

## 附属書 14 補修溶接施工要領書の内容例（参考）

### 序文

この附属書は、補修溶接施工要領書の内容例について参考のために記載するものであって、規定の一部ではない。

### 1. 目的

この附属書は、設備及び配管系の検査結果に基づき実施する標準的な溶接補修要領及び溶接補修時の留意点を定める。ただし、法規により施工要領が定められている場合は、それに従う。

### 2. 適用範囲

この附属書は、溶接により製作された設備及び配管系の溶接補修について適用する。

### 3. 一般事項

#### 3.1 一般事項

- a) “補修”とは、建築物、工作物、設備など（以下、“設備など”という。）の配置又は主要部を変更することなく、損傷箇所などを修復することをいう。
- b) 溶接法の種類として、この附属書では主として被覆アーク溶接及びTIG溶接を取扱う。
- c) この附属書では、溶接補修要領及び補修を実施する際の留意点を定める。

#### 3.2 用語の定義

この附属書で使用する溶接用語は、**JIS Z3001**（溶接用語）によるほか、次による。

##### a) 溶接施工法確認試験

溶接施工法確認試験は、溶接構造物の溶接において予めその施工方法の適否を確認するための試験方法で、適用される溶接方法について規定する区分ごとに行う（5. 参照）。

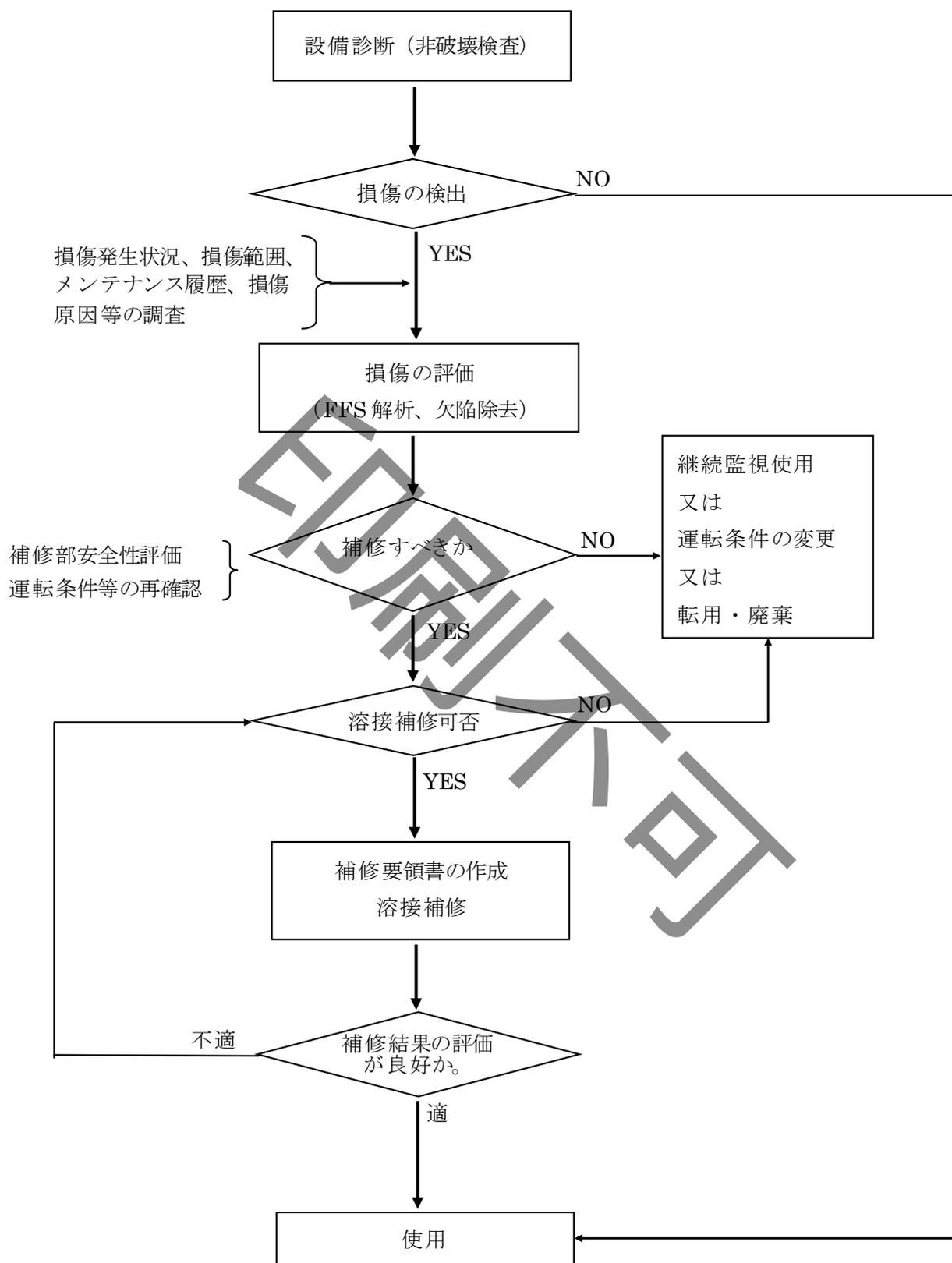
##### b) 溶接施工要領書

溶接施工要領書は、溶接の施工要領を定めたもので、溶接施工法確認試験で確認されたものをいう。

#### 3.3 溶接補修の標準的手順

溶接補修を計画するに当たっては、以下に示す損傷原因調査、溶接の可否判断などが必要になるため、設備の保全、溶接補修の経験及び能力を有する者が担当しなければならない。

欠陥検出から溶接補修までの標準的手順を、**附属書 14 図 1**に示す。



附属書 14 図 1 溶接補修の標準的手順 [1]

### 3.4 溶接士の資格

- a) 溶接作業に従事する溶接士は、JIS規格に基づく資格を有する溶接士、又は電気事業法、ガス事業法もしくは労働安全衛生法の規定に基づく溶接士であること。
- b) 半自動溶接を行う者は、**JIS Z 3841**（半自動溶接技術検定における試験方法及び判定基準）又はこれと同等以上の基準によって認定された資格者で、被溶接部の溶接作業に適合した資格を持つ溶接士であること。

### 4. 溶接施工管理者の選任

- a) 溶接着手前に溶接施工管理者を選任する。
- b) 溶接施工管理者は、溶接に関する十分な知識と経験を有し、この附属書及び関連書類の内容を十分に理解できる者であること。**JIS Z 3410 (ISO14731)** / **WES 8103**（溶接管理技術者認証基準）に基づく溶接技術者の資格を有することが望ましい。

### 5. 溶接施工法確認試験

計画された溶接施工法は、法規に定める“溶接施工方法の確認試験方法”に従って、事前にその妥当性を確認しなければならない。溶接施工法確認試験を実施した場合は、**附属書 14 付表 1**の例示を参考に記録書を作成する。

### 6. 溶接施工要領書

溶接施工法確認試験記録に基づき、溶接する材料の組み合わせと適用厚さに応じてそれぞれの項目を定め、**附属書 14 付表 2**の例示を参考に溶接施工要領書を作成する。

### 7. 溶接材料

溶接材料は、原則として製作時に使用したのと同じ仕様とする。ただし、使用環境における劣化損傷防止又は焼鈍を避ける目的で溶接棒を選定する必要がある場合は、この限りでない。

