

原子炉災害対策用
野外放射線監視システムに関する考察

1971年3月

日本原子力研究所

Japan Atomic Energy Research Institute

日本原子力研究所は、研究成果、調査結果などを JAERI レポートとして、つぎの4種に分けそれぞれの通し番号を付し、不定期に刊行しております。

- | | | |
|---------|--------------------------------|-------------|
| 1. 研究報告 | まとまった研究の成果あるいはその一部における重要な結果の報告 | JAERI 1001- |
| 2. 調査報告 | 総説・展望・調査の結果などをまとめたもの | JAERI 4001- |
| 3. 年報 | 研究・開発その他の活動状況などの報告 | JAERI 5001- |
| 4. 資料 | 施設の概要や手引きなど | JAERI 6001- |

このうち既刊分については「JAERI レポート一覧」にタイトル・要旨をまとめて掲載し、また新刊レポートは「研究成果要旨集」(隔月刊)で逐次紹介しています。

これらのリスト・研究報告書の入手および複写・翻訳などのご要求は、日本原子力研究所技術情報部(茨城県那珂郡東海村)に申しこんでください。

Japan Atomic Energy Research Institute publishes the nonperiodical reports with the following classification numbers:

1. JAERI 1001- Research reports
2. JAERI 4001- Survey reports and reviews
3. JAERI 5001- Annual reports
4. JAERI 6001- Manuals etc.

Requests for the above publications, and reproduction and translation should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan

JAERI 1193 正誤表 (Errata)

Page など	行 など	正 (Corrected)	誤 または 補註
要 旨	上から6行目 (以下「上6」 等と略記する)	……さらに γ 線遮蔽を施し	γ さらに線→さらに γ 線 (以下誤植部分には~~~~を付す)
Summary	下 2	……monitoring instrument, estimated with	estimated を補う
6 右	上 15	$10\left(\frac{100\mu R \cdot \text{hr}^{-1}}{10\mu R \cdot \text{hr}^{-1}}\right)$	= を補う
6 Fig. 3	縦 軸	……from reactor, d (km)	hm→km
6 Fig. 3	図中左側	Domain of not-detectable cases	cases を補足
8 右	(6)式積分内	$1 - e^{-\frac{0.693}{T_{ei}}(\tau_i - t)}$	$T_{ei} \rightarrow T_{ei}, 7 \rightarrow \tau_i$
8 右	下 6	ただし	ただし
9 左	(8)式右辺	$= \frac{\ln 10}{60^2 \dots} \exp\left\{-\left(\frac{y}{w_i(x)}\right)^2 \ln 10\right\}$	$\left(\frac{Z-H}{h_s(x)}\right)^2 \rightarrow \left(\frac{y}{w_s(x)}\right)^2$
9 左	(8)式右辺	$\left[\exp\left\{-\left(\frac{Z-H}{h_s(x)}\right)^2 \ln 10\right\} + \exp\left\{-\left(\frac{Z+H}{h_s(x)}\right)^2 \ln 10\right\}\right]$	$Z \rightarrow z$
10 Fig. 6	横軸の単位	$\times 10^{-2} \mu C_{\text{L}} \cdot \text{m}^{-2}$	$10^{-2} \rightarrow 10^{-12}$
10 右	(16)式	$K_{\text{grnd}} = K_2 v_g \sum E_i \int_0^{\tau_i} f_i(t) dt$	K_2 の後に v_g を補う。
12 左	脚 註	大きな値は $K_{\text{inh}} \cdot \lambda_s(x, y, 0)$	$(x, y) \rightarrow (x, y, 0)$
13 左	(27)式積分内	$\frac{\dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t)}{f_s(x_0, y_0)}$	$f_s(x_0, y_0) \rightarrow f_s(x_0, y_0)$
13 左	下 6	スタック・モニタ等で……	スタック, モニタ→スタック・モニタ
13 右	上 6	$\{(x_0, y_0)\}$ を定めること。	$x_0, y_0 \rightarrow (x_0, y_0)$
14 右	下 11	…… w_r の最大値 \hat{w}_r を……	$\hat{w}_r \rightarrow w_r, \hat{w} \rightarrow \hat{w}_r$
14 Fig. 11	表 題	Radius \hat{w}_r of……	$w_r \rightarrow \hat{w}_r$
15 Fig. 12	横 軸	Action level per unit time of	in→of
15 Fig. 12	表 題	to be monitored $\phi = \frac{9\pi}{8}$	16→8
19 右	上 17	の問題は6.2節以降で……	6.4節→6.2節
21 右	右 7	$g_{ij}(x_{ij}) \doteq 1 - P_{ij}^{1+x_{ij}}$	$1 \doteq -P_{ij}^{1+x_{ij}} \rightarrow \doteq 1 - P_{ij}^{1+x_{ij}}$
21 右	上 10	$g_{ij}(x_{ij}) = 1 - 1^{1+x_{ij}} = 0$	$1x_{ij} \rightarrow 1^{1+x_{ij}}$
22 左	(53)式	$f_{\text{No}}(C) = \dots$	$f_{\text{No}}(C) \rightarrow f_{\text{No}}(C)$
22 左	上 9	それぞれ V 種類の……	$v \rightarrow V$
22 左	上 12	予算枠 C_{max} のもとで……	$\tilde{C} \rightarrow C_{\text{max}}$
23 左	上 10	$10^6 C_i$ とすれば 1.6 km 程度, ……	16 km→1.6 km
23 右	下 5	…… (保護物理安全	安定→安全
23 右	下 4	立田初巳氏 健	己→巳
27 左	上 5	……最大ならしめるものを \hat{x}_i ……	$x_i \rightarrow \hat{x}_i$
27 左	上 9	$\sum_{i=1}^U \hat{x}_i m_i$	$\tilde{x}_i \rightarrow \hat{x}_i$
30 左	(48)'式	$\sum_{i=1}^N W_i \prod_{j=1}^V g_{ij}(x_{ij})$	$\sum_{j=1}^V \Pi \rightarrow \prod_{j=1}^V$
31 Fig. 19	下 8	$ef_{\text{Ni}}(C) \leftarrow \beta, \dots$	$f_j(C) \rightarrow f_{\text{Ni}}(C)$
31 Fig. 19	下 1	PRINT : $ef_{\text{NV}}(C)$	$f_{\text{N}}(C) \rightarrow f_{\text{NV}}(C)$

原子炉災害対策用

野外放射線監視システムに関する考察

要 旨

原子炉施設の周辺に配置する放射線監視網の理想的なあり方について考察するにあたり、 γ 線のスカイシャイン現象や複雑な気象要素の効果を評価するために新しい手法を用いた。

ここでは、原子炉事故にともなう放射線災害の規模を評価するために、最高汚染地点に所在した住民（標準人）の甲状腺（決定臓器）に関する線量預託を用いることとした。その観点に立つと、もし対策レベル（すなわち緊急対策をとるべき線量レベル）を甲状腺に対して 100 rems、FP 雲の吸入時間を 10 hr とすれば、 γ 線検出器は原子炉から 1.6 km 以上離れて約 400 m ほどの間隔で配置し、 γ さらに線遮蔽を施した空気汚染モニタを原子炉から約 1 km 離れて 1 km ほどの間隔で補足的に配置することが望ましいこととなる。

なお、経済的制約その他の複雑な条件のもとにおいて最適の監視システムを決定する問題も、マトリックス型動的計画法を開発することにより解決できた。そこでは、監視システムの性能を「FP 雲を発見し状況を把握しうる確率」によって定義し、対策レベル（災害の規模）ならびに監視装置の設置場所、監視警報レベル、および故障の確率の関数として、気象統計値を用いて評価した。

1970年3月

日本原子力研究所 東海研究所
保健物理安全管理部

角 川 正 義

Studies on an Environmental Monitoring System for the Radiological Disasters due to a Reactor Accident

Summary

Some numerical design problems have been studied to find an ideal system of environmental monitoring, based on the estimation of a γ -ray sky-shine, complex radio-ecological effects, etc. The magnitude of radiological disaster was defined as the dose-commitment to the thyroid gland, a critical organ, of (standard) resident at the most contaminated spot. Provided that the dose corresponding to an action level against the radiological disaster is taken as 100 rems for the thyroid gland, and the inhalation time is 10 hr, it is ideal to set γ -ray detectors 1.6 km or more away from the reactors at about 400 m intervals, and in addition radioactive-aerosol monitors to collect iodine-131, shielded against the sky-shine, 1 km from the reactors at 1 km intervals.

A method was also developed of determining the optimum distribution of monitoring instruments under complicated constrains, utilizing the dynamic programming technique. The efficiency of a monitoring system was defined as the probability to detect a fission products cloud in a radiological disaster, as functions of the action level, and position, alarm level and failure rate of monitoring instrument, with climatologic data.

April 1970

Masayoshi KADOKAWA
Division of Health Physics and Safety
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute

目 次

1. ま え が き	1
2. 野外監視システムの課題と特殊用語の説明	2
3. 事故現場から到達する γ 線と監視所の避隔距離との関係	4
3.1 地物などによる遮蔽効果と sky-shine γ 線	4
3.2 放射線監視所の役割と避隔距離	5
4. FP 雲による総合的被曝と監視システムの基本的あり方との関係	8
4.1 FP 雲に起因する被曝に関する総合的考察	8
4.1.1 原子炉災害時に受ける被曝の内容	8
4.1.2 不可避免的に受ける被曝に関する定量的表現	8
4.1.3 被曝量分布の特徴と観測値との関係	11
4.2 放射線監視所の配置を考える際の指針	13
5. 理想的な監視システムに関する考察	14
5.1 γ 線検出器を備えた監視所の必要数	14
5.2 ダストモニタの役割とその状況把握能力	15
6. 経済性、場所的重要性ならびに測定器の信頼性を考慮に入れた最適配置法	18
6.1 最適配置法に関連する要素の定量的表現	18
6.1.1 重要度に関するフォーミュレーション	18
6.1.2 監視システムの性能（目的関数）の評価式	19
6.2 最適配置の数理計画法	20
6.2.1 初歩的な配置採択法	20
6.2.2 改善した最適配置法	20
6.2.3 サブ・システム冗長方式を考慮した最適配置法	21
7. 結 言	23
8. 記 号 表	24
文 献	26
Appendix 1 監視所候補地点の最適選択問題に関する補足説明	27
Appendix 2 サブシステム冗長方式を考慮した最適配置法に関する補足説明	30

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Fundamental concepts and technical terms of the environmental monitoring system.....	2
3. Separation distance of monitoring posts related with the direct γ -exposure rates in a reactor accident	4
3.1 Shielding effect of the natural features, and γ -ray sky-shine.....	4
3.2 Role of the monitoring posts, and their separation distances	5
4. Modes of the exposure to inhabitants from a fission products cloud, and a guiding rule to the ideal distribution of monitoring posts.....	8
4.1 Synthetic expression for the exposures to inhabitants	8
4.1.1 Details of the exposure to inhabitants in a radiological disaster	8
4.1.2 Quantitative expressions for unescapable exposures to the inhabitants.....	8
4.1.3 Characteristics of the exposures and their relation with the observable values.....	11
4.2 Guiding rule for the ideal distribution of monitoring posts	13
5. Ideal aspect of environmental monitoring system.....	14
5.1 Necessary number of γ -ray monitoring posts	14
5.2 Role of the FP aerosol monitoring posts and their detecting capability	15
6. Optimum distribution of the monitoring posts, considering the economy, location efficiency and instrument reliability	18
6.1 Quantitative expression of the factors used in the optimum distribution problems	18
6.1.1 Formulation of the weighting factor of locality	18
6.1.2 Estimation of the objective function (efficiency of the monitoring system)	19
6.2 Numerical design of the optimum distribution of monitoring posts	20
6.2.1 Primary approach	20
6.2.2 Numerical design method for the optimum selection of the monitoring post locations.....	20
6.2.3 Numerical design method for the optimum redundancy allocation of subsystems of monitoring instruments	21
7. Conclusion	23
8. Symbols used	24
References	26
Appendix 1 Complementary description of the optimum selection problem of monitoring post locations	27
Appendix 2 Complementary description of the optimum redundancy allocation of subsystems of monitoring instruments	30

1. ま え が き

原子力施設の周辺に配置する放射線監視システムは、放射性物質の放出状況を常時監視するとともに、原子炉事故等による環境汚染災害（以下これを原子炉災害という）の発生した場合に、その汚染の経過を迅速的に把握することにより、周辺地域の安全範囲等を判断するために必要な基礎資料を得ることを目的とする。

ところで放射線監視所の必要性については、関係各方で種々の論議がなされてはいるが、国際的にも国内的にも統一した見解が出ていない。論議の生ずる主な理由はその建設と維持に多額の費用を要する点にあり、統一の見解のないのは主としてその費用投入効果つまり放射線監視所にどこまで期待できるかの定量的解析が十分になされていなかったことによると思われる。

ところでわが国においては、公害防止の立場から火力発電所の建設が制約を受けるとともに、有力なエネルギー供給源として注目されてきた動力用原子炉が全国的な規模で建設されつつあり、放射線管理の立場にある者の任務は益々その重要性を増してきた。またこれと共に放射線管理体制の合理的な基準を確立することが必要となり、野外監視システムについても十分な検討が加えられなければならない。

この時にあたり、筆者は放射線監視システムの役割とその最適配置法について定量的な結果を得ることを試みた。もとより、これを行なうにあたっては、これまでの批判に関する何らの先入感を混じえず、ひたすら客観的な資料を得る態度をとった。また錯綜する諸要素によって論理の混乱するのを避けるために、原子炉災害の規模の表現法等について従来行なわれていた方法^{(9),(25)}とは異なる新しい視点から、各種分野を総合する確率論的表現ならびに数理計画法を用いて普遍的な結論を導くように努めた。

ここに報告する内容のうち第6章以外の部分は、さる1963年12月に「原子炉災害対策用野外観測網配置基準の考察(JAERI memo 1438)」と題し所内報告用としてまとめたものであるが、その後原研内外の数多くの方々より関心を寄せられて次第に残部も少なくなり再度の増刷が必要となってきたのを機会に、若干の追加と補正を加えて JAERI-report として印刷に付することとなったものである。今後とも御検討を戴いて、環境放射能対策の統一の見解が生まれるための契機として役立つことを期待したい。

2. 野外監視システムの課題と特殊用語の説明

原子炉施設の周辺に放射線監視網を配置するにあたり、システム工学的観点から次の幾つかの課題が生れる。

- (1) 放射線監視用検出器を配置する地点（以下これを有人・無人の区別に関係なく「監視所」という）は、原子炉からどれくらいの距離に設置すればよいか。
- (2) 各監視所の相互間隔はどれくらいに保って、何箇所くらい配置すればよいか。
- (3) 各監視所にはどのような測定器が適当か、またそれらの測定器は原子炉事故時にどの程度の期待をかけることができるか。
- (4) 地域的重要性や建設費、維持費等が各地点ごとに異なり、かつそれぞれの長短が複雑に錯綜して優劣をつけ難い場合に、どのような候補地の選択を行えばよいか。また、その選択内容が異なると監視の効率がどのような影響が及ぶか。

これらの課題は、一見単純のようであるが解析を行なってみると意外に複雑であり、しかも問題の解析をなおざりにすると、建設と維持に多額の費用と労力を要するにもかかわらず、不完全で無駄の多い監視網となるおそれがある。しかし、筆者の知るかぎりでは、これらの課題について体系的に解析した文献は数少なく、問題点が十分に解明されているともいえないので、これらについ

て考察した結果を次章以降に述べる。

この論文では、他の文献等には使われない特殊な用語を用いるので、以下にこれを説明する、Fig. 1 も参照して解釈されたい。

(a) 監視所 (Monitoring post)

……野外監視用検出器を配置する場所。(その場所で監視する人が居るか否かは関係のないものとする。)

(b) 監視網 (Monitoring network)

……原子炉災害の状況を把握するために編成した幾つかの監視所の集まり。

(c) 監視システム (Monitoring system)

……監視網とほとんど同じ意味で用いるが、ここでは監視装置の内容も考慮に入れている。

(d) 避隔距離 (Separation distance), 記号 d

……原子炉(事故現場と想定する場所)と監視所との距離

(e) FP 雲 (FP cloud or Fission products cloud)

事故時に原子炉から放出される FP で汚染された気流

(f) 把握可能領域 (Detecting domain), 記号 \hat{w}_7, \hat{w}_c ,

または $w(A; d, L, S)$

……監視所にアラームレベル以上の観測値を与える

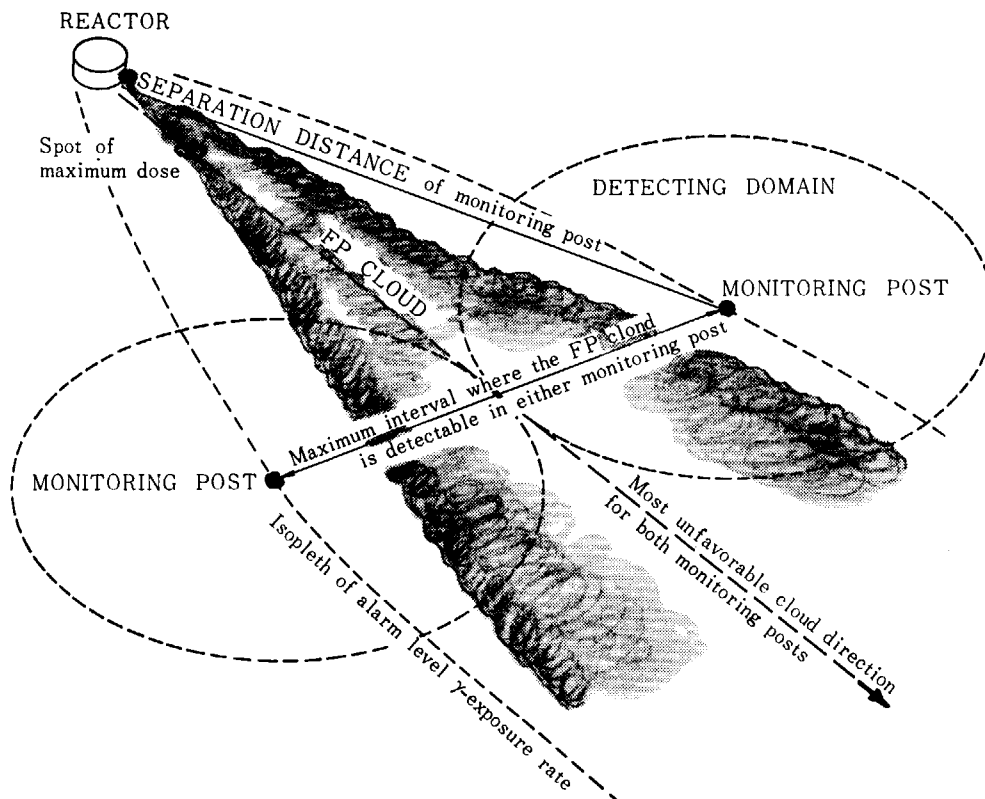


Fig. 1 Fundamental concepts and technical terms

- ような FP 雲の通過範囲 (4.2 節~5.2 節参照)
- (g) **最大被曝地点**(Spot of maximum dose)
記号 $(x_m, 0)$
……FP 雲による総合的積算被曝量 (一生涯にわたって預託された被曝量も含んだもの) の最大の地点 (4.1.3 節参照)
- (h) **原子炉災害の規模** (Magnitude of radiological disaster), 記号 $D(x_m, 0)$
……最大被曝地点にいる住民 (標準人) の決定臓器 (甲状腺) が不可避免的に受ける総合的積算被曝線量 (4.2 節参照)
- (i) 原子炉災害の**被害進行度** (Damage rate of radiological disasters), 記号 $\dot{D}(x_m, 0)$

$$\doteq \frac{\text{原子炉災害の規模}}{\text{住民の FP 雲吸入時間}}$$
- (j) **監視システムの性能** (Detecting capability of the monitoring system), 記号 Ω
 ……FP 雲を発見し災害評価に役立つ観測値を得るための能力. ここではアラーム・レベル以上の値を観測しうる確率で表わす (6.1.2 節参照).
 なお, 数式の記号については, 上述のほか, 巻末の一覧表を参照されたい.

