

鉄鋼業への高出力レーザーの応用

Development of High Power Laser Applications in Steel Industry

南田勝宏

Katsuhiro Minamida

(株)日鐵テクノリサーチ
レーザー技術センター 所長

1 はじめに

1960年にレーザーが発明され、1970年に高出力レーザーのYAGレーザー、CO₂レーザーが出現、1977年に米国GM社にて実用化され、日本に導入され始めて約20年になった。その間にルビーレーザーの開発から始まり、X線レーザーの開発へと多種類のレーザーそして多岐の応用が開発された。鉄鋼業におけるレーザーの高密度エネルギーの利用としてのレーザー加工への応用技術の研究・開発が盛んに実施されてきた。代表的な加工用レーザーはCO₂レーザーとYAGレーザーで、その性能も急速に進歩してきた。それに伴って、高出力レーザーを用いた新製品、新プロセスの研究・開発は多くの機関にて益々盛んになっている。

2 レーザによる熱加工の特徴

レーザービームの特徴を一口でいうと“コヒーレント (coherent)”な光であるという事である。すなわち指向性と単色性がよく、位相がそろい、干渉性に優れている為に、レンズ等の光学系で集光する事により、高密度のエネルギービームを得る事が出来る。他熱源とレーザービームとのエネルギー密度を比較した場合、一般のアーク熱源に比べてレーザービームは10万倍以上のエネルギー密度にする事が可能である。レーザービームを鋼材等に照射すると、その部分は瞬時に加熱され、さらにレーザービームの出力、または、照射時間を増すと溶融、沸騰、蒸発、飛散と加工現象が変化する。

また、レーザービームは光であるので非接触加工とか、真空中およびガス中での雰囲気加工が可能である。これらの特徴を生かし、多くの分野でレーザー応用技術の開発と実用化が進んでいる。レーザー発振器や周辺技術としてのレーザー応用技術の発展期となった現在は、レーザー応用技術が従来の諸加工技術(機械加工、放電加工、アーク溶接、抵抗溶接等)と競合

しあっても、その優位性を主張できる状態になってきた。このようにして、レーザー加工技術は鉄鋼業においても、多くの製造工程にて、新製造プロセスおよび新製品を創出している。

3 レーザと被加工材との相互作用

高出力レーザー応用技術の開発ではレーザービームの鋼材表面における吸収要因とその加熱・溶融現象への影響を調べる事が最も重要である。Figure1にレーザー加工現象を左右する主要因を示す。レーザービームの特性(波長、出力、横モード、その他)とレーザービームの照射条件(集光径、時間、角度、雰囲気)および材料の表面性状(物性値、粗さ、被膜、温度、他)による相互作用にて材料の加熱、溶融そして蒸発現象を決定する。その一例を次に示す。Figure2はレーザービームの各種鋼材表面での波長吸収特性を示す。CO₂レーザーの波長10.6 μ mとYAGレーザーの波長1.06 μ mでは吸収率が5~8倍と大きく異なっている。そして、Figure3は鋼板表面性状とレーザービーム入射角によるレーザービームの鋼材表面の反射率の変化を示し、その値は100%から50%で入熱量が大きく異なり加工現象に変化をもたらす。そして、高出力レーザー加

