

溶接管理技術者の体験紹介

SUS316LT チューブの粒界割れに関する対策例

株式会社三井E & S マシナリー
三 隅 勝 正

1. はじめに

各種プラント向け圧力容器などの製缶機器を製作する場合、プロセス流体の腐食性に応じて選定された各種材料を取り扱うことになる。また、これら各々の材料については、その特性に応じて、製造工程中の取り扱いに特別な配慮や検討が必要となることがしばしばある。

ここでは、圧力容器に用いられるステンレス鋼としては一般的である SUS316L を使用したチューブラーリアクタの溶接施工に関するトラブルシューティング事例を紹介する。

本事例においては、事前検討段階において生じたトラブルに関して、溶接工程のみならずその関連工程、機器を製作する工場内で使用する治工具、更には材料メーカーの製造工程にまで調査範囲を拡大し、原因の推定と再現テストによる検証を経て対策を講じることにより、実機の溶接施工においてはトラブル無く要求品質を満足する結果を得た。

溶接施工で発生したトラブルの原因を様々な角度からのアプローチにより究明し、解決した事例の一つとして、参考にして頂ければ幸いである。

2. 背景

対象となるチューブラーリアクタは化学プラント向けであり、構造としては固定管板型熱交換器に類似している (図 1¹⁾)。従ってチューブの管板への取付溶接は熱交換器同様、極めて重要な溶接接手であり、当該機器にはストレンクス溶接 (初層ノンフィラー+2 層ティグ溶接) が採用されていた。

このストレンクス溶接には、継手の重要性から客先仕様としてモックアップテスト (実機と同じ材質の組み合わせ・寸法形状で小規模なテストピースを作製し、各種試験によって溶接施工法と溶接士の技量を事前に確認するもの) を実施することが要求されていた。

今回のトラブル事例は、このモックアップテストにおいて発生したものである。

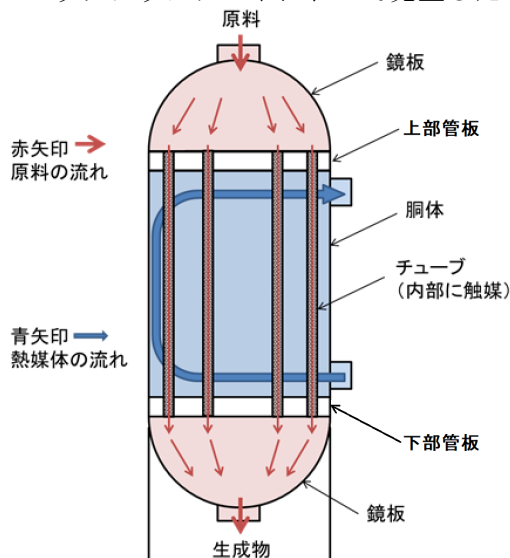


図 1 チューブラーリアクタの構造

3. モックアップテスト仕様

(1) テストピース

テストピースは、管板を模した SUS316L 板 (150mm×150mm×t30mm) に設けられた 7 個の管穴にチューブ (工事用予備から充当した SUS316LTB 管) を挿入し、共金系となる 316L ティグ溶接材料を用いてストレングス溶接を施工したものを、当該ストレングス溶接に従事する溶接士の人数分となる 8 セット準備した。また、機器に組み込まれるチューブサイズが 2 種類あったため、8 セットの内訳を O.D. 36.0mm×t 3.0mm のチューブ用に 7 セット、O.D. 38.1mm×t 2.6mm のチューブ用に 1 セットとした。

溶接後の外観を図 2 に示す。



図 2 溶接後のモックアップテストピース外観

(2) 試験項目と目的

- (a) 浸透探傷試験：溶接部表面の欠陥検出
- (b) 超音波探傷試験：溶け込み深さ確認
- (c) 放射線透過試験：溶接部の内在欠陥検出
- (d) 引抜き試験 (中央部④のチューブ)：溶接部強度の確認
- (e) 断面マクロ試験：ルート部の溶け込み状態確認
- (f) ミクロ組織試験：溶接部および近傍組織の健全性確認とミクロ割れ検出

