

サーモグラフィ活用による状態監視保全技術の改善

Improvement of Condition-Based Maintenance Technology by Utilization of Thermography

島田 宏樹 (Hiroki Shimada)*

要約 米国の原子力発電所では、近年赤外線サーモグラフィ（サーモグラフィ）を用いた機器の状態監視保全技術が事故未然防止として効果を上げ、定着してきている。ところが国内の原子力発電所ではこれはまだほとんど活用されていない状況に鑑み、これを発電所員が使いやすいものとする方策を実験的に検討した。まず測定効率向上の観点から、1回の測定により正確な温度測定を可能にするため、測定温度に影響する主要因を調べた。その結果、黒体テープによって測定した設備塗装仕様毎の放射率表を適用することおよび測定時の背後熱源（反射率の影響）と背景雑音（散乱光の影響）を避けるための測定位置が正確な温度測定にとって有効であることがわかった。また、大気中での赤外線減衰を調べた結果、10 m以内であればほとんど減衰せずに測定可能であることが判明した。更に発電所設備（主に電気設備）の中でサーモグラフィの適用が難しい機器を明確にした。これらの検討結果と米国の異常熱画像説明集および温度上昇時の判定基準を織り込んで、「サーモグラフィ測定マニュアル」として取りまとめた。その上で、これを原子力発電所の現場調査に適用し、電力線接続部の温度上昇箇所を見出し、サーモグラフィによる故障の未然防止への有効性が実証された。更に機械設備に対しても、サーモグラフィによって逆弁の漏洩の有無やタンク水位の確認も可能であることを見出した。

キーワード 赤外線サーモグラフィ、サーモグラフィ、原子力発電所、放射率、測定マニュアル、状態監視保全

Abstract In the United States, condition-based maintenance technology comprising IR thermography (hereafter “ thermography ” for short) has been regarded in recent years as the established means for effectively improving the performance of accident-preventive measures for nuclear power stations. As very few nuclear power plants in Japan have been utilizing the technology, measures for allowing power station personnel to use the technology with ease have been studied on an empirical basis. First, in view of improving the measuring efficiency to determine temperatures more accurately with a single measurement, principal factors affecting the measured temperature values have been analyzed. As a result, it has been found effective for accurate temperature measurement to make use of the table of radiation rates that have been determined for each facility coating specification by using a black body tape and to determine the measuring spot by avoiding rear heat sources (influence of reflection ratio) and background noise (influence of scattered light). Concurrently, as a result of determining the IR attenuation in the atmosphere, thermographic measurement has been found feasible without any significant attenuation as long as the distance is below 10 meters. Further, every power station facility (mainly electrical facilities) that is immune to thermography has been identified. These study results have been documented in the form of the “ Thermography Measurement Manual ” by also including in it the descriptions on abnormal thermal images and the judgment criteria at elevated temperatures that have been used in the United States. Based on these accomplishments, condition-based maintenance technology employing thermography has been applied to on-site investigation of nuclear power stations, and the effectiveness of thermography-aided accident-prevention has been demonstrated by detecting locally temperature rising spots of power cable joints. Moreover, with respect to maintenance of machinery, the thermography proves itself to be a viable means for detecting leakage in check valves and for checking the tank water level.

Keywords IR thermography, thermography, nuclear power station, radiation rate, measurement manual, and condition-based maintenance

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

1. はじめに

米国の原子力発電所高稼働率の主な理由⁽¹⁾は、(1)プラント運転中保守、時間計画保全から状態監視保全への移行による燃料取替期間の短縮、(2)運転サイクルの長期化がある。こうしたことを含め、海外の事故・故障情報から教訓を学び、我が国で同種の事故・故障を防止することは、原子力発電の信頼性向上を図るために有益である。

本研究では、米国の原子力発電所の事故・故障情報から、良好事例として、機器の異常兆候や劣化の傾向を早期に見つけ、故障の未然防止を図る保全方式として有効活用されている状態監視保全技術の一つである赤外線サーモグラフィ（以下サーモグラフィという）の活用状況および有効性を調査した。そしてその技術を国内の原子力発電所へ導入することを目的として、実機適用上の問題点となる測定対象の放射率、背景雑音および伝搬経路等による影響を実験的に検討し、それらを解決するために現場で検証を行った。その結果、同一塗装機器に同じ放射率を適用すると共に、温度上昇時の判定基準等を織り込むことによって、効率的で容易に実施できる「サーモグラフィ測定マニュアル」を作成した。これにより発電所員がサーモグラフィを効率的で使いやすい形態にする方策を示すことにした。

2. サーモグラフィの概要

2.1 サーモグラフィの原理と特徴

サーモグラフィの原理と特徴を図1に示す。物体から放射される赤外線を走査部の反射ミラーによって検出器に入力し、赤外線の強さに応じた電気信号に変換、増幅する。信号処理系で走査部からの位置信号と共に演算処理して、モニタ上に画像を表示する。

特徴の内、長所としては非接触のため測定対象物に影響を与えないので、発電所設備で通電部、回転部、過熱部、高所等の多くの設備に利用できる。また温度分布を2次的に捉えるので、ホットスポットの発見が容易にできる。欠点としては表面温度しか測れないことがある。