3. 事故現場から到達する γ 線と監視所の避隔距離との関係

3.1 地物などによる遮蔽効果とスカイ・シャイン γ 線

大規模の原子炉事故により多量の核分裂生成物が原子炉格納容器内に充満し閉じこめられたような場合に、それより放射される γ 線が樹木、建築物、丘陵等の遮蔽体の存在状況および γ 線のエネルギーなどによりどの程度変るものであるかを検討してみよう。

まず遠方に到達する γ 線を、地物等の吸収作用を受けながら地面に沿って到達する成分と、上空に射出された後に散乱されながら地上に達する成分 (sky-shine) とに分けて考える。

このうち前者による照射率 $\dot{D}_{\text{obstacle}}(d, Q_i)$ は

$$\dot{D}_{\text{obstacle}}(d, Q_i) = \frac{Q_i}{d^2} k_i \exp\{-(\mu_{1i}t + \mu_{2i}d)\} (\mu R \cdot \text{hr}) \quad (1)$$

で示される。ここで

d : 事故の原子炉から監視所までの距離 (m)

Q_i : FP を γ 線エネルギーで分類した場合における、 i 番核種群の所在量 (Ci)

k_i : i 番核種群の代表的な γ 線エネルギーに対する γ 線放射定数 ($\mu R \cdot \text{hr} / \text{Ci} \cdot \text{m}^{-2}$) (Table 1 参照)

μ_{1i} : 格納容器壁材の全吸収係数 (i 番核種群の代表的な γ 線エネルギーに対する値) (cm^{-1})

t : 格納容器の壁厚 (cm)

$\mu_{2i}d$: i 番核種群の γ 線が地物の所在する場所を距離 d だけ通過する際に受ける吸収の割合。したが

TABLE 1 Estimated characteristic values of fission products confined in a reactor container at a hypothetical accident

Group number for the fission products classified by energies	Symbol	Unit	Value		
			1	2	3
Representative energy of each ⁽⁵⁾ group	E_i	MeV	0.33	1.14	2.13
Specific gamma ray emission	k_i	$\frac{\mu R \cdot \text{hr}^{-1}}{\text{Ci} \cdot \text{m}^{-2}}$	1.9×10^5	6.0×10^5	1.0×10^6
Linear absorption coefficient of container material (steel)	μ_{1i}	m^{-1}	0.87	0.46	0.32
Linear absorption coefficient of air	μ_{3i}	m^{-1}	0.013	0.0074	0.0052
Quadratic term coefficient ⁽²⁾ in the equation (4) and (5)	S_i	—	2.04	0.104	0.024

って μ_{2i} は地物所在空間の実効的な全吸収係数 (m^{-1}) ということになる。

つぎに、後者すなわちスカイ・シャインによる γ 線照射率 $\dot{D}_{\text{sky}}(d, Q_i)$ については、微視的観点 (Klein-仁科の式) から近似的に計算する方法⁽¹⁾もあるが、ここでは1回散乱以外の要素も加味するために、巨視的に、ビルド・アップ現象の意味を活用して計算してみる。すなわち γ 線照射の場を γ 線の到達過程について分解して考えると次のようになる。

$$(\text{スカイ・シャイン成分}) = (\text{ビルド・アップを含めた放射線場}) - (\text{地面に沿って散乱を受けないで到達する成分}) \quad (2)$$

したがって次式が導かれる。

$$\dot{D}_{\text{sky}}(d, Q_i) = \frac{Q_i}{d^2} k_i \exp\{-(\mu_{1i}t + \mu_{3i}d)\} \cdot \{B(\mu_{1i}t, \mu_{3i}d) \cdot K_i(d) - 1\} (\mu R \cdot \text{hr}^{-1}) \quad (3)$$

ここで

μ_{3i} : 空気層の全吸収係数 (i 番核種群の代表的な γ 線エネルギーに対する値) (m^{-1})

$B(\mu_{1i}t, \mu_{3i}d)$: 格納容器壁と空気層を通過する場合のビルド・アップ因子。これは乗積法を用いて次のように表わすことができる。(ただし S_i は2次項の係数で実験的に与えられる。⁽²⁾ Table 1 参照)

$$B(\mu_{1i}t, \mu_{3i}d) = (1 + \mu_{1i}t) \cdot \{1 + \mu_{3i}d + S_i \cdot (\mu_{3i}d)^2\} \quad (4)$$

$K_i(d)$: 地面の γ 線散乱効果を考慮した境界面補正係数で次式で定義する。物理的に考察すると、近距離では1/2より大きな値であるが、 d が大きくなるに従い1/2に収斂する。モンテカルロ法の計算によれば数百メートルで1/2となる結果が出ている⁽³⁾。

$$K_i(d) = \frac{\text{地面上における照射率}}{\text{無限の広さの均一空気中における照射率}}$$

したがって、格納容器内に閉じこめられた Q_i Ci の i 番核種から射出する γ 線は、地面上 d だけ離れた地点に、次式 ((1), (3), (4) 式をまとめたもの) で表わされる照射率 $\dot{D}_{\text{direct}}(d, Q_i)$ を与えることとなる。

$$\dot{D}_{\text{direct}}(d, Q_i) = \frac{Q_i}{d^2} k_i [\exp\{-(\mu_{1i}t + \mu_{2i}d)\} + \exp\{-(\mu_{1i}t + \mu_{3i}d)\} \cdot \{(1 + \mu_{1i}t)(1 + \mu_{3i}d + S_i(\mu_{3i}d)^2) K_i(d) - 1\} (\mu R \cdot \text{hr}^{-1})] \quad (5)$$

ここで右辺[]内の第1項に含まれる μ_{2i} は一般に未

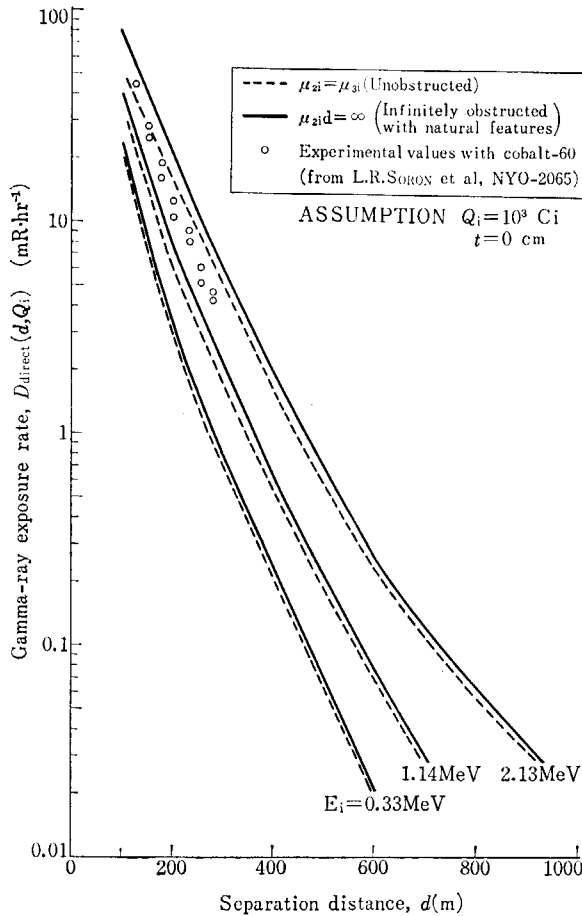


Fig. 2a Exposure rates of γ-ray from radioactive materials as a function of separation distance (d).
Gamma-ray energy (E) and obstruction density of natural features (μ_{zi}) are the parameters.

知であり場合によって異なるが、実際上 ($\mu_{zi} \sim \infty$) の範囲内にあることは明白であるので、その両極端 (μ_{zi} および ∞) の場合について計算した結果を Fig. 2a および Fig. 2b に示す。この図において、γ線スペクトル(曲線のパラメータの値)は文献(5)にもとづいて算出した分類によるものである。

Fig. 2a の値のある部分は、SORON らが ^{60}Co (1.2 MeV) を用いて行なった野外実験⁽⁴⁾の結果(線源が 10^3 Ci の場合に換算したもの)と比較することができるが、極めて良い一致が見られる。

さて、Fig. 2a において $\mu_{zi} = \mu_{zi}$ の場合(点線)と $\mu_{zi} d = \infty$ の場合(実線)を比較すると、 d (横軸)の値が数百メートルにより大きい場合には、両者の計算値がきわめて近接している。これは、丘陵、山林、建築物等の地物が全く所在しない場合であっても、またこれと逆に極めて稠密に密集している場合であっても、到達するγ線の照射率 \dot{D}_{direct} にはさほどの差異が現われないことを意味する。この理由は、地物の有無には関係のない $\dot{D}_{\text{sky}}(d, Q_i)$ の値が地物の影響を受ける $\dot{D}_{\text{obst}}(d, Q_i)$ の値と

* 原研では、これらを配置する場所をモニタリング・ポイントと呼んでいる。

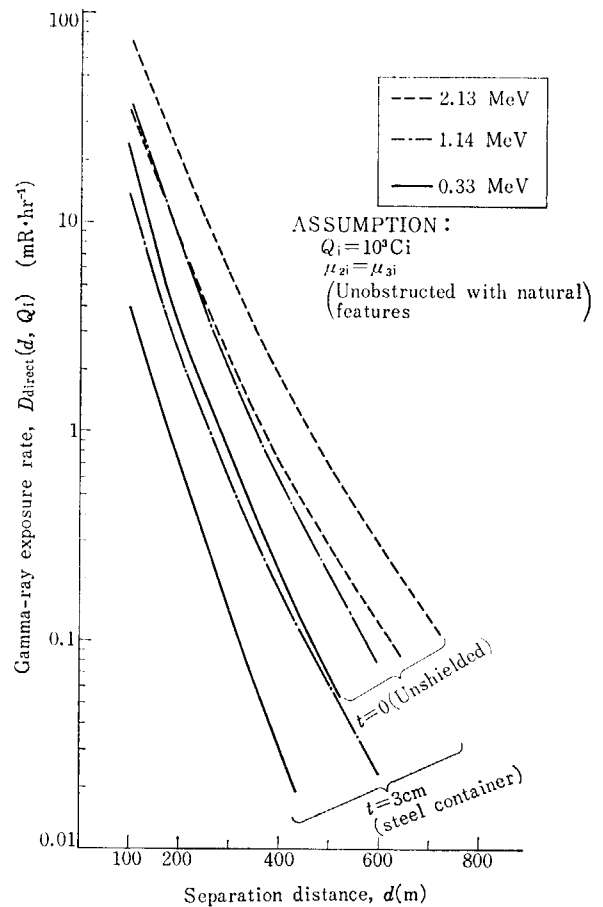


Fig. 2b Exposure rates of γ-ray from radioactive materials confined in a reactor container as a function of separation distance (d).
Gamma-ray energy (E) and wall thickness of the reactor container (t) are the parameters

較べると格段に大きな値であることによる。

3.2 放射線監視所の役割と避隔距離

原子炉格納容器内に核分裂生成物が充満した場合に、ある地点での放射線場の強さがそのスペクトル分布とともに測定できれば、(5)式を逆算することにより原子が建家内に所在するFPの量を推算すること⁽⁶⁾は可能であろう。しかし場合によっては、きわめて強い放射線場のために測定器がスケール・アウトし、あるいは動作不良等を生ずることがありうるので、高価な監視装置を始めから固定位置に設置することは得策といえない。平素より固定的に分散配置しておくべき測定器としては、バッジ・フィルム(またはガラス線量計、熱ルミネッセンス線量計)のような比較的安価なもの*が望ましく、事故の発生した場合に始めて、警報式あるいは記録式の線量測定装置やγ線波高分析装置を併用(移動的に配置)するのが望ましい。ただし瞬間的に多量の放射線を射出する事故(核燃料物質の臨界事故等)に対しては、その瞬間に即応して放射線場の強さを表示し警報しうる固定的

な放射線監視装置が必要となるが、その配置数を必要最小限に留めるために、対象施設(想定事故現場)を重点的にしぼるのが得策といえる。

平素より固定的に配置する放射線監視所(検出した異常の状況はテレメータ的に集中監視するもの)の役割は、事故現場から流れ出るFP雲の連続監視にありとすることが妥当といえる⁽⁶⁾。したがって放射線監視所は、前述のスカイ・シャインγ線がFP雲(またはそれから発するγ線)の測定を妨害しないような位置にまで、想定事故現場から遠ざけて配置することが望ましいこととなる。なお、平常時に少量ながらも排出される⁴¹Ar等の放射性気体については、野外監視所よりは原子炉等の排気モニターで監視する方が監視効率および各種費用の面で得策である*。

放射線監視所を想定事故現場からどの程度まで遠ざけるべきかの課題は、事故現場に閉じこめるFP量のほかに次の2つの問題点を考慮して検討しなければならない。

- A. そのFPのγ線スペクトル(核種の混合比率)
- B. 現場から到達するγ線の忍容度

上記のうち、A項のγ線スペクトルについては3年間連続運転の軽水炉が停止してから1日後に事故が発生するものと想定し、TABLE 1のような核種群(すなわち代表的γ線スペクトルがそれぞれ0.33, 1.14 および 2.13

MeVであるような核種群)が16%, 57% および 27%の割合で混在しているものとして扱うこととする⁽⁶⁾。この想定条件は多少変化しても避隔距離にはさほど大きく影響しないことが Fig. 2a, 2b より推察できる。(たとえば、上記の%に関する仮定とは別に、全量2.13 MeVと全量0.33 MeVとの両極端の場合を考えると、避隔距離の値のずれは300 m以内におさまる。)

次にB項の忍容度については、いわゆるs/n比と類似の概念(すなわち監視対象であるFP雲からのγ線の照射率との比較値)を用いて判定することが妥当であろう。ここではFP雲のγ線がアラーム・レベル** (100 μR·hr⁻¹) すれすれにしか照射しない場合を想定し、そのレベルとの比較のもとに定めることとする。たとえば、現場から到達するγ線が10 μR·hr⁻¹であるような場所ではs/n比に相当する値は $10 \left(\frac{100 \mu R \cdot hr^{-1}}{10 \mu R \cdot hr^{-1}} \right)$ となる。

必要最小限の避隔距離を想定事故現場のFP量にもとづいて判定するための図表を Fig. 3 に示す。この図は上記A, Bの2つの問題点に関する上述の考え方にもとづいて(5)式を用いて作成したものである。現場から到達するγ線照射率の値は、図の中でパラメータとして表わした。判定にあたっては、所定のs/n比相当値より定まる直達γ線の照射率(パラメータの値、 \dot{D}_{direct})と最大想定事故等の資料より定まるFP量(横軸の値)にもとづいて、縦軸の値を読みとればよい。たとえば、s/n比相

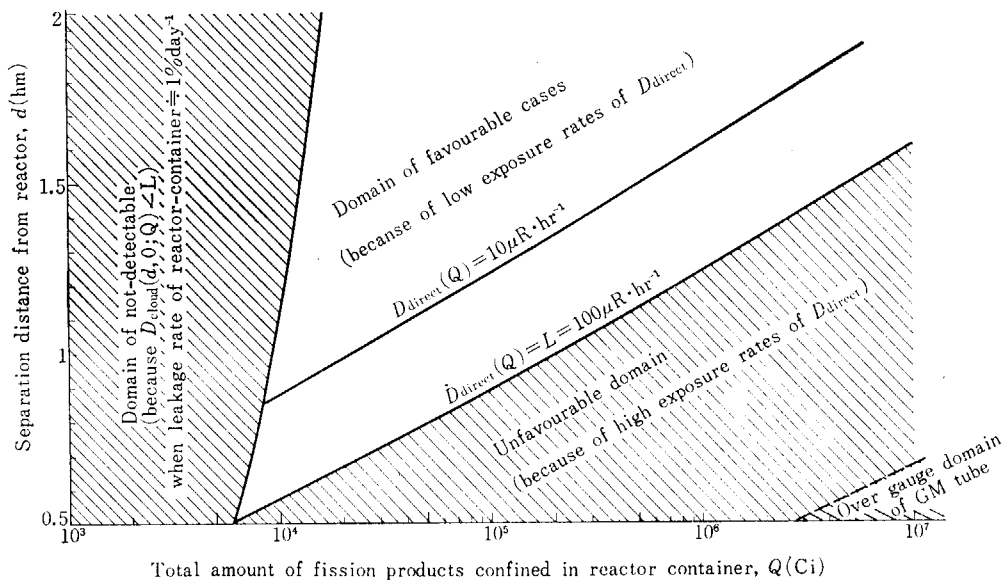


Fig. 3 Separation distance between monitoring post and reactor (d) as a function of the amount (Q) of fission products contained in the reactor.

The exposure rate of direct $\dot{D}_{direct}(Q)$ is the parameter. Assumed that the nucleid ratio of fission products(0.33 MeV, 1.14 MeV and 2.13 MeV) is 16%, 57% and 27%, respectively.