4. トラブル事象

断面マクロ・ミクロ試験において、チューブの断面に微細な粒界割れが確認された。割れはチューブ内面側に 2 箇所発生しており、1 箇所はチューブ内面に開口し (図 3)、もう 1 箇所はチューブ内面付近に内在した状態であった。また、割れが確認されたのは、O.D. 36.0mm チューブ用のテストピース 1 個のうち、1 本のチューブのみであった。

割れの大きさとしてはごく微細であり、発生位置を考慮すれば溶接部の品質評価に直接影響を及ぼすとは考えにくいものであった。しかしながら、この割れが工事用予備から充当したチューブ材に発生していたことから、チューブ材そのものの品質を確認する必要性も生じたため、調査を実施することとした。

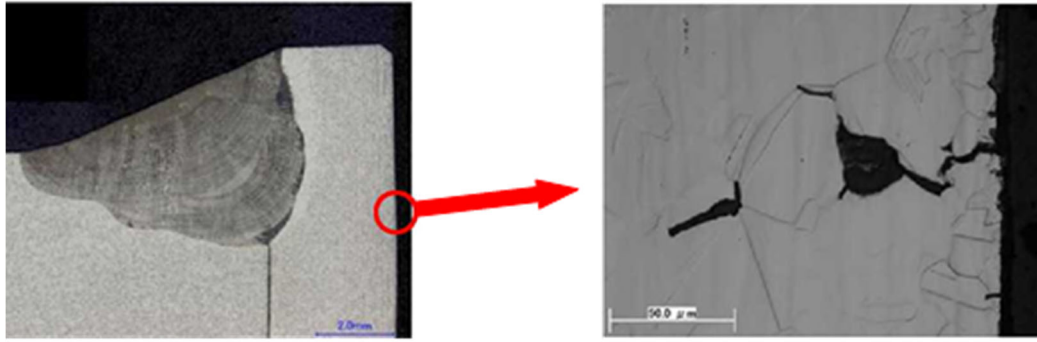


図3 断面マクロ・マイクロ試験により検出された粒界割れ

5. 調査内容

割れの原因を究明するために、あらためて各種試験を実施した。また、その結果を踏まえ、機器製作工場ならびにチューブメーカーの工場までを対象範囲に含め、調査を実施した。

(1) 断面マイクロ組織試験

- (a) 前述した2箇所の割れのうち、チューブ内面側に内在した状態のものについて、試料を研磨代0.1mm単位で再研磨を繰り返して観察したところ、チューブ内面側に割れが繋がった(図4)。
- (b) 他のチューブの断面試験試料を用いて、再度マイクロ組織試験を行ったが、同様の粒界割れは認められなかった。

