

## 圧力設備の劣化と損傷事例

日揮株式会社 笹口 裕昭  
(化学機械溶接研究委員会)

### 1. はじめに

国内外の石油・化学プラントや電力・ガスプラントは運転開始から長期間経過している設備が多く、近年、設備保全管理の重要性が増しています。これらのプラントは、加熱炉、反応塔、熱交換器、貯槽、配管などの圧力設備で構成されます。

化学機械溶接研究委員会（以下、委員会という）では、圧力設備溶接補修小委員会（以下、小委員会という）を設置し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（以下、溶接補修指針という）」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。

小委員会で溶接補修技術調査を行う中で、具体的な圧力設備の劣化や損傷事例について小委員会の構成メンバーから貴重な資料を提示いただきました。最終的に、溶接補修指針には記載されていないこれらの劣化や損傷事例については、今まで当委員会が主催した溶接補修関連のシンポジウムや講習会の中で解説を行ってきました。

ここでは、これらの圧力設備の劣化や損傷事例を、なるべく具体的に、そしてなるべく平易に解説したいと思います。

### 2. 事例として解説する劣化・損傷の種類

ここでは、次の4つの損傷事例を紹介します。ただし、損傷を起こした圧力設備がある具体的なプラント名や損傷が発見された時期などは、なかなか開示することができません。その点はぜひご理解をいただきたいと思います。

- ① クリープぜい化（1.25Cr-0.5Mo 鋼）
- ② 475°Cぜい化（フェライト系ステンレス鋼）
- ③ シグマ相ぜい化（オーステナイト系ステンレス鋼）
- ④ 硫化物応力割れ（炭素鋼）

### 3. クリープぜい化の事例

最初の事例は、石油精製プラントの接触改質装置の反応塔で起きたクリープぜい化の事例です（**図1**）。接触改質装置（Catalytic Reformer）は、原油からトッパーと呼ばれる常圧蒸留装置で分離した直留ナフサを主な原料として触媒の作用でオクタン価の高い改質ガソリンを製造するプロセスです。ガ

ソリン製品の供給に欠かせない重要な設備です。接触改質反応は通常 500℃程度で行われ、反応塔 (Reactor) の多くは 1.25Cr-0.5Mo 鋼が使用されています。

使用材料	A387 Gr.C (1.25Cr-0.5Mo 鋼)
使用温度 (°C)	500
試用期間 (年)	16

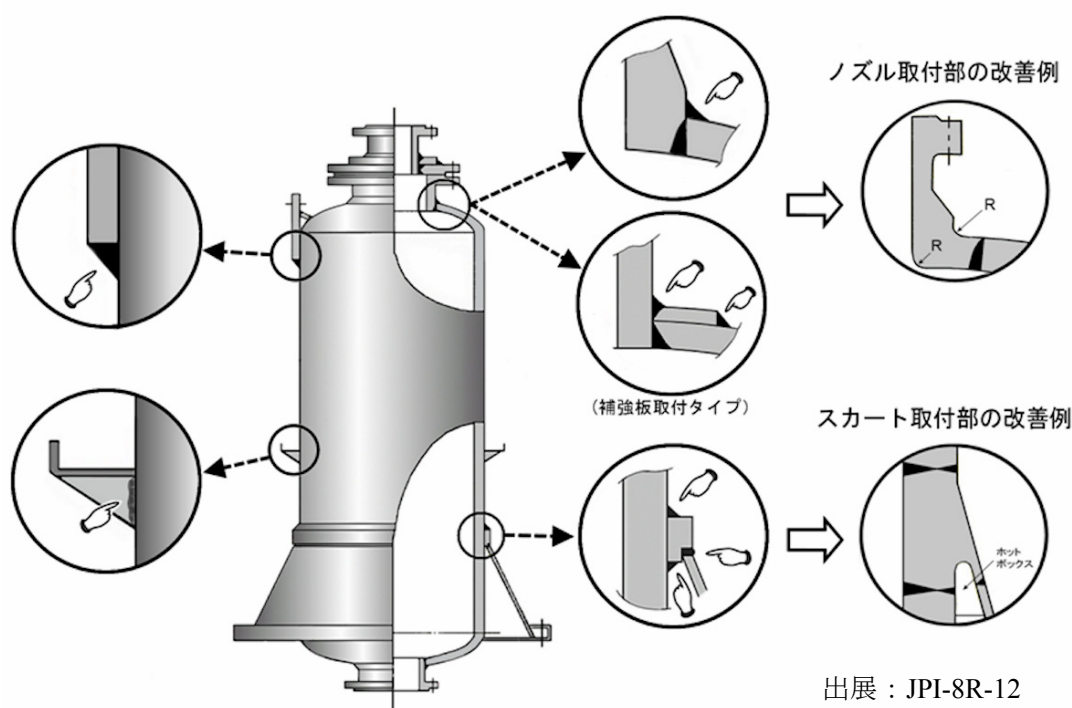
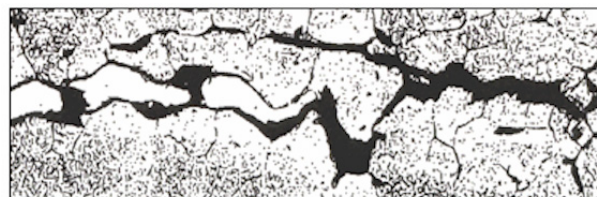


