

原子力機器の加工に対しては、高精度、低ひずみ、低入熱といった通常の製品とは異なる厳しい仕様が要求されている。

当社では、低ひずみで熱影響が少なく精密加工ができるレーザー加工の特長を生かし、原子力機器の加工に、レーザーによる切断・溶接・表面熱処理の技術を適用し、品質向上、信頼性の確保並びに製作期間の短縮に大きく寄与している。

The requirements for the processing of nuclear energy equipment include high precision, low distortion, and low heat input. Toshiba has developed laser processing techniques for cutting, welding, and surface heat treatment of nuclear energy equipment because the zone affected by distortion and heat in laser processing is very small.

Laser processing contributes to the manufacturing of high-quality and high-reliability equipment and reduces the manufacturing period.

## 1 まえがき

レーザーによる加工は、レーザーの集光性を利用し、低ひずみで熱影響の少ない加工ができるという特長を持っている。当初は、穴あけ、切断に使用していたが、最近ではレーザー発振器の大出力化に伴い、溶接、表面熱処理の分野でも適用が拡大されつつある。

原子力機器の加工においては、高精度、低ひずみ、低入熱といった通常の製品とは異なる厳しい仕様が要求されているため、上記に示すレーザー加工の特長を生かし、当社では原子力機器の加工にレーザーによる切断・溶接・表面熱処理の技術を適用している。

原子力機器の加工にレーザーを適用することにより、製品の品質向上、信頼性確保並びに製作期間の短縮に大きく寄与している。以下に、当社の原子力機器の製造に関するレーザー加工の実用化技術について述べる。

## 2 レーザ精密切断技術の適用

原子力分野における切断は、炭素鋼やステンレス鋼が多く、従来はガス切断もしくはプラズマ切断を使用してきたが、これらの切断方法では酸化熱反応を得るために酸素ガスを用いているので、酸化層を機械加工で除去する必要がある。

レーザーによる切断も、当初は、酸化熱反応を得るために酸素ガスをアシストガスとして利用していた。しかし、近年では、レーザー出力及びレーザー光の集光性が向上したことから、10mm程度の板厚までは窒素ガスをアシストガスとして

利用することにより、切断面が酸化しない無酸化切断が可能となった。

また、レーザー切断は光を非常に細く絞って切断するため、非常に良い切断精度を得ることができる。

これらの特長を利用した切断事例について述べる。

### 2.1 オーステナイト系ステンレス鋼への適用

無酸化レーザー切断は、切断面が酸化されないように高圧窒素ガスを用いる切断方法であるが、板厚3mm以上の板材には大出力レーザー発振器が必要であることから、あまり普及せず、データもほとんどない状態である。

このため、オーステナイト系ステンレス鋼における無酸化レーザー切断条件を選定した。

レーザー発振器側のパラメータには、レーザー出力、集光レンズの焦点距離、材料表面に対する焦点の位置などがあり、高圧窒素ガスのパラメータには、ガス圧、流速、流量などがある。これら数多くのパラメータを入熱エネルギーとして整理して、適正切断条件を板厚と入熱エネルギーの関係で整理した一例が図1である。

図1に示す適正切断条件 $\pm 10\%$ の範囲内で切断すれば、切断面が酸化しない無酸化レーザー切断が可能である。切断面の材料評価については、切断面のマイクロ組織観察、SEM（走査型電子顕微鏡）観察、原子力使用環境での腐食試験を実施し、無酸化レーザー切断面がそのまま残っても問題のないことを確認している。

