JAERI-M
8468

有限要素法による燃料ペレットの照射挙動解析プログラム

1979年9月

山田　禮司・原山　泰雄・石橋　明弘*・小野　正夫*

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.

有限要素法による燃料ペレットの照射挙動解析プログラム

日本原子力研究所東海研究所安全工学部
山田 礼司+・原山 泰雄・石橋 明弘*・小野 正夫*

（1979年9月6日受理）

燃料の安全性を評価するためには，燃料棒の照射による局所的な変化を理解しておく必要がある。燃料の局所的な変化の原因の大部分は，燃料ペレットの照射による変化に起因している。これらの変化を理解する手段として有限要素法に基づいた弾塑性解析プログラムを作成した。

プログラムはペレットのクラックの解析に重点をおいて作成された。プログラムの現段階ではペレットと被覆管の機械的相互作用は考慮していない。

プログラムは，r－z体系の二次元軸対称モデルに基づく解析プログラムFEMF3とr－θ体系の平面モデルによる解析プログラムFREB4の二種を作成した。

これらのプログラムを用い，燃料ペレットのクラックがその出力の変化によってどのように変化するかについて考察を加えた。

+） 現在，核融合研究部
*） センチュリ リサーチ センター

JAERI-M 8468

Finite Element Method Programs to Analyze Irradiation Behavior of Fuel Pellets.

Rayji YAMADA[+], Yasuo HARAYAMA,
Akihiro ISHIBASHI[*] and Masao ONO[*].

Division of Reactor Safety, Tokai Research Establishment, JAERI.
(Received September 6, I979)

For the safety assessment of reactor fuel, it is important to grasp local changes of fuel pins due to irradiation in a reactor. Such changes of fuel result mostly from irradiation of fuel pellets. Elasto-plastic analysis programs based on the finite element method were developed to analyze these local changes. In the programs, emphasis is placed on the analysis of cracks in pellets; the interaction between cracked-pellets and cladding is not taken into consideration.

The two programs developed are FEMF3 based on a two-dimensional axially symmetric model (r-z system) and FREB4 on a two-dimensional plane model (r-θ system). It is discussed in this report how the occurrence and distribution of cracks depend on heat rate of the fuel pin.

Keywords: Fuel Pellet, Crack, Finite Element Method, Program, Local Changes, 2-Dimensional Model, Plane Stress and Strain, Elasto-Plastic Analysis, Irradiation Effects.

[+]Present address: Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI.

[*]CRC Co. Ltd., Tokyo, Japan.

目　　　　次

Contents

1. 概　　要

燃料の安全性を評価するためには，燃料棒の照射による局所的な変化を理解しておくことが必要である。この局所的な変化の原因の大部分は燃料ペレットの照射による変化に起因している。このような燃料ペレットの燃料出力による照射挙動をシュミレートするプログラムの開発が望まれた。出力に応じた燃料ペレットの局所的な挙動をシュミレートするには，弾塑性解析を基にした有限要素法は非常に有効な手段である。

そこで，有限要素法による二種類のプログラムを作成した。一つは，二次元軸対称モデルによるプログラムＦＥＭＦ３であり，他の一つは二次元平面モデル（平面応力場）としたプログラムＦＲＥＢ４である。これらのプログラムは弾性，塑性，熱膨張およびクリープによる燃料の応力および歪を計算する。そのさい，計算に必要な燃料ペレットの発熱による燃料内の温度についても，有限要素法を用いた熱伝導解析によって求める。

これらのプログラムの特長は，燃料ペレットのクラックとクラックのヒーリングを扱うことが可能なことである。しかし，燃料ペレット－被覆管の間の接触問題は，プログラムの現段階では扱えない。また，計算対象を有限要素に分割する自動メッシュ分割機能がプログラムに組込まれ，入力データの簡素化が計られている。さらに，プログラムの使用適用範囲を軽水炉の燃料棒に限定し，計算上必要な燃料ペレットおよび被覆管の物性値はすべてプログラムに内蔵している。なお，これら物性値は両プログラムを通じ同一である。

使用する要素は三角形要素を基本にしている。ＦＥＭＦ３は三角形リング要素である。ＦＲＥＢ４は三角形要素のほかに四角形要素をも使用可能である。

有限要素法による計算結果は，そのままでは読みにくい。計算結果を見やすくするためには，図化することが望ましい。そこで，作成した二つのプログラムについての計算結果を処理しプロッターで出力する専用のプログラムＰＬＯＴＦが作成された。

この報告書は，作成したプログラムの基礎になっている解析方法，プログラム内容の概要とサンプル問題とその出力を記述した。サンプル問題とその計算結果については，ＰＬＯＴＦによって結果を出力し，ペレット内の応力の変化について考察を加えた。特に，ペレットのクラックが，出力および照射履歴によってどのような変化をするかを追ってみた。その結果，しばしば，燃料棒の照射後試験に見られるパイナップル状クラック分布が出来る過程についての情報がえられた。

2. 解　析　法

2.1 熱伝導解析

熱伝導解析には，定常熱伝導方程式を使用した。[1] 基礎方程式は，

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(k\, r_B \frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\, r_B \frac{\partial T}{\partial z}\right)-r_B Q=0 \qquad (2.1.1)$$

であり，境界条件として膜熱伝導率を用いた次の条件

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial n}\right)_S=-h\,(T_S-T_O)+q \qquad (2.1.2)$$

を用いる。但し，（2.1.1）式に於いて軸対称モデル（FEMF 3）の時 $r_B=r$，平面モデル（FREB 4）の時 $r=x$，$z=y$，$r_B=1$ である。ここで，T；温度（℃），k；熱伝導率（W／cm ℃），Q；出力密度（W／cm^3），h；熱伝達率（W／cm^2 ℃），T_S；表面温度（℃），T_O；外部温度（℃），q；境界での単位面積当りの熱流入量（W／cm^2），n；境界での単位法線ベクトルである。

（2.1.1）および（2.1.2）を満たす汎関数Xは

$$X=\int_V \frac{1}{2}\left[\left\{k\, r_B\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)^2+k\, r_B\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right\}-r_B Q T\right] dV$$

$$+\int_S r_B\, q\, T\, ds+\int_S \frac{1}{2} h\, r_B\,(T_S-T_O)^2\, ds \qquad (2.1.3)$$

である。いま，節点数nより構成される要素があり各節点の温度を T_i（$i=1\sim n$），形状関数を N_i（$i=1\sim n$）とすれば要素内の任意の点の温度は，

$$T(r,\ z)=\sum_{i=1}^{n} N_i T_i \qquad (2.1.4)$$

で表わされる。（以下，FREB 4の時 $r=x$，$z=y$とおく。）形状関数 N_i は，[2] 三角形要素のとき要素の節点番号を i，j，kとし，その座標を（r_i，z_i），（r_j，z_j），（r_k，z_k）とすると，

$$N_i=a_i+b_i r+c_i z,\quad a_i=r_j z_k-r_k z_j,\quad b_i=z_j-z_k,\quad c_i=r_k-r_j \qquad (2.1.5)$$

で与えられる。（N_j，N_kは，添字 i，j，kを循環的に置換して得られる。）四角形要素の時，形状関数 N_i はあらわに全体座標（r，z）で表わせないので局所座標系で表わす。すなわち，要素の図心を原点とし，四辺形の辺上で ξ，ηが±1となるような局所座標（ξ，η）とする。四角形要素の節点番号を i，j，k，ℓ とし，その局所座標を（−1，−1），（1，−1），（1，1），（−1，1）とすると，形状関数 N_i は

$$\left.\begin{aligned} N_i&=0.25\times(1-\xi)(1-\eta),\quad N_j=0.25\times(1+\xi)(1-\eta)\\ N_k&=0.25\times(1+\xi)(1+\eta),\quad N_\ell=0.25\times(1-\xi)(1+\eta)\end{aligned}\right\} \qquad (2.1.6)$$

となる。

汎関数Xを表す(2.1.3)式を最小化することにより得られる方程式は,

$$\frac{\partial X^e}{\partial \{T\}^e} = [H]^e \{T\}^e - \{F\}^e = 0 \qquad (2.1.7)$$

である。(添字eは要素を意味する。)また,(2.1.7)式におけるマトリックス及びベクトルの成分は,

$$H_{ij} = \iint \left\{ k \frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + k \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} r_B \, dr \, dz + \int h N_i \{N\} r_B \, ds \qquad (2.1.8)$$

$$F_i = \iint Q N_i r_B \, dr \, dz + \int h N_i T_0 r_B \, ds \qquad (2.1.9)$$

である。(2.1.7)式をすべての要素について求め,その総和を求めれば,次の連立一次方程式を得る。

$$[H]\{T\} = \{F\} \qquad (2.1.10)$$

(2.1.10)式を解けば求める温度{T}を得る。

ギャップ熱伝達の影響は,(2.1.10)式の〔H〕を次のように修正する。Fig. 2.1に示すように,g_1,g_2,g_3,g_4をギャップを構成する節点,g_1とg_2の距離をℓ_{12},g_3とg_4の距離をℓ_{34}としたとき,$L = 0.5 \times (\ell_{12} + \ell_{34})$とし,ギャップマトリックスを次のように定義する。[3]

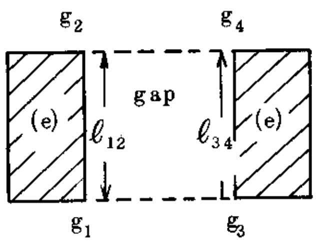


Fig. 2.1 Gap Element

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{6} \\ & \frac{1}{3} & -\frac{1}{6} & -\frac{1}{3} \\ \text{Sym.} & & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} \\ & & & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \times h_g \times \bar{r} \times L \qquad (2.1.11)$$

(2.1.11)式を(2.1.10)式の〔H〕に加え込むことにより,ギャップ熱伝達を扱う。但し,h_gはギャップ熱伝達率であり,平面問題の時$\bar{r} = 1$,軸対称問題の時$\bar{r}$はg_1, g_2, g_3, g_4の図心のr座標である。なお,熱伝導解析に於て,FEMF3,FREB4両コードとも物性

値が温度依存であるため収束計算を行ない，より正解な解を求めている。

2.2 弾塑性解析

ＦＥＭＦ３，ＦＲＥＢ４ともに増分型手法で解析する[4]。全歪増分 $\{\Delta\varepsilon\}$ は，

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon^e\} + \{\Delta\varepsilon^\theta\} + \{\Delta\varepsilon^c\} + \{\Delta\varepsilon^p\} \qquad (2.2.1)$$

で与えられるとする。但し，$\{\Delta\varepsilon^e\}$；弾性歪増分，$\{\Delta\varepsilon^\theta\}$；熱歪増分，$\{\Delta\varepsilon^c\}$；クリープ歪増分，$\{\Delta\varepsilon^p\}$；塑性歪増分である。（2.2.1）式に弾性応力マトリックス $[D^e]$ を乗ずれば，

$$\begin{aligned}[D^e]\{\Delta\varepsilon\} &= [D^e]\{\Delta\varepsilon^e\} + [D^e](\{\Delta\varepsilon^\theta\} + \{\Delta\varepsilon^c\} + \{\Delta\varepsilon^p\}) \\ &= \{\Delta\sigma\} + [D^e](\{\Delta\varepsilon^\theta\} + \{\Delta\varepsilon^c\} + \{\Delta\varepsilon^p\})\end{aligned}$$

したがって，

$$\{\Delta\sigma\} = [D^e]\{\Delta\varepsilon\} - [D^e](\{\Delta\varepsilon^\theta\} + \{\Delta\varepsilon^c\} + \{\Delta\varepsilon^p\}) \qquad (2.2.2)$$

ここで，降伏条件を f とした時塑性歪増分は H' を比例定数とすると，Reuss の式より

$$\{\Delta\varepsilon^p\} = \frac{1}{H'}\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\Delta f \qquad (2.2.3)$$

である。ここで，Δf は

$$\Delta f = \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T\{\Delta\sigma\} \qquad (2.2.4)$$

で与えられる。（Ｔは転置行列を表わし，比例定数 H' は歪硬化率を表わす。）（2.2.2）と（2.2.4）式より，

$$\begin{aligned}\Delta f = &\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T([D^e]\{\Delta\varepsilon\} - [D^e]\{\Delta\varepsilon^\theta\} - [D^e]\{\Delta\varepsilon^c\}) \\ &- \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]\frac{1}{H'}\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\Delta f\end{aligned}$$

がえられ，これを $\Delta f/H'$ について解けば

$$\frac{\Delta f}{H'} = \frac{\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T([D^e]\{\Delta\varepsilon\} - [D^e]\{\Delta\varepsilon^\theta\} - [D^e]\{\Delta\varepsilon^c\})}{H' + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}} \qquad (2.2.5)$$

となる。

（2.2.3），（2.2.5）式より，（2.2.2）式は次のように表わせる。

$$\{\Delta\sigma\} = \left([D^e] - \frac{[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]}{H' + \left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}^T[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial\sigma}\right\}}\right)(\{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon^\theta\} - \{\Delta\varepsilon^c\}) \qquad (2.2.6)$$

(2.2.6)式で

$$[D^p] = [D^e] - \frac{[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T[D^e]}{H' + \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}^T[D^e]\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}} \quad (2.2.7)$$

とおけば

$$\{\Delta\sigma\} = [D^p](\{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon^\theta\} - \{\Delta\varepsilon^c\}) \quad (2.2.8)$$

となる。Mises の降伏条件 f は

$$f = \left[\frac{1}{2}\left\{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 6\tau_{rz}^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}} = \sigma_e \quad (2.2.9)$$

で与えられる。平面応力場の問題では，(2.2.9)式に於て $\sigma_z = 0$，$\sigma_r = \sigma_x$，$\sigma_\theta = \sigma_y$，$\tau_{rz} = \tau_{xy}$ とすることにより次式をうる

$$f = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}} = \sigma_e \quad (2.2.10)$$

弾性応力マトリックス $[D^e]$ に等方性を仮定すれば，軸対称問題のとき，

$$[D^e] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \mathrm{Sym.} & & 1 & 0 \\ & & & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \quad (2.2.11)$$

である。平面応力問題のとき

$$[D^e] = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (2.2.12)$$

である。

但し，E はヤング率，ν はポアソン比である。$[D^p]$ マトリックスは(2.2.7)，(2.2.9)，(2.2.10)，(2.2.11)，(2.2.12) 式より求めることができる。すなわち軸対称問題の時

$$[D^p] = [D^e] - \begin{bmatrix} S_1^2/S & S_1S_2/S & S_1S_3/S & S_1S_6/S \\ & S_2^2/S & S_2S_3/S & S_2S_6/S \\ & & S_3^2/S & S_3S_6/S \\ \mathrm{Sym.} & & & S_6^2/S \end{bmatrix} \quad (2.2.13)$$

で与えられる。但し，

$$S = \frac{4}{9}\sigma_e^2 H' + S_1\sigma_z' + S_2\sigma_r' + S_3\sigma_\theta' + 2S_6\tau_{rz}'$$

$$S_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\sigma_z' + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\sigma_r' + \sigma_\theta')$$

$$S_2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\sigma_r' + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\sigma_\theta' + \sigma_z')$$

$$S_3 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\sigma_\theta' + \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\sigma_z' + \sigma_r')$$

$$S_6 = \frac{E}{1+\nu}\tau_{rz}'$$

$$\sigma_z' = (2\sigma_z - \sigma_r - \sigma_\theta)/3, \quad \sigma_r' = (2\sigma_r - \sigma_\theta - \sigma_z)/3$$

$$\sigma_\theta' = (2\sigma_\theta - \sigma_r - \sigma_z)/3, \quad \tau_{rz}' = \tau_{rz}$$

である。一方，平面応力場の〔D^p〕マトリックスは

$$[D^p] = [D^e] - \begin{bmatrix} S_1^2/S & S_1S_2/S & S_1S_6/S \\ & S_2^2/S & S_2S_6/S \\ \mathrm{Sym.} & & S_6^2 \end{bmatrix} \qquad (2.2.14)$$

である。

但し，
$$S = \frac{4}{9}\sigma_e^2 H' + S_1\sigma_x' + S_2\sigma_y' + 2S_6\tau_{xy}'$$

$$S_1 = \frac{E}{1-\nu^2}\sigma_x' + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\sigma_y', \quad S_2 = \frac{E}{1-\nu^2}\sigma_x' + \frac{\nu E}{1-\nu^2}\sigma_y'$$

$$S_6 = \frac{E}{1+\nu}\tau_{xy}', \quad \sigma_x' = (2\sigma_x - \sigma_y)/3, \quad \sigma_y' = (2\sigma_y - \sigma_x)/3,$$

$$\tau_{xy}' = \tau_{xy}$$

とする。弾性要素には（2.2.11），（2.2.12）式を，塑性要素には（2.2.13），（2.2.14）式をそれぞれ〔D〕として，FEMF3，FREB4に対して用いる。

解くべき剛性方程式は，

$$[K]\{\Delta U\} = \{\Delta F\} \qquad (2.2.15)$$

である。ここで〔K〕は全体剛性マトリックスで，$[K] = \sum_e [K^e]$ である。〔K^e〕は

$$[K^e] = \int_V [B]^T [D][B]\,dV \qquad (2.2.16)$$

である。$\{\Delta U\}$ は解かれるべき未知変位増分であり，$\{\Delta F\}$ は荷重増分で外圧，熱歪，クリープ歪増分によるものにわけられる。すなわち，

$$\{\Delta F\} = \sum_e (\{\Delta F_p^e\} + \{\Delta F_{thermal}^e\} + \{\Delta F_{creep}^e\}) \qquad (2.2.17)$$

$$\{\Delta F_p^e\} = \int [N]^T \{\Delta P\}\,ds \;(\text{但し，P は外圧}) \qquad (2.2.18)$$

$$\{\Delta F_{thermal}^e\} = \int_V [B]^T [D]\{\Delta\varepsilon_{thermal}^e\}\,dV \qquad (2.2.19)$$

$$\{\Delta F_{creep}^e\} = \int_V [B]^T [D]\{\Delta\varepsilon_{creep}\}\,dV \qquad (2.2.20)$$

である。$\{\Delta\varepsilon_{thermal}^e\}$ は熱歪増分で，次のように与えられる。

$$\{\Delta\varepsilon_{thermal}^e\} = \{\alpha\Delta T \;\; \alpha\Delta T \;\; \alpha\Delta T \;\; 0\}^T \quad (\text{軸対称の時})$$

$$= \{\alpha\Delta T \;\; \alpha\Delta T \;\; 0\}^T \quad (\text{平面応力場})$$

αは熱膨張率，ΔTは温度増分である。

$\{\Delta\varepsilon_{creep}\}$はクリープ歪増分で，次のように与えられる。

$$\{\Delta\varepsilon_{creep}\} = \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}_c \Delta t}{2\sigma_e}\{\sigma_z' \ \sigma_r' \ \sigma_\theta' \ \tau_{rz}'\}^T \quad \text{（軸対称の時）}$$

$$= \frac{3\dot{\bar{\varepsilon}}_c \Delta t}{2\sigma_e}\{\sigma_x' \ \sigma_y' \ \tau_{xy}'\}^T \quad \text{（平面応力の時）}$$

$\dot{\bar{\varepsilon}}_c$ はクリープ歪速度である。また，Δt は時間増分とする。

（2.2.16），（2.2.19），（2.2.20）式中の〔B〕は形状マトリックスで，（2.1.5）及び（2.1.6）で示された形状関数より求まる。すなわち軸対称三角形要素のときは，

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & \partial N_i/\partial z & 0 & \partial N_j/\partial z & 0 & \partial N_k/\partial z \\ \partial N_i/\partial r & 0 & \partial N_j/\partial r & 0 & \partial N_k/\partial r & 0 \\ N_i/\bar{r} & 0 & N_j/\bar{r} & 0 & N_k/\bar{r} & 0 \\ \partial N_i/\partial z & \partial N_i/\partial r & \partial N_j/\partial z & \partial N_j/\partial r & \partial N_k/\partial z & \partial N_k/\partial r \end{bmatrix} \tag{2.2.21}$$

で与えられる。この式中のN_i，N_j，N_k は（2.1.5）式による。$\bar{r}$は要素図心の r 座標。平面三角形要素のときは，

$$[B] = \begin{bmatrix} \partial N_i/\partial x & 0 & \partial N_j/\partial x & 0 & \partial N_k/\partial x & 0 \\ 0 & \partial N_i/\partial y & 0 & \partial N_j/\partial y & 0 & \partial N_k/\partial y \\ \partial N_i/\partial y & \partial N_i/\partial x & \partial N_j/\partial y & \partial N_j/\partial x & \partial N_k/\partial y & \partial N_k/\partial x \end{bmatrix} \tag{2.2.22}$$

で与えられる。平面四角形要素のときは，

$$[B] = \begin{bmatrix} \partial N_i/\ x & 0 & \partial N_j/\partial x & 0 & \partial N_k/\partial x & 0 & \partial N_\ell/\partial x & 0 \\ 0 & \partial N_i/\partial y & 0 & \partial N_j/\partial y & 0 & \partial N_k/\partial y & 0 & \partial N_\ell/\partial y \\ \partial N_i/\partial y & \partial N_i/\partial x & \partial N_j/\partial y & \partial N_j/\partial x & \partial N_k/\partial y & \partial N_k/\partial x & \partial N_\ell/\partial y & \partial N_\ell/\partial x \end{bmatrix} \tag{2.2.23}$$

で与えられる。

このときのNは（2.1.6）式に従う。

全歪増分$\{\Delta\varepsilon\}$は（2.2.15）式より求まる要素変位ベクトル$\{\Delta U\}$を使って，

$$\{\Delta\varepsilon\} = [B]\{\Delta U\} \tag{2.2.24}$$

で求まり，応力増分$\{\Delta\sigma\}$は，（2.2.24）式を用いて（2.2.8）式より求まる。解かれた増分量（変位，応力，歪）よりステージ i における全体量は

$$\left.\begin{array}{l} \{U\}_i = \{U\}_{i+1} + \{\Delta U\}_i, \quad \{\sigma\}_i = \{\sigma\}_{i-1} + \{\Delta\sigma\}_i \\ \{\varepsilon\}_i = \{\varepsilon\}_{i-1} + \{\Delta\varepsilon\}_i \end{array}\right\} \tag{2.2.25}$$

で与えられる。なお，FREB4で出力する径方向及び円周方向の応力，歪は，x－y座標系で求めた後，次の式により r－θ座標系に変換している。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{2.2.26}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{r\theta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \qquad (2.2.27)$$

但し，θはx軸とr方向とのなす角度である。

2.3 クラックモデルおよびクラックヒーリング

2.3.1 クラックが要素に入るか否かの判定

A. 要素の等価応力σ^{eq}が破壊応力σ^{ULT}(T)より大きい場合，その要素にクラックが入るとする。但し，計算技術上0.95σ^{ULT}(T)を判定に用いている。ここでT＝温度である。

B. Aの条件を満足していても，各応力成分(σ_r, σ_θ, σ_z)がすべて圧縮(負値)であった場合は，0.95σ^{ULT}(T)f_{comp}を判定に用いる。f_{comp}は定数で，ここでは4.0を採用している。

2.3.2 クラックが入る方向の判定

クラックの入る方向は，要素の偏差応力(σ_r', σ_θ', σ_z')の最大値をもつ方向に直交する面に入るものとする。

2.3.3 クラックの本数の定義

2.3.1の条件を満足する毎に，その要素のクラックが1本ずつ増えることとする。クラックの本数は2.3.2で決定されたクラック方向毎に加算され，クラックヒーリングが生じると，その方向のクラック本数は0となる。

2.3.4 クラックが入ることによる剛性の劣化

クラックが入ることによりヤング率のみ劣化させる。各要素の各方向にM_i ($i=r,\theta,z$)の三つの係数を用意し，本来のヤング率E(T)のかわりに，$E_i^*=E(T)/M_i$ ($M_i \geq 1$, $i=r,\theta,z$)を用いる。但しクラック面に直交する方向iのM_iは，$M_i=M_o+(\ell_j-1)\times 2$を用い，その他の方向についてはM＝$M_i\times g$を用いる。ここで，jはクラック方向を，$\ell_j$はj方向のクラックの数を表わす。現在プログラム中では，$M_o=7.0$，$g=\frac{1}{4}$を用いている。$g=0.0$の場合M＝1.0である。

2.3.5 FEMF3におけるクラックした要素の応力－歪マトリックス

歪と応力を結びつける関係式は，2.3.4で述べたことを考慮すると以下のように書ける。すなわち，

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1/E_2 & -\nu_2/E_2 & -\nu_2/E_2 & 0 \\ -\nu_2/E_2 & C_2/E_1 & -\nu_1/E_1 & 0 \\ -\nu_2/E_2 & -\nu_1/E_1 & C_3/E_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} \qquad (2.3.1)$$

となる。但し，$C_1=M_z$，$C_2=M_r$，$C_3=M_\theta$，$E_2=E_z$，$E_1=E_r=E_\theta$，$\nu_2=\nu_z$，$\nu_1=\nu_r=\nu_\theta$である。また$G=\frac{E_2}{2C_1}/(1+\frac{\nu_2}{C_1})$である。これを応力ー歪マトリックスに書き換えると，

$$\begin{Bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_r \\ \sigma_\theta \\ \tau_{rz} \end{Bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} \frac{C_2C_3-\nu_1^2}{E_1^2} & \frac{C_3\nu_2+\nu_1\nu_2}{E_1E_2} & \frac{\nu_1\nu_2+C_2\nu_2}{E_1E_2} & 0 \\ \frac{C_3\nu_2+\nu_1\nu_2}{E_1E_2} & \frac{C_1C_3}{E_1E_2}-\frac{\nu_2^2}{E_2^2} & \frac{C_1\nu_1}{E_1E_2}+\frac{\nu_2^2}{E_2^2} & 0 \\ \frac{\nu_1\nu_2+C_2\nu_2}{E_1E_2} & \frac{C_1\nu_1}{E_1E_2}+\frac{\nu_2^2}{E_2^2} & \frac{C_1C_2}{E_1E_2}-\frac{\nu_2^2}{E_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & AG \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{rz} \end{Bmatrix} \tag{2.3.2}$$

となる。ここで，

$$A=\frac{C_1C_2C_3}{E_1^2E_2}-\frac{C_1\nu_1^2}{E_1^2E_2}-\frac{C_2\nu_2^2}{E_1E_2^2}-\frac{C_3\nu_2^2}{E_1E_2^2}-\frac{2\nu_1\nu_2^2}{E_1E_2^2} \tag{2.3.3}$$

である。

2.3.6 FREB 4におけるクラックした要素の応力ー歪マトリックス

平面応力場における応力ー歪マトリックスは（2.2.12）式で表わされるが，クラックを近似するためには，径方向と円周方向に異なる物性をもつ異方性の応力ー歪マトリックスを用いる。すなわち，

$$[D]=\frac{E_2}{(1-n\nu_2^2)}\begin{bmatrix} n & n\nu_2 & 0 \\ n\nu_2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & m(1-n\nu_2^2) \end{bmatrix} \tag{2.3.4}$$

を用いる。ここで，$n=E_1/E_2$，$m=G_2/E_2$，$G_2=E_2/\{2(1+\nu_2)\}$であり，径方向添字をr，円周方向添字をθとすれば，$E_1=E_r$，$E_2=E_\theta$，$\nu_1=\nu_r$，$\nu_2=\nu_\theta$である。2.3.4で定義したM_r，M_θを用いて，（i）径方向クラックの時，$E_\theta \to E_\theta/M_\theta$，$\nu_\theta \to \nu_\theta/M_\theta$に変換し，（ii）円周方向クラックの時，$E_r \to E_r/M_r$，$\nu_r \to \nu_r/M_r$に変換して，〔D〕を修正することによりクラックを近似する。この方法で修正された〔D〕マトリックスは（$\gamma-\theta$）系で定義されたものであるから，全体系の$[D]_g$に変換する必要がある。すなわち，

$$[D]_g=[L][D][L]^T \tag{2.3.5}$$

となる。但し

$$[L]=\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta-\sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{2.3.6}$$

である。

2.3.7 クラックが入ることによる応力緩和

クラックが入る直前の要素の応力σ_i（$i=r,\theta,Z$）は，クラックが入ることにより応力が

緩和され，

$$\sigma_i^* = \sigma_i\,(1-e) \tag{2.3.7}$$

になるものとする。但し，

$e = f$　（クラック面に直交する方向）

$\;\;= g$　（その他の方向）

とする。f，gは定数で，プログラムでは$f=\frac{1}{2}$，$g=\frac{1}{4}$にしている。

クラックの入った要素の周囲の要素には，次式で計算された節点力$\{F_c\}$をFEMF3では次のタイムステップに，FREB4ではクラック収束計算中に作用させる。ここで，節点力は

$$\{F_c\} = \int [B]^T \{\sigma^*\}\,dV \times e \tag{2.3.8}$$

である。但し，$\{\sigma^*\}$はクラックした要素のクラック直前の応力，eは前述の値である。

2.3.8　クラックヒーリング

次のA，Bの条件が両方満足されたときクラックヒーリングが生じるものとする。

A.　要素平均温度がヒーリング温度（T_{HEAL}）より大きい。

B.　偏差応力が圧縮（負値）である。

Bの判定は各方向について行なわれ，全てクラックがヒーリングするのではなく，各方向においてクラックが閉じることになる。なおT_{HEAL}は，プログラム中で1,400℃としてある。また，FEMF3においては，A，Bの条件が両方満足されたとき，もしそれ以前にクラックが生じていれば，1本のクラックがヒーリングして閉じるとし，クラックの本数の減少とそれに伴う剛性率の回復がなされる。

2.4　クリープおよび歪硬化率H′の取扱い

クリープ歪速度$\dot{\bar{\varepsilon}}_c$は，温度，相当応力，中性子束等の関数で与えられる。等価歪増分は$\Delta\varepsilon_{eq}^{creep} = \dot{\bar{\varepsilon}}_c \cdot \Delta t$であり，FEMF3，FREB4ともに$\Delta\varepsilon_{eq}^{creep}$が0.001を越える場合は，それ以下に強制的にセットする。各方向のクリープ歪増分は

$$\left.\begin{aligned}\{\Delta\varepsilon_{creep}\} &= \frac{3\,\dot{\bar{\varepsilon}}_c\,\Delta t}{2\,\sigma_e}\{\sigma_z' \quad \sigma_r' \quad \sigma_\theta' \quad \tau_{rz}'\}^T \quad \text{（軸対称の時）}\\ &= \frac{3\,\dot{\bar{\varepsilon}}_c\,\Delta t}{2\,\sigma_e}\{\sigma_x' \quad \sigma_y' \quad \tau_{xy}'\}^T \quad \text{（平面応力の時）}\end{aligned}\right\} \tag{2.4.1}$$

で与えられる。

等価応力$\bar{\sigma}$が等価塑性歪$\bar{\varepsilon}_p$を用いて$\bar{\sigma} = c\,(\alpha + \bar{\varepsilon}_p)^n$と表わせるものとする。温度Tの時の降伏応力を$\sigma_Y$（T），ヤング率をE（T）とすると，$\alpha = \sigma_Y(T)/E(T)$の仮定の下で，$\sigma_Y = c\,\alpha^n$より$c = \sigma_Y/\alpha^n$となる。歪硬化率H′は

$$H' = \frac{\partial\bar{\sigma}}{\partial\varepsilon_p} = n\,c\,(\alpha + \bar{\varepsilon}_p)^{n-1} = n\,\sigma_Y^{(1-n)}\,E^{-n}(\sigma_Y/E + \bar{\varepsilon}_p)^{n-1} \tag{2.4.2}$$

である。σ_Y，E，nはペレット，被覆管それぞれに物性値として与える。但しFREB4ではペレットのH′は零とした。

3. プログラム概説

3.1 タイムステップ決定法およびブロックダイヤグラム

照射履歴を追う方法はFEMF3とFREB4では異る。FEMF3およびFREB4のブロックダイアグラムをFig. 3.1とFig. 3.2に示す。FEMF3では自動タイムステップコントロールによる方法である。すなわち，第1回目は入力されたタイムステップで計算をするが，2回目以降のタイムステップは，n回目の計算で塑性もしくはクラックをしなかった弾性要素が，次のステップで塑性もしくはクラックするのに必要な燃料出力増分を推測し，それを時間増分に変換してn+1回の計算の際のタイムステップとする。一方，FREB4では，タイムステップは入力タイムステップによってのみ決定される。場合によっては入力タイムステップが大きすぎる場合もあるので収束計算が行なわれる。すなわち，入力ステップで応力を計算し破壊条件を満たす要素があれば，その要素にクラックを入れ応力を緩和させる。次に，剛性マトリックスを修正し再計算を行う。さらにこの状態でも破壊条件を満たす要素が出てくれば，その要素にクラックを入れて計算が続行される。以上の手順ですべての要素の応力が破壊条件の値以下になるまでくり返し計算を行う。このくり返し計算終了後次のステップに移る。

3.2 サブプログラム概説およびプログラムの使用条件

FEMF3はTable 3.1に示す様に主プログラムを含んで総数47個のサブプログラムで構成される。Table 3.1には，各サブプログラムの機能の概要がまとめられている。FREB4は，主プログラムを含んで総数42個のサブプログラムで構成される。これらサブプログラムの機能の概要をTable 3.2に示す。FEMF3およびFREB4の両プログラムの使用上の制限条件等をTable 3.3に示す。

FEMF3とFREB4には，その計算結果をプロッターで図化するための専用の独立したプログラムPLOTFがある。FEMF3，FREB4およびPLOTFのプログラムの詳細について特に必要ならばそのプログラムリストをAppendix-Cに収録しているので参照されたい。

第1章にも述べたように計算上使用する燃料ペレットと被覆管の物性値は，FEMF3とFREB4を通じて同一であり，すべてプログラム組込みになっている。これらの物性値については，Appendix-Aに収録したので，そちらを参照されたい。

3.3 データ入力法

FEMF3およびFREB4の両者共，入力はカード型式である。必要な入力データおよび入力形式等は，Appendix-Bに表にして収録した。すなわち，Table B.1にFEMF3の，

