

特集：圧力容器の溶接**圧力容器の耐食肉盛溶接について**株式会社 タ セ ト
溶接技術部 岡 崎 司**1. はじめに**

炭素鋼や低合金鋼の圧力容器は内部流体が腐食性の場合、何らかの方法で内面に耐食性を持たせる必要がある。肉盛溶接 (Weld overlay) はこのための一つの方法であり、内面の形状が複雑な場合、他の方法(耐食材料のクラッド鋼やストリップライニング)に比べ格段に自由度が大きい利点があり、圧力容器に多く適用されている。鉄鋼材料に直接肉盛溶接される耐食材料には、Ni 基合金や銅合金もあるが、特殊な腐食環境を除いては、鉄鋼材料に直接溶接可能であり、溶接性が良好なオーステナイト系ステンレス鋼が主となる。

一般的に肉盛溶接金属に要求される性能は、耐食性を保証する化学成分である。このため溶接施工で一番重要となるファクターは溶接材料の化学成分と希釈率であり、これによりオーステナイト系ステンレス鋼の肉盛溶接金属の機械的性能もほぼ決まるといってよい。

しかしながら、圧力容器でのステンレス鋼の肉盛溶接の場合、一般的なステンレス鋼同士の共金溶接と異なり、炭素鋼母材の溶接時に要求される溶接後熱処理 (PWHT) を受けるケースが多い。特に母材が Cr-Mo 鋼の場合には、PWHT 温度が 700°C前後と、ステンレス鋼においては Cr 炭化物析出による鋭敏化や金属間化合物である σ 相の析出によるぜい化など、耐食性や機械特性の劣化が問題となる。

本稿では、まず基本的なステンレス鋼の肉盛溶接施工に用いられる溶接方法の紹介と溶接施工上の留意点を解説し、次に代表的な大型圧力容器である石油精製用圧力容器での肉盛溶接について、PWHT と供用中での肉盛溶接金属部での性能劣化と具体的な損傷事例を、最後に肉盛溶接部の補修溶接の考え方について解説する。

2. 肉盛溶接に適用する溶接施工方法

肉盛溶接に適用される溶接法としては、一般にステンレス鋼の溶接に用いられる被覆アーク溶接法 (SMAW)、ティグ溶接法 (GTAW)、ミグ溶接法 (GMAW)、フラックス入りワイヤによるマグ溶接法 (FCAW)、サブマージアーク溶接法 (SAW) のほかに、肉盛溶接専用の溶接方法と言える带状電極肉盛溶接法(バンド溶接法)がある。このバンド溶接法は図 1 に示すように带状電極(通常 0.4mm 厚で幅は 25~75mm) を用い、SAW 同様にフラックスを散布した中を溶接するもので、SAW と同様にアークを発生させてこのアーク熱で带状電極を溶かしていくサブマージアーク溶接法 (SAW) と溶融スラグ内を流れる電流のジュール発熱で带状電極を溶かすエレクトロスラグ溶接法 (ESW) がある。このバンド溶接法は広幅の溶接金属が得られるため、平坦で広い面積の圧力容器胴部などの溶接には非常に高効率で適しているが、ノズル部のような形状の複雑な部分には適用できない。また装置が大型のため主に大径の圧力容器である石油精製用圧力容器や原子力圧力容器の肉盛溶接に使用

される。

これらの肉盛溶接方法の中で、大型の圧力容器では、胴部や鏡板ではバンド溶接法が、ノズル内面やフランジ面では GTAW、SMAW および FCAW が用いられる。ただしフランジ面のように機械加工の入る部分では、酸素量の高い FCAW 溶接金属では浸透探傷試験 (PT) による微細な指示模様が現れる危険性が高く、FCAW は高能率であるが他の溶接方法に比べ不利となる。