### 8. 溶接施工

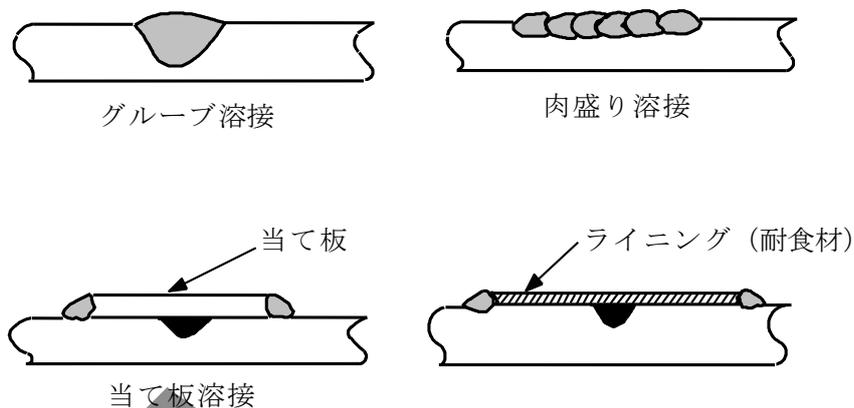
#### 8.1 気象条件

次のいずれかの気象条件の場合には、溶接を行ってはならない。ただし、適切な防護措置（風雨対策、予熱など）を施す場合は、この限りではない。

- a) 雨天 小雨以上のとき（降雪時を含む。）
- b) 強風 風速 7m/s 以上のとき（TIG 溶接では 2m/s 以上のとき）
- c) 低気温 気温 + 5°C 以下のとき
- d) 高湿度 相対湿度 90% 以上のとき

## 8.2 溶接補修の代表的な方法

発生した劣化損傷に応じて、**附属書 14 図 2** のような補修溶接が計画される。



**附属書 14 図 2** 溶接補修の代表的な方法 <sup>[1]</sup>

## 8.3 劣化損傷と溶接補修方法

劣化損傷は、使用環境における材料の劣化損傷、機械的損傷及び製作時の欠陥に大別できる。また、損傷の発生時期としては材料製造時、機器の製作時、定常運転時、非定常運転時、運転停止時などがある。

欠陥検出技術の進歩や溶接品質基準の変更に伴い、古い機器においては現在の標準的な品質基準を満足できない溶接欠陥が検出され、対応が必要になることもある。

代表的損傷例とその溶接補修方法を、**附属書 14 表 1** に示す。

附属書 14 表 1 主な損傷形態と溶接補修方法<sup>[1]</sup>

材料区分	損傷の種類	原因	補修のタイプ (1)				問題点	注意事項
			グルーブ溶接	肉盛り溶接	当て板溶接	部分更新		
炭素鋼 (低合金鋼)	全面減肉	腐食		○	○	○	溶接による変形	予熱、PWHT
	局部減肉	外面腐食など	△	○	○	△	硬化、遅れ割れ	ショートビードを避ける。 予熱、テンパービード、 PWHT
	水素侵食	高温高圧水素、 硬化組織	△			○	部位・分布	応急策として溶接補修＋ PWHT。恒久策として、耐 水素侵食性材による部分・ 全体更新。
ステンレス鋼	孔食	塩化物	○	△	△	△	孔食分布、補修溶接時 の高温割れ(ショート ビード)	フェライト管理、クレータ 処理。耐孔食性溶接材の採 用。
共通	割れ	繰返し応力、 応力集中	○			△	部位・分布、割れ再発	応力集中軽減 (スムーズ仕 上げ)。 振動軽減 (サポートなど)

注 (1) ○：適する、△：状況により採用

備考 低合金鋼の溶接補修においては、12.2 を参照。

## 8.4 溶接補修前処理 (準備)

### 8.4.1 欠陥の除去

- a) 溶接補修に有害となる欠陥 (割れなど) は、アークエアガウジング、グラインダーなどで完全に除去しなければならない。
- b) 除去後は、磁粉探傷試験(MT) 又は 浸透探傷試験(PT) を行い、欠陥が除去されたことを確認する。
- c) 開先面及び開先部付近は、溶接に先立ち、油脂、ペイント、不純物、水分などを完全に除去する。既設との取合部は、既設部に付着している不純物を広範囲 (できれば溶接部から 10mm の範囲以上) に取り除き、溶接に悪影響を及ぼさないようにする。

### 8.4.2 溶接性に悪影響を及ぼす材料劣化などの改善

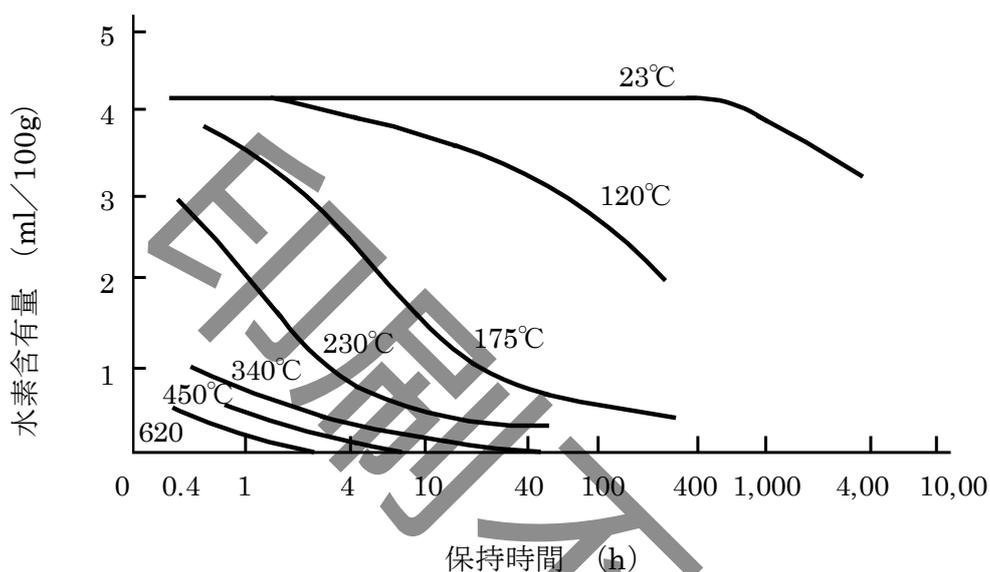
#### a) 脱水素処理の検討

対象物の使用条件における環境条件から水素吸蔵の可能性について検討し、水素吸蔵の可能

性がある場合、脱水素処理による溶接性改善又は試験溶接による確認を実施する。水素吸蔵は、水素環境（高温  $H_2$ 、 $H_2S$  雰囲気など）で使用された炭素鋼や低合金鋼の設備及び配管系で生じやすく、このような環境で使用された設備の補修に当たっては、事前の検討が重要である。

脱水素処理は、使用された環境の厳しさにもよるが、ヒータコイル、ヒータパネル、予熱バーナーなどによる方法が推奨される。

長時間使用され拡散性水素を吸蔵した材料の、加熱温度、加熱時間、拡散性水素含有量の関係を**附属書 14 図 3**に示す。



**附属書 14 図 3** 加熱による溶接金属中の拡散性水素量の減少例<sup>[1]</sup>

#### b) 脱脆化処理の検討

長期間使用で脆化した材料の溶接補修に際しては、溶接前に脱脆化を目的とした熱処理の実施が有効である。

- 1) 炭素鋼や Cr-Mo 鋼における水素侵食は非可逆的現象であり、熱処理により材質や溶接性の回復はできないため、注意が必要である。
- 2) SUS 347 は、微細炭化物の析出により再熱割れ性（SR 割れ性）が高くなる。この状態で溶接すると熱応力で割れを生じやすいが JIS 材料規格で定める固溶化熱処理を行った後、850～900℃で安定化熱処理を行うことで回復できる。
- 3) ニッケル基合金で高温長期間使用により炭化物や金属介在物が析出し溶接性を低下させているケースでも、析出温度以上での熱処理により溶接性の回復が可能である。

#### 8.4.3 開先加工及び開先合わせ

- a) 欠陥除去後、補修溶接用の開先に仕上げる。遅れ割れが懸念される材料についてはショートビードでの施工にならないように溶接長さが 50mm 以上になるように仕上げる。

- b) 溶接部位、溶接範囲の大小により、溶接後の変形や使用環境に対して悪影響を及ぼさないように検討を行う。
- c) 厚さ不貫通型欠陥の場合には、溶接欠陥防止のため開先底部を R 形状に仕上げることが望ましい。
- d) ステンレス鋼の場合、清浄作業に用いるワイヤーブラシは、ステンレス鋼製を使用する。
- e) 溶接補修において、仮止め溶接を行う場合は、基本的に本溶接と同様の管理を行う。