Table B.2にＦＲＥＢ４のデータ入力法を与える。先にも述べたように，これらプログラムの計算結果は，プロッターで図化することができる。この専用のプロッタープログラムPLOTFを使用する場合のデータ入力法をAppendix-BのTable B.3に示す。なお，ＰＬＯＴＦを使用する場合，ＦＥＭＦ３あるいはＦＲＥＢ４の計算結果は一旦ディスクに格納される。そのためには，ディスクが確保されねばならない。

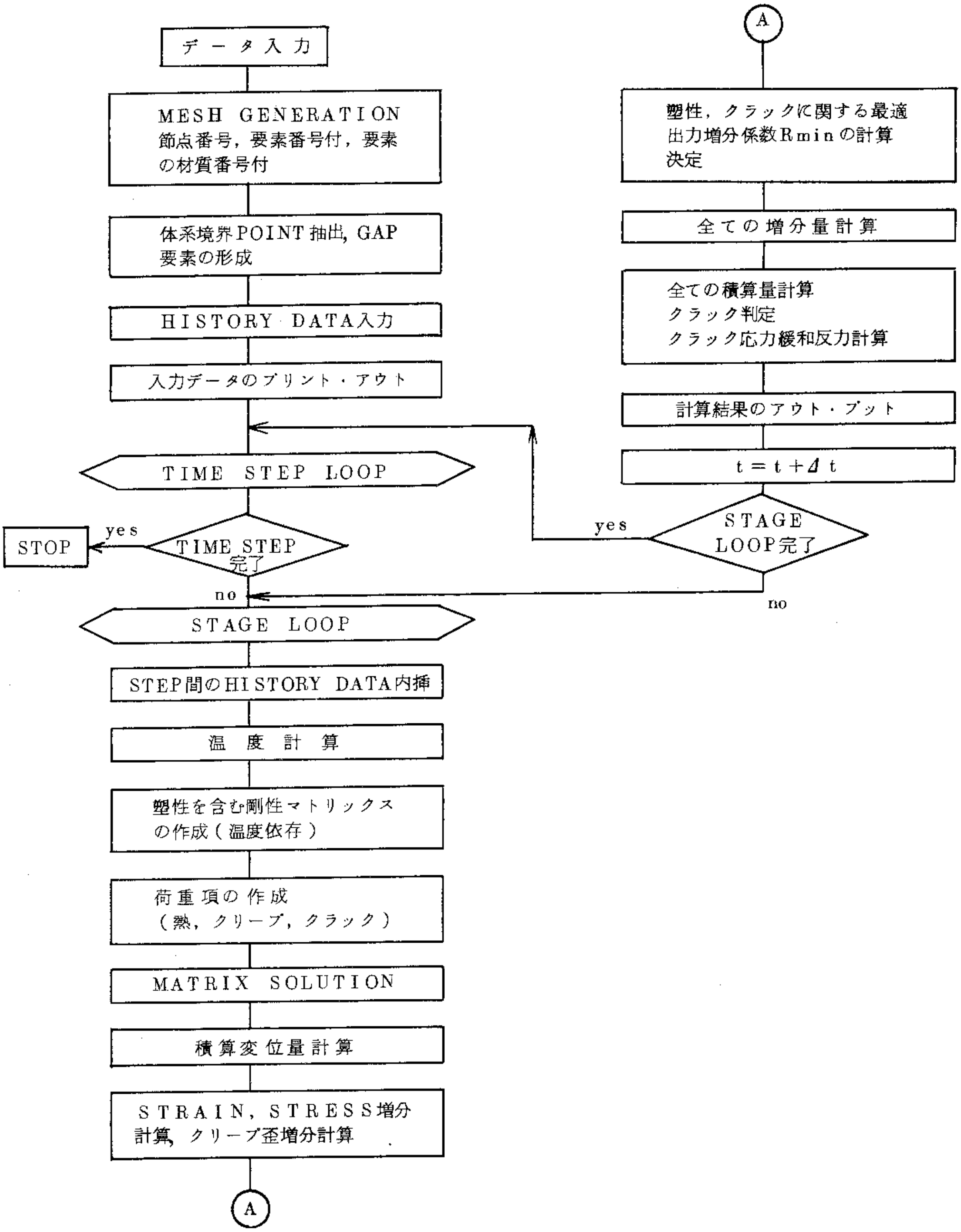


Fig. 3.1 Block diagram of FEMF3

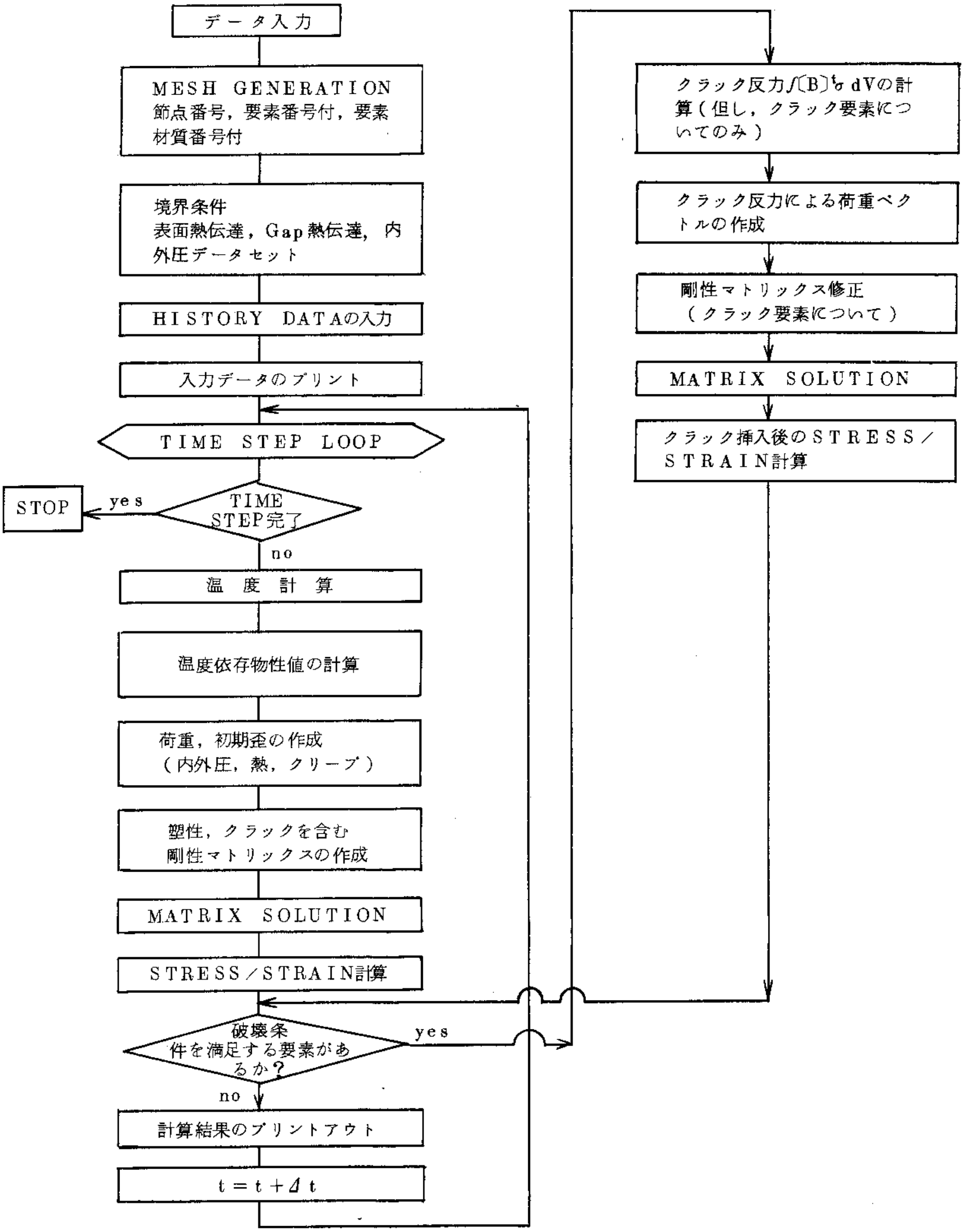


Fig. 3.2 Block diagram of FREB4

Table 3.1 FEMF3に含まれるサブプログラムの機能

サブプログラム名	機　　能
1. FEMF3	MAIN PROGRAM 計算の流れを制御する。
2. ANCC	被覆管，歪硬化係数，異方性パラメータを計算する。
3. ANCP	ペレット　〃
4. BOUNDA	体系の表面に存在する要素の抽出，境界上節点の拘束条件セット
5. CRACKD	クラック後の要素STIFFNESS MATRIXの作成
6. CREPC	被覆管クリープ歪増分量計算式
7. CREPP	ペレット　〃
8. CREEP	Prandtl－Reuss flow ruleよりクリープ歪増分成分を計算
9. DATAPR	入力データ，カード，イメージをプリントする
10. DEFORM	変位増分より，歪，応力増分の計算。増分量より積算量計算。積算量より，等価歪，応力及び偏差応力計算。弾性歪，熱歪，塑性歪，クリープ歪の各成分セット。
11. DISPL	変位増分量格納
12. EXPAN	被覆管，ペレットの熱膨張係数計算
13. FORM	要素STIFFNESS MATRIXよりGLOBAL STIFFNES MATRIXを作成
14. GDUMP	要素，節点MAPプリント・アウト
15. GEMESH	自動メッシュ作成
16. HCAP	被覆管，ペレット比熱計算（非定常の場合に使用）
17. HCOND	被覆管，ペレット熱伝導率計算
18. HISINP	照射履歴データの入力
19. HISSET	自動制御されたタイム・メッシュに相当した各パラメータを入力値より内挿
20. INCREM	時間増分量決定
21. INOUT	入力データの編集，プリント・アウト
22. INPUT	データの入力，COMMON AREAのゼロ・クリアー
23. INVERS	逆MATRIX計算
24. LOAD	内外圧による節点力計算，初期歪考慮（熱，クリープ，クラック）

Table 3.1 (Con't)

サブプログラム名	機　　　　能
25. OUT1	節点力，変位，座標，負荷係数プリント・アウト
26. OUT2	応力－歪・要約プリント・アウト
27. OUT3	応力－歪・詳細プリント・アウト
28. PAGE	アウト・プット各頁のHeaderプリント
29. LASTD	塑性STIFFNESS MATRIX作成
30. POISS	被覆管，ペレット ポアソン比計算
31. REFER	最適負荷係数の計算及び決定
32. SHEAR	せん断係数計算
33. SOLVE	GAUSS消去法により連立方程式を解く
34. STATUS	塑性，クラック，ヒーリング判定
35. STIFF	要素弾性STIFFNESS MATRIXの作成
36. TEMPER	温度分布計算
37. TEMPPR	温度分布プリント・アウト
38. TEPP	一次内挿ルーチン
39. TERP	複数個ARRAY間の一次内挿ルーチン
40. TSTIF	温度分布計算用STIFFNESS MATRIX（定常条件）作成
41. TSTIFT	温度分布計算用STIFFNESS MATRIX（過渡条件）作成 （現在このルーチンは未使用）
42. ULTIMC	被覆管最大引張強さ計算
43. ULTIMP	ペレット　〃
44. YIELDC	被覆管塑性応力計算
45. YIELDP	ペレット　〃
46. YOUNG	被覆管，ペレット，ヤング率計算
47. PLOT	PLOTER用Data Fileの作成

Table 3.2　FREB4に含まれるサブプログラムの機能

サブプログラム名	機　能
1. FREB4	MAIN PROGRAM プログラム全体の制御
2. ALPHA	熱膨張率の計算
3. CONV	(r , θ) 座標を (x , y) に変換する。
4. CONVR	not used
5. CORD	座標データ入力及びプリントアウト
6. ELEM (Entry)	要素　〃　〃　〃
7. CRAK	クラックの判定，クラック本数，クラック反力の計算
8. DPLOT	プロッタプログラムPLOTF用データファイル作成
9. FINSL	一次内挿ルーチン
10. FINSR	〃　〃
11. FLOAD	荷重項の計算
12. FRST	破壊応力の計算
13. GLOBL	全体剛性マトリックスの計算
14. INPA	データ入力補助ルーチン
15. INPB	〃　〃
16. INPC	〃　〃
17. INPX	データ入力及びプリント・アウト
18. ISET	整数セット
19. KMATRX	熱伝導構成マトリックスの作成
20. MAKEM	要素剛性マトリックスの計算
21. MATD	物性値のセット
22. MODFY	クラックした要素マトリックスの修正
23. OUTPT	計算結果のプリント・アウト
24. P	四角形要素の形状関数Niの計算
25. PAGE	改ページ及び表題のプリント
26. POISSN	ポアソン比の計算
27. PX	四角形要素の形状関数の微分項 $\partial Ni/\partial\xi$ の計算

Table 3.2 (Con't)

サブプログラム名	機　　能
28. PY	四角形要素の形状関係の微分項 $\partial Ni / \partial \eta$ の計算
29. SETTS	バンド幅，タイムメッシュのセット
30. SOLUTI	バンド型連立一次方程式を解く
31. STRESS	応力，歪の計算
32. TEMPER	温度計算全体のコントロール
33. THCON	熱伝導率の計算
34. THSTRN	熱歪の計算
35. CREEP (Entry)	クリープ歪の計算
36. VALN	n−value の計算
37. VALA (Entry)	α − value 〃
38. VALC (Entry)	c − value 〃
39. VMOV	実数データのArray間転送
40. VSET	実数データのセット
41. YIELD	降伏応力の計算
42. YOUNG	ヤング率の計算

Table 3.3　プログラム使用上の制限条件および注意事項

<table>
<tr><th></th><th>FEMF3</th><th>FREB4</th></tr>
<tr><td>体　系</td><td>R－Z</td><td>R－θ</td></tr>
<tr><td>要　素</td><td>3角形注)</td><td>3角形あるいは4角形</td></tr>
<tr><td>要素数</td><td>R－方向最大格子数　20
Z－方向最大格子数　9</td><td>Rおよびθの分割は任意であるが下記の節点総数等の制限以内でなければならない</td></tr>
<tr><td>最大節点総数</td><td>300</td><td>200</td></tr>
<tr><td>最大要素総数</td><td>500</td><td>250</td></tr>
<tr><td>最大バンド巾</td><td>10</td><td>20</td></tr>
<tr><td>履歴の最大ステップ数</td><td>20</td><td>100</td></tr>
<tr><td rowspan="2">モデル</td><td colspan="2">ディシュペレットは扱えない。接触問題は扱えない。スウェリング，組織変化は計算しない。</td></tr>
<tr><td>燃料棒断面の上・下の境界は変形後も中心軸に垂直な平面を保つとする。但し，軸方向の一様な伸びは許される。</td><td>一般化平面歪問題は扱えない。平面歪問題は扱えるが，軸方向応力σ_Zが圧縮応力として大きくなりすぎ現実にそぐわない。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">使用ディスク</td><td>F01
F02
F03　作業用ファイル
F04
F08
F09　PLOTF用データファイル</td><td>F01　PLOTF用データファイル</td></tr>
<tr><td colspan="2">プロッタ出力を得たいときは，上記F09（FEMF3），F01（FREB4）を確保する必要があり，PLOTFではこのファイルがデータファイルとなる。</td></tr>
</table>

注)　要素の構成は3角形要素でFig. 4.12に示すように，R，Z軸に平行な格子状を分割すること。さらに，Z－方向の分割は燃料ペレットと被覆管を通じて同一であること。

4. サンプル問題による燃料ペレットクラックの解析結果

作成したプログラムＦＥＭＦ３とＦＲＥＢ４のテストをかねて燃料ペレットの出力上昇時の挙動解析を行った。プログラムの性格上，解析はペレットのクラックの発生，クラック領域の拡大およびゆ着の問題を中心にしている。

計算に使用した燃料の寸法は，燃料ペレットの外径0.62cm（中心孔なし），被覆管の外半径0.715cm，内半径0.634cm（ペレットと被覆管の半径ギャップ0.014cm）とした。また，軸方向の計算預域として高さ0.75cmを設定した。この寸法は，ＢＷＲ７×７型の標準タイプ燃料である。燃料の材質はペレットは二酸化ウラン焼結体，被覆管はジルコニウム合金（ジルカロイ－２）とし，物性値はAppendix－Ａに収録したものを使用した。

計算に必要な燃料の照射履歴は，初期冷却水温度を室温（25℃）とし，出力状態で288℃とした。燃料棒出力は，最初０（Ｗ／cm）で最大出力450（Ｗ／cm)に10時間で達するものとしたが，詳しくはFig.4.1(c)（ＦＲＥＢ４）およびFig. 4.12(c)（ＦＥＭＦ３）を参照されたい。

ＦＲＥＢ４による計算の出力履歴については，最大出力に達した後，その出力が連続して続かずわずかに減少するものとした。これは，核分裂性物質の消失による出力の減少を考慮したものである。したがって，ＦＥＭＦ３の計算結果と直接な比較は必ずしも妥当ではないかもしれないが，出力の減少は小さいので大きな相違は起らないと考える。なお，計算上ギャップのガス圧力は1 kg／cm^2で変化なしとし，ギャップ熱伝達率は0.568W／cm^2℃であると考えた。

上記の数値を用い二次元平面モデルによるプログラムＦＲＥＢ４の計算結果を，Fig. 4.1からFig. 4.11までに示した。また二次元軸対称モデルによるプログラムＦＥＭＦ３の計算結果をFig. 4.12よりFig. 4.21までに示した。これらの図は計算結果をＰＬＯＴＦを用いてプロッターで出力したものをまとめたものである。プロッターによらす通常のラインプリンターによる出力については，同一問題の出力をAppendix Ｄに収録しておいたので，必要ならば参照されたい。

計算対象の要素分割，要素番号等はFig. 4.1およびFig. 4.12に示される。

Fig. 4.2～4.3より明らかなように，出力上昇時にはペレット中心部の温度がペレット周辺よりも温度上昇が大きいため，中心部の引張歪は増大しかつ圧縮応力も増大する。またペレット周辺部は，出力上昇時には周方向の引張応力が増大しかつ小さな幾つかのピークが見られる（Fig.4.3－ａ）。これらのピークは，ペレット周辺部にクラックが発生し，応力緩和が起きたことにより発生したものである。また出力が下降し初期温度にもどった状態では，中心部の半径方向，周方向および，周辺部の周方向に残留応力が見い出される。これらは周辺部にクラックが最後まで残るため周方向クリープ歪が引張側になることと，中心部では出力上昇時の圧縮応力に応じて周方向のクリープ歪が圧縮側になることにより，負荷を零にした時，周辺部に周方向の圧縮応力が，中心部に引張応力が発生するためと考えられる。

Fig.,4.4にクラックパターンを示した。周辺部より中心に向けてクラックが発生していく

様子がみられる。ここでは125W/cmでクラックが発生している。クラックは大部分半径方向に沿って発生するが，出力下降時にペレットの中心部および中心部と周辺部のほぼ中間部に周方向に沿ったクラックが発生する。これは中心部と周辺部の温度降下の差から半径方向の引張応力が増加するためと考えられる。

Fig. 4.5よりFig. 4.11までは，各出力時の応力，歪分布図を示す。Fig. 4.5－a，b，Fig. 4.6－a，bは周辺部にクラックが入ったことにより，周辺部の周方向の引張応力が緩和されかつ歪が増加していることを示す。また応力等高線図（Fig. 4.6－c，d）からもクラック発生点での応力緩和がわかる。またFig. 4.8－dは，中心部で塑性により圧縮応力の増加が止まり，応力緩和がペレット中間部まで進み，非常にせまい領域に応力勾配が出来ることを示す（Fig. 4.8－d）。出力下降時，中心部の圧縮応力は減少し引張応力に転じかつ，周方向よりも軸方向の応力が大になる（Fig. 4.10－a，Fig. 4.11－a）。また中間部の軸方向の引張応力が大きくなる（Fig. 4.10－c）。これらの結果がクラックパターン（Fig. 4.4－i）に影響している。またFig. 4.11－a，dに見る如くσ_θが中心部で正，周辺で負となるのは中心部で周方向クリープ歪が圧縮，周辺部では周方向クリープ歪が引張であるのに対応している。

FEMF3の計算結果Fig. 4.13からFig. 4.15までの出力上昇時の状態はFREB4の結果と同じく，中心部で圧縮，周辺部で引張応力が見られ，クラックが周辺部に発生したことによる小さなピークが見い出される。ただ異ることは，FREB4では平面応力モデルであるため$\sigma_Z=0$なのに対して，FEMF3では中心部に非常に大きな圧縮応力のσ_Zが発生する。そのため，中心部附近の応力，歪履歴はFREB4とは大分異る。Fig. 4.13－aで出力が450W/cmに達した所で，σ_Zがあるため中心部でクラックが発生し応力が緩和している。周辺部に比較すると，中心部のZ方向の歪は小さく，その分圧縮応力は大きい(Fig.4.18-a，b)。以上のことは，中心部に関して平面応力として取扱うことに無理があることを示す。

Fig. 4.16は各出力時におけるクラックパターンである。出力上昇初期には，周辺部に半径方向に沿ったクラックが発生し，ペレット上部程中心軸方向に深くクラックが入る。出力が増大すると，中心部は塑性状態となりZ＝0の周辺部ではZ方向のクラックが，また中間部より内部には周方向クラックが発生する。最終的には，中心部もクラックし，ほぼ全面にクラックが発生することになる。Fig. 4.17よりFig. 4.21まで各出力時の応力，歪分布図を示した。Fig. 4.17－aでは，r＝0よりr＝0.45cm付辺まではきれいな軸対称応力解を示しておりr＝0.45cm以上ではクラックが半径方向に入るためσ_Tが緩和している。Fig. 4.18－aでは，クラックによる応力緩和はさらに内部にまでわたっている。線出力密度が450W/cmに達すると中心部にクラックが発生するため，応力は緩和される（Fig. 4.19－a）。それにより歪は大きく増加する（Fig. 4.19－b）。また，中心軸及び中間部で大きな半径方向の引張応力，σ_rが発生している（Fig. 4.20－c）。これはFig. 4.16－eの結果と対応がつく。Fig. 4.21－dから明らかなように，σ_θの残留応力は中心部は引張応力，周辺部は圧縮応力となっている。この結果はFREB4と同じであるか，絶対値そのものは幾分小さくなっている。これはFEMF3の場合σ_Zの影響で全面にクラックが入っており，応力が小さくなり全般にクリープ歪がおされられていること。クラックの影響がほぼ一様であるためと考えられる。

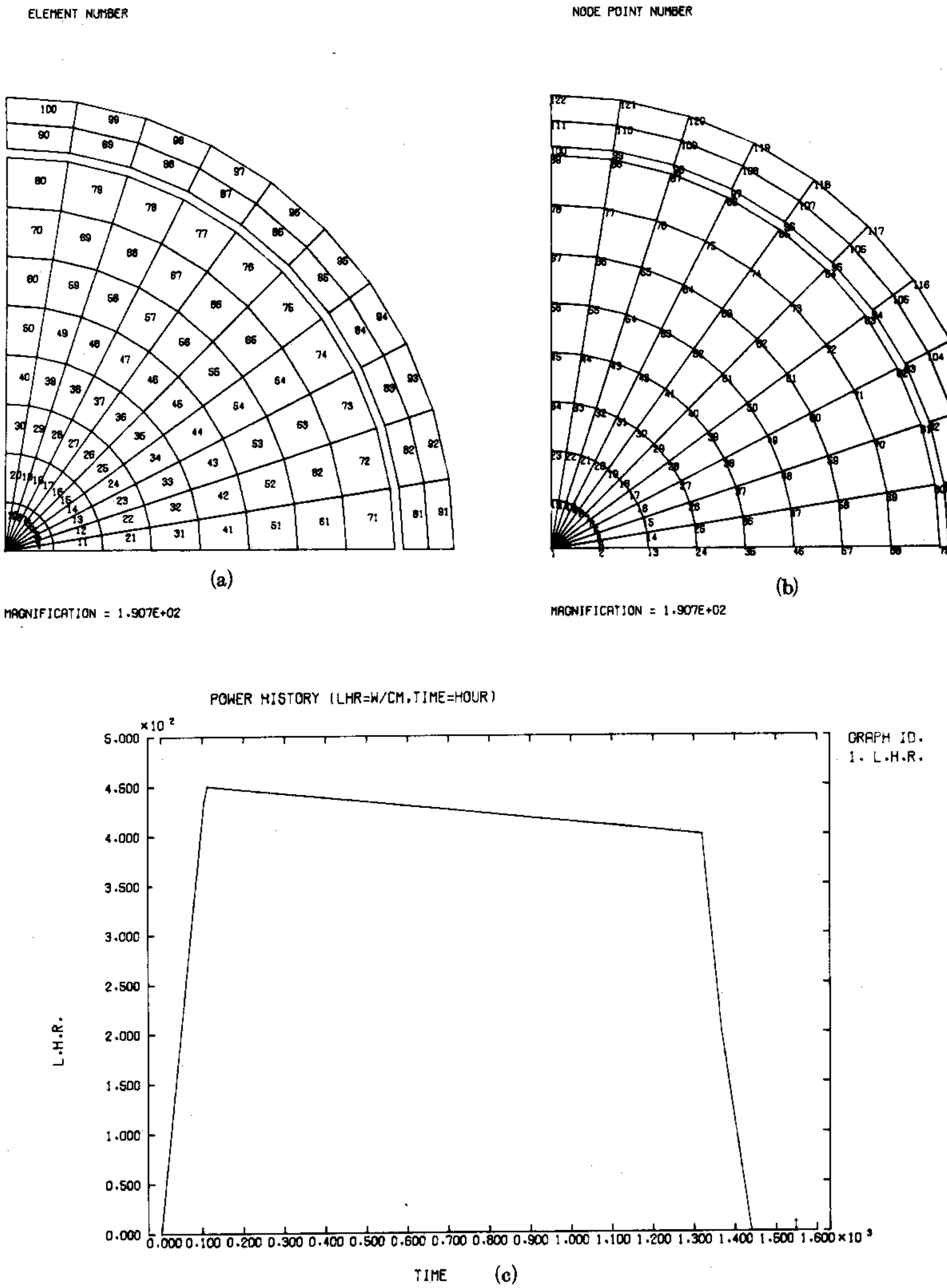
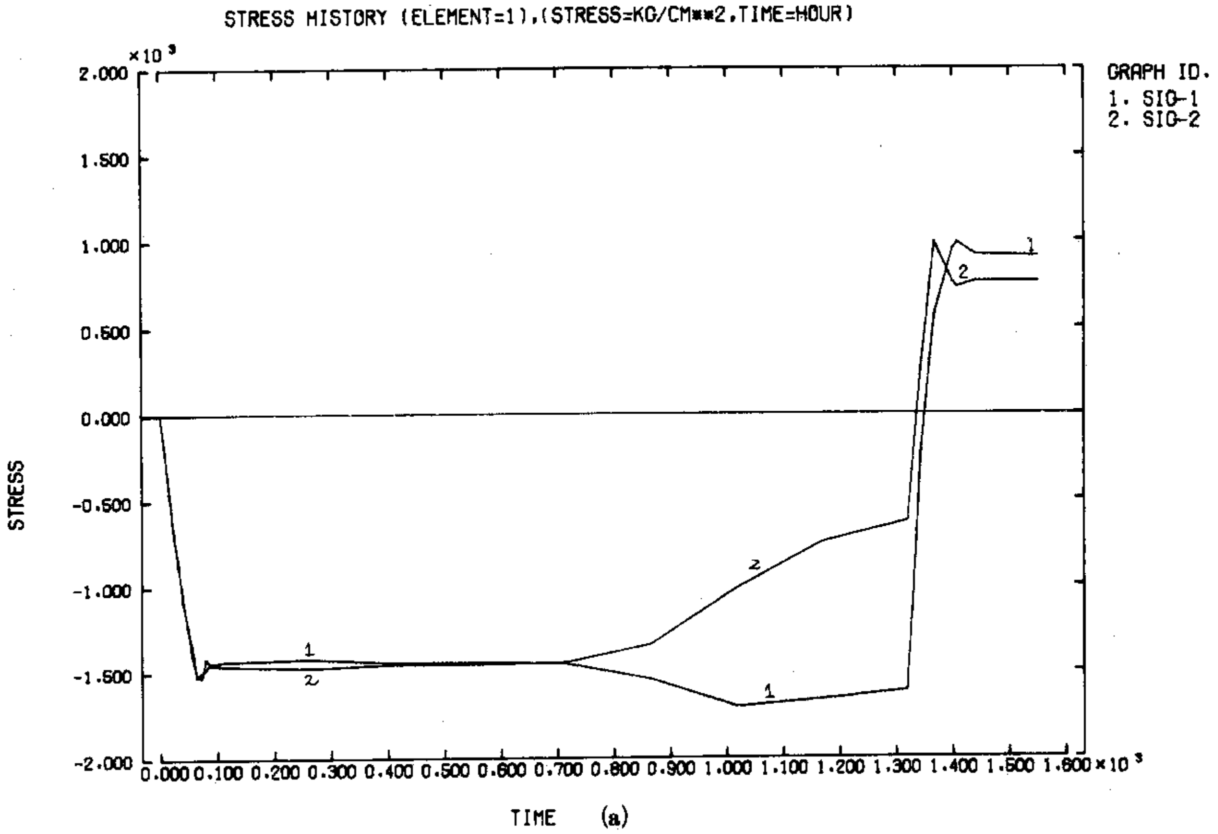
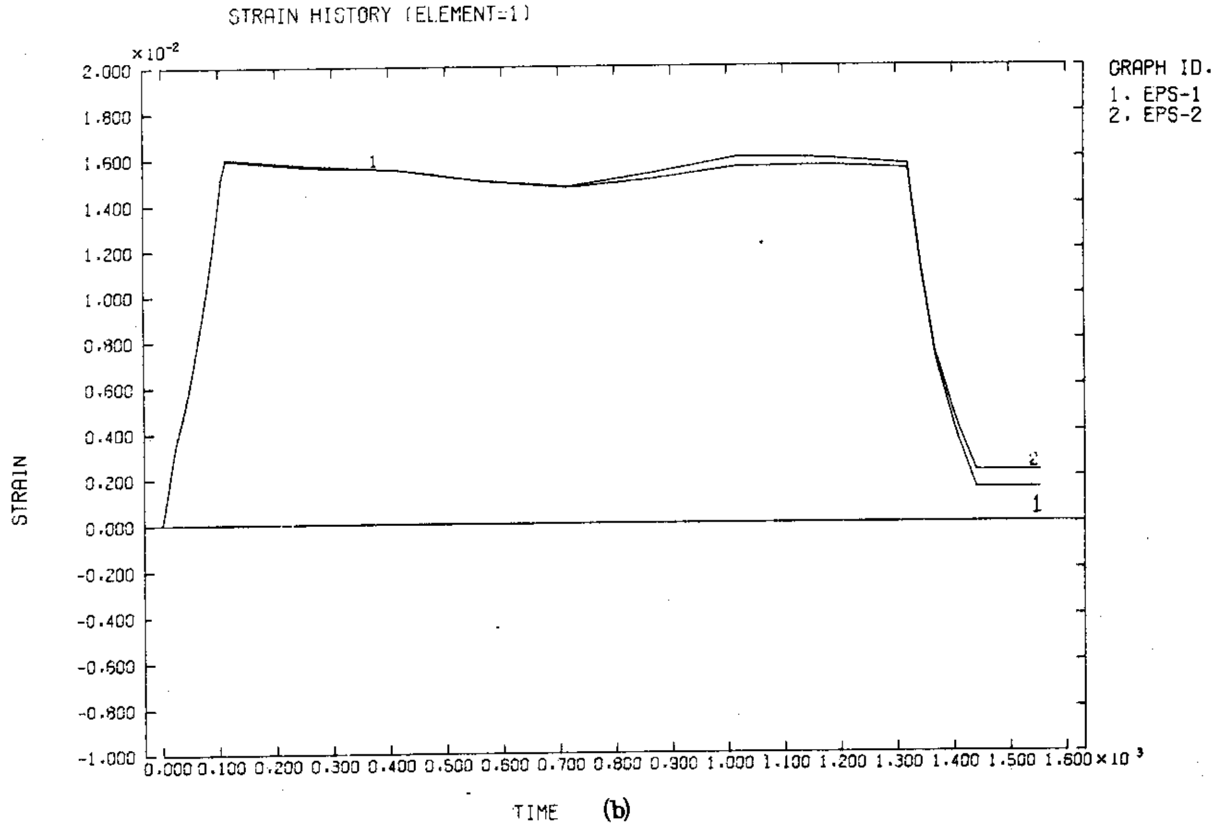


Fig. 4.1 Two dimensional plane model (FREB4) : a) Figure of element numbers, b) figure of nodal points, and c) power history (w/cm).
(Fig. 4.1～4.11 show the results calculated by FREB4.)

