

(技術資料)

音響診断による発電所設備異常監視

Online Power Plant Acoustical Abnormality Monitoring System



小山武志*
Takeshi Koyama

It is important to discover abnormal equipment symptoms early to keep power plant operation stable. To this end, a microphone was set up in the neighborhood of key equipment in the Shinko Kobe Power Station. The microphone was connected to an “online acoustical abnormality monitoring system” which detects equipment sound abnormalities. The article reports on the system’s design, method of the detection, adjustment parameters for abnormal detections, and the system’s overall success.

まえがき = 神鋼神戸発電所は、70万kWの発電設備2基で構成される計140万kWの石炭火力発電所である。1号機は2002年4月に、2号機は2004年4月に、それぞれ営業運転を開始した。発電所の位置及び全体レイアウトを図1、主要設備の概要を表1に示す。

当発電所は、関西電力㈱へ電力の卸供給をしているいわゆるIPP発電所（Independent Power Producer、以降IPPと表記）であり、日々の送電量は、関西電力㈱で前日の15時までに電力需要の予測を基に決定され、給電指令として当社へ与えられる。出力70万kW × 2基の発

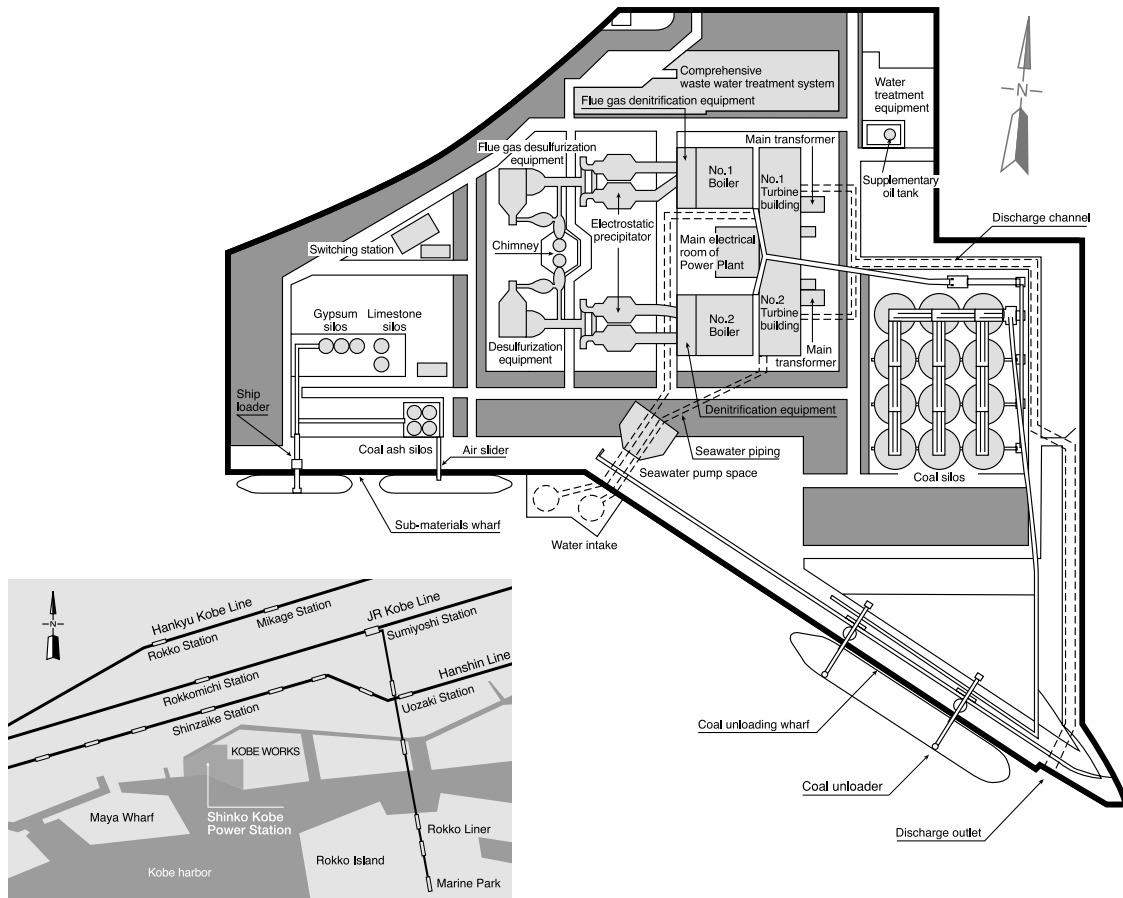


図1 発電所のレイアウトと位置
Fig. 1 Layout and location of the Shinko Kobe Power Station

* 鉄鋼部門 IPP 本部 発電技術部

表 1 主要設備の概要

Table 1 Specifications of main equipments

	Equipment	Item	Power Plant No.1	Power Plant No.2
Main equipment	Boiler	Type	Radiant reheat once-through type	Radiant reheat once-through type
		Amount of evaporation	2,340t/h	2,340t/h
	Turbine	Steam conditions	25.0MPa, 542/568	25.0MPa, 542/568
		Type	Reheat condensation type	Reheat condensation type
Rated output		700,000kW	700,000kW	
Generator	Steam conditions	24.1MPa, 538/566	24.1MPa, 538/566	
	Speed	3,600rpm	3,600rpm	
	Type	Horizontal shaft, tubular revolving filed type	Horizontal shaft, tubular revolving filed type	
	Rated capacity	778,000kVA	778,000kVA	
