

JAERI-M

9 6 8 3

FREC-4A：原子炉通常運転状態に
おける燃料棒挙動解析プログラム

1981年10月

原山 泰雄・泉 文男

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.

FREC-4A：原子炉通常運転状態における燃料棒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

原山泰雄・泉 文男

(1981年 8月 28日受理)

FREC-4A (Fuel Reliability Evaluation Code - version 4 A) は原子炉通常運転下の燃料棒の挙動を解析する。燃料棒の挙動はその照射履歴に従って計算される。プログラムは、下部に挿入された初期負荷スプリング (あるいは支持カラー) の効果を含んで、PCMIによって引き起こされる燃料棒全長についての被覆の伸びを計算することに重点がおかれている。

FREC-4A は燃料棒を軸方向にセグメントに分割する。各セグメントにおいて、温度、応力と歪は軸対称であり、軸方向の歪は一定であると仮定される。しかしながら、この軸方向の歪は燃料と被覆について異なるとされる。セグメントを半径方向に同心状のリングに分割し、これにCYGRO (ウエスチングハウス社で開発された燃料挙動解析プログラム) が開発した方法を適用することにより、FREC-4A は接触力速度と「ギャップ間隙」の変位速度間の剛性マトリックスを求める。この剛性マトリックスを要素マトリックスとして、上、下部プレナム領域を含め燃料棒全長についての全体剛性方程式を作成する。燃料棒の長さに沿った接触力およびギャップ変位速度はこの全体剛性方程式を解くことにより求められる。

各セグメントの応力と歪速度は、得られた接触力速度を境界条件として使用することにより計算される。

時間 $t + \Delta t$ における変数 (接触力, 応力, 歪等) の値は得られた速度にタイムステップを乗じて、各変数の時間 t における初期値を加えることにより定められる。これらの値は、次のタイムステップの初期値として使われる。

FREC-4A に用いられた方法は簡単であり、全長についての燃料棒の変形を求めるのに適している。

この報告書は、FREC-4A が使用している剛性マトリックスの作成法、全体剛性方程式の形成法に関する理論と使用マニュアルを記載している。

FREC-4A: A Computer Program to Predict Fuel Rod Performance
under Normal Reactor Operation

Yasuo HARAYAMA and Fumio IZUMI
Division of Reactor Safety,
Tokai Research Establishment, JAERI
(Received August 28, 1981)

The program FREC-4A (Fuel Reliability Evaluation Code - version 4A) predicts a fuel rod performance under normal reactor operation. The performance is calculated in accordance with the fuel rod irradiation history. Emphasis is placed on predicting the axial cladding elongation for full length of the fuel rod induced by PCMI (Pellet-Cladding Mechanical Interaction), including influence of an initial preloaded spring (or support collar) inserted in fuel rod lower plenum.

In FREC-4A the fuel rod is divided into axial segments. In each segment, it is assumed that temperature, stresses and strains are axially symmetrical, and axial strains are constant for fuel pellets and the cladding. However, axial strains are calculated as to be different fuel pellet axial strain from the cladding one. Applying a method developed in CYGRO (a fuel performance code developed by Westinghouse CO.) to a segment, in which both pellet and cladding are radially partitioned into concentric rings, FREC-4A obtains stiffness matrices between contact load rates and "gap clearance" rates. Then using them as element matrices, FREC-4A forms a global stiffness equation of the fuel rod including upper and lower plenum. Contact load and "gap clearance" rates along the fuel rod length are obtained by solving the global stiffness equation. Stress and strain rates in each segment can be calculated by using the obtained contact load rates as boundary conditions.

Variables (contact loads, strains, stresses etc.) at time of t are found by multiplying those rates by time step (Δt) and adding obtained quantities to initial values

at time (t). Then, obtained values of variables are used as the initial values of a next time step.

The method adopted in FREC-4A is simple and suited for predicting the fuel rod deformations over full length.

The present report describes formulations of stiffness matrices of the segment and the global stiffness equation, and an input manual of the program.

Keywords ; Computer Program, FREC-4A, Finite Element Method, Fuel Rod, Axial Elongation, Performance, Contact Load, PCMI, Gap, Displacement, Irradiation history

目 次

1. プログラム概要	1
1.1 プログラムの目的	1
1.2 幾何学的モデル	2
1.3 解法の大略	4
1.4 プログラム構成	6
1.5 プログラム沿革	16
2. 解法	17
2.1 剛性方程式	17
2.1.1 セグメント部の剛性方程式	17
2.1.2 プレナム領域の剛性方程式	21
2.2 全体剛性方程式とその解法	23
3. 計算モデル	27
3.1 クラックおよびヒーリングモデル	27
3.1.1 クラックモデル	27
3.1.2 ヒーリングモデル	28
3.2 燃料棒内圧評価モデル	29
3.3 冷却水温度	34
4. 入力データ	35
4.1 入力データの種類と入力方法	35
4.2 照射履歴データ	35
4.2.1 核分裂速度	36
4.2.2 高速中性子照射量	36
4.2.3 燃料のスウェリング	38
4.2.4 被覆管スウェリング	38
4.2.5 燃料棒出力の修正	40
4.3 出力分布	43
4.3.1 軸方向出力分布	43
4.3.2 径方向出力分布	45
4.4 物性値に関するデータの入力	45
4.4.1 熱膨張率, ヤング率等	45
4.4.2 クリープ歪速度および加工硬化に関するデータ	45
4.5 気孔に関するデータ	52
4.5.1 気孔の種類等	52
4.5.2 気孔の寸法等の入力	53

4.5.3 気孔の移動に関する入力データ	55
5. プログラム出力	59
5.1 入力データに関する情報の出力	59
5.2 計算結果に関する出力	82
謝 辞	91
参考文献	92
Appendix A ゼグメントの剛性方程式に関する補足	93
Appendix B 入力手引	99
Appendix C プログラムリスト (マイクロフィッシュ)	140

Contents

Nomenclature	
1. Introduction	1
1.1 Objectives of program	1
1.2 Geometrical model	2
1.3 Outline of solution	4
1.4 Structure of program	6
1.5 History of program	16
2. Solution	17
2.1 Stiffness equations	17
2.1.1 Stiffness equations of a segment	17
2.1.2 Stiffness equations of plenum regions	21
2.2 Global stiffness equation and solution	23
3. Models	27
3.1 Model of pellet-crack and healing	27
3.1.1 Pellet-crack model	27
3.1.2 Healing model	28
3.2 Estimating fuel rod internal pressure	29
3.3 Coolant temperature	34
4. Input data	35
4.1 Categories of input data and input method	35
4.2 Data of fuel rod irradiation history	35
4.2.1 Fission rate	36
4.2.2 Fast neutron fluence	36
4.2.3 Fuel swelling	38
4.2.4 Cladding irradiation growth	38
4.2.5 Modification of fuel rod power	40
4.3 Power distribution	43
4.3.1 Axial power distribution	43
4.3.2 Radial power distribution	45
4.4 Material properties	45
4.4.1 Thermal expansion coefficients, Young's modulus etc.	45
4.4.2 Creep strain rates and strain hardenings	45
4.5 Input data for pores	52
4.5.1 Categories of pores etc.	52
4.5.2 Dimensions of pores	53
4.5.3 Input data for pore migration	55

5. Output	59
5.1 Output prints of input data	59
5.2 Output prints of calculated results	82
Acknowledgements	91
References	92
Appendix - A. Supplement of segment stiffness equation	93
Appendix - B. User's guide for input data	99
Appendix - C. Listing of program (Microfishes)	140

記 号 (Nomenclature)

A	= cross-sectional area
E	= Young's modulus
F	= contact load in global stiffness equation
f	= contact load
h	= height from bottom of inner space in fuel rod
I	= number of segments
K	= spring constant in global stiffness equation
k	= spring constant
L	= length
P_{int}	= fuel rod internal pressure
P_{out}	= fuel rod outer pressure
R	= radius
T	= temperature
u	= "gap clearance"
W	= load

Greek symbols

α	= thermal expansion coefficient
α_{01}	= <u>1</u> st eigen value of <u>0</u> th Bessel's function
ν	= Poisson's ratio
μ	= friction factor

Special symbols

{ }	= column vector
[]	= matrix
[] ^T	= transport matrix
[] ⁻¹	= inverse matrix

Subscripts and superscripts

a	= inner
b	= outer
c	= cladding

f = fuel

lp = lower plenum

up = upper plenum

s = rigid collar or spring

r,t,z = cylindrical coordinates

$f_1^{(i)}$, $u_1^{(i)}$ = radial contact load and gap clearance at fuel inner surface
in ith segment.

$f_2^{(i)}$, $u_2^{(i)}$ = radial contact load and gap clearance between fuel outer
surface and cladding inner surface in ith segment.

$f_3^{(i)}$, $u_3^{(i)}$ = axial contact load and gap clearance, defined as
$$u_3^{(i)} = L_{cz}^{(i)} - L_{fz}^{(i)}$$

$f_{(i)}$ = axial contact load at (i)th axial node.

$u_{(i)}$ = axial clearance between cladding and fuel at (i)th axial node,
defined as $u_{(i)} = h_{(i)c} - h_{(i)f}$.

($\dot{\quad}$) = rate of change of () during a time step.

Superscripts

(i) = ith segment

(l) = lower plenum

(p) = upper plenum

1. プログラム概要

1.1 プログラムの目的

原子炉に装荷される燃料棒挙動の安全性は、通常三つの観点から評価される。一つは、燃料棒の熱的評価である。例えば、燃料ペレットの最高温度がその融点 (UO_2 の場合約 $2,800\text{ }^\circ\text{C}$) 以下であるかを評価する。他の一つは、構造強度的評価であり、FP 放出に対する防護としての被覆が健全に保たれるかどうか重点がおかれている。この観点からの安全性の目安として「被覆の円周方向の平均伸びが1%以内」が適用されることが多い。第3の観点は、使用材料の腐食を含めた化学的評価である。

第1および第2の観点からの燃料棒の照射履歴を考慮した安全性評価には、計算機プログラムが使用される。これは、その評価計算過程に多くのくりかえし計算を必要とすることが最大の理由である。

FREC-4Aの計算目的は、燃料棒の照射履歴に従った照射挙動のなかの使用材料（特に被覆）の機械強度の変化を解析することである。もちろん、この解析を進めるためには、第1の温度分布を含んだ熱的評価が先行しなければならない。しかし、プログラム使用上の簡易性を考え、FREC-4Aの温度分布計算は、必要最小限におさえられている。この意味で、もし熱的評価に重点がある場合には、他のプログラムを使用することが望ましい。

通常運転状態下の燃料棒まわりの冷却水圧力、温度はほとんど確定している。これは、原子炉システムの熱的基本仕様のためである。

計算プログラムで温度分布、応力分布を求める場合、冷却水温度と圧力は、それぞれの分布の境界条件である。しかし、この境界条件は被覆外面での境界条件を与えているに過ぎない。燃料ペレット外面における温度、圧力もまた境界条件である。ペレット外面温度は、被覆内面との間のギャップにおける熱伝達の良否によって左右される。同様に被覆内面での圧力は境界条件として与えられねばならないが、これは燃料ペレットと接触し接触圧力を発生するか、しないかによって大きく変化する。しかもギャップ熱伝達とか接触とかは、燃料棒の照射条件等によって時々刻々変化する。

計算プログラムに使用する基礎方程式、例えば熱伝導方程式とか弾性方程式は、境界条件が与えられたとき解がえられる。これら方程式を燃料棒に適用したとき、先に述べたようにギャップにおける状態が確定しなければ解を得ることは不可能となる。このため、計算プログラムでは、大部分の場合くりかえし計算法を用いてギャップにおける境界条件を定める手法が用いられる。逆に言えば、燃料棒を扱うプログラムのむずかしさは、プログラム内において自らギャップの境界条件を定めて解を求めねばならないことである。

FREC-4Aは、燃料棒を計算上軸方向に分割しさらにこれを半径方向に同心状のリングに分割する。この分割リングに軸対称二次元有限要素法を適用した後、燃料棒全体の剛性方程式を定め、これらから燃料棒各部に発生する接触力を求める。¹⁾

FREC-4A の特色の1つは、この境界条件に関係した接触力を、くりかえし計算を用いることなく定めることができることである。さらに、このとき、軸方向の荷重および伸びも考えることが出来、燃料棒全体としての軸方向の伸びの解析が可能なことである。

1.2 幾何学的モデル

FREC-4A は、燃料棒を上部プレナム、ペレットスタックおよび下部プレナムから構成されていると考える。ただし、下部プレナムは無いとしてもよい。上部プレナム内には、こいるばねが挿入されていてもいなくてもよいとする。下部プレナムがあるとした場合、ペレットスタックは、円筒状のカラーあるいは予め一定荷重でたわませられたこいるばねによって支持されているとする。

プログラムでは、ペレット中心孔に計測用の熱電対の如き棒が挿入されているとしてもよい。しかし、そのような場合、その棒は、半径方向には全く変位せず（熱膨張等起さない）、軸方向には燃料ペレットと全く同じように伸び、縮みするものと仮定される。この仮定により、この棒と燃料ペレットが接触したとしても、軸方向の接触力は中心孔表面には発生しない。

計算上、FREC-4A は Fig. 1 に示す如く、上部プレナム、燃料ペレットスタック、下部プレナムの領域に分割する。ペレットスタックは、さらに軸方向に任意の有限長さ分割される。このスタック部の分割された部分を FREC-4A ではセグメントと呼ぶ。各セグメントに含まれる燃料ペレットおよび被覆管は、それぞれ半径方向に任意の個数の同心状のリング要素に分割される。

燃料ペレットスタックは、全長にわたって連続な円柱あるいは円筒であると仮定される。しかし、軸方向に分割された場所において、その上・下のセグメント内のリング同志の連続性は仮定されない。すなわち、各セグメントは、中心対称の二次元変形としてのみ取扱い、剪断歪、剪断応力は考慮しない。

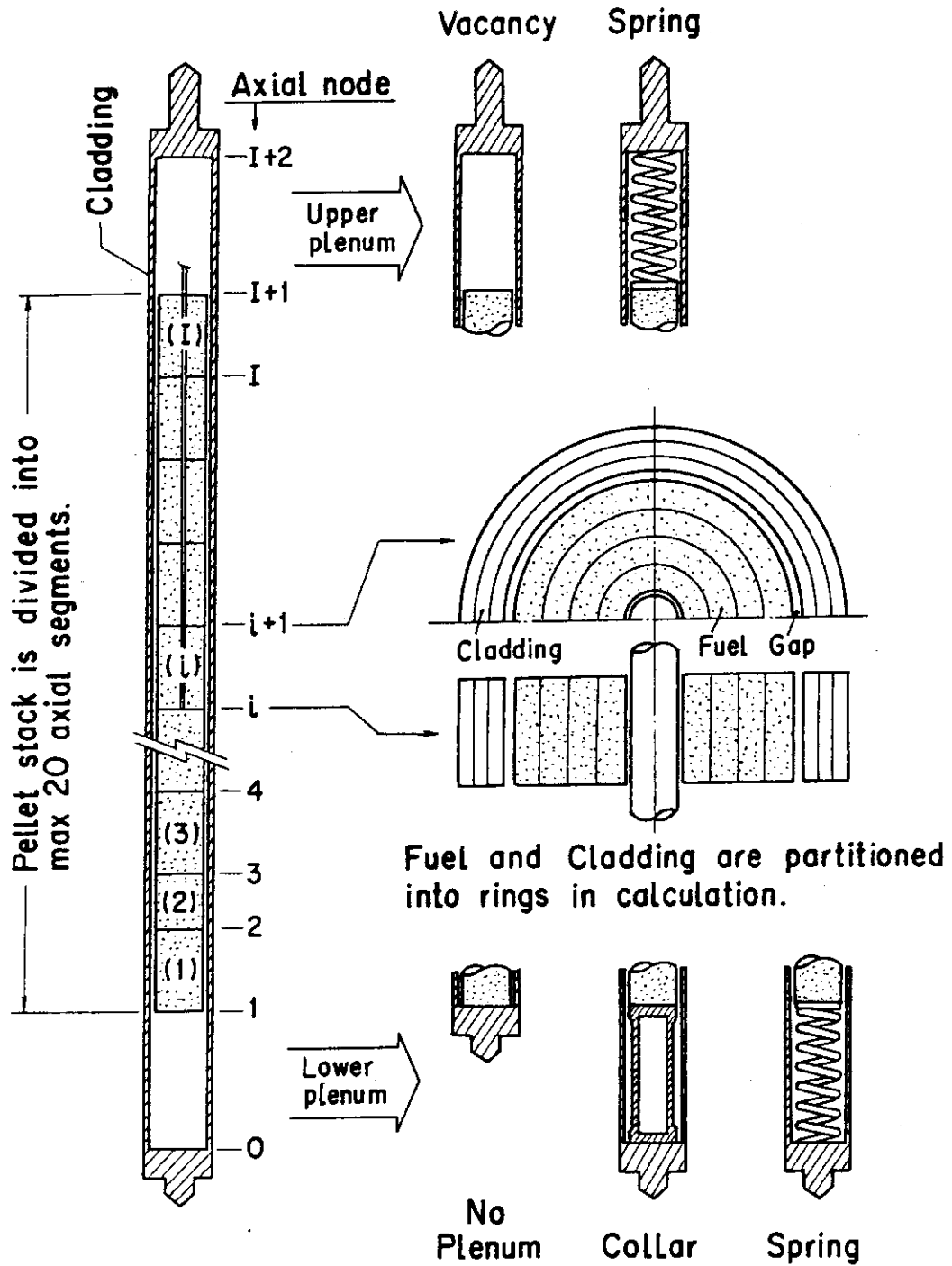


Fig. 1 Fuel rod geometrical model in FREC-4A.

1.3 解法の大略

FREC-4Aは、燃料棒の照射履歴による燃料棒挙動を追跡するプログラムである。FREC-4Aの流れ図をFig.2に示す。プログラムでの解法の概略の流れ図に沿って説明する。

入力で与えられた照射履歴データをもとに計算に使用するタイムステップを設定する。FREC-4Aは、各タイムステップにおける応力増分あるいは歪増分が制限値を越えたときには、応力または歪の増分が制限値以内になるようにタイムステップの再設定が行われる。FREC-4Aは、くりかえしループを設けていない。その代り、上記の様にタイムステップの細分化が行われる。このため、タイムステップはかなり小さな時間増分となる。

FREC-4Aは、タイムステップ(Δt)を進めつつ燃料棒の照射履歴を追ってゆく。そのさい、そのタイムステップ前の時間 t における燃料棒内のすべてのパラメータ、応力、歪、荷重変化等は既知であるとされる。

冷却水圧、燃料棒内圧により被覆および燃料ペレットにかかる荷重速度を計算する。これは応力分布を求める場合の境界条件の1部として使用される。

上部、下部プレナムを含み全セグメントの各リング節点における温度が計算される。

各セグメント内の同心状リングに軸対称二次元有限要素法を適用する。求めた温度分布と前タイムステップで定められた応力等を使用して、燃料ペレットについては、熱膨張、弾性、塑性、クリープ、スウェリング、気孔の移動と焼きしまり、被覆については、熱膨張、弾性、塑性、クリープと照射成長を考慮して、応力速度と歪速度間のマトリックスを作成する。このマトリックスを使用して、セグメント内の各リングにおける荷重速度と変位速度間の剛性マトリックスが作成される。

各リングについて作成された剛性マトリックスは、セグメント内の燃料ペレットおよび被覆単体としての剛性マトリックスにまとめられる。この手法として、有限要素法の部分構造法が利用される。次いで、各セグメントの燃料ペレットおよび被覆につきまとめられた剛性マトリックスから、接触力速度とギャップ寸法変位速度間の剛性マトリックスを導く。

この接触力速度-ギャップ寸法変位速度間の剛性マトリックスはセグメントの下部端面が拘束されているとして求めているので、この拘束を解いた剛性マトリックスに拡張される。

各セグメントの接触力速度とギャップ寸法変位速度間の拡張剛性マトリックスを1つの要素マトリックスとして、燃料棒全体についての接触力速度とギャップ寸法変位速度に関する全体剛性方程式を作成する。

全体剛性方程式を解き、接触力速度およびギャップ寸法変位速度が求められる。これにより、各セグメント内の燃料ペレットおよび被覆の境界条件が確定する。

境界条件が確定したので、これまでの計算をすべて逆にたどって、各セグメント次いでセグメント内の各リングに関する荷重速度、変位速度、応力速度および歪速度等が求められる。

これら全パラメータの速度にタイムステップを乗じてパラメータの増分が計算され、かつそれらの増分をそれぞれのパラメータに加算する。

再びタイムステップループの先頭に戻る。これを入力された照射履歴が終るまでくり返す。

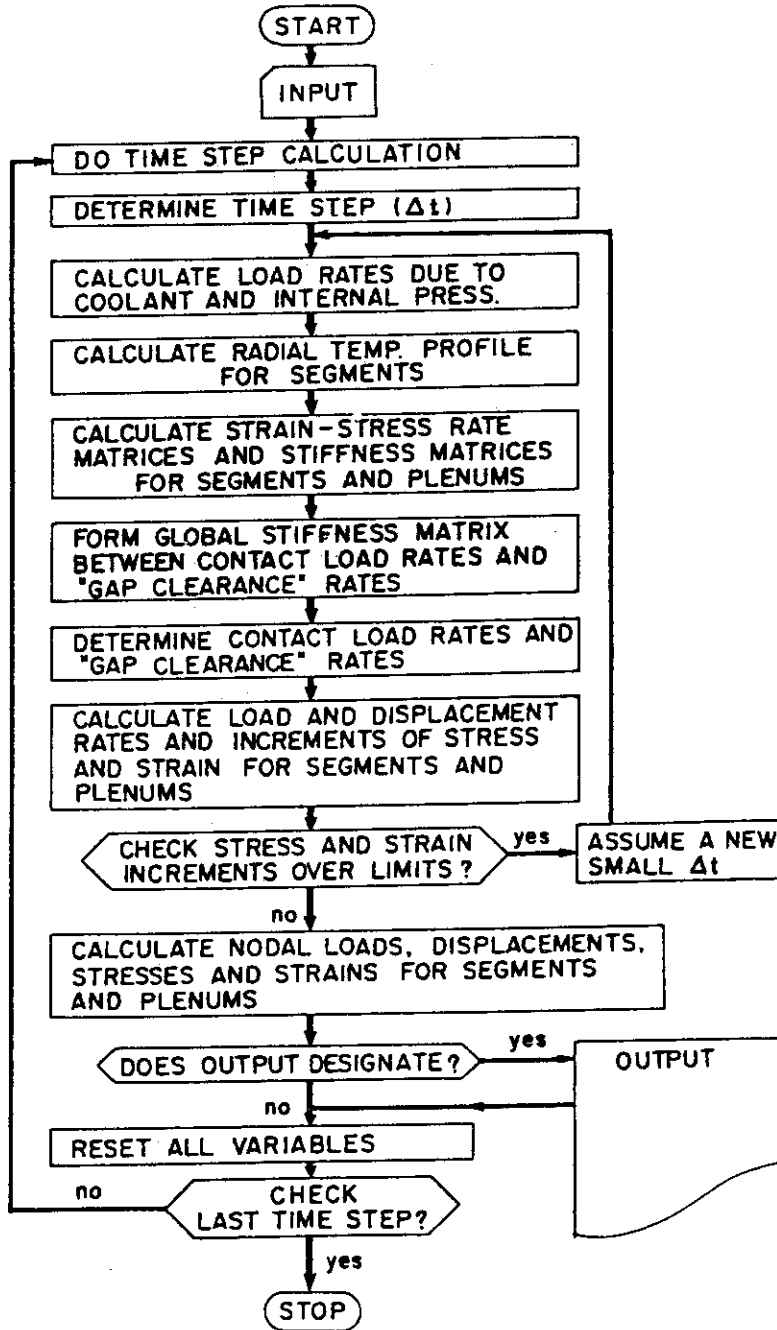


Fig. 2 Flow chart of FREC-4A.

1.4 プログラム構成

FREC-4Aの呼び出し関係を中心にしたプログラム構造を Fig. 3 に示す。FREC-4Aは主プログラムを含み約63の副プログラムから構成される。各副プログラムの機能を Table 1 に示す。

副プログラムは、主プログラムでタイムステップコントロールの中から呼ばれるものとその外側でI/Oに関するものとに分れている。コントロールの中から呼ばれる副プログラムの大部分は、STEP ○○の副プログラム名が付されている。

FREC-4Aの副プログラム中、中心となるものは、STEP3である。STEP3は、燃料棒全体の剛性方程式を作成し、それを解いている。

温度分布の計算は、STEP2 から呼ばれるTEMPとTEMPから呼ばれるTEMPLで行われる。

各種の歪速度モデルによる歪速度計算の制御は、SSASTによっている。SSASTはSTEP3Bから呼ばれる。

弾性、熱膨張、塑性クリープ、照射による体積膨張、気孔の移動および焼きしまりによる歪速度は、副プログラムSASE, SAST, SASC, SASI, SASPとSASDによって計算される。これら歪速度計算に必要な各パラメータの設定と次のタイムステップの初期値の設定は、それぞれSTEP9, STEP7, STEP8, STEP10とSTEP11で行われる。

FREC-4Aは、弾性限をこえた応力による塑性変形と弾性限以下の応力によるクリープ変形は統一してモデル化されている。なお、塑性による歪速度は、SASCの段階では決定できないので、STEP7Lにおいて行われる。

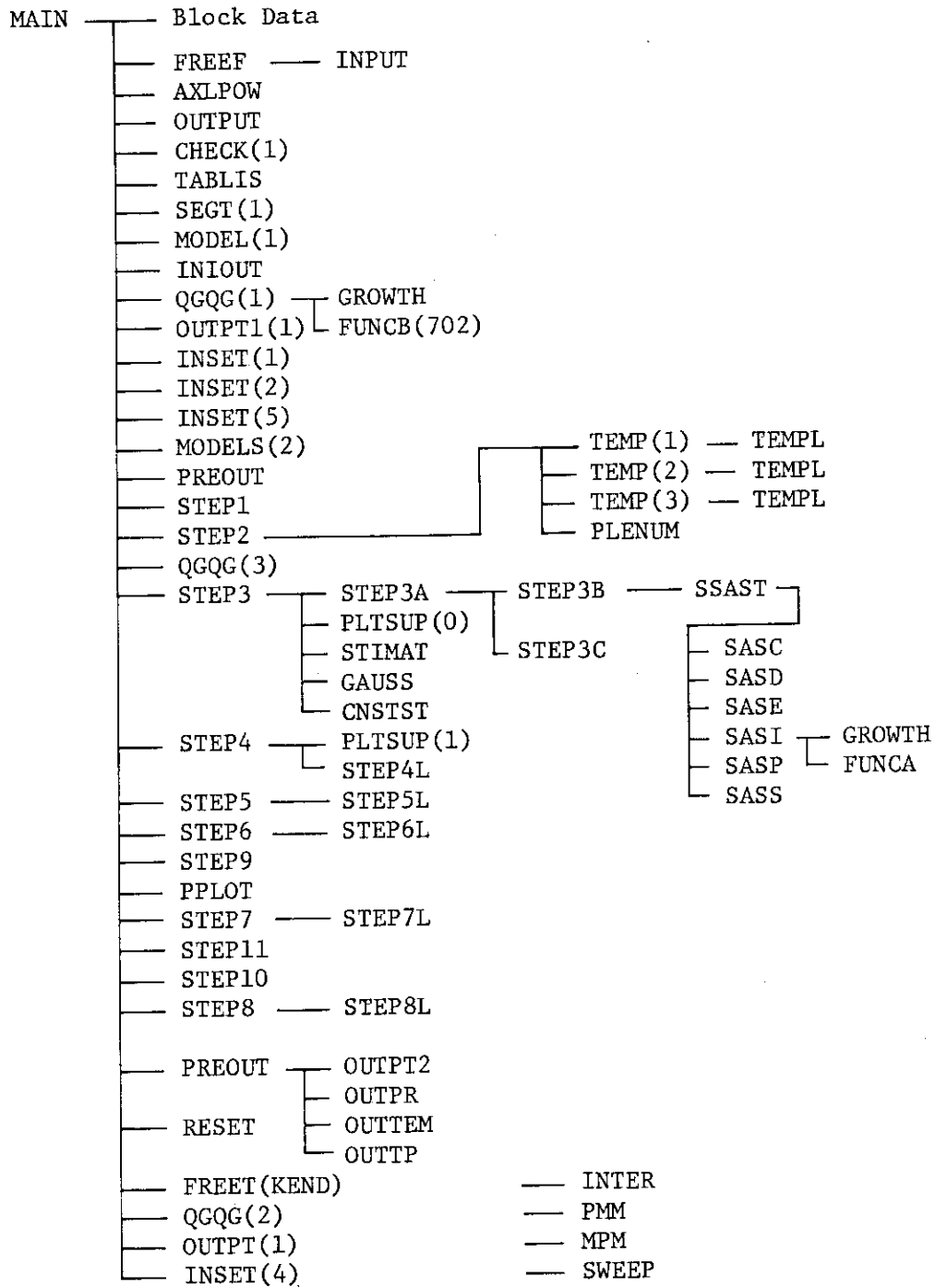


Fig. 3 Structure of FREC-4A

Table 1 各副プログラムの機能

副プログラム名	機 能	備 考
MAIN	プログラム全体の制御	
AXLPOW	入力で軸方向出力分布を与えないとき、軸方向出力分布を作る。	
Block Date	各種変数の初期値を設定	
CHECK	入力データ間の相互矛盾がないか調査し、必要ならば、その情報をプリントする。	
CNSTST	副プログラム STEP 3 から呼ばれ、全体剛性方程式を解く場合、定数を設定する。	
FREFP (KEND)	入力データカード(1~80コラム)を Free Format 形式で読み込む。入力カード番号 9999 が読まれると、KEND=1 となり、読み込まれた history 計算の終了と共にプログラム STOP となる。	
FUNCA (KS 1)	SASI から呼ばれ、スウェリングモデルによる気孔体積の変化を計算する。 KS 1 = 100 気孔内圧力、気孔まわりの応力場の均合を考慮して、気孔体積の変化を計算する。 KS 1 = 200 上記の外、計算結果を store する。	
FUNCB (KS 1)	KS 1 = 702 を除き、GROWTH から呼ばれ、スウェリング率の計算を行う。本文 4.2 参照 KS 1 = 702 : 副プログラム QGQG から呼ばれ、入力カード 5000 の NUT (7) > 1 のとき、燃料棒出力履歴の修正を行う。 KS 1 = 301 : 燃料スウェリングのデータとして、入力カード 5002 から読み込んだデータを使用し、燃料スウェリング履歴データを作成する。 KS 1 = 302 : 燃料スウェリングのデータとして、組込みのデータを使用し、燃料スウェリング履歴データを作成する。	Table 3, 本文 4.2.5 参照

副プログラム名	機 能	備 考
<p>FUNCB (KS 1)</p>	<p>KS 1 = 401 : 被覆照射成長のデータとして, 入力カード 5003 から読込んだデータを使用し, 被覆照射成長履歴データを作成する。</p> <p>KS 1 = 402 : 被覆照射成長データとして, 組込みの関係式 (C-タイプ) を使用し, 被覆照射成長履歴データを作成する。</p> <p>KS 1 = 403 : 上記と同様であるがA-タイプを使用する。</p>	
<p>GAUSS</p>	<p>全体剛性マトリックスの逆マトリックスを作る。</p>	
<p>GROWTH (KSW 1)</p>	<p>SASI および QGQG から呼ばれる。</p> <p>燃料ペレット, 被覆の固体部の照射による体積膨張 (スウェリング or 照射成長) を計算する。</p> <p>KSW 1 = 100, 101 : SASI から呼ばれ, 燃料のスウェリングを計算する。</p> <p>KSW 1 = 200, 201 : SASI から呼ばれ, 被覆の照射成長を計算する。</p> <p>KSW 1 = 301, 302 ; QGQG から呼ばれ, 燃料のスウェリングの計算を行う。履歴データの作成。</p> <p>KSW 1 = 401, 402, 403 : QGQG から呼ばれ, 被覆の照射成長の計算を行う。履歴データの作成。</p>	
<p>FUNCC</p>	<p>クリープ歪速度 ($\dot{\epsilon}_c$) および降伏歪のデータがクリープ歪速度と応力, 加工硬化歪と応力の対として与えられているとき, 計算に使用する形式の係数 (C, G, P, Q) に変換する。</p> <p>すなわち, 例えばクリープ歪速度のデータ ($\sigma_1, \dot{\epsilon}_{c1}$) と ($\sigma_2, \dot{\epsilon}_{c2}$) の組として入力されたとき,</p> $\dot{\epsilon}_{c1} = 10^C (\sigma_1 / 70.31)^G$ $\dot{\epsilon}_{c2} = 10^C (\sigma_2 / 70.31)^G$ <p>を満足する C, G に変換する。</p> <p>加工硬化歪と応力についても同様の操作を行う。</p>	<p>本文 4.4.2 参照</p>
<p>HEAD (KS 1, KS 2)</p>	<p>出力プリントの先頭ラントのプリント等</p> <p>KS 1 = 2 : 入力データのプリントの Top line プリント</p> <p>KS 1 = 3 : 計算結果のプリントの Top line プリント</p> <p>KS 2 = 1 ~ 14 : 出力する副プログラム識別番号 (出力グループに対応)</p>	<p>Table 9 参照</p>

副プログラム名	機 能	備 考						
INIOUT	ϵ_{vs} (m) (燃料の固体部分の体積膨張) vs. (fiss./cc)の値 (組込データ), 出力グループ(6)のプリント							
INPUT	Free Format 形式で FREEF で読み込んだ入力データをカード番号と field に従い所定の変数名に格納する。							
INSET(KEY)	<p>計算開始に当り, 変数の設定等を行う。</p> <p>KEY=1, 分割リング数を入力データから設定する。 全セグメントの燃料ペレットの気孔数, 気孔体積を設定。</p> <p>KEY=2, 全セグメントのリングの坐標設定。 history data を計算に使用する変数に再設定。</p> <p>KEY=3, history data をくりかえし使用する場合, history data を再設定するために準備されたものであるが, FREC-4A の現段階ではプログラム未整備につき使用されない。</p> <p>KEY=4, 新たに history data が入力された場合で, 新たな history data を旧data に接続させる。</p> <p>KEY=5, 全セグメントについての径方向出力分布の設定, および出力グループ(8)をプリントする。</p>							
INTER (KS1, YOKO, TATE)	<p>物性値等 Table Function で与えられたものの内挿計算を行う。</p> <p>KS1 = $M \times 100 + L \times 10 + KKS$ で構成される。 KKS = MOD (KS1, 10) として, KKS = 1, 温度と燃焼度よりガス放出率を算出する。 KKS = 2, (L = 1: 燃料, L = 2: 被覆)</p> <table border="0" style="margin-left: 40px;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">TATE = 1, 熱膨張係数</td> <td rowspan="4" style="font-size: 3em; padding: 0 10px;">}</td> <td rowspan="4" style="vertical-align: middle;">温度の函数として 計算する。</td> </tr> <tr> <td>TATE = 2, ヤング率</td> </tr> <tr> <td>TATE = 3, ポアソン比</td> </tr> <tr> <td>TATE = 4, 熱伝導率</td> </tr> </table> <p>KKS = 3, (L = 1: 燃料, L = 2: 被覆)</p> <p>M = 1, クリープ係数, C M = 2, クリープ係数, G M = 3, 降伏応力係数, P M = 4, 降伏応力係数, Q M = 5, 加工硬化係数, W</p>	TATE = 1, 熱膨張係数	}	温度の函数として 計算する。	TATE = 2, ヤング率	TATE = 3, ポアソン比	TATE = 4, 熱伝導率	
TATE = 1, 熱膨張係数	}	温度の函数として 計算する。						
TATE = 2, ヤング率								
TATE = 3, ポアソン比								
TATE = 4, 熱伝導率								

副プログラム名	機 能	備 考
INTER (KSLYOKO, TATE)	<p>上記の各係数を温度および fission rate 等を指標として算出する。</p> <p>KKS = 4 (L = 1: 燃料, L = 2: 被覆)</p> <p>固体部分の体積成長速度の補正係数 R_{vp} を温度, 圧力を指標として算出する。(SASI より呼ばれる)</p> <p>KKS = 5</p> <p>気孔個数密度の温度による補正係数 R_{gasn} を算出する。(STEP 10 より呼ばれる)</p> <p>KKS = 7 (L = 1: 下部プレナム, L = 2: 上部プレナム)</p> <p>副プログラム PLENUM から呼ばれプレナム内の平均温度 (内圧評価用) を計算する。</p>	
MODELS (KEY)	<p>歪速度モデルの使用等の状況をプリントする。</p> <p>KEY = 1, 入力データより各歪速度モデルの選定および出力副プログラムの指定, Key word を設定する。</p> <p>KEY = 2, その計算におけるモデルの使用状況について出力グループ(9)をプリントする。</p>	
MPM	マトリックスの加算を行う。	
MPROP	<p>MAIN から呼ばれ, クリープ歪速度等の係数の変換が必要なとき, FUNCC を呼び出し, その変換を行う。これらの変換が行われると, IISW=1 に設定され, 変換された係数が出力グループ(3)としてプリントされる。</p>	
OUTPR	PREOUT から呼ばれ, 指定されたセグメントに関する計算結果, 出力グループ (11) の出力を行う。	
OUTPUT	入力データを指定の変数に格納後の, 入力データの状態, 出力グループ(2)を出力する。	
OUTPT 1	計算を行うために入力あるいは設定された history data, 出力グループ(7)をプリントする。	
OUTPT 2	燃料棒全体 (全セグメント, プレナム等) についての計算結果, 出力グループ (10) の出力を行う。通常, history data の各節において出力される。	

副プログラム名	機 能	備 考
OUTTEM	PREOUT から呼ばれ、指定されたセグメントに関する計算結果、出力グループ(13)を出力する。ただし、この出力はデバック用出力である。	
OUTTP	計算結果をプロッタ等で処理するために、計算結果のいくつかを機番1に出力する。	
PLENUM	プレナム圧力を計算する。	
PLTSUP (LSW)	LSW=0: 上, 下部プレナム内に挿入の構造物の変化, プレナムスプリング長, 荷重の変化等を計算する。 LSW=1: 副プログラムSTEP 4 から呼ばれ, 各セグメントにかかる外荷重(接触力を含む)速度(各セグメントの応力に関する境界条件)を設定する。	
PMM	マトリックスの乗算	
P PLOT	計算結果のうち, 燃料棒出力, ペレットスタック高さ等の照射時刻による変化をラインプリンタによってプロットする(出力グループ(12))。	
PREOUT	計算結果の出力のため OUTPT 2, OUTPR, OUTTEM, OUTTP を制御して出力を行う。また, 出力各変数の出力前後の置きかえ, Store を行う。	
QGGG (KS 1)	KS 1 = 1, 2 history data がすべてにわたって入力されていないとき, 補完すべき history data を作成する。 (核分裂速度, 高速中性子束フルーエンス, 固体部体積膨張率) KS 1 = 3, 時間ステップ Δt の間の核分裂速度, 高速中性子束を設定する。	
RESET	各time ステップの終了時において, 次の時間ステップに関する各変数の初期値を設定する。	
SASC (KSW)	塑性クリープによる歪速度の計算。 KSW=1: 燃料ペレット, KSW=2: 被覆	
SASD	燃料ペレットの焼きしまりによる歪速度の計算	
SASE (KSW)	弾性による歪速度の計算 KSW=1: 燃料ペレット, KSW=2: 被覆	

