

# PWR原子炉容器の冷却材出入口管台に対する水中レーザー溶接技術

Underwater Laser Beam Welding Technology for Reactor Vessel Nozzles of PWRs

依田 正樹 田村 雅貴

■ YODA Masaki ■ TAMURA Masataka

原子炉容器や炉内構造物の溶接部などで、応力腐食割れと考えられるひび割れの発生が報告されている。

東芝は、PWR (Pressurized Water Reactor: 加圧水型原子炉) 原子炉容器の冷却材出入口管台<sup>(注1)</sup> (以下、出入口管台と略記) に対する保全対策として、レーザーを用いた遠隔水中溶接技術を開発した。試験により、出入口管台内面の応力腐食割れに対する予防保全効果や出入口管台材料への適用性を確認するとともに、実機に適用できる水中レーザー溶接装置を製作した。

この技術は、従来使用されていた気中溶接工法と比べると、原子炉容器の水抜きが不要なため、工事期間を短縮できるとともに作業員の放射線被ばくを低減できる。今後、当社のグループ会社である米国のウェスチングハウス社と協力して、国内外の多くのPWRプラントへこの技術の適用を推進していく。

Toshiba has developed an underwater laser beam welding technology for the maintenance of reactor vessel nozzles of pressurized water reactors (PWRs), which eliminates the need for the drainage of water from the reactor vessel. The new welding system makes it possible to both reduce the work period and minimize the radiation exposure of workers compared with conventional technologies for welding in ambient air.

We have confirmed the effectiveness of this technology through experiments in which stress corrosion cracking (SCC) was mitigated on the inner surfaces of nozzles. We are promoting its practical application in Japan and overseas in cooperation with Westinghouse Electric Company, a group company of Toshiba.

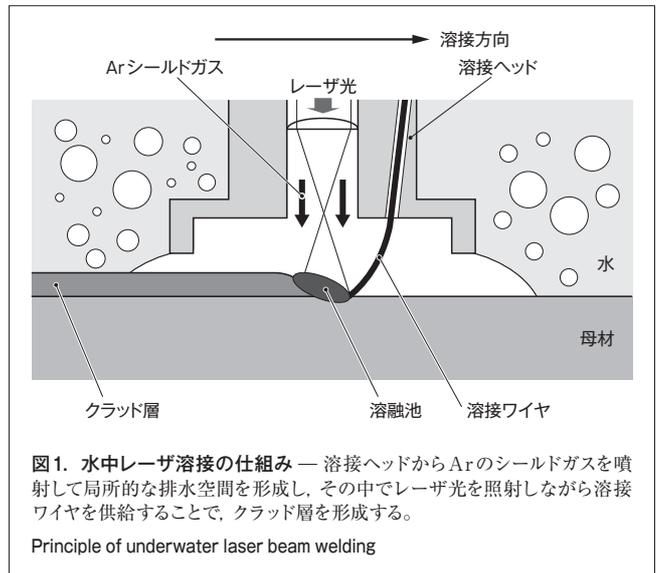
## 1 まえがき

BWR (Boiling Water Reactor: 沸騰水型原子炉) やPWR (Pressurized Water Reactor: 加圧水型原子炉) では、原子炉 (圧力) 容器や炉内構造物の溶接部に、応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking) が発生した事例が報告されている<sup>(1)</sup>。これを克服するため、これまで様々な対策が施されてきた。

東芝は、SCCに対する予防保全及び補修工法の一つである水中レーザー溶接技術<sup>(2),(3)</sup>を、PWR原子炉容器の冷却材出入口管台 (以下、出入口管台と略記) に適用するため、新たな溶接技術としてのテンパービード溶接工法と、実機施工装置を開発した。原子炉容器は、定期検査中でも炉内からの放射線を遮るために満水となっている。気中でしか行えない従来の溶接工法に比べ、遠隔施工による水中レーザー溶接では原子炉容器からの排水が不要となる。これにより、作業時間を短縮できるとともに、作業員の放射線被ばくを低減できる。

## 2 水中レーザー溶接技術の仕組み

水中レーザー溶接法の仕組みを図1に示す。原子炉容器内に設置した溶接ヘッドから施工対象面にアルゴン (Ar) のシールドガスを噴射し、水を排除するとともに表面を乾燥させる。