図1 クリープぜい化の損傷事例と再発防止策 (改善例) の一例

1.25Cr-0.5Mo 鋼では、450~600℃の温度範囲で長時間加熱されるとクリープぜい化が原因で生じる損傷が問題になります。クリープというのは、降伏点以下の応力でも高温下では時間に依存して延性伸びが生じる、つまり材料が変形しやすくなる現象としてよく知られています。しかし、このクリープ温度領域で鋼を長時間使用した場合、特に溶接熱影響部 (HAZ) の粗粒域で変形を伴わないで粒界亀裂が生じることがあります。これがクリープぜい化と呼ばれる現象で、クリープぜい化に伴い発生する割れをクリープぜい化割れと呼びます。

クリープぜい化は、クリープ変形中に結晶粒界にボイド (空洞) ができ、このボイドが連結して微小亀裂になり、割れに成長するといわれています。一般に、同じ耐熱 Cr-Mo 鋼でも 1.25Cr-0.5Mo 鋼の方が 2.25Cr-1.0Mo 鋼よりもクリープぜい化の感受性が高い、つまりぜい化しやすいということが知られています。

さて、図1のケースでは16年の運転期間を経た反応塔に対して、プラントの定期補修 (Shutdown Maintenance: SDM) 時の開放検査で溶接線の MT (磁粉探傷検査) を行い、多くの割れを検出しまし

た。割れ周辺のマクロ組織検査（SUMP、またはレプリカ法ともいいます）の結果、①割れは HAZ 粗粒域における粒界割れを呈する、②表面に開口した割れの周辺には多くの微小亀裂が認められる、③割れ近傍の結晶粒界に多数のマクロボイドが認められる、といった調査結果が得られたため、損傷原因は HAZ 粗粒域のクリープぜい化割れと判断されたようです。

この事例では、MT と SUMP を駆使して劣化部を完全に除去したのみでなく、特にトップマンホールの周継手については、同じ条件で長年使用され劣化の可能性のある HAZ 粗粒域全周を研削除去したのち、新たに健全な溶接部に置き換えたと報告されています。本来ならば、経年劣化を伴う機器の恒久対策としては新しい機器に更新することが望ましいのですが、このように割れ損傷部を含む劣化部をすべて健全な溶接部と取り換えるといった溶接補修は、現実的に妥当な判断だったと考えられます。この場合でも、溶接エンジニアが現場で損傷状態の調査を行うとともに、適切な補修方法を考案し、溶接補修の実施状況を管理しています。経験のある溶接エンジニアがいてこそ、このような溶接補修が行えるといえます。

