

JAERI-M

5628

燃料照射挙動解析プログラムの概要

1974年3月

原山 泰雄・森島 淳好・泉 文男

藤田 操・山田 礼司・栗山 實

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

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

燃料照射挙動解析プログラムの概要

日本原子力研究所東海研究所安全工学部

原山泰雄・森島淳好・泉 文男

藤田 操・山田礼司・栗山 實

(1974年2月9日受理)

燃料棒の照射挙動を解析する計算機プログラムの必要性について述べた後、現在までに開発されたプログラムの概要について解説した。

Computer Programs for the Analysis of Fuel-Rod Behaviors

Yasuo HARAYAMA, Atuyoshi MORISHIMA, Fumio IZUMI,  
Misao FUJITA, Reiji YAMADA and Minoru KURIYAMA

(Received February 9, 1974)

Availability and necessity of the computer program for analyzing the behaviors of fuel rods are described, with features of the programs.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 燃料照射挙動解析プログラム .....	1
2.1 概 要 .....	1
2.2 安全基準 .....	1
2.3 燃料棒の照射挙動 .....	2
2.4 計算モデル .....	5
2.5 計算プログラム .....	6
3. 燃料照射挙動解析プログラムの開発の現状 .....	9
3.1 プログラム開発の経緯 .....	9
3.2 燃料挙動解析プログラムの概要 .....	10
3.3 プログラムの計算の流れ, 入出力項目 .....	21
4. 燃料照射挙動解析プログラム開発に関する今後の課題 .....	65
5. プログラム関連文献リスト .....	69

## 1. はじめに

燃料の安全性を確保するということは、燃料被覆管が破損してしまうような諸限界に安全率を見込んで設計限界としてとり入れることである。この設計限界を調査、検討する手段の1つとして燃料照射挙動解析プログラムの開発が進められている。

この報告書では、これら燃料照射挙動解析プログラムの必要性、プログラムの種類等について述べ、燃料安全第一研究室において、現在開発中のプログラムのいくつかについてその概要を解説した。

## 2. 燃料照射挙動解析プログラム

### 2.1 概 要

燃料照射挙動解析プログラムとは「燃料棒の照射履歴に従い各時点における燃料棒各部分の温度、応力、変位等の状態を計算によって推定する」ものである。軽水炉の定常運転状態における燃料挙動において、安全上燃料の性能を制限する要因は、

- 1) 燃料  $\text{UO}_2$  ペレットの最高温度
- 2) 燃料被覆管の塑性歪

である。このほか、最小限界熱流束比 (MCHF R, MDNBR) も制限因子であるが、軽水炉の使用条件では、後者の制限因子より、前の2者が厳しい条件となるので、これらが主として安全評価基準の対象となる。

以上は、燃料棒の定常状態の場合であって、LOCAの条件を満足するように燃料棒の運転状態を定めれば、これによる温度条件は、先の1)の条件よりさらに厳しくなる。

### 2.2 安全基準

#### 2.2.1 燃料 $\text{UO}_2$ ペレットの最高温度

定常運転時の燃料においては、燃料の中心温度が最高温度である。燃料棒の単位長さ当り出力  $P$  (W/cm) (Linear Heat Generation Rate) と燃料の表面および中心温度、 $\theta_s, \theta_c$  との間には、

$$P = 4\pi K(\theta_s, \theta_c)$$

$$K(\theta_s, \theta_c) = \int_{\theta_s}^{\theta_c} k d\theta$$

$k$  : 燃料の熱伝導率 (W/cm·C)

の関係がある。

燃料の表面温度は冷却水温度に被覆管表面から燃料表面までの熱抵抗による温度差を加算してえられる。通常の場合ペレット表面温度は500~600Cと推定される。燃料ペレット中心温度は、燃料棒の出力によって変化する。一方燃料  $\text{UO}_2$  ペレットの最高温度については「燃料の最高温度が設計出力において  $\text{UO}_2$  の溶融温度 ( $\approx 2800\text{C}$ ) 以下であること。」という設計

## 1. はじめに

燃料の安全性を確保するということは、燃料被覆管が破損してしまうような諸限界に安全率を見込んで設計限界としてとり入れることである。この設計限界を調査、検討する手段の一つとして燃料照射挙動解析プログラムの開発が進められている。

この報告書では、これら燃料照射挙動解析プログラムの必要性、プログラムの種類等について述べ、燃料安全第一研究室において、現在開発中のプログラムのいくつかについてその概要を解説した。

## 2. 燃料照射挙動解析プログラム

### 2.1 概 要

燃料照射挙動解析プログラムとは「燃料棒の照射履歴に従い各時点における燃料棒各部分の温度、応力、変位等の状態を計算によって推定する」ものである。軽水炉の定常運転状態における燃料挙動において、安全上燃料の性能を制限する要因は、

- 1) 燃料  $\text{UO}_2$  ペレットの最高温度
- 2) 燃料被覆管の塑性歪

である。このほか、最小限界熱流束比 (MCHF, MDNBR) も制限因子であるが、軽水炉の使用条件では、後者の制限因子より、前の2者が厳しい条件となるので、これらが主として安全評価基準の対象となる。

以上は、燃料棒の定常状態の場合であって、LOCAの条件を満足するように燃料棒の運転状態を定めれば、これによる温度条件は、先の1)の条件よりさらに厳しくなる。

### 2.2 安全基準

#### 2.2.1 燃料 $\text{UO}_2$ ペレットの最高温度

定常運転時の燃料においては、燃料の中心温度が最高温度である。燃料棒の単位長さ当り出力  $P$  (W/cm) (Linear Heat Generation Rate) と燃料の表面および中心温度、 $\theta_s, \theta_c$  との間には、

$$P = 4\pi K(\theta_s, \theta_c)$$

$$K(\theta_s, \theta_c) = \int_{\theta_s}^{\theta_c} k d\theta$$

$k$  : 燃料の熱伝導率 (W/cm·C)

の関係がある。

燃料の表面温度は冷却水温度に被覆管表面から燃料表面までの熱抵抗による温度差を加算してえられる。通常の場合ペレット表面温度は500~600℃と推定される。燃料ペレット中心温度は、燃料棒の出力によって変化する。一方燃料  $\text{UO}_2$  ペレットの最高温度については「燃料の最高温度が設計出力において  $\text{UO}_2$  の溶融温度 (≒2800℃) 以下であること。」という設計

基準が設けられている。これによって逆に燃料棒の線出力密度が制限されることになる。

### 2.2.2 燃料被覆管の塑性歪

定常運転中の燃料棒を考えると、被覆管には、冷却水圧による外圧、燃料棒内のF Pガス等による内圧、内外面の温度差による圧力が発生する。

燃料ペレットと被覆管内面は最初接触しないように設計されるが、照射の時間が経過すると $UO_2$ ペレットの熱膨張、クラックの発生、スウェリング等によって運転中ペレットの体積の増加がおこり、被覆管内面に接触する。これらの接触により、被覆管は歪をおこす。その歪は弾性限をこえるため塑性歪を生ずる。PWRのように冷却水圧が高い場合には、被覆管のクリープもこれに加わる。

塑性歪について「被覆管円周塑性歪が1%をこえないこと」が安全上の許容歪の目安とされ、実際の燃料設計においては、

1) 被覆管の内外圧および内外面温度差による応力は弾性解析によって求められる。

2) 燃料ペレットのクラック、スウェリング等による体積の増加(ギャップ、ディッシュの体積を除いたもの)が被覆管に変形を引き起すと仮定すると、そのときの歪量を知ることができる。

上記により安全が確認されるが、設計という立場から、安全側の数値を採用すること、ペレットと被覆管の接触力を考えない等のため、実際の燃料挙動とは異なる。

### 2.3 燃料棒の照射挙動

2に述べた二つの基準の内容、すなわち、燃料 $UO_2$ ペレットの最高温度と燃料被覆管の塑性歪とは独立なものではなく互に密接に関係している。以下、現在までに行なわれた実験、試験燃料棒の結果、経験された破損等をもとに、現時点における燃料棒の照射挙動を考える。

(Fig 2.1 参照)

1) 燃料棒は、製作時被覆管内面とペレット外面との間に間隙(ギャップ, Gap)が設けられている。このギャップは運転状態になるとペレットの熱膨張により小さくなる。最大ホットスポットにおいてペレットは被覆管内面に接触するであろう。

燃料の $UO_2$ ペレットは、また、その内部の高い温度勾配による熱応力のためクラックが発生する。クラックによっていくつかに分れた各ブロックは、被覆管内面に近づいて再配置(Relocation)すると考えられる。

熱膨張、クラックあるいはその再配置、ペレットのhour-glass状変形によって被覆管にペレットは接触する。被覆管との機械的相互作用(mechanical interaction)は被覆管の直径、長さの増加として現れる。またペレットとペレットの接した端面の被覆管部分にridgingが現れる。

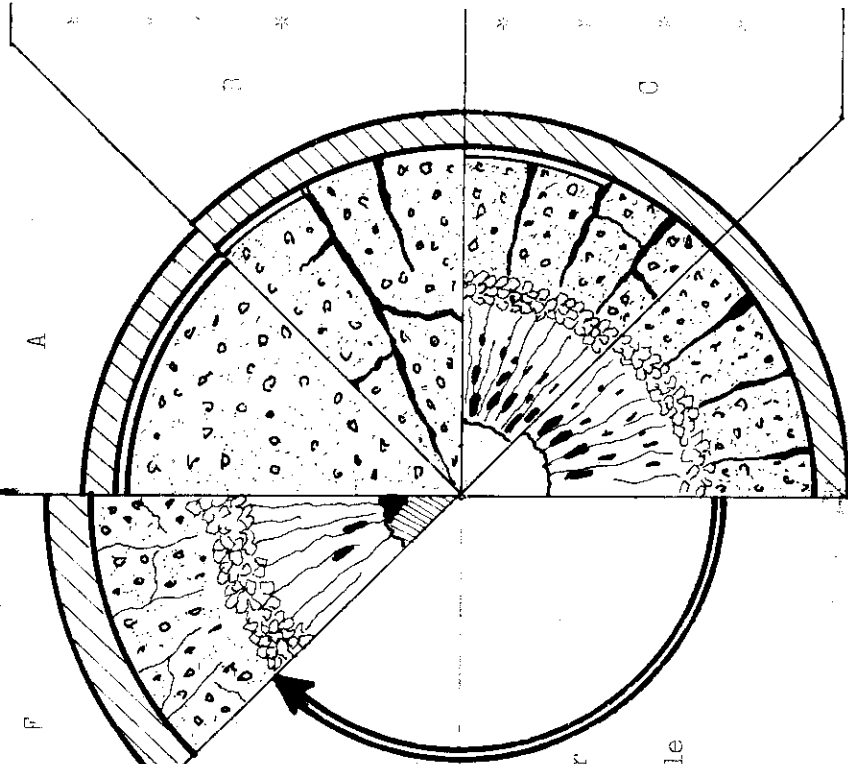
一方、被覆管にも、外面に流れる冷却水圧による外圧、燃料棒内のF Pガス等による内圧、内外面の温度差、ペレットとの接触力等にもとづく応力が発生する。これらの応力下において被覆管は、クリープあるいは塑性流れを起し、永久歪が被覆管に残ることになる。

2)  $UO_2$ ペレットは出力状態になると間もなく、製作時の気孔(Pore)の一部が消失し、密度の上昇(焼しまり, Densification)がおこる。



- \* Heat Rating Reduced by Fissile Depletion
- \* Largest Holes and Old Cracks Replaced by Fine Gas Bubbles and Inclusions
- \* Cladding Strain due to Fuel Swelling

Fresh Fuel



Time at Power  
Fission Products  
Fill the Available  
Void

- \* Radial and Circumferential Cracks from Thermal Shock
- \* Starter Cracks Cover Inner
- \* Gap Partly and Irregularly Closes from Thermal Expansion and Cracking
- \* Reduction in Thermal Conductivity because of Cracks
- \* Columnar Grain Formation by Lenticular Pore Migration
- \* Central Void Filled from Pores Displaced from Columnar Grain Region
- \* Crack & Hole Healing to Beyond Grain Growth Region
- \* Gap Unchanged from state "B" (by Densification)
- \* Gap Closes Further
- \* Gap Completely Closes from Xe and Desorbed Gas Contamination
- \* "Stable" Residual Crack Pattern Achieved After several Cycles

- \* Grain Growth Proceeds
- \* Central Void Diameter Increases Continuously

STRUCTURE EVOLUTION IN AN OXIDE FUEL PIN

この焼しまりにより、燃料ペレットと被覆管のギャップは少し大きくなり、ペレットと被覆管の熱伝達性能が低下する。また $UO_2$ ペレットスタックの縮少は燃料棒の線出力密度を増加させる。ギャップ熱伝達性能の低下、線出力密度の上昇は、燃料棒により多くの蓄積エネルギーを蓄積し、LOCA時の安全評価で問題となる。そして燃料棒に出力スパイクやつぶれ部を出現させる可能性を作り出す。

3) 燃料の照射が進むと、先に生じたクラックのうち燃料の中央部分のクラックは、燃料温度の上昇によって癒着(healing)する一方クラックのあるペレット外周部との境界にStrong unbroken ringを形成する。

燃料内の高温領域で気孔は、燃料内の温度勾配によって高温側に移動する(pore migration)。この結果として、ペレット中心に中心孔(centre void)ができる。さらに気孔が移動した後は、密度の高い等軸晶、柱状晶が形成される。

4) 高燃焼に近づくと共に、燃料ペレットは、スウェリングにより体積膨張を起す。この体積膨張は、中心孔、クラック等の間隙を埋めつくし、被覆管を内側から押し拡げる作用をする。 $UO_2$ ペレット内では、ペレットの表面と中心との温度差による熱応力、接触していれば被覆管からの圧力による応力、ならびに高温によるクリープあるいは塑性流れが起り応力の緩和がおこる。

## 2.4 計算モデル

燃料棒内の状態を計算によって推定することを考える。燃料被覆管の変形を正確に知るためには、 $UO_2$ ペレットの熱膨張、スウェリング、クリープ、被覆管の熱膨張、クリープ等が解っていないなければならない。これらの物性値は、温度のほか燃焼度、照射量に依存している。したがって、これらの変形を求めるには、まず、最初に温度分布が分っていないなければならない。燃料温度、特に $UO_2$ ペレット内の温度分布を計算するには被覆管内面と $UO_2$ ペレット外面間の熱伝達率(ギャップ熱伝達率)が必要である。

ギャップ熱伝達率は、

i) 被覆管内面と $UO_2$ ペレット外面間の距離(ギャップ)  
 ii) 被覆管内面と $UO_2$ ペレットが接触していれば、その接触力  
 iii) ギャップ中に含まれるガスの種類と、その温度、圧力  
 等に関係している。ここでギャップ寸法は、ペレットの熱膨張、スウェリング等によって決まるものである。このように温度分布と変形は互いに関係しており、一方のみを独立には決定できない。

ある照射履歴の燃料棒の与えられた条件下における状態の推定は、必要なパラメータの数がきわめて多く、また直接に各数値が求められず、繰返し計算が必要であるため手計算の範囲をこえる。このために電子計算機による計算プログラムの開発が行なわれてきた。

実際の燃料棒では照射前後のデータしか入手できないが、もし上記のようなプログラムができれば、照射中の燃料の状態を知ることができる。しかし、プログラムは一種の計算式の組み合わせであるから、計算に必要な全ての数値、計算式が分っていないなければならない。計算に採用した基礎式による数学モデル上の制約のほか、計算上必要な数値(特に物性値関係)には、未

確定なものが多い。そのため、プログラムを作成したとしても、

1) 数学モデル上の制約から計算できない事項も出てくる。たとえば、使用する基礎式が一次元(半径の関数)ならば、燃料棒の軸方向の変化を計算することはできない。また、燃料  $UO_2$  ペレットは一般に連続体として取扱われている。そのような連続体としたプログラムではクラックが発生したペレットの計算はできない。

2) 良く分っていない  $UO_2$  ペレット、被覆管の物性値等には、任意な数値を与えることになる。このような例として、 $UO_2$  ペレットからのFPの放出率、ペレットのクリープ計算の係数等がある。

このような訳で、プログラムが完成したからといって、直ちに燃料棒の挙動を解析できるとは限らない。プログラムの妥当性の判定は、計装燃料棒等の実験から得られたデータと計算結果が一致することである。プログラムとしては、実験等のデータに合致するように入力数値の変更を行なう必要が生じる。

その上、プログラムには、ある数値を少し変化させただけで計算結果に大きく影響を及ぼすようなものもあれば、たとえば入力値を20%変化させても、計算結果に1%の変化も表われないようなものもある。したがってプログラムの使用においては、入力データのチェック(sensitivity check, 感度解析)が十分行なわれなければならない。

燃料棒の挙動を完全に模擬できる計算プログラムは簡単に得られない。そこである一つの考え方のもとに計算対象、計算式、数式を選んでモデルを組み立てることになる。そのような方法は、計算対象、目的によってそれぞれ異なるので、各種のモデルが存在する。

## 2.5 計算プログラム

燃料棒の照射挙動を解析するプログラムで発表されているものを捨ってみると、FIGRO, CYGRO-I, II, III, STRIPE, BEHAVE-1, 2, SATURN-0, 1, LIFE-1, 2, CRASH, BRAV, FTB-4, COMETHE, ISUNE-1, などがある。また、最近になってCAPCON等が文献で紹介されている。

これらプログラムは、次の2種に分れるようである。すなわち、燃料棒内の温度分布を求めることを主たる目的にしているものと、燃料棒内各部分の応力、変位、歪等を求めることを目的にしているものである。

1) 燃料棒内の温度分布を求める場合に、被覆管内、燃料  $UO_2$  ペレット内の温度は、それぞれの熱伝導率を用いることにより計算できる。被覆管表面温度は、冷却水との温度差を Jens-Lottes, Dittus-Boelter の実験式によって計算することにより求められる。最も不確実な要素を含むものは、 $UO_2$  ペレット表面温度を決めるために必要な被覆管内面とペレット表面間の温度差である。この温度差を算出するためにギャップにおける熱伝達率が必要である。したがって、燃料棒内の温度分布を求めるプログラムでは、いかにギャップ熱伝達率を評価するかが問題となる。

2) 燃料棒内各部分の応力、歪、変位を求めるプログラムにおいては、しばしば温度分布を入力形式あるいは簡略化したものが多い。これは、

1) 応力、歪、変位等に関して温度の効果があまり大きくはない。

2) 他のパラメータ算出の精度を考慮したとき、温度のみ正確に算出してみても意味がない。

3) 温度分布と応力、歪の分布を同時に計算するプログラムはプログラムが大きくなるばかりでなく、計算に要する時間が長くなるため効率的でない。  
等によるのではないかと考えられる。

燃料棒の  $UO_2$  ペレットおよび被覆管について発生する歪の種類でプログラムに組込まれているものをまとめたものを Table 2.1 に示す。

3) Table 2.1 でも分るように、ほとんどの歪は温度依存性をもつ。燃料棒内の温度は、出力によって変動する。出力は燃料棒の照射履歴によって変る。燃料棒の照射挙動を考える場合、燃料棒のおかれた原子炉の運転履歴および照射履歴を考慮して解析しなければならない。

例えば、ギャップ中のガス組成も運転中の  $UO_2$  ペレットからの F P の放出により変化するので、ギャップに存在する混合ガスの熱伝導率は燃焼度に依存する。

プログラムに取入れられるこの種の履歴として、

1. 原子炉圧力
2. 冷却水温度
3. 燃料棒出力
4. 照射量、燃焼度

があり、これらの時間による変化が考慮される。

Table 2.1 燃料棒における歪について

歪の種類	歪を起す原因	関係のある物性値	影響を与える因子		備考
			燃料(UO <sub>2</sub> )	被覆管(2ry-2)	
体積の変化がある	燃しまり	密度( $\rho$ )	初期密度, Poreのサイズ, 分布, 燃焼度, ギャップサイイズ, デイシユの大きさ, F P ガス放出温度, 製造条件	照射	
	スリウエグ	密度( $\rho$ )			
熱歪	温度上昇	熱膨張係数( $\alpha$ )	温度	温度, 異方性	
照射成長	照射			異方性, 製造履歴	
弾性歪	冷却水圧 燃料棒内 圧, 温度 勾配(接 触力)	ヤング率(E) ポアソン比 ( $\nu$ )	温度	温度	
	クリープ	クリープ率( $\dot{\epsilon}$ )	温度, 燃焼度, 応力の大きさ, 応力下の時間	温度, 照射量, 異方性, 応力の大きさ, 応力下の時間	
塑性歪	応力	降伏応力( $\sigma_Y$ )	温度, 燃焼度	温度, 照射量	

### 3. 燃料照射挙動解析プログラムの開発の現状

#### 3.1 プログラム開発の経緯

燃料照射挙動解析プログラムの開発は昭和47年度から開始された。この種のプログラムは、先にも述べたように、既に多くのものが開発されている。それらのプログラムの中から、燃料棒の温度分布、ならびに被覆管の応力、変位を評価するのに適当で、しかも文献等による情報の入手し易いものとしてFIGR $\bar{O}$ とCYGR $\bar{O}$ を選定し、その調査が昭和46年度後半から始められた。

燃料棒の線出力密度が与えられた場合、燃料の温度分布を評価するための重要因子は温度、密度、燃焼度に依存する燃料の熱伝導率とギャップ熱伝達率である。FIGR $\bar{O}$ は燃料の熱膨張、スウェリング、被覆管の熱膨張、クリープ、およびプレナムガスの組成等を考慮してギャップ熱伝達率を評価し、燃料棒内各部分の温度分布を算出する。このプログラムは、内容の手直しおよび入力データの吟味により、燃料内温度を評価するのに適当なプログラムである。

CYGR $\bar{O}$ プログラムは、燃料および被覆管の応力、歪、変位を燃焼度、線出力密度の時間による変化に伴なって計算できるので、被覆管の変形を評価するのに適当なものである。

これらプログラムの内容の概要は後述の通りである。これらに相当するプログラムを作成し、現在一応の出力が得られる段階になった。

GAPCONプログラムはUSAECが、燃料の焼しまりに関して、ギャップ熱伝達率の評価上使用することを推奨しているものである。これは、ソースプログラムが公表されたのでFACOM 230-60ならびにCDC-6600用に変換し第一段階の出力結果が得られた。

FIGR $\bar{O}$ は1ケースの計算時間がFACOM 230-60で約2秒であり、入力データも比較的少なく小廻りのきく利点がある。しかし、入力のスウェリングの数値等にかなり実験に裏付けされたデータが必要である。また、応力、変位の計算法には不備な点がある。CYGR $\bar{O}$ は応力、変位の計算方法は、かなり詳細に扱われている。しかし計算に必要な入力データの種類が多く、かつ実験によらねばならない入力項目が多いこと、および時間ステップを細分すると計算時間も10分を越すので、多くのケースを手軽に計算するのには不利である。

プログラムSTRIFEはスウェリングは考慮されていないが、クラックモデルを採用し、燃料を塑性領域、弾性領域、クラック領域に分けて、応力、変位計算を行う。計算時間は、1ケース10秒ないし30秒で、使用法によりFIGR $\bar{O}$ 、CYGR $\bar{O}$ の中間的存在として、比較検討用に使用すると便利である。そこでFIGR $\bar{O}$ 、CYGR $\bar{O}$ と共に作成した。

上記FIGR $\bar{O}$ 、CYGR $\bar{O}$ 、STRIFEのソースプログラムは入手できないので、独自にこれらに相当するプログラムを作成した。オリジナルとはかなり相違すると考えられるので、それぞれFREF-1、FREC-1、FRES-1と名付けた。

またGAPCONはソースプログラムは入手できたが、単位系にフートポンド、CGSが混用されていること、また主プログラムがFORTRANカードで600枚以上あること等のため手直しに不便であった。そこで、主プログラムを8ブロックからなる副プログラムに分割した。さらに温度分布のグラフを作成する副プログラムを追加した。単位系もCGS系に統一した。

これら改造後のGAPCUNをFREG-1と呼ぶことにした。

### 3.2 燃料挙動解析プログラムの概要

FREF-1, FREG-1, FREG-1は、それぞれ、FIGRO, CYGRO, GAPCONに相当するプログラムである。以下にこれら原型プログラムについて知りえたことを紹介する。また、今後のプログラム開発の上で有益と考えられるCYGRO-Ⅲについて付記する。

#### (1) FIGROプログラム

##### 1) 概 要

Bettis原子力研究所で開発された計算プログラムFIGROは、円筒型酸化物燃料のスウェリングの解析と半径方向温度分布の計算のために作られた。

燃料は、中空または中実のいずれのペレットでもよく、計算を簡単にするために基本的に1または2の半径方向領域をとることができる。

燃料の熱伝導率は、温度、燃焼度、気孔率の関数としている。被覆管の表面を通る熱流束と、燃料中心あるいは内面の温度のいずれかを熱伝導方程式の境界条件とすることができる。もし、後者の境界条件を与えると、それを前者に変換して用いる。

燃料スウェリングは、温度、燃焼度、核分裂速度、圧力の関数とする。

FIGROの主要な仮定はつぎのとおりである。

- a) スウェリングは燃料棒の運転履歴と無関係で、燃料棒の燃焼度だけに依存する。
- b) ギャップにおける境界での熱伝達は、Version 1では熱伝達係数を、Version 2ではRoss & Stouteの式を変形して使用している。
- c) 軸方向の熱の移動は無視する。
- d) 計算は軸対称を前提になされる。
- e) 燃料の熱応力によるクラックは考慮しない。

基本的な計算手順は、温度分布と、スウェリングによる体積と気孔率の変化の計算とを組合わせたループからなっている。したがって、つぎのようなステップに分けることができる。

- a) 初期の燃料寸法と気孔率にもとづく温度分布の計算
- b) この温度分布にもとづく燃料スウェリングの計算
- c) スウェリングに許される寸法と気孔率による補正
- d) 適合する寸法と気孔率にもとづく温度分布の再計算
- e) ふたたびb)にもどる。

この反復計算は収束するまで、すなわち、引き続いて行った2つの計算値が与えられた限界値内になるまでくり返される。(Fig 3.1)

最終的な燃焼度の計算に必要なインプットはつぎのとおりである。

- 初期寸法 (燃料と被覆管の内径・外径・ギャップ, 中心チャンネル, 燃料内の第1または第2領域)
- 初期気孔率
- 最終外圧
- 冷却材温度 (冷却材は水)

- 被覆管表面の熱流束（または燃料中心の温度）
- 最終燃焼度
- 核分裂速度
- 被覆管内の発生熱
- 被覆管の熱伝導率

FIGROではその目的から応力解析は行なわれないので、燃料と被覆管の機械的相互作用の問題はとり扱われない。

## 2) スウェリングモデル

FIGROではガス状の核分裂生成物によるスウェリングのモデルを選ぶことができる。いずれも、スウェリングは運転履歴に関係なく、計算の時点での温度と燃焼度の関数であるとしている。

第1のモデルは、FPガスの気泡の数と大きさを一定と仮定し、それらに理想気体の法則が適用できるという考えかたにもとづいている。

第2のモデルは、結合によって気泡の成長を認めるGreenwood & Speightの考えにもとづいている。気泡の移動は、気泡表面からの燃料原子の拡散によって起る。理想気体の法則の代わりにVan der Waalsの状態方程式を用いる。気泡内の圧力は、表面張力と外圧によって決定される。

