JAERI-Data/Code
94-011

高燃焼燃料解析コード EXBURN-Ⅰの開発

1994年9月

鈴木元衛・斉藤裕明*

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

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは，日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1994

編集兼発行　日本原子力研究所

印　　刷　㈱原子力資料サービス

JAERI－Data/Code 94－011

高燃焼燃料解析コードEXBURN－Ⅰの開発

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部
鈴木　元衛・斉藤　裕明*

（1994年8月22日受理）

軽水炉燃料の高燃焼度領域における通常時及び過渡時のふるまいを解析する計算コードEXBURN－Ⅰを開発した。高燃焼領域では，FPガス放出，被覆管の水側腐食，ペレットの性質の変化などが，燃焼度に依存しつつ燃料棒のふるまいに大きく影響する。

こうした現象を解析するため，本バージョンにおいてはFEMAXI－Ⅳをベースとしつつ，改良を施し，ペレット熱伝導率変化，FPガス放出率の燃焼度依存変化，被覆管水側酸化などの新たなモデルを組み入れた。本報告は，コードの全体構造とモデル及び物性値の説明を行い，入力マニュアル，及びサンプル入出力を添えたものである。

本コードの性能の実験データによる検証と向上は次の段階でなされる。

東海研究所：〒319－11　茨城県那珂郡東海村白方字白根2－4
＊ＣＲＣ総合研究所

JAERI－Data/Code 94－011

Development of High-burnup Fuel Analysis Code EXBURN－I

Motoe SUZUKI and Hiroaki SAITOU*

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received August 22, 1994)

A computer code EXBURN－I has been developed which analyses LWR fuel behavior in high-burnup region in normal operation and transient conditions.

In the high-burnup region, fuel behavior is affected considerably by such burnup-dependent factors as FP gas release, waterside corrosion of cladding, and pellet property change.

To analyze these phenomena, in the present version, the base code FEMAXI－Ⅳ has been improved and incorporated such new models as pellet thermal conductivity change, burnup-dependent FP gas release rate, and cladding waterside corrosion.

The present report describes the whole structure of the code, adopted models, and material properties, followed by input manual and sample input／output.

Verification and further improvement of the code performance by experimental data will be done in the next stage.

Keywords: High-burnup Fuel, Zircaloy Cladding, Waterside Corrosion, FP Release Rate, Pellet Thermal Conductivity

* CRC Research Institute, Inc.

目　　次

1. 序　　言 …… 1
1.1 コードの概要 …… 1
1.2 サブルーチン機能 …… 6
2. 解析理論および機能 …… 16
2.1 熱的ふるまい …… 16
2.1.1 温度分布 …… 16
2.1.2 ギャップ熱伝達 …… 37
2.1.3 接触力評価モデル …… 39
2.1.4 ＦＰガス生成・放出 …… 52
2.2 燃料棒全長での力学的ふるまい …… 76
2.2.1 有限要素モデル …… 76
2.2.2 基 本 式 …… 80
2.2.3 ペレットクラック …… 84
2.2.4 クリープ …… 86
2.2.5 塑　　性 …… 90
2.2.6 剛性方程式 …… 93
2.2.7 ペレット及び被覆管に作用する外力及び接触力 …… 94
2.2.8 境界条件 …… 95
2.2.9 全体マトリクスの作成 …… 98
2.2.10 上下プレナム境界条件 …… 99
2.2.11 ペレットと被覆管の接触判断条件 …… 101
2.3 物 性 値 …… 105
2.3.1 やきしまり …… 105
2.3.2 ペレットのホットプレス …… 105
2.3.3 初期リロケーション …… 107
2.3.4 応力反転による被覆管クリープの変化 …… 107
2.3.5 ＭＯＸ燃料の計算 …… 108
2.3.6 ガドリニア入りペレットの扱い …… 109
参考文献 …… 119
付　　録 …… 121

Contents

1. Introduction 1
1.1 Outline of Code 1
1.2 Subroutine Functions 6
2. Analytical Theory and Functions 16
2.1 Thermal Behavior 16
2.1.1 Temperature Distribution 16
2.1.2 Gap Thermal Conductance 37
2.1.3 Contact Force Evaluation Model 39
2.1.4 Fission Gas Generation and Release 52
2.2 Mechanical Behavior of Entire Fuel Length 76
2.2.1 FEM Model 76
2.2.2 Basic Equations 80
2.2.3 Pellet Cracking 84
2.2.4 Creep 86
2.2.5 Plasticity 90
2.2.6 Stiffness Equation 93
2.2.7 External and Contact Forces on Pellet and Cladding 94
2.2.8 Boundary Conditions 95
2.2.9 Generation of Total Matrix 98
2.2.10 Boundary Condition for Upper and Lower Plenums 99
2.2.11 Criteria of Pellet-clad Contact 101
2.3 Materials Properties 105
2.3.1 Pellet Sintering 105
2.3.2 Hot-press of Pellet 105
2.3.3 Initial Relocation 107
2.3.4 Change of Cladding Creep by Stress Reversal 107
2.3.5 MOX Fuel Calculation 108
2.3.6 Gadolinia-containing Pellet 109
References 119
Appendix 121

1. 序　　言

軽水炉が原子力発電の主流を占める期間が長期にわたるものと予想されている現在、軽水炉の高度化が進められており、燃料においては、燃焼度の伸長が求められている。

このため、高燃焼度燃料の信頼性を向上させるために、そのふるまいを精度良く解析できるコードが求められている。５０ＧＷｄ／ｔＵ程度以上の高燃焼度領域における燃料ふるまいは、それ以下の燃焼度領域のふるまいとは質的に異なったものがあり、独自にモデル化し、解析することが必要となる。

したがって、従来の燃料解析コードであるＦＥＭＡＸＩ－Ⅳを基本構造としつつ、高燃焼度領域での解析に必要な改良を実施し、モデルの追加、修正などを行い、高燃焼度領域の燃料ふるまい解析コードＥＸＢＵＲＮ-Ｉを開発した。本コードは最初のバージョンであり、今後多くの実験データによる検証を経て、予測性能の向上をはかっていく予定である。

１．１　コードの概要

軽水炉燃料のふるまいは、内外圧、熱応力、希ガス、及び照射の影響を受け、燃料ペレットと被覆管の相互作用（ＰＣＩ）およびペレットと被覆管のクリープ等によって特徴づけられ、また、ＦＰガス放出等にみられるように燃焼度に依存する部分がある。低、中燃焼度領域においては、こうしたふるまいを解析する燃料解析コードとしてＦＥＭＡＸＩ－Ⅲ[1]、ＦＥＭＡＸＩ－Ⅳ[2]がある。

一方、高燃焼度領域ではさらに燃焼度に強く依存するようになり、ペレットのリム層形成、ペレットの熱伝導率低下、被覆管の水側酸化による表面熱伝達率の低下などの質的に異なった問題が生じる。こうした高燃焼領域に固有の問題を解析するため開発したＥＸＢＵＲＮ－Ｉの概要を以下に示す。

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉは高燃焼燃料の通常時及び過渡時における挙動を決定論的モデルにより解析するコードである。コードは図１．１にその概略を示すように、温度分布やＦＰガス放出時の熱的挙動を解析する部分と力学的挙動を解析する部分から構成されている。

熱的解析部は、温度分布やガス圧力を径方向１次元軸対称問題として扱い、ペレット・被覆管のギャップ幅変化、ＦＰ放出モデル、軸方向ガス流動およびこれらのギャップ熱伝達へのフィードバックを考慮して解析する。軸方向出力分布を考慮するため燃料棒軸方向は最大１２領域に分

割され、熱的フィードバックが燃料棒全長にわたって収束するまで繰り返し計算されている。

力学的挙動部では軸対称有限要素法（ＦＥＭ）を燃料棒全長に適用してペレットと被覆管の力学的相互作用を解析する。ここでは、まず熱膨張、やきしまり、スエリングおよび、リロケーションによる初期ひずみを計算し、ペレットの割れ、弾塑性およびクリープを考慮して剛性方程式を作成し、接触モードに対応する境界条件を仮定して剛性方程式を解くことにより、応力やひずみを計算する。

ここでは塑性、クリープ及び割れペレットの弾性が、未知量である応力ひずみの関数であることを考慮して、剛性マトリクスに関する繰り返し計算が行われる。非接触 ⇆ 接触、弾性 ⇆ 塑性の状態変化の時には、計算結果はを状態変化が起こった時刻に内挿され、その時刻以後について状態を改めて計算を行う。軸方向は最大１２セグメントに分割して計算する。このモデルでは、上部セグメントの接触状態によって、下部セグメントの軸力を評価することが可能である。また、有限要素モデルにおいてもモデルを単純化し、全体自由度を削減している。

本コードで考慮されている現象を表１．１に示す。物性値は公開されているものをできる限り採用している。

また、Ｐｕ入りのＭＯＸ燃料およびＧｄ入りの燃料の計算を、物性値を指定することにより可能としている。

基本構造はＦＥＭＡＸＩ－Ⅳコードのそれを引き継いでいるが、新たに採用した機能及び主要な改良点は、次の通りである。

・力学的解析について、ペレット１個に着目して解析する局所的力学解析モデルを廃止し、燃料棒全長にわたって解析する機能のみとした。

・被覆管の水側酸化膜の影響を熱的解析、力学的解析の双方に組み入れた。

・リム領域からのＦＰガスの放出モデル[3]を導入した。

・ＦＰガス放出率を燃焼度から直接計算できる内田のモデル[4]を追加した。

・燃料内出力分布計算コードＲＯＤＢＵＲＮ[5]の計算結果を取り入れた計算を可能とした。

・ハルデン・データベース(TFDB)[6]のデータを入力データとすることを可能とした。

表1.1 EXBURN－I

	熱的過程 （温度分布を求める過程）	力学的変位を伴う過程
ペレット	熱伝導（径方向フラックス分布） ＦＰガス放出（温度と燃焼度に依存）	熱膨張 弾性 塑性 クリープ クラック 初期リロケーション やきしまり スウェリング（固体ＦＰ、ガスバブル） ホットプレス
被覆管	酸化膜成長 熱伝導	酸化膜成長 熱膨張 弾性 塑性 クリープ 軸方向照射成長
燃料棒	ギャップ熱伝導率 （混合ガス、接触、輻射） 被覆管表面熱伝達 ギャップガス流動	ペレット・被覆管の力学的相互作用 摩擦

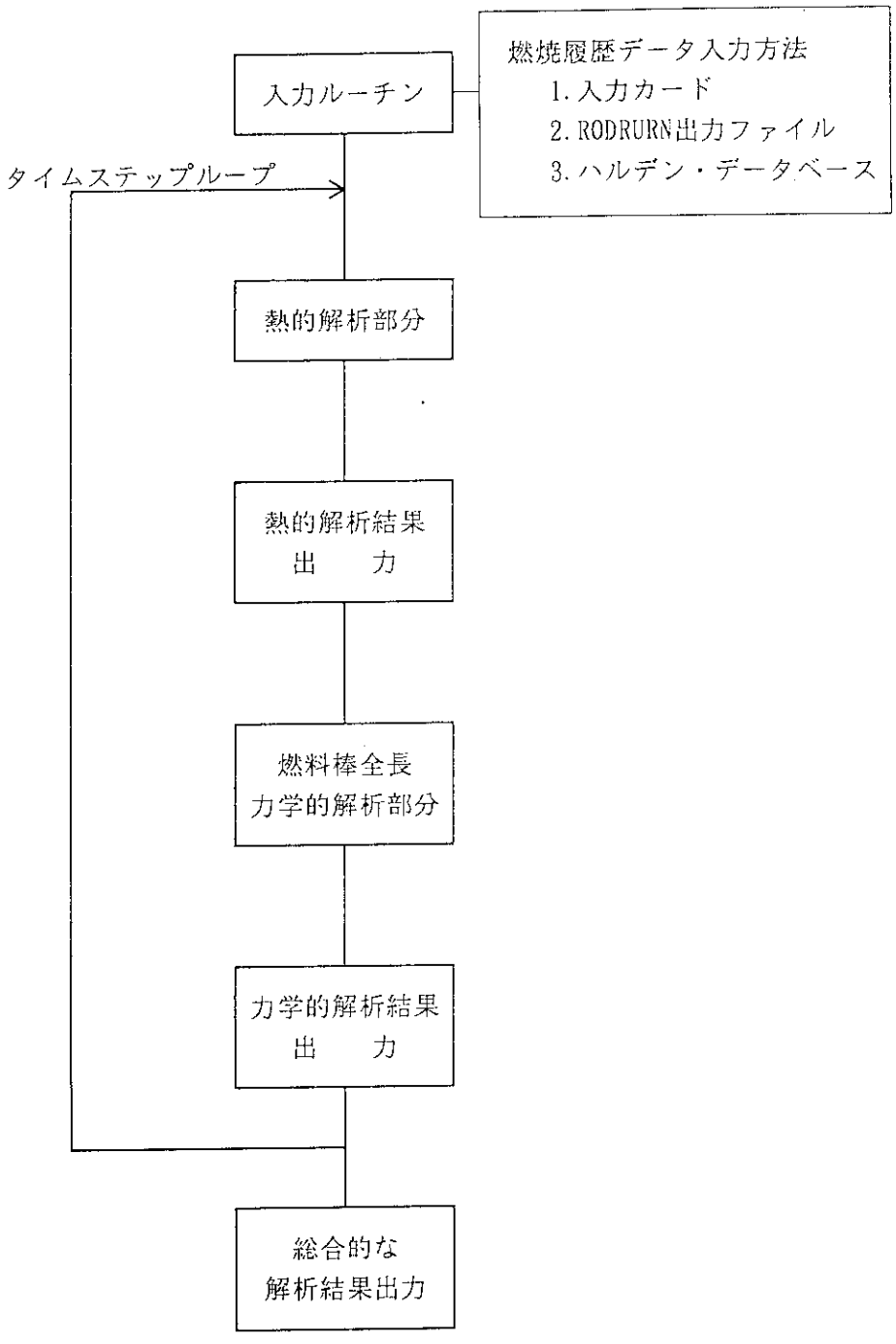


図1.1 EXBURN－Iコード体系

本コードの主な特徴は以下の通りである。

(1)要素特性

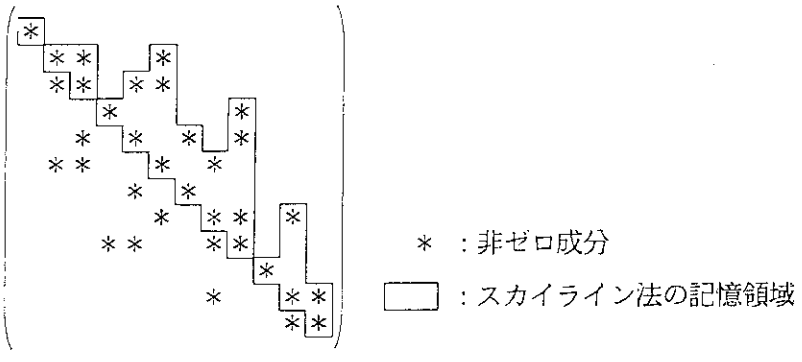
燃料全長にわたる力学計算を行うため、ＦＥＭ解析において四角形３自由度要素を導入し、計算領域、計算時間の短縮をはかっている。

(2)クリープ解法

陰解法計算により、高クリープ速度時における数値解の安定性の向上が計られている。

(3)マトリクス解法

有限要素法の連立方程式（剛性方程式）の係数マトリクスは下図のようにゼロ成分の多い優対角対称マトリクスである。そこで方程式の解法として、スカイライン法を採用し、マトリクス非ゼロ成分の記憶方式および処理手順を改良し、記憶容量のコンパクト化および、計算時間の短縮がはかられている。スカイライン法では下図における実線内部だけを記憶し記憶領域を節約する。ＦＰガス放出モデルにおいては、マトリクスや逆行列の演算回数が最小になるように工夫されている。



(4)非平衡残差

非線形問題を解く場合、タイムステップ毎に生じる非平衡残差の累積を避けるため、平衡条件式を増分型で表わさず、荷重と応力の全体の釣り合いが満足される定式化を行っている。

(5)接触問題

ペレット・被覆管の接触状態として、ギャップ開き、固着、すべりの３つの接触モードを考える。有限要素法の解法上は、ペレット、被覆管の節点対について接触状態を判定し、それぞれのモードによって境界条件が設定される。

(6)割れペレットの挙動

ペレットの割れは従来のコードと同様に、剛性低下の方法で近似的に取り扱うが、割れてリロケーションしたペレットのＰＣＩ下における挙動をよりよく表すために、圧縮状態下における剛

性の回復をリロケーションの量の関数として表すようにしている。

(7)ＦＰ放出モデル

ＦＰの放出機構は、等価球モデルを用いてモデル化されている。これにより、経験的モデルに比べ、実験データ範囲外への外挿が可能になっている。

(8)ギャップ内ガス拡散流動モデル

ギャップ内の拡散流動をモデル化し、放出されたガスのギャップ熱伝達に与える影響を厳密に評価している。

(9)被覆管の酸化及びクリープ変形のモデル

被覆管外表面の酸化をモデル化し、酸化による熱伝導度の変化、ヤング率、ポアソン比の変化の影響の計算を可能にしている。

(10)非定常現象の解析モデル

非定常熱伝達、ギャップガス流動、ＦＰ放出モデルの機構論的取り扱いにより、非定常時の燃料挙動を扱っている。また、各モデル毎に独自のタイムステップルーチンを設けて、精度の良い解と計算時間の短縮を行っている。

(11)計算の簡略化

ＦＰ放出モデルでは、低温領域、高温領域で、同じ形の計算を行っている場合には、一方の要素の計算結果を他方にも用い、二重の計算をさける工夫が施されている。参照回数の多い物性値等はデータテーブル化し、特殊関数の使用をさけている。

以上の工夫により、ＥＸＢＵＲＮ-Ｉでは、精度のよい解が短い計算時間で得られる。

１．２　サブルーチン機能

表１．２に、ＥＸＢＵＲＮ－Ｉコード本体についてのサブルーチンの機能を示す。

また、Appendix ３にサブルーティントゥリーを示す。

なお、表１．２中での略称は、

主：プログラムコントロールルーチン、プロッタールーチン、及び補助ルーチン等で解析モデルに属さないサブルーチン群

熱：熱的解析部分で用いるサブルーチン群

力学：熱料棒全長にわたる力学的解析部分で用いるサブルーチン群

である。

表1.2 EXBURN－I サブルーチンリスト

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
AAZERO	コモン領域のゼロセット	○		
ADBU	時間増分から燃焼度増分の計算	○		
ADRESS	マトリクス上のアドレス計算			○
ADTM	燃焼度増分から時間増分の計算	○		
ADVANC	ＦＰ放出モデルの結晶粒径，濃度等の更新		○	
AXIVAL	ON-LINEプロッターの縦軸のセット	○		
BBL	ペレット結晶粒内バブル径の計算		○	
BBLDEN	ペレット結晶粒内バブル密度の計算		○	
BLOCKDATA	ブロックデータリスト	○		
BURNUP	燃焼度の計算	○		
CAGROW	被覆管軸方向照射成長ひずみの計算			○
CANDM	ＦＰ放出モデル計算ルーチン		○	
CATHEX	被覆管軸方向熱膨張			○
CCREEP	被覆管クリープひずみ		○	
CDTHEX	被覆管半径方向熱膨張		○	○
CELMD1	被覆管酸化膜ヤング率		○	○
CELMOD	被覆管健全部（金属相）ヤング率		○	○
CFRFZ	被覆管軸力の計算			○
CHCAP	被覆管健全部（金属相）定容比熱		○	
CHSOFT	被覆管降伏関数の応力微分項の計算			○
CLEAR	実数領域のゼロセット	○		
CMAT1	ペレット［Ｃ］マトリクスの作成			○
CMAT2	被覆管［Ｃ］マトリクスの作成			○

表１．２　（続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
CNSTR	変位増分のセット			○
CORRO	被覆管腐食速度の計算		○	○
CPOIR	被覆管健全部（金属相）ポアソン比		○	○
CPOIR1	被覆管酸化膜ポアソン比		○	○
CTHCN1	被覆管酸化膜熱伝導率		○	
CTHCON	被覆管健全部（金属相）熱伝導率		○	
CTSOFT	被覆管降伏関数の温度微分項の計算			○
CUBIC	３次方程式の最大実数解の算出（バブル径の計算）		○	
CYIE	ジルカロイ降伏応力（0.2%耐力）			○
CYIE2	ジルカロイ降伏応力（$\overline{\varepsilon}_p$ での降伏曲面の大きさ）			○
CYLD	ジルカロイ降伏応力（0.2%耐力）		○	
DATE2	日付を文字列で与える	○		
DENSF	ペレットやきしまりモデル		○	
DFCLAD	被覆管荷重ベクトルの作成			○
DFPLT	ペレット荷重ベクトルの作成			○
DFX	被覆管降伏曲面の大きさの決定に使用			○
DIFC	ペレット結晶粒内でのＦＰの拡散係数		○	
DIFCON	Ｘｅ－Ｈｅ相互拡散係数		○	
DOT	被覆管クリープのＰｕｇｈの反転に使用			○
EQSCAL	$\overline{\varepsilon}^p$ における降伏曲面の大きさの収束計算			○
FCREEP	ペレットクリープひずみの計算(MATPRO-09)		○	
FDIST	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算		○	
FDISTF	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算		○	

表１．２　（続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
FELMOD	ペレットヤング率		○	○
FEMAX4	プログラム全体のコントロール	○		
FEMRD1	熱計算と燃料棒全長力学的計算との接続ルーチン			○
FFG	粒成長によるＦＰ掃き出し率の計算		○	
FGPRO	ＦＰガス生成量の計算		○	
FGRELN	ペレット各要素のＦＰ放出率の計算		○	
FGRUCD	ペレット各要素のＦＰ放出率の計算（燃焼度依存モデル）		○	
FISGAS	ＦＰガス放出率を温度領域毎に決定するテーブル		○	
FISRAT	核分裂密度の計算	○		
FLMCON	被覆管表面熱伝達係数（Jeas-Lottesの式）		○	
FLXDEP	ペレット径方向フラックスデプレッションの計算		○	
FPOIR	ペレットポアソン比			○
FX	被覆管の降伏曲面の大きさの決定に使用			○
FYIE	ペレット降伏応力（0.2%耐力）			○
GAPCON	ギャップコンダクタンスの計算		○	
GAPMOD	ギャップコンダクタンスの収束計算		○	
GAPS	ギャップ幅の計算			○
GDTHCON	ガドリニアの熱伝達率		○	
GRAIN	ペレット粒成長の計算		○	
GRAPH1	ON-LINEプロッター用コントロールルーチン（熱計算）	○		
GRAPH2	ON-LINEプロッター用コントロールルーチン（FP挙動）	○		
GRAPH3	ON-LINEプロッター用コントロールルーチン（応力・ひずみ）	○		
GRID	グリッド点の設定（ON-LINEプロッター）	○		

表1．2 （続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
GTHCON	ガスの熱伝導率		○	
HEAD2	熱料棒全長解析用のタイトル	○		
HEADER	局所解析用のタイトル	○		
HEATG	酸化膜熱伝導率（旧）	○		
HOTVOL	プレナム容積計算の補助ルーチン		○	
HTX	被覆管表面熱伝達係数(Jens-Lottes)		○	
ICLEAR	整数領域のゼロセット	○		
INIGAS	Hot stand-byでのプレナム圧力，容積計算		○	
INPGER	入力ジェネレータ	○		
INPHIS	出力履歴の入力ルーチン	○		
INPIMG	入力イメージの印刷	○		
INPROD	RODBURNからの入力ルーチン	○		
INPUT1	熱計算のための入力ルーチン	○		
INTG	ＦＰ放出計算の係数マトリクス［Ａ］，［Ｅ］の計算		○	
INTGH	ＦＰ放出計算の係数マトリクス［Ｈ］の計算		○	
INTGX	ペレット結晶粒内での残留ＦＰの体積積分		○	
INTPLT	２次補間ルーチン	○		
INV3	３×３対称マトリクスの逆行列			○
LENGT	キャラクター長の計算（ON-LINEプロッター）	○		
LINER	プロッターの線のパターン	○		
LSYM	シンボルの印刷（ON-LINEプロッター）	○		
MAIN	主ルーチン	○		
MATDAT	伝熱計算のための物性値セット		○	

表1．2 （続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
MDEPS0	全体モデルの初期ひずみの計算			○
MDSIG	全体モデルの応力計算			○
MOVE	全体マトリクスの保存（全体モデル）			○
MTDF	全体荷重ベクトルの作成（全体モデル）			○
NEWPEN	ダミー			
ONPLOT	ON-LINEプロッターのコントロールルーチン	○		
OPTS02	非対称マトリクスの解法			○
OPTSOL	対称マトリクスの解法			○
OUTP	全体モデルの出力（時間依存）			○
OUTP1	全体モデルの出力（時間依存）			○
OUTPT1	最終のサマリー出力		○	○
OUTPT2	最終のサマリー出力		○	○
PDENS	ペレットやきしまりひずみ		○	○
PFRFZ	ペレット軸力の計算			○
PHCAP	ペレットの定容比熱		○	
PHIST	タイムステップコントロール	○		
PJUMP	初期リロケーション		○	
PLOT	ダミー			
PLOTS	ダミー			
PLUNIT	ダミー			
POWDIS	出力分布の計算		○	
PRHIS2	出力履歴の出力ルーチン	○		
PRINT0	熱計算の入力データの出力		○	

表１．２　（続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
PRINT1	熱計算のアウトプット（時間依存）		○	
PRINT2	ギャップガス情報出力（時間依存）		○	
PRINT3	温度分布（時間依存）		○	
PRINT5	熱計算詳細情報出力　（時間依存）		○	
PROPT2	オプション出力（全体モデル用）	○		
PSWELT	ペレット固体スウェリングひずみ		○	○
PTHCON	ペレット熱伝導率		○	
PTHEX	ペレット熱膨張		○	○
PUTHCN	ペレット熱伝導率		○	
RDGAS1	軸方向移流ガス計算タイムステップ幅の設定		○	
RDGAS2	軸方向移流拡散モデル		○	
RDTEMP	熱計算全体のコントロール		○	
REDSTR	粒成長後のペレット粒内でのＦＰ密度分布の再配分		○	
REMESH	被覆管腐食進行時の力学計算有限要素の切り直し			○
RIMFGR	ペレットのリム効果によるＦＰガスの掃き出し		○	
SBES0	０次変形ベッセル関数		○	
SBES1	１次変形ベッセル関数		○	
SECOND	計算時間（秒）			○
SETR	ペレット内粒成長後の再メッシュ切り		○	
SETR0	ペレット内粒内座標の初期設定		○	
SOLVE	ＦＰ放出計算用のソルバー		○	
SOLVF2	ペレット・被覆管の間のすべり状態の設定			○
SOLVF3	ペレット・被覆管の間の固着状態の設定			○

表1．2 （続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
SPACE	ダミー			○
SSMAT	セグメント毎の全体マトリクスの作成			○
SUFCN	被覆管表面熱伝達係数のコントロール		○	
SWELL	ＦＰ放出モデルと関連付けしたペレットスウェリングモデル		○	○
SYMBOL	ダミー			
TEMP1D	一次元熱伝導計算		○	
TERP	ON-LINE PLOTTER用計算ルーチン		○	
THERFD	ガススウェリングによるギャップの閉塞		○	
THGAPN	熱計算での変形計算		○	
TIC	ON-LINEプロッター補助ルーチン	○		
TMELT	ペレットメルティングポイントの計算		○	
TMSTP	全体解析用のタイムステップ幅の決定			○
TYPE1	ON-LINEプロッタータイプ　1	○		
TYPE2	ON-LINEプロッタータイプ　2	○		
URSWEL	ペレットガススウェリングひずみ（ＢＭＩモデル）		○	○
USMESH	伝熱計算用メッシュ切り		○	
USTEMP	伝熱計算主ルーチン		○	
VLUMES	プレナム容積計算		○	
WHERE	ダミー			
XBDMAT	［Ｂ］^{T}［Ｄ］マトリクス			○
XBMAT	［Ｂ］マトリクス			○
XCPEP2	被覆管クリープひずみ速度$\frac{1}{\varepsilon^c}$ の作成			○

表1．2 （続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
XCPEQ2	被覆管クリープの$\frac{1}{\varepsilon^c}(=f)$，$\frac{\partial f}{\partial \bar{\sigma}}$，$\frac{\partial f}{\partial \bar{\varepsilon}^c}$ の作成			○
XCPHD2	被覆管クリープの$\frac{1}{\varepsilon^H}(=g)$，$\frac{\partial g}{\partial \bar{\sigma}}$，$\frac{\partial g}{\partial \bar{\varepsilon}^H}$ の作成			○
XCPM11	ペレットクリープの$[C^c]$マトリクス，$\{\Delta\varepsilon^c\}$ベクトル作成			○
XCPM12	ペレットクリープのひずみ増分$\{\Delta\varepsilon^c\}$の作成			○
XCREP1	被覆管クリープの$[C^c]$マトリクス，$\{\Delta\varepsilon^c\}$ベクトル作成			○
XCREP2	被覆管クリープのひずみ増分$\{\Delta\varepsilon^c\}$の作成			○
XDPMAT	$[D^p]$マトリクス			○
XDPST	相当塑性ひずみ増分の計算			○
XDVSIG	偏差応力			○
XELML1	要素マトリクス，荷重ベクトルの作成			○
XELML2	要素の応力，ひずみ計算			○
XEQEPS	相当ひずみ			○
XEQSIG	相当応力			○
XESMAT	要素剛性マトリクス			○
XFHSFT	ペレット降伏関数の応力微分項			○
XFLOAD	要素荷重ベクトル			○
XFTSFT	ペレット降伏関数の温度微分項			○
XIODD	ヨウ素濃度の計算			○
XPCM	全体解析のメインルーチン			○
XPJUMP	初期リロケーション			○
XPRBTY	塑性／除荷判定			○
XPSWEL	ペレットスウェリングひずみ			○

表１．２ （続き）

ｻﾌﾞﾙｰﾁﾝ名	内　　容	主	熱	力学
XPUGH	被覆管クリープＰｕｇｈの反転			○

2. 解析理論および機能

ここでは、ＥＸＢＵＲＮ－Ｉで使用した解析理論および機能について説明する。２．１節では熱的ふるまい部、２．２節では力学的ふるまい部についての理論と機能について示す。また、２．３節では使用した物性値についての補足説明を示す。

２．１　熱的ふるまい

熱的ふるまい部では、冷却材温度から燃料内の温度分布を計算する。計算手順を以下に示す。

(1) 冷却材入口温度から冷却材軸方向温度分布を計算する。

(2) 被覆管表面熱伝達モデルにより冷却材温度を起点として被覆管表面温度を計算する。

(3) 被覆管酸化膜の熱伝導計算から被覆管健全層（金属相）表面温度を計算する。

(4) ペレット中心から被覆管健全層（金属相）表面までの温度分布を(3)の結果を境界条件として径方向１次元温度モデルで計算する。

以上について２．１．１節で述べる。また、径方向一次元温度分布モデルで必要なギャップ熱伝達、接触力モデル、ＦＰガス放出モデルについてはそれぞれ、２．１．２、２．１．３、及び２．１．４節で述べる。

２．１．１　温度分布

（１）燃料棒表面熱伝達モデル

（１）－１　基本的な仮定・方針

冷却材の温度分布の計算では、冷却材の相変化を考慮してエンタルピーを主変数とする。この方法は、単相流（サブクール水）のＰＷＲ及び二相流（核沸騰状態）のＢＷＲのいづれをも計算対象とする。その際の仮定と方法は次の通りである。

①冷却材のエンタルピー上昇に関しては、冷却材が軸方向に一様に流れていることを仮定する定常の論理を用いる。ただし、入口温度・流速等が全解析期間を通じて一定ということではなく、時間依存変数として入力できるようにしている。

②蒸気表は簡略化したものをコード自身が備える。この簡略化した蒸気表から内挿により状態変数を求める。

③圧力及び質量速度は軸方向に一定とする。蒸気と水のスリップはゼロとする。

（1）－2　冷却材のエンタルピー

仮定①により図2．1のように定義された体系において、冷却材（水または蒸気）のエンタルピーは次式によって順次入口から求められる。

$$h_{n+1} - h_n = \frac{2\pi r \overline{q}_n l_n}{GA} \tag{2.1.1}$$

ここで　h_n ：ノードnにおける比エンタルピー（J/kg）

r ：燃料棒外半径（m）

l_n ：セグメントnの長さ（m）

G ：質量速度（$=\rho v$）（kg/m²・s）

A ：流路断面積（m²）

$\overline{q}_n$ ：セグメントnの定常熱流束（J/m²・s）

である。

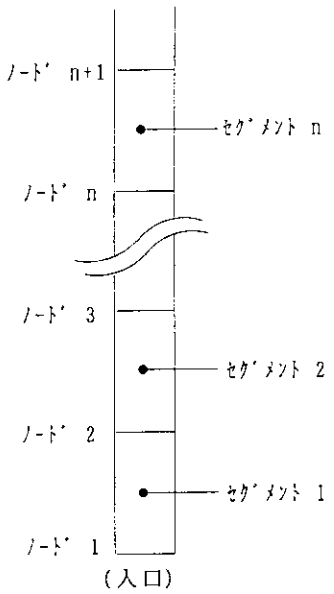


図2．1　モデル形状

具体的な計算の体系を図２．２に示す。

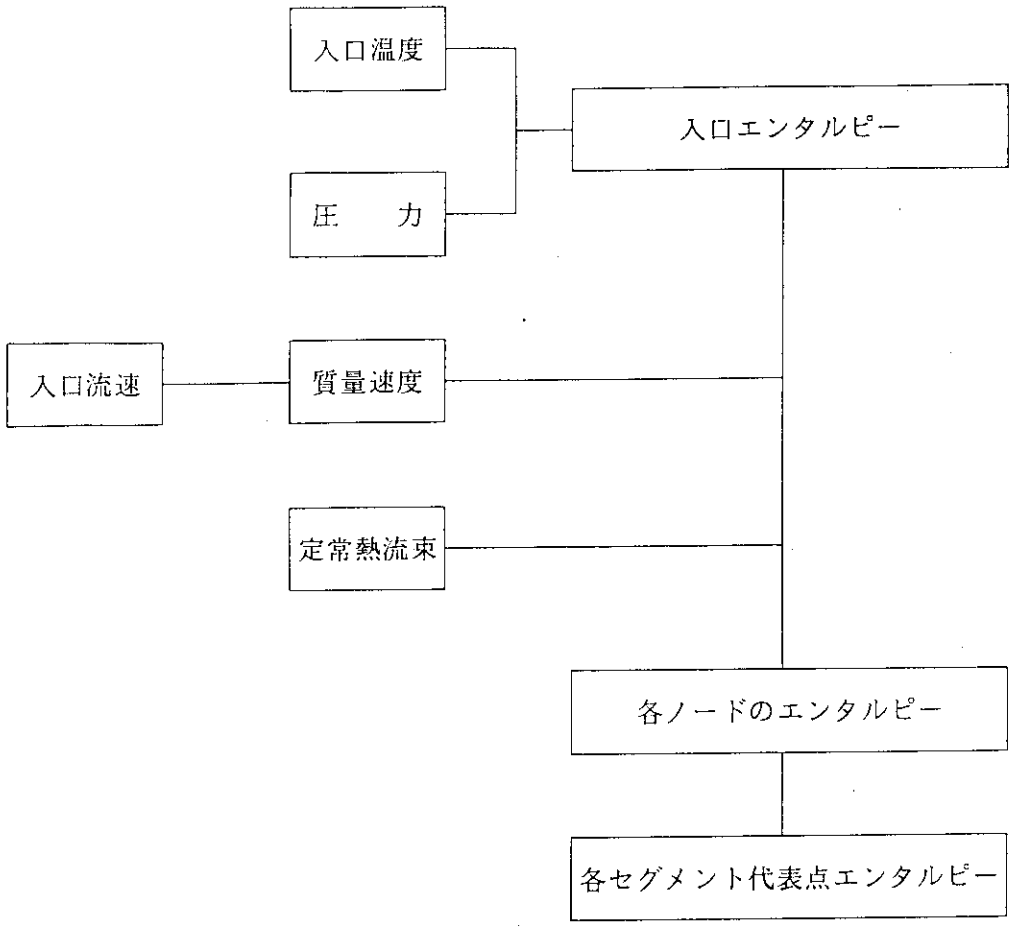


図２．２　計算体系

（１）－３　蒸気表を用いた状態量の計算

（１）－２の計算および後述する（１）－４項の熱伝達計算に必要な状態量は、比エンタルピー、比体積、粘性係数、熱伝達度およびプラントル数である。

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉの場合、冷却材状態としてはサブクール水と、水に近い２相領域とする。

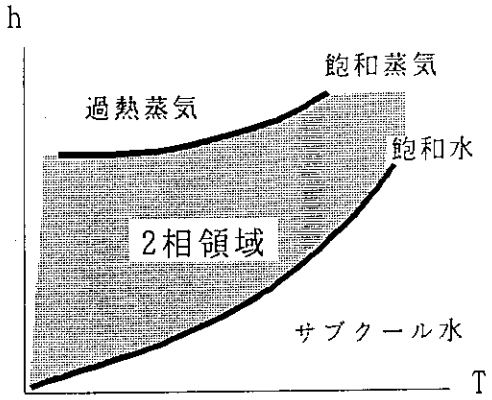


図２．３　冷却材状態図

［１］エンタルピー、温度

サブクール水のエンタルピーは圧力依存性はほとんどないが、圧力が大きく変わると若干変わる。そこで、サブクール領域でのｈ（Ｐ、Ｔ）の表は、３０気圧刻みの粗い圧力間隔となっており、以下のように内挿して用いる。ＥＸＢＵＲＮ-Ｉの場合、圧力を求める計算は必要ない。

① Ｔ、Ｐからｈを求める計算（入口エンタルピーの計算）

1)状態を決める

T_s（Ｐ）線図を内挿してT_s（Ｐ）を定め、Ｔと比較する。なお、T_s（Ｐ）線図は圧力が１ｂａｒ～１８０ｂａｒの範囲とし、内挿が可能な範囲で温度を指定する。

2)エンタルピーを求める

ａ．Ｔ＜T_sの場合（サブクール）

ｈ（Ｐ、Ｔ）表（Ｔで２０℃、Ｐで３０気圧間隔）を用い、Ｐより大きい最初の定圧線データｈ（Ｐ、Ｔ）　　（P_1＞Ｐ）

をＴについて内挿してｈを決める。（圧力について内挿しない）

ｂ．Ｔ＞T_sの場合（過熱蒸気）

過熱蒸気であるが、ＥＸＢＵＲＮ-Ｉの場合、ある許容幅を設けた上でエラーストップする。

ｃ．Ｔ＝T_s（０．２℃の許容幅内）の場合（２相状態）

２相状態であるが、水相におけるエンタルピーを採用し、

$h = h_f$（水相）

とする。

② Ｐ、ｈからＴを求める計算

1)状態を決める

h_s（Ｐ）線図を内挿してｈとh_sを比較する。なお、h_s（Ｐ）線図は圧力が１ｂａｒ～１８０ｂａｒの範囲とし、内挿が可能な範囲でエンタルピーを指定した。

2)Ｔを求める

ａ．ｈ（Ｐ，Ｔ）表（Ｔで２０℃、Ｐで３０気圧間隔）において、Ｐより大きい最初の圧力P_1の列のエンタルピーデータを内挿してＴを求める。（圧力については内挿しない）

ｂ．h_f＜ｈ＜h_gの場合（２相領域）

水相温度を採用し、

$T = T_s$

とする。

［２］その他の状態変数

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉにおいては、水の粘性係数、熱伝達度、及びプラントル数はサブクール状態のDittus-Boelter式にのみ使う。また、これらの量は圧力依存性が余り大きくない。したがって、飽和水に対するμ_s（Ｔ）、k_s（Ｔ）、Pr_s（Ｔ）の表を用いる。（Ｔについて１０℃間隔）

h_s（Ｐ）線図、T_s（Ｐ）線図、ｈ（Ｐ、$\dot{T}$）線図、密度、粘性係数、熱伝導度、及びプラントル数を、図２．４～図２．１０にそれぞれ示す。各図において、△形のデータ点は、ＥＸＢＵＲＮ－Ｉが持つ物性値テーブルにおけるデータに対応している。

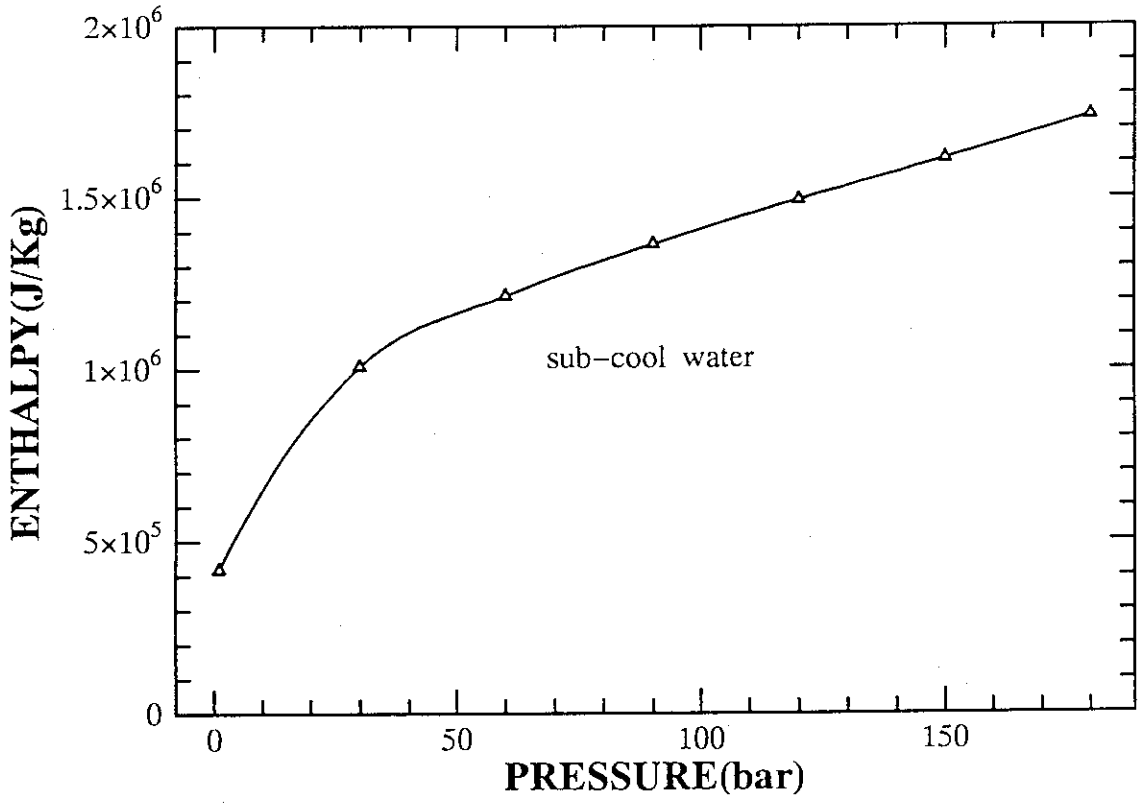


図 ２．４　ｈｓ（ｐ）線図

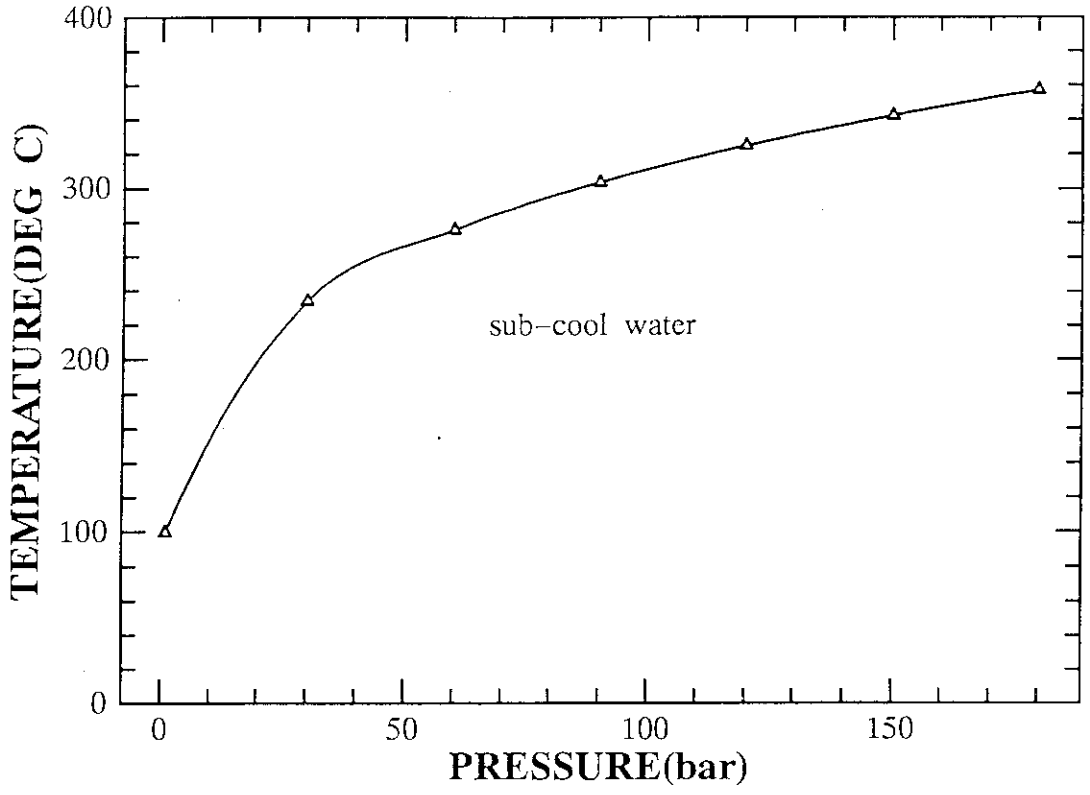


図 2．5　Ｔｓ（ｐ）線図

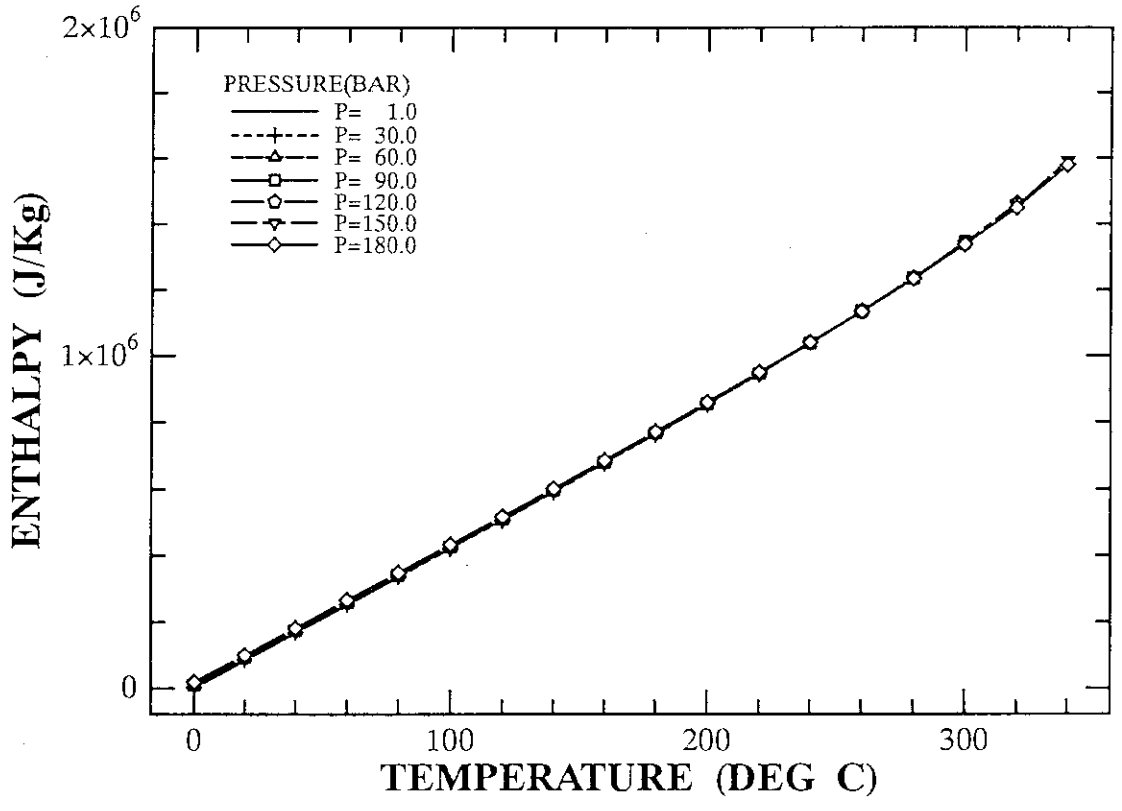


図 2．6　ｈ（ｐ、Ｔ）線図

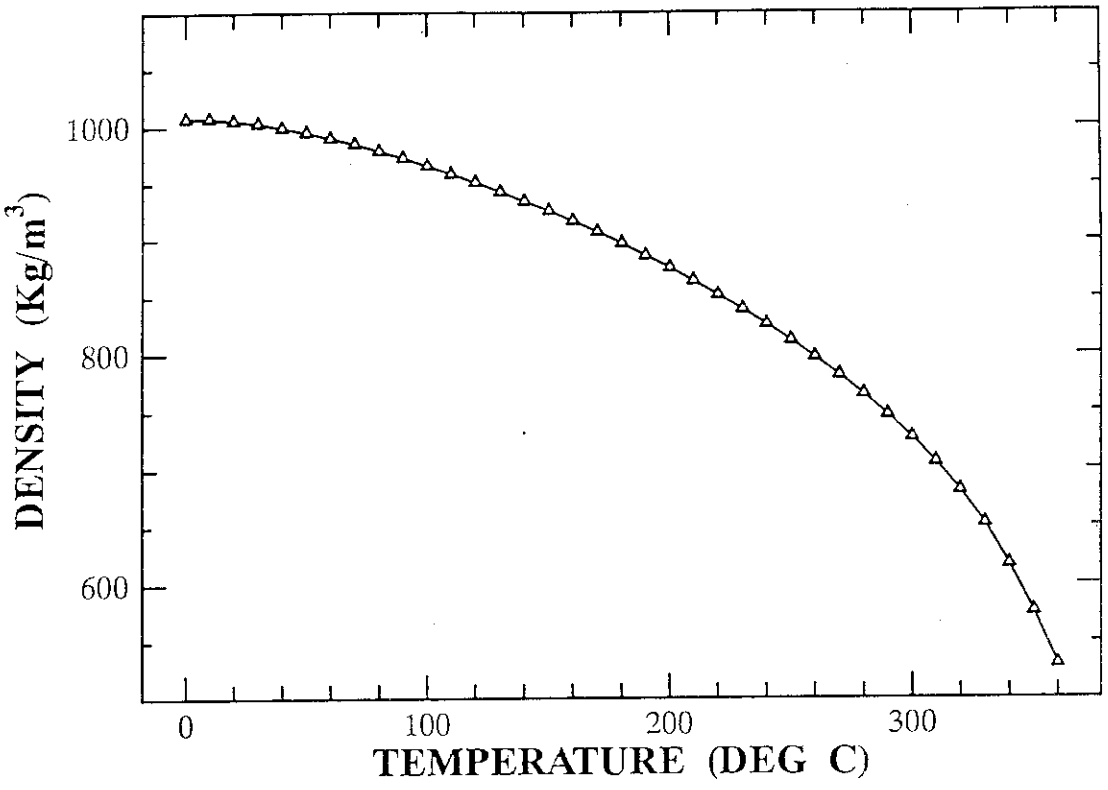


図 2．7　水の密度

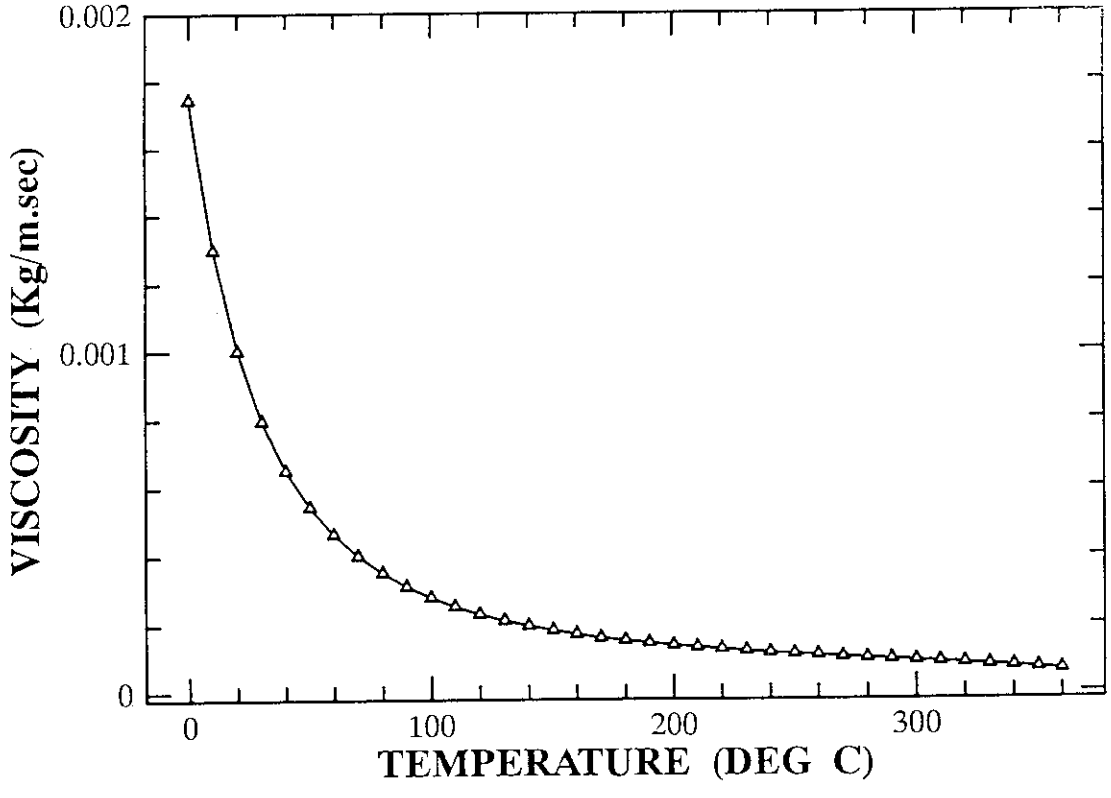


図 2．8　水の粘性係数

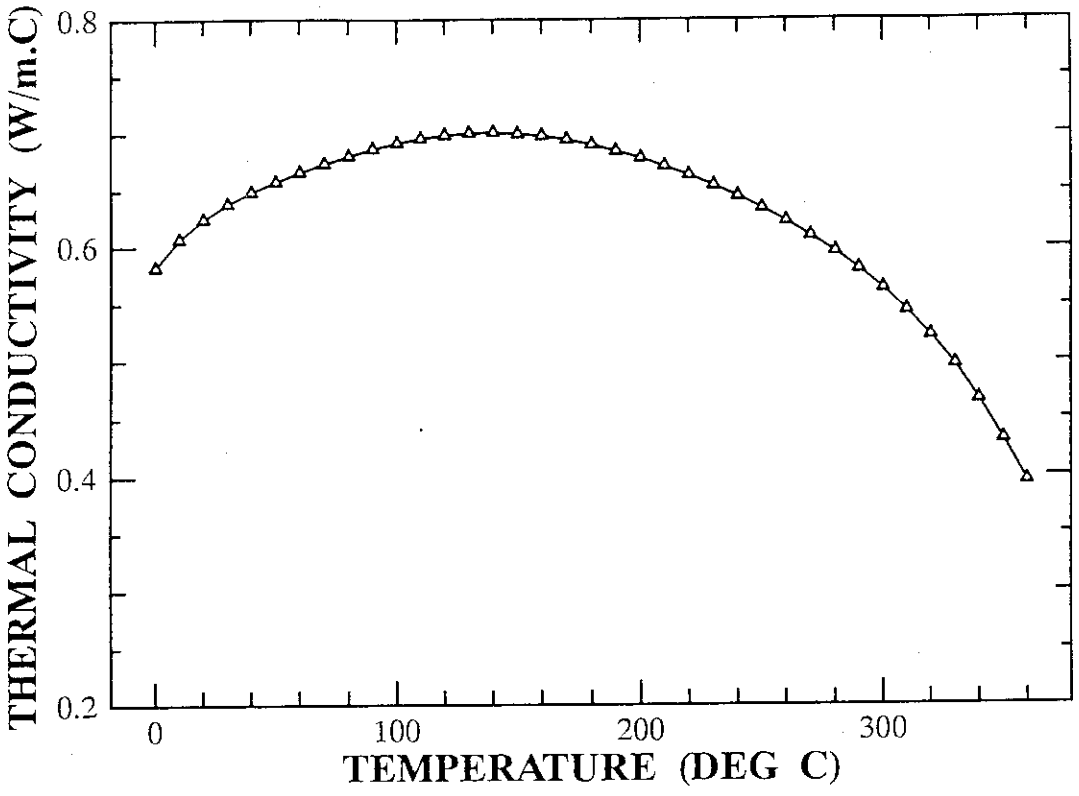


図 2．9　水の熱伝導度

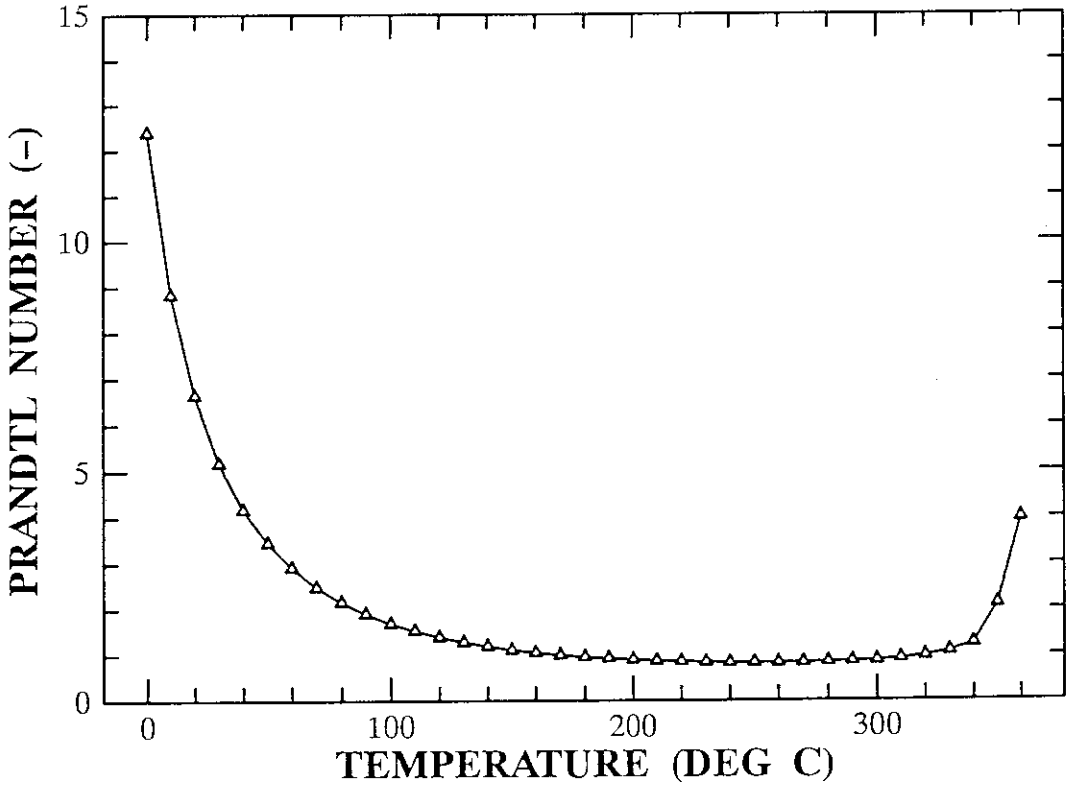


図 2．10　水のプラントル数

（1）－4　熱伝達モデルの使用法

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉでは燃料内部の熱伝導差分式から、次の式を得る。次の（２）項参照。

$$q_N = A T_N + B \tag{2.1.2}$$

ここで　q_N：被覆管表面熱流束　（W／m²）

T_N：被覆管表面温度　（K）

である。

(2.1.2)式と、被覆管表面熱伝達係数についての Dittus-Boelter または Jens-Lottes 式から表面温度T_Nを得る。（１）－５項を参照。

