

JAERI-M

5690

高温ガス炉の黒鉛腐蝕計算コード
“PEGASUS”

1974年5月

鈴木 勝男・鎌田 稔*・河井美和子*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

高温ガス炉の黒鉛腐蝕計算コード “ PEGASUS ”

日本原子力研究所動力炉開発管理室

鈴木勝男・鎌田 稔*・河井美和子*

(1974年4月15日受理)

高温ガス炉の設計においては、炉心構造材黒鉛と冷却材中不純物との間の化学反応が1つの問題となっている。本報告書はこの問題を解析するために、冷却材中不純物による黒鉛材料の腐蝕の過程を非定常拡散問題として定式化し、それを一般的な境界条件(第3種の境界条件)のもとに解いた計算コード“ PEGASUS ”の概略を記述するものである。モデル化の主な仮定は、

- (1) 黒鉛材は円筒形かつ軸対称である。
- (2) 化学反応は水蒸気濃度に関して1次である。
- (3) 黒鉛材中への反応体輸送は拡散機構によって支配される。

等である。以上の仮定に従って定式化された方程式はある種の特徴を有しており、その解析解は変数分離法およびDankwertの方法を適用して求められている。

本計算コードの主な内容は、

- (1) 黒鉛材中水蒸気濃度分布の計算
- (2) 黒鉛材腐蝕速度および腐蝕量の計算
- (3) 被覆燃料粒子被覆層の腐蝕厚さの計算
- (4) 黒鉛材中への水蒸気浸入深さの評価

等からなっている。

A Computer Code for the Analysis of Graphite
Corrosion in HTGR ; " PEGASUS "

Katsuo SUZUKI

Office of Power Reactor Projects , JAERI

Minoru KAMADA & Miwako KAWAI

Century Research Center Corporation

(Received April 15, 1974)

The steam-graphite reaction $(H_2O + C \rightarrow CO + H_2)$ is of interest for gas-cooled reactors because of the use of graphite core structural material in the High Temperature Gas-Cooled Reactors and the possible presence of water vapour in the coolant either as impurity or through inleakage from the secondary loops, especially from the steam generator. In order to analyse the effects of that reaction in the reactor core, the computer code "PEGASUS" has been developed in which the problems are formulated mathematically as the unsteady diffusion problem with the first order chemical reaction and solved numerically under the third kind of boundary conditions.

Some of the assumptions in the code are as follows :

- (1) the graphite is cylindrically symmetric,
- (2) the steam-graphite reaction in the core is of the first order,
- (3) the transport of reactants into the graphite is governed by their diffusion.

This computer code is able to be used for the calculation of the quantities described bellow :

- (1) water vapour concentration as the function of time and positions in the graphite cylinder,
- (2) corrosion rates and corrosion losses of graphite cylinder,
- (3) linear corrosions of the outermost P_yC-layer of coated particle fuel,
- (4) depth of the permeation of water vapour into graphite cylinder.

目 次

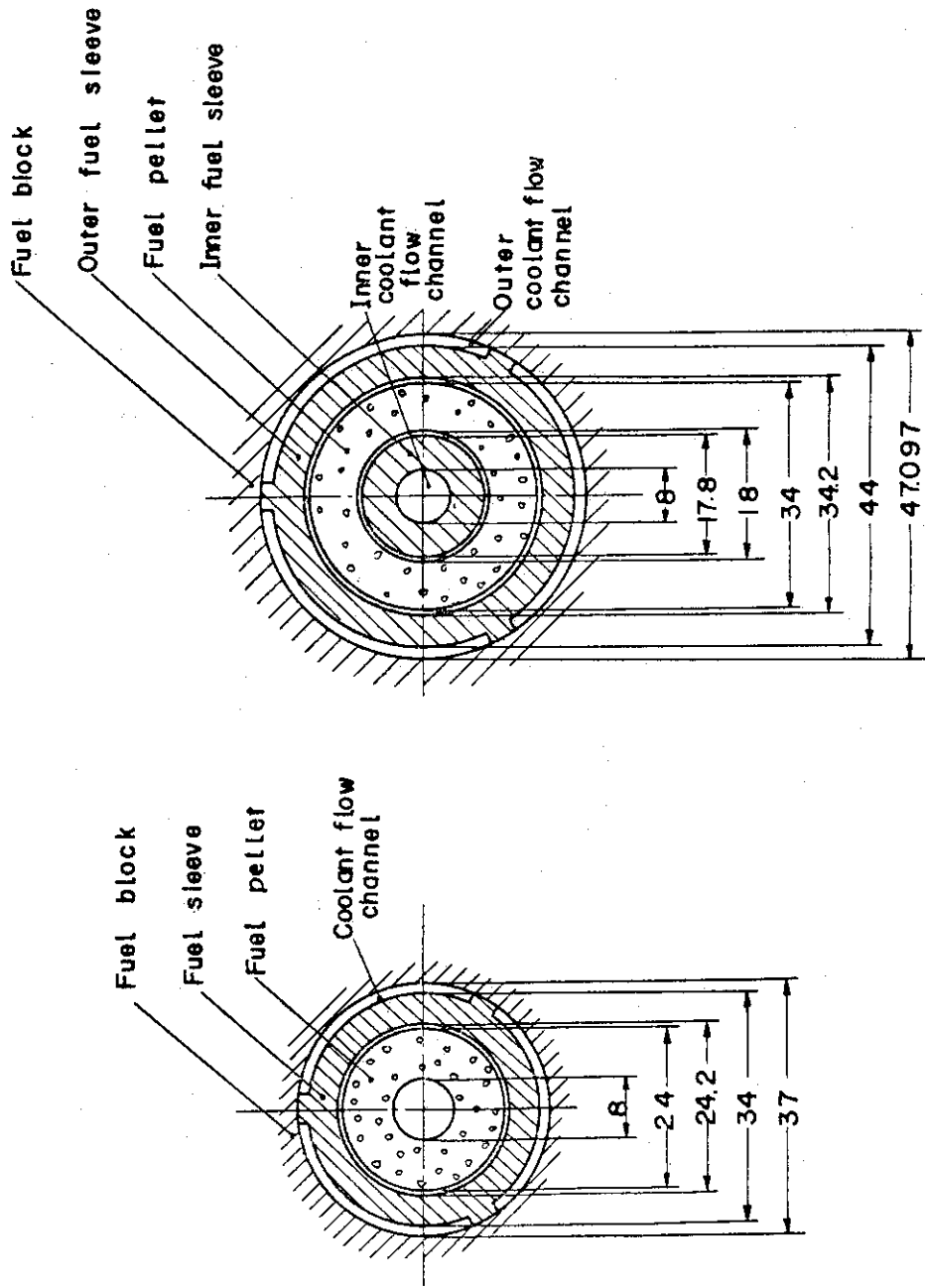
1. はじめに	1
2. モデルと定式化	3
3. 黒鉛腐蝕量の計算	9
4. 計算コード	13
5. あとがき	23
6. 謝 辞	23
参考文献	23
Appendix A Sample Output of Standard Problem	25
Appendix B Programme List of "PEGASUS"	32

1. はじめに

多目的高温ガス実験炉の燃料体は被覆燃料粒子を黒鉛母材中に分散させ、それを焼結して成形した燃料コンパクトを黒鉛スリーブ内に密封する構造になっている。燃料体からの除熱は黒鉛スリーブの外側を流れる1次冷却材ヘリウムによって行われている。日本原子力研究所 (JAERI) で現在進めている多目的高温ガス実験炉の設計では燃料体型として、中空型燃料体型と円環型燃料体型の2種類が考えられている。⁶⁾ (Fig. 1.1 参照)

核分裂生成物を被覆燃料粒子内に閉じ込めておくことを基本的な設計思想の1つとしている高温ガス炉では、冷却材中不純物と燃料体の腐蝕化学反応は重要な問題の1つであるとされ、開発初期の段階から各国で精力的に研究されてきている。これらの研究の主な目的は設計の立場からは2つに大別できる。その1は原子炉運転時における全炉心的な平均腐蝕速度の推定を可能とするための反応速度論的研究であり、他の1つは炉心構造材黒鉛の強度および燃料体の健全性評価のための黒鉛材の浸蝕深さの推定のための研究である。前者については、反応律速因子も数多く見出されている。^{12), 1)} またドラゴン計画では炉心に水蒸気を直接注入するいわゆる“water injection experiment”を行ない、全炉心腐蝕反応度を求める大規模な実験もなされている。^{2), 3)} 後者に関しては、その性格上実験的接近は困難なために、解析的手段による方法が試みられている。例えば、P. Hawtinらは“water shift reaction”をも考慮した定常状態モデルによる計算コード“RICHTER”を開発した。⁴⁾ また、M. N. Ozisikらは円筒形黒鉛の水蒸気による腐蝕現象を1次化学反応を伴う非定常拡散問題として定式化し、ある特殊な境界条件を与えて解いている。⁵⁾ これは円筒形内面冷却、外面不浸透壁という体系にしか適用できず、広範囲な応用を持つものではないと思われる。

本報告書は燃料体の冷却材中不純物水蒸気による腐蝕現象をM. N. Ozisikらと同様に非定常拡散問題として定式化し、多目的高温ガス実験炉のいずれの燃料体型をも取扱えるように、より一般的な境界条件(第3種の境界条件)を課して解いた計算コード“PEGASUS”の概要を記述するものである。本計算コードの主な内容は、燃料体中の水蒸気濃度分布の計算、黒鉛腐蝕速度・腐蝕量の計算、被覆燃料粒子被覆層の腐蝕厚さの計算および燃料体中への水蒸気浸蝕深さの評価等からなっている。



(a) Hollow fuel pin (b) Annular fuel pin

Fig.1.1.1 Details of Hollow Fuel Pin and Annular Fuel Pin
(quoted from Ref.6)

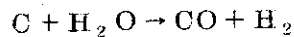
2. モデルと定式化

多目的高温ガス実験炉の燃料体として現在考えられているものとして、中空型燃料体と円環型燃料体の2種類があることは既に述べた。冷却材中の水蒸気は燃料体スリーブ表面から内部へ拡散浸透してゆき、黒鉛材、コンパクト母材および被覆燃料粒子被覆層と化学反応を起すものと考えられる。本章では、このような黒鉛材と水蒸気との相互作用を解析するために次のような仮定を設けてモデル化し、これに基づいて定式化を行ない燃料体内水蒸気濃度分布を求めらることにする。

2.1 モデル化の仮定

モデル化の主な仮定は次の通りである。

- (i) 燃料体は無限中空円筒形であり、かつ軸対称である。
- (ii) 燃料体内の水蒸気拡散定数および化学反応速度定数は一定である。
- (iii) 化学反応は



のみを考える。更に、化学反応は水蒸気濃度に関する1次反応でありかつ非可逆的である。

- (iv) 化学反応生成物の影響は無視できる程小さい。
- (v) 黒鉛材内水蒸気濃度分布は、水蒸気の拡散と化学反応とにより決定される。
- (vi) 固体表面において境界条件は次の形に表わせるものとする。

$$a \left. \frac{\partial \bar{w}}{\partial n} \right|_s + b \bar{w} = c w_0$$

但し、

- w ; 固体中水蒸気濃度分布
- w_0 ; 冷却材中水蒸気濃度
- n ; 固体表面の法線方向
- a, b, c ; 定数

2.2 基本方程式とその解^{7)-10), 13)}

上述の仮定に基づいて、燃料体中の水蒸気濃度分布を定式化すれば、基本方程式は次の如くなる。(Fig. 2.1 参照)

基本方程式

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} = D \left\{ \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} \right\} - k \bar{w} \quad (r_2 \leq r \leq r_1, 0 < t) \quad (2-1)$$

境界条件・初期条件

$$\begin{aligned}
 r=r_1 & ; \quad a_1 \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + b_1 \bar{w} = c_1 w_{10} \\
 r=r_2 & ; \quad a_2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial r} + b_2 \bar{w} = c_2 w_{20} \\
 t=0 & ; \quad \bar{w}(r, 0) = 0
 \end{aligned}
 \tag{2-2}$$

記号の説明

- w ; 黒鉛材中水蒸気濃度分布
 w_{i0} ; 冷却材中水蒸気濃度
 D ; 黒鉛材中水蒸気拡散定数
 k ; 化学反応速度定数
 r_1 ; 円筒外径
 r_2 ; 円筒内径
 a_i, b_i, c_i ; 定数

方程式系(2-1), (2-2)は次の3段階の手順を踏んで解くことができる。次にこの解法の概略を述べる。

(1) 第1段; $k=0$ の場合の定常解

ここではまず, $k=0$ の場合の基本方程式および境界条件(2-2)式をみたす定常解 $\theta_1(r)$ を求める。すなわち,

$$\frac{d^2 \theta_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \theta_1}{dr} = 0
 \tag{2-3}$$

境界条件

$$\begin{aligned}
 r=r_1 & ; \quad a_1 \frac{d \theta_1}{dr} + b_1 \theta_1 = c_1 w_{10} \\
 r=r_2 & ; \quad a_2 \frac{d \theta_1}{dr} + b_2 \theta_1 = c_2 w_{20}
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

この方程式の解 $\theta_1(r)$ は容易に求めることができ、次の通りである。

$$\theta_1(r) = A \cdot \ln r + B$$

但し

$$A = \Delta_1 / \Delta$$

$$B = \Delta_2 / \Delta$$

(2-5)

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 + b_1 r_1 \ln r_1 & b_1 r_1 \\ a_2 + b_2 r_2 \ln r_2 & b_2 r_2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} c_1 w_{10} r_1 & b_1 r_1 \\ c_2 w_{20} r_2 & b_2 r_2 \end{vmatrix}$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 + b_1 r_1 \ln r_1 & c_1 w_{10} r_1 \\ a_2 + b_2 r_2 \ln r_2 & c_2 w_{20} r_2 \end{vmatrix}$$

(2) 第2段 ; $k = 0$ の場合の非定常解

次に, $k = 0$ とした場合の基本方程式と線型境界条件を満たす解 $\theta_2(r, t)$ を求めよう。

すなわち

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial t} = D \cdot \left\{ \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \right\} \quad (2-6)$$

境界条件

$$\left. \begin{aligned} r=r_1 & ; a_1 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} + b_1 \theta_2 = 0 \\ r=r_2 & ; a_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} + b_2 \theta_2 = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

初期条件

$$t = 0 ; \theta_2(r, 0) = -\theta_1(r)$$

方程式系 (2-6) - (2-7) は線型な方程式および境界条件であるので, これらの方程式系を満たす解 $\theta_2(r, t)$ は一般に次のような級数の形で与えられる。すなわち

$$\theta_2(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot u_0(\alpha_n r) \cdot e^{-D \alpha_n^2 t} \quad (2-8)$$

但し,

$$\left. \begin{aligned} u_0(\alpha_n r) &= x_n J_0(\alpha_n r) - y_n Y_0(\alpha_n r) \\ x_n &= a_1 \alpha_n Y_1(\alpha_n r_1) - b_1 Y_0(\alpha_n r_1) \\ y_n &= a_1 \alpha_n J_1(\alpha_n r_1) - b_1 J_0(\alpha_n r_1) \\ \alpha_n &\text{ は固有値であり, 次の方程式の根である。} \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

$$\begin{vmatrix} a_1 \alpha J_1(\alpha r_1) - b_1 J_0(\alpha r_1) & a_1 \alpha Y_1(\alpha r_1) - b_1 Y_0(\alpha r_1) \\ a_2 \alpha J_1(\alpha r_2) - b_2 J_0(\alpha r_2) & a_2 \alpha Y_1(\alpha r_2) - b_2 Y_0(\alpha r_2) \end{vmatrix} = 0$$