## 8.5 溶接機器

- a) アーク溶接機は、溶接方法に応じて選択し、使用される溶接棒に対して十分な電気容量を持ち適正な電流を供給できるものとする。
- b) 自動溶接及び半自動溶接の場合には、電源部分のほかワイヤ送給装置、溶接ヘッド又は溶接トーチ、シールドガス用の圧力調整器、制御装置などは実際の作業に適した性能を有するものとする。
- c) 溶接機が溶接現場と離れた場所に設置される場合には、溶接機の設置場所の環境やアースのセット位置の環境についても火気使用場所としての管理が必要である。

## 8.6 溶接棒管理

- a) 溶接棒は、規格、等級、銘柄、寸法別に分類し、汚染、発錆、吸湿しないように保護設備に保管する。
- b) 被覆アーク溶接棒は、被覆剤の剥がれ、割れ、汚れ、変質などの有害な欠陥のないものであることを確認する。
- c) 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、溶接棒製造業者の指定する推奨条件による。
- d) 被覆用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。再乾燥については管理状態によっても異なるが、溶接棒製造メーカーのリコメンドによる回数を限度とする。
- e) 現場での溶接棒の保管方法として、ハンドドライヤーを使用する。ただし、持ち込みができない場所では溶接棒を最小必要量のみの持ち込みとし、こまめに溶接棒の補充を行う。

## 8.7 溶接

### 8.7.1 本溶接

- a) 溶接は、溶接施工要領書に従って行う。
- b) 溶接施工管理は、**附属書 14 付表 3**を参考に溶接作業記録などを作成記録し管理する。
- c) 補修溶接法

補修溶接における代表的な積層法を以下に示す。

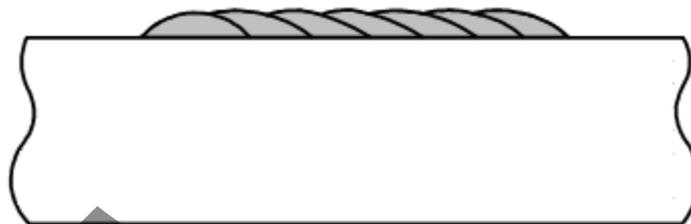
#### 1) バタリング法

溶接グループ、開先部などに順次肉盛り溶接を行う方法をいう。経年劣化により溶接性

が低下している場合又は溶接熱、溶接による応力で割れが発生しやすいケースで有効である。

2) ハーフラップ法

**附属書 14 図 4**に示すように前ビードに次のビードを重ねるように溶接する方法をいう。補修部へのアークを弱めにして、溶接棒又はフィラーメタルをできるだけ溶し込むことにより母材の希釈を軽減したビードを形成する。脆化による溶接性の低下で溶接熱、溶接による応力で割れやすい場合の補修溶接で有効な手法である。



**附属書 14 図 4** ハーフラップ法<sup>[1]</sup>

3) テンパービード法

炭素鋼、Cr-Mo 鋼、高張力鋼に対して溶接 HAZ 部や溶接金属部を溶接熱でテンパーすることにより硬さの低下や靱性の改善をねらった施工法である。

- d) 異材継手の溶接材料の選定は、原則としてオリジナルどおりとするが、溶接性や劣化損傷防止の観点から**附属書 14 表 2**を参考にして選定することができる。

附属書 14 表 2 異材継手溶接材料選定<sup>[1]</sup>

	炭素鋼	C-0.5Mo 鋼	1Cr-0.5 Mo 鋼	1.25Cr-0. 5Mo 鋼	2.25Cr-1 Mo 鋼	5Cr-0.5 Mo 鋼	9Cr-1Mo 鋼	オーステナ イト系ステ ンレス鋼
炭素鋼	—	A	A	A、B	B、C	C、D	C、D	G
C-0.5Mo 鋼	A	—	B	B	B、C	C、D	C、D	G
1Cr-0.5Mo 鋼	A	B	—	C	C	C、D	C、D	G
1.25Cr-0.5Mo 鋼	A、B	B	C	—	C	C、D	C、D	G
2.25Cr-1Mo 鋼	B、C	B、C	C	C	—	D	D	G
5Cr-0.5Mo 鋼	C、D	C、D	C、D	C、D	D	—	E	G
9Cr-1Mo 鋼	C、D	C、D	C、D	C、D	D	E	—	G
オーステナイト系 ステンレス鋼	G	G	G	G	G	G	G	—

備考 1. A : 炭素鋼 (JISD4316、D5016)

B : C-0.5Mo 鋼 (JISDT1216)

C : 1.25Cr-0.5Mo 鋼 (JISDT2313、2315、2316、DT2318)

D : 2.25Cr-1Mo 鋼 (JISDT2413、2415、2416、DT2418)

E : 5Cr-0.5Mo 鋼 (JISDT2516)

F : 9Cr-1Mo 鋼 (JISDT2616)

G : ① 熱サイクルをうけ、かつ、後熱する場合

・ 75Ni-16Cr-7Fe (インコネル系)

② 熱サイクルをうけないが 600°F (315°C) 以上で使用する場合

・ 75Ni-16Cr-7Fe (好ましい) (インコネル系)

・ 25Cr-12Ni (タイプ 309)

③ 熱サイクルをうけず 600°F (315°C) 以下で使用する場合

・ 25Cr-12Ni (タイプ 309)

・ 75Ni-16Cr-7Fe (インコネル系)

2. 異材継手の場合の溶接材料選定は、溶接金属の性能が、少なくとも一方の母材の性能を満足するようにすることが基本となる。

e) 溶接順序は、変形や溶接割れが生じないような最適な方法を選定する。

1) 組立が進行するにつれて溶接不能又は困難になる場所が生じないように注意する。

2) 収縮がなるべく自由に起るように中央から四周に及ぼし、かつ対称的に溶接を進める。

3) 各層又はパスを通じて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。

4) 溶接部の角変形を最小限とするよう歪防止用治具の取付け、適切な溶接手順の検討を行う必要がある。

5) 溶接入熱量の計算は、次式により行う。

$$\text{溶接入熱量 (Joule/cm)} = [60 \times \text{電流 (A)} \times \text{電圧 (V)}] / \text{速度 (cm/min)}$$

### 8.7.2 再溶接

- a) ブローホール、スラグ巻込み、割れなどで再溶接が必要となった場合には、再溶接を行う。
- b) 再溶接補修が必要となる場合には、その原因を究明し、必要により当初の溶接施工計画を見直した上で対応する必要がある。むやみに再溶接を繰り返してはならない。
- c) 同一箇所でも2回以上の補修が発生した場合には、原因を調査し材料劣化に起因した損傷でないことを確認してから溶接補修すること。

