

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]

平成21年1月

有限責任中間法人 日本原子力技術協会

## はじめに

我が国の原子力発電所では、安全・安定運転を確保するため、炉内構造物等の健全性を確認あるいは保証することが、重要な課題となっています。本ガイドラインは、このような重要性に鑑み、損傷発生の可能性のある構造物について、点検・評価・補修等に関する要領を提案するものです。

平成12年、炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会が、(社)火力原子力発電技術協会に設置され、これまでに各種のガイドラインを発行してまいりました。平成19年より本検討会は、有限責任中間法人 日本原子力技術協会に継承され、検討を継続しております。

本ガイドラインの策定にあたっては、常に最新知見を取り入れ、見直しを行っていくことを基本方針としております。この方針に則り、現行版の発行後も最新知見の調査及び収集に努めることと致します。本ガイドラインが原子力産業界で活用され、原子力発電所の安全・安定運転の一助になることを期待しております。

最後に、本ガイドラインの制定にあたり、絶大なご助力を賜りました学識経験者、電力会社、メーカーの方々等、関係各位に深く感謝いたします。

平成21年1月

炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会  
委員長 野本敏治



炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会 委員名簿

(平成21年1月現在、敬称略、順不同)

委員長	野本 敏治	東京大学名誉教授
副委員長	関村 直人	東京大学教授
委員	安藤 柱	横浜国立大学教授
委員	安藤 博	元(財)発電設備技術検査協会
委員	辻川 茂男	東京大学名誉教授
委員	西本 和俊	大阪大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	班目 春樹	東京大学教授
幹事	坂下 彰浩	東京電力(株)
幹事	吉田 裕彦	関西電力(株)
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	小林 敏行	北海道電力(株)
委員	丹治 和宏	東北電力(株)
委員	松本 純	東京電力(株)
委員	石沢 順一	東京電力(株)
委員	鈴木 俊一	東京電力(株)
委員	市川 義浩	中部電力(株)
委員	米田 貢	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	平野 伸朗	関西電力(株)
委員	溝部 日出夫	中国電力(株)
委員	高木 敏光	四国電力(株)
委員	水繰 浩一	九州電力(株)
委員	青木 孝行	日本原子力発電(株)
委員	師尾 直登	日本原子力発電(株)
委員	鞍本 貞之	電源開発(株)
委員	伊東 敬	日立GEニュークリア・エナジー(株)
委員	元良 裕一	(株)東芝
委員	小山 幸司	三菱重工業(株)
委員	杉江 保彰	日本原子力技術協会
参加者	工藤 保	原子力安全・保安院
参加者	菊池 正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	山本 豊	(独)原子力安全基盤機構
事務局	関 弘明	日本原子力技術協会

## ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、有限責任中間法人 日本原子力技術協会 に設置された炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会において、常に最新知見が反映されるよう見直しを行うという基本方針のもとに、本ガイドラインに関する専門知識と関心を持つ委員により中立、公平、公正を原則とした運営規約に従う審議を経て、制定されたものである。また、ガイドライン検討会は、ガイドラインが許認可にも適用可能となるよう別途、透明性、公開性、公平性のある手続きに従って学協会規格に取り入れられるよう働きかける。なお、ここで「最新知見」とは、その時点で工学的に公知化されていて、ガイドライン及びその「解説」「参考資料」に示し得る範囲の知見であり、「工学的に公知化されている」とは、その分野の専門知識を有する者により認められた工学的な客観事実のことである。

本ガイドラインは各規程事項の技術的根拠を明確にしており、その示した根拠の範囲内においてガイドライン検討会はガイドラインの記載内容に対する説明責任を持つが、これ以外の本ガイドラインを使用することによって生じる問題などに対して一切の責任を持たない。また、このガイドラインに従って行われた点検、評価、補修等の行為を承認・保証するものではない。従って、本ガイドラインの使用者は、本ガイドラインに関連した活動の結果発生する問題や第三者の知的財産権の侵害に対し補償する責任が使用者にあることを認識して、この規格を使用する責任を持つ。

