

水中レーザーによるテンパービード溶接技術の開発

Development of temper bead welding by under water laser welding

福田 健 (東芝)
頓宮 雄一 (東芝)
依田 正樹 (東芝)
森島 康雄 (東芝)

田村 雅貴 (東芝)
河野 渉 (東芝)
小畑 稔 (東芝)

Takeshi Fukuda and Masataka Tamura and Yuichi Tongu ,
Toshiba corporation, 2-4,Suehiro-cho,Tsurumi-ku,Yokohama
Wataru Kono and Masaki Yoda and Minoru Obata and Yasuo Morishima,
Toshiba corporation,8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama,

Toshiba has developed temper bead welding by under water laser welding as SCC counter measure for aged components in PWR and BWR nuclear power plants. Temper bead welding by under water laser welding technique recovers toughness of low alloy steel reactor vessel by employing proper the number of cladding layers and their welding conditions. In this report, some evaluation results of material characteristics of temper bead welded low alloy steel are presented.

Key Words: Under water laser beam welding, Temper bead welding, low alloy steel

1. 緒言

東芝は、これまで原子炉内構造物の予防保全、補修工法として、工期短縮、作業者被ばく低減の効果が大きい水中レーザー溶接技術の開発に取り組み、オーステナイ系材料のクラッド溶接や、き裂封止溶接技術を開発してきた^[1]。

近年、加圧水型原子炉(PWR)の压力容器管台の溶接部において、SCCの発生事例報告がある。この部位を代表とするSCC対処を目的とした予防保全、補修溶接では、熱影響が低合金鋼に及び、通常溶接後熱処理が必要である。しかしながら実機での溶接後熱処理は構造上困難であり、熱影響で脆化した硬化層を焼き戻しながら溶接し、後熱処理と同様の効果を得るテンパービード溶接を適用する必要がある。

水中レーザー溶接法を原子炉压力容器に適用するため、新たに水中レーザーによるテンパービード溶接工法を開発した。本報告では、PWRの原子炉冷却材出入口管台を対象とした、水中レーザーによるテンパービード溶接部の材料評価の結果を報告する。

2. 水中レーザー溶接方法の概要と適用箇所

水中レーザー溶接法の原理を図1に示す。施工部に設置した溶接ヘッドからシールドガスを噴射し、施工対象面に局所的な空洞を形成する。その空洞中で

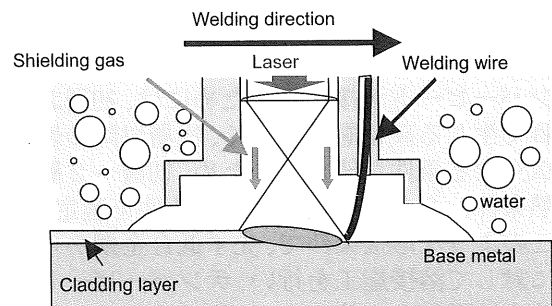


Fig.1 Schematic illustration of under water laser beam welding

レーザー光を照射しながら溶加材を供給してクラッド層を形成する溶接技術である^[1]。

Fig.2 に水中レーザー溶接の適用箇所の代表例である、PWR冷却材出入口管台の異材溶接継手部の模式図を示す。本部位では、600合金溶接部の耐SCC性改善を目的に、高Cr濃度を有する690合金をクラッド溶接する。クラッド溶接部が低合金鋼に近接する場合には、テンパービード溶接が必要となる。

水中レーザー溶接によるテンパービード溶接は、施工環境が水中であるために溶接時の冷却速度が速く、気中環境に比べてテンパービード溶接が難しいと考えられてきた。

そこで、水中レーザーによるテンパービード溶接の適正条件の確認と、溶接部の断面観察、硬さ、衝撃試験をはじめとした材料評価試験を行い、水中レーザーによるテンパービード溶接部の健全性を評価した。

連絡先: 福田 健
株式会社 電力・社会システム開発センター
〒230-0045 神奈川県横浜市鶴見区末広町 2-4
E-mail:takeshi4.fukuda@toshiba.co.jp

