



JP0750061

JAEA
Research

臨界警報装置に与える宇宙線の影響に関する調査

— 単一検出と宇宙線との関連 —

Investigation Concerning Influence of Cosmic Rays on
Criticality Accident Alarm System

- Relationship between "Single Detection" and Cosmic Rays -

井崎 賢二 鈴木 秀樹 椎 裕彦 大関 清

Kenji IZAKI , Hideki SUZUKI , Hirohiko TSUBAKI and Kiyoshi OZEKI

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
放射線管理部

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

March 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っておりまます。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

臨界警報装置に与える宇宙線の影響に関する調査
— 単一検出と宇宙線との関連 —

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター

核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部

井崎 賢二・鈴木 秀樹※・椿 裕彦・大関 清

(2007年1月18日受理)

核燃料サイクル工学研究所内における約20年間の臨界警報装置（国産型）の運用において、3台1組で構成される検出部のうち1台の検出器で、年に数回の頻度で“単一検出”と呼ばれる検出器出力の一過性の変動が施設の放射線レベルとは無関係に発生している。放射線管理部ではこれまでにノイズ対策を含めて単一検出の発生原因について調査・検討を行っており、今回、単一検出の発生原因として考えられる“宇宙線”的影響を調査するため、保守用（予備品）の臨界警報装置の検出器を用いて長期的な観測を行い、宇宙線検出の観点から観測データを解析した。

本報告書では、観測結果及び解析結果を示すとともに、宇宙線が単一検出の発生に寄与している可能性が高いことを述べる。

Investigation Concerning Influence of Cosmic Rays on Criticality Accident Alarm System

— Relationship between “Single Detection” and Cosmic Rays —

Kenji IZAKI, Hideki SUZUKI*, Hirohiko TSUBAKI and Kiyoshi OZEKI

Radiation Protection Department
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2007)

Criticality Accident Alarm System (CAAS) has been used in Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories for about 20 years, and there is occurrence of the abnormal signal called “Single Detection”, as an operational problem of CAAS. Radiation Protection Division has investigated the cause affecting “Single Detection”, as well as reducing the influence of noises such as electromagnetic waves and power source variations.

This report shows the result of the long-term observation with detectors of CAAS and describes that cosmic rays have high possibility to cause “Single Detection”.

Keywords: Cosmic Ray, Air Shower, Criticality Accident Alarm System, Single Detection, Hadron, Muon, Radiation Measurement, Cascade Shower, Plastic Scintillation Detector

* Cooperative Staff

目 次

1.	緒 言	1
2.	臨界警報装置について	2
2.1	臨界警報装置とは	2
2.1.1	臨界警報装置の構成	2
2.1.2	臨界警報装置設計上の想定臨界事故の範囲	5
2.1.3	臨界警報装置の信頼性評価	5
2.2	国産型臨界警報装置の運用後における単一検出の防止策	5
3.	宇宙線について	9
3.1	宇宙線とは	9
3.1.1	1次宇宙線と2次宇宙線	9
3.1.2	軟成分と硬成分	10
3.2	宇宙線の現象	10
3.2.1	空気シャワー	10
3.2.2	電磁カスケードシャワー	10
3.2.3	空気中における電磁カスケードシャワーと μ 粒子の発生	11
3.3	宇宙線の観測装置	11
3.3.1	主な宇宙線観測装置の種類	11
3.3.2	プラスチックシンチレータを用いた宇宙線観測装置の例	12
4.	過去の単一検出の発生状況と宇宙線検出との関連	13
4.1	施設ごとの単一検出の発生回数	14
4.2	単一検出が発生した検出器の設置場所	14
4.3	単一検出の発生時間帯	15
4.4	単一検出発生時における他の放射線管理モニタの動作状況	15
5.	臨界警報装置用検出器を用いた長期観測	17
5.1	光伝送型監視装置による観測	17
5.1.1	光伝送型監視装置による観測結果	17
5.1.2	光伝送型監視装置による観測結果と宇宙線観測との関連	18
5.2	連続通電盤による観測	19
5.2.1	連続通電盤の概要	19
5.2.2	宇宙線検出の有無に着目した観測及び観測結果	20
5.2.3	電圧上昇を引き起こす宇宙線現象に関する推定	27

6.	宇宙線による単一検出の発生防止に向けた検討	36
6.1	宇宙線による臨界警報吹鳴の可能性に関する検討	36
6.2	宇宙線による単一検出や臨界警報の発生防止策	36
6.2.1	宇宙線による単一検出の発生防止策	37
6.2.2	宇宙線による臨界警報の発生防止策	37
7.	まとめ	38
	参考文献	39
	付録 連続通電盤における単一検出の発生頻度(H18.10.16 現在)	40

Contents

1.	Introduction	1
2.	Criticality Accident Alarm System	2
2.1	Criticality Accident Alarm System	2
2.1.1	The Configuration of Criticality Accident Alarm System	2
2.1.2	The Postulated Accident in Criticality Accident Alarm System	5
2.1.3	The Reliability Assessment of Criticality Accident Alarm System	5
2.2	Prevention Measures against "Single Detection" of the Homegrown Criticality Accident Alarm System	5
3.	Cosmic Ray	9
3.1	Cosmic Ray	9
3.1.1	Primary Cosmic Rays and Secondary Cosmic Rays	9
3.1.2	Soft Component and Hard Component	10
3.2	Phenomenon of Cosmic Rays	10
3.2.1	Air Shower	10
3.2.2	Electromagnetic Cascade Shower	10
3.2.3	The Production of Electromagnetic Cascade Shower and Muon in the Atmosphere	11
3.3	Cosmic Ray Detectors	11
3.3.1	Types of Cosmic Ray Detectors	11
3.3.2	Examples of Cosmic Ray Detectors using Plastic Scintillation Detector	12
4.	The Relationship between Occurrence of "Single Detection" and Detection of Cosmic Rays	13
4.1	The Frequency of Occurrence of "Single Detection"	14
4.2	Installation Sites of Detectors which generated "Single Detection"	14
4.3	The Occurrence Time of "Single Detection"	15
4.4	Operating Conditions of other Radiation Monitors in the Occurrence Time of "Single Detection"	15
5.	The Long-term Observation with Detectors for Criticality Accident Alarm System	17
5.1	The Observation with the Optical Transmission Type Monitoring System	17
5.1.1	The Results of Observation with Optical Transmission Type Monitoring System	17
5.1.2	The Relationship between the Results of the Observation with the Optical Transmission Type Monitoring System and the Detection of Cosmic Rays	18
5.2	The Observation with the Continuous Current Equipment	19

5.2.1	The Continuous Current Equipment	19
5.2.2	The Result of the Observation focused on the Detection of Cosmic Ray	20
5.2.3	Inference concerning the Phenomenon of Cosmic Rays causing Voltage Rises	27
6.	Investigation of Prevention Measures against “Single Detection”	36
6.1	Investigation concerning the Possibility of the Critical Alarm caused by Cosmic Ray	36
6.2	Prevention Measures against the occurrence of “Single Detection” and the Critical Alarm caused by Cosmic Ray	36
6.2.1	Prevention Measures against the occurrence of “Single Detection” caused by Cosmic Ray	37
6.2.2	Prevention Measures against occurrence of the Critical Alarm caused by Cosmic Ray	37
7.	Conclusion	38
	Reference	39
Appendix :	The Frequency of the Occurrence of “Single Detection” on the Continuous Current Equipment (at the date of October 16, 2006)	40

図 目 次

図 2-1 臨界警報装置ブロックダイアグラム	3
図 2-2 臨界警報装置の検出部の設置例	3
図 2-3 検出器出力の概念図	4
図 2-4 シールド対策後のプルボックス	6
図 2-5 シールド対策前後の検出器出力の変化	6
図 2-6 電源ノイズ対策前後の検出器出力の変化	7
図 3-1 1次宇宙線の飛来と2次宇宙線の発生の概念図	9
図 3-2 空気シャワーの発生の様子	11
図 4-1 単一検出に関する要因解析結果	13
図 4-2 宇宙線を計測した場合の検出器出力の概念図	16
図 5-1a 光伝送型監視装置で捉えた単一検出発生時の検出器出力①	17
図 5-1b 光伝送型監視装置で捉えた単一検出発生時の検出器出力②	18
図 5-2 連続通電盤における検出器の配置	19
図 5-3a “ノイズを検出したと思われる電圧変動”の観測例	20
図 5-3b “シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”の観測例	21
図 5-4 上昇幅の異なる“シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”	22
図 5-5 電圧変動が観測された時間帯とその割合	22
図 5-6 検出器出力の電圧上昇幅と観測頻度の相関	23
図 5-7 Pu3 で観測された検出器出力の上昇事例	26
図 5-8a 著しい電圧上昇の観測事例 （全体的に高い電圧上昇が観測されるパターン）	27
図 5-8b 著しい電圧上昇の観測事例 （1台の検出器で著しく高い値を示すパターン）	28
図 5-9 μ 粒子の観測頻度の推定に関する概念図	30
図 5-10 電磁カスケードシャワー中の電子／光子の発達の様子（概念図）	32
図 5-11 高エネルギー粒子又は電磁カスケードシャワーの通過に伴う検出器出力パターン	33
図 5-12 建屋内での電磁カスケードシャワーの発生の様子	35

表 目 次

表 2-1 核燃料サイクル工学研究所内に設置された臨界警報装置の系統数 (平成 18 年 1 月現在)	2
表 4-1 単一検出の施設ごとの発生回数	14
表 4-2 単一検出の検出器設置場所ごとの発生頻度	15
表 4-3 単一検出の発生時間帯	15
表 5-1 電圧上昇が 0.1V 以上の観測事例における同時観測の頻度	24
表 5-2 電圧上昇幅ごとの同時観測回数	24
表 5-3a 検出器①及び検出器②との同時観測事例に関与した確率 (4 台の検出器の間の同時観測事例を含む場合)	25
表 5-3b 検出器①及び検出器②との同時観測事例に関与した確率 (4 台の検出器の間の同時観測を含まない事例に限った場合)	25
表 5-4 鉛直方向に並んだ 3 台の検出器における検出器出力パターン	33

1. 緒 言

核燃料サイクル工学研究所の再処理施設や MOX 燃料製造施設等には臨界警報装置が設置されており、その検出端は 6 施設で 35 系統（1 系統につき検出器 3 台：計 105 台）が配置されている。

約 20 年間の臨界警報装置の運用において、これまで警報設定値が比較的低い検出器（測定対称： γ 線）に限って、単一検出^{*}が年に数回発生しており、その都度、現場状況（施設の運転状況、他の放射線モニタの指示値変動、現場でのノイズ発生の可能性の有無など）を確認し、原因究明を行っている。その結果、単一検出発生事例のうちの数件は、現場機器から発生する電磁波の影響を受けたことが確認されており、その対策として、信号系にノイズが入り込まないようにケーブルルート（電線管、プルボックス）の電磁シールドを強化するとともに、電源系からのノイズの回り込みを防止するためのノイズカットトランスを設置することによって対応してきた。

しかし、上記のような対策を施した後でも、頻度は少ないものの単一検出が発生しているため、放射線計測器のバックグラウンドの 1 つである“宇宙線の影響”に着目し、臨界警報装置の検出器（以下、臨界検出器または検出器という）による宇宙線の検出の可能性について検討したうえで、保守用（予備品）の臨界検出器を用いた長期観測を行い、単一検出の発生と宇宙線の飛来との関連を調査した。

なお、本報告書で述べる内容は、2006 年 3 月 24～26 日に日本原子力研究開発機構大洗研究開発センターにて開催された日本原子力学会「2006 年春の年会」において報告されている。

*検出端を構成する 3 台の検出器のうち 1 台の検出器のみで警報設定値を超えるか、又は、1 台の検出器出力が著しく低下する事象

2. 臨界警報装置について

2.1 臨界警報装置とは

臨界警報装置は、万一施設内で臨界事故が発生した場合に、臨界事象の発生を検知するとともに、施設内の従業員を退避させるための装置である。平成 18 年 1 月の時点で、核燃料サイクル工学研究所内には 35 系統の検出端（検出端 1 系統につき 3 台の検出器を使用）が設置されている。その内訳を表 2-1 に示す。

表 2-1 核燃料サイクル工学研究所内に設置された臨界警報装置の系統数
(平成 18 年 1 月現在)

施設名		系統数
再処理施設	分離精製工場 (MP)	4 系統*
	プルトニウム転換技術開発施設 (Pu-CON)	8 系統
核燃料物質 使用施設	プルトニウム燃料第一開発室 (Pu1)	2 系統
	プルトニウム燃料第二開発室 (Pu2)	6 系統
	プルトニウム燃料第三開発室 (Pu3)	14 系統
	高レベル放射性物質研究施設 (CPF)	1 系統

* 分離精製工場に設置されている検出器は 4 系統のうち 1 系統は中性子検出器。

日本原子力研究開発機構の核燃料サイクル工学研究所（動力炉・核燃料開発事業団及び核燃料サイクル開発機構時代を含む）では、昭和 40 年に初めて Pu1 に臨界警報装置が設置されて以来、外国製のものを含む数種類の臨界警報装置を使用してきた。しかし、昭和 55 年及び昭和 56 年に再処理施設に設置された臨界警報装置（フランス製）で誤警報が発生したことなどから、その後、より信頼性の高い国産の臨界警報装置を開発しており、現在、核燃料サイクル工学研究所では、この国産の臨界警報装置を使用している。

2.1.1 臨界警報装置の構成

臨界警報装置は主に検出部、判定部及び警報部から構成されており、信頼性向上の観点から各部に誤警報発生防止や監視機能喪失防止の対策が施されている。図 2-1 に臨界警報装置プロックダイアグラムを示す。

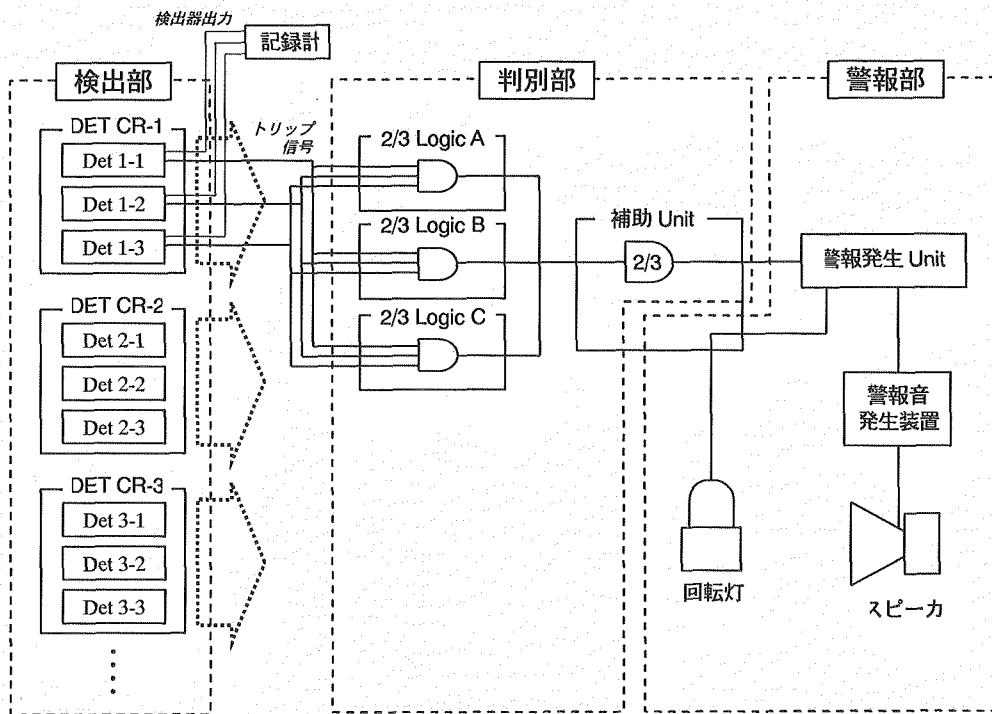


図 2-1 臨界警報装置ブロックダイアグラム

1) 検出部

検出部は、2 out of 3 論理を適用するため、1 系統につき 3 つの検出器で構成されている。検出器はあらかじめ設定された値を超えた場合にトリップ信号を出力するようになっている。また、検出器の配置設計では、臨界時の放射線を確実に検知し、かつ、核燃料物質の運搬による線量率の上昇による誤警報の発生を防止するため、検出器間は原則 2m 程度の間隔を保たせて設置するようにしている。図 2-2 に臨界警報装置の検出部の設置例を示す。

