

プラント圧力設備の溶接補修の留意点

新興プランテック株式会社
志賀 啓介
(化学機械溶接研究委員会)

1. はじめに

国内の石油精製・石油化学に代表されるプラント設備の多くは高度成長期の1960年～1970年代に建設されており、操業開始以来、改造・改修を経て既に40年を越えようとしています。長年の稼働に伴いプラント設備の構成材料は、高圧・高温、さらに種々の腐食環境に長期間暴露され、クリープ、水素脆化・侵食、疲労、腐食、あるいはそれらが複合した状態での時間に依存した経年劣化が問題となり、メンテナンスの重要性がクローズアップされています。

このような背景のもと、装置の安全と機能維持を図るための再生技術である溶接補修に着目し、化学機械溶接研究委員会では圧力設備溶接補修小委員会を設置して各種圧力設備の溶接補修技術調査を行い、2009年に「プラント圧力設備溶接補修指針」を刊行しました。この溶接補修指針の概要についてはWE-COMマガジン第5号で解説していますので、そちらもご一読ください。

ここでは上記指針によるプラント圧力設備の各種溶接補修方法と溶接補修事例について解説します。

2. 溶接補修の特徴

国内のプラント装置は、法規制あるいは装置所有者の自主保安により、定期的に設備検査が行われています。検査により、何らかの損傷が検出された場合、装置の安全と機能の維持のため、損傷部に対して適切な再生処置を講じなくてはなりません。殆どの場合、損傷部の再生処置として溶接補修が採用されます。損傷部の溶接補修に際しては、WE-COM第5号の第3図「設備診断と溶接補修の検討手順例」に従って、溶接補修の要否／可否が決定されます。プラント圧力設備の溶接に関しては、新規に製作する設備であれば材料自身の脆化に対する不安要素は少なく、また、成熟した溶接技術により問題なく製品が完成します。しかし、既設設備の溶接補修の場合、①長期使用に伴う材料の脆化による損傷の再発、②使用条件を考慮した材料・溶接材料の選定、③溶接後熱処理の要否、④溶接後熱処理が不可能な場合の代替策、⑤稼働中の損傷再発防止のための溶接後の硬さ制限、等々を考慮した補修対策を立案する必要があります。これら溶接補修に際しての留意点の詳細については、「プラント圧力設備溶接補修指針」を参照願います。

3. 各種溶接補修方法

溶接補修の要否／可否は、**図 1** に示すフローに基づき劣化・損傷の形態（サイズ、位置、形状、

程度、分布など)によって決定されます。溶接補修の実行が決定されることにより、代表的な溶接補修方法(図2~4)である①きず除去と肉盛溶接補修、②窓形溶接補修、③外面当て板溶接補修が選択されます。各種溶接補修方法の詳細については、日本溶接協会規格 WES 7700 シリーズ「圧力設備の溶接補修」を参照下さい。