### 8.8 裏はつり

欠陥の補修で突合せ両側溶接を行う場合、一方からの溶接を行った後、反対側から裏はつりによって欠陥部を完全に除去してから溶接しなければならない。

裏はつりは、グラインダー切削、機械切削、タガネ切削、アークエアガウジングなどの方法で行う。

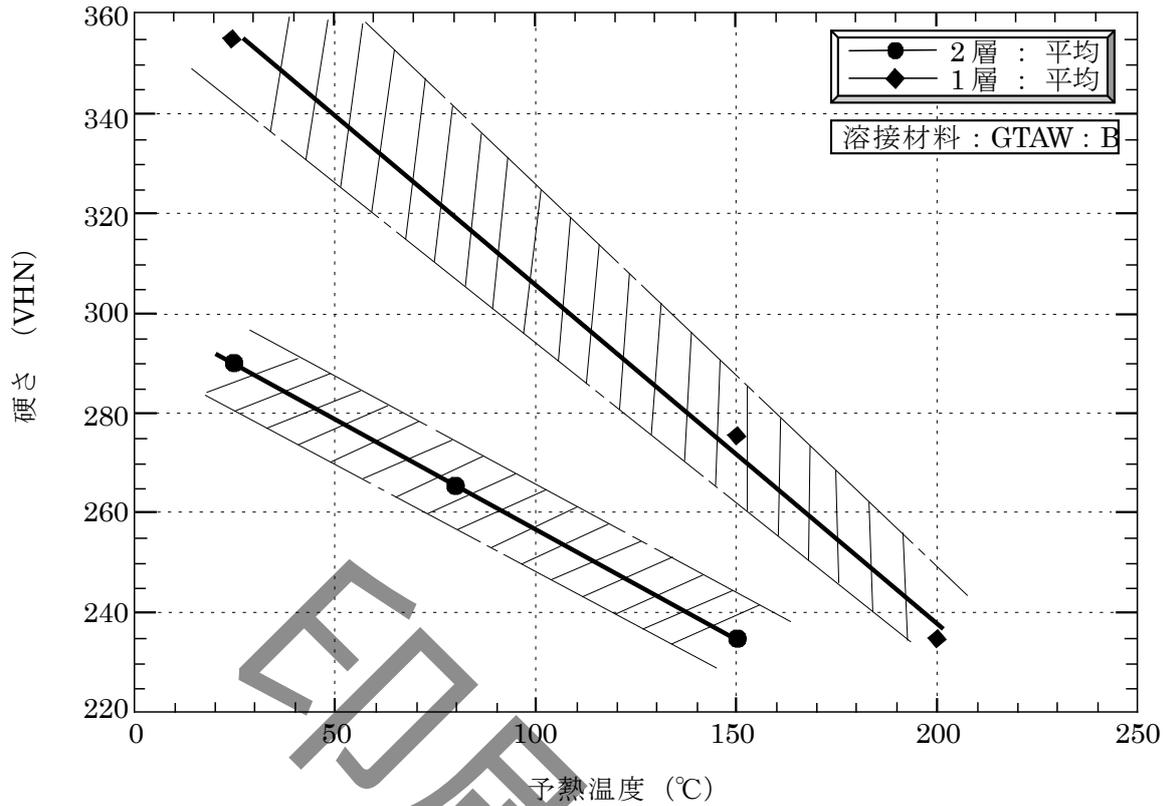
### 8.9 溶接仕上げ

- a) アークの始点及び終点は、ブローホール、割れなどの溶接欠陥が発生しやすく、注意が必要である。これらの欠陥の発生を避けるために、先端処理を行った溶接棒の使用、後退スタート法の採用、終点のクレーター処理などが実施されることがある。
- b) クリープ損傷、繰返し応力の発生する環境又は脆性破壊が懸念される環境で使用される場合においては、溶接ビードをグラインダーでスムーズに仕上げることにより応力の局部的集中を避ける。
- c) 溶接部及びその付近には割れ、アークストライクの跡、有害と認められるアンダーカット、オーバーラップ、ピット、治具跡などの欠陥がないこと。
- d) ビードの形状は、一様でスラグ、スパッターなどが付着していないこと。

## 9. 予熱及び直後熱

予熱の必要性、加熱方法、管理方法は、個別の“溶接施工要領書”で定めなければならない。

- a) 予熱は、主に溶接時の水素に起因する遅れ割れ防止や硬化軽減を目的に行う。**附属書 14 図 5**は、炭素鋼の現場 TIG 隅肉溶接（1層溶接、2層溶接）における改善例（予熱温度と溶接後の硬度の関係）を示す。
- b) 直後熱は、遅れ割れを発生しやすい材料において、脱水素を目的として実施する。



附属書 14 図 5 炭素鋼の溶接後の硬度に及ぼす予熱効果<sup>[1]</sup>

## 9.1 予熱

### 9.1.1 予熱及びパス間温度

- a) 母材の区分による一般的指針としての予熱温度を**附属書 14 表 3**に示す。

附属書 14 表 3 予熱温度 [1]

母材区分 (最小引張強さ)		予熱条件	予熱温度
P-1	1 グループ	炭素鋼 481MPa {49.0kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	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 25.4mm を超えるもの (1)
	2 グループ	炭素鋼 481MPa {49.0kgf/mm <sup>2</sup> } 以上 549MPa {56kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	
	3 グループ	炭素鋼 549MPa {56kgf/mm <sup>2</sup> } 以上 618MPa {63kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	上記以外の材料すべて
P-3 耐熱 低合 金鋼	1 グループ	Mo 鋼 (合金成分計 2.75%以下、Cr0.75%超え除く) 481MPa {49.0kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	材料の規格最小引張強さが 483MPa {49.2kgf/mm <sup>2</sup> } を超えるか、又は継 手の厚さが 16mm を超えるもの
	2 グループ	Mo 鋼 (合金成分計 2.75%以下、Cr0.75%超え除く) 481MPa {49.0kgf/mm <sup>2</sup> } 以上 549MPa {56kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	
	3 グループ	Mo 鋼 (合金成分計 2.75%以下、Cr0.75%超え除く) 549MPa {56kgf/mm <sup>2</sup> } 以上 618MPa {63kgf/mm <sup>2</sup> } 未満	上記以外の材料すべて
P-4 耐熱低合金鋼		Cr-Mo 鋼 (合金成分計 2.75%以下、Cr20%超え及び P-3 除く) 1Cr-0.5Mo、1.25Cr-1Mo など	材料の規格最小引張強さが 414MPa {42.2kgf/mm <sup>2</sup> } を超えるか、又は継 手の厚さが 12.7mm を超えるもの
			上記以外の材料すべて
P-5 耐熱低合金鋼		Cr-Mo 鋼 (合金成分計 12%以下、P-3 及び P-4 除く) 2.25Cr-1Mo、5Cr-0.5Mo、9Cr-1Mo など	材料の規格最小引張強さが 414MPa {42.2kgf/mm <sup>2</sup> } を超えるか、又は材 料の規格クロム量の最小値が 6.0%を 超え、かつ、継手の厚さが 12.7mm を 超えるもの
			上記以外の材料すべて
P-6		マルテンサイト系ステンレス鋼 析出硬化系ステンレス鋼 13Cr 系ステンレス鋼	P-6 の材料すべて
P-7		フェライト系ステンレス鋼 13Cr-Al 系、17Cr 系、26Cr-1Mo	P-7 の材料すべて
P-8A		オーステナイト系ステンレス鋼 18Cr-8Ni 系、25Cr-20Ni 系など	P-8A の材料すべて
P-8B		オーステナイト・フェライト系ステンレス鋼 25Cr-4Ni-Mo 系など	P-8B の材料すべて
P-9A 低温用 Ni 鋼		Ni 鋼 (Ni 分 2.50%以下) 2.5Ni 系	P-9A の材料すべて
P-9B 低温用 Ni 鋼		Ni 鋼 (Ni 分 2.50%を超え 3.50%以下) 3.5Ni 系	P-9B の材料すべて
P-11A 低温用 Ni 鋼		Ni 鋼 (Ni 分 3.50%を超え 9.0%以下) 9Ni 系	予熱不要 (2)

附属書 14 表 3 予熱温度 (つづき)

母材区分 (最小引張強さ)		予熱条件	予熱温度
P-11B	炭素鋼で焼入焼戻しによって引張強さが 790MPa {80kgf/mm <sup>2</sup> } 級のもの C-Mn-Si-Cr-Mo-V系	材料の規格最小引張強さが 483MPa {49.2kgf/mm <sup>2</sup> } を超えるか、又は継手の厚さが 16mm を超えるもの	80℃ ( <sup>2</sup> )
		上記以外の材料すべて	10℃

注 (1) これは、断熱用のクリップ、容器内の部品、取付物及び内圧による荷重を伝えない他の取付けに用いる 12.7mm 以下のすみ肉溶接には適用しない。

(2) 熱処理材の機械的性質に悪影響を及ぼさないように、各厚さに対して層間温度を制限するように考慮しなければならない。

- b) 異なる P 番号の二つの材料を溶接する場合は、一般に溶接施工要領書にある予熱温度のうちの高い方の温度を適用する。
- c) AWS D10.8-78 における各鋼種に対する最低予熱温度及び PWHT 温度を**附属書 14 表 4**に示す。

