

原子力施設の
中央監視式野外放射線
モニタリング・システム

1965 年 9 月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

原子力施設の中央監視式野外放射線モニタリング・システム

要 旨

原子力施設が平常運転において環境による拡散，希釈を考慮して放射性排気，排液を放出し，あるいは万一の事故によって周辺住民にある程度以上の被曝を与えるおそれがあるとき，その施設周辺の野外放射線モニタリングが要求される．原子炉事故に伴う災害解析によると，重大事故時に放射線被曝を抑制するためには，事故後最初の数時間以内に必要な処置が終るのが重要であることを示している．野外放射線モニタリング・システムを整えることによって，異常をすみやかに発見，適切な処置をほどこし得て，事故後の放射線被曝を抑制し，立地の不利を補うことは，きわめて望ましいことである．

本報は，野外放射線モニタリングに要求される条件，大気中に放射性物質が放出されたとき要求される野外放射線モニタリング・システムについての理論解析，このシステムを構成する中央監視式放射線モニタリング・システムの設計および野外放射線モニタリングの中央監視方式，中央監視式野外放射線モニタリング装置について述べた．

1965年6月

日本原子力研究所東海研究所

保健物理安全管理部 石原 豊秀

Centralized Field Radiological Monitoring System at Nuclear Installation

Summary

In the normal operations, radioactive gases and liquids are released from nuclear installations, considering the environmental conditions in the dispersion and dilution of the radioactive substances. There is also the possibility that the populace around are exposed to the radiation at the time of an accident of such nuclear installations. In both cases of the above, the field radiological monitorings are required. The evaluation of the reactor hazards shows that, in the case of major accidents, adequate procedures must be taken within a few hours of the accident in order to minimize the radiation exposures. In this connection, it is desirable to maintain an effective radiological monitoring system, which detects the unusual conditions of radioactivity and permits the adequate steps of radiation control, thus minimizing the radiation hazard from the accident and also compensating for the unfavorable site conditions.

This report describes the requirements of such field monitoring, theoretical analysis of the monitoring system used when the radioactive substances are released into the atmosphere, detailed design of the system and the development of the centralized field monitoring system and required equipment.

June, 1965

TOYOHIDE ISHIHARA
Health Physics and Safety Division
Tokai Research Establishment, Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

まえがき	1
1. 理論解析	3
1.1 大気拡散, 沈着	3
1.1.1 Sutton の拡散式	3
1.1.2 Pasquill の方法	4
1.1.3 沈 着	5
1.2 被曝解析	5
1.2.1 建物内の放射性物質からの γ 線	5
1.2.2 放射性雲からの β , γ 線	6
1.2.3 放射性地表面汚染からの γ 線	7
1.2.4 その他の被曝	7
1.3 被曝評価の方法	8
2. 原子力施設の中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計	10
2.1 測定対象の選定	10
2.2 測定範囲と測定結果を得るまでに要求される時間	10
2.3 測定法	13
2.3.1 空間分布放射線	13
2.3.2 大気放射能	13
2.3.3 計数誤差	13
2.3.4 む す び	14
2.4 検出器の最適配置	15
2.4.1 γ 線検出器の配置	15
2.4.2 大気塵埃放射能検出器の配置	18
2.4.3 検出器の配置を決める上に考慮すべきその他の事項	21
2.4.4 む す び	21
2.5 中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計例	22
2.5.1 γ 線観測網	22
2.5.2 大気塵埃放射能観測網	23
2.5.3 検出能力に対する考察	23
2.5.4 装置の信頼性に対する考察	28
2.5.5 日本原子力研究所の中央監視式野外放射線モニタリング・システム	28
3. 中央監視式野外放射線モニタリング装置	31
3.1 中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置	31
3.1.1 パルス信号の遠距離伝送	31
3.1.2 パルス信号の多重遠距離伝送	33
3.1.3 装 置	33
3.2 中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置	37
3.2.1 モニタリング・ステーション装置	38
3.2.2 中央監視装置	41
3.3 気象観測装置	42
4. 考察と結言	43
記号表	45
参考文献	46

Contents

Introduction.....	1
1. Theoretical analysis.....	3
1.1 Atmospheric dispersion and deposition.....	3
1.2 Analysis of exposure.....	5
1.3 Evaluation of exposure.....	8
2. Design of centralized field radiological monitoring system at nuclear installation.....	10
2.1 Suitable objects of measurement.....	10
2.2 Ranges of detection and required period of measurement.....	10
2.3 Measuring methods.....	13
2.4 Location of detectors.....	15
2.5 Example of centralized field radiological monitoring system.....	22
3. Centralized field radiological monitoring instrument.....	31
3.1 Centralized field radiological monitoring post.....	31
3.2 Centralized field radiological monitoring station.....	37
3.3 Meteorological instrument.....	42
4. Discussion and conclusions.....	43
List of symbols.....	45
References.....	46

まえがき

原子炉事故に伴う放射性汚染気体、塵埃の放散による被曝解析と安全評価ならびに放射線障害防止対策について研究した結果¹⁾によると、原子炉などの事故の際、もちろん原子炉の運転用計測器、炉室のモニタリング装置の記録なども利用するが放出された核分裂生成物による被曝は、あらかじめ原子炉建物周辺にモニタリング装置を配置しておいて直接にその程度をとらえることが望ましい。すなわち事故後すみやかに周辺の汚染状況を測定し、被曝評価をして適切な処置を施すことによって被曝を十分減少させることができると考えられる。

また、原子力施設の稼働に伴い、平常運転で屋外への放射線の漏洩や、環境による拡散、希釈を考慮した放射性排気、排液の放出が考えられる。常時放出されるものは通常わずかであるが長期的にはそれによる被曝とその施設周辺の汚染が問題となりうる。この測定評価のため施設周辺の野外放射線モニタリングをおこなう必要が生じる。

原子炉などの事故時に放出される放射性物質の種類や量は、平常運転によって放出されるものと異なることは当然であるばかりでなく、事故の種類によっても異なる。また放出された時の高さ、その時の気象条件によって周辺に与える様相が変わってくる。原子力施設の野外放射線モニタリング・システムは、その施設のいかなる場合の放射線、放射能の異常の発見、汚染の測定、被曝の評価にも役立つものでなければならない。このためには測定対象の選択、検出法、検出器の種類、測定範囲、検出器の配置、監視方法などをいかにするかがきわめて重要な問題となる。

原子力施設の立地基準や、事故時の災害については、すでに多くの解析がなされているが、野外放射線モニタリングについて系統的解析はほとんどおこなわれていない。これはこの問題が原子力施設の安全性、立地といった問題と関連し、考慮すべき条件が多いうえ、未知の問題を含み、経験にもとほしいためと考えられる。原子力施設の野外放射線モニタリングは国によってまた施設によって非常に異なった方式がとられている。Argonne National Laboratory²⁾では、大気塵埃、降水、排液および土壌、植物などの環境試料を定

期的に採取、測定する方法がとられ、連続モニタリングはおこなわれていない。Brookhaven National Laboratory³⁾では、大気塵埃、空間分布放射線を固定の放射線モニタリング・ステーションで連続モニタリングおこなう方式をとっているが、観測結果は毎週1度の巡回によって知ることのできるものである。Oak Ridge National Laboratory⁴⁾では、大気塵埃の連続モニタリングをおこない、毎日1度巡回するほか排液、降水、落下塵などの採取、測定がおこなわれている。Windscale, Calder Works⁵⁾では移動のサーベイを中心に牛乳、土壌、植物などの環境試料の採取、測定がおこなわれている。いずれも異常をすみやかに発見し、必要な処置をほどこすための中央監視式の放射線モニタリング方式はとられていない。

原子力施設の安全性を確保するために、その設計、建設、維持、運転に当っては、事故の起る確率を最小にし、また万一事故が発生しても周囲に与える影響が少くなるよう多大の考慮が払われている。従って、重大な事故が起る可能性はきわめて少いと考えられる。特に敷地外の公衆に災害を与えるような事故はまず起らないと予想できるが、もし発生した時はその影響する範囲は広く深刻となる可能性をもっている。面積狭少なわが国では、平野部に原子力施設を設置するとき、環境問題はきわめて重要で原子力施設の潜在的危険性、すなわち施設に内蔵される放射性物質の種類、量が事故により、あるいは平常運転によって周辺住民に危険をおよぼすならかの可能性が考えられるときは、あらかじめ十分の環境の事故対策を整える必要性がある。

原子炉事故に伴う災害解析によると、重大事故時に放射線被曝を抑制するためには、事故後最初の数時間以内に必要な処置が終るのが重要であることを示している。野外放射線モニタリング・システムを整えることによって、異常をすみやかに発見、適切な処置を施し得て事故後の放射線被曝を抑制し、立地の不利を補うことは、きわめて望ましいことである。

原子力施設周辺の野外放射線モニタリング・システムは、次の条件を満足するものでなければならない。

- 1) 放射性物質が突然に放出された場合でも適切な

処置がとれるよう十分すみやかに放射性汚染の検出ができること。

- 2) 国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告、および国内法規によって放射線の漏洩、放射性物質の放出は制限されている。放射線の漏洩、放射性物質の放出がこの範囲内であることを確認できること。
- 3) わずかではあるが繰返し放出されると蓄積する可能性をもっているような危険な核種、特に長い半減期の核種のレベルを決った方法で測定し、長期にわたる蓄種を知ること。

このような放射線モニタリング・システムは次の2つに大別される。

- 1) 固定連続運転の中央監視式野外放射線モニタリング
- 2) 定期あるいは随時おこなう放射線サーベイ、

環境試料の採取、測定

筆者は1956年以来日本原子力研究所において同所周辺の野外放射線モニタリング・システムについて解析、計画し、このシステムに必要な装置を開発、建設するとともに、これら装置を使用して野外の放射線、放射能測定をおこなってきた。

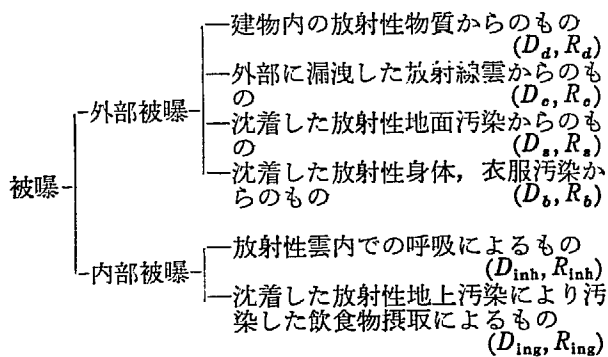
本研究では、大気中に放射性物質が放出されたとき要求される野外放射線モニタリング・システムについて理論解析をおこない、このシステムを構成する中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計について詳細に解明し、かつ野外放射線モニタリングの中央監視方式、中央監視式野外放射線モニタリング装置について開発した。またこの装置の能力、現在残されている解析の不確実な問題、野外の放射線サーベイ、環境試料の採取、測定の必要性についても論述した。

1. 理論解析

原子力施設からの放射線の漏洩や、放射性物質の大気中への放出を常時監視するとともに、異常をすみやかに発見、事故に伴う災害の経過を把握、適切な処置を施すに必要な基礎資料を得るための原子力施設周辺の野外放射線モニタリング・システムについて解析する。

原子力施設建物、格納容器などに内蔵された放射性気体、塵埃が大気中に放出されるとき、施設周辺の野外に与える汚染量は、放出量に比例し、その分布は放出高とその時の気象条件から一意的に決つてこよう。汚染分布が分れば周辺に居住し、あるいは立入る人が受ける被曝*を評価することが可能である。このことは放出高とその時の気象条件および汚染量を推定あるいは測定することによって汚染分布、周辺に居住し、あるいは立ち入る人の被曝を評価できる。また建物、格納容器などに内蔵された放射性物質と漏洩状況の相関関係が分れば内蔵量を推定することによつても被曝を評価できることになる。大気中に放出された気体、塵埃放射性物質の拡散と沈着、放射性物質が建物内に充満し、また外部に漏洩したとき受ける被曝について解析し、いかなる測定が必要で、また測定値からいかに被曝を評価したらよいかについて解明する。

放射性物質が建物内に充満し、また外部に漏洩したとき受ける被曝について分類すると次のようになる。



D, R はそれぞれ被曝線量および線量率である。

ある地点で受ける全被曝線量 D_{total} は

$$D_{total} = D_d + D_o + D_s + D_b + D_{inh} + D_{ing}$$
 となる。全 γ 線量率 $R_{total\gamma}$ については

$$R_{total\gamma} = R_{d\gamma} + R_{o\gamma} + R_{s\gamma} + R_{b\gamma}$$

* 同一地点に長く止る場合の被曝について考える。

ただし $R_{d\gamma}, R_{o\gamma}, R_{s\gamma}, R_{b\gamma}$ はそれぞれ建物内の放射性物質、放射性雲、放射性地面汚染、放射性身体・衣服汚染からの γ 線量率である。全 β 線量率 $R_{total\beta}$ については、

$$R_{total\beta} = R_{o\beta} + R_{s\beta} + R_{b\beta}$$

ただし $R_{o\beta}, R_{s\beta}, R_{b\beta}$ はそれぞれ放射性雲、放射性地面汚染、放射性身体・衣服汚染からの β 線量率である。

本章ではある地点で受ける被曝線量 $D(D_{total}, D_d, D_o, D_s, D_{inh}, D_{ing})$ のその地点における γ 線量率 $R_\gamma (R_{total\gamma}, R_{d\gamma}, R_{o\gamma}, R_{s\gamma})$ や、 β 線量率 $R_\beta (R_{total\beta}, R_{o\beta}, R_{s\beta})$ または大気放射能濃度 χ_o 、あるいは地表面の放射能汚染密度 χ_s に対する関係と、被曝線量 D の分布を求める。

すなわち被曝線量 D が次式

$$\begin{aligned} D &= f_1(R_\gamma) \\ D &= f_2(R_\beta) \\ D &= f_3(\chi_o) \\ D &= f_4(\chi_s) \end{aligned}$$

で表わされるならば γ 線量率 R_γ 、 β 線量率 R_β 、大気放射能濃度 χ_o 、あるいは地表面の放射能汚染密度 χ_s のいずれかを測定することによって被曝線量 D を求めることができる。

まず基礎となる大気の拡散、沈着と被曝について解析する。

1.1 大気拡散、沈着

大気拡散については、多くの理論式があるが、ここでは現在まで広く使われてきた統計理論を背影に発展させた Sutton の拡散式と、最近英国気象局で開発された半実験式、Pasquill の方法とによる。

今 Fig. 1 に示すように、放出源の地表を源点として平均風の方向に x 軸、垂直上方に z 軸、 xz 平面に垂直に y 軸をとる。風下 (x, y, z) 地点の濃度 $\chi_o(x, y, z)$ を求める。

1.1.1 Sutton の拡散式⁶⁾

点源より連続排出の場合 O. G. Sutton の拡散式に

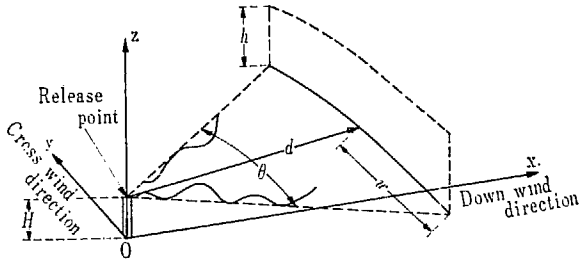


Fig. 1 Schematic representation of stack gas behavior

よると

a) 大気が Anisotropic のとき次式で与えられる。

$$\chi_o(x, y, z) = \frac{q \exp(-y^2/c_y^2 x^{2-n})}{60^2 \Pi c_y c_z \bar{U} x^{2-n}} \times \left[\exp\left\{-\frac{(z-H)^2}{c_z^2 x^{2-n}}\right\} + \exp\left\{-\frac{(z+H)^2}{c_z^2 x^{2-n}}\right\} \right] \quad (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (1)$$

ここに

- q …放射性気体、塵埃の排出率 (c·hr⁻¹)
- \bar{U} …平均風速 (m·sec⁻¹)
- c_y …風向に直角な横の水平拡散係数 (m^{n/2})
- c_z …垂直方向の拡散係数 (m^{n/2})
- n …気層安定度のパラメータ
- H …放出源の地上よりの高さ (m)

地上濃度 $\chi_o(x, y, 0)$ は、 $z=0$ とおいて

$$\chi_o(x, y, 0) = \frac{2q}{60^2 \Pi c_y c_z \bar{U} x^{2-n}} \times \exp\left\{-\frac{1}{x^{2-n}} \left(\frac{y^2}{c_y^2} + \frac{H^2}{c_z^2}\right)\right\} \quad (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (2)$$

b) 大気が Isotropic のとき地上濃度 $\chi_o(x, y, 0)$ は次式で与えられる。

$$\chi_o(x, y, 0) = \frac{2q}{60^2 \Pi c^2 \bar{U} x^{2-n}} \exp\left(-\frac{y^2 + H^2}{c^2 x^{2-n}}\right) \quad (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (3)$$

ここに

- c …拡散係数 (m^{n/2})

1.1.2 Pasquill の方法⁷⁾

点源より連続排出の場合、

風下での濃度分布 $\chi_o(x, y, z)$ は、 y 軸方向、 z 軸方向とも風下軸上の点を中心として正規型とし、地面はガスの完全反射体と考えると次のように表わされる。

$$\chi_o(x, y, z) = \chi_o(x, 0, H) \exp\left\{-\left(\frac{y}{w(x)}\right)^2\right.$$

$$\times \ln 10 \left[\exp\left\{-\left(\frac{z-H}{h(x)}\right)^2 \ln 10\right\} + \exp\left\{-\left(\frac{z+H}{h(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \right] (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots (4)$$

ここに

$w(x)$ …風下 x の距離における軸上濃度の 1/10 になるひろがり (拡散幅とよぶ) (m)

$h(x)$ …風下 x の距離における軸上濃度の 1/10 になる高さ (拡散高度とよぶ) (m)

放出源から 1 時間に 1 c の割合で放射性気体、塵埃が連続排出される場合、 dt 時間に放出される量は、同じ時間に風下 d (m) の yz 平面を通過する量と等しいから

$$1 \times dt = 60^2 \bar{U} dt \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \chi_o(d, y, z) dy dz = 60^2 \bar{U} dt \chi_o(d, 0, H) \frac{w(d)h(d)\Pi}{\ln 10}$$

従って

$$\chi_o(d, 0, H) = \frac{\ln 10}{60^2 \Pi w(d)h(d)\bar{U}} \quad (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式を (4) 式に代入して

$$\chi_o(d, y, z) = \frac{\ln 10}{60^2 \Pi w(d)h(d)\bar{U}} \times \exp\left\{-\left(\frac{y}{w(d)}\right)^2 \ln 10\right\} \left[\exp\left\{-\left(\frac{z-H}{h(d)}\right)^2 \ln 10\right\} + \exp\left\{-\left(\frac{z+H}{h(d)}\right)^2 \ln 10\right\} \right] (\text{c}\cdot\text{m}^{-3})$$

放射性気体、塵埃の排出率が q (c·hr⁻¹) のときは一般的に

$$\chi_o(x, y, z) = \frac{q \ln 10}{60^2 \Pi w(x)h(x)\bar{U}} \times \exp\left\{-\left(\frac{y}{w(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \times \left[\exp\left\{-\left(\frac{z-H}{h(x)}\right)^2 \ln 10\right\} + \exp\left\{-\left(\frac{z+H}{h(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \right] (\text{c}\cdot\text{m}^{-3}) \dots\dots (6)$$

地上濃度は、 $z=0$ とおいて

$$\chi_o(x, y, 0) = \frac{2q \ln 10}{60^2 \Pi w(x)h(x)\bar{U}} \times \exp\left[-\left\{\left(\frac{y}{w(x)}\right)^2 + \left(\frac{H}{h(x)}\right)^2\right\} \ln 10\right] \dots\dots (7)$$

風下軸上地上濃度は、 $y=0$ とおいて

$$\chi_o(x, 0, 0) = \frac{2q \ln 10}{60^2 \Pi w(x)h(x)\bar{U}} \exp\left\{-\left(\frac{H}{h(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \quad (\text{c}\cdot\text{m}^{-3})$$

$w(x)$ を放出源から張る角度 $\theta/2$ に変換すると風下 d (m) の地上濃度 $\chi_o(d, 0, 0)$ は

$$\chi_o(d, o, o) = \frac{4.65 \times 10^{-2} q}{\bar{U} \theta d h} \times \exp \left\{ - \left[\frac{H}{h} \right]^2 \ln 10 \right\} \quad (\text{c} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots (8)$$

となる。ただし h は風下 d (m) における拡散高度。式中拡散高度 h , 拡散幅 θ は大気不安定度によって大幅に変る。この方法では大気不安定度を A (Extremely unstable), B (Moderately unstable), C (Slightly unstable), D (Neutral), E (Slightly stable), F (Moderately stable) の6つに分け、安定度別に図式的に与えている。

$H=0$ では

$$\chi_o(d, o, o) = \frac{4.65 \times 10^{-2} q}{\bar{U} \theta d h} \quad (\text{c} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots (9)$$

1.1.3 沈着

大気中に放出された放射性物質は, A, Kr, Xe など分子状のものを除き, 粒子状のものは地上に沈着し地表面汚染を生ずるとともに大気濃度が減少する。

沈着速度 v_o (cm·sec⁻¹) を次のごとく定義する。

v_o = 単位面積当りの全沈着量/地表の大気放射能積算濃度

沈着による地表面汚染 χ_s (c·m⁻²) は, 次式で与えられる。

$$\chi_s = \frac{3600}{100} A v_o \quad (\text{c} \cdot \text{m}^{-2}) \dots\dots (10)$$

ここに A (c·hr·m⁻³) は地表の大気放射能積算濃度である。

地表の大気放射能濃度を $\chi_o(t)$ とすれば

$$A = \int_0^t \chi_o(t) dt \quad (\text{c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}) \dots\dots (11)$$

1.2 被曝解析

1.2.1 建物内の放射性物質からの γ 線

建物内に充満した放射性物質の放出する β, γ 線によって建物外の地点で受ける線量率 $R_{d\gamma}$ (rem·hr⁻¹) は, β 線量率は無視できるから, γ 線量率についてのみ考えればよい。建物と考えている地点とがかなりの距離があり, 建物内の放射性物質を点線源と見なすことができれば, 次式で与えられる。

$$R_{d\gamma} = \frac{1}{2} \frac{Q}{4 \pi d^2} \frac{3.7 \times 10^{10} \times 3600 \sum f_i E_i^{\gamma}}{1.2 \times 10^3 \times 10^3} \frac{1.6 \times 10^{-6} \mu_i B_i \exp \{ - (\mu_{bi} d_1 + \mu_{ai} d) \}}{\times \frac{s_t}{s_a} = \frac{80}{d^2} \sum f_i E_i^{\gamma} \mu_i B_i \exp \{ - (\mu_{bi} d_1$$

$$+ \mu_{ai} d) \} Q \quad (\text{rem} \cdot \text{hr}^{-1}) \dots\dots (12)$$

$$B_i = (1 + \mu_{bi} d_1) (1 + \mu_{ai} d) \therefore R_{d\gamma} = F_1 Q \quad (\text{rem} \cdot \text{hr}^{-1}) \dots\dots (13)$$

$$F_1 = \frac{80}{d^2} \sum f_i E_i^{\gamma} \mu_i B_i \exp \{ - (\mu_{bi} d_1 + \mu_{ai} d) \}$$

ここに

- Q 建物内に充満した放射性物質の量 (c)
- f_i 1崩壊あたりの i 番目の γ あるいは β を放出する割合
- E_i^{γ} ... i 番目の d 崩壊, β 崩壊に対応する γ 線のエネルギー
- μ_{ai} ... 空気の i 番目の γ 線に対する線吸収係数 (m⁻¹)
- μ_{bi} ... 建物の i 番目の γ 線に対する線吸収係数 (m⁻¹)
- μ_i ... 空気の i 番目の γ 線に対するエネルギー吸収係数 (m⁻¹)

- B_i ... i 番目の γ 線に対する Build up 係数
- d_1 建物壁の厚さ (m)
- d 建物から考えている地点までの距離 (m)
- $s_t/s_a = 1.13$ 軟組織と空気との stopping power の比

$$1 \text{ c} = 3.7 \times 10^{10} \quad (\text{dis} \cdot \text{sec}^{-1})$$

$$1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-6} \text{ erg}$$

$$1 \text{ m}^3 \text{ air} = 1.2 \times 10^3 \text{ g} \quad (20^\circ \text{C}, 1 \text{ atm})$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg} \cdot \text{g}^{-1}$$

F_1 は建物内に充満した放射性物質の構成, 建物の構造, 建物と考えている地点までの距離から決る。

被曝線量 $D_{d\gamma}$ (rem) は, 線量率 $R_{d\gamma}$ (rem·hr⁻¹) を被曝する時間 T (hr) について積分すればよいから

$$D_{d\gamma} = \int_0^T R_{d\gamma} dt \quad (\text{rem})$$

となる。

建物内に充満した放射性物質の量 Q が時間とともに減衰するとし, $Q \exp \left(\frac{-0.693 t}{T_r} \right)$ で示されるとする。ただし T_r (hr) は実効半減期である。

$$D_{d\gamma} = F_1 \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{0.693 T}{T_r} \right) \right\} Q \quad (\text{rem}) \dots\dots (14)$$

$$D_{d\gamma} = F_1 \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{0.693 T}{T_r} \right) \right\} A \quad (\text{rem}) \dots\dots (15)$$

$$F_1 = F_1 / \epsilon \int_0^x \frac{2}{60^2 \pi \cdot c_y c_z \bar{U} x_0^{2-n}} \times \exp \left\{ - \frac{1}{x_0^{2-n}} \left(\frac{y_0^2}{c_y^2} + \frac{H^2}{c_z^2} \right) \right\} dt$$

(Sutton の拡散式による)

あるいは

$$F_1 = F/\varepsilon \int_0^T \frac{2 \ln 10}{60^2 \Pi w(x_0) h(x_0) \bar{U}} \times \exp \left[- \left\{ \left(\frac{y_0}{w(x_0)} \right)^2 + \left(\frac{H}{h(x_0)} \right)^2 \right\} \ln 10 \right] dt$$

(Pasquill の方法による)

ε (hr⁻¹) は建物内の放射性物質の大気中への漏洩率である。

$$q = \varepsilon Q \quad (\text{c} \cdot \text{hr}^{-1})$$

$$D_{d,r} = F_1 \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{0.693 T}{T_r} \right) \right\} \frac{q}{\varepsilon}$$

(rem) (16)

1.2.2 放射性雲からの β , γ 線

一様な大気放射能濃度 χ_o (c·m⁻³) の放射性雲により地上で受ける線量率 R_o (rem·hr⁻¹) は、単位体積中で吸収されるエネルギーと、単位体積中で発生するエネルギーは等しいと考え、次のごとく表わすことができる。

$$R_o = \frac{1}{2} \chi_o \frac{3.7 \times 10^{10} \times 3600 \left\{ \sum_i f_i E_i^\gamma + \sum_i f_i (E_i^\beta)_{av} \right\} 1.6 \times 10^{-6} \frac{s_t}{s_a}}{1.2 \times 10^3}$$

$$= 1.00 \times 10^3 \left\{ \sum_i f_i E_i^\gamma + \sum_i f_i (E_i^\beta)_{av} \right\} \chi_o$$

(rem·hr⁻¹) (17)

ここに

$(E_i^\beta)_{av}$ i 番目の β 崩壊に対応する β 線の平均エネルギー (MeV)

点源より放射性気体、塵埃が連続排出される場合、大気放射能濃度分布 $\chi_o(x, y, z)$ は放射性気体、塵埃の排出率 q と放出源の地上よりの高さ H 、およびその時の気象条件で決まる。前項で述べた Sutton の拡散式 (2) 式、あるいは Pasquill の方法による (7) 式を用いると、(17) 式は次のように表わされる。

$$R_o = F_2 q \quad (\text{rem} \cdot \text{hr}^{-1}) \dots \dots (18)$$

$$F_2 = 1.00 \times 10^3 \left\{ \sum_i f_i E_i^\gamma + \sum_i f_i (E_i^\beta)_{av} \right\} \times \frac{2}{60^2 \Pi c_y c_z \bar{U} x_0^{2-n}} \exp \left\{ - \frac{1}{x_0^{2-n}} \left(\frac{y_0^2}{c_y^2} + \frac{H^2}{c_z^2} \right) \right\}$$

