

## 地下式原子力発電所の想定事故時における 核種の地中格納効果の評価手法

### NUMERICAL METHOD ON THE UNDERGROUND CONTAINMENT OF FISSION PRODUCTS AT A HYPOTHETICAL ACCIDENT IN UNDERGROUND NUCLEAR POWER PLANT

駒田 広也\*・林 正夫\*\*

By Hiroya KOMADA and Masao HAYASHI

を示すものである。

#### 1. ま え が き

原子力発電所の立地に対する社会環境上の制約を、地域の自然環境の保全および安全性に対する信頼性の向上の面から、工学的に解決するための研究が急務となっている。

地上における自然環境を積極的に保存し、かつ国土の有効な利用をはかるための方策として、原子力発電所の地下立地が注目されている。地下式原子力発電所はヨーロッパを中心に6基建設されている<sup>1)</sup>。しかし、現在、ヨーロッパで建設されているものは実験、発電併用の小さなものが多い。アメリカでも地下立地の検討がなされており、検討結果が報告されている<sup>2)~4)</sup>。また、わが国においても検討されている<sup>5)~7)</sup>。地下式原子力発電所の特長の1つとして、地下空洞周辺地盤における想定事故時の核分裂生成成分(F.P.)の格納性があげられる。

仮想的に1次冷却系の想定事故の場合には、核種を含むガスが地下空洞に充満し、温度およびガス濃度が上がり、空洞内の気圧も上昇し、ガスが原子炉格納容器から岩盤に漏えいし、その後、地中より地表へのガスの拡散、地下水の移動に伴う溶解した放射性核種の移動が想定される。この種の一連の想定は非常に確率の低いものであり、架空に近いものである。しかも地下立地においては、上述の想定事故に対する核種の地下での格納性が高いことが予測されている。この予測の有効性を実証するためには、この問題に対する厳格な安全性評価の手法の開発が必要である。

したがって、本報告は地下式原子力発電所の想定事故時における地下空洞周辺での核種の地下移動についての検討手法およびその検討手法に基づいた一部の検討結果

#### 2. 地下式原子力発電所の想定事故時における 安全性の概念

原子力発電所の平常運転時には、地上式と地下式とを比較した場合、放射性物質の排出に関する安全上の差異はあまりないものと考えられる。次に事故の場合について、地上式と地下式との安全上の差異について以下に述べる。炉の形式が同じであれば事故の1次的様相は地上の場合も地下の場合も大差はないと考えられる。すなわち、現在もっとも多く採用されている軽水炉(PWRおよびBWR)の場合ならば、1次冷却材喪失に伴う燃料破損事故が地下の場合でも最大仮想事故になると考えられる。この事故では、まず大きな内部エネルギーをもった1次冷却水が核納容器内部に開放され、容器内圧力が5 kg/cm<sup>2</sup>程度に上昇し、つづいて事故時炉心冷却系がまったく作動しないと仮定して数十秒程度で燃料被覆管が破損し、内部に蓄積された放射性核分裂生成物のうちハロゲンガスの一部、希ガスおよびエアロゾルが気相中に、また、固形分の一部が液相中に溶解漏えいする。この段階までは地下式の場合も地上式の場合も大差はないと考えられるが、これ以後、放射性物質が人体にまで到達する過程が大きく異なる。

地上設置の場合には、格納容器から漏えいした放射性ガスおよびエアロゾルは直接またはフィルターを経て外界に放出され、大気中を拡散して人体にまで比較的短時間で到達する。液相中の放射性物質の移動速度は気相中に比べて非常に小さいので人体への影響が小さい。そのため地上に設置する軽水炉の安全解析では、よう素(I)、キセノン(Xe)、およびクリプトン(Kr)の比較的半減期の短いものまで含めたガス状放射性同位体の影響についてのみ検討がなされている。

これに対して地下式の場合には、格納容器の壁面を透

\* 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所 地盤耐震部地下構造物研究室

\*\* 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所 副所長

過した放射性物質は地層中に入り、その中をゆっくりと移動してゆき、ごく一部が地表に現われることになる。ただし、格納容器室連絡孔のエアロックや貫通孔のシールが不完全であったり、外部との間に短絡箇所があったりする場合には地上式の場合と同じ状況になるので十分注意しなければならない。

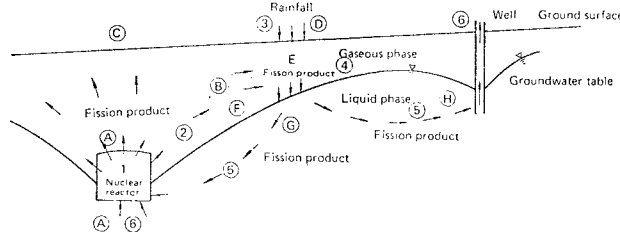
さて、地中における放射性物質の移動メカニズムは複雑なものと予想されるが、定性的にはおおよ次のようなことと考えられる。まず水に溶解した固形分については、水中での分子拡散、地下水流による連行、および毛管浸透が移動の駆動力となる。さらに移動の途中で、地盤媒質および地下水中の溶存物質との間で吸着、脱着あるいは化学反応といった相互作用を行うものと考えられる。エアロゾル状態で漏えいした物質は短時間で地盤媒質に沈着するが、仮に地下水が存在すれば上述の固形分と同様な移動のしかたをするものと考えられる。次にガス状で漏えいした物質の移動について考える。地盤中に地下水がない場合、ガス分子は地盤の空隙中を分子拡散と圧力勾配による気流により移動するが、移動の途中、吸着、脱着および化学反応などが伴う。地盤中では、顕著な空気の流れはないので、ガス状放射性物質の移動速度

は大気中にくらべて非常に小さなものと考えられる。しかしながら、地下水に溶解した固形分の移動速度よりは、かなり大きいであろうと予測される。地下水がある場合ガス状物質は地下水面までは上述のように移動してゆき、一部は水に溶解する。その後は固形分と同じような移動のしかたをするものと考えられる。

このようにして地表部まで到達した放射性物質は、直接被曝源となったり、食物連鎖を通じて人体へ経口摂取されたり、大気中に移行し呼吸を通じて人体への放射線被曝をもたらすものと考えられる。しかしながら、前述のように地盤中での物質の移動速度は大気中にくらべて非常に小さく（数メートル/年の程度であろう）、また地盤媒質への吸着、吸収能力は相当大きいので、地表放出濃度の時間的希釈、地盤中での放射性崩壊、地盤中での停留割合の大きなことなどの効果により、公衆への放射線被曝の可能性は非常に小さなものになると考えられる。

### 3. 想定事故時における放射性核種の地中移動経路

前述のように、原子炉の想定事故時において、核種が



- ㉑  $P = P_b(t)$  History of air pressure in the cavity  
 $C = C_b(t)$  History of fission product concentration in the cavity

$$\text{㉒} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( K_a \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_a \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = \alpha f \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

Unsteady gaseous diffusion equation

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot C) - \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C) - \frac{\rho}{e} \left( \frac{\partial}{\partial t} K_{ad} C + K_{ab} C \right) - \lambda C$$

Transport equation of fission product

- ㉓  $P = P_a(t)$  Atmospheric pressure on the surface
- ㉔  $h = h_0(t)$  Depth of ponding rainwater on the surface
- ㉕  $dq(x, y, t) = \beta \cdot q(x, y, t) \cdot Q(x, y, t)$   
Quantity of fission product desorbed by the infiltrated water
- ㉖  $H = H_s$  Potential of groundwater table  
 $q_s(x, y, t) = \int_{y_0}^y dq(x, y, t) - \frac{y - y_0}{V} dy$   
Quantity of fission product mixing in the groundwater

$$\text{㉗} \quad \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0$$

Stationary seepage equation

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot C)$$

$$- \frac{\partial}{\partial y} (V_y \cdot C) - \frac{\rho}{e} \left( \frac{\partial}{\partial t} K_{ad} C + K_{ab} C \right) - \lambda C$$

Transport equation of fission product

$$\text{㉘} \quad K_x \frac{\partial H}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} l_y + g = 0$$