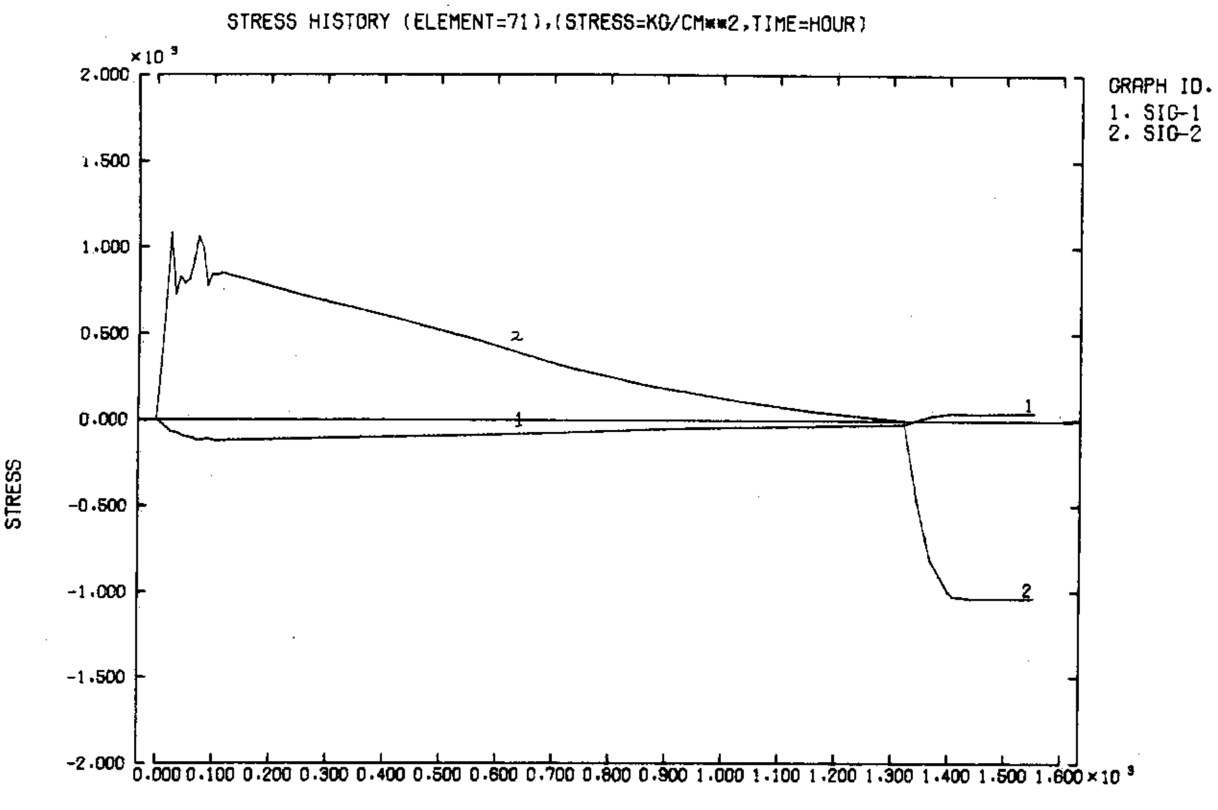


(a)

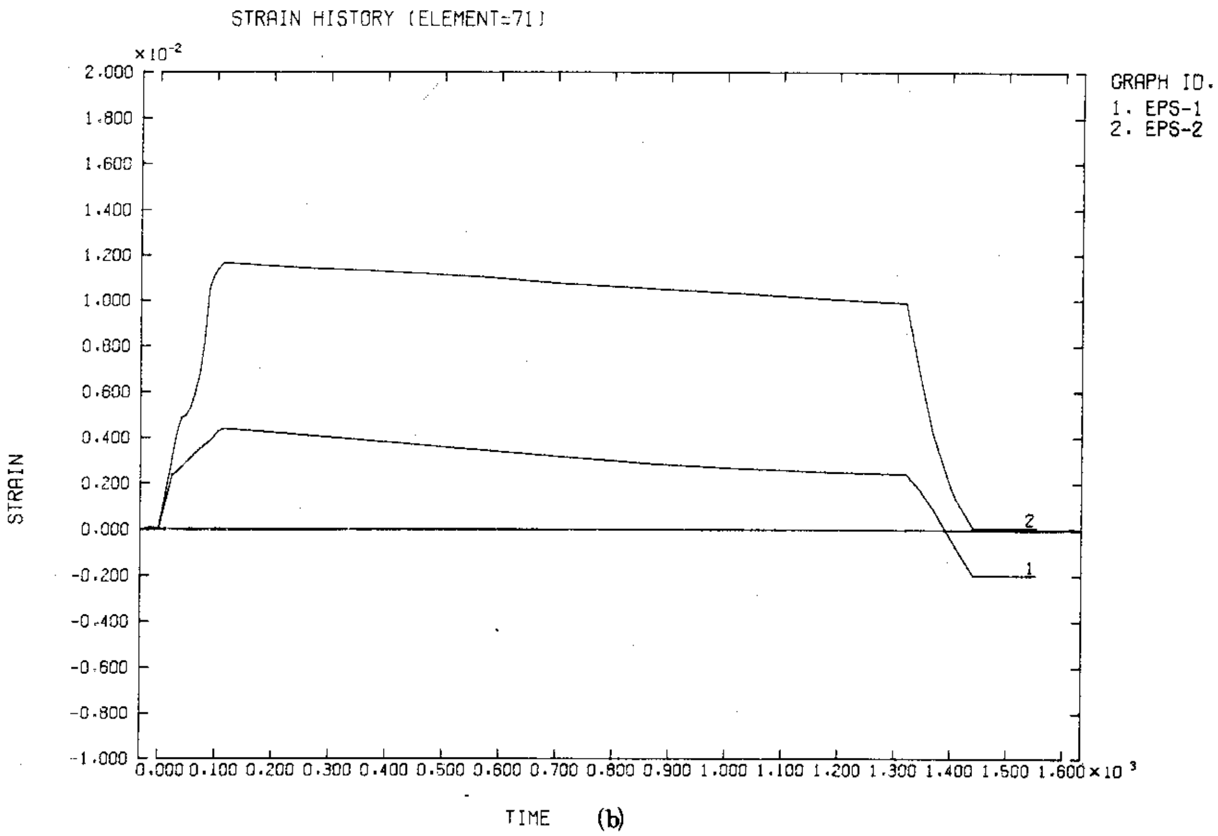


(b)

Fig. 4.2 a) Stress history and b) strain history at the element 1 which is located at the center of pellet.
(Symbols 1 and 2 denote radial and circumferential directions, respectively.)



(a)



(b)

Fig. 4.3 a) Stress history and b) strain history at the element 71 which is located at the circumference of pellet.

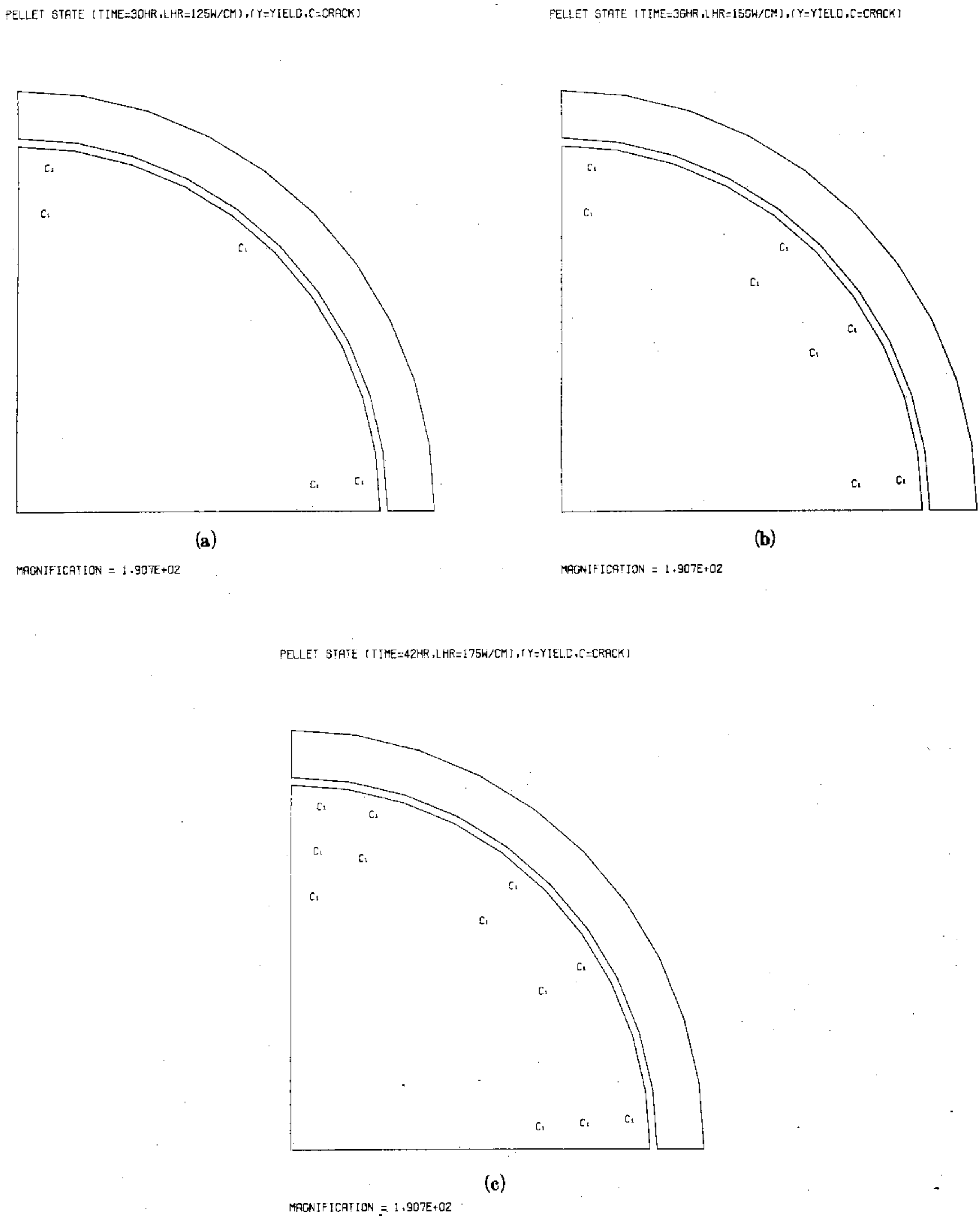
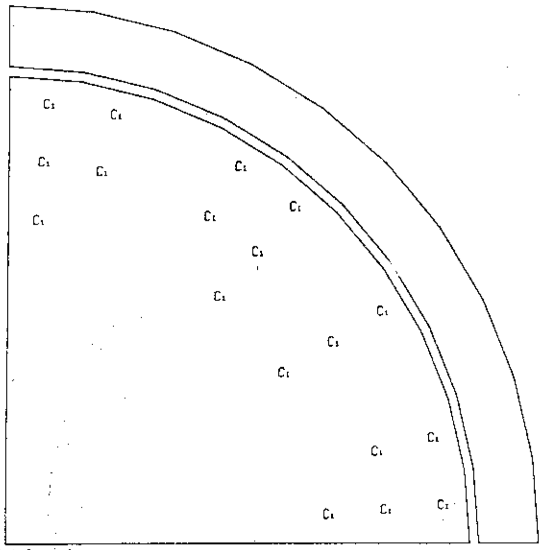


Fig. 4.4 Crack and plasticity areas of pellet at linear heat rate : a) 125w/cm, b) 150w/cm, c) 175w/cm,

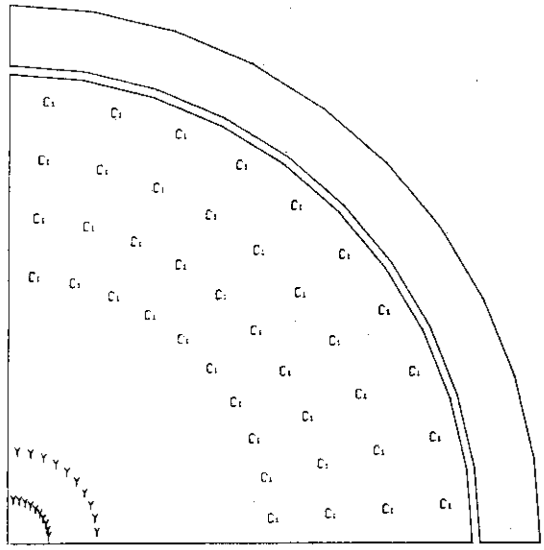
PELLET STATE (TIME=48HR,LHR=200W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



(d)

MAGNIFICATION = 1.907E+02

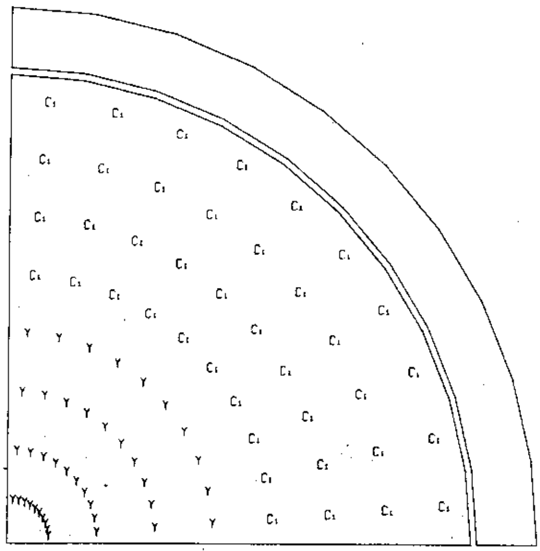
PELLET STATE (TIME=72HR,LHR=300W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



(e)

MAGNIFICATION = 1.907E+02

PELLET STATE (TIME=108HR,LHR=450W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



(f)

MAGNIFICATION = 1.907E+02

Fig. 4.4 d) 200w/cm, e) 300w/cm, f) 450w/cm,

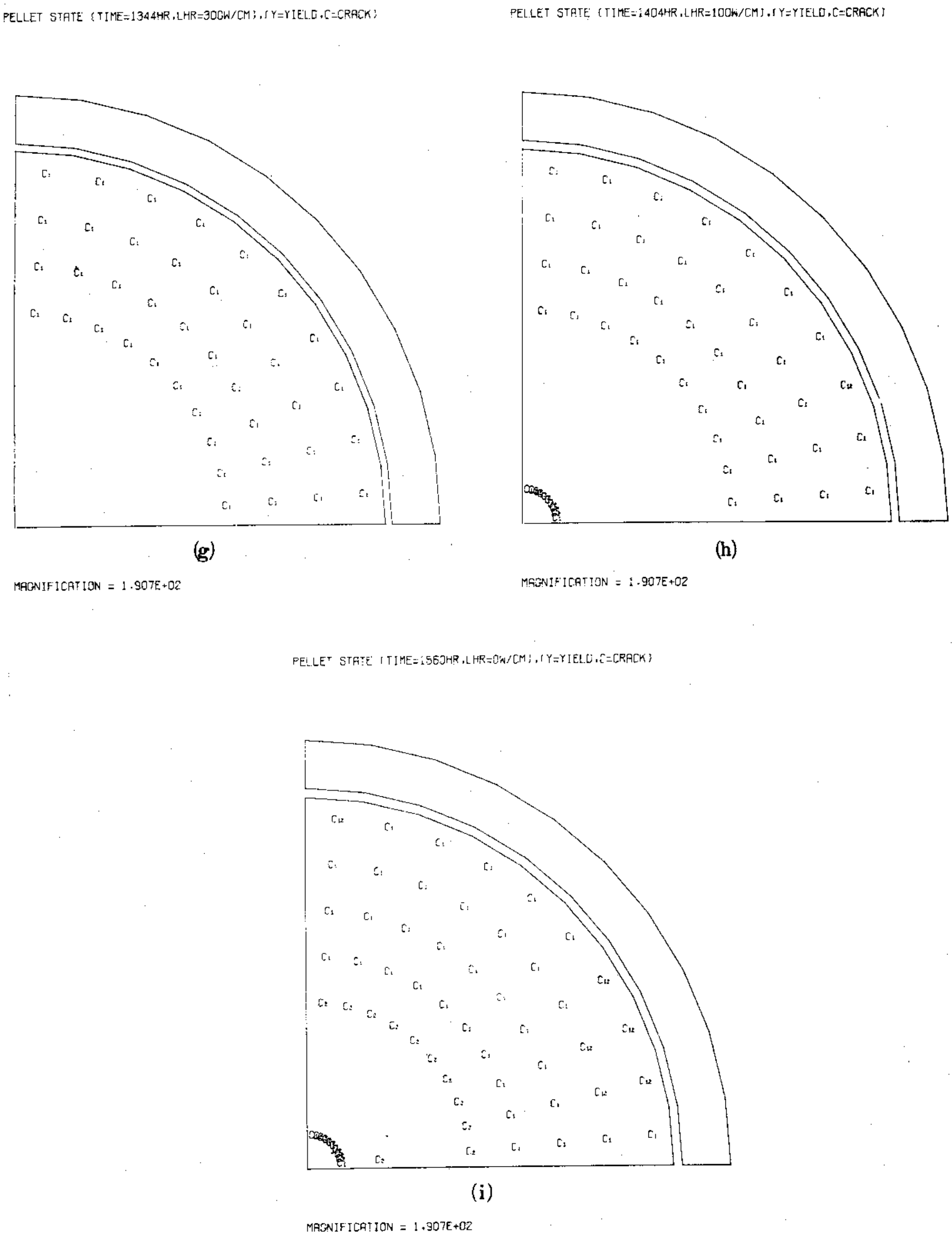
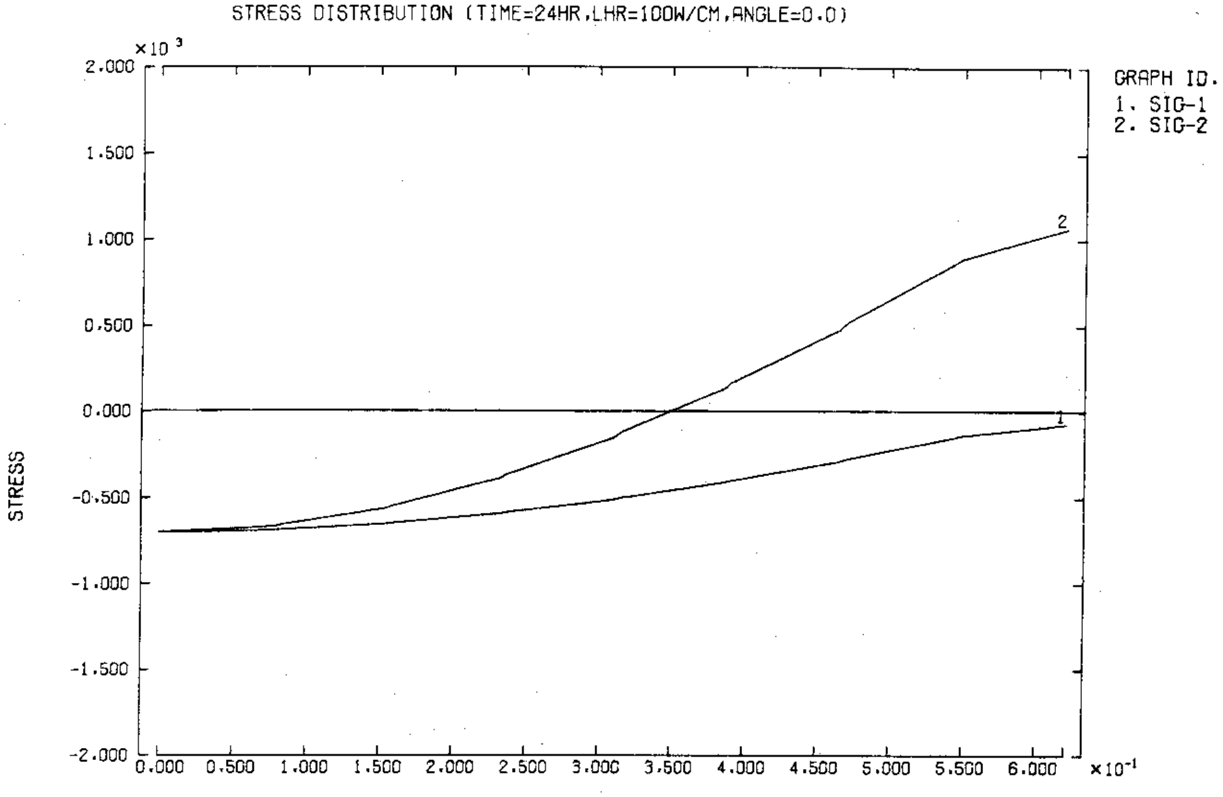
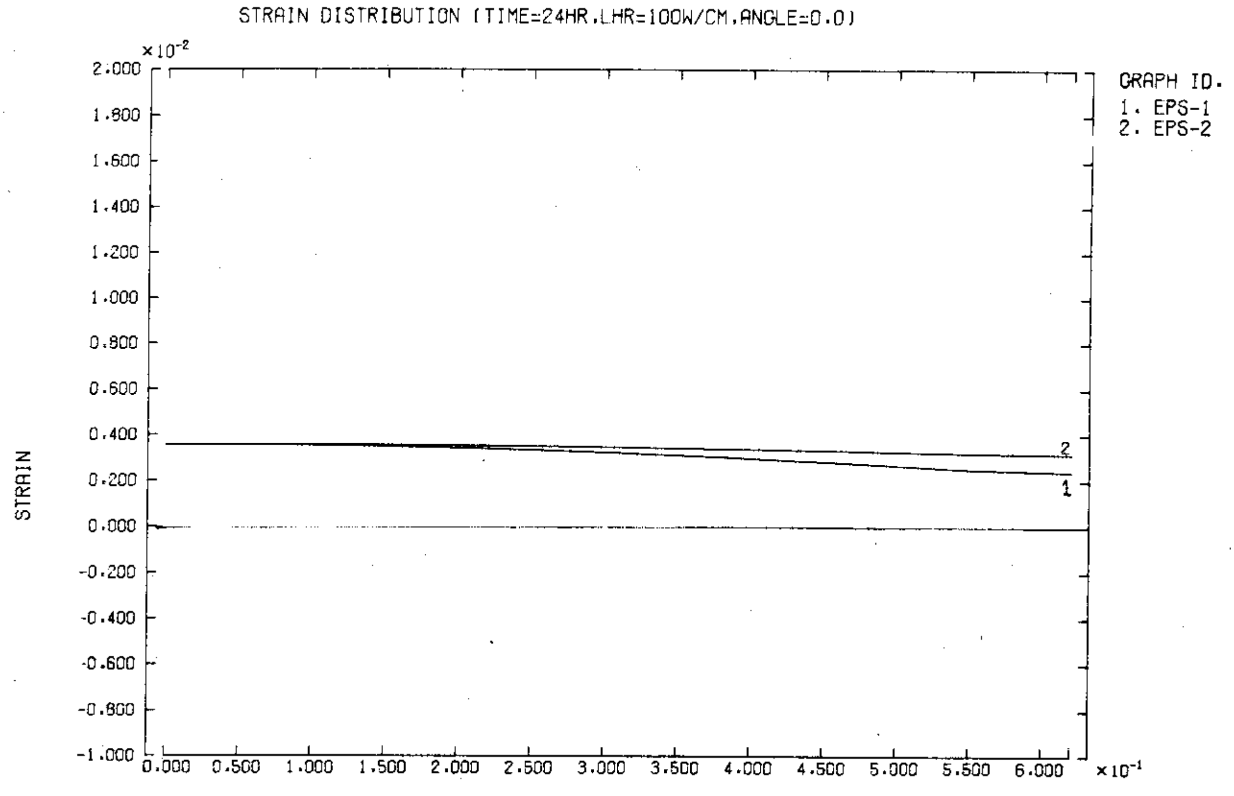


Fig. 4.4 g) 300w/cm, h) 100w/cm, i) 0 w/cm.
(C_1, C_2 and Y denote radial, circumferential cracks and plasticity area, respectively)

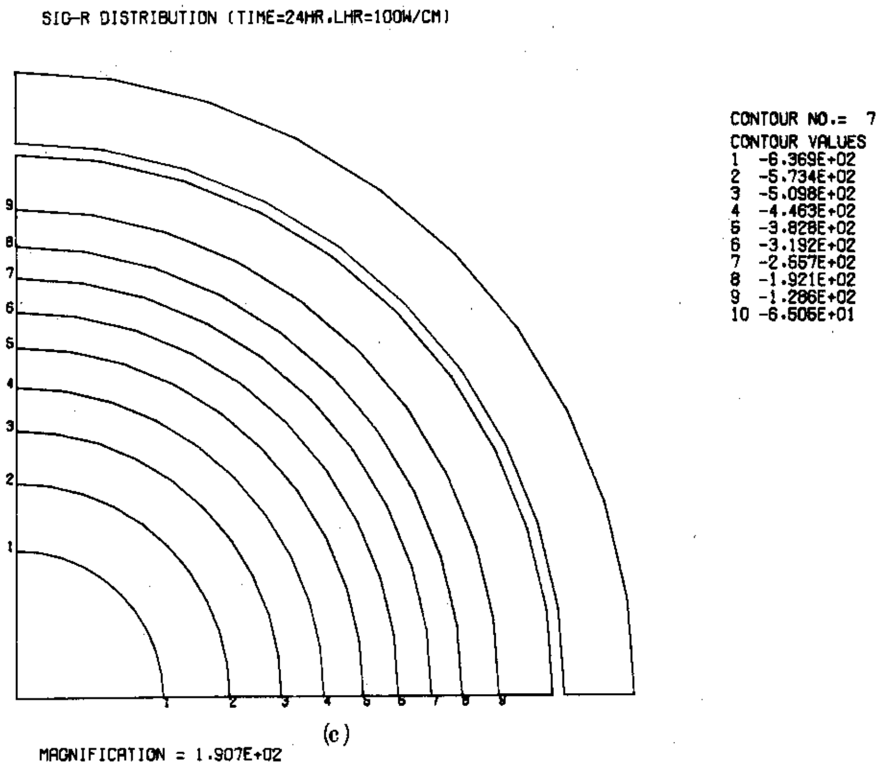


(a)

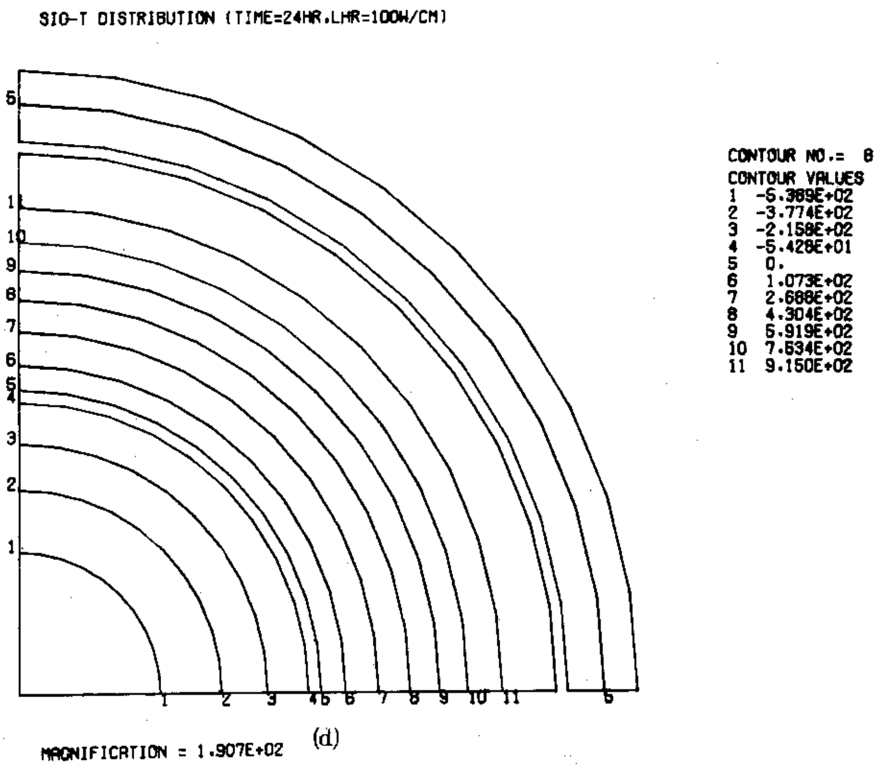


(b)

Fig. 4.5 Stress and strain distributions of pellet at 100w/cm of linear heat rate : a) the radial stress distribution at $\theta=0°$ (kg/cm^2), b) the radial strain distribution at $\theta=0°$.



(c)



(d)

Fig. 4.5 c) the radial stress contour map (kg/cm^2). d) the tangential contour map (kg/cm^2).
(The items a),b),c) and d) in figs. 4.6 ~ 4.11 are the same as those in figs. 4.5)

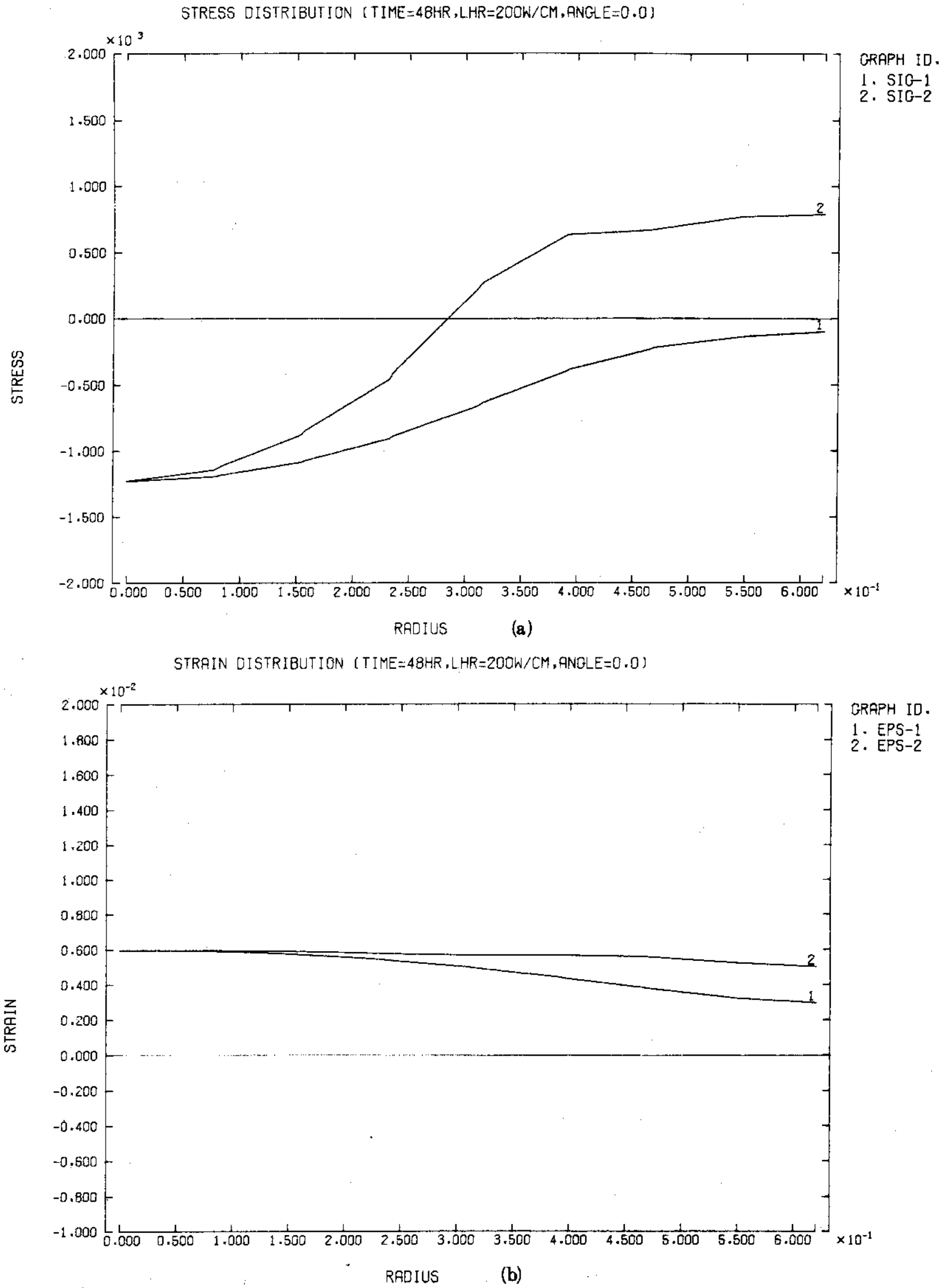
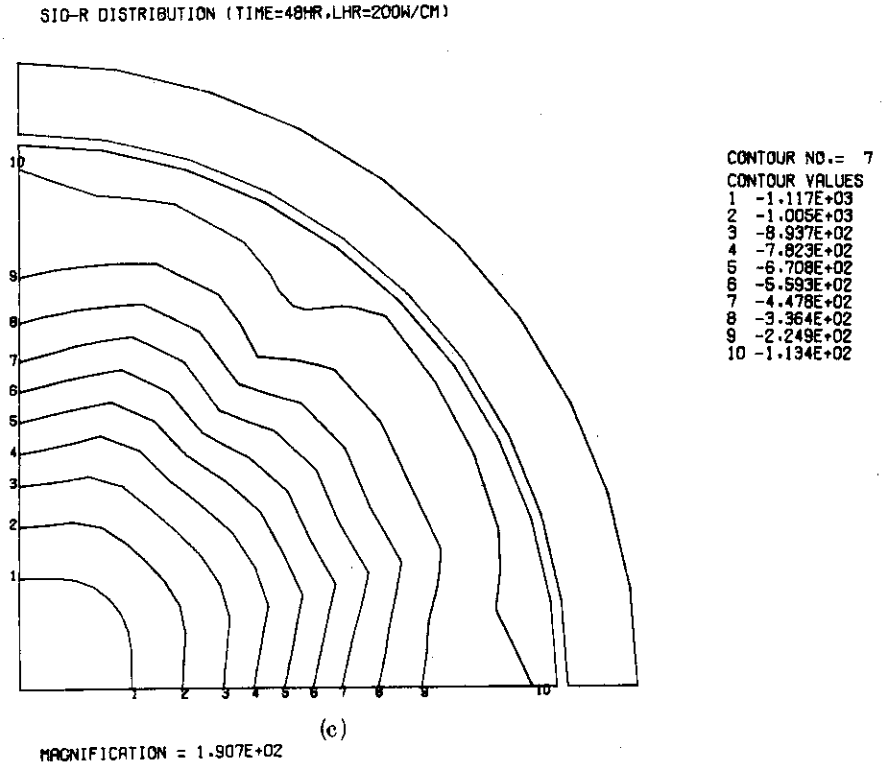
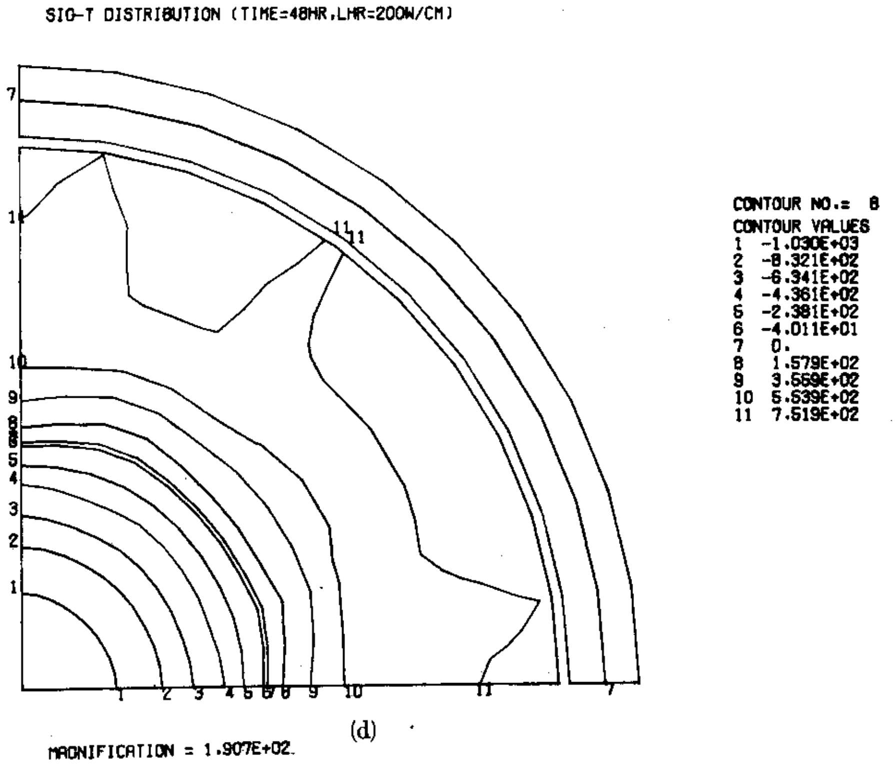


Fig. 4.6 Stress and strain distributions of pellet at 200 w/cm of linear heat rate.