必要に応じて、FPガスの放出によるスウェリング効果の軽減もプログラムに含めることができる。FPによるスウェリングを考慮した単純な数式が使用されている。

## 3) 温度分布

温度分布の計算は冷却材の温度から始まる。被覆管表面の熱流束を基礎にして、冷却材と被覆管の境界層、被覆管、燃料と被覆管のギャップまたは密着層、および燃料（2領域に分割もできる）、を通過する各段階の温度上昇を計算する。この方法では、被覆管内のすべての発熱を計算に含めることが可能である。境界層の熱伝達は、さきにも述べた熱伝達係数を用いて計算する。ギャップ熱伝達は、Version 1では熱伝達係数を、Version 2ではRoss & Stouteの式を用いて計算する。酸化燃料中の熱的状態の決定に用いられる方程式は、初期気孔率の影響のほかに、100%密度燃料の熱伝導に対するスウェリングの効果を考慮している。

## 4) スウェリングによる寸法と気孔率の変化

スウェリングによって、燃料の製造気孔率と軸方向および半径方向の寸法が変化する。適当なパラメータを用いることにより、スウェリングの様子とその影響の許容範囲を決定することができる。

通常はつぎの4種の計算を必要に応じて遂行することができる。

- a) 製造時の気孔率へのスウェリング
- b) 軸方向へのスウェリング
- c) 半径方向の外側へのスウェリング
- d) 中空ペレットの場合は半径方向の内側へのスウェリング

これらの計算には、上記のa), b), c), d)の順序、あるいはb), c), d), a)の順序の2種が



用意されている。

入力パラメータの決定には、燃料棒についての慎重な検討から求められた推定、実験的観察による補正、さらにCYGROのような広範なプログラムによる計算との比較によって裏づけされるべきである。

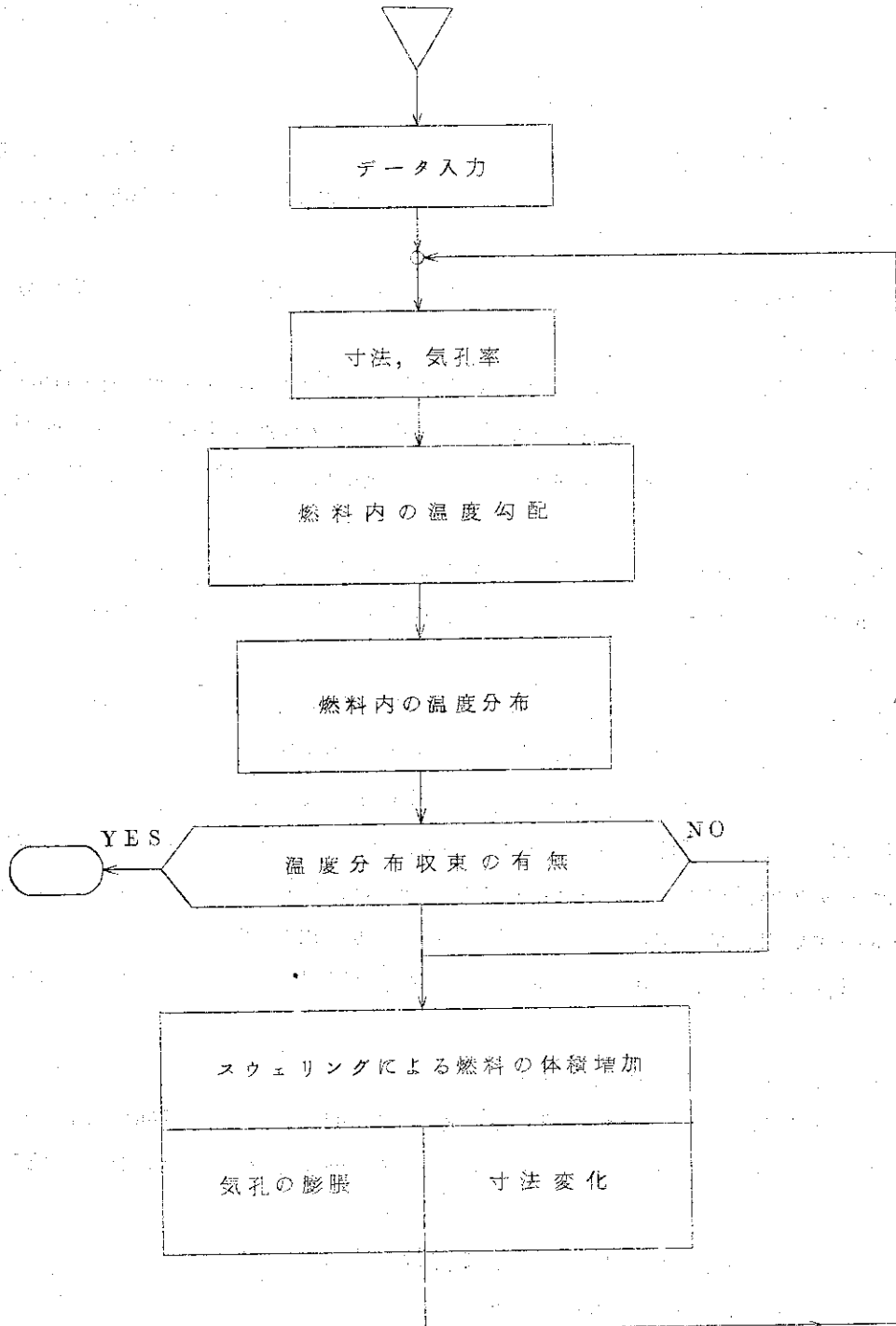


Fig 3.1 FIGROのフローチャートの概略

## (2) GYGRO-II プログラム

## 1) 概 要

ウェスチングハウス社で開発された GYGRO (Stress Analysis of the Growth of Cylindrical Fuel Elements) には、その開発段階により I, II, III がある。

プログラムの主たる目的は、被覆管と燃料の接触の有無によって気孔を有する燃料のスウェリングがどう変化するかを知ろうとするものである。気孔のある燃料のスウェリングの問題を統一された力学的取扱いで処理する CYGRO は、燃料の体積の平衡にもとづく従来のプログラムに比して、きわめてユニークなプログラムである。それ故、次のような現象の取扱いは、燃料に弾塑性の理論を適用しうるときにのみ可能である。

- i) 燃料と被覆管の間の機械的接触
- ii) 燃料のクリープと塑性
- iii) ガスによるスウェリング
- iv) 高温下での圧縮
- v) 燃料のクラック
- vi) 燃料と被覆管の間の接触と摩擦

CYGRO-I は、次の項目の関数として燃料棒の機械的、熱的ふるまいを計算することを特色としている。

- i) 時 間
- ii) 冷却水温度、冷却水圧力、燃料棒出力のような外部条件
- iii) 時間によって変化する燃料棒内の圧力

しかしながら、外部条件の時間による変化は、擬定常状態の取扱いが可能であるという仮定にもとづいている。(pseudo-transient lifetime code)

CYGRO は有限要素法を使用しており、小さな時間間隔の間、時間に依存している変数はその微小時間中の変化は無視できるものとしてくりかえし計算なしで進行する。要素の構成に関する境界条件としては、変位適合条件を使用する。数学上の形としてはベクトルで構成された行列方程式の計算を行なう。

CYGRO-II は、気泡と製造時の気孔の取扱いの事項を追加し、CYGRO-I を大巾に修正したものである。その構成と計算手法の説明は、CYGRO-1 の文献より CYGRO-2 の文献の方が明解である。

## 2) 計算上の仮定

CYGRO-II は次の仮定にもとづいている。

- a) 軸対称で、軸方向の変化はないものとする。その結果、応力および歪は半径と時間のみの関数である。
- b) 温度分布は半径方向熱流束にもとづく定常熱伝導方程式の解である。温度分布に応力、歪の影響はないものとするので、温度分布は冷却水温度と燃料棒出力および熱伝導率から与えられる。
- c) プレナムの圧力はインプットで与えられる。
- d) 燃料中のクラックは考慮外である。

e) 燃料と被覆管が接触した場合には、接触による軸方向作用を考えるが、摩擦力は考えない。

f) 質量移行現象は考慮しない。例えば、中央部への気孔の移動と緻密化は含まれていない。

上記仮定のうち、d)～f)はCYGRO-IIIでは考慮されている。

### 3) 理論-CYGRO

#### 3-1 力学モデル

計算対象は、剛体と考える中心プラグを含んだ燃料と被覆管から構成された軸方向単位長さの要素である。燃料はプラグ、および被覆管と接触するがギャップをもつかのどちらかである。外力は、燃料および被覆管の内面、外面と軸方向断面に作用する。外力はガス圧あるいは冷却水圧力による圧縮力と、接触がある場合には、接触力が加算される。接触する場合には、最初接触力は分らないが、計算によって得られる。プラグと燃料の接触において、軸方向の接触力は考慮されない。

CYGROの特色は、力と変位のベクトルの数式化にある。力のベクトルはリングの内、外面と軸方向断面に作用する三つの力で形成され、変位のベクトルもまた内、外径と軸方向高さの変位によって組立てられる。

さらにその特色は、考慮しているパラメータそれ自身ではなく、時間の変数であるそれらパラメータの時間変化率を計算することである。このパラメータの時間変化率に時間間隔を乗じ、変化量を求め時間間隔の始めのパラメータに加えることにより時間間隔の終りの時間におけるパラメータの値を求める。同心状に分割された燃料、被覆管のリング中においては応力、歪、温度および物性値は全く等しいと仮定している。

最初、燃料あるいは被覆管から切り出されたと考えた単一のリングを考える。これら独立のリングを境界条件が満足されるように組立てる。リングの外力と変位は、ベクトルによる計算で加えられ、燃料全体、被覆管に働く外力と等しくおかれる。

リングに関する力と変位ベクトルの時間変化時間の関係式を求めることを目的に、まず変位速度のベクトルと歪速度ベクトルの間の簡単な関係式をうる。歪速度ベクトルは、半径方向、円周方向、軸方向の歪速度から構成される。弾性、クリープ、熱膨脹とスウェリングの歪を考慮して、歪速度ベクトルが、次の小節に示されるような、応力速度ベクトルの一次式で表わされる。歪エネルギーの変化は外力による仕事の変化に等しいというエネルギーの平衡より、力と応力との関係式がえられる。この方法により、力のベクトルの時間変化率と変位ベクトルの時間変化率の関係式がえられる。

#### 3-2 応力-歪の関係

応力-歪の関係式は、各方向に関する歪として弾性、熱膨脹、クリープおよびスウェリングによる歪が加算されてえられる。

必要な関係式は、他の歪と独立にえられ、特に、応力に関係した項と、そうでないものに分れる。

弾性歪については、三軸のフックの法則を仮定する。

熱膨脹は、三方向で異なる熱膨脹係数と、温度分布から計算される。気孔中への膨脹による

熱膨張の応力依存性は考慮されていない。

クリープによる歪はゾーダベルグあるいはプラントロイスの方程式で計算される。これらは三軸の応力状態をあつかうため、相当応力としてミーゼスによる応力を使用する。

二次クリープと一次クリープあるいは塑性について次のような考慮が払われている。二次クリープには、 $\dot{\epsilon}_g = P_1 \cdot \sigma_g^{Q_1}$ 、塑性歪には  $\epsilon_g = P_2 \cdot \sigma_g^{Q_2}$  を使用する。ここで  $\epsilon_g$  は相当歪であり、 $\dot{\epsilon}_g$  はその歪速度、 $\sigma_g$  は相当応力、 $P_1, P_2, Q_1, Q_2$  は定数である。

これらの式の使用において、その時間間隙の初めにおける相当応力が一定の応力  $\sigma_p$  をこえるとき、塑性の式を使用し、その他の場合には二次クリープの式を適用する。

スウェリングによる膨張は、固体と気体状の核分裂生成物によっておこる。固体状の核分裂生成物によるスウェリング速度はインプットパラメータである。ガス状核分裂生成物によるスウェリング速度は応力速度の一次式で表わされる。各リングは異なる大きさの球状の気孔を数種類含んでいるものとする。その気孔中に気体状核分裂生成物が含まれ、気孔の圧力がファン・デア・ワールスの式を使って計算される。

気孔は、その周囲と圧力のバランスが保たれていると考える。ガスの圧力は、気孔にかゝる外部圧力と気孔表面での表面張力とつり合う。各気孔の周囲の部分、非圧縮性の物質であるとする。気孔のまわりの応力は、その非圧縮性と考えた部分の歪エネルギーの計算から求められる。計算を単純化し、気孔のまわりの塑性部分はクリープをおこすとする。計算式の変形により、スウェリング歪速度と応力速度の関係がえられる。

### 3-3 解法

燃料と被覆管の各リングにつき、力と変位の速度ベクトルが分っている。これを使用して、各リングを次の条件を満足するように組立て燃料と被覆管の力のベクトルと変位ベクトルを求める。

- a) とたりのリング間に作用する半径方向の力はその大きさが等しく、方向が逆である。
- b) 隣接しているリング半径方向変位速度は等しい。
- c) 各リングにかかる軸方向の力の和は燃料あるいは被覆管全体にかゝる軸方向の力に等しい。

さらに、次のエネルギーの平衡が使用される。

すなわち、各リングに作用する外力の和は、燃料あるいは被覆管全体にかゝる外力に等しい。以上の方法により燃料あるいは被覆管全体が1個のリングと考えられた場合の式が導かれる。燃料と被覆管の間に接触がなければ、外力はただちに判明する。接触がある場合には、接触力が計算されなければならぬ。こうして変位速度ベクトルが分る。以上の手順を逆にたどって、各リングの変位、歪、応力速度等が求められる。

### (3) CYGRO-III プログラム

#### 1) 概要

E. Duncombe が CYGRO-II に、燃料の割れ挙動、燃料内の気孔の移動、燃料柱と被覆管の摩擦、の3つの効果を組み入れたものである。

#### 2) 燃料の割れ挙動

燃料の割れはふつう、主軸に対して垂直な平面上に発生するため、3つの主応力に関係する。

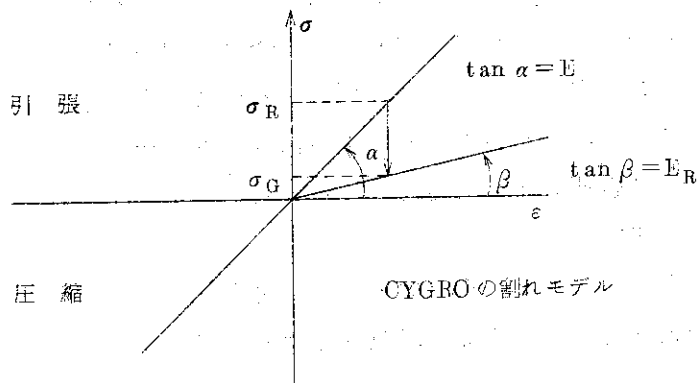
CYGROでは、3つの軸の1つにそって発生した割れに対して、その方向の応力が与えられた値を越えると仮定する。1個のリングに発生した割れが次のリングに及ぶことは想定していない。圧縮力がかかれば、割れはただちに癒着すると考える。

円柱体に半径方向の割れが生ずると、応力の方向対称性は失われる。すなわち、応力は半径と方向に依存するようになる。CYGROでは、角度に関係なく定義された方向的に平均化された応力を考えることによって割れの挙動を簡略化している。

要素リングの割れの応力が3つの主軸で超過した時には、燃料は対応する方向で破損する。ここでは、半径方向の割れが起ると燃料の要素リングに任意の多数の放射状の破片ができ、切線方向の応力はゼロになると仮定している。

割れ挙動の数値的取扱いは、最初につぎの論理的設問が行なわれる。

- a) 応力が割れの規定値を超過するとき燃料は破損する。
- b) 割れを生じた要素で引張応力が圧縮応力に変化するとき、割れの即時癒着が起る。この割れの挙動の取扱いはつぎの応力-ひずみ図で示される。



$E$  = 割れのない状態での弾性モジュール

$E_R$  = 割れた状態での弾性モジュール

$\sigma_R$  = 割れの応力

$\sigma_G$  = 割れた状態の応力

つぎに、割れ挙動を(1)式によって与えられる応力理論のHookの法則を、(2)式に置換して考える。

$$\vec{\epsilon} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{bmatrix} \vec{\sigma} \quad \text{割れのない状態} \quad (1)$$

$$\vec{\epsilon} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} C_i & -\nu & -\nu \\ -\nu & C_j & -\nu \\ -\nu & -\nu & C_k \end{bmatrix} \vec{\sigma} \quad \text{割れのある状態} \quad (2)$$

$\vec{\epsilon}$  = 弾性変形ベクトル

$\vec{\sigma}$  = 応力ベクトル

$\nu$  = ポアソン比

$C_i, C_j, C_k$  = 割れのない状態の弾性モジュールを、割れのある状態に変化するための補

正係数で次式にしたがう。

$$E_{Rl} = \frac{E}{C_l} \quad l = i, j, k \quad (3)$$

### 3) 燃料内の気孔の移動

CYORO-III の気孔の移動速度は2つの式で計算される。大きい気泡（たとえば焼結気孔）に対しては、気化と凝縮のメカニズムが作用する。

$$V_1 = \frac{A_v}{T^{3/2}} \cdot \frac{dT}{dr} \cdot \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right) \quad (4)$$

$V_1$  = 大きい気孔の移動速度

$Q_v$  = 燃料の分子当りの気化熱（活性化エネルギー）

$A_v$  = 物質の常数で燃料と気体の組成により定まる。

常数は炉内使用中の圧力で割らなければならない。

$\frac{dT}{dr}$  = 温度勾配

$k$  = ボルツマン常数

$T$  = 絶対温度

小さい気泡（FPガス）に対して、輸送機構は表面拡散であると想定する。

$$V_2 = 3D_0 \frac{\nu \Omega Q^*}{r_0 kT^2} \cdot \frac{dT}{dr} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (5)$$

$V_2$  = 小さい気孔の移動速度

$Q$  = 表面拡散の活性化エネルギー

$\nu$  = 単位表面積当りの拡散分子の数

$\Omega$  = 固体の分子体積

$r_0$  = 気泡の半径

$Q^*$  = 表面拡散の伝達熱

$\frac{dT}{dr}$  = 固体の温度勾配

$T$  = 絶対温度

燃料内の個々の気泡の移動速度を、2つの速度  $V_1$  と  $V_2$  の合計として計算する。限界体積以下の半径をもつ気泡は、つねに結晶粒界にあるものと見なす。表面拡散についてのこの限界半径は次式で計算する。

$$r_{crit} = \left( \frac{\Omega \gamma T}{2Q \cdot \frac{dT}{dr}} \right)^{1/2} \quad (6)$$

$r_{crit}$  = 限界半径

$\gamma$  = 結晶粒界の表面エネルギー

その他は前の式と同じ。

CYORO-III の気孔移動は現在つぎのように計算されている。

各時間区間の終りで、気孔体積は低温リング要素から隣接する高温リング要素に移るが、リング要素の固体の質量は、はじめのままで残る。すなわち、要素の半径を新たに再計算する必

要があるが、気孔の移動中の各要素の発熱は一定に保たれる。時間区分の終りに通過する気孔体積は次式で計算する。

$$\Delta V_g = P \cdot V_{1,2} \cdot \Delta t \cdot 2\pi \cdot r \quad (7)$$

$\Delta V_g$  = 時間区分  $\Delta t$  の間の気孔移動

$P$  = リング要素内の気孔率

$V_{1,2} = \bar{V}_1 + V_2$  = 気孔移動速度

$r$  = リング要素の内径

気孔が通過する経路はリングの幅の $\frac{1}{2}$ よりも小さくなるよう、CYGRO-III の時間区分は制限されている。すなわち、

$$V_{1,2} \Delta t \leq 0.5 (r_i - r_{i-1}) \quad (8)$$

ここに、

$r_i, r_{i-1}$  = リング要素の限定された半径

### 5) 被覆管と燃料の摩擦

CYGROでは、被覆管と燃料の機械的相互作用を、軸方向および半径方向の接触圧を用いて計算する。摩擦係数が無限の場合（密着）の場合には、軸方向の接触圧は燃料棒のすべての部分で一定であり、軸方向に依存しない燃料棒の力の存在を想定する。（Fig 3.2）

通常の場合（摩擦のある場合）には、軸方向の力は、燃料柱の自由端からはじまり、燃料から被覆管へ単位長さに比例してかかる。これは、軸方向の接触圧力が、自由端から燃料柱の長さに比例して大きくなり、密着の場合の値に達することを意味する。

摩擦を生ずる条件は、燃料棒のある点で接着状態で計算された軸方向の力  $F_z$  が、摩擦、すなわち摩擦係数をかけた燃料と被覆管の間の半径方向の力よりも大きいかどうかで定まる。

$$F_z \leq \mu F_r \quad \text{接着} \quad (9)$$

$$F_z > \mu F_r \rightarrow F_z = \mu F_r \quad \text{摩擦}$$

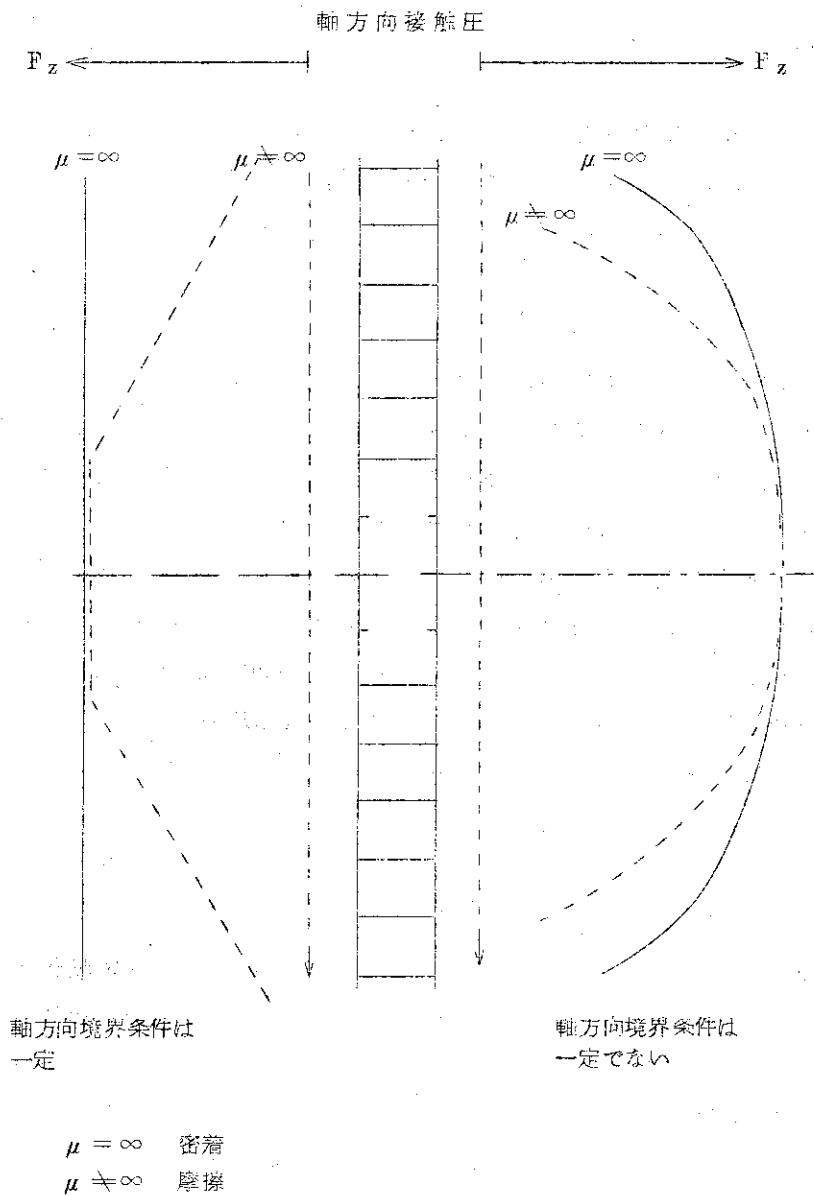


Fig 3.2

(4) GAPCONプログラム

1) 概 要

ギャップ熱伝達計算プログラム“GAPCON”はUSER'S GUIDE FOR GAPCON : A Computer Program to predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficients in Oxide Fuel Pin, by G. R. Horn and F. E. Panisco (HEDL-TME 72-128) に報告されている。GAPCONはUSAECがWestinghouse Handford Company に依頼して開発した計算コードで、元来は高速炉用のものであるが、これを軽水炉用に手直ししたものである。

GAPCONは燃料棒内各部分の温度分布を計算するプログラムである。特に温度計算上問題になるギャップ熱伝達率を評価することを特長としている。

計算対象は、円柱形酸化燃料を含んだ金属被覆管でその内部の空隙はガスによって満たさ



れた燃料棒である。燃料棒の照射履歴のうち、燃料棒出力と燃焼度との時間による変化のみが考慮されている。

## 2) 計算手法

(1) 燃料棒内の温度分布を求める場合に大きな影響を与えるギャップ熱伝達率の計算には、Ross and Stoute の実験式を修正して使用する。

(2) ギャップ寸法を決定する燃料ペレットおよび被覆管の種類としては熱膨張とスウェリングを考慮している。

(3) ギャップにおける接触圧力は、冷却水圧力をも考慮した通常の焼ばめの式を使用する。

(4) GAPCON プログラムを特長づけているのは、ギャップ中の混合ガスの熱伝導率をかなり詳細に計算していることである。ギャップに含まれるガスの種類として、ヘリウム、アルゴン、水素、窒素、クリプトン、キセノンの6元素を考えている。ヘリウム、あるいはアルゴンは燃料棒に封入される初期封入ガスである。水素と窒素は燃料ペレットに最初吸着されており、燃料温度の上昇によってペレットからギャップ空間に放出されると考える。

クリプトンとキセノンは、まず核燃料物質から生成するクリプトン、テルル、ヨウ素を計算し、これら元素のほうかいからその生成量を中性子束と時間の関数として計算する。

FPガスの放出には、Duttらのモデル(1350°C以上の領域から100%放出、1350°C以下の領域からは燃焼度と線出力密度の関数とするが2%以下にはならないものとする)を使用している。

上記のような方法によってギャップ中のガスの組成を定め、混合ガスの熱伝導率の式を使用して熱伝導率を定める。

(5) GAPCONは燃料ペレットの焼しまりがあるときのギャップ熱伝達率を評価することを目的にしたものであるが、プログラムに焼しまりの計算は直接は組込まれてはいない。しかしながら、燃料の再組織化がプログラム化されている。すなわち、ある温度以上の燃料ペレットの組織は柱状晶となり、密度の上昇があるものとする。また、その温度領域内に含まれる燃料ペレット内の気孔は中心に移動し中心孔を形成すると考える。この再組織化の境界となる温度は、燃料が出力状態におかれた時間に依存すると仮定している。

