

「建築設備配管の非破壊検査」 空気調和・衛生工学会機関紙より

名古屋営業所 近藤 浩

キーワード 設備配管 非破壊検査 内視鏡 放射線透過試験 超音波厚さ測定 磁粉探傷試験
浸透探傷試験 寿命計算

概要

空気調和・衛生工学会 → 須賀工業(株)技術研究所竹田さん → JUST本社坂井佳美さん → 近藤 という経路で執筆を依頼された、機関紙「空気調和衛生工学」2011年5月号特集「見えないところを見る」の「建築設備配管の非破壊検査」をJUST技報に載せます。JUSTではあまり売りに上げに貢献していない分野ですが、名古屋では探査グループ売りに上げの10%弱を占め、顧客はX線探査の顧客と同一のサブコンです。また、私が10年後には確実に会社にはいないので、わずかばかりの知識をどこかに残そうという意図もありここに掲載しました。

1. はじめに

非破壊検査と一口に言っても、超音波厚さ測定は腐食調査のための「計測」であり、放射線透過試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験は溶接施工時の溶接品質の確認のための「探傷」と、配管または配管の溶接部に何かトラブルが起きたときの「調査」の手法である。また放射線透過試験は四つ切りフィルムなどで溶接部に限らず配管を多く写し込めば腐食の「定性調査」となる。空調・衛生設備の生命線である配管の保守検査に適用出来る非破壊検査についてその原理と適用方法を紹介する。

2. 内視鏡検査

内視鏡検査は配管の中にスコープを挿入し、直接配管の中を観察する検査方法で、観察によってわかるものは

- (1) 錆こぶ、スケールなどの腐食生成物の状況
- (2) 堆積物や付着物の状況
- (3) 閉塞率の概略

などであり、超音波厚さ測定のように配管の残存厚さなどを知る事の出来る定量的な検査手法ではないが、管端コアなしのVLP配管の継手における錆こぶや排水管の堆積物の状況など直接写真撮影やビデオ撮影で記録が残せる調査方法である。

【機器の種類】

(1) ファイバースコープ

ガラス繊維の先端に対物レンズを付け終端に接眼レンズを取り付け目視で観察、または1眼レフカメラで撮影が出来る。解像度は繊維の1本が画素となるのでやや荒い。照明は別のガラス繊維の束でキセノンランプなどの光源ユニットから対物レンズの位置に導いて観察場所を照射し先端は手元で自由に湾曲させることが出来る。ガラス繊維が切断するとだんだん画素が抜け落ちて来るので取り扱いは慎重におこなわなくてはならない。

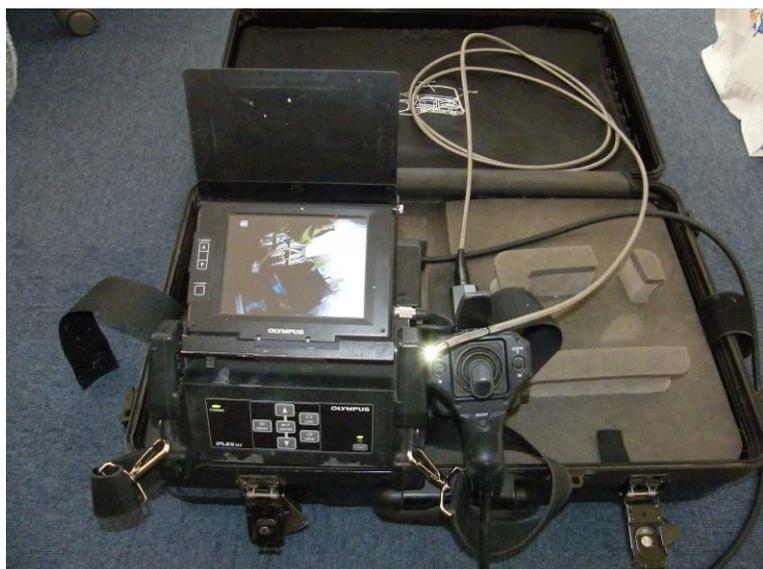
写真 2-1 (ファイバースコープ)



(2) ビデオスコープ

小型CCDカメラがケーブル先端に付き、長さが数メートルのケーブルで本体の液晶画面に画像を表示する。照明も白色LEDなどを使い、ガラス繊維を用いた装置よりも解像度が高く明るい画像が観察できる。種類によっては先端が自由に湾曲出来るもの、あるいは20メートルを超える長さのものもある。ビデオの外部出力が付いているので動画として記録することも簡単であるが、最近は家庭用ビデオカメラに外部入力端子が付いているものが無くなってきたので、名古屋営業所ではインターフェースを介して小型のノートパソコンに直接記録している。またコンパクトフラッシュメモリーを内蔵し静止画像を記録することのできる機種もある。

写真 2-2 (ビデオスコープ)



ファイバースコープ、ビデオスコープとも先端が湾曲できるものはエルボ・ティーズなどがあっても配管に沿って自由に進むことが出来るが、小口径配管ほどこれらの継手部をかわすのにある程度熟練

が必要である。

閉塞率はあらかじめCADなどで円の全面積に対する閉塞のチャートを10%刻みで作っておいて、画像とチャートを比べることで概略の数値を出すことができる。

写真2-3 (ファイバースコープ VLP 排水管)



写真2-4 (ビデオスコープ VP プール循環水)

