技術報告

プラント配管の予防保全と溶接補修

中野　正大（技術本部　企画開発部）

わが国のプラント設備は高経年化の一途をたどり，それにともなう事故も増加傾向にある[1]．中でも配管は維持管理が容易でなく，コスト負担も大きい．そこで，国内の予防保全および溶接補修に関する規格，ならびに予防保全技術の現状を示すとともに，配管の溶接補修技術とその事例を紹介した．配管の維持管理に役立てていただけると幸いである．

1.　はじめに

わが国のプラント設備の多くは建設から40年間が経過し，当時敷設された配管は高経年化の一途をたどっている．高圧ガス保安協会の高圧ガス関係事故集計によれば年間の事故件数は減少傾向にあるものの，“腐食管理不足”の分類ではわずかながら増加傾向にある．プラント設備における配管は，総延長が長く，形状が複雑で部品数も多い．さらに，外装，断熱，塗装，ライニング，サポートなどの付帯部材も多い．そこに敷設場所，外部環境，運転条件，内部流体などの損傷要因を含め，変更履歴に検査記録を含めると，配管の維持管理が容易でないことがわかる．しかしながら，プラント設備を運転し続けるためには，体系的な保全計画，地道な検査，補修，再発防止およびそれらの記録が必要不可欠である．

2.　プラント配管の予防保全

配管の維持管理は，①配管各系統の損傷リスク評価を行い，②破損した場合の影響度を評価し，③損傷現象を抽出し，④検査や更新計画を立て，⑤結果を記録し計画に反映させるといった手順で行われる[2]．**表1**に国内の予防保全に関する規格とガイドラインを示す．配管の予防保全はこれらを参考に進めていく必要がある．ここでは，配管の予防保全を効率よく行うための技術として，**表2**に配管腐食部のスクリーニング技術を，**表3**に保温材下腐食などの再発防止技術を示す．

3.　溶接補修の種類と特徴

プラント設備において，損傷が発生した場合にはその原因を調査するとともに，同様の損傷が類似設備に発生していないかを検討する必要がある．そして，調査結果に基づいて損傷部の補修方法と再発防止策を立案する．**表4**に国内の溶接補修に関する規格とガイドラインを示す．補修溶接はこれらを参考に進めていく必要がある．**図1**に補修溶接の種類とその形状を示す．補修溶接の対象をプラント設備の配管サイズが20B程度までとすれば，補修方法のほとんどが損傷した部分を切断して取り除き，その部分を新材によって取り換える方法が適用される．中には，損傷の種類とその範囲，補修期間，補修後の運転期間，経済性などの理由から，その他の補修方法が適用される場合もある．溶接方法にはティグ溶接が適用されやすいが，拘束条件が厳しい場合や被溶接部に不純物が多く含まれる場合には，被覆アーク溶接を適用すると解決することがある．以下にそれぞれの補修方法についての解説を示す．ここで，箇条書きのものは注意事項を示し，表4のWES7700-1～4に示される事項を省略する．

3.1　肉盛溶接

肉盛溶接は，損傷部を完全に除去して減肉した部分を溶接金属によって肉盛する方法で，割れや局部腐食などの損傷の程度が比較的軽微な場合に適用される．

本稿は，2017年3月24日発行の「溶接技術」2017年4月号に掲載されたものです．

表1　予防保全に関する規格とガイドライン

団体	規格番号	名称
日本機械学会	JSME S NA1	発電用原子力設備規格 維持規格
	JSME S NG1	発電用原子力設備規格 加圧水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格
	JSME S NH1	発電用原子力設備規格 沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格
	JSME S TB1	発電用火力設備規格 火力設備配管減肉管理技術規格
	JSME S CA1	発電用設備規格 配管減肉管理に関する規格
日本ガス協会	JGA 指-109	容器・配管の腐食及び疲労割れに関する検査・評価・補修指針
高圧ガス保安協会他*	KHK S 0850-1～6	保安検査基準（一般高圧ガス保安規則関係 他）
	KHK/KLK S 0850- 7	保管検査基準（LNG受入基地関係）
	KHK S 1850-1～6	定期自主検査指針（一般高圧ガス保安規則関係 他）
	KHK/KLK S 1850-7	定期自主検査指針（LNG受入基地関係）
	KHK/PAJ/JPCA S 0851	高圧ガス設備の供用適性評価に基づく耐圧性能及び強度に係る次回検査時期設定基準
日本高圧力技術協会	HPIS Z 101-1	圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第1段階評価
	HPIS Z 101-2	圧力機器のき裂状欠陥評価方法－第2段階評価
石油学会	JPI-8S-1	配管維持規格
	JPI-8S-2	設備維持規格
	JPI-8S-3	回転機維持規格
	JPI-8S-4	電気設備維持規格
	JPI-8S-5	計装設備維持規格
	JIP-8S-6	屋外貯蔵タンク維持規格
日本溶接協会	WES2805	溶接継手のぜい性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法
	WES2820	圧力設備の供用適性評価方法－減肉評価
エンジニアリング協会	-	保温材下配管外面腐食（CUI）に関する維持管理ガイドライン（2012年2月）
日本プラントメンテナンス協会	-	外面腐食対策ガイド（2010年10月）
	-	配管付属物の外面腐食対策ガイド（2016年4月）

