

〈解説〉

プラントにおけるサーモグラフィによる熱診断

基幹産業事業本部 工事事業部 工事技術部 梶原啓太

1. はじめに

保温・保冷材は経年によって劣化し、プラント設備にさまざまな弊害をもたらす。このため、プラント内の機器と同様に、保温・保冷材も定期的なメンテナンスが必要である。しかし、保温・保冷材の交換作業には足場が必要となることが多く、またプラント内の広範囲に施工されているため、費用や工期の制約から一度にメンテナンスを行うのは難しい。このため、効率的かつ効果的にメンテナンスを行うためには、保温・保冷材の状態を把握・診断し、メンテナンスの優先順位を定める必要がある。

本稿では、近年さまざまな分野に広く普及しているサーモグラフィを用いた、プラントにおける保温・保冷材の劣化診断とその応用例について紹介する。

2. サーモグラフィによる保温・保冷材の劣化診断

2.1 サーモグラフィの原理

絶対零度（ -273.15°C ）以上のすべての物質は、その表面から赤外線を放出している。赤外線とは、可視光線の赤色光と電波の間の波長を持つ電磁波全般を指し、その波長は約 $0.7\mu\text{m}$ ～ $1000\mu\text{m}$ である。

サーモグラフィは、この物体表面から放射される赤外線を検出し、対象の表面温度分布を画像化するもので、非接触で温度測定を行う代表的な測定方法である。保温・保冷材の表面温度を可視化することで保温・保冷材の劣化を分かりや

すく把握することができ、測定対象が離れていたり、高温であっても測定することが可能である。また、対象を面として捉え一度に広い範囲を測定することで劣化の全体像が把握しやすく、接触式に比し測定時間が短縮できるという特長を有している。

2.2 熱画像と保温・保冷材の劣化状態

保温・保冷材が劣化した場合、表面温度に異常が生じる。保冷の場合は、保冷材が劣化した箇所の表面温度が設計値よりも低くなり、外装材表面に結露や結氷が生じ、外観上検知できることが多い。一方、保温の場合は、劣化箇所の表面温度が設計値よりも高くなる。保温材の劣化箇所は、高温によって外装材の変色が生じる場合もあるが、一般的には外観上検知できない場合が多い。サーモグラフィによって得られる熱画像は、温度異常箇所を周囲とは異なる色あいで表示でき、外観上目視で発見しにくい保温材の劣化箇所も容易に検知することができる。

サーモグラフィによる保温材診断イメージを図1に示す。

図1 (a) は試験用加熱配管に、けい酸カルシウム保温材の劣化を模し、一部含水したものと目地を空けて施工したものである。

図1 (b) は一般的な現地施工で、(a) に外装材を施工したものである。配管は 200°C に加熱しているが、目視によって外装材表面の異常は確認できない。

図1 (c) はサーモグラフィによって得られた(b)の熱画像である。保温材の劣化を模した箇所は

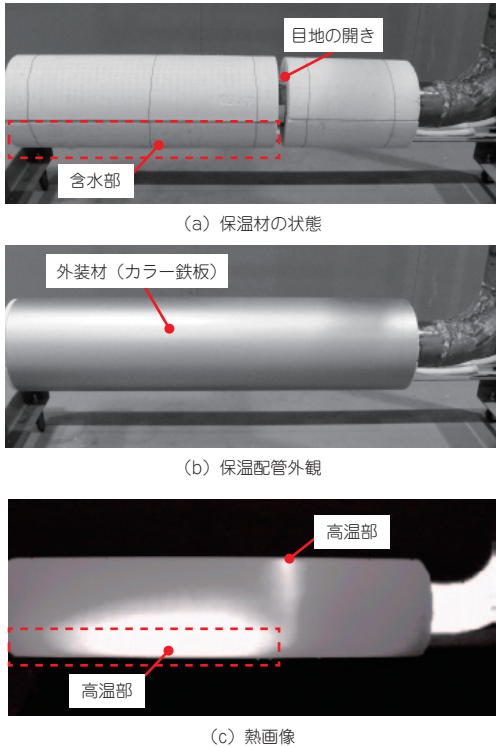


図1 サーモグラフィによる保温材診断イメージ

高温色を呈していることが確認できる。このように、サーモグラフィによって得られた熱画像から、非破壊で保温・保冷材の目地の開きや含水といった劣化状態を推測，診断することができる。