(2-8)式に含まれる未知係数 A_n は(2-7)式の初期条件を満たすように決定されなければならない。すなわち、次式によって決められる。

$$\theta_2(r, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot u_0(\alpha_n r) = -\theta_1(r) \quad (2-10)$$

関数 $u_0(\alpha_n r)$ の構成から、これが Sturm - Louville 型境界値問題の固有値 α_n に属する固有関数であることは明らかであるから、固有関数の直交性の定理を用いて係数 A_n を求めることができ次式で表わせる。

$$A_n = \frac{\int_{r_2}^{r_1} r \cdot u_0(\alpha_n r) \{-\theta_1(r)\} dr}{\int_{r_2}^{r_1} r \cdot u_0^2(\alpha_n r) dr} \quad (2-11)$$

更に、固有関数系 $\{u_0(\alpha_n r)\}_{n=1, 2, \dots}$ の規格化積分は

$$\begin{aligned} \int_{r_2}^{r_1} r \cdot u_0^2(\alpha_n r) dr &= \frac{1}{2\alpha_n} \left[r \cdot \left\{ \frac{\partial u_0}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial u_0}{\partial r} - u_0 \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} \right) \right\} \right]_{\alpha=\alpha_n}^{r_1} \\ &= \frac{1}{2} \left[r^2 \{ u_1^2(\alpha_n r) + u_0^2(\alpha_n r) \} \right]_{r_2}^{r_1} \end{aligned}$$

で与えられる。また(2-11)式の分子の積分も実行できて次式で表わせる。

$$\int_{r_2}^{r_1} r \cdot u_0(\alpha_n r) \{-\theta_1(r)\} dr = \frac{1}{\alpha_n} \left[\alpha_n \cdot r \cdot u_1(\alpha_n r) \cdot \theta_1(r) + A \cdot u_0(\alpha_n r) \right]_{r_2}^{r_1}$$

従って、係数 A_n は結局次のように表わせる。

$$A_n = \frac{2}{\alpha_n^2} \cdot \frac{\{\alpha_n r_1 u_1(\alpha_n r_1) \theta_1(r_1) + A u_0(\alpha_n r_1)\} - \{\alpha_n r_2 u_1(\alpha_n r_2) \theta_1(r_2) + A u_0(\alpha_n r_2)\}}{r_1^2 \{u_1^2(\alpha_n r_1) + u_0^2(\alpha_n r_1)\} - r_2^2 \{u_1^2(\alpha_n r_2) + u_0^2(\alpha_n r_2)\}} \quad (2-12)$$

以上によって、(2-8)式の $\theta_2(r, t)$ は完全に決定された。すなわち、方程式系(2-6)、(2-7)を満たす解は $\theta_2(r, t)$ の形で書きあらわされたのである。最後にまとめて記すと次の通りである。

$$\theta_2(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot u_0(\alpha_n r) \cdot e^{-D\alpha_n^2 t}$$

但し、

$$\left. \begin{aligned} u_0(\alpha_n r) &= x_n \cdot J_0(\alpha_n r) - y_n Y_0(\alpha_n r) \\ u_1(\alpha_n r) &= x_n \cdot J_1(\alpha_n r) - y_n Y_1(\alpha_n r) \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned} x_n &= a_1 \alpha_n Y_1(\alpha_n r_1) - b_1 Y_0(\alpha_n r_1) \\ y_n &= a_1 \alpha_n J_1(\alpha_n r_1) - b_1 J_0(\alpha_n r_1) \\ A_n &; (2-12) \text{式参照} \\ \alpha_n &; \text{固有値である。}(2-9) \text{式参照} \\ \theta_1(r) &; (2-5) \text{式参照} \end{aligned}$$

(3) 第3段; Dankwertの方法の適用¹⁰⁾

第1段および第2段で求めた解 $\theta_1(r)$, $\theta_2(r, t)$ を用いて

$$\theta(r, t) = \theta_1(r) + \theta_2(r, t) \quad (2-14)$$

なる関数 $\theta(r, t)$ を構成すれば, 関数 $\theta(r, t)$ は方程式系(2-1), (2-2)において $k=0$ とした場合の解になっていることが容易にわかる。ここで適用する Dankwertの方法とは, このような関数 $\theta(r, t)$ に適当な積分変換を施すことにより, 所与の方程式(2-1), (2-2)の解を得ようとするものである。すなわち, $\theta(r, t)$ に次のような積分変換を行えば, 求める解となる。

$$\bar{w}(r, t) = k \cdot \int_0^t \theta(r, t) \cdot e^{-kt} dt + \theta(r, t) \cdot e^{-kt} \quad (2-15)$$

(2-15)式の $\bar{w}(r, t)$ が所与の方程式系(2-1), (2-2)の解であることは直接代入しても確かめられる。(2-15)式の変換を実行すれば, 求める黒鉛材中水蒸気濃度分布 $\bar{w}(r, t)$ は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{w}(r, t) = & \theta_1(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{k}{D\alpha_n^2 + k} \cdot u_n(\alpha_n r) \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{D\alpha_n^2}{D\alpha_n^2 + k} \cdot u_0(\alpha_n r) \cdot e^{-(D\alpha_n^2 + k)t} \end{aligned} \quad (2-16)$$

但し

$$\begin{aligned} \theta_1(r) &; (2-5) \text{式参照} \\ u_0(\alpha_n r) &; (2-9) \text{式参照} \\ A_n &; (2-12) \text{式参照} \end{aligned}$$

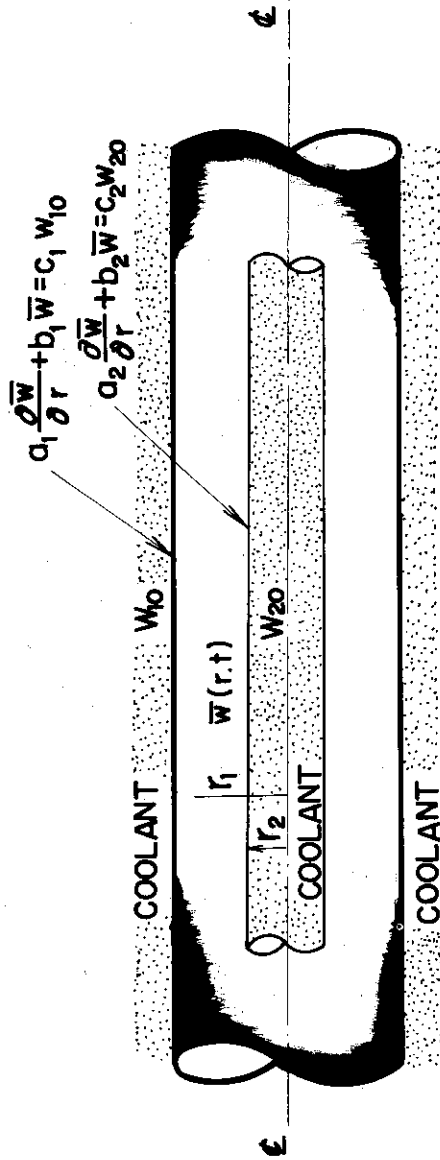


Fig.2.1 Model and its Coordinate and Geometry for Fuel Pin in the Multi-Purpose High Temperature Gas-Cooled Reactor

3. 黒鉛腐蝕量の計算

燃料体中で生ずる黒鉛・水蒸気化学反応は極めて高温の状態下で進行しており、微量の水蒸気は殆んどすべてが燃料体黒鉛と反応して、一酸化炭素と水素とに分解されるものと考えることができる。¹²⁾これは次の化学反応式で記述することができる。



本章では、化学反応(3-1)は水蒸気濃度に関して1次反応であり、かつ反応速度定数は一定々数であると仮定して炉心設計の観点から要求される黒鉛材の腐蝕特性量の計算を行うことを目的とするものである。

3.1 局所的黒鉛腐蝕速度： $m(r, t)$

燃料体内の位置 r の点における黒鉛腐蝕速度であり、次の式で定義する。

$$m(r, t) = \frac{12}{18} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot k \bar{w}(r, t) \quad (3-2)$$

但し

$m(r, t)$;	局所的黒鉛腐蝕速度	$\left\{ \frac{\text{g-loss carbon}}{\text{g-initial carbon}} / \text{sec} \right\}$
$\bar{w}(r, t)$;	黒鉛材中水蒸気濃度分布	$\left[\text{g-H}_2\text{O} / \text{cm}^3 - \text{graphite} \right]$
ρ_c ;	黒鉛材の初期密度	$\left[\text{g} / \text{cm}^3 \right]$
k ;	化学反応速度定数	$\left[\text{sec}^{-1} \right]$

3.2 空間平均化黒鉛腐蝕速度： $m_{sp.av.}(t)$

燃料体の黒鉛腐蝕速度の空間的な平均を次式で定義し、これを空間平均化黒鉛腐蝕速度 $m_{sp.av.}(t)$ と呼ぶ。これは燃料体軸方向に垂直な断面の平均的な黒鉛損失速度を表わす量である。

$$m_{sp.av.}(t) = \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r \cdot m(r, t) dr / \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r \cdot dr \quad (3-3)$$

この式は水蒸気濃度分布 $\bar{w}(r, t)$ の形から積分の実行が可能であり、結果は次の通りである。

$$m_{sp.av.}(t) = C_1 \cdot \left\{ S + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot B_n \cdot \frac{k}{D\alpha_n^2 + k} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot B_n \cdot \frac{D\alpha_n^2}{D\alpha_n^2 + k} e^{-(D\alpha_n^2 + k)t} \right\} \quad (3-4)$$

但し

$$m_{sp,av}(t) ; \text{空間平均化黒鉛腐蝕速度} \left[\frac{g\text{-loss carbon}}{g\text{-initial carbon}} / \text{sec} \right]$$

$$c_1 = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{r_1^2 - r_2^2} \cdot \frac{k}{\rho_c}$$

$$S = \frac{1}{4} r_1^2 \{ 2(A \ln r_1 + B) - A \} - \frac{1}{4} r_2^2 \{ 2(A \ln r_2 + B) - A \}$$

$$A_n ; (2-12) \text{式参照}$$

$$B_n = \frac{r_1 \cdot u_1(\alpha_n r_1) - r_2 \cdot u_1(\alpha_n r_2)}{\alpha_n}$$

$$u_1(\alpha_n r) ; (2-13) \text{式参照}$$

$$A ; (2-5) \text{式参照}$$

$$B ; (2-5) \text{式参照}$$

3.3 時間積算局所的黒鉛腐蝕量: $W_\theta(r, T)$

燃料体中の位置 r の点における時間区間 $(0, T)$ の間の時間積算の黒鉛腐蝕量を次式で定義する。

$$W_\theta(r, T) = \int_0^T m(r, \tau) d\tau \quad (3-5)$$

黒鉛腐蝕速度 $m(r, \tau)$ は (3-2) 式で定義されており、従って (3-5) 式の積分は水蒸気濃度分布 $\bar{w}(r, t)$ の時間積分を行えばよい。これは $\bar{w}(r, t)$ の時間依存の項が指数関数の形であるので、次式の如くに書ける。

$$W_\theta(r, T) = c_2 \cdot \left\{ (\theta_1(r) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{k}{D\alpha_n^2 + k} \cdot u_0(\alpha_n r)) T + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \frac{D\alpha_n^2}{(D\alpha_n^2 + k)^2} \cdot u_0(\alpha_n r) \cdot (1 - e^{-(D\alpha_n^2 + k)T}) \right\} \quad (3-6)$$

但し

$$c_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{k}{\rho_c}$$

$$\theta_1(r) ; (2-5) \text{式参照}$$

$$u_0(\alpha_n r) ; (2-9) \text{式参照}$$

$$A_n ; (2-12) \text{式参照}$$

3.4 黒鉛腐蝕量: $W(T)$

燃料体軸方向に垂直な断面における時間区間 $(0, T)$ 間の時間積算黒鉛腐蝕量 $W(T)$ を次式で定義する。

$$W(T) = \int_0^T dt \int_{r_2}^{r_1} 2\pi r \cdot m(r, t) dr \quad (3-7)$$

(3-7)式は(3-3)式および(3-5)式と同様な形であるので積分可能である。すなわち次の式が結果する。

$$W(T) = c_3 \cdot \left\{ \left(S + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot B_n \frac{k}{D\alpha_n^2 + k} \right) T + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot B_n \cdot \frac{D\alpha_n^2}{(D\alpha_n^2 + k)^2} \cdot \left(1 - e^{-(D\alpha_n^2 + k)T} \right) \right\} \quad (3-8)$$

但し

$$W(T) ; \text{ 黒鉛腐蝕量 } \left[\frac{\text{g-loss carbon}}{\text{g-initial carbon}} / \text{cross section} \right]$$

$$c_3 = \frac{4\pi}{3} \cdot \frac{k}{\rho_c}$$

S ; (3-4)式参照

A_n ; (2-12)式参照

B_n ; (3-4)式参照

3.5 被覆粒子被覆層の腐蝕厚さの計算: $Z(r, t)$

黒鉛材中水蒸気濃度分布 $\bar{w}(r, t)$ を用いて、被覆層の腐蝕厚さ Z を次式で計算する。

$$Z(r, t) = \int_0^t A \cdot k_{cp}(r, \tau) \cdot \bar{w}(r, \tau) d\tau \quad (3-9)$$

但し

$Z(r, t)$; 燃料体内の点 r に位置する被覆粒子最外層の、 t 時間の間の腐蝕損失厚さ。[cm]

$k_{cp}(r, t)$; 被覆層と水蒸気との化学反応速度定数 ($\text{mg/cm}^2 \cdot \text{atm-H}_2\text{O} \cdot \text{hr}$)

$\bar{w}(r, t)$; 被覆粒子周辺の水蒸気濃度分布 ($\text{g-H}_2\text{O/cm}^3$)

$A(r, t)$; 換算定数

3.6 燃料体水蒸気浸入深さ (R_0) の評価

ここでは、水蒸気による被覆粒子の被覆層腐蝕の観点から、水蒸気の燃料体中への浸入深さ (R_0) の評価を行う。すなわち、被覆層の腐蝕に対して許容腐蝕厚さ Z_0 を設定し、(3-9) 式から求まる Z と比較することにより水蒸気浸入深さ R_0 を評価する。すなわち

$$Z_0 \geq Z(r, t)$$

ならば、水蒸気によって被覆粒子は影響されないと判定するわけである。従って水蒸気浸入深さ R_0 は次式で求められる。

$$Z(R_0, t) = Z_0 \quad (3-10)$$

但し、時間 t は固定しておく。

4. 計算コード

本計算コードはメイン・プログラムと8個のサブルーチンから成っている。コードの簡単なブロックダイアグラムはFig. 4.1に示してある。各サブルーチンの主な内容は次の通りである。

