

核燃料取扱施設における臨界警報装置

Criticality Detection and Alarm System for Nuclear Fuel Facility

山口 清 治* 松 野 清* 楠 戸 豊 士*
Kiyoji Yamaguchi Kiyoshi Matsuno Toyoshi Kusudo

I. ま え が き

原子力発電所の実用化に伴い、核燃料物質を多量に取り扱う施設での、核分裂性物質の臨界安全管理が重要な問題になっている。

これらの施設では、核分裂性物質の質量制限、濃度制限、形状制限などの 厳重な 臨界安全管理がなされており、不注意による臨界事故発生危険性はきわめて低い、完全にゼロとは言えない。さらに、臨界事故が発生した場合は、その近傍にいる作業者は、強い放射線被曝を受ける。したがって、臨界事故が発生した場合、できるだけ早く警報を発し、作業者を退避させる臨界警報装置を確立する必要がある。

核燃料取扱施設においての臨界警報装置の必要性は日本では、法的に明確にされていないが、現在、原子力学会の専門委員会で、設置基準を作成するための検討が進められている。

臨界警報装置としては、通常の放射線監視装置と異なる、次のような特殊性を考慮しなければならない。

- 1) 臨界事故が発生する確率は、施設の供用期間中を通じて、ほとんどない程度のものであり、また臨界時に発生する放射線は、バースト状パルスでその継続時間は、1/1,000～1 秒と非常に短い。したがって、臨界警報装置は、そのような、ごくまれにしか発生しない、しかも短時間の放射線を確実に検知し、警報を発する速応性と確実性を持たなければならない。
- 2) 臨界警報は、その施設における 最重要の 警報である。したがって、臨界警報装置自体の誤動作あるいは、外来ノイズなどによる誤警報発生確率をできる限り少なくしなければならない。
- 3) 放射線レベルを測定することが目的ではなく、臨界時の判別だけをすれば良い。したがって、測定精度は、それ程重要ではない。

当社は、この程、日本原子力研究所・大洗研究所内の燃料研究棟に、臨界警報装置を製作納入した。そこで、その装置の設計と、試験結果について報告する。

II. 装 置 の 概 要

1. 設計の考え方

臨界警報装置の設計に当たって、まず問題になるのが、検出の対象となる放射線の種類（ガンマ線か中性子か）とその検出方法である。

原理的には、臨界に直接関係ある中性子を検出する方が望ましいと言えるが、中性子測定は一般的でなくコスト高で、特性試験や動作チェックが複雑となる。一方、ガンマ線を検出する方法は、測定方式が確立されており、信頼度が高く、特性試験や動作チェックが簡単であるため、米国、英国等でも、中性子測定より多く使用されている。⁽¹⁾⁽²⁾ 本装置の場合も、通常時の周辺ガンマ線バックグラウンドレベルが低く、問題にならないので、ガンマ線測定法を採用している。

ガンマ線検出器としては、GM計数管、シンチレーション計数管、電離箱などが実用化されているが、パルス方式のものは、どうしても、外来雑音の影響を受けやすいので、臨界警報装置としては、あまり適しているとは言えない。そこで、本装置では、プラスチックシンチレータを使用した、DC電流方式を採用することにより、ガンマ線感度を高く、外来雑音に強くすることを意図した。この検出方法は、従来からあるが、⁽³⁾ どちらかと言えば、特殊な分野での応用が多い。

誤警報防止対策としては、5チャンネルの系統で構成し臨界警報は、2OUT OF 5 の論理信号によって、発する冗長性回路を採用している。一般に、単一チャンネルの時の、検出レベルを越えているにもかかわらず誤って、警報を発しない確率を P 、検出レベル以下であるのに、誤って警報を発する確率を q とすると、同じチャンネルを X OUT OF N 方式にした場合、事故時に警報を発しない確率は、