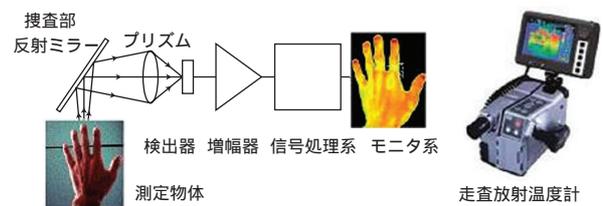


図1 サーモグラフィの原理と特徴⁽²⁾

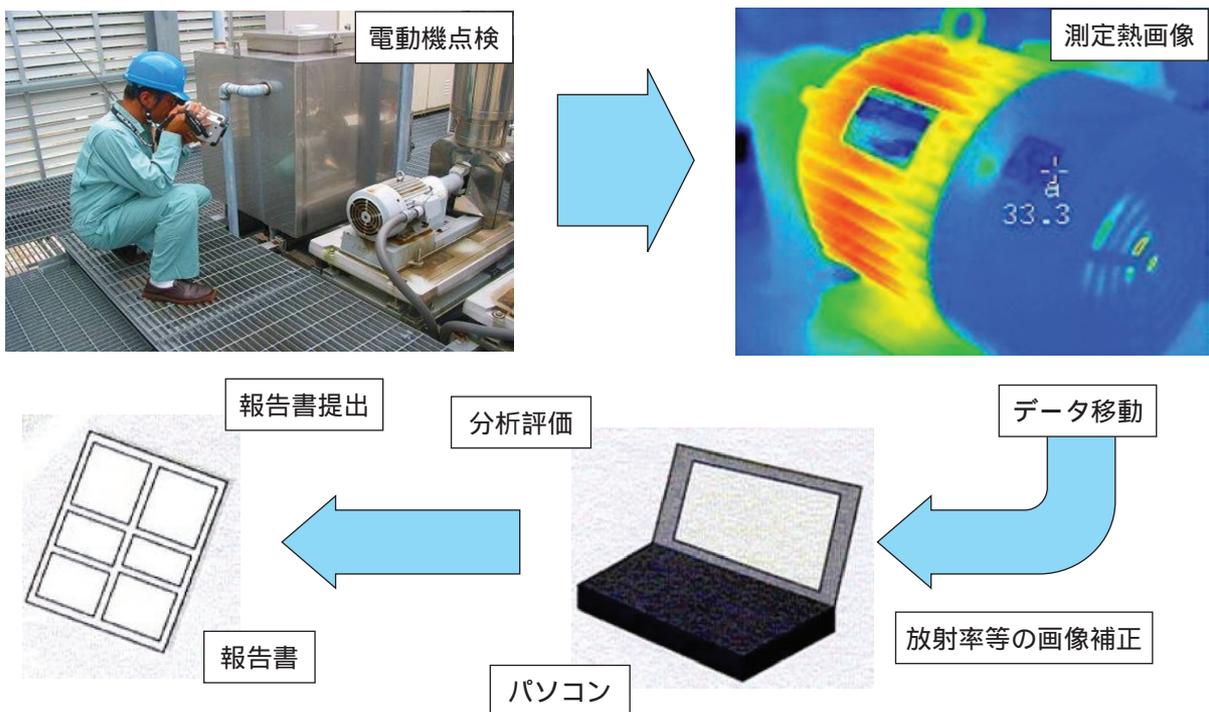


図2 サーモグラフィによる設備保全の流れ

2.2 サーマグラフィによる設備保全の例

サーモグラフィによる設備保全の流れを図2に示す。この写真は電動機の温度上昇の有無を確認するために、サーモグラフィで熱画像を測定している様子である。測定後、サーモグラフィに内蔵しているメモリからパソコンにデータを移動して、パソコン上で熱画像を分析評価し、異常の有無を判断したうえで報告書を作成する。

3. 日本の電力会社および米国の原子力発電所におけるサーモグラフィ活用状況の調査

3.1 日本の電力会社におけるサーモグラフィ活用状況の調査

日本の電力会社におけるサーモグラフィの活用状況を聞き取り調査したところ、原子力発電所については平成11年から1社で電気設備全般の点検に導入された程度でまだ普及していないが、原子力以外では主に送電線、配電線設備の点検に利用されていることがわかった。関西電力の原子力発電所では平成7年にサーモグラフィを試験導入したが、4項に示すような実機適用上の問題点から本格採用に至っていない。

3.2 米国の原子力発電所におけるサーモグラフィ活用状況の調査

(1) 調査方法

調査にあたっては、本研究所技術システム研究所原子力情報研究プロジェクトで構築した「海外原子力発電所不具合データベース」⁽³⁾による不具合事象をもとに、1990年から2001年までに入手した情報のうち、米国の原子力発電所でサーモグラフィを使用した実績のある事象を収集した。

調査項目は 発生プラントおよび発生年月日、活用内容および設備名、点検周期である。

(2) 調査結果と分析

設備別サーモグラフィ点検実績数と年度別サーモグラフィ点検実績数それぞれを図3と図4に示す。図3に示すようにサーモグラフィによる点検の実施または故障を発見した実績を調査したところ、合計89事象となり、それを分類すると変圧器、制御盤、補助リレー

