化学プラントにおける局部腐食の非破壊検査と診断

今 川 博 之*

* 東レ株式会社工務第3部

Non-Destructive Inspection for Local Corrosion of Metals in Chemical Plants

Hiroshi Imagawa*

*Engineering Department, Toray Industries Inc., Nagoya

The measurements of localized corrosion for metals using in chemical plants by non-destructive methods such as ultrasonic, X-ray, eddy current etc. are explained. Several examples of estimation for corrosion damage in chemical plants are discussed.

1. ま え が き

最近の化学プラントは大型化し単系列化しているために、一度漏れ事故を起こすと運転への影響は勿論のこと、地域社会への公害などその影響は計り知れぬ程大きい。片やプラントの新設が少なくなつて、10数年を経過した装置を修理しながら、安全と稼働率の維持に努めているのが実状ではなかろうか。このような状況下では装置の運転並びに休止時の検査に重点が置かれ、各種の非破壊検査が採用されている。いろいろな測定器が手軽に使えるようになってきたが、使用中の装置の表面は部分的に大きな凹凸を有している上に、内面の腐食状態を観察できず、外面からの測定も多く、点在する最大腐食部位の検出と評価には少なからず問題を抱えている。そこで本報告では、腐食性環境下のプラントに発生する腐食損傷の例をあげ、その診断（測定と判定）の現状について述べてみたい。

2. プラントの腐食・割れに関する非破壊検査法

建設時の検査に比べて供用後の検査は多くの制約を受けると共に、一方では高精度の値が要求されて、現地検査員と依頼者の間で時折り測定値の信頼性について議論されることがある。そこで、まず各検査法について腐食や割れ等の測定に当たって注意すべき点を述べたい。

2.1 厚さ測定

最近、小型で精度の良い測定器が出現しているが、保

表 1 超音波厚さ計の使用上の注意点

要 因	内 容
腐食されて薄い部分 (1.0mm 以下)	厚さ 0.8mm が 1.6~2.4mm と表示され危険である。
材質による誤差	鋼が基準で、ステンレス鋼、銅、鋳物等指示値の修正が必要。
鋼材内部の不純物	圧延方向の不純物（ラミネーションも含）部からの反射で薄く表示されることがある。
表面腐食の凹凸大	油を多く塗布すると測定できるが油膜の 4 倍の厚さが加算され危険である。
裏面腐食の凹凸大	反射波が弱く測定不能が多い。

一般に多く使われている 10φ 5 MHz 測定範囲 1.0~100 mm の場合。

守検査では被測定物の面がかなり凹凸を有しているために、新しい板では見られない多くの問題を抱えており¹⁾、これらをまとめて表 1 に示す。すなわち測定器の精度は 0.1 mm あっても指示値は表面や裏面の状態によって大きく変化し、異状に大きい値を示す場合もありうるので注意しなければならない。

2.2 X 線による局部腐食の測定

配管等の曲管部に近い溶接部付近のエロージョン等による局部腐食は、外面からの超音波厚み計による測定では点検査となり、信頼性の高い結果を望めない。この対策として一般に放射線検査が行われ、管の内部に液体や固形物（さび等）が存在しない条件下で撮影される^{2),3)}。

* 〒455-91 名古屋市中区大江町 9-1 (9-1, Ooe-cho, Minato-ku, Nagoya, 455-91 Japan)

表 2 X線透過フィルムから管の残存肉厚を求める方法

区分	方 法	長 所	短 所	精 度
壁輪郭法	フィルムに写った管壁の像を実測する。	撮影と肉厚測定が容易である。	撮影枚数が増え不経済である。 管の口径が大きくなると輪郭が不鮮明となり測定困難となる。	±0.5 mm
コントラスト法	フィルム中央部の基準点の黒度と他の点の黒度を対比して肉厚を推定する。	2～3枚の撮影で、全周の肉厚推定ができ経済的で、検査落ちがない。	やや精度が悪く、肉厚の測定に特殊の技術が必要とする。 侵食凹みにX線吸収物質が溜まると誤差が生じやすい。	肉厚の±10% 2φ以上の孔食深さ推定可。

