

炭素鋼鋼管の高速検査技術

—磁束抵抗法 (MFR: Magnetic Flux Resistance)—

住友化学株式会社 生産安全基盤センター

末次 秀彦 多田 豊和

はじめに

化学プラントでは冷却水（淡水）で冷却する炭素鋼製多管式熱交換器が多数使用されているが、伝熱管の冷却水側から孔食状の腐食が発生し、最終的には貫通して漏れに至るケースもある。これを抑制するためには、設計段階、運転段階および検査・診断段階で様々な注意が必要である。設計段階では熱交換器の設置方向（縦型、横型）、冷却水の流路（管内・管外）、流速、温度等について検討される。また、運転段階では冷却水水質の管理範囲を定めて継続的に監視するとともに、冷却水の流速の維持に努めている。そして検査・診断の段階では開放検査において錆の発生状況や付着物の状況を目視で確認するとともに、検査周期を定めて伝熱管の肉厚測定を行い、漏れに至るまでの寿命の予測、漏れた場合のリスク等を評価して、熱交換器の次回検査時期や更新時期を決定している。

炭素鋼製熱交換器伝熱管の肉厚測定方法としては、水浸回転式超音波厚さ測定法（IRIS: Internal Rotary Inspection System）が世界の主流検査技術として適用されている。これは±0.1mmという従来の検査診断技術の中で最も高い肉厚測定精度を有しているためである。一方で1日あたりの検査本数が100本程度と少なく抜取検査にならざるを得ないため、測定値を全体の代表値とする、あるいは極値統計法を組合せた最大腐食減肉量の推定値を用いて、その後の評価を実施しているのが実状である。このような中で、炭素鋼製伝熱管の高速検査と高精度評価を両立することをコンセプトとして技術開発を進めた結果、磁束抵抗法（MFR: Magnetic Flux Resistance）という新しい概念の検査技術の開発に成功した^{1), 2)}。本技術を実機検査に採用して検証を重ねた結果、IRISと比較して検査速度で5倍以上のスピードを実現しながら、メンテナンス計画の立案に必要な肉厚情報として十分な評価精度（±0.2mm）を有していることが確認された。本稿ではMFRの原理や特徴について紹介する。

測定原理

MFRの原理をFig. 1に示す。永久磁石とヨークおよび炭素鋼製伝熱管によって形成される磁気回路中の磁束密度をホール素子で測定する。炭素鋼製伝熱管の肉厚が減少して断面積が減少すると、磁気回路の流路が狭まることにより、磁気抵抗が増加して磁束の流れが減少する。特に炭素鋼製伝熱管が磁気飽和に近くなるような強い磁化領域では、炭素鋼製伝熱管の肉厚に応じて、磁気回路中の磁束密度が線形的に変化する。このとき、ホール素子を通過する磁束と出力電圧には比例関係があるので、ホール素子の出力電圧から素子部の局所的な肉厚を評価できる。具体的にはプローブが空中にある状態（Fig. 1左側）では最も磁気抵抗が大きくなり、管の肉厚が最も厚い健全部（Fig. 1右側）では磁気抵抗は最小になる。そして管の肉厚が減少すると（Fig. 1中央）その肉厚に比例して磁気抵抗が変化する。また、管内に挿入するプローブの周方向にホール素子を複数配置し、ホール素子の出力電圧値の分布を計測することで、管の周方向の減肉形状を推定することができる。

評価方法と測定精度

Fig. 2は管内面に深さと角度を変えて扇型の模擬減肉を加工した試験片を、周方向にホール素子を8個設置した8チャンネル型のMFRプローブで測定した結果である。縦軸に断面欠損率、横軸にホール素子の出力電圧の合計値を取って示しているが、良好な線形的な関係が認められている。このように、プローブの周方向に配置した8個全てのホール素子の電圧出力値を合計した値は、減肉形状に関係無くホール素子を配置した位置の管の断面欠損率に比例することがわかる。次にFig. 3に示した様に各チャンネルのホール素子からの電圧信号の強度分布に注目する。電圧信号の強度分布は減肉形状に対応しているため、減肉の形状を扇型と仮定して、減肉の周方向の発生範囲を決定する。全

