最も早く実現され、1960年にルビーロッドを用いたレーザー発振に成功している。その後、NdドープYAGやチタンサファイアなど多くの材料で固体レーザーが実現されている。固体レーザーは、平均パワーではFLなどに劣るが、高パルスエネルギーという点では主役であり、ディスクレーザーやスラブレーザーでキロワットクラスのものが出回っている。金属の表面改質などの用途に応用先を広げるためには、数十ジュール以上の高パルスエネルギーが必要であり、更なる高エネルギー化の技術開発が期待される。このためには、Nd:YAG、Yb:YAGに代わる新材料の探索、複数のレーザービームの結合などの大出力化技術に関する技術開発が必要である。

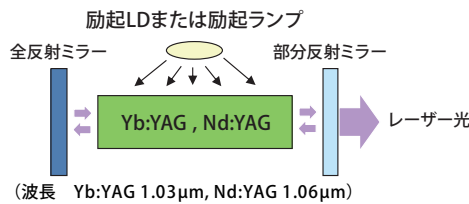


図5 固体レーザーの模式図  
出所:NEDO技術戦略研究センター作成 (2015)

## (2) 半導体レーザー (LD)

半導体レーザーは、図6に示すように発振媒体にpn接合の半導体を用いたものであり、1970年の室温連続発振の成功以降、量子井戸などの活性層構造、分布帰還型(DFB)や面発光型などの共振器構造の高度化により、光ファイバー通信分野で多くのレーザーが開発、実用化されてきた(表3)。また、光メモリ、ディスプレイの分野では、CD用の近赤外、DVD用の赤色、Blu-ray用の青色のレーザーが実用化され、最近では緑色レーザーの開発も進んでいる。近年、かなり高出力のものも得られるようになってきたが、更なる高出力化が要求されている。このためには、電気-光変換効率の向上などによるチップ出力の向上、複数のチップの出力を集めるための多重化技術の開発などが必要である。LDは我が国が技術開発で世界をリードしてきた分野であり、高出力のLDにおいても十分に競争力を発揮できるといえる。高効率化、高出力化、発振波長域の拡大に向けて新材料(GaN/AlNなど)、新しい活性層構造(量子ドット、量子カスケードなど)、新しい共振器構造(面発光レーザー、フォトニック結晶レーザーなど)など、我が国が得意とする「新材料、新構造、新原

理」を有する研究テーマにリソースを集中投入することが望まれる。

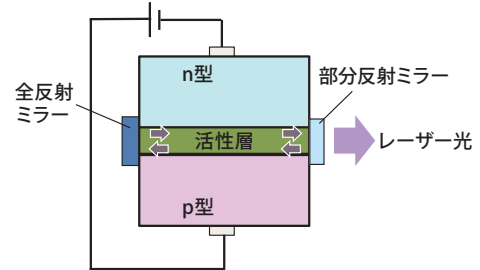


図6 半導体レーザーの模式断面図  
出所:NEDO技術戦略研究センター作成 (2015)

表3 主な化合物半導体材料と発振波長

DH構造の材料構成			波長 [μm]		
活性層	クラッド層	基板	0.5	1	5
InGaN	AlGaIn	GaN	■		
AlGaAs	AlGaAs	GaAs		■	
AlGaInP	AlGaInP	GaAs		■	
GaInAsP	AlGaAs	GaAs		■	
GaInAsP	GaInAsP	InP			■

出所:NEDO技術戦略研究センター作成 (2015)

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## (3) ファイバーレーザー (FL)

FLの提案は1960年代からあったが、高出力FLが実用化レベルまで進展したのは、図7に示すような、光通信における光ファイバー増幅器の技術（希土類添加ファイバー、ファイバークレイティング、励起コンバイナ、励起半導体レーザーなど）を展開できたことによる。希土類添加ファイバーとしてはEr、Tm、Tbなど、種々の希土類元素を添加したFLがある。平均パワーが100kWという高出力なレーザーもあり、金属加工、穴開け、溶接などのレーザー加工分野での利用が期待されているが、現在は海外メーカー1社のほぼ独占状態になっている。

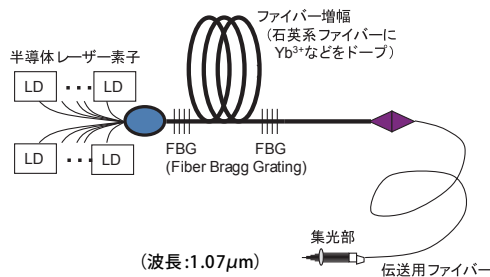


図7 ファイバーレーザーの模式図  
出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

## (4) 気体レーザー

気体レーザーとは、レーザー媒質に気体を用いたレーザーであり、He-Neレーザー、Arイオンレーザー、CO<sub>2</sub>レーザー（図8）、エキシマレーザー（ArF）などがある。高出力が得られるCO<sub>2</sub>レーザーは、これまで金属加工用、治療用などに多く用いられてきたが、加工用レーザーとしては次第にFLに置き換わることが予想されている。半導体リソグラフィ用のレーザーとしては、長らくエキシマレーザー（ArF）が用いられてきたが、更なる短波長化が要求されており、EUV光源への置き換えも予想されている。