副プログラム名	機 能	備 考
SASI (KSW)	照射による体積膨張（スウェリング）の歪速度計算。 KSW=1：燃料ペレット，KSW=2：被覆	
SASP	燃料ペレット内の気孔の移動による歪速度の計算を行う。	
SASS (KSW)	歪速度モデルのオプション指定がなされないとき，弾性，熱膨張歪速度を設定する。ヤング率（E），ポアソン比（ ν ），熱膨張係数（ α ）に温度によらない固定値が使用される。 KSW=1：燃料ペレット $E = 1.5 \times 10^6$ (kp/cm ²) $\nu = 0.3$ $\alpha = 10.52 \times 10^{-6}$ KSW=2：被覆管 $E = 8 \times 10^5$ (kp/cm ²) $\nu = 0.42$ $\alpha = 6.7 \times 10^{-6}$	
SAST (KSW)	熱膨張歪速度の計算。 KSW=1：燃料ペレット，KSW=2：被覆	
SEGT	計算に使用する塑性-クリープの係数による降伏応力，クリープ応力を計算し，プリントアウトする。	
SSAST	歪速度選定オプションに従いSASC，SASD，SASE，SASI，SASS，SAST等呼び出し，歪速度を計算する。	
STEP 1	照射履歴と計算状態（最大応力変動巾等）に従って時間ステップ巾（ Δt ）を設定する。	
STEP 10	時間ステップ Δt が進んだ後の燃料ペレットの気孔移動に関する諸変数を再設定する。	
STEP 11	時間ステップ Δt が進んだ後の燃料ペレットの焼きしまりに関する諸変数を再設定する。	
STEP 2	燃料棒の内・外圧の変化を計算し，被覆および燃料ペレットの外荷重変化速度を計算する（応力分布を求めるための境界条件の1つ）。また，自重を考慮する場合は，その処理を行う。	

副プログラム名	機 能	備 考
STEP 3	STEP 3Aを呼んで各セグメントに関するギャップ間隙—接触力の剛性マトリックスを作る。 このマトリックスをもとに燃料棒全長に関する剛性マトリックスを作成する。ギャップ間隙と接触力速度に関する剛性方程式を解いてギャップ間隙の変位速度，接触力速度を計算する。	
STEP 3A	各セグメントのギャップ間隙変位速度と接触力速度に関する柔性マトリックスの作成。	
STEP 3B	各セグメントについて，燃料，被覆の分割リングの各リングについての剛性マトリックスの計算	
STEP 3C	燃料および被覆について分割のリングをつなぎ合せ燃料と被覆の単一物体としたときの剛性マトリックスを作成する。	
STEP 4 STEP 4L	各セグメント中の燃料，被覆を単一物体と考えたときの内，外面および長手方向の変位速度を計算する。	
STEP 5 STEP 5L	各セグメント中の燃料，被覆の全リングに関する変位速度と荷重速度を計算する。	
STEP 6 STEP 6L	全リングについての歪速度と応力速度を計算する。	
STEP 7 STEP 7L	時間ステップ Δt が進んだ後の塑性〜クリープに関する諸変数を再設定する。	
STEP 8 STEP 8L	時間ステップ Δt が進んだ後のスウェリングに関する諸変数を再設定する。	
STEP 9	全セグメントにつき，その中に含まれる，リング等の荷重，変位，歪，応力を計算する。	
STIMAT	全セグメント，プレナムのギャップ間隙変位速度と接触力速度間の剛性マトリックスを単位要素と考えて，燃料棒全体の剛性マトリックスを作成する。	
SWEEP	与えられたマトリックスの逆マトリックスを作成する。	
TABLIS	計算に使用する Tabular Function（主として物性値で入力データとして与えられる）のプリントアウト。	

副プログラム名	機 能	備 考
TEMP(LIT)	<p>副プログラム STEP 2 から呼ばれ、燃料棒内に考えた全節点の温度を計算するためのコントロールを行う。照射履歴データから各セグメントの冷却水温度を定める。</p> <p>LIT = 1: 下部プレナムに接する燃料ペレットの温度を計算する。</p> <p>LIT = 2: 上部プレナムに接する燃料ペレットの温度を計算する。</p> <p>LIT = 3: ペレットスタック内の全セグメントについて半径方向温度分布を計算する。</p>	
TEMPL	<p>副プログラム TEMP で設定された境界条件の冷却水温度をもとに半径方向各節点の温度を差分法によって計算する。</p>	
TMX	<p>与えられたマトリックスの転換マトリックスを作成する。</p>	

1.5 プログラム沿革

FREC-4Aは、FREC-3²⁾を基礎に拡張されたプログラムである。FREC-3は、燃料棒のある単位長さ部分を計算対象としていた。FREC-4Aはこれを軸方向に拡張しさらに、上の下部プレナムをもその計算対象範囲に含めた。しかしながら、燃料ペレットおよび被覆管の熱的、弾塑性的な挙動に関するモデルは、多少の修正を含みほとんどそのままFREC-3のモデルを流用している。

FREC-3では、計算対象が燃料棒の部分であったため、燃料棒内圧は、照射履歴の1種としての入力データとして取扱われた。これは、燃料棒内圧を評価するためにかなりの仮定等を設けなければならないからである。FREC-4Aは燃料棒全体を取扱うので、燃料棒内圧をプログラム内で処理することにした。

プログラム内の応力、歪等に関するモデルは、本質的にCYGRO-2, 3^{3), 4)}(米国Whestinghouse社開発のプログラム)によっている。

FREC-4Aの当初の予定では、

- 1) 被覆管の偏肉によるオーバリティの変化
- 2) 燃料棒内の非軸対称熱発生
- 3) 上記2) やスペーサによる燃料棒の軸方向伸びの拘束による燃料棒の曲りとそれによって発生する被覆管曲げモーメント

等のモデルを組込むことを予定していた。しかしながら、これらのモデルは次の機会にゆずることとし、これまでに完成したプログラムをFREC-4Aとしてまとめた。

なお、このプログラムを使用する場合、物性値の入力はかなりむずかしい。物性値の作成、プログラム計算に使用する形式への変換等をプログラムに組込むことも一応考えてみた。しかし、そのためにプログラムが大きくなり、ターンアラウンドタイムの低下を引き起すことをさけて、現段階ではプログラム化されていない。

2. 解 法

先に1.2節の幾何学的モデルで述べたように、FREC-4Aは燃料棒内の燃料ペレットスタック部を軸方向に分割し、さらにこの中を半径方向に同心状の有限要素リングに分割する。

半径方向に分割したリングに適用する歪速度等のモデルにはFREC-3のモデルが利用される。これらリングに関する応力速度-歪速度マトリックス、荷重速度-変位速度の剛性マトリックスおよび各セグメントにおける接触力速度-ギャップ寸法変位間の剛性方程式の作成法についてはFREC-3の報告書²⁾を参照されたい。なお、各セグメントに関する接触力速度とギャップ寸法変位間の剛性方程式の導出については、Appendix-Aに説明してある。

各セグメントの接触力速度に関する剛性方程式が得られた後、これを使用して、燃料棒全体の接触力速度とギャップ寸法変位速度間の全体剛性方程式を構成する方法をこの章で記述する。

2.1 剛性方程式

燃料スタック（セグメント）、上部、下部プレナム領域に分けてその領域毎の要素剛性方程式を導き、終りに燃料棒全体の剛性方程式が導かれる。

2.1.1 セグメント部の剛性方程式

セグメントについての剛性方程式の導出とその定式化について説明する。

燃料ペレットスタック領域を1個のセグメントに分割する。その結果、 $I+1$ 個の境界が規定される。

第 i 番目のセグメントを考えよう。タイムステップの始めにおいて、セグメント内の燃料ペレットと被覆管の軸方向の長さは常に等しいとする。セグメントの下部の境界面において、燃料ペレットと被覆管は同一平面で、かつお互に軸方向に移動しないと仮定して、プログラムCYGRO（中心対称二次元有限要素法を利用したプログラム）で開発されている手法³⁾をセグメントに適用する。ただし、上記の軸方向拘束の仮定は、最終的に取りはずされる。

Fig. 4に示す接触力（図中の $f_1^{(i)}$ 、 $f_2^{(i)}$ 、 $f_3^{(i)}$ ）の時間微分である接触力速度、 $\{\dot{f}^{(i)}\}$ と、次の如く定義する“ギャップ間隙”

$$\{u^{(i)}\} = \begin{Bmatrix} u_1^{(i)} \\ u_2^{(i)} \\ u_3^{(i)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_{fa} - R_{pb} \\ R_{ca} - R_{fb} \\ L_{cz}^{(i)} - L_{fz}^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (2.1)$$

の時間微分の変位速度 $\{\dot{u}^{(i)}\}$ との間には、

$$\{\dot{f}^{(i)}\} = \{\dot{f}_s^{(i)}\} + [k^{(i)}] \{\dot{u}^{(i)}\} \quad (2.2)$$

で表わされる剛性方程式が成立する。この導出の詳細については、Appendix-Aを参照されたい。

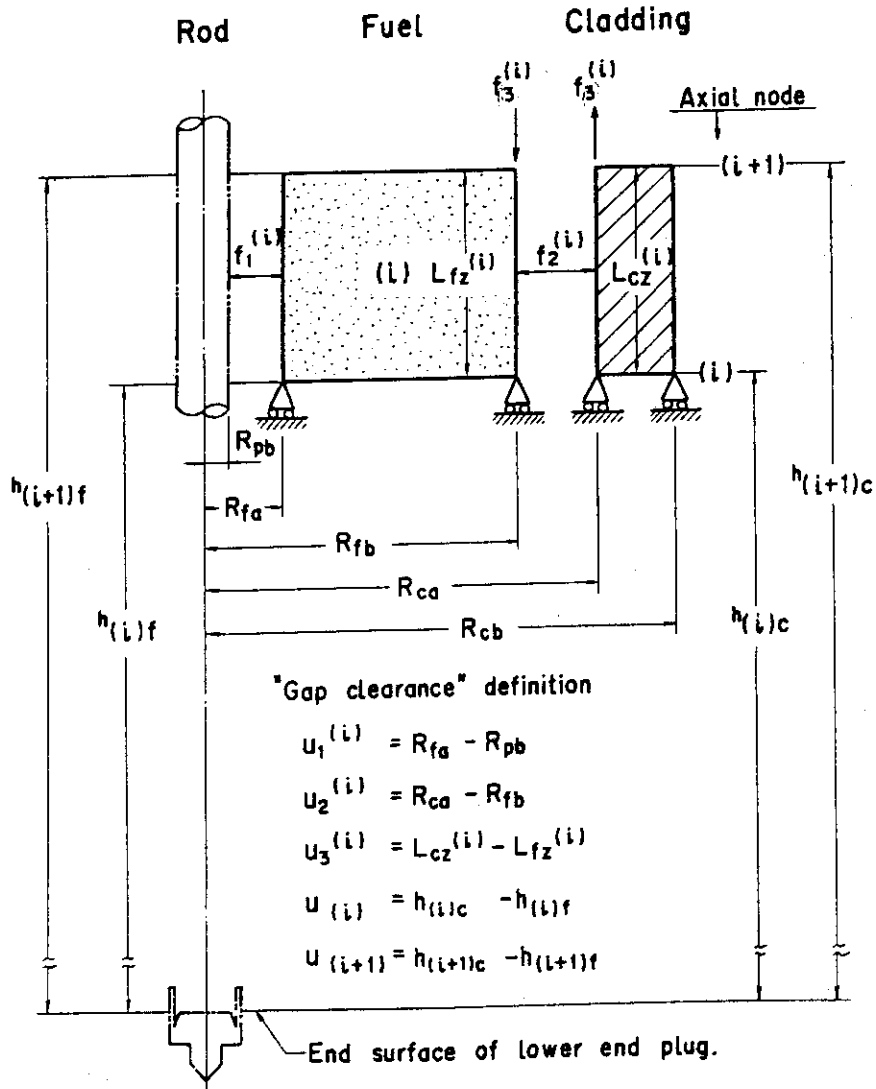


Fig. 4 Contact loads and "gap clearances".

この (2.2) 式を書き直すと,

$$\begin{Bmatrix} \dot{f}_1^{(i)} \\ \dot{f}_2^{(i)} \\ \dot{f}_3^{(i)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{f}_{s1}^{(i)} \\ \dot{f}_{s2}^{(i)} \\ \dot{f}_{s3}^{(i)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & k_{13}^{(i)} \\ & k_{22}^{(i)} & k_{23}^{(i)} \\ \text{Sym.} & & k_{33}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1^{(i)} \\ \dot{u}_2^{(i)} \\ \dot{u}_3^{(i)} \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

となる。ここで、 $\dot{f}_{s1,2,3}$ は燃料棒内、外圧力および熱応力のような初期歪等に基づく荷重速度である。また、 $[k^{(i)}]$ は剛性マトリックスを表す。

$f_1^{(i)}$ は、燃料ペレットの内面に作用する半径方向接触力、 $f_2^{(i)}$ と $f_3^{(i)}$ は燃料と被覆の間の半径方向および軸方向の接触力である。ペレット内面の軸方向接触力は、2.1節に述べた仮定により発生しない。また、中心ロッドがなければ、ペレット内面での接触力、 $f_1^{(i)}$ は常に0である。燃料ペレットと被覆との間に発生する軸方向の接触力の作用点は、そのセグメントの上部の境界面と考えることにする (Fig. 4 参照)。なお、この軸方向接触力の向きは燃料ペレットと被覆とについて逆になる。プログラムは、Fig. 4 に示す如く燃料ペレットに圧縮側に作用する力を正にとる。

上記(2.3)式は、(i)番目のセグメントの下部端面の軸方向の移動が Fig. 4 に示すように拘束されているとして導かれた。そのため、この方程式を要素方程式として、ペレットスタック全体の剛性方程式には使用できない。

全体剛性方程式に使用する要素方程式とするためには、下端面の拘束を取りはずす必要がある。

まず、軸方向ギャップ間隙 $u_3^{(i)}$ を、ある基準面からの高さで表わすことを考える。プログラムでは、基準面として燃料棒の下部端栓の上面を選んでいる。基準面から軸方向ノード(i)と(i+1)番までの高さを燃料ペレットおよび被覆管について、それぞれ $h_{(i)f}$, $h_{(i+1)f}$, $h_{(i)c}$, $h_{(i+1)c}$ とする (Fig. 4, Fig. 5 参照)。

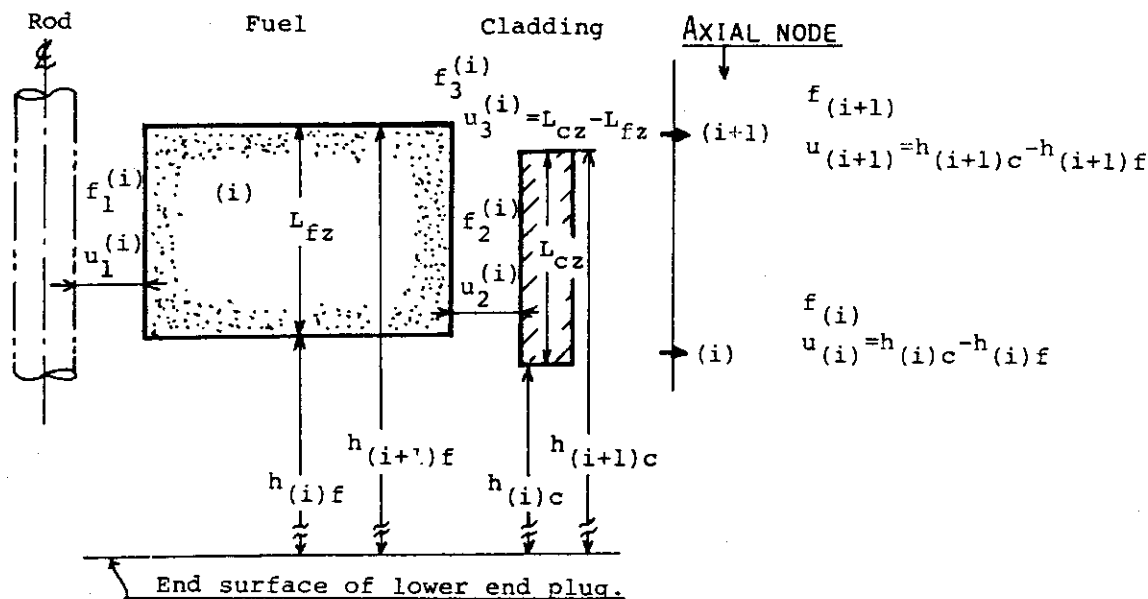


Fig. 5 Contact loads and "gap clearances" in a segment.

$u_3^{(i)}$ は先の定義より、

$$u_3^{(i)} = L_{cz} - L_{fz}$$

である。これは、

$$\begin{aligned} u_3^{(i)} &= (h_{(i+1)c} - h_{(i)c}) - (h_{(i+1)f} - h_{(i)f}) \\ &= (h_{(i+1)c} - h_{(i+1)f}) - (h_{(i)c} - h_{(i)f}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

と表わされる。セグメントの軸方向ノード(i), (i+1)番の"軸方向ギャップ間隙", $u_{(i)}$, $u_{(i+1)}$ を

$$\left. \begin{aligned} u_{(i)} &= h_{(i)c} - h_{(i)f} \\ u_{(i+1)} &= h_{(i+1)c} - h_{(i+1)f} \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

と定義すると (Fig. 4, 5 参照), $\dot{u}_3^{(i)}$ は、

$$\dot{u}_3^{(i)} = \dot{u}_{(i+1)} - \dot{u}_{(i)} \quad (2.6)$$

と表すことができる。

一方、軸方向ノード (i+1) 番目の軸方向接触力 $f_{(i+1)}$ は

$$f_{(i+1)} = f_3^{(i)} \quad (2.7)$$

であり、ノード (i) 番目の軸方向接触力 $f_{(i)}$ は、Fig. 4 に示される軸方向移動を拘束した支持点にかゝる $f_3^{(i)}$ の力と考えられ、その大きさは $f_3^{(i)}$ であり、向きが逆になる (Fig. 6 参照)。

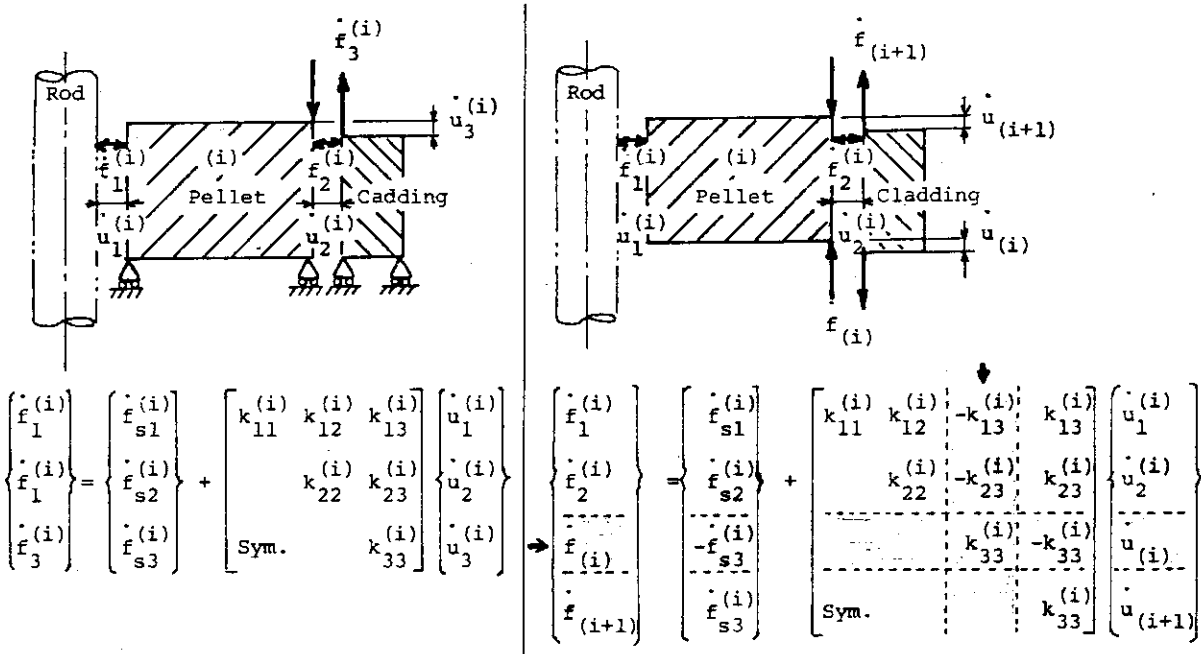


Fig. 6 Axial expansion of ith segment stiffness equation obtained by the method of CYGRO, using axial contact load rates $\dot{f}_{(i)} = -\dot{f}_3^{(i)}$, $\dot{f}_{(i+1)} = \dot{f}_3^{(i)}$ and gap clearance rates $\dot{u}_3^{(i)} = \dot{u}_{(i+1)} - \dot{u}_{(i)}$.

すなわち、

$$f_{(i)} = -f_3^{(i)} \quad (2.8)$$

である。

(2.6) 式を (2.3) 式に代入し、かつ、 $\dot{f}_{(i)}$ を追加して、(2.3) 式を書き直せば、

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}_1^{(i)} &= \dot{f}_{s1}^{(i)} + k_{11}^{(i)} \dot{u}_1^{(i)} + k_{12}^{(i)} \dot{u}_2^{(i)} - k_{13}^{(i)} \dot{u}_{(i)} + k_{13}^{(i)} \dot{u}_{(i+1)} \\ \dot{f}_2^{(i)} &= \dot{f}_{s2}^{(i)} + k_{21}^{(i)} \dot{u}_1^{(i)} + k_{22}^{(i)} \dot{u}_2^{(i)} - k_{23}^{(i)} \dot{u}_{(i)} + k_{23}^{(i)} \dot{u}_{(i+1)} \\ \dot{f}_{(i)} &= \dot{f}_{s3}^{(i)} - k_{31}^{(i)} \dot{u}_1^{(i)} - k_{32}^{(i)} \dot{u}_2^{(i)} + k_{33}^{(i)} \dot{u}_{(i)} - k_{33}^{(i)} \dot{u}_{(i+1)} \\ \dot{f}_{(i+1)} &= \dot{f}_{s3}^{(i)} + k_{31}^{(i)} \dot{u}_1^{(i)} + k_{32}^{(i)} \dot{u}_2^{(i)} - k_{33}^{(i)} \dot{u}_{(i)} + k_{33}^{(i)} \dot{u}_{(i+1)} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

が得られる。

(2.9) 式をマトリックスで表示すれば、次のように書くことができる。

$$\begin{Bmatrix} \dot{f}_1^{(i)} \\ \dot{f}_2^{(i)} \\ \dot{f}^{(i)} \\ \dot{f}^{(i+1)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{f}_{s1}^{(i)} \\ \dot{f}_{s2}^{(i)} \\ -\dot{f}_{s3}^{(i)} \\ \dot{f}_{s3}^{(i)} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11}^{(i)} & k_{12}^{(i)} & -k_{13}^{(i)} & k_{13}^{(i)} \\ & k_{22}^{(i)} & -k_{23}^{(i)} & k_{23}^{(i)} \\ & & k_{33}^{(i)} & -k_{33}^{(i)} \\ \text{Sym.} & & & k_{33}^{(i)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1^{(i)} \\ \dot{u}_2^{(i)} \\ \dot{u}^{(i)} \\ \dot{u}^{(i+1)} \end{Bmatrix} \quad (2.10)$$

この式は、(2.3)式の軸方向拡張形であり、先にセグメントの下端面は軸方向に移動しないとされた仮定の拘束は、この式では解除されている。

FREC-4Aは、(2.10)式をセグメントに関する要素剛性方程式として使用する。

2.1.2 プレナム領域の剛性方程式

プレナム領域においては、弾性と熱膨張による軸方向伸びだけを考える。半径方向の変化は無視される。

(1) 下部プレナム領域

下部プレナムに Fig. 7 (b)に示すような支持カラーが挿入されている場合を考えよう。

プレナム領域の支持カラーと被覆の軸方向伸び速度は

支持カラー, s について

$$\dot{L}_{sz}^{(e)} = \alpha_s L_{sz}^{(e)} \dot{T}_s + \dot{w}_s / k_s$$

被覆, c について

$$\dot{L}_{cz}^{(e)} = \alpha_c L_{cz}^{(e)} \dot{T}_s + \dot{w}_c / k_c$$

(2.11)

となる。ここに、 \dot{w}_s と \dot{w}_c は

$$\dot{w}_s = -A_s \dot{P}_{int} - \dot{f}_3^{(e)}$$

$$\dot{w}_c = \pi R_{ca}^2 \dot{P}_{int} - \pi R_{cb}^2 \dot{P}_{out} + \dot{f}_3^{(e)}$$

(2.12)

で決定される。ばね定数 k_s と k_c は

$$k_s = A_s E_s / L_{sz}^{(e)}$$

$$k_c = \pi (R_{cb}^2 - R_{ca}^2) E_c / L_{cz}^{(e)}$$

(2.13)

である。

(2.11)に(2.12)式を代入し、軸方向間隙変位速度 $\dot{u}_3^{(e)} (= \dot{L}_{cz}^{(e)} - \dot{L}_{sz}^{(e)})$ について解けば、

$$\dot{u}_3^{(e)} = a_{e1} \dot{T}_s + a_{e2} \dot{f}_3^{(e)} \quad (2.14)$$

がえられる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_{\ell t} &= (\alpha_c L_{cz} \dot{T}_c - \alpha_s L_{sz} \dot{T}_s) + \pi (R_{ca}^2 \dot{P}_{int} - R_{cb}^2 \dot{P}_{out}) / k_c \\ &\quad + A_s \dot{P}_{int} / k_s \\ a_{\ell \ell} &= 1/k_c + 1/k_s \end{aligned} \right\} \quad (2.15)$$

である。

(2.14) 式を $\dot{f}_3^{(0)}$ について解くことにより、

$$\dot{f}_3^{(0)} = \dot{f}_{\ell t} + k_{\ell \ell} \dot{u}_3 \quad (2.16)$$

がえられる。ここで

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}_{\ell t} &= -\dot{a}_{\ell t} / a_{\ell \ell} \\ k_{\ell \ell} &= 1/a_{\ell \ell} \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

である。

下部プレナムの下部面（下部端栓の上端面）が第（0）番の軸方向ノードであるとしよう。また、軸方向ノード、0と1番における軸方向接触力を $\dot{f}_{(0)}$ 、 $\dot{f}_{(1)}$ とする。2.2.1で考えたことと全く同じ方法で、下部プレナム領域における剛性方程式が次のように得られる。

$$\left\{ \begin{array}{c} \dot{f}_{(0)} \\ \dot{f}_{(1)} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} -\dot{f}_{\ell t} \\ \dot{f}_{\ell t} \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} k_{\ell \ell} & -k_{\ell \ell} \\ -k_{\ell \ell} & k_{\ell \ell} \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \dot{u}_{(0)} \\ \dot{u}_{(1)} \end{array} \right\} \quad (2.18)$$

下部プレナムに支持カラーでなく、こいるばねが挿入されている場合には、ばねにかゝる荷重が予め負荷された荷重以上に達した後、ばねはたわみを開始するとする。ばねの場合には、先の(2.13)式が与えるばね定数 k_s をそのこいるばねのばね定数で置き換える。

(2) 上部プレナム領域

下部プレナム領域に適用したものと全く同じ方法が上部プレナム領域にも適用される（Fig. 7(a)参照）。軸方向ギャップ間隙変位速度 $\dot{u}_3^{(p)} (= \dot{L}_{cz} - \dot{L}_{sz})$ は

$$\dot{u}_3^{(p)} = a_{pt} \dot{f}_3^{(p)} + a_{pp} \dot{f}_3^{(p)} \quad (2.19)$$

となる。ここで、

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_{pt} &= (\alpha_c L_{cz} \dot{T}_c - \alpha_s L_{sz} \dot{T}_s) + \pi (R_{ca}^2 \dot{P}_{int} - R_{cb}^2 \dot{P}_{out}) / k_c \\ &\quad + A_s \dot{P}_{int} / k_s \\ a_{pp} &= 1/k_c + 1/k_s \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

(2.19) 式を $\dot{f}_3^{(p)}$ について解いて

$$\dot{f}_3^{(p)} = \dot{f}_{pt} + k_{pp} \dot{u}^{(p)} \quad (2.21)$$

が得られる。ここに

$$\left. \begin{aligned} \dot{f}_{pt} &= -\dot{a}_{pt} / a_{pp} \\ k_{pp} &= 1 / a_{pp} \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

である。

上部プレナムの上端面を軸方向ノード第 (I+2) 番であると考えよう。軸方向ノード (I+1) と (I+2) における軸方向接触力を $f_{(I+1)}$, $f_{(I+2)}$ とすれば, 上部プレナム領域における剛性方程式

$$\begin{Bmatrix} \dot{f}_{(I+1)} \\ \dot{f}_{(I+2)} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\dot{f}_{pt} \\ \dot{f}_{pt} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{pp} & -k_{pp} \\ -k_{pp} & k_{pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{(I+1)} \\ \dot{u}_{(I+2)} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

がえられる。

2.2 全体剛性方程式とその解法

燃料ペレットスタック (セグメント), 上部と下部プレナム領域の剛性方程式をもとに, 燃料棒全体に関する剛性方程式が, 有限要素法の手法を用いて形成される。すなわち,

$$\{\dot{F}\} = \{\dot{F}_{gt}\} + [K_{gg}] \{\dot{u}\} \quad (2.24)$$

となる。

1例として, 軸方向に3セグメントとした場合の剛性マトリックス $[K_{gg}]$ の例を Fig. 8 に示す。また, 方程式の構造を燃料棒と対比して Fig. 9 に示す。

$\dot{u}_{(0)}$ と $\dot{u}_{(I+2)}$ は燃料棒内部の最下部と最上部面における被覆管と挿入の支持カラーあるいはばね間の相対的移動率を表わしている。これらの場所において軸方向の間隙は通常生じない。そこで, プログラムでは, この最上面および最下面を相互移動のない, 軸方向拘束面であるとする。それ故, 全体剛性方程式において $\dot{u}_{(0)}$ と $\dot{u}_{(I+2)}$ は常に0となる。そのとき, 剛性マトリックス $[K_{gg}]$ 中の軸方向ノード(0)番および (I+2) 番に対応する行および列は除去することができ。さらに, 下部プレナムがない燃料棒では, 同様の理由で, $\dot{u}_{(1)} = 0$ でなければならず, そのとき軸方向ノード(1)番に対応する行と列は除去される。

セグメントに作用する接触力速度 $\{\dot{F}\}$ とギャップ間隙変位速度 $\{\dot{u}\}$ は, (2.24) 式を解くことによって得られる。その解法の手順の概要は次の通りである。

1. すべての接触力速度を0と仮定し ($\{\dot{F}\} = -\{F\} / \Delta t$), (2.24) 式を解く。求められた $\{\dot{u}\}$ をもとに予想されるギャップ間隙 $\{u\}$ を $\{u\}_{t+\Delta t} = \{u\}_t + \{\dot{u}\} \Delta t$ で求める。

2. 求めた予想されるギャップ間隙を用い、次の処理を行う。

i 番目のセグメントに関し、燃料ペレットと被覆管の間の半径方向ギャップ間隙 $u_2^{(i)}$ の正、負を調べる。

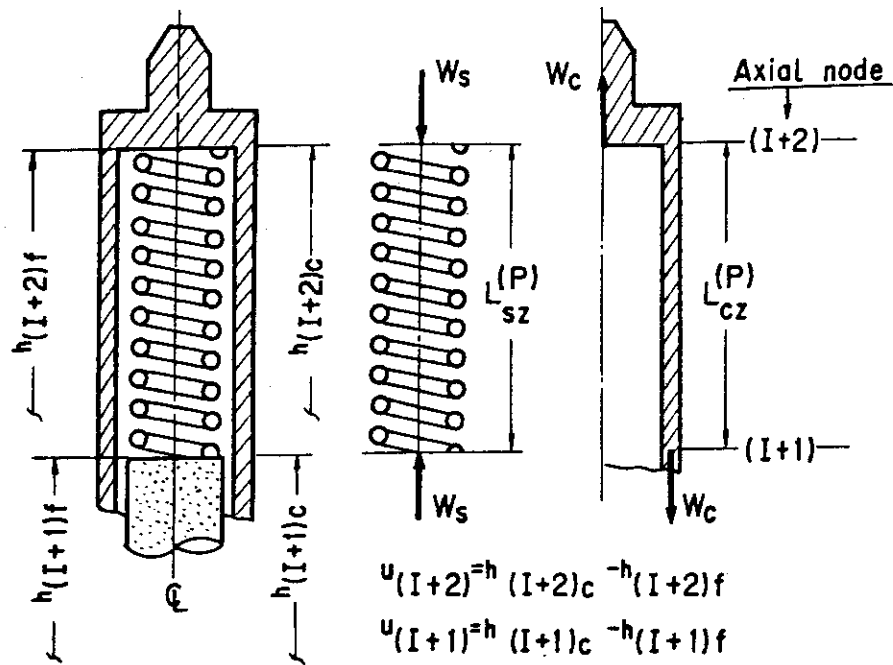
(1) もし $u_2^{(i)}$ が正ならば、接触力 $F_2^{(i)}$ が 0 になるように設定する。

(2) もし $u_2^{(i)}$ が負ならば、ギャップ間隙が 0 になるように設定する ($\dot{u}_2^{(i)} = u_2^{(i)} / \Delta t$)。

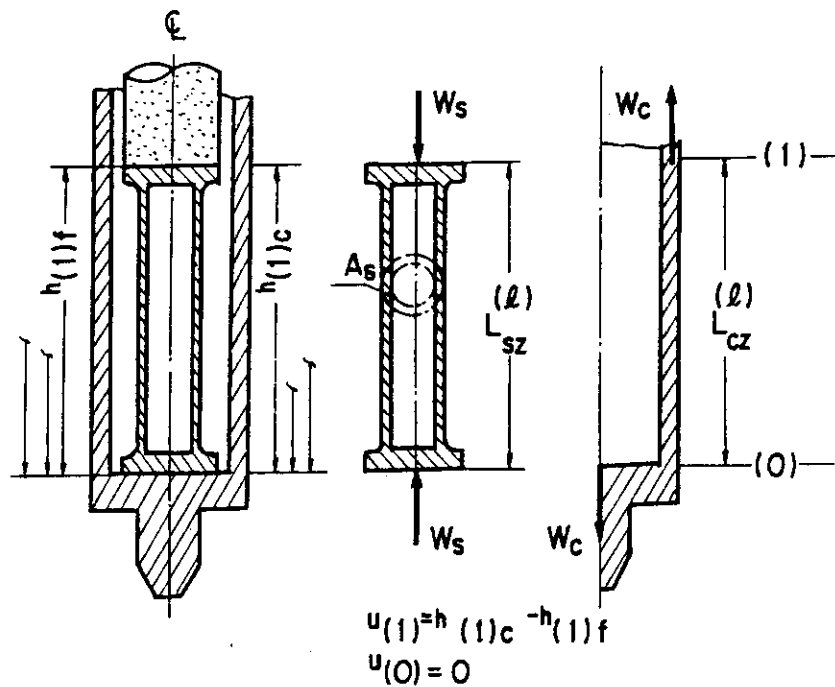
さらに、軸方向接触力が $|F_{(i+1)}| = \mu F_2^{(i)}$ を満足するように決定される。

3. 以上の条件の下に、すべての接触力速度とギャップ間隙がマトリックス演算の数値解法によって決定される。

接触力速度とギャップ間隙が決定されると、セグメントの荷重と変位の境界条件がすべて定められたことになり、要素剛性方程式にたちもどり、これまでの手法を逆にたどって荷重速度と変位速度が求められる。さらに、各セグメントの荷重、変位が決定され、最終的にセグメント内の応力、歪の分布が求められる。



(a) Upper plenum



(b) Lower plenum

Fig. 7 Loads and "gap clearances" in plenums.

Axial node		0	1	2	3	4	5
0	k_{pp}		$-k_{pp}$				
	$k_{11}^{(1)}$	$k_{12}^{(1)}$	$-k_{13}^{(1)}$		$k_{13}^{(1)}$		
		$k_{22}^{(1)}$	$-k_{23}^{(1)}$		$k_{23}^{(1)}$		
1			$k_{pp} + k_{33}^{(1)}$		$-k_{33}^{(1)}$		
			$k_{11}^{(2)}$	$k_{12}^{(2)}$	$-k_{13}^{(2)}$		$k_{13}^{(2)}$
				$k_{22}^{(2)}$	$-k_{23}^{(2)}$		$k_{23}^{(2)}$
2					$k_{33}^{(1)} + k_{33}^{(2)}$		$-k_{33}^{(3)}$
					$k_{11}^{(3)}$	$k_{12}^{(3)}$	$-k_{13}^{(3)}$
						$k_{22}^{(3)}$	$-k_{23}^{(3)}$
3						$k_{33}^{(2)} + k_{33}^{(3)}$	$-k_{33}^{(3)}$
4		sym.					$k_{33}^{(3)} + k_{pp}$
5							k_{pp}

Fig. 8 Formation of global stiffness matrix in FREC-4A for 3 segments case. Columns and rows corresponding to axial node 0 and 5 are eliminated from the matrix, because the nodes restrained.

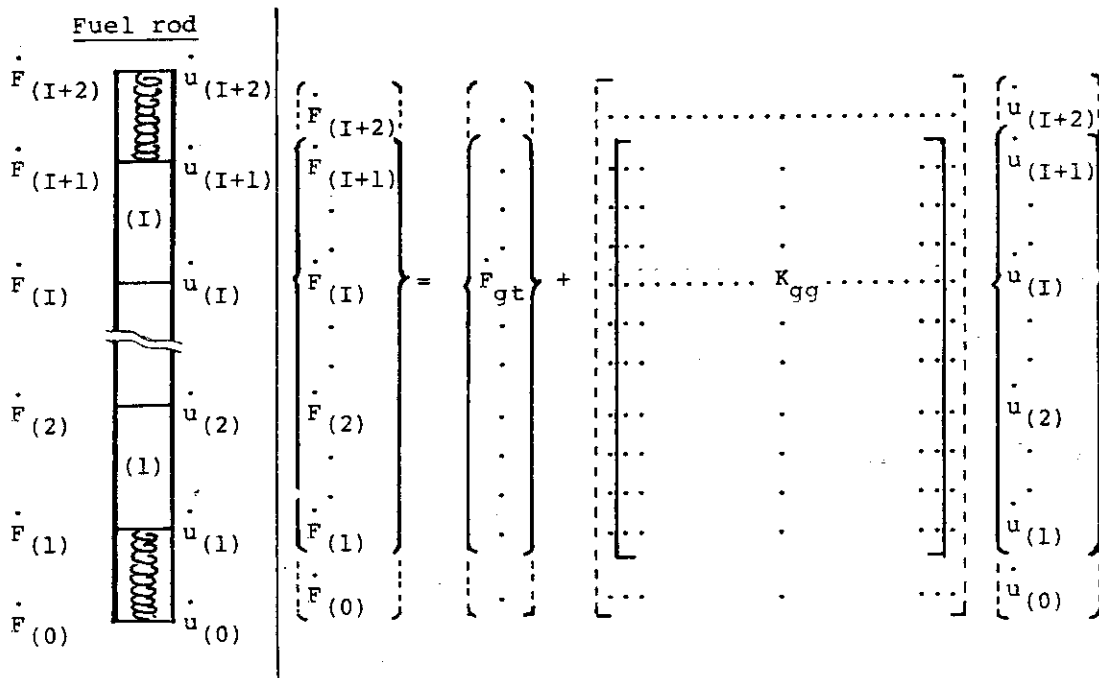


Fig. 9 A Global Stiffness Equation.