撮影の方法は表2に示す壁輪郭法とコントラスト法があり、やや精度が落ちるが後者が経済的なため広範囲な検査に採用されており、超音波厚み計との併用で精度の向上が計られている。

2.3 渦流探傷検査によるチューブ欠陥の検知

渦流探傷検査はチューブ内にプローブを圧縮空気にて挿入し、一定の速度（0.5～3 m/s）で引き出しながら記録を取る方法で、検査方法、条件の設定や判定には高度の技術が要求される。表3に欠陥部位と形態を対象に最適方式の適合性を、表4に判定用の出力信号に影響する因子を示す⁴⁾。このように多くの影響因子があることは、

表 4 渦流探傷検査時の出力信号に与える要因

区 分	主 要 因
欠 陥 形 状	長さ・幅・深さ
欠 陥 密 度	同一円周上の数
材質の電気抵抗	溶接部、内部応力、硬さ、温度
渦電流変化	支持板、管板、拡管溝、附着物、打こん、プローブの揺動
一次電圧変動	現地検査の場合近くで溶接器などを使うことによる電圧低下

他の検査に比べて操作と判定に熟練を必要とする。

2.4 腐食割れの検査

鉄鋼等の強磁性材には磁粉探傷検査が実施され、割れの検知能力は優れているが、現地作業においては実験室ほどの高精度は望めない。図1は6グループによる検知能力の差を示したもので⁵⁾、長さ5mm以下の割れ検出率

図 1 タンク内割れの極間式磁粉探傷検査によるグループ (A～F) ごとの欠陥検出率

表 3 チューブ検査に用いられる各種渦流探傷方式の比較

区分	対象	方 式	記 録 方 式	評 価 方 法	長	短	作業性	経済性
A	管板と支持板部を除く直管	振 幅 式 (自己比較形) (隣接比較形)	1チャンネル チャート紙	振幅値の大きさをみて比較する。	約6mm離れた隣接部と比較し異状を出力する。チューブ内面もしくは外面にある同一形状の欠陥検出に優れている。複合形態欠陥の評価には不適である。		良 好	安 価
B		位 相 振 幅 式 (自己比較のベクトル表示形)	2チャンネル チャート紙 (X, Y)	X, Yの振幅を読み取ってX/Yの比を算出比較する。	上記に同じ方式だが出力信号がX, Yのため、チューブの内面及び外面に共存する各種の局部損傷の検出と評価に優れている。しかし記録紙の解読に数倍の時間を要する。最近コンピュータ化のものがある。		やや劣る	やや高価
C		二 次 元 式 (位相振幅式) +絶対値式	3チャンネル チャート紙 (X, Y, Z)	X, Yは上記に同じ、Zは振幅値の大きさをみて比較する。	上記に同じ方式のものに、絶対値式評価のZチャンネルが加わり、軸方向に延びた均一腐食の減肉検知ができる。		やや劣る	やや高価
D	直管全長	多重周波式 (二重周波による位相振幅式) 三 次 元 式	4チャンネル チャート紙 (X ₁ , Y ₁ , X ₁ X ₂ , Y ₁ Y ₂)	X ₁ , Y ₁ は上記X, Yに同じ。 合成したX ₁ X ₂ /Y ₁ Y ₂ の比を算出比較する。	二重周波でX信号Y信号を合成し、管板等のノイズをカットし、欠陥信号のみを取り出しX ₁ X ₂ , Y ₁ Y ₂ をチャートに出力する。 解読は上記Bに同じく時間を要す。 X ₁ , Y ₁ のチャートは欠陥確認のために用いる。 X ₁ X ₂ , Y ₁ Y ₂ に絶対値式を加えた三次元式もある。		やや劣る	高 価