レー等の電気設備の点検に多く活用されていることがわかる。また、図4に示すように年度別で見ると利用状況は増加傾向にある。

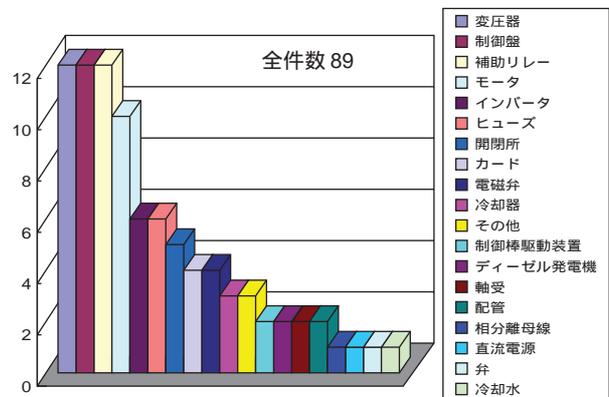


図3 設備別サーモグラフィ点検実績

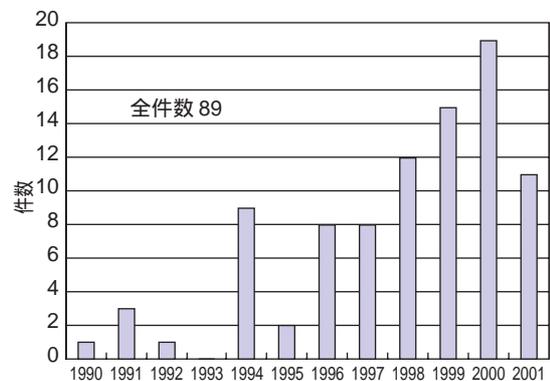


図4 年度別サーモグラフィ点検実績

事故未然防止事例の年度別件数を図5に示す。全体で89事象のうち、サーモグラフィの使用により機器の故障を発見し、未然に事故防止した23事例を年度別件数で表したもので、98年以降いずれも主に変圧器、電動機等の電気設備に4件以上の発見があり、事故の未然防止に役立った件数が増加し、有効性の高い手法であることがわかる。また、図6に米国の原子力発電所サーモグラフィ使用実績割合を示す。ここで定期使用というのは、決められた頻度でサーモグラフィ点検を実施している発電所で、これはすでに37%に達し、臨時使用すなわちトラブル等の点検時にサーモグラフィを使用した発電所は23%、使用の有無不明は情報入手できなかった発電所の割合を示す。この図から、米国の原子力発電所の60%で、すでにサーモグラフィによる状態監視保全を実施しており、サーモグラフィを用いた機器の状態監視技術が事故未然防止に効果を上げ、定着してきていることがわかる。

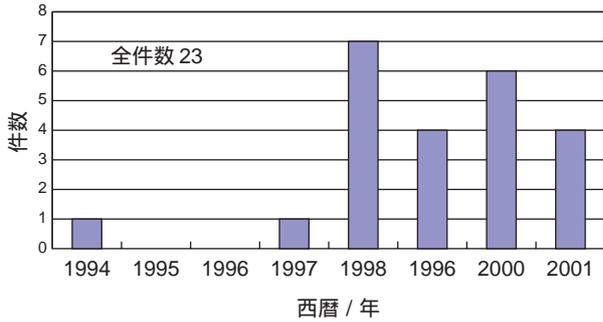


図5 事故未然防止事例の年度別件数

発電所総数 104 (定期使用 38 臨時使用 24 使用の有無不明 42)

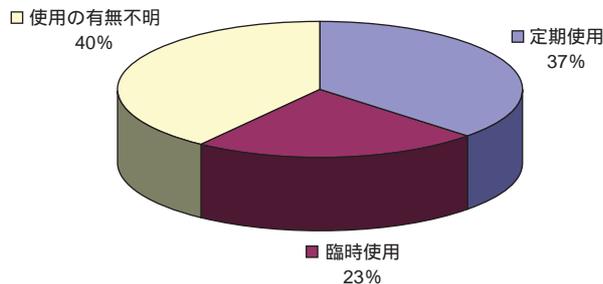


図6 米国原子力発電所サーモグラフィ使用実績割合

具体的なサーモグラフィによる事故未然防止の事例として、2000年12月に米国 Lucie 2号機において240kV送電線から主変圧器への引き込み線接続部に周囲と比べて温度が約5℃高いことが判明し、次回検時に修理を計画した。

4. 実機適用に関する問題点の調査、解決方法および検証

過去の試験導入の経験を生かすため、実機適用に関する問題点を調査した結果、以下の5つがあったことが判明した。そこでサーモグラフィの現場適用に当たって、それぞれの問題点の解決策を検討し、現場で検証することとした。

- (1) サーモグラフィによる熱画像評価が困難な機器がある。
- (2) 正確な温度測定が困難。
- (3) 測定手順や温度判定において使い勝手が良くない。
- (4) 測定マニュアルがない。
- (5) 携帯性が悪い(測定器が重く、大きい)

4.1 サーモグラフィによる熱画像評価が困難な機器

図7から図10に示すように、多数のランプによる熱源(カード、小型補助リレー)、保護カバー取り外し困難(保護リレー)、光沢や凹凸による光反射等(アルミ保温)の原因でサーモグラフィによる熱画像評価(温度測定)が困難な機器があり、これらの機器の点検については実務者の判断等の負担を大きくしていた。