(c)



(d)

Fig. 4.6 Stress and strain distributions of pellet at 200 w/cm of linear heat rate.

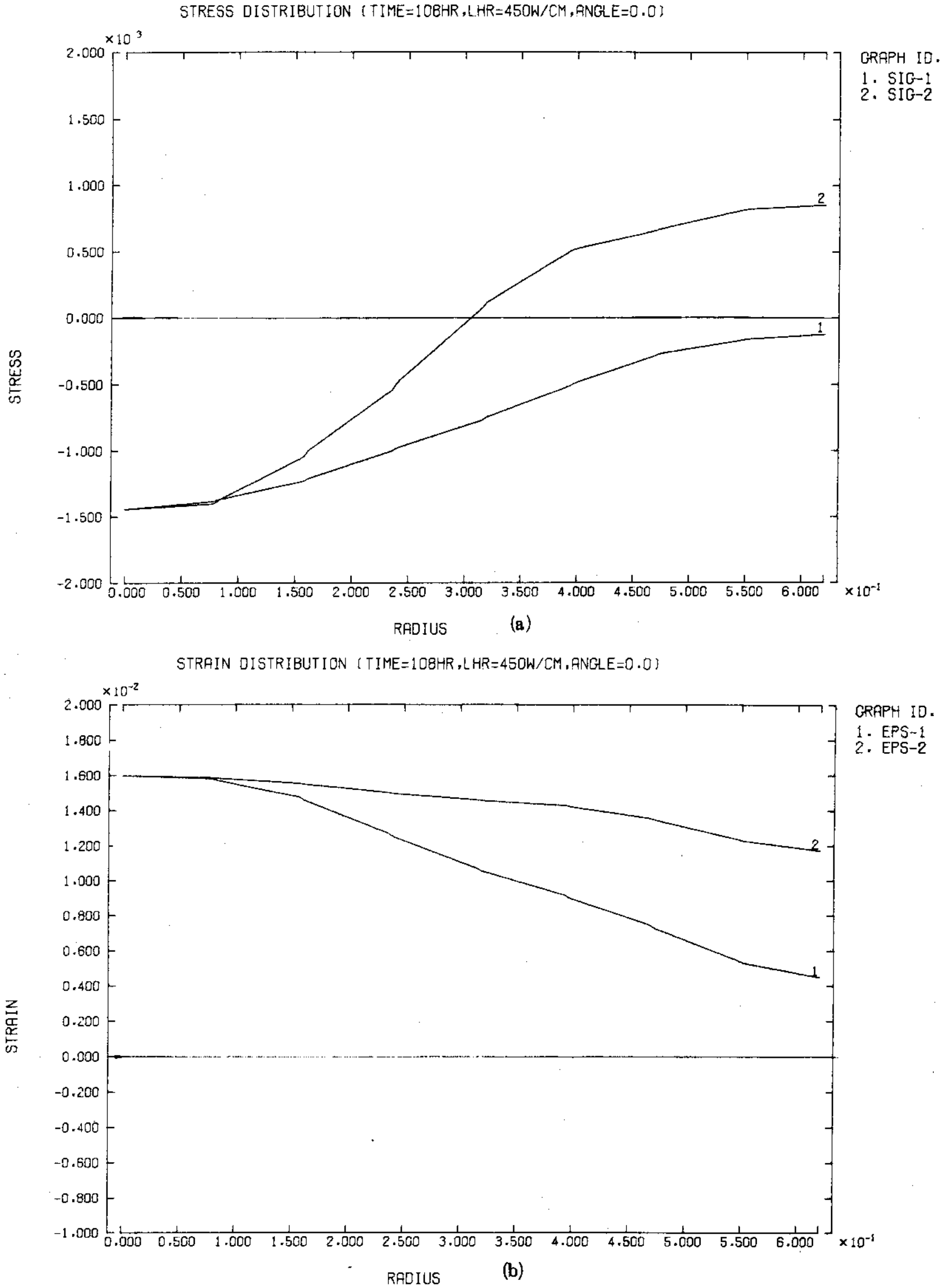
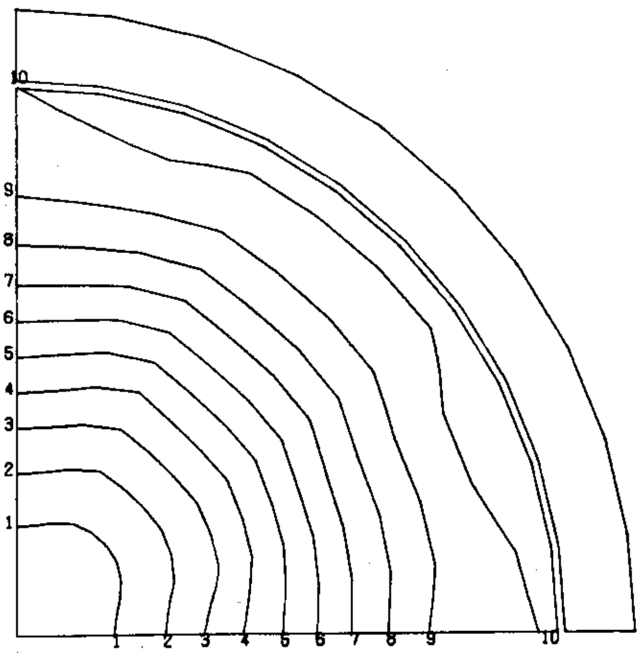


Fig. 4.7 Stress and strain distributions of pellet at 450 w/cm of linear heat rate.

SIG-R DISTRIBUTION (TIME=108HR,LHR=450W/CM)

CONTOUR NO.= 7
CONTOUR VALUES
1 -1.313E+03
2 -1.182E+03
3 -1.061E+03
4 -9.201E+02
5 -7.891E+02
6 -6.581E+02
7 -5.271E+02
8 -3.960E+02
9 -2.650E+02
10 -1.340E+02

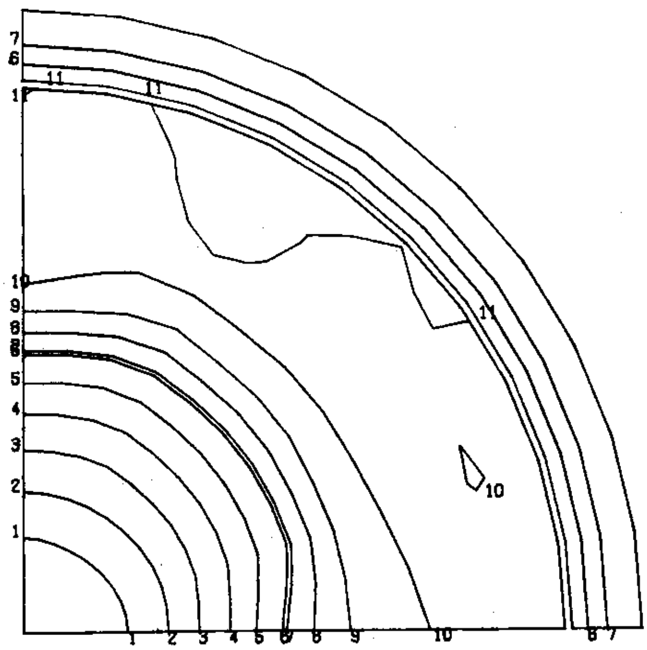


MAGNIFICATION = 1.907E+02

(c)

SIG-T DISTRIBUTION (TIME=108HR,LHR=450W/CM)

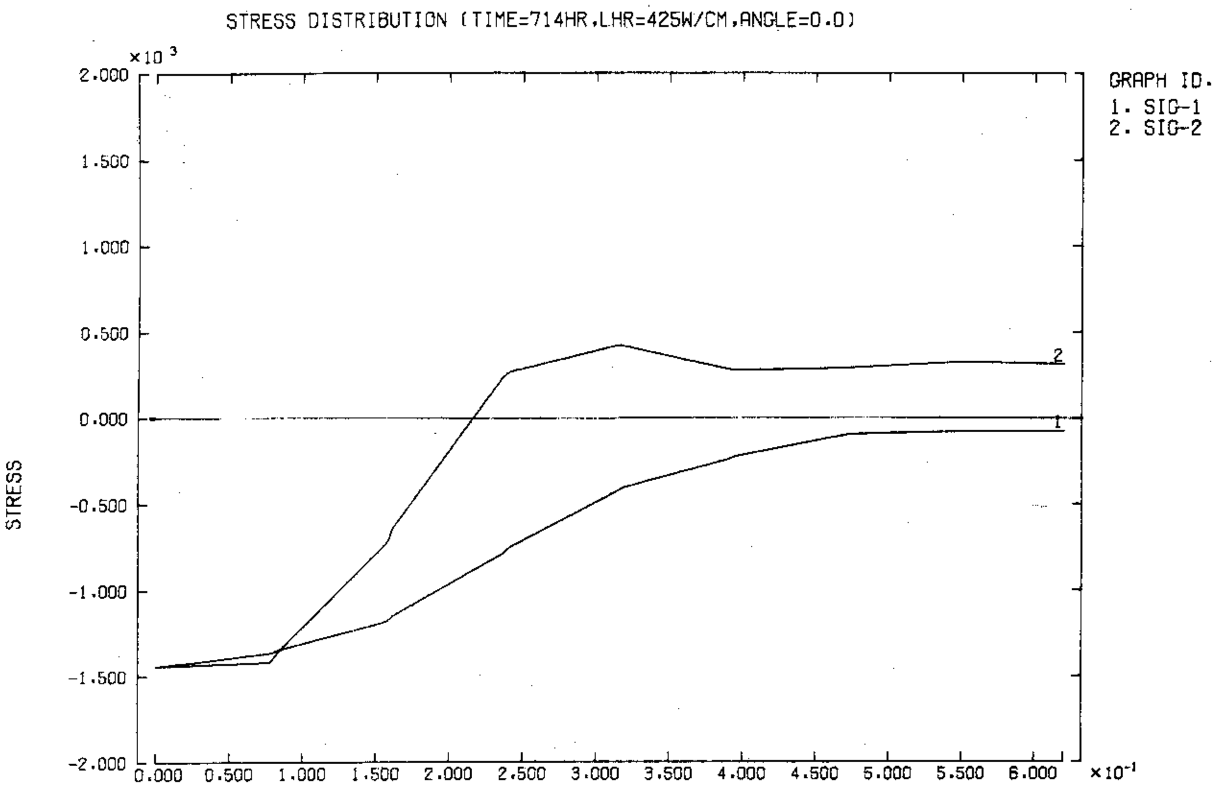
CONTOUR NO.= 8
CONTOUR VALUES
1 -1.210E+03
2 -9.761E+02
3 -7.420E+02
4 -5.080E+02
5 -2.739E+02
6 -3.980E+01
7 0.
8 1.943E+02
9 4.284E+02
10 6.624E+02
11 8.965E+02



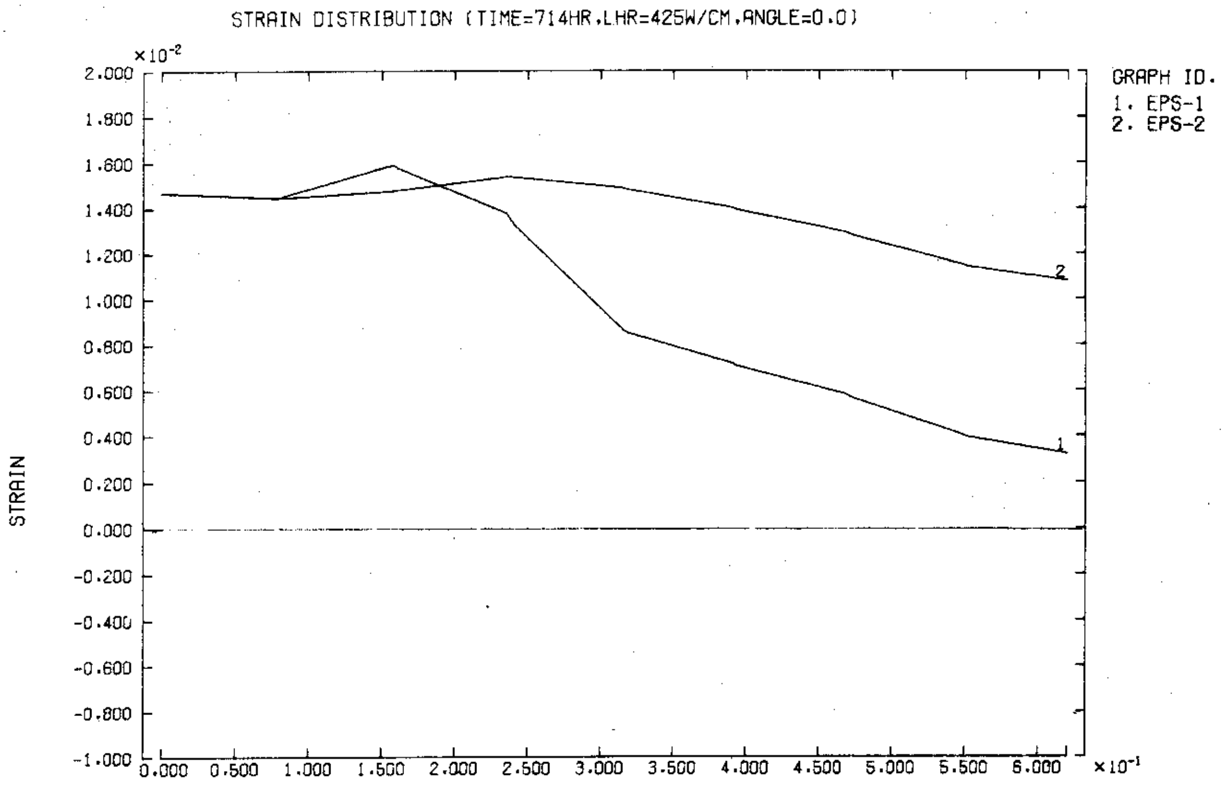
MAGNIFICATION = 1.907E+02

(d)

Fig. 4.7 Stress and strain distributions of pellet at 450 w/cm of linear heat rate.

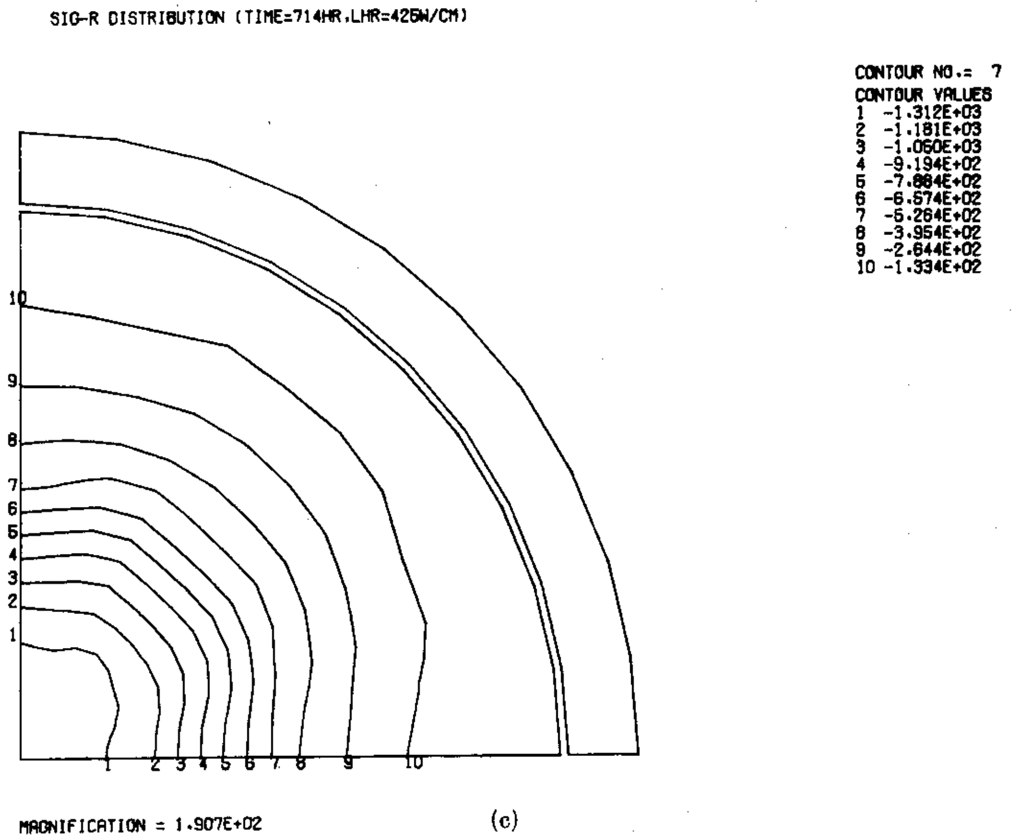


(a)

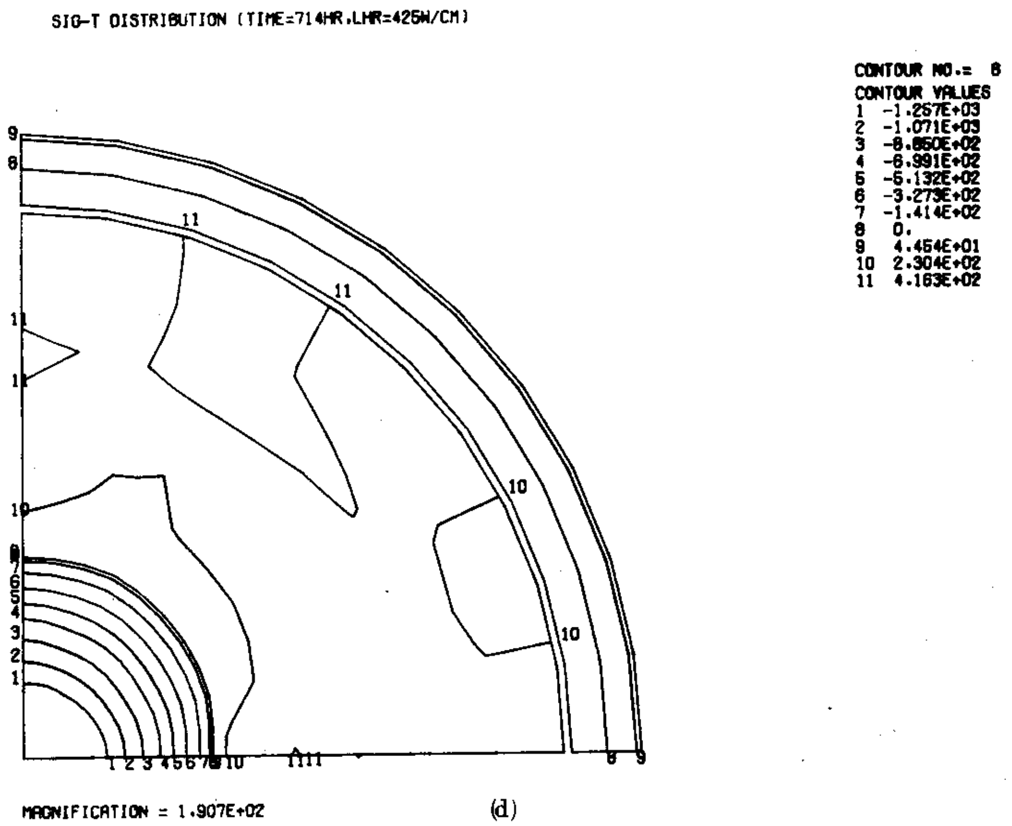


(b)

Fig. 4.8 Stress and strain distributions of pellet at 425 w/cm of linear heat rate.

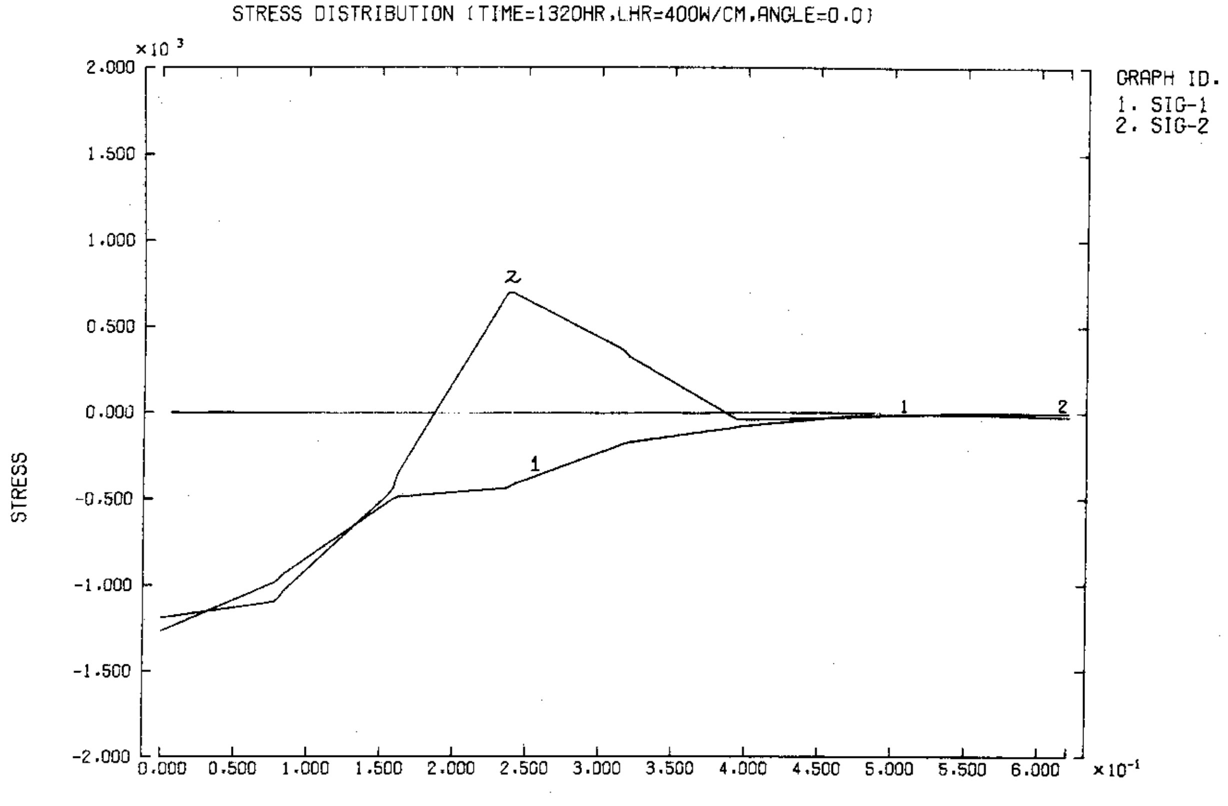


(c)

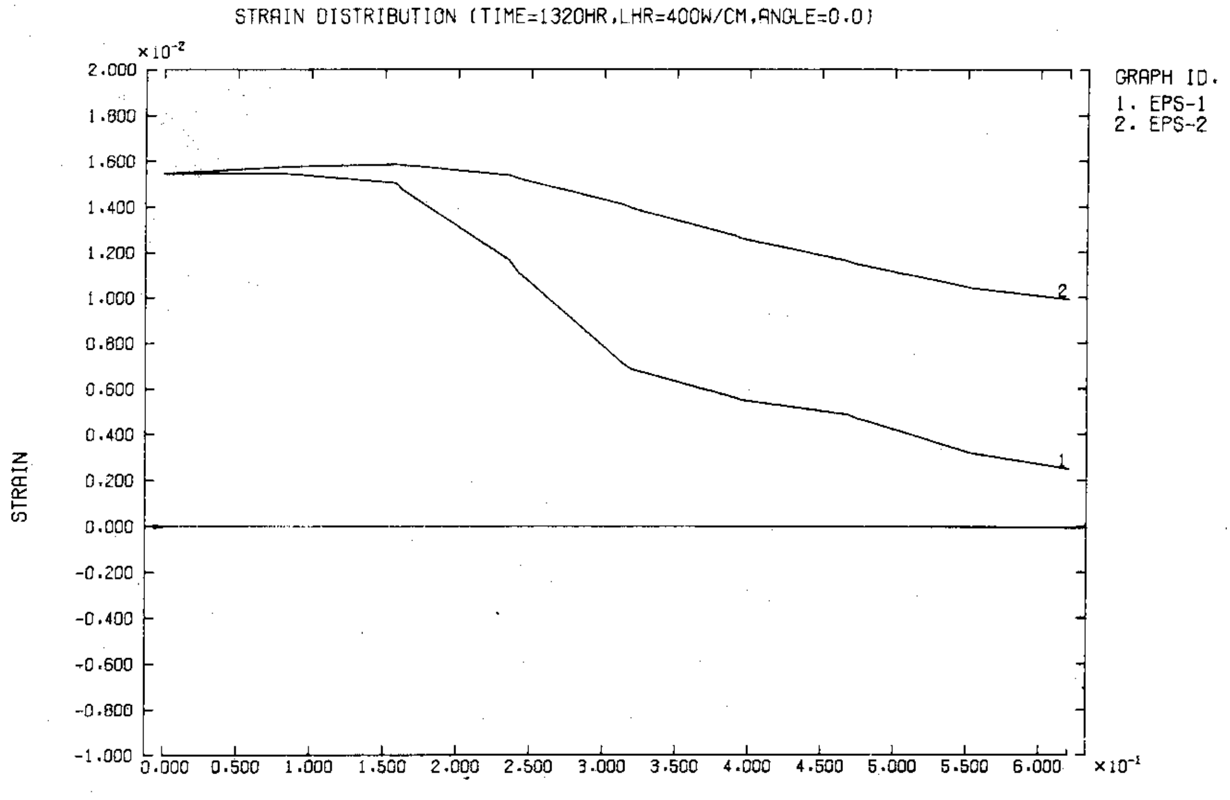


(d)

Fig. 4.8 Stress and strain distributions of pellet at 425 w/cm of linear heat rate.

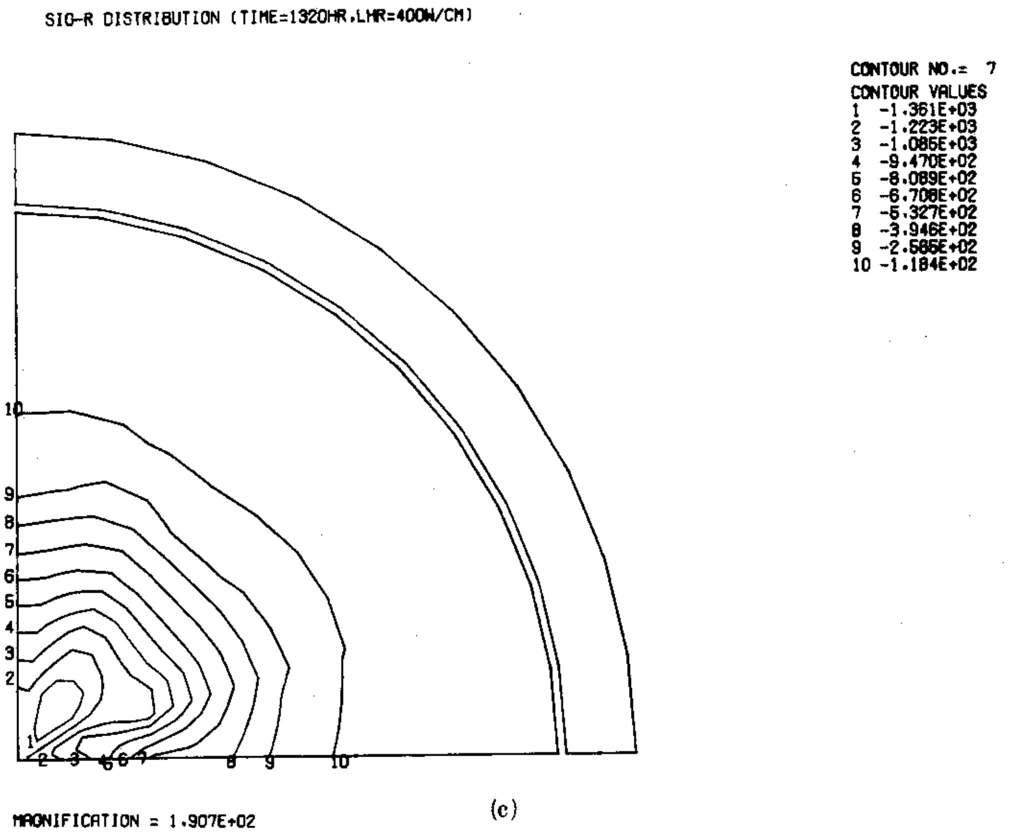


(a)

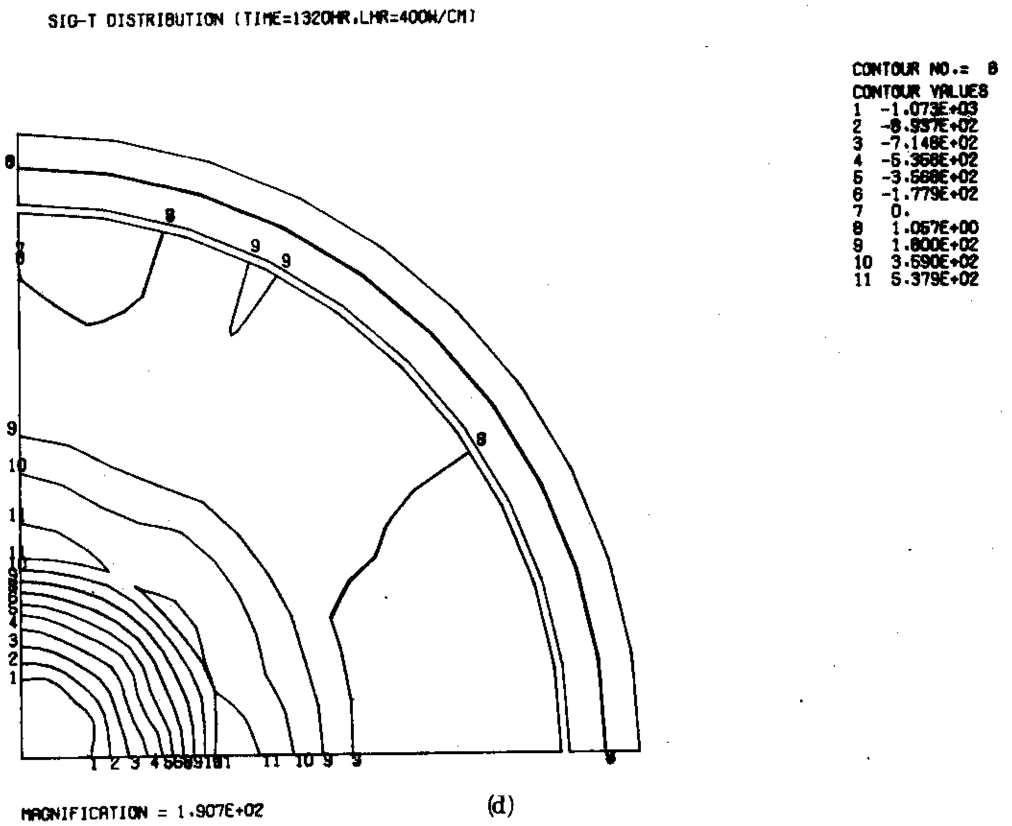


(b)

Fig. 4.9 Stress and strain distributions of pellet at 400 w/cm of linear heat rate.

