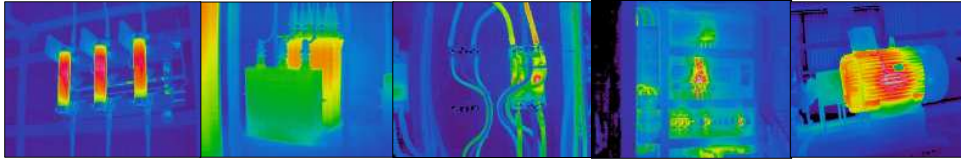


機械の異常は熱にも現れる 熱で診る状態監視技術 サーマグラフィ



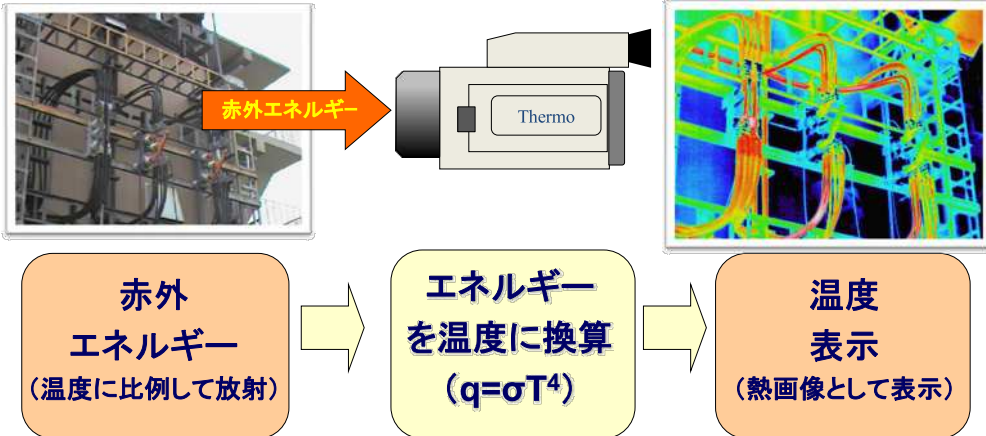
2019年10月4日

株式会社サーモグラファー 山越 孝太郎

赤外線サーモグラフィ装置とは

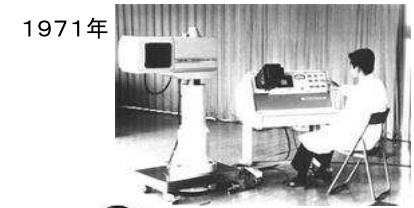
サーモグラフィ装置は赤外線カメラのうち、赤外線放射エネルギーを見かけの温度に変換し、その分布を画像表示する装置

(JIS Z2300 非破壊試験用語より)



1. 機器の進化

- i. 可搬性の向上 (小型・軽量化)
- ii. 低価格化 (導入障壁の低下)
- iii. 操作性の向上
- iv. デジタル化



2. 社会認知度の向上

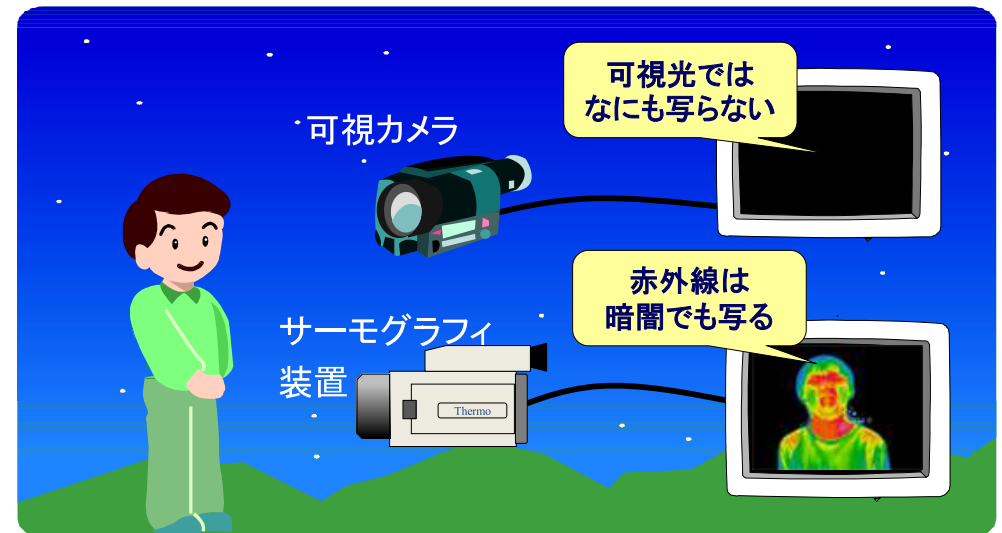
3. 技量認証制度の開始

- i. 米国非破壊検査協会SNT-TC-1A認証の採用 (2009年日本電気協会)
- ii. (一社)日本非破壊検査協会による「赤外線サーモグラフィ試験技術者」技量認証制度の開始 (2012年)
- iii. 日本非破壊検査協会「ISO18436-7機械状態監視診断技術者 (サーモグラフィ)」の資格認証制度開始 (2016年10月)



Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

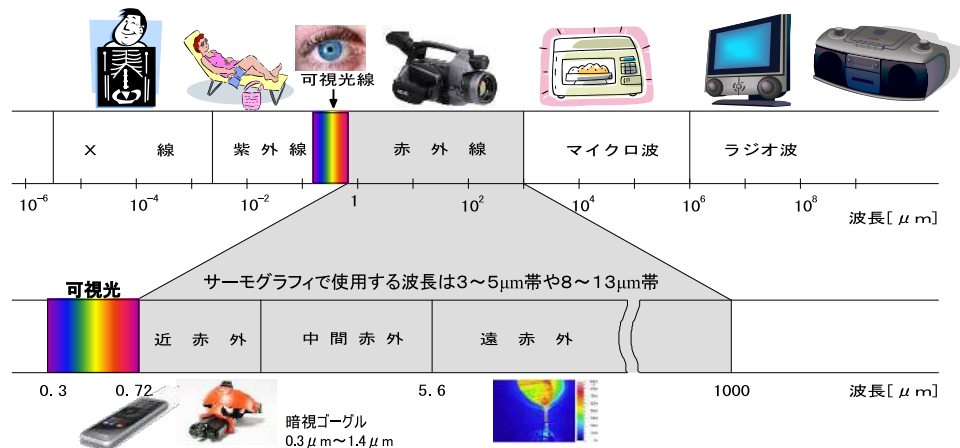
温度が見えるサーモグラフィ装置



サーモグラフィ装置は温度を測るので暗闇でも計測できる (赤外線の世界では絶対零度以上のものは発光体)

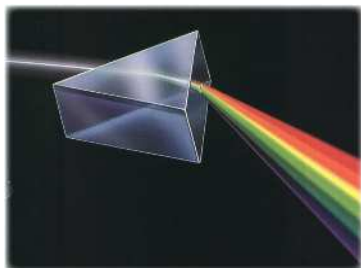
赤外線は目に見えない電磁波(光の一種)

- 赤外線は可視光線の赤より波長が長く(周波数は低い)電波より波長が短い電磁波を言う。
- 波長範囲は0.72 μmから約1000 μm(1mm)。



赤外線も光と同じ性質を持つ

- 赤外線は肉眼では見えない光(電磁波)で、絶対零度(-273.15℃)より高い温度のすべての物体から放射されています。
- 赤外線も光の一種で、可視光線と同じように**反射・屈折・回折**などの性質を持っています。可視のカメラと同じように、光学系を作ることができます。赤外線カメラと可視のカメラは、使用する光の波長が異なるだけで、大変よく似ています。



可視のデジタルカメラ
(レンズはガラスかプラスチック)



赤外線カメラ
(レンズはGeやSiなど)

赤外線を利用して、なぜ温度がわかる?

