

◇ミニ特集：バルブと材料の損傷と寿命診断◇

化学工業における配管とバルブの損傷と診断

石丸 裕* 森久和*

1. 緒言

プロセスプラントにおいて配管とバルブは人体における血管系と同じように、極めて重要な役割を果たしている。配管そのものは単純な構造で、またバルブも本質的な構造変化が著しく進んでいるというものではないが、プラント全体あるいはパイプラインと言ったスケールで見ると総延長さや、点数は膨大なものとなる。そこでもしリークに至るようなトラブルが発生すると直接環境に接しているだけに影響は大きく、広範囲に及ぶ危険性がある。またバルブは閉止する機能と流量を調整する機能を持つが、そこでは流れが不連続になり、流体からの機械的な作用も強く受け、またスライド部のシール性という相反する要求も満たさなくてはならない。こうしたことからプラント内における重要度は極めて高く、かつその範囲（埋設されていたり、構外を走るパイプラインもある）、数の多さに対応する、検査、管理も容易ではない。

また現在の化学プラントにおいては1970年前後に建設された設備が大きな役割を占めており、老朽化による問題を解決すべく、予知、予見性の高い維持保全技術が要求されている。本報告では配管やバルブを構成する材料の視点から、そこに生じるトラブルや診断方法について述べてみたい。

2. 配管、バルブに発生する損傷

①化学工業のトラブル発生率

図1は総合的な化学工業で1年間に発生し、解析された約200件のトラブルの機器別分類を示している。配管に生じたトラブル数は全体の約10%でかなり大きい割合を示す。一方バルブに生じたトラブルは約1%であった。

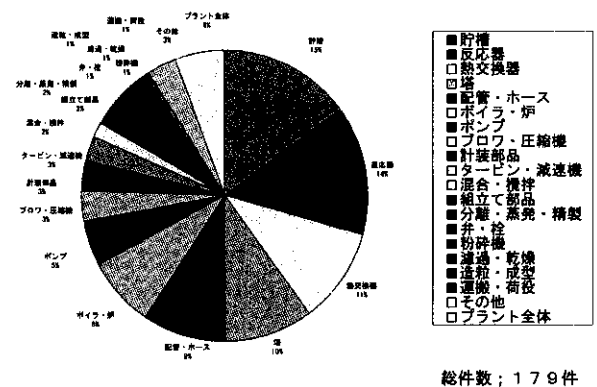


図1 総合型化学工業における設備損傷の装置別分類

バルブに発生するトラブル件数が少ないのは意外な感もあるが木村氏も同じ感想を述べている。1) その理由の一つとしてバルブは動的な要素であり故障が発生しやすい、また故障はプラントのオペラビリティや安全性に深刻な影響を与えるということで定期的な点検やパッキンの更新などメンテナンスが分厚いということが考えられる。ただバルブの制御系のトラブルは少なからずあるようだが本報告では取り上げないことにする。

②配管、バルブに用いられる主な材料について

当然のことながら配管やバルブにはそれぞれが使用される条件（応力、腐食環境、使用温度など）や求められる機能に応じて、金属材料はもとより、樹脂、FRP、ガラスや無機焼結材、またそれらの複合化材など幅広い材料が使分けられている。

こうした材料の使用にあたっては製造あるいは施工プロセスをよく考慮しておきたい。金属性管材の場合にはシームレス管と溶接管、熱処理プロセス等の違いが使用上のパフォーマンスに差をもたらし、また板材と管材では異なる組成や熱処理を有する事

*住友科学工業(株)生産技術センター、材料研究室

があり、板材を用いたラボでの腐食試験結果が管材にそのまま適用できないケースもあり得る。配管の溶接部で熱処理が必要な場合には、局部熱処理がなされることが多いが、加熱幅や温度分布によって材質的な改善はなされても残留応力の再分布により期待通りの低減がはかられないことがある²⁾。

樹脂材料として配管やバルブに使用可能な基本的材料は比較的限られているが、添加剤や施工プロセスによりその物性は微妙に変化する。特に添加剤の情報はユーザーには提供されないことが多く、金属の場合のような普遍性は期待できない場合がある。表面処理やライニングなどの方法による金属材料との複合化も広く取り入れられている。樹脂材料単独であっても外表面に耐候性を有する材料や塗装を配するなどの機能的複合化も進んでいる。もちろんバルブでは摺動部や座の部位を硬くする必要から材料複合化は早くから実用的になされている。

③発生する損傷モード

化学工業では、環境と使用される材料の組み合わせが複雑であるために、様々な形態の損傷が発生している。腐食環境下では均一な腐食減肉をうけることが多いが、配管、バルブといった性格上、流動やプロセスに同伴される気泡やスラリーの影響をうけた腐食やエロージョン、腐食摩擦、またフランジ面ではガスケット部での隙間腐食や孔食などの局部腐食がしばしば発生する。隙間部や液の滞留部（閉止中の配管やバルブも含めて）では塩素などの腐食因子の濃縮もおこりやすく、結果としてステンレス鋼では応力腐食割れを生じることがある。また管路が液で満たされていない場合には気相部で液の凝縮が生じ、そこで腐食因子の濃縮を来し腐食や応力腐食割れをもたらすこともある。この場合には外面の保温断熱による気相部の凝縮防止が有効なことが多い。また炭素鋼や鋳鉄性の配管やバルブでは、環境による腐食度そのものは小さくても、腐食生成物の体積が大きく管路を閉塞させてしまうことがある。例えば炭素鋼は常温海水中では0.1~0.2mm/Y程度の実用的耐食性を示すが、腐食生成物による閉塞の問題を生じることがある。大気により生じる配管の外面腐食は、配管の延長長さが膨大であり、かつ高所に設置され保守には足場を要することが多い等などの理由で、塗装管理や検査、その対策費も含めると巨額の費用損失をもたらしている。大気中には塩