- (1) MAIN ; 入力データおよび計算手順を制御する。
- (2) ROOT ; 内挿法を繰返し用いることにより固有値を求める。
- (3) OMEGA ; 水蒸気濃度分布 $\bar{w}(r, t)$ の計算
- (4) MRT ; 黒鉛腐蝕速度 $m(r, t)$ の計算
- (5) MPAV ; 空間平均化黒鉛腐蝕速度 $m_{sp,av}(t)$ の計算
- (6) WLOCR ; 黒鉛腐蝕量の時間積算量の計算
- (7) WLOSC ; 黒鉛腐蝕量 w の計算
- (8) CPCR ; 被覆燃料粒子の被覆層の腐蝕厚さ ΔZ の計算を行う。
- (9) OUTPUT1 ; 計算結果を出力する。

4.1 入力形式

入力形式はTable 4-1にまとめられている。入力は次に示すものから主に構成される。

- (1) タイトル
- (2) 計算上のオプション
- (3) 時間ステップの制御
- (4) 燃料体に関する物性定数
- (5) 計算対象とする被覆燃料粒子の数および位置の指定
- (6) 被覆燃料粒子に関する物性定数
- (7) 燃料体内温度分布
- (8) 被覆燃料粒子の水蒸気との化学反応速度定数

入力データの1例をTable 4-2に示す。

4.2 出力形式

出力形式の1例をAppendix Aに示す。オプションにより出力の制御を行うことができる。出力の主なものは以下の諸量である。

- (1) 入力データ
- (2) 固有値
- (3) 水蒸気濃度分布
- (4) 局所的黒鉛腐蝕速度
- (5) 空間平均化黒鉛腐蝕速度
- (6) 時間積分局所黒鉛腐蝕量
- (7) 黒鉛腐蝕量

- (8) 被覆燃料粒子被覆層の腐蝕厚さ
- (9) 黒鉛材内への水蒸気浸入深さ

4.3 計算例

高温ガス実験炉予備設計で検討されている燃料体型としては中空型燃料体と円環型燃料体の2種類があることは既に述べた。ここでは、これらの燃料体を対象として計算した結果を示す。すなわち、Fig. 4.2は燃料体内水蒸気濃度分布を、Fig. 4.3は黒鉛腐蝕量を、そしてFig. 4.4は被覆層腐蝕厚さをそれぞれ径方向位、時間に対してプロットしたものである。

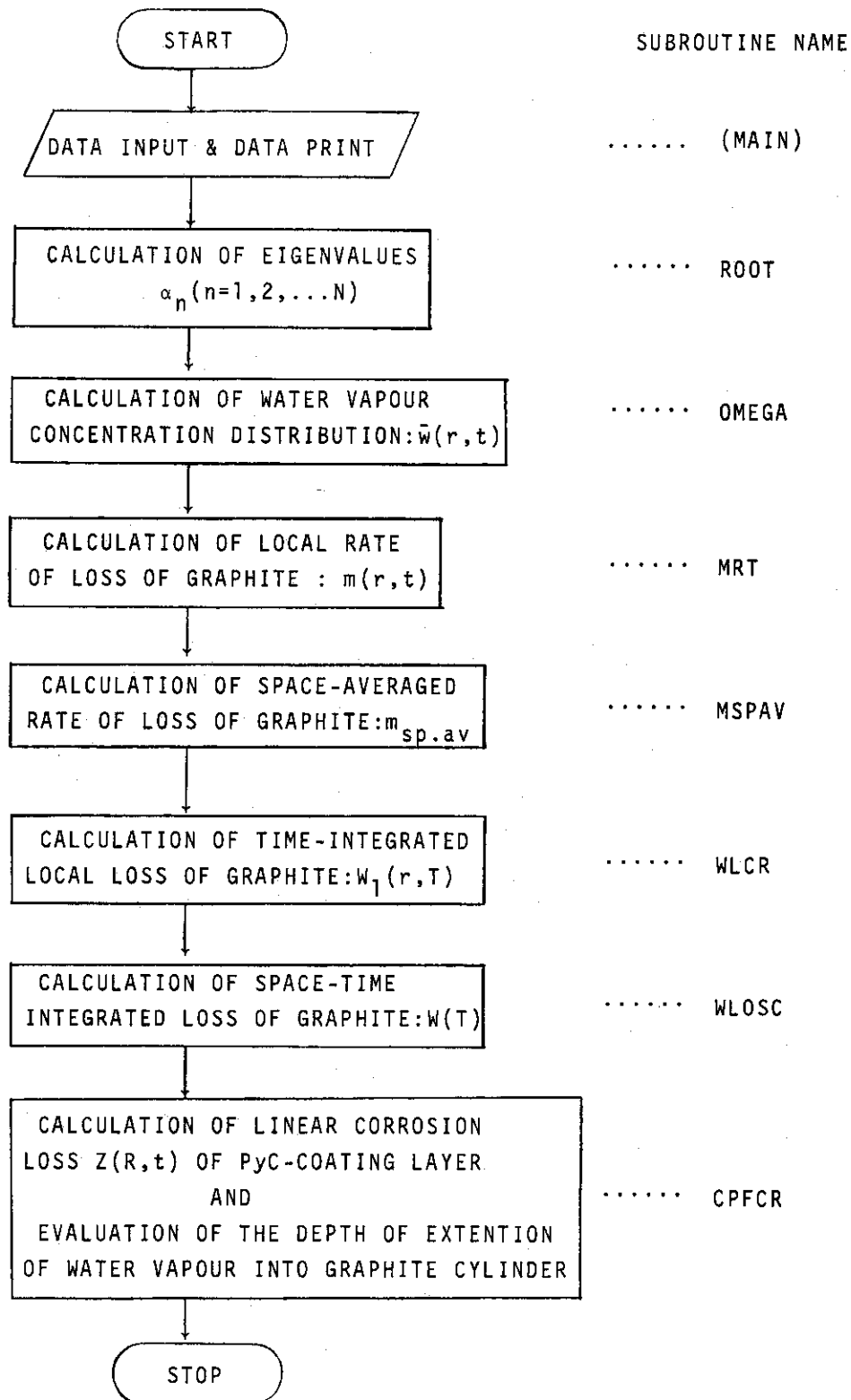


Fig.4.1 Simple Flow Chart of the Code "PEGASUS".

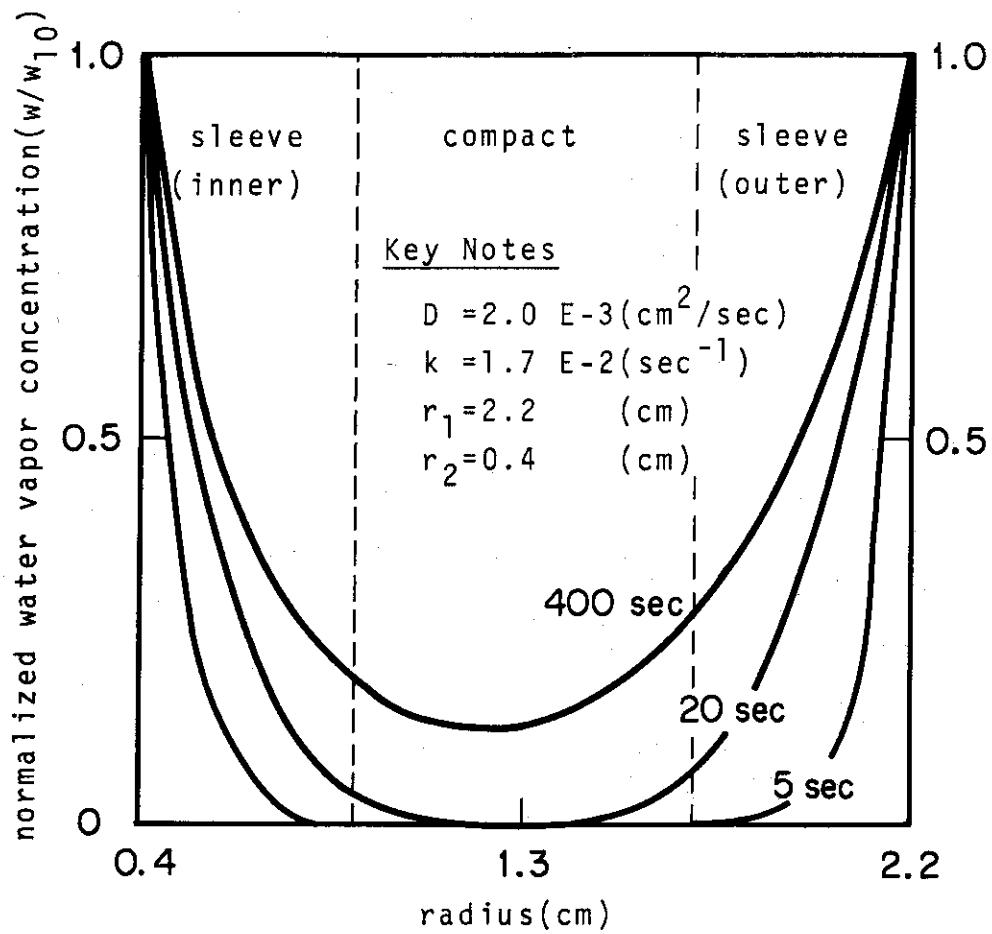


Fig.4.2 Distribution of Water Vapour Concentration ($w; \text{g-H}_2\text{O/cm}^3$) in the graphite cylinder normalized by Water Vapour at the outer surface ($w_{10}; \text{g-H}_2\text{O/cm}^3$) as the function of Time and Positions in the Annular Fuel Pin.

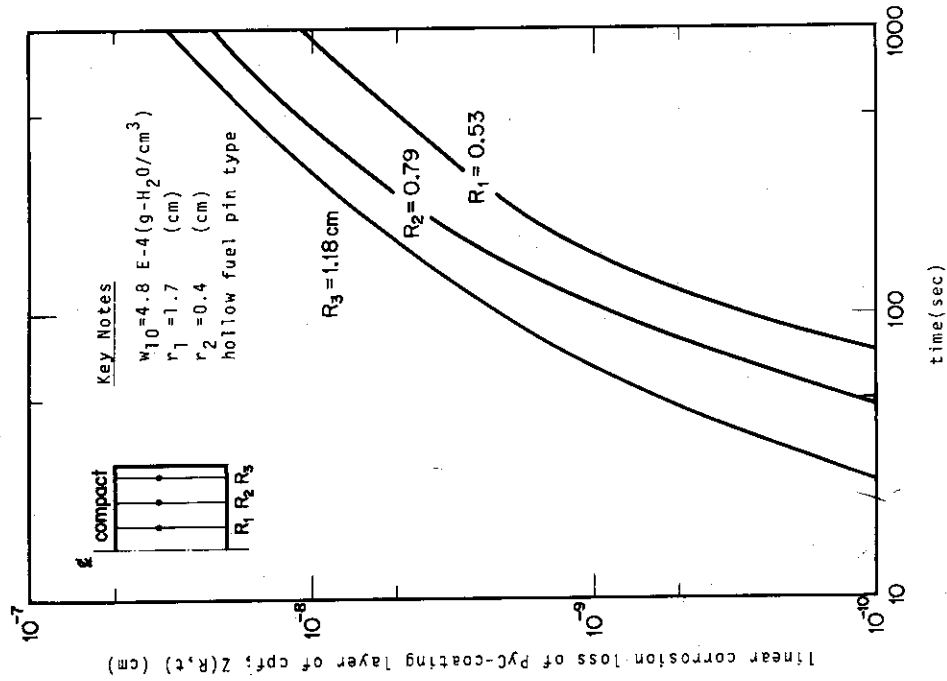


Fig. 4.4 Linear Corrosion Loss of PyC-coating layer of cpf as the function of Time and Positions in the Hollow Fuel Pin corresponding to the Concentration of Water Vapour at the outer surface, $w_{10} = 4.8\text{E-}4 \text{ g-H}_2\text{O/cm}^3$.

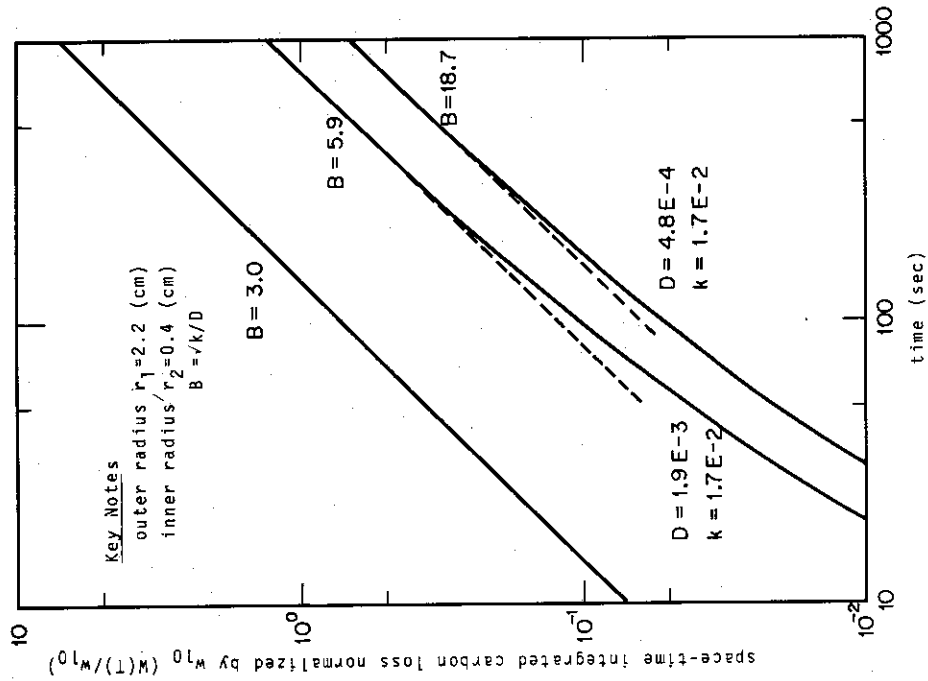


Fig. 4.3 Space-Time integrated Carbon Loss ($W(T)$); g-loss C/g-initial C) normalized by the concentration of water vapour (w_{10}); g-H₂O/cm³ at the outer surface of Annular Fuel Pin.

Table 4.1 The Manual for Input Cards

-Key Notes-

- 1) The cards subsequent to Card #6 are not required only if eigenvalues of boundary problem are pursued.
- 2) The sets of Card #8 should be prepared only if the linear corrosion of PyC-coating layer of cpf (R_0) is calculated.
- 3) Both Temperature and Chemical Reaction Rate Constant of cpf's intended to calculate the linear corrosion of coating layer must be entered without omission as many data as necessary for the minor time-steps.

<u>CARD NO.</u>	<u>FORMAT</u>	<u>DESCRIPTIONS</u>
#1	A-type	80-column Title Card. Title Card may be continued on as many cards as necessary.
#2	Blank	This card is used to indicate the end of the Title Cards.
#3	6I5	Option Card IOPT1=1; to calculate the distribution of water vapour and to save the results on the magnetic tape. =2; only to pursue the eigenvalues of the boundary value problem. =others; not to calculate the distribution of water vapour but to require it as the input being saved on the tape. IOPT2=1; to calculate the local rate of loss of graphite m . #1; not to calculate m . IOPT3=1; to calculate the space-averaged rate of graphite m_{sp-av} . #1; not to calculate m_{sp-av} . IOPT4=1; to calculate the time-integrated local loss of graphite W_1 . #1; not to calculate W_1 .