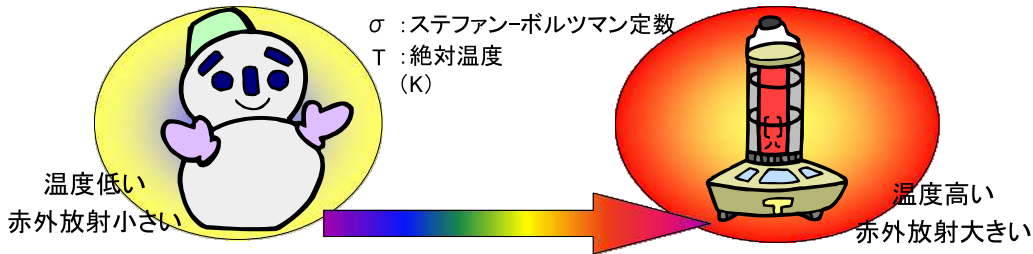
ステファン-ボルツマンの法則

- ある温度Tにおける物体はどれも**絶対温度の4乗に比例するエネルギー**を放射している=赤外線は、**絶対零度(約-273.15℃)以上の全ての物質から放射されている**目に見えない光
- 放射エネルギーは、**温度に比例して大きくなる**

$$E = \sigma T^4$$

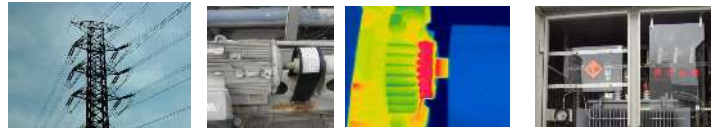
ステファン-ボルツマン定数
= 5.6697 × 10⁻¹²
W・cm⁻²・K⁻⁴

E : 放射エネルギー
σ : ステファン-ボルツマン定数
T : 絶対温度 (K)



赤外線サーモグラフィ計測の長所

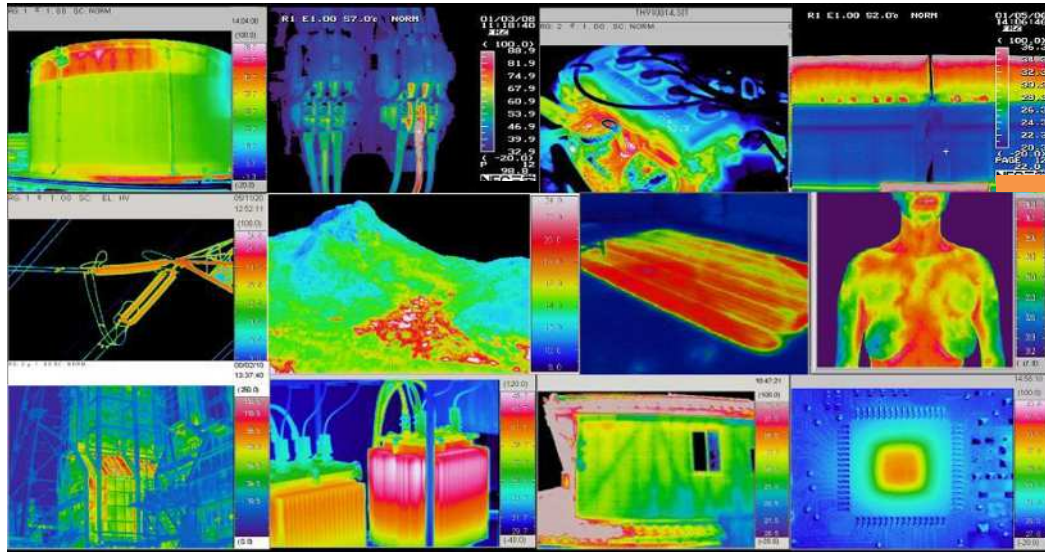
- 温度分布を画像**として表示することができる。
 - 異常部位の見落としを低減できる**パターン計測**である
- 測定対象物表面の**微小な温度差**がわかる
 - 0.1℃以下の温度差が検知可能
- 非接触で遠隔から計測**できる
 - 稼動状態や通電状態でも可能で、危険箇所に触れずに計測でき安全
 - 対象物に影響を与えずに広範囲を短時間に計測できる。非破壊計測である
- 微小面の計測**が可能
 - ICやサーマルヘッドなどの微小面積の温度分布を計測可能
- 高速**での計測が可能、動いている物体の温度も計測可能
 - 記録機能が充実し、高速の現象もキャプチャー
- デジタルデータ**なので**報告書作成**や**管理**が容易
 - コンピュータで処理・管理、レポート作成が容易に後から処理できる



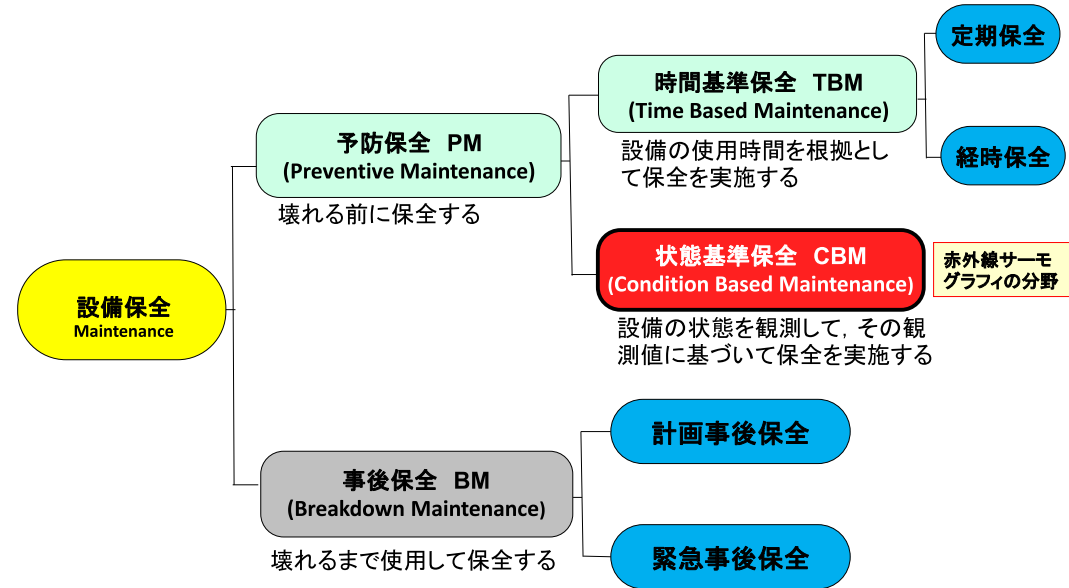
通電中、稼動中の物体も計測可能

様々な利用される赤外線サーモグラフィ

電力・電気・電子 / 機械・加工 / 鉄鋼・金属 / 石油・化学 / 窯業・ガラス / 自動車 / エネルギー / 建設・土木構造物 / 住宅・建築 / 航空・宇宙 / 生体・医学



状態基準保全 設備を停止することなく長く使用し続けるために



赤外線サーモグラフィによる設備診断を効果的に適用するには

1. 診断技術

- i. 設備の劣化や故障の検出に関する理論
 - a. 診断精度や適用限界
- ii. 機器性能

2. 経済性

- i. ハードウェア、ソフトウェアの価格
- ii. 人件費

3. 要員の力量

- i. 実施する要員の力量要件が高度である。

「赤外線サーモグラフィは何を見ているのか？」
を把握する



赤外線サーモグラフィは直接的に異常を見ている？



設備の温度分布は、なぜ生じるのか？

赤外線サーモグラフィ装置が計測するのは測定対象の **表面温度分布** です。

しかし設備診断で欲しいのは単なる温度情報ではなく、**劣化故障**のモードです。

電気設備で言えば、抵抗値や電流値、機械設備であれば、摩擦抵抗や荷重の増減が知りたいのです。

設備診断を行う際には、知りたいモードが熱損失として何処にどれだけ出てきたらどう判断するか明確にして行うことが重要です。

診断の目的

発熱モード

・電気品：ジュール熱

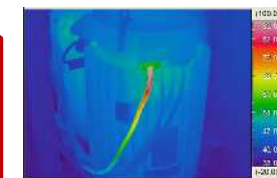
$$Q = I^2 \times R$$

発熱量 = 電流² × 抵抗

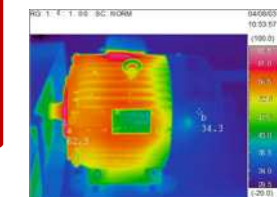
・回転機：摩擦熱

$$Q = \mu \times W \times V$$

発熱量 = 動摩擦係数 × 荷重 × 速度



知りたい内容は何か



赤外線サーモグラフィが対象とする劣化モードと故障モード

- 電気設備の不良・・・端子部の接触抵抗増加、過負荷、負荷アンバランス
- 配管系の不良・・・シートリーク、閉塞
- 回転機器の不良・・・軸受損傷、軸受部潤滑不良、ミスアライメント