ところで、1.25Cr-0.5Mo 鋼のクリープぜい化については、P（リン）、As（ヒ素）、Sn（スズ）、Sb（アンチモン）などの鋼中の不純物元素が感受性を高めることが知られています。1990 年代以降は、製鋼技術の進歩により鋼中のこれらの不純物が格段に減ったため、クリープぜい化のリスクは大幅に改善されています。

#### 4. 475°Cぜい化の事例

2 つ目の事例は、同じく石油精製プラントの減圧蒸留塔で起きた 475°Cぜい化の例です。常圧蒸留装置で分離された重質の常圧残油は、減圧蒸留装置によって減圧軽油と減圧残油に分離されます。これらの生成物は、その後流動接触分解装置（FCC）でガソリン、LPG、軽油などの製品を作るための原料となります。

この減圧蒸留装置の心臓部が、バキュームタワーと呼ばれる減圧蒸留塔です。通常は、炭素鋼の内面側にフェライト系ステンレス鋼 SUS405 を合わせたクラッド鋼が使用されています。運転温度は、350~450°C程度です。重質の油分は沸点が高く、常圧で分離するためには非常に高温で処理する必要がありますが、高温で処理するとコーキング（コークスが発生する現象）など不都合な現象が起こります。このため、圧力を下げれば沸点も下がるという自然科学の原理を応用して、減圧下で油分を分離します。

さて、この減圧蒸留塔で起きた損傷は 475°Cぜい化（475 ぜい化ともいいます）です。フェライト系ステンレス鋼特有の現象で 475°C付近に加熱するとぜい化、すなわち衝撃値が低下することが知られています。475°Cぜい化が起こる冶金的な説明は、JWES のホームページにある“Q&A1000”を読んでみてください。損傷が起きた装置は、運転温度が約 400°Cで、8 万時間（おおよそ 11 年間）使用されていました。この装置の定期補修（SDM）時に既設材をサンプリングし、溶接補修に耐えられるものかどうか確認するために試験を行った結果、損傷のあることがわかりました。

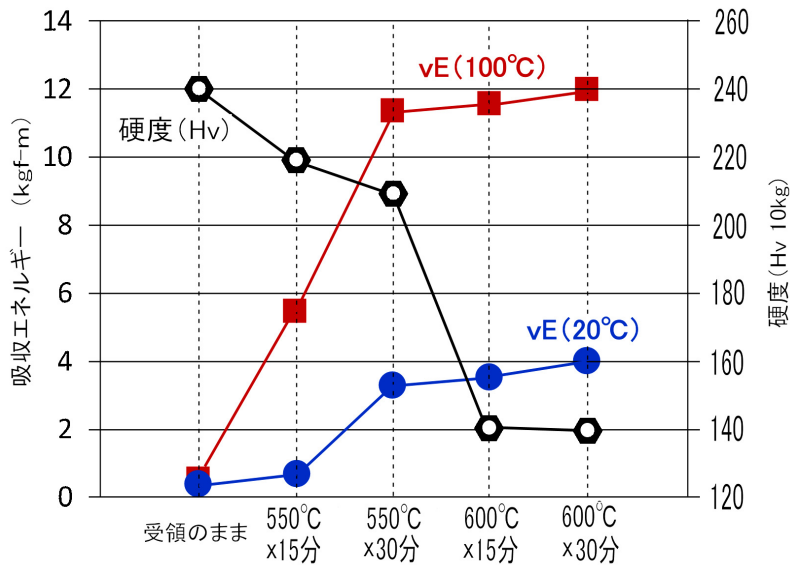


図2 475°Cぜい化材に対する脱ぜい化処理による硬さと吸収エネルギー値の変化

サンプリングした材料の表面には割れなどの欠陥は見られませんでした。溶接の熱影響を受けていない母材部でビッカース硬さが 230-250HV を示し、シャルピー衝撃値は当時の単位で 1kgf-m 以下 (SI 単位に換算すれば 10J 以下) という極めて低い値を示していました。また、引張試験でも引張強度は SUS405 の規定値を満足していましたが、伸びが規定値を 10%程度下回っていたと報告されています。