$\dot{u}(0)$ and $\dot{u}(I+2)$ are gap clearance rates between plenum spring and cladding at the bottom and top. It is assumed in FREC-4A that their axial clearance rates are restrained. Then the columns and rows corresponding to (0)th and (I+2)th axial node may be eliminated.

3. 計算モデル

歪速度の構成方程式に組込む歪速度として、次のような歪速度を考える。すなわち、

A 燃料ペレットについて

- 1) 弾性 (クラックおよびヒーリングを含む)
- 2) 熱膨張
- 3) 塑性
- 4) クリープ
- 5) スウェリング
- 6) 気孔の移動
- 7) 焼きしまり

B 被覆管について

- 1) 弾性
- 2) 熱膨張
- 3) 塑性
- 4) クリープ
- 5) 照射成長

によって発生する歪速度を考慮する。

これら歪速度について、FREC-3 のモデルを使用している。したがって、モデルの詳細についてはFREC-3 の報告書²⁾を参照されたい。ただし、燃料ペレットのクラックモデルは、FREC-4 A へのモデルの組みみにさいし、修正を加えたので、この章において説明する。

各セグメント内の半径方向の温度の計算もFREC-3に使用した計算法をそのまま使用している。

3.1 クラックおよびヒーリングモデル

3.1.1 クラックモデル

FSEC-4 A のクラックを含んだ弾性歪速度は、FREC-3 のモデルを変更して使用している。

弾性歪速度 $\{\dot{\varepsilon}_s^e\}$ を次の様に与える。

$$\{\dot{\varepsilon}^e\} = \{\dot{a}_{st}^e\} + [a_{ss}^e] \{\dot{\sigma}\} \quad (3.1)$$

ここに、

$$\{\dot{a}_{st}^e\} = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_r/E (C_r-1)/\Delta t \\ \sigma_t/E (C_t-1)/\Delta t \\ \sigma_z/E (C_z-1)/\Delta t \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

$$[a_{ss}^e] = \begin{bmatrix} C_r/E & -\nu/E & -\nu/E \\ & C_t/E & -\nu/E \\ \text{Sym.} & & C_z/E \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

とする。また、 σ = 応力、 E = ヤング率、 ν = ポアソン比、 $C_{r,t,z}$ はクラックによるヤング率低下のための係数、 Δt = タイムステップである。

クラックがない場合は、 $C_r = C_t = C_z = 1$ とする。ある方向 i ($i = r, t, z$) の応力が $\sigma_i > \sigma_f$ (クラックが生じる応力) となった場合 $C_i = M$ とする。その他の場合の取扱いは Table 2 に示す通りである。

Table 2 Treatment of crack.

Test 1	Previously Uncracked		Previously Cracked	
Test 2	$\sigma_j > \sigma_f$	$\sigma_j < \sigma_f$	$\sigma_j > 0$	$\sigma_j < 0$
Action	Become cracked	Remain uncracked	Remain cracked	During healing
	$C_j = M$	$C_j = 1$	$C_j = M$	$C_j = M$

Remarks; $j = r, t$ or z direction,
 $M = \text{large number.}$

なお、 $\{\dot{a}_{st}^e\}$ は、新たにクラックが生じたときのみ、そのクラックが生じた方向に加算される。これ以外の場合は0に設定される。

このクラックモデルは、クラックが生じたとき、 $\{\dot{a}_{st}^e\}$ で与えられる仮想歪速度を加えることにより応力を切り下げることである。また、クラック状態にある場合は、ヤング率は E/C に低下するとする。クラック状態にあるにもかかわらず、応力が σ_f をこえたときには、さらにクラックが生じると考え、先と同じ仮想歪が生じるとする。ただし、このクラックは9回以内に制限されている。この関係を Fig. 10 に示す。

3.1.2 ヒーリングモデル

クラックした燃料ペレットは、応力が負になったら、ヒーリングを開始するとする。ヒーリングは、次の二つの条件のどちらかが満足されたとき完了したとされる。

a) 応力 σ_j が

$$\sigma_j < -(1 - 1/C_j) n \sigma_f \quad (3.4)$$

となったとき、ただし、 n はクラックを起した回数である。

b) ヒーリング係数 f_h が1になったとき。 f_h は

$$f_h = \sum (\Delta t / t_h) \quad (3.5)$$

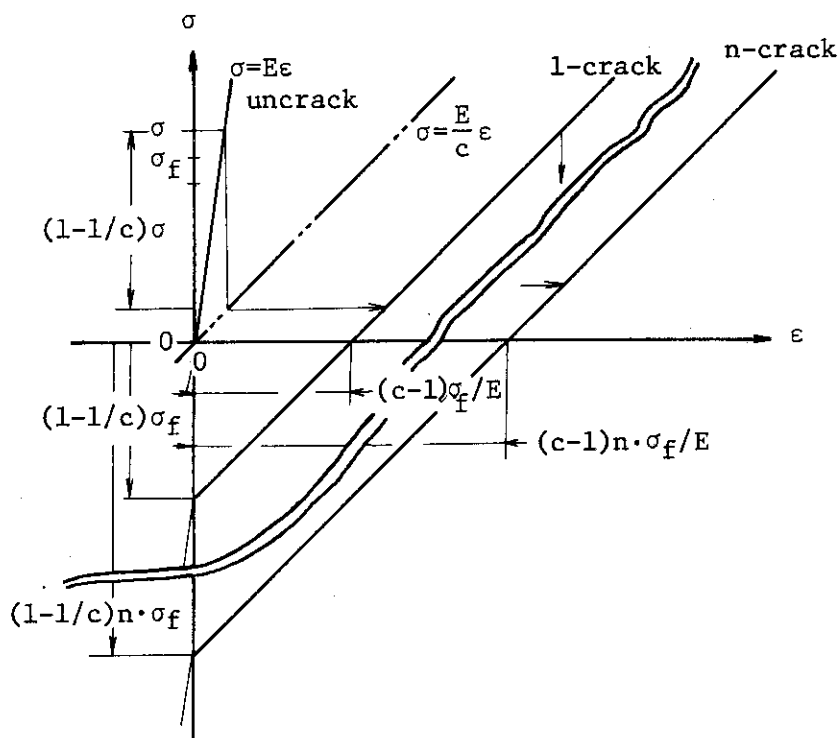


Fig. 10 Crack model of FREC-4A.

とし、ここに t_h は Ainscough-Rigby¹⁵⁾ による関係式で、ヒーリングが完了に必要な時間 (t_h) であり、次の様与えられる。

$$t_h = 1.8 \times 10^{-6} \exp(3200/T) / P \quad (3.6)$$

ここで、 T = クラック状態にある部分の温度 (°K) P = クラック面にかかる圧縮応力 ($= -\sigma_j$, MPa) である。

なお、ヒーリング状態にある場合、(3.3) 式中の対応するマトリックスの要素は

$$\{ (M-1) f_h + 1 \} / E \quad (3.7)$$

とされる。

ヒーリングが完了したとき、クラックはなくなったと見なされ、弾性状態にもどされる。しかし、ヒーリングの途中で応力が σ_f をこえたならば、クラック状態が維持されるとする。

3.2 燃料棒内圧評価モデル

FREC-3 は、取扱う計算対象が燃料棒の単位長さであったので、燃料棒の内圧をプログラム内で評価することは困難なため、照射履歴データの1種としての入力値として処理された。

FREC-4A は計算対象を燃料棒に拡張したので、内圧の計算が可能となった。

各タイムステップの終りにおける燃料棒内圧、 $P_{int, e}$ は常に平衡状態にあり、かつガスが理想気体の法則に従うとして、

$$P_{int,e} = P_{int,b} \frac{V_b}{V_e} \cdot \frac{M_e}{M_b} \cdot \frac{\bar{T}_e}{\bar{T}_b} \quad (3.8)$$

で与える。ここで、

$$\begin{aligned} P_{int} &= \text{燃料棒内圧} \\ V &= \text{燃料棒内のガスで満される体積} \\ M &= \text{ガスモル数} \\ T &= \text{体積平均温度} \end{aligned}$$

であり、添字 b および e は各タイムステップの最初と最後を表す。さらに、各変数のタイムステップ後の値は、

$$\left. \begin{aligned} V_e &= V_b + \dot{V} \Delta t \\ M_e &= M_b + \dot{M} \Delta t \\ T_e &= T_b + \dot{T} \Delta t \end{aligned} \right\} \quad (3.9)$$

で表わされるとする。

\dot{V} は、ガスギャップ、燃料ペレットの中心孔およびプレナムの各体積変化速度の加算値から計算される。

\dot{M} は、燃料ペレット内で生成する F・P ガスの生成量と温度分布に燃焼度を加味した放出率（入力カード 90K で与えられる）から評価される。

燃料棒内のガスの平均温度 \bar{T} は、次の式から得られる。

$$\bar{T} = \frac{\sum_i^I V_{gap,i} + \sum_i^I V_{void,i} + V_{lp} + V_{up}}{\sum_i^I \frac{V_{gap,i}}{T_{gap,i}} + \sum_i^I \frac{V_{void,i}}{T_{void,i}} + \int_{V_{lp}} \frac{dV_{lp}}{T_{lp}} + \int_{V_{up}} \frac{dV_{up}}{T_{up}}} \quad (3.10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} gap &= \text{燃料ペレット外面と被覆内面間のギャップ} \\ void &= \text{燃料ペレット中心孔} \\ lp &= \text{下部プレナム} \\ up &= \text{上部プレナム} \\ I &= \text{セグメント総数} \end{aligned}$$

である。

$T_{gap,i}$ は、i 番目のセグメントの燃料ペレット外面と被覆管内面の算術平均温度、 $T_{void,i}$ は i 番目のセグメントの燃料ペレット中心温度とする。

プレナムの平均温度は、JAERI-M 6249⁵⁾により次のように推定する。

(1) 下部プレナムの平均温度

先の (3.10) 式に含まれる下部プレナム平均温度に関する項は、

$$\int_{V_{\ell p}} \frac{dV_{\ell p}}{T_{\ell p}} = \frac{V_{\ell p}}{T_{\ell p}}$$

と表わすことができる。

ここで、下部プレナムの熱は熱伝導のみによって流れ、プレナム中の温度分布 ($T_{\ell p}$) は次のように近似されると仮定する。

$$T_{\ell p} = T_w + (T_m - T_w) J_0 \left(\alpha_{01} \frac{r}{R_{cb}} \right) \frac{\sinh(\alpha_{01} Z/R_{cb})}{\sinh(\alpha_{01} L/R_{cb})} \quad (3.11)$$

ここに、

- T_w = 冷却水温度 (°K)
- T_m = プレナムに接する燃料ペレットの最高温度
- J_0 = 0次のベッセル函数
- α_{01} = J_0 の第1固有値
- L = プレナム長さ
- R_{cb} = 被覆管外半径
- r, z = 円柱坐標

とする。

上記の仮定より、 $\bar{T}_{\ell p}$ を求めると

$$\frac{\bar{T}_{\ell p}}{T_w} = \frac{\alpha_{01}^3}{2} \left(\frac{R_{ca}}{R_{cb}} \right)^2 \left(\frac{L}{R_{cb}} \right) / I_{\ell p} \quad (3.12)$$

となる。ここに、

R_{ca} = 被覆管内半径

$$I_{\ell p} = \int_0^{\alpha_{01} R_{ca}/R_{cb}} \int_0^{\alpha_{01} L/R_{cb}} \frac{r dr dz}{1 + \frac{\Delta T_m}{T_w} J_0(r) \frac{\sinh(z)}{\sinh(\alpha_{01} L/R_{cb})}} \quad (3.13)$$

$\Delta T_m = T_m - T_w$

とする。

(3.12) 式により、 $\bar{T}_{\ell p}/T_w$ は、 R_{ca}/R_{cb} 、 L/R_{cb} と $\Delta T_m/T_w$ によって決定される。もし、軽水炉燃料のみを考えるならば、 $R_{ca}/R_{cb} = 0.885$ としうる。そのとき、 $\bar{T}_{\ell p}/T_w$ は L/R_{cb} と $\Delta T_m/T_w$ によって決定される。いま、 $\bar{T}_{\ell p}/T_w$ の値を $C_{\ell p}(L/R_{cb}, \Delta T_m/T_w)$ と表すと、 $\bar{T}_{\ell p}/T_w$ は

$$\bar{T}_{\ell p}/T_w = C_{\ell p}(L/R_{cb}, \Delta T_m/T_w) \quad (3.14)$$

と書くことができる。

Fig. 11 (a) に C_{lp} の値を図示する。プログラムにおいて \bar{T}_{lp} の値は、 $\Delta T_m / T_w$ と L / R_{cb} および T_w の値によって決まる C_{lp} の値を使用して計算される。

(2) 上部プレナム

上部プレナムにおける平均温度 (\bar{T}_{up}) を推定する方法は、上記の下部プレナムの場合と同じである。ただし、上部プレナムの温度分布は、次のようであると仮定する。

$$T_{up} = T_w + (T_m - T_w) J_0 \left(\alpha_{01} \frac{r}{R_{cb}} \right) \left(\frac{z}{L} \right) \quad (3.15)$$

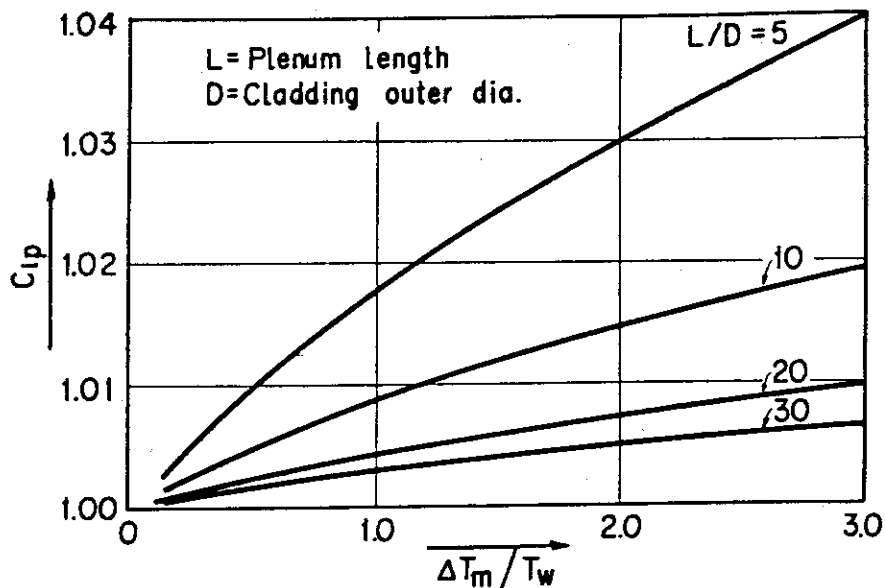
この温度分布を使って、 \bar{T}_{up} を

$$\begin{aligned} \frac{\bar{T}_{up}}{T_w} &= \frac{\alpha_{01}^2}{2} \left(\frac{R_{ca}}{R_{cb}} \right)^2 / I_{up} \\ &= C_{up} (R_{ca} / R_{cb}, \Delta T_m / T_w) \end{aligned} \quad (3.16)$$

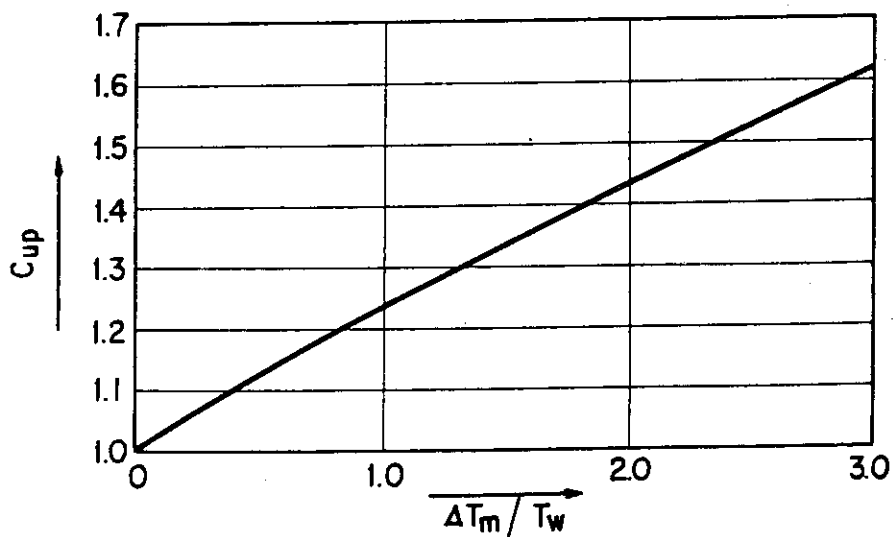
の形に書くことができる。ここに、

$$I_{up} = \int_0^{\alpha_{01} R_{ca} / R_{cb}} \int_0^1 \frac{r dr dz}{1 + (\Delta T_m / T_w) z J_0(r)} \quad (3.17)$$

である。再び R_{ca} / R_{cb} を 0.885 とすれば、 C_{up} は $\Delta T_m / T_w$ のみによって決定される。 C_{up} の値を Fig 11 (b) に示す。



(a) For lower plenum



(b) For upper plenum

Fig. 11 Coefficient to estimate average temperature in plenums. ($\Delta T_m = T_m - T_w$, T_m = Maximum temp. of pellet adjacent to plenum ($^{\circ}K$), T_w = Coolant temp. ($^{\circ}K$))

3.3 冷却水温度

FREC-4Aは、燃料棒全長を取扱う。温度分布の境界条件である冷却水温度は、各セグメントで変ると考えられる。入口と出口との温度差を入力で与え、各セグメントの冷却水温度はそのセグメントより下方の出力の加算値に応じて温度が上昇するモデルを組込んだ。

各セグメント内の半径方向ノードにおける温度を計算する場合、そのセグメントまわりの冷却水温度が与えられねばならない。

冷却水入口温度 (T_{inlet}) と冷却水圧力 (P_b) は入力として与えられた照射履歴データから定められる。

FREC-4Aは、セグメント(i)番における冷却水温度 ($T_{c,i}$) を次のように設定する。すなわち、

$$T_{c,i} = T_{inlet} + \Delta T_{max} \cdot \frac{P_t}{P_{max}} \cdot \frac{\sum_{j=1}^i P_{f,j} (h_{j+1} - h_j) + 0.5 (P_{f,i+1} + P_{f,i}) (h_{i+1} - h_i)}{\sum_{j=1}^{i+1} P_{f,j} (h_{j+1} - h_j)} \quad (3.18)$$

とする。ここに、

ΔT_{max} = 冷却水出口と入口間の最大温度差 (°C), 入力データ

P_{max} = 平均線出力密度 (w/cm), 入力データ

P_t = 時間 t における平均線出力密度 (w/cm)

$P_{f,j}$ = 軸方向ノード(j)における出力分布係数

h_j = 基準面からの軸方向ノード j の高さ (cm)

である。ただし、 $T_{c,i}$ が次式⁶⁾によって決まる飽和温度 (T_{sat}) 以上になる場合は、

$T_{c,i} = T_{sat}$ とする。

$$\begin{aligned} T_{sat} = & 147.40 + 4.1932 P_b - 0.059187 \cdot P_b^2 + 5.2595 \times 10^{-4} \cdot P_b^3 \\ & - 1.5756 \times 10^{-6} P_b^4 - 1.2442 \times 10^{-8} \cdot P_b^5 + 1.2722 \times 10^{-10} \cdot P_b^6 \\ & - 4.0803 \times 10^{-13} \cdot P_b^7 + 4.3416 \times 10^{-16} P_b^8 \quad (^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

で計算する。ここで、

P_b = 冷却水圧力 ($\text{kg/cm}^2 \text{ a}$)

である。

このモデルは、燃料棒平均出力 P_t が P_{max} に達したとき出口冷却水温度は入口冷却水温度より ΔT_{max} の温度上昇があるとし、その途中は、下部からの出力積分値に比例するとするものである。

4. 入力データ

4.1 入力データの種類と入力方法

FREC-4Aの入力データは、主として次のような種類に分類される。

- 1) 燃料棒の形状および出力分布に関するデータ
被覆管内外径，ペレット径等。
- 2) 燃料棒の機能に関するデータ
プレナム体積，プレナムばね定数等。
- 3) 燃料棒の照射履歴に関するデータ
燃料棒出力，冷却水圧力，冷却水温度等。
- 4) 燃料ペレットおよび被覆管の物性値に関するデータ
降伏応力，クリープに関する係数等。
- 5) その他
計算の制御，オプション選択の key word 等。

すべてのデータは，1～80 コラムまでを使用したカードで入力される。入力データは，カードの先頭にカード番号が付された Free Format 型式で読み込まれる。入力データの識別は，カード番号とそのカードの何番目 (field ; フィールド) の入力かによっている。

入力データカードの作成および各入力変数の説明等は Appendix-B に収録されているので参照されたい。ここでは，入力データ群を作成するにさいし，特に説明を必要とする事項について記述する。

4.2 照射履歴データ

FREC-4Aは，原則として次の8個の照射履歴データを必要とする。照射履歴データは，照射時間に依存するデータとして，

- 1) 次の2)以下の値を与える時間間隔
- 2) 冷却材圧力，
- 3) 冷却材温度
- 4) 燃料棒出力，RQT (J)
- 5) 燃料ペレットの気孔を除いた固体部分の体積膨張率 (スウェリング率)，EVT (J, 1)
- 6) 上記5)と同じで被覆材の体積膨張率，EVT (J, 2)
- 7) 速中性子束フルーエンス，FST (J, 2)
- 8) 核分裂速度，FST (J, 1)

が与えられねばならない (J: 履歴ステップ)。

上記のうち，1)～4)は必ず入力されねばならない。境界条件の1つであるギャップガス圧力

は初期圧力，温度が与えられ，それ以後の値は，3.3節の方法によりプログラム内で計算される。

上記5)～8)の値については，プログラム内で，設定可能になっているが，これを行うためには，オプションの key word を指定しなければならない。

この選定は，入力オプションキーワード，HIST（入力カード番号907，第3 field の入力値）と NUT（入力カード番号5000，第3～7 field の入力値）によって行われる。

選定方法の詳細は，Table 3 に示す通りである。すなわち，照射データをプログラム内で作成するかしないかを HIST で選定，どのような作成法を取るかを NUT で指定する。

4.2.1 核分裂速度

履歴データとしての核分裂速度が入力データ（カード番号605）として与えられない場合，プログラム内で設定することが出来る。

核分裂速度の履歴データは，燃料棒出力を使用して次のように設定する。

$$FST(J, 1) = QG(1) \cdot \frac{RQT(J)}{\pi(R_0^2 - R_i^2)} \cdot C_1 \quad (4.1)$$

ここで， FST(J, 1) = 履歴ステップ J における核分裂速度 (fission/cm³/sec)

QG(1) = 燃料棒全体に対する燃料の出力割合。

RQT(J) = 履歴ステップ J における燃料棒出力 (線出力密度, w/cm)

R_i, R₀ = 燃料ペレット内外半径 (cm)

C₁ = 核分裂速度に変換する係数 (fission/w/sec)

である。

4.2.2 高速中性子照射量

履歴データとしての高速中性子照射量が入力されない場合，プログラム内で設定することができる。この照射量 (nvt) は，被覆管のスウェリング率等の算出のために使用される。

高速中性子照射量の履歴データは，次のように設定される。

$$FST(J, 2) = \left\{ \sum_1^J FST(J, 1) \cdot TIME(J) \right\} \cdot CCLAD \quad (4.2)$$

ここで， FST(J, 2) = 履歴ステップ J における高速中性子照射量 (n./cm²)

TIME(J) = 履歴ステップ J-1 と J 間の時間増分 (sec)

CCLAD = 高速中性子照射量への変換係数

である。

この設定法は次のような考え方に基づく。核分裂速度， \dot{F} は $\Sigma_f \phi_t$ と表わされる (Σ_f : 巨視的核分裂断面積 (cm⁻¹), ϕ_t : 熱中性子束 (n/cm²-sec))。プログラムでは，高速中性子束 ϕ_f が熱中性子束に比例していると仮定する。すなわち， $\phi_f / \phi_t = C_2$ とする。このとき， $CCLAD = C_2 / \Sigma_f$ である。

Table 3 Selection of irradiation history data control option

notes ; C : Input card No. , F : Field No. on input card

History data used in program		Option key		Generation or Modification
		HIST C907 F3	NUT(M) C5000 F(M) M=3~7	
Original read-in history data are used	FST(J,1)	HIST =0	NUT(5)=0	fission rate, \dot{F} , FST(J,1) C605 read in
	FST(J,2)		NUT(6)=0	nvt FST(J,2), C606 read in
	EVT(J,1)		NUT(3)=0	fuel swelling EVT(J,1) C607 read in
	EVT(J,2)		NUT(4)=0	cladding swelling EVT(J,2) C608 read in
	RQT(J)		NUT(7)=0	線出力密度 RQT(J) C602 read in
Use modified or generated history data	FST(J,1)	HIST =1	NUT(5)=1	$\dot{F} = QG(1) \cdot RQT(J) \cdot C_1$
	FST(J,2)		NUT(6)=1	$FST(J,2) = (\Sigma \dot{F} \Delta t) \times C_2$
	EVT(J,1)		NUT(3)=1	fuel swelling の data として C5002 read in, 計算によって EVT(J,1) を設定
			NUT(3)=2	Use built-in data
	EVT(J,2)		NUT(4)=1	cladding swelling data C5003 read in
			NUT(4)=2	Use built-in equation (C-type)
			NUT(4)=3	Use built-in equation (A-type)
	RQT(J)		NUT(7)=1	$\frac{\text{Values RQT(J) on history card}}{1 - C_3 \times (\Sigma \dot{F} \Delta t)}$
NUT(7) > 1		(Values RQT(J) on history card) \times $F_q(\Sigma \dot{F} \Delta t)$		

4.2.3 燃料のスウェリング

プログラムは、燃料の照射による体積膨張（スウェリング）のうち、気孔に起因するものは、かなり詳細な計算を行う。しかし、固体部分に関するスウェリングは照射履歴データとして処理する。

燃料の固体部分に関するスウェリングが入力履歴として与えられないとき、プログラムはその内部でスウェリングデータを設定することができる。

(1) 次式を使用して燃料スウェリング履歴データを設定する。

$$EVT(J, 1) = F_m(FISC(J)/TD) \cdot TD + 0.0025 \cdot FISC(J) \quad (4.3)$$

ここに、 $EVT(J, 1)$ = 履歴ステップ J における燃料スウェリング（固体部）

TD = 燃料の製作時の初期 fractional density

$FISC(J)$ = 履歴ステップ J までの核分裂速度の時間積分値 (fission/cm³)。

$$\left(= \sum_1^J FST(J, 1) \cdot TIME(J) \right)$$

$F_m(FISC(J)/TD) = FISC(J)/TD$ の値を変数としたスウェリング率

である。なお、 F_m の値を決定するには、そのためのデータをカード番号 5002 で与えねばならない。

(2) プログラム組込みのデータセットを利用して燃料スウェリング履歴データを設定する。組込みのデータセットを Table 4 に示す。また、その変化の様子を Fig. 12 に示す。

プログラムでは、このデータセットから $FISC(J)$ に対応するスウェリング率 $\Delta v/v$ を内挿法によって定め、これを履歴のデータとする。

通常、酸化物燃料（気孔を含む）のスウェリング率は $0.3 \sim 0.7 (\% \Delta v/v) / 10^{20}$ (fission/cm³) と云われている。ただし、これは被覆によって強く拘束した場合の値である。また、気孔を除いた固体状 F.P. によるスウェリング率は、 $0.16 \sim 0.54 (\% \Delta v/v) / 10^{20}$ (fission/cm³) の値が与えられている⁷⁾。一方、この組込みの値は、 $0.85 \sim 1.26 (\% \Delta v/v) / 10^{20}$ (fission/cm³) である。ただし、この組込みの値は無拘束スウェリングの値である。これらの値は、温度と応力によって補正することができる。さらに、各方向への異方性をも考慮する。その取扱いの詳細は、Table B. 1 の I 300, I 6 J 0 の入力マニュアルを参照されたい。

4.2.4 被覆の照射成長

被覆の照射成長は、被覆の照射量に応じた履歴データとして処理される。ただし、照射成長は、プログラム上照射による体積変化（燃料におけるスウェリング）と全く同じ考え方で処理されている。もし、被覆が不銹鋼でスウェリングを考える必要がある場合は、燃料と同じ様に取扱えばよく、被覆がジルコニウム合金で照射成長を問題とするものでは、体積変化は考えず、特定の方角への成長のみとして扱われる。この取扱は、これら体積変化の各方向の異方性係数で処理される。

履歴データで与えられた照射成長率は、基準温度、圧力（応力）によるものとし、プログラム内の計算では、温度、圧力による補正が行われる。これら、その取扱いの詳細は、文献(2)および

Table 4 Fuel swelling data (on an f./cc (solid basis) built in program.

f./cc	$\Delta V/V$	f./cc	$\Delta V/V$
0.0	0.0	1.6×10^{21}	0.155
1.0×10^{20}	0.005	1.7×10^{21}	0.170
2.0×10^{20}	0.014	1.8×10^{21}	0.185
3.0×10^{20}	0.020	1.9×10^{21}	0.200
4.0×10^{20}	0.027	2.0×10^{21}	0.215
5.0×10^{20}	0.036	2.1×10^{21}	0.230
6.0×10^{20}	0.045	2.2×10^{21}	0.245
7.0×10^{20}	0.055	2.3×10^{21}	0.257
8.0×10^{20}	0.063	2.4×10^{21}	0.273
9.0×10^{20}	0.071	2.5×10^{21}	0.290
1.0×10^{21}	0.085	2.6×10^{21}	0.305
1.1×10^{21}	0.095	2.7×10^{21}	0.323
1.2×10^{21}	0.105	2.8×10^{21}	0.340
1.3×10^{21}	0.120	2.9×10^{21}	0.360
1.4×10^{21}	0.130	3.0×10^{21}	0.377
1.5×10^{21}	0.144		

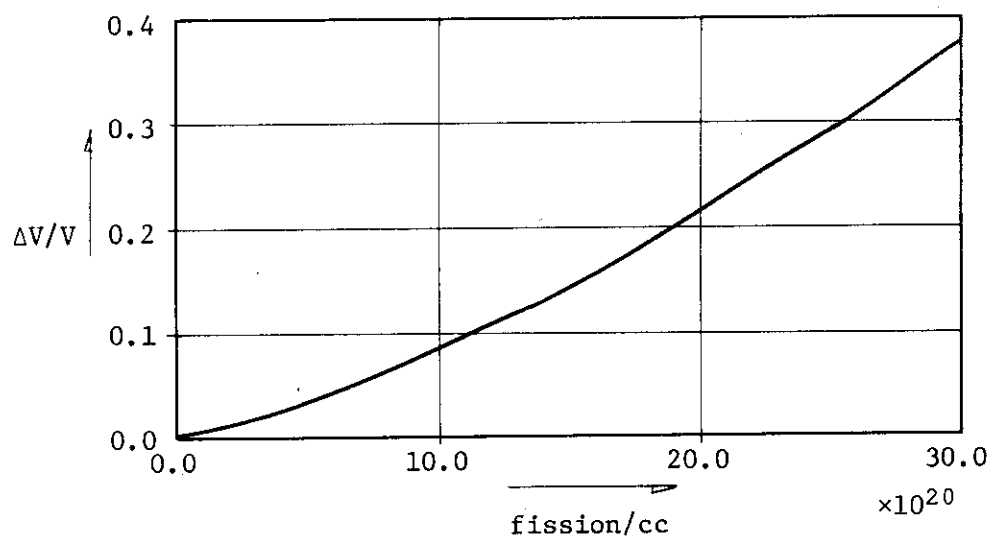


Fig. 12 Fuel swelling (solid) data built in program.

Table B. 1 の入力カード番号 I 300, I 6 J 0 の説明を参照されたい。

照射成長率（体積膨張率でもよいが説明の都合上照射成長率とする）の履歴データが与えられないときにはプログラム内で作成し、設定される。その場合の設定法について以下に説明する。

- (1) 照射量と被覆照射成長率のデータセットを別途、入力カード 5003 番として用意し、これを入力する。このデータセットを利用し FST (J, 2) に対応する照射成長率 $\epsilon_{vsc}(J)$ を直線内挿によって求める。履歴ステップ J の被覆照射成長率 EVT (J, 2) を

$$EVT (J, 2) = \epsilon_{vsc} (J)$$

として設定する。

- (2) プログラムに組込まれた関係式を利用して、照射成長率履歴データを設定する。プログラムには、同一方程式であるが係数を変えた 2 種の式⁴⁾が準備されている。このオプションの選定については Table 3 を参照されたい。

その照射成長率表示式は、

$$\begin{aligned} \epsilon_{vsc} (nvt) = & ACLAD - nvt \\ & + APCLAD \cdot (1 - \exp(-nvt / QRCLAD)) \end{aligned} \quad (4.4)$$

である。ここで、 nvt = 高速中性子照射量 (n/cm^2),

$$C\text{-Type 係数: } ACLAD = 1.0019 \times 10^{-24}$$

$$APCLAD = 5.083 \times 10^{-4}$$

$$QRCLAD = 0.15 \times 10^{20}$$

$$A\text{-Type 係数: } ACLAD = 0.3519 \times 10^{-24}$$

$$APCLAD = 7.303 \times 10^{-4}$$

$$QRCLAD = 0.27 \times 10^{20}$$

とする。

履歴データとしての被覆照射成長率は、

$$EVT (J, 2) = \epsilon_{vsc} (FST (J, 2))$$

として設定する。

(4.4) 式によるときの値を Table 5 に、その値の変化の様子を Fig. 13 に示す。

4.2.5 燃料棒出力の修正

FREC-4A は入力を与えられた燃料棒出力データを修正し使用するオプションを持っている。

- (1) 第 1 のオプションは、次のような取扱いである。

$$RQT(J) = \frac{\text{履歴カード 602 の値 (input RQT (J))}}{1 - PCOR \cdot FST (J, 1)} \quad (4.5)$$

ここで、

$$FST (J, 1) = \text{核分裂速度 (fission rate) の時間積分値 (fission/cm}^3\text{)}$$

$$PCOR = \text{係数 (入力カード番号 5001, field 3 で入力)}$$

である。

Table 5 Cladding irradiation growth calculated from equations incorporated in program.

	NVT	C-TYPE	A-TYPE
1	0.0	0.0	0.0
2	1.0000E+20	6.0784E-04	7.4750E-04
3	2.0000E+20	7.0868E-04	8.0024E-04
4	3.0000E+20	8.0887E-04	8.3586E-04
5	4.0000E+20	9.0906E-04	8.7106E-04
6	5.0000E+20	1.0092E-03	9.0625E-04
7	6.0000E+20	1.1094E-03	9.4144E-04
8	7.0000E+20	1.2096E-03	9.7663E-04
9	8.0000E+20	1.3098E-03	1.0118E-03
10	9.0000E+20	1.4100E-03	1.0470E-03
11	1.0000E+21	1.5102E-03	1.0822E-03
12	1.1000E+21	1.6104E-03	1.1174E-03
13	1.2000E+21	1.7106E-03	1.1526E-03
14	1.3000E+21	1.8108E-03	1.1878E-03
15	1.4000E+21	1.9110E-03	1.2230E-03
16	1.5000E+21	2.0111E-03	1.2581E-03
17	1.6000E+21	2.1113E-03	1.2933E-03
18	1.7000E+21	2.2115E-03	1.3285E-03
19	1.8000E+21	2.3117E-03	1.3637E-03
20	1.9000E+21	2.4119E-03	1.3989E-03
21	2.0000E+21	2.5121E-03	1.4341E-03
22	2.1000E+21	2.6123E-03	1.4693E-03
23	2.2000E+21	2.7125E-03	1.5045E-03
24	2.3000E+21	2.8127E-03	1.5397E-03
25	2.4000E+21	2.9129E-03	1.5749E-03
26	2.5000E+21	3.0130E-03	1.6100E-03
27	2.6000E+21	3.1132E-03	1.6452E-03
28	2.7000E+21	3.2134E-03	1.6804E-03
29	2.8000E+21	3.3136E-03	1.7156E-03
30	2.9000E+21	3.4138E-03	1.7508E-03
31	3.0000E+21	3.5140E-03	1.7860E-03

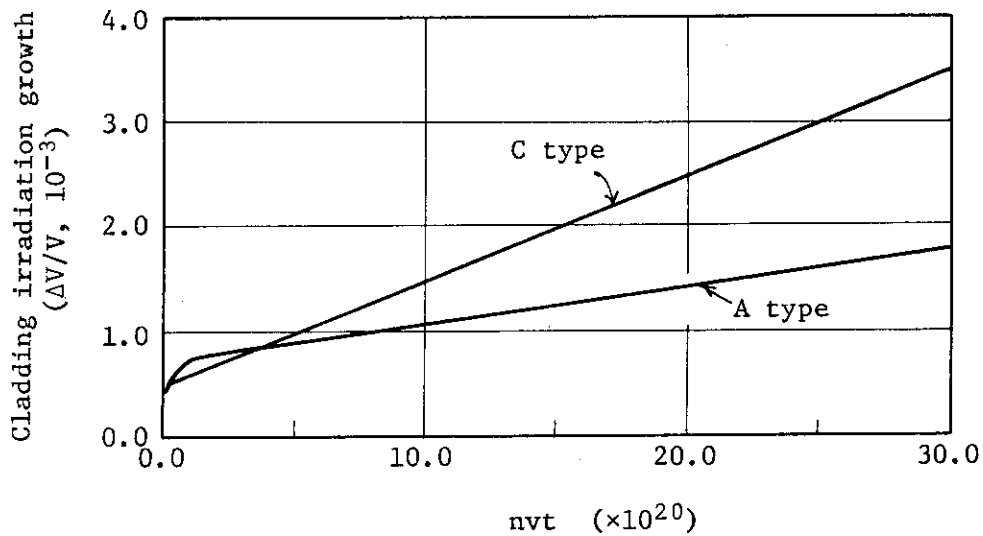


Fig. 13 Cladding irradiation growth calculated from equations incorporated in program.