附属書 14 表 4 オーステナイト系ステンレス鋼と Cr-Mo 鋼との溶接施工の熱処理条件<sup>[1]</sup>

鋼種	溶接材料 <sup>(1)</sup>	最低予熱温度 (°C)	PWHT 温度 (°C)
炭素鋼	D309、高 Ni 系	不要 <sup>(2)</sup>	590～650 (厚さ 19mm 以上)
C-Mo 鋼	D309、高 Ni 系	95	635～690 (厚さ 16mm 以上)
0.5～1.25Cr-Mo 鋼	D309、高 Ni 系	120	635～680 <sup>(3)</sup>
2～3Cr-Mo 鋼	D309、高 Ni 系	150	690～745
5～9Cr-Mo 鋼	D309、高 Ni 系	205	705～760

注 (1) 以下のいずれかの場合には、高 Ni 系を使用する。

- ・繰り返し熱応力が作用する。
- ・設計温度が 315°C を超える。
- ・PWHT が要求される。

(2) 大気温度が 0°C より低い場合は、40°C 以上とする。

(3) 水素脆化に対しては 690～730°C。

- d) オーステナイト系ステンレスクラッド鋼において、クラッド側の第一層及び鋼板上の肉盛を行う場合は、母材側材質に応じた温度とする。
- e) パス間温度は、予熱温度と同じ温度とする。オーステナイト系ステンレス鋼、Ni 合金などでは、高温割れ防止からパス間温度を規定して管理することが必要である。また、炭素鋼及び Cr-Mo 鋼の補修溶接では予熱が重要視されるが、衝撃靱性が要求される場合にはパス間温度を規定して管理することが必要となる。

### 9.1.2 加熱方法

加熱方法は、プロパンガスバーナー加熱又は電気抵抗式加熱による。

9.1.3 予熱温度保持範囲

予熱温度保持範囲は、突合せ溶接継手及びすみ肉溶接継手のいずれも、開先部中心から両側約100mm幅を加熱する。

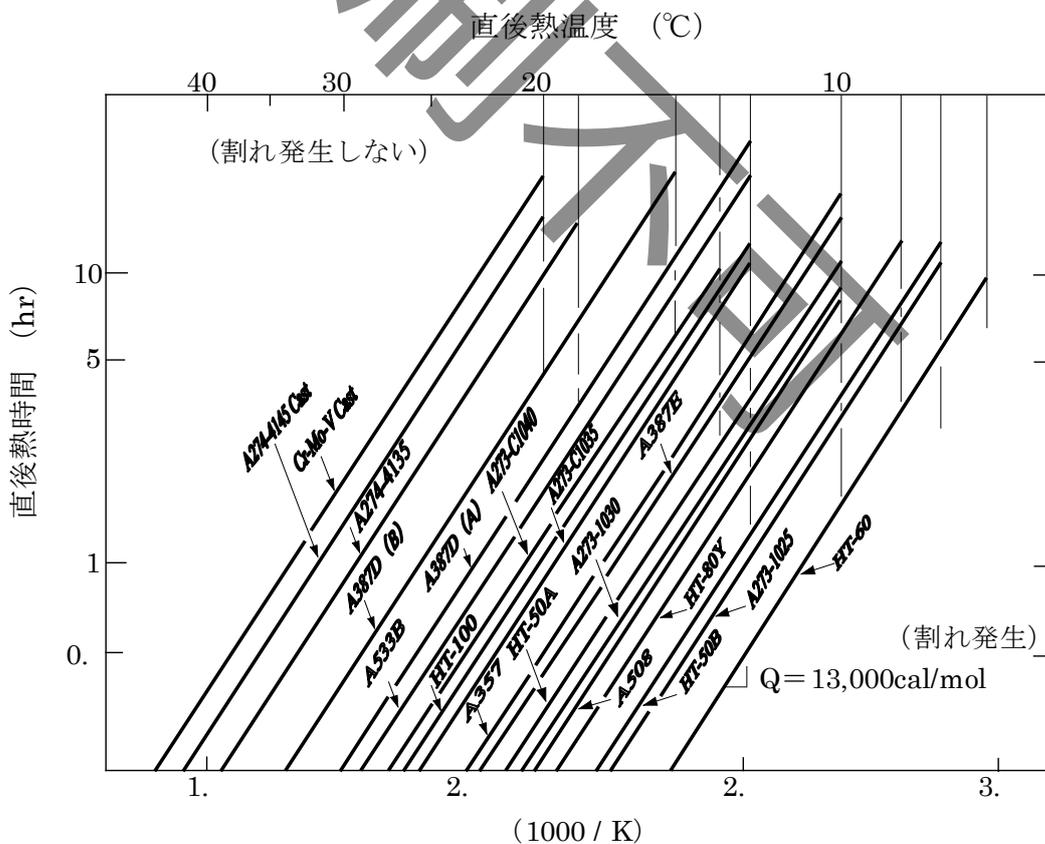
9.1.4 温度測定

溶接を行う直前及び溶接作業中に、温度チョーク又は表面温度計で溶接部から 50mm 離れた位置で所定の温度であることを確認する。

9.2 直後熱

厚肉炭素鋼、高張力鋼、Cr-Mo 鋼、フェライト系ステンレス鋼など硬化しやすい材料は、水素による遅れ割れが懸念される。こういった材料の溶接で、溶接後直ちに応力除去焼鈍を実施することが困難な場合は、溶接終了後速やかに直後熱を行う。ただし、応力除去焼鈍を直後熱で代行することはできない。

附属書 14 図 6 に各種鋼材のルート割れを防止するための直後熱条件を調査した試験結果を示す。



附属書 14 図 6 各種鋼材のルート割れ防止の直後熱条件の一例<sup>[1]</sup>

## 10. 溶接後熱処理 (PWHT)

### 10.1 PWHT の要否

PWHT の要否は、設備又は配管系の建設時に用いた技術基準での PWHT の要否による。

### 10.2 PWHT の温度及び方法

- a) PWHT の温度及び方法は、設備又は配管系の建設時に用いた技術基準の規定による。
- b) 設備又は配管系などの現場補修後での局部熱処理では、変形や座屈を防止するために、機器、配管などの内外面よりサポートリングなどの十分な補強を行って実施する。
- c) 炭素鋼及び低合金鋼は、PWHT により強度低下を生じる。一般に圧力容器については材料購入段階で製作時の PWHT の他に将来の補修、改造で必要となる PWHT を考慮した強度保証が行われているため、PWHT 施工時にはミルシートの確認が必要である。

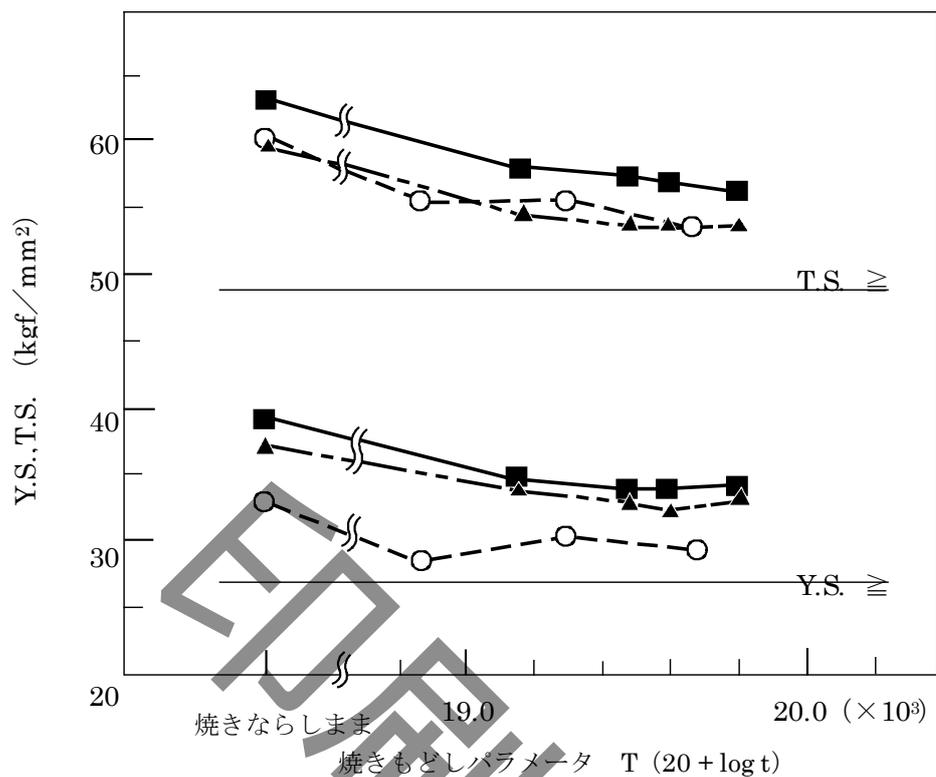
一例として、**附属書 14 図 7** に炭素鋼の熱処理条件（加熱温度と時間）と引張り強さ、降伏強さの関係を示す。強度は、焼戻しパラメータ（テンパーパラメータ） $P$  で整理できる。PWHT 一回当たりの強度低下は、テンパーパラメータを用いて推定できる。

