



2. 作業環境の監視に係わる技術小論

(2) 臨界警報装置の開発

野田 喜美雄
安全部

資料番号: 81-11

2. Development of Technology on Radiation Monitoring
of Working Environment
(2) Development of Criticality Accident Alarm System

Kimio Nada
(Safety Division)

動燃事業団においては、再処理工場の建設時、臨界警報装置を輸入して設置したが、2度の誤警報を経験したことから、信頼性の高い臨界警報装置を国産化することとした。国産化にあたっては、機器の単一故障が誤警報につながらないよう、高い冗長性を有するシステム設計とした。開発したシステムは、臨界事故時に発生する放射線を検出する検出部、放射線の上昇が臨界事故としての条件を満たすか判定する判別部および警報を発生する警報部から成り、システムの信頼性は平均故障間隔(MTBF)で 6.3×10^4 時間となった。この臨界警報装置は、東海事業所の6施設に設置されている。

1. はじめに

動燃事業団東海事業所においては、昭和40年、プルトニウム燃料第一開発室に最初の臨界警報装置を設置して以来、プルトニウム燃料第二開発室、再処理工場等合計6施設に臨界警報装置を設置している。

再処理工場には、昭和48年、フランスから輸入した臨界警報装置を設置したが、昭和55年および56年に誤警報が発生したことから、より信頼性の高い臨界警報装置の国産化を図ることとした。

2. 装置に課せられた役割

- ① 臨界事故が発生した場合、退避の対象となる区域にいる作業者を他のすべてに優先して退避させることができるよう、これを速やかに検知し、警報を吹鳴させること。
- ② 核物質の工程間移動を伴うような施設工程の運転時には、臨界警報装置が正常に稼働しているようにすること。
- ③ 誤警報の発生により臨界警報装置に対する信頼感を低下させてはならないこと。

3. 臨界警報装置の開発

3.1 判別条件の設計

臨界事故としての判別条件を検討するにあたっては、過去の臨界事故例や臨界実験を調査し、臨界事故時における総核分裂数の範囲、放射線の放出パターン、放射線量率等を参照した。

1) 臨界事故等の事例

① 臨界事故時の核分裂パターン

臨界事故の発生源が溶液系、固体系等により、臨界事故時の核分裂パターンは異なるが、溶液系を考えた場合、臨界バーストのパターンは、短時間(～ms)の初期ピーク部と、引き続く初期ピークよりは低い核分裂のプラトー部とで代表することができ、臨界事故の規模は、総核分裂数、初期ピークの核分裂数、初期ピークの持続時間、臨界事故の継続時間等で示すことができる。

② 臨界事故事例等

過去の臨界事故を調査すると、溶液系における総核分裂数の範囲は、 $10^{15} \sim 10^{19}$ fissionsの範囲にあり、初期ピークの持続時間は1ms程度、臨界事故の継続時間は1ms～20sの範囲

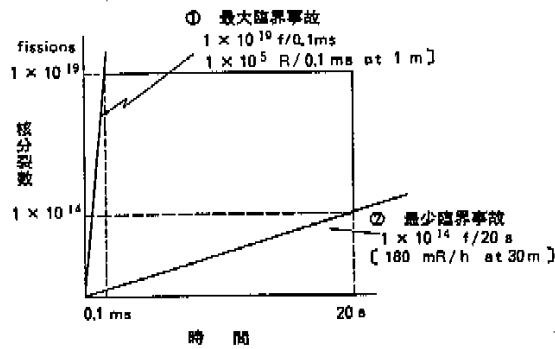


図-1 モデル化した想定する臨界事故の範囲

となっている。またフランスが実施したCRACと呼ばれている一連の溶液系の臨界実験では総核分裂数の範囲が、 $10^{16} \sim 10^{18}$ fissionsの範囲にある。

2) 想定臨界事故の範囲

設計にあたり想定した臨界事故の範囲を以下に示す(図-1参照)。

- ① 総核分裂数の範囲 : $10^{15} \sim 10^{18}$ fissions
- ② 初期ピークの核分裂数 : $10^{14} \sim 10^{17}$ fissions
- ③ 初期ピークの持続時間 : 0.1 ~ 3 ms
- ④ 臨界事故の最大継続時間 : 20s

3) 判別の条件

上記の調査等を基に、臨界事故としての判別条件を、①放射線場があらかじめ設定したしきい値を越え、②放射線場が短時間に形成されることとし、さらに、誤警報の防止の観点から、③放射線場がある程度広範囲にわたって形成されること、も条件とした。