＊高圧ガスLNG協会（KLK），石油連盟（PAJ），石油化学工業協会（JPCA）

表2　配管腐食部のスクリーニング技術（参考）

名称	調査対象	解説
イメージングプレート法	保温材下腐食	放射線を配管に照射し，それを半導体センサーで捉え，配管の腐食部を特定する．配管サイズは2～30Bで，断熱材を取付けたまま供用中に適用できる[3].
ガイド波による検査	保温材下腐食	減衰の少ないガイド波を配管全体に伝搬させ，反射波を受信することで，配管の腐食部を特定する．断熱材の一部を解体して，センサーを取付ければ，その前後を探傷できる．探傷範囲は長いもので片側91mのものもある[4]．配管サイズは1.5～36Bで，断熱材を取付けたまま供用中に適用できる[5].
パルス過流法	保温材下腐食 内外面腐食 （炭素鋼）	コイルに直流電流をパルス状に流すことで，配管の外面に渦電流を発生させ，渦電流が肉厚方向へ浸透し，配管の内面に達すると急速に減衰する．この信号を受信することで肉厚が予測できる．断熱材，錆や海洋生成物などの上から肉厚測定ができる[6]．面測定のため局部腐食の検出には不向きである．
交流磁気探傷検査	保温材下腐食 応力腐食割れ 疲労 など	コイルで発生させた交流磁束が試験体を透過し再びコイルに戻ってきた時に発生する電圧の振幅（導電率）と位相（透磁率）の変化によって探傷を行う．保温材下腐食や応力腐食割れなどの探傷に適用できる[7].
超音波による検査	配管接触部腐食	配管とラックの接触部，防止堤内部の配管などの検査において，超音波を周方向や斜め周方向に送信し，その超音波を受信することで腐食減肉率を測定できる[8].
中性子水分測定	保温材下腐食	中性子水分計を用いて，配管断熱材内部の水分量を予測することで，配管の外面腐食部を推測できる[9].
サーモグラフィー検査	保温材下腐食 内面腐食	サーモグラフィーによって配管の表面温度を測定し，断熱材の劣化状態や配管内の堆積物の有無などを予測することで，配管の腐食部を推測できる．

表3　保温材下腐食などの再発防止技術（参考）

名称	解説
高性能断熱材	固体の中でも最も小さい熱伝導率を持つシリカエアロゲルを適用した断熱材には，低い熱伝導率，撥水性，柔軟性，水蒸気の発散などの優れた特性がある．また，既設配管の含水した断熱材の上にこの断熱材を巻くことで，水分が蒸発し，断熱機能を回復させることができる[10]．保温材下腐食を抑制できる．
低ハロゲン撥水断熱材	断熱材に含まれる可溶性塩化物イオンを50ppm以下に制限し，断熱材に撥水材を含ませて断熱材内部まで撥水機能を持たせることで，オーステナイト系ステンレス鋼に発生する外面応力腐食割れを抑制できる[11]．
防錆機能付き断熱材	配管に接触する断熱材内面に無機系防錆顔料を固定化することで，雨水や塩化物イオンが侵入しても配管外面の腐食を防止できる[12]．保温材下腐食を抑制できる．
パイプライニング	腐食した配管をピグによって洗浄，清掃，塗装（ライニング）することで，配管の内面腐食を防止できる[13]．
エアロゲル塗料	シリカエアロゲルを塗料化したものを配管に塗布することで，耐熱性・防食性に加えて，断熱・保温特性の効果がある[14]．
特殊ゴム系の断熱外装材	特殊ゴム系の断熱外装材では，継目を特殊コーキング材でシールすることで完全な防水気密性構造を構築する．保温材下腐食および外面応力腐食割れを抑制できる[15]．