$$\frac{N!}{(N-X+1)!(X-1)!} P^{N-X+1} \dots\dots\dots (1)$$

また、事故でないのに、誤警報を発する確率は、

$$\frac{N!}{X!(N-X)!} q^X \dots\dots\dots (2)$$

で表される。

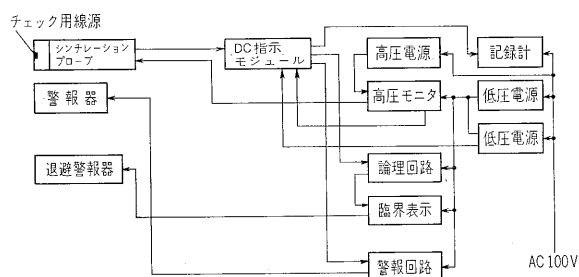
* 東京工場

2 OUT OF 5 方式の場合、式(1)、(2)より、事故時に警報を発しない確率は、 $5P^4$ 、誤警報を発する確率は、 $10q^2$ となり、両方の確率を、低くすることができる。

また、システム全体が常に、正常に動作していることを確認するとともに、いずれかの系統が動作異常となった場合は、直ちに、故障警報を発し、予備の機器と交換するための、動作中診断機能を持たせている。

2. 系統の構成

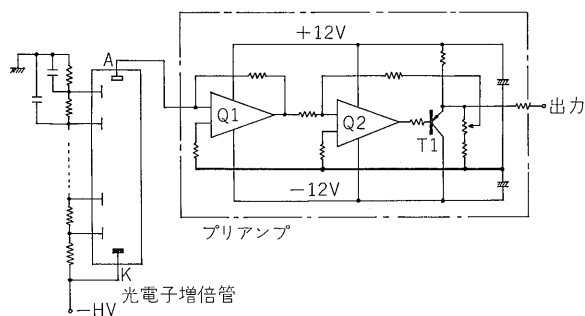
第1図に、構成機器の系統を示す。本装置は、5チャンネルから構成されている。



第1図 臨界警報装置系統構成図

Fig.1. Block diagram of criticality detection and alarm system

各チャンネルの検出端は、シンチレーションプローブと警報器で構成され、監視対象とする区域に、適当な間隔で配置される。シンチレーションプローブには、2"φ×2"のプラスチックシンチレータ、光電子増倍管と、プリアンプが内蔵されている。ガンマ線が、プラスチックシンチレータと反応して発生する光を光電子増倍管で電流に変換する。光電子増倍管は、第2図のように負高圧を印加して、直流電流として取り出してIC2段のプリアンプで増幅する。シンチレータを使用する場合は、通



第2図 シンチレーションプローブ回路図

Fig.2. Circuit diagram of scintillation probe

常、パルス計測法であるが、パルス計測は、外来ノイズの影響を受けやすく、誤警報発生に結びつく点を考慮して、直流方式とした。一方、直流方式は温度特性やドリフトなどに欠点があるが、臨界警報装置の場合は、前述したように、精度は重要でないで、あまり問題とならない。

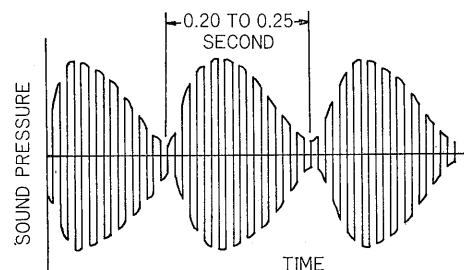
プローブの先端には、チェック線源を常時取り付け、約 15mR/h の一定出力が得られるようにし、その信号を、系の動作中診断に利用する。線源は、セシウム-137で半減期が30年と、非常に長寿命のため、本装置の供用期間中の補正は、ほとんど必要ない。また、定期点検時などには、線源をプローブから容易に脱着できる構造としている。

警報器は、臨界事故が発生した時、その近傍の作業者を確実に退避させるために、検出端において、ブザーとランプによる警報を発する。

DC指示モジュールは、シンチレーションプローブのプリアンプから、ケーブル伝送された直流信号を、さらに増幅して、指示、記録および警報識別を行う。目盛は、0~100mR/h の直線目盛で、トリップ回路は、高レベルトリップと低レベルトリップがある。低レベルトリップ点は、5mR/h に設定されており、系統の異常により、チェック線源があるにもかかわらず、出力が5mR/h 以下になった場合は、故障警報を発する。高レベルトリップは、半導体方式による高速応答性を持ち、警報レベルは、臨界時の放射線レベルと、通常時のチェック線源によるバックグラウンドレベルを考慮して、50mR/h に設定されている⁽¹⁾。この数値は、米国の臨界事故警報系に関する国内基準に合致し、チェック線源によるバックグラウンドレベルより 35mR/h 高いので、バックグラウンドレベルの変動による誤警報はないと考えられる。