このサンプル材の試験結果を持って、ぜい化の原因を 475°Cぜい化と結論付けたようです。当時のユーザー側、施工者側の溶接エンジニアは、このサンプル材に様々な条件で熱処理を行い、その結果、**図2**に示すようにぜい化した材料は 600°C×15 分の熱処理で新規材レベルに回復したと報告されています。このように、一旦ぜい化してしまった材料でもその損傷の種類によっては、適切な熱処理を行えばぜい化前の状態に回復することが可能です (**図2**、**図3** 参照)。これを可逆的な現象と呼びますが、この可逆的な損傷を回復させるための熱処理を、脱ぜい化処理といいます。

この 475°Cぜい化は可逆的な損傷の一つです。この事例の場合は、脱ぜい化処理で靱性が回復されることが分かったものの実機の装置で熱処理を行うことが難しいので、溶接補修前に 100°C以上の予熱を行うことで、補修時の溶接割れの発生を防止できたと報告されています。

今回紹介したものは溶接補修がうまくいったケースですが、同じく石油精製プラントの SUS405 製の脱硫リアクター (運転温度は約 350°Cと先のケースに比べると低い) では、部分更新の溶接補修時に、脱ぜい化処理を行わず新規材と既設材を溶接したところ、既設材の HAZ に多数のクラックが発生し、結局は補修不可能となったというケースも報告されています。

脱ぜい化処理を行うか否か、熱処理をしたうえで適切に溶接補修が行えるのか否か、といった判断は、その損傷のケースによって現場をよく知る経験のある溶接エンジニアがケースバイケースで判断していかなければならない問題だということが言えます。残念ながら、教科書的な様な正解がないのです。

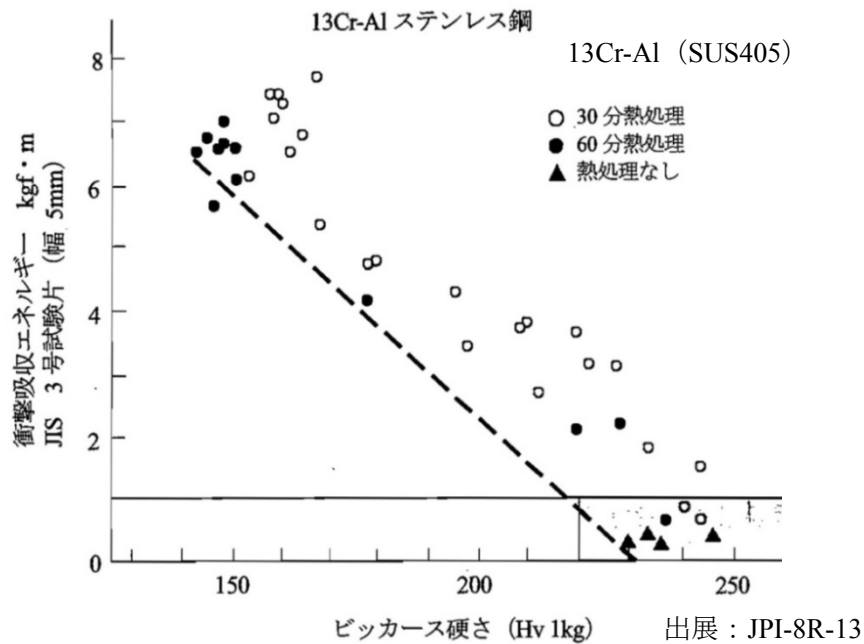


図3 常温における硬さと吸収エネルギーの関係

ところで、この章の初めに475℃ぜい化はフェライト系ステンレス鋼特有の現象であるといいましたが、最近の事例で二相ステンレス鋼でも475℃ぜい化の事例が報告されています。二相ステンレス鋼をこのような高温で使用するケースは極めてまれだと思いますが、不適切な熱処理も含めて、二相ステンレス鋼を使用するときにはくれぐれも気を付けていただきたいと思います。