3.2 装置の信頼性設計

装置の信頼性としては、装置外部からの外乱に対する安定性と、装置内部の故障に対する安定性を考慮し、以下の項目について検討した。

1) 装置外部からの外乱に対する安定性

- ① 臨界事故以外の原因による放射線
- ② 電磁誘導等のノイズ
- ③ 衝撃等

2) 装置の故障に対する安定性

- ① 機能喪失……臨界警報を発生すべき時に臨界警報を発生しない
- ② 誤警報……臨界警報を発生すべき時でないのに臨界警報を発生する

3) 信頼性の目標値

開発する新しい臨界警報装置の信頼性の目標値は、海外の例を参考にし、その平均故障間隔(MTBF)が 3×10^6 時間を上回ることとした。

このため、設計・製作にあたっては、信頼度の高い使用部品の選定、回路設計上のディレーティング、冗長設計とトレードオフ、信頼性評価および製作工程の管理について考慮した。

3.3 各部の機能

1) 全体構成

検出部として、臨界監視場所に設置される3台1組からなる検出器(検出器3台が一つの臨界監視場所に設置され、これが1チャンネルとなる)。

判別部として、検出器からのトリップ信号を受け、2 OUT OF 3 論理を判定する3台の2/3論理回路および各論理回路からの論理判定結果を受け、3台の論理回路出力に対しさらに2 OUT OF 3 論理を判定し臨界事故が発生したか否かを判断する補

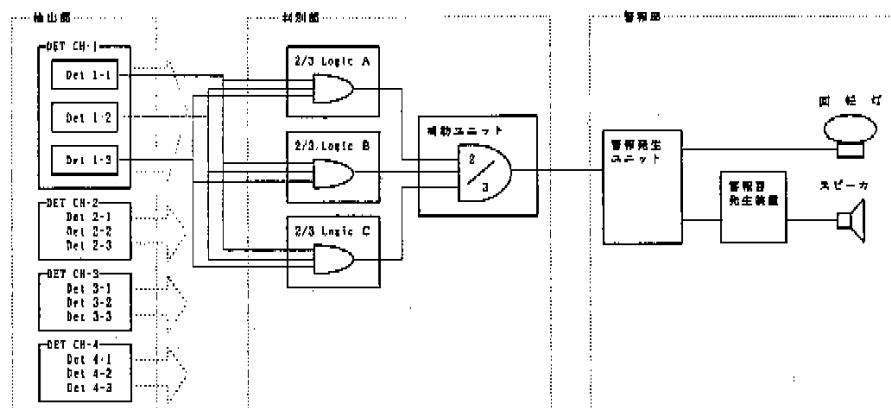


図-2 臨界警報装置ブロックダイアグラム

助ユニット。

警報部として、補助ユニットからの臨界信号を受け、臨界警報を発生する警報発生ユニットおよび回転灯、ならびに警報音発生装置およびスピーカ。

また付随する機能として点検部があり、検出器をはじめとし各部の健全性の点検を行うことができる。装置のブロックダイアグラムを図-2に示す。

2) 検出部

検出器としては、 γ 線検出器と中性検出器の二種類がある。

通常は γ 線検出器が用いられるが、臨界事故の発生想定箇所と、検出器設置場所との間に鉛等の厚い遮蔽体がある場合や、検出器設置場所の、バックグラウンドとしての γ 線量率が高い場所には、中性子検出器が用いられる。

① γ 線検出器：

プラスチックシンチレーション式検出器により γ 線線量率を監視し、あらかじめ設定していた線量率に達した場合、トリップ信号を出力する。

この他に、線量率に比例したアナログ信号も出力することができる。また、健全性の確認機能として、LEDを用いた光電部の点検機構や高圧回路部の故障監視機構が内蔵されており、日常点検に用いられている。

② 中性子検出器：

半導体検出器に濃縮ウラン片を対向させ、中性子線によるウランの核分裂片を計測する。核分裂によるパルス数があらかじめ設定していた値に達した場合、トリップ信号を出力する。

健全性の確認機能としては、濃縮ウランからの α 線を利用した点検機構が内蔵されており、日常点検に用いられている。

3) 判別部

① 2/3論理回路

1チャンネルにつき3台の検出器が使用されるが、1台の2/3論理回路には4チャンネルまで入力可能となっている。2/3論理回路は3台が1組となって使用される。

論理判定は、各チャンネル毎に3台の検出器について、0.5秒以内の2 OUT OF 3論理を採用し、それぞれ3台の2/3論理回路が独立で判定している。

② 補助ユニット

3台の2/3論理回路出力についてさらに2 OUT OF 3論理判定を行い、臨界事故発生の最終判別を行う。

臨界事故の発生と判別した場合、警報部へ臨

界信号を送る。

4) 警報部

① 警報発生ユニット

臨界信号を受け、臨界警報を発生すべく警報音発生装置および回転灯起動信号を発生する。

また、臨界警報装置全体の運転制御、点検、機能監視等を行うことができる。

② 警報音発生装置

臨界警報として、基本周波数が1 kHz、変調周波数が4 Hzの警報音をスピーカから発生させる。

③ 警報器

i. 警報音……スピーカにより臨界警報音を発生し、音源から10メートルの場所75db以上の音圧となることとしている。

ii. 警報光……回転灯により赤色の警報光明滅方式としている。

各警報器の現場への設置方法は、隣り合う機器が互いに異なるリレーからのケーブルで配線されるように工夫されている。

5) 点検部

検出器、2/3論理回路、補助ユニットならびに警報発生ユニットの健全性が点検できる。また、警報音発生装置、スピーカおよび回転灯は、常時故障診断が行われている。

6) 電源

検出器および2/3論理回路の電源は、2 OUT OF 3論理設計を満たすべく、それぞれ独立に設けられ、補助ユニット、警報発生ユニットおよび警報音発生装置の電源は、並列冗長設計としている。点検部の電源は単一系としている。