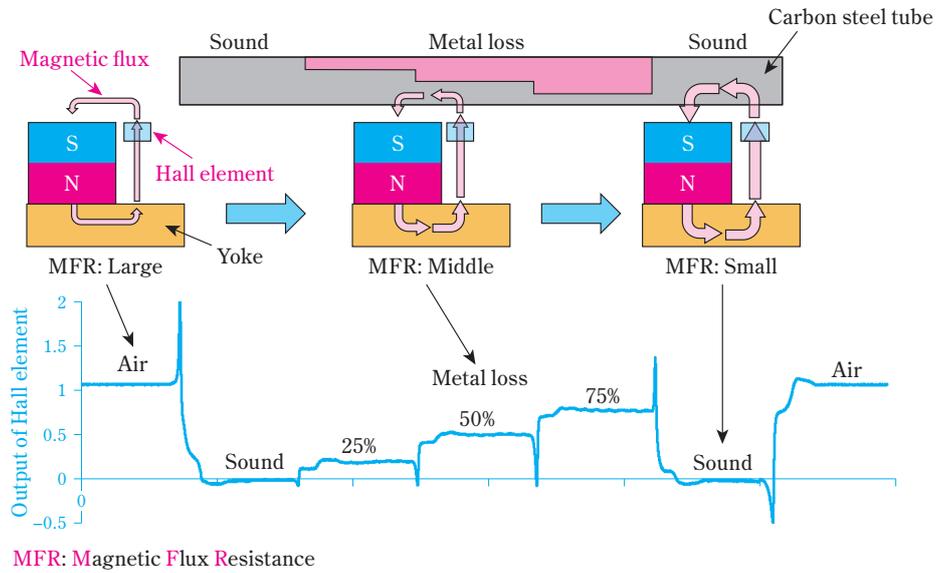


Fig. 1 Measurement principle of MFR

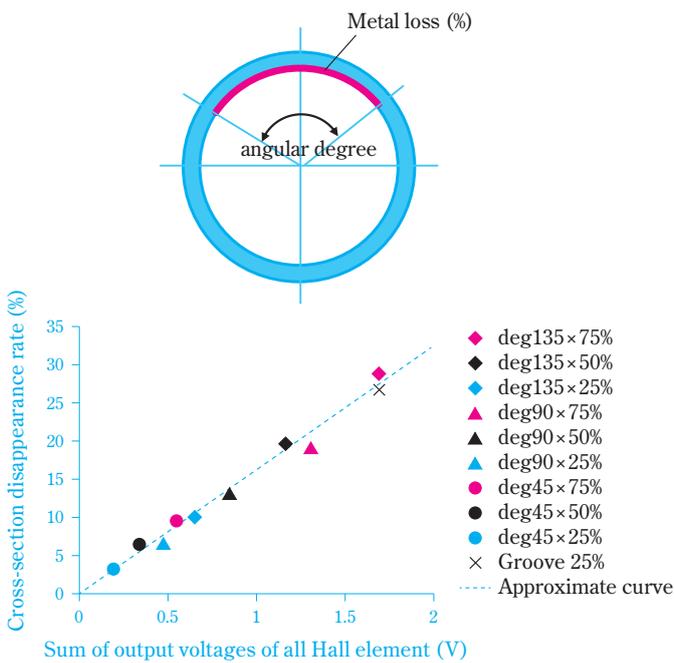


Fig. 2 Evaluation of cross-section disappearance rate by MFR

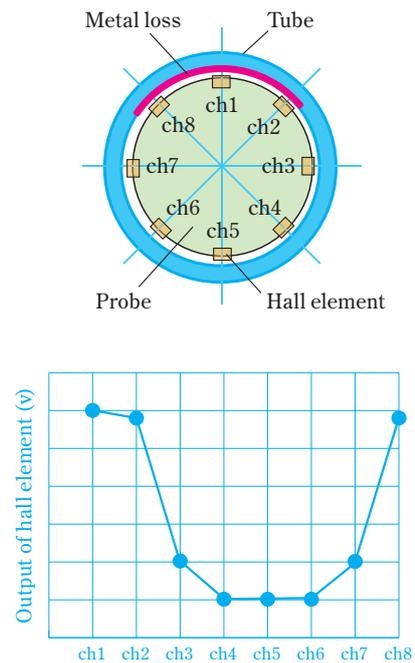


Fig. 3 Hall element location and signal distribution

ホール素子の電圧出力の合計値から求めた断面欠損率と全ホール素子の出力電圧の分布から求めた扇型形状の減肉範囲 (角度) から減肉深さを計算で求める。

開発した MFR で炭素鋼製伝熱管の検査を実施して肉厚評価精度を検証した結果を Fig. 4 に示す。横軸に

MFR による肉厚の評価値、縦軸に肉厚の実測値をとって比較した。冷却水通水環境で使用される炭素鋼製伝熱管の腐食形態は Fig. 5 に示した様な全面減肉と局部減肉が混在した複合減肉となるが、MFR の測定精度は概ね $\pm 0.2\text{mm}$ を達成している。これは、熱交換器の