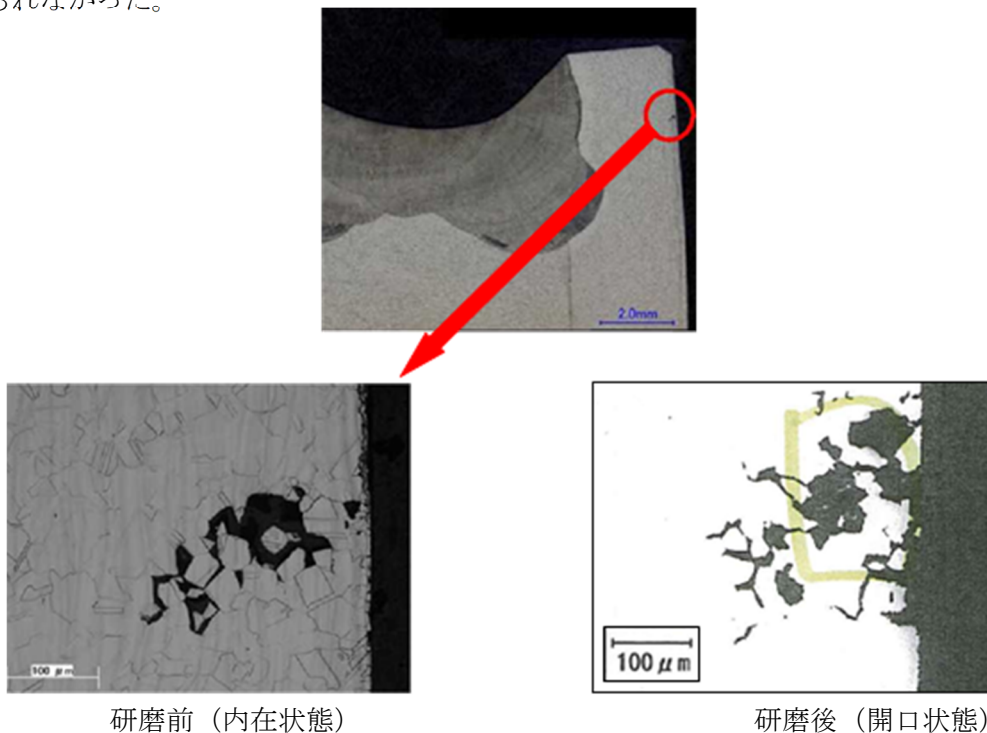


図4 内在している状態で観察された粒界割れ

(2) EPMA分析

- (a) 割れ内部につまったスケールからFe、O(酸化物)が検出された。
- (b) 割れ近傍からZnが検出された。Znは表面付近に多く、粒界に侵入した形跡が認められた。また、AlやSiも検出された。

(3) 工場内調査

EPMA 分析で検出された Zn・Al・Si の由来を特定するため、チューブメーカーの工場ならびに機器製作工場について調査を実施した。結果は次の通りであった。

- (a) チューブ製造工場においては、製造、検査、運搬等でチューブ材に接触する可能性のある設備、治工具および資材を管理対象とし、低融点金属含有量のチェックと規制を行っていることが分かった。これにより、Zn を含む不純物がチューブに混入する可能性は極めて低いと判断した。
- (b) Al や Si については、チューブ製造工場内において造管後試験前処理の研磨工程（研磨剤には Al や Si が多く含有されている）で付着し残留したものと判断した。
- (c) 機器製作工場においては、工程内で使用する次の治工具を除き、Zn などの低融点金属がチューブに接触・付着することはないことを確認した。

- ① 拡管工程で使用するエキスパンダーの真鍮製*キャップナット
- ② 溶接時の真鍮製アースランプ

*当該部品の材質はメーカー報告より、JIS H3250 C3604B（6:4 黄銅）であることを確認。

JIS H3250 C3604B : Cu 57.0-61.0%, Pb 1.8-3.7%, Fe ≤ 0.7%, Zn Rem.