(2) 第2のオプションは、次のような取扱いをする。

$$RQT(J) = \{ \text{履歴カード 602の値(input RQT(J))} \} \\ \times F_q(FST(J,1)) \quad (4.6)$$

ここで、 F_q の値を定めるには、別にカード番号5004として、 $f(=\sum \dot{F} dt, f/cm^3)$ と F_q の値が入力されねばならない。ただし、入力の f の値は $FST(J,1)$ と一致する必要はない。読み込まれた f と F_q のデータセットより直線内挿法を用いて $FST(J,1)$ に対応する F_q が求められる。

(3) 上記(1)と(2)のような修正を行う理由は、燃料ペレット内の核燃料物質が照射によって減少するため、燃料棒を同一出力に維持しようとするとき、中性子束が高くならなければならないことによる。

4.3 出力分布

4.3.1 軸方向出力分布

FREC-4Aの軸方向出力分布は、原則として入力データ (Card No. 701~721) で与えるようになっている。しかしながら使用しうるべきデータが欠如している場合、次の如き計算式の値が使用できる。

(1) 平均出力で与えられたとき

燃料棒の出力 (Card No. 602のデータ) が燃料棒の平均出力 (Card No. 700, field 2 IPEAK = 1) で与えられたとき、軸方向出力分布比は

$$\frac{P(y)}{P_{av}} = \frac{L}{\int_0^L \cos \left\{ \frac{\pi}{L+2d} (y-L/2) \right\} dy} \cos \left\{ \frac{\pi}{L+2d} (y-L/2) \right\} \dots\dots\dots (4.7)$$

で与える。ここで、

- P(y) = 高さ y における出力
- P_{av} = 燃料棒平均出力
- L = ペレットスタックの長さ
- y = ペレットスタック低面からの高さ
- d = 外挿距離

である。

なお、

$$\int_0^L \cos \left\{ \frac{\pi}{L+2d} (y-L/2) \right\} dy = \frac{2}{\pi} (L+2d) \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L+2d} \right)$$

である。それゆえ、先の (4.8) 式は

$$\frac{P(y)}{P_{av}} = \frac{\pi}{2} \frac{L}{L+2d} \frac{1}{\sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L+2d} \right)} \cos \left\{ \frac{\pi}{L+2d} \left(y - \frac{L}{2} \right) \right\} \dots\dots\dots (4.8)$$

となる。ここで、L = 366 (cm) , d = 3 (cm) ならば、

$$\frac{P(y)}{P_{av}} = 1.546 \cos \left\{ 8.445 \times 10^{-3} (y - 183) \right\} \dots\dots\dots (4.9)$$

である。(4.9) 式によるときの出力分布比を Fig. 14 に示す。

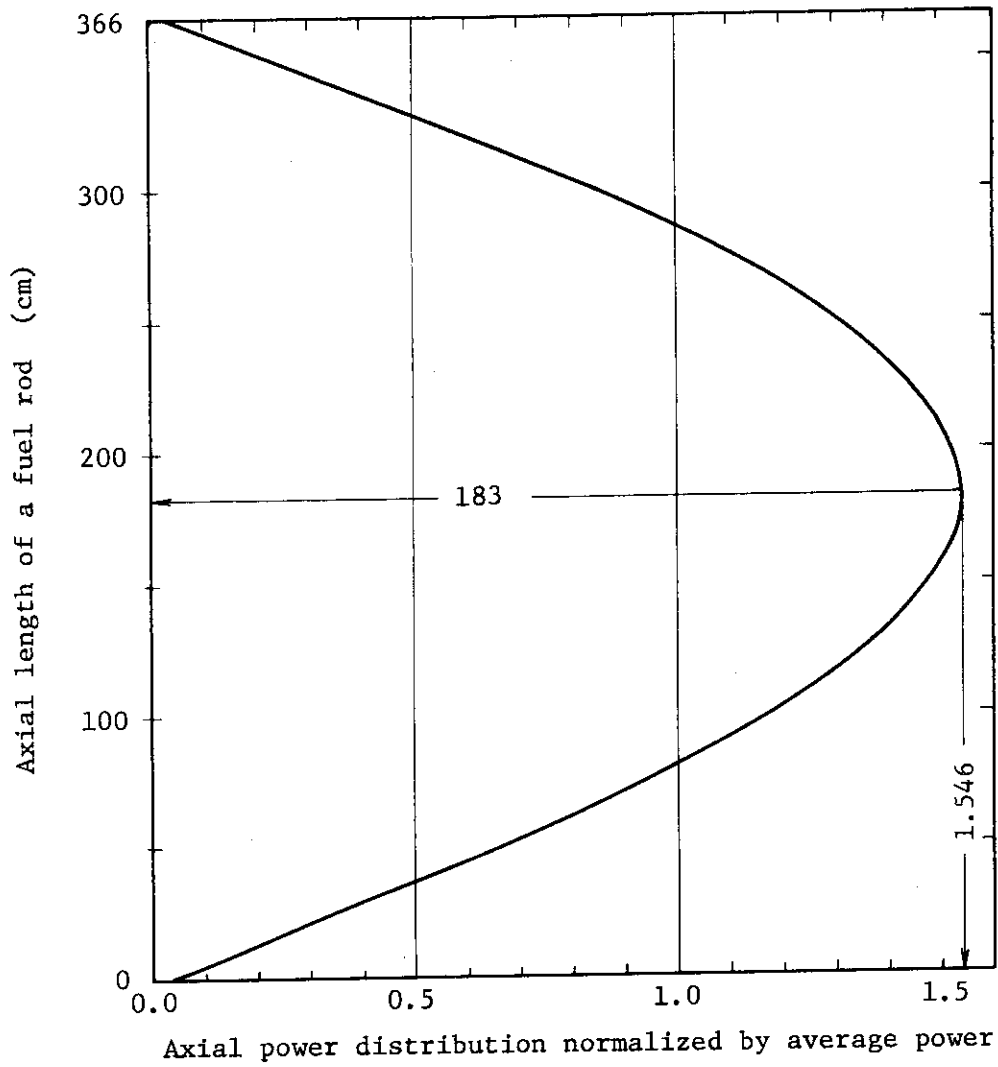


Fig. 14 Axial Power distribution calculated from equ. (4-9) incorporated in program.

(2) ピーク出力で与えられたとき

燃料棒の出力 (Card No. 602 のデータ) が燃料棒のピーク出力, P_{max} (Card No. 700, field 2 IPEAK = 2) で与えられたとき, 軸方向出力分布比は,

$$\frac{P(y)}{P_{max}} = \cos \left\{ \frac{\pi}{L+2d} \left(y - \frac{L}{2} \right) \right\} \quad (4.10a)$$

で与える。ここで, P_{max} = ピーク出力とする。

ただし, この場合, 平均出力比, P_{av} は $P_{av} = 1$ ではない。平均出力は,

$$P_{av} = \frac{2}{\pi} \frac{L+2d}{L} \sin \left(\frac{\pi}{2} \frac{L}{L+2d} \right) P_{max} = \frac{2}{\pi} P_{max} \quad (4.10b)$$

である。

4.3.2 径方向出力分布

FREC-4A の燃料の径方向出力分布は, すべて入力データ (Card No. I500 および I50L00, ここで I=1 (燃料ペレット), I=2 (被覆管), L=セグメント番号である) で与えねばならない。入力の出力分布は相対出力比でよい。この入力値は入力後, その径方向出力平均値に対してノルマライズされる。

4.4 物質値に関するデータの入力

4.4.1 熱膨張係数, ヤング率等

燃料ペレットおよび被覆管の熱膨張係数, ヤング率, ポアソン比および熱伝導率は, その値を入力で与えねばならない。入力は, 入力カード No. I6J0 (I=1~2, J=1~4) による。これらのデータは, すべて温度のみに依存する物性値として扱われ, プログラム内の使用にさいして温度に対して内挿される。

サンプルインプットの値を Table 6(a) に示す。Table 6(a) の燃料ペレットに関する値は, WAPD-TM-583⁸⁾ の UO_2 95% T.D についての値から作成された。Table 7(a) の被覆管に関する値は, WAPD-TM-583 の ジルカロイ-4 の値から作成した。

4.4.2 クリープ歪速度および加工硬化に関するデータ

(1) 定常クリープ歪速度 ($\dot{\epsilon}_c$) は, プログラムにおいて

$$\dot{\epsilon}_c = 10C \left(\frac{\sigma}{70.31} \right)^G \quad (4.11)$$

で計算される。ここで, σ は応力 (kg/cm^2), 係数 C, G は温度と核分裂速度, 燃焼度 (燃料の場合), 中性子束あるいは照射量 (被覆材について) の函数とする。この C, G を入力とし

Table 6 Sample input data of fuel properties

(a) Thermal and elastic data

Temp. , °C	260	1233	1925	2760
Linear Coefficient of Thermal Exp. (1/°C)	8.01×10^{-6}	14.4×10^{-6}	18.0×10^{-6}	22.32×10^{-6}
Young's Modulus, kg/cm ²	16.2×10^5	13.8×10^5	10.9×10^5	7.4×10^5
Poisson's Ratio	0.291	0.291	0.291	0.291
Thermal Conductivity, W/cm ² °C	0.0425	0.022	0.021	0.046

(b) Creep and plasticity constants

Fission rate; f, /cc-sec	1.0 × 10 ¹²						2.0 × 10 ¹³						1.0 × 10 ¹⁴					
	C	G	P	Q	C	G	P	Q	C	G	P	Q	C	G	P	Q		
Temp. , °C	-8.3	1.0	-42.95	20	-7.0	1.0	-42.95	20	-6.3	1.0	-42.95	20	-6.3	1.0	-42.95	20		
260	-5.6	3.0	-27.8	20	-5.6	3.0	-27.8	20	-5.6	3.0	-27.8	20	-5.6	3.0	-27.8	20		
1233	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20		
1925	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20		
2760	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20	-3.5	4.6	-16.92	20		

Table 7 Sample input data of clad properties

(a) Thermal and elastic data

Temp. , °C	0	260	538	538.1
Linear Coefficient of Thermal Exp. (1/°C)	5.6×10^{-6}	6.5×10^{-6}	7.4×10^{-6}	
Young's Modulus, kg/cm ²	9.94×10^5	8.12×10^5	6.37×10^5	
Poisson's Ratio	0.325	0.325	0.325	
Thermal Conductivity, W/cm ² °C	0.125	0.15	0.19	

(b) Creep and plasticity constants

Fast Fluence, (E>1MeV) n./cm ²	0.0						2.6 × 10 ²⁰						2.0 × 10 ²¹					
	C	G	P	Q	C	G	P	Q	C	G	P	Q	C	G	P	Q		
0	-81.7	26	-22.45	10.3	-90.0	38.2	-23.3	10.3	-95.0	45.0	-23.9	10.3						
260	-28.45	12.5	-16.32	9.0	-89.0	42.2	-18.4	9.0	-133.0	69.9	-19.9	9.0						
538	- 8.9	7.5	- 1.6	5.37	34.0	-16.	- 0.15	5.37	62.0	-31.0	0.8	5.37						

て与える。

加工硬化歪 (ϵ_{SH}) と応力 (σ) の間には,

$$\epsilon_{SH} = 10^P \left(\frac{\sigma}{70.31} \right)^G \quad (4.12)$$

の関係があると仮定する。ここに, P, Q は先の C, G と同様なパラメータを変数とする函数であり, 入力値である。

これらの関係式は, FREC-4A がその基礎プログラムとして採用した CYGRO の手法⁴⁾をそのまま利用している。CYGRO で使用される係数 C, G, P, Q の値の 1 例を Table 6 (b) に示す。Table 6 (b) は, WAPD-TM-583 の 95% T. D. UO₂ 燃料ペレットについての値を示す, Table 7 (b) は, ジルカロイ-4 15% cold work 材についての値を示す。

(2) 被覆管クリープ歪速度の係数 C, G の参考として, プログラム BUCKLE⁹⁾ に使用されている二次クリープ歪速度計算式から, これらの係数を定めてみると, Table 8 の通りとなる。

Table 8 Creep constants C, G calculated from BUCKLE
2ndary creep strain rate equation.

Fast flux Temp. (°C)	0.5000000E+12		0.6000001E+14		1.0000000E+14	
	C	G	C	G	C	G
0.0	-17.31046	1.00297	-15.54315	1.00297	-15.35457	1.00297
260.00	-10.68489	1.00297	-8.91758	1.00297	-8.72900	1.00297
350.00	-9.67956	1.00297	-7.91226	1.00297	-7.72368	1.00297
538.00	-4.83293	1.25712	-3.06562	1.25712	-2.87705	1.25712

BUCKLE の二次クリープ歪速度は

$$\dot{\epsilon}_t = B \phi^{0.85} \exp(-Q/RT) \sinh(S \cdot \sigma_t) \quad (4.13)$$

と表わされる。ここで,

$\dot{\epsilon}_t$ = 円周方向のクリープ歪速度 (1/hr),

ϕ = 高速中性子束 (n/cm²-sec) (E > 1 Mev),

T = 被覆管温度 (°K),

R = ガス定数 (= 1.987 cal/mole °K),

B = 定数 (= 9.5 × 10⁻¹³),

σ_t = 円周方向応力 (psi),

S = 応力係数 (1.7 × 10⁻⁴)

Q = 活性化エネルギー (cal/mole) で次のような値とする。

$$T_{crit} = 640 - 0.001 \cdot \sigma$$

$T < T_{crit}$ のとき,

$$Q = 16,980$$

$T > T_{crit}$ のとき,

$$Q = 16,980 - 72.6 (T - T_{crit})$$

とする。

である。Table 8 の C, G の値を求めるにさいし、応力として $\sigma = 200$ と 500 kg/cm^2 を使用した。

なお、BUCKE のクリープ歪速度の如く高速中性子束をパラメータとするものを使用する場合はカード番号 I 000 の field 5 で入力する MCGPQ (I) = I2 × 10 + I1 の key word で I2 = 3 と指定しなければならない。

(3) クリープ歪速度-塑性の係数 C, G, P, Q については、その入力法にいくつかのオプションが用意されている。

i) 係数の入力形式として次の二つがある。

一つは、クリープ歪速度と加工硬化歪が

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_c &= 10^C \cdot (\sigma / 70.31)^G \\ \epsilon_{SH} &= 10^P \cdot (\sigma / 70.31)^Q \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

の形で与えるとして、係数 C, G, P, Q を入力するものである。他の一つは、クリープ歪速度と加工硬化歪が

$$\left. \begin{aligned} \dot{\epsilon}_c &= (\sigma / C')^{1/G'} \\ \epsilon_{SH} &= (\sigma / P')^{1/Q'} \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

の形式で与えられるとして、C', G', P', Q' を入力するものである。この場合、入力された値 C', G', P', Q' は、先に (1) で記述した第 1 の方法で与えられる C, G, P, Q の形に、入力後変換される。

この入力形式の選定はカード番号 906, field 2 の MPQ で制御される。

ii) 係数 C, G, P, Q の変数は、温度の外に、核分裂速度、燃焼度 (fission/cc)、高速中性子束および照射量 (nvt) の 4 種のうちのどれか 1 つが使用される。

その選定はカード番号 I 000 の field 5 の MCGPQ (I) で行われる。

iii) クリープ歪速度と応力のペアの値、2 個を直接入力しておきプログラム内で C, G を設定することもできる。

同様に、加工硬化歪と応力のペアの値、2 個を入力して、プログラム内で P, Q を設定できるようにもなっている。

この入力法の制御は、カード番号 I 6 J K の field 1 の MEB 16 で行われる。詳細についてはデータ入力マニュアル (Appendix - B) を参照されたい。

(4) 被覆管がジルカロイ材の場合、(1) に述べたクリープ歪速度計算式の他に Nichols による 2

つのクリープ歪モデルが追加される。¹⁰⁾ それは、

$$\dot{\epsilon}_{\text{climb}} = D \sigma^n \phi \quad (4.16)$$

$$\dot{\epsilon}_{\text{gr}} = B \sigma \phi + B' \sigma \phi \cdot \exp \{-k (\text{nvt})\} \quad (4.17)$$

である。ここに、

D, r, B, B', k : 定数 (入力カード No. 1700 の入力パラメータ)

σ : 応力 (psi)

ϕ : 中性子束 (fast), (n/cm/sec)

nvt: fast neutron fluence (n/cm²)

である。 $\dot{\epsilon}_{\text{climb}}$ は照射によって引き起こされたりその他の障害をうかす転位による歪速度である。 $\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ は照射成長に含まれる過程に似た過程による付加的クリープである。なお、 $\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ は、FREC-4Aの前 version FREC-3 使用の関係式と異なり、後述の理由により上記の如く修正された。

まず、入力として必要なデータ n は、Nichols によれば $n=4$ である。また、 D は、Nichols の図¹⁰⁾より、その条件、 $\phi = 1.2 \times 10^{14}$ で、 $\sigma = 4.5 \times 10^4$ (psi) で、 $\dot{\epsilon}_{\text{climb}} \approx 10^{-4}$ (1/hr)、 $\sigma = 2.4 \times 10^4$ で $\dot{\epsilon}_{\text{climb}} \approx 10^{-5}$ (hr⁻¹) として、求めると $D \approx 2.0 \sim 2.5 \times 10^{-37}$ となる。なお、CYGRO-3 のサンプルインプット⁴⁾では、 $D = 2.46 \times 10^{-37}$ となっている。

$\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ の係数 B について、同じく Nichols が与えている図より、 $\sigma = 2.6 \times 10^3$ (psi) で $\dot{\epsilon}_{\text{gr}} \approx 10^{-7}$ (hr⁻¹)、 $\sigma = 2.7 \times 10^4$ で $\dot{\epsilon}_{\text{gr}} \approx 10^{-6}$ (hr⁻¹) として求めてみると $B \approx 3.08 \sim 3.2 \times 10^{-25}$ となる。CYGRO-3 のサンプルインプットは $B = 2.928 \times 10^{-25}$ となっている。

$\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ は、照射成長に似た過程のクリープである。一方ジルカロイ被覆材の照射成長としてプログラム組込みの式は、

$$\epsilon_{\text{vsc}} = A_1 \cdot (\text{nvt}) + A_2 [1 - \exp \{-K \cdot (\text{nvt})\}] \quad (4.18)$$

とする (4.2.4 節参照)

ここで、 ϵ_{vsc} は照射成長による体積歪を表す。この体積歪を時間で微分すると、

$$\dot{\epsilon}_{\text{vsc}} = A_1 \phi + A_2 \cdot K \phi \exp \{-K (\text{nvt})\} \quad (\text{sec}^{-1}) \quad (4.19)$$

となる。 $\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ は照射成長に似たクリープ速度なので、FREC-4A では、プログラムの統一性を保つため、先の (4.17) 式を (4.19) 式と同形式で表示することにした。

いま、 $\dot{\epsilon}_{\text{gr}}$ が照射成長 ϵ_{vsc} と比例していると仮定すれば、 B', k の値は、

$$2.928 \times 10^{-25} \cdot \sigma = (1/3) \cdot 3600 \cdot A_1$$

$$B' \cdot \sigma = (1/3) \cdot 3600 \cdot A_2 K$$

から、

$$B' \simeq 1 \times 10^{-24} \quad \text{or} \quad 2.251 \times 10^{-23}$$

$$K \simeq 6.7 \times 10^{-20} \quad \text{or} \quad 3.7 \times 10^{-20}$$

程度となろうか。ただし、 A_1 、 A_2 、 K の値としては、4.2.4節で述べたジルカロイ材の照射成長の値を使用した。

(5) 燃料ペレットおよび被覆管のリング状に分割された部分の相当応力が降伏応力をこえたとき、温度による加工硬化歪の回復が計算される。この回復歪速度として

$$\dot{\epsilon}_R = K \epsilon_{SH} \exp(-Q/R/T) \quad (4.20)$$

の関係式がプログラムに組込まれている。²⁾ここで、

$$\dot{\epsilon}_R = \text{回復歪速度 (hr}^{-1}\text{)}$$

$$\epsilon_{SH} = \text{加工硬化歪}$$

$$Q = \text{活性化エネルギー (cal/mole)}$$

$$R = \text{気体定数 (cal/mole/}^\circ\text{K)}$$

$$T = \text{温度 (}^\circ\text{K)}$$

である。

a) 燃料ペレットについて、上記(4.20)式に必要な入力データ K と Q のサンプルインプットの値は、次の条件から定めた。

加工硬化歪が $\epsilon_{SH} = 1$ であるものが、温度 2800°C では 1 min で $\epsilon_{SH} = 0.002$ となり、温度 1700°C では 1 時間 で $\epsilon_{SH} = 0.5$ になるとする。これより、 $K = 2.95 \times 10^7$ 、 $Q = 6.89 \times 10^4$ となる。

b) ジルカロイ被覆材の場合、このようなデータは特に得られていないので、次のような推定値を使用した。冷間加工された管の焼きなましは、通常、次のようになっている。

Stress Relief 材 $\simeq 500^\circ\text{C}$ 2時間

Full Anneal 材 $\simeq 600^\circ\text{C}$ 2時間

プログラム組込みのデータは、上記の条件と、冷間加工後の加工硬化歪が $\epsilon_{SH} = 1$ とし、Stress Relief 材では焼きなまし後 $\epsilon_{SH} = 0.5$ 、Full Anneal 材では $\epsilon_{SH} = 0.002$ となるとして定めた。すなわち、

$$K = 7.176 \times 10^7 \quad (\text{hr}^{-1})$$

$$Q = 2.941 \times 10^4 \quad (\text{cal/mole})$$

としている。

4.5 気孔に関するデータ

FREC-4Aは、燃料の気孔によるスウェリングを考える。このため、気孔に関するかなり多くのデータが入力されねばならない。

このデータは、主としてカード番号 I 20 K で入力されるがこの外、904 (field 5, 6, 7), 906 (field 4), I 000 (field 2, 3, 4, 7), I 300 (field 4, 5, 6) で関係するデータが入力される。

なお、固体部のスウェリングに関してカード番号 I 400 (field 1, 2, 3), I 6 J 0 (field 1, 6, 7, 8) の入力データがある。

気孔による燃料スウェリングのモデルについては、文献(2)を参照されたい。

4.5.1 気孔の種類等 (I 000 入力データ)

カード番号 I 000 で、気孔の種類の数、気孔の周囲の物質に関するクリープおよび塑性に関する係数と表面張力のデータが入力される。

(1) 気孔種類の数

計算において気孔の種類の数(気孔を球形と考えたときのその半径の区分数)を決定しなければならない。しかし、4.5.2 で後述するように計算に使用できるようなデータは欠如している。

FREC-4A のテストラン等では、CYGRO-3 等のサンプルインプット⁴⁾を参考にして、1種としている。

(2) 表面張力

気孔の周りの物質の表面張力が入力されねばならない。UO₂ 焼結ペレットについて、CYGRO-3 のサンプルインプットでは 2.885×10^{-3} (lb/in) $\approx 5.1521 \times 10^{-4}$ (kg/cm) としている。比較すべき値もないので、FREC-4A は上記の値をそのまま使用している。

(3) 塑性応力、クリープ歪速度に関する係数、RSC, RSP

これらの係数、RSC (R_{SC}) RSP (R_{SP}) は、次のように使用される。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p &= R_{SP} \sigma_y \\ \sigma_C &= R_{SC} \sigma_{g,ave} / \dot{\epsilon}_y \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

ここで、

σ_y = 降伏応力で、 $10^P (\sigma_y / 70.31)^Q = 0.002$ から得られる値

$\dot{\epsilon}_y$ = クリープ歪速度で、 $10^G (\sigma_{g,ave} / 70.31)^G$ から得られる値

$\sigma_{y,ave}$ = 気孔のまわりの固体部分の相当応力

である。なお、C, G, P, Q は I 6 J K で入力される塑性およびクリープ歪計算のための係数

である。詳しくは文献(2)を参照されたい。

これらの係数は、気孔まわりの固体部分の塑性とクリープの取扱いの自由度を持たせるために導入されたものである。しかしながら、係数 R_{SP} の物理的意味は次のような考えによる。

σ_y は、 UO_2 ペレットの如く気孔を含んだものについての降伏応力であるが、気孔の周囲の固体部分は、気孔がない物質（1種の欠陥がない物質）と考えられ、その降伏応力は大きい。

同様に、 R_{SC} の物理的意味は、気孔があるときに応力 $\sigma_{y,ave}$ に対するクリープ歪速度が $\dot{\epsilon}_y$ であるものを、気孔がない場合クリープ強度は増大するとして $R_{SC} \cdot \sigma_{g,ave}$ に対し、クリープ歪速度を $\dot{\epsilon}_y$ にする。

4.5.2 気孔の寸法等の入力

気孔の寸法等（入力値としては体積、気孔数とする）はカード番号I20Kで入力されねばならない。この入力値が気孔に関する主要な値である。

ここで入力される大部分の値は、燃料ペレットの製造時の単位体積（ 1 cm^3 ）当りの値として入力されねばならない。

(1) 気孔内のガスのモル数, GAS M (kg, ke)

燃料ペレットを半径方向に分割したときの、第ke番目のリングの製造時の単位体積当りに存在する気孔の種類kgの気孔に含まれるガスのモル数である。

もし、最初に入力値が与えられず、あるいは0で入力されたような場合は、

$$(1 + 2r/r) v = 83.17 \cdot m \cdot (27.0 + 273.)$$

を満足するmに設定される。

ここに、 r : 表面張力

r : kgの気孔球半径

v : kgの気孔の体積

とする。

これは、気孔内のガス量を、温度 27°C で、圧力が1気圧と表面張力に平衡するように設定するものである。

(2) ガス生成率 AGAS (kg, ke) および放出率係数 BGAS (kg, ke)

燃料ペレット内で生成したF.P.ガスは気孔内に流入しその後、放出されると仮定する。気孔内のガスモル数の変化は、

$$\dot{M}_{gi} = A_m \dot{F} - B_m M_{gi} D_t \quad (4.22)$$

に従うとしている。ここで、

M_{gi} : i種の気孔に含まれるガスモル数

F : 核分裂数密度 (fission/cc)

T_{ave} : リングの平均温度

D_t : 放出率

A_m : AGAS (kg, ke)

B_m : BGAS (kg, ke)

である。 D_t は後述のように、カード番号90Kで入力される Table function D_{ft} から決定される。生成率と放出率係数 A_m , B_m が入力されねばならない値である。

i) 生成率, AGAS (kg, ke)

通常ガスの生成率, $A_m = AGAS$ (kg, ke) は, 1 fission 当り 0.3 atom, あるいは 1.35×10^{-3} gr-moles/MWD と言われている。¹¹⁾ いま, 気孔の種類の数個が1個で, 生成したガスがすべて気孔に流入するものとすれば, 先の値より $A_m = 5 \times 10^{-25}$ gr-moles/fission となる。

気孔が2種以上ある場合, 気孔毎の生成, 流入の詳細は明確でない。そのため, プログラムでは, 1種と考えたときの生成率を全気孔体積に対するその気孔体積の比で振り分けている。

FREC-4Aの1つのインプットとしては, $AGAS$ (kg, ke) = 5×10^{-25} とする。

ii) 放出率係数, BGAS (kg, ke)

B_m (=BGAS (kg, ke))の単位は, 1/hr である。先の(4.22)式を $\dot{F} = \text{const.}$ (steady state) と考えて積分すれば

$$M_{gi} = \frac{A_m \dot{F} t}{B_m t D_t} \{ 1 - \exp(-B_m t D_t) \} \quad (4.23)$$

が得られる。ここで, $A_m \dot{F} t$ は時間 t までのガスの全生成量 (P) を表わしている。

通常の燃料設計等に使用される F. P. ガスの放出率 (D_{ft}) は全生成量に対する比で定義される。それは

$$M_{gi} = P (1 - D_{ft})$$

と表される。プログラムで D_{ft} は, そのリングの平均温度 (T_{ave}) と核分裂数密度 (F) の Table function としてカード番号90Kで入力される。

いま, $B_m t = 1$ として, 上記2式を等しいと置くと, D_t は次式を満足しなければならない。

$$\frac{1}{D_t} \{ 1 - \exp(-D_t) \} = 1 - D_{ft} \quad (4.24)$$

FREC-4Aは, (4.22)式に使用する D_t を上記の式から収斂計算により求めている。

ここで, 入力すべき値 $B_m = BGAS$ (kg, ke) は, 一種の時定数と考えられる。すなわち, $1/B_m$ (hr) 経過したときに, 放出率が D_{ft} となる。

FREC-4Aのサンプルインプットとしては, $B_m = 1/24 \approx 4.17 \times 10^{-2}$ (1/hr) を使用している。

M_{gi} は気孔内にとじこめられるガス量であり, 全生成量との差 ($P - \sum_i M_{gi}$) は放出されるとする。一方, 燃料棒内圧の計算においても放出ガス量を計算している。FREC-4Aは, これら F. P. ガスの放出に関し, それぞれ別途に計算しており, 現在両者のリンケージは行っていない。

(3) 気孔寸法等

気孔に関する寸法は、それぞれの気孔の種類毎にまとめた体積、気孔数密度として入力される。

i) 気孔領域体積, VGAS (kg, ke), VSOL (kg, ke)

VGAS (kg, ke) は、リング ke 中の気孔の種類 kg について、製造時 1 cc 当りの体積である。

いま、気孔の種類が 1 種で、95% T. D の UO₂ ペレットならば、VGAS (1, ke) = 0.05 と入力すればよい。

VSOL (kg, ke) は、上記 VGAS (kg, ke) の気孔とその気孔に属する固体領域を合せた体積である。すなわち、VSOL (kg, ke) - VGAS (kg, ke) の体積が、気孔内のガス圧とまわりの応力場との平衡を保つための領域である。したがって入力値としては VSOL (kg, ke) > VGAS (kg, ke) でなければならない。

GYGRO-3 等のサンプルインプット⁴⁾では、気孔を 1 種とし、VSOL を特に特定せず VSOL (1, ke) = 1.0 としている。これは、ガス圧と応力場との平衡を保つ領域は、気孔を除く、残りの全固体部分とするものである。

ii) 気孔数密度, GASN (kg, ke), FGAS (kg, ke)

GASN (kg, ke), FGAS (kg, ke) 共 kg 種の気孔の気孔数密度 (n/cc) である。ただ、GASN は、入力値のまま保存され、気孔数変化に対する参考値として使用される。FGAS は時間 t における値である。

未照射のペレットならば、GASN (kg, ke) = FGAS (kg, ke) として入力されねばならない。

CYGRO-3 のサンプルインプット等では、気孔を 1 種とし GASN (1, ke) = 1.0 × 10⁷ (n/cc) を使用している。

4.5.3 気孔の移動に関する入力データ

(1) 気孔の移動速度関係式

気孔の移動速度に関する式は、

蒸発-凝縮の機構による気孔移動速度として、

$$\rho_v = \frac{A_v}{P T^{3/2}} \frac{dT}{dr} \exp\left(-\frac{Q_v}{k T}\right) \quad (4.25)$$

を使用し、表面拡張による気孔移動速度として、

$$\rho_s = \frac{A_s}{r T^2} \frac{dT}{dr} \exp\left(-\frac{Q_s}{k T}\right) \quad (4.26)$$

を使用している。³⁾ ここに、

ρ_v, ρ_s = 気孔速度 (cm/hr)

A_v, A_s = 定数

T = 温度 (°K)

$d T / d r$ = 固体内の温度勾配 ($^{\circ} K / cm$)

P = 気孔内ガス圧力 ($kp / cm^2 a$)

r = 気孔半径 (cm)

Q_V, Q_S = 活性化エネルギー (erg)

k = ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-16} erg / ^{\circ} K$)

である。入力すべき値は、 $A_V, Q_V/k, A_S$ と Q_S/k の4個としてプログラム化されている。

(2) $A_V, Q_V/k$ の値

Nichols¹¹⁾によれば、 $Q_V = 142,600 (cal / mole) = 9.982 \times 10^{-12} (erg)$ としている。これより、 Q_V/k を求めると $Q_V/k = 7.1787 \times 10^4 (^{\circ} K) = 12.9216 \times 10^4 (^{\circ} R)$ である。一方、CYGRO-3等のサンプルインプットデータは、 $Q_V/k = 15.19 \times 10^4 (^{\circ} R)$ を使用している¹²⁾。ただし、この値は、 ThO_2 を5.6~10 w/o含む UO_2 ペレットについての値である。

A_V の試算値として、NicholsはWAPD-570で、 $P \approx 10^6 (dynes / cm^2) (1 atm)$ のときの値として $A_V = 3.04 \times 10^9 (cm^2 (^{\circ} K)^{1/2} / sec)$ を与えている。CYGRO-3のサンプルインプットは、WAPD-570の値を、圧力を(psi)とし、さらに単位変換した $A_V = 3.2 \times 10^{13} (1 b (^{\circ} F)^{1/2} / hr)$ を使用している。これを、FREC-4Aの入力値に単位変換すると $A_V = 1.0944 \times 10^{13} (kp - (^{\circ} K)^{1/2} / hr)$ となる。

WAPD-570の係数の試算値 $A_V = 3.04 \times 10^9$ には、ミスプリントがあるようで、その後述べられた移動速度の試算値 $T = 2000 (^{\circ} K)$ 、 $d T / d r = 1000 ^{\circ} C$ のとき $\rho_V = 15 (\text{\AA} / sec)$ と一致しない。

移動速度の試算値より、係数を求めると $A_V = 5 \times 10^{10} (cm^2 (^{\circ} K)^{1/2} / sec)$ となる。これをFREC-4A用の入力値に単位変換すると、 $A_V = 1.8 \times 10^{14} (kp - (^{\circ} K)^{1/2} / hr)$ である。

なお、菊地等の実験¹³⁾によれば、最初の気孔内圧が1気圧で、温度 $T = 2100 (^{\circ} K)$ 、温度勾配 $d T / d r \approx 1460 (^{\circ} K / cm)$ のときの移動速度 $\rho_V \approx 400 (\text{\AA} / sec) = 1.44 \times 10^{-2} (cm / hr)$ がえられている。

(3) $A_S, Q_S/k$ の値

Q_S の値として、Nicholsは $Q_S \approx 2/3 Q_V$ と推定している。¹⁴⁾これに従えば、 $Q_S/k \approx 4.7858 \times 10^4 (^{\circ} K)$ となる。CYGRO-3のサンプルインプットでは同様な方法で、 $Q_S/k = 101 \times 10^3 (^{\circ} R) = 5.61 \times 10^4 (^{\circ} K)$ としている。

A_S の値として、CYGRO-3のサンプルインプットは、 $A_S = 22.5 \times 10^3 (in^3 - ^{\circ} R / hr) \approx 2.0484 \times 10^5 (cm^3 - ^{\circ} K / hr)$ を採用している。

表面拡散による移動速度の実験報告の1例として、Nicholsが引用しているWhaphamの測定によれば、気孔半径 $r = 50 (\text{\AA})$ 、温度 $T \approx 1600 (^{\circ} C)$ 、温度勾配 $d T / d r \approx 10^6 (^{\circ} K / cm)$ のとき、移動速度は $\rho_S \approx 10^3 (\text{\AA} / sec) = 3.6 \times 10^{-2} (cm / hr)$ となっている。ただし、この場合 $Q_S \approx 40000 (cal / mole)$ である。

(4) 計算例

先の(2)、(3)に述べた入力値を用いて計算した例をFig. 15に示す。ただし、温度勾配は、

1000 °K/cmとしている。また、蒸発-凝縮移動の計算（図中の1V）は、気孔内圧を1 kg/cm² とし、表面拡散移動の計算は（図中の2S, 3S）、気孔半径を10⁻³, 5 × 10⁻⁷ cm とした。使用の数値は、図中に示す通りである。1Vと2Sの数値は、CYGRO-3のサンプルインプットを修正したものであり、3Sの数値は(3)に述べた Whapham の結果を(4.26)式に適用したものである。

気孔の総数は、CYGROサンプルインプット等では、1 × 10⁷ n/cm³としている。いま、95% T. DのUO₂ペレットを考えると、その気孔の平均半径は1 × 10⁻³ cm程度となる。照射されるとこの半径は減少するので、表面拡散による気孔の移動速度は図中の2Sの値より大きくなるであろう。

蒸発による移動速度の計算例1Vは気孔内圧を1気圧としているが、照射により気孔内圧は100～数千気圧に上昇することを考えると、図中の値より小さくなる。

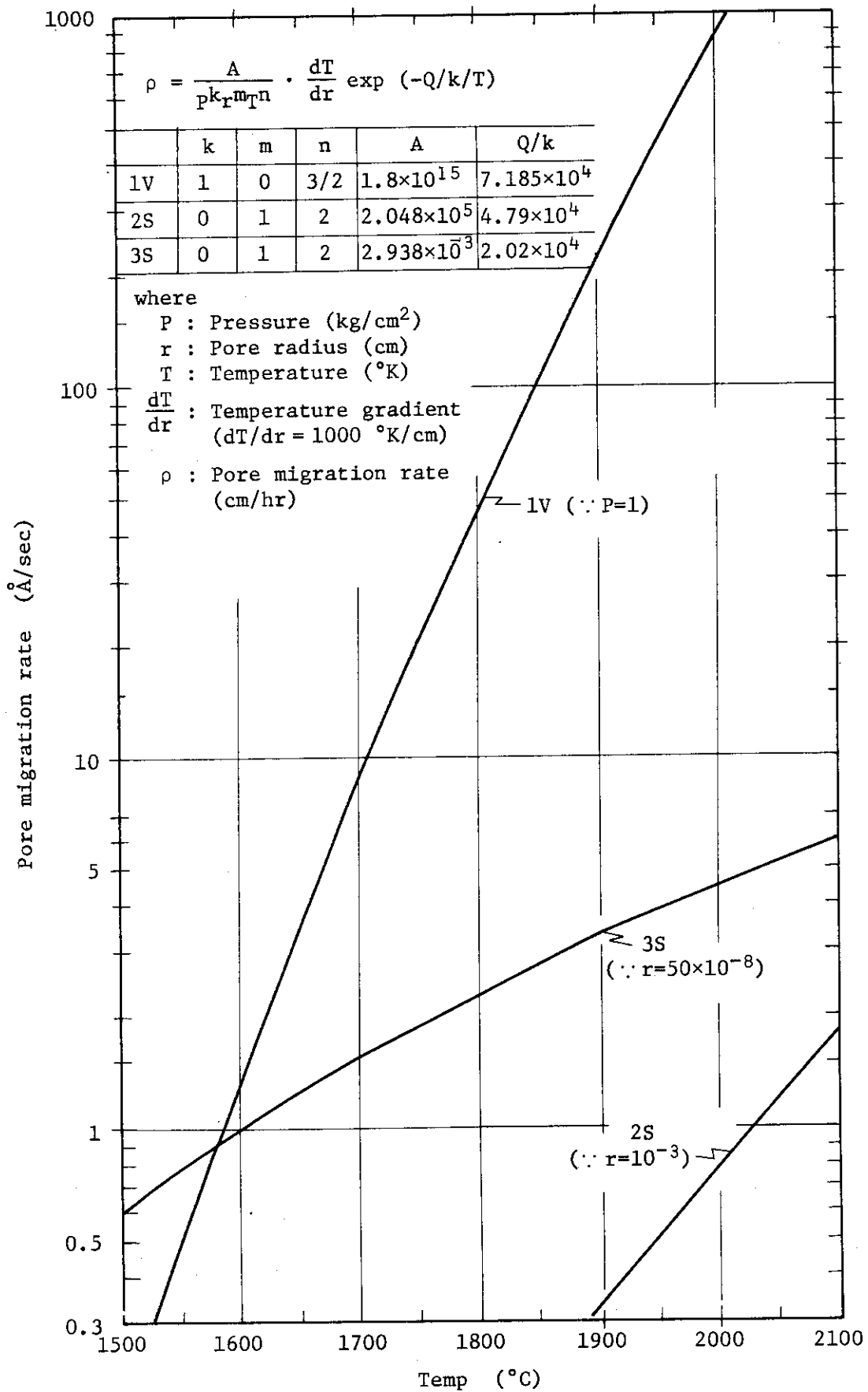


Fig. 15 Calculated examples of pore migration rates.

