

溶接管理技術者の体験紹介

石油精製反応容器の配管部に発生した  
高温損傷の原因調査と補修溶接対応

日本製鋼所 M&E 株式会社  
石垣良次

1. 背景

A社にて26年間使用されてきた石油精製反応容器上部入口ノズルへの接続配管フランジ内面に運転環境から侵入した水素によるブリストア（膨れ）が非破壊検査にて検出された。当該配管は90°エルボの両端に鍛鋼製フランジが溶接にて取り付けられており、その片側フランジにのみ内面に超音波探傷検査（UT検査）にてブリストアが検出された。ブリストアは、高温高圧の水素環境下で使用される炭素鋼や低合金鋼に発生する水素侵食であり、鋼中炭素と環境側から侵入した水素との反応によって生じたメタン（CH<sub>4</sub>）が結晶粒界、炭化物、あるいは非金属介在物界面などに生成し、その内圧でメタンバブルの連結、マイクロフィッシャーの形成しブリストアへ段階的に進行していくものである。

2. 石油精製反応塔(リアクタ)とは

重油水素化分解・脱硫リアクタは付加価値の高いガソリン、軽油などの軽質油を生産するために、硫黄等を含む原料油を触媒の存在下で水素と反応させることによって脱硫、分解精製を行う装置であり、大きいものでは胴部肉厚200mm以上、重量は2,000トン近くになる縦型円筒圧力容器である。リアクタは高温高圧かつ水素環境下で運転されるため、長期連続運転されたリアクタでは運転環境に起因する損傷が報告されている。図1に脱硫リアクタの概要と代表的な損傷事例を示す。

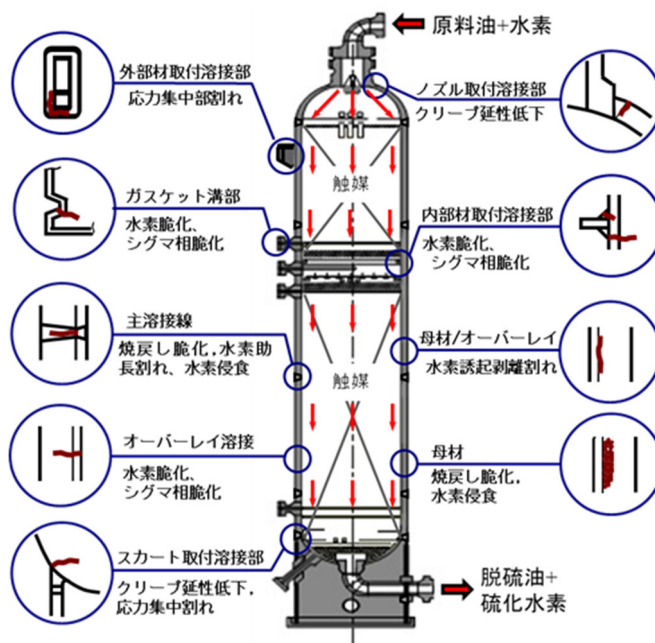


図1 脱硫リアクタ概要と代表的な損傷事例

### 3. 損傷個所の詳細と非破壊試験結果

図2にリアクタ上部入口ノズルへの接続配管の形状を示す。フランジは、材質が ASTM A182-F1 (C-0.5Mo 鋼) 鍛鋼品の配管材である。エルボ材のサイズは外径 267.4 mm、肉厚 18.2mm であり、エルボ材質は JIS STPA12 (C-0.5Mo 鋼)、運転環境は運転温度 450°C、運転圧力 20MPa (204 kgf/cm<sup>2</sup>)、水素分圧 15MPa (153 kgf/cm<sup>2</sup>)、運転時間 86,000 時間である。水素侵食によるブリストアの検出は、欠陥エコー法、減衰法、音速測定法のうち欠陥エコー法を用いて実施した。図3に各検査手法の能力比較を示す。水素侵食検査結果を図4に示すが、得られた健全部の底面エコー部分と比較して水素侵食部では欠陥エコーが細かく複数に立ち上がることから健全部と水素侵食部とは明確なエコーの違いが発生する。