Table 4.1 (continued)

<u>CARD NO.</u>	<u>FORMAT</u>	<u>DESCRIPTIONS</u>
		IOPT5=1; to calculate the space-averaged time-integrated loss of graphite W. #1; not to calculate W.
		IOPT6=1; to calculate the depth of the extension of water vapour into the graphite cylinder (R_0). #1; not to calculate R_0 .
#4	2F10.2,2I5,F10.2	Geometrical Data Card r ₁ ; outer radius (cm). r ₂ ; inner radius (cm). NR ; number of mesh-points in the radial direction of the graphite cylinder (max.11). N ; numbers of eigenvalues needed. ε ; permissible error for the eigenvalues.
#5	8F10.2	Boundary Conditions Data Card See the equation (2-2) in the text. Input data of a ₁ , a ₂ , b ₁ , b ₂ , c ₁ , c ₂ , w ₁₀ and w ₂₀ are entered up in that order. If only the eigenvalues are extracted, the data c ₁ , c ₂ , w ₁₀ and w ₂₀ in that equation are not needed.
#6	I5,5(I5,F10.2)	Data Card for Setting Up Time-Steps. N ₁ ; number of time-steps (major). n ₁ ; number of time-steps in the first major time-step interval (minor). Δt ₁ ; time-step interval of the first major time-step (sec). In the same manner of n ₁ and Δt ₁ , n _i and Δt _i have to be given repeatedly for the i-th major time-step (i=2,3,4 and 5).
#7	4F10.2	Data Card for Physical and Geometrical Constants. D ; diffusion coefficient of water

Table 4.1 (continued)

<u>CARD NO.</u>	<u>FORMAT</u>	<u>DESCRIPTIONS</u>
		vapour in the graphite (cm^2/sec).
		k ; reaction rate constant of the chemical reaction (sec^{-1}).
		ρ_c ; initial density of the compact (g/cm^3).
		L ; length of graphite cylinder (cm).
The set of next cards should be prepared only if the depth of the extension of water vapour (R_0) is calculated; in other words it is required only if IOPT6=1.		
#8-1	I5,2F10.2	NCPF ; number of cpf's of which the linear corrosion of coating layer is intended to calculate.
		t ; upper limit of time-integral for the coating layer corrosion (hr).
		Z_0 ; permissible linear corrosion of outermost coating layer (cm).
#8-2	16I5	The figures of mesh-points in the compact for cpf's intended to calculate the linear corrosion in the Card #8-1 should be supplied.
#8-3	F10.2,4I5	ρ ; density of PyC-coating layer of cpf (g/cm^3).
		ITD ; This is the option used to select the input format of temperature data of cpf. If ITD=1, Card #8-4 should be prepared. If ITD \neq 1, Card #8-4' should be needed.
		NCARD1 ; number of Card #8-4's.
		ICR ; This is the option used to select the input format of the reaction rate constant of chemical reaction corresponding to the temperature on the Card #8-4 or #8-4'. If ICR=1, Card #8-5 should be prepared. If

Table 4.1 (continued)

<u>CARD NO.</u>	<u>FORMAT</u>	<u>DESCRIPTIONS</u>
#8-4	3I5,F10.2	<p>ICR#1, Card #8-5' should be needed. NCARD2 ; number of Card #8-5's. This Card should be prepared only if ITD=1. NMP ; mesh-point number within the compact for cpf intended to calculate the corrosion of PyC-coating layer. I1 ; start point of minor time-step corresponding to the time interval of the constant temperature of the cpf identified by NCPF. I2 ; finish point of minor time-step corresponding to the time interval of the constant temperature of the cpf identified by NCPF. TEMP ; temperature of cpf identified by NCPF for the time-step interval from I1 to I2 (centigrade).</p>
#8-4'	8F10.2	<p>This Card should be prepared only if ITD#1. TEMP ; temperature of cpf's as the function of time-step and positions within compact (in ascending order).</p>
#8-5	3I5,F10.2	<p>This Card should be prepared only if ICR=1. NMP ; the same manner as CARD #8-4. I1 ; the same mean as CARD #8-4. I2 ; the same mean as CARD #8-4. CHM ; rate constant of chemical reaction of PyC-coating layer of cpf identified by NCPF for the time interval from I1 to I2 (mg/cm²hr).</p>
#8-5'	8F10.2	<p>This Card should be prepared only if ICR#1. CHM ; rate constant of chemical reaction of PyC-coating layer of cpf's as the function of time-step and positions within compact (in ascending order).</p>

Table 4.2 Example of Input Data for "PEGASUS" code.

ANNULAR ROD FUEL		: SAMPLE PROBLEM OF PEGASUS CODE		1974.3.25	
1	1	1	1		
2.2	0.4	11	60	0.001	
2.0E-3	-2.0E-3	1.0E08	1.0E08	1.0E08	4.8E-4
4	2	10.0	9	1000.0	9 10000.0
2.0E-3	1.7E-2	1.8	250.0		
7	10000.0	3.E-4			
3	4	5	6	7	8 9
1.8	1	29	1084.0		
3	1	29	1082.0		
4	1	29	1079.0		
5	1	29	1074.0		
6	1	29	1065.0		
7	1	29	1053.0		
8	1	29	1042.0		
9	1	29	9.E-3		
3	1	29	8.E-3		
4	1	29	7.E-3		
5	1	29	6.E-3		
6	1	29	5.E-3		
7	1	29	4.E-3		
8	1	29	3.E-3		
9	1	29			

5. あとがき

炉心構造材黒鉛と冷却材中不純物との間の化学反応の重要性を高温ガス炉の設計の観点から分析するならば、

- (1) 炉心構造材の強度と黒鉛腐蝕との関係による構造設計への影響
 - (2) 化学反応による炉心流路断面積の変化および1次系機器への炭素沈着現象による熱伝達特性の劣化に伴う熱設計への影響
 - (3) 燃料体腐蝕による燃料体および被覆燃料粒子の健全性への影響
- の3点に集約されると考えられる。

本計算コード“PEGASUS”は特に(3)の評価を簡単かつ手軽に行うことを目的として開発されたものである。境界条件としては極めて一般的な第3種の境界条件を採用しており広い応用面を有していると思われる。尚、計算機使用言語はFORTRAN-IVであり、CDC-6600 およびFACOM-230/60 計算機で使用可能である。典型的な例題 (Table 4.2) の計算機使用時間はCDC-6600 計算機で7秒以下である。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、大洗研究所計画飯田浩正氏には方程式の解法に関して貴重など意見をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。また動力炉開発管理室の下川純一熱中性子炉設計班長および同班員三竹管氏には、本研究の当初から種々のご援助をいただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) P.L.Walker et al., "Chemistry & Physics of Carbon", vol.3. Marcel Dekker, New York. 1968.
- (2) Dragon Annual Report 11, (30-32), 1969-70
- (3) F.P.O.Ashworth, "Safety Aspects of High Temperature Reactors", Proceedings of Gas-Cooled Reactors Information meetings, Oak Ridge, April 27-30, 1970
- (4) P.Hawtin et al., "The Calculation of Graphite Corrosion and Coolant Composition in Helium Cooled H.T.Rs.", AERE-R 6262 (1970)
- (5) M.N. Ozisik et al., "Carbon Loss from Graphite Cylinders Exposed to Steam for Short Times.", Nucl. Sci. & Eng., 44, 310-319 (1971)
- (6) 野沢, 能沢他, 「多目的高温ガス実験炉第2次予備設計」, JAERI-memo 4852, 32-57 (1972) (unpublished)
- (7) 犬井, 「偏微分方程式とその応用」コロナ社, 東京 (昭32)
- (8) 川下, 「熱伝導論」第9章, オーム社, 東京 (昭41)

5. あとがき

炉心構造材黒鉛と冷却材中不純物との間の化学反応の重要性を高温ガス炉の設計の観点から分析するならば、

- (1) 炉心構造材の強度と黒鉛腐蝕との関係による構造設計への影響
- (2) 化学反応による炉心流路断面積の変化および1次系機器への炭素沈着現象による熱伝達特性の劣化に伴う熱設計への影響
- (3) 燃料体腐蝕による燃料体および被覆燃料粒子の健全性への影響

の3点に集約されると考えられる。

本計算コード“PEGASUS”は特に(3)の評価を簡単かつ手軽に行うことを目的として開発されたものである。境界条件としては極めて一般的な第3種の境界条件を採用しており広い応用面を有していると思われる。尚、計算機使用言語はFORTRAN-IVであり、CDC-6600およびFACOM-230/60計算機で使用可能である。典型的な例題(Table 4.2)の計算機使用時間はCDC-6600計算機で7秒以下である。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、大洗研究所計画飯田浩正氏には方程式の解法に関して貴重など意見をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。また動力炉開発管理室の下川純一熱中性子炉設計班長および同班員三竹管氏には、本研究の当初から種々のご援助をいただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) P.L.Walker et al., "Chemistry & Physics of Carbon", vol.3. Marcel Dekker, New York. 1968.
- (2) Dragon Annual Report 11, (30-32), 1969-70
- (3) F.P.O.Ashworth, "Safety Aspects of High Temperature Reactors", Proceedings of Gas-Cooled Reactors Information meetings, Oak Ridge, April 27-30, 1970
- (4) P.Hawtin et al., "The Calculation of Graphite Corrosion and Coolant Composition in Helium Cooled H.T.Rs.", AERE-R 6262(1970)
- (5) M.N. Ozisik et al., "Carbon Loss from Graphite Cylinders Exposed to Steam for Short Times.", Nucl. Sci. & Eng., 44, 310-319(1971)
- (6) 野沢, 能沢他, 「多目的高温ガス実験炉第2次予備設計」, JAERI-memo 4852, 32-57(1972)(unpublished)
- (7) 犬井, 「偏微分方程式とその応用」コロナ社, 東京(昭32)
- (8) 川下, 「熱伝導論」第9章, オーム社, 東京(昭41)

5. あとがき

炉心構造材黒鉛と冷却材中不純物との間の化学反応の重要性を高温ガス炉の設計の観点から分析するならば、

- (1) 炉心構造材の強度と黒鉛腐蝕との関係による構造設計への影響
 - (2) 化学反応による炉心流路断面積の変化および1次系機器への炭素沈着現象による熱伝達特性の劣化に伴う熱設計への影響
 - (3) 燃料体腐蝕による燃料体および被覆燃料粒子の健全性への影響
- の3点に集約されると考えられる。

本計算コード“PEGASUS”は特に(3)の評価を簡単かつ手軽に行うことを目的として開発されたものである。境界条件としては極めて一般的な第3種の境界条件を採用しており広い応用面を有していると思われる。尚、計算機使用言語はFORTRAN-IVであり、CDC-6600 およびFACOM-230/60 計算機で使用可能である。典型的な例題 (Table 4.2) の計算機使用時間はCDC-6600 計算機で7秒以下である。

6. 謝 辞

本報告書をまとめるにあたって、大洗研究所計画飯田浩正氏には方程式の解法に関して貴重など意見をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。また動力炉開発管理室の下川純一熱中性子炉設計班長および同班員三竹管氏には、本研究の当初から種々のご援助をいただいた。これらの方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) P.L.Walker et al., "Chemistry & Physics of Carbon", vol.3. Marcel Dekker, New York. 1968.
- (2) Dragon Annual Report 11, (30-32), 1969-70
- (3) F.P.O.Ashworth, "Safety Aspects of High Temperature Reactors", Proceedings of Gas-Cooled Reactors Information meetings, Oak Ridge, April 27-30, 1970
- (4) P.Hawtin et al., "The Calculation of Graphite Corrosion and Coolant Composition in Helium Cooled H.T.Rs.", AERE-R 6262 (1970)
- (5) M.N. Ozisik et al., "Carbon Loss from Graphite Cylinders Exposed to Steam for Short Times.", Nucl. Sci. & Eng., 44, 310-319 (1971)
- (6) 野沢, 能沢他, 「多目的高温ガス実験炉第2次予備設計」, JAERI-memo 4852, 32-57 (1972) (unpublished)
- (7) 犬井, 「偏微分方程式とその応用」コロナ社, 東京 (昭32)
- (8) 川下, 「熱伝導論」第9章, オーム社, 東京 (昭41)

- (9) 橋, 甲藤, 「熱伝達論・熱伝導論」, 熱伝導論編, 共立, 東京
- (10) J. Crank, "The mathematics of Diffusion" Clarendon Press, Oxford.
1956
- (11) 鈴木勝男, 「高温ガス炉に於ける炭素輸送サイクルの解析」
JAERI-memo 5313(1973)(unpublished)
- (12) 森口, 宇田川, 一松, 「数学公式Ⅲ-特殊関数」, 第Ⅳ編, 岩波(1959)

APPENDIX : A
SAMPLE OUTPUT OF STANDARD PROBLEM

--- INPUT DATA ---

I. CALCULATION OPTION

- 1 DISTRIBUTION OF WATER VAPOUR
- 2 LOCAL RATE OF LOSS OF GRAPHITE
- 3 SPACE-AVERAGED RATE OF GRAPHITE
- 4 TIME-INTEGRATED LOCAL LOSS OF GRAPHITE
- 5 SPACE-AVERAGED TIME-INTEGRATED LOSS OF GRAPHITE
- 6 CORROSION OF COATED PARTICLES FUEL AND DEPTH OF THE EXTENSION OF WATER VAPOUR

II. MEASURE OF FORM AND CHARACTERISTICS

OUTSIDE RADIUS (CM) 2.200
 INSIDE RADIUS (CM)400
 LENGTH OF FUEL (CM) 250.000
 DIFFUSION COEFFICIENT IN GRAPHITE (CM**2/SEC) 2.000000E-03
 REACTION RATE CONSTANT OF GRAPHITE-WATER VAPOUR REACTION (1/SEC) 1.700000E-02
 INITIAL DENSITY OF GRAPHITE (G/CM**3) 1.800000E+00

III. BOUNDARY CONDITIONS

A1*DW/DR + B1*(R1) = C1*M10 AT OUTER BOUNDARY
 A2*DW/DR + B2*(R2) = C2*M20 AT INNER BOUNDARY

A1 2.000000E-03
 A2 -2.000000E-03
 B1 1.000000E+00
 B2 1.000000E+00
 C1 1.000000E+00
 C2 1.000000E+00
 WATER VAPOUR CONCENTRATION AT OUTER BOUNDARY W10 (G/CM**3) 4.800000E-04
 WATER VAPOUR CONCENTRATION AT INNER BOUNDARY W20 (G/CM**3) 4.800000E-04

IV. CALCULATION DATA

NUMBER OF EIGENVALUES 60
 NUMBER OF MESH POINTS IN THE RADIAL DIRECTION 11
 NUMBER OF DIVISIONS BETWEEN REACTION STEP TIMES (MAJOR) 4
 NUMBER OF DIVISIONS BETWEEN REACTION STEP TIMES (MINOR) 2
 REACTION STEP TIMES (SEC) 10.00 100.00 1000.00
 PERMITTED ERROR 1.000000E-03
 NORMALIZATION WITH W10 1.000000E-03
 4.800000E-04