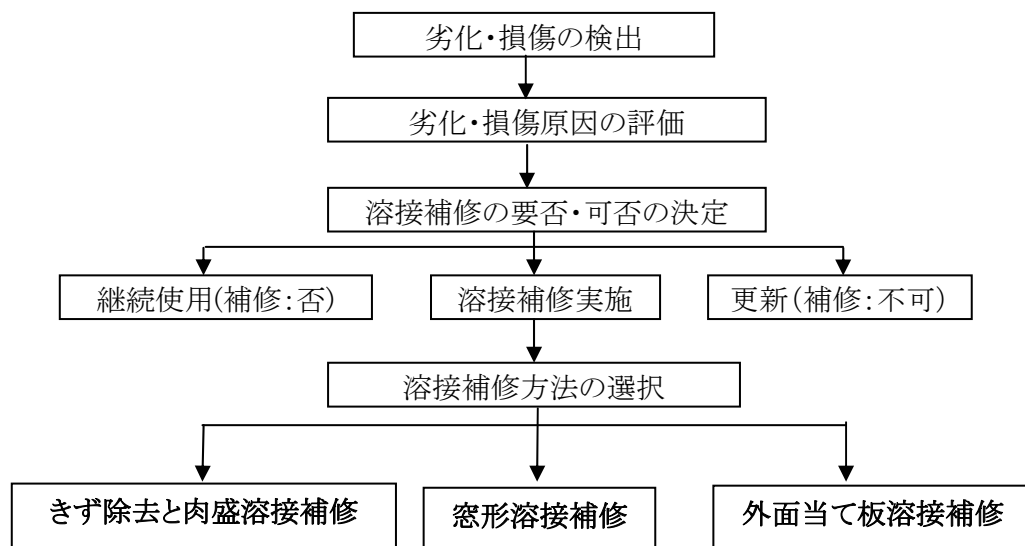
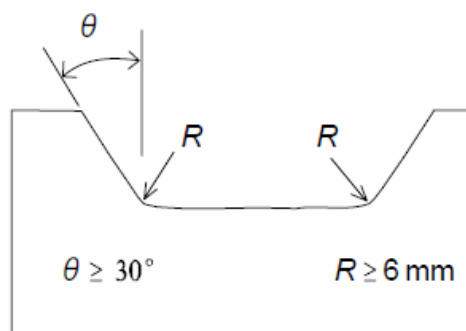
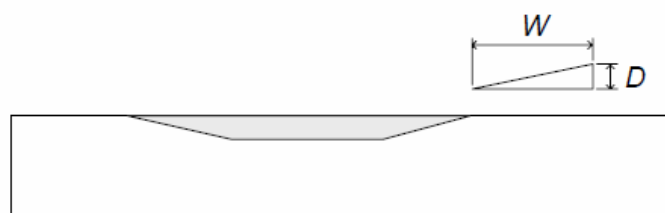


図1 溶接補修方法の選択フロー図

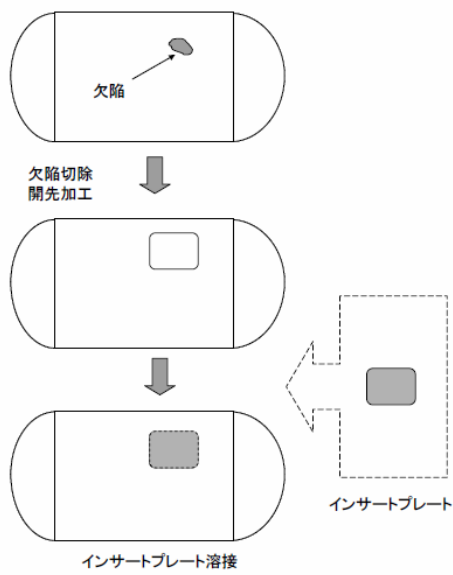


1) きず除去部の仕上がり形状(肉盛溶接を行う場合)

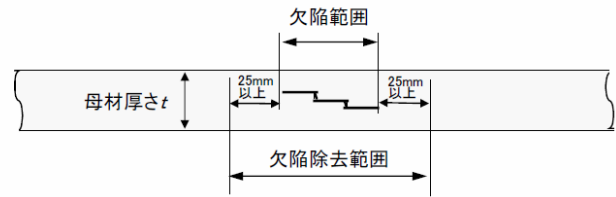


2) きず除去部の仕上がり形状(肉盛溶接を行わない場合)