Main transformer	Voltage	24kV	24kV	
	Power factor	90% (delay)	90% (delay)	
	Type	Forced-oil, forced-air cooled type	Forced-oil, forced-air cooled type	
	Rated capacity	750,000kVA	780,111kVA	
Environment protection equipment	Flue gas denitrizer	Voltage(primary/secondary)	24kV/275kV	25kV/275kV
		Type	Dry process ammonia catalytic reduction method	
	Dust collecting equipment	Type	Electrical (dry process)	
	Flue gas desulfurizer	Type	Wet process limestone gypsum method	
Chimney	Waste water treatment equipment	Type	Comprehensive waste water treatment equipment	
		Type	Centralized type with 2 independent steel pipes	
Harbor facilities	Coal unloading wharf	Height	150m	
		Type	58,000DWT class x 1 berth (existing wharf)	
	Sub-materials wharf	Type	2,000DWT class x 1 berth, 6,000DWT class x 1 berth	
Coal storage facilities	Coal unloader	Type	Continuous enclosed type coal unloading equipment	
		Number of units	2 units	
		Type	Steel silo	
Coolant intake/discharge equipment	Water intake	Capacity	30,000t/unit	
		Number of units	9 units/3 units	
	Water discharge	Method	Vertical water intake pipe method (deep intake type)	
		Water intake amount	65t/s 2units	
		Method	Surface discharge type	
		Construction	PC combination RC construction	

電所は、IPP 発電所としては国内最大であり、供給量は神戸市の最大需要量の約 70% をカバーする規模である。このため、電力供給責任という点で、電力会社の発電所と同等の極めて重要な役割を担っており、BTG (Boiler, Turbine, Generator) 主機設備だけでなく、脱硝装置、脱硫装置、電気集塵機などの性能を常に維持した運転が不可欠である。

安定操業を維持するには、適切な設備保全により設備を確実に稼働させることが重要である。加えて、設備の異常の兆候を早期に発見し、設備異常が起こる前あるいは拡大しないうちに対応することも重要である。

プラントの状態監視としては、従来計器 (温度計、圧力計、振動計など) により、中央操作室において運転員が常時監視を行っている。しかし、温度や圧力、振動などに設備の異常が現れるときは、既に異常が進行し、ある程度被害が拡大していることがある。