* ただし原子炉付設の排気モニターは、決して故障等を生じてはならぬので、万全を期するため冗長システム等を採用して信頼性の向上を図ることが望ましい。

** 放射性気流に対するアラーム・レベルは、平常時に放出される⁴¹Ar等による環境放射線の変動の最大値を参考として定める。

当値を10(したがって直達γ線の忍容度を10 μR·hr⁻¹)、現場に閉じこめられたFPの量を10⁶ Ciとした場合には、必要最小限の避隔距離は1.6 kmとなる。

なお、上述の考察の論拠のみからすれば、たとえ避隔距離は小さくとも、事故(換言すれば炉室内に充満した

FPの量)の程度によっては役立つことがあるのでないかという誤った判断に陥りやすいが、避隔距離が小さいと次の2つの問題点に対処できず、いずれにしても不満足なものとなることに注意せねばならない。

- (a) 事故の程度が小さい場合には、漏洩するFP量も少なくなる。したがってFP雲から射出して観測される γ 線の照射率も少なくなり、アラームレベル以下となって平常時の変動と区別しにくくなる
- (b) 大きな事故が発生した場合には、当然のことではあるが直達 γ 線が強くなり、 s/n 比相当値が悪くなるだけでなく、監視装置の測定範囲を越えてしまう(GM管の場合には窒息現象を起してしまう)。

FP雲から放射する γ 線の分布は次章4.1.2節(3)項に述べるが、その結果(Fig. 8, Fig. 9等)にもとづいて、上記(a)の問題点の生ずる範囲を算出するとFig. 3の左側の細い斜線領域のようになる。これは[FPの格納容器からの漏洩率]/風速の値を $0.01 \text{ day}^{-1}/\text{m}\cdot\text{sec}^{-1}$ 、FP

* (b)に述べた問題点は、核燃料体中のFPの全量が、炉心から放出されて原子炉格納容器内に閉じこめられたような事故の場合について考えたものである。Windscaleにおけるウイグナー・エネルギー放出作業中の事故(1957年)のように、FPが煙突のみから放出されてしまいdirect γ 線の影響を無視できるような場合には、上記の問題点は考える必要がない。

雲 γ 線の平均スペクトル⁽⁹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾を 0.7 MeV とし、また気象条件は通常の状態(安定度 D)を想定したものである。つぎに、上記(b)の弱点の顕著となる領域はFig. 3右下の細い斜線の領域で示し、とくにGM管が窒息現象を起す領域(直達 γ 線により、約 $30 \text{ mR}\cdot\text{hr}^{-1}$ 以上の照射率となる場合)については、Fig. 3の右下隅に太い斜線で示した。Fig. 3によれば、避隔距離を 500 m とした場合に、閉じこめられたFPが $6 \times 10^8 \text{ Ci}$ 未満のときには上記(a)の弱点が現われる。一方 $5.5 \times 10^8 \text{ Ci}$ 以上で上記(b)の弱点が現われはじめ、 $3 \times 10^9 \text{ Ci}$ 以上になるとGM管の窒息現象ため測定が不可能となる。これらの数値は、実際の事故*の場合の条件の変化によって多少のずれを生ずるであろうが、緊急時対策の一環として監視所の位置を定める際には十分に留意すべき事項であろう。

以上の考察で、避隔距離をある程度大きくとらなければならぬことを知った。しかし別の面から考えれば、避隔距離を大きくすると、監視所の数を多くする必要性を生じ、経済性その他の観点から好ましくない。避隔距離の決定については、このように相反する要求をもついくつかの条件を考慮して最適の監視システムを見出してゆかねばならぬが、これについては、次章以降に述べることとする。

4. FP 雲による総合的被曝と監視システムの基本的あり方との関係

4.1 FP 雲に起因する被曝に関する総合的考察

原子炉格納容器内に充満している FP が施設外へ漏洩して周辺に流れ出すと、空気および地物が汚染し住民は直接的、間接的な種々の経路を通して放射線被曝を受けることとなる。これらの被曝量に関する評価についてはすでにいくつかの研究⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾がなされているので、ここでは、それらの要点について整理し、若干の補正を加えて次節以下の考察を進めるための準備としよう。

4.1.1 原子炉災害時に受ける被曝の内容

原子炉災害時に周辺住民の受ける被曝を経路別に分類すると、次のようなものが考えられる。

- D_{direct} ……原子炉格納容器内に閉じこめられた FP から放射する放射線による外部被曝
- D_{inh} ……FP 雲を吸入して受ける内部被曝
- D_{grnd} ……FP 雲の沈降により汚染した地面から放射する放射線による外部被曝
- D_{cloud} ……FP 雲から放射する放射線による外部被曝
- D_{veg} ……汚染した野菜等を摂取することによる内部被曝
- D_{milk} ……汚染した牛乳等を摂取することによる内部被曝
- D_{egg} ……汚染した鶏卵等を摂取することによる内部被曝

これらのうち、 D_{direct} については、他の要素と較べて距離による減少効果が著しいこと*を考慮すると、適切な行政的施策（たとえば、原子力地帯整備の際、非居住区域に若干の予備をもたせること等）がとられていさえすれば問題とならない。また D_{milk} および D_{egg} については、牛や鶏等が汚染空気または汚染餌料等を摂取してから1日以上経過しなければ、汚染した牛乳や卵等を産出しないので、それまでの間に流通経路の規制を行えば人間に摂取されることを防ぐことができる。 D_{veg} についても、同様に、それが食膳に乗るまでの時間に緊急通報を流せば被曝を防止することができる。

このように考えると、周辺の住民が不可避的に受ける被曝の内容は D_{inh} 、 D_{grnd} および D_{cloud} の3種類にしぼられる。ただし D_{inh} は直接に測定することができない

*たとえば、 D_{cloud} は、風下に約 4 km 以上遠ざからなければ1桁低下しないに対し、 D_{direct} は約 200~400 m づつ遠ざかるごとに1桁づつ低下する。

ので他の観測値から推定しなければならぬ点に留意しておく必要がある。

4.1.2 不可避的に受ける被曝に関する定量的表現

(1) 汚染空気の吸入による内部被曝, D_{inh}

周辺住民が吸入によって受ける内部被曝量 D_{inh} のうち、最も影響の大きい核種は ^{131}I であり、その決定臓器が甲状腺であることはすでによく知られている⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

いま、大気安定度 S 、平均風速 u のときに、 T 時間放出された FP の汚染気流をある場所 $(x, y, 0)$ にいる住民（標準人）が吸入することにより受ける内部被曝量を $D_{inh}(x, y; S, u, T)$ とすれば、これは次のように表わされる。

$$D_{inh}(x, y; S, u, T) \cong K_1 \cdot \int_0^T \sum_i f_i \epsilon_i T_{ei} (1 - e^{-\frac{0.693}{T_{ei}}(\tau - t)}) \cdot C_{su}(x, y, 0; t) dt \quad (\text{rem}) \quad (6)$$

ここで

$K_1 \cong 1.3 \times 10^3$ (rem·day⁻¹·MeV⁻¹/FP Ci·hr·m⁻³)
……換算係数（標準人の呼吸率、甲状腺の質量、および FP 雲中の各核種ごとの uptake ratio を用いて算出した値）

f_i ……FP 雲中の i 番核種の存在比

ϵ_i …… i 番核種の実効エネルギー⁽⁸⁾(MeV)

T_{ei} …… i 番核種の実効半減期 (day)

τ_i ……汚染気流を吸入した時点からの経過時間（ここでは一生涯に受ける被曝量を安全側で評価するために十分に大きな値とするので、一般に $\tau_i \gg T$ となる）

$C_{su}(x, y, 0; t)$ ……地点 $(x, y, 0)$ で時刻 t における FP 濃度 (Ci·m⁻³)、これは次式のように表わされる。

$$C_{su}(x, y, 0; t) = \frac{q(t - \frac{x}{u})}{u} \chi_s(x, y, 0) \quad (7)$$

ただし

$q(t - \frac{x}{u})$ ……時刻 $t - \frac{x}{u}$ における FP の放出率 (FP Ci·hr⁻¹)、炉格納容器の漏洩率を $\epsilon(t - \frac{x}{u})$ とすれば、

$$q(t - \frac{x}{u}) = \epsilon(t - \frac{x}{u}) \cdot Q \quad \text{となる。}$$

$\chi_s(x, y, 0)$ ……FP 放出率 1 Ci·hr⁻¹、風速 1 m·sec⁻¹、安定度 S の場合に、地点 $(x, y, 0)$ における空気中の FP

濃度, これは次のように F. PASQUILL によって与えられている⁽¹²⁾.

$$\begin{aligned} \chi_s(x, y, 0) &= \frac{\ln 10}{60^2 \cdot \pi \cdot w_s(x) h_s(x)} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{Z-H}{h_s(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \\ &\cdot \left[\exp\left\{-\left(\frac{Z-H}{h_s(x)}\right)^2 \ln 10\right\} \right. \\ &\left. + \exp\left\{-\left(\frac{Z+H}{h_s(x)}\right)^2 \ln 10\right\}\right] \quad (8) \end{aligned}$$

ただし

(x, y, z) ……FP を放出する原子炉の位置 (地上) を原点とし, 風下方向を x 軸, 風下に直角 (crosswind) な水平方面を y 軸, また地面に垂直な方向を z 軸とする直角座標

$w_s(x)$ ……FP 雲の y 軸方向の拡がり幅 (m), 濃度が気流の中心軸 ($y=0$) における値の 1/10 に稀薄化している位置 (y 座標軸上の値) として定義され, 安定度 S および風下方向の距離 x の関数として実験的に定まっている⁽¹²⁾.

$h_s(x)$ ……FP 雲の z 軸方向の拡がり幅 (m), これも濃度が 1/10 となる z 軸上の位置によって定義され, 安定度 S および風下距離 x の関数である.

H ……FP 雲の実効放出高度であり, 地上 ($z=0$) から測った高さ (m), ここでは $H=10$ m と想定する. ところで, (6) 式において $\tau_1 \gg T$ なる点に着目すると,

$$D_{inh}(x, y; S, u, T) \doteq K_{inh} \int_0^T C_{su}(x, y, 0; t) dt \quad (9)$$

となる. あるいは (7) 式を代入すると,

$$D_{inh}(x, y; S, u, T) \doteq K_{inh} \frac{\chi_s(x, y, 0)}{u} \int_0^T q\left(t - \frac{x}{u}\right) dt \quad (10)$$

となる. ただし⁽⁶⁾

$$\begin{aligned} K_{inh} &\doteq K_1 \sum_i f_i \varepsilon_i T_{ei} \left\{1 - \exp\left(-\frac{0.693\tau_1}{T_{ei}}\right)\right\} \\ &\doteq 2.6 \times 10^5 \text{ (rem/FP Ci}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-2})^* \quad (11) \end{aligned}$$

(9) 式は, 周辺住民の内部被曝量 (inhalation dose) が, 吸入した空気の汚染度の時間積分量に比例して分布することを示す. これを人体について実験的に確かめることは困難であるが, 実際に FP を放出する野外実験の際に鼠 (rat) を配置して FP 雲を吸入させ, 体内沈着量を測定した報告⁽¹³⁾があるので, これを引用して Fig. 4 に示す. Fig. 4 は (9) 式の妥当性 (濃度分布の時間積分量と比例関係にあること) を良く示している.

(2) 汚染した地面から受ける外部被曝, D_{grnd}

前項と同じ条件を想定しよう. 放出された FP は気流

* 「FP Ci」の記号は, FP の Ci 数, 換言すれば FP を構成する各核種の Ci 数の和を意味することとする. 文献(8)では ¹³¹I の 1 Ci が含まれる FP の総量は約 13 Ci であると想定している.

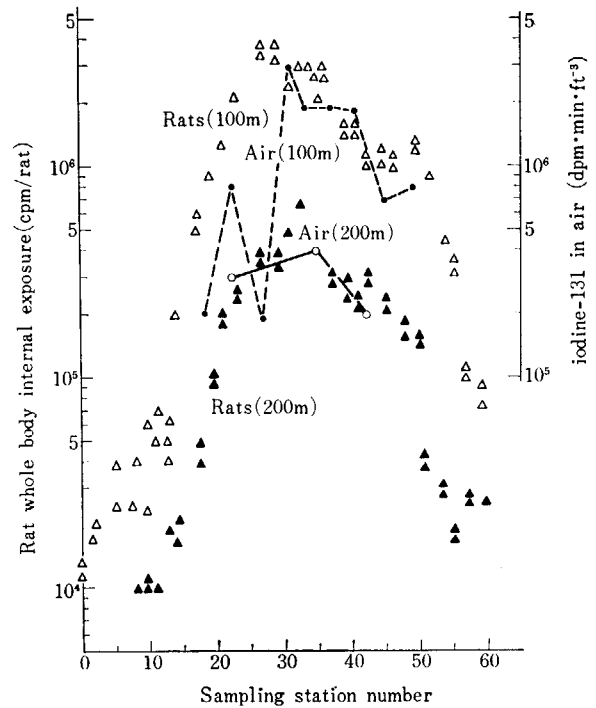


Fig. 4 Comparison in the experiments between the iodine-131 concentration distribution in the air and the corresponding dose distribution.

△, ▲: radiobiological data of rats located on arc-lines 100 m and 200 m downwind, respectively.
: laboratory assay of the iodine-131 from a high-volume air sampler 100 m downwind.
 ○—○: laboratory assay of the iodine-131 from a high-volume air sampler 200 m downwind.

(From U.S. Air Force, "Fission products field release test", AFSWC-TR-59-44 p. 361 and p. 348 (1959))

に乗って風下に運ばれるが, その途中で沈降するために地面等が汚染しそれから発する γ 線によって外部被曝を受けることとなる. このときの被曝量を $D_{grnd}(x, y)$ とすれば次のように表わされる.

$$\begin{aligned} D_{grnd}(x, y; T, \tau_2) &\doteq K_2 \sum_i f_i E_i' \cdot S(x, y; T) \int_0^{\tau_2} \exp\left(-\frac{0.693}{T_{ri}} t\right) dt \\ &\text{(rem)} \quad (12) \end{aligned}$$

ここで

$K_2=17.6 \text{ (rem}\cdot\text{MeV}^{-1}\cdot\text{day}^{-1}/\text{FP Ci}\cdot\text{m}^{-2})$ ……空気層による吸収等を考慮して算出した換算係数

E_i' ……沈降した FP 中の i 番核種群の代表的な γ 線エネルギー (MeV)

T_{ri} …… i 番核種群の物理的半減期 (day)

τ_2 ……汚染した地域 (x, y) に滞在する時間 (day)

$S(x, y; T)$ ……地域 (x, y) に FP 雲が T 時間沈降した後に於ける地面汚染度 ($\text{Ci}\cdot\text{m}^{-2}$), これは次のように表わすことができる.

$$S(x, y; T) = \frac{\chi_s(x, y, 0)}{u} v_g \int_0^T q\left(t - \frac{x}{u}\right) dt \quad (13)$$

ただし v_g は FP の地面に対する沈降速度である。Windscale の事故 (1957 年)⁽⁹⁾ 其他における実測⁽¹³⁾, ⁽¹⁴⁾ によれば, $v_g = 1 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ とするのが妥当であろう (Fig. 5 参照)。

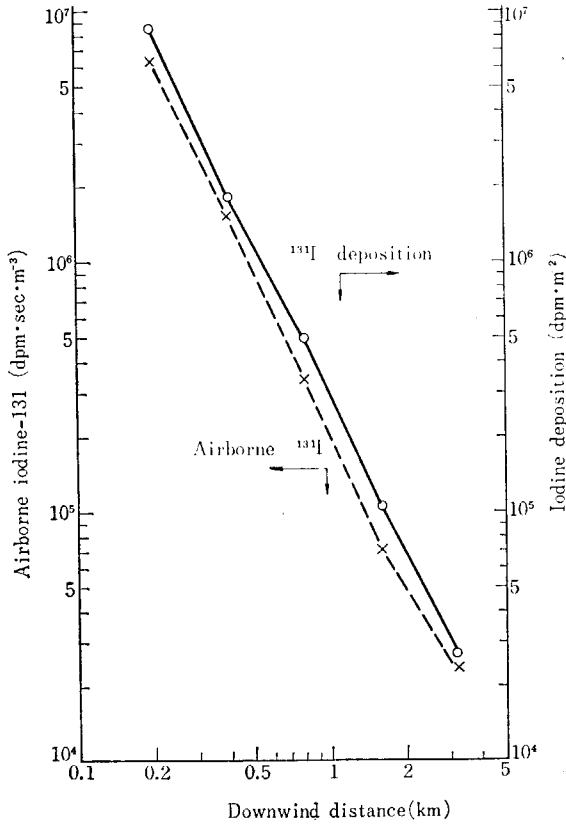


Fig. 5 Comparison in the experiments of iodine-131 concentration distribution in the air and the corresponding "sticky-paper" deposition distribution. (From U. S. Air Force, "Fission products field release test", AFSWC-TR-59-44, p. 343 and p. 350 (1959))

(12)式の両辺を τ_2 で微分すると次のようになる。

$$\dot{D}_{grnd}(x, y; T, t) = K_2 \sum_i E_i' \cdot f_i(t) \cdot S(x, y; T) \quad (12)'$$

ここで $f_i(t) = f_i \cdot \exp\left(-\frac{0.693t}{T_{ri}}\right) \quad (14)$

(12)' 式の右辺に含まれる $f_i(t) \cdot S(x, y; T)$ は, i 番核種群の時刻 t , 地点 (x, y) における地表面汚染度 ($\text{Ci}\cdot\text{m}^{-2}$) に相当する。(12)' 式の実験的に確かめたものを Fig. 6 に示す。これは、外国の核兵器実験の後に東海村周辺に降下した FP のうち $^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$ (すなわち 0.75 MeV) の核種について、笠井ら⁽¹⁵⁾ が測定した土壌の汚染度と、それから受ける γ 線照射率との関係を描いたものである。Fig. 6 の中で Δ 印のデータは (12)' 式による予想値 (破線) とほぼ一致するが、 \bullet 印のデータは予想値より低い。これは放射性降下物が時間の経過とともに地中に浸入したため、土壌による γ 線の自己吸収

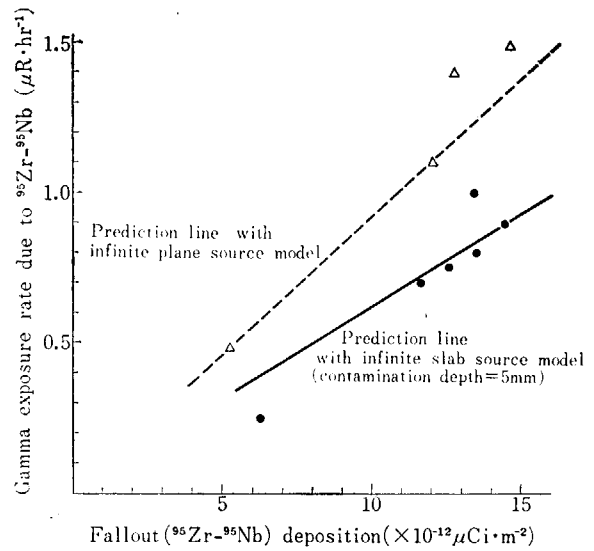


Fig. 6 Comparison of the calculated and the measured values of gamma exposure rates due to fall-out ($^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$) deposition. (Measured values were reproduced from⁽¹⁵⁾ A. KASAI, S. MORIUCHI, and K. MATSUSHITA by permission)

の作用が加わって低い値となったものと考えられる。(これを裏付けるために、放射性降下物が地中約 5 mm の深さまで浸入した場合の (無限平面板線源モデルによる) 計算値を Fig. 6 の実線に示したが、実測値の \bullet 印と良く一致している。一方、土壌中の放射性降下物を調べてみると、大部分が地表から 5 mm の深さまでに分布していることが多い⁽¹⁵⁾。したがって、(12)' 式または (12) 式は安全側に評価したものと考えることができる。

ところで (13) 式を (12) 式に代入すると次のようになる。

$$D_{grnd}(x, y; T, \tau_2) = K_{grnd} \frac{\chi_s(x, y, 0)}{u} \int_0^T q\left(t - \frac{x}{u}\right) dt \quad (R) \quad (15)$$

ただし

$$K_{grnd} = K_2 \sum_i E_i' \int_0^{\tau_2} f_i(t) dt \quad (\text{rem/FP Ci}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3}) \quad (16)$$

K_{grnd} は τ_2 の関数であるが、安全側に評価するために $\tau_2 \rightarrow \infty$ とすれば、一定値となる。すなわち

$$K_{grnd} = 0.9 \times 10^5 \quad (\text{rem/FP Ci}\cdot\text{hr}\cdot\text{m}^{-3})$$

(3) 汚染空気から受ける外部被曝, D_{cloud} 前項までと同じ条件のもとで、風下のある地点 (x, y) に居る住民が受ける D_{cloud} の値は次式で表わされる。

$$D_{cloud}(x, y; S, u, T) = \sum_i f_i k_i' \int_0^T \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_i \rho}}{\rho^2} B(\mu_i \rho) C_{Su}(\xi, \eta, \zeta; t) \times d\xi d\eta d\zeta dt \quad (\text{rem}) \quad (17)$$

ここで

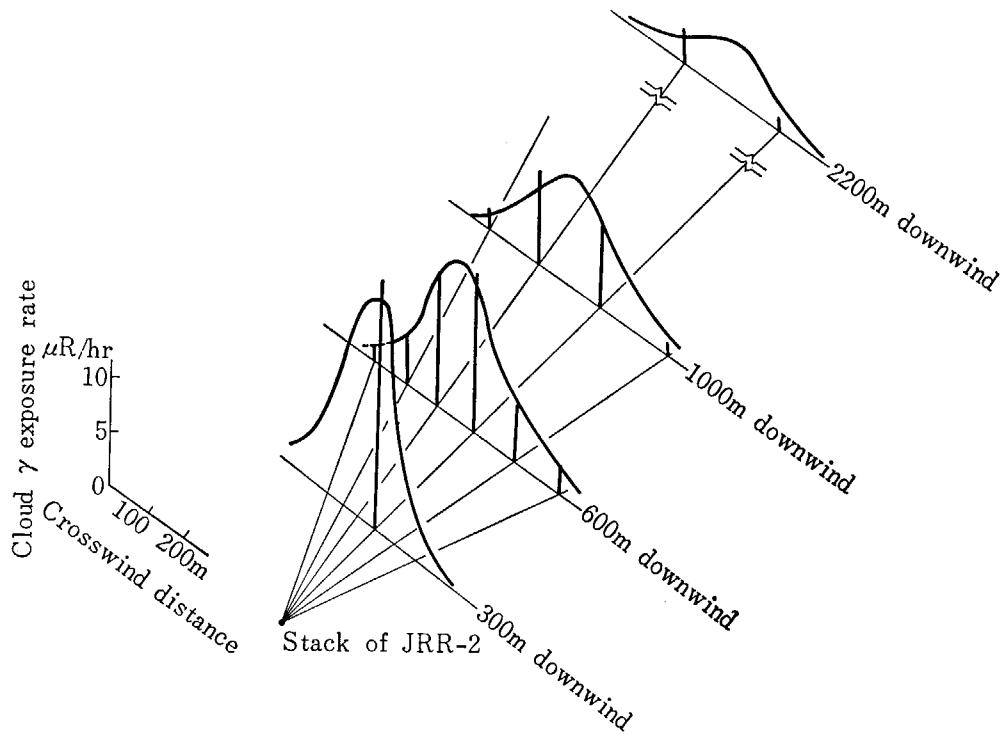


Fig. 7 Comparison of the calculated and the experimental values of gamma-exposure rates from a passing ⁴¹Ar cloud. Experimental values are expressed with the height of columnar lines; from the previous report⁽¹⁶⁾

k_i'FP 雲中の i 番核種群の γ 線放射定数* ($\mu R \cdot hr^{-1}/Ci \cdot m^{-2}$)

$$\rho = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2 + \zeta^2} \quad (m) \quad (18)$$

μ_i i 番核種群から発する γ 線の線吸収係数(m^{-1})
 $B(\mu_i, \rho)$ γ 線が空气中を通過する際のビルドアップ係数, μ_i, ρ に関する 2 つの指数函数の和として実験的に定まっている.