は平均 50% と悪い。このことは鋼製タンクの腐食割れ等の推移を評価する場合に注意すべき事項である。

一方アルミニウム、ステンレス鋼、銅合金、チタン材などの非磁性材には浸透探傷検査が実施されるが、検査時に閉口している運転時の応力に起因する割れは検出し難く、軟らかい金属はグラインダー等の前処理によって割れが閉口する場合もあり、注意が必要である。

2.5 割れ深さの測定

割れ深さの測定には、割れをまたいで電気抵抗を測定する方法があり、割れが分岐していると深さの推定に狂いが生じたり、測定時の接触圧や部位による測定値の変動が多い等の問題がある。

そのほかに放射線や超音波による方法もあるが、腐食割れのように分岐し湾曲しているものは、検知は可能であるが評価は一般に困難である。

2.6 その他運転中の検査

表面の温度を測定することにより内面のライニング厚みの減少を推定するサーモグラフィ（検知可能な温度差は $0.1 \sim 0.5^{\circ}\text{C}$ ）の適用や、使用中に伝播する割れから発生する音波をとらえ時間当たりの発生回数等を記録する AE（アコースティック・エミッション）法などがある。

3. 局部腐食の診断例

3.1 廃熱ボイラーチューブの局部腐食

縦型の軟鋼製多管式ボイラのシェル（ボイラー水）側の目視検査で、最上段の仕切板に接する部分のチューブに異状な隙間が観察されたため、抜管して調べたところ、ボイラー水による腐食（デンティン）であることが判明した。他のチューブについて問題がないか否かを明確にするために、検査をすることになった。

まず抜管チューブをモデルに磁性用（永久磁石）のプロブで渦流探傷検査を試みたが、仕切り板のノイズが大きく、局部的な外面の凹みを定量的に評価することは不可能であった。そこでチューブ肉厚測定専用の超音波厚み計を用い、チューブ（口径 50 mm、肉厚 3.7 mm）の内側から、上部仕切り板付近を上下させながら（約 100 mm）1 箇所につき 4 方向を測定した。その結果いずれも設計必要厚み以上あり、問題のないことが確認された。

3.2 タンク底板全面腐食の測定

重油タンク等は法規による開放検査が義務づけられ、多くの測定がなされている。最近ポータブルで精度の良い測定器が出現し、誰でも簡単に測定出来るため、使用者側でチェックを行い、測定値が指示値よりかなり（1 mm 近く）違っていることで、問題となる場合が多い。図 2 はタンク底板の定点を 5 回測定した時のばらつき

図 2 重油タンク底板の超音波厚さ計による定点測定（5 回）のばらつき、使用 10 年（測定器は 10ϕ 5 MHz 分割形）

きを示したものである。このように全面腐食とはいえ、大きい所で 1 mm（元厚の 15%）近い差を示し、完成検査時にはみられない保守検査時の特異現象とみなされる。これは底板が長期使用によってかなりの凹凸を呈しているため、測定プローブの少しのずれに対して指示値が大きくふらついたものである。このような現象から、タンク底板等の厚み測定には腐食の最大値を求めて、漏れの危険性を評価する極値統計法が適用されつつある^{6),7)}。

3.3 配管の定点測定について

装置の腐食管理は超音波厚み計による定点測定が多く行われている。図 3 は 15 年間使用して数箇所漏れを発生した軟鋼製送水管の残存厚さを 6 m 間隔で（1 箇所につき 6 回）測定した結果である。これから漏れ（残存厚み 0 mm）を予測することは困難であるが、経験的な値として、測定値の中に元厚みの半分以下の値がみられる場合は漏れの危険性が大であると判断されている。

この例からもわかるように定点測定は、新設プラント等で平均的な初期の腐食異常を早めに検知したい場合や、長期間使用したプラントで全体に腐食が進行して、破裂の危険を予知するには有効であるが、最近特に注目されている余寿命の推定にはさほど利用されていない。