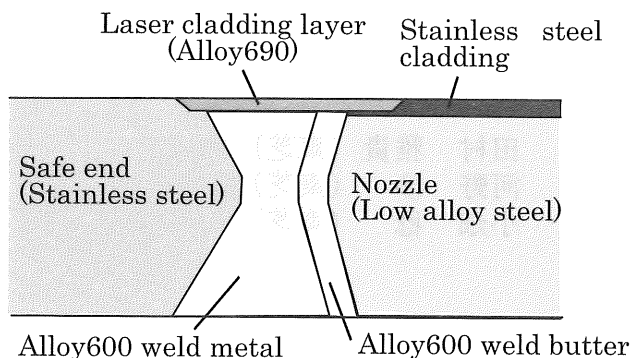


Fig.2 Schematic illustration of cladding layer on dissimilar weld between reactor vessel and safe end

3. 試験方法

供試材はPWRの冷却材出入口管台を想定し、母材は低合金鋼(SA-533 TypeB Cl. 1、SQV2A 相当)、溶加材はErNiCrFe-7A(690合金)を用いた。

テンパービード溶接は、初層溶接で焼入れ硬化した溶接熱影響部が、後続溶接でピーク温度600℃～Ac1温度の熱サイクルによる焼戻しを受けて、硬化部の靱性が改善^[2]する工法である。効率的にテンパービード溶接を行うためには、初層および2層目で生じる硬化層が小さく、次層以降の焼戻し層が広がる条件が望ましいため、初層～2層目は小入熱条件、3～6層目は大入熱条件を選定した。

このような溶接条件で、先ず低合金鋼から成る平板に対して溶接施工を行い、テンパービード溶接部の健全性評価を目的として、断面マクロ・ミクロ組織、硬さ測定、シャルピー衝撃試験、さらに溶接部の強度試験として側曲げ試験と引張試験を実施した。

その後、実機のPWR冷却材出入口管台への適用性確認を目的に、実機施工部を模擬した深さ4mmの溝加工を有するφ700mmのパイプ内面にテンパービード溶接を行い、溶接部の外観と断面マクロ・ミクロ組織、および硬さ評価を行った。さらに、同部位での補修溶接に対する適用性確認を目的に、深さ40mmの溝加工部に対してテンパービード溶接を行い、断面マクロ・ミクロ組織観察、硬さ評価、および衝撃試験を行った。

4. 試験結果

4. 1 平板による溶接部の健全性評価

Fig.3に平板に対して溶接施工したテンパービード溶接部の断面組織を示す。断面マクロ観察では、割れ、ブローホール等の溶接欠陥がないことが確認できた。また、ミクロ組織観察から、溶融境界付近の熱影響部は微細な金属組織となっていることが確認できた。

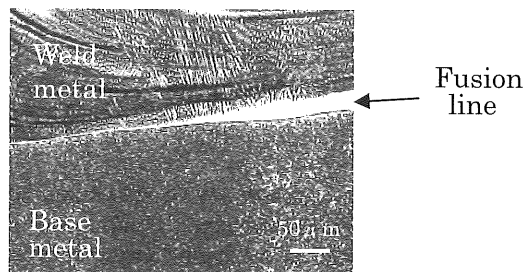
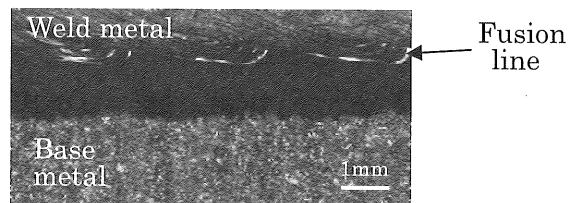


Fig.3 Cross-sectional observation of temper bead weld

Fig.4には、初層と6層積層後の溶接部およびその近傍の硬さを示す。低合金鋼の硬さに変化が認められた熱影響部の範囲は溶融境界から約1mmであった。初層溶接後、溶融境界から0.25mmの熱影響部硬さは470HVであり、焼入れによる著しい硬化が認められたが、低温割れ等の欠陥は認められなかった。一方、6層のテンパービード溶接後は、溶融境界から0.25mmの熱影響部の硬さは300HV以下に低下しており、初層の溶接による硬化部が、後続の溶接の焼戻しの熱影響により軟化していることが確認できた。

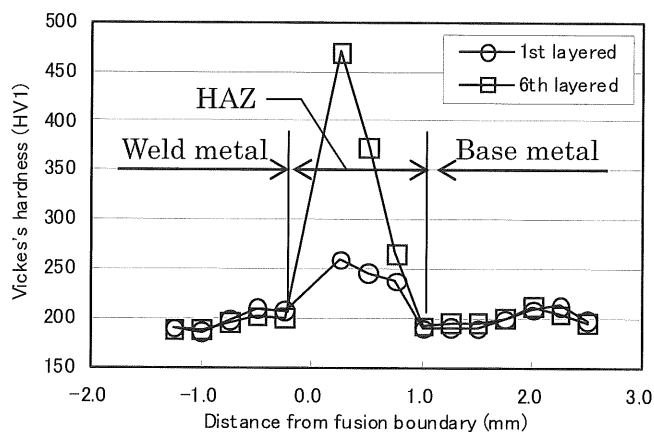


Fig.4 Vicker's hardness profiles (1st and 6th layered)