表4　溶接補修に関する規格とガイドライン

団体	規格番号	名称
石油学会	JPI-8R-16	溶接補修
高圧ガス保安協会	KHK S0180	溶接容器溶接補修基準
	-	補修技術ハンドブック～高圧ガス保安に関する情報紹介 No.100（1986年3月）
日本溶接協会	WES 3004	圧力設備用金属材料のきずの補修
	WES 7700-1	圧力設備の溶接補修 第1部：一般
	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
	WES 7700-3	圧力設備の溶接補修 第3部：窓形溶接補修
	WES 7700-4	圧力設備の溶接補修 第4部：外面当て板溶接補修
	-	プラント圧力設備溶接補修指針（2009年11月）
火力原子力発電技術協会	TNS-G2806	当て板すみ肉溶接による補修方法に関する指針

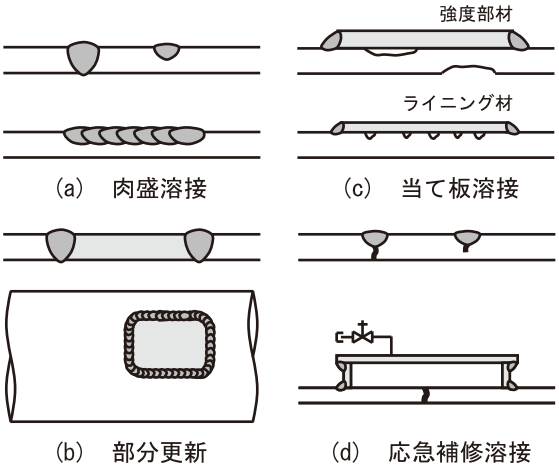


図1　補修溶接の種類とその形状

・高温で供用された材料表面は緻密な酸化スケールに覆われ，非破壊検査でき裂が検出されない場合もあるので，表面の酸化スケールを除去してから非破壊検査を行う．

・き裂が局所的に存在する場合は，それらのき裂をすべて除去してから補修溶接を行う．なお，微細なき裂は非破壊検査で検出されない恐れがあるため，被溶接部周辺の表面を溶接前に研削する．

・き裂をロータリーヤスリで研削するとき裂が閉塞状態となる場合があるため，非破壊検査を行う前には砥石でその表面を再研削する．

・損傷部が溶接金属にある場合は，研削過程で製造時の溶接欠陥を検出する場合があるので，それを想定しておく．

3.2　部分更新

部分更新は，損傷した部分を切断して取り除きその部分を新材によって取り換える方法である．配管を補修溶接する場合の多くは全周を切断して部分的に更新する方法が適用される．配管サイズが大きい場合には局所的な窓形補修が適用されることもある．

・更新範囲を決定する際には，新設部と取合いとなる既設部の健全性を確認する．

・窓形補修の溶接順序は，拘束割れを防止するために拘束応力を低減する順序とし，全長多層法ではなくブロック法またはカスケード法を適用する[16].
・窓形補修の角部では,溶接欠陥が入りやすいので,仮付け溶接，ビードつなぎおよびクレータ処理を行わないようにする.

3.3　当て板溶接

当て板溶接は，損傷した部分をそのままにして強度または耐食性を満足させる方法である．配管サイズが大きい場合には強度部材を用いた当て板溶接が適用されることもある.

・当て板を強度部材とする場合は予め構造設計を行い，その強度を十分に確保する.
・当て板溶接では既設の寸法形状をよく確認してから，当て板の加工を行う.
・当て板溶接を行う被溶接部は非破壊検査によってその健全性を確認する.

3.4　応急補修溶接

応急補修溶接は，損傷した部分を部分的に除去して溶接を行う方法，または損傷した部分全体を覆うことで漏えいを防止する方法である．応急補修溶接は，補修期間が極めて短い場合や補修後の運転期間が短い場合に適用される.

・ボックス溶接を適用する場合は予め構造設計を行い，その強度を十分に確保する.
・ボックス溶接では既設の寸法形状をよく確認してから，ボックスの製作を行う.