その排水空間の中で光ファイバ伝送したレーザー光を照射して母材を溶融し、その溶融池に溶接ワイヤを供給しながら移動して、表面にクラッド層<sup>(注2)</sup>を連続的に形成する仕組みである。

(注1) 原子炉容器などにあらかじめ取り付けられている配管接続のための台。  
(注2) 金属表面に別の種類の金属で薄く肉盛りした層。

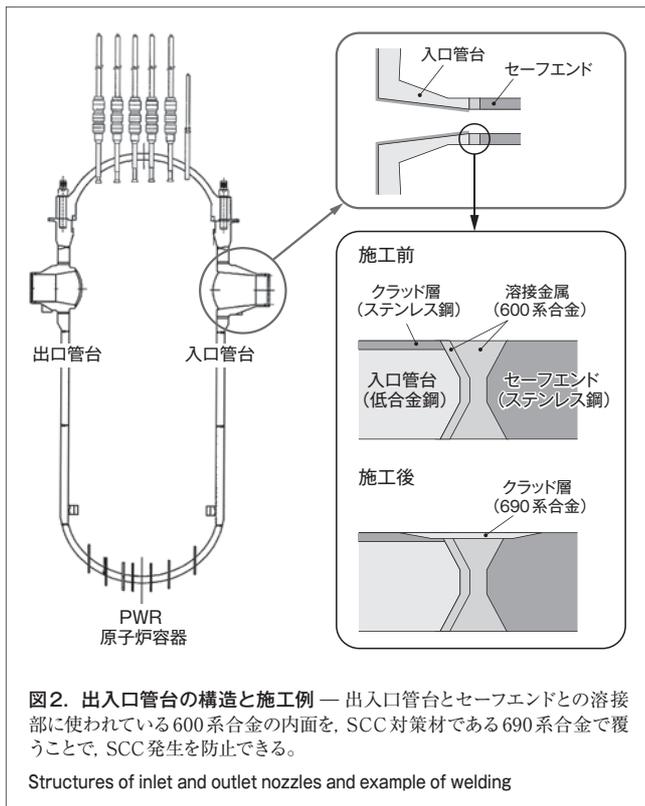


図2. 出入口管台の構造と施工例 — 出入口管台とセーフエンドとの溶接部に使われている600系合金の内面を、SCC対策材である690系合金で覆うことで、SCC発生を防止できる。  
Structures of inlet and outlet nozzles and example of welding

### 3 出入口管台への適用

#### 3.1 クラッド溶接の耐SCC性確認

施工対象となる出入口管台の溶接部の構造と施工例を図2に示す。初期に建設されたプラントでは、600系ニッケル (Ni) 基合金 (以下、600系合金と略記) と呼ばれる、SCC発生懸念がある材料が溶接部に使用されている。この600系合金の表面に、SCC対策材とされている690系Ni基合金 (以下、690系合金と略記) の溶接ワイヤを用いてクラッド層を形成し、内面を覆うことで、SCC発生の可能性を低減することができる。

600系合金溶接金属の上に、水中レーザ溶接により690系合金のクラッド層を5層肉盛溶接した試験片の、クロム (Cr) 濃度の分布測定結果を図3に示す。横軸は試験片のクラッド層表面からの深さ、縦軸はCr濃度であり、Cr濃度が増すことにより耐SCC性が向上する。この例では、母材の600系合金溶接金属のCr濃度は約15%であり、Cr濃度が約29%の690系合金の溶接ワイヤをクラッド溶接している。クラッド第1層目は母材と溶融して、Cr濃度が母材よりもやや高い約21%となり、肉盛層数が増すに連れてCr濃度が増加している。3層目以上で690系合金とみなすことができるCr濃度が27%を超えることがわかる。

次に、690系合金3層のクラッド溶接によるSCC防止効果を確認するため、PWR炉水模擬環境でのSCC試験を実施した。図4(a)に示すとおり、試験片として600系合金溶接金属