論理回路では、DC指示モジュール5チャンネルの高レベルトリップ信号を入力として、このうち、2チャンネル以上が同時に発生した時、自己保持臨界警報出力を臨界表示モジュールに送る。論理回路は、すべて半導体素子を使用し、回路自体を二重化して、信頼度を高くしている。DC指示モジュール5チャンネルのうち、1チャンネルだけで高レベルトリップが発生した場合は、論理回路が動作しないので、臨界警報出力は出ないが、高レベル警報を発する。

臨界表示モジュールは、論理回路から臨界警報出力を受け、施設内全域に退避警報音を発生させる。退避警報音としては、通常の施設に備えられている、ベル、サイ



第3図 退避警報音に関する米国スタンダード

Fig.3. USA standard for immediate evacuation signal

レンなどの警報音と明確に異なり、ノイズレベルより、十分大きな音量を持つことが要求される。退避警報音に関する米国スタンダード⁽⁴⁾では、第 3 図に示すような変調音が推せんされているが、コスト高となるため、本装置では、ホーン付きブザーを使用した。このブザーは、1 m離れた場所で、110~115ホンの音量を発生する。

3. 点検時の動作チェック

装置の正常な動作状態が保たれていることを確認するために、定期的に動作チェックを行う必要があるが、臨界警報装置の場合は、その重要度からみて、測定系については、月に 1 度、退避警報系を含めて、3 か月に 1 度程度が適当と思われる。

ここで、点検方法などについて、次のようなことが重要である。

- (1) 点検中に、臨界事故が発生することもあり得るので、できるだけ、点検時間を短くすること。
- (2) 測定系の点検の場合に、誤って退避警報を発しないため、点検モードでは自動的に退避警報をバイパスする。
- (3) 退避警報を発生させるには、キースイッチによる操作を必要とし、点検終了後正常モードに戻さないと、キーが外せないようにする。また、キーは、管理責任者の許可がないと持ち出せないようにする。

上記の点を考慮して、本装置では次の要領で動作点検が行えるようにした。

- (1) DC指示モジュールのパネル上のモード切換スイッチを「テスト」にして、調整用可変抵抗をドライブで回すことにより、プローブからの信号と等価的な電流を入力部に発生させる。電流の大きさは、メータの指示範囲全域にわたって変えられるので、低レベルトリップと高レベルトリップが、設定されたレベルで動作するかどうかの確認が容易に行える。

この時、モード切換スイッチを「テスト」にすると、退避警報は自動的にカットされ、不注意な操作による誤警報発生を防止している。

この方法で、2 チャンネル以上の高レベルトリップを発生させると、臨界表示モジュールの警報ランプが動作するので、論理回路が正常に動作しているかどうかの確認ができる。

- (2) 臨界表示モジュールのキースイッチをONにして前項と同様の操作をして、2 チャンネル以上の高レベルトリップを発生させると、臨界表示モジュールの警報ランプが動作すると同時に、退避警報が発生する。キースイッチは、OFF (正常な使用位置) に戻さないと、キーが外せない構造になっている。

4. 異常動作の表示

正常な動作中に、高圧電源から供給されている高圧が

異常になったり、低圧電源から供給されている回路用電源の $\pm 24\text{V}$ 、 $\pm 12\text{V}$ のいずれかが異常になった場合、およびシンチレーションプローブに接続されているケーブルが外れた場合、あるいは、その他の何らかの理由(光電子増倍管の異常など)で、チェックングソースが付いているにもかかわらず、指示が 5mR/h 以下になって、低レベルトリップが発生した場合、そのチャンネルのDC指示モジュールの動作ランプが点滅し、警報回路のブザーが鳴る。そのような場合は、直ちに予備の機器と交換することができるように、一連の機器について、少なくとも、1 台の予備器が用意されている。

