

溶接管理技術者の体験紹介

アルカリ SCC 対策としての PWHT 温度について

元 ENEOS 株式会社  
高 安 潤

1. はじめに

筆者は、石油精製会社の溶接管理技術者として勤務している。過去の経験から溶接施工に関わるトラブル事例として、石油精製装置の応力腐食割れ (SCC) を紹介し、その推定メカニズムと、その事後対策について以下に紹介する。読者の皆様の参考になれば幸いである。

2. トラブル事例の概要

石油精製装置のガス回収系 (LPG 洗浄系) のブタンソーダスクラバー (ガス処理装置) のタワーにおいて、機器開放時にシェル内面からの磁粉探傷試験 (MT) を実施したところ、次項に詳細を示すように溶接線近傍で複数の割れを確認した。

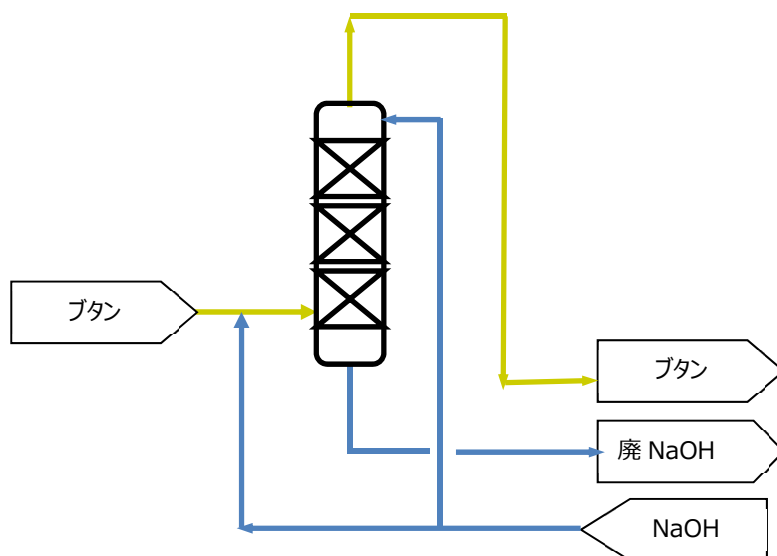


図1 ブタンソーダスクラバータワーの概略フロー

<機器仕様と運転条件>

図1に示すブタンソーダスクラバーのタワーの仕様と運転条件は下記の通りであった。この装置は、ブタンガスをソーダ (NaOH) で洗浄し、精製してブタンガスに含まれる硫化水素等の不純物を取り除くためのものである。

- サービス : C4 (ブタン)、NaOH (21wt%)
- 設計温度 : 55°C
- 設計圧力 : 1.89MPa
- 運転温度 : 40°C

- シェル母材規格：SB410-SR 厚さ 17mm
- 更新年：1987 年 当初の機器の溶接部に割れを確認したため、溶接後熱処理（PWHT）仕様にて更新した。

### 3. 検査結果

溶接線近傍で確認された複数の割れの検査結果は、以下の通りであった。

- 機器外面からの超音波肉厚測定により、シェル肉厚は 17.3～17.5mm であり減肉は認められなかった。
- 内面からの MT により図 2 に示すようなクモの巣状の割れ部が確認され、図 2 の□赤枠箇所の硬度は 165HV（エコーチップによる測定）であった。
- 割れ部断面の代表的なマイクロ組織写真を図 3 に示す。割れは粒界割れの様相を呈している。
- 不具合部（割れ部）の X 線回折による引張残留応力を測定した結果を図 4 に示す。シェル外面にはシェル周方向および軸方向共に圧縮残留応力 116MPa および 166MPa の値が、シェル内面には周方向および軸方向共に引張残留応力 113MPa および 171MPa の値が計測された。