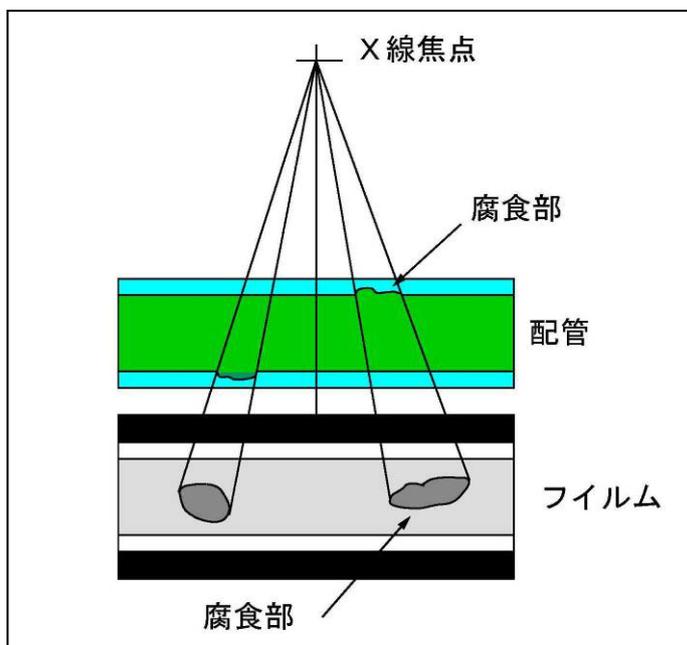


3. 放射線透過試験

放射線透過試験はフィルムで内部の様子が観察でき、非破壊検査の醍醐味といえる検査方法である。配管の放射線透過試験は施工時の完全溶込み溶接部の検査と保守検査における腐食調査に大別され、ここでは保守検査について述べる。

放射線透過試験の原理は人の健康診断における胸部X線撮影のように、一方からX線を配管に照射し反対側に設置したフィルム上に配管の透過画像を撮影する方法である。

図3-1 (放射透過試験の原理)

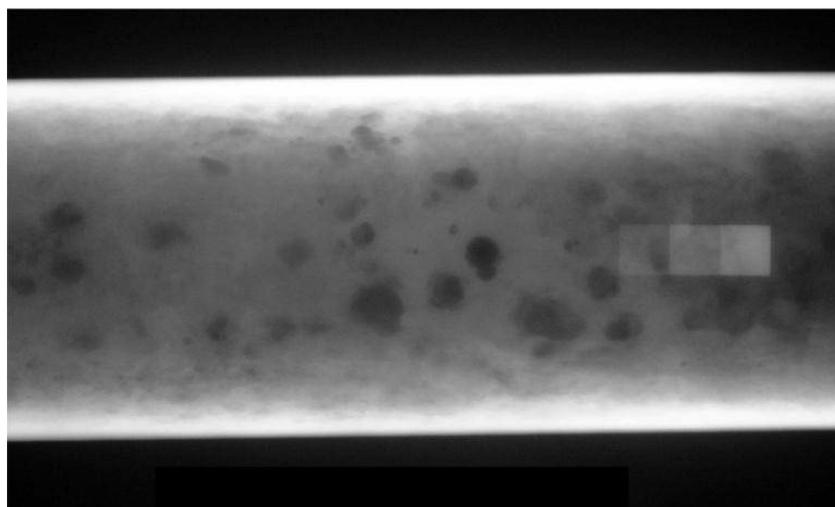


現在市販されている携帯型工業用X線装置は入力が200V、X線管（クーリッジ管）の印加電圧（管電圧）が最大200KVから300KV、管電流は3mAと5mAのものがある。管電圧を高くすれば発生するX線の波長が短くなり、X線のエネルギーも高く透過能力は増大する。管電流3mAのものは建物内の100V・15Aのコンセントから昇圧トランスで100Vを200Vに変換して使用でき、5mAのものは発電機を持ち込むか200Vの仮設分電盤を設置して使用する。

透過写真上の腐食は下記のように写る

- (1) 腐食部が他の健全部より黒く写る

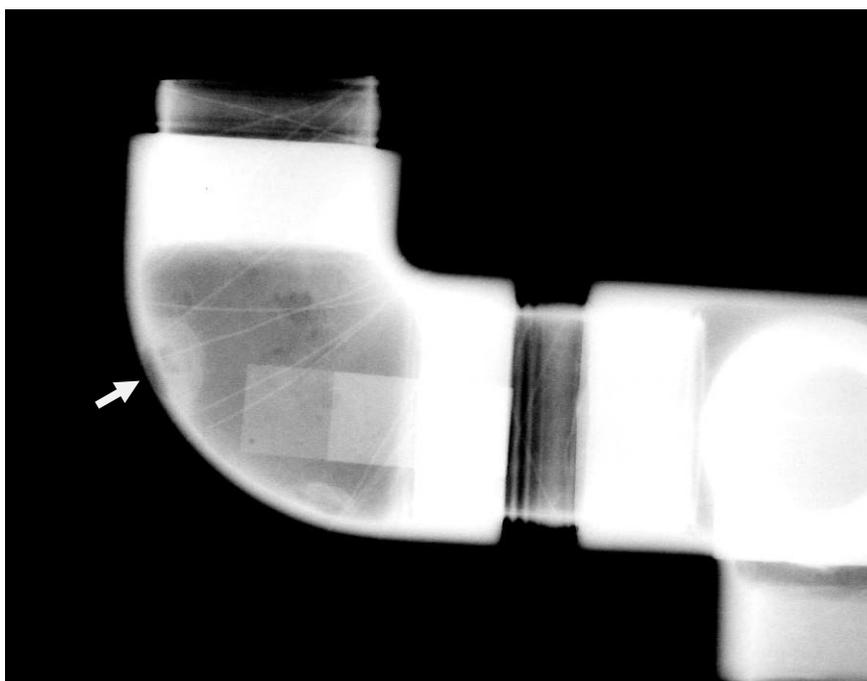
(写真3-1)



(写真3-1)は18年間使用した雑排水管（SGP100A、元厚4.5mm）で黒く写っている腐食部の残存厚さは超音波厚さ計による測定で1.4mmだった。

(2) 管壁が写り腐食部が管壁を抉るように写る

(写真3-2)