図 3 15 年間使用して漏れを発生している炭素鋼製送水管の超音波厚さ計による測定結果

3.4 タンク底板の孔食と極値統計の応用

タンク底板は外面からの腐食のほかに、内面に防食のためにコーティングを施したものは多数の孔食を発生する場合がある。この孔食は内部に腐食生成物が詰まって盛り上がっているため、孔食の深さを知るのは容易でない。しかるに早期にタンクの底板を更新するか孔食の肉盛溶接を行うかの判定を下さなければならない。この場

表 5 ライニングタンク底板の孔食測定
(極値統計用) 結果

孔食深さの 順位 (J)	縦 軸 ¹⁾ (φ)	母材部の孔食 深さ (mm) ²⁾	溶接線上の孔 食深さ (mm) ³⁾
1	0.9	1.7	3.3
2	0.8	1.3	2.6
3	0.7	1.0	2.1
4	0.6	0.8	1.7
5	0.5	0.7	1.3
6	0.4	0.6	1.1
7	0.3	0.4	0.8
8	0.2	0.3	0.5
9	0.1	0.2	0.6

- 1) $\phi = \frac{N+1-J}{N+1}$: ϕ : 累積確率, J: 孔食深さの順位
N: サンプルの数(この場合は9)
2) 面積 $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ で 9 箇所を抜き取り各箇所の最大深さ
3) 長さ 2 m で 9 箇所を抜き取り各箇所の最大深さ

図 4 コーティングした軟鋼製タンク底板内面の孔食深さを測定し極値確率紙による解析 (使用 6 年)

合の診断の一例をあげる。

孔食の程度がやや異なる、底板コーナー部、及び溶接部、母材部に分け、一定長さ (約 2 m) 及び一定面積 ($0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$) を約 9 箇所を選び、その部分の孔食の数と深さを求め、各部の最大値を拾って表 5 を完成し、極値確率紙に描くと図 4 のようになる。対象部分の大きさ/サンプル 1 個の大きさから再帰期間 T を求め、当てはめ線と交わった点 A, B を下に降すと予想される最大侵食量 (極値) が求められる。

図 4 から、最も深い孔食は溶接線上にあって、4.8 mm (母材厚みの 80%) である。一方母材上のそれは 3.0 mm (母材厚みの 50%) で、漏れてはいないが、溶接線については余盛り分を無視して、肉盛り等の補修が必要と判定された。

3.5 ボイラーチューブの孔食

省エネルギー運動の推進に伴いボイラーの休止頻度が多くなって、運転中にチューブ漏れが 1 本発生した。切除して検査したところ、上下に走っている伝熱管の下部 U 字部に内面からの孔食がみられた。これは休止時に排出されない水のいたずらによるものと推定され、1 本首にした状態で引続いて使用可能か否かを調べた。

現象からみて、水の溜まる U 字部の孔食と推定され、U 字部 220 箇所から 9 箇所を抜き取り X 線透過写真を撮り、フィルムのコントラストから孔食 (数 mmφ) 部の

検査方法

濃淡から孔食部の残存厚みを推定する

図 5 炭素鋼製ボイラーチューブ内面 (蒸気側) の孔食深さを X 線写真にて測定し極値確率紙による解析

残存厚みを推定し（事前にフィルム濃度と凹み部の残存厚みの相関曲線を作成し参考にする）、各 U 字部の孔食部最少厚みを求め図 5 の極値グラフを得た。これから引き続いて漏れる危険性のあることがわかり、残存厚みの 50% 以上進行した孔食が 122 箇所（ $222 \times (1-0.4)$ ）存在し、全数検査による修理が必要であると判定された。

3.6 銅合金熱交換チューブの局部腐食

銅合金チューブはインレットアタックやデポジットアタックを受け易く、前者は十字方向の内径測定が、後者は渦流探傷検査が行われる。大きな熱交換器になると、全数検査を実施する前に抜き取り検査を行い、漏れの危険性を評価して、危ない場合には全数検査を実施すれば効率的である。