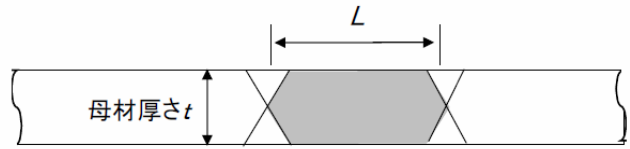
図2 きず除去と肉盛溶接補修の概念図



1) 窓形溶接補修手順



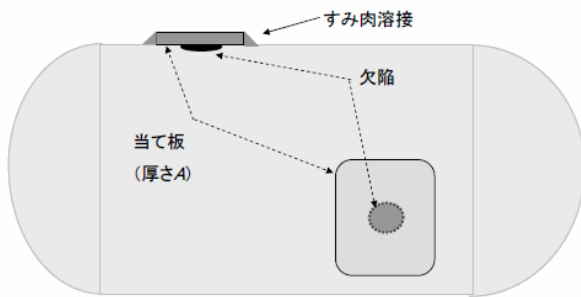
2) 欠陥除去範囲



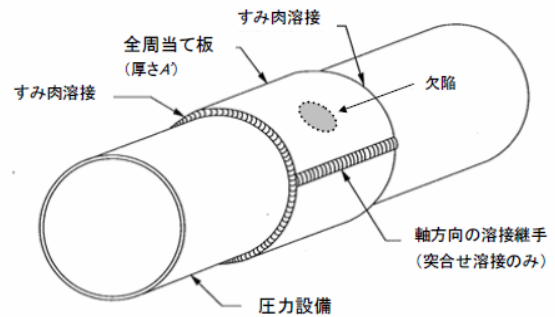
インサートプレートの大きさは、欠陥除去範囲、120mm 又は $5t$ (t : 母材の厚さ) の3寸法の中で最も大きい値以上とする。

3) インサートプレートの大きさ

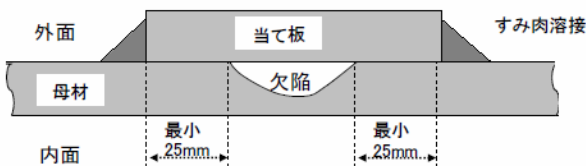
図3 窓形溶接補修の概念図



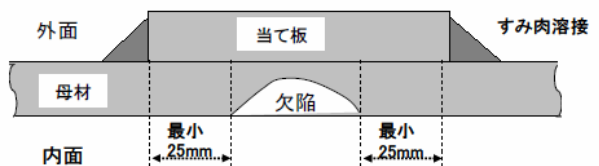
1) 部分当て板溶接補修



2) 全周当て板溶接補修



3) 欠陥が外面側にある場合



4) 欠陥が内面側にある場合

図4 外面当て板溶接補修の概念図

4. 溶接補修の留意点

各種損傷形態を対象とした既設圧力設備の溶接補修の留意点は、WE-COM 第5号「表1 主な損

傷形態と溶接補修における留意点」で解説されていますので参照下さい。ここでは、既設圧力設備の溶接補修に当たっての留意事項について、WES 7700 シリーズを参考にして解説します。

4.1 低温割れの防止

4.1.1 脱水素熱処理

水素環境（高圧水素、湿潤硫化水素条件など）で使用された炭素鋼、高張力鋼及び Cr-Mo 鋼では、材料中に吸蔵された水素の除去を目的とした脱水素熱処理を行うことが溶接後の低温割れ防止に効果があります。脱水素熱処理の条件は直後熱条件（4.1.3 項）と同様であり、鋼種により若干相違はありますが温度は一般的に 200～400℃が採用されます。

4.1.2 予熱

溶接補修でも、表 1 に示した新規製作時の標準的な予熱条件に従います。予熱は溶接直前に行い、予熱温度は被溶接構造物の厚さが 50mm 以下の場合には溶接開先の縁から厚さの 4 倍の位置で、かつ、50mm を超えない位置で測定します。厚さが 50mm を超える場合は、開先から 75mm 以上離れた位置で測定します。拘束が厳しいなど溶接補修時の割れが懸念される場合には、予熱温度を高くするとともに予熱幅を広くするなどの処置が必要となります。

脱水素熱処理後の被溶接構造物の表面温度が表 1 の最低予熱温度以上である場合、脱水素熱処理に引き続き溶接補修を行うことができます。

表 1 標準的な予熱条件

材料		最低予熱温度 (°C)
炭素鋼	厚さ<25mm	10
	厚さ≥25mm	80
C-0.5Mo鋼		80
1Cr-0.5Mo鋼		120
1.25Cr-0.5Mo鋼		120
2.25Cr-1Mo鋼		200
5Cr-0.5Mo鋼		200
9Cr-1Mo鋼		200
フェライト系ステンレス鋼		200
オーステナイト系ステンレス鋼		不要
ニッケル合金		不要