なお、臨界警報装置全体は無停電電源から供給されている。

7) その他の機能

① 供用中監視点検モジュール

臨界警報装置全体の動作状況を常時監視し、また日常点検を自動的に実施し結果を出力することができる。

② 記録計

検出器のアナログ出力を常時記録することができる。

従来の臨界警報装置の誤警報は、2/3論理回路の故障によるものであった。従来の装置は、2/3論理回路や電源等が故障した場合、警報を発生するように回路が設計されており、故障したことが知られていることのないように（フェイル セーフ）配慮されていたが、臨界警報装置に課せられた社会的役

測は遅く、誤警報に対しても高い信頼性が要求された。

このため、今回開発にあたっては、2/3論理回路の故障も相定した上で、装置の機能が健全であることとした。

すなわち、1台の2/3論理回路が故障した場合、この回路は装置の系から除外し、故障の影響が他に伝播しないようにした。

ブロックダイヤグラム上は、3台の2/3論理回路の出力判定を行う補助ユニットが1台しかなく、この故障が装置の信頼性を左右するよう見えるが、この回路は3台の2/3論理回路の出力で作動する独立したリレー接点で構成されており、2 out of 3 理論の論理上の回路であることから、この回路全体が故障することはない。

この補助ユニットの論理回路構成の考案が装置の信頼性の向上に大きく寄与している。

4. 信頼性評価

MTBFを算出するにあたっては、保全を考慮した。すなわち、臨界警報装置が故障警報を発生するようなモードで故障した場合の平均修復時間(MTTR)を1時間とし、故障警報を発生しないようなモードで故障した場合のMTTRは翌日の点検まで故障が見つからないものとし、(通常の故障は故障警報を発生するモードが多いが、故障警報の発生しないモードも0.5の確率で発生するものとみなし、これらを平均した。)修理時間も考慮して25時間とした。

平均MTTRを13時間とし、開発したシステムのMTBFを25℃(常温)の条件で計算すると 6.3×10^6 時間となった。

5. 保全性

装置の各部はモジュールによるユニット構成となっており、すべてコネクタ接続である。したがって、開発した臨界警報装置は単一故障が発生した場合、その監視機能を損なわずに不良モジュールの交換ができる構造となっている。

6. まとめ

- ① 単一の故障が装置全体の故障への発展防止
- ② 供用中の装置の健全性確認

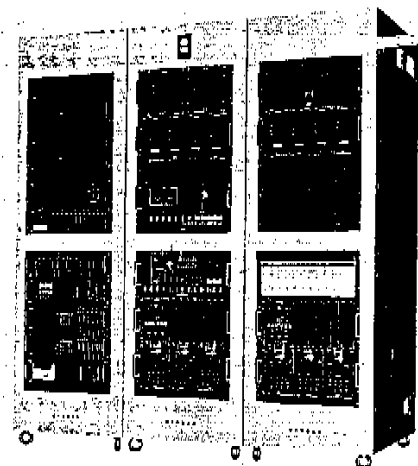


写真-1 臨界警報装置外観

③ 供用中の装置の保全

の3点について合理的に可能な限り達成することができた。

すなわち、単一故障に対しては、2 out of 3 論理の部分では2 out of 2 となり、並列冗長の部分では単一系となるが、装置全体としては臨界事故の監視ができる。

また、検出器、判別部、警報部および電源部は、供用中監視点検モジュール等により、常時健全性が確認されており、故障の早期発見に役立っている。

さらに、万が一装置の単一故障が発生した場合、装置の健全性を確保したまま故障した部分の交換が可能である。これらのことは、従来の装置では不可能であったことから開発した臨界警報装置のアーベイラビリティ(ある時間の時点で装置が健全である確率)は格段に向上したといえる。装置全体のMTBFは 6.3×10^6 時間となり、当初目標とした 3×10^6 時間を上回った。

開発した臨界警報装置(写真-1参照)は動燃事業団の東海事業所に昭和58年3月最初に設置されて以来、旧型の装置は順次更新され現在6施設すべてが新しい臨界警報装置となり、その延べ稼働時間が約 2.3×10^5 時間(平成4年1月現在)となっている。