

JAERI-M  
83-098

パフモデル及び粒子拡散モデルによる  
主蒸気管破断事故時の被曝線量評価法

1983年7月

茅 野 政 道

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）  
あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城  
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Section, Division  
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,  
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1983

---

編集兼発行 日本原子力研究所  
印刷 山田軽印刷所

パフモデル及び粒子拡散モデルによる主蒸気管破断事故時の被曝線量評価法

日本原子力研究所東海研究所環境安全研究部

茅野 政道

(1983年6月3日受理)

沸騰水型原子炉 (BWR) の運転中何らかの原因により、主蒸気管が破断した場合には、破断口から冷却材の流出が起こり、核分裂生成物が直接発電所敷地周辺へ放出される可能性がある。BWRの建設にあたっては、この事故を重大及び仮想事故の一つとして、安全評価を行っている。ここで、主蒸気管隔離弁閉鎖前に破断口から放出される核分裂生成物による被曝評価は、半球モデルとよばれる簡単な大気中移行モデルが用いられているが、このモデルの結果は場合によりかなり過大評価になる。ここでは、より現実的なモデルとして、流出蒸気の浮上、拡散を考慮したパフモデルと粒子拡散モデルを用いた評価法について検討した。

Dose Evaluation Method for the Main Steam Pipe  
Rupture Accident by Puff and Particle-diffusion Models

Masamichi CHINO

Department of Environmental Safety Research,  
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received June 3, 1983)

In case that the main steam pipe rupture accident happens in operating a boiling water reactor, there is a fear that fission products are released in the environment because of outflow of coolant from the ruptured pipe.

When the construction of a boiling water reactor is planned, this accident is listed as one of postulated accidents in licensing review of nuclear facilities and safety analysis must be done.

The external dose and thyroid dose, caused by the fission products disposed before the close of isolation valves, are evaluated by the simple transport model, called hemisphere model. But, the results computed by this model are overestimated extremely in some conditions.

So, we developed more realistic two evaluation codes, based on puff model and particle-diffusion model. These codes can simulate radioactive cloud's buoyancy and dispersion and have a simple external dose evaluation model.

Keywords : Steam Pipe, Rupture, Reactor Accident, Boiling Water Reactor,  
Safety Analysis, External Dose, Thyroid Dose, Hemisphere Model,  
Puff Model, Particle-diffusion Model, Dose Evaluation

## 目 次

1. まえがき	1
2. 主蒸気管破断事故の概要	1
2.1 事故の仮定	1
2.2 従来の被曝線量評価	2
3. 被曝線量評価モデル	4
3.1 半球モデル	4
3.2 パフモデル	5
3.3 粒子拡散モデル	7
4. 計算結果	10
4.1 評価モデルの検証	10
4.2 各モデルの結果の比較	10
5. パフモデルと粒子拡散モデルによる安全評価法	17
6. 結 論	20
謝 辞	20
参考文献	21

## CONTENTS

1. Introduction .....	1
2. General Discription of the Main Steam Pipe Rupture Accident (MSPRA) .....	1
2.1 Assumption of MSPRA Accident .....	1
2.2 The Common Method of Dose Evaluation .....	2
3. Dose Evaluation Models .....	4
3.1 Hemisphere Model .....	4
3.2 Puff Model .....	5
3.3 Particle-Diffusion Model .....	7
4. Calculated Results .....	10
4.1 Verification of Each Model .....	10
4.2 Comparison of Some Results Computed by Each Model.....	10
5. The Method of Safety Analysis by the Puff and Particle-Diffusion Models..	17
6. Disccusion .....	20
Acknowledgements .....	20
Literature Cited .....	21

# 1. ま え が き

沸騰水型原子炉（BWR）の運転中、何らかの原因により、主蒸気管が破断した場合には、破断口から冷却材の流出が起これり、核分裂生成物が直接発電所敷地周辺の環境に放出される可能性がある。

「原子炉立地審査指針」によれば、原子炉立地にあたっては、重大事故<sup>\*</sup>及び仮想事故<sup>\*\*</sup>を想定して、敷地境界外での被曝線量を求め、同指針に記載されためやす線量との比較により立地条件の適否を判断することになっているが、BWRの場合、この想定事故の一つとして主蒸気管破断事故があげられる。主蒸気管破断事故の被曝線量評価は、現象を主蒸気隔離弁閉鎖前の瞬時放出と閉鎖後の漏えい放出に分け、閉鎖前は半球モデル、閉鎖後はいわゆるガウス・ブルームモデルを用いて行なっている。半球モデルは、拡散を考慮しておらず、明らかに過大評価モデルであり安全評価上問題はないが、放出及び気象条件によってはかなり過大評価となる。

本報告では、隔離弁閉鎖前の評価法に着目して、より現実的モデルとして、環境中での拡散を考慮したパフモデルとランダム・ウォーク法を用いた粒子拡散モデルを検討した。本モデルでは、放出蒸気雲の熱による上昇も考慮されている。また、本コードでは、外部被曝線量の計算で行われる空間積分をモンテカルロ法で行ない計算時間の短縮を行なっている。

なお、本研究は、（財）原子力安全研究協会の原子力気象調査専門委員会評価分科会における昭和57年度の作業の一環として行なったものである。

## 2. 主蒸気管破断事故の概要

### 2.1 事故の仮定

主蒸気管破断事故は、格納容器外で主蒸気管が破断して、破断口から冷却材が流出する事故であり、核分裂生成物が環境へ放出される可能性がある。主蒸気管破断事故のうち、冷却材流量が最大となるのは主蒸気管が瞬時に完全破断する場合である。主蒸気管の完全破断は、種々の安全対策からみて、實際上まづ起こらないと考えられるが、最悪の場合を考えこのような瞬時の完全破断を仮定している。主蒸気管が破断すると主蒸気隔離弁は、数秒で閉鎖され、冷却材の流出は一応停止するが、原子炉の圧力に応じて漏えいが継続するものとする。破断口から放出された冷却材（水と蒸気の2相流）は、主蒸気トンネル室より原子炉建屋又は、タービン建屋に移行し、各建屋のブローアウトパネルより環境中に放出される。主蒸気隔離弁閉鎖後、

---

\* 敷地周辺の事情、原子炉の特性、安全防護施設等を考慮し、技術的見地からみて、最悪の場合起こるかも知れないと考えられる重大な事故。

\*\* 重大事故を超えるような技術的見地からは起こるとは考えられない事故。

# 1. ま え が き

沸騰水型原子炉（BWR）の運転中、何らかの原因により、主蒸気管が破断した場合には、破断口から冷却材の流出が起こり、核分裂生成物が直接発電所敷地周辺の環境に放出される可能性がある。

「原子炉立地審査指針」によれば、原子炉立地にあたっては、重大事故<sup>\*</sup>及び仮想事故<sup>\*\*</sup>を想定して、敷地境界外での被曝線量を求め、同指針に記載されためやす線量との比較により立地条件の適否を判断することになっているが、BWRの場合、この想定事故の一つとして主蒸気管破断事故があげられる。主蒸気管破断事故の被曝線量評価は、現象を主蒸気隔離弁閉鎖前の瞬時放出と閉鎖後の漏えい放出に分け、閉鎖前は半球モデル、閉鎖後はいわゆるガウス・プルームモデルを用いて行なっている。半球モデルは、拡散を考慮しておらず、明らかに過大評価モデルであり安全評価上問題はないが、放出及び気象条件によってはかなり過大評価となる。

本報告では、隔離弁閉鎖前の評価法に着目して、より現実的モデルとして、環境中での拡散を考慮したパフモデルとランダム・ウォーク法を用いた粒子拡散モデルを検討した。本モデルでは、放出蒸気雲の熱による上昇も考慮されている。また、本コードでは、外部被曝線量の計算で行われる空間積分をモンテカルロ法で行ない計算時間の短縮を行なっている。

なお、本研究は、（財）原子力安全研究協会の原子力気象調査専門委員会評価分科会における昭和57年度の作業の一環として行なったものである。

## 2. 主蒸気管破断事故の概要

### 2.1 事故の仮定

主蒸気管破断事故は、格納容器外で主蒸気管が破断して、破断口から冷却材が流出する事故であり、核分裂生成物が環境へ放出される可能性がある。主蒸気管破断事故のうち、冷却材流量が最大となるのは主蒸気管が瞬時に完全破断する場合である。主蒸気管の完全破断は、種々の安全対策からみて、実際上まづ起こらないと考えられるが、最悪の場合を考えこのような瞬時の完全破断を仮定している。主蒸気管が破断すると主蒸気隔離弁は、数秒で閉鎖され、冷却材の流出は一応停止するが、原子炉の圧力に応じて漏えいが継続するものとする。破断口から放出された冷却材（水と蒸気の2相流）は、主蒸気トンネル室より原子炉建屋又は、タービン建屋に移行し、各建屋のブローアウトパネルより環境中に放出される。主蒸気隔離弁閉鎖後、

\* 敷地周辺の事情、原子炉の特性、安全防護施設等を考慮し、技術的見地からみて、最悪の場合起こるかも知れないと考えられる重大な事故。

\*\* 重大事故を超えるような技術的見地からは起こるとは考えられない事故。



原子炉圧力は、圧力逃し弁、冷却系等により大気圧まで減少し漏えいは停止する。重大事故か仮想事故かにより停止までの期間は異なる。大気中に放出される核分裂生成物としては、運転中冷却材に含まれていた放射性ハロゲンの他に、炉圧力の低下に供ない燃料棒のピンホールから冷却材中に放出されるものが考えられる。ここでは、事故前から冷却材中に存在した核分裂生成物については隔離弁閉鎖前に放出されるものとするが後者については、閉鎖後の漏えいにより大気中に放出されるものとする。放出量については、仮定した事故により異なる。

## 2.2 従来の被曝線量評価

主蒸気管破断事故の被曝評価は、従来以下の様に行われてきた。ブローアウトパネルから大気中へ放出される核分裂生成物は、地上放出されるものとする。主蒸気隔離弁閉鎖前に放出された冷却材は、高温低湿状態の外気中で完全蒸発し、ある体積をもった飽和空気雲になる。この雲の体積は、外気の気温、湿度、冷却材の平均エンタルピーから、湿り空気線図を用いて算出できる<sup>(1)</sup>。地上放出の場合、雲の形は、半球を地面にふせたような形を仮定する。被曝評価は、この半球状の雲が拡散なしに、そのままの形で風下方向に一定速度で流れていくものとして行う。一方、隔離弁閉鎖後の漏えいによる放射性雲からの被曝評価は、いわゆるガウス・ブルームモデルにより行う。求めている被曝線量は、「立地審査指針」にめやすとして記載された。甲状腺被曝線量と全身被曝線量である。

ここで、主蒸気隔離弁閉鎖前の評価に用いられる半球雲を用いたモデル（以下半球モデルとする）は、放出時に形成された半球状の雲が、大気拡散及び熱放出による浮上なしに風下に流されることを仮定したモデルであり、安全評価の上では、過大評価ということで問題はないが、条件によっては、特に甲状腺被曝線量及び $\beta$ 線による全身被曝線量がかなり過大評価になる。そこで、ここではパフモデルと粒子拡散モデルにより、大気拡散及び浮上を考慮したモデルで被曝評価を行うこととした。各モデルの概略を Fig. 1 に示す。次章で、従来の半球モデルと、モデル、粒子拡散モデルについて述べる。