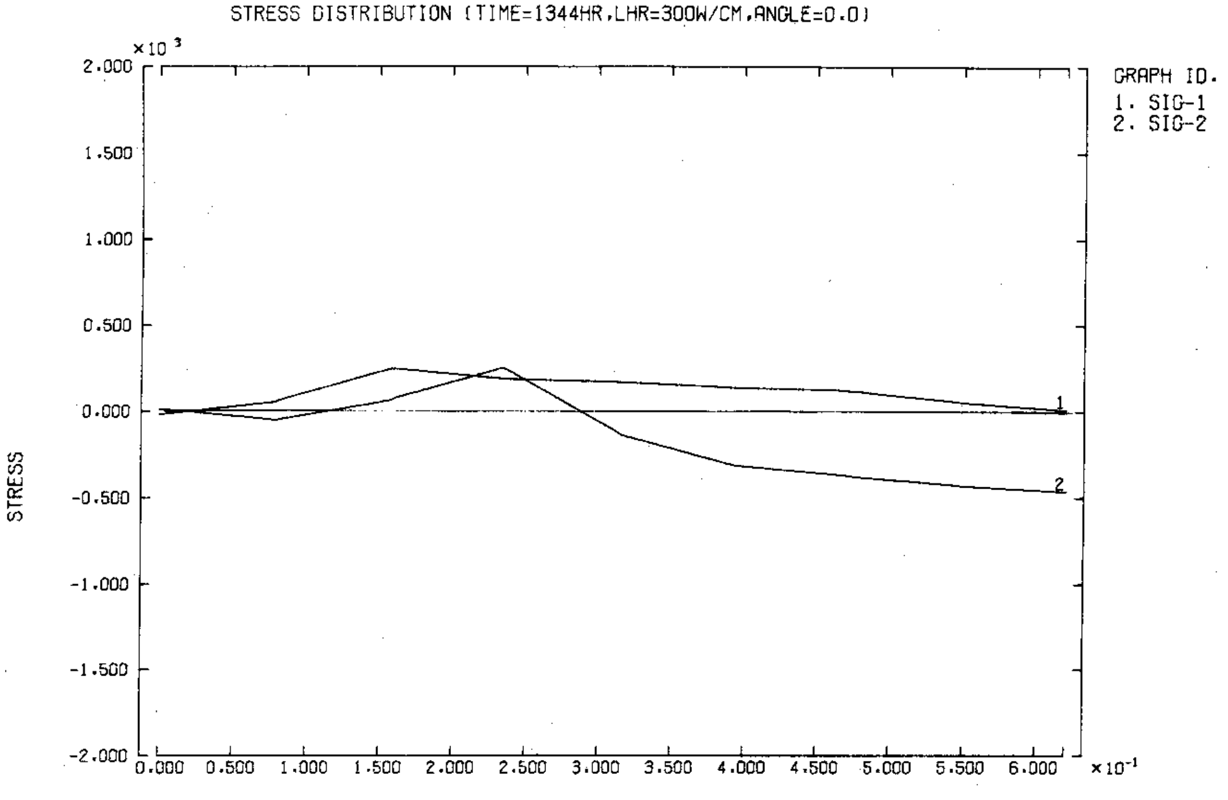


(c)

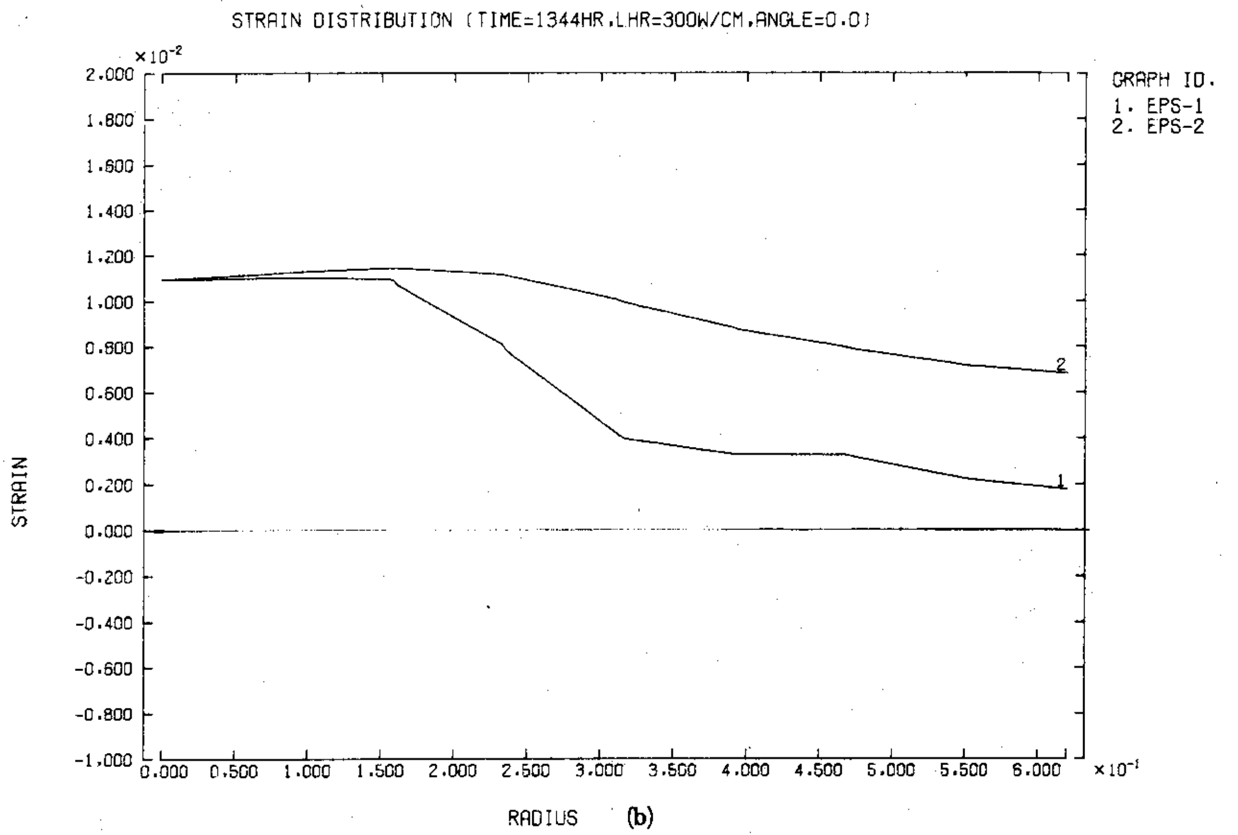


(d)

Fig. 4.9 Stress and strain distributions of pellet at 400 w/cm of linear heat rate.

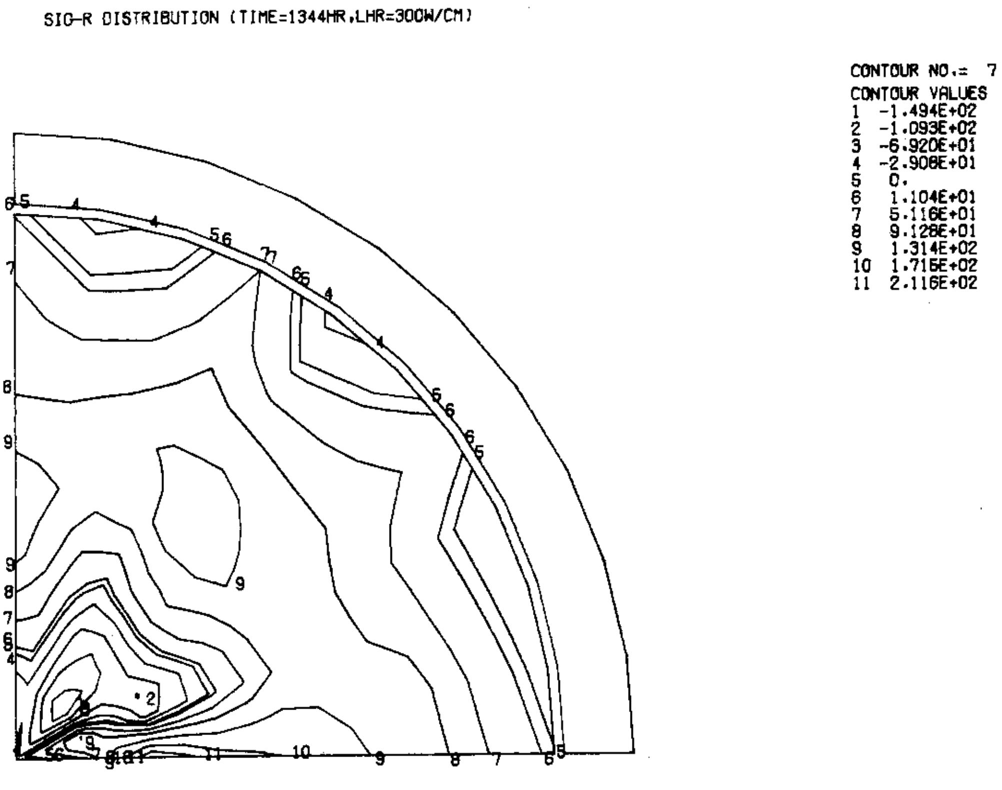


(a)

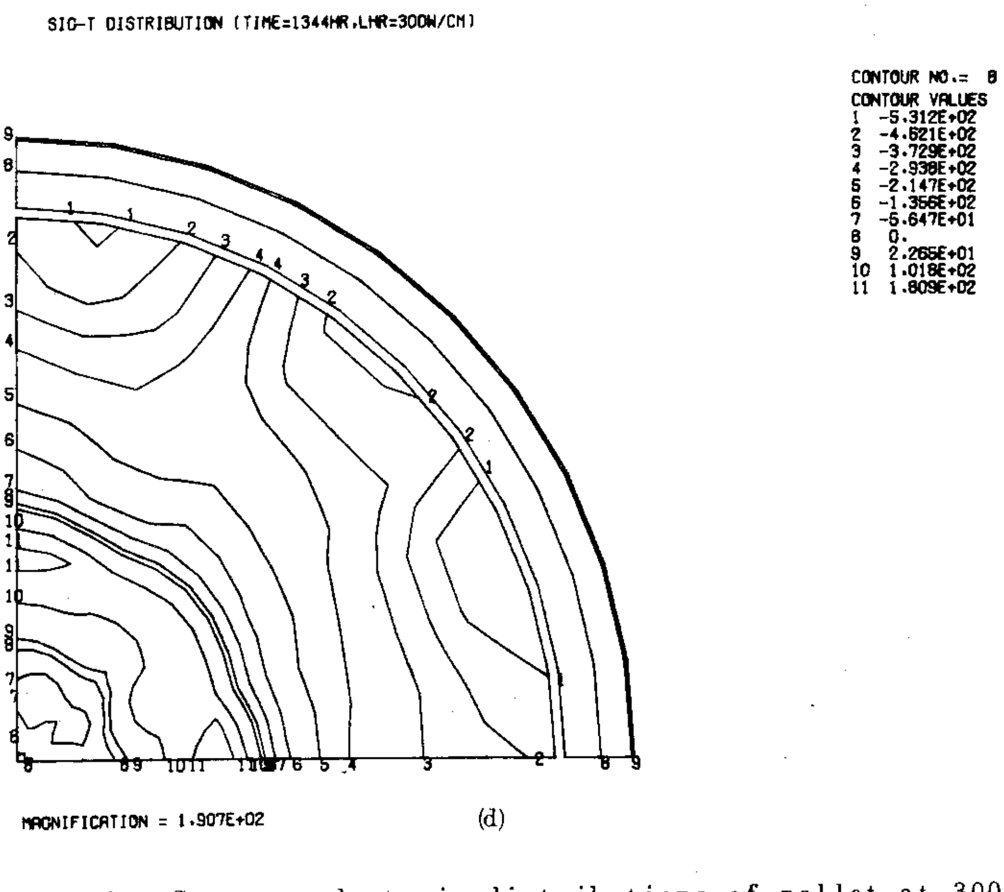


(b)

Fig. 4.10 Stress and strain distributions of pellet at 300 w/cm of linear heat rate.

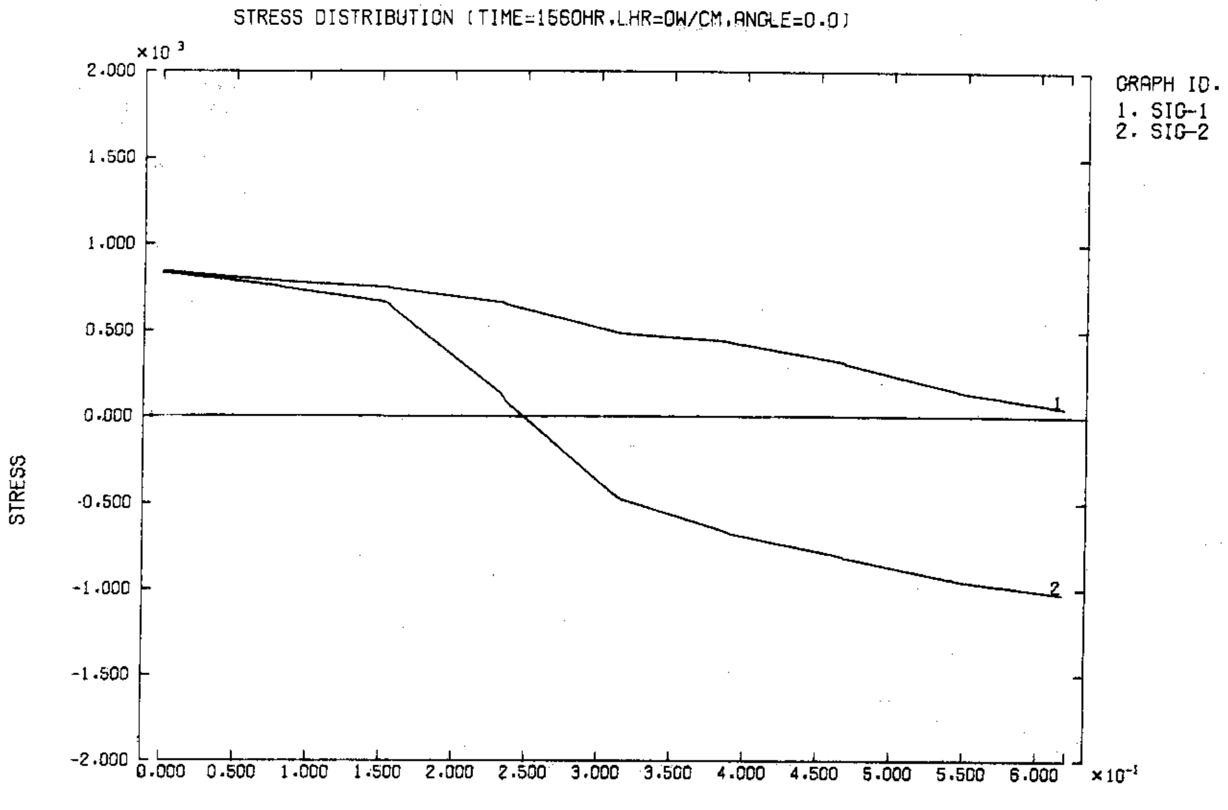


(c)

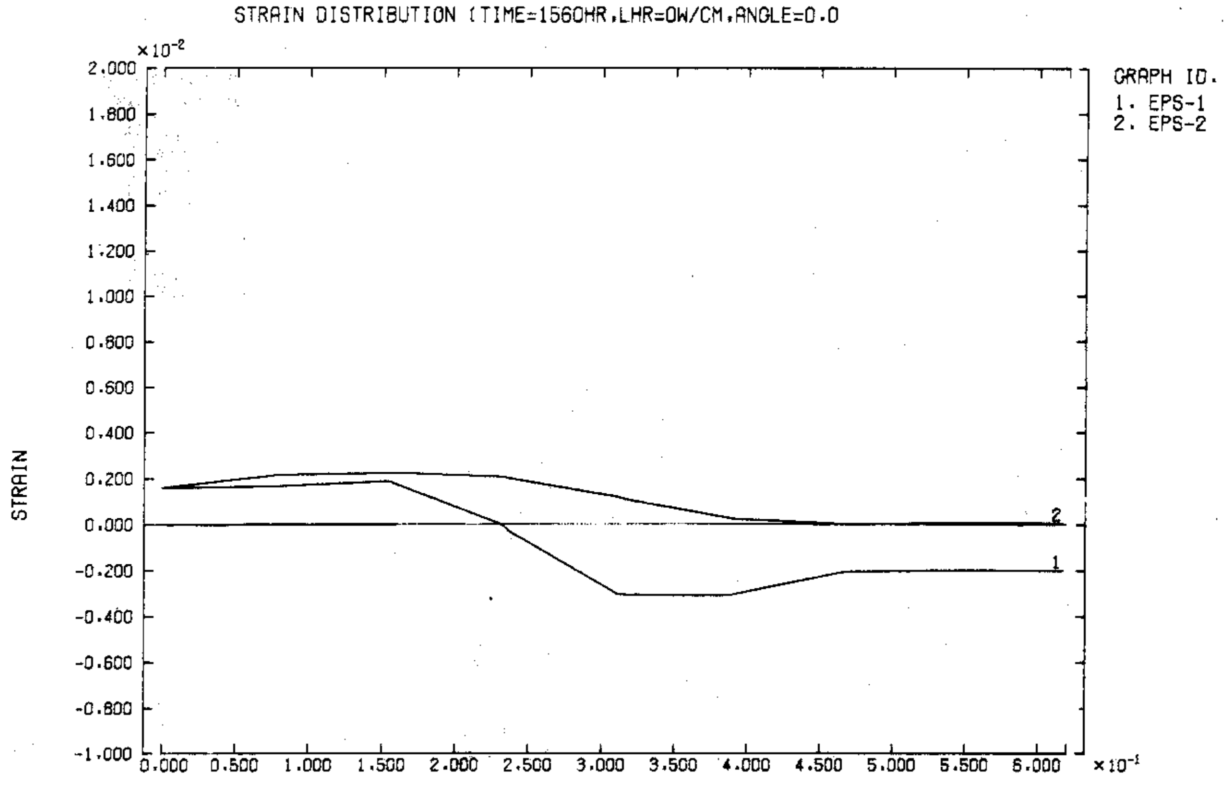


(d)

Fig. 4.10 Stress and strain distributions of pellet at 300 w/cm of linear heat rate.

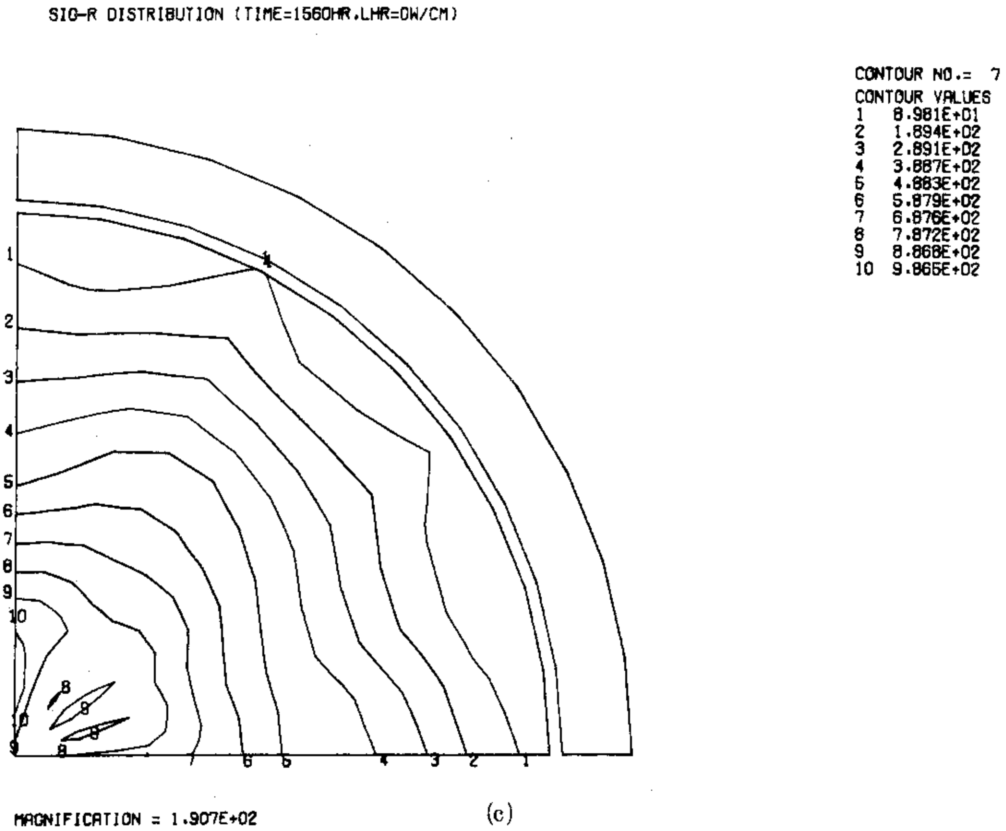


(a)

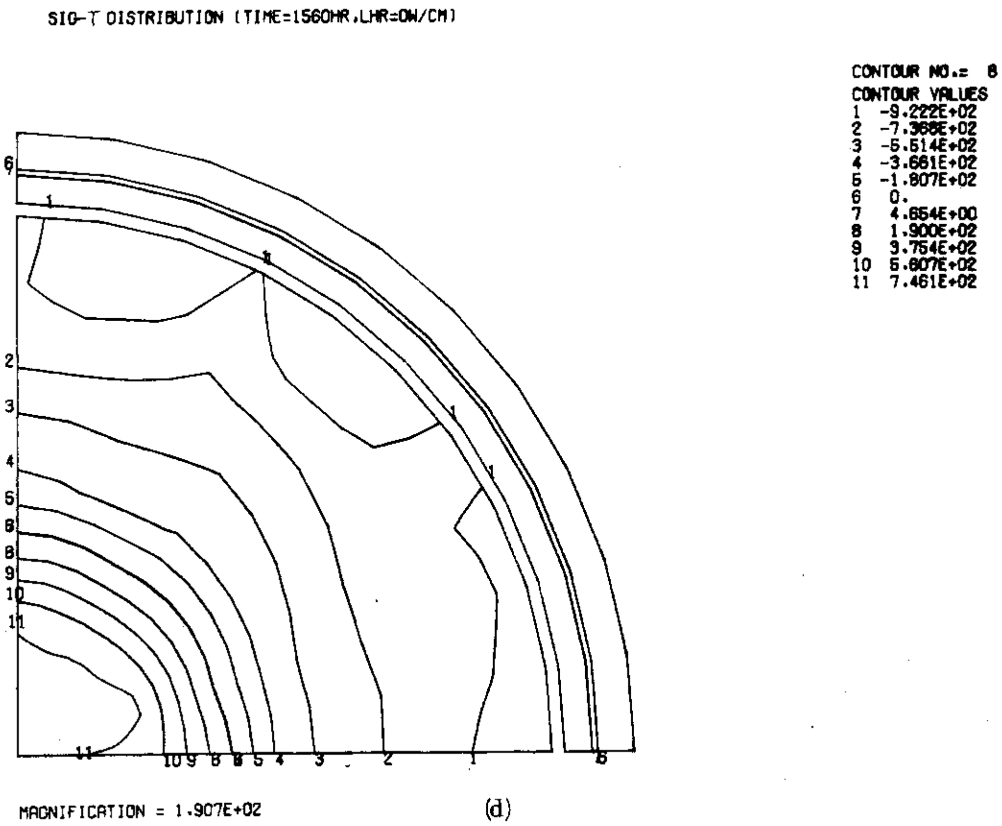


(b)

Fig. 4.11 Stress and strain distributions of pellet at 0 w/cm of linear heat rate.



(c)



(d)

Fig. 4.11 Stress and strain distributions of pellet at 0 w/cm of linear heat rate.

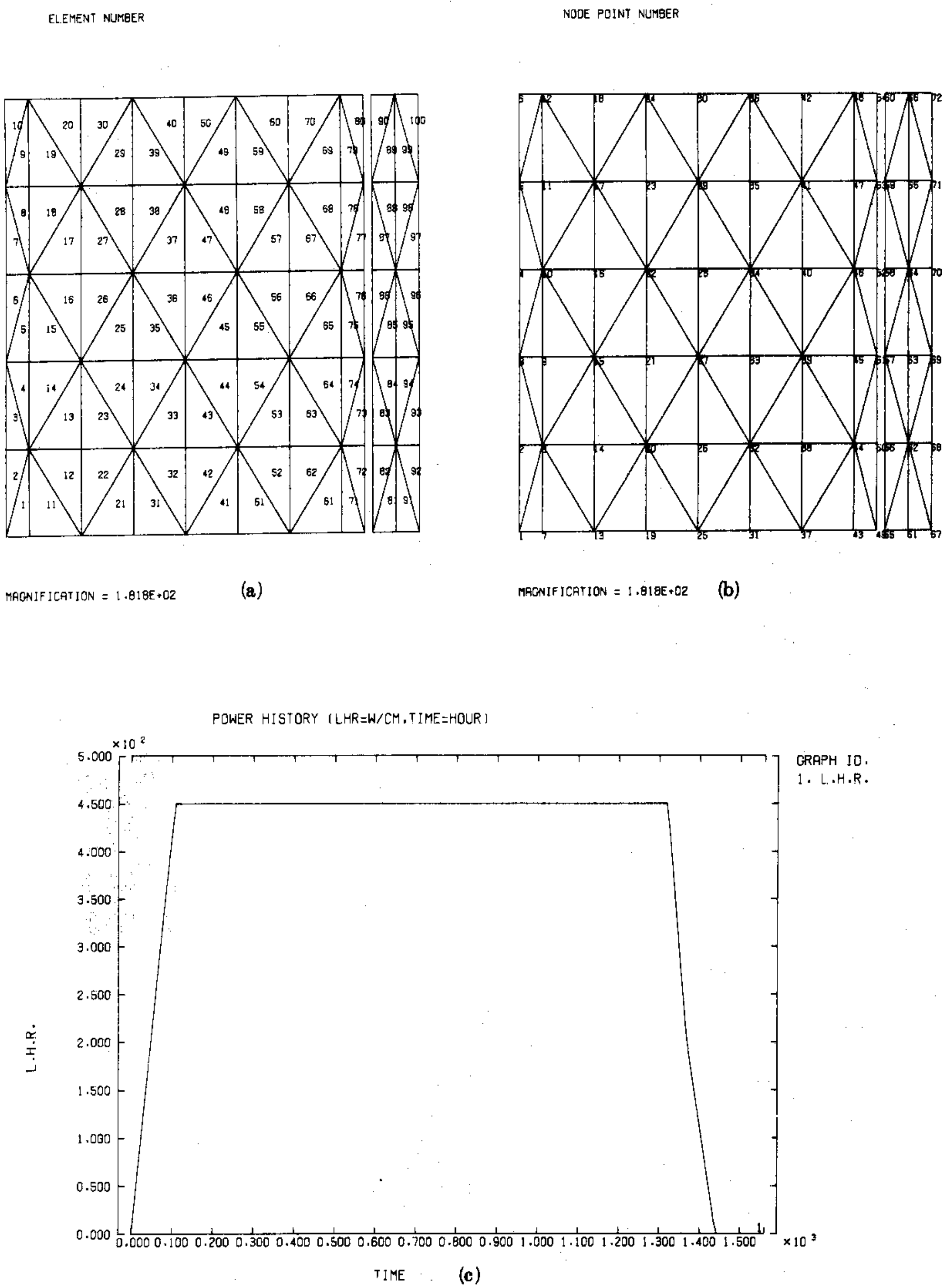
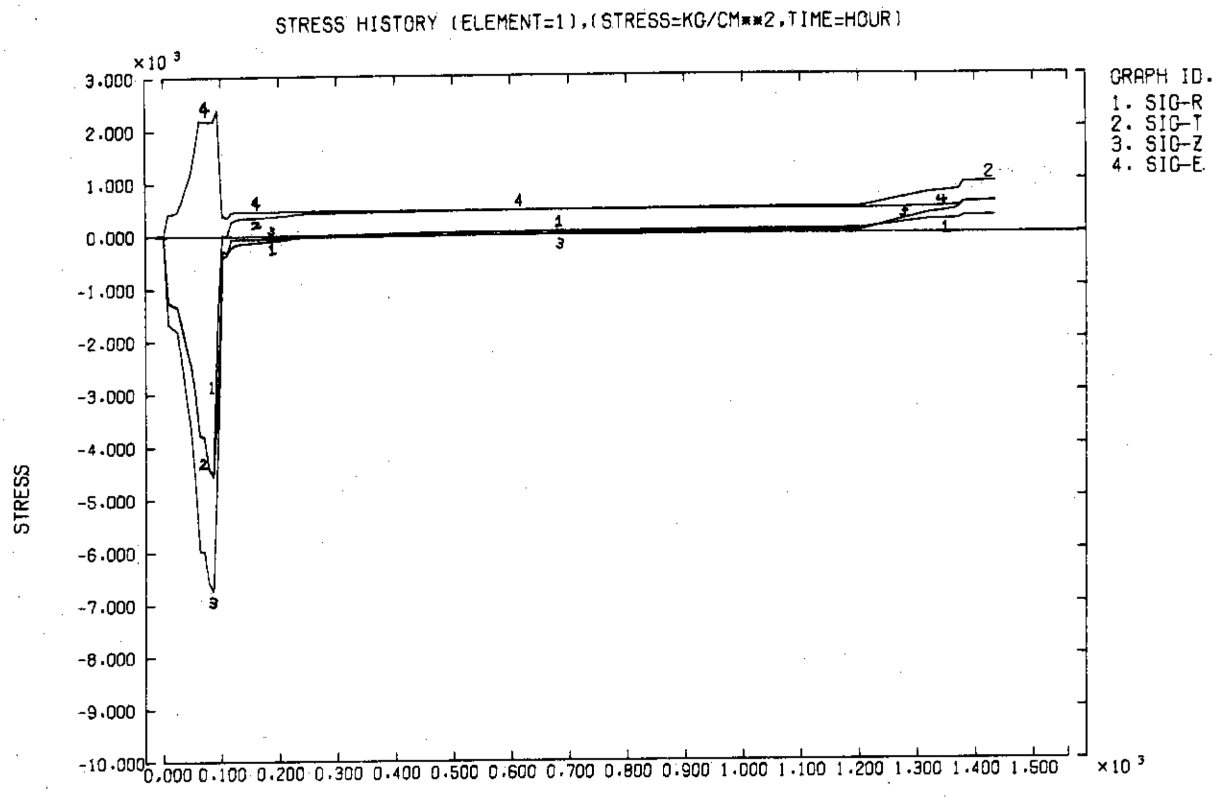
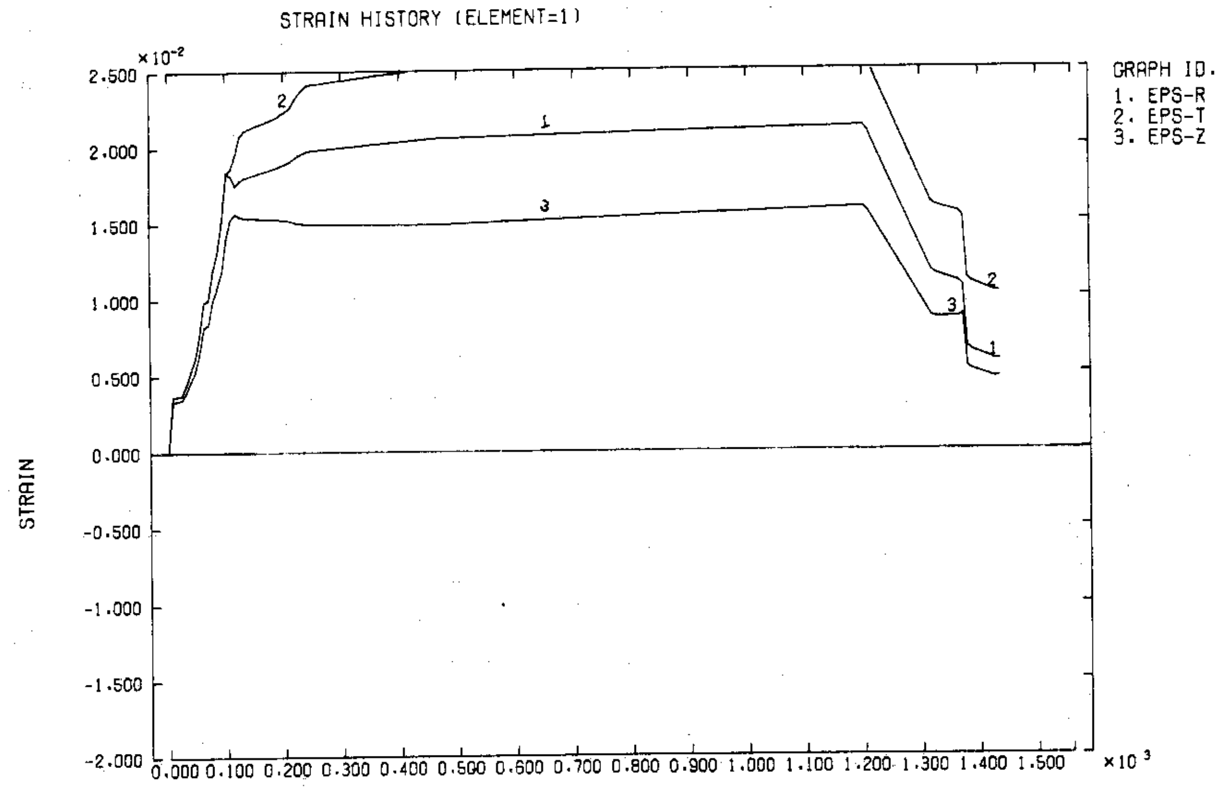


Fig. 4.12 Two dimensional axially symmetric model (FEMF3) :
a) Figure of element numbers, b) figure of nodal points,
c) power history (w/cm).
(Figs 4.12~4.21 show the results calculated by FEMF3)

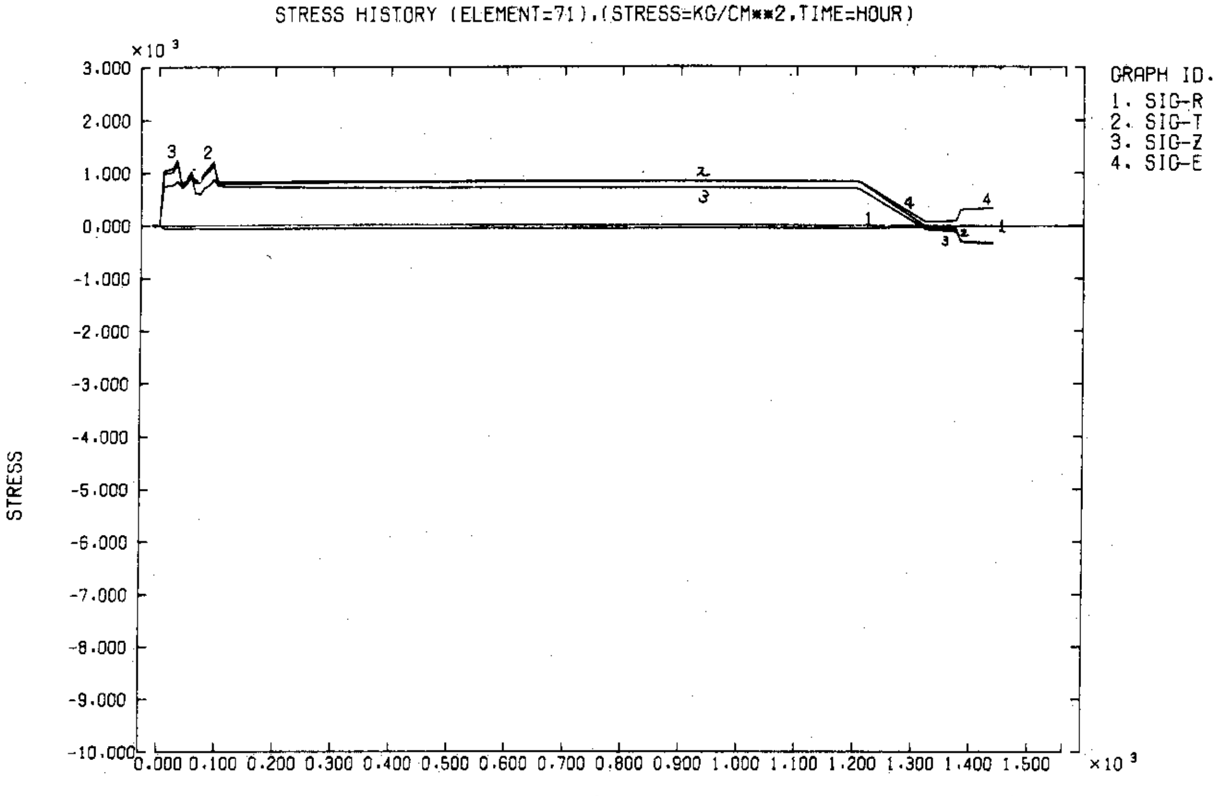


(a)

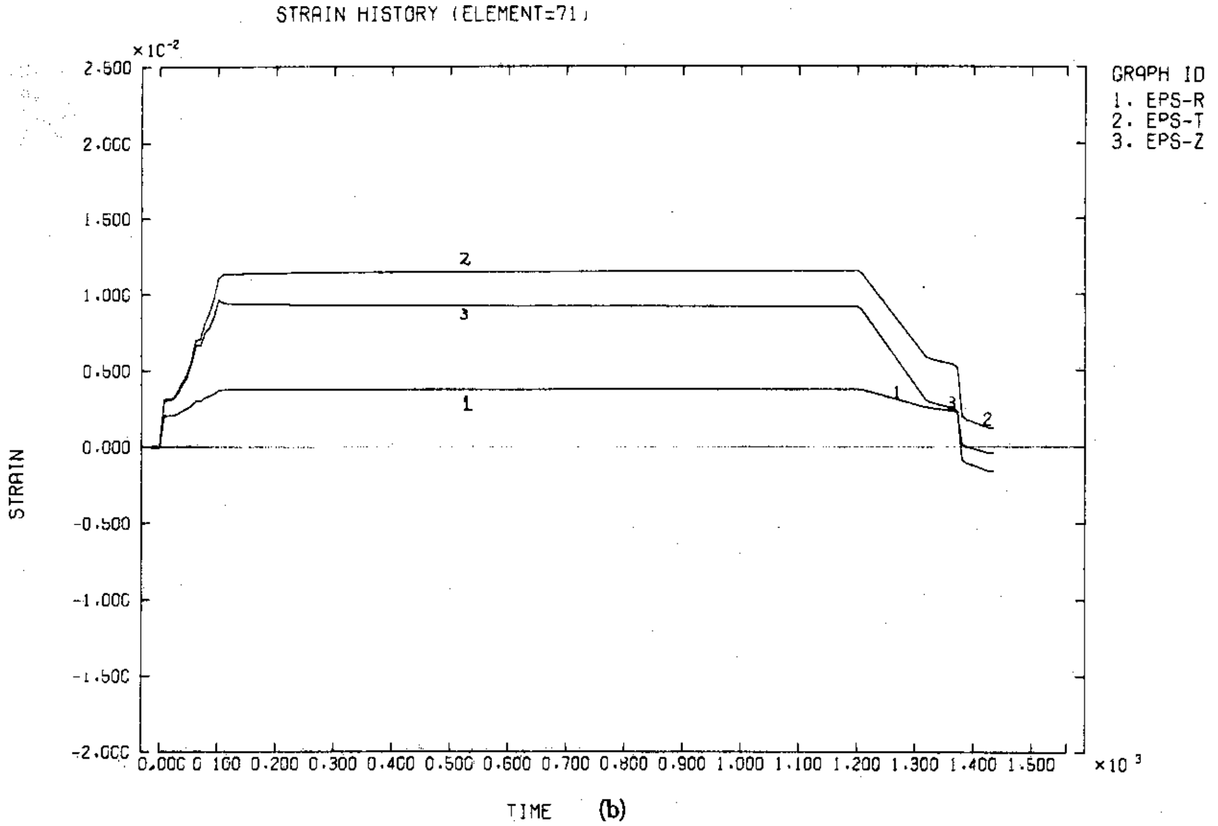


(b)

Fig. 4.13 a) Stress history and b) strain history at the element 1 which is located at the center of pellet.