石炭火力発電所の一般的なトラブルの例としては、ボイラ内部のチューブ (図 2) が灰によるエロージョンで減肉し、蒸気が噴出するトラブル (いわゆる噴破) がある。チューブのエロージョンについては、基本的には予防保全で対応しているが、局所的に想定外の摩耗が進行した場合、チューブの噴破に至ることがある。いったん、噴破により蒸気漏れや水漏れが発生し、その部位が拡大すると、長期のプラント停止を招くことになる。このようなトラブルをできるだけ初期の段階で発見し適切な処置を行えば、プラント全体の長期停止を回避できる。しかし、き裂が小さく蒸気の漏量が少ない段階では、流量計や圧力計で正常か異常かを判別するのは困難である。これまで設備異常の兆候の早期発見には、熟練した運転員の五感 (特に音) による巡視点検に依っているが、巡回周期が 8 時間ごとであり、常時熟練した運転員が巡視点

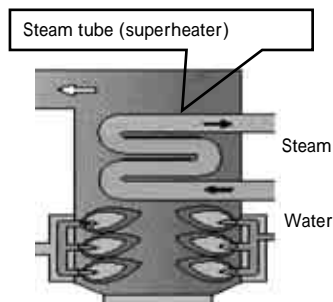


図 2 ボイラ内部の蒸気チューブ
Fig. 2 Steam tube in boiler

検をすることは困難である。また、運転員の熟練度によって検知レベルが異なるという課題もある。そこで神鋼神戸発電所では、設備から発せられる音の変化で設備異常を検知する音響診断システムを導入した。本システムにより設備の音を常時監視し、設備異常の兆候の早期発見に効果を上げているので報告する。

1. 音響診断システム

1.1 装置概要としくみ

導入した音響診断システムの装置概要を図 3 に示す。現場の設備近傍に設置した集音マイクにより収集した音を A/D 変換器でデジタル信号に変換し、ネットワーク経由で中央操作室のパソコンに収集する。パソコンでは、あらかじめ登録しておいた基準音 (正常音) と収集した音との差異を数値化する。図 4 に示すように、最初に物理現象をモデル化するときによく用いられる線形予測の自己回帰モデルによって基準音をモデル化する。次に収集音を A/D 変換した時系列信号に対してそのモデルによる予測値を求める。時系列信号を