表1 金属材料の高温使用による脆化現象

現象	材料の例	温度範囲	脆化因子 (割れ原因)
焼き戻し脆化	Cr-Mo鋼 (2.25~3Cr)	350~600°C	$J=(Si+Mn)(P+Sn) \times 10^4 > 150$ $X=(10P+5Sb+4Sn+As) \times 10^4 > 15$
フリー脆化	低合金鋼 (Cr<1.25)	400~550°C	$CFE=P+2.4As+3.6Sn+8.2Sb > 0.15$
再熱割れ (SR割れ)	ステンレス 高強度鋼 低合金鋼 (1~2.25Cr)	500~800°C 500°C~ 500~700°C	NbCの粒内析出強化 $Z=Cr+3.2Mo+8.1V-2I > 0$ $P_{22}=Cr+Cu+2Mo+10V+7Nb+5Ti-2 > 0$
黒鉛化	炭素鋼 0.5Mo鋼	425°C~ 468°C~	$Fe_3C \rightarrow 3Fe+C$ (グラファイト析出)
475脆性	Cr 2相系 ステンレス	400~550°C	フェライト相がCrの高い相と低い相に分離
σ相脆化	ステンレス	500~950°C	金属間化合物の析出(PHACOMP 析出)

分ミスト、SO₂、H₂S、CO₂、NH₃、NO_x等が腐食因子として存在し、また気温の変動や吸湿性のある不純物の存在で相対湿度が100%以下でも、金属表面に水分の凝縮が生じるために炭素鋼製の機器では0.1~0.2mm/yの外面腐食が進行するが、悪条件が重なるとこの何倍もの腐食となる。保温材下の腐食(CUI):Corosion Under Insuration:は非破壊検査が容易でないこともあり化学プラントの材料問題の懸案事項のトップのひとつとして位置づけられている。

高温配管においても管内流体の流動の影響は無視できない。流動に直接的な材料アタック作用がなくても保護性の酸化皮膜の形成を妨げたり損傷させることで加速的な酸化をもたらす場合もある。バルブにおいて酸化皮膜が不安定になるような形状部では、同じ理由で局部的な酸化の進行がある。また温度サイクルも皮膜損傷の一因となり得る。高温での金属組織変化は実用上避けがたいことではあるが高温強度の低下以外にも色々な事態をもたらす。ステンレス鋼を例にとると、高温下でのCr炭化物形成に伴う炭化物周辺のCr濃度の低下によって酸化や浸炭への抵抗低下が生じるが、同じ理由で湿食域における粒界腐食や割れの感受性も高くなっており、設備停止や休憩時に雨水に濡れるところで外面に深刻な保温材下腐食を経験した装置もある。特に高温用途では炭素含有量の高い材料が多く使われており、この傾向は強い。高温での組織変化は材料の延性にも大きい影響を及ぼす。特に表1に示す材料の脆化現象は配管やバルブのエルボウ、レデューサー、フランジ部等の形状不連続で歪みが集中する部位に深刻な割れをもたらす。昨今は化学成分の調整でこうした脆化への対処も可能となってきているが、古い設備では要注意である。

力学的な要因による損傷例としては管内の流動やバルブでの流れの乱れによる管系の振動、あるいは

往復動のコンプレッサーなど振動の多い機器から伝播する振動、脈動などにより、フランジ付け根や、配管支持部などの固定部で疲労破壊がしばしば経験される。高温では、配管系の熱応力とその繰り返しによる変形や疲労が懸念されるが、特にライニング材や熱膨脹係数の異なる異材接合、溶接部ではその界面に生じる局部的熱応力も問題になる。熱膨脹を吸収するためのベロウやたわみ部も変形モードと周囲の拘束を十分に考慮し、座屈などの大変形を生じないような注意が必要である。バルブではハンドルに過度な力を加えヨークで折損するとか、シート面に異物がかみ込んだまま締めつけ損傷を与える、あるいは鋳鉄製バルブで寒い日に凍結による割れが発生するなど設計時の考慮をこえる問題も現場では発生している。

④加工上の問題

配管では溶接に起因する問題が多い。工業用水や海水で使用される電縫鋼管のシーム溶接部には写真1に示すような溝状の選択腐食が発生する。鋼中のMnSが製管時にメタルフロウに沿って管表面に露出し錆下の隙間でのpH低下に伴って鋼のアノード溶解を促進する、あるいは溶接時の急熱急冷により溶接部がペーナイトを含む組織となるためといったような原因が考えられている。高圧ガス設備のように非破壊検査が必要とされる配管ではまれであるが、一般配管の溶接接合部では融け込みが殆どなく、管内面側は未融合のまま残されている所が少ない。水系の配管で、この未融合隙間部に腐食因子が濃縮し応力腐食割れを生じた例を写真2に示す。また低圧系ではフランジと管端部の溶接を全周行わず、スポット的に行う場合がある。写真3は小型貫流ボイラーのボイラー水配管のフランジで、こうした間欠的な溶接をしたために非溶接部からフランジ孔と管の隙間に水分が侵入し腐食を生じた例である。

大半のバルブは鋳造品であるために、局所的な腐食により漏れに至る部位は鋳巣やひけ等の鋳造欠陥と関連している場合が多い。また高Niや高Si系の高級ステンレス鋼が耐食性の観点から選択される場合には、特別に慎重な検査が望まれる。また鋳造欠陥は溶接補修されることが多いが、腐食が金属組織や組成の微妙な影響を受ける系で使用される場合にはバルブメーカーと事前に補修方案について認識を合わせておくべきである。配管のサポート部は図2-aに

