

原子力発電所地下立地における核種の地中格納効果の評価手法と考察(仮想事故時)

電力中央研究所土木技術研究所 ○ 駒田 宏也  
同 上 林 正夫

1. まえがき

地下式原子力発電所が欧州を中心に現在も基建設されている。また、我国においても原子力発電所の地下立地の検討がなされている<sup>1),2)</sup>。原子力発電所の地下収納にはいくつかの特長があるが、その一つとして、核種の地中格納効果があげられる。仮想的に一次冷却系の想定事故として、冷却系の能力に支障が生じるような場合を想定すると、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、その後は、地中より地表へのガスの拡散、地下水による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が、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、ここでは、原子力発電所の地下立地を想定し、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一部の検討結果を述べる。

2. 核種の移動経路と数値シミュレーションの基礎式

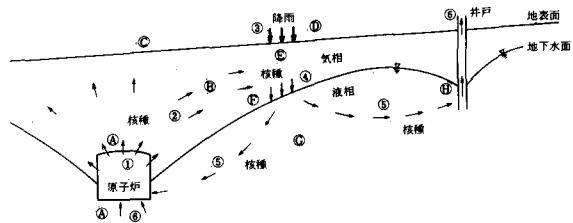
原子炉の想定事故時において、核種が地下空洞に放出される場合を想定する。そして、図-1に示すように、これらの核種が地下空洞周辺地盤の気相および液相に伝わる。空洞内は約5気圧に上昇し、空洞内の核種は、おもにこの空気圧の上昇による空気移動によって移動され、また、液相においては、固相への付着、吸収をとともなう透水、拡散によって移動される。さらに、気相中の核種は、その後の降雨の地下への浸潤によって、地下水

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表における基礎式を図-1に示す。これらの基礎式のうちで、非定常気体拡散方程式および定常透水方程式に関する解析法は確立されているが、最も重要な核種輸送方程式に関する一般的な解析法は確立されていないようである。以下にこの解析法について述べる。

3. 有限要素法による輸送方程式の解析法

核種の濃度Cに関する2次元輸送方程式は、図-1にも示すように、次式で与えられる。

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



- ①  $P = P_0(t)$  (空洞内の空気圧履歴)  
 $C = C_0(t)$  (空洞内の核種濃度履歴)
- ②  $\frac{\partial}{\partial t} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) = v \frac{\partial C}{\partial t}$  (非定常気体拡散方程式)  
 $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial}{\partial x} K_{ad} C + K_{ad} C \right) - \lambda C$  (核種輸送方程式)
- ③  $P = P_0(t)$  (地表面の大気圧)  
④  $h = h_0(t)$  (地表面の飽和の透水率)  
⑤  $\Delta p(x, y, t) = p q(x, y, t) \cdot Q(x, y, t)$  (降雨水により飽和される核種の量)
- ⑥  $H = H_0$  (地下水面のポテンシャル)  
 $q(x, y, t) = \int_0^H \Delta q(x, y, t - \frac{z}{v_z}) dz$  (地下水に出入する核種の量)  
 $\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) = 0$  (定常透水方程式)  
 $\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (v_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (v_y C) - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial}{\partial x} K_{ad} C + K_{ad} C \right) - \lambda C$  (核種輸送方程式)
- ⑦  $k_x \frac{\partial H}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial H}{\partial y} l_y + p_w = 0$  (境界上の流入量)

- P 空気圧 (kg/cm<sup>2</sup>)
- C 核種の濃度 (B/cm<sup>3</sup>)
- K<sub>x</sub>, K<sub>y</sub> 気体の透過係数 (cm/sec)
- α 気体の圧縮率 (-/cm)
- f 多孔体の閉け率 (-)
- D<sub>x</sub>, D<sub>y</sub> 拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)
- v<sub>x</sub>, v<sub>y</sub> 実質部内の平均流速 (cm/sec)
- ρ 多孔体の密度 (g/cm<sup>3</sup>)
- d 多孔体の閉け率 (-)
- K<sub>ad</sub> 核種の付着係数 (cm<sup>2</sup>/g)
- K<sub>ad</sub> 核種の吸着係数 (cm<sup>2</sup>/g-sec)
- λ 核種の崩壊係数 (1/sec)
- h 水頭 (cm)
- H 媒体に吸着されている核種の量 (B/cm<sup>3</sup>)
- Q 降雨強度 (cm/sec)
- β 媒体から浸潤される核種の量 (1/sec)
- H 水頭ポテンシャル (cm)
- k<sub>x</sub>, k<sub>y</sub> 透水係数 (cm/sec)
- ε<sub>x</sub>, ε<sub>y</sub> 境界上の方向余弦 (-)
- p<sub>w</sub> 境界上の地下水流入量 (B/cm)

