

補修工法ガイドライン
[水中レーザー肉盛溶接工法]

平成24年 11月

一般社団法人 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、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およ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、絶大なご助言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24年11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

補修工法ガイドライン

改訂履歴

ガイドライン名：水中レーザー肉盛溶接工法

改訂年月	版	改訂内容	備考
平成 24 年 11 月	初版発行		

ガイドラインの責任範囲

このガイドラインは、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、専門知識と関心を持つ委員と参加者による審議を経て制定されたものである。

日本原子力技術協会はガイドライン記載内容に対する説明責任を有するが、ガイドラインを使用することによって生じる問題に対して一切の責任を持たない。また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、このガイドラインを使用する責任を持つ。

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24年11月現在, 順不同, 敬称略)

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 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	大阪大学名誉教授 福井工業大学教授
委員	橋爪 秀利	東北大学教授
委員	望月 正人	大阪大学教授
幹事	村井 荘太郎	東京電力(株)
幹事	平野 伸朗	関西電力(株)
幹事	堂崎 浩二	日本原子力発電(株)
委員	勝海 和彦	北海道電力(株)
委員	飯田 純	東北電力(株)
委員	吉田 伸司	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	倉田 勝	北陸電力(株)
委員	野村 友典	関西電力(株)
委員	谷 浦 亘	中国電力(株)
委員	黒川 肇一	四国電力(株)
委員	大久保 康志	九州電力(株)
委員	江口 藤敏	日本原子力発電(株)
委員	寺門 剛	日本原子力発電(株)
委員	枅 明彦	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	菊池 正明	(独)原子力安全基盤機構
参加者	小澤 正義	(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

水中レーザー肉盛溶接工法ガイドライン

目次

第1章	目的及び適用	1
1.1	目的	1
1.2	適用	1
1.2.1	適用範囲	1
1.2.2	適用時期	1
第2章	工法の概要	1
第3章	工法適用の条件	1
第4章	工法適用に対する要求事項	2
4.1	工法適用にあたっての前提条件	2
4.2	工法に対する要求事項	2
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1-1]	ガイドライン制定の目的	7
[解説2-1]	水中レーザー肉盛溶接工法について	7
[解説3-1]	水中レーザー肉盛溶接適用部位に要求される機能について	8
[解説4-1]	工法適用にあたっての前提条件	8
[解説4-2]	水中レーザー肉盛溶接施工条件に関する確認項目	9
[解説4-3]	水中レーザー肉盛溶接部の非破壊試験	12
[解説4-4]	開先面の目視検査	12
[解説4-5]	溶接条件	12
[解説4-6]	施工範囲	12
[解説4-7]	手直し溶接	12

1 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、応力腐食割れ(SCC)等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水中レーザビーム溶接により強度部材として欠陥除去部を埋め戻すために適用する補修方法(以下、水中レーザ肉盛溶接工法と呼ぶ)の要領を示すことを目的とする。[解説1-1]

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)、オーステナイト系ステンレス鋼及びこれらに接合されたフェライト鋼の部材(母材、溶接金属)の補修に適用する。

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。

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、炉内からの排水を不要とするため、水中においてシールドガス(アルゴン等)を溶接施工部に供給することで局所的な空洞を確保し、確保された空洞中でレーザ光を照射しながら溶接ワイヤを供給して肉盛溶接する。

母材にフェライト鋼が使用されている原子炉圧力容器等の機器においては、き裂除去の機械加工によりフェライト鋼が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。[解説2-1]

3 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)またはオーステナイト系ステンレス鋼に発生したSCC等によるき裂に対する補修を目的とした水中レーザ肉盛溶接工法に適用する。

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。

(事前の実施・確立事項)

- (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1の水中レーザー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、健全な水中レーザー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。

[解説3-1]

4 工法適用に対する要求事項

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は以下とする。

- (1) 溶接施工面（開先面）には、SCCその他のき裂がないこと。
- (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) 接液部については、耐SCC性に優れた溶接材料を用いること。
- (4) 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であること。
- (5) 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。

[解説4-1]

4.2 工法に対する要求事項

水中レーザー肉盛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

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。

[解説4-2]

(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、水中レーザ肉盛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) 健全性評価