5. プログラム出力

FREC-4Aの出力は、入力データに関する出力と計算結果に関する出力の2つに分類される。これらの出力は、12個の出力グループに分けられる。この章において、各出力グループの説明を行う。

各出力グループは、Table 9に示す構成になっている出力グループ(1)~(12)については、1つの例をFig. 16~25に示すので参照されたい。

5.1 入力データに関する情報の出力

FREC-4Aの入力データは、4章で記述したように、あまり簡単ではない。そこで、これらの入力データを整理してプリントする機能が付加されている。

入力データの情報に関し合計9個の出力グループが準備されている。

(1) 出力グループ(1)

出力グループ(1)は、入力カードをそのカードイメージのままプリントしたものである。

(2) 出力グループ(2)

FREC-4Aの入力は、4.1節で説明したように、入力変数をFree Format形式で読み込む。したがって、出力グループ(1)のままでは、どの数値が何の変数に対応するかを見ることは困難である。そのため、入力値と変数を対応づけた出力グループ(2)が用意されている。

出力の変数は、入力カード上の数値を各変数に設定した後のものである。この出力は、初期の変数に所定の値が入力されたかどうかを検討するのに便利である。ただし、クリープ速度の係数C、G等が直接入力されない場合、C、G等の値には、入力された仮の値がプリントされる。なお、この件についてはAppendix-Bを参照されたい。

(3) 出力グループ(3)

この出力は、計算に使用されるTable functionの主要なものについてまとめたものである。主なものは、物性値関係の数値で、これらは温度の外に核分裂速度、核分裂数密度、中性子束あるいは照射量等の2変数によって決まる函数とされている。

出力は、物性値等をその変数と共に表形式で示している。Table functionの値が正しく設定されているかどうかはこの出力によって調べることが望ましい。

なお、MEATと表示されているものは燃料ペレット、CLADの表示は被覆を示す。

クリープ速度の係数C、G等が入力データとして直接与えられず、プログラム内で変換作成するよう指示された場合(4.4.2節参照)、この出力は2回出力される。後に出力された値が計算に使用される設定値である。

(4) 出力グループ(4)

この出力は、計算に使用される塑性応力と塑性歪を示す。

FREC-4Aの塑性応力(σ_P)と塑性歪(ϵ_P)の間には

$$\epsilon_P = 10^P (\sigma_P / 70.31)^Q \quad (5.1)$$

の関係を仮定している。ここで、係数P, Qは、温度および核分裂速度、中性子束や照射量を変数とするTable functionで、入力値である。

出力に表形式で示される値は、上記(5.1)式を σ_P について解いた

$$\sigma_P = 70.31 (\epsilon_P / 10^P)^{1/Q} \quad (\text{kg/cm}^2) \quad (5.2)$$

を示す。各列の値は、その列の上部に表示されたSP(x)とあるxを $\epsilon_P = x$ として使用したものである。P, Qが燃料か被覆によって変るばかりでなく、温度および照射量等のTable functionなので、それらの区別をKM, KT, KFの番号で示している。Table functionの変数として使用される温度および照射量等は出力の最初の部分にプリントされている。

(5) 出力グループ(5)

この出力は、定常クリープの係数, C, Gから得られる応力と歪の値を示す。

FREC-4Aの定常クリープ歪速度($\dot{\epsilon}_c$)は

$$\dot{\epsilon}_c = 10^C (\sigma / 70.31)^G \quad (5.3)$$

で計算される。ここで、 σ は応力, C, Gは温度および照射量等によるTable functionであり、入力値である。

表形式で、この出力中に示された値は、各列の上部にSC(x)として示される数xを $\dot{\epsilon}_c = x$ とし、上記(5.3)式を

$$\sigma = 70.31 (\dot{\epsilon}_c / 10^C)^{1/G} \quad (5.4)$$

として解いた応力, σ (kg/cm²)である。

その他、この出力の読み方は出力グループ(4)と同じである。

(6) 出力グループ(6)

この出力は、プログラム組込みの燃料ペレットの固体部スウェリング率(EVS (MEAT)で表示)の値を示す。この値については4.2.3を参照されたい。

なお、この組込みの値が使用されるのは、入力カード番号907でHISTが1, 5000でNUT(3)が2のときである。

(7) 出力グループ(7)

この出力は入力された照射履歴を整理したプリントである。時間, 出力, 冷却水温度と圧力以外入力されなかった場合、4.2節に述べたオプション・キーワードに従いプログラム内で作成した照射履歴データをプリントしている。核分裂速度, nvt, 燃料および被覆材の固体部スウェリング等の値は、最高出力部セグメントについての値を示す。

なお、この出力中TIMEとあるものは、入力値の時間増分の積算値である。

(8) 出力グループ(8)

この出力は、燃料棒の出力分布係数の整理結果を示す。半径方向の出力についてはノルマライ

ズした結果を示している。

(9) 出力グループ(9)

この出力は、計算に使用する計算モデルの使用、非使用についてまとめたものである。また、計算結果の出カルーチンの指定の有無についてもプリントしている。

これらモデルを選定しているキーワードの入力カード番号等をも記している。

Table 9 Output from FREC-4A

Classification	Output Group	Description	subroutine to print
Output for input data	1	Prints of input card images	FREF
	2	Prints of input data set in computer	OUTPUT
	3	Table function for material properties etc.	TABLIS
	4	Table of stress vs. ϵ_{SH} (strain hardening strain)	SEGT(1)
	5	Table of stress vs. creep strain rate	
	6	Table of UO ₂ pellet swelling rate vs. burnup (f./cc)	INIOUT
	7	Table of time depend irradiation history data	OUTPT1
	8	Power distribution	INSET(5)
	9	モデルの使用状態のまとめ	MODELS(2)
	10	燃料棒全体についての計算結果のまとめ (指定された時点)	OUTPT2
	11	セグメントについての計算結果の詳細	OUTPR
	12	ペレットスタック値, 上部プレナム部の被覆の位置の軸方向伸び等の照射時刻による変化をラインプリンタでプロットする	PPLLOT
	13	プログラム開発段階において使用したデバック出力	OUTTEM
	14	計算結果の図形処理のため機番1へ出力する	OUTTP

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE FREEF

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(1)- *****

```

1622, 0, -4.50, 1.34, -34, 20, -0.001, 0, 0 *
1623, 0, -3.59, 1.00, -34, 20, -0.001, 0, 0 *
1630, 1925, 0, 13.4, -6, 8.15, +5, 0.291, 2.0, -2, 1.0, 1.0, 1.0 *
1631, 0, -0.46, 4.46, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1632, 0, 0.11, 4.14, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1633, 0, 0.93, 3.67, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1640, 2765, 0, 22.5, -6, 1.00, +5, 0.291, 2.0, -2, 1.0, 1.0, 1.0 *
1641, 0, -0.46, 4.46, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1642, 0, 0.11, 4.14, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1643, 0, 0.93, 3.67, -8.0, 20, -0.001, 0, 0 *
1700, 1.0-4, 0, 4.0, 0, 0, 0, 2.95+7, 6.89+4 * CREEP COEFFICIENTS. *
2000* DATA OF CLADDING *
2000, 4.0, 0, 1.0, 1.0+3, 44, 0, 2.885-3, 6.55 *
2100, 0.532, 0, 0, 0, 0, 0 * CLADDING INITIAL RADIUS *
2101, 0.560, 0, 0, 0, 0, 0 * CLADDING INITIAL RADIUS *
2102, 0.588, 0, 0, 0, 0, 0 * CLADDING INITIAL RADIUS *
2103, 0.616, 0, 0, 0, 0, 0 * CLADDING INITIAL RADIUS *
2300, 1.0, 1.0, 1.0, -0.722, -0.011, 0.733, 38.5, 13.5 *
2400, 1.0, 2.0, 3.0, 0, 0, 0, 0, 0 *
2500, 1.0, 1.0, 4.0, 1.0, 0, 0, 0, 0 *
2610, 250, 6.4, -6, 8.2+5, 0.325, 0.148, 1, 1, 1 * ZRY MECH. PROPERTIES *
2611, 0, -12.87, 3.8, -6.95, 2.04, 18.5 *
2612, 0, -11.61, 1.298, -22.0, 10.3, -0.0 * CGPQ
2613, 0, -14.14, 4.71, -6.52, 1.3, 18.5 *
2614, 0, -11.42, 1.298, -23.0, 10.3, -0.0 *
2615, 0, -15.23, 5.52, -6.07, 0.64, 18.5 *
2616, 0, -10.90, 1.298, -23.6, 10.3, -0.0 *
2617, 300, 6.56-6, 7.9+5, 0.325, 0.155, 1, 1, 1 * ZRY MECH. PROPERTIES *
2618, 0, -11.44, 3.8, -5.98, 2.04, 18.5 *
2619, 0, -8.03, 1.216, -16.32, 9.0, -0.0 * CGPQ
2620, 0, -13.36, 4.71, -4.66, 1.3, 18.5 *
2621, 0, -7.85, 1.216, -18.4, 9.0, -0.0 *
2622, 0, -14.79, 5.52, -3.78, 0.64, 18.5 *
2623, 0, -7.33, 1.216, -19.9, 9.0, -0.0 *
2624, 350, 6.72-6, 7.6+5, 0.325, 0.161, 1, 1, 1 * ZRY MECH. PROPERTIES *
2625, 0, -10.77, 3.8, -4.61, 2.04, 18.5 *
2626, 0, -7.46, 1.204, -13.10, 8.12, -0.0 * CGPQ
2627, 0, -12.57, 4.71, -3.16, 1.3, 18.5 *
2628, 0, -7.28, 1.204, -14.80, 8.12, -0.0 *
2629, 0, -14.18, 5.52, -1.85, 0.64, 18.5 *
2630, 0, -6.76, 1.204, -16.00, 8.12, -0.0 *
2631, 400, 6.88-6, 7.3+5, 0.325, 0.168, 1, 1, 1 * ZRY MECH. PROPERTIES *
2632, 0, -10.77, 3.8, -4.61, 2.04, 18.5 *
2633, 0, -6.64, 1.187, -1.60, 5.37, -0.0 * CGPQ
2634, 0, -12.57, 4.71, -3.16, 1.3, 18.5 *
2635, 0, -6.46, 1.187, -0.15, 5.37, -0.0 *
2636, 0, -14.18, 5.52, -1.85, 0.64, 18.5 *
2637, 0, -5.94, 1.187, -0.10, 5.37, -0.0 *
2638, 1.0-4, 2.46-37, 4.0, 2.928-25, 0, 0, 7.176+7, 2.941+4 * CREEP *
5000* IRRADIATION HISTORY DATA GENERATED INTERNALLY *
5000, 31, 1, 2, 3, 1, 1, 0, 0 *
5001, 3.1 +10, 2.59, 0 *
5002, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 *
5003, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 *
5004, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 *
5005, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 *
    
```

Fig. 16(b) A sample of output group (1).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE FREEF

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(1)- *****

```

5006, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0 *
9901, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111 * KAKE(J,1) *
9901, 1000000, 0000000, 0000000, 0000000, 00300000, 00000000 * KAKE(J,1) *
9901, 2000000, 0R4 * KAKE(J,1) *
9902, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111 * KAKE(J,2) *
9902, 0011100, 0000000, 0000000, 0000000, 00000000, 00000000 * KAKE(J,2) *
9902, 0R5 * KAKE(J,2) *
9903, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111, 1111111 * KAKE(J,3) *
10401, 0.1 * HOLLOW PELLET.
10402, 0.1858 *
10403, 0.2716 *
10404, 0.3574 *
10405, 0.4432 * HOLLOW PELLET.
10406, 0.5290 * HOLLOW PELLET.
150400, 1, 1.08262, 2, 1.10906, 3, 1.17935, 4, 1.29095, 5, 1.44703, 6, 1.65384 *
, CDNT
600, 0, 0, 1, -3*
601, 1.0, 1.0, 24.0 * D-TIME (1ST CYCLE) -
602, 260, 0.0, 0.0 * KW/CM, L.H.G.R.
603, 240, 240, 25 * COOLANT TEMPERATURE.
604, 34.1, 34.1, 1.0 * COOLANT PRESSURE.
9999* JOB END.
    
```

Fig. 16(c) A sample of output group (1).

***** OUTPUT GROUP -(2)- *****

FREC-4A INPUT DATA LIST

MOPT(1)	MOPT(2)	MOPT(3)	MOPT(4)	KKK	IPROPT	IPRCON	OTIME	
0	0	1	-5	111111	11	304	5.000+01	600
TIME(1)	TIME(2)	TIME(3)	TIME(4)	TIME(5)	TIME(6)	TIME(7)	TIME(8)	601
0.0	0.28000D+02	0.35000D+01	0.22500D+02	0.14000D+02	0.14000D+02	0.14000D+02	0.14000D+02	602
L.H.G.R.(1)	L.H.G.R.(2)	L.H.G.R.(3)	L.H.G.R.(4)	L.H.G.R.(5)	L.H.G.R.(6)	L.H.G.R.(7)	L.H.G.R.(8)	603
0.0	0.0	0.32000D+03	0.48000D+03	0.48000D+03	0.48000D+03	0.48000D+03	0.48000D+03	604
T(WATER)(1)	T(WATER)(2)	T(WATER)(3)	T(WATER)(4)	T(WATER)(5)	T(WATER)(6)	T(WATER)(7)	T(WATER)(8)	605
0.25000D+02	0.24000D+03	0.24000D+03	0.24000D+03	0.24000D+03	0.24000D+03	0.24000D+03	0.24000D+03	606
P(WATER)(1,2)	P(WATER)(2,2)	P(WATER)(3,2)	P(WATER)(4,2)	P(WATER)(5,2)	P(WATER)(6,2)	P(WATER)(7,2)	P(WATER)(8,2)	607
0.10000D+01	0.34100D+02	0.34100D+02	0.34100D+02	0.34100D+02	0.34100D+02	0.34100D+02	0.34100D+02	608
F(1,2)	F(2,2)	F(3,2)	F(4,2)	F(5,2)	F(6,2)	F(7,2)	F(8,2)	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
EVS(MEAT)(1)	EVS(MEAT)(2)	EVS(MEAT)(3)	EVS(MEAT)(4)	EVS(MEAT)(5)	EVS(MEAT)(6)	EVS(MEAT)(7)	EVS(MEAT)(8)	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
EVS(CLAD)(1)	EVS(CLAD)(2)	EVS(CLAD)(3)	EVS(CLAD)(4)	EVS(CLAD)(5)	EVS(CLAD)(6)	EVS(CLAD)(7)	EVS(CLAD)(8)	
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

Fig. 17(a) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTPUT

***** OUTPUT GROUP -(2)- *****

FREC-4A INPUT DATA LIST

MSET	IPEAK	DLEN	DTEM	ALHR	LSGF	
5	0	0.0	100.00	450.00	0	700
ALZ	ALC	APD				
0.0	0.0	0.70				701
1.00	1.00	0.99				702
12.95	12.95	1.00				703
24.90	24.90	1.00				704
35.10	35.10	0.99				705
36.10	36.10	0.70				706
LPST	NSPL	MSPL	ALL	ALPSL	SCKL	PRLDL
0	1	2	0.0	1.580-05	5.310+00	3.000+00
ESL	ALPRC	ARGC				
0.0	0.0	0.0				756
KUPS	NSPU	MSPU	AUL	ESU	ALPSU	AUSP
0	3	5	3.650+00	2.180+06	1.560-05	1.000-02
PGAPS	TEMPS	SVOLS	PLVOL	PLVOLL	SCKU	PRLDU
1.00	298.16	7.70	7.70	7.70	1.500+00	1.800+00
						758

Fig. 17(b) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTPUT

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(2) - *****

FMS(1,2)	FMS(2,2)	FMS(3,2)	FMS(1,1)	FMS(2,1)	FMS(3,1)		
0.0	0.30000D+20	0.30000D+21	0.84000D+12	0.10000D+14	0.11800D+15	800	
FMS(1,4)	FMS(2,4)	FMS(3,4)	FMS(1,3)	FMS(2,3)	FMS(3,3)		
0.0	0.26000D+21	0.20000D+22	0.80000D+13	0.16000D+15	0.80000D+15	801	
TG(K)	CGFT(1,K)	CGFT(2,K)	CGFT(3,K)	RGASN(K)	ZUYKB	0	0
0.10000D+04	0.50000D-02	0.50000D-02	0.50000D-02	0.10000D+01	0.10000D+04	90K	
0.13000D+04	0.10000D+00	0.10000D+00	0.10000D+00	0.90000D+00	0.13000D+04	901	
0.16000D+04	0.60000D+00	0.60000D+00	0.60000D+00	0.80000D+00	0.16000D+04	902	
	CGAP	HGAP	HNOGAP	HWATER	R(VDW)	A(VDW)	B(VDW)
0.217000D-02	0.14175D+01	0.56700D+00	0.56700D+01	0.84805D+02	0.0	0.0	0.0
	FCORE	FCON(R)	FCON(Z)	CSC(MAX)	DE(MAX)	RPLUG	QPLUG
0.0	0.0	0.0	0.0	0.30000D+03	0.30000D-03	0.90000D-01	0.0
	SGMIN	MPQ	MCORE	MGAS	MGL	EDOGS	MFILE
0.10000D+01	0.0	0.0	0.0	0.10000D+01	0.10000D+01	0.0	0.0
	MCEE	DVMAX	HIST	RAP	RBP	RABP	FRICION F. PCOLL
0.0	0.0	0.0	0.10000D+01	0.50000D+00	0.10789D+01	0.40000D+00	0.20000D+04
	FRCOL	DTMIN	SIGMA	SUPER	MAXPOR	NTPR	FDENS
0.23000D+00	0.50000D-02	0.14600D+04	0.75000D+01	0.50000D+00	0.0	0.0	0.96500D+00
	REACTT	PFACIT	RFACFC	PFACFC	0	0	0
0.23000D+01	0.33000D+01	0.23000D+01	0.33000D+01	0.33000D+01			
	FMSUP	FSUP	KSUP	ESUP	ESLIP	ASUP	0
0.0	0.0	0.0	0.10000D+01	0.0	0.0	0.0	0

Fig. 17(c) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTPUT

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(2)- *****

NRM	0.60000D+01	0.10000D+01	0.10000D+02	0.10000D+04	0.11000D+02	0.10000D+01	0.10000D+03	0.10412D+02	1000
RADIUS(KR)	SR(KE)	SC(KE)	SZ(KE)	EGC(KE)	EGZ(KE)	EG(KE)	EV(KE)		11JK
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1100
0.10580D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1101
0.21160D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1102
0.31740D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1103
0.42320D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1104
0.52900D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		1105
GASM(KG)	AGAS(KG)	BGAS(KG)	VGAS(KG)	VSOL(KG)	GASN(KG)	MING(KG)	FGAS(KG)		12JK
0.0	0.50000D-24	0.41700D-01	0.40000D-01	0.10000D+01	0.10000D+08	0.20000D+01	0.10000D+08		1201
0.0	0.50000D-24	0.41700D-01	0.40000D-01	0.10000D+01	0.10000D+08	0.20000D+01	0.10000D+08		1202
0.0	0.50000D-24	0.41700D-01	0.40000D-01	0.10000D+01	0.10000D+08	0.20000D+01	0.10000D+08		1203
0.0	0.50000D-24	0.41700D-01	0.40000D-01	0.10000D+01	0.10000D+08	0.20000D+01	0.10000D+08		1204
0.0	0.50000D-24	0.41700D-01	0.40000D-01	0.10000D+01	0.10000D+08	0.20000D+01	0.10000D+08		1205
RALPHA(R)	RALPHA(C)	RALPHA(Z)	RV(R)	RV(C)	RV(Z)	DTMAX	DTEDGE		1300
0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	0.33330D+00	0.33330D+00	0.33330D+00	0.20000D+01	0.10000D+01		1400
PVM(1)	PVM(2)	PVM(3)	AV	GV	AS	QS	RGB		1500
0.0	0.60000D+04	0.10000D+05	0.18000D+15	0.71789D+05	0.20484D+06	0.47858D+05	0.57150D-04		1610
KR(=1)	RQ(1)	KR	RQ(KR)	KR	RQ(KR)	KR	RQ(KR)		1611
0.10000D+01	0.10000D+01	0.20000D+01	0.10226D+01	0.30000D+01	0.10917D+01	0.40000D+01	0.12123D+01		1612
0.50000D+01	0.11392D+01	0.60000D+01	0.16444D+01						1613
TM(J)	ATM(J)	ETM(J)	UTM(J)	CTM(J)	VPM(1,J)	VPM(2,J)	VPM(3,J)		1620
MEB16(K,J)	CSTM(K,J)	GSTM(K,J)	PSTM(K,J)	QSTM(K,J)	WSTM(K,J)	0	0		1621
0.26000D+03	-0.87500D-05	0.17800D+07	0.29100D+00	0.45000D-01	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01		1622
0.0	-0.71700D+01	0.10000D+01	0.45000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1623
0.0	-0.58700D+01	0.10000D+01	0.45000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1630
0.0	-0.51700D+01	0.10000D+01	0.45000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1631
0.12322D+04	0.11200D-04	0.15190D+07	0.29100D+00	0.25000D-01	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01		1632
0.0	-0.43900D+01	0.23400D+01	0.34000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1633
0.0	-0.45000D+01	0.13400D+01	0.34000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1640
0.0	-0.35900D+01	0.10000D+01	0.34000D+02	0.20000D+02	0.10000D-02				1641
0.19250D+04	0.13400D-04	0.81500D+06	0.29100D+00	0.20000D-01	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01		1642
0.0	-0.46000D+00	0.44600D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				1643
0.0	0.11000D+00	0.41400D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				1644
0.0	0.93000D+00	0.36700D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				1645
0.27650D+04	0.22500D-04	0.10000D+06	0.29100D+00	0.20000D-01	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01		1700
0.0	-0.46000D+00	0.44600D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				
0.0	0.11000D+00	0.41400D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				
0.0	0.93000D+00	0.36700D+01	0.80000D+01	0.20000D+02	0.10000D-02				
EINT	CPOW	XPOW	CLIN	BDS	KK	FKC	GACT		
0.10000D-03	0.0	0.40000D+01	0.0	0.0	0.0	0.29500D+08	0.68900D+05		

Fig. 17(d) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(CHR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTPUT

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(2)- *****

NRM	0.40000D+01	0.0	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+04	0.44000D+02	0.0	0.28850D-02	0.65500D+01	2000
RADIUS(KR)	SR(KE)	SC(KE)	SZ(KE)	EGC(KE)	EGZ(KE)	EG(KE)	EY(KE)	21JK		
0.53200D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2100		
0.56000D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2101		
0.58800D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2102		
0.61600D+00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2103		
RALPHA(R)	RALPHA(C)	RALPHA(Z)	RV(R)	RV(C)	RV(Z)	DTMAX	DTEDGE	2300		
0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	-0.72200D+00	-0.11000D-01	0.73300D+00	0.38500D+02	0.13500D+02			
PVM(1)	PVM(2)	PVM(3)	AV	QV	AS	QS	RGB	2400		
0.10000D+01	0.20000D+01	0.30000D+01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
KR(=1)	RQ(1)	KR	RQ(KR)	KR	RQ(KR)	KR	RQ(KR)	2500		
0.10000D+01	0.10000D+01	0.40000D+01	0.10000D+01							
TM(J)	ATM(J)	ETM(J)	UTM(J)	CTM(J)	VPM(1,J)	VPM(2,J)	VPM(3,J)	26J0		
MEB16(K,J)	CSTM(K,J)	GSTM(K,J)	PSTM(K,J)	GSTM(K,J)	WSTM(K,J)	0	0	26JK		
0.25000D+03	0.64000D-05	0.82000D+06	0.32500D+00	0.14800D+00	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	2610		
0.0	-0.11610D+02	0.12980D+01	-0.22000D+02	0.10300D+02	0.0	0.0	0.0	2611		
0.0	-0.11420D+02	0.12980D+01	-0.23000D+02	0.10300D+02	0.0	0.0	0.0	2612		
0.0	-0.10900D+02	0.12980D+01	-0.23600D+02	0.10300D+02	0.0	0.0	0.0	2613		
0.30000D+03	0.65600D-05	0.79000D+06	0.32500D+00	0.15500D+00	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	2620		
0.0	-0.80300D+01	0.12160D+01	-0.16320D+02	0.90000D+01	0.0	0.0	0.0	2621		
0.0	-0.78500D+01	0.12160D+01	-0.18400D+02	0.90000D+01	0.0	0.0	0.0	2622		
0.0	-0.73300D+01	0.12160D+01	-0.19900D+02	0.90000D+01	0.0	0.0	0.0	2623		
0.35000D+03	0.67200D-05	0.76000D+06	0.32500D+00	0.16100D+00	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	2630		
0.0	-0.74600D+01	0.12040D+01	-0.13100D+02	0.81200D+01	0.0	0.0	0.0	2631		
0.0	-0.72800D+01	0.12040D+01	-0.14800D+02	0.81200D+01	0.0	0.0	0.0	2632		
0.0	-0.67600D+01	0.12040D+01	-0.16000D+02	0.81200D+01	0.0	0.0	0.0	2633		
0.40000D+03	0.68800D-05	0.73000D+06	0.32500D+00	0.16800D+00	0.10000D+01	0.10000D+01	0.10000D+01	2640		
0.0	-0.66400D+01	0.11870D+01	-0.16000D+01	0.53700D+01	0.0	0.0	0.0	2641		
0.0	-0.64600D+01	0.11870D+01	-0.15000D+00	0.53700D+01	0.0	0.0	0.0	2642		
0.0	-0.59400D+01	0.11870D+01	-0.10000D+00	0.53700D+01	0.0	0.0	0.0	2643		
EINT	CPW	XPW	CLIN	BDS	XK	FKC	GACT	2700		
0.10000D-03	0.24460D-36	0.40000D+01	0.29280D-24	0.0	0.0	0.71760D+08	0.29410D+05			

Fig. 17(e) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTPUT

***** OUTPUT GROUP -(2)- *****

FREC-4A INPUT DATA LIST

NUT(1)	NUT(2)	NUT(3)	NUT(4)	NUT(5)	NUT(6)	NUT(7)	NUT(8)	
31	1	2	3	1	1	0	0	5000
CFUEL	CCLAD	PCOR						
0.31000D+11	0.25900D+01	0.0						5001
CARD-907 F3=HIST=1.0	CARD-5000 F3=NUT(3)= 1	IGAI WA	CARD-5002 NO DATA WA	SIYDD SARENAI				5002
CARD-907 F3=HIST=1.0	CARD-5000 F4=NUT(4)= 1	IGAI WA	CARD-5003 NO DATA WA	SIYDD SARENAI				5003
CARD-907 F3=HIST=1.0	CARD-5000 F7=NUT(7)=>1	IGAI WA	CARD-5004 NO DATA WA	SIYDD SARENAI				5004
								OUTPUT FORMAT 680
								OUTPUT FORMAT 681
								OUTPUT FORMAT 682
SHUT(1)	SHUT(2)	SHUT(3)	SHUT(4)	SHUT(5)	SHUT(6)	TORF		5005
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
PSUT(1)	TSUT(1)	PSUT(2)	TSUT(2)	PSUT(3)	TSUT(3)			5006
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
N12	N22	N15	N18	N28	N5002	N5003	N5004	N5006
5	0	16	0	0	6	6	6	6
KAKE(1)	KAKE(2)	KAKE(3)	KAKE(4)	KAKE(5)				990K
20000000	0	0	0	0				
0	0	0	0	0				
11111111	11111111	11111111	11111111	11111111	11111111	11111111	11111111	

Fig. 17(f) A sample of output group (2).

DATE 81-08-26, TIME 14(CHR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE TABLIS

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(3)- *****

```

*SOLID GROWTH FUNCTION *PVP( , )*      FORTRAN NAME= VPM(3,4,2)      PRESSURE      AND      TEMPERATURE
(MEAT)
    TM(1,1)= 260.00      PVM(1,1)= 0.0      PVM(2,1)= 6000.0      PVM(3,1)= 10000.
    TM(2,1)= 1232.2      VPM(1,1)= 1.0000      VPM(2,1,1)= 1.0000      VPM(3,1,1)= 1.0000
    TM(3,1)= 1925.0      VPM(1,2)= 1.0000      VPM(2,2,1)= 1.0000      VPM(3,2,1)= 1.0000
    TM(4,1)= 2765.0      VPM(1,3)= 1.0000      VPM(2,3,1)= 1.0000      VPM(3,3,1)= 1.0000
    VPM(1,4,1)= 1.0000      VPM(2,4,1)= 1.0000      VPM(3,4,1)= 1.0000

(CLAD)
    TM(1,2)= 250.00      PVM(1,2)= 1.0000      PVM(2,2)= 2.0000      PVM(3,2)= 3.0000
    TM(2,2)= 300.00      VPM(1,2)= 1.0000      VPM(2,1,2)= 1.0000      VPM(3,1,2)= 1.0000
    TM(3,2)= 350.00      VPM(1,3)= 1.0000      VPM(2,2,2)= 1.0000      VPM(3,2,2)= 1.0000
    TM(4,2)= 400.00      VPM(1,4)= 1.0000      VPM(2,3,2)= 1.0000      VPM(3,3,2)= 1.0000
    VPM(1,4,2)= 1.0000      VPM(2,4,2)= 1.0000      VPM(3,4,2)= 1.0000

*MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL CONDUCTIVITY      FOR MEAT AND CLAD      FROM TABLIS LINE NO.
(MEAT)
    THERM.EX.COEFF(/DEG-C)      YOUNGS MODULUS(KG/SQCM)      POISSONS RATIO      THERM.COND.(W/CM.DEG-C)
    TM(1,1)= 260.00      ETM(1,1)= 0.17800D+07      UTM(1,1)= 0.29100      CTM(1,1)= 0.45000D-01
    TM(2,1)= 1232.2      ETM(2,1)= 0.15190D+07      UTM(2,1)= 0.29100      CTM(2,1)= 0.25000D-01
    TM(3,1)= 1925.0      ETM(3,1)= 0.81500D+06      UTM(3,1)= 0.29100      CTM(3,1)= 0.20000D-01
    TM(4,1)= 2765.0      ETM(4,1)= 0.10000D+06      UTM(4,1)= 0.29100      CTM(4,1)= 0.20000D-01

(CLAD)
    TM(1,2)= 250.00      ETM(1,2)= 0.64000D-05      UTM(1,2)= 0.32500      CTM(1,2)= 0.14800
    TM(2,2)= 300.00      ETM(2,2)= 0.65600D-05      UTM(2,2)= 0.32500      CTM(2,2)= 0.15500
    TM(3,2)= 350.00      ETM(3,2)= 0.67200D-05      UTM(3,2)= 0.32500      CTM(3,2)= 0.16100
    TM(4,2)= 400.00      ETM(4,2)= 0.68800D-05      UTM(4,2)= 0.32500      CTM(4,2)= 0.16800
    
```

Fig. 18(a) A sample of output group (3).

```

FREC-4A INPUT DATA LIST
***** OUTPUT GROUP - ( 3 ) - *****
*PLASTIC COEFF. *PFT( , , ) * FORTRAN NAME=PSTM(3,4,2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS
(MEAT)
  FMS(1,1) = 0.84000D+12      FMS(2,1) = 0.10000D+14      FMS(3,1) = 0.11800D+15
  PSTM(1,1,1) = -45.000      PSTM(2,1,1) = -45.000      PSTM(3,1,1) = -45.000
  TM(2,1) = 1232.2          PSTM(1,2,1) = -34.000      PSTM(3,2,1) = -34.000
  TM(3,1) = 1925.0          PSTM(2,3,1) = -8.0000     PSTM(3,3,1) = -8.0000
  TM(4,1) = 2765.0          PSTM(1,4,1) = -8.0000     PSTM(3,4,1) = -8.0000
*PLASTIC COEFF. *PFT( , , ) * FORTRAN NAME=PSTM(3,4,2) INTEG. FLUX (N/CM**2), NVT AND TEMPERATURE TABLIS
(CCLAD)
  FMS(1,4) = 0.0            FMS(2,4) = 0.26000D+21      FMS(3,4) = 0.20000D+22
  PSTM(1,1,2) = -22.000     PSTM(2,1,2) = -23.000     PSTM(3,1,2) = -23.600
  TM(2,2) = 300.00         PSTM(1,2,2) = -16.320     PSTM(3,2,2) = -19.900
  TM(3,2) = 350.00         PSTM(2,3,2) = -14.800     PSTM(3,3,2) = -16.000
  TM(4,2) = 400.00         PSTM(1,4,2) = -1.6000     PSTM(3,4,2) = -0.10000
*PLASTIC EXPONENT *QFT( , , ) * FORTRAN NAME=QSTM(3,4,2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS
(MEAT)
  TM(1,1) = 260.00         FMS(1,1) = 0.84000D+12      FMS(2,1) = 0.10000D+14      FMS(3,1) = 0.11800D+15
  TM(2,1) = 1232.2        QSTM(1,1,1) = 20.000      QSTM(2,1,1) = 20.000      QSTM(3,1,1) = 20.000
  TM(3,1) = 1925.0        QSTM(1,2,1) = 20.000      QSTM(2,2,1) = 20.000      QSTM(3,2,1) = 20.000
  TM(4,1) = 2765.0        QSTM(1,3,1) = 20.000      QSTM(2,3,1) = 20.000      QSTM(3,3,1) = 20.000
  TM(1,2) = 250.00         QSTM(1,4,1) = 20.000      QSTM(2,4,1) = 20.000      QSTM(3,4,1) = 20.000
  TM(2,2) = 300.00         FMS(1,4) = 0.0            FMS(2,4) = 0.26000D+21      FMS(3,4) = 0.20000D+22
  TM(3,2) = 350.00        QSTM(1,1,2) = 10.300      QSTM(2,1,2) = 10.300      QSTM(3,1,2) = 10.300
  TM(4,2) = 400.00        QSTM(1,2,2) = 9.0000     QSTM(2,2,2) = 9.0000     QSTM(3,2,2) = 9.0000
  TM(1,3) = 1925.0        QSTM(1,3,2) = 8.1200     QSTM(2,3,2) = 8.1200     QSTM(3,3,2) = 8.1200
  TM(4,3) = 2765.0        QSTM(1,4,2) = 5.3700     QSTM(2,4,2) = 5.3700     QSTM(3,4,2) = 5.3700
*STN-HRDG EXPONENT*WFT( , , ) * FORTRAN NAME=WSTM(3,4,2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS
(MEAT)
  TM(1,1) = 260.00         FMS(1,1) = 0.84000D+12      FMS(2,1) = 0.10000D+14      FMS(3,1) = 0.11800D+15
  TM(2,1) = 1232.2        WSTM(1,1,1) = -0.10000D-02 WSTM(2,1,1) = -0.10000D-02 WSTM(3,1,1) = -0.10000D-02
  TM(3,1) = 1925.0        WSTM(1,2,1) = -0.10000D-02 WSTM(2,2,1) = -0.10000D-02 WSTM(3,2,1) = -0.10000D-02
  TM(4,1) = 2765.0        WSTM(1,3,1) = -0.10000D-02 WSTM(2,3,1) = -0.10000D-02 WSTM(3,3,1) = -0.10000D-02
  TM(1,2) = 250.00         WSTM(1,4,1) = -0.10000D-02 WSTM(2,4,1) = -0.10000D-02 WSTM(3,4,1) = -0.10000D-02
  TM(2,2) = 300.00         FMS(1,4) = 0.0            FMS(2,4) = 0.26000D+21      FMS(3,4) = 0.20000D+22
  TM(3,2) = 350.00        WSTM(1,1,2) = 0.0         WSTM(2,1,2) = 0.0         WSTM(3,1,2) = 0.0
  TM(4,2) = 400.00        WSTM(1,2,2) = 0.0         WSTM(2,2,2) = 0.0         WSTM(3,2,2) = 0.0
  TM(1,3) = 1925.0        WSTM(1,3,2) = 0.0         WSTM(2,3,2) = 0.0         WSTM(3,3,2) = 0.0
  TM(4,3) = 2765.0        WSTM(1,4,2) = 0.0         WSTM(2,4,2) = 0.0         WSTM(3,4,2) = 0.0

```

Fig. 18(b) A sample of output group (3).