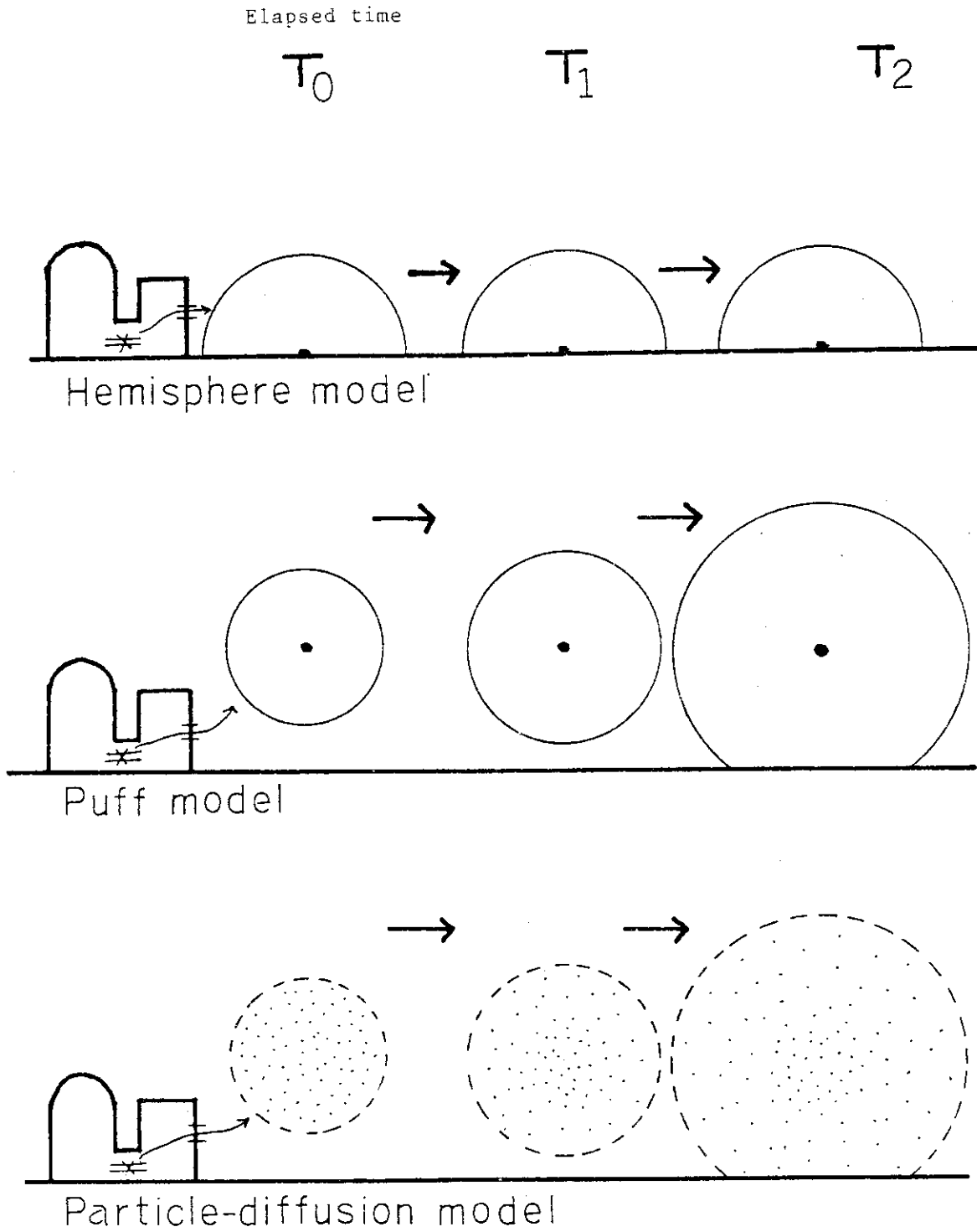


Fig. 1 Hemisphere, puff and particle-diffusion models for calculating the external and thyroid dose, caused by the fission products disposed before the close of isolation valves.

### 3. 被曝線量評価モデル

#### 3.1 半球モデル<sup>(1)</sup>

半球モデルでは、主蒸気隔離弁閉鎖前に流出した冷却材の外気中での完全蒸発により、半球状の飽和空気雲が形成され、核分裂生成物がその中に一様分布すると仮定している。この半球状の雲は風により地上を移動するがその際拡散することはない。半球の半径  $r$  は、湿り空気線図から得られる飽和空気雲の体積  $V$  から

$$r = \sqrt[3]{\frac{6V}{4\pi}} \quad (1)$$

により求められる。次に被曝線量の求め方を示す。

##### (a) 甲状腺被曝線量

甲状腺被曝線量  $D_t$  (rem) は、

$$D_t = \frac{D_1}{V} \cdot R \cdot D_\infty \cdot f_c \cdot \frac{\alpha}{u} \quad (2)$$

ここで、

$Q_1$  : 放射性よう素放出量 (Ci)

$V$  : 半球状雲の体積 ( $m^3$ )

$R$  : 呼吸率  $3.47 \times 10^{-4} m^3/s$ <sup>(2)</sup>

$D_\infty$  : よう素 1 Ci 吸入した時の成人甲状腺被曝線量  $1.48 \times 10^6$  (rem/Ci)

$f_c$  : 成人甲状腺被曝線量を小児甲状腺被曝線量に換算する係数 (= 4)

$\alpha$  : 半球状雲の直径 (m)

$u$  : 雲の移動のための風速 (m/s)

なお、核分裂生成物の崩壊は考慮していない。

##### (b) 全身被曝線量

半球状の空間中に核分裂生成物が一様に分布している場合、球底部の中心部における  $\gamma$  線全身被曝線量  $D_r$  (rem) は、

$$D_r = 0.25 \frac{Q_r}{V} \cdot E_r \cdot \frac{\alpha}{u} (1 - \exp(-\mu \cdot r)) \quad (3)$$

ここで、

$Q_r$  : 半球状雲中の核分裂生成物 (Ci) ( $\gamma$  線エネルギー 0.5 MeV 換算値)

$V$  : 半球状雲の体積 ( $m^3$ )

$E_r$  :  $\gamma$  線のエネルギー (0.5 MeV)

$\mu$  : 空気に対する  $\gamma$  線のエネルギー吸収係数 ( $m^{-1}$ )

$\alpha$  : 半球状雲の直径 (m)

$u$  : 雲の移動のための風速 (m/s)

また $\beta$ 線による被曝線量 $D_\beta$  (rem) については、サブマージョンモデルにより、

$$D_\beta = 0.23 \frac{Q_\beta}{V} E_\beta \cdot \frac{d}{u} \quad (4)$$

ここで、

$Q_\beta$  : 雲中の核分裂生成物量 (Ci) ( $\beta$ 線実効エネルギー - 0.5 MeV 換算値)

$E_\beta$  :  $\beta$ 線の実効エネルギー (0.5 MeV)

他のパラメータは前述と同様である。

### 3.2 パフモデル

パフモデルでは、主蒸気隔離弁閉鎖前に放出された冷却材は、熱放出により浮上し湿り空気線図から得られる体積 $V$ の球状雲を形成する。上昇高によっては、球の下部が一部地面に接する場合も考える。この時、核分裂生成物は、計算の都合上、雲内でガウス分布するものとし、標準偏差 $\sigma_0$ は、体積 $V$ から得られる球半径を $r$ とすると

$$\sigma_0 = \frac{1}{3} r \quad (5)$$

で与える。単位放出 (1 Ci) の場合風下距離 $x$ でのパフの濃度分布 $\chi$ は、

$$\chi(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^{3/2} \Sigma'_x \Sigma'_y \Sigma'_z} \exp \left\{ -\frac{(x-x_p)^2}{2 \Sigma_x'^2} \right\} \exp \left\{ -\frac{(y-y_p)^2}{2 \Sigma_y'^2} \right\} \\ \times \left[ \exp \left\{ -\frac{(z-z_p)^2}{2 \Sigma_z'^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(z+z_p)^2}{2 \Sigma_z'^2} \right\} \right] \quad (6)$$

ここで、 $x_p, y_p, z_p$ は、パフの中心の座標 (m) で、 $z_p$ は、パフの上昇高で与える。パフの上昇高 $H$  (m) は、飽和空気雲の熱放出率 $C$  (cal/s) と風速 $u$  (m/s) から、Singer の式<sup>(3)</sup>により

$$H = \frac{11 \cdot C^{1/3} \cdot (0.3048)^2}{U} \quad (7)$$

で与えられる。また $\Sigma'$ は、

$$\Sigma'_x = \Sigma'_y = \sigma_0 + \sigma_{p,h} \quad (8)$$

$$\Sigma'_z = \sigma_0 + \sigma_{p,v} \quad (9)$$

で与えられる。ここで $\sigma_{p,h}, \sigma_{p,v}$ は、パフの拡散による、風下 $x$ での標準偏差であり、水平

風向変動の標準偏差を  $\sigma_\theta$  , 鉛直方向のそれを  $\sigma_z$  とすると,

$$\sigma_{p,h} = 0.22 \sigma_\theta \cdot x \quad (10)$$

$$\sigma_{p,h} = 0.22 \sigma_z \cdot x \quad (11)$$

で与える<sup>(4)</sup>。次に被曝線量の求め方を示す。

(a) 甲状腺被曝線量

風下軸上の地上甲状腺被曝線量  $D_I$  (rem) は,

$$D_I = D_\infty \cdot R \cdot f_c \cdot Q_I \cdot \int_0^\infty \chi(x, 0, 0) dt \quad (12)$$

で与えられる。ここで,  $t$  はパフの移動時間,  $\chi$  は, (6)式で与えられる時刻  $t$  での地上軸上濃度分布,  $x = u \cdot t$  であり, 他の記号は (2)式と同様である。(12)式の積分は計算コードでは, 区分求積により,

$$\int_0^\infty \chi(x, 0, 0) dt \simeq \sum_{n=1}^{\infty} \chi_n(x, 0, 0) \Delta T \quad (13)$$

で求める。ここで,  $n$  は分割ステップ番号,  $\chi_n$  はステップ  $n$  での濃度,  $\Delta T$  はステップの時間中である。

(b) 全身被曝線量

風下主軸上の地上の  $r$  線による全身被曝線量  $D_r$  (rem) は,

$$D_r = (K_1 / 3600.0) \cdot E_r \cdot A_c \cdot Q_r \\ \times \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^\infty \frac{e^{-\mu r}}{4 \pi r^2} \cdot B(\mu r) \cdot \chi(x', y', z') dz' dy' dx' dt \quad (14)$$

ここで,

$K_1$  : 照射線量率への換算係数  $1.88 \times 10^3 \left( \frac{\text{dis} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{R}}{\text{MeV} \cdot \text{Ci} \cdot \text{h}} \right)$ , 但し  $R = \text{rem}$  とする。

$A_c$  :  $r$  線に対する空気の実吸収係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$r$  : 放射性雲中の点  $(x', y', z')$  から計算地点  $(x, 0, 0)$  までの距離 (m)

$\mu$  :  $r$  線に対する空気の実吸収係数 ( $\text{m}^{-1}$ )

$B(\mu r)$  :  $r$  線に対する空気の実係数

$\chi(x', y', z')$  : 放射性雲中の点  $(x', y', z')$  での濃度 ( $\text{Ci}/\text{m}^3$ )