こうした問題に対しては、現場機器の温度測定を行い、温度測定不可能な機器を抽出し、測定対象リストに反映することにした。

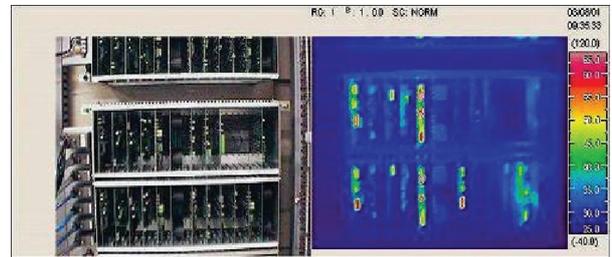


図7 カード

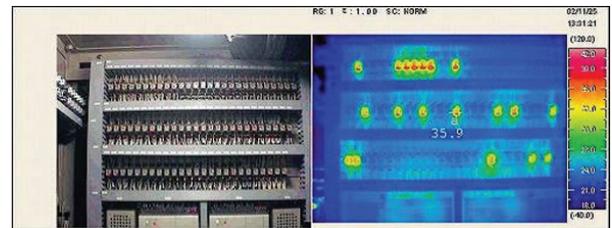


図8 小型補助リレー

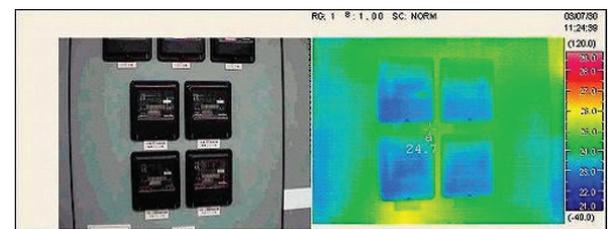


図9 保護リレー

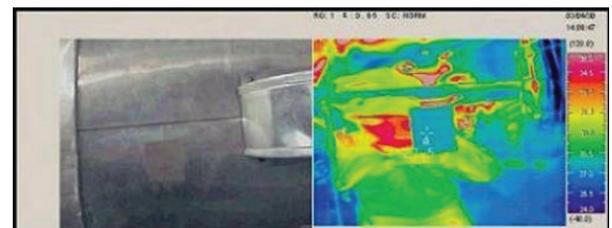


図10 アルミ保温

4.2 正確な温度測定が困難な場合

サーモグラフィ温度測定における主な影響因子を図11に示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

- (測定対象の放射率) : 測定対象の表面材料の違いによる赤外線放射効率の違い。
- (背景雑音) : 太陽光の反射, 直射や周囲物体からの反射の影響。
- (伝搬経路) : 大気中の水蒸気, ガスによる赤外線の吸収, 散乱による影響。

そこで以下の項目について実験的検討を行った。



図11 サーモグラフィ温度測定における主な影響因子

(1) 放射率(反射率)の温度影響

放射率の温度影響の例を図12と図13に示す。赤外線を全て放射する理想物体の放射率を1として、通常の測定対象物では (放射率) + (反射率) = 1 という式が成り立つ。この式を基本に放射率の影響を見ると、ケース1は、物体からの放射分だけが温度計に入力される場合で、温度計の放射率設定を1にしておけば測定値は100になる。ケース2は、放射分が 100×0.9 、環境温度による 20×0.1 が反射分となる場合で、温度計は92相当が入力されるが、温度計で放射率を0.9にすると環境温度による反射分を差し引いて補正し100を測定することができる。このように、測定物体の放射率を知っていなければ、正確な温度測定はできない。

ケース3は、背後に200の物体がある場合で、周囲環境にある高温物体のエネルギーが主な反射分となり、すなわち 200×0.1 が反射分となり、温度計は110相当が入力される。温度計の放射率補正は環境温度で補正するため、放射率を0.9にしてもこの場合は、正確な温度は測定できない。このように測定対象物の放射率は1以下であり、必ず反射があるため、測定位置の背後に高温物体が無いことを確認することが重要になる。

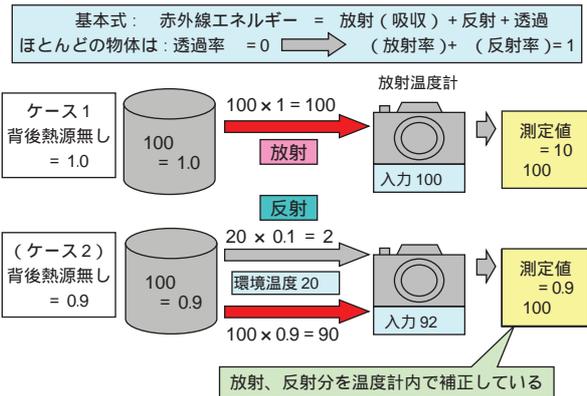


図12 放射率の温度影響(背後熱源なし)

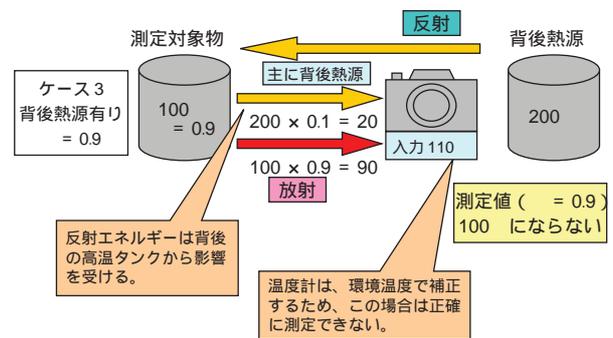


図13 放射率の温度影響(背後熱源有り)