(写真3-2)は37年間使用した冷温水管(SGP32A、3.2mm)でエルボの背に貫通寸前の孔食が錆こぶとともに写し出されている。

微少な腐食をフィルム上の濃度差で撮影するにはX線の管電圧を抑えて吸収係数(μ)を上げるとコントラストが付きやすく、(写真3-2)のように配管(継手)の管壁を撮影したい場合にはX線装置の照射口に銅のフィルターを取り付け散乱線の原因となる波長の長いX線を除去し、エネルギーの高いX線を使用するとよい。

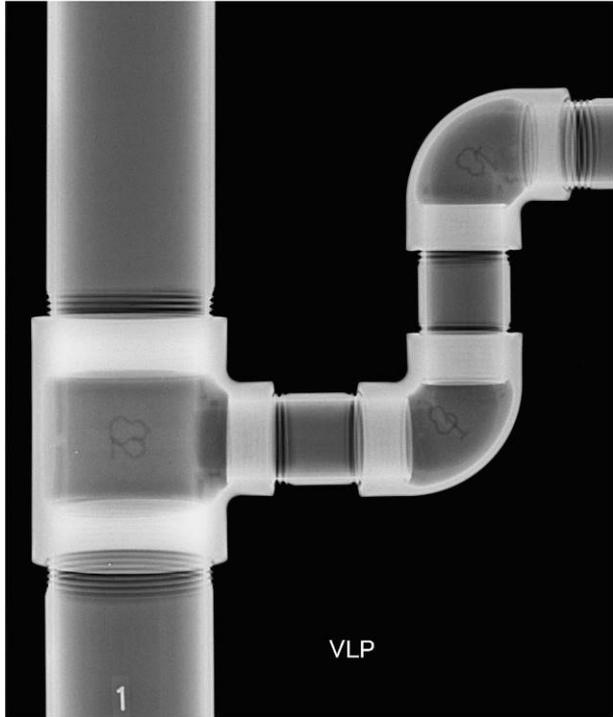
透過写真を観察して判読できる項目は腐食や錆こぶの状況、スケールや堆積物の厚さなど定性的なものであるが、透過写真で撮影された著しい腐食部を何力所かねらって超音波厚さ計で厚さ測定をおこなえば数値としての結果が得られるので寿命計算など定量的な評価をすることが出来る。

最近では従来の銀塩写真とはまったく違うCR(Computed Radiography)も非破壊試験分野で利用されるようになってきた。銀塩写真との大きな違いは

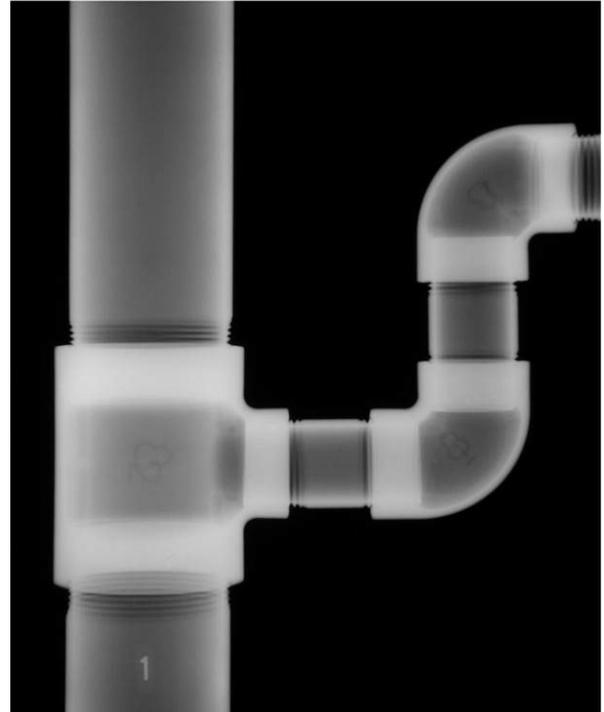
- (1) 現像、停止、定着など暗室作業がない。
- (2) フィルムに代わる感光材料は繰り返し使用できる。
- (3) 一般に使用される工業用フィルムに比べ感度が高い。
- (4) ダイナミックレンジが広く厚い部分、薄い部分両方が1枚の写真で表現できる。
- (5) 画像処理が可能で、目的にあった画像に加工できる。
- (6) コンピュータ上に情報を保存できる。

などメリットは非常に多いが、価格が非常に高価である。

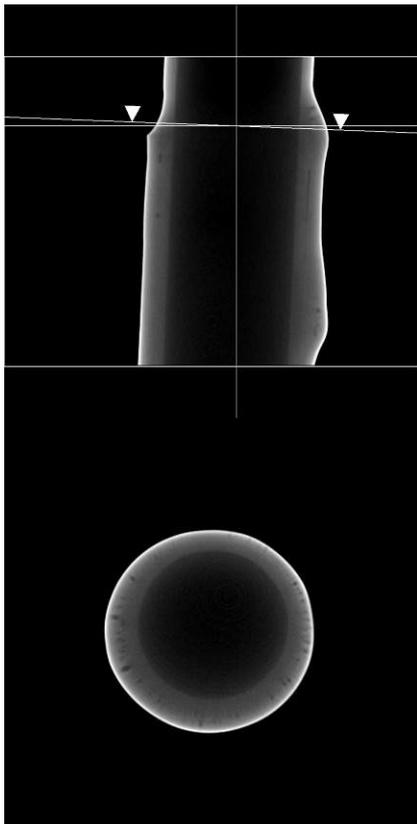
(写真3-3) CRによる写真



(写真3-4) 従来の銀塩写真



X線CT (Computed Tomography) は医療の分野で人の頭部の撮影によく利用されているが、電子部品の精密検査に使用されているCT装置で銅管のろう付け部を撮影した事例を紹介する。最大管電圧160KV、管電流0.2mA、認識解像度約1 μ mのCT装置で撮影したろう付け部は一般の工業用X線装置ではまったく写らなかったポイドと思われる空孔が銅管のフィレット部に集中して発生していることがわかり、断面のSEM観察では銅管重ね部の内部からフィレット表層部のポイドまでつながっていることが確認された。