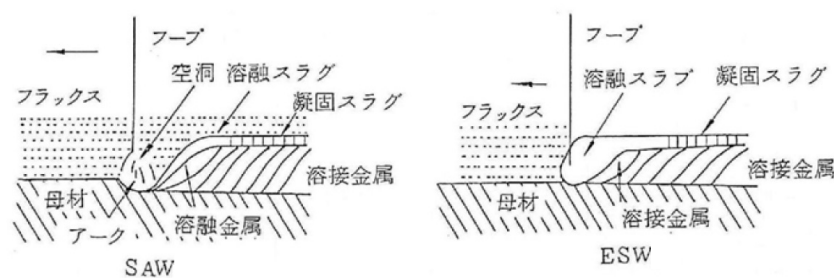


図1 帯状電極肉盛溶接法¹⁾

(上記の写真は ESW の例)

3. ステンレス鋼の肉盛溶接の考え方

上述したように、ステンレス鋼の肉盛溶接において問題となるのは、肉盛溶接金属の化学成分である。最も単純なケースとして炭素鋼上にオーステナイト系ステンレス鋼溶接材料で 1 層肉盛溶接した場合である。この時溶接金属の化学成分は共金溶接と異なり、母材の希釈を受け Ni 量や Cr 量が低下する。これは図 2 に示すように、シェフラーの組織図を用いて予想できる。溶接金属の組織は、溶接材料の全溶着金属 (母材の希釈を受けない溶接金属) の Ni 当量、Cr 当量に相当する点 (図 2 中 308、316 および 309) と母材の化学成分より計算される Ni 当量、Cr 当量に相当する点 (図 2 中 SS400) を希釈率で内分した点の組織となる。このことから、炭素鋼上へステンレス鋼溶接材料で溶接したケースでは、図 2 からわかるように共金溶接用の溶接材料である 308 や 316 を用いて希釈率 25% で溶接した場合、溶接金属はフェライト量の極端な低下やマルテンサイト組織の析出などが起こりやすく、溶接金属は高温割れの発生や極端な延性の低下などの問題が発生し、健全な溶接金属を得ることが難しい。一方、炭素鋼の希釈を考えて 308 や 316 に比べ Ni と Cr を高め、フェライト量も

10～25%で成分設計された 309 では広い希釈範囲で数%のフェライトを含むオーステナイト組織の健全な溶接金属を得ることができる。このように、ステンレス鋼の肉盛溶接においては、異材溶接と同じく炭素鋼や低合金鋼の希釈を受ける初層では、309 系溶接材料を用いて溶接し、2 層目以降目標成分の溶接材料で溶接することが基本となる。表 1 に肉盛溶接金属の目標成分ごとの使用する溶接材料の鋼種を示す。ただし、希釈率が小さいバンド溶接における ESW では 1 層盛で目標成分が得られる、BS309LD (目標成分 308L)、BS309LMo (目標成分 316L) および BS309LNb (目標成分 347) が、ステンレス帯鋼として JIS Z3321:2010 に規定されている。

希釈率は、初層の組織の安定性のみならず、2 層目以降の溶接金属に大きな影響を与える。肉盛溶接においては、客先仕様や経済性の観点から肉盛り高さや肉盛り層数の制限が課せられることが多く、接液表面の化学成分の保証には希釈率のコントロールが重要なファクターとなる。表 1 中、最終層での Mo 量や Nb 量の制限から、初層の 309 系溶接材料に Mo や Nb 入りを使用するのは、溶接方法によっては希釈率のコントロールだけでは仕様を満足できないためである。