図2にサーモグラフィによる熱画像例を示す。

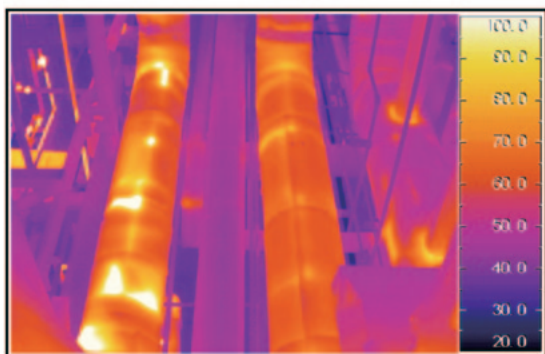


図2 サーモグラフィによる熱画像例

2.3 熱画像の解析

熱画像はデジタルデータとして保存でき，熱画像内の最高温度，最低温度，平均温度などの情報を容易に抽出することができる。これらの

情報に加え，内部温度，外気温度，風速などを考慮し熱計算を行うことで，測定対象箇所の熱損失の推測が可能である。さらに，熱損失をもとに，プラントの年間の燃料費に相当する損失金額やCO₂排出量などを試算することも可能である。これらの試算は，直接的に燃料浪費を判定するものではないが，保温材メンテナンスによる費用面や環境面での効果を数値化することができる。

2.4 保温・保冷材劣化マップ

熱画像から，放散・侵入熱量を算出し，保温・保冷材の劣化状態をイメージ化した劣化マップを作成することができる（図3参照）。判定基準の是非は，各プラントの事情に合わせて検討する必要があるが，この劣化マップによってメンテナンス優先エリアを容易に設定でき，効果的かつ効率的なメンテナンスを行うことができる。

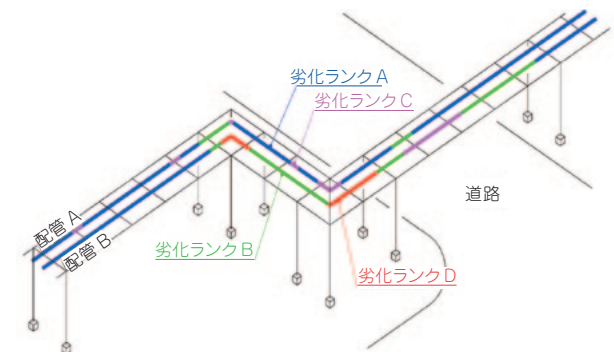


図3 保温・保冷材劣化マップ例

2.5 サーモグラフィ使用時の注意点

2.5.1 放射率の補正

あらゆる光を吸収し放射する物質を完全黒体と呼び，同じ温度であれば完全黒体が最も多くの赤外線放射する。完全黒体の赤外線放射量は温度によって定まるため，赤外線放射量を測定することで完全黒体の温度を求めることができる。サーモグラフィは，この原理を利用して物質の温度を求めている。

しかし，現実の物質は完全黒体ではなく，同じ温度の物質でも材質や表面の状態によって赤

外線放射量は異なる。現実の物質と完全黒体の赤外線放射量の比を放射率と定義し、一般に ε (イプシロン) で表す。サーモグラフィで正しい表面温度を得るためには、この放射率を適切に設定することが重要である。設定を誤ると実際の表面温度とは乖離したデータが得られてしまうため注意が必要である。

放射率は文献などに記載された値を参考として設定するほか、測定時にサーモグラフィが示す表面温度と接触式表面温度計で得られる表面温度を随時比較し、放射率の設定に誤りがないかチェックする必要がある。

2.5.2 放射率が低い測定対象の表面温度測定

鏡面など放射率が低い物質は、表面からの赤外線放射量が少ない一方、外部からの熱や光を多く反射する。このような物質をサーモグラフィで測定した場合、物質そのものからの放射赤外線よりも反射分の赤外線を多く測定してしまい、正確な表面温度を得ることができない。

プラントでの保温・保冷の測定では、無塗装のステンレスやアルミ外装材などが施工された機器・配管がこれに該当する。たとえば、非保温で高温のバルブや電灯が近傍にあり、これらが外装材に写りこんだ場合、それらの温度があたかも外装材の表面温度として撮影される。場合により、測定者自身の熱画像が外装材に写り込むこともある。