4.1.3 直後熱

炭素鋼、高張力鋼および Cr-Mo 鋼の溶接部は、急熱・急冷に伴う硬化、拡散性水素の集積、継手の大きな拘束条件により低温割れが危惧されます。直後熱は、溶接後の拡散性水素を除去することで低温割れ防止に寄与します。各種材料の低温割れ防止のための直後熱条件を図 5 に示します。直後熱の条件は鋼種により若干相違はありますが、温度は一般的に 200～400℃が採用されます。

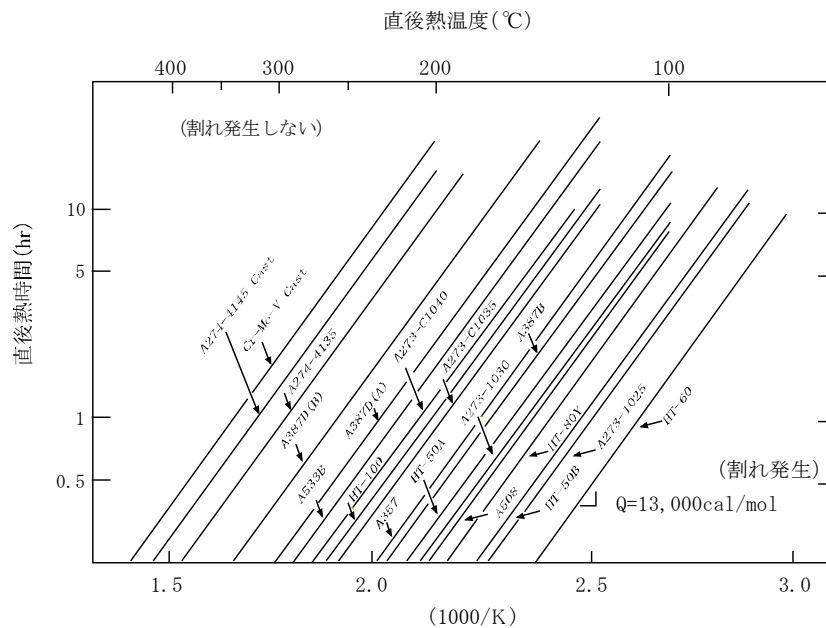


図5 各種鋼材の低温割れ防止のための直後熱温度と保持時間

4.2 きずの除去

4.2.1 きず除去の際の亀裂進展防止

疲労亀裂及び母材が脆化した状態できずを除去する時は、きずの除去作業で亀裂が進展しないための対策として、きず先端をドリルなどで丸みを持たせたストップホール法（図6）によるきず除去の方法があります。

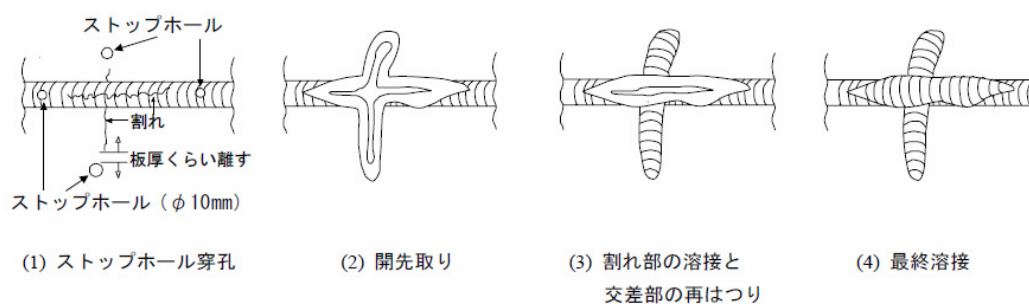


図6 亀裂進展防止のストップホールと溶接補修の例

4.2.2 熱的方法によるきずの除去

熱的方法（エアアークガウジング）によりきずを除去することにより、硬化層の深さは図7に示すように表面から約0.5mmの深さにおよぶことから、肉盛補修溶接をせずに継続使用する場合は、熱影響による変質層及び硬化層を機械的方法によって表面から1mm以上研削除去します。