赤外線サーモグラフィが対象とする劣化モードと故障モード

- 電気設備の不良・・・端子部の接触抵抗増加、過負荷、負荷アンバランス
- 配管系の不良・・・シートリーク、閉塞
- 回転機器の不良・・・軸受損傷、軸受部潤滑不良、ミスアライメント

赤外線サーモグラフィ診断技術 (JEAG4223-2008)

劣化モード 故障モード	事象の例	温度変化の状況
端子部の接触抵抗増加 (端子の締め付け緩み、酸化被膜形成等)	分電盤又は制御盤等で、端子の締め付けの緩み又は酸化被膜形成による接触抵抗の増加。	当該端子の温度が上昇する。
過負荷	電気機器、電気回路等で定格負荷を上回る負荷がかかること等による、電流値の定格容量超過。	電気機器(電動機、開閉器、遮断器等の電気回路)の温度が上昇する。
負荷アンバランス	三相電源負荷において断線や短絡等による各相間電流差の発生。	各相間に温度差が生じる。

赤外線サーモグラフィ診断技術 (JEAG4223-2008)

劣化モード 故障モード	事象の例	温度変化の状況
軸受損傷 (傷、割れ、摩耗等)	回転機器の軸受部の転動体、内外輪、保持器が傷等の発生により振動、異音が発生。	ポンプ、電動機等回転機器軸受部付近の温度が上昇する。
軸受部潤滑不良	回転機器の軸受部の潤滑油、グリースが過充填又は不足。	ポンプ、電動機等回転機器軸受部付近の温度が上昇する。
ミスアライメント	カップリングで結合されている複数本からなる回転軸回転中心線の調整不十分。(ミスアライメントの形態としては偏心、仰角、偏心と仰角の組合せがある。	ポンプ、電動機等回転機器軸受部付近の温度が上昇する。

赤外線サーモグラフィが対象とする劣化モードと故障モード

- 電気設備の不良・・・端子部の接触抵抗増加、過負荷、負荷アンバランス
- 配管系の不良・・・シートリーク、閉塞
- 回転機器の不良・・・軸受損傷、軸受部潤滑不良、ミスアライメント

赤外線サーモグラフィ診断技術 (JEAG4223-2008)

劣化モード 故障モード	事象の例	温度変化の状況
配管系	シートリーク	弁の弁体－弁座間に異物等のかみこみにより弁体－弁座間に隙が生じ、当たりに一部不良が生じたことによる、流体(逃し弁等では蒸気)の微小漏洩。
	閉塞	系統中の錆、異物等による配管の閉塞。



Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

17

熱計測の評価手法(基本的な3つの方法)

- **絶対評価** 主に電気設備に適用できる。
電気設備は同種・同類の物でも負荷状況が同じ物は殆んど無く発熱パターンも違う。そのため、その対象単独での判断をしなければならない。
手法としては、温度上昇予測・使用部材の正常発熱パターン集の作成が有効。
- **相互評価** 主に補機関係のポンプ・電動機に適用できる。
同種・同類の物が複数個あり、概ね運転状況・設置環境が同じであるため。
手法としては、計測の画角・温度設定を合わせ且つ判断したい部位を明確にする必要がある。
- **相対評価** 主に重要機器の継続監視に適用できる。
監視対象の機器のトレンドを取ることで劣化進行状況を把握し、故障発生の予測に役立つ。
手法としては、前記の二評価法を全て使い環境・負荷の変動状態を一律に平滑化する必要があり最も高度な手法。



Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

電気設備の熱画像判読

電気設備の熱画像判読の 基本的な三つの方法

- ◆ 負荷上昇時の温度上昇を予測して判読
発熱量 = I^2R を考慮
- ◆ 温度パターンによる判読
- ◆ 温度勾配による判読

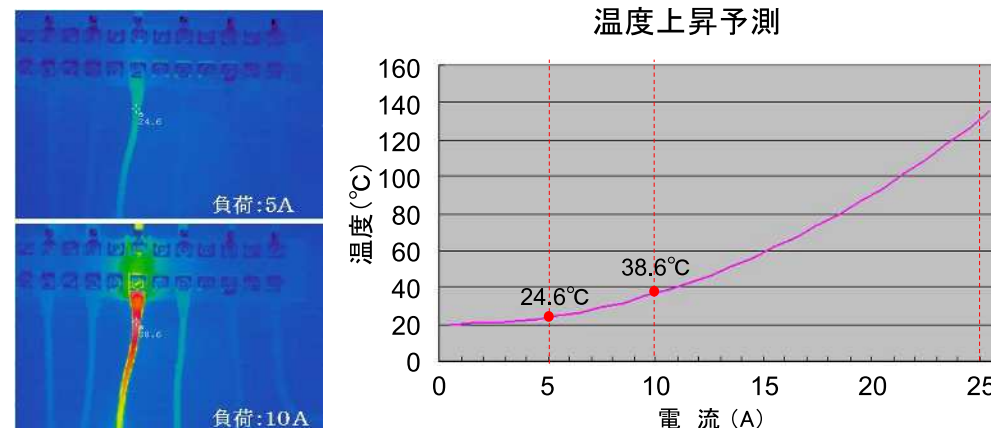


Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

19

熱画像の判読 - 負荷上昇時の温度予測

- 電気設備は100%の負荷で稼働していることは殆んどなく、計測時の負荷と抵抗値に応じた熱を発生している。したがって、計測した時点の温度値を用いて良否の判定をすることは出来ない。
- 計測時の負荷電流と温度値から、負荷が上昇したときの温度値を予測するのが有効となる。

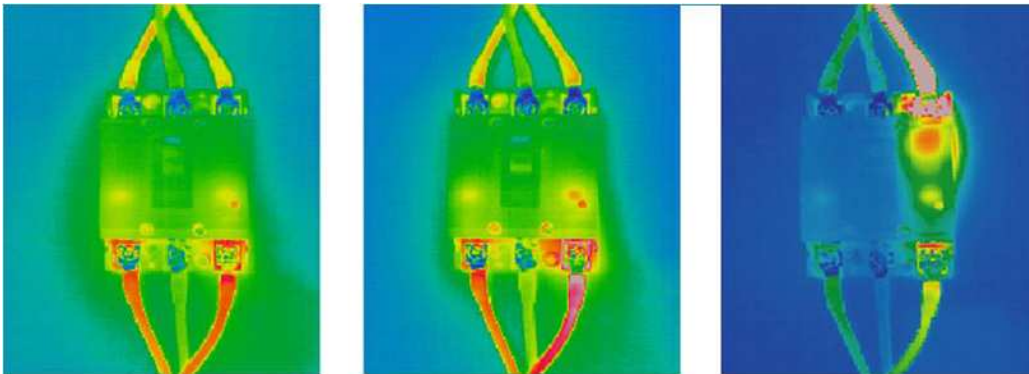


Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

20

熱画像の判読 - 温度パターンによる判定

- 負荷電流が流れると、それ自身の抵抗により通常部材は発熱する。(正常な負荷発熱)
- 測定対象の正常な負荷発熱画像の温度パターンと比較して、良否を判定する。
- 図は、MCCB(配線用遮断器)の発熱パターンの例である。