- Inflow rate on the boundary
- $P$ : Air pressure in  $\text{kg/cm}^2$
- $C$ : Concentration of F.P. in  $\text{g/cm}^3$
- $K_a$ : Permeability of gas in  $\text{cm/sec}$
- $\alpha$ : Compressibility of gas in  $1/\text{cm}$
- $f$ : Porosity of porous medium (-)
- $D_x, D_y$ : Diffusion coefficient in  $\text{cm}^2/\text{sec}$
- $V_x, V_y$ : Mean velocity of flow for solid part in  $\text{cm/sec}$
- $\rho$ : Density of porous medium in  $\text{g/cm}^2$
- $e$ : Void ratio of porous medium (-)
- $K_{ad}$ : Adsorption coefficient of fission product in  $\text{cm}^3/\text{g}$
- $K_{ab}$ : Absorption coefficient of fission product in  $\text{cm}^3/\text{g} \cdot \text{sec}$
- $\lambda$ : Decay coefficient of fission product in  $1/\text{sec}$
- $h$ : Head in  $\text{cm}$
- $q_s$ : Quantity of fission product  $\text{g/cm}^3$
- $Q$ : Intensity of infiltration in  $\text{C/cm}^2 \cdot \text{sec}$
- $\beta$ : Desorbed coefficient (-)
- $H$ : Total potential in  $\text{cm}$
- $K_x, K_y$ : Coefficient of permeability in  $\text{cm/sec}$
- $l_x, l_y$ : Direction cosine of normal on the boundary
- $g$ : Inflow rate of boundary  $\text{g/cm}$

図一 核種の移動経路と核種の移動に関する基礎式

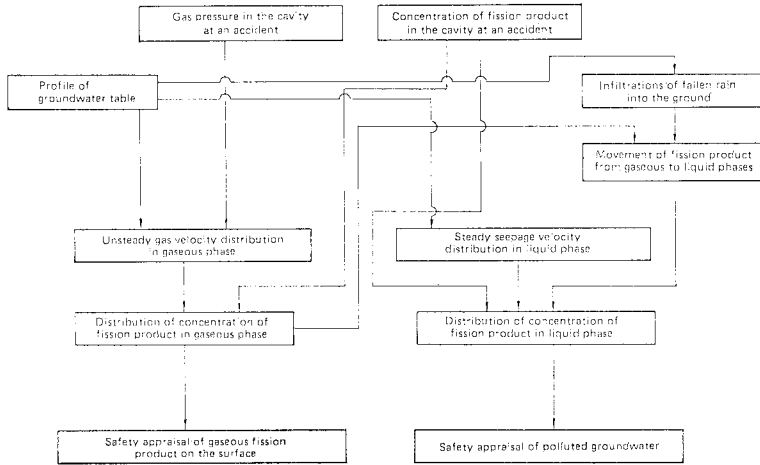


図-2 放射性核種の地下移動に関する数値シミュレーション手法のフロー図

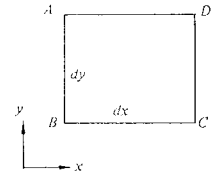


図-3 2次元多孔体要素

$$dy \cdot \left( F_x + \frac{\partial F_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

である。したがって、四辺形の  $x$  方向の核種の増加は、

$$-dx \cdot dy \cdot \frac{\partial F_x}{\partial x} \dots\dots\dots (3)$$

である。同じく  $y$  方向で、

$$-dx \cdot dy \cdot \frac{\partial F_y}{\partial y} \dots\dots\dots (4)$$

である。一方、この直方体の中の核種の量は、 $e$  を媒体の間隙比、 $\rho$  を比重、 $C$  を核種の液体中または気体中の濃度、 $q$  を核種の土に吸着された量とすると、核種の量は、

$$\left( \frac{e}{1+e} \cdot C + \frac{1}{1+e} \cdot \rho \cdot q \right) dx \cdot dy \dots\dots\dots (5)$$

であり、核種量の単位時間当りの増加は、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e}{1+e} \cdot C + \frac{1}{1+e} \cdot \rho \cdot q \right) dx \cdot dy \dots\dots\dots (6)$$

である。これは質量保存の法則によって、先に求めた核種の増加と等しくなるはずである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{e}{1+e} \cdot C + \frac{1}{1+e} \cdot \rho \cdot q \right) = - \frac{\partial F_x}{\partial x} - \frac{\partial F_y}{\partial y} \dots\dots\dots (7)$$

$F$  は2成分からなっている。

1) 1つは液体または気体の流動で輸送されるもので  $\{e/(1+e)\} \cdot v \cdot C$  である。ここに、 $v$  は断面平均流速である。

2) 他の1つは拡散で輸送されるもので濃度勾配に比例し、 $D \cdot \{e/(1+e)\} \cdot \partial C / \partial L$  である。

したがって、 $F_x, F_y$  は次式となる。

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{e}{1+e} \cdot v_x \cdot C - D_x \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \\ F_y &= \frac{e}{1+e} \cdot v_y \cdot C - D_y \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

次に  $q$  は核種の土への吸着量である。想定事故時においても、地下式原子力発電所から周辺岩盤に放出される核種の濃度はきわめて低く、核種が土に吸着する量はその飽和量よりも十分に小さいと考えられる。したがって、 $q$  は付着係数  $K_{ad}$ 、吸収係数  $K_{ab}$  を使って次式で

地下空洞に放出される場合を想定する。そして、図-1に示す番号の順に、これらの核種が地下空洞周辺地盤の気相および液相に伝わる。空洞内は約5気圧に上昇し、空洞内の核種はおもにこの気圧の上昇による空気移動によって気相中に移動される。また、液相中においては、固相への付着、吸収を伴う透水、拡散によって移動される。さらに、気相中の核種は、その後の降雨の地下への浸潤によって、地下水面下の液相へ輸送されるものとはここでは想定する。

以上の移動経路を数値シミュレーションする場合の概略のフローを 図-2 に示す。また、地下空洞周辺の各地点における基礎式を 図-1 に示す。これらのうちで、非定常気体拡散ならびに定常浸透流に関する基礎式およびその解析法は確立されているが、もっとも重要な核種輸送に関する基礎式およびその一般的な解析法は確立されていないようである。したがって、以下に核種輸送に関する基礎方程式とその解析法を述べる。

#### 4. 多孔性地盤中での核種輸送に関する基礎方程式とその解析法

##### (1) 核種輸送の基礎方程式

2次元  $x, y$  座標系で、図-3 に示すように、多孔体中の四辺形 ABCD を考える。

単位奥行をもつ一辺 AB 面を通して単位時間に流入する放射性核種の量は、

$$dy \cdot \left( F_x - \frac{\partial F_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{2} \right) \dots\dots\dots (1)$$

である。ここに、 $F_x$  は単位面積当りに通過する核種の Flux である。同じく、CD 面より出ていく核種の量は、

表わせる<sup>8)</sup>。

$$q = K_{ad} \cdot C + \int K_{ab} \cdot C dt \dots\dots\dots (9)$$

したがって、式 (7) の輸送方程式は次式で表わせる。なお、核種の自然減衰量を  $\lambda \cdot C$  として加える<sup>9)</sup>。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ &- \frac{\partial}{\partial x} (v_x \cdot C) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y \cdot C) \\ &- \frac{\rho}{e} \left( \frac{\partial}{\partial t} K_{ad} \cdot C + K_{ab} \cdot C \right) - \lambda \cdot C \end{aligned} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $C$ ：核種の濃度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $D_x, D_y$ ：拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)、 $v_x, v_y$ ：平均流速 (cm/sec)、 $\rho$ ：多孔体の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $e$ ：間隙比 (—)、 $K_{ad}$ ：核種の付着係数 (cm<sup>3</sup>/g)、 $K_{ab}$ ：核種の吸収係数 (cm<sup>3</sup>/g·sec)、 $\lambda$ ：核種の減衰係数 (1/sec)。

(2) 有限要素法による輸送方程式の解析法

式 (10) の輸送方程式は 1 次元の簡単なモデルに対して解析的に解くことができる<sup>10)</sup>。しかし、複雑な 2 次元あるいは 3 次元形状をしたモデルに対しては解析的に解くことが困難である。したがって、ここでは、複雑な形状をしたモデルに対しても近似的に計算することができる有限要素法による 2 次元の解析法を以下に述べる。