(6) GAPCONは実際の燃料照射履歴を追跡するようになっていないが、出力と燃焼度の時間による変化は追跡できる。

## 3) 計算の流れ

GAPCONの計算の流れは、3.3中の図に示されている。以下計算の流れの概要について説明する。

(1) ギャップ空間に含まれる混合ガスの組成と混合ガスの熱伝達率の計算を行う。

(2) ペレットならびに被覆管の変位は、ギャップ寸法を決定するために必要である。ペレットについては、熱膨張とスウェリングを、被覆管については熱膨張を計算する。

(3) 上記の寸法変化をもとに、接触の有無の判定を行い、接触が起る場合は、接触力の計算を行う。

(4) ギャップ熱伝達率を計算する。

(5) 計算値と先の仮定値と比較する。この両者が一致しない場合は、新しいギャップ熱伝

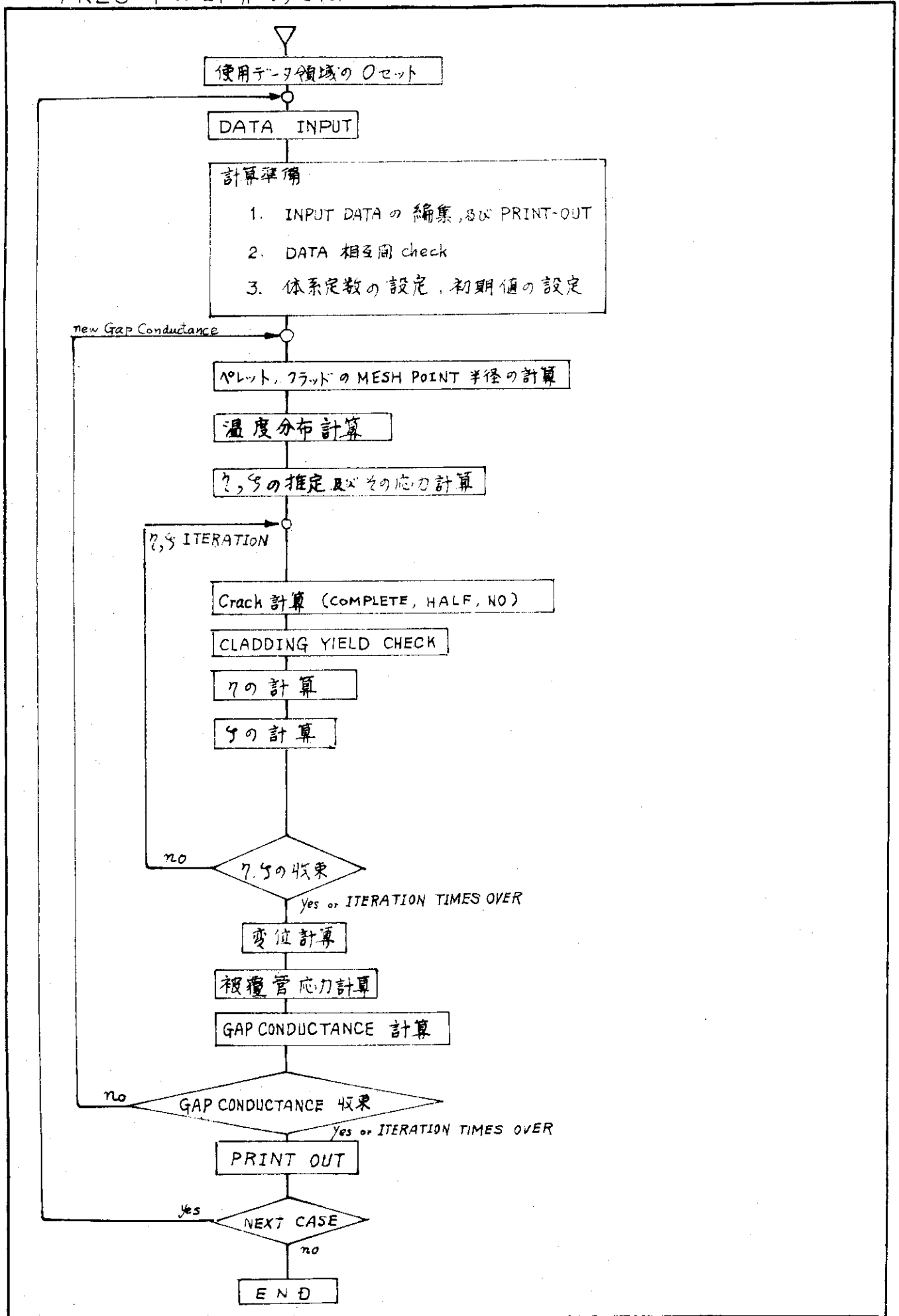
達率を仮定値とし、計算値と仮定値が一致するまでこの過程を続ける。

(6) 燃料が再組織化するかしをいかの判定を行う。再組織化が起る場合には、境界温度以上の領域内のペレットの気孔はペレット中心に集まったものとして、中心孔の孔径を計算する。

### 3.3 プログラムの計算の流れ、入出力項目

先の述べた通り、FREEF-1, FREC-1, FRES-1, FREG-1 は、第一次のデバッグを完了し、一応の出力が得られる段階に達している。今後、主要パラメータについての感度チェックを主とする作業が進められる予定であるが、ここで、上記各プログラムの計算の流れ、入力項目のリストならびに出力を例示する。

# FRES-1 の計算の流れ



# FRES-1 の入力構成

入力項目	入力番号	入力番号	入力単位	計算式
1 温度分布 (OPTION COMB)	1001	1	N.D	Max 100 分割
2 燃料の半径方向の分割数	1001	2	N.D	Max 50 分割
3 被覆管の半径方向の分割数	1001	3	N.D	1=5, 0=10, 2=15, 3=20
4 軸方向の束条件 (OPTION)	1001	4	N.D	
5 Gap Conductance (OPTION)	1001	5	N.D	
6				0=ALL PRINT 100=PER SKIP
7 中間出力指定 (OPTION)	1100	1		
8 指定中間出力指定 (OPTION)	1100	2		
9				
10				
11 被覆管に作用する外圧	2001	1	KG/cm <sup>2</sup>	
12 被覆管内のガス圧	2001	2	KG/cm <sup>2</sup>	
13 初期出力 / 全出力	2002	1	N.D	
14 最終出力 / 全出力	2002	2	N.D	
15				
16 燃料の初期温度分布	2101~ 2109		°C	
17 被覆管の初期温度分布	2201~ 2209		°C	
18				
19 燃料内半径	3001	1	mm	
20 燃料外半径	3001	2	mm	
21 被覆管の外半径	3001	3	mm	
22 燃料と被覆管初期半径比	3001	4	mm	
23				
24 燃料のモリソン比	3002	1	N.D	
25 燃料の相対密度	3002	2	N.D	
26 被覆管のモリソン比	3002	3	N.D	
27				
28 燃料の熱膨張係数	3101~ 3109		1/°C	1=フル形式
29 燃料のモリソン率	3201~ 3209		KG/mm <sup>2</sup>	1=フル形式
30 燃料の引張強さ	3301~ 3309		KG/mm <sup>2</sup>	1=フル形式
31 燃料の圧縮弾性限界値	3401~ 3409		KG/mm <sup>2</sup>	1=フル形式
32 燃料の温度分布	3501~ 3509		°C	
33				
34 被覆管の熱膨張係数	3601~ 3609		1/°C	1=フル形式
35 被覆管のモリソン率	3701~ 3709		KG/mm <sup>2</sup>	1=フル形式
36 被覆管の耐力	3801~ 3809		KG/mm <sup>2</sup>	1=フル形式
37 被覆管の温度分布	3901~ 3909		°C	
38				
39 燃料1ペレットの最終温度分布	4101~ 4109		°C	
40 被覆管の最終温度分布	4201~ 4209		°C	

NTOP { 1 Built in Mesh Wise Data (data card 2101~2109)  
2 Data on Card 5102 }

分割数  
NFUEL  
NCLAD  
NAXOP  
NGAOP

出力  
NOPOUT  
KSOP(1,2,3,4)

圧力  
PE  
PG  
PI  
PF

温度  
TC  
TF

半径  
GEOMET(1)  
GEOMET(2)  
GEOMET(3)  
GEOMET(4)

燃料ペレットと被覆管の物性値及び温度分布  
CMP(1)  
CMP(2)  
CMP(3)

CTF( )  
YMF( )  
UTF( )

PFF( )  
TMF( )

CTC( )  
YMC( )  
YSC( )  
TMC( )

FTF( )  
FTC( )

燃料被覆管の計算係数  
AF( )  
EF( )  
SU( )  
SF( )  
AC( )  
EC( )  
SY( )

初期条件係数  
Z1(2)  
Z1(3)  
Z1(4)  
Z1(5)

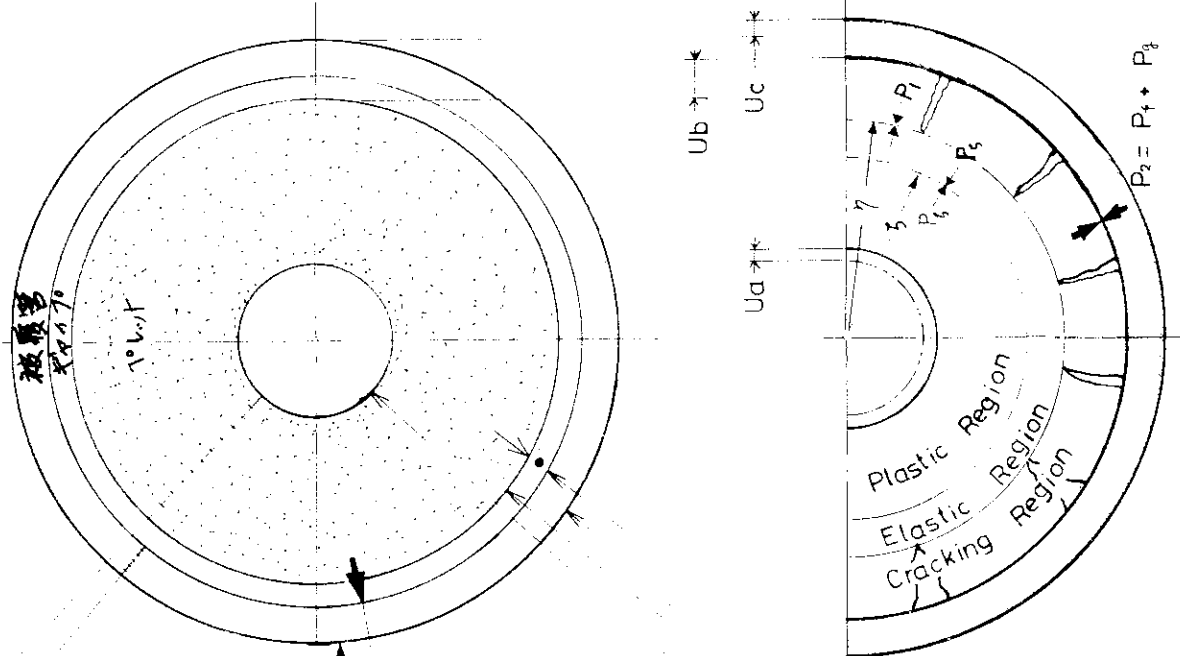
最終条件係数  
Z2(2)  
Z2(3)  
Z2(4)  
Z2(5)

変数  
NGAS  
X( )  
PZAH( )

計算出力の様式指定  
NGRAPH( )  
NCTG( )  
NYOKO( )  
PUNKT( )  
NTATE

Ua: Radial Displacement of Pellet Inner Radius.  
Ub: Radial Displacement of Pellet Outer Radius.  
Uc: Radial Displacement of Cladding Outer Radius.  
Pg: Internal Pressure at Elastic-Plastic Boundary.  
Pf: Internal Pressure at Elastic-Plastic Boundary.  
Pg: Solid Pressure  
Pg: Gas Pressure

入力項目	入力番号	入力単位	計算式
41 燃料の熱膨張係数計算係数	5001	N.D	
42 燃料のモリソン率計算係数	5002	N.D	
43 燃料の引張強さ計算係数	5003	N.D	
44 燃料の圧縮弾性限界値計算係数	5004	N.D	
45			
46 被覆管熱膨張係数計算係数	5005	N.D	
47 被覆管のモリソン率計算係数	5006	N.D	
48 被覆管の耐力計算係数	5007	N.D	
49			
50	5101	1	式番号の指定
51 UO <sub>2</sub> の熱伝導率の式	5101	2	N.D
52 初期条件下の被覆管表面温度	5101	3	°C
53 初期条件下の線出力密度	5101	4	W/cm
54 初期 Gap Conductance	5101	5	W/cm <sup>2</sup>
55			
56	5102	1	N.D
57 UO <sub>2</sub> の熱伝導率の式	5102	2	°C
58 最終条件下の被覆管表面温度	5102	3	°C
59 最終条件下の線出力密度	5102	4	W/cm
60 最終 Gap Conductance	5102	5	W/cm <sup>2</sup>
61			
62 燃料棒内のガス成分元素	6001	N.D	
63 ガス成分元素の濃度比	6002	%	
64 燃料ペレットの表面粗さ	6003	1-3	cm
65			
66 計算実行のオプション	7000	1	N.D
67 計算表作成プログラムの指定	7100	1-3	N.D
68 プログラム作成時の仕様	7110	1-4	N.D
69 プログラム軸上の計算指定			N.D
70 プログラム軸の指定			N.D
71			
72 プログラムのパラメータの指定	7230	1	N.D
73 プログラムのパラメータ指定数	7230	2	N.D
74 パラメータ値の入力	7231		N.D
75			
76			
77			
78			
79			
80			



STRIPE INPUT DATA LIST

1	STRIPE REPORT WAPD-TM-652											
61	STRIPE SAMPLE PROBLEM STANDARD NO.1 *** TYPICAL BWR CONDITION ***											
61	CLAD OD=14.3 MM,	ID=12.42 MM,	T=0.94 MM								CARD	
61	PELLET OD	=12.11 MM,	DIA-GAP = 0.31 MM								CARD 3001	
140,	2.5,	0.5,	0.666,	0.0								
1001,	2,	20,	3,	1,	1,	1,	1	*NTCP,*FUEL,*CLAD,*NAXOP,*NGACP,*NIDA,*JENS				
1100,	100,	0,	0,	0,	0						*1001	
2001,	71.7,	1.0	*PE,*PG	EXTERNAL SYSTEM PRESSURE, INITIAL GAS PRESSURE							*0011	
2002,	0.1,											
2101,	20.R10											
2201,	20.R5											
3001,	0,	6.055,	7.150,	0.155	*CLAD THICKNESS=0.94 MM					BWR (B)		
3002,	0.3,	0.95,	0.3	*CMP( )						POISSON ZRY		
3101,	6.791-6,	7.3791-6,	7.9590-6,	8.5390-6,	9.1189-6,	9.6989-6						
3102,	10.2789-6,	10.8588-6,	11.4388-6,	12.0187-6,	12.5987-6,	13.1787-6						
3103,	13.7586-6,	14.3386-6,	14.9185-6,	15.4985-6,	16.0785-6,	16.6584-6						
3104,	17.2384-6,	17.8183-6,	18.3983-6,	18.9782-6,	19.5582-6,	20.1382-6						
3105,	20.7181-6,	21.2981-6,	21.8781-6,	22.4580-6,	23.0380-6,	23.6179-6						
3106,	24.1979-6	*CTFC( ) COEFF. OF THERMAL EXPANSION OF FUEL MATERIAL										
3201,	21.3913+3,	21.3356+3,	21.2235+3,	21.0589+3,	20.8299+3,	20.5484+3						
3202,	20.2105+3,	19.8161+3,	19.3653+3,	18.8581+3,	18.2943+3,	17.6742+3						
3203,	16.9975+3,	16.2645+3,	15.4749+3,	14.6290+3,	13.7265+3,	12.7677+3						
3204,	11.7523+3,	10.6800+3,	9.5523+3,	8.3677+3,	7.1265+3,	5.8290+3						
3205,	4.4750+3,	3.0645+3,	1.5976+3,	0.0742+3,								
3206,	*YMF( ), YOUNGS MODULUS FOR FUEL MATERIAL AT 100 PERCENT I.D.											
3301,	10.0 R30											
3401,	68.903	56.951	47.108	38.671	31.991	26.718						
3402,	22.148	18.261	15.117	12.585	10.406	8.578						
3403,	7.101	5.906	4.908	4.064	3.340	2.784						
3404,	2.306	1.898	1.582	1.301	1.076	0.886						
3405,	0.731	0.605	0.499	0.415	0.345	0.281						
3406,	0.232	*PFF( ), PLASTIC FLOW-STRESS OF FUEL MATERIAL										
3501,	0,	100,	200,	300,	400,	500,						
3502,	600,	700,	800,	900,	1000,	1100,						
3503,	1200,	1300,	1400,	1500,	1600,	1700,						
3504,	1800,	1900,	2000,	2100,	2200,	2300,						
3505,	2400,	2500,	2600,	2700,	2800,	2900,						
3506,	3000,	*TMF( ), TEMPERATURE TABLE OF FUEL PROPERTIES										
3601,	5.63-6,	6.61-6,	7.58-6	*CTCC( ),	COEFF. OF THERMAL EXPANSION OF CLAD							
3701,	9800,	7900,	5950,	*VMC( ),	YOUNGS MODULUS FOR CLAD MATERIAL							
3801,	44,	16,	6,	*VSC( ),	YIELD STRENGTH OF CLAD MATERIAL							
3901,	0,	300,	600,	*TMC( ),	TEMP. TABLE OF CLAD PROPERTIES							
4101,	1955.4,	1941.5,	1899.3,	1827.6,	1725.4,	1589.3,	1416.5,	1203.2,	947.1			
4102,	684.9,	435.5	*FTFC( ),	FUEL TEMPERATURE PROFILES								
4201,	348.3,	328.3,	318.3,	308.3,	297.7	*FTCC( )	CLAD TEMP PROFILES					
5001,	6.7991-6,	5.7996-9,	0.0	*COEF. OF THERMAL EXPANSION UO2								
5002,	21.39 +3,	-2.8222-3	*YOUNG S MODULUS FOR UO2 (KG/S0MM)3201 P.35									
5003,	10.0	0.0	*ULTIMATE STRENGTH OF UO2 (KG/S0MM)3301 P.36									
5004,	70.0	0.0	*PLASTIC FLOW STRESS UO2 (KG/S0MM)3401 P.36									
5005,	5.62-6,	3.1627-9,	0.0	*CREF. OF THERMAL EXPANSION CLAD								
5006,	9.8688+3,	-6.5817,	0.0	*YOUNG MODULUS FOR CLAD (KG/S0MM)3701 P.40								
5007,	44.0	-0.1233,	1.0-4	*YIELD STRENGTH CLAD (KG/S0MM)3801 D-817								
5101,	1.0	1.0,	20.0,	0.0,	1.5	*INITIAL	*GE67					
5102,	2.0	1.0,	286,	610.0,	1.5	*BWR RATED POWER MAX						
6001,	3,	6,	7,	9	*ELEMENTS=3 6=AIR, 7=HELIUM, 9=XENON							
6002,	5,	80,	15,	*MIXED GAS PERCENT								
6003,	0.8-4,	1.6-4,	0.001	*ROUGHNESS CLA VALUE AND JUMP DISTANCE								

STRIPE INPUT DATA LIST

```

PABC(1) PABC(2) PABC(3) PABC(4)
2.5000 0.50000 0.66600 0.0
NTOP 2 12(9) 0 NFUEL 20 NCLAD 3 NAXOP 1 NGAOP 1 NIDA 1 JENS 1
NOPOUT 100 KSOP(1) 0 KSOP(2) 0 KSOP(3) 0 KSOP(4) 0
PE PG
71.700 1.0000
PT PF
0.0 1.0000
NTOP=2 NANODE CARD NO.= 3001 MADE SKIP SIMASU
GEOMET(1) GEOMET(2) GEOMET(3) GEOMET(4)
0.0 6.0550 7.1500 0.15500
CMP(1) CMP(2) CMP(3)
0.30000 0.95000 0.30000
NTOP=2 NANODE CARD NO.= 5001 MADE SKIP SIMASU
AF (COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF FUEL)
0.67991E-05 0.57996E-08 0.0
EF (YOUNGS MODULUS OF FUEL)
21390. -0.27450 -0.28220E-02
SU (ULTIMATE STRENGTH OF FUEL)
10.000 0.0 0.0
SF (PLASTIC FLOW STRESS OF FUEL)
70.000 -0.81630E-03 0.0
AC (COEFFICIENT OF THERMAL EXPANSION OF CLAD)
0.56200E-05 0.31620E-08 0.0
EC (YOUNGS MODULUS OF CLAD)
9868.8 -6.5817 0.0
SY (YIELD STRENGTH OF CLAD)
44.000 -0.12330 0.10000E-03
Z1(1) Z1(2) Z1(3) Z1(4) Z1(5) INITIAL CONDITION
1.0000 1.0000 20.000 0.0 1.5000
Z2(1) Z2(2) Z2(3) Z2(4) Z2(5) FINAL CONDITION
2.0000 1.0000 286.00 610.00 1.5000
NGAS 3 KKC(1) 6 KKC(2) 7 KKC(3) 9 KKC(4) .....
X(1) X(2) X(3) X(4) .....
5.0000 80.000 15.000
PZAH(1) PZAH(2) PZAH(3) ROUGHNESS AND TEMPERATURE JUMP DISTANCE
0.80000E-04 0.16000E-03 0.10000E-02
    
```

TITLE CARDS FOR INPUT DATA

TITLE OF INPUT DECK..... STRIPE REPORT WAPD-TM-652  
TITLE OF CASE..... STRIPE SAMPLE PROBLEM STANDARD NO.1 \*\*\* TYPICAL BWR CONDITION \*\*\*  
CLAD OD=14.3 MM, ID=12.42 MM, T=0.94 MM  
PELLET OD =12.11 MM, DIA-GAP = 0.31 MM CARD 3001

NCASE --- POWER --- SIGMA.THETA --- P1 ETA CLAD IT PFUEL COMPUTER  
INITIAL FINAL A(ZETA) ETA B MID C YIELD TIME  
(KG/SQMM) (KG/SQMM) (KG/SQMM) (KG/SQMM) (KG/SQMM) (MM) (KG/SQMM) (MM) (KG/SQMM)  
1 0. 1. 0.0 0.0 0.0 -5.28485 -1.96028 0.0 3.0275 NO 0 0.0 0.0 14 SEC  
U.ETA U.B U.C P-ZETA ZETA IT SIGMA.Z EPS.Z F.Z  
(MM) (MM) (MM) (KG/SQMM) (MM) (MM) (TIMES) (MM) (MM) (MM) (MM)  
1 0.0 0.16789 0.01431 1.09864 3.02750 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRIPE CASE= 1 FINAL OUTPUT \*TIME= 14 SEC \*CLAD MESH= 3 \*PELLET MESH= 20  
GEOMETRY INITIAL(MM) FINAL(MM) DISPLACEMENT(MM)  
CLADDING OUTER RADIUS (MM) = 7.1500 7.1643 0.14312E-01  
PELLET OUTER RADIUS (MM) = 6.0550 6.2229 0.16789  
PELLET INNER RADIUS (MM) = 0.0  
GAP (MM) = 0.15500 0.14252E-02  
ELASTIC REGION (MM) = 3.0275 0.0

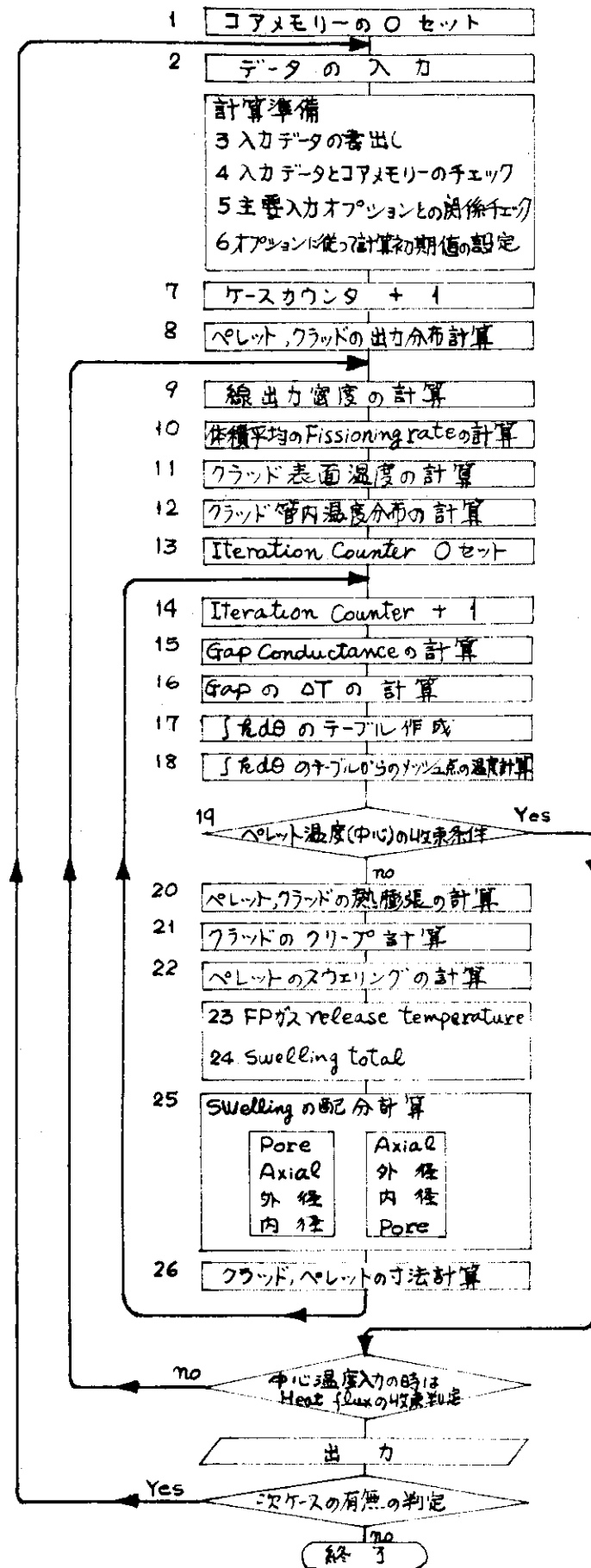
RADIAL STRESS OR CONTACT PRESSURE  
EXTERNAL PRESSURE GIVEN (KG/SQCM) = 71.700  
PLENUM GAS PRESSURE GIVEN (KG/SQCM) = 1.0000  
CLAD PELLET SOLID CONTACT PRESSURE (KG/SQMM) = 0.0  
TOTAL INTERNAL PRESSURE (SOLID + GAS) (KG/SQMM) = 0.10000E-01  
RADIAL STRESS AT ETA (KG/SQMM) = 0.0  
RADIAL STRESS AT ZETA (KG/SQMM) = 1.0986

NTOP = 2 G= GIVEN, C= CALCULATE, I= INITIAL, F= FINAL, (I)=(LAST-1) ITERATION, L= LAST ITERATION  
LINEAR HEAT RATING (W/CM) = 0.0 (IG) 610.00 (FG)  
GAP CONDUCTANCE (W/SQCM DEG.C) = 0.88691 (I) 0.89652 (L) = 0.88691 (L) + 0.0 (L)

TEMPERATURE --- PELLET --- --- GAP GAS --- --- CLAD ---  
CENTER MEAN OUTER MEAN INNER OUTER WATER  
INITIAL 20.000 20.000 20.000 20.000 20.000 20.000  
FINAL 2400.6 1411.0 562.31 474.02 385.72 296.04  
CLAD YIELD = NO  
THERMAL CONDUCTIVITY EQUATION \*\*\*\* GE67 \*\*\*\* IS USED  
PERCENT OF MIXED GAS AIR HELIUM XENON  
5.0000 80.000 15.000