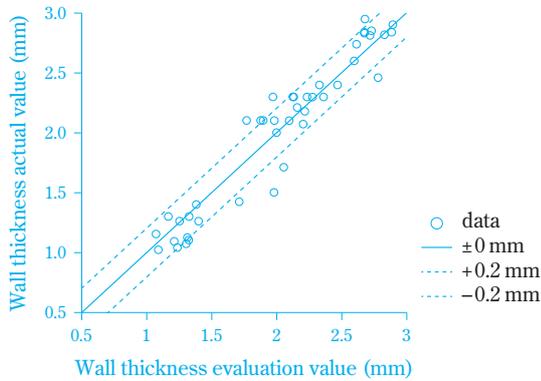


Fig. 4 Accuracy of thickness evaluation by MFR

メンテナンス計画の立案に必要な肉厚情報として十分な評価精度である。

従来技術との比較

炭素鋼製伝熱管の検査は先述のIRISに加えて、国内ではRFECT (Remote Field Eddy Current Testing: リモートフィールド渦流探傷試験) が適用されており、海外ではこれらの手法に加えてMFL (Magnetic Flux Leakage: 漏洩磁束法) が採用されている。これら従来の方法とMFRについて様々な視点から比較した結果をTable 1に示す。

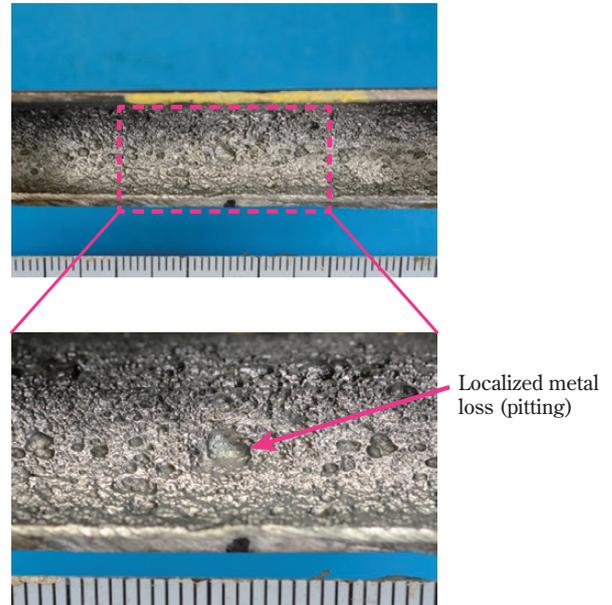


Fig. 5 Typical corrosion of carbon steel tubes in cooling water service

1. 測定原理と評価精度

各手法の測定原理はFig. 6に示した様にIRISが伝熱管への超音波の反射や透過に要した時間を計測し、MFLは伝熱管を磁化して減肉部から漏れ出た磁束を計測し、RFECTは減肉部によって変化した渦電流を間接