放射率が低い測定対象の厳密な表面温度を求める場合、表面に放射率の高い紙などを貼り付け、熱的に安定した後に測定を行う方法があるが、広範囲の配管・機器を測定対象とするのは難しい。現実的には、なるべく周囲の熱反射の影響がないよう工夫し、接触式温度計などで実際の表面温度を適時確認している。

2.5.3 保冷材の蓄熱と放熱

屋外の保冷材(外装板)の日射面は、日中のふく射熱によって外気温度以上に温度が上昇し蓄熱する。やがて日が陰り周囲温度が急激に下がると、蓄熱した保冷材(外装板)の表面温度が外気温度よりも高くなり、放熱を始める。夜間など熱的に安定した状態では、保冷材(外装板)の表面温度は外気温度よりも低いため、熱は保

冷材内部に侵入するが、これとは逆の現象になる。これはサーモグラフィに限らず、熱流計や他の温度測定方法でも検知され、発生しうる事象として理解しておく必要がある。従って、保冷の測定の場合は、日射面を避けて測定したり、蓄熱の影響が少なくなる夜間に測定したりする必要がある。

2.5.4 熱画像と保温・保冷材劣化状態との整合性

保温・保冷の構造上の理由、たとえば、金属貫通部、保温・保冷材下のリブや突起物などの存在、形状の制約により保温・保冷厚さが十分に確保できないなど、これらの部位の表面温度が周囲よりも高温または低温となる場合がある。しかし、外装材が施工され内部の状態を把握できないため、保温・保冷の劣化を判別し難い場合がある。保温・保冷材の劣化を適切に判断するためには、施工対象の形状やそれらの保温・保冷構造をよく理解しておく必要がある。

一方、先に図1に示した保温材診断イメージのように、熱画像から明らかに保温・保冷材の劣化であると判断できる場合も多い。

熱画像から保温・保冷材の劣化状態を推測するためには、熱画像と保温・保冷材の劣化状態がどのように関連しているかという知見が必要である。保温・保冷材の劣化診断精度を向上させるためには、サーモグラフィの測定に合わせ、部分的でも保温・保冷材の解体調査を行うことが望ましい。

2.5.5 内部温度と外気温度の差が小さい場合

内部温度と外気温度の差が小さく、サーモグラフィによる表面温度分布が明らかに得られない場合は、中性子水分計による測定結果を併用することにより、評価精度の向上・補完を行う。

特に、内部温度が100℃以下の領域は、熱的な性能劣化の程度は軽微であり、劣化要因として、含水による影響がより大きなファクターとなる。この温度領域は、CUI (Corrosion Under Insulation: 保温材下の外面腐食) の発生しやすい領域とされており、腐食点検を補完する意味からも中性子水分計の併用がより効果的な診断につながる。

(本報「(寄稿) 屋外配管の外面腐食診断法について」参照)

3. 熱診断実施例

3.1 保温保冷性能の劣化診断事例

本例は蒸気配管(40A)を対象に当社e'-AIM[®]工法(パイロジェル[™]XTの増し保温[®]工法)の施工前後の保温性能を比較検証したものである。

e'-AIM[®]工法は劣化した既設保温材を取り外すことなく、上からパイロジェル[™]XTを重ね巻きして、低下した保温性能を回復させる保温機能回復工法で、その概要図を図4に示す。

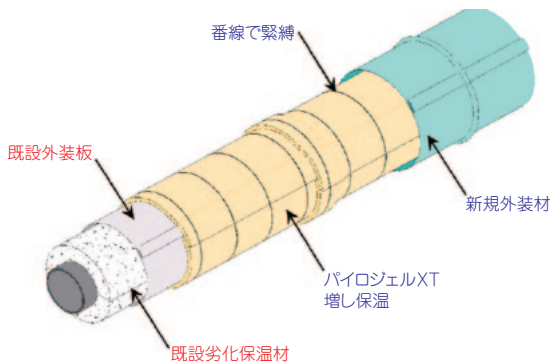


図4 e'-AIM工法概要図

表1は建設時の設計値と測定結果をまとめたものである。建設時の放散熱量の設計値42.3W/m

表1 e'-AIM工法の効果

【設計値】		
対象名称	15S蒸気配管	
配管径	40A	
内部温度	150℃	
環境条件	周囲温度:15.6℃ 風速:1.8m/s	
既設保温材	けい酸カルシウム保温筒1号-15 40mm	
表面温度(℃)	23.4	
放散熱量平均値(W/m)	42.3	
【測定値】		
e'-AIM工法	パイロジェルXT 10mm(増し保温)	
配管長さ	70m	
放散熱量平均値(W/m)	施工前	125.8
	施工後	47.8
	削減効果	▲78.0
年間削減金額*1 参考値	218,500円/年	

