

石炭サイロ発熱監視装置の研究開発

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 宮崎 習

キーワード： 石炭サイロ
低品位炭
自然発熱
赤外線熱画像カメラ
発熱監視装置

Key Words : Coal silo
Low grade coal
Natural fever
Infrared thermal camera
Fever monitor

Development of Coal Fever Monitor

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department
Manabu Miyazaki

Abstract

In recent years, coal-fired thermal power plants use low-grade coal like sub-bituminous coal for cost reduction. However, there is a fear of a fire because the low-grade coal stored in a coal silo has the potential to exothermic phenomenon due to natural oxidation.

So we developed a coal fever monitor using an infrared thermal camera with picture analysis technology. As a result of actual use at the coal silo, the reliability of the coal fever monitor was confirmed.

1. はじめに

近年、石炭火力発電所では、コスト削減を目的に亜瀝青炭等の低品位炭を使用するケースが増えてきている。しかし、低品位炭は自然酸化による発熱現象が起りやすく、サイロ内等での火災発生が懸念される。

そこで、赤外線熱画像カメラによる石炭表面の温度分布画像や、各種センサによるガス濃度等のデータを活用した石炭サイロ発熱監視装置（CFM；Coal fever monitor）を研究開発した。

本監視装置を石炭火力発電所の石炭サイロに仮設して、長期にわたる発熱状況を監視した結果、サイロ火災の未然防止に有効であることが確認できたため、これを報告する。

2. 石炭サイロの構造

対象の石炭サイロ（四国電力株式会社橘湾発電所No.4サイロ）の構造を図1に示す。

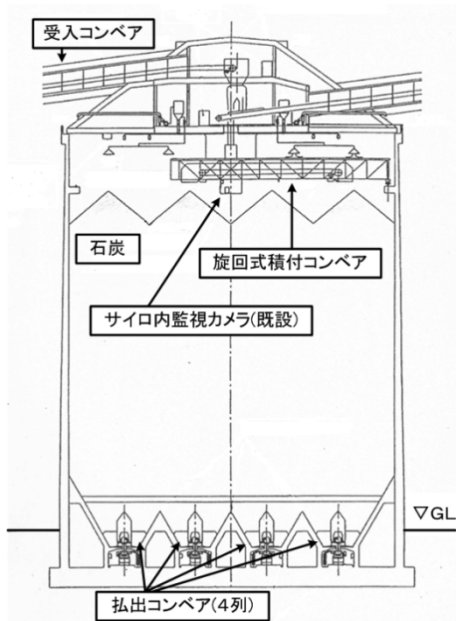


図1 石炭サイロの構造

同サイロは、旋回式積付コンベアを有し、サイロ内に同心円状に石炭を投入することにより、石炭を平坦に積付けすることが可能である。

石炭の払出しについては、サイロ底部にある4列の払出コンベア上の可動式払出口を用いており、通常は4列中任意の2列を順次切替えながら稼働させて、石炭面を平坦に保ったまま払出しを行っている。

また、稼働払出口を固定して、任意の座標の石炭だけを払出すことも可能な構造になっている。

3. 発熱監視方法

石炭の発熱監視方法にはいくつかの方法がある。以下に代表的な方式について記載する。

3.1 ガス検知方式

石炭サイロ内の各種のガス濃度を測定することにより石炭の発熱を監視する手法である。

(1) 臭気

石炭に含まれる石炭酸などの臭気ガスは、石炭の発熱に対する濃度上昇が他種類のガスよりも比較的早く、早期の発熱検知に有効である。

CFMでは、特に炭化水素系ガスに対して感度が高い酸化インジウム系熱線型焼結半導体式の臭気センサ（既設装置）からのデータを利用した。

(2) CO

COガスは、石炭発熱の直接的な指標として用いることができる。

CFMでは、安定したセンサ出力が得られる電気化学方式のCOセンサ（既設装置）からのデータを利用した。

(3) CO₂

CO₂ガスは臭気ガスに次いで石炭の温度上昇に敏感であることに加え、非分散赤外線吸収式のCO₂センサは構造が単純なことから、センサ寿命が長く、メンテナンス性が良好である。