なお、本ガイドラインの発行をもって、この規格が我が国の規制当局によって承認されたと考えてはならない。



# 水中レーザークラッド溶接工法ガイドライン

## 目 次

第1章 目的及び適用	
1.1 目的	1
1.2 適用	1
第2章 工法の概要	2
第3章 工法適用の条件	2
第4章 工法適用に対する要求事項	
4.1 工法適用に当たっての前提条件	3
4.2 工法に対する要求事項	3
4.3 使用装置に対する要求事項	4
第5章 施工後の確認	4
第6章 適用フロー	4
解説	
[解説-1] ガイドライン制定の目的	7
[解説-2] 水中レーザークラッド溶接工法について	7
[解説-3] 水中レーザークラッド溶接適用部位に要求される機能について	8
[解説-4] 工法適用にあたっての前提条件	8
[解説-5] 水中レーザークラッド溶接施工条件に関する確認項目	9
[解説-6] 水中レーザークラッド溶接部の表面検査	11
[解説-7] 開先面の目視検査	11
[解説-8] 積層数	11
[解説-9] 手直し溶接	11
添付資料	
添付-1 水中レーザービーム溶接によるクラッド溶接工法	12

## 第1章 目的及び適用

### 1.1 目的

本ガイドラインは、加圧水型原子力発電所(PWR)及び沸騰水型原子力発電所(BWR)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、水中レーザービーム溶接により耐応力腐食割れ性(耐SCC性)に優れたクラッド層を形成することにより、被施工面におけるSCCの発生を予防するために適用する予防保全方法の要領を示すことを目的とする。 [解説-1]

### 1.2 適用

#### 1.2.1 適用範囲

本ガイドラインは、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)に適用する。

#### 1.2.2 適用時期

本ガイドラインの適用時期は、商業運転開始後の供用期間中とする。



## 第2章 工法の概要 [解説-2]

水中レーザークラッド溶接工法は、部材表面を耐 SCC 性に優れた溶加材を用いたクラッド溶接で覆うことにより、被施工部位の SCC 発生に対する予防保全を行うことを目的とする工法である。工法としては、部材原表面に直接クラッド溶接を施工する場合（図1 (a)）と、原表面に追い込み加工を施した後にクラッド溶接を施工する場合（図1 (b)）がある。耐 SCC 性に優れた溶加材を用い、水中でレーザービームを利用したクラッド溶接を施工することが特徴である。

