

肉盛溶接補修の要件

1 はじめに

本要件は、ボイラー及び压力容器（以下「ボイラー等」という。）において、強度回復を目的に一般的に行われると考えられる肉盛溶接補修を念頭に、ボイラー等の肉盛溶接補修を行う場合の標準的な実施手順、実施方法等についてとりまとめたものである。本要件の適用範囲にないステンレス鋼や運転温度の高いもの等については、肉盛溶接補修を排除するものではないが、その対象に応じ、慎重に詳細な検討を行った上で実施する必要がある（ステンレス鋼の肉盛溶接補修に参考となる規格として、WES7700がある。）。

2 適用範囲

ボイラー等の肉盛溶接補修における本要件の適用範囲を表1に示す。

表1 肉盛溶接補修の適用範囲

項目	適用範囲	Note.
a) 設備	ボイラー・压力容器とその関連設備	-
b) 材料	炭素鋼及び低合金鋼（C-0.5Mo 鋼, 1.25Cr-0.5Mo 鋼, 2.25Cr-1Mo 鋼）	-
c) 運転温度	炭素鋼： ≤ 350 °C, 低合金鋼： ≤ 450 °C	*1
d) 損傷形態	腐食, エロージョン・コロージョン, 流れ加速腐食（FAC）, 表面きず, 割れなど	-
e) 肉盛対象面	外面及び内面	*2
f) 肉盛面積	制限なし	*3
g) 残存厚さ	片側溶接：3mm 以上, 両側溶接：制限なし	-
Note. *1 材質変化がない上限温度とする。 *2 配管内面の減肉に対して、外面肉盛溶接補修を行うことは対象外とする。 *3 必要により変形防止策をとる。		

a) 設備

ボイラー等とその関連設備（以下「圧力設備」という。）を対象とする。

- ・ボイラー：ボイラー本体、節炭器、過熱器、配管等
- ・压力容器：容器本体、配管等

b) 材料

炭素鋼及び高温部で使用される C-0.5Mo 鋼, 1.25Cr-0.5Mo 鋼, 2.25Cr-1Mo 鋼（以下、低合金鋼と呼ぶ）を対象とする。

c) 運転温度

設計温度以下で使用されている圧力設備を対象とする。

炭素鋼と低合金鋼の温度と許容応力の関係を図1に示す。炭素鋼は、350 °C以下では材質変化がないことからほとんど許容応力に変化がない。400 °C以上では黒鉛化により強度が低下する可能性がある。低合金鋼は、430 °C以上に長時間さらされると炭化物の球状化により強度が低下する可能性があるが、許容応力にほとんど変化がな

い 450 °C までは実用上問題ない。

これらのことから、対象材料の上限使用温度は、炭素鋼を 350 °C、低合金鋼を 450 °C とする

なお、運転温度が上限使用温度を超えても肉盛溶接補修は可能であるが、硬さ試験、表面ミクロ組織観察(SUMP)により材料の劣化状態を評価し、肉盛溶接補修の可否を判断する必要があるため、本要件では適用範囲外としている。材料が経年劣化している可能性が高い場合にはサンプリングによる調査を推奨する。

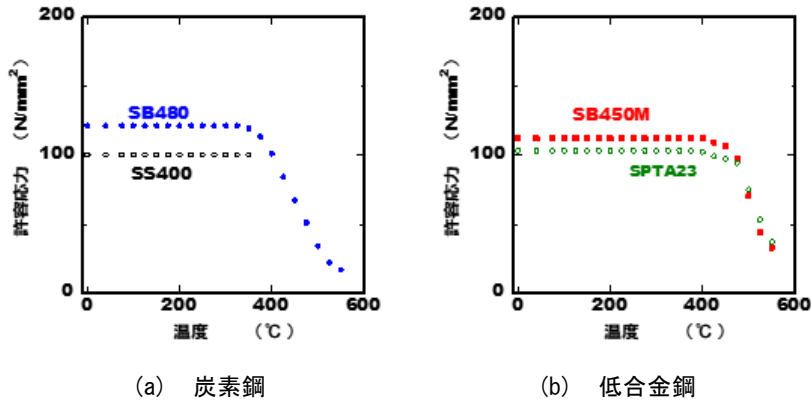


図 1 炭素鋼及び低合金鋼の許容応力と温度の関係 (JIS B 8265) 1)※

※本図は、JIS B8265 表 B.1—鉄鋼材料の許容引張応力の数値を基に作成。

d) 損傷形態

腐食、エロージョン・コロージョン、流れ加速腐食 (FAC : Flow-accelerated corrosion)、表面きず、割れなどを対象とする。ボイラー等及び配管における主な損傷形態を表 2 に示す。

表 2 ボイラー・圧力容器及び配管における主な損傷形態

設備	構成材料	損傷形態		検査	
		内面	外面		
ボイラー	水管	炭素鋼	腐食、FAC(*1)	アッシュコロージョン、硫酸腐食	内面側：UT厚み計、RT 外面側：目視検査
	過熱器管	炭素鋼、低合金鋼	腐食、過熱 (*2)、アルカリ腐食		内面側：UT厚み計、RT 外面側：目視検査
	ヘッダ	炭素鋼、低合金鋼	腐食		内・外面側：目視検査
配管	炭素鋼、低合金鋼	腐食、エロージョン・コロージョン、FAC(*1)	CUI(*3)		内面側：UT厚み計、RT 外面側：目視検査(保温材除去後)
容器	塔・槽	炭素鋼、低合金鋼	腐食	CUI(*3)	内面側：目視検査 外面側：目視検査(保温材除去後)
	熱交換器	炭素鋼、低合金鋼	腐食	CUI(*3)	内面側：目視検査 外面側：目視検査(保温材除去後)

注1：FAC(Flow-Accelerated Corrosion：流れ加速腐食)