4.　各種損傷に対する溶接補修の留意事項

配管に発生する損傷は**表5**に示すように材質や断熱材の有無によって分類できる．ここで，配管の内部流体に起因する損傷は多岐にわたるため共通性のあるものを数例示し，埋設管の損傷については除外する.

4.1　保温材下腐食の補修溶接（外面）

保温材下腐食とは，断熱外装材が経年変化，施工不良などによって，断熱材に雨水などの水分が侵入し構造的に滞留しやすい場所で，腐食環境が整い，大気腐食と同様に局部的な腐食が進行する現象である．補修方法は補修条件に合わせて図1のいずれも適用できる．補修後には下地処理を行い，塗装または溶射などを確実に行う必要がある．なお，部分更新を行う際に材質をオーステナイト系ステンレス鋼SUS304に変更する場合は外面応力腐食割れ対策を講じる必要がある.

4.2　配管接触部腐食（外面）

配管接触部腐食とは，配管とサポート等の構造的なすき間に雨水などの水分が滞留することで腐食環境が整い，大気腐食と同様に局部的な腐食が進行する現象である．補修方法は前節と同様にいずれも適用できる．再発防止策は配管とサポート等のすき間を極力排除した構造にするとともに，補修後は下地処理を行い，塗装または防食テープ施工などを確実に行う必要がある.

表5　プラント設備の配管に発生する主な損傷

材質	損傷部位	断熱材	損傷例
炭素鋼，低合金鋼	外面	あり	保温材下腐食
		なし	配管接触部腐食
	内面	―	エロージョン・コロージョン（蒸気など）
	応力集中部など	―	振動疲労，熱疲労
オーステナイト系ステンレス鋼	外面	あり	塩化物型応力腐食割れ
		なし	鋭敏化型応力腐食割れ
	内面	―	微生物腐食（自然水など）
	応力集中部など	―	振動疲労，熱疲労

