

水中レーザー溶接技術

Underwater YAG Laser Welding Technique

金澤 寧 田村 雅貴

■ KANAZAWA Yasushi ■ TAMURA Masataka

原子力発電プラントにおいて、もっとも重要な構造物の一つである原子炉圧力容器内部構造物などの溶接による保全を行う場合、狭隘(きょうあい)部などは、施工対象部へのアクセス性が困難な条件を考慮した施工方法を検討する必要がある。また、原子力発電プラントであることから、施工時の放射線による被ばくを低減する必要もある。

東芝は、低入熱の溶接が可能であり、狭隘部のために施工装置の小型化が可能な、レーザー光を用いた水中溶接技術を開発した。各種の溶接試験によって水中レーザー溶接法の施工条件の検証を行った結果、この溶接技術が信頼性の高い溶接技術であることを実証した。

When planning preventive maintenance of reactor components using welding, it is necessary to consider special environments such as narrow space or difficult accessibility while minimizing exposure to radiation in the reactor pressure vessel.

Toshiba has developed an underwater neodymium: yttrium-aluminum-garnet (Nd: YAG) laser welding technique. The features of this welding technique are low-heat-input welding and compact welding machine dimensions for welding in narrow spaces. This paper provides a summary of the new welding technique as a reliable welding technology.

1 まえがき

近年、沸騰水型原子炉(BWR: Boiling Water Reactor)や加圧水型原子炉(PWR: Pressurized Water Reactor)の原子炉(圧力)容器内部に設置されている炉内構造物などにおいて、応力腐食割れ(SCC: Stress Corrosion Cracking)と考えられるひび割れが報告されている。炉内構造物などに確認された割れは、経済産業省原子力安全・保安院が承認している、(社)日本機械学会発行の発電用原子力設備規格“維持規格(2002年改訂版)(JSME S NA1-2002)”に従った評価を行わなければならない。構造物の健全性が確保されていることが評価できれば、そのまま運転を継続することは可能である。しかし、ひび割れを残して運転を継続するためには計画的な継続点検を行う必要があり、原子力発電所の定期検査期間が長くなる。そこで、発見されたひび割れに対して補修を行うことで、効率的な原子力発電所の運転が可能となる。

東芝は、SCCに対する予防保全工法、及び補修工法の一つとして水中レーザー溶接技術を開発した。原子炉は、定期検査中であっても炉水を抜くことは難しいことから、こうした水中での溶接を可能とするこの技術は、効率的な原子力発電所の運用に非常に有効な保全技術である。

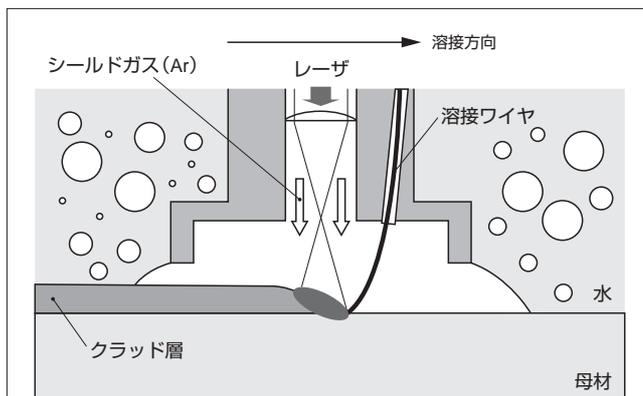


図1. 水中レーザー溶接法の施工概念—シールドガス(Ar)を溶接施工部に供給することで局所的な空洞を形成し、その空洞中でレーザー光を照射し溶接ワイヤを供給することで、クラッド層を形成する溶接技術である。

Schematic of underwater laser welding technique

2 水中レーザー溶接の原理

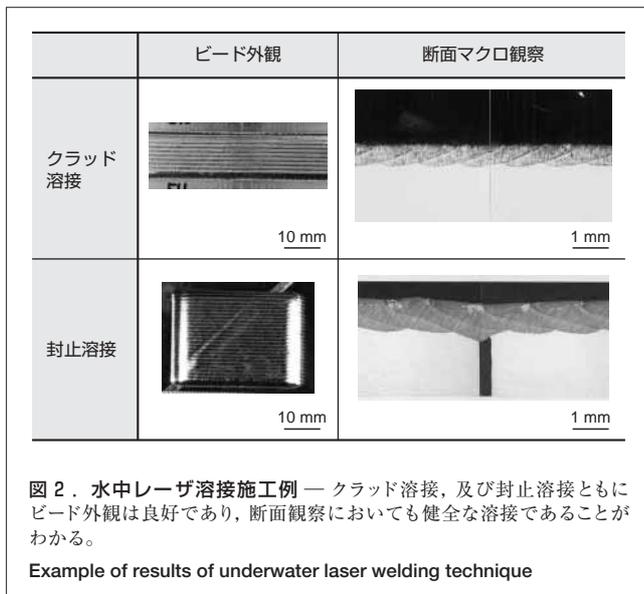
水中レーザー溶接法は、図1に示すように、シールドガス(アルゴン: Ar)を溶接施工部に供給することで局所的な空洞を形成し、その空洞中でNd: YAGレーザー^(注1)光を照射しながらワイヤ状の溶加材を供給することで、クラッド層を形成する溶接技術である。