V. DATA FOR THE CALCULATION OF OPTION 6 (1)

NUMBER OF COATED PARTICLES FUEL 7
 THE FIGURES OF MESH POINTS IN THE COMPACT FOR COATED PARTICLES FUEL INTENDED 3
 UPPER LIMIT OF TIME-INTEGRAL FOR THE COATING LAYER CORROSION 1.000000E+04
 PERMISSIBLE LINEAR CORROSION OF OUTER MOST COATING LAYER 3.000000E-04
 DENSITY OF PYC-COATING LAYER (G/CM**3) 1.800000E+00

V. DATA FOR THE CALCULATION OF OPTION 6 (2)

TIME	MESH NO. OF CPF								
	3	4	5	6	7	8	9		
5.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
10.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
20.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
30.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
40.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
50.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
60.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
70.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
80.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
90.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
100.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
200.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
300.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
400.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
500.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
600.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
700.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
800.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
900.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
1000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
2000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
3000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
4000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
5000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
6000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
7000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
8000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
9000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		
10000.0	9.00E-03	8.00E-03	7.00E-03	6.00E-03	5.00E-03	4.00E-03	3.00E-03		

V. DATA FOR THE CALCULATION OF OPTION 6 (2)
TEMPERATURE OF EACH COATED PARTICLES FUEL AT EACH TIME STEP

TIME	3	4	5	6	7	8	9
5.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
10.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
20.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
30.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
40.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
50.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
60.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
70.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
80.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
90.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
100.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
200.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
300.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
400.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
500.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
600.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
700.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
800.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
900.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
1000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
2000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
3000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
4000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
5000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
6000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
7000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
8000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
9000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00
10000.0	1084.00	1082.00	1079.00	1074.00	1065.00	1053.00	1042.00

--- EIGENVALUES (LZCM) ---

ROOTS OF DETERMINANT I A1*ALPHA*J1(ALPHA*R1)-81*J0(ALPHA*R1) A1*ALPHA*Y1(ALPHA*R1)-81*Y0(ALPHA*R1) I = 0.0
I A2*ALPHA*J1(ALPHA*R2)-82*J0(ALPHA*R2) A2*ALPHA*Y1(ALPHA*R2)-82*Y0(ALPHA*R2) I

NUMBER OF EIGENVALUES..... 60

1)	1.690893E+00	2)	3.456477E+00	3)	5.211369E+00	4)	6.962183E+00
5)	8.711040E+00	6)	1.045982E+01	7)	1.220594E+01	8)	1.395264E+01
9)	1.569905E+01	10)	1.744525E+01	11)	1.919130E+01	12)	2.093723E+01
13)	2.268306E+01	14)	2.442883E+01	15)	2.617454E+01	16)	2.792021E+01
17)	2.966563E+01	18)	3.141142E+01	19)	3.315699E+01	20)	3.490253E+01
21)	3.664805E+01	22)	3.839355E+01	23)	4.013304E+01	24)	4.188452E+01
25)	4.362998E+01	26)	4.537544E+01	27)	4.712088E+01	28)	4.886632E+01
29)	5.061175E+01	30)	5.235717E+01	31)	5.410258E+01	32)	5.584800E+01
33)	5.759340E+01	34)	5.933880E+01	35)	6.108420E+01	36)	6.282959E+01
37)	6.457498E+01	38)	6.632037E+01	39)	6.806576E+01	40)	6.981114E+01
41)	7.155652E+01	42)	7.330189E+01	43)	7.504727E+01	44)	7.679264E+01
45)	7.853801E+01	46)	8.028338E+01	47)	8.202874E+01	48)	8.377411E+01
49)	8.551947E+01	50)	8.726484E+01	51)	8.901020E+01	52)	9.075566E+01
53)	9.250032E+01	54)	9.424627E+01	55)	9.599163E+01	56)	9.773699E+01
57)	9.948234E+01	58)	1.012277E+02	59)	1.029730E+02	60)	1.047184E+02

--- EQUILIBRIUM WATER VAPOUR CONCENTRATION ---

RADIUS (CM)	WATER VAPOUR CONCENTRATION (G(WATER)/CM**3(GRAPHITE))	WATER VAPOUR DISTRIBUTION NORMALIZED BY W10
0.400	4.800246E-04	1.000051E+00
0.580	2.465721E-04	5.136919E-01
0.760	1.372526E-04	2.859430E-01
0.940	8.59262E-05	1.791513E-01
1.120	6.594062E-05	1.373138E-01
1.300	5.605005E-05	1.176043E-01
1.480	8.360215E-05	1.741711E-01
1.660	1.213689E-04	2.528518E-01
1.840	1.877137E-04	3.910702E-01
2.020	2.983265E-04	6.215177E-01
2.200	4.800000E-04	1.000000E+00

--- WATER VAPOUR CONCENTRATION ---

NUMBER OF REACTION STEP TIMES 23 (CONTAINED TIME=0.0 (SEC))

1. TIME = 5.000 (SEC)

2.066E-03

RADIUS (CM)	WATER VAPOUR CONCENTRATION (G(WATER)/CM**3(GRAPHITE))	WATER VAPOUR DISTRIBUTION NORMALIZED BY W10
0.400	4.800319E-04	1.000066E+00
0.580	7.739346E-05	1.612364E-01
0.760	3.586187E-06	7.471224E-03
0.940	4.941718E-08	1.029525E-04
1.120	5.330538E-09	1.110529E-05
1.300	2.283089E-09	4.756434E-06
1.480	1.170557E-09	2.438660E-06
1.660	7.042563E-08	1.460951E-04
1.840	5.351174E-06	1.114828E-02
2.020	9.670143E-05	2.014613E-01
2.200	4.800000E-04	1.000000E+00

2. TIME = 10.000 (SEC)

4.132E-03

RADIUS (CM)	WATER VAPOUR CONCENTRATION (G(WATER)/CM**3(GRAPHITE))	WATER VAPOUR DISTRIBUTION NORMALIZED BY W10
0.400	4.800319E-04	1.000065E+00
0.580	1.363238E-04	2.840076E-01
0.760	2.241880E-05	4.620583E-02
0.940	1.916678E-06	3.993879E-03
1.120	8.479255E-08	1.766651E-04
1.300	7.748114E-09	1.612524E-05
1.480	1.617219E-07	3.362207E-04
1.660	3.336139E-06	6.950290E-03
1.840	3.345014E-05	6.968795E-02
2.020	1.698865E-04	3.539302E-01
2.200	4.800000E-04	1.000000E+00

LOCAL CARBON LOSS RATE

NUMBER OF REACTION STEPS 29 (CONTAINED TIME=0.0 (SEC))

1. TIME = 5.000 (SEC) 2.066E-03

RADIUS (CM)	(G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE (G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	3.022423E-06	6.296715E-03	6.296715E-03
.580	4.872922E-07	1.015192E-03	1.015192E-03
.760	2.257970E-08	4.704104E-05	4.704104E-05
.940	3.111452E-10	6.482192E-07	6.482192E-07
1.120	3.356264E-11	6.992218E-08	6.992218E-08
1.300	1.537506E-11	2.994792E-08	2.994792E-08
1.480	7.370173E-12	1.535453E-08	1.535453E-08
1.650	4.415317E-10	9.198578E-07	9.198578E-07
1.840	3.369258E-08	7.019287E-05	7.019287E-05
2.020	6.088609E-07	1.268460E-03	1.268460E-03
2.200	3.022222E-06	6.296296E-03	6.296296E-03

2. TIME = 10.000 (SEC) 4.132E-03

RADIUS (CM)	(G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE (G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	3.022417E-06	6.296703E-03	6.296703E-03
.580	8.583348E-07	1.788198E-03	1.788198E-03
.760	1.4411524E-07	2.940736E-04	2.940736E-04
.940	1.206797E-08	2.514161E-05	2.514161E-05
1.120	5.339212E-10	1.112336E-06	1.112336E-06
1.300	4.873405E-11	1.015293E-07	1.015293E-07
1.480	1.018249E-09	2.121352E-06	2.121352E-06
1.650	2.100532E-08	4.376108E-05	4.376108E-05
1.840	2.106120E-07	4.387750E-04	4.387750E-04
2.020	1.069656E-06	2.228449E-03	2.228449E-03
2.200	3.022222E-06	6.296296E-03	6.296296E-03

3. TIME = 20.000 (SEC) 8.204E-03

RADIUS (CM)	(G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE (G LOSS-CARBONI)/(G INITIAL-CARBONI/SEC)	LOCAL CARBON LOSS RATE PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	3.022409E-06	6.296684E-03	6.296684E-03
.580	1.173445E-06	2.444677E-03	2.444677E-03
.760	3.696059E-07	7.700122E-04	7.700122E-04
.940	8.811881E-08	1.835888E-04	1.835888E-04
1.120	1.566891E-08	3.264356E-05	3.264356E-05
1.300	6.164127E-09	1.288360E-05	1.288360E-05
1.480	3.079056E-08	6.414708E-05	6.414708E-05
1.650	1.531363E-07	3.190339E-04	3.190339E-04
1.840	5.489152E-07	1.143573E-03	1.143573E-03
2.020	1.457576E-06	3.036618E-03	3.036618E-03
2.200	3.022222E-06	6.296296E-03	6.296296E-03

--- TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS ---

NUMBER OF REACTION STEP LINES 29 (CONTAINED TIME=0.0 (SEC))

1. TIME = 5.000 (SEC) 2.066E-03

RADIUS (CM)	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS (G(LOSS-CARBON)/G(INITIAL-CARBON))	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	1.511213E-05	3.148361E-02
.580	3.774931E-07	2.036340E-03
.760	2.394909E-08	4.989394E-05
.940	1.947514E-09	4.057322E-06
1.120	1.582438E-09	3.130076E-06
1.300	1.420173E-09	2.958696E-06
1.480	1.524368E-09	3.175766E-06
1.660	2.090044E-09	4.354259E-06
1.840	3.469378E-08	7.227871E-05
2.020	1.221798E-06	2.545412E-03
2.200	1.511111E-05	3.148148E-02

2. TIME = 10.000 (SEC) 4.132E-03

RADIUS (CM)	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS (G(LOSS-CARBON)/G(INITIAL-CARBON))	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	3.022423E-05	6.296716E-02
.580	4.451677E-06	9.274326E-03
.760	4.125725E-07	8.595261E-04
.940	2.341090E-08	4.877272E-05
1.120	2.252832E-09	4.693592E-06
1.300	1.522832E-09	3.172567E-06
1.480	2.731104E-09	5.170230E-06
1.660	3.914764E-08	8.155759E-05
1.840	6.149601E-07	1.281167E-03
2.020	5.596217E-06	1.157545E-02
2.200	3.022222E-05	6.296296E-02

3. TIME = 20.000 (SEC) 8.264E-03

RADIUS (CM)	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS (G(LOSS-CARBON)/G(INITIAL-CARBON))	TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
.400	6.044836E-05	1.259341E-01
.580	1.686945E-05	3.097892E-02
.760	3.043260E-06	6.340124E-03
.940	4.913471E-07	1.023640E-03
1.120	6.237702E-08	1.297438E-04
1.300	1.524969E-08	4.010351E-05
1.480	1.216379E-07	2.534115E-04
1.660	8.535218E-07	1.778170E-03
1.840	4.529216E-06	9.435867E-03
2.020	1.651463E-05	3.657215E-02
2.200	6.044444E-05	1.259259E-01

--- SPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE ---

TIME (SEC)	DIMENSIONLESS TIME	SPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE (G/LOSS-CARBON)/(%INITIAL-CARBON)/SEC	SPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE PAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE
5.000	2.0661E-03	3.681531E-07	7.669856E-04
10.000	4.1322E-03	5.062123E-07	1.054609E-03
20.000	8.2645E-03	6.781264E-07	1.412763E-03
30.000	1.2397E-02	7.887438E-07	1.643216E-03
40.000	1.6529E-02	8.678497E-07	1.806354E-03
50.000	2.0661E-02	9.249993E-07	1.927082E-03
60.000	2.4793E-02	9.689911E-07	2.018731E-03

--- CORROSION OF COATED FUEL PARTICLES (RADIUS .760 CM)

DENSITY OF PVC (G/CM**3) 1.80

STEP	TIME (SEC)	TEMPERATURE (DEG)	REACTION VELOCITY COEFFICIENT (MG/CM**2,HR)	CONCENTRATION (MOL/CM**3)	LOSS OF PVC (CM)
1	5.00	1084.00	9.00000E-03	3.58619E-06	7.70241E-11
2	10.00	1084.00	9.00000E-03	2.24188E-05	5.80982E-10
3	20.00	1084.00	9.00000E-03	5.87021E-05	4.35898E-09
4	30.00	1084.00	9.00000E-03	8.12852E-05	1.04704E-08
5	40.00	1084.00	9.00000E-03	9.53591E-05	1.81132E-08
6	50.00	1084.00	9.00000E-03	1.04730E-04	2.67479E-08
7	60.00	1084.00	9.00000E-03	1.11517E-04	3.60519E-08

--- DEPTH OF THE EXTENSION OF WATER VAPOUR (CM)

PERMISSIBLE LINEAR CORROSION OF OUTER MOST COATING LAYER (CM) 3.0000E-03

STEP	TIME (SEC)	INNER EXTENSION (CM)	OUTER EXTENSION (CM)
1	5.00	0.	0.
2	10.00	0.	0.
3	20.00	0.	0.
4	30.00	0.	0.
5	40.00	0.	0.
6	50.00	0.	0.
7	60.00	0.	0.
8	70.00	0.	0.