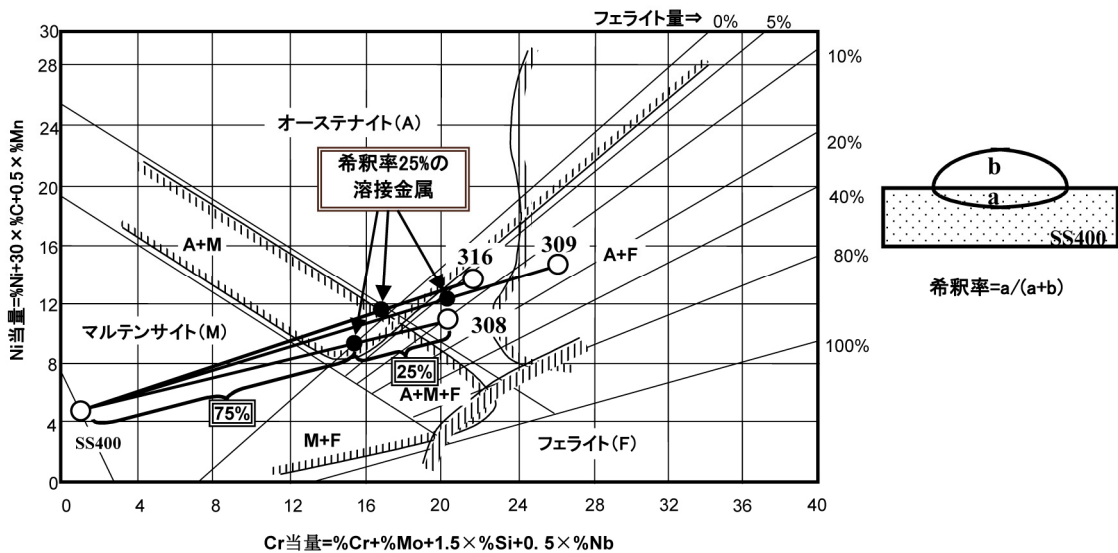


図 2 シェフラーの組織図を用いた肉盛溶接金属の組織予想²⁾

表 1 肉盛溶接に使用する溶接材料

肉盛溶接金属の目標成分	層	適用溶接材料
308	初層	309/309L
	2層目以降	308
308L	初層	309L
	2層目以降	308L
316	初層	309/309Mo
	2層目以降	316
316L	初層	309L/309LMo
	2層目以降	316L
347	初層	309L/309LNb
	2層目以降	347

表 2 に各溶接方法の希釈率の目安を示す。この希釈率の目安にかなりの幅があるのは、希釈率は溶接施工パラメータにより影響を受けるためである。この中でバンド溶接は、フープサイズ、フラックスが決まれば、溶接条件（電流、電圧、速度）のみで希釈率は決まり、さらに自動溶接であることから希釈率は極めて安定である。これに対し、GTAW、SMAW および FCAW に関しては希釈率に影響を与えるパラメータが多い。FCAW における溶接条件の変動による希釈率の変化の一例を図 3 に、ワイヤねらい位置による希釈率の変化の一例を図 4 に示す。GTAW においては、これに加え溶加材の溶加量も希釈率に大きな影響を与える。これらすべてをコントロールしなければ、一定の希釈率を得ることが困難となるため、FCAW と GTAW による肉盛溶接では自動溶接が望ましい。

一般にオーステナイト系ステンレス鋼の溶接部の機械的性能は炭素鋼のように溶接条件の影響を受けにくい。肉盛溶接においては希釈率が溶接条件などの施工パラメータの影響を大きく受け、これが溶接金属の性能に大きな影響を与える。このため、肉盛溶接においては施工前の施工試験の実施による施工パラメータの確認と、実施工における施工パラメータの管理が、共金溶接以上に溶接金属の品質を管理する上において重要となる。

表 2 各種溶接方法での希釈率の目安²⁾

溶接方法	希釈率
GTAW	10～20%
SMAW	20～25%
FCAW	20～30%
バンド溶接	10～15%(SAW) 5～10%(ESW)