(注1) Nd(ネオジウム)を含むイットリウム-アルミニウム-ガーネット結晶を用いたレーザー。

開発した水中レーザー溶接法は、炉内構造物などのSCCの発生を防止することを目的として、耐食性のあるクラッド溶接(CRC: Corrosion Resistant Cladding)、及び炉内構造物などに生じたSCCによるひび割れを封止する溶接の両ケースに適用可能な技術である。前者は予防保全、後者は事後保全を目指したものである。ここで、ひび割れを封止する溶接とは、溶接金属によりひび割れをふさぐことで、ひび割れを炉水環境から隔離することと、ひび割れからの炉水の漏えいを防止することを目的とした溶接方法である。

この溶接技術では、施工対象部位の水を抜く時間を省けるばかりでなく、水遮断の効果により、炉内での施工における作業者の被曝低減にも有効な工法である。

図2はクラッド溶接及び封止溶接施工後の代表的な例を示したものであるが、いずれも金属光沢がある良好な溶接ビードが得られた。封止溶接では割れの直上において良好な溶接金属層が形成され、割れを封止することができた。



3 水中レーザー溶接の開発

3.1 溶接ヘッドの開発

当社で開発した水中レーザー溶接はNd:YAGレーザーを応用し、溶接ヘッドの周辺を部分的に気中とするものである⁽¹⁾。図3はこの装置の主要な機器の一つである溶接ヘッド外観と実験装置を示したもので、Nd:YAGレーザー発振器から発振されたレーザー光は光ファイバを通して溶接ヘッドに伝送され、内蔵された光学系により集光され、溶融池を形成する。溶接ヘッドは水槽中の水に入るが、シールドガスを溶接ヘッド先端から放出することにより、施工部近傍を局所的な気中とすることができる。また、溶接ワイヤケースから溶接ワイヤ(溶加材)を溶融池に供給することで、溶接金属層を形成

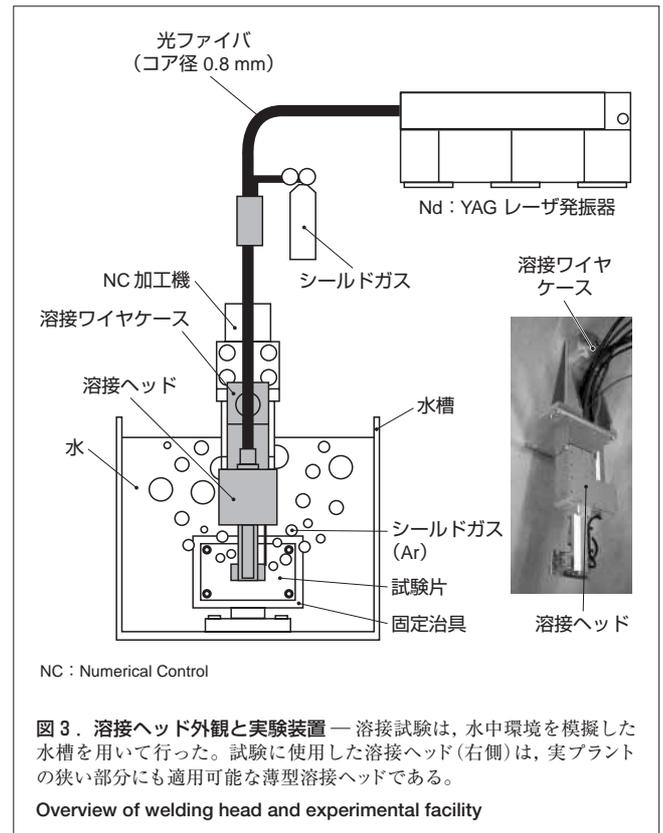


表1. 水中レーザー封止溶接の施工条件範囲
Conditions of cladding and seal welding

項目	施工条件
レーザー発振器	Nd:YAGレーザー
波長 (nm)	1064
レーザー出力 (kW)	0.9 - 1.2
溶接速度 (cm/min)	30 - 50
シールドガス	アルゴン