(2) 放射率の温度影響と測定方法

放射率の測定方法は、図14に示すように放射率0.95の市販の黒体テープを測定対象機器に貼り付け、テープ温度が本体と同じになるように30分程度待ち、測定器の放射率を0.95にセットして黒体テープの温度(a点)を測定する。そして、黒体テープ至近(b点)の温度の放射率を調整して、同一温度になる放射率を測定するという方法で統一する。図14の場合、タンクの放射率は0.22となる。

また、放射率の違いによる温度差を測定したところ、

黒体テープ近くの温度(b点)が黒体テープ温度(a点)と同じになるようにb点の放射率を調整して、決定する。下図の場合は放射率0.22。

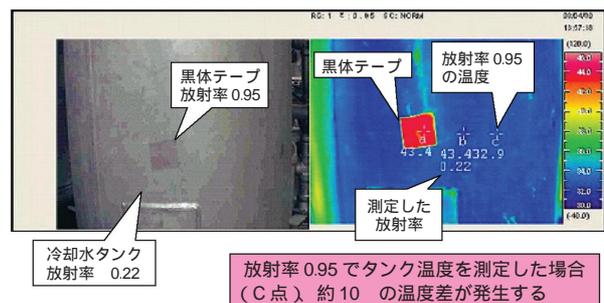


図14 放射率の測定方法と影響評価の確認

タンク表面の放射率は0.22で、測定値はb点の43.4だが、放射率を0.95にして測定した場合、測定温度はc点の32.9 となり、放射率の差により約10 の温度差が生じることを確認した。

(3) 塗装仕様による放射率の現場検証

放射率表の作成に当たっては、着眼点として 放射率は表面材料に依存すること、発電所機器はほとんど表面に塗装が施工されており、同一塗装仕様なら放射率が同じはずという観点から塗装仕様による放射率を検証した。一例として、各発電所で同一塗装仕様の変圧器各10台の放射率を測定した結果、図15に示すように、放射率が0.94～0.99(温度変化は約0.5以内)の範囲に入り、同一塗装仕様なら同じ放射率の適用が可能と判断した。この場合は平均値0.97を使用することにした。また、他の機器についても原則として同一の考え方を適用することにした。

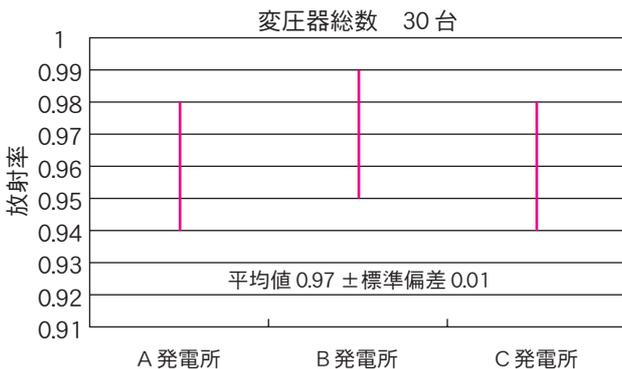


図15 同一塗装仕様の変圧器放射率

(4) 放射率表の作成

今回作成した放射率表を表1に示す。塗装仕様毎に平均の放射率を記載し、各発電所共通に使用できるようにした。

表1 各発電所共通放射率表

対象機器	部位	表面材料	塗装仕様	色仕様	放射率
					平均値 ± 標準偏差
変圧器	本体	非磁性鋼	フッ素樹脂系	N 7	0.97 ± 0.01
所内変圧器他	放熱器	みがき帯鋼	フッ素樹脂系	N 7	0.97 ± 0.02
電動機	フレーム	炭素鋼 ss400	フタル酸樹脂系	2.5G7/2	0.95 ± 0.03
主発電機、励磁器	胴部	炭素鋼	フタル酸樹脂系	U75 - 80B	0.96 ± 0.01
相分離母線ダクト	フレーム	炭素鋼 ss400	フタル酸樹脂系	2.5G7/2	0.95 ± 0.01

(5) 背景雑音の影響

散乱光(太陽光、室内灯)の影響と防止方法

図16と図17は照明用分電盤の母線温度を測定した画像を示す。正面から測定した場合は、室内にある蛍光灯の光により母線部分の温度がばらついていますが、このような場合は、測定位置をずらすことで温度のバラツキを回避できることがわかった。

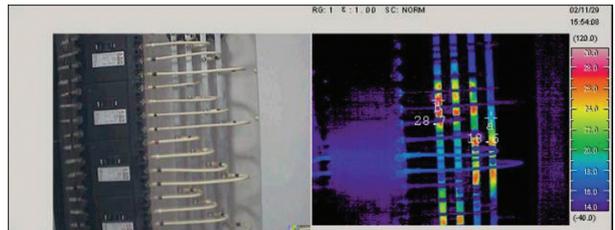


図16 分電盤母線(正面から測定)

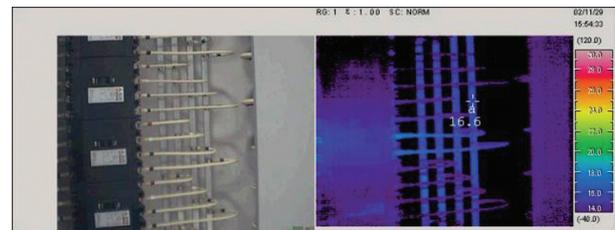


図17 分電盤母線(約10度斜めから測定)