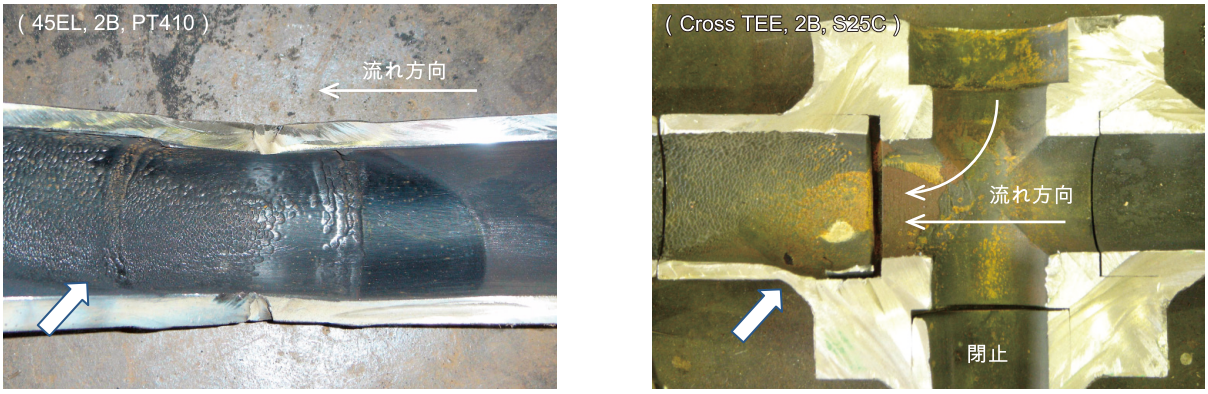


図2　エロージョン・コロージョンの事例

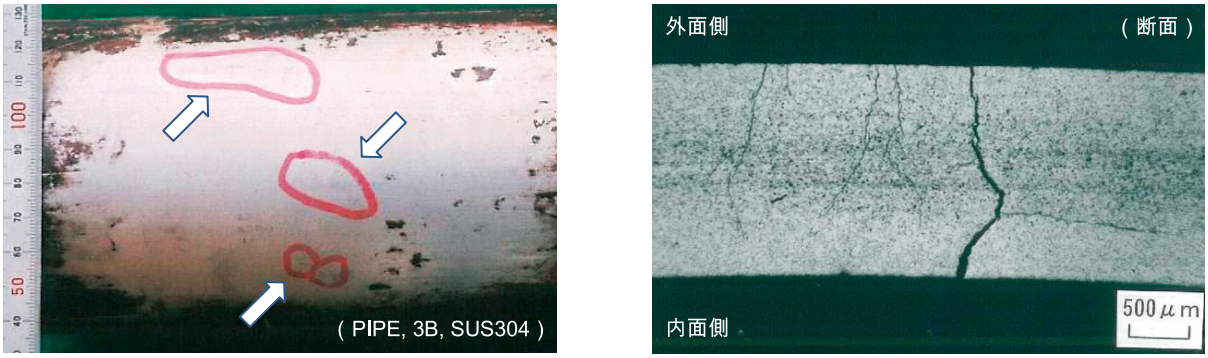


図3　塩化物型外面応力腐食割れの事例

4.3　エロージョン・コロージョン（内面）

エロージョン・コロージョンとは，内部流体が衝突などによって配管内面の保護性腐食生成物の被膜を取り去って，腐食を進行させるエロージョンとコロージョンが重畳した現象である．エロージョン・コロージョンは流速が急激に変化する90度エルボ部やティー部などで発生しやすい．**図2**に示す事例は45度エルボおよびクロスティーによってボイラー水が管壁に衝突し，減肉したものである．補修方法は部分更新の適用が望ましく，再発防止策には材質をオーステナイト系ステンレス鋼に変更するなどがある．なお，その場合にも外面応力腐食割れ対策を講じる必要がある．

4.4　塩化物型応力腐食割れ（外面）

塩化物型応力腐食割れとは，保温材下腐食と同様に，断熱外装材の経年変化，施工不良などによって断熱材に雨水などの水分が侵入し，構造的に滞留しやすい場所で塩化物イオンが不動態皮膜を破壊し，新生面の局部的な腐食と材料の引張残留応力が重畳して，き裂が発生し進展する現象である．塩化物型応力腐食割れは溶接熱影響部に発生する事例が多いが，腐食環境によっては引張残留応力の小さい母材に発生する場合もある．**図3**に示す事例は1日に1回の頻度で管内の洗浄をするため，管外面が結露し，断熱材中の腐食性イオンが溶出し濃縮したことで塩化物型外面応力腐食割れに至ったものである[17]．

補修方法は部分更新が望ましいが，補修条件によって肉盛溶接を適用する場合は3.1節の注意事項を参考にして割れを完全に取り除く必要がある．また，この損傷は食孔起点で発生する場合が多いため，割れ周辺に食孔状のものがあれば，その表面を研削し，内部に応力腐食割れが発生していないことを確認する必要がある．再発防止策には，溶接部またはそれに母材を含めて塗装する，低ハロゲン撥水断熱材を適用するなどがある

4.5　鋭敏化型応力腐食割れ（外面）

鋭敏化型応力腐食割れとは，鋭敏化によって耐食性が低下した結晶粒界とその近傍の局部的な腐食と材料の引張残留応力が重畳して，き裂が発生し進展する現象で，溶接熱影響部に発生しやすい．補修方