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(3)- ***** DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN) PAGE 10
 FROM SUBROUTINE TABLIS

INPUT TABLE LIST

*GAS LEAKAGE FUNCTION *DFT(,) * FORTRAN NAME= CGFT(3,4) INTEGRATED FLUX AND GAS TEMPERATURE

TM(1,2)= 1000.0
 TM(2,2)= 1300.0
 TM(3,1)= 1600.0
 TM(4,2)= 1400.0
 FMS(1,2)= 0.0
 CGFT(1,1)= 0.50000D-02
 CGFT(1,2)= 0.10000
 CGFT(1,3)= 0.60000
 CGFT(1,4)= 1.00000
 FMS(2,2)= 0.30000D+20
 CGFT(2,1)= 0.50000D-02
 CGFT(2,2)= 0.10000
 CGFT(2,3)= 0.60000
 CGFT(2,4)= 1.00000
 FMS(3,2)= 0.30000D+21
 CGFT(3,1)= 0.50000D-02
 CGFT(3,2)= 0.10000
 CGFT(3,3)= 0.60000
 CGFT(3,4)= 1.00000

*CREEP COEFF. *CFT(, ,) * FORTRAN NAME=CSTM(3,4,2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS (MEAT)

TM(1,1)= 260.00
 TM(2,1)= 1232.2
 TM(3,1)= 1925.0
 TM(4,1)= 2765.0
 FMS(1,1)= 0.84000D+12
 CSTM(1,1,1)= -7.1700
 CSTM(1,2,1)= -6.3900
 CSTM(1,3,1)= -0.4600
 CSTM(1,4,1)= -0.4600
 FMS(2,1)= 0.10000D+14
 CSTM(2,1,1)= -5.8700
 CSTM(2,2,1)= -4.5000
 CSTM(2,3,1)= 0.11000
 CSTM(2,4,1)= 0.11000
 FMS(3,1)= 0.11800D+15
 CSTM(3,1,1)= -5.1700
 CSTM(3,2,1)= -3.5900
 CSTM(3,3,1)= 0.93000
 CSTM(3,4,1)= 0.93000

*CREEP COEFF. *CFT(, ,) * FORTRAN NAME=CSTM(3,4,2) INTEG. FLUX (N/CM**2), NVT AND TEMPERATURE TABLIS (CLAD)

TM(1,2)= 250.00
 TM(2,2)= 300.00
 TM(3,2)= 350.00
 TM(4,2)= 400.00
 FMS(1,4)= 0.0
 CSTM(1,1,2)= -11.610
 CSTM(1,2,2)= -8.0300
 CSTM(1,3,2)= -7.4600
 CSTM(1,4,2)= -6.6400
 FMS(2,4)= 0.26000D+21
 CSTM(2,1,2)= -11.420
 CSTM(2,2,2)= -7.8500
 CSTM(2,3,2)= -7.2800
 CSTM(2,4,2)= -6.4600
 FMS(3,4)= 0.20000D+22
 CSTM(3,1,2)= -10.900
 CSTM(3,2,2)= -7.3300
 CSTM(3,3,2)= -6.7600
 CSTM(3,4,2)= -5.9400

*CREEP EXPONENT *GFT(, ,) * FORTRAN NAME=GSTM(3,4,2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS (MEAT)

TM(1,1)= 260.00
 TM(2,1)= 1232.2
 TM(3,1)= 1925.0
 TM(4,1)= 2765.0
 FMS(1,1)= 0.84000D+12
 GSTM(1,1,1)= 1.0000
 GSTM(1,2,1)= 2.3400
 GSTM(1,3,1)= 4.4600
 GSTM(1,4,1)= 4.4600
 FMS(2,1)= 0.10000D+14
 GSTM(2,1,1)= 1.0000
 GSTM(2,2,1)= 1.3400
 GSTM(2,3,1)= 4.1400
 GSTM(2,4,1)= 4.1400
 FMS(3,1)= 0.11800D+15
 GSTM(3,1,1)= 1.0000
 GSTM(3,2,1)= 1.0000
 GSTM(3,3,1)= 3.6700
 GSTM(3,4,1)= 3.6700

*CREEP EXPONENT *GFT(, ,) * FORTRAN NAME=GSTM(3,4,2) INTEG. FLUX (N/CM**2), NVT AND TEMPERATURE TABLIS (CLAD)

TM(1,2)= 250.00
 TM(2,2)= 300.00
 TM(3,2)= 350.00
 TM(4,2)= 400.00
 FMS(1,4)= 0.0
 GSTM(1,1,2)= 1.2980
 GSTM(1,2,2)= 1.2160
 GSTM(1,3,2)= 1.2040
 GSTM(1,4,2)= 1.1870
 FMS(2,4)= 0.26000D+21
 GSTM(2,1,2)= 1.2980
 GSTM(2,2,2)= 1.2160
 GSTM(2,3,2)= 1.2040
 GSTM(2,4,2)= 1.1870
 FMS(3,4)= 0.20000D+22
 GSTM(3,1,2)= 1.2980
 GSTM(3,2,2)= 1.2160
 GSTM(3,3,2)= 1.2040
 GSTM(3,4,2)= 1.1870

Fig. 18(c) A sample of output group (3).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN) PAGE 13
FROM SUBROUTINE SEGT(1)

FREC-4A OUTPUT		***** OUTPUT GROUP - (4) - *****		N/CM**2(INVT)	
KM	1 (MEAT), 2 (CLAD) FOR MEAT 1 260.00 DEG-C 2 1232.2 DEG-C 3 1925.0 DEG-C 4 2765.0 DEG-C	KT	TEMPERATURE FOR CLAD 250.00 DEG-C 300.00 DEG-C 350.00 DEG-C 400.00 DEG-C	SP(0.0 10)	SP(0.050) SP(0.100) SP(0.200) SP(0.500) SP(1.000)
FISS./CC/SEC					
MCGPR = 1					
0.84000D+12					
0.100000D+14					
0.118000D+15					
KM	KT	KF	SP(0.001) SP(0.005) SP(0.0 10)	SP(0.020) SP(0.050) SP(0.100) SP(0.200)	SP(0.500) SP(1.000)
1	1	1	8853. 9165. 9595. 9933. 0.1028D+05 0.1077D+05 0.1115D+05 0.1154D+05 0.1208D+05 0.1251D+05	9933. 9933. 9933. 2800. 2898. 2898. 3034. 3141. 3252. 3404. 3525.	3404. 3525. 3404. 3525.
1	2	1	2495. 2583. 2704. 2800. 2898. 3034. 3141. 3252. 3404. 3525.	2800. 2898. 2898. 3034. 3141. 3252. 3404. 3525.	3404. 3525. 3404. 3525.
1	3	1	125.1 125.1 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5	145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3	170.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6
1	4	1	125.1 125.1 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5 129.5	145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3 145.3	170.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6 176.6
2	1	1	4918. 6150. 6578. 7522. 5749. 7190. 8222. 8794. 6150. 7690. 8225. 8991. 9617. 0.1028D+05 0.1100D+05 0.1176D+05 0.1286D+05 0.1375D+05	6150. 7690. 8225. 8991. 9617. 0.1028D+05 0.1100D+05 0.1176D+05 0.1286D+05 0.1375D+05	8991. 9617. 0.1028D+05 0.1124D+05 0.1203D+05 0.1375D+05
2	2	1	2124. 3616. 5307. 2294. 3905. 5732. 2540. 4324. 6347. 2963. 5044. 7403. 3280. 5585. 8197. 3543. 6032. 8553. 3826. 6514. 9362. 4236. 7213. 0.1059D+05 0.1143D+05	2743. 4670. 6855. 2963. 5044. 7403. 3280. 5585. 8197. 3543. 6032. 8553. 3826. 6514. 9362. 4236. 7213. 0.1059D+05 0.1143D+05	4236. 4575. 4575. 7790. 7790. 0.1059D+05 0.1143D+05
2	3	1	1233. 1997. 2806. 1343. 2175. 3056. 1503. 2434. 3421. 1637. 2651. 3726. 1783. 2888. 4058. 1996. 3232. 4543. 2174. 3521. 4948. 2368. 3834. 5388. 2650. 4292. 6032. 2887. 4675. 6570.	1637. 2651. 3726. 1783. 2888. 4058. 1996. 3232. 4543. 2174. 3521. 4948. 2368. 3834. 5388. 2650. 4292. 6032. 2887. 4675. 6570.	2650. 2887. 4675. 6570. 2650. 4292. 6032. 2887. 4675. 6570.
2	4	1	38.58 20.72 23.57 23.07 43.90 31.81 27.96 27.37 52.07 31.14 31.14 67.40 79.94 90.96 48.84 55.57 42.93 42.02 90.96 48.84 47.81 122.7 139.7 155.57 75.00 73.60	59.24 31.81 27.96 27.37 52.07 31.14 31.14 67.40 79.94 90.96 48.84 55.57 42.93 42.02 90.96 48.84 47.81 122.7 139.7 155.57 75.00 73.60	122.7 139.7 155.57 75.00 73.60 122.7 139.7 155.57 75.00 73.60

Fig. 19 A sample of output group (4).

***** OUTPUT GROUP -(5) - *****

FREC-4A OUTPUT

KM = 1 (MEAT), 2 (CLAD)		KT = TEMPERATURE FOR CLAD		SC(0.100-08) SC(0.100-06) SC(0.100-05) SC(0.100-04) SC(0.100-03) SC(0.100-02) SC(0.100-01)		
	FOR MEAT	DEG-C	DEG-C			
1	260.00	DEG-C	250.00	10401.6	10401.6D+07	0.104016D+08
2	1232.2	DEG-C	300.00	521315	52131.5	521315.
3	1925.0	DEG-C	350.00	104016	10401.6	104016.
4	2765.0	DEG-C	400.00	104016	10401.6	104016.
FISS./CC/SEC						
MCGPQ = 1						
MCGPQ = 4						
O.0						
O.26000D+21						
O.20000D+22						
O.11800D+15						
KM	KT	KF	SC(0.100-08)	SC(0.100-06)	SC(0.100-05)	SC(0.100-04)
1	1	1	1.04016	104.016	10401.6	10401.6D+07
		2	0.521315D-01	521315	52131.5	521315.
		3	0.104016D-01	1.04016	10401.6	104016.
1	2	1	5.39157	14.4233	38.5848	1976.14
		2	0.308241D-01	0.171854	0.958138	925.769
		3	0.273590D-03	0.273590D-02	0.273590	273.590
1	3	1	0.855661	1.63389	2.40288	18.9493
		2	0.443217	0.772970	1.34806	12.4707
		3	0.138477	0.259333	0.485665	5.97386
1	4	1	0.855661	1.63389	2.40288	18.9493
		2	0.443217	0.772970	1.34806	12.4707
		3	0.138477	0.259333	0.485665	5.97386
2	1	1	7209.18	42491.5	250448.	31.7547
		2	5146.44	30333.5	178788.	21.7489
		3	2045.93	12058.9	71075.9	11.1875
2	2	1	11.2048	74.4339	494.469	18.9493
		2	7.96849	52.9352	351.652	21.7489
		3	2.97677	19.7748	131.366	11.1875
2	3	1	3.69854	25.0377	169.496	31.7547
		2	2.62137	17.7457	120.132	21.7489
		3	0.969694	6.56447	44.4390	11.1875
2	4	1	0.722594	5.02753	34.9796	18.9493
		2	0.509626	3.54578	24.6701	21.7489
		3	0.185854	1.29310	8.99689	11.1875

Fig. 20 A sample of output group (5).

DATE 81-08-26, TIME 14(CHR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE INLOUT

***** OUTPUT GROUP -(6)- *****

FREC-4A INPUT DATA LIST

EVS(MEAT) VS F/CC TABLE (BUILT-IN DATA)

F/CC	EVS(MEAT)	F/CC	EVS(MEAT)	F/CC	EVS(MEAT)	F/CC	EVS(MEAT)
0.0	0.0	0.10000D+21	0.50000D-02	0.20000D+21	0.14000D-01	0.30000D+21	0.20000D-01
0.40000D+21	0.27000D-01	0.50000D+21	0.36000D-01	0.50000D+21	0.45000D-01	0.70000D+21	0.55000D-01
0.80000D+21	0.63000D-01	0.90000D+21	0.71000D-01	0.10000D+22	0.85000D-01	0.11000D+22	0.95000D-01
0.12000D+22	0.10500	0.13000D+22	0.12000	0.14000D+22	0.13000	0.15000D+22	0.14400
0.16000D+22	0.15500	0.17000D+22	0.17000	0.18000D+22	0.18500	0.19000D+22	0.20000
0.20000D+22	0.21500	0.21000D+22	0.23000	0.22000D+22	0.24500	0.23000D+22	0.25700
0.24000D+22	0.27300	0.25000D+22	0.29000	0.26000D+22	0.30500	0.27000D+22	0.32300
0.28000D+22	0.34000	0.29000D+22	0.36000	0.30000D+22	0.37700		

IF HIST (C907,F3) EQUALS 1, AND NUT(3) (C5000,F3) EQUALS 2, WE USE THIS BUILT-IN DATA AS FUEL(MEAT) SOLID SWELLING IRRADIATION HISTORY DATA.

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(7)- ***** FROM SUBROUTINE OUTPT1

DELTA-TIME (HR)	T(WATER) (DEG.C)	LHGR (W/CM)	FDOOT (F/CC/SEC)	FISS (F/CC)	F (NVT)	EVS(MEAT)	EVS(CLAD)
0.0	25.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28.000	34.100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31.500	34.100	320.00	0.11284D+14	0.71087D+17	0.18412D+18	0.35544D-05	0.50278D-05
22.500	34.100	240.00	0.16926D+14	0.12134D+19	0.31431D+19	0.60678D-04	0.81360D-04
14.000	34.100	240.00	0.16926D+14	0.20666D+19	0.55525D+19	0.10333D-03	0.13321D-03

INITIAL FUEL ROD INTERNAL PRESS. (PGAPS)= 1.000 (KG/CM**2)
INITIAL FUEL ROD TEMPERATURE (TEMPS)= 298.160 (DEG.K)
POWER RATIO FOR FUEL AND CLAD (GGMAX)= 1.000 0.0
POWER RATIO FOR PLUG (PLUGO)= 0.0
DTMEMO= 100.00(DEG.C) / ALHR= 450.00(W/CM)
*DTMEM IS TEMP. DIFFERENCE BETWEEN OUTLET AND INLET OF FUEL ASSEMBLY WHEN ROD AVERAGE LHGR REACHES ALHR.

FREC-4A INPUT DATA LIST ***** OUTPUT GROUP -(8)- ***** FROM SUBROUTINE INSET(5)

OPTION FOR AXIAL POWER PROFILE (IPEAK)= 0
IPEAK=0...USER INPUT AXIAL PROFILE
IPEAK=1...PROGRAM SET (AV. POWER HISTORY)
IPEAK=2...PROGRAM SET (PEAK POWER HISTORY)
AXIAL INTERPOLATION LENGTH (COLEN) = 0.0

NODE	APD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0.8450	0.8074	0.8272	0.8796	0.9628	1.0792	1.2335	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	0.9950	0.8074	0.8272	0.8796	0.9628	1.0792	1.2335	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
3	1.0000	0.8143	0.8327	0.8891	0.9872	0.9277	1.3391	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9950	0.8143	0.8327	0.8891	0.9872	0.9277	1.3391	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
1	0.8450	0.8143	0.8327	0.8891	0.9872	0.9277	1.3391	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

Fig. 21 Samples of output group (6) ~ (8).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE MODELS-2

```

FREC-4A INPUT DATA LIST      ***** OUTPUT GROUP -( 9 )- *****
-----
FREC-4A MODEL SELECTION -----
DEFORMATION CONTROL KEY WORD (KKK= 11111)
LD LM LE LP LT LS  =1..ON, =0..OFF
 1 1 1 1 1 1
LD= PEELET DENSIIFICATION MODEL
LM= PORE MIGRATION MODEL
LE= ELASTIC MODEL
LP= PLASTIC CREEP MODEL
LT= THERMAL EXPANSION MODEL
LS= PELLETT SWELLING MODEL

(SIGMA = -1460.) (CARD. 908,3RD FIELD)
(MGL = 1) (CARD. 906,5TH FIELD)
(CARD. 600,6TH FIELD)

CRACK HEALING MODEL -2
EG IS USED IN CREEP STRAIN RATE MODEL(MGL,GE.O)
PRINT TYPE SELECTION (IPROPT= 11)
LOTP LOTM LOPT LOPR =1..ON, =0..OFF
 0 0 1 1

LOPR= PRINT AT SUBROUTINE OUTPR
LOPT= PRINT AT SUBROUTINE PPLOT
LOTM= PRINT AT SUBROUTINE OUTTEM
      NODE SELECTION IS 3 TO 4(IPRCON= 304)
      (CARD. 600,7TH FIELD)
LOTP= WRITE TO PLOT TAPE
      (LSGF = 0) (CARD. 700,6TH FIELD)
      (LPST = 0) (CARD. 755,1ST FIELD)
      (KUPS = 0) (CARD. 757,1ST FIELD)

TAKE NO ACCOUNT OF FUEL ROD GRAVITY FORCE
LOWER PLENUM NOT EXIST
NO SPRING IN UPPER PLENUM
    
```

Fig. 22 A sample of output group (9).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN)
FROM SUBROUTINE OUTP12

***** OUTPUT GROUP -(10) - *****

FREC-4A OUTPUT

TIME(START,END) ,DT (HOUR) = 31.457 31.500 0.043
 COOLANT PRESSURE (KG/CM2) = 34.100 GAP GAS PRESSURE (KG/CM2) = 2.227
 UPPER PLENUM VOLUME (CC) = 7.55
 III,JJJ,KTIME = 91 91 82 SEC/STEP= 37.373 CP(MINUT)= 0.7878

AXIAL SECTION NUMBER	L.H.G.R. (CW/CM)	BURNUP (FISSIONS /CC)	NEUTRON FLUENCE (NEUTRONS /CM2)	AXIAL ELEVATION (CM)	UPPER LENGTH (CM)	CLAD LENGTH (CM)	INNER (KG)	OUTER (KG)	AXIAL (KG)	UPPER (KG)
TOP				39.81						
5	270.400	6.23D+16	1.85	1.56D+17	36.34	1.01	0.0	0.0	0.0	0.0
4	318.400	7.34D+16	2.18	1.83D+17	35.34	10.27	0.0	0.0	0.0	0.0
3	320.000	7.11D+16	2.11	1.84D+17	25.07	12.03	0.0	0.0	0.0	0.0
2	318.400	7.07D+16	2.10	1.83D+17	13.04	12.97	0.0	0.0	0.0	0.0
1	270.400	6.01D+16	1.78	1.56D+17	1.01	1.00	0.0	0.0	0.0	0.0
BOTTOM				0.0						

AXIAL SECTION NUMBER	INNER RADIUS (CM)	INNER TEMP. (DEG.C)	OUTER RADIUS (CM)	OUTER TEMP. (DEG.C)	FUEL CLAD GAP (CM)	COOLANT TEMP. (DEG.C)
5	0.1006	811.6	0.5321	377.0	0.5327	295.0
4	0.1007	912.1	0.5324	385.0	0.5327	302.7
3	0.0000	1113.0	0.5326	376.5	0.5327	303.0
2	0.0000	1108.2	0.5326	376.5	0.5327	302.7
1	0.0000	967.9	0.5322	371.9	0.5327	295.0

STRESS (KG / CM 2)

AXIAL SECTION NUMBER	FUEL (R)	INNER (R)	INNER (Z)	FUEL (R)	OUTER (R)	OUTER (Z)	CLAD (R)	INNER (R)	INNER (Z)	CLAD (R)	OUTER (R)	OUTER (Z)
5	-4.57D+02	-1.49D+03	-2.55D+03	-4.95D+01	5.33D+02	4.94D+02	-1.13D+01	-3.56D+02	-2.40D+02	-3.21D+01	-1.19D+02	-2.34D+01
4	-5.27D+02	-1.75D+03	-2.29D+03	-5.94D+01	6.46D+02	6.96D+02	-1.18D+01	-3.75D+02	-2.60D+02	-3.26D+01	-1.00D+02	-5.24D+00
3	-2.07D+03	-2.07D+03	-4.42D+03	-8.42D+01	7.36D+02	6.58D+02	-1.18D+01	-3.76D+02	-2.60D+02	-3.26D+01	-9.97D+01	-4.64D+00
2	-2.06D+03	-2.06D+03	-4.41D+03	-8.37D+01	7.34D+02	6.55D+02	-1.18D+01	-3.75D+02	-2.60D+02	-3.26D+01	-1.00D+02	-5.24D+00
1	-1.72D+03	-1.72D+03	-4.02D+03	-6.83D+01	5.92D+02	5.46D+02	-1.13D+01	-3.56D+02	-2.40D+02	-3.21D+01	-1.19D+02	-2.34D+01

STRAIN (CM / CM)

AXIAL SECTION NUMBER	FUEL (R)	INNER (R)	INNER (Z)	FUEL (R)	OUTER (R)	OUTER (Z)	CLAD (R)	INNER (R)	INNER (Z)	CLAD (R)	OUTER (R)	OUTER (Z)
5	0.00776	0.00679	0.00582	0.00355	0.00598	0.00582	0.00191	0.00135	0.00154	0.00152	0.00138	0.00154
4	0.00888	0.00758	0.00688	0.00368	0.00665	0.00688	0.00196	0.00138	0.00157	0.00151	0.00141	0.00157
3	0.01004	0.01004	0.00678	0.00373	0.00713	0.00678	0.00196	0.00138	0.00157	0.00151	0.00141	0.00157
2	0.00999	0.00999	0.00678	0.00373	0.00710	0.00678	0.00196	0.00138	0.00157	0.00151	0.00141	0.00157
1	0.00849	0.00849	0.00611	0.00360	0.00631	0.00611	0.00191	0.00135	0.00154	0.00152	0.00138	0.00154

CRACKING MAP (R,T,Z) (1=CRACKED, 0=UNCRACKED)

AXIAL SECTION NUMBER	R	T	Z	R	T	Z
1	2	3	4	5	1	2
5	0	0	0	10	11	0
4	0	0	0	11	11	0
3	0	0	0	10	11	0
2	0	0	0	10	11	0
1	0	0	0	10	11	0

Fig. 23 A sample of output group (10).

***** OUTPUT GROUP -(11) - *****

FREC-4A OUTPUT

AXIAL SEGMENT NUMBER = 4

TIME	P(WATER)	T(WATER)	L.H.G.R.	FDOT	FISS	F	EVS(MEAT)	EVS(CLAD)	P(GAP)
28.00	34.10	239.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.731
31.50	34.10	239.89	318.40	0.11640+14	0.73350+17	0.18320+18	0.36680-05	0.50030-05	2.227

TIME	RA(M)	RB(M)	R(GAP)	RB(C)	FCON(I)	FCON(R)	FCON(Z)	EMAX(M)	EMAX(C)	SMAX(M)	SMAX(C)
28.00	0.10019	0.53000	0.00260	0.61672	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31.50	0.10070	0.53240	0.00032	0.61687	0.0	0.0	0.0	0.39530-03	0.47260-07	1567.	236.3

KM	KR	TEMP	RADIUS	DEMS/DI	SP	PB	TAVE	EV	VH	VH(1)	VH(2)	VH(3)	VH(4)	VH(5)
1	1	912.1	0.10070	0.46320-03	0.79450-19	4012.7	1506.5	893.9	0.00000	0.04000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	885.5	0.18727	0.13780-03	0.79450-19	4285.3	852.5	843.5	0.00000	0.04000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	3	810.3	0.27372	0.22490-03	0.79450-19	4822.8	-426.7	752.8	0.00000	0.04000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	4	700.7	0.36004	0.42380-04	0.79450-19	5676.5	-169.8	627.7	0.00000	0.04000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	5	558.2	0.44628	0.31940-04	0.79450-19	6962.7	-421.1	470.9	0.00000	0.04000	0.0	0.0	0.0	0.0
1	6	385.0	0.53240	0.0	0.0	1.0	0.0	343.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

KM	KE	ET-6	SR	SC	SZ	SG	EPHS	EGR	EGC	EGZ	EL	SL(R-C)-6	SL(C-Z)-6	SL(Z-R)-6
2	1	302.7	0.53272	0.30450-07	0.0	2564.7	176.5	294.0	0.00001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	2	285.9	0.56078	0.16930-07	0.33380-08	3423.7	74.3	277.6	0.00001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3	269.6	0.58883	0.10510-07	0.82360-08	4421.1	-19.7	261.6	0.00001	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	4	253.8	0.61687	0.0	0.0	1.0	0.0	246.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

KM	KE	ET-6	SR	SC	SZ	SG	EPHS	EGR	EGC	EGZ	EL	SL(R-C)-6	SL(C-Z)-6	SL(Z-R)-6
1	1	0.160+07	-526.6	-1748.2	-2293.7	1567.3	0.1000-03	0.00035	-0.00002	-0.00033	0.00040	0.1630+04	874.	-0.2500+04
1	2	0.160+07	-747.9	-484.3	-1359.8	777.9	0.1000-03	0.00006	0.00012	-0.00018	0.00018	-326.	0.1200+04	-872.
1	3	0.160+07	-447.5	1191.7	544.0	1430.0	0.1000-03	-0.00012	0.00015	-0.00003	0.00016	-0.1940+04	850.	0.1090+04
1	4	0.170+07	-182.6	385.5	314.6	536.2	0.1000-03	-0.00008	0.00000	0.00008	0.00009	-658.	-10.4	668.
1	5	0.170+07	-59.4	645.6	695.9	731.5	0.1000-03	-0.00003	0.00001	0.00002	0.00003	-755.	-55.7	810.

KM	KE	KG	DFT	PGAS	PA	SG(AVE)	SP	SC	RA	VA	VPC	NH(T)	MOLES
2	1	0.790+06	-11.8	-375.3	-259.6	236.3	0.1000-03	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	364.	-116.
2	2	0.800+06	-26.0	-232.1	-130.5	139.5	0.1000-03	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	206.	-102.
2	3	0.810+06	-32.6	-100.4	-5.2	86.6	0.1000-03	0.00000	-0.00000	0.00000	0.00000	67.8	-95.2

KM	KE	KG	DFT	PGAS	PA	SG(AVE)	SP	SC	RA	VA	VPC	NH(T)	MOLES
1	1	1	0.500-02	8.1	7.1	706.	0.4010+07	0.3910+08	0.9850-03	0.4000-01	0.2310-04	0.100000+08	0.327490-05
1	2	1	0.500-02	7.8	6.7	399.	0.4290+07	0.5380+08	0.9850-03	0.4000-01	0.1220-04	0.100000+08	0.327490-05
1	3	1	0.500-02	7.1	6.1	203.	0.4820+07	0.8560+08	0.9850-03	0.4000-01	0.5560-05	0.100000+08	0.327490-05
1	4	1	0.500-02	6.3	5.2	82.8	0.5680+07	0.1510+09	0.9850-03	0.4000-01	0.1920-05	0.100000+08	0.327490-05
1	5	1	0.500-02	5.2	4.1	201.	0.6960+07	0.2370+09	0.9850-03	0.4000-01	0.3810-05	0.100000+08	0.327490-05

Fig. 24 A sample of output group (11).

DATE 81-08-26, TIME 14(HR) 38(MIN) PAGE 25
 FROM SUBROUTINE PPLOT

***** OUTPUT GROUP -(12) - *****

FREC-4A OUTPUT

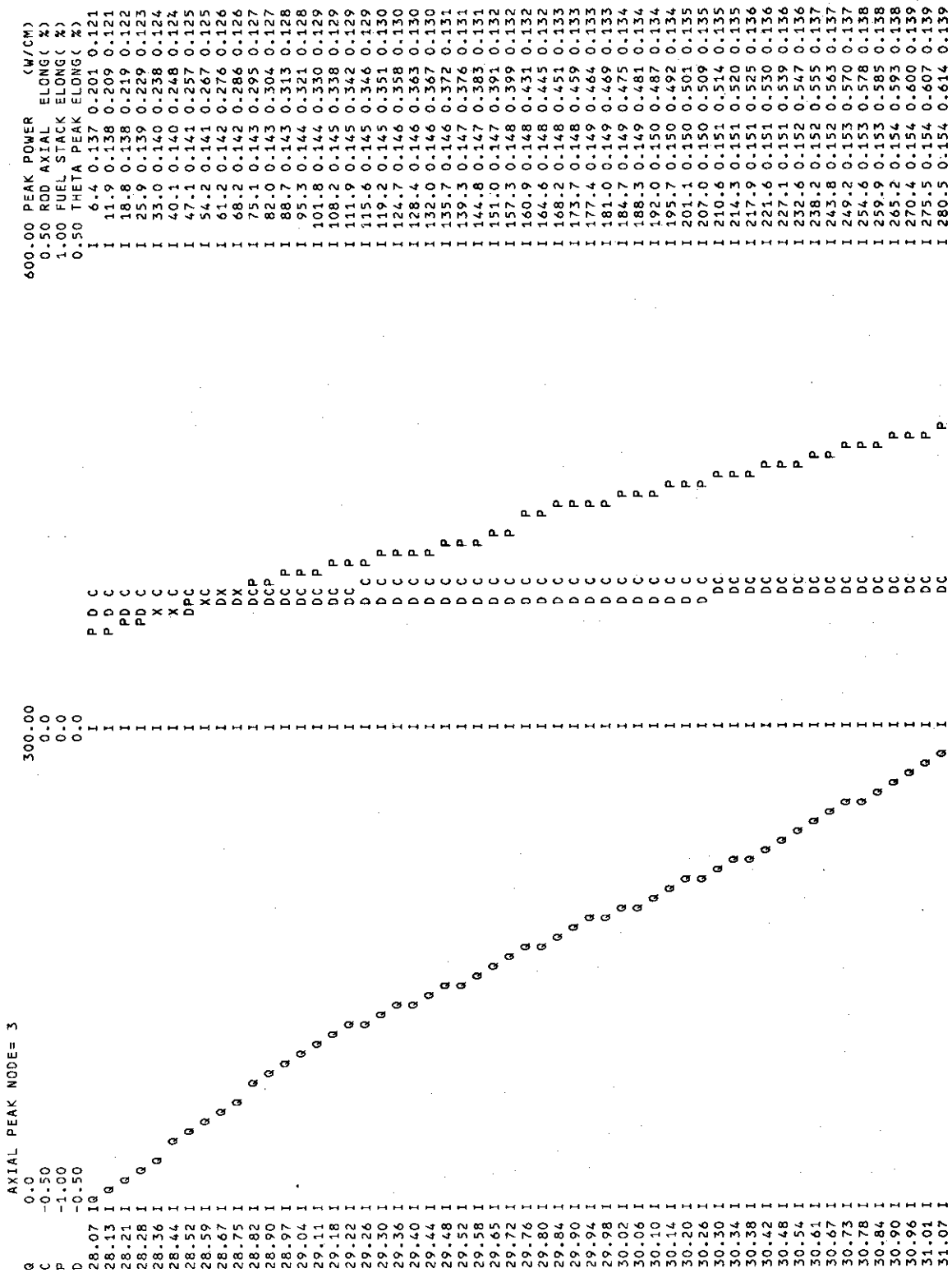


Fig. 25 A sample of output group (12).

5.2 計算結果に関する出力

計算結果に関する出力として、4つの出力グループが準備されている。

出力グループ(10)は、照射履歴データで与えた各節毎に必ず出力されるが、他の出力は入力カード 600 番で与えるオプションキーワード IPROPT, IPRCON に従って出力される。

FREC - 4 A の計算結果の出力は、ラインプリンタによるものを基本にしている。プロッタによる図形処理のため出力グループ(14)が準備されているが、FREC - 4 A の現段階では、完全ではない。

出力グループ(10)~(12)のプリントされた数値のうち、説明を必要とするものについては、Table 10 にまとめてあるので参照されたい。

(1) 出力グループ(10)

この出力は、FREC - 4 A の計算対象の燃料棒全体についての計算結果をまとめたものである。主なプリントは、各セグメントの線出力密度、燃焼度と軸方向の伸び、接触力等である。また、燃料ペレットと被覆管の内径、外径とそこでの温度および内側と外側とリング要素の応力と歪がプリントされる。さらに、全リング要素についてのクラック情報をもプリントされる。

この出力グループが出力されるのは、入力照射履歴データの各節の時刻と、入力カード番号 600 で入力された DTIME の指示による。

計算開始後、この出力は2回出力される。このうち、後の出力は、計算結果であるが、前の出力は、主プログラムでタイムステップコントロールループの外側から呼ばれたもので計算結果ではない。ただ、初期値等の設定の検討のために出力される。

(2) 出力グループ(11)

この出力グループは、特定のセグメントに関し、その計算結果の詳細をプリントしたものである。これは、600 番の入力カードで与えるオプションキーワード IPOPT で指定しなければ出力されない。また、どの番号範囲のセグメントについて出力するかを IPRCON によって指定しなければならない。

(3) 出力グループ(12)

この出力は、ラインプリンターを用いたプロットである。出力されるパラメータは、

- i) 照射時刻(照射履歴入力データ上の)
- ii) 燃料棒の最高出力セグメントの線出力密度
- iii) 上記 ii) のセグメント部の被覆外半径の変化
- iv) ペレットスタック上部の軸方向座標の変化
- v) 被覆管の上部プレナム頂位置の軸方向座標の変化

である。

(4) 出力グループ(13)

この出力グループは、プログラム作成途中のデバック用に作成された出力である。したがって、通常の計算においては出力しない方が望ましい。

ただし、計算結果で、リングの連続性が失なわれているような場合の検討には便利である。

(5) 出力グループ(14)

この出力は、計算結果を機番1に出力する。機番1に出力後、図形処理等のデータとするものである。したがって、この出力を行わせるには、制御カード等で機番1の使用の宣言がなされていなければならない。

ただし、このための出力ルーチンは完全なものではないので、使用にあたってはプログラムの修正、追加が必要となるかもしれない。

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
10	TIME (START, END) ~ KTIME			Fig. 23 参照
	TIME (START, END), DT	hr	この出力を行った時の, 照射履歴上の時刻。この出力直前のタイムステップ前後の時刻とタイムステップ巾。	
	III	—	主プログラムのタイムステップコントロールループ内で, 副プログラム STEP 1 から STEP 3 を通過した回数。STEP 3 での燃料と被覆管の接触力およびペレットスタックの軸方向のスリップの状態により, タイムステップの再設定が行われる。STEP 3 内にくりかえし計算法が組込まれ, スリップ等の状態の場合, 再計算が行われる。これより, 計算状態が改善されたので, 主プログラム内のタイムステップの再設定は現在行われていない。したがって, III は次の J J J と等しい値となる。	
	J J J	—	同じく, 副プログラム STEP 1 から STEP 6 を通過した回数。STEP 6 での, 応力 or 歪の増分が制限値より大きい場合, タイムステップの再設定が行われる。	
	KTIME	—	主プログラムのタイムステップコントロールループのくりかえし数。	
	SEC / STEP	sec	前回と今回の出力の間の計算時間をその間のくりかえし数で除した値。	

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
10	CP (MINUT)	min	主プログラムのタイムステップコントロールループが1回廻るために要した平均計算時間を表わす。	
	AXIAL SECTION NUMBER ?			
	CONTACT FORCE			
	AXIAL SECTION NUMBER	—	分割した軸方向セグメントNoおよび上部, 下部プレナムを示す。	
	L. H. G. R	W / cm	線出力密度。	
	BURNUP (FISSIONS/CC) (MWD/MTU)	f · / cc MWD/MTM	各セグメント毎の燃焼度を核分裂数密度と $MWD/MTM(U) = (F \cdot / cc) / 3.37 \times 10^{16}$ とした換算値を示す。	
	NUTRON FLUENCE	n/cm ²	nvt を示す。	
	AXIAL ELVATION		各セグメントの上側の高さ (UPPER) と各セグメント長 (LENGTH) を示すが, CLADに, ついては, 計算の初期値の高さが,	

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
10			このプリントの時点でどうなったかを示す。	
	CONTACT FORCE INNER	kg	ペレットと中心棒間の半径方向接触力。	
	OUTER	kg	ペレットと被覆間の半径方向接触力	
	AXIAL	kg	セグメントに接触によってかかる軸方向荷重（上方からの影響を含む）。	
	UPPER	kg	接触によってセグメント同志の軸方向節点（上側）に生ずる軸方向荷重。ただし、BOTTOMについては下側の荷重。	
	STRESS ? STRAIN		各セグメント内の燃料および被覆の内側と外側のリングについての応力と歪。 (R) : 半径方向 (T) : 円周方向 (Z) : 軸方向	
	CRACKING MAP		計算対象の全リングについてのクラック情報。 各リングについて、3桁の数値で示される。各桁は半径、円周、軸の方向を示し、クラックはこの各方向に対し、垂直に発生したことを示す。 (例) 11とあれば、円周と軸の各方向に垂直なクラックが生じたことを示す。	

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
11	TIME ~EVS (CLAD)		このセグメントに関する照射履歴データを示す。これらのプリントは前回の出力（上側）と今回の出力（下側）である。	Fig. 24 参照
	FDOT	f•/cc/sec	fission rate	
	F	n/cm ²	fast neutron fluence (nvt)	
	P (WATER)	kg/cm ²	冷却水圧力	
	T (WATER)	°C	冷却水温度	
	FISS	f•/cc	燃焼度	
	EVS (MEAT)	—	燃料ペレットの固体部スウェリング率	
	EVS (CLAD)	—	被覆の体積膨張率	
	TIME ~SMAX (C)		前段の出力と同じく、前回の出力のときの値（上側）と今回の出力（下側）を示す。	
	RA (M)	cm	燃料ペレット内半径	
	RB (M)	cm	燃料ペレット外半径	
	R (GAP)	cm	半径ギャップ寸法	
	RB (C)	cm	被覆外半径	
	FCON (I)	kg	ペレット内側での接触力	
	FCON (R)	kg	ペレットと被覆間の半径方向 接触力	
	FCON (Z)	kg	ペレットと被覆間の軸方向 接触力	
	EMAX (M)	—	ペレットに関する最大相当歪	
	EMAX (C)	—	被覆に関する最大相当歪	
	SMAX (M)	kg/cm ²	ペレットに関する最大相当応力	
	SMAX (C)	kg/cm ²	被覆に関する最大相当応力	
	KM KR ~VH (5) KM		この段の出力は、セグメント内のリングについての計算結果を示す。 KM=1はペレット、KM=2は被	

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
11	KR	—	覆を指示する。 半径方向分割のノード番号, or リング番号	
	TEMP	°C	半径方向ノード点での温度	
	RADIUS	cm	半径方向ノード点での半径	
	DEM/DT	1/hr	相当歪速度	
	DEPS/DT	1/hr	加工硬化歪速度	
	SP	kg/cm ²	塑性応力 (次段の EPSH = ϵ_{SH} 歪に対応する応力)	
	PB	kg/cm ²	気孔の周囲の応力, $P_{ave} = R_v(r) \sigma_r + R_v(c) \sigma_c + R_v(z) \sigma_z$	
	TAVE	°C	リング内, 外とタイムステップの前後を考えたリングの平均温度	
	EV	cm ³ /cm ³	製作時の 1 cc の体積の体積変化 (スウェリングおよび焼きしまりによる変化を含む)	
	VH	—	製作時の 1 cc の体積当りの気孔体積, $VH = \sum_{i=1}^5 VH(i)$	
	VH(I)		気孔の種類 I の気孔体積	
	KM KE ~CRACK		この段の出力はセグメント内のリングについての計算結果を示す。	
	ET-6	kg/cm ²	ヤング率 (E_t)	
	SR	"	半径方向応力 (σ_r)	
	SC	"	円周方向応力 (σ_c)	
	SZ	"	軸方向応力 (σ_z)	
	SG	"	相当応力	
	EPSH	—	加工硬化歪	
	EGR	—	相当歪の半径方向成分 (ϵ_{gr})	
	EGC	—	" 円周 " (ϵ_{gc})	
	EGZ	—	" 軸 " (ϵ_{gz})	
	EL	—	相当歪	

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
11	SL (R-C)	kg / cm ²	$\sigma_r - \sigma_c + (E_t / 1.5) (\epsilon_{gr} - \epsilon_{gc})$	
	SL (C-Z)	kg / cm ²	$\sigma_c - \sigma_z + (E_t / 1.5) (\epsilon_{gc} - \epsilon_{gz})$	
	SL (Z-R)	"	$\sigma_z - \sigma_r + (E_t / 1.5) (\epsilon_{gz} - \epsilon_{gr})$	
	CRACK		クラック情報, 左から半径, 円周, 軸方向を示す。クラックは各方向の面に垂直に発生するとする。 0はクラックなし, 数値 (>1) クラックあり。	
	K M KE KG		この段の出力は, 気孔に関する計算結果である。	
	~MOLES		気孔の種類	
	KG		F. P. ガスの放出率 (この出力時の)	
	DFT	—	気孔内圧力	
	PGAS	kg / cm ²	気孔の外表面境界の圧力 (表面張力考慮後の圧力)	
	PA	"	気孔に属する固体部の相当応力	
	SG (AVE)	"	" 塑性応力	
	SP	"	" クリープ係数	
	SC	kg-hr/cm ²	気孔半径	
	RA	cm	気孔体積	
	VA	cm ³	塑性-クリープ境界の体積	
	VPC	cm ³	気孔数	
	NH (T)	—	気孔に含まれるガスのモル数	
MOLES	mole			

Table 10 Output Guide of Program FREC-4A

Output group	Output Symbols or Variables	Unit	Explanation	Remarks
12	AXIAL PEAK NODE	—	計算対象の燃料棒の最大出力セグメント番号	Fig. 25 参照
	最左欄の数値	hr	照射履歴上の照射開始よりの時刻	
	右側の第1欄の数値	kW/cm	最大出力セグメント部の出力。プロットおよびスケールはQで示される。	
	右側の第2欄の数値	%	上部プレナムの頂部の軸方向の伸び（頂部の軸方向変化の初期頂部高さに対する割合）。プロットおよびスケールはCで示される。	
	右側の第3欄の数値	%	燃料ペレットスタック頂部の軸方向の伸び（頂部の変化の初期の頂部高さに対する割合）。プロットおよびスケールはPで示される。	
	右側の第4欄の数値	%	最大出力セグメント部の被覆外半径の変化（各時刻における外半径変化の初期外半径に対する割合）。プロットおよびスケールはCで示される。 (注) プロットの表示が、他のものあるいはスケールと重なった場合はXで示される。	

謝 辞

このプログラムの開発に当り，森島淳好氏（企画室室長）と市川達生氏（燃料安全第一研究室室長）から多くの激励と助力をえた。気孔の移動とか，被覆のクリープのモデルの作成に関し菊地章，内田正明氏（燃安第一研）と古田照夫氏（燃安第三研）から多くの教示をえた。プログラミングおよびテストランの多くは，大坪直昭氏と石橋明弘氏（センチュリ・リサーチ・センタ（株））の努力に負うものである。

以上に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Y. Harayama, F. Izumi and M. Uchida, "FREC : A Computer Program to Predict Fuel Rod Performance under Normal Reactor Operation", to be printed in Res. Mechanica.
- 2) 原山泰雄, 泉 文男, 藤田 操, "FREC-3: 照射履歴に従った燃料棒の応力と歪解析プログラム—計算方法と計算モデルについて—", JAERI-M 8407 (1979)
- 3) C.M. Friedrich and W.H. Guilinger, "CYGRO-2 - A FORTRAN IV Computer Program for Stress Analysis of the Growth of cylindrical Fuel Elements with Fission Gas Bubbles", WAPD-TM-547 (1966).
- 4) E. Duncombe, C.E. Friedrich and J.K. Fischer, "CYGRO-3 - A Computer Program to determine Temperatures, Stresses and Deformations in Oxide Fuel Rods", WAPD-TM-961 (1970).
- 5) 原山泰雄, 泉 文男, 山田礼司, 鈴木元衛, "燃料棒プレナム内平均温度の考察", JAERI-M 6249 (1975)
- 6) 瀬谷東光, 田所啓弘, 沢井 定, "水の物性値(特に飽和水, 飽和蒸気)", 未公刊資料 (1967)
- 7) 下川純一等, "原子炉研修所講義テキスト, 燃料編" 日本原子力研究所 原子炉研修所 (1978)
- 8) E. Duncombe, J.E. Meyer, W.A. Coffman, "Comparisons with Experiment of Calculated Dimensional Changes and Failure Analysis of Irradiated Bulk Oxide Fuel Test Rods Using the CYGRO-1 Computer Program", WAPD-TM-583 (1966).
- 9) P.J. Pankaskie, "BUCKE : An Analytical Computer Code for Calculating Creep Buckling of an Initially Oval Tube", BNWL-1784 (1974).
- 10) F.A. Nichols, "Theory of the Creep of Zircaloy during Neutron Irradiation", J. Nucl. Mat. 30 (1969) pp.249-270.
- 11) F.A. Nichols, "Behavior of Gaseous Fission Products in Oxide Fuel Elements", WAPD-TM-570 (1966).
- 12) E. Duncombe, "Analysis of Void Migration, clad Collapse and Fuel Cracking in Bulk Oxide Fuel Rods", WAPD-TM-794 (1968).
- 13) 菊地 章, 飛田 勉, "二酸化ウランペレットにおけるレンズ状ボイドの移動挙動と生成機構", JAERI-M 5722 (1974)
- 14) F.A. Nichols, "Kinetics of Diffusional Motion of Pores in Solids - A Review - ", J. Nucl. Mat. 30 (1969), pp.143-165.
- 15) J.B. Ainscough and F. Rigby, "Measurement of crack sintering Rates in UO₂ pellets", J. Nucl. Mater. 47 (1973), pp.246-250.