水中レーザ肉盛溶接工法の適用に際して、各機器の構造健全性が確保される必要がある。このためには、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する。この結果をもとに、施工後に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

水中レーザ肉盛溶接部については、溶接施工前の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い、規定を満足することを確認すること。 [解説 4-3]

(4) 溶接施工

実機施工は、水中レーザ肉盛溶接施工管理要領に従い、実施すること。

(a) 開先面

目視検査にて、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を確認すること。 [解説 4-4]

(b) 溶接条件

水中レーザ肉盛溶接施工管理要領に従った溶接条件を適用すること。 [解説 4-5]

(c) 施工範囲

施工後に不連続で特異な形状ができないよう開先内を埋め戻すこと。 [解説 4-6]

(d) 積層数

積層数は、母材および溶加材の材質を考慮し決定した最少層数以上とすること。また、常温テンパービード溶接が必要な場合はテンパー効果が得られる最少層数以上とすること。

(e) 溶接中の手入れ

グラインダー、ワイヤブラシ、バフ等により、ビード表面（層間を含む）の手入れを必要に応じて行うこと。

(f) 手直し溶接

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(3)に規定する施工後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。 [解説4-7]

(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S C C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こと。

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。

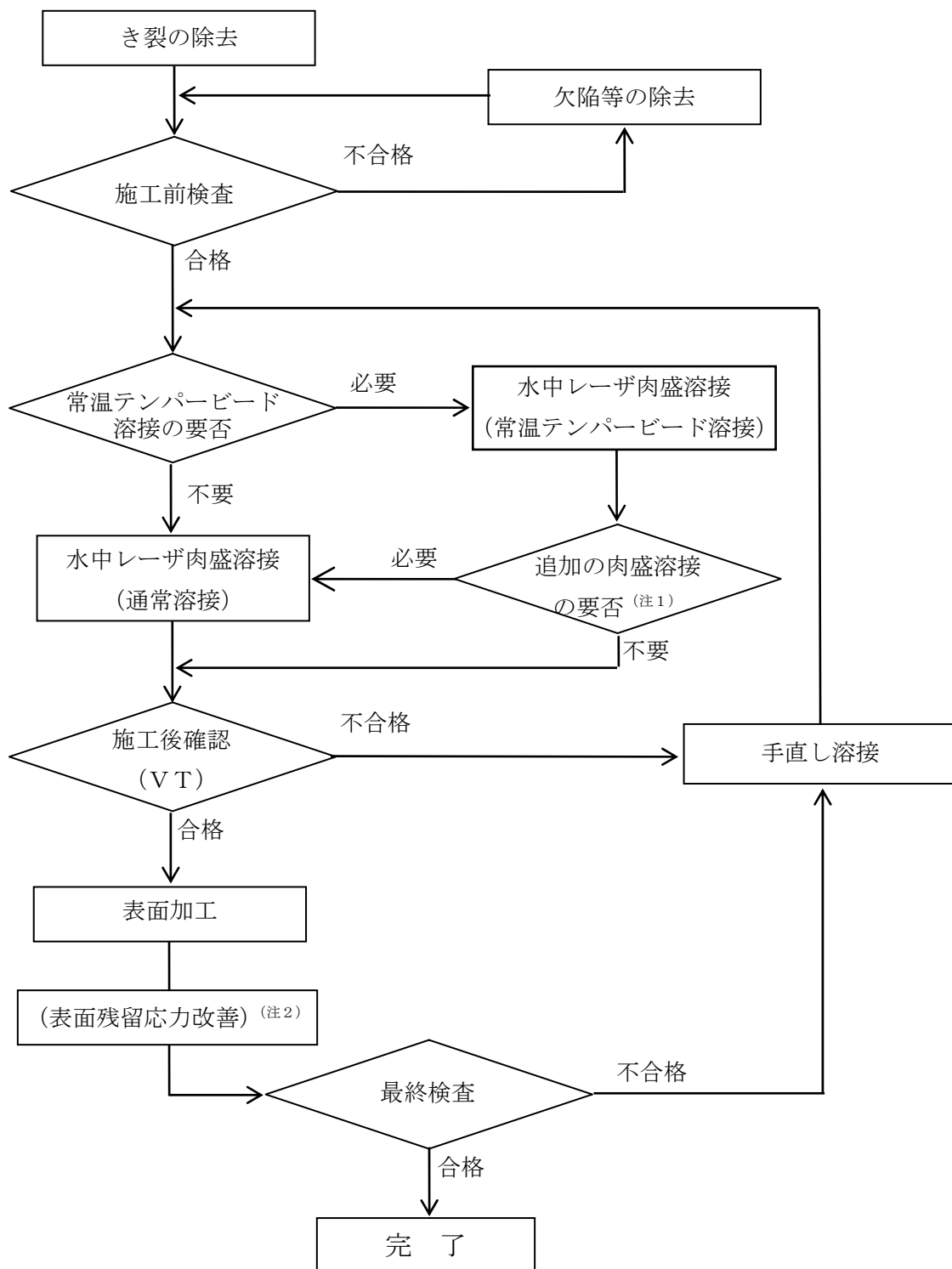
5 施工後の確認

水中レーザー肉盛溶接工法の施工後、以下の確認を行うこと。

- (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(V T)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。

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図2に示す。



(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。

図1 水中レーザー肉盛溶接施工ステップ

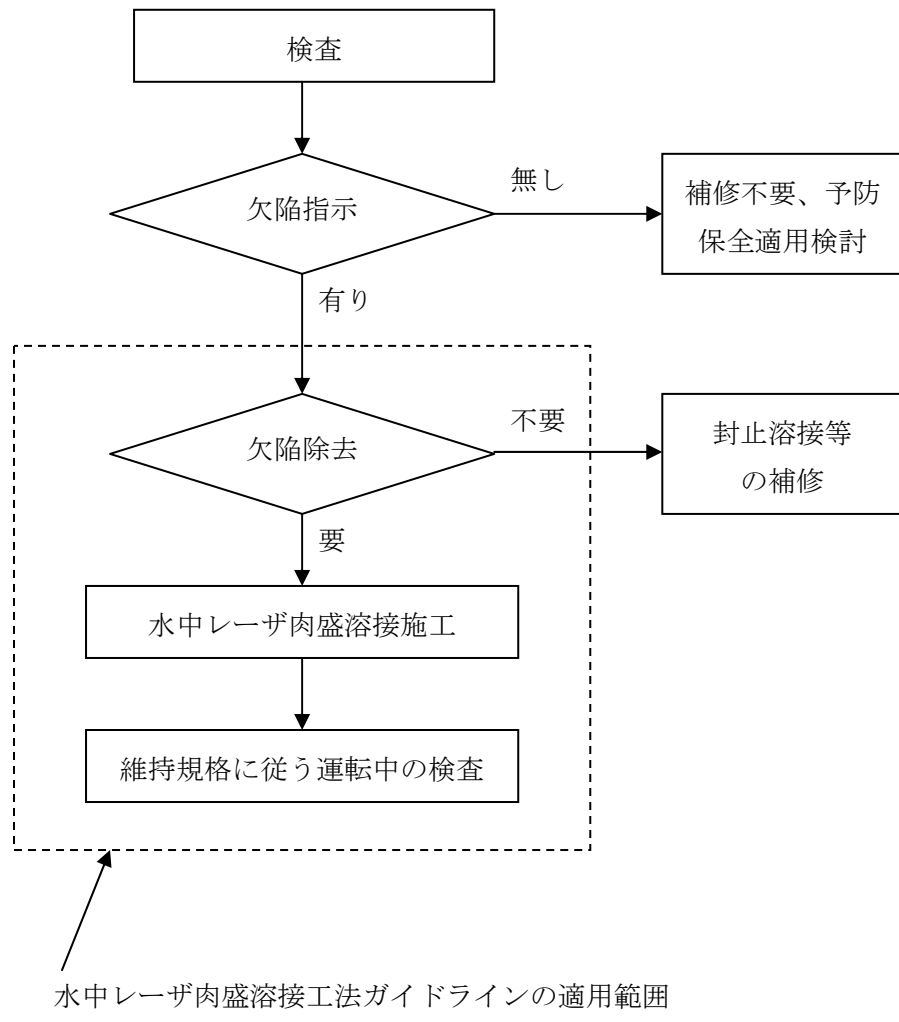


図2 水中レーザー肉盛溶接工法の適用フロー

[解説 1-1] ガイドライン制定の目的

原子力発電用設備では、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。水中レーザー溶接を適用した各種工法については、応力腐食割れに対する予防保全工法としての水中レーザークラッド溶接工法、及び補修工法としての封止溶接工法の適用に関してまとめたガイドラインについては既に制定している。