背後熱源の影響と防止方法

図18に示すように、背後に運転中のポンプ等の熱源がある場合と背後に熱源がない場合、測定対象の電動機の同一個所温度は、放射率をこの場合0.5として比較すると背後熱源のある場合は測定値が28.7、ない場合は27.1 となり、測定温度に1.6 の差が生じることがわかった。この影響を防ぐために測定位置の指定が必要な場合は、現場の平面図により、測定器の位置を指定する測定位置図を作成した。

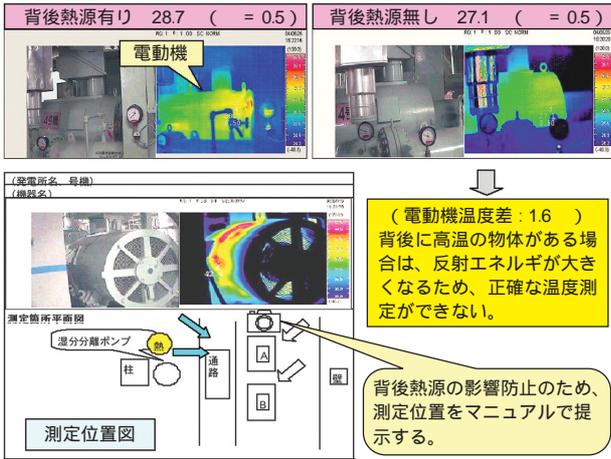


図 18 背後熱源の影響と防止方法

(6) 伝搬経路（大気減衰）の影響検証

発電機フレーム温度を例として伝搬経路の影響を図 19 に示す。実際の発電所現場では測定対象物との間に、水蒸気、ガスあるいはダストが多い場所はほとんどない。しかし念のため大気による減衰がないか測定距離を変えて検証した。発電機フレームの同一個所の温度を測定距離 1 m、5 m および 10 m で測定した結果、測定差（最大値 - 最小値）は 0.6 しかないことがわかり、ほとんど減衰がないことを確認した。

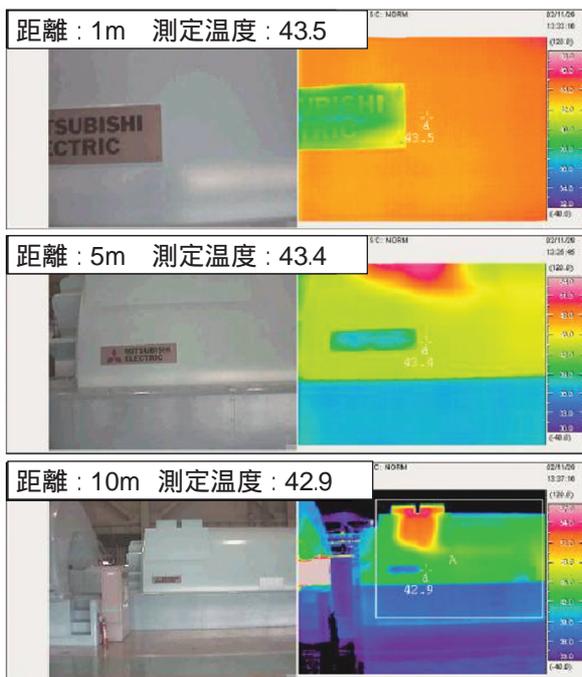


図 19 測定距離による発電機フレーム温度

4.3 使い易くするための改善

図 20 に従来と今回の測定手順の比較を示す。従来の手順は以下のような点で使い勝手が良くなかった。温度への影響因子を考慮していなかった従来での測定方法では、正確な温度を測る場合 2 回測定していたため、効率が悪い。判定基準、異常熱画像事例がないため測定結果の判断が難しい。これらを考慮した測定マニュアルがなかった。そこで以下のようにして使い易くした。

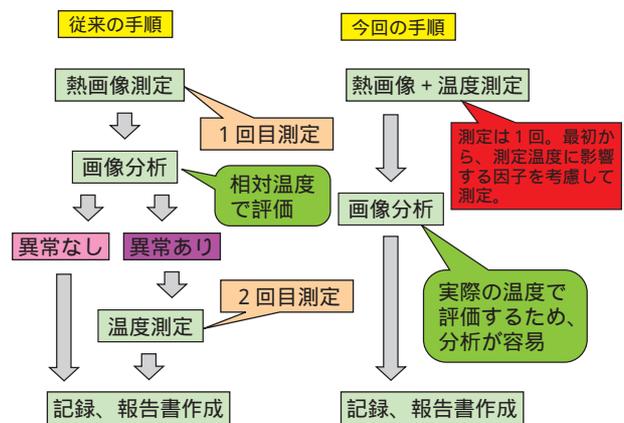


図 20 測定回数の比較

(1) 1 回測定により温度測定を完了する方法

従来は 1 回目の測定では、相対温度で評価して異常がなければそのまま報告しており、異常が見つかったら 2 回目の測定で温度測定を実施していた。これでは 2 種類の測定方法があり使い易いとは言えない。そこで今回は、1 回目から温度測定を考慮した測定方法（4.2 参照）で実施すれば測定方法が 1 種類となり、実際の温度で画像を評価できるため分析が容易になる。

(2) 温度判定基準の調査

サーモグラフィ測定時の温度上昇値（測定温度 - 周囲温度）に対する判定基準が国内にないため、米国の文献を調査した。その結果、米国電力研究所 EPRI の標準的ガイドライン⁽⁶⁾は表 2 のようになっているので、これを参考として測定マニュアルに記載した。また、機器毎の最高許容温度および最高温度上昇限度は、可能な限り日本工業規格 JIS や電気規格調査会標準規格 JEC、メーカー規格等を参照して測定マニュアルに反映することにした。これにより温度

