

汚染雲からの吸収線量を計算するためのコードおよび原子力船のための数値計算例

佐藤 健一郎* 伊藤 泰義*
伊 従 功* 山路 昭雄**

A Program for Computing External Dose Rate from a Radioactive Cloud and Numerical Examples for Nuclear Ships

by

Ken'ichirō Sato, Yasuyoshi Ito,
Isao Iyori and Akio Yamaji

A program for calculating the external dose rate from a radioactive cloud was written in 06 NARC language (analogous to FORTRAN). The basic equation used for the atmospheric dispersion is equivalent to the so-called generalized Gaussian plume formula with the stack and the inversion lid modifications. The numerical integration was performed using the Legendre-Gauss quadrature technique together with the polar coordinate system developed by D. S. Duncan. The time required for the integration was found around forty minutes on the NEAC-2206 computer.

The typical results from the program are shown in graphical form putting emphasis on the safety of the persons in the vicinity of a nuclear ship. To help the discussion, the results from the usual method of evaluation based on the assumption of infinitely spread cloud are also presented. Thus, the great safety factors involved in the conventional analysis are easily estimated as functions of downwind distance. For example, the actual finite cloud dose for the meteorological category F is lower than that computed for the infinite cloud by a factor of approximately 70 at 100m downwind distance, and by a factor of approximately 2 even as far from the stack as 10 km. Another important result of the calculation is the remarkable discrepancy between the isodose and the isoconcentration lines at distances close to the stack. It must be remembered, however, that the basic equation for the region extremely close to the stack is not yet well established, so the analysis for the region was made by extrapolating the available data. For this reason, the results may be considered as a measure for estimating the safety factors involved in the conventional analysis.

汚染雲による外部被曝線量を計算するための計算コードを06 NARC語で書いた。大気拡散の基本方程式は一般化したガウス分布とし、煙突(スタック)と逆転層の効果も計算できるようになっている。D.S.Duncan

に従って、ルジャンドルーガウスの数値積分法と極座標を導入したが、計算の所要時間は約40分になった。

数値計算例としては船の近くにいる人の安全に重点を置くことにし、計算結果をグラフで示した。比較のため、無限に広がった雲を仮定する従来の計算法から得られた計算結果も示されている。こうして従来の計

* 原子力船部 ** 東海支所

算法に含まれている大きな安全係数を容易に評価できるようにした。

予想された通り等吸収線量線と等濃度線のずれは特に煙突に近接した領域で著しい。しかしながら、この領域の解析はこの領域外で得られた観測結果を単に外挿して行なったものであることに留意する必要がある。

1. はじめに

原子炉事故時に周辺環境の安全性を評価する場合には、原子炉施設から放出された核分裂生成物の大気拡散によって出来る雲からの直接被曝と、吸入による被曝、地面に沈着したものによる被曝は主に希ガスによる全身被曝が重要であり、吸入による被曝は主として汚染による甲状腺被曝が問題である。その何れがより重大な障害を与えるかは状況によって異なるが、原子力船に於いて仮想される重大事故では、蓄積されていた核分裂生成物は、大気に放出される前に汚染を吸収するフィルターを通るとするのが普通である。従って原子力船の事故の場合に、周辺環境の安全を確保する距離を算定する因子の中で雲からの被曝が支配的となることが多い。しかるに雲からの直接被曝のこれまでの略算法では、着目する地点での核分裂生成物の濃度の雲が地上から無限に様に拡がっているものとして線量を出している。これでは英国気象庁方式又はSuttonの方式で拡散するとした場合に比較して、放出源の近くで数十倍、遠くで数倍大きく算出されると言われている。原子力船が人口稠密地帯により接近し得ることを示す為には、雲による直接被曝を正確に計算せねばならない。

又、一般に原子炉の平常運転時の周辺環境の安全確保には、放射性ガスの放出に関する管理が最も重要である。この場合放出許容量を今までの略算法で計算すると、不当に大きな線量となり、出力を制限するか、ガス貯蔵装置を大きくするか、管理区域を過大にとるかすることになる。又燃料再処理施設に於ては取扱う核分裂生成物の量は非常に多量となり、恐らく1ヶ所の施設の容量は放出ガス量の推定から制限を受けることとなるであろう。