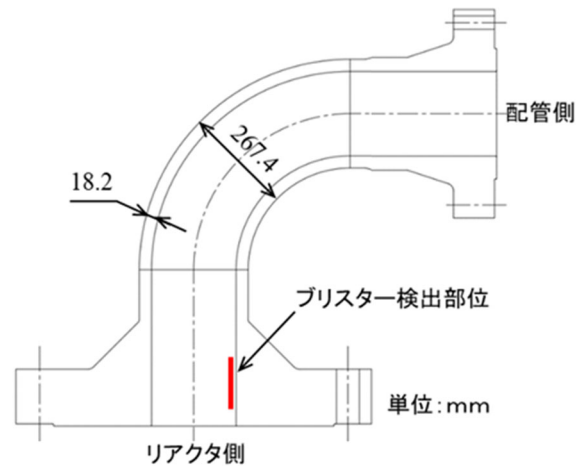


図2 接続配管形状

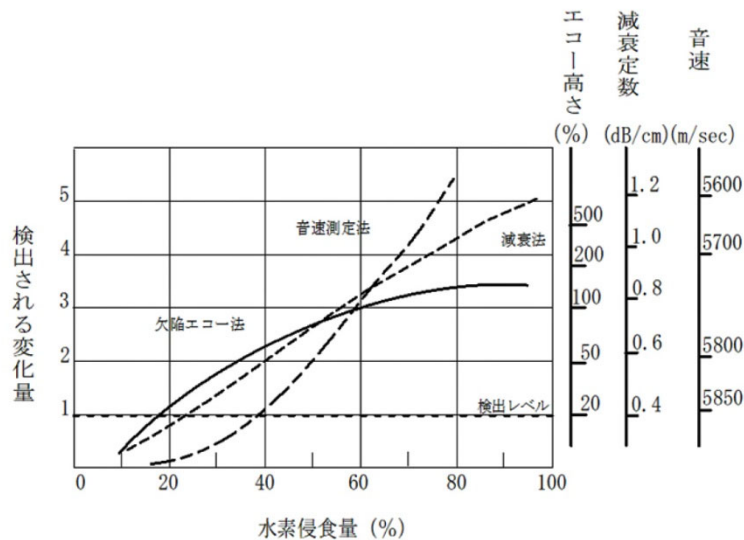


図3 水素侵食と超音波による変化量

**欠陥エコー法** : 水素侵食初期は検出しやすい。水素侵食量が増すごとに変化量が少なくなる。

**減衰法** : 欠陥エコー法よりも水素侵食量が多くなると検出できない。水素侵食量に比例するが、表裏面の影響を受けやすい。

**音速測定法** : 著しく水素侵食を受けないと検出できない。

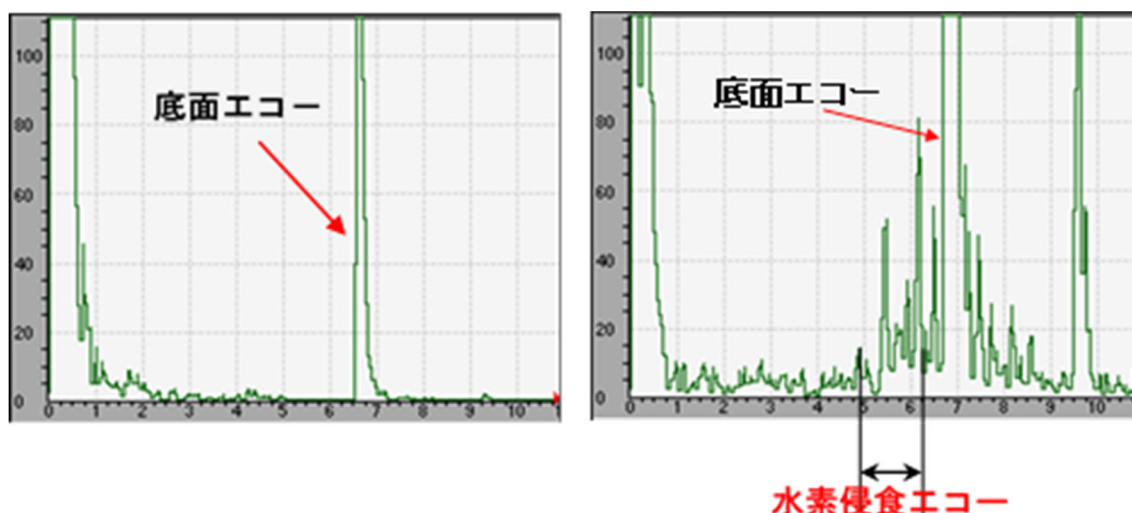


図4 水素侵食検査結果（欠陥エコー法代表波形）

#### 4. 損傷状況の詳細

##### 1) ミクロ組織観察と炭化物分析結果

表1にC-0.5Mo鋼規格値、フランジ及びエルボの化学成分分析結果を示す。結果として、各部品は通常のC-0.5Mo鋼の化学成分値の範囲であった。規格分析値で0.60-0.90は分析値の範囲を表し、単独の数値は最大値を現す。

表1 C-0.5Mo鋼化学成分規格値とフランジ／エルボの分析結果

	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
ASTM A182-F1 規格値	0.28	0.60- 0.90	0.045	0.045	0.15- 0.35	-	-	0.44- 0.65
鍛鋼 フランジ	0.28	0.62	0.008	0.009	0.27	0.11	0.17	0.5
JIS STPA 12 規格値	0.10- 0.20	0.30- 0.80	0.035	0.035	0.10- 0.50	-	-	0.45- 0.65
エルボ	0.14	0.47	0.009	0.01	0.28	0.02	0.01	0.52

ミクロ組織観察結果からエルボ材が初析フェライトと針状ベイナイト組織、損傷が発生したフランジ材は初析フェライトと塊状パーライト組織であり、ミクロ組織に違いが検出された。また、炭化物の周囲には水素侵食によるメタンバブルが認められた。図5に代表的なミクロ組織観察結果を、図6に代表的な水素侵食のメタンバブルを示す。ミクロ組織観察に引き続き両材料の炭化物の違いの確認を実施した結果、エルボ材はFe<sub>3</sub>C型炭化物<sup>1)</sup>の回折線強度が「強い (strong)」であり、水素侵食損傷の発生したフランジ材はFe<sub>3</sub>C型炭化物の回折線強度は「弱い (weak)」であり、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>型炭化物が「強い (strong)」の回折結果が得られた。

M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型炭化物を伴う塊状パーライト組織の生成は水素侵食抵抗性を劣化させることが知られており<sup>1-3)</sup>、この金属組織が本損傷の原因になったと考えられる。