$$X(n) = - \sum_{k=1}^M A_k \cdot X(n-k) + \epsilon(n) \dots\dots\dots(1)$$

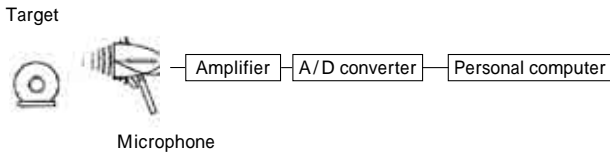


Fig. 3 Outline of online acoustical abnormality monitoring system

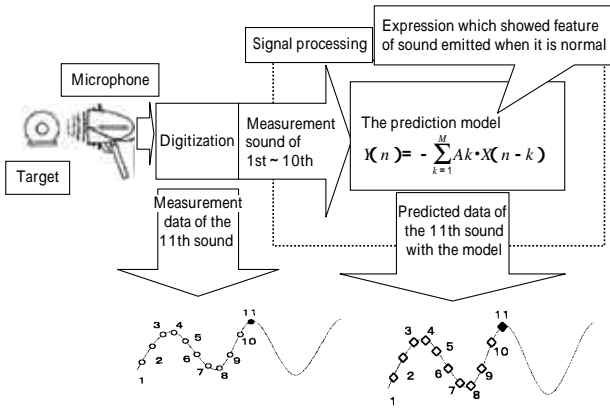


Fig. 4 Method of quantification of sound data

とすると、基準音（正常音）の時系列信号において $\epsilon(n)$ が最小になるように、係数 A_k を決定する。

ここに、 $X(n)$: 現時点でのサンプル値

$X(n-k)$: k サンプル前の値

A_k : 線形予測係数

M : 予測次数

$\epsilon(n)$: 仮想的な入力信号

$\hat{X}(n)$ を $X(n)$ の線形予測値として

$$\hat{X}(n) = - \sum_{k=1}^M A_k \cdot X(n-k) \dots\dots\dots(2)$$

としたとき、この予測値と実際の時系列信号との差を求めることにより、基準音と収集音との差異を定量化できる（逆フィルタ法）

$$X(n) - \hat{X}(n) = \epsilon(n) \dots\dots\dots(3)$$

設備が正常時には、基準音との差異が小さいが、設備の異常により、設備から発生した収集音が通常と異なる場合は、基準音との差異が大きくなる。基準音との差異があらかじめ設定した異常判定値を超えると警報を出力する。

1.2 集音マイク設置場所

発電所内の集音マイク設置場所を図5に示す。1号発電設備、2号発電設備、貯運炭設備あわせて合計155台の集音マイクを設置している（表2参照）。発電設備では、大型ファン、ポンプなどの重要設備を中心に集音マイクを設置した。また、貯運炭設備では、ベルトコンベヤのローラのベアリング異常などを検知するために、ベルトコンベヤに沿って設置した。ベルトコンベヤのローラ異常は、発見が遅れるとベルトとローラの摩擦によりベルト火災の発生につながるおそれがある。当発電所では、難燃性ベルトや、火災検知器（火災検知線）、散水設備の採用などの防災対策を実施しているが、さらに、音響診断システムにより設備の常時監視を行い、設備異常（ローラ不転など）の早期発見による火災発生未然防止の強化を図っている。

表2 集音マイク設置個数
Table 2 Number of microphones

	Number
Power Plant No.1	27
Power Plant No.2	25
Coal storage facilities, Coal-handling belt conveyor (Common equipment)	103
Total	155