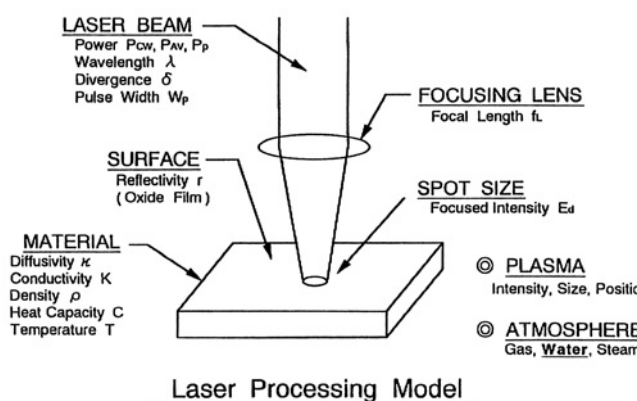


Figure 1 Main factors of laser material processing

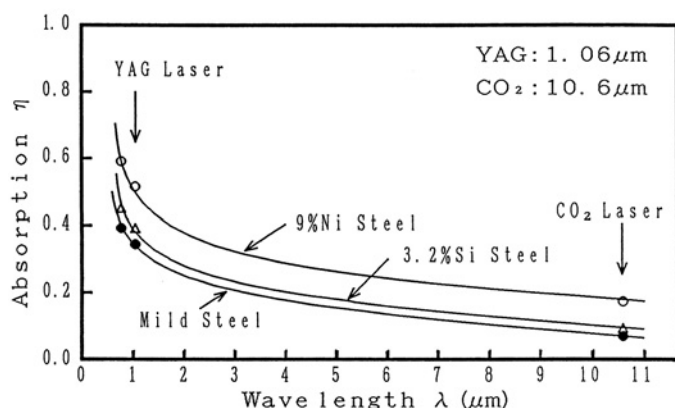


Figure 2 Absorption of various steels for wavelength

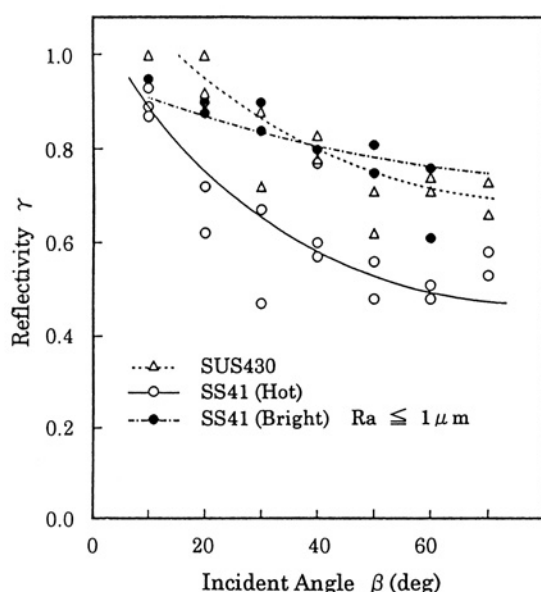


Figure 3 Effects of roughness and Incident angle on reflectivity

工の特徴として発生するレーザー誘起プラズマの挙動も加工現象に大きく影響する。また、ビーム伝搬路での不純物（水、水蒸気、油等）の排除はエネルギー損失の防止、そしてビームモードの保存の観点からも十分な考慮が必要である。

4 レーザによる加工技術の革新

レーザービームのエネルギー密度が高い状態では、材料の蒸発と雰囲気ガスのイオン化とレーザービームの吸収によってプラズマが発生する。このレーザー誘起プラズマはレーザービームを吸収し溶け込み深さを減少させるので一般には有害として除去している。しかし、このプラズマは高温のエネルギー源であり有効利用する等の柔軟な試行と開発も考えられ、これも一つの方法と思う³⁾。また、従来のレーザー加工でのレーザービームの照射方法は、レンズまたはミラーで可能な限り高い集光状態を達成し、エネルギー密度を高めた加工がほとんどである。しかし、その加工現象の変化幅（可変範囲）は少な

く、新現象そして新プロセスは生まれにくい。この点が新プロセス開発の盲点ともいえる。発想を転換し、低密度エネルギーによる照射、波長による吸収特性の差異、材料特有の物性値を活用する方策も考えられる。筆者らは高出力レーザービーム応用技術の開発において、材料とレーザービームの相互作用に注視して、総合的なレーザービームのエネルギー効率を高めると共に、レーザービーム加工における、新現象の探究と新プロセスを創出すべく、鉄鋼製造プロセスへの研究開発を実施してきた^{1,12,13)}。以下に、本研究開発で得られた知見と結果の代表的な応用例を示す。