正常な負荷発熱

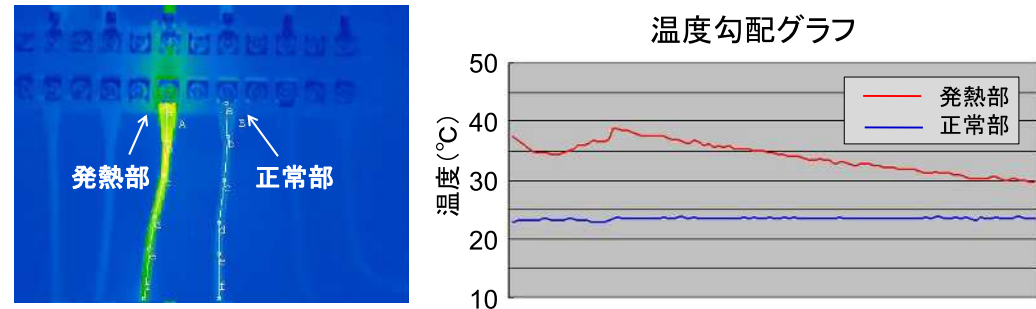
負荷側端子の緩み

内部接点の発熱



熱画像の判読 - 温度勾配による判定

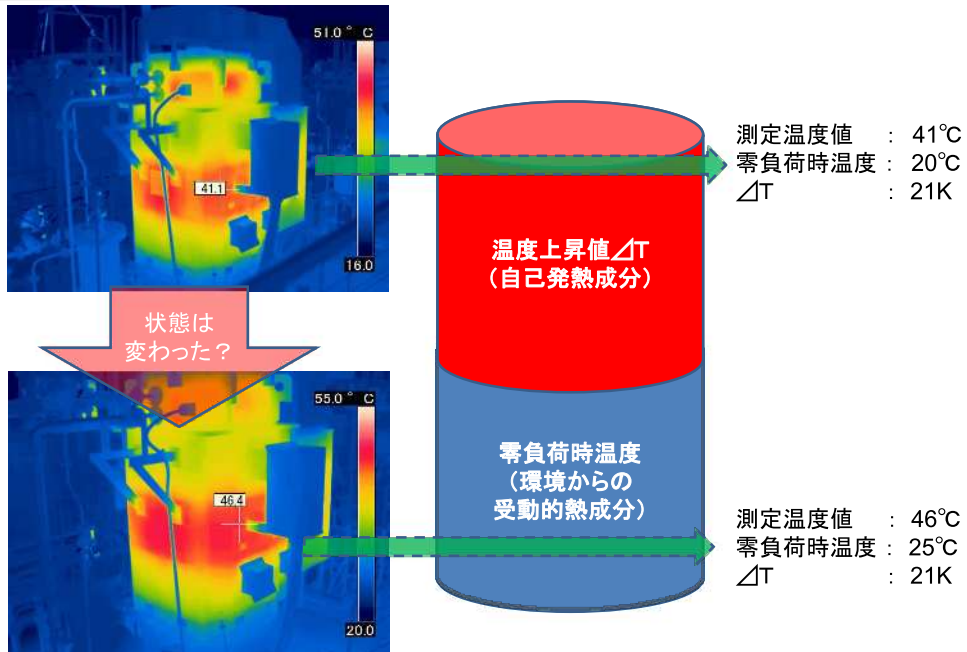
- 負荷による発熱か、局所的な抵抗増加による発熱かを判別するには、熱の伝導を考慮する。
- 図の熱画像は、端子台のネジの締め付け不良の例である。



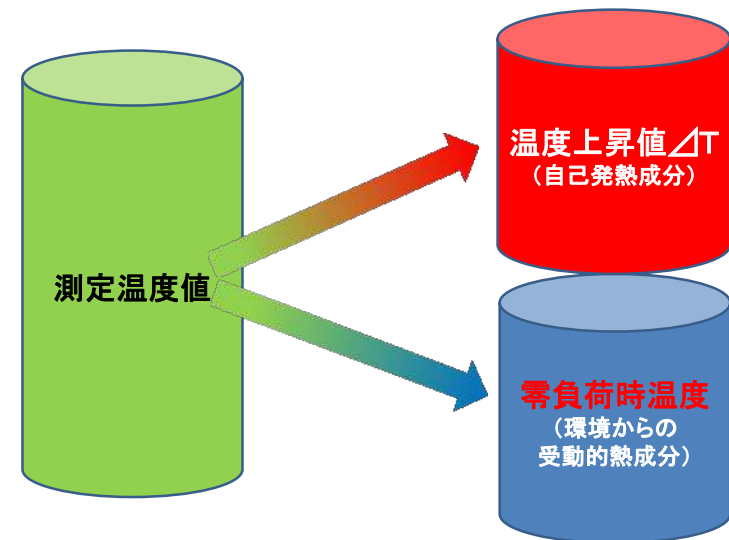
- 負荷による発熱の場合、部材が均一に発熱するが、局所的な抵抗増加による発熱の場合、発熱した場所からの熱伝導で、必ず温度勾配を生ずる。
- 温度勾配を生じた発熱は、温度の一番高い点に、接続不良などの発熱原因が見られる。



対象パラメータは？



ΔT と零負荷時温度を知る



管理基準の設定

● 絶対管理基準値

- ・最高許容温度
- ・使用温度限度
- ・温度上昇限度

← 規格より引用
(JIS・JEM・JECなど)

● 状態監視目標値

正常時の ΔT (温度上昇値)
の許容範囲
【振動解析で言う通常値】

← ベースラインデータより
機器ごとに設定

● 判定基準(アクション)

- ・絶対判定基準
- ・相対判定基準
- ・相互判定基準

← 絶対管理基準値・状態監視目標値を逸脱した場合のアクション指標

管理基準の例

機器名	測定箇所	最高許容温度(°C)	使用温度限度(°C)	器具	測定状況	判定結果	備考	
コンロ	扉裏(左側)	55	15	JEM105	○	—	—	
		扉裏(右側)	75		30	○	—	—
	扉裏(左側)	80	40		○	—	—	
		扉裏(右側)	80		50	○	—	—
	二次側	二次側	90		50	○	—	—
		二次側	110		60	○	—	—
		二次側	130		80	○	—	—
		二次側	145		110	○	—	—
		二次側	160		140	○	—	—
		二次側	90		50	○	—	—
制御回路	制御回路	75	35	JSC6204-1	○	—	—	
	制御回路	80	40		○	—	—	
	制御回路	85	—		○	—	—	
	制御回路	100	—		○	—	—	
二次側	二次側	75	35	JEM105	○	○	電圧降下の原因が不明	
	二次側	90	50		○	—	—	
	二次側	75	35		△	○	5K~20K	
	ケーブル	100	—		△	—	—	
	配線用	90	50		○	—	—	
	配線用	80	15		○	—	—	
	配線用	90	40		○	—	—	
	電圧	90	50		○	—	—	
	電圧	90	40		○	—	—	
	電圧	90	40		○	—	—	

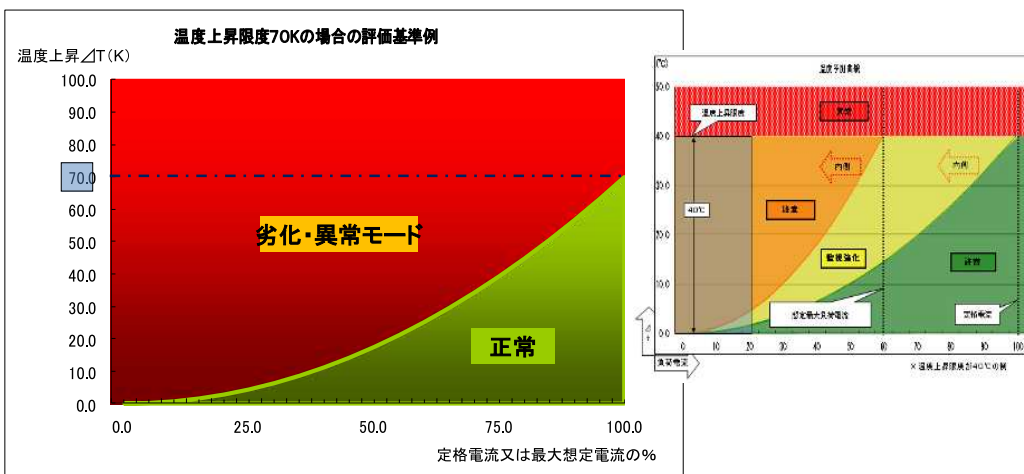
相対評価判定値

判定	設定値	アクション
異常	35K以上	即刻使用中止もしくは、修理
注意	20~35K	保全のアクションを提言及び測定周期の変更
監視強化	10~20K	測定周期の変更(程度に応じて1W~3M)
許容	10K	通常の状態監視継続
正常	目標値内	通常の状態監視継続

