

原子力プラントにおける異常信号(ノイズ)弁別手法の開発

Development of Abnormal Signal(Noise) Discrimination Method in Nuclear Power Plant

楳田 義一 (Yoshikazu Umeda)* 犬島 浩 (Hiroshi Inujima)[†]
津高 良和 (Yoshikazu Tutaka)[‡]

要約 微弱信号を取り扱う計測制御装置においては、観測信号が異常信号(ノイズ)によって乱された場合、その信号の本質を同定することは極めて困難であるが、原子力プラントの安全性の維持管理という観点からは、観測信号とノイズを分離する手法は重要である。

本稿では、このような問題に対し、信号とノイズの波形をパターン分類して、効果的に分離同定できるアルゴリズム(異常信号弁別手法)の開発とシステム化を試みた。この波形認識アルゴリズムは、計算機の支援により、観測信号を小区間のサンプル周期に分割して波形形状を認識しながら、波形の特徴を抽出する。

このアルゴリズムは正確で高感度の機能を有していることが確認でき、原子力プラントの放射線監視装置への適用性についても見通しが得られた。

キーワード ノイズ, パターン分類, 放射線監視装置, 異常信号弁別手法, アルゴリズム

Abstract Measuring and characterizing low-level input signals for control systems is extremely difficult in the presence of noise. However, separating the signal from the noise is important for maintaining and controlling the plant safety.

This paper describes the experiment made to systematically develop an algorithm(noise discrimination method) which allows for the effective identification and classification of signal and noise. This computerized signal recognition algorithm samples the observed signal at a high frequency in order to recognize the wave pattern and extract characteristics.

It has been verified that this is an accurate and highly sensitive algorithm. Thus it is proposed that it would be applicable to radiation monitoring systems for nuclear power plants.

Keywords noise, pattern classification, radiation monitoring system, noise discrimination method, algorithm

1. はじめに

原子力プラントでは、設備の高信頼化はもとより、運転中の機器に対しては、事故を未然に防止したり、稼働率を向上させることを目的とした設備状態監視技術に対する要求が高まりつつある。設備の状態監視技術には、機器に取り付けたセンサの信号から運転中の異常徴候を早期に検出したり、プロセスデータから正常信号と異常信号(ノイズ)を弁別し、原因を同定するための情報を提供するなどの方法が考え

られる。

本研究では後者の考え方にに基づき、原子力プラント特有の微弱信号を取り扱う計装システムにおいて、異常信号が検出器出力に重畳した時、正常信号と異常信号を弁別できる手法の研究に着手した。計装システムの出力信号としては、核計装および放射線監視装置の検出器出力に重畳したノイズを実プラントで採取し、その信号を統計処理して正常信号と異常信号に弁別できる診断アルゴリズムの開発を実施した。

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

[†]三菱電機(株)産業システム研究所

[‡]三菱電機(株)制御製作所

また、その結果をタイムリーに、運転員や保守員に提供して、診断支援できる技術のシステム化を検討した。システム化の検討では、放射線監視装置における正常信号と異常信号を弁別できる診断プログラミング、およびハードウェアと機能構成を考慮したプロトタイプ機の試作検証および実機への適用性を検討した。

2. 異常信号弁別技術の開発

放射線監視装置で検出器出力信号に重畳するノイズを弁別する手法の検討を行った。対象モニタの信号出力波形は、原子カプラントで用いられている表1の代表的な検出器で採取した信号およびノイズとした。各検出器での観測信号は、特定の電圧以上の波形をパルス信号としてカウントしている。このカウントする電圧レベルを表1に示したが、最小検出電圧は0.3Vであり、経験上この電圧の66.7% (0.2V)以上と5V以下を診断対象とした。また、マイナスの電圧に関してはパルス信号としてカウントしないので詳細な検討から除外するが、その存在だけは明示しておいた。パルス巾が10ns以下のサージ状の波形は周波数特性上、装置が反応しないことから診断対象外とした。

2.1 波形の特徴

(1) 正常パルスの形状

正常なパルスは急峻に立ち上がり、なだらかに下降する形状を有している。

検出器のタイプによってこの形状はゼロV以下にアンダーシュートするもの、しないもの

	プラント	検出器の種類	最小検出電圧
1	A	エリアモニタGM管	2.0V
2	A	NaIシンチレータ	0.4V
3	A	プロセスモニタGM管	1.0V
4	A,B	PIシンチレータ	0.3V
5	B	プロセスモニタGM管	1.0V
6	B	NaIシンチレータ	0.4V

表1 検出器の種類と最小検出電圧

の2タイプに分類できる。

(2) ノイズ(疑似パルス)の形状

疑似パルスの形状は、実機データの観測結果から6つのパターンに分類された。

- a. 負の単一ピーク：
負の電圧領域で大きく振れる形状
- b. 振動波形：
正負の電圧領域で振動している形状
- c. 微小パルス：
短時間のスパイク状の形状
- d. 正の振動波形：
正の電圧領域で振動している形状
- e. 巨大パルス：
波高値が通常観測される電圧レベルを大きく越えているパルス
- f. タイプ不明：
上記a～eにあてはまらない形状