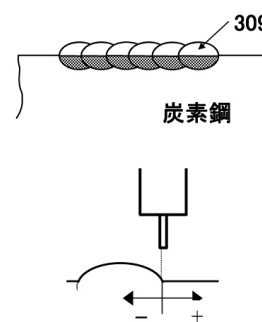
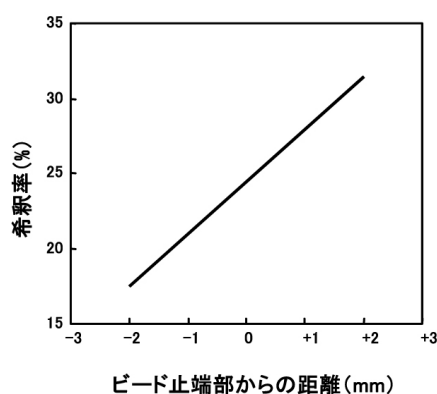
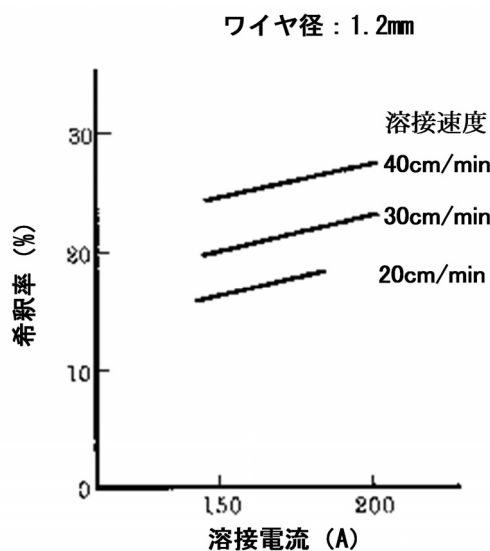


図 3 フラックス入りワイヤによる肉盛溶接条件と希釈率の関係の一例²⁾

図 4 フラックス入りワイヤによる肉盛溶接におけるワイヤねらい位置による希釈率の変化の一例²⁾

4. PWHT を受ける肉盛溶接金属の問題点

二層目以降の肉盛溶接金属の性能は、溶接のままでは溶接材料の全溶着金属の性能とほとんど同等となり、特に問題が生じることはない。しかしながら、母材の板厚や種類によっては PWHT が必要となる。特に母材が Cr-Mo 鋼厚板の場合、PWHT 温度が約 700°C で PWHT 時間は数十時間となり、溶接金属には炭化物や金属間化合物の析出などが起こり、機械的性能や耐食性の劣化が問題となる。もう一つの PWHT が肉盛溶接金属に与える悪影響は、母材と肉盛溶接金属境界（ボンド部）での浸炭層の成長によるボンド部のぜい化である。以下に肉盛溶接金属の性能に及ぼす PWHT の影響について基本的な考え方を述べる。

4.1 耐食性

オーステナイト系ステンレス鋼では、550°C～800°C に加熱されると粒界に Cr 炭化物が析出し、粒界や粒界近傍に Cr 欠乏層ができ、この部分の耐食性が劣化する。この現象は鋭敏化と呼ばれている。石油精製用压力容器ではシャットダウン時にポリチオン酸が発生するため、鋭敏化した場合には粒界型の応力腐食割れ（SCC）が問題となる。しかし、オーステナイト+フェライト組織の肉盛溶接金属では、700°C での長時間の PWHT により、Cr 欠乏層に Cr が補充される（Healing）状態となっており、鋭敏化の状態はかなり解消されるケースが多く、ポリチオン酸 SCC による損傷事例は後述する σ 相ぜい化による損傷事例に比べると少ない。⁴⁾

4.2 機械的性能

オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属では 700°C 前後の高温に保持されるとフェライト相内に σ 相と呼ばれる Fe-Cr の脆い金属間化合物が析出し、溶接金属がぜい化する。この σ 相は図 5 に示すように、308 系の溶接金属においては 700°C において 10h 程度で析出を開始する。この σ 相析出の C 曲線のノーズは Nb や Mo の添加とともに高温短時間側にシフトする。いずれにしても、Cr-Mo 鋼への肉盛金属では PWHT による σ 相の析出は避けられない。 σ 相析出によるぜい化の影響を最小限にとどめるには、 σ 相の析出サイトとなるフェライト相の量を少なくすることが有効であり、通常 650°C 以上の PWHT を受ける肉盛溶接金属では溶接のままのフェライト量を 8% 以下とするのが一般的である。この程度のフェイト量であれば肉盛溶接部は 700°C で 50h の PWHT 後においても、試験片厚みの 2 倍の曲げ半径の曲げ試験に合格する十分な延性を確保できる。