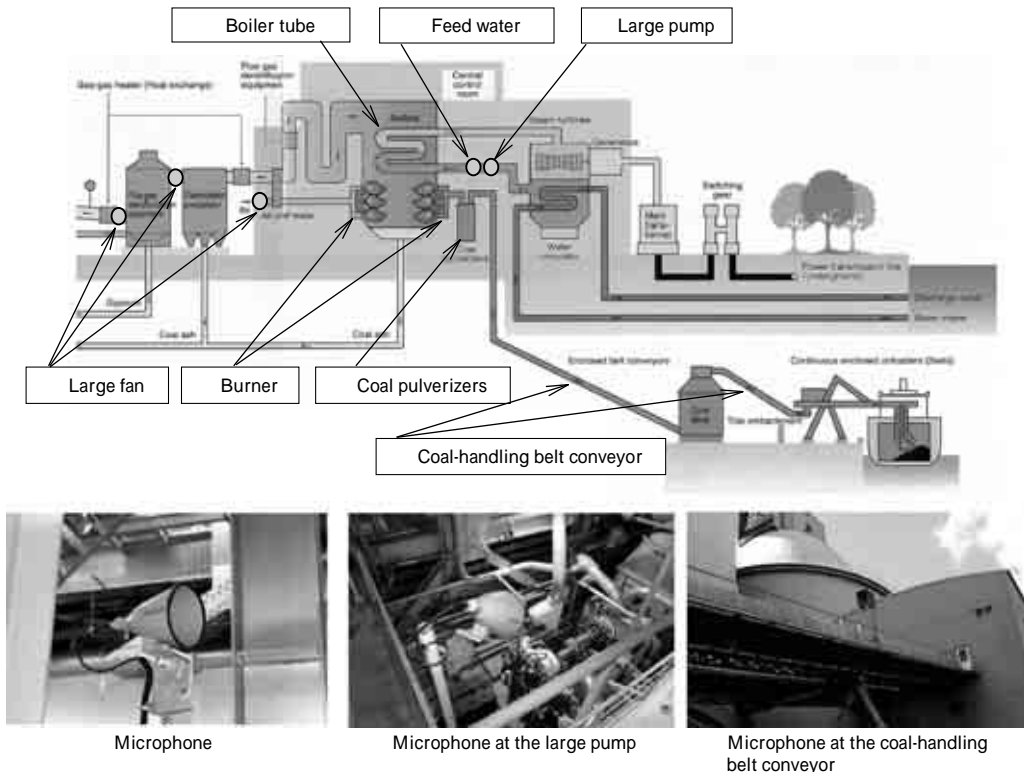


図5 発電所集音マイク設置場所
Fig. 5 Microphone placement sites in the power station

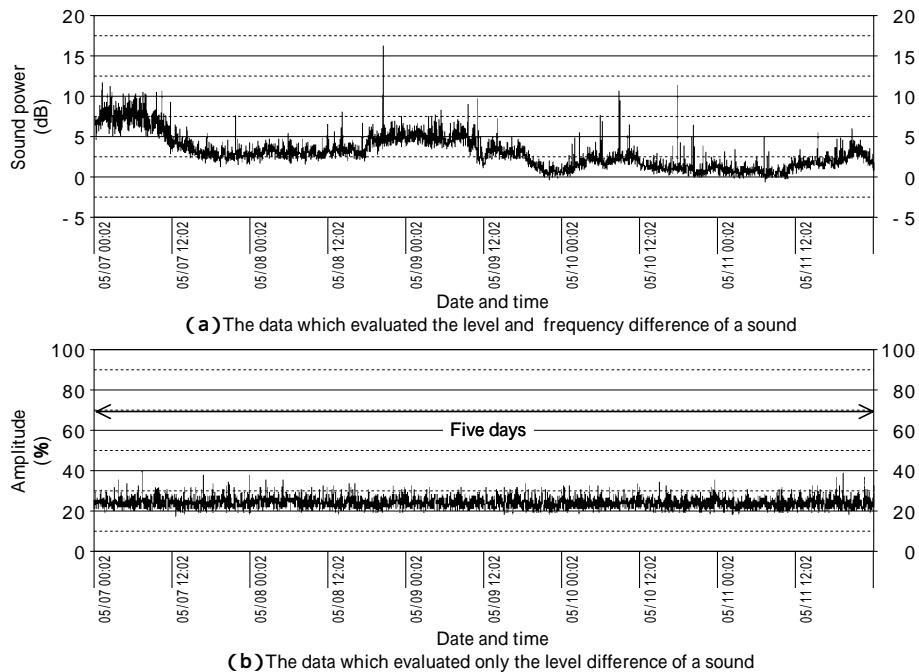


図6 微粉炭ミルの数値データ
Fig. 6 Digital data of coal pulverizer

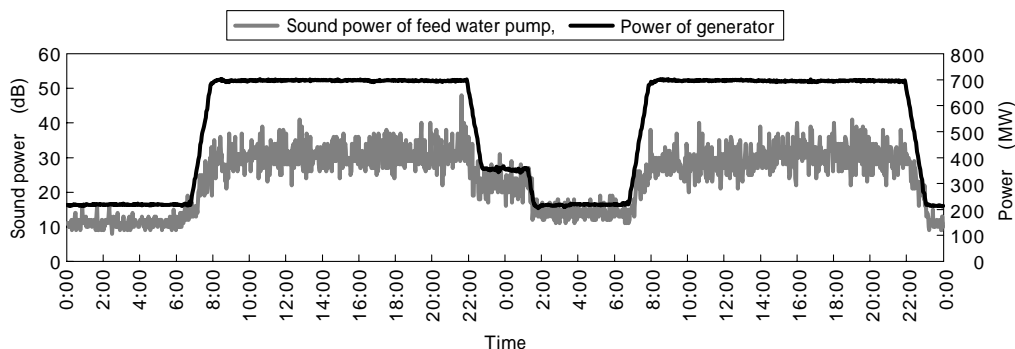


図7 発電機出力による給水ポンプの音の変化
Fig. 7 Change in sound from feed water pump according to power of generator