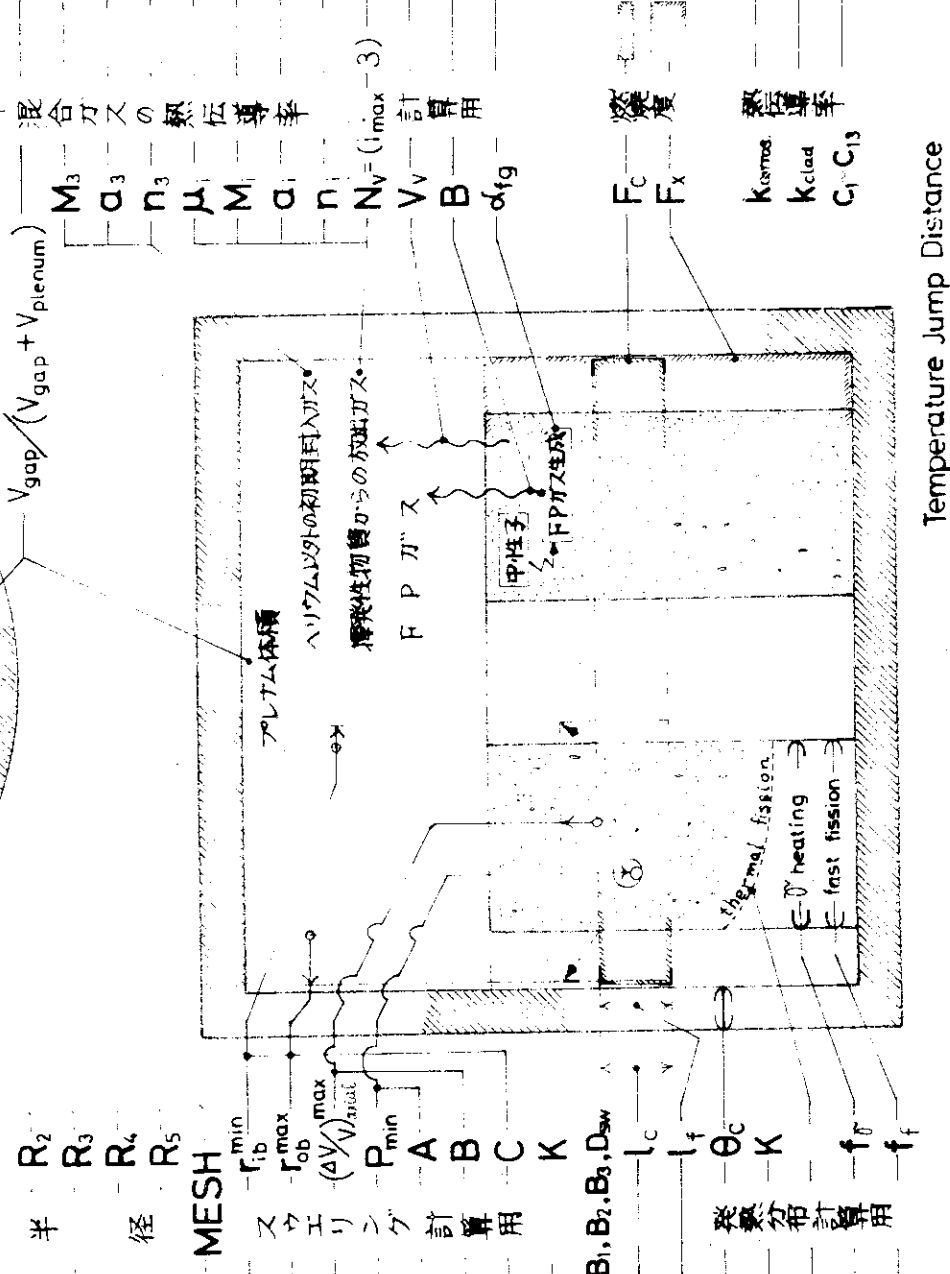
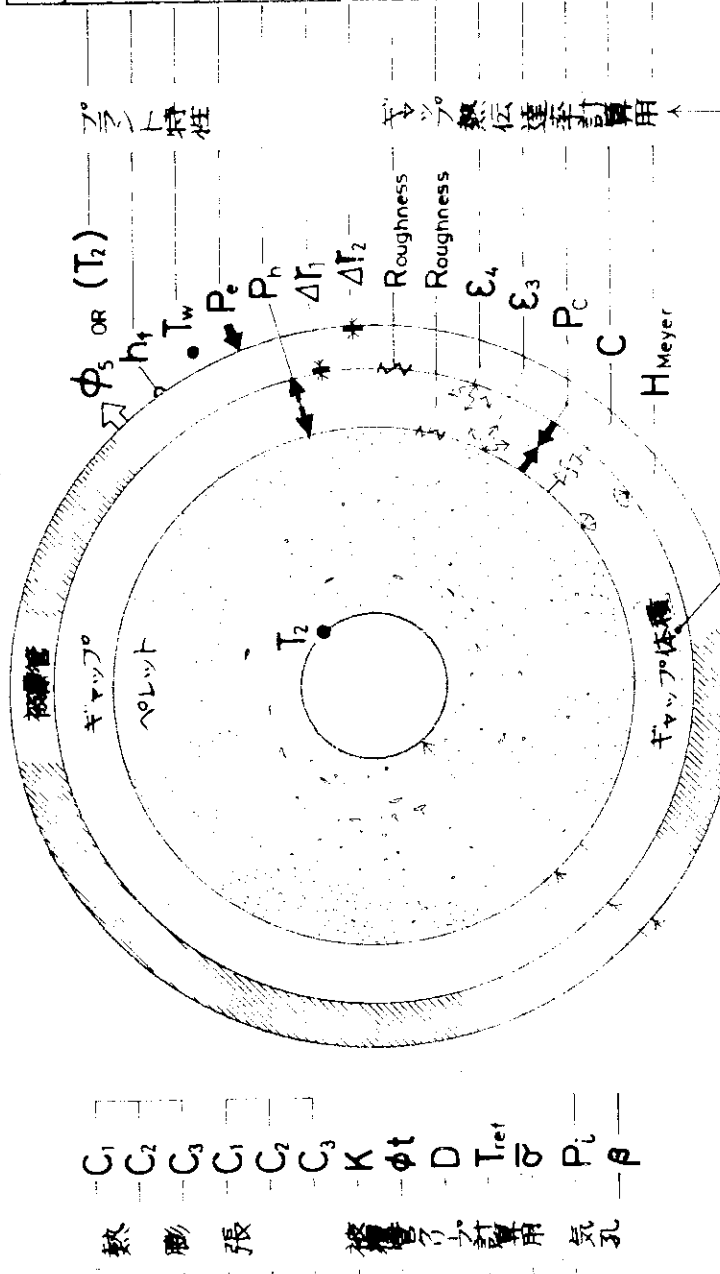
THERMAL CONDUCTIVITY AND MEAN TEMPERATURE OF GAS MIXTURE = 0.15455E-02 W/CM.DEG-C , 474.02 DEG-C  
TT(SUPLU VS SUPIC) TT(ZETA) TT(ZETA) TT(ZETA AND ZETA) TT3(LARGEST LOOP) FROM MAIN LTNE NO.  
0 0 0 0 -3 1 5 4  
1 0 0 0

FREF-1 の計算の流れ





入力項目	入力番号	入力単位	計算式
被覆管熱膨張率出用	600		(491)
二次式の係数	600		(491)
ペレット熱膨張率出用	600		(491)
二次式の係数	1610		(491)
被覆管のフリープ定数	1610		(491)
高濃中性子束の積分値	1610		(491)
被覆管のフリープ定数	770		(517)
フリープ計算の基準温度	770	n/cm <sup>2</sup>	(518)
フリープ計算式選択用能力	770	°C	
ペレットの初期気孔率	770	kg/cm <sup>3</sup>	
気泡の形状による係数	1200	ND	(444)
	1150	ND	(441)
ペレット内半径	1200	cm	
ペレット外半径	1200	cm	
被覆管内半径	300	cm	
被覆管外半径	300	cm	
ペレットのメッシュ分率	1300		
スクリゾグ許容最小四半径	1400	cm	(460)
許容最大外半径	1400	cm	(456)
許容最大内半径	1400	ND	(452)
許容最小気孔率	1400	ND	(448)
気孔指向定数	1400	ND	(446)
軸方向指定定数	1400	ND	(449)
径方向指定定数	1400	ND	(451)
固体スウェーリング係数	400	ND	(414)
種別系FPガス放出係数	500		(415)
被覆管の単位長さ	300	cm	(419)
ペレットの単位長さ	1200	cm	(419)
被覆管の発熱	300	ND	(464)
ペレットのK	151	1/cm	中核のK
熱中性子による核分裂係数	1050	ND	(469)
ペレットのガンマ発熱	1060	ND	(464)
高濃中性子による核分裂係数	1060	ND	(469)



入力項目	入力番号	入力単位	計算式
熱流速 OR (中心温度)	200	W/cm <sup>2</sup> (°C)	(417)
被覆管表面熱伝達率	200	W/cm <sup>2</sup> °C	(417)
冷却材温度	200	°C	(417)
冷却材圧力	200	kg/cm <sup>2</sup> abs	(417)
内圧	200	kg/cm <sup>2</sup> abs	
被覆管内面腐食皮膜厚さ	780	cm	(512)
被覆管外面腐食皮膜厚さ	780	cm	(511)
被覆管内面粗さ	1000	μ	(476)
ペレット外面粗さ	1000	μ	(476)
被覆管内面輻射率	700	ND	(481)
ペレット表面輻射率	700	ND	(481)
ペレット被覆管指定接近係数	1000	kg/cm <sup>2</sup>	(475)
ペレット被覆管の接触係数	1000	ND	(476)
ペレット被覆管の接触係数	1000	kg/cm <sup>2</sup>	(475)
体積比	1700	ND	(516)
ペレット以外の初期封入ガスの物性値	1030		(514)
封入ガスの物性値	1030		(514)
ペレット内に含まれている揮発性物質の物性値	1021, 1029	ND	(516)
揮発性物質の種類	1020		
揮発性物質の放出	1020	cc/cc	(516)
FPガスの放出	1700	ND	(516)
核分裂片のガス原子の生成	1700	atom/atom <sub>fiss</sub>	(516)
ピッチ部の局所的燃焼度	200	10 <sup>20</sup> fiss/cc	(413)
軸方向の平均燃焼度	200	10 <sup>20</sup> fiss/cc	(516)
被覆管の腐食皮膜の熱伝導率	780	W/cm°C	(511)
被覆管の熱伝導率(表材)	301, 303	W/cm°C	(431)
ペレットの熱伝導率(保数)	1101, 1103	W/cm°C	(442)
(封入ガス+揮発性物質)のTJD	1000	μ	(479)
FPガスのTJD	1000	μ	(479)

FREE-1の入力構成

FIGRO INPUT DATA LIST

07/10/73 PAGE 1

1 FIGRO REPORT WAPD-TM-618,618A1,757,618A2  
 41 FIGRO SAMPLE PROBLEM STANDARD NO.1 \*\*\* TYPICAL BWR CONDITION \*\*\*  
 61 CLAD OD=14.3 MM, ID=12.42 MM, T=0.94 MM CARD 300  
 61 PELLET OD =12.11 MM, DIA-GAP = 0.31 MM CARD 1200  
 100, 2, 1, 0, 1, 2, 11 \* \*001  
 140, 2.5, 0.5, 0.666, 0.0 \*  
 150, 0, 0, 0.01  
 151, 1-1 \*DIFFUSION CONSTANT (UNIT = U/CM) FOR BESSEL I-7EKO (HESS-) \*051  
 200, 610.0, 11.9, 286.0, 71.7, 1.0, 0.0, 0.3 \*\*  
 300, 0.621, 0.715, 1.0, 5.0, 0.01 \*BWR STANDARD CLAD T=0.0:4 \*003  
 301, 0.1417, 250, 0.1480, 300, 0.1543, 350, 0.1606, 400, 0.1669, 450  
 3-2 \* IRRADIATED ZRY THERMAL CONDUCTIVITY VS TEMPERATURE W/CM-C VS DEAC  
 3-3 \* WAPD-TM-757 PARE-52 SAMPLE PROBLEM  
 400, 0.0025 \*COEF. OF FUEL VOLUME SWELLING DUE TO SOLID FISSION PRODUCT  
 500, 1415.6, 0.0, 0.0, 5.0 \*FISSION GAS RELEASE CONSTANT EQ.(415)  
 600, 6.0-5, 5.14-6, 3.80-9 \*7RY CLAD THERMAL-EXPANSION CONSTANT EQ.(491)  
 700, 0.3, 0.35 \* CLAD AND FUEL SURFACE EMISSIVITY  
 770, 1.2-31, 0.5+21, 0.7-40, 149, 844. \*ZRY CREEP PROPERTIES EQ. 517,518  
 780, 0.0121, 1.92, 4.18, 0.0, 0.0 \* CLAD CORROSION LAYER DATA  
 800, 2.636, 0.856, -0.265, -4.6188, 0.248, 1.468 \*  
 801, 0.825, -0.104, -4.3538  
 1000, 6.1, 0.56, 0.8, 1.0, 25.0, 8800. \* 1.0 \* GAP CONDUCTANCE DATA  
 1020, 2, 0.04 \*NUMBER OF VOLATILE VV  
 1021, 0.6, 41.2, 1.903-6, 0.79 \*VOLATILE GAS DATA  
 1022, 0.4, 73.1, 3.114-6, 0.71 \*VOLATILE GAS DATA  
 1060, 0.1, 0.2 \*GAMMA FRACTION OF ZONE-1, FAST AND EPI OF ZONE-1  
 1100, 3, 100, 0 \*POROSITY CORRECTION OPTION, OUTPUT OPTION, SKIP OPTION  
 1101, 1894.7, 648.4, 7.0597, 0.0, 0.02059, 0.0 \*CONPEL  
 1150, 0.7 \* PORE SHAPE FACTOR (BETA) IN EQ.(441)  
 1200, 0.0, 0.6055, 1.0, 0.05 \*BWR STANDARD PELLET G=0.0155 \*0021  
 1300, 10 \* MESH  
 1400, 0.0, 0.621, 0.02, 0.0, 0.5, 0.25, 1.0 \* BWR STANDARD HAIBUN\*0041  
 1600, 1 \*NDPEX 1-CARD-1610, 2=TH02, 3=(TH+U)02  
 1610, -1.66-4, 8.25-6, 2.21-9 \*UO2 THERMAL EXPANSION COEFFICIENTS EQ.(491)  
 1700, 0.3, 0.4, 0.05 \* AFG,HR IN EQ.(489)  
 2000, 0.0, 0.0 \* ZONE-2 HFF, QF2 EQ.(440),(464),(468)  
 2060, 0.0 \* ZONE2 GAMMA(2) EQ.(465)  
 3000, 0.0025, 1.0 \*TIME STEP SIZE, TOTAL TRANSIENT TIME (80TH IN SECONDS)  
 3010, 1.0, 0.0, 1.0, 0.1, 1.25, 1.0 \* EQ.(509),(534)  
 5000, 0 \*PLOTTER CONTROL OPTION (NGRAPH) 0=NO TABLE AND NO GRAPH, MAX=20 \*0005

FIGRO INPUT DATA LIST

07/10/73 PAGE 2

NFTOP	2.0000	NZUNOP	1.0000	NSWEDP	0.	NSOLOP	1.0000	NFPRDP	2.0000	NCONDP	11.0000		100
PABC(1)	2.5000	PARC(2)	.5000	PABC(3)	.6600	PARC(4)	0.						100
NSHAPE	0.	NIDA	0.	CONV.F	.10000E-01	SQFT.F	0.						140
RESSEL	1.1000												140
L.H.RATE	610.00	HF	11.900	TWATER	286.00	PEXT	71.700	PH	1.0000	DEPLET.	0.	DEPLET-AXIAL	151
R4	.62100	R5	.71500	LC	1.0000	NOPCON	5.0000	THETA-C	.10000E-01				151
KC	.14170	T	250.00	KC	.14800	T	300.00	KC	.15430	T	350.00	KC	200
KCSOLID FUEL SWELLING COEFFICIENT)	.25000E-02												200
B1	1815.6	R2	0.	B3	0.	USW	5.0000						300
C1	.60000E-04	C2	.51400E-05	C3	.38000E-08								300
E4	.30000	F3	.35000										301
K	.12000E-30	PHI-T	.50000E+21	D	.70000E-40	T-REF	149.00	SIGMA-RAR	844.00				301
KL	.12100E-01	MMUL	1.9200	CL	4.1800	DELTA-R1	0.	DELTA-R2	0.				400
A1	2.6360	R1	.85600	C1	-2.26500	O1	-4.6188	X1	.24800	R2	.82500	R2	400
								A2	1.4680	C2	-.10400	C2	500
													500
													600
													600
													700
													700
													770
													770
													780
													780
													800
													800
													800

GIR	6.1000	GFGR	.56000	R1	.80000	R2	1.0000	PC	25.000	C	1.0000	1000
ALPHA	0.	DELTA	0.									1000
NV	2.0000	VV	.40000E-01									1010
MU( 1)	0.	M( 1)	131.30	AC( 1)	.65186E-06	NC( 1)	.79100					1010
MU( 2)	0.	M( 2)	83.800	AC( 2)	.37506E-06	NC( 2)	.95400					1020
MU( 3)	0.	M( 3)	4.0030	AC( 3)	.24998E-04	NC( 3)	.72100					1020
MU( 4)	.60000	M( 4)	41.200	AC( 4)	.19030E-05	NC( 4)	.79000					1021
MU( 5)	.40000	M( 5)	73.100	AC( 5)	.31140E-05	NC( 5)	.71000					1021
M(3)	0.	A(3)	0.	NC(3)	0.							1030
F11	0.	F12	0.	F21	0.	F22	0.	F31	0.	F32	0.	1030
F-GAMMA-1	.10000	F-FAST-1	.20000					F41	0.	F42	0.	1050
NOPPOR	3	NOPDUT	100					F51	0.	F52	0.	1050
C1	1894.7	C2	648.40	C3	7.0597	C4	0.	C5	0.	C6	0.	1060
C8	0.	C9	0.	C10	0.	C11	0.	C12	0.	C13	0.	1060
BET8	.70000	FRAU	0.	FRATH	0.							1100
RII	0.	ROI	.60550	LF	1.0000	PORE	.50000E-01					1100
MESH	10.000											1101
												1101
												1150
												1150
												1200
												1200
												1300
												1300

FIGRO INPUT DATA LIST

07/10/73 PAGE 4

RIBMIN	ROBMAX	DVVAMAX	PMIN	A	B	C	
0.	.62100	.20000F-01	0.	.50000	.25000	1.00000	
NOPEX							
1.0000							
C1	C2	C3					
-.16600E-03	.82500E-05	.22100E-08					
ALPHA-FG	R	R					
.30000	.40000	.50000F-01					
HFF	OF2						
0.	0.						
GAMMA2							
0.							
TSTEP	TIME						
.25000E-02	1.0000						
FT(1)	TIME(1)	FT(2)	TIME(2)	FT(3)	TIME(3)		
0.	0.	1.0000	.10000	1.2500	1.0000	0.	0.
C(1)	TEMP(1)	C(2)	TEMP(2)	C(3)	TEMP(3)		
0.	0.						
TW(1)	TIME(1)	TW(2)	TIME(2)	TW(3)	TIME(3)	TW(4)	TIME(4)
0.	0.						
RHO-C	C-C						
0.	0.						
RHO-F							
0.							
NGRAPH							
0.							
NCTG(1)	NCTG(2)	NCTG(3)					
0.	0.	0.					
NYDKO(1)	NYDKO(2)	NYDKO(3)					
0.	0.	0.					
PUNKT(1)	PUNKT(2)	PUNKT(3)	PUNKT(4)	PUNKT(5)	PUNKT(6)	PUNKT(7)	PUNKT(8)
0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.	0.
NTATE(1, 1)	NTATE(2, 1)	NTATE(3, 1)	NTATE(4, 1)	NTATE(5, 1)			
0	0	0	0	0			
NPARA(1)	NPARA(2)						
0	0						
PARA(1)	PARA(2)	PARA(3)	PARA(4)				
0.							

1400  
1400  
1600  
1600  
1610  
1610  
1700  
1700  
2000  
2000  
2060  
2060  
3000  
3000  
3010  
3010  
3020  
3020  
3030  
3030  
3040  
3040  
3050  
3050  
5000  
5000  
5100  
5100  
5110  
5110  
5111  
5111  
5121  
5121  
5130  
5230  
5131  
5231

TITLE CARDS FOR INPUT DATA

TITLE OF INPUT DECK..... FIGRO REPORT WAPD-TM-618,618A1,757,618A2

TITLE OF CASE..... FIGRO SAMPLE PROBLEM STANDARD NO.1 \*\*\* TYPICAL BWR CONDITION \*\*\*

CLAD OD=14.3 MM, ID=12.42 MM, T=0.94 MM CAVD 300  
 PELLETT OD =12.11 MM, DIA-GAP = 0.31 MM CARD 1200  
 TIME= .162 SEC MESH= 10 SOFTENING F.= .50000 ITERATION= 8 FROM FINOUT

GEOMETRY INITIAL FINAL THERM.EXPAN. CREEP SWELLING  
 CLADDING OUTER RADIUS (CM) .71500 .71660 -16021F-02 0. 0.  
 CLADDING INNER RADIUS (CM) .62100 .62239 -13915F-02 0. 0.  
 PELLETT OUTER RADIUS (CM) .60550 .61700 -11494E-01 0. 0.  
 PELLETT INNER RADIUS (CM) 0. 0. 0. 0. 0.  
 GAP .15500E-01 .53935E-02 0. 0. 0.

OPERATING CONDITION PRESSURE = 71.700 (KG / SQCM)  
 SYSTEM EXTERNAL TEMPERATURE = 286.00 (DEG C)  
 WATER TEMPERATURE = 0. (FISSION PER CC)  
 BURNUP

TEMPERATURE (DEG - C)  
 PELLETT CENTER TEMPERATURE = 2572.4  
 PELLETT VOLUMETRIC AVERAGE TEMPERATURE = 1619.4  
 PELLETT OUTER SURFACE TEMPERATURE = 724.17  
 CLADDING INNER SURFACE TEMPERATURE = 383.71  
 CLADDING OUTER SURFACE TEMPERATURE = 294.70  
 WATER TEMPERATURE = 286.00  
 CLADDING CORROSION LAYER DELTA T (TOTAL) = 89.011  
 CLADDING CORROSION LAYER DELTA T (OUTER) = 0.  
 METAL CORROSION LAYER DELTA T (INNER) = 89.011  
 CLADDING CORROSION LAYER DELTA T (INNER) = 0.  
 WATER CLAD SURFACE DELTA T = 8.6988

PEAK TEMPERATURE AND LINEAR HEAT RATING  
 TEMPERATURE 2572.4 (DEG-C) FROM LIN.H-RATE 610.00 (W / CM)

GAP CONDUCTANCE H-GAS H-SOLID H-GAS H-RAUATION  
 .46190 0. .45931 .25R27E-02 (W / SQCM-DEG-C)  
 813.40 0. 808.85 4.5481 (HTU / SOFT-H-NEG.F)

PLENUM PRESSURE\*\*INITIAL(AT RT) 1.0000 KG / SQCM \*\*FINAL(AT OPERATION) 3.2399 KG / SQCM  
 THERMAL CONDUCTIVITY OF GAS MIXTURE = .26412E-02W/CM-DEG.C

THERMAL CONDUCTIVITY EQUATION \*\*\*\*\*6E(1967) \*\*\*\*\* IS USED

PELLET CLAD SOLID CONTACT PRESSURE \*\*ACTUAL 0. \*\*INPUT 25.000 KG/SQCM

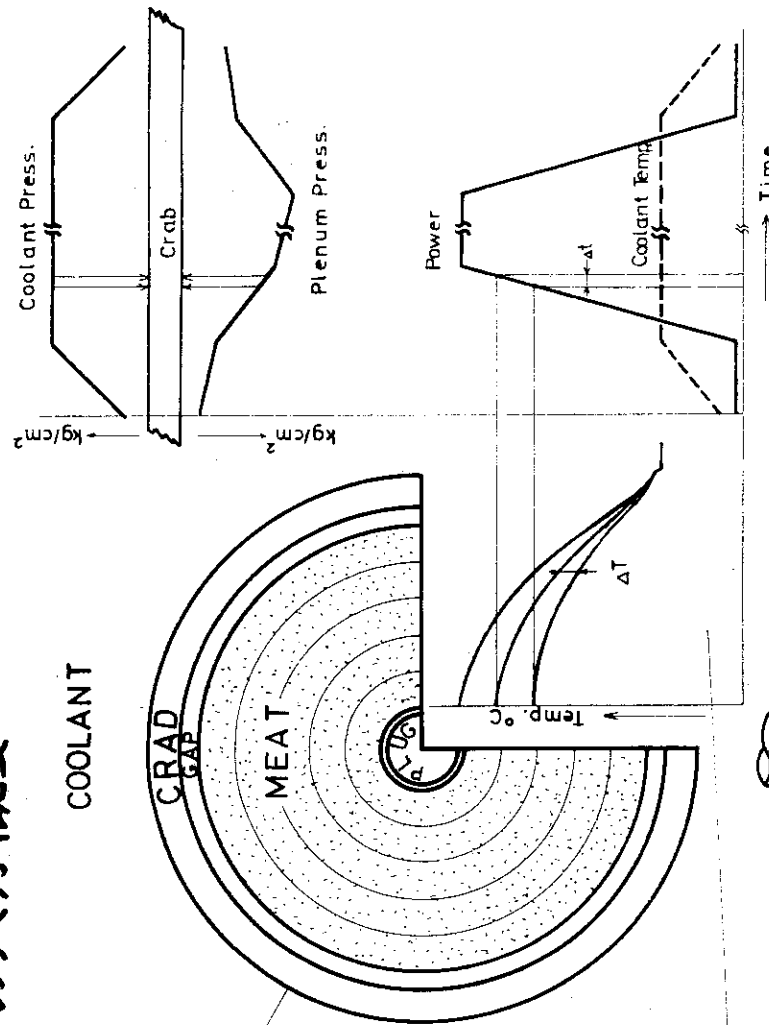
SWELLING FRACTIONAL GAS RELEASE  
 SWOLLEN VOLUME(CM) VOL.GROWTH TEMP.DEG-CC  
 0. 1-1518 0. 1815.6

\*\*\*\*\* BURNUP GA 0.0 NANODE, INTEGRATED FAST FLUX GA .50000E+21 (NEUTRON/SQCM) TO INPUT SAREIE I-HASUGA  
 CREEP STRAIN=0.0 TO SITE KEISAN SIMASITA

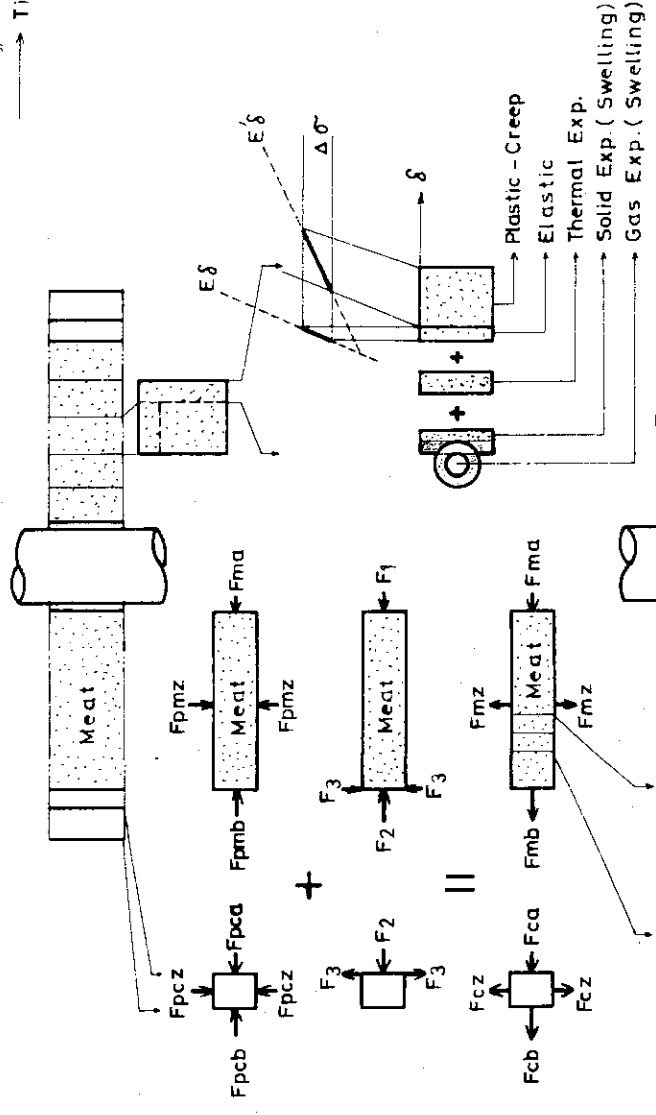
# FREC-1 の入力概要

DIMENSION
NUMBER OF RINGS
RADIUS OF RINGS

HISTORY-CARD
TIME INTERVALS
COOLANT TEMP.
COOLANT PRESS.
POWER
PLENUM PRESS.