注2：内面スケール生成によるメタル温度の上昇

注3：CUI (Corrosion Under Insulation:保温材下腐食)

e) 肉盛対象面

損傷部がある外面又は内面に対して肉盛溶接補修を行う。管の内面減肉部に対して外面側に肉盛溶接補修を行うことで損傷部の強度を回復できるが、次の観点から外面側からの肉盛溶接補修は対象外とする。

- ・管の内部減肉にともなう内部流体の流速変化やスケール堆積などに起因した損傷など、強度以外の要因がある。
- ・管の損傷については部分的に新管で取替が容易である。

f) 肉盛面積

肉盛施工の面積については制限を設けない。肉盛面積が広がると溶接による変形が発生しやすいため、適切な変形防止・軽減策をとることが必要である。

g) 残存厚さ

残存厚さは 3 mm 以上が望ましいが、外面と内面の両方で肉盛溶接補修ができる場合には残存厚さは制限なしとする。参考として、ASME PCC-2 (Repair of Pressure Equipment and Piping) 及び NBIC (National Board Inspection Code) では、ボイラーチューブの内面減肉部に対して、外面側に肉盛溶接補修を行う場合の残存厚さは 3 mm 以上と規定している。この規定は溶接補修時の溶落ち防止のためと推察される。

3 肉盛溶接補修の検討及び留意点

割れなどの損傷が発生し、そのままでは継続して供用できないと判断された場合、溶接補修により圧力設備を供用できる状態に復旧又は更新する必要がある。

溶接補修法については、肉盛溶接補修、部分取替（窓形溶接補修）、当て板溶接補修などがあるが、ここでは肉盛溶接補修を行う場合の検討事項及び留意点を示す。

肉盛溶接補修の標準的な検討・実施手順を図 2 に示す。

欠陥・損傷検出後は腐食減肉、割れ、表面きずなどの状況を把握し、肉盛溶接補修の要否・可否を検討する。肉盛溶接補修の実施に当たっては、溶接補修要領書を作成して、溶接補修要領及び試験・検査要領を明確にすることが必要である。

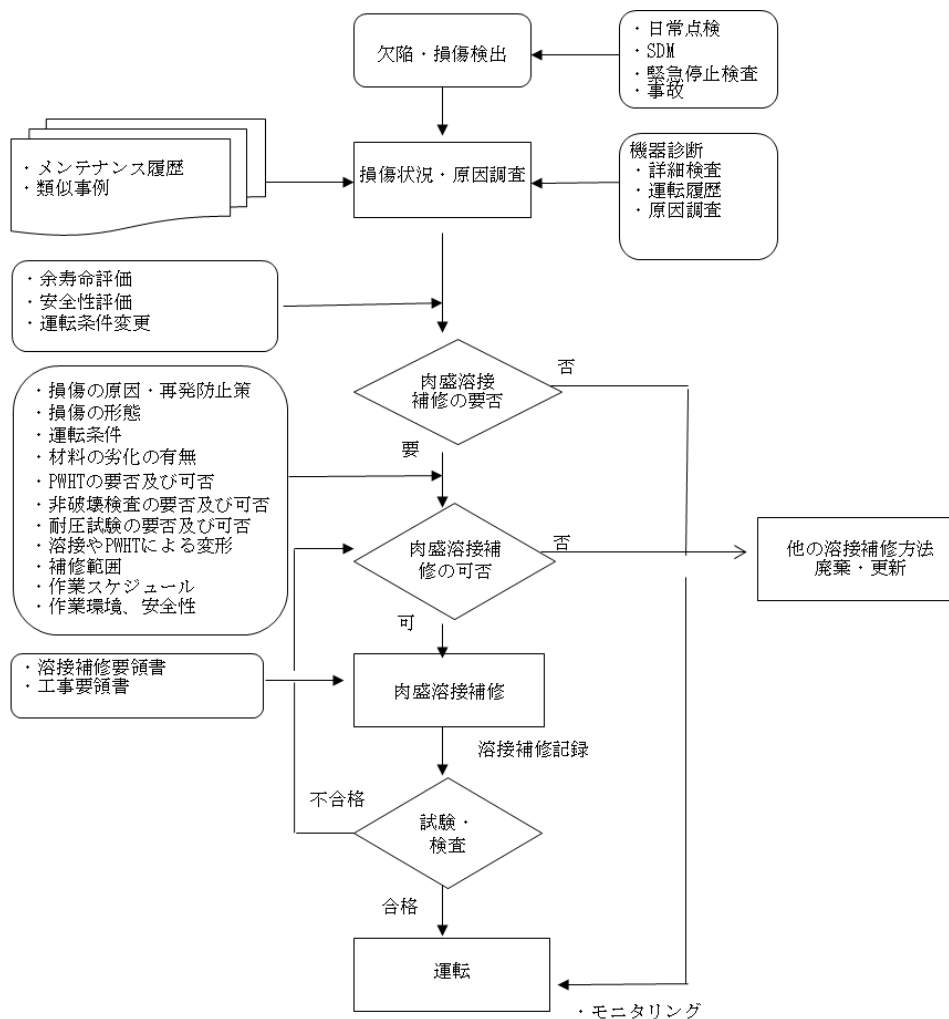


図 2 肉盛溶接補修の標準的な検討・実施手順

腐食減肉、割れ、表面きずなどの欠陥部についての肉盛溶接に関するそれぞれの検討・実施項目についての留意点を次にまとめる。

a) 損傷の検出

定期検査によって劣化・損傷の有無を確認するほか、日常点検で劣化・損傷によると考えられる異常が認められた場合には、必要に応じて運転を停止して検査を行い腐食減肉、欠陥など損傷の有無を確認する。