## 5. シグマ ( $\sigma$ ) 相ぜい化の事例

3つ目の損傷事例は、石油精製プラントの流動接触分解装置 (Fluid Catalytic Cracking: FCC) の再生塔排ガスラインで起きた $\sigma$ 相ぜい化 (シグマぜい化ともいいます) の例です。FCCは、減圧軽油や常圧残油などの重質油を触媒の作用で接触分解し、高オクタン価ガソリン、プロピレンなどを含むLPG、分解軽油を主に生産する装置で、化石燃料資源の有効活用のためには欠かせない重要なプロセスです。

FCCのプロセスを詳しく説明する紙面の余裕はありませんが、基本的には原料をLPGやガソリン留分に分解する反応塔 (Reactor)、分解した炭化水素を製品に分離する蒸留塔 (Fractionator) に分けられます。一方、反応に使われた触媒は、析出したコークを再生塔 (Regenerator) で燃焼することで活性を回復し反応塔へ戻ります。この再生塔は通常650~800℃という非常に高温で運転され、再生塔からの排ガスはプラント内で熱源として有効利用されています。

再生塔の排ガスラインの配管や周辺機器にはSUS304、SUS304Hなどが使われます。損傷が起きた箇所は、この排ガスラインのノズルやガセットなどの溶接部です。溶接材料は308Hでティグ溶接 (GTAW) や被覆アーク溶接 (SMAW) が使用されていたようです。この装置の定期補修 (SDM) 時に、これら排気ガスラインの溶接部に図4のような多くの割れが検出されました。資料からはこの装置の使用年数は不明ですが、長年補修しながら使用してきたため、割れが溶接金属なのか母材なのかは肉眼では判別できないものの、ほぼ溶接金属内の割れであろうと報告されています。

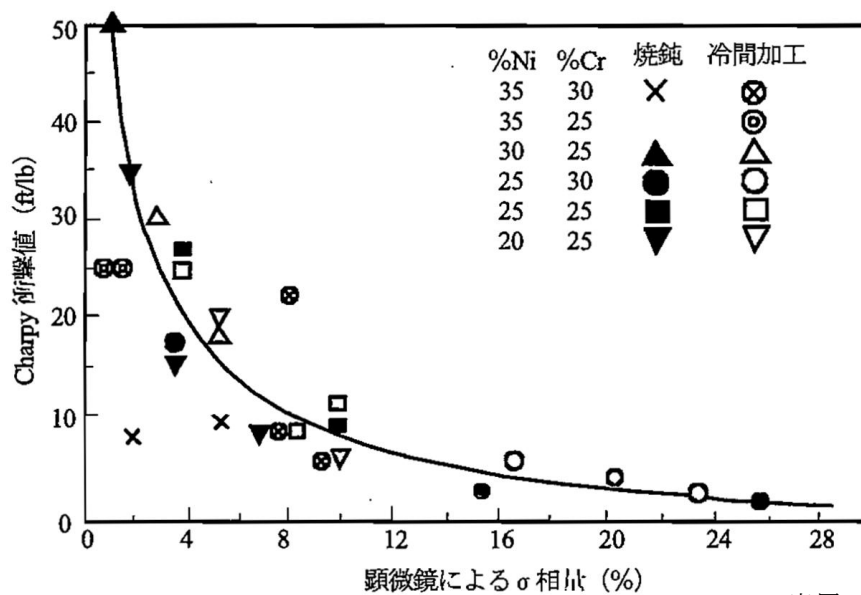


<補修のポイント>

- δフェライト量を低く抑えた溶接材料の使用
- ビードのスムージング（グラインダー処理）

図4 FCC フリューガスラインの溶接部に発生した割れ

ユーザー側、施工者側の溶接エンジニアで協議し、この割れは $\sigma$ 相ぜい化に伴う割れであると結論付けています。 $\sigma$ 相ぜい化は、フェライト系ステンレス鋼や二相ステンレス鋼に顕著なぜい化現象で、600~800℃に加熱されて $\sigma$ 相と呼ばれるFe（鉄）とCr（クロム）の金属間化合物が析出することで起こります。 $\sigma$ 相は硬くて極めて脆いという特徴があり、そのため $\sigma$ 相が析出すると延性や靱性を著しく低下させるのです（図5参照）。場合によっては、この事例のようにぜい化に伴って割れを生じることもあります。