*1: 年間削減金額計算方法

熱量価格: 5円/kWh 稼働時間: 8000時間/年とし計算

熱量金額 = 放散熱量 ÷ 1000 × 5円/kWh × 8000時間 (『保温JIS解説 2006年版』計算例参照)

に対し、e'-AIM[®]工法施工前放散熱量の平均が125.8W/mと劣化が認められるが、施工後には47.8W/m(図5参照)と低減されている。

また、同例の施工前後の熱画像を図6に示す。

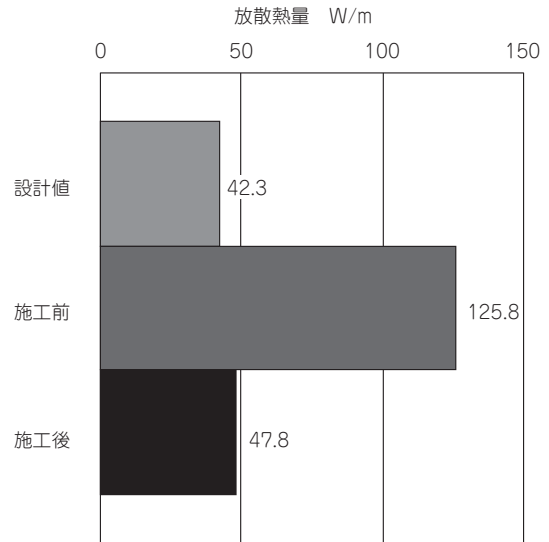


図5 施工前後の放散熱量比較

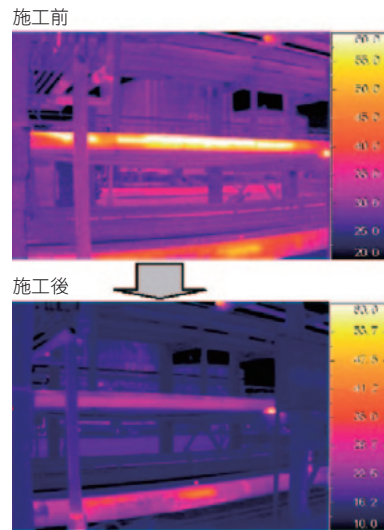


図6 施工前後の熱画像比較

測定結果の評価については、通常、設計値との比較により良否を判定する。また、設計値に対する劣化度合によりランク分けを行い評価基準としている。当社では、劣化度合が設計値の2倍以上の値を標準的な保温更新レベルとしている。

なお、サーモグラフィの測定では、測定時の内部温度、環境条件が設計時と異なるため、得

られたデータを設計値と比較できるように補正している。

このように、サーモグラフィにより放散熱量を数値化することで保温・保冷材の劣化診断が可能となるが、より正確な診断とするためには、前述の通り、使用時の注意点に留意し、外乱要因の排除に努めることが肝要である。

当社での主な診断事例は、次のとおりである。

○省エネ対策（CUI保全対策）

劣化調査～修繕提案（e-AIM®工法・他）

○予防保全1

火力主要設備の夏季（冬季）重負荷前点検

○予防保全2

定点測定による経年調査／ガスリーク対策

○劣化マップによる計画修繕提案

大型診断（プラント全体、指定エリア）

○その他

加熱炉など高温機器の劣化調査

3.2 非金属製伸縮継手の劣化診断

ここでは、プラント熱診断のもう一つの事例として、ベロー診断を紹介する。

非金属製伸縮継手TOMBO No.9999-NA「NAベローQ®」は、大口径配管ダクトの熱膨張、振動、圧力などによって生ずる伸縮変位移動および応力を吸収し、高強度、耐食・耐熱性に優れたフレキシブルジョイントとして各種プラント装置の配管ダクトに多数使用されている。