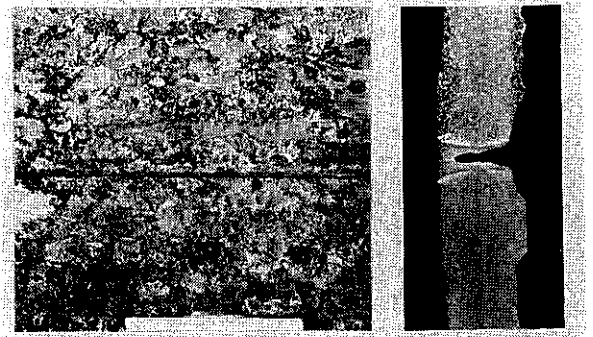


写真1 電縫鋼管に発生した溝状腐食

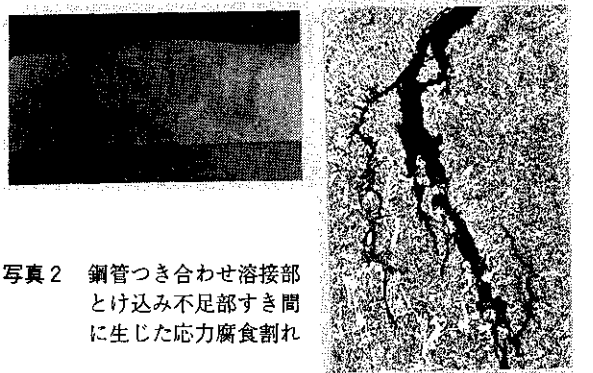


写真2 鋼管つぎ合わせ溶接部とけ込み不足部すき間に生じた応力腐食割れ

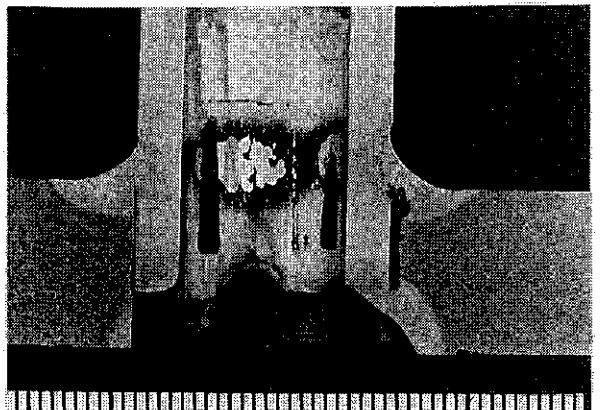


写真3 貫流ボイラー水配管、フランジ構造不適によるすき間腐食

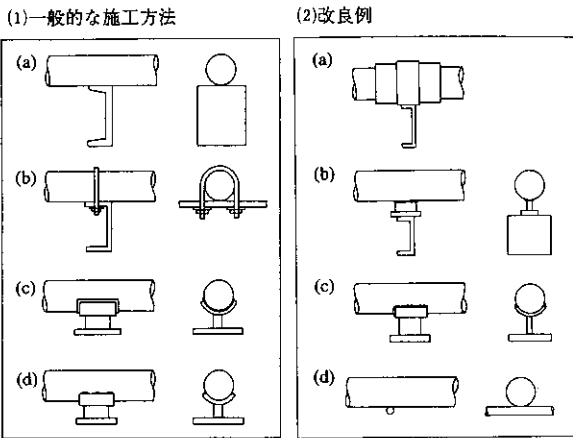


図2 配管のサポート方式

示すような構造が多いが、この部位に雨水やダスト、錆等が集積し局所的な腐食を生じる問題も現場の頭を悩ませている。よくとられる対策としては図2-bに示すように腐食のおそれのある部位を保護防食テープでまいたり、シューをかませて水がたまらない構造にするなどの方法が実用的に用いられている。樹脂やGLライニング配管の様に脆い材料が使用されている場合には工事中の衝撃、あるいは作業員が足場にする等の不用意な取り扱いによる損傷発生ケースもある。保温材解体、再組立後の後始末など、工事そのものの品質も配管、バルブの健全性には大きく影響する。

3. 具体的な損傷事例の紹介

以下に現場で実際に発生したバルブの損傷事例を紹介する。

①フランジネック部の折損

SCS13製バルブが写真4-aに示すようにフランジネック部で折損した。断面を調べると写真4-bに示すように casting defect が著しく、これによる強度不足とフランジに加わる配管からの曲げ応力、形状的な応力集中が原因の疲労破壊であると判断された。環境要因は認められなかった。

②ノズル差込溶接部の割れ

容器の壁にノズルを差し込み溶接し、そこにフランジを介してバルブを設置していた部位でノズル差し込み溶接部に写真5に示すような割れを生じ、ノズルが抜け落ちた。溶接部の強度が不足していたのが原因であるがこうした溶接設計不良部位は少ない。

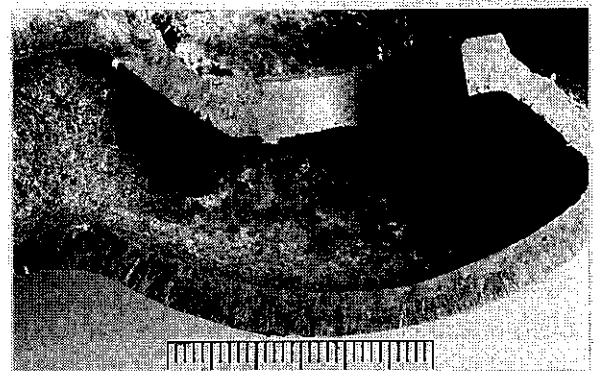
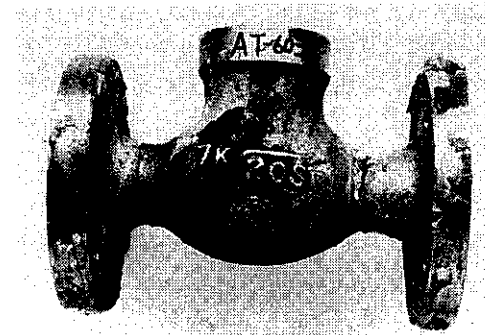