$$P = T (20 + \log t) \times 10^{-3}$$

ここで、 $T$  は加熱温度（絶対温度）、 $t$  は保持時間（hr）である。

マーク	SB49 鋼
—○—	A 材、C 当量 0.514
—▲—	B 材（微量合金元素添加） C 当量 0.499
—■—	C 材（微量合金元素添加） C 当量 0.543

板厚 150mm



附属書 14 図 7 炭素鋼 (SB49) の強度と PWHT 条件例 <sup>[1]</sup>

## 11. 溶接部の検査

### 11.1 溶接部の非破壊検査

補修溶接部については、健全性確認のためあらかじめ計画された非破壊検査要領に従って検査を行い、要求基準を満足すること。

### 11.2 PWHT 施工における検査

#### 11.2.1 PWHT 施工前確認

溶接後熱処理に先立って、次の a)～c)を確認する。

- a) 必要な溶接作業が全て終了していること。
- b) 加熱により変形が予想される部分は、十分支持補強されていること。
- c) 溶接部外観検査並びに指定の非破壊検査に合格していること。

#### 11.2.2 PWHT 施工確認

温度記録チャートにより、昇温速度、降温速度、保持時間及び保持温度が適切であることを確認する。

### 11.2.3 PWHT 施工後硬度検査

溶接後熱処理後、溶接部の硬度検査を次の a)～c)の方法により行い、溶接後熱処理後の溶着金属及び熱影響部の硬さは、材質ごとに**附属書 14 表 5**のとおりとする。

- a) 硬度測定は、炉内焼鈍を行ったものは同一炉内で熱処理した溶接箇所の10%（最低3箇所）について実施する。局部焼鈍を行ったものは全数について実施する。
- b) 硬度測定箇所は、1溶接線を円周上均等割りで3箇所とし、1箇所当たり熱影響部及び溶着金属部の2ポイントとする。
- c) 熱影響部の硬度測定は、溶着金属との境界にできるだけ近い点で行う。

**附属書 14 表 5 溶接金属の硬さ基準**<sup>[1]</sup>

材 質 区 分	ブリネル硬さ (HB)
炭 素 鋼	200 以下
0.5Wt%モリブデン以下（クロム含有せず）	200 以下
2.0Wt%クロム以下	225 以下
2.0Wt%クロムを超えるもの	235 以下

## 12. 材料別にみた補修溶接施工上の留意事項

### 12.1 炭素鋼・高張力鋼

炭素鋼の焼入れ硬化性はそれほど大きくなく、溶接部の硬さは溶接のままでもあまり高くなり、溶接性がよい。高張力鋼は、通常、その強度・厚さの増加とともに焼入れ硬化性が大きくなり溶接性が次第に悪くなる。

#### a) 遅れ割れ

鋼の溶接部では、熱影響部が急冷によって硬化する傾向をもっている。熱影響部の硬化性の大きい鋼は、溶接割れを誘起しやすく、継手延性も劣化しやすい。鋼の溶接熱影響部の硬化性を支配する1つの要因は、鋼材の炭素当量であるから、可能な範囲で炭素当量の低い鋼を選択するのが望ましい。低合金高張力鋼の溶接低温割れ感受性を評価するのに、炭素当量の代わりに割れ感受性指数も用いられる。

遅れ割れは、次の炭素当量  $C_{eq}$ （又は割れ感受性組成  $P_{CM}$ ）が高く、継手の拘束度（又は厚さ）が大きく、溶接時の冷却速度が大きく、水素量が多い場合に起りやすい。

$$C_{eq}(\%) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

炭素鋼など、基本的に合金元素が含まれていない場合には、簡易的に次式で評価できる。

$$C_{eq}(\%) = C + Mn/6$$

$$P_{CM}(\%) = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B$$

一般に、 $C_{eq} \geq 0.4$ （%）、 $P_{CM} \geq 0.25$ （%）、厚さ  $\geq 25$ mm のとき起りやすく、この場合、 $C_{eq}$ 、 $P_{CM}$ 及び厚さに応じて予熱や低水素系の溶接棒を用いることが必要となる。 $P_{CM}$ 値に溶接金属中

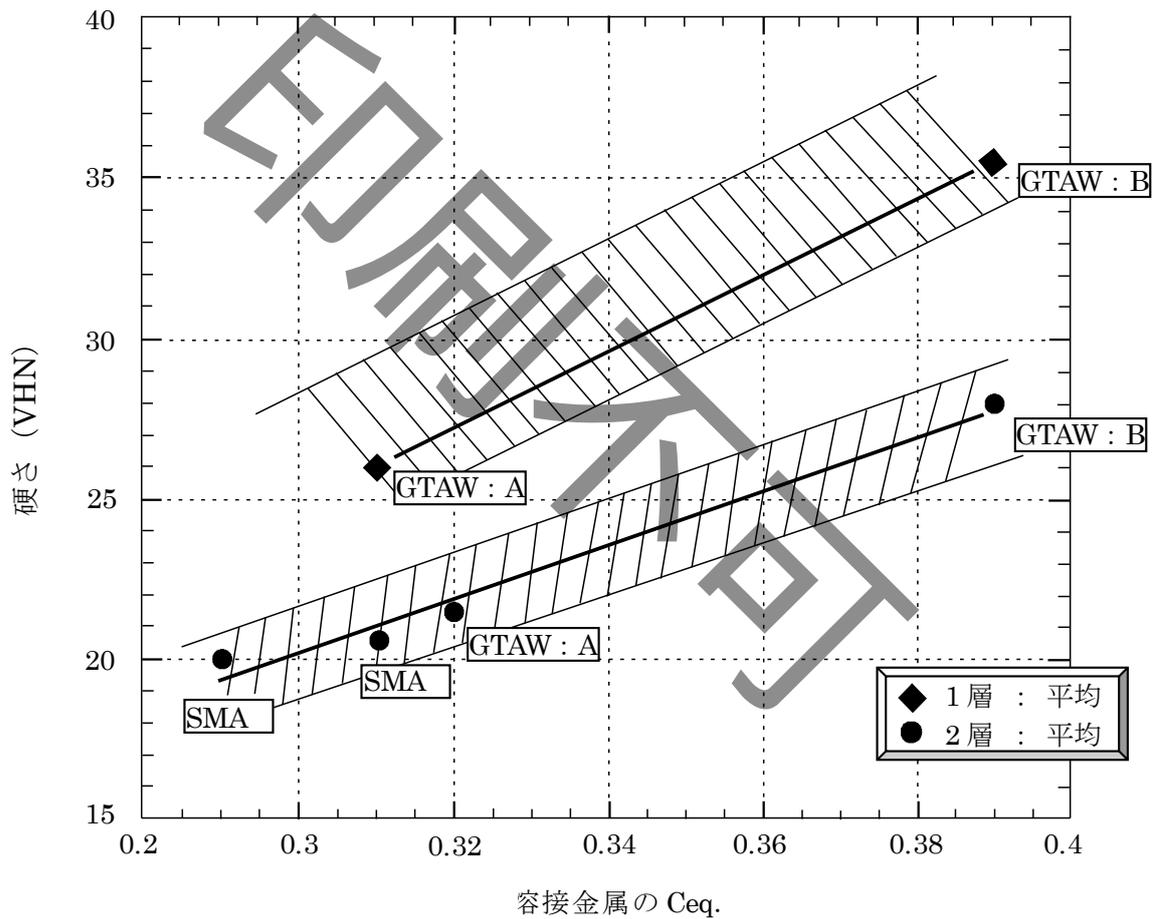
の拡散性水素量  $H$  (ml/100g) と厚さ  $t$  (mm) の影響も考慮した PC 値で遅れ割れ評価が行われる。

$$PC = P_{CM} + t/600 + H/60$$

**b) 炭素鋼溶接時の予熱**

炭素鋼溶接時の炭素当量、予熱条件、硬さの関係について厚肉や大きな構造物の溶接を実施する場合、又はショートビードで溶接補修を実施する場合は、溶接入熱不足により非常に溶接部の冷却速度が大きくなり溶接性が悪くなる。その対応の一つとして予熱を実施する。