(Sutton の拡散式による)

あるいは

$$F_2 = 1.00 \times 10^3 \left\{ \sum_i f_i E_i^\gamma + \sum_i f_i (E_i^\beta)_{av} \right\} \times \frac{2 \ln 10}{60^2 \Pi w(x_0) h(x_0) \bar{U}} \times \exp \left[- \left\{ \left(\frac{y_0}{w(x_0)} \right)^2 + \left(\frac{H_0}{h(x_0)} \right)^2 \right\} \ln 10 \right]$$

(Pasquill の法による)

ただし大気放射能濃度は、考えている地点 (x_0, y_0) の濃度で一様であるとしたいわゆる Submersion model である。

被曝線量 D_o (rem) は、線量率 R_o (rem·hr⁻¹) を被曝する時間 T (hr) について積分するか、大気放射能濃度 χ_o (c·m⁻³) の代りに大気放射能積算濃度 A (c·hr·m⁻³) を用いればよいから

$$D_o = \int_0^T F_2 q dt \quad (\text{rem})$$

$$D_o = F'_2 A \quad (\text{rem}) \dots \dots (19)$$

$$F'_2 = 1.00 \times 10^3 \left\{ \sum_i f_i E_i^\gamma + \sum_i f_i (E_i^\beta)_{av} \right\}$$

考えている時間中気象条件、排出率が変化しなければ

$$D_o = F_2 T q = F_2 T \varepsilon Q \quad (\text{rem}) \dots \dots (20)$$

(6) 式で示される濃度分布をする放射性雲 $\chi_o(x, y, z)$ (c·m⁻³) による地上のある地点 $(x_0, y_0, 0)$ の γ 線量率 $R_{o,\gamma}$ (rem·hr⁻¹) は、次式で与えられる。

$$R_{o,\gamma} = \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\chi_o(x, y, z)}{4 \Pi \rho^2} \times \frac{3.7 \times 10^{10} \times 3600 \sum_i f_i E_i^\gamma 1.6 \times 10^{-6} \mu_i B_i}{1.2 \times 10^3 \times 10^3} \times \exp(-\mu_{a,i} \rho) (s_t/s_a) dx dy dz$$

(rem·hr⁻¹) (21)

$$\rho = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + z^2} \quad (\text{m})$$

大気放射能濃度分布 $\chi_o(x, y, z)$ の代りに Sutton の拡散式、(1) 式あるいは Pasquill の方法による (6) 式を用いると (21) 式は

$$R_{o,\gamma} = F'_2 q \quad (\text{rem} \cdot \text{hr}^{-1}) \dots \dots (22)$$

$$F'_2 = 1.6 \times 10^2 \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\sum_i f_i E_i^\gamma \mu_i B_i}{\rho^2} \frac{\exp(-\mu_{a,i} \rho) \exp(-y^2/c_y^2 x^{2-n})}{60^2 \Pi c_y c_z \bar{U} x^{2-n}} \times \left[\exp \left\{ - \frac{(z-H)^2}{c_z^2 x^{2-n}} \right\} + \exp \left\{ - \frac{(z+H)^2}{c_z^2 x^{2-n}} \right\} \right] \times dx dy dz$$

(Sutton の拡散式による)

あるいは

$$F'_2 = 1.6 \times 10^2 \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\sum_i f_i E_i^\gamma \mu_i B_i \times \exp(-\mu_{a,i} \rho) \ln 10}{60^2 \Pi w(x) h(x) \bar{U}} \exp \left\{ - \left(\frac{y}{w(x)} \right)^2 \ln 10 \right\} \left[\exp \left\{ - \left(\frac{z-H}{h(x)} \right)^2 \ln 10 \right\} + \exp \left\{ - \left(\frac{z+H}{h(x)} \right)^2 \ln 10 \right\} \right] \times dx dy dz$$

(Pasquill の方法による)

被曝線量 $D_{o,\gamma}$ (rem) は

$$D_{c,r} = \int_0^T F'_3 q dt$$

考えている時間中気象条件、排出率が変化しなければ

$$D_{c,r} = F'_3 T q \quad (\text{rem}) \dots (23)$$

あるいは大気放射能積算濃度 $A(\text{c}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3})$ を用いて

$$D_{c,r} = 1.6 \times 10^3 \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{\sum_i f_i E_i \mu_i B_i \times \exp(-\mu_{a,i} \rho)}{\rho^2} A(x, y, z) dx dy dz \quad (\text{rem}) \dots (24)$$

1.2.3 放射性地表面汚染からの γ 線

一様な放射性地表面汚染 $\lambda_s(\text{c}\cdot\text{m}^{-2})$ から、の地上 $r(\text{m})$ における γ 線量率 $R_{s,r}(\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1})$ は、地表面を無限平面、 γ 線エネルギーを平均値で考えると次式で与えられる。

$$R_{s,r} = 1.07 \times 10^2 (\mu_m)_{i,i,s} E_{\alpha v}^r \lambda_s \left\{ \int_{\mu_{a,r}}^\infty \frac{\exp(-y)}{y} dy + \exp(-\mu_{a,r}) \right\} \quad (\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}) \dots (25)$$

ここに

$(\mu_m)_{i,i,s}$ 組織の質量吸収係数 $(\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1})$

$E_{\alpha v}^r$ 1崩壊あたりの γ 線の平均エネルギー (MeV)

$E_{\alpha v}^r = 0.7 \text{ MeV}$ と仮定すると $\mu_a = 9.0 \times 10^{-3}(\text{m}^{-1})$ となる。 $(\mu_m)_{i,i,s} = 0.03(\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1})$ を用いると $r = 0.7 \text{ m}$ では、(25)式は次のごとくなる。

$$R_{s,r} = 12.4 \lambda_s \quad (\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}) \dots (26)$$

β 線量率については、そのエネルギーが高いときは無視できないがここでは省略する。

(25)式に Sutton の拡散式、(2)式あるいは Pasquill の方法による式、(7)式および $\lambda_s = 36 A v_g$ を代入することによって

$$R_{s,r} = F'_3 v_g A \quad (\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}) \dots (27)$$

$$F'_3 = 3.75 \times 10^3 (\mu_m)_{i,i,s} E_{\alpha v}^r \left\{ \int_{\mu_{a,r}}^\infty \frac{\exp(-y)}{y} dy + \exp(-\mu_{a,r}) \right\}$$

放射性雲の通過により生ずる放射性地表面汚染については、その通過が比較的短時間で終ると考えられるからその間気象条件、排出率は変化しないとすれば(25)式は

$$R_{s,r} = F'_3 v_g T q \quad (\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}) \dots (28)$$

$$F'_3 = 3.75 \times 10^3 (\mu_m)_{i,i,s} E_{\alpha v}^r \left\{ \int_{\mu_{a,r}}^\infty \frac{\exp(-y)}{y} dy + \exp(-\mu_{a,r}) \right\} \frac{2}{60^2 \Pi c_y c_z \bar{U} x_0^{2-n}} \exp$$

$$\left\{ -\frac{1}{x_0^{2-n}} \left(\frac{y_0^2}{c_y^2} + \frac{H^2}{c_z^2} \right) \right\} \quad (\text{Sutton の拡散式による})$$

$$F'_3 = 3.75 \times 10^3 (\mu_m)_{i,i,s} E_{\alpha v}^r \left\{ \int_{\mu_{a,r}}^\infty \frac{\exp(-y)}{y} dy + \exp(-\mu_{a,r}) \right\} \frac{2 \ln 10}{60^2 \Pi w(x_0) h(x_0) \bar{U}} \times \exp \left[- \left\{ \left(\frac{y_0}{w(x_0)} \right)^2 + \left(\frac{H}{h(x_0)} \right)^2 \right\} \ln 10 \right] \quad (\text{Pasquill の方法による})$$

放射性雲からの直接の外部線量は、その通過中比較的短時間で終るから、被曝する間の放射能の減衰については考えなかった。放射性地表面汚染からの被曝はその場所にいる限り永く続くから放射能の減衰を考慮する。被曝線量 $D_{s,r}$ は

$$D_{s,r} = \int_0^{T'} R_{s,r} \exp \left(-\frac{0.693 t}{T_r} \right) dt = F'_3 v_g \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{0.693 T'}{T_r} \right) \right\} A \quad (\text{rem}) \dots (29)$$

あるいは

$$D_{s,r} = F'_3 v_g T \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{0.693 T'}{T_r} \right) \right\} q \quad (\text{rem}) \dots (30)$$

ただし $T_r(\text{hr})$ は実効半減期、 $T'(\text{hr})$ は放射性地表面汚染のある場所に止る時間である。

1.2.4 その他の被曝

放射性雲内での呼吸による内部被曝については、体内放射線の許容量に関する ICRP 専門委員会の報告⁸⁾による。

放射性雲内での呼吸による内部被曝 $D_{inh}(\text{rem})$ は、大気放射能積算濃度 $A(\text{c}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3})$ に比例するから次式で示される。

$$D_{inh} = F_4 A \quad (\text{rem}) \dots (31)$$

F_4 は放射性核種、問題の臓器などによって決まる常数である。大気放射能積算濃度は、点源より放射性気体、塵埃が連続排出される場合は、放出源の地上よりの高さ、およびその時の気象条件が一定であれば排出量 $Tq(\text{c})$ に比例するから次式で示される

$$D_{inh} = F'_4 T q \quad (\text{rem}) \dots (32)$$

身体、衣服の放射性汚染により人体の受ける被曝は、汚染をそのままにしておくと同量になることもありうるが衣服を交換し、身体除染をおこなうことによって減少させることができる。沈着した放射性地上汚染により、汚染した飲食物摂取による人体の被曝は、複雑であるし、汚染しない飲食物を他地域から補

充することも可能であるからこれらのものは除外して考える。

1.3 被曝評価の方法

以上の解析から、原子力施設建物に内蔵された放射性気体、塵埃が大気中に放出される時、施設周辺のある地点で受ける全線量 D_{total} (rem) は、放出が比較的短時間で終り、考えている時間中放射性気体、塵埃の排出率、放出源の地上よりの高さ、およびその時の気象条件が変化しないとすれば、次式で示される。

$$\begin{aligned} D_{total} &= D_a + D_o + D_s + D_{inh} \\ &= \left[F_1 \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T}{T_r}\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + F_2 T \varepsilon + F_3 v_g T \frac{T_r}{0.693} \times \right. \\ &\quad \left. \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T'}{T_r}\right) \right\} \varepsilon + F_4 T \varepsilon \right] Q \\ &\quad \text{(rem) } \dots\dots (33) \end{aligned}$$

あるいは

$$\begin{aligned} D_{total} &= \left[F_1 \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T}{T_r}\right) \right\} \right] \frac{1}{\varepsilon} \\ &\quad + F_2 T + F_3 v_g T \frac{T_r}{0.693} \\ &\quad \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T'}{T_r}\right) \right\} + F_4 T \right] q \text{ (rem)} (34) \end{aligned}$$

あるいは

$$\begin{aligned} D_{total} &= \left[F_1' \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T}{T_r}\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + F_2' + F_3 v_g T \frac{T_r}{0.693} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{0.693 T'}{T_r}\right) \right\} \right. \\ &\quad \left. + F_4 \right] A \\ &\quad \text{(rem) } \dots\dots (35) \end{aligned}$$

で示される。ただし放射性雲からの被曝は、Submersion model について示した $F_1, F_1', F_2, F_2', F_3, F_3', F_4, F_4'$ は建物内に充満した放射物質の構成、建物の構造、考えている地点の位置、放出源の地上よりの高さ、その時の気象条件、問題の臓器などにより決まる常数である。建物内に充満した放射性核種や放出状況については施設により事故の種類により推定することもできる。

すなわちある地点で受ける全被曝線量 D_{total} は、建物内に充満した放射性物質の量、あるいは建物より大気中に放出される放射性気体、塵埃の排出率、あるいは考えている地点の大気放射能積算濃度のいずれかを求めることによって評価することができる。ただし放射物質の構成、気象条件、放出高、被曝する時間、沈着速度、漏洩率などについては別に評価する必要がある。

ある。

建物内に充満した放射性物質の量 Q は、放射性物質の構成、建物の構造が分るか、想定できれば、建物外の地点で受ける γ 線量率 R_d を測定することによって(12)式より容易に求められる。ただし建物内に充満した放射性物質の量 Q から放射性雲からの外部被曝、呼吸による被曝などを評価するときは、漏洩率 ε を仮定する必要がある。漏洩率を正確に評価、あるいは測定することは困難であるから、この評価は一般には誤差が大きくなる。

建物内に充満した放射性物質からの被曝線量 D_a の影響の大きい近距離の被曝評価や、事故直後にその規模を評価するのに重要である。

放射性気体、塵埃の排出率 q を測定することは事故時には困難と考えられる。なにゆえなら事故時には放射性気体、塵埃は必ずしも煙突を通して放出されず、かえって建物の間げきより漏洩するであろう。このことは事故時に施設周辺環境に与える被曝評価には野外における放射線、放射能の測定が特に重要であることを意味する。平常時の運転では問題になるような量の放出であれば測定、管理されるであろうから排出率 q からかなり正確に被曝を評価できることになる。

大気放射能積算濃度 A より被曝を評価することはもっとも直接的である。通常原子力施設よりある程度以上の距離では、飲食物による被曝を除けば事故時の被曝は、呼吸による内部被曝が最大となる。大気放射能積算濃度 A は大気放射能濃度 X_a を測定することにより求められる。濃度 X_a の測定はなんらかの方法で放射性気体、塵埃を集めておこなうか、放射性雲からの放射線量率 R_a を知ることによって求められる。線量率から求める方法は短時間で結果が得られるが後述のごとく感度はよくない。沈着速度 v_g が分れば、放射性地表面汚染からの放射線量率 R_s を測定することによっても大気放射能積算濃度を求められる。この方法は放射性雲通過後評価の必要が生じたとき都合がよい。地表面の放射能汚染密度 X_s を試料採取により測定する方法は、後述のごとく正確で感度がよい。

放射線量率を測定し被曝を評価するとき、全線量率 R_{total} から被曝を評価することは可能であるが、個々の線量率たとえば建物から、あるいは放射性雲からといったように分離測定され被曝を評価するときよりも仮定する事項が多くなりそれだけ精度が落ちる。放射線量率は建物から、放射性雲から、放射性地表面汚染からと分離測定されるのが望ましい。

建物内に充満した放射性物質からの線量率は、放射

性雲の影響のない風上あるいは放射性雲の到達前に計ることにより求められる。放射性雲からの線量率のみを計るには建物からの線量率の影響の少くなる距離まで検出器を離さねばならない。放射性雲通過の初期は放射性地表面汚染からの線量率は無視できる。放射性雲通過後は放射性雲からの影響がなくなる。

任意の地点で受ける被曝線量 $D(x, y)$ は、建物内に充満した放射性物質の量 Q 、放射性気体、塵埃の排出

率 q 、放出源の地上よりの高さ H 、その時の気象条件被曝する時間 T などから決る。ある地点で受ける被曝線量 $D(x_0, y_0)$ を求めることによって評価することができる。

以上の解析に中性子線からの被曝については考慮しなかった。野外にまで中性子線が漏洩することは放射線管理上望ましくないことであるし、通常漏洩は考えられない。

2. 原子力施設の中央監視式野外放射線 モニタリング・システムの設計

本章では原子力施設周辺に配置する中央監視式野外放射線モニタリング・システムの測定対象の選定, 必要な測定範囲と測定結果を得るまでに要求される時間, 測定法および検出器の最適配置について解明し, 実際に設計・建設した中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計例についても詳論する. このシステムは, その時その時の原子力施設周辺における放射線, 放射能のレベルについて最初の情報を得ることを第1の目的にしている.

2.1 測定対象の選定

原子力施設建物, 格納容器などに内蔵された放射性気体, 塵埃が大気中に放出されるとき, 施設周辺のある地点で受ける全被曝線量 D_{total} は, 建物内に充満した放射性物質の量 Q , または放射性気体, 塵埃の排出率 q , あるいは大気放射能積算濃度 A のいずれかが分れば評価できることを前章で示した. (33, 34, 35 式参照) 放射性物質の量 Q は, 建物内の放射性物質からの γ 線量率 $R_{d\gamma}$ より (12 式参照), 大気放射能積算濃度 A は放射性雲からの線量率 R_o (17 式あるいは 21 式参照), または大気放射能濃度 λ_o と被曝する時間 T (11 式参照), あるいは地表面の放射能汚染密度 λ_s (10 式参照) から評価できることについても関係を明らかにした. なお放射性気体, 塵埃の排出率 q は原子力施設周辺における測定からは, 間接的にしか求められない.

全被曝線量 D_{total} は, 建物内の放射性物質からの線量 D_d , 放射性雲からの線量 D_o , 放射性地表面汚染からの線量 D_s , および放射性雲内での呼吸による線量 D_{inh} などの合計で, それぞれ建物内の放射性物質からの線量率 R_d , 放射性雲からの線量率 R_o , 放射性地表面汚染からの線量率 R_s , および大気放射能濃度 λ_o を測定することによって評価できる. 建物内に充満した放射性物質の量 Q , または放射性気体, 塵埃の排出率 q , あるいは考えている地点の大気放射能積算濃度 A より全被曝線量 D_{total} を直接求めることは, 建物内の放射性物質からの線量 D_d , 放射性雲からの線量 D_o , 放射性地表面汚染からの線量 D_s , および放射性雲内

での呼吸による線量 D_{inh} など個々の線量を評価して全線量を求めるときより仮定する事項がふえ, 評価上の誤差を大きくする原因となるが短時間で結果が得られる. 原子力施設周辺における野外放射線モニタリング・システムを考えるに当っては全線量 D_{total} が直ちに評価できるのみでなく, D_d , D_o , D_s , D_{inh} など個々の線量が測定, 評価できるよう準備されるのが望ましい.

従って原子力施設周辺の野外放射線モニタリング・システムの測定対象を分類すると空間分布 β , γ 放射線, 大気 α , β 放射能および放射性地表面汚染となる.

2.2 測定範囲と測定結果を得るまでに 要求される時間

原子力施設周辺の野外放射線モニタリング・システムに要求される能力は, 施設周辺に居住し, あるいは立ち入る人の被曝を評価することができるとともに, 異常をすみやかに発見, 被曝がある値に達するときは, 周辺に配置されたいずれかの検出器が警報設定値以上の観測値を得て警報を発することである.

被曝線量 $D(\text{rem})$ は, 線量率 $R(t) (\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1})$ を被曝を受ける時間 $T(\text{hr})$ について積分したものと与えられる. すなわち

$$D = \int_0^T R(t) dt \quad (\text{rem}) \dots \dots (36)$$

となる. 被曝は比較的短時間で終ると考え, $R(t)$ が考えている時間中変化がないとすれば, $D = RT(\text{rem})$ となる. このようにしても実際面ではあまり大きな誤差とはならないであろう. もし線量率が一定であるとみなすことが困難であれば補正を考えればよい. Fig. 2 に線量率 $R(t)$ が時間変化のない場合, 線量率, 被曝を受ける時間, 被曝線量の関係を示す. 図から分るように被曝線量がある一定の値に達するまでの時間は, 線量率に逆比例する. 線量率の高いほど早く発見, 処置を終る必要があり, 低いときは多少遅れても差支えない. 測定を要する空間分布放射線量率, 大気放射能濃度や発見処置を終るまでに要求される時間の範囲はきわめて広いことが分る. Fig. 2 は大気放射

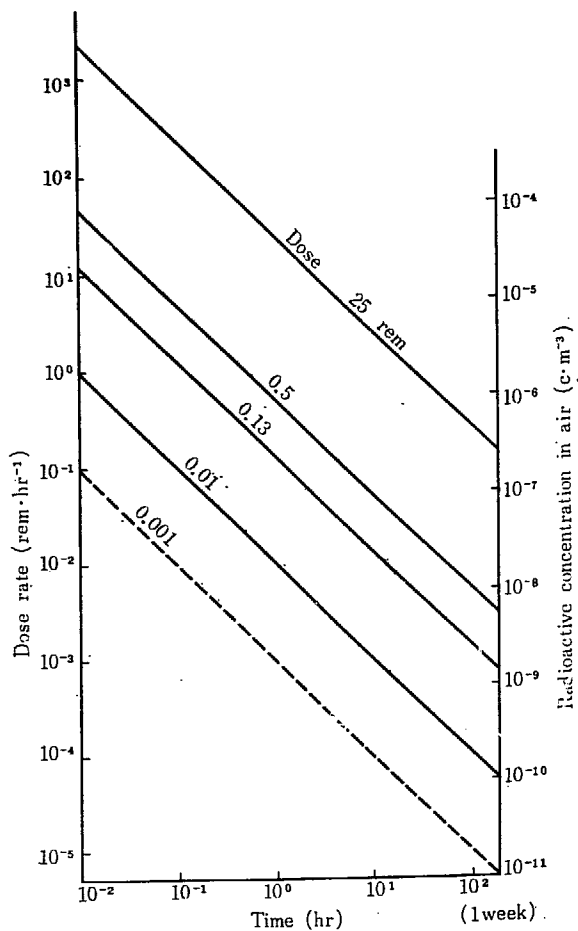


Fig. 2 Dose rate (or radioactive concentration in air) versus time for constant doses. Assumed: 10^{-9} ($\text{c}\cdot\text{week}\cdot\text{m}^{-3}$) radioactive concentration in air corresponds 0.1 (rem)

能についてはその積算濃度が 10^{-9} $\text{c}\cdot\text{week}\cdot\text{m}^{-3}$ のとき 0.1 rem の被曝を与えるとして仮定した。

次に被曝線量，空間分布放射線量率，大気放射能濃度，および放射性地表面汚染密度の測定範囲について考察する。

ICRP は職業上の被曝にたいし，計画および設計の目的には，生殖線，造血臓器の最大週線量が 0.1 rem になることを勧告している⁹⁾。また管理区域の周辺に住む一般人の被曝は職業上の被曝の 1/10 が考えられている。従って，原子力施設周辺の野外放射線モニタリング・システムでは，上記臓器については，少くも最大被曝地点における週線量が 0.01 rem 以上になるときは被曝を測定，評価できることが必要となる。このことは観測点では $0.01 \times 1/k$ rem 以上の被曝が測定，評価できねばならない。 k は最大被曝地点の被曝線量と観測点の被曝線量の比である。 k を 10 と仮定すれば，週線量 0.001 rem 以上の測定，評価が要求される。被曝を評価する必要がある最大値は人間に対す

る半致死量 LD_{50} が 400~500 rem であることから 1000 rem まで考えれば十分である。しかしこのような高い線量を野外で測定する必要性はきわめて少ない。

空間分布放射線量率の測定範囲は $0.01 \times 1/k$ $\text{rem}\cdot\text{week}^{-1}$ に相当する $0.06 \times 1/k$ $\text{m rem}\cdot\text{hr}^{-1}$ ，および自然放射線にもとづく線量率が約 0.01 $\text{mrem}\cdot\text{hr}^{-1}$ であることから考え，約 0.01 $\text{mrem}\cdot\text{hr}^{-1}$ 以上が測定できれば，前述の週線量 0.001 rem 以上を測定，評価できる。測定を要する最大値については 1 時間当たり 25 rem の被曝を測定できることを考えても測定範囲は 6 桁以上となり，きわめて広範囲である。しかし異常が発見でき，また被曝がある値に達するときは，いずれかの検出器が警報設定値以上の観測値を得て警報を発するためには，必ずしもこのように広い範囲を測定できる必要性はない。一般に使用される測定器を使用したとき，同一のもので測定できる範囲は 3 桁と考えると，測定範囲は 0.01~10 $\text{mrem}\cdot\text{hr}^{-1}$ となる。

被曝評価のためには，線量を測定することの重要性に比べ，線量率測定はそれほど重要ではない。

大気放射能濃度の測定は，連続的な職業上の被曝に対する最大許容濃度の 1/10 にさらに $1/k$ の計数をかけた値以上が測定されればよい。識別されない放射性核種の空気中の最大許容濃度は，連続的な職業上の被曝の場合， α 放射性核種については 4×10^{-13} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ ， β 放射性核種については ^{90}Sr ， ^{129}I ， ^{210}Pb ， ^{227}Ac ， ^{228}Ra ， ^{230}Pa ， ^{241}Pu および ^{240}Bk のうちの 1 つも含まれない場合 10^{-9} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ である。

従って，測定を要する濃度範囲は，最大被曝地点の被曝線量と観測点の被曝線量の比， k を 10 と仮定すれば α 放射性核種について 4×10^{-15} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上， β 放射性核種については 10^{-11} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上となる。一方大気中には天然に存在する Rn および Tn とその崩壊生成物があり，その濃度は場所により，時間により著しく変化している。大気中の Rn 濃度は通常 5×10^{-10} ~ 10^{-12} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度，Tn 濃度はそれ以下である。Rn および Tn の崩壊生成物の実効半減期は比較的短く，それぞれ約 40 分，約 11 時間であるので，集塵後 4~5 時間まって Rn の崩壊生成物の濃度を集塵直後の約 1/100 することによって問題としている核種を 10^{-11} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ まで検出することができる。

α 放射能汚染が屋外で単独に起る可能性は少ないし，自然放射能の存在によって， 4×10^{-15} $\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ までのレベルを連続測定するためには，自然放射能の減衰を 72 時間程度まつか，特殊な測定法による以外ない。

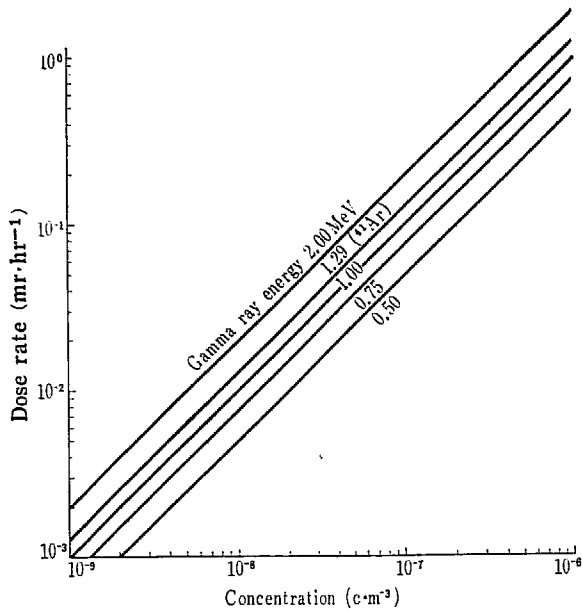


Fig. 3 Gamma dose rate versus radioactive concentration in air

従って、連続モニタリングをおこなうときの検出感度としては、 $10^{-11} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ 考えればよいといえる。

Fig. 3 に (17) 式によって計算した γ 線エネルギーをパラメータに、大気放射能濃度と γ 線量率との関係を示す*。 γ 線エネルギーが 0.7 MeV^{**} のとき γ 線量率が $0.01 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ になる大気放射能濃度は $1.5 \times 10^{-8} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ である。 γ 線量率は γ 線エネルギーが一定ならば大気放射能濃度に比例する。 γ 線モニターの測定範囲が $0.01 \sim 10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ であればこの測定器によって $1.5 \times 10^{-8} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ までの大気放射能濃度を測定することができる。この計算では放射性物質は無限半球の大気中に均一に分布しているとしている。大気放射能濃度を測定する塵埃モニターの測定範囲は、 $10^{-11} \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ になるよう設計するのが適当といえる。このように設計すれば γ 線モニターおよび塵埃モニターによって大気放射能濃度は、 $10^{-11} \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲を連続モニターできる。さらに広い濃度については、集塵試料から求めることができる。詳しいことは、2.3 測定法で述べる。

Fig. 4 に (26) 式で計算した γ 線の平均エネルギーが 0.7 MeV のとき、地上 0.7 m における放射性地表面汚染と γ 線量率の関係を示す。