Table 1 Characteristics of MFR

| Method | IRIS | MFL | RFECT | MFR |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Measurement principle | Ultrasonic | Magnetic Flux Leakage | Eddy Current | Magnetic Flux Resistance |
| Accuracy | ○ ±0.1mm | × | × | ○ ±0.2mm |
| Speed | × | ○ | ○ | ○ |
| | 100tube/day | 500tube/day | 500tube/day | 500tube/day |
| Small DIA tube | ○ | ○ | ○ | △* |
| | ≤ φ19.05 | ≤ φ19.05 | ≤ φ19.05 | ≥ φ25.4 |
| Influence of scale | × | △ | △ | ○ |
| | Inspection impossible | Reduced accuracy | Reduced accuracy | Ensured accuracy |
| Medium | Water | Unnecessary | Unnecessary | Unnecessary |
| Remarks | Low sampling rate | Screening inspection | Screening inspection | 100% inspection High sampling rate |

IRIS: Internal Rotary Inspection System
 MFL: Magnetic Flux Leakage
 RFECT: Remote Field Eddy Current Testing
 MFR: Magnetic Flux Resistance

* φ19.05: Under development

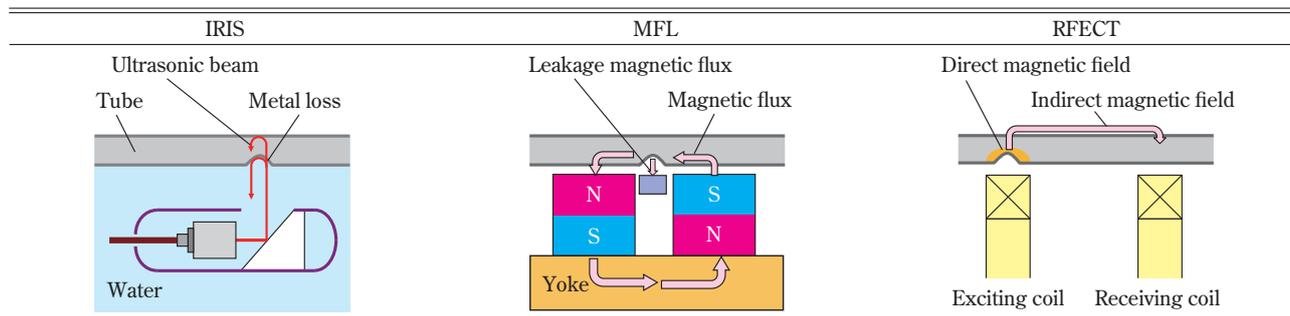


Fig. 6 Measurement principle of each method

磁場の変化として計測している。IRISについては、超音波を効率よく伝熱管に伝播させるために水を媒質として使用する必要があるが、その他の方法は電磁気を利用しているため特別な媒質は必要ない。測定精度を比較すると、IRISは肉厚の変化を超音波の伝播時間の変化として計測しているため $\pm 0.1\text{mm}$ という高い測定精度を達成している。MFRは前述したように伝熱管の断面積を磁束抵抗の変化として正確に計測しているが、肉厚を求める段階で扇型モデルを仮定して計算しているため若干測定精度が低下し、 $\pm 0.2\text{mm}$ となっている。MFLとRFECTについては、肉厚の変化に伴って相対的に変化する事象を計測しているため、検査対象物の腐食状況（腐食形態）に影響されやすく、高い測定精度を確保することは難しい。