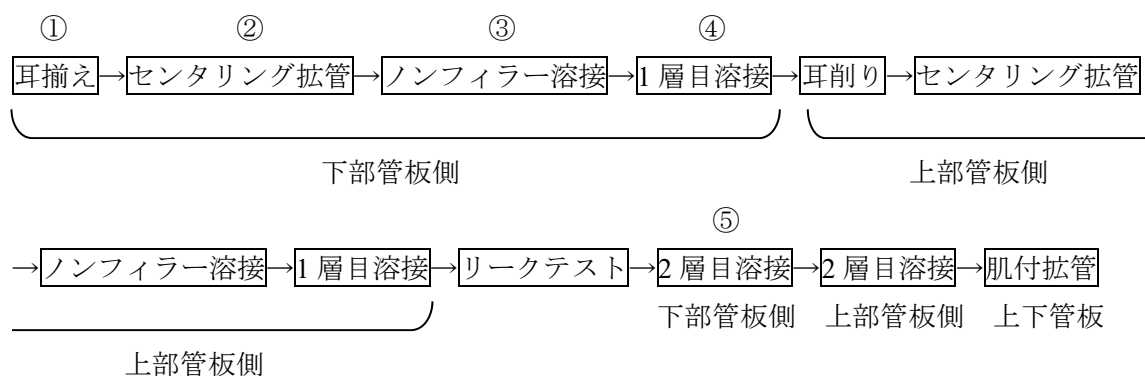
6. 原因推定

調査の結果から、今回の割れの特徴および要因をまとめると次の 3 点となる。

- (a) チューブ内面からの粒界割れである
- (b) 亜鉛が検出されている
- (c) エクスパンダーに真鍮製キャップナットが使用されている

以上の 3 点から今回の割れはモックアップテストのチューブ取付工程で発生したと考え、原因を推定した。

なお、実機のチューブ取付工程の作業手順を図 5 に示す。図中の①～⑤はモックアップテストピースにおける作業手順*を示す。



*モックアップテストピースでは、代表して片側のチューブ取付工程のみ、実機と同じ作業手順通りに行った。

図 5 チューブ取付工程の作業手順

チューブ取付工程より、次のように割れ発生に至る経緯を推定した。

- (i) センタリング拡管時にエキスパンダーのキャップナットがチューブ内面に接触
- (ii) キャップナットがチューブ内面に擦れて、真鍮が付着
- (iii) 付着した真鍮が、センタリング拡管によりチューブ内面に圧着

- (iv) 溶接時の熱で低融点の亜鉛が溶融し、チューブ材の粒界に侵入
- (v) 溶接時の冷却過程において、チューブ内面に引張応力が発生
- (vi) 亜鉛が侵入した粒界は相対的に周囲より結合力が低下し、割れ発生

7. 再現テスト

原因推定をもとに、再現テストを計画・実施した。

モックアップテストピースの予備材を使用して各種条件のもとでチューブ取付溶接を行い、断面マイクロ組織試験および EPMA 分析にて粒界割れの再現性を確認した。

(1) キャップナットをチューブ内面に擦りつけた後に溶接した場合

キャップナットをチューブ内面に擦りつけている状況を図 6 に示す。キャップナットはチューブ端面から約 25mm の範囲を、チューブ内面全周にわたって擦りつけた。擦りつけた後のチューブ内表面には擦れた跡が残っているが、目に見えて真鍮が削れている様子や、深さのある傷も見受けられなかった。