濃度  $C$  に関する 2 次元輸送方程式は式 (10) より次式で示される。

$$\begin{aligned} \left( D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - \left( v_x \frac{\partial C}{\partial x} + v_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ - \left( \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) C - \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、未知関数  $C$  は領域内で一価とし、 $D_x, D_y, v_x, v_y, \rho/e, K_{ab}, \lambda, K_{ad}, \partial C/\partial t$  はある領域内では一定とする。そして、境界条件の一般的なものとして、次の 2 種類がある。

(a)  $C$  の値が境界上で指定される。  
 $C = C_b \dots\dots\dots (12)$

(b) 境界が不透水層になる。  
 $D_x \frac{\partial C}{\partial x} l_x + D_y \frac{\partial C}{\partial y} l_y = 0 \dots\dots\dots (13)$

$l_x, l_y$  は境界上の法線の方向余弦である。

式 (11) の輸送方程式を解くための有限要素法の定式化には、重み付き残差法による<sup>11)</sup>場合と汎関数を用いる場合とが考えられる。ここでは汎関数を用いて有限要素法の定式化を以下に行った。

式 (11)、(12) および式 (13) の汎関数には指数関数が含まれ、数値計算では精度上好ましくない。したがって、汎関数に指数が含まれないように、もとの方程式を

変数変換する。そして、変数変換式として次式が考えられる<sup>12)</sup>。

$$\eta = C \cdot e^{\beta/2} \dots\dots\dots (14)$$

$$\beta = -\frac{v_x}{D_x} x - \frac{v_y}{D_y} y \dots\dots\dots (15)$$

変換された未知数  $\eta$  について、式 (11)~(13) に対応する式は次のようになる。

輸送方程式

$$\begin{aligned} \left( D_x \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{v_x^2}{4 D_x} + \frac{v_y^2}{4 D_y} \right) \eta \\ - \left( \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) \eta - \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (16)$$

境界条件

(a)  $\eta = C_b \cdot e^{\beta/2} \dots\dots\dots (17)$

(b)  $\left( D_x \frac{\partial \eta}{\partial x} l_x + D_y \frac{\partial \eta}{\partial y} l_y \right) + \left( \frac{v_x}{2} \eta l_x + \frac{v_y}{2} \eta l_y \right) = 0 \dots\dots (18)$

そして、式 (16)~(18) の汎関数として、次式が見いだされる。

$$\begin{aligned} z = \iint \left[ \left[ \frac{D_x}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{D_y}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right] \right. \\ \left. + \left\{ \frac{v_x \eta}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{v_y \eta}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right\} \right. \\ \left. + \left( \frac{v_x^2}{4 D_x} + \frac{v_y^2}{4 D_y} \right) \frac{\eta^2}{2} + \left( \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) \frac{\eta^2}{2} \right. \\ \left. + \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} \eta \right] dx dy \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

有限要素法では場のエネルギーを表わす汎関数  $z$  を最小にすることが解析上の目標となる。ここでは三角形要素について取り扱うことにし、3 節点  $i, j, m$  における  $\eta$  に関する変分式は次のようになる。

$$\left\{ \frac{\partial z}{\partial \eta} \right\}^e = [H]^e \{ \eta \}^e + [P]^e \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} \right\}^e \dots\dots\dots (20)$$

$[H]^e$  の要素  $h_{ij}$ 、 $[P]^e$  の要素  $p_{ij}$  はそれぞれ次式になる。

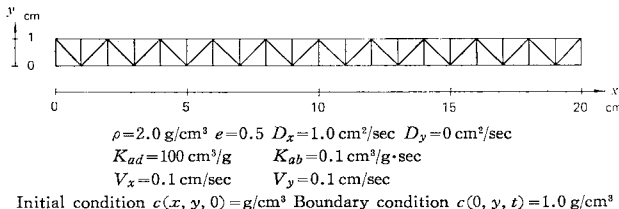
$$\begin{aligned} h_{ij} = \frac{D_x}{4A} q_i q_j + \frac{D_y}{4A} r_i r_j + \frac{v_x}{12} (q_i + q_j) \\ + \frac{v_y}{12} (r_i + r_j) + \left( \frac{v_x^2}{4 D_x} + \frac{v_y^2}{4 D_y} \right. \\ \left. + \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) \times \begin{cases} 4/6 & (i=j) \\ 4/12 & (i \neq j) \end{cases} \dots\dots\dots (21) \end{aligned}$$

$$p_{ij} = \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \times \begin{cases} 4/6 & (i=j) \\ 4/12 & (j \neq j) \end{cases} \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 $q_i = y_j - y_m, q_j = y_m - y_i, r_i = x_m - x_j, r_j = x_i - x_m, A$  は三角形の面積である。

式 (20) を全要素について、重ね合わせてつり合い式をたてると次式になる。

$$\left\{ \frac{\partial z}{\partial \eta} \right\} = [H] \{ \eta \} + [P] \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} \right\} = 0 \dots\dots\dots (23)$$



図—4 有限要素モデルと諸物性値

$$a = \frac{1}{D} \left( K_{ab} + \lambda \frac{e}{\rho} \right), \quad b = \frac{v}{D},$$

$$d = \frac{1}{D} \left( 1 + K_{ad} \frac{\rho}{e} \right)$$

この理論解と有限要素法による数値解とを照合する目的で、図—4 に示す有限要素モデルと諸物性値で計算を行い、図—5 を得た。

したがって、式 (23) の  $\{n\}$  を逐次積分法によって、時刻ごとに求めることができる<sup>13)</sup>。

(3) 理論解と数値解との照合

輸送方程式の1次元基礎式

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right) - v \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\rho}{e} \left\{ K_{ad} \frac{\partial C}{\partial t} + \left( K_{ab} + \lambda \frac{e}{\rho} \right) C \right\}$$

.....(24)

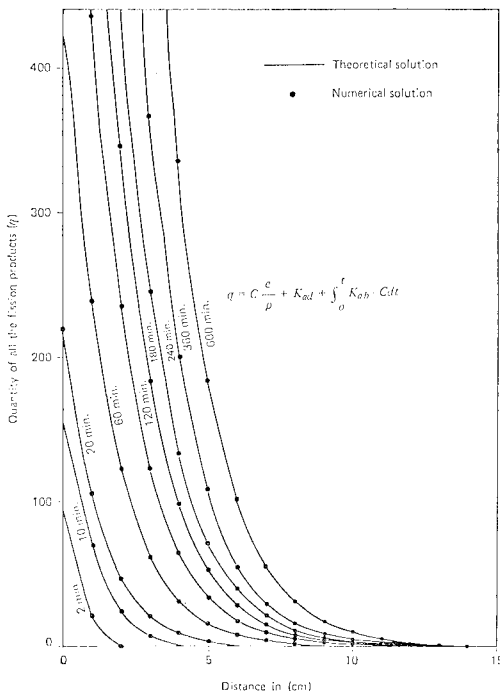
の解は、初期条件  $C(x, 0) = 0$ 、境界条件  $C(0, t) = C_0$  では、次式になる<sup>14)</sup>。

$$C(x, t) = \frac{2 C_0}{\sqrt{\pi}} e^{b/2 \cdot x} \int_{x/2 + \sqrt{d|t}}^{\infty} x/2 + \sqrt{d|t}$$

$$\cdot \exp \left\{ - \left( a + \frac{b^2}{4} \right) \frac{x^2}{4 \xi^2} - \xi^2 \right\} d \xi$$

.....(25)

ここに、



図—5 理論解と数値解との比較

5. 想定事故時における核種の地中格納効果

(1) 解析の特徴および仮定

ここでは、先に述べた解析法によって、原子炉の仮想事故時に地下空洞周辺の地盤中に放出される放射性核種が地盤の気相中を移動して大気中に漏えいする過程について解析した。