（１）２相状態の場合

Jens-Lottes 式のみを使う。

（２）サブクール状態の場合

冷却水温度をT_B、飽和温度をT_S、被覆管表面温度をT_Nとすると、サブクール水における熱伝達式は Dittus-Boelter の式による熱伝達係数h を用いて、

$$q_{N1} = h(T_N - T_B) \tag{2.1.3}$$

と書ける。また、飽和温度における２相状態での熱伝達式は、Jens-Lottes の式による熱伝達係数を用いて、

$$\begin{aligned} q_{N2} &= h\ (T_N - T_S) \\ &= \alpha^* q_N^{3/4}\ (T_N - T_S) \end{aligned}$$

である。したがって、

$$\begin{aligned} q_{N2}^{1/4} &= \alpha^*\ (T_N - T_S) \\ q_{N2} &= \alpha^{*4}\ (T_N - T_S)^4 \end{aligned}$$

より、

$$q_{N2} = \alpha\ (T_N - T_S)^4 \tag{2.1.4}$$

と書ける。したがって、被覆管表面熱流束q_Nは、

$$q_N = q_{N1} + q_{N2} \tag{2.1.5}$$

となる。(2.1.2)式及び(2.1.3)式より、

$$A T_N + B = h(T_N - T_B)$$

$$T_N = \frac{B + h T_B}{h - A} \tag{2.1.6}$$

を得る。$T_N > T_s$の場合、(2.1.2)～(2.1.5)式までを連立させて

$$AT_N + B = h(T_N - T_B) + \alpha(T_N - T_S)^4 \tag{2.1.7}$$

となる。(2.1.7)式を変形して、

$$(A-h)T_N + B + hT_B = \alpha(T_N - T_S)^4$$

ここで、$\tilde{T} = T_N - T_S$ とおくと、$T_N = \tilde{T} + T_S$ より

$$(A-h)(\tilde{T} + T_S) + B + hT_B = \alpha\tilde{T}^4$$

$$(A-h)\tilde{T} + (A-h)T_S + B + hT_B = \alpha\tilde{T}^4$$

さらに

$$a = (A-h)/\alpha \quad 、 \qquad b = \{(A-h)T_S + B + hT_B\}/\alpha$$

とおいて整理すれば、$\tilde{T}$ についての方程式

$$a\tilde{T} + b = \tilde{T}^4 \tag{2.1.8}$$

を得る。この方程式を解いて$\tilde{T}$ を求め、

$$T_N = \tilde{T} + T_S \tag{2.1.9}$$

に代入することにより、T_N を求めることができる。

（1）－5　被覆管表面熱伝達係数

<u>Jens-Lottesの実験式</u>[7]

$$h_W = 0.1263 \cdot exp\left(\frac{P_W}{6.201\times10^6}\right) q_S^{0.75} \tag{2.1.10}$$

h_W　：表面熱伝達係数（W/cm²・K）

P_W　：冷却水圧力（N/cm²）

q_S　：被覆管外面熱流束（W/cm²）

<u>Dittus-Boelterの式</u>[8]

$$\dot{h}_W = 0.023\ \frac{k}{De}\left(\frac{DeV\rho}{\mu}\right)^{0.2} \cdot (Pr)^{0.4} \tag{2.1.11}$$

$\dot{h}_W$　：表面熱伝達係数（W/m²・K）

k　：冷却水熱伝導度（W/m・K）

De　：等価直径（m）

V　：冷却水速度（m/s）

ρ　：冷却水密度（kg/m³）

μ　：冷却水の粘度（kg/m・s）

Pr　：プラントル数

ただしここで、$h_W = h_W^* \cdot 10^{-4}$ である。

また、等価直径とは、燃料周囲の冷却材流路を円柱に換算したときの円柱直径であり、（1）－7項で解説する。

（1）－6　プログラムの流れ

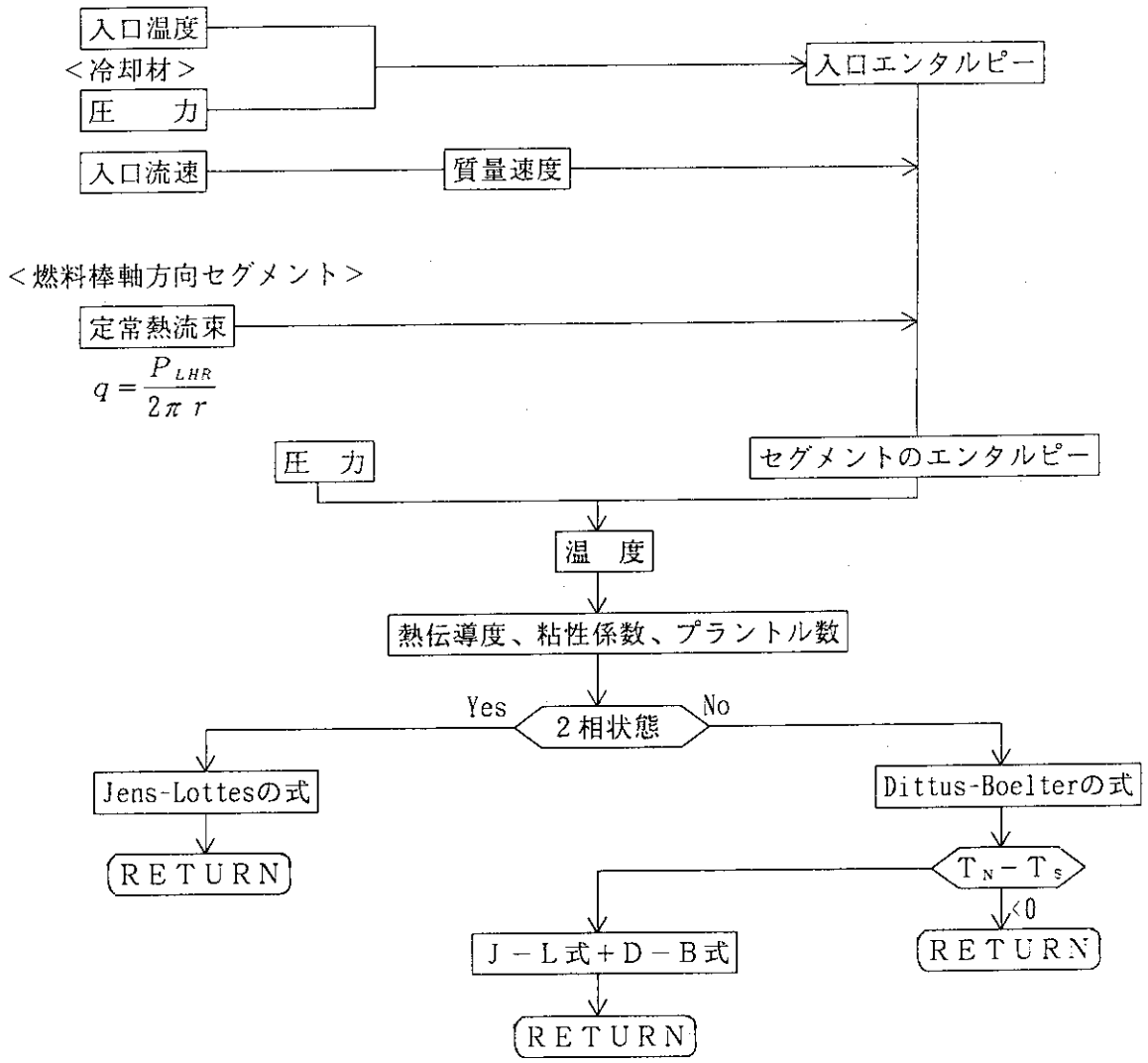


図2.11　プログラムの流れ図

（1）－7　流路相当直径

流路相当直径は次式で与えられる。

$$De = \frac{4S}{l_w} \tag{2.1.12}$$

De　：流路相当直径（wetted）

l_w　：ぬれ淵長さ　（wetted）

S　：流路断面積

$$D_{he} = \frac{4S}{l_h} \tag{2.1.13}$$

D_{he}　：流路相当直径（heated）

l_h　：ぬれ淵長さ　（heated）

l_w と l_h の相違は燃料外面の灰色面（放射率 ε が $0 < \varepsilon < 1$ である表面）の長さを考慮するか否かである。上面チャンネル②の例をとると、

$l_w = l_1 + l_2 + l_3$

$l_h = l_2 + l_3$

l_i　：面 i の長さ

である。

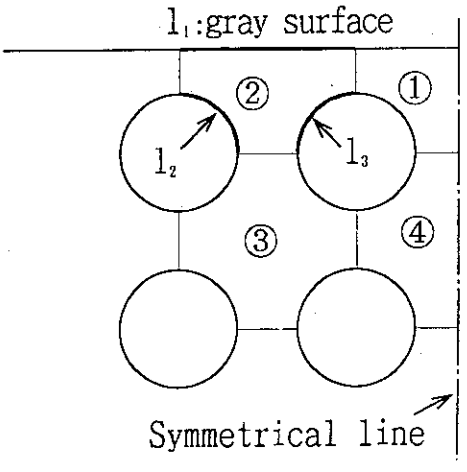


図2.12　チャンネルモデル

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉの場合、流路相当直径の入力を行わない場合、チャンネル③を想定してピッチと燃料棒直径から流路相当直径を求める。流路断面積Ｓは各チャンネルにより異なるが、

$$S = A - \frac{1}{2}\sum_i \int r_i(\theta)^2 d\theta \tag{2.1.14}$$

の形式で表される。Ａは例えばチャンネル①では、

$A = l^2$

チャンネル③では、

$A = 4l^2$

l　：ピッチの１／２

と表される。

$\int r_i(\theta)^2 d\theta$ の項については、チャンネルへ面した燃料表面の平均半径をつかえば、

$$\int r_i(\theta)^2 d\theta = \overline{r_i}^2 \theta_i \tag{2.1.15}$$

なお、ＥＸＢＵＲＮ－Ｉの場合流路断面積の入力指定のない場合は、チャンネル③を想定して次式で平均の流路断面積が計算される。

$$S = 4l^2 - \pi \overline{r}^2 \tag{2.1.16}$$

（１）－８　使用上の注意

①冷却材の入口温度および入口流速は履歴点データで与える。ただし、入口流速をゼロとする場合はJens-Lottes式のみを用い、冷却材温度はその入口温度と等しいものとして扱われる。

②ネームリスト中の指定としてＰＩＴＣＨ、ＦＡＲＥＡ、ＤＥがあるが、それぞれ、

ＰＩＴＣＨ…燃料棒管のピッチ　（cm）

ＦＡＲＥＡ…流路断面積　（cm^2）

ＤＥ　…流路相当直径　（cm）

である。この際、計算に必要な変数はＦＡＲＥＡとＤＥであるが、これらの値を指定した場合はその値が使われ、入力しない場合はＰＩＴＣＨと被覆管外径からＦＡＲＥＡとＤＥが計算される。

（２）酸化膜

高燃焼領域では、被覆管の水側腐食（酸化）が大きくなり、これによる被覆管の熱伝達や力学的挙動への影響は無視できなくなる。被覆管の外面酸化膜の厚み増加は以下のようにして計算する。

酸化膜の熱伝導度は、ＭＡＴＰＲＯモデルにより温度の関数として次の式で与えられる[9]。

$$C_N = 0.835 + 1.81 \times 10^{-4} T \tag{2.1.17}$$

ここで　C_N ：被覆管酸化膜熱伝導度（W／m・K）

Ｔ ：温度（K）

である。

酸化膜厚Ｓの経験式は以下に示す Haldenモデル、もしくは MATPROモデルのいづれかを入力で指定する。その際、初期酸化膜厚みは、軸方向の各セグメントごとに入力で指定可能である。

どちらのモデルにおいても、腐食速度は酸化膜と健全部（＝金属相）の界面温度の関数として

与えられ、また、ある厚さまで酸化が進んだところで腐食速度式が遷移する。

Haldenモデル[10]

遷移前腐食速度 ：$dS/dt = (A/S^2)\exp(-Q_1/RT)$ (2.1.18a)

遷移後腐食速度 ：$dS/dt = C\exp(-Q_2/RT)$、 (2.1.18b)

$$C = C0 + U(M\phi)^P$$

遷移の生じる酸化膜厚：$S_t = D\exp(-Q_3/RT - ET)$ (2.1.18c)

ただし　dS/dt ：腐食速度（$\mu m/day$）

S ：酸化膜厚（μm）

T ：酸化膜と金属相の界面温度（K）

ϕ ：高速中性子束（n/cm^2s）

R ：気体定数（1.987 cal/mol・K）

$A = 6.3\times10^9$（$\mu m^3/day$）　$Q_1 = 32289$（cal／mol）

$C_0 = 8.04\times10^4$（$\mu m/day$）　$U = 2.59\times10^8$（$\mu m/day$）

$M = 7.46\times10^{-15}$（cm^2s/n）　$P = 0.24$

$Q_2 = 27354$（cal／mol）　$D = 2.14\times10^7$（μm）

$Q_3 = 10763$（cal／mol）　$E = 1.17\times10^{-2}$（K^{-1}）

である。

MATPROモデル[11]

遷移前：　$S = (4.976\times10^{-9}A\cdot t\cdot\exp(-15660/T) + S_0^3)^{1/3}$ (2.1.19a)

遷移後：　$S = 82.88A\cdot t\cdot\exp(-14080/T) + S_{TRAN}$ (2.1.19b)

遷移時の酸化膜厚：$S_{TRAN} = 7.749\times10^{-6}\exp(-790/T)$ (2.1.19c)

ここで、

S ：酸化膜厚（m）

t ：時間（days）

$A = 1.5$（for PWR）、　$= 9$（for BWR）

である。

腐食速度ないしは酸化膜厚が酸化物相－金属相の界面温度Tの関数として与えられることから、

温度Tは(2.1.17)式と、(2.1.18)式あるいは(2.1.19)式との連立により求めることができる。

ところで、(2.1.17)式では、温度依存の項が定数項よりも1桁程度小さいため、酸化膜内の温度分布はほぼ直線で近似できることが期待できる（図２．１３Ｂ参照）。そこで、ＥＸＢＵＲＮ－Ｉでは、熱伝導度を酸化膜内で一様とし、酸化膜表面温度によってその値を決定するものとした。

腐食の進行に伴う被覆管健全層（金属相）の厚みの減少は，酸化相の体積変化を考慮している。ジルカロイの場合、酸化相の体積は、その生成に費やされた金属相の体積の約１．４倍となる。この比率をPiling-Bedworth Ratioという。（図２．１３Ａ参照）

この比率値をPBRとすれば、酸化膜の厚みはＳであるから、被覆管健全層の厚みの減少、被覆管外径の増加はそれぞれ

S/PBR、　　S*(PBR-1)/PBR

であたえられる。熱計算の熱伝導方程式の差分メッシュ、力学計算の半径方向有限要素メッシュは、この変化にもとづいてタイムステップ毎にメッシュを切りなおしている。

なお、力学計算部では酸化膜に対応する有限要素メッシュを持ち、健全部と同時に解いているが、熱計算部では、熱伝導方程式の境界条件を酸化膜境界面温度であたえ、酸化膜は、この境界条件を設定するために用いられる。

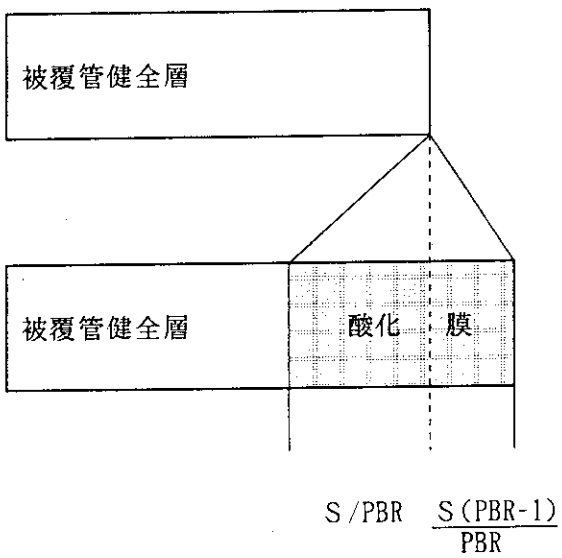


図２．１３Ａ　被覆管腐食による体積増加

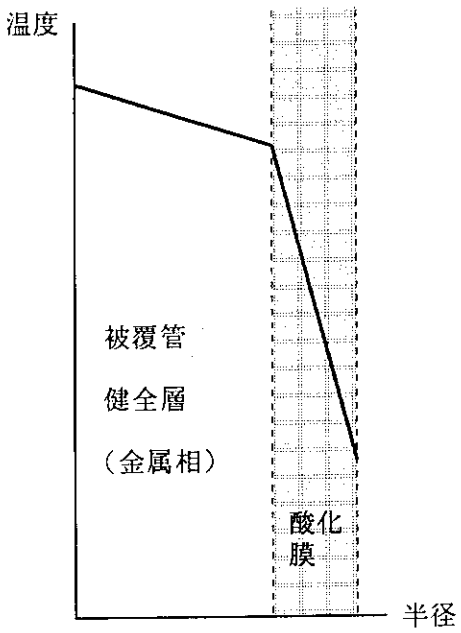


図２．１３Ｂ　被覆管内温度分布

（３）半径方向一次元温度モデル

半径方向１次元の解析においては、燃料棒の軸方向の熱伝導を無視して、半径方向一次元熱伝導方程式で記述する。燃料内の各メッシュにおける物性値は温度依存とし、軸方向の各位置でのギャップ熱伝達係数および管表面温度は変化するものとする。これらの仮定に基づくと、燃料棒内の熱伝導は次式となる。

$$\frac{\partial}{\partial t}\{g(u,r)u(r,t)\}=\nabla k(u,r)\cdot\nabla u(r,t)+s(r,t) \qquad (2.1.20)$$

ここで

u ：温度（K）、

r ：径方向座標 （m）

t ：時間（s）、

g ：体積比熱 （J/m³）、

k ：熱伝導率 （W/m-K）、

s ：単位体積あたりの発熱量 （J/m³・s）

である。

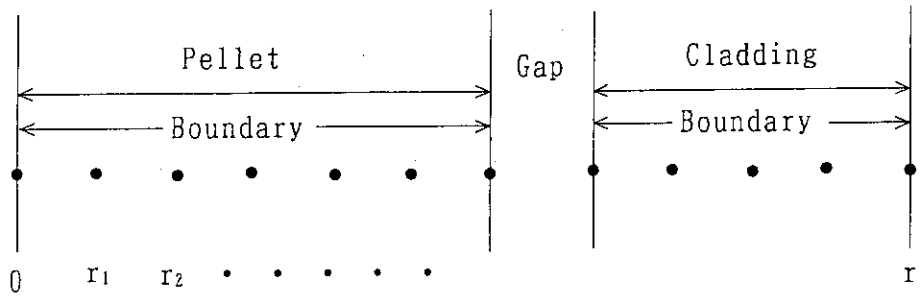


図２．１４Ａ　温度計算体系

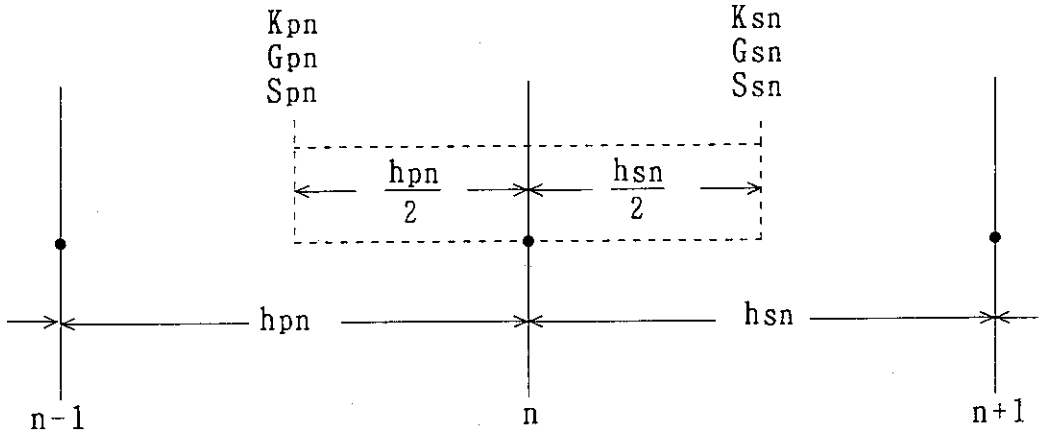


図２．１４Ｂ　メッシュモデル

ここで、式(2.1.20)の体積積分を行う。ただし、体積は図２．１４Ｂ内で破線で示された体積である。

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t} g(u, r) u(r, t) dV = \iiint_V \nabla k(u, r) \cdot \nabla u(r, t) dV + \iiint_V s(r, t) dV \tag{2.1.21}$$

１次元問題であるので、体積の次元はｒを除いて、他は１にする。共通ファクター２πを省略し、時間微分に対して前進差分法を用いると、(2.1.21)式の第１項は、

$$\iiint_V \frac{\partial}{\partial t}\{g(u, r) u(r, t)\} dV \approx \iiint_V g(u, r) \frac{\partial u}{\partial t}(r, t) dV$$

$$\approx \frac{(u_n^{m+1} - u_n^m)}{\Delta t}\left(g_{pn}\frac{h_{pn}}{2}\left(r_n - \frac{h_{pn}}{4}\right) + g_{sn}\frac{h_{sn}}{2}\left(r_n + \frac{h_{sn}}{4}\right)\right) \tag{2.1.22}$$

u_n^m は座標 r_n 、時間 t_m における温度であり、u_n^{m+1} は座標 r_n 、時間 $t_m + \Delta t$ における温度である。(2.1.21)式の第２項は、

$$\iiint_V \nabla k(u, r) \cdot \nabla u(r, t) dV = \iint_S k(u, r) \nabla u(r, t) \cdot d\overline{S}$$

$$\approx -\frac{k_{pn}(u_n - u_{n-1})}{h_{pn}}\left(r_n - \frac{h_{pn}}{2}\right) + \frac{k_{sn}(u_{n+1} - u_n)}{h_{sn}}\left(r_n + \frac{h_{sn}}{2}\right) \tag{2.1.23}$$

境界面にそった面積分の評価に当たって、内部境界での熱流の連続条件を用いた。便宜上、次の項目を定義する。

$$h_{pn}^v = \frac{h_{pn}}{2}\left(r_n - \frac{h_{pn}}{4}\right) \quad , \quad h_{sn}^v = \frac{h_{sn}}{2}\left(r_n + \frac{h_{sn}}{4}\right)$$

$$h_{pn}^s = \frac{1}{h_{pn}}\left(r_n - \frac{h_{pn}}{2}\right) \quad , \quad h_{sn}^s = \frac{1}{h_{sn}}\left(r_n + \frac{h_{sn}}{2}\right) \tag{2.1.24}$$

$$D_n = g_{pn} h_{pn}^v + g_{sn} h_{sn}^v$$

次に(2.1.21)式の第３項での発熱項Ｓ（ｒ、ｔ）を変数分離して、

$$S(r, t) = Q(r) P_f P(t)$$

ここで、Ｑ（ｒ）は径方向相対出力分布、すなわち発熱密度分布関数、P_f は発熱密度の基準値であり、$P(t)$ はそれに対する相対変化である。これらにより(2.1.21)式の第３項は、

$$\iiint_V S(r, t) dV \approx (Q_{pn} h_{pn}^v + Q_{sn} h_{sn}^v) P_f P(t) \tag{2.1.25}$$

となる。

したがって、(2.1.21)式は各項の近似、すなわち(2.1.22)式、(2.1.23)式、及び(2.1.25)式の右辺を合わせることにより、n番目のメッシュ点について、

$$\frac{(u_n^{m+1}-u_n^m)D_n}{\Delta t}=-(u_n-u_{n-1})k_{pn}h_{pn}^s+(u_{n+1}-u_n)k_{sn}h_{sn}^s$$

$$+(Q_{pn}h_{pn}^v+Q_{sn}h_{sn}^v)P_fP(t) \qquad (2.1.26)$$

という差分近似式に変換される。(2.1.25)式についてCrank-Nicolson法を適用すると、

$$\frac{(u_n^{m+1}-u_n^m)D_n}{\Delta t}=-\left(\frac{u_n^{m+1}+u_n^m}{2}-\frac{u_{n-1}^{m+1}+u_{n-1}^m}{2}\right)K_{pn}h_{pn}^s$$

$$+\left(\frac{u_{n+1}^{m+1}+u_{n+1}^m}{2}-\frac{u_n^{m+1}+u_n^m}{2}\right)K_{sn}h_{sn}^s$$

$$+(Q_{pn}h_{pn}^v+Q_{sn}h_{sn}^v)P_f\frac{P(t_{m+1})+P(t_m)}{2} \qquad (2.1.27)$$

ここで、g_{pn}，k_{pn} および g_{sn}，k_{sn} はメッシュ点n－1とnの平均温度およびメッシュ点nとn－1の平均温度より求める。

(2.1.27)式を書きかえて、中間領域のメッシュ点nの差分方程式を次のように与える。

$$a_nu_{n-1}^{m+1}+b_nu_n^{m+1}+c_nu_{n+1}^{m+1}=d_n^m$$

ここで

$$a_n=-\frac{k_{pn}h_{pn}^s\Delta t}{2}\quad,\quad c_n=-\frac{k_{sn}h_{sn}^s\Delta t}{2}$$

$$b_n=D_n-a_n-c_n$$

$$d_n^m=-a_nu_{n-1}^m+(D_n+a_n+c_n)u_n^m-c_nu_{n+1}^m$$

$$+\Delta t(Q_{pn}h_{pn}^v+Q_{sn}h_{sn}^v)P_f\left\{\frac{P(t_{m+1})+P(t_m)}{2}\right\} \qquad (2.1.28)$$

である。

ギャップ領域については、(2.1.26)式と同様に

$$\frac{(u_n^{m+1}-u_n^m)D_n'}{\Delta t}=-(u_n-u_{n-1})k_{pn}h_{pn}^s+(u_{n+1}-u_n)h_g$$

$$+Q_{pn}h_{pn}^vP_fP(t) \qquad (2.1.29)$$

$$\frac{(u_{n+1}^{m+1}-u_n^{m})D_n''}{\Delta t}=-(u_{n+1}-u_n)h_g+(u_{n+2}-u_{n+1})k_{sn}h_{sn}^{s}$$

$$+Q_{sn}h_{sn}^{v}P_fP(t) \qquad (2.1.30)$$

ここで、$D_n'=g_{pn}h_{pn}^{v}$ ， $D_n''=g_{sn+1}h_{sn+1}^{v}$ ， h_g はギャップ熱伝達係数である。

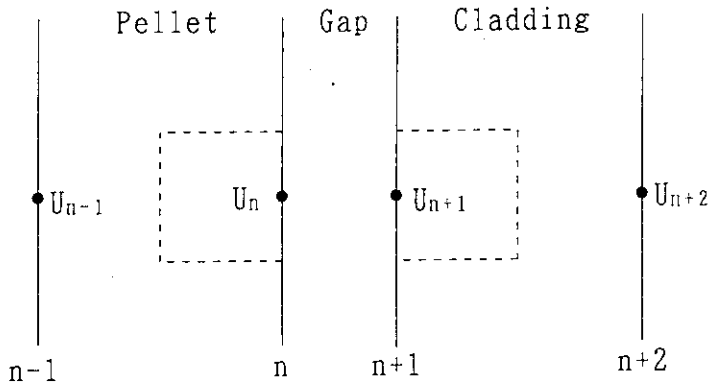


図２．１５　ギャップモデル

また、燃料棒中心については(2.1.26)式は、

$$\frac{(u_0^{m+1}-u_0^{m})}{\Delta t}g_{s0}h_{s0}^{v}=(u_1-u_0)k_{s0}h_{s0}^{s}+Q_{s0}h_{s0}^{v}P_fP(t) \qquad (2.1.31)$$

である。

被覆管表面の境界方程式は、

$$\rho c_p\Delta V\frac{\partial u}{\partial t}=-A_{n-\frac{1}{2}}k\frac{\partial u}{\partial r}\bigg|_{r=r_n-\Delta r/2}-\phi A_n+q\Delta V \qquad (2.1.32)$$

である。

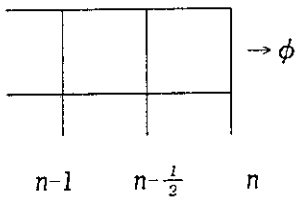


図２．１６　被覆管表面モデル

前式の差分近似式を

$$a_nu_{n-1}^{m+1}+b_nu_n^{m+1}=d_n \qquad (2.1.33a)$$

の形式で表すと係数a_n，b_n，d_nは、

$$a_n=\frac{-0.5A_{n-\frac{1}{2}}k}{\Delta r} \tag{2.1.33b}$$

$$b_n=\left(\frac{\rho c_p\Delta V}{\Delta t}+\frac{0.5A_{n-\frac{1}{2}}k}{\Delta r}\right) \tag{2.1.33c}$$

$$d_n=\frac{\rho c_p\Delta V}{\Delta t}u_n^m-\frac{0.5A_{n-\frac{1}{2}}k}{\Delta r}(u_n^m-u_{n-1}^m)$$

$$-0.5A_n(\phi^{m+1}+\phi^m)+q^{m+\frac{1}{2}}\Delta V \tag{2.1.33d}$$

$$A_{n-\frac{1}{2}}=2\pi\left(r_n-\frac{\Delta r}{2}\right)$$

$$A_n=2\pi r_n$$

$$\Delta V=\pi\left(r_n^2-\left(r_n-\frac{\Delta r}{2}\right)^2\right)$$

となる。ここで

k ：熱伝導度（W/m-K）、　C_p ：比熱（J/kg・K）

ρ ：密　度（g/cm³）、　r_n ：被覆管外半径（m）

Δr ：メッシュ幅（m）、　Δt ：タイムステップ幅（s）

ϕ ：表面熱流束（W/m²）、　$q^{m+\frac{1}{2}}$ ：発熱率（W/m³）at$\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)$

A_n ：軸方向単位長さ当たり被覆管表面積（m²）

である。

ただし、(2.1.33d)式中の時刻t_mにおける熱流束ϕ^mについては、定常の論理を用いて、

$\phi^m=q'^m/2\pi r_n$

q' ：線出力

で与える。これは、再メッシュ切りなどによる差分誤差のため、算出される熱流束に誤差が累積することを避けるためである。

(2.1.33a)式～(2.1.33d)式において未知数は、u_{n-1}^{m+1}，u_n^{m+1}，ϕ^{m+1} である。

次に、ガウスの消去法により、第1点から始めて第n－1点までの前進消去により得られた係数をE、Fとおくと、次式を得る。

$$u_{n-1}^{m+1} = -E_{n-1} u_n^{m+1} + F_{n-1} \tag{2.1.34}$$

(2.1.33b, c, d)式及び(2.1.34)式を(2.1.33a)式に代入すると、

$$A_1 u_n^{m+1} + B_1 = \phi^{m+1} \tag{2.1.35}$$

ここで

$$A_1 = -(b_n - a_n E_{n-1}) / 0.5 A_n \tag{2.1.36}$$

$$B_1 = -\left(0.5\phi^m A_n + a_n F_{n-1} - \frac{\rho c_p \Delta V}{\Delta t} u_n^m + a_n (u_n^m - u_{n-1}^m) - q^{m+\frac{1}{2}} \Delta V\right) / 0.5 A_n \tag{2.1.37}$$

である。なお、時間増分Δt は、

$$\Delta t = \left\{\frac{(\Delta r)^2}{K_i}\right\}_{min} \cdot \eta \text{、} \qquad \eta \text{：制御パラメータ} \tag{2.1.38}$$

を用いて決定する。$\{\cdots\}_{min}$は、陽解法を採用したときに安定解を得るために必要な最大の時間増分である。ＥＸＢＵＲＮ-Ｉでは完全陰解法（$\theta = 1$）を採用しているためさらに大きな時間増分を用いても安定解を得ることができる。計算精度が充分で計算時間が長くなりすぎない時間増分として、$\eta = 10$を選んだ。

なお、分布関数$Q(r)$ はRobertsonの公式（Halden実験式）により次式で表す[12]。

$$Q(r) = \frac{(b+2)(1-h^2)[(1-a)r^b + (a-h^b)]}{b(1-h^2)(a-h^b) + 2(1-h^b)(1-ah^2)} \tag{2.1.39}$$

ここで、 a ：ペレット内面対外面発熱密度比 (-)

b ：発熱密度関数Ｑ（ｒ）における形状指数 (-)

h ：規格化したペレット内半径 (-)

である。

(2.1.39)式の発熱密度分布を定める２つの形状パラメータａおよびｂは、ハルデン炉の場合、次のように求められる。Robertsonは発熱分布に関し次の表式を与えている。

$$Q(R) = I_0(k \cdot R) + \frac{I_1(k \cdot R_i)}{K_1(k \cdot R_i)} \cdot K_0(k \cdot R) \tag{2.1.40}$$

ここで、 I ： 第１種変形ベッセル関数　　R_i ： ペレット中心孔半径 (cm)

K ： 第２種変形ベッセル関数　　R ： ペレット半径方向位置（cm）

k ： 中性子拡散距離の逆数（cm^{-1}）

である。

k は次式で計算される。

$$k = 0.328(E \cdot D)^{0.8} + 0.54\left(\frac{0.5}{R_P}\right)^{0.82} \cdot (E \cdot D)^{0.19} \tag{2.1.41}$$

ここで、 E ： U^{235}濃縮度（%）

D ： ペレット密度対理論密度比 （-）

R_P ： ペレット半径 （cm）

である。

(2.1.39)式における形状指数bは、(2.1.40)式が2次関数でよく近似できることからb＝2とする。内面対外面発熱密度比aは(2.1.40)式を用いて、次のように表す。

$$a = \frac{Q(R_I)}{Q(R_P)} \tag{2.1.42}$$

2.1.2 ギャップ熱伝達

ギャップ熱伝達率は、Ross and Stouteのモデルを修正した次式により表す[13]。

$$h_g = \frac{\lambda_{gas}}{C(R_{eff} + R_2) + (g_1 + g_2) + GAP} + \frac{\lambda_m \cdot p_c}{0.5 \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot H} + h_r \tag{2.1.43}$$

右辺第1項はガスによる熱伝達成分、第2項は固体接触による成分、第3項は輻射による成分である。

ここで、 $C = 2.77 - 2.55 \times 10^{-8} \cdot P_c$

$$\lambda_m = \frac{2\lambda_p(T_{po}) \cdot \lambda_c(T_{ci})}{\lambda_p(T_{po}) + \lambda_c(T_{ci})} \quad (\mathrm{W/cm \cdot K})$$

$$h_r = \left[\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1\right]^{-1} \cdot \sigma \cdot \frac{T_{po}^4 - T_{ci}^4}{T_{po} - T_{ci}}$$

λ_{gas} ：混合ガスの熱伝導度（W/cm･K）

p_c ：ペレットと被覆管の接触圧力（Pa）

R_{eff} ：ペレットみかけの表面粗さ（cm）

R_2 ：被覆管表面粗さ（cm）

$g_1 + g_2$ ：固相気相間温度ジャンプ距離（cm）

GAP ：半径方向ギャップ（cm）

H ：被覆管メイヤー硬度（Pa）（ $H=2.8\sigma_Y$ [3]）

σ_Y ：降伏応力（Pa）

σ ：ステファン・ボルツマン定数（W/cm・K^4）（$\sigma=5.67\times10^{-12}$ ）

ε_p ：ペレット放射率（-）

ε_c ：被覆管放射率（黒色酸化被膜）（-）

である。

λ_{gas}, g_1+g_2 の表式を以下に示す。

（1）混合ガス熱伝導度

ＭＡＴＰＲＯモデルより次のように表される[9]。

$$\lambda_{gas}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\lambda_i}{1-\sum_{\substack{i=1\\ i\neq j}}^{n}\phi_{ij}\frac{x_j}{x_i}}\right) \tag{2.1.44}$$

ただし、

$$\phi_{ij}=\frac{\left[1+\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_j}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2}{2^{\frac{3}{2}}\left(1+\frac{M_i}{M_j}\right)^{\frac{1}{2}}}\left[1+\frac{2.41(M_i-M_j)(M_i-0.142M_j)}{(M_i+M_j)^2}\right] \tag{2.1.45}$$

ここで　x_i ：ガスｉのモル比

λ_i ：ガスｉの熱伝導度（W/cm・K）

M_i ：ガスｉモル重量

である。ガスの種類として、ヘリウム、クリプトンおよびゼノンを考える。ガス組成は、クリプトンおよびゼノンがＦＰガスであるため、ガス放出に依存する。これについては２．１．４項で述べる。

（2）固気間温度ジャンプ距離

$$g_1+g_2=\sum_{i=1}^{n}(g_1+g_2)_i\cdot\frac{10^5}{p_{gas}} \tag{2.1.46}$$

ここで、

$(g_1+g_2)_i$ ：ガスｉの固気間温度ジャンプ距離（cm）

p_{gas} ：ガス圧力（Pa）

である。

$(g_1+g_2)_i$ は、Ross and Stoute の結果から、ヘリウム、クリプトンおよびゼノンに対してそれぞれ１０×１０$^{-4}$、１×１０$^{-4}$および１×１０$^{-4}$（cm）を用いる。

ガス圧力 p_{gas} の計算については、後の(2.1.168)式で説明する。

２．１．３　接触力評価モデル

(2.1.43)式で表現されるギャップ熱伝達率を計算するためには、ペレットと被覆管の接触圧力 P_c を求めることが必要である。ＥＸＢＵＲＮ－Ｉにおいては、このため、２．２章で述べる燃料棒全体の力学的ふるまいの解析とは独立に、ギャップ熱伝達率の計算に目的を限定した接触力評価モデルをもつ。このモデルの特徴は以下の通りである。

・ペレットの半径方向変位の計算にクリープを考慮。

・被覆管の半径方向変位の計算にクリープを考慮。

・ペレットの剛性回復モデルを組み入れた接触力の計算。

以上に基づいて接触力評価モデルを解説する。

（１）ペレットの半径方向変位

ペレットの半径方向変位は、クリープを考慮して次式で与える。

$$u_f = u^{rel} + \sum_{i=1}^{10} (\varepsilon_i^{th} + \varepsilon_i^{den} + \varepsilon_i^{ss} + \varepsilon_i^{u} + \varepsilon_i^{c}) \Delta r_i \qquad (2.1.47)$$

ここで、

u_f ：燃料の半径方向変位（ｃｍ）

ε_i^{th} ：リングｉの熱ひずみ（－）

ε_i^{den} ：リングｉのやきしまり（－）

ε_i^{ss} ：リングｉの固体ＦＰ（拘束）スウェリング（－）

ε_i^{u} ：リングｉの気体ＦＰ（非拘束）スウェリング（－）

ε_i^{c} ：リングｉのクリープひずみ（－）

Δr_i ：リングｉの幅（ｃｍ）

i ：リングの番号（半径方向に10リングとする）

である。

このうち、ε_i^{th}, ε_i^{den}, ε_i^{ss} については接触状態とは無関係に決定できるひずみとする。

ε_i^{u}, ε_i^{c} と接触状態との関係を表２．１に示す。

表２．１　接触状態とひずみの関係
（○：考慮する、×：考慮しない）

ひずみ＼接触状態	非接触	接触
ε_i^{u}	○	×
ε_i^{c}	×	○

ペレットのクリープひずみ速度式は、ＭＡＴＰＲＯ－０９の式を用いる[9]。すなわち、

$$\dot{\varepsilon}^{c} = \frac{(A_1 + A_2 F)\overline{\sigma}\, e^{-Q_1/RT}}{(A_3 + f_d) G^2} + \frac{A_4 \overline{\sigma}^{4.5} e^{-Q_2/RT}}{(A_6 + f_d)} + A_7 \overline{\sigma} F e^{-Q_3/RT} \qquad (2.1.48)$$

ここで、

$A_1 = 9.728 \times 10^{6}$ 、　$Q_1 = 90,000$

$A_2 = 3.240 \times 10^{-12}$ 、　$Q_2 = 132,000$

$A_3 = -87.7$ 、　$Q_3 = 5,200$

$A_4 = 1.376 \times 10^{-4}$ 、　$A_6 = -90.5$

$A_7 = 9.24 \times 10^{-28}$

$\dot{\varepsilon}^{c}$ ：クリープひずみ速度（hr^{-1}）

F ：核分裂速度（＝10^{19}fissions/m^3-sをＥＸＢＵＲＮ－Ｉでは指定している。）

$\overline{\sigma}$ ：相当応力（psi）

R ：ガス定数（1.987cal/mol-K）

Q ：活性化エネルギー（cal/mol）

T ：温度（K）

f_d ：理論密度比（%）

G ：結晶粒径（μm）

である。

ただし、クリープひずみ速度を計算する際に用いる燃料温度については指定温度以上の領域で

は指定温度で評価することにする。相当応力は、平面応力条件を用いると、$\sigma_z=0$ であり、また $\sigma_r \approx \sigma_\theta = -P_{fc}$ （接触圧力）を仮定すると、$\overline{\sigma}=P_{fc}$ となる。

この条件によりクリープひずみ速度を求めると、

$$\left\{\overline{\dot{\varepsilon}}_i^c\right\}=\overline{\dot{\varepsilon}}_i^c\frac{1}{2\overline{\sigma}}\begin{Bmatrix}2\sigma_r-\sigma_\theta\\-\sigma_r-\sigma_\theta\\2\sigma_\theta-\sigma_r\end{Bmatrix}=\overline{\dot{\varepsilon}}_i^c\begin{Bmatrix}-\frac{1}{2}\\1\\-\frac{1}{2}\end{Bmatrix} \tag{2.1.49}$$

となり、周方向クリープ速度は

$$\dot{\varepsilon}_{\theta,i}^c=-\frac{1}{2}\overline{\dot{\varepsilon}}_i^c \tag{2.1.50}$$

である。

（２）被覆管の半径方向変位

被覆管の半径方向変位は、弾性ひずみと熱ひずみに加えてクリープひずみを考慮する。このとき、被覆管の半径方向変位は次式で与えられる。

$$u_c=\frac{r_{ci}}{E_c}\left(\frac{(p_{gas}+p_{fc})(r_{ci}^2+r_{co}^2)-2p_w r_{co}^2}{r_{co}^2-r_{ci}^2}+\nu_c p_{gas}\right)+(\varepsilon_c^{th}+\varepsilon_c^c)\frac{r_{co}+r_{ci}}{2} \tag{2.1.51}$$

ここで、

u_c ：被覆管の半径方向変位（cm）

E_c ：被覆管のヤング率（Pa）

r_{ci} ：被覆管の内半径（cm）

r_{co} ：被覆管の外半径（cm）

p_{gas}：内圧（Pa）

p_{fc} ：燃料と被覆管の接触圧（Pa）

p_w ：冷却水圧力（Pa）

ν_c ：被覆管のポアソン比

ε_c^{th} ：被覆管の熱ひずみ

ε_c^c ：被覆管のクリープひずみ

である。

被覆管のクリープひずみは、薄肉円筒殻理論（シェルモデル）より、

$$\sigma_\theta = \frac{r_{ci}(p_{con}+p_{gas}) - r_{co}p_w}{r_{co}-r_{ci}} \tag{2.1.52}$$

$$\sigma_z = \frac{r_{ci}^2(p_{con}+p_{gas}) - r_{co}^2 p_w}{r_{co}^2-r_{ci}^2} \tag{2.1.53}$$

で与えられる。ただし、非接触時については$p_{con}=0$である。

ここで、相当応力は、

$$\overline{\sigma} = \left[\frac{1}{2}\{(\sigma_\theta-\sigma_z)^2+\sigma_\theta^2+\sigma_z^2\}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.1.54}$$

とする。

このようにして得られた$\sigma_\theta, \sigma_z, \overline{\sigma}$ の量的関係を例をとって以下に示す。

［例１］ＢＷＲ条件（内圧を２倍として計算）

$r_{ci}=5.39$（mm）、 $r_{co}=6.25$（mm）、$p_{gas}=0.2$（MPa）、 $p_{cool}=7.3$（MPa）とし、

p_{con} をパラメータとして計算すると、

表２．２　接触力と応力の関係（ＢＷＲ条件）

p_{con}	0	10	20	30	40	50	60
σ_θ	-51.8	10.9	73.6	136.2	198.9	261.6	324.3
σ_z	-27.9	1.1	30.1	59.2	88.2	117.2	146.2
$\overline{\sigma}$	44.9	10.4	64.0	118.3	172.6	226.9	281.3

（単位:MPa）

となる。これらの値は、固着条件のもとでの軸力を適切に模擬している。

［例２］ＰＷＲ条件（内圧を２倍として計算）

$r_{ci}=4.18$（mm）、 $r_{co}=4.75$（mm）、 $p_{gas}=6.0$（MPa）、 $p_{cool}=15.7$（MPa）とし、　　をパラメータとして計算すると、

表２．３　接触力と応力の関係（ＰＷＲ条件）

p_{con}	0	10	20	30	40	50	60
σ_θ	-86.8	-13.5	59.8	133.2	206.5	279.8	353.2
σ_z	-49.0	-14.7	19.7	54.0	88.3	122.6	157.0
$\overline{\sigma}$	75.4	14.1	52.8	116.0	179.5	243.0	306.5

（単位:MPa）

となる。

この$\overline{\sigma}$ を用いて被覆管の相当クリープひずみ増分を、

$$d\overline{\varepsilon}_c^c = f\ (\overline{\sigma}, T, \phi, \overline{\varepsilon}_c^c)\ \cdot d\,t \tag{2.1.55}$$

で与える。ただしf はＭＡＴＰＲＯ－０９の式[9]から

$$f = \dot{\varepsilon}_c^c = 2\left[C_1 \phi\, e^{-Q1/RT}\left\{\overline{\sigma} + C_2 e^{Q2\overline{\sigma}}\right\}\right]^2 \times \left(\frac{3600}{\overline{\varepsilon}_c^c}\right) \tag{2.1.56}$$

ここで　$\dot{\varepsilon}_c^c$ ：　被覆管の相当クリープひずみ速度　（s^{-1}）

$\overline{\varepsilon}_c^c$ ：被覆管の相当クリープひずみ

$C_1 = 5.129\times10^{-29}$ ，　$Q_1 = 10,000$

$C_2 = 7.252\times10^{2}$ ，　$Q_2 = 4.967\times10^{-8}$

ϕ　：　高速中性子束　（$n/m^2/s$）

$\overline{\sigma}$　：　相当応力　（Pa）

T　：　温度　（K）

R　：　ガス定数　（1.987cal/mol/K）

である。

円周方向および軸方向のクリープひずみ増分は、

$$d\varepsilon_{c,\theta}^c = \frac{1}{2\overline{\sigma}}\ (2\sigma_\theta - \sigma_z)\cdot d\overline{\varepsilon}_c^c \tag{2.1.57}$$

$$d\varepsilon_{c,z}^c = \frac{1}{2\overline{\sigma}}\ (2\sigma_z - \sigma_\theta)\cdot d\overline{\varepsilon}_c^c \tag{2.1.58}$$

である。　なお、(2.1.56)式中の$\overline{\varepsilon}_c^c$ について

$$\overline{\varepsilon}_c^c = \overline{\varepsilon}_{c,n}^c + \theta_c \cdot d\overline{\varepsilon}_c^c$$

として収束計算を行う。

また、(2.1.51)式中での ε_c^c は

$$\varepsilon_c^c = \varepsilon_{c,\theta}^c = \sum_n d\varepsilon_{c,\theta,n}^c$$

で与える。

（3） ギャップ幅と接触力

燃料と被覆管のギャップ幅は次式で与える。

$$\delta = \delta_o + u_c - u_f \tag{2.1.59}$$

ここで　δ ：　燃料と被覆管の間の半径ギャップ幅　(m)

δ_o ：　製造時のギャップ幅　(m)

u_c ：　被覆管の半径方向変位（m）

u_f ：　燃料の半径方向変位（m）

である。δ が負と算出されると、燃料と被覆管は接触状態にあると判定し、接触力が計算される。このとき数値計算上、ペレットと被覆管は、幅が

$$\delta_{fc} = -\delta = -(\delta_o + u_c - u_f) > 0 \tag{2.1.60}$$

だけ重なっている状態にあるが、接触力はこの重なりをなくすようペレットと被覆管を押し戻したときに発生する力として計算される。

接触力の評価方法は、割れたペレットの剛性回復モデル（後述）を考慮して次のように与えた。

リロケーションによるペレット径方向変位量（片側）を δ_{rel} としたとき、剛性回復モデルでは、$\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ でペレットが剛性を回復する（本来の物性値に戻る）と仮定した。すると、重なり幅 δ_{fc} のうち、被覆管がペレットを押し戻す変形量を δ_f 、被覆管が押し出される変形量を δ_c とすると、

$$\delta_{fc} = \delta_f + \delta_c \tag{2.1.61}$$

ペレット側については、$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$ として、

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta = -\frac{\delta_f}{r_{ci}}$$

$$-P_{fc} = E_f \cdot \varepsilon_r = E_f\left(-\frac{\delta_f}{r_{ci}}\right) \tag{2.1.62}$$

とする。

被覆管側については、

$$\varepsilon_\theta = \frac{\delta_c}{r_{ci}} \quad \text{より、}$$

$$\sigma_\theta = E_c \varepsilon_\theta = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}}$$

$$P_{fc} = \sigma_r = \sigma_\theta \frac{t}{r_{ci}} = E_c \frac{\delta_c}{r_{ci}} \cdot \frac{t}{r_{ci}} \qquad (t = r_{co} - r_{ci}:\ \text{被覆管肉厚})$$

である。すなわち、

$$P_{fc} = E_c \frac{\delta_c (r_{co} - r_{ci})}{r_{ci}^2} \tag{2.1.63}$$

で与える。ここで(2.1.62),(2.1.63)式のP_{fc} は等しい。

(2.1.61)～(2.1.63)式より、δ_f, δ_c について解くと、

$$\delta_f = \frac{E_c (r_{co} - r_{ci})}{E_c (r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \tag{2.1.64}$$

$$\delta_c = \frac{E_f r_{ci}}{E_c (r_{co} - r_{ci}) + E_f r_{ci}} \delta_{fc} \tag{2.1.65}$$

である。ここで、次の条件を与える。

① $\delta_{fc} = 0$ のとき、　$E_f = 0$

② $\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ のとき、　$E_f = E$（本来の物性値）

③ $0 \leqq \delta_{fc} \leqq 2\delta_{rel}$ のとき、　$P_{fc} = \alpha_1 \delta_{fc}^2$

とする。

なお、条件③は、次の（４）項で示すように、区間 $0 < \delta_{fc} < 2\delta_{rel}$ においてヤング率E_f が δ_{fc} の１次関数であるという仮定（図２．１９参照）から以下のように導かれる。

$E_f = \dfrac{d\sigma}{d\varepsilon}$ の関係から、接触力P_{fc} はδ_{fc} の２次関数として与えられることがわかる。

そこで、

$$P_{fc} = \alpha_1 \delta_{fc}^2 + \alpha_2 \delta_{fc} + \alpha_3$$

とおけば、条件①より、$\delta_{fc}=0$ のとき$P_{fc}=0$ であることから$\alpha_3=0$ となる。

また、

$$E_f = \frac{\partial P_{fc}}{\partial \delta_{fc}} = 2\alpha_1 \delta_{fc} + \alpha_2$$

となるが、$\delta_{fc}=0$ のとき$E_f=0$ であることから、$\alpha_2=0$ となる。

したがって、$P_{fc}=\alpha_1 \delta_{fc}^2$ となり条件③が導かれる。

ところで、(2.1.63)式より、

$$\delta_c = \frac{r_{ci}^2}{E_c\,(r_{co}-r_{ci})} P_{fc} = \frac{r_{ci}^2}{E_c\,(r_{co}-r_{ci})}\,\alpha_1 \delta_{fc}^2 \equiv \alpha\,\delta_{fc}^2 \qquad (2.1.66)$$

となるので、δ_c は、区間$0<\delta_{fc}<2\delta_{rel}$ においてδ_{fc} の２次関数となる。これらの関係を図２．１８に示す。

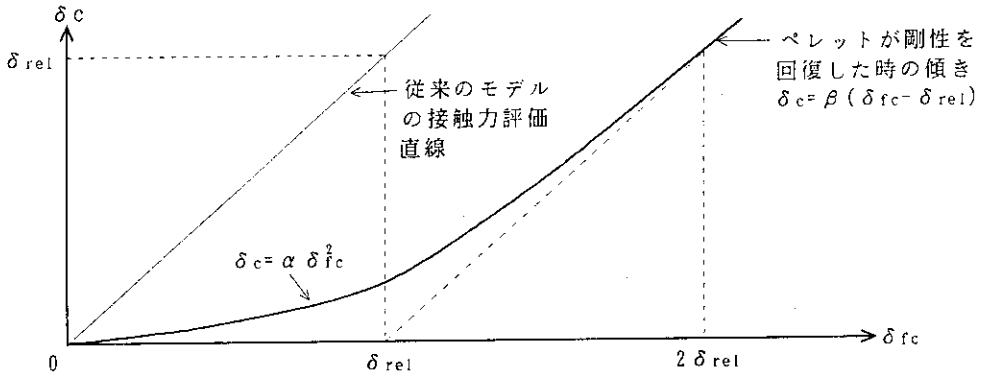


図２．１８　ペレット剛性回復モデル

図２．１８中の未知量α、βについて求めると、②の条件より、βは、$\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ のときペレットのリロケーション分の変位は完全になくなり、(2.1.65)式及び$E_f = E$ より、

$$\delta_c = \frac{E r_{ci}}{E_c\,(r_{co}-r_{ci}) + E r_{ci}}\,\delta_{rel} \qquad (2.1.67)$$

となる。

したがって、

$$\beta = \frac{E r_{ci}}{E_c\,(r_{co}-r_{ci}) + E r_{ci}} \qquad (2.1.68)$$

また、αについては、$\delta_{fc} = 2\delta_{rel}$ のとき

$$\delta_c = \frac{Er_{ci}}{E_c(r_{co}-r_{ci}) + Er_{ci}} \cdot 2\delta_{rel} \quad \text{より、}$$

$$\frac{2Er_{ci} \cdot \delta_{rel}}{E_c(r_{co}-r_{ci}) + Er_{ci}} = \alpha(2\delta_{rel})^2$$

$$\alpha = \frac{Er_{ci}}{2\delta_{rel}\{E_c(r_{co}-r_{ci}) + Er_{ci}\}} \tag{2.1.69}$$

である。以上をまとめると、

$$\left.\begin{aligned} \delta_c &= \frac{Er_{ci}}{2\delta_{rel}\{E_c(r_{co}-r_{ci}) + Er_{ci}\}}\delta_{fc}^2 \quad (0 \leqq \delta_{fc} < 2\delta_{rel}) \\ \delta_c &= \frac{2Er_{ci}}{E_c(r_{co}-r_{ci}) + Er_{ci}}(\delta_{fc}-\delta_{rel}) \quad (\delta_{fc} \geqq 2\delta_{rel}) \end{aligned}\right\} \tag{2.1.70}$$

となり、ペレット-被覆管の接触力は

$$P_{fc} = E_c \frac{\delta_c(r_{co}-r_{ci})}{r_{ci}^2} \tag{2.1.71}$$

で与えられる。

また、接触力は被覆管が降伏した後は、それ以上には大きくならないものとする。

すなわち、被覆管の相当応力が降伏応力σ_Y 以上になったら、(2.1.54)式の代わりに

$\overline{\sigma} = \sigma_Y$ とする。

ここで被覆管のσ_Y は、再結晶焼鈍材に対しては、次式を用いる[9]。

$$\sigma_Y = 21.60 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{Y0}^{irr} \tag{2.1.72}$$

ただし　　σ_Y ： 0.2% 耐力　(kg／mm²)

　　T ： 温度　(℃)

である。

応力除去材に対しては次式を用いる[9]。

$$\sigma_Y = 31.32 - 0.0213 \times T + \Delta\sigma_{Y0}^{irr} \tag{2.1.73}$$

照射硬化による降伏応力の増加$\Delta\sigma_{Y0}^{irr}$ は次式を用いる[9]。

$$\Delta\sigma_{Y0}^{irr} = 33.4\,[1 - exp\,(-c\phi t)]^{\frac{1}{2}} \tag{2.1.74}$$

ここで　　c ：　$2.92\times10^{-21}exp\ (-1.6\times10^{-14}\phi)$

ϕ ：　高速中性子束（n/cm²/s）

t ：　時間　（s）

である。

（4）割れたペレットの剛性回復

ペレットの割れはペレットのヤング率を変更することでモデル化する。

割れたペレットのヤング率は、弾性ひずみの一次関数として下図のように表す。

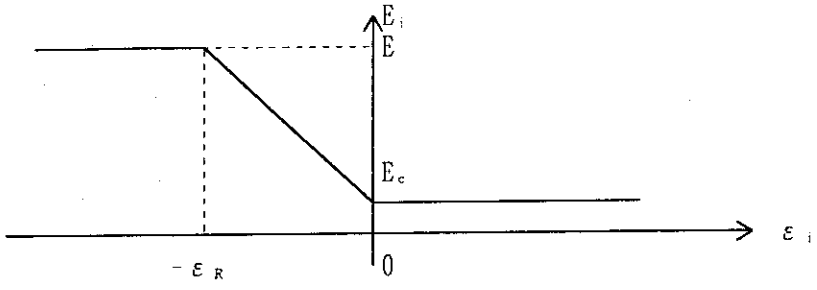


図２．１９　割れたペレットのヤング率

図２．１９より、主方向ｉのヤング率は次のように与えられる。

$$E_i = \begin{cases} E_c & (0 \leqq \varepsilon_i) \\ -\dfrac{E-E_c}{\varepsilon_R}\varepsilon_i + E_c & (-\varepsilon_R < \varepsilon_i < 0) \\ E & (\varepsilon_i \leqq -\varepsilon_R) \end{cases} \tag{2.1.75}$$

ここで　　ε_R ：　ペレットが完全に剛性を回復した時のひずみ

$\varepsilon_i = -\delta_{fc}/r_{ci}$

である。

次に、ε_R の決定法について述べる。

ε_R ＝　（リロケーションひずみ）＋（弾性ひずみ）

とする。すなわち

$$\varepsilon_R = \varepsilon_{rel} + \frac{(-\sigma_R)}{E} \tag{2.1.76}$$

ただし、$-\sigma_R$ は、ペレットが完全な剛性を回復するときの応力である。（図２．２０参照）

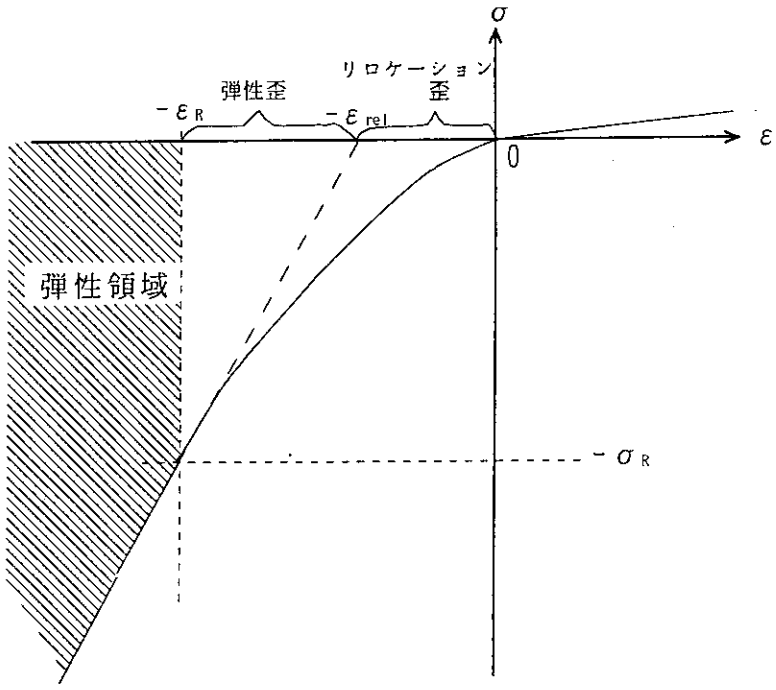


図２．２０　割れたペレットの応力とひずみの関係

(2.1.75)式より、ε_i がE_i の決定に現れるのは、$-\varepsilon_R<\varepsilon_i<0$ の区間だけなので、

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = E_i$ の関係を用いると、

$$\sigma = \frac{E-E_c}{-2\varepsilon_R}\varepsilon_i^2 + E_c\cdot\varepsilon_i \quad (-\varepsilon_R<\varepsilon_i<0) \tag{2.1.77}$$