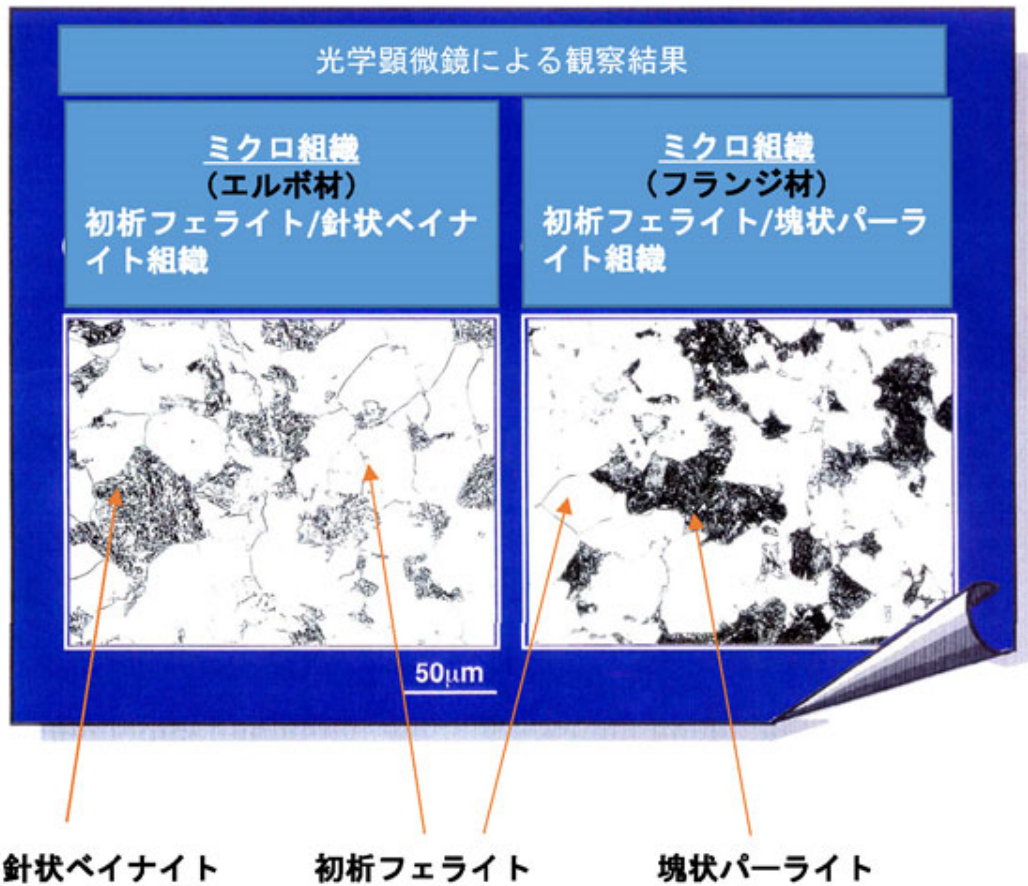


図5 ミクロ組織観察結果

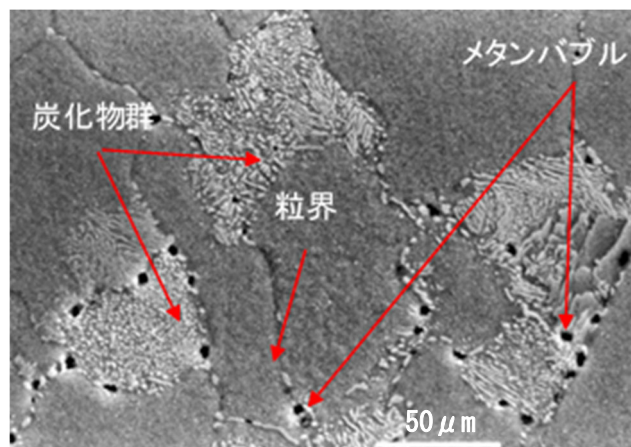


図6 水素侵食によるメタンバブル

## 2) ミクロ組織及び炭化物の変化調査

フランジ材の C-0.5Mo 鋼から厚さ 35 mm の試験材を製作し脱水素熱処理（以下、DHT:Dehydrogenation Heat Treatment）後、900℃のオーステナイト化温度からの冷却速度を 1℃/分、

2°C/分、10°C/分、50°C/分の4条件とし冷却速度の変化に伴う、マイクロ組織および炭化物の変化を調べた。結果を表2に示す。

表2 C-0.5Mo 鋼のマイクロ組織及び炭化物に及ぼす  
オーステナイト化温度からの冷却速度の影響

冷却速度 (°C/分)	マイクロ組織	X線回折結果		
		Fe <sub>3</sub> C	Mo <sub>2</sub> C	M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>
50	F / B	S(強い)	.....	.....
10	F / B	S(強い)	.....	.....
2	F / B / P	S(強い)	.....	W(弱い)
1	F / B / P	S(強い)	.....	S(強い)

(S) : 強い  
(m) : 中  
(W) : 弱い  
..... : 検出されず

F: 初析フェライト  
P: 塊状パーライト  
B: 針状ベイナイト

注記) オーステナイト温度: 900°C  
焼き戻し温度: 620°C

冷却速度の低下に伴いマイクロ組織は初析フェライト+針状ベイナイト組織から、初析フェライト+塊状パーライト組織へ変化すること、およびゆっくりとした冷却速度条件で M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型炭化物が生成することが確認された<sup>1)</sup>。