正常パルスと疑似パルス(振動波形)の代表例を図1に示す。

2.2 波形認識アルゴリズム

波形認識アルゴリズムは、3つの部分で構成されるアルゴリズムを考えた。

パルス区間の抽出、特徴抽出、パターン分類である。

パルス区間は、観測された信号を正と負の電圧領域に分割することで、観測信号の持続時間を決定する。次に、正常パルスとノイズを区別するために、信号の正と負の領域から各種パラメータを設定して特徴を抽出する。最後にパルス区間と特徴抽出のパラメータからパターン进行分类する。

(1) パルス区間の抽出

パルス区間とは、正のベースライン(しきい値 h と呼ぶ)以上の振幅を持ったパルスの継続時間をいう。言い替えれば、パルスと認識したい区間である。

このパルス区間の抽出アルゴリズムは、次のステップで構成した。

- a. 正と負のエネルギー信号の作成
原信号を適当な小区間 j に分割し、それぞれの区間でしきい値 h 以上のデータを積分する。このように一定の幅とある高さを持ったデータを、仮にエネルギーと称し信

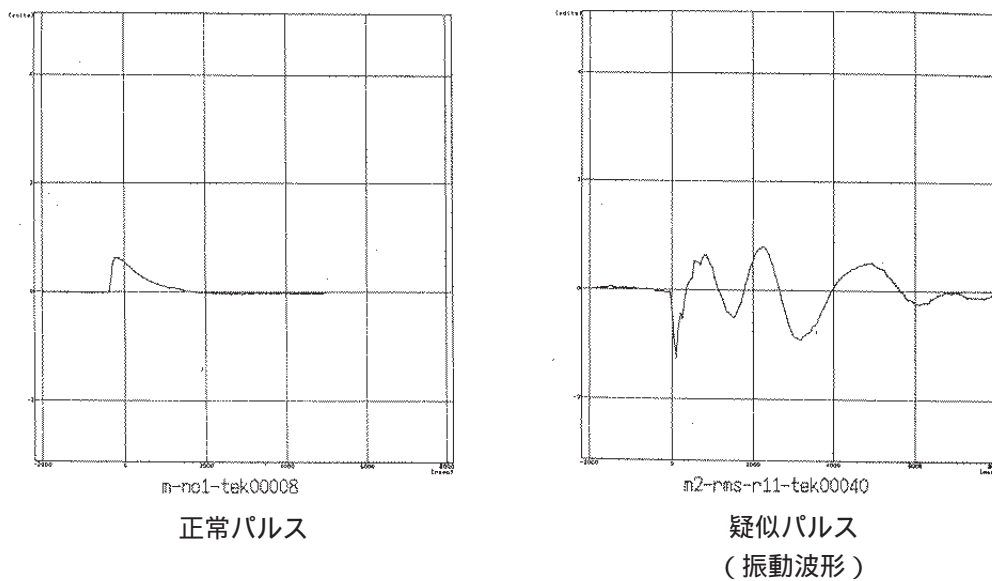


図1 正常パルスと疑似パルス(振動波形)の形状例

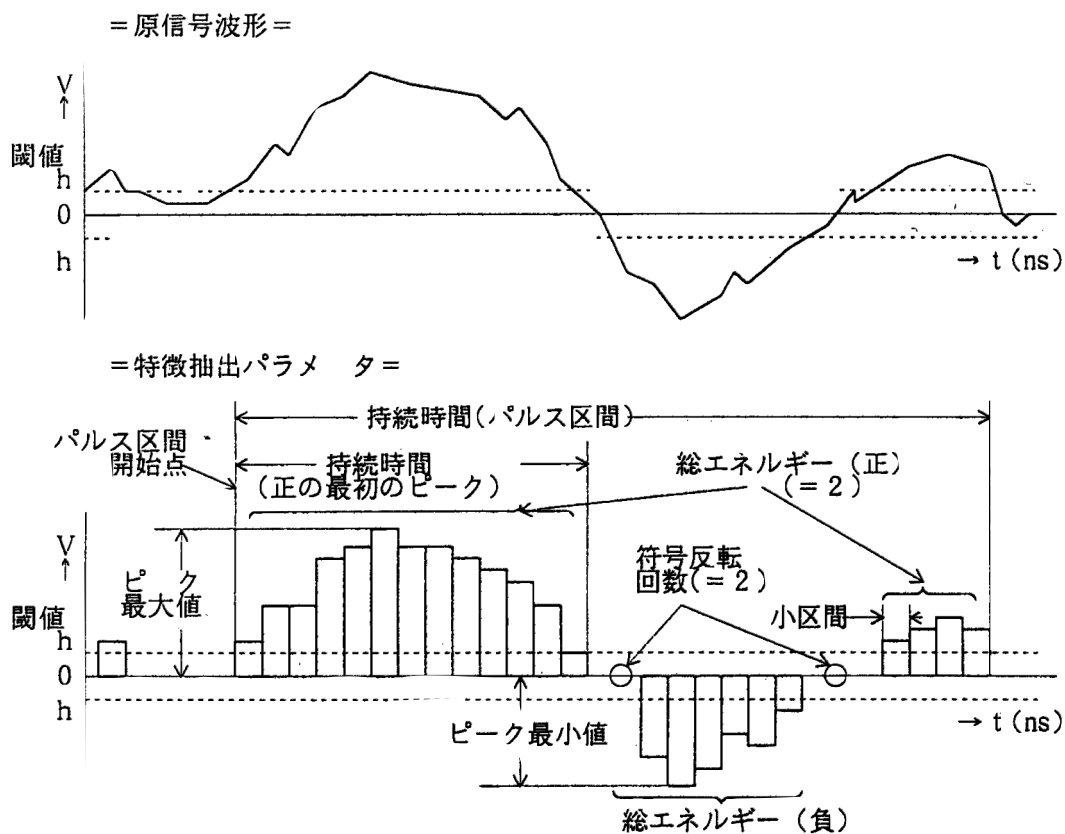


図2 特徴抽出の概念図

号として取り扱うこととした。このしきい値 h 以上の積分値を正のエネルギー (e^+j)、同様にしきい値 $-h$ 以下の積分値を負のエネルギー (e^-j) と呼ぶこととした。また、 e^+j と e^-j のそれぞれの総和を全エネルギー (e^j) とした。

b. 連続区間の抽出

小区間毎に積分した正負エネルギーを最初の区間から走査し、2個以上連続して存在している箇所をパルス区間の開始位置とする。更に小区間を走査して正負エネルギーがゼロの小区間を10個以上連続した時、信号の終了位置とした。

(2) 特徴の抽出

正常パルスと疑似パルスの特徴を自動的に抽出するために、正負のエネルギー信号 (e^+j と e^-j) をベースに、以下のパラメータを設定した。

図2に特徴抽出の概念(パラメータの抽出法)を示す。

=各パラメータの定義=

- a. 原信号サンプル周期: T (単位 ns / 点)
解析対象とする信号のサンプリング周期。信号採取時に決定する。
- b. 出力サンプル周期: T_s (単位 ns)
($=n \cdot T$ n は適当な整数)