図-1 核種の移動経路と核種の移動に関する基礎式

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

---- (1)

つきに、境界条件として、

(a) C の値が境界上で指定される。

$$C = C_b$$

(b) 境界が不透水層になる。

$$D_x \frac{\partial C}{\partial x} l_x + D_y \frac{\partial C}{\partial y} l_y = 0$$

の2種類が考えられる。式(1)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場合と汎函数を用いる場合とが考えられる。ここでは汎函数を用いて有限要素法の定式化を以下に行なった。

式(1)の汎函数には指数関数が含まれて、数値計算では精度上あまり好ましくない。そこで、汎函数に指数が含まれないように、もとの方程式を次式で変数変換する。

$$\eta = C \cdot e^{\frac{\rho}{2}} \quad \text{---- (2)}$$

$$\text{ここに、} \beta = -\frac{V_x}{D_x} x - \frac{V_y}{D_y} y \quad \text{---- (3)}$$

変換された未知数 $\eta$ について、式(1)および境界条件式に対応する式はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} & \left( D_x \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) - \left( \frac{V_x^2}{4D_x} + \frac{V_y^2}{4D_y} \right) \eta \\ & - \left( \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) \eta - \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad \text{---- (4)}$$

(a)  $\eta = C_b e^{\frac{\rho}{2}}$

(b)  $\left( D_x \frac{\partial \eta}{\partial x} l_x + D_y \frac{\partial \eta}{\partial y} l_y \right) + \left( \frac{V_x}{2} \eta \cdot l_x + \frac{V_y}{2} \eta \cdot l_y \right) = 0$

として、これらの式の汎函数は次式になる。

$$\begin{aligned} \chi = \iint_G & \left\{ \frac{D_x}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^2 + \frac{D_y}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^2 \right\} + \left\{ \frac{V_x \eta}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + \frac{V_y \eta}{2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) \right\} + \left( \frac{V_x^2}{4D_x} + \frac{V_y^2}{4D_y} \right) \frac{\eta^2}{2} \\ & + \left( \frac{\rho}{e} K_{ab} + \lambda \right) \frac{\eta^2}{2} + \left( 1 + \frac{\rho}{e} K_{ad} \right) \frac{\partial \eta}{\partial t} \eta \Big] dx \cdot dy \end{aligned} \quad \text{---- (5)}$$

有限要素法では、各節点の $\eta$ に関して汎函数を最小にする条件を用いることにより最終的には、次式の行列表示で示される。

$$[H] \{ \eta \} + [P] \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial t} \right\} + \{ F \} = 0 \quad \text{---- (6)}$$