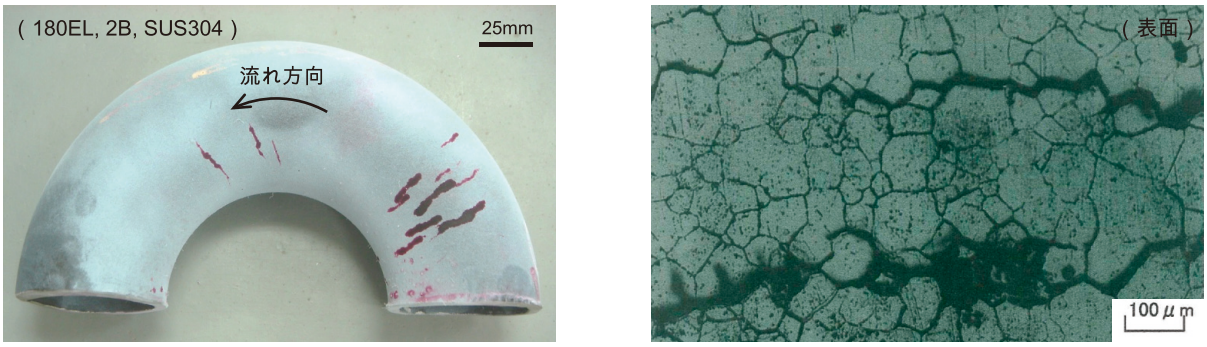


図4　鋭敏化型応力腐食割れの事例

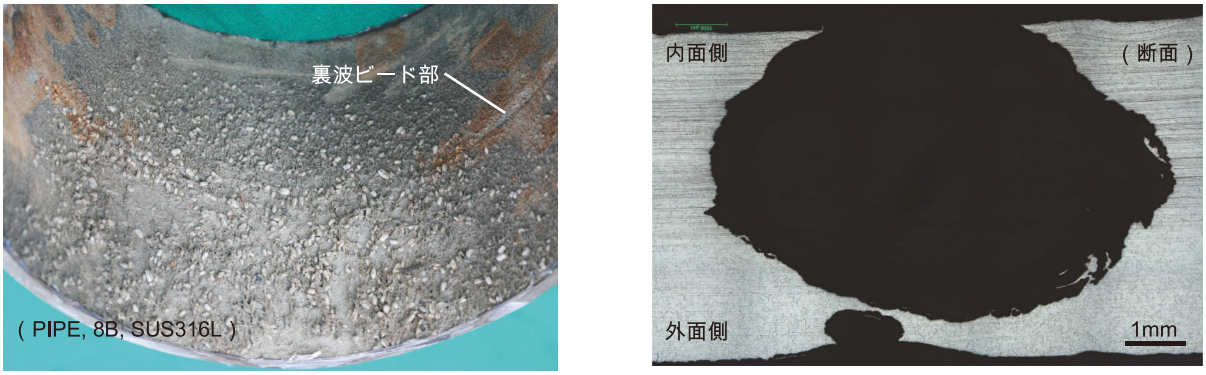


図5　微生物腐食の事例

法は前節と同様である．再発防止策には更新部材にSUS304Lなどの低炭素系ものを適用する，溶接部を塗装するなどがある．

ここで，供用中に母材が鋭敏化した場合の事例を**図4**に示す[18]．鋭敏化温度域で使用された配管がプラントの休止によって放置され，その間に配管の内外面で結露が発生し，鋭敏化型応力腐食割れが母材に発生した事例である．

4.6　微生物腐食（内面）

微生物腐食とは，配管の内部流体が淡水や海水などの自然水である場合において，流体に含まれる微生物が金属表面に付着しバイオフィルムを形成し，その中の微生物の代謝などにより食孔が発生する現象である．微生物腐食の多くは溶接部にみられ，その腐食速度は直線則で5mm/y程度となることも珍しくない．**図5**に微生物腐食が海水配管に発生した事例を示す[19]．配管内面には貝が多量に付着しており，腐食部は入口が狭く内部が広いインク壺型であった．腐食速度は直線則で7.2mm/yであった．

補修方法は，非破壊検査によって腐食部を特定し，その部分の部分更新や当て板溶接などが有効である．再発防止策には，配管内面を定期的に洗浄する，内部流体に含まれる微生物を殺菌する，または配管内面をライニングして環境遮断するなどがある．

4.7　振動疲労（応力集中部）

振動疲労とは，圧縮機や回転機などの影響で配管に変動応力が繰返し負荷された場合に，疲労き裂が発生し進展する現象で，ノズルやフランジなどのすみ肉溶接部やフレキシブルチューブなどの応力集中部に発生しやすい．補修方法には部分更新を適用し，再発防止策が必要不可欠である．

ノズルなどの再発防止策では，溶接構造のサポートを本管とノズルに取り付ける方法もあるが，この場合にはサポートの溶接止端部から新たな疲労き裂が発生しやすいため，注意が必要である．**図6**にその事例を示す．疲労き裂は溶接止端部を起点に発生し進展している．振動疲労を防ぐためのサポートは可能な限り機械的な固定方法とすることが望ましい．