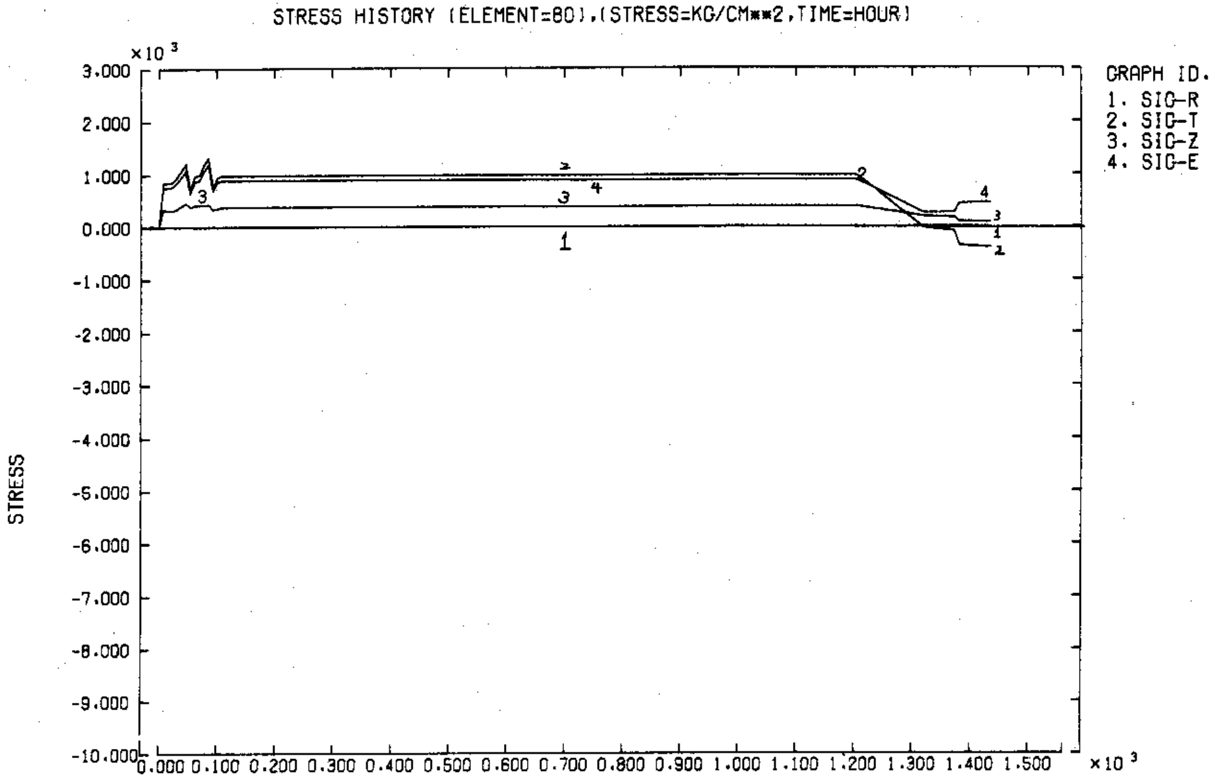


(a)

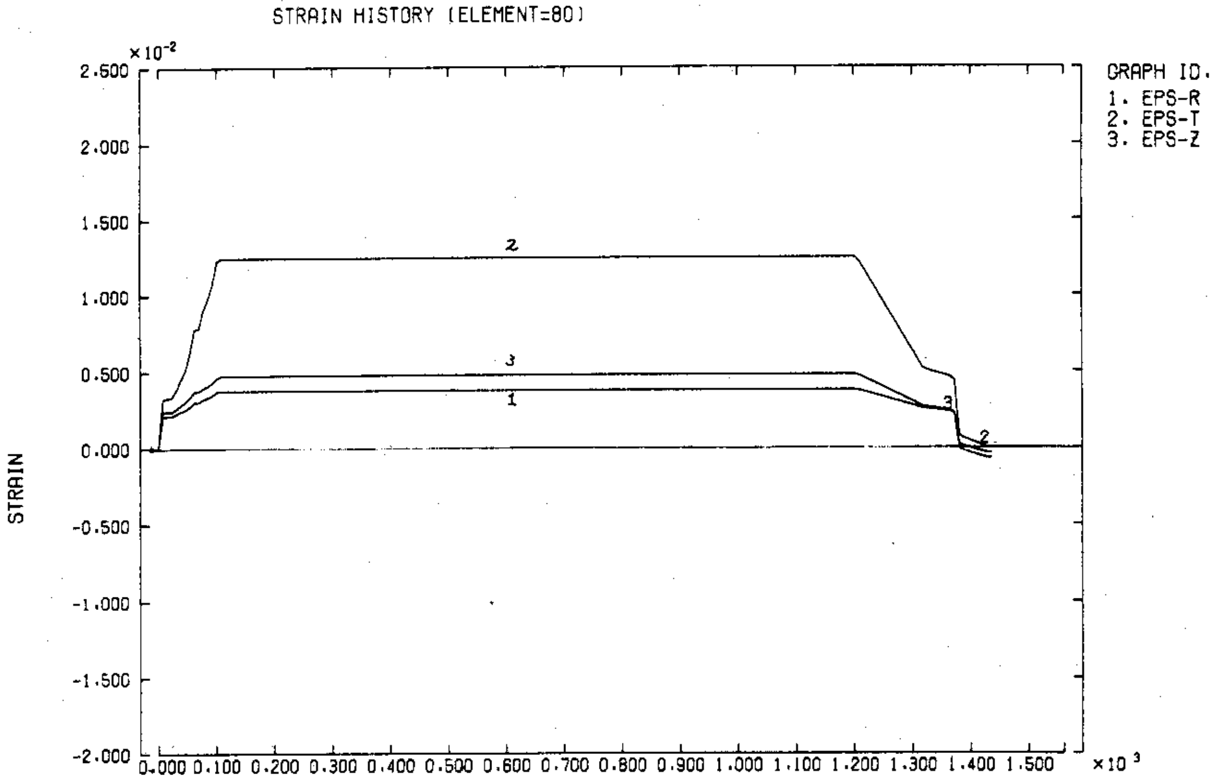


(b)

Fig. 4.14 a) Stress histony and b) strain histoy at the element 71 which is located at the circumference in z=0.



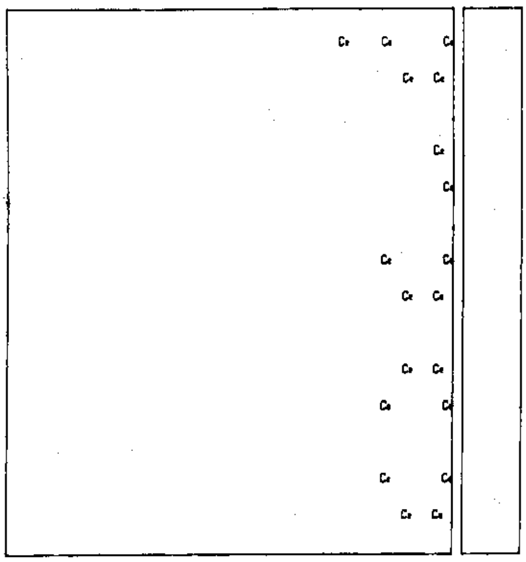
(a)



(b)

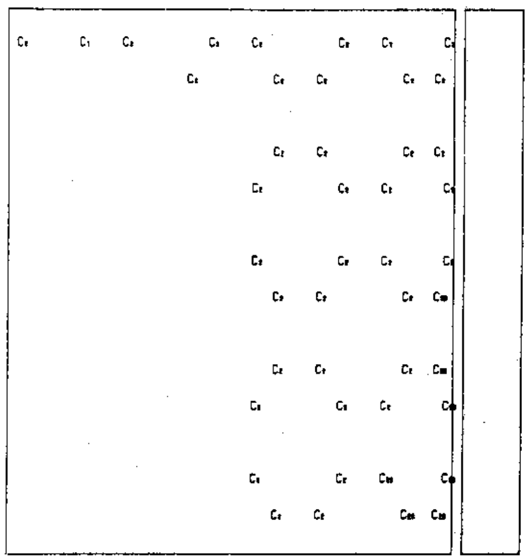
Fig. 4.15 a) Stress history and b) strain history at the elemeut 80 which is located at the edge of pellet.

PELLET STATE (TIME=24HR,LHR=100W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



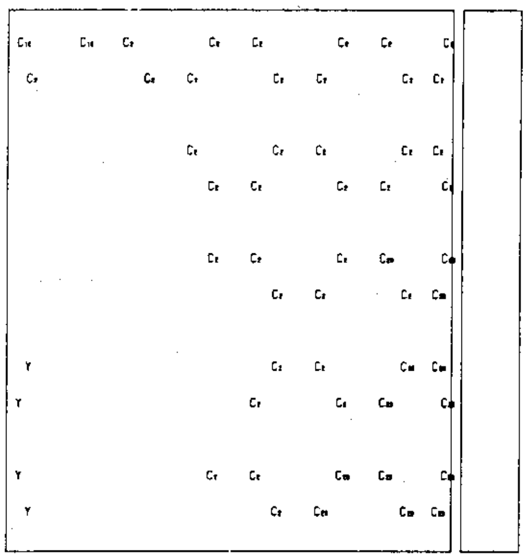
MAGNIFICATION = 1.818E+02 (a)

PELLET STATE (TIME=48HR,LHR=200W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (b)

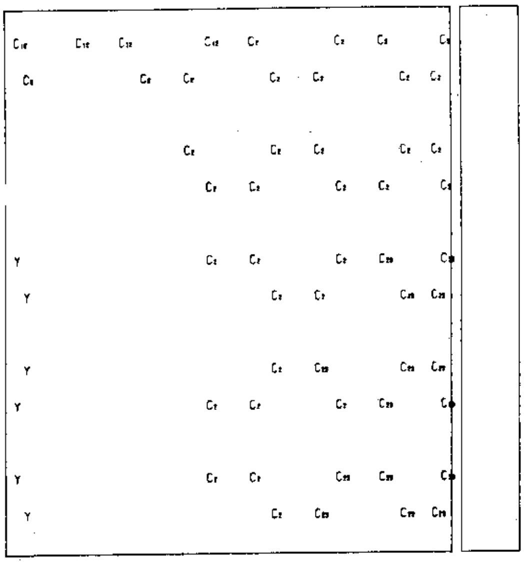
PELLET STATE (TIME=72HR,LHR=300W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (c)

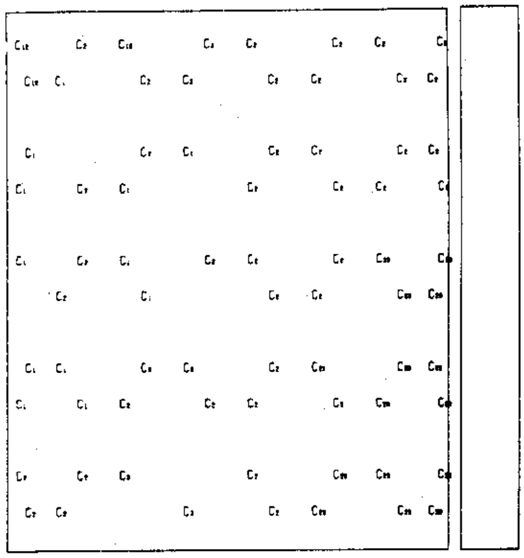
Fig. 4.16 Crack and plasticity areas of pellet at linear heat rate: a) 100w/cm, b) 200w/cm, c) 300w/cm,

PELLET STATE (TIME=96HR,LHR=400W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



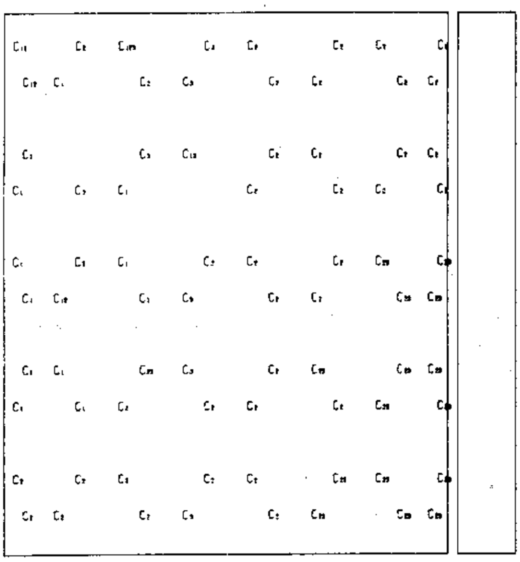
MAGNIFICATION = 1.818E+02 (d)

PELLET STATE (TIME=1320HR,LHR=450W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (e)

PELLET STATE (TIME=1440HR,LHR=0.0W/CM),(Y=YIELD,C=CRACK)



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (f)

Fig. 4.16 d) 400w/cm, e) 450w/cm, f) 0w/cm.
(C_1, C_2, C_3 and Y denote circumferential, radial, axial cracks and plasticity area, respectively.)

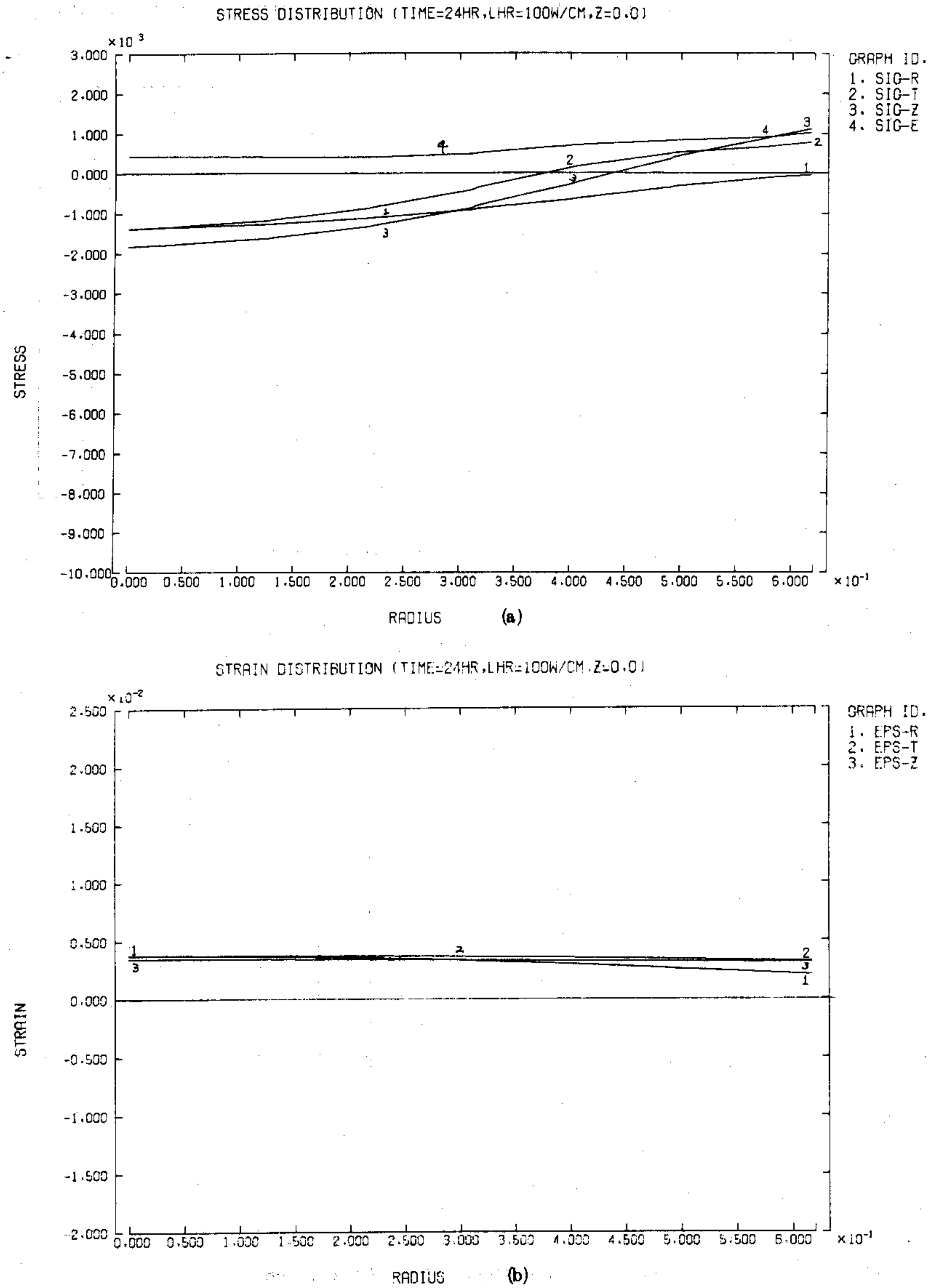
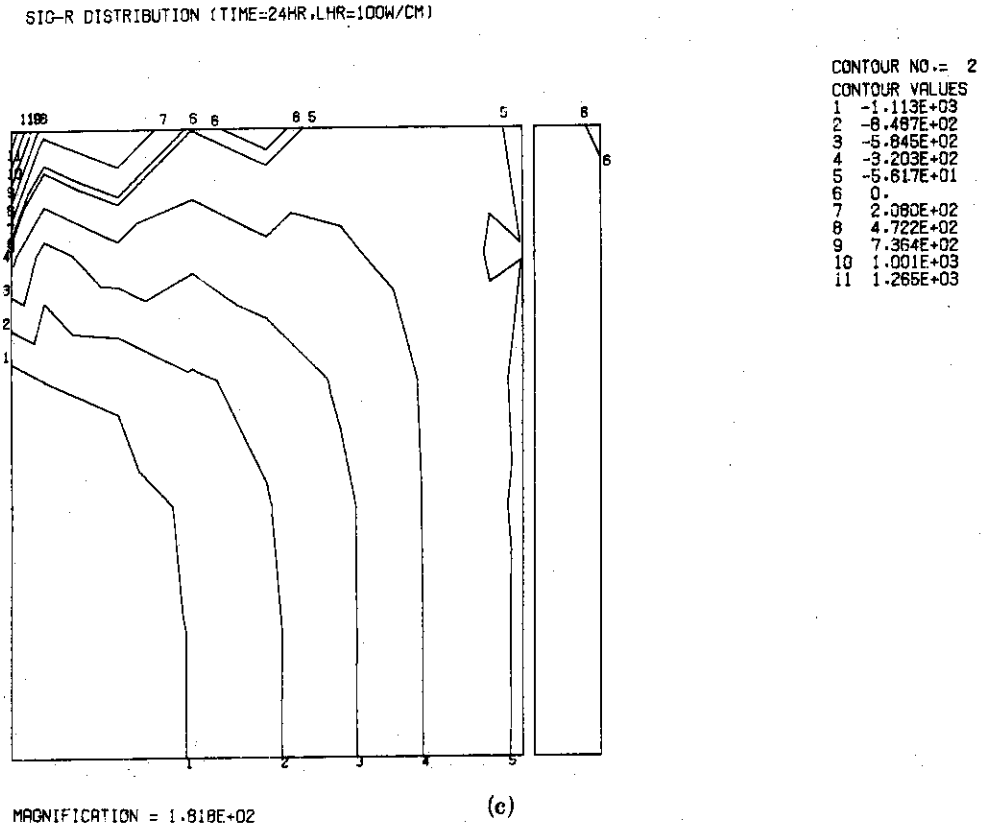
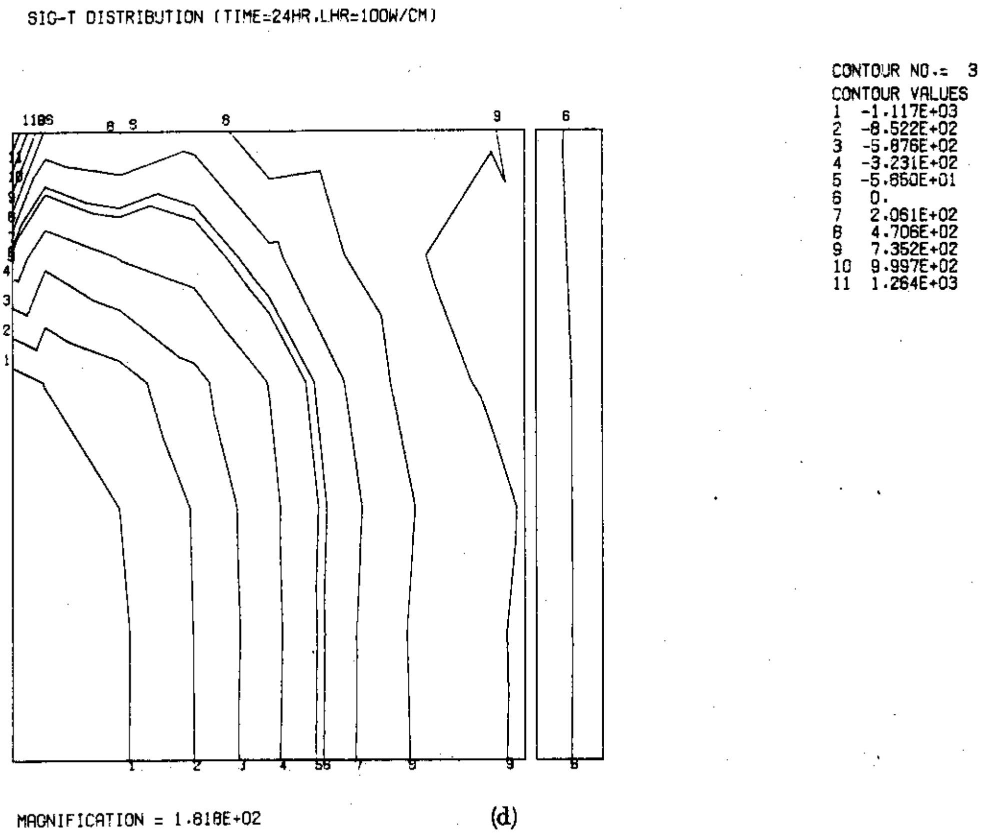


Fig. 4.17 Stress and strain distributions of pellet at 100w/cm of linear heat rate : a) the radial stress distribution at z=0.0 (kg/cm^2), b) the radial strain distribution at z=0.0.

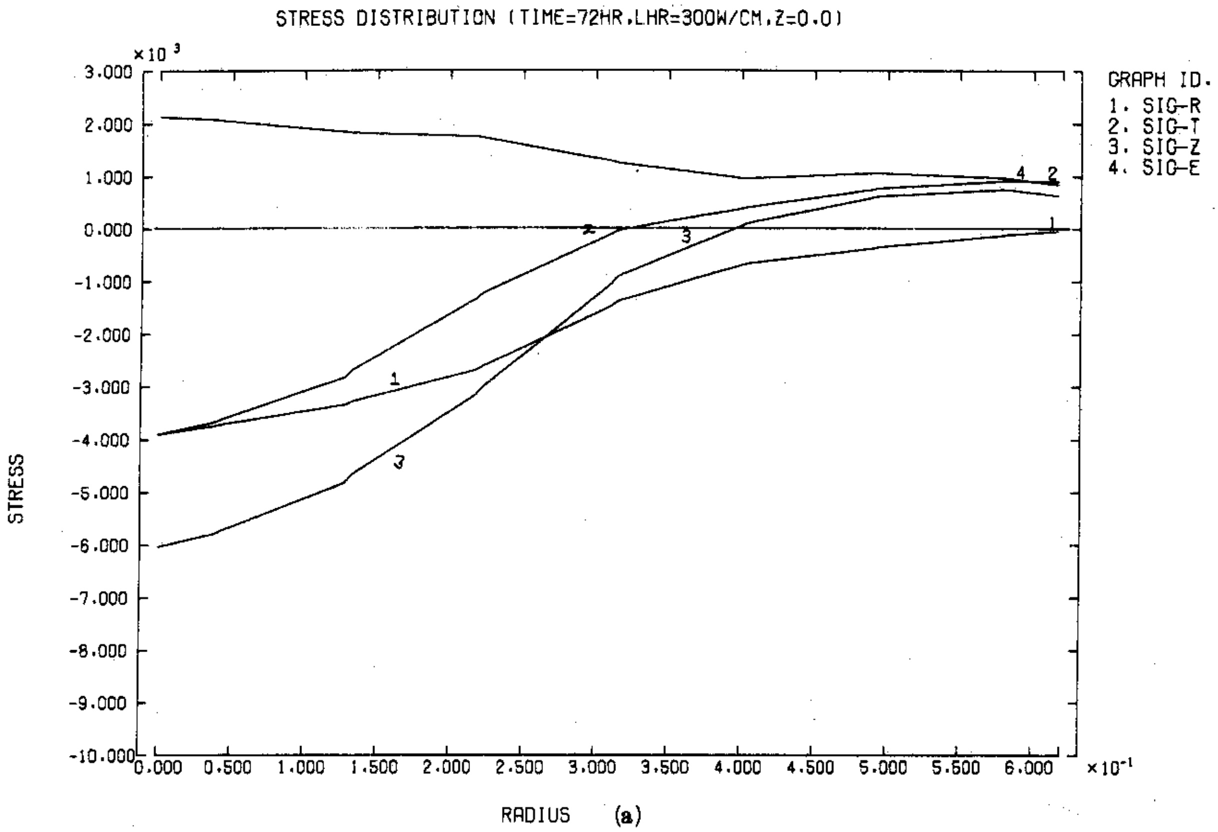


(c)

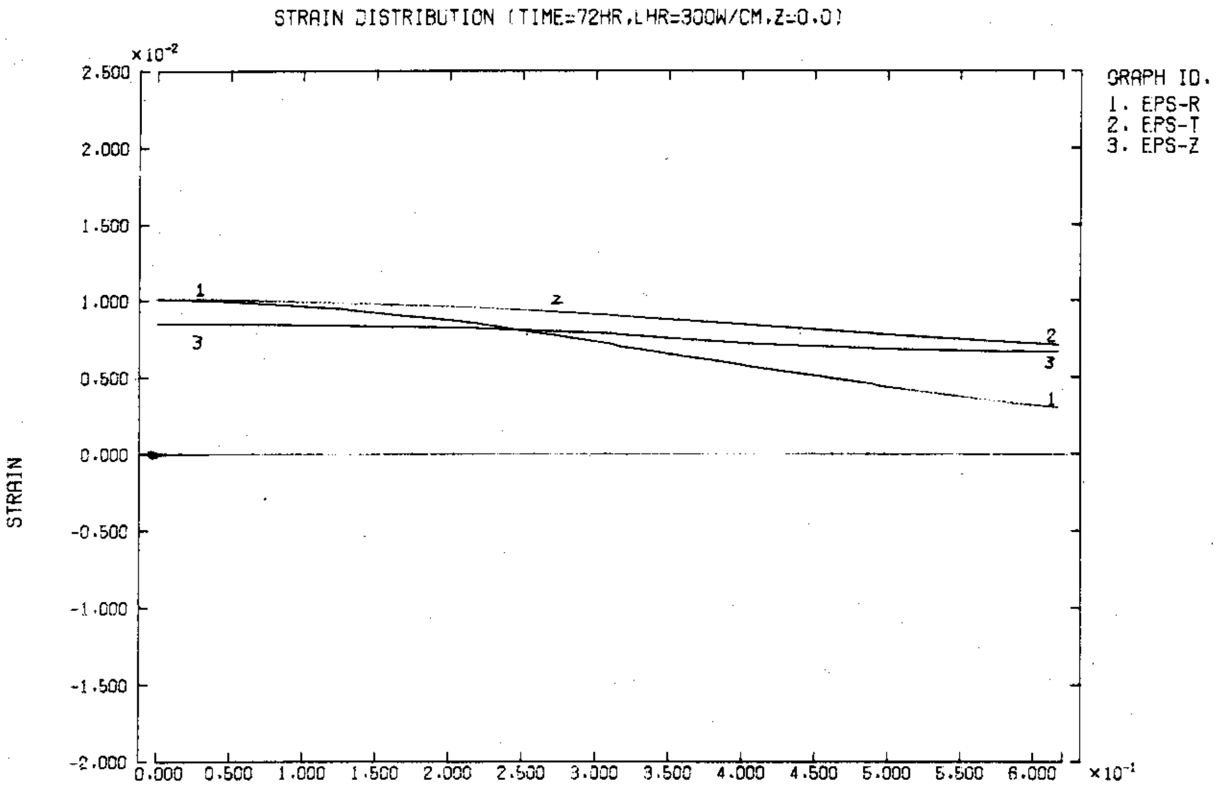


(d)

Fig. 4.17 c) the radial stress contour map (kg/cm^2),
d) the tangential stress contour map (kg/cm^2).
(The items a),b),c) and d) in figs 4.18~4.21 are the same as those in fig. 4.17)

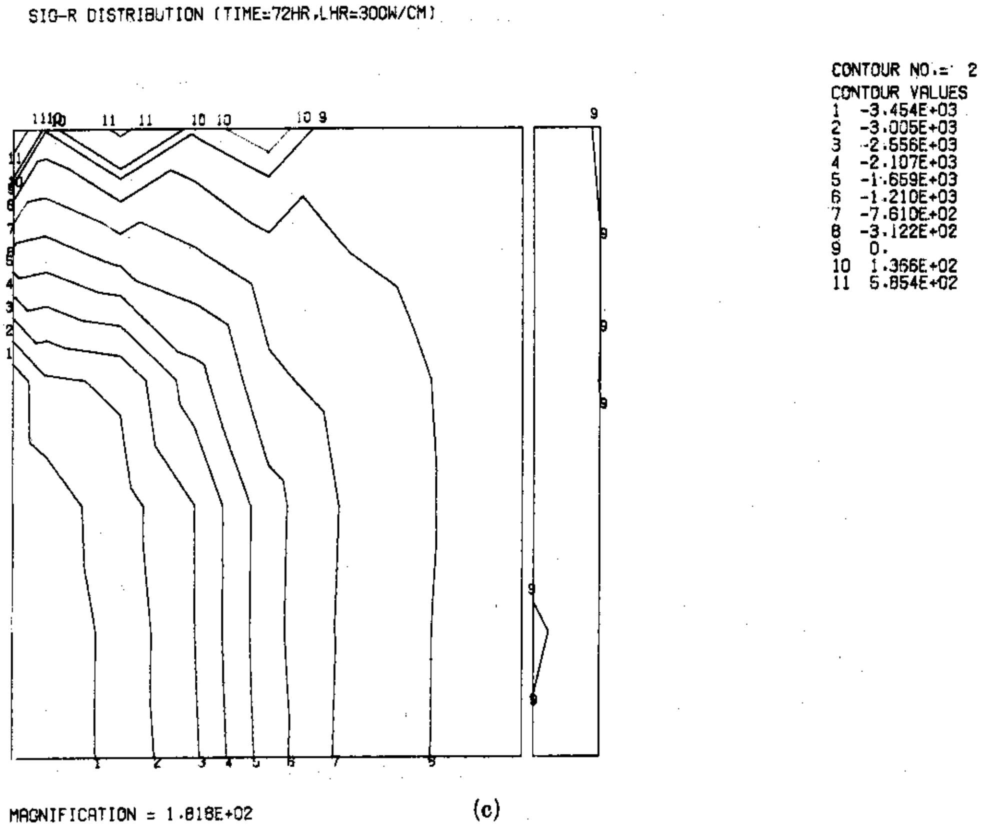


(a)

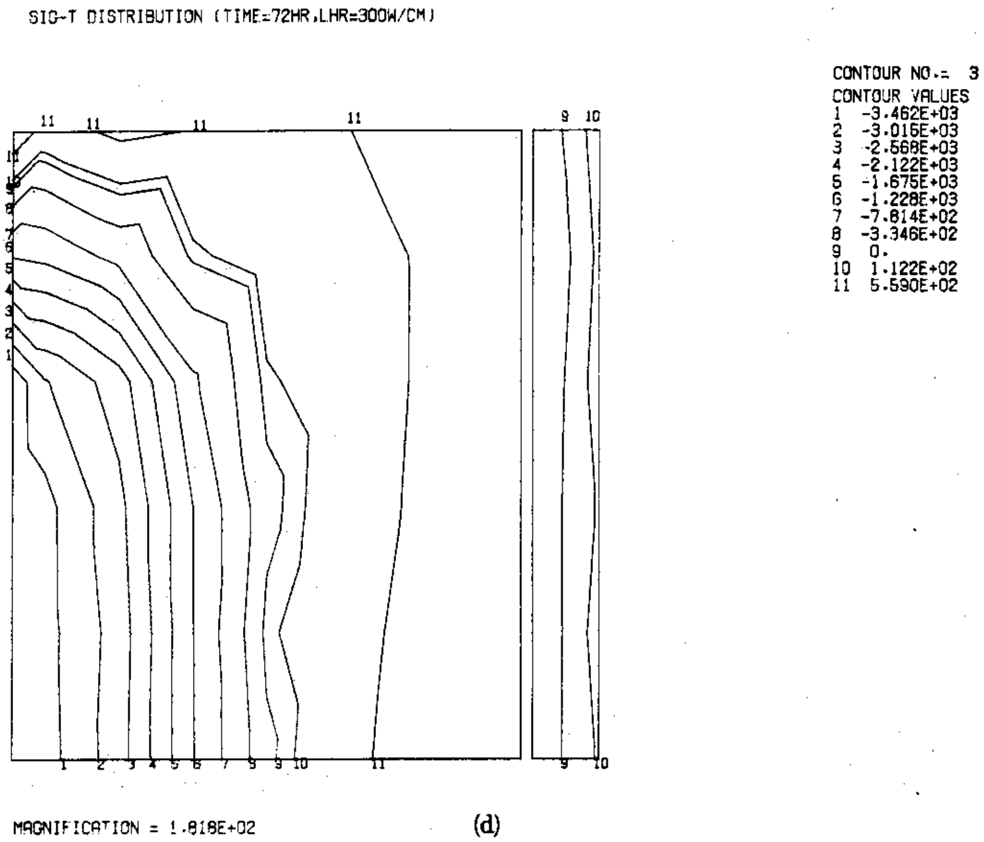


(b)

Fig. 4.18 Stress and strain distributions of pellet at 300w/cm of linear heat rate.