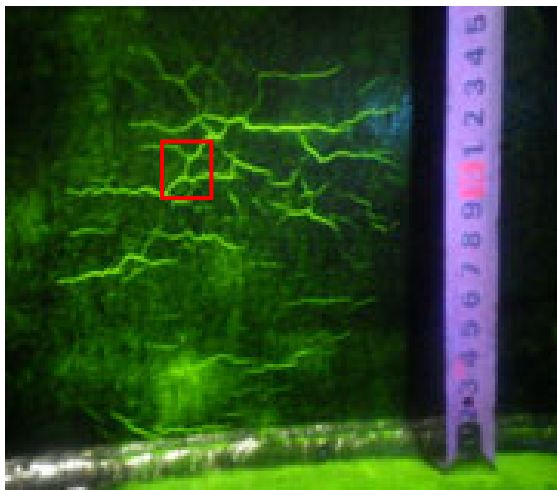


図 2 MT による割れの様相

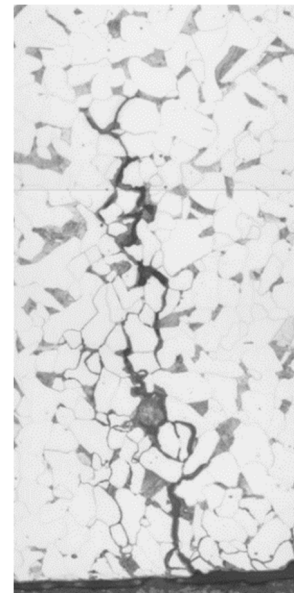


図 3 割れ部断面の代表的なマイクロ組織

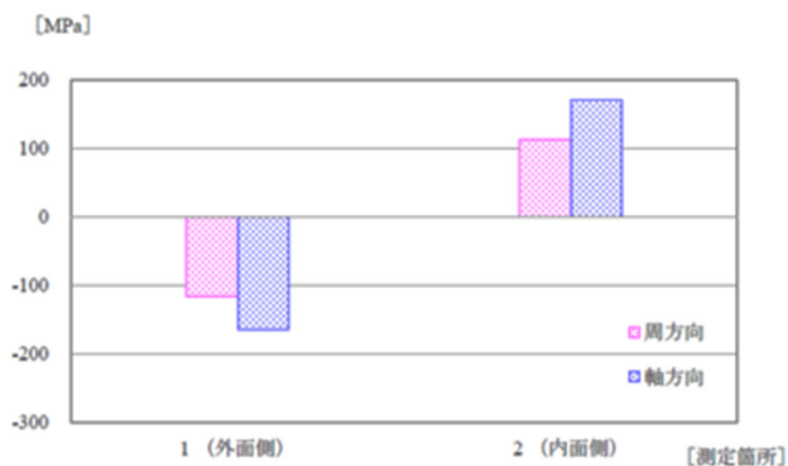


図 4 割れ部の引張残留応力測定結果

#### 4. 割れのメカニズムに対する考察

割れのメカニズムとしては炭素鋼であることと運転条件から以下が挙げられる。

- ① アルカリ応力腐食割れ (アルカリ SCC)
- ② 硫化物応力割れ (SSC : Sulfide Stress Cracking)

割れ部の硬度測定結果は 200HV 以下であり、SSC の可能性は低いと判断した。

また、以下に列記する理由からアルカリ SCC と推定した。

- 割れ部の組織観察結果、粒界割れの様相を確認。
- NACE SP0403<sup>1)</sup> および API582<sup>2)</sup> によるとアルカリ SCC 対策 (引張残留応力低減) の PWHT 温度は  $635 \pm 14^\circ\text{C}$  が必要。
- 当該機器の更新時の PWHT 温度仕様は  $625 \pm 25^\circ\text{C}$  となっており、実際の施工記録を確認した結果、 $620^\circ\text{C}$  で 1 時間保持であった。また、温度測定方法は、機器に熱電対を取り付けて行ったかどうかは不明であった。
- 図 5 は、実装置 (SB49) の X 線回折による軸方向の残留応力と SCC 発生状況とを比較した結果であるが、160MPa 以下の残留応力では SCC の発生はなく、この値は PWHT による残留応力低減の効果を判定する基準として利用できるとされている<sup>3)</sup>。割れ部の X 線回折による軸方向の引張残留応力は 171MPa であり、図 5 に示す SCC 限界応力 (実績値) である 160MPa を超えていた。
- 図 6 は、590MPa 級の高張力鋼 (HT590) の加熱温度と保持時間による残留応力緩和の試験結果を示しているが、残留応力はまず加熱過程で材料の降伏点の低下に従って減少し、PWHT 温度に達すると、その温度における材料の降伏点直下のレベルまで緩和される。さらに、保持期間中にクリープ現象 (高温リラクゼーション) によって残留応力緩和現象が進行する。高温強度の低い鋼材および溶接部では、前者が残留応力緩和の主体とされている<sup>4)</sup>。図 6 は高張力鋼の試験結果ではあるが、炭素鋼 (P1 材) の JIS 等の規格の PWHT 最低保持温度  $595^\circ\text{C}$  を超えて加熱することにより、引張残留応力低減の効果がより期待できる可能性があることが示唆される。
- 当該機器の運転温度は  $40^\circ\text{C}$ 、ソーダ濃度 21wt% であり、NACE SP0403 Figure1 Caustic Service Chart の限界曲線以下であるが、開放時に行う水洗後の温水洗浄時にアルカリ SCC 環境となった可能性がある。1987 年の機器更新前もアルカリ SCC と推定される割れが見つかり、PWHT 仕様で更新している。