さらにセンサ出力の通常値がCOセンサのように0(ppm)ではなく、大気中のCO₂濃度である約400(ppm)を出力することから、センサの良否を判定しやすいメリットがある。

(4) 絶対湿度

石炭が発熱した際に発生する水蒸気量を測定することにより、間接的に石炭の発熱を検知することができる。石炭粉塵の雰囲気中で絶対湿度を安定して測定するには、ほぼメンテナンスフリーである熱計測式センサの使用が必要不可欠である。

ガス検知方式は、安価なセンサが利用できる利点があるが、石炭サイロのように内部空間容積が大きい場合には、局所的に発生したガスがガスセンサの設置箇所まで拡散するのに時間を要するのが難点である。

CFMの開発に当たっては、後述の赤外線熱画像カメラを主な監視方法とすることから、ガスセンサについては既設装置の臭気レベル・COガス濃度信号を利用することにした。

3.2 放射温度センサ走査方式

サイロ内石炭の表面温度を測定して発熱状況を検知する方式であり、一般的には安価な放射温度センサが用いられるケースが多い。

しかし、放射温度センサは原理上、測定角（測定範囲）の問題が存在する。

測定角が広いセンサでは、測定対象の表面温度が広範囲にわたって均一である必要があり、部分的な発熱に対しては、石炭温度を過小評価してしまう恐れがある。また、測定角が狭いセンサでは発熱した箇所を的確に捕らえなければ温度上昇を検知できない。

この問題を解決するには、測定角の狭い放射温度センサを上下左右に機械的に走査して石炭サイロ内全域を測定する方式が有効であるが、1回の走査に時間を要するのが難点である。

3.3 赤外線熱画像カメラ方式

石炭表面温度を測定するのに赤外線熱画像カメラを用いる方式であり、リアルタイムにサイロ内石炭表面温度分布を測定することができることに加え、局所的な温度上昇も測定することが可能である。

さらに、熱画像を画像解析することにより、石炭発熱の自動監視が可能になる利点があることから、CFMの主たる監視方式に採用した。

4. 設計・製作

CFMについては、実用的な発熱監視機能を持たせるとともに、石炭サイロ内の粉塵汚損に耐え、長期にわたってメンテナンスフリーであることに重点を置いた設計とした。

4.1 構成

CFMは、全体を5つのユニット（カメラユニット、制御ユニット、コンプレッサユニット、電源ユニット、表示ユニット）で構成しており、各ユニット間はワンタッチ防水コネクタ接続とすることにより、設置やメンテナンスが容易に行える構造にした。全体構成を図2に、内部構成を図3に示す。