図2に、水中レーザークラッド溶接の施工ステップを示す。

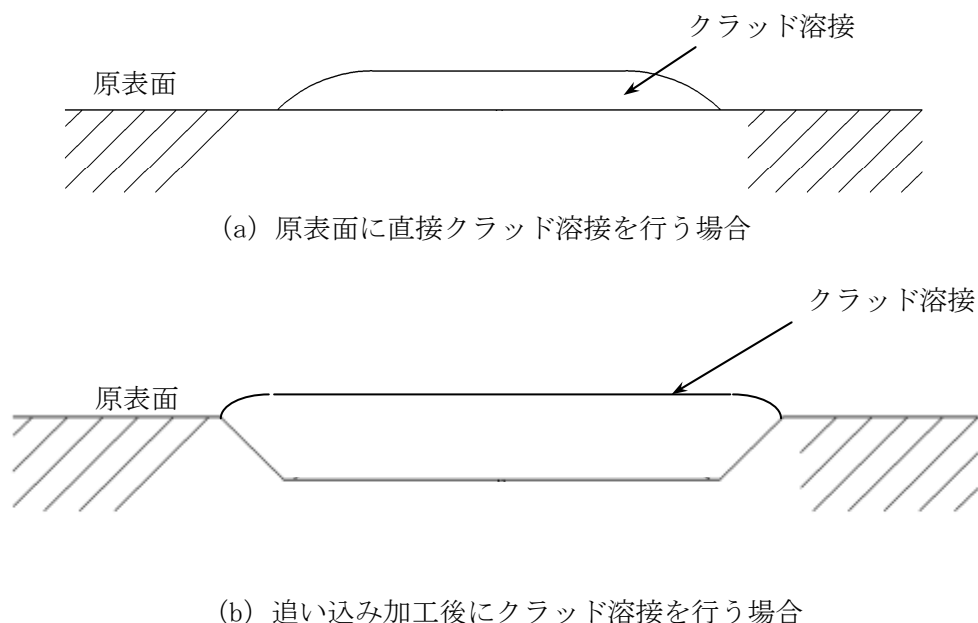


図1 水中レーザークラッド溶接工法概要

## 第3章 工法適用の条件

本ガイドラインは、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)の SCC に対する予防保全を目的とした水中レーザークラッド溶接工法に適用する。

本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。

- (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) 図2の水中レーザークラッド溶接施工ステップに基づき、水中レーザークラッド溶接施工管理要領を確立しておくこと。
- (3) 水中レーザークラッド溶接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、水中レーザークラッド溶接施工管理要領に基づき、健全なクラッド溶接施工が可能であることを事前に確認しておくこと。

## 第4章 工法適用に対する要求事項

### 4.1 工法適用に当たっての前提条件 [解説-3、解説-4]

本工法の適用に当たっての前提条件は以下とする。

- (1) 適用部位表面に SCC その他のき裂が無いこと。
- (2) 溶接施工面（開先面）には、溶接に悪影響を及ぼす有害な異物等がないこと。
- (3) 耐 SCC 性に優れた溶接材料を用いること。
- (4) クラッド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。

### 4.2 工法に対する要求事項

水中レーザークラッド溶接工法に対する要求事項は以下とする。

#### (1) 溶接施工法及び溶接士の管理

##### (a) 溶接施工法 [解説-5]

溶接方法はレーザービーム溶接とし、溶接施工法は、発電用原子力設備規格 溶接規格 (JSME S NB1、以下 JSME 溶接規格という。) に準拠した溶接施工法確認試験にて確認されたものとする。(JSME 溶接規格でクラッド溶接の継手として求められる確認試験を行うこと。)

##### (b) 溶接士

実機施工に際しては、JSME 溶接規格に準拠した溶接士の資格管理を実施すること。

##### ① 溶接士の資格

本溶接に必要な資格（レーザービーム溶接資格）を有している溶接士を選定すること。

##### ② 訓練

工場において、水中レーザークラッド溶接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、確実に溶接施工できるよう各溶接士を事前に訓練すること。

#### (2) 溶接部の検査 [解説-6]

水中レーザークラッド溶接部について、溶接施工前及び溶接施工後に、表面検査を行うこと。

#### (3) 溶接施工

実機施工は、水中レーザークラッド溶接施工管理要領に従い、実施すること。

##### (a) 施工対象面（開先面）

目視検査にて、施工対象面（開先面）に SCC その他によるき裂や、溶接に悪影響を及ぼす有害な異物等がないことを確認すること。 [解説-7]

##### (b) 溶接条件

水中レーザークラッド溶接施工管理要領に従った溶接条件を適用すること。

##### (c) 施工範囲

水中レーザークラッド溶接は、目的とする対象範囲を包絡するように施工を行うこと。

(d) 積層数[解説-8]

積層数は、溶接時の材料成分希釈を考慮し、クラッド溶接後の材料成分の耐 SCC 性を確保する観点から必要な層数以上とすること。

(e) 手直し溶接[解説-9]

溶接施工過程で欠陥が発生するなどの理由により手直しが必要となった場合、あるいは(2)に規定する溶接後の表面検査で判定基準を超える欠陥指示が出た場合は、手直し溶接を行うこと。なお、手直し溶接は、欠陥等を除去した後に施工すること。

また、手直し溶接の記録を作成し、保管すること。

(4) 表面残留応力改善

水中レーザークラッド溶接施工により、クラッド溶接部の近傍に引張残留応力が発生し、耐 SCC 性の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、クラッド溶接部近傍の表面性状改善を行うこと。