である。(2.1.77)式を$\varepsilon_i<0$ を考慮して解くと、

$$\varepsilon_i = \frac{-E_c+\sqrt{E_c^2+\frac{2\sigma\ (E_c-E)}{\varepsilon_R}}}{\frac{E_c-E}{\varepsilon_R}} \tag{2.1.78}$$

である

(2.1.78)式を(2.1.75)式の区間　$-\varepsilon_R<\varepsilon_i<0$ に代入して E について解くと、

$$E_i = \sqrt{E_c^2 + \frac{2\sigma\ (E_c-E)}{\varepsilon_R}} \tag{2.1.79}$$

である。

$\varepsilon_i = -\varepsilon_R$ のとき、　$E_i = E$ の関係を用いてσ_R を求めると、

$$\sigma_R = -\frac{\varepsilon_R}{2}\ (E_c + E) \tag{2.1.80}$$

(2.1.80)式を(2.1.76)式に代入すると、

$$\varepsilon_R = \frac{2E}{E-E_c}\ \varepsilon_{rel} \tag{2.1.81}$$

非接触時のペレットヤング率は0と仮定しているので　$E_c = 0$より、

$$\varepsilon_R = 2\varepsilon_{rel} \tag{2.1.82}$$

である。

以上をまとめると、E_f は次のように与えられる。

$$\left.\begin{aligned} E_f &= \frac{E}{2\varepsilon_{rel}} \cdot \frac{\delta_{fc}}{\gamma_{ci}} && (\delta_{fc} < 2r_{ci}\varepsilon_{rel}) \\ E_f &= E && (\delta_{fc} \geqq 2r_{ci}\varepsilon_{rel}) \end{aligned}\right\} \tag{2.1.83}$$

ここで、$\delta_{rel} = r_{ci}\varepsilon_{rel}$ である。たとえば、リロケーションパラメータ ＝0.3で、片側ギャップ幅を100μmとすると、δ_{fc} が60μmになると剛性を回復する。

（5） ペレットリロケーション

ペレット内のクラックは燃焼度の進行とともに、形状を変える。EXBURN－Iではこの変化を次のようにモデル化している。燃焼初期には図2.21に示すように、径方向にクラックが走り、クラックによる空隙はペレット中心近傍に集中している状態にある。

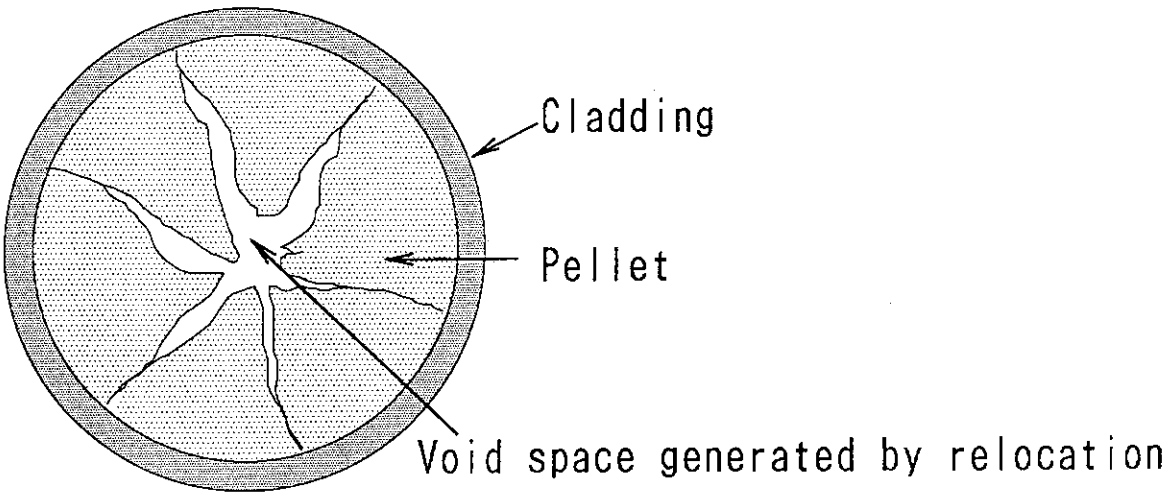


図2.21　ペレット初期状態のクラック

燃焼が進行するにともないこれらのクラックは徐々に周端部近傍の周方向マイクロクラックに移行し、最終的には、図２．２２に模式的に示すようにすべて周方向マイクロクラックに置き換わると考える。このクラックの移行は、ある燃焼度で始まり、ある燃焼度で完了し、その間の移行は、図２．２３に示すように各体積が燃焼度について線型に変化するように進行すると仮定する。

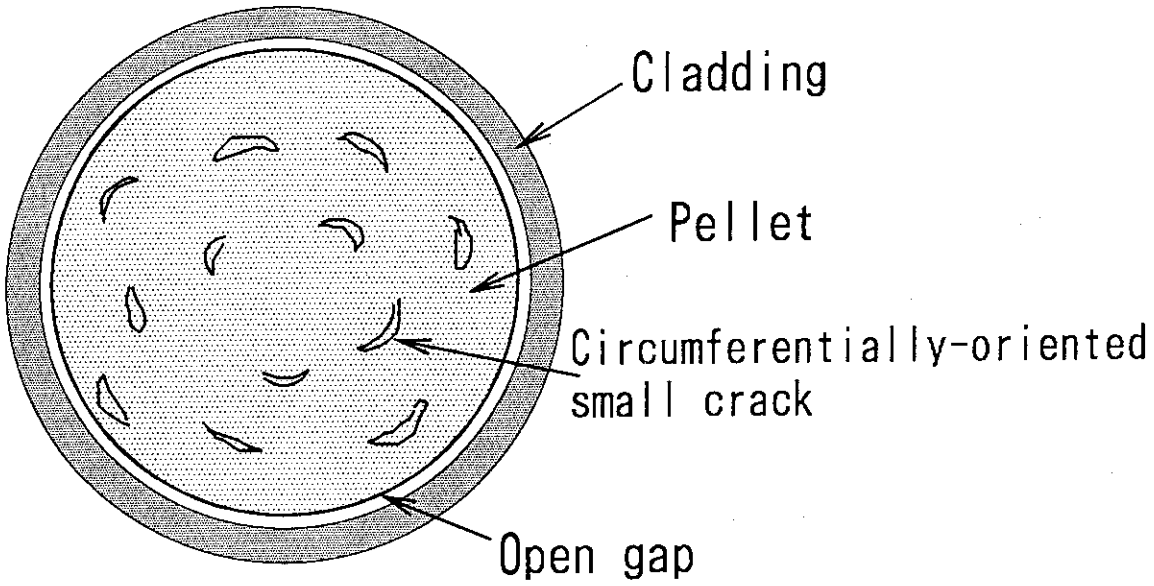


図２．２２　十分燃焼が進んだ後のクラック状態

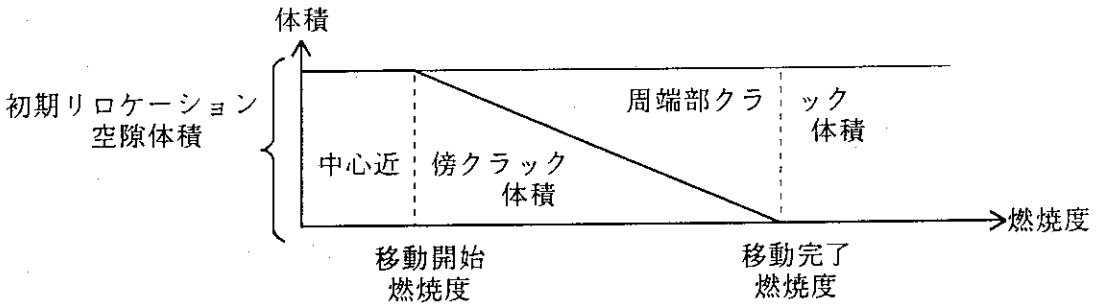


図２．２３　燃焼の進行とリロケーション体積の変化

また、接触力によるペレットの縮小は、周端部クラック体積分のみが担うものとし、中心近傍クラック体積は接触力に依らず変化しないと仮定する。

ＥＸＢＵＲＮ－Ｉでは、クラックの移動開始燃焼度と移動完了燃焼度を入力パラメータとする。

2．1．4　ＦＰガス生成・放出

本コードでは、ペレットスタックを軸方向に最大１２セグメントまで分割し、各セグメントについて、径方向を最大１０領域にまで分割して、ＦＰガスの生成・放出を計算する。計算においては、ＦＰガス放出モデルとして、温度依存モデルとシンプルな燃焼度依存モデルのいづれかを選択できる。

（１）　生成速度

軸方向セグメントｊ、径方向領域ｉにおけるＦＰガス生成速度は、次式で表される。

$$P^{ij} = \frac{Y \cdot f^{ij} \cdot q^{j}}{E_f \cdot N_A} \tag{2.1.84}$$

ここで、

P^{ij}　：　領域ijの単位長当りのＦＰガス生成速度（mol/cm･s）

f^{ij}　＝　$2\pi \int_{i-\frac{1}{2}}^{i+\frac{1}{2}} \phi\ (r)\ rdr$

ϕ (r)　：　径方向発熱密度分布関数、(2.1.39)式

q^{j}　：　軸方向セグメントjの平均発熱密度（W/cm）

$= \dfrac{P^{j}_{LHR}}{\pi\ (1-h^2)}$

P^{j}_{LHR}　：　軸方向セグメントjの線出力（W/cm）

h　：　中心孔規格化半径r_{ci}/r_{co}（－）

E_f　：　1 fission 当りに発生するエネルギー、3.204×10^{-11}ジュール（200MeV）

Y　：　ＦＰガス（K_r ＋ X_e）の核分裂収率、0.3

N_A　：　アボガドロ数、6.02×10^{23}

である。

（２）温度依存モデル

（２）－１　放出機構の仮定

まず、粒内で生成されたガスは次の３つの機構により粒界へ放出され、そこにガスバブルを形成し、蓄積すると仮定する。

1）ガス・アトムの拡散

2）粒成長による掃き出し

3）リム化による掃き出し

粒界でのガスの蓄積量がある飽和量に達すると、バブルが連結し、外界へのトンネルが形成される。粒界が飽和すると、粒内より粒界へ流れ出てくる追加のガスはトンネルより外界へ直ちに放出される。なお、粒内ではガスの粒内気泡へのトラッピングあるいは、粒内気泡から固相への再溶解を取り扱う。

また、粒界に溜まっているガスも一定の割合で粒内へ再溶解することも考慮している。

（２）－２　トラッピングを伴う拡散[14][15]

図２．２４(a)にペレット断面の粒内ガス気泡と粒界ガス気泡の状態を示す。

図２．２４(b)に理想化された結晶粒モデルを示す。

単位体積あたりに半径$\overline{R}$ の粒内気泡がN個存在するとする。照射中、平衡状態においては、$\overline{R}$ とN の間には次の関係が成立している。

$$N\overline{R}^2 = \alpha / \pi \lambda \tag{2.1.85}$$

ここで

N ：　粒内気泡密度　(bubbles／cm³)

$\overline{R}$ ：　粒内気泡平均半径　(cm)

α ：　気泡の生成率　(bubbles／fission fragment)

λ ：　飛程　(cm)

である。図２．２４(b)の粒界は粒界気泡の球殻ブランケットで覆われている様に描かれているが、実際の粒界は隣合った結晶粒を分離している。

固体内に溶解しているガスと粒内バブル中のガスとの間の分配は、トラッピングの平衡条件により支配されると仮定する。固体内に溶解しているガスは濃度勾配を駆動力とし、拡散により粒界に移動する。

半径ａの球形固体内の粒内気泡にトラップされていないガスの拡散は、トラッピングと再溶解を考慮した場合次式で表される。

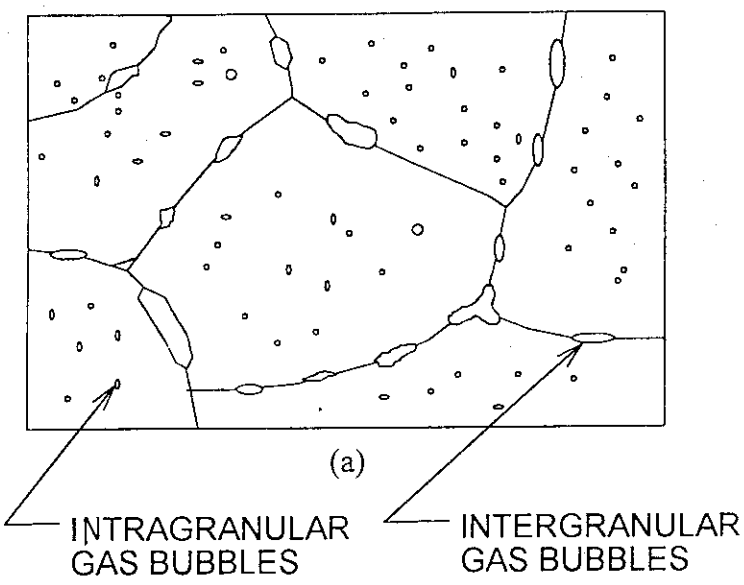


図２．２４(a)　ペレット粒内ガス気泡と粒界ガス気泡の状態の模式図

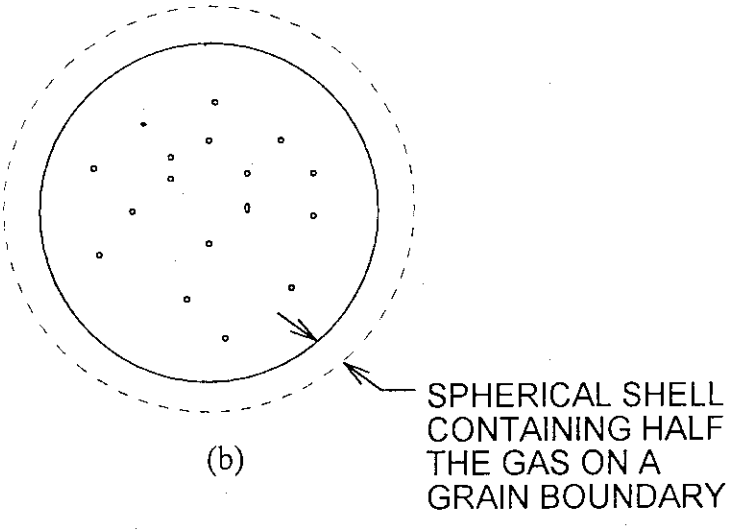


図２．２４(b)　ペレット結晶粒理想化モデル

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial c}{\partial r}\right) - gc + b'm + \beta \tag{2.1.86}$$

ここで　c ：　単位体積あたり固体内に溶解するガス原子数　$(atoms/cm^3)$

D ：　ガス原子の拡散係数　(cm^2/s)

g ：　粒内気泡にトラップされるガスの割合　(s^{-1})

b' ：　固体内への再溶解率　(s^{-1})

m ：　単位体積あたり気泡内に存在するガス原子数　$(atoms/cm^3)$

β ：　単位体積あたりのガスの生成率　$(atoms/cm^3/s)$

である。

粒内気泡にトラップされたガス平衡は次式で表される。

$$\frac{\partial m}{\partial t} = gc - b'm \tag{2.1.87}$$

平衡トラッピング状態において、m の時間変化が無視されるとき、(2.1.87)式は、

$$gc = b'm \tag{2.1.88}$$

と簡略化される。そこで(2.1.86)式及び(2.1.87)式を辺々加えると、

$$\frac{\partial\ (c+m)}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial c}{\partial r}\right) + \beta \tag{2.1.89}$$

となる。ここで(2.1.88)式より、

$$c + m = \frac{b'+g}{b'}c \tag{2.1.90}$$

の関係が得られる。これを(2.1.89)式に代入すると、

$$\frac{\partial\ (c+m)}{\partial t} = \frac{Db'}{b'+g}\left(\frac{\partial^2\ (c+m)}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial\ (c+m)}{\partial r}\right) + \beta \tag{2.1.91}$$

を得る。　ここで、固体内及び気泡内のガス原子数の和を

$$\phi = c + m \tag{2.1.92}$$

で表すと、トラッピングを伴う球内の拡散方程式は最終的に次のように表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = D' \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \beta \qquad (2.1.93)$$

ここで $$D' = \frac{b' D}{b' + g} \qquad (2.1.94)$$

である。ϕ はガスが固相に存在するか、粒内気泡内に存在するかに関係なく、粒内の単位体積あたりのガス原子数を表す。

D' は見かけの拡散係数であり、トラッピングの効果はこの中に含まれている。

気泡へのトラッピング率gは次式で与えられる。

$$g = 4\pi D \bar{R} N \qquad (2.1.95)$$

$\overline{R}$ ：バブル平均半径　(cm)

N ：バブル数密度　(bubbles/cm^3)

固相への再溶解率b' は次式で与えられる。

$$b' = 3.03 F \pi \lambda (\overline{R} + Z_o)^2 \qquad (2.1.96)$$

ここで　F ：　核分裂速度　(fissions／cm^3／s)

λ ：　飛程　(cm)

Z_o ：　定数　(＝10^{-7}cm)

である。

拡散係数 D は Turnbull により次式で与えられている[16]。

$$D = 7.6\times10^{-10} exp(-7\times10^4/RT) + S^2 jv V + 2\times10^{-40} F \qquad (m^2/s)$$

ここで　R ：ガス定数 ＝ 1.987 cal／mole／K

T ：温度　(°K)

S ：原子ジャンプ距離 ＝ $\Omega^{\frac{2}{3}}$

Ω ：原子容積 ＝ 4.09×10^{-29}　(m^3)

$jv = 10^{13} exp(-5.52\times10^4/RT)$

$$V = \frac{(\partial_s S^2 + Z V_o)}{2Z} \left[\left(1 + \frac{4K' Z}{jv (\partial_s S^2 + Z V_o)^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right]$$

$\partial_s = 10^{15}$　(m^{-2}，シンク強度)

$Z = 2$ （欠損点数）

$K' = 10^{-4}$ （原子当りの欠損率）

$V_o = exp\ (-5.52\times10^{4}/RT)$

$F = 10^{19}$ （$fission/m^3/sec$ ，核分裂速度）

である。

拡散係数の温度依存性を図２．２５に示す。

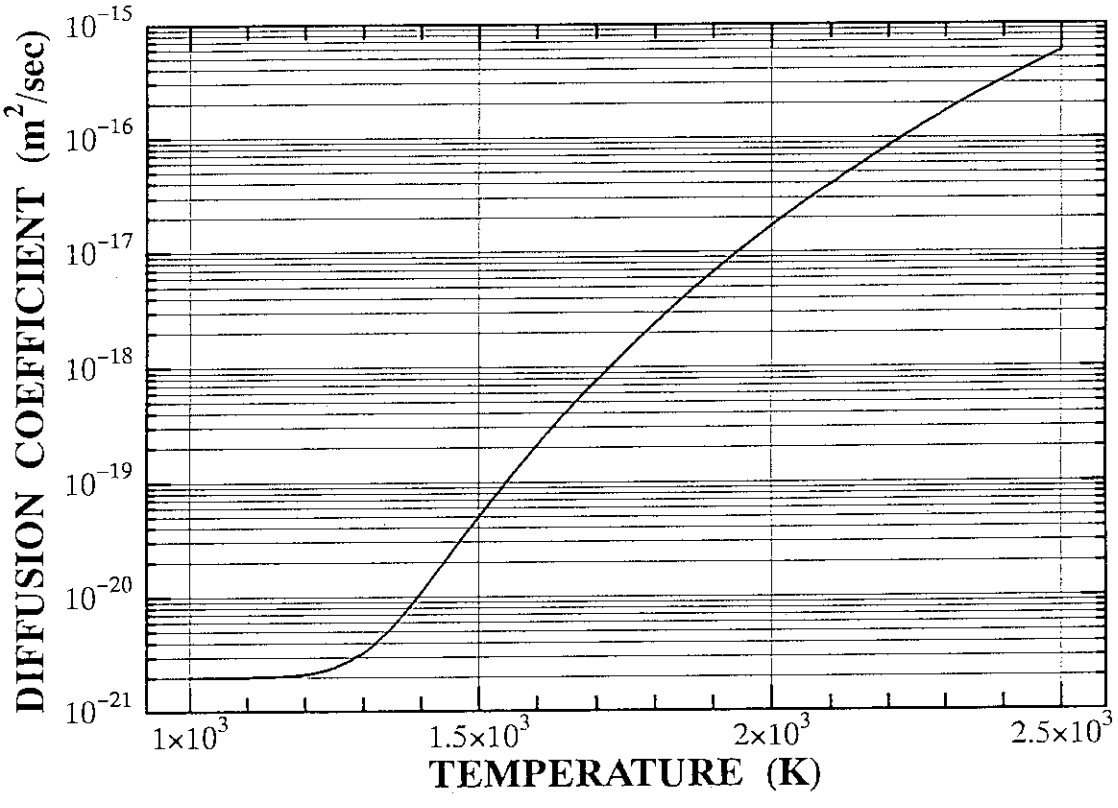


図２．２５　拡散係数

（２）－３　粒成長に伴う粒界へのガスの掃き出し

粒成長に伴い、粒内ガスは粒界へ掃き出される。粒界へ掃き出されるガスの割合 fg は次式で表される。

$$fg = 1-\left(\frac{a^{i-1}}{a^{i}}\right)^{3} \qquad (2.1.97)$$

ここで　a^{i} ：　粒成長後の結晶粒半径　(cm)

a^{i-1}：　粒成長前の結晶粒半径　(cm)

である。図２．２６に粒成長の概念図を示す。図中の斜線部に相当する部分のガスが、粒成長に伴い粒界へ掃き出される。

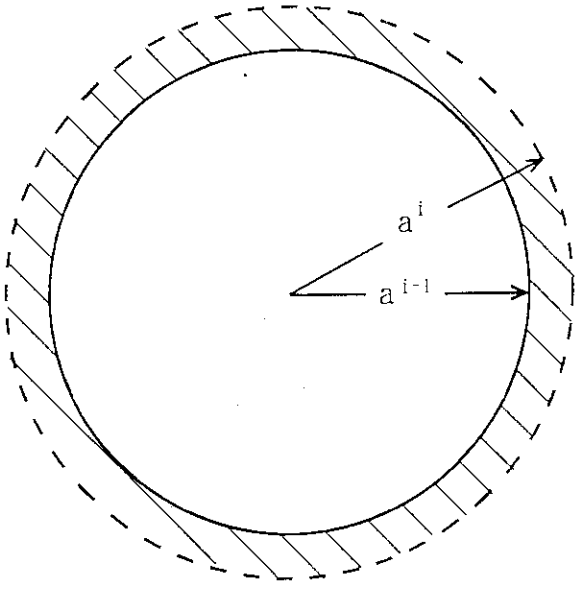


図２．２６　粒成長概念図

粒成長モデルとしては、次の２つのモデルを用いている。

① Ainscough モデル[17]

$$\frac{dD}{dt} = k\left(\frac{1}{D} - \frac{1+0.002B}{Dm}\right) \quad (\mu m/h) \qquad (2.1.98)$$

② 修正 Nichols モデル[18]

$$\frac{dD}{dt} = k\left(\frac{1}{D^{2}} - \frac{1+0.002B}{Dm^{2}}\right) \quad (\mu m/h) \qquad (2.1.99)$$

ここで　$k = 5.24\times10^{7}\ (-2.67\times10^{5}/RT)$　$(\mu m^{2}/h)$

D ：　結晶粒径　(μm)

Dm ：　限界粒径　$(=2.23\times10^{3}exp\ (-7620/T))$　(μm)

B ：　燃焼度　(Mwd/Kg U)

である。

（２）－４　リム化によるＦＰガスの放出

高燃焼時のペレットのリム化によるＦＰガスの放出を次のモデルにより計算する[3]。リム領域で生成されたキセノンのうち、リム化により掃き出されるキセノンの割合F_rを次式で与える。

$$F_r = 0.00625(B_u - 62.2), \qquad B_u > 62.2 \tag{2.1.100}$$

ここで、B_uはペレット端部における燃焼度（MWd/KgU）である。

燃焼度の進展に伴うリム領域の発達を燃焼度の関数として次式を与える。

$$W = 2.19\ (B_u - 48.8) \tag{2.1.101}$$

ここで、Wはリム領域幅（μｍ）である。さてこの式からリム領域幅は、端部燃焼度が１５０MWd/kgUにいたっても高々２２０μｍ程度であり、ＥＸＢＵＲＮ-ＩのＦＰガス計算で用いているペレット領域分割の最外層領域に十分収まる程度であることがわかる。したがって、リム化の影響は最外層領域V_rでのみ計算する。(2.1.100)式及び(2.1.101)式から、最外層領域において生成されたキセノンのうち、掃き出されるキセノンの割合R_rを次式で与えることができる。

$$R_r = V_r \cdot F_r \tag{2.1.102}$$

$$V_r = \pi\{r_o^2 - (r_o - W)^2\} / \pi(r_o^2 - r_i^2) \tag{2.1.103}$$

ここで、r_iは最外層領域の内側半径、r_oはペレット半径である。

（２）－５　粒界気泡の連結によるガス放出

照射が進むにつれ、粒界で気泡密度が高くなり、気泡が粗大化すると、気泡は広範囲にわたって連結する。そして連結気泡の一点がクラックや自由空間に通じる通路に接触すると、気泡は開気孔となり、気泡内のガスは燃料ピンの自由空間に放出する。

モデルでは、粒界の単位面積あたりのガス原子数がある一定の値を超えると、気泡が連結し自由空間へのトンネルが形成されると仮定する。そして、いったん粒界でのガス濃度が一定値に達すると、粒内より移動してくる追加のガス分子は直ちに自由空間に放出されると仮定する。

（２）－６　粒界気泡内ガスの粒内への再溶解

粒界は隣合った結晶粒を分離するため、粒界の単位領域あたり半分のガスが再溶解すると仮定する。すなわち、

$$\frac{bN}{2} \qquad (atoms/cm^2/s) \tag{2.1.104}$$

ここで　　b ：　再溶解率　(10^{-6}/s)

　　N ：　粒界の単位面積あたりのガス原子数　($atoms/cm^2$)

である。

（３）　ＦＰガス放出モデル（燃焼度依存モデル）

温度依存のＦＰガス放出モデルでは、独立変数として燃料温度を用いている。しかしながら、燃料温度自体は測定で正確に求められず、検証用のデータとしては不充分である。そこで燃焼度依存モデルとして、内田のモデルを採用する[5]。内田のモデルではBoothのモデル[19]を修正し、燃焼度、線出力、粒径等正確な実測の可能なデータによってＦＰ放出を計算することで不確定な要素を排除し、粒内バブル等を考慮しない簡単なモデルで正確な計算を可能にしている。

（３）－１　拡散モデルの式

拡散定数D を径方向に一様であるとして、拡散方程式を次式で与える。

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -D\left(\frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi}\frac{\partial c}{\partial \xi}\right) + S \tag{2.1.105}$$

ここで、

t ：時間（days）

ξ ：等価球径方向座標（μm）

c ：ＦＰガス濃度　(MWd/t-U)

S ：ＦＰガス生成率(W/g-U)

D ：拡散定数　(μm^2/day)

である。

このモデルでは粒内気泡は考慮していない。ＦＰガス濃度が燃焼度を単位とし、生成率が出力を単位として表されているが、目的の量が無次元の放出率（放出量／生成量）であるので、問題はない。同様に、全生成量B は燃焼度（$MWd/t-U$）を単位として表される。

さらに、一般に時間に依存する拡散定数を拡散項から取り除くために、有効時間τ を導入して式を書き換える。拡散定数が時間の関数であるとして有効時間τ を以下のように定義する。

$$\tau = \int_0^t D dt = \int_0^B \frac{D}{S} dB \qquad \left(\because B(t) = \int_0^t S(t) dt\right) \tag{2.1.106}$$

τ を用いて(2.1.105)式を書き換えれば、

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -\left(\frac{\partial^2 c}{\partial \xi^2} + \frac{2}{\xi}\frac{\partial c}{\partial \xi}\right) + \frac{S}{D} \tag{2.1.107}$$

となる。

（3）－2　ＦＰ放出率

ＦＰ放出率を次のように定義する。

・$f(t_1, t_2)$:時刻t_1に等価球内で一様に生成されたＦＰガスが時刻t_2までに放出される割合

・$F(t_1, t_2)$:時刻t_1からt_2までの間に生成されたＦＰガスが時刻t_2に放出される割合。

ここでは、$f(\tau_1, \tau_2)$ の重ね合わせにより$F(0, \tau_f)$ をもとめる。

(2.1.105)式で$D=const.$ としたときの$f(0,t)$ についてのBoothの解を用いて$f(0, \tau)$ についての(2.1.107)式の解をつくる。(2.1.107)式の右辺第１項は拡散定数が１の拡散項であるとみなせるので、Booth の解について、拡散定数を$D \equiv 1$ とし、有効時間τ で書き換えれば、(2.1.107)式の$S/D=0$ のときの解として、

$$f(0, \tau) = 1 - \frac{6}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}exp\left(-4n^2\pi^2\frac{\tau}{g^2}\right) \tag{2.1.108}$$

を得る。ここでg は等価球の直径（μm ）である。$f(0, \tau)$ が小さいときは

$$f(0, \tau) = \frac{12}{g}\sqrt{\frac{\tau}{\pi}} - \frac{12\tau}{g^2} \tag{2.1.109}$$

と近似できる。実際(2.1.109)式は40%までのＦＰ放出率に対し実用上問題なく使用できる。

ところで、(2.1.107)式では拡散定数についての情報はτ と右辺第２項が持っており、(2.1.108)式は、Boothの解の持っている本来の拡散定数が時間によらないという制限を受けない。(2.1.107)式右辺第２項を考慮して重みをつけて重ね合わせの原理を用いれば、ＦＰガス放出率として、

$$F(0, \tau_f) = \frac{1}{B_f}\int_0^{\tau_f}\frac{S}{D}(\tau)f(\tau, \tau_f)d\tau \tag{2.1.110}$$

を得る。ここで、当初の目的通り出力を独立変数とするために

$$\frac{S}{D} = \frac{dB}{d\tau} \tag{2.1.111}$$

を用いて変数変換をすれば、結局、

$$F(0, \tau_f) = \frac{1}{B_f}\int_0^{B_f} f(0, \tau_f)dB = \frac{12}{gB_f}\int_0^{B_f}\left\{\sqrt{\frac{\tau_f - \tau}{\pi}} - \frac{\tau_f - \tau}{g}\right\}dB \tag{2.1.112}$$

となる。

ところでτ は、(2.1.106)式、あるいは(2.1.111)式を通じて、拡散定数D に依存している。よって、D を出力の関数として書き表すことにより、ＦＰ放出率を出力の関数として記述することができる。内田のモデルでは、実際の拡散定数のふるまいを表す関数として$exp(x^2)$ 型の関数を選び、

$$D = A_0\, q\, exp\{\alpha B^2 - \beta(q_m - q)^2\} \qquad (\alpha, \beta > 0) \tag{2.1.113}$$

とおいた。ここで、A_0, α, β, q_m は、フィッティングパラメータであり、

$$A_0 = 9.4\times10^{-4},\ \alpha = 1.0\times10^{-9},\ \beta = 5.33\times10^{-5},\ q_m = 700$$

が使用されている。

（３）－３　アニュラーペレットに対する補正

内田のモデルでは、アニュラーペレットについては拡散方程式を改めて解き直さず、通常ペレットについての解を補正して計算する。ＦＰ放出率についての両者の違いは

・同じ線出力であれば、アニュラーペレットの方がピーク温度が低く、ＦＰ放出率も少ない。

・同じピーク温度であれば、アニュラーペレットの方が最大温度近辺の体積が大きいだけＦＰ放出率も大きい。

の２点である。

線出力ｑと温度Ｔの関係は、通常ペレットでは、積分方程式

$$\int_{T_o}^{T_i} k\ dT = \frac{q}{4\pi} \tag{2.1.114}$$

で与えられる。ここで添え字 i および o は、それぞれペレット中心および表面を表す。これに対し、アニュラーペレットでのこの関係は、

$$\int_{T_o}^{T_i} k\ dT = \frac{q}{4\pi}\left(1 + \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\, ln\frac{r_i}{r_o}\right) \tag{2.1.115}$$

で与えられる。ただしi, o は、それぞれ内側表面、外側表面を表す。

したがって、アニュラーペレットにおいては線出力を

$$q' = q\left(1 + \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2}\, ln\frac{r_i}{r_o}\right) \tag{2.1.116}$$

のように補正することで、通常ペレットと同じ関係を用いることができる。

次に体積効果による補正を考える。そのために最大温度の等しい通常ペレットとアニュラーペレットを比較する。アニュラーペレットの線出力をq とすれば、最大温度の等しい通常ペレットの線出力は(2.1.116)式からq_1 となる。通常ペレットにおいて、ＦＰ放出領域を$0<r_1$ にあると仮定すると、先の熱伝導度の積分はこの領域で

$$I1 = \int_{T_1(r_1)}^{T_1(0)} k\,dT = \frac{q'\ r_1^2}{4\pi r_0^2} \tag{2.1.117}$$

と書ける。アニュラーペレットにおいて、この領域と同じ温度領域が$r_i<r<r_2$ にあるとすれば、同様の積分は

$$I_2 = \int_{T_2(r_1)}^{T_2(0)} k\,dT = \frac{q}{4\pi(r_0^2-r_i^2)}\left(r_2^2-r_i^2+2r_i\ln\frac{r_i}{r_2}\right) \tag{2.1.118}$$

となる。

ここで$r_2=r_i+\Delta r$ （$\Delta r \ll r_i$） とおけば

$$I_2 = \frac{q}{4\pi}\frac{\Delta r^2}{r_0^2-r_i^2} \tag{2.1.119}$$

と近似できる。(2.1.117)、(2.1.119)式から

$$\Delta r = \frac{r_1\sqrt{r_0^2-r_i^2}}{r_0}\sqrt{\frac{q'}{q}} \tag{2.1.120}$$

と書くことができるので、放出領域の体積比は結局

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\pi(r_2^2-r_i^2)}{\pi r_1^2} = \frac{2r_i\sqrt{r_0^2-r_i^2}}{r_1 r_0}\sqrt{\frac{q'}{q}}$$

となる。

体積効果によってアニュラーペレットの放出率は、通常ペレットに比べてV_2/V_1 だけ増加する。ところで(2.1.109)式から、拡散方程式の解はおおよそ拡散計数D の1/2乗のふるまいをすると考えられる。したがって体積効果は拡散計数を$(V_2/V_1)^2$ 倍することによって得ることができる。パラメータr_1 を実験にあわせて$r_1=r_i/2$ とおけば、必要な補正は拡散定数の式(2.1.113)中の定数A_0 を

$$A_0' = A_0\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 = 16A_0\frac{q'}{q}\left\{1-\left(\frac{r_i}{r_0}\right)^2\right\}$$

で置き換えることで得られる。

（4）ギャップ内ガスの拡散・流動モデル

（4）－1 以下のような仮定および方法にもとづいて拡散の計算を行う。

① ヘリウムとキセノンのみの2成分系混合ガスについて行う。

② ヘリウムとキセノンは相互拡散するものとする。

③ ガスはギャップ部を通って相互拡散するものとする。

④ 計算はFickの第1法則により陰解法的に行い、燃料棒内圧力差による流動とは独立とする。

⑤ 拡散の計算が行われている間、燃料棒内圧は一様であるとする。

（4）－2 計算式

まず、記号の一覧を示す。

N ： ガスモル数 $(mole)$

n ： モル密度 $(mole/m^3)$

D^{12} ： 相互拡散定数 (m^2/s) $(D^{12}=D^{21})$

T ： 温度 (K)

V ： 体積 (m^3)

P ： 圧力 (Pa)

C ： モル分率 $(C_i=n_i/(n_1+n_2))$

添え字として i ： ガスの種類 （1＝キセノン、2＝ヘリウム）

j ： 軸セグメント $(j=P_L, 1, 2, 3, \cdots, N, P_U)$

（P_L‥下部プレナム、P_U‥ 上部プレナム）

ここで特にモル密度については、添え字は、

n_{ij} ： セグメントj におけるガスi の密度

n_j ： セグメントj における全ガスの密度

のように用いるものとする。

仮定から体系は次の図のようにモデル化することができる。

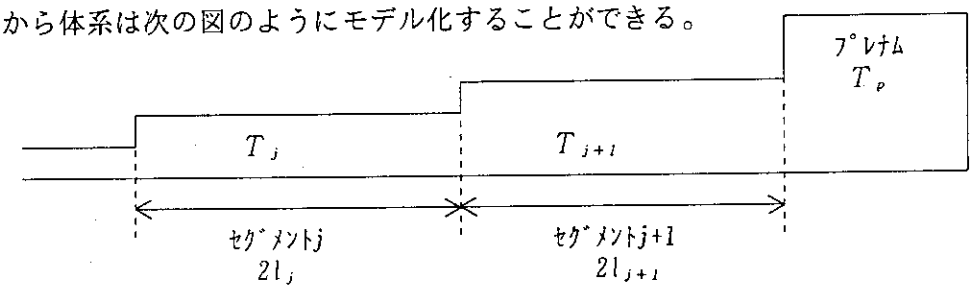


図2．27 ガス拡散・流動モデル

セグメントj において ガスi の総量は

$$N_{ij} = n_{ij} V_j$$

$$= C_{ij}\, n_j\, V_j = \frac{P}{R}\, C_{ij}\, \frac{V_j}{T_j} \qquad (2.1.123)$$

である。

ここで各セグメントは流路断面積 S_j もち、各セグメントの長さを $2l_j$ とし、またセグメント j と j+1 の境界位置を * で表すとする。

単位時間にセグメント j から * を越えて j+1 に流入するガスl(Xe)の量は、 Fick の法則により、

$$G_l\ (j \rightarrow *) = S_j\, D_j^{l2}\, \frac{n_{lj} - n_{l*}}{l_j} \qquad (2.1.124)$$

同じく

$$G_l\ (* \rightarrow j+1) = S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}\, \frac{n_{l*} - n_{lj+1}}{l_{j+1}} \qquad (2.1.125)$$

連続性の条件から

$$G_l\ (j \rightarrow *) = G_l\ (* \rightarrow j+1)$$

が成り立つ。

ゆえに

$$S_j\, D_j^{l2}\, \frac{n_{lj} - n_{l*}}{l_j} = S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}\, \frac{n_{l*} - n_{lj+1}}{l_{j+1}} \qquad (2.1.126)$$

n_{l*} について解いて

$$n_{l*} = \frac{S_j\, D_j^{l2}\, l_{j+1}\, n_{lj} + S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}\, l_j\, n_{lj+1}}{S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}\, l_j + S_j\, D_j^{l2}\, l_{j+1}} \qquad (2.1.127)$$

(2.1.124)式を用いて

$$G_l\ (j \rightarrow j+1) = G_l\ (j \rightarrow *)$$

$$= \frac{S_j\, D_j^{l2}\, S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}}{S_{j+1}\, D_{j+1}^{l2}\, l_j + S_j\, D_j^{l2}\, l_{j+1}}\ (n_{lj} - n_{lj+1}) \qquad (2.1.128)$$

ここで

$$F_{j,j+1} = \frac{S_j\ D_j^{12}\ S_{j+1}\ D_{j+1}^{12}}{S_{j+1}\ D_{j+1}^{12}\ l_j + S_j\ D_j^{12}\ l_{j+1}} \tag{2.1.129}$$

として

$$G_1\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ (n_{1j} - n_{j+1}) \tag{2.1.130}$$

一方　ガス2（He）についても同様に

$$G_2\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ (n_{2j} - n_{2j+1}) \tag{2.1.131}$$

(2.1.130)式と(2.1.131)式を加えて

$$G\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ (n_j - n_{j+1}) \tag{2.1.132}$$

ここで、　$n_j = n_{1j} + n_{2j}\ ,\ n_{j+1} = n_{1j+1} + n_{2j+1}$

である。

一般にセグメント j と $j+1$ のギャップ部の温度が異なることから、平衡状態においても

$$n_j \fallingdotseq n_{j+1} \tag{2.1.133}$$

しかるに(2.1.132)式によればセグメント j と $j+1$ が平衡していても、数値計算上セグメント j から $j+1$ に向かう正味の流れが生じてしまうことになる。

これは温度勾配を持つ場に Fick の第1法則のみを適用した結果である。この流れを打消すためには(2.1.130)式及び(2.1.131)式にそれぞれ温度差の効果を表わす第2項を加える必要がある。

(2.1.132)式に加えるべき第2項は、

$$G\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ \{ (n_j - n_{j+1}) - (\bar{n}_j - \bar{n}_{j+1}) \} \tag{2.1.134}$$

理想気体の法則から

$$\bar{n}_j = \frac{P}{R}\ \frac{1}{T_j}\ ,\quad \bar{n}_{j+1} = \frac{P}{R}\ \frac{1}{T_{j+1}} \tag{2.1.135}$$

(2.1.130)式及び(2.1.131)式はそれぞれ

$$G_1\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ \{ (n_{1j} - n_{1j+1}) - (\bar{n}_{1j} - \bar{n}_{1j+1}) \} \tag{2.1.136}$$

$$G_2\ (j \rightarrow j+1) = F_{j,j+1}\ \{ (n_{2j} - n_{2j+1}) - (\bar{n}_{2j} - \bar{n}_{2j+1}) \} \tag{2.1.137}$$

理想気体の法則から

$$\bar{n}_{1j} = \frac{P}{R}\frac{\overline{C}_1}{T_j} \quad , \quad \bar{n}_{1j+1} = \frac{P}{R}\frac{\overline{C}_1}{T_{j+1}} \tag{2.1.138}$$

$$\overline{C}_1 = \frac{N_{1j} + N_{1j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{1j}\ V_j + n_{1j+1}\ V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \tag{2.1.139}$$

$$\bar{n}_{2j} = \frac{P}{R}\frac{\overline{C}_2}{T_j} \quad , \quad \bar{n}_{2j+1} = \frac{P}{R}\frac{\overline{C}_2}{T_{j+1}} \tag{2.1.140}$$

$$\overline{C}_2 = \frac{N_{2j} + N_{2j+1}}{V_j + V_{j+1}} = \frac{n_{2j}\ V_j + n_{2j+1}\ V_{j+1}}{V_j + V_{j+1}} \tag{2.1.141}$$

$$\overline{C}_1 + \overline{C}_2 = 1 \tag{2.1.142}$$

である。

（４）－３　Ｈｅ－Ｘｅ相互拡散モデルの陰解法化

境界面Ｒ（セグメント j-1 と j の境界面）を通してセグメント j に拡散するガス１（Xe）の flux $J_{1,R}$ は、

$$J_{1,R} = F_{j-1,j}\ \{\ (n_{1,j-1} - n_{1,j}) - (\bar{n}_{1,j-1} - \bar{n}_{1,j})\ \} \tag{2.1.143}$$

境界面Ｓ（セグメント j と j+1 の境界面）を通してセグメント j+1 に拡散するガス１（Xe）の flux $J_{1,S}$ は、

$$J_{1,S} = F_{j,j+1}\ \{\ (n_{1,j} - n_{1,j+1}) - (\bar{n}_{1,j} - \bar{n}_{1,j+1})\ \} \tag{2.1.144}$$

である。すると、

$$V_j\ \frac{\partial n_{1,j}}{\partial t} = J_{1,R} - J_{1,S} \tag{2.1.145}$$

となる。

(2.1.145)式を(2.1.143)式及び(2.1.144)式を用いて陰解法表示すると次式となる。ただし、タイムステップ変数として k を用いる。

$$\frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^{k}}{\Delta t} = \frac{1}{V_j^{\theta 1}}\ \{F_{j-1,j}^{\theta 1}\ [\ (n_{1,j-1}^{\theta 2} - n_{1,j}^{\theta 2}) - (n_{1,j-1}^{\theta 1} - n_{1,j}^{\theta 1})\ ]$$

$$- F_{j,j+1}^{\theta 1}\ [\ (n_{1,j}^{\theta 2} - n_{1,j+1}^{\theta 2}) - (n_{1,j}^{\theta 1} - n_{1,j+1}^{\theta 1})\ ]\} \tag{2.1.146}$$

ここで、

θ_1 ＝　温度、容積、圧力、平衡モル比に関する補間

θ_2 ＝　モル濃度に関する補間

である。θ_1 は軸方向収束ループ内での補間パラメータであり、θ_2 は相互拡散サブルーチン内の補間パラメータである。θ_1 は軸方向収束ループ内では変化するが、相互拡散サブルーチン内では変化しない定数として扱う。

したがって、(2.1.146)式について

$$n_{1,j}^{\theta 2} = (1-\theta_2)\ n_{1,j}^{k} + \theta_2 n_{1,j}^{k+1} \tag{2.1.147}$$

の関係を入れて整理すると、

$$\begin{aligned}\frac{n_{1,j}^{k+1} - n_{1,j}^{k}}{\Delta t} &= \frac{\theta_2\ F_{j-1,j}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}}\ n_{1,j-1}^{k+1} - \frac{\theta_2\ \{F_{j,j+1}^{\theta 1} + F_{j-1,j}^{\theta 1}\}}{V_j^{\theta 1}}\ n_{1,j}^{k+1} \\ &+ \frac{\theta_2\ F_{j,j+1}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}}\ n_{1,j+1}^{k+1} + \frac{1}{V_j^{\theta 1}}\ \{F_{j-1,j}^{\theta 1}\ [\ (1-\theta_2)\ (n_{1,j-1}^{k} - n_{1,j}^{k}) \\ &- (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta 1})\ ] - F_{j,j+1}^{\theta 1}\ [\ (1-\theta_2)\ (n_{1,j}^{k} - n_{1,j+1}^{k}) \\ &- (\bar{n}_{1,j}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta 1})\ ]\ \}\end{aligned} \tag{2.1.148}$$

となる。(2.1.148)式を

$$A_j\ n_{1,j-1}^{k+1} + B_j\ n_{1,j}^{k+1} + C_j \cdot n_{1,j+1}^{k+1} = D_j \tag{2.1.149}$$

の形に書き直すと、

$$A_j = -\frac{\theta_2\ F_{j-1,i}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}}\ \Delta t \tag{2.1.150}$$

$$B_j = 1 + \frac{\theta_2\ \{F_{j-1,j}^{\theta 1} + F_{j,j+1}^{\theta 1}\}}{V_j^{\theta 1}}\ \Delta t \tag{2.1.151}$$

$$C_j = -\frac{\theta_2\ F_{j,j+1}^{\theta 1}}{V_j^{\theta 1}}\ \Delta t \tag{2.1.152}$$

$$\begin{aligned}D_j &= \frac{1}{V_j^{\theta 1}}\ F_{j-1,j}^{\theta 1}\ (1-\theta_2)\ \Delta t\ n_{1,j-1}^{k} \\ &+ \{1 - \frac{1-\theta_2}{V_j^{\theta 1}}\ (F_{j-1,j}^{\theta 1} + F_{j,j+1}^{\theta 2})\ \Delta t\}\ n_{1,j}^{k} \\ &+ \frac{1}{V_j^{\theta 1}}\ F_{j,j+1}^{\theta 1}\ (1-\theta_2)\ \Delta t\ n_{1,j+1}^{k} \\ &+ \frac{1}{V_j^{\theta 1}}\ \{F_{j,j+1}^{\theta 1}\ (\bar{n}_{1,j}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j+1}^{\theta 1}) \\ &- F_{j-1,j}^{\theta 1}\ (\bar{n}_{1,j-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,j}^{\theta 1})\ \}\ \Delta t\end{aligned}$$

である。

上下部セグメント(プレナムも含めて)では、第1セグメントでは境界面Rはないので

$$V_1 \frac{\partial n_{1,1}}{\partial t} = -J_{1,s}$$

$$= -F_{1,2}\left[(n_{1,1} - n_{1,2}) - (\bar{n}_{1,1} - \bar{n}_{1,2}) \right] \qquad (2.1.154)$$

したがって

$$\frac{n_{1,1}^{k+1} - n_{1,1}^{k}}{\Delta t} = -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} n_{1,1}^{k+1} + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} n_{1,2}^{k+1}$$

$$- \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} n_{1,1}^{k} + \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} n_{1,2}^{k}$$

$$+ \frac{F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta 1}) \qquad (2.1.155)$$

より

$$B_1 = 1 + \frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} \Delta t \ , \quad C_1 = -\frac{\theta_2 F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} \Delta t$$

$$D_1 = \left(1 - \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} \Delta t\right) n_{1,1}^{k} + \frac{(1-\theta_2) F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} \Delta t \, n_{1,2}^{k}$$

$$+ \frac{F_{1,2}^{\theta 1}}{V_1^{\theta 1}} (\bar{n}_{1,1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,2}^{\theta 1}) \Delta t \qquad (2.1.156)$$

とおくと、

$$B_1 \cdot n_{1,1}^{k+1} + C_1 \cdot n_{1,2}^{k+1} = D_1 \qquad (2.1.157)$$

である。

同様に第n セグメントでは境界面S はないので、

$$V_n \frac{\partial n_{1,n}}{\partial t} = J_{1,R}$$

$$= F_{n-1,n}\left[(n_{1,n-1} - n_{1,n}) - (\bar{n}_{1,n-1} - \bar{n}_{1,n}) \right] \qquad (2.1.158)$$

したがって、

$$A_n = -\frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t \ , \quad B_n = 1 + \frac{\theta_2 F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t$$

$$D_n = \frac{(1-\theta_2) F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t \, n_{1,n-1}^{k} + \left(1 - \frac{(1-\theta_2) F_{n-1}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \Delta t\right) n_{1,n}^{k}$$

$$- \frac{F_{n-1,n}^{\theta 1}}{V_n^{\theta 1}} \left(\bar{n}_{1,n-1}^{\theta 1} - \bar{n}_{1,n}^{\theta 1}\right) \Delta t \tag{2.1.159}$$

とおくと、

$$A_n \cdot n_{1,n-1}^{k+1} + B_n \cdot n_{1,n}^{k+1} = D_n \tag{2.1.160}$$

である。

以上をまとめると、ガス１の拡散について次のような全体マトリクスを得る。

$$\begin{Bmatrix} B_1 & C_1 & & & & & & & \\ A_2 & B_2 & C_2 & & & & & & \\ & A_3 & B_3 & C_3 & & & & & \\ & & \cdot & & & & & & \\ & & & \cdot & & & & & \\ & & & & \cdot & & & & \\ & & & & & \cdot & & & \\ & & & & & & \cdot & & \\ & & & & & & A_{n-2} & B_{n-2} & C_{n-2} \\ & & & & & & & A_{n-1} & B_{n-1} & C_{n-1} \\ & & & & & & & & A_n & B_n \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} n_{1,1}^{k+1} \\ n_{1,2}^{k+1} \\ n_{1,3}^{k+1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n_{1,n-2}^{k+1} \\ n_{1,n-1}^{k+1} \\ n_{1,n}^{k+1} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ D_{n-2} \\ D_{n-1} \\ D_n \end{Bmatrix} \tag{2.1.161}$$

(2.1.161)式を解くと、各セグメントのガス濃度が求まる。

なお、θ_1 は軸方向温度計算ループ内の収束計算における補間パラメータである。

（４）－４　拡散定数

ガスの拡散定数は、Presentのものを用いた[20]。すなわち、

$$D^{12} = \frac{3}{8}\left(\frac{\pi k T}{2m^*}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{n \pi d_{12}^2} \tag{2.1.162}$$

ここで　$m^* = \dfrac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$　（m：　１分子の重量）

$d_{12} = \dfrac{1}{2}(d_1 + d_2)$　（d：　分子の直径）

$n = n_1 + n_2$　（分子密度）

k：　ボルツマン定数

T：　温度（K）

である。

（4）－5　圧力調整の計算

各タイムステップの終りにおいて、各セグメントにおける全ガスモル数（全種類の合計）を N_j とすると、

$$N_j = \sum_i N_{ij} \qquad (i \text{ はガスの種類}) \tag{2.1.163}$$

さらに燃料棒内全空間について

$$N = \sum_j N_j \tag{2.1.164}$$

理想気体の法則から

$$P = N \cdot R \cdot \frac{1}{\sum_j \left(\frac{V}{T}\right)_j} \tag{2.1.165}$$

したがって、圧力調整後のセグメント j における全モル数を N_j' とすると

$$N_j' = \frac{P}{R}\left(\frac{V}{T}\right)_j \tag{2.1.166}$$

である。

N_j と N_j' の相違に対しては、ペレットスタックの下部から順に隣接セグメント間の収支により調整していく（図２．２８参照）。

すなわち、

$N_{i\to j}$ ：　i から j への混合ガスの移動モル数

f_{ij} ：　移動前のセグメント j における i の割合

とすると、移動後のセグメント j におけるガス i のモル数は

$$N_{ij}' = f_{ij}\{N_j - \sum_k N_{j\to k}\} + \sum_l f_{il} N_{l\to j} \tag{2.1.167}$$

である。

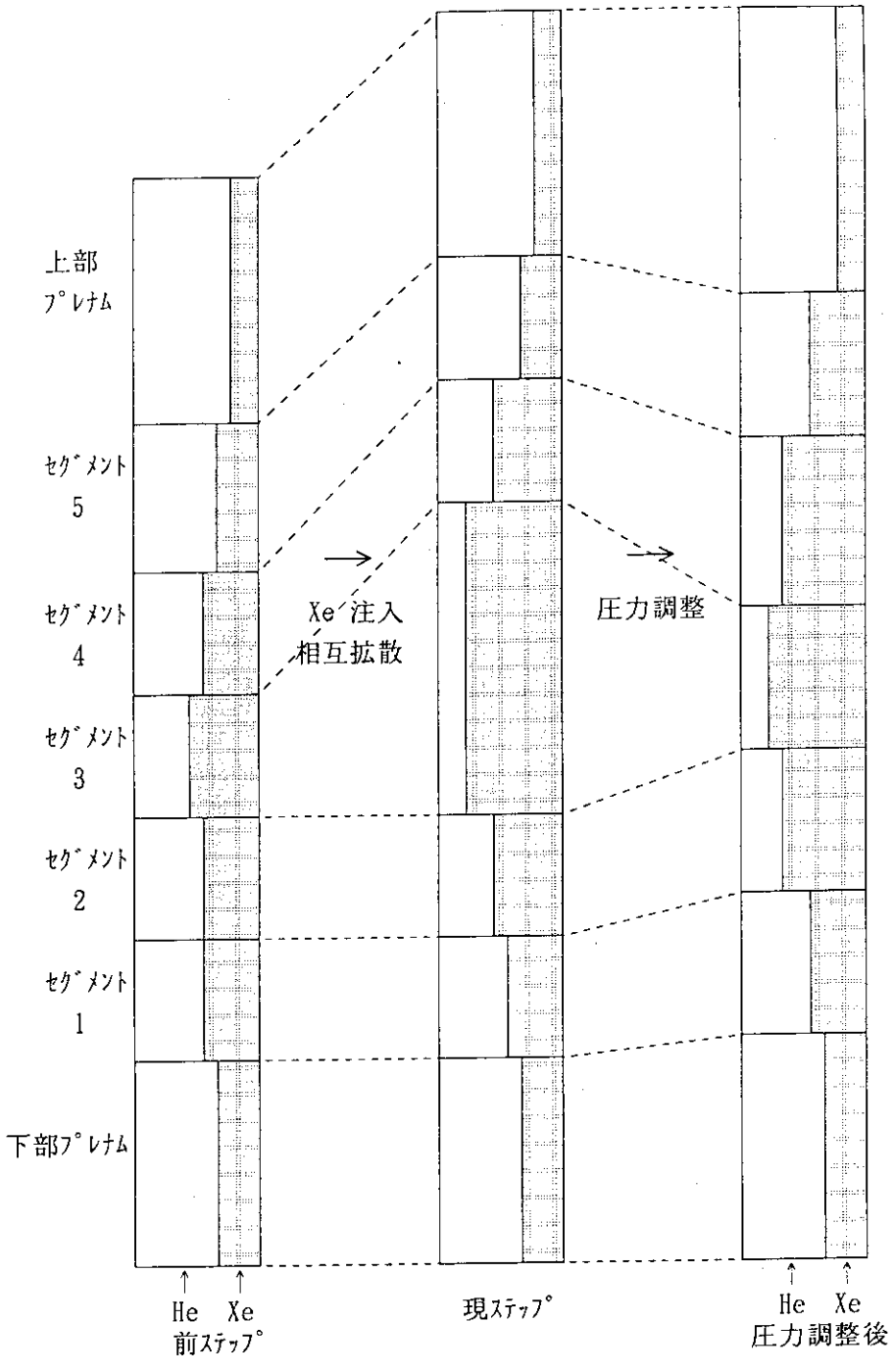


図２．２８　圧力調整の計算（縦軸・モル数）

（4）－6　ガス圧力

燃料棒内ガスは理想気体としてふるまい、圧力は燃料棒内で一様であると仮定する。このとき、ガス圧力は次式で計算される。

$$P_{gas} = \frac{n_T \cdot R}{\dfrac{V_{pl}}{T_{pl}} + \sum_{j=1}^{M}\left(\dfrac{V^j_{gap}}{T^j_{gap}} + \dfrac{V^j_h}{T^j_{pi}} + \dfrac{V^j_{int}}{T^j_{av}}\right)} \qquad (2.1.168)$$

ここで、　P_{gas} ：　燃料棒内ガス圧（Pa）

n_T ：　全ガスモル数（モル）

R ：　ガス定数、8.314 $Joule/K \cdot mole$

V_{pl} ：　プレナム容積（m^3）

T_{pl} ：　プレナムガス温度（K）

T_w ：　冷却水温度（K）

V^j_{gap} ：　軸方向セグメント j　のギャップ容積（m^3）

V^j_h ：　軸方向セグメント j　の中心孔容積（m^3）

V^j_{int} ：　スタック内部の開気ガス容積（m^3）

T^j_{gap} ：　軸方向セグメント j　のギャップ温度（K）

$= 0.5(T^j_{ps} + T^j_{ci})$

T^j_{pi} ：　軸方向セグメント j　の中心温度（K）

T^j_{av} ：　軸方向セグメント j　のペレット体積平均温度（K）

開気ガス容積V^j_{int}　は、ディッシュ部容積、チャンファ部容積、ペレット端面間ギャップ容積およびクラック面間容積（＝クラック空隙空間容積）などを含む。

（5）　タイムステップの更新

タイムステップ幅は、コード内で自動的に制御され、定常解による制限Δt_1、ガス拡散による制限Δt_2、非定常温度計算による制限Δt_3により決定される。ここで$\Delta t_1 \geqq \Delta t_2 \geqq \Delta t_3$である。

表2．4　タイムステップ幅の決定因子

時間増分	状態	決　定　因　子
Δt_1	定常	ＦＰ放出、ギャップ変化（線出力、燃焼度）
Δt_2	ガスの拡散	拡散定数、濃度勾配
Δt_3	伝熱	比熱の効果

①Δt_1は定常状態のタイムステップ幅であり、解が安定するために、出力変化が10W/cm、燃焼度変化が50～500MWd/t（パラメータ計算で決定する）に収まるように決定される。これは、サブルーチンＰＨＩＳＴで行う。さらに、全要素の変形計算においてクリープ計算での発散を防ぐ制約としてΔt_1を決定している。

②Δt_2はガスの拡散のタイムステップ幅で100msまたはΔt_1を上限として、各セグメントの平衡に達するまでの時間と、セグメント間の最大移動量、圧力調整条件で決定する時間のうちもっとも短いものをΔt_2として決定する。