解析対象として地下式原子力発電所のモデルについてのおもな特徴ならびに仮定を以下に記述する。

1) 原子炉型は PWR である。ただし、BWR についてもここで取り扱った PWR の検討手法 および解析結果とほとんど差がないと思われる。

2) 発電出力は約 1000 MW である。

3) 一次冷却材喪失の仮想事故 (LOCA) を想定する。この事故は想定される最大の事故である。

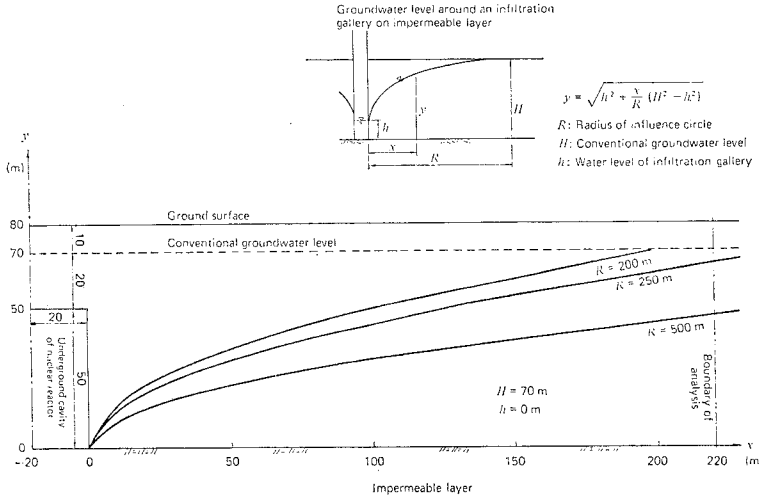
4) 解析対象とした放射性ガスは <sup>85</sup>Kr と <sup>131</sup>I である。地下式原子力発電所の場合には、事故発生より大気中に核種が漏えいする時間遅れが大きい (土かぶり が 30 m では 100 日~1000 日と考えられる) ため、半減期の長い核種が安全性検討には重要となる。ちなみに <sup>85</sup>Kr は事故時に生成される希ガスのうちでもっとも半減期が長く 10.73 年であり、<sup>131</sup>I は、よう素のうちでもっとも半減期が長く 8.06 日である。

5) 格納容器の外側には直接に地下空洞の岩盤が接している。地上式では格納容器の外側に生体遮へい (2 次遮へい) がある。したがって、今回の地下式の検討では生体遮へいを岩盤に期待している。地上式における事故時の安全評価では、生体遮へいによって格納容器から放出されるガスのうち、希ガスは吸収されないが、よう素は 90% が吸収されるとしている。

6) 地下空洞の土かぶりを 30 m とする。地下空洞が掘削可能な土かぶりは 100 m 以上であると思われるので、今回の解析より得られる結果よりも実際にはさらに核種の格納効果大きいと考えられる。

7) 岩盤の接合面やクラックの存在を考慮しないで、一様な岩盤を想定する。

8) 解析の対象とする <sup>85</sup>Kr および <sup>131</sup>I はすべて気体分子として存在しており、エアロゾル粒子としての存在は考えない。さらに、核種と土粒子との間での吸着は表



図一六 原子炉地下空洞周辺の地下水面形状

面における吸着のみを考え、表面での化学反応は考えない。

9) 原子炉事故後約1日までは格納容器内の温度は100~150°Cに上昇するので、空洞周辺岩盤の温度も上昇すると考えられる。そして、高温になると常温の場合よりも拡散係数が大きくなることが予想される。しかしながら、<sup>85</sup>Kr, <sup>131</sup>I 以外の多くの気体分子について実験的に調べられた拡散係数の温度による影響は比較的小さく、常温より100°C程度の温度上昇では、拡散係数の値はただか2倍にしかならない。このことを考慮すると、<sup>85</sup>Kr, <sup>131</sup>I においても、後述の図一八の仮想事故時における100~150°Cの温度上昇では、拡散係数は常温時の値と比べて、オーダー的に変化することはないものと思われる。

(2) 地下空洞周辺地盤の解析モデル

原子炉事故時において、放射性ガスが輸送される空洞周辺地盤の気相の領域を決めるためには、地下水面形状を推定する必要がある。そして、以下のような仮定のもとで、図一六のような地下水面形を考えることとする。

- 1) 地下空洞の断面を幅40m、高さ50mとする。これは発電出力1000MWのPWRの格納容器を収納する断面寸法である。
- 2) 地下空洞の土かぶりを30mとする。
- 3) 地下空洞周辺の地下水は水平集水埋渠の水面形<sup>15)</sup>とする。
- 4) 在来地下水位は地表面より10m下がりとする。
- 5) 地下空洞は不透水層上にある。
- 6) 地下空洞内の水位をh=0とする。核種の地表面への輸送に関しては、気相の領域が広く、厳しい条件であり、h=0の場合に比較して安全側の検討となる。

7) 影響半径をR=250mとする。

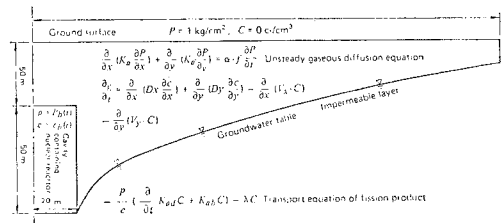
そして、図一七に示す地下水面より上部の地盤を節点数191で三角形要素に分割した。地下式原子力発電所に適しているわが国の海岸地帯によくみられる岩盤を想定して、間隙率f=0.33、透気係数K<sub>a</sub>=1×10<sup>-4</sup>cm/secとした。なお、透気係数は、一般に透水係数の10~10<sup>2</sup>倍のデータが得られている<sup>16)</sup>。

(3) 想定事故時における地盤中での気体流速分布

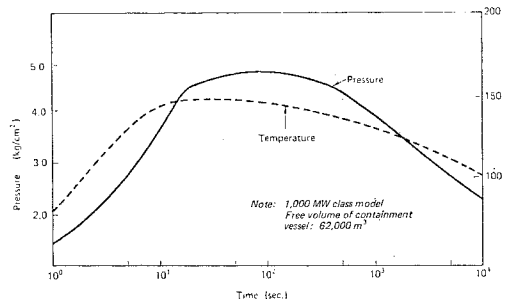
原子炉の仮想事故後の格納容器内の圧力変化は、1000MWの発電出力で格納容器自由体積62000m<sup>3</sup>の場合、図一八のように計算される。図には温度変化も記述されている。格納容器内の圧力がおのまか空洞壁面の岩盤に伝わるものとし、図一八の圧力変化曲線を空洞壁面の圧力境界条件として、図一にも示した非定常気体拡散の方程式

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_a \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_a \frac{\partial P}{\partial y} \right) = \alpha \cdot f \frac{\partial P}{\partial t} \dots \dots \dots (26)$$

を解き、地盤中の空気圧力分布を求めた。式(26)における透気係数、間隙率は前述のようにK<sub>a</sub>=1×10<sup>-4</sup>cm/sec、f=0.33とし、気体の圧縮率はα=7.14×10<sup>-4</sup>1/cm (α=(1/γ)・(P/r<sub>w</sub>))、比熱比γ=1.4、圧力P=1kg/



図一七 地盤の気相中の核種移動計算のモデル



図一八 仮想事故時の格納容器内の圧力、温度変化

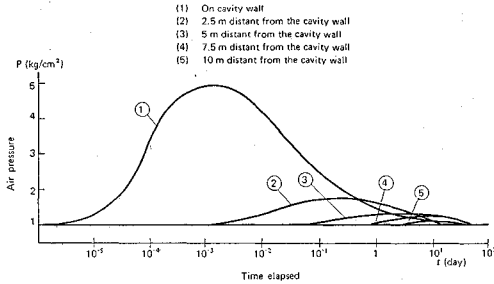


図-9 地盤中の空気圧変化曲線

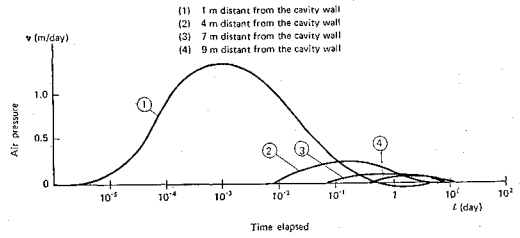


図-10 地盤中の空気速度変化曲線

cm<sup>2</sup>, 水の単位重量  $\gamma_w = 1 \text{ g/cm}^3$  より) とした。

解析で得られた地盤中の空気圧変化曲線および空気速度分布を 図-9 および 図-10 に示す。空洞壁面より 5 m も離れた箇所では、空気圧力が上昇しないことがわかる。また、空気速度が顕著に生じるのは事故後約 1 日までであり、その地盤領域は空洞壁面より約 5 m の範囲内である。したがって、放射性核種が地盤中を移動する過程は、事故後 1 日目ではおもに空気移動によって輸送され、1 日以後はおもに核種の分子拡散によって移動するものと考えられる。なお、この地盤中の非定常な速度分布は後述の核種の濃度分布の解析に用いられる。