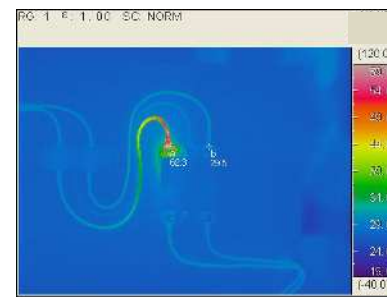
この判定値は標準的な回転機器に適用するもので、直接測定・間接測定又は潤滑剤等を考慮して判定する必要がある

管理基準の設定(絶対管理基準値)

- 各機器の温度上昇限度、最高許容温度値との比較。
電気部材の場合は、負荷電流との相関で設定する。

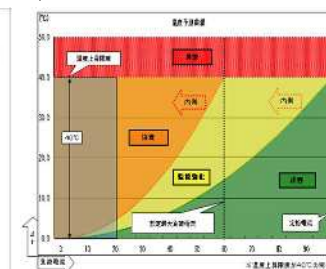
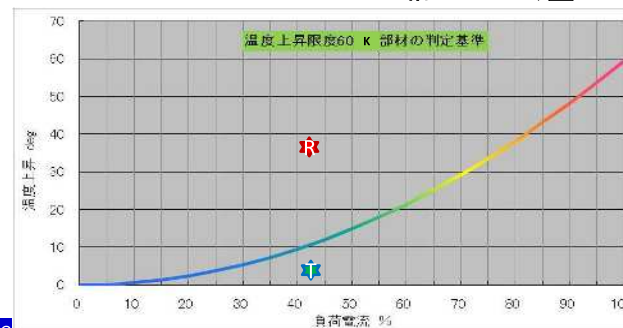


電気品の絶対評価手順

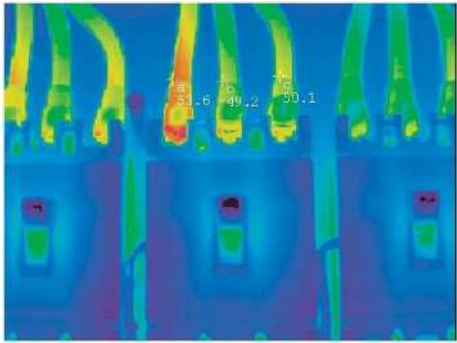


配線用遮断器(MCCB)1次側端子接続部の発熱

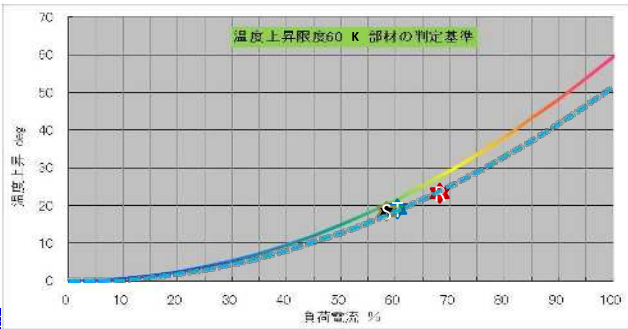
- ・定格電流20A
- ・端子部温度上昇限度60K
- ・測定時負荷電流7.6A(37%)
- ・零負荷時温度(盤内)25°C
- ・端子部温度
R相62.3°C(ΔT 37.3K)
T相29.5°C(ΔT 4.5K)



電気品の絶対評価手順事例



- ・定格電流90A ・端子部温度上昇限度60K
- ・測定時負荷電流 R:62A(67%)
S:51A(57%)
T:55A(61%)
- ・零負荷時温度(盤内)31°C
- ・端子部温度 R:53.6°C(22.6K)
S:49.2°C(18.2K)
T:50.1°C(19.1K)

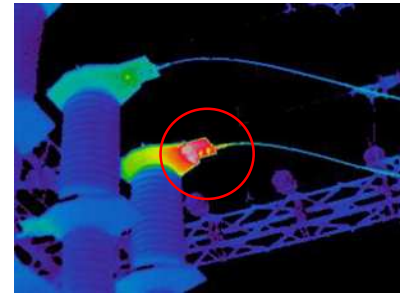
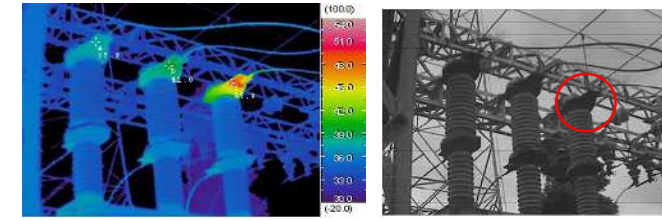


Copyright THE

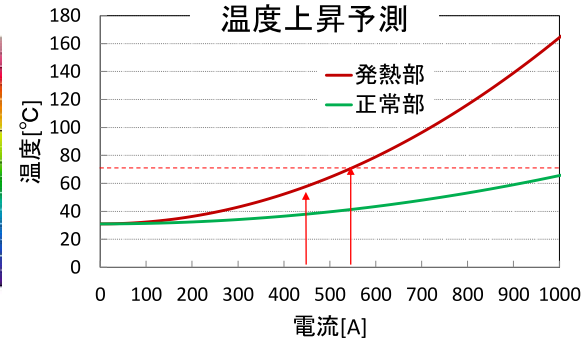
絶対評価の事例

- ・ガス遮断器(GIS)ブッシングヘッド

定格:77kV, 1000A
 周囲温度:31°C
 温度: u相:37.9°C
 v相:41.0°C
 w相:57.9°C
 負荷電流:450A
 対象部位管理温度:70°C



w相拡大画像



Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

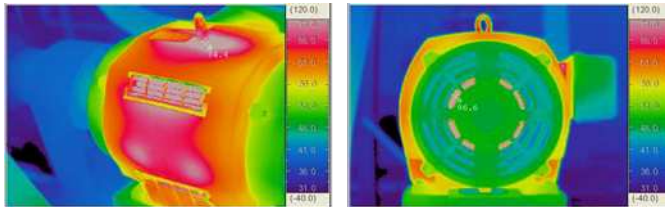
相互評価の事例

- ・三相籠型電動機
冷却水移送設備
定格:45kW, 158A
絶縁種別:F種(最高許容温度:155°C)
極数:4極



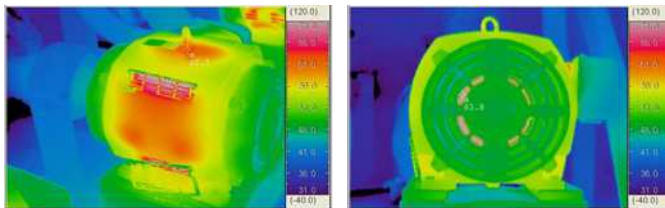
A号機

周囲温度:36°C
 固定子枠温度:74°C
 温度上昇(ΔT):38°C
 負荷電流:118A
 ポンプ出力:0.22MPa



B号機

周囲温度:36°C
 固定子枠温度:63°C
 温度上昇(ΔT):27°C
 負荷電流:117A
 ポンプ出力:0.22MPa

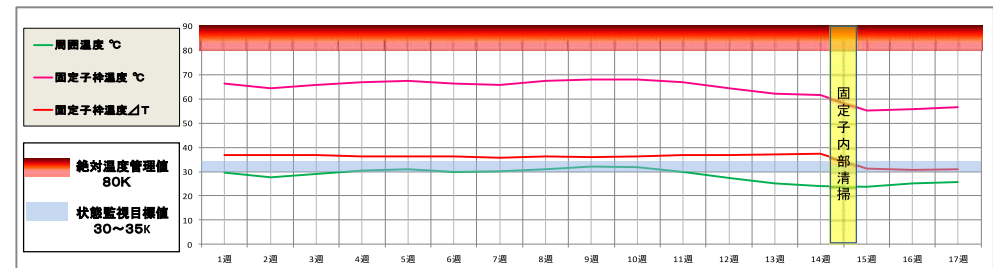


Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

相対評価の事例

- ・固定子枠の温度上昇値(ΔT)が状態監視基準値を超えていたため相対監視を行っていたが10週目を過ぎた時点から、温度上昇値(ΔT)が上昇し始めたため、固定子枠内部を分解清掃した。
- ・分解清掃後運転再開した結果、温度上昇値(ΔT)は状態監視目標値内に収まった。
- ・原因:固定子に付着したダストによる、放熱阻害が原因であった。