Appendix A セグメントの剛性方程式に関する補足

計算の基本体系は、軸対象二次元である。

A.1 歪速度と応力速度間の関係式

歪速度の構成方程式は、

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{a}_{st}\} + [a_{ss}] \{\dot{\sigma}\} \quad (\text{A.1})$$

と表わされる。ここに、

$$\{\dot{a}_{st}\} = \text{初期歪},$$

$$[a_{ss}] = \text{歪-応力マトリックス}$$

である。この歪速度の構成方程式には、弾性、塑性、熱膨張、クリープ、スウェリング、焼きし
まりおよび気孔の移動による歪速度が組込まれる。熱膨張と弾性のみを考えるときには、

$$\{\dot{a}_{st}\} = \begin{Bmatrix} \alpha_r \dot{T} \\ \alpha_c \dot{T} \\ \alpha_z \dot{T} \end{Bmatrix}, \quad [a_{ss}] = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1-\nu & -\nu & \\ & 1-\nu & \\ \text{Sym} & & 1 \end{bmatrix}$$

である。なお、

$$\{\dot{\epsilon}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_r \\ \dot{\epsilon}_c \\ \dot{\epsilon}_z \end{Bmatrix}, \quad \{\dot{\sigma}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\sigma}_r \\ \dot{\sigma}_c \\ \dot{\sigma}_z \end{Bmatrix}$$

であり、

T = 温度

$\dot{\epsilon}$ = 歪速度

$\dot{\sigma}$ = 応力速度

α = 熱膨張係数

suffix

r, c, z = cylindrical coordinate

である。

A. 2 歪速度と変位速度間の関係式

FREC-4Aは、計算対象のセグメント内の燃料ペレットおよび被覆管を半径方向に有限個の同心状リングに分割する。その1つのリングについて、変位速度 $\{\dot{u}\}$ を

$$\{\dot{u}\} = \begin{Bmatrix} \dot{R}_a \\ \dot{R}_b \\ \dot{L}_z \end{Bmatrix}$$

とする。ここで、

u = 変位

R = リング半径

L = リングの軸方向長さ

suffix ,

a = 内径

b = 外径

z = 軸方向

である。歪速度と変位速度の間には

$$\dot{\epsilon}_r = \frac{\dot{R}_b - \dot{R}_a}{R_b - R_a}$$

$$\dot{\epsilon}_c = \frac{\dot{R}_b + \dot{R}_a}{R_b + R_a}$$

$$\dot{\epsilon}_z = \dot{L}_z / L_z$$

の関係が成立するとする。これをマトリックスで表示して、

$$\{\dot{\epsilon}\} = [C_{se}] \{\dot{u}\} \quad (\text{A. 2})$$

とする。ただし、

$$[C_{se}] = \begin{bmatrix} -1 / (R_b - R_a) & 1 / (R_b - R_a) & 0 \\ 1 / (R_b + R_a) & 1 / (R_b + R_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 / L_z \end{bmatrix}$$

とする。

A. 3 応力速度と外荷重速度の関係式

考えているリングにかかる外荷重は、Fig. 4の如くであるとする。このリング状物体内の歪エネルギーと外荷重による仕事を考えることより、

$$\{\dot{f}_e\} = V_o [C_{se}]^T \{\dot{\sigma}\} \quad (\text{A.3})$$

がえられる。ここで、

$$\{\dot{f}_e\} = \begin{Bmatrix} \dot{f}_{ea} \\ \dot{f}_{eb} \\ \dot{f}_{ez} \end{Bmatrix}$$

であり、 f_{ea} = リング内面にかかる半径方向外荷重

f_{eb} = リング外面にかかる半径方向外荷重

f_{ez} = リング断面にかかる軸方向外荷重

V_o = リング状物体の体積

である。

A.4 外荷重速度と変位速度間の関係式

応力速度を (A.1) 式を逆に解いて

$$\{\dot{\sigma}\} = \{\dot{b}_{st}\} + [b_{ss}] \{\dot{\epsilon}\} \quad (\text{A.4})$$

とえる。ここに、

$$\{\dot{b}_{st}\} = -[a_{ss}]^{-1} \{\dot{a}_{st}\}$$

$$[b_{ss}] = [a_{ss}]^{-1}$$

である。(A.4) 式の $\{\dot{\epsilon}\}$ に (A.2) 式を代入し、

$$\{\dot{\sigma}\} = \{\dot{b}_{st}\} + [b_{ss}] [c_{se}] \{\dot{u}\}$$

を得る。この得られた $\{\dot{\sigma}\}$ を (A.3) 式に代入することにより、外荷重速度と変位速度間の関係式として

$$\{\dot{f}_e\} = \{\dot{b}_{et}\} + [b_{ee}] \{\dot{u}\} \quad (\text{A.5})$$

が得られる。ここに、

$$\{\dot{b}_{et}\} = V_o [c_{se}]^T \{\dot{b}_{st}\}$$

$$[b_{ee}] = V_o [c_{se}]^T [b_{ss}] [c_{se}]$$

とする。

A. 5 燃料ペレットおよび被覆管の剛性方程式

燃料ペレット、被覆管が半径方向に分割されず、ただ1個のリングとする場合は、(A.5)式がそのままそれぞれの剛性方程式となる。分割が行われた場合は、部分構造法によって、燃料ペレットと被覆管のそれぞれについて各リングを組み合せ1個のリングに組立てる。その結果、燃料ペレットと被覆管全体についての次のような剛性方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \{f_f\} &= \{b_{ft}\} + [b_{ff}] \{u_f\} \\ \{f_e\} &= \{b_{ct}\} + [b_{cc}] \{u_c\} \end{aligned} \right\} \quad (A.6)$$

ここで、 $\{u_f\} = \begin{Bmatrix} R_{fa} \\ R_{fb} \\ L_{fz} \end{Bmatrix}$, $\{u_c\} = \begin{Bmatrix} R_{ca} \\ R_{cb} \\ L_{cz} \end{Bmatrix}$

$$\{f_f\} = \begin{Bmatrix} f_{fa} \\ f_{fb} \\ f_{fz} \end{Bmatrix} , \quad \{f_c\} = \begin{Bmatrix} f_{ca} \\ f_{cb} \\ f_{cz} \end{Bmatrix}$$

である。

A. 6 外荷重を圧力によるものと接触によるものに分離する

計算において、燃料棒の内、外圧力は既知であるとする。外圧は履歴データより得られ、内圧は推定される。このとき接触力が未知数となる。そこで、燃料ペレットおよび被覆管にかかる外荷重を圧力によるものと接触によるものとに分離しておく、

燃料ペレットにかかる内圧 P_a による外荷重 $\{f_{pf}\}$ を

$$\{f_{pf}\} = \begin{Bmatrix} f_{pfa} \\ f_{pfb} \\ f_{pfz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2\pi R_{fa} L_{fz} P_a \\ 2\pi R_{fb} L_{fz} P_a \\ \pi(R_{fb}^2 - R_{fa}^2) P_a \end{Bmatrix}$$

と定義する。被覆管にかかる内、外圧力 (P_b) による外荷重 $\{f_{pc}\}$ を次のように定義する。

$$\{f_{pc}\} = \begin{Bmatrix} f_{pca} \\ f_{pcb} \\ f_{pcz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 2\pi R_{ca} L_{cz} P_a \\ 2\pi R_{cb} L_{cz} P_b \\ \pi R_{cb}^2 P_b - \pi R_{ca}^2 P_a \end{Bmatrix}$$

また、接触力 $\{f\}$ を

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \text{ペレット中心における半径方向接触力} \\ \text{ペレットと被覆管の間の半径方向接触力} \\ \text{ペレットと被覆管の間の軸方向接触力} \end{Bmatrix}$$

とする。

燃料ペレットと被覆管に作用する外荷重は

$$\{f_f\} = \begin{Bmatrix} f_{pfa} + f_1 \\ -f_{pfb} - f_2 \\ -f_{pfc} - f_3 \end{Bmatrix}, \quad \{f_c\} = \begin{Bmatrix} f_{pca} + f_2 \\ -f_{pcb} \\ -f_{pcz} + f_3 \end{Bmatrix}$$

である。これを、圧力による外荷重と接触による外荷重に分離して、

$$\left. \begin{aligned} \{f_f\} &= [c_f] \{f_{pf}\} + [c_c] \{f\} \\ \{f_c\} &= [c_f] \{f_{pc}\} + [c_c] \{f\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.7})$$

と表わす。ここに、

$$[c_f] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad [c_c] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

とする。

A.7 ギャップの変位速度

接触力 $\{f\}$ に対応するギャップ寸法 $\{u\}$ を

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} R_{fa} - R_{rod} \\ R_{ca} - R_{fb} \\ L_{cz} - L_{fz} \end{Bmatrix}$$

と定義する。ここに、 R_{rod} はペレット中心孔に挿入された rod の半径とする。ただし、この rod は軸方向にペレットと全く等しく伸び、縮みし、半径方向には初期値のままであると仮定される。

ギャップの変位速度 $\{\dot{u}\}$ は

$$\{\dot{u}\} = \begin{Bmatrix} \dot{R}_{fa} \\ \dot{R}_{ca} - \dot{R}_{fb} \\ \dot{L}_{cz} - \dot{L}_{fz} \end{Bmatrix}$$

となる。これは、

$$\{\dot{u}\} = [c_f]^T \{\dot{u}_f\} + [c_c]^T \{\dot{u}_c\} \quad (\text{A.8})$$

と書くことができる。

A.8 接触力速度とギャップ変位速度の剛性方程式

燃料ペレットと被覆管の変位速度 $\{\dot{u}_f\}$, $\{\dot{u}_c\}$ を表わす (A.6) 式を逆に解いて

$$\left. \begin{aligned} \{\dot{u}_f\} &= \{a_{ft}\} + \{a_{ff}\} \{\dot{f}_f\} \\ \{\dot{u}_c\} &= \{a_{ct}\} + \{a_{cc}\} \{\dot{f}_c\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.9})$$

を得る。ここに

$$\begin{aligned} \{a_{ft}\} &= -\{b_{ff}\}^{-1} \{b_{ft}\} \\ \{a_{ct}\} &= -\{b_{cc}\}^{-1} \{b_{ct}\} \\ \{a_{ff}\} &= \{b_{ff}\}^{-1} \\ \{a_{cc}\} &= \{b_{cc}\}^{-1} \end{aligned}$$

である。

この (A.9) 式に (A.7) 式を時間で微分した $\{\dot{f}_f\}$, $\{\dot{f}_c\}$ を代入する。さらに、これを (A.8) 式に代入することにより、ギャップ変位速度と接触力速度との矛盾方程式

$$\{\dot{u}\} = \{\dot{a}_t\} + \{a\} \{\dot{f}\} \quad (\text{A.10})$$

が得られる。ここで、

$$\begin{aligned} \{\dot{a}_t\} &= \{c_f\}^T \{\dot{a}_{ft}\} + \{c_c\}^T \{\dot{a}_{ct}\} \\ &\quad + \{c_f\}^T \{a_{ff}\} \{c_f\} \{\dot{f}_{pf}\} + \{c_c\}^T \{a_{cc}\} \{c_c\} \{\dot{f}_{pc}\} \\ \{a\} &= \{c_f\}^T \{a_{ff}\} \{c_f\} + \{c_c\}^T \{a_{cc}\} \{c_c\} \end{aligned}$$

である。

剛性方程式は (A.10) 式を $\{f\}$ について解いた

$$\{f\} = \{\dot{f}_s\} + \{k\} \{\dot{u}\} \quad (\text{A.11})$$

である。ここに、

$$\begin{aligned} \{\dot{f}_s\} &= -\{a\}^{-1} \{\dot{a}_t\} \\ \{k\} &= \{a\}^{-1} \end{aligned}$$

である。

Appendix B 入力手引

FREC-4Aの入力は、5.1節で述べたようにすべてカードによって行われる。入力データは、カードの先頭にカード番号が付されたFree Format型式で読込まれる。入力データの識別は、カード番号とそのカードの何番目 (field : フィールド) の入力かによって行われる。

B.1 入力カード作成上の注意事項

FREC-4Aの入力は、すべてカードによって行われる。以下に入力カード作成上の注意事項を記す。なお、この説明については、Fig. 16 がサンプルデータとして有益なので参照されたい。

- (1) カードの先頭には、カード番号がパンチされねばならない。このカード番号は、Table B.1に説明されるカード番号のみが有効であり、それ以外の番号は無効となる。
- (2) カード番号とそれに続く入力データは、すべてカンマ(,)で区切られねばならない。
- (3) 各カードの入力データの最後は、アスタリスク(*)をパンチする。アスタリスク以後にパンチされた数値等は入力データと見なされない。逆に言えば、アスタリスク以後に入力データのメモ等をパンチすることができる。
- (4) 入力データの数値には、I、F、Eの各タイプが使用できる。Fタイプの数値で少数以下が必要なものはIタイプで入力可能である。

Eタイプの入力は通常のFORMAT型式と異なり、Eパンチを必要としない。

〔例〕

入力したい数値	FREC-4A入力パンチ形式
15.8E-6	15.8-6
3.0E+19	3.0+19

なお、入力においてblank column (b) と 0 (ゼロ) は区別されている。例えば、240 を入力したいとき 24 b とすると 24 に設定される。注意されたい。

- (5) 各カード入力において、同一数値を複数入力する場合、くりかえし入力の省略法としてR (Repeat) が使用できる。

〔例〕 9901, 0 R 5 *

9902, 20000000, 11111111 R 4 *

上記の例の上側では、9901番のカードの1~5 field のすべてに0が入力される。下側の例では、9902番のカードの第1 field に20000000が入力され、その後の2~5 field にすべて11111111が入力される。

この省略法Rは、Rを使うことによって、このカードの入力データが終了する以外の場合に使用してはならない。すなわち、R入力の次は必ずアスタリスク(*)でなければならない。

- (6) Table B.1中、カード番号がI000, I10J等で示されたものは、I=1 or 2 であり、

1は燃料に関するデータ、2は被覆に関するデータである。

- (7) Table B.1中、Variable Symbolには、プログラム内使用のVariable nameを記した。この場合、出力グループ(2)(Fig. 17参照)でのVariable nameのプリントと異なるものがある。それについては、()でプリントされる表示を示してある。

B.2 入力データセットの作成

個々の入力カードは、B.1の注意を参考に、Table B.1で与える説明によって作成される。ここでは、全体としての入力データ群の作成について記す。

- (1) 入力データのエンドカードは、カード番号9999である。
- (2) 入力カードの順序は、原則としてカード番号の小さいものから大きいものへとしなければならない。IOLOK番のカード等、カード番号が5桁以上の数となるカードは、「(b番号), CONT」のカードあるいはエンドカード9999番の前に置かれねばならない。なお、この件については、後述の(4)を参照されたい。
- (3) カード番号の重複による重複したデータの読み込みは可能である。ただし、プログラムの計算には、最後に読み込まれたカードの入力データが使用される。
- (4) 入力データ上の燃料棒の照射履歴の節点は、最大5に設定されている。しかし、その照射履歴につないで照射履歴データを継続させ計算を続行することが可能である。ただし、そのためには、次の例に示すように入力データセットを構成する。

〔例〕

カード番号		
600, 0, 0, 1, -5,		
601, } } } 609, }	照射履歴の最初の5節点入力	
700, } } } } } IOLOK, } I5LOK, }	照射履歴以外の入力	
(b番号), CONT		
600, 0, 0, 1, -5,		} 同一方法による } くりかえし可能。
601, } } } 609, }	継続する照射履歴5節点入力	

```
(b 番号), CONT
600, 0, 0, 1, -N, .....
601,
) 継続照射履歴 N (N ≤ 5) 節点入力
609,
9999 * END CARD
```

なお、上記の例に示すような入力データセットにおいて、継続する照射履歴データの外に照射履歴以外のデータを入力することも可能である。例えば物性値等を計算の照射履歴の途中で切替えると、出力分布を変更する等の操作を行うことができる。ただし、FREC-4Aの現段階では、これらの切替え、変更について十分なプログラムチェックが行われていないので、そのような計算を行う場合には、プログラムの修正等を行う必要があるかもしれない。

一度入力した照射履歴をくりかえし使用するオプションを設けるつもりでプログラム整備が途中まで行われている。しかし、FREC-4Aの現段階では使用できないので、照射履歴を継続する場合は、上記に述べたような方法をとられたい。

B.3 入力データ群と出力グループ(2)

出力グループ(2)は、入力データ群が最も標準的な場合を想定してプリントを行う。したがって、データの入力が特別な方法による場合は、正常な値のプリントにならないことが生じる。留意してほしい事項を以下に記す。

(1) クリープ歪速度

クリープ歪速度や加工硬化に関する係数 C, G, P, Q 等が直接入力されず、4.4.2節で述べた特別な方法によって入力され、プログラム内で変換作成しなければならない場合、出力グループ(2)のこれらに関するプリントは仮に入力した C, G, P, Q の値をプリントするだけである。変換が行われると、出力グループ(3)が2度出力される。このとき後に出力された C, G, P, Q が計算に使用される変換後の値である。

(2) 4桁以上の入力カード番号

燃料ペレットの内外径をペレットスタックにより変更するため、IOLOJ 等の入力カード番号が5桁になっているものがある。これらの入力情報は、出力グループ(2)ではプリントされない。

Table B.1 Manual of input cards
 ((注) Variable Symbol 欄に () で表わされるものは出力グループ(2)における表示を示す)

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
600	1	I	MOPT(1)	—	MOPT(1)=0 で入力すること。	
	2	I	MOPT(2)	—	MOPT(2)=0 で入力すること。	
	3	I	MOPT(3)	—	card No 601~608 までの history card をくりかえし使用して計算するためのオプション。しかしながら、FREC-4A の現段階ではプログラム未整備のため history data のくりかえし使用は不可能。 MOPT(3)=1 として入力のこと。	
	4	I	MOPT(4)	—	履歴データの個数, 最終回は-(負)で入力のこと。 $ MOPT(4) \leq 5$ 。	
	5	I	KKK	—	歪モデルの選定の key word, 6桁の整数 $KKK = LD \times 10^5 + LM \times 10^4 + LE \times 10^3 + LP \times 10^2 + LT \times 10 + LS$ $0 \leq LD, LM, LE, LP, LT, LS \leq 1$,	
	6	I	I PROPT	—	LD: 焼きしまりモデル, LM: 気孔移動モデル LE: 弾性モデル, LP: 塑性-クリープモデル LT: 熱膨張モデル, LS: スウェリングモデル 出力オプション。4桁の整数 $I PROPT = LOPT \times 10^3 + LOTM \times 10^2 + LOPT \times 10 + LOPR$ $LOPR = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ 1: 副プログラム OUTPR の出力(出力グループ(11))がえられる。 $LOPT = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ 1: 副プログラム PPLOT の出力(出力グループ(12))がえられる。	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
600	6	I	IPROPT	—	<p>LOTM = $\begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$: 副プログラムOUTTEMの出力(出力グループ(13))がえられる。</p> <p>LOTP = $\begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$: 副プログラムOUTTPが呼ばれ、プロットのために計算結果を機番1に出力する。</p> <p>出力オプション。副プログラムOUTPRとOUTTEMで出力する軸方向セグメントを指定する。</p> <p>IPRCON = LIS × 100 + LIE, 1 ≤ LIS, LIE ≤ 20 LISからLIEのセグメントについて出力。</p> <p>[例] IPRCON = 0310と入力されたら, LIS = 3, LIE = 10となり3から10のセグメントについて計算結果が出力される。</p> <p>プリント出力の時間間隔</p> <p>通常履歴データの各節で出力のプリントが行なわれるが, その途中の計算結果を出力したいとき, この値を入力すると, 各節からDTIME経過した時間毎に出力がえられる。</p>	
601	1~J	F	TIME(J)	hr	時間増分。J = 1, MOPT(4)。TIME(1)は, 照射開始時刻, TIME(1) = 0.0とすることが望ましい。	
602	1~J	F	RQT(J) (L.H.G.R.(J))	w/cm	燃料棒の線出力密度。J = 1, MOPT(4)	
603	1~J	F	TWAT(J) (T(WATER)(J))	°C	冷却材の炉心入口温度。J = 1, MOPT(4)	

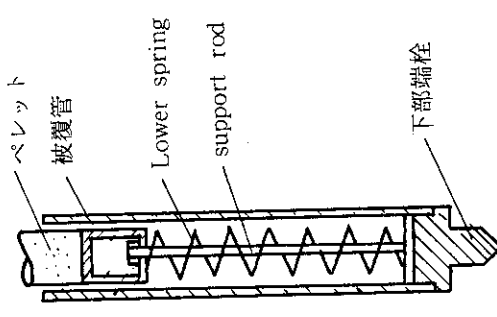
Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
604	1~J	F	PMT (J, 2) (P (WATER) (J))	kg/cm ²	冷却材圧力。J = 1, MOPT (4) (注) 照射履歴データのカードNo. 601~604の時間増分, 燃料棒出力, 冷却水入口温度, 冷却水圧力は必ず入力されねばならない。他の照射履歴パラメータは, カードNo. 907および5000で与えるkey word HISTとNUT (M)の選択により, プログラム内で作成することができる。なお, 任意の時刻tでの照射履歴パラメータは, その時間によって各パラメータを直線内挿して求められる。 Fission rate. J = 1, MOPT (4)	
605	1~J	F	FST (J, 1) (FDOT (J, 2))	f/cm ² /sec	Fast neutron fluence (nvt)。J = 1, MOPT (4)	
606	1~J	F	FST (J, 2) (F (J, 2))	n/cm ²	燃料ペレットに関する固体部のSwelling率 ϵ_{vs} (m)の値。製作時の単位体積当りの固体部分の体積膨張率。J = 1, MOPT (4)	
607	1~J	F	EVT (J, 1) (EVS (MEAT) (J))	cm ³ /cm ³	被覆に関する照射による体積膨張率 ϵ_{vs} (c)の値。製作時の単位体積当りの体積膨張率。J = 1, MOPT (4)	
608	1~J	F	EVT (J, 2) (EVS (CLAD) (J))	cm ³ /cm ³	(注) 605~608の履歴データは燃料棒の最大出力部についての値を入力すること。	
700	1	I	MSET	—	軸方向分割の個数, (MSET $\leq 20^*$)	* I 000, NRM (I) の(注)参照
	2	I	IPEAK	—	軸方向出力分布に関するオプション。 IPEAK = 0, 使用者入力。card No. 701~701+MSETで入力する	§ 4.3 参照

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
700					<p>値を使用する。</p> <p>IPEAK = 1, プログラム内でセットする card No 602 で与えられる L, H, G, R は燃料棒の平均出力であると 考え, 次式で軸方向相対出力比を求める。</p> $\frac{P(y)}{P_{ave}} = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L+2d}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L}{L+2d}\right)} \cos\left\{\frac{\pi}{L+2d}\left(y - \frac{L}{2}\right)\right\} \quad (a)$ <p>IPEAK = 2, プログラム内で設定する。 card No. 602 で与えられる L, H, G, R は燃料棒のピーク出力 (P_{max}) であると考え, 次式で軸方向相対出力比を求める。</p> $P(y)/P_{max} = \cos\left\{\frac{\pi}{L+2d}\left(y - \frac{L}{2}\right)\right\} \quad (b)$	§ 4.3 参照
	3	F	DLEN	cm	上記 IPEAK = 1 or 2 で軸方向出力比を与えるときに必要とする外挿距離 d。(例) DLEN = 3 (cm)	
	4	F	DTEMO	°C	次に入力する燃料棒平均線出力密度 (ALHR) に達したときの冷却水入口と出口の温度差。	
	5	F	ALHR	w/cm	各セグメントについての冷却水温度を計算するときの基準線出力密度 (注) PWR のように boiling しない燃料棒であれば, 上記の説明の通り入力すればよい。BWR についてはプログラム内で Saturate 温度以上にはならないようになっている。逆に言えば, BWR については仮想の温度差 DTEMO を入力する必要がある。	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks												
700	6	I	LSGF	—	<p>通常BWRのsubcool温度は10~15℃であり, boiling pointは燃料棒全長に対しその下方から10~20%にある。いま燃料棒の出力がcos状に分布していると仮定すると, BWRに対する仮想の温度差は次のようになる。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Z</th> <th>0.1L</th> <th>0.15L</th> <th>0.2L</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10</td> <td>408.6</td> <td>183.5</td> <td>104.7</td> </tr> <tr> <td>15</td> <td>613.0</td> <td>275.3</td> <td>157.1</td> </tr> </tbody> </table> <p>Z : boiling point, L : fuel rod length, Tsub : subcool temp.</p> <p>燃料棒の自重に関するOption key word. LSGF=0 : 自重を考慮しない。 LSGF=1 : 燃料ペレットについて自重を考える。 LSGF=2 : 燃料ペレットと被覆管の両方について自重を考慮する。 (注) LSGF=1, 2の場合, I 000, field 8でその密度を入力する必要がある。</p>	Z	0.1L	0.15L	0.2L	10	408.6	183.5	104.7	15	613.0	275.3	157.1	
Z	0.1L	0.15L	0.2L															
10	408.6	183.5	104.7															
15	613.0	275.3	157.1															
700+L	1 2 3	F F F	ALZ (L) ALC (L) APD (L)	cm cm —	<p>L=1, MSET+1 MSETはcord 700で入力 燃料スタックの軸方向分割点, MOD ((700+L), 100) 番目の高さ。 上記に対応する被覆管軸方向分割点の高さ* (注) ALC(L)=ALZ(L)で入力のこと。 上記分割点における軸方向出力の相対出力比。IPEAK≠0のときは</p>	<p>* 燃料ペレットスタック下端を基準高さ(0.0)としたときの高さとする。</p>												

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
700+L					<p>入力不要</p> <p>Plenum MSET ALZ (MSET + 1), ALC (MSET + 1) ALZ (MSET), ALC (MSET) ALZ (3), AL (3) ALZ (2), ALC (2) ALZ (1), ALC (1)</p>	
755	1	I	LPST	—	<p>下部プレナムに関する情報の入力。 LPST=0, 下部プレナムなし =1, 下部プレナムにsupport collar 挿入。 =2, 下部プレナムにsupport assembly 挿入。</p>	support assembly については(注)参照。
	2	I	NSPL	—	Lower Spring or support collar の温度評価を行うときの内側の半径方向位置の番号*	LPST=0 の場合, field 2~7 の値は計 算上無視される。
	3	I	MSPL	—	Lower Spring or support collar の温度評価を行うときの外側の半径方向位置の番号*	
	4	F	ALL	cm	*この番号は、径方向に分割したベレットの分割点番号とする。 下部プレナムの長さ	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
755	5	F	ALPSL	(1/°C)	Thermal expansion coefficient of lower plenum spring or support collar.	
	6	F	SCKL	kg/cm	Spring constant (k) of lower plenum spring.	
	7	F	PRLDL	kg	Preload of lower spring.	
756	1	F	ESL	kg/cm ²	下部プレナムに関する情報 (cont)	<p>Young's modulus of lower spring support rod.</p> <p>Thermal expansion coefficient of support collar.</p> <p>Cross section area of support collar.</p> <p>(注) support assembly は, spring である。しかし, 初期負荷 (preload) がかかっている。負荷を与えるため, support rod を必要とする。プログラムで考えている support assembly は下図に示すような構造である。</p> <p>すなわち, 一定の負荷 (PR LDL) 以上になったら, spring がたわみを開始する。</p>
	2	F	ALPRC	1/°C		
	3	F	ARGC	cm ²		



Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
757	1	I	KUPS	—	上部プレナムに関する情報を入力する。 KUPS = 0, 上部プレナムにspring なし = 1, " spring 挿入	
	2	I	NSPU	—	Upper Spring の温度評価を行うときの内側の径方向位置番号*。	
	3	I	MSPU	—	Upper Spring の温度 " 外側 " 番号*。	
	4	F	AUL	cm	* この番号は径方向にペレットを分割したときのリングの節点番号とす。	
	5	F	ESU	kg/cm ²	上部プレナムの長さ	
	6	F	ALPSU	1/°C	Upper Spring の Young's Modulus	
	7	F	AUSP	cm ²	Thermal expansion coefficient of upper plenum spring	
	8	F	SCKU	kg/cm	Cross section area of upper spring	
	9	F	PRLPU	kg	Spring constant (k) of upper spring Preload of upper spring	
758	1	F	PGAPS	kg/cm ²	プレナム(上, 下部を含んだ)に関する情報の入力。 プレナム圧力	
	2	F	TEMPS	°K	初期プレナム温度	
	3	F	SVOLS	cm ³	全プレナム体積	
	4	F	PLVOL	cm ³	初期上部プレナム体積	
	5	F	PLVOLL	cm ³	初期下部プレナム体積。(LPST = 0 の入力の場合, 計算上, この値は無視される。)	
800	1	F	FMS (K, 2)	fission/cc	Table function に使用する integral fission rate の設定値	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
800	1		K = field No.		(例) $0.0, 3 \times 10^{19}, 3 \times 10^{21}$ Table function に使用する fission rate の設定値 (例) $1.0 \times 10^{12}, 2 \times 10^{13}, 1.0 \times 10^{14}$ Table function に使用する integral fast neutron flux (fast fluences, nvt) の設定値 Table function に使用する fast neutron flux の設定値 (例) $0.5 \times 10^{14}, 1.0 \times 10^{14}, 7 \times 10^{14}$	
	3			fission/cc/sec		
	4	F	FMS (K, 1)			
	1		K = field No. -3			
	6			n/cm ²		
	4	F	FMS (K, 4)			
801	1		K = field No.		Table function に使用する fast neutron flux の設定値 (例) $0.5 \times 10^{14}, 1.0 \times 10^{14}, 7 \times 10^{14}$	
	3			n/cm ² /sec		
	4	F	FMS (K, 3)			
	1		K = field No. -3			
	6					
	4	F	FMS (K, 4)			
90K	1	F	TG(K)	°C	K = 1 ~ 3 Field 2 ~ 4, および 5 で入力する $D_{ft}(I, K)$ (ガス放出率) と RGASN(K) (気孔数に關する温度ファクター) を Table function で与えるための温度の設定値。TG(1) < TG(2) < TG(3) になるように入力のこと。 ガス放出率, $D_{ft}(I, K)$, 温度 TG(K), 燃焼度 FMS (I, 2) に対する値。 例えば, 1000°C 以上 0.5% 放出 1000 ~ 1300 °C 10% 放出 1300 ~ 1600 °C 60% 放出 1600°C 以上 100% 放出	
	2	F	CGTF (I, K)	-		
	1					
	4					
	2					
	4					

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks																								
90K					<p>ならば、入力カードは次のようになる。</p> <p>800, 0.0, 3+19, 3+21,</p> <p>901, 1000., 0.005, 0.005, 0.005,</p> <p>902, 1300., 0.1, 0.1, 0.1,</p> <p>903, 1600., 0.6, 0.6, 0.6,</p> <p>上記の如く入力された場合、ガス放出率は次表のように使用される。</p> <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>fission/cc</th> <th>0.0</th> <th>3×10^{19}</th> <th>3×10^{21}</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>°C</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1000以下</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> <td>0.005</td> </tr> <tr> <td>1000~1300</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>1300~1600</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>1600以上</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> <td>1.0</td> </tr> </tbody> </table>	fission/cc	0.0	3×10^{19}	3×10^{21}	°C				1000以下	0.005	0.005	0.005	1000~1300	0.1	0.1	0.1	1300~1600	0.6	0.6	0.6	1600以上	1.0	1.0	1.0	
fission/cc	0.0	3×10^{19}	3×10^{21}																											
°C																														
1000以下	0.005	0.005	0.005																											
1000~1300	0.1	0.1	0.1																											
1300~1600	0.6	0.6	0.6																											
1600以上	1.0	1.0	1.0																											
	5	F	RTNG(K) (RGASN(K))	—	<p>注) プログラムにおいてDFTはDIMENSION DFT(3,4)となっており、DFT(I, 4)は必ずDFT(I, 4) = 1.0に設定されている。</p> <p>燃料ペレットの気孔数の変化を求めるときの温度ファクター。</p> <p>気孔数(N_{ht}) = $N_{ht}(\text{ref}) \cdot \text{RGASN}(K)$</p> <p>として定められる。ここで、$N_{ht}(\text{ref})$はI 20K, field 6の値である。ただし、カード番号I 20K, field 7のMNHT(kg)の値が±1のときのみ使用される。</p> <p>特別なオプションkey word。通常は0とする。</p> <p>TGASZ(K) = 0のとき、ガス放出率DFT(I, K)の温度設定値TG(K)が使用される。</p>																									
	6	F	TGASZ(K) (ZUYKB)	°C																										

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
90K					<p>TGAS (K) ≠ 0 のとき、 温度 TG (K) に対する RGASN (K) の値に代えて TGASZ (K) に対する RGASN (K) の値が使用される。ガス放出率の温度設定値とは異なる温度を設定したい場合に使用する。</p>	
904					<p>field 1~3, ギャップ熱伝達に関する値。 ギャップ熱伝達係数は 1) ギャップが開いているとき $1/h_{go} = t_{gap}/C_{gap} + 1/h_{gap} \quad (w/cm^2/^\circ C)$ 2) ギャップが閉じたとき $h_{gc} = h_{go} + \frac{P_I}{500} \cdot h_{nogap}$</p>	
	1	F	CGAP	w/cm ² /°C	<p>で計算される。ここで、t_{gap} = ギャップ巾 (cm) P_I = 接解圧力 (kg/cm²) である。 ギャップガスの熱伝導率 (= C_{gap})。 [例] $k_{gas} = C_{gap} = 2.6145 \times 10^{-3}$ (w/cm/°C) (He at 400°C) sample input $C_{gap} = 0.01$ (Btu/hr/in/°F) $= 2.1 \times 10^{-3}$ (w/cm/°C)</p>	
	2	F	HGAP	w/cm ² /°C	<p>ギャップが閉じたとき ($t_{gap} = 0$) の熱伝達係数 (= h_{gap}) sample input $h_{gap} = 2,500$ (Btu/hr/ft²/°F) $= 1.4175$ (w/cm²/°C)</p>	
	3	F	HNOGAP	w/cm ² /°C	<p>接触したときのギャップ熱伝達係数 (= h_{nogap})。</p>	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
904					$\frac{P_I}{500} \times h_{\text{nogap}}$ で与えられる。 $\text{sample input } h_{\text{nogap}} = 1,000 \text{ (Btu/hr/ft}^2\text{/}^\circ\text{F)}$ $= 0.567 \text{ (w/cm}^2\text{/}^\circ\text{C)}$ 被覆管表面と冷却水間の熱伝達率 (= h_{water}) [例] BWRの場合, $h_{\text{water}} \cong 10,000 \text{ (Btu/}^\circ\text{F/hr/ft}^2\text{)}$ $= 5.67 \text{ (w/cm}^2\text{/}^\circ\text{C)}$ PWRの場合, $h_{\text{water}} \cong 5,900 \text{ (Btu/hr/ft}^2\text{/}^\circ\text{F)}$ $= 3.3453 \text{ (w/cm}^2\text{/}^\circ\text{C)}$ field 5, 6, 7は燃料ペレットの気孔内圧力をファン・デア・パールの の式で評価するときのガス定数。 燃料ペレットの気孔内圧力(P)をファン・デア・パールの式	
	4	F	HWATER	w/cm ² /°C		
	5	F	GRAB(1) (R(VDW))	kg-cm /°K-mole		
	6	F	GRAB(2) (A(VDW))	cm ³ /mole	$P = \frac{(T + T_{\text{abs}}) R_{\text{vdw}}}{(V/M) - A_{\text{vdw}}} - \frac{B_{\text{vdw}}}{(V/M)^2}$ T: 温度(°C), V: 体積(cm ³), M: モル数 で評価するときのガス定数。 $R_{\text{vdw}} = \text{GRAB(1)}, A_{\text{vdw}} = \text{GRAB(2)},$ $B_{\text{vdw}} = \text{GRAB(3)}$ とする。	
	7	F	GRAB(3)	kg-cm ⁴ /mole ²	Sample input: ガスはボイル・シャルルの法則に従うとして、次の ように入力した。 $R_{\text{vdw}} = 848054 \text{ (kg-cm}^4\text{/}^\circ\text{K/mole)}$ $A_{\text{vdw}} = B_{\text{vdw}} = 0.0$	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
904	8	F	PLUGLN	cm	ペレット中心孔挿入のプラグの長さ PLUGLN < 0 ならば, ペレットスタック上方からの長さ PLUGLN > 0 ならば, ペレットスタック下方からの長さ	
905	1	F	FCORE	kg	燃料ペレット内面におけるプラグと燃料の半径方向接触力 (全セグメントの平均値) * ただし, どのセグメントにおいても接触していないければ 0.0 でよい (以下同じ)	
	2	F	FCON(1) (FCON(R))	kg	燃料ペレットと被覆管の間の半径方向接触力 (全セグメントの平均値) *	
	3	F	FCON(2) (FCON(Z))	kg	燃料ペレットと被覆管の間の軸方向接触力 (全セグメントの平均値) * *) FCORE, FCON(R), FCON(Z) の値は, 各セグメントの各方向接触力の初期値の設定に使用される。 各タイムステップ, Δt で許される応力増分の最大値.**	
	4	F	DSCRIT (CS(MAX))	kg/cm ²	各タイムステップ, Δt で許される歪増分の最大値.**	
	5	F	DECRI (DE(MAX))	cm/cm	** これらの最大値よりも大きな増分がえられた場合はタイムステップが細分化される。	
	6	F	PLUG (RPLUG)	cm	プラグの半径	
	7	F	QPLUG	—	燃料棒の全発熱量に対するプラグの発熱割合	
	8	F	TPLUG	—	未使用。	
906	1	F	SGMIN	—	未使用, SGMIN = 1.0 と入力のこと。	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
906	2	I	MPQ	—	<p>Input option key word on the form of the plastic - creep equations for steady state.</p> $MPQ = I 4 \times 10^3 + I 3 \times 10^2 + I 2 \times 10 + I 1$ $(0 \leq I 1, I 2, I 3, I 4 < 10)$ <p>で表わされる4桁の整数。</p> <p>I 1, I 2は燃料について使用される。</p> <p>I 3, I 4は被覆 " "。</p> <p>I 3, I 1 = 0 ならば,</p> $\epsilon_{SH} = 10^P (\sigma / 70.31)^Q$ <p>を満足するP, Qを入力すること。</p> <p>I 3, I 1 = 1 ならば,</p> $\epsilon_{SH} = (\sigma / P)^{1/Q}$ <p>を満足するP, Qを入力すること。</p> <p>I 4, I 2 = 0 ならば,</p> $\dot{\epsilon}_0 = 10^G (\sigma / 70.31)^G$ <p>を満足するC, Gを入力すること。</p> <p>I 4, I 2 = 1 ならば</p> $\dot{\epsilon}_0 = (\sigma / C)^{1/G}$ <p>を満足するC, Gを入力すること。</p> <p>プラグの接触条件を指定する key word</p> <p>MCORE = 0 ならば, 燃料とプラグは原子炉運転中, 分離接触しうる。</p> <p>MCORE = 1 ならば, 燃料とプラグは常に接触状態にあるとす。</p> <p>MGAS = 0 or 1, MGAS = 1 のとき, pore に関する Variable は</p> <p>カードNo. I 20 K に従って入力されねばならない。MGAS = 0 のとき,</p> <p>燃料ペレットに関する variable は第1リングのみを入力すれば, 他</p> <p>のリングの variable は第1リングに等しくおかれる。</p> <p>クリープ歪速度 (ϵ_0) を計算するときのオプション key word.</p>	カード番号 I 6 JK 参照
	3	I	MCORE	—		
	4	I	MGAS	—		
	5	I	MGL	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
906	6	F	EDOGS	—	<p>MGL ≤ 0 ならば、クリープ歪速度は</p> $\dot{\epsilon}_c \leq 10^x \left(\frac{\sigma}{70.31} \right)^w \epsilon_{SH}^z$ <p>とし、ϵ_{SH} (加工硬化歪) を使用して計算される。 MGL = 1 ならば、クリープ歪速度は、</p> $\dot{\epsilon}_c = 10^x \left(\frac{\sigma}{70.31} \right)^z \epsilon_L$ <p>とし、ϵ_L (塑性相当歪) を使用して計算される。 固体部分の体積成長速度 (スウェリング速度) 評価のオプション key word.</p> <p>EDOGS = 0 ならば、</p> $\dot{V}_{su} = R_{vp}(P_{ave}, T_{ave}) \dot{V}_{st}(t)$ <p>で体積成長速度 (\dot{V}_{su}) を評価する。ここに、</p> $R_{vp}(P_{ave}, T_{ave}) = \text{圧力}(P_{ave}) \text{と温度}(T_{ave}) \text{による補正係数,}$ $\dot{V}_{st}(t) = \text{時間 } t \text{ における基準圧力, 温度での体積成長速度}$ <p>とする。</p> <p>EDOGS < 0 ならば、</p> $\dot{V}_{su} = \frac{R_{vp}(P_{ave}, T_{ave}) V_{st} - V_s}{\Delta t} + R_{vp} \dot{V}_{st}$ <p>で体積成長速度を評価する。ここに、</p>	文献(2)参照