(4) 想定事故時に格納容器内に放出される核種

現行の地上式原子力発電所の事故時における安全評価の概要を 図-11 に示す。すなわち被曝線量の計算において考慮すべき被曝線量の種類は以下のものである。

- ① よう素吸入による甲状腺内部被曝線量
- ② 希ガスの  $\gamma$  線による外部被曝線量
- ③  $\gamma$  線のスカイシャイン線量
- ④ 炉心からの  $\gamma$  線による直接線量

ほかに参考として、希ガスの  $\beta$  線による被曝線量があげられる。

地下式の場合には、上述の ③、④ の  $\gamma$  線は岩のかぶりがあるので通過せず大気中に放出されることはないと考えられる。したがって、地下式の事故時における安全評価の対象となる線

量は、① よう素と ② 希ガスだけと考えられる。

よう素と希ガスの仮想事故時における放出過程の模式図を 図-12 に示す。図-12 の放出過程は以下のような仮定に基づいている。

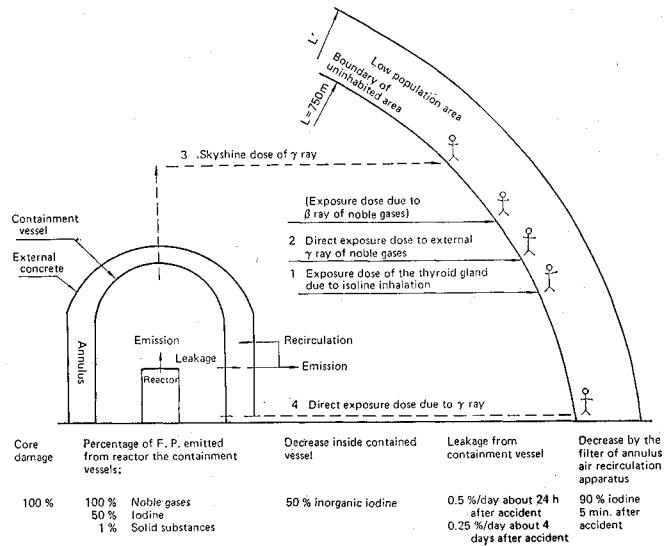


図-11 地上式原子炉事故時の安全評価の概要例

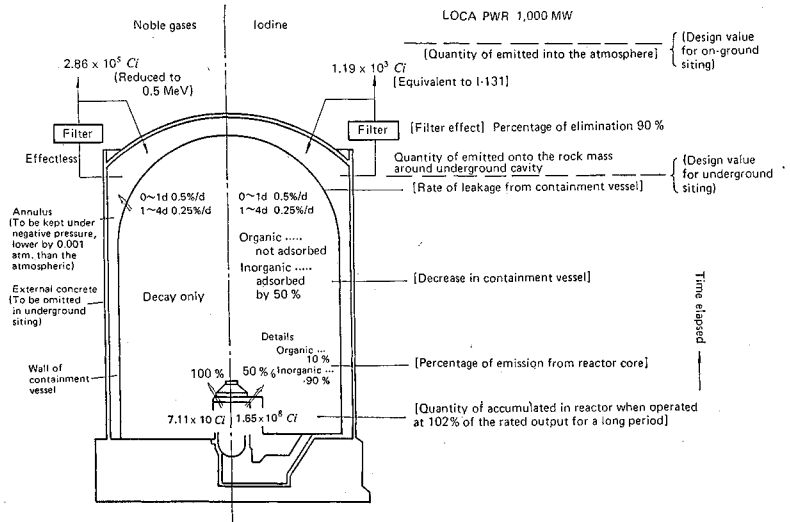


図-12 仮想事故時の核分裂生成物の放出過程模式図

1) 事故発生直前まで、原子炉は定格の102%出力で長時間にわたって運転されていたものとする。

2) 全燃料棒の被覆材が損傷するものとし、燃料ペレットと被覆材のすきまから、炉心に内蔵されている核分裂生成物に対し、次の割合で放出されるものとする。

希ガス 100%, よう素 50%

3) 放出されたよう素のうち10%は有機よう素、残り90%は無機よう素の形態をとるものとする。

4) 原子炉格納容器内に放出されたよう素のうち、無機よう素については50%が原子炉格納容器や同容器内の機器に付着し、漏えいに寄与しないものとする。

5) 原子炉格納容器内に放出された核分裂生成物のアイスコンデンサ設備および格納容器スプレー水による除去効果は無視する。

6) 原子炉格納容器からの漏えい率は次のように仮定する。事故後24時間までは0.5%/day、その後3日間は0.25%/day。

7) 地上式ではアニュラス部の空気再循環装置のフィルター効果によってよう素は90%除去されると仮定するが、今回の地下式の検討ではアニュラス部を設置しないと仮定するため、原子炉格納容器から漏えいしたよう素はそのまま周辺の岩盤に放出されるものとする。希ガスについては、地上式においてもアニュラス空気再循環装置のフィルター効果は無視している。

格納容器内に放出される希ガスおよびよう素の主要な種類と量を表-1および表-2に示す。これらの核種のうちで、地下式の場合に最初に検討しなければならないのは半減期が長い核種である。したがって、今回の解析では、よう素の代表として<sup>131</sup>I(半減期8.07日)、希

表-1 希ガスの炉内蓄積量

Fission product	Half-life	$\gamma$ -ray energy (MeV)	Quantity of in-pile accumulation (Ci)
Xe-131 m	11.9 d	0.0039	$7.01 \times 10^5$
133 m	52.6 h	0.033	$4.71 \times 10^6$
133	5.31 d	0.044	$1.96 \times 10^8$
135 m	15.6 min	0.42	$5.35 \times 10^7$
135	9.14 h	0.24	$1.87 \times 10^8$
Kr-83 m	1.86 h	0.00084	$1.45 \times 10^7$
85 m	4.40 h	0.16	$4.53 \times 10^7$
85	10.76 y	0.0022	$7.65 \times 10^6$
87 m	76.0 min	1.0	$8.15 \times 10^7$
88 m	2.80 h	1.7	$1.12 \times 10^8$

表-2 よう素の炉内蓄積量

Fission product	Half-life	Quantity of in-pile accumulation (Ci)
I-131	8.07 d	$8.76 \times 10^7$
132	2.26 h	$1.38 \times 10^8$
133	21 h	$1.97 \times 10^8$
134	52 min	$2.80 \times 10^8$
135	6.68 h	$1.79 \times 10^8$

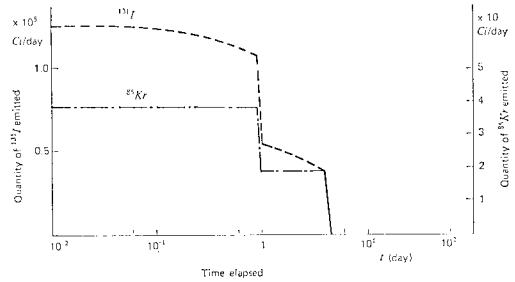


図-13 核種の空洞内への放出量

ガスの代表として<sup>85</sup>Kr(半減期10.76年)を検討することにする。

以上の核種の放出過程の仮定に基づいて、<sup>131</sup>Iと<sup>85</sup>Krが空洞内に放出される量を求めると図-13になる。なお、これらの放出量 $q$ (キュリー/sec)を用いて、想定事故時の空洞内の核種の濃度変化曲線 $C_b$ (キュリー/cm<sup>3</sup>)は次式で求められる。

$$C_b = q / (A \cdot v) \dots \dots \dots (27)$$

$A$ は空洞内の表面積であり、今回の解析では $A=11780$  m<sup>2</sup>とした。 $v$ は空洞内の表面を通過する空気速度(cm/sec)であり、前述の空洞内の圧力上昇による空洞周辺地盤の空気速度分布より求められる。