#### 4.3 使用装置に対する要求事項

水中レーザークラッド溶接施工等の装置仕様(要求事項)を明確にし、水中レーザークラッド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。

### 第5章 施工後の確認

水中レーザークラッド溶接工法の施工後、以下の確認を行うこと。[解説-6]

- (1) 水中レーザークラッド溶接後に目視検査(VT)、もしくは同等の欠陥検出性が確認された非破壊検査手法による表面検査を行い、規定を満足することを確認すること。
- (2) 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。

### 第6章 適用フロー

水中レーザークラッド溶接工法の適用に関するフローを図3に示す。

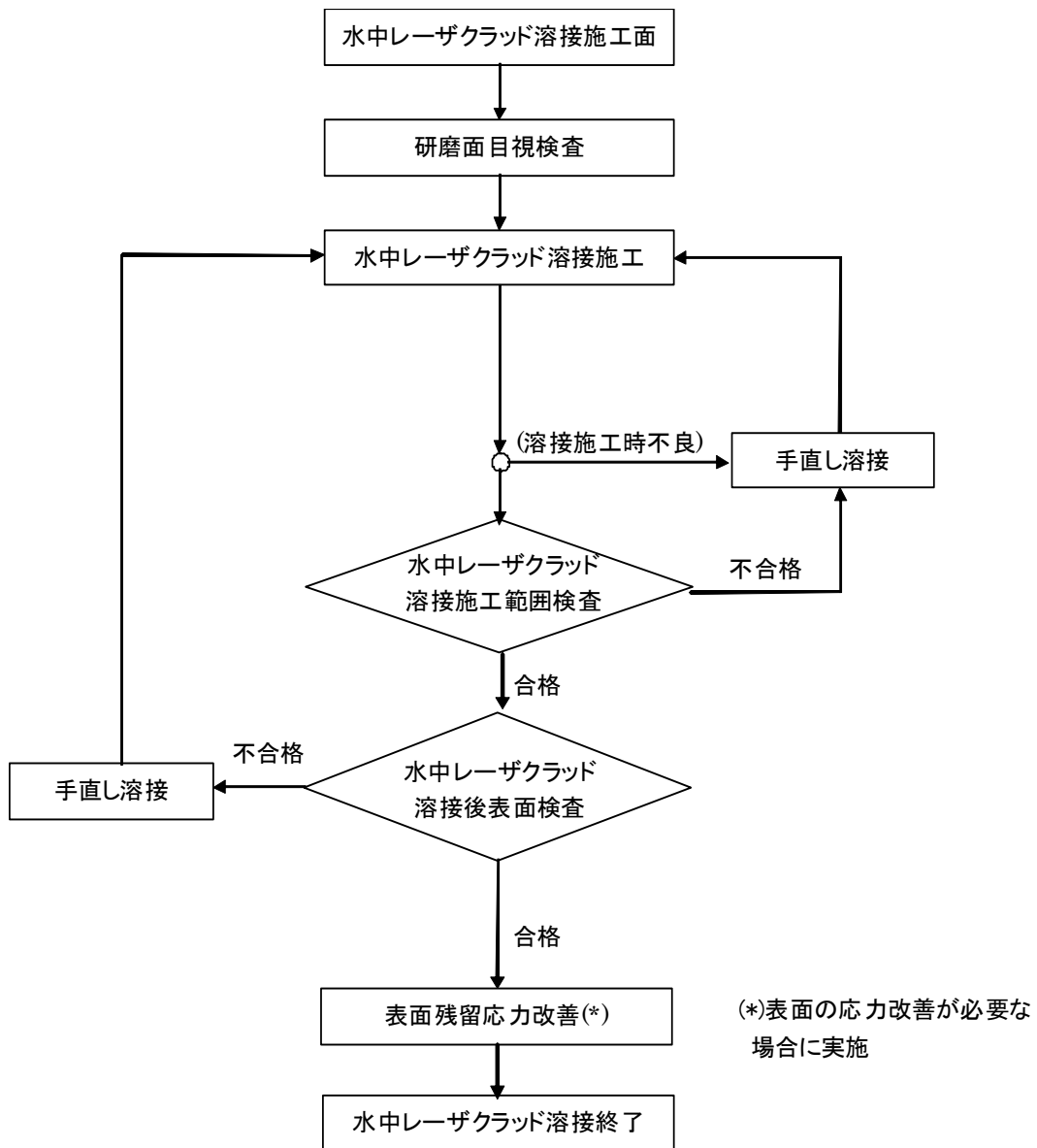


図2 水中レーザークラッド溶接施工ステップ

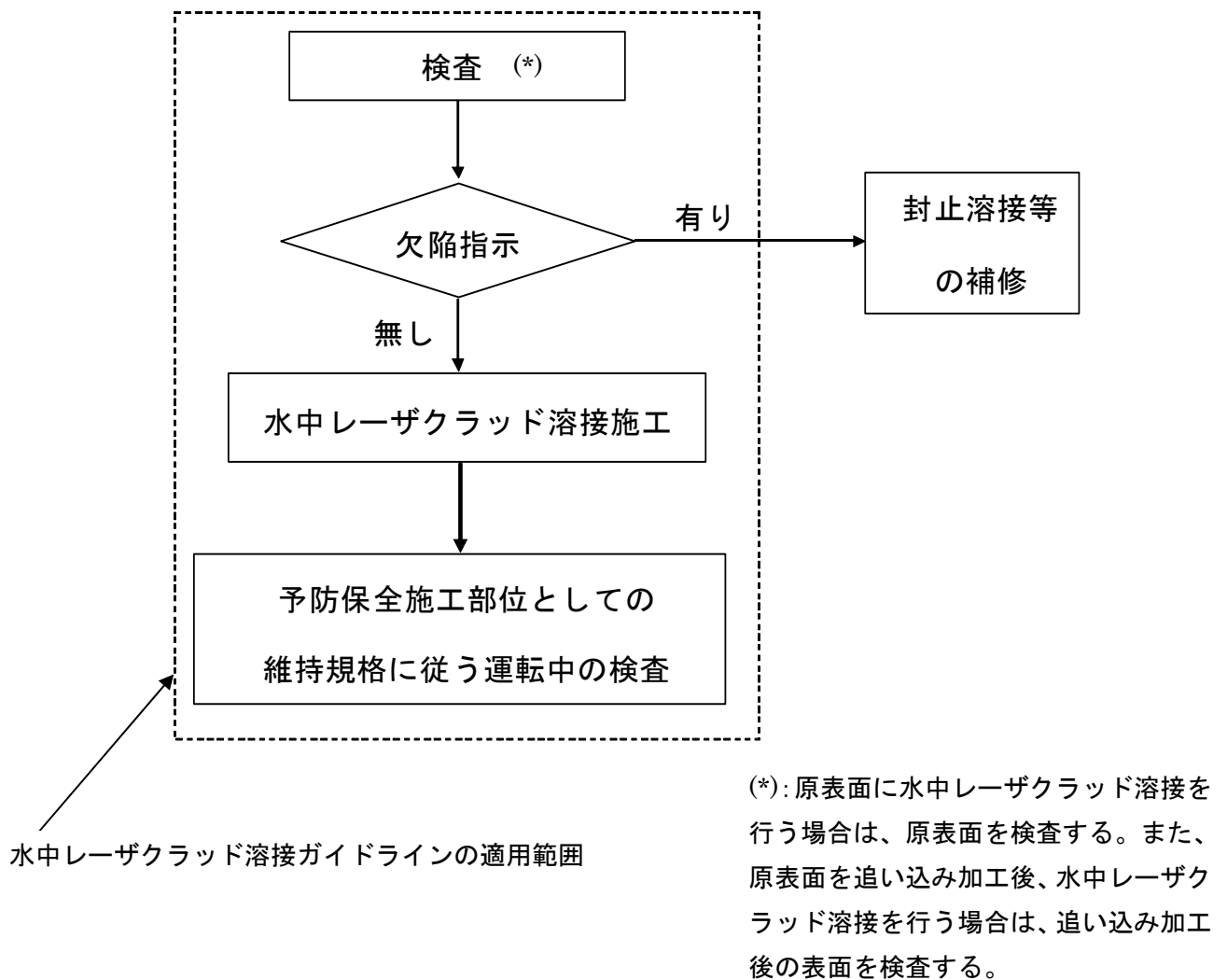


図3 水中レーザクラッド溶接施工法の適用フロー

## [解説-1] ガイドライン制定の目的

国内プラントにおいて、炉内構造物等に経年変化事象による損傷が散見されてきたことから、これらの炉内構造物に要求される安全上重要な機能の維持を確認するための点検手法として、炉内構造物の点検評価ガイドラインの検討を進めている。また損傷を未然に防止するための予防保全並びに補修工法についても、施工管理に関するガイドラインが必要となっている。