① “材料の蒸発反力を利用した” 電磁鋼板の表面処理（磁区制御）技術²⁾、② “レーザー誘起プラズマを2次熱源とした” プラズマ有効利用レーザー溶接技術と連続圧延ラインのコイル継ぎ溶接^{3,4)}、③ “リップルレーザー面熱源溶融法による溶融膜の安定形成” の開発で可能となった極薄鋼板の突き合わせ溶接⁵⁾、④ “材料表面の高反射特性を逆利用した自動収斂特性” を利用した高速鋼管製造の溶接技術⁶⁾、⑤ 漏れ制御YAGレーザーの開発による“溶融効果促進と微細クレターの形成” を基礎とした自動車用高鮮映性鋼板の製造技術⁷⁾、⑥ “コーンミラーの開発とレーザー雲の形成” による自動車タイヤ用スチールワイヤーの極表層処理技術⁸⁾、⑦ “熱処理層の制御と色付け” によるステンレス鋼板のカラーデザイン化技術⁹⁾、⑧ “メカとレーザー発振技術が合体した” CO₂レーザーの超高速パルス化とその応用¹⁰⁾、⑨ “5軸制御のYAGレーザーヘッド” による全溶接ステンレスハニカムパネルの製造技術¹¹⁾、⑩ “世界最大の45kW CO₂レーザー” による約1000℃の熱間連続圧延用パー接合機の開発等がある^{13,14)}。

5 高出力レーザー加工の応用技術

5.1 リップルレーザーによる極薄鋼板の溶接

電磁鋼板の分野では低鉄損材の需要が急増し、薄手・高級化が定着した。一方、製品の出荷に際して最終工程のスリットラインで不良部除去、出荷重量調整のためにコイルの溶接を実施している。ステンレス鋼板でも同様にプロセス内での薄手材の溶接が不可欠で従来法では溶接成功率が低くプロセスのネックとなっていた。

レーザー溶接法は高エネルギー密度が得られ、溶融幅の狭い溶接が出来、熱影響域も極めて少ない特徴がある。しかし、一般レーザー溶接法の利点であるキーホール溶接は薄手鋼板の突き合わせ溶接に次の点で不向きである。すなわち、キーホール溶接は高温プラズマの発生を伴い、板厚中から熱伝搬させ溶融するので常にプラズマの穴がある。この“穴”が溶け落ちの核になり溶接欠陥を発生する。また、Figure4に示すように、溶融幅が狭いので、高精度の鋼板突き合わせ精度が