Table1 には、熱影響部および母材のシャルピー衝撃試験（試験温度-23℃、繰返し数 3）での吸収エネルギーの値を示す。水中テンパービード溶接後の熱影響部の吸収エネルギーは、母材の吸収エネルギーを上回り、溶接部が母材と同等以上の靱性を有していることが確認できた。水中テンパービード溶接後の熱影響部の硬さは母材よりもやや高い値を示すが、Fig.3 に示したように金属組織が微細化されているため、母材よりの靱性が向上したと考えられる。

Table1 Absorbed energy of heat affected zone after temper bead welding and base metal

	Heat affected zone (After temper bead welding)	Base metal
1	213 J	146 J
2	209 J	158 J
3	162 J	144 J

Test temperature: -23℃

Fig.5 には溶接部の曲げ試験後の外観を示す。溶接金属、熱影響部ともに欠陥の発生はなく、熱影響部は十分な延性を有することが確認できた。

Fig.6 には溶接部の引張試験後の外観を示す。破断位置は低合金鋼母材であり、溶接部は母材を上回る引張強度を有することが確認できた。

以上に示したように、水中テンパービード溶接部は、硬さ、衝撃特性、延性、引張強度といった材料評価試験の結果、テンパービード溶接としての機能を満足し、健全な溶接が可能であることが確認できた。

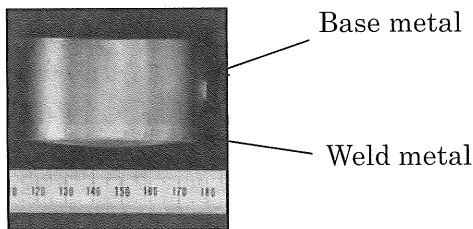
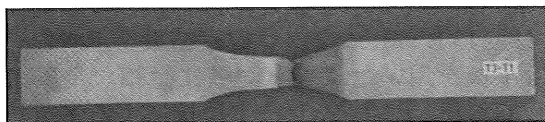


Fig.5 Appearance of test coupon after side bending test



Tensile strength : 614MPa
Breaking position : Base metal

Fig.6 Appearance of test coupon after tensile test

4.2 実機施工部を模擬したパイプ内面の溝に対するテンパービード溶接部の評価

Fig.7 に示すようなPWR冷却材出入口管台へ適用するため、パイプ内面に水中レーザー溶接可能な装置の開発と水中テンパービード溶接性の評価を行った。Fig.8 はパイプ内面を溶接可能な溶接装置の外観であり、溶接ヘッドから配管内面にレーザー光を出射しながら回転することで、パイプ内面を溶接することができる。

水中テンパービード溶接試験は施工部形状を模擬して、深さ 4mm の溝加工部を有する内径 φ700mm のパイプ内面に対して実施した。Fig.9 にパイプ内面施工部の外観観察結果を示す。溶接部表面には有害な欠陥は認められず、良好な溶接状態であった。浸透探傷試験でも指示模様は認められなかった。Fig.10 に溶接部の断面マクロ観察結果を示す。溶接金属及び熱影響部ともに有害な欠陥は認められず、曲率を有するパイプ内面への施工でも、健全な溶接が可能であることが確認できた。