積分対象とする小区間の周期巾。波形認識できる適当な値を設定。
- c. 定常状態しきい値: h (単位 v)
パルスを検出するための最小電圧レベル。
- d. 持続時間: T (単位 ns)
パルスと判定された時間長。
- e. 持続時間(最初の正ピーク): T_p (単位 ns)
正エネルギーの最初の連続区間長。
- f. 総エネルギー(正): E_p (単位 $v \cdot ns$)
パルス区間に於ける正エネルギーの小区間の積分和
- g. 総エネルギー(負): E_m (単位 $v \cdot ns$)
パルス区間に於ける負エネルギーの小区間の積分和
- h. エネルギー比(負/正): E_r

$$E_r = E_m / E_p$$

- i. ピーク最大値: P_p (単位 v)
正のエネルギーの最大値
- j. ピーク最小値: P_m (単位 v)
負のエネルギーの最大値
- k. 符号反転: C_s (単位 回)
パルス区間に於いてエネルギーの小区間がベースラインを越えた回数。
- l. 正のピーク個数: C_p (単位 個)
正エネルギーのピークの数。

(3) パターン分類

実測データをもとに分類(正常パルス: 2分類, 疑似パルス: 6分類)した信号波形を自動的に識別させるために(2)項のパラメータに、それぞれの定数を設定した。パラメータ定数の設定にあたっては、観測結果から経験的に設定した後、波形の診断と定数の修正を繰り返して最適値を決定した。

2.3 測定波形と認識結果

実機で採取した全データについて、波形の診断を行った。診断にあたっては、パーソナルコンピュータ(パソコン)に波形認識アルゴリズムを組み込み、診断結果の確認のためパラメータの計算結果も合わせて出力して評価した。

測定波形と認識結果の概要を以下に示す。

(1) 正常パルスの測定波形と認識結果例

図3に正常パルスの測定波形と認識結果を示す。

定性的に良く認識されている。

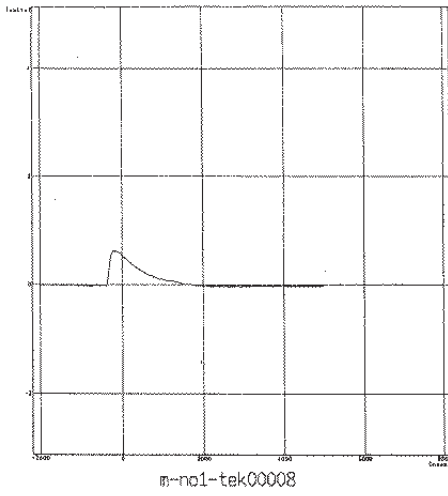
(2) 疑似パルスの測定波形と認識結果例

図4に疑似パルス(振動波形例)の測定波形と認識結果を示す。

定性的に良く認識されている。

3. システムの試作検証

信号弁別支援システムをオンライン化するには、パルス波形を連続採取しながら診断が可能な高速処理機能が要求されるため、検出器出力信号の少ない放射線監視装置(RMS)を対象とした。このプロトタイプシステムをRMS異常信号弁別システムとした。