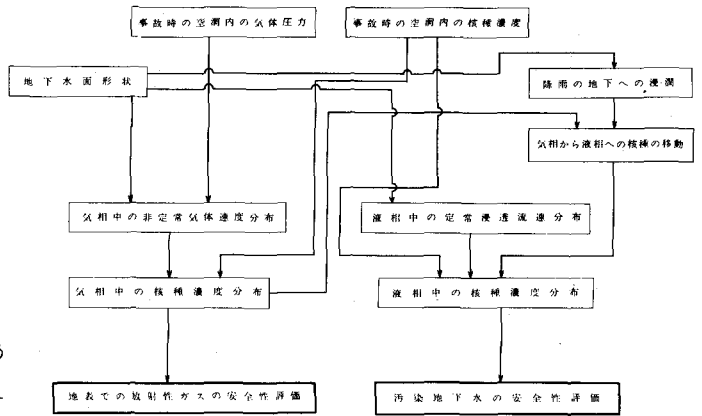


図-2 核種の地下移動に関する数値シミュレーション手法のフロー図

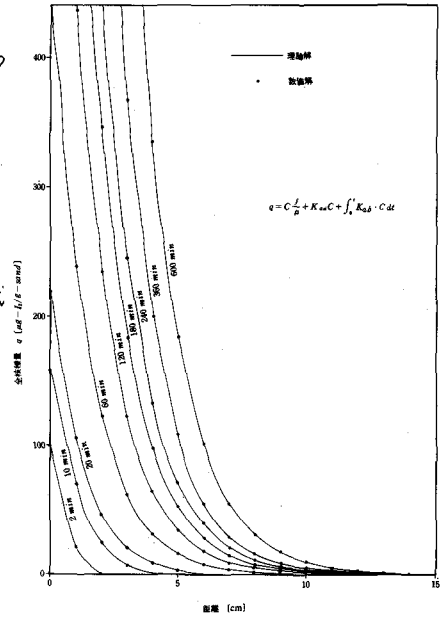


図-3 理論解と数値解との比較

式(6)の $\{\eta\}$ はある時刻ごとにStep-by-Stepで求めることができる。そして、式(1)の1次元理論式による値と有限要素法による数値解析値との比較を図-3に示す。

#### 4. 地盤の気相中における気体流速分布

ここでは想定事故時における地盤の気相中の核種の移動の解析を行なった。解析モデルとして、図-4に示すように空洞周辺地盤の地下水面より上部の気相中を解析領域とし、189の節点数で313の三角形要素に分割した。

想定事故時に空洞内に生成される核種は、地盤の気相中においては、おもに空洞内の圧力上昇により地盤中に生ずる空気移動と核種の濃度差による拡散によって、移動される。したがって、核種移動の計算にあたって、想定事故時における地盤中の空気速度分布を求める必要がある。泥岩のような地盤を想定し、地盤の透気係数 $K_a=1 \times 10^{-4}$  cm/sec、地盤の明けき率 $f=0.33$ の場合、非正常気体拡散の方程式によって、地盤中の空気圧履歴を計算すると、図-5になる。空洞内圧力上昇の時間が短いこと、および空気が圧縮性のために、空洞壁面より約5 mも地盤の中に入ると、圧力はあまり上昇していない。

#### 5. 地盤の気相中におけるKr, Iの分布

相定事故時に空洞内に生成される核種には、よう素(I)、クセノン(Xe)、クリプトン(Kr)などのようなガス

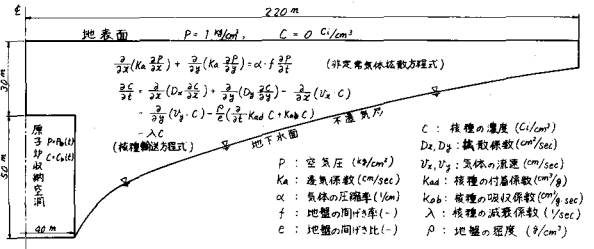


図-4 地盤の気相中の核種移動計算のモデル

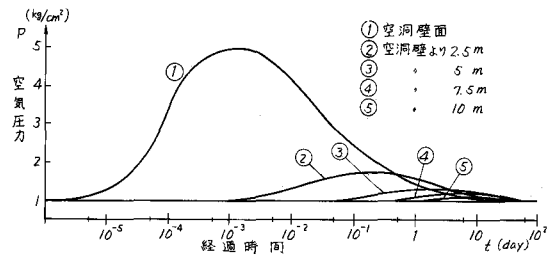


図-5 地盤中の空気圧変化曲線

表-1 核種の物性値

係数	<sup>85</sup> Kr	<sup>131</sup> I
$D_x, D_y$ (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)	$2.13 \times 10^{-9}$	$9.96 \times 10^{-7}$