なお,  $B(\mu r)$  は次式から求めるものとする。

$$B(\mu r) = 1 + \alpha(\mu r) + \beta(\mu r)^2 + \gamma(\mu r)^3 \quad (15)$$

ただし,  $A_c, \mu, \alpha, \beta, \gamma$  については, 0.5 MeV の  $r$  線に対する値を用い, 以下の通りとする。

$$A_c = 3.84 \times 10^{-3} (\text{m}^{-1}), \mu = 1.05 \times 10^{-2} (\text{m}^{-1}), \alpha = 1.0, \beta = 0.4492, \gamma = 0.0038$$

(14)式のうち、 $x', y', z'$ 方向の空間積分については、コード化する場合、いくつかの数値積分法が考えられるが、ここでは、新しい試みとしてモンテカルロ法を用いた。モンテカルロ法による積分は一般に以下のおこなわれる。被積分関数を  $f(x', y', z')$ 、 $x, y, z$  の分布関数を  $P(x', y', z')$  とすれば、三重積分は、

$$\iiint f(x', y', z') \cdot P(x', y', z') dx' dy' dz' \simeq \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N f(X_n, Y_n, Z_n) \quad (16)$$

で表わされる。ここで、 $X_n, Y_n, Z_n$  は、確率分布関数  $P(x', y', z')$  から、乱数を用いて発生させた点の座標であり、 $N$  は点数を表わす。(14)式では、 $f(x', y', z')$ 、 $P(x', y', z')$  は、それぞれ

$$f(x', y', z') = \frac{e^{-\mu r}}{4\pi r^2} B(\mu r) \quad (17)$$

$$P(x', y', z') = \chi(x', y', z') \quad (18)$$

に相当する。したがって、ここでは、(6)式の分布関数に従う  $N$  個の座標群  $(X_n, Y_n, Z_n)$  をモンテカルロ法で、乱数により発生させ、これらの値を(17)式に代入して(16)式により積分値を求めることになる。計算コードでは  $N = 1000$  としている。ここで、(17)式の  $r$  は

$$r^2 = (X_n - x)^2 + Y_n^2 + Z_n^2 \quad (19)$$

で表わされる。計算では、 $(X_n, Y_n, Z_n)$  座標では、分布の標準偏差を  $\sigma$  とすると  $\pm 3\sigma$  以内で発生させている。また、 $r > 500$  m 以上の場合は、 $r$  線の影響は無視している。この手法は、遠方では精度の面で、他の高度な数値積分法に比べて劣るが、モデルが簡便であり迅速な計算に適している。(14)式の時間積分については、(13)式と同様な手法でおこなった。

$\beta$ 線による被曝線量  $D_\beta$  (rem) については、サブマージョンモデルにより、

$$D_\beta = 0.23 \cdot E_\beta \cdot Q_\beta \int_0^\infty \chi(x, 0, 0) dt \quad (20)$$

で与えられる。ここでパラメータの意味は、(4)、(12)式と同様である。

### 3.3 粒子拡散モデル

主蒸気管破断事故では、初期に流出した冷却材の完全蒸発により、飽和空気雲が形成される。核分裂生成物はこの雲の中に、始め一様分布しており、拡散により徐々にガウス分布に近づいていくと考えられるが、パフモデルでは、この現象を扱えないため、始めからガウス分布を仮定している。このため、放出点付近の被曝線量は、条件によって半球モデルによる値よりも大きくなる場合がある。このことを改善するため、粒子拡散モデルを用いて、一様分布からガウス分布への移行をシミュレートできるコードを作成した。

粒子拡散モデルは雲を多数の粒子でおきかえ、粒子群で雲の動きをシミュレートする手法で

ありPIC法<sup>(5)</sup>、モンテカルロ法<sup>(6)</sup>等があるが、ここでは、取扱いの簡便なモンテカルロ法を用いた。手法は以下の通りである。初期条件としての上昇高H及び飽和空気雲の半径rの求め方は、パフモデルと同様であるが、核分裂生成物の一様分布を表わすために、一様乱数を用いて雲内に多数の粒子を発生させる。初期の粒子位置を $(x_0, y_0, z_0)$ とすると、これらは、下式で表わされる。

$$x_0 = 2.0 \cdot r \cdot [R]_0^1 - r \quad (21)$$

$$y_0 = 2.0 \cdot r \cdot [R]_0^1 - r \quad (22)$$

$$z_0 = 2.0 \cdot r \cdot [R]_0^1 + (H - r) \quad (23)$$

ここで $[R]_0^1$ は0から1の一様乱数を表わす。(23)式で $H < r$ の場合、 $z_0$ が負になることがあるが、この場合は反射させる。この様に発生させた粒子群の移流・拡散は経過時間を細かい時間ステップ $\Delta T$ に分けて次の様に扱う。拡散は、粒子のランダムウォークにより表わすが、ある粒子が拡散係数Dの空間中でT時間だけランダムウォークを繰り返すとT時間後の、粒子位置の確立分布関数は、ガウス分布式で表わされ、その標準偏差は、 $\sqrt{2DT}$ となる。中央極限定理によれば、T時間間の各ステップでの拡散による移動距離Lの分布関数が不明であってもその標準偏差が $\sqrt{2D\Delta T}$ であれば、集積分布はガウス分布になる。ここでは簡便さのために一様乱数を用いて、

$$L = [R]_{-\xi}^{+\xi} \quad (24)$$

であらわす。ここで $[R]_{-\xi}^{+\xi}$ は、 $-\xi$ から $+\xi$ までの一様乱数であり、 $\xi$ は、Lの分布が $\sqrt{2D\Delta T}$ になる様に、

$$\xi = \sqrt{6D \cdot \Delta T} \quad (25)$$

で与えられる。0から1の一様乱数 $[R]_0^1$ を用いると、(24)式は、

$$L = \sqrt{24D \cdot \Delta T} (0.5 - [R]_0^1) \quad (26)$$

となる。したがって、時間Tでの位置を $P_T$ 、 $T + \Delta T$ 後の位置を $P_{T+\Delta T}$ とすれば、

$$P_{T+\Delta T} = P_T + u \cdot \Delta T + L \quad (27)$$

が成り立つ。ここで $u \cdot \Delta T$ は、移流項であり、 $u$ は風速である。拡散係数Dは、

$$D = \frac{1}{2} \frac{d\sigma^2(x)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dx}{dt} \cdot \frac{d\sigma^2(x)}{dx} \quad (28)$$

の関係を用いて、パフの標準偏差式(10)、(11)から、水平、鉛直両方向について求める。(27)式は、 $x, y, z$ 方向のそれぞれのLを用いる。

## (a) 甲状腺被曝線量

風下主軸上の地上での被曝線量 $D_I$ (rem)は、パフと同様に、(12)式で与えられる。ここで $\chi(x, 0, 0)$ は、評価点を中心とした、500 m $\times$ 100 m $\times$ 20 mのセル内の内に存在する粒子数 $n$ と全発生粒子数 $N$ の比により、

$$\chi(x, y, z) = n / N \quad (29)$$

で表わす。

## (b) 全身被曝線量

風下主軸上の地上での $\gamma$ 線による全身被曝線量 $D_\gamma$ (rem)は、各粒子を、点源とみなして以下の式で計算する。

$$D_\gamma = (K_1 / 3600.0) \cdot E_\gamma \cdot A_c \cdot \frac{Q_\gamma}{N} \\ \times \int_0^\infty \left[ \sum_{n=1}^N \frac{e^{-\mu r_n}}{4 \pi r_n^2} B(\mu r_n) \right] dt \quad (30)$$

ここで、 $N$ は全粒子数、 $n$ は粒子番号、 $r_n$ は評価点と粒子 $n$ との距離で、粒子座標を $(x_n, y_n, z_n)$ 評価点を $(X, 0, 0)$ とすると

$$r_n^2 = (X - x_n)^2 + y_n^2 + z_n^2 \quad (31)$$

である。他のパラメータは(14)式と同様である。

$\beta$ 線による被曝線量 $D_\beta$ (rem)は、サブマージョンモデルにより、

$$D_\beta = 0.23 \cdot E_\beta \cdot Q_\beta \int_0^\infty \chi(x, 0, 0) dt \quad (32)$$

で表わされ、ここで $\chi(x, 0, 0)$ は(29)式と同様であり、他のパラメータは、(4)式と同じである。



## 4. 計算結果

### 4.1 評価コードの検証

第3章で述べたモデルにより計算コードを作成したが、コードの検証のため、ガウス・プルームモデルとの比較を行った。ここでは、比較のために、放出量は、ガウスプルームモデルで1Ci/h、本モデルで1Ciとし、比較線量値は、ガウスプルームモデルでrem/h、本モデルでremとする。また放出高は100m、大気安定度はDとし、分布の標準偏差はPasquill-Gifford曲線<sup>(7)</sup>を用いた。なお、放出は点源から行なわれるものとしており、実効エネルギーは1MeVとした。

#### (1) 甲状腺被曝線量

パフモデル、粒子拡散モデル、ガウスプルームモデルによる風下軸上の地上線量の比較をFig. 2に示す。粒子型モデルでは、地上から高さ20mまでの平均的濃度を用いるため、高所放出の場合、他のモデルに比べて値が大きくなるが、パフモデルとガウスプルームモデルの値はよく一致している。ここで1ステップの距離巾は、10mとした。

#### (2) 全身被曝線量

各モデルによる風下主軸上の地上線量の比較をFig. 3に示す。ガウス・プルームモデルで用いた曲線は、林らが1MeVの $\gamma$ 線の場合について、ガウス・ルジャンドル積分を用いて得たものである<sup>(8)</sup>。各モデルの結果は、よく一致しており、パフモデルで用いたモンテカルロ積分法及び粒子拡散モデルによる点線源積分法が妥当であることを示している。 $\beta$ 線による全身被曝線量については、サブマージョンモデルを用いているので、甲状腺被曝線量の場合と結果は、同様である。

以上より、高所放出の場合に粒子拡散モデルを用いた甲状腺被曝線量において、値が若干大きくなるが、パフモデル、粒子拡散モデル共に、物理的に正しくコード化されているといえる。

### 4.2 各モデルの結果の比較

安全評価の場合には、最悪の状態をもたらすと考えられる気象条件を用いて計算を行なう必要がある。半球モデルにおいては、(2)及び(3)式にみられるように、風速が小さいほど、線量は大きくなるが、飽和空気雲の浮上を考慮した、パフ及び粒子拡散モデルでは、上昇高を与える(7)式に示すように、上昇高が風速に反比例するため、かならずしも風速が小さいほど値が大きくなるとはいえない。ここでは、冷却材の完全蒸発による飽和空気雲の体積、熱放出率は入力を与えるものとして、大気安定度B, D, F風速1.0, 2.0, 3.0, 4.0m/sについて各モデルで、風下主軸上10.0kmまで計算を行ない結果を比較した。入力パラメータは、雲の初期体積 $5.0 \times 10^6 \text{ m}^3$ 、熱放出率 $5.0 \times 10^6 \text{ cal/s}$ 、実効エネルギー0.5MeV、放出量1Ciとした。時間ステップは、1ステップで雲の中心が30m程度移動するように与えた。