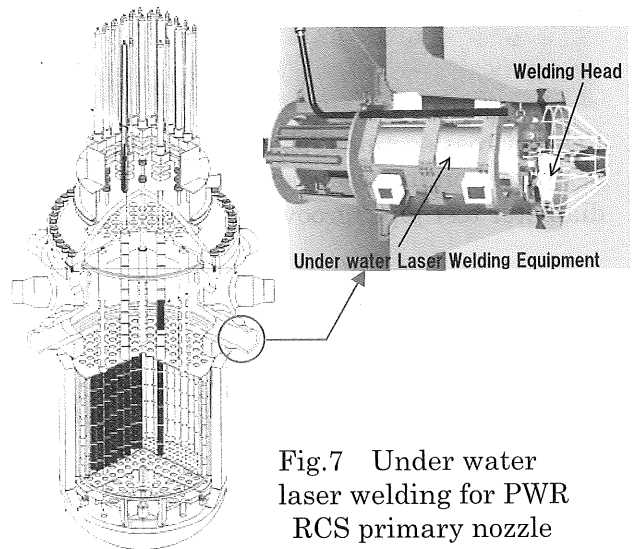


Fig.7 Under water laser welding for PWR RCS primary nozzle

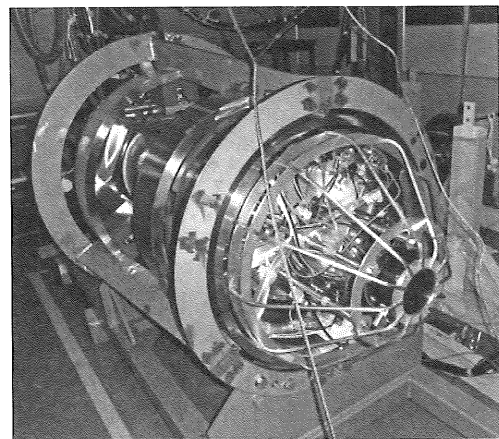


Fig.8 Appearance of under water laser welding equipment

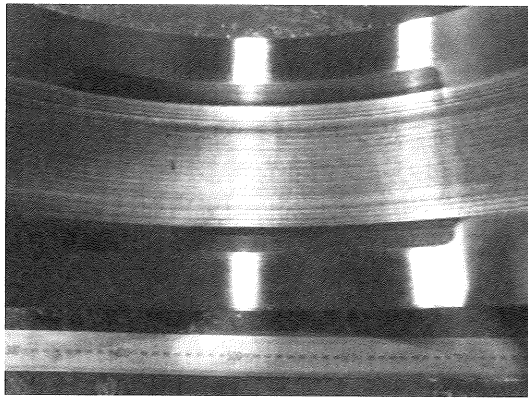


Fig.9 Appearance of weld bead on inner surface of φ700 diameter test pipe

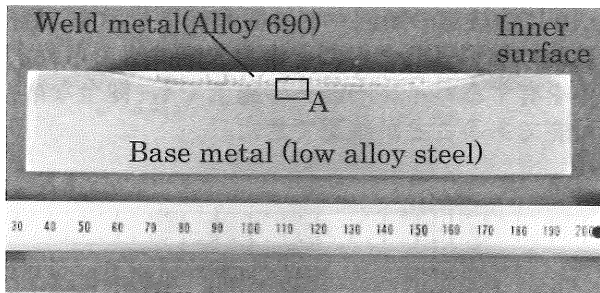


Fig.10 Cross-sectional observation of temper bead weld on inner surface groove of φ700 diameter test pipe (groove depth : 4mm)

Fig.11 には溝加工部の船底部 (Fig.10 A部) の断面マイクロ観察結果を示す。熱影響部は平板を用いた試験と同様に微細な金属組織を呈しており、テンパービード溶接による多重熱サイクルを受けて、組織変化を起こしたと考えられる。

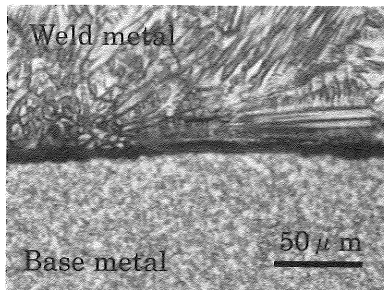


Fig.11 Microstructure of A area in Figure11

Fig.12 には、溝加工部の舟底部近傍の溶接部の硬さ分布を示す。低合金鋼の熱影響部の硬さは、平板施工時と同様、最大で 300HV 以下であった。曲率を有するパイプ内面施工を行っても、平板に対する施工と同様に、初層溶接時の硬化層が焼き戻しの熱影響を受けて、硬さが低下したと考えられる。