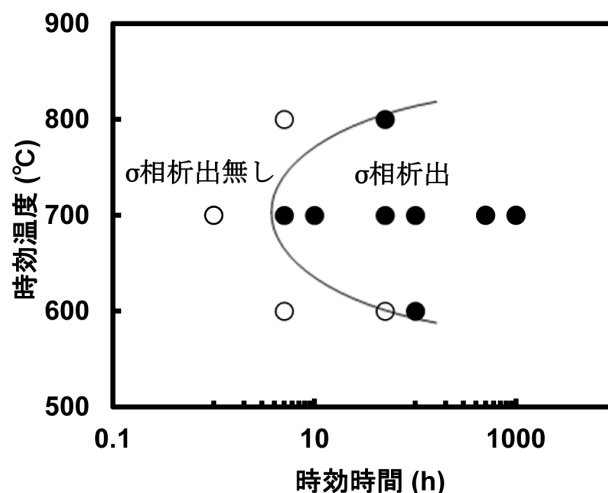


図 5 308 系溶接金属の σ 相析出の C 曲線³⁾

4.3 浸炭層

ステンレス鋼肉盛溶接部が PWHT を受けるとボンド部に図 6 に示すように浸炭層と呼ばれる Cr 炭化物の層ができる。これは炭素鋼側から炭素が拡散し溶接金属の Cr と反応したもので、炭素鋼側浸炭層近傍は浸炭層の成長に伴い軟化する。この浸炭層は硬いため、成長すると側曲げ試験で微細な割れが発生することもある。この浸炭層の成長は炭素の拡散に律速されるため PWHT 条件の範囲では、温度が高く時間が長くなるほど成長する。しかしながら、Cr-Mo 鋼のように母材に Cr を含有していれば成長は遅くなるため、Cr-Mo 鋼への肉盛溶接の浸炭層で問題になることは少ない。

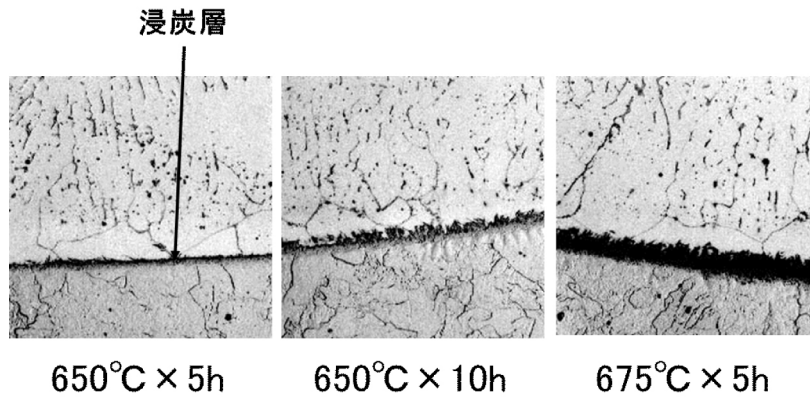


図 6 PWHT 条件によるボンド部の浸炭層の成長

5. 石油精製用圧力容器の肉盛溶接部の損傷事例

Cr-Mo 鋼製の石油精製用圧力容器の肉盛溶接部は上記のように PWHT によるぜい化を受けるだけでなく、運転中は高温高压の水素・硫化水素環境となるため水素によるぜい化を受ける。すなわち、図 7 に示すように水素を吸蔵した溶接金属の延性は大きく減少する。しかも、PWHT によってぜい化した溶接金属では著しく延性が損なわれる。ここでは、この水素環境において肉盛溶接金属でみられる代表的な損傷であるガスケットリング溝のコーナー部での割れと肉盛溶接ボンド部近傍にみられる割れについて述べる。