(写真3-5) 銅管ろう付け部のX線CT

4. 超音波厚さ測定

超音波厚さ測定は配管の厚さを外面から0.1mm程度の精度で測定することが可能な検査方法で、配管の余寿命を推定する上で非常に重要な検査である。

現在用いられている厚さ計はほとんどパルス反射式の超音波厚さ計で、配管表面から入射させた超音波（縦波）の裏面からの反射をとらえ、その往復時間から厚さを求めている。

超音波厚さ計は近年様々な形式の測定器が販売され、測定値を厚さ計内部に保存しパソコンに出力できるもの、塗装やコーティングの上から金属部分だけの厚さを測定できるもの、測定値をデジタル表示するだけでなく、汎用超音波探傷器のように縦軸に超音波の反射強度、横軸に超音波の往復時間（厚さ）を表示したAスコープ表示器が附属しているものなどがある。

図4-1 厚さ測定の原理

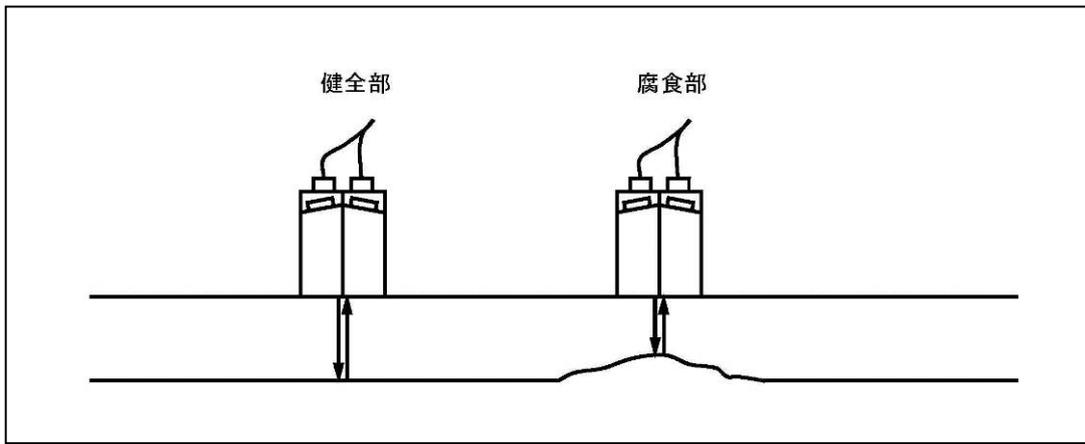


写真4-1 超音波厚さ計（デジタル表示）



写真4-2 超音波厚さ計（Aスコープ付き）



超音波厚さ測定は測定自体非常に簡単なものであり、あらかじめ決定しておいた測定点に対し前処理（塗装の除去、簡単な研磨）をおこない接触媒質（グリセリンなど）を塗布し、超音波の送受信をおこなう探触子（プローブ）を当てるだけで数値が表示される。この測定で重要なことは厚さ計の校正である。最近の厚さ計は厚さ計本体と探触子を接続しただけで自動校正をおこない測定できるものもあるが、探触子の片減りなどが原因で校正が不正確になってしまう場合がある。測定に際しては、必ず

対比試験片を使用して予想される測定対象の厚さを挟む2点で校正をおこなう事が測定の精度を高めるうえで重要である。校正を正しくおこなわなかったために、毎年定期点検をおこなう配管で、前年より厚い測定値が出てしまった話をときどき耳にする事がある。

厚さ測定用の対比試験片はJIS G 0801「圧力容器用鋼板の超音波探傷検査方法」附属書JAによる「二振動子垂直探傷用E形対比試験片(RB-E)」及びJIS Z 2355「超音波パルス反射法による厚さ測定方法」附属書6「超音波厚さ計用対比試験片(RB-T)」を用いる。

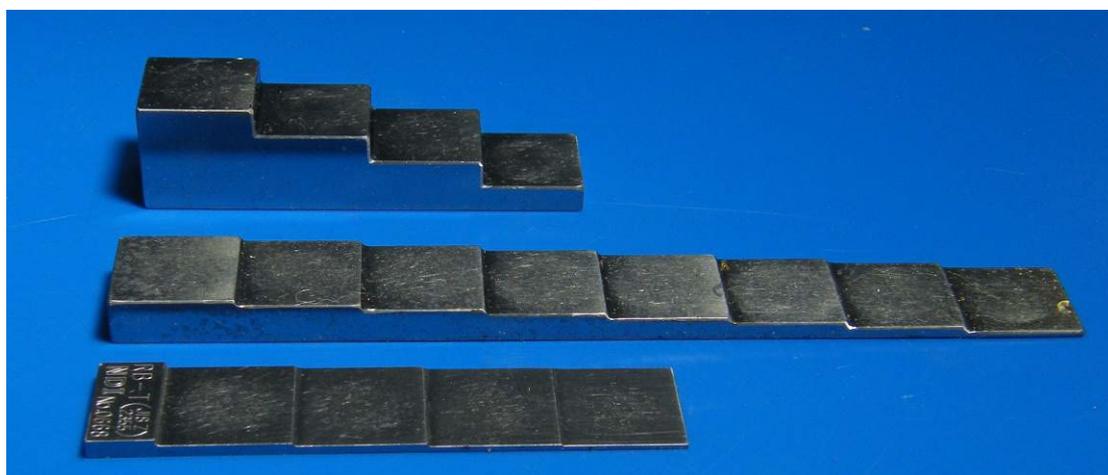
RB-EはSB410またはSM材などでSB410と同等の音響特性を持った材料で製作するが、厚さ測定用には規格より小さい大きさであるが現場での使いやすさを考え1面当たり20mm×20mmの大きさで、1mmから8mmの1mmステップ、5mmから20mmの5mmステップの2種類を備えておけば十分である。ステンレス鋼には同種のステンレス鋼で製作しなければならない。