セグメント毎の平衡に達するまでの時間は、(2.1.145)式により、

$$\Delta t_j^1 = \frac{(n_{1,j} - \bar{n}_{1,j}) V_j}{J_{1,R} - J_{1,S}} \tag{2.1.169}$$

である。ここで添字iはセグメント番号である。

次に、セグメント間の最大移動量から決定される時間を考える。セグメント間の最大移動モル数 N_{max} を基準とすれば、$(J_{1,R})_j = (J_{1,S})_{j-1}$ であることから、$(J_{1,R})_j$ を用いて記述すれば、

$$\Delta t_j^2 = \frac{N_{max}}{(J_{1,R})_j} \tag{2.1.170}$$

である。

さらに圧力調整（ガスの流動）条件から決まる時間を考える。EXBURN-Ｉでは、FEMAXI-Ⅳと同様、圧力平衡は瞬時に達せられると仮定している。この仮定のために計算においてガスがセグメント間を往来することによる数値的振動が生じることが考えられる。この条件は解の振動を防ぐための条件である。そのために、各セグメントにおけるガス放出量に対する制限を与える。セグメント毎のガス放出速度（mol/s）をβとすると、制限は、

$$\Delta t_j^3 = \frac{N_{max}}{\beta_j} \tag{2.1.171}$$

となる。これらの条件からΔt_2 は、

$$\Delta t_{21} = min(\Delta t_1^1, \Delta t_2^1, \cdots, \Delta t_n^1) \cdot \eta_2 \tag{2.1.172a}$$
$$\Delta t_{22} = min(\Delta t_1^2, \Delta t_2^2, \cdots, \Delta t_n^2) \tag{2.1.172b}$$
$$\Delta t_{23} = min(\Delta t_1^3, \Delta t_2^3, \cdots, \Delta t_n^3) \tag{2.1.172c}$$

$$\Delta t_2 = min(\Delta t_{21}, \Delta t_{22}, \Delta t_{23}) \tag{2.1.173}$$

で与えられる。ここで η_2 と(2.1.170)式中の N_{max} は組み込みの制御パラメータである。また、

(2.1.172)式中の N_{max} については、(2.1.170)式中の N_{max} とは同じものとして扱い、各セグメントにおける圧力上昇を基に決定する。前段の計算の終了時におけるセグメントiの体積V_i 、温度T_i からセグメントiの移動モル数を、

$$N_{max,i} = \frac{P_{gas} \cdot V_i}{R\ T_i} \cdot \eta \qquad (2.1.174)$$

で与える。P_{gas} は前段のガス圧力、η は制御パラメータである。最大移動モル数 は、これらから、

$$N_{max} = min(N_{max,1}, N_{max,2}, \cdots N_{max,n}) \qquad (2.1.175)$$

で与えられる。

最後に、Δt_3 の決定方法を示す。Δt_3 はΔt_2 をさらに細分割した、非定常温度計算部分に対する時間増分幅である。 Δt_3 は、

$$\Delta t_3 = \left\{\frac{(\Delta r^2)}{K_i}\right\}_{min} \cdot \eta_3 \qquad (2.1.176)$$

とする。ここで、Δr は径方向メッシュ幅、K_i は温度伝達率である。

制御パラメータはη_3 = 10～100 の範囲で決定する。なお、Δt_3 の決定は、Δt_1 中の線出力幅の制限で代替できるとも考えられ、自動的に$\Delta t_1 (= \Delta t_3)$ がある既定値の Δt_X 以下になったら非定常として扱い、出力保持後は、中心温度の変化幅 ΔT により次段の Δt_3 がある既定の Δt_Y 以上になったら自動的に定常計算に切り替えることにしている。

2．2 燃料棒全長での力学的ふるまい

2．2．1 有限要素モデル

図2．29に示すように、解析モデルの体系は2次元軸対称であり、燃料棒全長は軸方向セグメントに分割され、さらに各セグメントは半径方向のリング要素に分割される。応力・歪解析は、この体系において図2．30に示す四角形3自由度要素を用いた有限要素法により実施する。

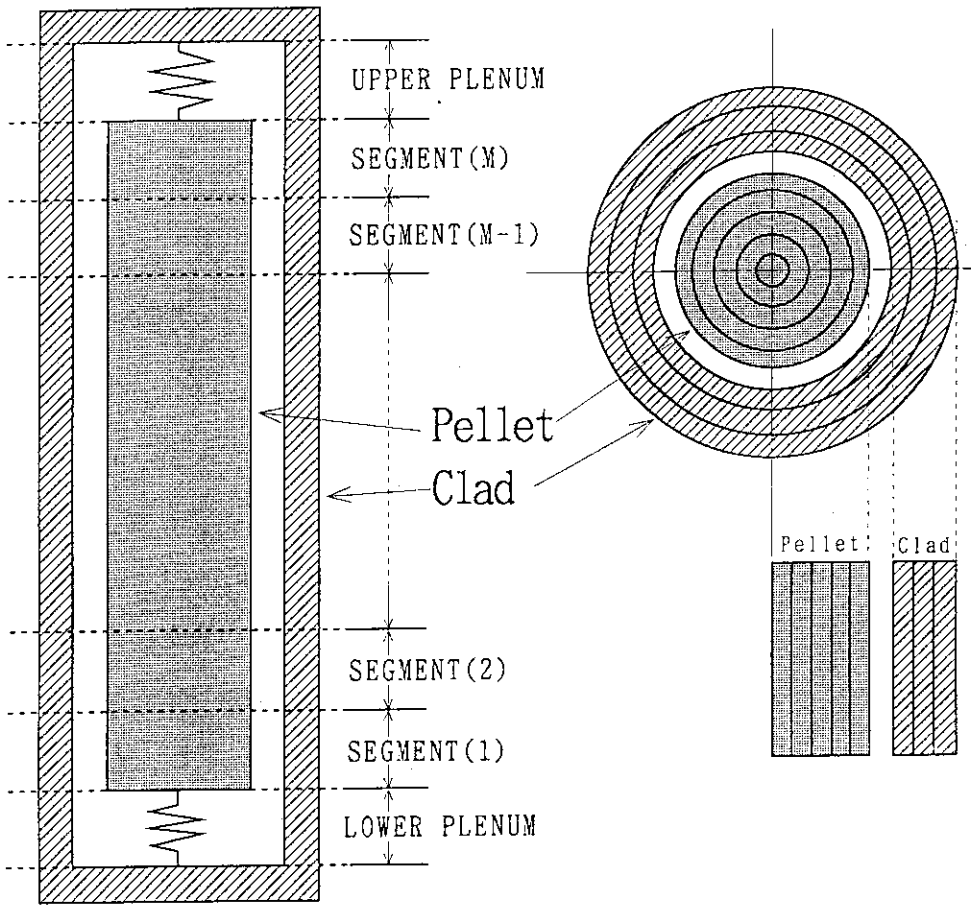


図2．29　形状モデル

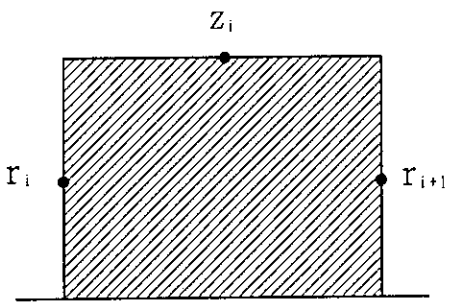


図2．30　四角形3自由度モデル

また、メッシュ切りと節点自由度の関係を１つの軸方向セグメントについて図２．３１に示す。

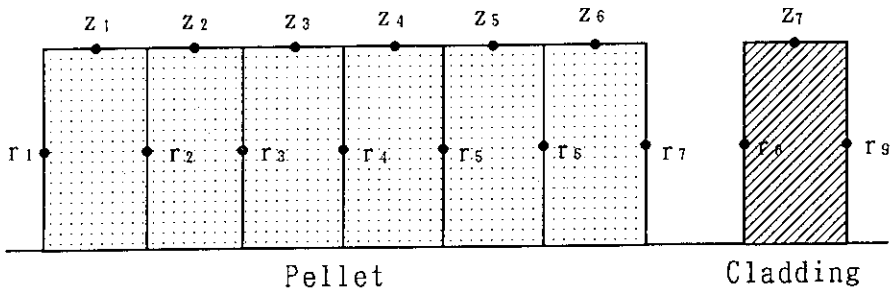


図２．３１　有限要素法メッシュ切り（１セグメント相当）

ペレットの軸方向自由度z_1～z_6については、各自由度の軸方向の変位が一様であると仮定し、代表して１つの自由度z_sで扱うこととし、

$$z_1 = z_2 = z_3 = z_4 = z_5 = z_6 (= z_s) \tag{2.2.1}$$

とおく。

ここで、以後の有限要素法の基本式で用いるこの要素の種々のマトリクスを求める。まず、ひずみ-変位マトリクス［B］を求める。径方向変位をυ、軸方向変位をωとすると、図２．２７で示した要素内の任意の点(r, z)における変位(υ, ω)は、

$$\upsilon = \frac{r_{i+1} - r}{r_{i+1} - r_i} \upsilon_i + \frac{r - r_i}{r_{i+1} - r_i} \upsilon_{i+1} \tag{2.2.2}$$

$$\omega = \frac{z}{z_i} \omega_i \tag{2.2.3}$$

で与えられる。

要素内のひずみ成分は、軸対称問題の場合、次のようになる。

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial\upsilon/\partial r \\ \upsilon/r \\ \partial\omega/\partial z \end{Bmatrix} \equiv [B]\{u\} \tag{2.2.4}$$

(2.2.2)～(2.2.3)式を用いれば、

$$\frac{\partial \upsilon}{\partial r} = -\frac{1}{r_{i+1} - r_i} \upsilon_i + \frac{1}{r_{i+1} - r_i} \upsilon_{i+1} \tag{2.2.5}$$

$$\frac{\upsilon}{r} = \frac{r_{i+1} - r}{r(r_{i+1} - r_i)} \upsilon_i + \frac{r - r_i}{r(r_{i+1} - r_i)} \upsilon_{i+1}$$

である。ここでr を要素中央の径方向座標$\frac{r_i+r_{i+1}}{2}$ とおくと、

$$\frac{v}{r} = \frac{r_{i+1}-\frac{r_i+r_{i+1}}{2}}{\frac{r_i+r_{i+1}}{2}(r_{i+1}-r_i)} v_i + \frac{\frac{r_i+r_{i+1}}{2}-r_i}{\frac{r_i+r_{i+1}}{2}(r_{i+1}-r_i)} v_{i+1}$$

$$= \frac{1}{r_i+r_{i+1}} v_i + \frac{1}{r_i+r_{i+1}} v_{i+1} \tag{2.2.6}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial z} = \frac{1}{z_i} \omega_i \tag{2.2.7}$$

となる。(2.2.5)～(2.2.7)式を(2.2.4)式に代入すれば、

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{r,i} \\ \varepsilon_{\theta,i} \\ \varepsilon_{z,i} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_{i+1}-r_i} & \frac{1}{r_{i+1}-r_i} & 0 \\ \frac{1}{r_{i+1}+r_i} & \frac{1}{r_{i+1}+r_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{z_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_i \\ v_{i+1} \\ \omega_i \end{Bmatrix} \tag{2.2.8}$$

を得る。

したがって、［B］マトリクスの成分として

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_{i+1}-r_i} & \frac{1}{r_{i+1}-r_i} & 0 \\ \frac{1}{r_{i+1}+r_i} & \frac{1}{r_{i+1}+r_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{z_i} \end{bmatrix} \tag{2.2.9}$$

を得る。

また、各要素の体積V_i は、

$$V_i = \pi(r_{i+1}^2 - r_i^2) z_i \tag{2.2.10}$$

で与えられる。

次に、応力-ひずみマトリクス［C］をもとめる。応力-ひずみ関係式は、

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon^e\} \tag{2.2.11}$$

で表される。［D］は、ひずみ-応力マトリクスと呼ばれ、要素の剛性を表す。この〔D〕マトリクスの逆行列として〔C〕マトリクスを定義すればこの関係式は、

$$\{\Delta\varepsilon^e\} = [C]\{\Delta\sigma\} \tag{2.2.12}$$

と書け、［C］マトリクスは、

$$[C] = \frac{1}{E}\begin{bmatrix} 1 & -\upsilon & -\upsilon \\ -\upsilon & 1 & -\upsilon \\ -\upsilon & -\upsilon & 1 \end{bmatrix} \tag{2.2.13}$$

で与えられる。ここでE はヤング率、υ はポアソン比である。

ここで、基本式の解法の概略を示す。外力を$\{F\}$ 、初期ひずみベクトルを$\{\Delta\varepsilon_o\}$とすると、第$n+1$ ステップにおける平衡方程式は、仮想仕事の原理より、

$$\{F_{n+1}\} = \int [B]^T \{\sigma_{n+1}\}\, dV \tag{2.2.14}$$

で与えられる。未知量と既知量を明確に区別するため応力増分$\{\Delta\sigma\}$ を使えば、

$$\{F_{n+1}\} = \int [B]^T\{\sigma_{n+1}\}\, dV + \int [B]^T\{\Delta\sigma_{n+1}\}\, dV$$

$$\int [B]^T\{\Delta\sigma_{n+1}\}\, dV = \{F_{n+1}\} - \int [B]^T\{\sigma_n\}\, dV \tag{2.2.15}$$

となる。さらに、(2.2.11)式を用いて、未知量をひずみベクトルとし、既知量である初期ひずみ増分$\{\Delta\varepsilon_0\}$ を分離する。

$$\int [B]^T[D]\{\Delta\varepsilon^e_{n+1}\}\, dV = \{F_{n+1}\} - \int [B]^T\{\sigma_n\}\, dV$$

$$\int [B]^T[D]\{\Delta\varepsilon_{n+1} - \Delta\varepsilon_{o,n+1}\}\, dV = \{F_{n+1}\} - \int [B]^T\{\sigma_n\}\, dV$$

$$\int [B]^T[D]\{\Delta\varepsilon_{n+1}\}\, dV = \{F_{n+1}\} + \int [B]^T[D]\{\Delta\varepsilon_{o,n+1}\}\, dV - \int [B]^T\{\sigma_n\}\, dV \tag{2.2.16}$$

(2.2.4)式を代入すれば、

$$\int [B]^T[D][B]\, dV \cdot \{\Delta u_{n+1}\}$$

$$= \{F_{n+1}\} + \int [B]^T[D]\{\Delta\varepsilon_{o,n+1}\}\, dV - \int [B]^T\{\sigma_n\}\, dV \tag{2.2.17}$$

となり、未知量を積分から繰り出すことができる。結局、

$$\sum_{i=1}^{M}[B_i]^T[D_i][B_i]\Delta V_i \cdot \{\Delta u_i\}$$

$$= \{F_{n+1}\} + \sum_{i=1}^{M}[B_i]^T[D_i]\{\Delta \varepsilon_{0}{}^{i}{}_{n+1}\}\Delta V_i - \sum_{i=1}^{M}[B_i]^T\{\sigma_i^{i}\}\Delta V_i \qquad (2.2.18)$$

（Mは要素総数）

とすることにより、変位増分ベクトル$\{\Delta u_i\}$を得ることができる。

実際に計算で用いているモデルでは、クリープ、塑性について陰解法を用いているため、さらに複雑な解法を要する。

次項に、基本式の取扱いについて示す。

2.2.2 基本式

時刻t_{n+1}における平衡条件は、仮想仕事の原理より次のように表される。

$$\int_V [B]^T\{\sigma_{n+1}\}dV - \{F_{n+1}\} = 0 \qquad (2.2.19)$$

ここで、

$[B]$ ： ひずみ－変位マトリクス

$\{\sigma_{n+1}\}$ ： 時刻t_{n+1}における応力ベクトル

$\{F_{n+1}\}$ ： 時刻t_{n+1}における外荷重ベクトル

である。

時間増分$\Delta t_{n+1}(=t_{n+1}-t_n)$における弾性ひずみ増分と応力増分の間の関係式は［C］が時間依存することを考慮して以下のように書ける。

$$\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{e}\} = [C_{n+\theta}]\{\Delta \sigma_{n+1}\} \qquad (2.2.20)$$

ここで $[C_{n+\theta}] = (1-\theta)[C_n] + \theta[C_{n+1}] \qquad (\theta = \frac{1}{2})$

$\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{e}\}$ ： 弾性ひずみ増分ベクトル

$[C_{n+\theta}]$ ： ひずみ－応力マトリクス

$\{\Delta \sigma_{n+1}\}$ ： 応力増分ベクトル

である。

また、弾性ひずみ増分は次のように表される。

$$\{\Delta\varepsilon^{e}_{n+1}\} = \{\Delta\varepsilon_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{th}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{rel}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{den}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{sw}_{n+1}\} -\{\Delta\varepsilon^{HP}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\} \tag{2.2.21}$$

ここで、

$\{\Delta\varepsilon_{n+1}\}$ ： 全ひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{th}_{n+1}\}$ ： 熱ひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{rel}_{n+1}\}$ ： ペレットリロケーションひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{den}_{n+1}\}$ ： ペレットやきしまりひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{sw}_{n+1}\}$ ： ペレットスウェリングひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{HP}_{n+1}\}$ ： ペレットホットプレスひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}$ ： 塑性ひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\}$ ： クリープひずみ増分ベクトル

である。このうち応力に依存しないひずみ増分ベクトルについては初期ひずみ増分ベクトルとして次のようにまとめる。

$$\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\} = \{\Delta\varepsilon^{th}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{rel}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{den}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{sw}_{n+1}\} \tag{2.2.22}$$

$\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}$ ： 初期ひずみ増分ベクトル

さらに、ペレットのホットプレスひずみ増分ベクトルを、2.2.4節で詳述するように、ペレットの塑性、クリープひずみ増分ベクトルに繰り込んで扱うこととすれば、(2.2.21)式を次のように書くことができる。

$$\{\Delta\varepsilon^{e}_{n+1}\} = \{\Delta\varepsilon_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\} \tag{2.2.23}$$

ここで、

$\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}$ ： ホットプレスひずみを含めた塑性ひずみ増分ベクトル

$\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\}$ ： ホットプレスひずみを含めたクリープひずみ増分ベクトル

である。

一方、全ひずみは節点変位と次のように関係付けられる。

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}\} = [B]\{\Delta u_{n+1}\} \tag{2.2.24}$$

ここで、$\{\Delta u_{n+1}\}$ は節点変位増分ベクトルである。

(2.2.21)式及び(2.2.22)式をを用いれば応力-ひずみ関係式(2.2.20)式は、

$$[C_{n+\theta}]\{\Delta\sigma_{n+1}\}-[B]\{\Delta u_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\} = 0 \qquad (2.2.25)$$

となる。(2.2.23)式は次のように書き換えられる。

$$[C_n]\{\Delta\sigma_{n+1}\}+([C_{n+\theta}]-[C_n])\{\Delta\sigma_{n+1}\}-[B]\{\Delta u_{n+1}\}$$
$$+\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\} = 0 \qquad (2.2.26)$$

さて、第n＋1ステージの計算において、第i回目の Newton-Raphson 反復計算を終了し、第i＋1回目の反復を行っているとき、(2.2.26)式を次のように書く。

$$[C_n](\{\sigma^{i}_{n+1}\}+\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}-\{\sigma_n\})-[B]\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}$$
$$+\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{p,i+1}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{c,i+1}_{n+1}\}+[\Delta C^{i}_{n+\theta}](\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_n\}) = 0 \qquad (2.2.27)$$

ここで

$$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} = \{\sigma^{i+1}_{n+1}\} - \{\sigma^{i}_{n+1}\}$$
$$\{\Delta C^{i}_{n+\theta}\} = \{C^{i}_{n+\theta}\} - [C_n]$$

である。

また、このとき平衡条件(2.2.19)式は次のようになる。

$$\int_V [B]^T\{\sigma^{i}_{n+1}\}dV+\int_V [B]^T\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}dV = \{F_{n+1}\} \qquad (2.2.28)$$

(2.2.27)、(2.2.28)式より、$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$ 及び$\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}$ が決定される。

上、下プレナムのバネ要素に対しての扱いは、自由度は軸方向のみ、ひずみは弾性初期ひずみ（熱ひずみ）のみに許容することとなる。したがって、(2.2.25)式において

$$\{\Delta\varepsilon^{p}_{n+1}\} = 0,\ \{\Delta\varepsilon^{c}_{n+1}\} = 0$$

として

$$[C_{n+\theta}]\{\Delta\sigma_{n+1}\} - [B]\{\Delta u_{n+1}\} + \{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\} = 0 \qquad (2.2.29)$$

を得る。さらに、(2.2.29)式は、

$$[C_{n+\theta}](\{\sigma^{i}_{n+1}\}+\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}-\{\sigma_n\}) - [B]\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\} = 0$$

と書くことができる。

ここで $[D_{n+\theta}] = [C_{n+\theta}]^{-1}$ とおくと、

$$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} = [D_{n+\theta}](\{B\}\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-[C_{n+\theta}](\sigma^{i}_{n+1})-(\sigma_n))$$

となる。これを(2.2.28)式に代入すれば、

$$\int_V [B]^T [D_{n+\theta}]([B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - \{\Delta \varepsilon_{n+1}^{o}\} - [C_{n+\theta}](\{\sigma_{n+1}^{i}\} - \{\sigma_n\}))\, dV$$

$$+ \int_V [B]^T \{\sigma_{n+1}^{i}\}\, dV = \{F_{n+1}\} \tag{2.2.30}$$

未知量について整理すれば、

$$\int_V [B]^T [D_{n+\theta}][B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\}\, dV$$

$$= \{F_{n+1}\} + \int_V [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{o}\}\, dV + \int_V [B]^T (\{\sigma_{n+1}^{i}\} - \{\sigma_n\})\, dV$$

$$- \int_V [B]^T \{\sigma_{n+1}^{i}\}\, dV \tag{2.2.31}$$

となり、結局、

$$\int_V [B]^T [D_{n+\theta}][B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{F_{n+1}\} + \int_V [B]^T [D_{n+\theta}]\{\Delta \varepsilon_{n+1}^{o}\}\, dV$$

$$- \int_V [B]^T \{\sigma_n\}\, dV \tag{2.2.32}$$

を得る。

塑性クリープひずみを考慮していないため、$[D_{n+\theta}] \cdot [C_{n+\theta}] = [I]$ として(2.2.32)式を導いている。

(2.2.32)式ではベクトル表示をしてあるが、自由度は軸方向成分のみである。

外力は具体的には、

$$F_{n+1} = \pi r_{co}^2 P_{water,\, n+1} - \pi r_{ci}^2 P_{gas,\, n+1} \tag{2.2.33}$$

で与えられる。

ここで、

r_{co}	:	被覆管外半径（m）
r_{ci}	:	被覆管内半径（m）
$P_{water,\, n+1}$	:	第n+1 ステージでのクーラント圧力（Pa）
$P_{gas,\, n+1}$	:	第n+1 ステージでのプレナム圧力（Pa）

である。また、(2.2.32)式の右辺第３項は

$$\int [B]^T \{\sigma_n\}\, dV = k(v_{pl,\, n} - v_{u,\, n}) \tag{2.2.34}$$

で与えられる。ここで、

k ： バネ定数（N／m）

$u_{pl,n}$ ： 第n ステージでのプレナム上端変位（m）

$u_{u,n}$ ： 第n ステージでのペレット（又は被覆管）の上端部変位（m）

である。

下部プレナムの場合についても同様に扱う。

2．2．3 ペレットクラック

クラックが発生したペレットのふるまいは、2．1．3項（3）～（5）において説明したように、ペレットの剛性低下の方法で近似する。すなわち、方向 i （軸方向、周方向あるいは径方向）が引張状態のとき、その方向に垂直な面にクラックが生じ、i 方向ヤング率は小さな値（物性値の約1／100）になると仮定する。

また、圧縮状態のときには、図2．32[1]に示すように、リロケーションによるひずみに依存して弾性が回復し、リロケーションによる隙間を埋め尽くすまでペレット断片が圧縮されたとき完全な弾性（本来の物性値としての弾性係数）を回復すると仮定する。

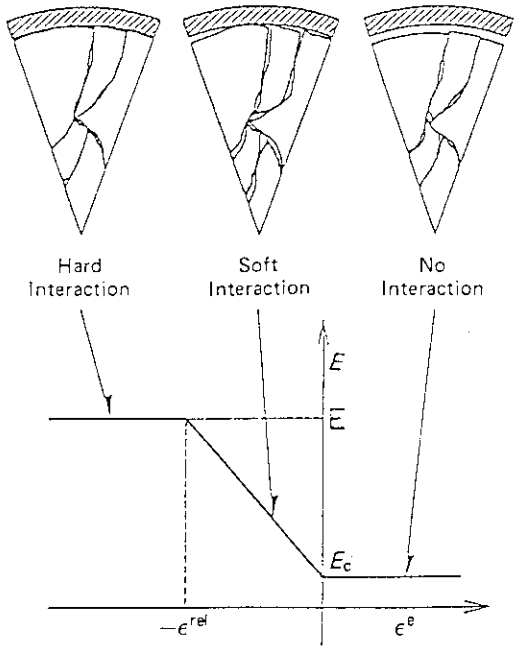


図2．32 クラックが発生したペレットの剛性モデル

ペレットの剛性マトリクス〔C〕は次のように表す。

$$
[C] = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_r} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ & \frac{1}{E_z} & -\frac{\nu}{E} & 0 \\ & & \frac{1}{E_\theta} & 0 \\ \text{Sym.} & & & \frac{4(1+\nu)}{E_r+E_z} \end{pmatrix} \qquad (2.2.35)
$$

ここで、

E_r ： 径方向ヤング率(Pa)

E_z ： 軸方向ヤング率(Pa)

E_θ ： 周方向ヤング率(Pa)

E ： クラックのないペレットのヤング率（物性値）(Pa)

ν ： ポアソン比(-)

である。

各方向のヤング率E_iは次のように表す。

$$
E_i = \begin{cases} E_c & , \ \varepsilon_i - \varepsilon_i^0 > 0 \text{ のとき} \\ \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_i^0}{\varepsilon_i^{rel}}(E - E_c) + E_c & , \ -\varepsilon_i^{rel} \leqq \varepsilon_i - \varepsilon_i^0 \leqq 0 \text{ のとき} \\ E & , \ \varepsilon_i - \varepsilon_i^0 < -\varepsilon_i^{rel} \text{ のとき} \end{cases} \qquad (2.2.36)
$$

ここで、 ε_i ： i 方向ひずみ

ε_i^0 ： i 方向初期ひずみ

ε_i^{rel} ： i 方向の初期リロケーションひずみ量（入力データ）

E_c ： クラックしたペレットの引張状態での実効的なヤング率

である。

初期状態（燃焼度＝0、出力＝0、このとき$\varepsilon_i - \varepsilon_i^0 = 0$）において、ペレットのヤング率$E_i$は小さな値$E_c$である。出力上昇に伴うペレットふるまいの変化は、図２．３２に模式的に示すように、次のように記述される。

① 非接触のとき、小さなヤング率のためペレットの熱膨張に対する弾性的拘束が弱く、ペレットは固有の熱膨張率にほぼ従って熱変形し、ギャップを閉鎖する。

② 接触が生じると、ペレット内に被覆管の拘束力によって圧縮ひずみが増加してくる。このとき、リロケーションによってペレットクラック面に生じていたすきまが圧縮されるにつれて、

剛性が大きくなる過程がヤング率を直線的に変化させることによって近似される。

すなわちここでは、クラックし、リロケーションしたペレットと被覆管の緩慢な力学的相互作用が次第に強まっていくプロセスをモデル化している。

③ クラック面のすきまが十分に圧縮消滅されると、ペレットの圧縮剛性は完全に回復すると考える。ここではペレットと被覆管の強い相互作用をモデル化している。

2.2.4 クリープ

被覆管及びペレットのクリープ式は、一般的な形として次のように書ける。

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{C} = f\,(\bar{\sigma},\ \bar{\varepsilon}^{H},\ T,\ \phi,\ F) \qquad (2.2.37)$$

ここで、

$\dot{\bar{\varepsilon}}^{C}$	:	相当クリープ速度(1/s)
$\bar{\sigma}$	:	相当応力(Pa)
$\bar{\varepsilon}^{H}$	:	クリープ硬化パラメータ(-)
T	:	温度(K)
ϕ	:	高速中性子束(n/m²・s)
F	:	核分裂速度(fission/m³・s)

である。

クリープ硬化パラメータが相当クリープひずみに等しいと仮定すると、硬化パラメータの変化率は、

$$\dot{\bar{\varepsilon}}^{H} \equiv f \qquad (2.2.38)$$

と書ける。(2.2.37)式は単軸応力低下におけるクリープ式であるが、これを多軸応力状態に一般化すれば、クリープ速度ベクトル$\{\dot{\varepsilon}^{C}\}$は、応力ベクトル、クリープ硬化パラメータのベクトル関数として表される。このベクトル関数を$\{\beta\}$とおけば、$\{\dot{\varepsilon}^{C}\}$は、

$$\{\dot{\varepsilon}^{C}\} = \{\beta(\{\sigma\},\ \bar{\varepsilon}^{H})\} \qquad (2.2.39)$$

と書ける。ただし、T, ϕ およびF は既知パラメータとして扱われるので省略した。

いま、時刻t_n の計算を終了し、次の時間増分幅をΔt_{n+1} として時刻t_{n+1} の計算を行っているとき、クリープひずみ増分ベクトルは、次のように書ける。

$$\{\Delta\varepsilon^{C}_{n+1}\} = \Delta t_{n+1}\{\dot{\varepsilon}^{C}_{n+\theta}\} = \Delta t_{n+1}\{\beta(\{\sigma_{n+\theta}\},\ \bar{\varepsilon}^{H}_{n+\theta})\} \qquad (2.2.40)$$

ここで、

$$\{\sigma_{n+\theta}\} = (1-\theta)\{\sigma_n\} + \theta\{\sigma_{n+1}\}$$

$$\overline{\varepsilon}^{H}_{n+\theta} = (1-\theta)\,\overline{\varepsilon}^{H}_{n} + \theta\,\overline{\varepsilon}^{H}_{n+1}$$

（ただし、$0 \leqq \theta \leqq 1$）

である。

たとえば、$\theta=0$ とすると上式は増分の始点の状態量（既知量）で定まるクリープ速度を用いる方法（初期ひずみ法）となる。この場合計算手順は単純となるが、数値的不安定になりやすく、高クリープ速度下において時間増分幅を極めて小さくとらねばならないことが知られている。

一方、$\theta \neq 0$ とすると、未知量を含む表式となり手順が複雑化するが、θ が1に近づくにつれて数値解の安定性が向上する。（$\theta \neq 0$ とする方法は陰解法と呼ばれる）。

本コードではθ を 0～1 の任意の値を指定できるよう一般性のある定式化を行っている。

いま、時刻t_n から t_{n+1} の計算において、Newton-Raphson 法による反復の第 i 回目を終了し第 i ＋ 1 回目の反復を行っているとき、クリープ速度ベクトルは次のように書くことができる。

$$\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i+1}_{n+\theta}\} = \{(\beta\{\sigma^{i}_{n+\theta}\} + \theta\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\},\ \overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+\theta} + \theta d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1})\}$$

$$= \frac{3f\left(\overline{\sigma}(\{\sigma^{i}_{n+\theta}\} + \theta\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}),\ \overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+\theta} + \theta d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1}\right)}{2\overline{\sigma}(\{\sigma^{i}_{n+\theta}\} + \theta\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\})}$$

$$\times\ \sigma'(\{\sigma^{i}_{n+\theta}\} + \theta\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}) \qquad (2.2.41)$$

ここで、$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$ および $d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1}$ は反復による修正量である。

ところで、クリープ式(2.2.39)は、流れ則(flow-rule)を用いて各軸成分の関数形が同形であることにより、(2.2.38)式を用いて、

$$\{\dot{\varepsilon}^{C}\} = \frac{3f}{2\overline{\sigma}}\{\sigma'\} \qquad (2.2.42)$$

と書くことができる。

ここで、　　$\{\sigma'\}$　：　偏差応力ベクトル

である。(2.2.41)式に流れ則を適用し、1次のテイラー展開を取ることによって次のように近似される。

$$\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i+1}_{n+\theta}\} = \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} f^{i}_{n+\theta}\{\sigma'^{i}_{n+\theta}\}$$

$$- \frac{3}{2(\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta})^{2}} f^{i}_{n+\theta} \{\sigma'_{n+\theta}\} \left[\frac{\partial \overline{\sigma}}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} f^{i}_{n+\theta} \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \{\sigma'_{n+\theta}\} \left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta} \left[\frac{\partial \overline{\sigma}}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \{\sigma'^{i}_{n+\theta}\} \left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta} \theta d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1}$$

$$= \left\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i}_{n+\theta}\right\} + \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta} - \frac{f^{i}_{n+\theta}}{\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}}\right) \left[\sigma' \frac{\partial \overline{\sigma}}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+\theta}\}$$

$$+ \frac{3f^{i}_{n+\theta}}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \{\sigma'^{i}_{n+\theta}\} \left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta} \theta d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1} \qquad (2.2.43)$$

上式を、$\{\sigma'\} = \frac{2\overline{\sigma}}{3} \{\frac{\partial \overline{\sigma}}{\partial \sigma}\}$ なる関係を用いて書き直すと、

$$\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i+1}_{n+\theta}\} = \{\dot{\varepsilon}^{C,\,i}_{n+\theta}\}$$

$$+ \frac{9}{4(\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta})} \left(\left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta} - \frac{f^{i}_{n+\theta}}{\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}}\right) (\sigma'_{i}\sigma'_{j})^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3f^{i}_{n+\theta}}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \left[\frac{\partial \sigma'}{\partial \sigma}\right]^{i}_{n+\theta} \theta \{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+ \frac{3}{2\overline{\sigma}^{i}_{n+\theta}} \{\sigma'^{i}_{n+\theta}\} \left(\frac{\partial f}{\partial \overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta} \theta d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1} \qquad (2.2.44)$$

一方、クリープ硬化増分は(2.2.38)式より、次のように表される。

$$\Delta \overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+\theta} = \Delta t_{n+1}\, f\left(\overline{\sigma}^{i+1}_{n+\theta},\ \overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+\theta}\right)$$

$$= \Delta t_{n+1}\, f\left(\overline{\sigma}(\{\sigma^{i}_{n+\theta}\} + \theta\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}),\ \overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+\theta} + \theta\, d\overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+1}\right)$$

上式は、1次のテイラー展開をとって、次のように近似される。

$$\Delta\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+\theta} = \Delta\overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+\theta} + d\overline{\varepsilon}^{\,i+1}_{n+1}$$

$$= \Delta t_{n+1}\cdot f^{i}_{n+\theta} + \theta\ \Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta}\left\lfloor\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}$$

$$+\ \theta\Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta}\ d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1} \qquad (2.2.46)$$

ここで$\Delta\overline{\varepsilon}^{H,\,i}_{n+\theta} = \Delta t_{n+1}\ f^{i}_{n+\theta}$ であるから、 $d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1}$ は次のように表される。

$$d\overline{\varepsilon}^{H,\,i+1}_{n+1} = \frac{\theta\Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta}\left\lfloor\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}}{1-\theta\Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta}} \qquad (2.2.47)$$

これを(2.2.44)式に代入し整理すると、

$$\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i+1}_{n+\theta}\} = \{\dot{\varepsilon}^{C,\,i}_{n+\theta}\} + F_1\theta(\sigma'_i\sigma'_j)^{i}_{n+\theta}\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} + F_2\theta\left[\frac{\partial\sigma'}{\partial\sigma}\right]^{i}_{n+1}\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} \qquad (2.2.48)$$

ここで、

$$F_1 = \frac{9}{4(\overline{\sigma}^{\,i}_{n+\theta})^2}\left(\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta} - \frac{f^{i}_{n+\theta}}{\overline{\sigma}^{\,i}_{n+\theta}} + \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta}\theta\Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\sigma}}\right)^{i}_{n+\theta}}{1-\theta\Delta t_{n+1}\left(\frac{\partial f}{\partial\overline{\varepsilon}^{H}}\right)^{i}_{n+\theta}}\right) \qquad (2.2.49)$$

$$F_2 = \frac{3f^{i}_{n+\theta}}{2\overline{\sigma}^{\,i}_{n+\theta}} \qquad (2.2.50)$$

である。

一方、クリープひずみ増分は次のように与えられる。

$$\{\Delta\varepsilon^{C,\,i+1}_{n+1}\} = \Delta t_{n+1}\{\dot{\varepsilon}^{C,\,i+1}_{n+\theta}\}$$

$$= \{\Delta\varepsilon^{C,\,i}_{n+1}\} + [C^{C,\,i}_{n+\theta}]\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} \qquad (2.2.51)$$

ただし、

$$[C^{C,\,i}_{n+\theta}] = \theta\Delta t_{n+1}\left(F_1(\sigma'_i\sigma'_j)^{i}_{n+\theta} + F_2\left[\frac{\partial\sigma'^{\,i}}{\partial\sigma}_{n+\theta}\right]\right)$$

(2.2.51)式がクリープひずみ増分の陰な表式である。本式を(2.2.25)式に代入し整理すると次式が得られる。

$$\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} = [\hat{D}_{n+\theta}^{i}]\Big([B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\overline{C}_{n+\theta}^{i}]\,(\{\sigma_{n+1}^{i}\} - \{\sigma_n\}) - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{0}\} - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{c_{i+1}}\} - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{p_{i+1}}\}\Big) \tag{2.2.52}$$

ただし、 $[\hat{D}_{n+1}^{i}] = ([\overline{C}_{n+1}^{i}] + [C_{n+1}^{c_i}])^{-1}$

$$\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} = \{u_{n+1}^{i}\} + \{du_{n+1}^{i+1}\} - \{u_n\}$$

である。

2.2.5 塑 性

被覆管とペレットの降伏条件は次のように表される。

$$h(\{\sigma\}) = K\,(\overline{\varepsilon}^{P},\ T) \tag{2.2.53}$$

ここで、 $\overline{\varepsilon}^{P}$ ： 相当塑性ひずみ（硬化パラメータ）

T ： 温度

K ： 降伏曲面の大きさ

h ： 降伏関数

である。

降伏関数 h は、被覆管の異方性とペレットの圧縮性（ホットプレス）を考慮して次のように表される。

$$h = \left[\frac{3}{2(F+G+H)}\{H(\sigma_r-\sigma_\theta)^2 + F(\sigma_\theta+\sigma_z)^2 + G(\sigma_z+\sigma_r)^2 + 2N\tau_{rz}^2\} + 3\alpha(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta)^2\right]^{\frac{1}{2}} \equiv \overline{\sigma} \tag{2.2.54}$$

ここで、 F、G、H、N ： 被覆管異方性係数、

τ_{rz} ： r z 平面にはたらくsheering stress、

α ： ペレットホットプレスパラメータ

である。

時刻t_n からt_{n+1} までの塑性ひずみ増分ベクトルは、流れ則を用いて次のように表される。

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{P}\} = \Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P}\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}_{n+\theta} \tag{2.2.55}$$

いま、第 i 回目の反復を終了して第 i ＋ 1 回目の反復のとき、降伏条件および流れ則は次のように書ける。

$$h(\{\sigma_n\}+\{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\}) = K(\overline{\varepsilon}_n^P + \Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1},\ T_n+\Delta T_{n+1}) \tag{2.2.56}$$

$$\{\Delta\varepsilon_{n+1}^{P,\,i+1}\} = \Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1}\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}_{n+1}^{i} \tag{2.2.57}$$

$\{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\}$，$\Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1}$ および ΔT_{n+1} について(2.2.56)式の１次のテイラー展開をとると次の近似式が得られる。

$$h(\{\sigma_n\}) + \left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor_{n+\theta}^{i}\cdot\{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\} = K(\overline{\varepsilon}_n^P\ \ T_n)$$

$$+\left(\frac{\partial K}{\partial\overline{\varepsilon}^P}\right)_{n+\theta}^{i}\Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1} + \left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}\Delta T_{n+1} \tag{2.2.58}$$

次の関係、 $\{\Delta\sigma_{n+1}^{i+1}\} = \{\sigma_{n+1}^{i}\} + \{d\sigma_{n+1}^{i+1}\} - \{\sigma_n\}$ (2.2.59)

を(2.2.58)式に代入し整理すると、

$$\Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1} = \frac{1}{\dot{H}_{n+\theta}^{i}}\left(\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor_{n+\theta}^{i}(\{\sigma_{n+1}^{i}\} - \{\sigma_n\}) + h(\{\sigma_n\}) - K(\overline{\varepsilon}_n^P, T_n)\right.$$

$$\left. - \left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}\Delta T_{n+1} + \left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor_{n+\theta}^{i}\{d\sigma_{n+1}^{i+1}\}\right) \tag{2.2.60}$$

ここで、

$$\dot{H}_{n+\theta}^{i} = \left(\frac{\partial K}{\partial\overline{\varepsilon}_P}\right)_{n+\theta}^{i} \tag{2.2.61}$$

である。 (2.2.60)式に(2.2.52)式を代入すると、

$$\dot{H}_{n+1}^{i}\,\Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1} + \left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}\Delta T_{n+1} - h(\{\sigma_n\}) + K(\overline{\varepsilon}_n^P,\ T_n)$$

$$= \left\lfloor\frac{\partial\sigma}{\partial\sigma}\right\rfloor_{n+\theta}^{i}(\{\sigma_{n+1}\} - \{\sigma_n\})$$

$$+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor_{n+\theta}^{i}(\hat{D}_{n+\theta}^{i})\left([B]\{\Delta u_{n+1}^{i+1}\} - [\overline{C}_{n+\theta}^{i}](\{\sigma_{n+1}^{i}\} - \{\sigma_n\}) - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{o}\}\right.$$

$$\left. - \{\Delta\varepsilon_{n+1}^{C,\,i}\} - \Delta\overline{\varepsilon}_{n+1}^{P,\,i+1}\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}_{n+\theta}^{i}\right) \tag{2.2.62}$$

本式を $\Delta\overline{\varepsilon}^{P,\,i+1}_{n+1}$ についてまとめると、

$$\Delta\overline{\varepsilon}^{P,\,i+1}_{n+1} = \frac{\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\left(B\right)\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-\left(\overline{C}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{C_i}_{n+1}\}\right)}{\dot{H}^{i}_{n+\theta}+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}}$$

$$+\frac{\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}\Delta T_{n+1}+h(\{\sigma_{n}\})-K(\overline{\varepsilon}^{P}_{n},T_{n})}{\dot{H}^{i}_{n+\theta}+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \qquad (2.2.63)$$

上式を、(2.2.57)式の関係を用いて、(2.2.52)式に代入すると次式が得られる。

$$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}=\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\left(B\right)\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-\left(\overline{C}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{C_i}_{n+1}\}\right)$$

$$-\frac{\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)}{\dot{H}^{i}_{n+\theta}+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}}$$

$$\times\left(\left(B\right)\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-\left(\overline{C}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{C_i}_{n+1}\}\right)$$

$$-\frac{\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left(\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}\Delta T_{n+1}+h(\{\sigma_{n}\})-K(\overline{\varepsilon}^{n}_{P},T_{n})\right)}{\dot{H}^{i}_{n+\theta}+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \qquad (2.2.64)$$

これを整理すると次のようになる。

$$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\}=\left(\hat{D}^{P,\,i}_{n+\theta}\right)\left(\left(B\right)\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-\left(\overline{C}^{i}_{n+\theta}\right)\left(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_{n}\}\right)-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{C_i}_{n+1}\}\right)$$

$$+\{S^{i}_{n+\theta}\}\Delta T_{n+1}-\{Z_1\}-\{Z_2\} \qquad (2.2.65)$$

ここで、

$$\left(\hat{D}^{P,\,i}_{n+\theta}\right)=\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)-\frac{\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)}{\dot{H}^{i}_{n+\theta}+\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}\left(\hat{D}^{i}_{n+\theta}\right)\left\{\frac{\partial h}{\partial\sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \qquad (2.2.66)$$

$$\{S^{i}_{n+\theta}\} = \frac{[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left(\frac{\partial K}{\partial T}\right)_{n+\theta}}{\dot{H}^{i}_{n+\theta} + \left\lfloor\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \tag{2.2.67}$$

$$\{Z_1\} = \frac{[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left\lfloor\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}(\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_n\})}{\dot{H}^{i}_{n+\theta} + \left\lfloor\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \tag{2.2.68}$$

$$\{Z_2\} = \frac{[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}\left(h(\{\sigma_n\})-K(\overline{\varepsilon}^{p}_{n}, T_n)\right)}{\dot{H}^{i}_{n+\theta} + \left\lfloor\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\rfloor^{i}_{n+\theta}[\hat{D}^{i}_{n+\theta}]\left\{\frac{\partial h}{\partial \sigma}\right\}^{i}_{n+\theta}} \tag{2.2.69}$$

である。

(2.2.65)式がペレットのクラック、クリープ及び塑性を考慮した構成方程式である。

以上の計算においては、ペレットと被覆管の降伏応力およびクリープ速度に関する物性値は、2．1．3項（接触力評価モデル）と同一の式を用いている。

2．2．6　剛性方程式

ペレットクラック、クリープおよび塑性を考慮した構成方程式(2.2.65)を再記する。

$$\{d\sigma^{i+1}_{n+1}\} = [\hat{D}^{p,i}_{n+\theta}]\Big([B]\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\}-[\overline{C}^{i}_{n+\theta}](\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_n\})-\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}-\{\Delta\varepsilon^{c,i}_{n+1}\}\Big)$$
$$+\{S^{i}_{n+\theta}\}\Delta T_{n+1}-\{Z_1\}-\{Z_2\} \tag{2.2.65}$$

(2.2.65)式を(2.2.26)式に代入し整理すると次のように書ける。

$$[K^{i}_{n+\theta}]\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\} = \{\Delta\hat{F}^{i}_{n+1}\} \tag{2.2.70}$$

(2.2.70)式が要素の剛性方程式である。ただし、

$$[K^{i}_{n+\theta}] = 2\pi\iint[B]^{T}[\hat{D}^{p,i}_{n+\theta}][B]\,rdrdz \tag{2.2.71}$$

$$\{\Delta\hat{F}^{i}_{n+1}\} = 2\pi\iint[B]^{T}[\hat{D}^{p,i}_{n+\theta}]\Big\{[\overline{C}^{i}_{n+\theta}](\{\sigma^{i}_{n+1}\}-\{\sigma_n\})$$

$$+\{\Delta\varepsilon^{o}_{n+1}\}+\{\Delta\varepsilon^{c,i}_{n+1}\}\Big\}\ rdrdz$$

$$-2\pi\iint[B]^{T}(\{S^{i}_{n+\theta}\}\ \Delta T_{n+1}-\{Z_{1}\}-\{Z_{2}\})\ rdrdz$$

$$+\ (\{F_{n+1}\}-2\pi\iint[B]^{T}\{\sigma^{i}_{n+1}\}\ rdrdz) \qquad (2.2.72)$$

である。

2．2．7　ペレット及び被覆管に作用する外力及び接触力

ペレット及び被覆管に作用する力を図２．３３のように扱う。

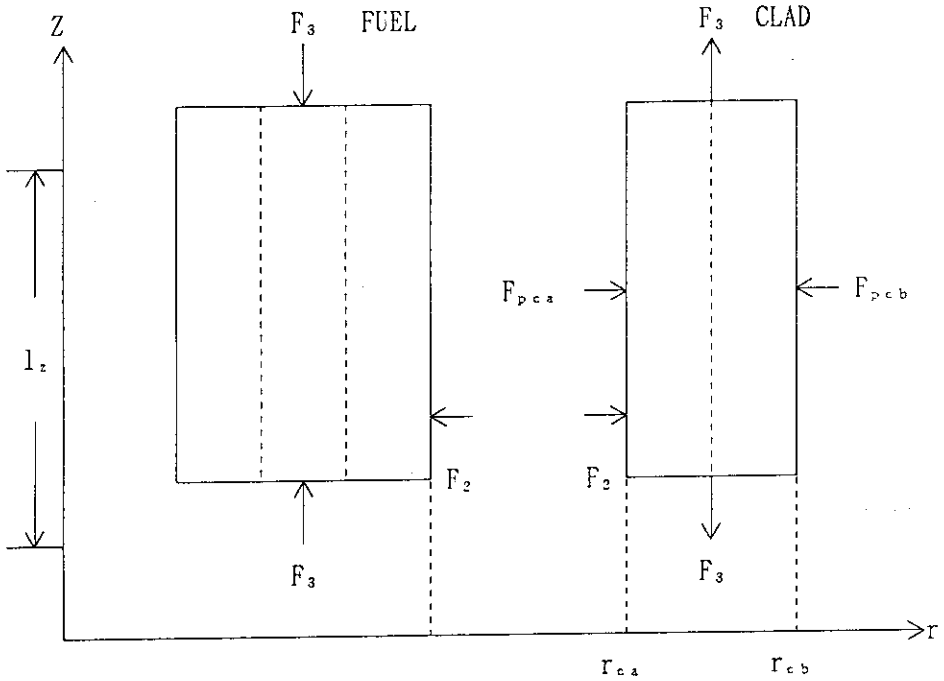


図 ２．３３ 燃料・被覆管に作用する力

ここで、

F_2　：　ペレット／被覆管接触力

F_3　：　軸力

F_{pca}　：　プレナムガス圧力

F_{pcb}　：　クーラント圧力

である。

ただし、ペレットと被覆管の間の接触力は、２．１．３項とは独立に計算する。

ペレットの割れによって、ペレット内部にもプレナムガス圧でガスが入り込んでいるため、プレナムガス圧力によるペレットの変形の効果は無視できるものとした。

2．2．8 境界条件

境界条件を、図２．３４に示すようなペレット３層、被覆管２層の場合を例にとって説明する。

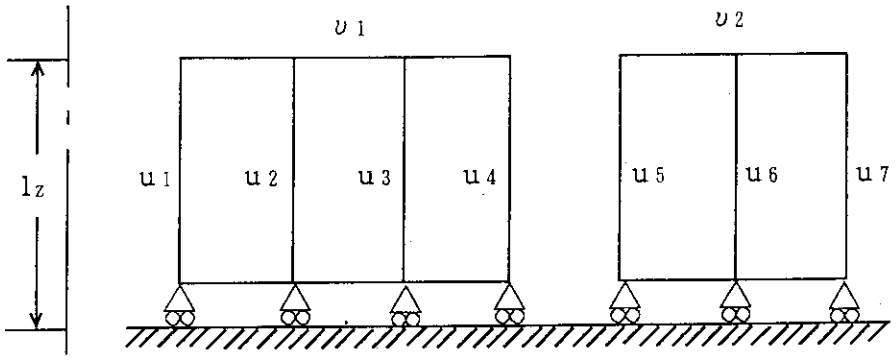


図 2．3 4　　解析モデルの一例

上図において、u は径方向変位、v は軸方向変位である。

各要素の剛性方程式は(2.2.73)式で与えられる。

$$[K^{i}_{n+\theta}]\{\Delta u^{i+1}_{n+1}\} = \{\Delta \hat{F}^{i}_{n+1}\} \tag{2.2.73}$$

この剛性方程式を*Newton－Raphson* 法の繰り返しが終了した状態で、繰り返しの添字 i を省略し、次式のように表す。

$$[B_{ee}]\{\Delta u_{n+1}\} = \{F_{n+1}\}+\{B_{et,n+1}\} \tag{2.2.74}$$

ここで、　$[B_{ee}] = [K_{n+\theta}]$

$$\{B_{et,n+1}\} = \{\Delta \hat{F}_{n+1}\}-\{F_{n+1}\}$$

である。

図２．３４のセグメントの全体マトリクスは、

$$
\begin{bmatrix}
B^1_{11} & B^1_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B^1_{13} & 0 \\
B^1_{21} & B^1_{22}+B^2_{11} & B^2_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & B^1_{23}+B^2_{13} & 0 \\
0 & B^2_{21} & B^1_{22}+B^3_{11} & B^3_{12} & 0 & 0 & 0 & B^2_{23}+B^2_{13} & 0 \\
0 & 0 & B^3_{21} & B^3_{22} & 0 & 0 & 0 & B^3_{23} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & B^4_{11} & B^4_{12} & 0 & 0 & B^4_{13} \\
0 & 0 & 0 & 0 & B^4_{21} & B^4_{22}+B^5_{11} & B^5_{12} & 0 & B^4_{23}+B^5_{13} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B^5_{21} & B^5_{22} & 0 & B^5_{23} \\
B^1_{31} & B^1_{32}+B^2_{31} & B^2_{32}+B^3_{31} & B^3_{32} & 0 & 0 & 0 & B^1_{33}+B^2_{33}+B^3_{33} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & B^4_{31} & B^4_{32}+B^5_{31} & B^5_{32} & 0 & B^4_{33}+B^5_{33}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
\Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \Delta u_6 \\ \Delta u_7 \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ F_{pca} \\ 0 \\ -F_{pcb} \\ 0 \\ 0
\end{Bmatrix}
+
$$

$$
\begin{Bmatrix}
B^1_{et,1} \\
B_{et,2}+B^2_{et,1} \\
B^2_{et,2}+B^3_{et,1} \\
B^3_{et,2} \\
B^4_{et,1} \\
B^4_{et,2}+B^5_{et,1} \\
B^5_{et,2} \\
B^1_{et,3}+B^2_{et,3}+B^3_{et,3} \\
B^4_{et,3}+B^5_{et,3}
\end{Bmatrix}
\qquad (2.2.75)
$$

である。(2.2.75)式は、外力ベクトル$\{F_{n+1}\}$については、図 2.33中のF_{pca}, F_{pcb} のみが考慮されている。

次に、ペレットと被覆管の接触がある場合の扱い方を以下に示す。

（1）固着の場合

ペレット最外層セグメントの変位Δu_4 と被覆管最内層セグメントの変位Δu_5 を変位ベクトルの同じ場所に入れる。したがって(2.2.75)式は次のように与える。

$$
\left[\begin{array}{c:c}
B_{8\times 8} & \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ -1 \end{matrix} \\ \hdashline
0\cdots\cdots 0\ 1\ -1 & 0
\end{array}\right]
\left\{\begin{array}{c}
\vdots \\ \Delta u_4=\Delta u_5 \\ \vdots \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \hdashline F_3
\end{array}\right\}
=
\left\{\begin{array}{c}
F_{n+1} \\ \hdashline 0
\end{array}\right\}
+
\left\{\begin{array}{c}
B_{et} \\ \\ \\ \\ \\ \\
\end{array}\right\}
\qquad (2.2.76)
$$

(2.2.76)式を解いてF_3 を求める。

さらに、(2.3.75)式を下式に変えて全体マトリクスに組み込む。

$$
\begin{bmatrix}
B_{33}^{1+2+3} & 0 & -B_{31}^{1} & -B_{32}^{1}-B_{31}^{2} & -B_{32}^{2}-B_{31}^{3} & -B_{32}^{3} & 0 & 0 & -B_{33}^{1+2+3} & 0 \\
0 & B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & -B_{31}^{4} & -B_{32}^{4} & -B_{31}^{5} & 0 & -B_{33}^{4+5} \\
-B_{31}^{1} & 0 & & & & & & & B_{31}^{1} & 0 \\
-B_{32}^{1}-B_{31}^{2} & 0 & & & & & & & B_{32}^{1}+B_{31}^{2} & 0 \\
-B_{32}^{2}-B_{31}^{3} & 0 & & & & B_{6\times 5} & & & B_{32}^{2}+B_{31}^{3} & 0 \\
-B_{32}^{3} & -B_{31}^{4} & & & & & & & B_{32}^{3} & B_{31}^{4} \\
0 & -B_{31}^{4}-B_{31}^{5} & & & & & & & 0 & B_{32}^{4}+B_{31}^{3} \\
0 & -B_{32}^{5} & & & & & & & 0 & B_{32}^{3} \\
-B_{33}^{1+2+3} & 0 & B_{31}^{1} & B_{32}^{1}+B_{31}^{2} & B_{32}^{2}+B_{31}^{3} & B_{32}^{3} & 0 & 0 & B_{33}^{1+2+3} & 0 \\
0 & -B_{33}^{4+5} & 0 & 0 & 0 & B_{31}^{4} & B_{32}^{4}+B_{31}^{5} & B_{32}^{5} & 0 & B_{33}^{4+5}
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
\Delta v_{1,l}^{L} \\ \Delta v_{2,l}^{L} \\ \Delta u_{1,l} \\ \Delta u_{2,l} \\ \Delta u_{3,l} \\ \Delta u_{4,l}=\Delta u_{5,l} \\ \Delta u_{6,l} \\ \Delta u_{7,l} \\ \Delta v_{1,l}^{U} \\ \Delta v_{2,l}^{U}
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
F_{3,l} \\ -F_{3,2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F_{2,l}+F_{2,l}+F_{pca} \\ 0 \\ -F_{pcb} \\ -F_{3,l} \\ F_{3,l}
\end{Bmatrix}
+
\begin{Bmatrix}
B_{et,l}
\end{Bmatrix}
\qquad (2.2.77)
$$

ここで、(2.2.77)式の l はセグメント番号である。ただし、$B_{33}^{1+2+3} = B_{33}^{1}+B_{33}^{2}+B_{33}^{3}$ の略である。なお、マトリクスは対称である。

（2）すべりの場合

(2.2.76)式に対応して次式で与える。

$$
\begin{bmatrix}
B_{9\times 9} & \begin{matrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ \mu \\ -\mu \end{matrix} \\
\hline
0\cdots 0\ 1\ -1\ 0\cdots 0\ 0\ 0\ 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{Bmatrix}
\vdots \\ \Delta u_4 \\ \Delta u_5 \\ \vdots \\ \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\
\hline
F_3
\end{Bmatrix}
=
\begin{Bmatrix}
F_{n+1} \\
\hline
0
\end{Bmatrix}
+
\begin{Bmatrix}
B_{et} \\
\hline
0
\end{Bmatrix}
\qquad (2.2.78)
$$

μ：動摩擦係数

(2.2.78)式を解いて F_2 を求める。

さらに、

$$F_3 = \mu F_2 \qquad (2.3.79)$$

より F_3 を与え、(2.3.77)式の形で全体マトリクスに組み込む。

（3）オープンギャップの場合

(2.3.77)式で$F_3 = 0$として全体マトリクスに組み込む。

2.2.9 全体マトリクスの作成

ペレットスタックの軸方向のセグメント数が3個とすると全体マトリクスは以下の形になる。

$$\begin{bmatrix} B_{ee}^{1} & & \\ & B_{ee}^{2} & \\ & & B_{ee}^{3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_{1,1}^{L} \\ \Delta v_{2,1}^{L} \\ \Delta v_{1} \\ \vdots \\ \Delta v_{1,1}^{U} + \Delta v_{1,2}^{L} \\ \Delta v_{2,1}^{U} + \Delta v_{2,2}^{L} \\ \Delta u_{2} \\ \vdots \\ \Delta v_{1,2}^{U} + \Delta v_{1,3}^{L} \\ \Delta v_{2,2}^{U} + \Delta v_{2,3}^{L} \\ \vdots \\ \Delta v_{1,3}^{U} \\ \Delta v_{2,3}^{U} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \\ \\ \\ \\ F_{n+1} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \\ \\ \\ \\ B_{et\,n+1} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{Bmatrix} \tag{2.3.80}$$