4.8　熱疲労（応力集中部など）

熱疲労とは，内部流体の急激な温度変化によって熱応力が繰返し負荷された場合に，疲労き裂が発生し進展する現象で，温度差のある流体の合流部近傍

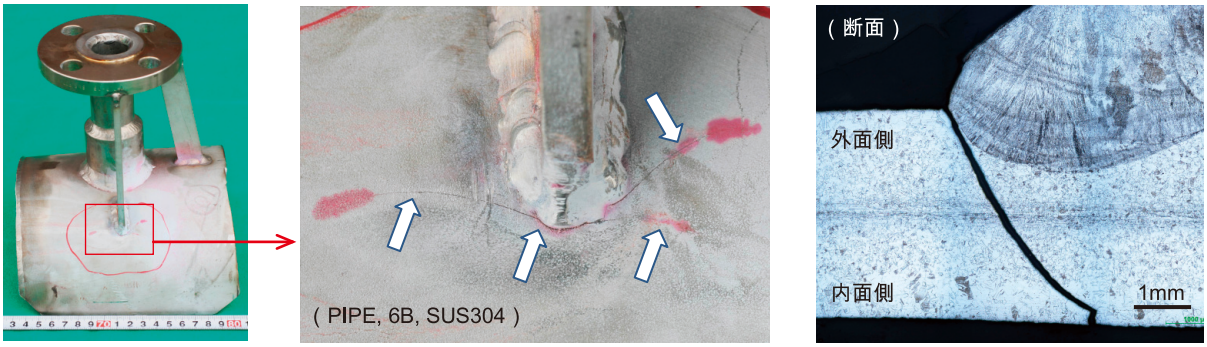


図6　振動疲労の事例

やドレン水が逆流しやすい部分で局所的に発生しやすい．補修方法には部分更新を適用し，再発防止策が必要不可欠である．温度差のある流体の合流部では，応力集中を緩和する構造とし，インサート管を挿入するなどの対策が有効である[20]．

5.　溶接補修の事例紹介

5.1　プロセスガス配管に発生した熱疲労

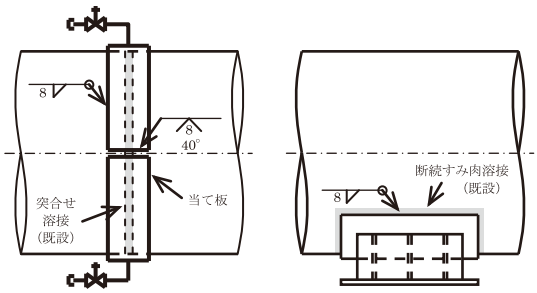
5.1.1　概要

30年間使用した炭素鋼製のプロセスガス配管において，突合せ溶接部より漏えいがみられたため，その部分を応急補修した後に部分更新を行った．そして，漏えい部の分析を行ったところ，運転操作にともなう応力変動によって生じた熱疲労と推定された．損傷部では，建設時から内在していた溶込不良を起点に割れが発生し，周方向に進展して貫通に至っていることが明らかとなった．その周辺の突合せ溶接部についても合わせて放射線透過試験を行ったところ，溶込不良が多数検出された．

5.1.2　検査

対象となる配管を，運転操作にともなう熱応力が負荷され，建設時に同じ品質で製造されたものとしたところ，そのサイズは18～42Bで，溶接個所数は180ポイントであった．また，過去にはその配管とサポートシューの溶接部においても，溶接止端部よりき裂が発生し漏えいした事例があった．

突合せ溶接部の検査は放射線透過試験を適用したが，対象となる溶接個所数が多いことおよび配管が高所にあることから，3回に分けて行った．検査の優先順位は，配管の熱応力解析の結果，過去の漏えい傾向，漏えい時の被害状況を考慮して決定した．サポートシューのすみ肉溶接部の検査は磁粉探傷試験を適用した．



(a)　突合せ溶接部　　(b)　サポートシューのすみ肉溶接

図7　補修溶接の方法

5.1.3　補修

突合せ溶接部の補修は，溶込不良の程度によって部分更新または当て板溶接を行った．当て板溶接の対象となった溶接ビードに対しては，その余盛を除去して，図7(a)のように当て板溶接を行った．当て板溶接後には磁粉探傷試験を行い，すみ肉溶接部の健全性を確認するとともに，各ノズルから気密試験を行った．一方，サポートシューのすみ肉溶接部の補修は，割れが検出されたものは割れを除去するとともに，図7(b)のように本管とサポートシューの断続すみ肉溶接を全周すみ肉溶接に変更した．補修対策を講じてからプロセスガス配管で漏えいは発生しなくなった．