γ 線量率が $0.01 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ になるのは、放射性地表面汚染が $0.81 \text{ c}\cdot\text{km}^{-2}$ ($1.8 \times 10^4 \text{ dpm}\cdot(10 \text{ cm})^{-2}$) の

* $1 \text{ rem} \doteq 1 \text{ r}$ とした

** 事故のときの核分裂生成物の平均エネルギーと仮定

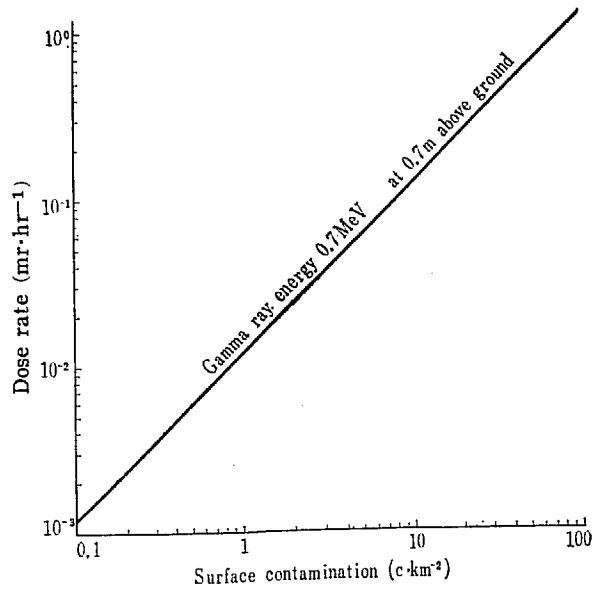


Fig. 4 Gamma dose rate radioactive surface contamination

ときである。このことはこれ以下の地表面汚染については連続モニタリングすることは困難であることを意味する。微量の地表面汚染の測定、評価には、試料を採取、測定することが必要となる。

$10^{-11} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下の大気放射能濃度や $0.81 \text{ c}\cdot\text{km}^{-2}$ 以下の放射性地表面汚染は連続モニタリングすることは困難であるが、試料を採取測定することによって時間を要するが検出することができる。Fig. 2 から分るようこの程度の大気放射能濃度あるいは地表面汚染のときは測定結果を得るまでに1週間を要してもさしつかえない。さらに高い大気放射能濃度 $10^{-11} \sim 1.5 \times 10^{-8} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ については、大気中の塵埃をなんらかの方法で集め、自然放射能のある程度減衰する時間をまつことによって連続モニタリングできるので測定結果は、試料を採取測定する方法に比べきわめて短い時間で得られる。大気放射能濃度がさらに高く $1.5 \times 10^{-8} \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ になると放射性雲からの γ 線量率を測定することによって求められ、集塵や自然放射能の減衰をまつ時間が不要となり、さらに短時間で測定結果が得られる。大気放射能濃度の測定は、低レベルでは測定結果を得るまでに日時を要するが採取した試料によって、中レベルでは塵埃モニターによって連続的に何時間かの時間遅れで、高レベルでは γ 線モニターによって直ちに測定評価することはきわめて実際的である。放射性地表面汚染の測定においても同様に汚染レベルによって、試料採取により測定する方法と、 γ 線モニターによる測定法を組合せ、要求される時間以内に測定結果を得ることが可能である。

2.3 測定法

2.3.1 空間分布放射線

空間分布 γ 放射線の測定に使用される検出器としては、電離箱、GM 計数管、シンチレーション計数管および写真乳剤によるものなどがある。電離箱はエネルギー依存性が少なく、線量測定に適しているが、必要な感度を得るためには高感度の電位計を要し、装置が複雑となる。検出器相互間の比較や、高精度の測定には都合がよいが、連続モニタリングとしては必ずしも適していない。GM 計数管は、エネルギー依存性が多いが、簡便で必要な感度が容易に得られ、特にハロゲン計数管を使用するときは寿命も十分長く、広い温度範囲、 $-55\sim 75^{\circ}\text{C}$ で使用でき、動作電圧も低く、定性的測定として野外の使用に適している。シンチレーション計数管は、シンチレータとして NaI (Tl) を使用したものは、GM 計数管以上にエネルギー依存性がある。感度は高く、分解時間は短く必要ならエネルギー測定も可能であるが GM 計数管を使用する時より装置が複雑となる。ここで考える野外放射線モニタリング・システムではシンチレーション計数管を使うほどの必要はない。写真乳剤によるものは、広い範囲の線量測定ができるが線量率を連続的に測定することはできない。従って、次にのべる空間分布 β , γ 放射線測定にも便利な、光感性がなく、容易に水密な取付けのできる側壁型ハロゲン GM 計数管を選び、 β 線の影響を受けないよう適当な遮蔽をほどこす。

空間分布 β , γ 放射線測定用検出器は、 γ 線用と同じ側壁型ハロゲン計数管とし、 β 線の遮蔽を除く。両検出器を接近させて測定をおこない、 β 線遮蔽体による γ 線の吸収の補正をして2つの測定値の差を求めることにより、 β 線による値のみを容易に算出できる。

2.3.2 大気放射能

大気放射能は放射性雲からの β , γ 線を直接測定することによっても知ることができる。特に A, Kr, Xe など放射性気体は、外部被曝が問題となるので、この方法は直接的である。その場所の濃度を知るためには、ガス・モニターによらねばならないが、被曝評価上は放射性気体の濃度を測定する必要性は少いので、この野外放射線モニタリング・システムにはガス・モニターは置かない。I は分子状で放出されるかもしれないが放出後凝縮核に付着し粒子になると考えること

ができる。

粒子状のものに対して、必要な感度を得るためには、なんらかの方法で放射性塵埃を集めて測定する必要がある。沓紙式集塵法は電気集塵法に比べ、放射性塵埃の採取においても、採取後の測定においても簡便なのでこの方法を用いる。塵埃の多いとき、無人で連続集塵しても沓紙に塵埃がつまり集塵不能におちいることのないよう沓紙は連続移動とする。集塵後 α 放射能測定は ZnS シンチレーション計数管、 β 放射能については、端面型 GM 計数管を用い装置が簡単になるようにする。

2.3.3 計数誤差

空間分布放射線、大気放射能を GM 計数管、シンチレーション計数管など電気的な検出器によって計数、測定する場合、計数誤差が生ずる。計数誤差の原因の1つは原子の壊変が統計的現象であるために生ずる統計的誤差で他の1つは検出器および計数装置の有する有限な不感時間あるいは分解時間による計数落しの誤差である。統計的誤差が問題になるのは計数率の低いときであり、計数落しの誤差が問題になるのは計数率の高いときである。計数誤差は全体の測定精度から考え、要求される測定範囲で $\pm 10\%$ 程度以下であれば十分である。

計数誤差をある値以下にするために必要な計測時間あるいは計数率計の時定数、大気塵埃放射能測定における空気吸引量、計数装置のスケールダウンについて考察する。

計数値の相対的標準偏差が全測定範囲で $\pm 10\%$ 以下になるような計測時間を求めてみる。これは計数率のもっとも低い測定において、バックグラウンドの補正をおこなった計数値の相対的標準偏差を $\pm 10\%$ にするために必要な計測時間に相当する。

いま試料の計数を n_s 、計数時間を t_s 、バックグラウンド計数を n_b 、計測時間を t_b とすると求める測定値は、

$$(n_s/t_s - n_b/t_b) \pm \sqrt{n_s/t_s^2 + n_b/t_b^2} \dots\dots\dots (37)$$

となる。 $\sqrt{n_s/t_s^2 + n_b/t_b^2}$ は計数の標準偏差である。

γ 放射線量率を測定する場合、側壁型ハロゲン GM 計数管として Anton 106 を使用すると、この GM 計数管の壁材などの汚染による、バックグラウンド計数

* 検出器のバックグラウンドは、あらかじめ十分の時間をかけて測定すれば計数誤差を少なくできるが、使用中汚染したり遮断条件が変わることなどからこの程度の値となる。

率は、5 cpm ± 1 cpm 程度*。感度は Ra の γ 線に対し 1 cpm が約 0.34 μr·hr⁻¹ に相当している。自然放射線、約 8.5 μr·hr⁻¹ を相対的標準偏差、±10% で測定するための計測時間は、(37)式より 5.8 分となる。すなわち 6 分間計測すれば計数値の相対的標準偏差は ±10% 以下とすることができる。β, γ 線量率測定の場合は、γ 線量率のみ測定する場合より同じ計測時間なら相対的標準偏差は少なくなる。

計数率計を使用するときは、指示の相対的標準偏差は、 $1/\sqrt{2n_s CR}$ で表わされる。ここに C, R は、それぞれ計数率計の積分回路の容量と抵抗で CR は時定数である。Anton 106 GM 計数管で自然放射線を測定する場合、相対的標準偏差を ±10% とするためには、 $n_s=0.5$ cps であるから、時定数は 100 sec とすればよい。

次に 10⁻¹¹ c·m⁻³ の濃度の気塵放射能を相対的標準偏差、±10% で測定するのに必要な空気吸引量を求めてみる。集塵効率を 100%、計数効率を 10%、検出器のバックグラウンドを 10 cpm±2 cpm、計測時間を 6 分、空気吸引時間を 1 時間とすると、(37)式より 250 l·min⁻¹ の割で空気を吸引すればよいことが分る。空気吸引量が 250 l·min⁻¹ であれば 1 週間分の集塵試料から汎用の放射能測定装置で 4×10⁻¹⁵ c·m⁻³ までの気塵放射能濃度を測定できる。

次に計数落しの誤差について考える。放射線検出器、計数装置はそれぞれ不感時間、分解時間をもっているからこの時間以内に連続して放射線が入った場合には計数落しが生ずる。この装置で測定できる最大値は、γ 放射線量率については 10mr·hr⁻¹ とした。GM 計数管の不感時間は、一般に用いられるもので 100~300 μsec, Anton 106 GM 計数管で 100 μsec である。

不感時間による数え落しのために計数効率は

$$N'/N = 1/(1 + N\tau) \dots\dots\dots (38)$$

となる。ただし N は単位時間に起る真の計数、N' は単位時間の実際の計数、τ は不感時間である。従って 10% の数え落しを生ずる計数率は、1111 cps で、これは Ra からの γ 線に対し 23 mr·hr⁻¹ に相当する。この GM 計数管は 10 mr·hr⁻¹ までの測定には十分たえる。計数装置の電気的計数回路の分解時間は比較的短いので計数落しが問題となるのは通常計数回路のあとにつける機械的な度数計である。度数

計の分解時間によって計数回路に要求されるスケールダウンをどうするかが決ってくる。この装置では分解時間 0.015 sec の回転度数計を使用するとする。回転度数計は窒息型であるから現象が記録される確率は

$$N'/N = \exp(-N\tau) \dots\dots\dots (39)$$

で与えられる。τ は度数計の分解時間である。N'/N=0.9 とするためには N=7(sec⁻¹) となる。γ 線量率が 10 mr·hr⁻¹ のときの計数率は約 490 cps であるから計数装置は 1/70 以下にスケールダウンされる必要がある。計数器のスケールダウンは最大 1/80 とし、常時使用するのは簡単で動作の安定な 2 進計数法による 1/8、放射線レベルが上昇したときは 10 進計数を加え 1/8×1/10 とするのが適当である。

大気 β 放射能を不感時間 100 μsec の GM 計数管で同じ型式の計数装置で測定すると 10% の計数落しとなる濃度は 1.5×10⁻⁸ c·m⁻³ で、前節で述べた測定範囲の最大値と合致している。

大気 α 放射能の測定は、検出器にシンチレーション計数管を使用するから、検出器の不感時間は GM 計数管に比べずっと短く、不感時間に帰因する計数落しは問題にならない。大気 α 放射能は天然に存在する Rn および Tn とその崩壊生成物が測定できればよい。10⁻⁹ c·m⁻³ まで測定するためには計数装置は 1/10 にスケールダウンされるものであればよい。もし集塵後放射能の減衰をまって 10⁻¹⁰ c·m⁻³ まで測定するならば計数装置でスケールダウンされる必要がなくなり、装置はきわめて簡単なものとなる。

2.3.4 むすび

上述の測定法によって、γ 線量率、γ 線量、大気放射能濃度を測定するとき、測定できる範囲を Fig. 5 に示す。実線をほどこした部分は計数誤差 ±10% 以下、破線をほどこした部分は計数誤差 ±50% 以下である。γ 線モニターによって γ 線量を測定する場合

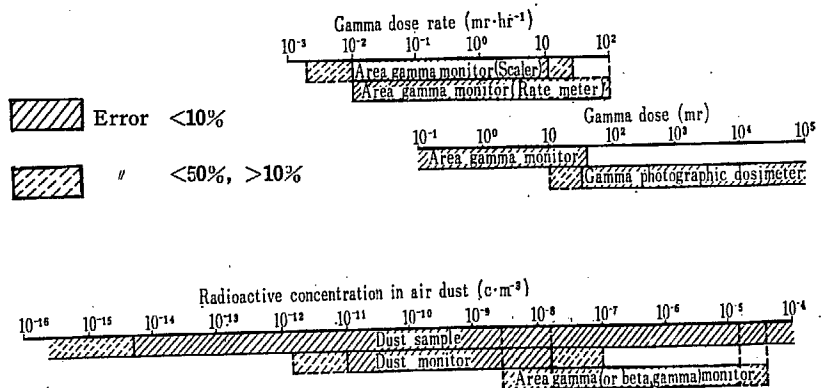


Fig. 5 Schematic representations of measuring methods

は、5桁の度数計を使用、計数は計数装置によって1/8にスケールダウンされるとした。

このような測定法を用いることによってきわめて広い範囲の γ 線量率、 γ 線量、大気放射能濃度を測定することができる。

測定誤差の原因となる γ 線量率測定上の検出器の方向依存性、エネルギー依存性、大気放射能測定上の濾紙の集塵効率、自己吸収、後方散乱、検出器のエネルギー依存性などについてはここでは論じない。

空間分布放射線測定用検出器は、建物屋上または、ポール上に取付けると、野外において人為的妨害が少く、放射性雲からの線量率を測定するのに地物の影響が少い。

2.4 検出器の最適配置

本節では第1章で解析した大気拡散、沈着ならびに被曝解析結果にもとづき数値計算をおこない、原子力施設周辺に配置する中央監視式野外放射線モニタリング・システムの検出器の最適配置について説明する。ここに最適配置とは最少の検出器数によって所期の目的を達成することのできるものをいう。

問題はきわめて複雑であるので解析はできるだけ単純化して進める。大局的に放射線モニタリング・システムを考えあとで必要な補正をする。一般的に論ずるため次の仮定をもうける。

- 1) 放出源について
点源と考える。
放出率は一定で長く続くか、または瞬間放出とする。
放出高は10 m ないし 50 m とする。
- 2) 地形について
周辺は平坦地と考え、地形の凹凸、地物の影響はないとする。
- 3) 気象について
風向、風速は定常的であるとする。
降水はないとする。
- 4) 放出される放射性物質について
原子炉事故については核分裂生成物の選択的放出があるとする。
放出された核分裂生成物は考えている地点に達するまで減衰はないとする。
沈着があっても放射性雲の濃度は変わらないとする。

2.4.1 γ 線検出器の配置

a) 建物内の放射性物質からの γ 線量率測定のための検出器の配置

事故などによって建物内に充満した放射性物質によって建物外の地点の γ 線量率を測定し、被曝線量を評価するとともに、建物内の放射性物質の内蔵量を推定するための γ 線検出器の配置について解析する。 γ 線量率は(12)式から計算することができる。 γ 線量率は建物内の放射性物質の量に比例し、距離に逆比例する(Fig. 12 参照*)、図は建物内に充満した放射性物質の量 Q が、それぞれ 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 c ときの γ 線量率と距離の関係を示している。建物内に 10^3 c の放射性物質が充満したとき、これからの γ 線量率は0.3 km の距離で $0.01 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ となる。 γ 線検出器の測定範囲が $0.01\sim 10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ であれば数個の検出器を適当な距離に配置することによって、きわめて容易に建物内に充満した放射性物質の量を評価することができる。また建物内の放射性物質の量と漏洩率、放出高、そのときの気象条件から野外の汚染分布ならびに周辺に居住しあるいは立ち入る人の受ける被曝線量を求められることについてはすでに詳論した。

b) 放射性雲からの γ 線量率測定のための検出器の配置。

原子炉事故などに伴う放射性気体、塵埃の放散によるある程度以上の被曝は、放射性雲からの γ 線量率を測定することによってただちに評価できることをすでにのべた。このための γ 線検出器の配置について解析する。

大気中に放出された放射性雲からの地上における γ 線量率を(21)式に従って近似計算した結果をFig. 6~10に示す。計算方法は文献10によった。 γ 線量率は放射性気体、塵埃の放出率に比例し、風速に逆比例するから一般性をもたせるため図は放出率 $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (あるいは放出量1 c)、風速 $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ について示してある。また原子炉事故などによって核分裂生成物が建物内に充満し、建物外に漏洩するときその実効の高さとして10 m、 γ 線の平均エネルギーは 0.7 MeV と仮定した¹⁾。

Fig. 6 は風下軸上の地上における γ 線量率(あるいは線量)分布、Fig. 7~10 は、それぞれ風下0.3, 0.6, 1, 2 km における風と直角方向の地上における γ 線量率(あるいは線量)分布である。各図とも大気

* 建物内に充満した放射性物質の構成、建物の構造についてはJAERI-6005(1960)によった。

Release rate(or amount) : $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (or 1 c)
 Wind speed : $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$
 Release height : 10 m
 Gamma ray energy : 0.7 MeV
 A, D, F : Stability of atmosphere

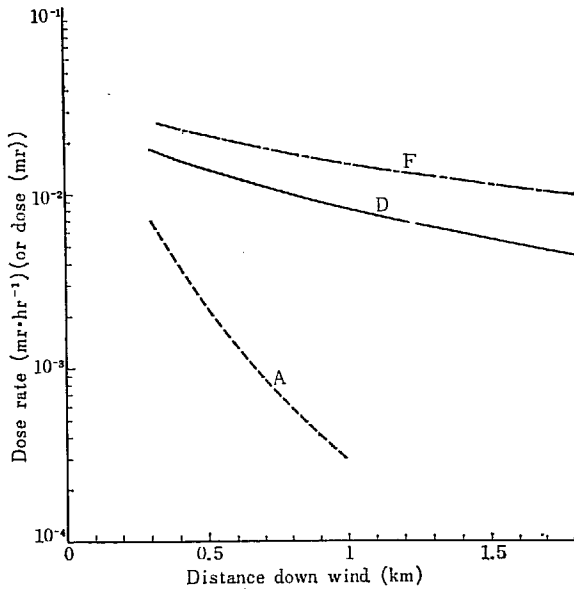


Fig. 6 Calculated gamma dose rate (or dose) from radioactive cloud at ground level

安定度 A, D, F の場合について示したが, 風下 2 km では安定度 A, のときはきわめて低い線量率 (あるいは線量) となるので略した. 安定度 D, F では Fig. 6 から分るよう風下軸上の線量率 (あるいは線量) は風下距離によってあまり変わらない. また風と直角方向の線量率 (あるいは線量) の拡がりも Fig. 7~10 から分るよう風下 0.3 km 以上の距離ではあまり変わらない. 安定度 A の場合は放射源からの距離が遠くなると急激に線量率 (あるいは線量) が低下することが Fig. 6 から分る. このことは安定度 A のときは, ある程度以上の距離では, 放射性雲からの γ 線を検出することが困難なことを意味する.

γ 線検出器が異常を判別し, 警報を発することのできる最低のレベルをバックグラウンド放射線の上に $0.05 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ と仮定すれば, 放射性電からの γ 線量率が $0.05 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ 以上になる地点に少くも 1 つの γ 線検出器が配置されれば異常をただちに知ることができる. このような配置は, Fig. 7~10 より求めることができる. すなわち放出率/風速がある値のときの線量率分布から γ 線量率が $0.05 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ になる位置

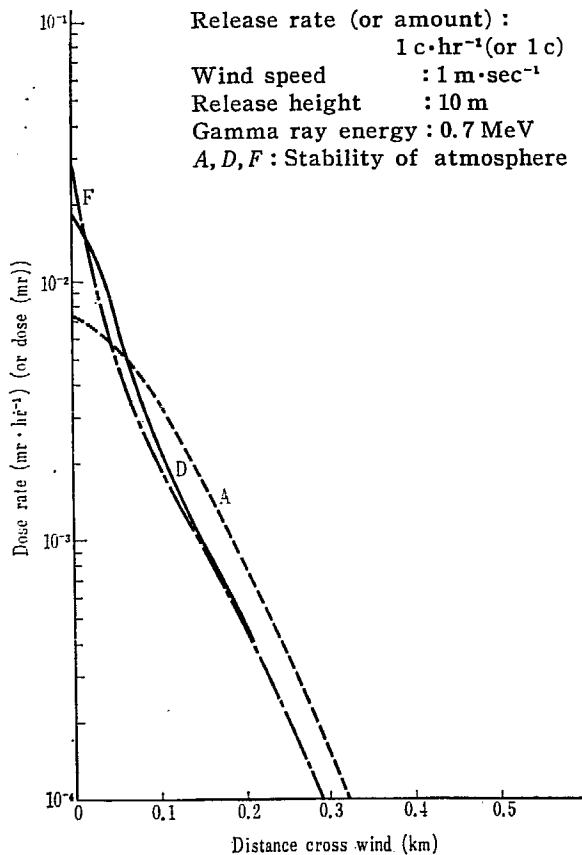


Fig. 7 Calculated gamma dose rate (or dose) from radioactive cloud at ground level 0.3 km down wind

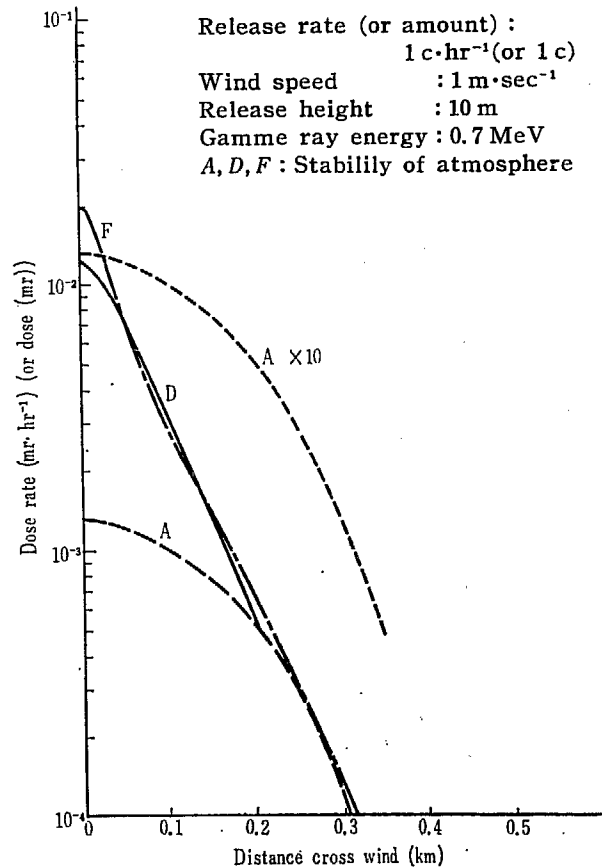


Fig. 8 Calculated gamma dose rate (or dose) from radioactive cloud at ground level 0.6 km down wind

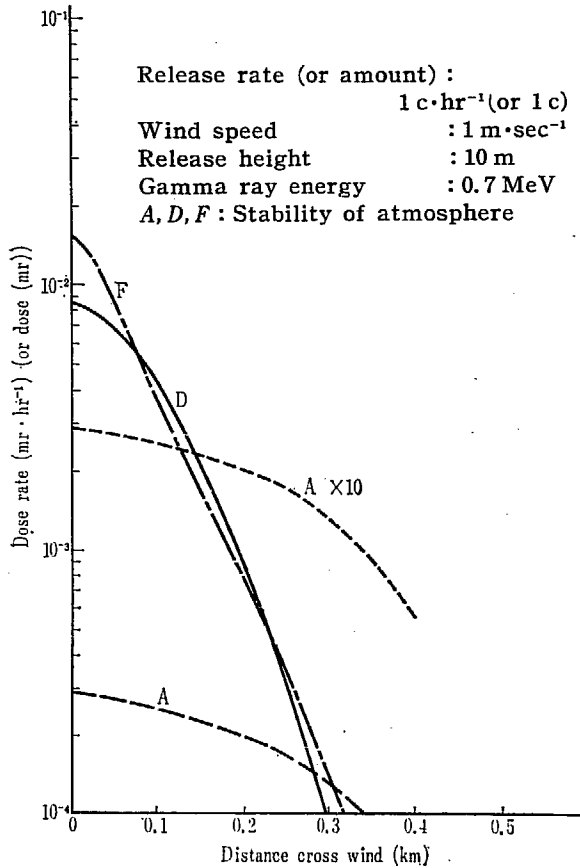


Fig. 9 Calculated gamma dose rate (or dose) from radioactive cloud at ground level 1 km down wind

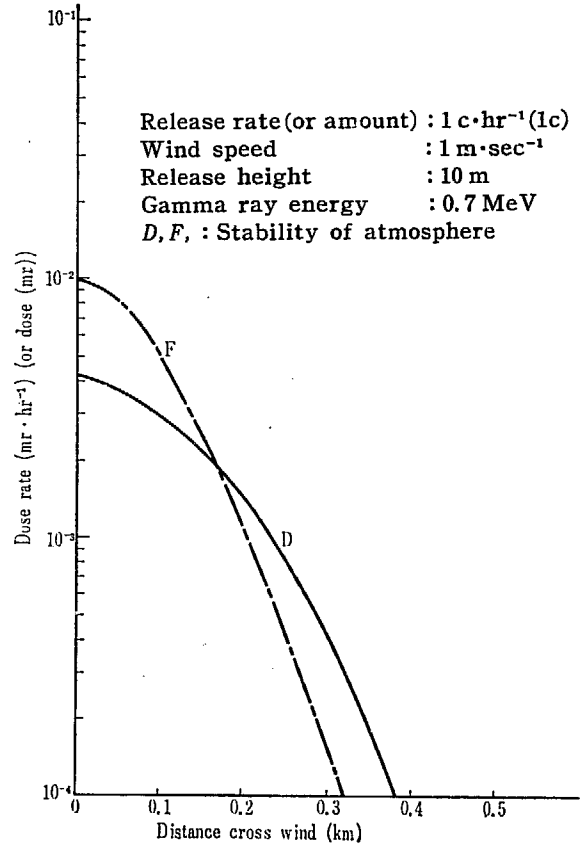


Fig. 10 Calculated gamma dose rate (or dose) from radioactive cloud at ground level 2 km down wind

を求めることによって得られる。Fig. 11 は安定度 D , F について放出率/風速が $100, 70, 50 \text{ c} \cdot \text{hr}^{-1} / \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ のとき、 γ 線量率が少くも $0.05 \text{ mr} \cdot \text{hr}^{-1}$ となる風下距離とその距離における最大幅、あるいは放出点をはさむ最大角度を示すもので、 γ 線検出器を配置する風下距離とその距離における最大間隔を意味する。

γ 線検出器を配置する間隔は、放出率が増加するほど、また近距離に配置されるほど少なくてすむことが分る。大気安定度 A については放出率/風速が $100 \text{ c} \cdot \text{hr}^{-1} / \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ についてのみ示したが、放出源より $0.7 \sim 0.8 \text{ km}$ 以上の距離では検出器をきわめて密に配置することが必要となる。

c) 建物内の放射性物質および外部に漏洩した放射性雲からの γ 線量率と検出器を配置する距離

放射性物質の野外への放出がある時は、建物内に放射性物質が貯えられ、これからの γ 線量率が無視できなくなることがあり得る。

Fig. 12 に漏洩率/風速 $= 0.1\% \cdot \text{day}^{-1} / \text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ の時*, (12) 式で計算した建物からの γ 線量率, (21) 式