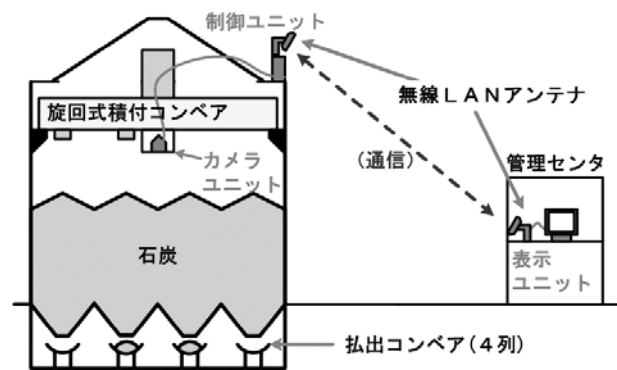


図2 CFM全体構成

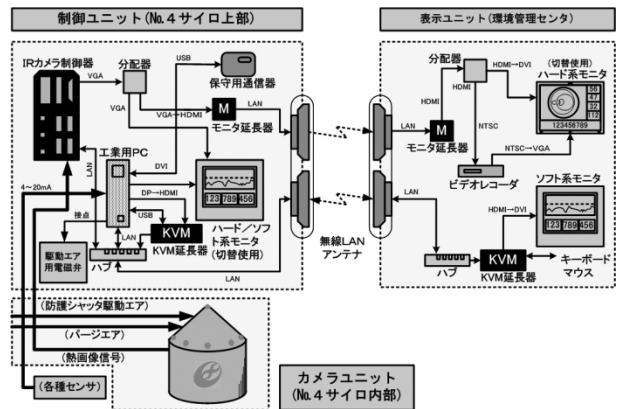


図3 CFM内部構成

(1) カメラユニット

カメラユニットは、耐圧防爆ケースに入った赤外線熱画像カメラと防護シャッタ機構、およびそれらを格納するケースで構成されており、石炭サイロ内の旋回式石炭積付コンベア中央下部にある既設サイロ内監視カメラ設置用の吊りステーに設置した。(図4)



図4 カメラユニット外観

使用した赤外線熱画像カメラの仕様は、次のようになっている。

- ・非冷却マイクロボロメータ式
- ・解像度=384dot×288dot (画素数 110, 592dot)
- ・測定温度範囲=-40~150℃

当該カメラを赤外線窓付きの耐圧防爆ケースに入れ、石炭受入れ時の石炭粉塵による赤外線窓の汚損防止用防護シャッター機構とともにステンレス製のカメラユニットに組み込んだ。(図5)

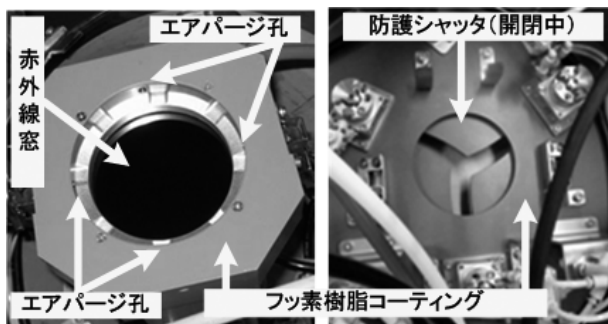


図5 赤外線窓・防護シャッター外観

カメラユニットの内部はパージエアで加圧されており、加圧後のパージエアは赤外線窓周囲に配置された複数のエアパージ孔からサイロ内に放出されることによりゲルマニウム製の赤外線窓の汚損を防ぐ構造とした。

また、耐圧防爆ケースやカメラユニットの継手部の固定にはボルトナット類ではなく、ワンタッチ錠を使用することにより、工具なしの分解点検を可能とし、サイロ内へのボルトナット類や工具の落下を防止している。

(2) 制御ユニット

制御盤ユニットは、石炭サイロの上部屋外に設置しており、赤外線熱画像カメラの制御装置、熱画像記録・解析用工業用パソコン（以下、工業用PC）、無線LAN機器等を組み込んだ。(図6)



図6 制御ユニット他外観

(3) コンプレッサユニット

コンプレッサユニットは、カメラユニット用パージエアと防護シャッター駆動用エアの供給源である。ユニット内には、エアパージ用の低圧リアコンプレッサと防護シャッター駆動用の中圧スクロールコンプレッサを組み込んだ。(図6)

(4) 電源ユニット

電源ユニットは、表示ユニットを除く全ユニットへの電源供給元であり、ユニット内には、ノイズカットトランスと無停電電源装置（UPS）を組み込んだ。(図6)

(5) 表示ユニット

表示ユニットは、石炭サイロから離れた管理センタに設置されており、無線LAN機器、液晶モニター（ハード系モニターとソフト系モニター）、およびビデオレコーダから構成される。(図7)



図7 表示ユニット外観

4.2 監視方法

CFM には、ガスセンサ等からのアナログデータを用いたトレンド監視、赤外線熱画像カメラによる熱画像監視、および熱画像の全画素毎の温度データを工業用 PC で処理した画像解析監視の 3 種類の監視方法を有している。