## (a) 甲状腺被曝線量

Fig. 4 に風速 1 m/s, Fig. 5 に 2.0 m/s, Fig. 6 に 3.0 m/s, Fig. 7 に 4.0 m/s の場合の結果を示す。図中のグラフに添えたアルファベットは大気安定度, 風速値の下に示した H は, (7)式による実効放出高を示す。半球モデル以外は, 風速 1 m/s では, 雲の中心は 173.9 m まで上昇し, 半径は 105.6 m となるので完全な球となる。風速 2.0, 3.0, 4.0 m/s では, 上昇高が, それぞれ 86.1 m, 58.0 m, 43.5 m であるのに対して半径が 107.0 m, 111.8 m, 115.8 m となるため球の一部が地面に接した形になる。そのため風速 1 m/s では, 地上に雲が達するまでに時間がかかり Fig. 4 に示すように, 近距離では拡散の大きい大気安定度 B の場合, 中距離で D, 遠距離で F の場合に, 線量が大きくなる。しかしながら, かなりの上昇高であるため, いずれの場合も半球モデルに比べて低い値となる。

風速 2 m/s 以上の結果では, 半球モデル以外でも雲の一部がはじめから, 地面に接しているために放出時の地上濃度は, 初期分布を均一と仮定した粒子拡散モデルでは半球モデルと同じであり, ガウス分布を仮定したパフモデルでは, 雲の中心点の高さにより異なる。したがって粒子拡散モデルの結果は Fig. 5 から Fig. 7 に示すように, 各安定度とも, 距離が近くなるとともに, 半球モデルの結果に近づく。しかし, 半球モデルでは直径部分が評価点を通過するのに対して, 上昇高を考慮したモデルでは, 球下部の直径より短い部分が評価点を通るため, 被曝時間が短くなり, 完全には一致しない。パフモデルでは, 風速 3 m/s 以上では, 雲の中心が地面に近くなり, 均一濃度とした場合の値よりも大きな初期地上濃度が表われるため, Fig. 6 および Fig. 7 に示すように近距離で半球モデルの値よりも過大評価となる。この傾向は, 風速が大きいほど, すなわち雲の中心高が低いほど, 強く表われる。大気安定度でみると, 雲の一部がはじめから地面に接している場合, 粒子拡散モデルでは, 拡散の小さい安定度 F の時に線量は最大となる。パフモデルでは, 風速が小さい時 (実効放出高が高い) は, 地面に接している部分が, 始め低濃度であるため, Fig. 5 に示すように, 風速 1 m/s の場合と同様の傾向がみられるが, 放出高が低くなると, Fig. 6, Fig. 7 に示すように, 安定度 F の場合が最大となる。

## (b) 全身被曝線量

風速 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s の場合の  $\gamma$  線による全身被曝線量の結果を Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 に示す。 $\gamma$  線の被曝の場合には,  $\gamma$  線の飛程が長いので, 評価地点の濃度を問題とする甲状腺被曝線量や  $\beta$  線全身被曝線量の場合と異なり雲全体の形状が問題となる。そのため, 風速が弱く雲がかなり上昇する場合には, Fig. 4 と Fig. 8 の比較でわかるように, かなり傾向が異なる。風速 2 m/s 以上の雲の一部が地面に接する場合も同じことがいえるが, 雲の上昇による線量の減少と, 雲の半径の減少による軸上線量の増加が相殺しまた  $\gamma$  線の飛程が長いことから, 実際には Fig. 5 から Fig. 7 と Fig. 9 から Fig. 11 の比較でわかるように, かなり甲状腺線量の場合と気象条件に対する傾向が似てくる。 $\beta$  線全身被曝線量については, 各モデルの相対関係は, 甲状腺線量の場合と同一になる。

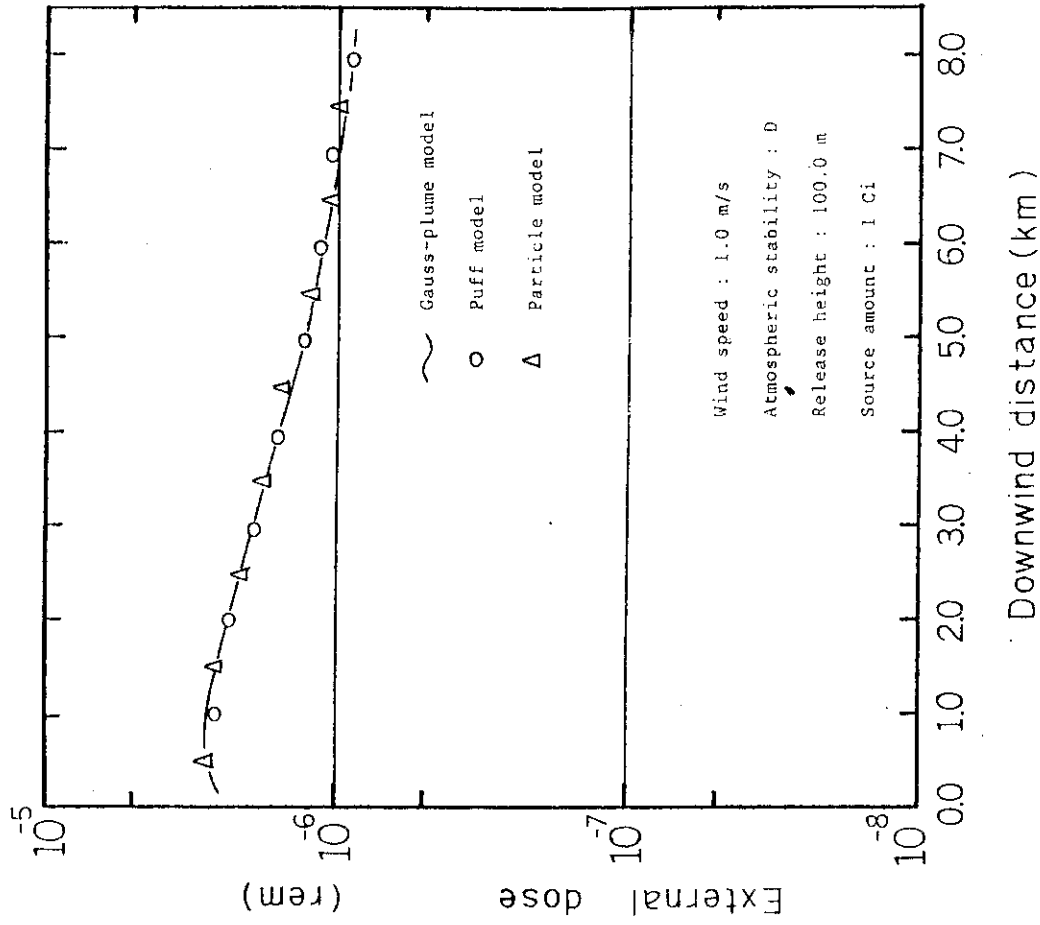


Fig. 3 Comparison of external dose computed by puff and particle-diffusion models with those by gauss-plume model.

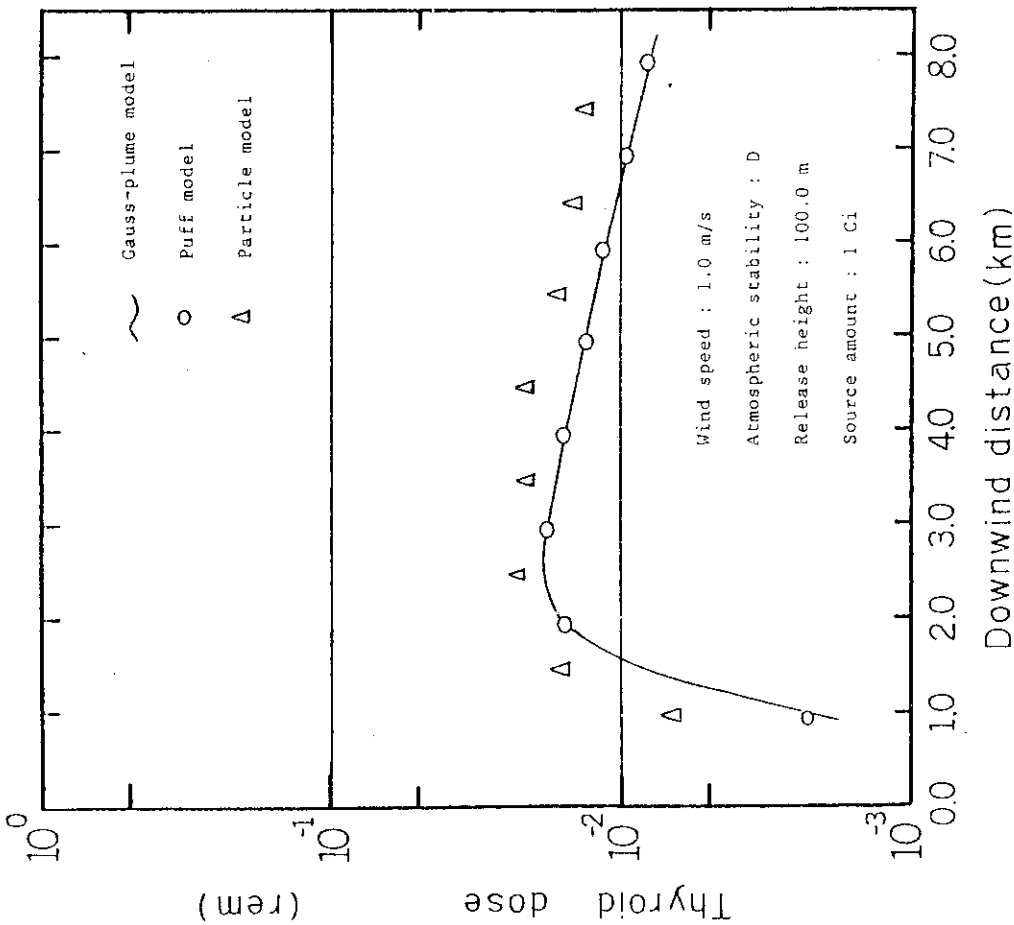


Fig. 2 Comparison of thyroid dose computed by puff and particle-diffusion models with those by gauss-plume model.