2. システム改良

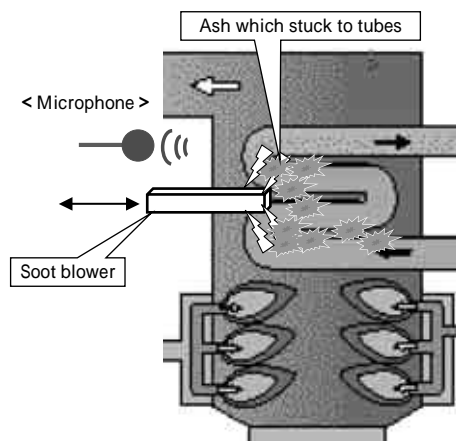
本システムは、02年度に1号発電設備への導入を開始したが、導入当初は、設備異常ではない設備の間欠音を、設備異常と判定するなど誤検知が多かった。そこで、下記のような調整・改良を実施し、運転員の信頼を得るシステムとすることができた。

2.1 対象機器による収集音数値化方法の選択

正常・異常の判定のための収集音の数値化には、前述した基準音(正常音)との差を逆フィルタ法で定量化する方法を用いた。この方法では、音の大きさと音の高低(周波数差)が1つの値として数値化される。しかし、ボイラに投入する石炭をすりつぶす微粉炭ミルのように、音の大きさはほぼ一定であるが、音の高低は正常時でも変化する機器がある。このような機器に対しては、音の大きさだけを数値化する様にアルゴリズムを改良した(図6)。

2.2 機器稼働状態にあわせた基準音(正常音)の最適化

稼働状態によって正常音が異なる機器がある。例えば、給水ポンプでは、発電出力によって水量が変化するため音も変化する(図7)。また、ボイラ炉内の音は、炉



Soot blower is inserted in a boiler while jetting steam and runs intermittently with facilities, removing ash sticking to the surface of tubes.

図8 スートブロワによる間欠音発生
Fig. 8 Outbreak of intermittent sound by soot blower

内の灰を落とすための機器(スートブロワ)の稼働によって変化する(図8)。スートブロワ稼働前から稼働、停止までの音の変化を図9(a)に示す。稼働中に発せられる音により、異常判定値を越える値となっている。そこで、発電出力や関連機器の起動停止に対する複数の基準音を作成し、機器の状態にあわせた基準音を用いて判別

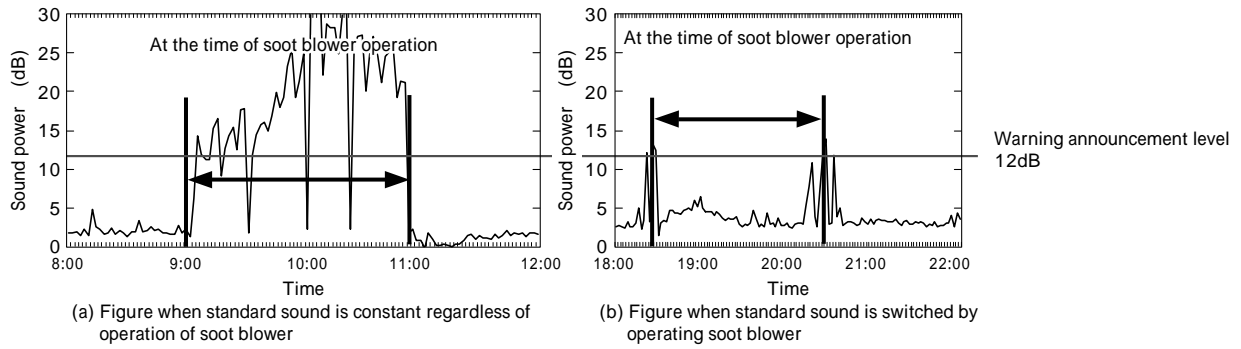


図9 機器の稼働状態にあわせた基準音の最適化
 Fig. 9 Optimization of standard sound that matched with operation state of equipment