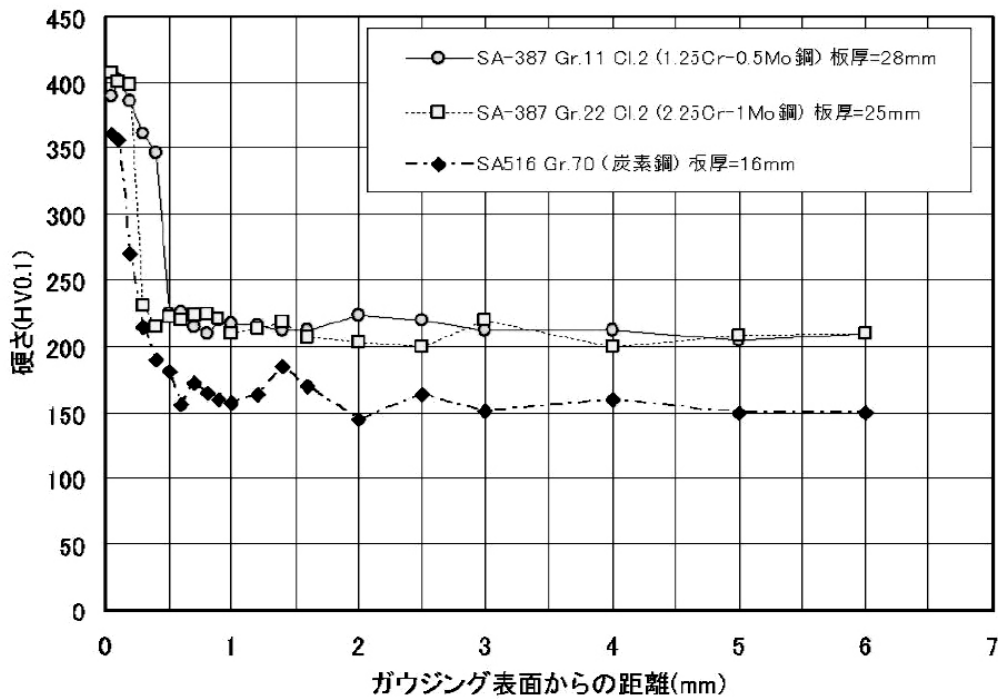


図7 各種鋼材（板厚16～28mm）におけるエアアークガウジング面の硬さ例

4.3 窓形溶接補修時の拘束割れ防止

4.3.1 インサートプレートの形状

インサートプレートの大きさは溶接部の残留応力に大きな影響を与えます。図8に示すようにインサートプレートの直径が約80～100mmの場合に残留応力が大きくなりがちです。インサートプレートの形状は、このような過大な残留応力の回避および欠陥が残存しないことを目的として、図3「窓形溶接補修の概念図」に示した形状が推奨されています。