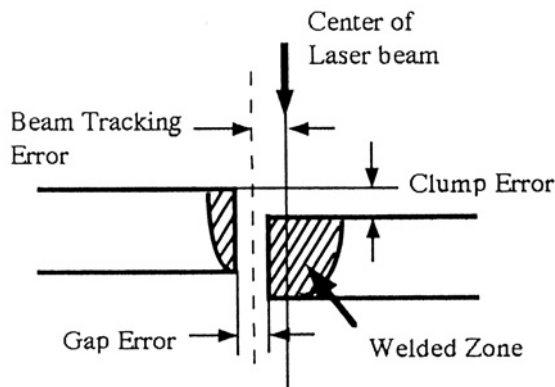


Figure 4 Schematic diagram of butting errors in the laser welding process

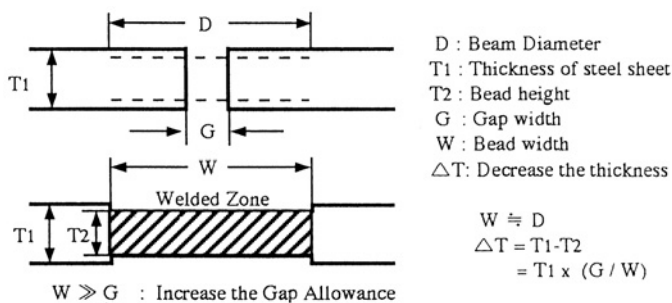


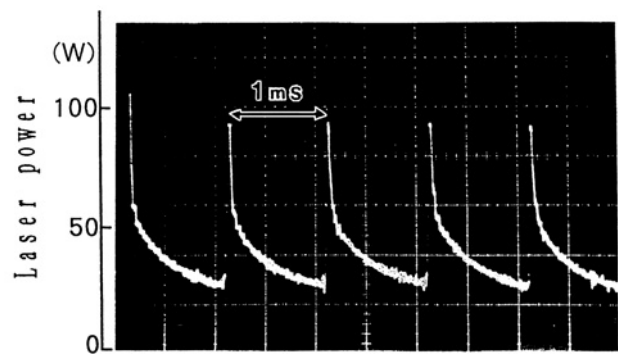
Figure 5 Schematic representation of the cross sectional view of the butt-welded portion using the wide bead formation

要求される。

Figure5に新開発技術の概念図を示す。この技術は集光ビーム径が大きく、エネルギー密度が低い条件でも幅広の溶融が可能である。レーザービームはリップルモードで連続成分とパルス成分にて合成している。パルス成分にて鋼板表面を瞬時に溶融しレーザービームの吸収率を高め連続成分にて最適入熱量を設定する方式である。薄手鋼板の物性値、板厚、溶接速度に対応し、投入する入熱を制御（レーザーパワー、ビーム径、波長吸収率）する事で幅広く溶融する。この過程では、表面から熱伝搬によって下面まで溶融するので溶融金属が安定して“橋”を形成し溶け落ちのない溶接が得られる。これにより、Figure5中の式にて示すように突き合わせ間隔が溶融幅に比例して緩和できる。Figure6にリップルレーザーの波形、Figure7に100 μ m厚のステンレス薄鋼板の突き合わせ断面組織を示す。Figure8に突き合わせ間隔による欠陥の発生状況を示す。この結果は、従来のレーザー方式に比べ2倍以上の突き合わせ精度の緩和となり安定性、実用性の高い薄手鋼板のレーザー溶接法となった。

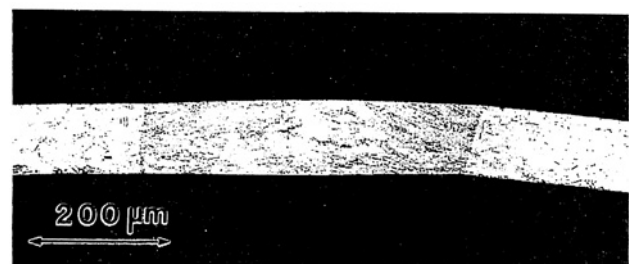
5.2 コーンミラーによる鋼ワイヤーの極表層熱処理技術⁸⁾

鋼ワイヤーを使用している自動車用タイヤは自動車の高速



(Ave. Power = 40w, Peak Power = 100w, Rep. rate = 1kHz)

Figure 6 The temporal output of the rippled mode Nd-YAG laser



Cross sectional view of the welded portion

type 304 ss sheet 100 μ m^t
Average power = 100W, R_m = 25 %
Welding speed = 2.4m/min

Figure 7 The cross sectional of bead made by the ripple mode Nd-YAG laser

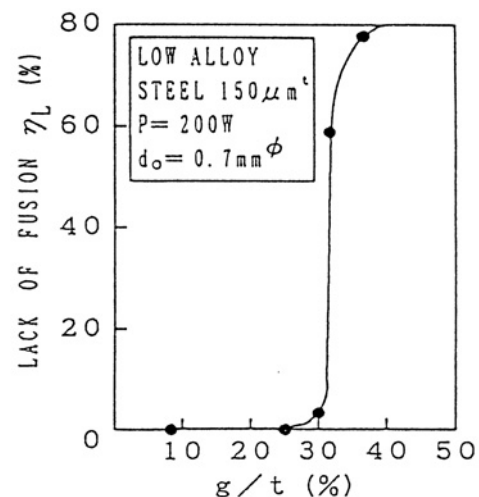


Figure 8 The defect ratio η_L against the gap ratio

化、エンジンの高出力化に対応し、より高強度のニーズがある。このために、タイヤに用いる直径300 μ mの鋼ワイヤーの高張力化が進み、現在、引っ張り強度は3.33 GPa (340kgf/mm²) を越えている。しかし、ワイヤーのもう一つ必要条件である曲げ疲労強度の不足という問題が残っている。従来のレーザー照射による表面改質の技術では鋼ワイヤー