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)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、施工管理項目と施工管理条件を示すことを目的とする。

[解説 2-1] 水中レーザー肉盛溶接工法について

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、水深による肉盛溶接部への影響は無い。

水中レーザー肉盛溶接工法は、SCC等のき裂除去部の補修に使用するが、構造健全性を確保するのに必要な強度部材の領域までき裂除去部が及んだ場合に、母材と同等以上の機械的性質を有する強度部材として肉盛溶接により埋め戻すことにより、構造健全性を確保する。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、水中レーザー肉盛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できない場合は、フェライト鋼近傍の肉盛溶接は通常の強度溶接ではなく、水中で予熱することなく健全な靱性を得ることができる常温テンパービード溶接を用いる。

水中レーザー肉盛溶接工法を適用する施工部位の例を、解説図 2.1-1 に示す。フェライト鋼を母材とする管台の異材溶接継手部の軸方向断面の一例を示した図である。高ニッケル合金溶接部の内面に発生したき裂を除去した後に肉盛溶接(強度溶接)を行うが、フェライト鋼の近傍は常温テンパービード溶接を用いている。

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、沸騰水型原子炉の場合、

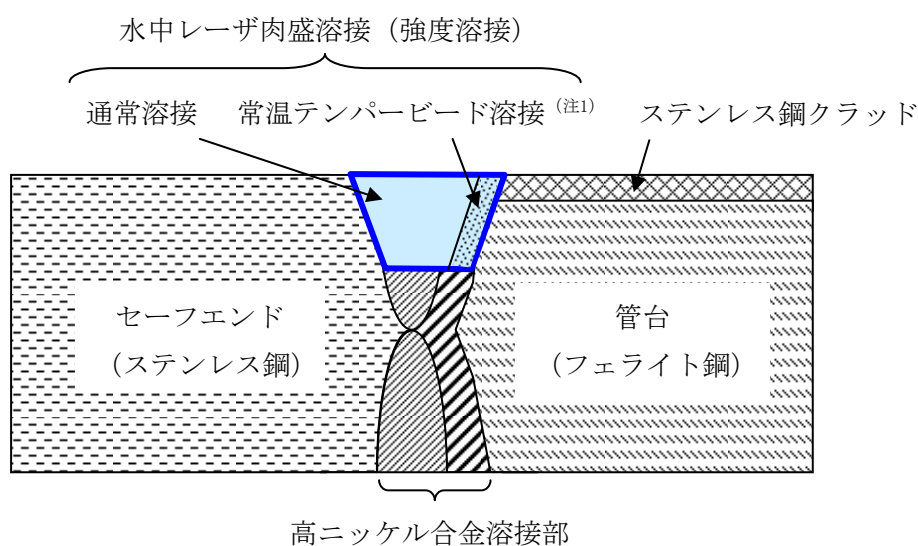
- ・ 炉心シュラウド
- ・ 制御棒駆動機構(CRD)ハウジング

- ・ 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。



(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。

解説図 2.1-1 水中レーザ肉盛溶接施工部位の例

[解説 3-1] 水中レーザ肉盛溶接適用部位に要求される機能について

水中レーザ肉盛溶接を適用する部位においては、肉盛溶接の継手が母材と同等以上の強度を有することが要求される機能である。

[解説 4-1] 工法適用にあたっての前提条件

水中レーザ肉盛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、水中レーザ肉盛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、水中レーザ肉盛溶接工法の適用性を確認すること。

- (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、水中レーザ肉盛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できない場合は、常温テンパービード溶接を適用すること。
- (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) 水中レーザ肉盛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。

[解説 4-2] 水中レーザ肉盛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

水中レーザ肉盛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 4.2-1に、水中レーザ肉盛溶接の溶接条件例を解説表4.2-2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、水中で健全な溶接部が形成できることを下記①から⑤の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は省略してもよい。)