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、応力腐食割れ(SCC)が発生することを予防するために、水中でレーザービーム溶接によるクラッド溶接を施工する場合の施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的とする。ここでいうクラッド溶接は、母材としての強度部材を構成しないものである。

## [解説-2] 水中レーザークラッド溶接工法について

水中レーザークラッド溶接工法は、対象となる部材表面を耐 SCC 性に優れる溶加材を用いたクラッド溶接で覆うことにより、被施工部位の SCC 発生に対する予防保全または補修を目的とする工法である。工法としては、部材原表面に直接クラッド溶接を施工する場合(図 1 (a))と、原表面に追い込み加工を施した後にクラッド溶接を施工する場合(図 1 (b))がある。耐 SCC 性に優れた溶加材を用い、水中でレーザービームを利用したクラッド溶接を施工することが特徴である。

レーザービーム溶接工法は既に JSME 溶接規格で規定されている。本ガイドラインでは、施工部に部分気中環境を作り、水中でレーザービーム溶接を施工する場合を対象とするが、従来規定されているレーザービーム溶接の施工管理項目、施工管理条件と基本的に同様である。本溶接工法において、加熱源はレーザー光であり、水深による圧力の影響は受けにくく、水深によるクラッド層への影響は無い。

本ガイドラインで対象とする水中レーザークラッド溶接は、SCC への予防保全を目的とするものであり、母材及び溶加材の材質、溶接時の成分希釈を考慮したうえで、クラッド層が耐 SCC 性を満足する化学成分とすることを原則とする。

図 1 (b)に示すように、原表面を追い込み加工後にクラッド溶接を行う場合の目的としては、当初の表面粗さや、微小な傷、欠陥を除去して溶接施工表面を整えること、あるいは、水中レーザークラッド溶接後の表面を当初の原表面と合せること等が想定される。追い込み加工は以下を前提とする。

- ・ 構造健全性を確保するのに必要な強度部材の領域に至ることがないこと。
- ・ フェライト鋼に接合された高ニッケル合金(ニッケルクロム鉄合金)またはオーステナイト系ステンレス鋼の部材(母材、溶接金属)に適用する場合には、既設の溶接部の厚さが、水中レーザークラッド溶接時の熱影響を、フェライト鋼に与えない厚さ以上に確保されていること。

施工対象部位としては、原子炉炉内構造物や原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する部材であり、具体的な例として、沸騰水型原子炉の場合、

- ・ 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、加圧水型原子炉の場合、
- ・ RV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。