写真4 铸造欠陥を有するバルブのフランジネック部の割れ

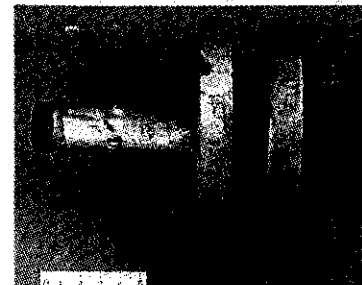


写真5 容器に差し込み溶接されたバルブとりつけ用ノズルの脱落

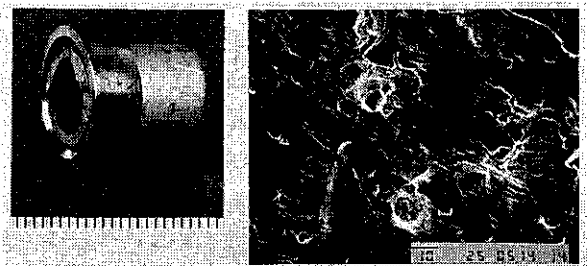


写真6 自緊式簡易継手部の疲労破壊

③自緊式ロック継ぎ手の割れ

自緊式ロック継ぎ手は簡易な機構ながら継ぎ手の信頼度は高く、広く使われているが、締め付け部に

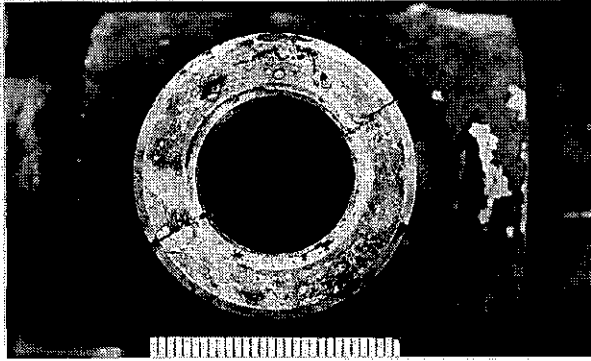


写真7-a ステンレス鋼製アングル弁に生じた割れ

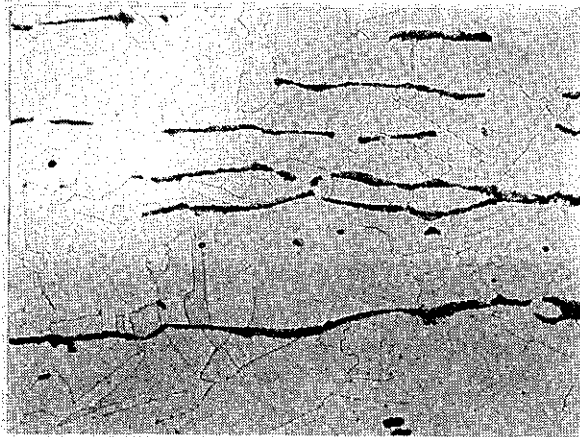


写真7-b アングル弁断面マイクロ組織

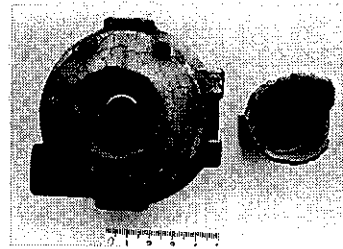


写真7-c 割れ部の断面（研磨のまま）

応力集中が生じるために曲げ応力が繰り返されるような部位に使用されると、写真6に見られるような疲労破壊が生じることがある。

④ステンレ鋼製バルブの応力腐食割れ

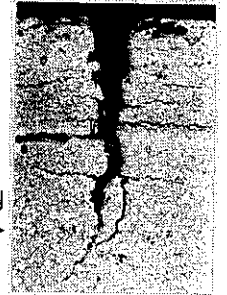
常温で塩化物系の触媒を含むラインに使用されていたSUS317製のアングル弁に写真7-aに示すような



↑写真8-a

亜鉛ダイキャストバルブの割れ

写真8-b 亜鉛ダイキャストバルブ割れ部のマイクロ組織



割れが生じた。この材料のマイクロ組織を写真7-bに示すが δ フェライトが圧延方向にすじ状に存在しており、写真7-cに示すようにこの δ フェライトにそった腐食が原因であった。

⑤亜鉛ダイキャスト製減圧弁の割れ

写真8-aに示すように亜鉛ダイキャスト製減圧弁に割れが生じた。マイクロ組織を観察すると写真8-bに示すように結晶粒界にそった腐食、割れが多数観察される。この材料の化学成分を分析するとPbが0.037%と高く、Cuが0.137%と低めであった。亜鉛中のPb、Sn、Cd等は、水分のある環境での粒界腐食を加速し、CuやMgはそれに対する抑制効果がある³⁾。JIS規格のPbの許容値は0.005%であり今回使用されていた材料はこれをはるかに上回る量が含有されており、これにより容易に粒界腐食割れを生じたものと判断された。

4. 配管とバルブの非破壊診断

①検査コード

日本には配管、バルブを対象とした一般的な検査指針やコードは用意されていない。海外規格で石油精製工場用途にAPI(American Petroleum Institute)で規格化されたAPI 570(Piping Inspection Code)⁴⁾は他産業においても十分に参考になる。そこには検査にあたっての総括的な考え方や特に石油精製プラントの配管やバルブで問題になる設備損傷形態に対しての検査の具体的な考え方や方法が示され、また検査頻度、結果の評価方法、記録方法、問題があった場合の対処方法なども示されている。さらこれを補う形でRecommended Practice 574(Inspection of Piping, Tubing,

Valve, and Fitting)も出版されている。

②劣化メカニズムと診断

化学工業に使用される配管類ではプロセス側からの腐食や磨耗による減肉、応力腐食割れ、つまり、また外面（大気）側からの腐食、応力腐食割れ、振動の有るところでは疲労による割れ、溶接部における割れや応力腐食割れ等が主な検査対象となる損傷である。最近では検査に対しての要求水準も高くなり、より精度の高い定量性や、隅肉溶接部、重ね継ぎ手部、保温材下表面などこれまで検査できないとされていた部位、あるいは局部腐食現象の定量的評価などが求められるようになってきている。

しかしこうした幾何学的に現れる事象だけではなく使用環境から材料が受ける質的变化や腐食の可能性を知りたいという要求も強くなっている。例えば高温では2—③に述べたように、使用過程で材料は組織変化を来し、それは設計の前提とされた強度性能の低下をもたらすだけではなく溶接熱影響部のような局部的な部位に脆化をもたらす。現場で使用中的材料のこうした材質変化を非破壊的に評価する手法の開発は今最も注目されている研究テーマの一つといってもよい。レプリカ法等により直接金属組織を観察する方法、またそこで観察される炭化物の状態変化やマイクロポイド発生率を画像的に定量化しようという試みも行われている。一方そうした組織変化は材料の耐食性にも影響があるということで材料を適当な電解質溶液に接触させ、そこでの電気化学特性（分極挙動）を評価するという方法も提案されている。もちろん超音波や渦電流、磁気特性などの物理的方法を用いた評価方法も種々検討されている。こうした技術の例を表2に示す。

バルブにおいては機能的な検査も重要になる。特に流体の内通のオンライン検査についてはアコースティックエミッション法や加速度センサーを用いた音響的なモニタ法が試みられている。そこでは現場の複雑なノイズ信号の中から、漏れにより生じる音響あるいは振動をいかに敏感に検出するかがキーとなっている。バルブにおける非破壊検査はバルブが鋳造により作られ、かつ複雑な形状をしていることから単純な方法では手に負えない事もある。また均一な管材料と違いバルブの場合には、非破壊検査で得られた物理信号を評価するための、同じ材料学的（結晶学的）条件を持つ適当な予備検討用材料や、