以下にそれぞれの監視方法について記載する。

(1) トレンド監視

各種センサから得られる臭気ガス、CO ガス等のデータと赤外線熱画像カメラからの温度データを 6 秒毎に取り込んでソフト系モニタにトレンドグラフとして表示する。(図 8)

これにより、石炭サイロ内の変動状況を把握することができるとともに、通常のデータ変動範囲から逸脱した異常データの早期把握が可能である。

なお、データは 1 分毎に工業用 PC に記録 (CSV ファイル・1,000 日分) しており、別途 USB メモリ等の記録媒体に抜き出すことが可能である。

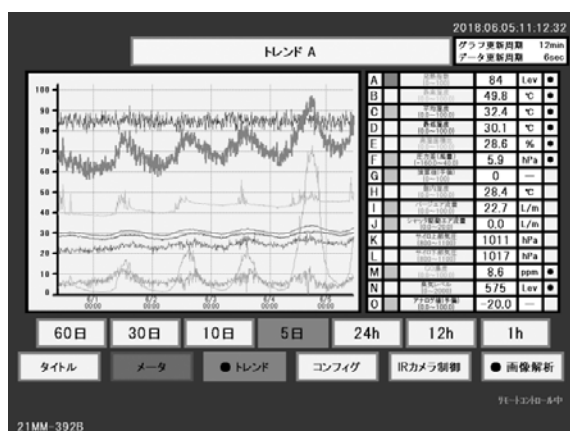


図 8 トレンド監視画面例(ソフト系モニタ)

(a) 温度

赤外線熱画像カメラからの全画素毎の温度データから、最高値と平均値および最低値を抜き出してグラフ化したもので、サイロ内の石炭表面温度の監視を行う。

(b) ガス濃度

既設の別装置からの臭気レベルと CO ガス濃度信号を利用し、グラフ化している。どちらのガス濃度も石炭表面温度の上昇に先立って上昇する傾向がある。

(c) 気圧差

石炭サイロ内外の気圧差は、間接的に払出コンベア室→石炭層→サイロ上部換気装置→サイロ外へ流れる換気空気量としてグラフ化している。石炭層に供給される空気量が多い箇所ほど温度上昇しやすい傾向があるため、参考情報として監視している。

(2) 熱画像監視

赤外線熱画像カメラからの出力信号は、疑似カラーによる熱画像信号と全画素毎のデジタル温度データ信号がある。

熱画像信号には、石炭サイロ内の温度分布の他に、最高・平均・最低温度と高温領域面積値を表示させている。これらは、赤外線熱画像カメラの制御装置から直接出力される信頼性の高いハードウェアデータであり、ハード系モニタに表示している。

さらに、全画素温度データ信号を工業用 PC で処理して得られるソフトウェアデータとして、ノーマライズ画像、熱画像解析(相関)、熱画像解析(差分)があり、ソフト系モニタに表示している。

(a) 最高、平均、最低温度

熱画像の全画素温度の最高・平均・最低温度をリアルタイム表示している。この中で特に最高温度は、局所的な発熱を検知できることから、極めて有効な発熱監視ファクタである。(図 9)

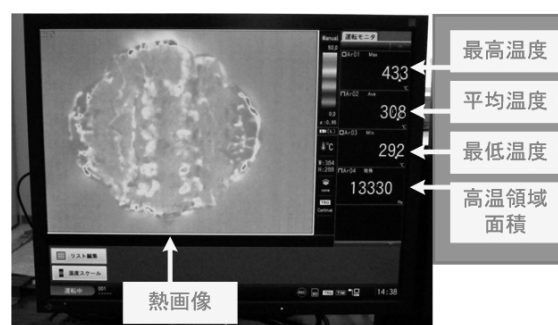


図 9 熱画像監視画面 (ハード系モニタ)