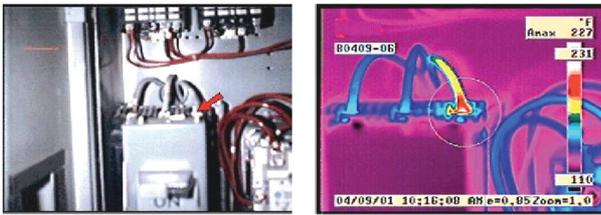
判定を実施する場合は、機器毎の国内基準と EPRI 基準を考慮して判断することが可能となる。

表 2 EPRI の標準的判定基準⁽⁶⁾

温度上昇値	処 置
10 以下	定検サイクルで是正処置
10 ~ 35 以下	傾向管理、1ヶ月以内の修理
35 ~ 75 以下	傾向管理、1週間以内の修理
75 超過	即日修理

(3) 異常熱画像事例の調査

米国の文献を調査して、図 21 に示すような異常熱画像、可視画像および評価を記載した異常熱画像集⁽⁷⁾を参照し、測定マニュアルに反映することにした。



(モールドケース遮断器 1 次側右側相の接続部温度上昇)
端子部からケーブルに熱電導しており、接続部の緩み、汚損、腐食、あるいは酸化により電気的高抵抗になり、高温になったと推定される。接続部の検査、点検を行い、その後サーモグラフィで再検査する。

図 21 モールドケース遮断器 1 次側右相の接続部温度上昇の例⁽⁷⁾

4.4 測定マニュアル

これまでに述べた調査をもとに以下のような内容を含む「測定マニュアル」を作成した。

- (1) 温度測定手順書 (温度影響因子に対する対処方法を反映)
- (2) 放射率表 (設備毎に塗装仕様を記載)
- (3) 判定基準表 (米国電力研究所の標準的ガイドラインを記載)
- (4) 測定対象機器リスト (熱画像評価が困難な機器を記載)
- (5) 測定位置図 (背後熱源等による影響防止が必要な機器)
- (6) 報告書作成手順書 (統一様式, 画像データ処理手順)
- (7) 異常熱画像説明集 (米国の過去の温度上昇事例)

4.5 携帯性

平成 7 年の試験導入時の測定器重量は、測定器が機械走査式で冷却装置が必要であったため約 30 kg と重たく、移動に苦勞しかつ常時 2 名の測定員が必要であった。

図 22 に測定器重量の変遷を示す。最近、飛躍的に製造技術が進歩し、電子走査式で非冷却方式の製品が主流となり、手軽に持ち歩ける大きさで、重量も 2 kg 以下のものが市販され、携帯性の問題は解消されているので本調査では、特に対応しないことにした。今回、実際に使用した計器重量は 1.7 kg で、1 人で測定を実施しても特に問題は発生しなかった。



図 22 測定器重量の変遷

5. 発電所におけるサーモグラフィ点検の実施と点検の結果

発電所におけるサーモグラフィ点検の過程で電力線接続部の温度上昇を発見し、サーモグラフィ点検の有効性が確認できた。更にケーブル等の通電状態や逆止弁漏洩の有無の確認等が可能であることがわかった。

5.1 電力線接続部の温度上昇

図 23 (上) は電力線接続部における温度上昇を示すサーモグラフィである。画像の評価として温度上昇箇所の周囲に熱源がないことから、接続部の緩み等により接触抵抗が増大したことによる温度上昇と推定される。温度を判定すると、接続部温度が約 49℃、温度上昇値が約 19℃であり、国内基準 JEC の最高許容温度 (105℃)、温度上昇限度 (65℃) に対して低いので緊急な処置の必要性はないが、前出表 2 の米国

EPRI 基準では温度上昇値 19 は、1ヶ月以内に処置が必要であることおよび通常の締め付けであれば発熱する箇所ではないので、至近定期検査時または計画停電時に接続部の接触抵抗や緩み等の点検を実施し、それまでの間、定期的にサーモグラフィによる温度傾向管理を実施することにした。

その後、関西電力と I N S S 経年劣化グループにより、図 24 に示す接続部点検を実施した結果、温度上昇の原因は、電食防止のため酸化皮膜防止剤を比較的厚く塗布したことから接触抵抗が増大（健全な接続部に比べ、温度上昇した接続部の接触抵抗値は約 20 倍）して発生したと推定された。接続部の点検手入れを実施（端子表面を清掃後、酸化皮膜防止剤を薄く塗布し、規定トルクで締めつけ）し、復旧した後は、図 23（下）に示すように温度上昇が解消された。本事例によりサーモグラフィ点検の有効性が実証された。