表2 材質劣化の主な診断方法

表面損傷 腐食欠陥、腐蝕結晶学的変化 電磁気的性質 磁気的性質 音響特性 腐蝕子寿命、エキソ電子 組織変化 電気化学的性質 脆化特性 変形形状変化 溶接部、コンプライアンス 機械試験 ブルーテスト
--

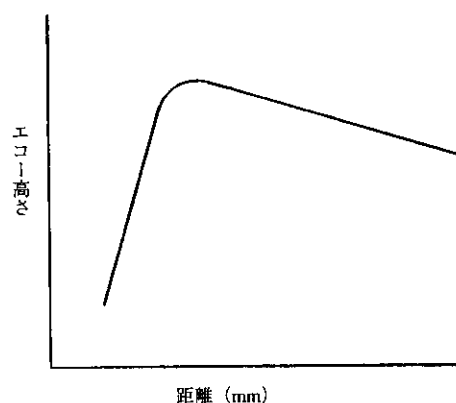


図3 超音波厚さ測定時の反射エコーの距離—振幅特性曲線（モデル図）（2振動子）

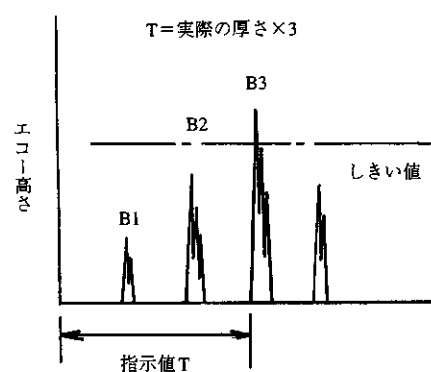


図4 超音波厚さ測定時に肉厚が薄い時の超音波エコー受信波形

検定用の試験片を得る事が困難である。理想を言えば検査したい部位毎に同じタイプ、設計、製法のバルブをつかって検査方法やデータ評価方法を検討する事が望ましい。

③配管の検査

次に配管に生じるいくつかの損傷形態について具体的な検査法を紹介する。

a. 腐食減肉

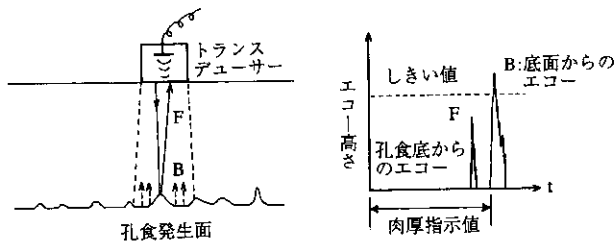


図5 孔食部の超音波厚さ測定時の誤差

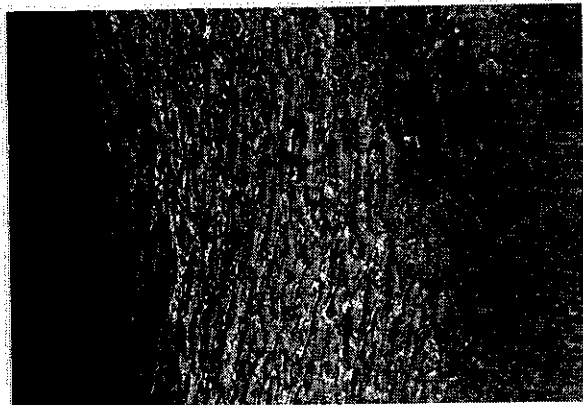


写真9 苛性ソーダによる腐食であれを生じた配管内面

腐食による均一減肉部の厚さ測定には超音波厚さ計が広く用いられている。測定法は超音波センサを垂直に材料表面に当てるだけという簡単な方法であるが特に腐食が進み残肉厚が薄くなると測定結果の判断には注意を要する。こうした場合には2振動子型垂直探触子を用いる事が多く、これを用いれば一般の鋼材で0.5mm程の薄いものでも測定可能である。しかし図3の2振動子垂直探触子の距離—振幅特性曲線に示すように薄肉側での受信感度が低いため、図4のように最初に受信する底面波B1エコーがしきい値を超えず、B3エコーを検出すれば肉厚測定値は2倍に表示されてしまう。残存肉厚の小さい場合の厚さ測定にあたっては、こうした誤表示による誤差防止のためには波形表示機能のついた超音波厚さ計を用いて波形観察による確認を行うことが必要である。

また、防食のために表面に溶射法などでセラミックコーティングをしたり、ボイラー水管のように管内面にシリカなどの固いスケールが付着した場合の皮膜厚さの測定は、皮膜側の音響インピーダンス(密度×音速)が小さいので、皮膜形成面の反対側の面から測定することにより、皮膜と母材を合計し

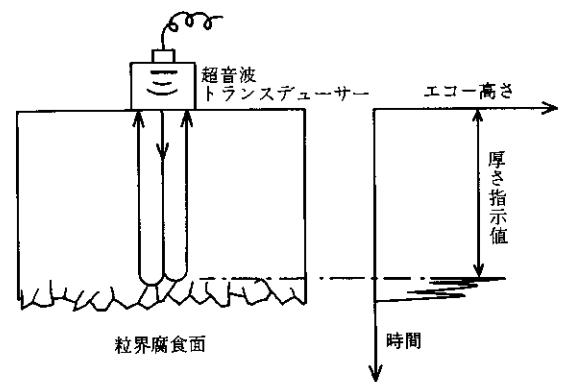


図6 超音波直接接触法による粒界腐食材の厚さ測定(非腐食面からの測定)