熱画像監視画面では、図 10 のように、円形の石炭サイロ壁面と稼働中の払出コンベア (中央縦 2 列のライン) 部分の温度が高いことが確認できる。これは、空気がサイロ底部から石炭層を抜けている箇所で石炭の発熱が発生していることを示している。

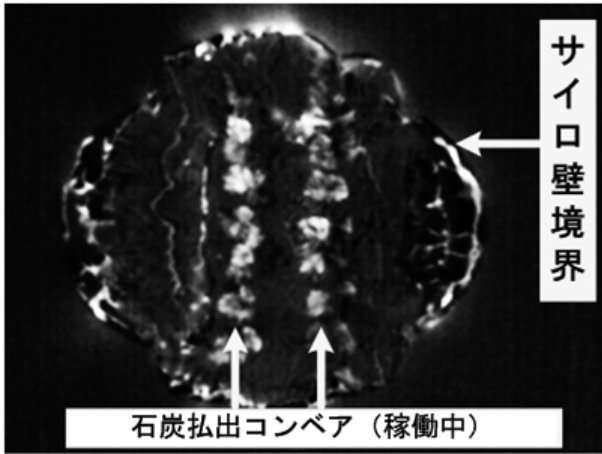


図 10 石炭払出時の熱画像監視画面の一例

(b) 高温領域面積

熱画像のうち、設定値以上の温度に達したエリアの面積を表示させており、参考値として監視している。

(c) ノーマライズ画像

ハード系モニタの熱画像の表示レンジは固定(例；0℃～60℃)で運用されているため、画像内の温度差が小さい場合は、画面全体がほぼ同一色になってしまい、判別が困難となる。

そこで全画素毎の温度データを工業用 PC で処理し熱画像を作成した後、ノーマライズ処理(画像中の最低温度と最高温度をそれぞれ 0%と 100%に割り当て)を行うことにより、視認性を向上させた画像をソフト系モニタに表示させている。(図 11)

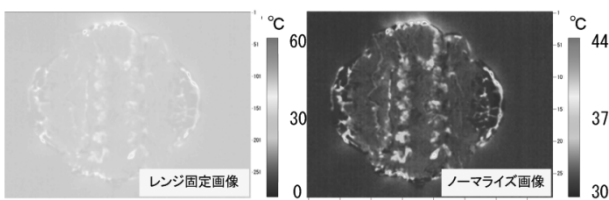


図 11 ノーマライズ処理による判別性向上

これにより、画像のコントラストが常に最大になることから、サイロ内石炭温度分布の把握が容易になり、温度上昇傾向のより早期の監視を実現している。(図 12)

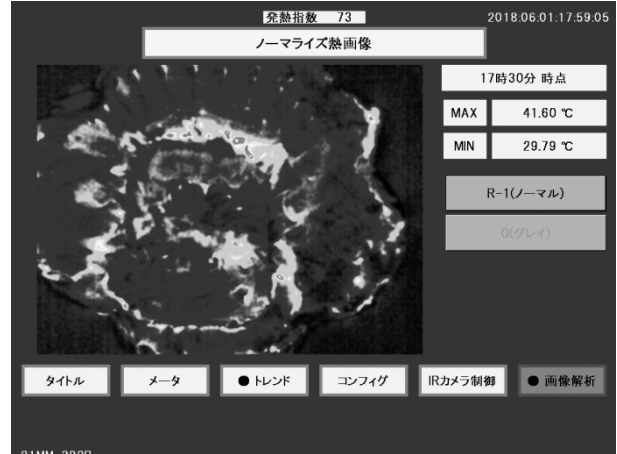


図 12 ノーマライズ画面 (ソフト系モニタ)

(d) 熱画像解析(相関)

図 10 に示すとおり、石炭とサイロ壁の境界や使用中の払出コンベア上部のように、空気が流れこむ箇所の温度が上昇する傾向があり、熱画像は特定の画像パターンを示すケースが多い。