これらの事項は放出された放射性核分裂生成物が有限な範囲に拡散されるとして被曝線量を計算せねばならない事を示唆している。電子計算機の使用が容易になった現在、大型計算機用のこの種の計算コードは既に発表されているが、当所に於ても NEAC-2206 用の計算コードを作製し上述の目的に使用することとし

た。

2. 放射性雲による γ 線被曝線量率

2.1 線量率及び濃度について

大きな拡がりを持つ雲からの被曝の場合には、 γ 線被曝に対して β 線被曝は省略出来る。エネルギー E [MeV]なる γ 線束 ϕ [$\text{m}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$]による組織の吸収線量率 D_A [rad/hr]は、組織の質量エネルギー吸収係数を $(\mu_a/\rho)_{\text{tissue}}$ [$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$]とすると、

$$D_A = \frac{1.6 \times 10^{-6}}{100} \times 3600 \times \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tissue}} \times \phi \times E \quad (2-1)$$

照射線量率 D_E [röntgen/hr]は、 $(\mu_a/\rho)_{\text{air}}$ [m^2g^{-1}]を空気の質量エネルギー吸収係数とすると、

$$D_E = \frac{1.60 \times 10^{-6}}{87.7} \times \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{air}} \times \phi \times E \quad (2-2)$$

又或る地点 (X, Y, Z) での濃度を C [curie/ m^3]とすると、観測点 (x, y, z) での γ 線束 $\phi(x, y, z)$ は、

$$\phi = 3.70 \times 10^{10} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} \cdot B(\mu r) \cdot C(X, Y, Z) dXdYdZ \quad (2-3)$$

ここで $B(\mu r)$ は再生係数で、

$$B(\mu r) = 1 + \mu r + \frac{(\mu r)^2}{7E^{2.4}}, \quad (0.5 \leq E \leq 2.0) \quad (2-4)$$

μ [m^{-1}]は空気の線吸収係数。

$$r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2 + (z-Z)^2}$$

(2-3)式を(2-1)式、(2-2)式に代入すると、吸収線量率 D_A [rad/hr]と照射線量率 D_E [röntgen/hr]はそれぞれ下記の様になる。

$$D_A = \frac{1.60 \times 10^{-6}}{100} \times 3600 \times 3.7 \times 10^{10} \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{tissue}} E \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \cdot C(X, Y, Z) dXdYdZ \quad (2-5)$$

$$D_E = \frac{1.60 \times 10^{-6}}{87.7} \times 3600 \times 3.7 \times 10^{10} \left(\frac{\mu_a}{\rho} \right)_{\text{air}} E \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \cdot C(X, Y, Z) dXdYdZ \quad (2-6)$$

英国気象庁方式による拡散式では、風向の平均の方向に X 軸、垂直上方に Z 軸、 $X-Z$ 平面に垂直に Y

軸をとり、地表放出源と同じ位置に座標の原点をとり、 Q Curie/hr の放出がある場合、単位を次の様にとると、

- C : 濃度 Curie/m³
- X, Y, Z : m
- u : 平均風速 m/sec
- h : 拡散高度 (煙源から風下距離 X (m) に於ける濃度 $C(X, 0, 0)$ の 1/10 の濃度になる高さ) m
- θ : 拡散角 (煙源から風下距離 X (m) に於ける濃度 $C(X, 0, 0)$ の 1/10 の濃度をもつ Y 軸上の点 y_0 に対して原点から張る角度の 2 倍) deg

$$y_0 : X \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2} \times \frac{\pi}{180}\right)$$

地点 (X, Y, Z) に於ける濃度 C は、

$$C = \frac{4.65 \times 10^{-2}}{u \cdot \theta \cdot h \cdot X} \exp\left\{-\left(\frac{Y}{y_0}\right)^2 \ln 10 - \left(\frac{Z}{h}\right)^2 \ln 10\right\} \cdot Q \quad (2-7)$$

で与えられる (Fig. 1)。

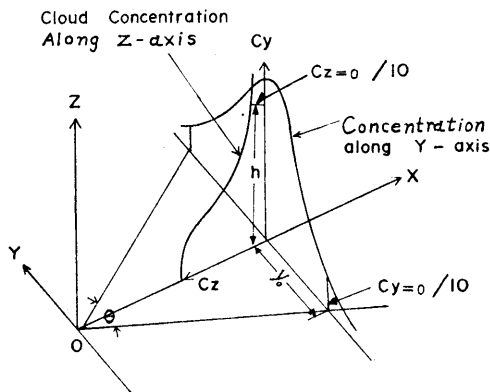


Fig. 1 Definition of h, y_0, θ , etc.