RB-Tは厚さ0.8mm、1.0mm、1.5mm、2.0mmの階段状試験片で、厚さ計の校正というよりは測定に使用する厚さ計と探触子の組み合わせの測定最下限を確認する目的で使用される。一般に使用する周波数5MHz 直径10mmの探触子は新品の状態では概ね1.0mmの厚さを測定可能であるが探触子の摩耗により測定下限がだんだん大きくなっていく。

周波数5MHzの探触子を使用した測定で2mm以下の測定値が得られた場合、実際の厚さがその探触子の測定下限を超えていれば、最小値が実際の厚さの2倍程度の厚さを表示してしまう可能性があり注意が必要である。

また2.0mm以下の最小値が得られた場合、あるいは多くの測定点の内の最小値を周波数7.5MHz～10MHzの探触子で確認すると、内部の腐食の状態によっては5MHzでの最小値よりさらに0.3mm程度薄い測定値が得られる事もある。

写真4-3 対比試験片



測定点は配管の径に応じて円周45.0°(8等分)～10.0°ピッチ(36等分)、軸方向20mmピッチ10点など80点から360点の範囲であらかじめけがき線をいれて測定する。あるいは放射線透過試験で撮影されたフィルムを判読し、最も腐食している場所にねらいを付けて最小値を求めるなどの方法がある。

また、探触子の先端は平面であるのに対して、配管の表面には曲率があり、探触子の送信側、受信側の振動子を分割している音響隔離面を管の軸方向に直角に当てないと真の最小値が表示されないことがあり、特に小口径配管では顕著である。

ただし、JIS Z 2355「超音波パルス反射法による厚さ測定方法」附属書4 管材の厚さ測定方法では外径25mm以上（一部省略）では音響隔離面を管軸と「直角」に、外径25mm未満（一部省略）では「平行」に と記載されている。

測定は後述するJIS Z 2305による超音波厚さ測定技術者あるいは超音波探傷試験技術者の有資格者がおこなわなくてはならないが、測定者に求められることは配管の腐食のイメージを描いて測定しなくてはならないことである。空調配管の初期の孔食の状態や衛生配管の排水管における全面腐食の状態など、管種、用途、使用年数に応じて様々な腐食形態があり、抜管・サンプリングした標本やX線フィルムなどでそれらの配管の厚さ測定をおこなった場合、どのような測定値やその分布となるのかイメージしておかなければならない。

しばしば測定中に異常な値が得られることがある。すなわちほとんど腐食していない測定値の中にごく一部の測定点で元厚の1/2程度の厚さが表示される場合である。

鋼材の中にはまれに非金属介在物がちょうど鋼材の厚さの1/2程度の場所に存在し、これによる反射が表示されることが原因であるが、このような場合はAスコープ付きの超音波厚さ計、若しくは汎用超音波探傷器に周波数10MHzの分割型垂直探触子を用いて以上部の波形を見て確認するか、放射線透過試験をおこなえば、腐食部か鋼材中の介在物なのか容易に判定することができる。

雑排水管や污水管に使用されている鑄鉄管は一般の圧延材料を元に製造されたSGPやSTPGと超音波の音速が著しく異なりしかもかなりの幅がある。

表4-1

材料	縦波音速 m/S
鋼	5870~5950
鑄鉄	3500~5600
SUS304	5790

したがって圧延材料で作られた対比試験片は役に立たず鑄鉄管の場合はサンプリングされた鑄鉄管のテストピースの厚さをマイクロメータによって測定した厚さで校正しなければならないが1点での校正となり、正しい校正用試験片を用いたSGPやSTPGに比べ測定誤差は大きくなると思われる。

圧延材料の校正用試験片で校正した状態で鑄鉄管を測定した場合、実際の厚さより15~25%くらい厚い値を表示してしまうので注意が必要である。

また鑄鉄管は超音波の減衰が圧延材料と比べ大きく、一般の5MHzの探触子を使用した場合に測定値が表示されないときは2MHz以下の低い周波数の探触子を使用すると使用する超音波の波長が長くなり鑄鉄管による超音波の減衰が少なくなり測定が可能になる場合がある。

高温配管とは一般の厚さ計に用いられる探触子の使用温度60℃以上のものをいい、蒸気管などの厚さ測定をおこなう場合は、探触子、接触媒質とも配管の表面温度に適合した高温用のものを用いなければならない。測定の方法、探触子の冷却、厚さ測定値の温度補正などは使用する超音波厚さ計・探触子のマニュアルを参考にすると良い。

寿命計算は調査した配管があと何年くらい使用できるのか測定データに基づいて計算するわけであるが、配管の寿命は、「腐食が進行し配管を貫通して内容物が漏洩するまで」、「腐食が進行して配管の厚さが耐圧性能上必要な厚さ（腐れ代を含まない最小必要厚さ）に到達するまで」の2種類考え方があり、ネジ継手を使用している配管では、厚さをネジ部の厚さ（母材部の約1/2）として考える。