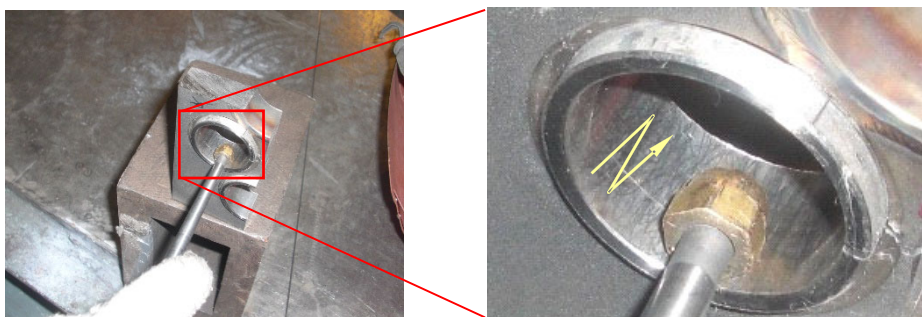


図 6 キャップナットをチューブ内面に擦りつけている状況

この後、ノンフィラー溶接、フィラーワイヤーを使用して 2 層の溶接を行った。

(2) キャップナットを削って粉状にした場合

(a) 金属粉をチューブ内面に置いて溶接した場合

金属粉をチューブ内面に置いて溶接した状況を図 7 に示す。溶接後の写真からは溶接時の熱で金属粉が変色しているのが分かる。



溶接前

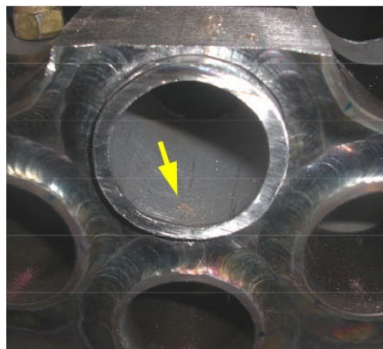
溶接後*

図 7 金属粉をチューブ内面に置いて溶接を行った状況

*本テストはモックアップテストの溶接済み練習用 TP を流用して行ったため、「溶接後」とは、練習溶接ビードの上からノンフィラーでリメルトした状態を示す。

(b) 金属粉を置いた上から拡管を行った後に溶接した場合

金属粉を置いた上から拡管を行った後に溶接した状況を図 8 に示す。拡管後の写真からは金属粉がチューブ内面に押し付けられて、引き伸ばされている（チューブ内面が若干変色している）のが分かる。



拡管前



拡管後



溶接後

図 8 金属粉をチューブ内面に置いた上から拡管後に溶接を行った状況

(3) 溶接時のチューブ内表面温度計測

Zn が粒界に侵入した温度条件を確認するため、ストレンクス溶接時のチューブ内表面の温度を計測した。計測には接触式温度計を使用したため、チューブを半分に切断したテストピースを用いて行った。温度計測状況を図 9 に示す。