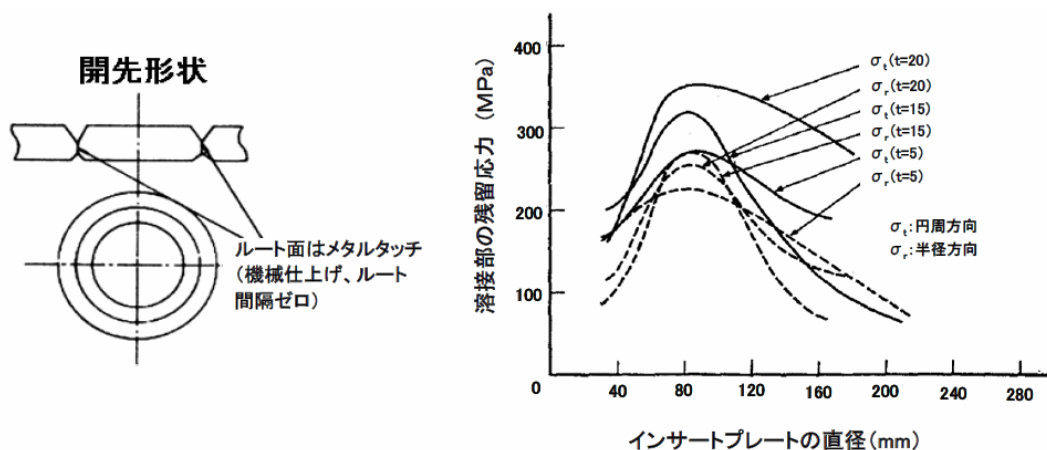
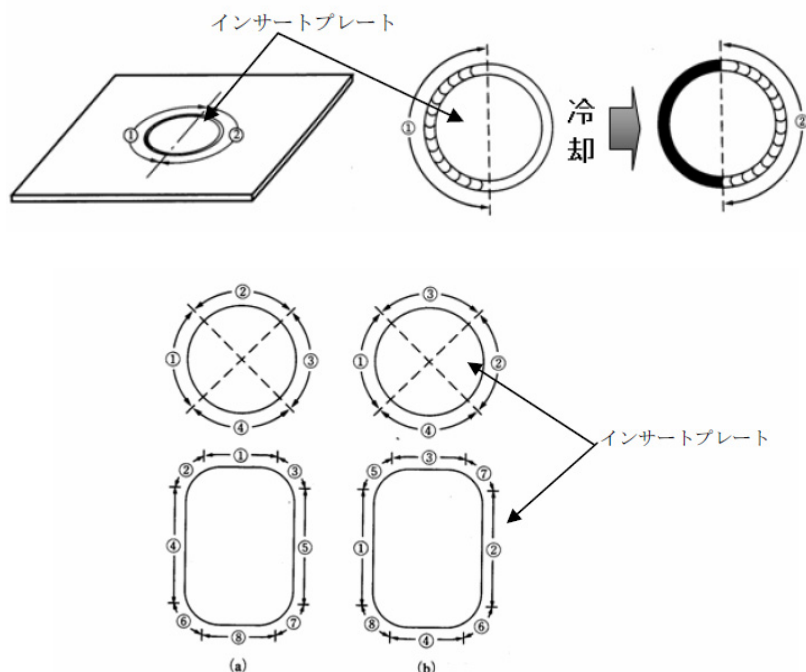


図8 インサートプレートの直径と溶接部の残留応力の関係

4.3.2 インサートプレートの溶接方法

はめ込み方式による窓形溶接補修の場合、継手の拘束が大きくなると割れが発生しやすくなります。

このため、溶接順序や積層方法並びに溶接分割法を配慮した溶接施工を採用したり、ルート間隔を極力小さくして溶着量を減少させて収縮量を軽減させることで溶接時の割れの危険性の低減を図ることができます。拘束力を低減させる施工のポイントを図9に示します。



- ・適切な分割数にて溶接をおこなう
- ・インサートプレートの直径が 250mm～300mm 以上の場合は、2 分割以上として割数を増やす
- ・溶着方法は、ブロック法、カスケード法を採用
- ・板厚の 1/2 程度までは連続して積層し、収縮に対する割れ抵抗を増す

図9 窓形溶接の溶接方法

5. 圧力設備の溶接補修事例

プラントの圧力設備は設備の安全・機能維持を目的とした設備検査が行われ、何らかのキズや欠陥が検出され、次回の検査まで安全に運転することが担保できない場合、設備の再生として溶接補修が行われます。ここでは、圧力設備の外面腐食検査に基づき行った肉盛溶接補修事例について紹介します。