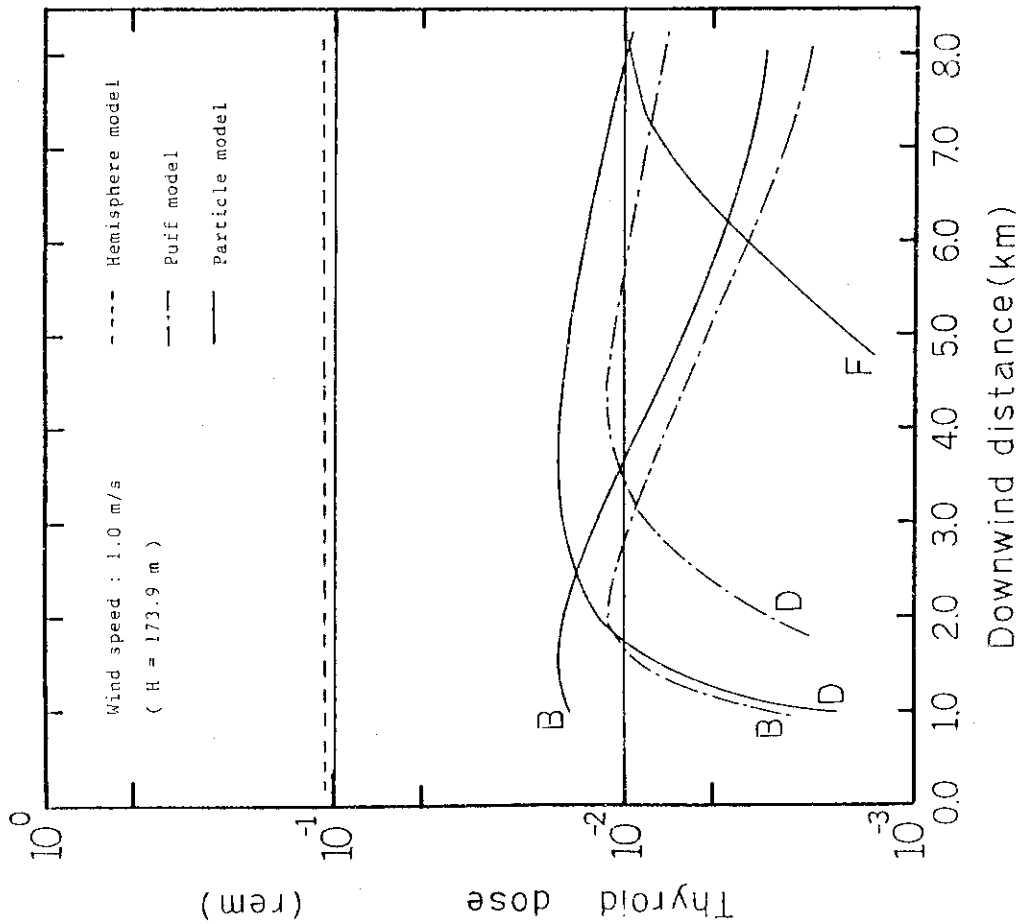
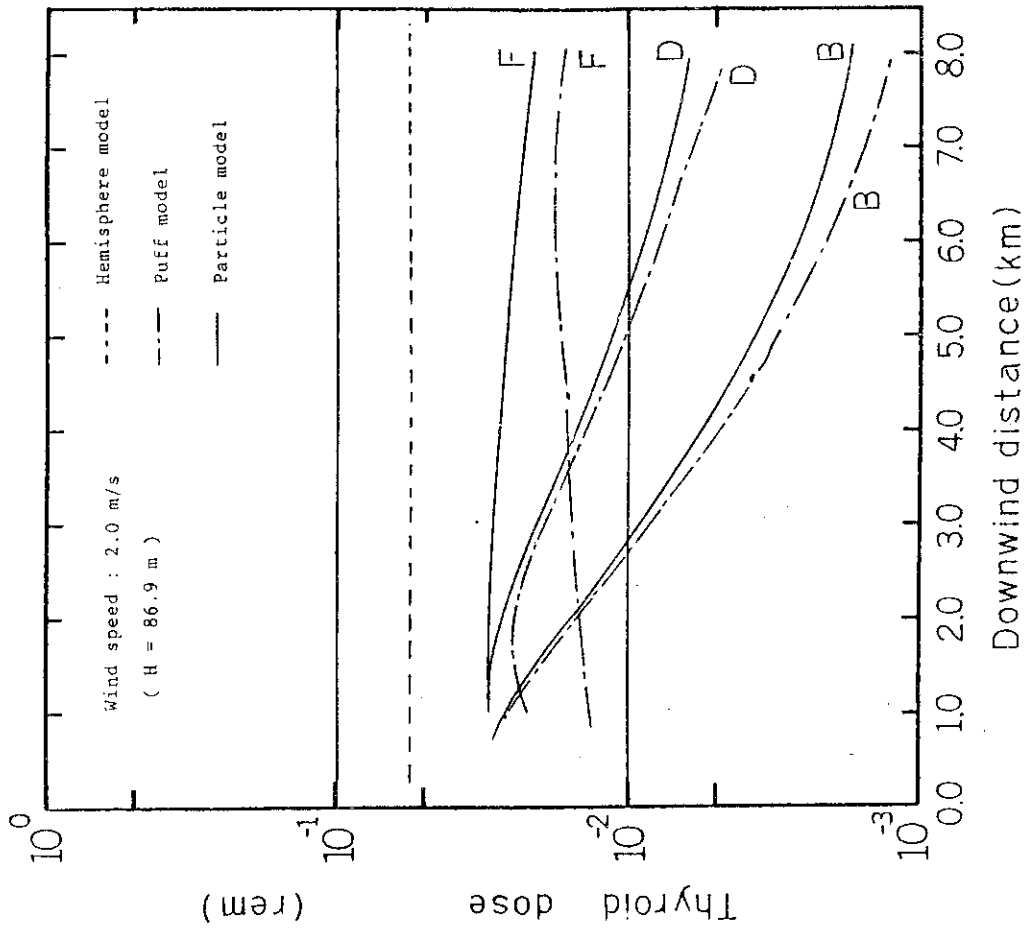


Fig. 4 Comparison of thyroid dose computed by three models, atmospheric stability S, D and F and wind speed 1.0 m/s.

Fig. 5 Comparison of thyroid dose computed by three models, atmospheric stability S, D and F and wind speed 2.0 m/s.

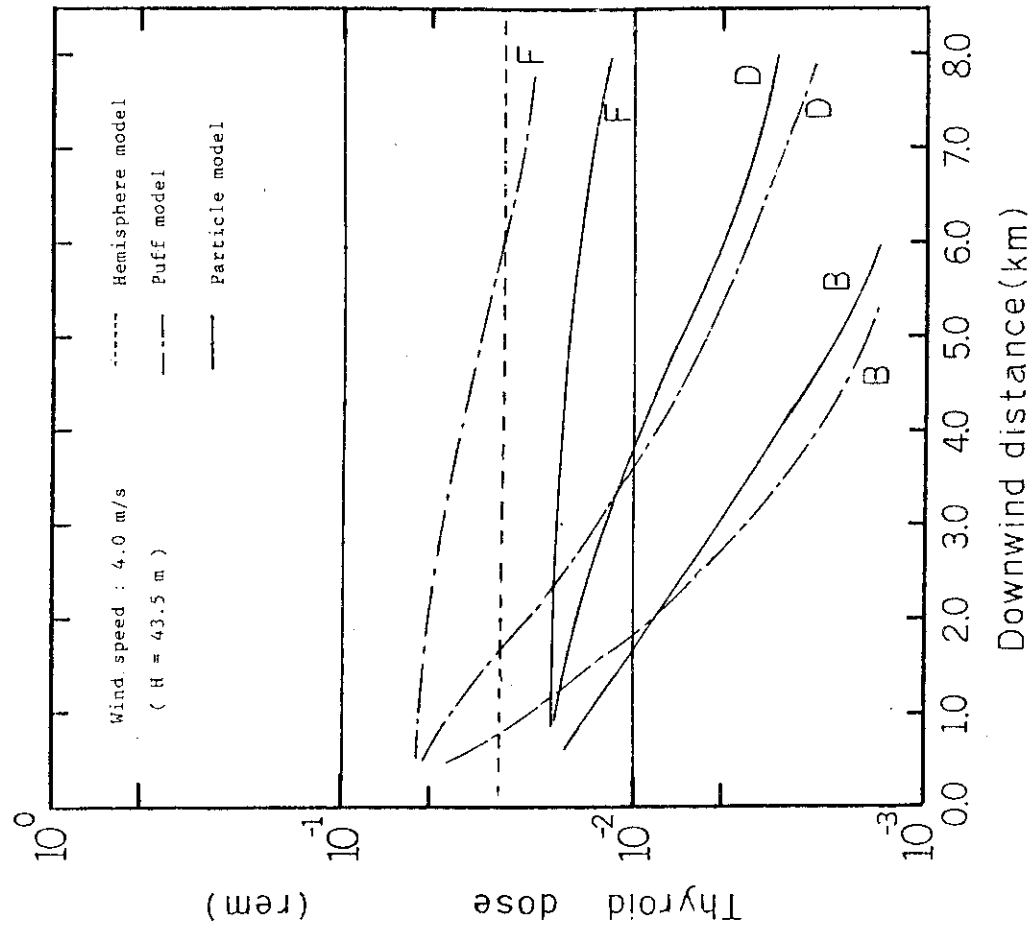


Fig. 7 Comparison of thyroid dose computed by three models, atmospheric stability B, D and F and wind speed 4.0 m/s.

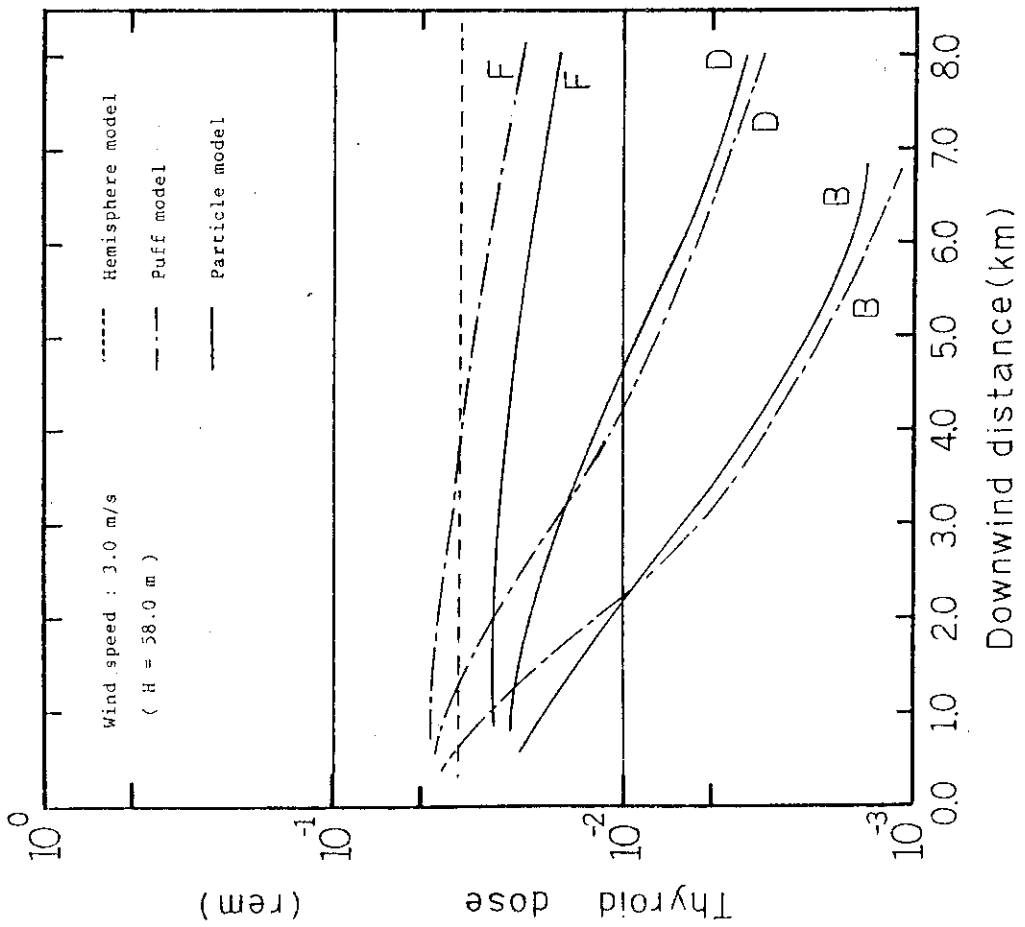


Fig. 6 Comparison of thyroid dose computed by three models, atmospheric stability B, D and F and wind speed 3.0 m/s.