図4-2 寿命の考え方（常圧配管）

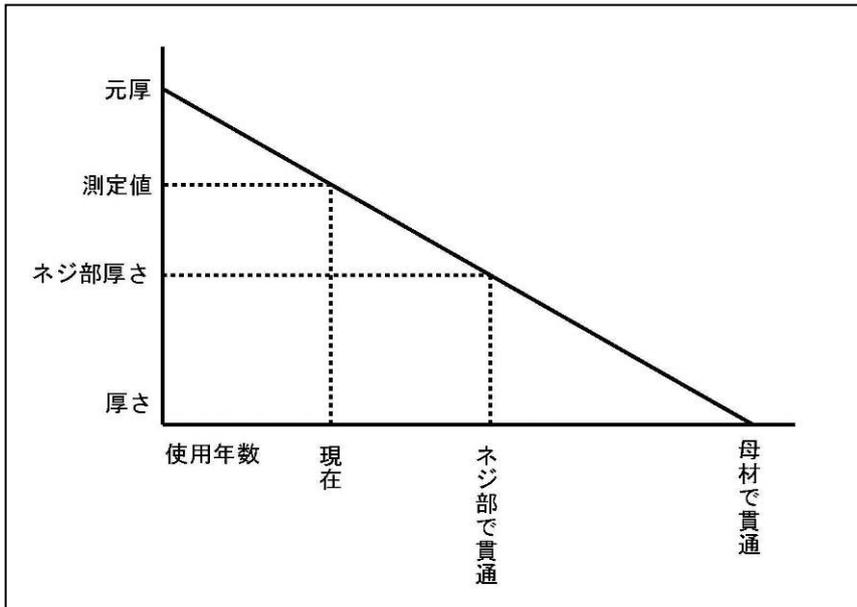
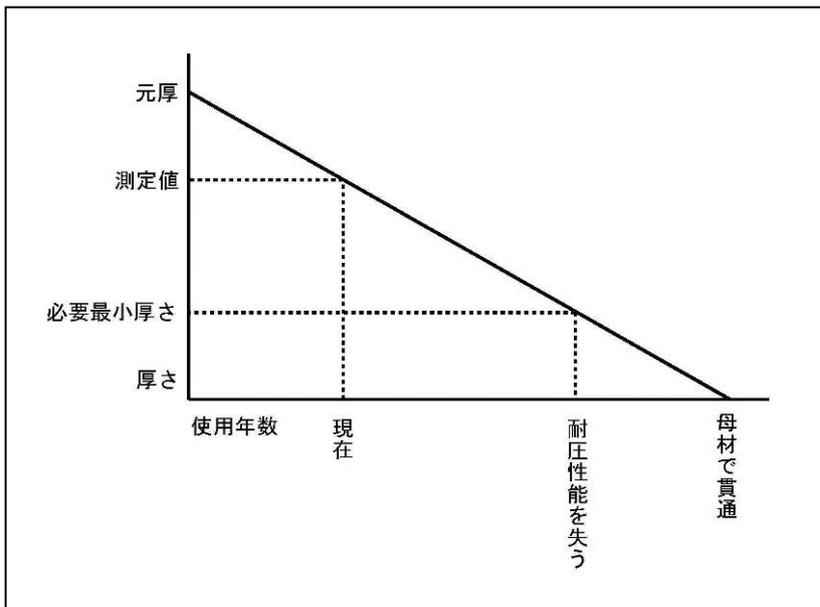


図4-3 寿命の考え方（圧力配管）



建築設備配管の場合、厚さ測定を定期的におこなうことはほとんど無く、使用開始から測定を実施した期間、同じ割合で（直線的）に腐食が進行したと考えるほかない。

また、超音波厚さ測定をおこなった部位は長い配管のごく一部で測定をおこなっていない場所に必ず測定値以上の腐食が存在するはずであるから、実際の寿命は計算で得られた半分程度と考えていた方がいいと思われる。

また、同じラインの配管で10箇所程度厚さを詳細に測ることが可能ならば確率的に予想される最大腐食量を計算する「極値統計解析」も可能かと思われる。

5. 磁粉探傷試験

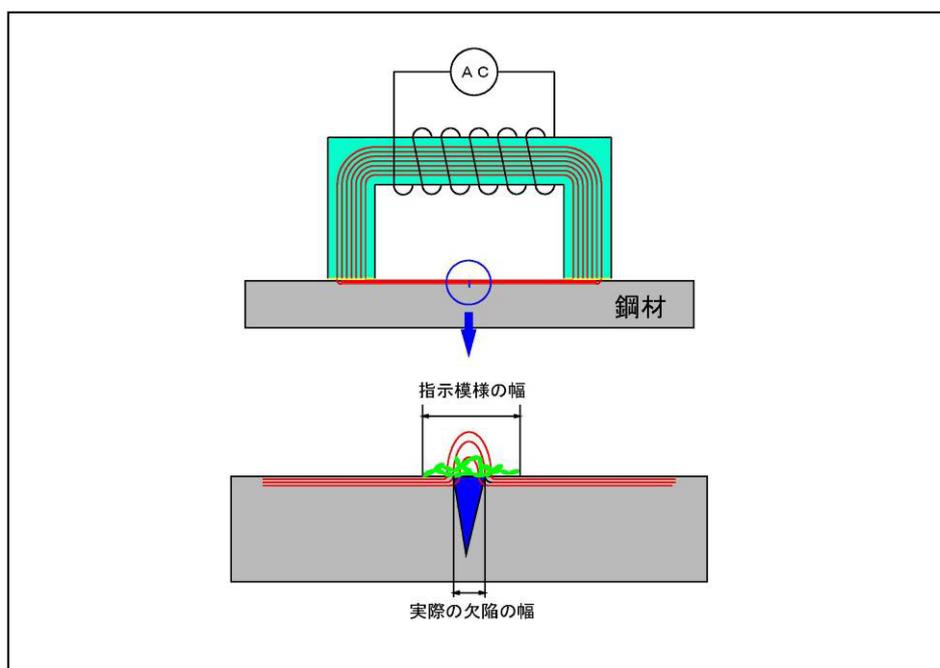
磁粉探傷試験は非破壊試験方法の中で強磁性材料における表層部のきずを検出する方法として最強の方法である。

特に構造物の強度低下を著しいものにしたたり漏洩に結びつく表面の割れの検出に優れ、石油タンク、圧力容器などの溶接部の建設時の検査、保守検査などに広く用いられ、その使用は「消防法」「高圧ガス保安法」「ガス事業法」「電気事業法」などで規定されている。

磁粉探傷試験はJIS Z 2320では9種類の磁化方法に分類されるが、その中でタンクなどの大型溶接構造物や配管溶接部など、現場で検査をおこなう場合に広く使用されている可搬型の「極間法（ヨーク法）」でその原理を説明する。