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
906					$\Delta t = \text{タイムステップ}$ $V_s = \text{固体分固体積}$ とする。 $\text{EDOGS} > 0$ ならば、 $\dot{V}_{su} = \frac{R_{vp}(P_{ave}, T_{ave})V_{st} - V_{st}}{\text{EDOGS} + \Delta t} + R_{vp} \dot{V}_{st}$ で体積成長速度を評価する。 未使用, MFILE = 0 で入力のこと。 未使用, PFILE = 0 で入力のこと。	
	7	I	MFILE	—		
	8	I	PFILE	—		
	907	1	I	MCEE	—	Option key (未使用), MCEE = 0 とすること。
2		F	DVCRIT (DVMAX)	—	気孔体積変化によるスウェリングを計算するとき (文献(2)の(4, 40)式)の収斂判定条件。 ただし, DVCRIT = 0.0 と入力されると, プログラム内(sub. SASI)で DVCRIT = 0.001 として使用される。 history data をプログラム内で作成するかしないかの key word. HIST = 0.0, 601~608 のすべての history が使用される。 HIST = 1.0, 601~604 以外の history data は 5000, 5001 の option key およびデータに従って作成される。 燃料ペレットの熱伝導率の修正のための係数 $R_{ab} \times (1 - R_{ap} \cdot \rho) / (1 + R_{bp} \cdot \rho)$ の形で使用するときの定数。 ここで, $R_{ap} = \text{RAP}$, $R_{bp} = \text{RBP}$, $R_{ap} = \text{RABP}$	
3		F	HIST	—		
4		F	RAP	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
907	5	F	RBP	—	<p>ρ = 気孔率である。</p> <p>Sample input : 16 J0 入力熱伝導率が95% T.Dの場合、気孔率による変化を考慮して次のような値としてもよい。</p> <p>RAP=1., RBP=0.5, RABP=1.025/0.95=1.07895</p> <p>燃料ペレット—被覆の間の摩擦係数。</p> <p>Sample input, FR=0.4</p> <p>(注) この値に大きな値を入力すれば、燃料ペレットと被覆間のすべりはなくなる。</p> <p>未使用, PCOLL > 冷却材圧力を入力しておくこと。</p>	
	6	F	RABP	—		
	7	F	FR (FRICTION F.)	—		
	8	F	PCOLL	—		
908	1	F	FRCOL	—	<p>未使用</p> <p>タイムステップの最小値。タイムステップΔtがこの値より小さくなったら $\Delta t = \text{DTMIN}$ と置かれる。</p> <p> SIGMA = 燃料ペレットが割れを起こす応力。また、その値の符号によってhealing model が選定される。</p> <p>SIGMA > 0.0ならば、その応力が負となったらただちにhealingは完了とする。</p> <p>SIGMA < 0.0ならば、</p> <p>クラックが完全に癒着するまでの時間 (t_h) を $t_h = 1.8 \times 10^{-6} \exp(32000/T) / P$ で評価する。</p> <p>ペレットがクラックを起したときヤング率を小さくするための係数</p> <p>Sample input, SUPER = 7.5</p>	§ 3.1 参照
	2	F	DTMIN	hr		
	3	F	SIGMA	kg/cm ²		
	4	F	SUPER	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
908	5		MAXPOR	—	} 未使用, 焼きしまりによる最終到達密度 (fractional T.D.) sample input FDENS = 0.965	
	6		NTRR	—		
	7	F	FDENS	—		
909	1	F	RFACTT	—	被覆の相当応力 (σ_g) 等を求める場合の異方差パラメータ。 $\sigma_g^2 = \frac{1}{(RP+P)} \{ R(\sigma_r - \sigma_c)^2 + RP(\sigma_c - \sigma_z)^2 + P(\sigma_z - \sigma_r)^2 \}$ で, $\sigma_c - \sigma_r > 0$ のとき, $R = RFACT$, $P = PFACT$ とする。 $\sigma_c - \sigma_r < 0$ のとき, $R = RFACTC$, $P = PFACTC$ とする。 (例) CYGRO - 3 sample input, $RFACTT = RFACTC = 2.3$ $PFACTT = PFACTC = 3.3$ WARD - TM - 940 によれば, $RFACTT = RFACTC = 2.0$ $PFACTT = PFACTC = 9.3$	
	2	F	PFACTT	—		
	3	F	RFACTC	—		
	4	F	PFACTC	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
910					このカードは、燃料棒と支持物（グリッド or スペーサ）間の拘束あるいはすべりに関する情報の入力である。しかし、FREC-4Aの現段階では支持物による拘束等はプログラム化されていないので、このカードによる入力変数はすべて未使用である。 未使用、燃料棒と支持物（グリッド）間の最大拘束力。 未使用、 未使用、 未使用、 未使用、 未使用、 未使用、	
	1	F	FMSUP	kg		
	2	F	FSUP	kg		
	3	F	KSUP	kg		
	4	F	ESUP	kg		
	5	F	ESLIP	—		
	6	F	ASUP	1/°C		
1000					カードNo.1000より1700までのcard No.はNo.が4桁ないし4桁以上の数値で、Iは1 or 2である。I=1は燃料、I=2は被覆に関する入力であることを指示する。 半径方向節点数。 NRM(1)+NRM(2) ≤ 20 でなければならぬ。 (注) FREC-4Aの現段階では、 MSET × {NRM(1)+NRM(2)} - 1 ≤ 200 に制限している。MSET：軸方向分割数 物質I中の気孔の種類数 NGAS(I) ≤ 5 でなければならぬ。 (注) NGAS(I) = 0 とすれば、気孔体積によるスウェリング計算は行なわれない。また、気孔に関するプリントもスキップされる。 気孔のまわりのクリープ応力の係数、RCS(I) > 0	§ 4.5.1 参照
	1	I	NRM(I)	—		
	2	I	NGAS(I)	—		
	3	F	RCS(I)	1/hr		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
1000					$\sigma_c = R_{cs} \bar{\sigma}_g / \dot{\epsilon}_y$ <p>[例] CYGRO-3 sample input RCS(1) = 1.0</p> <p>気孔のまわりの物質の塑性応力の係数, RPS(I) > 0</p> $\sigma_p = R_{sp} \sigma_y$ <p>[例] CYGRO-3 sample input RSP(1), RSP(2) = 1 × 10³</p> $\sigma_c = \bar{\sigma}_g / (\dot{\epsilon}_y / R_{cs})$ <p>と変形すれば分るように R_{cs} を大きくすれば、与えられた応力 σ_g に対し、pore まわりのクリープ歪速度を小さくすることになる。</p> <p>クリープ-塑性の係数に関する変数の種類を指定するための option key word.</p> <p>MCGPQ(I) = I 2 × 10 + I 1, 0 < I 1, I 2 < 10 2桁の整数。</p> <p>I 1 : P Q の control に使用する I 2 : C Q の control に使用する</p> <p>I 1, I 2 = 1, C, G, P, Q の変数の 1 つとして核分裂速度 (f/cc/sec) が使われる = 2, C, G, P, Q の変数の 1 つとして燃焼度 (f/cc) が使われる = 3, C, G, P, Q の変数の 1 つとして高速中性子束が使われる</p>	
	4	F	RPS(I)	—		
	5	I	MCGPQ(I)	—		出力グループ(3)参照

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 000	6	F	QGMAX(I)	—	= 4, C, G, P, Qの変数の1つとして照射量(nvt (n/cm ²)) が使われる。 燃料棒出力に対する物質1の出力の比 気孔のまわりの表面張力 (例) CYGRO-3 サンプラインプット 2885×10^{-3} (lb/in) = 5.1521×10^{-4} (kg/cm) 物質1の密度 Sample input DENS(1) = 10.96 (100% T. D) = 10.412 (95% T. D) DENS(2) = 6.55 (ジルコニウム合金)	
	7	F	GAMMA(I) (S. TEN.)	kg/cm		
	8	F	DENS(I)	gr/cm ³		
I 10J	1	F	RAM(K _r) (RADIUS (KR))	cm	J = 0 ~ NRM(I), 以下の各データは径方向に分割されたリングの各メ ッシュ点あるいはリング毎に与えなければならない。 $K_r = K_e = (I - 1) \cdot NRM(I) + K + 1$ K ≙ NRM(I) のとき, リングの内側半径 K = NRM(I) - 1 のとき, リングの外側半径 リング Ke における初期半径方向応力	
	2	F	SRM(Ke) (SR (KE))	kg/cm ²		
	3	F	SCM(Ke) (SC (KE))	kg/cm ²		
	4	F	SZM(Ke) (SZ (KE))	"		
	5	F	EL(2, Ke) (EGC (KE))	cm/cm		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 10J	6	F	EL (3, Ke) (EGZ (KE))	cm/cm	リング Ke における初期軸方向歪	
	7	F	EPM (Ke) (EG (KE))	"	リング Ke における初期相当塑性歪	
	8	F	VTOT (Ke) (EV (KE))	cm ³ /cm ³	物質 I の照射初期単位体積についての体積変化率 (固体部の体積膨張, 気孔体積変化, 気孔の移動による体積変化と焼きましりによる体積変化を含む。) (注) 未照射燃料の計算においては, field 2~8 までの入力はすべて 0.0 にすることが望ましい。	
I 0L0J					入力カード I 10J の field 1 で入力したリングの半径を各セグメントにおいて修正したい場合に使用する。 I 0L0J card は input card No. が 5 桁である。 構成 $I \times 10^4 + L \times 10^2 + J$ ここで, $I = 1$ (meat), $= 2$ (clad) L : セグメント番号 ($2 \leq L \leq MSET$) J : リングの nodal point 番号 ($1 \leq J \leq NRM(I)$) $KL = J + (L - 1) \times (NRM(1) + NRM(1) + 1)$ セグメント L 番の半径方向節点 J の半径	
I 20K					このカードは気孔に関する入力情報である。K は $K = KG (KE - 1) + J$, ($1 \leq J \leq NGAS(I)$) とする。ここに, $KG = 1 \sim NGAS(I)$, (ガス気孔種類指定)	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks	
I 20K					<p>KE = 1 ~ NE (リング番号を指定)</p> <p>とす。ただし, NE = NRM(I) - 1 である。</p> <p>I 20K のカードは全部で NGAS (I) * { NRM(I) - 1 } 枚なければならぬ。カードは次の様な順序に並べること。</p> <p>(KG, KE) = (1, 1), (2, 1), ……; (NGAS (I), 1), (1, 2), (2, 2), ……; (NGAS (I), 2),</p> <p>∴</p> <p>(1, NE), (2, NE), …, (NGAS (I), NE)</p> <p>すなわち, 第 1 リングのガス気孔の種類 1 ~ NGAS (I) のデータを並べた後に, 第 2 リングに移る。</p> <p>なお, データがすべてのリングについて等しいならば, 入力はカード No. 906 の field 4 で MGAS = 0 と入力することにより, 第 1 リングのデータのみを入力し, 第 2 リング以後の入力を省略することができる。(ただし, 燃料ペレットのみである)</p> <p>物質 I 内の単位体積当りのガスモル数。もし, GASM = 0.0 と入力されたら, 気孔内圧力を 1 kg/cm^2 と考え, これに相当するモル数がプログラム内で設定される。</p> <p>核分裂によるガス生成率</p> <p>Sample input : 通常ガスは $0.3 \text{ atoms/fission}$ と考えられている。これを mole ($1 \text{ gr mole} = 6 \times 10^{23} \text{ atoms}$) に換算して $0.3 / 6 \times 10^{23} \approx 0.05 \times 10^{-23} = 5 \times 10^{-25} \text{ (moles/fission)}$。</p> <p>気孔内に蓄積したガスの放出率係数。</p> <p>[例] 平衡に達するのは, $\text{BGAS (KG, KE)} = 1 / 24 \approx 4.17 \times 10^{-2}$</p>		
	1	F	GASM(KG, KE)	mole			気孔によるスウェリングモデルについては文献(2)を参照されたい。
	2	F	AGAS (KG, KE)	mole/fission			
	3	F	BGAS (KG, KE)	1/hr			

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks	
I 20 K	4	F	VGAS (KG, KE)	cm ³ /cm ³	(L/hr) と考えられる。 Power ramp では、15 min 以内に大部分が放出される。 物質 I の初期単位体積に占めるリング KE, ガス気孔 KG の領域の気孔体積。		
	5	F	VSOL (KG, KE)	cm ³ /cm ³	[例] 95% T.D UO ₂ なら、VGAS = 0.05 となる。 リング KE 中の初期単位体積当りのガス気孔領域 KG の全体積。		
	6	F	GASN (KG, KE)	n/cm ³	VGAS < VSOL ≤ 1.0 でなければならぬ。 物質 I の初期単位体積当りのガス気孔領域 KG 中の気孔数。(参考値), N _{hi} (ref))。Sample input, 1 × 10 ⁷ (n/cm ³)		
	7	F	MING (KG, KE)	—	気孔数評価に関する key word (入力カード 90 K 参照) MING = 0 ならば、常に FGAS (KG, KE) = GASN (KG, KE) とおかれる。 MING = 1 ならば、FGAS (KG, KE) = RGASN(K) · GASN (KG, KE) とおかれる。 MING = -1 ならば、FGAS (KG, KE) は FGAS (KG, KE) と RGASN(K) · GASN (KG, KE) のうちの小さい方が採用される。		
	8		FGAS (KG, KE)	n/cm ²	時間 t における気孔数, 入力時は FGAS (KG, KE) = GASN (KG, KE) とする。		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 300	1	F	ARAT (1, I) (RALPHA(R))	—	熱膨張係数の異方性パラメータ, 半径方向	
	2	F	ARAT (2, I) (RALPHA(C))	—	" , 円周方向	
	3	F	ARAT (3, I) (RALPHA(Z))	—	" , 軸方向	
	4	F	VRAT (1, I) (RV(R))	—	もし, 等方性ならば, ARAT (1, I) = ARAT (2, I) = ARAT (3, I) = 1.0 とする。 スウェリングの異方性パラメータ, 半径方向	
	5	F	VRAT (2, I) (RV(C))	—	" , 円周方向	
	6	F	VRAT (3, I) (RV(Z))	—	" , 軸方向	
					もし等方性ならば, $VRAT (1, I) = VRAT (2, I) = VRAT (3, I) = 1/3$ とする。これは, 気孔の外部から気孔にかかる圧力を評価するとき 使用する各方向の重み係数でもある。 プログラムのモデルは, 燃料に関するスウェリングも, 被覆に関する 照射成長も共に体積膨張モデルとして扱われる。照射成長のみにする ためには, この係数で調節しなければならぬ。 [例] $VRAT (1, 2) = -0.722$, $VRAT (2, 2) = -0.011$ $VRAT (3, 2) = 0.733$ 。 $VRAT (1, 2) + VRAT (2, 2) + VRAT (3, 2) = 0.0$ } 未使用	
	7	F	DTMAX (I)	—		
		F	DTEDGE (I)	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 400	1	F	PVM (1, I)	F/L ²	このカードの field 4 以下は、気孔の移動に関するデータを入力する。 Tabular function RVP (圧力, 温度) の圧力についての設定値。 (RVP については I6J0 field 6~8 参照)。 文献(2)の(4, 5, 1)式(気孔の Vapor transport) $\rho_v = \frac{A_v}{P T^{3/2}} \frac{dT}{dr} \exp(-Q_v/k/T)$ に使用される A _v (AV) および Q _v /k (QV) の値 Sample input : AV(1) = 1.8 × 10 ¹⁴ (kp - (°K) ^{1/2} /hr) QV(1) = 142,600 (cal/mol) / 6.025 × 10 ²³ / 3.297 × 10 ⁻²⁴ = 7.1787 × 10 ⁴ (°K)	
	2	F	PVM (2, I)	F/L ²		
	3	F	PVM (3, I)	F/L ²		
	4	F	AV(I)	kp - (°K) ^{1/2} /hr		
	5	F	QV(I)	°K		
	6	F	AS(I)	cm ³ - °K/hr	文献(2)の (4, 5, 3) 式 (気孔の Surface diffusion) $\rho_s = \frac{A_s}{r T^2} \cdot \frac{dT}{dr} \exp(-Q_s/k/T)$ に使用される A _s (AS) および Q _s /k (QS) の値 Sample input AS(1) = 22.5 × 10 ³ (in ³ /°R/hr) = 2.0484 × 10 ⁵ (cm ³ /°K/hr) QS(1) = (2/3) · (Q _v /k) = 4.7858 × 10 ⁴ (°K)	
	7	F	QS(I)	°K		
	8	F	RGB(I)	cm	気孔の移行において、結晶粒界で trap され移動しない限界の気孔半径 (温度 2000 °K, 温度勾配 1000 °K/cm の条件下)	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 400					[例] CYGRO-3 sample input 2.25×10^{-5} in = 5.715×10^{-5} cm	
I 500	奇数 偶数	I F	KRB (KR) RB (RQ)	— —	このカードは物質 I 内の第 1 セグメントの半径方向出力分布の相対比を与える。 ^{*1} 与え方はカード I 1JK で指定する半径方向メッシュ点とそのメッシュ点での相対出力比の組とする。 半径方向メッシュ点番号 上記メッシュ点における相対出力比 ^{*2} (not nalmalized) (例) ^{*3} 1500, 1, 0.095, 2, 0.96, 4, 0.98, 6, 1.0 * 2500, 1, 1.0, 4, 1.0 * (注) *1), I 50L 00 のカードでこの出力比の修正が行なわれない場合には、このカードで与える出力比が全セグメントについて設定される。 使用される。 *2), プログラム内で normalize が行なわれる。 *3), メッシュ点番号は小さいものから大きいものへと入力する。すべてのメッシュ点の値を与える必要はないが、最初と最後のメッシュ点とその出力比は必ず与えねばならない。	
I 50L00					このカードは物質 I 内のセグメント L 番以上の半径方向出力分布の相対出力比を与える。 ^{*1} 入力法は I 500 と同じである。 カード番号は 6 桁で、その構成は	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks	
I 500L00	奇数 偶数	I	KRB		$I \times 10^4 + L \times 10^2$ $I = 1 \text{ or } 2$ $L = \text{セグメント番号} (2 \leq L \leq 20)$ である。 半径方向メッシュ点番号。 上記メッシュ点における相対出力比。 (注)*1, セグメントのL番目の出力比を与えるばかりでなくL番目以上のセグメントの出力比をもこのカードで与える出力比に設定される。(L+1)番のセグメントでは出力分布を変更したいときにはI50L100のカードを必要とする(L ₁ = L+1)。		
		F	RB				
I 6J0	1	F	TM(J, I)	°C	J = 1~4, 温度依存の物性値, 熱膨張係数等を入力するカード。 J = field 1 で入力する温度に対応する。 field 2 以下, および次の I 6JK カードで読込まれる物性値の設定温度。		
	2	F	ATM(J, I)	1/°C	熱膨張係数。		
	3	F	ETM(J, I)	kg/cm ²	ヤング率。		
	4	F	UTM(J, I)	—	ポアソン比。		
	5	F	CTM(J, I)	w/cm-°C	熱伝導率。		
	6	}	F	VPM(L, J, I)	—	固体部のスウェリング率を求めるにさいし使用される補正係数RVP (P _{ave} , T _{ave}), 文献(2)の(4, 4, 4)式参照。	
	7					L = 1~3 で, I 400 field 1~3 で入力される圧力の設定値に対応し	
	8					なければならぬ。	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 6 J 0					Jはこのカード field 1 で入力される温度 TM (J, I) の設定値に対応しなければならぬ。	
I 6 J K	1	I	MEB 16 (K, J, I)	-	<p>J = 1 ~ 4, K = 1 ~ 3, 温度および照射量等に依存する物性値の入力カード。 { J は温度設定値番号 (I 6 J 0 参照), K は核分裂速度, 照射量等 (800 ~ 801 参照) の設定値番号に対応。 }</p> <p>この入力カードで入力する変数の入力法および入力データの処理方法を指定するオプションキーワード。</p> <p>MEB 16 (K, J, I) = (IDC) × 10 + (IDP) で表わされる 2桁までの整数。ただし, IDC, IDP は 0 または 1 とする。</p> <p>上記, IDC, IDP を使用し, 以下の field 順番号を作成する。すなわち,</p> <p style="margin-left: 40px;">I 2 = 2</p> <p style="margin-left: 40px;">I 2A = I 2 + IDC</p> <p style="margin-left: 40px;">I 3 = I 2A + 1</p> <p style="margin-left: 40px;">I 3A = I 3 + IDC</p> <p style="margin-left: 40px;">I 4 = I 3A + 1</p> <p style="margin-left: 40px;">I 4A = I 4 + IDP</p> <p style="margin-left: 40px;">I 5 = I 4A + 1</p> <p style="margin-left: 40px;">I 5A = I 5 + IDP</p> <p style="margin-left: 40px;">I 6 = I 5A + 1</p> <p>とする。</p> <p>[例] MEB 16 (K, J, I) = 0, すなわち, IDC = IDP = 0 のときは</p>	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 6JK					MEB 16, CSTM, GSTM, PSTM, QSTM, WSTM の順で入力すればよい。	
	I 2	F	CSTM(K, J, I)	—	クリープ歪速度 ($\dot{\epsilon}_c$) は, $\dot{\epsilon}_c = 10^0 (\sigma/70.31)^G$ の形で計算される。	
	I 2A	F	SCG 1 (K, J, I)	kg/cm ²	IDC=0 のときは, SCG 1, SCG 2 の入力は不要で CSTM, GSTM の値が上式 C, G の値として入力される。	
	I 3	F	GSTM(K, J, I)	—	IDC=1 のときは, CSTM= $\dot{\epsilon}_{c1}$, GSTM= $\dot{\epsilon}_{c2}$ としてクリープ	
	I 3A	F	SCG 2 (K, J, I)	kg/cm ²	歪速度, SCG 1= σ_1 , SCG 2= σ_2 としてその歪速度を与える応力を入力する。	
					プログラム内で, 次のような処理を行い, CSTM, GSTM を設定する。	
					$GSTM = \log_{10} (\dot{\epsilon}_{c2} / \dot{\epsilon}_{c1}) / \log_{10} (\sigma_2 / \sigma_1)$	
					$CSTM = \log_{10} \dot{\epsilon}_{c1} - GSTM \cdot \log_{10} (\sigma_1 / 70.31)$	
	I 4	F	PSTM(K, J, I)	—	加工硬化歪 (ϵ_{SH}) は $\epsilon_{SH} = 10^P (\sigma/70.31)^Q$ の形で計算される (σ =応力)。	
	I 4A	F	SPQ 1 (K, J, I)	kg/cm ²	IDP=0 のときは, SPQ 1, SPQ 2 の入力は不要で, PSTM, QSTM の値が上式 P, Q の値として入力される。	
I 5	F	QSTM(K, J, I)	—	IDP=1 のときは, PSTM= $\epsilon_{SH,1}$, QSTM= $\epsilon_{SH,2}$ として歪, SPQ 1= σ_1 , SCG 2= σ_2 としてその歪を与える応力を入力する。		
I 5A	F	SPG 2 (K, J, I)	kg/cm ²	プログラム内で, 次のような処理を行い, PSTM, QSTM を作成する。		
				$QSTM = \log_{10} (\epsilon_{SH,2} / \epsilon_{SH,1}) / \log_{10} (\sigma_2 / \sigma_1)$		
				$PSTM = \log_{10} \epsilon_{SH,1} - QSTM \cdot \log_{10} (\sigma_1 / 70.31)$		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
I 6 J K	I 6		WSTM(K, J, I)	—	歪硬化指数, 歪硬化クリープ法則が $\dot{\epsilon}_c = 10^x (\sigma / 70.31)^S \epsilon_{SH}^W$ で表わされるとしたときのWを入力する。	
I 7 0 0					クリープ歪速度の計算においてNichols のモデル ¹⁰⁾ を考慮するため に必要なデータを入力する。 クリープ歪速度の計算に $\dot{\epsilon}_{climb} = D \sigma^n \phi$ (a) $\dot{\epsilon}_{gr} = B \sigma \phi + B' \sigma \phi \exp \{ -k (nvt) \}$ (b) の2式が追加される。 未照射で, 加工硬化がないときの歪 (最低歪)。 1×10^{-10} 以下の値が入 力されたときは, $1 \times 10 \times 10^{-10}$ としてプログラム内で使用される。あまり小 さな値が入力されるとエラーの原因となる。sample input EINT(I) = 1.0×10^{-4} (0.01% strain) 上記(a)式の係数Dの値。 sample input CPOW(2) = 2.46×10^{-37} 上記(a)式の係数nの値, XPOW(2) = 4 上記(b)式の係数Bの値, CLIN(1) = 2.928×10^{-25} 上記(b)式の係数B'の値。 上記(b)式の係数kの値。 加工硬化歪の回復歪速度は $\dot{\epsilon}_R = K \epsilon_{SH} \exp(-Q/R/T)$ (c) で計算される。 上記(c)式の係数Kの値。Sample input	
	1	F	EINT(I)	cm/cm		
	2	F	CPOW(I)			
	3	F	XPOW(I)			
	4	F	CLIN(I)			
	5	F	BDS(I)			
	6	F	XK(I)			
	7	F	FKC(I)	hr ⁻¹		

本文 4.4.2 節参照

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
1700	8	F	QACT(I)	cal/mole	$FKC(1) = 2.95 \times 10^7$, $FKC(2) = 7.176 \times 10^7$ 上記(c)式の係数Qの値。Sample input $QACT(1) = 6.89 \times 10^4$, $QACT(2) = 2.941 \times 10^4$	
5000	1	I	NUT(1)	—	燃料スウェリングのデータ設定点数。 (その1) NUT(3)=1のとき, 燃料スウェリングの履歴データ $\epsilon_{vs}(m)$ は $\epsilon_{vs}(m) = F_m \{ \sum (\dot{F} \Delta t / TD) \} \times TD + 0.0025 \times 10^{-20} (\sum \dot{F} \Delta t)$ で与えられるとする。ここで $\sum \dot{F} \Delta t = \text{fission rate } (\dot{F}) \text{ の時間積分値}$ $TD = \text{平均初期燃料密度}$ $F_m = \text{input card 5002 で読込まれる値}$ である。入力値 NUT(1) は input card 5002 で F_m を読み込むときの $F_m(f)$ と f の対の数。 (その2) NUT(3)=2のとき, 燃料のスウェリング率としてプログラム組込みの値が使用される。こ のとき, NUT(1)=31とする。 被覆照射成長のデータ設定点数。 (その1) NUT(4)=1のとき入力されねばならない。 $NUT(4) = 1$ のとき, input card 5003 で $f, F_c(f)$ のペアを読み 込む必要がある。そのペアの数として NUT(2) を設定する。 input card 5003 で, $f, F_c(f)$ の値を用いて被覆照射成長履歴データ	Table 3 参照 § 4.2 参照
	2	I	NUT(2)	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
5000	3	I	NUT(3)	—	<p>$\epsilon_{vs}(c)$ を $\epsilon_{vs}(c) = F_c(F)$ として定める。ここでFはhistoryとして与えられる照射量(nvt)である。 燃料スウェリング率に関する option key。 NUT(3)=0, 燃料スウェリング率はhistory card 605で与えられねばならない。 NUT(3)=1, 先のNUT(1)の項で記したようにinput card 5002から$\Delta\dot{F}\Delta t$と$F_m(\Delta\dot{F}\Delta t)$のペアが読み込まれ、NUT(1)の項の式を使用して各履歴ステップについての燃料スウェリング率が計算されhistory dataとして設定される。 NUT(3)=2, プログラム内蔵の燃料スウェリング率データが使用されることになる。 被覆照射成長に関する option key。 NUT(4)=0, 被覆材の照射成長率はhistory card 608で与えられねばならない。 NUT(4)=1, 先のNUT(2)の項で記したようにinput card 5003から読み込んだ値を基に被覆材照射成長率のhistory dataが設定される。 NUT(4)=2, プログラム組み込みの被覆材照射成長率計算式(C-type)から被覆材照射成長率のhistory dataが設定される。 NUT(4)=3, 上記NUT(4)=2と同じであるが、計算式としてA-typeを使用する。</p>	§ 4.2 参照
	4	I	NUT(4)	—		

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
5000	5	I	NUT(5)	—	<p>fission rate の history に関する option key。 NUT(5)=0 のとき, input history card 605 で fission rate history が与えられなければならない。 NUT(5)=1 のとき, fission rate history は燃料棒出力 (RQT(J)) より, 次式で設定される。 $\dot{F} = QG(1) \cdot RQT(J) \cdot C_1 \quad (a)$ ここで, $QG(1)$=input card 1000, field 6 で入力される全出力に対する燃料の出力比 C_1 = input card 5001 field 1 で入力される燃料棒出力を fission rate に変換する係数。</p>	
	6	I	NUT(6)	—	<p>nvt history に関する option key。 NUT(6)=0 のとき, input history card 606 で nvt history が与えられなければならない。 NUT(6)=1 のとき, nvt history は fission rate history より, 次式で設定される。 $FST(J, 2) = (\sum \dot{F} \Delta t) \times C_2 \quad (b)$ ここで, C_2 = input card 5001 field 2 で入力される変換係数。 燃料棒出力 (線出力密度) の修正使用に関する option key。 NUT(7)=0 のとき, 燃料棒出力の history は history card 602 で与えられなければならない。 NUT(7)=1 のとき, 燃料棒出力の history は次のように修正され使用される。</p>	
	7	I	NUT(7)	—	$RQT(J) = \frac{\text{Values RQT(J) on history card 602}}{1 - C_3 \times (\sum \dot{F} \Delta t)} \quad (c)$	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks								
5000					<p>ここで、$C_3 = \text{input card 5001, field 3}$ で入力される係数。 $\text{NUT}(7) > 1$ のとき、燃料棒出力の history は次のように修正され、使用される。 $\text{RQT}(J) = (\text{Values RQT}(J) \text{ on history card 602}) \times F_q (\Delta \dot{F} \Delta t) \quad (d)$ ここで、$F_q (\Delta \dot{F} \Delta t)$ は input card 5004 で読込まれる F_q の値から設定される値。 $\text{NUT}(7) = M7 (M7 > 1)$ の値は input card 5004 で読込まれる f、F_q (f) のペアの数でなければならない。 未使用、$\text{NUT}(8) = 0$ とすること。</p>									
5001	8	I	NUT(8)	—		(a), (b), (c) 式は 5000 中の式番号								
	1	F	CFUEL	f./w-sec	<p>(a) 式に使用する係数 C_1、燃料棒出力を核分裂速度に変換する係数。 (例) 3.1×10^{10} (fission/w-sec)</p>									
	2	F	CCLAD		<p>(b) 式に使用する係数、核分裂速度を高速中性子束に変換する係数。 $\text{CCLAD} = C_2 / \Sigma_f$、$C_2 = \text{熱中性子束に対する高速中性子の割合}$、$\Sigma_f = \text{燃料の巨視的核分裂断面積 (cm}^{-1}\text{)}$。 (例) $\Sigma_f = N_A \cdot \sigma_f$、$N_A = \text{原子数密度 (n/cm}^3\text{)}$、$\sigma_f = \text{核分裂断面積 (cm}^2\text{)}$。 UO_2 95% T.D. 焼結ペレットの場合、N_A は次の如き値である。</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Enrich (%)</th> <th>N_A (atms/burn cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.0</td> <td>4.6×10^{-4}</td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>5.8×10^{-4}</td> </tr> <tr> <td>3.0</td> <td>7.0×10^{-4}</td> </tr> </tbody> </table>	Enrich (%)	N_A (atms/burn cm)	2.0	4.6×10^{-4}	2.5	5.8×10^{-4}	3.0	7.0×10^{-4}	
Enrich (%)	N_A (atms/burn cm)													
2.0	4.6×10^{-4}													
2.5	5.8×10^{-4}													
3.0	7.0×10^{-4}													

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
5001	3	F	PCOR		<p>C_2 は, LWR では約3程度と考えられる。ただし, 中性子エネルギーを1 MeV以上とすると,</p> <p>$C_2 = 0.8$ (PWR), $C_2 = 1.0$ (BWR) 程度と考えられる。</p> <p>(c) 式に使用する係数。</p>	
5002	奇数 偶数	F F	TBX (1, 1) TBY (1, 2)	f./cc/sec —	<p>このカードは, カードNo 907, field 3の HIST = 1で, No. 5000, field 3の NUT(3)=1のときに必要である。</p> <p>このカードの入力値より, 燃料ペレットのスウェリングに関する履歴データが作成される。</p> <p>fission rate (f./cc/sec) と体積膨張率 (スウェリング, $\Delta V/V$) の対が NUT(1)個与えられねばならない。</p> <p>ただし, NUT(1)はカードNo. 5000, field 1の入力値でこの場合, $NUT(1) \leq 10$ でなければならぬ。</p> <p>fission rate, I = 1, NUT(1) 体積膨張率, I = 1, NUT(1)</p>	Table 3 参照
5003					<p>このカードは, カードNo. 907, field 3の HISTが1で, No. 5000, field 4の NUT(4)が1のときに必要である。</p> <p>このカードの入力値より, 被覆の体積膨張率に関する履歴データが作成される。</p> <p>Fast neutron fluence と体積膨張率 ($\Delta V/V$) の対が NUT(2)個与えられねばならない。ただし, NUT(2)はカードNo. 5000, field 2の入力値。</p>	Table 3 参照

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
5003	奇数 偶数	F F	TBX (I, 1) TBY (I, 2)	n/cm ² —	fast neutron fluence } 被覆の体積膨張率 } I = 1, NUT(2) (NUT(2) ≤ 10)	
5004					このカードは、カード No 907, field 3 の HIST が 1 で、No 5000, field 7 の NUT (7) が 1 以上 (NUT (7) > 1) のとき必要である。 このカードの入力値を使用して、履歴データの燃料棒線出力密度が修正される。 燃焼度 (f./cc) とその燃焼度における出力修正係数の対が NUT (7) 個与えられなければならない。 燃焼度 } 出力修正係数 } I = 1, NUT (7) I < NUT (7) ≤ 10	Table 3 参照
5005 5006					} FREC - 4 A の現段階では使用せず。	
bbbb					履歴データ (最大 5 ステップ) をさらに継続させて計算したい場合、card No プランクを準備し、一旦入力を打ち切り、継続の履歴データを入力させることができる。 [例] bbbb, CONT	
990K	1~5	I	KAKE (J, K)		J = 1, 5, K = 1, 3 プログラム開発途中において、計算中の状態を知るために用意されたオプション・キー・ワード。	

Card No.	Field	Type	Variable symbol	Unit	Explanation	Remarks
990K					<p>KAKE (J, K), K = 1, 5 で入力される。 入力の数値は 8 桁の整数である。 9901 と 9902 で入力の KAKE (J, K) (J = 1, 5, K = 1, 2) の各整数は、その桁によって臨時の出力プリントを行う副プログラムを指定する。その桁に含まれる数値は出力プリントの程度を指定する。 9903 で入力の KAKE (J, 3) は照射履歴データに対応して、出力プリントを行う時点を指定する。 計算結果にエラーが発生するときの外、この変数は、すべて 0 で入力のこと。 [例] 9901, OR 5 9902, OR 5 9903, OR 5</p>	
9999					<p>入力データの最後にカード番号 9999 を必要とする。 この番号のカードにより、入力データが終了する。 [例] 9999* JOB END *</p>	

Appendix C プログラムリスト (マイクロフィッシュ)

FREG-4Aのプログラムリストをマイクロフィッシュで収録している。巻末に添付する。