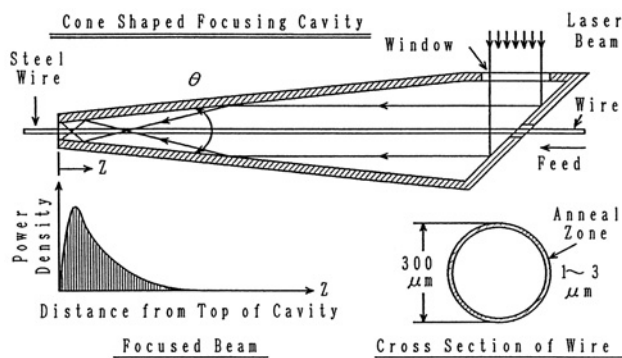


Figure 9 Schematic diagram of the new laser annealing method

が極めて小径であり、円周方向に高密度で均一にレーザ照射することは困難である。開発した新技術は円錐型集光光学系（以下、コーンミラーとする）が主体でCO₂レーザ（波長10.6μm）の金属表面での高反射特性を基盤にしている。本技術の概念をFigure9に示す。Cuベースで内面Auメッキにて構成したコーンミラー内にてレーザビームがコーンミラーの立体角とその壁面および銅ワイヤーの表面で多重反射を繰り返す。そして、レーザビーム投入角に依存したコーンミラーとワイヤーの反射率により多重反射と一部の吸収を繰り返しながらコーンミラーの先端部に収斂する。集光したレーザビームはエネルギー密度を5kW/cm²と高めて円周方向に均一化したレーザビームの“雲”を形成する。このレーザビームの“雲”の中を銅ワイヤーが通過する際に、エネルギーの吸収に伴いそのワイヤー表層が加熱される。また、銅ワイヤーが極細である為に通常のレーザ熱処理法に比較し、冷却速度が遅く銅ワイヤーの極表層の軟化処理が可能になる。レーザビームの投入エネルギーと銅ワイヤーの送給速度によって入熱量（レーザパワー）を制御し熱処理条件を決定する。この様にして、従来、不可能であった極細線の表層熱処理を可能にした。実験結果をFigure10に示す。

レーザ出力は500W、処理速度は30～90m/minである。銅ワイヤーの引張強度の低下はなく、曲げ疲労強度を3～4倍向上した。これは直径300μmの銅ワイヤーの極表層1～3μm（組織観察にて）を軟化し、残留応力の緩和効果によって曲げ疲労強度が向上した。そしてレーザ出力1kWにて200m/min以上の超高速処理が可能である。