非金属製伸縮継手の構造例を図7に示す。

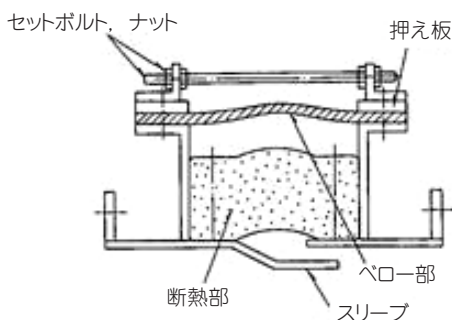


図7 非金属製伸縮継手の構造例

フランジなど金物部を除く部分の基本構造は、内部流体をシールするためのPTFE（四ふっ化エチレン樹脂）シートと補強用の耐熱クロスから

なるベロー部、および内部の熱からベロー部を保護する断熱ブランケットとそれを保護する耐熱クロスからなる断熱部で構成されている。

非金属製伸縮継手の耐用年数は一般的に約10年といわれるが、実際にはプラントの運転状況によりその寿命は変化する。

非金属製伸縮継手に求められる性能は内部流体のシールと配管・ダクトの変位を吸収することであるが、PTFEの連続使用耐熱温度は約260℃で、温度条件はシール材としての寿命を大きく左右する。また、260℃以下の使用条件でも運転状況、使用年数、設置条件などにより劣化度（余寿命）は大きく変化する。断熱材のずれや損傷によりヒートパスを生じるとベロー部は温度上昇により急速に強度低下する。

以下にベロー診断（非金属伸縮継手診断）の標準的なフローを示す。

- 1) 伸縮継手仕様、運転条件、運転履歴の調査
- 2) 運転時における非破壊検査
 - ①サーモグラフィによる表面温度測定
 - ②目視による表面損傷検査
 - ③触手による弾力性調査
 - ④面間寸法、変位量の測定調査
- 3) 劣化度のポイント化
- 4) 伸縮継手の総合評価
- 5) 伸縮継手取替時期の提案

ベロー診断は、サーモグラフィによる表面温度測定を行うことでベロー部が設計温度の許容値内に保持されているかの点検を行うほか、本体外層クロスの劣化度合い、設計伸縮量に対する面間寸法、変位量の点検などを行い、総合的に劣化度評価を行っている。ベロー部表面温度の測定例を図8、9に示す。

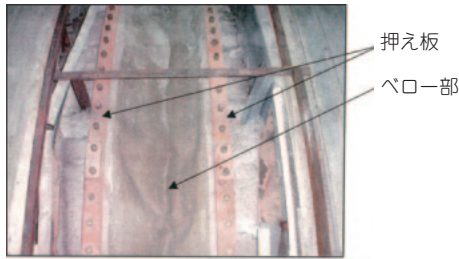


図8 実画像

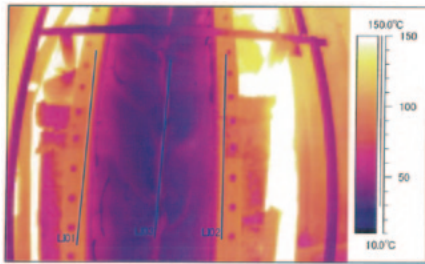


図9 熱画像

なお、これら劣化度の評価基準は、過去の伸縮継手取替工事にて採取した資料（使用済み基材）を随時調査し、その残留引張強度などのデータベースをもとに設定しており、運転状況、使用年数、設置条件なども考慮した上で、最終的な取り替え時期を推奨している。

4. おわりに

近年、環境問題から「エコ」がキーワードとなり産業や業務のさまざまな局面で省エネ対策が求められてきた。さらに東日本大震災の影響による電力供給の問題により、電力使用量の削減が依然として大きな課題となっている。保温・保冷は熱損失を極力抑えるためのものであり、これらを健全に保つことはエネルギーの効率的な利用のために不可欠である。

本稿を参考に、サーモグラフィを用いた保温・保冷材の劣化診断に関する理解を少しでも深めていただき、メンテナンスのお役に立てていただければ幸いである。

- * 本稿は、省エネルギー誌（2011年10月号）掲載の「熱性能の診断方法」の内容を引用し、加筆修正したものです。
- * TOMBOはニチアス(株)の登録商標または商標です。
- * e-²AIM, 増し保温はニチアス(株)の登録商標です。
- * ペロー-Qはニチアス(株)の登録商標です。
- * パイロジェルはaspen aerogels社の商標です。
- * 本稿の測定値は参考値であり、保証値ではありません。

筆者紹介



楯原啓太

基幹産業事業本部 工事業業部
工事技術部 環境対策課