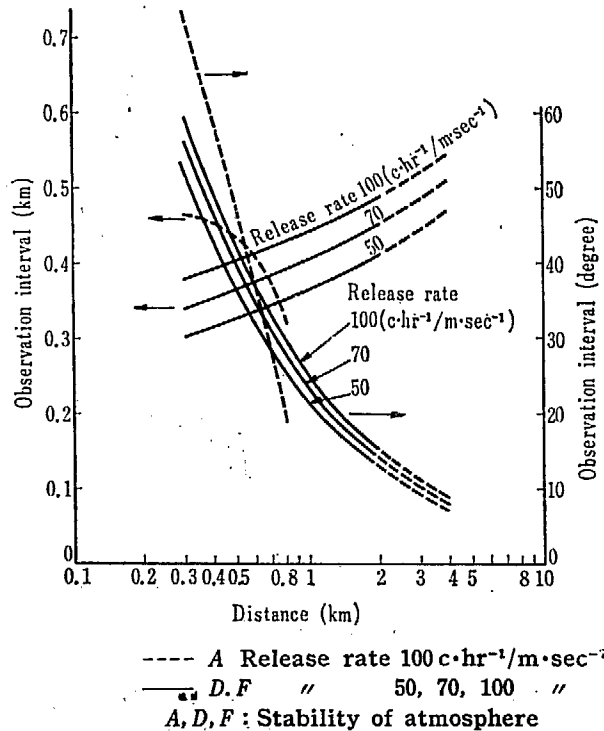


Fig. 11 Necessary observation interval (Alarm level $0.05 \text{ mr} \cdot \text{hr}^{-1}$)

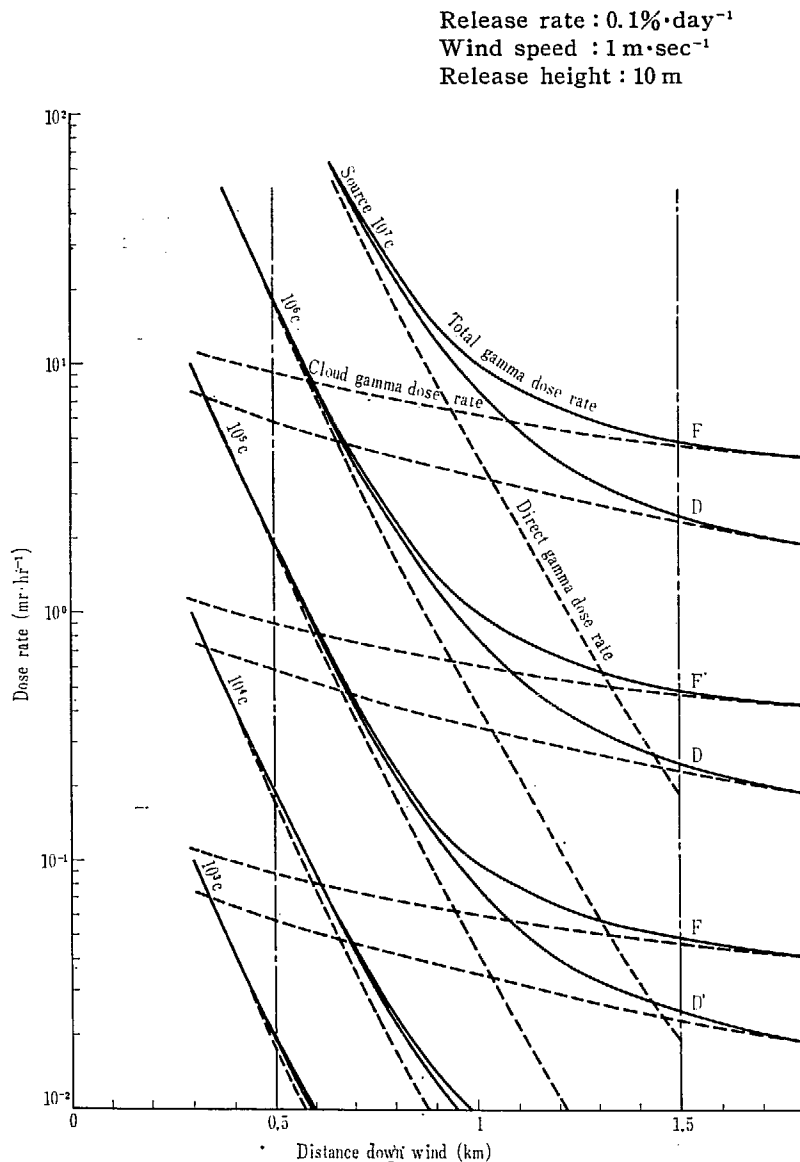


Fig. 12 Calculated gamma dose rate from building and radioactive cloud at ground level.

で計算した放射性雲からの γ 線量率および全 γ 線量率を示す。事故直後を考えて地表面汚染からの γ 線量率の影響は無視した。これから γ 線モニターをおく建物からの距離は、放射性雲からの γ 線量率を正しく評価するためには、建物からの直達 γ 線の影響が無視できる1.5 km以遠がよいことが分る。

一方建物からの γ 線量率を測定、建物内に貯えられた放射性物質の量を推定するには、放射性雲からの影響の無視できる0.5 km以下の距離あるいは放射性雲

* 原子炉室から外部への漏洩率は、JPDR 原子炉の災害解析では事故直後で $0.5\% \cdot \text{day}^{-1}$ 、米 AEC の Reactor site criteria (10 CFR part 100) では $0.1\% \cdot \text{day}^{-1}$ がとられている。

からの影響のない風上側で測定するのがよいことが分る。

d) 地表面汚染からの γ 線量率

大気汚染が継続すると地表面汚染が生じ、これからの γ 線量率が無視できなくなる。大気放射能濃度が一樣で、沈着速度 v_d を $1 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ と仮定すると数時間で地表面汚染からの γ 線量率と放射性雲からの γ 線量率が同程度となることに注意しなければならない。地表面汚染は、放射性雲通過後もその物理的半減期に従って減衰しながら長く継続する。この観測値から大気放射能積算濃度を評価することが可能である。Fig. 13 に γ 線エネルギーを0.7 MeV、沈着速度 v_d を $1 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ としたとき地上0.7 mにおける γ 線量率と地表面の大気放射能積算濃度との関係を示す。 γ 線量率の測定範囲が $0.01 \sim 10 \text{ mr} \cdot \text{hr}^{-1}$ であれば約 $2 \times 10^{-8} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ の積算濃度を評価することができる。

2.4.2 大気塵埃放射能検出器の配置

大気中に放出された気体、塵埃放射性物質がいかにか拡散、稀釈されるかによって大気塵埃放射能検出器の最適配置が決ってくる。点源より放出される煙の濃度分布をPasquillの方法およびSuttonの拡散式から求めてみる。

まず英国気象局で開発された大気拡散に関するPasquillの方法によって

解析を進める。大気中に放出された気体、塵埃放射性物質の濃度は放出率に比例し、風速に逆比例するから一般性をもたせるため放出率 $1 \text{ c} \cdot \text{hr}^{-1}$ (あるいは放出量 1 c) 風速 $1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ について数値計算したのが Fig. 14~18である。Fig. 14 は(8)式で計算した風下軸上の地上濃度分布で大気安定度A, D, Fについて、また放出源の地上よりの高さ10, 20, 40, 60 mについて示した。Fig. 15~18 は(7)式で計算した地上の平面濃度分布である。Fig. 15~17 は地上放出において大気安定度がそれぞれA, D, Fについて示したものであり、Fig. 18 は大気安定度の出現頻度の通常一番多くなる大気安定度Dについて放出高が40 mのときについて示したものである。

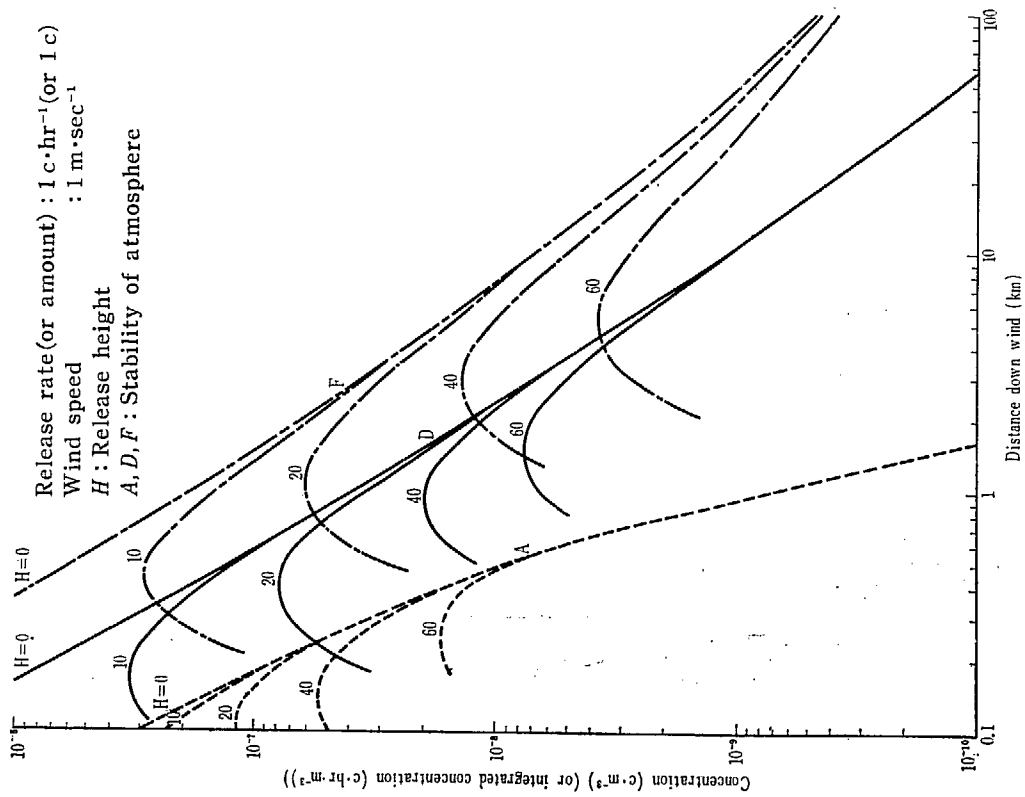


Fig. 14 Calculated concentration (or integrated concentration) at ground level

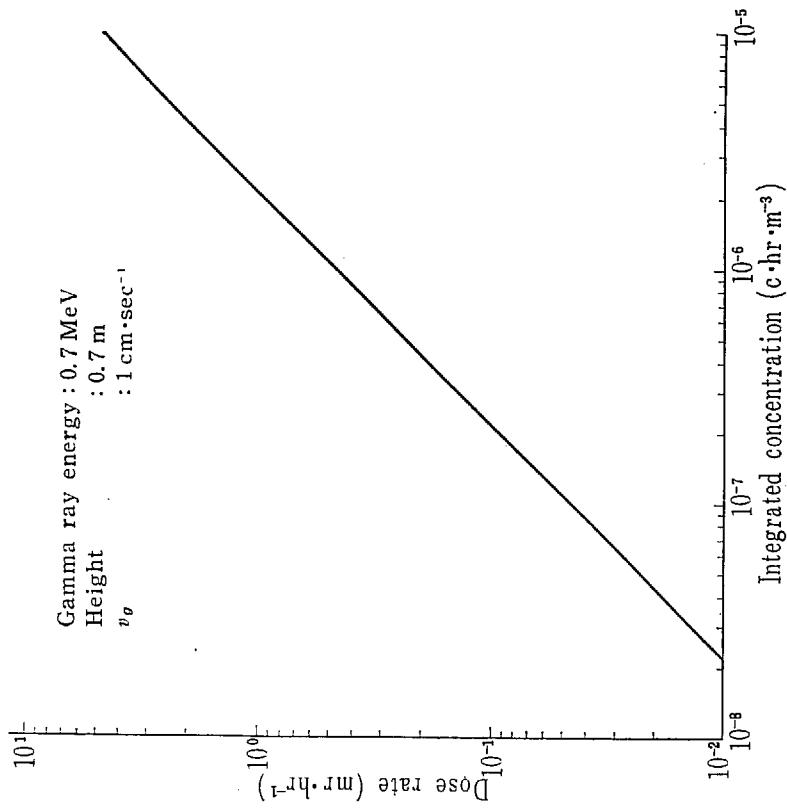


Fig. 13 Calculated gamma dose rate from surface contamination

Release rate (or amount) : $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (or 1 c)
 Wind speed : $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$
 Release height : 0 m
 Stability of atmosphere : A

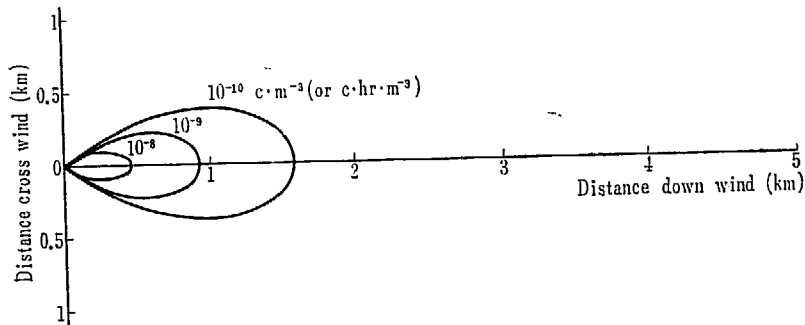


Fig. 15 Calculated concentration (or integrated concentration) at ground level

Release rate (or amount) : $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (or 1 c)
 Wind speed : $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$
 Release height : 0 m
 Stability of atmosphere : D

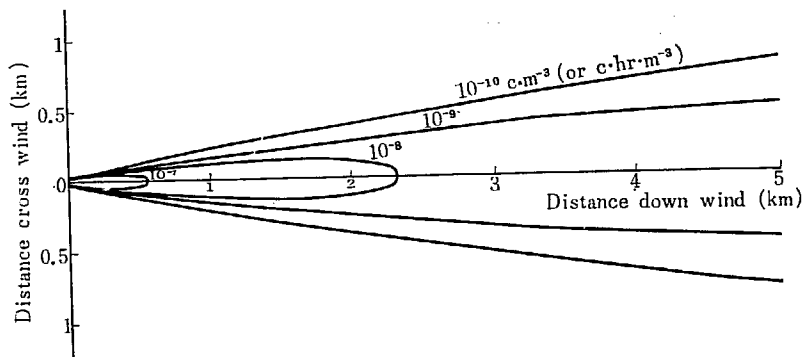


Fig. 16 Calculated concentration (or integrated concentration) at ground level

Release rate (or amount) : $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (or 1 c)
 Wind speed : $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$
 Release height : 0 m
 Stability of atmosphere : F

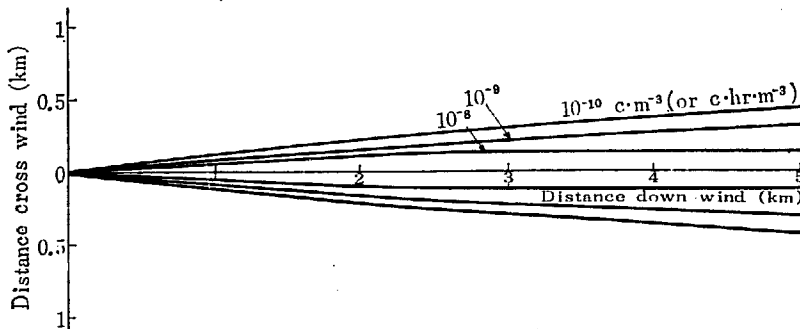


Fig. 17 Calculated concentration (or integrated concentration) at ground level

Sutton の拡散式 (2 式参照) に従って数値計算した結果¹¹⁾でも濃度分布の傾向は同じでいずれの場合も濃度は風下軸上でもっとも高く、また煙突の地上よりの高さの低いほど気層の不安定な場合ほど最高濃度地点は発煙点に近づき、煙突の地上よりの高さが高く、気層の安定な場合ほど最高濃度地点は発煙点より遠くなる。

煙突の地上よりの高さ 10 m ないし 50 m について、気層の安定な場合、不安定な場合について考えると最高濃度地点は、Sutton の拡散式によると煙源より 0.07~9 km の範囲、Pasquill の方法によるともっとも発煙点に近いとき 0.1 km 以下もっとも遠いとき約 4 km となる。

a) 放出源からの距離

大気塵埃放射能検出器は、塵埃放射能濃度の最大となる地点に配置されることが望ましい。しかし風向や大気安定度は時間とともに変化するし、煙突の高さも幾種類かあるときは、固定の大気放射能検出器でこのようなことを実現することは不可能である。そこで風下軸上に検出器があるとして、放出高が 10 m ないし 50 m、大気安定度が A ないし F のとき、最大濃度地点の濃度の 1/10 以上の濃度になるような地点に、少くも 1 つの検出器があるための距離を求めてみる。Fig. 14 より分るように、大気安定度が A ないし F のとき、放出高が 10 m のときは、放出源より約 0.3 km の距離に 1 つの検出器があればよく、放出高が 50 m のときは約 1.2 km の距離に 1 つの検出器があればよい。もし放出高が一定ではないが 10 m ないし 50 m の範囲にあり、かつ放出源が 1 カ所に集中しているときは、放出源より約 0.3 km および約 1.2 km の距離に 1 つづつの検出器が配置されていれ

Release rate(or amount) : $1 \text{ c}\cdot\text{hr}^{-1}$ (or 1 c)
 Wind speed : $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$
 Release height : 40 m
 Stability of atmosphere : D

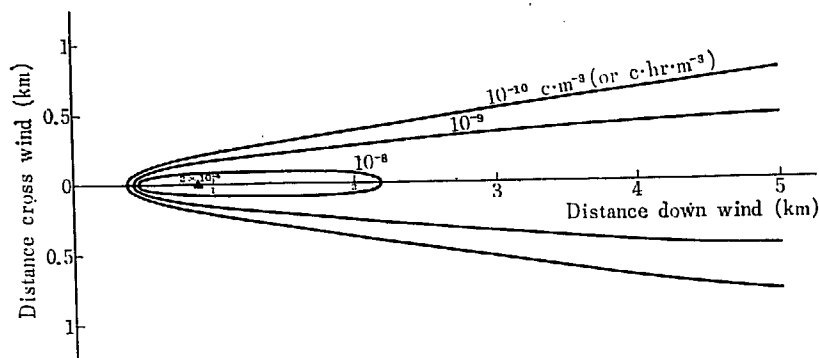


Fig. 18 Calculated concentration (or integrated concentration) at ground level.

ば、大気安定度によって最大濃度の出現する距離が変化してもつねに最大濃度の $1/10$ 以上の観測値が得られる。

Sutton の拡散式から濃度分布を計算した結果から同様にこの距離を求めてみると、放出源から約 0.3 km および約 4 km となる。Pasquill の方法による場合より遠距離となる。

これら拡散式を実際にたしかめるためには、大規模な野外実験を必要とし、技術的にもむずかしい点が多い。現在までに得られた結果では各方法によって、安定度の区分が必ずしも一致しないから各式を細かく比較することはできないが、煙源より $1,000 \text{ m}$ 以下の範囲では、最大濃度およびその出現距離はよく一致し、距離が遠くなると違いが大きくなるような傾向がみられることが報告されている¹²⁾。Sutton の拡散式は、東海村において地表 20 m 以下で煙拡散をおこなって放出源より風下 3 km までの距離について実験した結果では近似的にさしかえないことが示されている¹³⁾。また東海村で PbI_2 や ^{41}A をトレーサとした実験結果では、Pasquill の方法は実際とよく一致した¹⁴⁾¹⁵⁾。煙源より非常に近い場所では、地物の影響によりこれら拡散式は適用しがたい、距離が遠くなると放出高の違いによる影響が少なくなる。

b) 間隔

大気塵埃放射能検出器が異常を判別し、警報を発することのできる最低のレベルをバックグラウンド放射能の上に $10^{-10} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ と仮定すれば大気塵埃放射能濃度が $10^{-10} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上になる地点に少くも 1 つの検出器があればよいことになる。この間隔を求めてみる。大気安定度が A のときは Fig. 14, 15 より分るよ

うに放出源より約 0.3 km の距離に約 60° ごとに配置すればよいことになる。大気安定度が D, F のときは Fig. 14, 16~18 より放出源より約 1.2 km の距離に約 15° ごとに配置すればよいことになる。以上は Pasquill の方法によったときで、Sutton の拡散式によるときは前述のごとく配置する距離が遠くなるが間隔についてはあまり変わらないと考えられる。検出器を 15° ごとに配置することはきわめて密である。

一方主風向は時間とともに変化するため、大気塵埃放射能を検出するまでの時間遅れを長くすれば検出器

を配置する角度は広げて考えられる。

2.4.3 検出器の配置を決める上に考慮すべきその他の事項

検出器の最適配置を決める場所の選定にあたっては、次の事項についても充分考慮する必要がある。

- 1) 現在および将来の人口分布を考慮、集団被曝の評価が容易にできる場所
- 2) 甚しい傾斜、凹凸のない平坦地で地形の影響の少ない場所
- 3) 周囲に樹木、建物などのない局地的影響の少ない場所
- 4) 道路が整備され、保守点検のための巡回、建設のための器材運搬などに便利な場所
- 5) 検出器が汚染したとき、その除去に必要な水の得られる場所
- 6) 人為的妨害の少ない場所
- 7) 風速別風向頻度、各大気安定度の出現頻度、静穏、逆転層の出現頻度とその継続時間

2.4.4 むすび

原子力施設周辺に配置する中央監視式野外放射線モニタリング・システムの γ 線検出器、大気塵埃放射能検出器の最適配置を決めるため大気拡散、沈着、被曝に関する数値計算をおこないその基礎を明らかにした。 γ 線検出器によって異常をすみやかに発見するとともにある程度以上の被曝を与えるときは直ちに警報を発し異常を知ることが可能である。大気塵埃放射能検出器は、より低いレベルの異常を発見することができるが異常を直ちに発見できるモニタリング・システ

ムは、きわめて多くの検出器を必要とし実施しがたい。結局大気塵埃放射能検出器によると、異常を発見するまでにある程度の時間がかかることになる。これら両検出器は互いにあい補い野外放射線モニタリングを完全ならしめることが可能である。

2.5 中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計例

以上論述したことを基礎に中央監視式野外放射線モニタリング・システムの設計をおこなった。このシステムによって測定、被曝評価をおこなう範囲はきわめて広く、週線量で 0.001 rem 以上、最大 1,000 rem と考えられ、地域についても広範である。このような広い測定範囲、地域を効果的に被曝評価をおこなう方法は、適切な測定法と検出器配置の組合せの選択にある。

大気塵埃放射能は、きわめて低いレベル $4 \times 10^{-15} \text{ c} \cdot \text{m}^{-3}$ あるいはそれ以上の濃度については 1 週間分の集塵試料を集めて測定することが、 $10^{-11} \text{ c} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の濃度については大気塵埃放射能測定装置によって連続モニタリングが、さらに高いレベル $1.5 \times 10^{-8} \text{ c} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の濃度については γ 線測定装置によって連続モニタリングができる。大気塵埃放射能測定装置による場合は測定結果を得るまでに数時間、 γ 線測定装置による場合は数分で測定結果が得られる。大気汚染が継続するときは、放射性地表面汚染が生じ地表面試料からあるいは地表面汚染からの γ 線によって地表面汚染を測定あるいは大気汚染状況を評価することも可能である。外部線量は、フィルム線量計によってきわめて広い線量範囲を測定することができる。

2.5.1 γ 線観測網

ある程度以上の被曝を周辺住民に与えるような事故については、直ちに汚染を検出し、最初の被曝評価をおこなえるよう γ 線検出器による観測網が必要となる。原子炉災害解析によると周辺住民が事故時に受ける被曝は、放射性雲内での呼吸によって吸入された放射性ヨウ素による甲状腺被曝が最大となることが示されている。周辺住民に対し甲状腺に 1 時間あたり 25 rem 以上の被曝を与えるような事故の場合、異常を直ちに判別し、警報を発するよう γ 線検出器の必要最少な配置を求める。25 rem を選んだのは ICRP の勧告が 1959 のミュンヘン声明で追加された緊急事態の際の周辺住民の被曝としてイギリスの MRC 報告を支

持し、この報告によると甲状腺に対し 25 rad* となっている**。

Beattie¹⁰⁾ によると ^{131}I の大気中積算濃度が $1.9 \times 10^{-8} \text{ c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ のとき全放射性ヨウ素*** により 6 ヶ月児は、甲状腺に 25 rem の被曝を受ける、(大人に対しては 5.6 rem)。この積算濃度になる。 ^{131}I の放出量は放出高が 10 m のときは、地上の風下濃度分布を示した Fig. 14 より分るように大気安定度にほとんど関係なく風速 $1 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$ の時、6 c である。 ^{131}I が放出される時は ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I およびその他の核分裂生成物が付ずいして放出されるであろう。原子炉が 1~2 週間以上定常運転をおこない炉内の放射性ヨウ素が平衡に達していればその構成比は ^{131}I 1.0 に対し ^{132}I 1.52, ^{133}I 2.16, ^{134}I 2.52, ^{135}I 2.20 であるから全放射性ヨウ素は ^{131}I の 9.40 倍となる。従って、全核分裂生成物の放出量は Kr, Xe なども含め ^{131}I の 10 倍以上となろう。

甲状腺に 25 rem の被曝を与えるときの全放出量を 70 c と仮定する。建物内に貯えられた放射性物質からの γ 線は無視して放射性雲からの γ 線のみを測定できる 1.5 km、後述のごとく当地で人口密度が高く、将来さらに増加の可能性のある 4 km、および放射性雲からの γ 線は無視して建物内の放射性物質からの γ 線のみを測定できる 0.5 km の各距離に検出器を配置するとき、必要な検出器の最大間隔を求めてみる。 γ 線検出器が異常を判別し警報を発することのできる最低レベルを $0.05 \text{ mr} \cdot \text{hr}^{-1}$ としたとき、 γ 線検出器を配置する距離とその距離における最大間隔を示した Fig. 11 より、その間隔はそれぞれ 430 m (17°) ごと、510 m (8°) ごと、360 m (40°) ごととなる。以上は大気安定度 D, F の場合についてである。建物より 0.5 km

* この場合 1 rad \approx 1 rem

** 日本では原子力委員会原子炉安全基準専門部会が甲状腺に対して 150 rem という基準線量を決め(暫定的)原子炉設置許可の際、周辺の公衆の防護のための安全性を判断するため、最大想定事故(MCA)の場合同一地点に留っている公衆(小児を含む)の居住者がこの線量を越えて被曝しないこととしている。この線量は放射線審議会緊急被曝特別部会が現在の医学的見地から障害を検知し得たと文献的に報告された最小の線量(最小限界線量)である。25 rem はこの基準線量(最小限界線量)150 rem に比べはるかに低い。

*** 原子炉が運転を開始して 1~2 週間たち、ほぼ平衡に達したときの ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , および ^{132}Te - ^{132}I 。

の距離に配置する γ 線検出器が、建物内の放射性物質からの γ 線を検出するためならば数個で充分である。しかし放射性物質は、必ずしも建物内に充満し放出されるのではなく、直接炉心より放出されることもある。とくに平常運転時に放出される ^{131}I は、建物内に充満することがないから0.5 kmの距離に配置した γ 線検出器によって容易に監視することができる。

大気安定度 A のときは、建物内の放射性物質からの γ 線の影響のあるときは、放射性雲からの γ 線を測定汚染分布を評価することは困難であるが、この影響のないときは0.5 kmの距離の検出器によって容易に汚染分布を測定、評価できる。安定度 A またはこれに近い気象条件の出現頻度は少い^{**}。安定度 A のとき被曝が問題となるのは主として放出源より0.3 km以内の範囲で、通常原子力施設の敷地内となる。安定度 A のときは γ 線検出器によってただちに汚染を検出することは困難なことがありうるが、そのような事態になる可能性は少く、またそうなっても問題になる被曝は敷地内に止る。この不備は大気塵埃放射能観測網によって補われる。

結局 γ 線観測網は、放出条件、気象条件などの違いや立地条件に対応できるように近距離、遠距離および中距離に配置する。近距離のものは、放出源より約0.5 kmに約 40° ごとの間隔で、遠距離のものは放出源より約4 kmの人口密度の高い地点を選び、その間を補うものとして約1.5 kmの距離に前述の間隔で配置するのが適当といえる。