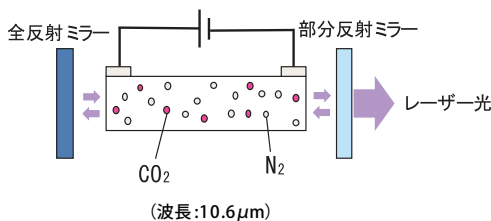


図8 CO<sub>2</sub>レーザーの模式図  
出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

## (5) 自由電子レーザー

自由電子レーザーとは、自由電子のビームと電磁場との共鳴的な相互作用によってコヒーレント光を発生させる方式のレーザーである（図9）。電気的な操作によって、波長を自由に変えることができるという特徴をもち、軟X線、紫外線、可視光線、遠赤外域まで幅広い波長の光を取り出すことができる。出力もメガワット級まで実用化することができるといわれている。大型放射光施設Spring8に隣接するX線自由電子レーザー施設SACLAでは、波長1Å以下のX線レーザー光の生成に成功している。

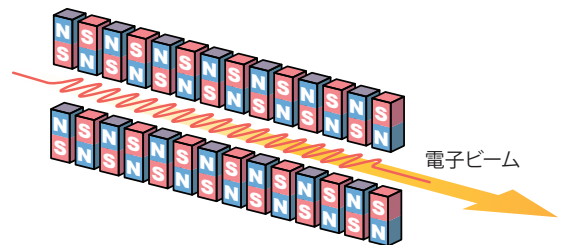


図9 X線自由電子レーザーの模式図  
出所:NEDO 技術戦略研究センター作成 (2015)

# パワーレーザー分野の技術戦略策定に向けて

## (6) レーザーユニットとレーザーシステム

レーザーシステムは、レーザーユニット（レーザーを出力する部分）とそのレーザーを利用するための周辺部分を含めた装置で構成される。つまり、レーザーシステムはレーザー光を使って種々の機能を発揮する機械システムである。

例えば、板金を加工するようなレーザーシステムでは、図10に示すように、加工に合わせて、材料の板金をX-Yテーブル上で移動させるものがある。これを実現するレーザーユニットやテーブルの駆動系、各種の制御系などを含めた全体がレーザーシステムである。

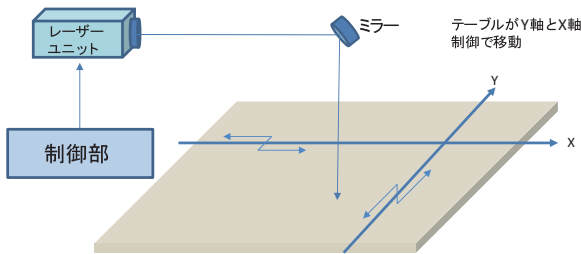


図10 レーザーシステム（板金加工）の例  
出所:NEDO技術戦略研究センター作成（2015）

図11の例は、レーザーユニットとしてファイバーレーザーを使用し、産業用ロボットのアームの先端にレーザー出力部を取り付けたものである。加工に合わせて、制御部からの指令に基づいて、レーザーユニットの出力を制御するとともに、ロボットのアームを移動させ、加工対象にレーザーを照射する。この場合のレーザーシステムはレーザーユニットやロボット、レーザーの制御系などを含めたものとなる。

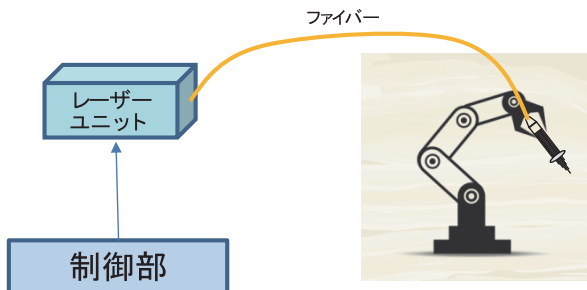


図11 レーザーシステム（産業用ロボット）の例  
出所:NEDO技術戦略研究センター作成（2015）

## 4章 おわりに

パワーレーザーは、製造業における材料加工のための重要な技術であり、製品の品質、コストに直結する工作機械である。パワーレーザー技術の向上、革新には既存の製造工程を効率化するのみならず、これまで不可能であった加工も可能とすることが期待されており、日本においては、パワーレーザーに適用できる優れた要素技術が蓄積されている。海外ではパワーレーザーを今後の生産技術革新の重要な要素に据え、国家プロジェクトで開発を進めているなど、現状のままでは我が国の製造業の弱体化を招きかねない状況となっている。したがって、パワーレーザー技術の革新は、我が国の機械製造業を始めとする産業の国際競争力向上において重要な位置を占める。

また、近年、加工用にはCO<sub>2</sub>レーザーなどの気体レーザーから、FLを含む固体化されたレーザー光源の利用が進んでいるため、固体レーザー技術及び励起用のLD技術の重要性は一層増大している。以上より、固体パワーレーザー等の技術への新たな取組が急務と考えられ、これまでのレーザーユニットで実現されていなかった波長、パルス幅、出力などを達成するための技術開発によって、加工技術の高度化を図ることが必要である。また、レーザーユニットのみならず、レーザーシステムとしてIoTやIndustrie 4.0に対応する包括的な技術革新によって、我が国産業の競争優位の源泉を獲得することが期待される。

本資料は技術戦略研究センターの解釈によるものです。掲載されているコンテンツの無断複製、転送、改変、修正、追加などの行為を禁止します。引用を行う際は、必ず出典を明記願います。