b) 損傷状況及び原因調査

劣化・損傷が認められた場合には、厚さ測定及び非破壊試験などを行い、損傷状況（損傷形態、範囲、深さなど）を確認し、記録するとともに損傷原因を調査する。

原因調査に当たっては、過去に行われたメンテナンス履歴及び運転履歴を確認し、適切な検査を実施する。

c) 溶接補修の要否

劣化・損傷の確認結果に基づき、次回の定期検査時までの使用を考慮して、溶接補修の要否を決定する。

d) 溶接補修の可否

溶接補修が必要と判断された場合、材料の経年劣化の可能性を考慮し、類似設備での溶接補修事例及び技術文献資料などを参考に溶接補修の可否を判断する。

予期しない腐食又は割れについては、損傷原因を調査し、再発防止又は再発軽減策を検討し採用する。

肉盛溶接補修が不可の場合には、他の溶接補修方法、運転条件の変更、運転期間の見直し、設備の変更、廃棄・更新などを検討する。

e) 肉盛溶接補修

溶接性だけでなく、次の項目を総合的に考慮して検討する。

1) 損傷の状態の確認

損傷部について、VT及び適切な検査により、位置、形状、寸法、分布などを確認し記録する。

2) 損傷の原因及び再発防止策

損傷の原因を推定し、再発防止又は再発軽減策を検討する。

3) PWHT

原則として、溶接補修部のPWHTは製作時の要求により実施する。溶接補修部のPWHTの保持時間及び有効加熱幅の決定に用いる厚さは補修深さとする〔JIS Z 3700（溶接後熱処理方法）6.2.h参照〕³⁾。

4) 試験・検査

溶接補修部については適切な非破壊検査を行い、健全性を確認する。

非破壊検査で合格した場合、適用法規・規格に従って、原則として、耐圧試験を行う。

5) 溶接補修による変形

補修対象設備及び補修部位、補修範囲については特に制限を設けませんが、補修範囲が大きくなると変形などが生じやすいため、変形防止・軽減策を考慮する。変形防止・軽減策にはジグによる拘束、溶接順序などがある。

f) 溶接補修要領書

肉盛溶接補修にあたっては溶接補修要領書を作成し、溶接材料、予熱、溶接法、溶接条件、積層法、PWHT、試験・検査などを明記する。溶接補修要領書の作成は溶接について十分な知識・技術を有する者が行う。

溶接補修要領書への主な記載項目を次に示す。

1) 施工者、施工管理組織

2) 施工対象（設備の名称、仕様など）

3) 溶接補修の目的

4) 施工（責任）範囲

5) 溶接補修方法

- 6) 欠陥除去方法及び確認方法
- 7) 溶接技能者又は溶接オペレータの資格
- 8) 溶接施工要領書（WPS）及び溶接施工法確認試験記録（PQR）
- 9) 溶接施工上の特記事項
- 10) PWHT の要否， 施工要領
- 11) 溶接補修前後の試験・検査要領， 合否基準及び立会区分
- 12) 記録すべき項目（溶接記録， 検査記録など）

g) 溶接補修の実施

溶接補修要領書に従って， 溶接補修を行う。溶接施工要領書（WPS）については， 適用法規・規格に従って溶接施工法確認試験を行う。設備保有者あるいは溶接補修実施者が溶接補修対象に該当する溶接施工法確認試験記録（PQR）を保有している場合には当該試験を省略できる。

フェライト系材料の溶接における主な留意点を次に示す。

1) ショートビードを避ける

欠陥除去範囲が小さい（短い， 狭い， 浅い）場合， 溶接補修はショートビードになり， 図 3 に示すように， 母材からの希釈と急熱急冷効果などで異常硬化が生じやすいため， できるだけビード長さを 50 mm 以上にする。ショートビードが避けられない場合には， 高めの温度で予熱する又は 2 層以上肉盛溶接した後に余盛を仕上げるものとする。

なお， 溶接補修部が PWHT される場合にはこのことを考慮する必要はない。

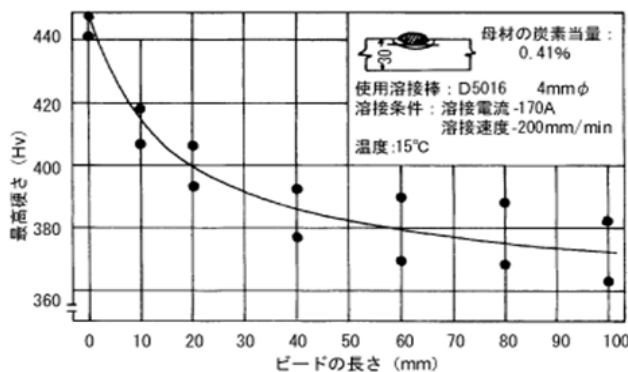


図 3 溶接ビード長さと熱影響部最高硬さの関係⁴⁾

2) 低温割れ防止

低温割れは炭素鋼， 高張力鋼や Cr-Mo 低合金鋼などの溶接部が急熱急冷により硬化し， 溶接金属中の拡散性水素がこの部分に集積して発生する。割れ因子としては硬化， 拡散性水素， 引張応力（拘束）があげられる。硬さには， 溶接金属と母材の化学成分（特に， 炭素量など）が影響する。

水素源としては， 溶接棒フラックス中に含まれる水分， シールドガスや大気中の水分， 開先面の油， さび， 有機物， 水分などがある。割れ防止には溶接棒の吸湿防止管理， 溶接開先の清掃， 予熱が有効である。

h) 試験・検査

溶接補修部については溶接補修要領書に規定された試験・検査を実施する。試験・検査で不合格となった場合， 図 2 に示すように， その原因を調査し改善策を取り， 欠陥を除去した後に再溶接補修を行い所定の検査を行う。

4 肉盛溶接補修の施工の準備

a) 溶接補修要領書等の作成

肉盛溶接補修に当たっては、WES 7700-1（圧力設備の溶接補修 一般）を参考に、溶接補修要領書を作成する。要領書は、JIS Z 3410（溶接管理—任務及び責任）に基づく溶接管理を行う能力を有する、溶接について十分な知識・技術を有する者が作成する。当該者として、例えば、一般社団法人日本溶接協会のWES 8103（溶接管理技術者認証基準）1級又は同等以上の能力を有する技術者がある。参考として、溶接補修要領書の内容の例を参考1に示す。