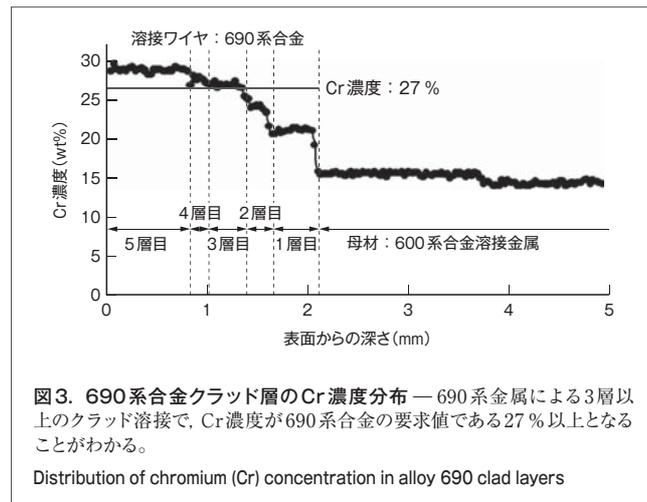


図3. 690系合金クラッド層のCr濃度分布 — 690系合金による3層以上のクラッド溶接で、Cr濃度が690系合金の要求値である27%以上となることがわかる。  
Distribution of chromium (Cr) concentration in alloy 690 clad layers

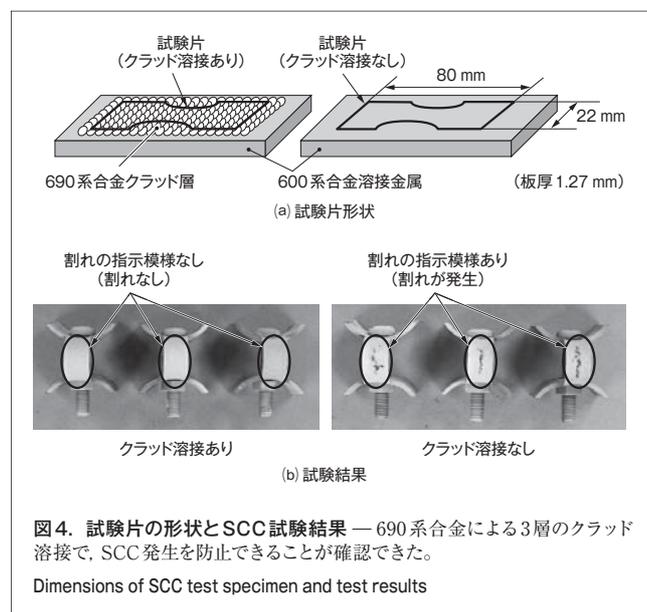
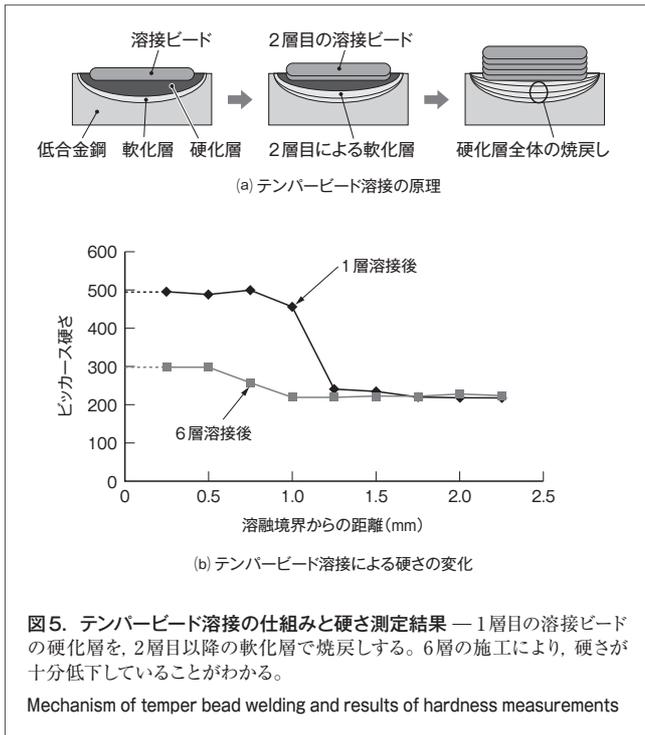


図4. 試験片の形状とSCC試験結果 — 690系合金による3層のクラッド溶接で、SCC発生を防止できることが確認できた。  
Dimensions of SCC test specimen and test results