測定日	初回	5週間後	10週間後	15週間後(改修後)
外気温(°C)	29.6	31.9	31.7	23.8
フレーム温度(°C)	66.3	67.4	68	55.1
フレーム部熱画像				



Copyright THERMOGRAPHERS CO.,LTD

判定・評価できるデータの取得のために

1. 体制・装備

- 2人1組 ... 測定者(カメラ操作)と記録者
 周囲の安全確認と測定の指揮または記録者
- 記録表(チェックリスト) ... 熱画像・可視画像と測定対象の関連付け、諸情報の記録。

点検日	測定場所	棟・階	盤名称	発熱	ファイル名	枚	備考					
部品名	形式	デバイスNo.	相別	定格	電流	相別	定格	電流	相別	定格	電流	備考

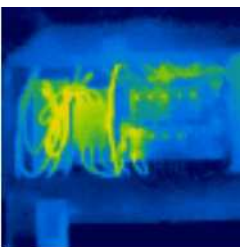
- デジタルカメラ ... 詳細な可視画像の取得(測定対象の情報入手)



機器の選定:カメラの性能

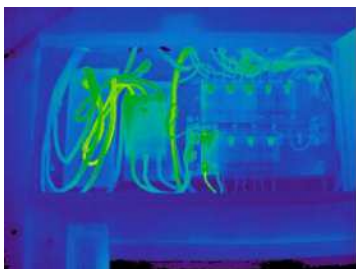
低価格

120×120画素



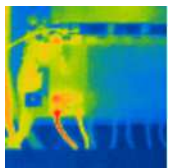
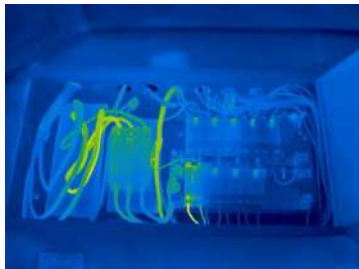
一般的価格

320×240画素



高価格

640×480画素



※焦点はどのデータも正確

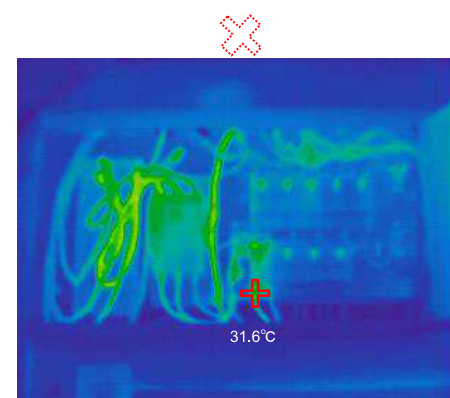
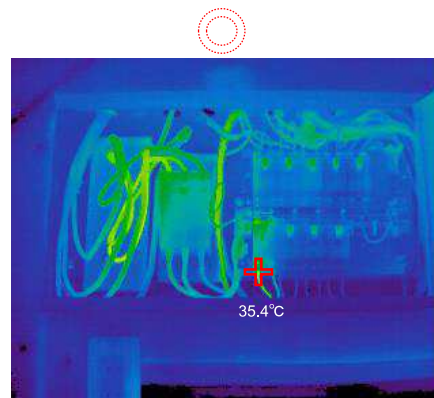
判定・評価できるデータの取得のために

2. 適正な赤外カメラの設定

- キャリブレーション(環境反射補正)の実行
 - 環境温度の適正化(データの均一化)
- 空間分解能の確認
 - 対象物の大きさに対応したレンズの選択及び測定距離
- フォーカス設定
 - **最低限のクリア項目!!**
- 熱画像の温度設定
 - 適正でないと不具合を見逃す。
 零負荷時の温度=周囲温度
- ファイル名の設定
 - 何時、誰が何を取ったのか。

測定時の留意点(フォーカス)

- ・フォーカスが適正でないと、測定対象の形状がハッキリしないばかりでなく
 空間分解能が劣化し、測定温度も不正確になる。



測定時の留意点(温度設定)

・温度設定が適正でないと、測定対象の温度分布がハッキリしないばかりでなくホットスポットを見逃す可能性がある。



判定・評価できるデータの取得のために

4. 熱画像以外の情報の取得 (評価・解析のために)

■ 測定対象の名称

- 名称から役割や稼動状態が推測できる。
- 電氣的役割 : 機器名称または略称(一般的な)
- 客先名称 : 盤名称、機器No、機器名称(客先の)

*** 判らないものは客先保全担当者に聞く！**

■ 負荷電流 ... 評価・判定には必須。

- 低圧機器 : 計器表示またはクランプメータにて計測。
- 高圧機器 : 変電所指示及び電線温度から推測

■ その他の情報 ... 配線図及び単線結線図の入手

- 機器の運転状態の確認(電源のオンオフなど)

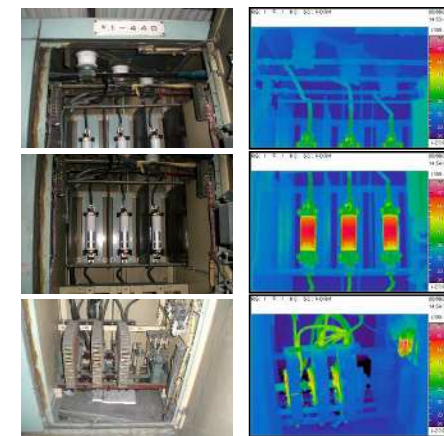


判定・評価できるデータの取得のために

3. 熱画像の取得 (報告のストーリーをイメージして)

■ 全体熱画像の撮影

- 全体の温度分布の取得。
- 盤:分割して約3画像で。
- 機器:接続されている電線、ケーブルも入れて。
- 一次側を画面上又は左に。
- 分割して撮影する場合は機器もしくは評価したい部位が画像の中心に来るように！



■ 異常個所の撮影

- 全体画像のクローズアップ。
- 発熱箇所からの熱の伝導がわかる熱画像。
- 陰になって見えにくい時は、複数画像を取得。

*** 撮り損なうより撮りすぎるくらいに！**



判定・評価できるデータの取得のために

5. その他

■ 測定順序

- 電気の流れ及び役割に沿った測定手順を予め決める。
- 対象の電気回路を理解する。(配線図及び単線結線図)