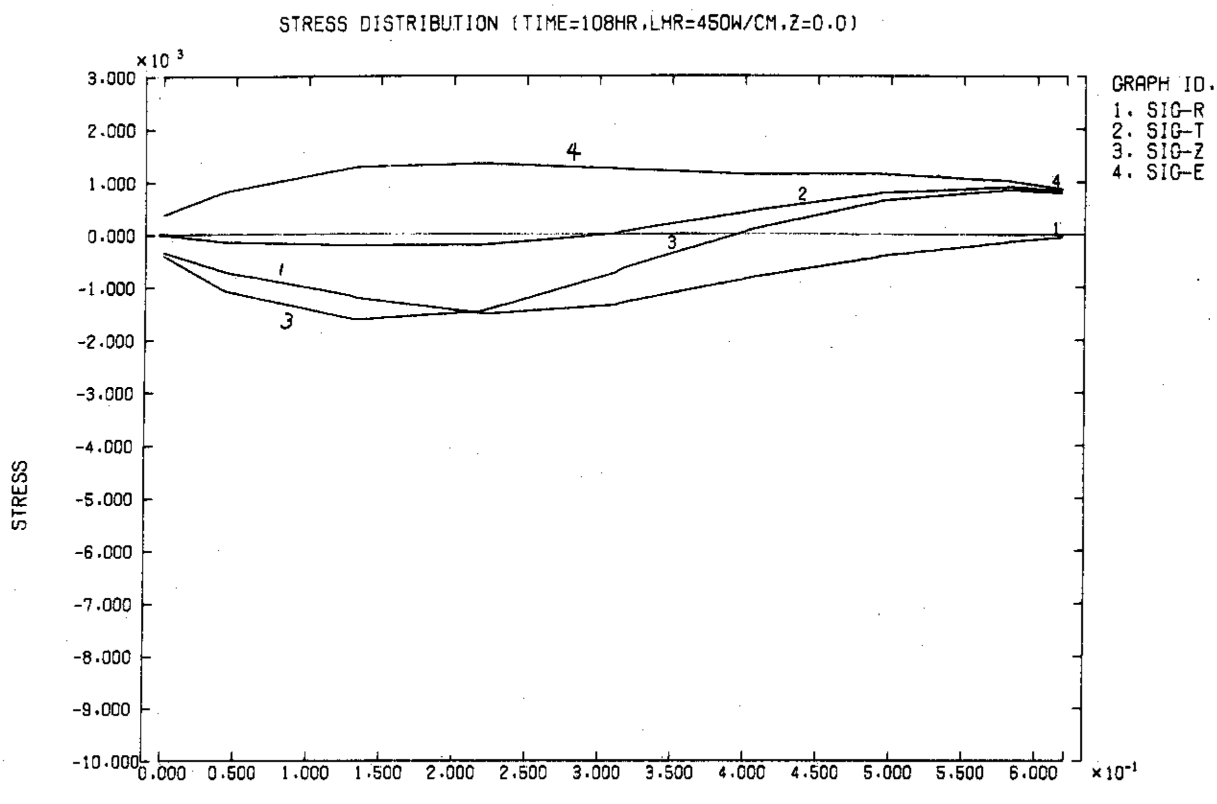


(c)

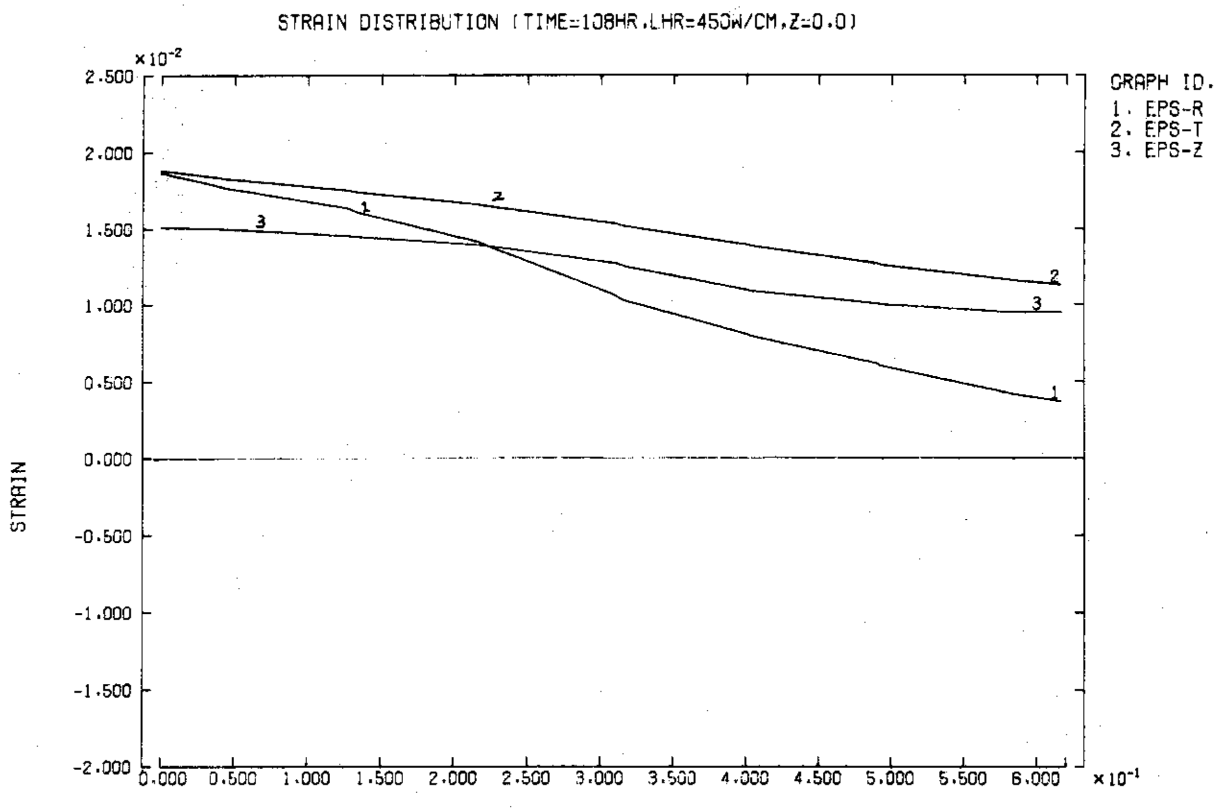


(d)

Fig. 4.18 Stress and strain distributions of pellet at 300w/cm of linear heat rate.

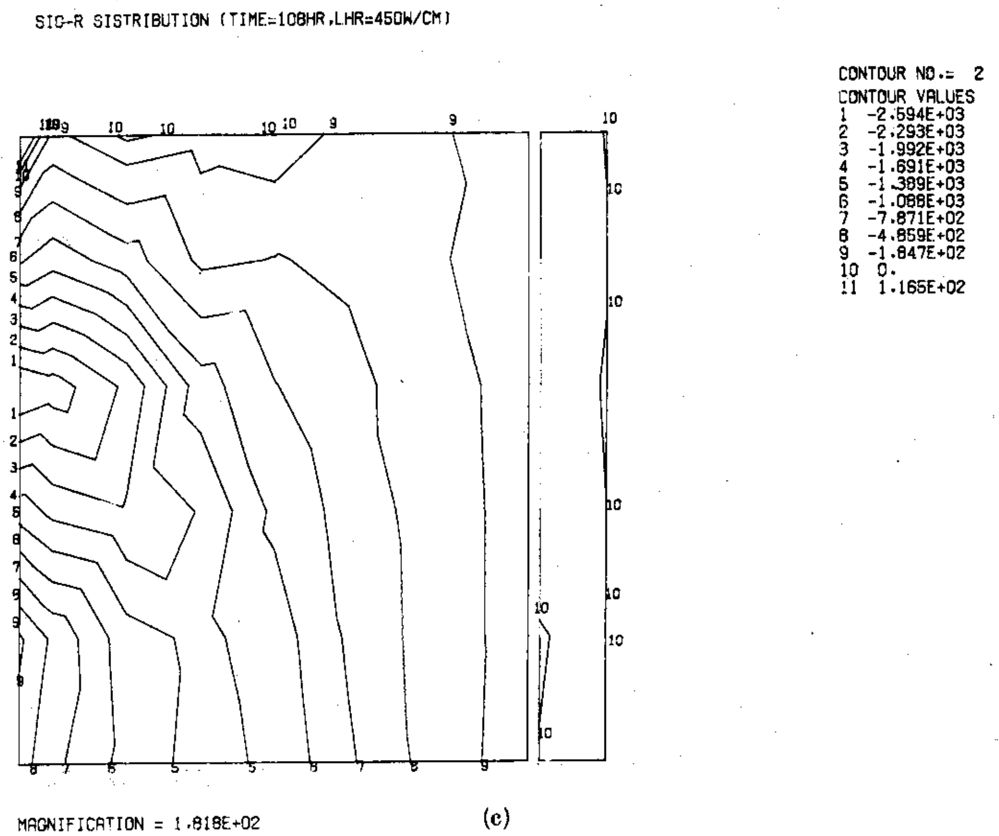


(a)

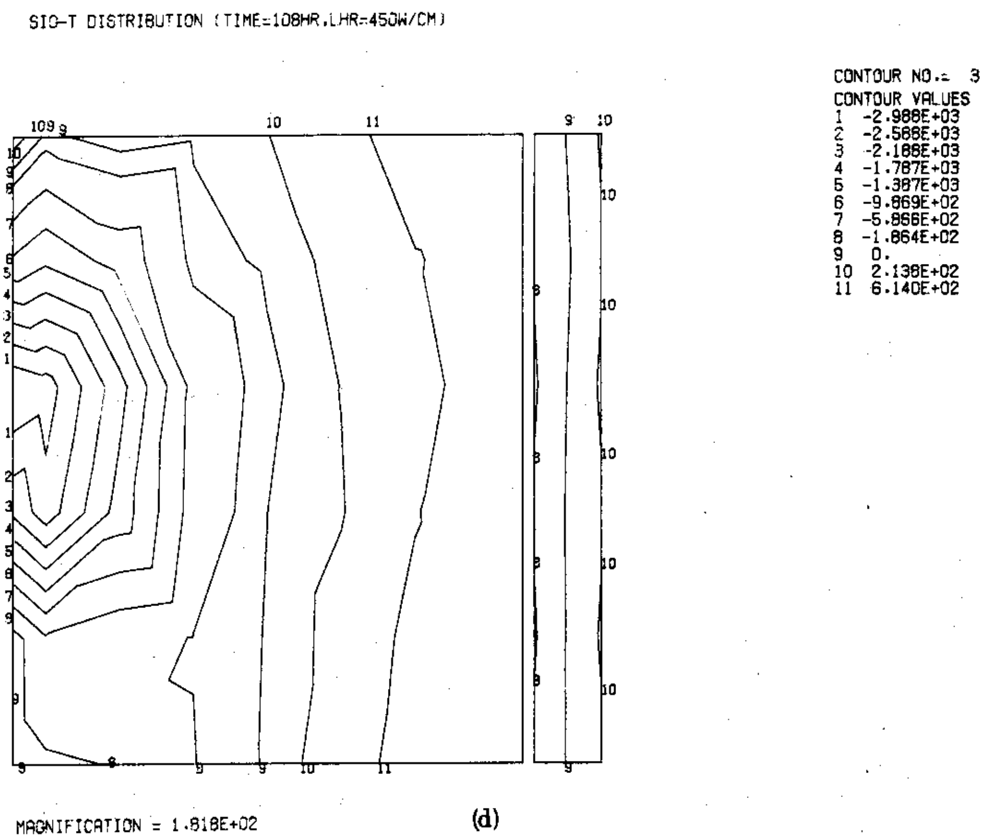


(b)

Fig. 4.19 Stress and strain distributions of pellet at 450w/cm (after 108 hours from the start up) of linear heat rate.

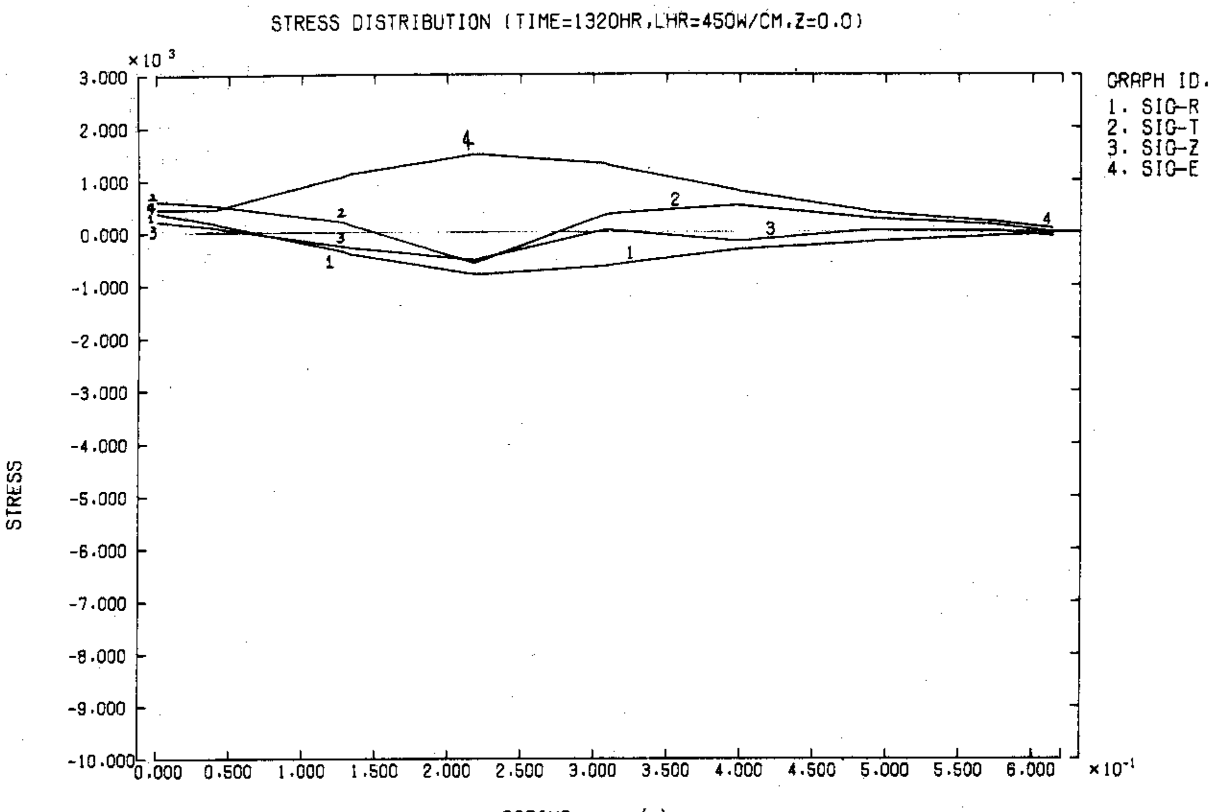


(c)

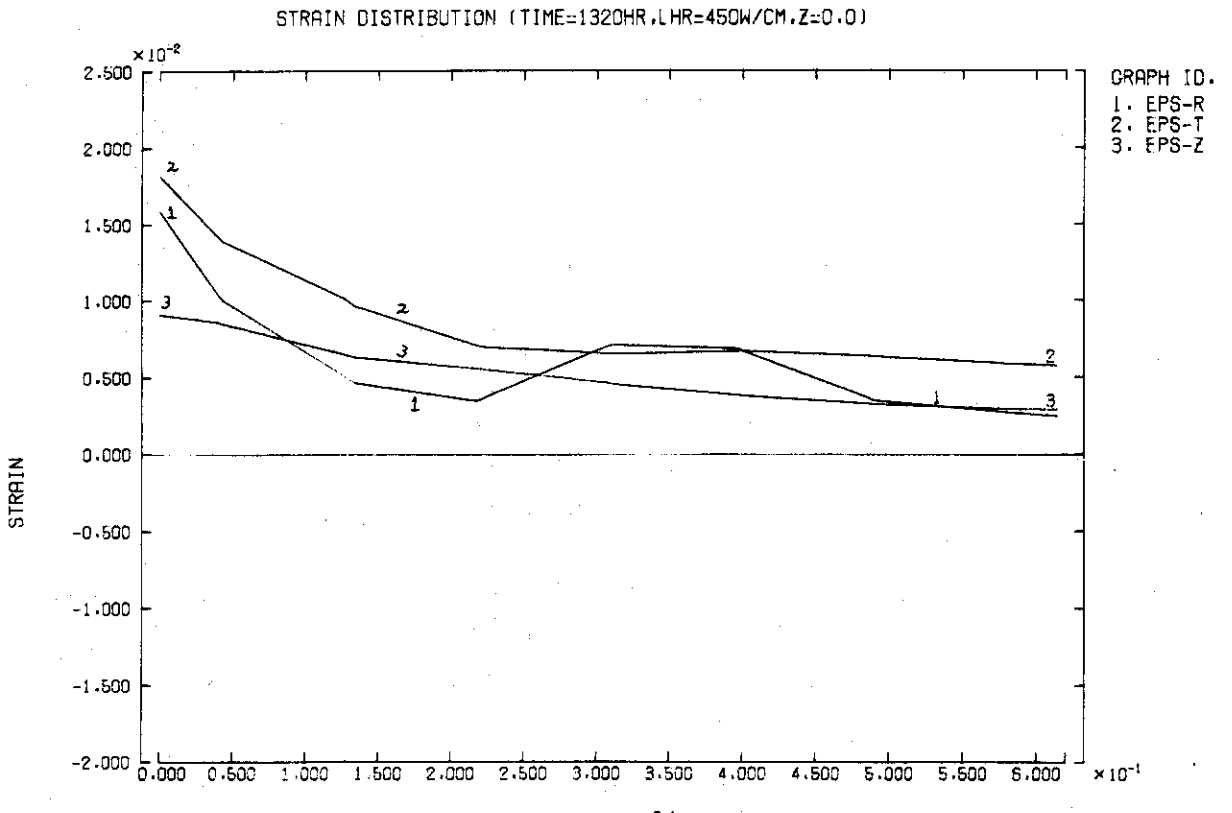


(d)

Fig. 4.19 Stress and strain distributions of pellet at 450w/cm (after 108 hours from the start up) of lineat heat rate.



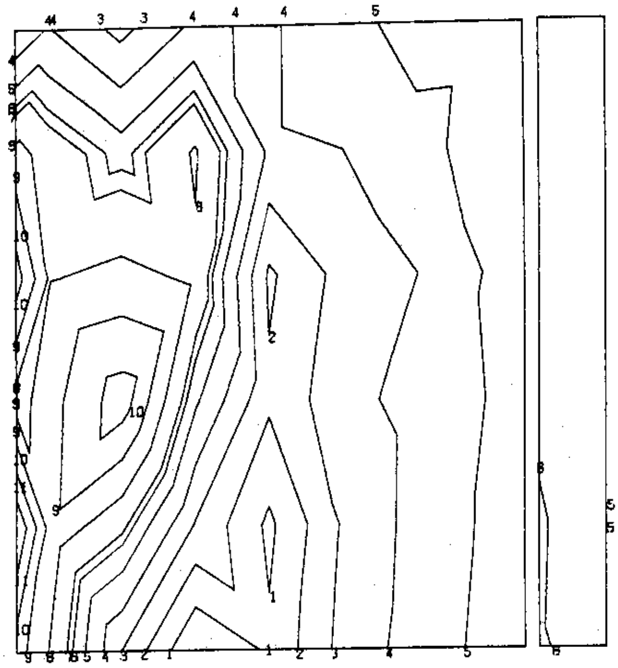
(a)



(b)

Fig. 4.20 Stress and strain distributions of pellet at 450w/cm (after 1320 hours from the start up) of linear heat rate.

SIG-R DISTRIBUTION (TIME=1320HR,LHR=450W/CM)

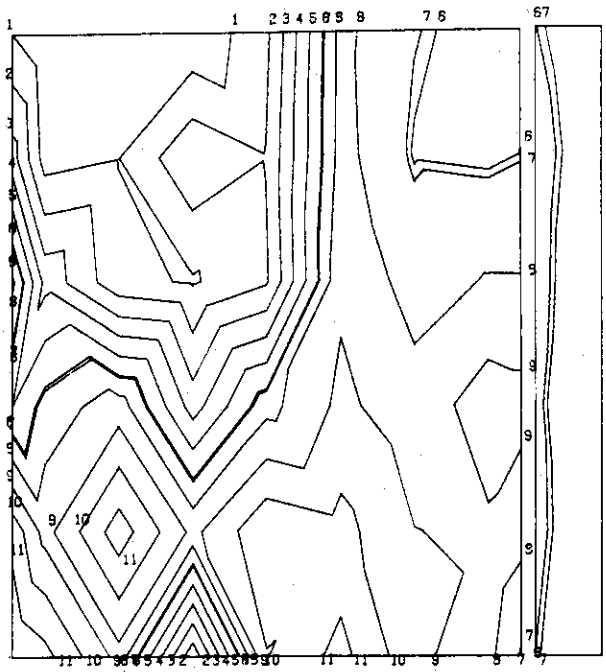


CONTOUR NO.= 2
CONTOUR VALUES
1 -6.551E+02
2 -5.156E+02
3 -3.761E+02
4 -2.366E+02
5 -9.707E+01
6 0.
7 4.245E+01
8 1.820E+02
9 3.215E+02
10 4.610E+02
11 6.005E+02

MAGNIFICATION = 1.818E+02

(c)

SIG-T DISTRIBUTION (TIME=1320HR,LHR=450W/CM)

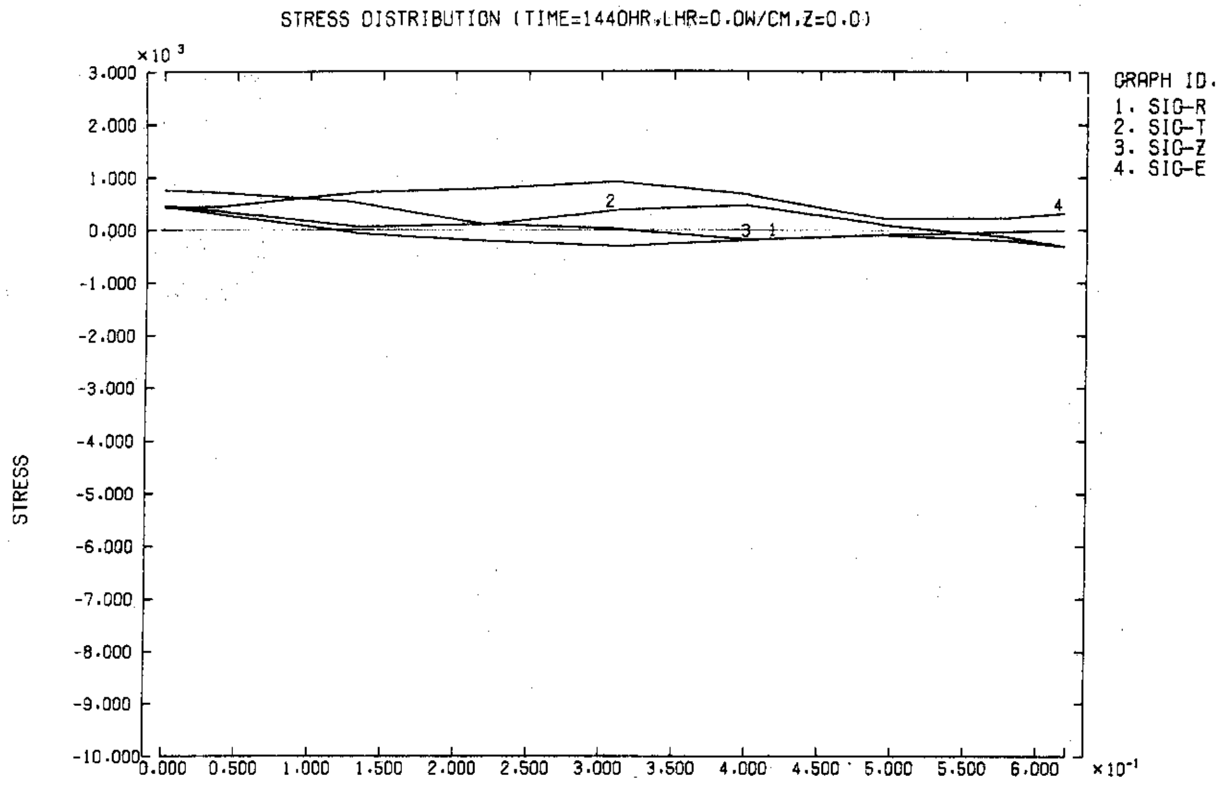


CONTOUR NO.= 3
CONTOUR VALUES
1 -6.356E+02
2 -5.107E+02
3 -3.857E+02
4 -2.608E+02
5 -1.358E+02
6 -1.088E+01
7 0.
8 1.141E+02
9 2.390E+02
10 3.640E+02
11 4.889E+02

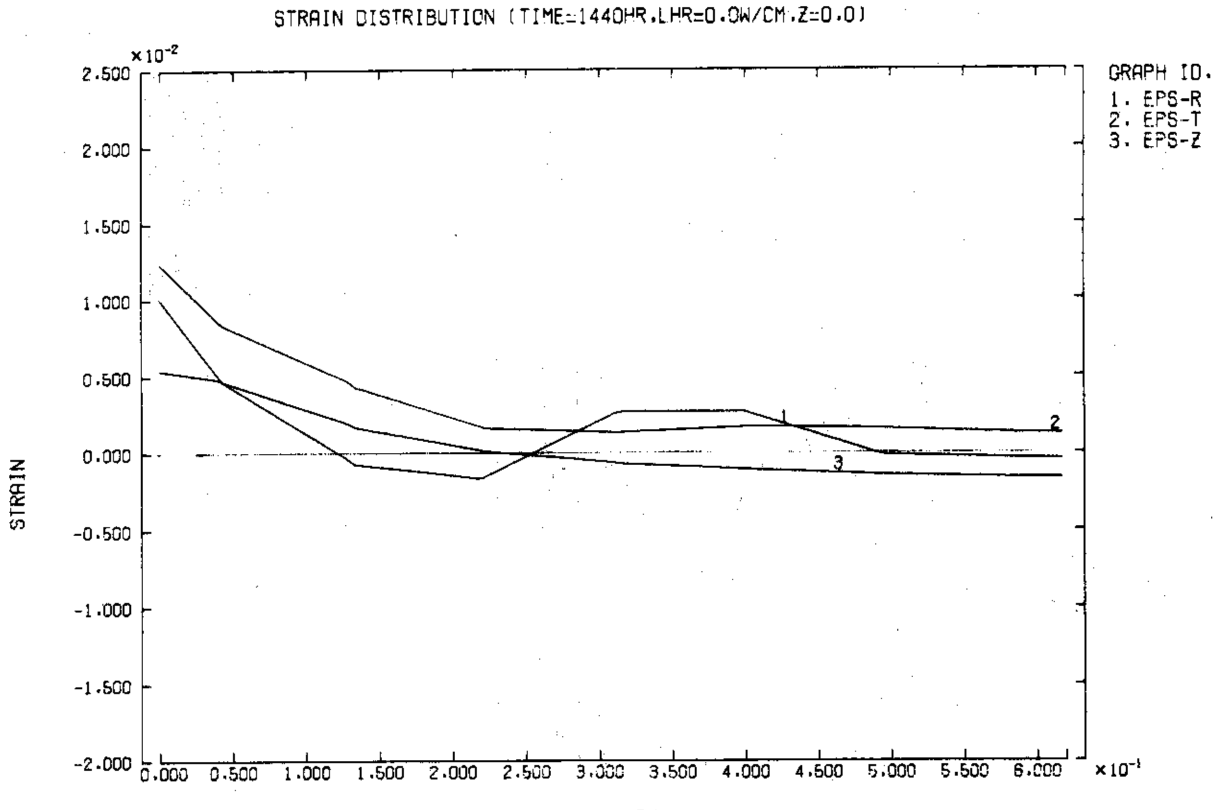
MAGNIFICATION = 1.818E+02

(d)

Fig. 4.20 Stress and strain distributions of pellet at 450w/cm (after 1320 hours from the start up) of linear heat rate.