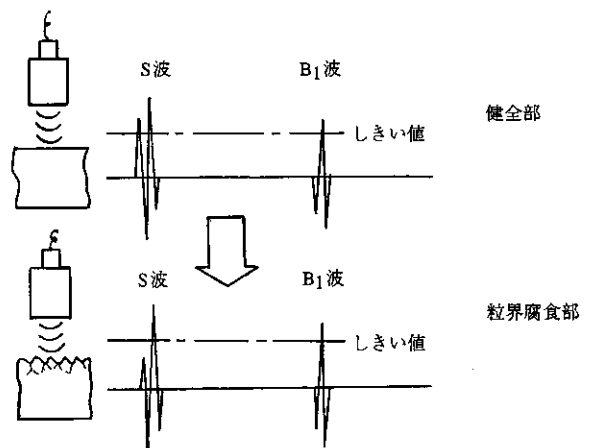


図7 超音波水浸法による粒界腐食面からの厚み測定時の問題点

た厚さが測定される。

孔食やエロージョンにより不均一な減肉を生じた部位の検査にも、超音波厚さ計が用いられることが多い。この場合、図5に示したように超音波探触子の振動子径に対して検査対象となる腐食部の孔径が小さいと、腐食底からの反射エコー強度は弱くなり、これより遅れてくる強い底面エコーにマスクされてしまい腐食底までの厚さは測定出来ない。写真9は苛性ソーダの移送配管で激しく凹凸状に腐食しているが、このような表面になれば超音波を入射しても乱反射し原理的に超音波法は適用できなくなる。こうした場合には放射線法が用いられる。減肉部の深さ測定精度は超音波法よりは劣るが、孔食のような局部腐食であっても、予め深さのわかった平底孔を用いて写真濃度と深さの相関図を作成しておけば、かなりの精度で腐食深さの定量評価は可能である。

ステンレス鋼に粒界腐食が生じると結晶粒脱落に

表3 保温材・断熱材下腐食の非破壊検査方法

手 法	検 査 手 法	測 定 原 理 および 特 徴
放射線	フィルム (写真乳剤)	放射線の透過量の分布をフィルム上で像として観察する。
	FCR (Fuji Computed Radiography)	フィルムの代わりに輝尽性蛍光体をプラスチック支持体上に高密度薄層塗布したIP(Imaging Plate)を設置し放射線の透過量の分布を記録する。専用の読み取り器を通してCPU上で画像化できる。微量線量に対しても感度が高い。
	スルーVU (real-time-radiography)	放射線の透過線量を計測できる半導体センサーを配管を挟んで線源の対面側に複数個並べたアレイセンサーにより透過放射線量を計測する。透過線量はデジタルデータとして取り出すことが容易であり、配管上をスキャンングすることにより、CPU上で透過放射線量のマップ(腐食減肉マップ)を画像化できる。
	RTXS (Real Time X-ray Scope)	放射線の強さに応じて発光する蛍光板の像(光)を増幅し CCD カメラを通して TV モニターで観察できるため、現場でリアルタイムに腐食状況を確認できる。
	中性子水分計	中性子線源からでる速中性子が水素原子に当たると減速し熱中性子に変わる性質を利用し、この熱中性子量を計測する。断熱材に浸透した水分量を計測し、潜在的な腐食部位を特定できる。
渦電流	パルス エディカレント	通常使用される交流波ではなく、パルス波を用いて試験材の励磁を行なうことにより、高エネルギーの励磁電流をコイルに印可でき、大きな磁界強度を得ることができる。測定は、1次コイルに与えたパルスの波形と材料に渦電流が流れるのにもなって2次コイルに発生するパルス波形の比較を行なう。
	極低周波数エディカレント	通常、数 KHz～数 100KHz の交流が用いられるが 50Hz 以下の低周波の交流を検査コイルに印可して検査を実施。50mm 程度の保温材を介して直径 50mm 程度の腐食減肉を検出できる。

より腐食面は荒れてくる。この場合非腐食面側から超音波厚さ計により測定すると、図6に示したように粒界腐食の底からのエコーを検出するために正味の健全肉厚を測定出来る。しかし腐食面側から超音波を入射すると、図7に模式的に示すようにその面の荒れにより表面で反射する超音波の最初のピークが減衰し、次のピークの波にゲートがかかり、1波長分の測定誤差が生じることになる。オーステナイト系ステンレス鋼では10MHzの探触子使用時では約0.6mm、5MHzの探触子使用時では約1.2mm薄く測定することになる。

b.外面断熱材下腐食、ラック支持部の腐食

配管外面断熱材下腐食の確認法としては、順次範囲を決めてその範囲の断熱材を全て解体して検査する方法や、外装板に隙間が開いている部位や腐食されている所、弁、ノズル、エルボー、T管部など外装板に隙間が出来やすい場所を限定して検査する方法などが現場ではとられている。また断熱材に吸収された水分を強度の弱い中性子線源を用いて検出することで腐食発生の可能性の高い断熱材が濡れているところを探る装置も市販されている。こうした一律的な断熱材解体によらない検査法としては表3に示すような方法が提案されている。軟X線を配管の

接線方向に透過させて配管外面の腐食状況をモニターテレビで観察する方法、線源強度の強いイリジウム192を用いて配管外面から放射線を照射させ、透過線量を半導体センサーなどで検出し、内外面の腐食減肉を同時に観察する方法⁶⁾などの方法の実用化検討が進んでいる。

配管のラック支持部に生じる外面腐食の確実な検査方法は配管を吊り上げて検査することであるが、なかなか容易な工事ではない。非破壊的に検査する方法としては、図8に示したように超音波透過法が提案されている⁷⁾。ラックに振れ止め金具をつけて支持している箇所については管周方向に超音波探触子を配置し、ラックへの支持にバンド巻き方式が採用されている箇所については管軸方向に超音波探触子を配置して、透過してきた超音波の減衰量により腐食深さの推定を行う。

c.応力腐食割れの検査

応力腐食割れを検査する方法としては、炭素鋼など強磁性体には磁粉探傷試験 (MT) や浸透探傷試験 (PT) が、オーステナイト系ステンレス鋼など非磁性体には浸透探傷試験 (PT) が主として適用されている。しかしこれらの検査方法を長大な配管系の検査に適用するのは足場の問題も含めて非効率的で