検出器には γ 線用の検出器を使用しているが、 γ 線の遮へいにより臨界事故の検知が困難な場所やバックグラウンドとしての γ 線の線量率が高い場所では中性子線用の検出器を使用している。

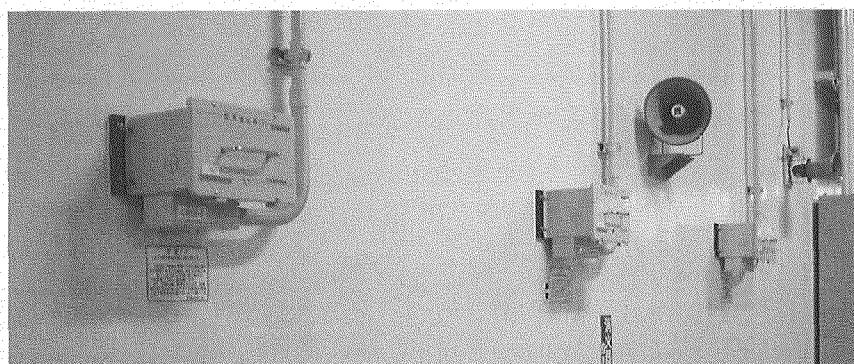


図 2-2 臨界警報装置の検出部の設置例

γ 線用の検出器は、臨界事象に伴う瞬間的な γ 線線量率の変動を確実にとらえることができるよう、応答速度の速いプラスチックシンチレーション式（ γ 線によってプラスチックシンチレータが発した光を光電子増倍管が電気信号に変換する方式）を採用するとともに、信号処理では、放射線パルスを計数するタイプ（計数率計タイプ）ではなく、検出器出力（アナログ出力電圧値：1~5V）の電位変動を監視するタイプ（電位計タイプ）を採用している。なお、臨界検出器の回路上の時定数は、臨界事象の最小継続時間を考慮し、約1msに設定している。図2-3に検出器出力の概念図を示す。

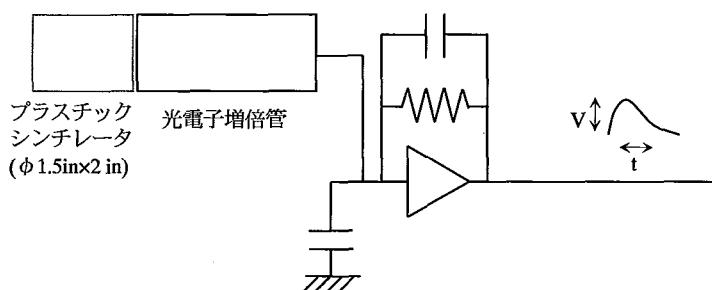


図2-3 検出器出力の概念図

検出器出力がトリップレベルを超えた場合に、判別部にトリップ信号が送られる。また、検出器の健全性確認の観点から発光ダイオード（LED）を用いた点検機構や高電圧回路部の故障監視機構（検出器出力が下がった場合にもトリップ信号が出力される機構）が内蔵されている。

2) 判別部

判別部は、検出部からのトリップ信号を受け、臨界事故の発生に関する判別を行う部分であり、2/3論理回路と補助ユニットで構成されている。

2/3論理回路は論理回路自体の故障を考慮し、検出器と同様に3台1組で使用される。2/3論理回路では、3台1組で設置されている検出器のうち、2台以上の検出器から0.5秒以内にトリップ信号が論理回路に入力されたときにのみ補助ユニットへと信号を出力するよう設計されている。

補助ユニットでは、さらに、3台1組で使用されている2/3論理回路のうち2つ以上の2/3論理回路から信号を受けた際に、警報部へ信号を出力する。

3) 警報部

警報部は判別部からの出力信号を基に、音系（スピーカ）と光系（回転灯）にそれぞれ信号を送り、動作させる部分である。

判別部の補助ユニットの出力信号は、まず、警報発生ユニットに入力される。警報発生ユニットからは、音系の信号が警報音発生装置へ送られ、光系は警報発生ユニットから補助ユニットを通して回転灯に起動信号が送られる。警報音発生装置は基本周波数が1kHz、変

調周波数が 4 Hz の警報音をスピーカから発生させる。

4) その他の構成部

臨界警報装置のその他の構成部としては、点検部や電源部があり、それぞれ健全性確認や信頼性の向上に関して配慮されている。

点検部では、臨界警報装置の主要部分である検出器、2/3 論理回路、補助ユニット、警報発生ユニットの系統的な健全性確認が容易に行える設計になっている。また、電源部では2/3 論理設計を満たすべく、主要構成機器の電源はそれぞれ独立に設け、並列冗長設計としている。

2.1.2 臨界警報装置設計上の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は、総核分裂数が $10^{15} \sim 10^{19}$ fissions、初期ピークの核分裂数が $10^{14} \sim 10^{17}$ fissions、初期ピークの持続時間を 0.1~3ms、臨界事故の最大持続時間を 20s としている¹⁾。

2.1.3 臨界警報装置の信頼性評価

臨界警報装置の信頼性は、海外の例を参考として、平均故障間隔（MTBF）を 3×10^6 時間（目標値）として設計されている。実際には、平均復旧時間（MTTR）を 13 時間とし、MTBF を 25°C（常温）として求めると、 6.3×10^6 時間となる¹⁾。

2.2 国産型臨界警報装置の運用後における单一検出の発生防止策

主にプルトニウム燃料製造施設（Pu1、Pu2、Pu3）において、装置の誤警報ではないが、单一検出が年に数回の頻度で発生している。先に述べたように、臨界警報装置は 2 out of 3 論理を適用しているため、单一検出が誤警報になることはないが、発生要因によっては誤警報の発生に繋がる可能性があるため、原因を明らかにしておく必要があった。

单一検出が発生した際には、その都度、施設の運転状況などの情報を入手するとともに、臨界警報装置の健全性を確認し、单一検出の発生原因を調査しているが、一過性の事象であり、全てを究明することは困難な状況にある。これまでに单一検出の発生要因として特定できた事象には“現場での高周波シーラの使用による電磁ノイズ”及び“検出器出力の低下”があり、以下のよう対策を実施した。

1) ケーブルルートからの電磁波の混入防止（シールド対策）

過去の原因調査により、臨界警報装置用のケーブル配管（電線管）の途中にあるプルボックス（ケーブル敷設用ボックス）から、高周波シーラ等の使用時に発生する電磁波ノイズが混入することが確認された。電磁波の混入が確認されたプルボックスでは、施工方法に問題が確認された（電線管とプルボックスが電気的に絶縁され、プルボックスの蓋に隙間が生じていた）ため、プルボックスのシールド強化を行った。具体的には、電線管とプルボックス管の電気的シールドを強化するとともに、プルボックスの蓋に折り曲げ加工を施し物

理的に隙間を埋めた。図 2-4 にシールド対策後のプルボックスを示す。

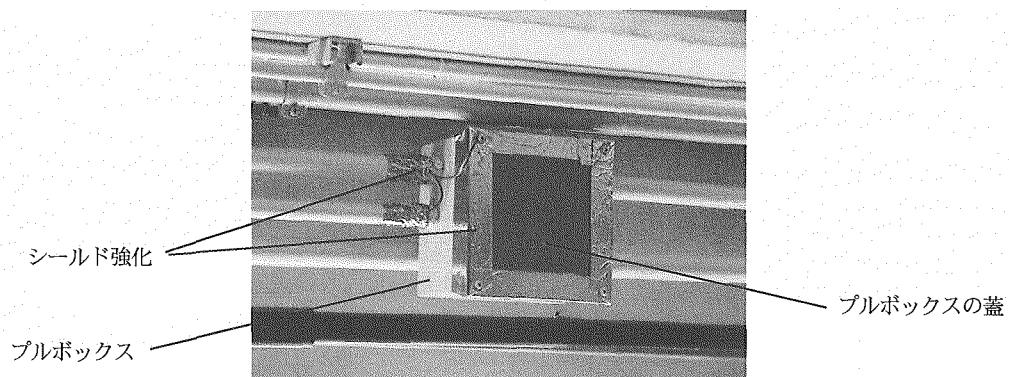
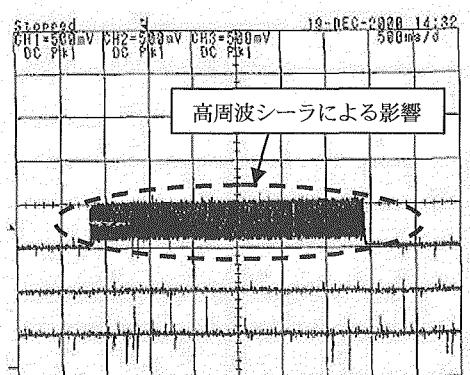
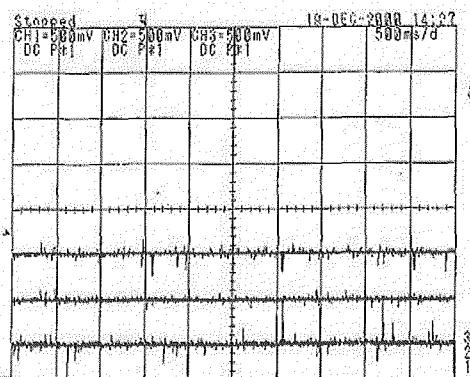


図 2-4 シールド対策後のプルボックス

シールド対策後は、高周波シーラを用いた試験を行い、ノイズの影響が低減されたことを確認した。図 2-5 にシールド対策前後の検出器出力の変化を示す。



対策前の検出器出力



対策後の検出器出力

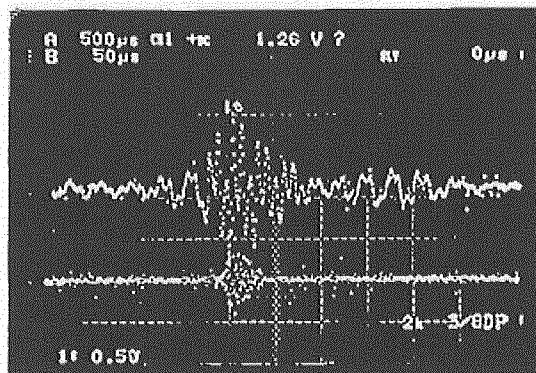
図 2-5 シールド対策前後の検出器出力の変化

また、万一、高周波シーラの使用時に電磁波が臨界警報装置のケーブルルートに混入することを想定し、信号ケーブルが同一配管内に収納されていたものについて、分離する工事を実施した。さらに、臨界警報装置の検出器や信号ケーブルルート付近で電磁波が発生するような作業を行う場合には、事前に施設内の核物質の移動を停止したうえで、臨界警報装置を停止する措置（ソフト対策）を行うようにした。

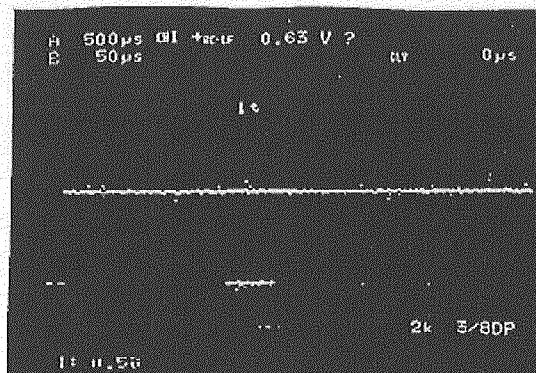
2) 電源のノイズの影響低減

平成2年11月にPu3で現場調査を行ったところ、臨界警報装置の無停電電源（インバータ給電）を通じて検出器出力へノイズが混入していることを確認した。また、臨界警報装置と同室内に設置されている工程用計算機のケーブル類と臨界警報装置のケーブル類がフリーアクセスフロア内で混在し、さらに、アースが共有化されていることが分かった。このため、臨界警報装置に影響を与える可能性を考慮して、予防措置の観点から、無停電電源にノイズカットトランスを付加するとともに、フリーアクセスフロア内のケーブル配線を整理し、アースを工程用計算機と分離した。

これらの対策により、無停電電源のノイズが検出器出力へ混入するのを低減させた。図2-6に電源ノイズ対策前後の検出器出力の変化を示す。



対策前の検出器出力



対策後の検出器出力

図2-6 電源ノイズ対策前後の検出器出力の変化

3) 検出器内ブリーダ抵抗の定期的な交換

検出器内のブリーダ抵抗が断線し、検出器出力が低下することにより単一検出が発生したことがこれまでに数件確認されている。これは、フェイルセーフ（故障した場合に安全側の状態になること）の考えに基づき、検出器の故障によって 2 out of 3 での監視ができないくなる期間を短くするために、単一検出を発生させて知らせるものである。なお、1台の検出器が故障した場合であっても、2 out of 2 による監視が行われ、臨界監視は継続される設計となっている。

ブリーダ抵抗の断線による単一検出が発生した以降、予防保全としてブリーダ抵抗、可変抵抗、電解コンデンサ、リレー等の部品の定期的な交換を実施するようになった。

3. 宇宙線について

3.1 宇宙線とは

宇宙線は、大きく分けて1次宇宙線と2次宇宙線に分類できる。1次宇宙線とは光速に近い速度で宇宙空間を飛び交う粒子のことをいう。1次宇宙線が地球に飛来する際には、大気中の原子核と相互作用を起こすことによって、中間子や電子などの2次粒子を発生させる。この2次粒子を総称して2次宇宙線と呼ぶ。また、エネルギーの高い1次宇宙線が大気に突入すると、大気中で大規模な2次宇宙線の粒子群が発生することになり、この2次粒子の発生の様子がシャワーのように見えることから、この現象を空気シャワーと呼んでいる。図3-1に1次宇宙線の飛来と2次宇宙線の発生の概念図を示す。