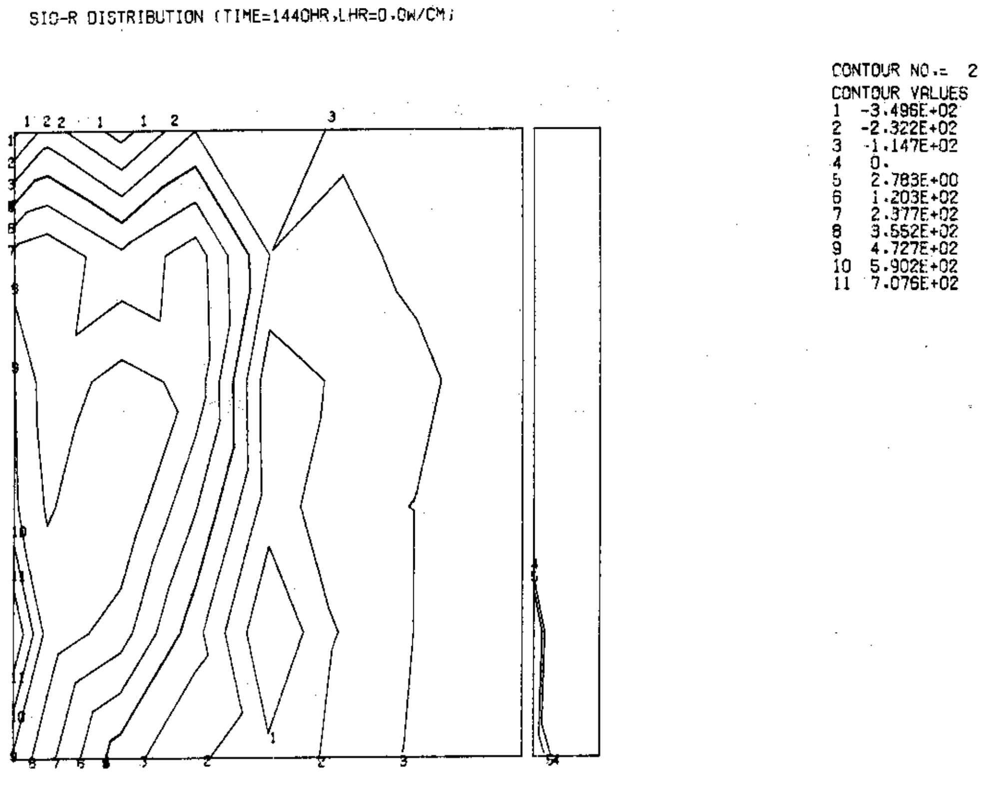


(a)

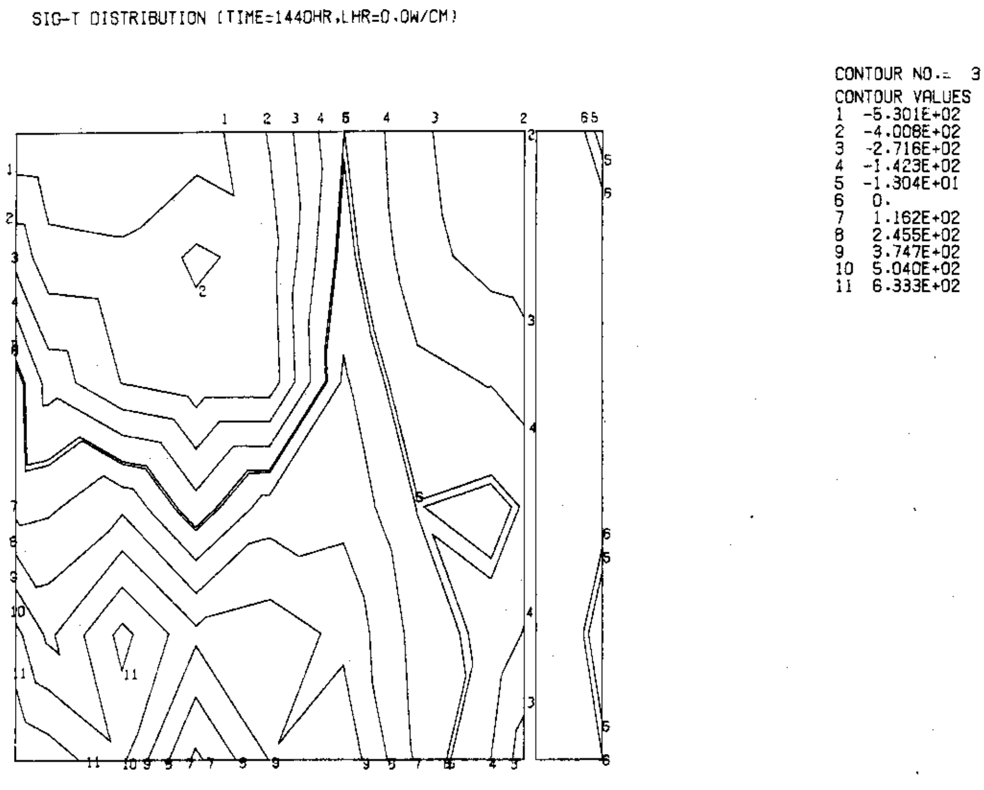


(b)

Fig. 4.21 Stress and strain distributions of pellet at 0w/cm of linear heat rate.



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (c)



MAGNIFICATION = 1.818E+02 (d)

Fig. 4.21 Stress and strain distributions of pellet at 0w/cm of linear heat rate.

参 考 文 献

1)　藤野勉；コンピュータによる構造工学講座Ⅱ－4－B熱伝導と熱応力　p 179 (1972) 培風館

2)　O.C. Zienkiewicz and Y. K. Cheung；マトリックス有限要素法　p 53 (1970) 培風館

3)　C. Visser, W. Van Buren, W. K. Wilson and S. E. Gahrielse；WERL－ELPLA－1 (1970)

4)　山田嘉昭；コンピュータによる構造工学講座Ⅱ－2－A塑性，粘弾性　p 72 (1972) 培風館

Appendix-A　プログラム組込み物性値

プログラムＦＥＭＦ３およびＦＲＥＢ４とも必要な物性値はプログラム内に組込まれている。ただし，燃料ペレットは二酸化ウラン焼結体，被覆管はジルコニウム合金としている。これらの物性値をTable A に記載する。

Table A　プログラム使用の物性値

MATERIAL : UO_2 (1)

項　目	計　算　式	参　照　文　献
THERMAL EXPANSION	$\alpha = [(T^2 - 625.) \times 2.896 \times 10^{-9} + (T - 25.) \times 6.797 \times 10^{-6}] / (T - 25)$ α : 1/°C,　T : °C	CONWAY, FINCEL & Hein Trans. Amer. Nucl. Soc. VOL. 6, No. 1 (1963) 153.
THERMAL CONDUCTIVITY	$K_{95} = \frac{38.24}{T + 129.4} + 4.788 \times 10^{-13} \cdot T^3$　（95%密度の時） $K_P = K_{95} \cdot \frac{1.025}{0.95} \times \frac{1 - P}{1 + 0.5P}$　（密度 ρ の時） K_{95}, K_P : W/cm-°C　T : °K　P : porosity $1 - \frac{\rho}{\rho_0}$ ISOTROPIC, $\rho/\rho_0 = 0.95$ fix	LYONS Trans. Amer. Nucl. Soc. VOL. 8, No. 1 (1965) 35.
SPECIFIC HEAT	$C_P = 0.06833 + 0.9003 \times 10^{-5} T - 0.8415 \times 10^{-3} T^{-2}$ C_P : cal/gr-UO_2-°K　T : °K　1 mole UO_2 = 270 gr	
YOUNG'S MODULUS	$E_{\rho_0} = 2.139132 \times 10^6 - 27.4499T - 0.2822496T^2$ $E_\rho = (1.875 \times \rho/\rho_0 - 0.875) E_{\rho_0}$　（ρ_0 : 理論密度） E_ρ : kg/cm²　T : °C $\rho/\rho_0 = 0.95$ fix (ISOTROPIC)	WAPD-TM-652 P. 35.
POISSON'S RATIO	$\nu = 0.9625(\rho/\rho_0)^2 - 1.7025(\rho/\rho_0) + 1.045$　（ρ_0 : 理論密度） $\rho/\rho_0 = 0.95$ fix (ISOTROPIC)	WAPD-TM-652 P. 35.

MATERIAL : UO_2 (2)

項　目	計　算　式	参照文献
STRAIN HARDENING	$\bar{\sigma} = C(\alpha + \bar{\varepsilon})^n$ $n = 6.885 \times 10^{18} \times T^{-6.274}$ 　 T : ℃ $\alpha = \dfrac{\sigma_Y}{E}$ 　 σ_Y : YIELD STRESS, E = YOUNG'S MODULUS $\sigma_Y = c\,\alpha^n$ より 　 $c = \sigma_Y / \alpha^n$ $(n > 5,\ C = 10^{20})$	
CREEP CORRELATION	$\dot{\varepsilon}_c = \dot{\varepsilon}_{Thermal} + \dot{\varepsilon}_{fission}$ $\dot{\varepsilon}_{Thermal} = A \cdot \sigma_e \exp(-90000/RT) + B \cdot \sigma_e^{4.5} \exp(-132000/RT)$ $\dot{\varepsilon}_{Thermal}$: 1/sec. 　 R = 1.986 cal/mole-°K T : °K 　 σ_e : PSI $A = \dfrac{2.702 \times 10^3}{(D-87.8)G^2}$, 　 $B = \dfrac{3.822 \times 10^{-7}}{D-90.5}$ D : Fractional Density (%) 　 95% fix G : Grain size (microns) 　 30 μm fix $\dot{\varepsilon}_{fission} = c\,\dot{f}\,\sigma_e$ $c = 1.45 \times 10^{-26} \cdot cm^3 /$ fissions - PSI $\dot{f} = 3.1 \times 10^{10} \left(\dfrac{P}{\pi R^2}\right)$ P : LINEAR HEAT RATE (W/cm) R : pellet outer Radius (cm)	GEAP-13788

MATERIAL : UO_2 (3)

項目	計算式	参照文献
YIELD STRESS	温度(°C) / 引張: 25 / 1200; 1200 / 1370; 1300 / 1100; 1400 / 900; 1500 / 715; 1600 / 530; 1700 / 430 — KG/cm^2	
ULTIMATE TENSILE STRESS	温度(°C): 25 / 1200.; 1400 / 1400.; 1500 / 900.; 1600 / 650.; 1700 / 500. — KG/cm^2	

YIELD STRESS:

温度(°C)	引張
25	1200
1200	1370
1300	1100
1400	900
1500	715
1600	530
1700	430

KG/cm^2

ULTIMATE TENSILE STRESS:

温度(°C)	
25	1200.
1400	1400.
1500	900.
1600	650.
1700	500.

KG/cm^2

MATERIAL : Zry 2 (1)

項目	計算式	参照文献
THERMAL EXPANSION	$\alpha = 5.62 \times 10^{-6} + 3.162 \times 10^{-9}\,T$ α : 1/°C T : °C	ORNL-3281

MATERIAL : Zry 2 (2)

<table>
<tr><th>項　目</th><th>計　算　式</th><th>参 照 文 献</th></tr>
<tr><td>THERMAL CONDUCTIVITY</td><td>$K = 4.135 \times 10^{-3} \times 0.95 [7.23 + 2.41 \times 10^{-3} T + 1.3 \times 10^{-6} T^2]$
K : cal/sec・cm・°C　　T : °F</td><td>WAPT-TM-757
FIGRO P.7</td></tr>
<tr><td>SPECIFIC HEAT</td><td><table><tr><th>温度(℃)</th><th>C_P (cal/gr-°C)</th></tr><tr><td>50</td><td>0.0692</td></tr><tr><td>100</td><td>0.0704</td></tr><tr><td>200</td><td>0.0716</td></tr><tr><td>300</td><td>0.0774</td></tr><tr><td>400</td><td>0.0796</td></tr><tr><td>500</td><td>0.0824</td></tr><tr><td>600</td><td>0.0848</td></tr><tr><td>700</td><td>0.0868</td></tr></table></td><td>J. Nucl. Mater. 18
(1966) 233.</td></tr>
<tr><td>YOUNG'S MODULUS</td><td>Transverse $E = -6.667 \times 10^2 T + 10.833 \times 10^5$
Longitudinal $E = -6.582 \times 10^2 T + 9.869 \times 10^5$
E : kg/cm^2,　T : °C</td><td>ORNL-3281</td></tr>
<tr><td>POISSON'S RATIO</td><td>$\nu = 0.36 + 0.4 \times 10^{-3} T$
T : °C</td><td>ASTM STP 314</td></tr>
<tr><td>STRAIN HARDENING</td><td>$\bar{\sigma} = C(\alpha + \bar{\varepsilon})^n$
$n = 0.03$
$\alpha = \sigma_Y / E$　　σ_Y : Yield STRESS, E = YOUNG'S MODULUS
$\sigma_Y = c\,\alpha^n$ より　　$c = \sigma_Y / \alpha^n$</td><td></td></tr>
</table>

MATERIAL : Zry 2 (3)

項目	計算式	参照文献
CREEP CORRELATION	$\dot{\varepsilon} = B\,\phi^{0.85}\exp(-Q/RT)\sinh(S_c \cdot \sigma)$ $\times \{1 + \alpha k \exp(-k\tau)\}$ $\dot{\varepsilon}$: 1/hr $B = 9.5 \times 10^{-13}$ $S_c = 1.7 \times 10^{-4}$ $\alpha = 900$ $k = 0.006$ ϕ = neutron flux (n/cm^2 - sec) $= 1 \times 10^{13}$ fix τ = Time (hour) T : °K $Q = 16980$ $T \leq 600°F$ $= 16980 - 76.2(T - T_c)$ $T > 600°F$ $T_c = 640 - 0.001\sigma$ T : °K σ : equivalent Stress (PSI)	BNWL-B-253 BUCKLE

Appendix B　データ入力法

ＦＥＭＦ３，ＦＲＥＢ４およびＰＬＯＴＦの各プログラムについてその入力法を表にまとめて示す。Table B.1 はＦＥＭＦ３，Table B.2 はＦＲＥＢ４，Table B.3 はＰＬＯＴＦについてのデータ入力法の説明である。

Table B.1　ＦＥＭＦ３入力データ説明

カード番号	カラム	内　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
1 (20A4)	1-80	タイトルカード，出力頁の先頭にプリントする。		NTITL(20)
2 (10I5)	1- 5	R－方向の格子数　最大２０		NROW
	6-10	Z－方向の格子数　最大　9		NCOL
	11-15	ペレットを示す材質番号，カード番号7⁺のカラム16-20で与える材質番号と一致しなければならない。		MPEL
	16-20	被覆管を示す材質番号，カード番号7⁺のカラム16-20で与える材質番号と一致しなければならない。		MCLD
	21-25	熱歪を計算するか否かのオプション ＝0　計算しない ＞0　計算する		MTHERM
	26-30	塑性歪を計算するか否かのオプション ＝0　計算しない ＞0　計算する		MPLAST
	31-35	クリープ歪を計算するか否かのオプション ＝0　計算しない ＞0　計算する		MCREEP
	36-40	クラックを考慮するか否かのオプション ＝0　クラックさせない ＞0　クラックを考慮する		MCRACK
	41-45	クラックヒーリングを考慮するか否かのオプション ＝0　考慮しない ＞0　考慮する		MHEAL
	46-50	プロッタプログラムＰＬＯＴＦ用データを掃き出すか否かのオプション ＝0　掃き出さない ＞0　掃き出す		MPLOT

カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
3 (10I5)		プリントアウトを制御するシグナル		
		=0　プリントアウトしない		
		=1　プリントアウトする		
	1-5	温度分布		MOUT(1)
	6-10	内外表面に作用する圧力（外荷重）		MOUT(2)
	11-15	等価節点力		MOUT(3)
	16-20	節点変位		MOUT(4)
	21-25	ひずみ		MOUT(5)
	26-30	応　力		MOUT(6)
	31-35	変形後の各節点座標		MOUT(7)
	36-40	未使用		MOUT(8)
	41-45	〃		MOUT(9)
	46-50	〃		MOUT(10)
4 (4F 10.0)		体系寸法に関する入力		
	1-10	ペレットの内半径（中実の場合）	cm	RPI
	11-20	ペレットの外半径	cm	RPO
	21-30	被覆管の内半径	cm	RCI
	31-40	被覆管の外半径	cm	RCO
5+ (7F 10.0)		Z方向格子の各々の高さを与える。		
	1-10	中心に一番近いZ格子の高さ（通常0.0）	cm	ELEVA(1)
	11-20	中心から2番目に近いZ格子の高さ	cm	ELEVA(2)
	21-30	中心から3番目に近いZ格子の高さ	cm	ELEVA(3)
		⋮　⋮　⋮		
		カード番号2，カラム6-10で与えたNCOL個のデータが必要であり，最大9。		
		NCOL≦7　ならばカード1枚		
		NCOL≧8　ならばカード2枚必要である。		
6 (3F 10.0)	1-10	初期温度（被覆管，ペレット共に一定温度）	℃	RTEMP
		もし入力しなければ，25℃にセットする。		
	11-20	計算の第1回目の時間増分。	days	DTINI
		もし入力しなければ，入力された運転履歴の第1タイムステップの1／10を用いる。		
	21-30	現在の状態より，更に1要素以上が塑性又はクラックする状態に至る時間増分係数R_{min}の最小値。もし計算によって得られた最小値がこの値より小さければ，この入力で与えられた値を最小値とする。		RMIN
		入力を省略した場合は1.0とする。		

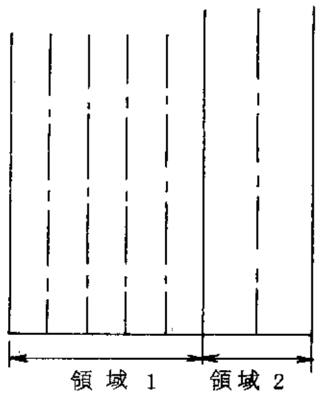
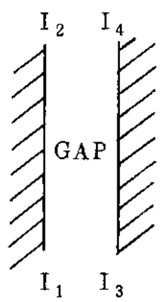
カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
7^{+} (F10.0, 2I5)	1-10	等分割されるRegion(注1)の外半径。	cm	RR
	11-15	分割数(ND等分)		ND
	16-20	その領域の材質番号，負値はGapを示す。 (注1)  図例だと 領域1は5等分　　ND=5 領域2は2等分　　ND=2 現在，ギャップエレメントは使用していないため，ギャップ空間の分割数は任意でよい。RR<0によって，このデータ群の終了を示す。 ここで定義される径方向格子総数はカード番号2のNROWと一致しなければならない。		MAT
8^{+} (8F8.0, 2F4.0)		燃料の照射履歴を与えるカード群		
	1-8	積算照射時間T_n（負値のときこのデータ群の終了）		HIST(1, n)
	9-16	線出力密度(以下積算時間T_nでの各値を入力)		HIST(2, n)
	17-24	冷却材圧力		HIST(3, n)
	25-32	冷却材温度		HIST(4, n)
	33-40	ギャップコンダクタンス		HIST(5, n)
	41-48	冷却材－被覆管　熱伝達率		HIST(6, n)
	49-56	ギャップガス圧力(内圧)		HIST(7, n)
	57-64	中心孔内圧力(もし中心孔があれば)		HIST(8, n)
	65-68	未使用		HIST(9, n)
	69-72	プリントアウト制御。n=HIST(10,)としたとき，1タイムステップ内をm回で計算されると，n回毎にプリントアウトされる。n=0のときはn=1(毎回プリント)となる。又，n>mの場合はm=1のときのみプリント。又，HIST(10,)の正，負によって応力，歪に関して要約又は詳細なプリントが得られる。 HIST(10,n)<0 　積算応力，歪値(要約) HIST(10,n)>0 　増分及び積算応力，歪値(詳細)		HIST(10, n)

Table B.2　FREB 4入力データ説明

カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
1 (18A4)	1-72	タイトルカード		MTITL(18)
2 (16I5)	1- 5	節点総数　最大200		NODE
	6-10	要素総数　最大250		NELM
	11-15	入力履歴ステップ数　最大100		NSTP
	16-20	被覆管表面熱伝達辺の数　最大100		NFIM
	21-25	熱伝達率データテーブルの数　最大　5		NFTB
	26-30	ギャップペアの数　最大100		NGAP
	31-35	ギャップ熱伝達率データテーブル数　最大　5		NGTB
	36-40	変位拘束点の数		NFIX
	41-45	内外圧を受ける辺の数　最大100		NPRS
	46-50	内外圧データテーブルの数　最大　5		NPTB
	51-55	平面応力／平面歪オプション (1／2／3：平面応力／平面歪／ミックス)		NCND
	56-60	プロットデータ掃出しオプション (0／1；no／yes)		NPLT
	61-65	プリント・コントロール・オプション (0／1；no／各ステージ毎に各要素の物性値をプリントする)		NOUT
	66-70	塑性計算オプション(0／1；no／yes)		NPLA
	71-75	クリープ計算オプション(0／1；no／yes)		NCRP
	76-80	クラック計算オプション(0／1；no／yes)		MCRK
3^{+}		節点座標の入力 (i) Format (2I5, 2F10.0, I5, 2F10.0, I5) or (ii) Format (7I5, 2F10.0) (i) M, N, X1, Y1, K, X2, Y2, L (ii) M, K1, K2, K3, K4, K5, K6, X2, Y2 |M|=1 or 2のときは(i)のタイプで入力 |M|=3 のときは(ii)のタイプで入力 |M|=1　節点Nの座標は(X1, Y1) |M|=2　節点N(X1, Y1)とK(X2, Y2)との間にL点直線内挿。このときの節点番号増分は(K−N)／(L+1)，作られる節点はL+2個	cm	内容中に示す。

カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
3^+ （つづき）		|M|＝3　節点K1からK2（節点番号増分K3）までの座標は，節点K4からK5（増分K6）の座標に対して節点座標増分（X2，Y2）で作られる。このとき $\frac{K2-K1}{K3}+1=\frac{K5-K4}{K6}+1$ |M|＝0　データの終り。 （注）　M＜0のときは，上記（X,Y）は，（R,θ）とみなし，座標変換する。		
4^+		要素データ入力 Format（16I5） M, NI, NJ, KI, KJ, KK, KM, LI, LJ, NBR, NBT M＝1　要素NIは材質番号NJで（KI，KJ，KK，KM）より構成された径方向クラックに関するシグナルはNBR，円周方向クラックに関するシグナルはNBT。（注参照） 3角形要素のときはKM＝0 M＝2　要素NIからNJは増分（KI，KJ，KK，KM）としてLIからLJ番目の要素より作成し，材質番号はLI～LJと同じ。このときNBR，NBTもまた増分である。 この操作を$k=\frac{NJ-NI+1}{LJ-LI+1}$回くり返す。 M＝0　データの終り。 （注）　NBR，NBTが零のときはその要素が破壊条件を満たしてもクラックさせない。或る要素に径方向クラックが入ったとき，同じNBRをもつ要素すべてにクラックを入れる。（円周方向クラックのときは同じNBT）		内容中に示す。
5^+ （2F10.0，2I5）	1-10	積算照射時間T_n	Hour	STEP（n）
	11-20	線出力密度（積算時間T_nにおける値）	W／cm	POWR（n）
	21-25	タイムステップ分割数 計算タイムステップとしてSTEP（n−1）とSTEP(n)間をKSTP(n)分割する。 なお，n＝1のときはKSTP(1)＝1とする。		KSTP（n）
	26-30	計算結果のプリントコントロール STEP（n−1）とSTEP(n)間でKSTP(n)ステップの計算に対して， KOUT（n）＝0　のとき毎回プリント KOUT（n）＝m　のときm回おきにプリント このデータはカード番号2のカラム11-15で指定したNSTP枚入力する。		KOUT（n）

カード番号	カラム	内　　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
6^+ (5I5)		表面熱伝達を受ける辺のデータ I1, I2, IN, ID, IT 節点番号（I1, I2）で定義された 辺を初期値として増分をIDとし， IN個の辺を定義する。 I1＝0のカードでデータの終り。 作られるデータ数はNFIM（カード 番号2，カラム16-20）でなければならない。 このときITは熱伝達率のデータテーブル番号である。 KFIL(1, n)　KFIL(2, n)　表面熱伝達を受ける辺を示す節点番号 KFIL(3, n)　その辺に作用する熱伝達率のデータテーブル番号		KFIL(3, n)
7^+		熱伝達率，冷却材温度データ カード7・1　Format（I5） NST　：熱伝達率，冷却材温度データを指定する時間テーブルの数 カード7・2^+　Format（8F10.0） TIN(i)　i＝1～NST 上記データを指定する時間テーブル カード7・3^+　Format（8F10.0） 熱伝達率をNST個入力する。 カード7・4^+　Format（8F10.0） 冷却材温度をNST個入力する。 カード7・3^+，7・4^+をNFTB（カード1）回くり返し入力。このとき対応するデータテーブル番号は入力順である。	W/cm^2 °C	HFIL(i, j) TCOOL(i, j)
8^+ (7I5)		ギャップデータ I1, I2, I3, I4, IN, ID, IT 節点（I1, I2, I3, I4）より構成されたギャップを初期値としてIN個作られ，そのときの増分はID，参照するギャップコンダクタンスのデータテーブル番号はITである。  定義されるべきデータはNGAP（カード1）個でなければならない。 なお，データの終りはI1＝0のカードである。		KGAP(5, n)

カード番号	カラム	内　　　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
8+ （つづき）		KGAP(1, n) KGAP(2, n) KGAP(3, n) KGAP(4, n)　ギャップを構成する節点 KGAP(5, n)　指定したギャップに作用するギャップコンダクタンスを与えるテーブル番号		
9+		ギャップコンダクタンス(h_g)データ カード9・1　Format (I5) NST ： h_g を定義する時間テーブルの数 カード9・2　Format (8F10.0) TIN(i), i＝1～NST h_g を指定する時間テーブル カード9・3　Format (8F10.0) TIN(i) に対応して h_g を NST個入力する。 カード9・3をNGTB（カード1）回くり返し入力。 このとき対応するデータテーブル番号は入力順。	W/cm^2・℃	GAPS(i, j)
10+ (5I5)		内外圧を受ける辺のデータ I1, I2, IN, ID, IT 節点番号（I1，I2）で定義された辺を初期値として増分をIDとしIN個の辺を定義する。 I1＝0のカードでデータの終り。 作られるデータ数はNPRS（カード1）でなければならない。このときITは内外圧データテーブル番号である。 KPRS(1, n) KPRS(2, n)　内外圧を受ける辺を示す節点番号。 KPRS(3, n)　その辺に作用する内外圧のデータテーブル番号。 圧力の作用する方向は軸I1-I2を90°回転した方向である。		KPRS(3, n)
11+		内外圧データ カード11・1　Format (I5) NST ： 内外圧を定義する時間テーブルの数。 カード11・2　Format (8F10.0) TIN(i), i＝1～NST 内外圧を指定する時間テーブル	kg/cm^2	PRES(i, j)

カード番号	カラム	内　　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
		カード11・3　Format (8F10.0) TIN(i) に対応して内外圧をNSTを個入力する。 カード11・3 を NPTB(カード1)回くり返し入力。 このとき対応するデータテーブル番号は入力順。		
12^{+} (4I5)		変位を拘束する節点のデータ I1, IN, ID, IV 節点I1より増分IDとしてIN個の節点の拘束条件はIV。 IV = 1　;　x 方向固定 IV = 2　;　y 方向固定 IV = 3　;　x y 方向固定 データはI1 = 0のカードで終る。 ここで定義された拘束節点の数はNFIX(カード1)と等しくなければならない。		KFIX(n)
13^{+} (4I5)		平面応力，平面歪オプションデータ。 このデータはカード1で指定したNCNDが3のときにのみ入力する。 I1, IN, ID, IV 要素I1より増分IDとしてIN個の要素に対してIVで指定したオプションにする。 IV = 0　;　平面応力場 IV = 1　;　平面歪場		KCND(n)

Table B. 3　PLOTF入力データ説明

カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
1 (18A4)	1-72	タイトルカード。プロット図の上部にこのタイトルを描く。 EOFカードで全データの入力終了。		NTITL(18)
2 (I5, F10.0)	1- 5	プロット図のタイプ NTYPE＝0　形状及びケース依存の図を描く。 NTYPE＝1　時間対線出力図を描く。 NTYPE＝2　径方向座標を指定してケース依存の図を描く。FEMF3では軸方向分布，FREB4では円周方向分布図。 NTYPE＝3　FEMF3では軸座標，FREB4では角度を指定してケース依存の図を描く。 NTYPE＝4　要素を指定して時間依存の図を描く。		NTYPE
	6-15	タイトルの文字の大きさ。 入力しなければ，2.5mmをプログラムでセットする。 （注）　以後のカード入力順は，NTYPEの値により次のテーブルにしたがって必要なカードのみ入力しなければならない。 NTYPE 0　①→②→③→④→⑤*→⑥** 1　①→②→⑩ 2　①→②→⑦→⑨→⑩ 3　①→②→⑦→⑨→⑩ 4　①→②→⑧→⑨→⑩ *　カード4のNNEL＞0のとき入力。 **　カード4のMCON＞0のとき入力。	mm	XLEN1
3 (I5, 4F10.0)	1- 5	データテープ中の対象となるステップ番号		NCAS
	6-15	形状に対する倍率 SCALF＜0のとき自動スケール。 SCALF＝0のとき前ケースと同じ倍率を採用。 SCALF＞0のとき倍率はSCALF。		SCALF
	16-25	節点番号，要素番号，温度値など数字の大きさ。 入力しなければ2.5mmをセット。	mm	XN
	26-35	未使用		DELL
	36-45	等高線につける番号の大きさ。 入力しなければ2.5mmをセット。	mm	XLEN2

カード番号	カラム	内　　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
4 (16I5)	1－5	|NNEL|は作図の対象となるべき要素数。 NNEL＜0のときは前ケースと同じ要素群。		NNEL
	6－10	NGEO＝0　形状図は描かない。 ＝1　変形前の形状図を描く。 ＝2　変形後の形状図を描く。		NGEO
	11－15	NELM＝0　要素番号は描かない。 ＝1　変形前の要素に番号を描く。 ＝2　変形後の要素に番号を描く。		NELM
	16－20	NPOI＝0　節点番号は描かない。 ＝1　変形前の節点に番号を描く。 ＝2　変形後の節点に番号を描く。		NPOI
	21－25	NCIN＝0　形状輪郭図は描かない。 ＝1　変形前の輪郭図を描く。 ＝2　変形後の輪郭図を描く。		NCIN
	26－30	NTEMP＝0　温度値は描かない。 ＝1　変形前の要素に温度値を描く。 ＝2　変形後の要素に温度値を描く。		NTEMP
	31－35	NSTR＝0　応力図は描かない。 ＝1　要素図心に応力図を描く。		NSTR
	36－40	NEPS＝0　歪図は描かない。 ＝1　要素図心に歪図を描く。		
	41－45	NCON＝0　等高線図は描かない。 ＝1　温度　の等高線を描く。 ＝2　σ_x (σ_r)　〃　〃 ＝3　σ_y (σ_θ)　〃　〃 ＝4　σ_z　〃　〃 ＝5　τ_{xy} (τ_{rz})　〃　〃 ＝6　σ_e　〃　〃 ＝7　σ_1　〃　〃 ＝8　σ_2　〃　〃 ＝9　ε_x (ε_r)　〃　〃 ＝10　ε_y (ε_θ)　〃　〃 ＝11　ε_z　〃　〃 ＝12　γ_{xy} (γ_{rz})　〃　〃 ＝13　ε_e　〃　〃 ＝14　ε_1　〃　〃 ＝15　ε_2　〃　〃 ＝16　u_x (u_r)　〃　〃 ＝17　u_y (u_z)　〃　〃 カッコ内は軸対称モデル（FEMF3）の場合。		NCON

カード番号	カラム	内　　　容	単　位	FORTRAN SYMBOL
4 (つづき)	46-50	|MCON| は基本等高線の数。 MCON＞0 のときは描くべき等高値の値を入力する。(カード6参照) MCON＜0 のときはプログラムで等高線値を決定する。		MCON
	51-55	サブ等高線の数。		MCOM
	56-60	等高線サーチのときの要素内分割数。 NX≦1 のときはプログラム中でNX＝2とする。		NX
	61-65	NPLA＝0 降伏マークは書かない。 ＝1 変形前の要素図心に降伏マークを描く。 ＝2 変形後の要素図心に降伏マークを描く。 降伏マークはY，大きさはXN(カード3)		NPLA
	66-70	NCRK＝0 クラックマークは描かない。 ＝1 変形前の要素図心にクラックマークを描く。 ＝2 変形後の要素図心にクラックマークを描く。 マークの大きさはXN(カード3) クラックマーク： C_1 ; Radial crack C_2 ; Circumferancial crack C_3 ; Transversal crack $Cnm\ell$; mix $1 \leq n, m, \ell \leq 3$		
5 (3I5)	1-5	要素群の最初の番号。		I 1
	6-10	要素群の最後の番号。		I 2
	11-15	増分。 I 1＝0のカードでデータ入力終了。		I 3
6^+ (8F 10.0)	1-10 11-20 21-30 ⋮	描くべき等高線の値を MCON 個だけ入力する。		CNVAL(1) CNVAL(2) CNVAL(3) ⋮ CNVAL(MCON)
7 (2I5, F10.0)	1-5	データテープ中の対象となるステップ番号。		NCAS
	6-10	同一グラフに描かれるデータ指定数。		NGRF
	11-20	指定座標値 ・NTYPE＝2のとき 半径＝PVAL に固定してFEMF3では軸方向分布図，FREB4では径方向分布図を描く。		PVAL

カード番号	カラム	内容	単位	FORTRAN SYMBOL
7 （つづき）		・NTYPE＝3のとき FEMF3では軸座標＝PVALに固定して半径方向分布図を描き，FREB4では角度＝PVALに固定して半径方向分布図を描く。 単位は，半径，軸座標のときはcm，角度のときは度である。		
8 （2I5）	1-5 6-10	指定要素番号。 同一グラフに描くデータ指定数。		NOELM NGRF
9^+ （16I5）		グラフに描くデータ指定番号群をNGRF個指定する。 データ指定番号に対する物理量は， 1. 温度　　10. ε_y (ε_θ) 2. σ_x (σ_r)　　11. ε_z 3. σ_y (σ_θ)　　12. γ_{xy} (γ_{rz}) 4. σ_z　　13. ε_e 5. τ_{xy} (τ_{rz})　　14. ε_1 6. σ_e　　15. ε_2 7. σ_1　　16. u_x (u_r) 8. σ_2　　17. u_y (u_z) 9. ε_x (ε_r) カッコ内は軸対称モデル（FEMF3）の場合。 同一単位をもつ物理量についてのみ複数個指定できる。		NGRF(i)
10 （5F10.0）	1-10 11-20 21-30 31-40 41-50	指定データをグラフ化したときインデックスの文字の大きさ。入力しなければ2.5mmをセットする。 横方向目盛の最小値。 横方向目盛の最大値。 VXMIN ≧ VXMAX のときは自動スケールにより VXMIN，VXMAX を決める。 縦方向目盛の最小値。 縦方向目盛の最大値。 VYMIN ≧ VYMAX のときは自動スケールにより VYMIN，VYMAX を決める。 単位は，それぞれグラフに描く物理を考慮して決める。	mm	XLEN3 VXMIN VXMAX VYMIN VYMAX

Appendix C　プログラムリスト

マイクロフィッシュで収録した。巻末に添付する。

Appendix D　サンプル問題出力

マイクロフィッシュで収録した。巻末に添付する。