*** 取りこぼしの防止だけでなく測定のストーリー性も重要！**

■ 測定後のチェックリストの整理

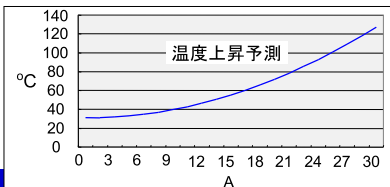
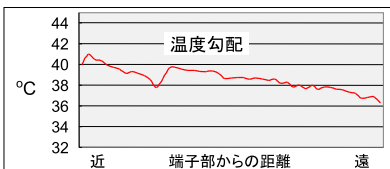
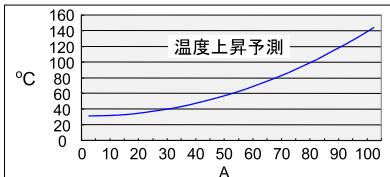
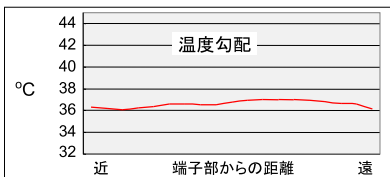
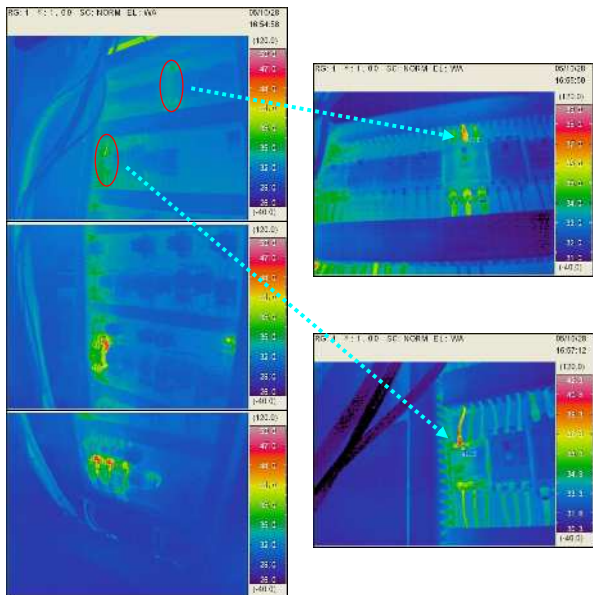
- 不具合発生箇所の確認及び客先への速報。

*** 報告書作成のために！**



熱画像の判読演習

■ 機器制御動力盤 MCCB 配線用遮断器



JIS規格、温度定格の例

■ 日本工業規格 JIS C8370 MCCB 配線用遮断器

場所および構成材料		温度上昇限度 (温度計法) [K]
接点	自力接触	40
	他力接触	銀、銀メッキ及び銀合金 — その他 40
接続部	銀、銀メッキ及び銀合金	—
	すず、はんだ又は ニッケルメッキ相互間 その他	60 40
絶縁部	合成樹脂製品	—
端子		60
充填用コンパウンド		—
人が操作する部分	金属部	20
	絶縁部	35

温度限界の例

周囲温度に対する対象部品の温度上昇(ΔT) - 間接的な場合

温度差, ΔT	修理の緊急性
5°Cを超えている場合	即修理が必要。
5°C以下の場合	次回の定時メンテナンス時に修理。 (その間監視強化)

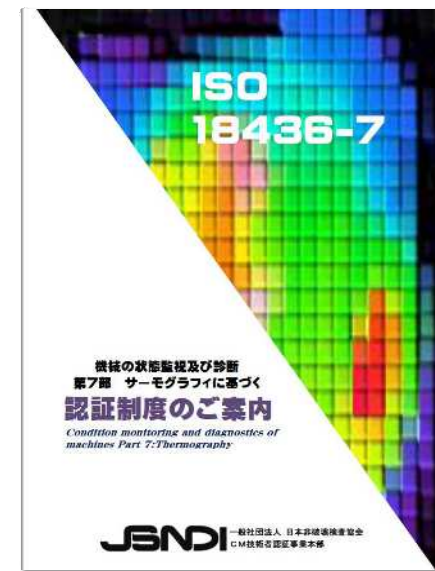
ISO 18436-7 に基づく機械状態監視診断技術者 (サーモグラフィ) 認証制度

(一社)日本非破壊検査協会
赤外線サーモグラフィ試験を実施する
診断技術者をカテゴリー I ~ III の3段階に規定

認定訓練機関が講習を実施

- ①株式会社チノー
- ②株式会社ニシヤマ

ISO18436-7 機械状態監視診断技術者
認証の取得者数はカテゴリー1が97名、
カテゴリー2が27名(2018年11月1日現在)である。



- ◆ ISO 18436-1 : 資格認証機関に対する要求事項
- ◆ ISO 18436-2 : 振動診断技術者に対する要求事項
- ◆ ISO 18436-3 : 訓練機関に対する要求事項
- ◆ ISO 18436-4 : 潤滑診断(現場)技術者に対する要求事項
- ◆ ISO 18436-5 : 潤滑診断(分析室)技術者に対する要求事項
- ◆ ISO 18436-6 : AE診断技術者に対する要求事項
- ◆ **ISO 18436-7 : 赤外線サーモグラフィ診断技術者に対する要求事項**
- ◆ ISO 18436-8 : 超音波診断技術者に対する要求事項

(日本非破壊検査協会は訓練シラバスに完全合致)

項目	訓練時間		
	カテゴリーⅠ	カテゴリーⅡ	カテゴリーⅢ
0. 導入	0.5	—	—
1. 赤外線サーモグラフィの原則	6	7	6
2. 装置およびデータ採取	5	3	1
3. 画像処理	6	2	1
4. 適用機器	4.5	0	0
5. 診断と予測	1	2	2
6. 状態監視への適用	4	10.5	7
7. 是正措置	—	3	6
8. 報告および文書化(ISO標準)	1	0.5	0.5
9. 状態監視プログラムの設計	0.5	0.5	3.5
10. 状態監視プログラムの導入	1	1	1
11. 状態監視プログラムの管理	0.5	0.5	2
12. 修了試験	2	2	2
それぞれのカテゴリーに対する総時間	32	32	32

訓練課程および訓練時間

訓練実施状況



会場: 株式会社チノー



講習風景



実習風景(放射率補正実習)



実習風景(電気設備診断実習)



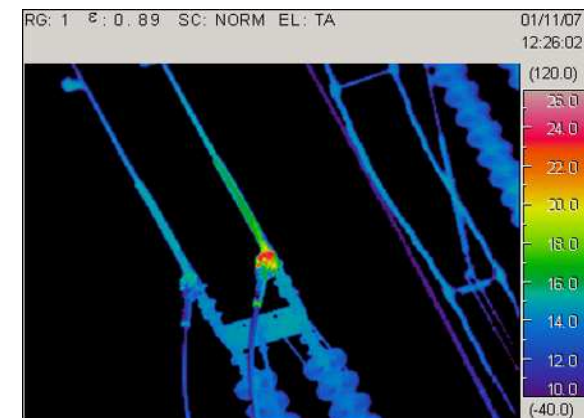
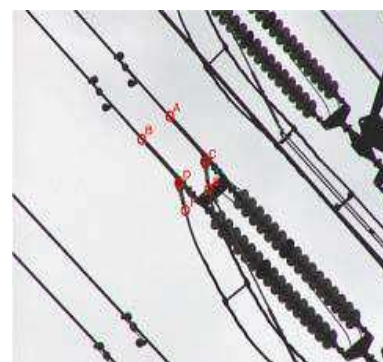
修了試験会場