(5) 地盤中の核種の拡散係数、付着係数等の物性値

式(10)で表わされる濃度 $C$ に関する輸送方程式を解くには以下の物性値が必要である。

a) 拡散係数 $D_e$ ( $D_e = D_x = D_y$ )

$$D_e = 8.2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec} \dots \dots \dots ^{131}\text{I}$$

$$D_e = 1.6 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec} \dots \dots \dots ^{85}\text{Kr}$$

上記の値は以下のようにして算出した。

2成分系ガス分子の相互拡散係数 $D_{AB}$ (cm<sup>2</sup>/sec)はHirschfelderら<sup>17)</sup>によれば次式で与えられる。

$$D_{AB} = 0.0018583 \frac{T^{3/2}}{P \cdot \sigma_{AB}^2 \cdot \Omega_{AB}} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \dots \dots \dots (28)$$

ここに、 $T$ は絶対温度を表わし、常温の場合を考えると、 $T=293^\circ\text{K}$ 、 $P$ は圧力であり $P=1$  atmである。そして、 $\sigma_{AB}$ は分子の衝突直径を表わし、Air-I系では $\sigma_{AB}=4.300[\text{\AA}]$ 、Air-Kr系では $\sigma_{AB}=3.558[\text{\AA}]$ である。 $\Omega_{AB}$ は拡散に関する衝突積分であり、Air-I系では $\Omega_{AB}=1.20$ 、Air-Kr系では $\Omega_{AB}=1.00$ である<sup>18)</sup>。

$M_A, M_B$ はガス成分 $A, B$ の分子量であり、Airでは $M=28.97$ 、<sup>131</sup>Iでは $M=262.0$ 、<sup>85</sup>Krでは $M=85.0$ である。以上の値を式(28)に代入して、Air-I系では $D_{AB}=0.082$  cm<sup>2</sup>/sec、Air-I系では $D_{AB}=0.16$  cm<sup>2</sup>/secが得られる。そして、多孔体中における有効拡散係数 $D_e$ は、 $D_e = D_{AB} \cdot f / \theta$  ( $f$ : 間隙率、 $\theta$ : 屈曲度)で与



えられ、式(10)の輸送方程式にはあらかじめ間隙率が含まれているため、 $f=1$ とし、 $\theta$ の値は粗い層で10、密の層で $10^2$ のオーダーで測定されている<sup>19)</sup>。ここでは $\theta=10$ とする。

b) 付着係数(分配係数)  $K_{ad}$

$$K_{ad}=100 \text{ cm}^3/\text{g} \dots\dots\dots {}^{131}\text{I}$$

$$K_{ad}=0 \dots\dots\dots {}^{85}\text{Kr}$$

地下空洞周辺の岩盤を試料とした付着係数の値に関する報告がみあたらないので、今回の解析には、標準砂および川砂の試料による測定結果<sup>12)</sup>より、よう素の付着係数を  $100 \text{ cm}^3/\text{g}$  とした。したがって、今回の解析結果では、地中での核種の格納効果は小さく評価される傾向にある。なお、希ガスの付着係数は無視する。

c) 吸収係数  $K_{ab}$

$$K_{ab}=0.2 \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{sec} \dots\dots\dots {}^{131}\text{I}$$

$$K_{ab}=0 \dots\dots\dots {}^{85}\text{Kr}$$

付着係数と同じく、標準砂および川砂の試料による測定結果より<sup>14)</sup>、よう素の吸収係数を  $0.2 \text{ cm}^3/\text{g} \cdot \text{sec}$  とした。

d) 減衰係数  $\lambda$

$$\lambda=9.96 \times 10^{-7} \text{ 1/sec} \dots\dots\dots {}^{131}\text{I}$$

$$\lambda=2.13 \times 10^{-9} \text{ 1/sec} \dots\dots\dots {}^{85}\text{Kr}$$

減衰係数は核種の半減期の逆数とする。<sup>131</sup>Iの半減期は8.06日であり、<sup>85</sup>Krは10.73年である。

以上の値を表-3に示す。

(6) 想定事故時における放射性核種の地表への漏えい

前述までの解析条件のもとに、原子炉の仮想事故時に地盤中に放出される<sup>131</sup>Iおよび<sup>85</sup>Krの地中格納効果

表-3 核種の物性値

Coefficient	<sup>85</sup> Kr	<sup>131</sup> I
$D_x \cdot D_y$ (cm <sup>2</sup> /sec)	$1.6 \times 10^{-2}$	$8.2 \times 10^{-3}$
$K_{ad}$ (cm <sup>3</sup> /g)	0	100
$K_{ab}$ (cm <sup>3</sup> /g·sec)	0	0.2
$\lambda$ (1/sec)	$2.13 \times 10^{-9}$	$9.96 \times 10^{-7}$

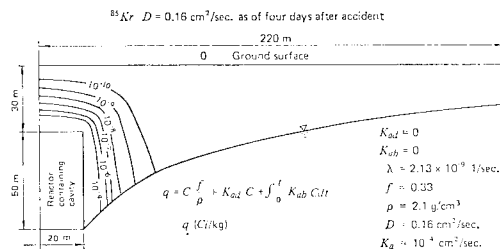


図-14 地盤中の固相の単位重量あたり吸着されている核種量  $q$  (キュリー/kg) (<sup>85</sup>Krの  $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

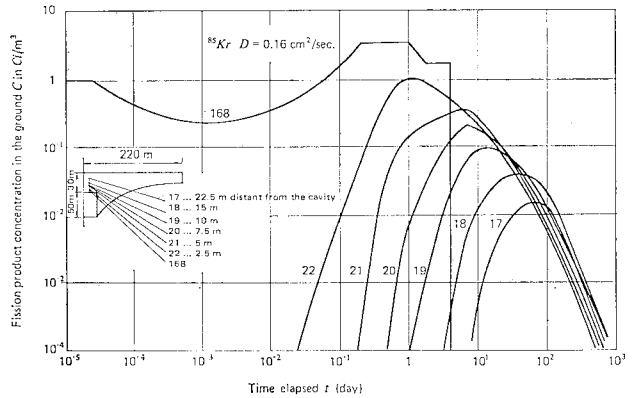


図-15 地盤中の核種濃度の経時変化 (<sup>85</sup>Krの  $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

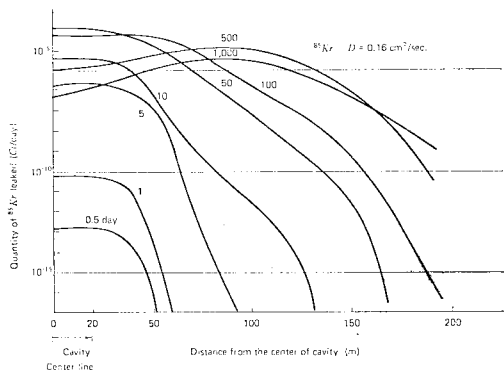


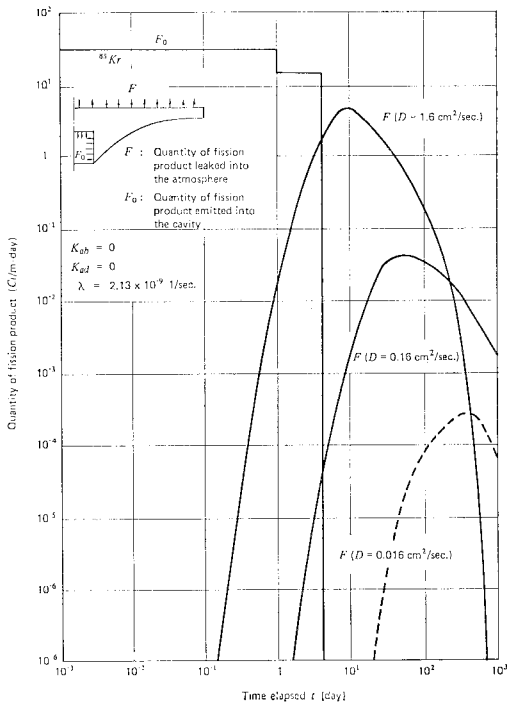
図-16 地表面から大気中への核種の漏えい量の経時変化の分布 (<sup>85</sup>Krの  $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