する。図中に示す溶接ヘッドは、当社が狭隘部向けに開発した厚さ約50mmの薄型ヘッドである。表1は水中レーザー封止溶接の施工条件範囲を示したものである。

3.2 施工材料の組合せ及び溶接性確認項目

表2は水中レーザー溶接技術が適用可能な、母材と溶加材の組合せを示したものである。母材には炉内構造物などで

表2. 母材と溶加材の組合せ
Base metal and filler metal

母材	溶加材
SUS316L	Y308L若しくはYNiCr-3
DNiCrFe-3	YNiCr-3
DNiCrFe-1J	ERNiCrFe-7

使用されるオーステナイト系ステンレス鋼としてSUS316L, ニッケル基合金としてDNIrCrFe-3 (インコネル 182 相当材: BWR 材料)とDNIrCrFe-1J (インコネル 132 相当材: PWR 材料)を対象とした。

なお、オーステナイト系ステンレス鋼とニッケル基合金の溶接部に対しては、ニッケル基合金の溶加材を用いる。

溶接性の確認は、溶接施工に影響を及ぼすと考えられる、施工時の環境の影響(水環境と水深)と施工部の形状の影響に着目して行った。

3.3 水中施工と気中施工の比較

この溶接技術は、水環境下での施工となることから、水の影響及び水深の影響を確認する目的で、気中環境下でのレーザ溶接との比較、及び施工部位を想定した水深でのレーザ溶接施工を行った。図4に示すように、気中環境下で溶接を行った溶接ビードの外観と断面は、ともに水中施工の結果と同等であることが確認された⁽¹⁾。また、施工想定部位の水深を模擬した、水深30m相当の加圧水中で溶接を行った溶接ビードの外観と断面は、ともに健全な溶接であり、水深の影響はないことを確認した。このように、水中レーザ溶接技術は、気中レーザ溶接と同等の溶接が可能であり、施工環境の影響は受けないことが確認された。

3.4 複数層施工の確認

炉内構造物などの補修工法としてこの溶接技術を実際に適用する場合には、表面の耐食性維持、及び必要溶接厚確保の観点から複数層の溶接を行うことが考えられる。こうした複数層の溶接は繰り返し熱影響を与えることとなるため、複数層溶接による施工面に及ぼす影響を確認する側曲げ試験を行った。図5は側曲げ試験結果を示したものであるが、いずれの材料においても欠陥がないことを確認した。

3.5 溶接部の形状の影響

この溶接技術を適用する炉内構造物などの大半の構造は、3次元の形状を持っていることから、図3の試験装置を

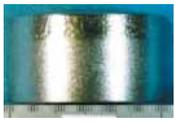
母材 溶加材	ビード外観	浸透探傷試験
DNIrCrFe-3 YNIrCr-3	 10 mm	 10 mm
DNIrCrFe-1J ERNIcCrFe-7	 10 mm	 10 mm

図5. 側曲げ試験結果 — 側曲げ試験で割れが確認されていないことから、クラッド溶接部に十分な延性を持っていることが確認できる。

Results of lateral bending test

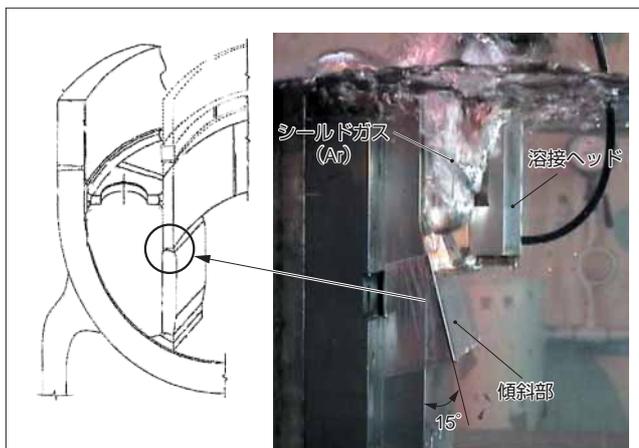


図6. 傾斜部模擬溶接の試験状況 — 傾斜部においても施工が可能であることを確認した試験状況を示す。左に示すシールドサポートの一部を模擬した試験体が右の写真である。

State of seal welding for slide configuration structure

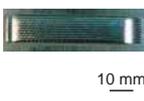
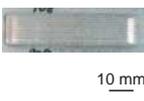
	ビード外観	浸透探傷試験	断面マクロ観察
気中 施工	 10 mm	 10 mm	 1 mm
水中 施工	 10 mm	 10 mm	 1 mm