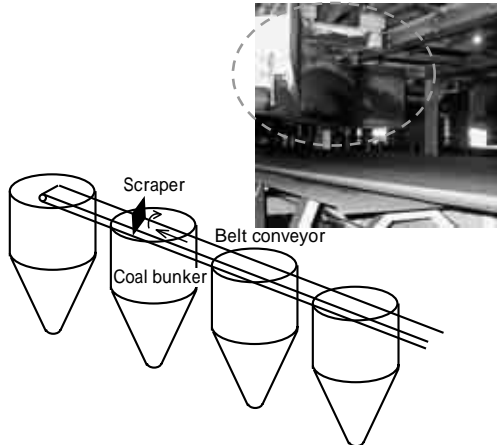


図10 スクレーバによる石炭槽への石炭投入
 Fig.10 Coal thrown method into coal bunker by scraper

を行うようにアルゴリズムを改良した。この結果、図9 (b)に示すように設備が正常なときは、スートブロワ稼働中でも異常判定値以下の値となっている。

2.3 診断周波数の最適化

稼働状態によって音が変わる機器の中には、稼働状態と発生音の周波数特性が一律でないため、2.2節の処理では対応できない場合がある。例えば、ボイラの上部に設置されている石炭運搬用のベルトコンベヤなどである。図10に示すように複数のコールバンカ(石炭槽)に石炭を投入するときは、コンベヤ上部のスクレーパをベルトに押しつけて石炭の流れを変えて投入している。その際、ベルトとスクレーパが擦れて音が発生する場合があるが、押しつけ時間や石炭の水分及び粒度などによって音の発生状況は異なる。

ベルトコンベヤのローラ異常の有無による音の違いを図11に示す。ローラの異常が発生すると、周波数全域に渡って、音が変わる。一方、スクレーパの擦れ音が発生した場合の音を図12に示す。スクレーパの擦れる音は、周波数が5~8kHzで発生している。そこで、誤検出防止の方法として、スクレーパ稼働時の擦れ音とベアリング異常時に発生する音との周波数特性の差に着目した。5kHz以上の音をローパスフィルタにより低減することにより、スクレーパの擦れ音の影響を排除することができ、擦れ音の有無にかかわらず、ローラ異常を検知することができる。フィルタによる診断周波数の低減範囲は、本来、必要最小限とする方が望ましい。スクレーパの擦れ音であれば、5~8kHzの範囲であるが、現シ

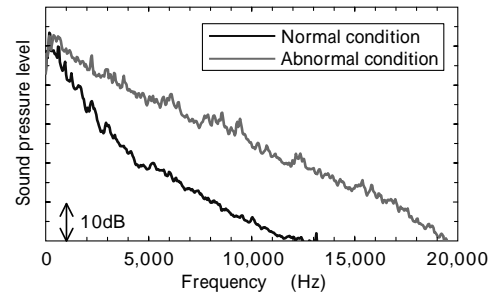


図11 異常ローラ有無によるベルトコンベヤの音の差
 Fig.11 Difference in sound of belt conveyor due to abnormal roller presence

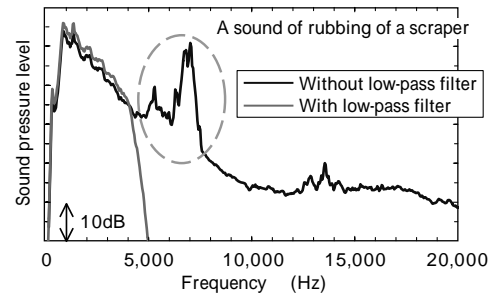


図12 ローパスフィルタの効果
 Fig.12 Effect of low pass filter

ID	機器名	部品名	異常検知	異常範囲	動作モード
1	ボイラ	スクレーパ	TRUE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
2	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ停止時
3	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
4	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
5	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
6	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
7	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
8	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
9	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
10	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
11	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
12	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
13	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
14	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
15	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
16	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
17	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
18	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
19	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時
20	ボイラ	スクレーパ	FALSE	5000-20000Hz	スクレーパ稼働時