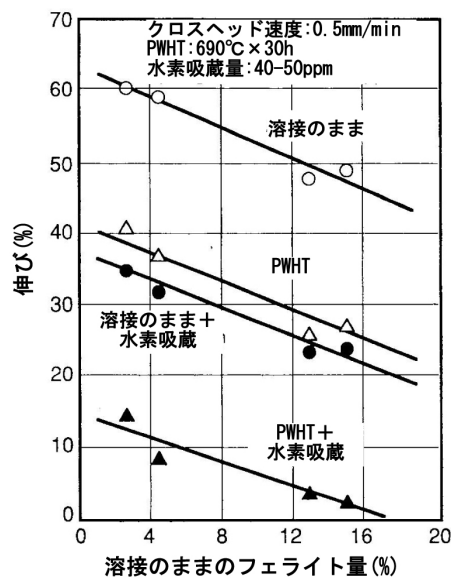


図 7 347 溶接金属の延性に及ぼすデルタフェライト量、PWHT および水素吸蔵の影響⁵⁾

5.1 ガスケットリング溝の割れ

ガスケットリング溝のコーナー部では、図 8 に示す肉盛溶接金属の割れが発生し、補修を受ける事例が多い。これは溶接金属が σ 相ぜい化に加え水素脆化を起こしているうえにガスケットリングを押しえつけるため、コーナー部に大きな応力集中が起こるためである。対策としては、溝コーナー部の曲率半径を大きくして応力集中を軽減するとともに、最終層（347）は最終 PWHT 後に溶接し、溶接のままの状態で使用することで σ 相ぜい化の影響を免れることである。⁷⁾

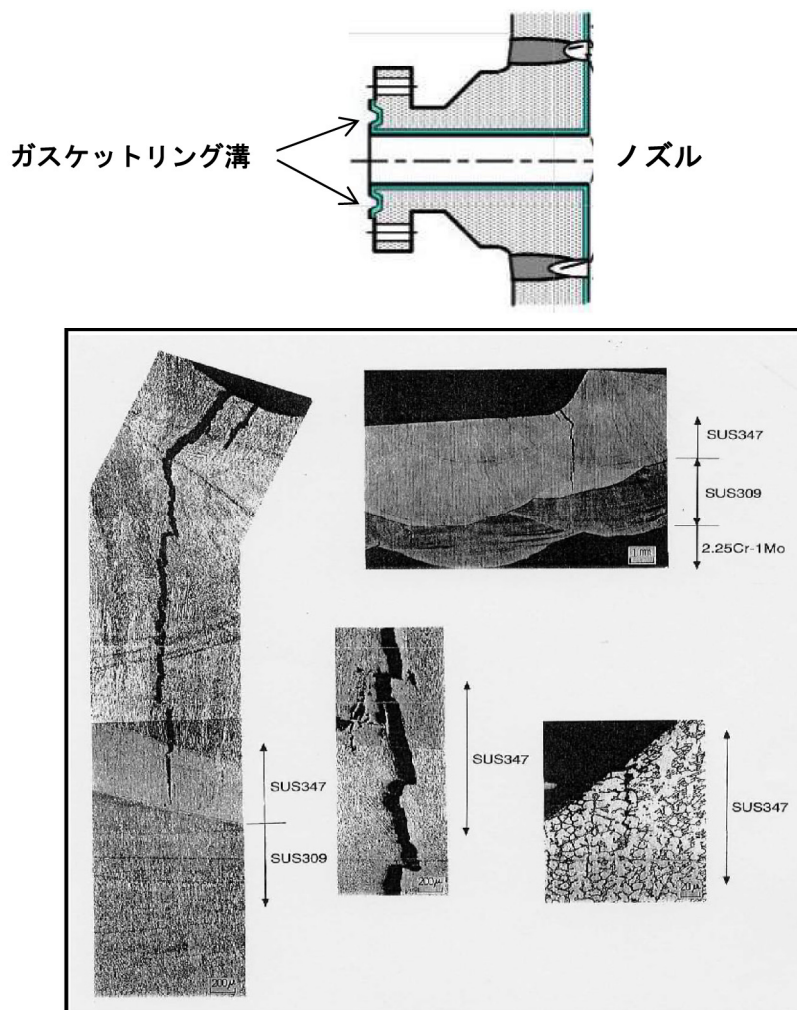


図 8 ガスケットリング溝コーナー部に発生した割れの一例⁶⁾

5.2 ボンド部での離割れ

運転中は高温、高圧の水素・硫化水素環境となる石油精製用圧力容器では、シャットダウン時に図 9 に示すような初層溶接金属と Cr-Mo 鋼母材のボンド部近傍の溶接金属側に割れが発生することがある。この割れははく離割れ（Disbonding）と呼ばれている。この割れの原因は、図 10 に示すように運転中に圧力容器内部からの拡散で定常状態に達した水素濃度が、シャットダウンによりボンド部近傍の溶接金属に集積し、この部分で水素濃度が 50ppm 以上となり水素脆化により割れが発生したとされている。現状では母材を V 入りの Cr-Mo 鋼にすることで V 炭化物による水素のトラップ効果によりボンド部への水素の集積を軽減しこの割れを回避している⁹⁾ためほとんど問題となっていない。