地上に到達する宇宙線としては、1次宇宙線がそのままの状態で地上に到達することはないと認め、ほとんどが2次宇宙線と考えてよい。

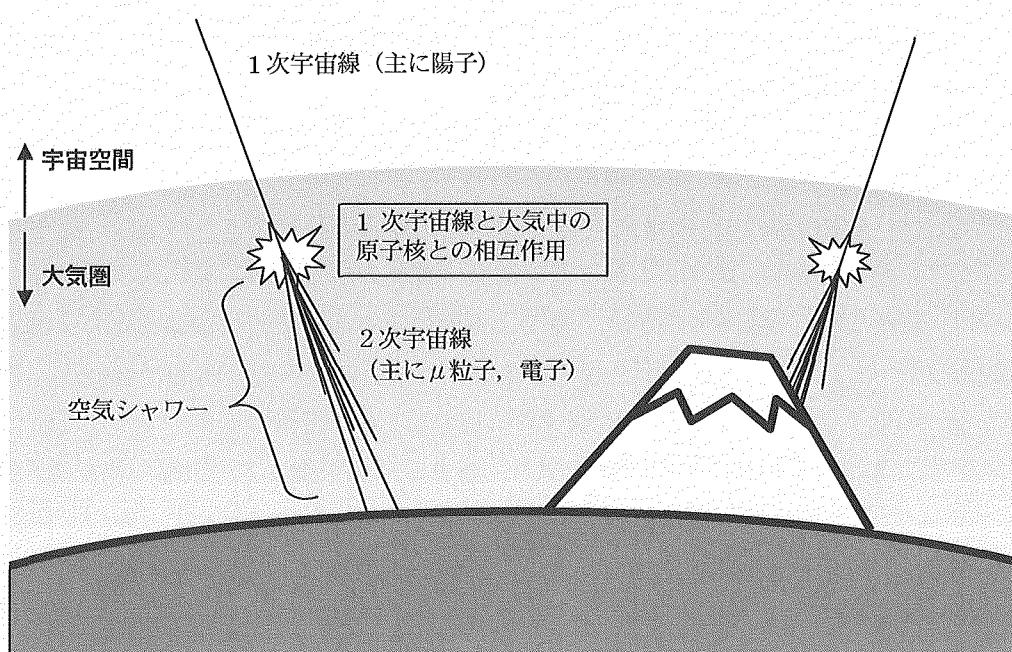


図3-1 1次宇宙線の飛来と2次宇宙線の発生の概念図

3.1.1 1次宇宙線と2次宇宙線

1次宇宙線の大部分は裸の原子核であり、さらに原子核のうちのほとんどは陽子で、重い核は1%程度にすぎない²⁾。1次宇宙線のエネルギー範囲は広く、現在では 10^{20}eV を超えるものが観測されている。1次宇宙線のエネルギースペクトルの全体的な傾向として、 $10^{10}\text{eV} \sim 10^{20}\text{eV}$ 程度までは1次宇宙線エネルギーが大きくなるに連れて粒子数がべき乗にしたがつて減少することが知られている³⁾。

2次宇宙線は1次宇宙線が大気中の原子核と相互作用を起こすことによって発生するものであり、主な2次宇宙線の種類としては、中間子、 μ 粒子、電子、光子などがある。大気中で発生したこれらの2次宇宙線はさらに相互作用を起こしたり、大気中に吸収されたりするため、高度によって成分や飛来本数が異なってくる。地上付近にまで到達する2次宇宙線の本数は、毎分 1cm^2 あたり約1本であり、二次宇宙線の荷電粒子のうちの約3/4を μ 粒子が占めている⁴⁾。

3.1.2 軟成分と硬成分

地上に飛来する宇宙線は大気中の相互作用により様々な粒子の束となっている。これらの宇宙線を大きく分けると、物質に比較的吸収されやすい成分（軟成分）となかなか物質に吸収されにくい成分（硬成分）に分類でき、軟成分は鉛 10cm 程度で吸収される⁵⁾。軟成分の代表的なものには電子や光子があり、硬成分の代表的なものに μ 粒子や高エネルギーhadron^{*}がある。

3.2 宇宙線の現象

宇宙線は空気中や物質中でさまざまな相互作用を引き起こす。その代表的なものとして、空気シャワーと電磁カスケードシャワーがある。

3.2.1 空気シャワー

1本の1次宇宙線が大気中の原子核と相互作用を引き起こすことによって発生した中間子、 μ 粒子、電子、光子、陽子、中性子などの粒子群を空気シャワーといふ。空気シャワー中の粒子は、新たな相互作用を引き起こしたり、寿命により他の物質に崩壊したり、電磁カスケードシャワー（3.2.2に示す）を引き起こしたりすることによって一時的に増殖し、その後、エネルギーの低下とともに大気中に吸収されていく。1次宇宙線のエネルギーが非常に高いと、大気中で引き起こす相互作用の回数が増え、地上に到達する2次宇宙線の数が多くなる。

空気シャワーの広がりは、1次宇宙線の種類やエネルギー、大気中の相互作用の条件などによって異なるが、地上での広がりの大きいもので数百メートル以上にもなる。空気シャワーを構成する粒子の中で大きく広がる成分としては、空気シャワー中に発生した電磁カスケードシャワー成分（電子及び光子）や μ 粒子が主であり、エネルギーの高い粒子ほど空気シャワーの中心に集まる傾向がある。一方、空気シャワーの中心部にはhadronの芯が存在し、このhadronの芯の広がりは通常は地上付近でも数メートル程度である³⁾。

3.2.2 電磁カスケードシャワー

エネルギーの高い電子は、物質中（大気中、金属中）で制動放射により光子をつくり、また、光子は電子対生成により電子と陽電子をつくる。電子や光子のエネルギーが非常に高い場合、

* hadronとはクオークとグルーオンで構成される複合粒子の総称であり、代表的なものに、陽子、中性子、中間子がある

制動放射と電子対生成が交互に起こり、電子と光子が増殖する。この現象を電磁カスケードシャワーと呼ぶ。電磁カスケードシャワー中の電子や光子は、エネルギーが高いときは増殖するが、エネルギーが低下して物質中に吸収されると次第に消滅していく。特に鉛などの原子番号の大きな物質中では、カスケードシャワーは急速に増殖し、急速に吸収される。

3.2.3 空気における電磁カスケードシャワーと μ 粒子の発生

1次宇宙線のエネルギーがある程度高ければ、1次宇宙線の種類によらず空气中で電子カスケードシャワーが発生する。これは、1次宇宙線が大気中の原子核と相互作用を起こした際に発生する π 中間子のうち、 π^0 中間子が直ちに（約 10^{-15} 秒後に）2つの光子に崩壊し、その光子が起因となってカスケードシャワーが発達するためである。発生する π 中間子のうち、 π^\pm 中間子については、 μ 粒子とニュートリノに崩壊する。

1次宇宙線が光子であった場合には、 π 中間子の発生が伴わないとから μ 粒子は発生せず、電磁カスケードシャワーのみが発達する^⑨。図3-2に空気シャワーの発生の様子を示す。

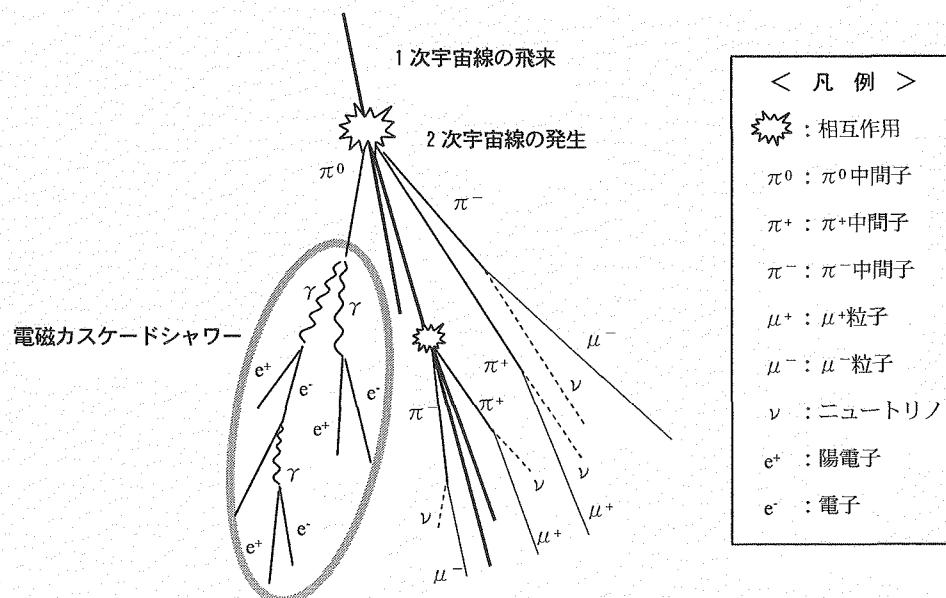


図3-2 空気シャワーの発生の様子

3.3 宇宙線の観測装置

宇宙線を観測する装置には様々な原理のものがあり、観測対象となる宇宙線の種類や宇宙線の現象などによって観測手法が異なる。

3.3.1 主な宇宙線観測装置の種類

宇宙線を検出できる装置を大きく二つに分類すると、“電気信号として処理するタイプ”と“宇宙線の飛跡をとらえるタイプ”がある。前者にはGM計数管やチエレンコフカウンターのように飛来数を計数するものや、電離箱、比例計数管、シンチレーションカウンタ、半導体

検出器のように飛来数に加えてエネルギー情報も得られるものがある。また、後者には、ウィルソン霧箱やスパークチェンバーのように宇宙線の飛跡を瞬間的に観測するものや、原子核乾板や固体飛跡検出器のように、長期間設置しその間に残された宇宙線による飛跡を観測するものがある。

3.3.2 プラスチックシンチレータを用いた宇宙線観測装置の例

宇宙線観測においては、大面積の検出面を要し、瞬間的な反応を検知することが要求されるため、安価で加工がしやすく、かつ、応答速度の速い“プラスチックシンチレータ”が幅広く用いられている。

プラスチックシンチレーション検出器を用いた宇宙線観測装置の代表的なものに空気シャワー観測装置（Air Shower Array）がある。空気シャワー観測装置はプラスチックシンチレータを用いた検出器を複数配置したもので、検出器の出力信号を処理することで空気シャワーの飛来方向や空気シャワーの発生源となった1次宇宙線のエネルギーなどを推定することができる。

4. 過去の単一検出の発生状況と宇宙線検出との関連

平成元年4月から平成18年1月までの期間に单一検出は53件発生しており、発生の都度、現場調査等を行うとともに発生要因を追求してきた。しかし、現場機器からの電磁波の影響など原因が特定されている事例があるものの、单一検出が一過性のものであり頻度も少ないとから原因究明が困難な状況にあった。図4-1に原因が特定されていない单一検出（以下、本書では、“单一検出”と記す）に関する要因解析結果（FTA）を示す。

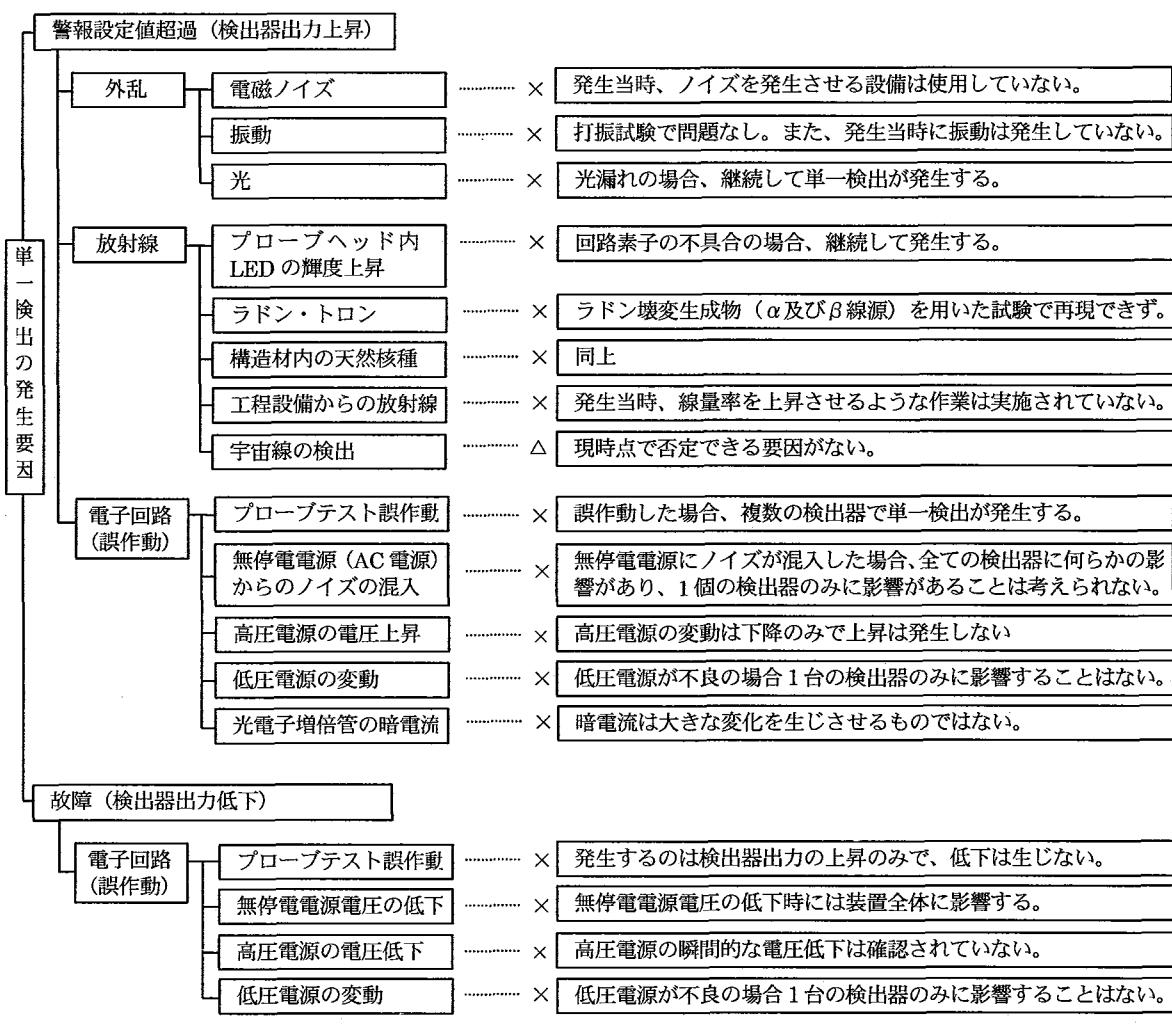


図4-1 単一検出に関する要因解析結果

要因解析結果において单一検出の原因となっている可能性が否定できない“宇宙線の検出”について、原因となっている可能性を追求するため、原因が特定されていない单一検出の発生事例に限って宇宙線の性質に着目した解析を行った。

4.1 施設ごとの単一検出の発生回数

施設ごとの単一検出の発生回数を集計すると、臨界警報装置の警報設定値の低い施設（Pu1, Pu2, Pu3）で発生回数が多いことが分かる。表 4-1 に単一検出の施設ごとの発生回数を示す。

表 4-1 単一検出の施設ごとの発生回数

施設	警報設定値 ^{*1} (V)	検出器数 ^{*2} (個)	発生回数 (回)	発生頻度 ^{*3} (回/検出器)
MP	2.84	9	0	0.000
Pu-CON	2.69	24	1	0.042
CPF	3.99	3	0	0.000
Pu1	2.12	6	9	1.500
Pu2	2.12	18	15	0.833
Pu3	2.12	42	20	0.476

*1 LED 発光（健全性確認のため）に伴う上昇分（約 1.4V）を含む

*2 γ 線用検出器（プラスチックシンチレーション式）のみの数を示す

3.1.1 に述べたように、1 次宇宙線はエネルギーが高くなるにつれて飛来数がべき乗に従って減少する傾向にある。また、1 次宇宙線のエネルギーが高いほど大気中で多くの2次宇宙線を発生させるとともに、2次宇宙線の中に存在する粒子のエネルギーも大きくなる。一方で、シンチレータの性質として、放射線のエネルギーが高い場合にはエネルギー損失と蛍光量が大体比例する⁷⁾ことから、2次宇宙線のエネルギーに比例した検出器出力を得ているとすれば、1 次宇宙線と臨界警報装置の検出器出力には相関があると考えられる。

よって、1 次宇宙線のエネルギースペクトルを考慮すると、警報設定値が高い施設ほど単一検出が発生しにくくなる、つまり、警報設定値が低い施設で単一検出が発生しやすいことが説明でき、宇宙線の飛来との関連を推定することができる。

4.2 単一検出が発生した検出器の設置場所

単一検出の発生数が多いプルトニウム燃料施設に限定し、検出器の設置場所に着目した単一検出の発生数を確認した。その結果、最上階に設置された検出器や建屋の外周付近に設置された検出器で単一検出の発生数が多くなる傾向があることが分かった。表 4-2 に検出器の設置場所と単一検出の発生頻度を示す。