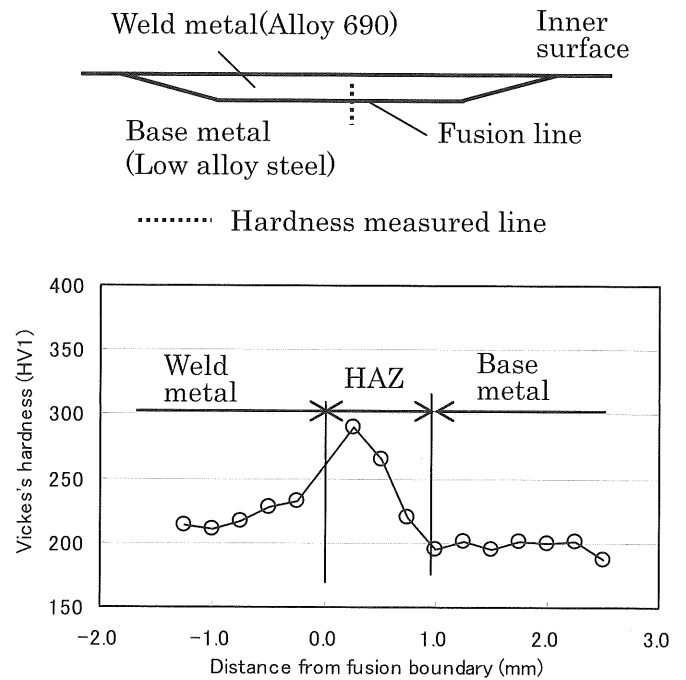


Fig.12 Vicker's hardness profiles of temper bead weld on inner surface groove of φ700 diameter test pipe

以上の結果より、曲率を有するPWR冷却材出入口管台の溶接施工部形状を模擬した深さ4mmの溝加工を有するφ700mmのパイプ内面に対して水中テンパービード溶接を行い、溶接部が健全な断面組織と硬さを有することが確認できた。

4.3 補修溶接を模擬したテンパービード溶接部の評価

補修溶接を模擬した試験体は、実機継手構造にならない、低合金鋼 (圧力容器側) とステンレス鋼 (セーフエンド側) を、600合金で溶接した後、溶接継手部に深さ40mmの溝加工したものを用いた。溝加工部のうち低合金鋼に近接する部分のみテンパービード溶接を行い、他の部分は施工効率の高い条件で溶接施工した。

Fig.13 には、溶接部の断面マクロ組織を示す。溶接金属及び熱影響部ともに有害な欠陥は認められず、深さ40mmの溝加工部に対しても、健全な溶接が可能であることが確認できた。

Fig.14 には、低合金鋼と溶接金属の熔融境界近傍部 (Fig.13 B部) のマイクロ観察結果を示す。熱影響部は平板を用いた試験と同様に微細な金属組織を呈しており、テンパービード溶接による多重熱サイクルを受けて、組織変化を起こしたと考えられる。

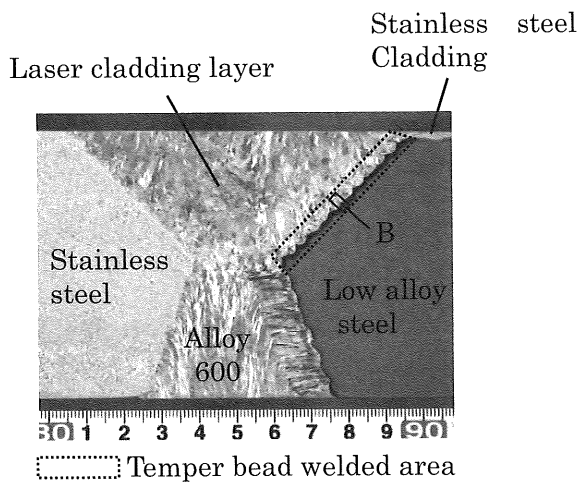
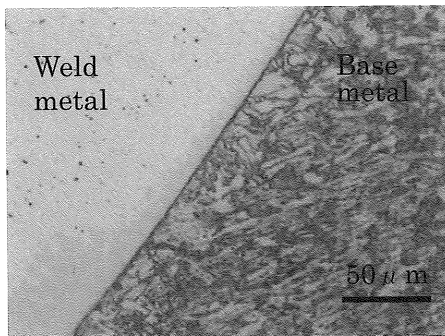


Fig.13 Cross-sectional observation of 40mm depth groove simulated repair welding for RCS primary nozzle



Microstructure of B area

Fig.14 Microstructure of B area in Figure12

Fig.15 には、低合金鋼と溶接金属の溶融境界近傍の硬さ分布を示す。低合金鋼の熱影響部の硬さは、最大で 330HV であり、深さ 40mm の溝加工部の傾斜面に対する施工でも、平板に対する施工と同様に、初層溶接時の硬化層が焼き戻しの熱影響を受けて、硬さが低下したと考えられる。

衝撃試験は、Fig.16 に示した位置、方向で採取したシャルピー試験片で行った。Table2 に結果を示す。平板に対する試験と同様、低合金鋼の吸収エネルギーは母材の吸収エネルギーを上回り、溶接部が母材と同等以上の靱性を有していることが確認できた。