5.3 レーザによる全溶接ステンレスハニカムパネルの製造技術¹²⁾

レーザ溶接による新型のハニカムパネル製造法をFigure11に示す。トラス型のハニカムコアとフェースシートの接合の

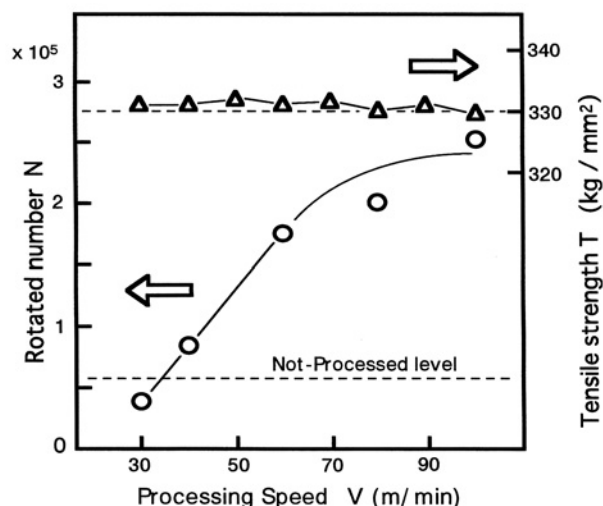


Figure 10 The results of the tensile strength test and the fatigue strength test

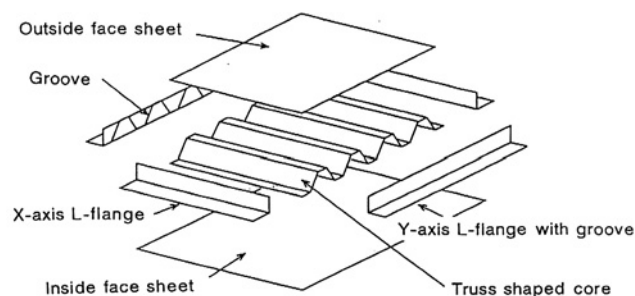


Figure 11 Concept of production method of Truss-type honeycomb panel

概念を示している。本ハニカムの最大の特徴はフランジにありハニカム同志または他部材との結合が容易で継手部の機械特性も極めて高い所にある。一般のハニカム構造体は軽量高剛性を特徴とした構造材料、機能材料であり、構造材料としては航空機等輸送機器の内外壁やドアあるいは一部の建築材料に利用されている。このようなハニカムパネルはハニカムコアとそれを挟む2枚のフェースシートから出来ている。フェースシートとハニカムコアとの接合は接着材が主であり、このような製造方法のハニカムパネルは材質、あるいは材料間の接着剤に起因し、高温箇所である輸送機器のエンジン周辺や、海洋構造物や船舶などの耐蝕性の要求される箇所での利用が不可能または制限される欠点がある。ステンレス製全溶接ハニカムパネルはこれらの接着材方式のハニカム構造体の問題点を解決している。この新型ハニカムパネルの応用としてテクノスーパーライナー（TSL）の主要部分である水中翼（Wing）と没水体（Lower Hull）を搭載した。この状態をFigure12に示す。

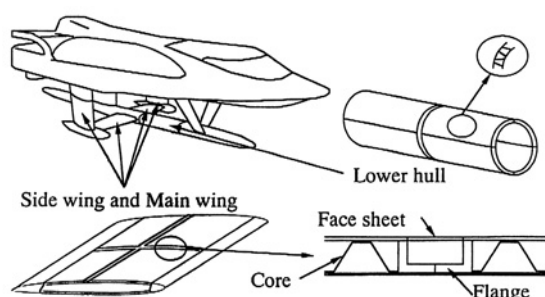


Figure 12 Composition of honeycomb panel used for main parts of Techno-Super-Liner

TSLのハニカムパネルに対する要求は極めて厳しく、特に水中翼は揚力の発生、船全体の姿勢制御を行う機能から高い機械的特性や寸法精度が必要である。次に、本開発のハニカムパネルの機械的特性などを示す。(1) パネルのたわみ量； $\omega \leq 2.0\text{mm}$ (等分布荷重； $q = 0.24\text{MPa}$)、(2) 許容応力； $\sigma \leq 470\text{MPa}$ (降伏応力； $\sigma_y = 588\text{MPa}$ としたときの $0.8\sigma_y$)、(3) パネルの引張疲労強度；2気圧相当で500万回まで破断無し、(4) 耐食性は無垢材と同等、(5) 寸法精度； $10\mu\text{m}$ 以上、(6) 他部材との接合が現場施工にて容易である、(7) 曲面パネルが得られ、(8) フランジにてパネル端面で応力集中を避ける構造になっている等の特徴がある。