電源は交流100Vを用い、コの字型の電磁石である極間式磁粉探傷器を試験面に当てて通電すると、極間式磁粉探傷器と試験面の間に閉じた磁束の閉回路が形成される。交流電源を用いるので交流の「表皮効果」により、どんなに試験体の厚さが厚くとも磁束は試験面の表層部に集中して流れる。このとき試験体表層部に磁束を遮断するようなきずが存在すると、磁束の一部がきずの部分から空間に漏れ出す（漏洩磁束）。

図5-1（磁粉探傷の原理）



このきずの部分はちょうど小さな馬蹄形の磁石から磁束が空間に漏れているような形となり、この磁化した状態で試験面に強磁性微粉末（磁粉、粒度数 μm ～数十 μm ）を分散させた検査液を静かに注ぎかけると、馬蹄形の磁石のN、Sの磁極にクリップや釘が吸引されるように、検査液中の磁粉がきずからの漏洩磁束に捕らえられ、きずの回りに吸着しきずによる磁粉模様形成される。このとき、検査液に分散させる磁粉の色調を試験面の色調とコントラストの高い色調のもの、あるいは磁粉表面に蛍光塗料が塗布されている蛍光磁粉を用い、紫外線照射灯（ブラックライト）を照射し暗所で観察すれば、人の目には見えない微細なきずであっても、検出（人の目に知覚）することが可能になる。

写真5-1 蒸気管溶接部発生した割れ（目視）



写真5-2 蒸気管溶接部発生した割れ（磁粉模様）



写真は漏洩している蒸気管溶接部である。目視による写真では注意しないと気付かない漏洩部であるが、磁粉探傷試験による写真では漏洩部が溶接部中央に発生した縦割れであることが容易にわかる。

極間式磁化装置を用いた磁粉探傷試験におけるきずの検出性能の確認には、一般的にはJIS Z 2320によるA形またはC形の標準試験片を使用した「標準試験片確認方式」が用いられる。

JISのA形標準試験片のうちA1-15/100、A2-30/100（分母は試験片の厚さ、分子は人工きずの深さ ともに μm ）は黒色磁粉を用いた場合、ちょうど溶接部の探傷に必要な磁界の強さ（概ね $1200\sim 2000\text{ A/m}$ ）で人工きずが明瞭に現れる。消防法や高圧ガス保安法などは溶接部の試験にはこれらのA形標準試験片の使用が規定されている。

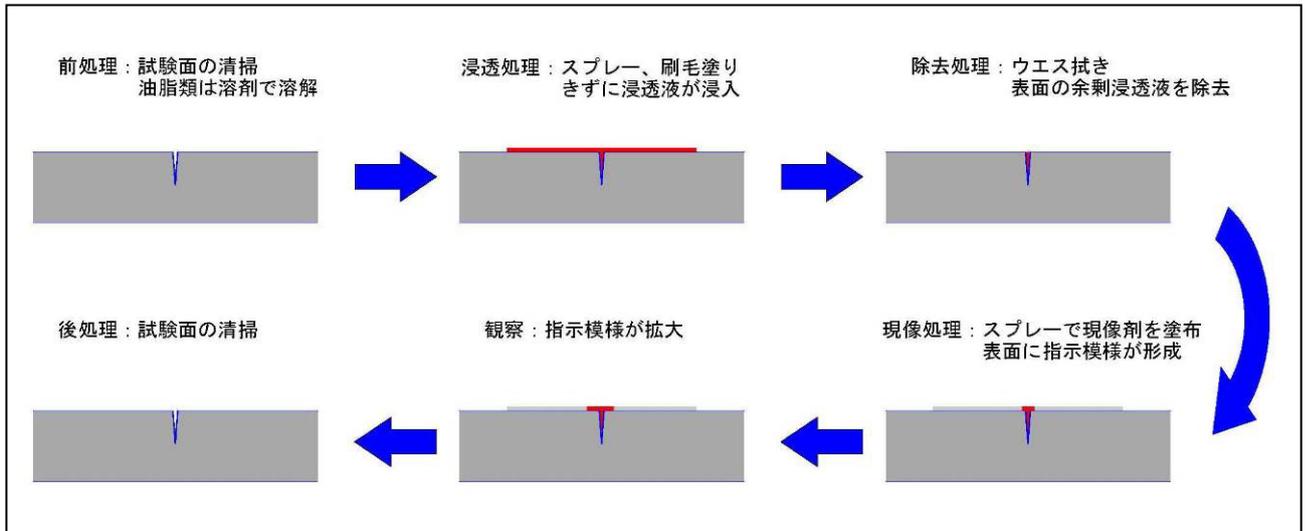
可搬型極間式磁化装置はその電流の種類、磁化電流の大きさやコイルの巻き数などを変えて試験体に導入する磁界の強さを試験体の大きさや磁気特性によって調整できる他の試験方法と異なり、試験体に導入できる磁界の強さは機器により一定であり、試験体と磁粉探傷器の密着の度合、補助ヨークの使用、電源の電圧降下、検査液濃度など種々の要素により探傷有効範囲（1回の探傷操作で探傷できる範囲）が小さくなる。配管の溶接部の探傷ではA形標準試験片またはA形標準試験片より薄くて配管のような曲率を持った探傷面に貼りやすいC形標準試験片（厚さ $50\mu\text{m}$ 、溝の深さ $8\mu\text{m}$ ）を使用してその探傷有効範囲を必ず確認して探傷を実施しなければならない。

6. 浸透探傷試験

浸透探傷試験は磁粉探傷試験と同様、材料表面のきずを検出する方法であるが、磁粉探傷試験との決定的な違いは表面に開口しているきずのみ検出可能である点と、多孔質や使用する溶剤におかされない材料ならどんな材料にも適用可能という点である。配管でいうならば磁粉探傷試験が適用不可能なオーステナイト系ステンレス鋼（SUS304、316など）の表面きずの検出には必然的に浸透探傷試験を使用することになる。