このため、現状の熱画像が発熱時の熱画像と同じパターンになりつつあるかどうかを、画像処理によって数値化できれば、早期の自動発熱検知が実現できる可能性がある。

そこで、疑似カラーの熱画像を白黒化(2値化)した後、あらかじめ登録した参照画像と実際の熱画像との画像相関値を定期的(30分毎)に自動計算して、相関値トレンドとして表示させるとともに、相関値が設定値以上で警報表示させるようにした。(図 13、図 14)

なお、白黒化した熱画像データに対しては、以下の前処理を自動実行する機能を付加しており、石炭レベルの変動や旋回式積付コンベアの動作による画像変化の影響等を抑制するようにした。

・自動拡大・縮小機能

熱画像を自動拡大・縮小させて、石炭の積付けレベルの変化による熱画像パターンの大きさ変化をキャンセルする。

・自動回転機能

画像を自動回転させて、旋回式積付コンベアの旋回による熱画像パターンの回転変化をキャンセルする。

・自動膨張・収縮

白黒熱画像の白画素を自動膨張・収縮させて石炭面の平均温度変化による熱画像パターン変化の影響を抑制する。

画像番号	参照画像	実画像	モデル図A	モデル図B	モデル図C
	対象画像				
ア		1.000	0.437	0.166	0.185
イ		0.175	0.189	0.422	0.253
ウ		0.320	0.298	0.276	0.475
エ		0.000	0.013	0.081	0.002

○→横軸最大値

図 13 相関値計算結果例

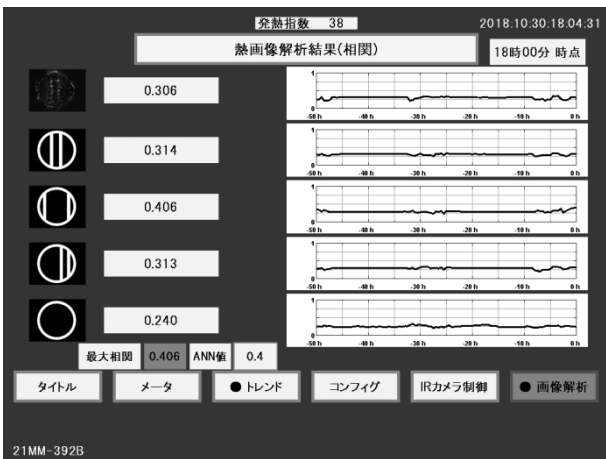


図 14 熱画像解析(相関) (ソフト系モニタ)

(e) 熱画像解析(差分)

石炭の発熱が発生した場合、発熱に先だって熱くなった空気が石炭層内を上昇した後に表面の石炭を加熱して、局部的に温度の高いエリアを形成する場合があります。

図 15 の例では、画像左側に現れた高温部の領域が次第に大きくなっていることが分かる。

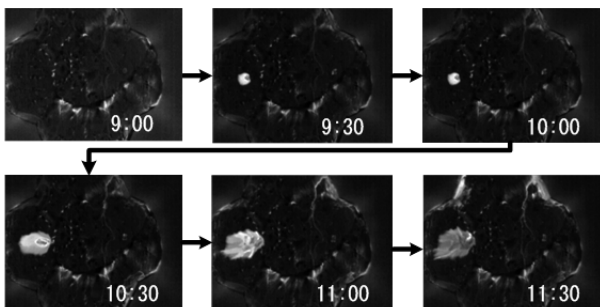


図 15 局所的な温度上昇例

この様なゆっくりした変化を監視しやすくするために、定期的 (30 分毎) に熱画像上の指定面積以上の温度上昇エリアを自動解析して表示する機能を組み込んだ。(図 16)