5. 無停電電源

すでに述べたように、臨界警報装置には、極度に高い信頼度が要求されるため、通常の場合、それを支えるために、無停電電源装置が使用される。本装置の場合も、当初は、無停電電源系の設置が計画されたが、かなりコスト高となるため、今期は見送られ、次期以降の予算により増設される予定となっている。

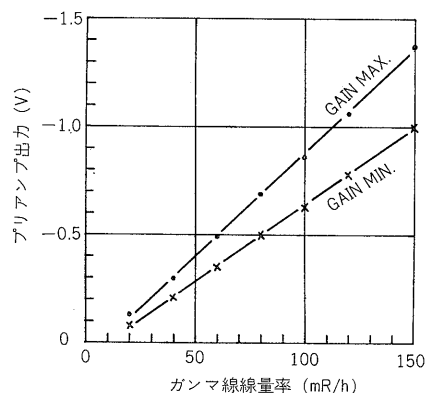
そのため、特に警報論理回路を構成する機器については、停電時(実際に問題になるのは停電後の再通電時)に誤動作のないよう考慮している。

III. 試験結果および検討

1. 出力特性

第 4 図に、 ^{137}Cs のガンマ線による、シンチレーションプローブの出力直線性を示す。

図から明らかなように、光電子増倍管の出力電流および、プリアンプの出力電圧とも、3%以内の良好な直線性を示し、臨界警報装置用として、十分な性能を持つことが分かる。



第 4 図 出力直線性

Fig. 4. Output linearity

次に、出力電流の大きさは、高レベルトリップの設定点である 50mR/h の線量率の時、約 $2\mu\text{A}$ が得られる。これは、標準的なガンマ線電離箱の場合の $10^4\sim 10^5$ 倍という桁はずれの大きさである。一般的に、出力電流が大

きいと、増幅器のフィードバック抵抗を小さくすることができ、応答時間を早くすることが可能となる。また、出力電流が大きいと、当然外部雑音の影響も少なくなり、信号の処理も容易で、安定で信頼度の高い回路を構成することができる。

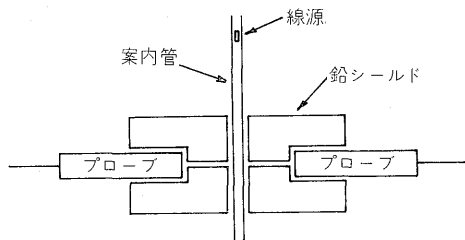
したがって、この点では、シンチレータ方式が電離箱方式に比較して、臨界警報装置として、圧統的に有利であるといえることができる。

2. 応答特性

シンチレーションプローブから警報回路までを含めた系全体の応答特性を測定するためには、適当な放射線を、適当な短時間、パルス状に発生させる装置が必要のため、簡単にはできない。そこで、次のような、線源落下による方法とパルスジェネレータの電圧パルスによる2種類の試験を実施した。

1) 線源落下試験

第5図のように、スリットを有する鉛シールドで囲まれた。2台のシンチレーションプローブの前に、垂直にガイドパイプを立て、パイプの中へ、ガンマ線標準線源(^{229}Ra 5.29mCi)を落下させて、放射線パルスが発生さ



第5図 線源落下試験

Fig. 5. Arrangement of response test with radiation source

せる。放射線パルスの強さは、シンチレーションプローブとガイドパイプとの距離を変えることによって、また放射線パルスの継続時間は、スリットの大きさを変えることによってある程度調整できる。スリットは、60, 30, 10, 5 mmの4種類を実施した。

落体運動の場合、運動方程式より、

$$\begin{cases} v = v_0 - gt & \dots\dots\dots(3) \\ y = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2}gt^2 & \dots\dots\dots(4) \end{cases}$$

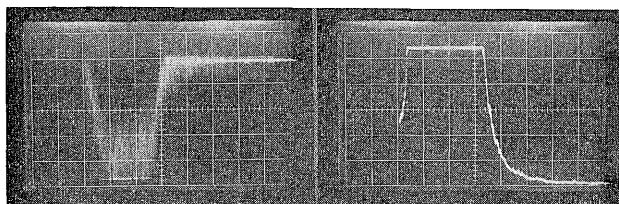
が成立する。ここで、 v は速度、 t は時間、 y は高さ、 g は重力加速度、 v_0 は初速度、 y_0 は最初の高さである。式(3)、(4)から、125cmの高さから、線源を落下させた場合の速度は 495cm/sec となる。したがって、スリットを60, 30, 10, 5 mmとした時の放射線パルスの継続時間はそれぞれ、12, 6, 2, 1msec となる。ただし、空気抵抗および、ガイドパイプとの摩擦は無視し、線源は点状近似としてあるので、以下の実測による値はやや長くなっている。