2. 検査速度とスケールの影響

検査速度については長さが4~5mの伝熱管の場合、IRISが1日あたり100本程度であるのに対してMFL、RFECT、MFRについては500本程度が可能である。スケールの影響についてはIRISではスケールが管肉厚方向への超音波の伝播阻害要因となる。スケールの付着量の増加は測定データ数の減少をもたらし、同時に最大減肉深さの評価値の信頼性を低下させる。MFL、RFECTについてはスケール中への磁気の漏洩や渦電流の発生が考えられ、評価値に影響を及ぼすものと思われる。このような中でMFRは非常に強力な磁場を伝熱管に与える関係で、比透磁率が低い腐食スケール程度であれば磁気飽和させてしまうため、測定精度に全く影響しないことを確認済みである。従って、検査の前処理として行われるジェット洗浄の程度はプローブが伝熱管内に挿入できる程度でよく、前処理時間を含め

てより一層の検査時間の短縮が期待できる。

3. 検査可能な管サイズ

小径管への対応という面ではIRIS、MFL、RFECTは管外径が $\phi 19\text{mm}$ 以下の管に対しても適用が可能である。これに対してMFRは原理上、管に強い磁場を与える必要があるが、プローブの小径化に伴って磁化力が低下し、必要な磁場を与えることが困難になる。よって、現状はJIS G 3461のSTB規格（ボイラ・熱交換器用炭素鋼管）による外径 $\phi 25.4\text{mm}$ で肉厚2.6mmの伝熱管（公称内径 $\phi 20.2\text{mm}$ ）が適用可能な最小サイズとなる。なお、外径 $\phi 19\text{mm}$ の伝熱管に対応するプローブについては鋭意開発中である。

装置構成とデータ解析

MFRを用いて炭素鋼製熱交換器（管寸法： $\phi 25.4 \times 2.0\text{t} \times 2495\text{L}$ ）の検査を実施する場合の装置構成をFig. 7に示した。MFRプローブ、それを駆動するMFR装置、データ処理を行うPC（Personal Computer）で構成される。MFR装置は単三型バッテリー4本で駆動し、約4時間の連続検査が可能である。Fig. 8には炭素鋼製伝熱管のMFRによる検査状況を示した。現場検査で取得したデータは、解析ソフトがインストールされたPCで自動解析され、伝熱管1本ごとの最小肉厚値が一覧表の形式で出力される。なお、データ解析に要する時間は1本あたり10秒程度である。

まとめ

当社ではMFRという新しい概念の炭素鋼管の高速・高精度な検査技術を開発した。その特徴を次の通りまとめる。

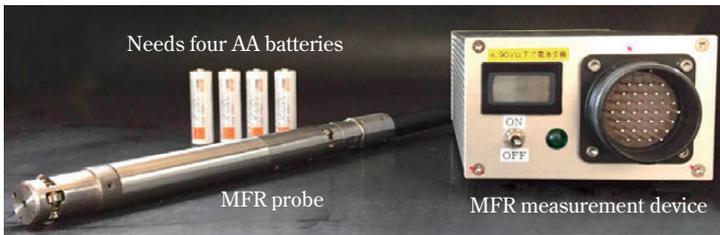


Fig. 7 Configuration of measurement device

- ・肉厚測定精度：±0.2mm
- ・検査速度：500本／日（4～5m長さの伝熱管、作業時間8時間の場合）
- ・管内清掃程度：プローブが通過できる程度（腐食スケールの影響なし）

MFRの高速で高精度な検査性能を活かして、伝熱管の全数検査あるいは抜取率の向上を実現するとともに、腐食速度評価、余寿命予測精度の向上につなげることができる。これは炭素鋼製熱交換器のメンテナンス時期



Fig. 8 Inspection status of heat exchanger by MFR

の最適化につながり、メンテナンスコストとプラントの安全・安定操業を高次元でバランスさせることが可能となる。

引用文献

- 1) 住友化学(株), JP 2017-026353 A.
- 2) 住友化学(株), JP 2017-026354 A.