(2.3.80)式を(2.3.81)式のように書き直すと

$$[B_{ee}^{T}]\{\Delta u\} = \{\Delta F\} \tag{2.3.81}$$

が成り立つ。

2．2．10　上下プレナム境界条件

（1）上部プレナム

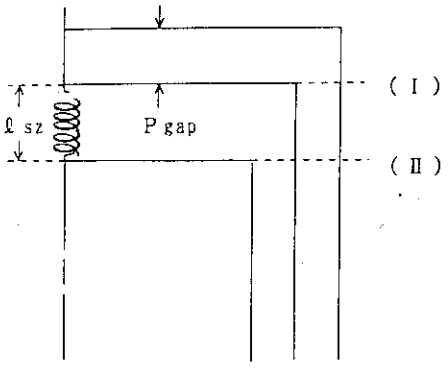


図2．35　上部プレナム境界条件

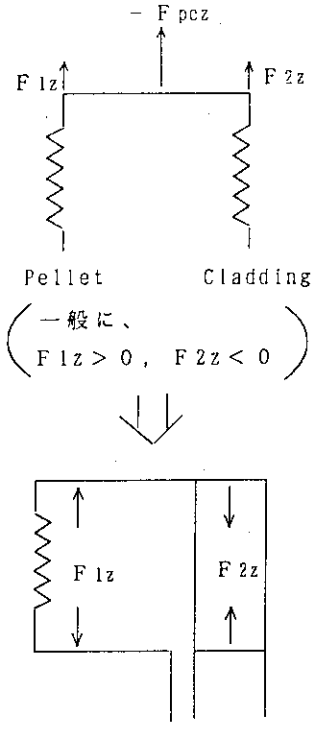


図2．36　プレナム境界条件モデル

図2．35において境界（Ⅰ）で平衡方程式は

$$F_{pcz} = \pi r_{cb}^2 P_{water} - \pi r_{ca}^2 P_{gap} \tag{2.2.82}$$

であるので、軸方向の力のつりあいから

$$-F_{pcz} = F_{1z} + F_{2z} \tag{2.2.83}$$

である。ここで

$$\left.\begin{aligned} F_{1z} &= k_s \cdot \upsilon_{sz} \\ F_{2z} &= k_c \cdot \upsilon_{sz} \end{aligned}\right\} \tag{2.3.84}$$

k_s ＝プレナムスプリングバネ定数、

k_c ＝プレナム部被覆管のみけのバネ定数、

υ_{sz} ＝境界（Ⅰ）での軸方向変位

である。また、F_{1z}，F_{2z} は以下のように書ける。

$$\left.\begin{aligned} F_{1z} &= k_s(\upsilon_{sz} - \upsilon_{1,3}^{U}) - k_s \alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_o) \\ F_{2z} &= k_c(\upsilon_{sz} - \upsilon_{2,3}^{U}) - k_c \alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_o) \end{aligned}\right\} \tag{2.3.85}$$

ここで、α_sおよびα_cはそれぞれプレナムスプリングおよびプレナム部被覆管の熱膨張率である。次に、(2.3.85)式を増分形に書きなおす。

$$\left.\begin{aligned}\Delta F_{1z} &= k_s(\Delta v_{sz} - \Delta v_{1.3}^{U}) - k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ \Delta F_{2z} &= k_c(\Delta v_{sz} - \Delta v_{2.3}^{U}) - k_c\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\end{aligned}\right\} \qquad (2.3.86)$$

また、(2.2.86)式を次の形に書きなおす。

$$\left.\begin{aligned}\begin{Bmatrix}\Delta F_{1z}\\ -\Delta F_{1z}\end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix}-k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix}k_s & -k_s\\ -k_s & k_s\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta v_{sz}\\ \Delta v_{1.3}^{U}\end{Bmatrix}\\ \begin{Bmatrix}\Delta F_{2z}\\ -\Delta F_{2z}\end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix}-k_c\alpha_c l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ k_c\alpha_c l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix}k_c & -k_c\\ -k_c & k_c\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta v_{sz}\\ \Delta v_{2.3}^{U}\end{Bmatrix}\end{aligned}\right\} \qquad (2.2.87)$$

(2.2.87)式をまとめると、

$$\begin{Bmatrix}-\Delta F_{pcz}\\ -\Delta F_{1z}\\ -\Delta F_{2z}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}\Delta F_{1z} + \Delta F_{2z}\\ -F_{1z}\\ -F_{2z}\end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix}-(k_c\alpha_s + k_c\alpha_c) l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ k_c\alpha_c l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\end{Bmatrix} + \begin{bmatrix}k_s + k_c & -k_s & -k_c\\ -k_s & k_s & 0\\ -k_c & 0 & k_c\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta v_{sz}\\ \Delta v_{1.3}^{U}\\ \Delta v_{2.3}^{U}\end{Bmatrix}$$

(2.2.88)

(2.3.88)式を(2.3.81)式に代入する。ここで$-\Delta F_{1z}$，$-\Delta F_{2.z}$は全体マトリクスを解けば下のセグメントからの反力として与えられるものなので考慮する必要はない。

したがって(2.2.81)式は

$$\left[\begin{array}{c:c}B_{ee}^{T} & \begin{matrix}0\\ \vdots\\ 0\end{matrix}\\ \hdashline \cdots\cdots & \begin{matrix}B_{ee}+k_s & B_{ee} & -k_s\\ B_{ee} & B_{ee}+k_s & -k_c\end{matrix}\\ \hdashline 0\ \cdots\cdots\ 0 & -k_s \quad -k_c \quad k_s+k_c\end{array}\right]\left\{\begin{array}{c}\vdots\\ \Delta U\\ \vdots\\ \hdashline \Delta v_{1.3}^{U}\\ \Delta v_{2.3}^{U}\\ \Delta v_{sz}\end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{c}\vdots\\ \Delta F\\ \vdots\\ \hdashline -\Delta F_{1z} - k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ -\Delta F_{2z} - k_c\alpha_c l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\\ -\Delta F_{pcz} + (k_s\alpha_s + k_c\alpha_c) l_{sz}(T_{n+1} - T_n)\end{array}\right\} \qquad (2.2.89)$$

のように書ける。

（2）下部プレナム

下部プレナムが存在しない場合は、(2.2.80)式中、$\Delta v_{1.1}^{L} = \Delta v_{2.1}^{L} = 0$ なので、マトリクス上から削除すれば境界条件は満たされる。

下部プレナムが存在する場合は、

$$\left.\begin{aligned}F_{1z} &= k_s v_{1.1}^{L} - k_s\alpha_s l_{sz}(T_{n+1} - T_o)\\ F_{2z} &= k_c v_{2.1}^{L} - k_c\alpha_c l_{sz}(T_{n+1} - T_o)\end{aligned}\right\} \qquad (2.2.90)$$

である。(2.2.90)式を増分形で与えると、

$$\left.\begin{aligned}\Delta F_{1z} &= k_s \Delta v_{1,1}^{L} - k_s \alpha_s l_{sz}(T_{n+1}-T_n)\\ \Delta F_{2z} &= k_c v_{2,1}^{L} - k_c \alpha_c l_{sz}(T_{n+1}-T_o)\end{aligned}\right\} \qquad (2.2.91)$$

となる。 (2.2.91)式を(2.2.89)式に組み込めば、

$$\begin{bmatrix} B_{ee}+k_s & B_{ee} & \cdots\cdots \\ B_{ee} & B_{ee}+k_c & \\ \vdots & & B_{ee}^{T} \\ \vdots & & \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_{1,1}^{L} \\ \Delta v_{2,1}^{L} \\ \vdots \\ \Delta v_{1,3}^{U} \\ \Delta v_{2,3}^{U} \\ \Delta v_{sz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F_{1z}+k_s \alpha_s l_{sz}(T_{n+1}-T_n) \\ \Delta F_{2z}+k_c \alpha_c l_{cz}(T_{n+1}-T_n) \\ \vdots \end{Bmatrix} \qquad (2.2.92)$$

を得る。 ΔF_{1z} , ΔF_{2z} はセグメント１の反力として与えられる。

(2.2.92)式が、解くべき全体マトリクス（対称マトリクス）である。

２．２．１１　ペレットと被覆管の接触判断条件

ペレット・被覆管の接触条件としては、ギャップ開き、固着、すべりの３状態を扱う。３状態の相互転化と変化条件を図２．３７および表２．５に示す。

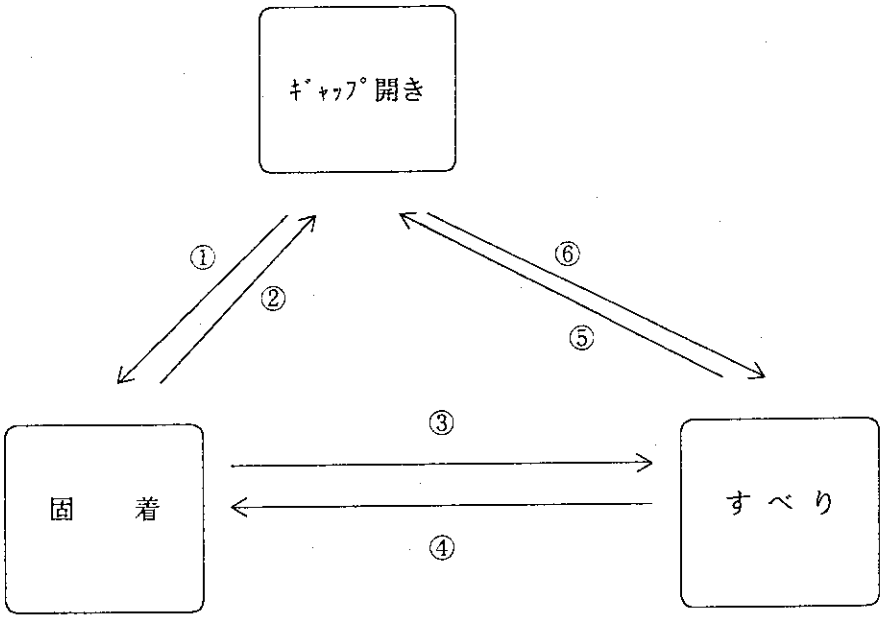


図２．３７　接触状態の変化　（①～⑥は表２．５参照）

表２．５　接触状態の変化と条件

番号	状態変化	状態変化条件、処置
①	ｷﾞｬｯﾌﾟ開き→固着	ギャップ幅が正から負に変化した時に、 ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙを行い $\lvert F_3 \rvert < \mu \lvert F_2 \rvert$ の条件を満足した場合、固着と判定。
②	固着→ｷﾞｬｯﾌﾟ開き	接触力F_2 が負から正に変化した場合、ｷﾞｬｯﾌﾟ開きと判定。 ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙを行う。
③	固　着→すべり	接触状態で $\lvert F_3 \rvert \geq \mu \lvert F_2 \rvert$ に変化した時、すべりと判定。 ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙは行わない。
④	すべり→固　着	接触状態で $\lvert F_3 \rvert < \mu \lvert F_2 \rvert$ に変化した時、固着と判定*。 ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙは行わない。
⑤	すべり→ｷﾞｬｯ開き	②の条件と同じ。
⑥	ｷﾞｬｯﾌﾟ開き →すべり	ギャップ幅が正から負に変化したとき、 ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙを行い、$\lvert F_3 \rvert \geq \mu \lvert F_2 \rvert$ の条件を満足した場合、すべりと判定。

ここで　F_2 はペレット・被覆管径方向接触力
F_3 はペレット・被覆管軸方向接触力
μ はペレット・被覆管の間の摩擦係数

（１）固着・すべり判定

①固着条件

固着と判定する条件は、ペレット、被覆管の変位増分が等しく、軸力が接触力から決定される最大静止摩擦力よりも小さいとき、すなわち、

$$\left.\begin{array}{l} \Delta u_p = \Delta u_c \\ \lvert F_3 \rvert < \mu \lvert F_2 \rvert \end{array}\right\} \qquad (2.2.93)$$

である。

固着モードが仮定されているとき、(2.2.93)式の$\Delta u_p = \Delta u_c$ は判定のための境界条件として与えられるから、$\lvert F_3 \rvert < \mu \lvert F_2 \rvert$ の条件を満足しない場合は接触モードは固着からすべりに変更される。

②すべり条件

すべり状態においては

$$|F_3| = \mu |F_2| \tag{2.2.94}$$

が境界条件として与えられるので、接触モードのすべりから固着への判定条件として

$$F_3 < \mu F_2$$

を用いることはできない。

そこで、軸力が存在するのにもかかわらず、軸力の向きと変位増分とが矛盾する結果となる計算がされたとき、すなわち、

$$F_2 \times F_3 > 0 \ (F_2 < 0 \text{より}, F_3 < 0) \text{の場合} \quad \Delta u_p < \Delta u_c \ 、$$

または

$$F_2 \times F_3 < 0 \ (F_2 < 0 \text{より}, F_3 > 0) \text{の場合} \quad \Delta u_p > \Delta u_c$$

のとき、接触モードをすべりから固着に変更する。

また、

$$F_2 \times F_3 = 0$$

の場合は固着とする。その理由は、$F_2 < 0$ であるので必然的に $F_3 = 0$ であるからである。なお、ここで示した Δu_p ，Δu_c は各セグメントごとの変位増分である。

（２）境界面で働く力

図２．３８で示すように境界面 $S_{i,i+1}$ で働く力は、

$$\begin{aligned} S_{i,i+1} &= F_{3,U} + (F_{3,5} - F_{3,U}) + (F_{3,4} - F_{3,5}) \\ &\quad + \cdots + (F_{3,i} - F_{3,i+1}) \\ &= F_{3,i} \end{aligned}$$

であり、他のセグメントの力 $F_{3,j}$ $(j \neq i)$ には影響されないから、固着／すべり判定は前項の判定条件に従ってすべての軸方向セグメントで同時に行ってよい。

このことは、セグメントが受ける軸力は常にペレット／被覆管の軸方向接触力（＝摩擦力）に釣り合っており、この軸力の大きさが接触状態でのすべり、あるいは固着モードを決定していることに他ならない。したがって、強いＰＣＭＩが発生しない限り軸力が大きくなることはない。なぜなら、弱いＰＣＭＩでは、軸力はすべりにより緩和されるからである。

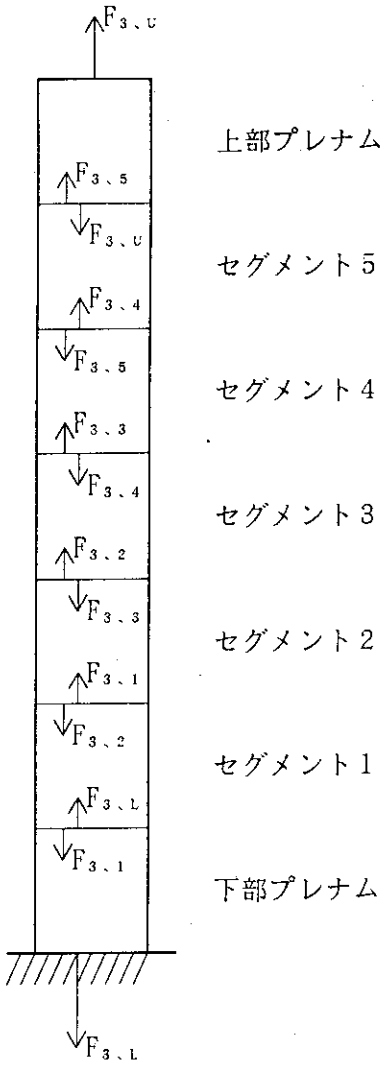


図２．３８　　ペレットにかかる軸方向の力

（３）タイムステップコントロール

前記の固着／すべりの仮定・判定の繰り返しが、全セグメントにわたって収束したとき、接触状態（非接触⇄接触）の変更があった場合、タイムステップコントロールを行い、以下に示す時点において状態を変更する。

非接触　→　接　触への変化：　　ギャップ幅がゼロとなる時点

接　触　→　非接触への変化：　　接触圧がゼロとなる時点

これらの場合では、すべての時間依存データを線形補間を行い、タイムステップ幅を変更して、新しい接触条件でタイムステップを進める。

2．3 物 性 値

本コードで使用する物性値の一覧を表2．6に示す。以下にいくつかの物性値、モデルにつき説明を補足する。

2．3．1 やきしまり

ペレットのやきしまりは次式で計算する。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V^{max}}{V}\left(1 - e^{-C \cdot BU}\right) \tag{2.3.1}$$

ここで、 $\frac{\Delta V}{V}$ ＝ やきしまりによる体積収縮（%）

$\frac{\Delta V^{max}}{V}$ ＝ ポアの消滅による体積収縮（%）

BU ＝ 燃焼度(GWD/tUO_2)

である。上式において $\frac{\Delta V^{max}}{V}$ およびCは再焼結データ等により求められる経験的パラメータである。

2．3．2 ペレットのホットプレス

降伏関数および流れ則は(2.2.54)式および(2.2.55)式を以下に再記する。

ただし、(2.2.54)式および(2.2.55)式において、$h = \overline{\sigma}$ とおく。すなわち、

$$\overline{\sigma} = \left[\frac{3}{2(F+G+H)}\{H(\sigma_r - \sigma_z)^2 + F(\sigma_z - \sigma_\theta)^2 + G(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + 2N\tau^2_{rz}\} + 3\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2.2.54}$$

$$\{\Delta\varepsilon^p_{n+1}\} = \Delta\overline{\varepsilon}^p_{n+1}\left\{\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial\sigma}\right\}_{n+\theta} \tag{2.2.55}$$

ペレット材質の等方性$(H = F = G = 1,\ N = 3)$ を仮定すると、(2.2.54)式より

$$\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial\sigma_r} = \frac{3}{2\overline{\sigma}}\left\{\frac{2\sigma_r - \sigma_z - \sigma_\theta}{3} + 2\alpha(\sigma_r + \sigma_z + \sigma_\theta)\right\} \tag{2.2.54a}$$

が成り立つ。したがって、

$$\left\{\frac{\partial\overline{\sigma}}{\partial\sigma}\right\}_{n+\theta} = \frac{1}{\overline{\sigma}_{n+\theta}}\begin{bmatrix} 1+3\alpha & -0.5+3\alpha & -0.5+3\alpha \\ & 1+3\alpha & -0.5+3\alpha \\ & & 1+3\alpha \\ & \text{Symmetry} & \end{bmatrix}\{\sigma_{n+\theta}\} \qquad (2.3.2)$$

である。これを(2.2.55)式に代入し、整理すると、

$$\{\Delta\varepsilon^{P}_{n+1}\} = \frac{(1+3\alpha)\Delta\overline{\varepsilon}^{P}_{n+1}}{\overline{\sigma}_{n+\theta}}\begin{bmatrix} 1 & -\nu^{P} & -\nu^{P} \\ & 1 & -\nu^{P} \\ & & 1 \\ & \text{Symmetry} & \end{bmatrix}\{\sigma_{n+\theta}\} \qquad (2.3.3)$$

ここで、$\nu^{P} = \dfrac{0.5-3\alpha}{1+3\alpha}$ である。

塑性による体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon^{P}_{h,\,n+\theta}$ は、

$$\Delta\varepsilon^{P}_{h,\,n+1} = \Delta\varepsilon^{P,r}_{n+1} + \Delta\varepsilon^{P,z}_{n+1} + \Delta\varepsilon^{P,\theta}_{n+1}$$

$$= \frac{(1+3\alpha)\Delta\overline{\varepsilon}^{P}_{n+1}}{\overline{\sigma}}(1-2\nu^{P})(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta)$$

$$= \frac{9\alpha\Delta\overline{\varepsilon}^{P}_{n+1}}{\overline{\sigma}}(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta) \qquad (2.3.4)$$

である。

またクリープの場合も(2.3.2)式が適用されるので、同様に、クリープによる体積ひずみ増分 $\Delta\varepsilon^{c}_{h,\,n+1}$ は、

$$\Delta\varepsilon^{c}_{h,\,n+1} = \frac{9\alpha\Delta\overline{\varepsilon}^{c}_{n+1}}{\overline{\sigma}}(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta) \qquad (2.3.5)$$

となる。したがって、塑性およびクリープ流動に伴うペレットの体積ひずみ変化（＝ホットプレス）$\Delta\varepsilon_{h,\,n+1}$ は次のように表される。

$$\Delta\varepsilon_{h,\,n+1} = \Delta\varepsilon^{P}_{h,\,n+1} + \Delta\varepsilon^{c}_{h,\,n+1}$$

$$= \frac{9\alpha}{\overline{\sigma}}\left(\Delta\overline{\varepsilon}^{P}_{n+1} + \Delta\overline{\varepsilon}^{c}_{n+1}\right)(\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta) \qquad (2.3.6)$$

2．3．3 初期リロケーション

ペレットは、スタートアップ時に熱応力によって割れ、その時、ペレット片が径方向に飛散してギャップを狭めることが考えられる。この効果を初期リロケーションと呼ぶ。本コードでは、初期リロケーションは、燃焼度0、線出力0の冷却水条件下(hot stand-by)におけるギャップ幅に比例すると仮定し、

$$REL = \alpha \cdot (r_{ci}^{c} - r_{pi}^{c}) \tag{2.3.7}$$

とおく。ここで、r_{ci}^{c} および r_{pi}^{c} はそれぞれ hot stand-by における被覆管内半径およびペレット半径(cm)である。α は、実験データとの照合を介して定められる経験的パラメータで、リロケーションパラメータと呼ばれる。

2．3．4 応力反転による被覆管クリープの変化

クリープ中に応力方向を反転すると、再び一次クリープが生じる。この現象をシミュレートするために、Pughは簡便法を提案した[22]。Pughの方法の大要は次のようである。

1) クリープ硬化は $\overline{\varepsilon}^{H}$ で表されているとし、

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{\frac{\partial \overline{\sigma}}{\partial \sigma}\right\} f(\overline{\sigma}, \overline{\varepsilon}^{H}, T) \tag{2.3.8}$$

とする。

2) 第1回目の応力反転時には $\overline{\varepsilon}^{H} > \hat{\varepsilon}$ であり、

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_H, \quad \overline{\varepsilon}^{H} = 0 \tag{2.3.9}$$

とする。

3) 第2回目以降の反転時には、

$$\begin{cases} \overline{\varepsilon}^{H} \geqq \hat{\varepsilon} \text{ なら } \hat{\varepsilon} = \overline{\varepsilon}^{H}, \ \overline{\varepsilon}^{H} = 0 \\ \overline{\varepsilon}^{H} < \hat{\varepsilon} \text{ なら } \overline{\varepsilon}^{H} = \hat{\varepsilon} - \overline{\varepsilon}^{H} \end{cases}$$

とする。

これらを図示すれば図2．36のようになる。

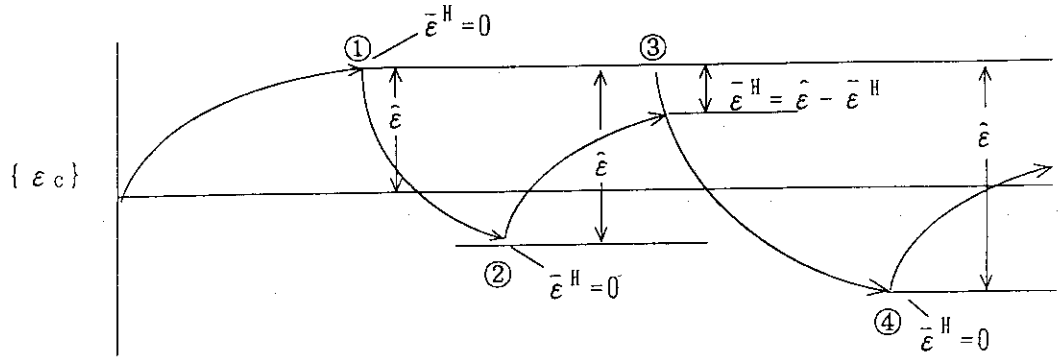


図２．３６　応力の反転によるクリープの反転

なお、応力反転の判定は、クリープ式が

$$\{\dot{\varepsilon}_c\} = \left\{\frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \sigma}\right\} f(\bar{\sigma}, \bar{\varepsilon}^H, T), \quad f \geqq 0 \qquad (2.3.10)$$

であるので、$\{\dot{\varepsilon}_c\}$ の符号が、前ステップと現ステップで反転したかどうかで決定する。

多軸応力状態でのこの符号の反転判断は $\{\dot{\varepsilon}_c\}$ の成分のスカラー積の符号による。

２．３．５　ＭＯＸ燃料の計算

Ａｐｐｅｎｄｉｘの入力マニュアルは、ＭＯＸ燃料を計算する場合のオプションを持つ。この場合、物性値などの扱いを以下のようする。

（１）ペレット融点[29]

$$Tm = Tu - 5.414\,P + 0.007468\,P^2 - 0.0032\,BU \qquad (2.3.11)$$

ただし

Tm＝ 融点（℃）

Tu＝ UO_2 の融点（2800℃）

P ＝ PuO_2 のモル分率（％）

BU＝ 燃焼度（MWd/t）

（２）ペレット熱伝導度 K

Martin の推奨値[30]および Washington の式[27]を修正して用いる。

ペレットは hypo-stoichiometric state にある、すなわち、

$(Pu, U)O_y$ において　$0 < y < 2$　と仮定して、

1) 12%≦PuO_2≦30% の場合

$$K=(0.037 + 3.33y + 2.37\times10^{-4}\ T)^{-1} + 78.9\times10^{-12}T^3 \quad (W/mK) \qquad (2.3.12)$$

2) 0%≦PuO_2≦12% の場合、従来のUO_2のデータとの内挿により、

$$K(f)=Ku(1 - f/0.12) + K(MOX)\times f/0.12 \quad (W/mK) \qquad (2.3.13)$$

ここで

f = weight fraction of PuO_2 to (PuO_2+UO_2),

Ku: Washington の式,

$$Ku=[(0.035+2.25\cdot10^{-4}\cdot T)^{-1} + 83.0\cdot10^{-12}\cdot T^3]\cdot(1+z) \quad (W/mK) \qquad (2.3.14)$$

($z:UO_{2-z}$, $0\leqq z\leqq 0.05$)

である。

（３）焼きしまり、スウェリング、クリープ特性、熱膨張率、ヤング率、及びポアソン比はUO_2ペレットと同じとする。

（４）ＦＰガス放出率およびＸｅ／Ｋｒ比については、ユーザーがＭＯＸ燃料の特性を考慮した値を指定する。

２．３．６　ガドリニア入りペレットの扱い

Ａｐｐｅｎｄｉｘの入力マニュアルは、ガドリニア入り燃料を計算する場合のオプションを持つ。この場合、特に問題となるのはペレットの熱伝導度Ｋである。

これに対しては、以下に示す Fukushima の式[31]を暫定的に入れているが、今後検討すべき課題である。

$$K = \frac{1}{aT + b} \qquad (2.3.15)$$

ここで、

K ＝ ペレット熱伝導度（W/m-K）、

T ＝ 温度（K）

である。

(2.3.15)式の係数 a と b は、Gd_2O_3濃度に依存し、以下のテーブル及び内挿によって決定される。

Gd_2O_3 (w/o)	a	b
0.0	2.32733×10^{-4}	1.180229×10^{-4}
0.03	2.131412×10^{-4}	1.732423×10^{-4}
0.057	1.996481×10^{-4}	2.069985×10^{-4}
0.085	1.961735×10^{-4}	2.342200×10^{-4}

内挿の補間式は

$$K = r A^{Gd} \tag{2.3.16}$$

ここでｒとＡを指定された温度上で決定する。すなわち、２点のガドリニア濃度とＫの値から、(2.3.16)式を２通り作って連立させて解き、ｒとＡを決定し、中間のガドリニア濃度における熱伝導度Ｋを求める。

表2.6 物性値

<table>
<tr><th>MATERIAL PROPERTY</th><th>EXPRESSION</th><th>REF.</th></tr>
<tr><td>UO_2 PELLET

THERMAL

CONDUCTIVITY
(1)</td><td>For 0℃<T<1,650℃:
$$k=\frac{[1-\beta(1-D)]}{[1-\beta(1-0.95)]}\left[\frac{K_1}{K_2+T}+K_3\,exp(K_4T)\right]$$
For 1,650℃<T<2,840℃:
$$k=\frac{[1-\beta(1-D)]}{[1-\beta(1-0.95)]}\left[K_5+K_3\,exp(K_4T)\right]$$
where
k = thermal conductivity in (W cm^{-1} K^{-1})
D = fraction of theoretical density
β = porosity coefficient = 2.58 − 0.58 × 10^{-3}T
T = temperature (℃).
<table><tr><th>K_1</th><th>K_2</th><th>K_3</th><th>K_4</th><th>K_5</th></tr><tr><td>40.4</td><td>464</td><td>1.216×10^{-4}</td><td>1.867×10^{-3}</td><td>0.0191</td></tr></table></td><td>(9)</td></tr>
<tr><td>UO_2 PELLET

THERMAL
CONDUCTIVITY

(2)</td><td>Washington's empirical equation[23]:
$K = [(0.035+2.25\times10^{-4}T)^{-1}+83.0\times10^{-12}T^3$

1) decreasing with burn-up(low temperatuer)
$$K=\frac{1+83.0\times10^{-12}T^3(0.035+2.25\times10^{-4}T)}{0.035+2.25\times10^{-4}T+2.4(Bu/1000)}$$

2) decreasing with burn-up
$$K=\frac{1+83.0\times10^{-12}T^3(0.035+2.25\times10^{-4}T)}{0.035+2.25\times10^{-4}T+D_1D_2 2.4(Bu/1000)(1-D_2Bu)}$$

where
K = thermal conductivity in (W /m-K)
D_1 = 600
D_2 = 0.005
T = temperature (℃).
Bu = burn-up(MWd/kg-UO_2)</td><td>(28)</td></tr>
</table>

表2.6 （続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
MOX PELLET (PuO_2-UO_2 PELLET) THERMAL CONDUCTIVITY	Assuming hypo-stoichiometric state, i.e. $0<y<2$ for $(Pu,U)O_y$, 1) $12\% \leq PuO_2 \leq 30\%$ →Ref.(30) $K=(0.037 + 3.33y + 2.37\times10^{-4}\ T)^{-1} + 78.9\times10^{-12}T^3$ (W/mK) 2) $0\% \leq PuO_2 \leq 12\%$ →By interpolation, $K(f)=Ku(1 - f/0.12) + K(MOX)\times f/0.12$ (W/mK) where f=weight fraction of PuO_2 to (PuO_2+UO_2), Ku:thermal conductivity of UO_2 by Washington[23], $Ku=[(0.035+2.25\cdot10^{-4}\cdot T)^{-1} + 83.0\cdot10^{-12}\cdot T^3]\cdot(1+z)$ (W/mK) ($z:UO_{2-z}$, $0 \leq z \leq 0.05$)	—
UO_2 PELLET THERMAL EXPANSION	$\frac{\Delta L}{L} = -4.972 \times 10^{-4} + 7.107 \times 10^{-6}T + 2.581 \times 10^{-9}T^2 + 1.140 \times 10^{-13}T^3$ where $\frac{\Delta L}{L}$ = linear thermal expansion T = temperature(℃).	(9)
UO_2 PELLET THEORETICAL DENSITY	$\rho = 10.96\ (g/cm^3)$	(9)

表2.6 （続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
UO_2 PELLET YOUNG'S MODULUS	$E = 2.26 \times 10^{11} (1 - 1.131 \times 10^{-4} T) [1 - 2.62(1-D)]$ where E = Young's modulus (Pa) T = temperature(℃) (0 - 1,300℃) D = fraction to theoretical density.	(9)
UO_2 PELLET POISSON'S RATIO	$\nu = 0.316$	(9)
UO_2 PELLET CREEP RATE	$\dot{\varepsilon} = \frac{(A_1+A_2\dot{F})\sigma e^{-Q_1/RT}}{(A_3+D)G^2} + \frac{A_4 \sigma^{4.5} e^{-Q_2/RT}}{(A_6+D)} + A_7 \sigma \dot{F} e^{-Q_3/RT}$ where $A_1 = 9.728 \times 10^6$ $A_7 = 9.24 \times 10^{-28}$ $A_2 = 3.240 \times 10^{-12}$ $Q_1 = 90,000$ activation $A_3 = -87.7$ $Q_2 = 132,000$ energy $A_4 = 1.376 \times 10^{-4}$ $Q_3 = 5,200$ (cal/mole) $A_6 = -90.5$ $\dot{\varepsilon}$ = creep rate (hr^{-1}) $\dot{F}$ = fission rate (8.4×10^{17} - 1.18×10^{20} fissions/m^3-s) σ = stress (1,000 - 16,000 psi) R = gas constant (1.987cal/mol-K) T = temperature (713 - 2,073 K) D = theoretical density (0.92 - 0.98) G = grain size(4 - 35μ), and stoichiometry of 2.00 to 2.01.	(9)

表２．６　（続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
UO_2 PELLET SWELLING	In unrestrained condition: $\left(\frac{\Delta V}{V}\right)^{gs}$ per 10^{20} fissions/$cm^3 = 4.396\times10^{2}\, exp\left(-\frac{1.645\times10^{4}}{T_s}\right)$ with $T_s = T - 100$ where $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^{gs}$: volume change by gaseous fission product swelling, T : temperature (K).	(23) (24)
	In restrained condition: $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^{sd}$ per 10^{20} fissions/$cm^3 = 0.0025$ where $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^{sd}$: volume change by solid fission product swelling,	(9)
UO_2 PELLET DENSIFICATION	$\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^{d} = \frac{\Delta V_{max}}{V_0}\left[1 - exp\left(-2.3025\frac{BU}{SBU}\right)\right]$, where $\left(\frac{\Delta V}{V_0}\right)^{d}$: volume change by densification, V_0 : initial pellet volume, ΔV_{max} : maximum volume change by porosity, BU : burn-up (MWd/tUO_2), SBU : burnup constant for densification. ΔV_{max} and SBU are given as input values determined by resintering tests of pellet. SBU defines the slope of densification.	(9)

表２．６　（続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
UO_2 PELLET PLASTICITY	$\sigma_Y = \begin{cases} 66.9 - 0.0397\,(T - 273), & \text{for } T \leq 1473K \\ 36.6 - 0.0144\,(T - 273), & \text{for } T > 1473K \end{cases}$ $H' = \begin{cases} 520.0 - 0.3860\,(T - 273), & \text{for } T \leq 1473K \\ 139.5 - 0.06895\,(T - 273), & \text{for } T > 1473K \end{cases}$ where σ_Y = yield stress (kg/mm²) H' = tangiential modulus (kg/mm²) T = temperature (K)	(22)
UO_2 PELLET SPECIFIC HEAT CAPACITY	$C_P = 15.496\left[\frac{K_1\theta^2 exp(\theta/T)}{T_2[exp(\theta/T)-1]^2} + 2K_2T + \frac{K_3E_D}{RT^2}exp(-E_D/RT)\right]$ where C_P = specific heat capacity (J/kg•K), K_1 = 19.145 (cal/mol•K), K_2 = 7.8473×10^{-4} (cal/mol•K²), K_3 = 5.6437×10^{6} (cal/mol), θ = 535.285 (K), E_D = 37,694.6 (cal/mol), T = temperature (K), and R = 1.987 (cal/mol•K).	(9)
ZIRCALOY THERMAL CONDUCTIVITY	$K = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2}T - 1.45\times10^{-5}T^2 + 7.67\times10^{-9}T^3$ where K = thermal conductivity (W/m-K) T = temperature (K)	(9)

表2.6 （続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
ZIRCALOY THERMAL EXPANSION	For axial expansion $\frac{\Delta L}{L_0} = -2.506 \times 10^{-5} + 4.441 \times 10^{-6}T$ For diametral expansion $\frac{\Delta D}{D_0} = -2.373 \times 10^{-4} + 6.721 \times 10^{-6}T$ where T = temperature (℃)	(9)
ZIRCALOY YOUNG'S MODULUS	$E = [9.900\times10^{5} - 566.9\times(T - 273.15)] \times 9.8067 \times 10^{4}$ where E = Young's modulus (Pa) T = temperature(K)	(26)
ZIRCALOY POISSON'S RATIO	$\nu = 0.3303 + 8.376\times10^{-5}(T - 273.15)$ where T = temperature(K)	(26)
ZIRCALOY CREEP RATE	$\dot{\varepsilon}^{c} = 2\left[5.129\times10^{-29}\phi e^{-\frac{10000}{RT}}\left\{\sigma + 7252\times10^{2}e^{4.967\times10^{-8}\sigma}\right\}\right]^{2} \times \left(\frac{3600}{\varepsilon^{c}}\right)$ where $\dot{\varepsilon}^{c}$ = creep strain rate (s^{-1}) ϕ = fast neutron flux ($n/m^2\cdot s$) , E ≧ 1MeV R = gas constant , 1.986 cal/mol•K σ = stress (Pa), T = temperature (K) ε^{c} = creep strain	(9)

表2.6 （続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
ZIRCALOY PLASTICITY	$\sigma_Y = \sigma_Y^{f} + \Delta\sigma_Y^{irr}$ where σ_Y = 0.2% proof stress (kg/mm²) σ_Y^{f} = out-of-pile proof stress (kg/mm²) = A − 0.0213 T A = 21.60 for fully annealed Zr-2 = 31.32 for stress relieved Zr-2 T = temperature (℃), 220≦T≦450℃ $\Delta\sigma_Y^{irr}$ = hardening due to irradiation (kg/mm²) $= 33.44\,[1 - \exp(-B\phi t)]^{1/2}$ $B = 2.92\times10^{-21}\exp(-1.6\times10^{-14}\phi)$ ϕ = fast neutron flux (n/cm²s), E≧1MeV n = 0.0504 + 0.0001435 T where n = strain hardening exponent T = temperature (℃), 220 ≦ T ≦ 450℃	(9)
GAS THERMAL CONDUCTIVITY	$k_{helium} = 3.366 \times 10^{-3}\,T^{0.668}$ $k_{krypton} = 4.726 \times 10^{-5}\,T^{0.923}$ $k_{xenon} = 3.366 \times 10^{-5}\,T^{0.872}$ where k = thermal conductivity (W/m-K) T = gas temperature (K).	(9)

表２．６　（続き）

MATERIAL PROPERTY	EXPRESSION	REF.
ZIRCALOY AXIAL GROWTH	$\frac{\Delta L}{L} = A\,[\exp(240.8/T)]\,[\phi t]^{1/2}\,[1-3f_z]\,[1+2.0CW]$ where $\frac{\Delta L}{L}$ = fractional change in length due to growth, A = 1.407×10^{-16} [neutrons/m^2]$^{-1/2}$, T = cladding temperature (K), ϕt = fast neutron fluence (n/m^2) (E≧1.0MeV), f_z = texture factor for the tubing axis, and CW = cold work. (fraction of cross-sectional area reduction).	(9)
SPECIFIC HEAT CAPACITY OF ZIRCALOY	$C_P = 245.11 + 0.15558T - 3.3414 \times 10^{-5} \cdot T^2$ where C_P = specific heat capacity (J/kg•K) T = temperature (300 - 1090K)	(9)
ZIRCALOY DENSITY	$\rho = 6.55$ (g/cm^3)	(9)
ZrO_2 THERMAL CONDUCTIVITY	$K = 0.835 + 1.81 \times 10^{-4}T$ where K = thermal conductivity of ZrO_2 (W/m-K) T = temperature (K)	(11)
ZrO_2 YOUNG'S MODULUS	$E = -3.77 \times 10^7 T + 1.367 \times 10^{11}$ where E = Young's modulus (N/m^2) T = temperature(K)	(11)
ZrO_2 POISSON'S RATIO	$\nu = 0.30$	(11)

参 考 文 献

(1) Nakajima T., Ichikawa M., et al., FEMAXI-III: A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI 1298 (1985)

(2) Nakajima T., Saito H. and Ousaka T., Fuel Behavior Modelling Code FEMAXI-IV and Its Application, IAEA-TI-TC-659, Paper presented at IAEA Technical Committee on Water Reactor Fuel Element Computer Modelling in Steady-State, Transient and Accident Conditions, Preston, England, Sept.19-22, (1988)

(3) 電力中央研究所「バッテル高燃焼時諸効果研究計画、タスク３報告書」高燃焼時諸効果資料調査委員会報告 Ｔ９０８０２ （１９９０年９月）

(4) Uchida M., Macroscopic Calculational Model of Fission Gas Release from Water Reactor Fuels, J.Nucl.Sci.Technol., 30, pp.752-761 (1993)

(5) 内田正明、斉藤裕明、 燃料棒内出力分布計算コード：ＲＯＤＢＵＲＮ, JAERI-M 93-108 (1993)

(6) Wiesenack W. and Hustadnes V., TEST-FUEL-DATA-BANK SYSTEM USER MANUAL, HWR-338 (1993)

(7) Jons W.H. and Lottes P.A., Analysis of Heat Transfer, Burnout, Pressure Drop and Density Data for High Pressure Water, ANL-4627 (1951)

(8) Dittus F.W. and Boelter L.M.K., Univ.Calif.Pubs.Eng.2, 443 (1930)

(9) MATPRO-09, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, USNRC TREE NUREG-1005 (1976).

(10) Tsukada T., JAERI-memo 01-046

(11) MATPRO-A, TREE NUREG/CR-5273, EGG-2555, Vol.4 (1990)

(12) Robertson J.A.L., $\int k\,d\theta$ in Fuel Irradiation, CRFD-835 (1959)

(13) Ross A.M. and Stoute R.L., Heat Transfer Coefficient between UO_2 and Zircaloy-2 CRFD-1075 (1962)

(14) Cornell R.M., Speight M.V. and Masters B.C., J.Nucl.Mater. 30, 169 (1969)

(15) Speight M.V., Nucl.Sci.Eng. 37, 180 (1969)

(16) Turnbull J.A. et al., J.Nucl.Mater.,107, 168 (1982)

(17) Ainscough J.B. et al., ibid.49, 117 (1973/74)

(18) Nichols F.A., J.Appl.Phys., 37, p.4599 (1966)

(19) Booth A.H. and Rymen T., AECL-692 (1958)

(20) Present R.D., Kinetic Theory of Gases, Mc-Graw Hill, N.Y. p.55 (1958)

(21) Rashid Y.R.,Tang H.R. and Johanssqn E.B., Mathematical Treatment of Hot Pressing of Reactor Fuel, Nucl.Eng.Des.29, pp.1-6 (1974)

(22) Pugh , Current Recommended Constitution Equations for Inelastic Analysis of FFTF Components, ORNL-TM-3602 (1972)

(23) Chubb W., Storhok V.W. and Keller D.L., Factors Affectiong the Swelling of Nuclear Fuel at High Temperatures, Nucl.Technol. 18, pp.231-255 (1973).

(24) Zimmermann H., Investigation on Swelling and Fission Gas Behavior in Uranium Dioxide, J.Nucl.Mater.75, pp.154-161 (1978).

(25) Tachibana T.,Furuya H. and Koizumi M., Dependence on Strain Rate and Temperature Shown by Yield Stress of Uranium Dioxide, J.Nuc.Sci.Technol.,13, pp.497-502 (1976).

(26) Fisher E.F. and Renken C.J., Single-Crystal Elastic Moduli and the hcp-bcc Transformation in Ti, Zr, and Hf, Phys.Rev. pp.A482-A494 (July 1954).

(27) Washington A.B.G., UKAEA TRG 2236(D) (1973)

(28) Kosaka Y., Thermal Conductivity Degradation Analysis of the Ultra High Burnup Experiment (IFA-562), HWR-341 (1993)

(29) Hagrman D.L. and Reyman G.A., MATPRO-Version11, NUREG/CR-0497 (1979)

(30) Martin D.G., A Re-Appraisal of the Thermal Conductivity of UO_2 and Mixed (U,Pu) Oxide Fuels, J.Nucl.Mater., 110, pp.73-94 (1982)

(31) Fukushima S., Ohmichi T., Maeda A., and Watanabe H., The Effect of Gadolinium Content on the Thermal Conductivity of Near-Stoichiometric $(U,Gd)O_2$ Solid Solutions, ibid. 105, pp.201-210 (1982)

Appendix

A．1 入力マニュアル

Card No.	SYMBOL (FORMAT)	
1	MTITL(I), I=1,20 (20A4)	任意のタイトル
2	¥INPUT ¥END (2～80カラム)	任意のパラメータ
	計算パラメータをName Listにて指定する.	
3	NAX, IFEM1, IPLANT, IFEM2 (4I10)	燃料棒仕様
	NAX =軸方向ノード数(1≦NAX≦12) IFEM1 =第１着目ノード番号(1≦IFEM1≦NAX) IPLANT =1 …… Halden BWR の場合 =2 …… その他の BWR の場合 =3 …… PWR の場合 =4 …… 新クリープ式（ＰＷＲ） IFEM2 =第２着目ノード番号 (1≦IFEM2≦NAX) ただし、第２着目ノードの力学的計算を行わない場合は 入力不要。	
4	MRASA, CDIN, CDOUT (I10, 2F10.0)	被覆管仕様
	MRASA =0 …… RA 材 =1 …… SR 材 CDIN =被覆管内径 (cm) CDOUT = 〃 外径 (cm)	
5	NAX枚必要 (I = 1, NAX) IDISH(I), ICHAM(I), PDIN(I), PDIA(I), PLENG(I), ENR(I), FDENI(I), DZ(I) (2I10, 6F10.0)	ペレット仕様
	IDISH(I) =0 …… ディッシュなしペレット =1 …… 片端面ディッシュ 〃 =2 …… 両端面 〃 〃 ICHAM(I) =0 …… チャンファなしペレット =1 …… チャンファ ペレット PDIN (I) = ペレット中心孔直径 (cm) PDIA (I) = ペレット直径 (cm) PLENG(I) = 1ペレット長さ (cm) ENR (I) = U-235 濃縮度 (-) FDENI(I) = ペレット密度対理論密度比 (-) DZ (I) = ノードの軸方向長さ (cm)	
6	IDISH = 1 or 2 の場合のみ入力 DISH, DEPTH, DISHB (3F10.0)	ディッシュ仕様
	DISH = ディッシュ直径(cm) DEPTH = ディッシュ深さ(cm) DISHB = ディッシュ底直径(cm)	

Card No.	SYMBOL (FORMAT)	
7	ICHAM = 1の場合のみ入力 CHAMR, CHAMZ (2F10.0)	チャンファ仕様
	CHAMR = チャンファ幅 (cm) CHAMZ = 〃 深さ(cm)	
8	PLENUM(2), GPIN, (GMIXO(I), I=1,4), PWEIT, PLENUM(1) (8F10.0)	プレナム仕様
	PLENUM(2) =上部 プレナム部容積 (cm^3) GPIN = 初期ガス圧力 (MPa) GMIXO(I) = 初期ガス組成 (-) i = 1 … He, i = 2 … N_2, i = 3 … Kr, i = 4 … Xe PWEIT =ペレット総重量 (gram) PLENUM(1) =下部 プレナム容積 (cm^3)	
9	NHIST (I10)	履歴点数
	NHIST > 1 を入力 CARD10,11についてNHIST組入力する.	
10	A1, B1, A2, A5 A3, A4, IT, IP, IS, A6 (6F10.3I5,F5.0)	履歴点データ
	A1 = 時間 (HOUR) B1 = 燃焼度 (MWD/TUO_2 (IBUNP=0) MWD/TU (〃 =1) GJ/KGU (〃 =2) A2 = 線出力 (W/cm) A5 = 高速中性子束 (n/cm^2-sec) A3 = 冷却材温度 (K) A4 = 〃 圧力 (MPa) IT = 入力ジェネレータ IP =0 出力しない履歴点 =1 出力する 〃 =2 出力する 〃 (最終情報出力をあたえる履歴点) IS = ダミー A6 = 冷却材速度 (m/sec)	
11	(RH(I), I=1, 12), II (12F5.0,I5)	軸方向相対出力分布
	RH(I)=軸方向ノードjの相対出力 (-) (NAX個のデータ) II =同様の相対出力を行う履歴点数	
12	BU,(RRH(I), I=1, 10) (F10.0,10F5.0)	径方向相対出力分布
	BU =燃焼度 (単位は10と同じ) RRH(I)=径方向方向ノードIの相対出力 (-) NAMELISTで入力したIFLXの数だけ入力	
13	IEND (A4)	入力終了カード
	STOP を入力する	

NAMELISTで指定する変数　－計算内容・制御－

変数名	内　　容	標準値
	計算内容の指定	
INPCK	入力チェックオプション(=0:通常計算，=1:入力チェックのみ計算わ行わない)	0
ICK1	温度計算オプション(=0:通常計算，=1:温度計算のみを行う)	0
IBUNP	入力燃焼度の単位指定（=0:MWD/tUO_2，=1:MWD/tU，=2:GJ/kgU）	0
IFLX	径方向発熱分布を入力する際の燃焼度で指定する点数。 IFLX<0のときRODBURNの出力ファイルから径方向発熱分布等を読込む	0
ICHI	弾性計算オプション　（ICHI=1の場合弾性計算）	0
	計算制御・調整	
TLIM	CPUの計算打ち切り時間　(sec)	1000.
FAC	タイムステップ幅調整因子	1.E4
LMAX	力学計算Newton法の繰り返し回数	2
PWCHG	入力した線出力を一様に(1+PWCHG)倍して計算する	0.0
IRH	IRH=1に指定すると出力履歴中の軸方向相対出力分布入力を省略した期間について、燃焼度によって相対出力分布が線形に補間される	0
IPH	出力増分オプション (=0:着目ノードで出力増分を決定, =1:最大出力変動ノードで出力増分を決定)	0
DPBU	1タイムステップ当りの着目セグメントにおける燃焼度増分幅 (MWD/tUO_2)	500
ITIME	履歴途中でプレナムガス圧を変える場合の履歴番号(ITIME<NHIST)	99999999
GASPRN	履歴途中でプレナムガス圧を変える場合のガス圧(Pa)	0.0
MPP	冷却材条件、軸方向流動条件に拘わらず同じ軸方向出力分布の箇所はまとめて計算する場合　MPP=1とする	0
LCMAX	軸方向接全ノードにたいする固着／すべり判定の最大回数	3
DPXX	1タイムステップ当りの出力増分幅　(W/cm)	10.
ITIMY	塑性タイムステップコントロールオプション (=-1:ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙなし；　= 0:除荷のみﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙする = 1:ﾀｲﾑｽﾃｯﾌﾟｺﾝﾄﾛｰﾙする)	-1
IAUTO	定常／非定常伝熱計算の自動オプション (IAUTO=1ならON;IAUTO=0はマニュアル，ただしIAUTO=1の場合は全期間を通じてガス流動計算を行う。)	1

NAMELISTで指定する変数 －計算条件，形状データ等－

変数名	内　　容	標準値
GAPLK	軸力が発生する最小ギャップ幅（μm）	3.0
GMIN	最小ギャップ幅 （片側） （cm）	0.001
R1	ペレット表面粗さ （μm）（ITHMC=0の場合 R1=1程度）	1.0
FAIW	FAIW≧10^{10}以上の時は1W/cm当りの高速中性子束(n/cm^2-sec) すなわちFAIWの単位は(n/cm^2-sec/W/cm)	0.0
ALSU	上部プレナムバネ膨張率 （K^{-1}）	1.5E-5
ALSL	下部プレナムバネ膨張率 （K^{-1}）	1.5E-5
AMU	ペレット・被覆管摩擦係数	0.4
DE	冷却材流路の相当直径 （cm）	0
FAREA	冷却材流路断面積 （cm^2）	0
PITCH	燃料棒間のピッチ （cm）	0, 1.3
IOPT1	下部プレナムオプション(=0:下部プレナムはない, =1:下部プレナムはある)	0
XKSU	上部プレナムバネ定数 （N/m）	1500.0
XKSL	下部プレナムバネ定数 （N/m）	2500.0
AY	ペレット上端面の傾き（Tilting Value） （ディッシュペレットの場合はAY=0）	0.002

NAMELISTで指定する変数 －やきしまりモデル－

変数名	内　　容	標準値
DMAX	再焼結（1700℃ X 24hr)における密度増加 （%）	1
SBU	やきしまり完了時の燃焼度 （MWd/tUO_2）	2500
IDENSF	焼きしまりﾓﾃﾞﾙｵﾌﾟｼｮﾝ （=0:FEMAXIｵﾘｼﾞﾅﾙ , =1:ROLSTAD , =2:NRC , =3:MARLOWE）	0
SITIM	熱処理時間(Marloweの焼きしまり式に用いる）（HOUR）	24
TDNSF	熱処理温度(Marloweの焼きしまり式に用いる） （°K）	2000
GG	熱処理後の結晶粒径(Marloweの焼きしまり式に用いる）(m)	1.E-5
GG0	初期結晶粒径(Marloweの焼きしまり式に用いる） (m)	

NAMELISTで指定する変数 －リロケーション・クラックモデル－

変数名	内　　容	標準値
IYNG	ペレットクラックモデルオプション （IYNG=0:全ｸﾗｯｸ空間が埋まる、IYNG=1:ｸﾗｯｸ空間の半分が埋まる）	1
FRFAC	FRELOCをFRFAC倍して初期リロケーションとする （但しクラックのつぶれはFRELOCで与えた歪相当分のみ適用）	1.
XRELOC	サーマルリロケーション （熱モデルで用いるリロケーション係数）	0.2
FRELOC	ペレットメカニカルリロケーションパラメータ	0.5
EPSRLZ	軸方向リロケーション歪	0.005
BUMIN	クラックが移動を開始する燃焼度(MWd/t-U)	0.0
BUMAX	クラックが移動を開始する燃焼度(MWD/t-U)	0.0
FACR	径方向クラックオプション （ペレットは径方向にリロケーション歪のFACR倍だけ埋まると本来の剛性を回復する）	1.0
FACZ	軸方向クラックオプション （ペレットは軸方向にリロケーション歪のFACZ倍だけ埋まると本来の剛性を回復する）	1.0
ECRAC3	クラック時のペレット剛性（N/m²）	2.E9

NAMELISTで指定する変数　－クリープ・塑性モデル－

変数名	内　　容	標準値
ICAGRW	被覆管軸方向照射成長モデルオプション （=0:考慮しない、=1:MATPRO-09モデル）	1
FAIMAX	高速中性子束の被覆管クリープ計算での打ち切り値(n/cm²-s) （MATPRO-09モデルのみ適用する）	1.E14
CATEXF	軸方向ファクター（照射成長モデルで用いる）	0.05
ISTR	被覆管0.2%耐力の照射硬化オプション （=1:物性式に従わず照射硬化を考慮する）	0
COLDW	コールドワーク　（照射成長モデルで用いる）	0.81
TCS	ﾍﾟﾚｯﾄクリープ速度を計算する際に用いるﾍﾟﾚｯﾄ温度の最大値（K）	2073.15
TCRMX	ペレットクリープ計算でTCRMX以上の温度領域はTCRMXで計算する。 （熱計算モデル）　　（K）	1773.15
IPUGH	IPUGH=0:被覆管クリープでPughの反転を考慮しない IPUGH=1:被覆管クリープでPughの反転を考慮する	0
FCRFAC	ペレットクリープの速度式を FCRFAC 倍とする　（－）	10.0
EFCOEF	クリープ計算が発散した場合に用いるタイムステップ幅決定因子 EFCOEFを小さくすればタイムステップ幅は短くなる。	1.0
CRFAC	PWR燃料，クリープ速度式をCRFAC倍とする．	1.3
IFY	ペレット降伏応力の式 （IFY=0:Rodford K.C等の式、IFY=1:PNC立花等の式）	0

NAMELISTで指定する変数　－スウェリング・ホットプレスモデル－

変数名	内　　容	標準値
ISWEL	スウェリング計算オプション（=0:既存モデル、≠0:新モデル）	0
IFSWEL	燃料ｽｳｪﾘﾝｸﾞﾓﾃﾞﾙｵﾌﾟｼｮﾝ （=0:SPSR=0.25 ，=1:MATPRO-09）	0
IURS	ガスバブルスウェリングを被覆管-ペレット接触圧のバランスで算出するオプション（IRUS=1でON）	0
STFCP	ペレット気泡スウェリングが発生する限界圧力　（Pa）	-3.0E7
SPCON	ガスバブルスウェリングが発生できる限界接触圧力(N/m²)	-1.E6
BETAX	ペレットホットプレスパラメータ （FEM-2D: 0.002 ,FEM-1D:0.166）	0.002 0.166
FACP	スウェリング計算の圧力をFACP倍する	1

NAMELISTで指定する変数　－ＦＰガス放出モデル－

変数名	内　　容	標準値
IGASP	FPガス放出率ｵﾌﾟｼｮﾝ　＝0；SUB. FGRELN　選択 ＝1；SUB. FISGAS　選択（温度テーブル使用） ＝2；SUB. FISUCD　選択（燃焼度依存モデル）	0
IGAS	FPガス放出率ｵﾌﾟｼｮﾝ（SUB.FISGAS選択の場合） （=1:R.C NELSON，=2:MORISIMA，=3:W.B.LEWIS，=4:G.KARSTEN）	0
IGRAIN	UO_2粒成長ﾓﾃﾞﾙｵﾌﾟｼｮﾝ （=0:FEMAX-4 ORIGINAL，=1:ANISCOUGH，=2:MACEWAN，=3:LYONS， =4:MATPRO-09）	0
MTGR	粒成長モデルのオプション =0:Ainscough Model　　=1:Modified Nichols Model	0
NODEG	希ガス放出モデルの粒内メッシュ数	3
RREL	ＦＰ放出モデルのペレット粒内のメッシュ切りの分割比（NODEG-1個のデータを用いる）	10,1,1,1
THEATF	FPガス放出モデル粒内拡散方程式陰解法オプション（0≦THEATF≦1）	1
FMULT	タイムステップパラメータ（粒内拡散）	1
BG	単位面積当りの気泡数(bubbles/cm^3)	5.E8
GR	ﾍﾟﾚｯﾄ粒径　（μm）	10
FGG	粒成長掃き出し率の因子　f_0	1
RFGFAC	リム領域からのＦＰガス掃き出し率の因子	0.0
GRMAX	希ガス放出モデルにおける１タイムステップ当りの粒径の許容変化率	0.01
AMLMX3	セグメントに放出される1タイムステップ当りのXe+krガスのモル数	2.E-6
FRMIN	FPガス放出率の最小放出率（%）	0.5
RB	境界層幅　（粒内再溶解用)(cm)	2.E-6
IPEXT	ガス気泡にかかる静水圧(Pext)のオプション =0: Pext=0 =1: Pext=プレナム圧 =2: Pext=接触圧 =3: Pext=Max（プレナム圧，接触圧）	0
PSAT	気泡にかかる限界圧力（Pa）	1.E8
APORE	初期バブル半径　（cm）	0
BNMIN	粒界ガス飽和量（atom/cm^2）	5.E14

変数名	内　　容	標準値
FACD	実効ガス拡散係数をFACD倍する。	1
FBSAT	計算された粒界ガス飽和量をFBSAT倍する	1.0
BFCT	バルブから粒内への再溶解率bをBFCT倍する。	1
GRWF	粒成長率をGRWF倍する　(=0:粒成長なし, =1:通常の粒成長)	1.5
ADDF	粒内再溶解を模擬する湧き出し密度をADDF倍する	9.0
AG	粒成長抑制パラメータ	1

NAMELISTで指定する変数　－軸方向ガス流動モデル－

変数名	内　　容	標準値
IST	ガス流動オプション =0:瞬時完全混合モデル =1:軸方向ガス拡散モデル	1
THG1	軸方向希ガス流動計算温度、体積変化に関する陰解法パラメータ ($0 \leq \theta_1 \leq 1$)	1
THG2	軸方向希ガス流動計算、拡散に関する陰解法パラメータ ($0 \leq \theta_2 \leq 1$)	1
DTPR	ガス流動拡散モデルにおける1タイムステップ当りの放出モル数の全プレナムモル数に対する割合 (タイムステップ幅の決定に用いる)	0.1, 0.01
ETA	ガス流動モデルの定常状態までの移行割合	0.05
AMLMX2	ガス流動モデルのセグメント間を拡散により移行するXe+krガスの1タイムステップ当りのモル数	1.E-6
NTVHE	TVHEのテーブルの大きさ	0
TVHE (13,50)	TVHE(1,n):n番目の時間テーブルの時刻(hr) TVHE(i,n):n番目の時刻でのi-1セグメントにおけるHe生成量(mole)	650*0.