一般に放出源が高さ H m のときは、

$$C = \frac{1}{2} \times \frac{4.65 \times 10^{-2}}{u \cdot \theta \cdot h \cdot X} \left[\exp\left\{-\left(\frac{Y}{y_0}\right)^2 \ln 10 - \left(\frac{Z-H}{h}\right)^2 \ln 10\right\} + \exp\left\{-\left(\frac{Y}{y_0}\right)^2 \ln 10 - \left(\frac{Z+H}{h}\right)^2 \ln 10\right\} \right] Q \quad (2-8)$$

とした。

2. 2 濃度積分について

i) 地表面からの反射を含まない場合

地表面からの反射を考えなければ、 $Y-Z$ 面上での等濃度の曲線は楕円となる。 Y, Z に関する積分をこの楕円に沿って行なうことにする。係数を K と置いて線量率の式を円筒座標に変換すると次式になる。(Fig. 2, 3)。

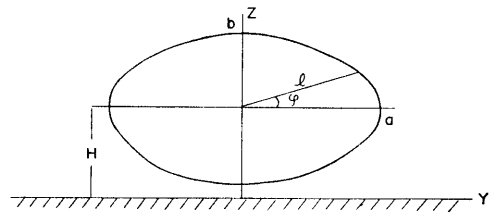


Fig. 2 Cross Section of Cloud and Definition of a, b, l , and ϕ

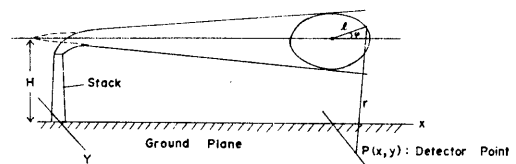


Fig. 3 Geometry of Cloud

$$D(x, y, z) = K \cdot \frac{\mu_a}{\rho} E \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-\mu r} B(\mu r)}{4\pi r^2} C(X, l, \phi) l \cdot d\phi dl dX = K \cdot \frac{\mu_a}{\rho} E \int_0^\infty I(x, y, z, X) dX \quad (2-9)$$

但し、

$$I(x, y, z, X) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\mu r} B(\mu r)}{4\pi r^2} C(X, l, \phi) l d\phi dl \quad (2-10)$$

μ_a はエネルギー吸収係数 (m^{-1}) である。

楕円の形を

$$\left(\frac{Y}{a}\right)^2 + \left(\frac{Z-H}{b}\right)^2 = 1$$

とすると、等濃度楕円となる為には

$$b = a \frac{h}{y_0}$$

又、 $Y = l \cos \phi$

$$Z - H = l \sin \phi$$

であるから、

$$l = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{a^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{b^2}}} = \frac{a}{y_0 \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2}}} \quad (2-11)$$

積分を l から $\varphi=0$ のときの l , 即ち a に沿って行なうように $I(x, y, z, X)$ を変換する。

即ち,

$$\begin{aligned} I(x, y, z, X) &= \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\mu r} B(\mu r)}{4\pi r^2} \\ &\quad \cdot C(X, l, \varphi) \frac{ad\varphi da}{y_0^2 \left(\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2} \right)} \\ &= \int_0^\infty C(X, a, 0) \\ &\quad \int_0^{2\pi} \frac{e^{-\mu r} B(\mu r) ad\varphi da}{4\pi r^2 \cdot y_0^2 \left(\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2} \right)} \end{aligned} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(x-X)^2 + (y-l \cos \varphi)^2 + (z-l \sin \varphi)^2} \\ &= \sqrt{(x-X)^2 + \left(y - \frac{a \cos \varphi}{y_0 \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2}}} \right)^2} \\ &\quad + \left(z - \frac{a \sin \varphi}{y_0 \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2}}} \right)^2 \end{aligned}$$

ii) 地表面反射と逆転層反射を含む場合
地表面で完全反射し、逆転層がないと仮定すると、

$$Z = |H + l \sin \varphi| \quad (2-13)$$

逆転層があり、逆転層で濃度は完全反射と仮定すると、逆転層の高さを H' (m) と置けば

$$Z = H' \left[\sin \frac{[n]\pi}{2} + (-1)^{[n]} (n - [n]) \right] \quad (2-14)$$