肉盛溶接補修は、あらかじめ溶接施工法確認試験（WPQT）を行い確認されたWPSに従って実施する。設備保有者又は溶接補修実施者が溶接補修対象に該当する溶接施工法確認試験記録（PQR）を保有している場合には、溶接施工法確認試験を省略できる。参考として、肉盛溶接補修の施工要領書（WPS）例を参考1に示す。

b) 溶接補修の施工管理

溶接補修は溶接補修要領書に従って行い、その施工管理は、溶接について十分な知識・技術を有する者が行う。当該者として一般社団法人日本溶接協会 WES 8103（溶接管理技術者認証基準）2級又は同等以上の能力を有する技術者がある。

c) 溶接士の資格と技量

溶接士は適用法規に適した溶接資格を保有し、かつ十分な技量と豊富な経験を有する者とする。

5 きず除去施工

きず（腐食減肉、表面きず、割れ等をいう。以下同じ。）除去は、WES 7700-2（きず除去と肉盛溶接補修）を参考に行う。以下にその要領を示す。

a) 前処理及びきず寸法の特定

きず周辺の塗料、内部流体、腐食生成物などの不純物を完全除去して十分に清掃後、外観検査（VT）、浸透探傷試験（PT）、磁気探傷試験（MT）、放射線透過試験（RT）、超音波探傷試験（UT）などの適切な方法によって、きず範囲、分布、深さなどを確認する。非破壊試験方法については溶接補修要領書による。

b) きず除去

供用中に検出されたきずは除去する。ただし、必要最小厚さを満足する浅いきずは、次回検査までの将来腐れ代を予測して、除去する必要があることが確認できればそのまま使用することができる。

なお、進展のおそれのある割れ等のきずは除去することが基本である。

c) きず除去方法

きずの種類、位置及び母材の種類、溶接材料の種類によって、機械的方法（グラインダ、ロータリヤスリ、機械切削、研磨盤、砥石など）又は熱的方法（ガウジング）から適切な方法を選択する。

1) 機械的方法

機械的方法によるきずの除去は、グラインダ、ロータリヤスリ、機械加工などの方法で行い、変色するような強加工は表面に変質層及び高い引張残留応力を生成するので、仕上げ加工段階での強加工は避ける。

グラインダ研削では、ホイールは母材に適したものを使用する。グラインダ研削の目に沿った方向に引張残留応力が発生するので、研削方向に留意する。アミン、苛性塩などによる応力腐食割れをグラインダで除去する場合には、過度の熱で割れが拡大しないように、切削量を管理する。肉盛溶接せずに継続使用する場合には、さらに細粒のロータリヤスリで研磨仕上げる。

ロータリヤスリ研磨では、狭い範囲の研削又はグラインダ研削後の仕上げ加工などに使用する。ロータリヤスリには形状、サイズ、目種類、粗さが異なる多くの種類があるため、きず除去形状を考慮して、適切なヤスリを選定する。

2) 熱的方法

エアーク又はプラズマークによるガウジングできずを除去した場合には、表面スケールをグラインダで除去し、滑らかに仕上げる。

d) きず除去の施工手順

きずの除去及び除去部の仕上げは、次の手順で行う。

- 1) きずの除去方法及び形状は、きず範囲、分布、深さを考慮して決定する。
- 2) 近接するきずの除去を行う場合、50 mm 未満の短ビードによる過剰な硬化及び溶接残留応力を避けるため、きずはまとめて除去する。溝の深さ、幅は極力浅く、狭幅となるように配慮し、かつ、溶接に適した形状とする。
- 3) 疲労亀裂及び母材がぜい化した状態の割れを除去するときには、きず除去作業で割れが進展しないように、必要に応じて割れ先端部をドリルなどで丸みを与えた後に除去作業を行う。
なお、疲労亀裂等は、補修後も再発するおそれが高いため、十分な再発防止対策を検討・実施する必要がある。
- 4) 低合金鋼で著しい経年劣化が予測される場合には、必要に応じてきず除去前に脱ぜい化熱処理を行う。
- 5) 熱的な方法できずを除去する場合、溶接予熱温度に準じて予熱を行う。
- 6) 熱的方法で除去した場合、熱影響による変質層及び硬化層については機械的方法によって、1 mm 以上除去する。ただし、熱的方法での除去後に肉盛溶接を行う場合には、表面のスケール、浸炭層などを除去し、溝の始端、終端及び両側面は図 4 に示す形状を確保する。きず除去深さ及び形状確認には、専用のゲージを利用する。
- 7) きずが完全に除去されたことを、VT に加えて MT 又は PT で確認する。

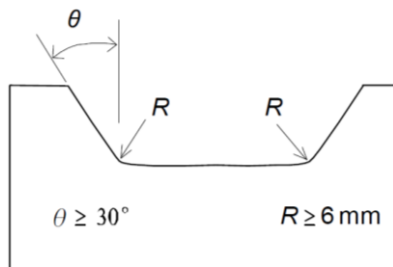


図 4 きず除去部の仕上げ形状⁵⁾

6 肉盛溶接補修の実施

溶接補修要領書に従って次の通り行う。

a) 準備

- 1) 溶接機、溶接材料、予熱・直後熱装置及びジグ、検査機器などについて、問題なく使用できるように点検を行う。
- 2) 溶接補修作業場所周辺について毒性流体の漏えい・拡散などの災害防止の観点から安全状況を確認する。
- 3) 屋外作業については、雨天、強風対策を行う。

b) 溶接材料の選定

溶接材料は、溶接補修要領書又は WPS で定めたものとする。原則として、製作時に使用された材料又は同等材料を選定する。ただし、劣化・損傷防止及び溶接性を十分に考慮して溶接材料を選定する。