以上の結果より、補修溶接を模擬した深さ 40mm の溝加工部に対して水中テンパービード溶接を行い、溶接部が健全な断面組織、硬さ、衝撃特性を有することが確認できた。

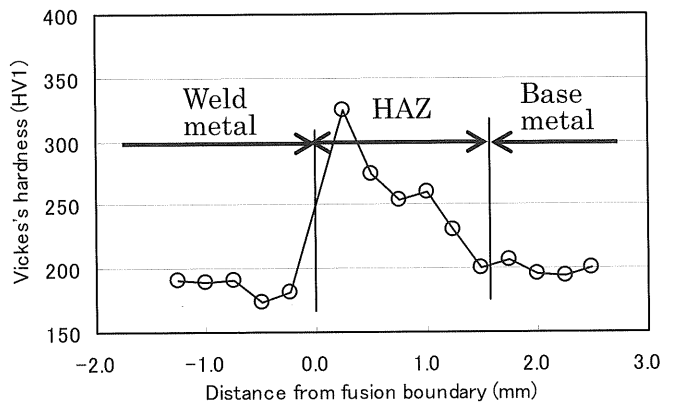
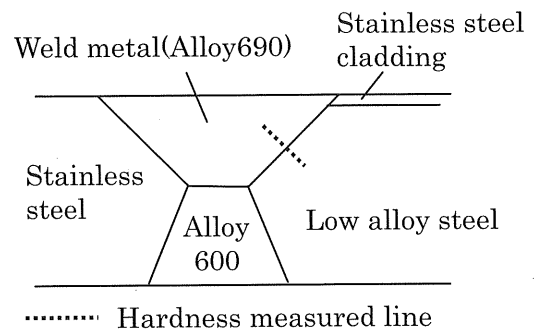


Fig.15 Vicker's hardness profiles of 40mm depth groove simulated repair welding for RCS primary nozzle

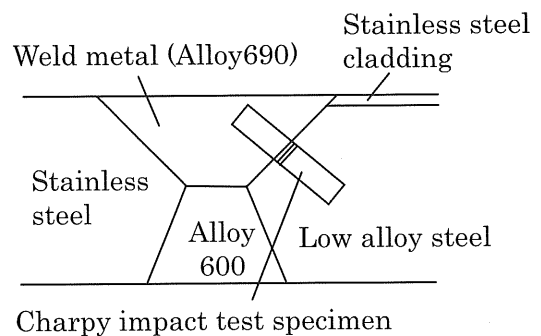


Fig.16 Charpy impact test location from temper bead welded test piece

Table2 Absorbed energy of heat affected zone after temper bead welding and base metal

	Heat affected zone (After temper bead welding)	Base metal
1	219 J	146 J
2	164 J	158 J
3	166 J	144 J

Test temperature: -23°C

5. まとめ

水中テンパービード溶接を、初層～2層目を低入熱条件、3～6層目を大入熱条件として、低合金鋼から成る平板に対して溶接施工を行った。断面観察、硬さ測定、衝撃特性の評価から、母材と同等以上の靱性を有する健全なテンパービード溶接部が得られることを確認した。また、曲げ試験・引張試験の評価により、テンパービード溶接部は十分な延性と引張強度を有することを確認した。

また、同等の溶接条件で、PWR冷却材出入口管台の溶接施工部形状を模擬した深さ4mmの溝加工部を有するφ700mmのパイプ内面に対して、テンパービード溶接を行った結果、平板に対する施工と同様、溶接部は健全な断面組織と硬さを有しており、実機を模擬した曲率を有するパイプ内面の溝に対しても、テンパービード溶接が可能であることが確認できた。

さらに、補修溶接を模擬した深さ40mmの溝加工部に対してテンパービード溶接を行った場合でも、平板に対する施工と同様、溶接部は健全な断面組織と硬さ、衝撃特性を有しており、実機の補修溶接部を模擬した溝加工部でもテンパービード溶接が可能であることが確認できた。

参考文献

- [1] M. TAMURA, et al., “Development of Underwater Laser Cladding and Underwater Laser Seal Welding Techniques for Reactor Components”, ICONE13 -50141, Beijing, China, May, 2005.
- [2] 水野, 松田, 「原子力圧力容器鋼 (S Q V 2 A) のテンパービード溶接法に関する研究」, 溶接学会接冶金研究委員会, (2005)