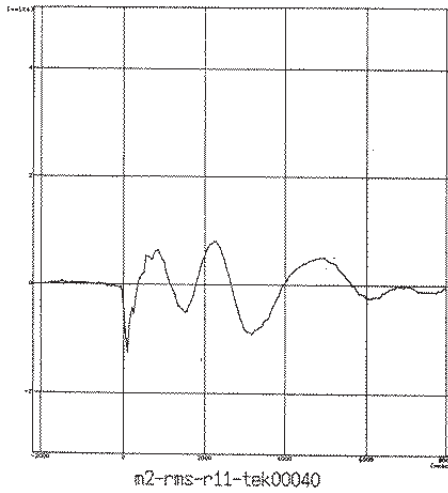
```

===== m-n01-tek00008.dat =====
額定値サンプル周期: 20 nsec
出力サンプル周期: 100 nsec
定常状態電位: 0.2 volts
切り出し区間: -400~700 nsec
持続時間: 1500 nsec
持続時間(正ピーク): 300 nsec
総エネルギー(正): 395.847 volts*nsec
総エネルギー(負): 0 volts*nsec
エネルギー比(負/正): 0.00
ピーク電位値: 0.81231 volts
ピーク電位値: 0 volts
符号反転: 0 回
正のピーク個数: 1 個
判定結果: 正常パルス Type 1
    
```

[パソコンの波形出力]

[診断のため信号処理した出力波形]

図3 正常パルス認識結果



```

===== m2-rms-r11-tek00040.dat =====
額定値サンプル周期: 50 nsec
出力サンプル周期: 200 nsec
定常状態電位: 0.2 volts
切り出し区間: -300~6500 nsec
持続時間: 6800 nsec
持続時間(正ピーク): 600 nsec
総エネルギー(正): 1240.379 volts*nsec
総エネルギー(負): 1202.25 volts*nsec
エネルギー比(負/正): 0.97
ピーク電位値: 0.754629 volts
ピーク電位値: -0.882422 volts
符号反転: 6 回
正のピーク個数: 3 個
判定結果: 疑似パルス Type 2 (振動波形)
    
```

[パソコンの波形出力]

[診断のため信号処理した出力波形]

図4 疑似パルス（振動波形例）認識結果

3.1 RMS異常信号弁別システム開発

(1) システム構成

図5にシステム構成を示す。実装する計測器は実機への適用性を考慮して小型のモジュールを選定した。システム構成は、デジタルオシロで検出器の出力波形を信号処理し、コントローラへ転送して診断を行う。コントローラへの各種条件設定や診断結果の表示のためにパーソナルコンピュータを使用、コントローラとパーソナルコンピュータ間をLAMで接続した。

図6にプロトタイプ機の外観写真を示す。

(2) 計測範囲

プロトシステムの性能目標を次のとおり定めた。

波形認知の計測範囲：0～1000cpm

RMSの計測範囲は $1 \sim 10^7$ cpmである。通常の指示値は、検出器の設置場所によって異なるが5～700cpm程度であるため、実運用上必要とされる計測範囲に限定した。

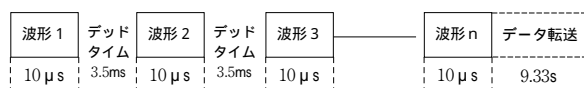
(3) 波形採取・転送

- a. チャンネル数 1チャンネル(入力抵抗1M)
- b. 入力レンジ -8～+8V
- c. 周波数帯域 DC～250MHz
- d. トリガ - 1～3Vで可変(0.1V単位)
- e. 波形採取時間設定

可変(標準設定は10 μ sと100 μ s)