APPENDIX ; B
PROGRAMME LIST OF "PEGASUS"

```

PROGRAM PEGASUS CDC 6600_FTN V3.0-P328.OPT=1 03/20/74
PROGRAM PEGASUS(INPUT,CUTPUT,TAPE5=INPUT,TAPE6=OUTPUT,TAPE2,TAPE3)
C
C ANALYSIS FOR REACTION OF GRAPHITE-WATER VAPOUR
C --- OPTIONS ---
5 C IOPT1..... 1= DISTRIBUTION OF VAPOUR
C 2= EIGENVALUES
C OTHERS= USE THE WATER VAPOUR AS THE INPUT BEING SAVED
C ON THE TAPE 3
C IOPT2..... 1= LOCAL RATE OF LOSS OF GRAPHITE
10 C IOPT3..... 1= SPACE-AVERAGED RATE OF GRAPHITE
C IOPT4..... 1= TIME-INTEGRATED LOCAL LOSS OF GRAPHITE
C IOPT5..... 1= SPACE-AVERAGED TIME-INTEGRATED LOSS OF GRAPHITE
C IOPT6..... 1= CORROSION OF COATED PARTICLES FUEL AND
C DEPTH OF THE EXTENTION OF WATER VAPOUR
15 C
COMMON /TITLE/ ITITLE(8)
COMMON /OPT/ IOPT1,IOPT2,IOPT3,IOPT4,IOPT5,IOPT6
COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
20 COMMON /TIMD/ KUKAN,MESH(5),TIMEX(5)
COMMON /TIM/ TIME(100),DIMLT(100),NT
COMMON /CNT/ DC,SPK,DENS,FUEL,TGRA
COMMON /CPF/ NCPF,TIMAX,THICK,MESHN(30),ROHPC
,ITD,NCARD1,ICR,NCARD2
25 COMMON /CMN/ TEMP(100,30),CHM(100,30)
C
DATA PAI / 3.1415926/
C
ICASE = 1
30 10 CONTINUE
CALL FACE(ICASE)
20 CONTINUE
READ(5,110) IOPT1,IOPT2,IOPT3,IOPT4,IOPT5,IOPT6
IF(IOPT1.NE.1.AND.IOPT1.NE.2) GO TO 25
35 READ(5,120) R1,R2,NR,N,ERR
READ(5,130) A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
IF(IOPT1.EQ.2) GO TO 55
READ(5,140) KUKAN,(MESH(I),TIMEX(I),I=1,KUKAN)
CALL TM
40 READ(5,130) DC,SPK,DENS,FUEL
25 CONTINUE
IF(IOPT6.NE.1) GO TO 55
READ(5,150) NCPF,TIMAX,THICK
READ(5,110) (MESH(NN),NN=1,NCPF)
45 READ(5,160) ROHPC,ITD,NCARD1,ICR,NCARD2
IF(ITD.NE.1) GO TO 35
DO 30 NN=1,NCARD1
READ(5,170) NMP,I1,I2,VALUE
DO 30 I=I1,I2
50 TEMP(I,NMP) = VALUE
30 CONTINUE
NCP = 1
NN = 1
31 CONTINUE
55 IF(MESHN(NCP).EQ.NN) GO TO 32
IF(NN.EQ.NR) GO TO 90
NN = NN+1
GO TO 31
60 32 CONTINUE
DO 33 L=1,NT
TEMP(L,NCP) = TEMP(L,NN)
33 CONTINUE
IF(NCP.EQ.NCPF) GO TO 34
65 NCP = NCP+1
NN = NN+1
GO TO 31
34 CONTINUE
GO TO 40
70 35 CONTINUE
READ(5,130) ((TEMP(L,NN),I=1,NT),NN=1,NCPF)
40 CONTINUE
IF(ICR.NE.1) GO TO 50
DO 45 NN=1,NCARD2
75 READ(5,170) NMP,I1,I2,VALUE
DO 45 I=I1,I2
CHM(I,NMP) = VALUE
45 CONTINUE
NCP = 1
80 NN = 1

```

```

46 CONTINUE
IF(MESHN(NCP).EQ.NN) GO TO 47
IF(NN.EQ.NP) GO TO 90
NN = NN+1
85 GO TO 46
47 CONTINUE
DO 48 L=1,NT
CHM(L,NCP) = CHM(L,NN)
48 CONTINUE
90 IF(NCP.EQ.NCPF) GO TO 49
NCP = NCP+1
NN = NN+1
GO TO 46
49 CONTINUE
GO TO 55
50 CONTINUE
READ(5,130) ((CHM(I,NN),I=1,NT),NN=1,NCPF)
55 CONTINUE
IF(IOPT1.EQ.1.OR.IOPT1.EQ.2) GO TO 57
100 CALL TAPER
57 CONTINUE
TEM = DC/(R1*R1)
DO 58 L=1,NT
DMLT(L) = TIME(L)*TEM
105 58 CONTINUE
IGRA = PAI*ABS(R1*R1-R2*R2)*FUEL*DENS
CALL OUTPT1
IF(IOPT1.NE.1.AND.IOPT1.NE.2) GO TO 60
CALL ROOT
110 IF(IOPT1.EQ.2) GO TO 85
CALL OMEGA
60 CONTINUE
IF(IOPT2.NE.1) GO TO 65
115 CALL MRT
65 CONTINUE
IF(IOPT3.NE.1) GO TO 70
CALL MSPAV
70 CONTINUE
120 IF(IOPT4.NE.1) GO TO 75
CALL WLOSC
75 CONTINUE
IF(IOPT5.NE.1) GO TO 80
CALL WLOSC
125 80 CONTINUE
IF(IOPT6.NE.1) GO TO 85
CALL CPFCR
85 CONTINUE
ICASE = ICASE+1
130 GO TO 10
90 CONTINUE
WRITE(6,180)
STOP
110 FORMAT(1E15)
120 FORMAT(2F10.2,2I5,F10.2)
130 FORMAT(8F10.2)
140 FORMAT(15,5(15,F10.2))
150 FORMAT(15,2F10.2)
160 FORMAT(F10.2,4I5)
170 FORMAT(3I5,F10.2)
140 180 FORMAT(1H0,5X,32H**ERROR INPUT DATA OF OPTION 6 )
END

```

SUBROUTINE SAVE

```

C
C SAVE THE CALCULATED VALUE FOR AFTER CALCULATION
C
5 COMMON /GEO/ A1(5)
COMMON /BND/ A2(8)
COMMON /IIM/ A3(201)
COMMON /CNT/ A4(5)
COMMON /RLT/ A5(101)
10 COMMON /DMG/ A6(3000)
COMMON /RDS/ A7(62)
COMMON /DMY/ A8(3400)
COMMON /EMV/ A9(30)
WRITE(2) A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9
15 C
RETURN
END

```


SUBROUTINE OUTPT1

CDC 6600 FTN V3.0-P328 OPT=1 03/20/74

```

SUBROUTINE OUTPT1
C
COMMON /OPT/ IOPT1,IOPT2,IOPT3,IOPT4,IOPT5,IOPT6
COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
5 COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
COMMON /TIMD/ KUKAN,MESH(5),TIMEX(5)
COMMON /TIM/ TIME(100),DIMLT(100),NT
COMMON /CNT/ DG,SPK,DENS,FUEL,TGRA
10 COMMON /CPF/ NCPF,TIMAX,THICK,MESHN(30),ROHPC
,ITD,NCARD1,ICR,NCARD2
COMMON /CMN/ TEMP(100,30),CHM(100,30)
C
WRITE(6,100)
IF(IOPT1.NE.1) GO TO 10
15 WRITE(6,110)
GO TO 30
10 CONTINUE
IF(IOPT1.NE.2) GO TO 20
WRITE(6,120)
20 GO TO 55
20 CONTINUE
WRITE(6,130)
30 CONTINUE
IF(IOPT2.NE.1) GO TO 35
25 WRITE(6,140)
35 CONTINUE
IF(IOPT3.NE.1) GO TO 40
WRITE(6,150)
40 CONTINUE
30 IF(IOPT4.NE.1) GO TO 45
WRITE(6,160)
45 CONTINUE
IF(IOPT5.NE.1) GO TO 50
35 WRITE(6,170)
50 CONTINUE
IF(IOPT6.NE.1) GO TO 55
WRITE(6,180)
55 CONTINUE
WRITE(6,190) R1,R2
40 IF(IOPT1.EQ.2) GO TO 60
WRITE(6,200) FUEL,DG,SPK,DENS
60 CONTINUE
WRITE(6,210) A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
WRITE(6,220) N
45 IF(IOPT1.EQ.2) GO TO 65
WRITE(6,230) NR,KUKAN,(MESH(I),I=1,KUKAN)
WRITE(6,240) (TIMEX(I),I=1,KUKAN)
65 CONTINUE
WRITE(6,250) ERR
50 IF(IOPT1.EQ.2) RETURN
WRITE(6,260) W1
IF(IOPT6.NE.1) RETURN
WRITE(6,270) NCPF,(MESHN(I),I=1,NCPF)
WRITE(6,280) TIMAX,THICK,ROHPC
55 WRITE(6,290) (MESHN(I),I=1,NCPF)
DO 70 L=1,NT
WRITE(6,300) TIME(L),(TEMP(L,I),I=1,NCPF)
70 CONTINUE
WRITE(6,310) (MESHN(I),I=1,NCPF)
60 DO 75 L=1,NT
WRITE(6,320) TIME(L),(CHM(L,I),I=1,NCPF)
75 CONTINUE
NNN = NCPF
65 DO 85 NN=1,NCPF
NNT = MESHN(NNN)
DO 80 I=1,NT
TEMP(I,NNT) = TEMP(I,NNN)
70 CHM(I,NNT) = CHM(I,NNN)
80 CONTINUE
NNN = NNN-1
85 CONTINUE
C
RETURN
75 100 FORMAT(1H1,4X,18H--- INPUT DATA --- //
1 9X,22HI. CALCILATION OPTION //)
110 FORMAT(13X,31H1 DISTRIBUTION OF WATER VAPOUR )
120 FORMAT(13X,14H1 EIGENVALUES )
80 130 FORMAT(13X,60H1 USE THE WATER VAPOUR AS THE INPUT BEING SAVED ON
1THE TAPE )

```

```

140 FORMAT(13X,33H2 LOCAL RATE OF LOSS OF GRAPHITE )
150 FORMAT(13X,34H3 SPACE-AVERAGED RATE OF GRAPHITE )
160 FORMAT(13X,41H4 TIME-INTEGRATED LOCAL LOSS OF GRAPHITE )
170 FORMAT(13X,50H5 SPACE-AVERAGED TIME-INTEGRATED LOSS OF GRAPHITE )
180 FORMAT(13X,80H6 CORROSION OF COATED PARTICLES FUEL AND DEPTH OF T
85 THE EXTENTION OF WATER VAPOUR )
190 FORMAT(/78X,40H11. MEASURE OF FORM AND CHARACTERISTICS //
116X,20HOUTSIDE RADIUS (CM) ,54(1H.) , F13.3 /
216X,19HINSIDE RADIUS (CM) ,65(1H.) ,F13.3 )
90 200 FORMAT(16X,20HLENGTH OF FUEL (CM) ,64(1H.) , F13.3 / 16X,
146HDIFFUSION COEFFICIENT IN GRAPHITE (CM**2/SEC) ,34(1H.) ,1PE13.6/
216X,65HREACTION RATE CONSTANT OF GRAPHITE-WATER VAPOUR REACTION (1
3/SEC) ,19(1H.) , E13.6 /
416X,38HINITIAL DENSITY OF GRAPHITE (G/CM**3) ,46(1H.) ,E13.6 )
95 210 FORMAT(/7X,25H11. BOUNDARY CONDITIONS //
1 30X,51HA1*DW/DP + B1*W(R1) = C1*W10 AT OUTER BOUNDARY /
2 30X,51HA2*DW/DP + B2*W(R2) = C2*W20 AT INNER BOUNDARY //
3 16X,3HA1 ,81(1H.) ,1PE13.6 / 16X,3HA2 ,81(1H.) ,E13.6 /
4 16X,3HB1 ,81(1H.) , E13.6 / 16X,3HB2 ,81(1H.) ,E13.6 /
100 5 16X,3HC1 ,81(1H.) , E13.6 / 16X,3HC2 ,81(1H.) ,E13.6 /
6 16X,59HWATER VAPOUR CONCENTRATION AT OUTER BOUNDARY W10 (G/CM**
73) ,25(1H.) ,E13.6 /
8 16X,59HWATER VAPOUR CONCENTRATION AT INNER BOUNDARY W20 (G/CM**
93) ,25(1H.) ,E13.6 )
105 220 FORMAT(/8X,21H1V. CALCULATION DATA /
1 16X,22HNUMBER OF EIGENVALUES ,62(1H.) ,I13)
230 FORMAT(16X,46HNUMBER OF MESH POINTS IN THE RADIAL DIRECTION ,
1 39(1H.) ,I13 / 16X,56HNUMBER OF DIVISIONS BETWEEN REACTION S
2TEP TIMES (MAJOR) ,28(1H.) ,I13/ 16X,56HNUMBER OF DIVISIONS BETWE
110 3EN REACTION STEP TIMES (MINOR) ,28(1H.) ,I13,2I10 /103X,2I10)
240 FORMAT(16X,26HREACTION STEP TIMES (SEC) ,58(1H.) ,F13.2,2F10.2 /
1 103X,2F10.2 )
250 FORMAT(16X,15HPERMITTED ERROR ,69(1H.) ,1PE13.6)
115 260 FORMAT(16X,23HNORMALIZATION WITH W10 ,61(1H.) ,1PE13.6)
270 FORMAT(/9X,45HV. DATA FOR THE CALCULATION OF OPTION 6 (1) //
1 16X,32HNUMBER OF COATED PARTICLES FUEL ,52(1H.) ,I13 /
2 16X,77HTHE FIGURES OF MESH POINTS IN THE COMPACT FOR COATED PARTI
120 3CLES FUEL INTENDED ,7(1H.) ,I13,5I4 / 108X,5I4 )
280 FORMAT(16X,61HUPPER LIMIT OF TIME-INTEGRAL FOR THE COATING LAYER C
108CORROSION ,23(1H.) ,1PE13.6 /16X,57HPERMISSIBLE LINEAR CORROSION OF
20UTER MOST COATING LAYER ,27(1H.) ,E13.6 /16X,39HDENSITY OF PYC-COA
3TING LAYER (G/CM**3) ,45(1H.) ,E13.6 )
125 290 FORMAT(14H,8X,45HV. DATA FOR THE CALCULATION OF OPTION 6 (2) //
1 16X,59HTEMPERATURE OF EACH COATED PARTICLES FUEL AT EACH TIME STE
2P //35X,15HMESH NO. OF CPF / 23X,4HTIME,19,10I9 /)
300 FORMAT(1H ,18X,F8.1,3X,11F9.2)
310 FORMAT(/16X,34HRATE CONSTANT OF CHEMICAL REACTION //
1 35X,15HMESH NO. OF CPF / 23X,4HTIME,19,10I9 /)
130 320 FORMAT(1H ,18X,F8.1,3X,1PE9.2,10E9.2)

```

END

SUBROUTINE CARD

```

C
COMMON/ TITLE / ITITLE(8)
COMMON/ASS/ NADD
5 DIMENSION ICHAR(80),JCHAR(80)
C
DO 30 I=1,80
30 JCHAR(I) = 1H
DECODE(80,100,ITITLE) ICHAR
10 100 FORMAT(80A1)
ICOUNT = 0
IFLAG = 1
DO 10 I=1,80
15 IF(ICHAR(I).EQ.1H ) GO TO (1,2,3) IFLAG
IFLAG = 2
JCOUNT = 0
GO TO 10
1 ICOUNT = ICOUNT + 1
GO TO 10
20 2 IFLAG = 3
3 JCOUNT = JCOUNT + 1
10 KCOUNT = (ICOUNT + JCOUNT)/2
IF(KCOUNT.GE.80) GO TO 99
II = 80 - ICOUNT - JCOUNT
25 DO 20 I=1,II
20 JCHAR(KCOUNT+I) = ICHAR(ICOUNT+I)
WRITE(6,200) JCHAR
200 FORMAT(30X,80A1)
99 RETURN
30 ENO