なお、同等材料の取扱いは関係者間の合意による。

c) 溶接材料の管理

- 1) 溶接材料は、規格、等級、銘柄、寸法別に分類し、汚れ、さびの発生、吸湿のないように保護設備に保管する。
- 2) 被覆アーク溶接棒は、被覆剤の剥がれ、割れ、汚れ及び変質などの有害な欠陥がないことを確認する。
- 3) 被覆アーク溶接棒は、被覆剤を十分乾燥して使用する。被覆剤の乾燥温度及び乾燥時間は、溶接材料供給者の指定する推奨条件による。
- 4) 被覆アーク溶接棒が乾燥後、許容経過時間内に使用されなかったときは、再乾燥を行って使用する。再乾燥に

については、溶接材料供給者が規定する回数を限度とする。

5) 現場での被覆アーク溶接棒の保管には携帯ドライヤを使用する。

d) 予熱

炭素鋼、低合金鋼については、溶接部の硬化及び低温割れ防止のため予熱を行う。参考として、母材の区分による予熱温度を表3（JIS B 8266:2003 附属書 18⁶⁾）に示す。

予熱はWPSに指定された温度以上で実施する。

表3 予熱温度（JIS B 8266:2003 附属書 18⁶⁾）

P 番号	材料の種類	予熱条件	予熱温度
1	炭素鋼	材料の規格炭素量の最大値が0.30%を超え、かつ、継手の厚さが25mmを超えるもの ⁽¹⁾	80℃
		上記以外の材料すべて	10℃
3	0.5Mo鋼	材料の規格最小引張強さが480 N/mm ² を超えるか、又は継手の厚さが16mmを超えるもの	80℃
		上記以外の材料すべて	10℃
4	Cr-Mo鋼 (1Cr-0.5Mo, 1.25Cr-1Mo など)	材料の規格最小引張強さが410 N/mm ² を超えるか、又は継手の厚さが13mmを超えるもの	120℃
		上記以外の材料すべて	10℃
5	Cr-Mo鋼 (2.25Cr-1Mo)	材料の規格最小引張強さが410 N/mm ² を超えるか、又は継手の厚さが13mmを超えるもの	150℃

注(1) これは断熱材用のクリップ、容器内の部品、取付物及びその他内圧による荷重を伝えない部品の取付けに用いる13mm以下のすみ肉溶接には適用しない。

e) 溶接の実施

1) 溶接順序

- 1.1) 溶接順序は、変形及び溶接割れが生じ難い方法を選定する。
- 1.2) 溶接の始点又は終点は、前層の始点及び終点と重ならないようにする。
- 1.3) 溶接変形を最小限とするように適切な溶接手順及びひずみ防止ジグなどの適用について検討する。

2) 溶接積層法

溶接補修では、溶接補修部の硬化を軽減するため、必要に応じて、図5に示すハーフラップ法及び多層溶接（2層以上）を適用する。

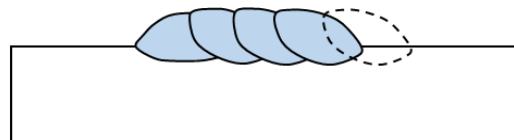


図5 ハーフラップ法の積層例

f) 直後熱

- 1) 厚肉の炭素鋼及び低合金鋼などで低温割れが懸念される場合には、直後熱（250～350℃）を行う。
- 2) 直後熱温度は、表面温度計などによって測定し管理を行う。

g) 溶接部の仕上げ

溶接部は、溶込みが十分で、かつ、割れ又はアンダカット、オーバラップ、クレータ、スラグの巻込み、プロ

一ホールなどで有害なものがあるとはならない。溶接ビード形状が極端に凸状の場合は溶接ビードをグラインダ研削により滑らかに仕上げる。

h) 留意点

- 1) 溶接補修を行う場合には、溶接部周辺について油脂、塗料、不純物、水分などを十分に除去する。
- 2) フェライト系材料については、急熱急冷による硬化及び低温割れ防止の観点から、短ビードを避ける。
- 3) スパッタ及びアークストライクが生じた場合には、これらをグラインダで除去する。
- 4) 溶接補修部は、非破壊試験が可能な状態に表面を仕上げる。

7 PWHT

肉盛溶接補修部の PWHT は、原則として、対象圧力容器の製造時の PWHT 有無に従う。

PWHT の保持時間及び均熱幅の決定に用いる厚さは、JIS Z 3700（溶接後熱処理方法）に従い肉盛溶接補修の深さをを用いる。応力腐食割れなどの損傷部位の肉盛溶接補修において、PWHT が再発防止策として有効な場合は、設備の製造時に PWHT が行われていなくても PWHT を実施できる。

PWHT については、以下に留意する。

- 1) 溶接補修部は、残留応力緩和、機械的特性、使用環境条件及び溶接補修深さを総合的に考慮して PWHT の可否を決定する。
- 2) PWHT 要領は、JIS Z 3700 に従う。
- 3) 炭素鋼及び低合金鋼については、PWHT による強度への影響について事前検討を行い、問題がないことを確認する。
- 4) 局部加熱により PWHT を行う場合には、熱応力に起因する変形及び残留応力を軽減するため、できるだけ緩やかな温度勾配になるように加熱する。必要に応じて変形防止ジグを使用する。原則として、円筒胴の局部加熱は、全周均一加熱を行う。