NAMELISTで指定する変数　－熱膨張率－

変数名	内　　容	標準値
ICATHX	Zr熱膨張率ｵﾌﾟｼｮﾝ(軸方向)　(=0:MATPRO-09 , =2:SCOTT)	
ICDTHX	Zr熱膨張率ﾓﾃﾞﾙｵﾌﾟｼｮﾝ(径方向)　(=0:MATPRO-09)	
IPTHEX	UO_2燃料熱膨張率ｵﾌﾟｼｮﾝ (=0:FEMAX-4 ORIGINAL , =1:MATPRO-09 , =2:BURDICK AND PARKER , =3:HALDEN , =4:CONWAY AND FINCEL)	0

NAMELISTで指定する変数 －その他熱計算モデルオプション－

変数名	内　　容	標準値
IPTHCN	UO_2燃料熱伝導率モデルオプション （=0:FEMAX-4 ORIGINAL , =1:MATPRO-09 , =2:LYONS , =3:ASAMOT , =4:FIGRO ）	0
IGAPCN	ギャップコンダクタンスモデルオプション （=0:FEMAXｵﾘｼﾞﾅﾙ , =1:MATPRO-9 , =2:ROSS & STOUTE , =3:DEAN）	0

NAMELISTで指定する変数 －ペレットオプション－

変数名	内　　容	標準値
	ＭＯＸ燃料計算オプション	
MOX	MOX用の物性値の使用スイッチ（=1で使用）	0
PU	MOX=1のとき，PuO_2のモル分率を入力（mole Fract.）	0.0
Y	MOX=1のとき，UO_{2-y}のyの値を入力（$0 \leqq y \leqq 0.05$）	0.0
	ガドリニア入り燃料計算オプション	
IGD	ガドリニア入り燃料棒用スイッチ（=1で使用）	0
GD	IGD=1のとき，Gd_2O_3の濃度を入力（wt. Fract.）	0.0

NAMELISTで指定する変数 －被覆管腐食計算－

変数名	内　　容	標準値
ICORRO	被覆管の外面腐食ﾓﾃﾞﾙｵﾌﾟｼｮﾝ （=0:考慮しない , =1:Halden 実験式 =2:MATPRO-A(PWR)実験式 , =3:MATPRO-A(BWR)実験式	0
OXTH(I)	Iは軸方向のセグメント番号、I=1～セグメント数 N(Max.12)に対し、外表面の初期酸化膜厚みを指定。単位はμｍ。	1.0
NRCZR	力学計算時の被覆管健全層（金属相）の半径方向メッシュ分割数	2
NRCOX	力学計算時の被覆管外面酸化膜の半径方向メッシュ分割数	2
FCORRO	酸化膜成長速度の加速因子	0.
PBR	酸化による体積増加率（－）；Piling-Bedworth Ratio	1.4
AKFAC	被覆管表面熱伝達係数（Dittus-Boelter式）を増大させる係数	1.0
OXFAC	酸化膜熱伝導度を増大させる係数	1.0

NAMELISTで指定する変数 －出力制御１－

変数名	内　　容	標準値
IDAY	出力履歴の時間単位(IDAY=0:hr,=1:day)	0
IPLOPT	=0:入力した経歴点のみ掃き出す =1:計算したタイムステップ全点について掃き出す =-n:計算したタイムステップをn点おきに掃き出す （ただし、入力した経歴点は必ず掃き出す）　〈OFF-LINE PLOTER〉	0
IPRINT	出力オプション(=0:出力しない、=1:出力する)	標準(*1)
(1)	インプットデータリスト	1 (1)
(2)	燃料設計データ	1 (1)
(3)	座標・メッシュ切りデータ	1 (0)
(4)	パラメータリスト	1 (1)
(5)	履歴データ	1 (1)
(6)	タイムステップごとの熱的結果	1 (1)
(7)	タイムステップごとの力学的結果	1 (0)
(8)	セグメントごとの熱的結果のまとめ（熱モデル）	1 (1)
(9)	セグメントごとの力学的結果のまとめ（熱モデル）	1 (1)
(10)	セグメントごとのFPガスの結果のまとめ（熱モデル）	1 (1)
(11)	燃料棒全体のFPガスの結果のまとめ（熱モデル）	1 (1)
(12)	ペレット，被覆管の変形挙動のまとめ（力学的モデル）	1 (0)
(13)	ペレットの応力と歪のまとめ（力学的モデル）	1 (0)
(14)	被覆管の応力と歪のまとめ(力学的モデル)	1 (0)
(15)	主要結果のまとめ (Final Information)	1 (1)
(16)	セグメントごとの熱的挙動のプロッター (ON-LINE)　(Unit 14)	1 (1)
(17)	セグメントごとのFPガス挙動のプロッター (ON-LINE)　(Unit 14)	1 (1)
(18)	力学的挙動のプロッター (ON-LINE)　(Unit 14)	1 (0)
(19)	未使用	0 (0)
(20)	未使用	0 (0)
IWNOD	セグメント出力オプション (=0:出力しない,=1:出力する) IPRINT(8),IPRINT(9),IPRINT(10),IPRINT(16)IPRINT(17)において、 IWNOD(I)=1のセグメントIについて出力(プロッター出力を含む)され IWNOD(I)=0のセグメントIについては出力しない。 ただし、IWNODがすべて０の場合は、IFEM セグメントのみ IWNOD(IFEM)=1にセットされる。	12*0
IWTHE	熱的計算出力オプション (=0:出力しない,=1:出力する),(IPRINT(6)=1の場合のオプション)	
(1)	燃料温度	
(2)	ギャップガス	0
(3)	粒半径	0
(4)	粒内ガス気泡半径	0
(5)	粒内ガス気泡密度	0
(6)	粒内ガス拡散係数	0
(7)	粒内ガス実効拡散係数	0
(8)	粒内ガス原子数	0
(9)	粒界ガス原子数	0
(10)	放出ガス原子数	0
(11)	粒内＋粒界ガス原子数	0
(12)	粒内＋粒界＋放出ガス原子数	0
(13)	生成ガス原子数	0

NAMELISTで指定する変数 －出力制御２－

変数名	内　　容	標準値
IWTHE (14)	FPガス放出率	0
(15)	粒界ガス密度	0
(16)	粒界飽和ガス密度	0
(17)	熱計算の条件	0
(18)	熱計算の従来の出力	0
IWROD	力学計算出力オプション	
(1)	径方向応力	0
(2)	円周方向応力	0
(3)	軸方向応力	0
(4)	相当応力	0
(5)	降伏応力	0
(6)	径方向クリープ歪	0
(7)	円周方向クリープ歪	0
(8)	軸方向クリープ歪	0
(9)	クリープ硬化歪	0
(10)	相当塑性歪	0
(11)	スウェリング歪	0
(12)	径方向トータル歪	0
(13)	円周方向トータル歪	0
(14)	軸方向トータル歪	0
(15)	熱歪	0
(16)	要素温度	0
(17)	径軸方向圧力	0
(18)	径軸方向変位	0
IPLT	EXBURN-I プロッターテープの作成 （力学モデル） （Unit 1）	0
IPLT2	EXBURN-I プロッターテープの作成 （熱モデル）	0
IARGUS	ARGUS用出力ファイルを作成する(IARGUS=1) (NREC7(ユニット７番)を使用する。)	0

A．2 プロッタ入力マニュアル

Card No.	SYMBOL (FORMAT)	
1	コメント	
2	ISET (*)	図の総数

以下のカードをISET組入力する

3	IRNUM, ITOPT, ISYM (*)	機能の設定
	IRNUM; 1 図に描く線の本数 （最大５本） ITOPT; グラフの種類の指定 ITOPT=0 X軸を時間、燃焼度、線出力とする。 ITOPT=1 X軸を径、または軸方向座標とする。 ITOPT=2* 実測値との比較図を作成する。 （この場合は実測値が線を１本使うので、 IRUMは最大４本となる。） ISYM ;センターシンボルのオプション =0 センターシンボルをプロットしない =1 センターシンボルをプロットする	
4	IXOPT, IXOPT2, IYNUM, (IYOPT(I), I=1, IYNUM) (*)	軸の設定
	IXOPT; X軸の内容を指定する。 （ITOPT=0 or 2の場合に指定する） =1 時間 =2 径方向座標 (-) } ITOPT=1 の場合に指定する。 =3 軸方向座標 (-) } =4 燃焼度 （着目ノード点） =5 線出力 （着目ノード点, W/cm） =6 燃焼度 （要素平均） =7 線出力 （要素平均, W/cm） IXOPT2; 時間、燃焼度の単位の指定 X軸を時間（IXOPT=1）とした場合の単位指定 IXOPT2 =0 Hour IXOPT2 =1 Day X軸を燃焼度(IXOPT=4 or 6)とした場合の単位指定 IXOPT2 =0 MWd/tUO_2 IXOPT2 =1 GWd/tUO_2 IXOPT2 =2 MWd/tU IXOPT2 =3 GWd/tU X軸に時間、燃焼度以外を指定した場合は、IXOPT=2 とする。 IYNUM; Y軸の数。Y軸を２種類以上（＝２種類以上の物理量、IYNUM≧2） とした場合は、各軸ごとに１本づつグラフを描くことに なるため、IYNUM=IRNUM とする。 (IYOPT(I), I=1, IYNUM); Y軸の内容を表２から選択して、番号を入力する。	
5	(IR(I), I=1, IRNUM) (*)	径方向メッシュ番号
	(IR(I), I=1, IRNUM) 図ごとに径方向メッシュ番号を指定する 指定する必要がない場合は１を入力する	

Card No.	SYMBOL (FORMAT)	
6	(IZ(I), I=1, IRNUM) (*)	軸方向メッシュ番号
	(IZ(I), I=1, IRNUM) 図ごとに軸方向メッシュ番号を指定する 指定する必要がない場合は１を入力する	
7	(ITIM(I), I=1, 2) or (ITIM(I), I=1, RNUM) (*)	タイムステップ番号
	(ITOPT=0 または2の場合は(ITIM(I), I=1, 2)で入力する) ITIM(1)=図の始点のタイムステップ番号を指定する ITIM(2)=図の終点のタイムステップ番号を指定する (ITOPT=1の場合は、(ITIM(I), I=1, RNUM)で入力する) 図ごとにタイムステップ番号を指定する。	
8	X0, XM, XNUM, IXN, IFLAG(6) (*)	Ｘ軸目盛の設定
	IXOPT=2, 3のときはDUMMY X0 ;Ｘ軸目盛りの最小値 XM ; 〃 最大値 XNUM ; 〃 間隔 IXN ; 〃 小数点以下の桁数 (例) 10 のとき IXN=-1 10.0 のとき IXN= 1 10.00 のとき IXN= 2 IFLAG(6):Ｘ軸のスケールの指定 =3 Ｘ軸を自動スケールで計算する	
9	IYNUM枚必要 (I = 1, IYNUM) Y0(I), YM(I), YNUM(I), IYN(I), IFLAG(I) (*)	Ｙ軸目盛の設定
	Y0(I) ;Ｙ軸目盛りの最小値 YM(I) ; 〃 最大値 YNUM(I): 〃 間隔 IYN(I) ; 〃 小数点以下の桁数 (IXNと同様に入力) IFLAG(I);Ｙ軸目盛りのオプション =0 目盛りを実数タイプで描く（小数表示） =1 〃 Ｅタイプで描く（指数表示） =2 Ｙ軸を対数軸にする =3 Ｙ軸を自動スケールで計算する (*)IFLAG(I)=3の時は自動スケールなのでY0〜IYNはDUMMY	

(注1) ITOPT=2のときには、実測データをユニット２から入力する。
このため、ユニット２に(X, Y)組としたデータ列を用意する必要がある。
（データはフリーフォーマットで作成する。）

Ｙ軸の内容（１）

群	NO	項　　目	単位
A 時間・燃焼度に対するデータ	1	要素平均燃焼度	(MWd/tUO_2)
	2	ＦＰガス放出率	(%)
	3	プレナム内圧	(MPa)
	4	プレナム体積	(cc)
	5	ペレット伸び	(%)
	6	被覆管伸び	(%)
	7	被覆管最大外径変化	(μm)
	8	軸方向平均線出力	(w/cm)
	9	平均Iodine濃度	(g/cm^2)
	10	最大Iodine濃度	(g/cm^2)
	67	被覆管平均外径変化	(μm)

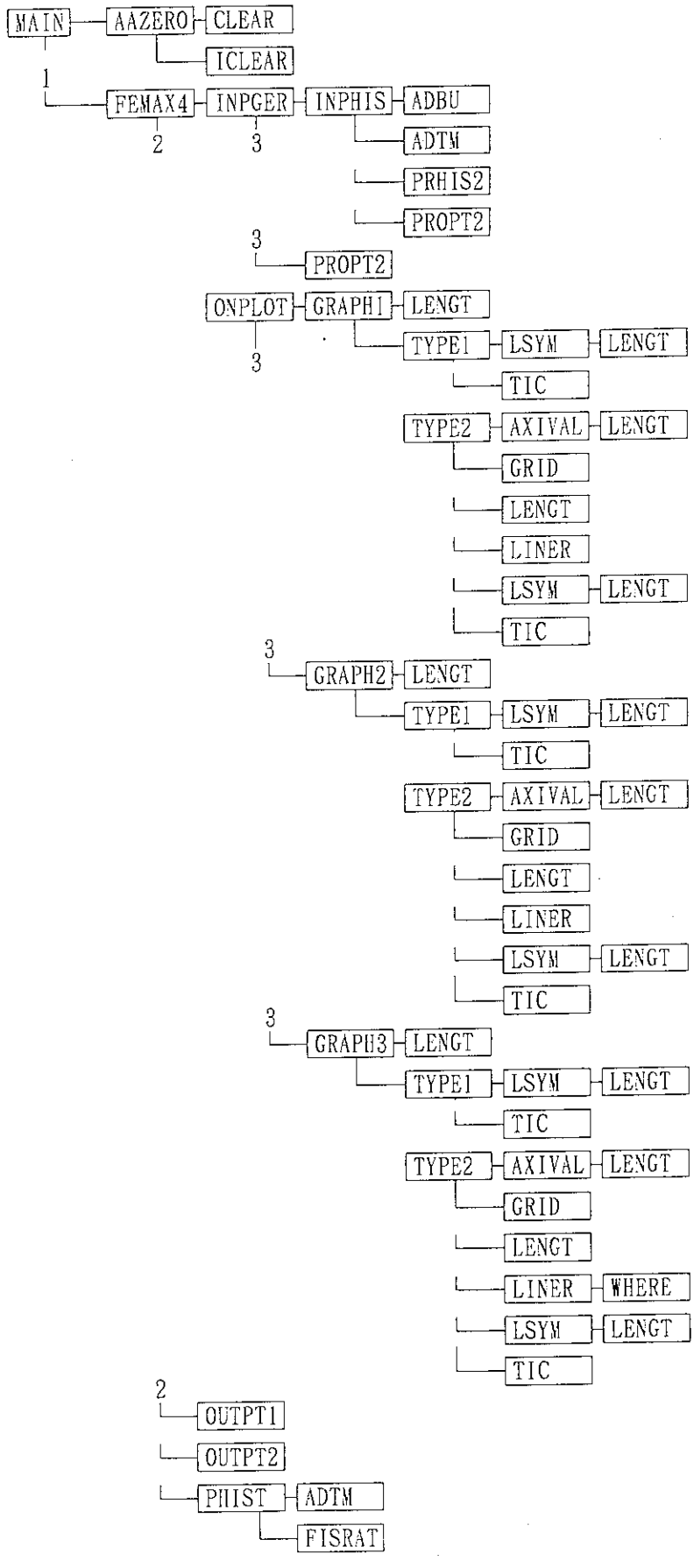
Ｙ軸の内容（２）

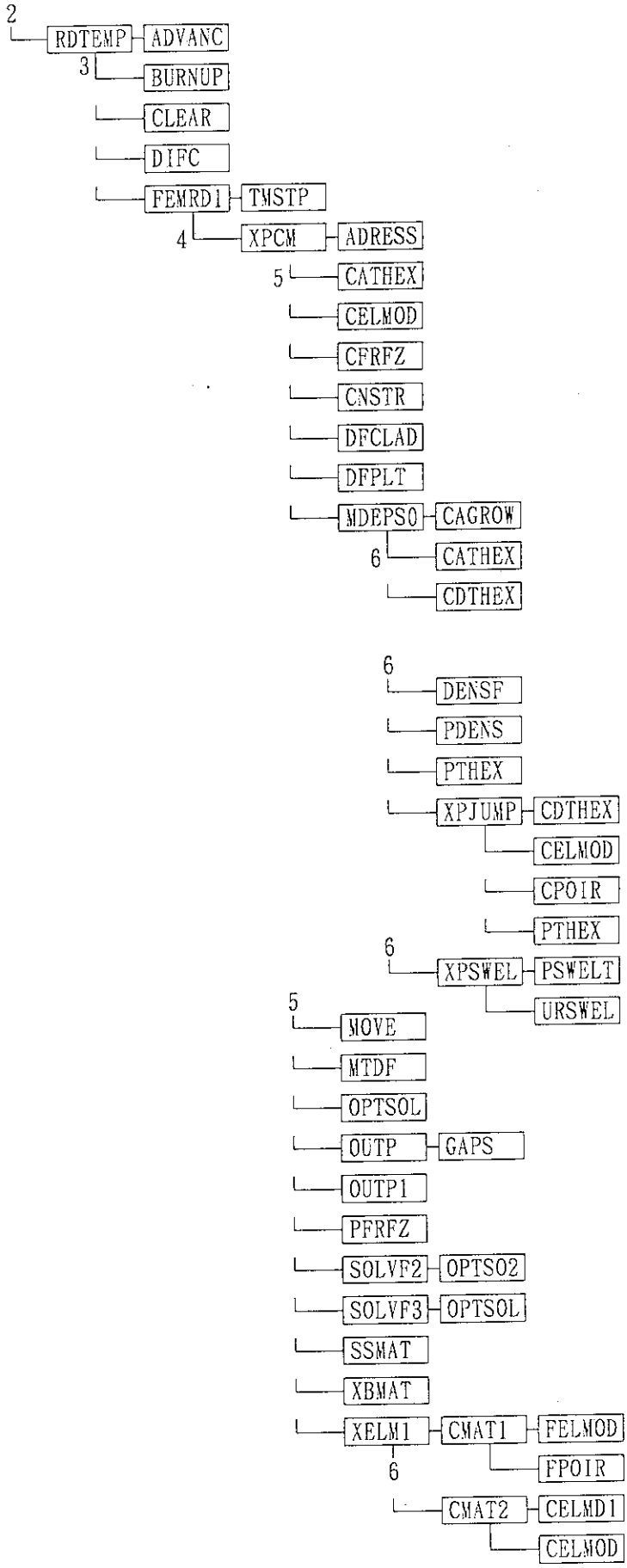
群	NO	項　　目	単位
B 時間・燃焼度と軸方向座標に対するデータ	11	線出力	(W/cm)
	12	燃焼度	(MWd/tUO_2)
	13	全ギャップ幅（直径）	(μm)
	14	ＰＣＭＩ圧力	(MPa)
	15	ＦＰガス放出率	(%)
	16	ペレット－被覆管摩擦力	(MPa)
	17	ペレット伸び	(%)
	18	被覆管伸び	(%)
	19	ギャップコンダクタンス	(W/cm^2c)
	20	冷却材温度	(℃)
	21	被覆管内面温度	(℃)
	22	被覆管外面温度	(℃)
	23	ペレット中心温度	(℃)
	24	ペレット外面温度	(℃)
	25	被覆管外径変化	(μm)
	26	Ｘｅ＋Ｋｒ組成	(%)
	68	ペレット密度	(T・D)
	69	酸化膜-金属相界面温度	(℃)
	70	酸化膜厚み	(μm)

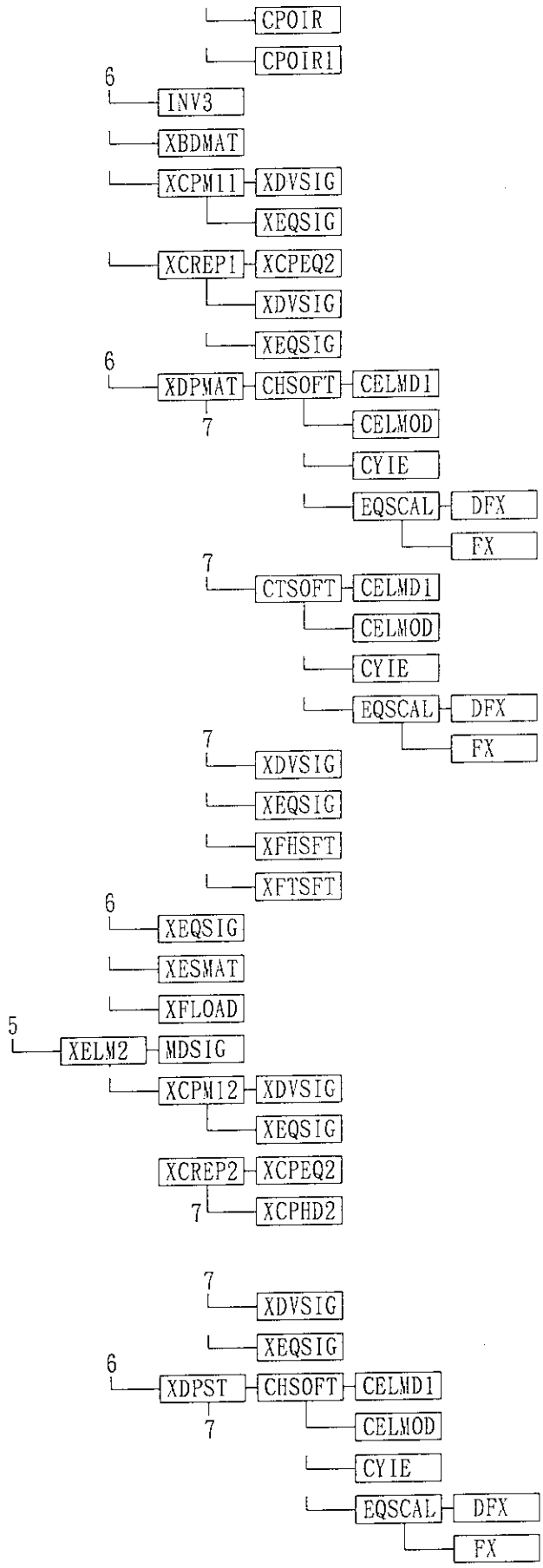
Ｙ軸の内容（３）

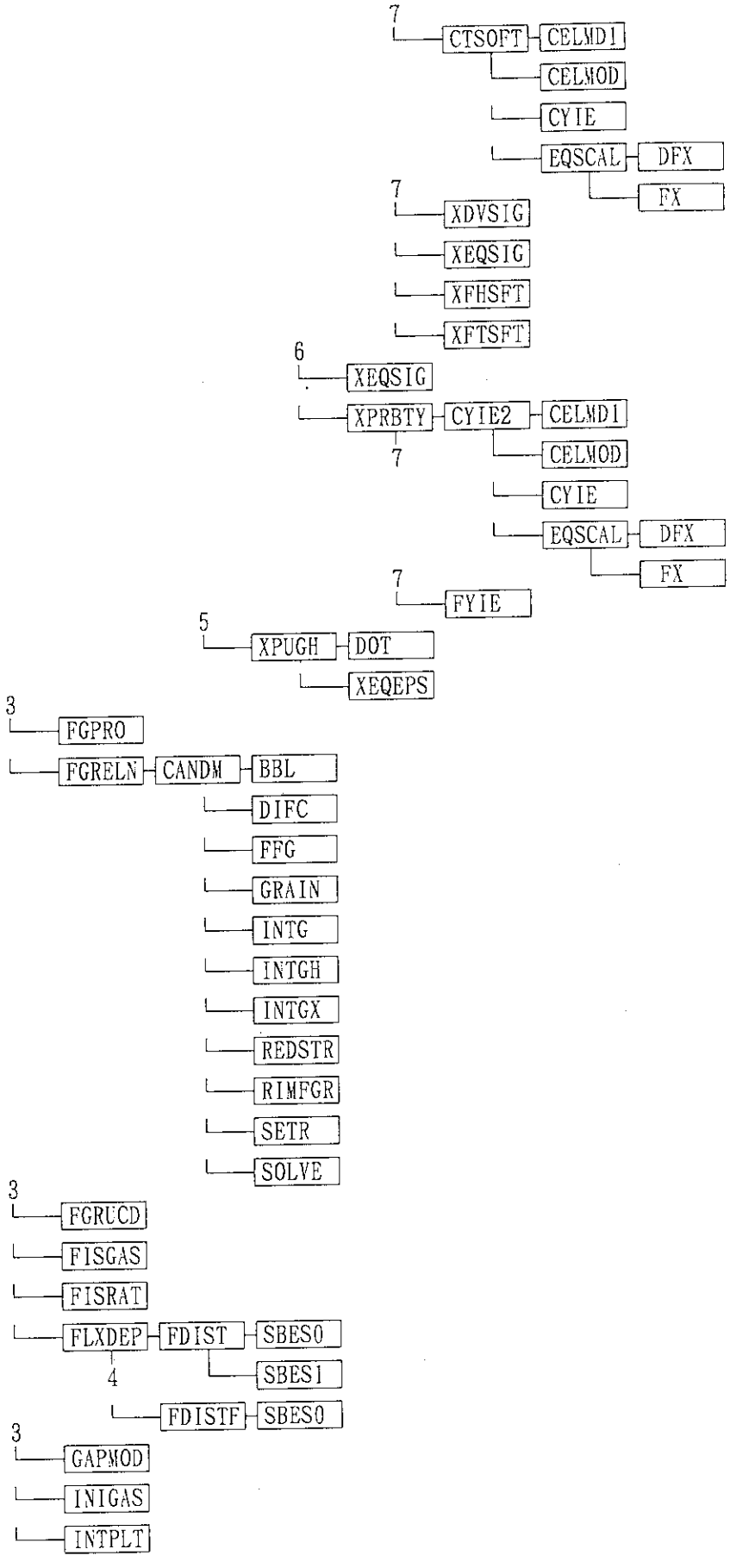
群	NO	項　　目	単位
C	27	ペレット相当応力	(MPa)
	28	ペレット平均応力	(MPa)
時	29	ペレット径方向応力	(MPa)
間	30	ペレット周方向応力	(MPa)
・	31	ペレット軸方向応力	(MPa)
燃	32	ペレット径方向弾性歪	(0.01%)
焼	33	ペレット周方向弾性歪	(0.01%)
度	34	ペレット軸方向弾性歪	(0.01%)
と	35	ペレット相当クリープ歪	(0.01%)
軸	36	ペレット径方向クリープ歪	(0.01%)
方	37	ペレット周方向クリープ歪	(0.01%)
向	38	ペレット軸方向クリープ歪	(0.01%)
座	39	ペレット相当塑性歪	(0.01%)
標	40	ペレット径方向歪	(0.01%)
及	41	ペレット周方向歪	(0.01%)
び	42	ペレット軸方向歪	(0.01%)
径	43	ペレット径方向熱膨張歪	(0.01%)
方	44	ペレット軸方向熱膨張歪	(0.01%)
向	45	ペレットスウェリング歪(⊿L/L)	(0.01%)
座	46	ペレット要素温度	(℃)
標	47	ペレットＦＰガス放出率	(%)
に	48	被覆管相当応力	(MPa)
対	49	被覆管平均応力	(MPa)
す	50	被覆管径方向応力	(MPa)
る	51	被覆管周方向応力	(MPa)
デ	52	被覆管軸方向応力	(MPa)
ー	53	被覆管径方向弾性歪	(0.01%)
タ	54	被覆管周方向弾性歪	(0.01%)
	55	被覆管軸方向弾性歪	(0.01%)
	56	被覆管相当クリープ歪	(0.01%)
	57	被覆管径方向クリープ歪	(0.01%)
	58	被覆管周方向クリープ歪	(0.01%)
	59	被覆管軸方向クリープ歪	(0.01%)
	60	被覆管相当塑性歪	(0.01%)
	61	被覆管径方向歪	(0.01%)
	62	被覆管周方向歪	(0.01%)
	63	被覆管軸方向歪	(0.01%)
	64	被覆管径方向熱膨張歪	(0.01%)
	65	被覆管軸方向熱膨張歪	(0.01%)
	66	被覆管スウェリング歪	(0.01%)
	71	被覆間要素温度	(℃)

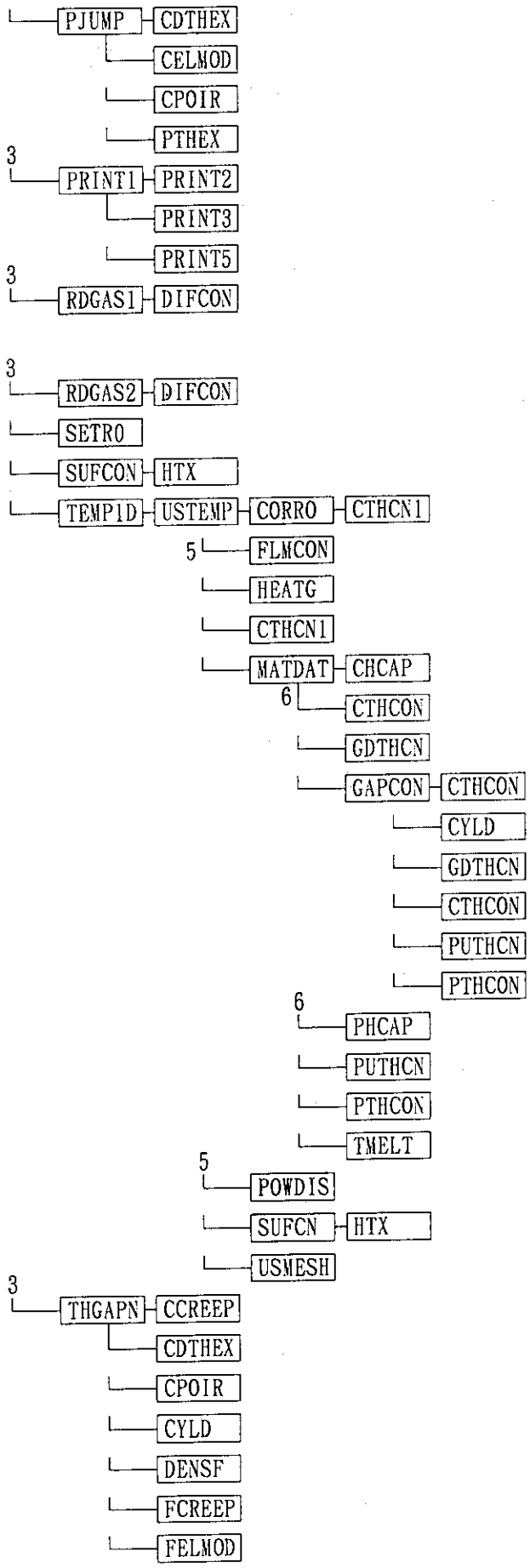
A．3　Subroutine Tree of EXBURN-I

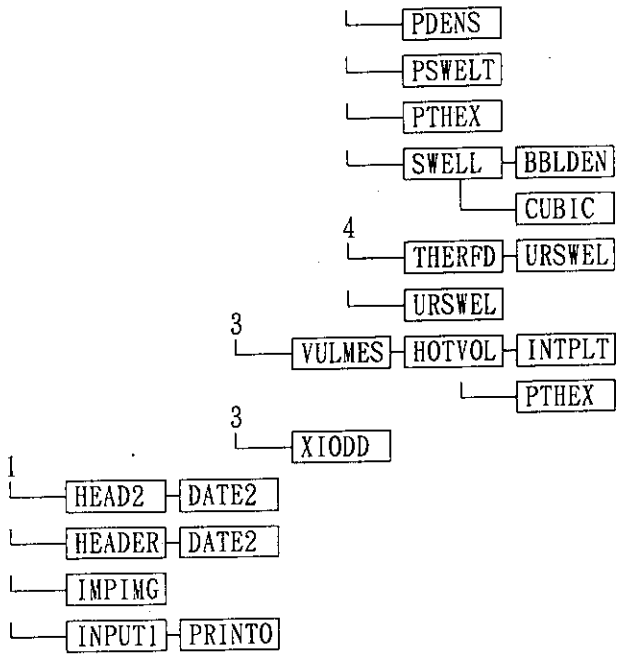



2
RDTEMP
ADVANC
3
BURNUP
CLEAR
DIFC
FEMRD1
TMSTP
4
XPCM
ADRESS
5
CATHEX
CELMOD
CFRFZ
CNSTR
DFCLAD
DFPLT
MDEPS0
CAGROW
6
CATHEX
CDTHEX
6
DENSF
PDENS
PTHEX
XPJUMP
CDTHEX
CELMOD
CPOIR
PTHEX
6
XPSWEL
PSWELT
URSWEL
5
MOVE
MTDF
OPTSOL
OUTP
GAPS
OUTP1
PFRFZ
SOLVF2
OPTSO2
SOLVF3
OPTSOL
SSMAT
XBMAT
XELM1
CMAT1
FELMOD
6
FPOIR
CMAT2
CELMD1
CELMOD


CPOIR
CPOIR1
6
INV3
XBDMAT
XCPM11
XDVSIG
XEQSIG
XCREP1
XCPEQ2
XDVSIG
XEQSIG
6
XDPMAT
CHSOFT
CELMD1
7
CELMOD
CYIE
EQSCAL
DFX
FX
7
CTSOFT
CELMD1
CELMOD
CYIE
EQSCAL
DFX
FX
7
XDVSIG
XEQSIG
XFHSFT
XFTSFT
6
XEQSIG
XESMAT
XFLOAD
5
XELM2
MDSIG
XCPM12
XDVSIG
XEQSIG
XCREP2
XCPEQ2
7
XCPHD2
7
XDVSIG
XEQSIG
6
XDPST
CHSOFT
CELMD1
7
CELMOD
CYIE
EQSCAL
DFX
FX


7
CTSOFT
CELMDI
CELMOD
CYIE
EQSCAL
DFX
FX
7
XDVSIG
XEQSIG
XFHSFT
XFTSFT
6
XEQSIG
XPRBTY
CYIE2
CELMDI
CELMOD
CYIE
EQSCAL
DFX
FX
7
7
FYIE
5
XPUGH
DOT
XEQEPS
3
FGPRO
FGRELN
CANDM
BBL
DIFC
FFG
GRAIN
INTG
INTGH
INTGX
REDSTR
RIMFGR
SETR
SOLVE
3
FGRUCD
FISGAS
FISRAT
FLXDEP
FDIST
SBES0
SBES1
4
FDISTF
SBES0
3
GAPMOD
INIGAS
INTPLT


PJUMP
CDTHEX
CELMOD
CPOIR
PTHEX
3
PRINT1
PRINT2
PRINT3
PRINT5
3
RDGAS1
DIFCON
3
RDGAS2
DIFCON
SETRO
SUFCON
HTX
TEMP1D
USTEMP
CORRO
CTHCN1
5
FLMCON
HEATG
CTHCN1
MATDAT
CHCAP
6
CTHCON
GDTHCN
GAPCON
CTHCON
CYLD
GDTHCN
CTHCON
PUTHCN
PTHCON
6
PHCAP
PUTHCN
PTHCON
TMELT
5
POWDIS
SUFCN
HTX
USMESH
3
THGAPN
CCREEP
CDTHEX
CPOIR
CYLD
DENSF
FCREEP
FELMOD


PDENS
PSWELT
PTHEX
SWELL
BBLDEN
CUBIC
4
THERFD
URSWEL
URSWEL
3
VULMES
HOTVOL
INTPLT
PTHEX
3
XIODD
1
HEAD2
DATE2
HEADER
DATE2
IMPIMG
INPUT1
PRINTO

A．4．　出力例

EXTENDED BURN-UP FUEL ANALYSIS

VERSION 1.0

RUN DATE 94/06/27

```
*****************************************************************************
*                                                                           *
*                                                                           *
*          SAMP    LE                                                       *
*                                                                           *
*                                                                           *
*****************************************************************************
```

I N P U T D T A L I S T

```
                    1         2         3         4         5         6                   8
CARD NO. ....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5.....  ...5....0
    1. SAMPLE
    2.  &INPUT IBUNP=0,ICK1=0,GR=10.,IPLT=0,BETAX=0.002,IFEMRD=1,
    3.         R1=1.,EPSRLZ=5.D-3,IPLOPT=0,DMAX=2.,GRWF=1.,SBU=1.04,FCRFAC=1.,
    4.         IPTHCN=6,BUMIN=5000.0,BUMAX=20000.0,IURS=1,
    5.         ICORRO=1,IGASP=0,EFCOEF=1.0,
    6.         FAREA=1.17,OXFAC=1.5,AKFAC=2.5,DTPL=2.0,
    7.         OXTH=10*2.0,
    8.         IPRINT(16)=3*0,
    9.         IWTHE=18*1,IWROD=18*1,
   10. &END
   11.         10         5         3
   12.          1      0.95     1.095
   13.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   14.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   15.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   16.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   17.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   18.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   19.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   20.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   21.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   22.          0         0       0.0      0.93       4.0      0.03      0.95      4.50
   23.       3.26       3.0       1.0       0.0       0.0       0.0     332.0       0.0
   24.          3
   25.                   0.0       0.0   1.0D+14     578.0      15.0   100     1       2.2
   26.  0.55 0.67 0.77 0.88 0.97 1.06 1.13 1.24 1.33 1.40                3
   27.                 610.0     150.0                578.0      15.0         1       2.2
   28.                9900.0     120.0   1.0D+14     578.0      15.0         2       2.2
   29. STOP
       ....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0....5....0
```

SAMPLE

P.W.R. FUEL ROD.

*INPUT DATA

(1) PELLET SPECIFICATIONS ----

NODE	DIAMETER (CM) INSIDE	DIAMETER (CM) OUTSIDE	SHAPE CHAMF	SHAPE DISH	U-235 ENRICH.	FRACTIONAL DENSITY	ONE PELLET LENGTH (CM)	NODE LENGTH (CM)
1	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
2	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
3	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
4	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
* 5	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
6	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
7	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
8	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
9	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500
10	0.000	0.930			0.030	0.950	4.000	4.500

PELLET TOTAL WEIGHT (GRAM) = 332.000
GRAIN SIZE (MICRON) = 10.000
MAXIMUM FRACTIONAL DENSITY = 0.970
SATURATE BURNUP (MWD/TUO2) = 10000.000

(2) OTHERS

CLAD. MATERIAL IS STRESS RELIEVED ZIRCALOY
CLAD. INSIDE DIAMETER (CM) = 0.950
CLAD. OUTSIDE DIAMETER (CM) = 1.095

THERMAL RELOCATION (-) = 0.200
UPPER PLENUM VOLUME (CM**3) = 3.260
LOWER PLENUM VOLUME (CM**3) = 0.000
INITIAL GAS PRESSURE (MPA) = 3.000

INITIAL GAS COMPOSITION (PERCENT)
HELIUM = 100.0
NITROGEN = 0.0
KRYPTON = 0.0
XENON = 0.0
PELLET SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0001
CLADDING SURFACE ROUGHNESS (CM) = 0.0001
ROOM TEMPERATURE (DEG.K) = 291.15

SAMPLE -- FEMAXI-IV (VER-00) --

CALCULATIONAL PARAMETERS(1)

NAMELIST PARAMETERS

PARAMETER	DESCRIPTION	DIMENSION	VALUE
INPCK	INPUT DATA CHECK OPTION (=0;CALCULATION ,=1;INPUT DATA CHECK)		0
IBUNP	UNIT OPTION FOR BURNUP (=0;MWD/TUO2 ,=1;MWD/TU, =2;GW/KGU)		0
ICX1	FEM MECHANICAL CALCULATION OPTION (=0;CALCULATE ,=1;NOT CALCULATE		0
DMAX	INCREASED DENSITY IN RESINTERING TEST(1700 DEG.C * 24 HR)	PERCENT	2.00
SBU	BURNUP AT WHICH DENSIFICATION TERMINATES	MWD/TUO2	10000.0
CRFAC	CREEP ACCELERATION FACTOR	-	1.30
DE	EQUIVALENT HYDRAULIC DIAMETER	CM	0.01
FAREA	FLOW AREA OF COOLANT	CM**2	0.00
PITCH	FUEL ROD PITCH	CM	1.30
IPH	POWER INCREMENTAL WIDTH ATTENTION SEGMENT (=0;IFEM SEGMENT ,=1;MAXIMUM POWER SEGMENT)	-	0
IOPT1	BOTTOM PLENUM OPTION (=0;NO BOTTOM ,=1;BOTTOM PLENUM IS PRESENT)	-	0
IFLX	NUMBER TO INPUT THE RADIAL FLUX DEPRESSION PROFILE	-	0
AR	DIAMETER OF EQUIVALENT SPHERE (USED IN COMPUTING THERMAL ANALYSIS)	CM	0.00100
IWROD	ELEMENT INFORMATION OUTPUT CONTROL TABLE (=0;OFF ,=1;ON)		

= 1;RADIAL STRESS	1	=11;SWELLING STRAIN	1
= 2;CIRCUM. STRESS	1	=12;RADIAL TOTAL STRAIN	1
= 3;AXIAL STRESS	1	=13;CIRCUM. TOTAL STRAIN	1
= 4;EQUI. STRESS	1	=14;AXIAL TOTAL STRAIN	1
= 5;YIELD STRESS	1	=15;THERMAL STRAIN	1
= 6;RADIAL CREEP STRAIN	1	=16;ELEMENT TEMPERATURE	1
= 7;CIRCUM. CREEP STRAIN	1	=17;PRESSURE	1
= 8;AXIAL CREEP STRAIN	1	=18;NODE DISPLACEMENT	1
= 9;EQUI. HARD STRAIN	1		
=10;EQUI. PLAS. STRAIN	1		

GR	GRAIN SIZE (USED IN COMPUTING MECHANIGAL ANALYSIS)	MICRON	10.00
IPLT	DRAW UP PLOTTER TAPE OPTIONS (=0;NO ,=1;YES)	-	0
IPLT2	DRAW UP PLOTTER TAPE OPTIONS (=0;NO ,=1;YES)	-	0
FBSAT	SATURATION DENSITY CONTROL FACTOR	-	1.00
THEATF	GAS FLOW CALCULATION OPTION (=0;EXPLICIT, =0.5;CRANC-NICOLSON ,=1;IMPLICIT)	-	1.00
PREL	DIVIDING FRACTIONS OF ELEMENTS IN A GRAIN	-	10.0 1.0 1.0 1.0
RB	WIDTH OF RESOLUTION LAYER	CM	2.00-06
FACD	DIFFUSION COEFFICIENT CONTROL FACTOR	-	1.00
FGG	RELEASE FRACTION BY GRAIN BOUNDARY SWEEPING	-	1.00
AG	COEFFICIENT TO CONTROL BURNUP DEPENDENCY OF GRAIN GROWTH	-	1.00
APORF	INITIAL GAS BUBBLES RADIUS	CM	0.00+00
FACP	FACTOR TO CONTROL EXTERNAL PRESSURE IN SWELLING	-	1.00
BNMIN	MINIMUM SATURATION DENSITY	ATOMS/CM**2	5.00+14
ISWEL	SWELLING MODEL OPTION (=0;ORIGINAL ,=1;MODIFIED)	-	0
XRELOC	RELOCATION PARAMETER IN THERMAL CALCULATION	-	0.20
BFCT	FACTOR TO CONTROL RESOLUTION RATE FROM INTRAGRANULAR BUBBLES TO MATRIX	-	1.00
GRWF	FACTOR TO CONTROL GRAIN GROWTH RATE (=0;NO GROWTH ,=1;ORDINAL GROWTH)	-	1.00
ADDF	FACTOR TO CONTROL RESOLUTION RATE FROM BOUNDARY TO GRAIN	-	9.00
MPP	THERMAL CALCULATION OPTION (=0;STANDARD ,=1;SIMPLE)	-	0
TLIM	CPU FINISH TIME	SEC	1000.00
RI	PELLET SURFACE ROUGHNESS	MICRON	1.00
TCRMX	CUT OFF TEMPERATURE OF PELLET CREEP CALCULATION (THERMAL MODEL)	DEG.K	1773.15
IWTHE	THERMAL INFORMATION OUTPUT OPTION (=0;OFF ,=1;ON)		

=1;TEMPERATUE	1	=10;RELEASED ATOMS	1
=2;GAP GAS	1	=11;GR. +BOU. ATOMS	1
=3;GRAIN RADIUS	1	=12;GR. +BOU. +REL. ATOMS	1
=4;INT. BUBBLE RADIUS	1	=13;PRODUCED ATOMS	1
=5;INT. BUBBLE DENSITY	1	=14;FISSION GAS RELEASE	1
=6;DIFFUSION COEF.	1	=15;BOUNDARY DENSITY	1
=7;EFFECT. DIF. COEF.	1	=16;BOUND. SAT. DENSITY	1
=8;GRAIN ATOMS	1	=17;THERMAL INFORMATION	1
=9;BOUNDARY ATOMS	1	=18;THERMAL GENERAL OUTPUT	1

IPRINT	OUTPUT OPTION (=0;OFF ,=1;ON)		
= 1;INPUT DATA LIST			1
= 2;FUEL DESIGN DATA			1
= 3;MESH AND COORDINATE DATA			1
= 4;PARAMETERS LIST			1
= 5;HISTORY DATA LIST			1
= 6;THERMAL RESULTS	(EVERY TIME STEP)		1
= 7;MECHANICAL RESULTS	(EVERY TIME STEP)		1
= 8;THERMAL RESULTS	(THERMAL MODEL)		1
= 9;MECHANICAL RESULTS	(THERMAL MODEL)		1
=10;FP GAS RESULTS	(EVERY SEGMENT)		1
=11;FP GAS RESULTS	(WHOLE ROD)		1
=12;FUEL-CLAD DISPLACEMENT	(MECHANICAL MODEL)		1
=13;FUEL STRESS AND STRAIN	(MECHANICAL MODEL)		1
=14;CLAD STRESS AND STRAIN	(MECHANICAL MODEL)		1
=15;FINAL INFORMATION			0
=16;THERMAL BEHAVIOR	(PLOTTER)		0
=17;FP GAS BEHAVIOR	(PLOTTER)		0
=18;MECHANICAL BEHAVIOR	(PLOTTER)		0
IWNOD	AXIAL SEGMENT PRINT AND PLOTTER OPTION (=0;OFF ,=1;ON)		0 0 0 0 1 0 0 0 0 0

CALCULATIONAL PARAMETERS(2)

PARAMETERS FOR FEM ANALYSIS

PARAMETER	DESCRIPTION	DIMENSION	VALUE
DPXX	POWER DEPENDENT TIME STEP	-	10.00
EFCDEF	CREEP DEPENDENT TIME STEP	-	1.00
ITEND	NUMBER OF NEWTON-RAPHSON ITERATIONS	-	1
KUMAX	NUMBER OF SLIP/FIXED ITERATIONS	-	10
THETC	CREEP PARAMETER	-	1.00
THETP	PLASTIC PARAMETER	-	0.50
AY	TILTING VALUE	CM	0.00
AMU	FRICTION COEFFICIENT BETWEEN FUEL AND CLADDING	-	0.40
ILOCK	LOCKING OPTION	-	0
TROOM	ROOM TEMPERATUE	DEG.K	291.15
HO,FO,GO,EO	PELLET PARAMETER OF ANISOTROPY	-	1.0 1.0 1.0 3.0
GAMR,GAMZ,GAMT	CRACK PARAMETER	-	0.0 0.0 0.0
BETA	HOTPRESS PARAMETER	-	0.002
YEC	PELLET CRACK ELASTIC VALUE (YEC(R),YEC(Z),YEC(T))	PA	2.00+09 2.00+09 2.00+09
FRELOC	MECHANICAL RELOCATION PARAMETER	-	0.50
EPSRLZ	AXIAL RELOCATION PARAMETER	-	5.000D-03
DCHG	RE-RELOCATOIN PARAMETER	-	0.50
SPCON	UNRESTRAINT SWELLING BOUNDARY STRESS	PA	-1.000D+06
XN	UNRESTRAINT SWELLING BOUNDARY STRESS COEF.	-	1.00
HO,FO,GO,EO	CLADDING PARAMETER OF ANISOTROPY	-	1.0 1.0 1.0 3.0

CALCULATIONAL PARAMETERS(3)

DIMENSION INFORMATION

PARAMETER	DESCRIPTION	DIMENSION	VALUE
LASR	REAL DIMENSION AREA (USED)	-	97606

LC	REAL DIMENSION AREA (DEFINED)	-	100000
LAS1	INTEGER DIMENSION AREA (USED)	-	3203
LD1	INTEGER DIMENSION AREA (DEFINED)	-	10000
NCDE	NODAL POINT NUMBER	-	80
NOD2	NODAL POINT FREEDUM NUMBER	-	160
NELM	ELEMENT NUMBER	-	18
NPAR	GAP PAIR NUMBER	-	0
NMAX	SYMMETRIC MATRIX FREEDUM NUMBER	-	144
NMY	NON-SYMMETRIC MATRIX FREEDUM NUMBER	-	14
NMK	BOUNDARY PAIR NUMBER	-	6
MAX	SYMMETRIC MATRIX AREA	-	0
NC9	ASYMMETRIC MATRIX AREA	-	0
MM	CLADDING LAYER NUMBER	-	1
NH	PELLET LAYER NUMBER	-	5
KK	AXIAL LAYER NUMBER	-	3
NAX	AXIAL NODE NUMBER	-	10
NHIST	TIME HISTORY POINT NUMBER	-	3

FILM CONDUCTANCE OPTION

PARAMETER	DESCRIPTION	DIMENSION	VALUE
PITCH	FUEL ROD PITCH	CM	1.300
FAREA	FLOW AREA	CM2	1.170
DE	EQUIVALENT HYDRAURIC DIAMETER	CM	1.360

***** HISTORY DATA (1) *****

STAGE NO. (NHIST)	TIME (H: M: S)	BURNUP (MWD/TUO2)	(MWD/TU)	(GJ/KGU)	L.H.R (W/CM)	COOLANT TEMP. (DEG.K)	COOLANT PRESS. (MPA)	COOLANT VELOSITY (M/S)	FAST NEWTRON FLUX (N/CM2.)	HISTRY OPTION (0=OFF)	PRINT OPTION (1=ON)	SS/US OPTION (1=ON)
1	0: 0: 0	0.0	0.0	0.00	0.0	578.00	15.00	2.2	1.0000+14	100	1	0
2	1438:26:50	610.0	692.0	59.72	150.0	578.00	15.00	2.2	1.0000+14	0	1	0
3	13608:59:51	9900.0	11231.5	969.21	120.0	578.00	15.00	2.2	1.0000+14	0	2	0

LAST STAGE NUMBER = 3

***** HISTORY DATA (2) *****

STAGE (NHIST)	TIME (H: M: S)	L.H.R. (W/CM)	AXIAL PEAKING FACTOR (1)	(2)	(3)	(4)	(5)	6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	0: 0: 0	0.00	0.550	0.670	0.770	0.880	0.970	1.060	1.130	1.240	1.330	1.400	0	0
2	1438:26:50	150.00	0.550	0.670	0.770	0.880	0.970	1.060	1.130	1.240	1.330	1.400	0	0
3	13608:59:51	120.00	0.550	0.670	0.770	0.880	0.970	1.060	1.130	1.240	1.330	1.400	0	0

FEM ANALYSIS IS APPLIED AT SEGMENT OF NUMBER 5

****

******** OUTPUT ---STAGE--- 1 ********** IFEM = 5 ****

****

THERMAL ANALYSIS INFORMATION

STAGE NO.	1	
TIME	0.00	HR
COOLANT TEMPERATURE	578.00	DEG.K
COOLANT PRESSURE	1.500+01	MPA

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURN UP (MWD/TU02)	GAP CONDUCTANCE (W/CM**2 K) TOTAL	GAS	SOLID	RAD.	TEMPERATURE (K) PC	PS	CI	CS	CLEARANCE (MICRONS)	CONTACT FORCE(MPA)
1	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
2	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
3	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
4	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
* 5	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
6	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
7	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
8	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
9	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000
10	0.001	0.0	0.2941	0.2912	0.0000	0.0029	578.0	578.0	578.0	578.0	75.188	0.000

NODE	CSFR*	PFAC*	BURN UP (FISS/CC *10**20)	PELLET DISPLACEMENT (MICRONS) THERMAL EXPANS.	CREEP	DENSIFI CATION	IRRAD. SWELL	RELOC ATION	DISPLA CEMENT	CLADDING DISPLACEMENT (MICRONS) THERMAL EXPANS.	ELASTIC DEFORM.	CREEP	DISPLA CEMENT
1	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
* 5	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.8943	2.0000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

NODE	ZR-ZROX INT. TEMP.(K)	CLAD SURFACE TEMP.(K)	COOLANT TEMP.(K)	CLAD OUTER CORROSION RATE(MICRON/D)	THICNESS(MICRON)	CLAD SURF. TEMP. HALDEN EXP.(K)
1	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
2	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
3	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
4	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
* 5	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
6	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
7	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
8	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
9	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
10	578.0	578.0	578.0	0.00097	2.00000	578.0
PL	580.0	580.0	578.0	0.00428	1.00000	

INITIAL GAS (MOL) = 5.630-03

FISSION GAS RESULT

LOCAL FISSION GAS RELEASE FRACTION (AXIAL NODE)
1 0.00500 2 0.00500 3 0.00500 4 0.00500 5 0.00500 6 0.00500 0.00500 8 0.00500 9 0.00500 10 0.00500

ROD AVERAGE FISSION GAS = 0.00500 FRACTIONS OF GAS MIXTU - (PERCENT) AXIAL NODE

			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RELEASE FRACTION												
ROD GAS PRESSURE (MPA) =	5.954	HE	100.0	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
		N2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TOTAL GAS (MOL) =	5.630-03	KR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
		XE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

RELEASED IODINE (GRAM/CM**2) = 2.59D-21 (AVERAGE) 2.51D-21 (PEAK)

(MOL)	HE	N2	KR	XE		TOTAL
PRODUCED GAS	0.000+00	0.000+00	1.30D-17	8.700-17	. . . .	1.00E-16
RELEASED GAS	0.00D+00	0.000+00	8.19D-21	5.48D-20	. . . .	6.30E-20
ROD GAS	5.630-03	0.000+00	8.19D-21	5.48D-20	. . . .	5.63E-03

RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AT AXIAL NODE OF 5

PELLET 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	/ GAP /	CLAD. 1	2	3
578	578	578	578	578	578	578	578	578	578	578		578	578	578

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE FUEL (DEG.C) IWTHE= 1

SEG										
10	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
9	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
8	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
7	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
6	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
5	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
4	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
3	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
2	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85
1	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85	304.85

GAP GAS INFORMATION (X) IWTHE= 2

SEG	HE	N2	KR	XE
10	100.0	0.0	0.0	0.0
9	100.0	0.0	0.0	0.0
8	100.0	0.0	0.0	0.0
7	100.0	0.0	0.0	0.0
6	100.0	0.0	0.0	0.0
5	100.0	0.0	0.0	0.0
4	100.0	0.0	0.0	0.0
3	100.0	0.0	0.0	0.0
2	100.0	0.0	0.0	0.0
1	100.0	0.0	0.0	0.0

RADIUS OF GRAIN (MICRON) IWTHE= 3

SEG										
10	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
9	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
8	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
4	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
2	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
1	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

RADIUS OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (ANGSTROM) IWTHE= 4

SEG										
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

DENSITY OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (BUBBLES/CM**3) IWTHE= 5

SEG										
10	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
9	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
8	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
7	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
6	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
5	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
4	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
3	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
2	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18
1	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18	1.935D+18

DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 6

SEG										
10	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
9	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
8	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
7	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
6	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
5	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
4	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
3	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
2	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
1	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17

EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 7

SEG										
10	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
9	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
8	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
7	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
6	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
5	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
4	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
3	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
2	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
1	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 8

SEG										
10	9.030D-06	2.715D-05	4.547D-05	6.411D-05	8.319D-05	1.029D-04	1.232D-04	1.444D-04	1.666D-04	1.898D-04
9	8.579D-06	2.580D-05	4.320D-05	6.090D-05	7.903D-05	9.771D-05	1.171D-04	1.372D-04	1.582D-04	1.803D-04
8	7.998D-06	2.405D-05	4.027D-05	5.678D-05	7.368D-05	9.110D-05	1.091D-04	1.279D-04	1.475D-04	1.681D-04
7	7.289D-06	2.192D-05	3.670D-05	5.174D-05	6.715D-05	8.302D-05	9.945D-05	1.166D-04	1.344D-04	1.532D-04
6	6.837D-06	2.056D-05	3.443D-05	4.854D-05	6.299D-05	7.787D-05	9.329D-05	1.093D-04	1.261D-04	1.437D-04
5	6.257D-06	1.881D-05	3.150D-05	4.442D-05	5.764D-05	7.126D-05	8.537D-05	1.001D-04	1.154D-04	1.315D-04
4	5.676D-06	1.707D-05	2.858D-05	4.030D-05	5.229D-05	6.465D-05	7.745D-05	9.077D-05	1.047D-04	1.193D-04
3	4.967D-06	1.494D-05	2.501D-05	3.526D-05	4.576D-05	5.657D-05	6.777D-05	7.943D-05	9.161D-05	1.044D-04
2	4.322D-06	1.300D-05	2.176D-05	3.068D-05	3.981D-05	4.922D-05	5.897D-05	6.911D-05	7.971D-05	9.084D-05
1	3.548D-06	1.067D-05	1.786D-05	2.519D-05	3.268D-05	4.041D-05	4.841D-05	5.673D-05	6.544D-05	7.457D-05

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 9

SEG										
10	1.348D-08	4.054D-08	6.788D-08	9.570D-08	1.242D-07	1.535D-07	1.839D-07	2.156D-07	2.487D-07	2.834D-07
9	1.281D-08	3.851D-08	6.449D-08	9.092D-08	1.180D-07	1.459D-07	1.747D-07	2.048D-07	2.362D-07	2.692D-07
8	1.194D-08	3.590D-08	6.012D-08	8.476D-08	1.100D-07	1.360D-07	1.629D-07	1.909D-07	2.202D-07	2.510D-07
7	1.088D-08	3.272D-08	5.479D-08	7.725D-08	1.002D-07	1.239D-07	1.485D-07	1.740D-07	2.007D-07	2.287D-07
6	1.021D-08	3.069D-08	5.140D-08	7.246D-08	9.403D-08	1.163D-07	1.393D-07	1.632D-07	1.883D-07	2.145D-07
5	9.340D-09	2.809D-08	4.703D-08	6.631D-08	8.605D-08	1.064D-07	1.274D-07	1.494D-07	1.723D-07	1.963D-07
4	8.474D-09	2.548D-08	4.267D-08	6.016D-08	7.806D-08	9.651D-08	1.156D-07	1.355D-07	1.563D-07	1.781D-07
3	7.414D-09	2.230D-08	3.733D-08	5.264D-08	6.831D-08	8.445D-08	1.012D-07	1.186D-07	1.368D-07	1.558D-07
2	6.451D-09	1.940D-08	3.249D-08	4.580D-08	5.943D-08	7.348D-08	8.803D-08	1.032D-07	1.190D-07	1.356D-07
1	5.296D-09	1.593D-08	2.667D-08	3.760D-08	4.879D-08	6.032D-08	7.226D-08	8.469D-08	9.769D-08	1.113D-07

NUMBER OF GAS ATOMS RELEASED TO FREE VOLUME (ATOMS) IWTHE= 10

SEG										
10	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
9	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
8	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
7	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
6	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
5	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
4	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
3	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
2	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
1	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN AND BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 11

SEG										
10	9.044D-06	2.720D-05	4.554D-05	6.420D-05	8.332D-05	1.030D-04	1.234D-04	1.446D-04	1.668D-04	1.901D-04
9	8.592D-06	2.584D-05	4.326D-05	6.099D-05	7.915D-05	9.785D-05	1.172D-04	1.374D-04	1.585D-04	1.806D-04
8	8.010D-06	2.409D-05	4.033D-05	5.687D-05	7.379D-05	9.123D-05	1.093D-04	1.281D-04	1.478D-04	1.684D-04
7	7.300D-06	2.195D-05	3.676D-05	5.182D-05	6.725D-05	8.314D-05	9.960D-05	1.167D-04	1.346D-04	1.534D-04
6	6.847D-06	2.059D-05	3.448D-05	4.861D-05	6.308D-05	7.799D-05	9.343D-05	1.095D-04	1.263D-04	1.439D-04
5	6.266D-06	1.884D-05	3.155D-05	4.448D-05	5.773D-05	7.137D-05	8.550D-05	1.002D-04	1.156D-04	1.317D-04
4	5.685D-06	1.709D-05	2.862D-05	4.036D-05	5.237D-05	6.475D-05	7.757D-05	9.091D-05	1.049D-04	1.195D-04
3	4.974D-06	1.496D-05	2.505D-05	3.531D-05	4.582D-05	5.665D-05	6.787D-05	7.954D-05	9.175D-05	1.046D-04
2	4.328D-06	1.301D-05	2.179D-05	3.073D-05	3.987D-05	4.930D-05	5.906D-05	6.921D-05	7.983D-05	9.097D-05
1	3.553D-06	1.068D-05	1.789D-05	2.522D-05	3.273D-05	4.047D-05	4.848D-05	5.682D-05	6.553D-05	7.468D-05