図13 基準音条件設定画面
 Fig.13 Page that sets condition of standard sound

ステムでは、フィルタ設定の上限または下限の指定しかできない。今後、範囲指定可能なように改良を行っていき、異常検知精度の向上を図る予定である。

2.4 調整が容易なシステムの構築

以上で示したシステムを円滑に運用するためには、基準音とその設定条件を容易に登録できることが必要である。汎用表計算ソフトと組み合わせ、運転員でも容易に条件設定を可能とした(図13)。また、一部の機器については、現場の生の音を中央操作室においてスピーカで確認できるようにした。これらのシステム改造により、精度を向上するための調整がより容易となった。

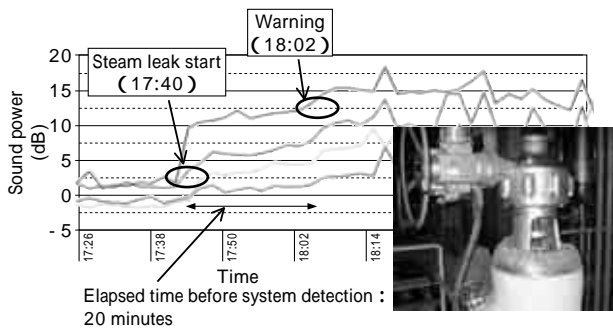


図14 ボイラ補助蒸気均等圧弁のバルブパッキンからの蒸気漏れ検知

Fig.14 Steam leak detection from valve packing of valve to maintain pressure of boiler assistance steam equally

3. 検知実績例

これまでの、異常検知例を図14, 図15に示す。図14は、弁からの蒸気の漏れを検知した例で、図15は、ベルトコンベヤのローラベアリング異常を検知した例である。そのほか、機器からのエア漏れなど、05年度では、1,2号発電設備で4件、貯運炭設備で6件の軽微な設備異常を本システムにより検知した。

むすび = 神鋼神戸発電所では、安定操業のために設備の

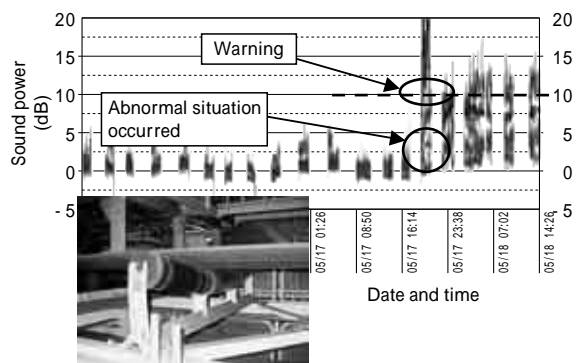


図15 石炭ベルトコンベヤのローラベアリングにおける異常検知

Fig.15 Abnormal roller bearing detection on coal belt conveyor

異常の兆候を早期に発見する音響診断システムを導入し、活用している。今後は、警報出力用の異常判定値の再調整や、機器の稼働状態による基準音の最適化などを行い、さらに精度向上を目指す。

参考文献

- 1) R. Ohba et al. : Sensors and Their Applications XII, S.J. Prosser and E Lewis eds. (2003) IOP Publishing (Bristol) p.127.
- 2) R. Ohba et al. : Machine diagnosis by acoustic signal processing, Sensors VI-Technology, systems and Applications, K.T.V. Grattan and A.T. Augusti eds. (1993) IOP Publishing (Bristol) p.193.