[解説－3] 水中レーザークラッド溶接適用部位に要求される機能について

水中レーザークラッド溶接を適用する部位においては、クラッド溶接部表面の耐 SCC 性が優れていることが要求される機能である。

また、原表面のクラッド等を研削して水中レーザークラッド溶接を行う場合、残存する構造部で、機器に要求される構造健全性その他の機能的要求を満足することが必要である。

[解説－4] 工法適用にあたっての前提条件

水中レーザークラッド溶接工法適用にあたっては、本文記載の前提条件に加えて、水中レーザークラッド溶接を適用する機器や部位に応じて、下記の項目についても確認し、溶接工法の適用性を確認すること。(図 1 (b) の様に、原表面追い込み加工を行う場合、追い込み加工後に適用部位表面に SCC その他のき裂が無いこと。また、SCC を残す場合の封止溶接については、封止溶接工法に関するガイドライン「補修工法ガイドライン 封止溶接」(JANT I-VIP-01) に従い実施すること。)

- (1) フェライト鋼に接合された高ニッケル合金(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)に適用する場合は、既設の溶接部の厚さが、水中レーザークラッド溶接時の熱影響をフェライト鋼に与えない厚さ以上に、確保されていること。
- (2) 中性子照射が溶接性に及ぼす影響を評価し、溶接施工が可能であること。
- (3) 水中レーザークラッド溶接により生じる熱変形が機器の機能に影響を及ぼさないこと。
- (4) 水中レーザークラッド溶接は、耐 SCC 性を向上させることを目的として施工するものであることから、母材及び溶加材の材質を考慮し、クラッド層が耐 SCC 性に対する化学成分の要求を満足する最小層数以上の施工を行うこと。

[解説－5] 水中レーザクラッド溶接施工条件に関する確認項目

(1) 溶接施工法の確認事項

水中レーザクラッド溶接の溶接施工法の確認すべき事項（基本支配因子）を解説表 2 に示す。

(2) 溶接施工法確認試験

溶接施工法確認のための試験要領は、JSME 溶接規格の溶接施工法確認試験要領に準拠して実施するものとする。

なお、事前確認試験として、施工対象部位を模擬した試験体及び、実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、健全な溶接部が形成できることを下記項目について確認する。（但し、実施済みの同内容モックアップ試験結果がある場合省略してもよい。）

- 1) 目視検査（クラッド溶接部に割れ等の有害な欠陥がないこと）
- 2) 浸透探傷試験（PT）（クラッド溶接部に割れ等の有害な欠陥がないこと）
- 3) 断面マクロ観察（クラッド溶接部に割れ等の有害な欠陥がないこと）
- 4) 成分分析（耐 SCC 性要求）
- 5) 硬さ試験（参考試験）
- 6) 強度試験（JSME 溶接規格に準じ、クラッド溶接継手として求められる試験を実施すること）



解説表 1 レーザビーム溶接によるクラッド溶接工法の溶接方法の確認項目  
(基本支配因子)

項目	確認項目*	備考
溶接方法	LB(式)溶接 (水中クラッド溶接)	溶接区分として、「LB(式)溶接 (水中クラッド溶接)」 という定義を設ける。(水中での施工を対象とする)
母材	○	適用する母材を規定する。
溶接棒	—	対象外
溶接金属	—	対象外
予熱	行わない	
溶接後熱処理	行わない	クラッド溶接時の溶接熱影響がフェライト鋼に及ば ないようにするため、フェライト鋼に接合された既 設の溶接部の厚さが 4mm 以上確保されていることを 適用条件とする。
シールドガス	○	シールドガスの種類を規定する。
裏面からのガス 保護	行わない	
溶加材	○	溶加材の区分を規定する。
ウェルドインサ ート	使用しない	
フラックス	—	対象外
心線	—	対象外
溶接機	○	レーザの種類を規定する。
層数	多層	
母材の厚さ	制限なし	
ノズル	—	対象外
レーザ出力	○	適正施工条件範囲を規定する。
溶接速度	○	適正施工条件範囲を規定する。
ワイヤ供給速度	○	適正施工条件範囲を規定する。
ビーム	○	ビーム発振方法を規定する。
オシレーション	行わない	
溶接姿勢	○	溶接姿勢を規定する。
水深	○	最大水深を規定する。
揺動	—	対象外
あて金	—	対象外
リガメントの幅	—	対象外