ここで

$$n = \frac{|H + l \sin \varphi|}{H'}$$

$[n]$ はガウス記号で n を越えない最大の整数。

Z を上述の様に置く事によって一般に地表面反射と逆転層反射がある場合にも (2-12) 式の等濃度楕円積分が使えることになる。

故に等濃度楕円積分は次式になる。

$$\begin{aligned} I(x, y, z, X) &= \frac{1}{2} \cdot \frac{4.65 \times 10^{-2}}{h \cdot \theta \cdot h \cdot X} \int_0^\infty \exp \left\{ - \left(\frac{a}{y_0} \right)^2 \ln 10 \right\} \cdot a \cdot \end{aligned}$$

$$\int_0^{2\pi} \frac{e^{-\mu r} B(\mu r) d\varphi da}{4\pi r^2 y_0^2 \left(\frac{\cos^2 \varphi}{y_0^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{h^2} \right)} \quad (2-15)$$

3. 積分方法

式 (2-15) の数値積分にはルジャンドルガウスの数値積分を用いた。このルジャンドルガウス法の長所は少ないメッシュ数で精度の良い結果が得られる事である。

ルジャンドルガウスの式は積分をある多項式で近似するもので

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{2} \sum_{i=1}^m f \left\{ \frac{(b-a)g_i + (b+a)}{2} \right\} A_i$$

で表わされ、 g_i はルジャンドル多項式 $P_n(g)$ の i 番目の根である。

また A_i は

$$A_i = \frac{2(1-g_i^2)}{(m+1)^2 [P_{m+1}(g_i)]^2} \quad m: \text{メッシュ数}$$

これらの g_i と A_i の値は $2 \leq m \leq 16$ にわたって A.N.Lowan 等によって計算され表にされている。我々は10点法を使用した。

4. プログラムの説明とコード使用法

4.1 フローチャート

(次頁のとおり)