8 試験・検査

a) 非破壊試験・検査

- 1) 溶接補修部及びその周辺については、溶接補修要領書に従って溶接前後に試験・検査を行い、健全性を確認する。
- 2) 溶接補修部及びその周辺について表面仕上げを行う。
- 3) PT, MT, UT, RT などの非破壊試験は、溶接補修要領書に従い有資格者が実施し、要求基準を満足することを確認する。
- 4) PWHT を行った場合には、PWHT 後に VT 及び MT 又は PT を、溶接補修部だけでなくその周辺についても実施する。必要に応じて溶接補修部周辺の既存の溶接部についても健全性を確認する。
- 5) 溶接補修要領書で規定されている場合には、溶接部の硬さ試験及び寸法検査を行い、要求値を満足することを確認する。

b) 耐圧試験

溶接補修要領書に従って、耐圧試験を行う。詳細は、関連法規・規格又は JIS B 8265 の 8.5（耐圧試験）による。

該当する圧力設備全体の耐圧試験が困難な場合、関係者間の合意により、溶接補修範囲について部分耐圧試験又は適切な非破壊試験等を行うことにより代替できる。

9 溶接補修の記録

溶接補修を実施した場合には、次の内容を含む記録を作成し、保管する。

1) 補修実施日

- 2) 補修装置・機器名
- 3) 劣化・損傷検査記録
- 4) 損傷原因調査記録
- 5) 溶接補修要否・可否検討結果
- 6) 溶接補修要領書
- 7) 溶接補修記録
- 8) PWHT 記録
- 9) 試験・検査記録
- 10) 耐圧試験記録

10 供用開始後の試験・検査

肉盛溶接補修を実施した設備について、3.2.1 項で述べた損傷原因と再発防止策を考慮して供用開始後の検査計画を立案する。

具体的には、肉盛溶接補修と併せて運転条件の変更や防食措置を実施した場合は、運転条件や防食措置のモニタリングを行い、損傷が再発生していないことを確認する。

設備の内面の腐食減肉に対して肉盛溶接補修を実施した場合、肉盛溶接補修箇所の余寿命評価を行う。肉盛溶接補修後は厚さが補修厚さまで回復するため、肉盛溶接補修前の腐食速度を適用し、次式で算出する。

$$L_R = \frac{t - t_a}{C_R}$$

ここに、 L_R ：肉盛溶接補修後の余寿命（year）

t ：肉盛溶接補修後の厚さ（mm）

t_a ：適用法規の最小厚さ又は材料の許容応力から算出した必要最小厚さ（mm）

C_R ：腐食速度（mm/year）

肉盛溶接補修後の余寿命評価によって十分な余寿命を有すると判断された場合においても、次回開放時に肉盛溶接補修部について外観目視検査（VT）や厚さ検査などを実施し、異常な腐食や割れがないことや、損傷が再発生していないことを確認する。

一方、設備の外面对して肉盛溶接補修を実施した場合、日常検査にて肉盛溶接補修部の異常の有無を確認する。保温下の外面腐食に対して肉盛溶接補修を実施した場合には、被覆材（保温、保冷など）の損傷や、繋ぎ部から雨水の浸入がないことを確認する。被覆材の損傷や繋ぎ部から雨水の浸入がある場合には、保温材上から非破壊検査（RT やパルス渦流探傷検査）し、又は必要に応じて保温材を取り外して VT を計画する。

参考

1 標準的な肉盛溶接補修の溶接補修要領書の内容及び WPS の例

炭素鋼（SB410）及び低合金鋼（SCMV4）製の圧力容器における腐食減肉部についての標準的な肉盛溶接補修の溶接補修要領書の内容例を表 4 及び表 5 に、WPS の例を表 6 及び表 7 に示す。

表4 炭素鋼の標準的な肉盛溶接補修要領の例

No.	項目	方法・使用器具	詳細
1	腐食減肉の範囲	超音波肉厚測定器 デプスゲージ	腐食減肉の範囲，分布，深さを確認する。
2	腐食部の除去	グラインダ	腐食減肉部とその周辺の腐食部をグラインダ研削にて除去する。
3	仕上がり形状	グラインダ，MT/PT デプスゲージ	溶接作業性を考慮して，腐食減肉部の仕上がり形状を整える。 底部の曲率半径6mm以上，端部の仕上げ角度30度以上とする。 被溶接部とその周辺に表面欠陥がないことを確認する。 被溶接部の範囲，分布，深さを確認する。
4	肉盛溶接補修	準備	被溶接部の周辺に可燃物などがないことを確認する。 降雨や風の対策を行う。
		予熱及びパス間温度	予熱及びパス間温度を10℃から350℃とする。
		被覆アーク溶接棒の乾燥	使用前に300℃～350℃で30分～60分の乾燥を行う。 現場では被覆アーク溶接棒を携帯ドライヤで保管する。
		被覆アーク溶接（SMAW）	溶接電流及びアーク電圧の範囲を記録する。 被溶接部の深さが浅い部分であっても2層以上の溶接を行う。 溶接の始点と終点が前層のそれらと重ならないようにする。 パス毎にスラグを確実に除去する。 溶接士の溶接範囲を記録する。
5	溶接部の仕上げ	グラインダ，VT	アンダカット，オーバラップなどの欠陥がないことを確認する。 最終層の形状が非破壊検査の妨げになる場合，グラインダ研削により滑らかに仕上げる。
6	検査	MT，UT	有害なきず等がないことを確認する。
7	耐圧試験	水圧試験	異状がないことを確認する。

表5 低合金鋼の標準的な肉盛溶接補修要領の例

No.	項目	方法・使用器具	詳細
1	腐食減肉の範囲	超音波肉厚測定器 デプスゲージ	腐食減肉の範囲，分布，深さを確認する。
2	腐食部の除去	グラインダ	腐食減肉部とその周辺の腐食部をグラインダ研削にて除去する。
3	仕上がり形状	グラインダ，MT/PT デプスゲージ	溶接作業性を考慮して，腐食減肉部の仕上がり形状を整える。 底部の曲率半径6mm以上，端部の仕上げ角度30度以上とする。 被溶接部とその周辺に表面欠陥がないことを確認する。 被溶接部の範囲，分布，深さを確認する。
4	肉盛溶接補修	準備	被溶接部の周辺に可燃物などがないことを確認する。 降雨や風の対策を行う。
		予熱及びパス間温度	予熱及びパス間温度を150℃から300℃とする。
		ティグ溶接（GTAW）	溶接電流及びアーク電圧の範囲を記録する。 被溶接部の深さが浅い部分であっても2層以上の溶接を行う。 溶接の始点と終点が前層のそれらと重ならないようにする。 溶接士の溶接範囲を記録する。
		直後熱	温度範囲を250℃から350℃とする。
5	溶接部の仕上げ	グラインダ，VT	アンダカット，オーバラップなどの欠陥がないことを確認する。 最終層の形状が非破壊検査の妨げになる場合，グラインダ研削により滑らかに仕上げる。
6	PWHT	熱電対，温度チャート計 硬さ試験	保持温度を690℃，保持時間を1時間とする。 PWHT前後で溶接金属と溶接熱影響部の硬さ試験を行う．PWHT後の硬さが300HV以下であることを確認する。
7	検査	MT，UT	有害なきず等がないことを確認する。
8	耐圧試験	水圧試験	異状がないことを確認する。