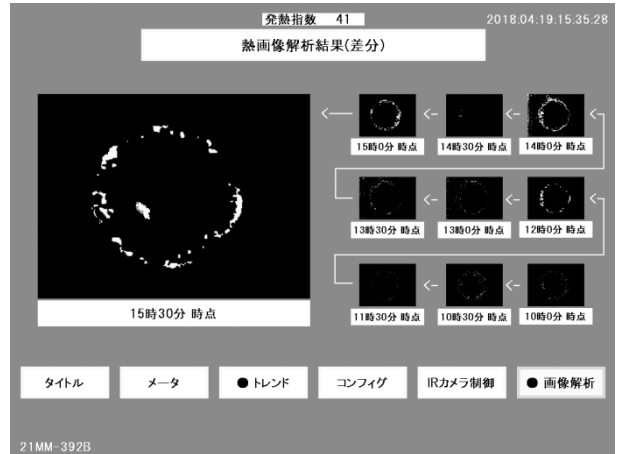


図 16 熱画像解析(差分)画面(ソフト系モニタ)

5. 仮設・試験結果

以上の性能を有する CFM を設計製作し、平成 27 年 9 月に四国電力株式会社橘湾発電所 No.4 サイロに仮設して、連続監視を行った。

5.1 稼働状況

CFM は仮設後、ほぼ 3 カ年間連続稼働している。当初懸念された赤外線窓の粉塵汚損もパージェアの効果によって一切生じておらず、ほぼノーメンテナンスでの稼働を実現することができている。

5.2 石炭発熱監視

平成 30 年 8 月に実際に石炭の発熱が発生したが、CFM による異常検知によって早期の発熱対策を行うことができた。

その時の CFJ の監視画面等を以下に示す。

石炭表面温度が上昇し始めたのは当日の 5 時頃であり、およそ 5 時間後に石炭表面最高温度が 46℃から 140℃に急上昇した。

温度上昇は極めて局所的であったため、熱画像上では発見することは困難であったが、最高温度表示機能により石炭発熱を検知することができた。(図 17、図 18)

また、石炭サイロレベルが高い場合、石炭表面温度と払出石炭温度は必ずしも一致しないが、当

日は石炭サイロレベルが比較的 low、熱画像と併せることにより発熱箇所を特定し、発熱箇所の石炭を集中的に払出すことによって発熱を抑制することができた。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。



図 17 発熱時熱画像（ハード系モニタ）

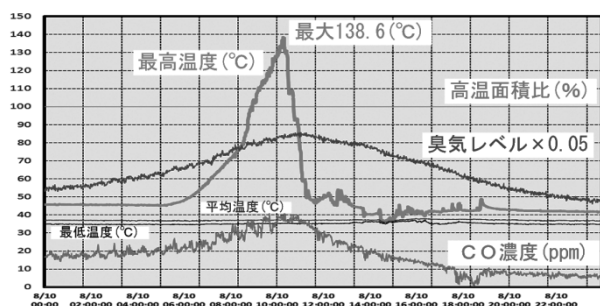


図 18 トレンドデータ（保存周期=1分）

なお、この発熱現象後に、ハード系モニタ画面上への温度高の警報表示機能および温度高警報接点出力機能を追加し、発熱監視機能のさらなる強化を図った。

6. まとめ

CFM は、四国電力株式会社からの委託研究である「石炭サイロ発熱監視装置の研究開発」の成果である。同研究により石炭サイロ内の発熱監視においては、ガス濃度のトレンド監視に加え、赤外線熱画像カメラによる広範囲の温度分布監視が有効であることを確認できた。

特に、赤外線熱画像カメラでは、発熱温度に加えて発熱箇所を監視できることから、発熱箇所に応じた対処（スポット的な石炭の抜き取りや循環運転）が行え、的確かつ効率的な発熱防止を図れることが分かった。

赤外線熱画像カメラは比較的高額な測定器ではあるが、石炭サイロの発熱を監視することで火災を防止できる可能性があることから、亜瀝青炭等の低品位炭用石炭サイロへの適用は有用と考える。