従来の障害解析では(17)式の代りにサブマージョン・モデルによる近似式が使用されていたが、誤差が大きくて放射線監視網の配置を検討する場合には支障をきたすので、ここでは筆者の方法⁽⁷⁾で計算することとする。この計算値は実測値と良く一致することが ⁴¹Ar 放出実験(1961年, 東海)によって確かめられている⁽¹⁶⁾ (Fig. 7 参照).

(17)式に(7)式を代入して書き直すと次のようになる。

$$D_{cloud}(x, y; S, u, T) \doteq \frac{f_s(x, y)}{u} \int_0^T q\left(t - \frac{x}{u}\right) dt \quad (rem) \quad (19)$$

ただし

* 原子炉格納容器中の FP の中に含まれる各核種は、その物理化学的性状に応じて選択的に環境へ放出されるので、FP 雲の γ 線スペクトルは閉じこめられた FP から発する γ 線のスペクトルとは異なったものとなる。

$f_s(x, y)$

$$= \sum_i f_i k_i' \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\mu_i \rho}}{\rho^2} B(\mu_i, \rho) \chi_s(\xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta$$

$$\left(\frac{R}{FP \text{ Ci/m} \cdot \text{sec}^{-1}} \right) \text{ または } \left(\frac{R \cdot \text{hr}^{-1}}{FP \text{ Ci} \cdot \text{hr}^{-1}/\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}} \right) \quad (20)$$

γ 線の平均エネルギー*を 0.7 MeV ⁽⁹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾ とした場合の $f_s(x, y, 0)$ の値を Fig. 8, Fig. 9 に示した⁽⁷⁾.

なお、外部被曝の内容には、上記の γ 線のほかに、 β 線による被曝もあるが、これは大部分が皮膚によって吸収され内部の臓器にはほとんど達しない。このときの皮膚の β 線被曝は、人体周辺の空気中の β 核種の濃度に比例し、その換算係数⁽¹¹⁾は核種によって異なるが、比較的に β 線エネルギーの高い (2.5 MeV の) ¹³¹I のみの雲の場合であっても約 $1 \times 10^3 \text{ rem}/\text{Ci} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$ 程度であり、前節までに述べた K_{inh} および K_{grnd} と較べると約 2 桁小さい。

4.1.3 被曝量分布の特徴と観測値との関係

原子炉災害の発生によって、風下の任意の地点 (x, y) に居る住民の甲状腺が不可避免的に受ける被曝量 $D(x, y)$ は、前節の(10), (15), (19)をまとめることによって次のように表わされる。

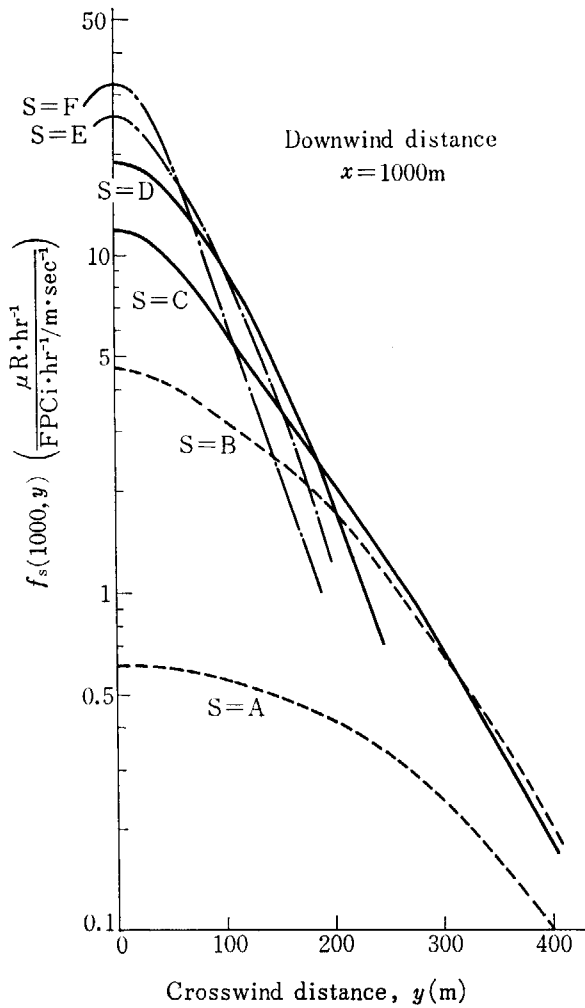


Fig. 8 Specific values $f_s(1000, y)$ of FP cloud (0.7 MeV) gamma exposure rates.
 S; atmospheric stability in PASQUILL's category⁽¹²⁾.
 y; crosswind distance on the arc-line 1000 m downwind.

$$D(x, y) = F_s(x, y) \frac{1}{u} \int_0^T q\left(t - \frac{x}{u}\right) dt \quad (\text{rem}) \quad (21)$$

ただし

$$F_s(x, y) = (K_{inh} + K_{grnd}) \chi_s(x, y, 0) + f_s(x, y, 0) \quad (\text{rem/FP Ci} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}) \quad (22)$$

(21)式を T について微分すれば、時刻 t において FP 雲を単位時間放出(あるいはそれを吸入*)した場合の甲状腺被曝量 $\dot{D}(x, y; t)$ が得られる。すなわち、

$$\dot{D}(x, y; t) = F_s(x, y) \frac{1}{u} q\left(t - \frac{x}{u}\right) \quad (\text{rem/hr of cloud}) \quad (23)$$

$F_s(x, y)$ の値を風下中心線 ($y=0$) に沿って計算したものを Fig. 10 に示す。この図の曲線のパラメータは大気安定度 S としているが、各曲線の示す最大値は安定

* $F_s(x, y)$ の構成要素のうち最も大きな値は $K_{inh} \cdot \chi_s(x, y)$ である。すなわち吸入 (inhalation) による被曝が最も卓越している⁽¹³⁾。

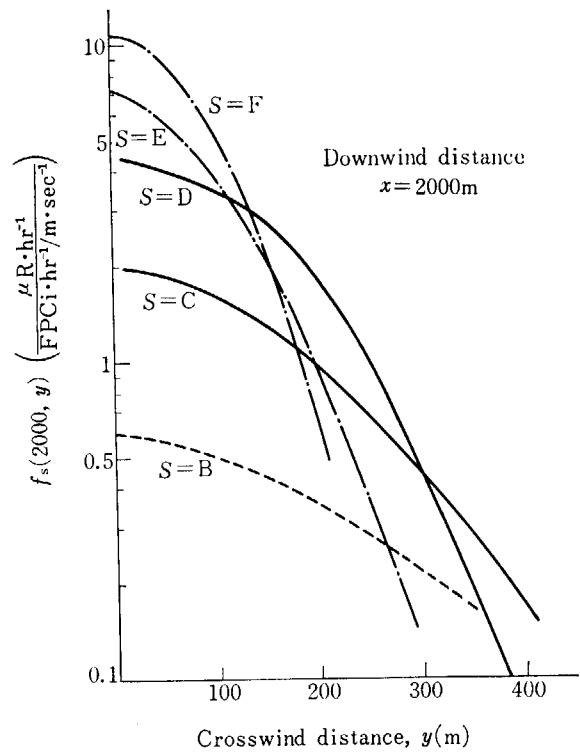


Fig. 9 Specific values $f_s(2000, y)$ of FP cloud (0.7 MeV) gamma exposure rates.

度にはあまり関係なくほぼ一定の値 (約 0.12 rem/FP Ci·m⁻¹·sec) となる。今後はこの点に着目して考察を進めることとする。

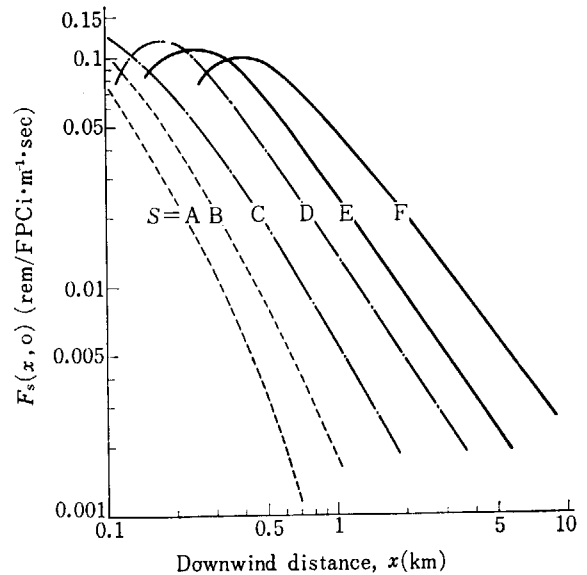


Fig. 10 Value of conversion factor $F_s(x, 0)$ as a function of the downwind distance (x).
 S; atmospheric stability

ところで、事故現場においては高放射線場および各種の混乱があるために、FP の放出率 $q\left(t - \frac{x}{u}\right)$ を逐次測定し監視することは不可能に近い。そこで、施設外に放出された FP 雲の観測値を用いて事態を判定せねばなら

ぬこととなる。

いま、ある観測地点 (x_0, y_0) で時刻 t における FP 雲の γ 線の測定値を $\dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t)$ とすれば、(19) 式 (正確には T で微分した式) にもとづいて、次式を得る。すなわち観測時刻 t よりも $\frac{x_0}{u}$ だけ遡った時点における FP 放出率は

$$q\left(t - \frac{x_0}{u}\right) = \frac{u}{f_s(x_0, y_0)} \cdot \dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t) \quad (24)$$

(FP Ci·hr⁻¹)

(24)式を(23)式に代入すると、

$$\dot{D}(x, y; t) = \frac{F_s(x, y)}{f_s(x_0, y_0)} \cdot \dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t) \quad (25)$$

(rem/hr of cloud)

あるいは、これを FP 雲の通過時間について積分すると、

$$D(x, y) = \int_0^T \frac{F_s(x, y)}{f_s(x_0, y_0)} \dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t) dt \quad (26)$$

となる。

とくに、最高に被曝する地点 $(x_m, 0)$ における値を評価したい場合には、 $F_s(x_m, 0)$ の価が安定度 S (換言すれば、時刻 t) によってほとんど変りがないことに着目すると、次のように表わすことができる。

$$D(x_m, 0) \doteq F(x_m, 0) \int_0^T \frac{\dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t)}{f_s(x_0, y_0)} dt \quad (\text{rem}) \quad (27)$$

ただし

$$F(x_m, 0) = \max\{F_A(x_m, 0), F_B(x_m, 0), \dots, F_F(x_m, 0)\} \quad (28)$$

すなわち、 $F(x_m, 0)$ は安全側に評価した値 (約 0.12 rem/FP Ci·m⁻¹·sec) である。

上述のとおり、FP の刻々の放出率 $q = \left(t - \frac{x_0}{u}\right)$ および住民の甲状腺被曝の程度 (最大予想値) $D(x_m, 0)$ は、 γ 線の観測値 $\dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t)$ にもとづいて評価することができる*。

4.2 放射線監視所の配置を考える際の指針

前節までの考察の結果にもとづいて、野外放射線監視網の理想的な配置のための原則について考えてみよう。

原子炉から気体状に放出する放射性物質は、平常時にはスタック、モニタ等で監視することができる。しかし大規模な事故が発生したような場合には、原子炉に付設したモニタ等が大量の放射線照射を受けて正常に使用できない事態も考えられるので、野外の放射線監視所はその場合も充分監視の役割を果せるように配置されていなければならない。したがって次の原則が生まれる。

* このような評価を簡便に行なうために、筆者 (1963年) は特殊な計算尺を考案した⁽⁶⁾。

「原子炉災害の規模」 $D(x_m, 0)$ が「対策レベル」 A を越えるおそれのある事態が発生すれば、監視網の中の何れかの位置 (x_0, y_0) にある監視装置がアラーム・レベル L 以上の観測値 $\dot{D}_{\text{cloud}}(x_0, y_0; t)$ を得て、かならず FP 雲の通過を発見し把握できるように配置 $\{x_0, y_0\}$ を定めること。

この原則を数理計画上の問題として考える前に、上述の表現が誤りなく解釈されるよう、若干の用語に関する定義を行ない補足説明を加えよう (Fig. 1 参照)。

「原子炉災害の規模」(記号 $D(x_m, 0)$ 単位 thyroid rem)

——最高被曝地点 $(x_m, 0)$ に居る標準人の決定臓器が不可避的に受ける積算被曝線量 (rem)。

ここで、「不可避的に受ける被曝」の内容は、周辺住民が原子炉災害発生のお知らせを受けてから安全地域に避難を完了するまでの間に受ける外部被曝 D_{gnd} , D_{cloud} , および体内に吸入し残留する FP による内部被曝 (線量預託を含んだもの) D_{inh} の和を意味する。したがって前節までの(21), (26), (27)式等に含まれる積分記号の上限値 (T) は、次のように定義し変えることとする。

$$T = \max(T_A, T_B) \quad (29)$$

ただし

T_A ……FP の放出を開始してから住民の避難が完了するまでの時間。

T_B ……FP の放出を開始してから放出が終るまでの時間。

従来は、事故現場から放散する FP の総キューリー数で災害の規模を表わすことが多かったが、本当に知りたいのは何 rem の被曝者が出るかという結果的事実である。また放出キューリー数が解っても、その時の風速や大気安定度などが決まらなければ災害の程度は決らない。しかし、ここに提案した表現法は、それら幾つかの条件に煩わされず、災害規模の数値と被害の程度が一義的に対応する長所を有する。さらにまた、FP 雲の観測値とも比例的に対応するので、災害の評価が容易となる。

「対策レベル」(記号 A , 表示単位 thyroid rem)

——周辺住民 (標準人) の決定臓器 (甲状腺) が緊急時に受ける被曝量に関する許容値。原子炉災害に対する緊急活動体制 (action) は、このレベルにもとづいて発動するものとする^{(18-a)(18-b)}。

なお、参考までに、放射線審議会 (内閣総理大臣の諮問機関) は昭和 42 年 3 月の答申^(18-a)において、「放射性ヨードによる甲状腺の内部被曝に対する指標線量として 150 ラド」を提示している。(ここで、「指標線量」の意味については、「地域ごとに設定されるべき放射線レベルの越えてはならない値」と定義されている)。

「配置」(記号 $\{(x_0, y_0)\}$)

……ここでは、複数個の監視所の配置を考えている。

5. 理想的な監視システムに関する考察

原子炉災害時に、流れ出すFP雲を見逃がさないためには、監視所の設置数を多くすることが望ましいが、必要以上に多くすることは経済性の見地から好ましくない。ここでは、必要小限の数を算出することを目標として考察を進めよう。

5.1 γ 線検出器を備えた監視所の必要数

放射線監視所には、 γ 線検出器のみを備えたものとダスト・モニタも兼ね備えたものの2つに大別されるが、前者(これをモニタリング・ポストと呼ぶこととする)の方は建設費が安く維持も容易であるという長所を有する。

ここでは、まずモニタリング・ポストについて、前章4.2節の原則を満す配置間隔および必要最少限の配置数を算出してみよう。

ところで、モニタリング・ポストが原子炉を中心に取巻いて円弧状に配置されるとすれば、前章(27)式に含まれる x_0 は避隔距離(第3章) d と一致する。またFP雲がモニタリング・ポストと隣のモニタリング・ポストの間を通り抜ける場合を考えれば、 y_0 はそれらの配置間隔 w_r の1/2に相当する値をもつ(Fig. 1参照)。したがって4.2節の原則は(27)式にもとづいて次のように表現することができる。

$$A \leq F(x_m, 0) \int_0^T \frac{L}{f_s(d, \frac{w_r}{2})} dt \quad (30)$$

ただし、 L はモニタリング・ポストのアラーム・レベル設定値。

ここで、大気安定度 S は住民の避難が完了するまでの間(あるいはFP放出が終るまでの間)変りが無いとすれば、 $f_s(d, \frac{w_r}{2})$ は積分記号の外へ出すことができる。すなわち

$$f_s(d, \frac{w_r}{2}) \leq \frac{F(x_m, 0)}{A} L \cdot T \quad (31)$$

したがって、(30)式を満足する w_r の最大値 \hat{w}_r は次式で定まる。

$$\hat{w}_r = 2 f_s^{-1} \left(\frac{F(x_m, 0)}{A} L \cdot T ; d \right) \quad (32)$$

(32)式の意味は、 d をひとまず固定して、(31)式を満足する \hat{w}_r の最大値 \hat{w} を求めた後、 d の値をずらして同様の操作を繰返すことを意味する。たとえば、 $F(x_m, 0) = 0.12 \text{ rem/FP Ci} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}$ 、 $L = 100 \mu\text{R} \cdot \text{hr}^{-1}$ とし、 A/T の値(以下これを $\dot{\lambda}$ と記す)をそれぞれ1, 10および100 thyroid rem/hr of cloudとして、各安定度の場合の \hat{w}_r の値を計算すればFig. 11のようになる。

Fig. 11によれば、4.2節の原則に適合する配置間隔(最大値) \hat{w}_r は、風下方向の距離(換言すれば避隔距離) d が増しても、さほど大きくなるしない。したがって避隔距離が増すほど数多くのモニタリングポストが必要となるが、この関係を $\dot{\lambda}$ の函数として表わしたものをFig. 12に示す。Fig. 12の曲線群のパラメータ n は必要最少限のモニタリング・ポストの数を意味するが、これは次

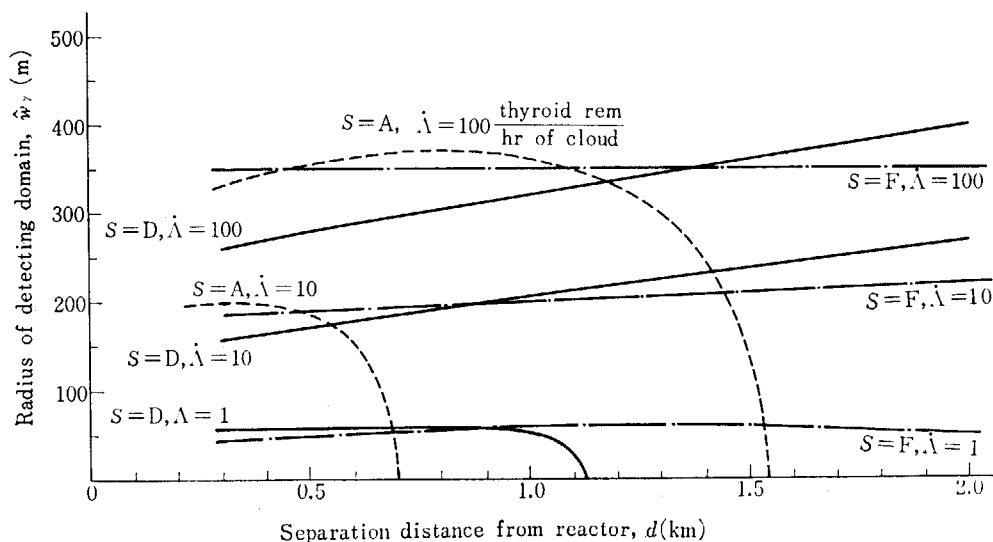


Fig. 11 Radius w_r of the detecting domain for γ -ray monitoring post as a function of the separation distance (d); the alarm level of γ -ray monitoring post (L) is taken as $100 \mu\text{R} \cdot \text{hr}^{-1}$.