f. 採取波形の転送方法

波形を連続採取(n=256個)しデジタル変換した後、データをまとめてコントローラへ転送する。



(4) 診断

デジタルオシロから転送されたデータを、2章の診断アルゴリズムにより正常か異常かを診断して下記の情報を提供すると共に、固定ディスクに格納する。

- a. 異常波形の採取時刻，異常波形のパターン

分類

(5) 診断結果の表示

診断結果を確認したい時(例えば、RMSが指示上昇した場合は、固定ディスクの情報をパーソナルコンピュータ画面に出力表示すると共にダンプ出力も可能とした。

(6) 画面設計

診断アルゴリズムの検証と実機適用性の検討情報を入手するために、パーソナルコンピュータ画面の設計を行った。

a. 初期設定画面

発電所のユニットNo.，年月日時分を入力。

b. 機能選択画面

各種機能画面(個別設定画面，指示値の表示等)の選択。

c. 個別設定画面

計測するモニタの選択と、トリガレベル，サンプリング時間等の設定

d. 指示値モニタ画面

選択されたモニタの指示値を表示。

e. 異常波形データ一覧画面

採取波形の収録時刻と診断結果を一覧表示。

f. 波形表示画面

波形データ一覧で指定した波形形状と診断結果を表示。

(7) データ欠測率の評価

検出器出力を連続採取しながら診断する場合、装置の不感時間および伝送時間等の物理的な制約がシステムの性能に影響する。

システム性能として、欠測率(信号の数え落とし率)を評価した。

システム検討の段階では、欠測率の補正が可能な1割を目標としたが、モデル機での試算では約4割であった。

3.2 工場・現地試験

(1) 試験要領

図7-1に工場・現地での試験回路を示し、図7-2に試験状況の写真を示す。

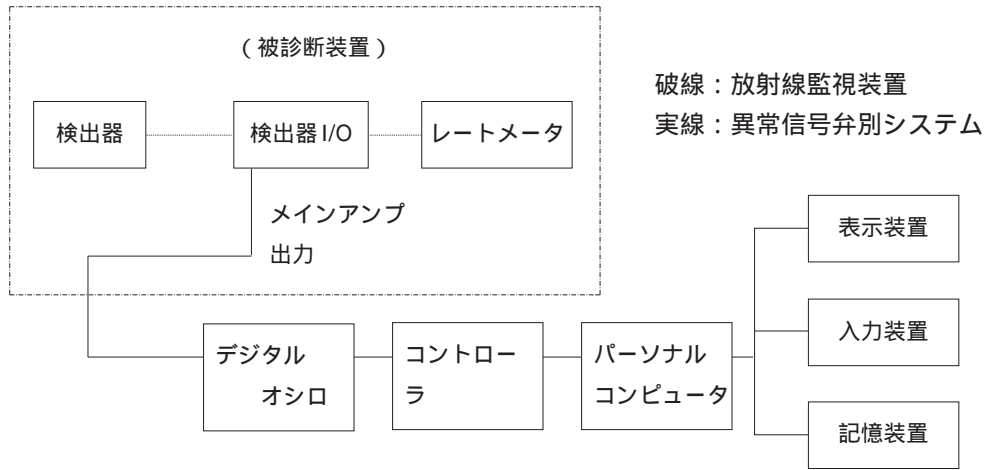
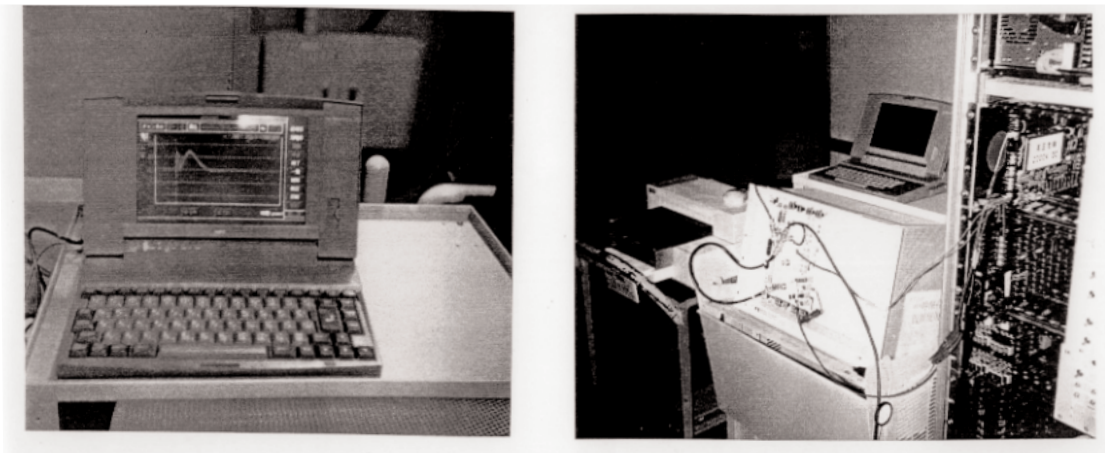


図5 システム構成



パソコン出力画面

プロト機 (架に収納)

放射線監視装置

図6 プロトタイプ機外観

(2) 初期設定

検証試験のための初期設定を、下記のとおり実施した。

項目	GM管	Nal, P1シンチ
サンプリング時間	100 n sec	10 n sec
1 波形収録時間	100 μ sec	10 μ sec
トリガレベル	本設モニタの最小検出電圧設定に合わせた	

(3) 試験結果

a. 正常信号の計測範囲

外来ノイズを与えない状態で、線源を照射して全波形を診断(約 10^3 cpmまで)した結果、すべて同一波形であり正常信号と弁別できた。

b. 宇宙線の影響

環境中に存在する宇宙線を採取し、指示値に対する影響を評価した。

宇宙線のようにエネルギーが極度に高い場合には、検出器出力波形は装置の増幅範囲を超えて飽和波形となり、正常波形と異なる形状になる。このため当初は巨大パルスとして分類した。

しかし、RMSの通常時の指示値には高エネルギーの宇宙線が含まれ、その割合も大きいことから、この巨大パルスを正常信号と分類することにした。

代表波形を図8(A)に示す。

c. 実信号によるノイズ試験

RMSの指示値変動に影響を与える外来ノイズ要因として、溶接機、雷、遮断機の投入/遮断、電源系の短絡事故、電磁継電器の動作等による誘導ノイズを経験している。実信号による外来ノイズ試験では、過去に最も影響を受けたノイズ(溶接作業時に発生する高周波ノイズ、電磁継電器ノイズおよび雷サージ)を人為的に与え異常波形と診断できることを確認した。

(a) 溶接機ノイズ試験

検出器近傍で溶接機によるノイズを発生させた。特定のモニタにおいてRMSの指示値が上昇し、異常信号として弁別し

た。観測された疑似パルスは、要約すると次のとおり。

イ. 微小なノイズ、振動波形ノイズ

単発的に観測された信号のためRMSの指示値上昇はない。

代表波形を図8(B)に示す。

ロ. 波高値がほぼ一定の負の単一パルスおよび負のパルスに連動した正のパルス

負の単一パルスは、RMSの指示値に影響しない。

負のパルスに連動した正のパルスは正常信号と類似しており指示値の上昇が見られた。これは、負の単一パルスが溶接機ケーブルに近接する前置増幅器前段に入り、増幅されて正常信号と類似したと考えられる。