の上に690系合金3層の水中レーザによるクラッド溶接を行ったものと、クラッド溶接を行わないものをそれぞれ3体製作した。表面にSCC発生を加速する引張応力を付与するため、逆U曲げ (RUB: Reverse U-Bend) 試験片とした。JIS (日本工業規格) G 0511: 2006「金属及び合金の逆U曲げ試験片を用いた応力腐食割れ試験方法」に基づいて、RUB試験片をPWR炉水環境を模擬した360℃の高温水中に1,000時間浸漬 (しんせき) した後、試験片表面の液体浸透探傷試験を行ってSCC発生の有無を確認した。図4(b)に示すように、クラッド溶接を行った試験片3体に割れはなく、クラッド溶接を行わなかった試験片3体はすべて割れが発生した。この結果から、水中レーザクラッド溶接がSCC発生の防止に有効であることを確認できた<sup>(4)</sup>。

#### 3.2 テンパーヒート溶接技術の開発

出入口管台の材料である低合金鋼は、溶接による熱影響で



材料の粘り強さである靱性（じんせい）が劣化するおそれがある。そこで、新規製作時には溶接後熱処理（PWHT：Post Weld Heat Treatment）により全体を約600℃に加熱して焼戻しすることで、靱性を回復させる。しかし、水中レーザー溶接を適用する場合には、出入口管台内部は炉水で満たされており、PWHTを適用することは困難である。そこで、水中レーザー溶接の溶接条件を工夫することで、PWHTと同様の効果を得ることができる水中レーザーによるテンパービード溶接技術を開発した。

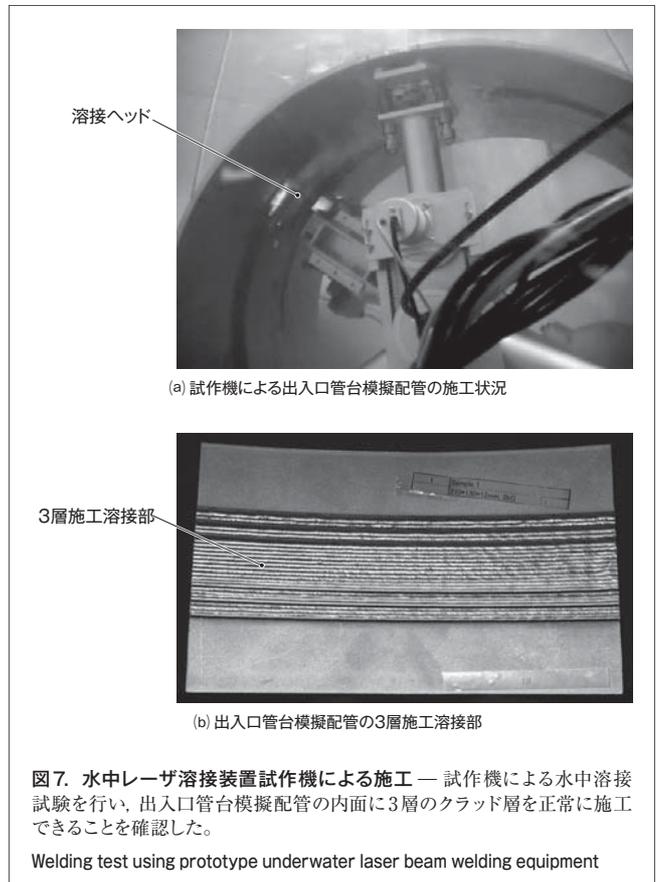
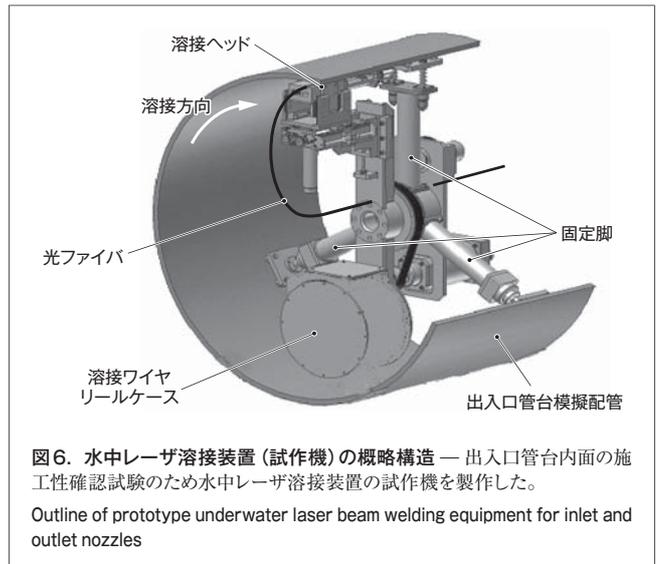
テンパービード溶接の仕組みを図5(a)に示す。低合金鋼に溶接を行うと、熱影響により、溶接ビードの下の母材に強度が低下した硬化層と、更にもう下に焼戻し効果による軟化層ができる。この現象を応用することで、2層目の軟化層を用いて1層目にできた硬化層の焼戻しを行い、更に層数を重ねることですべての硬化層を焼戻しすることができる。水中レーザーによる6層のテンパービード溶接を行った試験片の硬さ測定結果を図5(b)に示す。横軸は溶接ビードと低合金鋼の界面からの距離、縦軸はビッカース硬さである。1層施工後は表面から深さ約1mmにわたる領域が硬化しているが、6層施工後は焼戻し効果により十分軟化していることがわかる。なお、溶接ビードには硬化層はできないことを確認している。