2.5.2 大気塵埃放射能観測網

大気放射能測定において必要な検出感度を得るためには、空気を吸引し大気中の塵埃をなんらかの方法で集めたり、集められた塵埃中に含まれる自然放射能がある程度まで減衰する時間まって測定する必要があることから測定結果が得られるまで通常1～5時間かかる。

大気塵埃放射能測定装置が連続的な職業上の被曝の

* JRR-2 原子炉では10 MW 運転で常時約5 c-hr⁻¹の割合で ^{131}I が放出される。

** 東海村における1958年9月より1959年8月まで1ヵ年間に於ける大気安定度 A , $A-B$ の出現頻度は4%である。

*** 当所で大気塵埃放射能測定装置を配置したときは大気拡散に関しPasquillの方法はまだ開発されていなかった従ってSuttonの拡散式によった。このためこの距離は4 kmとなった。4 kmの距離は当地域では人口密度が高く集団被曝の評価には都合がよい。

場合の最大許容濃度 $(\text{MPC}_a)_{16\text{hr}}$ の1/100まで検出でき、最大濃度地点の濃度の1/1,000以上の範囲に少くも1つの検出器が配置される場合を考える。(Fig. 14～18参照)この大気塵埃放射能測定装置によって検出された時は、最大濃度地点ではすでに $1/100 (\text{MPC}_a)_{16\text{hr}} \times 1,000 \times (1 \sim 5) = (10 \sim 50) \times (\text{MPC}_a)_{16\text{hr}} \cdot \text{c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上の積算濃度になっていることがありうる。

しかし実際には主風向は時間とともに変化する。東海村で観測された1時間毎の風向観測値(16方位に分類)より同一風向の継続する時間別の頻度調査結果をFig. 19～23に示す。調査は1962年1月、4月、7月、10月の各月について方位別におこなわれた。Fig. 23より分るように各月とも同一方向の風向が1時間以上継続する頻度は約50%である。5時間経過すると約95%の頻度で風向は少くも 22.5° 変化する。大気塵埃放射能測定装置が、放出源を中心に 45° ごとに配置されていれば、通常10時間以内には風下軸上に存在することにならう。この装置が風下軸上にあるときは少くも最大濃度地点の濃度の1/10以上を測定でき、かつ風下軸上になる最大時間を10時間、測定に要する時間を1～5時間と仮定すると、この装置によって検出されたときの最大濃度地点の積算濃度は $1/100 (\text{MPC}_a)_{16\text{hr}} \times 10 \times (11 \sim 16) = (1.1 \sim 1.6) \times (\text{MPC}_a)_{16\text{hr}} \cdot \text{c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上となっていることがありうる。 $(\text{MPC}_a)_{16\text{hr}}$ の大気放射能濃度が1週間続いたときの被曝が0.1 remに相当すると仮定すれば $(1.1 \sim 1.6) \times (\text{MPC}_a)_{16\text{hr}} \cdot \text{c} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ は0.0007～0.001 remにすぎず、きわめてわずかな値である。

大気塵埃放射能検出器は放出源より約0.3 kmの距離に約 60° ごと(大気安定度 A を対象)および、約1.2 kmの距離^{***}に約 45° ごと(大気安定度 D , F を対象)に配置するのが適当といえる。

2.5.3 検出能力に対する考察

γ 線検出器が前々節にのべたように配置された γ 線観測網の検出能力について考察する。放射性気体、塵埃が放出されたとき、観測点が風下軸上にあるとき観測される放射性雲からの γ 線量率と地上における最大濃度地点の大気放射能濃度の関係をFig. 24 a, bに示す。Fig. 24 aは放出源より1.5 kmの距離の観測点におけるもの、Fig. 24 bは0.5 kmの距離におけるものである。Fig. 24 bについては、大気安定度 A のときは最大濃度地点の大気放射能濃度のみでなく、少くも敷地内と考えた風下0.3 kmの距離の大気放射能濃度についても示した。Fig. 24 a, bは放射性雲からの

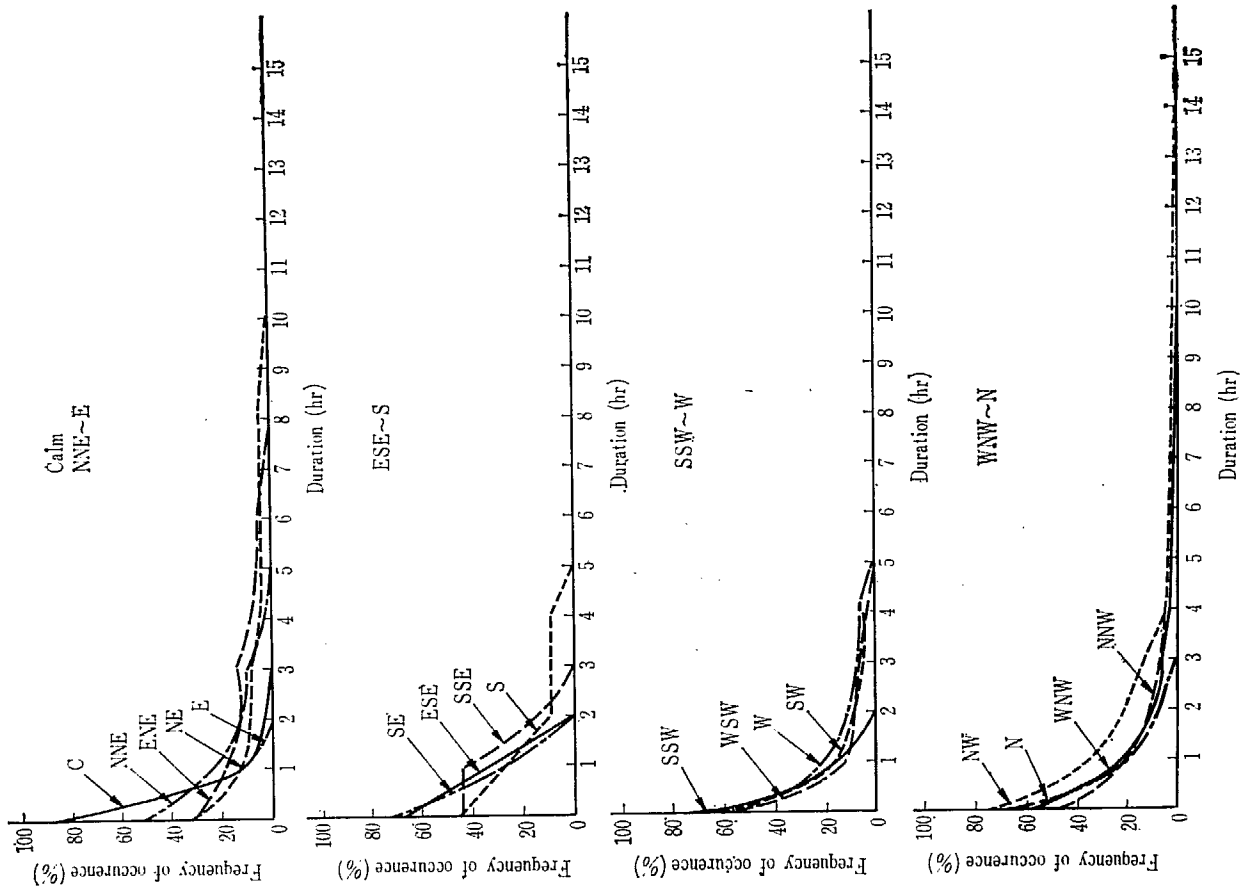


Fig. 19 Duration of wind blowing in same directions in Jan. 1962

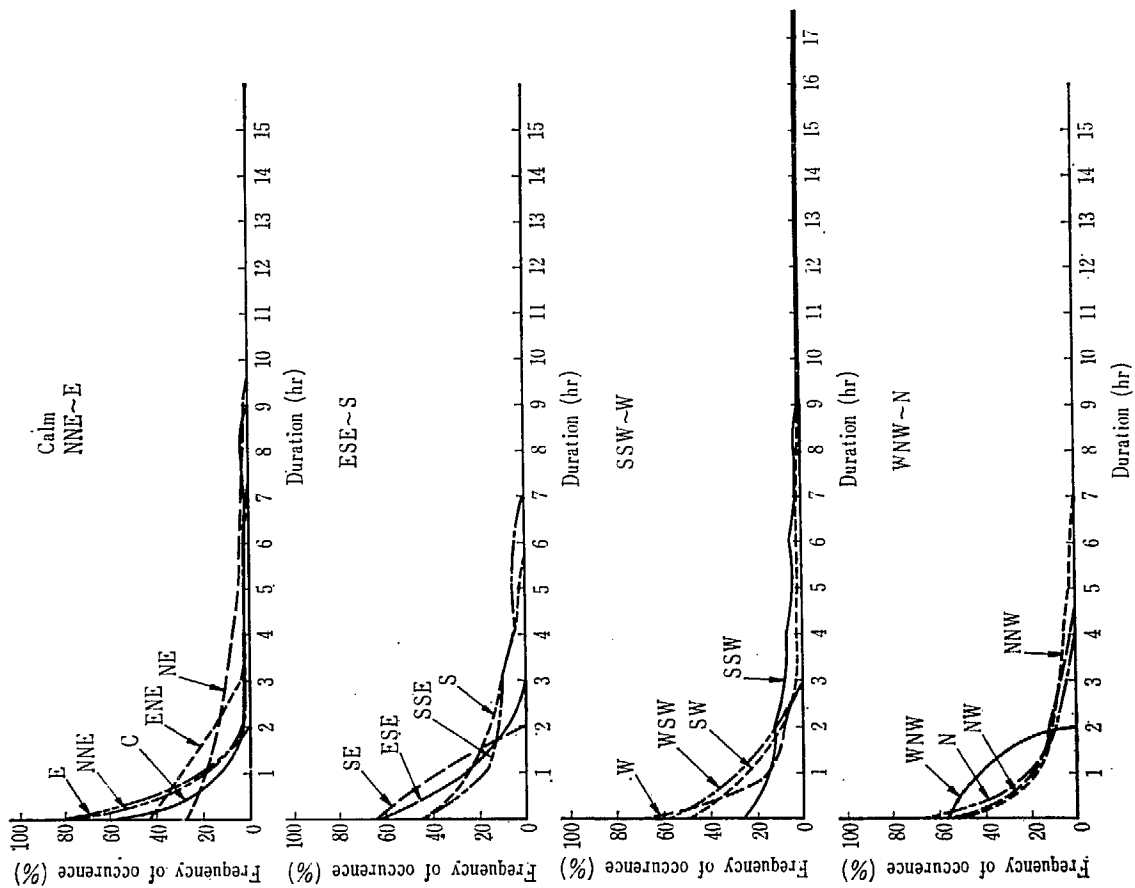


Fig. 20 Duration of wind blowing in same directions in Apr. 1962

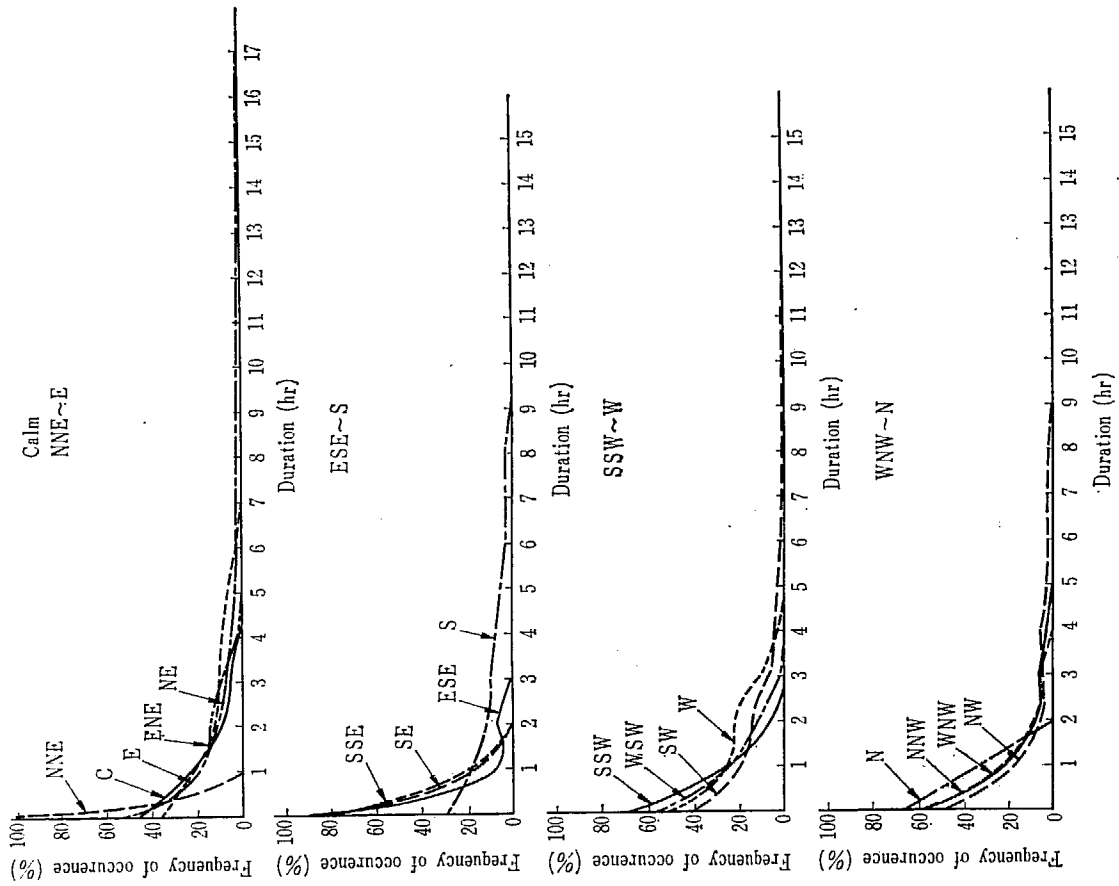


Fig. 21 Duration of wind blowing in same directions in July 1962

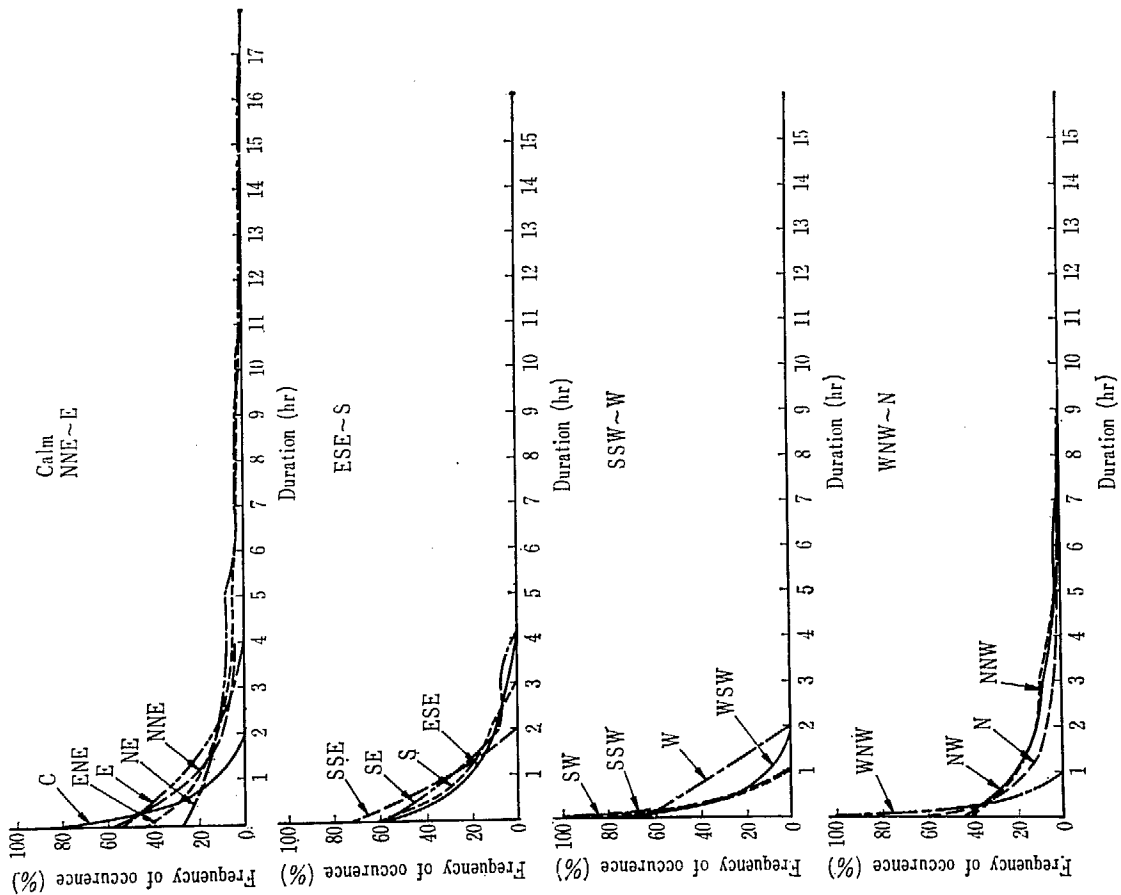


Fig. 22 Duration of wind blowing in same directions in Oct. 1962

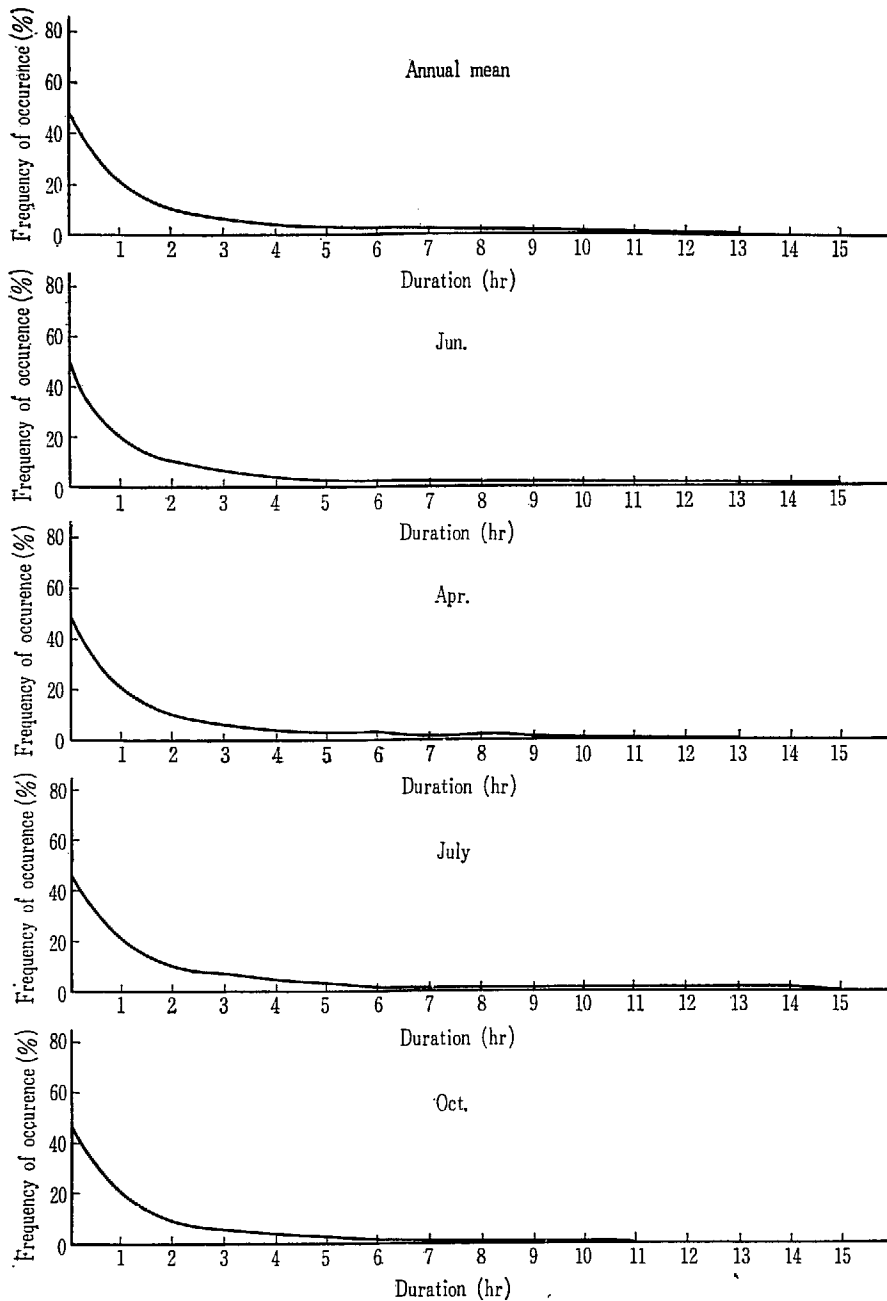


Fig. 23 Duration of wind blowing in same directions in 1962

風下軸上の γ 線分布を示した Fig. 6 および放射性雲の風下軸上濃度分布を示した Fig. 14 よりえがいたものである。放出高は10 mと仮定した。 γ 線検出器の測定範囲は $0.01 \sim 10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ であるから、建物内の放射性物質からの γ 線の影響のないとき、この γ 線観測網によって最大濃度地点（安定度Aのときは放出源より風下0.3 kmの距離の地点）の大気放射能濃度約 $2 \times 10^{-7} \sim 10^{-4} \text{ c}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲が検出できる。Fig. 25はこの γ 線観測網によって測定できる最大濃度地点の線量率あるいは大気放射能濃度と検出までに要する概略の時間との関係を示すものである。図は主風向の変動を

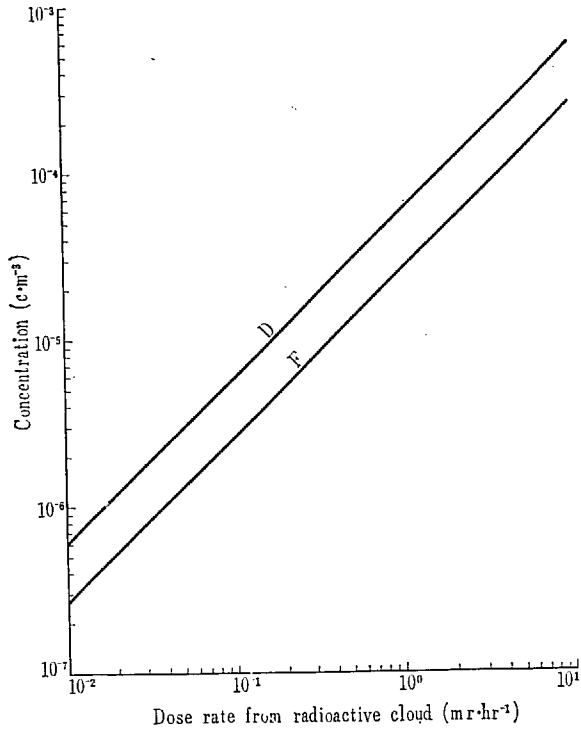
考慮に入れてある。

γ 線観測網は、低レベルの大気放射能濃度を測定することは不可能であるが、ある程度以上の濃度については、きわめて短時間で測定値が得られる。特に計数率計を使用しアナログ表示をし、適切な時定数たとえば $0.01 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ で100 secとし、線量率に逆比例して短く、 $10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ で0.1 secとすれば、指示の相対的標準偏差は計数率にかかわらず一定となるばかりでなく、線量率の高くなるほど短時間で指示を得ることができる。

Fig. 26 は建物内に貯えられた放射性物質の量と γ 線量率との関係を、建物と検出器との距離をパラメータにえがいたもので(12式参照)、建物内に貯えられた約 10^3 c 以上の放射性物質の量を容易に評価できることを示している。

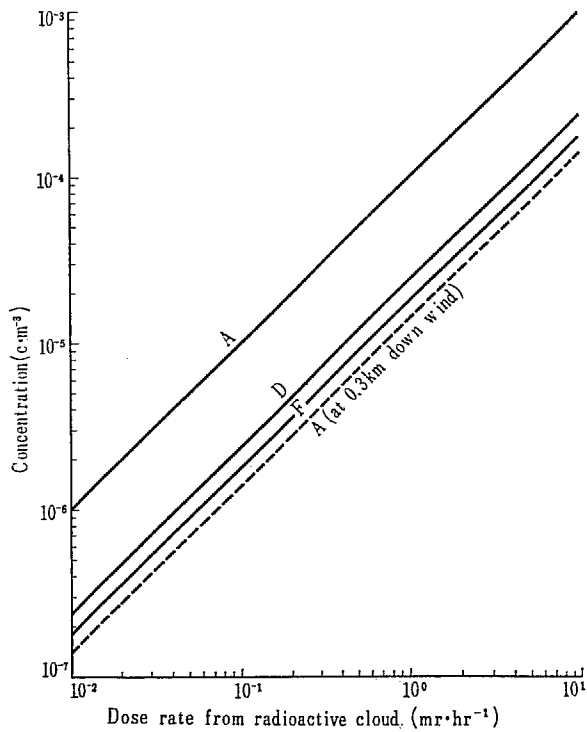
大気塵埃放射能検出器（高濃度大気放射能測定のための γ 線検出器を含む）が前節にのべたように配置されたとき、この大気塵埃放射能観測網の検出できる大気塵埃放射能濃度と時間の概略の関係を Fig. 27 に示す。この観測網はきわめて広範囲の大気放射能濃度を測定することができるが検出までにある程度の時間を要する。

放射線モニタリング・システムは γ 線検出器を中心としたものと大気塵埃放射能検出器を中心としたものとに分けて考えられる。 γ 線検出器により異常を直ちに判別し、必要な処置をほどこす基礎資料を得ることができる。大気塵埃放射能検出器は観測結果を得るまでにある程度の時間を要するから必然的結果として平常時のモニタリングが主となる。これら両装置はたがいにあい補い野外放射線モニタリングを完全ならしめることができる。このモニタリング・システムの設計と、観測値からおこなう被曝評価には多くの仮定がおかれている。放出される放射性物質の構成、建物から



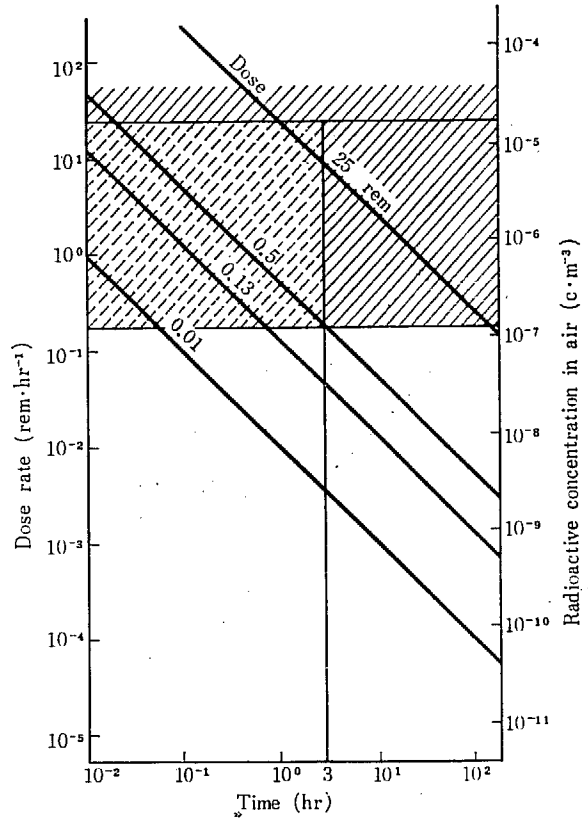
Observation point: 1.5 km down wind

Fig. 24a Maximum concentration at ground level versus gamma dose rate from radioactive cloud at observation point



Observation point: 0.5 km down wind

Fig. 24b Maximum concentration at ground level versus gamma dose rate from radioactive cloud at observation point



Range of measurable (always)
 Range of measurable (depends on meteorological condition)

Assumed: $1.8 \times 10^{-5} \text{ c}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3}$ radioactive iodine concentration in air corresponds 25 rem