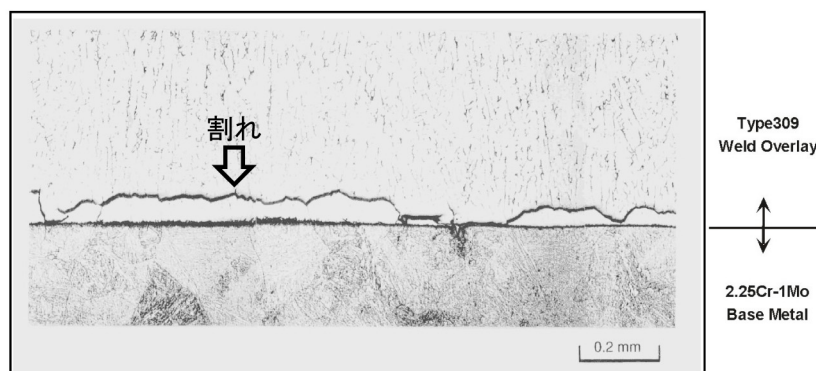


図 9 肉盛溶接金属のはく離割れ⁶⁾

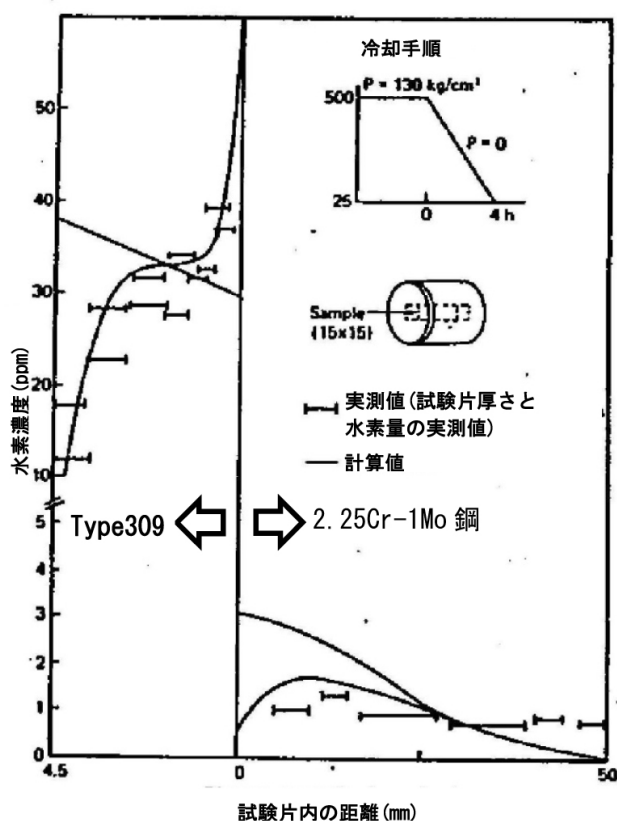


図 10 石油精製用压力容器肉盛溶接部ボンド近傍の水素分布⁸⁾

6. 肉盛溶接部の補修溶接

肉盛溶接部が腐食や割れにより損傷を受けた場合、補修溶接が必要となるケースがある。図 11 は補修深さによる補修溶接手順を示したものである。きず除去後の肉盛溶接金属の残厚が 3mm 以上の場合は、補修溶接の熱影響が母材に達しないため、補修溶接後の PWHT が不要となるが、3mm 未満の残厚となれば、母材に PWHT が要求されている場合、PWHT が必要となる。¹⁰⁾