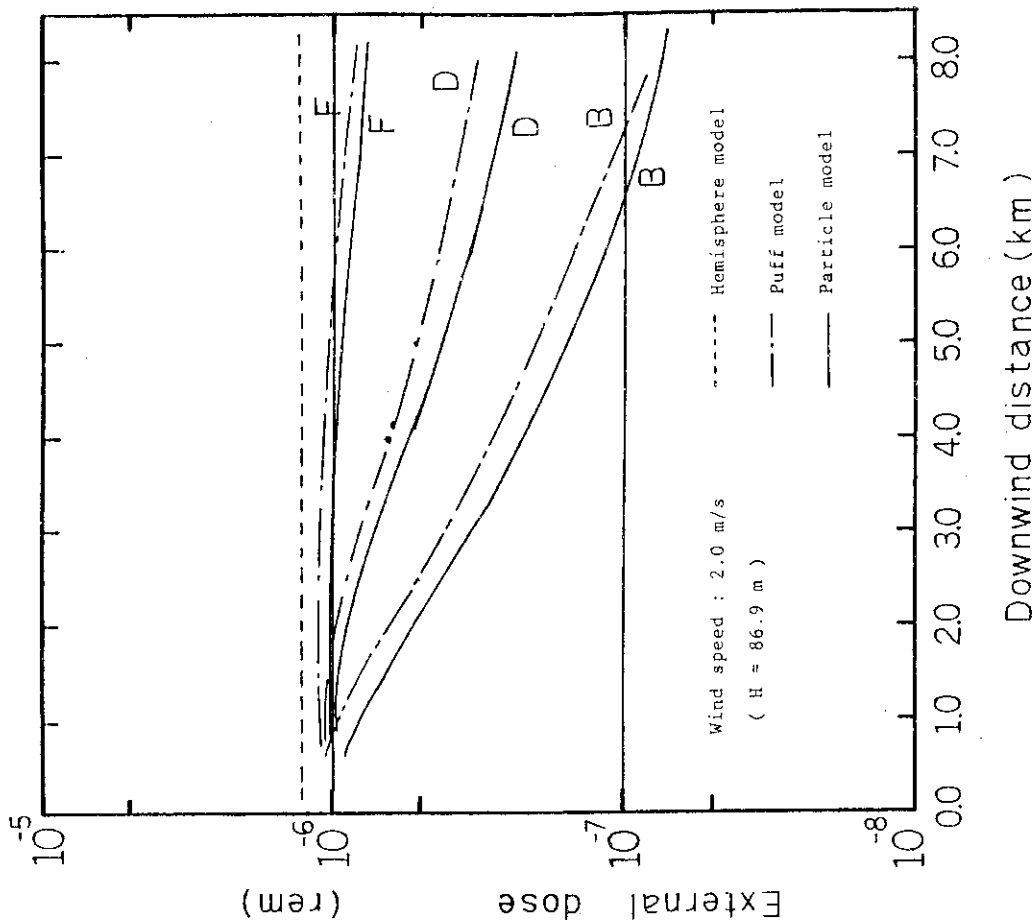


Fig. 9 Comparison of external dose computed by three models, atmospheric stability B, D and F and wind speed 2.0 m/s.

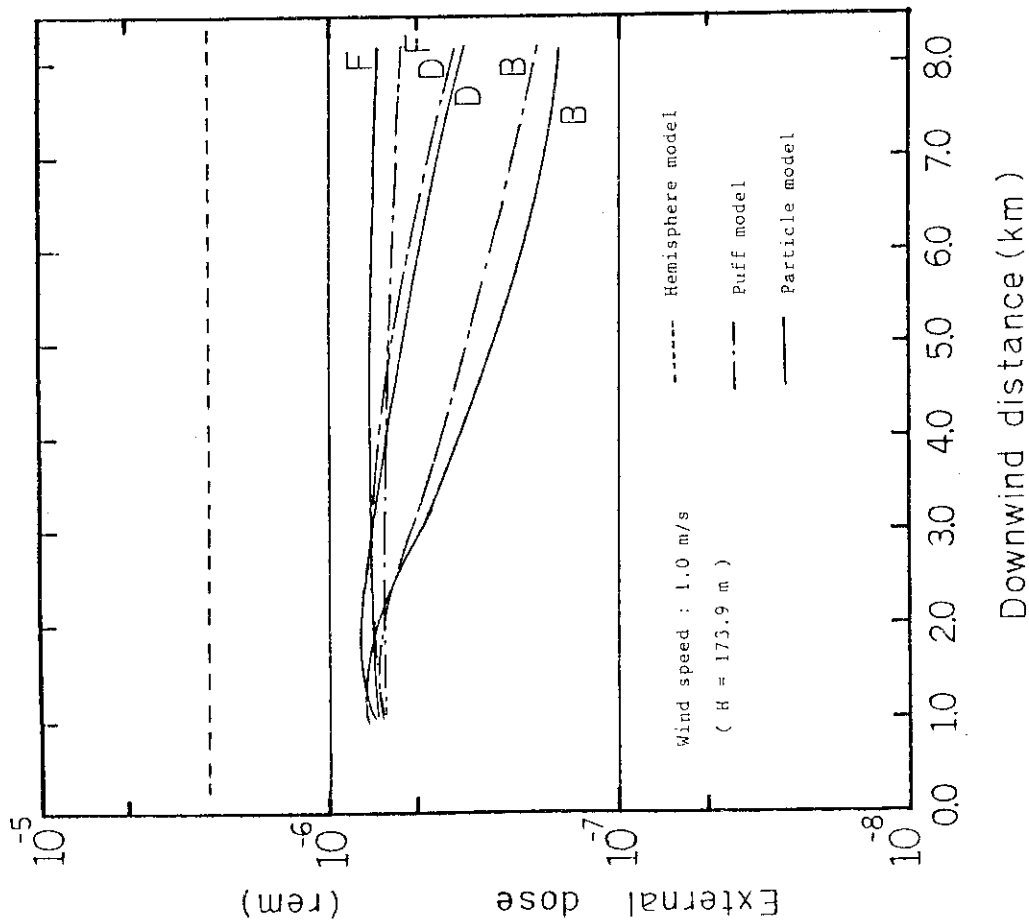


Fig. 8 Comparison of external dose computed by three models, atmospheric stability B, D and F and wind speed 1.0 m/s.

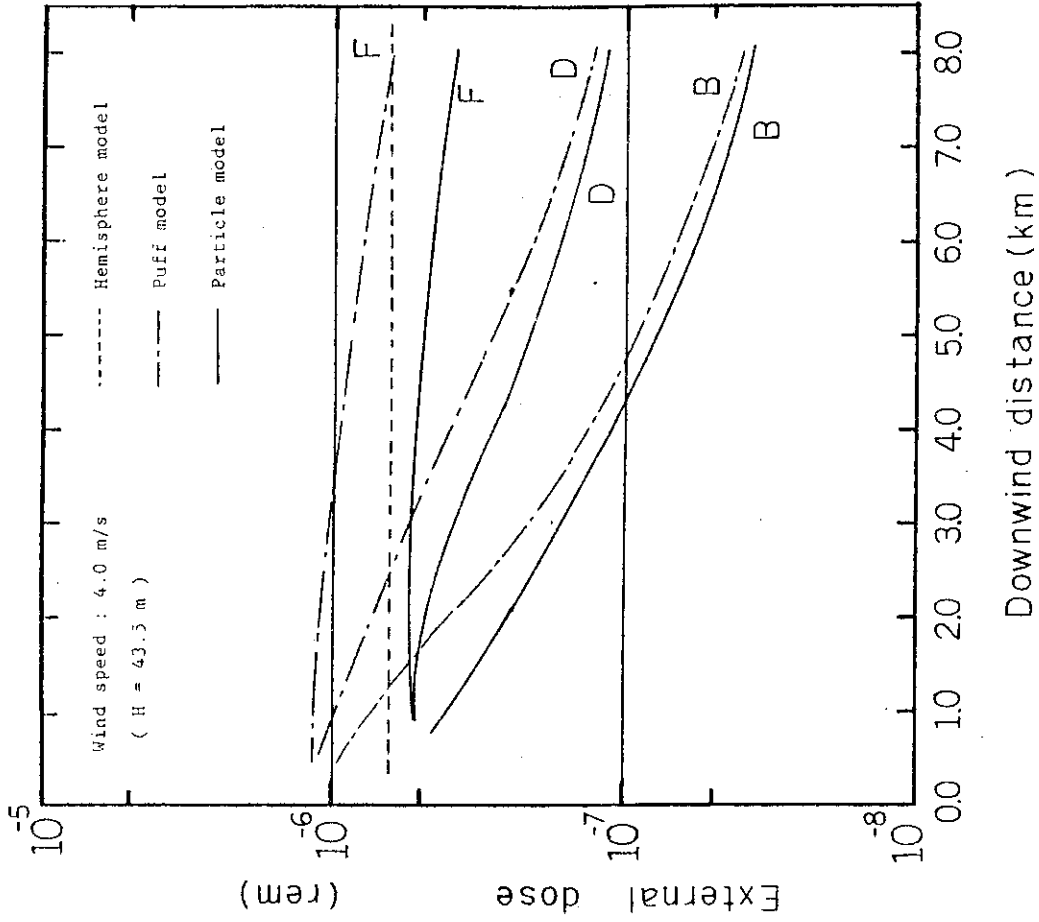


Fig.10 Comparison of external dose computed by three models, atmospheric stability E, C and F and wind speed 3.0 m/s.

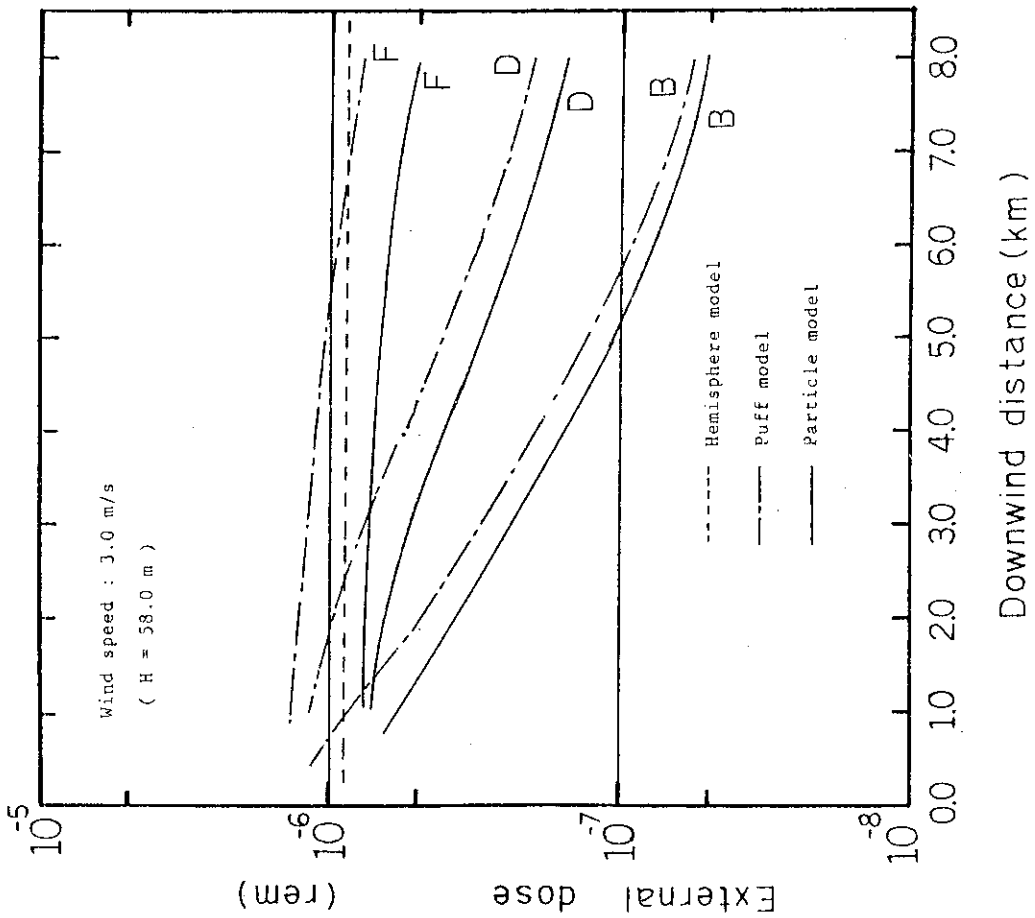


Fig.11 Comparison of external dose computed by three models, atmospheric stability B, D and F and wind speed 4.0 m/s.