について解析を行った。

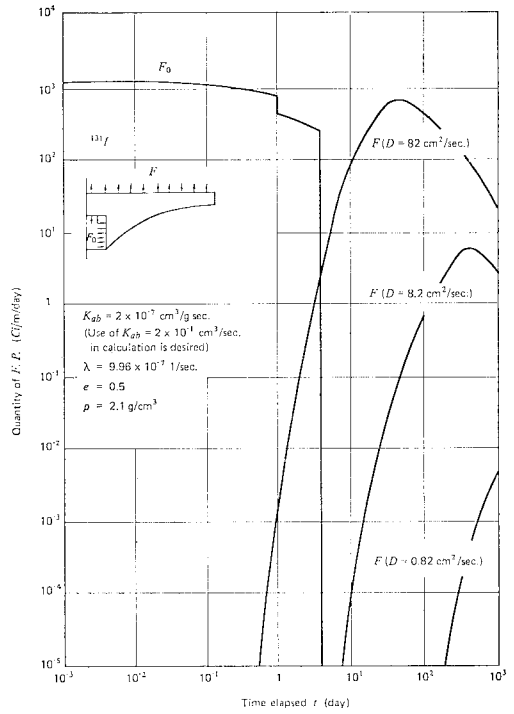
表-3に示した核種の物性値では、核種の移動が遅く、有限要素法による数値解析の解が収束するためには、三角形要素の1辺を1cm以下にしなければならない。ここでは、拡散係数  $D$  を大きくしたり、吸収係数  $K_{ab}$  を小さくしたりして、核種の移動を実際よりも速くさせた場合の解析を行って、その結果より実際の移動状態を想定した。

<sup>85</sup>Krについて、表-3に示す拡散係数  $D=0.016 \text{ cm}^2/\text{sec}$  では数値解の収束が得られなかったため、 $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、 $D=1.6 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の2ケースの解析を行った。

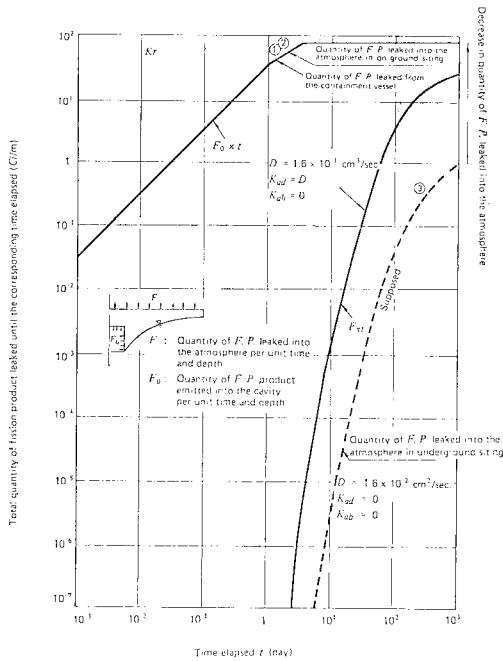
<sup>85</sup>Krの  $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の場合について、地盤中の固相の単位重量あたりに吸着されている核種量の分布を図-14に、地盤中の核種濃度の経時変化を図-15に、地表面から大気中への核種の漏えい量の経時変化の分布を図-16に示す。図-17には空洞内に放出される量と地表面から大気中への核種の漏えい量の経時変化を示す。図-17において、 $D=1.6 \text{ cm}^2/\text{sec}$  と  $D=0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$  の場合の漏えい量の経時変化のグラフより、時間  $t$  ならびに漏えい量  $F$  を外捜比例させることにより、 $D$



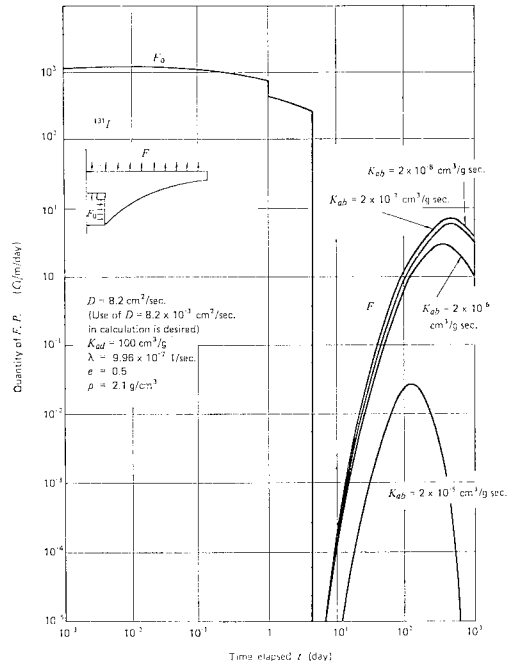
図一七 地表面から大気中への核種の漏えい量 (<sup>85</sup>Kr の場合)



図一十九 <sup>131</sup>I の  $K_{ab}=2 \times 10^{-7}$  1/sec で  $D$  をパラメーターにした場合の漏えい量



図一八 大気中に漏えいする <sup>85</sup>Kr の地上式と地下式の比較



図一二十 <sup>131</sup>I の  $D=8.2$  cm²/sec で  $K_{ab}$  をパラメーターにした場合の漏えい量

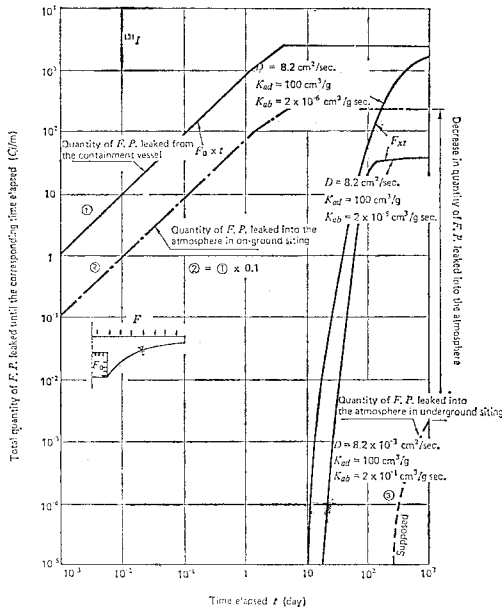


図-21 大気中に漏えいする <sup>131</sup>I の地上式と地下式の比較

=0.016 cm<sup>2</sup>/sec の場合の漏えい量の経時変化を推定した。D=0.016 cm<sup>2</sup>/sec の場合には大気中への漏えいのピークは事故後約 500 日であり、そのピーク量は空洞内のピーク量の約 1/10<sup>5</sup> に減少することが予想される。さらに、図-18 には事故経過時間までの核種総量を示す。事故後 1000 日までに大気中へ漏えいする量は空洞内に放出される量の約 1/10<sup>2</sup> に減少することがわかる。Kr などの希ガスは地盤中での吸着が期待できないので、大気への漏えいの減少量は少ないが、大気への漏えいの時間的希釈効果が大きいと思われる。

なお、<sup>85</sup>Kr には (4) で述べたように、地下式では地上式の場合に設置されるアニュラス部のフィルター効果がないため、格納容器から漏えいした核種量は大気に放出されることになる。したがって、今回の解析モデルにおける地下式では、大気中に放出する量は地上式に比べて約 1/10<sup>2</sup> に減少することになる。

<sup>131</sup>I についても同様に、表-3 に示す拡散係数 D=8.2×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/sec、吸収係数 K<sub>ad</sub>=0.2 cm<sup>3</sup>/g・sec では数値解が得られなかったので、K<sub>ab</sub>=2×10<sup>-7</sup> cm<sup>3</sup>/g・sec の場合に D=82, 8.2, 0.82 cm<sup>2</sup>/sec の 3 ケース、D=8.2 cm<sup>2</sup>/sec の場合に K<sub>ab</sub>=2×10<sup>-8</sup>, 2×10<sup>-7</sup>, 2×10<sup>-6</sup>, 2×10<sup>-5</sup> cm<sup>3</sup>/g・sec の 4 ケースの解析を行った。解析結果を図-19~21 に示す。D をパラメーターにした場合の図-19 と K<sub>ab</sub> をパラメーターにした場合の図-20 とから、<sup>85</sup>K の場合と同様に、時間 t ならびに漏えい量 F を外挿比例させることにより、実際に想定される D=8.2×10<sup>-3</sup> cm<sup>2</sup>/sec、K<sub>ab</sub>=0.2 cm<sup>3</sup>/g・sec の場合には、大