	損傷除去後の状況	補修溶接方法	PWHT
補修溶接が母材に達しない	<p>肉盛溶接金属 3mm以上 炭素鋼/低合金鋼</p>	<p>肉盛溶接金属: 上盛溶接材料 肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼</p>	不要
	<p>肉盛溶接金属 3mm未満 炭素鋼/低合金鋼</p>	<p>肉盛溶接金属: 上盛溶接材料 肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼</p>	母材の要求による
補修溶接が母材に達する	<p>肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼</p> <p>PWHT が必要ないか 650°C 以下の PWHT の場合</p>	<p>肉盛溶接金属: 上盛溶接材料 肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼 309 系溶接材料</p>	母材の要求による
補修部が母材に達する	<p>肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼</p> <p>低合金鋼の補修が必要な場合</p>	<p>肉盛溶接金属: 上盛溶接材料 肉盛溶接金属 炭素鋼/低合金鋼 炭素鋼用溶接材料 309 系溶接材料</p>	母材の要求による

図 11 肉盛溶接部の補修溶接方法

7. おわりに

オーステナイト系ステンレス鋼の肉盛溶接において最も重要となるのは、初層の組織と最終層（接液層）の化学成分であるが、これは溶接材料の化学成分と希釈率により決まる。このため、肉盛溶接施工においては、希釈率の管理を厳密に行われなければならない。さらに低合金鋼への肉盛溶接においては、PWHT を要求される場合が多いが、肉盛溶接部は PWHT により耐食性や機械的性能が劣化する。特にオーステナイト系ステンレス鋼溶接金属に関してはフェライトを含む組織となるため、炭化物や σ 相の析出の C 曲線は、オーステナイト単相の組織となるステンレス鋼母材のそれとは異なるものとなるため、肉盛溶接金属の性能の検証には十分な注意が必要である。

参考文献

- 1) 池田: バンド肉盛溶接に関するデータ紹介, 特殊材料溶接研究委員会異材溶接 WG 資料, SW-WG-18(2014)
- 2) 岡崎: ステンレス鋼の溶接第 3 回, 溶接技術 2008 年 11 月号
- 3) 西本ら: 恒温保持過程における溶接金属の組織変化, 溶接学会論文集第 18 巻第 3 号, (2000)
- 4) 化学機械溶接研究委員会圧力設備溶接補修小委員会編: プラント圧力設備溶接補修指針, CP-0902, (2009), p.263
- 5) T.Ishiguro: International Conference on Interaction of Steels with Hydrogen in Petroleum Industry Pressure Vessel Services, MPC, Sept.(1990)
- 6) 化学機械溶接研究委員会圧力設備溶接補修小委員会: 保全技術者に役立つ新しい「プラント圧力

設備の溶接補修指針」シンポジウム資料, CP-0901(2009), p.180

- 7) 化学機械溶接研究委員会圧力設備溶接補修小委員会編: プラント圧力設備溶接補修指針, CP-0902(2009), P253
- 8) 酒井ら: ステンレス鋼オーバーレイ部の水素による剥離割れに影響を及ぼす諸因子, 第 89 回溶接冶金研究委員会資料, WM-889-82, (1982)
- 9) T.Ishiguro et al: Proceeding of International Conference on Interaction of Steels with Hydrogen in Petroleum Industry Pressure Vessel Service, Paris, March 28-30 (1989) p.215
- 10) 茅野ら: ステンレス鋼オーバーレイ部 (クラッド) の溶接補修における PWHT 要否, 石油精製圧力容器の補修溶接性に関する研究 第 1 報, 圧力技術, Vol.40, No.2(2002)

<略歴>

岡崎 司 (おかざき つかさ)

1978 年 大阪大学 工学部 溶接工学科 卒業

1980 年 大阪大学 大学院 工学研究科 溶接工学専攻 前期課程修了

1980 年 日本油脂株式会社 入社 神明工場 配属

2000 年 株式会社タセト 入社

2002 年 大阪大学 大学院 博士 (工学) 取得

2004 年 株式会社タセト 溶接技術部 部長

現在に至る