5.4 45kW CO₂レーザーによる熱間連続圧延用バー接合システムの開発^{13,14)}

熱間連続圧延は1000℃近傍の高温である粗バーを粗圧延と複数の仕上げ圧延により数ミリの薄鋼板まで圧延するシステムで従来は粗バーを一本毎にて圧延するもので、粗バーの先端部と後端部の性能は仕様外の特性となり歩留まりの低下となっていた。

Figure13に本溶接システム構成の概要を示す。本レーザー溶接システムは現時点で産業上用いることができる世界最大の45kW CO₂レーザーを2台用いた実機応用技術である。主な構成は大きく分けて以下の4つの部位より構成される。①コイルボックス：粗圧延機を出た粗バー（厚さ30～40mm、

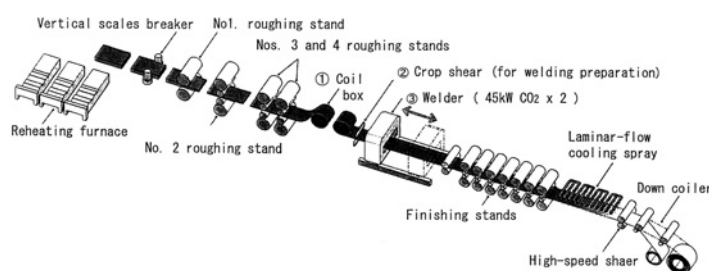


Figure 13 Major feature of continuous finish rolling at Oita works' hot-rolling mill

温度1000℃～1100℃)を巻き取り保熱し、溶接機が必要とするタイミングで巻き戻すことができる装置。②クロップシャー：先行材の後端と、後行材の先端を切り揃え溶接に必要な開先形状を形成する装置。③溶接台車：仕上げスタンドでの粗バーの圧延速度（最大90m/min）に追従可能な速度で移動する。先行の粗バー後端と後行の粗バー先端をクランプし、2つのレーザートーチを圧延方向と直角方向に開先に自動動かしながら移動し、速度3m/min～10m/minでレーザー溶接を実施する装置。④レーザー発振器（図示せず）：圧延ラインの両側の地上に1台ずつ固定配置されており、接合台車との間は伸縮可能なビーム導波路で結ばれている。この導波路を通じてレーザービームは導波され開先に照射される。レーザービーム幅は約4mm、溶け込み深さは約30mmである。

本システムにて粗バーから薄鋼板が連続的に供給される仕組みになり全てが従来の中間部材の特性（高品質で均一）となり大幅な歩留まり向上となった。

6 鉄鋼業での高出力レーザー応用の展開

鉄鋼業では生産性向上そしてコスト削減を旗頭に技術開発を推進している。Figure14に高出力CO₂レーザーの開発と鉄鋼業への導入を年次とパワーレベルにて示す。この中で新プロセスの開発が進み高出力レーザーの応用も活発になっている。このように高出力レーザーの開発と利用は急速に進歩しているが、新日本製鐵（株）を含む鉄鋼業でも70年代の後半より高出力レーザーの研究開発を開始している。そして、高出力レーザーの開発発展と共に10kWから25kWのCO₂レーザーを製鉄所に導入している。米国海軍での100kWレーザーの報告が20年前に報告されている。民間利用は間が空いたが、ここ

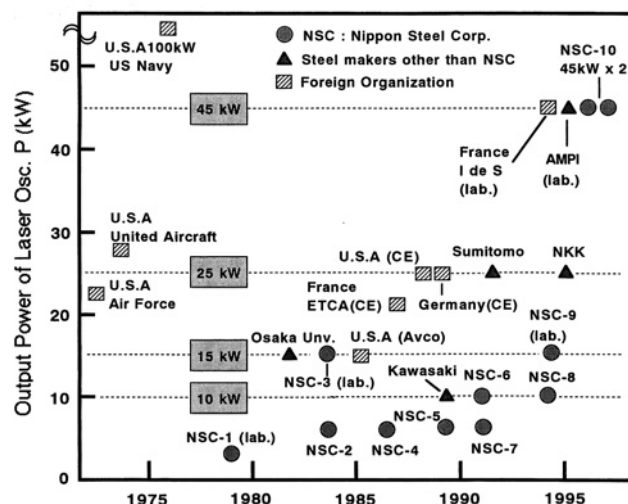


Figure 14 Development and introduction of the high power CO₂ laser into the steel industry