第6～9図に、スリットを60, 30, 10, 5 mmにして、線源を落下させた時の、シンチレーションプローブ（プリアンプ）および、DC指示モジュールの出力波形を示す。この時の照射線量率は約 700mR/h で、プリアンプの出力で、-7 Vに相当する。

図より、スリットが30mm以上の時は、照射線量率に対し、100%の応答が得られるが、10mmの時は、約60%、5 mmの時は、約30%の応答となることが分かる。

2) シングルサイクルパルス試験

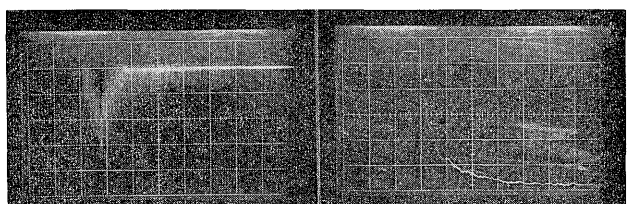
次に、警報回路系の応答性を確認するために、パルス発生器から、DC指示モジュールの入力端子に、パルス波高-1 V、パルス幅 100～1ms のシングルサイクルパ



(a) プリアンプ出力波形 (20ms, 2V/div) (b) DC指示モジュール出力波形 (20ms, 2V/div)

第6図 過渡応答特性 (スリット60mm)

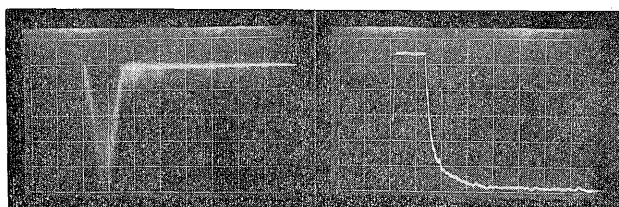
Fig. 6. Transient response (slit: 60mm)



(a) プリアンプ出力波形 (5ms, 2V/div) (b) DC指示モジュール出力波形 (5ms, 2V/div)

第8図 過渡応答特性 (スリット10mm)

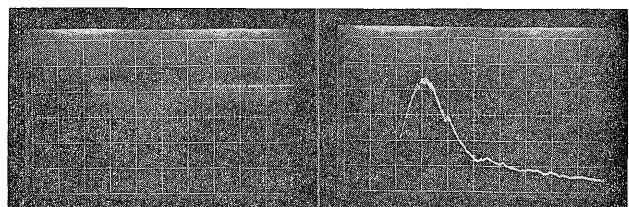
Fig. 8. Transient response (slit: 10mm)



(a) プリアンプ出力波形 (20ms, 2V/div) (b) DC指示モジュール出力波形 (20ms, 2V/div)

第7図 過渡応答特性 (スリット30mm)

Fig. 7. Transient response (slit: 30mm)



(a) プリアンプ出力波形 (2ms, 2V/div) (b) DC指示モジュール出力波形 (2ms, 2V/div)

第9図 過渡応答特性 (スリット5 mm)

Fig. 9. Transient response (slit: 5mm)

ルスを与えた結果、パルス幅 1ms の時も、警報回路が正しく動作することが分かった。

したがって、1) と 2) の結果より、警報設定レベルを 50mR/h とすると、パルス幅 1ms の時は、約 170 mR/h 以上の放射線パルスに対して臨界警報が発生すると考えられる。

3. 温度特性

シンチレーションプローブの先端にチェックソースを取り付けて、恒温槽内に設置し、温度特性を調べた。温度サイクルは +15℃ を基準として、低音側 -5℃、高温側 +45℃ とした。