```

```

SUBROUTINE ROOT
CQC 6600 FTN V3.0-P328 OPT=1 03/20/74

SUBROUTINE ROOT
C ROOTS OF U0(A*ALPHAN) = 0
COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
5 COMMON /RLT/ RES(100),SS
REAL J01,J02,J11,J12
S=0.1
H1=0.0
ISTART=1
10 KON=0
1 H1=H1+S
X1 = R1*H1
X2 = R2*H1
CALL BESJY0(J01,Y01,X1,2)
15 CALL BESJY0(J02,Y02,X2,2)
CALL BESJY1(J11,Y11,X1,2)
CALL BESJY1(J12,Y12,X2,2)
A1H = A1*H1
A2H = A2*H1
20 BES1 = (A1H*J11-B1*J01)*(A2H*Y12-B2*Y02)
1 = (A1H*Y11-B1*Y01)*(A2H*J12-B2*J02)
IFUGO=1
IF(BES1) 2,3,3
2 IFUGO=-1
25 3 IF(ISTART.EQ.1) 4,5
4 ISTART=2
GO TO 8
5 IF(IFUGO*JFUGO) 6,8,8
6 KON=KON+1
30 CALL COPERN(H1,H2,BES1,BES2,ANS)
RES(KON)=ANS
IF(KON.GE.N) 7,8
7 DO 13 I=1,N,4
II=I+3
35 IF(MOD(I,212).EQ.1.OR.I.EQ.1) 9,10
9 WRITE(6,100)
WRITE(6,200) N
10 IF(II.GT.N) 11,12
11 WRITE(6,400) (J,RES(J),J=I,N)
40 GOTO 13
12 WRITE(6,400) (J,RES(J),J=I,II)
13 CONTINUE
RETURN
8 H2=H1
45 JFUGO=IFUGO
BES2=BES1
GO TO 1
100 FORMAT(1H1,9X,26H--- EIGENVALUES (1/CM) --- //
115X,112HROOTS OF DETERMINANT I A1*ALPHA*J1(ALPHA*R1)-B1*J0(ALPH
50 2A*R1) A1*ALPHA*Y1(ALPHA*R1)-B1*Y0(ALPHA*R1) I = 0.0 /
315X,112H I A2*ALPHA*J1(ALPHA*R2)-B2*J0(ALPH
4A*R2) A2*ALPHA*Y1(ALPHA*R2)-B2*Y0(ALPHA*R2) I
200 FORMAT(1H0,14X,21HNUMBER OF EIGENVALUES , 19(1H.),I3/)
400 FORMAT(10X,4(I3,14),1PE15.6,10X))
55 END

```

```

SUBROUTINE OMEGA
C
C WATER VAPOUR CONCENTRATION W
C
5 COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
COMMON /TMD/ KUKAN,MESH(5),TIMEX(5)
COMMON /TIM/ TIME(100),DIHLT(100),NT
10 COMMON /CNT/ DC,SPK,DENS,FUEL,TGRA
COMMON /RLT/ RES(100),SS
COMMON /OMG/ OMEG(30,100)
COMMON /RDS/ RAD(30),THETA(30),A,B
COMMON /DMY/ J0(100,30),SV1(100),SV2(100),U11(100),U12(100)
COMMON /EMV/ EMVC(30)
15 C
C DIMENSION XN(100),YN(100)
C
REAL J01,J11,J12,J0
EQUIVALENCE (XN(1),SV1(1)),(YN(1),SV2(1))
20 C
IF(NR.GT.1) GO TO 10

```

```

WRITE(6,100)
STOP
C
25      10 CONTINUE
        DELR = (R1-R2)/FLOAT(NR-1)
        DO 15 I=1,NR
          RAD(I) = DELR*FLOAT(I-1) + R2
        15 CONTINUE
30      TEM1 = A1+B1*R1*ALOG(R1)
        TEM2 = A2+B2*R2*ALOG(R2)
        TEM3 = B1*R1
        TEM4 = B2*R2
        TEM5 = C1*N1*R1
        TEM6 = C2*N2*R2
35      DELT = TEM1*TEM4 - TEM2*TEM3
        DEL1 = TEM5*TEM4 - TEM6*TEM3
        DEL2 = TEM1*TEM6 - TEM2*TEM5
40      A = DEL1/DELT
        B = DEL2/DELT
C
        DO 20 I=1,NR
          THETA(I) = A*ALOG(RAD(I))+B
        20 CONTINUE
45      DO 25 J=1,N
          X1 = RES(J)*R1
          X2 = RES(J)*R2
          CALL BESJY0(J01,Y01,X1,2)
          CALL BESJY1(J11,Y11,X1,2)
          CALL RESJY1(J12,Y12,X2,2)
50      XN(J) = A1*RES(J)*Y11-B1*Y01
          YN(J) = A1*RES(J)*J11-B1*J01
          U11(J) = XN(J)*J11-YN(J)*Y11
          U12(J) = XN(J)*J12-YN(J)*Y12
55      25 CONTINUE
        DO 30 I=1,NR
          DO 30 J=1,N
            XX = RES(J)*RAD(I)
            CALL BESJY0(J0,Y0,XX,2)
            UD(J,I) = XN(J)*J0-YN(J)*Y0
        30 CONTINUE
        R11 = R1*R1
        R22 = R2*R2
65      DO 40 J=1,N
          F1 = 0.5*R11*(U11(J)**2+U0(J,NR)**2)
          F2 = 0.5*R22*(U12(J)**2+U0(J,1)**2)
          G1 = (RES(J)*R1*U11(J)*THETA(NR)+A*U0(J,NR))/RES(J)**2
          G2 = (RES(J)*R2*U12(J)*THETA(1)+A*U0(J,1))/RES(J)**2
70      AN = -(G1-G2)/(F1-F2)
          SV1(J) = OC*RES(J)**2+SPK
          SV2(J) = AN/SV1(J)
40 CONTINUE
        DO 45 I=1,NR
          SUM = 0.0
          DO 42 J=1,N
            SUM = SUM + SV2(J)*SPK*UD(J,I)
          42 CONTINUE
          FWVC(I) = SUM + THETA(I)
60 CONTINUE
80      45 CONTINUE
        DO 60 L=1,NT
          DO 60 I=1,NR
            SUM = 0.0
            DO 55 J=1,N
              TEM2 = SV1(J)*TIME(L)
              IF(ABS(TEM2).GT.700.) GO TO 55
              TEM1 = SV2(J)*OC*RES(J)**2*UD(J,I)
              SUM = SUM + TEM1/EXP(TEM2)
            55 CONTINUE
          OMEG(I,L) = FWVC(I) + SUM
          IF(OMEG(I,L).LT.0.0) OMEG(I,L)=0.0
60 CONTINUE
          WRITE(6,140) NT
          LINE=6
95      DO 80 L=1,NT
            LINE=LINE+NR+6
            IF(LINE.LE.63) GO TO 65
            WRITE(6,140) NT
            LINE=12+NR
100     65 CONTINUE
          WRITE(6,150) L,TIME(L),DIMLT(L)
          DO 68 I=1,NR
            DIV = OMEG(I,L)/W1
            WRITE(6,160) RAD(I),OMEG(I,L),DIV
105     68 CONTINUE
        80 CONTINUE

```

```

WRITE(6,170)
DO 90 I=1, NR
EWVCN = EWVC(I) / W1
110 WRITE(6,175) RAD(I), EWVC(I), EWVCN
90 CONTINUE
CALL SAVE
RETURN
115 C
100 FORMAT(1H1,9X,26H*** ERROR NO. OF MESH IS 1 )
140 FORMAT(1H1,9X,34H--- WATER VAPOUR CONCENTRATION --- //
1 16X,30HNUMBER OF REACTION STEP TIMES ,6(1H.),I3,
2 31H (CONTAINED TIME=0.0 (SEC) )
120 150 FORMAT(1H0,14X,I3, 8H. TIME = ,F10.3,6H (SEC) 10X,1PE11.3 //
1 30X,36HRADIUS WATER VAPOUR CONCENTRATION
1 5X,25HWATER VAPOUR DISTRIBUTION /
2 30X,36H (CM) (G(WATER)/CM**3(GRAPHITE))
2 11X,17HNORMALIZED BY W10 / )
125 160 FORMAT(30X,F6.3,11X,1PE13.6,17X,E13.6)
170 FORMAT(1H1,9X,46H--- EQUILIBRIUM WATER VAPOUR CONCENTRATION --- //
1 30X,6HRADIUS,9X,26HWATER VAPOUR CONCENTRATION
1,5X,25HWATER VAPOUR DISTRIBUTION /
131X,4H(CM),10X,26H(G(WATER)/CM**3(GRAPHITE))
130 2,9X,17HNORMALIZED BY W10 / )
175 FORMAT(30X,F6.3,16X,1PE13.6,16X,E13.6)
END

```

```

SUBROUTINE TM
C
COMMON /TIMD/ KUKAN,MESH(5),TIMEX(5)
COMMON /TIM/ TIME(100),OIMLT(100),NT
5 C
NT=0
DO 10 I=1,KUKAN
JJ = MESH(I)
TIMEY = TIMEX(I)
10 IF(I.GT.1) 1,2
2 HTIME = TIMEY/FLOAT(JJ)
DO 20 J=1,JJ
NT=NT+1
TIME(NT)=HTIME*FLOAT(J)
15 20 CONTINUE
GO TO 10
1 TIMEZ = TIMEX(I-1)
HTIME = (TIMEY-TIMEZ)/FLOAT(JJ)
DO 30 J=1,JJ
20 NT=NT+1
TIME(NT)=HTIME+TIME(NT-1)
30 CONTINUE
10 CONTINUE
RETURN
25 END

```

```

SUBROUTINE TAPER
C
C READ THE SAVED VALUE ON THE TAPE3
C
5 COMMON /GEO/ A1(5)
COMMON /RND/ A2(8)
COMMON /IIM/ A3(201)
COMMON /CNT/ A4(5)
COMMON /RLT/ A5(101)
10 COMMON /OMG/ A6(3000)
COMMON /RDS/ A7(62)
COMMON /DMY/ A8(3400)
COMMON /EWV/ A9(30)
C
15 READ(3) A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9
C
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE MRT CDC 6600 FTN V3.0-P328 OPT=1 03/20/74
SUBROUTINE MRT
C
C LOCAL CARBON LOSS RATE M(R,T)
C
5 COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /TIM/ TIME(100),DIMLT(100),NT
COMMON /CNT/ DC,SPK,DENS,FUEL,TGRA
COMMON /OMG/ OMEG(30,100)
COMMON /RDS/ RAD(30),THETA(30),A,B
10 COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
REAL MRTS
C
CONST = 4./3.*SPK/DENS
WRITE(6,100) NT
15 LINE = 6
C
DO 20 L=1,NT
LINE = LINE+NR+6
IF(LINE.LE.63) GO TO 2
20 WRITE(6,100) NT
LINE = 12+NR
2 CONTINUE
WRITE(6,120) L,TIME(L),DIMLT(L)
DO 10 I=1,NR
25 MRTS = CONST*OMEG(I,L)
IF(I.EQ.1) GO TO 5
IF(MRTS.LT.0.) MRTS=0.0
5 CONTINUE
MRTS = MRTS*TGRA
30 DIV = MRTS/W1
C
WRITE(6,130) RAD(I),MRTS,DIV
10 CONTINUE
35 20 CONTINUE
RETURN
100 FORMAT(1H1,5X,30H--- LOCAL CARBON LOSS RATE --- //
1 12X,30HNUMBER OF REACTION STEP TIMES ,6(1H.),I3,
2 31H (CONTAINED TIME=9.0 (SEC) )
40 120 FORMAT(1H0,10X,I3,8H. TIME = ,F10.3,6H (SEC) 10X,1PE11.3 //
1 21X,6HRADIUS,12X,22HLOCAL CARBON LOSS RATE,16X,
2 22HLOCAL CARBON LOSS RATE / 22X,4H(CH)
3 5X,38H(G[LOSS-CARBON]/G[INITIAL-CARBON]/SEC)
45 130 3X,39HPAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE / )
130 FORMAT(21X,F6.3,17X,1PE13.6,28X,E13.6)
END

```

```

SUBROUTINE MSPAV
C
C SPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE
C
5 COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
COMMON /TIM/ TIME(100),DIMLT(100),NT
COMMON /CNT/ DC,SPK,DENS,FUEL,TGRA
COMMON /RLT/ RES(100),SS
10 COMMON /RDS/ RAD(30),THETA(30),A,B
COMMON /DMY/ UD(100,30),SV1(100),SV2(100),U11(100),U12(100)
C
DIMENSION SV3(100)
REAL MSAT
15 EQUIVALENCE (SV3(1),U11(1))
C
CONST = 4./3.*SPK/((R1*R1-R2*R2)*DENS)
S = 0.25*(R1*R1*(2.0*THETA(NR)-A)-R2*R2*(2.0*THETA(1)-A))
SUMA = 0.0
20 DO 10 J=1,N
BN = (R1*U11(J)-R2*U12(J))/RES(J)
SV3(J) = SV2(J)*BN
C (SV2(J)=AN(J)/(DC*RES(J)**2+SPK))
SUMA = SUMA + SV3(J)
25 10 CONTINUE
SS = S + SUMA*SPK
C
WRITE(6,100)
WRITE(6,101)

```

```

30      DO 30 L=1,NT
        SUMB = 0.0
        DO 20 J=1,N
          TEM = -SV1(J)*TIME(L)
          IF (ABS(TEM).GT.700.) GO TO 20
35      SUMB = SUMB + SV3(J)*RES(J)**2*EXP(TEM)
        20 CONTINUE
          MSAT = CONST*(SS+SUMB*DC)
          IF (L.EQ.1) GO TO 25
          IF (MSAT.LT.0.) MSAT=0.0
40      25 CONTINUE
          QMSAT = MSAT*TGRA
          DIV = MSAT/W1
          WRITE(6,110) TIME(L),DIMLT(L),MSAT,DIV
        30 CONTINUE
45      100 FORMAT(1H1,5X,39H--- SPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE --- // )
        101 FORMAT( 7X,4HTIME,10X,12HDIMENSIONLESS,5X,31HSPACE-AVERAGED CARBON
          LOSS RATE,10X, 31HSPACE-AVERAGED CARBON LOSS RATE /
          2 6X,5H(SEC),14X,4HTIME,7X,38H(G[LCSS-CARBON]/G[INITIAL-CARB
          30N]/SEC),3X
50      4,39HPAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE / )
        110 FORMAT(2X,F9.3,10X,1PE12.4,13X,E13.6,28X,E13.6)
        99 RETURN
        END

```

SUBROUTINE WLOSCR

```

C
C TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS
C
5      COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
        COMMON /BND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
        COMMON /TIM/ TIME(100),DIMLT(100),NT
        COMMON /CNT/ DC,SPK,DENS,FUEL,TGRA
        COMMON /RLT/ RES(100),SS
10     COMMON /RDS/ RAD(30),THETA(30),A,B
        COMMON /DMY/ UB(100,30),SV1(100),SV2(100),U11(100),U12(100)
        COMMON /EWV/ EWVC(30)
C
C
15     CONST = 2./3.*SPK/DENS
        WRITE(6,100) NT
        LINE = 6
        DO 30 L=1,NT
          LINE = LINE+NR+6
20     IF (LINE.LE.63) GO TO 5
          WRITE(6,100) NT
          LINE = 12*NR
          5 CONTINUE
          WRITE(6,110) L,TIME(L),DIMLT(L)
25     WRITE(6,111)
        DO 20 I=1,NR
          SUM = 0.0
          DO 10 J=1,N
            TEM = -SV1(J)*TIME(L)
            TEM1 = 1.0
            IF (ABS(TEM).LE.700.0) TEM1=1.0-EXP(TEM)
            SUM = SUM + SV2(J)*RES(J)**2*UB(J,I)/SV1(J)*TEM1
30     10 CONTINUE
          WLCR = CONST*(EWVC(I)*TIME(L)+SUM*DC)
          IF (L.EQ.1) GO TO 15
          IF (WLCR.LT.0.0) WLCR=0.0
35     15 CONTINUE
          GWLCR = WLCR*TGRA
          DIV = WLCR/W1
40     C
          WRITE(6,120) RAD(I),WLCR,DIV
        20 CONTINUE
        30 CONTINUE
        RETURN
45     100 FORMAT(1H1,9X,41H--- TIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS --- //
          1 16X,30HNUMBER OF REACTION STEP TIMES ,6(1H.),I3,
          2 31H (CONTAINED TIME=0.0 (SEC) )
110    FORMAT(1H0,14X,I3,3H. TIME = ,F10.3,6H (SEC) 10X,1PE11.3 // )
111    FORMAT(20X,6HRADIUS,8X,33HTIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS,7X,
          1 33HTIME-INTEGRATED LOCAL CARBON LOSS /
          2 21X,4H(CM),8X,34H(G[LOSS-CARBON]/G[INITIAL-CARBON])
          4,3X,39HPAR UNIT WATER CONC. IN OUTER GAS PHASE / )
50     120 FORMAT(19X,F6.3,18X,1PE13.6,27X,E13.6)
        END