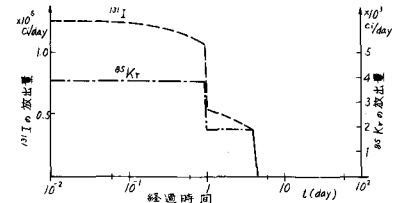


図-6 核種の空洞内への放出

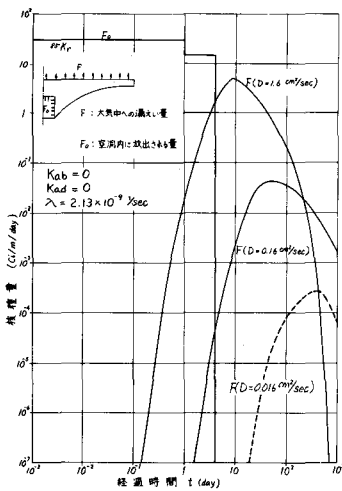


図-7 地表面から大気中への核種の漏えい量(<sup>85</sup>Krの場合)

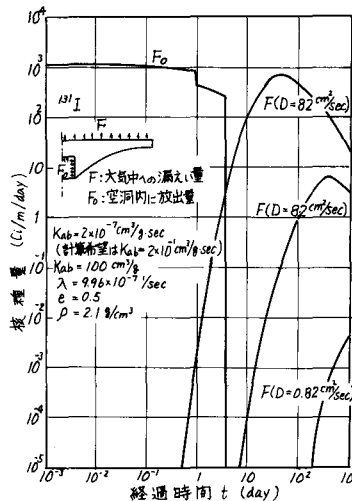


図-8 <sup>131</sup>Iの $K_{ab}=2 \times 10^{-7}$  /secでDをパラメーターにした場合の漏えい量

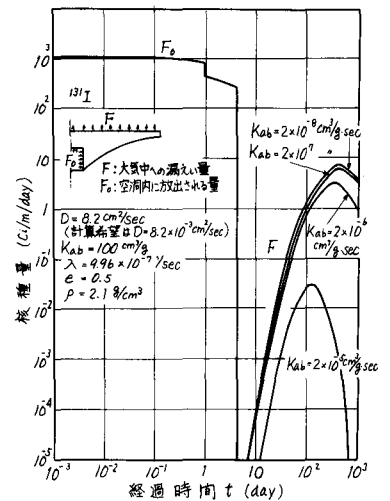


図-9 <sup>131</sup>IのD=8.2 cm²/secでKabをパラメーターにした場合の漏えい量

状とストロンチウム (Sr), セシウム (Cs) などのような固体状とがある。ここでは、ガス状物質で半減期が長い  $^{85}\text{Kr}$  (半減期 10.73年) と  $^{131}\text{I}$  (半減期 8.06日) について解析した。表-1に示したように、 $^{85}\text{Kr}$  には地盤中の固体への付着、吸収がないが、 $^{131}\text{I}$  には地盤中の固体への付着、吸収が期待できる。

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。

$$C_b = Q / (A \cdot v) \quad \text{----- (7)}$$

Aは空洞内の表面積 (cm<sup>2</sup>) である。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。Qは空洞内に放出される核種量 (キュリー/sec) であり、図-6の経時変化で与えられる。この核種量は1000MW級の原子炉の仮想事故として一次冷却材喪失事故を想定したものである。

表-1に示す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における解が収束するためには、1要素の長さを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なって、その結果より実際の移動状態を想定した。

解析結果を図-7~12に示す。Krは地盤中で付着、吸収が期待されないため、地盤での核種量の格納効果としては、地表放出の時間的希釈効果が大きいと思われる。図-7に示すように、地表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  $1 \times 10^5$  に減少することが予想される。次に、Iは地盤中への付着、吸収が期待されるので、図-8, 9, 11より想定すると、地表への漏えいは事故後1000日以上となり、その量は空洞内への放出量の  $1 \times 10^8$  以下に減少すると思われる。

### 6. 今後の予定

地盤の地下水面下の液相中の核種の移動についてもケーススタディを重ねて原子力地下立地による核種の地中格納効果を評価していく予定である。一方、解析条件の妥当性を検討するために、実証的な実験および室内での土砂試料によるガスの吸着特性の測定などを実施していく予定である。