図 9 ストレンクス溶接時のチューブ内表面温度計測の状況

温度計測の結果、ストレンクス溶接時にはチューブ内表面は容易に 400℃以上に達することが分かった。

8. 再現テスト後の調査

再現テスト後のテストピースはそれぞれ断面マイクロ組織試験と EPMA 分析を行った。結果は次の通りであった。

(1) キャップナットをチューブ内面に擦りつけた後に溶接した場合

(i) ミクロ組織試験

該当チューブを全周 7 断面において断面観察を行ったところ、7 断面中 1 断面に粒界割れが認められた。

(ii) EPMA 分析

割れが見られた部位近傍のチューブ内表面について EPMA による面分析を行ったところ、割れの近傍から Cu と Zn が検出された (図 10)。

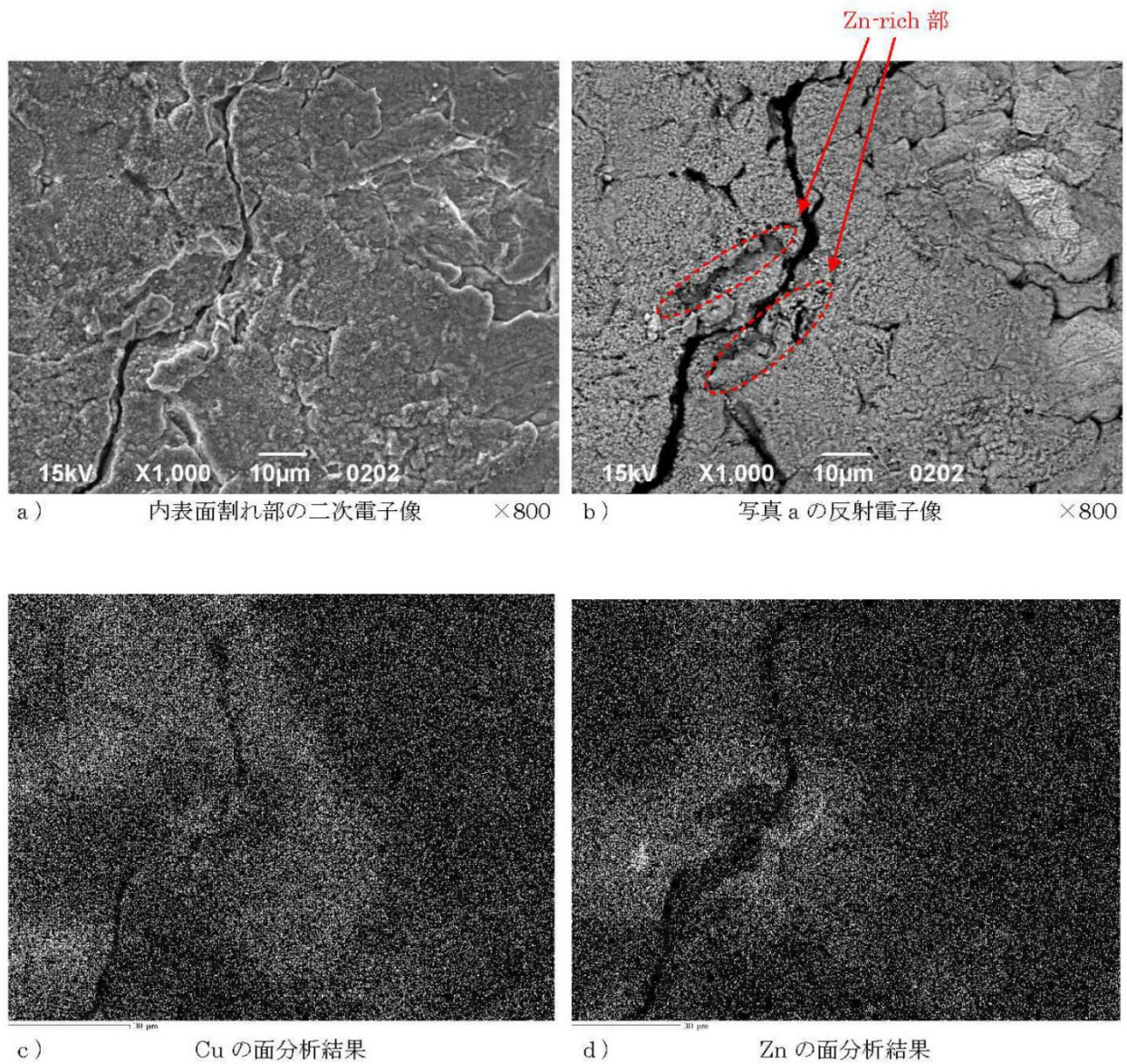


図 10 再現テストによる粒界割れ部の EPMA 面分析結果

(2) キャップナットを削って粉状にした場合

(a) 金属粉をチューブ内面に置いて溶接した場合

(i) ミクロ組織試験

該当チューブ上の 5 断面において断面観察を行ったが、いずれの断面にも割れは確認されなかった。

(ii) EPMA 分析

前項にて割れが確認されなかったため、EPMA 分析は行わなかった。

(b) 金属粉を置いた上から拡管を行った後に溶接した場合

(i) ミクロ組織試験

該当チューブ上の 4 断面において断面観察を行ったところ、2 断面に割れが確認された (図 11)。

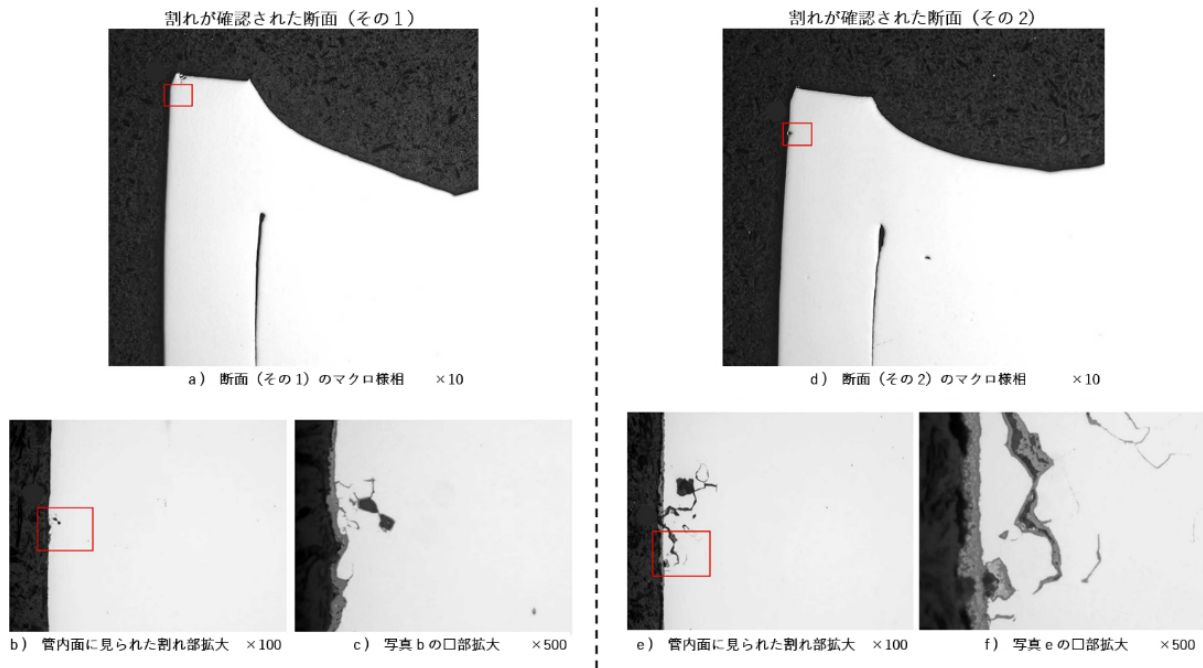


図 11 再現テストにより発生した 2 箇所の粒界割れ

(ii) EPMA 分析

割れが確認された断面について EPMA による面分析を行ったところ、割れ近傍のチューブ内表面層から Cu と Zn が検出された。またその部分について定性分析を行ったところ、Cu は 4.31wt%、Zn は 18.97wt% という結果が得られた。