TEMPERATURE
THERMAL CONDUCTIVITY
HEAT TRANSFER COEFF.
CLAD SURFACE, GAP



MATERIAL PROPERTY, ETC.
THERMAL EXP. COEFF.
ELASTIC PROPERTY
PLASTIC PROPERTY
SOLID SWEELLING EXP.
GAS SWEELLING EXP.
PORE DISTRIBUTION

MAJOR OUTPUT
DISPLACEMENT OF EACH RING
STRESS OF EACH RING
STRAIN OF EACH RING
CONTACT FORCE





```

599. 0. 0. 0.
600. 1. -5. 61.5. 277. 61.5. 277. 61.5. 277. * PRESSURE
601. 1. 25. 277. 277. 277. 277. 277. * TEMPERATURE
602. 0. 0. 0. 1.0. 0. 1.0. 0. 1.0. 0. * @G/@GMAX --- ROT(5)
603. 0. 0. 4. 4. 4. 4. 4. 4. * DELTA TIME (IN HOUR)
604. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. * GAP PRESSURE
605. 0. 2.6+20. 2.0+21. 1.0+12. 2.0+13. 1.0+14. 1.0+15. 1.0+16.
900. 0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0.
901. 0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0.
902. 5.2+2. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0.
903. 1.0+3. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0. 1.0.
904. 0.0032. 0.567. 0.567. 11.9. 84.8054. 0. 0. 0. 273.15 * DUMMY
905. 0. 0. 0. 70.0. 1.0-3. 0. 0. 5000.0 * CHANGE LJMIT
906. 1.0. 0. 0. 1.0. 0. 0. 0. 0.
907. 0. 0. 0. 1.0. 0. 0. 0. 0.
908. 0.25. 1.0-5. 15.0. 7.5. 0.5. 0. 0. 1.0+5. 2000.0
909. 2.3. 3.3. 2.3. 3.3.
910. 0. 0. 1.0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.
1000. 6.0. 1.0. 1.0. 1000.0. 1.0. 673. 0. 2.885 -3
1100. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1101. 0.1066. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1102. 0.2132. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1103. 0.3198. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1104. 0.4264. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1105. 0.533. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. 0.0. * JPRD TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
1200. 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1201. 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1202. 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1203. 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1204. 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1205* 0. 5.0-25. 0. 1.0-2. 1.0. 1.00+7. 0. 1.00+7. * REVICED 1973-5-16
1206* 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 1. 2- 0.1. 0. 0. 5021
1207* 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 1. 2- 0.1. 0. 0. 6021
1208* 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 1. 2- 0.1. 0. 0. 8021
1209* 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 7+ 00.1. 0. 1. 2- 0.1. 0. 0. 9021
1300. 1.0. 1.0. 1.0. 3.333 -1. 3.333 -1. 2.0. 1.0
1400. 0. 6.0 +3. 1.0 +4. 3.2 +13. 1.519 +5. 0. 0. 0
1500. 1.0. 0.95. 2.0. 0.96. 4.0. 0.291. 6.10 -2. 1.0. 1.0. 1.0
1610. 0. 8.3 -6. 2.14 +6. 0.291. 6.10 -2. 1.0. 1.0. 1.0
1611. 0. -7.9. 1.0. -45. 20. 18.5
1612. 0. -6.6. 1.0. -45. 20. 18.5
1613. 0. -5.9. 1.0. -45. 20. 18.5
1620. 1000. 10.5 -6. 1.84 +6. 0.291. 2.75 -2. 1.0. 1.0. 1.0
1621. 0. -7.7. 1.43. -34. 20. 18.5. 0. 0
1622. 0. -6.8. 1.23. -34. 20. 18.5. 0. 0
1623. 0. -6.1. 1.23. -34. 20. 18.5. 0. 0
1630. 2500. 13.8 -6. 3.0 +5. 0.291. 2.24 -2. 1.0. 1.0. 1.0
1631. 0. 2.64. 4.81. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1632. 0. 1.56. 5.06. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1633. 0. 0.72. 5.06. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1640. 3500. 16.0 -6. 3.0 +5. 0.291. 4.0 -2. 1.0. 1.0. 1.0
1641. 0. 2.64. 4.81. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1642. 0. 1.56. 5.06. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1643. 0. 0.72. 5.06. -8.0. 20. 18.5. 0. 0
1700. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0.

```

FREC-1 INPUT DATA LIST

```

2000 4.0 0. 1.0 1. +3 2. 0. 0. 2.885-3
2100 0.5415 0. 0. 0. 0. 0. 0. * JPDR TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
2101 0.5648 0. 0. 0. 0. 0. 0. * JPDR TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
2102 0.5881 0. 0. 0. 0. 0. 0. * JPDR TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
2103 0.6115 0. 0. 0. 0. 0. 0. * JPDR TEST CASE INITIAL RADIUS INPUT
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 6.0 1.0 0. 0. 0. 0
2610 0 5.62-6 9.8 +5 0.325 0.117 1 1 1 *ZRY MECH. PROP
2611 0 -12.87 3.8 -6.95 2.04 18.5
2612 0 -14.14 4.71 -6.52 1.3 18.5
2613 0 -15.23 5.52 -6.07 0.64 18.5
2620 150 6.09-6 8.85+5 0.325 0.136 1 1 1 *ZRY ME H. PROP
2621 0 -11.44 3.8 -5.58 2.04 18.5
2622 0 -13.36 4.71 -4.66 1.3 18.5
2623 0 -14.79 5.52 -3.78 0.64 18.5
2630 300 6.56-6 7.9 +5 0.325 0.155 1 1 1 *ZRY MECH. PROP
2631 0 -10.77 3.8 -4.61 2.04 18.5
2632 0 -12.57 4.71 -3.16 1.3 18.5
2633 0 -14.18 5.52 -1.85 0.64 18.5
2640 450 7.04-6 6.95+5 0.325 0.174 1 1 1 *ZRY MECH. PROP
2641 0 -10.77 3.8 -4.61 2.04 18.5
2642 0 -12.57 4.71 -3.16 1.3 18.5
2643 0 -14.18 5.52 -1.85 0.64 18.5
2700 2.928 -25 2.46 -37.4 1.0 -4 2.0 0 0 0
2800 0 1.2 +14. 2 +4 1.2 +14 0 0 0 0
5000 10 7 1 1 1 1 8 0
5001 3 1 +10 7 908 0 *REVISED 1973-4-20
5002 0 0 3+20 20-3 6+20 45-3 9+20 71-3 12+20 105-3
5003 0 0 5 18 13 -5 2 +19 395 -6 5 +19 62 -5 1 +20 75 -5 3 +20 84 -5 2 +21 145 -5
5004 0 1 1 +10 1 1 +20 1 1 +21 1 1 +22 1 1 3 +21 1 1 5 +21 1 1 +22 1 1
5005 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5006 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5007 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5008 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
9900 22000000 0R6
9900 00000000 02000000 0R5
9900 00000000 00220000 0R5
9900 00000000 00002000 0R5
9900 00000000 00000002 0R5
9900 0R1 :00220000 0R4
9900 0R1 :00000020 0R4
9900 0R2 :00200000 0R3
9900 0R2 :00000020 0R3
9900 0R4 :00000022 0R1
9900 0R5 :00200000 00000000
9900 0R5 :20000000 00000000 *GROG PRINT
9900 0R5 :02000000 00000000 *GROF PRINT
9900 0R5 :00002000 00000000 *PLEM PRINT
9900 0R5 :00000200 00000000 *TEMP PRINT
9900 0R6 :00000020 00000000 *TMPE PRINT
9900 2R7 :20000000 *SSST PRINT
9900 0R7 *NO PRINT

```



FREC-1 INPUT DATA LIST

73-07-05

PAGE 5

F(1)	F(2)	F(3)	FDOT(1)	FDOT(2)	FDOT(3)					900
0.0	0.26000E 21	0.20000F 22	0.10000E 13	0.20000E 14	0.10000E 15	0	0	0		900
TG(K)	DFT(1,K)	DFT(2,K)	DFT(3,K)	RGASN(K)	ZUYKR					90K
0.0	0.10000E 01	0.10000F 01	0.10000F 01	0.21100E 23	0.10000E 04	0	0	0		901
0.52000E 03	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000F 01	0.12250E 19	0.20000E 04					902
0.10000E 04	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000F 01	0.69000E 17	0.30000E 04					903
CGAP	HGAP	HNOGAP	HWATER	R(VDW)	A(VDW)	B(VDW)	TABS			904
0.32000E-02	0.56700E 00	0.56700F 00	0.11900F 02	0.84805E 02	0.0	0.0	0.27315E 03			904
FCORE	FCON(R)	FCON(Z)	CSCMAX)	DE(MAX)	RPLUG	ØPLUG	TPLUG			905
0.0	0.0	0.0	0.70000E 02	0.10000E-02	0.0	0.0	0.50000E 04			905
SGMIN	MPØ	MCORE	MGAS	MGL	EDOGS	MFILE	PFILE			906
0.10000E 01	0.0	0.0	0.10000E 01	0.0	0.0	0.0	0.0			906
MCEE	DVMAX	HIST	RAP	RBP	MAXC	MU	PCOLL			907
0.0	0.0	0.10000E 01	0.0	0.0	0.0	0.10000E 06	0.20000E 04			907
FRCOL	DTMIN	SIGMA	SUPER	MAXPOR	NTPR					908
0.25000E 00	0.10000E-04	0.15000E 02	0.75000E 01	0.50000E 00	0.0	0	0			908
RFACTT	PFACTT	RFACTC	PFACTC							909
0.23000E 01	0.33000E 01	0.23000F 01	0.33000E 01			0	0			909
FMSUP	FSUP	KSUP	ESUP	ESLIP	ASUP					910
0.0	0.0	0.10000E 01	0.0	0.0	0.0	0	0			910

FREC-1 INPUT DATA LIST

NR	NG	RSC	RSP	MCGRP@	@GMAX	EZ	S. TEM.	
0.50000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 04	0.10000E 01	0.67300E 03	0.0	0.28850E-02	1000
RADIUS(KR)	SK(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
0.10660E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1101
0.21320E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1102
0.31980E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1103
0.42640E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1104
0.53300E 00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1105
MOLES(KG)	AM(KG)	BM(KG)	VH(KG)	V(KG)	NH(KG)	MNHT(KG)	NHT(KG)	12JK
0.0	0.50000E-24	0.0	0.10000E-01	0.10000E 01	0.10000E 08	0.0	0.10000E 08	1200
0.0	0.50000E-24	0.0	0.10000E-01	0.10000E 01	0.10000E 08	0.0	0.10000E 08	1200
0.0	0.50000E-24	0.0	0.10000E-01	0.10000E 01	0.10000E 08	0.0	0.10000E 08	1200
0.0	0.50000E-24	0.0	0.10000E-01	0.10000E 01	0.10000E 08	0.0	0.10000E 08	1200
0.0	0.50000E-24	0.0	0.10000E-01	0.10000E 01	0.10000E 08	0.0	0.10000E 08	1200
RALPHA(R)	RALPHA(C)	RALPHA(Z)	RV(R)	RV(C)	RV(Z)	DTMAX	DTEDGE	1300
0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.33330E 00	0.33330E 00	0.33330E 00	0.20000E 01	0.10000E 01	1300
P(1)	P(2)	P(3)	AV	@V	AS	@S	RGB	1400
0.0	0.60000E 04	0.10000E 05	0.32000E 14	0.15190E 06	0.0	0.0	0.0	1400
KR(*1)	R@ (1)	KR	R@ (KR)	KR	R@ (KR)	KR	R@ (KR)	1500
0.10000E 01	0.95000E 00	0.20000E 01	0.96000E 00	0.40000E 01	0.98000E 00	0.60000E 01	0.10000E 01	1500
TEMP(T(J))	ALPHAT(J)	FT(J)	NUT(J)	CT(J)	RVP(1,J)	RVP(2,J)	RVP(3,J)	16J0
0	GFT(K,J)	GFT(K,J)	PFT(K,J)	@FT(K,J)	WCS(K,J)	0	0	16JK
0.0	0.83000E-05	0.21400E 07	0.29100E 00	0.61000E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	1610
0.0	-0.79000E 01	0.10000E 01	0.45000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1611
0.0	-0.66000E 01	0.10000E 01	0.45000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1612
0.0	-0.59000E 01	0.10000E 01	0.45000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1613
0.10000E 04	0.10500E-04	0.18400E 07	0.29100E 00	0.27500E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	1620
0.0	-0.77000E 01	0.14300E 01	0.34000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1621
0.0	-0.68000E 01	0.12300E 01	0.34000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1622
0.0	-0.61000E 01	0.12300E 01	0.34000E 02	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1623
0.25000E 04	0.13800E-04	0.30000E 06	0.29100E 00	0.22400E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	1630
0.0	0.26400E 01	0.48100E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1631
0.0	0.15600E 01	0.50600E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1632
0.0	0.72000E 00	0.50600E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1633
0.35000E 04	0.16000E-04	0.30000E 06	0.29100E 00	0.40000E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	0.10000E 01	1640
0.0	0.26400E 01	0.48100E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1641
0.0	0.15600E 01	0.50600E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1642
0.0	0.72000E 00	0.50600E 01	0.80000E 01	0.20000E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	0.18500E 02	1643
CLIN	CPW	XPOW	EINT	NPOW	0	0	0	1700
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				1700
TIME	... NVMAX	TIME	... NVMAX	TIME	... NVMAX	TIME	... NVMAX	180K
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0				1800

FREC-1 INPUT DATA LIST

73-07-05

PAGE 7

NR NG RSC RSP MCGP@ @GMAX EZ S.TEM. 2000  
 0.4000E 01 0.0 0.1000E 01 0.1000E 04 0.2000E 01 0.0 0.0 0.28850E-02 2000

RADIUS(KR) SR(KE) SC(KE) SZ(KE) FGC(KE) EGZ(KE) EG(KE) EV(KE) 11JK 2100  
 0.54150E 00 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2101  
 0.56480E 00 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2102  
 0.58810E 00 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2103  
 0.61150E 00 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2300

RALPHA(R) RALPHA(C) RALPHA(Z) RV(R) RV(C) RV(Z) DTMAX DTEDGE 2300  
 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01-0.7220E 00-0.1100E-01 0.7330E 00 0.3850E 02 0.1350E 02 2300

P(1) P(2) P(3) AV @V AS @S RGB 2400  
 0.1000E 01 0.2000E 01 0.3000E 01 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 2400

KR(=1) R@ (1) KR R@ (KR) KR R@ (KR) KR R@ (KR) 2500  
 0.1000E 01 0.1000E 01 0.6000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 2500

TEMP(J) ALPHAT(J) ET(J) NUT(J) CT(J) RVP(1,J) RVP(2,J) RVP(3,J) 26J0  
 CFT(K,J) GFT(K,J) PFT(K,J) @FT(K,J) WCS(K,J) 0 0 26JK  
 0.0 0.5620E-05 0.9800E 06 0.3250E 00 0.1170E 00 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 2610  
 0.0 -0.12870E 02 0.3800E 01-0.6950E 01 0.2040E 01 0.1850E 02 2611  
 0.0 -0.14140E 02 0.4710E 01-0.6520E 01 0.1300E 01 0.1850E 02 2612  
 0.0 -0.15230E 02 0.5520E 01-0.6070E 01 0.6400E 00 0.1850E 02 2613

0.1500E 03 0.6090E-05 0.8850E 06 0.3250E 00 0.1360E 00 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 2620  
 0.0 -0.11440E 02 0.3800E 01-0.5580E 01 0.2040E 01 0.1850E 02 2621  
 0.0 -0.13360E 02 0.4710E 01-0.4660E 01 0.1300E 01 0.1850E 02 2622  
 0.0 -0.14790E 02 0.5520E 01-0.3780E 01 0.6400E 00 0.1850E 02 2623

0.3000E 03 0.6560E-05 0.7900E 06 0.3250E 00 0.1550E 00 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 2630  
 0.0 -0.10770E 02 0.3800E 01-0.4610E 01 0.2040E 01 0.1850E 02 2631  
 0.0 -0.12570E 02 0.4710E 01-0.3160E 01 0.1300E 01 0.1850E 02 2632  
 0.0 -0.14180E 02 0.5520E 01-0.1850E 01 0.6400E 00 0.1850E 02 2633

0.4500E 03 0.7040E-05 0.6950E 06 0.3250E 00 0.1740E 00 0.1000E 01 0.1000E 01 0.1000E 01 2640  
 0.0 -0.10770E 02 0.3800E 01-0.4610E 01 0.2040E 01 0.1850E 02 2641  
 0.0 -0.12570E 02 0.4710E 01-0.3160E 01 0.1300E 01 0.1850E 02 2642  
 0.0 -0.14180E 02 0.5520E 01-0.1850E 01 0.6400E 00 0.1850E 02 2643

CLIM CPOW XPOW EINT NPOW 0 0 0 2700  
 0.29280E-24 0.24600E-36 0.4000E 01 0.1000E-03 0.2000E 01 2700

TIME . . . NVMAX TIME . . . NVMAX TIME . . . NVMAX 280K  
 0.0 0.1200E 15 0.2000E 05 0.1200E 15 0.0 0.0 0.0 2800

50

FREC-1 INPUT DATA LIST

NUT(1)	NUT(2)	NUT(3)	NUT(4)	NUT(5)	NUT(6)	NUT(7)	NUT(8)	
10	7	1	1	1	1	8	0	5000
CFUEL	CCLAD	PCOR						5000
0.31000E 11	0.79080E 01	0.0						5001
TBX(1,1)	TBY(1,1)	TBX(2,1)	TBY(2,1)	TBX(3,1)	TBY(3,1)			5001
0.0	0.0	0.30000E 21	0.20000E-01	0.60000E 21	0.45000E-01	0.90000E 21	0.71000E-01	5002
0.12000E 22	0.10500E 00	0.15000E 22	0.14400E 00	0.18000E 22	0.18500E 00	0.21000E 22	0.23000E 00	5002
0.24000E 22	0.27300E 00	0.27000E 22	0.32300E 00					5003
TBX(1,2)	TBY(1,2)	TBX(2,2)	TBY(2,2)	TBX(3,2)	TBY(3,2)			5003
0.0	0.0	0.50000E 19	0.13000E-03	0.20000E 20	0.39500E-03	0.50000E 20	0.62000E-03	5004
0.10000E 21	0.75000E-03	0.30000E 21	0.84000E-03	0.20000E 22	0.14500E-02			5004
TBX(1,3)	TBY(1,3)	TBX(2,3)	TBY(2,3)	TBX(3,3)	TBY(3,3)			5005
0.0	0.10000E 01	0.10000E 11	0.10000E 11	0.10000E 21	0.10000E 01	0.10000E 22	0.10000E 01	5005
0.20000E 22	0.10000E 01	0.30000E 22	0.10000E 22	0.30000E 22	0.10000E 01	0.10000E 23	0.10000E 01	5006
SHUT(1)	SHUT(2)	SHUT(3)	SHUT(4)	SHUT(5)	SHUT(6)	TOHF		
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)			
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
N12	N22	N15	N18	N28	N28	N5002	N5003	N5004
5	0	12	0	0	0	20	14	16
KAKE(1)	KAKE(2)	KAKE(3)	KAKE(4)	KAKE(5)	KAKE(6)	KAKE(7)	KAKE(8)	
0	0	0	0	0	0	0	0	9900
								9900

LIMIT  
2

91

FREC-1 OUTPUT  
INPUT TABLE LIST

73-07-05 PAGE 9

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

TM(1,1)= 0.0  
 TM(2,1)= 1000.0  
 TM(3,1)= 2500.0  
 TM(4,1)= 3500.0  
 TGAS(1)= 0.0  
 TGAS(2)= 520.0  
 TGAS(3)= 1000.0  
 FMS(1,2)= 0.0  
 CGFT(1,1)= 1.0000  
 CGFT(1,2)= 1.0000  
 CGFT(1,3)= 1.0000  
 FMS(2,2)= 0.26000E 21  
 CGFT(2,1)= 1.0000  
 CGFT(2,2)= 1.0000  
 CGFT(2,3)= 1.0000  
 FMS(3,2)= 0.20000E 22  
 CGFT(3,1)= 1.0000  
 CGFT(3,2)= 1.0000  
 CGFT(3,3)= 1.0000

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

TM(1,1)= 0.0  
 TM(2,1)= 1000.0  
 TM(3,1)= 2500.0  
 TM(4,1)= 3500.0  
 FMS(1,1)= 0.10000E 13  
 CSTM(1,1,1)= -7.9000  
 CSTM(1,2,1)= -7.7000  
 CSTM(1,3,1)= 2.6400  
 CSTM(1,4,1)= 2.6400  
 FMS(2,1)= 0.20000E 14  
 CSTM(2,1,1)= -6.6000  
 CSTM(2,2,1)= -6.8000  
 CSTM(2,3,1)= 1.5600  
 CSTM(2,4,1)= 1.5600  
 FMS(3,1)= 0.10000E 15  
 CSTM(3,1,1)= -5.9000  
 CSTM(3,2,1)= -6.1000  
 CSTM(3,3,1)= 0.72000  
 CSTM(3,4,1)= 0.72000

\*CREEP COEFF. \*CFT( , , ) \* FORTRAN NAME= CSTM(3,4,2) INTEG. FLUX (N/CM2) AND TEMPERATURE TABLIS  
 (CLAD)

TM(1,2)= 0.0  
 TM(2,2)= 150.00  
 TM(3,2)= 300.00  
 TM(4,2)= 450.00  
 FMS(1,2)= 0.0  
 CSTM(1,1,2)= -12.870  
 CSTM(1,2,2)= -11.440  
 CSTM(1,3,2)= -10.770  
 CSTM(1,4,2)= -10.770  
 FMS(2,2)= 0.26000E 21  
 CSTM(2,1,2)= -14.140  
 CSTM(2,2,2)= -13.360  
 CSTM(2,3,2)= -12.570  
 CSTM(2,4,2)= -12.570  
 FMS(3,2)= 0.20000E 22  
 CSTM(3,1,2)= -15.230  
 CSTM(3,2,2)= -14.790  
 CSTM(3,3,2)= -14.180  
 CSTM(3,4,2)= -14.180

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

TM(1,1)= 0.0  
 TM(2,1)= 1000.0  
 TM(3,1)= 2500.0  
 TM(4,1)= 3500.0  
 FMS(1,1)= 0.10000E 13  
 GSTM(1,1,1)= 1.0000  
 GSTM(1,2,1)= 1.4300  
 GSTM(1,3,1)= 4.8100  
 GSTM(1,4,1)= 4.8100  
 FMS(2,1)= 0.20000E 14  
 GSTM(2,1,1)= 1.0000  
 GSTM(2,2,1)= 1.2300  
 GSTM(2,3,1)= 5.0600  
 GSTM(2,4,1)= 5.0600  
 FMS(3,1)= 0.10000E 15  
 GSTM(3,1,1)= 1.0000  
 GSTM(3,2,1)= 1.2300  
 GSTM(3,3,1)= 5.0600  
 GSTM(3,4,1)= 5.0600

\*CREEP EXPONENT \*GFT( , , ) \* FORTRAN NAME= GSTM(3,4,2) INTEG. FLUX (N/CM2) AND TEMPERATURE TABLIS  
 (CLAD)

TM(1,2)= 0.0  
 TM(2,2)= 150.00  
 TM(3,2)= 300.00  
 TM(4,2)= 450.00  
 FMS(1,2)= 0.0  
 GSTM(1,1,2)= 3.8000  
 GSTM(1,2,2)= 3.8000  
 GSTM(1,3,2)= 3.8000  
 GSTM(1,4,2)= 3.8000  
 FMS(2,2)= 0.26000E 21  
 GSTM(2,1,2)= 4.7100  
 GSTM(2,2,2)= 4.7100  
 GSTM(2,3,2)= 4.7100  
 GSTM(2,4,2)= 4.7100  
 FMS(3,2)= 0.20000E 22  
 GSTM(3,1,2)= 5.5200  
 GSTM(3,2,2)= 5.5200  
 GSTM(3,3,2)= 5.5200  
 GSTM(3,4,2)= 5.5200



\*PLASTIC COEFF. \*PFT( , , ) \* FORTRAN NAME = PSTM(3.4.2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS  
(MEAT)

TM(1.1)= 0.0 FMS(1.1) = 0.10000E 13 FMS(2.1) = 0.20000E 14 FMS(3.1) = 0.10000E 15  
 TM(2.1)= 1000.0 PSTM(1.1,1) = -45.000 PSTM(2.1,1) = -45.000 PSTM(3.1,1) = -45.000  
 TM(3.1)= 2500.0 PSTM(1.2,1) = -34.000 PSTM(2.2,1) = -34.000 PSTM(3.2,1) = -34.000  
 TM(4.1)= 3500.0 PSTM(1.3,1) = -8.00000 PSTM(2.3,1) = -8.00000 PSTM(3.3,1) = -8.00000  
 PSTM(1.4,1) = -8.00000 PSTM(2.4,1) = -8.00000 PSTM(3.4,1) = -8.00000

\*PLASTIC COEFF. \*PFT( , , ) \* FORTRAN NAME = PSTM(3.4.2) INTEG. FLUX (N/CM2) AND TEMPERATURE TABLIS  
(CLAD)

TM(1.2)= 0.0 FMS(1.2) = 0.0 FMS(2.2) = 0.26000E 21 FMS(3.2) = 0.20000E 22  
 TM(2.2)= 150.00 PSTM(1.1,2) = -6.9500 PSTM(2.1,2) = -6.5200 PSTM(3.1,2) = -6.0700  
 TM(3.2)= 300.00 PSTM(1.2,2) = -5.5800 PSTM(2.2,2) = -4.6600 PSTM(3.2,2) = -3.7800  
 TM(4.2)= 450.00 PSTM(1.3,2) = -4.6100 PSTM(2.3,2) = -3.1600 PSTM(3.3,2) = -1.8500  
 PSTM(1.4,2) = -4.6100 PSTM(2.4,2) = -3.1600 PSTM(3.4,2) = -1.8500

\*PLASTIC EXPONENT \*@FT( , , ) \* FORTRAN NAME = @STM(3.4.2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS  
(MEAT)

TM(1.1)= 0.0 FMS(1.1) = 0.10000E 13 FMS(2.1) = 0.20000E 14 FMS(3.1) = 0.10000E 15  
 TM(2.1)= 1000.0 @STM(1.1,1) = 20.000 @STM(2.1,1) = 20.000 @STM(3.1,1) = 20.000  
 TM(3.1)= 2500.0 @STM(1.2,1) = 20.000 @STM(2.2,1) = 20.000 @STM(3.2,1) = 20.000  
 TM(4.1)= 3500.0 @STM(1.3,1) = 20.000 @STM(2.3,1) = 20.000 @STM(3.3,1) = 20.000  
 @STM(1.4,1) = 20.000 @STM(2.4,1) = 20.000 @STM(3.4,1) = 20.000

\*PLASTIC EXPONENT \*@FT( , , ) \* FORTRAN NAME = @STM(3.4.2) INTEG. FLUX (N/CM2) AND TEMPERATURE TABLIS  
(CLAD)