修了証授与

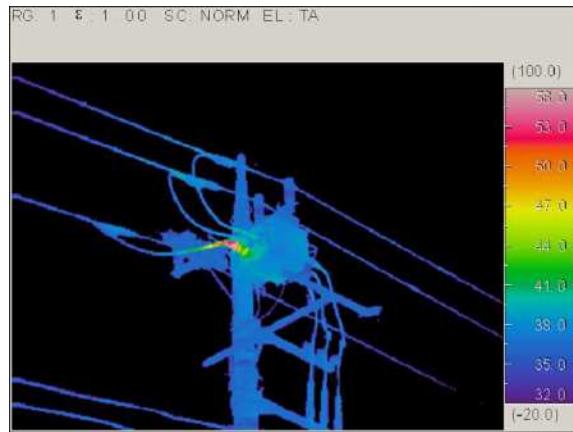
事例紹介

送電線引き留めクランプ発熱例



事例紹介

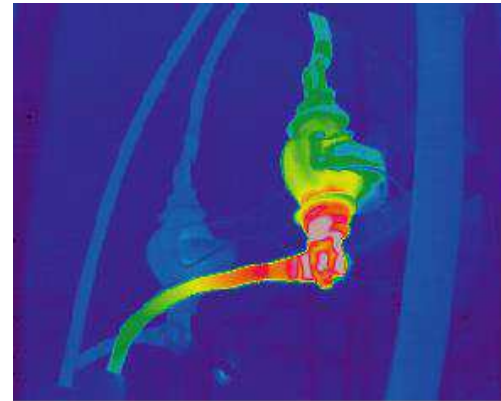
■ 開閉器ブッシング部発熱例



事例紹介

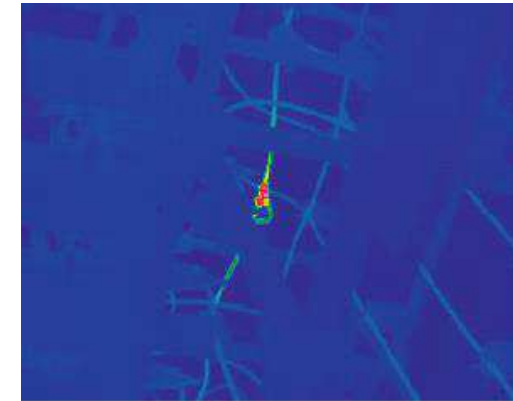
■ 変流器(CT)

- 一次導体端子負荷側の接触抵抗増加。



■ 高圧母線T分岐

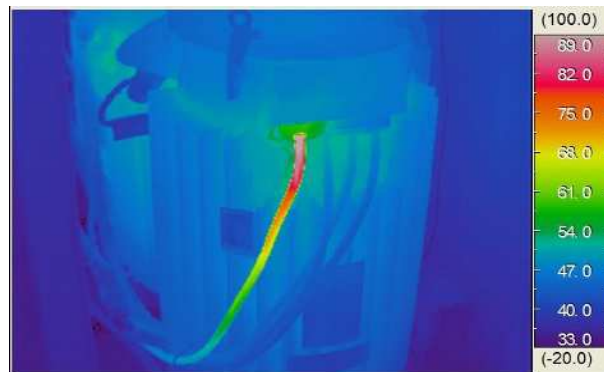
- 圧縮接続部の圧接不良。



事例紹介

■ 変圧器

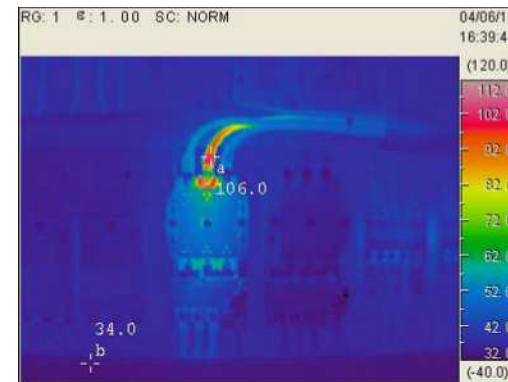
- 二次側引出線端子部締め付け不良。



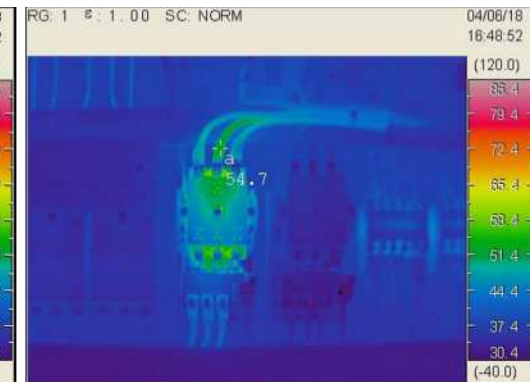
事例紹介

■ ブレーカ端子 増し締め効果

増し締め前



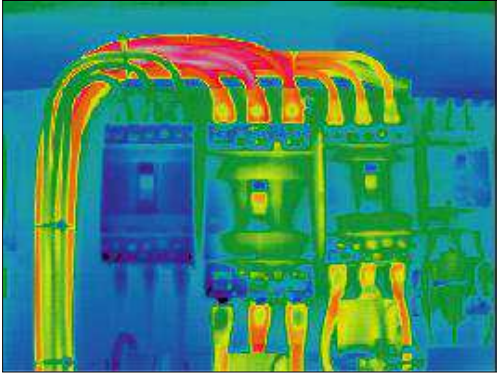
増し締め後



事例紹介

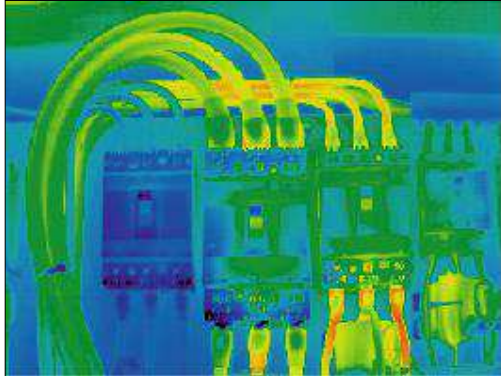
■電線の結束

- 無理な電線の結束による過熱。



■電線の結束(改善後)

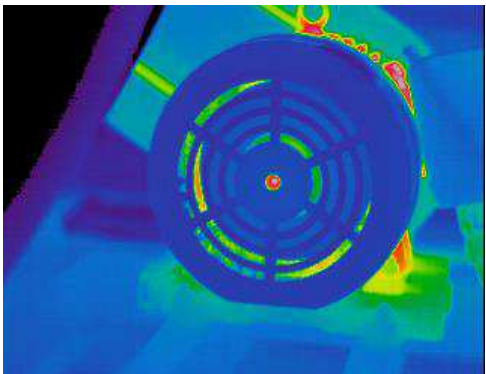
- 異常な温度分布は見られない。



事例紹介

■モータ

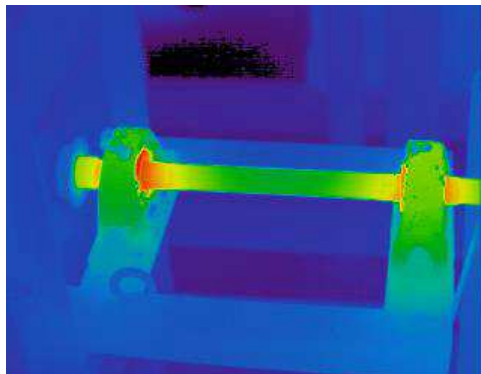
- 2次側玉受け部の発熱。



■軸受け

- 3次側、4次側軸受けベアリング部の発熱。

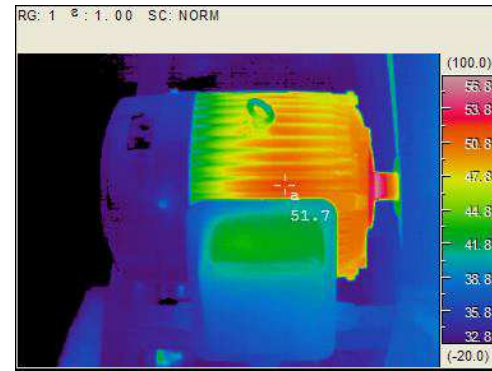
- 図の右側が3次、左側が4次。



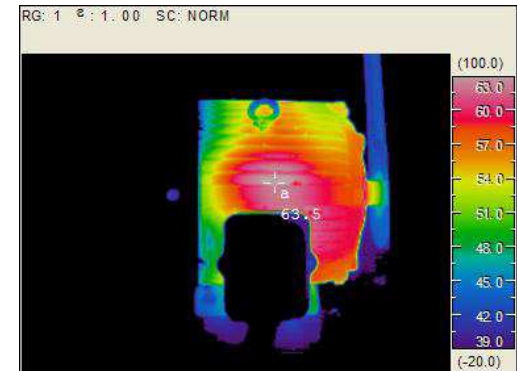
事例紹介

■モータの発熱例

正常な温度パターン



巻線部の過熱の例



事例紹介

■高温蒸気配管

- 高温部は断熱劣化または内部の高温蒸気のリークの可能性はある