9. 考察

再現テストの結果から、キャップナットとチューブ内面の接触による Zn の付着が粒界割れの原因であったことが裏付けられた。ただし、キャップナットとチューブ内面が接触後に溶接すれば必ず割れが発生するというものではなかった。これは、チューブ内面とキャップナットの材質に硬さの差はあるものの、これら金属どうしの接触のみでは容易にキャップナット材の一部がチューブ内面に付着することがないためと推測できる。また、キャップナットの金属粉がチューブ内面に付着しただけの状態と、その上から拡張でチューブ内面に押し付けた状態では、溶接後の割れ発生確率が全く異なることから、真鍮製キャップナットの金属粉がチューブ内面に付着しているときの状態が割れの発生し易さに大きく影響することが分かった。

参考までに、割れ発生確率を各条件のもとで比較してみると次のようになる。

再現テスト

<割れが確認された断面数 / 試験断面数>

| | |
|-----------------------------|---------------|
| キャップナットをチューブ内面に擦りつけた後に溶接 | : 1 / 7 = 14% |
| キャップナットの削り粉をチューブ内面に置いた状態で溶接 | : 0 / 5 = 0% |
| キャップナットの削り粉の上から拡張で押し付けた後に溶接 | : 2 / 4 = 50% |

モックアップテスト

<割れが確認されたチューブ本数 / 断面試験を行ったチューブ本数>

$1 / (6 \times 8 \text{ ブロック}) = 1 / 48 = 2\%$

キャップナット材のチューブ内面への付着し易さを定量的に評価するのは難しいが、再現テスト結果を踏まえ、キャップナット材のチューブ内面への付着し易さに影響する因子を次のように推測する。