TM(1.2)= 0.0 FMS(1.2) = 0.0 FMS(2.2) = 0.26000E 21 FMS(3.2) = 0.20000E 22  
 TM(2.2)= 150.00 @STM(1.1,2) = 2.0400 @STM(2.1,2) = 1.3000 @STM(3.1,2) = 0.64000  
 TM(3.2)= 300.00 @STM(1.2,2) = 2.0400 @STM(2.2,2) = 1.3000 @STM(3.2,2) = 0.64000  
 TM(4.2)= 450.00 @STM(1.3,2) = 2.0400 @STM(2.3,2) = 1.3000 @STM(3.3,2) = 0.64000  
 @STM(1.4,2) = 2.0400 @STM(2.4,2) = 1.3000 @STM(3.4,2) = 0.64000

\*PLASTIC SLOPE \*WCS( , , ) \* FORTRAN NAME = WSTM(3.4.2) INTEG. FLUX (N/CM2) AND TEMPERATURE TABLIS  
(MEAT)

TM(1.1)= 0.0 FMS(1.1) = 0.10000E 13 FMS(2.1) = 0.20000E 14 FMS(3.1) = 0.10000E 15  
 TM(2.1)= 1000.0 WSTM(1.1,1) = 18.500 WSTM(2.1,1) = 18.500 WSTM(3.1,1) = 18.500  
 TM(3.1)= 2500.0 WSTM(1.2,1) = 18.500 WSTM(2.2,1) = 18.500 WSTM(3.2,1) = 18.500  
 TM(4.1)= 3500.0 WSTM(1.3,1) = 18.500 WSTM(2.3,1) = 18.500 WSTM(3.3,1) = 18.500  
 WSTM(1.4,1) = 18.500 WSTM(2.4,1) = 18.500 WSTM(3.4,1) = 18.500

\*PLASTIC SLOPE \*WCS( , , ) \* FORTRAN NAME = WSTM(3.4.2) FISSION RATE(FISS./CC/SEC) AND TEMPERATURE TABLIS  
(CLAD)

TM(1.2)= 0.0 FMS(1.2) = 0.0 FMS(2.2) = 0.26000E 21 FMS(3.2) = 0.20000E 22  
 TM(2.2)= 150.00 WSTM(1.1,2) = 18.500 WSTM(2.1,2) = 18.500 WSTM(3.1,2) = 18.500  
 TM(3.2)= 300.00 WSTM(1.2,2) = 18.500 WSTM(2.2,2) = 18.500 WSTM(3.2,2) = 18.500  
 TM(4.2)= 450.00 WSTM(1.3,2) = 18.500 WSTM(2.3,2) = 18.500 WSTM(3.3,2) = 18.500  
 WSTM(1.4,2) = 18.500 WSTM(2.4,2) = 18.500 WSTM(3.4,2) = 18.500

\*SOLID GROWTH FUNCTION \*PVP( , ) \* FORTRAN NAME= VPM(3,4,2)

(MEAT)  
 PVM(1,1) = 0.0  
 PVM(1,1,1) = 1.0000  
 PVM(2,1,1) = 1.0000  
 PVM(2,2,1) = 1.0000  
 PVM(3,1,1) = 1.0000  
 PVM(3,2,1) = 1.0000  
 PVM(3,3,1) = 1.0000  
 PVM(3,4,1) = 1.0000

(CLAD)  
 PVM(1,2) = 1.0000  
 PVM(1,1,2) = 1.0000  
 PVM(2,1,2) = 1.0000  
 PVM(2,2,2) = 1.0000  
 PVM(3,2,2) = 1.0000  
 PVM(3,3,2) = 1.0000  
 PVM(3,4,2) = 1.0000

\*MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL CONDUCTIVITY FOR MEAT AND CLAD

(MEAT)  
 THERM.EX.COEF(/DEG-C)  
 ATM(1,1) = 0.0  
 ATM(2,1) = 1000.0  
 ATM(3,1) = 2500.0  
 ATM(4,1) = 3500.0  
 YOUNGS MODULUS(KG/SCM)  
 ETM(1,1) = 0.21400E 07  
 ETM(2,1) = 0.18400E 07  
 ETM(3,1) = 0.30000E 06  
 ETM(4,1) = 0.30000E 06

(CLAD)  
 THERM.EX.COEF(/DEG-C)  
 ATM(1,2) = 0.56200E-05  
 ATM(2,2) = 0.60900E-05  
 ATM(3,2) = 0.65600E-05  
 ATM(4,2) = 0.70400E-05  
 YOUNGS MODULUS(KG/SCM)  
 ETM(1,2) = 0.98000E 06  
 ETM(2,2) = 0.88500E 06  
 ETM(3,2) = 0.79000E 06  
 ETM(4,2) = 0.69500E 06

AND TEMPERATURE

PVM(3,1) = 10000.  
 VPM(3,1,1) = 1.0000  
 VPM(3,2,1) = 1.0000  
 VPM(3,3,1) = 1.0000  
 VPM(3,4,1) = 1.0000

PVM(3,2) = 3.0000  
 VPM(3,1,2) = 1.0000  
 VPM(3,2,2) = 1.0000  
 VPM(3,3,2) = 1.0000  
 VPM(3,4,2) = 1.0000

FROM TABLS LINE NO.

THERM.COND.(W/CM,DEG-C)  
 CTM(1,1) = 0.61000E-01  
 CTM(2,1) = 0.27500E-01  
 CTM(3,1) = 0.22400E-01  
 CTM(4,1) = 0.40000E-01

CTM(1,2) = 0.11700  
 CTM(2,2) = 0.13600  
 CTM(3,2) = 0.15500  
 CTM(4,2) = 0.17400

POISSON RATIO  
 UTM(1,1) = 0.29100  
 UTM(2,1) = 0.29100  
 UTM(3,1) = 0.29100  
 UTM(4,1) = 0.29100

UTM(1,2) = 0.32500  
 UTM(2,2) = 0.32500  
 UTM(3,2) = 0.32500  
 UTM(4,2) = 0.32500

FREC-1 OUTPUT

1. KM = 1 (MEAT), 2 (CLAD)      KT = TEMPERATURE  
 FOR MEAT                            FOR CLAD  
 1 0.0                                    0.0                                    DEG-C  
 2 1000.0                                150.00                                DEG-C  
 3 2500.0                                300.00                                DEG-C  
 4 3500.0                                450.00                                DEG-C

FISSIONS/ CC-SEC                    NEUTRONS/ SQCM  
 MCGP# = 1                            MCGP# = ?  
 1 0.10000E 13  
 2 0.20000E 14  
 3 0.10000E 15

2.KM	KT	KF	SP(0.001)	SP(0.002)	SP(0.005)	SP(0.010)	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.	0.1028E 05	0.1077E 05	0.1115E 05	0.1154E 05	0.1208E 05	0.1251E 05
		2	8853.	9165.	9595.	9933.	0.1028E 05	0.1077E 05	0.1115E 05	0.1154E 05	0.1208E 05	0.1251E 05
		3	8853.	9165.	9595.	9933.	0.1028E 05	0.1077E 05	0.1115E 05	0.1154E 05	0.1208E 05	0.1251E 05
1	2	1	2495.	2583.	2704.	2800.	2898.	3034.	3141.	3252.	3404.	3525.
		2	2495.	2583.	2704.	2800.	2898.	3034.	3141.	3252.	3404.	3525.
		3	2495.	2583.	2704.	2800.	2898.	3034.	3141.	3252.	3404.	3525.
1	3	1	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
		2	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
		3	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
1	4	1	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
		2	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
		3	125.1	129.5	135.5	140.3	145.3	152.1	157.4	163.0	170.6	176.6
2	1	1	6073.	8530.	0.1337E 05	0.1877E 05	0.2637E 05	0.4132E 05	0.5805E 05	0.8153E 05	0.1278E 06	0.1795E 06
		2	0.3588E 05	0.6114E 05	0.1237E 06	0.2109E 06	0.3594E 06	0.7273E 06	0.1240E 07	0.2113E 07	0.4275E 07	0.7286E 07
		3	0.4405E 07	0.1301E 08	0.5446E 08	0.1609E 09	0.4752E 09	0.1989E 10	0.5875E 10	0.1735E 11	0.7263E 11	0.2149E 12
2	2	1	1294.	1817.	2847.	3999.	5618.	8803.	0.1237E 05	0.1737E 05	0.2722E 05	0.3823E 05
		2	1331.	2268.	4589.	7821.	0.1333E 05	0.2697E 05	0.4597E 05	0.7835E 05	0.1585E 06	0.2702E 06
		3	1164.	3437.	0.1439E 05	0.4250E 05	0.1235E 06	0.3234E 06	0.1552E 07	0.4584E 07	0.1919E 08	0.5667E 08
2	3	1	432.8	608.0	952.7	1338.	1880.	2945.	4137.	5811.	9106.	0.1279E 05
		2	93.36	159.1	322.0	548.8	935.3	1893.	3226.	5498.	0.1113E 05	0.1896E 05
		3	1.123	3.316	13.88	40.99	121.1	506.8	1497.	4422.	0.1851E 05	0.5467E 05
2	4	1	432.8	608.0	952.7	1338.	1880.	2945.	4137.	5811.	9106.	0.1279E 05
		2	93.36	159.1	322.0	548.8	935.3	1893.	3226.	5498.	0.1113E 05	0.1896E 05
		3	1.123	3.316	13.88	40.99	121.1	506.8	1497.	4422.	0.1851E 05	0.5467E 05

FREC-1 OUTPUT

KM = 1 (MEAT), 2 (CLAD) KT = TEMPERATURE  
 FOR MEAT FOR CLAD  
 1 0.0 DEG-C DEG-C  
 2 1000.0 DEG-C DEG-C  
 3 2500.0 DEG-C DEG-C  
 4 3500.0 DEG-C DFG-C

FISSIONS/ CC-SEC

MCGPQ = 1  
 1 0.10000E 13  
 2 0.20000E 14  
 3 0.10000E 15

NEUTRONS/ SOCM

MCGPQ = 2  
 0.10  
 0.26000E 21  
 0.20000E 22

3.KM	KT	KF	SCC ( 0.10E-08)	SCC ( 0.10E-07)	SCC ( 0.10E-06)	SCC ( 0.10E-05)	SCC ( 0.10E-04)	SCC ( 0.10E-03)	SCC ( 0.10E-02)	SCC ( 0.10E-01)
1	1	1	5.58599	55.8599	558.599	5585.99	55859.9	558599.	0.558599E 07	0.558599E 08
		2	0.279962	2.79962	27.9962	279.962	2799.62	27996.2	279962.	0.279962E 07
		3	0.558599E-01	0.558599	5.58599	55.8599	558.599	5585.99	55859.9	558599.
1	2	1	8.66980	43.3820	217.075	1086.20	5435.15	27196.5	136086.	680948.
		2	1.14415	7.43858	48.3613	314.417	2044.16	13289.9	86403.4	561745.
		3	0.308586	2.00625	13.0435	84.8009	551.326	3584.40	23303.7	151507.
1	3	1	0.267388	0.431560	0.696533	1.12420	1.81444	2.92848	4.72653	7.62857
		2	0.575630	0.907344	1.43021	2.25439	3.55351	5.60126	8.82905	13.9169
		3	0.843629	1.32978	2.09608	3.30397	5.20793	8.20906	12.9396	20.3963
1	4	1	0.267388	0.431560	0.696533	1.12420	1.81444	2.92848	4.72653	7.62857
		2	0.575630	0.907344	1.43021	2.25439	3.55351	5.60126	8.82905	13.9169
		3	0.843629	1.32978	2.09608	3.30397	5.20793	8.20906	12.9396	20.3963
2	1	1	733.704	1344.87	2465.11	4518.50	8282.33	15181.3	27827.1	51006.6
		2	867.751	1414.85	2306.87	3761.30	6132.70	9999.22	16303.5	26582.4
		3	945.634	1435.10	2177.92	3305.23	5016.04	7612.37	11552.6	17532.3
2	2	1	308.464	565.409	1036.38	1899.67	3482.06	6382.56	11699.1	21444.2
		2	592.639	966.282	1575.50	2568.81	4188.39	6829.06	11134.6	18154.7
		3	787.069	1194.46	1812.72	2751.00	4174.94	6335.92	9615.45	14592.5
2	3	1	205.537	376.745	690.566	1265.79	2320.18	4252.84	7795.37	14288.8
		2	402.774	656.713	1070.75	1745.84	2846.55	4641.23	7567.41	12338.5
		3	610.247	926.115	1405.48	2132.97	3237.00	4912.50	7455.25	11314.1
2	4	1	205.537	376.745	690.566	1265.79	2320.18	4252.84	7795.37	14288.8
		2	402.774	656.713	1070.75	1745.84	2846.55	4641.23	7567.41	12338.5
		3	610.247	926.115	1405.48	2132.97	3237.00	4912.50	7455.25	11314.1

4\*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)	F/CC	EVS(MEAT)	FROM INIOUT LINE NO.
0.0	0.0	0.10000E-02	0.50000E-02	0.20000E 21	0.14000E-01	0.30000E 21	0.20000E-01	0.70000E 21	0.55000E-01	
0.40000E 21	0.27000E-01	0.50000E 21	0.36000E-01	0.60000E 21	0.45000E-01	0.70000E 21	0.55000E-01	0.80000E 21	0.63000E-01	
0.80000E 21	0.63000E-01	0.90000E 21	0.71000E-01	0.10000E 22	0.85000E-01	0.11000E 22	0.95000E-01	0.12000E 22	0.14400	
0.12000E 22	0.10500	0.13000E 22	0.12000	0.14000E 22	0.130000	0.15000E 22	0.14400	0.16000E 22	0.19000E 22	0.20000
0.16000E 22	0.15500	0.17000E 22	0.17000	0.18000E 22	0.18500	0.19000E 22	0.20000	0.20000E 22	0.24500	0.25700
0.20000E 22	0.21500	0.21000E 22	0.23000	0.22000E 22	0.24500	0.23000E 22	0.30500	0.24000E 22	0.27000E 22	0.32300
0.24000E 22	0.27300	0.25000E 22	0.29000	0.26000E 22	0.30500	0.27000E 22	0.37700	0.28000E 22		
0.28000E 22	0.34000	0.29000E 22	0.36000	0.30000E 22	0.37700					

CYGR0 INPUT DATA LIST

EVS(MEAT)	EVS(CCLAD)	FDOT	F	P(WATER)	@G/@GMAX	T(WATER)	FISS	PCOLL	TIME
0.0	0.0	0.0	0.0	0.10000E 01	0.0	0.25000E 02	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.61500E 02	0.0	0.27700E 03	0.0	0.0	0.40000E 01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.61500E 02	0.10000E 01	0.27700E 03	0.0	0.0	0.40000E 01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.61500E 02	0.10000E 01	0.27700E 03	0.0	0.0	0.10000E 01
0.0	0.0	0.0	0.0	0.61500E 02	0.0	0.27700E 03	0.0	0.0	0.40000E 01

FROM OUTTEN

TIME = 0.0 - 0.0 , DIFFERENCE TIME = 0.0

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DM(3,1) 0.0 0.53300 1.00000 DDM(3,1) 0.0 0.0 0.0  
DC(3,1) 0.54150 0.61150 1.00000 DDC(3,1) 0.0 0.0 0.0

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0  
DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0

(CLAD) 0.0 0.0 0.0  
(CLAD) 0.0 0.0 0.0

GAP , D(3,1) = 0.0 , 0.85000E-02, 0.0 , DD(3,1) = 0.0 , 0.0 , 0.0

HEAT FLUX = 0.0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

DE(3,1,K) 0.0 0.106600 0.213200 0.319800 0.426400 0.533000  
0.106600 0.213200 0.319800 0.426400 0.533000  
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

DE(3,1,K) 0.541500 0.564800 0.588100  
0.564800 0.588100 0.611500  
1.00000 1.00000 1.00000  
0.0 0.0 0.0

DDE(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DDE(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DFE(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DFE(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DDS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DDS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

FS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

FS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DFS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

DFS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0

FROM OUTTEM

TIME = 0.0 - 0.0 , DIFFERENCE TIME = 0.0

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DM(3,1) 0.0 0.53300 1.0000 DDM(3,1) 0.0 0.0 0.0  
DC(3,1) 0.54150 0.61150 1.0000 DDC(3,1) 0.0 0.0 0.0

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0  
DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0

(CLAD) 0.0 -3.84217 -1.17474  
(CLAD) 0.0 0.0 0.0

GAP , D(3,1) = 0.0 , 0.850000E-02, 0.0 , DD(3,1) = 0.0 , 0.0 , 0.0

HEAT FLUX = 0.0

25.000 25.000 25.000 25.000 25.000 25.000 25.000 25.000

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

0.0 0.106600 0.213200 0.319800 0.426400 0.541500 0.564800 0.588100  
0.106600 0.213200 0.319800 0.426400 0.533000 0.564800 0.588100 0.611500  
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000  
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRAIN DS(3,1,K) DS(3,1,K) DS(3,1,K)  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRAIN RATE DDS(3,1,K) DDS(3,1,K) DDS(3,1,K)  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRESS FS(3,1,K) FS(3,1,K) FS(3,1,K)  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRESS RATE DFS(3,1,K) DFS(3,1,K) DFS(3,1,K)  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

FROM OUTTEM

TIME = 3.50 - 4.00 , DIFFERENCE TIME = 0.500

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DMC(3,1) 0.0 0.53417 1.0003 DDM(3,1) 0.0 0.29974E-03 0.56129E-03  
DC(3,1) 0.54205 0.61217 1.0002 DDC(3,1) 0.14233E-03 0.17603E-03 0.37822E-03

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0

CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0

ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0

DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0

GAP , D(3,1) = 0.0 , 0.78815E-02, -0.748720E-03, DD(3,1) = 0.0 , -0.157410E-03, -0.183076E-03,

HEAT FLUX = 0.0

277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\*

DE(3,1,K) 0.0 0.106833 0.213666 0.320499 0.427332 0.534165  
0.106833 0.213666 0.320499 0.427332 0.534165  
1.00028 1.00028 1.00028 1.00028 1.00028  
1.000219 1.000219 1.000219 1.000219 1.000219  
DDF(3,1,K) 0.0 0.599477E-04 0.119895E-03 0.179843E-03 0.239791E-03  
0.599477E-04 0.119895E-03 0.179843E-03 0.239791E-03 0.299739E-03  
0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03

DS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

DFS(3,1,K) 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

DFF(3,1,K) 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRAIN DS(3,1,K)

0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02  
0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02  
0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02 0.218405E-02

STRAIN RATE DDS(3,1,K)

0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03  
0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03  
0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03 0.561292E-03

STRESS FS(3,1,K)

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

STRESS RATE DFS(3,1,K)

0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0

\*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

DF(3,1,K) 0.542047 0.565390 0.588732 0.588732 0.588732  
0.565390 0.588732 0.612174 0.612174 0.612174  
1.00019 1.00019 1.00019 1.00019 1.00019  
1.00144 1.00144 1.00144 1.00144 1.00144  
DDF(3,1,K) 0.142328E-03 0.153744E-03 0.164953E-03 0.164953E-03  
0.153744E-03 0.164953E-03 0.176027E-03 0.176027E-03  
0.378216E-03 0.378216E-03 0.378216E-03 0.378216E-03

DFE(3,1,K) 0.0 20.1094 39.4435  
-20.1094 -39.4435 -58.1684  
-5.68437 -5.92511

STRAIN DS(3,1,K)

0.184395E-02 0.181154E-02 0.178279E-02 0.178279E-02  
0.102686E-02 0.105924E-02 0.108798E-02 0.108798E-02  
0.143533E-02 0.143533E-02 0.143533E-02 0.143533E-02

STRAIN RATE DDS(3,1,K)

0.267385E-03 0.276176E-03 0.283976E-03 0.283976E-03  
0.489145E-03 0.480326E-03 0.47507E-03 0.47507E-03  
0.378216E-03 0.378216E-03 0.378216E-03 0.378216E-03

STRESS FSC(3,1,K)

-11.5511 -32.8221 -51.6977  
-548.064 -526.831 -507.984  
-279.856 -279.869 -279.878

STRESS RATE DFS(3,1,K)

-2.89335 -8.22735 -12.9596  
-137.270 -131.985 -127.287  
-70.1125 -70.1278 -70.1389



FROM OUTTEM

TIME = 7.90 - 8.00 , DIFFERENCE TIME = 0.100

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DM(3,1) 0.0 0.54288 1.0004 DDM(3,1) 0.0 0.29520E-02 0.44429E-02  
DC(3,1) 0.54368 0.61422 1.0000 DDC(3,1) 0.41616E-04 0.47591E-04 0.77349E-04

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0  
DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0

(CLAD) 0.0 -237.344 -72.8907  
(CLAD) 0.0 0.0 0.0

GAP , D(3,1) = 0.0 , 0.795516E-03, -0.260431E-01, DD(3,1) = 0.0 , -0.291037E-02, -0.436555E-02,

HEAT FLUX = 155.64

2674.755 2594.324 2330.231 1914.279 1370.593 731.535 361.348 336.300 311.746 287.575  
277.000

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

0.0 0.110295 0.219849 0.328577 0.436598 0.543677 0.567129 0.590624 0.590624  
0.110295 0.219949 0.328577 0.436598 0.542881 0.567129 0.590624 0.614224 0.614224  
1.00044 1.00044 1.00044 1.00044 1.00044 1.00001 1.00001 1.00001 1.00001  
1.01936 1.01936 1.01936 1.01936 1.01936 0.993159 0.993159 0.993159 0.993159  
DDE(3,1,K)  
0.0 0.179673E-02 0.315819E-02 0.359951E-02 0.354324E-02 0.416159E-04 0.455924E-04 0.474932E-04 0.474932E-04  
0.179673E-02 0.315819E-02 0.359951E-02 0.354324E-02 0.295198E-02 0.455924E-04 0.474932E-04 0.475908E-04 0.475908E-04  
0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.773486E-04 0.773486E-04 0.773486E-04 0.773486E-04

DFE(3,1,K)  
0.0 -1317.23 2217.05 -1936.53 -1388.00 0.0 6.08401 6.36683 6.36683  
1317.23 2217.05 1936.53 1388.00 0.0 -6.08401 -6.36683 0.0 -6.36683  
107.979 283.891 157.507 91.9108 -641.288 -3.39011 -0.365999 3.75611 3.75611

DS(3,1,K)  
0.341127E-01 0.282670E-01 0.188570E-01 0.12504E-01 0.297238E-02 0.652160E-02 0.835577E-02 0.856392E-02 0.856392E-02  
0.341127E-01 0.321670E-01 0.287358E-01 0.251277E-01 0.207242E-01 0.408741E-02 0.420359E-02 0.436916E-02 0.436916E-02  
0.191784E-01 0.191784E-01 0.191784E-01 0.191784E-01 0.191784E-01 -0.686469E-02 -0.686469E-02 -0.686469E-02 -0.686469E-02  
DSS(3,1,K)  
0.163167E-01 0.124315E-01 0.406432E-02 0.570924E-03 0.555993E-02 0.785096E-04 0.804026E-04 0.789184E-04 0.789184E-04  
0.163167E-01 0.150264E-01 0.123350E-01 0.934352E-02 0.663570E-02 0.169561E-03 0.809050E-04 0.413493E-05 0.413493E-05  
0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.444290E-02 0.773486E-04 0.773486E-04 0.773486E-04 0.773486E-04

FS(3,1,K)  
-3253.66 -2979.45 -1321.59 -443.416 -443.416  
-3253.66 -2426.45 438.607 4083.92 4083.92  
-4941.53 -4510.73 -1969.20 3314.84 3314.84

STRESS RATE  
1847.76 1666.73 692.869 228.278 228.278  
1847.76 1269.28 -405.250 -2048.86 -2048.86  
2811.40 2481.14 833.681 353.840 -1945.46

STRAIN RATE  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0  
0.0 6.08401 6.08401 6.08401 6.08401 6.08401 6.08401 6.08401 6.08401  
-6.08401 -6.08401 -6.36683 -6.36683 -6.36683 -6.36683 -6.36683 -6.36683 -6.36683  
-3.39011 -0.365999 -0.365999 -0.365999 -0.365999 -0.365999 -0.365999 -0.365999 -0.365999

STRESS RATE  
-53.5413 -106.668 -221.259 1148.14 1080.81  
-2520.57 -221.259 521.463 1080.81 1080.81  
-2632.05 521.463 521.463 521.463 521.463

STRESS RATE  
-0.880780 -1.72023 -0.841384 -0.841384 -0.841384  
-41.4866 -1.93361 43.0262 43.0262 43.0262  
-41.6274 -4.24263 -4.24263 -4.24263 -4.24263

FROM OUTTEM

TIME = 8.75 - 9.00 , DIFFERENCE TIME = 0.250

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DM(3,1) 0.0 0.54298 0.99999 DDM(3,1) 0.0 0.86239E-04 -0.27775E-04  
DC(3,1) 0.54368 0.61422 1.0000 DDC(3,1) -0.14443E-05 -0.11446E-05 -0.19634E-05

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0  
CONTACT FORCE = 0.0 0.0  
ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 (CLAD) 0.0 -237.346 -72.8917  
DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 (CLAD) 0.0 0.0 0.0

GAP \* D(3,1) = 0.0 , 0.698195F-03, -0.260457E-01, DD(3,1) = 0.0 , -0.876832F-04, 0.258116E-04,

HEAT FLUX = 155.64

2652.962 2570.764 2306.455 1891.065 1348.555 711.260 361.349 336.300 311.746 287.575  
277.000

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

0.0 0.110451 0.220197 0.328784 0.436751 0.543675 0.567128 0.590623 0.590623  
0.110451 0.220197 0.328784 0.436751 0.542977 0.614223 0.614223 0.590623  
0.999993 0.999993 0.999993 0.999993 0.999993 1.00000 1.00000 1.00000  
1.01936 1.01936 1.01936 1.01936 1.01936 0.993157 0.993157 0.993157

0.0 0.137060E-03 0.216089E-03 0.176401E-03 0.127894E-03 0.082238E-04  
0.137060E-03 0.216089E-03 0.176401E-03 0.127894E-03 0.862388E-04  
-0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04

0.0 -338.823 -585.096 -495.838 -278.037  
338.823 585.096 495.838 278.037 0.0  
30.3307 83.3119 68.2627 -17.7543 -164.151

0.353270E-01 0.291086E-01 0.184795E-01 0.127481E-01 0.351110E-02  
0.353270E-01 0.33392E-01 0.255664E-01 0.255987E-01 0.20978E-01  
0.191790E-01 0.191790E-01 0.191790E-01 0.191790E-01 0.191790E-01

0.124130E-02 0.720241E-03 0.365459E-03 0.449231E-03 0.392097E-03  
0.124130E-02 0.106834E-02 0.715072E-03 0.397533E-03 0.218575E-03  
-0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04 -0.277750E-04

-2669.97 -2445.41 -1802.20 -1099.43 -373.968  
-2669.97 -1989.80 352.789 1010.50 3446.78  
-4013.16 -3654.38 -1493.92 -64.5798 2651.41

484.915 442.999 314.117 161.417 45.3201  
484.915 354.992 -130.538 -415.757 -2.73523  
792.000 731.242 364.577 -68.3729 -502.117

0.543675 0.567128 0.590623 0.590623 0.590623  
0.567128 0.590623 0.614223 0.614223 0.590623  
1.00000 1.00000 1.00000 1.00000 1.00000  
0.993157 0.993157 0.993157 0.993157 0.993157

-0.144434E-05 -0.122656E-05 -0.118008E-05 -0.114462E-05  
-0.122656E-05 -0.118008E-05 -0.114462E-05 -0.114462E-05  
-0.196339E-05 -0.196339E-05 -0.196339E-05 -0.196339E-05

0.0 -0.720702 -0.405271 0.0  
0.720702 0.405271 0.0 0.0  
0.463374 -0.221039 -0.242335

0.653092E-02 0.835775E-02 0.856543E-02 0.856543E-02  
0.406500E-02 0.420151E-02 0.436723E-02 0.436723E-02  
-0.686666E-02 -0.686666E-02 -0.686666E-02 -0.686666E-02