5.2　LPGガス配管に発生した硫化物応力割れ

5.2.1　概要

炭素鋼製のLPGガス配管において，運転開始から1ヶ月間に数ヶ所のフランジすみ肉溶接部で漏えいがみられた．漏えい部の分析を行ったところ，内部

流体に含まれる硫化水素ガスと溶接部の硬化に起因した硫化物応力割れと推定された．損傷部では，割れがすみ肉溶接のルート部を起点に発生し，枝分かれをしながら進展し貫通に至っていることが明らかとなった．溶接金属の硬さは300HVを超えるところもみられ，溶接金属と母材の炭素当量はそれぞれ0.4%程度であった．

5.2.2　検査

対象となる配管を，内部流体に硫化水素ガスが含まれ，接液部が硬くなりやすい溶接部に限定したところ，その溶接部は小口径の差込み溶接継手が想定された．

すみ肉溶接の接液部硬さの上限値を248HVとし[21]，すみ肉溶接の接液部硬さと表面硬さの相関，および表面硬さ試験のばらつきから，表面硬さの管理値を200HVとした．そして，対象となるすみ肉溶接の表面硬さ試験を行い，それを上回る結果となったものは部分更新を行うこととした．

5.2.3　補修

部分更新では，溶接方法にティグ溶接を適用し，予熱を150℃以上とし，積層数を2層以上とした．溶接後には表面硬さ試験を行い，それが管理値以下であることを確認した．補修対策を講じてからは，LPGガス配管で漏えいは発生しなくなった．

6.　おわりに

配管の維持管理を適切に行っていくためには，新しい技術を既設および新設の配管へ積極的に取り入れて，イニシャルコストに多少の負担はあってもライフサイクルコストを重視して，20年後30年後の積み立てを行うような再発防止と配管設計を行っていく必要がある．それを実現するには，エンドユーザだけでなく，プラント業界全体でこの問題に取り組まなければならない．

参考文献

1) 高圧ガス保安協会：高圧ガス関係事故集計（平成28年6月末現在）(2016)
2) 中原正大：化学プラントの老朽化現象と対応，配管技術，57 (9)，pp.40-46 (2015)
3) 白石時宜：Thru-VUシステムによる保温配管放射線検査，配管技術，56 (2)，pp.44-47 (2014)
4) オリンパス株式会社，HP：腐食管理のためのガイド波検査
5) 有限会社ティティエス，HP：ロングレンジガイド波による配管診断とは
6) 有限会社ティティエス，HP：PECによる金属腐食のスクリーニングとは
7) 偕成エンジニア株式会社，HP：原理（MDKセンサ）
8) 日本非破壊検査株式会社，HP：超音波探傷検査UT
9) 金森道人，高須英明：屋外配管の外面腐食診断法について，配管技術，55 (14)，pp.55-58 (2013)
10) エアロジェル推進チーム：保温機能を回復させ，省エネに貢献する「e'-AIM®工法」，ニチアス技術時報，2，pp.17-21 (2012)
11) 日本ケイカル株式会社，HP：全体はっ水製品“ケイカルエース・スーパーシリカ WP”
12) 山城博隆:防錆機能付保温材の紹介,配管技術,56 (13),pp.89-94 (2014)
13) コスモエンジニアリング株式会社，HP：配管保全技術ーパイプライニング
14) 中野浩：エアロゲルを実用化した断熱・保温塗料，配管技術，57 (10)，pp.47-51 (2015)
15) 明星工業株式会社，HP：ULVA SHIELD
16) 溶接学会，日本溶接協会：溶接・接合技術総論，産報出版，p.353 (2015)
17) 中野正大，安西敏雄，炭矢芳男：オーステナイト系ステンレス鋼に発生した塩化物応力腐食割れの事例とその対策，高田技報，15，pp.18-23 (2005)
18) 中野正大，安西敏雄：エチレン製造装置の分解炉に発生する損傷とその対策，高田技報，21，pp.32-37 (2011)
19) 中野正大：微生物腐食（その2）―河川・地下水環境における微生物腐食―，防錆管理，58 (7)，pp.30-35 (2014)
20) 北陸電力株式会社：高サイクル熱疲労による損傷の防止に関する評価結果について (2008)
21) 石油学会：劣化損傷の評価と対応，JPI-8R-12-2014

中野　正大　Masahiro NAKANO
技術本部　企画開発部
技術開発グループ　グループ長
技術士（金属部門）