通常の現場アーク溶接及び TIG 溶接における溶接材料の炭素当量と溶接後の硬さの関係を**附属書 14 図 8**に示す。



**附属書 14 図 8** 溶接金属の炭素当量と溶接後の硬度の関係 [1]

**12.2 低合金鋼**

**a) 低合金鋼の溶接性**

低合金鋼の溶接性に関する問題点は、次のとおりである。

- － 熱影響部の硬化と延性の低下
- － 溶接金属と熱影響部の冷間割れ（遅れ割れ）

- －PWHTによる熱影響部の割れ（再熱割れ）
- －溶接部の切り欠き靱性
- －長時間加熱による脆化（焼戻し脆化）

このうち、特に溶接部の遅れ割れ防止に対する配慮が最も重要な課題となる。

**b) 冷間割れ**

Cr-Mo 鋼は、焼き入れ性が高く、予熱・パス間温度を適切に管理しないと低温割れが生ずる。

**c) 水素侵食を発生した機器の補修溶接**

この損傷の特徴は、一般的には脱炭を伴う粒界割れである。通常損傷が全面的に発生するので補修できないことが多い。水素損傷が局部的で軽微な場合は、補修計画を十分に検討することが必要である。

**d) 溶接設計上の注意**

溶接残留応力で脆性破壊を発生することのないように注意する。

### 12.3 ステンレス鋼

**a) オーステナイト系ステンレス鋼**

一般的なオーステナイト系ステンレス鋼（安定化鋼を除く）は、500～800℃の温度範囲の加熱で鋭敏化し耐食性が劣化する。また、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接においては、高温割れ防止のため溶接金属に通常 5～10%のフェライトを含有させる。このフェライトの含有量によっては、機械的性質や耐食性が劣化することがあるので注意を要する。

鋭敏化防止と高温割れ防止のため、通常予熱は行わず、パス間温度を 150℃以下に保ち、かつ過大な入熱を避ける必要がある。

**b) マルテンサイト系ステンレス鋼**

13Crで代表されるマルテンサイト系ステンレス鋼は、急冷により硬化し割れ発生が起ることがあるので、通常 200～400℃の予熱が必要である。また、延性・靱性確保などの目的で、溶接後熱処理が通常実施される。

**c) フェライト系ステンレス鋼**

13Cr-Al、17Crなどのフェライト系ステンレス鋼では、400～550℃で 475 脆性、550～850℃で  $\sigma$ 相脆化を起こすので、この範囲での加熱をできるだけ避ける。溶接後熱処理も通常行わない。しかし、溶接時には硬化・割れを防ぎ延性を保つために、通常 150℃程度の予熱を行う。

#### 12.3.1 FCAW（Flux Cored Arc Weld）の注意条項

550℃以上の高温サービスで使用されるオーステナイト系ステンレス鋼を FCAW により補修溶接を実施する場合には、フラックス中に含まれる Bi が、溶接施工性を損ない運転中に損傷（再熱割れ）を発生する場合がある。高温サービスで使用する設備の溶接金属に含まれる Bi 含有量は 0.001%以下にする必要がある。

### 12.3.2 溶接作業時の補助工具選定について

補助工具（ワイヤーブラシ、グラインダーなど）はステンレス鋼専用のものを用い、もらい錆などの原因をつくらないこと。

### 12.3.3 高温割れ

オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部は、オーステナイト単相のため柱状晶が粗大化しやすく、また、熱膨張係数が大きいため、収縮応力が大きいことなどの理由で高温割れが極めて起りやすい。このうち、最もよく起るものは、溶接金属のクレータ割れ、溶接ビードの縦割れなどの凝固割れである。オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属中に約 5%程度の  $\delta$  フェライトが含まれていると、割れ防止に効果がある。

### 12.3.4 亜鉛脆化割れ

亜鉛汚染されたオーステナイト系ステンレス鋼は、溶接により割れを生じ、ステンレス鋼溶接部の品質確保の観点から大きな問題となる。現場溶接では亜鉛汚染の機会が多く、亜鉛系材料に使用したグラインダーなどの使用は避け、亜鉛系材料との接触も避ける。また、亜鉛系塗料による塗装をしないことなどの注意が必要である。

## 12.4 異材溶接の適用例と適正溶接材料

異材の組合せとしては、代表的には、炭素鋼と低合金鋼、高合金鋼（ステンレス鋼）と炭素鋼、低合金鋼又は高合金鋼同士の組合せが計画され製作されている。これらの異材で製作された機器において、製作に起因した欠陥又は使用環境に起因した欠陥を溶接補修する場合に推奨できる溶接材料を**附属書 14 表 6**に示す。

附属書 14 表 6 異材溶接の適用例と適正溶接材料<sup>[1]</sup>

異材組合せ	溶接材料	溶接性		耐食性
		遅れ割れ	高温割れ	孔食
炭素鋼×Cr-Mo 鋼	炭素鋼	△-○	—	◎
	Cr-Mo 鋼	△	—	◎
	D309	—	○	△
	Inconel 600	—	○	△
	Inconel 625	—	○	◎
SUS321× 炭素鋼又は Cr-Mo 鋼	D347	—	×	○
	D309	—	○	△
	D309Nb	—	○	○
	Inconel 600	—	○	△
	Inconel 625	—	○	◎
SUS 316× 炭素鋼又は Cr-Mo 鋼	D316	—	×	○
	D309	—	○	△
	D309Mo	—	○	○
	Inconel 600	—	○	△
	Inconel 625	—	○	◎
SUS 316 ×Incoloy 825	D316	—	×	◎
	Inconel 600	—	○	△
	Inconel 625	—	○	◎

備考 ◎：優れる、○：適する（可能性小）、△：適さない（可能性中）、  
×：適さない（可能性大）、—：問題が発生しない

#### 12.4.1 13Cr 系ステンレスクラッド鋼製機器の補修溶接

13Cr 系ステンレスクラッド鋼のクラッド部が腐食したり、損傷を受けた場合に現場にて補修溶接をする場合の推奨溶接材料と必要熱処理条件について**附属書 14 表 7**に示す。

附属書 14 表 7 13Cr系ステンレスクラッド鋼の補修溶接推奨例<sup>[1]</sup>

検討項目		フェライト系 (D430+D410系 <sup>(1)</sup> )	オーステナイト系 (D309系)	インコネル系 (DNiCrFe-2又は3)	
施工時	溶接割れ	遅れ割れ	△ (横割れ)	◎	
		高温割れ	◎	△	
	予・直後熱、PWHT <sup>(2)</sup>		要	不要	不要
	非破壊検査	PT/MT	要	要	要
UT		要 <sup>(3)</sup>	不用	不用	
運転時	ガルバニック腐食		◎	△	△
	熱応力 (熱伸び差)		◎	△	○
	割れの母材への進展 <sup>(4)</sup>		△	○	○
施工性及びコスト		△	◎	○	

注 (1) Nb含有材。

(2) 母材側から要求される場合を除く。

(3) 初層の横割れ検査 (ビード上操作、余盛除去) が望ましい。

(4) 肉盛溶接部に割れが存在する場合の母材への進展性。

備考 ◎ 問題なし/優れている、○ 良好、△ やや問題あり/やや劣る

#### 12.4.2 オーステナイト系ステンレスクラッド鋼の溶接における希釈率

オーステナイト系ステンレスクラッド (オーバーレイ) 鋼製機器の補修溶接を実施するときには、ステンレス鋼部分の溶接性を良好にするためには、材料の成分条件から、希釈率を推定する必要がある。