Meteorological stability (S) and action level against the radiological disaster per unit time of inhalation ($\dot{\lambda}$) are the parameters.

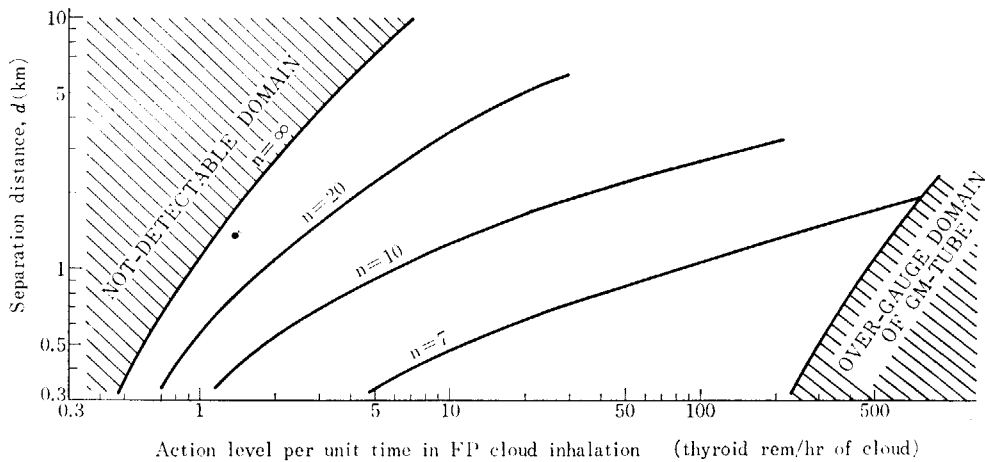


Fig. 12 The number n of γ -ray monitoring posts, determined by the action-level dose per unit time of inhalation \dot{A} and the separation distance from reactor d ; the alarm level $L=100\mu R\cdot hr^{-1}$, the scope angle to be monitored $\phi=\frac{9\pi}{16}$, and atmospheric stability $S=D$.

式によって定められる。

$$n = \left[\frac{\phi}{\tan^{-1} \hat{\omega}_r} \right] + 1 \quad (33)$$

ここで

ϕ ……監視を必要とすべき範囲（原子炉を中心として測った角度領域。通常 $\phi=2\pi$ であるが、東海研究所は海に面しているので Fig. 12 では $\frac{9}{8}\pi$ として計算してある。

また、 $[\]$ はガウスの記号、すなわち $[\]$ 内の値を越えない最大整数を意味する。

Fig. 12 において、対策レベル \dot{A} (横軸の値) と避隔距離 d (縦軸の値) が与えられれば、必要最小限のモニタリング・ポストの数 n は直ちに求められる。たとえば、 $\dot{A}=150$ thyroid rem, $T=10$ hr, $d=1.6$ km の場合には $n=10$ となる。

なお、 \dot{A} の値 (横軸の値) が小さい場合は、FP の放出率が小さい場合に対応する。したがって FP 雲の γ 線の照射率 \dot{D}_{cloud} も小さくなり、場合によっては、アラーム・レベル以上の照射率がない(すなわち、FP 雲の通過を把握できない)ことが起りうる。また避隔距離 d (縦軸の値) が大きい場合にも \dot{D}_{cloud} の値が小さくなり、アラーム・レベル以上の値が観測できない。Fig. 12 では、このようなことの生ずる領域を Not-detectable domain として左隅に細い斜線で示した。

また、非常に大きな事態を想定する場合には、 \dot{D}_{cloud} の値も大きくなり、場合によっては、GM 管が窒息現象を起こして監視できなくなる。Fig. 12 では、この領域を over-gauge domain として太い斜線で右隅部分に示した。

5.2 ダストモニタの役割とその状況把握能力

前節にも述べたように、 γ 線監視網にはその状況把握能力に限界がある。たとえば Fig. 12 によれば、避隔距離 d を 2 km とした場合に、モニタリングポストをいくら増設しても、 $\dot{A}=1.5$ thyroid rem/hr of cloud 未満の事態に対してはアラーム・レベル ($100 \mu R\cdot hr^{-1}$) 以上の監視値が得られない(したがって FP 雲の通過に気付かない)。また、Fig. 11 も同様なことを示しており、とくに安定度 A (破線で示した曲線) では避隔距離 d が大きくなると急激にその能力 (縦軸方向の幅、 $\hat{\omega}_r$) が乏しくなる。たとえば $d=1.6$ km 程度に遠ざかると $\dot{A}=100$ (thyroid rem/hr of cloud) であっても FP 雲に対する把握可能領域の半径 (縦軸の値) は 0 となる。換言すればアラーム・レベル以上の監視値が得られないこととなる。

この理由として次の3点があげられる。

- (1) 平常時に原子炉から排出され、風向等によって変動する ^{41}Ar 等 (不活性ガス) は、野外の γ 線検出器に対して不規則なバックグラウンド変動を与える。したがってモニタリング・ポストの s/n 比相当値が悪くなるので、アラーム・レベル L を高くしておかなければならない。
- (2) 事故時に原子炉からスカイシャインの形で到達する γ 線の照射を避けるために、 γ 線監視所は十分な避隔距離 d をとらなければならない。ところが避隔距離が大きければ、FP 雲から受ける γ 線の観測値も小さくなる。なお、避隔距離を小さくするために、鉛等の遮蔽を施してスカイシャインの照射を弱める方法も考えられるが、 γ 線監視所の場合には、監視すべき FP 雲の γ 線も遮蔽されることになるので、把握能力は良

くならない。

- (3) 事故時に放出されるFP雲から射出する γ 線について考えると、その照射率分布 $f_s(x_0, y_0)$ の値の x_0 方向における減少傾向は、安定度 $S=A$ のときに最も著しい(Fig. 8 参照)。したがって、 $f_s(d, \frac{w}{2})$ についても同様のことがいえる。

このような問題点を解消する方策として、たとえば、FP雲を直接に捕集して監視できるダスト・モニタを併用して γ 線監視網の弱点を補強する方式が考えられる。

ダスト・モニタは一般にその購入、設置および維持に要する費用が、 γ 線監視装置に比べ高くつく。また異常に汚染した気流が到達してから若干の時間(捕集時間またはRaB, RaC等の減衰時間)が経過しなければ、異常事態の発生を検出することができない。したがって、ダスト・モニタのみを用いて野外交射線監視システムを構成することは適当でないが、前記の3つの問題点を解決する次のような長所を持っているので、その有効性を十分に活用することが望ましい。すなわち、

- (a) 前記(1)の問題点、すなわち ^{41}Ar 雲からの放射線を混同して測定することについては、ダスト・モニタのように濾紙等にFPを捕集する方式を用いると、 ^{41}Ar が不活性であるのでほとんど捕集されなくなる。したがって、混同して測定することは防止できる。
- (b) 前記(2)の問題点、すなわち、スカイ・シャイン等の γ 線避けることについては、ダスト・モニタの場合には検出部分を鉛等で包んで遮蔽することができ

る。したがって、遮蔽さえ十分にすれば、避隔距離 d を小さくとることができる。

- (c) ダスト・モニタの監視対象であるFP雲の濃度分布は、安定度が A の場合には、 γ 線 D_{cloud} の分布 $f_A(x_0, y_0)$ とほぼ同じ形である。しかしダスト・モニタはモニタリング・ポスト(γ 線検出器)と較べると、異常汚染の判別能力が桁違いに鋭敏であるのでアラーム・レベルを低くとることができる。

たとえば、最高濃度地点において、モニタリング・ポストが自然放射線と同程度($10\mu\text{R}\cdot\text{hr}^{-1}$)以上の γ 線を検知しうるためには $10^{-7}\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ 程度のFP雲濃度が必要である*のに較べ、ダスト・モニタの場合には $10^{-10}\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ (=自然放射能の日変動の最高値)以上であれば、異常を検出することができる。なお、自然放射能は気象条件等の変動に起因して著しく**日変動する性質をもっているが、この変動傾向の性質はすでに解明されており^{(19),(20)}、その傾向をある程度予測することもできるので、アラーム・レベルをさらに低い値に設定することも可能である。

ダスト・モニタのFP雲に対する把握可能領域の半径 \hat{w}_c は、前節で導いた(31)式あるいは(32)と同様の考え方で次のように表わすことができる。

$$\chi_c\left(d, \frac{w_c}{2}\right) \leq \frac{F(x_m, 0)}{A} \cdot L \cdot T \quad (34)$$

あるいは

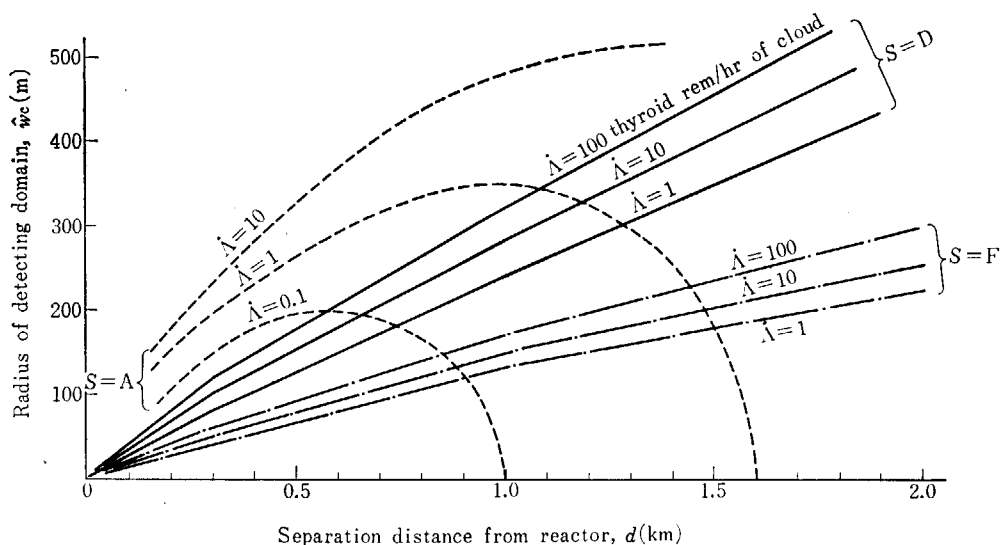


Fig. 13 Radius \hat{w}_c of graspable domain of FP cloud monitoring post (with cloud sampler) as a function of separation distance d ; the alarm level of FP cloud monitor is taken as 1×10^{-10} FP $\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$.

Meteorological stability S and action level against radiological disaster per unit time of inhalation \dot{A} are the parameters.

* 換言すれば、たとえ ^{41}Ar 等を平常時に放出しない原子炉であっても、FP雲が $10^{-7}\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上とならなければ、異常に気付くことができないことを意味する。

** 移動濾紙式ダスト・モニタで集塵し、約2時間の減衰時間を待って測定する場合は $10^{-12} \sim 10^{-11}\text{Ci}\cdot\text{m}^{-3}$ の範囲が変動する⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾。

$$\hat{w}_c = 2\chi_s^{-1} \left(\frac{F(x_m, 0)}{A} LT; d \right) \quad (35)$$

(35)式において、 $F(x_m, 0) = 0.12 \text{ rem/FP Ci} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}$,
 $L = 10^{-10} \text{ Ci} \cdot \text{m}^{-3}$ として A の値をそれぞれ 1, 10 およ
 び 100 thyroid rem/hr of cloud として計算した \hat{w}_c の

値を Fig. 13 に示す.

Fig. 13 によれば、風下 1 km の付近にダスト・モニ
 タを配置すると、 γ 線監視網の欠点（安定度 A のときに
 監視能力が乏しいこと）を補なうのに最も有効であるこ
 とが解る.

6. 経済性, 場所的重要度ならびに測定器の信頼性を考慮に入れた最適配置法

野外に監視網を配置するにあたって, 基本的には前節までに述べた基準にしたがって決定することが望ましい。しかし現実には予算枠その他の制約を受け, また各地点ごとに重要性が異なるので, それらを総合的に考慮して最適の配置を行なわなければならない。また場合によっては, とくに重要な系統の特定の機器について, 故障による欠測をなくするために冗長方式の採用を検討することがあるが, これらについて数理計画の観点からの考察を加えてみよう。

6.1 最適配置法に関連する要素の定量的表現

6.1.1 重要度に関するフォーミュレーション

数理計画を行なう場合に, 問題となるのは重要度の定め方であるが, 次式のように, 「事故時に放出された FP 汚染気流が i 番目の野外監視所の把握可能範囲内に流れこむ確率」をもって i 番監視所の重要度 W_i と定義しよう。

$$W_i = \sum_S P(S) \int_{\varphi_1 + \pi - \tan^{-1} \frac{w(\dot{A}; d_i, L_i, S)}{d_i}}^{\varphi_1 + \pi + \tan^{-1} \frac{w(\dot{A}; d_i, L_i, S)}{d_i}} p_S(\varphi) d\varphi \quad (36)$$

ここで

φ ……原子炉を中心, N (北) 方位を基準線として時計回りに測った方位

$p_S(\varphi)$ ……大気安定度 S のもとに, φ 方向へ気流の流れる確率

$P(S)$ ……大気安定度 S の出現確率

$w(\dot{A}; L_i, d_i, S)$ ……i 番監視所の把握可能領域の半径。ここで監視所というのは, モニタリング・ポストとダスト・モニタのいずれか (または両者) を意味する。したがって, $w(\dot{A}; L_i, d_i, S)$ の値は前章における \hat{w}_r および \hat{w}_c の総称として用いるが, 関与する変数を明記するためにこのような表示を行なう。

L_i ……i 番監視所のアラーム・レベル

d_i ……i 番監視所の避隔距離

φ_i ……i 番監視所の所在する方位

\dot{A} ……原子炉災害の対策レベルの値 \dot{A} を住民の FP 雲吸入予想時間 T で割った値 (5.1 節参照)。

(36)式から解るように, 前もって想定すべき \dot{A} の値を別とすれば, 重要度 W_i は i 番監視所特有の数値 ($d_i,$

φ_i, L_i) のみの関数である。またこの積分の意味と計算法は次のように考えればよい (Fig. 14 参照)。

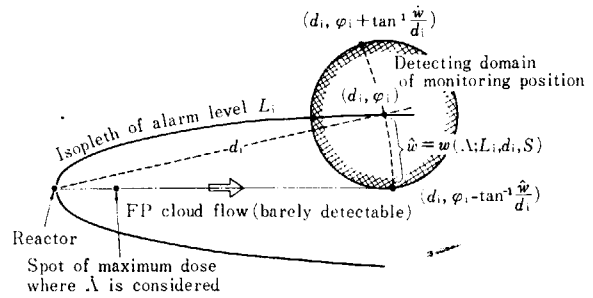


Fig. 14 The relation between the detecting domain of an environmental monitoring post and the radioactive-cloud spread.

まず, Fig. 14 に示すように, i 番監視所の位置 (d_i, φ_i) を中心として, $S=A$ なるときの $w(\dot{A}; d_i, L_i, S)$ の値を半径とする円を描き, その円の領域内に原子炉から $S=A$ の状態で流れこむ風の相対的現頻度 (%) を算出する。換言すれば, $S=A$ のときに風向が $\varphi_i + \pi - \tan^{-1} \frac{w(\dot{A}; d_i, L_i, S)}{d_i}$ と $\varphi_i + \pi + \tan^{-1} \frac{w(\dot{A}; d_i, L_i, S)}{d_i}$ の間にある相対的頻度 (%) を統計的に求める。同様な操作を $S=B, S=C, \dots, S=F$ なる状態について繰返し, 得られた各数値 (%) の和を求めればよい。想定事故現場とし

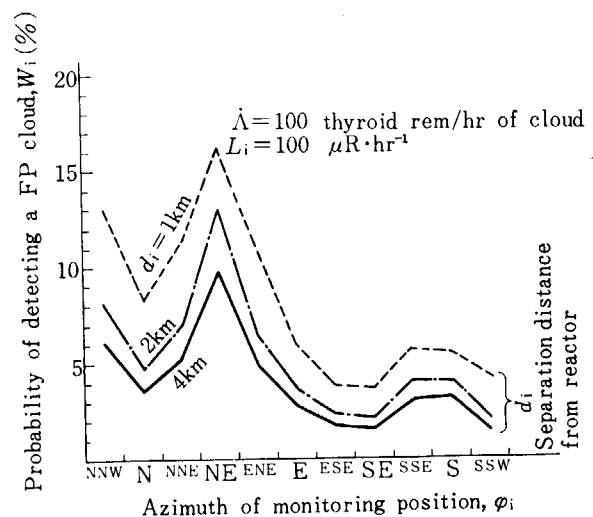


Fig. 15 The distribution of the weighting factor W_i expressed as the probability to detect a FP cloud, as functions of azimuth φ_i and separation distance d_i of the monitoring post in TOKAI; $\dot{A}=100$ thyroïd rem/hr of cloud, and $L_i=100 \mu R \cdot hr^{-1}$.

These weighting factors were calculated with the meteorological data⁽²²⁾ in TOKAI in 1968.

ての原子炉が複数個あって, 野外監視所(複数個)がそれらを取巻く場合も, 同様の考え方で計算できる. 東海研究所周辺について計算した W_i の値の分布図を Fig. 15 に示す. これは $\dot{A}=100$ thyroid rem/hr of cloud, $L=100 \mu R \cdot hr^{-1}$ として方位 φ_i を変数として, 避隔距離 d_i ($=1 \text{ km}, 2 \text{ km}, 4 \text{ km}$) を曲線のパラメータとして描いたものである. すなわち,

なお, 「重要度」の表現法としては, 上述の考え方のほかに, 次式に示すような集団被曝量の確率的期待値 PD を用いて各地域の重要性を比較する方法がある.

$$PD = K \cdot \bar{C}(d_i, \varphi_i; A) \cdot \pi(d_i, \varphi_i) \cdot \Gamma(d_i, \varphi_i)$$

ここで

$$K = K_{inh} + K_{grnd} = 3.5 \times 10^5 \text{ rem/FP Ci} \cdot \text{hr} \cdot \text{m}^{-3}$$

(4.1.2 節参照)

$\bar{C}(d_i, \varphi_i; A)$ ……規模 A なる原子炉災害が起きた場合の i 番地点 (d_i, φ_i) 付近における空気汚染度 (FP Ci \cdot hr \cdot m $^{-3}$) の確率的平均値. これは対象地域における気象要素 S, u, φ の出現頻度を長期間にわたり観測し統計処理した値⁽²³⁾ を Pasquill の気象拡散式の中に組み入れて地域平均値を求めることによって得られる (単位……FP Ci \cdot hr \cdot m $^{-3}$).