この検出器の設置位置による単一検出の発生頻度の相違は、3.1.2 に示した宇宙線の軟成分と硬成分の影響が出ていると考えることができる。宇宙線の軟成分（電子、光子、低エネルギーのハドロンなど）は鉛 10 cm 程度（普通コンクリート換算で 50 cm 程度）で大部分が遮へいされるが、硬成分（高エネルギーハドロン、 μ 粒子など）はコンクリート 50 cm 程度であれば大部分が通過する。この条件を実際の施設に当てはめてみると、建屋の天井や床の厚さが 20~30 cm 程度であることから、軟成分が施設の最上階や外壁付近に設置された検出器のみに影響

表 4-2 単一検出の検出器設置場所ごとの発生頻度

設置場所	発生頻度 (回／検出器数)	検出器 1 台の 最大発生数
最上階	1.556 (14/9)	6 回
外周付近	1.083 (13/12)	4 回
その他	0.172 (17/99)	2 回

することが説明できる。

よって、表 4-2 に示した結果が宇宙線の軟成分／硬成分の影響であると考えれば、宇宙線との関連を推定することができる。

4.3 単一検出の発生時間帯

単一検出（臨界警報装置の警報設定値が等しい施設である Pu1, Pu2 及び Pu3 で発生したもののみ）について発生時間帯を整理すると、時間帯に際立った偏りがないことが分かる。表 4-3 に単一検出の発生時間帯を示す。

表 4-3 単一検出の発生時間帯

時間帯	回数	時間帯	回数	時間帯	回数
0:00～1:00	0	8:00～9:00	1	16:00～17:00	0
1:00～2:00	3	9:00～10:00	2	17:00～18:00	2
2:00～3:00	1	10:00～11:00	2	18:00～19:00	1
3:00～4:00	1	11:00～12:00	3	19:00～20:00	0
4:00～5:00	1	12:00～13:00	1	20:00～21:00	1
5:00～6:00	1	13:00～14:00	2	21:00～22:00	1
6:00～7:00	1	14:00～15:00	2	22:00～23:00	2
7:00～8:00	3	15:00～16:00	0	23:00～24:00	3

超高エネルギー宇宙線の飛来源に関する詳細については宇宙線研究者の間で研究中ではあるものの、現在考えられている発生源には地球上での飛来の時間帯に影響する要素はない。よって、単一検出の発生時間帯の観点からは、施設の運転状況との関連はなく、単一検出と宇宙線との関連は否定できないことが分かる。

4.4 単一検出発生時における他の放射線管理モニタの動作状況

単一検出が発生した際には、モニタの健全性確認等の意味で必ず他の放射線管理モニタの動作状況も確認する。施設内に設置されている連続監視用の放射線管理モニタには、エリアモニタ（線量率の監視用）、ダストモニタ（空気中放射性物質濃度の監視用）、排気モニタ（排気中放射性物質濃度の監視用）がある。しかし、原因が特定されていない単一検出の発生時には、

これまでいずれの放射線管理モニタにも指示値変動が確認されていない。

先にも述べたとおり、地上に飛来する宇宙線は、空気シャワーとなってある程度広がりを持って飛来するため、単一検出の発生が宇宙線に起因するもの仮定すると、複数の検出器で同時に宇宙線を検出する可能性は否定できない。そこで放射線管理モニタの宇宙線感度について検討した。

放射線管理モニタは様々な原理で空間の線量率や捕集試料中の放射能を計測するが、信号処理上では原理的に計数率計タイプ（放射線計測パルスの数を数えるタイプ）と電位計タイプ（電圧又は電流の変動幅を監視するタイプ）に大別される。これを現場に設置されている放射線管理モニタに当てはめると、臨界警報装置以外は全てが計数率計タイプである。

放射線検出器が地上付近で宇宙線を検出した場合、瞬間に複数の宇宙線を検出する（空気シャワーを検出する）ことから、1つの大きなパルスとなって現れると考えられる。この場合、電位計タイプである臨界警報装置では、検出器出力として瞬間的な電圧変動が確認され、特に、プラスチックシンチレータへのエネルギー付与が大きいほど検出器出力に大きな影響が現れると考えられる。しかし、計数率計タイプの放射線管理モニタの場合は、放射線計測パルスの波高が高かったとしても1カウントとして処理されるため、計数値に大きな変動が生じない。図4-2に宇宙線を計測した場合の検出器出力の概念図を示す。

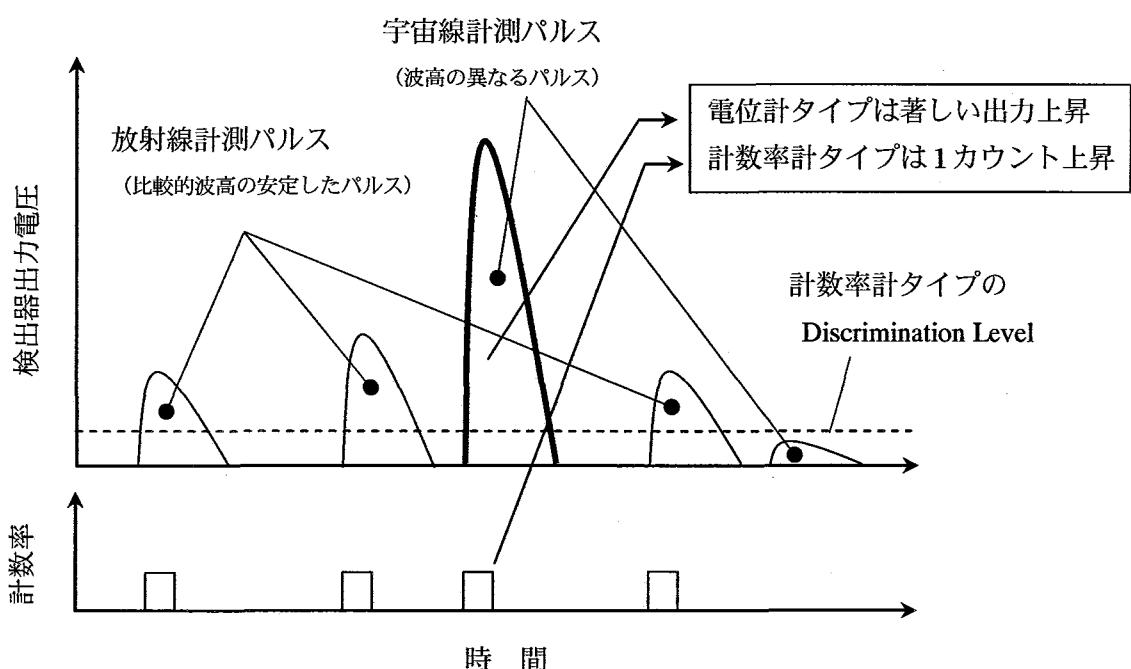


図4-2 宇宙線を計測した場合の検出器出力の概念図

臨界警報装置は電位計タイプであり、また、臨界事故時の初期バーストの検知にも対応させるため電位計タイプの放射線計測器としては時定数が短くなっていることから、特に宇宙線検出の影響が大きく出やすくなっていると考えられる。よって、放射線計測上からも宇宙線と単一検出の関連を推定することができる。

5. 臨界警報装置用検出器を用いた長期観測

これまでの単一検出の発生状況を整理すると、単一検出の発生と宇宙線の飛来の関連が否定できず、むしろ、その可能性を示唆するいくつかの事実が確認できることが分かる。

一方で、放射線計測においては、シンチレーション検出器のバックグラウンドとして宇宙線の影響があることが知られているが⁸⁾、原子力施設の放射線管理用設備に与える宇宙線の影響については、詳細が明らかにされていない。

そこで、臨界警報装置の検出器を用い、検出器出力を長期的に観測し、検出器出力の変動事例を把握するとともに、その結果から単一検出の要因が宇宙線となっている可能性を追求した。

5.1 光伝送型監視装置による観測

平成8年に単一検出発生時における検出器出力の変動データを採取するため、Pu3の2階（単一検出の発生頻度が高い場所）に光伝送型監視装置を設置し、検出器出力を監視した。本装置は、臨界警報装置の検出部・判別部の構成を模擬したもの（検出器やモジュールは臨界警報装置に使用しているものを利用）で、検出器（臨界検出器と同じもの）から監視盤までの間の信号ケーブルにノイズが混入しないよう、従来のメタルケーブルから光ケーブルに変更するとともに、監視盤において検出器出力の上昇時の波形データが蓄えられるように設計されたものである。また、検出器の警報設定値は単一検出が発生しやすいように、プルトニウム燃料施設における従来の設定値（約0.87mGy/h相当）以下に設定し、検出器3台の設定値は、検出器1で約0.87mGy/h相当、検出器2で約0.70mGy/h相当、検出器3で約0.41mGy/h相当とした。

5.1.1 光伝送型監視装置による観測結果

約1年間の観測期間において、2回の単一検出が発生し、発生時の検出器出力データ（電圧値）を採取した。図5-1a及び図5-1bに光伝送型監視装置で捉えた単一検出発生時の検出器出力を示す。

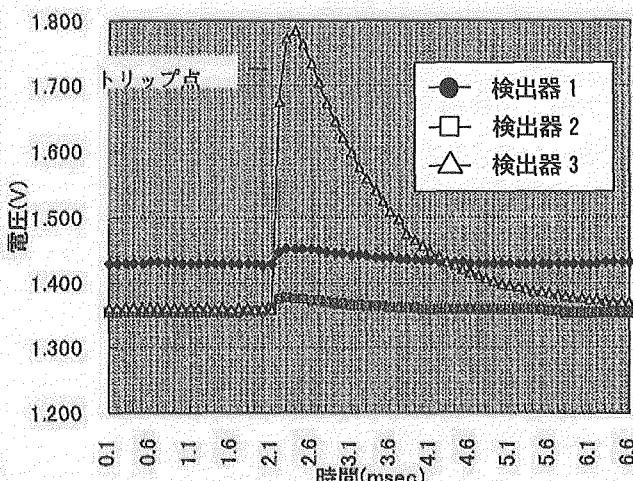


図 5-1a 光伝送型監視装置で捉えた単一検出発生時の検出器出力①

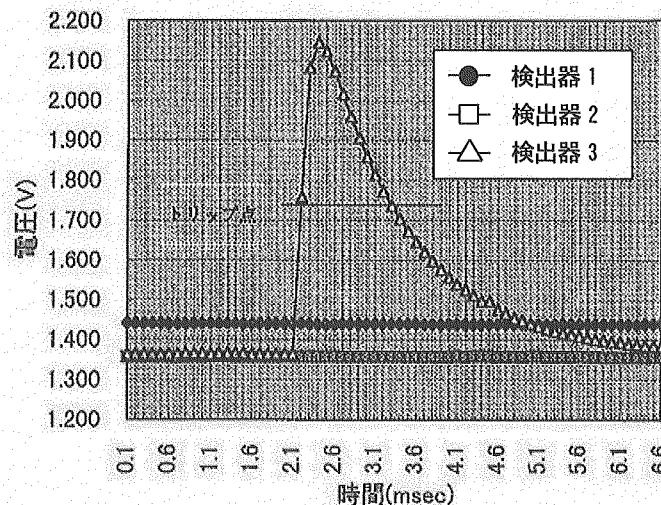


図 5-1b 光伝送型監視装置で捉えた単一検出発生時の検出器出力②

観測結果から得られた事項は以下のとおりである。

- ・ 単一検出が発生したのはいずれも警報設定値が一番低い検出器 3 であった。
- ・ 単一検出の発生時刻に現場では電磁ノイズを発生する可能性のある作業は行われていなかった。
- ・ 検出器出力の変動（時間的変化）は、2 回ともほぼ同じであった。
- ・ 図 5-1a では、3 つの検出器すべてで検出器出力の上昇が観測された。
- ・ 図 5-1b では、検出器 3 のみで出力の上昇が観測されており、その出力上昇は、 0.87mGy/h に相当する電圧値（約 2.12 V）程度にまで上昇していた。

5.1.2 光伝送型監視装置による観測結果と宇宙線観測との関連

光伝送型監視装置では検出器と監視盤の間の信号ケーブルは光ケーブルであることから信号ケーブルでノイズの影響を受けることが想定できないため、考えられる要因としては、検出器側での作動（放射線等の検出又は検出器回路上のノイズ）と監視盤側の異常（電源系統の異常や点検機能の作動）が考えられる。しかし、単一検出が発生した時間帯においては、現場で作業が行われていないこと、電源系の点検結果から健全性が確認されていること及び検出器を作動させるような機能（点検機能）はオフにしていたことから、臨界検出器自体が何らかの放射線を検出した可能性があると考えられる。

宇宙線の観測が原因となる可能性を追求する際に特に着目すべき点は、どちらのデータでも同じ変動（瞬間的な上昇）が観測されており、また、図 5-1a のデータでは 3 つの検出器で同時刻に検出器出力の変動が記録されているのに対し、図 5-1b のデータでは 1 つの検出器でしか変動が記録されていないことである。本事象については、宇宙線の観測を前提にすれば、異なる性質の空気シャワー（粒子数、粒子の種類、広がり、エネルギーの異なるシャワー）を検

知したと考えれば説明ができる。逆に、電源系の異常の観点からは、各検出器への電源供給は個別に行われていることや、電源系にノイズが生じた場合は特定の検出器に影響する傾向があることを考慮すると、検出器出力の上昇が3台の検出器で観測されたり、1台の検出器だけで観測されたりする可能性は低いと考える。

5.2 連続通電盤による観測

1次宇宙線のエネルギースペクトルを考慮すると、地上付近に飛来する宇宙線のエネルギーは、エネルギーが高くなるにつれて少なくなっていることが推測される。したがって、仮に単一検出の発生要因が宇宙線の影響であるとすれば、エネルギーの低い宇宙線は通常時においても頻繁に検出されているはずである。

そこで、平成17年2月から平成18年7月にかけて、連続通電盤に設置された臨界検出器について長期的な検出器出力の変化を観測し、観測データから宇宙線との関連をさらに追及した。

5.2.1 連続通電盤の概要

連続通電盤は、核燃料サイクル工学研究所内の計測機器校正施設の1階に設置されている。連続通電盤は、臨界警報装置の各構成機器の健全性を確認する装置であるため、実際に再処理施設やプルトニウム燃料施設などで使用されている臨界警報装置と同様な構成になっており、臨界の判定機能や装置全体の健全性確認機能（点検機能など）も有している。また、装置の健全性は、連続通電盤の各構成機器が臨界警報装置の保守用備品としても用いられることから、定期的な点検を行うことによって確保されている。連続通電盤に接続できる検出器は、上・中・下段に分けて4台／段×3段=12台の検出器（つまり、4系統の検出端）が接続可能となっている。図5-2に連続通電盤における検出器の配置を示す。