```

```

SUBROUTINE WLCSC                                CDC 6600 FTN.V3.0-P328 OPT=1 03/20/74
      SUBROUTINE WLOSC
      C
      C SPACE, TIME-INTEGRATED CARBON LOSS
      C
      5      COMMON /OPT/   IOPT1, IOPT2, IOPT3, IOPT4, IOPT5, IOPT6
            COMMON /GEO/   R1, R2, NR, N, ERR
            COMMON /SND/   A1, A2, B1, B2, C1, C2, W1, W2
            COMMON /TIM/   TIME(100), DIMLT(100), NT
            COMMON /CNT/   DC, SPK, DENS, FUEL, TGRA
      10     COMMON /RLT/   RES(100), SS
            COMMON /ROS/   RAD(30), THETA(30), A, B
            COMMON /DMY/   UD(100, 30), SV1(100), SV2(100), U11(100), U12(100)
      C
      DIMENSION SV3(100)
      15     EQUIVALENCE (SV3(1), U11(1))
            DATA PAI / 3.1415926/
      C
      CONST = 4./3.*PAI*SPK/DENS
      IF(IOPT3.EQ.1) GO TO 15
      20     S = 0.25*(R1*R1*(2.0*THETA(NR)-A)-R2*R2*(2.0*THETA(1)-A))
            SUMA = 0.0
            DO 10 J=1, N
            BN = (R1*U11(J)-R2*U12(J))/RES(J)
            SV3(J) = SV2(J)*BN
      25     C      (SV2(J)=AN(J)/(DC*RES(J)**2+SPK))
            SUMA = SUMA + SV3(J)
      10 CONTINUE
      SS = S + SUMA*SPK
      C
      30     15 CONTINUE
            WRITE(6, 200)
            WRITE(6, 201)
            DO 30 L=1, NT
            SUMB = 0.0
      35     DO 20 J=1, N
            TEM = -SV1(J)*TIME(L)
            TEM1 = 1.0
            IF(ABS(TEM).LE.700.) TEM1=1.0-EXP(TEM)
            SUMB = SUMB + SV3(J)*RES(J)**2/SV1(J)*TEM1
      40     20 CONTINUE
            WR = CONST*(SS*TIME(L)+SUMB*DC)
            IF(L.FQ.1) GO TO 25
            IF(WR.LT.0.0) WR=0.0
      45     25 CONTINUE
            QWR = WR*TGRA
            DIV = WR/W1
            WRITE(6, 210) TIME(L), DIMLT(L), WR, DIV
      30 CONTINUE
      RETURN
      50     200 FORMAT(1H1, 9X, 41H--- SPACE, TIME-INTEGRATED CARBON LOSS --- //)
            201 FORMAT(11X, 4HTIME, 8X, 12HDIMENSIONLESS, 3X, 33HSPACE, TIME-INTEGRATED C
            1ARBON LOSS
            1, 5X, 33HSPACE, TIME-INTEGRATED CARBON LOSS /
            210X, 5H(SEC), 12X, 4HTIME, 7X, 34H(GLOSS-CARBON)/G(INITIAL-CARBON))
      55     3, 2X, 39HPAR UNIT WATER CONG. IN OUTER GAS PHASE / )
            210 FORMAT(6X, F9.3, 8X, 1PE12.4, 14X, E13.6, 25X, E13.6)
            END

```

```

      SUBROUTINE FACE(ICASE)
      COMMON/TITLE/ITITLE(8)
      C
      IFLG=1
      5     4 READ(5, 900) ITITLE
            IF(EOF(5)) 99,7
            7 IF(IFLG.EQ.1) 6,1
            6 WRITE(6, 100)
            WRITE(6, 110)
      10     WRITE(6, 120) ICASE
            IFLG=2
            1 DO 2 I=1, 8
            IF(ITITLE(I).NE.10H ) GOTO 3
            2 CONTINUE
      15     GOTO 5
            3 CALL CARD
            GOTO 4
            5 IOAY=IPDY(1.0)
            WRITE(6, 130) IOAY

```



```

20      RETURN
100     FORMAT(1H1,11(/),45X,46MANALYSIS FOR REACTION OF GRAPHITE-WATER VA
1P0UR /44X,48(1H-))
110     FORMAT(/1H0,43X,5(1H*)/41X,11H*** ** ***/39X,7H*** ***,6X,3H*** /
*37X,2H**,4X,2H**,8X,3H***/35X,1H*,5X,2H**,9X,3H***/41X,2H**,10X,3H
25     ****/40X,3H***,9X,3H***/39X,3H***,9X,3H***/38X,5H***,7X,3H***/37X,
*3H***,2X,7H***,38X,1H*,22X,1H*/36X,3H***,10X,4H***,8X,6H***
***,6X,6H***,6X,2H**,6X,2H**,3X,2H**,7X,2H**/35X,3H***,9X,2H**,3X
*,1H*,6X,2H**,3X,2H**,5X,2H**,3X,2H**,5X,4H** *,5X,2H**,3X,2H**,6X,
*4H** */34X,3H***,9X,2H**,3X,1H*,6X,1H*,4X,2H**,3X,3H** *,4X,2H**,5X
30     *,1H*,3X,1H*,4X,2H**,3X,2H**,6X,1H*,3X,1H*/33X,2H**,11X,5H***,4X,
*4H* **,3X,2H**,2X,5H** **,3X,2H**,3X,3H***,4X,1H*,3X,2H**,3X,2H**
*4X,3H***,4X,1H*/32X,2H**,12X,3H***,4X,2H**,2X,2H**,2X,5H** **,3X,2
*H** ,2X,5H** **,2X,1H*,3X,6H** **,3X,2H**,3X,2H**,2X,1H*,3X,2H** /
*27X,5H***,15X,6H***,4X,7H***,6X,7H*** **,5X,6H*** **,2X,
35     *9H*** **,5X,4H*** /59X,2H**/56X,4H*** /55X,4H** */54X,4H** */55
*X,2H**)
120     FORMAT(3(/),65X,5HCASE,,12(/))
130     FORMAT(4(/),90X,5HDATE ,A10)
900     FORMAT(8A10)
40      99 STOP
      END

```

```

SUBROUTINE CPECR
C
COMMON /GEO/ R1,R2,NR,Z,ERR
COMMON /RDS/ RAD(30),THETA(30),A,B
5     COMMON /OMG/ OMEG(30,100)
COMMON /TIM/ TIME(100),OIMLT(100),NT
COMMON /CPF/ NCPF,TIMAX,THICK,MESHN(30),ROHPC
COMMON /CMN/ TEMP(100,30),CHM(100,30)
COMMON /OMY/ U0(100,30),SV1(100),SV2(100),U11(100),U12(100)
10     C
      DIMENSION DELZZ(30,100)
C
      EQUIVALENCE (DELZZ(1,1),U0(1,1))
C
15     DATA PG / 82.05 /
C
      DO 10 L=1,NT
      IF (TIME(L).LT.TIMAX) 10,5
5     CONTINUE
      NTIME = L
      GO TO 15
10     CONTINUE
      NTIME = NT
15     CONTINUE
      TEM = PG / (18.0*ROHPC)*1.E-3
      DELT = TIME(1)
C
      DO 30 NN=1,NCPF
      NN = MESHN(NN)
30     WRITE(6,100) RAD(NN),ROHPC
      F0 = 0.0
      TEMPT = TEMP(1,NN)+273.0
      CHMT = CHM(1,NN)/3600.0
      AA = TEMPT*TEM
35     F1 = AA*CHMT*OMEG(NN,1)
C
      DELZ = DELT*(F0+F1)/2.0
      DELZZ(NN,1) = DELZ
C
40     OT1 = DELT
      LM = 1
      WRITE(6,110) LM,TIME(1),TEMP(1,NN),CHM(1,NN),OMEG(NN,1),DELZ
      DO 20 L=2,NTIME
      TEMPT = TEMP(L,NN)+273.0
45     CHMT = CHM(L,NN)/3600.0
      AA = TEMPT*TEM
      F2 = AA*CHMT*OMEG(NN,L)
      OT2 = TIME(L)-TIME(LM)
C
50     TEM1 = OT1+OT2
      TEM2 = -F0*OT2*OT2 + F1*(2.0*OT1+TEM1)*TEM1
      + F2*OT1*(2.0*TEM1+OT2)
1     DELZ = DELZ+OT2*TEM2/(6.0*OT1*TEM1)
      WRITE(6,110) L,TIME(L),TEMP(L,NN),CHM(L,NN),OMEG(NN,L),DELZ
55     C

```

SUBROUTINE GPEGR

CDC 6600 FTN V3.0-P328 OPT=1 03/20/74

```

      LM      = L
      DT1    = DT2
      F0     = F1
60      F1     = F2
      DELZZ(NN,L) = DELZ
      C
      20 CONTINUE
      30 CONTINUE
65      C
      C      -- THE DEPTH OF THE EXTENTION OF WATER VAPOUR --- RD
      WRITE(6,120) THICK
      IF(NCPF.EQ.1) GO TO 99
      DO 90 L=1,NTIME
70      RIN   = 0.0
      ROUT  = 0.0
      NN    = MESHN(1)
      SA1   = DELZZ(NN,L)-THICK
      SAIN  = SA1
75      IF(SA1) 35,40,45
      35 CONTINUE
      ISTATE = -1
      GO TO 50
      40 CONTINUE
80      ISTATE = 0
      GO TO 50
      45 CONTINUE
      ISTATE = 1
      50 CONTINUE
85      ANM   = NN
      DO 80 NNN=2,NCPF
      NN    = MESHN(NNN)
      SA2   = DELZZ(NN,L)-THICK
90      IF(SA1*SA2) 52,58,75
      52 CONTINUE
      IF(ISTATE) 54,54,56
      54 CONTINUE
      RR    = SA2*(RAD(NN)-RAD(NNM))/(SA2-SA1)
      ROUT  = R1-RAD(NN)+RR
95      GO TO 85
      56 CONTINUE
      RR    = SA1*(RAD(NN)-RAD(NNM))/(SA1-SA2)
      RIN   = RAD(NNM)+RR-R2
      ISTATE = -1
100     GO TO 75
      C
      58 CONTINUE
      IF(SA2) 60,62,70
105     60 CONTINUE
      RIN   = RAD(NNM)-R2
      ISTATE = -1
      GO TO 75
      62 CONTINUE
      IF(SA1) 64,66,68
110     64 CONTINUE
      ROUT  = R1-RAD(NN)
      GO TO 85
      66 CONTINUE
115     RIN   = RAD(NNM)-R2
      ROUT  = R1-RAD(NN)
      GO TO 85
      68 CONTINUE
      RIN   = RAD(NN)-R2
120     ISTATE = 0
      GO TO 75
      70 CONTINUE
      ROUT  = R1-RAD(NNM)
      GO TO 85
125     75 CONTINUE
      SA1   = SA2
      ANM   = NN
      80 CONTINUE
      IF(SAIN.GE.0.0.AND.SA2.GE.0.0) 82,85
130     82 CONTINUE
      RIN   = R1-R2
      ROUT  = RIN
      C
      85 CONTINUE
135     WRITE(6,130) L,TIME(L),RIN,ROUT

```

```

90 CONTINUE
   RETURN
C
99 CONTINUE
140 WRITE(6,140)
   RETURN
C
100 FORMAT(1H1,9X,48H--- CORROSION OF COATED FUEL PARTICLES ( RADIUS
1      ,F7.3,5H CM ) //
145 2      16X,41HDENSITY OF PYC (G/CM**3) .....F7.2 //
3      8X,4HSTEP,5X,4HTIME,7X,7CHTEMPERATURE REACTION VELCC- CONCENTRA
4TION  LOSS OF PYC / 42X,15HITY COEFFICIENT /
5 19X,5H(SEC),11X,54H(DEG) (MG/CM**2.HR) (MOL/CM**3)
6 (CM) / )
150 110 FORMAT(1H ,110,F11.2,F17.2,1PE15.5,E17.5,E17.5)
120 FORMAT(1H1,9X,47H--- DEPTH OF THE EXTENTION OF WATER VAPOUR (CM)//
116X,72HPERMISSIBLE LINEAR CORROSION OF OUTER MOST COATING LAYER ( C
2X) .....E14.5 //
155 38X,4HSTEP,5X,4HTIME,4X,33HINNER EXTENTION OUTER EXTENTION /
419X,5H(SEC),13X,4H(CM),14X,4H(CM) / )
130 FOPMAT(1H ,110,F11.2,1PE17.5,E19.5)
140 FORMAT(1H0,5X,38H*** ERROR NO. OF MESHES IS EQUAL TO 1 )
   END

```

```

SUBROUTINE COPERN(H1,H2,BES1,BES2,ANS)
C
COMMON /GEO/ R1,R2,NR,N,ERR
COMMON /IND/ A1,A2,B1,B2,C1,C2,W1,W2
5 COMMON /RLT/ RES(100),SS
C
REAL J01,J02,J11,J12
C
10 IC = 0
H3 = 0.
1 CONTINUE
IC = IC+1
HANTEI = H3
15 H3 = (BES2*H1-BES1*H2)/(BES2-BES1)
IF(ABS(HANTEI-H3)/H3.LE.ERR) GO TO 3
IF(IC.GE.200) GO TO 3
X1 = R1*H3
X2 = R2*H3
20 CALL BESJ0(J01,Y01,X1,2)
CALL BESJ0(J02,Y02,X2,2)
CALL BESJ1(J11,Y11,X1,2)
CALL BESJ1(J12,Y12,X2,2)
A1H = A1*H3
A2H = A2*H3
25 BES3 = (A1H*J11-B1*J01)*(A2H*Y12-B2*Y02)
1 - (A1H*Y11-B1*Y01)*(A2H*J12-B2*J02)
IF(BES3*BES1.GE.0.) GO TO 2
BES2 = BES3
H2 = H3
30 GO TO 1
2 CONTINUE
BES1 = BES3
H1 = H3
GO TO 1
35 3 CONTINUE
ANS = H3
C
RETURN
END

```