従って、フランジ実損傷材に認められた塊状パーライト組織と M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型炭化物は、明らかにオーステナイト化温度からのゆっくりとした冷却速度条件で熱処理冷却されたことによって析出したと考えられる。

C-0.5Mo 鋼の熱処理条件にはオーステナイト化温度から空冷する焼きならし (Normalizing) 処理と、炉冷または恒温変態させる焼きなまし (Annealing) 処理とが ASTM 規格で認められており、後者は塊状パーライトを生成する熱処理条件に相当する。また焼きならしであっても熱処理時の肉厚が厚い場合には、冷却速度が遅くなり、M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型炭化物を含む塊状パーライトが生成する場合があります。

## 5. 溶接補修対応

### 1) 脱水素熱処理 (DHT) の実施

低合金鋼において高温高圧水素環境で生じる水素侵食損傷など、水素に起因する割れや水素誘起割れなどの場合、材料内部に拡散性水素が存在し、補修溶接時に遅れ割れなどの発生原因になると考える。その為に、補修溶接作業前に DHT の施工が必要との判断を行い、既設エルボ部分は再利用することから、小型熱処理炉を使用し DHT を 370~400°C、30 時間保持にて実施した。その後内外面のグラインダ手入れを実施し、内外面の浸透探傷検査 (PT 検査) を実施し欠陥の有無を確認した結果、欠陥は検出されなかった。

### 2) 新規フランジの材質とエルボ両端への溶接

開先加工は最小限としルート面 1.6mm、V 開先角度 65 度にて、新規フランジ 2 個を含めて機械

加工を実施した。開先加工面は PT 検査にて欠陥の有無を確認し結果として、欠陥は検出されなかった。新規フランジは水素侵食抵抗性の劣化を防止するため、オーステナイト化温度から空冷する焼きならし (Normalizing) 処理を実施した材料を使用した。

### 3) 被覆アーク溶接の溶接棒管理

溶接施工要領書<sup>1)</sup>では水素に起因した割れであること、および被覆アーク溶接 (SMAW) にて施工することから品質確保を考慮し低水素系溶接棒を使用し、使用前の溶接棒は特に被覆剤の乾燥管理を充分に実施した。補修溶接作業時の温度管理については a) エルボ材が高温高圧水素環境で使用されていたことから、DHT の実施についても水素が完全に抜けきらず鋼中に残留水素が存在する可能性があること、 b) 現場での作業が主体となるので高湿度となりやすいことから補修溶接の予熱・パス間温度については、通常の補修施工では 95~110℃であるが、過去の補修実績経験から、より高い 130~200℃にて温度管理を実施した。

SMAW の溶接棒被覆剤の水分量は放置時間だけでなく、気温および相対湿度の影響が大きいこと、またこの水分増加が溶着金属の拡散性水素量の増加につながる事が分かっており、この水分を除去するため、メーカーで十分に乾燥され包装の行き届いたものであっても、使用前にもう一度乾燥 (再乾燥) を実施した。<sup>3)</sup> 使用した低水素系溶接棒は、一般には使用前に 350~400℃の温度で 30~60 分乾燥するが、今回の溶接補修作業では乾燥温度は高め、乾燥時間は長めを採用した。補修溶接による欠陥の発生を抑制する為に乾燥後、直ちに使用しない時は 120~150℃の温度に保持可能な保管容器に入れておき、ここから取り出して使用した。

### 4) 溶接入熱と予熱

溶接入熱については対象が経年劣化材であることから、補修溶接前に溶接入熱の制限を明確にし、施行前の溶接施工要領書の再確認を監督職と溶接技術者、溶接工と実施し品質トラブルの回避を行った。