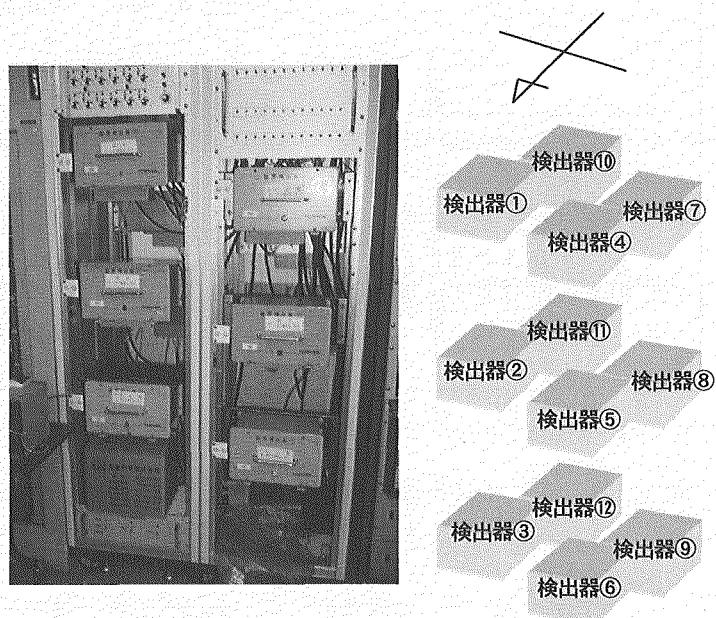


図5-2 連続通電盤における検出器の配置

5.2.2 宇宙線検出の有無に着目した観測及び観測結果

臨界検出器が宇宙線を検出しているか否かを判断するために必要なデータを収集した。その結果、以下のように、臨界検出器がノイズではなく放射線を観測しており、また、観測されたデータに宇宙線の性質を示す傾向があることが確認できた。

1) 臨界検出器が放射線を観測していることの確認

平成 17 年 2 月末から 6 月末にかけて、臨界検出器が放射線を計測していること確認するために、連続通電盤に設置された検出器のうち、検出器③、検出器⑥、検出器⑨、検出器⑫、検出器⑧に波形観測装置を接続し、いずれかの検出器出力があらかじめ設定された値以上に上昇した場合に、すべての検出器における電圧変動のデータが取得できるようにした。なお、接続した検出器のうち、検出器⑧については、放射線によるプラスチックシンチレータの発光現象以外の要因を確認するために、プラスチックシンチレータのみを取り外しておいた（光電子増倍管以降は通常の状態）。

◇ 観測された波形の種類

観測の結果、検出器出力の変動（上昇）は頻繁に観測され、その変動傾向から“ノイズを検出と思われる電圧変動”と“シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”に分類できた。図 5-3a に“ノイズを検出と思われる電圧変動”的観測例を示し、図 5-3b に“シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”的観測例を示す。

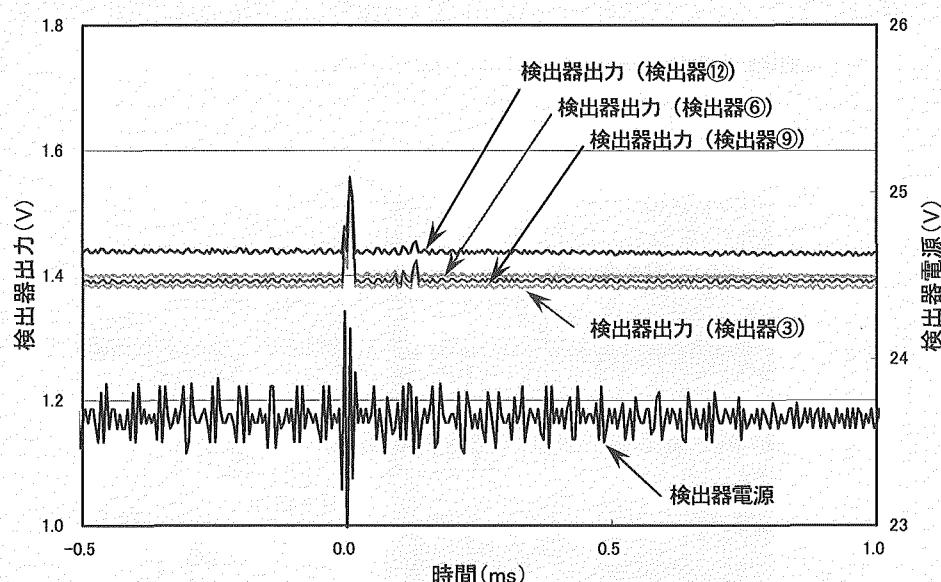


図 5-3a “ノイズを検出したと思われる電圧変動”的観測例

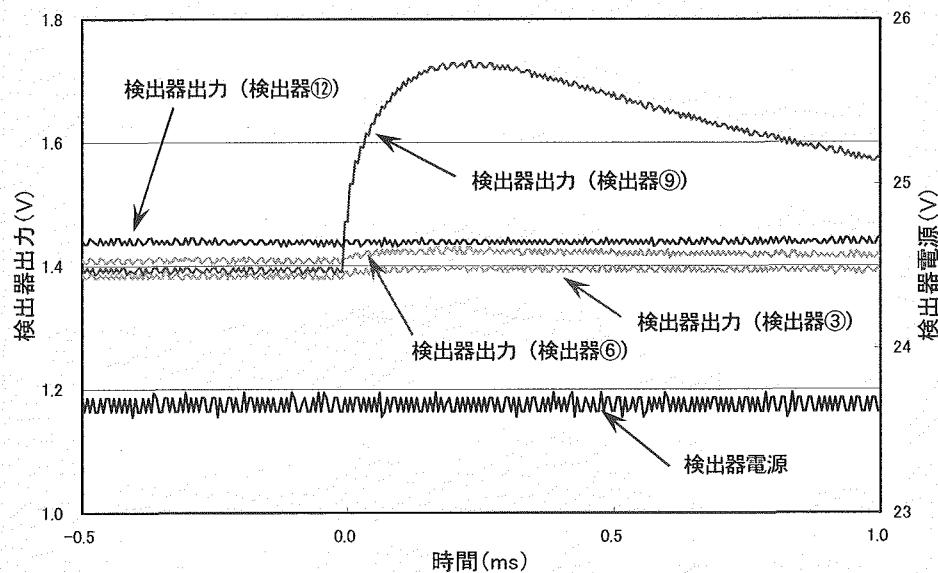


図 5-3b “シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”の観測例

“ノイズを検出と思われる電圧変動”については様々な変動パターンがあるものの、検出器出力の上昇時には必ず電源の変動が伴っていた。また、発生時刻が、保守・メンテナンス作業など装置の操作を行ったときであったことから、臨界警報装置の作動等に伴う電源の変動が原因であることを特定できた。

◇ “シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”の観測頻度と変動傾向

ほぼ平面上に配置された検出器③、検出器⑥、検出器⑨、検出器⑫において、検出器出力の上昇幅が 0.07V 以上（プルトニウム燃料施設における検出器トリップレベルは上昇幅が約 0.66V）の電圧上昇の観測回数は、1 日に検出器 1 個あたり 20 回程度であった。また、電圧変動の上昇幅は一定していないものの、電圧の上昇時間と下降時間（時定数）が同じであったことから、シンチレーションパルス波形のように、正常に処理された計数信号であることが予想された。図 5-4 に上昇幅の異なる“放射線を検出したような電圧変動”を示す。本図においては、電圧変動が同じであることを示すために、観測された時刻が異なる変動事例について時間軸をスライドさせて重ねて表示してある。

また、図 5-4 に示したような電圧変動は、検出器に γ 線 (Cs-137 線源; 662keV) を照射したときにも同様な電圧変動が得られており、その一方で、プラスチックシンチレータを取り外した検出器⑧では、検出器出力の上昇幅が 0.07V を超えた事例は 4 ヶ月間で 1 回も確認されなかった。

以上のことから“シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”はプラスチックシンチレータが何らかの放射線を検知し、シンチレータが発光することにより生じていると判断できた。

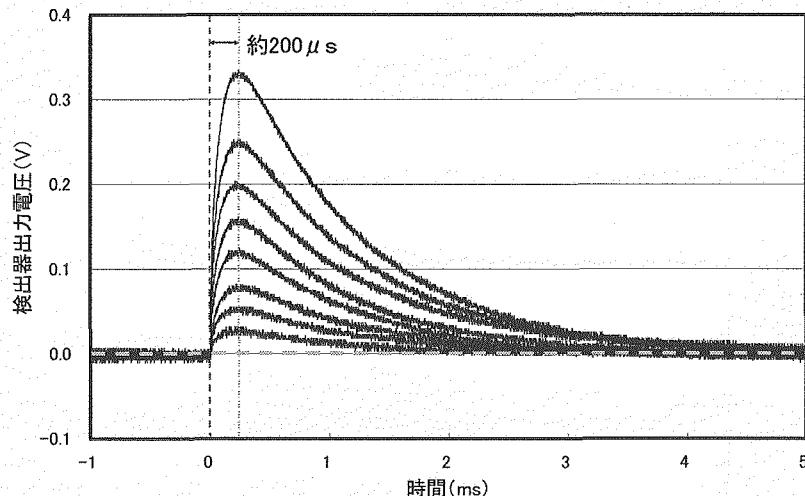


図 5-4 上昇幅の異なる“シンチレーションパルス波形に類似した電圧変動”

本図においては、観測された時刻は異なるものの、電圧上昇傾向が同じであることを示すために、電圧の立ち上がり時刻を合わせ、重ねて表示してある。

2) 観測された放射線が宇宙線であることの確認

観測された放射線が宇宙線である可能性を検討するにあたり、検出器③、検出器⑥、検出器⑨、検出器⑫による観測に加え、検出器①及び検出器②による監視を追加し、観測された電圧変動の観測傾向と宇宙線の性質とを比較した（この時点で検出器⑧は観測から外した）。

◇ 観測時間帯

これまでに電圧変動が観測された時間帯は、宇宙線の飛来と同じようにランダムであり、特定の時間帯に偏ることはなかった。図 5-5 に電圧変動が観測された時間帯とその割合を示す。

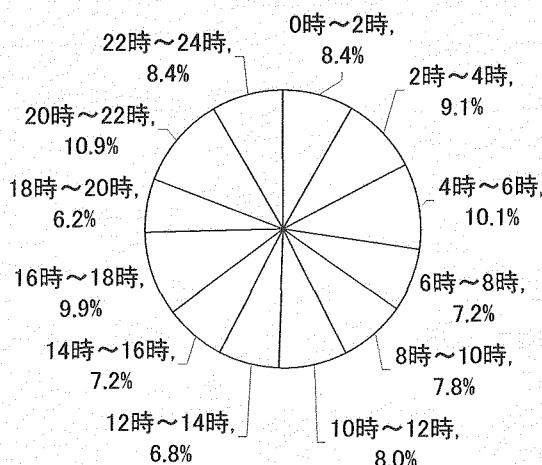


図 5-5 電圧変動が観測された時間帯とその割合

◇ 観測頻度

図 5-6 に検出器出力の電圧上昇幅と観測頻度の相関を示す。有機シンチレータはエネルギー損失と発光量はだいたい比例関係にある（特に電子であれば 100KeV 以上、陽子でも 10MeV 以上あればほぼ比例すると考えることができる）⁷⁾。よって、電圧上昇幅と観測頻度の相関を求めることにより、検出器に入射している放射線のエネルギースペクトルを仮定することができる。

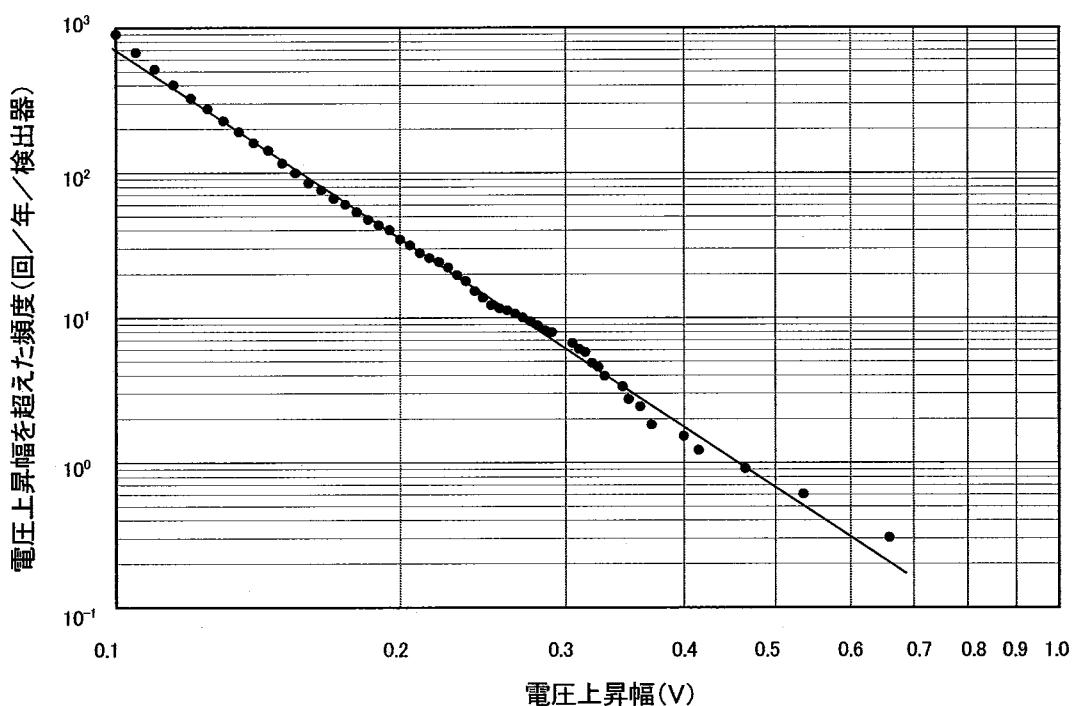


図 5-6 検出器出力の電圧上昇幅と観測頻度の相関

図 5-6 より、電圧上昇幅が大きくなればなるほど、ほぼべき乗に従った減少傾向があり、1 次宇宙線のエネルギースペクトルと同様な傾向であることがわかる。よって、2 次宇宙線のエネルギーに比例した検出器出力を得ているとすれば、宇宙線が観測されていることが推測できる。

なお、単一検出が発生している施設における検出器のトリップレベル（=約 0.66V）を基に、本図から単一検出の発生頻度を推定したところ、単一検出の発生頻度は年間約 0.2 回であり、これは、建屋の最上階に設置された検出器における発生頻度（年間約 0.1 回）とオーダー的に一致している。

◇ 複数の検出器での同時観測

連続通電盤の最下段にほぼ平面上に設置された検出器③、検出器⑥、検出器⑨、検出器⑫において検出器出力の上昇幅が 0.1V を超えた回数は、約 10 ヶ月間の観測で延べ 2,679 回であり、そのうち約 1 割程度が検出器 2 つ以上で同時観測された。表 5-1 に電圧上昇が 0.1V 以上の観測事例における同時観測の頻度を示す。

表 5-1 電圧上昇が 0.1V 以上の観測事例における同時観測の頻度

電圧上昇を観測した 検出器の数 (台)	観測回数	全体に占める 確率 (%)
1	2,341	87.4
2	172	6.4
3	48	1.8
4	118	4.4

観測期間：約 10 ヶ月

本表において特徴的なことは、1 つの検出器のみ電圧上昇が観測される頻度が最も高いことと、3 つの検出器で同時観測される頻度よりも 4 つの検出器で同時観測される頻度の方が高いことである。仮に観測されている放射線が宇宙線であるとすれば、検出器出力の上昇が大きければ大きいほど、エネルギーの大きな粒子を含んだ大規模な空気シャワーを検知している可能性が高く、この結果、同時観測の確率が高くなると考えられる。さらに、空気シャワーはまとまって飛来することから、3 つの検出器で同時観測されるよりも 4 つの検出器で同時観測される可能性が高くなると考えられる。

これを確かめるために、電圧上昇幅ごとに同時観測する確率を求めた。表 5-2 に電圧上昇幅ごとの同時観測回数を示す。

表 5-2 電圧上昇幅ごとの同時観測回数

電圧上昇幅 観測した 検出器の数 (台)	0.10V 以上	0.15V 以上	0.20V 以上	0.25V 以上	0.30V 以上	0.35V 以上	0.40V 以上
1	2,341 (87.4%)	243 (66.0%)	51 (46.4%)	15 (36.6%)	4 (20.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
2	172 (6.4%)	56 (15.2%)	20 (18.2%)	4 (9.8%)	2 (10.0%)	1 (11.1%)	1 (20.0%)
3	48 (1.8%)	22 (6.0%)	12 (10.9%)	5 (12.2%)	4 (20.0%)	2 (22.2%)	2 (40.0%)
4	118 (4.4%)	47 (12.8%)	27 (24.5%)	17 (41.5%)	10 (50.0%)	6 (66.7%)	2 (40.0%)