NUMBER OF GAS ATOMS (GRAIN+BOUNDARY+RELEASED) (ATOMS) IWTHE= 12

SEG										
10	9.044D-06	2.720D-05	4.554D-05	6.420D-05	8.332D-05	1.030D-04	1.234D-04	1.446D-04	1.668D-04	1.901D-04
9	8.592D-06	2.584D-05	4.326D-05	6.099D-05	7.915D-05	9.785D-05	1.172D-04	1.374D-04	1.585D-04	1.806D-04
8	8.010D-06	2.409D-05	4.033D-05	5.687D-05	7.379D-05	9.123D-05	1.093D-04	1.281D-04	1.478D-04	1.684D-04
7	7.300D-06	2.195D-05	3.676D-05	5.182D-05	6.725D-05	8.314D-05	9.960D-05	1.167D-04	1.346D-04	1.534D-04
6	6.847D-06	2.059D-05	3.448D-05	4.861D-05	6.308D-05	7.799D-05	9.343D-05	1.095D-04	1.263D-04	1.439D-04
5	6.266D-06	1.884D-05	3.155D-05	4.448D-05	5.773D-05	7.137D-05	8.550D-05	1.002D-04	1.156D-04	1.317D-04
4	5.685D-06	1.709D-05	2.862D-05	4.036D-05	5.237D-05	6.475D-05	7.757D-05	9.091D-05	1.049D-04	1.195D-04
3	4.974D-06	1.496D-05	2.505D-05	3.531D-05	4.582D-05	5.665D-05	6.787D-05	7.954D-05	9.175D-05	1.046D-04
2	4.328D-06	1.301D-05	2.179D-05	3.073D-05	3.987D-05	4.930D-05	5.906D-05	6.921D-05	7.983D-05	9.097D-05
1	3.553D-06	1.068D-05	1.789D-05	2.522D-05	3.273D-05	4.047D-05	4.848D-05	5.682D-05	6.553D-05	7.468D-05

PRODUCED FISSION GASES IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 13

SEG										
10	1.718D-04	1.722D-04	1.730D-04	1.743D-04	1.759D-04	1.779D-04	1.804D-04	1.832D-04	1.864D-04	1.901D-04
9	1.632D-04	1.636D-04	1.644D-04	1.656D-04	1.671D-04	1.690D-04	1.713D-04	1.740D-04	1.771D-04	1.806D-04
8	1.522D-04	1.526D-04	1.533D-04	1.543D-04	1.558D-04	1.576D-04	1.597D-04	1.623D-04	1.651D-04	1.684D-04
7	1.387D-04	1.390D-04	1.397D-04	1.407D-04	1.420D-04	1.436D-04	1.456D-04	1.479D-04	1.505D-04	1.534D-04
6	1.301D-04	1.304D-04	1.310D-04	1.319D-04	1.332D-04	1.347D-04	1.366D-04	1.387D-04	1.412D-04	1.439D-04
5	1.191D-04	1.193D-04	1.199D-04	1.207D-04	1.219D-04	1.233D-04	1.250D-04	1.269D-04	1.292D-04	1.317D-04
4	1.080D-04	1.083D-04	1.088D-04	1.095D-04	1.106D-04	1.118D-04	1.134D-04	1.152D-04	1.172D-04	1.195D-04
3	9.451D-05	9.473D-05	9.518D-05	9.585D-05	9.674D-05	9.785D-05	9.919D-05	1.008D-04	1.025D-04	1.046D-04
2	8.223D-05	8.243D-05	8.282D-05	8.340D-05	8.418D-05	8.515D-05	8.631D-05	8.767D-05	8.922D-05	9.097D-05
1	6.750D-05	6.766D-05	6.798D-05	6.846D-05	6.910D-05	6.990D-05	7.085D-05	7.197D-05	7.324D-05	7.468D-05

FISSION GAS RELEASE RATE IN A RING (%) IWTHE= 14

SEG										
10	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
4	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 15

SEG										
10	4.291D-03	1.290D-02	2.161D-02	3.046D-02	3.953D-02	4.887D-02	5.855D-02	6.862D-02	7.915D-02	9.019D-02
9	4.076D-03	1.226D-02	2.053D-02	2.894D-02	3.755D-02	4.643D-02	5.562D-02	6.519D-02	7.519D-02	8.569D-02
8	3.801D-03	1.143D-02	1.914D-02	2.698D-02	3.501D-02	4.329D-02	5.186D-02	6.078D-02	7.010D-02	7.989D-02
7	3.463D-03	1.042D-02	1.744D-02	2.459D-02	3.191D-02	3.945D-02	4.726D-02	5.539D-02	6.389D-02	7.280D-02
6	3.249D-03	9.770D-03	1.636D-02	2.306D-02	2.993D-02	3.700D-02	4.433D-02	5.196D-02	5.993D-02	6.829D-02
5	2.973D-03	8.940D-03	1.497D-02	2.111D-02	2.739D-02	3.386D-02	4.057D-02	4.755D-02	5.484D-02	6.249D-02
4	2.697D-03	8.111D-03	1.358D-02	1.915D-02	2.485D-02	3.072D-02	3.680D-02	4.313D-02	4.975D-02	5.669D-02
3	2.360D-03	7.097D-03	1.186D-02	1.675D-02	2.174D-02	2.688D-02	3.220D-02	3.774D-02	4.353D-02	4.961D-02
2	2.054D-03	6.175D-03	1.034D-02	1.458D-02	1.892D-02	2.339D-02	2.802D-02	3.284D-02	3.788D-02	4.316D-02
1	1.686D-03	5.069D-03	8.489D-03	1.197D-02	1.553D-02	1.920D-02	2.300D-02	2.696D-02	3.109D-02	3.543D-02

SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 16

SEG										
10	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
9	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
8	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
7	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
6	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
5	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
4	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
3	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
2	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15
1	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15	1.503D+15

****
OUTPUT STAGE NUMBER = 1
TIME(HR) = 0.000 ROD GAS PRESS.(MPA) = 5.954 COOLANT PRESS.(MPA) = 15.000
****

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURNUP (GJ/KGU)	(MWD/TU)	(MWD/TUO2)	(FISS/CC)	FAST NEUTRON FLUX (N/CM**2/SEC)	FAST NEUTRON FLUENCE (N/CM**2)	FISSION RATE (FISS/CC/SEC)
1	0.001	1.522250-12	1.764040-11	1.554910-11	4.392390+05	5.670100+13	2.041240+12	2.526970+07
2	0.001	1.854380-12	2.148920-11	1.894160-11	5.350730+05	6.907220+13	2.486600+12	3.078310+07
3	0.001	2.131160-12	2.469660-11	2.176870-11	6.149350+05	7.938140+13	2.857730+12	3.537760+07
4	0.001	2.435610-12	2.822470-11	2.487850-11	7.027820+05	9.072160+13	3.265980+12	4.043160+07
5	0.001	2.684700-12	3.111130-11	2.742290-11	7.746580+05	1.000000+14	3.600000+12	4.456660+07
6	0.001	2.933800-12	3.399790-11	2.996730-11	8.465330+05	1.092780+14	3.934020+12	4.870170+07
7	0.001	3.127540-12	3.624300-11	3.194630-11	9.024360+05	1.164950+14	4.193810+12	5.191780+07
8	0.001	3.431990-12	3.977110-11	3.505610-11	9.902840+05	1.278350+14	4.602060+12	5.697180+07
9	0.001	3.681090-12	4.265770-11	3.760050-11	1.062160+06	1.371130+14	4.936080+12	6.110680+07
10	0.001	3.874830-12	4.490290-11	3.957950-11	1.118060+06	1.443300+14	5.195880+12	6.432300+07

TEMPERATURE (DEG C) IWROD= 16

UPPER PLENUM TEMP(DEG C)= 304.85

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
8	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
7	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
6	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
5	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
4	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
3	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
2	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	
1	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	304.9	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	304.9	304.9	304.9	304.9	
9	304.9	304.9	304.9	304.9	
8	304.9	304.9	304.9	304.9	
7	304.9	304.9	304.9	304.9	
6	304.9	304.9	304.9	304.9	
5	304.9	304.9	304.9	304.9	
4	304.9	304.9	304.9	304.9	
3	304.9	304.9	304.9	304.9	
2	304.9	304.9	304.9	304.9	
1	304.9	304.9	304.9	304.9	

STRESS(RADIAL)(MPA) IWOD= 1

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
9	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
8	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
7	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
6	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
5	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
4	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
3	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
2	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	
1	-8.5	-13.0	-15.0	-15.0	

STRESS(HOOP)(MPA) IWROD= 2

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
9	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
8	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
7	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
6	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
5	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
4	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
3	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
2	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	
1	-76.4	-71.9	-106.0	-106.0	

STRESS(AXIAL)(MPA) IWROD= 3

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
9	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
8	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
7	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
6	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
5	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
2	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	
1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
9	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
8	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
7	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
6	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
5	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
4	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
3	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
2	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	
1	-42.3	-42.3	-58.2	-58.2	

EQI. STRESS (MPA) IWROD= 4

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
9	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
8	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
7	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
6	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	58.7	51.0	78.9	78.8	

9	58.7	51.0	78.9	78.8	
8	58.7	51.0	78.9	78.8	
7	58.7	51.0	78.9	78.8	
6	58.7	51.0	78.9	78.8	
5	58.7	51.0	78.9	78.8	
4	58.7	51.0	78.9	78.8	
3	58.7	51.0	78.9	78.8	
2	58.7	51.0	78.9	78.8	
1	58.7	51.0	78.9	78.8	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

YIELD STRESS(MPA) IWROD= 5

SEGMENT NUM.											
10	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
9	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
8	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
7	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
6	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
5	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
3	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
2	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
1	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	537.4	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.				
10	231.0	231.0	224.7	224.7
9	231.0	231.0	224.7	224.7
8	231.0	231.0	224.7	224.7
7	231.0	231.0	224.7	224.7
6	231.0	231.0	224.7	224.7
5	231.0	231.0	224.7	224.7
4	231.0	231.0	224.7	224.7
3	231.0	231.0	224.7	224.7
2	231.0	231.0	224.7	224.7
1	231.0	231.0	224.7	224.7
	11	12	13	14 ELM.NUM.

CREEP STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 6

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.				
10	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0
	11	12	13	14 ELM.NUM.

CREEP STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 7

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.				
10	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0
	11	12	13	14 ELM.NUM.

CREEP STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 8

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

HARD STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 9

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

PLAST. STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 10

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

SWELLING STRAIN(0.01%) IWROD= 11

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
	11	12	13	14							

DENSIFICATION STRAIN(0.01%) IWRO : 11

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
	11	12	13	14							

TOTAL STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 12

SEGMENT NUM.											
10	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
8	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
7	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
6	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
5	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
4	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
3	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
2	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
1	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	22.9	22.3	21.6	21.6	
9	22.9	22.3	21.6	21.6	
8	22.9	22.3	21.6	21.6	
7	22.9	22.3	21.6	21.6	
6	22.9	22.3	21.6	21.6	
5	22.9	22.3	21.6	21.6	
4	22.9	22.3	21.6	21.6	
3	22.9	22.3	21.6	21.6	
2	22.9	22.3	21.6	21.6	
1	22.9	22.3	21.6	21.6	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

TOTAL STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 13

SEGMENT NUM.											
10	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
8	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
7	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
6	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
5	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
4	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
3	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
2	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
1	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	123.9	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	12.6	13.3	13.6	13.6	
9	12.6	13.3	13.6	13.6	
8	12.6	13.3	13.6	13.6	
7	12.6	13.3	13.6	13.6	
6	12.6	13.3	13.6	13.6	
5	12.6	13.3	13.6	13.6	
4	12.6	13.3	13.6	13.6	
3	12.6	13.3	13.6	13.6	
2	12.6	13.3	13.6	13.6	
1	12.6	13.3	13.6	13.6	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

TOTAL STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 14

SEGMENT NUM.											
10	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
9	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
8	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
7	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
6	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
4	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
3	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
2	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
1	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	72.5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	11.3	11.3	11.3	11.3	
9	11.3	11.3	11.3	11.3	
8	11.3	11.3	11.3	11.3	
7	11.3	11.3	11.3	11.3	
6	11.3	11.3	11.3	11.3	
5	11.3	11.3	11.3	11.3	
4	11.3	11.3	11.3	11.3	
3	11.3	11.3	11.3	11.3	
2	11.3	11.3	11.3	11.3	
1	11.3	11.3	11.3	11.3	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

THERMAL STRAIN(RADIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.											
10	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
9	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
7	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
6	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
5	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
4	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
3	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
2	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
1	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	19.3	19.3	19.3	19.3	
9	19.3	19.3	19.3	19.3	
8	19.3	19.3	19.3	19.3	
7	19.3	19.3	19.3	19.3	
6	19.3	19.3	19.3	19.3	
5	19.3	19.3	19.3	19.3	
4	19.3	19.3	19.3	19.3	
3	19.3	19.3	19.3	19.3	
2	19.3	19.3	19.3	19.3	
1	19.3	19.3	19.3	19.3	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

THERMAL STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.											
10	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
9	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
7	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
6	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
5	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
4	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
3	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
2	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
1	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	22.8	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	12.7	12.7	12.7	12.7	
9	12.7	12.7	12.7	12.7	
8	12.7	12.7	12.7	12.7	
7	12.7	12.7	12.7	12.7	
6	12.7	12.7	12.7	12.7	
5	12.7	12.7	12.7	12.7	
4	12.7	12.7	12.7	12.7	
3	12.7	12.7	12.7	12.7	
2	12.7	12.7	12.7	12.7	
1	12.7	12.7	12.7	12.7	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

IRRADIATION STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.											
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

PRESSURE ON UPPER AND SIDE SURFACE (MPA) IWROD= 17

SEGMENT NUMBER	CONTACT STATUS	PELLET RADIAL	PELLET AXIAL	CLADDING RADIAL	CLADDING AXIAL
10	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
9	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
8	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
7	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
6	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
5	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
4	OPEN	0.000	-0.064	5.954	42.320
3	OPEN	0.000	-0.064	5.954	42.320
2	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320
1	OPEN	0.000	-0.064	5.954	-42.320

DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) IWROD= 18

(R-DIRECTION)

10	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
9	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
8	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
7	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
6	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
5	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
4	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
3	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
2	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6
1	0.0	5.8	11.5	17.3	23.0	28.8	34.6	40.3	46.1	51.8	57.6

10	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
9	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
8	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
7	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
6	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
5	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
4	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
3	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
2	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4
1	5.8	6.6	7.4	7.4	7.4	7.4

(Z-DIRECTION)

SEG. NUM.	PELLET	CLADDING	GAP
	543.0		
10	3261.919	506.467	48.194
9	2935.727	455.820	48.194
8	2609.535	405.172	48.194
7	2283.343	354.525	48.194
6	1957.151	303.878	48.194
5	1630.959	253.231	48.194
4	1304.767	202.584	48.194
3	978.575	151.938	48.194
2	652.383	101.291	48.194
1	326.192	50.646	48.194

********** OUTPUT ---STAGE--- 16 ********** IFEM = 5 ****

THERMAL ANALYSIS INFORMATION

STAGE NO.	16	
TIME	1438.45	HR
COOLANT TEMPERATURE	578.00	DEG.K
COOLANT PRESSURE	1.500+01	MPA

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURN UP (MWD/TUO2)	GAP CONDUCTANCE (W/CM**2 K) TOTAL	GAS	SOLID	RAD.	TEMPERATURE (K) PC	PS	CI	CS	CLEARANCE (MICRONS)	CONTACT FORCE(MPA)
1	82.500	335.5	0.3358	0.3319	0.0000	0.0039	805.4	677.7	595.1	583.4	69.915	0.000
2	100.500	408.7	0.3463	0.3422	0.0000	0.0041	858.3	696.7	599.1	585.0	68.528	0.000
3	115.500	469.7	0.3555	0.3512	0.0000	0.0043	903.3	711.8	602.6	586.4	67.323	0.000
4	132.000	536.8	0.3661	0.3615	0.0000	0.0045	953.6	727.7	606.5	587.9	65.942	0.000
* 5	145.500	591.7	0.3751	0.3704	0.0000	0.0047	995.5	740.1	609.8	589.4	64.772	0.000
6	159.000	646.6	0.3844	0.3797	0.0000	0.0049	1038.0	752.1	613	590.8	63.566	0.000
7	169.500	689.3	0.3923	0.3873	0.0000	0.0050	1071.5	761.1	615.7	592.2	62.600	0.000
8	186.000	756.4	0.4048	0.3997	0.0000	0.0052	1124.4	774.3	619.9	594.0	61.045	0.000
9	199.500	811.3	0.4157	0.4104	0.0000	0.0053	1168.2	784.7	623.4	595.6	59.733	0.000
10	210.000	854.0	0.4247	0.4192	0.0000	0.0055	1202.8	792.5	626.3	597.1	58.685	0.000

NODE	CSFR*	PFAC*	BURN UP (FISS/CC *10**20)	PELLET DISPLACEMENT (MICRONS) THERMAL EXPANS.	CREEP	DENSIFI CATION	IRRAD. SWELL	RELOC ATION	DISPLA CEMENT	CLADDING DISPLACEMENT (MICRONS) THERMAL EXPANS.	ELASTIC DEFORM.	CREEP	DISPLA CEMENT
1	0.8943	2.0000	0.09	7.89	0.00	-2.30	0.35	18.80	5.94	0.39	0.28	0.00	0.66
2	0.8943	2.0000	0.12	9.78	0.00	-2.78	0.42	18.80	7.42	0.48	0.28	0.00	0.76
3	0.8943	2.0000	0.13	11.40	0.00	-3.18	0.49	18.80	8.71	0.57	0.28	0.00	0.84
4	0.8943	2.0000	0.15	13.23	0.00	-3.60	0.56	18.80	10.18	0.66	0.28	0.00	0.94
* 5	0.8943	2.0000	0.17	14.77	0.00	-3.99	0.61	18.80	11.44	0.74	0.28	0.00	1.02
6	0.8943	2.0000	0.18	16.34	0.00	-4.29	0.67	18.80	12.73	0.82	0.28	0.00	1.10
7	0.8943	2.0000	0.19	17.60	0.00	-4.55	0.71	18.80	13.76	0.89	0.28	0.00	1.17
8	0.8943	2.0000	0.21	19.59	0.00	-4.95	0.78	18.80	15.42	0.99	0.28	0.00	1.27
9	0.8943	2.0000	0.23	21.26	0.00	-5.28	0.84	18.80	16.82	1.08	0.28	0.00	1.36
10	0.8943	2.0000	0.24	22.59	0.00	-5.53	0.88	18.80	17.94	1.16	0.28	0.00	1.44

NODE	ZR-ZROX INT. TEMP.(K)	CLAD SURFACE TEMP.(K)	COOLANT TEMP.(K)	CLAD OUTER CORROSION RATE(MICRON/D)	THICKNESS(MICRON)	CLAD SURF. TEMP. HALDEN EXP.(K)
1	583.8	583.4	578.2	0.00120	2.06564	587.8
2	585.4	585.0	578.6	0.00129	2.06843	590.3
3	586.9	586.4	579.0	0.00138	2.07111	592.5
4	588.5	587.9	579.5	0.00149	2.07423	595.0
* 5	590.0	589.4	580.1	0.00159	2.07720	597.1
6	591.5	590.8	580.8	0.00171	2.08043	599.3
7	592.9	592.2	581.4	0.00182	2.08347	601.3
8	594.8	594.0	582.2	0.00197	2.08770	603.9
9	596.5	595.6	583.0	0.00212	2.09182	606.3
10	598.0	597.1	583.9	0.00227	2.09575	608.4
PL	585.9	585.9	583.9	0.00371	1.23524	

INITIAL GAS (MOL) = 5.63D-03

FISSION GAS RESULT

LOCAL FISSION GAS RELEASE FRACTION (AXIAL NODE)
1 0.00500 2 0.00500 3 0.00500 4 0.00500 5 0.00500 6 0.00500 7 0.00500 8 0.00500 9 0.00500 10 0.00500

ROD AVERAGE FISSION GAS RELEASE FRACTION = 0.00500

ROD GAS PRESSURE (MPA) = 6.575

TOTAL GAS (MOL) = 5.63D-03

FRACTIONS OF GAS MIXTURE (PERCENT)

	AXIAL NODE 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HE	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
N2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KR	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
XE	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

RELEASED IODINE (GRAM/CM**2) = 5.59D-08 (AVERAGE) 5.42D-08 (PEAK)

(MOL)	HE	N2	KR	XE	TOTAL
PRODUCED GAS	0.00D+00	0.00D+00	3.53D-05	2.36D-04	2.72E-04
RELEASED GAS	0.00D+00	0.00D+00	1.77D-07	1.18D-06	1.36E-06
ROD GAS	5.63D-03	0.00D+00	1.77D-07	1.18D-06	5.63E-03

RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AT AXIAL NODE OF 5

PELLET

...1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8.....9....10....11

996 993 984 971 952 927 898 865 827 785 740

/ GAP / CLAD.

...1.....2.....3

610 600 590

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE FUEL (DEG.C) IWTHE= 1

SEG										
10	927.36	918.09	899.69	872.41	836.67	792.97	742.00	684.56	621.58	554.11
9	892.93	884.31	867.19	841.81	808.53	767.81	720.25	666.56	607.57	544.20
8	849.26	841.45	825.93	802.92	772.70	735.69	692.39	643.39	589.42	531.23
7	796.64	789.78	776.14	755.90	729.29	696.63	658.34	614.90	566.86	514.86
6	763.25	756.97	744.49	725.94	701.54	671.56	636.36	596.35	552.00	503.86
5	720.98	715.42	704.36	687.91	666.25	639.59	608.22	572.48	532.74	489.46
4	679.26	674.38	664.67	650.23	631.18	607.71	580.02	548.40	513.13	474.58
3	629.15	625.06	616.93	604.80	588.78	569.00	545.62	518.81	488.80	455.85
2	584.32	580.91	574.10	563.96	550.54	533.93	514.25	491.62	466.20	438.16
1	531.60	528.94	523.63	515.70	505.19	492.15	476.65	458.77	438.59	416.22

GAP GAS INFORMATION (%) IWTHE= 2

SEG	HE	N2	KR	XE
10	100.0	0.0	0.0	0.0
9	100.0	0.0	0.0	0.0
8	100.0	0.0	0.0	0.0
7	100.0	0.0	0.0	0.0
6	100.0	0.0	0.0	0.0
5	100.0	0.0	0.0	0.0
4	100.0	0.0	0.0	0.0
3	100.0	0.0	0.0	0.0
2	100.0	0.0	0.0	0.0
1	100.0	0.0	0.0	0.0

RADIUS OF GRAIN (MICRON) IWTHE= 3

SEG										
10	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
9	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
8	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
4	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
2	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
1	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

RADIUS OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (ANGSTROM) IWTHE= 4

SEG										
10	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
9	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
8	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
7	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
6	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
5	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
4	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
3	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
2	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
1	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49

DENSITY OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (BUBBLES/CM**3) IWTHE= 5

SEG										
10	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18	1.669D+18
9	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18	1.675D+18
8	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18	1.682D+18
7	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18	1.692D+18
6	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18	1.699D+18
5	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18	1.707D+18
4	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18	1.717D+18
3	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18	1.729D+18
2	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18	1.741D+18
1	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18	1.757D+18

DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 6

SEG										
10	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
9	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
8	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
7	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
6	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
5	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
4	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
3	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
2	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
1	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17

EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 7

SEG										
10	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17
9	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17	1.990D-17
8	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17
7	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17
6	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17
5	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17	1.991D-17
4	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17
3	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17	1.992D-17
2	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17
1	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17	1.993D-17

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 8

SEG

10	1.917D+08	5.765D+08	9.654D+08	1.361D+09	1.766D+09	2.18[illegible]+09	2.616D+09	3.066D+0[illegible]	3.536D+09	4.030D+09
9	1.821D+08	5.477D+08	9.171D+08	1.293D+09	1.678D+09	2.07[illegible]+09	[illegible]485D+09	2.913D+09	3.360D+09	3.828D+09
8	1.698D+08	5.106D+08	8.551D+08	1.206D+09	1.564D+09	1.934D+09	[illegible]317D+09	2.716D+09	3.132D+09	3.569D+09
7	1.547D+08	4.653D+08	7.792D+08	1.099D+09	1.426D+09	1.763D+09	2.112D+09	2.475D+09	2.854D+09	3.253D+09
6	1.452D+08	4.365D+08	7.310D+08	1.031D+09	1.337D+09	1.653D+09	1.981D+09	2.321D+09	2.678D+09	3.051D+09
5	1.328D+08	3.995D+08	6.689D+08	9.430D+08	1.224D+09	1.513D+09	1.813D+09	2.124D+09	2.450D+09	2.792D+09
4	1.205D+08	3.624D+08	6.068D+08	8.555D+08	1.110D+09	1.373D+09	1.644D+09	1.927D+09	2.223D+09	2.533D+09
3	1.054D+08	3.171D+08	5.310D+08	7.486D+08	9.714D+08	1.201D+09	1.439D+09	1.686D+09	1.945D+09	2.216D+09
2	9.175D+07	2.759D+08	4.620D+08	6.514D+08	8.453D+08	1.045D+09	1.252D+09	1.467D+09	1.692D+09	1.929D+09
1	7.532D+07	2.265D+08	3.793D+08	5.347D+08	6.939D+08	8.579D+08	1.028D+09	1.205D+09	1.389D+09	1.583D+09

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 9

SEG										
10	3.410D+06	1.025D+07	1.717D+07	2.421D+07	3.141D+07	3.884D+07	4.653D+07	5.453D+07	6.290D+07	7.168D+07
9	3.240D+06	9.742D+06	1.631D+07	2.300D+07	2.985D+07	3.690D+07	4.421D+07	5.181D+07	5.976D+07	6.810D+07
8	3.021D+06	9.084D+06	1.521D+07	2.144D+07	2.783D+07	3.441D+07	4.122D+07	4.831D+07	5.572D+07	6.349D+07
7	2.753D+06	8.279D+06	1.386D+07	1.954D+07	2.536D+07	3.136D+07	3.756D+07	4.403D+07	5.078D+07	5.787D+07
6	2.583D+06	7.766D+06	1.300D+07	1.833D+07	2.379D+07	2.942D+07	3.524D+07	4.130D+07	4.764D+07	5.429D+07
5	2.364D+06	7.108D+06	1.190D+07	1.678D+07	2.178D+07	2.692D+07	3.225D+07	3.780D+07	4.360D+07	4.968D+07
4	2.145D+06	6.449D+06	1.080D+07	1.522D+07	1.976D+07	2.443D+07	2.926D+07	3.430D+07	3.956D+07	4.508D+07
3	1.877D+06	5.643D+06	9.450D+06	1.332D+07	1.729D+07	2.138D+07	2.561D+07	3.001D+07	3.462D+07	3.945D+07
2	1.633D+06	4.911D+06	8.224D+06	1.159D+07	1.505D+07	1.860D+07	2.229D+07	2.612D+07	3.013D+07	3.433D+07
1	1.341D+06	4.032D+06	6.752D+06	9.520D+06	1.235D+07	1.527D+07	1.830D+07	2.144D+07	2.473D+07	2.819D+07

NUMBER OF GAS ATOMS RELEASED TO FREE VOLUME (ATOMS) IWTHE= 10

SEG										
10	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
9	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
8	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
7	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
6	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
5	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
4	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
3	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
2	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
1	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN AND BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 11

SEG										
10	1.951D+08	5.868D+08	9.826D+08	1.385D+09	1.798D+09	2.223D+09	2.663D+09	3.121D+09	3.599D+09	4.102D+09
9	1.854D+08	5.574D+08	9.335D+08	1.316D+09	1.708D+09	2.111D+09	2.529D+09	2.965D+09	3.419D+09	3.897D+09
8	1.728D+08	5.197D+08	8.703D+08	1.227D+09	1.592D+09	1.969D+09	2.358D+09	2.764D+09	3.188D+09	3.633D+09
7	1.575D+08	4.736D+08	7.931D+08	1.118D+09	1.451D+09	1.794D+09	2.149D+09	2.519D+09	2.905D+09	3.311D+09
6	1.477D+08	4.443D+08	7.440D+08	1.049D+09	1.361D+09	1.683D+09	2.016D+09	2.363D+09	2.725D+09	3.105D+09
5	1.352D+08	4.066D+08	6.808D+08	9.598D+08	1.246D+09	1.540D+09	1.845D+09	2.162D+09	2.494D+09	2.842D+09
4	1.227D+08	3.688D+08	6.176D+08	8.708D+08	1.130D+09	1.397D+09	1.674D+09	1.962D+09	2.262D+09	2.578D+09
3	1.073D+08	3.227D+08	5.404D+08	7.619D+08	9.887D+08	1.222D+09	1.464D+09	1.716D+09	1.980D+09	2.256D+09
2	9.339D+07	2.808D+08	4.702D+08	6.630D+08	8.603D+08	1.064D+09	1.274D+09	1.493D+09	1.723D+09	1.963D+09
1	7.666D+07	2.305D+08	3.860D+08	5.442D+08	7.062D+08	8.731D+08	1.046D+09	1.226D+09	1.414D+09	1.611D+09

NUMBER OF GAS ATOMS (GRAIN+BOUNDARY+RELEASED) (ATOMS) IWTHE= 12

SEG										
10	1.951D+08	5.868D+08	9.826D+08	1.385D+09	1.798D+09	2.223D+09	2.663D+09	3.121D+09	3.599D+09	4.102D+09
9	1.854D+08	5.574D+08	9.335D+08	1.316D+09	1.708D+09	2.111D+09	2.529D+09	2.965D+09	3.419D+09	3.897D+09
8	1.728D+08	5.197D+08	8.703D+08	1.227D+09	1.592D+09	1.969D+09	2.358D+09	2.764D+09	3.188D+09	3.633D+09
7	1.575D+08	4.736D+08	7.931D+08	1.118D+09	1.451D+09	1.794D+09	2.149D+09	2.519D+09	2.905D+09	3.311D+09
6	1.477D+08	4.443D+08	7.440D+08	1.049D+09	1.361D+09	1.683D+09	2.016D+09	2.363D+09	2.725D+09	3.105D+09
5	1.352D+08	4.066D+08	6.808D+08	9.598D+08	1.246D+09	1.540D+09	1.845D+09	2.162D+09	2.494D+09	2.842D+09
4	1.227D+08	3.688D+08	6.176D+08	8.708D+08	1.130D+09	1.397D+09	1.674D+09	1.962D+09	2.262D+09	2.578D+09
3	1.073D+08	3.227D+08	5.404D+08	7.619D+08	9.887D+08	1.222D+09	1.464D+09	1.716D+09	1.980D+09	2.256D+09
2	9.339D+07	2.808D+08	4.702D+08	6.630D+08	8.603D+08	1.064D+09	1.274D+09	1.493D+09	1.723D+09	1.963D+09
1	7.666D+07	2.305D+08	3.860D+08	5.442D+08	7.062D+08	8.731D+08	1.046D+09	1.226D+09	1.414D+09	1.611D+09

PRODUCED FISSION GASES IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 13

SEG										
10	3.708D+09	3.716D+09	3.734D+09	3.760D+09	3.795D+09	3.839D+09	3.891D+09	3.953D+09	4.023D+09	4.102D+09
9	3.522D+09	3.531D+09	3.547D+09	3.572D+09	3.605D+09	3.647D+09	3.697D+09	3.755D+09	3.822D+09	3.897D+09
8	3.284D+09	3.292D+09	3.307D+09	3.330D+09	3.361D+09	3.400D+09	3.447D+09	3.501D+09	3.563D+09	3.633D+09
7	2.993D+09	3.000D+09	3.014D+09	3.035D+09	3.063D+09	3.099D+09	3.141D+09	3.190D+09	3.247D+09	3.311D+09
6	2.807D+09	2.814D+09	2.827D+09	2.847D+09	2.873D+09	2.907D+09	2.946D+09	2.993D+09	3.046D+09	3.105D+09
5	2.569D+09	2.575D+09	2.587D+09	2.605D+09	2.629D+09	2.660D+09	2.696D+09	2.739D+09	2.787D+09	2.842D+09
4	2.330D+09	2.336D+09	2.347D+09	2.363D+09	2.386D+09	2.413D+09	2.446D+09	2.485D+09	2.529D+09	2.578D+09
3	2.039D+09	2.044D+09	2.054D+09	2.068D+09	2.087D+09	2.111D+09	2.140D+09	2.174D+09	2.213D+09	2.256D+09
2	1.774D+09	1.779D+09	1.787D+09	1.799D+09	1.816D+09	1.837D+09	1.862D+09	1.892D+09	1.925D+09	1.963D+09
1	1.457D+09	1.460D+09	1.467D+09	1.477D+09	1.491D+09	1.508D+09	1.529D+09	1.553D+09	1.580D+09	1.611D+09

FISSION GAS RELEASE RATE IN A RING (%) IWTHE= 14

SEG										
10	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
4	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 15

SEG										
10	1.085D+12	3.264D+12	5.466D+12	7.706D+12	1.000D+13	1.236D+13	1.481D+13	1.736D+13	2.002D+13	2.282D+13
9	1.031D+12	3.101D+12	5.193D+12	7.321D+12	9.500D+12	1.175D+13	1.407D+13	1.649D+13	1.902D+13	2.168D+13
8	9.615D+11	2.891D+12	4.842D+12	6.826D+12	8.858D+12	1.095D+13	1.312D+13	1.538D+13	1.774D+13	2.021D+13
7	8.763D+11	2.635D+12	4.413D+12	6.221D+12	8.073D+12	9.981D+12	1.196D+13	1.401D+13	1.616D+13	1.842D+13
6	8.221D+11	2.472D+12	4.140D+12	5.836D+12	7.574D+12	9.363D+12	1.122D+13	1.315D+13	1.516D+13	1.728D+13

5	7.524D+11	2.262D+12	3.788D+12	5.341D+12	6.931D+12	8.569D+12	1.027D+ 3	1.203D+13	1.388D+13	1.581D+13
4	6.826D+11	2.053D+12	3.437D+12	4.846D+12	6.289D+12	7.775D+12	9.314D+12	1.092D+13	1.259D+13	1.435D+13
3	5.974D+11	1.796D+12	3.008D+12	4.241D+12	5.503D+12	6.804D+12	8.151D+12	9.553D+12	1.102D+13	1.256D+13
2	5.199D+11	1.563D+12	2.618D+12	3.691D+12	4.789D+12	5.921D+12	7.094D+12	8.314D+12	9.589D+12	1.093D+13
1	4.268D+11	1.284D+12	2.149D+12	3.030D+12	3.932D+12	4.862D+12	5.824D+12	6.826D+12	7.873D+12	8.972D+12

SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 16

SEG										
10	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15	1.050D+15
9	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15	1.063D+15
8	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15	1.080D+15
7	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15	1.103D+15
6	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15	1.118D+15
5	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15	1.139D+15
4	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15	1.162D+15
3	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15	1.192D+15
2	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15	1.222D+15
1	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15	1.260D+15

OUTPUT STAGE NUMBER = 16
TIME(HR) = 1438.447 ROD GAS PRESS.(MPA) = 6.575 COOLANT PRESS.(MPA) = 15.000

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURNUP (GJ/KGU)	(MWD/TU)	(MWD/TUD2)	(FISS/CC)	FAST NEUTRON FLUX (N/CM**2/SEC)	FAST NEUTRON FLUENCE (N/CM**2)	FISSION RATE (FISS/CC/SEC)
1	82.500	3.28455D+01	3.80625D+02	3.35500D+02	9.47739D+18	5.67010D+13	2.93621D+20	3.79046D+12
2	100.500	4.00117D+01	4.63670D+02	4.08700D+02	1.15452D+19	6.90722D+13	3.57684D+20	4.61747D+12
3	115.500	4.59837D+01	5.32875D+02	4.69700D+02	1.32684D+19	7.93814D+13	4.11070D+20	5.30664D+12
4	132.000	5.25527D+01	6.09000D+02	5.36800D+02	1.51638D+19	9.07216D+13	4.69794D+20	6.06474D+12
5	145.500	5.79275D+01	6.71284D+02	5.91700D+02	1.67147D+19	1.00000D+14	5.17841D+20	6.68499D+12
6	159.000	6.33022D+01	7.33568D+02	6.46600D+02	1.82655D+19	1.09278D+14	5.65888D+20	7.30525D+12
7	169.500	6.74825D+01	7.82011D+02	6.89300D+02	1.94717D+19	1.16495D+14	6.03258D+20	7.78767D+12
8	186.000	7.40516D+01	8.58136D+02	7.56400D+02	2.13672D+19	1.27835D+14	6.61982D+20	8.54576D+12
9	199.500	7.94263D+01	9.20420D+02	8.11300D+02	2.29181D+19	1.37113D+14	7.10029D+20	9.16602D+12
10	210.000	8.36066D+01	9.68863D+02	8.54000D+02	2.41243D+19	1.44330D+14	7.47399D+20	9.64844D+12

1 TEMPERATURE (DEG C) IWROD= 16

UPPER PLENUM TEMP(DEG C)= 304.85

SEGMENT NUM.										
10	927.4	918.1	899.7	872.4	836.7	793.0	742.0	684.6	621.6	554.1
9	892.9	884.3	867.2	841.8	808.5	767.8	720.2	666.6	607.6	544.2
8	849.3	841.4	825.9	802.9	772.7	735.7	692.4	643.4	589.4	531.2
7	796.6	789.8	776.1	755.9	729.3	696.6	658.3	614.9	566.9	514.9
6	763.3	757.0	744.5	725.9	701.5	671.6	636.4	596.3	552.0	503.9
5	721.0	715.4	704.4	687.9	666.2	639.6	608.2	572.5	532.7	489.5
4	679.3	674.4	664.7	650.2	631.2	607.7	580.0	548.4	513.1	474.6
3	629.2	625.1	616.9	604.8	588.8	569.0	545.6	518.8	488.8	455.8
2	584.3	580.9	574.1	564.0	550.5	533.9	514.2	491.6	466.2	438.2
1	531.6	528.9	523.6	515.7	505.2	492.2	476.7	458.8	438.6	416.2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	345.4	331.7	324.6	324.2	
9	342.9	329.8	323.1	322.7	
8	339.9	327.7	321.4	321.0	
7	336.5	325.3	319.6	319.2	
6	334.0	323.6	318.2	317.9	
5	331.2	321.6	316.7	316.4	
4	328.4	319.7	315.2	314.9	
3	325.1	317.5	313.6	313.3	
2	322.2	315.6	312.1	311.9	
1	318.8	313.4	310.5	310.4	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

STRESS(RADIAL)(MPA) IWRDD= 1

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-2.8	-2.7	-2.6	-2.3	-2.0	-1.7	-1.4	-1.0	-0.6	-0.2	
9	-2.6	-2.5	-2.4	-2.1	-1.9	-1.6	-1.3	-0.9	-0.6	-0.2	
8	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.7	-1.4	-1.1	-0.8	-0.5	-0.2	
7	-1.9	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	-1.2	-1.0	-0.7	-0.4	-0.1	
6	-1.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.1	
5	-1.5	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.8	-0.6	-0.4	-0.1	
4	-1.3	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	-0.1	
3	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.1	
2	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	
1	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-8.8	-13.0	-14.9	-14.9	
9	-8.8	-13.0	-14.9	-14.9	
8	-8.8	-13.0	-14.9	-14.9	
7	-8.9	-13.1	-14.9	-15.0	
6	-8.9	-13.1	-15.0	-15.0	
5	-8.9	-13.1	-15.0	-15.0	
4	-8.9	-13.1	-15.0	-15.0	
3	-8.9	-13.1	-15.0	-15.0	
2	-8.9	-13.1	-15.0	-15.0	
1	-9.0	-13.1	-15.0	-15.0	

STRESS(HOOP)(MPA) IWRDD= 2

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-2.8	-2.6	-2.1	-1.4	-0.6	0.2	1.0	1.8	2.8	3.7	
9	-2.6	-2.4	-1.9	-1.3	-0.6	0.1	0.9	1.7	2.6	3.5	
8	-2.3	-2.1	-1.7	-1.2	-0.5	0.1	0.8	1.5	2.3	3.1	
7	-1.9	-1.8	-1.5	-1.0	-0.5	0.1	0.6	1.3	2.0	2.7	
6	-1.7	-1.6	-1.3	-0.9	-0.5	0.0	0.6	1.2	1.8	2.5	
5	-1.5	-1.4	-1.2	-0.8	-0.4	0.0	0.5	1.0	1.6	2.2	
4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.7	-0.4	0.0	0.4	0.9	1.4	1.9	
3	-1.0	-1.0	-0.8	-0.6	-0.3	0.0	0.3	0.7	1.1	1.6	
2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.3	0.0	0.3	0.6	0.9	1.3	
1	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.7	1.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-68.7	-71.7	-75.2	-75.5	
9	-69.0	-71.4	-74.8	-75.0	
8	-69.3	-71.1	-74.2	-74.4	
7	-69.7	-70.6	-73.5	-73.6	
6	-70.0	-70.3	-73.0	-73.2	
5	-70.4	-70.0	-72.6	-72.7	
4	-70.7	-69.6	-72.1	-72.2	
3	-71.1	-69.2	-71.7	-71.8	
2	-71.5	-68.8	-71.5	-71.5	
1	-71.9	-68.5	-71.6	-71.6	

STRESS(AXIAL)(MPA) IWRDD= 3

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-15.5	-14.4	-12.1	-8.5	-3.9	0.0	1.1	2.3	3.7	5.1	
9	-14.9	-13.7	-11.4	-7.9	-3.5	0.0	1.0	2.2	3.4	4.7	
8	-13.9	-12.8	-10.4	-7.1	-3.0	0.0	0.9	2.0	3.1	4.3	
7	-12.6	-11.5	-9.3	-6.1	-2.5	0.0	0.8	1.7	2.7	3.7	
6	-11.6	-10.6	-8.5	-5.5	-2.3	0.0	0.7	1.5	2.4	3.4	
5	-10.4	-9.4	-7.5	-4.8	-2.0	-0.1	0.6	1.3	2.1	3.0	
4	-9.0	-8.1	-6.4	-4.2	-1.7	-0.1	0.5	1.1	1.8	2.6	
3	-7.4	-6.6	-5.2	-3.4	-1.5	-0.1	0.4	0.9	1.5	2.1	
2	-5.9	-5.3	-4.2	-2.8	-1.3	-0.2	0.3	0.7	1.2	1.7	
1	-4.3	-3.9	-3.1	-2.1	-1.0	-0.2	0.2	0.5	0.9	1.3	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-39.0	-41.6	-43.7	-43.8	
9	-39.2	-41.5	-43.4	-43.5	
8	-39.4	-41.3	-43.1	-43.2	
7	-39.6	-41.1	-42.8	-42.8	
6	-39.8	-40.9	-42.5	-42.6	
5	-40.0	-40.8	-42.3	-42.3	
4	-40.2	-40.6	-42.1	-42.1	
3	-40.4	-40.4	-42.0	-42.0	
2	-40.5	-40.3	-42.1	-42.0	
1	-40.7	-40.1	-42.4	-42.3	

EQI. STRESS (MPA) IWRDD= 4

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	12.8	11.8	9.8	6.7	2.9	1.8	2.4	3.1	3.9	4.7	
9	12.4	11.4	9.3	6.2	2.6	1.6	2.2	2.9	3.6	4.4	
8	11.7	10.7	8.6	5.6	2.2	1.5	2.0	2.6	3.3	4.0	
7	10.7	9.7	7.7	4.9	1.8	1.2	1.7	2.2	2.8	3.5	
6	10.0	9.0	7.1	4.4	1.6	1.1	1.5	2.0	2.6	3.2	
5	8.9	8.0	6.2	3.8	1.4	0.9	1.3	1.8	2.3	2.8	
4	7.8	7.0	5.4	3.3	1.2	0.8	1.1	1.5	2.0	2.4	
3	6.4	5.7	4.4	2.7	1.0	0.6	0.9	1.2	1.6	2.0	
2	5.1	4.5	3.5	2.2	0.9	0.5	0.7	1.0	1.3	1.6	
1	3.7	3.3	2.6	1.6	0.7	0.4	0.5	0.7	1.0	1.3	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14
10	51.9	50.8	52.3	52.5

9	52.1	50.6	51.8	52.0	
8	52.4	50.3	51.3	51.5	
7	52.7	49.9	50.7	50.8	
6	52.9	49.6	50.3	50.4	
5	53.2	49.3	49.9	50.0	
4	53.5	49.0	49.5	49.6	
3	53.9	48.6	49.2	49.2	
2	54.1	48.3	49.0	49.0	
1	54.5	47.9	49.0	49.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

YIELD STRESS(MPA) IWROD= 5

SEGMENT NUM.

10	295.0	298.6	305.8	316.4	330.3	347.3	367.2	389.6	414.1	440.3	
9	308.4	311.8	318.4	328.3	341.3	357.1	375.7	396.6	419.5	444.2	
8	325.4	328.5	334.5	343.5	355.2	369.6	386.5	405.6	426.6	449.2	
7	345.9	348.6	353.9	361.8	372.1	384.9	399.8	416.7	435.4	455.6	
6	358.9	361.4	366.2	373.4	382.9	394.6	408.3	423.9	441.2	459.9	
5	375.4	377.5	381.8	388.2	396.7	407.1	419.3	433.2	448.7	465.5	
4	391.6	393.5	397.3	402.9	410.3	419.5	430.2	442.6	456.3	471.3	
3	411.1	412.7	415.9	420.6	426.8	434.5	443.6	454.1	465.8	478.6	
2	428.6	429.9	432.6	436.5	441.7	448.2	455.9	464.7	474.6	485.5	
1	449.1	450.1	452.2	455.3	459.4	464.5	470.5	477.5	485.3	494.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.

10	271.0	274.0	268.4	268.5	
9	275.7	278.6	272.9	273.0	
8	281.6	284.3	278.4	278.5	
7	288.4	290.8	284.8	284.9	
6	292.5	294.8	288.7	288.8	
5	297.3	299.5	293.2	293.3	
4	301.6	303.6	297.2	297.3	
3	305.8	307.5	301.0	301.1	
2	308.4	309.8	303.2	303.3	
1	309.2	310.4	303.6	303.7	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 6

SEGMENT NUM.

10	3.5	3.0	2.2	1.1	0.0	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	
9	2.9	2.6	1.9	0.9	0.0	-0.5	-0.7	-0.8	-0.8	-0.8	
8	2.3	2.0	1.5	0.7	0.0	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	
7	1.7	1.5	1.0	0.5	0.0	-0.3	-0.4	-0.4	-0.5	-0.5	
6	1.3	1.2	0.8	0.4	0.0	-0.2	-0.3	-0.	[illegible]	-0.4	
5	1.0	0.8	0.6	0.3	0.0	[illegible]	-0.2	-0.	[illegible]	-0.	
4	0.7	0.6	0.4	0.2	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0	
3	0.4	0.4	0.3	0.1	0.0	-0.	-0.1	-0.1	-0.1	-0	
2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.	
1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.

10	48.7	40.1	41.7	41.6	
9	45.5	37.5	39.1	39.0	
8	41.6	34.3	36.0	35.9	
7	37.1	30.5	32.4	32.3	
6	34.2	28.2	30.1	30.0	
5	30.8	25.4	27.3	27.2	
4	27.4	22.6	24.6	24.5	
3	23.5	19.4	21.4	21.4	
2	20.0	16.6	18.6	18.6	
1	16.1	13.4	15.3	15.3	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 7

SEGMENT NUM.

10	3.5	3.2	2.5	1.7	0.8	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	
9	2.9	2.7	2.1	1.4	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	
8	2.3	2.1	1.7	1.1	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
7	1.7	1.5	1.2	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	
6	1.3	1.2	0.9	0.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
5	1.0	0.9	0.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
4	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
3	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.

10	-48.7	-40.7	-42.4	-42.3	
9	-45.5	-38.0	-39.7	-39.7	
8	-41.6	-34.7	-36.5	-36.4	
7	-37.1	-30.9	-32.8	-32.7	
6	-34.2	-28.6	-30.4	-30.4	
5	-30.7	-25.7	-27.6	-27.5	
4	-27.4	-22.9	-24.8	-24.8	
3	-23.5	-19.6	-21.5	-21.5	
2	-20.0	-16.8	-18.7	-18.7	
1	-16.1	-13.5	-15.4	-15.4	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 8

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-7.9	-6.4	-4.9	-3.0	-0.9	0.3	0.[illegible]	0.6	[illegible].7	1.7	
9	-6.0	-5.4	-4.1	-2.4	-0.7	0.2	0.[illegible]	0.5	[illegible].6	1.6	
8	-4.8	-4.2	-3.2	-1.9	-0.6	0.2	0.[illegible]	0.4	[illegible].4	.5	
7	-3.5	-3.0	-2.3	-1.3	-0.4	0.1	0.2	0.3	0.3	.4	
6	-2.7	-2.4	-1.8	-1.1	-0.3	0.1	0.2	0.2	0.3	.3	
5	-2.0	-1.8	-1.3	-0.8	-0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	1.2	
4	-1.4	-1.2	-0.9	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.1	0.[illegible]	0.2	
3	-0.9	-0.8	-0.6	-0.3	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.[illegible]	0.1	
2	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	
1	-0.3	-0.2	-0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	0.0	0.6	0.7	0.7	
9	0.0	0.5	0.6	0.6	
8	0.0	0.5	0.5	0.5	
7	0.0	0.4	0.4	0.4	
6	0.0	0.4	0.4	0.4	
5	0.0	0.3	0.3	0.3	
4	0.0	0.3	0.2	0.2	
3	0.0	0.2	0.2	0.2	
2	0.0	0.2	0.1	0.1	
1	0.0	0.1	0.0	0.0	

HARD STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 9

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	53.2	44.0	42.5	42.5	
9	49.6	41.0	39.8	39.7	
8	45.2	37.4	36.4	36.3	
7	40.1	33.2	32.6	32.5	
6	37.0	30.6	30.2	30.1	
5	33.1	27.4	27.2	27.2	
4	29.4	24.3	24.4	24.4	
3	25.1	20.8	21.2	21.2	
2	21.4	17.8	18.4	18.3	
1	17.1	14.3	15.1	15.1	

PLAST. STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 10

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	

SWELLING STRAIN(0.01%) IWROD= 11

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	
9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	
8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	
7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	
6	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	
5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
4	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	
2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	
1	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14

DENSIFICATION STRAIN(0.01%) IWROD= 11

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9	-11.9
9	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4	-11.4
8	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7	-10.7
7	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8	-9.8
6	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2	-9.2
5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5	-8.5
4	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7	-7.7
3	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8	-6.8
2	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0
1	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0	-5.0
ELM.NUM.	11	12	13	14						

TOTAL STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 12

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	169.9	168.6	166.2	162.8	158.7	154.3	149.9	145.1	140.2	135.2
9	166.6	165.5	163.4	160.3	156.6	152.6	148.6	144.2	139.5	134.9
8	162.6	161.7	159.8	157.2	153.9	150.5	146.9	142.9	138.7	134.4
7	158.0	157.3	155.7	153.5	150.8	147.9	144.8	141.3	137.6	133.8
6	155.2	154.5	153.2	151.3	148.9	146.2	143.4	140.2	136.9	133.3
5	151.8	151.2	150.1	148.5	146.4	144.1	141.7	138.9	135.9	132.7
4	148.5	148.0	147.1	145.7	144.0	142.1	139.9	137.5	134.9	132.1
3	144.7	144.4	143.6	142.6	141.2	139.6	137.8	135.8	133.6	131.2
2	141.5	141.2	140.6	139.8	138.7	137.4	135.9	134.2	132.4	130.4
1	137.9	137.7	137.2	136.6	135.8	134.8	133.6	132.3	130.9	129.3
ELM.NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

SEGMENT NUM.	11	12	13	14
10	70.5	61.3	58.1	58.0
9	67.3	58.6	55.7	55.6
8	63.4	55.4	52.8	52.7
7	59.0	51.7	49.4	49.4
6	56.2	49.4	47.3	47.3
5	52.7	46.6	44.8	44.7
4	49.4	43.8	42.3	42.2
3	45.6	40.7	39.4	39.4
2	42.2	37.9	36.9	36.9
1	38.3	34.8	34.1	34.0
ELM.NUM.	11	12	13	14

TOTAL STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 13

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	169.9	169.5	168.7	167.5	166.0	164.2	162.4	160.4	158.3	156.1
9	166.6	166.3	165.5	164.5	163.1	161.6	159.9	158.1	156.2	154.2
8	162.6	162.3	161.7	160.8	159.6	158.3	156.8	155.2	153.5	151.7
7	158.0	157.8	157.3	156.5	155.5	154.4	153.2	151.8	150.4	148.8
6	155.2	155.0	154.5	153.9	153.0	152.0	150.9	149.7	148.4	147.0
5	151.8	151.6	151.2	150.7	149.9	149.1	148.1	147.1	145.9	144.7
4	148.5	148.4	148.0	147.6	147.0	146.3	145.5	144.6	143.6	142.5
3	144.7	144.6	144.4	144.0	143.5	143.0	142.3	141.6	140.8	139.9
2	141.5	141.4	141.2	140.9	140.6	140.1	139.6	139.0	138.3	137.6
1	137.9	137.8	137.7	137.4	137.2	136.8	136.4	136.0	135.4	134.9
ELM.NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

SEGMENT NUM.	11	12	13	14
10	-29.2	-22.7	-19.9	-19.9
9	-26.3	-20.2	-17.6	-17.6
8	-22.9	-17.3	-14.9	-14.8
7	-18.9	-13.8	-11.6	-11.6
6	-16.4	-11.7	-9.7	-9.6
5	-13.4	-9.1	-7.2	-7.2
4	-10.5	-6.6	-4.9	-4.9
3	-7.1	-3.6	-2.2	-2.2
2	-4.1	-1.1	0.2	0.2
1	-0.7	1.8	2.9	2.9
ELM.NUM.	11	12	13	14

TOTAL STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 14

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9	111.9
9	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5	109.5
8	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5	106.5
7	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9	102.9
6	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5	100.5
5	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6	97.6
4	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8	94.8
3	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5	91.5
2	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5	88.5
1	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2	85.2
ELM.NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

SEGMENT NUM.	11	12	13	14
10	26.0	26.0	26.0	26.0
9	25.5	25.5	25.5	25.5
8	25.0	25.0	25.0	25.0
7	24.3	24.3	24.3	24.3
6	23.8	23.8	23.8	23.8
5	23.2	23.2	23.2	23.2
4	22.6	22.6	22.6	22.6
3	21.8	21.8	21.8	21.8
2	21.0	21.0	21.0	21.0
1	20.0	20.0	20.0	20.0
ELM.NUM.	11	12	13	14

THERMAL STRAIN(RADIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	87.7	86.6	84.4	81.1	76.9	71.9	66.1	59.8	53.1	46.2	
9	83.6	82.5	80.5	77.5	73.6	69.0	63.7	57.9	51.7	45.2	
8	78.4	77.5	75.7	73.0	69.6	65.4	60.7	55.4	49.8	43.9	
7	72.3	71.5	70.0	67.7	64.7	61.1	57.0	52.4	47.5	42.3	
6	68.5	67.8	66.4	64.3	61.7	58.4	54.7	50.5	46.0	41.2	
5	63.8	63.2	62.0	60.2	57.9	55.0	51.7	48.1	44.1	39.8	
4	59.3	58.7	57.7	56.2	54.1	51.7	48.8	45.6	42.1	38.4	
3	53.9	53.5	52.6	51.4	49.7	47.7	45.4	42.7	39.8	36.6	
2	49.3	48.9	48.2	47.2	45.9	44.2	42.2	40.0	37.6	34.9	
1	44.0	43.7	43.2	42.4	41.4	40.1	38.6	36.9	34.9	32.8	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	22.0	21.1	20.6	20.6	
9	21.8	21.0	20.5	20.5	
8	21.6	20.8	20.4	20.4	
7	21.4	20.7	20.3	20.2	
6	21.2	20.5	20.2	20.2	
5	21.0	20.4	20.1	20.1	
4	20.9	20.3	20.0	20.0	
3	20.6	20.1	19.9	19.8	
2	20.4	20.0	19.8	19.8	
1	20.2	19.9	19.7	19.7	

THERMAL STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	87.7	86.6	84.4	81.1	76.9	71.9	66.1	59.8	53.1	46.2	
9	83.6	82.5	80.5	77.5	73.6	69.0	63.7	57.9	51.7	45.2	
8	78.4	77.5	75.7	73.0	69.6	65.4	60.7	55.4	49.8	43.9	
7	72.3	71.5	70.0	67.7	64.7	61.1	57.0	52.4	47.5	42.3	
6	68.5	67.8	66.4	64.3	61.7	58.4	54.7	50.5	46.0	41.2	
5	63.8	63.2	62.0	60.2	57.9	55.0	51.7	48.1	44.1	39.8	
4	59.3	58.7	57.7	56.2	54.1	51.7	48.8	45.6	42.1	38.4	
3	53.9	53.5	52.6	51.4	49.7	47.7	45.4	42.7	39.8	36.6	
2	49.3	48.9	48.2	47.2	45.9	44.2	42.2	40.0	37.6	34.9	
1	44.0	43.7	43.2	42.4	41.4	40.1	38.6	36.9	34.9	32.8	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	14.5	13.9	13.6	13.6	
9	14.4	13.8	13.5	13.5	
8	14.3	13.8	13.5	13.5	
7	14.1	13.6	13.4	13.4	
6	14.0	13.6	13.3	13.3	
5	13.9	13.5	13.3	13.3	
4	13.8	13.4	13.2	13.2	
3	13.6	13.3	13.1	13.1	
2	13.5	13.2	13.1	13.1	
1	13.4	13.1	13.0	13.0	

IRRADIATION STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	12.9	12.9	12.9	12.9	
9	12.6	12.6	12.6	12.6	
8	12.1	12.2	12.2	12.2	
7	11.6	11.6	11.6	11.6	
6	11.2	11.3	11.3	11.3	
5	10.7	10.8	10.8	10.8	
4	10.2	10.3	10.3	10.3	
3	9.6	9.6	9.6	9.6	
2	9.0	9.0	9.0	9.0	
1	8.1	8.1	8.1	8.1	

PRESSURE ON UPPER AND SIDE SURFACE (MPA) IWROD= 17

SEGMENT NUMBER	CONTACT STATUS	PELLET RADIAL	PELLET AXIAL	CLADDING RADIAL	CLADDING AXIAL
10	OPEN	0.000	-0.064	6.511	-40.384
9	OPEN	0.000	-0.066	6.520	-40.385
8	OPEN	0.000	-0.067	6.531	-40.385
7	OPEN	0.000	-0.069	6.541	-40.386
6	OPEN	0.000	-0.071	6.547	-40.387
5	OPEN	0.000	-0.072	6.553	-40.387
4	OPEN	0.000	-0.074	6.558	-40.388
3	OPEN	0.000	-0.075	6.564	-40.388
2	OPEN	0.000	-0.076	6.567	-40.388
1	OPEN	0.000	-0.077	6.570	-40.389

DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) IWROD= 18

(R-DIRECTION)

10	0.0	7.9	15.7	23.5	31.0	38.4	45.6	52.6	59.3	65.8	72.1
9	0.0	7.7	15.4	23.0	30.5	37.8	44.9	51.8	58.5	65.0	71.2
8	0.0	7.6	15.1	22.5	29.8	37.0	44.0	50.8	57.5	63.9	70.2
7	0.0	7.3	14.7	21.9	29.0	36.1	42.9	49.7	56.2	62.6	68.9
6	0.0	7.2	14.4	21.5	28.6	35.5	42.3	49.0	55.5	61.8	68.0
5	0.0	7.1	14.1	21.1	28.0	34.8	41.5	48.1	54.5	60.8	67.0
4	0.0	6.9	13.8	20.6	27.4	34.1	40.7	47.2	53.6	59.9	66.0
3	0.0	6.7	13.4	20.1	26.8	33.3	39.8	46.2	52.5	58.7	64.8
2	0.0	6.6	13.1	19.7	26.2	32.6	39.0	45.3	51.6	57.7	63.8
1	0.0	6.4	12.8	19.2	25.5	31.9	38.1	44.3	50.5	56.6	62.6