-0.240447E-05 -0.207872E-05 -0.192946E-05 -0.192946E-05  
0.928615E-05 0.197798E-05 0.150257E-05 0.150257E-05  
-0.196339E-05 -0.196339E-05 -0.196339E-05 -0.196339E-05

-53.4362 -106.511 -84.2650 -84.2650  
-2315.56 -223.397 1145.38 1145.38  
-2626.27 518.856 1078.08 1078.08

0.102765 0.154576 0.534079E-01 0.534079E-01  
4.89697 -2.13627 -2.73523 -2.73523  
5.66702 -2.58762 -2.71488 -2.71488

FROM OUTTEM

TIME = 12.75 - 13.00 , DIFFERENCE TIME = 0.250

MESH = 5, NO = 1 - 6 (FOR MEAT) MESH = 3, NO = 7 - 10 (FOR CLAD)

DM(3,1) 0.0 0.53324 0.99931 DD(3,1) 0.0 -0.13988E-02 -0.27730E-02  
DC(3,1) 0.54351 0.61403 0.99998 DDC(3,1) -0.38079E-04 -0.42726E-04 -0.69687E-04

DOT CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
CONTACT FORCE = 0.0 0.0 0.0  
ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0  
DOT ADDED FORCE (MEAT) 0.0 0.0 0.0  
(CLAD) 0.0 -237.276 -72.8489  
(CLAD) 0.0 0.0 0.0

GAP \* D(3,1) = 0.0 , 0.1102654E-01, -0.903127E-02, DD(3,1) = 0.0 , 0.136074E-02, 0.270334E-02,

HEAT FLUX = 0.0

277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000 277.000

\*\*\*\*\* FOR MEAT \*\*\*\*\*

DE(3,1,K) 0.0 0.106974 0.213724 0.320030 0.426724 0.533240  
0.106974 0.213724 0.320030 0.426724 0.533240  
0.999307 0.999307 0.999307 0.999307 0.999307  
1.00186 1.00186 1.00186 1.00186 1.00186  
DDE(3,1,K) 0.0 -0.392843E-03 -0.758642E-03 -0.107069E-02 -0.130515E-02  
-0.392843E-03 -0.758642E-03 -0.107069E-02 -0.130515E-02 -0.139881E-02  
-0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02

D(3,1,K) 0.0 -873.264 -1490.96 -1606.55 -979.269  
873.264 1490.96 1606.55 979.269 0.0  
96.4625 233.549 207.104 -82.2161 -454.899

STRAIN DS(3,1,K) 0.357431E-02 0.146149E-02 -0.273635E-02 0.891884E-03 -0.790063E-03  
0.357431E-02 0.288939E-02 0.146593E-02 0.781261E-03 0.612981E-03  
0.185369E-02 0.185369E-02 0.185369E-02 0.185369E-02 0.185369E-02

STRAIN RATE DDS(3,1,K) -0.366896E-02 -0.342374E-02 -0.293321E-02 -0.219629E-02 -0.879186E-03  
-0.366896E-02 -0.342374E-02 -0.293321E-02 -0.219629E-02 -0.317902E-02  
-0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02 -0.277303E-02

STRESS FS(3,1,K) 6725.91 6307.40 5201.07 3080.83 861.669  
6725.91 5478.68 1609.23 -6049.59 -7784.71  
10706.3 10192.9 7204.40 -1214.51 -7667.71

STRESS RATE DF(3,1,K) 1274.54 1151.65 908.236 544.207 161.519  
1274.54 901.299 167.576 -916.695 -1442.00  
2650.42 2140.93 1140.79 -324.881 -1394.51

\*\*\*\*\* FOR CLAD \*\*\*\*\*

DE(3,1,K) 0.543505 0.566943 0.590432  
0.566943 0.590432 0.614033  
0.999983 0.999983 0.999983  
0.992848 0.992848 0.992848  
DDE(3,1,K) 0.380785E-04 -0.414852E-04 -0.430207E-04  
-0.414852E-04 -0.430207E-04 -0.427265E-04  
-0.696871E-04 -0.696871E-04 -0.696871E-04

D(3,1,K) 0.0 -7.78794 -7.41914 -7.41914  
7.78794 7.41914 0.0  
4.44845 -0.629204E-01 -4.38553

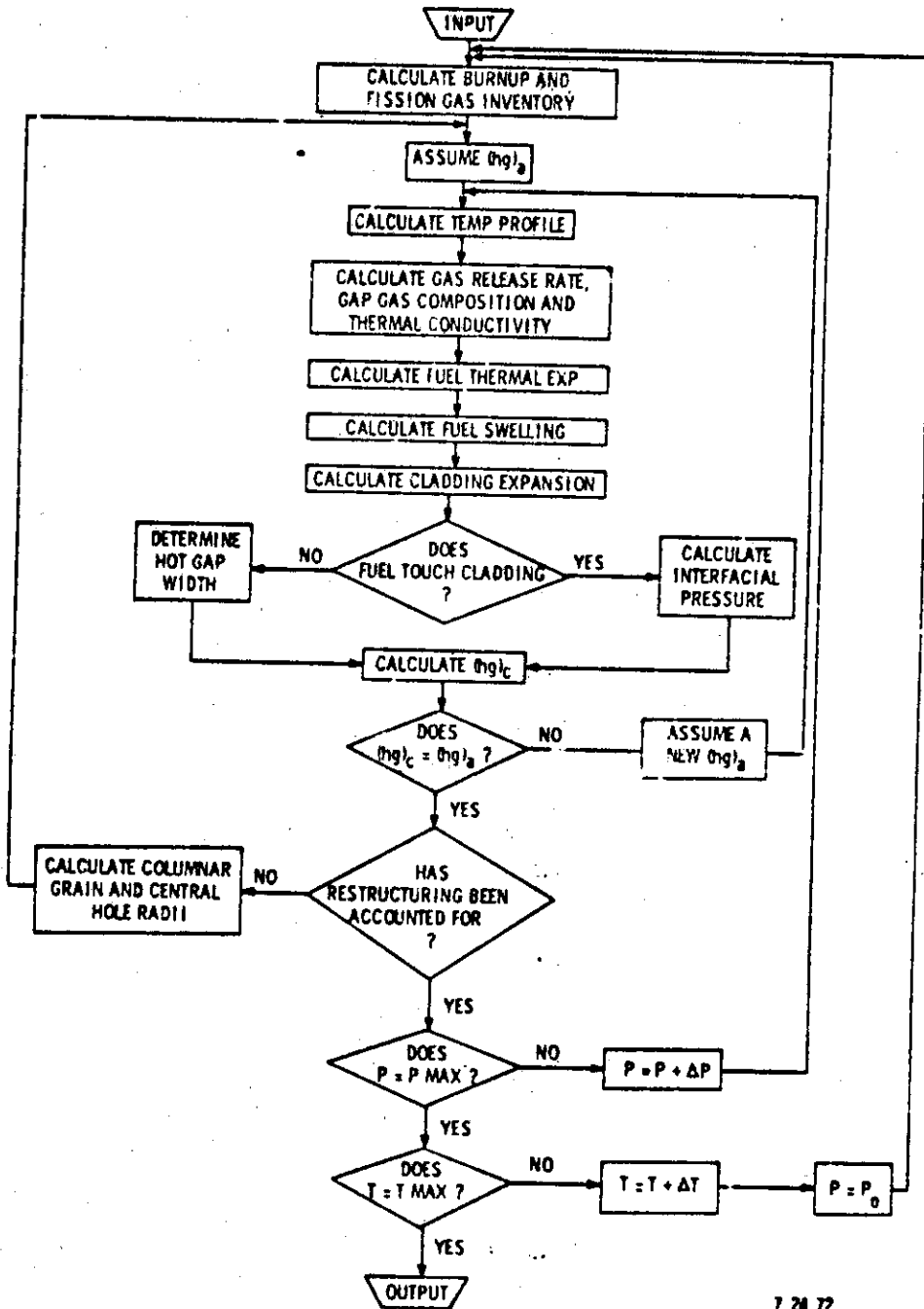
STRAIN DS(3,1,K) 0.593080E-02 0.806665E-02 0.857980E-02  
0.593080E-02 0.806665E-02 0.857980E-02  
-0.717758E-02 -0.717758E-02 -0.717758E-02

STRAIN RATE DDS(3,1,K) -0.716487E-04 -0.730138E-04 -0.711899E-04  
-0.716487E-04 -0.730138E-04 -0.711899E-04  
-0.696871E-04 -0.696871E-04 -0.696871E-04

STRESS FS(3,1,K) -49.0606 -98.3235 -80.4496  
-2308.96 -233.570 948.400  
-2413.21 515.407 884.826

STRESS RATE DF(3,1,K) 1.123336 2.09761 0.979323  
53.0475 -2.48196 -50.1001  
54.5705 -0.772655 -49.1694

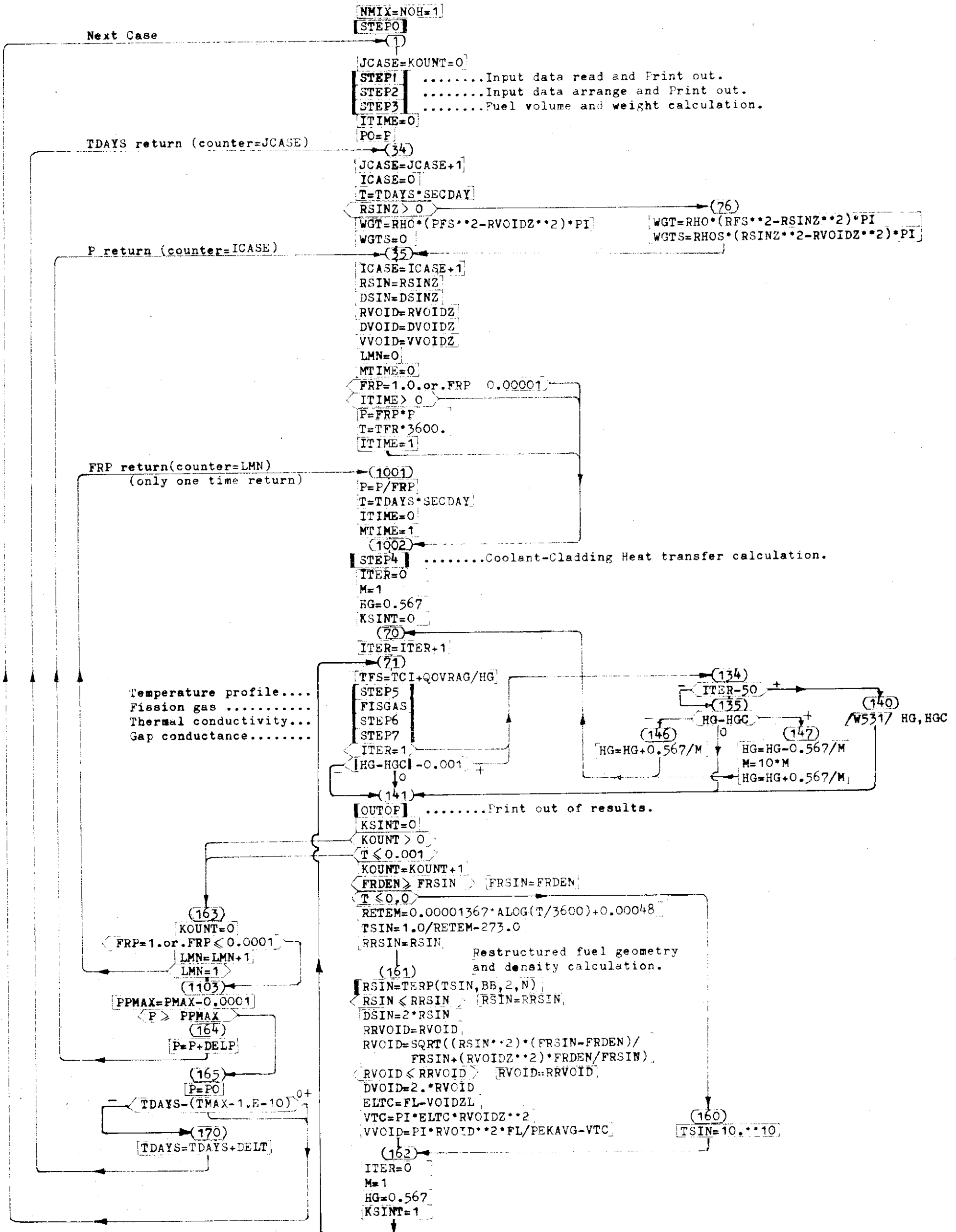
GAPCON の計算の流れ

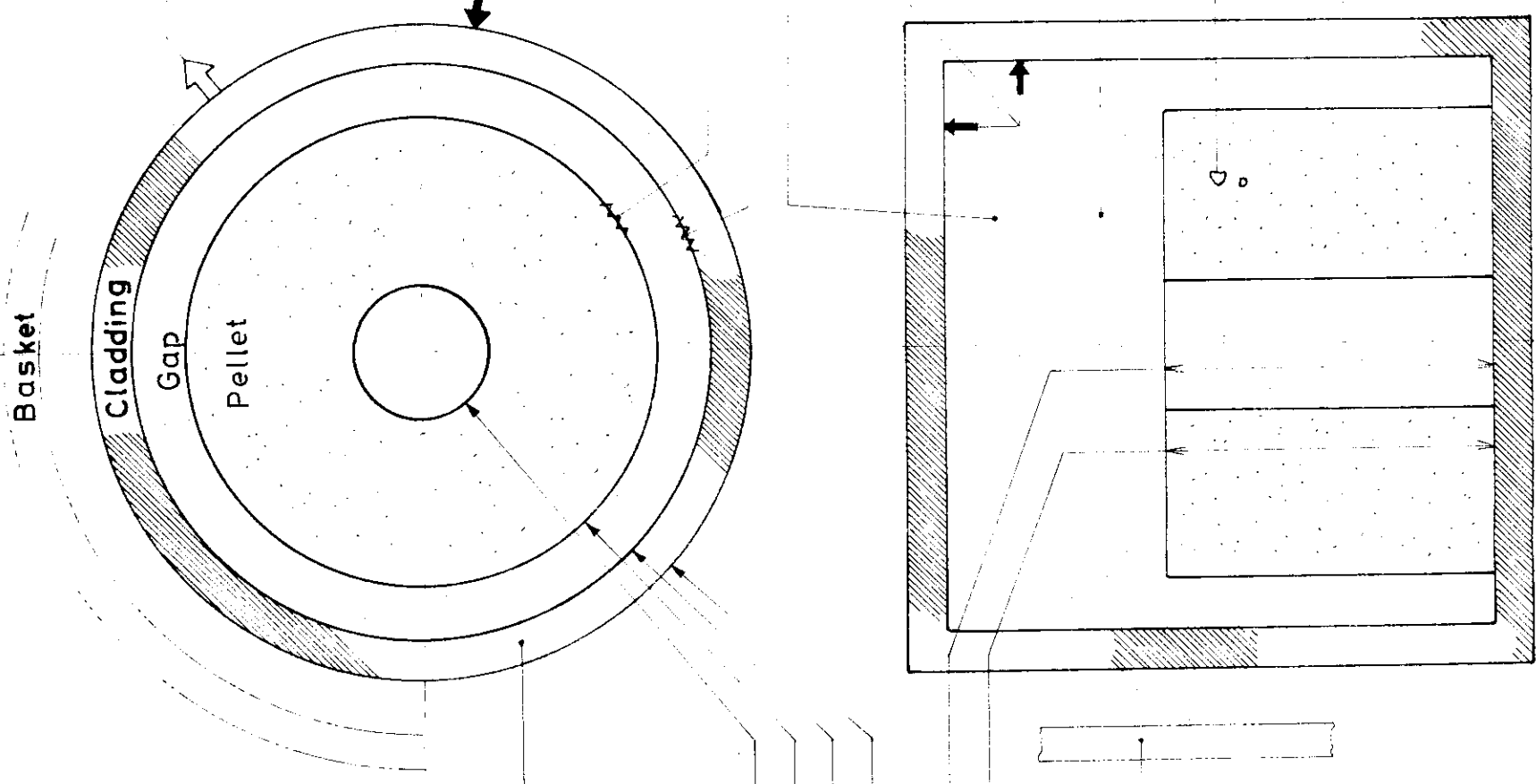


7 24 72

Figure 1. Simplified Flow Sheet for GAPCON

# Flow chart of FREG-1 Main program





入力項目	FORTRAN SYMBOL	入力単位
PuO <sub>2</sub> / (U <sub>302</sub> + PuO <sub>2</sub> )	FRPUO2	wt. frac.
<sup>235</sup> U / ( <sup>235</sup> U + <sup>238</sup> U)	FR35	wt. frac.
<sup>240</sup> Pu / (total Pu)	FR40	wt. frac.
<sup>241</sup> Pu / (total Pu)	FR41	wt. frac.
燃料密度 / 理論密度	FRDEN	
組織硬化後の相対密度	FRSIN	
新入力の判別シグナル	NEWCL	データ組込
<0 Zircaloy-2	NCLAD	データ組込
=0 316ss		外部入力
>0 (NCLADはカード枚数)		下記参照
被覆管物性値入力	Group2	
ペレット初期中心孔径	DVOIDZ	cm
Fuel OD	DFS	cm
Cladding ID	DCI	cm
Cladding OD	DCO	cm
組織硬化後の燃料径	DSINZ	cm
ペレット初期中心孔の長さ	LVOIDZ	cm
Fuel Stack Length	LF	cm
Basket Data		
Basket OD	DBO	w/cm <sup>2</sup>
Heat Transfer Coef.	HBC	w/cm <sup>2</sup> c
Therm. Conductivity	KB	w/cm <sup>2</sup> c
=0 flux is fast	IFLUX	
>0 flux is thermal		
軸方向中性子の最高/平均の値	PEKAVG	ratio
新入力の判別シグナル	NEWFLX	
<0	NFLX	計算式組込
=0 平坦		
>0 (NFLXはカード枚数)		
中性子束ひすみの入力	Group3	外部入力 下記参照

Group1 Table Input Thermal Conductivity vs. Temperature for Fuel  
 Group2 Table Input Thermal Conductivity, Yield Stress, Young's Mod., Poisson's Ratio, Thermal Expansion Coefficient and Meyer Hardness vs. Temperature.  
 Group3 Table Input Relative Neutron Flux vs. Diameter.

注1. Koolは普通 入力する必要はないが、Kool(整数)>0とすると TCOOLで入力した値が 被覆管内面温度として扱われる。

### FREG-1 の入力構成

入力項目	FORTRAN SYMBOL	入力単位
最初のケースの線出力密度	P	W/cm
線出力密度の増分	DEL P	W/cm
最高線出力密度	P MAX	W/cm
通過の線出力/束径の線出力	FRP	fraction
冷却材の種類	SIGHF	kg/cm <sup>2</sup>
冷却材圧力	EXTP	°C
冷却材温度	TCOOL	
注1	KOOL	cm
冷却材流速の相対径	DE	cm/sec
冷却材速度	V	cm/sec
燃料表面の粗さ(算術平均)	ROUF	cm
被覆管内面の粗さ(算術平均)	ROUC	cm
燃料棒内径の粗さ	VPLEN	cm <sup>3</sup>
初期封入ガス圧	ATMOS	kg/cm <sup>2</sup>
ヘリウム/初期封入ガス	FRACHE	mole fraction
アルゴン/初期封入ガス	FRACAR	mole fraction
水素/初期封入ガス	FRACH	mole fraction
窒素/初期封入ガス	FRACN	mole fraction
キセノン/初期封入ガス	FRACXE	mole fraction
クリプトン/初期封入ガス	FRACKR	mole fraction
燃料に吸着されているガス量	S	cc/g of fuel
吸着ガス組成 水素/水素+窒素	XX	fraction
=1 放出ガス完全混合	NMIX	
=0 フレッシュキセノンに分離		
=1 水素外部放出		
=0 水素ポンプ内残留		
最初のケースの照射日数	T DAYS	day
照射日数の増分	DELT	day
最高照射日数	T MAX	day
前のステップの期間	TFR	hour
新入力の判別シグナル	NEWK	計算式組込
<0 Godfrey テータ	NCON	計算式組込
=0 WARD テータ		外部入力
>0 (NCONはカード枚数)		下記参照
燃料の熱伝導率の入力	Group1	
燃料の融点	TM	°C

照射日数 熱伝導率

62

FREG-1 INPUT DATA (REFER C=547) 73-07-06 11 HR.22 MINUTE 20 SEC 682

\*NAM1 FRPU02=0.0, FR40=0.0, FR41=0.0, FR35=0.25000000E-01, FRDEN=0.93500000, FRSIN=0.98000000, DFS=0.90400000,  
 DSTNZ=0.0, DVOIDZ=0.0, DCL=0.92000000, DCO=0.10460000E 01, LF=0.36600000E 03, LVUJUZ=0.0, VPLEN=0.61500000E 02,  
 YCOOL=0.29900000E 03, DE=0.13970000E 01, V=0.42700000E 03, ETP=0.14700000E 03, PEKAVG=0.15000000E 01,  
 ROUF=0.30000000E-03, ROUC=0.17000000E-03, S=0.50000000E-01, XX=0.10000000, P=0.54100000E 03, DELP=0.11400000E 03,  
 PMAX=0.65500000E 03, IDAYS=0.0, DELI=0.40000000E 03, TMAX=0.40000000E 03, DBO=0.0, KB=0.0, HBC=0.0,  
 SIGHF=-0.10000000E 01, ATMOS=0.10000000E 01, TM=0.27900000E 04, FRACHE=0.10000000E 01, FRACAR=0.0, FRACH=0.0,  
 FRACN=0.0, FRACK=0.0, FRACX=0.0, FRP=0.0, TFP=0.0, NCON=0, NEWK=0, NCLAD=-1, NEWCL=0, NFLX=9, NEWFLX=1,  
 IFLUX=1, KOOL=0, NMIX=1, NOH=1\*

FLUX DEPRESSION INPUT DATA. RVC(I,J) DIAMETER(CH) VS. DEPRESSION

0.0	0.9547
0.1236	0.9556
0.2470	0.9593
0.3710	0.9662
0.4950	0.9777
0.6500	0.9917
0.7420	1.0116
0.8660	1.0420
0.9040	1.0600





\*\*\*\*\*  
 \* INPUT VALUES \* (CONTINUED)  
 \*\*\*\*\*

COOLANT IS WATER

THERMAL FLUX IRRADIATION

CLADDING IS ZIRCALOY-2

FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES DETERMINED FROM WARD DESIGN EQUATIONS  
 THIS CALCULATION ASSUMES COMPLETE MIXING OF GASES

FUEL THERMAL CONDUCTIVITY VALUES USED

TEMPERATURE (DEG C)	THERMAL CONDUCTIVITY (W/CM-DEG C)
250.	0.05366
500.	0.04017
750.	0.03171
1000.	0.02661
1250.	0.02348
1500.	0.02167
1750.	0.02088
2000.	0.02095
2250.	0.02179
2500.	0.02337
2750.	0.02567

UNRESTRUCTURED FUEL	RESTRUCTURED FUEL
0.05366	0.06060
0.04017	0.04373
0.03171	0.03452
0.02661	0.02897
0.02348	0.02555
0.02167	0.02358
0.02088	0.02272
0.02095	0.02279
0.02179	0.02369
0.02337	0.02540
0.02567	0.02789

FLUX DEPRESSION VALUES USED

DIAMETER (CM)	DIAMETER (IN)	FLUX RATIO
0.0	0.0	0.9547
0.1236	0.0487	0.9556
0.2470	0.0972	0.9593
0.3710	0.1461	0.9662
0.4950	0.1949	0.9777
0.6500	0.2559	0.9917
0.7470	0.2921	1.0116
0.8660	0.3409	1.0420
0.9040	0.3559	1.0600

LINEAR HEAT RATING 541.00 W/CM  
 TIME IN-REACTOR 0.0 DAYS  
 BURNUP 0.0 MWD/NTM  
 AVERAGE FLUX IN FUEL 0.8222E 14 NV  
 CLAD OD SURFACE HEAT FLUX 164.63 W/CM2  
 FUEL SURFACE HEAT FLUX 190.49 W/CM2  
 COOLANT TEMPERATURE 299.00 DEG C  
 FILM COEFFICIENT 3.07204 W/CM2/DEG C  
 CLAD THERMAL CONDUCTIVITY 0.13081 W/CM/DEG C  
 CLAD OD TEMPERATURE 352.59 DEG C  
 CLAD ID TEMPERATURE 437.31 DEG C  
 FUEL SURFACE TEMPERATURE 595.45 DEG C

RADIUS (INCHES) TEMPERATURE (DEG F) RADIUS (CM) TEMPERATURE (DEG C) PERCENT OF FUEL RADIUS

0.1602	1552.	0.4068	845.	90.00
0.1424	2032.	0.3616	1111.	80.00
0.1246	2514.	0.3164	1379.	70.00
0.1068	2965.	0.2712	1630.	60.00
0.0890	3360.	0.2260	1849.	50.00
0.0712	3682.	0.1808	2028.	40.00
0.0534	3928.	0.1356	2164.	30.00
0.0356	4100.	0.0904	2260.	20.00
0.0178	4201.	0.0452	2316.	10.00
0.0	4234.	0.0	2335.	0.0

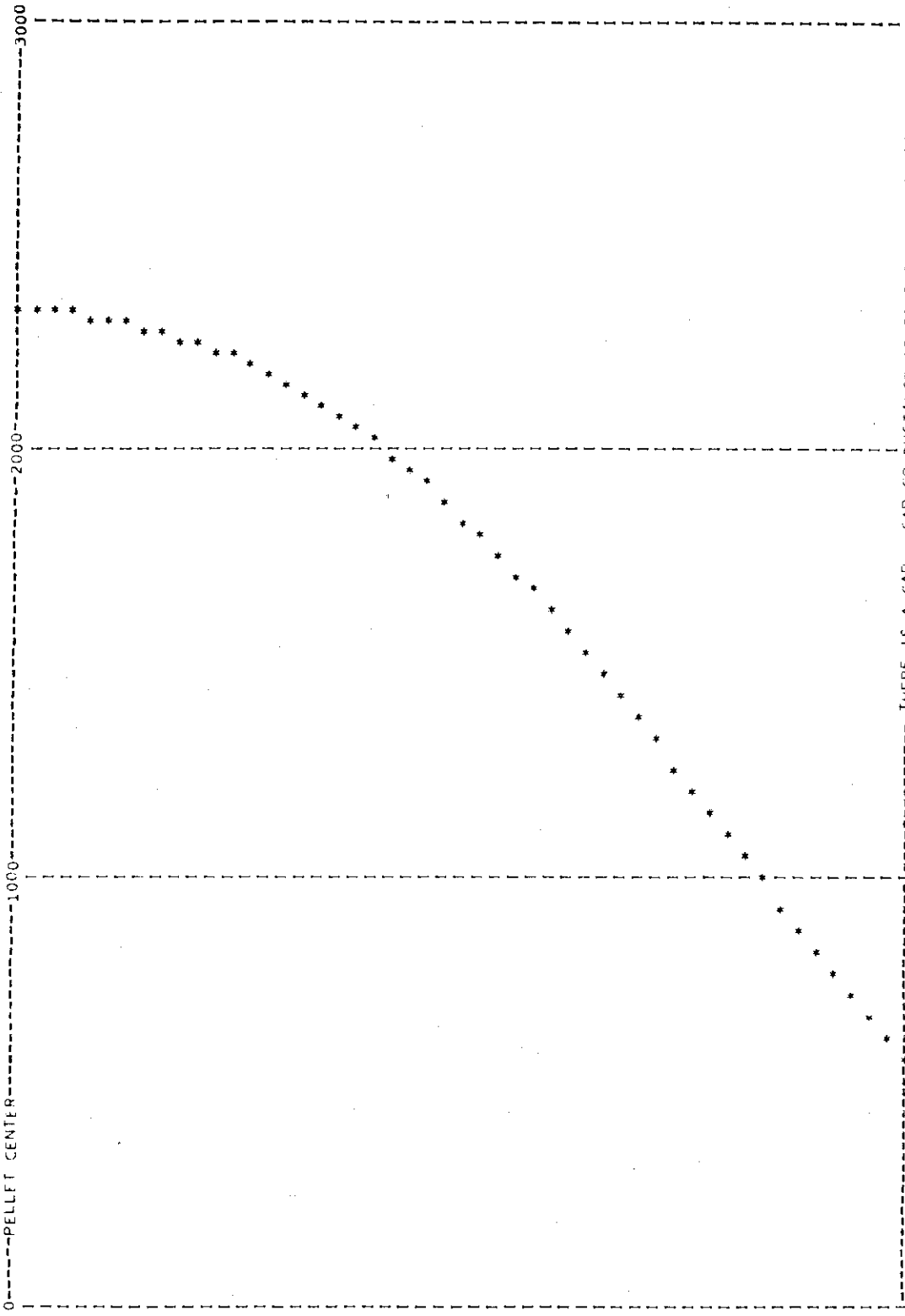
MELT TEMPERATURE 2790.00 DEG C ( 5054.00 DEG F )  
 MELT RADIUS 0.0 CM ( 0.0 INCH ) ( 0.0 PERCENT RADIUS)