図 6 はインレットアタックを対象に 19 本選んで、損傷の著しい部分の厚さを測定し、元厚から侵食量を求め、各値の最大値を極値確率紙にプロットしたものである。この結果で極値が元厚の 50% を超えていると（図 6 の直線 B）全数検査を実施することになっている。

同様なことが、渦流探傷検査による局部腐食についても、各セクションごとに 20 本程度を検査して、各チューブの最大侵食深さを求めて極値確率紙にプロットして、全数検査に移るかどうかを定めている。

図 6 銅チューブインレットアタックの残存厚さを測定し極値確率紙による解析

3.7 ステンレス鋼製チューブの応力腐食割れ

ステンレス鋼製熱交換器のチューブ 1 本が定期検査の気密テスト時に漏れているのを発見し、管内鏡による検

査でチューブ内面の腐食はなく、外面（ボイラー水）からの応力腐食割れと推定された。果たして他のチューブには異常がないか否かを調べた。

ステンレス鋼チューブ管板付近の応力腐食割れの検査には渦流探傷法が適用され、割れ深さの推定には特殊技術を要するが、図 7 のようなデータが得られている。このデータを基に数百本のチューブを全数検査して、数本の不良チューブ（割れ深さがチューブ厚みの 50% 以上）を検出した。したがってこれに盲栓をして運転を続けることとし、2 年に I 回同様な全数検査を行い、数本の不良チューブに盲栓を施している。このようにして数年以上を経過するが運転中の漏れは全くみられていない。

A. 信号出力と割れ断面

図 7 縦型ステンレス鋼製熱交換器チューブの管板直下の応力腐食割れ検査

3.8 チタン製熱交換チューブの損傷

チタンは耐食性に優れているため、腐食性薬液の加熱に縦型の多管式熱交換器として用いられ、熱媒中（シェル側）に薬液の混入が濃厚となり緊急停止をした。早速解体してチューブ内の目視を行ったが薬液による腐食はなんらみられず、水張り検査で最下部仕切り板付近（熱媒の入口）で漏れているチューブを見出し、果たして漏れチューブのみ盲をして運転を再開して良いかを調べた。

チタンは非磁性材であるために渦流探傷検査が可能で全数検査の結果、熱媒の流量アップによる仕切り板部位での振動磨耗であることが判明し、チューブごとの減肉深さをデータから算出し、減肉値 50% 以上のものに盲をした。この場合注意すべき点は仕切り板の位置によって図 8 のように同一の振幅値でも減肉深さが異なることである。このように渦流探傷検査は、その解析には多くの要因を考慮して評価しなければならない。

図8 チタン製熱交チューブの振動磨耗損傷の渦流探傷検査に及ぼす仕切板位置の影響 (位相振幅方式)

3.9 熱疲労割れ配管の検査

内管が SUS 316 の 6 mm, 外管が SGP の二重管で, 内管のステンレス管が, 長期使用により熱疲労割れによる漏れを生じた。漏れ部以外に割れを発生していないか否かを確認する方法として, 放射線による検査を行った。

割れの検知精度を調べるため, 漏れた管の内管 (SUS) のみを取り出し, X 線透過試験を行った結果が図9である。このように割れの進行方向に対して, X 線の照射角

図9 X線透過検査による熱疲労割れ検出時の照射角度の影響

度が 10 度以上になると, 目で見えていた割れもフィルムには一部写らなくなることが判明し, 放射線検査によってすべての割れを検出することは困難であると言える。

一方図 10 は上記の割れの深さを高周波電気抵抗法で測定した結果で, 比較的真實に近い値を示しているものもあるが, 分岐した割れは過大評価の危険性がある。以上のように割れの深さや長さの定量的な評価にはいまだ多くの問題を抱えている。