4.2 計算条件とその入力について

イ) 放出点

地上、煙突放散のいずれでも与えることが出来る。

入力

i) 実際のな煙源の高さ 単位 m

ロ) 線源のエネルギー組

平均エネルギーを与える。

入力

i) 線源の平均エネルギー 単位 MeV

ハ) 拡散式及び気象条件

英国気象庁方式使用。線源は連続放出源。気象安定度、風速は入力で与え、逆転層のある場合も計算出来る。

入力

i) 気象安定度 A, B, C, D, E, F をそれぞれ 1, 2, 3, 4, 5, 6 として与える。

ii) 風速 平均の風速を入れる。単位 m/sec

iii) 逆転層の高さ 単位 m

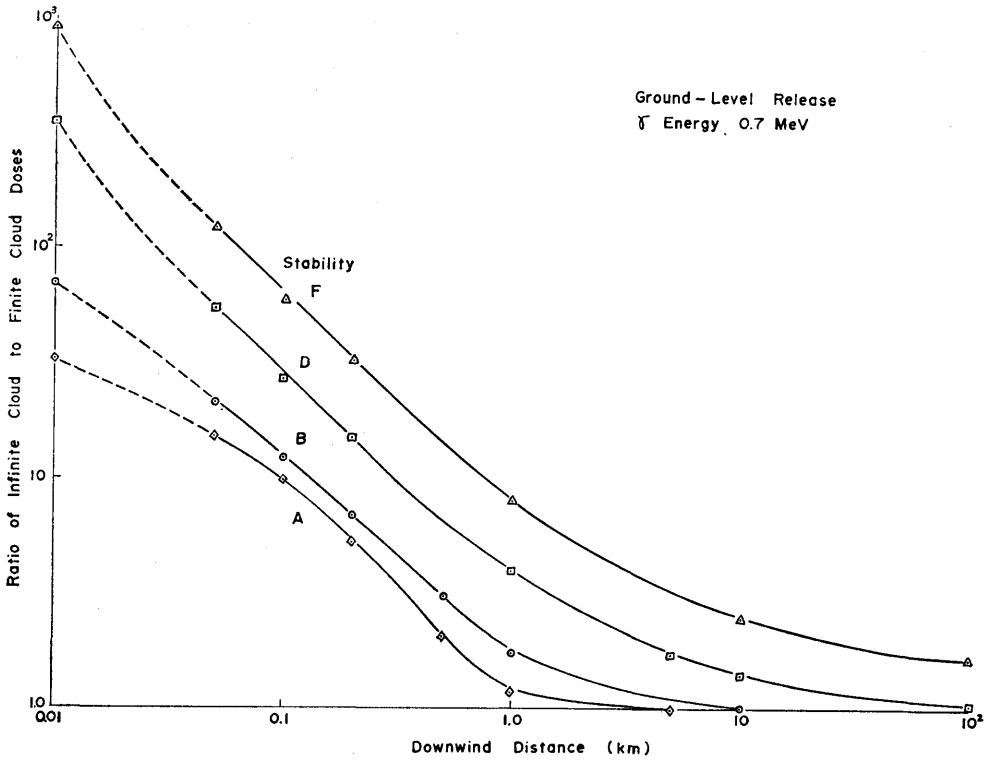


Fig. 4 Ratio of Infinite Cloud to Finite Cloud Doses

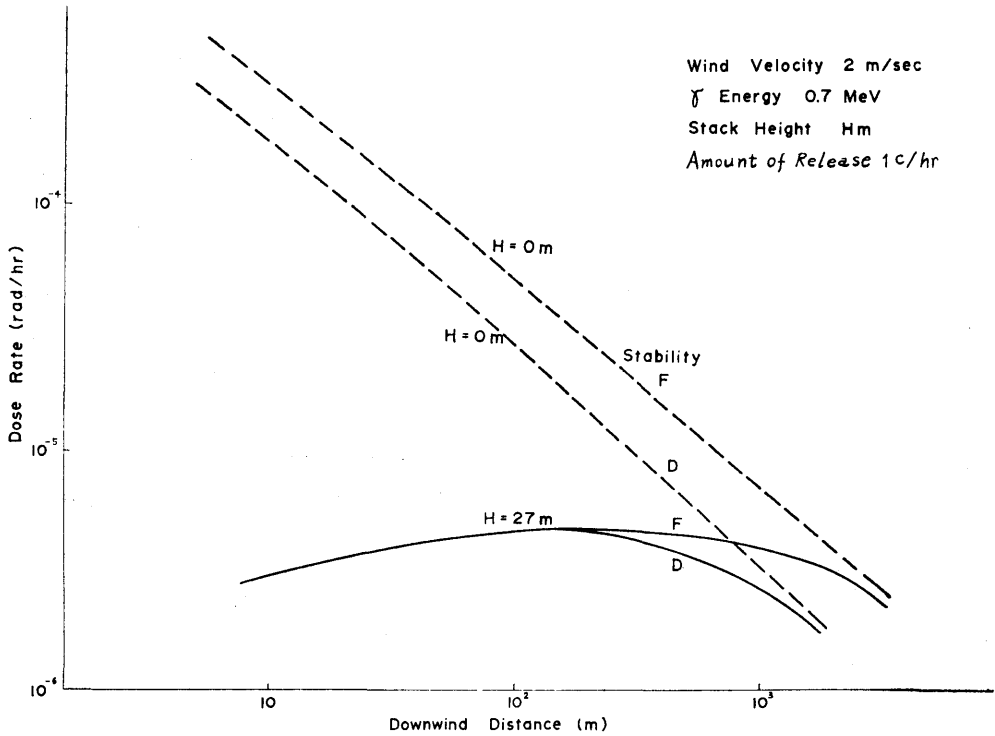


Fig. 5 Doses for Ground-Level Release and 27m High Stack Release

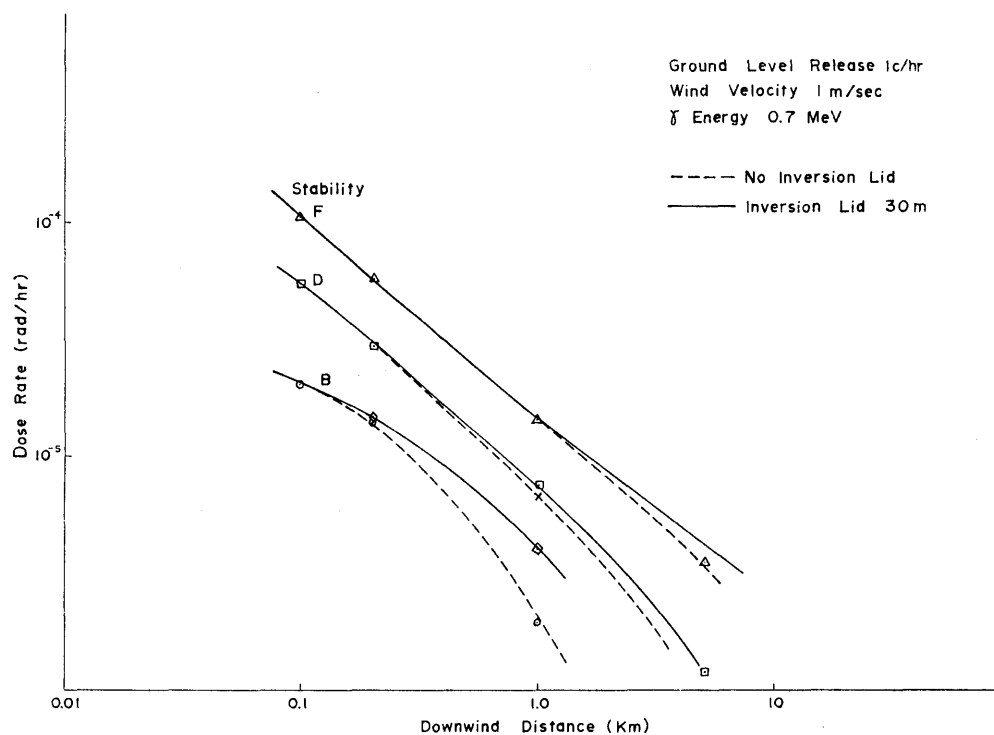


Fig. 6 Effect of Inversion Lid on Dose Rate