出展：JPI-8R-13

図5  $\sigma$ 相析出量とシャルピー衝撃値の関係（横軸： $\sigma$ 相の量%）

この装置の材料は SUS304H というオーステナイト系ステンレス鋼ですが、 $\sigma$ 相ぜい化はオーステナイト系ステンレス鋼でも起こります。特に、オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部には高温割れを防止するために数%の $\delta$ （デルタ）フェライトが含まれていることは、皆さんも十分ご承知と思いますが、この $\delta$ フェライトが 600～800℃で分解され $\sigma$ 相を析出するため、溶接金属中に $\delta$ フェライトが多いほど $\sigma$ 相ぜい化が起こりやすいといわれています。

このケースのように割れが生じてしまったものは回復できませんが、 $\sigma$ 相が生じた場合は 900℃以上に加熱し、急冷すると消滅します。つまり、 $\sigma$ 相ぜい化も 475℃ぜい化と同様に可逆的な損傷です。このケースでは、PT（浸透探傷検査）で溶接部の割れを検出し、欠陥の深さによって適宜グラインダー処理（欠陥の除去）か、欠陥除去後に肉盛り溶接をするか、装置の設計条件を十分に検討したうえで、現場で判断しながら補修を行ったと報告されています。溶接補修に使用する溶接材料は、高温仕様でかつ $\delta$ フェライトが少なく設計されている溶接材料を選んで施工されています。これはもちろん、今後の $\sigma$ 相ぜい化を少しでも軽減させるための対応です。この場合でも、経験のある溶接エンジニアが現場で適切な判断をし、指示をして健全な補修ができたわけです。

## 6. 硫化物応力割れの事例

最後の損傷事例は、材料としてはもっともなじみの深い炭素鋼の配管溶接部で起きた硫化物応力割れ（Sulfide Stress Cracking: SSC）の事例です。実は、この溶接割れは石油精製プラントのプロセス配管でかなりの事例報告が上がっています。いずれも炭素鋼小径配管のフランジやオリフィスタップなどのすみ肉溶接部であり、私たちがごく普通に使用する軟鋼用ティグ溶接（GTAW）棒を使用した溶接部であるという共通点があります。最大の特徴は、この配管のプロセス環境が湿潤硫化水素（H<sub>2</sub>S）雰囲気（サワーサービスといいます）だということです。事例報告を見ると、この溶接割れは運転からわずか数日から数か月で検出されており、中にはプラントのコミッショニング（試運転）で見つかったものもあります（**図 6** 参照）。