$\pi(d_i, \varphi_i)$ …… i 番地点 (d_i, φ_i) 付近における人口密度 (単位……man \cdot km $^{-2}$).

$\Gamma(d_i, \varphi_i)$ ……上記の人口密度を算出のさい対象とされた地域の面積 (単位……km 2).

計算結果の一例(大洗研究所の場合)を Fig. 16 に示す.

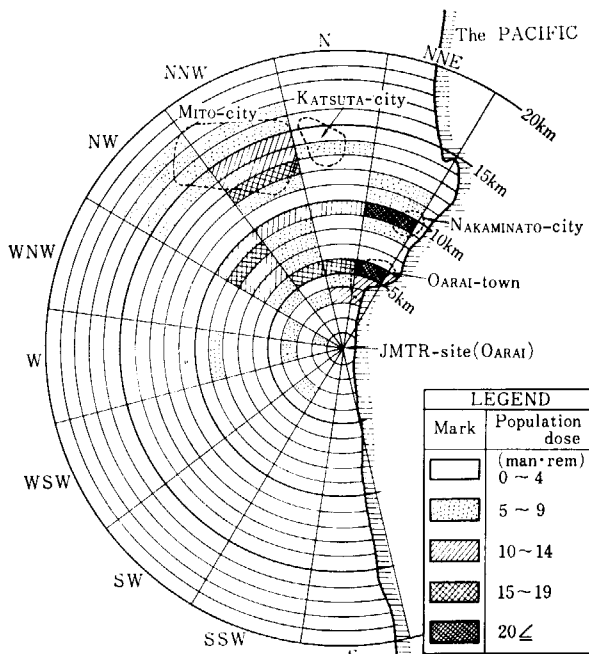


Fig. 16 Distribution of population dose expectation in OARAI, with $A=1$ thyroid rem.

6.1.2 監視システムの性能(目的関数)の評価式

野外監視所の最適配置を考える場合に, 配置の選択の

しかたが, どのような効果を出すかを定量的に評価する必要がある. (換言すれば, 数理計画上の目的関数を定めなければならない) そこで, 「監視システムの性能」を目的関数と考え次のような定義をしておこう.

「監視システムの性能」とは, 「システムの構成要素であるどれかの監視所が, FP 雲の通過を発見し把握しうる確率」と定義する. これを Ω と記せば次のように表わすことができる.

$$\Omega = \sum_{i=1}^N (1 - P_i) \cdot W_i \tag{37}$$

または

$$\Omega = \sum_{i=1}^N (1 - P_i) \sum_{S=A}^F P(S) \int_{\varphi_i + \pi - \tan^{-1} \frac{w(A; d_i, L_i, S)}{d_i}}^{\varphi_i + \pi + \tan^{-1} \frac{w(A; d_i, L_i, S)}{d_i}} p_S(\varphi) d\varphi \tag{37}'$$

ここで

P_i ……原子炉発生時に i 番監視所が故障している確率

W_i …… i 番監視所の重要度 (前節(36)式参照)

N ……予算枠の範囲内で設置しうる監視所の数の最大値

この目的関数が複雑な条件のもとでどのようなようになるかの問題は 6.4 節以降で考察するが, ここでは, 「監視システムの性能」が予算の制約にともなって受ける影響を大ざっぱに評価するために, 次のような簡単な条件の場合について計算してみよう.

- (a) 各監視所とも故障がない. すなわち $P_i=0$
- (b) 各監視所とも購入設置費および維持費は同一.
- (c) 各監視所は, 重要度の順位を考慮せず, 等間隔に配置する. ただし海側には配置しない. すなわち

$$\varphi_i = \frac{\phi}{N} i = \frac{9}{8N} \pi i \tag{38}$$

$$(i=1, 2, \dots, N)$$

この場合に (37)' 式は次のように表わされる.

$$\Omega = \sum_{S=A}^F P(S) \sum_{i=1}^N \int_{\frac{9\pi}{8N} i + \pi - \tan^{-1} \frac{w(A; d_i, L_i, S)}{d_i}}^{\frac{9\pi}{8N} i + \pi + \tan^{-1} \frac{w(A; d_i, L_i, S)}{d_i}} p_S(\varphi) d\varphi \tag{39}$$

上式において, $w(A; d_i, L_i, S)$ については $d_i=2 \text{ km}$, $L_i=100 \mu R \cdot hr^{-1}$ と想定し A の値を変数とした場合の値を Fig. 11 より読取って定め, $P(S)$ および $p_S(\varphi)$ については東海研究所の気象統計値 (1968年)⁽²²⁾ を用いて近似値を算出し, また予算枠については $N=5, N=10, N=20$, および $N=\infty$ とすることが可能なそれぞれの場合について試算したところ Fig. 17 のようになった.

Fig. 17 から次のことが解る.

- (1) 海側 ($2\pi - \phi = \frac{7}{8}\pi$ の範囲) には監視所を設けないと想定したので, N の値の如何にかかわらず, 67% 以上に性能を良くすることはできない.
- (2) たとえば, $A=50$ thyroid rem/hr of cloud と設定した場合, $N=20$ の予算があれば, 67% の確率で

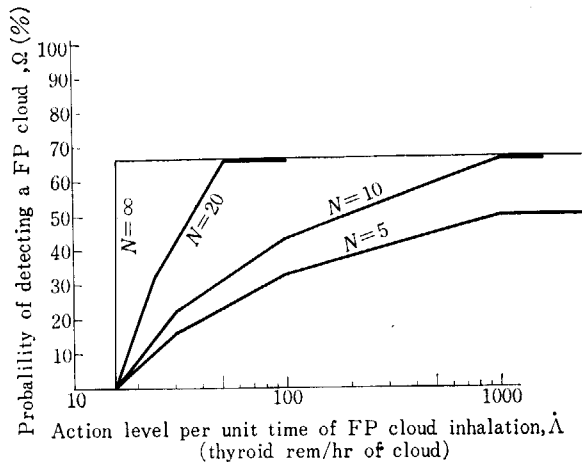


Fig. 17 Example of the efficiency Ω of a γ -ray monitoring network expressed as probability to detect a FP cloud, as a function of \dot{A} ; γ -detectors are located at regular intervals, $d=2$ km and $\Phi=\frac{9}{16}\pi$, in TOKAI.
The number N of γ -ray monitoring posts is the parameter.

FP 雲を発見しうるが, $N=10$ の予算に削減すれば 32% に落ち, $N=5$ のときには 23% に性能が落ちる.

(3) 予算を無限に使えたとしても ($N=\infty$), 16 thyroid rem 未満の原子炉災害に対しては監視の性能を果しえない。ただし, これらの結論も避隔距離 d ; およびアラームレベル L_i が変れば若干異ってくる。また, 上記(c)項の等間隔配置法が最適であるかどうかは解らない。重要度の順位, その他の要素を考慮して配置を決めれば, システムの性能をさらに向上させることができるであろう。次節以降ではこれについて考察する。

6.2 最適配置のための数理計画法

6.2.1 初歩的な配置採択法

いま, U 個の監視所候補地点を考え, 各地点の重要度を W_1, W_2, \dots, W_U とする。この中には予算枠その他の制約条件のために削除しなければならぬ候補地点も当然含まれてよいこととする。

まず, 予算のみの制約条件 C_{\max} のもとで最大の監視機能をもつ監視網を設計する場合に, どの候補地点を採択すればよいかの問題について考えてみよう。この問題に関し初歩的に考えつく解決法としては, W_i の大きいもの, あるいは購入設置費 c_i に対する W_i の割合 (つまり費用の投入効果) W_i/c_i の大きいものから順次, 予算の限界 C_{\max} に達するまで採択してゆく方法が考えられる。

6.2.2 改善した最適配置法

ところで, 前記の初歩的採択法がどんな場合にも妥当であるか否かを考えてみよう。採択地点の数は必ず整数であり端数は現われえないことを考慮すると監視所の設置費の和も離散的な値をとるので, 与えられた予算の枠内で使い残し分を最小 (理想的には零) としながら最大の投資効果を発揮したい場合には前項の採択法は適当でない。また, 重要方位にある監視所の信頼性を向上させるために冗長システム (この場合は同一方位に 2 個所以上の監視所) の必要性を考えたり, あるいは予算枠以外の制約条件が付加された場合における解決法は若干異なったものでなければならない。

これらについて数理計画法的考察を行なうために, 前項で用いた W_i, c_i のほかに次の記号を用いることとしよう。

x_i …… i 番候補地点を採択するか否かを示す未知変数。
すなわち $\begin{cases} x_i=0 \dots\dots \text{採択されない} \\ x_i=1 \dots\dots \text{採択する} \\ x_i=2 \dots\dots \text{冗長的に配置する} \end{cases}$

(いづれの場合も整数しかとりえないものとする)

$g(x_i)$ …… x_i の値が監視システムの性能に寄与する効果。監視網の能力として, 汚染気流放出事故の際の動作即応性を考える場合には, $g(x_i)=1-P_i^{x_i}$ となる。

P_i ……原子炉災害の発生時に i 番監視所が故障している確率。この値は設計段階における信頼度予測または既設監視所の保守記録を参考として定めることが多い。

m_i ……予算以外の制約条件をフォーミュレートする場合に, i 番監視所のもつ係数。(たとえば, 設置後の保守に要する年間維持費単価)

M_{\max} ……上記のフォーミュレートにあたり制約の限界を示す常数 (m_i と同一の単位を使用する)。

これらの記号を用いると, 前述の問題点は下記のようにフォーミュレートすることができる。

$$\text{(制約条件)} \quad \sum_{i=1}^U x_i c_i \leq C_{\max} \quad (40)$$

$$\sum_{i=1}^U x_i m_i \leq M_{\max} \quad (41)$$

$$\text{および } x_i \geq 0$$

$$\text{(目的函数)} \quad \text{Maximize } \left\{ \sum_{i=1}^U W_i \cdot (1 - P_i^{x_i}) \right\} \quad (42)$$

(42)式は x_i に関して線型ではなく, また x_i は整数でなければならないので, 解法は一般に困難とされているが, ここでは Bellman の最適性の原理⁽²⁴⁾を用いて解くことを試みた。すなわち, まず(40)式のみ条件のもとで, x_1, x_2, \dots, x_U を最適に選んだ場合における目的関

数の値 $\sum_{i=1}^U w_i g(x_i)$ を $f_U(C_{\max})$ とすれば, 次の漸化式を用いる.

$$f_U(C_{\max}) = \max_{0 \leq x_U \leq \left\lfloor \frac{C_{\max}}{c_U} \right\rfloor} [W_U g(x_U) + f_{U-1}(C_{\max} - x_U c_U)] \quad (43)$$

ここで max 記号の下の不等式条件の左辺の記号 [] はガウスの記号である. また, すべての C に対して

$$f_0(C) = 0 \quad (44)$$

と定義する.

(43), (44)式を用いて C の $0 \sim C_{\max}$ 間で順次繰返し計算を続けると, x_1, x_2, \dots, x_U の値の最適の組合せが解り, 同時にその最適状態における目的関数の値が解る.

つぎに, もう1つの制約条件(41)式も考慮に入れる場合には, ラグランジュの乗数 λ を導入して次の漸化関係式を作り, $M_{\max} - \sum_{i=1}^U x_i m_i$ の値が 0 または最小となるまで λ の値を調節しながら最適の x_1, x_2, \dots, x_U の値を求めてゆけばよい.

$$\begin{cases} f_U(C_{\max}) = \max_{0 \leq x_U \leq \left\lfloor \frac{C_{\max}}{c_U} \right\rfloor} [W_U g(x_U) - \lambda x_U m_U + f_{U-1}(C_{\max} - x_U c_U)] \\ f_0(C) = 0 \text{ for all } C \end{cases} \quad (45)$$

この計算に関するフローチャートおよび計算表の1例を Appendix 1 に示した.

6.2.3 サブ・システム冗長方式を考慮した最適配置法

前項の最適配置法では, 監視所の装置1式を単位として冗長方式を考えた. すなわち, 重要方位には2個以上の監視所を設け, 1個所が故障でも別の監視所で万全を期することとしている. その方式によれば, 故障が無いかぎり, 汚染気流の通過を2個以上の監視所で観測することとなるので評価の正確性を向上でき望ましいことは確かであるが, 設置費用が高かつきすぎるという欠点がある. ここでは, それを改善するために, 監視所を構成する個々のサブ・システム(検出器, 計数装置, 伝送系, 警報装置, etc*)の中で故障率の高いものにつき, 設備投資効果(W_i, c_i)や各種の制約条件などを考慮しつつ部分的な冗長方式をとることを考えてみよう. この方式で節減できた費用は他の重要部分(たとえば予備電源系等の共用サブ・システムなど)の強化に用いることができる.

さて, U 個の候補地点の中から N 個の地点が決定されそこに設置する施設はすべて $V-v$ 種類のサブ・システムから構成されているものとする. これらのうち i 番監視所の j 番サブ・システムについて, それぞれ次のような記号を定めよう.

* これらのサブ・システムは機能的に直列に結合されているものとする.

x_{ij} ……そのサブ・システムの冗長方式の採択数を示す未知数. すなわち,

$$\begin{cases} x_{ij} = 0 \dots \dots \text{冗長方式をとらない.} \\ x_{ij} \geq 1 \dots \dots \text{冗長方式をとる.} \end{cases}$$

$g_{ij}(x_{ij})$ ……監視システムが故障をしない確率.

監視システムの動作即応性を考える場合には $g_{ij}(x_{ij}) = 1 - P_{ij}^{1+x_{ij}}$ となる. たとえば, そのサブ・システムが絶対に故障しない時 ($P_{ij} = 0$ の時)には, $g_{ij}(x_{ij}) = 1 - 0^{x_{ij}} = 1$, 必ず故障する時 ($P_{ij} = 1$ の時)には $g_{ij}(x_{ij}) = 1 - 1^{x_{ij}} = 0$ となる.

P_{ij} ……そのサブシステムが緊急の際に故障している確率

c_{ij} ……購入取付の費用

C_{\max} ……監視システム設置のために与えられた予算枠

つぎに, 監視システムの共用サブシステム(電源系, 中央監視装置, etc)は v 種類あるものとし, その中の k 番目のサブシステムについて次のような記号を定めよう.

y_k ……そのサブシステムの冗長数.

$g_k(y_k)$ …… y_k の値が監視システムの性能に寄与する効果. 監視システムの動作即応性を考える場合には $g_k(y_k) = 1 - P_k^{1+y_k}$ となる.

P_k ……そのサブシステムの故障する確率

d_k ……購入設置の費用

これらの記号を用いると, 上記の問題は次のようにフォーミュレートできる.

$$\text{(制約条件)} \quad \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{V-v} x_{ij} c_{ij} + \sum_{k=1}^v y_k d_k \right) \leq C_{\max} \quad (47)$$

$$\text{(目的関数)} \quad \text{Maximize} \left\{ \sum_{i=1}^N W_i \prod_{j=1}^{V-v} g_{ij}(x_{ij}) \prod_{k=1}^v g_k(y_k) \right\} \quad (48)$$

上式を動的計画法の観点から扱いやすくするために, 次のような変数変換を行なう. ($k=1, 2, \dots, v$)

$$x_{1, V-v+k} = x_{2, V-v+k} = \dots = x_{N, V-v+k} = y_k \quad (49)$$

また, $d_k, g_k(y_k)$ についても次のように変換する. ($k=1, 2, \dots, v$)

$$c_{1, V-v+k} = c_{2, V-v+k} = \dots = c_{N, V-v+k} = \frac{d_k}{N} \quad (50)$$

$$g_{1, V-v+k}(x_{1, V-v+k}) = g_{2, V-v+k}(x_{2, V-v+k}) = \dots = g_k(y_k) \quad (51)$$

このとき, (47), (48) 式は次のように書き直すことができる.

$$\text{(制約条件)} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^v x_{ij} c_{ij} \leq C_{\max} \quad (47)'$$

$$\text{(目的関数)} \quad \text{Maximize} \left\{ \sum_{i=1}^N W_i \prod_{j=1}^v g_{ij}(x_{ij}) \right\} \quad (48)'$$

(48)' 式は x_{ij} について非線型であるが, この目的関数の最大値を表わす函数を $e \cdot f_{NV}(C_{\max})$ とすれば, Bel-

Iman の「最適性の原理¹²⁾」を用いて次のように、 $f_{NV}(C_{max})$ の v に関する繰返しの関係式と置き換えることにより問題を解くことができる。

$$\left\{ \begin{aligned} e \cdot f_{NV}(C_{max}) &= \max_{\substack{0 \leq x_{ij} \\ \sum_{i=1}^N x_{iv} c_{iv} \leq C_{max}}} \left[e \cdot G_{NV} f_{N, v-1} \left(C_{max} - \sum_{i=1}^N x_{iv} c_{iv} \right) \right] \quad (52) \\ f_{N_0} f(C) &= \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_N \end{pmatrix} \text{ for all } C \quad (53) \end{aligned} \right.$$

ここで、

$e = (1, 1, \dots, 1) \dots \dots N$ 次元の単位行ベクトル

$f_{VN}(C_{max}) \dots \dots N$ 次元の列ベクトル

それぞれ v 種類のサブシステム (このうち互に共有する v 種類のサブシステムを含む) からなる監視施設を N 個の地点に配置した監視システムにおいて、予算枠 C のもとで目的関数(48)'式の値を最大とするように配分した状態 \hat{x}_{ij} ($i=1, 2, \dots, U, j=1, 2, \dots, V$) における各監視所の $W_i \prod_{j=1}^V g_{ij}(\hat{x}_{ij})$ の値がこのベクトルの成分となる。

また

$$G_{NV} = \begin{pmatrix} g_{1V}(x_{1V}) & & 0 \\ & g_{2V}(x_{2V}) & \\ 0 & & g_{NV}(x_{NV}) \end{pmatrix} \quad (54)$$

解法の式(52), (53)に関するフローチャートおよび計算例を Appendix 2 に示した。

なお、(52), (53)式では予算 C_{max} を N 個の監視所に配分する場合の最適解を考えたが、冗長方式を部分的なサブシステムに限定するために節減しうる費用を次のいずれに使用すればよいかの選択の問題について考えてみよう。

(i) 監視所は N 個のまま、共用システムを充実すること。

(ii) 別に新たな監視所を新設すること。

このうち (i) については、(52) 式の中 (すなわち $x_{i, v-v+k}$) に含めて表現することができるので、問題点は(ii)の方策の実現可能性にしばられる。この解決法としては、(52)式で N の値を1つだけ増した状態における最適解を求めて、その時の目的関数の値 $e \cdot f_{N+1, v}(C_{max})$ を求め、

$$e f_{N+1, v}(C_{max}) > e \cdot f_{NV}(C_{max}) \quad (55)$$

ならば方策(ii)を採択するという決定を下すことにすればよい。この考え方を一般化すれば、次式で定まる増加分 ΔN だけ増設できることとなる。

$$e \cdot f_{N+\Delta N, v}(C) = \max \{ e f_{NV}(C), e f_{N+1, v}(C), e f_{N+2, v}(C), \dots, e f_{UV}(C) \} \quad (56)$$