Fig. 25 Ranges of measurable in gamma ray monitoring system

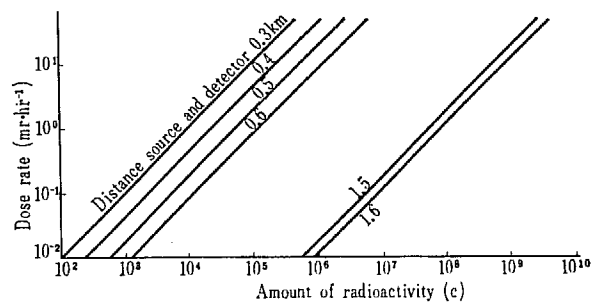


Fig. 26 Calculated gamma dose rate from building at observation point versus amounts of radioactivity in building

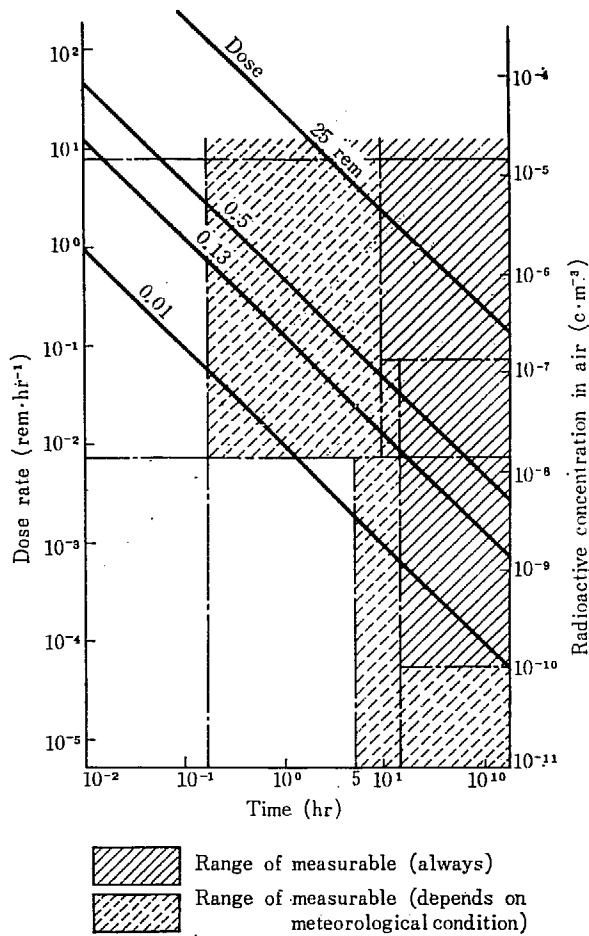


Fig. 27 Ranges of measurable in dust monitoring system

Assumed: 10^{-9} c·week· m^{-3} radioactive concentration in air corresponds 0.1 rem

の漏洩率，放出高などが仮定と異なるときは，その時その時に応じた補正をおこない被曝評価をする必要がある。

2.5.4 装置の信頼性に対する考察

放射線モニタリング・システムにおいて一つの重要なことは，装置の信頼性の高いこと，言い換えれば必要な期間装置が故障を起さずに稼動することである。中央監視式野外放射線モニタリング装置においては，装置の構成が複雑となり，従って使用する部品も多く故障発生 の頻度が上昇しがちとなる。

今モニタリング・システムが2系統以上存在し並列に運転されているとき1系統でも稼動している確率を考 えてみる。

いま各システムの reliability を P_1, P_2, \dots, P_n とすれば装置全体の reliability P は

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n)$$

$$= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \dots (40)$$

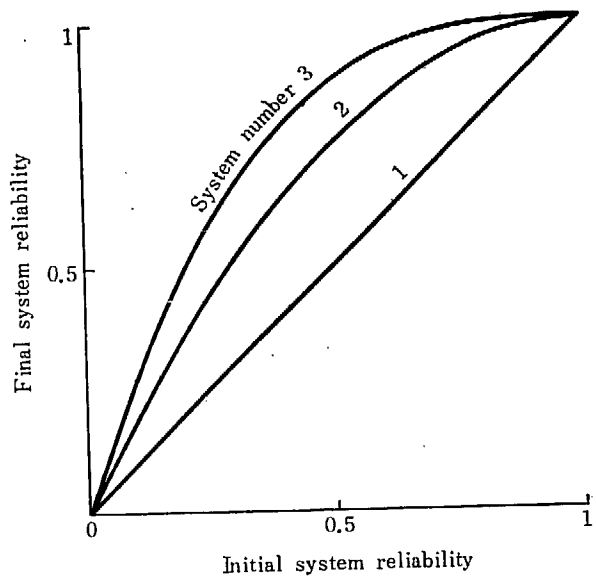


Fig. 28 System reliability

で示される。各システムの reliability は同じとして全体の reliability を計算した結果を Fig. 28 に示す。

システムが2系統以上になることによって信頼性が著しく向上することが分る。中央監視式野外放射線モニタリング装置では，90%程度の信頼性は期待できるので，2系統の放射線モニタリング装置を並列に稼動させることによりその少くも1系統が稼動する確率は99%程度となる。

2.5.5 日本原子力研究所の中央監視式野外放射線モニタリング・システム

日本原子力研究所東海研究所においては，JRR-1, JRR-2, JRR-3, JRR-4 および JPDR など多くの原子炉が存在するのみならず，高放射性物質取扱施設，燃料再処理試験施設，臨界集合体，廃棄物処理施設などが存在し，万一の事故を考えると周辺住民に対し退避，食糧制限などについてあらかじめ十分の準備を整える必要性が認められる*。

このため計画，建設した中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置 (γ 線観測網) の配置を Fig. 29 に，中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置 (主として大気塵埃放射能観測網) の配置を Fig. 30 に示す。

当所では，多くの原子力施設が敷地内に分散配置されている。放射線モニタリング装置は，これら各施設を中心にして半径 0.5 km, 1.5 km および 4 km の包

* たとえば原子炉燃料内には，平衡状態で ^{131}I は 1MWt 当り約 $2.5 \times 10^4 \text{c}$ の内蔵される。従って ^{131}I 10c 程度の放出は考えられないことではない。

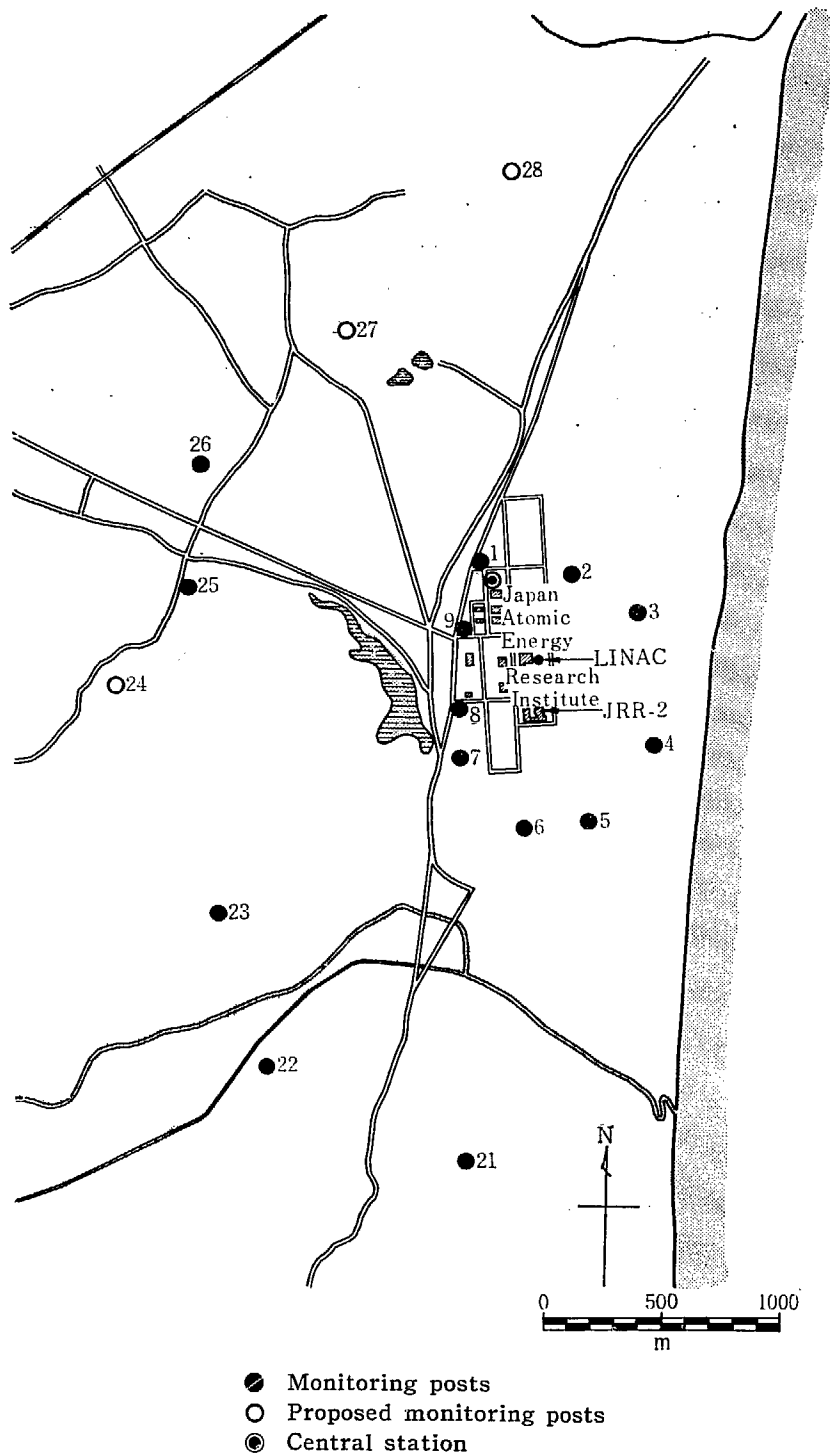


Fig. 29 Map of monitoring post system

絡線上を基準に立地を考慮して配置した。モニタリング・ポスト装置は事故時のモニタリングを第1の目的にしているため風向の出現頻度については考慮しなかった。モニタリング・ステーション装置は、平常時のモニタリングを第1の目的にしているため、東海村の主風向が北東風で風下約10 km および15 km に人口密度の高い勝田市、水戸市があることからこの方向に多

少重点をおいて配置した。当所の JRR-1原子炉を中心にして1 km 毎の人口密度は、1956年6月の調査で、4 km までは 205~229人/km²であったが4~5 km 帯は522人/km²で、この地域は将来さらに人口が集中するものと考えられたので、この地域についても重点をおいた。

モニタリング・ポスト装置の検出器はγ線を測定対象としたもののみとしきわめて簡単な構造とした。動作の確認は⁹⁰Sr チェッキングソースの遮蔽窓を中央監視室で開閉することによってできる。

モニタリング・ステーション装置は広範囲の大気塵埃放射能濃度を測定するためγ線検出器も含めた大気塵埃放射能測定装置を主体としているが、多少の装置を付加してほぼ完全な野外におけるモニタリングの1単位を形成させた。モニタリング・ステーション装置は空間分布 βγ、γ放射線測定装置、大気塵埃α、β放射能測定装置およびフィルム線量計よりなる。大気塵埃中のα放射能を連続モニタリングする必要は少ないが、大気中には天然のα、β放射能が存在しその割合はほぼ一定であるため、集塵試料のα放射能を測定することによって集塵装置、β放射能測定装置の動作を確認できる。βγ放射線測定装置も加え、γ放射線測定装置の動作を確認するとともに、両測定値からβ線の影響のみを評価、その場所の高レベルの大気放射能濃度も測定可能にした。フィルム線量計により0.03~1,000 rem というきわめて広い範囲の線量測定もできる。大気塵埃α放射能測定装置、βγ放射線測定装置およびフィルム線量計などは付加してもモニタリング・ステーション装置全体はあまり複雑にはならない。

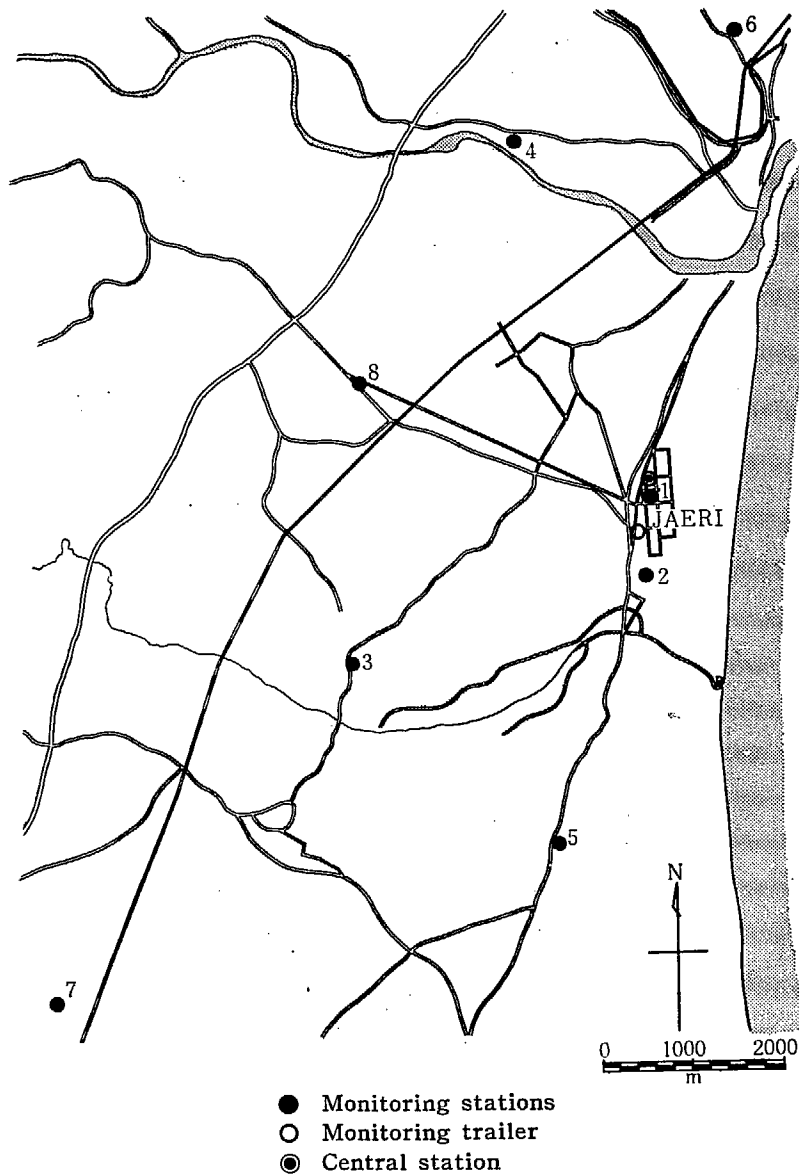


Fig. 30 Map of monitoring station system

異常を直ちに発見するためには、観測結果は刻々中央に送られ指示され警報とも連動しなければならない。日常の監視としては、ある程度蓄積された観測結果が伝送されれば十分である。前者のデータ処理はアナログ方式が適し、後者はデジタル方式が適する。

観測結果を中央監視室に伝送するのに有線、無線の2方式がある。有線によるときは伝送用ケーブルならびにその敷設工事に、無線によるときは送受無線機にかなりの費用がかかる。送受無線機を使用するときは距離が遠くなると段階的に費用が増加する。ある程度までの距離では同一出力のものが使用できるから費用は距離に関係なく一定となる。有線によるときはおおむね距離に比例して設備費を要する。伝送用ケーブルの敷設には土地、既設設備の利用、権利関係の問題から工事費は場所により相当のひらきがでるが、距離が2 km 以下では有線方式が、3 km 以上では無線方式が有利といえる。

Table 1 に中央監視式野外放射線モニタリング装置の測定対象、測定範囲、測定までに要する時間および検出器の配置についてまとめた。装置については次章に詳論する。

Table 1 Monitoring system

Object	Measurements			Arrangement
	Range	Method	Time required	
Radioactive concentration in air	$>4 \times 10^{-15}$ ($\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$)	$>4 \times 10^{-15}$ ($\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dust sample	
		$10^{-11} \sim 1.5 \times 10^{-8}$ ($\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$)	Dust monitor	5~15(hr)
		$1.5 \times 10^{-8} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ($\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$)	Gamma radiation monitor	$10^{-1} \sim 10$ (hr)
Gamma dose or dose rate	$10^{-2} \sim 10^3$ (r) $10^{-2} \sim 10$ ($\text{mr}\cdot\text{hr}^{-1}$)	$10^{-2} \sim 10^3$ (r)	Photographic dosimeter	
		$10^{-2} \sim 10$ ($\text{mr}\cdot\text{hr}^{-1}$)	Gamma radiation monitor	$10^{-1} \sim 10$ (hr) (Scaler)
				Immediately ~3(hr) (Rate meter)
				Centralized field radiological monitoring station Inner observation circle 0.3~0.35(km) radius, 60° interval Outer observation circle 1~4(km) radius, 45° interval
				Centralized field radiological monitoring post Inner observation circle 0.5(km) radius, 40° interval Outer observation circle 1.5(km) radius, 17° interval 4(km) radius, 8° interval

3. 中央監視式野外放射線モニタリング装置¹⁸⁾

3.1 中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置

中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置(γ 線観測網)は、原子力施設より1.5 km以内の空間分布 γ 放射線を連続測定し、測定結果を刻々中央監視室に伝送、指示する。指示が設定値を越したときは、可視、可聴の警報を発し、記録を開始しかつ警報表示地図盤上にある赤色灯はあらかじめ設定した警報レベルに応じ点滅あるいは連続点灯し、1目で施設周辺の異常地点を知ることができる。 γ 線観測値とその時の気象条件から直ちに γ 線量率分布を推定、放射能汚染ならびに被曝線量を評価しようとするものである。

装置は、構造簡易で、保守点検し易く、信頼性が高くかつ建設、維持費の少なくてすむものとする。特に周辺に配置される検出部は、保守のし易い必要性がある。従って電源、増幅器などを可能な限り中央に集めできれば検出部は検出器のみにすることが望ましい。

検出器をGM計数管とし、これから得られる出力パルス信号をそのまま同軸ケーブルによって数km伝送することによって検出部はきわめて簡単な構造とすることができる。

検出器からのパルス信号を長距離伝送する試み¹⁹⁾は、土壌の含湿度や密度測定、積雪計、地下水位計や室内における遠隔モニタリングを目的としたものについてはあるが、屋外において数kmの遠距離を伝送することは全く初めての試みである。

伝送距離が2 kmを越すときは、それぞれの検出器に1本の伝送用同軸ケーブルを用いると、ケーブルに要する費用が少くない。検出器の配置によっては1本のケーブルでいくつかの信号を伝送することが望ましい。GM計数管から得られる信号を、極性、パルス幅、パルス高などの違いにより、それぞれ固有の信号とし、1本の同軸ケーブルによって伝送、伝送された信号を受信してから分離する多種遠距離伝送方式についても開発した。

3.1.1 パルス信号の遠距離伝送

放射線検出器から得られる電離電流のパルス信号を

同軸ケーブルをへて増幅器へ電流結合させると、増幅器の入力インピーダンスは、きわめて低くとすることができ、同軸ケーブルの特性インピーダンス50 Ω あるいは75 Ω と容易に整合させることができる。入力インピーダンスが低い同軸ケーブルの分布容量の影響を受けることが少く、ケーブルの長さが長くなっても伝送波形がなまることが少い。従って高い計数率まで計数できるし、増幅後クリッピングの必要性もへってくる。

パルス信号を同軸ケーブルによって遠距離伝送するときの限界は、伝送線路に電力線、放送波、自動車、空電などから誘起される外部雑音と、伝送によるパルス信号の減衰から決ってくる。電流結合方式で前置増幅器なしで放射線検出器からの出力パルスを伝送する場合、良好なS/N比でどの位遠距離まで伝送できるかを調べた。

a) パルス信号の遠距離伝送

GM計数管から得られる出力パルス(パルス幅約1.5 μ sec 波高値約800 μ A)を同軸ケーブル3C2W(二重外部導体編組, PE充実絶縁)により200 m, 400 m,

- ⊙ 3C2W Coaxial cable
- ⊗ PE lead-shield coaxial cable
- △ PEF small-diameter coaxial cable

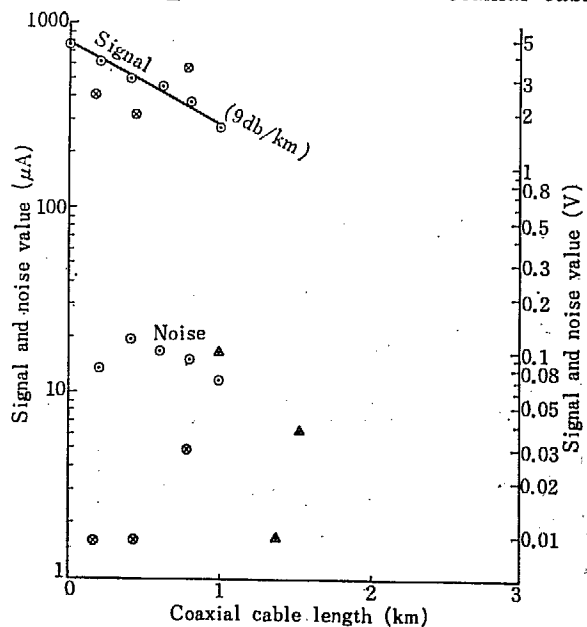
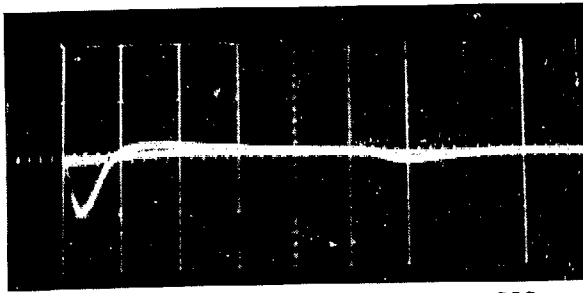


Fig. 31 Signal and noise value



2 V/div 2 μ sec/div F 1.8 1/8 sec SSS

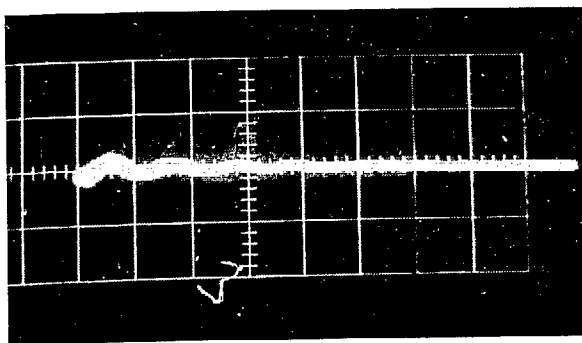
Fig. 32 Signal pulse transmitted via 1 km PE lead-shield coaxial cable

600 m, 800 m, 1,000 m 伝送したときの信号の減衰は、1 kmにつき約9 dbであった。(Fig. 31 参照) 3C2Wの減衰量の基準値は0.6 Mcで約9 db \cdot km⁻¹である。これだけ伝送してもパルス波形はほとんどくずれていない。

Fig. 32 に PE 鉛被同軸ケーブル (ポリエチレン絶縁鉛被ビニール防食同軸ケーブル) を用いてGM 計数管から得られるパルス信号を1 km 伝送したときの波形を示す。この同軸ケーブルの減衰量の基準値は0.6 Mcで約8 db \cdot km⁻¹, PEF 細心同軸ケーブル (発泡ポリエチレン絶縁高周波同軸ケーブル) では0.6 Mcで約4 db \cdot km⁻¹であるからこれらを用いると3C2Wを用いたときより減衰を少くパルス信号を伝送できることが云える。

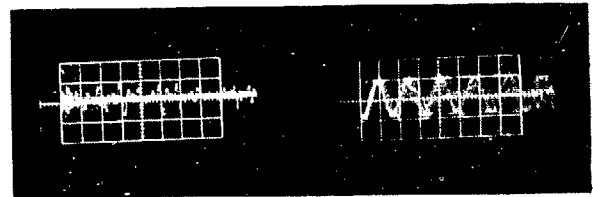
b) 同軸ケーブルに誘起される雑音

伝送線路に誘起される雑音は、場所により時間により異なるから、一般的にいうことは困難である。Fig. 31 に3C2W, PE 鉛被, PEF 細心の各同軸ケーブルを長さ, 場所, 時間を変えてケーブルに誘起される雑音を計ったとき, 通常得られる外部雑音の値を示す。通常同軸ケーブルに誘起される雑音は25 μ A (0.15 V) 以下であるが時に10倍あるいはそれ以上になったこともある。Fig. 33~36 に雑音波形の数例を示す。



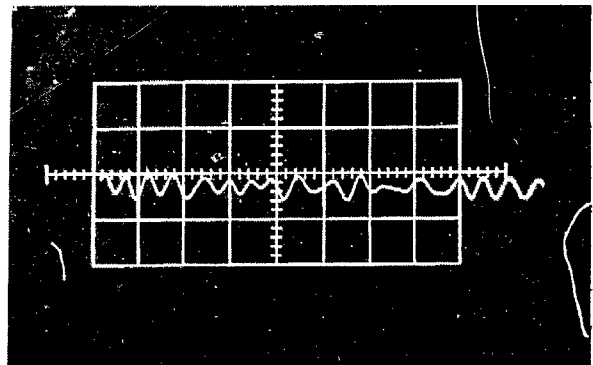
0.5 V/div 10 μ sec/div F 1.8 1/8 sec SSS

Fig. 33 Noises induced PE lead-shield coaxial cable (1 km length)



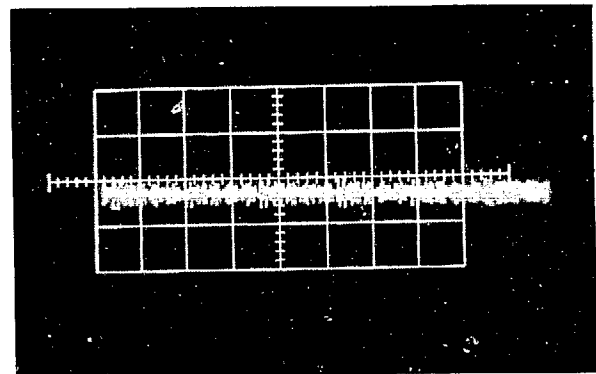
0.1 V/div 0.1 m sec/div 0.2 V/div 5 μ sec/div
No.6 monitoring post No.5 monitoring post

Fig. 34 Noises induced PE lead-shield coaxial cable



0.05 V/div 0.2 m sec/div F 1.8 1/8 sec SSS

Fig. 35 Noises induced PEF small-diameter coaxial cable at Arayadai monitoring post (2.7 km length)



0.05 V/div 2 m sec/div F 1.8 1/8 sec SSS

Fig. 36 Noises induced PEF small-diameter coaxial cable at Arayadai monitoring post (2.7 km length)

3C2V (一重外部導体編組) と 3C2W (二重外部導体編組) の各同軸ケーブル200 mを地面にならべて1直線において誘起される外部雑音を計ったところ予期されるように3C2Vに誘起される雑音は、3C2Wに比べずっと高く、約7~10倍であった。同軸ケーブルは二重遮蔽の必要が認められる。