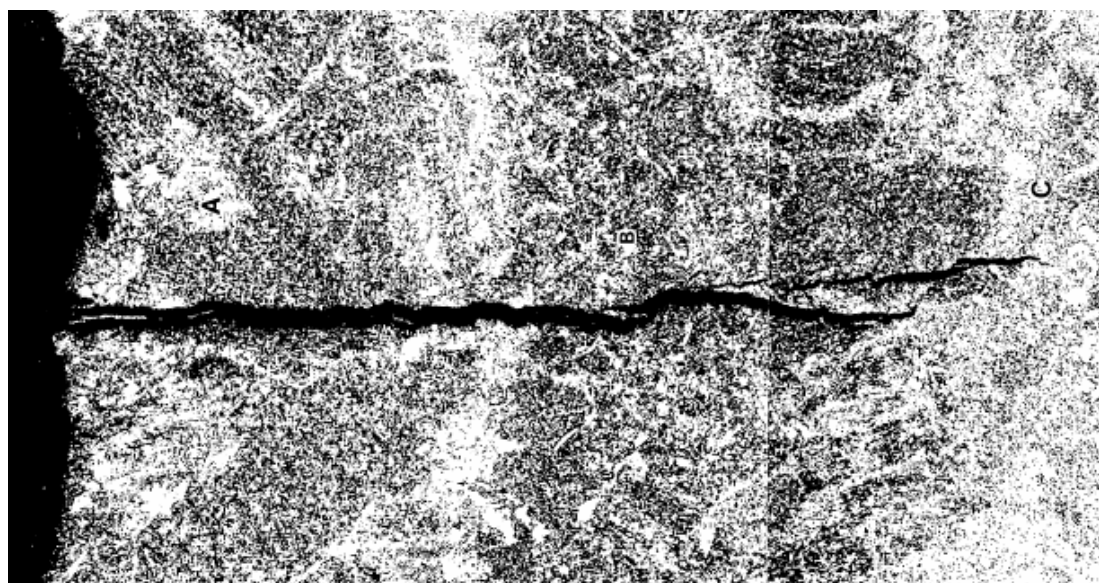


図 6 炭素鋼すみ肉溶接部の硫化物応力割れ

SSC は、湿潤環境で H<sub>2</sub>S から分解してできた水素が鋼中に拡散侵入して、溶接硬化部で割れる現象です（図 7 参照）。皆さんがよく知っている高張力鋼の低温割れ（遅れ割れ）と同じく、水素による水素ぜい化割れの一種です。低温割れとの決定的な違いは、湿潤硫化水素（H<sub>2</sub>S）雰囲気にある環境割れであるという 1 点です。ちなみに、ひと昔前にこの SSC を「硫化物応力腐食割れ（Sulfide Stress Corrosion Cracking: SSCC）」と呼んでいた時代がありましたが、現在では「硫化物応力割れ（SSC）」と呼ぶように統一されています。私たちも意識してこの用語を使いたいと思います。