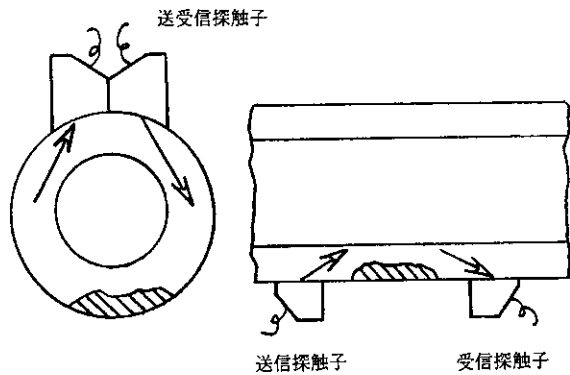


図8 ラック支持部に生じた腐食深さの超音波透過法による腐食深さ測定方法

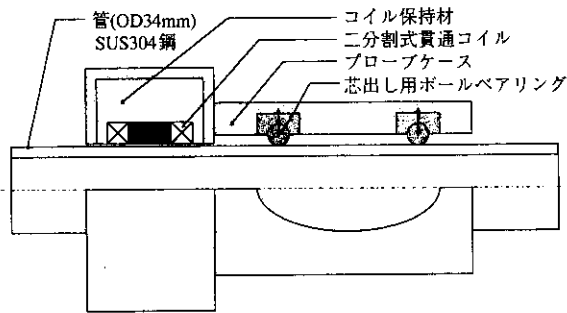


図9 管外面に発生した割れを検査するための分割コイル方式渦流探傷表面プローブ

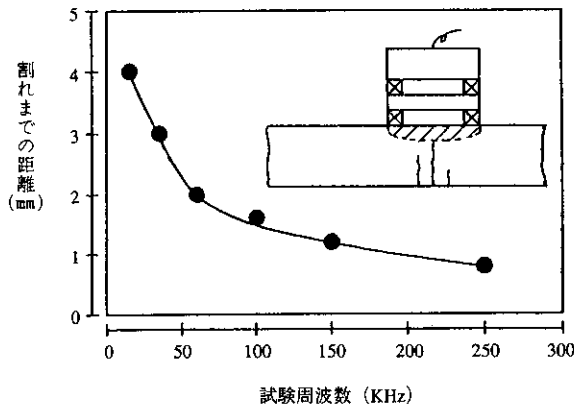


図10 渦流探傷法による割れ深さの測定(SUS304)
(割れまでの距離と、この割れを検出する周波数の関係)

問題がある。一つの対応策として図9に示したような、管全外表面の検査が可能な表面コイルを組み合わせた、2分割方式のプローブによる渦電流法をステンレス鋼管外面の大气による応力腐食割れ検査に適用している⁸⁾。割れの深さ方向の情報を得るのに適した超音波斜角探傷試験法は、応力腐食割れが単一亀裂ではなく分枝状に進展、分布しているために、それらの割れから反射するエコーはいわゆる林状エ

コーとなり、ビーム路程解析ができず割れ深さの推定は困難となる。こうした場合は渦電流法により、図10に示すように表面上置き型プローブを非割れ発生面に設置し、渦電流の浸透深さが周波数に依存することを利用して欠陥先端位置を求める方法が実用化されている⁸⁾。

d.管内の詰まり、汚れの検査

化学設備の保守に於いて、重合物や反応生成物の配管内面への詰まりは大きい問題となっている。この検査方法として現場的にはテストハンマーを用いた打撃により音の変化を聞き分ける方法が古くから行われている。定量的な検査方法としては、放射線強度の弱いセシウム137の放射線を配管外面から透過させ、内部のスケール付着状況の分布をマッピングする方法がある。また、管の一端から可聴音を管内に入れその共鳴状態をマイクロフォンで検出し音響解析してつまりの状態を判断するという機器も市販されている。

e.金属組織

溶接部の健全性や材料の劣化状況の確認のために、レプリカ法による金属組織観察は有効な診断手法として広く用いられてきた。これに代わる簡易な間接的組織検査方法として硬さ測定もよく行われる。現場では、超音波硬さ計やリバウンド式の硬さ計が使い勝手がよく、かつ検査部表面の仕上げを良くしておけば検査精度も満足できる所にある。

f.残留応力の評価

配管では特に溶接部の局部焼鈍後の残留応力が問題になる。残留応力は組織や硬さでは評価出来ないので直接測定する必要がある。非破壊的な測定方法としてはX線回折法、バルクハウゼンノイズ (BH) 法、磁歪法、超音波を用いた音弾性法等がある。

X線回折法はBraggの条件を用いて結晶格子面間隔の変化を測定する方法で、材料表面の応力を精度良く測定出来るが、金属組織の状態に対する配慮は必要である。バルクハウゼンノイズは、強磁性体に磁界が印加されたときに生じる磁区の発生、成長過程での磁壁の不連続な動きによる磁気ノイズである。このノイズの発生量がマクロな弾性応力負荷に関連しているということで、この信号の強さから材料表面の応力を求める方法がBHノイズ法である。やはり金属組織に敏感な方法である。また、強磁性体に磁界を印加したときの逆磁歪効果により生じる磁気異

方性（方向により生じる透磁率の違い）を利用した材料表面の残留応力測定法が磁歪法である。超音波音弾性法は材料内の応力によって縦波と横波の音速変化が異なることを利用した方法である。

g. フランジボルトの締め付け力測定

現場的にはナットのハンマリング時の音の変化により締め付け状態の判断がなされている場面をよく目にするが、こうした経験の蓄積が無くともよい、定量的な評価方法が必要とされている。最もよく行われるのがボルトの締め付け時のトルクをトルクレンチにより測定する方法である。しかしこの方法は、ナット座面とフランジ面の摩擦係数の違い等により不正確なものとなる。そこで直接ボルトの伸びを測定して軸力に換算する方法が最も正確であるというわけで、ボルトセンターに軸方向の小孔をほぼ全長にわたってあけ、測定棒を差し込んでそれを基準にボルトの伸びを測定する、超音波をボルトのヘッドから軸方向に入射し先端までの往復時間を測定して伸び量を測定する方法等が用いられている。最近では、六角形ナットの両対面に超音波探触子を配し、締め付けによりボルトとナットのネジ面の接触圧力が変わることを半径方向の透過音圧の減衰量で評価し、これを軸力に換算する方法も行われている⁹⁾。またボルトの応力そのものを前述の音弾性法で測定する方法もあるが、縦波と横波の音速比の変化は極めてわずかなので測定はかなり難しい。またフランジとボルトをひとつの振動の伝播媒体と考え、締め付け力により振動の伝播特性が変わる、あるいは系の剛性変化による共振波数が変わる等々の性質を利用した評価なども行われている。