2本の同軸ケーブルを束にして用いるとき相互かんしょうは無視できるが、高周波の電圧変動をするシールドのないケーブルが並行して近接しているときは誘導は無視できない。

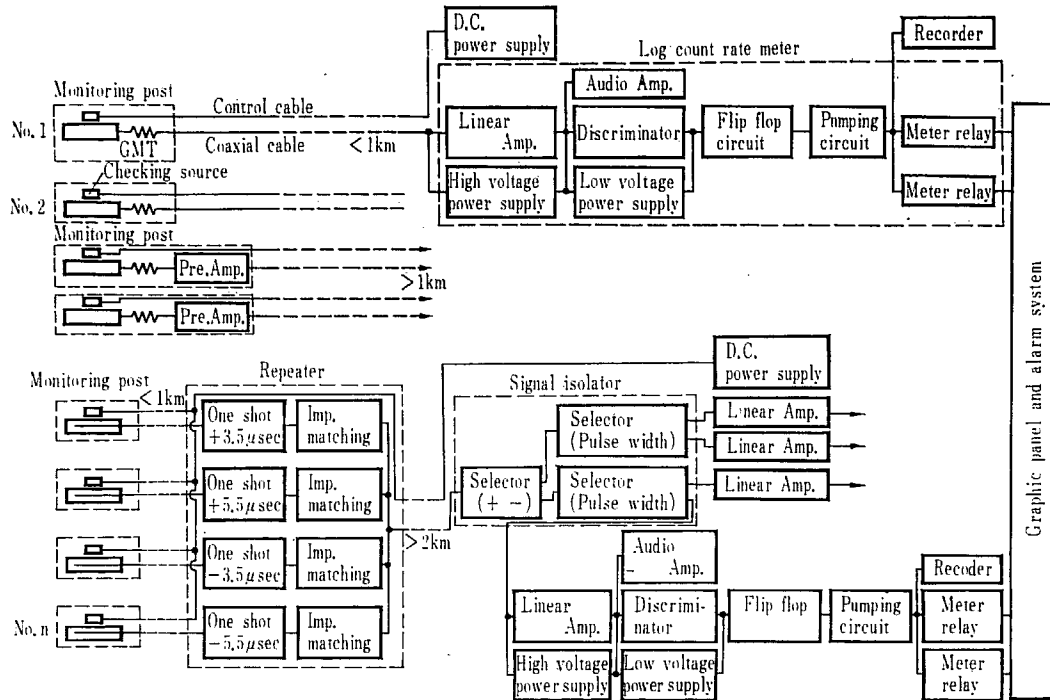


Fig. 37 Block diagram of remote radiological monitoring post system

S/N 比を10以上にするためには、雑音を $25 \mu A$ と仮定すると、 $250 \mu A$ 以上の信号を得る必要がある。GM 計数管の出力パルスを $500 \mu A$ とすると減衰量が $4 \text{ db} \cdot \text{km}^{-1}$ のとき 1.5 km 、 $8 \text{ db} \cdot \text{km}^{-1}$ のとき 0.75 km 前置増幅器なしで伝送できることになる。

3.1.2 パルス信号の多重遠距離伝送

ここでは試作した4重多重伝送方式について述べる。まず4つの検出器から得られるパルス信号を、ワンショットの波形整形回路により正負極性と長短パルス幅 ($5.5 \mu \text{ sec}$ と $3.5 \mu \text{ sec}$) の違いを組合せた各検出器固有の波形に整形する。このパルス信号をインピーダンス整合をして混合、1本の同軸ケーブルで伝送する。パルス幅はディレイラインの遅延時間によって決まる。(Fig. 37 参照)

多重伝送された信号は、信号分離回路に受けられ、負パルスはそのまま、正パルスは位相反転回路を通して負パルスに変換後シュミット型のディスクリミネータにより波形整形され、ディレイラインクリッピングをおこなってクリッピングされる。クリッピングされ

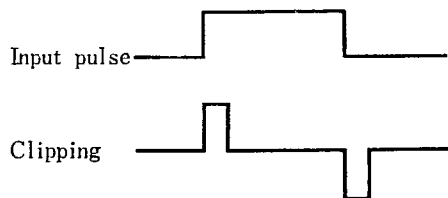


Fig. 38 Pulse shape

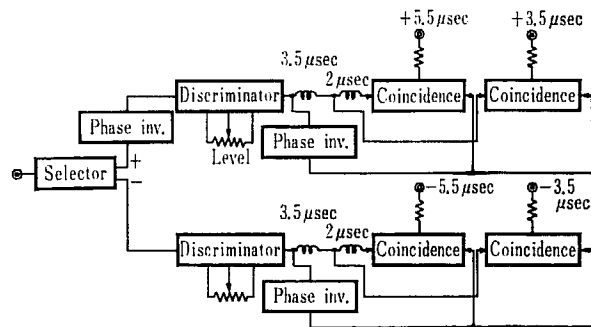


Fig. 39 Block diagram of signal isolator

た波形は Fig. 38 のごとく正負パルスとなり、その間隔は入力パルス幅と一致している。前者の波形をディレイラインで後者まで遅らせて、後者との AND 回路を構成する。この出力が幅選別出力となる。Fig. 39 に信号分離回路のブロックダイアグラムを示す。

多重伝送により、パルスの畳重によって生ずる計数損失の問題がある。検出器がGM 計数管の場合は、その不感時間 $100 \mu \text{ sec}$ に比べ伝送パルス幅は $5 \mu \text{ sec}$ 程度で十分狭いので、4 信号伝送では実用上ほとんど問題はない。またパルス幅選別によるときは、特定のパルスしか計数しないので高周波誘導雑音の影響が少くなる。

3.1.3 装置

この装置は検出部 (モニタリング・ポスト)、同軸

ケーブル，対数計数率計，記録計および警報表示地図盤よりなる。Fig. 37 にこの装置のブロックダイアグラムを示した。

GM 計数管の出力パルスは，信号伝送に使用する同軸ケーブルの長さが 1 km 程度以下では，安全抵抗を通すのみで，1 km 程度以上では，検出器のところにおかれた前置増幅器によって増幅後，3 km 程度では，中間におかれた中継器によって増幅後，中央監視室にある対数計数率計に伝送される。必要によっては多重伝送される。この計数率計によってパルス信号は電流値に変換され指示計に示される。指示計はまた 2 段のメータリレーとして働いて任意の値に警報レベルを設定することができる。

各検出器で測定している放射線レベルが 1 ヶ所でも設定値をこすと可視，可聴の警報を発すると同時に全部の記録計は一せいに動作を開始し，手で停止するまで記録し続ける。警報は 2 段で 1 段目（警戒レベル）では，警報表示地図盤の赤色警報表示灯が点滅し，ブザーが鳴る。2 段目（非常レベル）では，警報表示灯は連続点灯となりベルが鳴る。ブザー，ベルはアラームキャンセル用操作器を操作することによって停止できる。警報が停止しても記録計，警報表示灯は動作し続ける。記録計は単独でも，手で動作させることができる。

a) 検出部（モニタリング・ポスト）

検出部は野外で連続的に使用されるので完全な防水，防湿構造として，防熱や，機械的，化学的強度も十分もたせた。防水，防湿のためには GM 計数管プローブを完全密閉容器である内筐に入れた。この内筐は



Fig. 40 Monitoring post

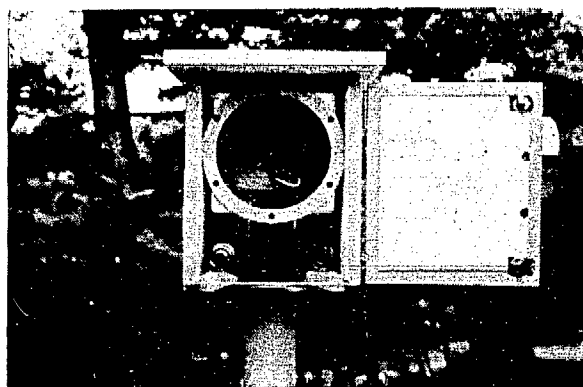


Fig. 41 Monitoring post interior

直射日光が当たっても器内温度が上昇しないよう，断熱材でできた外筐の内側におくとともに内外筐の間は外気が自然対流するようにして冷却している。従って夏季，直射日光のもとでも器内温度の上昇は 10°C 以下で，屋外使用のときしばしば問題になる温度上昇によるトランジスターの故障を皆無にすることができた。検出部の外観を Fig. 40，その内部構造を Fig. 41 に示す。

GM 計数管中心部の高さは地上 1.5 m，GM 計数管ソケットは外筐より 10 cm 離し，高さの相違，筐体による遮蔽の影響を少なくしてある。GM 計数管の β 線遮蔽筒の厚みは 2 mm 厚の真鍮で，約 3 MeV までの β 線を完全に遮蔽する。検出感度を上げたい時，Anton 108 GM 計数管（Anton 106 に比べ有効長が 5 cm 長い）も使用できるように β 線遮蔽筒は長くしてある。GM 計数管の有効感度範囲内に放射線遮蔽容器に入った ^{90}Sr チェッキングソースがある。中央監視室の指令によって遮蔽シャッターを開閉して装置の動作の良否を判定することができる。

b) 同軸ケーブル

パルス信号の伝送は，PE 鉛被同軸ケーブルか，PEF 細心同軸ケーブルによった。 ^{90}Sr 線源操作には CVV 制御用ケーブル（制御用ビニールケーブル）を使用した。ケーブルの特性を Table 2 に示す。同軸ケーブル，制御用ケーブルおよびメッセンジャーワイヤは，配線経路に応じて必要な本数をバインド線を巻き一体とした複合自己支持型とした。Fig. 42 に回線数に応じた配列を示す。

被覆に使用したポリエチレン (PE) は高密度 PE で，老化防止剤の混入がしてあり，またカーボンを混入し紫外線をカットしているため，屋外使用でも，温度変化，塩害などによる老化あるいは脆化，振動による傷害はほとんどないことが確かめられている。冬期に取

Table 2 Characteristics of cables

Cable	PE lead-shield coaxial cable	PEF Small-diameter coaxial cable	CVV Control cable
Characteristic impedance (Ω)	50 ± 3 (10 Mc)	75 ± 3 (10 Mc)	
Attenuation (db/km)	10 (1 Mc)	5 (1 Mc)	
D. C. Resistance (Ω /km)	<29.0 (20°C)	<16.2 (20°C)	<9.5 (20°C)
Capacitance ($\text{m}\mu\text{F}/\text{km}$)	100	58	
Inner conductor (mm)	0.9 ϕ (Copper)	1.2 ϕ (Copper)	1.8 ϕ (Copper)
Insulator (mm)	3.0 ϕ (Polyethylene)	$\sim 5.6\phi$ (Foamed polyethylene)	$\sim 5\phi$ (Vinyl)
Outer conductor (mm)	$\sim 3.7\phi$ (Copper)	$\sim 6\phi$ (Copper tape)	
Cover (mm)	$\sim 5.3\phi$ (Vinyl)		
Shield (mm)	~ 7.7 (Lead)	$\sim 6.4\phi$ (Iron tape)	
Anti corrosion (mm)	~ 11 (Vinyl)	$\sim 9.8\phi$ (Vinyl and Polyethylene)	
Weight (kg/km)	~ 390	~ 120	

A.....Coaxial cable
 B.....Control cable
 C.....Messenger wire
 D.....Bind wire

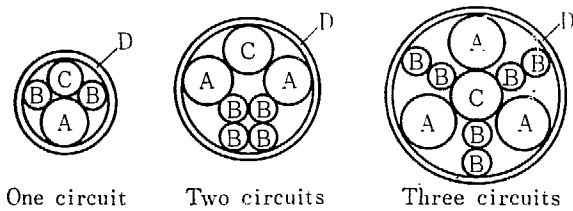
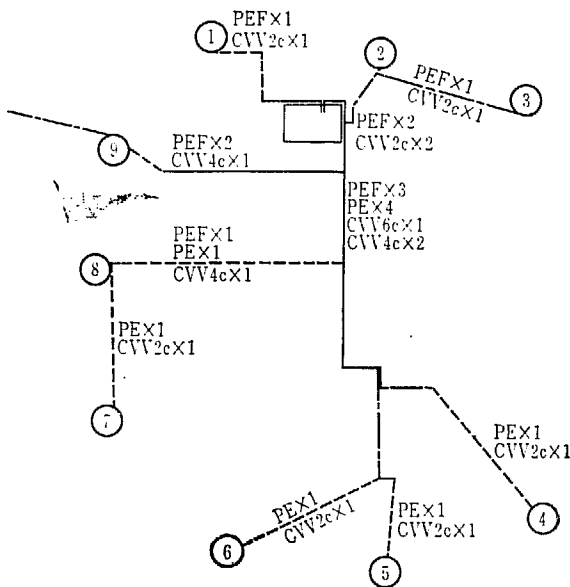


Fig. 42 Arrangement of cables



PEF.....PEF small-diameter coaxial cable
 PE..... PE lead-shield coaxial cable
 CVV.....CVV control cable
 □.....Central station
 ○Monitoring posts
 —.....Cable in pit
 - - - - -Cable under ground
 - - - - -Cable and 3 kV or 6 kV line on the same pole.

Fig. 43 Monitoring posts cable connection diagram (on site).

縮により張力がかかり、特に接続部に力が集中し、きれつの生ずることがないように施工する方法をとっている。

構内の配線は既設弱電ピットおよび高压配電線路柱を利用することを原則とし、必要に応じマンホール、ヒューム管、コンクリートトラフ、木柱を新設して埋設あるいは架空配線とした。Fig. 43 に構内分のケーブル配線の系統を示す。Fig. 44~47 にケーブルの敷設状況を示す。各検出部には第3種地線工事をおこなった。

伝送距離は内側観測圏でも0.17~1.55 kmあるが、1本のケーブルの長さは製作、輸送、施工上500 mとし、必要に応じ接続した。

PE 鉛被同軸ケーブルの接続

ケーブルを接続するときは、まず中心導体の銀鍍付をおこない平滑に仕上げる。この上にポリエチレン製テープをやや厚めに密に巻き、加熱ペンチで所定の厚さに加圧成形後、銅テープを巻き外部導体とし、その端部に軟銅線編組をバインドし半田付する。この上を合成ゴムの内側に自己融着性のある防食テープを巻くことによって防湿、防食ならびに機

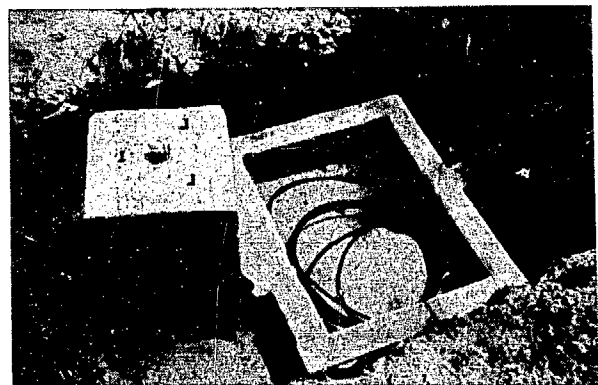


Fig. 44 Monitoring post foundation and coaxial cable.



Fig. 45 Coaxial cable under ground



Fig. 46 Coaxial cable in pit



Fig. 47 Coaxial cable on the pole

械的保護，保強がなされる．さらに鉛管をかぶせ，鉛被と接続した上防食テープ粘着ビニールテープをそれぞれ1/2ラップで1層巻きつける．

PEF 細心同軸ケーブルの接続

寸法の決った中心導体スリーブ，縦割ポリエチレンチューブおよび外部導体スリーブを使用して所定の寸法に仕上げた後，防湿，防食ならびに機械的保護，補強をする．

このような接続をすることによって，接続点における電気的特性の劣化や耐久性，強度などへの悪影響は無視できた．

c) 対数計数率計

i 比例増幅器

検出器から同軸ケーブルによって伝送された負のパルスは，比例増幅器によって増幅される．この最大利得は約5倍である．入力電流は増幅後 $5\text{ k}\Omega$ の抵抗を通して電圧パルスに変換される．増幅器は負饋還方式で安定な利得が得られるとともにオーバロードしないようリミッター回路が付加されている．入力感度最大 $5\ \mu\text{A}$ ，常用 $25\ \mu\text{A}$ で最小入力電流パルス幅 $0.3\ \mu\text{sec}$ である．

ii ディスクリミネータ回路

比例増幅器からの電圧出力はディスクリミネータ回路に送られる．ディスクリミネータはダイファレンシャルアンプとシュミットリガー回路およびデレイラインによる波形整形回路により成る．ダイファレンシャルアンプのバイアスを変化させてディスクリミネーションレベルを約 $0.1\sim 5\text{ V}$ の間変化させることができる．ダイファレンシャルアンプ後さらにシュミットリガー回路を通し，デレイラインで約 $0.2\ \mu\text{sec}$ にクリック後出力は次段に送られる．

iii スピーカアンプ

比例増幅器の出力はスピーカアンプにも接続され，入力パルスを音響的に監視する．入力パルス1つ毎にクリック音が発する．

iv 2進回路

ディスクリミネータの出力はフリップフロップ回路と電圧クランプ回路によって整形され，対数指示回路を駆動する．

v 対数指示回路

2進回路の出力は，対数指示回路に入る．この回路の原理は Fig. 48 に示すようなポンピング回路を数段重ねたもので，合成 DC 電流が入力周波数に対し対数的になる． C_1 の容量に反比例して計数率をふやすことができる．時定数は C_2R により決る． $0.01\text{mr}\cdot\text{hr}^{-1}$

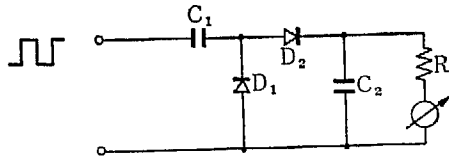


Fig. 48 Pumping circuit.

で 100 sec, $10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ で 0.1 sec としてある。

vi 指示計, 記録計

対数指示回路の出力は, 指示計および記録計に入る。指示は3デカードの対数値で目盛りされ, $0.01\sim 10 \text{ mr}\cdot\text{hr}^{-1}$ の範囲を直読できる。レンジは $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$ の3段切換となっている。指示計はまたメータリレーとして動作する。記録計はインク不要な, 熱ペン書き式である。すなわちペンには抵抗線が巻かれ, 電力を受けて熱せられる。記録紙は熱により表面の薬品が変化して鮮明な記録を残す。打点周期は10 secである。

vii 高圧電源

トランスとトランジスタで弛張発振させ, トランスの2次側に得られた交流高電圧をセレン整流器で整流して直流電圧を得る。冷陰極コロナ放電管によって安定化している。

viii 低圧電源

低圧電源はゼナーダイオードとトランジスタによる直流増幅器で定電圧出力を得ている。

ix 警報表示地図盤

原子力施設を中心にした1/3,000着色地図盤で, モニタリング・ポストの位置に赤色灯がついている。警報接点が入ると, 第1段目では赤色灯を点滅, 第2段目では連続点灯し異常を目視できる。中央監視室の警

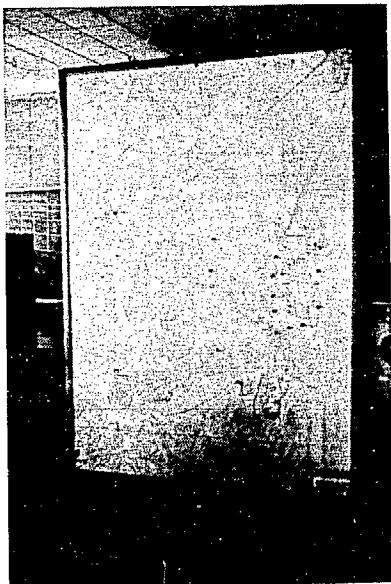


Fig. 49 Graphic panel

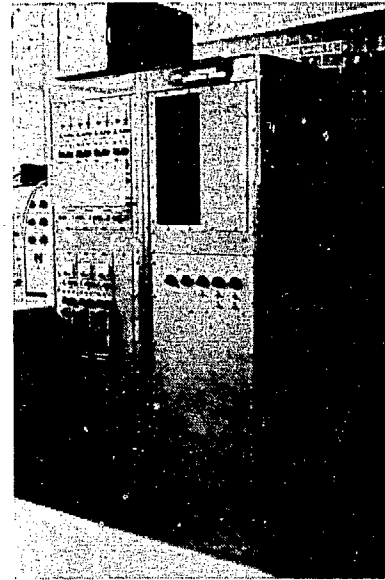


Fig. 50 Log count rate meters

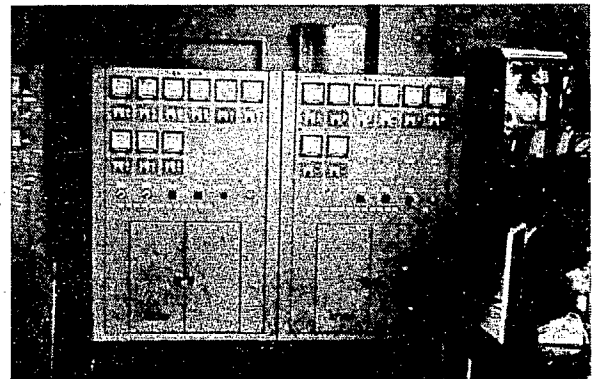


Fig. 51 Recorder and alarm system

報表示地図盤を Fig. 49 に, 計数率計部を Fig. 50 に, 記録計および警報部を Fig. 51 に示す。

x 電源設備

電源は, 検出器の前置増幅器に使用する電池を除き, すべて中央監視室から供給される。停電のときでも装置が動作するよう蓄電池を用いた非常電源を将来準備する予定でいる。

3.2 中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置

中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置は, 原子力施設周辺環境の大気放射能濃度と空間分布放射線量率を連続測定し, 測定結果を逐次中央監視装置に伝送, 記録させるとともに, 測定値が設定値を越したときは警報を発するものである。装置は, 必要な測定範囲を必要な測定精度でかつ可及的すみやかに測定結果を中央監視装置に集められるものとした。このため測定結果をテレメータにより中央に集める方

式を試みた。データ処理は、デジタル方式の記録を採用し、測定結果の処理を容易にした。これは前述のごとく測定値が5桁という広い範囲であるため、もしアナログ方式でデータを記録整理する場合は、データチャートは、全変化幅に応じた広さが必要で、かつ測定要素が多いので多くのチャートを必要とし、観測結果の処理が繁雑となる。デジタル方式を採用することによって、測定の精度も向上し、データ伝送も容易となる。

測定結果は、刻々中央に伝送するか、あるいはある程度蓄積したものを伝送するかのどちらかである。刻々のデータを伝送するためには、各ステーションと中央ステーションとの間にそれぞれの伝送路が必要で、超短波を使用するときは、多くの周波数割当が必要となり、極超短波の多重通信による場合は設備費に問題がある。観測結果を、刻々中央に集める必要性は少ないのである程度各ステーションで蓄積した後、各ステーションの各測定要素毎に中央に送信する方式をとった。

この方式によると1要素のデータ伝送処理に平均4秒を要する。10ステーション、各ステーション5要素とすると全データの伝送、処理の時間は約3.5分を必要とする。測定結果は少くも10~15分毎に得たいのと、必要な測定精度を得るためには、6分間の計測時間が必要で、結局計測6分、データ伝送・処理4分とし10分毎に同じ動作が繰返されるようにした。

放射線レベルの変化を知ることが重要であるとも

に、蓄積値、あるいは平均値を知ること大切である。このため1時間毎の平均値は、中央監視装置で計算、記録し、全蓄積値は各ステーションで得られるようにした。

中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置は、各モニタリング・ステーション装置と中央監視装置から構成されている。

3.2.1 モニタリング・ステーション装置

モニタリング・ステーション装置は、空間分布放射線検出部、塵埃サンプラー、大気放射能検出部、計数計、テレメータ装置、搬送装置、無線装置から構成されている。Fig. 52 にモニタリング・ステーション装置のブロックダイアグラムを示す。Fig. 53, 54 はモニタリング・ステーション建家の外観である。

a) 空間分布放射線検出部

空間分布放射線検出器は、壁厚 30 mg/cm^2 の側壁型ハロゲン GM 計数管 Anton 106 で、モニタリング・ステーション建物屋上に2本垂直に取付けられている。1本は空間分布 $\beta\gamma$ 放射線の検出用で、計数管をむき出しにして、保護用金網をかぶせただけのもの、他の1本は空間分布 γ 放射線の検出用で2mm厚の真鍮で β 線を遮蔽 γ 線のみを感じるようになっていいる。GM 計数管はソケット部で完全に気密に保たれ、プローブの部分に雨水が侵入する恐れはない。

GM 計数管のパルス出力は、抵抗を通し同軸ケーブルによって計数計に送られる。

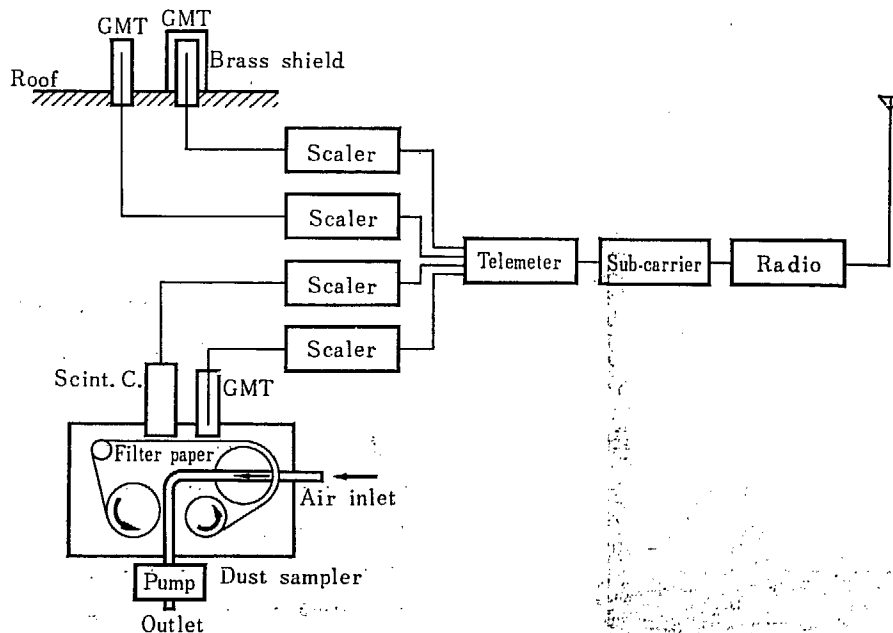


Fig. 52 Block diagram of monitoring station

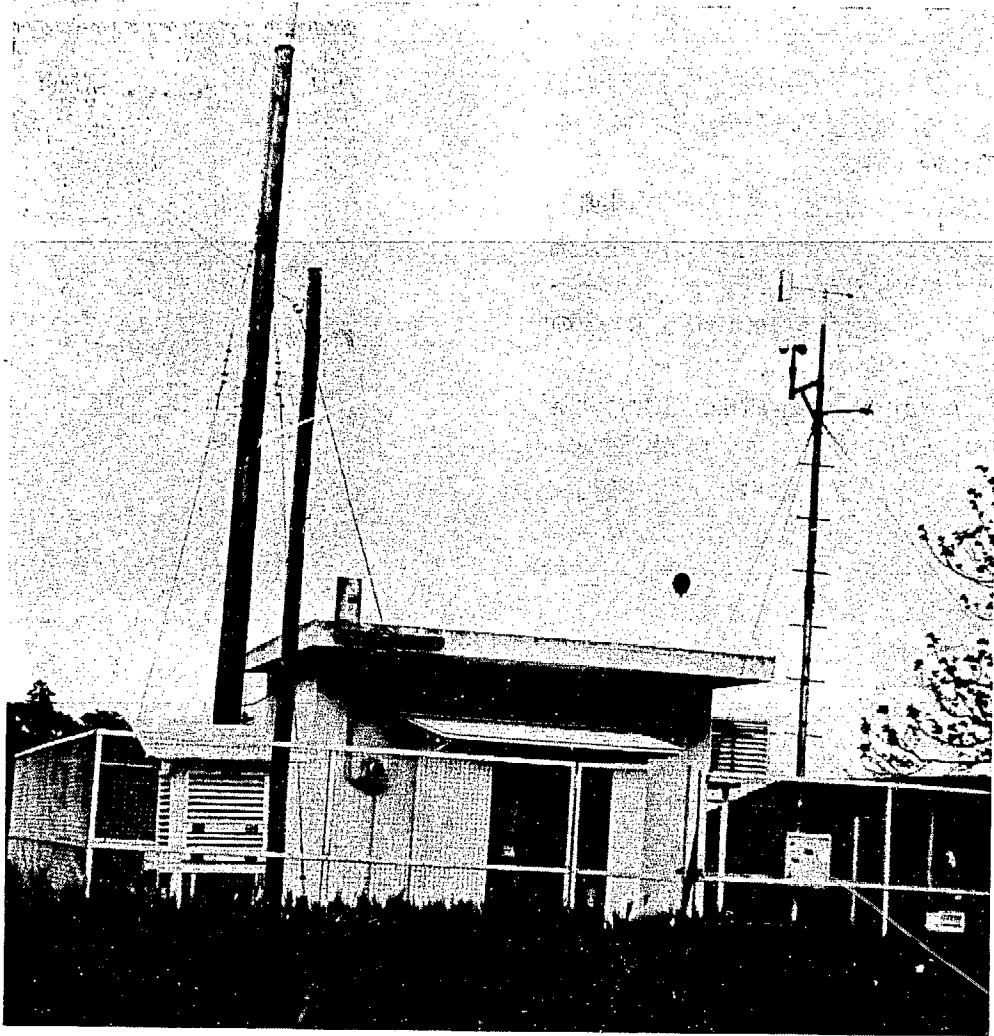


Fig. 53 No.3 Monitoring station

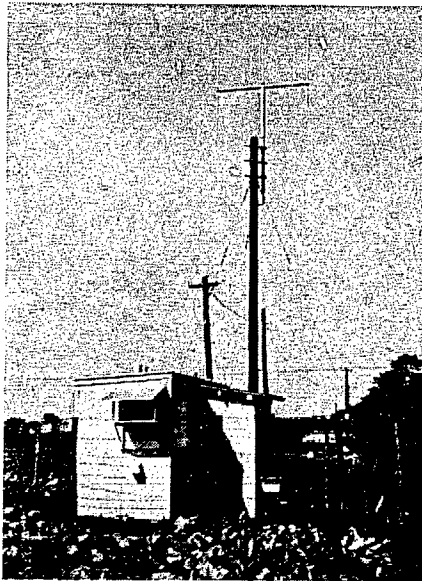


Fig. 54 No.5 Monitoring station

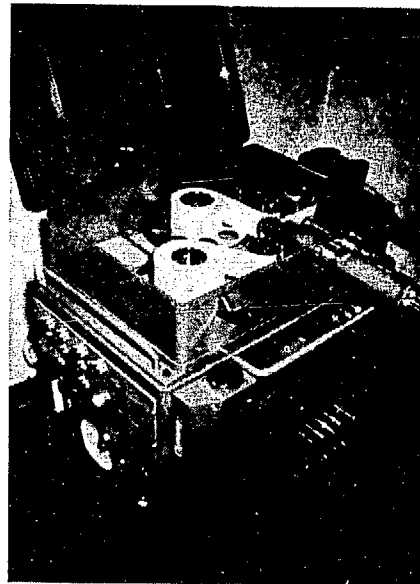


Fig. 55 Dust sampler

b) 塵埃サンプラー

この塵埃サンプラーは、大気中の塵埃を濾紙上に連続的に集める装置で、大気塵埃放射能測定に使用される。外観を Fig. 55 に示す。

大気は地上約1.5 m の高さより吸引され、集塵用濾紙* を通り、サンプリングヘッドに入り、浮子式流量計、吸引ポンプを経て排出される。サンプリングヘッドと流量計の間に圧力計が、流量計と吸引ポンプの間に流量調整弁が取り付けられている。