10	-15.7	-13.1	-10.9	-10.9	-10.9	-10.9
9	-14.2	-11.8	-9.6	-9.6	-9.6	-9.6
8	-12.4	-10.1	-8.1	-8.1	-8.1	-8.1
7	-10.4	-8.3	-6.4	-6.4	-6.4	-6.4
6	-9.1	-7.1	-5.3	-5.3	-5.3	-5.3
5	-7.5	-5.6	-4.0	-4.0	-4.0	-3.9
4	-6.1	-4.3	-2.7	-2.7	-2.7	-2.7
3	-4.3	-2.7	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
2	-2.8	-1.3	0.1	0.1	0.1	0.1
1	-1.0	0.3	1.6	1.6	1.6	1.6

(Z-DIRECTION)

SEG. NUM.	PELLET	CLADDING	GAP
	1084.0		
10	4450.333	1048.588	12.215
9	3946.591	931.729	14.553
8	3453.656	816.849	17.419
7	2974.389	704.512	20.761
6	2511.534	595.329	22.854
5	2059.088	488.254	25.434
4	1619.705	383.922	27.926
3	1193.086	282.424	30.848
2	781.543	184.516	33.409
1	383.219	90.055	36.358

********** IFEM = 5 ****
******** OUTPUT ---STAGE--- 41 **********

THERMAL ANALYSIS INFORMATION

STAGE NO.	41	
TIME	13609.00	HR
COOLANT TEMPERATURE	578.00	DEG.K
COOLANT PRESSURE	1.50D+01	MPA

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURN UP (MWD/TUO2)	GAP CONDUCTANCE (W/CM**2 K) TOTAL	GAS	SOLID	RAD.	TEMPERATURE (K) PC	PS	CI	CS	CLEARANCE (MICRONS)	CONTACT FORCE(MPA)
1	66.000	5445.0	0.2759	0.2720	0.0000	0.0038	781.2	673.0	592.6	582.3	84.999	0.000
2	80.400	6633.0	0.2818	0.2777	0.0000	0.0041	830.4	692.1	596.2	583.6	84.200	0.000
3	92.400	7623.0	0.2880	0.2838	0.0000	0.0042	872.2	707.0	599.2	584.7	83.106	0.000
4	105.600	8712.0	0.2961	0.2916	0.0000	0.0044	918.9	722.5	602.7	585.9	81.548	0.000
* 5	116.400	9603.0	0.3036	0.2990	0.0000	0.0046	957.8	734.5	605.7	587.1	80.049	0.000
6	127.200	10494.0	0.3118	0.3071	0.0000	0.0047	997.2	745.8	608.7	588.3	78.385	0.000
7	135.600	11187.0	0.3188	0.3139	0.0000	0.0049	1028.2	754.3	611.3	589.4	76.993	0.000
8	148.800	12276.0	0.3306	0.3256	0.0000	0.0050	1077.1	766.4	615.2	590.8	74.666	0.000
9	159.600	13167.0	0.3412	0.3360	0.0000	0.0052	1117.7	775.8	618.5	592.1	72.652	0.000
10	168.000	13860.0	0.3501	0.3447	0.0000	0.0053	1149.7	782.8	621.4	593.3	71.024	0.000

NODE	CSFR*	PFAC*	BURN UP (FISS/CC *10**20)	THERMAL EXPANS.	PELLET DISPLACEMENT (MICRONS) CREEP	DENSIFICATION	IRRAD. SWELL.	RELOCATION	DISPLACEMENT	CLADDING DISPLACEMENT (MICRONS) THERMAL EXPANS.	ELASTIC DEFORM.	CREEP	DISPLACEMENT
1	0.8943	2.0000	1.54	7.11	0.00	-22.15	5.68	18.80	-9.35	0.34	0.12	0.00	0.46
2	0.8943	2.0000	1.87	8.87	0.00	-24.26	6.93	18.80	-8.47	0.43	0.12	0.00	0.54
3	0.8943	2.0000	2.15	10.38	0.00	-25.64	7.96	18.80	-7.30	0.51	0.12	0.00	0.62
4	0.8943	2.0000	2.46	12.07	0.00	-26.83	9.10	18.80	-5.65	0.59	0.12	0.00	0.71
* 5	0.8943	2.0000	2.71	13.50	0.00	-27.60	10.03	18.80	-4.07	0.67	0.12	0.00	0.79
6	0.8943	2.0000	2.96	14.94	0.00	-28.23	10.96	18.80	-2.33	0.75	0.12	0.00	0.87
7	0.8943	2.0000	3.16	16.09	0.00	-28.64	11.68	18.80	-0.87	0.82	0.12	0.00	0.94
8	0.8943	2.0000	3.47	17.91	0.00	-29.16	12.81	18.80	1.56	0.92	0.12	0.00	1.04
9	0.8943	2.0000	3.72	19.43	0.00	-29.50	13.74	18.80	3.67	1.01	0.12	0.00	1.13
10	0.8943	2.0000	3.92	20.64	0.00	-29.72	14.45	18.80	5.37	1.09	0.12	0.00	1.21

NODE	ZR-2ROX INT. TEMP.(K)	CLAD SURFACE TEMP.(K)	COOLANT TEMP.(K)	CLAD OUTER CORROSION RATE(MICRON/D)	THICNESS(MICRON)	CLAD SURF. TEMP. HALDEN EXP.(K)
1	583.6	582.3	578.1	0.01656	9.18270	585.9
2	585.2	583.6	578.4	0.01830	9.91796	587.8
3	586.6	584.7	578.8	0.01985	10.18528	589.6
4	588.3	585.9	579.2	0.02174	10.93877	591.6
* 5	589.8	587.1	579.7	0.02354	11.64683	593.3
6	591.5	588.3	580.2	0.02552	12.42254	595.1
7	593.0	589.4	580.8	0.02737	13.14088	596.6
8	595.1	590.8	581.4	0.03022	14.21599	598.8
9	597.0	592.1	582.0	0.03304	15.26578	600.7
10	598.8	593.3	582.7	0.03576	16.26490	602.3
PL	584.7	584.7	582.7	0.00115	2.15938	

INITIAL GAS (MOL) = 5.63D-03

FISSION GAS RESULT

LOCAL FISSION GAS RELEASE FRACTION (AXIAL NODE)
1 0.00500 2 0.00500 3 0.00500 4 0.00500 5 0.00500 6 0.00500 7 0.00500 8 0.00500 9 0.00500 10 0.00500

ROD AVERAGE FISSION GAS RELEASE FRACTION = 0.00500

ROD GAS PRESSURE (MPA) = 6.215

TOTAL GAS (MOL) = 5.65D-03

FRACTIONS OF GAS MIXTURE (PERCENT)	AXIAL NODE 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HE	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6	99.6
N2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
KR	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
XE	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

RELEASED IODINE (GRAM/CM**2) = 9.07D-07 (AVERAGE) 8.79D-07 (PEAK)

(MOL)	HE	N2	KR	XE	TOTAL
PRODUCED GAS	0.00D+00	0.00D+00	5.74D-04	3.84D-03	4.41E-03
RELEASED GAS	0.00D+00	0.00D+00	2.87D-06	1.92D-05	2.21E-05
ROD GAS	5.63D-03	0.00D+00	2.87D-06	1.92D-05	5.65E-03

RADIAL TEMPERATURE DISTRIBUTION AT AXIAL NODE OF 5

PELLET ...1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	/ GAP /	CLAD. ...1	2	3
958	955	948	936	920	899	874	845	811	775	735		604	597	590

TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE FUEL (DEG.C) IWTHE= 1

SEG										
10	874.69	866.43	850.40	826.58	795.24	756.73	711.50	660.12	603.28	541.54
9	842.63	835.16	820.28	798.17	769.06	733.27	691.19	643.31	590.21	532.53
8	802.25	795.49	782.06	762.07	735.73	703.31	665.15	621.65	573.30	520.63
7	753.56	747.65	735.89	718.38	695.29	666.82	633.26	594.91	552.16	505.43
6	722.65	717.26	706.52	690.52	669.42	643.37	612.62	577.44	538.14	495.10
5	683.48	678.72	669.24	655.11	636.45	613.39	586.13	554.87	519.87	481.43
4	644.75	640.80	632.31	619.96	603.63	583.43	559.49	532.00	501.14	467.15
3	598.18	594.72	587.81	577.51	563.86	546.95	526.87	503.75	477.72	448.95
2	556.55	553.67	547.93	539.36	528.00	513.90	497.12	477.75	455.89	431.64
1	507.52	505.29	500.85	494.20	485.38	474.41	461.33	446.19	429.02	409.91

GAP GAS INFORMATION (%) IWTHE= 2

SEG	HE	N2	KR	XE
10	99.6	0.0	0.1	0.3
9	99.6	0.0	0.1	0.3
8	99.6	0.0	0.1	0.3
7	99.6	0.0	0.1	0.3
6	99.6	0.0	0.1	0.3
5	99.6	0.0	0.1	0.3
4	99.6	0.0	0.1	0.3
3	99.6	0.0	0.1	0.3
2	99.6	0.0	0.1	0.3
1	99.6	0.0	0.1	0.3

RADIUS OF GRAIN (MICRON) IWTHE= 3

SEG										
10	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
9	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
8	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
7	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
5	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
4	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
3	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
2	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
1	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00

RADIUS OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (ANGSTROM) IWTHE= 4

SEG										
10	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
9	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57	2.57
8	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
7	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40	2.40
6	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34	2.34
5	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
4	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16
3	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04	2.04
2	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92	1.92
1	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77

DENSITY OF INTRAGRANULAR GAS BUBBLE (BUBBLES/CM**3) IWTHE= 5

SEG										
10	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18	1.214D+18
9	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18	1.225D+18
8	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18	1.239D+18
7	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18	1.258D+18
6	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18	1.271D+18
5	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18	1.289D+18
4	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18	1.308D+18
3	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18	1.334D+18
2	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18	1.361D+18
1	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18	1.398D+18

DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 6

SEG										
10	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
9	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
8	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
7	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
6	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
5	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
4	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
3	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
2	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17
1	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17	2.000D-17

EFFECTIVE DIFFUSION COEFFICIENT (CM**2/SEC) IWTHE= 7

SEG										
10	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
9	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
8	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
7	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
6	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
5	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
4	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17	1.983D-17
3	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17
2	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17
1	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17	1.984D-17

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 8

SEG

10	3.094D+09	9.305D+09	1.558D+10	2.197D+1[illegible]	2.851D+10	3.52[illegible]+10	4.222D+10	4.948D+10	5.708D+10	6.504D+10
9	2.940D+09	8.840D+09	1.480D+10	2.087D+1[illegible]	2.708D+10	3.3[illegible]+10	4.011D+10	4.701D+10	5.422D+10	6.179D+10
8	2.741D+09	8.242D+09	1.380D+10	1.946D+10	2.52[illegible]+10	3.122D+10	3.740D+10	4.383D+10	5.055D+10	5.761D+10
7	2.498D+09	7.510D+09	1.258D+10	1.773D+10	2.301D+10	2.845D+10	3.408D+10	3.994D+10	4.607D+10	5.250D+10
6	2.343D+09	7.045D+09	1.180D+10	1.663D+10	2.158D+10	2.668D+10	3.197D+10	3.747D+10	4.322D+10	4.925D+10
5	2.144D+09	6.447D+09	1.080D+10	1.522D+10	1.975D+10	2.442D+10	2.925D+10	3.429D+10	3.955D+10	4.506D+10
4	1.945D+09	5.849D+09	9.794D+09	1.381D+10	1.792D+10	2.215D+10	2.654D+10	3.110D+10	3.588D+10	4.088D+10
3	1.702D+09	5.118D+09	8.570D+09	1.208D+10	1.568D+10	1.938D+10	2.322D+10	2.722D+10	3.139D+10	3.577D+10
2	1.481D+09	4.453D+09	7.457D+09	1.051D+10	1.364D+10	1.687D+10	2.021D+10	2.368D+10	2.731D+10	3.113D+10
1	1.216D+09	3.655D+09	6.121D+09	8.630D+09	1.120D+10	1.385D+10	1.659D+10	1.944D+10	2.242D+10	2.555D+10

NUMBER OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 9

SEG										
10	7.258D+07	2.182D+08	3.655D+08	5.152D+08	6.686D+08	8.266D+08	9.903D+08	1.161D+09	1.339D+09	1.526D+09
9	6.895D+07	2.073D+08	3.472D+08	4.895D+08	6.352D+08	7.853D+08	9.408D+08	1.103D+09	1.272D+09	1.449D+09
8	6.429D+07	1.933D+08	3.237D+08	4.564D+08	5.923D+08	7.322D+08	8.772D+08	1.028D+09	1.186D+09	1.351D+09
7	5.859D+07	1.762D+08	2.950D+08	4.159D+08	5.398D+08	6.673D+08	7.994D+08	9.369D+08	1.081D+09	1.231D+09
6	5.496D+07	1.653D+08	2.768D+08	3.902D+08	5.063D+08	6.260D+08	7.499D+08	8.790D+08	1.014D+09	1.155D+09
5	5.030D+07	1.513D+08	2.533D+08	3.571D+08	4.634D+08	5.729D+08	6.863D+08	8.044D+08	9.278D+08	1.057D+09
4	4.564D+07	1.372D+08	2.298D+08	3.240D+08	4.204D+08	5.198D+08	6.227D+08	7.298D+08	8.418D+08	9.592D+08
3	3.994D+07	1.201D+08	2.011D+08	2.835D+08	3.679D+08	4.549D+08	5.449D+08	6.387D+08	7.367D+08	8.395D+08
2	3.476D+07	1.045D+08	1.750D+08	2.467D+08	3.202D+08	3.959D+08	4.742D+08	5.558D+08	6.411D+08	7.305D+08
1	2.854D+07	8.582D+07	1.437D+08	2.026D+08	2.629D+08	3.250D+08	3.894D+08	4.564D+08	5.264D+08	5.998D+08

NUMBER OF GAS ATOMS RELEASED TO FREE VOLUME (ATOMS) IWTHE= 10

SEG										
10	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
9	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
8	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
7	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
6	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
5	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
4	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
3	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
2	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00
1	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00	0.000D+00

NUMBER OF GAS ATOMS IN A GRAIN AND BOUNDARY (ATOMS) IWTHE= 11

SEG										
10	3.167D+09	9.523D+09	1.595D+10	2.248D+10	2.918D+10	3.607D+10	4.321D+10	5.065D+10	5.842D+10	6.657D+10
9	3.009D+09	9.047D+09	1.515D+10	2.136D+10	2.772D+10	3.427D+10	4.105D+10	4.811D+10	5.549D+10	6.324D+10
8	2.805D+09	8.435D+09	1.412D+10	1.991D+10	2.584D+10	3.195D+10	3.827D+10	4.486D+10	5.174D+10	5.896D+10
7	2.556D+09	7.687D+09	1.287D+10	1.815D+10	2.355D+10	2.911D+10	3.488D+10	4.088D+10	4.715D+10	5.373D+10
6	2.398D+09	7.210D+09	1.207D+10	1.702D+10	2.209D+10	2.731D+10	3.272D+10	3.835D+10	4.423D+10	5.040D+10
5	2.194D+09	6.598D+09	1.105D+10	1.558D+10	2.021D+10	2.499D+10	2.994D+10	3.509D+10	4.047D+10	4.612D+10
4	1.991D+09	5.986D+09	1.002D+10	1.413D+10	1.834D+10	2.267D+10	2.716D+10	3.183D+10	3.672D+10	4.184D+10
3	1.742D+09	5.238D+09	8.771D+09	1.237D+10	1.605D+10	1.984D+10	2.377D+10	2.786D+10	3.213D+10	3.661D+10
2	1.516D+09	4.558D+09	7.632D+09	1.076D+10	1.396D+10	1.726D+10	2.068D+10	2.424D+10	2.796D+10	3.186D+10
1	1.244D+09	3.741D+09	6.265D+09	8.832D+09	1.146D+10	1.417D+10	1.698D+10	1.990D+10	2.295D+10	2.615D+10

NUMBER OF GAS ATOMS (GRAIN+BOUNDARY+RELEASED) (ATOMS) IWTHE= 1[illegible]

SEG										
10	3.167D+09	9.523D+09	1.595D+10	2.248D+10	2.918D+10	3.607D+10	4.321D+10	5.065D+10	5.842D+10	6.657D+10
9	3.009D+09	9.047D+09	1.515D+10	2.136D+10	2.772D+10	3.427D+10	4.105D+10	4.811D+10	5.549D+10	6.324D+10
8	2.805D+09	8.435D+09	1.412D+10	1.991D+10	2.584D+10	3.195D+10	3.827D+10	4.486D+10	5.174D+10	5.896D+10
7	2.556D+09	7.687D+09	1.287D+10	1.815D+10	2.355D+10	2.911D+10	3.488D+10	4.088D+10	4.715D+10	5.373D+10
6	2.398D+09	7.210D+09	1.207D+10	1.702D+10	2.209D+10	2.731D+10	3.272D+10	3.835D+10	4.423D+10	5.040D+10
5	2.194D+09	6.598D+09	1.105D+10	1.558D+10	2.021D+10	2.499D+10	2.994D+10	3.509D+10	4.047D+10	4.612D+10
4	1.991D+09	5.986D+09	1.002D+10	1.413D+10	1.834D+10	2.267D+10	2.716D+10	3.183D+10	3.672D+10	4.184D+10
3	1.742D+09	5.238D+09	8.771D+09	1.237D+10	1.605D+10	1.984D+10	2.377D+10	2.786D+10	3.213D+10	3.661D+10
2	1.516D+09	4.558D+09	7.632D+09	1.076D+10	1.396D+10	1.726D+10	2.068D+10	2.424D+10	2.796D+10	3.186D+10
1	1.244D+09	3.741D+09	6.265D+09	8.832D+09	1.146D+10	1.417D+10	1.698D+10	1.990D+10	2.295D+10	2.615D+10

PRODUCED FISSION GASES IN A GRAIN (ATOMS) IWTHE= 13

SEG										
10	6.017D+10	6.031D+10	6.060D+10	6.102D+10	6.159D+10	6.230D+10	6.316D+10	6.415D+10	6.529D+10	6.657D+10
9	5.716D+10	5.730D+10	5.757D+10	5.797D+10	5.851D+10	5.919D+10	6.000D+10	6.094D+10	6.202D+10	6.324D+10
8	5.330D+10	5.342D+10	5.367D+10	5.405D+10	5.455D+10	5.518D+10	5.594D+10	5.682D+10	5.783D+10	5.896D+10
7	4.857D+10	4.868D+10	4.891D+10	4.926D+10	4.971D+10	5.029D+10	5.098D+10	5.178D+10	5.270D+10	5.373D+10
6	4.556D+10	4.567D+10	4.588D+10	4.620D+10	4.663D+10	4.717D+10	4.782D+10	4.857D+10	4.943D+10	5.040D+10
5	4.169D+10	4.179D+10	4.199D+10	4.228D+10	4.268D+10	4.317D+10	4.376D+10	4.445D+10	4.524D+10	4.612D+10
4	3.782D+10	3.791D+10	3.809D+10	3.836D+10	3.872D+10	3.916D+10	3.970D+10	4.032D+10	4.104D+10	4.184D+10
3	3.309D+10	3.317D+10	3.333D+10	3.356D+10	3.388D+10	3.427D+10	3.474D+10	3.528D+10	3.591D+10	3.661D+10
2	2.880D+10	2.886D+10	2.900D+10	2.920D+10	2.948D+10	2.982D+10	3.022D+10	3.070D+10	3.124D+10	3.186D+10
1	2.364D+10	2.369D+10	2.381D+10	2.397D+10	2.420D+10	2.448D+10	2.481D+10	2.520D+10	2.565D+10	2.615D+10

FISSION GAS RELEASE RATE IN A RING (%) IWTHE= 14

SEG										
10	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
9	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
8	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
7	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
6	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
5	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
4	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
2	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50

DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 15

SEG										
10	2.310D+13	6.947D+13	1.163D+14	1.640D+14	2.128D+14	2.631D+14	3.152D+14	3.694D+14	4.261D+14	4.856D+14
9	2.195D+13	6.600D+13	1.105D+14	1.558D+14	2.022D+14	2.500D+14	2.995D+14	3.510D+14	4.048D+14	4.613D+14
8	2.046D+13	6.154D+13	1.030D+14	1.453D+14	1.885D+14	2.331D+14	2.792D+14	3.272D+14	3.775D+14	4.301D+14
7	1.865D+13	5.608D+13	9.391D+13	1.324D+14	1.718D+14	2.124D+14	2.545D+14	2.982D+14	3.440D+14	3.920D+14
6	1.749D+13	5.261D+13	8.809D+13	1.242D+14	1.612D+14	1.993D+14	2.387D+14	2.798D+14	3.227D+14	3.677D+14

5	1.601D+13	4.815D+13	8.062D+13	1.137D+14	1.475D+14	1.[illegible]4D+14	2.185D+[illegible]	2.560D+14	2.953D+14	3.365D+14
4	1.453D+13	4.368D+13	7.315D+13	1.031D+14	1.338D+14	1.[illegible]5D+14	1.982D+[illegible]	2.323D+14	2.679D+14	3.053D+14
3	1.271D+13	3.823D+13	6.401D+13	9.025D+13	1.171D+14	1.[illegible]9D+14	1.735D+14	2.033D+14	2.345D+14	2.672D+14
2	1.106D+13	3.327D+13	5.571D+13	7.854D+13	1.019D+14	1.64[illegible]D+14	1.510D+14	1.769D+14	2.041D+14	2.325D+14
1	9.084D+12	2.732D+13	4.574D+13	6.449D+13	8.369D+13	1.055D+14	1.239D+14	1.453D+14	1.676D+14	1.909D+14

SATURATION DENSITY OF GAS ATOMS IN A BOUNDARY (ATOMS/CM**2) IWTHE= 16

SEG										
10	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15	1.067D+15
9	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15	1.079D+15
8	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15	1.095D+15
7	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15	1.116D+15
6	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15	1.131D+15
5	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15	1.152D+15
4	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15	1.174D+15
3	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15	1.203D+15
2	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15	1.233D+15
1	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15	1.272D+15

****
OUTPUT STAGE NUMBER = 41
TIME(HR) = 13608.998 ROD GAS PRESS.(MPA) = 6.215 COOLANT PRESS.(MPA) = 15.000
****

NODE	L.H.R. (W/CM)	BURNUP (GJ/KGU)	(MWD/TU)	(MWD/TUO2)	(FISS/CC)	FAST NEUTRON FLUX (N/CM**2/SEC)	FAST NEUTRON FLUENCE (N/CM**2)	FISSION RATE (FISS/CC/SEC)
1	66.000	5.330660D+02	6.177350D+03	5.445000D+03	1.538130D+20	5.670100D+13	2.777920D+21	3.032370D+12
2	80.400	6.493710D+02	7.525140D+03	6.633000D+03	1.873730D+20	6.907220D+13	3.384010D+21	3.693980D+12
3	92.400	7.462920D+02	8.646290D+03	7.623000D+03	2.153390D+20	7.938140D+13	3.889090D+21	4.245320D+12
4	105.600	8.529050D+02	9.883760D+03	8.712000D+03	2.461020D+20	9.072160D+13	4.444670D+21	4.851790D+12
5	116.400	9.401340D+02	1.089460D+04	9.603000D+03	2.712710D+20	1.000000D+14	4.899240D+21	5.347990D+12
6	127.200	1.027360D+03	1.190540D+04	1.049400D+04	2.964400D+20	1.092780D+14	5.353810D+21	5.844200D+12
7	135.600	1.095210D+03	1.269170D+04	1.118700D+04	3.160170D+20	1.164950D+14	5.707360D+21	6.230140D+12
8	148.800	1.201820D+03	1.392710D+04	1.227600D+04	3.467790D+20	1.278350D+14	6.262940D+21	6.836610D+12
9	159.600	1.289050D+03	1.493800D+04	1.316700D+04	3.719490D+20	1.371130D+14	6.717510D+21	7.332820D+12
10	168.000	1.356890D+03	1.572420D+04	1.386000D+04	3.915250D+20	1.443300D+14	7.071070D+21	7.718760D+12

TEMPERATURE (DEG C) IWROD= 16

UPPER PLENUM TEMP(DEG C)= 304.85

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	874.5	866.4	850.4	826.6	795.2	756.7	711.5	660.1	603.2	541.5	
9	842.6	835.2	820.3	798.2	769.1	733.3	691.2	643.3	590.2	532.5	
8	802.2	795.5	782.1	762.1	735.7	703.3	665.2	621.7	573.3	520.6	
7	753.6	747.7	735.9	718.4	695.3	666.8	633.3	594.9	552.2	505.4	
6	722.7	717.3	706.5	690.5	669.4	643.4	612.6	577.4	538.1	495.1	
5	683.5	678.7	669.2	655.1	636.4	613.4	586.1	554.9	519.9	481.4	
4	644.8	640.6	632.3	620.0	603.6	583.4	559.5	532.0	501.1	467.1	
3	598.2	594.7	587.8	577.5	563.9	546.9	526.9	503.8	477.7	448.9	
2	556.5	553.7	547.9	539.4	528.0	513.9	497.1	477.8	455.9	431.6	
1	507.5	505.3	500.8	494.2	485.4	474.4	461.3	446.2	429.0	409.9	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	342.1	331.2	324.3	321.6	
9	339.5	329.1	322.7	320.2	
8	336.5	326.8	320.9	318.7	
7	333.1	324.3	318.9	317.1	
6	330.9	322.5	317.5	315.9	
5	328.2	320.5	316.0	314.6	
4	325.6	318.6	314.6	313.4	
3	322.6	316.5	313.0	312.0	
2	320.0	314.7	311.6	310.8	
1	317.0	312.6	310.1	309.5	

STRESS(RADIAL)(MPA) IWROD= 1

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-5.9	-5.9	-5.7	-5.5	
9	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5	-5.4	-5.3	-5.2	-5.0	
8	-4.7	-4.7	-4.7	-4.7	-4.7	-4.6	-4.6	-4.5	-4.3	-4.1	
7	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3	-3.2	-3.1	-2.9	-2.8	
6	-2.1	-2.1	-2.1	-2.1	-2.0	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	
5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	
4	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	
3	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	
2	-0.6	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	
1	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.1	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-12.4	-14.2	-15.0	-15.0	
9	-12.0	-14.1	-15.0	-15.0	
8	-11.5	-13.9	-15.0	-15.0	
7	-10.5	-13.6	-15.0	-15.0	
6	-9.6	-13.3	-15.0	-15.0	
5	-8.6	-13.0	-15.0	-15.0	
4	-8.6	-13.0	-15.0	-15.0	
3	-8.6	-13.0	-15.0	-15.0	
2	-8.6	-13.0	-15.0	-15.0	
1	-8.7	-13.0	-15.0	-15.0	

STRESS(HOOP)(MPA) IWROD= 2

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-6.0	-5.9	-5.6	-5.1	-4.2	-3.4	
9	-5.5	-5.5	-5.5	-5.5	-5.4	-5.3	-5.0	-4.4	-3.6	-3.0	
8	-4.7	-4.7	-4.7	-4.7	-4.5	-4.3	-4.0	-3.5	-2.9	-2.3	
7	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.6	-2.1	-1.6	-1.0	
6	-2.1	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.5	-1.2	-0.8	-0.3	0.2	
5	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.6	1.0	1.4	
4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.1	0.2	0.5	0.9	1.3	
3	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	0.0	0.2	0.5	0.8	1.1	
2	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.7	1.0	
1	-0.5	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-36.8	-39.0	-39.5	-40.1	
9	-40.3	-42.6	-43.2	-43.8	
8	-45.5	-47.9	-48.5	-49.3	
7	-54.1	-56.7	-57.3	-58.1	
6	-62.5	-65.2	-65.9	-66.9	
5	-71.5	-73.6	-76.1	-77.0	
4	-71.8	-73.3	-75.5	-76.3	
3	-72.1	-73.0	-74.9	-75.5	
2	-72.5	-72.6	-74.3	-74.8	
1	-72.9	-72.2	-73.8	-74.1	

STRESS(AXIAL)(MPA) IWROD= 3

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-5.0	-5.0	-5.0	-5.1	-5.0	-5.0	-4.8	-4.4	-2.5	0.5	
9	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-4.4	-4.3	-4.0	-3.4	-0.8	0.8	
8	-3.4	-3.4	-3.4	-3.3	-3.2	-3.0	-2.7	-1.6	0.2	1.1	
7	-1.7	-1.6	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-0.9	-0.1	0.5	1.3	
6	-0.9	-0.9	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.5	0.0	0.5	1.2	
5	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	0.0	0.5	1.1	
4	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7	-0.5	0.1	0.5	1.1	
3	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.3	0.1	0.5	1.0	
2	-0.9	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6	-0.2	0.1	0.5	0.9	
1	-0.9	-0.9	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.1	0.2	0.4	0.8	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-30.1	-33.3	-34.3	-34.8	
9	-32.4	-35.8	-37.2	-37.7	
8	-35.5	-39.0	-40.8	-41.4	
7	-38.9	-42.6	-45.2	-45.8	
6	-39.7	-43.4	-46.3	-46.7	
5	-39.9	-43.3	-45.6	-46.0	
4	-40.0	-43.1	-45.3	-45.6	
3	-40.2	-43.0	-45.0	-45.2	
2	-40.4	-42.8	-44.8	-44.9	
1	-40.6	-42.6	-44.5	-44.6	

EQI. STRESS (MPA) IWROD= 4

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.7	3.0	5.3	
9	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	2.0	3.9	5.1	
8	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	2.6	4.0	4.6	
7	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0	2.0	2.1	2.7	3.1	3.5	
6	1.3	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	1.9	2.3	
5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	1.4	
4	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	1.0	1.3	
3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.7	0.9	1.1	
2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	1.0	
1	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.[illegible]	0.[illegible]	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	21.8	22.5	22.4	23.0	

9	25.2	25.9	25.7	26.3	
8	30.3	30.6	30.4	31.1	
7	38.3	38.1	37.7	38.5	
6	46.0	45.2	44.5	45.3	
5	54.5	52.5	52.9	53.7	
4	54.7	52.2	52.4	53.1	
3	55.0	51.9	51.8	52.4	
2	55.3	51.6	51.4	51.8	
1	55.6	51.2	50.9	51.2	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

YIELD STRESS(MPA) IWROD= 5

SEGMENT NUM.											
10	315.6	318.7	325.0	334.3	346.5	361.5	379.1	399.1	421.2	445.2	
9	328.0	330.9	336.7	345.3	356.7	370.6	387.0	405.6	426.3	448.7	
8	343.7	346.4	351.6	359.4	369.6	382.3	397.1	414.0	432.9	453.4	
7	362.7	365.0	369.6	376.4	385.4	396.5	409.5	424.5	441.1	459.3	
6	374.7	376.8	381.0	387.2	395.4	405.6	417.6	431.3	446.6	463.3	
5	390.0	391.8	395.5	401.0	408.3	417.3	427.9	440.0	453.7	468.6	
4	405.0	406.7	409.9	414.7	421.1	428.9	438.2	448.9	461.0	474.2	
3	423.2	424.5	427.2	431.2	436.5	443.1	450.9	459.9	470.1	481.3	
2	439.4	440.5	442.7	446.1	450.5	456.0	462.5	470.1	478.6	488.0	
1	458.5	459.3	461.1	463.7	467.1	471.4	476.5	482.4	489.0	496.5	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	432.0	434.4	427.3	427.9	
9	435.4	437.7	430.5	431.1	
8	439.2	441.4	434.1	434.6	
7	443.1	445.1	437.7	438.1	
6	445.2	447.1	439.6	440.0	
5	447.5	449.2	441.7	442.0	
4	449.4	451.0	443.3	443.6	
3	451.2	452.6	444.8	445.0	
2	452.3	453.5	445.7	445.9	
1	453.0	454.0	446.0	446.2	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 6

SEGMENT NUM.											
10	1.3	0.2	-2.0	-5.2	-9.2	-14.1	-18.8	-23.2	-26.2	-26.1	
9	2.2	1.1	-0.8	-3.7	-7.3	-11.7	-15.8	-19.6	-21.8	-21.6	
8	3.2	2.4	0.6	-1.8	-4.9	-8.6	-12.0	-15.0	-16.3	-16.4	
7	4.6	3.9	2.5	0.5	-2.0	-4.8	-7.6	-9.6	-10.6	-11.1	
6	5.4	4.8	3.6	1.8	-0.3	-2.8	-5.2	-7.0	-8.0	-8.5	
5	5.0	4.4	3.4	2.0	0.2	-1.8	-3.8	-5.1	-5.9	-6.5	
4	4.1	3.7	2.9	1.7	0.3	-1.3	-2.9	-3.8	-4.5	[illegible]	
3	3.1	2.8	2.2	1.4	0.3	[illegible]	-2.0	-2.6	-3.0	[illegible]	
2	2.3	2.1	1.7	1.0	0.3	-0.6	-1.3	-1.7	-2.0	-2.3	
1	1.5	1.3	1.1	0.7	0.2	-0.3	-0.7	-0.9	-1.1	-1.3	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	134.5	115.7	111.7	111.3	
9	131.6	113.1	109.2	108.8	
8	127.3	109.3	105.7	105.3	
7	120.6	103.2	100.1	99.8	
6	114.2	97.7	95.0	94.7	
5	102.6	87.6	85.7	85.4	
4	90.3	77.1	75.7	75.5	
3	76.4	65.1	64.4	64.2	
2	64.5	54.9	54.7	54.5	
1	51.1	43.5	43.8	43.7	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 7

SEGMENT NUM.											
10	1.3	1.6	2.1	2.9	3.7	4.5	5.0	4.7	3.4	2.7	
9	2.2	2.4	2.9	3.5	4.2	4.7	5.0	4.5	3.5	3.3	
8	3.2	3.4	3.8	4.2	4.7	5.1	5.1	4.5	4.2	3.9	
7	4.6	4.8	5.0	5.3	5.5	5.6	5.5	5.0	4.7	4.3	
6	5.4	5.5	5.7	5.8	5.9	5.9	5.5	5.0	4.6	4.2	
5	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1	4.8	4.4	3.9	3.7	3.3	
4	4.1	4.1	4.1	4.0	3.9	3.6	3.1	2.8	2.7	2.4	
3	3.1	3.1	3.0	2.9	2.7	2.3	2.0	1.8	1.7	1.6	
2	2.3	2.3	2.2	2.0	1.8	1.5	1.2	1.1	1.1	1.0	
1	1.5	1.4	1.3	1.2	1.0	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	-126.7	-108.4	-104.1	-103.8	
9	-125.6	-107.6	-103.3	-103.1	
8	-123.5	-105.9	-101.9	-101.7	
7	-119.2	-102.2	-98.8	-98.5	
6	-114.1	-97.9	-95.0	-94.8	
5	-102.8	-88.2	-86.1	-85.9	
4	-90.5	-77.6	-76.1	-75.9	
3	-76.5	-65.6	-64.6	-64.5	
2	-64.6	-55.3	-54.9	-54.8	
1	-51.1	-43.8	-43.9	-43.8	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

CREEP STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 8

SEGMENT NUM.										
10	-6.3	-5.4	-3.5	-0.7	3.0	7.6	12.5	17.6	22.4	23.2
9	-7.2	-6.3	-4.6	-2.0	1.3	5.5	9.8	14.5	17.9	18.2
8	-8.5	-7.7	-6.2	-3.9	-1.0	2.6	6.3	10.1	11.9	12.4
7	-10.5	-9.8	-8.6	-6.7	-4.3	-1.3	1.9	4.5	5.9	6.8
6	-11.7	-11.1	-10.0	-8.3	-6.1	-3.3	-0.4	2.0	3.3	4.4
5	-10.6	-10.1	-9.0	-7.6	-5.6	-3.2	-0.6	1.2	2.3	3.1
4	-8.6	-8.2	-7.3	-6.1	-4.4	-2.4	-0.3	1.0	1.8	2.5
3	-6.5	-6.2	-5.5	-4.5	-3.1	-1.5	0.0	0.8	1.3	1.8
2	-4.8	-4.6	-4.0	-3.2	-2.1	-0.9	0.1	0.6	0.9	1.2
1	-3.1	-2.9	-2.5	-1.9	-1.2	-0.4	0.1	0.3	0.6	0.7
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	-7.7	-7.3	-7.6	-7.4	
9	-5.9	-5.5	-5.9	-5.7	
8	-3.8	-3.4	-3.8	-3.7	
7	-1.4	-1.0	-1.4	-1.3	
6	-0.1	0.2	0.0	0.1	
5	0.2	0.6	0.4	0.5	
4	0.2	0.5	0.4	0.4	
3	0.1	0.4	0.3	0.3	
2	0.1	0.4	0.2	0.2	
1	0.1	0.3	0.1	0.1	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

HARD STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 9

SEGMENT NUM.										
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	149.9	128.8	121.0	120.6	
9	147.4	126.6	119.0	118.7	
8	143.5	123.1	116.0	115.7	
7	136.7	117.2	110.9	110.6	
6	130.1	111.3	105.8	105.5	
5	116.8	99.9	95.4	95.1	
4	102.6	87.7	84.0	83.8	
3	86.6	74.0	71.2	71.0	
2	72.9	62.3	60.3	60.2	
1	57.6	49.2	48.1	48.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

PLAST. STRAIN(EQI.)(0.01%) IWROD= 10

SEGMENT NUM.										
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ELM.NUM.

SEGMENT NUM.					
10	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	
	11	12	13	14	ELM.NUM.

SWELLING STRAIN(0.01%) IWROD= 11

SEGMENT NUM.										
10	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1
9	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5
8	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5	27.5
7	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1	25.1
6	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5	23.5
5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5	21.5
4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5
3	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1	17.1
2	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8
1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 ELM.NUM.
	11	12	13	14						

DENSIFICATION STRAIN(0.01%) IWROD= 11

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	-63.9	
9	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	-63.4	
8	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	-62.7	
7	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	-61.6	
6	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	-60.7	
5	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	-59.4	
4	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	-57.7	
3	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	-55.1	
2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	-52.2	
1	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	-47.6	
	11	12	13	14							

TOTAL STRAIN(RADIAL)(0.01%) IWROD= 12

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	126.6	124.5	120.4	114.5	106.9	97.7	88.2	78.4	69.9	64.4	
9	124.3	122.4	118.7	113.3	106.5	98.5	89.7	81.1	73.9	68.9	
8	122.1	120.5	117.3	112.6	106.7	99.7	92.3	85.2	79.4	74.7	
7	121.6	120.2	117.6	113.8	108.9	103.2	97.2	91.7	86.9	82.5	
6	123.6	122.4	120.1	116.7	112.5	107.5	102.3	97.4	93.0	89.0	
5	124.4	123.4	121.5	118.7	115.2	111.0	106.7	102.7	99.0	95.4	
4	119.1	118.3	116.7	114.4	111.6	108.2	104.6	101.4	98.4	95.3	
3	113.5	112.9	111.7	110.0	107.8	105.3	102.6	100.2	97.7	95.2	
2	109.5	109.1	108.2	106.9	105.2	103.3	101.3	99.5	97.5	95.5	
1	106.2	105.9	105.3	104.4	103.3	102.0	100.7	99.3	97.9	96.3	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	153.7	134.8	127.1	126.6	
9	151.1	132.5	125.0	124.5	
8	147.4	129.1	121.9	121.4	
7	141.3	123.7	116.9	116.5	
6	135.6	118.7	112.2	111.8	
5	124.5	109.1	103.3	103.0	
4	112.3	98.6	93.6	93.3	
3	98.4	86.7	82.5	82.3	
2	86.5	76.5	73.1	72.9	
1	73.3	65.1	62.6	62.4	

TOTAL STRAIN(HOOP)(0.01%) IWROD= 13

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	126.6	125.9	124.5	122.5	119.9	116.7	113.0	109.1	105.0	101.0	
9	124.3	123.7	122.4	120.6	118.2	115.3	112.1	108.5	104.9	101.3	
8	122.1	121.6	120.5	118.9	116.9	114.4	111.6	108.5	105.4	102.4	
7	121.6	121.1	120.3	119.0	117.3	115.2	112.9	110.5	108.0	105.5	
6	123.6	123.2	122.4	121.3	119.8	118.0	116.0	113.8	111.6	109.5	
5	124.4	124.0	123.4	122.5	121.2	119.7	118.1	116.3	114.5	112.7	
4	119.1	118.8	118.3	117.5	116.5	115.3	113.9	112.5	111.0	109.5	
3	113.5	113.3	112.9	112.3	111.6	110.7	109.6	108.5	107.4	106.3	
2	109.5	109.4	109.1	108.6	108.0	107.4	106.6	105.8	104.9	104.0	
1	106.2	106.1	105.9	105.6	105.2	104.7	104.2	103.6	103.1	102.4	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	-103.7	-86.7	-79.4	-79.3	
9	-103.2	-86.5	-79.2	-79.2	
8	-102.1	-85.7	-78.5	-78.5	
7	-99.2	-83.4	-76.5	-76.5	
6	-95.6	-80.3	-73.8	-73.7	
5	-85.9	-72.0	-66.0	-66.0	
4	-74.0	-61.7	-56.4	-56.4	
3	-60.4	-50.0	-45.5	-45.4	
2	-48.9	-40.0	-36.2	-36.1	
1	-36.0	-28.8	-25.7	-25.7	

TOTAL STRAIN(AXIAL)(0.01%) IWROD= 14

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	87.8	
9	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	82.4	
8	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	75.7	
7	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	68.1	
6	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	63.4	
5	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	59.8	
4	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	57.2	
3	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	54.5	
2	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	52.6	
1	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	51.3	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	44.2	44.2	44.2	44.2	
9	44.8	44.8	44.8	44.8	
8	45.4	45.4	45.4	45.4	
7	45.9	45.9	45.9	45.9	
6	46.3	46.3	46.3	46.3	
5	45.4	45.4	45.4	45.4	
4	43.7	43.7	43.7	43.7	
3	41.6	41.6	41.6	41.6	
2	39.5	39.5	39.5	39.5	
1	36.8	36.8	36.8	36.8	

THERMAL STRAIN(RADIAL) (0.01%) IWRI = 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	81.4	80.4	78.5	75.7	72.1	67.8	62.8	57.2	51.2	44.9	
9	77.6	76.7	75.0	72.5	69.2	65.2	60.5	55.4	49.9	44.1	
8	72.9	72.2	70.6	68.4	65.4	61.9	57.7	53.1	48.2	42.9	
7	67.4	66.8	65.4	63.5	61.0	57.9	54.4	50.4	46.0	41.4	
6	64.0	63.4	62.2	60.5	58.2	55.4	52.2	48.6	44.6	40.4	
5	59.7	59.2	58.2	56.7	54.7	52.3	49.5	46.3	42.8	39.0	
4	55.6	55.1	54.3	53.0	51.3	49.2	46.8	44.0	41.0	37.7	
3	50.7	50.3	49.6	48.6	47.2	45.5	43.5	41.2	38.7	35.9	
2	46.5	46.2	45.6	44.7	43.6	42.2	40.6	38.7	36.6	34.3	
1	41.6	41.4	40.9	40.3	39.4	38.4	37.1	35.7	34.0	32.3	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	21.8	21.0	20.6	20.4	
9	21.6	20.9	20.5	20.3	
8	21.4	20.8	20.4	20.2	
7	21.2	20.6	20.2	20.1	
6	21.0	20.5	20.1	20.0	
5	20.8	20.3	20.0	19.9	
4	20.7	20.2	19.9	19.9	
3	20.5	20.1	19.8	19.8	
2	20.3	19.9	19.7	19.7	
1	20.1	19.8	19.6	19.6	

THERMAL STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	81.4	80.4	78.5	75.7	72.1	67.8	62.8	57.2	51.2	44.9	
9	77.6	76.7	75.0	72.5	69.2	65.2	60.5	55.4	49.9	44.1	
8	72.9	72.2	70.6	68.4	65.4	61.9	57.7	53.1	48.2	42.9	
7	67.4	66.8	65.4	63.5	61.0	57.9	54.4	50.4	46.0	41.4	
6	64.0	63.4	62.2	60.5	58.2	55.4	52.2	48.6	44.6	40.4	
5	59.7	59.2	58.2	56.7	54.7	52.3	49.5	46.3	42.8	39.0	
4	55.6	55.1	54.3	53.0	51.3	49.2	46.8	44.0	41.0	37.7	
3	50.7	50.3	49.6	48.6	47.2	45.5	43.5	41.2	38.7	35.9	
2	46.5	46.2	45.6	44.7	43.6	42.2	40.6	38.7	36.6	34.3	
1	41.6	41.4	40.9	40.3	39.4	38.4	37.1	35.7	34.0	32.3	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	14.4	13.9	13.6	13.5	
9	14.3	13.8	13.5	13.4	
8	14.1	13.7	13.4	13.4	
7	14.0	13.6	13.4	13.3	
6	13.9	13.5	13.3	13.2	
5	13.8	13.4	13.2	13.2	
4	13.7	13.4	13.2	13.1	
3	13.5	13.3	13.1	13.1	
2	13.4	13.2	13.0	13.0	
1	13.3	13.1	13.0	12.9	

IRRADIATION STRAIN(AXIAL) (0.01%) IWROD= 15

SEGMENT NUM.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	ELM.NUM.
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	

SEGMENT NUM.	11	12	13	14	ELM.NUM.
10	39.1	39.4	39.5	39.6	
9	38.2	38.4	38.6	38.6	
8	36.9	37.2	37.3	37.3	
7	35.3	35.5	35.6	35.6	
6	34.2	34.4	34.5	34.5	
5	32.8	33.0	33.0	33.1	
4	31.3	31.4	31.5	31.5	
3	29.3	29.4	29.5	29.5	
2	27.4	27.5	27.5	27.5	
1	24.9	24.9	25.0	25.0	

PRESSURE ON UPPER AND SIDE SURFACE (MPA) IWROD= 17

SEGMENT NUMBER	CONTACT STATUS	PELLET RADIAL	PELLET AXIAL	CLADDING RADIAL	CLADDING AXIAL
10	FIXED	-5.411	-3.426	11.509	-31.547
9	FIXED	-4.858	-2.573	10.967	-34.033
8	FIXED	-4.035	-1.504	10.161	-37.150
7	FIXED	-2.681	-0.300	8.834	-40.659
6	FIXED	-1.361	-0.025	7.539	-41.468
5	OPEN	0.000	-0.025	6.211	-41.482
4	OPEN	0.000	-0.025	6.212	-41.494
3	OPEN	0.000	-0.025	6.213	-41.506
2	OPEN	0.000	-0.025	6.213	-41.510
1	OPEN	0.000	-0.025	6.214	-41.523

DISPLACEMENT OF NODES (MICRON) IWROD= 18

(R-DIRECTION)

10	0.0	5.9	11.7	17.3	22.6	27.6	32.1	36.2	39.9	43.1	46.1
9	0.0	5.8	11.5	17.0	22.3	27.2	31.8	36.0	39.7	43.2	46.4
8	0.0	5.7	11.3	16.7	22.0	26.9	31.6	35.9	39.8	43.5	47.0
7	0.0	5.7	11.2	16.7	22.0	27.1	31.9	36.4	40.7	44.7	48.5
6	0.0	5.7	11.4	17.0	22.4	27.7	32.7	37.4	42.0	46.3	50.4
5	0.0	5.8	11.5	17.2	22.7	28.0	33.2	38.2	42.9	47.5	52.0
4	0.0	5.5	11.0	16.5	21.8	27.0	32.0	36.9	41.6	46.2	50.6
3	0.0	5.3	10.5	15.7	20.8	25.9	30.7	35.5	40.2	44.7	49.2
2	0.0	5.1	10.2	15.2	20.2	25.1	29.9	34.6	39.2	43.7	48.2
1	0.0	4.9	9.9	14.8	19.6	24.4	29.2	33.8	38.5	43.0	47.5

10	-53.9	-48.3	-43.5	-43.5	-43.4	-43.4
9	-53.6	-48.2	-43.4	-43.4	-43.4	-43.3
8	-53.0	-47.7	-43.0	-43.0	-43.0	-43.0
7	-51.5	-46.4	-41.9	-41.9	-41.9	-41.9
6	-49.6	-44.7	-40.4	-40.4	-40.4	-40.4
5	-44.6	-40.1	-36.1	-36.1	-36.1	-36.1
4	-38.5	-34.4	-30.9	-30.9	-30.9	-30.9
3	-31.6	-28.0	-24.9	-24.9	-24.9	-24.9
2	-25.7	-22.6	-19.8	-19.8	-19.8	-19.8
1	-19.1	-16.4	-14.1	-14.1	-14.1	-14.1

(Z-DIRECTION)

SEG. NUM.	PELLET	CLADDING	GAP
	1985.7		
10	2936.467	1951.032	0.000
9	2541.545	1751.941	0.000
8	2170.951	1550.375	0.000
7	1830.266	1346.248	0.000
6	1523.917	1139.609	0.000
5	1238.442	931.463	3.425
4	969.565	727.091	10.910
3	712.377	530.286	19.260
2	467.341	343.199	26.134
1	230.758	165.503	33.418

1 RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / THERMAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 5) 1

POWER HISTORY				THERMAL INFORMATION													
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	TEMPERATURE FUEL CENTER (DEG.C)	FUEL SURFACE (DEG.C)	CLAD INNER (DEG.C)	CLAD OUTER (DEG.C)	GAP CONDUCTANCE TOTAL (W/CM2/C)	GAS (W/CM2/C)	SOLID (W/CM2/C)	RADIAL GAP SIZE (MIC)	CONTACT PRESSURE (MPA)	PRODUCE GAS (XE+KR) (10-3MOL)	FISSION GAS RELEASE (%)	IODINE RELEASE (10-5 G/CM2)	CPU TIME (SEC)
1	0.0	0.0	0.0	304.9	304.9	304.9	304.9	0.2941	0.2912	0.0000	75.19	0.00	0.00	0.50	0.000	0
16	1438.4	145.5	591.7	722.4	467.0	336.6	316.8	0.3751	0.3704	0.0000	64.77	0.00	0.00	0.50	0.005	2
41	13609.0	116.4	9603.0	684.7	461.4	332.5	316.7	0.3036	0.2990	0.0000	80.05	0.00	0.00	0.50	0.088	11

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / MECHANICAL INFORMATION (SEGMENT NUMBER 5)

POWER HISTORY				FUEL						FUEL - CLAD		CLAD			
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	THERMAL EXPAN-SION (MIC)	CREEP (MIC)	DENSIFI-CATION (MIC)	SWELL-ING (MIC)	RELOCA-TION (MIC)	RADIAL DISPLA-CEMENT (MIC)	RADIAL GAP (MIC)	CONTACT PRESSURE (MPA)	THERMAL EXPAN-SION (MIC)	ELASTIC DEFORM-ATION (MIC)	CREEP (MIC)	RADIAL DISPLA-CEMENT (MIC)
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	18.8	0.0	75.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1438.4	145.5	591.7	14.8	0.0	-3.9	0.6	18.8	11.4	64.8	0.0	0.7	0.3	0.0	1.0
41	13609.0	116.4	9603.0	13.5	0.0	-27.6	10.0	18.8	-4.1	80.0	0.0	0.7	0.1	0.0	0.8

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / FISSION GAS INFORMATION (SEGMENT NUMBER 5)

POWER HISTORY				FUEL CENTER									FUEL - CLAD		
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	FUEL CENTER TEMP. (DEG.C)	GRAIN RADIUS (MIC)	BUBBLE RADIUS (ANGST)	BUBBLE DENSITY (10D17 BU/CM3)	DIFFUS. COEFF. (10D-16	DIFFUS. COEFF. /EFFECT CM2/S)	GAS DENS.AT BOUND. (10D13	SATURA-TION DENS. AT/CM2)	LOCAL FGR AT CENTER (%)	FISSION GAS RELASE (%)	AMOUNT OF GAS IN GAP (10-3MOL)	XE+KR PERCENT IN GAP (%)
1	0.0	0.0	0.0	304.9	5.00	0.00	19.35	0.2	0.20	0.00	150.33	0.50	0.50	0.16	0.00
16	1438.4	145.5	591.7	722.4	5.00	0.65	17.07	0.2	0.20	0.08	113.94	0.50	0.50	0.13	0.03
41	13609.0	116.4	9603.0	684.7	5.00	2.25	12.89	0.2	0.20	1.60	115.15	0.50	0.50	0.14	0.39

RESULTS OF THERMAL ANALYSIS / FISSION GAS INFORMATION (IDLE FUEL ROD)

POWER HISTORY					FUEL ROD										
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	BURNUP (10D20 FISS/CC)	AMOUNT OF GAS PRODUCE (XE+KR)	AMOUNT OF GAS RELEASE (XE+KR)	AMOUNT OF GAS PLENUM (10D-3 MOLE)	GAP	TOTAL IN FUEL ROD	FRACTION OF GAS MIXTURE HE (%)	N2 (%)	KR (%)	XE (%)	FISSION GAS RELEASE (%)	INNER GAS PRESSURE (MPA)
1	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	4.04	1.59	5.63	100.00	0.00	0.00	0.00	0.50	5.95
16	1438.4	145.5	591.7	0.17	0.27	0.00	4.37	1.26	5.63	99.97	0.00	0.00	0.02	0.50	6.58
41	13609.0	116.4	9603.0	2.71	4.41	0.02	4.23	1.42	5.65	99.61	0.00	0.05	0.34	0.50	6.22

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / FUEL AND CLAD FORMATION: (ANALYZED SEGMENT NUMBER 5)

POWER HISTORY				TOP OF FUEL				FUEL - CLAD AT TOP			CLADDING			DIAMETRAL RIDGE	
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	AXIAL DIPS. CENTER (MM)	AXIAL DIPS. SURFACE (MM)	RADIAL DIPS. INNER (MIC)	RADIAL DIPS. OUTER (MIC)	RADIAL GAP AT TOP (MIC)	CONTACT PRESS. AXIAL (MPA)	CONTACT PRESS. RADIAL (MPA)	AXIAL DISP. AT TOP (MM)	RADIAL DISP. OUT/TOP (MIC)	RADIAL DISP. OUT/MID (MIC)	RIDGE HEIGHT (MAX) (MIC)	RIDGE HEIGHT (TOP-MID) (MIC)
1	0.0	0.0	0.0	3.26	3.26	0.00	57.60	48.19	-0.06	0.00	0.54	7.43	7.43	0.00	0.00
16	1438.4	145.5	591.7	4.45	4.45	0.00	67.02	25.43	-0.07	0.00	1.08	-3.95	-3.95	0.00	0.00
41	13609.0	116.4	9603.0	2.94	2.94	0.00	51.98	3.43	-0.03	0.00	1.99	-36.12	-36.12	0.00	0.00

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAIN. IN FUE (ANALYZED SEGMENT NUMBER 5)

POWER HISTORY				TOP AND INNER OF FUEL											
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	CIRCUM. TOTAL STRAIN (0.01%)	AXIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	RADIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. CREEP STRAIN (0.01%)	AXIAL CREEP STRAIN (0.01%)	RADIAL CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. PLASTIC STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRESS (MPA)	AXIAL STRESS (MPA)	RADIAL STRESS (MPA)	EQUIVA. STRESS (MPA)
1	0.0	0.0	0.0	124.	72.	124.	0.	0.	0.	0.	0.	0.0	-0.1	0.0	0.1
16	1438.4	145.5	591.7	152.	99.	152.	1.	-2.	1.	2.	0.	-1.5	-10.4	-1.5	8.9
41	13609.0	116.4	9603.0	124.	65.	124.	5.	-11.	5.	10.	0.	-0.7	-0.8	-0.7	0.2

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / STRESSES AND STRAINS IN CLAD (ANALYZED SEGMENT NUMBER 5)

POWER HISTORY				TOP AND INNER OF CLADDING											
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/TUO2)	CIRCUM. TOTAL STRAIN (0.01%)	AXIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	RADIAL TOTAL STRAIN (0.01%)	CIRCUM. CREEP STRAIN (0.01%)	AXIAL CREEP STRAIN (0.01%)	RADIAL CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. CREEP STRAIN (0.01%)	EQUIVA. PLASTIC STRAIN (0.01%)	CIRCUM. STRESS (MPA)	AXIAL STRESS (MPA)	RADIAL STRESS (MPA)	EQUIVA. STRESS (MPA)
1	0.0	0.0	0.0	12.1	10.9	22.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-76.4	-42.3	-8.5	58.7
16	1438.4	145.5	591.7	-10.3	21.9	52.7	-30.7	0.0	30.8	35.5	0.0	-70.4	-40.0	-8.9	53.2
41	13609.0	116.4	9603.0	-73.3	40.0	125.7	-102.8	0.2	102.6	118.6	0.0	-71.5	-39.9	-8.6	54.5

RESULTS OF FEM MECHANICAL ANALYSIS / FUEL AND C D DEFE MATIONS (HOLE FUEL ROD)

POWER HISTORY						FUEL ROD			OXIDE THICKNESS	
STEP NO.	TIME (HR)	LINEAR HEAT RATE (W/CM)	BURNUP (MWD/ TUO2)	BURNUP (MWD/T)	FLUEN CE(10 E19N/ CM**2)	CLAD. DIA. DISP. (MIC)	FUEL AXIAL DISP. (0.01X)	CLAD. AXIAL DISP. (0.01X)	OXIDE THICK. AVERAGE (MIC)	OXIDE THICK. MAXIMUM (MIC)
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.9	72.5	10.9	1.909	2.000
16	1438.4	150.0	610.0	692.0	51.8	-9.3	98.9	21.9	2.003	2.096
41	13609.0	120.0	9900.0	11231.1	489.9	-67.5	65.3	40.0	11.395	16.265

```
  JJJJJJJJJJ   3333333333        11          00000000     6666666666
  JJJJJJJJJJ  333333333333      111         0000000000   666666666666
      JJ      33        33     1111        00        00  66        66
      JJ                33       11        00        00  66
      JJ                33       11        00        00  66
      JJ             3333        11        00        00  66666666666
      JJ             3333        11        00        00  666666666666
      JJ                33       11        00        00  66        66
JJ    JJ                33       11        00        00  66        66
JJ    JJ      33        33       11        00        00  66        66
JJJJJJJJ      333333333333   1111111111     0000000000   666666666666
 JJJJJJ        3333333333    1111111111      00000000     6666666666
```

DATE 94.06.27

TIME 17.45.36

```
 GGGGGGGGGG      00000000     9999999999    2222222222         11
GGGGGGGGGGGG    0000000000   999999999999  222222222222       111
GG        GG  00        00  99        99  22        22      1111
GG            00        00  99        99            22        11
GG            00        00  99        99            22        11
GG            00        00  999999999999           22         11
GG    GGGGG   00        00  999999999999         22           11
GG    GGGGG   00        00            99       22             11
GG        GG  00        00            99     22               11
GG        GG  00        00  99        99   22                 11
GGGGGGGGGGGG    0000000000   999999999999  222222222222   1111111111
 GGGGGGGGGG      00000000     9999999999   222222222222   1111111111
```

LP 3653 LINES

71 PAGES

```
FFFFFFFFFFFF   3333333333        11          00000000     6666666666     8888888888     6666666666     9999999999
FFFFFFFFFFFF  333333333333      111         0000000000   666666666666   888888888888   666666666666   999999999999
FF            33        33     1111        00        00  66        66   88        88   66        66   99        99
FF                      33       11        00        00  66             88        88   66             99        99
FF                      33       11        00        00  66              88      88    66             99        99
FFFFFFFF             3333        11        00        00  66666666666      88888888     66666666666    999999999999
FFFFFFFF             3333        11        00        00  666666666666     88888888     666666666666   999999999999
FF                      33       11        00        00  66        66    88      88    66        66             99
FF                      33       11        00        00  66        66   88        88   66        66             99
FF            33        33       11        00        00  66        66   88        88   66        66   99        99
FF            333333333333   1111111111     0000000000   666666666666   888888888888   666666666666   999999999999
FF             3333333333    1111111111      00000000     6666666666     8888888888     6666666666     9999999999
```