ここで

$$e f_{uV}(C) = \max_{\substack{0 \leq x_{ij} \\ \sum_{i=1}^u x_{iv} c_{iv} \leq C}} \left[e \cdot G_{uV} f_{uV-1} \left(C - \sum_{i=1}^u x_{iv} c_{iv} \right) \right] \quad (57)$$

$$G_{uV} = \begin{pmatrix} u & & & & \\ & \begin{pmatrix} g_{1V}(x_{1V}) & & 0 \\ & g_{2V}(x_{2V}) & \\ & & g_{uV}(x_{uV}) \end{pmatrix} & & & \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \\ & & & & 0 \end{pmatrix} U \quad (58)$$

$$f_{u_0}(C) = \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_u \end{pmatrix} \quad (u = N, N+1, \dots, U) \quad (59)$$

7. 結 言

前章までの考察の結果を整理すると次のようになる。

- (1) 原子炉格納容器に閉じこめた FP から射出する γ 線は、数百 m 以上離れた地点では、スカイ・シヤイン成分が大部分を占める。したがって、丘陵、山林、建物等の地物の状況を些細に調べることなくモニタリング・ポスト等の避隔距離を決定しても支障をきたさない。
- (2) モニタリング・ポストの避隔距離は、想定事故の規模によって異なるが、格納容器内の FP の総量を 10^6 Ci とすれば 16 km 程度、 10^7 Ci とすれば 2 km 程度が望ましい。これより近距離の範囲内は、モニタリング・ポイント（ガラス線量計、TLD、バッジ用フィルム）等を配置する方が有効である。
- (3) モニタリング・ポストの相互間の間隔は、避隔距離が 2 km の場合に、400 m 以内とすることが望ましい。（ただしこれは、対策レベルを 100 thyroid rem、住民が FP 雲を吸入する時間を 10 hr と想定した場合の値である）。
- (4) ダスト・モニタは、検出装置に適当な γ 線遮蔽を施したものを、原子炉から約 1 km くらい避隔した位置に配置して、 γ 線観測網を補強することが望ましい。
- (5) ダスト・モニタ相互間の距離は、避隔距離が 1 km の場合に、約 1 km 以内とすることが望ましい（ただしこれは前述(3)項と同じ条件を想定した場合の値である）。
- (6) 野外の放射線監視所は、上記のほか、人口の密集

地域や風向頻度等を考慮して配置することが望ましい。その場合、各地域の重要度を定量的に評定することを試みた。また避隔距離や相互間隔を判定するための図表を作成した。

- (7) 経済上の制約がある場合に、監視所の各候補地点の重要度や故障の確率等を考慮に入れて監視システムの検討を行なうときには、Bellman の「最適性の原理」の観点から考察する方法が有効であることを示した。またサブ・システム冗長方式を採用する場合のためにマトリックス型動的計画法を開発した。なお、これらの最適配置法の効果を判定する場合には、「システムの構成要素であるどれかの監視所が、FP 雲の通過を発見し把握しうる確率」を用いて評価する方法が実用的であることを示した。

なお最後に、この研究を行なう機会を与えて下さった青木敏男氏（元保健物理部長）、石原豊秀氏（元野外管理班長）を始め、貴重な気象資料を提供して下さいました環境放射能課の今井和彦氏、大和田忠明氏、および林隆氏、 γ 線遮蔽計算に有益な御意見を下さり今は亡き鶴尾昭氏、システム工学の面で原稿の校閲を下さり有益な助言を下さった中山隆氏（城西大学教授）、篠原慶邦氏（原子炉制御研究室）および熊沢蕃氏（線量計測課）、ならびに業務上格別な御便宜を賜った重松友道氏（保健物理安定管理部長）、藤田稔氏（主任研究員）、立田初己氏（線量計測課長代理）、沼宮内弼雄氏（副主任研究員）、笠井篤氏（環境放射能課研究員）および森内茂氏（環境放射線課研究員）に深く感謝します。

8. 記号表

(原則として本文の記載順序にしたがう。なおこのレポートのみで使う特殊用語については、本文の第2章(後半)に記載してあるので参照されたい。)

$\dot{D}_{direct}(d, Q_i)$ ……原子炉格納容器内に閉じこめられた FP から到達する γ 線	(x, y, z) ……原子炉の位置を原点とし、風下方向、風下直角方向および垂直方向をそれぞれ x, y および z 軸とする直角座標
$\dot{D}_{obstacle}(d, Q_i)$ ……上記 γ 線のうち、地物等の吸収を受けながら直接に達する成分	$w_s(x)$ ……FP 雲の y 軸方向の拡がり幅 (Pasquill の定義によるもの) ⁽¹²⁾
$\dot{D}_{sky}(d, Q_i)$ ……前記 γ 線のうち、上空に射出された後に散乱されながら地上に達する成分	$h_s(x)$ ……FP 雲の z 軸方向の拡がり幅 (Pasquill の定義によるもの) ⁽¹²⁾
d ……原子炉 (想定事故現場) から監視所までの距離	H ……FP の実効放出高度
Q_i ……閉じこめられた FP を γ 線エネルギーで分類した場合における i 番核種群の所在量。(以下第3章~第4章(4頁~8頁)においては、添字を付した記号について同様のことを想定することとする。)	FP Ci ……FP の Ci 数 (単位記号)
E_i …… i 番核種の代表的な γ 線エネルギー	K_{inh} ……換算係数 (FP 雲の積算濃度 \rightarrow 甲状腺の内部被曝量)
k_i …… i 番核種群の γ 線放射定数	E'_i ……沈降した FP 中の i 番核種群の代表的な γ 線エネルギー
μ_{1i} ……格納容器壁材の全吸収係数	T_{ri} …… i 番核種群の物理的半減期
t ……格納容器の壁厚	τ_2 ……汚染した地域に滞在する時間
$\mu_2 d$ …… i 番核種群の γ 線が地物の所在する場所を d だけ通過する際に受ける吸収の割合	$S(x, y; T)$ ……地域 (x, y) に FP 雲が T 時間沈降した後における地面汚染度
μ_{ai} ……空気層の全吸収係数	$f_i(t)$ …… $f_i \exp\left(-\frac{0.693}{T_{ri}} t\right)$
$B(\mu_{1i} t, \mu_2 d)$ ……格納容器壁と空気層を γ 線が通過する場合に受けるビュルド・アップ因子	K_{grnd} ……換算係数 (FP 雲の積算濃度 \rightarrow 汚染地面から受ける外部被曝量)
$K_i(d)$ ……地面 γ の線散乱効果を考慮した境界面補正係数	k'_i ……FP 雲中の i 番核種群の γ 線放射定数
S_i ……ビュルド・アップ表示式 (2次関数) における2次項の係数	μ_i …… i 番核種群から発する γ 線の線吸収係数
D_{inh} ……FP 雲を吸入して受ける内部被曝	$B(\mu_i \rho)$ …… γ 線が空気中を通過する際のビュルドアップ係数
D_{grnd} ……FP 雲の沈降により汚染した地面から射出する放射線による外部被曝	$f_s(x, y)$ ……11 ページ(20)式参照
D_{cloud} ……FP 雲から射出する放射線による外部被曝	$F_s(x, y)$ ……換算係数 $\left(\frac{\text{FP 放出率}}{\text{風速}} \rightarrow \text{住民の甲状腺が受ける総合的積算被曝線量}\right)$
D_{veg} ……汚染した野菜等を摂取することによる内部被曝	$\dot{D}(x, y; t)$ ……時刻 t において FP 雲を単位時間放出(あるいはそれを吸入)した場合、甲状腺が受ける総合的積算被曝量、換言すれば「被害進行度」
D_{milk} ……汚染した牛乳等を摂取することによる内部被曝	$D(x, y)$ ……原子炉災害の発生によって、風下の任意の地点 (x, y) に居る住民の甲状腺が不可避免的に受ける被曝量
D_{egg} ……汚染した鶏卵等を摂取することによる内部被曝	$(x_m, 0)$ ……住民 (標準人) の決定臓器 (甲状腺) の受ける総合的積算被曝量が最大となる地点
f_i ……FP 雲中の i 番核種群の存在比	T_{Δ} ……FP の放出を開始してから住民の避難が完了するまでの時間
ε_i …… i 番核種群の実効エネルギー	T_B ……FP の放出を開始してから放出が終るまでの時間
T_{ei} …… i 番核種群の実効半減期	
τ_1 ……汚染気流を吸入した時点からの経過時間	
S ……大気安定度 (Pasquill の分類に従う) ⁽¹²⁾	
$C_{su}(x, y, 0; t)$ ……地点 $(x, y, 0)$ で時刻 t における FP 濃度	
$q\left(t - \frac{x}{u}\right)$ ……時刻 $t - \frac{x}{u}$ における FP の放出率	
$\chi_s(x, y, 0)$ ……FP 放出率 $1 \text{ Ci}\cdot\text{hr}$ 、風速 $1 \text{ m}\cdot\text{sec}^{-1}$ の場合に、地点 $(x, y, 0)$ における空気中の FP 濃度	

T …… $= \max(T_A, T_B)$, すなわち FP の吸入時間
 A …… 対策レベル (あるいは緊急被曝量に関する許容値)
 \hat{A} …… $= A/T$
 (x_0, y_0) …… 監視所の位置
 w_γ …… γ 線監視所の間隔
 n …… 理想的な γ 線監視網を構成する γ 線監視所の個数
 \hat{w}_γ …… γ 線監視所の把握可能領域の半径
 ϕ …… 監視を必要とする範囲 (原子炉を中心として測った角度領域)
 \hat{w}_c …… ダストモニタを用いた監視所の把握可能領域の半径
 W_i …… i 番監視所の重要度
 φ …… 原子炉を中心、 N 方位を基準線として時計回りに測った方位
 φ_i …… i 番監視所の所在する方位
 d_i …… 原子炉から i 番監視所までの距離
 L_i …… i 番監視所のアラーム・レベル
 $w(A; L_i, d_i, S)$ …… 前記 w_γ および \hat{w}_c の総称として用いるが、関与する変数を明記するためにこのような表示を用いることとする。
 PD …… 集団被曝量の確率的期待値
 $\bar{C}(d_i, \varphi_i; A)$ …… 規模 A なる原子炉災害が起きた場合の i 番地点 (d_i, φ_i) 付近における空気汚染度の確率的平均値
 $\pi(d_i, \varphi_i)$ …… i 番地点 (d_i, φ_i) 付近における人口密度
 $\Gamma(d_i, \varphi_i)$ …… 上記の人口密度算出のさい対象となった地域の面積
 Ω …… 監視システムの性能
 P_i …… 原子炉災害発生時に i 番監視所が故障している確率
 N …… 予算枠の範囲内で設置しうる監視所の数の最大

値

C_{\max} …… 予算上の制約限界値
 C_i …… i 番監視所の購入設置費
 x_i …… i 番監視所 (候補地点) を採択するか否かを示す未知の変数
 $g(x_i)$ …… x_i の値が監視システムの性能に寄与する効果
 M_{\max} …… 予算以外の制約条件を考える場合の制約限界値
 m_i …… 上記の制約条件に関連して i 番監視所のもつ係数
 U …… 監視所の候補地点の数 ($U \geq N$ である)
 C …… 予算残額を示す変数 (動的計画法の場合にのみ使用する)
 λ …… ラグランジュの乗数
 v …… 共用サブシステム (電源系, 中央監視装置等) の種類の数
 $V-v$ …… 監視所のサブシステムの種類の数
 x_{ij} …… i 番監視所の j 番サブシステムの冗長方式の採否を示す未知変数
 $g_{ij}(x_{ij})$ …… x_{ij} の値が監視システムの性能に寄与する効果
 p_{ij} …… i 番監視所の j 番サブシステムが緊急の際に故障している確率
 c_{ij} …… i 番監視所の j 番サブシステムの購入取付の費用
 y_k …… k 番の共用サブシステムの冗長数
 $g_k(y_k)$ …… y_k の値が監視システムの性能に寄与する効果
 P_k …… k 番の共用サブシステムの故障する確率
 d_k …… k 番の共用サブシステムの購入設置の費用
 e …… N 次元の単位行ベクトル
 $f_{NV}(C)$ …… N 次元の列ベクトル
 \hat{x}_{ij} …… 監視システムとして最適に配分した状態における x_{ij} の値

文 献

- 1) TRUBEY D.K.: The single-scattering approximation to the solution of the gamma-ray air-scattering problem. *Nucl. Sci. Eng.* 10, pp. 102~104 (1961)
- 2) U.S. WEATHER BUREAU: METEOROLOGY AND ATOMIC ENERGY, p. 101 (1955)
- 3) BERGER M.J.: Calculation of energy dissipation by gamma radiation near the interface between two media, *J. Appl. Phys.* Vol. 28, pp. 1502~1508 (1957)
- 4) SORON L.R. et al.: Measurement of the scatter component from a kilocurie cobalt-60 source, NYO-2065, p. 6 (1957)
- 5) NAA-AER-1135, Rev. Supplement (1955)
- 6) 角川正義, 石原豊秀: 特殊計算尺による原子炉災害の評価法, *日本原子力学会誌* Vol. 8, No. 7, pp. 361~366 (1966)
- 7) TSUNOKAWA M. and AOKI T.: Calculation of the γ -dose rate distribution from the radioactive cloud in a reactor accident, *J. Atomic Energy Soc. Japan*, 5, No. 2, pp. 110~119 (1962)
- 8) 青木敏男ほか5名: 原子炉事故に伴う汚染気体の放散による被ばく解析と安全評価ならびに放射線障害防止対策について, *JAERI-5003*, pp. 147~166 (1961)
- 9) BEATTIE J.R.: An assessment of environmental hazard from fission product releases, AHSB(S) R 64 (1963)
- 10) IAEA: Environmental monitoring in emergency situations, IAEA SAFETY SERIES No. 18 (1966)
- 11) ICRP: Report of Committee II on permissible dose for internal radiation, ICRP PUBLICATION 2, p. 30 (1959)
- 12) PASQUILL F.: The estimation of the dispersion of wind-borne material, *Met. Mag.*, 90, 33 (1961)
- 13) U.S. AIR FORCE: Fission products field release test-I, AFSWC-TR-59-44 (1959)
- 14) U.S. AIR FORCE: Fission products field release test-II, AFSWC-TR-60-26 (1960)
- 15) 笠井篤, 森内茂, 松下紘三: 東海村周辺のバックグラウンド放射線量の調査, *JAERI-memo* 2240, p. 67 (1966)
- 16) KADOKAWA M.: Studies on the gamma-ray exposures in environment due to an argon-41 cloud from a nuclear reactor, *J. Nucl. Sci. Technol (Tokyo)*. 7, No. 1, pp. 34~40 (1970)
- 17) USAEC: Theoretical possibilities and consequences of major accidents in large nuclear power plants, WASH-740, p. 33 (1957)
- 18-a) 放射線審議会: 放射性物質の大量放出事故に対する応急対策の放射線レベルについて(答申), 昭和42年3月20日
- 18-b) ICRP 専門委員会 IV: 放射性物質の取り扱いに関連する環境モニタリングの諸原則, ICRP Publication 7, (44) 項 (1965年)
- 19) 角川正義, 大内正房: 大気放射能の日変動について(濃度増加時の解析), *JAERI-5006*, pp. 156~159 (1962)
- 20) 角川正義, 大内正房, 佐々木論, 森内茂: わずかの異常を検出するための“放射能管理図”の作成について, *JAERI-5002*, pp. 232~234 (1960)
- 21) 石原豊秀, 角川正義, 佐々木論, 笠井篤, 人見清一, 森内茂, 片桐浩, 松下紘三: 日本原子力研究所(東海村)周辺における環境放射線および放射能の測定と考察, *JAERI-1079* (1965)
- 22) 林隆, 大和田忠明: 東海研究所気象観測年報, *JAERI-memo* 3684 (1969)
- 23) 林隆, 大和田忠明: 大洗研究所気象観測年報, *JAERI-memo* 3562 (1969)
- 24) BELLMAN R.E. and DREYFUS S.E.: Applied dynamic programming (Princeton Univ.) (1962)
- 25) ISHIHARA T.: Environmental radiological monitoring system at nuclear installations, *Health Physics Pergamon Press*, Vol. 13, pp. 549~558 (1967)

APPENDIX 1

監視所候補地点の最適選択問題に関する補足説明

説明の都合上、6.2.2 節に出た式を再掲する。

(制約条件)
$$\sum_{i=1}^U x_i c_i \leq C_{\max} \quad (40)$$

$$\sum_{i=1}^U x_i m_i \leq M_{\max} \quad (41)$$

$$x_i = 0, 1, 2, \dots \text{ (正整数)}$$

(目的関数)
$$\text{Maximize } \left\{ \sum_{i=1}^U W_i g(x_i) \right\} \quad (42)$$

(Bellman の「最適性の原理*」による漸化式)

$$f_U(C_{\max}) = \max_{0 \leq x_U \leq \lfloor \frac{C_{\max}}{C_U} \rfloor} [W_U g(x_U) - \lambda x_U m_U + f_{U-1}(C_{\max} - x_U c_U)] \quad (43)$$

〔補足説明〕

(i) (43)式の計算過程をフローチャートに示したものを Fig. 18 に示す。変数 x_i は 0 から始まり $\lfloor \frac{C_{\max}}{c_i} \rfloor$ (すなわち $\frac{C_{\max}}{c_i}$ を越えない最大整数) までの値をとる。このうち $\alpha(x_i)$ すなわち $W_i g(x_i) - \lambda x_i m_i + f_{i-1}(C - x_i c_i)$ の値を最大ならしめるものを x_i とするが、それが求むる状態 (policy) を表わすことになる。なお (41) 式の制約限界値 M_{\max} は (43) 式の中に明白 (explicit) な形で記載されていないが、このことは、計算の結果得られる $\sum_{i=1}^U x_i m_i$ (フローチャート内では $M_U(C_{\max})$ の値) が式外の判定基準 M_{\max} に等しくなるように試行錯誤的にラグランジュの乗数 λ を見付けてゆく方法であることを意味する。

(ii) 計算方法をさらに具体的に説明するために、簡単な問題についての計算例を TABLE 2~TABLE 4 に示した。ここでは各観測所ごとに重要度 W_i 、購入設置費 c_i および保守管理費 m_i が TABLE 2 の上欄のように異なり、購入設置の予算枠 C_{\max} 、保守管理の予算枠 M_{\max} および観測施設の使命達成率 (稼動を必要とする時に故障である確率) の推定値 P は TABLE 2 の下欄のような場合に、5 個の候補地点の中からどのような選択を行えば最大の効果が得られるかの問題を考えている。5 個程度の候補地点からの選択ならば、わざわざ面倒な計算を施す必要の無いこともあるが、現実には候補地点の数が

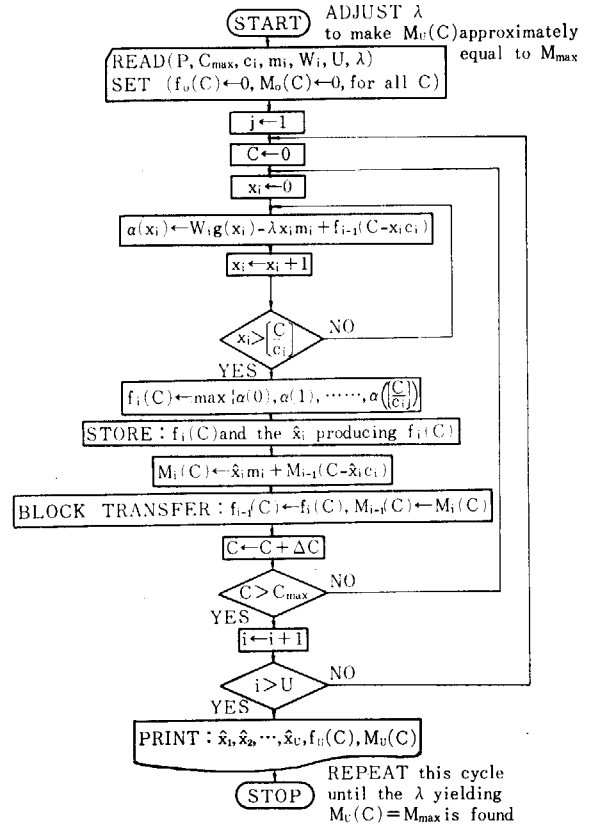


Fig. 18 Flow chart for selecting the optimal monitoring post locations.

