

# 水中レーザー肉盛溶接工法ガイドラインの概要

## Summary of the guideline on underwater laser beam repair welding

株式会社 東芝	市川 博也	Hiroya ICHIKAWA
株式会社 東芝	依田 正樹	Masaki YODA
株式会社 東芝	元良 裕一	Yuichi MOTORA

It is known that stress corrosion cracking (SCC) might occur at the weld of a reactor pressure vessel or core internals. Underwater laser beam clad welding for mitigation of SCC has been already established and the guideline “Underwater laser beam clad welding” was published. Moreover, the guideline “Seal welding” was also published as a repair method for SCC. In addition to these guidelines, the guideline “Underwater laser beam repair welding” was newly published in November, 2012 for the repair welding after completely removing a SCC crack occurred in weld or base metal. This paper introduces the summary of this guideline.

**Keywords:** SCC, BWR, PWR, repair, underwater laser beam welding, ambient temperature temper bead welding

### 1. はじめに

沸騰水型原子炉（BWR）や加圧水型原子炉（PWR）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）の発生が報告されており、SCCの発生が確認された場合には、補修工法の適用が望まれる。

これまで水中レーザー溶接を用いた工法として、SCCの発生を予防するためのクラッド溶接工法が確立され、予防保全工法ガイドライン [水中レーザークラッド溶接工法] として発行されている。また、SCCの発生が確認された場合に適用する補修工法としての封止溶接工法についても、補修工法ガイドライン [封止溶接工法] として発行されている。

これらの工法に加え、原子炉圧力容器や炉内構造物を構成する高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）及びオーステナイト系ステンレス鋼の部材（母材、溶接金属）に、SCCによるき裂が発生した場合に、き裂を完全に除去した後に強度部材として埋め戻す水中レーザー肉盛溶接工法に関して、2012年11月に新たに補修工法ガイドライン [水中レーザー肉盛溶接工法] が発行されたので、本ガイドラインの概要を紹介する。

### 2. 水中レーザー溶接の概要

水中レーザー溶接の仕組みを Fig.1 に示す。原子炉圧力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) 等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、表面にクラッド層を連続的に形成する仕組みである。

原子炉圧力容器は、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圧力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。

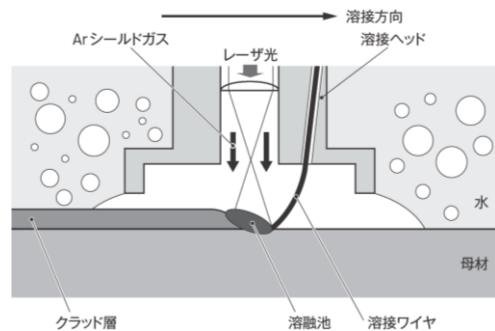


Fig.1 Principle of underwater laser beam welding

### 3. 水中レーザー肉盛溶接工法ガイドライン

#### 3.1 目的及び適用範囲

本ガイドラインは、原子炉圧力容器や炉内構造物の原子炉機器を構成する高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)及びオーステナイト系ステンレス鋼の部材(母材、溶接金属)に、SCCによるき裂が発生した場合に、き裂を完全に除去した後に強度部材として埋め戻す水中レーザー肉盛

連絡先:市川 博也、〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区  
新杉田町8、(株)東芝 原子力システム設計部  
E-mail: hiroya.ichikawa@toshiba.co.jp

溶接工法に関して、施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的として制定された。

### 3.2 工法の概要

水中レーザ肉盛溶接工法は、原子炉機器に SCC 等のき裂が見つかった際に、機械加工等によりそのき裂を除去し、除去した部分を構造強度上問題にならないように強度部材として埋め戻す工法である。その際の溶接法として、2項に示した水中レーザ溶接を用いる。

施工対象部位としては、クラス 1 容器、原子炉圧力容器の炉心支持構造物及び炉内構造物を構成する部材であり、具体的な例として、BWR の場合、

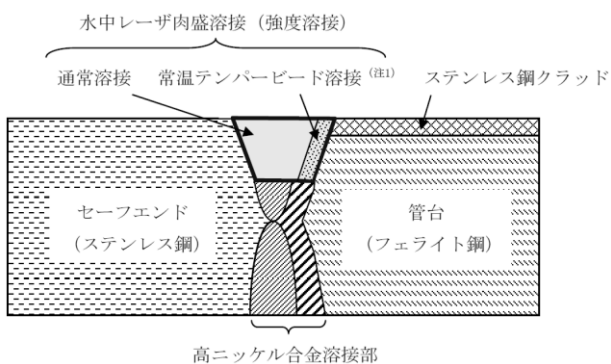
- ・ 炉心シュラウド
- ・ 制御棒駆動機構 (CRD) ハウジング
- ・ CRD スタブチューブ
- ・ 中性子計装ハウジング
- ・ ジェットポンプ
- ・ シュラウドサポート、