5.1 機器仕様

形状：40m（高さ）×3.5m（内径）×（32～50mm：板厚）

材質：SB480

溶接後熱処理条件：板厚及び使用環境から溶接後熱処理が要求される

5.2 補修計画

本工事では、設備検査により検出された外面腐食範囲に対し、将来も見込んで安全に設備を稼働する目的で肉盛溶接補修と溶接後熱処理による溶接補修要領としました。前述の通り、既設設備の溶接補修の場合、①長期使用に伴う材料の脆化による損傷の再発、②使用条件を考慮した材料・溶接材料の選定、③溶接後熱処理の要否、④溶接後熱処理が不可能な場合の代替策、⑤稼働中の損傷再発防止のための溶接後の硬さ制限、等々を考慮した補修対策を立案する必要があります。本補修工事では、長期使用に伴う材質変化、プロセス流体による応力腐食割れの有無の確認および補修箇所が機器の中段（高さ：約 20m）であることによる溶接後熱処理の安全性の検討を含めた補修計画が行われました。

5.3 既設材の材質変化状況の確認

溶接補修に先立ち、肉盛溶接範囲及びその周辺の溶接部の目視検査、磁粉探傷試験、母材の組織変化（SUMP）／微細割れ等の確認、強度低下の確認を目的とした硬さ測定を行い、既設材に対する溶接補修上の問題は無いことが確認されました。

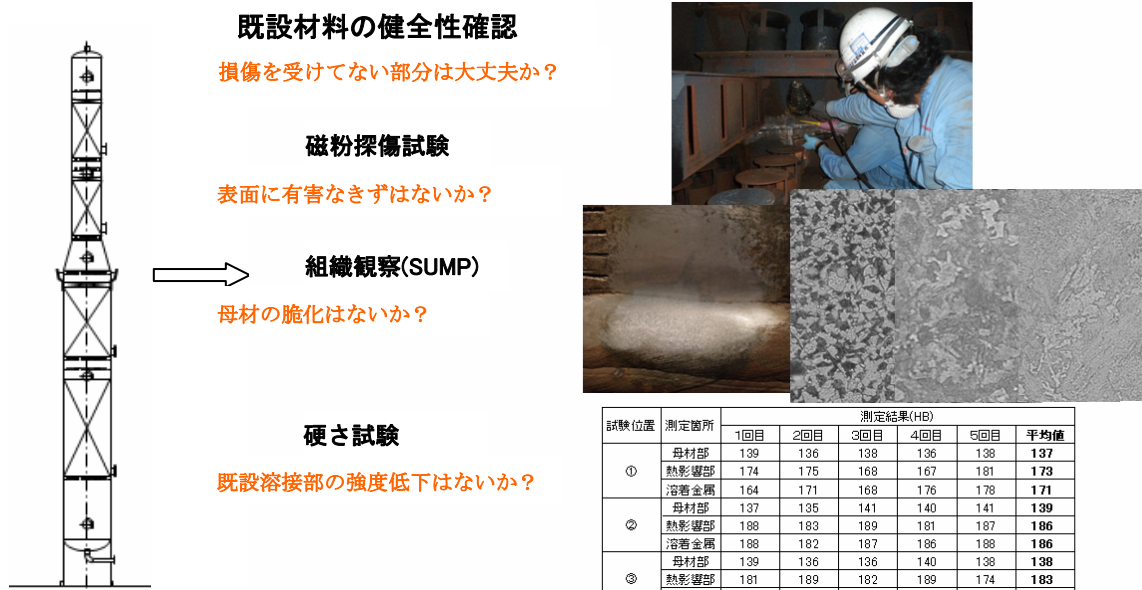


図 10 既設材の材質変化状況の確認

5.4 肉盛溶接補修及び溶接後熱処理の検討

本圧力設備は、法規及び供用中の溶接部の割れ防止を目的としたエンジニアリング観点からも溶接後熱処理を要する設備です。肉盛溶接補修箇所は機器の中段に位置し、広範囲であるため、全周に亘る局部溶接後熱処理が必要となりました。ただし、規定の熱処理温度（600℃）では座屈等による危険性があるため、表 2 に示す特定設備検査規則関係の例示基準（別表第 5）に基づき、加熱温度を低減して加熱時間を延長した熱処理条件（490℃×10 時間）を採用しました。施工状況を 図 11 および 図 12 に示します。