TABLE 2 Example input data in the optimal selection problem

Item	Symbol	Value				
No. of proposed sites	i	1	2	3	4	5
Degree of importance	W_i	0.04	0.031	0.12	0.09	0.05
Unit cost of installation	C_i	6	6	8	8	8
Annual expenses of maintenance	m_i	1	0.5	3	2	0.5
Maximum appropriation for installation of the monitoring system	C_{\max}	23				
Maximum annual appropriation for maintenance	M_{\max}	5.5				
Estimated mission unsucces rate of monitoring system	P	0.01				

* Bellman の「最適性の原理」は次のように定義されている⁽²⁴⁾。

The Principle of Optimality: An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision.

もっと沢山あって長所短所が複雑に入り組んでいることが多い。そのような場合に思考の合理化と客観性を保つためには、ここに述べる方法がかなり役立つであろう。なお、この計算例は電子計算機用のテストランニングの資料として使用できる。

TABLE 3 Example calculation in the optimum selection problem ($\lambda=0.01$)

i	C	x_i	和			$x_i c_i$	$C-x_i c_i$	$f_{i-1}(C-x_i c_i)$	$\alpha(x_i)$
			$W_i g(x_i)$	$\lambda x_i m_i$	$W_i g(x_i) - \lambda x_i m_i$				
i = 1 ($w_1=0.04$ $m_1=1$ $c_1=6$)	0-5	0	0	0	0	0	0	0	
	6-11	0	0	0	0	0	0	0	
		1	0.04	0.01	0.03	6	0-5	0	0.03
	12-17	0	0	0	0	0	12-17	0	0
		1	0.04	0.01	0.03	6	6-11	0	0.03
	18-23	2	0.04	0.02	0.02	12	0-5	0	0.02
		0	0	0	0	0	18-23	0	0
1		0.04	0.01	0.03	6	12-17	0	0.03	
	2	0.04	0.02	0.02	12	6-11	0	0.02	
	3	0.04	0.03	0.01	18	0-5	0	0.01	
i = 2 ($w_2=0.031$ $m_2=0.5$ $c_2=6$)	0-5	0	0	0	0	0-5	0	0	
	6-11	0	0	0	0	0	6-11	0.03	0.03
		1	0.031	0.005	0.026	6	0-5	0	0.026
	12-17	0	0	0	0	0	12-17	0.03	0.03
		1	0.031	0.005	0.026	6	6-11	0.03	0.056
	18-23	2	0.031	0.01	0.021	12	0-5	0	0.021
		0	0	0	0	0	18-23	0.03	0.03
1		0.031	0.005	0.026	6	12-17	0.03	0.056	
	2	0.031	0.01	0.021	12	6-11	0.03	0.051	
	3	0.031	0.015	0.016	18	0-5	0	0.016	
i = 3 ($w_3=0.12$ $m_3=3$ $c_3=8$)	0-5	0	0	0	0	0-5	0	0	
	6-7	0	0	0	0	0	6-7	0.03	0.03
	8-11	0	0	0	0	0	8-11	0.03	0.03
		1	0.12	0.03	0.09	8	0-3	0	0.09
	12-15	0	0	0	0	0	12-15	0.056	0.056
		1	0.12	0.03	0.09	8	4-7	0.03	0.12
	16-19	0	0	0	0	0	16-19	0.056	0.056
		1	0.12	0.03	0.09	8	8-11	0.03	0.12
	20-21	2	0.12	0.06	0.06	16	0-3	0	0.06
		0	0	0	0	0	20-21	0.056	0.056
22-23	1	0.12	0.03	0.09	8	12-13	0.056	0.146	
	2	0.12	0.06	0.06	16	4-5	0	0.06	
	0	0	0	0	0	22-23	0.056	0.056	
	1	0.12	0.03	0.09	8	14-15	0.056	0.146	
	2	0.12	0.06	0.06	16	6-7	0.03	0.09	
i = 4 ($w_4=0.09$ $m_4=2$ $c_4=8$)	0-5	0	0	0	0	0-5	0	0	
	6-7	0	0	0	0	0	6-7	0.03	0.03
	8-11	0	0	0	0	0	8-11	0.08	0.08
		1	0.09	0.02	0.07	8	0-3	0	0.07
	12-15	0	0	0	0	0	12-15	0.11	0.11
		1	0.09	0.02	0.07	8	4-7	0.03	0.10
	16-19	0	0	0	0	0	16-19	0.11	0.11
		1	0.09	0.02	0.07	8	8-11	0.08	0.15
	20-21	2	0.09	0.04	0.05	16	0-3	0	0.05
		0	0	0	0	0	20-21	0.146	0.146
22-23	1	0.09	0.02	0.07	8	12-13	0.11	0.18	
	2	0.09	0.04	0.05	16	4-5	0	0.05	
	0	0	0	0	0	22-23	0.146	0.146	
	1	0.09	0.02	0.07	8	14-15	0.12	0.19	
	2	0.09	0.04	0.05	16	6-7	0.03	0.08	
i = 5 ($w_5=0.05$ $m_5=0.5$ $c_5=8$)	0-5	0	0	0	0	0-5	0	0	
	6-7	0	0	0	0	0	6-7	0.03	0.03
	8-11	0	0	0	0	0	8-11	0.08	0.08
		1	0.05	0.005	0.045	8	0-3	0	0.045
	12-15	0	0	0	0	0	12-15	0.11	0.11
		1	0.05	0.005	0.045	8	4-7	0.03	0.075
	16-19	0	0	0	0	0	16-19	0.15	0.15
		1	0.05	0.005	0.045	8	8-11	0.08	0.125
	20-21	2	0.05	0.01	0.04	16	0-3	0	0.04
		0	0	0	0	0	20-21	0.18	0.18
22-23	1	0.05	0.005	0.045	8	12-13	0.11	0.155	
	2	0.05	0.01	0.04	16	4-5	0	0.04	
	0	0	0	0	0	22-23	0.19	0.19	
	1	0.05	0.005	0.045	8	14-15	0.11	0.155	
	2	0.05	0.01	0.04	16	6-7	0.03	0.07	

ブロック転送

x_i の捨り出し

TABLE 4 Example process of calculation of the optimal selection problem

Step	1st trial		2nd trial		Optimum	
λ	0.01		0.03		0.02	
i Policy	\hat{x}_i	$C-\hat{x}_i c_i$	\hat{x}_i	$C-\hat{x}_i c_i$	\hat{x}_i	$C-\hat{x}_i c_i$
5	0	23	1	15	0	23
4	1	15	0	15	1	15
3	1	15	1	7	1	7
2	0	11	1	1	1	1
1	1	(5)	0	(1)	0	(1)
Assessment of expenses of maintenance	$\sum \hat{x}_i m_i = 6 \leq M_{\max}$ (Unfit)		$\sum \hat{x}_i m_i = 5 < M_{\max}$ (Too small)		$\sum \hat{x}_i m_i = 5.5 = M_{\max}$ (Optimum)	
Total return	$\Sigma W_i g(\hat{x}_i) = 0.25$		$\Sigma W_i g(\hat{x}_i) = 0.12$		$\Sigma W_i g(\hat{x}_i) = 0.24$	

TABLE 3 は、 $\lambda=0.01$ とした場合の各段階における $\alpha(x_i)$ を求める方法を示したものである。 $\alpha(x_i)$ の値を i および C の各段階ごとと比較して、最大すなわち $f_i(C)$ となるものを太い数字で示した。この値は次の段の計算表における $f_{i-1}(C-c_i x_i)$ の欄に使用(転送)されることとなるが、このうちの一部分(後述の最適 policy の導出に役立ったもの)に矢印付点線を付した。なお $i=1$ の段では $f_0(C)=0$ の定義により 0 を記入する。このようにして計算を進め $i=5(=U)$ の段まで完了

すると、次は、最適選択の policy すなわち $\{\hat{x}_i\}$ を読みとることを行なう。まず $i=5$, $C=23(=C_{\max})$ の段の中から $f_5(23)=\max(0.19, 0.155, 0.07)=0.19$ を生み出す x_i の値を読みとると 0 を得る。すなわち $\hat{x}_5=0$ となる。次にそのときの $C-\hat{x}_5 c_5$ の値は $23-0 \times 8=23$ であるから、1つ上($i=4$)の $C=23$ に対応する段の中から $f_4(23)$ を生み出す x_i の値を読みとると 1 を得る。すなわち $\hat{x}_4=1$ となる。順次このようにして求めた x_i および $C-\hat{x}_i c_i$ (すなわち次の段で用うる C の値)を TABLE 4 の 1st trial ($\lambda=0.01$) の欄に集録した。ここで得た \hat{x}_i の値を用いて $\sum_{i=1}^5 \hat{x}_i m_i$ の値を試算すると $1 \times 1 + 1 \times 3 + 1 \times 2 = 6$ となり $\sum \hat{x}_i m_i \leq M_{\max}$ の条件を満足しないので、つぎは $\lambda=0.03$ として前(TABLE 3)と同様な計算を行なってみると TABLE 4 の 2nd trial のような結果となる。すなわち $\sum \hat{x}_i m_i < M_{\max}$ となるがまだ若干改良の余地があるように考えられる。このようにして trial and error 的な λ の決定を行なうが、前二者の内挿値として $\lambda=0.02$ をとり前と同様な計算を行なうと TABLE 4 第 3 欄のような結果を得た。査定を行なってみると今度は $\sum \hat{x}_i m_i = 5.5 = M_{\max}$ となり最適解に到達したことになる。したがって最適 policy としては $\hat{x}_2=1$, $\hat{x}_3=1$, $\hat{x}_4=1$ となり、その時の目的関数の値は $\Sigma W_i g(\hat{x}_i) = 0.031 g(1) + 0.12 g(1) + 0.09 g(1) \doteq 0.24$ となる。

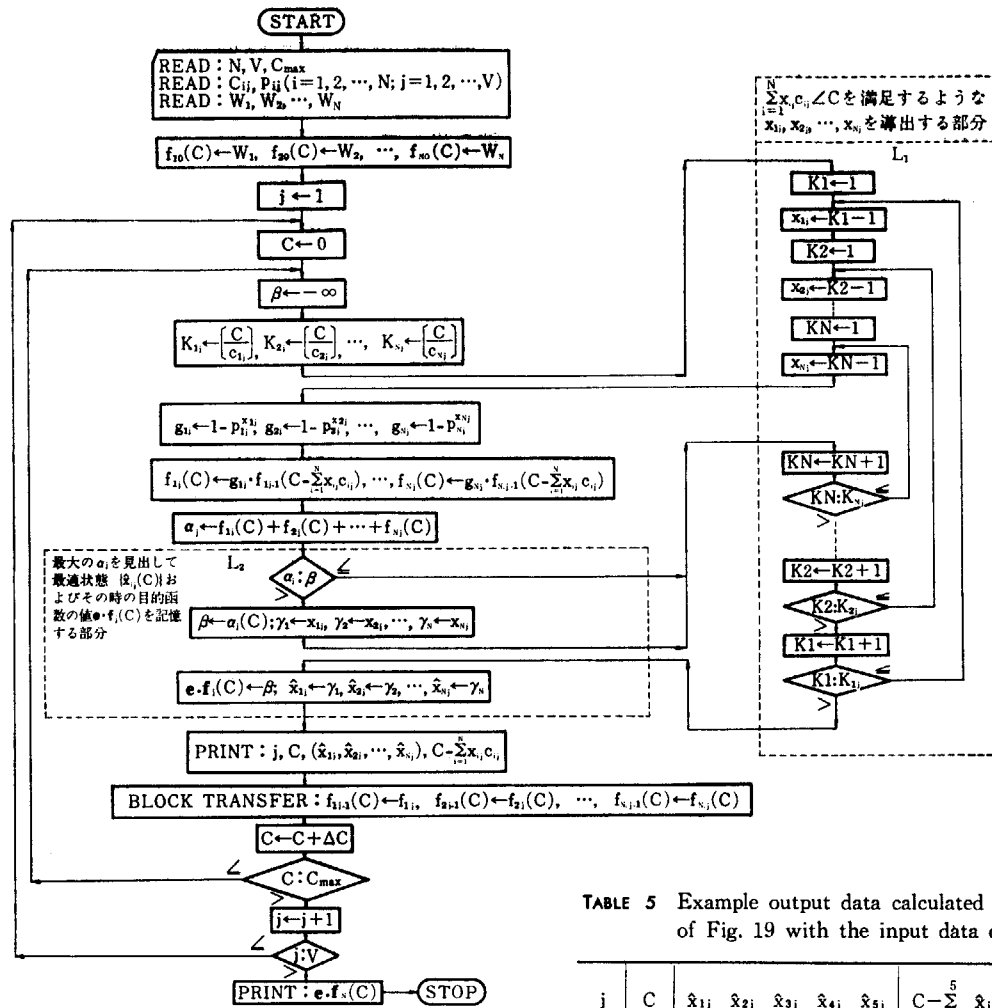


Fig. 19 Flow chart for giving the optimal redundancy in monitoring system

した。(これは前項のフローチャート Fig. 17 における

$$f_i(C) \leftarrow \max \left\{ \alpha(0), \alpha(1), \dots, \alpha \left[\frac{C}{c_{ij}} \right] \right\} \text{ 及び } \text{STORE} :$$

$f_i(C)$ and the \hat{x}_i producing $f_i(C)$ に相当する.)

[システム冗長方式の最適配置法に関する計算例]

いま、一例として、 $N=, v=3$ ($V-v=2, v=1$), $C_{max}=28$ とし、 c_{ij}, P_{ij} および W_j の値は Fig. 20 のような場合について計算した結果の一部を TABLE 5 に示した。

この表には、 j および C を小さな値から大きな値へ ($j:1 \rightarrow V, C:0 \rightarrow C_{max}$) と順次増加してゆく各段階ごとに、フローチャート (Fig. 19) にもとづいて算出した $\hat{x}_{1j}(C), \hat{x}_{2j}(C), \dots, \hat{x}_{Nj}(C)$ の値および、その際の $C - \sum_{i=1}^5 \hat{x}_{ij}(C)c_{ij}$ の値を示してある。また j の最終段階 ($j=V=3$) における $e \cdot f_3(C)$ の値も同表の右下部分に示した。

この表から最適配分の状態 $\{\hat{x}_{ij}\}$ ($i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, V$) を求めるには次の手順に従おう。

- (i) $j=V$ の段階

TABLE 5 Example output data calculated by the method of Fig. 19 with the input data of Fig. 20

j	C	\hat{x}_{1j}	\hat{x}_{2j}	\hat{x}_{3j}	\hat{x}_{4j}	\hat{x}_{5j}	$C - \sum_{i=1}^5 \hat{x}_{ij} c_{ij}$	$e \cdot f_3(C)$
1	0	0	0	0	0	0	0	
	1	0	0	1	0	0	0	
	2	0	0	1	1	0	0	
	3	0	0	1	1	0	0	
	4	0	0	1	1	0	0	
	5	0	0	1	1	0	0	
	6	0	0	1	1	0	0	
	7	0	0	1	1	0	0	
	8	0	0	1	1	0	0	
	9	0	0	1	1	0	0	
10	0	1	0	1	1	1	0	
11	1	1	0	1	1	1	1	
12	2	1	1	1	1	1	2	
13	3	1	1	1	1	1	3	
14	4	1	1	1	1	1	4	
15	5	1	1	1	1	1	5	
16	6	1	1	1	1	1	6	
17	7	1	1	1	1	1	7	
18	8	1	1	1	1	1	8	
19	9	1	1	1	1	1	9	
20	10	1	1	1	1	1	10	
21	11	1	1	1	1	1	11	
22	12	1	1	1	1	1	12	
23	13	1	1	1	1	1	13	
24	14	1	1	1	1	1	14	
25	15	1	1	1	1	1	15	
26	16	1	1	1	1	1	16	
27	17	1	1	1	1	1	17	
28	18	1	1	1	1	1	18	
29	19	1	1	1	1	1	19	
30	20	1	1	1	1	1	20	
31	21	1	1	1	1	1	21	0.99985
32	22	1	1	1	1	1	22	0.99988
33	23	1	1	1	1	1	23	0.99998

Result of selection :

$$\hat{x}_{11}=1, \hat{x}_{21}=0, \hat{x}_{31}=1, \hat{x}_{41}=1, \hat{x}_{51}=1, \hat{x}_{12}=1, \hat{x}_{22}=1, \hat{x}_{32}=1, \hat{x}_{42}=1, \hat{x}_{52}=0, \hat{y}_3=1$$

$$e \cdot f_3(28) = 0.99998$$

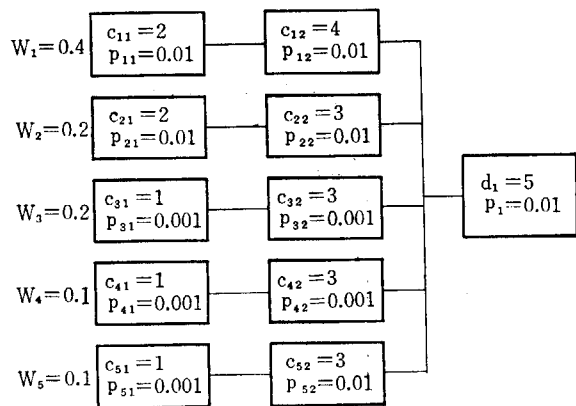


Fig. 20 Example input data for the optimal redundancy in a monitoring system.
 $N=5, V=3 (V-v=2, v=1), C_{max}=28$

同表の $j=3(=V), C=28 (=C_{max})$ に対応する値として $\hat{x}_{i3}(=\hat{y}_3)=1, C-\sum_{i=1}^5 \hat{x}_{i3}c_{i3}=23$ を得る。

(ii) $j=V-1$ の段階

同表の $j=2(=V-1)$ の欄の中から、前段で得た値 23 ($=C-\sum_{i=1}^5 \hat{x}_{i3}c_{i3}$) を参考として、 $C=23$ に対応する行を読み出して

$$\hat{x}_{12}=1, \hat{x}_{22}=1, \hat{x}_{32}=1, \hat{x}_{42}=1, \hat{x}_{52}=0, \text{ ならびに}$$

$$C-\sum_{i=1}^5 \hat{x}_{i2}c_{i2}=10$$

を得る。

(iii) $j=1$ の段階

同表の $j=1$ の欄の中から、前段で得た $C-\sum_{i=1}^5 \hat{x}_{i2}c_{i2}=10$ を参考として、 $C=10$ に対応する行を読み出して $\hat{x}_{11}=1, \hat{x}_{21}=0, \hat{x}_{31}=1, \hat{x}_{41}=1, \hat{x}_{51}=1$ を得る。

なお、最適状態における目的関数の値は、同表右下の欄の中から $j=3(=V), C=23(=C_{max})$ に対応する値として $e \cdot f_3(13)=0.99998$ を得る。