(b) 雷サージノイズ試験

検出器に多目的高電圧発生器を近接させ、雷サージノイズを発生させた。

ノイズ発生時にRMSの指示値が上昇し、異常信号(微小ノイズ)と弁別した。代表波形を図8(C)に示す。

(c) 電磁継電器ノイズ

検出器に電磁継電器を近接して、励磁/非励磁を一定周期繰り返し動作させた。

継電器動作中にRMSの指示値が上昇し、異常信号(微小ノイズ)と弁別した。

代表波形を図8(D)に示す。

d. 欠測率の確認

信号発生器から一定周期の疑似パルスを一定時間入力し、信号発生器出力数と観測した疑似パルス数を比較して欠測率の評価を行った。結果は、本システムの試算値(約4割)とほぼ一致していた。

e. 正常/疑似パルス重畳時の弁別性能試験

検出器に線源を照射した状態で、雷サージを連続発生しながら観測した。結果は、正常パルスと疑似パルスが重畳したり、正常パルスを複数個同時に観測した時、異常信号と診断した。

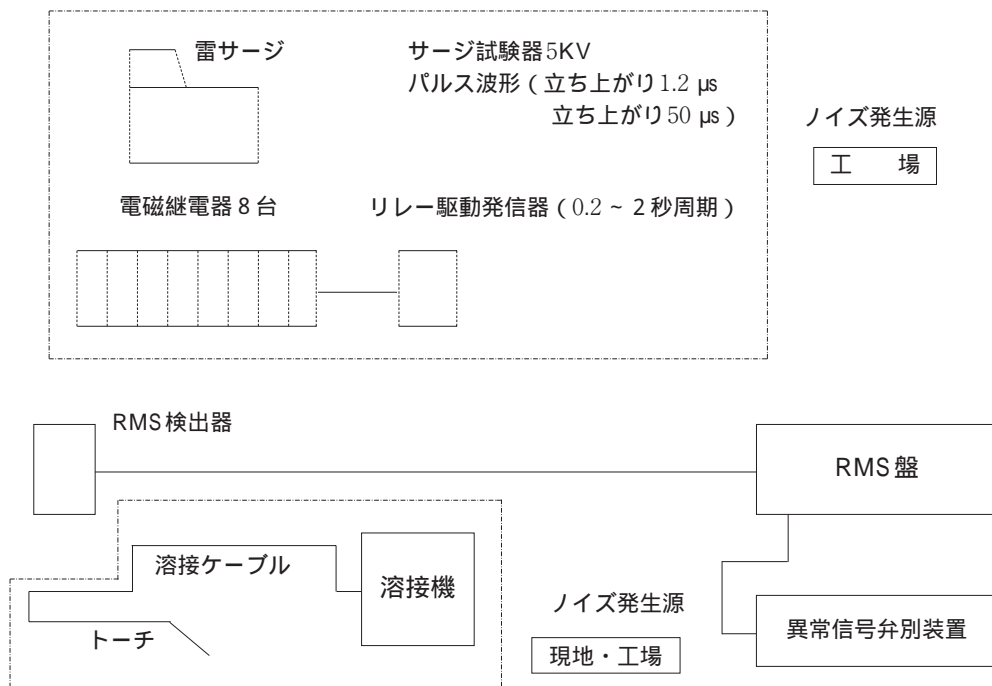
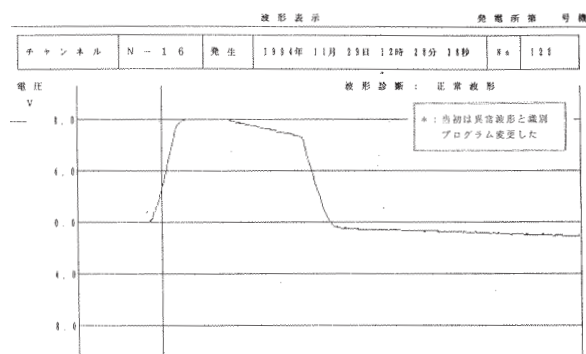


図 7-1 実信号によるノイズ試験回路

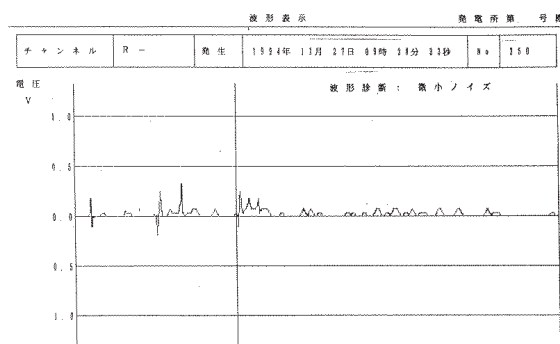


試験装置 ノイズ発生源 検出器 (モニタ)