ッシュ数を取った場合である事が解ったので、観測点の風上と風下を次に述べるような数領域に分けて積分させる事にした。観測点に最も近い領域（風上と風下に一個づつ）の幅は、この幅からの寄与が全領域積分値の50~60%になるようにとる。こうすると二番目の領域までの積分値は、大抵の場合全領域積分値の99%にする事が出来る。

7. 数値計算例

原子力船の安全解析の参考にするため、数値計算を行なったので、以下その結果を述べる。

7.1 無限の拡がりを持つ雲による吸収線量との比較

(2)~(5)式の $C(X, Y, Z)$ に $C(x, 0, 0)$ を代入して積分した値を D_{∞} と書き、 D_{∞}/D_A をグラフに示すと Fig. 4 のようになる。このように無限の拡がりをもつ雲を仮定すると、吸収線量はF型安定度の場合、風下50mで実際の値の100倍、1kmで約10倍、10kmで約2倍になる事がわかる。

7.2 煙源高の影響

Fig. 5 に煙源高の影響を示す。煙源の高さは0mと

27mの2通り、安定度はD型とF型の2通りをとった。図によると風下2km以遠では、地表面放出と高さ27mの煙突からの放出は大体同じになることがわかる。なお、煙突の近くでは吸収線量は無限の拡がりを持つ雲を仮定する計算法から予想される程には減少しない。これは、煙突の足下では放射能の濃度は殆んどゼロであっても、上空の雲からの照射があるためと考えられる。

7.3 逆転層の影響

F型の場合には上空へ向う拡散が小さいので、逆転層は通常問題にならない。高さ30mという異常に低い逆転層を仮定しても、その影響は、F型の場合でも、風下数km先でないとい現われない。(Fig. 6)