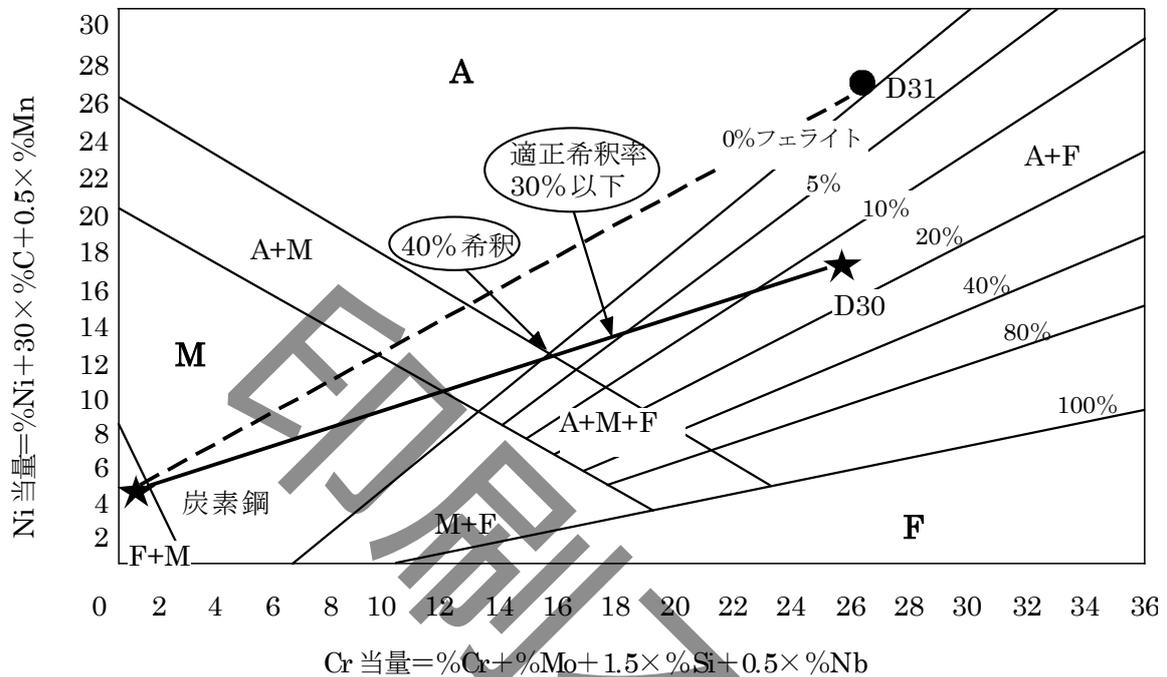
異材溶接では溶接金属は母材からの希釈の影響で、化学成分組成が変化し、溶接金属の金属組織が大幅に変化する。母材 A に異種溶接材料 B で溶接した場合の希釈状況を附属書 14 図 9 に示す。

希釈率 ( $\alpha$ ) は  $A / (A+B)$  (%) で計算でき、溶接金属の化学組成は  $\alpha A + (1-\alpha) B$  で得られる。ステンレス鋼の異材溶接では、図に示すようにシェフラー組織図を用いて溶接金属の化学組成とマイクロ組織変化を予測することができる。炭素鋼上に D309 ビードを置いた場合の溶接金属組織を検討するには、シェフラー組織図上に、D309 と炭素鋼の位置をそれぞれの化学成分 (Ni 当量、Cr 当量) からプロットする。

溶接金属の化学成分と組織は炭素鋼と D309 の点を結ぶ線上にあり、母材 (炭素鋼) からの希釈率に応じて、左側に移行する。すなわち、希釈率が大きくなるに従って溶接金属中のデルタフェライト量が低下し、約 40% でデルタフェライト量が 0 になり、マルテンサイトが生成される領域となる。高温割れ防止には 4% 以上のデルタフェライト量が必要であるため、適性希釈率は 30%

以下に管理することが必要であることがわかる。

同様に D310 で溶接した場合、D310 は完全オーステナイト組織を有し、母材からの希釈を受けても、フェライトは生成せず、オーステナイト領域に存在するため非常に高温割れ性が高いことが理解できる。



附属書 14 図 9 炭素鋼を D309 で肉盛り溶接した場合の溶接組織 [1]

附属書 14 付表 1 溶接施工法確認試験の記録の一例 <sup>[1]</sup>

施工法確認試験 (PQR)									
施工法確認記録 No.									
関連・溶接施工要領書									
実施者									
実施日					溶接 試験				
場所									
確認者									
溶接工		氏名			保有資格		年齢		経験
仮付け							才		年
初層									
2層～									
天候		気温			湿度		風速		天候
開先		角度	ROOT FACE	ROOT	目違い				
基準									
1									
2									
3									
仮付要領									
溶接方法		初層			シールドガス		バックシール		
		2層～			Ar 1/min		Ar 1/min		
		溶接姿勢			裏当て金		YES, NO		
溶接条件		パス		溶接棒		電流	電圧	速度	
			規格	径(mm)	(A)	(V)	(cm/min)		
		1							
		2							
		3～							
棒の乾燥		パス		温度		時間		再乾燥	
		1							
		2							
熱処理		予熱				パス間温度			
		後熱				PWHT			
硬度(HB)		溶着金属				熱影響部			
備考									

附属書 14 付表 2 溶接施工要領書の一例 <sup>[1]</sup>

REV	作成者	照査	承認	溶接手順シート				DWG NO	
0									
1								溶接継手	
2								開先形状	
母材									
P No									
PQR No									
開先加工法									
各ステップの検査			溶接ビードの仕上げ						
○自主チェック ◇社内検査 ◇立 会検査			□溶接のまま 余盛り高さ( )mm 以下						
開先表面	VT,PT,MT		内面				外面		
仮付	VT,PT,MT		□母材と同一曲率						
初層溶接後	VT,PT,MT		□母材と同一面						
裏はつり後	VT,PT,MT		□なめらかに						
溶接後	VT,PT,MT,UT,RT		特記事項						
PWHT 後	VT,PT,MT,UT,RT								
耐圧テスト後	VT,PT,MT,UT,RT								
パス数								裏当て要否	YES,NO
溶接方法								裏当て材	
溶接棒、フラックスの銘柄、棒径								予熱方法	
フラックス粒度								直後後熱	
電極径								中間 PWHT	
電流 A								最終 PWHT	
電圧 V								バックシールド	YES,NO
溶接速度 cm/min								ビード清掃	
極性 A C or D C								裏はつり方法	
トーチシールドガス流速 l/min								突出し長さ	
予熱温度 °C								単極 or 多極	
パス間温度 °C								オシレーション	
溶接姿勢								ガスカップ径	
P NO								ピーニング	YES,NO
AWS NO								溶接棒乾燥条件	
最大入熱								°C hr	
ストリング or ウィーブ				ストリング	ストリング	ストリング	ストリング	フラックス乾燥条件	
				ウィーブ	ウィーブ	ウィーブ	ウィーブ	°C hr	

附属書 14 付表 3 溶接作業記録の一例 [1]

溶接条件記録							報告書番号						
							ページ						
工事番号							積層法						
工事名称													
継手番号													
溶接手順シート番号													
溶接方法				溶接姿勢									
溶接材料		銘柄		ヒート/ロット番号									
被覆棒													
TIG 棒													
ワイヤ													
フラックス													
日付	パス	溶接士氏名	溶接材料		電流 A	電圧 V	速度 cm/min	予熱 パス 間温 度℃	シールド ドガス	ガス 流速 l/min	後熱 温度	入熱 KJ/c m	備考
			銘柄	サイズ mmΦ									
確認			照査					承認					

<参考文献>

- [1] JPI-8R-16-2009 溶接補修、(社)石油学会、2009

印刷不可