図10 電気抵抗法によるステンレス管の熱疲労割れ深さの測定例

3.10 外表面の温度測定によるライニング残厚の推定

銅製の鉛ホモゲンに煉瓦ライニングを施した反応槽の, 煉瓦の残存厚みを測定するのに, 赤外温度計を用いて, 運転時の槽外表面温度を測定した西井⁹⁾の報告がある。図 11 はその測定結果で, C は新品に近いようで, A, B は数年間使用したものである。このように長期間使っている槽の外表面部の温度は高い値を示している。ここで壁を通して流れる熱量 Q_1 は次式で表わされる。

図11 反応槽外表面の温度測定による内面ライニング煉瓦厚みの推定 (C槽は新品)

$$Q_1 = \frac{t_1 - t_4}{l_1/\lambda_1 + l_2/\lambda_2 + l_3/\lambda_3} \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h})$$

t : 煉瓦, 鉛, 鋼各層の境界面の温度 ($^{\circ}\text{C}$)

λ : 同じく各層の熱伝導率 ($\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

l : 同じく各層の厚み (mm)

また放散熱量 Q_2 は輻射及び対流で持ち去られる熱量の和となり, 次の式で表わされる。

$$Q_2 = (h_c + h_r)(t_4 - t_a) \quad (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h})$$

h_c : 自然対流係数 $= 2.2(t_4 - t_a)^{1/4}$ ($\text{kcal/m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

h_r : 放射伝熱係数 $= \frac{4.96P_s(T_4^4 - T_a^4)}{(t_4 - t_a)}$ ($\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}$)

ここで

P_s : 黒度で 0.9 と仮定, t_4 : 表面温度, t_a : 外気温度

T_4, T_a は表面及び外気の絶対温度

そこで定常状態では $Q_1 = Q_2$ とみなし, 内外面の温度から煉瓦の厚み l_1 を推定することが出来, 図 11 の値を得ている。

3.11 AE によるタンクの応力腐食割れ検査

AE による割れ検知については液体アンモニア (高張力鋼) の例が高橋ら⁹⁾ によって報告されている。この

図 12 高張力鋼製液体アンモニア球形タンクの応力腐食割れ (AE モニタリング)

場合, 球形タンク ($1,600 \text{ m}^3$) の下部に PTZ 圧電素子 (共振点 140 kHz) 6 個を取付け, 100 kHz のハイパスフィルターを用いて測定し, 中央部に近い下部配管系からの雑音の少ない部分を対象に図 12 の結果を得ている。

このように明らかに多くの割れが発生している場合を対象に, 割れが少なくなった場合の監視には適しているが, 割れが現在なく, どこに何時頃発生するかの監視には, 周囲からのノイズの影響があり, 割れの発生か否かを判定し難い。過去に大きな割れを発生し, 溶接補修した部分の割れ再発の監視などに用いられると効果的である。

4. おわりに

局部腐食の診断について述べたが, プラントの腐食診断はハード (測定器) とソフト (測定解析技術) の結合技術であり, 基礎から積み上げたソフト技術を養わなければ, いくら高価な測定器を入手しても適正な診断は出来ない。現実の複雑な問題をより多く認識し, 腐食の診断に本稿が少しでも参考になれば幸いである。

(1985 年 1 月 14 日 受理)

文 献

- 1) 井元鑑二: 防錆管理, **27**, 358 (1983).
- 2) 今川博之: 日本材料学会腐食防食部門委員会, 研究会資料, No. 19, 1 (1980).
- 3) R. P. Krollicki: *Materials Evaluation*, **35**, 32 (1977).
- 4) 末次 純: 日本非破壊検査協会, 004 特別研究委員会資料 004-192 (1980).
- 5) 成田罔郎: 溶接技術, **31**, No. 11, 25 (1983).
- 6) 今川博之, 松野健三: 防錆管理, **26**, 15 (1982).
- 7) 腐食防食協会編装置材料の寿命予測入門, 丸善 (1984).
- 8) 西井進一: プラントエンジニア, 1984 年 4 月 p. 39.
- 9) 高橋 克: アンモニアと工業, **32**, 154 (1979).