## サワーサービスでの硫化物応力割れ(SSC)

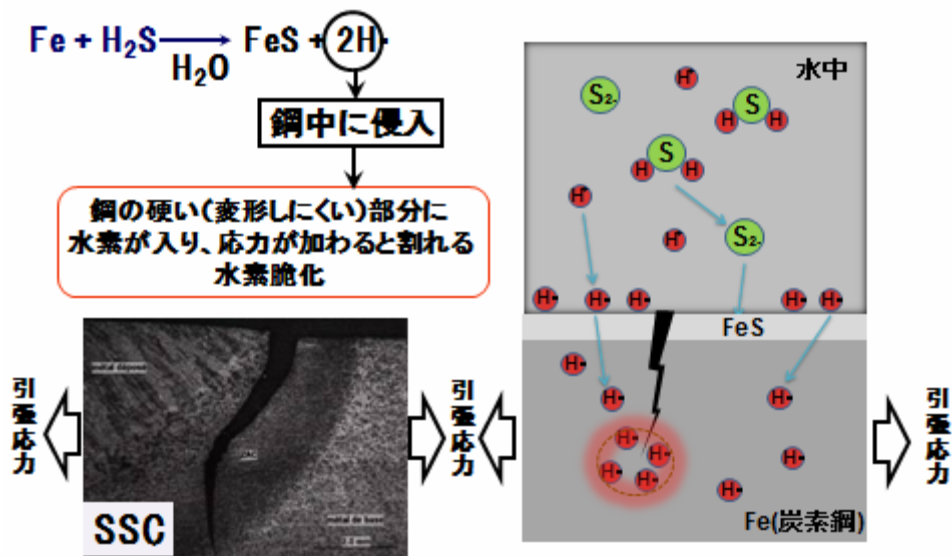


図 7 硫化物応力割れの発生原理

SSC は、硫化水素濃度、溶接部の硬さ、残留応力などが高いほど割れやすいことがわかっています。炭素鋼配管のティグ溶接部ですので、それほど硬さが高いはずはないと思われがちですが、すべての事例で、溶接部の硬さは 250HV から 300HV、さらに 400HV を超えているものも報告されています。実は、ティグ溶接の溶接金属は清浄度が高い分、被覆アーク溶接（SMAW）など他の溶接法と比較すると酸素量が極めて低く、その結果非常に焼入れ性が高い、つまり非常に硬くなりやすいことが専門家の間では知られています。軟鋼用ティグ溶接部の硬さ試験の結果が 300～400HV に達することを多くのデータが示しています。

最近の配管溶接には、特に国内工事ではティグ溶接が好んで使われるようになりました。ビード外観もきれいで、グラインダー処理が少ないため、工事の効率も決して悪くはありません。小径管ほどティグ溶接の効率はアップします。しかも、法規やプロジェクト仕様書ではすみ肉溶接部に硬さ試験が要求されることはまずありません。小径管は肉厚も薄いので、溶接後熱処理（PWHT）の要求もないケースがほとんどです。こういったところに落とし穴があり、本事例のような何でもない炭素鋼の小径配管のすみ肉溶接部で多くの割れ事例が報告されているということです。

各々の事例報告によると、各現場の溶接エンジニアが提案した補修の方法としては、細径の被覆ア

ーク溶接棒を使用する、最低 2 パスで施工する、高めの予熱を適用する、PWHT を行うなど、それぞれのケースで工夫しながら溶接補修の方法が検討され実施されています。この補修方法は、そのまま SSC 対策の溶接施工方法にもなります。SSC を起こさないためには、まず溶接部の硬さを下げるのが重要ですので、溶接後に溶接部の硬さを測ることができれば管理の目安になります。最近、矮小なすみ肉溶接部にも使用できる簡易型の硬さ測定器も開発され市販されるようになりました。こういった測定機器を正しく使いこなしていくことも、現場の溶接エンジニアに求められることです。

## 7. おわりに

今回は紙面の関係で 4 件のプラント圧力設備の損傷事例を、できるだけ平易に解説したつもりです。これらの損傷については、冒頭で紹介した「プラント圧力設備溶接補修指針」にもごく簡単ですが説明しています。この溶接補修指針は、溶接補修技術を体系的に取り纏めており、設備保全における溶接補修の検討や実施において活用できるほか、若手技術者の教育や技術伝承にも役立つものと思います。

なかなか損傷事例の情報は開示できるものが少ないのですが、少しずつでも委員会メンバーで共有できるデータを蓄積し、後進の役に立つような資料を整理していければと考えています。多くの溶接関係者に化学機械溶接研究委員会のメンバーになっていただき、貴重な資料をご提供いただければありがたい限りです。

### 参考資料：

- (1) プラント圧力設備溶接補修指針、JWES-CP-0902、平成 21 年(2009 年) 11 月、  
(社)日本溶接協会 化学機械溶接研究委員会 圧力設備溶接補修小委員会
- (2) 新版 溶接・接合技術特論、溶接学会編、産報出版(株)
- (3) JPI-8R-12
- (4) JPI-8R-13

#### <略歴>

1979 年 早稲田大学 理工学部 金属工学科 卒業  
1979 年 トーヨーカネツ株式会社入社 技術部溶接課  
配属  
2001 年 笹口技術士事務所設立 溶接技術コンサルタ  
ント開業  
2006 年 日揮株式会社入社 EN テクノロジーセンター  
配属 現在に至る  
日本溶接協会化学機械溶接研究委員会委員(常  
任幹事)

#### <専門>

LNG タンク、LPG タンクなどの低温タンクの溶接  
各種プラント機器、配管の溶接エンジニアリング

#### <資格>

溶接管理技術者 特別級  
IWE (International Welding Engineer)  
技術士(金属部門、建設部門、総合技術監理部門)  
APEC Engineer (Structural Eng., Mechanical Eng.)