表 2 特定設備検査規則関係の例示基準（別表第 5）

別表第 4 の右欄に掲げる温度と当該炉内の温度との差	定数
0 °C	1
30 °C	2
60 °C	3
(90) °C	(4)
(120) °C	(5)

- 備考 1 かっこ内の値は、炭素鋼についてのみ適用する
 2 表中の値の中間値は、比例計算によって計算する



図 11 溶接補修作業の実施状況（外面肉盛溶接、仕上げおよび検査）

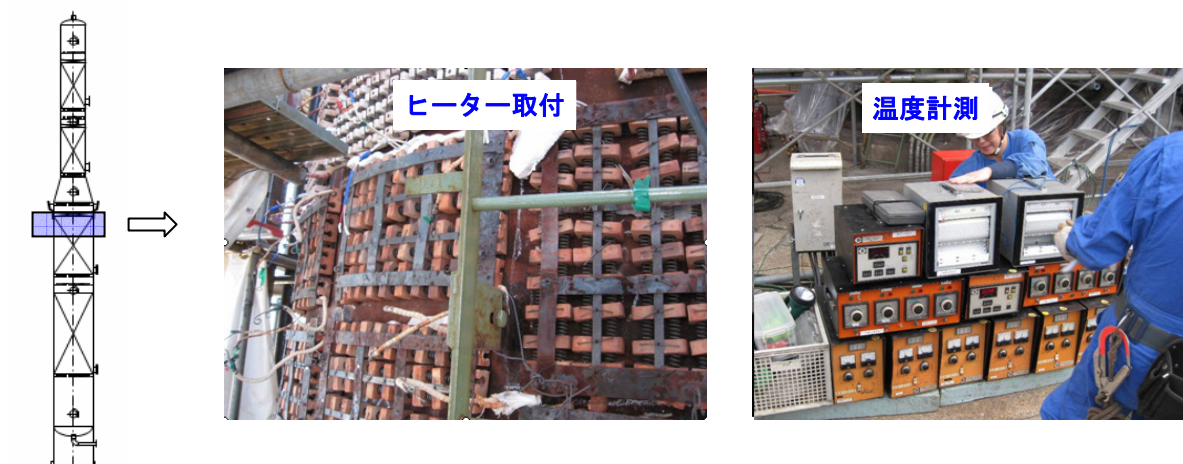


図 12 現地での溶接後熱処理の実施状況

6. おわりに

プラント圧力設備の溶接補修は、材料の損傷解析技術・溶接施工技術・検査技術並びに現地工事における制約条件（場所・工程）を加味して対策を講じなくてはならない等、工学的な知識以外に、事例を通じて得た知見・経験を要し、これが技術の継承にも困難さをもたらしているものと思います。今後は、プラント圧力設備の溶接補修技術の信頼性向上のため、これまでに経験してきた数多くの溶接補修実績の情報の共有化を図る仕組みが期待されます。

参考資料

日本溶接協会規格	WES 7700-1	圧力設備の溶接補修	第1部：一般
日本溶接協会規格	WES 7700-2	圧力設備の溶接補修	第2部：きず除去と肉盛溶接補修
日本溶接協会規格	WES 7700-3	圧力設備の溶接補修	第3部：窓形溶接補修
日本溶接協会規格	WES 7700-4	圧力設備の溶接補修	第4部：外面当て板溶接補修

以上

<略歴>

1980年 東海大学 工学部 金属材料学科 卒業

1980年 新潟工事株式会社入社 技術センター配属

2000年 新潟工事株式会社と三興製作所株式会社が合併し、新興プランテック株式会社となる

現在 技術本部 本部長