\* : ○の項目を確認、規定する。

#### [解説－6] 水中レーザクラッド溶接部の表面検査

水中レーザクラッド溶接施工部について、最終溶接施工後に表面検査を行い、判定基準を満足することを確認すること。

表面検査法としては、MVT－1試験に適合する目視検査（VT）、もしくは同等の欠陥検出性が確認された手法を用いることとし、判定基準として、割れ、オーバーラップ、アンダーカット等の有害な欠陥が無いことを確認すること。

#### [解説－7] 開先面の目視検査

具体的には、開先面が清浄であり、溶接に悪影響を及ぼすさび、ごみ等の有害な異物がないことを確認する。

#### [解説－8] 積層数

水中レーザクラッド溶接部に耐 SCC 性が満足できるよう、母材の希釈の影響を考慮した層数を決定するものとする。

#### [解説－9] 手直し溶接

- (1) 水中レーザクラッド溶接は SCC によるき裂を対象にした予防保全工法であり、水中レーザクラッド溶接施工により生じた表面欠陥（高温割れ等）については、機械加工や放電加工等により欠陥を除去した後、手直し溶接を実施すること。
- (2) 手直し溶接の要領（手直し溶接施工可能回数を含む）は事前に確認しておくこと。
- (3) 手直し溶接を実施した場合は、下記を記録すること。

欠陥範囲、欠陥除去範囲、手直し溶接回数（注 1）、手直し後の検査結果

（注 1）手直し溶接回数：

同一箇所における手直し溶接の回数であり、溶接施工過程や、表面検査後に実施する手直し溶接を対象とする。

## 水中レーザービーム溶接によるクラッド溶接工法

沸騰水型原子力発電所（BWR）及び加圧水型原子力発電所（PWR）の原子炉炉内構造物及び原子炉冷却材圧力バウンダリを構成するオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金（ニッケルクロム鉄合金）の部材に SCC が発生することを予防する目的で、水中レーザービーム溶接によるクラッド溶接を施工する場合の溶接施工条件の一例を下記に示す。

## (1)適用

本レーザークラッド溶接施工条件は、以下の部位に適用する。

- ・原子炉炉内構造物
- ・原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する部材

## (2)溶接施工条件

水中レーザークラッド溶接施工時の溶接条件を添付表 1-1 に示す。

添付表 1-1 水中レーザークラッド溶接 溶接条件

項目	適用条件
(1) 母材	適用対象材料範囲内（添付表 1-2）
(2) シールドガス	アルゴンガス
(3) 溶加材	適用対象材料範囲内（添付表 1-2）
(4) 積層数	多層
(5) 母材の厚さ	制限なし
(6) 溶接条件	適正施工条件範囲内
(7) 手直し溶接	同一箇所での手直し溶接は 2 回以内とすること。
(8) 施工姿勢	全ての施工姿勢
(9) 溶接機	YAG レーザ
(10) レーザの波長	1.06 $\mu$ m
(11) 水深	30m 以下

添付表 1-2 適用対象材料範囲

適用対象材料		溶加材	オーステナイト系 ステンレス鋼	ニッケルクロム 鉄合金
			R-7	R-43
オーステナイト系 ステンレス鋼	母材	P-8	○	○
	溶接金属	F-5	○	○
		R-7/E-7	○	○
ニッケルクロム 鉄合金	母材	P-43	×	○
	溶接金属	F-43	×	○
		R-43/E-43	×	○

○：適用範囲      ×：適用範囲外

---

予防保全工法ガイドライン  
[水中レーザクラッド溶接工法]

編集者 有限責任中間法人 日本原子力技術協会  
炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会  
発行者 有限責任中間法人 日本原子力技術協会  
〒108-0014 東京都港区芝4-2-3 NOF芝ビル7階  
電 話 03(5440)3603(代)  
FAX 03(5440)3606

---

© 日本原子力技術協会，2009

本書に掲載されたすべての記事内容は、日本原子力技術協会の許可なく、  
転載・複写することはできません。