この結果、全体的な傾向として、電圧上昇幅が大きくなるにつれて、1 台の検出器で観測されるよりも複数の検出器で同時観測される場合が多いことが分かり、著しい電圧上昇をもたらす事例には、広がりを持った放射線、つまり、空気シャワーが関与している

可能性があることが分かる。

◇ 観測される放射線の飛来方向

検出されている放射線の飛来方向を調べるため、最下段に設置された検出器である検出器③、検出器⑥、検出器⑨、検出器⑫の4台の検出器（以下、ここでは“4台の検出器”という）に加えて、検出器①及び検出器②の電圧変動を監視し、電圧上昇の同時観測事例を解析した。特に、宇宙線の場合は、鉛直方向から飛来する傾向にあるため、“4つの検出器”のうち検出器①（又は検出器②）と同時観測する確率が高くなるのは、鉛直方向に配置された検出器③となるはずである（図5-2参照）。

そこで、“4台の検出器”のうち1台以上の検出器で、検出器①（又は検出器②）と同時観測した事例について解析を行い、“4台の検出器”の各検出器がそれぞれ同時観測事例に関与した確率を求めた。表5-3a及び表5-3bに検出器①及び検出器②との同時観測事例に関与した確率を示す。

表5-3a 検出器①及び検出器②との同時観測事例に関与した確率
(4台の検出器の間の同時観測事例を含む場合*)

検出器	検出器①	検出器②
検出器③	81.8%	86.1%
検出器⑥	71.3%	68.4%
検出器⑨	64.6%	58.2%
検出器⑫	66.0%	57.8%

*同時観測事例の場合は、重複して数えているため合計すると100%を超えている

表5-3b 検出器①及び検出器②との同時観測事例に関与した確率
(4台の検出器の間の同時観測を含まない事例に限った場合)

検出器	検出器①	検出器②
検出器③	51.9%	66.2%
検出器⑥	25.9%	22.6%
検出器⑨	5.6%	4.3%
検出器⑫	13.0%	7.0%

表5-3a及び表5-3bより、“4台の検出器”のうち同時観測に関与した確率が最も高く

なっているのは、検出器①及び検出器②の真下にある“検出器③”で、逆に確率が最も低くなっているのは、検出器③から水平距離で最も離れた“検出器⑨”であることが分かる。また、検出器③からの水平距離が同じ“検出器⑥”と“検出器⑫”の確率を比べた場合、検出器⑥のほうが高くなっているが、これは検出器の設置位置に“段差”があり（図 5-2 参照）、検出器⑫に比べて検出器⑥の設置位置が検出器①（検出器②）から鉛直方向に若干離れている（天頂角が小さい）ことで説明ができる。

さらに、表 5-3bにおいて検出器③の確率に着目すると、検出器①との同時観測事例での値と検出器②との同時観測事例での値を比較すると、検出器②との同時観測事例での値のほうが高い値となっている（“4台の検出器”の中で検出器③に偏る割合が高い）が、これは検出器②の設置位置のほうが検出器①の設置位置よりも検出器③に近い位置にあることで説明ができる。

以上の結果から、観測している放射線の飛来方向は、宇宙線と同様に鉛直方向から飛来する傾向があると考えられる。

◇ その他

これまでに観測されている検出器出力の電圧上昇が連続通電盤特有のものでないことを確認するため、核燃料サイクル工学研究所内の Pu3 及び Pu-CONにおいて、実際に運用している臨界警報装置の検出器出力の変動を確認したところ、連続通電盤において観測された電圧変動と同様な電圧変動（時定数：約 1ms）が頻繁に観測された。図 5-7 に Pu3 で観測された検出器出力の上昇事例を示す。

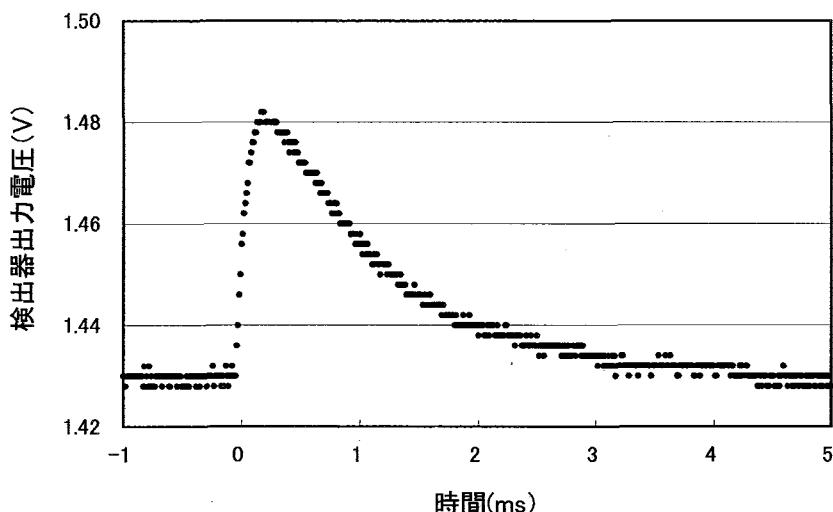


図 5-7 Pu3 で観測された検出器出力の上昇事例

以上の結果から、計測機器校正施設の連続通電盤で観測されていた放射線は宇宙線である可能性が高いといえる。

5.2.3 電圧上昇を引き起こす宇宙線現象に関する推定

臨界検出器が観測していた放射線は、宇宙線である可能性が高いことが分かった。そこで、単一検出に関与している宇宙線成分又は宇宙線現象について検討するため、連続通電盤に設置する検出器を12台に増やし、大きな検出器出力の変動が確認された事例を収集した。

1) 著しい電圧変動が確認された事例における検出器出力の上昇傾向

12台の検出器のうちいずれかの検出器において、著しい電圧上昇(0.2V以上)が観測された事例(全276件)を対象に、12台の検出器における電圧上昇の傾向を調査したところ、大きく分けて、“全体的に高い電圧上昇が観測されるパターン”と“1台の検出器で飛びぬけて高い値を示すパターン”に分類できた。図5-8a及び図5-8bに著しい電圧上昇の観測事例を示す。

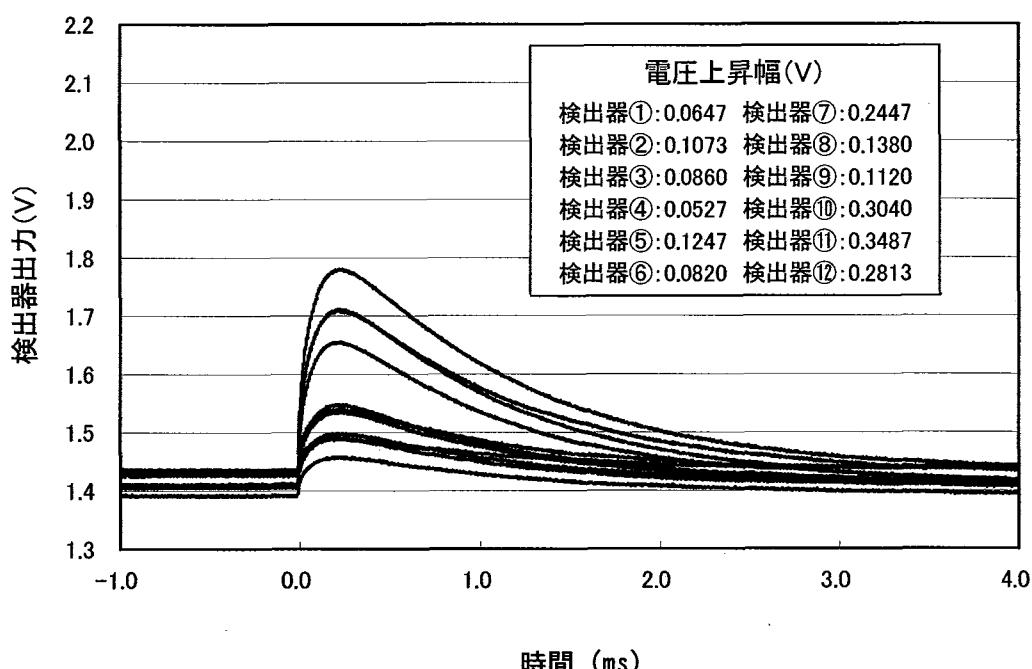


図5-8a 著しい電圧上昇の観測事例
(全体的に高い電圧上昇が観測されるパターン)

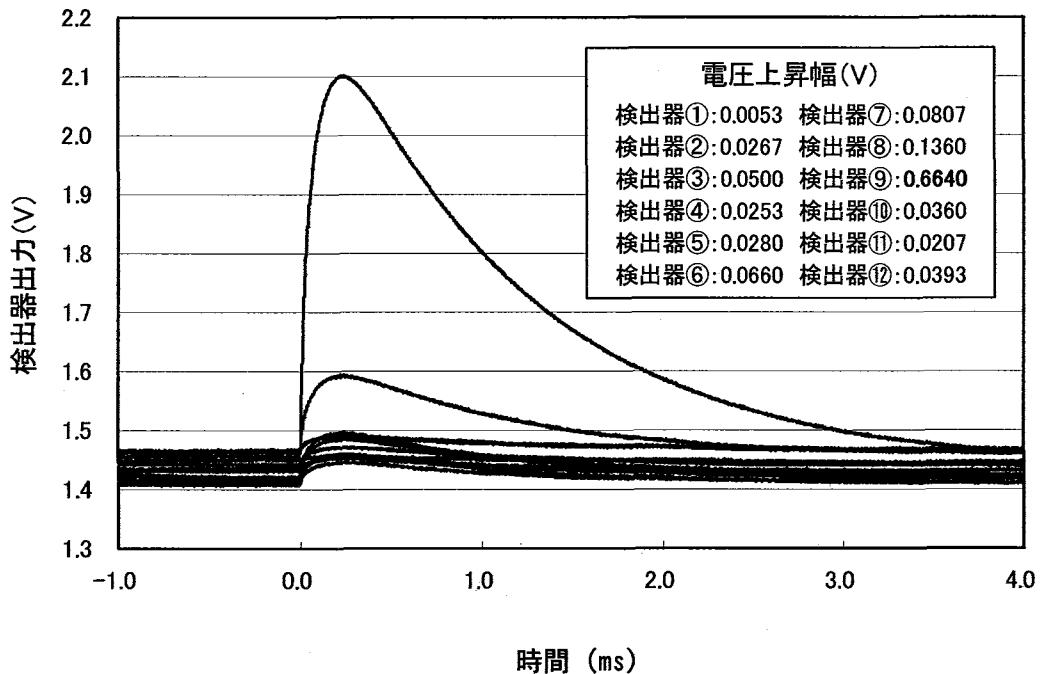


図 5-8b 著しい電圧上昇の観測事例
(1台の検出器で著しく高い値を示すパターン)

また、観測された事例について、どちらの傾向が多く見られるか確認したところ、“1台の検出器で飛びぬけて高い値を示すパターン”は276件中262件であった。さらに“全体的に高い値を示すパターン”である残りの14件について詳細に見てみると、実際には均一に検出器出力が上昇している事例ではなく、12台の検出器の上昇幅を比べると、最大値と最小値で数倍以上の開きがあった。

この結果、単一検出を引き起こすような事例は、全体的に高い値を示すパターンではなく、1台（或いは数台）の検出器でのみ著しい電圧上昇が生じるパターンであることが推測できる。

2) 著しい電圧変動を引き起こす宇宙線に関する検討

著しい電圧上昇が観測されるときの傾向として、ほとんどの事例で複数の検出器による同時観測となっていることがあげられる。これは、複数の宇宙線の飛来、つまり、空気シャワーが関与していることを示すと考えられる。

空気シャワー中には、 μ 粒子、ハドロン（核子、中間子など）、電子、光子など異種の粒子が混在しているが、これらが大気中を通る過程で、相互作用を起こしたり大気中に吸収されたりして粒子数を変化させる（一時的に増加し、次第に減少する）。その結果、地表付近では、相互作用をしにくい“ μ 粒子”と、大気中での電子対生成等で発生しやすい“電子”が大部分を占めていることになるが、1次宇宙線のエネルギーが極めて高い場合にはハドロン

も地表面まで到達する。

空気シャワーの広がりは、入射した 1 次宇宙線のエネルギーと大気中の相互作用によっても異なるものの、地表付近では、大きなものでよそ数百 m から数 km に及んでいる。また、地表付近での空気シャワーの中心部の粒子の特徴として以下のことがあげられる。

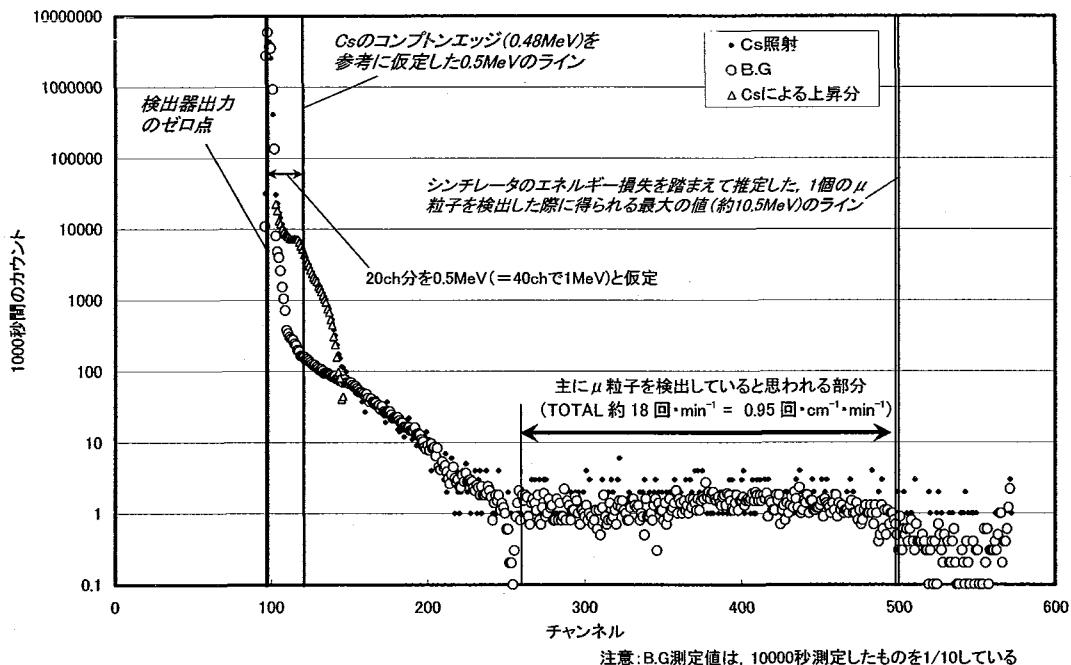
- 中心部ほど粒子密度が高い
- 中心部ほどエネルギーの高い粒子が存在する
- 1 次宇宙線のエネルギーが高い場合には中心にはハドロンの芯が存在する

先に述べたように、検出器出力の上昇が 0.2V を超えた事象を 2 つの傾向に分けてみると、“1 台の検出器で飛びぬけて高い値を示すパターン” が大部分を占めていた。仮に、空気シャワー中の粒子が単一検出の要因だとすれば、この粒子は、空気シャワー中にある一部分の粒子である可能性が高い。このことを裏付けるために以下の検討を行った。