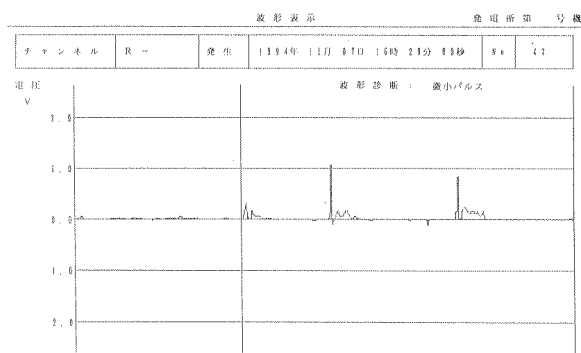
図 7-2 工場での試験状況写真



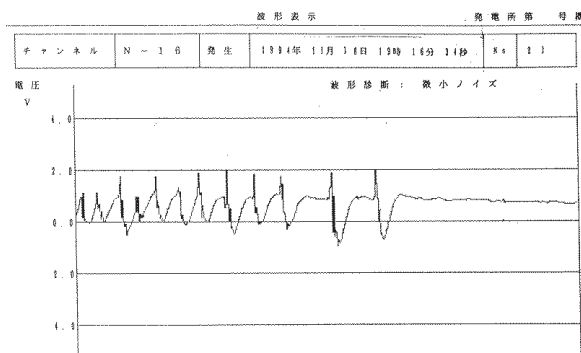
A : 宇宙線



B : 溶接機ノイズ



C : 雷サージ



D : 電磁継電器

図8 異常信号採取例

f. 連続性能試験

外来ノイズの影響を受けやすい定検中のプラントにおいて、プロトタイプ機の連続稼働試験を行った。

連続稼働試験中、RMS 指示値の異常な上昇はなく、単発の疑似パルスが観測されたのみであるが、その概要は以下のとおり。

- (a) ほとんどの信号は正常信号と弁別した。
- (b) 近接して複数個同時に正常パルスを観測すると、異常信号と誤診断した。
発生頻度は14.5時間中(BG:約500cpm)5個程度であった。
- (c) 最小検出電圧値(0.3V)に近い波高値の正常パルスを異常信号と誤診断した。
この割合は数%(700cpmで3~6個程度)

であった。

4. 成果および技術的課題と対策

4.1 成果

工場および現地試験結果では、以下に示すとおり、大部分のケースで正常パルスと疑似パルスを正しく認識できた。

- (1) 正常パルスの波高値が極端に低い場合(約0.4V以下)および正常パルスが近接して複数個同時に観測された場合以外は正常信号と正しく診断できた。
- (2) 電磁継電器、雷サージ、溶接機等の疑似パルスを異常信号と正しく診断できた。
- (3) 今回検証した外来ノイズ以外のノイズとして、

遮断器投入/遮断，電源系での短絡等による誘導ノイズを経験しているが，これらの波形は今回診断した振動波形ノイズと類似しており正しく弁別できると考える．

4.2 課題と対策

工場および現地試験結果から実機適用時の課題と対策について検討した．

(1) 波形認識の改善

- a．正常パルスであるにもかかわらずパルス波高値が極端に低い場合(約0.4V以下)は，サンプリング時の波形歪みの影響により疑似パルスと誤診断した．
- b．正常パルスを近接して複数個同時に観測すると，大きな振動波形と判断し疑似パルスと誤診断した．

対策については次項で述べる．

(2) 信号処理時間の高速化

プロトタイプシステム機はデータ転送時の確認時間が大きく，欠測率は計数率上限(10³cpm)で約4割であった．数え落としはあるものの，異常信号を検出し診断することは可能であった．

伝送時間の高速化(欠測率の低減)については，開発中のオシロを適用することにより，実用上問題ないレベルまで改善できるものと思われる．

4.3 波形認識の改善対策

(1) 診断アルゴリズムの改善検討

プロトタイプ機での検証試験結果から，前項に示した正常パルスの波高値が極端に低い場合や複数個の正常パルスを正しく認識するための方法を検討した．

最も誤診断しているケースは，正常パルスに高周波成分が重畳した場合である．この高周波成分を除去して，正常パルスを抽出する方法を検討した．

しかし，単に高周波成分を除去しただけでは振動的な波形と区別がつかないため，原信号と平滑化信号の差分から高周波成分を計算し，その絶対値を平滑化して高周波成分の分布を得る．この高周波成分の分布は正常パルスの特徴である滑らかなピークを持つ波形では，ほぼゼロであるが，振動的なパルスでは大きな値を持つ．そこで平滑化信号から高周波成分の分布を減じ，負値をゼロに置き換え