数年にして急速な進展が見られ、世界最大の商業機の45kW CO₂レーザがフランス溶接研究所に、国内でも近畿高エネルギー加工技術研究所 (AMPI) に導入された。そして前章にて報告したように新日鐵・大分製鉄所に2台導入し24時間のフル稼働となっている。

7 おわりに

近年、レーザ発振器の高出力化は急速に進み、最も、工業的に利用が高いYAGレーザ発振器とCO₂レーザ発振器は利用範囲も大きく拡大している。これらのレーザ発振器の高出力化と共に、レーザ加工の最適化を考慮してレーザビームの時間・空間的な制御の開発も盛んに実施され、今まで以上に応用範囲が広がってきた。今後、高出力レーザビームの利用技術の研究・開発の実施において、レーザ加工に及ぼす諸要因としてレーザビームと材料の相互作用をさまざまな角度から検討する事によって、新技術または新プロセスを創造する事が出来ると考える。そして、高出力のレーザビームの利用技術はその特徴を生かし、多くの分野、プロセスにて、更に重要な技術として発展していくと確信する。

参考文献

- 1) K. Minamida : High Power Laser Applications in Nippon Steel Corporation, Laser Advanced Materials Processing, LAMP'92, 2 (1992), 969.
- 2) T. Iuchi, et al. : Laser Processing for Reducing Core Loss of Grain Oriented Silicon Steel, Journal of Applied Physics, 53 (1982) 3, Part-2.
- 3) K. Minamida, et al. : CO₂ Laser Welding with Plasma Utilization, Proc. of the 1st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics (ICALEO'82), 31 (1982), 65.
- 4) 河合義人, 相原正樹, 石井功一, 田淵 衡, 佐々木弘明 : プロセスライン用レーザ溶接機の開発, 川崎製鉄技報, 16 (1984) 1, 53.
- 5) K. Minamida, A. Sugihashi, et al. : Butt Welding of Thin Stainless Steel with The Ripple Mode Nd-YAG Laser, Proc. of the laser material processing symposiums of ICALEO'91, 74 (1991), 168.
- 6) K. Minamida, et al. : Wedge Shape Welding with Multiple Reflecting Effect of High Power CO₂ Laser Beam, Proc. of the 5th ICALEO'86, (1986), 97.
- 7) K. Minamida, J. Suehiro, et al. : Laser System for Dulling Work Rolls by Q-switched Nd-YAG Laser, Journal of laser application, 1 (1989) 4, 15.
- 8) K. Minamida, M. Kido, et al. : Surface Annealing of Steel Wires for Automotive Tires by CO₂ Laser with Cone Focusing Mirror, Proc. of the 9th ICALEO'90, 71 (1990), 460.
- 9) S. Maeda, M. Yamamoto, et al. : Development of Color-Designed Stainless Steel by Pulsed Laser Irradiation, Nippon Steel Technical Report, (1990) 46.
- 10) T. Sakai and N. Hamada : A Q-Switch CO₂ Laser using Intense Pulsed RF Discharge and High Speed Rotating Chopper, Tenth International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers, 2502 (1994), 25.
- 11) M. Oikawa, K. Minamida, et al. : Development of All-Laser-Welded Honeycomb Structures for High Speed Civil Transports, Proc. of the 12th ICALEO'93, (1993), 453.
- 12) K. Minamida : Applications of High Power Laser Processing in the Steel Industry, Proc. Of International Forum of Laser Processing, IFLP'98, (1998), 34.
- 13) K. Minamida : High Power Laser Applications in Nippon Steel Corporation, Proceedings of SPIE, High Power Lasers in Manufacturing, 3888 (2000) (2000年8月10日受付)