◇ μ 粒子による影響に関する検討

地上における空気シャワーの成分で最も飛来本数が多いのは μ 粒子であり、飛来数は約 0.7 本・ $\text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ であると推測できる⁴⁾。また、 μ 粒子がプラスチックシンチレータに与えるエネルギーは、 μ 粒子のエネルギーがある程度大きければ、 μ 粒子のエネルギーに関係なく約 2.1 MeV/cm³³⁾ となることから、臨界警報装置に用いられているプラスチックシンチレータ内での最大の通過距離(斜め方向からの入射を考慮して約 5 cm と仮定) から計算すると、最大でも約 10.5 MeV となる。

そこで、臨界検出器による μ 粒子の観測状況を把握するため、B.G 測定 (μ 粒子の観測) と γ 線源照射時のエネルギースペクトルを測定し、両測定結果を比較した。なお、臨界検出器の出力は時定数が約 1 ms に設定されているため、マルチ・チャンネル・アナライザ (以下、MCA という) によるエネルギースペクトルの測定が行えないため、本測定においては、臨界検出器の出力の時定数を短くした状態 (測定回路におけるコンデンサの容量を約 1/100 にした状態) で行っており、時定数は約 10 μ s (改造前の 1/100) となっている。図 5-9 に μ 粒子の観測頻度の推定に関する概念図を示す。

図 5-9 μ 粒子の観測頻度の推定に関する概念図

大雑把な推測ではあるが、シンチレータの検出面積を 19cm^2 ($\approx 2\text{in} \times 1.5\text{in}$) と仮定し、 μ 粒子を観測したと思われる頻度を求めると $0.95 \text{ 回} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ となり、 μ 粒子の飛来頻度 ($\approx 0.7 \text{ 回} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)⁴⁾ とオーダー的に一致している。このことから、 μ 粒子は臨界検出器によって観測されていると考えられる。

ここで、単一検出に至るような電圧上昇 (0.66V) に相当するシンチレータに与えるエネルギー付与 (MeV) を推定する。まず、時定数を短くした状態で Cs を照射したときのデータから ch と mV の関係は

$$10\text{ch} \text{ あたり } 94\text{mV} \quad \dots \quad ①$$

であることが分かっており、また、 ch と MeV の関係は、図 5-9 から

$$20\text{ch} \text{ あたり } 0.5\text{MeV} \quad \dots \quad ②$$

であることが分かる。よって、①及び②から、時定数を $1/100$ にした状態では、

$$94\text{mV} \text{ あたり } 0.25\text{MeV} \quad \dots \quad ③$$

となる。

シンチレーションパルス波形においては、時定数がシンチレータの減衰時間よりも明らかに長い場合（今回の場合、減衰時間が数 ns であるのに対し、時定数は約 $10\mu\text{s}$ ）、パルス波高は電荷 Q に比例する¹⁰⁾ので、得られた波高（電圧変動）からそのシンチレータの吸収エネルギーが推定できる。そこで“コンデンサの容量を変更した場合でも、電圧変動時に流れる電荷 Q に大きな変化はなく、時定数を $1/100$ にすると波高が 100 倍になっている”とすると、单一検出に至るような著しい電圧上昇 (660mV) を生じさせ

るようなシンチレータのエネルギー吸収は、

$$660 \text{ mV} \times 100 \times (0.25 \text{ MeV} / 94 \text{ mV}) \approx 176 \text{ MeV} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

であると推測される。

この結果、単一検出に達するような著しい電圧上昇の原因が、仮に μ 粒子であったとすれば、一度に複数（少なくとも数十本から数百本）の μ 粒子が検出器を通過することになる。空気シャワーの性質から考えて、 μ 粒子を複数検出する場合とは空気シャワーの中心部の μ 粒子を観測したときと想定されるが、 μ 粒子は広がりを持って飛来することから、近隣の検出器でも同レベルの電圧上昇が確認されるはずであり、“1台の検出器で飛びぬけて高い値を示すパターン”を生じさせることは考えられない。また、これまでに観測された“全体的に高い電圧上昇が観測されるパターン”においても、詳細に見るとすべての検出器で同じレベルの電圧上昇が生じた事例がないことから、 μ 粒子の検出が単一検出の原因となっている可能性は低いと考える。

さらに、 μ 粒子は建屋コンクリートを容易に通過することから、最上階に設置した検出器で単一検出の発生頻度が高くなっていることを説明できず、 μ 粒子自体が単一検出の発生の大きな要因とは成り得ないことが分かる。

◇ 高エネルギー粒子の影響に関する検討

μ 粒子の影響の可能性が低いとすれば、空気シャワーの中心部にわずかに存在する高エネルギー粒子の影響が考えられる。高エネルギー粒子としては、主に核子（陽子、中性子）や中間子、電子があり、その粒子数やエネルギーは、1次宇宙線のエネルギーや種類によって異なっている。また、高エネルギー粒子の特徴としては、物質中で電磁力スケードシャワーを発生させることがあげられ、物質中で電磁力スケードシャワーが発生するまでの主な過程として以下の2つのケースが考えられる。

- 相互作用に伴って発生する電磁力スケードシャワー

硬成分の高エネルギー粒子（特にハドロン）が物質中に入射した場合、相互作用を起こすことによって、新たな粒子群が発生する。発生した粒子のうち、 π^0 中間子は2つの γ 線になり、さらに γ 線が物質中で電子対生成と制動放射を繰り返し、電磁力スケードシャワーが発達する。なお、この場合、入射粒子のエネルギーの一部が電磁力スケードシャワーに与えられる⁹⁾（図3-2参照）。

- 電子や光子の飛来によって発生する電磁力スケードシャワー

軟成分の高エネルギー電子又は光子が物質中に飛来した場合は、直ちに制動放射と電子対生成を繰り返し、電磁力スケードシャワーが発達する。なお、この場合、入射した粒子の全てのエネルギーが電磁力スケードシャワーに与えられる。

電子対生成や制動放射は電子又は光子が物質中の原子核近傍を通過するだけで発生するため、上記2つの電磁力スケードシャワーのうち“電子や光子の飛来によって生じ

る電磁カスケードシャワー”は物質に入射すると直ぐに発生する。これに対し、相互作用は原子核と衝突して初めて発生するものであるため、“相互作用に伴って発生する電磁カスケードシャワー”は物質（建物）の内部でも発生する可能性が高い。

いずれのパターンにしろ、物質中で電磁カスケードシャワーが発生した場合には、入射した高エネルギー粒子の通過経路の近傍に大量の電子と光子が発生することになるため、その経路上に臨界検出器が配置されていた場合、大きな検出器出力の上昇をもたらす可能性があると考えられる。

3) 高エネルギー粒子の観測に関する検討

次に、これまでに観測されている著しい電圧上昇の要因が、高エネルギー粒子そのものを検出している、又は、高エネルギー粒子の飛来に伴って発生する電磁カスケードシャワーを検出している可能性について検討を行った。

空気シャワーの中心部には複数の高エネルギー粒子が存在するため、コンクリート等に空気シャワーが飛来した場合には、電磁カスケードシャワーも複数発生することが想定される。これまでの観測事例から、図 5-8a 及び図 5-8b に示すように、“全体的に高い電圧上昇が観測されるパターン”と、“1 台の検出器で飛びぬけて高い値を示すパターン”に分けられるが、これは、空気シャワー中に突出したエネルギーを持った粒子が存在していた（或いは、それを検知できた）か否かによって現れ方が異なっているものと考えられる。

つぎに、電磁カスケードシャワーを臨界検出器が実際に検知していることに関して検討する。電磁カスケードシャワー中の電子や光子の数は、図 5-10 に示すように、物質を通過していく過程で増大しやがて減少するが、極めてエネルギーの高い粒子によって発生したカスケードシャワーは、鉛中で数 cm 程度は消滅しないことから、このようなカスケードシャワーは、連続通電盤内に鉛直方向に配列された 3 台の検出器を容易に通過すると考えられる。特に入射粒子のエネルギーが 10^3 GeV 以上になってくると、相互作用によって発生する電磁カスケードシャワーの発生方向も進行方向に鋭く集中するようになる¹¹⁾ ことから、それほど広くない範囲を一気に通過すると考えられる。

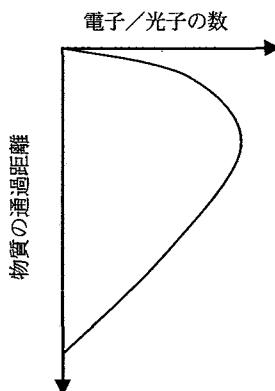


図 5-10 電磁カスケードシャワー中の電子／光子の発達の様子(概念図)

図 5-10 を考慮すると、仮に“高エネルギー粒子”又は“高エネルギー粒子の飛来に伴って発生する電磁カスケードシャワー”を臨界検出器が検知していたとすれば、その通過経路にある 3 台の検出器の電圧上昇の比較においては、図 5-11 に示す検出器出力のパターンのうち、パターン a、パターン b、パターン c のいずれかとなり、パターン d になることはないと考えられる。

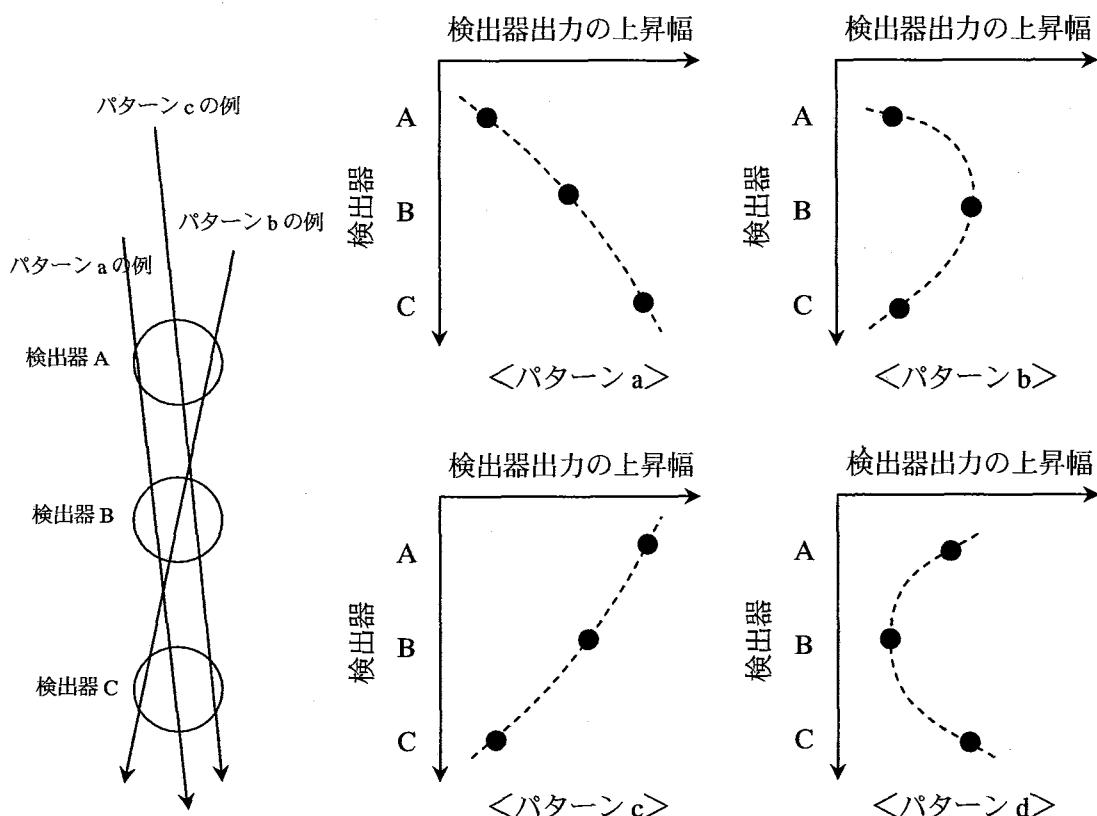


図 5-11 高エネルギー粒子又は電磁カスケードシャワーの通過に伴う検出器出力パターン

そこで、これまでに観測された電圧上昇事例について、12 個の検出器のうち鉛直方向に配列された 3 台の検出器のみで電圧上昇が同時に観測された事例について、その検出器出力のパターンを確認してみた（表 5-4 参照）。

表 5-4 鉛直方向に並んだ 3 台の検出器における検出器出力パターン

	観測回数
パターン a	11 (16.9%)
パターン b	36 (55.4%)
パターン c	16 (24.6%)
パターン d	2 (3.1%)

その結果、パターンdについては、他のパターンに比べて極端に少なくなっていたことが分かり、3台の検出器は1本の高エネルギー粒子又は高エネルギー粒子に伴って発生する電磁カスケードシャワーを観測していた可能性があると考えられる。なお、パターンdについて2回観測されたが、これはむしろ、1本の高エネルギー粒子又は高エネルギー粒子に伴って発生する電磁カスケードシャワーによって生じたものではなく、空気シャワー中に存在する複数粒子（複数の電磁カスケードシャワーを含む）の同時観測によって偶発的に発生したものと考えた方が自然であるといえる。

4) 単一検出の発生をもたらす宇宙線現象に関する推測

これまでの検討結果より、著しい検出器出力の発生をもたらす宇宙線現象としては、極めてエネルギーの高い粒子（ハドロン、電子など）又はこれらが発生させる電磁カスケードシャワーが起因していると考えられる。

これまで述べてきた内容を踏まえ、1次宇宙線が飛来してから、施設に設置された臨界検出器が電磁カスケードシャワーを検知するまでの現象に関して、推測されるシナリオを以下に示す（図5-12参照）。

- ① 1次宇宙線が地球に飛来する
- ② 1次宇宙線は大気中の原子核と相互作用を起こし、複数の粒子（2次宇宙線）を発生させる。
- ③ 1次宇宙線のエネルギーが高い場合、相互作用を繰り返し、大規模な空気シャワーとなって地表に粒子群が到達する。
- ④ 地表に到達した粒子群のうち、空気シャワーの中心部にある軟成分の高エネルギー粒子（主に電子、光子、低エネルギーハドロン）は、建屋外壁中（コンクリート中）で直ちに電磁カスケードシャワーを発生させる。
- ⑤ 軟成分の高エネルギー粒子又は高エネルギー粒子によって発生した電磁カスケードシャワーが臨界検出器（建屋最上階または外壁周辺に設置された検出器）を通過した際に、検出器出力がトリップレベルを超えて、単一検出が発生する。また、近傍（数m以内）の検出器においても、比較的小規模の電磁カスケードシャワーや μ 粒子の影響で検出器出力が上昇する場合がある。
- ⑥ さらに地上に到達した高エネルギー粒子のうち硬成分の高エネルギー粒子（高エネルギーハドロン）については、建屋内部にも到達するため、この高エネルギー粒子又はそれによって発生した電磁カスケードシャワーによって、建屋の内部に設置された臨界検出器においても単一検出を引き起こすことになる。