④バルブの検査方法

a. フランジリング溝の検査

高圧高温で使用されるフランジには、断面がオクタゴナル形をしたリングガスケットを用いる構造が多く使われている。フランジ部を解体すれば浸透探傷試験（PT）によりこのガスケットの溝部の欠陥検査は容易に行えるが、解体をしないで、超音波法を用いフランジが締結された状態で、フランジ外周面側から垂直探傷法、またフランジ面側からは斜角探傷法による検査も行われている。

b. 弁座シート面下の割れ検査

弁座シート面の割れや欠陥に対しても一般には浸透探傷試験（PT）が適用されているが、コーナー部

の割れは見逃す可能性が強い。そこで超音波探触子を細長い保持治具の先に固定することで弁内に挿入し、弁座シート面の下側の弁本体の内面側から垂直探傷試験を行うことも試みられている。

c. 逆止弁の検査

逆止弁には内部流体による腐食やエロージョンによる減肉、弁や取り付けボルトの脱落損傷あるいはスケールの推積も起こりやすい。これら内部状況の把握には、弁外面からの放射線透過試験（ γ 線）が断熱材を取りつけたままの状態で行われている。ただし弁本体は厚肉で、かつ形状も複雑であるために、従来から用いられているフィルム法の画像では解像力が悪く精度が劣るために、最近ではイメージングプレートを用いたデジタル画像解析により評価される例が多いようである。

5. 結果の評価

日本の化学工業においては現在の所、設備供用過程で得られた検査結果に対して、原子力発電用圧力容器について準備されているような公的な評価、維持基準¹⁰⁾は無い。化学工業で用いられる材料や環境の多様さが一つの理由といえるが、法的にも風潮としても、損傷を許容するという環境ではなかったというのが主因であろう。しかし最近になって化学設備に於いても老朽化が進み設計時の基準のみでは設備維持が困難であると認識されるようになり、また破壊力学等の進歩もあって、損傷許容思想のもとに供用中検査で得られた検査結果を評価するための維持基準の必要性が強く認識されるようになってきた。APIでは先に紹介したAPI 520等の規格の一貫として、API RP 580(Fitness for Service)を作成中である。その目次案を表4に示す。但し、このような結果や減肉に対する評価式と、その判断基準になる経年材の材料特性や損傷の進展則が蓄積されて初めて精度の高い評価は可能となるわけで、そのデータベースの充実が更に必要である。

なおAPI 580では検査結果は確定的なもので見なされているが、現場における検査は、検査法そのものが持つ固有の誤差や検出限界、また検査員に原因のある見逃しや評価、判断、記録などの誤りを含んでいる。また現場の検査は必ずしも機器の100%の範囲をカバーしているわけではない。こうしたことから検査後の設備の信頼性や残存寿命を評価するには

表4 ARI RP579 Fitness for Service の内容

1. 脆性破壊評価方法(Brittle Fracture) 2. 全面減肉評価方法(General metal Loss) 3. 局部減肉(Local Metal Loss) 4. 孔蝕(Pitting Corrosion) 5. ブリスターと層間剝離(Blisters and Laminations) 6. 溶接変形(Weld Misalignment and Distortion) 7. 亀裂の評価(Crack-Like Flaws) 8. クリープ領域での(Operating in the Creep Regime) 9. 火災の影響評価(Fire Damage) 10. 付録 応力評価法、応力拡大係数評価法、臨界荷重法、 残留応力評価、材料特性、疲労曲線、劣化モード
--

確率、統計的な評価が必要なことが判る。そこで各検査手法に対してはPOD(Probability of Detection)といった指標で検査手法毎に欠陥寸法に対する検出確率を与える方法が試みられている。また限られた部位の検査から設備全体の最大損傷量を予測するためには、極値統計法がよく用いられる。例えば配管の適当に選ばれたある範囲の減肉測定結果から同じ環境で使用されている配管全体の最大腐食深さを推定するといった使い方である。具体的な方法については文献¹¹⁾を参照していただきたい。

6. 結論

化学工業で用いられる管とバルブについて材料的な観点から、そこに生じる損傷や検査について述べた。現在ではメンテナンスコストを合理的に低減させるために様々なコンセプトや方法論が提案され試みられているが、その過程でこうした材料の損傷とその診断に対する関心も極めて高い物になっている。

しかし大きい災害は比較的単純な原因で発生している例も希ではない。最後にバルブのトラブルが原因となって大災害を引き起こした最近の例を紹介してこの稿を閉じたいと思う。バルブ、配管の使用に当たって、基本的な設計と管理が基本であるという

良い教訓と思われる。

オレフィン製造プラントのプロセス炭化水素ガスフローを制御するチェックバルブにおいて、駆動軸のダウエルピンの強度が不足していたために運転中にこのピンが破損し、内圧により駆動軸が発射されたように抜け、そこから多量のガスが漏れて蒸気雲を作り、プラント全体に影響が及ぶ大災害となった。負荷の高い(Heavy Duty)炭化水素ガスを扱うにはチェックバルブの設計がpoorであったのが原因とされているが、この事故を起こした工場では後の調べで、ダウエルピンが破損するトラブルは過去に4回経験されていたことが判った¹²⁾。小さな部品の破損が大事故を引き起こした例であるが、過去の4回のincidenceでこの大災害が予測されなかったという事実を我々は深く受けとめる必要が有ろう。

謝辞

本報告をまとめるにあたり(株)キッツ、工業弁事業部、西部長より貴重な情報の提供をいただいた。記して感謝いたします。

<引用文献>

- 1) 木村、バルブ技報、11.2 (1996) 18
- 2) H.Ishimaru, Chemical Engineering Progress, 22(1980)170
- 3) 相山、非鉄金属材料、254、コロナ社
- 4) API 570, Piping Inspection Code, 1st ed.(1993) API
- 5) API Recommended Practice 574, Inspection of piping, Tubing, Valves, and Fittings 1st ed.(1990) API
- 6) 藤原、(株) CXR技術資料
- 7) J&H. クラウトクレマー、超音波試験技術、375 (1980) 日本能率協会
- 8) 末次、私たちの生産現場の設備診断事例発表会、pp. A1-4-1(1991) JIPM
- 9) 池ヶ谷、H10年度非破壊検査協会春期大会、119 (1998)
- 10) ASME Boiler & PPressure Vessel Code. Sec X I, Rules for inspection of Nuclear power Plant Components
- 11) 腐食防食協会編、装置材料の寿命予測入門 (1984) 丸善
- 12) J. C. Belke International Conference and Workshop on Reliability nad Risk Management, 459(1998) AIChE