JIS Z 2343-1「非破壊試験－浸透探傷試験－第1部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様分類」によれば浸透液で3種類、余剰浸透液の除去材で5種類、現像剤で4種類の探傷剤があるが、一般の溶接部の探傷では赤色の浸透液、有機溶剤の除去剤、速乾式の現像剤の組み合わせである、「溶剤除去性染色浸透探傷試験－速乾式現像法」が一般的に用いられる。

図 6-1 (試験の手順)

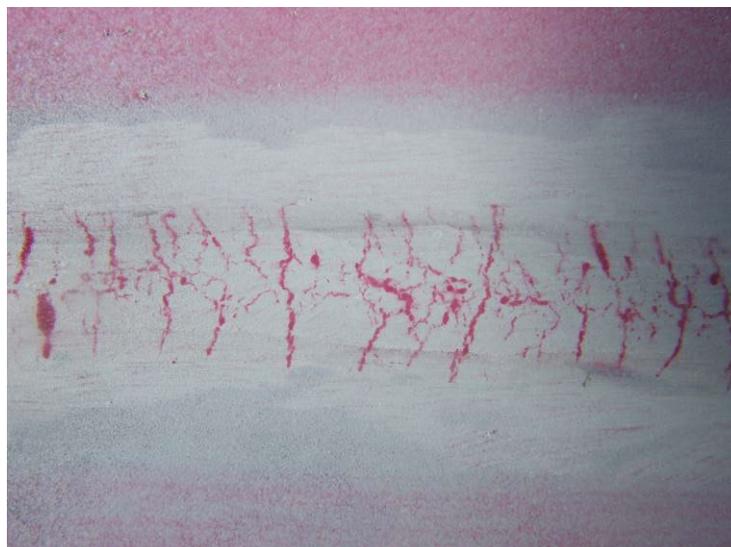


この「溶剤除去性染色浸透探傷試験—速乾式現像法」は前述の探傷剤のスプレー缶3本とウエス等があれば電源、水道などの設備が不用で、手軽に試験出来る方法であり、見よう見まねで試験が出来そうであるが、前処理方法、試験品の温度、予想されるきずの種類（溶接直後の検査か保守検査か）、観察などきずの検出に関わるデリケートな要素が多く、熟練した技術が必要である。

「溶剤除去性染色浸透探傷試験—速乾式現像法」による浸透探傷試験は試験の性質上（ウエスで表面の余剰浸透液を除去するため）表面形状の悪い溶接部は「疑似模様」（きずのないところにも表面の形状による浸透指示模様）が生じ、判定が困難になる場合があり、この浸透探傷試験方法を溶接部に適用する場合には、グラインダーなどで表面をスムーズに仕上げるか、ティグ溶接のように表面形状が平滑になる溶接方法が望ましい。

溶接後の検査で検出されるきずは表面に開口した「割れ」、「ブローホール」などで、保守検査では「応力腐食割れ」ステンレス鋼では「粒界腐食」なども検査対象になる。「粒界腐食」は明瞭な形や色調を有したきずの指示模様ではなく、染色浸透探傷試験では薄いピンク色の指示模様として現れることがあるので注意が必要である。

写真 6-1 (割れによる指示模様 テストピース)



7. 非破壊検査の資格

非破壊検査の資格は1968年に制定された、社団法人日本非破壊検査協会（以下JSNDIという）の規格NDIS 0601「非破壊検査技術者技量認定規定」に基づいて30年あまり試験が実施されて来たが、2001年にJIS化され、現在ではJIS Z 2305「非破壊試験－技術者の資格及び認証」が国内での一般的な非破壊試験技術者の認証規定となり、JSNDIが認証機関として資格試験等をおこなっている。

JIS Z 2305で取り扱う非破壊試験方法は6科目あるが本稿に記載した試験方法は以下の通り。

放射線透過試験 RT (Radiographic Testing)

超音波探傷試験 UT (Ultrasonic Testing)

磁粉探傷試験 MT (Magnetic Particle Testing)

浸透探傷試験 PT (Penetrant Testing)

各資格はそれぞれ下位からレベル1、2、3と分類され、それぞれ役務範囲、責任が定められている。

上記4科目は一般的には溶接部や材料の探傷における知識・技能が大部分を占めるが、配管の超音波厚さ測定のための技術資格「UMレベル1」も規定されている。

試験は毎年春・秋の2回、一次試験（筆記）、二次試験（実技試験等）が実施されている。受験申請には各科目・各レベルに応じたレベル3技術者による訓練記録を添付しなければならないが、JSNDI主催の講習会もこの訓練時間に含まれ、科目によっては訓練時間の全部を満足している。

7. まとめ

空調・衛生設備の配管は石油パイプラインや高圧ガス配管のように法的な規制がないものがほとんどで、保守のための定期検査などもあまりおこなわれていないのが現状で、化学プラントに比べれば圧倒的に事例は少ない。これら空調・衛生設備の配管検査手法について筆者のわずかな実務経験から記述した内容が、配管の保守・管理の一助となれば幸いである。

最後に実際の調査・検査で得られた貴重な写真を本稿に掲載することを快諾していただいた関係各位にお礼申し上げます。

参考文献

- (1) (社)日本非破壊検査協会 放射線透過試験Ⅲ
- (2) (社)日本非破壊検査協会 超音波厚さ測定Ⅰ
- (3) (社)日本非破壊検査協会 超音波探傷試験Ⅲ
- (4) JISZ2355「超音波パルス反射法による厚さ測定方法」
- (5) (社)日本非破壊検査協会 磁粉探傷試験Ⅱ
- (6) JISZ2343-1「非破壊試験－浸透探傷試験－第1部：一般通則：浸透探傷試験方法及び浸透指示模様の分類」