GAS RELEASE RATE 0.320606  
 RADIUS AVERAGED FUEL TEMPERATURE 1723.9 DEG C ( 3135.0 DEG F )  
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION 0.008265 CM ( 0.003254 INCH )  
 INCREASE IN FUEL RADIUS DUE TO SWELLING 0.0 CM ( 0.0 INCH )  
 TOTAL INCREASE IN FUEL RADIUS 0.008265 CM ( 0.003254 INCH )  
 INCREASE IN CLAD RADIUS DUE TO THERMAL EXPANSION 0.001376 CM ( 0.000542 INCH )  
 HOT GAP (RADIAL) 0.001111 CM ( 0.000437 INCH )  
 FUEL-CLAD INTERFACIAL PRESSURE 0.0 KG/CM2 ( 0.0 PSI )

FUEL-TO-CLAD GAP CONDUCTANCE 1.194102 W/CM2/C ( 2105.2 BTU/HR/FT2/F )  
 COMPONENT DUE TO SOLID-SOLID CONTACT 0.0 W/CM2/C  
 COMPONENT DUE TO CONDUCTION THROUGH THE GAS 1.186035 W/CM2/C ( 2091.0 BTU/HR/FT2/F 0.0 PERCENT )  
 COMPONENT DUE TO RADIANT HEAT TRANSFER 0.008288 W/CM2/C ( 14.6 BTU/HR/FT2/F 99.3 PERCENT )  
 COMPOSITION OF FILL GAS  
 0.667827 MOLE FRACTION HELIUM  
 0.0 MOLE FRACTION ARGON  
 0.0 MOLE FRACTION HYDROGEN  
 0.332173 MOLE FRACTION NITROGEN  
 0.0 MOLE FRACTION KRYPTON  
 0.0 MOLE FRACTION XENON

THERMAL CONDUCTIVITY OF FILL GAS 0.00163897 W/CM/C ( 0.094716 BTU/HR/FT2/F )  
 TEMPERATURE JUMP DISTANCE 0.00027074 CM ( 0.000107 INCH )  
 INITIAL GAS PRESSURE 4.38 KG/CM2 ( 62.337 PSI )

CASE 1: 1 TEST CASE FOR FREG-1 P/N NUMBER 2 (TYPICAL PWR PIN) 73-07-06 11 HR 22 MINUTE 29 SEC 430 7



THERE IS A GAP. GAP CONDUCTANCE IS 2105.2 BTU/HR/FT2/DEG F

CLAD INNER SURFACE

CLAD OUTER SURFACE

COOLANT

C

C

#### 4. 燃料照射挙動解析プログラム開発に関する今後の課題

燃料棒の照射挙動を評価する上で、入力として与えられる主要パラメータ、主要入力項目、ならびに計算項目をTable 4.1に示す。

計算項目は、計算の目的によって異なるのは当然であるが、同じ計算項目でも、モデルによって、計算手法は、かなり異なっている。

開発中のプログラム全般について、その利点、欠点を詳細に評価しうる段階になっていないが、共通する問題点は、すべて、定常状態の計算であり、特に長期間の連続運転後の出力変動の効果を評価できないことである。

燃料安全性評価を前提とした場合、被覆管の照射による特性の変化、被覆管に作用する力、変形を正確に把握する必要がある。現プログラムでは被覆管の腐食、水素吸収、水素の移動、脆化等の効果を正確に評価して、プログラムにその物性を入力する必要があるが、これらは、すべて照射履歴の影響を大きく受けるものと思われるので、計算の都度被覆管の物性を外部で評価して、入力することは、かなり困難である。したがって、照射履歴による被覆管の物性変化を追跡しうるプログラムの追加が必要となる。



### 5. プログラム関連文献リスト

FREF-1, FBEC-1の原型であるFIGRO, CYGROの原報, およびそれぞれプログラムが採用した基礎理論, 計算モデル, 物性ソースの情報源を, ペレット, ペレット-被覆管, 被覆管, 関連プログラムに分類して示した。

これらの典拠文献の検討評価は, 計算結果と実験との照合, 感度チェックとともに今後の課題となる。

FIGRO 関係文献

FIGRO の原報告

1. I. Goldberg et al., "FIGRO-FORTRAN-IV Digital Computer Program for the Analysis of Fuel Swelling and Calculation of Temperature in Bulk-Oxide Cylindrical Fuel Elements", WAPD-TM-618, (1966)
2. L.A. Waldman et al., "FIGRO (Addendum), A CDC-6600 Computer Program for the Analysis of Fuel Swelling and Calculation of Temperature in Bulk-Oxide Cylindrical Fuel Elements", WAPD-TM-618, Addendum, (1967)
3. I. Goldberg, "A Procedure for Calculation of Steady-State Temperature in Zircaloy-Clad, Bulk-Oxide Fuel Elements using the FIGRO Computer Program", WAPD-TM-757, (1969)
4. I. Goldberg, L.L. Lynn, "FIGRO(Addendum-II), A CDC-6600 Computer Program for the Analysis of Fuel Swelling and Calculation of Temperature in Bulk-Oxide Cylindrical Fuel Elements", WAPD-TM-618, Addendum II, (1970)

## ペレットのスウェリング

1. M.V. Speight, "Bubble Diffusion and Coalescence During the Heat Treatment of Materials Containing Irradiation-Induced Gases", J. Nucl. Mater. 12, 216-220 (1964).
2. G.W. Greenwood and M.V. Speight, "An Analysis of the Diffusion of Fission Gas Bubbles and its Effect on the Behaviour of Reactor Fuels", J. Nucl. Mater. 10, 140-144 (1963).
3. R.S. Barnes, "A Theory of Swelling and Gas Release for Reactor Materials", J. Nucl. Mater. 11, 135-148 (1964).
4. E.E. Gruber, "On the Theory of Migration and Coalescence of Bubbles in Solids", ANL-7079, November 1965.
5. R.C. Daniel et al., "Effects of High Burnup on Zircaloy-Clad Bulk  $UO_2$ , Plate Fuel Element Samples", WAPD-263, (1962).
6. F.A. Nichols, "Behavior of Gaseous Fission Products in Oxide Fuel Elements", WAPD-TM-570, (1966).
7. E. Duncombe et al., "Comparisons with Experiment of Calculated Dimensional Changes and Failure Analysis of Irradiated Bulk Oxide Fuel Test Rods Using the GYGRO-I Computer Program", WAPD-TM-583, (1966).



8. C.K. Kempter and R.O. Elliott, "Thermal Expansion of UN, UO<sub>2</sub>, UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>, and ThO<sub>2</sub>", J. Chem. Phys. 30, 1524-1526 (1959).
9. B. Ohnysty and F.K. Rose, "Thermal Expansion Measurements on Thoria and Hafnia to 4500°F", J. Amer. Ceramics Soc. 47, 398-400 (1964).

#### ペレットの熱的・機械的性質とその変化

1. A.L. Loeb, "Thermal Conductivity: VIII, A Theory of Thermal Conductivity of Porous Materials", J. Am. Ceram. Soc. 37, 96-99 (1954).
2. A.M. Ross, "The Dependence of the Thermal Conductivity of Uranium Dioxide on Density, Microstructure, Stoichiometry and Thermal-Neutron Irradiations", CRFD-817, September 1960.
3. V.C. Howard and T.F. Gulvin, "Thermal Conductivity Determinations on Uranium Dioxide by a Radial Flow Method", IG-Report-51, (1960).
4. R.C. Daniel and I. Cohen, "In-Pile Effective Thermal Conductivity of Oxide Fuel Elements to High Fission Depletions", WAPD-246, (1964).

5. L.E.J. Roberts et al., "The Behaviour of  $UO_2$  and of (U, Pu)  $O_2$  Fuel Materials Under Irradiation" in "Proceedings of the Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, 1964", Vol. 11, pp. 464-471, United Nations, New York, (1965).
6. J.L. Daniel et al., "Thermal Conductivity of  $UO_2$ ", HW-66945, (1962).
7. W.D. Kingery et al., "Thermal Conductivity: X. Data for Several Pure Oxide Materials Corrected to Zero Porosity", J. Am. Ceram. Soc. 37, 107-110 (1954).
8. J.R. MacEwan et al., "An In-Pile Study of the Thermal Conductivity and Electrical Properties of  $UO_2$  and  $UO_{2-x}$ ", Trans. Am. Nucl. Soc. 8, 380 (1965).
9. W.R. DeBoskey, "Irradiation Testing of Thoria-Urania Fuel for the Indian Point Reactor" in "Proceedings of the Thorium Fuel Cycle Symposium, Catlinburg, Tennessee, December 5-7, 1962", TID-7650, Book 2, pp.630-642.
10. D.H. Coplin et al., "In-Pile Direct Measurement of  $UO_2$  Thermal Conductivity", Trans. Am. Nucl. Soc. 8, 35-36 (1965).

11. G.W. Greenwood et al., "The Role of Vacancies and Dislocations in the Nucleation and Growth of Gas Bubbles in Irradiated Fissile Material", J. Nucl. Mater. 4, 305-324 (1959).
12. J. Belle, Ed., "Uranium Dioxide: Properties and Nuclear Applications", U.S. Government Printing Office, Washington 25, D. C., (1961).
13. H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", 2nd Ed., pp.10-11, Clarendon Press, Oxford, (1959).
14. J. Belle et al., "Thermal Conductivity of Bulk Oxide Fuels", WAPD-TM-586 Revised, (1967).
15. H.W. Deem, Compiler, "Fabrication, Characterization and Thermal-Property Measurements of ZrO<sub>2</sub>-Base Fuels", BMI-1755, (1966).
16. M. Pirani, "Radiation Properties of Substances Between 250°C and 800°C", J. Sci. Instr. 16, 372-378 (1939).

### 被覆管の機械的性質

1. J.J. Kearns, "Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy", WAPD-TM-472, (1965).
2. F.A. Nichols, "Theory of the Creep of Zircaloy During Neutron Irradiation", J. Nuc. Mater. 30, 249-270 (1969).

### ペレット-被覆管の熱伝達

1. A.M. Ross and R.L. Stoute, "Heat Transfer Coefficient Between  $UO_2$  and Zircaloy-2", CRFD-1075, (1962).
2. T.N. Cetinkale and M. Fishenden, "Thermal Conductance of Metal Surfaces in Contact", Proceedings of the General Discussions on Heat Transfer, September 11-13, 1951, 271-275, American Society of Mechanical Engineers (New York) and Institution of Mechanical Engineers (London), (1951).
3. H. von Ubisch et al., "Thermal Conductivities of Mixtures of Fission Product Gases with Helium and with Argon", Proceedings of the Second United Nations International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, (1958), Vol.7.

4. A. Goldsmith et al., "Handbook of Thermo-physical Properties of Solid Materials. Revised Edition. Volume II: Alloys", The Macmillan Company, New York, (1961).
5. A. Goldsmith et al., "Handbook of Thermo-physical Properties of Solid Materials. Revised Edition. Volume III: Ceramics", The Macmillan Company, New York, (1961).
6. N.V. Tsederberg, "Thermal Conductivity of Gases and Liquids", Translation by Scripta Technica, R.D. Cess, Ed., The M.I.T. Press, Cambridge, Mass., (1965).
7. L. Friend and S.B. Adler, "Transport Properties in Gases", A.B. Cambel and J.B. Fenn, Eds., Northwestern University Press, Evanston, Illinois, (1958).

#### ペレット被覆管の機械的相互作用

1. R.M. Berman et al., "Irradiation Behavior of Zircaloy-Clad Fuel Rods Containing Dished-End  $UO_2$  Pellets (LWBR-LSBR Development Program)", WAPD-TM-629, (1967).
2. J.T. Engel and H.B. Meieran, "Performance of Fuel Rods having 97 Percent Theoretical Density  $UO_2$  Pellets Sheathed in Zircaloy-4 and Irradiated at Low Thermal Ratings (LSBR/LWBR Development Program)", WAPD-TM-631, (1968).

関連プログラム

1. R.B. Smith and O.F. Swift, "BKSB-A Revision of the BKS System for the Philco-2000 Computer", WAPD-TM-379, (1963).
2. O.J. Marlowe, "Bettis FORTRAN Programming: Auxiliary Subroutines", WAPD-TM-365, (1963).
3. C.J. Pfeiffer, "CDC-6600 FORTRAN Programming - Bettis Environmental Report", WAPD-TM-668, (1967).
4. L.L. Lynn, "A Digital Computer Program for Reactor Design Water Properties", WAPD-TM-680, (1967).
5. C.M. Friedrich, "CYGRO - Stress Analysis of the Growth of Concentric Cylinders", WAPD-TM-514, (1965).
6. C.M. Friedrich, "CYGRO-I-Stress Anslysis of the Growth of Concentric Cylinders", WAPD-TM-514 Addendum No.1, (1966).
7. E. Duncombe, "A Procedure for Analysis of Zircaloy-Clad Bulk Oxide Rods Using the CYGRO-I Computer Program", WAPD-TM-583 Addendum No.1, (1967).
8. L.L. Lynn, "A Digital Computer Program for Nuclear Reactor Design Water Properties", WAPD-TM-680, (1967).

CYGRO 関係文献  
CYGRO の原報告

1. C.M.Friedrich, "CYGRO-Stress Analysis of the Growth of Concentric Cylinders", WAPD-TM-514, (1965)
2. C.M.Friedrich, "CYGRO-1 Stress Analysis of the Growth of Concentric Cylinders", WAPD-TM-514 (Addendum No.1), (1966)
3. C.M.Friedrich, 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, "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)
5. E.Duncombe, "A Procedure for Analysis of Zircaloy-Clad Bulk Oxide Rods using the CYGRO-1 Computer Program", WAPD-TM-583, (1967)
6. E.Duncombe et al., "CYGRO-3, A Computer Program to Determine Temperatures, Stress and Deformation in Oxide Fuel Rods", WAPD-TM-961, (1970)

## ペレットのスウェリング

1. G.W. Greenwood and M.V. Speight, "An Analysis of the Diffusion of Fission Gas Bubbles and Its Effect on the Behavior of Reactor Fuels", Journal of Nuclear Materials V. 10, No.2 (1963).
2. F.A. Nichols, "Behaviour of Gaseous Fission Products in Oxide Fuel Elements", WAPD-TM-570, (1966)
3. H.R. Warner, "Evaluation of Low-Density Single-Phase Cubic  $ZrO_2 + UO_2$  Fuels Stabilized with CaO", WAPD-292, (1966).

## ペレットの熱的・機械的性質とその変化

1. R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Oxford University Press, London, (1960).
2. R.A. Wolfe and S.F. Kaufman, "Mechanical Properties of Oxide Fuels", WAPD-TM-587, (1967).
3. W.M. Armstrong et al., "Creep Deformation of Stoichiometric Uranium Dioxide", J. Nucl. Mater. 7, 133-141 (1962).
4. S. Peterson, Ed., "Metals and Ceramics Division Annual Progress Report for Period Ending June 30, 1965", ORNL 3870, (1965).



5. P. Murray et al., "The Hot Pressing of Ceramics" in "Ceramic Fabrication Processes", W.D. Kingery, Ed., pp.147-171, Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, (1958).
6. R.C. Rossi and R.M. Fulrath, "Final Stage Densification in Vacuum Hot-Pressing of Alumina", J. Am. Ceram. Soc. 48, 558-564, (1965).
7. S.T. Konobeevsky, "On the Nature of Radiation Damage in Fissile Materials", J. Nucl. Energy, 3, 356-365 (1956).
8. J. Belle, Ed., "Thermal Conductivity of Oxide Fuels", WAPD-TM-586, (1967)
9. W.D. Kingery et al., "Thermal Conductivity: X, Data for Several Pure Oxide Materials Corrected to Zero Porosity", J. Am. Ceram. Soc. 37, 107-110 (1954).
10. J. Belle, Ed., "Uranium Dioxide: Properties and Nuclear Applications", U.S. Government Printing Office, Washington, 25, D.C., (1961).
11. R.C. Daniel and I. Cohen, "In-Pile Effective Thermal Conductivity of Oxide Fuel Elements to High Fission Depletions", WAPD-246, (1964).

12. R.C. Daniel and G.F Rubin, "Performance of Low Exposure Ceramic Fuel Rods in the L12-14 Test", WAPD-TM-597, (1966)
13. F.A. Nichols, "Behavior of Gaseous Fission Products in Oxide Fuel Elements", WAPD-TM-570, (1966).

### 被覆管の機械的性質

1. W.J. O'Donnell and B.F. Langer, "Fatigue Design Basis for Zircaloy Components", Nucl. Sci. Eng. 20, 1-12 (1964).
2. Timoshenko and Goodier, "Theory of Elasticity", McGraw Hill, 2nd Edition, (1951).
3. C.R. Woods, Ed., "Properties of Zircaloy-4 Tubing", WAPD-TM-585, (1966).
4. J.J. Kearns, "Thermal Expansion and Preferred Orientation in Zircaloy", WAPD-TM-472, (1965).
5. D.B. Scott, "Physical and Mechanical Properties of Zircaloy 2 and 4", WCAP-3269-41, (1965).
6. H.B. Meieran and J.T. Engel, "Irradiation Performance Limit for Zircaloy-4 Sheathed, 97 % T.D. UO<sub>2</sub> Fuel Rods at Low Thermal Ratings", WAPD-TM-631, (1968).

7. D.S. Griffin and W.J. O'Donnell, "Description and Analysis of Various Tube Failure Mechanisms", WAPD-TM-591, (1967).
8. P.J. Pankaskie, "Creep Properties of Zircaloy-2 for Design Application", HW-75267, (1962).
9. F.A. Nichols, "Theory of the Creep of Zircaloy During Neutron Irradiation", J. Nucl. Mater. 30, 249-270, (1969).
10. L. Raymond and J.E. Dorn, "Recovery of Creep-Resistant Substructures", Trans. Met. Soc. AIME 230, 560-567 (1964).

ペレット-被覆管の熱伝達

1. B.F. Rubin et al., "Irradiation Performance Capabilities of Oxide Fuel Rods-X-1-u Test of Two 100-Inch Long Highly Rated Annular  $ZrO_2 + UO_2$  Fuel Rods", WAPD-TM-574, (1966).
2. A.M. Ross and R.L. Stoute, "Heat Transfer Coefficient between  $UO_2$  and Zircaloy-2", AECL-1552, (1962).
3. E.H. Kennard, "Kinetic Theory of Gases", 1st Ed., P.183, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York and London, (1938).

## ペレット-被覆管の機械的相互作用

1. C.M. Friedrich, "Structure Design Notes: Calculation of Stresses, Forces, and Deflections in Linear-Elastic Skeleton Structures with Temperature, Pressures, Applied Loads and Redundant Loads", WAPD-TM-417, (1964).
2. P. Murray, "The Hot Pressing of Ceramics", in "Ceramic Fabrication Processes", W.D. Kingery, Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York, (1958).
3. R.C. Daniel et al., "Effects of High Burnup on Zircaloy-Clad Bulk  $UO_2$ , Plate Fuel Element Samples", WAPD-263, (1962).
4. B.F. Rubin et al., "The Irradiation Behavior of  $ZrO_2-UO_2$  Fuels", WAPD-264, (1962).
5. J.E. McCauley et al., "Evaluation of the Irradiation Performance of a Zircaloy-4 Clad Rod Containing Annular  $UO_2$  Fuel Pellets", WAPD-TM-595, (1966).
6. R.M. Berman et al., "Irradiation Behavior of Zircaloy-Clad Fuel Rods Containing Dished-End  $UO_2$  Pellets", WAPD-TM-629, (1967).
7. J.E. McCauley et al., "Evaluation of the Irradiation Performance of Zircaloy-4 Clad Rods Containing Solid Low-Density Fuel Pellets", WAPD-TM-596, (1968).

8. E. Duncombe, "Analysis of Void Migration, Clad Collapse and Fuel Cracking in Bulk Oxide Fuel Rods (LWBR Development Program)", WAPD-TM-794, (1968).

関連プログラム(実験との照合を含む)

1. C.M. Friedrich, "PLASTIC-SASS-A Computer Program for Stresses and Defections in a Reactor Subassembly under Thermal, Hydraulic, and Fuel Expansion Loads", WAPD-TM-312, (1963).
2. E. Duncombe et al., "Comparison with Experiment of Calculated Dimensional Changes and Failure of Irradiated Bulk Oxide Fuel Test Rods Using the CYGRO-1 Computer Program", WAPD-TM-583, (1966).
3. R. Courant, "Differential and Integral Calculus", Vol.1, Interscience Publishers, Inc., (1950).
4. G. Birkhoff and S. Maclane, "A Survey of Modern Algebra", MacMillan Company, (1951).
5. O.J. Marlowe, "Bettis FORTRAN Programming: Auxiliary Subroutines", WAPD-TM-365, (1963).
6. I. Goldberg et al., "FIGRO-A Fortran IV Digital Computer Program for the Analysis of Fuel Swelling and Calculation of Temperature in Bulk-Oxide Cylindrical Fuel Elements", WAPD-TM-618, (1966).

7. I. Goldberg, "A Procedure for Calculation of Steady-State Temperature in Zircaloy-Clad, Bulk-Oxide Fuel Elements Using the FIGRO Computer Program", WAPD-TM-757, (1969).
8. C.J. Pfeifer, "CDC-6600 FORTRAN Programming-Bettis Environmental Report", WAPD-TM-668, (1967).

## GAPCON 関係文献

## GAPCON の原報告

1. G.R. Horn and F.E. Panisko, "User's Guide for GAPCON: A Computer Program to Predict Fuel-to-Cladding Heat Transfer Coefficient in Oxide Fuel Pins", HEDL-TME 72-18, (1972).

## ペレット中のFPガス

1. M.E. Meek and B.F. Rider, "Summary of Fission Product Yields for  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , and  $^{241}\text{Pu}$  at Thermal Fission Spectrum, and 14-MeV Neutron Energies", APED-5398, Atomic Power Equipment Department, General Electric, (1968).
2. D.S. Dutt et al., "A Correlated Fission Gas Release Model for Fast Reactor Fuels", Trans. of Am. Nucl. Soc., 15, No.1, (1972).

## 燃料のスウェリング・クラック

1. W.E. Baily et al., "Effect of Diametral Gap Size on the In-Pile Performance of Fast Ceramic Reactor Mixed-Oxide Fuel", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.9, No.1, (1966)...
2. L.A. Lawrence, "Power Cycling Effect on Fuel-Cladding Gap Closure", Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.15, No.1, (1972).

3. G.E. Culley et al., "Response of an Irradiated, Mixed-Oxide Fuel Pin to an Overpower Transient in TREAT", Proceeding of the ANS Conference on Fast Reactor Fuel Element Technology, Edited by Ruth Farmahes, New Orleans, La., (1971).
4. J.A. Christensen, "Columnar Grain Growth in Oxide Fuels", Trans. Am. Nucl. Soc., 15, No.1, (1972).

ペレットの熱的・機械的性質とその変化

1. Westinghouse Advance Reactor Division, "Oxide Fuel Element Development Quarterly Progress Report for Period Ending September 30, 1969", WARD-4135-1, (1969).
2. T.G. Godfrey et al., "Thermal Conductivity of Uranium Dioxide and Armico Iron by an Improved Radial Heat Flow Technique", ORNL-3556, (1964).
3. R.C. Daniel and I. Cohen, "In-Pile Effective Conductivity of Oxide Fuel Element to High Fission Depletion", WAPD-246. Westinghouse Atomic Power Division, Pittsburg, Pennsylvania, (1964).
4. J. Bell et al., "Thermal Conductivity of Bulk Oxide Fuels WAPD-TM-586 (Revised), Westinghouse Atomic Power Division, Pittsburg", Pennsylvania, (1967).



5. B.F. Rubin et al., "The Irradiation of Stoichiometric and Hypostoichiometric  $UO_2$ - $PuO_2$  Fuels to Exposure of 125,000 MWd/Te, "Trans. ANS, 10, No.1, (1967).
6. K.J. Perry et al., "High Burnup Performance of Mixed Oxide Fuel to 100,000 MWd/Te", Presented at ANS Meeting, Chicago, (1967).
7. J.L. Krandota and C.N. Craig, "Melting Point of High Burnup  $PuO_2$ - $UO_2$ ", Trans. Am. Nucl. Soc., 11, No.1, p.132, (1968).
8. W.E. Baily et al., "Thermal Conductivity of Uranium-Plutonium Oxide Fuels", Nuclear Metallurgy Symposium, Phoenix, Arizona, (1967).
9. J. Rath and E.K. Halteman, "Thermal Expansion of Coprecipitated (U, Pu) $O_2$  Powders by X-Ray Diffraction Techniques", NUMEC-2389-9, Nuclear Materials and Equipment Corp., (1965).
10. J. Roth et al., "The Effect of Stoichiometry on the Thermal Expansion of 20 wt%  $PuO_2$ - $UO_2$  Reactor Fuel", Trans. of Am. Nucl. Soc., 10, No.2, (1967).

## 被覆管の機械的性質

1. "Liquid Metal Fast Breeder Reactor Material Handbook", HEDL-TME 71-32, Compiled by Hanford Engineering Development Laboratory, (1971).

## ペレット - 被覆管の熱伝達

1. A.M. Ross and R.L. Stoute, "Heat Transfer Coefficients Between  $UO_2$  and Zircaloy-2", CRFD-1075, (1962).
2. W.L. Badger and W.L. McCabe, "Elements of Chemical Engineering", McGraw-Hill Book Co., New York, (1936).
3. F.Kerith, "Principles of Heat Transfer", 2d Ed., International Textbook Co., Scranton, Pa., (1965).
4. R.B. Bird et al., "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, New York, N.Y., (1966).
5. Hans von Ubisch, "The Thermal Conductivities of Mixtures of Rare Gases at 29°C and 520°C", Arkiv For Fysik, Band 16, nr 7, (1959).
6. D. Geithoff et al., "Irradiation Performance of Fast Reactor Fuels", Presented at International Symposium on Plutonium Fuels Technology, AIME Symposium 1967, Nuclear Metallurgy, Vol.13, (1968).

7. M. Knudsen, "The Kinetic Theory of Gases--Some Modern Aspects", Methuen and Co., Ltd., 2d Edition, (1946).
8. S. Dushman, "Scientific Foundations of Vacuum Technique", John Wiley and Sons, New York, N.Y., (1958).