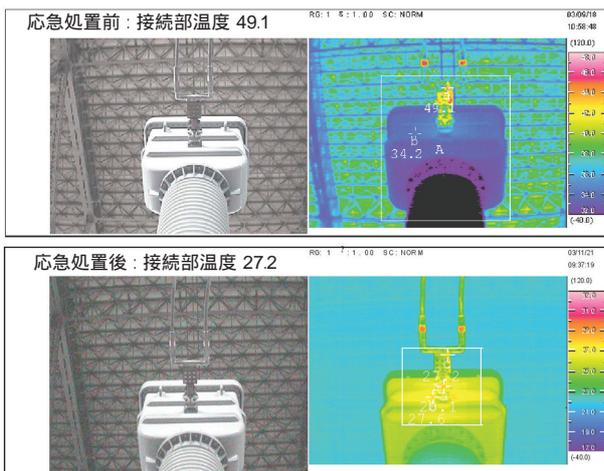


図 23 電力線接続部の温度上昇（応急処置前後）



図 24 接続部の外観

5.2 ケーブル等の通電状態の確認

電力ケーブルの通電状態を図 25 に示す。また、

屋外母線ダクト内の露結防止用ヒータの発熱状態を図 26 に示す。このように周囲温度より 1 以上の温度差があれば、十分にケーブルやヒータの通電状態の確認が可能であることがわかった。



図 25 電力ケーブルの通電状態の確認

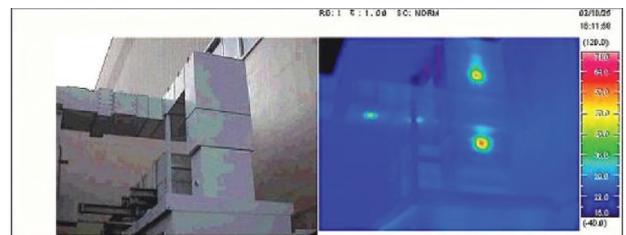


図 26 母線ダクト内ヒータの発熱状態の確認

5.3 機械設備に対する応用

逆止弁漏洩の有無を確認した写真とサーモグラフィ結果を図 27 に示す。ポンプ起動後の配管内の温度上昇経過を測定することにより逆止弁の漏洩の有無が確認可能であることがわかった。また、図 28 に示すように、タンク内の水位の確認がサーモグラフィにより測定可能であることがわかった。

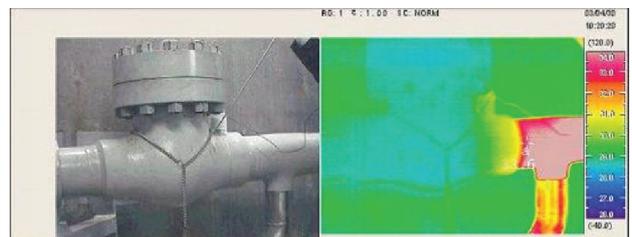


図 27 逆止弁漏洩の有無の確認

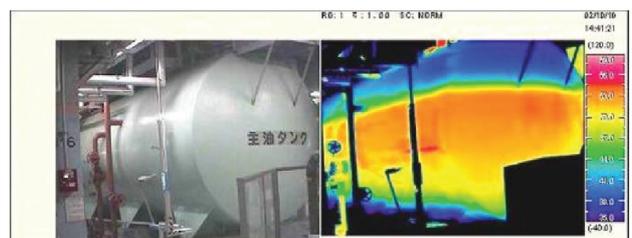


図 28 タンク内の水位の確認

6. まとめ

サーモグラフィを発電所員が使いやすい形態にするため、実機適用上の問題点を実験的に検討し、それらを解決するために現場検証を実施した。以下に得られた主な結果を示す。

- (1) 以下の内容を含む「測定マニュアル」を作成した。
 - ・サーモグラフィによる熱画像評価が困難な機器を抽出し、測定対象リストに反映した。
 - ・温度測定への主な影響因子である測定対象の放射率、背景雑音および伝搬経路の影響に対する対処方法を反映し、作業効率を考慮して1回で温度測定を可能にした。
 - ・放射率表は、同一塗装仕様なら同じ放射率が適用可能なことから、塗装仕様毎に平均の放射率を記載し、各発電所共通に使用できるようにした。
 - ・温度判定を実施する場合は、機器毎の国内基準とEPRI基準を考慮して判断することが可能となり、また異常熱画像、可視画像および評価を記載した異常熱画像集を反映し、判定をより容易にした。
- (2) 発電所におけるサーモグラフィ点検の過程で電力線接続部の温度上昇を発見し、点検手入れにより温度上昇を解消した。これによりサーモグラフィ点検の有効性が実証された。
- (3) 更に一部の機械設備についても逆止弁漏洩の有無確認等に有効利用可能であることがわかった。これらの結果をもとに、今後更に活用する点検対象機器を拡大し、放射率表や温度判定基準の充実等を行い、使い勝手の改善を図っていくことが重要と考えている。

文献

- (1) 綾乃 輝芳, “米国原子力発電所の高稼働実績と不具合事象の分析”, INSS Journal Vol.10, p.82-92 (2003).
- (2) NEC 三栄レポート No.127, “医学サーモグラフィの原理と応用”, p.2, (株)NEC 三栄, (2000)
- (3) 奥田 恭介, 柳 千裕, “原子力発電所技術情報に関するデータベースの構築について”, INSS Journal Vol.6, p.195-201 (1999).
- (4) 久野 治義, “赤外線工学”, p.14-71, コロナ社, (1998)
- (5) Academy of Infrared Thermography, “Level1 Infrared Certification”, section7.8, (株)NEC 三

栄,(2001)

- (6) EPRI Project Manager P Abbott, “Guideline for Developing and Managing an Infrared Thermography Program”, section4-10 ~ 4-16, Electric Power Research Institute,(2001)
- (7) EPRI Project Manager P Abbott, “Infrared Thermography Anomalies Manual(Revision 1)”, section3-3 ~ 3-57, Electric Power Research Institute,(2001)