- ① 目視検査(肉盛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)(肉盛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(肉盛溶接部に割れ等の有害な欠陥がないこと)
- ④ 硬さ試験(参考試験)
- ⑤ 強度試験(試験体の形状から実施が困難な場合を除き、JSME 溶接規格に準じ、強度溶接継手として求められる試験を実施すること)

また、常温テンパービード溶接を適用する場合は、下記⑥から⑧の項目についても確認すること。

- ⑥ 衝撃試験(JSME 溶接規格の判定基準を満足すること)
- ⑦ 硬さ試験(フェライト鋼熱影響部のビッカース硬さが 350HV 以下であること)
- ⑧ 断面ミクロ観察(フェライト鋼熱影響部の金属組織が微細な組織であること)

解説表 4.2-1 レーザビームによる肉盛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 ^(注1)	備考
溶接方法	LB (レーザービーム溶接)	
母材	○	適用する母材を規定する。
予熱	行わない	
溶接後熱処理	行わない	肉盛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に必要な、フェライト鋼に接合された既設の溶接部の厚さが確保できない場合は、常温テンパービード溶接を適用する。
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	
溶接機	○	レーザーの種類を規定する。
層	多層盛り	
母材の厚さ	○	母材の厚さの範囲を規定する。
レーザー出力	○	適正施工条件範囲を規定する。 ^(注2)
溶接速度	○	適正施工条件範囲を規定する。 ^(注2)
ワイヤ供給速度	○	適正施工条件範囲を規定する。
ビーム	○	レーザーの発振モードを規定する。
オシレーション	行わない	
施工姿勢	○	施工姿勢を規定する。
レーザーの種類	○	レーザーの種類を規定する。
レーザーのスポット径	○	スポット径を規定する。
レーザーの波長	○	レーザーの波長を規定する。
水深	行わない	

(注1) ○の項目を確認、規定する。

(注2) レーザ出力及び溶接速度の代わりに入熱量でも可

解説表 4.2-2 水中レーザー肉盛溶接 溶接条件例 (注1)

項目	適用条件
(1) 母材	適用対象材料範囲内 (解説表 4.2-3)
(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 (解説表 4.2-3)
(4) 積層数	多層
(5) 母材の厚さ	6 mm以上 (但し、常温テンパービード溶接については30 mm以上)
(6) 常温テンパービード溶接が必要なクラック残存厚さ	3 mm未満 (注2) (但し、3 mm以上に適用しても良い)
(7) 溶接条件	適正施工条件範囲内
(8) 手直し溶接	同一箇所での手直し溶接は3回までとすること。
(9) 施工姿勢	全ての施工姿勢
(10) レーザの種類	ファイバーレーザー/YAG レーザ
(11) レーザの波長	1.07 μm / 1.06 μm
(12) 水深	30 m以下

(注1) 適用対象：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

(注2) 発電用原子力設備規格 維持規格 (JSME S NA1) では4 mm未満と規定されているが、水中レーザー肉盛溶接は従来のアーク溶接等に比べ低入熱であり、3 mm以上であれば常温テンパービード溶接が不要であることを確認している。

解説表 4.2-3 適用対象材料範囲の例

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	—	○
フェライト鋼	母材	P-3	○	○

○：適用範囲 —：適用範囲外

[解説 4-3] 水中レーザー肉盛溶接部の非破壊試験

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。

[解説 4-4] 開先面の目視検査

具体的には、開先面が清浄で、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 4-5] 溶接条件

- (1) 水中施工であることから、水素の拡散による遅れ割れを生じない施工条件を選定すること。
- (2) 異種材の溶接においては、希釈による欠陥の発生等を十分考慮して溶接条件を選定すること。

[解説 4-6] 施工範囲

常温テンパービード溶接の溶接深さおよび溶接部の面積は、発電用原子力設備規格維持規格 (JSME S NA1) に従う。

[解説 4-7] 手直し溶接

- (1) 水中レーザー肉盛溶接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。

補修工法ガイドライン
[水中レーザー肉盛溶接工法]

編集者 一般社団法人 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 一般社団法人 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