## 5. パフモデルと粒子拡散モデルによる安全評価法

安全評価は、おこりうる最悪の場合を考えて行なう必要がある。第4章で計算された結果のうち、各風下距離で最大値となるものをそれぞれのモデルから選び比較を行なった。Fig. 12に、甲状腺線量の結果を示し、Fig. 13に $\gamma$ 線による全身被曝線量の結果を示す。甲状腺線量の場合、最大値をもたらす気象条件は、半球モデルでは風速1 m/sの場合、パフモデルでは大気安定度Fで、風速2 m/s又は3 m/sの場合、粒子拡散モデルでは大気安定度Fで風速2 m/sの場合であった。Fig. 12及びFig. 13に示すように、この場合半球モデルの結果は、全風下距離についての平均でみると、粒子拡散モデルに対して約3倍、パフモデルに対して約2倍過大評価であった。 $\beta$ 線の全身被曝については、サブマージョンモデルを用いるので、甲状腺線量の場合と同じ傾向になる。

以上の様に、半球モデルでは風速1 m/sが最大値をとるが他のモデルでは、風速と放出高の関係で被曝時間が複雑に変化するため解析的に最大値を与える風速を決定することは難しい。したがって、熱放出による上昇を考慮してパフ及び、粒子拡散モデルで安全評価を行なう場合は、第4章で行なったように、何種類かの風速で計算を行ない、最大の線量値を探す方法が実際的である。大気安定度については、両モデルともF型を用いる。パフモデルでは、初期分布を均一とし、移行の仮定でガウス分布に変化していく状態の数式化が必要である。

また、半球モデルは、雲の熱放出による上昇と、拡散を無視しているため過大評価になることを述べたが、大気安定度Fの場合には、拡散が小さく、拡散効果による線量の風下方向への減少は大きくないので、次の様な条件で、他のモデルと大差なく評価できる。第1は、上昇を考慮しない場合でこの時、各モデルの風速1.0 m/s、大気安定度Fの結果は甲状腺線量においてFig. 14、 $\gamma$ 線線量についてFig. 15のようになる。どちらの場合も、パフモデルでは、初期分布型が異なるため過大評価となるが、半球モデルと粒子拡散モデルでは、敷地境界と思われる2~3 km風下で10%~30%半球モデルの結果が大きい程度であり、問題はない。この場合、放出点近傍では、濃度値及び被曝時間が半球モデルと粒子拡散モデルで一致するため、放出点付近で両者の結果は一致する。第2は、実効放出高を考慮した風速を用いる場合で、この風速は、理想としては、他のモデルで用いる最悪風速を用いることになるが、解析的に求めることは難しいので、ここでは安全側として、球状雲の底が地面に接するような風速を考える。この値 $u$ は(7)式の右辺と、球体積 $V$ から半径を求める式により、

$$u = 11 \cdot C^{\frac{1}{3}} \cdot (0.3048)^2 / 3 \sqrt{\frac{3V}{4\pi}} \quad (33)$$

で与える。ここで、

Q：熱放出率 (cal/s)

V：飽和空気雲の体積 ( $m^3$ )

である。第4章での計算条件の場合、(33)式の解は、1.7 m/sであり線量値は1 m/sを用いた場合より1/1.7だけ減少する。ただし、 $u < 1.0$ のとなる時は、使えない。



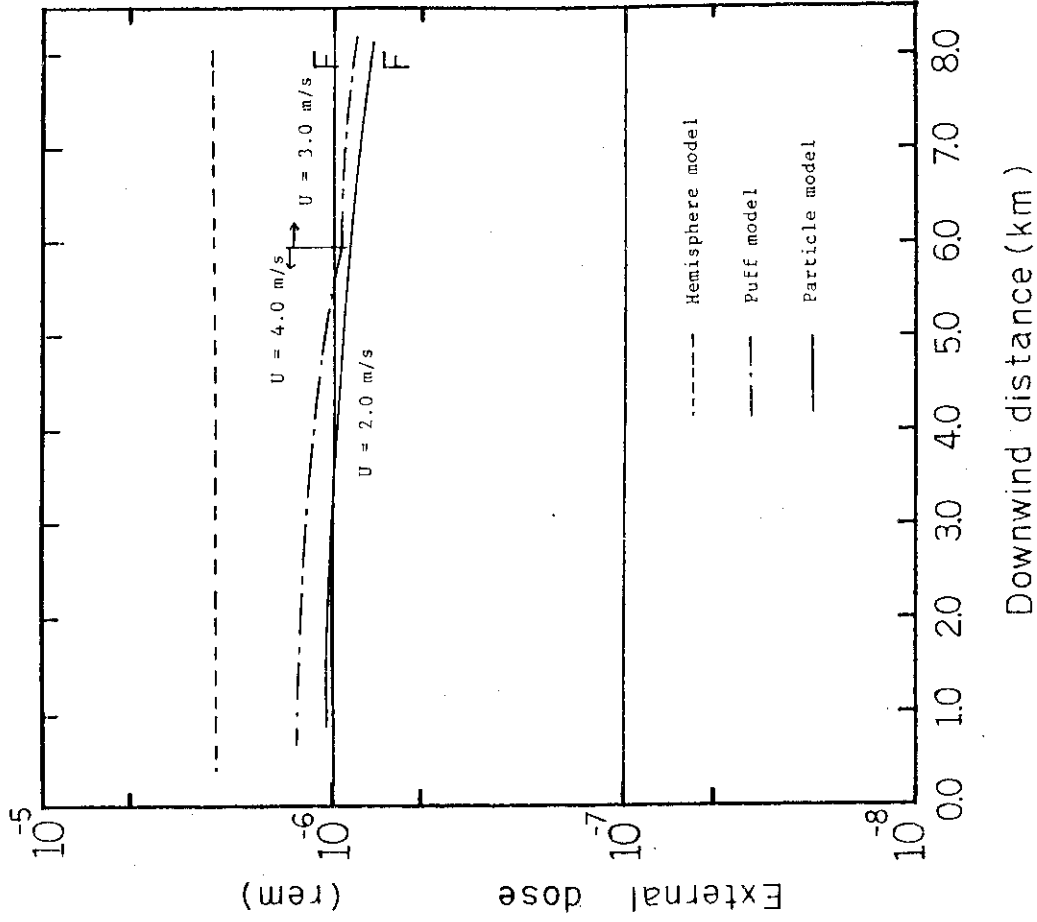


Fig.13 Comparison of the largest external dose computed by three models at the each downwind distance.

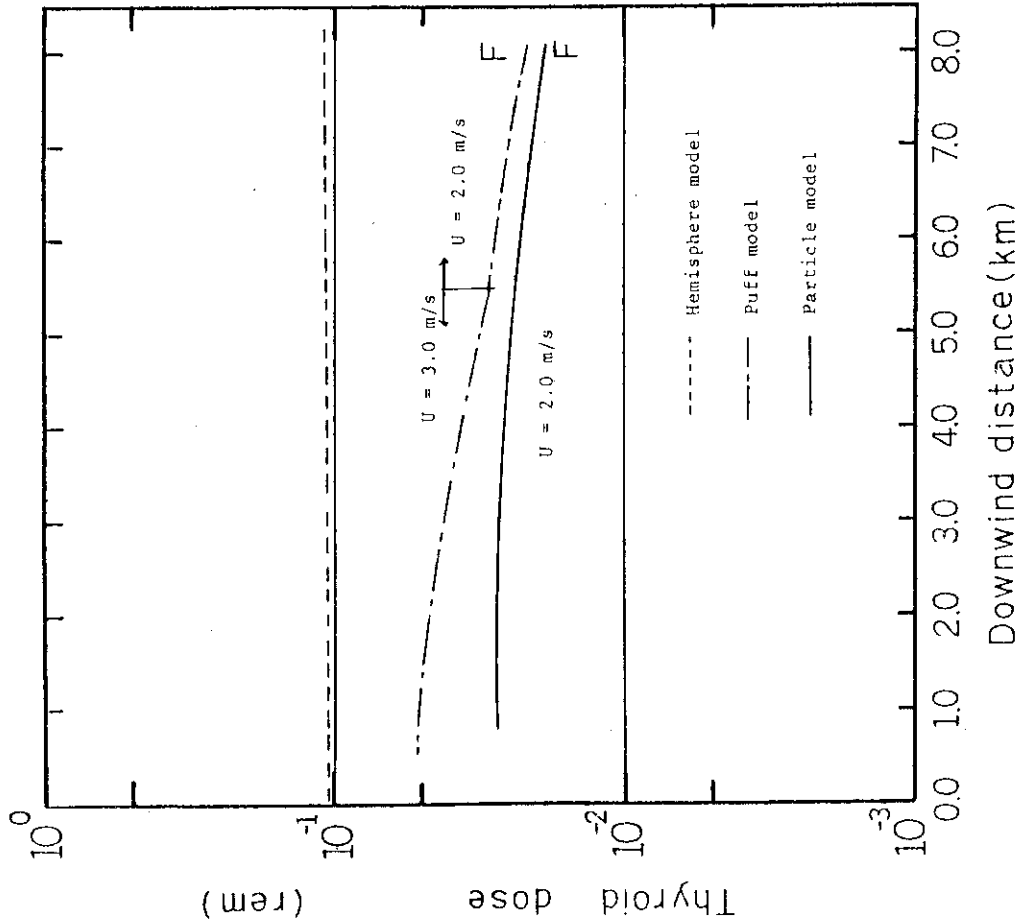


Fig.12 Comparison of the largest thyroid dose computed by three models at the each downwind distance.