これらのデータから、現在では最大13mmまでの板材に対し無酸化レーザー切断を適用しており、切断後の加工が不要となった。

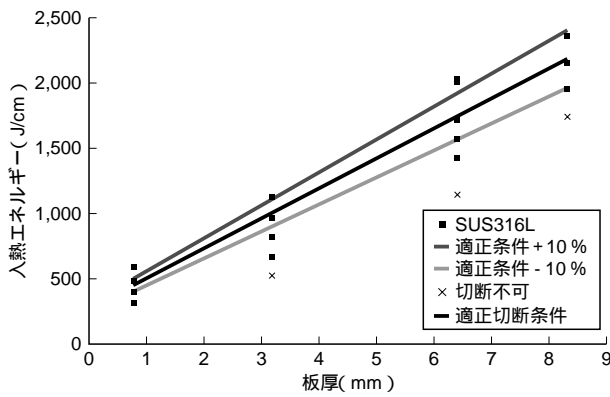


図1. ステンレス鋼(SUS316L)の適正切断条件 板厚と入熱エネルギーは直線関係にある。

Optimum laser cutting condition for stainless steel

## 2.2 ボロン添加ステンレス鋼への適用

原子力分野では、中性子を吸収する能力の高いボロンを添加したボロン添加ステンレス鋼を使用済燃料貯蔵ラックに使用している。

近年、原子力発電所の使用済燃料の増加に伴い、使用済燃料貯蔵プールの貯蔵容量を増量する必要が生じている。使用済燃料貯蔵プールの容量は限られており、その中に最大の使用済燃料を貯蔵するために、当社では、図2に示すようにボロン添加ステンレス鋼を格子状に構成する構造の新型使用済燃料貯蔵ラックを開発した。

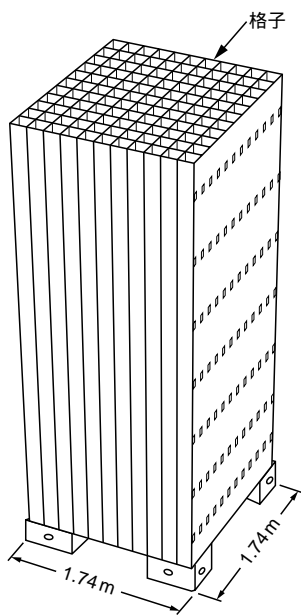


図2. 新型使用済燃料貯蔵ラック 格子型構造にすることにより、貯蔵効率を向上させることができた。

New type spent fuel storage rack

新型使用済燃料貯蔵ラックの概略製作手順は次のとおりである。

- (1) 板材を切断・加工する。
- (2) 板材を格子状に組み立てる。
- (3) 格子の内側角部を溶接する。
- (4) 燃料支持板、ベースを溶接する。

このような工程の中で、板材の切断・加工を通常の機械加工で実施すると、膨大な加工時間を必要とする。

そこで、当社では高精度で切断面がそのまま溶接開先面としても使用可能な、高圧窒素ガスを用いた無酸化レーザー切断技術に着目し、この新型使用済燃料貯蔵ラックの製作に適用した。

図1で得られた条件を基に、ボロン添加ステンレス鋼の切断条件を求めたが、オーステナイト系ステンレス鋼ではほとんど見られなかった切断面裏側に発生する溶融金属の付着物(ドロス)が見られ、明らかに切断性が異なるという結果が得られた。

このため、ボロン添加ステンレス鋼特有の切断条件を求める必要があると判断し、上記パラメータに対し最適切断条件の選定をした。その結果、オーステナイト系ステンレス鋼に比べ入熱エネルギーを高く、周波数を低く、ノズル径を小さくすることでドロスが発生しない適正切断条件が得られた。

ボロン添加ステンレス鋼の無酸化レーザー切断面を図3に示すが、切断面は金属光沢を呈しており、表面粗さも滑らかでそのまま溶接開先に使用できる。

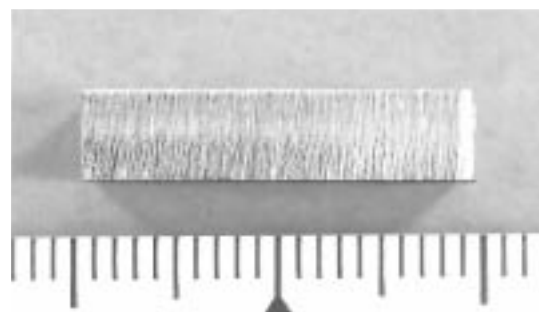


図3. 無酸化レーザー切断面 表面が酸化されず滑らかな面を呈している。

Cutting surface obtained by non-oxidation laser cutting

切断面の評価については、最終的には新型使用済燃料貯蔵ラックの構造を考慮して、レーザー切断面をそのまま溶接した溶接試験を行い、溶接部の各種材料評価試験を実施した結果、レーザー切断面をそのまま溶接しても問題のないことを確認している。