7.4 γ 線のエネルギー(E)の影響

γ 線のエネルギーを変えて計算すると Fig. 7 のようになる。なお近似式

$$B(\mu r) = 1 + \mu r + \frac{(\mu r)^2}{7E^{2.4}}$$

が成立つためには、 $0.5 \leq E \leq 2.0$ MeV でなければならない。

7.5 等吸収線量率線

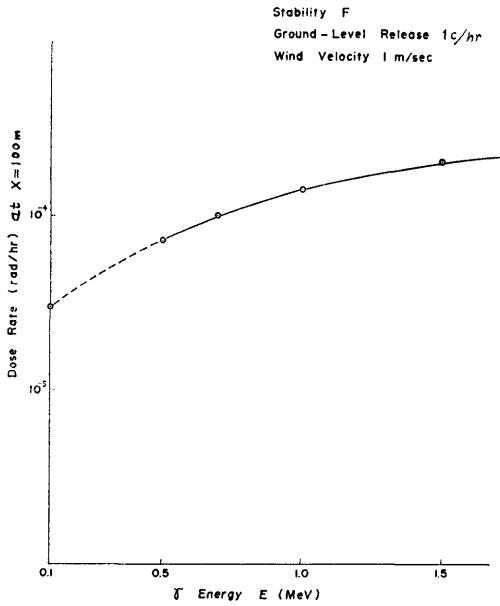


Fig. 7 Effect of γ Energy on Dose Rate at $X=100m$

Fig. 8は、吸収線量率の等しい地点を結んで描いたものである。比較のため、従来用いられている等濃度曲線を点線でかき、図上に重ねてある。両者は風下の遠い所ではほぼ一致しているが、発煙点の近くではかなりずれていることがわかる。Fig. 9は等吸収線量率線に囲まれた面積とこの線上の吸収線量率との関係を示す。比較のため等濃度線に囲まれた面積と線上吸収線量（無限の拡がりをもつ雲を仮定して計算した値）の関係を点線で描き図に重ねてある。また近似計算のためには、等吸収線量率線をこれと風下中心線上で接する等濃度線を用いることができよう。

Fig. 9の一点破線はこの近似から得られたものである。図からわかるように、風下中心線を300m以遠で横切る等吸収線量に対しては、近似計算の結果に係数2を掛ければ安全側のよい近似値が得られる。

参考文献

Duncan D.S., CLOUD-An IBM 7090 Program for Computing Gamma-Ray Dose Rate from a Radioactive Cloud, NAA-SR-MEMO-4822.