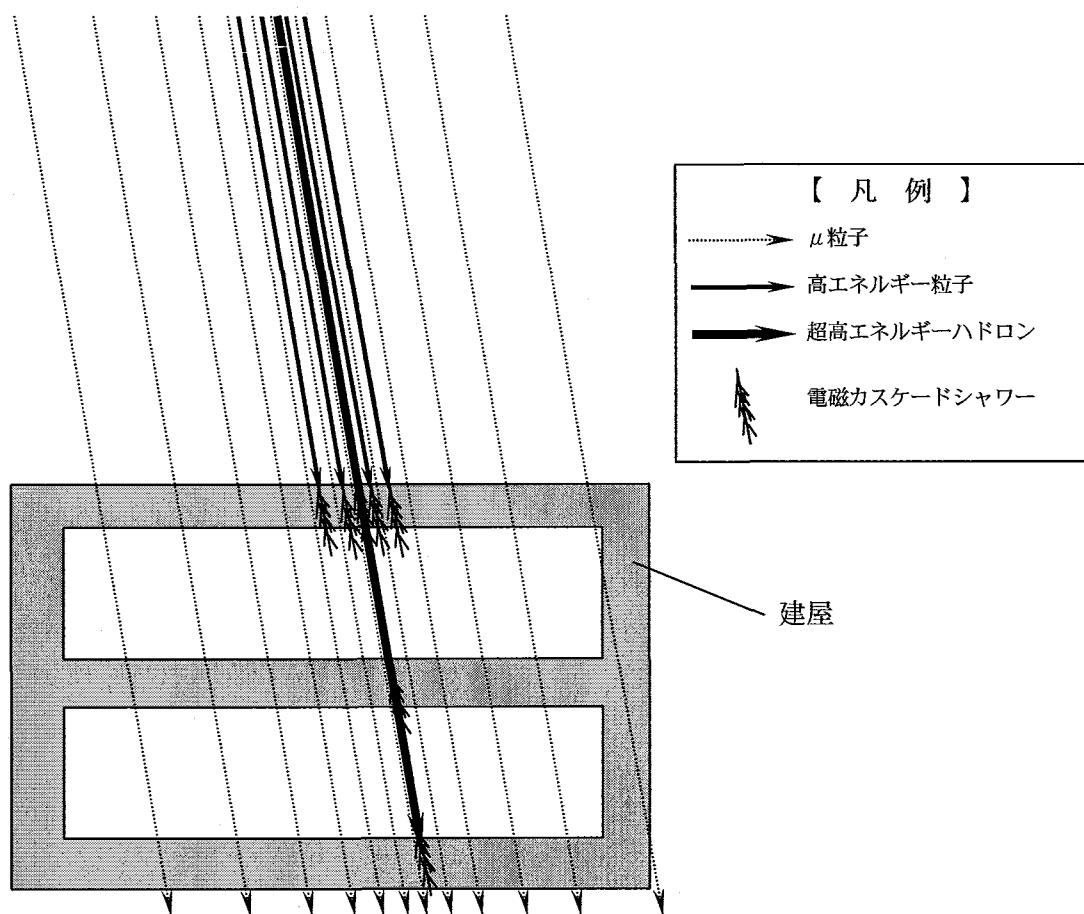


図 5-12 建屋内での電磁カスケードシャワーの発生の様子

6. 宇宙線による単一検出の発生防止に向けた検討

これまでの解析から、臨界検出器が日夜問わず宇宙線を検知しており、そのうち一部の高エネルギー宇宙線が単一検出に関与している可能性が高いことが分かった。

ここでは、宇宙線が臨界警報の吹鳴をもたらす可能性について検討するとともに、さらに宇宙線によって単一検出や誤警報が発生する確率を抑えるための対策について述べる。

6.1 宇宙線による臨界警報吹鳴の可能性に関する検討

空気シャワーの広がりは、地上付近において大きなもので数 km に及ぶ。したがって、3台の検出器で同時に宇宙線を観測することは容易に想像でき、また実際に、図 5-1a に示したように、現場に設置された3台の検出器で同時に検出器出力が上昇した事例も観測されている。

しかし、トリップレベルを超えるほどの検出器出力の上昇をもたらす宇宙線は、空気シャワーの中心部にある粒子の中でも極めて大きなエネルギーを持った粒子のみである可能性が高く、これまでの観測結果からも著しい電圧上昇が観測される事例では、平面上に並んだ検出器 4 台のうち、1台であることが分かっている。よって、現状の臨界検出器の配置（原則として約 2m 間隔で横に3台並んでいる）から考えると臨界警報が吹鳴（2台又は3台の検出器でトリップレベルをほぼ同時に超える事象）に至る可能性は、限りなく低いと考えられる。なお、仮に、万一、宇宙線によって臨界警報が吹鳴するケースを考えてみると、以下に示すようなケースのうち、いくつかのケースが重なり合った極めてまれな事例のみと考えられる。

<臨界検出器の条件>

- ・ 臨界検出器が鉛直方向に配置されているケース
- ・ 建屋の最上階に設置されているケース
- ・ 検出器のトリップレベルが低いケース

<宇宙線の条件>

- ・ 極めてエネルギーの高い1次宇宙線による空気シャワーが飛來したケース
- ・ 空気シャワーが水平方向から飛來するケース
- ・ 空気シャワーの中心部に超高エネルギー粒子が複数存在するケース
- ・ 複数の高エネルギー粒子又は複数の電磁カスケードシャワーが1つの検出器を通過したケース

6.2 宇宙線による単一検出や臨界警報の発生防止策

宇宙線は絶えず地球に降りそそぐものであり、また、物理的対策（遮へい）を行うと、宇宙線のエネルギーや種類によっては逆に遮へい物がブリーダーとなり電磁カスケードシャワーの発達を促すことにもつながるため、宇宙線の影響を容易に低減させることはできない。しかし、臨界警報装置による監視においては、単一検出の発生は好ましくない状態であり、極力防止する必要がある。

以下に、臨界警報装置への宇宙線の影響を低減させるための対策について示す。

6.2.1 宇宙線による単一検出の発生防止策

単一検出は、検出器近傍の物質がブリーダーとなって発生する電磁カスケードシャワーによって発生することも考えられることから、検出器付近には鉛のように原子番号の大きな物質を置かないことが望ましい。また、検出器の警報設定値が低ければ低いほど単一検出の発生頻度が高くなるため、今後は許認可上の要求事項を踏まえた上で、確実に臨界事故が監視できる範囲で（施設の安全管理に支障がない範囲で）警報設定値を高めに設定することが望ましい。

6.2.2 宇宙線による臨界警報の発生防止策

これまでの運転実績や連続通電盤による観測結果を踏まえると、宇宙線により 2 つの検出器で同時に警報設定値を超え、臨界警報が吹鳴することは考えがたい。しかし、可能性が全くないとまでは言えないため、単一検出の発生メカニズムを明らかにするとともに、装置設計上、可能な範囲で以下に示す対策を行っておく必要がある。

- ・ 検出器は鉛直方向に配列しない（宇宙線は鉛直方向に飛来する傾向があるため）
- ・ 検出器と検出器の間の距離は臨界監視に支障がない程度に離して配置する（高エネルギー粒子は空気シャワーの中心部の数m以内に集中するため）
- ・ 建屋の最上階には検出器を配置しない（高エネルギー電子／光子又はそれによって発達した電磁カスケードシャワーの影響を受けにくくするため）

上記に示した対策以外にも、検出原理の変更（中性子検出器の採用など）や検出器出力の信号処理方法の変更（時定数の変更など）を行うことによっても宇宙線の影響を低減することは可能であると考えられるが、この際は、同時に“臨界事象の検知”に対する基本的な設計要求について、再度、技術的な検討・評価を十分に行う必要がある。

7. まとめ

今回の調査により、臨界検出器は頻繁に宇宙線を観測していることが明らかになった。また、臨界検出器に空気シャワーの中心部が飛来した場合には、著しい検出器出力の上昇を招くとともに、近傍の複数の検出器が同時に宇宙線を観測する場合もあると考えられる。

単一検出を引き起こすような宇宙線としては、地上に到達する 2 次宇宙線の中でもその大部分を占める“ μ 粒子”よりも、わずかに含まれる“高エネルギー粒子（電子、ハドロンなど）”が関与していると考えられ、具体的には高エネルギー粒子を直接検知するか、またはそれらの粒子が発生させる電磁カスケードシャワーを検知していると推測される。

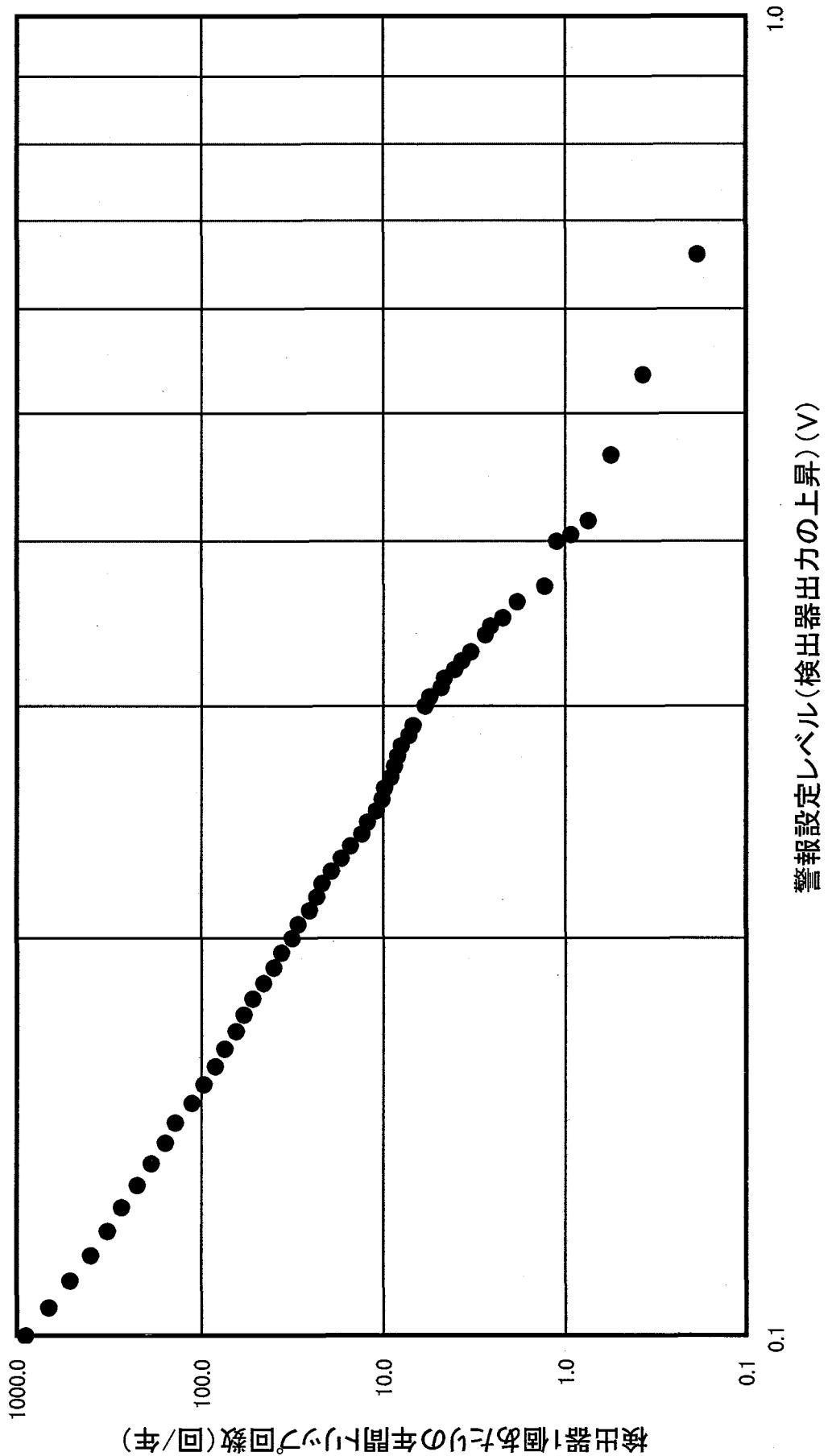
一方、放射線計測の観点からは、放射線検出器が宇宙線を検出した場合、検出器出力の信号処理方法によっては大きな指示値変動を引き起こすことが分かった。特に臨界警報装置のように、検出器出力電圧の変動を監視するタイプ（放射線の数を計数するタイプではない）で、かつ、瞬間的な変動を検知することを目的としているような放射線計測器（電位計タイプの中では時定数が短い検出器）については、宇宙線の影響が大きく現れると考えられる。

臨界警報装置は施設の健全性を確認する極めて重要な装置であり、警報の信頼性を確保することが要求されたため、宇宙線による誤警報の発生はもとより、単一検出の発生も防止していくことが必要である。しかし、単一検出の発生は極めて頻度が少ないとから、発生原因を追究するためには、これまでのような観測に加えて、シミュレーション計算等による定量的な評価を必要とする。

よって、今後もさらなる解析を進め、臨界警報装置が宇宙線を検知するメカニズムを把握する一方で、単一検出の発生防止策の検討など、臨界警報装置の信頼性向上に努めていく必要がある。

参考文献

- 1) 野田 喜美雄 ; “動燃技報 No.81” , P59~P62 (1992)
- 2) 早川 幸男 編集 ; “熱核反応・天体物理”, 共立出版, P. 117 (1961)
- 3) 小田 稔 ; “物理学選書 5 宇宙線 (改訂版)”, 裳華房 (1972)
- 4) 国立天文台 編集 ; “理科年表 平成 17 年 (机上版)”, 丸善, P. 天 60 (2004)
- 5) 石川 友清 編集 ; “放射線概論”, 通商産業研究社, P. 401 (1989)
- 6) 安倍 知 ; “入門 東大宇宙線研究所”, 無明舎出版, P. 242 (2004)
- 7) 加藤 貞幸 ; “新物理学シリーズ 26 放射線計測”, 培風館, P. 99~P. 101 (2001)
- 8) ニコラス ツルファニディス 著, 阪井 英治 訳 ; “放射線計測の理論と演習 (上巻) 基礎編”, 現代工学社, P. 226 (1986)
- 9) 西村 純 編集 ; “実験物理学講座 25 宇宙放射線”, 共立出版(1986)
- 10) グレン F. ノル 著, 木村 逸郎, 阪井 英治 訳 ; “放射線計測ハンドブック 第 2 版”, 日刊工業新聞社, P. 296~P. 300 (1991)
- 11) 八木 浩輔 ; “基礎物理科学シリーズ 4 原子核物理学”, 朝倉書店, P. 275 (1974)



連続通電盤における単一検出の発生頻度(H18.10.16現在)

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
立体	積立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	メートル	m ⁻¹
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率(数の)	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨクダ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エク	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼット	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad	$m \cdot m^{-1} = 1^{(b)}$
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)	$m^2 \cdot m^{-2} = 1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	$N \cdot m$
工率、放射	ワット	W	J/s
電荷、電気量	クーロン	C	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
電位差(電圧)、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フアラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
電磁誘導度	ウェーバー	Wb	$V \cdot s$
インダクタンス	ヘルツリーチ	H	Wb/m^2
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr^{(c)}$
(放射性核種)放射能吸収線量、質量エネルギー	ベクレル	Bq	lm/m^2
セグメント、カーマ			lx
線量当量、周辺線量当量			$lm^{-4} \cdot cd = m^{-2} \cdot cd$
方向性線量当量、個	シーベルト	Sv	s^{-1}
人線量当量、組織線量当量			J/kg

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa·s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N·m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m^{-1} \cdot s^{-1} = s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	$m^{-1} \cdot s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg·K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エネルギー	每ケルビン	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル毎ケルビン	W/(m·K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m ³	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	ファラード毎メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^2$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	ジュール每モル毎ケルビン	J/(mol·K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m ² ·sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	L	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーベル	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1海里=1852m
ノット	ト	1ノット=1海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1a=1 dm ² =10 ⁻² m ²
ヘルツ	ha	1ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バル	bar	1bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=1 nm=10 ⁻¹⁰ m
ペース	b	1 b=100f m ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルゴ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイナ	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボルト	P	1 P=1 dyn · s/cm ² =0.1Pa · s
ストップ	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステップ	Oe	1 Oe=(1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁸ Wb
スチール	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホタル	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キロリード	Ct	1 Ct=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻³ Sv
X線単位	XU	1X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W · m ⁻² · Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	Torr	1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
ト	atm	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	cal	1 atm=101 325 Pa
カリ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m