以上の検討結果を踏まえて、新型使用済燃料貯蔵ラックの製造を開始している。これらの製造技術の抜本の見直しと技術革新により、大幅な使用済燃料貯蔵ラックの性能向上が達成できたとともに、製作については製作期間の短縮に大きく貢献することができた。

### 3 レーザ溶接技術の適用

レーザー溶接は次のような特長を持っている。

- (1) エネルギー密度が他の溶接方法と比べ大きいので、高速溶接が可能であり、溶接による熱影響が非常に少ない。
- (2) 溶接後に発生する熱ひずみが小さい。

これらの特長を利用した適用事例を以下に述べる。

#### 3.1 薄板への適用(炉内機器)

炉内機器である制御棒(図4)は原子炉压力容器内の核反応を制御する重要な機器であり、板厚1mm程度のステンレス鋼の内側に中性子を吸収する材料が組み込まれており、このステンレス鋼は制御棒の中央で溶接により接合されている構造となっている。

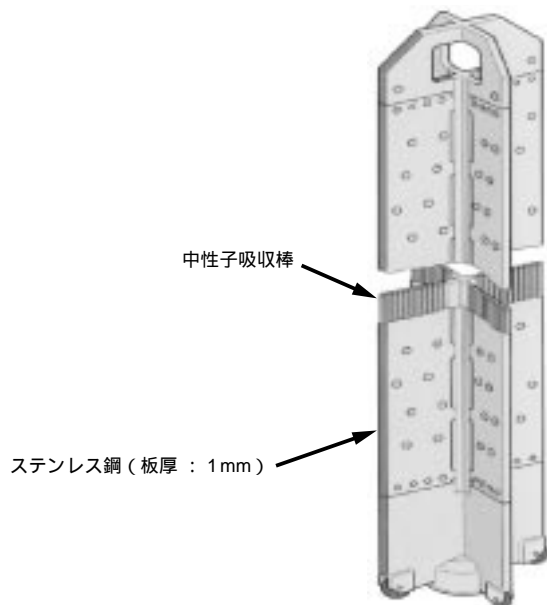


図4. 制御棒 中性子吸収棒が、板厚1mmのステンレス鋼に内蔵されている。  
Control rod

板厚1mm程度と非常に薄い板のために溶接による変形が発生するので、従来は変形の少ないスポット溶接、もしくは低入熱のTIG(Tungsten-Inert Gas)溶接により接合しているが、より変形を抑えるためにレーザー溶接の開発を実施した。

レーザー溶接によるビード外観と断面マクロ組織を図5に示すが、従来のTIG溶接と比べビード幅が非常に狭くなっており、熱影響が少ないので溶接による変形もTIG溶接に比べ約1/4と大幅に低減され、従来に比べ品質が向上している。

また、溶接に要する時間も半減し、製作期間短縮に大きな効果がある。

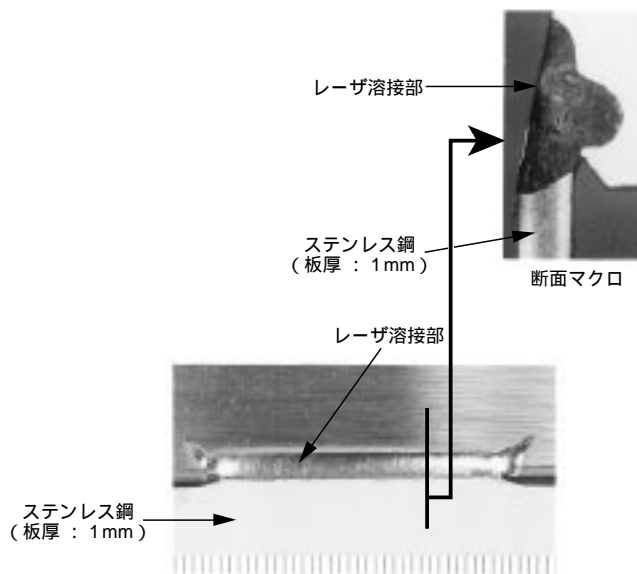


図5. レーザ溶接部の外観と断面マクロ組織 従来の溶接法に比べビード幅が非常に狭い。  
Bead appearance and macrostructure of laser welding cross section