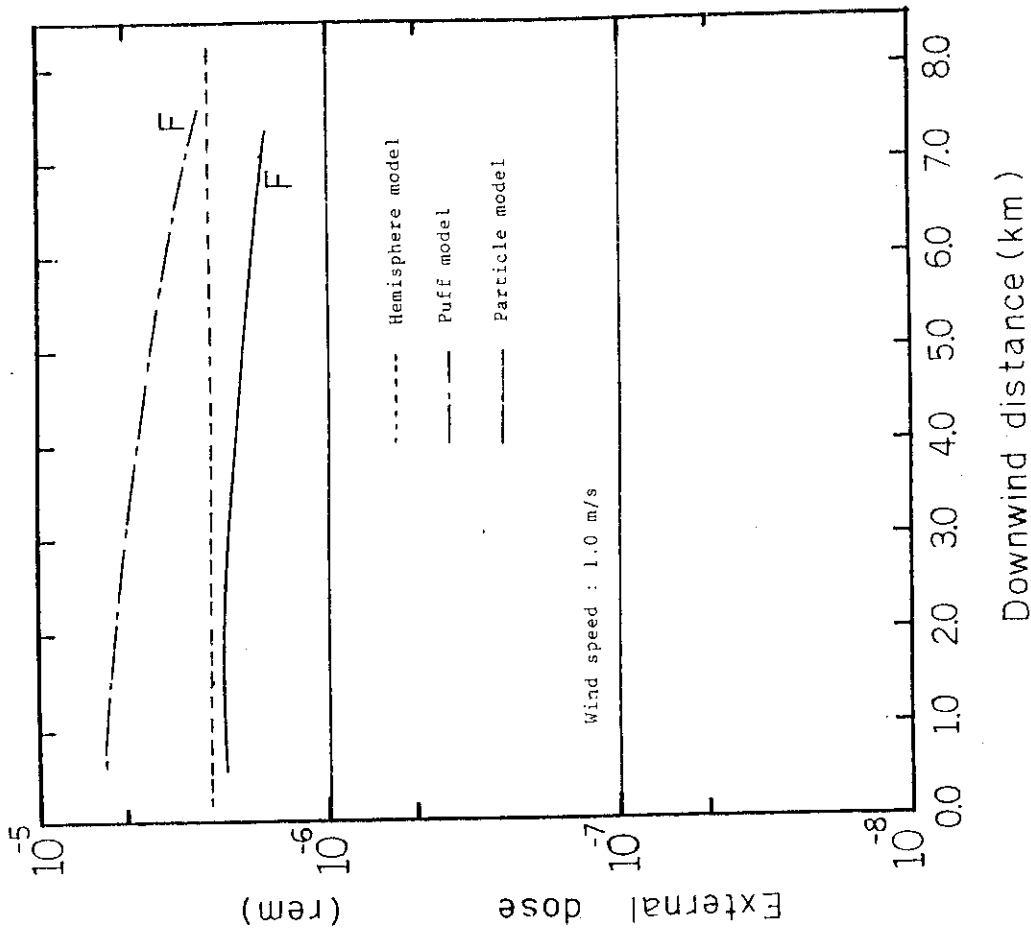


Fig.15 Comparison of the largest external dose computed by three models at the each downwind distance, not considering the cloud's buoyancy.

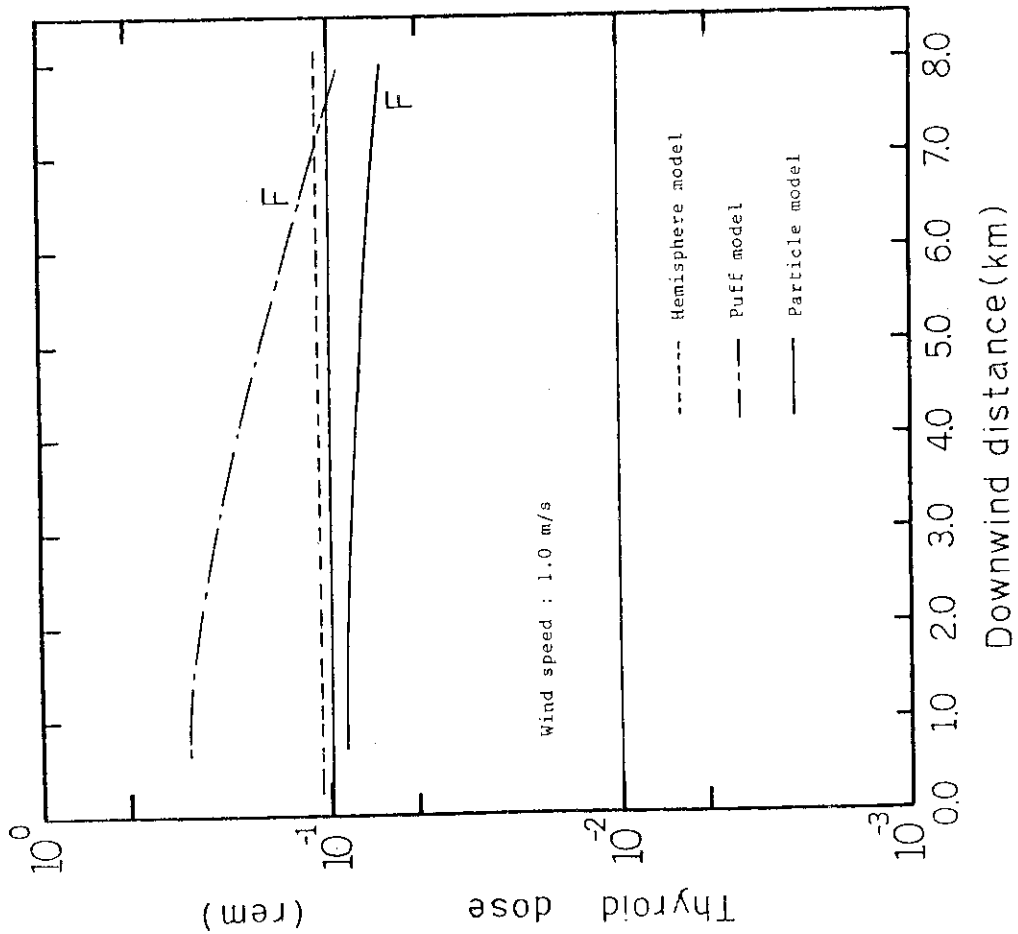


Fig.14 Comparison of the largest thyroid dose computed by three models at the each downwind distance, not considering the cloud's buoyancy.

## 6. 結 論

主蒸気管破断事故において、主蒸気隔離弁閉鎖前に放出される冷却材による被曝線量評価をパフモデルと粒子拡散モデルで行ない、従来用いられている半球モデルと比較した結果、以下のことがわかった。

(1) 半球モデルと吹上げを考慮した他のモデルの比較では、半球モデルは2～3倍過大評価になる。

(2) パフモデルでは、核分裂生成物の初期分布をガウス分布としているが、実際には、飽和空気雲内に均一分布すると考えられ、この点を考慮しないと、放出点近距離で、条件によりかなり過大評価となる。粒子拡散モデルでは、この点が改良されている。

(3) パフ及び粒子拡散モデルで安全評価を行なう場合最悪の気象条件を考える必要があるが、最大値をもたらす風速は事前に決めることが難しいので、何種かの風速で計算を行ない、選択する必要がある。また大気安定度は、Fとしてよい。

(4) 雲の上昇を考慮しない場合は、半球モデルの結果は、大気安定度Fの場合の粒子拡散モデルに比べて、20～30%程度の過大評価であり、半球モデルで充分である。

(5) 雲の上昇を考慮する場合は、(3)式による風速を用いることで、半球モデルの場合の結果も多少改善される。

(6) パフモデルで用いたモンテカルロ法による、 $\gamma$ 線全身被曝線量の計算法は、風下10km以内で精度よく計算が可能であり、計算時間の短かさやプログラミングの簡便さの点から有効である。

半球モデルの結果は、過大評価であることから、立地審査に用いる式としては、問題はないが、より現実的なシミュレーションの可能なパフモデル、粒子拡散モデルも今後使われるべきと考える。

なお、パフ及び粒子拡散モデルの計算コードは、1ランで1つの気象条件について全身被曝線量と、甲状腺被曝線量を求めるようになっており実行ステップ数は、パフモデルで180枚、粒子拡散モデルで250枚である。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、(財)原子力安全研究協会の原子力気象調査専門委員会評価分科会の伊藤直次主査(原研)をはじめ委員の皆様にも多くの助言と指導をいただいた。深く感謝いたします。

パフモデルのところで用いたモンテカルロ法による積分法については環境第1研究室の甲斐倫明氏に助力をいただいた。また、本報告書をまとめるにあたり、環境第1研究室長の森内茂氏に御指導をいただいた。上記の皆様にも深く感謝します。

## 6. 結 論

主蒸気管破断事故において、主蒸気隔離弁閉鎖前に放出される冷却材による被曝線量評価をパフモデルと粒子拡散モデルで行ない、従来用いられている半球モデルと比較した結果、以下のことがわかった。

(1) 半球モデルと吹上げを考慮した他のモデルの比較では、半球モデルは2～3倍過大評価になる。

(2) パフモデルでは、核分裂生成物の初期分布をガウス分布としているが、実際には、飽和空気雲内に均一分布すると考えられ、この点を考慮しないと、放出点近距離で、条件によりかなり過大評価となる。粒子拡散モデルでは、この点が改良されている。

(3) パフ及び粒子拡散モデルで安全評価を行なう場合最悪の気象条件を考える必要があるが、最大値をもたらす風速は事前に決めることが難しいので、何種かの風速で計算を行ない、選択する必要がある。また大気安定度は、Fとしてよい。

(4) 雲の上昇を考慮しない場合は、半球モデルの結果は、大気安定度Fの場合の粒子拡散モデルに比べて、20～30%程度の過大評価であり、半球モデルで充分である。

(5) 雲の上昇を考慮する場合は、(33)式による風速を用いることで、半球モデルの場合の結果も多少改善される。

(6) パフモデルで用いたモンテカルロ法による、 $\gamma$ 線全身被曝線量の計算法は、風下10km以内で精度よく計算が可能であり、計算時間の短かさやプログラミングの簡便さの点から有効である。

半球モデルの結果は、過大評価であることから、立地審査に用いる式としては、問題はないが、より現実的なシミュレーションの可能なパフモデル、粒子拡散モデルも今後使われるべきと考える。

なお、パフ及び粒子拡散モデルの計算コードは、1ランで1つの気象条件について全身被曝線量と、甲状腺被曝線量を求めるようになっており実行ステップ数は、パフモデルで180枚、粒子拡散モデルで250枚である。

## 謝 辞

本研究の遂行にあたり、(財)原子力安全研究協会の原子力気象調査専門委員会評価分科会の伊藤直次主査(原研)をはじめ委員の皆様にも多くの助言と指導をいただいた。深く感謝いたします。

パフモデルのところで用いたモンテカルロ法による積分法については環境第1研究室の甲斐倫明氏に助力をいただいた。また、本報告書をまとめるにあたり、環境第1研究室長の森内茂氏に御指導をいただいた。上記の皆様にも深く感謝します。

## 参 考 文 献

- (1) 「沸騰水型原子力発電所事故時の被曝評価手法について」, 東京芝浦電気株式会社TLR-032 (1980)
- (2) ICRP第2小委員会: 体内放射線の許容線量, ICRP Pub. 2, 日本放射性同位元素協会 (1959)
- (3) 原子力安全研究協会: 原子力気象に関する調査研究昭和57年度報告, P 94 (1983)
- (4) PASQUILL, F.: Atmospheric Diffusion, 4.7 (1974), Ellis Horwood Ltd.
- (5) 茅野政道: PIC (Particle-in-Cell) モデルによる大気中濃度分布計算コード, JAERI-M 82-219 (1983)
- (6) 茅野政道: DPRW法による大気中濃度分布計算モデル, JAERI-M 83-084 (1983)
- (7) SLAD, D. H. (ed): Meteorology and atomic energy 1968, TID-24190 (1968)
- (8) 林 隆, 白石忠男: 排気筒から放出される放射性雲からの $\gamma$ 線照射線量率, JAERI-M 8793 (1980)