また、PWR の場合、

- ・ 原子炉容器冷却材出口管台、入口管台
- ・ 炉内核計装筒管台

の溶接部や溶接部近傍が想定される。

Fig.2 に示すような、原子炉圧力容器の管台の異材溶接継手部等への施工においては、母材に使用されているフェライト鋼がき裂除去の機械加工により露出、あるいはフェライト鋼に溶接の熱影響が及ぶ開先となる場合がある。その場合には、通常の溶接では熱影響でフェライト鋼の



(注1) 常温テンパービード溶接は、予熱を行わないで 1 層目を小入熱で溶接してフェライト鋼の熱影響部の硬化域を最小にし、その硬化域を 2 層目以降の溶接熱サイクルによって焼き戻し (テンパー効果)、溶接後熱処理を行わなくとも良好な靱性を有する溶接部を得る溶接方法である。

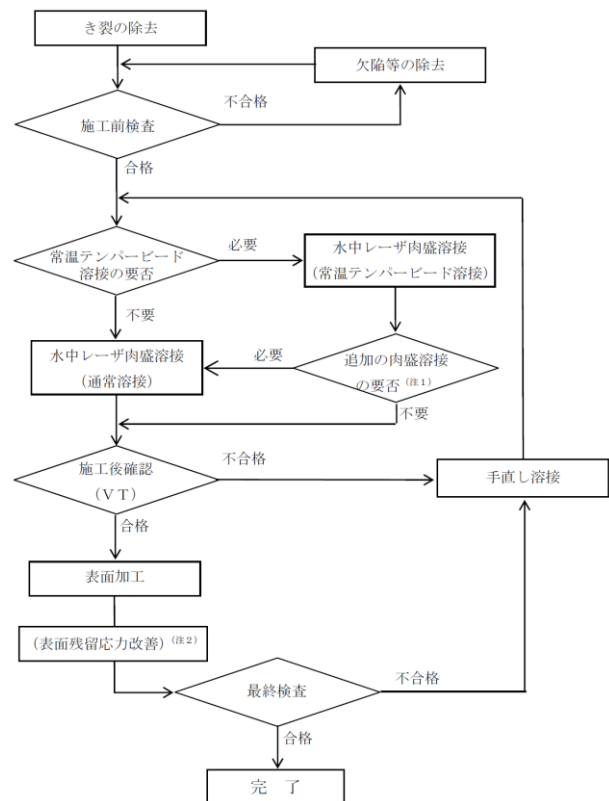
Fig.2 Example of underwater laser beam repair welding

靱性が低下する恐れがあるため、フェライト鋼に近い領域は靱性を低下させない常温テンパービード溶接を適用する。

### 3.3 工法適用の条件

本工法は、高ニッケル合金またはオーステナイト系ステンレス鋼に発生した SCC 等によるき裂に適用する。また、本補修工法の適用条件として、事前に以下の項目について実施し、確立しておくことを要求された。

- (1) 溶接条件について溶接施工法の確認試験を実施し、溶接施工法を確立しておくこと。
- (2) Fig.3 の水中レーザ肉盛溶接施工ステップに基づき、施工管理要領を確立しておくこと。
- (3) 適用部位を模擬した試験体及び専用の溶接装置を用いて、施工管理要領に基づき、健全な水中レーザ肉盛溶接施工が可能であることを事前に確認しておくこと。



(注1) 常温テンパービード溶接のみで埋め戻しが完了しない場合は、通常溶接を追加で実施する。

(注2) 肉盛溶接部の近傍に引張残留応力が発生して耐 SCC 性低下が予測される場合に実施する。

Fig.3 Steps of underwater laser beam repair welding

### 3.4 工法適用に対する要求事項

#### 3.4.1 工法適用にあたっての前提条件

本補修工法の適用にあたっての前提条件として、溶接施工面（開先面）にSCC等のき裂がないことや、溶接に悪影響を及ぼす有害な異物等がないこと、接液部には耐SCC性に優れた溶接材料を用いること、肉盛溶接部の継手は母材と同等以上の強度を有するものとする、肉盛溶接後の施工部位に対して継続的な検査が可能であること等が定められた。

#### 3.4.2 工法に対する要求事項

本補修工法の適用にあたって、以下の項目に対して、要求事項を定めた。

##### (1) 溶接施工法及び溶接士の管理

いずれもJSME溶接規格に準拠する。溶接施工法の確認すべき事項（基本支配因子）と、溶接条件の例が一覧にして示された。また、事前確認試験として、施工対象部位を模擬した試験体と、実施機施工装置と同等の装置を用いたモックアップ試験を行い、目視検査、浸透探傷試験（PT）、断面マクロ観察、硬さ試験、強度試験を行う。さらに常温テンパービード溶接を適用する場合は、衝撃試験、硬さ試験、断面ミクロ試験も行う。