気中への漏えいのピークは事故後 1000 日以降となり、そのピーク量は空洞内へのピーク放出量の 1/10<sup>5</sup> 以下に減少することが推定される。なお、地上式の場合にはよう素などの希ガスはアニュラス部のフィルター効果によって格納容器から漏えいした核種量の 90% が除去されるので、図-21 に示すように、今回の地下式の解析モデルでは地上式に比べて仮想事故時に大気中に放出する量を約 1/10<sup>2</sup> に減少することになる。

今回の解析モデルでは地下空洞の土かぶりを 30 m にした。しかしながら、実際の地下空洞の多くは土かぶりが 100 m 以上と考えられる。したがって、地盤中における核種の格納効果は今回の解析結果よりもさらに大きくなることが予測される。

## 6. 結 語

地下式原子力発電所の想定事故時における地下空洞周辺での核種の地下移動についての検討を行った。以下におもな解析の仮定および解析結果を述べる。

(1) 原子炉の想定事故時において、地下空洞に放出された核種は地盤中で次のように移動されるものとする。想定事故時には空洞内の圧力は約 5 気圧に上昇する。地下水面より上部の気相中においては、空洞内の核種はおもにこの空気圧の上昇による空気移動および分子拡散によって移動される。また、地下水面より下部の液相中においては、固相への付着、吸収を伴う透水、拡散によって移動される。さらに、気相中の核種は、その後の降雨の地下への浸潤によって、地下水面下の液相へ移動されるものとして想定する。

(2) 現在の地上式原子力発電所の事故時における安全評価の対象とする線量の種類は次のものである。① よう素吸入による甲状腺内部被曝線量、② 希ガスの r 線による外部被曝線量、③ r 線のスカイシャイン線量、④ 原子炉からの r 線による直接線量。地下式の場合には、③、④ の r 線は岩のかぶりが厚いので、r 線は通過せず考慮する必要はないと考えられる。したがって、地下式原子力発電所の事故時における安全評価の対象となる線量はよう素と希ガスによる被曝のみを検討すればよいと考えられる。

(3) 地下式原子力発電所の今回の検討では、生体遮へいを設置しないので、地上式の場合のようにアニュラス空間部におけるフィルター効果は期待できない。したがって、原子炉格納容器から漏えいしたよう素および希ガスはそのまま空洞周辺の岩盤に放出されるものとする。なお、地上式では、アニュラス部のフィルター効果によって、格納容器から漏えいしたよう素の 90% が除去でき、残り 10% が大気に放出されるものとしてい

る。

(4) 格納容器から漏えいするよう素および希ガスの主要な種類のうちで、地下式の場合に最初に検討しなければならないのは半減期が長い核種である。したがって、今回の解析では、よう素の代表として  $^{131}\text{I}$  (半減期 8.07 日)、希ガスの代表として  $^{85}\text{Kr}$  (半減期 10.76 年) を検討することにする。これらの核種が地下式の格納容器から漏えいする量は地上式の場合と同じとした。

(5) 地下空洞の土かぶりを 30 m とし、わが国の海岸山腹斜面によくみられる岩質を想定して、仮想事故 (1 次冷却材喪失の最大事故) 時における地下水面より上部の気相中における  $^{131}\text{I}$  と  $^{85}\text{Kr}$  の移動の解析を行い、次の結果が得られた。

(6) よう素は地盤中の固相への付着が期待できる核種である。地下式の場合に大気中に漏えいする  $^{131}\text{I}$  の量は地上式の場合の約  $1/10^5$  に減少する結果が得られた。一方、希ガスは地盤中の固相への付着が期待できない核種である。しかしながら、地下式の場合に大気中に漏えいする  $^{85}\text{Kr}$  の量は地上式の場合の約  $1/10^3$  に減少する結果が得られた。実際の地下空洞の多くは土かぶりが 100 m 以上と考えられる。したがって、地盤中における核種の格納効果は上述の結果よりもさらに大きくなることが予測される。

(7) 今後は、本報告における解析手法の妥当性を検討するために、実証的な実験およびガスの吸着特性の測定などを実施していく予定である。

(8) 本報告における数値解析プログラムは、放射性廃棄物の地中処分、石油の地下備蓄の予備検討にも役立つものと思われる。

謝 辞：本研究を進めるにあたり、京都大学工学部 土木工学科 丹羽義次教授、京都大学原子エネルギー研究所 高橋幹二教授ならびに高松工業高等専門学校 楠城力教授にご指導、ご助言をいただきました。末筆ながら感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 林 正夫・駒田広也：原子力発電所構造物の設計と施工。地下立地に関する研究開発の動向，土木学会誌，63 巻 4 月号，pp. 36~42，1978 年 4 月。
- 2) Watson, M.B., etc. : Underground Nuclear Power Plant Siting, Nuclear Engineering and Design, Vol. 33, No. 3, pp. 269~308, 1975.
- 3) Kammer, W.A., etc. : Underground Nuclear Power Plants with Surface Turbine Generators, Nuclear Engineering and Design, Vol. 33, No. 3, pp. 308~335, 1975.
- 4) Allensworth, J.A. : Underground Siting of Nuclear Power Plants; Potential Benefits and Penalties, Sandia Laboratories, SAND 76-0412, NUREG-0255, Aug. 1977.
- 5) 土木学会：原子力発電所の地下立地の安全性評価に関する研究，昭和 48 年度・科学技術庁原子力平和利用研究委託費成果報告書，1974。
- 6) 林 正夫：原子力発電所の地下立地，第 19 回発電水力講習会，1977 年 3 月。
- 7) 高橋幹二・楠城 力・田町敏夫：地下空洞による気体状核分裂生成物の格納性，京都大学原子エネルギー研究所彙報，別冊第 1 号，pp. 76~86，昭和 53 年 3 月。
- 8) 文献 7) の p. 79.
- 9) 文献 7) の p. 80.
- 10) 井上頼輝：放射性廃棄物の地中処分に関する基礎的研究，京都大学学位論文，昭和 45 年 11 月。
- 11) B.A. フィンレイソン：重みつき残差法と変分原理，鷺津ほか 2 名共訳，培風館，昭和 49 年 12 月。
- 12) Guymon, G.L., Scott, U.H. and L.R. Herrmann : A General Numerical Solution of the Two-Dimensional Diffusion-Convection Equation by the Finite Element Method, Water Resour. Res., Vol. 6, No. 6, pp. 1611~1617, Dec. 1970.
- 13) Wilson, E.L. and R.W. Clough : Dynamic Response by Step-by-Step Matrix Analysis, Proc. Symposium on the Use of Computers in Civil Engineering, Held in Lisbon, Portugal, Oct. 1963.
- 14) 高橋幹二ほか 3 名：放射性ヨウ素ガスの土砂中の挙動実験 (2)，京都大学原子エネルギー研究所彙報，Vol. 44, p. 63, 1973 年 9 月。
- 15) 土木学会編：水理公式集，p. 368，昭和 46 年。
- 16) 木島詩郎・橋本利郎・菰田一義：シールド工事における現場透気試験について，鹿島建設技術研究所年報，19 号，pp. 147~161, 1971 年。
- 17) 化学工学協会：化学工学便覧，丸善，p. 61，昭和 43 年。
- 18) 文献 17) の pp. 42~43
- 19) 寺島 泰ほか 3 名：セメント固化体中  $^{137}\text{Cs}$ ， $^{90}\text{Sr}$ ， $^{60}\text{Co}$  の溶出機構について，土木学会論文報告集，第 201 号，pp. 51~60，1972 年 5 月。

1) 林 正夫・駒田広也：原子力発電所構造物の設計と施工。

(1978.8.3・受付)