#### 3.2 薄板への適用(中性子しゃへい体)

図6に示すように曲率半径約1,200mmの箱状のプレート1(板厚1mm)にカドミウム(板厚1mm)を入れて、更にプレート2(板厚3mm)でふたをして全周溶接する中性子しゃへい体にレーザー溶接を適用した。

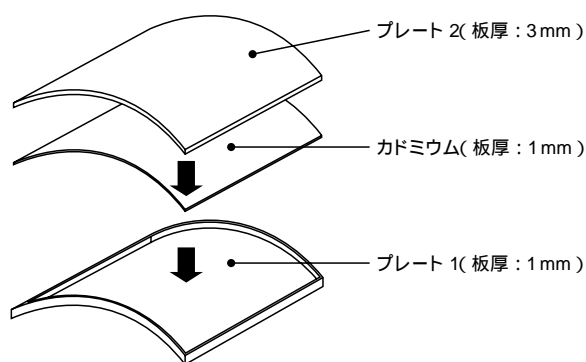


図6. 中性子しゃへい体の構造 ステンレス鋼の中にカドミウムを封止する構造である。  
Structure of neutron shield

この場合の技術課題は次のとおりである。

- (1) 融点が約310 と低いカドミウム板を溶融することなく、ステンレス鋼で完全に封止できる。
- (2) 溶接後の寸法精度が確保される。

レーザー溶接状況を示す図7は、溶接時の変形を抑えるために中性子しゃへい体を拘束し、更に、溶接ビードの酸化を防止するために専用のシールドジグを使用している。レーザー溶接後の溶接部の断面を図8に示すが、レーザー溶接特有の幅の狭い溶接となっており、カドミウムに熱影響が及んでいないことがわかる。

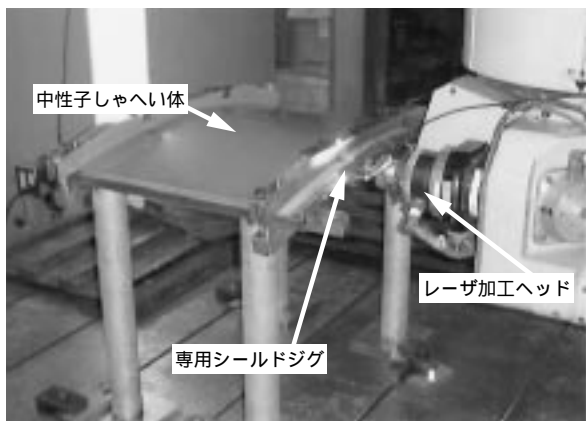


図7. レーザ溶接状況 専用のシールドジグを用いて酸化を防いでいる。  
Application of laser welding

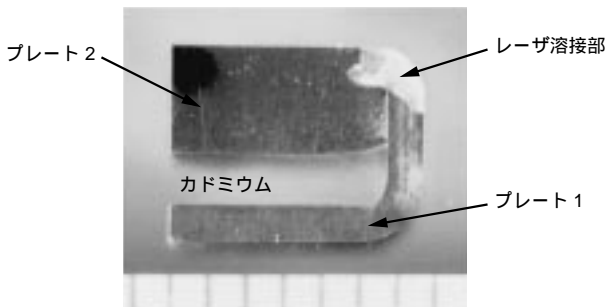


図8. レーザ溶接ビードの溶込み状況 カドミウムへの熱影響はない。  
Bead penetration of laser welding

この技術を使用することにより、溶接変形がなく品質が高い製品を短時間で製作することができた。

#### 4 表面熱処理技術の適用

レーザーによる表面熱処理は、高密度エネルギー熱源の特性を生かした局所的な熱処理が可能であり、特にレーザーに

よる焼入れ処理では複雑な形状の局部硬化が可能のため、自動車部品(ギヤ、カム、シャフト)への適用が実用化されている。

焼入れ温度が1,273 Kを超えるマルテンサイト系ステンレス鋼は、レーザー焼入れ性が悪く適用が難しいとされているが、全体を熱処理炉により硬化処理すると、原子力プラントの使用環境では応力腐食割れが発生しやすくなるという問題がある。