以上から、水中レーザー溶接による出入口管台の施工にあたっては、低合金鋼及びその近傍に690系合金を溶接する場合は、このテンパービード溶接により施工を行うこととした。

### 3.3 水中レーザー溶接装置の開発

出入口管台の内面施工用の水中レーザー溶接装置（試作機）

の概略構造を図6に示す。装置全体を3本の固定脚で出入口管台の模擬配管内面に固定し、溶接ヘッドと溶接ワイヤのリールケースを回転させて施工する構成である。レーザー光は、光ファイバにより溶接ヘッドに伝送される。この試作機を用いた水中レーザー溶接試験の状況と、ステンレス鋼製の出入口管台の模擬配管に690系溶接金属で3層のクラッド溶接を行った施工部の写真を図7に示す。この試作機により、360°いづれ



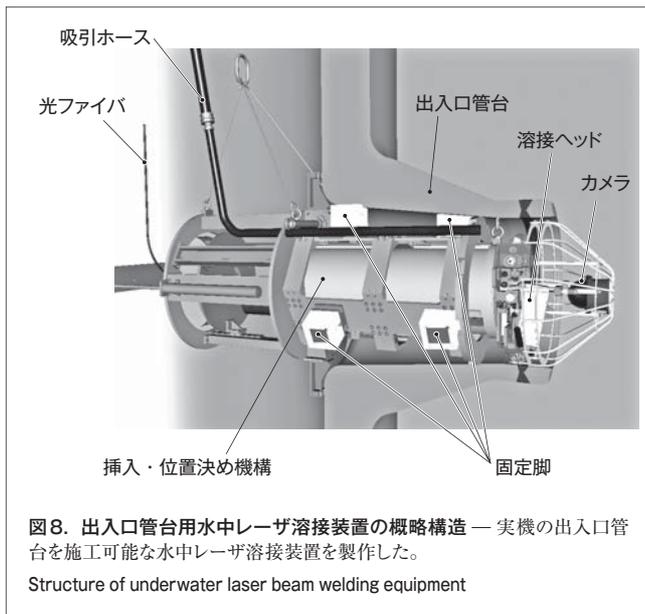


図8. 出入口管台用水中レーザー溶接装置の概略構造 — 実機の出入口管台を施工可能な水中レーザー溶接装置を製作した。  
Structure of underwater laser beam welding equipment

の姿勢においても正常なクラッド溶接を行うことができることを確認した。

次に、実機施工に対応するため、管台へ挿入して位置決める機構や観察用カメラ、シールドガス回収用の吸引ホースなどを付加した、出入口管台用水中レーザー溶接装置を製作した。装置の概略構造を図8に示す。装置を設置する際は、クレーンにより原子炉容器内に装置をつり下げて出入口管台の内部に挿入し、6か所の固定脚により固定し、溶接ヘッドを前後に移動して施工部への位置決めをする構成である。製作した出入口管台用水中レーザー溶接装置を用い、実機と同じ水深約10 mで試験を実施して性能を確認した。