##### (2) 健全性評価

適用対象機器の構造健全性を確保するため、損傷部位の状況（欠陥の範囲、深さ）を把握し、欠陥除去部の加工形状と肉盛溶接条件を決定し、各機器の構造健全性が確保されていることを確認する。

##### (3) 溶接部の検査

開先面検査及び溶接施工後の最終検査において、JSME溶接規格に準拠した非破壊試験を行うが、磁粉探傷試験（MT）、浸透探傷試験（PT）あるいは放射線透過試験（RT）等については水中での適用が困難であり、水抜きが不要な水中レーザー溶接の特性を活かすため、水中で適用が可能な目視試験（VT）、渦電流探傷試験（ECT）あるいは超音波探傷試験（UT）等を用いて確認する。

##### (4) 溶接施工

施工管理要領に従って施工することとし、開先面、溶接条件、施工範囲、積層数、溶接中の手入れ、手直し溶接について定めた。

##### (5) 表面残留応力改善

水中レーザー肉盛溶接施工により、肉盛溶接部の近傍に引張残留応力が発生して耐SCC性低下が予測される場合は、ピーニングあるいは研磨等の残留応力改善効果が確

認された手法を用いて、肉盛溶接部近傍の表面性状改善を行う。

#### 3.4.3 使用装置に対する要求事項

水中レーザー肉盛溶接施工等の装置仕様（要求事項）を明確にし、水中レーザー肉盛溶接工法に対する要求事項を満足できる装置であることを確認することとした。

### 3.5 施工後の確認

水中レーザー肉盛溶接工法の施工後に行う確認についても要求を定めた。

- (1) 施工記録により、施工が適正施工条件の範囲内で実施されていることを確認すること。また、施工層数が最少層数を満足していることを確認すること。
- (2) 水中レーザー肉盛溶接後に目視検査（VT）により溶接部の外観検査を行い、割れ等の有害な欠陥がないことを確認すること。
- (3) 供用期間中、維持規格等で当該機器に要求される検査を行い、確認すること。

### 3.6 適用フロー

水中レーザー肉盛溶接工法の適用に関するフローを Fig.4 に示す。

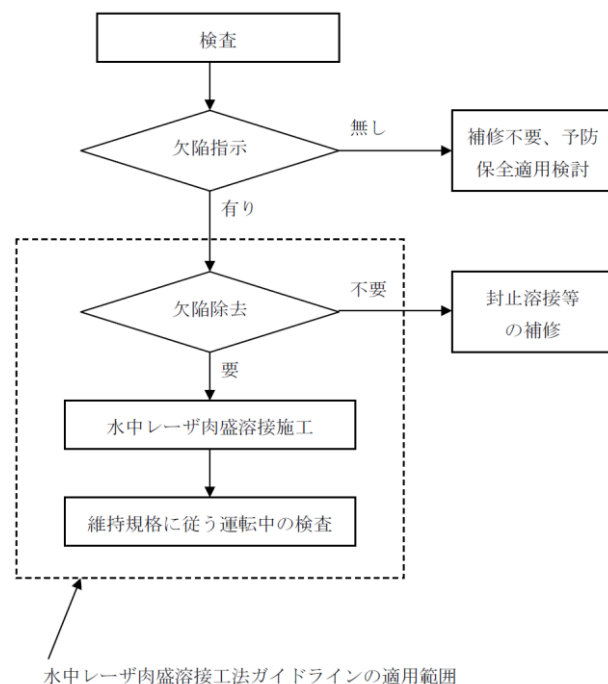


Fig.4 Work flow of underwater laser beam repair welding

## 4. おわりに

(社) 日本原子力技術協会ガイドライン検討会での審議を経て、欠陥を切削除去して埋め戻す水中レーザー肉盛溶接工法に関するガイドラインが発行され、その内容を紹介した。

今後、本ガイドラインが有効に活用されることを期待する。

## 参考文献

- [1] 補修工法ガイドライン [水中レーザー肉盛溶接工法] , 一般社団法人日本原子力技術協会, JANTI-VIP-16
- [2] 予防保全工法ガイドライン [水中レーザークラッド溶接工法] , 一般社団法人日本原子力技術協会, JANTI-VIP-07
- [3] 補修工法ガイドライン [封止溶接工法] , 一般社団法人日本原子力技術協会, JANTI-VIP-01

(平成 25 年 6 月 13 日)