- ① チューブ内表面の状態
 - ・滑らかであるか？ザラザラしていないか？
 - ・引っかかりのある傷は無いかな？
- ② キャップナットの状態
 - ・表面が滑らかであるか？ザラザラしていないか？
 - ・工場在庫エキスパンダーの場合、傷まみれになっていないか？
 - ・鋭いエッジが無いかな？
- ③ キャップナットがチューブ内面に接触するときの状態
 - ・どのくらいの強さで当たったか？
 - ・どのくらいの角度で当たったか？

真鍮製キャップナットの金属粉の付着し易さと併せ、今回のような粒界割れが発生する可能性が高い条件を要因別に表 1 にまとめる。

表 1 粒界割れが発生する要因と可能性

| 要因 | 相対的に粒界割れが発生する可能性 | |
|----------------------------------|------------------|-------------|
| | 高い | 低い |
| キャップナットの材質 | 真鍮 | ステンレス・炭素鋼 |
| センタリング拡管 | 有り | 無し |
| 金属粉の付着箇所 (開先深さ：2mm、突出し：3.5mm) | 管端から 6mm 未満 | 管端から 6mm 以上 |
| センタリング部の清掃 | しない | する |

可能性が高い条件が全て重なっても割れが発生するとは限らないが、可能性が低い条件が全て揃えば、今回と同様の割れが発生する可能性はほぼ無いと判断した。

いずれにしても、チューブの製造過程から機器製作工程を通してチューブに Zn が接触・付着する可能性はエキスパンダーのキャップナットを除いて他には見付かっていないことから、Zn の由来がキャップナットであると判断することは妥当と考えられる。

10. 再発防止対策

今回の割れの原因を、キャップナットの接触によるチューブ内面への Zn 付着として、再発防止対策を次のように策定した。

(1) チューブ取付工程

エキスパンダーのキャップナットはステンレス製に交換した。ただし、メーカー標準品*である真鍮製に比べて部品の硬さが硬くなるのに伴い、チューブ内面への傷発生リスクが高くなる。従って、当該リスクに対しては、さらに次の対策を講じた。

*チューブへの接触ダメージを軽減するために、硬さの低い真鍮を採用している。

- (a) エキスパンダーを挿入・抜き出しする際には、ナット部分がチューブ内面に極力当たらない様に十分慎重に作業することを、作業者に指示した。
- (b) 作業開始時、中断時及び再開時にはチューブ内面を目視確認し、拡管前後で傷が無いことを確認することを、作業者に指示した。
- (c) 上項の注意喚起のため、特にチューブ内面への傷防止について、作業場所（または機器本体）に注意点を掲示し、傷防止に対する意識を向上させた。

(2) その他の溶接工程

機器側に溶接時のアースクランプを取り付ける場合は、ステンレス鋼または鋼製の板をはさむことにより、真鍮製クランプから Zn などの低融点金属がステンレス鋼の部材に直接接触しないようにした。また、本体に後工程で除去する治具などが取り付けられているときには、治具材など本体以外の部分にクランプを取り付けるようにした。

11. 対策の有効性確認

機器の製作工程においては、再発防止対策を徹底することにより粒界割れの発生を防止することに成功し、対策の有効性が確認された。

今回の再発防止対策は、以降のステンレス鋼製機器製作にも水平展開を継続中である

参考文献

- 1) 一般社団法人 日本溶接協会 WE-COM マガジン第 23 号 特集「チューブラーリアクターの構造と溶接」

三 隅 勝 正 (みすみ かつまさ) 溶接管理技術者特別級

<略歴>

1995 年 山口大学 工学部 生産機械工学科 卒業

1995 年 三井造船株式会社 (現 株式会社 三井E & S マシナリー) 入社
玉野事業所 生産総括部 溶接技術グループ配属

2012 年 機械工場 生産計画部 プロセス機器グループ /グループ長

2015 年 同 製造部 溶接課 産業機械グループ /グループ長

2018 年 同 産業機械品質保証部 品質管理グループ /グループ長

現在に至る