### 7. 参考文献

- 1) 林正夫「原子力発電所の地下立地」第19回発電水力講習会前刷、1977年3月、電力土木技術協会
- 2) 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

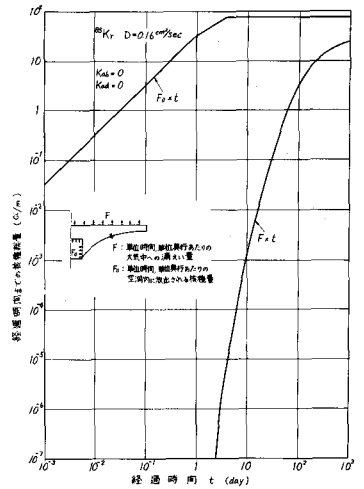


図-10 地表面から大気中への核種の漏えい量の時間変化 ( $^{85}\text{Kr}$ )

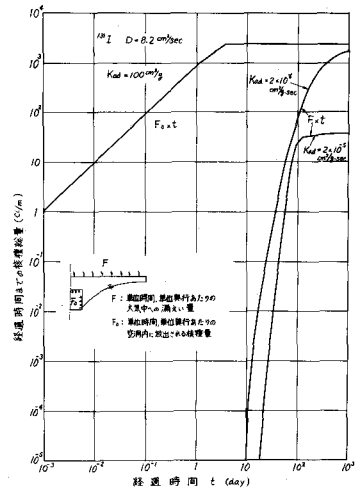


図-11 地表面から大気中への核種の漏えい量の時間変化 ( $^{131}\text{I}$ )

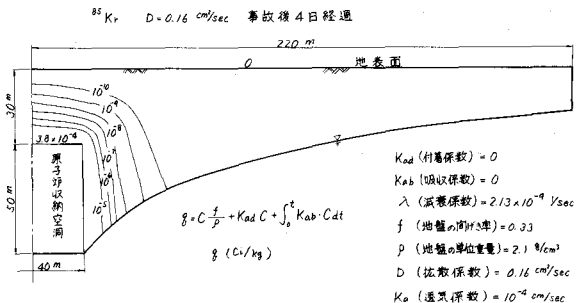


図-12 地盤中の固相に吸着されている核種量  $g$  (キュリー/kg) ( $^{85}\text{Kr}$  の  $D = 0.16 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )

Evaluation of Underground Containment of Fission Radioactive Gases caused at  
the Hypothetical Accident of Underground Nuclear Power Station

(Proc. the 11th Symposium on Rock Mechanics. Japanese Society of Civil  
Engineers, 1978)

Hiroya KOMADA

Masao HAYASHI

Central Research Institute of Electric Power  
Industry, Abiko City, Chiba Pref, Japan

Summary

A developed assessment procedure of the potential benefit associated with  
the underground nuclear power siting is proposed.

The proposed simulation on the behavior of the fission gas through rock masses  
at the hypothetical accident is outlined as follows:

(1) The gases are hypothetically assumed to be filled into the reactor containment  
cavity at the melting of fuel cores. (2) Unsteady numerical analysis of porous media  
is used to analyze the transportation of radionuclide gases such as Krypton and Iodine  
from the reactor cavity to surrounding porous rock masses up to the ground surface or  
to the groundwater. (3) Rapid pressure rise of gas in reactor containment cavity is  
assumed to be amounted by  $5 \text{ kg/cm}^2$  at the accident. (4) In the upper domain above the  
groundwater table, the gases are transported in the porous of rock masses mainly depend-  
ing on the pressure rise in the cavity. (5) In the lower domain under the groundwater  
table, on the other hand, the fission products are transported mainly depending on the  
seepage and the diffusion in groundwater.

Summarized evaluation of the analysis is follows;

(1) Krypton gas release in the atmosphere above the ground can be delayed by 500 days  
from the accident, and released gas intensity on the ground with 30 meters thickness  
of rock can be decreased by  $1 \times 10^{-5}$  times in comparison with the original value in the  
containment cavity.

(2) Iodine gas can be delayed by 1000 days and the intensity can be decreased by  
 $1 \times 10^{-8}$ . These containments effects beneficial in the nuclear power siting.