DHT は溶接部の冷却速度を遅くして、拡散性水素の放出を促進するので予熱と併用し、遅れ割れ防止対策として実施した。

### 5) 溶接後熱処理 (PWHT) の実施

PWHT の目的には、溶接部の拡散性水素の放出、延性・韌性の改善、硬さ低減、残留応力除去などがあり、溶接部の機械的特性や溶接品質に与える影響が大きいため、補修溶接の実施に当たっては PWHT の要否、可否、方法について十分な検討が必要であった。長期間使用された機器配管の補修溶接に対しては、適用法規の要求と使用環境や材料劣化などを考慮した技術的な判断を加えて検討する必要がある。既に補修溶接前に DHT の施工が実施されており、その後の検査にて割れなどの欠陥は検出されていないが、今後の長期運転を考慮し PWHT の最小保持温度を決定した。

当該溶接の PWHT 実施に就いては ASME SEC.VIII (圧力容器) では最小保持温度 593℃、JIS B8270 (圧力容器) では 595℃と記載されているが、同様のエルボ溶接補修の実績から PWHT 最小保持温度は 670~680℃とし、保持時間は 1.5 時間として施工を実施した。PWHT 実施後の非破壊

検査実施の結果からは、欠陥などの検出は無かった。表 3 に PWHT を行う場合の保持温度の設定に対する規定の一例を示す。

表 3 代表的規格の溶接後熱処理温度 (PWHT) 規定

(単位 °C)

P-No.	材質	ASME	ASME	ASME	JIS B
		sec.VIII	sec.III	B31.3	8270
		圧力容器	原子力	配管	圧力容器
1	C-steel	593	593-677	593-649	595
3	C-0.5Mo	593	593-677	593-718	595
4	1.25Cr-0.5Mo	593-677	593-677	704-746	595

## 6. おわりに

構造物に使用される材料には、その使用環境<sup>3)</sup>、構造設計、デザインや組立て方法などに応じて多様な特性が必要とされ、その溶接部にもそれ相当の特性が要求されている。また施工時には、省力化、低コスト化も求められている傾向は、近年ますます強まり、従来は必要とされなかったような新しい品質特性の要求が加わるなど更に高度化し、留まるところを知らない。

国内メーカーでは、これらの要求に合わせて、高機能、高品質の鋼をはじめとして種々の素材を開発し提供してきた。例えば、厚鋼板で例をあげると、建築分野では、火災時に高温での強度を維持することが可能な耐火鋼や、地震時の安全性を確保しかつ超大入熱の溶接にも耐えうる建築用高靱性鋼などを開発してきた。

構造物の使用性能は、しばしば、その素材の母材特性ではなく溶接部の特性で支配されることがあり、国内メーカーは、各産業分野における世界の動向や需要者からの要望をいち早く取り込み、必要特性を満たす素材開発を行い、同時に、高強度・高効率の新しい溶接・接合技術の提案も実施している。将来に向けての、更に効率の良いエネルギーの開発が期待されるのが現状であり、それらの装置、機器のための新たな材料や溶接技術の開発が期待されている。

## 参考文献

- 1) 木村公俊、和田洋流、茅野林造、石黒徹、服部恭司、川野浩二『C-0.5Mo 鋼の水素侵食抵抗性におよぼす塊状  $M_{23}C_6$  炭化物の役割』鉄と鋼 (1999) Vol.85 332-339
- 2) 木村公俊、石黒徹、茅野林造、服部恭司、川野浩二、山本寛『0.5Mo 鋼機器の水素侵食実体調査と金属組織要因の抽出』鉄と鋼 (1999) Vol.85 735-742
- 3) 高圧ガス『水素エネルギー普及に向けた自治体の取組みシリーズ(第 26 回)』VOL.58 NO.2 2021、P9、10、23、32

石 垣 良 次 (いしがき りょうじ) 溶接管理技術者特別級

---

<略歴>

1975年 株式会社日本製鋼所 室蘭製作所入社 塔槽設計課配属 設計員

1988年 同 室蘭研究所 鉄鋼研究部 研究員

2004年 同 室蘭研究所 鉄鋼研究部 課長

2009年 日鋼検査サービス株式会社 第一事業部 試験調査課 課長

2014年 同 第一事業部 非破壊検査部部長

2018年 同 第二事業部 非破壊検査課 課長

2020年 日本製鋼所 M&E 株式会社 室蘭製作所 機器メンテナンス Gr 課長

現在に至る