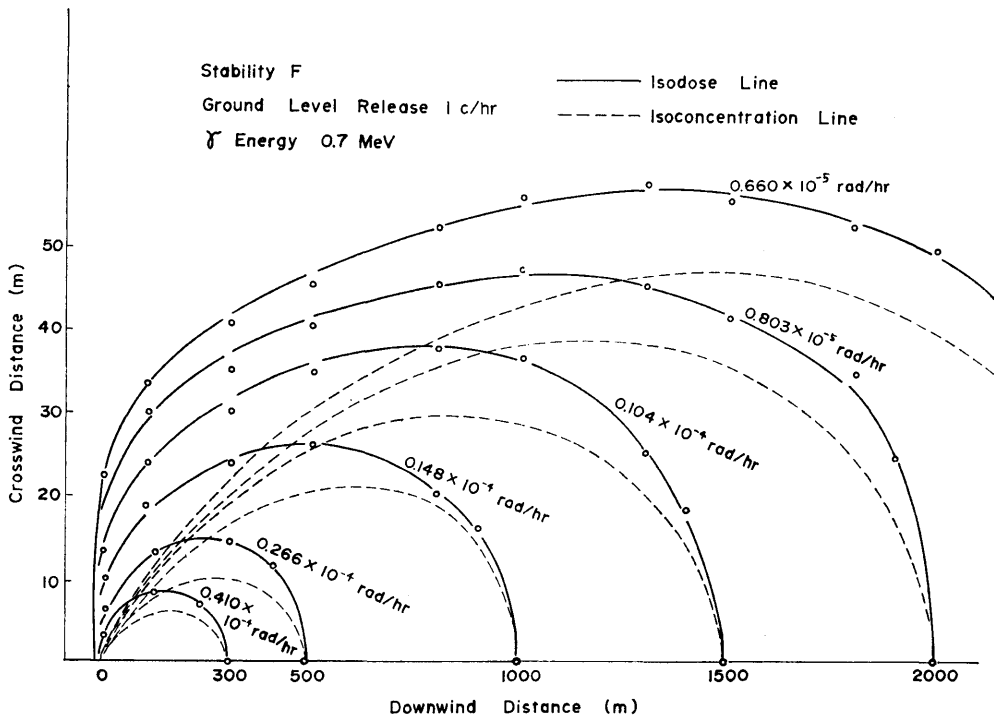


Fig. 8 Comparison of Isodose Line and Isoconcentration Line

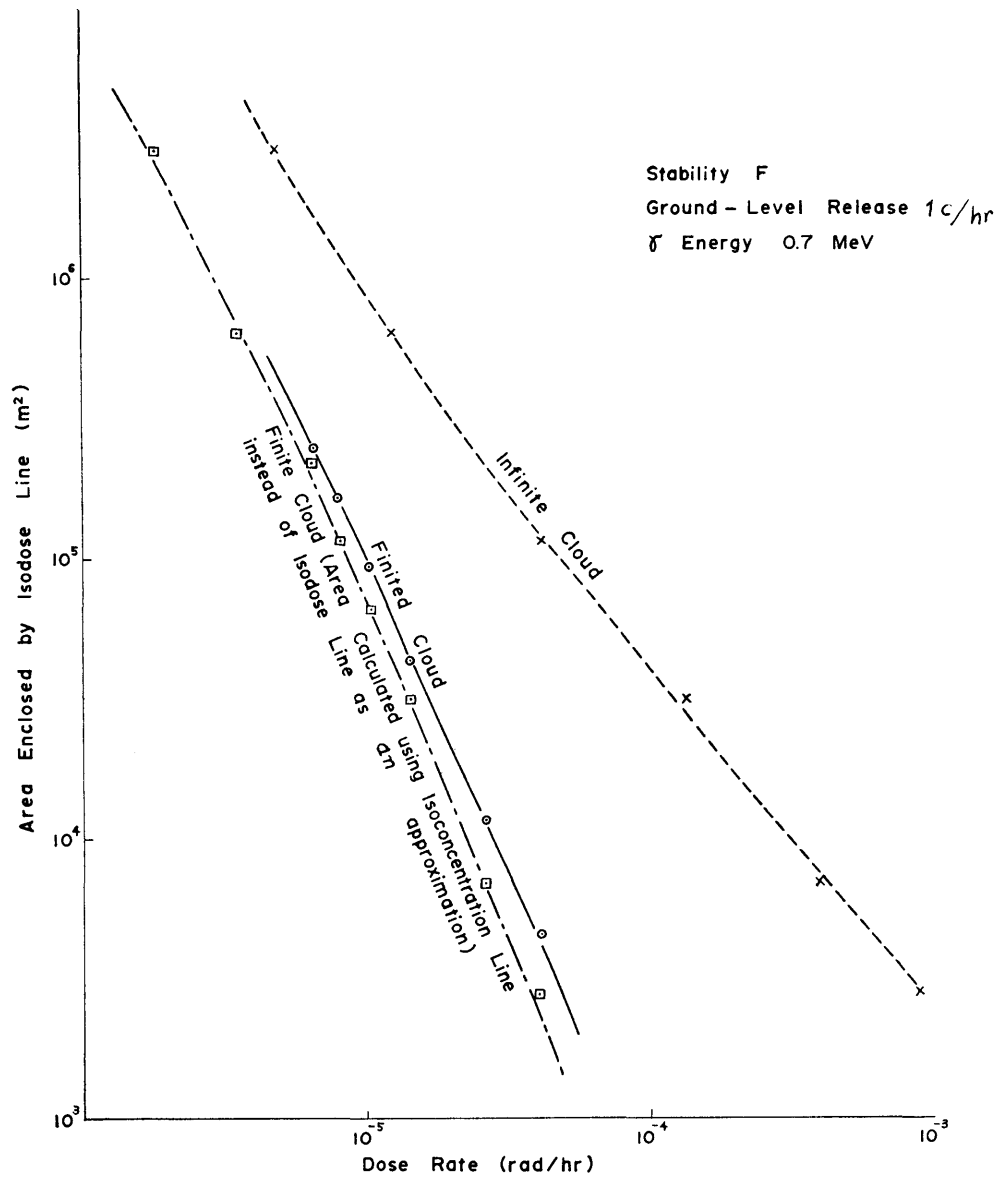


Fig. 9 Values of the Area Enclosed by an Isodose Line