濾紙は25 mm/hr の速さで連続移動するため、塵埃は連続的に濾紙上に集められる。大気放射能は集塵の終わった濾紙の部分が放射能検出器の前を通過するとき測定される。自然放射能の減衰をまつため、集塵後 β 線検出器の前を通過するまでに4.5時間、 α 線検出器の前を通過するまでに7時間かかるようセットしてある。この時間は変えることができる。大気吸引量は最大250 l/min である。

c) 大気放射能検出部

α 放射能の測定は、ZnS(Ag) の α 線用シンチレータ、光電子増倍管が使用されている。

β 放射能の測定は、低バックグラウンド端窓型 GM 計数管 GM 9321 HL を使用した。検出部は外部からの放射線の影響を少なくするため7 cm 厚の鉛で遮蔽されている。

d) 計数計

各検出器からのパルス出力は計数計によって計数される。空間分布 $\beta\gamma$ 、 r 放射線、大気 β 放射能測定用の計数計は8進と80進、大気 α 放射能測定用のものは1進と10進の出力を外部に与えている。出力はテレメータの4桁の回転表示器および計数計内の5桁の積算度数計を駆動する。テレメータの回転表示器は、通常8進（あるいは1進）の出力を選択しているが計数値が4桁以上になると80進（あるいは10進）を自動的に選択している。

計数計の内部の様子を Fig. 56 に示す。プリント基板その他を平面的に展開して配置してあり、また日常の点検に必要な端子はパネル面に出し保守点検の容易な構造としてある。

防塵と温度上昇防止のため Fig. 57, 58 に示すように計数計を放熱翼のついた密閉容器内に入れ、その外側を強制空冷している。このようにすることによって夏期でも計数計内の温度を40°C 以下に保つことができた。

* Hollingsworth and Vose 社製 # 70 使用。

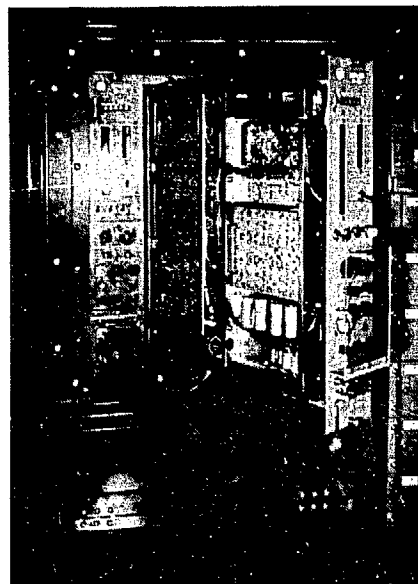


Fig. 56 Transistorized scaler, interior

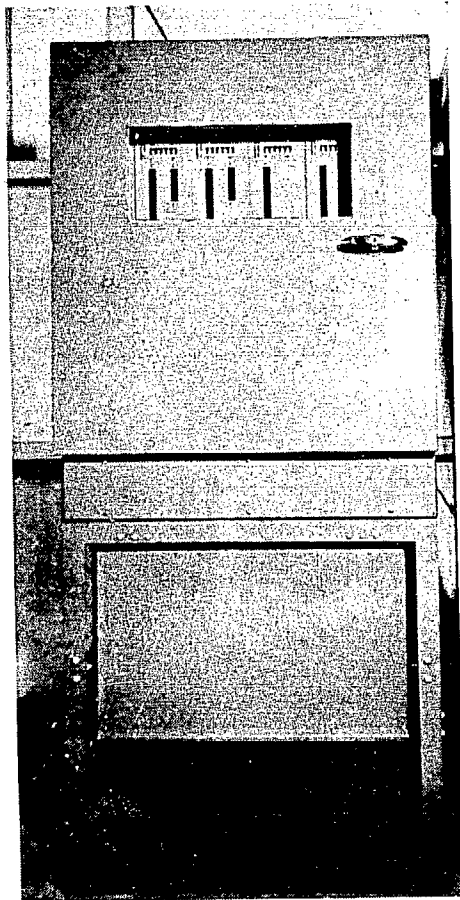


Fig. 57 Scaler and cooling case

検出器から送られた負のパルスは、比例増幅器によって増幅されディスクリミネータとスピーカアンプに送られる。ディスクリミネータの出力は8進または80進（1進または10進）回路、度数計駆動回路をへて回転表示器と積算度数計を駆動する。テレメータ、搬

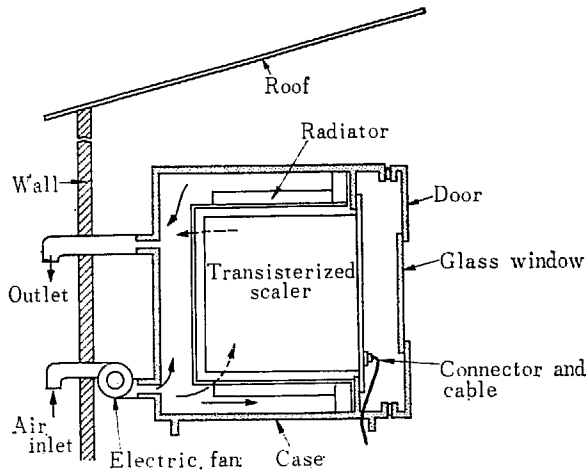


Fig. 58 Cross section of transistorized scaler.

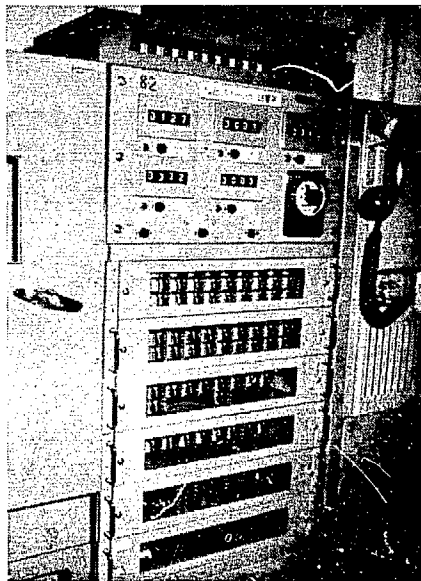


Fig. 59 Telemetering system.

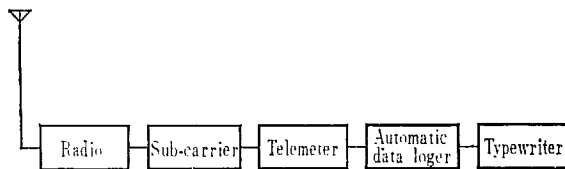


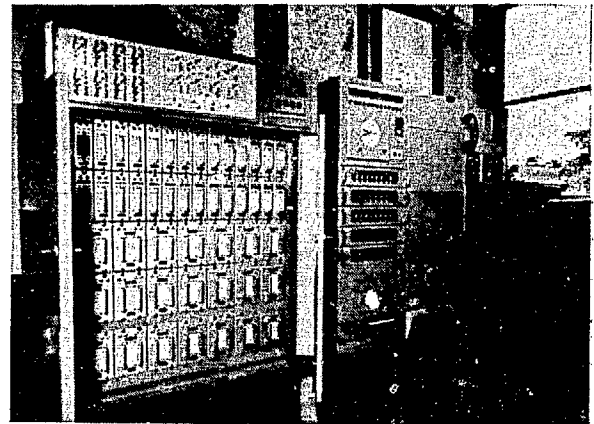
Fig. 60 Block diagram of central station.

送，無線の各装置については次項の中央監視装置で説明する。Fig. 59 にテレメータ装置の外観を示す。

3.2.2 中央監視装置

中央監視装置は，自動作表機，テレメータ装置，搬送装置，無線装置およびタイプライターから構成される中央監視装置のブロックダイアグラムを Fig. 60 に，外観を Fig. 61 に示す。

この装置の全動作指令は，中央監視装置の自動作表



Automatic computing data logger, telemeter, sub-carrier, radio and typewriter.

Fig. 61 Central station.

機内のプログラム機構によってなされている。

a) 毎10分動作

時計装置からの10分パルス (0, 10, 20, 30, 40, 50分) によって自動作表機は動作を開始，テレメータ装置に計数開始指令信号を発するとともにタイプライターの改行をおこない，6分後の印字に備える。テレメータ装置は，この計数開始指令信号を受けて，これを符号化し，時間的に直列な符号として搬送装置に伝え，搬送装置で変調され，無線装置によって全モニタリング・ステーションに伝送される。無線装置は60 Mc 帯を使用している。各モニタリング・ステーションの無線装置によって，受信された信号はそれぞれの搬送装置に与えられる。搬送装置はこの信号をテレメータ装置に与え，テレメータ装置は，この直列信号を並列信号に変換，計数開始信号であることを解読してそれぞれの計数計出力と回転表示器を結ぶゲートを入れることにより各検出要素の出力パルスは積算され始める。

次に時計装置からの6分パルス (6, 16, 26, 36, 46, 56分) によって自動作表機のプログラム機構は，計数停止指令を発して，全く同じ方法によってこのゲートははずす。回転表示器は，計数を蓄積したままで保持されている。

次に自動作表機は，順次これらの蓄積されたデータの処理を開始する。まず第1モニタリング・ステーションの呼び出し信号をテレメータ装置に与えるとともにタイプライターにその時の時刻を印字する。テレメータ装置は，呼び出し信号を受けて，これを符号化し，時間的に直列な信号として搬送，無線装置に与えることにより全モニタリング・ステーションに伝送される。各ステーションのテレメータ装置は，一斉にこ

の信号を受信するが、この信号があらかじめ定められた各ステーションの固有信号と合致したステーションのみ動作を開始する。すなわちそのステーションの無線装置は、送信に切り換り、まず第1量空間分布 βr 線量率蓄積値をテレメータ装置に伝え、搬送、無線装置をへて中央監視装置に伝送される。通常は、4桁の回転表示器の下3桁が伝送されるが、蓄積値が4桁になったときは桁上り信号が附加され、上3桁が伝送されるよう接続が自動的に切換る。前述のごとくこの時計数計も10進を加えた出力を選択するので結局通常の場合に比べ1/100の値が伝送されることになる。この場合でも少くも2桁のデータが記録されるので必要な精度が得られる。

中央監視装置では伝送されたこの値をテレメータ装置に与える。テレメータ装置は、この直列信号を並列信号に変換するとともに符号チェックをとった後、作表機に与える。作表機は、これを受けてこの値を計算回路に導く。桁上り信号のついた時は、計算回路への通路は遮断される。計算回路では、あらかじめ設定された値と差引計算をおこない、設定値>測定値であればタイプライターの印字は黒色、設定値<測定値であれば赤色の印字となるとともに警報を発する。桁上り信号が伝送された時も警報を発する。また伝送された測定値は、記憶回路によって逐次積算記憶される。

第1量の伝送・処理が終ると、第2量が伝送され逐次第5量までが伝送される。次に第2モニタリング・

ステーションに対する呼出し信号を発し、第1ステーションの場合と同様に伝送、処理がおこなわれ逐次全ステーションのデータ伝送、処理がおこなわれる。

伝送された蓄積値の確認がとれなかった時は、印字記録はハイフンになり、計算回路での設定値との差引計算や積算記憶はおこなわれない。桁上り信号を伴った時も差引計算、積算記憶はおこなわれない。

b) 毎時動作

時計装置からの1時間パルス(毎時0分)により自動作表機は過去1時間6回分の測定値の積算値に対し、平均および換算の演算をおこないタイプライターに印字する。

3.3 気象観測装置

大氣中に放出された放射性物質の拡散による汚染、被曝を評価するのに風向、風速、大氣安定度を知る必要がある。中央監視室ではこれら3要素を一目で分るよう風向、風速は指示計で、大氣安定度はA, A-B, B, B-C, C, C-D, D, E, F, F'の10段階を表示灯で示している²⁰⁾。大氣安定度は昼間は風速と日射の組合せで、夜間は風速と雲の状態および雲量の組合せで決るので、風速、日射を9.5分間測定した値から10分毎に表示している。雲の状態および雲量を自動的に測定することは困難であるので夜間は風速のみによって安定度を分類している。

4. 考察と結言

大氣中に放出された核分裂生成物の拡散と沈着、およびこれにもとづく被曝解析をおこない、野外における被曝評価の方法を明らかにし、原子力施設周辺に配置する中央監視式野外放射線モニタリング・システムの測定対象の選定、必要な測定範囲と測定結果を得るまでに要求される時間、測定法、検出器の最適配置について解明し、この解析結果から要求されるモニタリング装置の方式について開発、装置を設計、建設するとともにこの装置を使って野外の放射線、放射能の測定をおこなった。

γ 線検出器からなる中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置は、ある程度以上の被曝を周辺住民に与えるような事故について、直ちに汚染を検出し被曝評価がおこなえる。 γ 線検出器、大気塵埃放射能検出器およびフィルム線量計からなる中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置は、ほぼ完全な野外におけるモニタリングの1単位で広範囲の汚染と被曝評価ができる。これら両装置は互いに補いあい原子力施設周辺の連続モニタリングを完全ならしめている。連続モニタリングのできない特に大気放射能濃度が低い、あるいは高いとき、すなわち濃度が $10^{-11}\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下あるいは $1.5 \times 10^{-6}\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上の濃度については、集塵試料から測定することができる。

モニタリング装置の設置されていない場所の大気放射能濃度についてはその時の気象条件と得られた観測値から放出量を推定、濃度分布図 (Fig. 14~18) から汚染や被曝を評価することができる。ある期間の積算濃度については、その期間の気象条件と放出量から推定することができる。

Fig. 62 に、JRR-2 原子炉が5 Mw で連続運転されたとき、 ^{41}A が $2.2\text{c}\cdot\text{hr}^{-1}$ の割合で放出された。このとき原子炉周辺に配置されたモニタリング・ポスト装置によって観測された γ 線量率の時間変化の様相を示す。時間の経過とともに風向が変化し、逐次風下にあたるモニタリング・ポスト装置によって検出されていく様子がよく分る。 $2\text{c}\cdot\text{hr}^{-1}$ 程度の放出でもいずれ

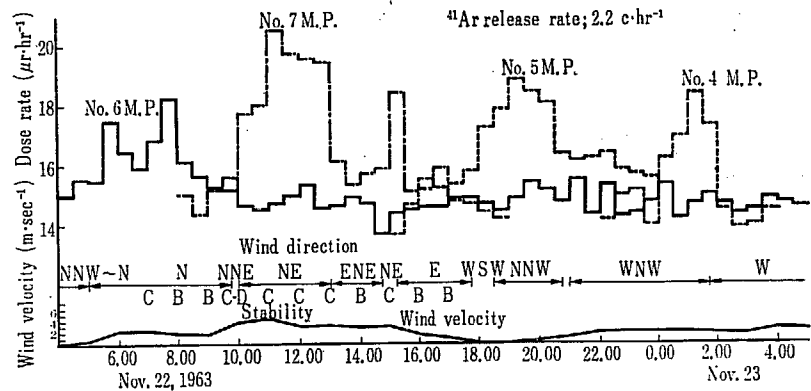


Fig. 62 Variations in gamma dose rate by ^{41}A cloud released from JRR-2 reactor stack.

かの観測点で放射性雲からの γ 線が検出されている。観測値と計算値はよく一致している。

原子力施設から漏洩する直接の γ 線については、 γ 線検出器によって容易に測定することができる。検出器の数はわずかでよい。Fig. 63 に線型加速機 (LINAC) が稼動したとき No.3 モニタリング・ポストで観測された γ 線量率の記録を示す。運転状況を一目で知ることができる。

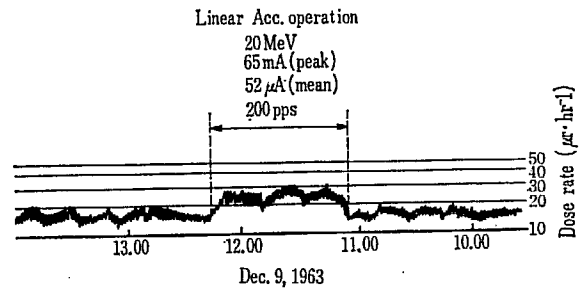


Fig. 63 Variation in gamma dose rate by Linear Acc. Operation at No.3 monitoring post.

これら平常運転時のデータから大気拡散、漏洩 γ 線量率などに関する基礎資料を得、さらに詳細な被曝解析をすることができる。

このモニタリング・システムを決めるための解析をおこなうにあたり、問題を単純化し、また多くの仮定をおいた。しかしつとめて一般性をもたせ完成されたモニタリング・システムがいかなる場合の汚染の測定、被曝評価にも役立つようつとめた。解析にはまだ多くの不確かさがある。気象解析については静穏時、

下層逆転のある時などについて未解決の問題をもっており、その出現頻度も無視し得ない。局地性についても解析の困難さがある。被曝解析についても施設内に貯えられまた放出される核分裂生成物の構成や、放出状態、地物の影響についても解析の困難さがある。観測結果から適切な判断を下していくことが特に重要である。

より広範囲により精確な放射線、放射能レベルを知るためには、環境のサーベイ、環境試料の放射能測定も欠くことができない。

現在の中央監視式モニタリング・ポスト装置ならびにモニタリング・ステーション装置の稼働率は、それぞれ約95%、90%である。連続モニタリング装置としては、信頼性はきわめて高い。

面積狭小な我が国において、平野部に原子力施設を設置するとき、中央監視式放射線モニタリング装置を設けることにより、異常を十分すみやかに発見、汚染の経過を連続的に知り、適切な処置を施すことができ事故後の被曝を抑制し、立地の不利を補うことができる。原子力施設の設置にあたり、隔離された敷地が得られないとき、このような装置はきわめて有用なものとする。

* この中央監視式野外放射線モニタリング装置の総建設費は約9,000万円と推定される。この装置を設置することにより利用できる土地面積の増加分で十分つぐなわれるものとする。

中央監視式野外放射線モニタリング・ステーション装置は、完成後すでに数年連続運転がおこなわれた。中央監視式野外放射線モニタリング・ポスト装置は近距離のものについては完成。1年以上の連続運転を終り、近く遠距離のもの建設がおこなわれる。本装置を計画するに当たり、いかなる気象条件、放射性気体、塵埃の放出条件でもつねに異常を発見できるためには高感度な検出器を密に配置する必要が予測され検出器の感度、装置の信頼性、経済性においていかにすれば満足なものになるかに問題があった。本装置は検出感度において、信頼性においてまた経済性*において十分満足なものといえる。

謝 辞

本研究をおこなうに当たり、全般的に御懇篤なる御指導を賜った東京大学工学部原子力工学科西野治教授に深く感謝する。また本研究をおこなう機会を与えられ、終始有益なる御教示と御援助をいただいた日本原子力研究所保健物理安全管理部牧野直文部長、青木敏男前部長ならびに坂岸昇吉次長に厚く御礼申し上げます。さらに装置の改良、建設に御協力いただいた佐々木諭、片桐浩、城谷孝、須賀新一の諸氏、線量計算をしていただいた角川正義氏、当地における同一風向の継続する時間別の頻度調査を心よく引受けられ資料を提供下さった伊藤直次氏など当所保健物理安全管理部の方々に御礼申し上げます。

記号表

A	大気放射能積算濃度	$\text{c}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3}$	Q	建物内に充満した放射性物質の量	c
B_i	i 番目の γ 線に対する Build up 係数		q	放射性気体塵埃の排出率	$\text{c}\cdot\text{hr}^{-1}$
C	容量	F	R	抵抗	Ω
c	拡散係数	m^2/s	R	被曝線量率. γ 線量率, β 線量率を区別するときはそれぞれ添字 γ あるいは β をつける.	$\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}$
c_v	風向に直角な横の水平拡散係数	m^2/s	$R_{\text{total}}, R_d, R_o, R_g, R_b$	それぞれ全体, 建物内の放射性物質, 放射性雲, 放射性地表面汚染, 放射性身体・被服汚染からの線量率. γ 線量率, β 線量率を区別するときはそれぞれ添字 γ あるいは β をつける	
c_z	垂直方向の拡散係数	m^2/s	$R(t)$	被曝線量率	$\text{rem}\cdot\text{hr}^{-1}$
D	被曝線量	rem	r	地表面からの高さ	m
D_{total}	$D_d, D_o, D_g, D_b, D_{\text{inh}}, D_{\text{ing}}$ それぞれ全体, 建物内の放射性物質, 放射性雲, 放射性地表面汚染, 放射性身体・衣服汚染, 呼吸, 飲食物摂取からの被曝線量	rem	S	大気安定度の種類 (A, B, C, D, E, F)	
d	放出源から風下距離, あるいは建物からの距離	m	s_t/s_a	軟組織と空気との Stopping power の比	
d_1	建物壁の厚さ	m	T	被曝する時間	hr
E_i^γ	i 番目の α 崩壊, β 崩壊に対応する γ 線のエネルギー	MeV	T'	放射性地表面汚染のある場所に止る時間	hr
$(E_i^\beta)_{av}$	i 番目の β 崩壊に対応する β 線平均エネルギー	MeV	T_r	実効半減期	hr
E_{av}^γ	1崩壊あたりの γ 線の平均エネルギー	MeV	t	時間	hr
$F_1, F_1', F_2, F_2', F_3, F_3', F_4, F_4'$	建物内に充満した放射性物質の構成, 建物の構造, 考えている地点の位置, 放出源の地上よりの高さ, その時の気象条件, 問題の臓器などにより決る常数		t_b	バックグラウンド計数時間	sec
f_i	1崩壊あたりの i 番目の α あるいは β を放出する割合		t_s	試料の計数時間	sec
H	放出源の地上よりの高さ	m	\bar{U}	平均風速	$\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$
h	風下 d の距離における軸上濃度の1/10になる高さ (拡散高度)	m	v_o	沈着速度	$\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$
$h(x)$	風下 x の距離における軸上濃度の1/10になる高さ (拡散高度)	m	w	風下 d の距離における軸上濃度の1/10になるひろがり (拡散幅)	m
k	最大被曝地点の被曝線量/観測点の被曝線量		$w(x)$	風下 x の距離における軸上濃度の1/10になるひろがり (拡散幅)	m
N	真の計数		x	放出源の地表を原点として平均風の方向に測った距離	m
N'	実際の計数		y	放出源の地表を原点として平均風向と直角な水平方向の距離	m
n	気層安定のパラメータ		z	放出源の地表を原点として上方に測った距離	m
n_b	バックグラウンド計数		θ	$2w$ に対して放出源から張る角度	$^\circ$
n_s	試料の計数		ϵ	建物内の放射性物質の大気中への漏洩率	hr^{-1}
P	装置全体の reliability		μ_{a_i}	空気の i 番目の γ 線に対する線吸収係数	m^{-1}
P_i	i 番目の装置の reliability		μ_{b_i}	建物壁の i 番目の γ 線に対する線吸収係数	m^{-1}
			μ_i	空気の i 番目の γ 線に対するエネルギー吸収係数	m^{-1}
			$(\mu_m)_{tis}$	組織の質量吸収係数	$\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$

ρ	放射性雲から考えている地点までの距離	m
τ	不感時間あるいは分解時間	sec
λ_0	大気放射能濃度	$\text{c}\cdot\text{m}^{-3}$
λ_s	地表面の放射能汚染密度	$\text{c}\cdot\text{m}^{-2}$

参 考 文 献

- 1) 青木敏男, 坂岸昇吉, 宮永一郎, 石原豊秀, 伊藤直次, 角田道生: JAERI-5003, 147 (1961)
- 2) J.SEDLET and F.S.IWAMI: Environmental Radioactivity at Argonne National Laboratory, ANL-6736 (1963)
- 3) M.M.WEISS: Area Survey Manual, BNL-344 (T-61) (1955)
- 4) J.C.HART: Applied Health Physics Annual Report for 1959, ORNL-3073 (1960)
- 5) H.HOWELLS: Personal communication
- 6) U.S.WEATHER BUREAU: Meteorology and Atomic Energy, AECU-3066 (1955).
- 7) P.J.MEADE: The Estimation of the Distribution of Concentration Down wind of a Source of Airborne Material, G11437 (1958).
- 8) Report of ICRP Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, Pergamon Press (1959).
- 9) Recommendation of the International Commission on Radiation Protection, Pergamon Press (1958).
- 10) 角川正義, 青木敏男: 日本原子力学会誌, 5, 110 (1962)
- 11) 気象庁・日本原子力研究所: 東海村微気象調査予備観測報告書 (1956)
- 12) 原子力気象調査会: 東海村の煙突から出る廃棄物の放散に関する調査 (1959)
- 13) 気象庁, 日本原子力研究所: 東海村微気象調査報告書 (1957)
- 14) S.SAKAGISHI and T.ISHIHARA: Practical Methods for Estimating Atmospheric Dispersion and External Exposure from Radioactive Cloud, IAEA Symposium on Reactor Safety and Hazard Evaluation Techniques (1962).
- 15) S.SAKAGISHI, T.ISHIHARA and I.MIYANAGA: Field Observation of Environmental Exposure Dose from Radioargon Clouds, 3rd U.N. Geneva Conf. (1964)
- 16) J.R.BEATTIE: An Assessment of Environmental Hazards from Fission Product Release, AHSB(S)R9 (1961)
- 17) JAERI-6001 (1957)
- 18) 石原豊秀: 早稲田電学誌, 38, 53 (1963)
- 19) H.MIWA and T.TOHYAMA: Radiation-Pulse Transmission via a long Cable without a Preamplifier and/or a Pulse Transformer, Nuclear Electronics II IAEA (1962)
- 20) JAERI-5012 (1963)