以上から 1987 年機器更新時に PWHT 温度  $625 \pm 25^\circ\text{C}$  の仕様で機器を更新したが、引張残留応力が高いところで約 170MPa あり、その結果アルカリ SCC が発生したと推定した。

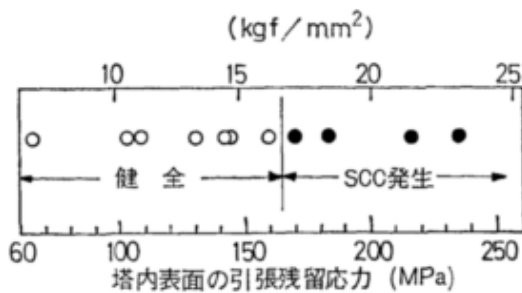


図 5 実装置 (SB49) での SCC と表面残留応力の関係<sup>3)</sup>

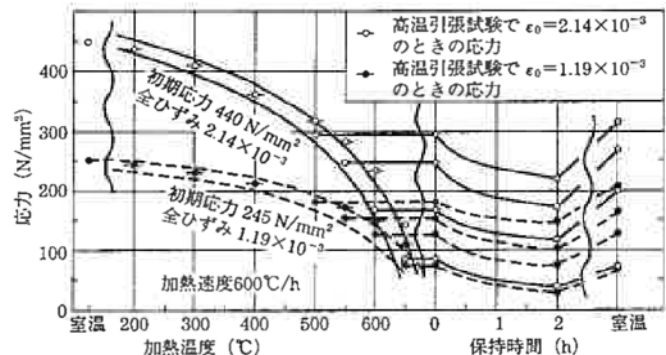


図 6 590MPa 級高張力鋼の応力緩和試験結果<sup>4)</sup>

## 5. アルカリ SCC 発生の真因と対策

アルカリ SCC 発生の真因は、PWHT 温度が不十分であったと考えられる。

JIS を含めて日本の規格においてはアルカリ SCC 対策としての PWHT 温度の規定はない。一方で NACE SP0403 および API 582 にはアルカリ SCC 対策として  $635^{\circ}\text{C} \pm 14^{\circ}\text{C}$  以上で PWHT する必要があることが記載され、またそれ以下の温度に下げて長時間保持する PWHT を行うことは認められていない。

PWHT による溶接残留応力の低減は、残存する弾性ひずみが塑性歪みに変換することによって生じる<sup>3)</sup>。残留応力は PWHT 温度に達するとその温度における材料の降伏応力直下のレベルまで緩和され、さらに保持時間中にクリープ現象によって残留応力の緩和が進行する。軟鋼および溶接部では前者が残留応力緩和の主体である<sup>4)</sup>。

近年、様々な研究により PWHT の温度が低温長時間で可能と考えられ、JIS 等の規格の PWHT 温度が引き下げられているが、アルカリ SCC 対策としての PWHT 温度は NACE SP0403、API 582 の基準を参照して決定する必要がある。

## 6. 当該機器の対策について

割れの見つかった部位を研削削除および肉盛り、または広範囲な箇所ははめ板で部分取替を行い、 $635 \pm 14^{\circ}\text{C}$ にて PWHT を実施した。PWHT 温度は機器に直接取り付けた熱電対にて計測制御した。

その後 MT 検査で割れないこと、また X 線回折法で測定した残留応力が  $20 \sim 30\text{MPa}$  以下となっていることを確認して恒久補修とした。

## 参考文献

- 1) NACE SP0403 (2015) “Avoiding Caustic Stress Corrosion Cracking of Carbon Steel Refinery Equipment and Piping”
- 2) API RP582 (3rd Edition 2016) “Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries”
- 3) 大久保：材料 30 巻(1981)第 337 号 pp963-974
- 4) “溶接後熱処理基準とその解説” 日本高圧力協会規格 (1994)
- 5) 熱処理技術便覧 pp291

### 高 安 潤 (たかやす じゅん) 溶接管理技術者特別級

<略歴>

1986 年 東京工業大学 工学部 金属工学科 卒業

1988 年 東亜燃料工業株式会社 (現 ENEOS 株式会社) 入社 総合研究所配属

2018 年 工務部 設備管理グループ配属 シニア担当マネージャー

2021 年 3 月末で退職し、現在に至る。