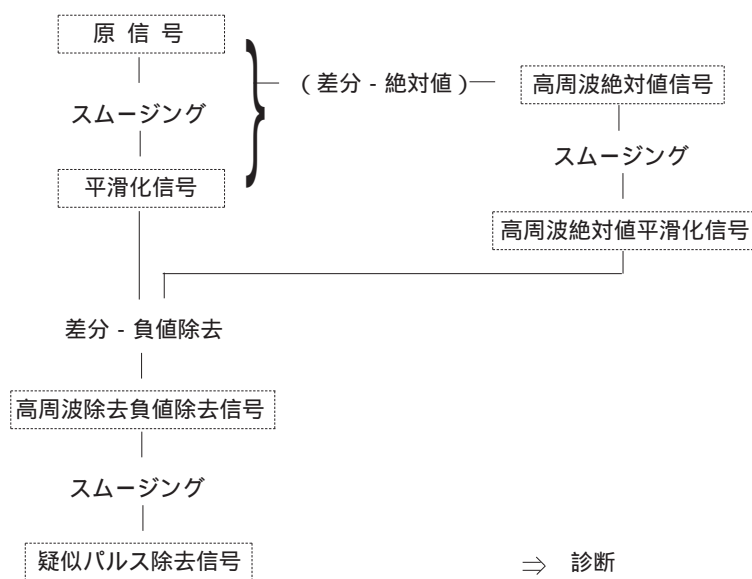


図9 改善アルゴリズム模式図

ることによって、高周波のパワーの強い部分を削除する。最後に細かい波形の揺らぎを押しさえるために、もう一度スムージングを行う。

このアルゴリズムを模式的にあらわすと図9となる。図10にその診断結果例を示す。

(2) 判定結果

工場/現地試験結果で誤診断したデータについて(1)項のアルゴリズムを組み込んで再診断すると148個中143個が視覚的判定基準と一致した。比率に直すと約97%であり、かなり人間の判断基準と合っており、残りの不一致の診断も許容できるものであった。

5. まとめ

(1) システム開発

放射線監視装置の指示が上昇した場合(約

1000cpm)に、検出器の出力信号をリアルタイムで弁別でき、外来ノイズの分離と発生原因を同定できる支援システムが開発できた。また、システムを試作評価して実機開発への見通しが得られた。

(2) システム試験と実機適用検討

波形の弁別については、放射線監視装置のNaIシンチレータ、PIシンチレータ、GM管の各種検出器出力でのフィールドテストの結果、ほぼ計画通りの成果を得た。一部で性能を満足できなかった項目については、診断アルゴリズムの検討により改善できた。

また、精度向上のための高速化および運用の利便性を考慮したマンマシーンインターフェイスの改善により、実機への適用が期待できる。

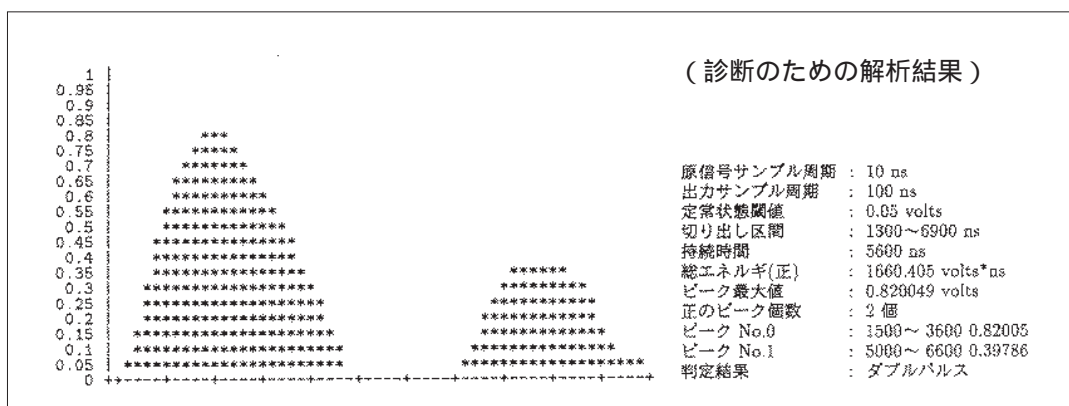
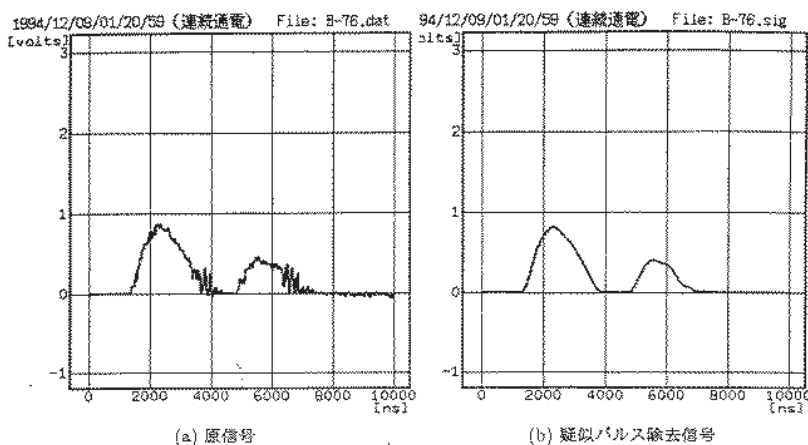


図10 改善アルゴリズムによる診断結果(ダブルパルスと診断)

(3) 適用範囲の拡大

適用範囲の拡大検討として、炉外核計装装置への適用が考えられる。

炉外核計装装置は、放射線監視装置に比べて通常時の計数率が大きくデジタルオシロの不感時間が更に大きくなるが、異常信号が継続している場合には疑似パルスの特徴を捉えられ原因調査の支援への適用が期待できる。

参考文献

- (1) 本阿彌，エレクトロニクス産業におけるノイズ発生源とその特徴，静電気学誌，8（1984）
- (2) 堀，他，低圧配電線の雷サージ電流の実測と予測について，1987年電学全大，1401
- (3) 本阿彌，ノイズ発生源とその特徴 電学計測研資，IM - 88 - 8，11（1988）
- (4) B. Klipec，Controlling Noise in Instrument Circuit Controll Engineering, 15 - 3
- (5) T. Dvorak，"Basics of Radiation Measurements", 8th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, Tutorial Lectures (March 1991)