表6 炭素鋼のWPSの例

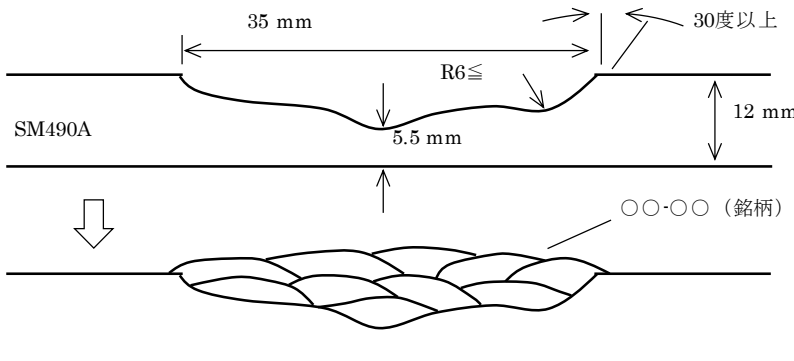
溶 接 施 工 要 領 書				
作成 ○○年○月○日				
工事名称	○○○○の外面減肉部の肉盛溶接補修工事			
適用法規	労働安全衛生法 第一種圧力容器構造規格			
装置名称	○○装置	機器名称	○○槽 (○-○○○)	
材質	JIS G 3106 SM490A	板厚	12 mm	
設計圧力	○○ MPa	設計温度	○○ °C	
内部流体	○○○○	使用期間	○○ 年	
溶 接 条 件				
WPS No.	○○-○○○	PQR No.	○○-○-○○○	
溶接方法	被覆アーク溶接	電源特性	交流	
溶接材料	○○-○○ (銘柄)	棒径	φ3.2 mm, 4.0 mm	
溶接電流	90 A~180 A	アーク電圧	14 V~ 26 V	
トーチシールド	-	バックシールド	-	
裏当て	-	裏はつり	-	
予熱	10 °C以上	パス間温度	350 °C以下	
PWHT	-			
溶接士の資格	普通ボイラー溶接士, JIS Z 3801 N-2P			
技術者の資格	溶接補修要領書の作成: WES 8103 1級以上, 施工管理: WES 8103 2級以上			
補 修 要 領				
				
No.	項目	詳細	記録	立会
1	損傷部の確認	損傷部の位置, 範囲と深さを記録する。	○	
2	仕上がり形状	底部の曲率半径6 mm以上, 端部の仕上げ角度30度以上。		
3	MT, 残存肉厚	欠陥がないことを確認し, 残存肉厚を記録する。	○	○
4	肉盛溶接	溶接材料, 溶接電流, アーク電圧, 溶接士の資格を記録する。	○	
5	溶接部の整形	余盛が凸状の場合は滑らかに仕上げる。		
6	溶接部のMT	欠陥がないことを確認する。	○	○
7	水圧試験	試験圧力○○MPa, 試験時間○○時間, 異常がないこと。	○	○
注意事項 ・溶接材料は使用前に300 °C~350 °Cで30分~60分の乾燥を行う。 ・肉盛溶接時はパス毎にスラグを確実に除去する。				

表7 低合金鋼のWPSの例

溶 接 施 工 要 領 書				
				作成 ○○年○月○日
工事名称	○○○の外面減肉部の肉盛溶接補修工事			
適用法規	労働安全衛生法 第一種圧力容器構造規格			
装置名称	○○装置	機器名称	○○槽 (○-○○)	
材質	JIS G 4109 SCMV4	板厚	12 mm	
設計圧力	○○ MPa	設計温度	○○ °C	
内部流体	○○○○	使用期間	○○ 年	
溶 接 条 件				
WPS No.	○○-○○○	PQR No.	○○-○-○○○	
溶接方法	ティグ溶接	電源特性	直流棒マイナス	
溶接材料	○○-○○ (銘柄)	棒径	φ2.0 mm, 2.4 mm	
溶接電流	90 A~220 A	アーク電圧	8 V~ 16 V	
トーチシールド	アルゴン	バックシールド	-	
裏当て	-	裏はつり	-	
予熱	150 °C以上	パス間温度	300 °C以下	
PWHT	保持温度：690 °C，保持時間：1時間			
溶接士の資格	普通ボイラー溶接士，JPI-7S-31 F種1級又はJIS Z 3801 T-1P			
技術者の資格	溶接補修要領書の作成：WES 8103 1級以上，施工管理：WES 8103 2級以上			
補 修 要 領				
No.	項目	詳細	記録	立会
1	損傷部の確認	損傷部の位置，範囲と深さを記録する。	○	
2	仕上がり形状	底部の曲率半径6mm以上，端部の仕上げ角度30度以上。		
3	MT，残存肉厚	欠陥がないことを確認し，残存肉厚を記録する。	○	○
4	予熱・パス間温度	予熱温度，パス間温度を記録する。	○	
5	肉盛溶接	溶接材料，溶接電流，アーク電圧，溶接士の資格を記録する。	○	
6	溶接部の整形	余盛が凸状の場合は滑らかに仕上げる。		
7	溶接部のMT	欠陥がないことを確認する。	○	
8	PWHT	PWHT後に硬さ試験が○○HV以下であることを確認する。	○	○
9	溶接部のPT	有害な欠陥がないことを確認する。		
10	水圧試験	試験圧力○○MPa，試験時間○○時間，異状がないこと。	○	○
注意事項				
・ PWHT後の硬さ試験は溶接金属と溶接熱影響部で行う。				