#### 4 あとがき

PWR原子炉容器の冷却材出入口管台のSCC対策として、690系合金によるクラッド溶接の適用性を確認するとともに、テンパービード溶接技術と水中レーザー溶接装置を開発した。実機工事では、米国のウェスチングハウス社が保有する出入口管台内面の水中切削装置及び水中検査装置と組み合わせて使用する(図9)。これらの装置を用いた実機工事期間は、従来工法と比較して半分に短縮できると試算している。また、テンパービード溶接については国内の第三者機関による認定を取得しており、米国でも認定手続きを進めている。

水中レーザー溶接技術を出入口管台のSCCの補修及び予防保全対策として適用することで、従来の溶接工法に比べて工期を短縮し、作業員の被ばくを低減できる。国内だけでなく世界市場で今後の適用が期待されており、当社のグループ会社である米国ウェスチングハウス社とともに国内外プラントへの適用を進めていく。

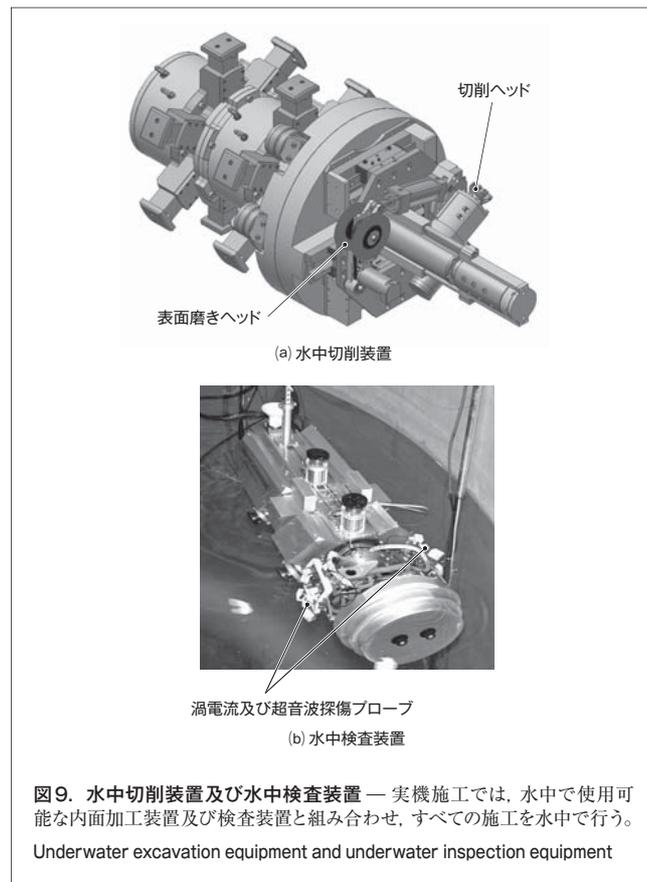


図9. 水中切削装置及び水中検査装置 — 実機施工では、水中で使用可能な内面加工装置及び検査装置と組み合わせ、すべての施工を水中で行う。  
Underwater excavation equipment and underwater inspection equipment

#### 文献

- (1) Grimm, B., et al. "U.S. Plant Experiences With Alloy600 Cracking and Boric Acid Corrosion of Light-Water Reactor Pressure Vessel Materials". U.S.NRC. <www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1823/sr1823.pdf>, (accessed 2010-08-20).
- (2) 金澤 寧, ほか. 水中レーザー溶接技術. 東芝レビュー. 60, 10, 2005, p.36-39.
- (3) Tamura, M., et al. "Development of Underwater Laser Cladding and Underwater Laser Seal Welding Techniques for Reactor Components (II)". 14th International Conference of Nuclear Engineering, Miami, FL, USA, 2006-07, American Society of Mechanical Engineers (ASME), et al. 2006, ICONE14-89346. (CD-ROM).
- (4) Hino, T., et al. "Underwater Laser Beam Welding of Alloy690". 2009 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Tokyo, Japan, 2009-05, Atomic Energy Society of Japan, et al. 2009, ICAPP '09-9075. (CD-ROM).



依田 正樹 YODA Masaki

電力システム社 核子エンジニアリングセンター 原子力機器設計部主幹。原子炉圧力容器及び炉内構造物のシステム設計に従事。日本原子力学会、レーザー学会会員。  
Isogo Nuclear Engineering Center



田村 雅貴 TAMURA Masataka

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部主査。レーザーを応用した材料技術開発に従事。溶接学会会員。  
Power and Industrial Systems Research and Development Center