しかし、表面だけを局部的に硬化処理することができれば応力腐食割れの発生を防ぐことができるので、マルテンサイト系ステンレス鋼の表面を溶融することにより、表面部分を硬化処理できるレーザー表面熱処理技術を開発し、適用している。

実際に適用している製品では、レーザー表面熱処理により表面から深さ方向に0.6 mm程度が溶融されており、図9に

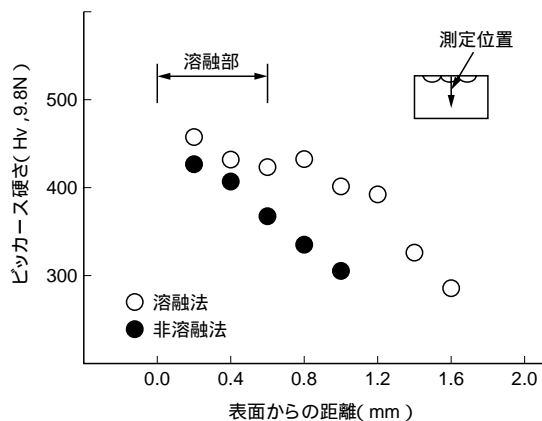


図9. レーザ表面熱処理後の硬さ分布 溶融法では、表面から深さ方向1 mm程度までは十分硬くなっている。  
Hardness distribution after laser surface treatment

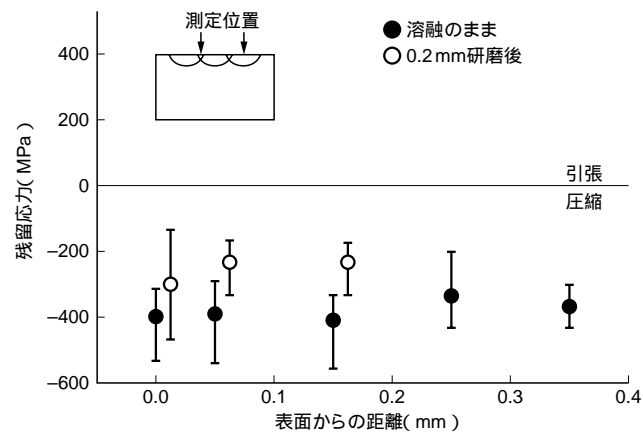


図10. レーザ表面熱処理後の残留応力分布 表面処理後の残留応力は圧縮である。  
Residual stress distribution after laser surface treatment

硬さ分布を示すが、表面から1 mm程度まではピッカース硬さで400以上は確保されている。

更に、加工条件をコントロールすることにより材料表面の残留応力を圧縮にすることができ、応力腐食割れ防止に大きな効果がある(図10)。

## 5 あとがき

原子力分野の製造技術のキーテクノロジーとしてレーザーによる加工技術の開発に注力し、実機への適用拡大を推進している。

今後は、更にレーザーの特長を生かして、高精度・高品質が要求される原子力機器へ適用するために技術開発を実施し、高品質で信頼性の高い原子力機器を提供していくために、よりいっそうの努力をしていく所存である。

## 文 献

(1) 田村雅貴,ほか.“大出力CO<sub>2</sub>レーザーによる切断技術に関する研究(第2報)”.精密工学会春季大会学術講演会講演論文集.1999.

(2) 牧野吉延,ほか.“マルテンサイト系ステンレス鋼のレーザー硬化処理”.溶接学会 溶接法研究委員会.1992.



山田 祐司 YAMADA Yuji

電力システム社 京浜事業所 原子炉機器部グループ長。  
原子力機器の製造技術開発に従事。溶接学会会員。  
Keihin Product Operations



前川 治 MAEKAWA Osamu

電力システム社 原子力事業部 磁子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部グループ長。原子炉機器の設計に従事。米国機械学会会員。

Nuclear Energy Systems and Services Div.



牧野 吉延 MAKINO Yoshinobu

電力システム社 電力・産業システム技術開発センター レーザ応用技術開発担当主査。

レーザーを応用した製造技術開発に従事。溶接学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center