2 肉盛溶接補修部の健全性に関する考察

肉盛溶接補修部は、減肉して残存した母材部とその上に肉盛溶接された溶接金属部から構成される。残存した母材部は経年使用されており、肉盛溶接の際にはそこに熱影響が加わることから、一般的には溶接部の健全性について考察しておく必要がある。

この報告書が適用する材料の運転温度範囲では、残存した母材部には材質変化が生じないため、次の b) の考察により熱影響部の健全性に問題はないと判断される。また、溶接金属部は肉盛溶接で新規に形成される部分であるため、強度的に問題はない。

a) 溶接金属部の強度

肉盛溶接補修には、設備製作時に使用された溶接材料と同等のものを使用することが望ましい。同等の溶接材料を使用できない場合は、母材と同等以上の強度をもつ溶接材料を選定する。

b) 溶接熱影響部の健全性（炭素鋼・低合金鋼）

肉盛溶接補修にともなう溶接熱サイクルが母材の残存部に加わった際の材質変化について考察する。

炭素鋼は溶接熱影響部では急冷されるため母材とは異なる焼入れ組織（ベイナイト及びマルテンサイト）となることが多い。

高温ではCは鋼中にすべて溶解するが、室温ではCが溶解できずに排出された状態が最も安定となる。しかし急冷されると高温で鋼中に溶解していたCを十分に排出することができず、Cを過飽和に溶解した焼入れ組織となって硬化する。

硬さは、図6に示すように炭素当量に依存し、炭素当量CE（WES）の値が大きいほど硬くなる。炭素当量CE（WES）の値はC量が高いほど、又Cr-Mo鋼のようにCr、Mo量の多いほど大きくなり、溶接熱影響部の最高硬さは高くなる。炭素鋼（炭素当量は0.38%以下）では熱影響部の硬さはHV300以下であることから十分な強度及び延性を有する健全な組織が得られる。

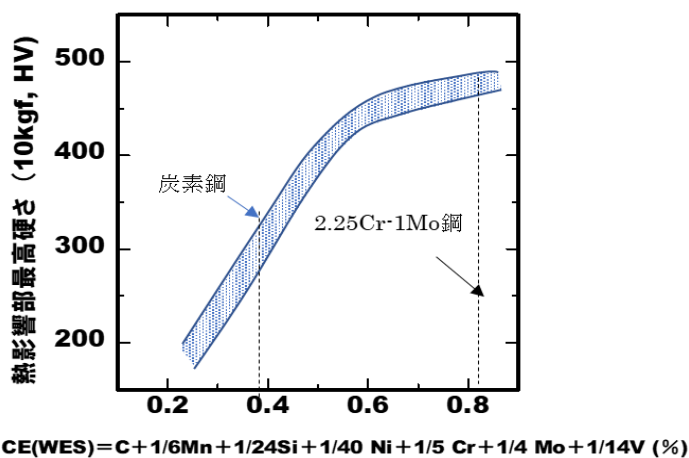


図6 炭素当量、CE（WES）と熱影響部の最高硬さとの関係⁷⁾

この硬化現象は可逆的であり、炭素当量が高くなるCr-Mo鋼において熱影響組織がたとえ硬化した場合でも通常実施されるPWHT（550℃～700℃）によって焼戻され、硬さはHV300以下に緩和されてじん性も回復して母材に比べて遜色のない健全な組織が得られる。

肉盛溶接補修は通常は多層溶接となり、その際の次層溶接時の熱サイクルによって熱影響部は焼戻され、PWHTをしない場合でも硬さはHV300以下となり熱影響部は十分な強度延性を有する（図7）。

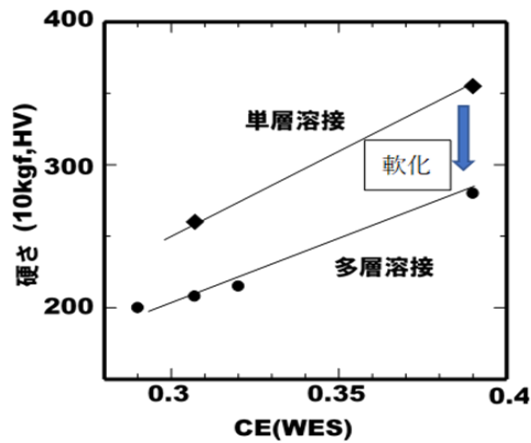


図7 多層溶接による溶接部の硬さの低減⁸⁾ [1]

[1] JPI-8R-16-2020 溶接補修 (2020, 公益社団法人 石油学会) の本文の P. 20 の「図9 多層溶接による溶接部の硬さの低減」の図を基に、日本溶接協会が作成

参考文献

- 1) JIS B 8265:2017, 圧力容器の構造—一般事項
- 2) WES 7700-1:2019, 圧力設備の溶接補修 第1部:一般, (一社)日本溶接協会
- 3) JIS Z 3700:2022, 溶接後熱処理方法
- 4) 接合・溶接技術 Q&A 002-01-01 「高張力鋼の構造物を組み立てる際のタック溶接のビード長さ」, 溶接情報センター, (一社)日本溶接協会
- 5) WES 7700-2:2019, 圧力設備の溶接補修 第2部:きず除去と肉盛溶接補修, (一社)日本溶接協会
- 6) JIS B 8266:2003, 圧力容器の構造—特定規格
- 7) 溶接・接合技術総論, 溶接学会・溶接協会編, 産報出版
- 8) JPI-8R-16-2020 溶接補修, (公社)石油学会