図4. 施工環境の影響 — 外観観察と断面観察結果に大きな違いがないことから、水中施工であっても気中施工に劣らない溶接が可能であることが確認できる。

Effect of ambient conditions

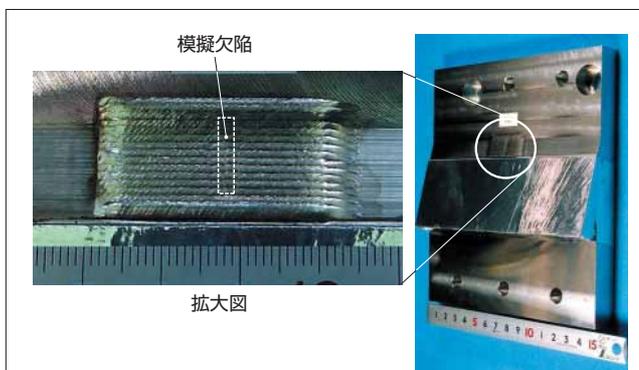


図7. 傾斜部模擬溶接試験片の外観 — 傾きを持った形状への施工結果から、健全な溶接ビードが形成されることが確認できる。

Result of seal welding for slide configuration structure

用いた試験体での横向き施工に加え、他の施工姿勢の影響確認を行った。その結果、横向き、上向き、下向き、立向きのいずれの姿勢においても溶接が可能であることを確認した。更に、より実際のプラントの施工面形状に近い形状での溶接性の確認を行うために、傾斜部を模擬した溶接性の確認を行った。図6に示す傾斜部模擬溶接の試験で、15°の傾斜部に設けた模擬欠陥に対して封止溶接を行った。図7は傾斜部模擬溶接試験片の外観を示すものであり、傾斜部に合わせたシールドカバーを溶接ヘッドの先端に設けることにより、封止溶接が可能であることを確認した。

4 水中レーザー溶接の効果

クラッド溶接及び封止溶接とも、健全な溶接を行うことが可能であることを確認したが、この溶接技術を適用する際には、予防保全としてクラッド溶接の場合はもちろんのこと、事後保全としての封止溶接の場合においても、施工した溶接金属自体に新たなSCCが生じることを防ぐ必要がある。そこで、溶接施工後の表面の化学成分の確認を行ったところ、オーステナイト系ステンレス鋼、及びニッケル基合金とも、耐SCC性に優れた化学成分を達成できることを確認した^{(2),(3)}。

また、封止溶接の目的は、外部環境からひび割れを隔離することでSCC進展を抑制することである。この溶接技術は水中での施工であり、SCCの割れ内部に水が残留する可能性があることから、割れ内部に水が残留した場合のSCC進展挙動についての確認を行った。その結果、封止溶接により割れを外部環境から隔離することで、SCC進展は生じないことも確認している⁽⁴⁾。

5 あとがき

国内においては、初期の原子力発電所が運転を開始して30年以上経過することから、予防保全、及び事後保全のニーズが高まりつつある。当社は、炉内構造物などに使用されている主要材料に対する施工、様々な施工姿勢での施工が

可能で、信頼性の高い水中レーザー溶接技術を開発した。この水中レーザー溶接法は原子炉の水を残したままで、狭隘部であっても低入熱での施工が可能であることから、全体の作業時間の短縮、放射線による被ばく低減、及び施工部に対する熱影響を少なくする保全工法として非常に有効な工法である。

今後は、遠隔作業ロボット、検査ロボット及び他の保全ロボットなどとの融合を進め、様々な形状で構成されている炉内構造物などを対象として、検査から補修・保全までの対応が可能な高度化システムの開発を進めていく。

文献

- (1) M. Tamura, et al. "Development of Underwater Laser Cladding and Underwater Laser Seal Welding Techniques for Reactor Components". 13th International Conference of Nuclear Engineering, 2005, ICONE13-50141.
- (2) 佐野雄二, ほか. レーザを使用した原子炉の水中メンテナンス技術. 溶接技術. 53, 5, 2005, p.78 - 82.
- (3) 佐伯綾一, ほか. "レーザを応用した炉内保全技術とそのPWRへの適用". 日本保全学会第2回総会, 学術講演会予稿集, 2005-07, p.191 - 196.
- (4) 伊藤幹朗, ほか. "環境隔離されたき裂のSCC進展抑制効果(II)". (社)腐食防食協会, 第51回材料と環境討論会講演集, 2004-09, p.51 - 54.



金澤 寧 KANAZAWA Yasushi

電力・社会システム社 原子力事業部 容器・構造設計担当
主査。原子炉压力容器、炉内構造物のシステム設計に従事。
日本機械学会会員。

Nuclear Energy Systems & Services Div.



田村 雅貴 TAMURA Masataka

電力・社会システム社 電力・社会システム技術開発センター
レーザー応用技術開発担当主務。レーザを応用した製造技術
開発に従事。溶接学会会員。

Power & Industrial Systems Research and Development Center