第 1 表に、温度特性結果をそれぞれの温度における出力電圧の値と、それを入力電流および照射線量率に換算した値で示す。+15℃ ~ -5℃ の間では、シンチレーションプローブの出力はほとんど変化しないが、+15℃ ~ 45℃ の間で大きく変化している。

第 1 表 シンチレーションプローブの温度特性
Table 1. Temperature coefficient of scintillation probe

	+15℃	-5℃	+45℃
出力電圧 (V)	-0.11	-0.11	-0.15
入力電流換算値 (μA)	-0.56	-0.56	-0.75
照射線量率換算値 (mR/h)	13	13	19

+45℃ における温度変化の原因としては、次の三つの要因が考えられる。

- (1) 高圧電源の変動
- (2) プリアンプの温度ドリフト
- (3) 光電子増倍管の暗電流の増加

そこで、それぞれについて別個に調べた結果、光電子増倍管の暗電流の増加による影響が大部分であることが分かった。光電子増倍管の暗電流を測定した結果、室温で 22nA、+45℃ で 200nA (印加高圧 1,200V の時) となり、約 180nA 増加することが分かった。この変化は、第 1 表における +15℃ ~ 45℃ の間の電流増加分 190 nA とほぼ一致する。高電子増倍管の暗電流は、10℃ の温度上昇につきほぼ 2 倍になるとされている例にも一致する⁽⁵⁾。

したがって、この温度変化はシンチレーション検出器の使用にあたって不可避の問題となる。一方、その温度変化分を、電子回路的に補償することは技術的には可能であるが、そのために、回路構成が複雑となり、素子が増加することは、信頼度設計の点から望ましくない。また、温度変化の大きさは、周囲温度が 0 ~ 45℃ 程度の変化をした場合でも、線量率に換算して約 6mR/h に相当する程度のものである。すでに述べたように、臨界警報装置は、線量率を測定することが目的ではなく、測定精

度はそれ程重要でないことから、その程度の温度変化は、実用上問題がないといえる。

4. ノイズチェック

シンチレーションプローブ 5 台を並置して、各チャンネルを通常の測定モードにした状態で、プローブおよび接続ケーブルにノイズ源を近づけた。

ノイズ源としては、実用的なものの中で、最も強力と思われる TIG 溶接機を使用して、ステンレス鋼のサンプルを繰り返し溶接して行った。

結果はいずれのチャンネルも正常に動作して、ミスアラームを一度も発生しなかった。このことから、本装置は通常考えられるパルス状の外來ノイズに対しては、まったく影響を受けず、きわめて安定なことが分かる。

IV. ま と め

プラスチックシンチレータを使用した直流電流方式の臨界警報装置について述べた。本装置の主要性能および特長は次のようにまとめられる。

- (1) ガンマ線感度は約 -4×10^{-5} A/R/h で、標準的なガンマ線電離箱の場合の $10^4 \sim 10^5$ 倍の大きさが得られる。
- (2) ガンマ線線量率に対して、3% 以内の直線性を有する。
- (3) ガンマ線のバースト状パルスに対して、良い応答性を示し、警報設定レベルを 50mR/h とすると、パルス幅 1ms の時は、約 170mR/h 以上の放射線パルスに対して臨界警報が発生すると考えられる。
- (4) 0 ~ 45℃ の温度変化に対して、線量率換算で、約 6mR/h の出力変化を示すが、臨界警報装置としては問題のない値である。
- (5) パルス状の外來ノイズに対しては、きわめて安定でミスアラームを発生しない。

最後に、本装置の設計から試験を通じ、適切な助言をいただいた、日本原子力研究所・大洗研究所の南賢太郎殿に深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) ANSI N16.2-1969: American National Standard, Criticality Accident Alarm System
- (2) K.J. Aspinall and J.T. Daniels: Review of U.K.A.E.A. Criticality Detection and Alarm Systems 1963/64 Part 1: Provision and Design Principles, AHSB(S)R 92
- (3) W.W. Managan: Application of Scintillation Counters to Reactors, IRE Trans. on Nuclear Sci. 171 (Dec. 1958)
- (4) USAS N2.3-1967: USA Standard, Immediate Evacuation Signal for Use in Industrial Installations where Radiation Exposure May Occur
- (5) W.J. ブライス、西野・関口訳: 放射線計測 189 (1966)



＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。